

# 我が国における 標準貫入試験の利用実態と留意点

～歴史背景とサウンディングとの関係を含めて～



一般社団法人 関東地質調査業協会

## 巻 頭 言

標準貫入試験は、1948 年に出版された Terzaghi and Peck の“Soil Mechanics in Engineering Practice”の中で、砂の相対密度や粘土の一軸圧縮強さと  $N$  値の関係などが紹介され、世界中に広まっていきました。日本でも 1951 年に導入され、1961 年には JIS 規格化されて急速に全国に広まり、我が国における地質調査では必要不可欠な原位置試験として定着してきました。

その中で、土木・建築構造物の基礎設計においては、標準貫入試験が簡便であることと相まって、土質定数の設定あるいは支持層の評価などに多用されています。

一方で、構造物設計法が限界状態設計法へと移行したにもかかわらず、 $N$  値という計測値が持つ意味を正しく理解しないで設計に用いられるケース、あるいは規格に準拠せずに実施された試験を正しく評価しないで用いられるケースなどが散見されます。構造物の安全性を評価する上では、試験の信頼度に基づく検討、言い換えれば  $N$  値に潜んでいるリスクを評価した上での検討が求められています。

一般社団法人関東地質調査業協会技術委員会では、令和元年度から令和 3 年度の足掛け 3 年にかけて標準貫入試験で得られた  $N$  値のリスクについて検討を続けてまいりました。

その主たる目的は、我が国が有する少子高齢化問題に追随して、業界を支えるボーリング機長、すなわちボーリングマシンが毎年数十台から百台程度減少している実態が明らかになったと同時に、発注業務そのものの減少と地質調査の重要な項目である原位置試験やサンプリングの能力を有する技術者が年々減少し、地質調査技術の伝承が業界の深刻な問題として顕在化している事実によるものです。

これまで、標準貫入試験については試験方法の改定を含め、利用方法については多くの文献や参考書で議論されてきています。しかしながら、時間とともに重要なことは忘れ去られ、便利なことだけが残存したまま数十年が過ぎ去り、昨今、重要な注意事項や利用限界が忘れられてきている実態に気が付かされるようになりました。

技術委員会では、ここにもう一度標準貫入試験について、試験方法の歴史とともに正しい利用方法について整理し、サウンディングや原位置試験の結果との関係、利用限界についてとりまとめる事としました。

お陰様で、技術委員の勉強と努力の成果として、標準貫入試験の利用に関する総括的な冊子を発刊するに至りました。

今後ボーリングの自動化を含め、デジタルトランスフォーメーションの利用により活用方法が改善されることも考えられますが、原点に立ち戻ることによって、本書がさらなる地質調査業の健全な発展の一助となれば幸いです。

一般社団法人関東地質調査業協会 技術委員会

2021 年 10 月

我が国における標準貫入試験の利用実態と留意点  
～歴史背景とサウンディングとの関係を含めて～

— 目次 —

|                                  | 頁  |
|----------------------------------|----|
| 1. 標準貫入試験の現状                     | 1  |
| 1.1 土質試料を得る役割                    | 1  |
| 1.2 地盤の硬軟や締まり具合を知るサウンディングとしての役割  | 2  |
| 1.3 設計分野における $N$ 値の利用            | 7  |
| 2. 標準貫入試験の問題点                    | 12 |
| 2.1 標準貫入試験の準拠する規格                | 12 |
| 2.2 標準貫入試験の概要                    | 12 |
| 2.3 標準貫入試験の方法                    | 13 |
| 2.4 信頼における $N$ 値測定のための留意事項       | 16 |
| 2.5 $N$ 値の測定誤差と地盤のばらつき           | 20 |
| 3. 標準貫入試験以外のサウンディングによる換算リスク      | 27 |
| 3.1 標準貫入試験以外のサウンディングと $N$ 値との相関式 | 27 |
| 3.2 標準貫入試験以外のサウンディングと $N$ 値の関係   | 32 |
| 3.3 スクリューウェイト貫入試験の整理             | 36 |
| 3.4 まとめ                          | 37 |
| 4. $N$ 値による換算リスク                 | 40 |
| 4.1 $N$ 値によるせん断抵抗角の推定による誤差       | 40 |
| 4.2 $N$ 値による粘着力の推定による誤差          | 46 |
| 4.3 $N$ 値による変形係数の推定による誤差         | 51 |
| 4.4 $N$ 値によるその他の地盤物性値の推定による誤差    | 57 |
| 4.5 まとめ                          | 67 |
| 5. 標準貫入試験による失敗事例                 | 70 |
| 6. 標準貫入試験の取り扱いについて               | 75 |

## 1. 標準貫入試験の現状

標準貫入試験は、国内の地盤調査において、ボーリングと併用して用いられる最も標準的な試験手法といえる。我が国で、標準貫入試験が普及した理由は、主に下記のような項目が挙げられる。

- ① 標準貫入試験は、地盤の深い位置における土質試料をほぼそのままの状態で採取することが可能であり、土質の観察や簡易な土質試験に利用することができる
- ② 標準貫入試験で得られる  $N$  値は、地盤の硬軟や締まり具合を示す指標としてイメージがしやすく、使い勝手が良い
- ③  $N$  値については、様々な地盤物性値との換算式が提案されており、設計に利用しやすい指標となっている

以下には、上記の3つの観点から、標準貫入試験の現状について整理する。

### 1.1 土質試料を得る役割

地盤調査としてのボーリングは、およそ 170 年前からアメリカで行われていたとされる。<sup>1)</sup> 当時のボーリングは、日本ではあまり使用されないウォッシュボーリングという調査手法が主流であった。ウォッシュボーリングは、比較的簡便な装置で地盤調査ができ、費用が安く、作業が早いことが利点である。一方、地質の状況の把握は、チョッピング時の感触、孔口から排出される土と水の混濁水の色や外観、排出水が沈殿した桶に溜まったサンプル（スライム）などで行われており、地層の判定結果にあまり信頼がおけないことが大きな欠点であった。

このような方法のウォッシュボーリングを利用して、その孔底にパイプを地中に打ち込んで土を採取し、深い位置の自然の土を目視観察することを考えたのは、アメリカの陸軍大佐 Charles R. Gow である。これは 1902 年（明治 35 年）といわれており、今より 120 年ほど前のことである。Gow が用いたサンプラーは直径 1 インチ（2.5cm）のパイプで、これを 110 ポンド（49.9 kg）のハンマーで地中に打ち込んで採取した。ウォッシュボーリングが土質調査用ボーリングとして長く使われてきたのは、この Gow のサンプラーのおかげである。なお、土質試料を採取するサンプラーの名称については、孔底の土をさらうという意味

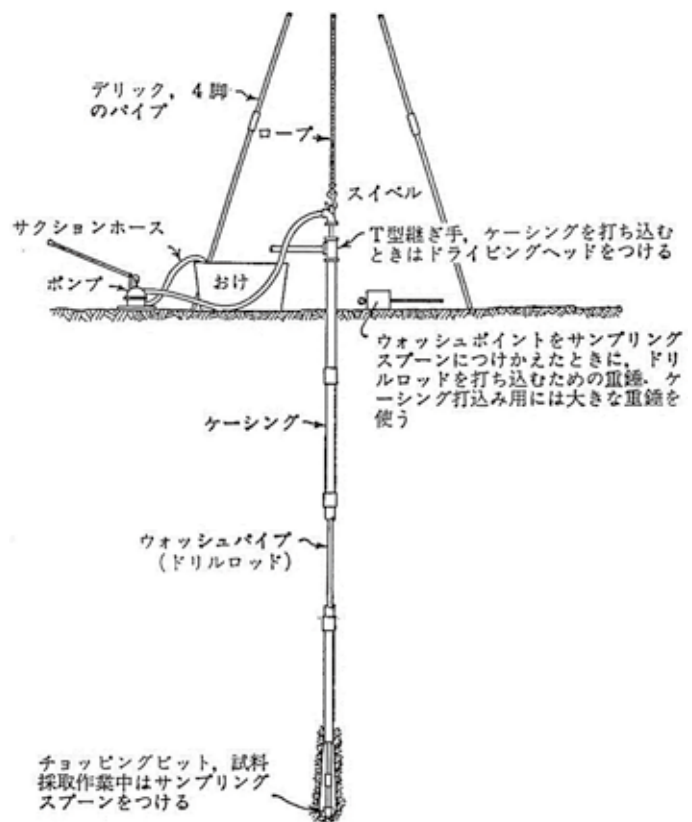


図 1-1-1 ウォッシュボーリングを行う装置  
(Mohr 1943 による)<sup>2)</sup>

を持つ”スプーン”という呼称が付加され、スプーンサンプラーと呼ばれている。1967年に出版された Terzaghi and Peck の著書では、調査ボーリングで使用するサンプラーの一つとして、標準貫入試験用サンプラーの原型器が、スプリットスプーンサンプラー（2つ割れのスプーンサンプラー）という呼称で紹介されている（図1-1-2参照）。

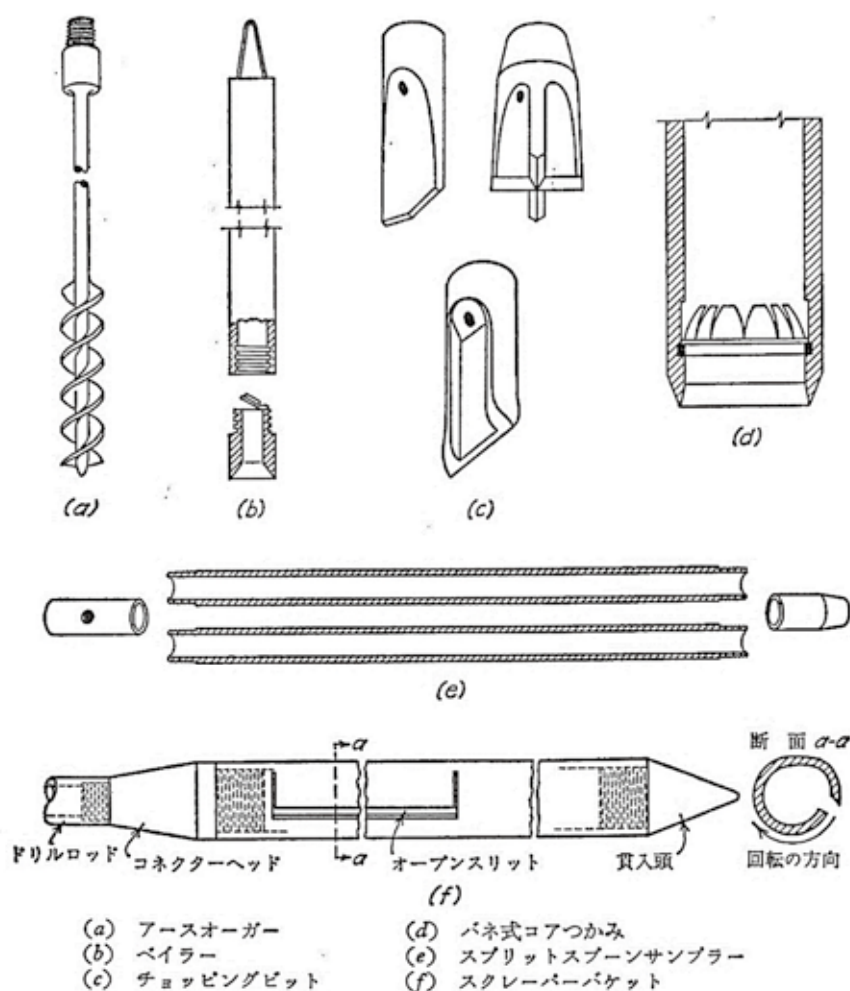


図1-1-2 ボーリング用の試料採取器具<sup>2)</sup>

## 1.2 地盤の硬軟や締まり具合を知るサウンディングとしての役割

現場技術者としては、地層の連なりや堆積状況を把握することが重要課題であるが、中でも土木・建築構造物の支持層と足り得る地質がどの程度の深さに存在するかを知ることは最も重要な課題である。このため、土としての硬軟や締まり具合を示す分かりやすい指標が求められた。この技術が、サウンディング（subsurface sounding）である。

図1-2-1は、英領コロンビア、バンクーバーのアルバーニー港において、たまたま現場に有った鋼製レールと落錘を使用して、即興のサウンディングを行った結果である。このような調査を行った結果、氷河の押し出しによる軟らかいシルトと粘土、ならびに粗粒な砂の複雑な分布を短期間で把握することができ、杭工事を行う上で大いに役立ったとされている。



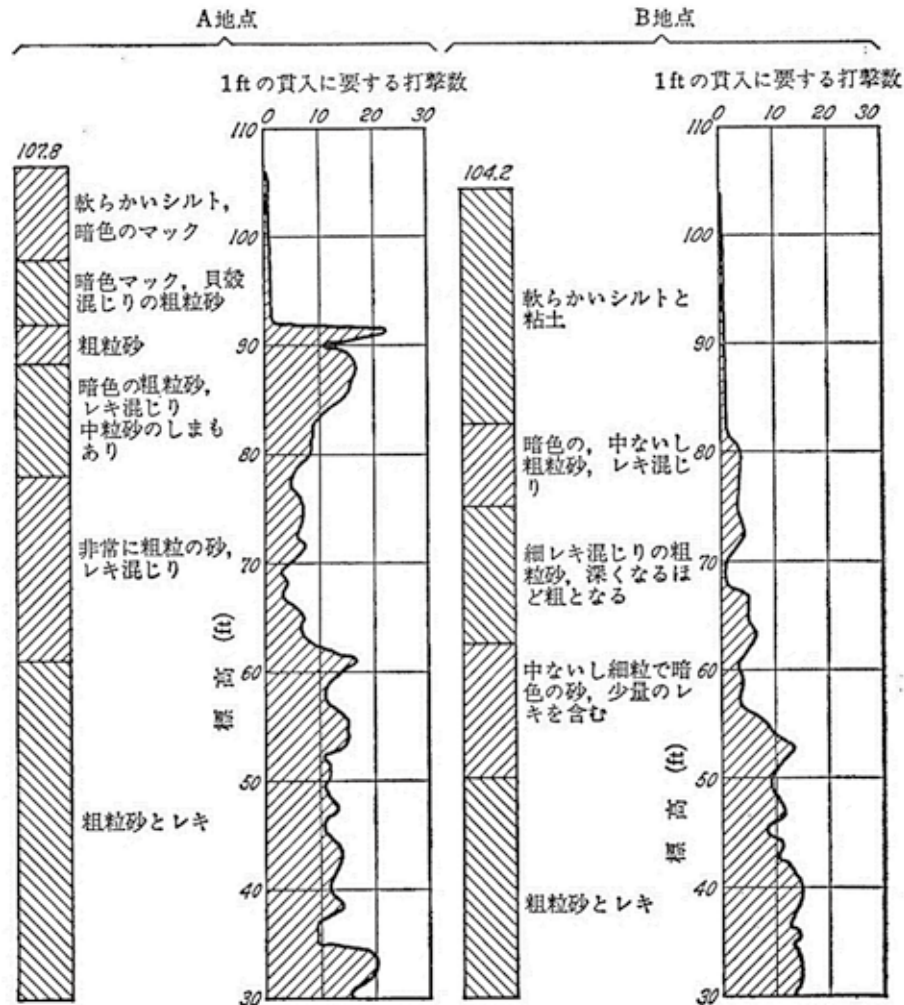


図 1-2-1 鋼製レールの打ち込みで記録したサウンディングの例<sup>2)</sup>

スプーンサンプラーの考案者である Gow 大佐は、自らの会社を設立し、1922 年（大正 11 年）に Raymond Concrete Pile 社の子会社となって Gow 社と社名を変更した。この頃には、径 2 インチ（5cm）の鋼製チューブを押し込むことでサンプリングを行うことを試みている。Gow 社の New England 支社長であった Harry A Mohr は、1927 年（昭和 2 年）に径 2 インチ（5cm）のスプリットスプーンサンプラーを製作し、140 ポンド（63.5kg）のハンマーを高さ 30 インチ（75cm）から自由落下させて土を採取する基準を創った。そして、サンプラーが 12 インチ（30cm）貫入するに要する打撃回数を測定した。この測定方法が、後に、標準貫入試験の原型となった。

Gow 社の親会社である Raymond Concrete Pile 社も、いわゆるレイモンドサンプラーを製作した（図 1-2-2 参照）。本サンプラーを適用する場合、サンプラーが孔底に達してから 6 インチ（15cm）の予備打ちをしてから Mohr の方法による貫入試験を実施することを試みた。これが“標準貫入試験”と呼ばれる原位置試験の誕生である。1920 年代後半から 1930 年代初頭にかけての出来事といわれる。さらに、Karl Terzaghi と Arthur Casagrande は 1938 年に結成された ASCE の土質力学におけるサンプリングと試験に関する委員会及び ASCE の基礎部門の活動を通じ、分割式スプーンサンプリング（the split spoon sampling）手順の採用を積極的に支援し、1940 年までにかかなり標準化が進められた。1947 年の後半には Terzaghi は 2 インチのス

プーンサンプラーを用いた打撃貫入試験を“Standard Penetration Test（標準貫入試験）”と称し、テキサス大学で開催された第7回地盤工学と基礎工学会議において「地盤調査の最近の傾向」と題して発表を行った。

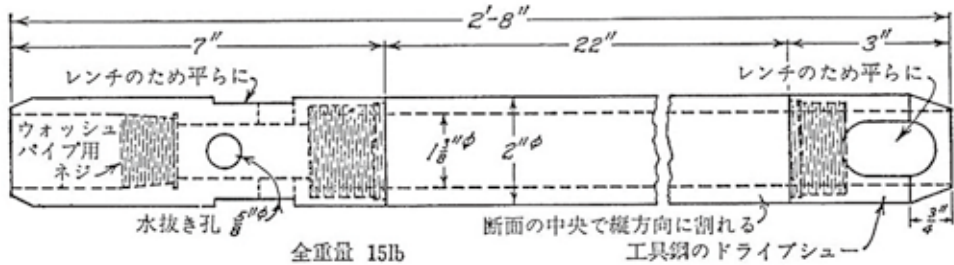


図 1-2-2 レイモンドサンプラーの構造図<sup>2)</sup>

この標準貫入試験を世界的に有名にし、土質調査を工学の分野に組み込んだのが、1948 年に出版された Terzaghi and Peck の“Soil Mechanics in Engineering Practice”である。同書は、Terzaghi が助手の Peck と共に記したものであり、その中で、砂の相対密度や軟らかい粘土層のせん断強さについて、標準貫入試験の  $N$  値との関係で表した。それが、表 1-2-1 および 1-2-2 である。特に、表 1-2-2 中に示される  $N$  値と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係は、 $N$  値と様々な物性値の関係についてその関係性を求める研究の礎となっている。なお、表 1-2-2 に示されている  $q_u$  は、標準貫入試験で得た試料で求めたものであり、乱れの影響で実際の地盤よりも小さな値となることが普通である。このため、同書では、重要な工事に際しては、チューブサンプリングの試料を用いて  $q_u$  を求めることが推奨されている。しかしながら、この  $N$  値と  $q_u$  の関係は、 $N$  値のみで簡便に  $q_u$  を推定できる利便性から、現在においても多くの設計分野で使用され続けている。

表 1-2-1  $N$  値と砂の相対密度の関係<sup>2)</sup>

| 打撃回数 $N$ | 相対密度   |
|----------|--------|
| 0~4      | 非常にゆるい |
| 4~10     | ゆるい    |
| 10~30    | 普通の    |
| 30~50    | 密な     |
| 50以上     | 非常に密な  |

表 1-2-2 粘土のコンシステンシーと  $N$  値と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係<sup>2)</sup>

|          | $q_u(t/ft^2)$ |           |           |           |           |       |
|----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| コンシステンシー | 非常に軟らかい       | 軟らかい      | 普通の       | 硬い        | 非常に硬い     | 固結した  |
| $N$      | <2            | 2~4       | 4~8       | 8~15      | 15~30     | >30   |
| $q_u$    | <0.25         | 0.25~0.50 | 0.50~1.00 | 1.00~2.00 | 2.00~4.00 | >4.00 |

我が国で初めて自然の土を採取する技術は、1923 年（大正 12 年）に西尾銑次郎が開発した西尾式サンプラーとされる<sup>1)</sup>。これは、Mohr がスプリットサンプラーを製作して貫入試験方法

を考案した年より4年ほど早い。1929年(昭和4年)に発行された佐藤康平著「橋梁工学・基礎の設計及施工」には、図1-2-3のように西尾式サンプラーの装置図が紹介されており、スプリットスプーンサンプラーとよく似た形状となっている<sup>3)</sup>。また、錘を落下させて打撃し、その際の貫入量から地盤の硬さを評価する手法も取り入れて、標準貫入試験に近い試験形態となっている。

西尾式サンプラーは、関東大震災後から日本が敗戦となる直前の1944年(昭和19年)ぐらいまで、東京都内のいくつかの現場で使われていたようであるが、残念ながら、我が国のスタンダードな地質調査手法として定着するまでには至らなかった。

アメリカで開発された標準貫入試験が、我が国に初めて導入されたのは、1951年(昭和26年)頃であり、森博氏(中央開発株式会社(当時))によるものである。1952年(昭和27年)には、有楽町～新橋駅間高架橋の地質調査において、標準貫入試験が国鉄技研によって初採用されている<sup>4)</sup>。

その後、1953年(昭和28年)には、土と基礎創刊号で森博氏によって標準貫入試験が紹介されている<sup>5)</sup>。1961年(昭和36年)12月には、JIS規格においてJIS A 1219「土の標準貫入試験方法」として制定された。これにより、標準貫入試験は、全国に広まり、ボーリング調査では必要不可欠な原位置試験として定着している。

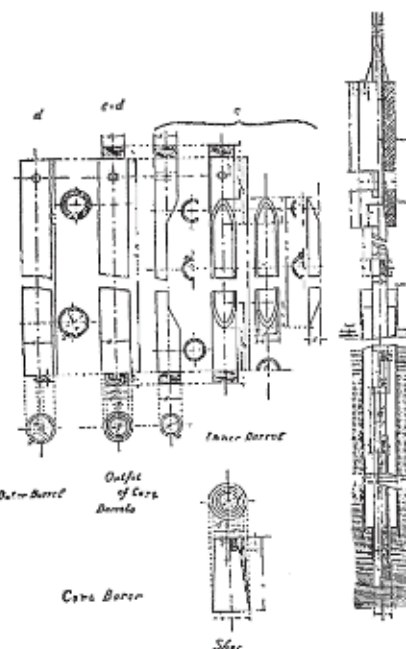


図 1-2-3 西尾式サンプラー<sup>3)</sup>

表 1-2-3 標準貫入試験の主な年表

| 項目       | 西暦 | 1900                                                                                                                                                                                                                                           | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 2000 | 10 | 20 |
|----------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|
| 社会情勢     |    | 1929世界恐慌 1945第二次世界大戦終結<br>1954-73高度経済成長 1986-91バブル期 2011東日本大震災                                                                                                                                                                                 |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |
| アメリカでの開発 |    | 1902頃 Charles R. Gowが打ち込みパイプ式のサンプラーを開発<br>1922頃 杭メーカーが鋼製チューブの押し込みサンプラーを開発<br>1927 現在に近い形(二つ割れのサンプラーと打撃回数の記録)に改良<br>1930 Harry Mohrによって標準化<br>1947 Terzaghiが論文発表<br>1948 Terzaghi-Peckが書籍『Soil Mechanics in Engineering Practice』で紹介<br>広く認知される |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |
| 日本国内での動き |    | 1951 中央開発が国内で初めて導入<br>1952 国鉄技研が高架橋の地質調査に導入<br>1953 森博氏が「土と基礎」創刊号で紹介<br>1959 サウンディング研究委員会設立                                                                                                                                                    |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |
| 基準化      |    | 1961 JIS A 1219としてJIS規格を制定<br>1967 JIS改正<br>2001 JIS改正<br>2005 ISOで承認<br>2013 JIS改正                                                                                                                                                            |    |    |    |    |    |    |    |    |      |    |    |





図 1-2-4 社報 中央開闢, 1962 の抜粋

### 1. 標準貫入試験

現在行われている原位試験法として最も多く適用されている工法で、ボーリングと云えば標準貫入試験を含むことは一般化されてきました。

この工法をボーリングに併用したのは我が国に於いては当社が最初だろうと思います。昭和 27 年には有楽町～新橋間高架橋で国鉄技研の■■■■さんと■■■■さん等と一緒に試験をした記憶があります。

試験方法は外径 51mm、内径 35mm、長さ 810mm、重さ 6.8kg の二つ部スプーン型試験器を重量 63.5kg 落下高 76cm より地中に 30cm だけハンマーで打込むに要する打撃数  $N$  によって、対象土の剪断強度を測定するもので、これは米国のレイモントコンクリートパイル会社によって考案され、テルシプギー及びベックによって理論づけられ国際的に通用する試験法となつた。

### (c) 標準スプーンサンプラー (図-2)

(Standard Spoon Sampler, A.S.T.M.)

此のサンプラーは駐日米軍建設局の依頼によつて駐留軍基地の基礎調査に使用したもので試料の採取径は 4 吋である。構造はドライサンプラーに似ているがサンプル



図-2.

チューブが縦に二つに割れるのが特徴である。試料は真鍮ライナーに入つたまま両端をパラフィンで密封して実験室に輸送する。之もドライサンプラーと同じく軟い粘土の不擾乱試料採取には適しないが、中位以上の硬い粘土及ロームには良い結果が得られる。

30

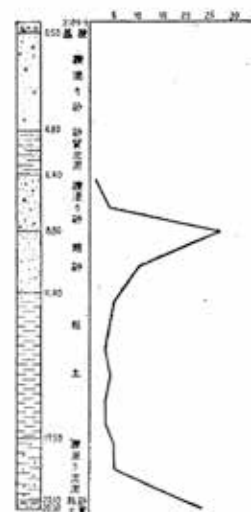


図-1.

20 米以下は赤褐色砂質である。此の図から少くとも傾向として打撃数が砂の内部摩擦角の増減に従つて増減する散乱である事が分る。更に充分な資料が得られれば砂地盤の  $N$  に対する  $\phi$  の領域を決める事は不可能ではなからう。尚ほ此の項の  $\phi$  の値は 調査鉄道研究所池田捜官の御好意により引用させて頂いた。

表-1. 粘土の許容支持力

$N$  = 標準打撃試験の打撃回数  
 $gw$  = 圧縮強度 ( $\text{ton/cm}^2$ )  
 $gd$  = 圧縮強度の極限支持力 ( $\text{ton/cm}^2$ )  
 $gds$  = 方形基礎の極限支持力 ( $\text{ton/cm}^2$ )  
 $gs$  = 許容支持力 ( $G=3$ ) ( $\text{ton/cm}^2$ )  
 $gs'$  = 許容支持力 ( $G=2$ ) ( $\text{ton/cm}^2$ )  
 $G_s$  = 基礎の破壊に対する安全率

| 粘土の性質  | $N$   | $gw$    | $gd$   | $gds$  | $gs$    |         | $gs'$  |         |
|--------|-------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|
|        |       |         |        |        | 方形      | 市橋      | 方形     | 市橋      |
| 非常に軟い  | 2以下   | 2.8以下   | 7.9以下  | 10以下   | 3.2以下   | 2.5以下   | 5.0以下  | 3.5以下   |
| 軟い     | 2~4   | 2.8~5.6 | 7.9~16 | 10~21  | 3.2~6.7 | 2.5~5.0 | 5.0~10 | 3.5~7.3 |
| 中位     | 4~8   | 5.6~11  | 16~32  | 21~41  | 6.7~13  | 5.0~10  | 10~20  | 7.3~14  |
| 粘強い    | 8~15  | 11~22   | 32~63  | 41~82  | 13~25   | 10~20   | 20~40  | 14~28   |
| 非常に粘強い | 15~30 | 22~44   | 63~127 | 82~164 | 25~52   | 20~40   | 40~80  | 28~56   |
| 硬い     | 30以上  | 44以上    | 127以上  | 164以上  | 52以上    | 40以上    | 80以上   | 56以上    |

図 1-2-5 森博氏による標準貫入試験の紹介<sup>5)</sup>

### 1.3 設計分野における $N$ 値の利用

国内の構造物設計においては、建築・道路・河川・港湾といった各分野で設計標準となる技術図書が刊行されている。

これらの図書では、物性値の設定や支持層の判断に対して、 $N$  値を数多く利用している。代表的な技術図書における  $N$  値の利用状況は、表 1-3-1～1-3-3 に示すとおりである。

$N$  値の利用状況について、その特徴を整理すると以下のようになる。

- ① 支持層としての評価、ならびに、杭基礎の支持力計算のように地中の深い位置における土質を評価する際には、どの設計分野においても  $N$  値での評価がよく利用されている。
- ②  $N$  値を地盤の締まり具合や硬軟を示す指標として利用し、それに伴って土質性状に応じた単位体積重量・粘着力・せん断抵抗角といった物性値の目安値を設定するといった手法が多く活用されている。
- ③ 軟弱な粘性土における一軸圧縮強さ  $q_u$  は  $N$  値からの推定式が示される図書が数多く存在する一方で、室内土質試験による一軸圧縮強さ  $q_u$  からの設定を推奨する図書も存在する。
- ④ サンプリングや室内土質試験の適用が難しい砂や砂礫の内部摩擦角の設定については、 $N$  値がよく利用されている。
- ⑤ 液状化判定においては、地盤を評価する上で  $N$  値が重要な指標となっている。

上述のように、 $N$  値はいずれの分野でも構造物設計においてよく利用されている状況にあり、 $N$  値のみである程度の設計ができてしまう状態にある。一方、 $N$  値とは、SPT サンプラーを地中に 30cm 貫入させるのに要する打撃回数で、本来は無次元量であり、物性値と関連させるには矛盾があるともいえる。

$N$  値が誕生する発端は、杭打ちなどの基礎工事においてどこで杭が止まるかを探るといった動機から始まっており、支持層を評価するという意味合いでは  $N$  値は良い指標であるといえる。

しかしながら、 $N$  値は、後述するように、粘土のコンシステンシーや砂の相対密度、土粒子の大きさや硬軟、乱れに伴う強度低下（鋭敏比）の大小、有効土被り荷重、試験深度による打撃エネルギーのロスなど、様々な要素が複雑に相まみえた結果として求まるものである。

従って、 $N$  値を利用した換算式を用いる際は、設計対象物の重要度を念頭に置いた上で、各種換算式の意味および適用範囲を十分に理解して利用することが求められる。

海外における標準貫入試験の利用状況を表 1-3-4 に示す。本表は、米国やアジアで活躍している日本人技術者を対象に、標準貫入試験の利用状況について肌感覚としての内容をヒアリングしたものである。これによると、海外においても、地盤調査では標準貫入試験がスタンダードな調査手法として、活用されている実態がみえる。一方、 $N$  値を利用した各種換算式の設計への適用については、全く使わないわけではないが日本ほどは多用しないというのが、一貫した返答であった。海外では、 $N$  値は地盤を評価する上での参考とはするが、設計に必要な物性値がある場合には、それを得るために必要な試験を実施して実際に確認するという感覚が根付いているようである。また、海外における技術基準書は、概念や技術体系などといった大きな枠組みについてのみ記載されていることが多く、我が国の技術図書やマニュアルのような事細かな基準化や説明はなされていない。このため、海外の設計では、設計者の技術的判断のウェ

イトがより大きくなっており、調べるべきものは調べるという風潮が強くなっているように思われる。このように、設計技術者の置かれている背景が海外と国内では異なっているため、双方を一義的に比較することは難しい面はあるが、*N* 値に偏重している国内設計のありかたについて、今一度、顧みることは必要といえる。

表 1-3-1 代表的な技術図書における *N* 値の利用状況一覧表 (1/3)

| 分類 | 発行                 | 図書                    | 版       | 区分・適用性  |           |            | 土質定数                |             |                  |                  |             |
|----|--------------------|-----------------------|---------|---------|-----------|------------|---------------------|-------------|------------------|------------------|-------------|
|    |                    |                       |         | 地層の成層状態 | 軟弱地盤の区分   | 適用性の目安     | 単位体積重量 ( $\gamma$ ) | 粘着力 ( $C$ ) | 一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) | 内部摩擦角 ( $\phi$ ) | 変形係数/地盤反力係数 |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編   | 2017.11 |         |           | p26 p60-64 |                     |             |                  | p536             | p188        |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編    | 2017.11 |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 杭基礎設計便覧               | 2015.4  | p65     |           | p444       |                     | p82         |                  | p85              | p89         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工要綱                | 2009.6  |         | p58       |            |                     |             |                  |                  |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 盛土工指針            | 2010.5  |         | p44       | p48        | p101                | p101        |                  | p101             |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 軟弱地盤対策工指針        | 2012.8  |         | p8        | p64        |                     |             | p45              |                  |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 切土工・斜面安定工指針      | 2009.7  | p127    |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 擁壁工指針                 | 2012.7  |         |           | p38        |                     | p64         |                  | p64              |             |
| 道路 | 日本道路協会             | カルバート工指針              | 2010.4  |         |           | p39        |                     | p72         |                  | p73              |             |
| 道路 | 日本道路協会             | 仮設構造物工指針              | 1999.3  |         |           | p28        |                     | p30         |                  | p30              | p105        |
| 道路 | 土木学会               | トンネル標準示方書 共通・山岳工法編    | 2016    |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川砂防技術基準 調査編          | 2012.6  |         | 第15章第2節-7 |            |                     |             |                  |                  |             |
|    |                    |                       |         |         |           | 第15章第3節-31 |                     |             |                  |                  |             |
|    |                    |                       |         |         |           | 第15章第2節-6  |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 共通編    | 2012.2  |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 堤防編    | 2016.3  |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川堤防の耐震点検マニュアル        | 2016.3  |         |           | p13 細分化    |                     |             |                  |                  |             |
|    |                    |                       |         |         |           | p15 代表断面   |                     |             |                  |                  |             |
|    |                    |                       |         |         |           | p17 土層分類   |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 国土交通省 砂防部          | 地すべり防止技術指針            | 2008.1  |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |
| 河川 | 土木研究所              | 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント | 2014.7  |         |           |            |                     | p57         | p57              |                  |             |
| 港湾 | 日本港湾協会             | 港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻   | 2018.5  | p302    |           |            |                     |             | p337             | p334             |             |
| 建築 | 国土交通省 営繕部整備課       | 建築構造設計基準の資料           | 2018.4  |         |           |            |                     | p53         | p54              | p53              | p52 p54     |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計指針            | 2019.11 | p27     |           | p25        | p30                 |             |                  | p30              | p32         |
| 建築 | 日本建築学会             | 小規模建築物基礎設計指針          | 2008.8  |         |           | p32        |                     | p40         | p40              | p39              |             |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎設計のための地盤調査計画指針    | 2009.11 |         |           |            |                     | p220        |                  | p53              | p55         |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A  | 2015.11 |         |           |            |                     |             | p95-97           | p97-98           | p75-81      |
| 建築 | 日本建築学会             | 山留め設計指針               | 2017.11 |         |           |            |                     |             |                  |                  | p156 p157   |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物  | 2012.1  |         | p100      | p44-93     | p95                 |             |                  | p94              | p99         |
|    |                    |                       |         |         |           | p434       | p437                |             |                  | p465             | p457        |
|    |                    |                       |         |         |           |            |                     | p478        |                  | p478             | p518        |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物   | 2013.9  |         | p19       | p19        |                     | p489        | p489             | p59              |             |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計   | 2012.9  | p64     | p53       | p24        |                     |             |                  |                  |             |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物 | 2012.1  |         |           | p13 p14    |                     |             |                  |                  |             |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 調査要領                  | 2017.7  |         | p1-79     | p1-15      | p1-48               |             |                  |                  |             |
|    |                    |                       |         |         | p5-5      |            |                     |             |                  |                  |             |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 設計要領 第2集 橋梁建設編        | 2016.8  |         | p4-4      |            | p4-7                | p4-10       |                  | p4-10            | p4-13       |
|    |                    |                       |         |         |           |            |                     |             |                  |                  | p4-39       |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 設計要領 第2集 擁壁/カルバート編    | 2019.7  |         |           |            |                     |             |                  |                  |             |

表 1-3-2 代表的な技術図書における *N* 値の利用状況一覧表 (2/3)

| 分類 | 発行                 | 図書                    | 版       | 判定・評価   |            |          |          |        |           |      |          |         |
|----|--------------------|-----------------------|---------|---------|------------|----------|----------|--------|-----------|------|----------|---------|
|    |                    |                       |         | 支持層判定   | 極限(許容)支持力度 | せん断弾性波速度 | 耐震設計上の基盤 | 液状化判定  | 液状化危険度ランク | 側方移動 | アンカー周面摩擦 | 土圧      |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編   | 2017.11 | p177    | p239       |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編    | 2017.11 |         |            | p69      | p70      | p162   |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 杭基礎設計便覧               | 2015.4  |         | p193       |          | p95      |        |           | p305 |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工要綱                | 2009.6  |         |            | p353     |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 盛土工指針            | 2010.5  | p33     |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 軟弱地盤対策工指針        | 2012.8  |         |            |          |          | p167   |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 切土工・斜面安定工指針      | 2009.7  |         |            |          |          |        |           |      | p295     |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 擁壁工指針                 | 2012.7  | p37 p69 |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | カルバート工指針              | 2010.4  |         | p75        |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | 日本道路協会             | 仮設構造物工指針              | 1999.3  |         | p72        |          |          |        |           |      | p132     | p37     |
| 道路 | 土木学会               | トンネル標準示方書 共通・山岳工法編    | 2016    |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川砂防技術基準 調査編          | 2012.6  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 共通編    | 2012.2  |         |            |          | p13      | p25    |           |      |          |         |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 堤防編    | 2016.3  |         |            |          |          |        | p16       |      |          |         |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川堤防の耐震点検マニュアル        | 2016.3  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 河川 | 国土交通省 砂防部          | 地すべり防止技術指針            | 2008.1  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 河川 | 土木研究所              | 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント | 2014.7  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 港湾 | 日本港湾協会             | 港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻   | 2018.5  |         |            | p382     |          | p408   |           |      |          |         |
| 建築 | 国土交通省 営繕部整備課       | 建築構造設計基準の資料           | 2018.4  | p61     | p61        |          |          |        |           |      |          |         |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計指針            | 2019.11 | p26     | p194-211   | p31      |          | p50-53 |           |      |          |         |
| 建築 | 日本建築学会             | 小規模建築物基礎設計指針          | 2008.8  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎設計のための地盤調査計画指針    | 2009.11 | p47     | p220       | p220     |          | p220   |           |      |          |         |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A  | 2015.11 | p16     |            |          |          | p54-59 |           |      |          |         |
| 建築 | 日本建築学会             | 山留め設計指針               | 2017.11 |         |            |          |          |        |           |      |          | p87 p93 |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物  | 2012.1  | p48     | p268 p270  |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         | p526       |          |          |        |           |      |          |         |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物   | 2013.9  | p17 p82 |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計   | 2012.9  |         |            |          | p36      | p56    |           |      |          |         |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物 | 2012.1  | p13     |            |          |          |        |           |      | p342-343 | p66     |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 調査要領                  | 2017.7  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 設計要領 第2集 橋梁建設編        | 2016.8  |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
|    |                    |                       |         |         |            |          |          |        |           |      |          |         |
| 道路 | NEXCO 東・中・西        | 設計要領 第2集 擁壁/カルバート編    | 2019.7  |         | p29        |          |          |        |           |      |          |         |

表 1-3-3 代表的な技術図書における *N* 値の利用状況一覧表 (3/3)

| 分類 | 発行                 | 図書                    | 版       | 施工効果・適用性 |              |      | 土質調査     |
|----|--------------------|-----------------------|---------|----------|--------------|------|----------|
|    |                    |                       |         | SCP      | パイプロフローテーション | モタレ壁 | サンプラーの適用 |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編   | 2017.11 |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編    | 2017.11 |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 杭基礎設計便覧               | 2015.4  |          |              |      | p111     |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工要綱                | 2009.6  |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 盛土工指針            | 2010.5  |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 軟弱地盤対策工指針        | 2012.8  | p274     | p288         |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 道路土工 切土工・斜面安定工指針      | 2009.7  |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 擁壁工指針                 | 2012.7  |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | カルバート工指針              | 2010.4  |          |              |      |          |
| 道路 | 日本道路協会             | 仮設構造物工指針              | 1999.3  |          |              |      |          |
| 道路 | 土木学会               | トンネル標準示方書 共通・山岳工法編    | 2016    |          |              |      |          |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川砂防技術基準 調査編          | 2012.6  |          |              |      |          |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 共通編    | 2012.2  |          |              |      |          |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川構造物の耐震性能照査指針 堤防編    | 2016.3  |          |              |      |          |
| 河川 | 国土交通省<br>水管理・国土保全局 | 河川堤防の耐震点検マニュアル        | 2016.3  |          |              |      |          |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
| 河川 | 国土交通省 砂防部          | 地すべり防止技術指針            | 2008.1  |          |              |      |          |
| 河川 | 土木研究所              | 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント | 2014.7  |          |              |      |          |
| 港湾 | 日本港湾協会             | 港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻   | 2018.5  |          |              |      |          |
| 建築 | 国土交通省 営繕部整備課       | 建築構造設計基準の資料           | 2018.4  |          |              |      |          |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計指針            | 2019.11 |          |              |      |          |
| 建築 | 日本建築学会             | 小規模建築物基礎設計指針          | 2008.8  |          |              |      |          |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎設計のための地盤調査計画指針    | 2009.11 |          |              |      |          |
| 建築 | 日本建築学会             | 建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A  | 2015.11 | p87-88   |              |      | p29      |
| 建築 | 日本建築学会             | 山留め設計指針               | 2017.11 |          |              |      |          |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物  | 2012.1  |          |              |      | p30 p32  |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
|    |                    |                       |         |          |              |      |          |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物   | 2013.9  |          |              |      | p19      |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計   | 2012.9  |          |              |      |          |
| 鉄道 | 鉄道総合技術研究所          | 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物 | 2012.1  |          |              | p270 | p14 p15  |
| 道路 | NEXCO東・中・西         | 調査要領                  | 2017.7  |          |              |      | p1-85    |
|    |                    |                       |         |          |              |      | p1-126   |
| 道路 | NEXCO東・中・西         | 設計要領 第2集 橋梁建設編        | 2016.8  |          |              |      |          |
| 道路 | NEXCO東・中・西         | 設計要領 第2集 擁壁/カルバート編    | 2019.7  |          |              |      |          |



表 1-3-4 海外における標準貫入試験の利用状況

| ヒアリング<br>項目 | 主な担当国と回答内容                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | 米国（本土）                                                                                                                                                                                                                | 米国（グアム）                                                                                                                                                | シンガポール                                                                                                                                             | その他アジア                                                                                                                                                                                                                                            |
| ①調査における利用   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・SPTはよく利用されるが、日本ほど多くはない印象</li> <li>・SPTとCPTの比は、2:1～1:1程度の印象</li> <li>・氷河堆積物が多い北部ではSPTが多く、軟弱地盤が多い南部ではCPTが多いようである</li> <li>・SPTとCPT共に、30m（100ft）が最大深度でそれ以上深く掘ることは稀である</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・SPTは頻繁に使用されており、室内試験よりはN値が利用されている</li> <li>・CPTの事例は少ないようであり、地盤改良工事の効果判定で利用した実績はある</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・東南アジアでは、SPTとCPTは両方とも広く使われている。</li> <li>・利用頻度に関する統計資料は持ち合わせていない。</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・統計資料はないが、アジア諸国では、SPTに比べてCPTの適用が多い印象</li> <li>・日系企業が関わるプロジェクトでは、日本式の地質調査を求められることがほとんどであり、そこではSPTが多用される</li> </ul>                                                                                          |
| ②換算式の利用     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・分野が異なるため詳しくはないが、ASTMの基準に示されているようである</li> </ul>                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・土質定数の設定において、N値を参考とするが、直接的に換算式を利用することは少ない</li> <li>・沈下計算ではN値を利用している</li> <li>・液状化判定では日本と同様にN値を利用している</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・シンガポールでは、杭の周面摩擦力など、いくつかの経験式にN値を用いている</li> <li>・また、強風化花崗岩（Residual Soil）のせん断強度の計算にも、N値が広く用いられている</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・アジア諸国でも、設計にN値が利用される場合はあるが、日本ほどあらゆる換算式が整備されている国はほかにない</li> <li>・性能設計が主流の海外では、調査目的や現場条件に応じて、N値以外の様々な原位置試験や室内試験により得られる地盤定数が適用される</li> </ul>                                                                  |
| ③その他        | ---                                                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・アメリカでは、日本のような示方書は存在せず、PEがOKと言えばOKの世界となっている</li> <li>・このため、技術者が信じる教科書や論文を参考に土質定数を決めている</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・SPTを実施しているのは適切な専門教育を受けていない外国人労働者であり、結果の信頼性には疑問を感じている</li> <li>・土質技術者は、そのようなN値に大きく依存している悲しい実態がある</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・アジア諸国の多くは、欧米の設計思想を取り入れているので、必然的に性能設計が多くなる</li> <li>・PEがOKと言えばOKの世界</li> <li>・構造物基礎の設計には、“Foundation Analysis and Design, Joseph E. Bowles”が参考書としてよく使われる</li> <li>・上記図書は、計算例も多く記載されており、実務者向けの良書</li> </ul> |

<引用・参考文献>

- 1) N値の話編集委員会：改訂 N値の話、理工図書、pp. 1-14、2004
- 2) 星埜和・加藤渡・三木五三郎・榎並昭 共訳：新版 テルツァギ・ペック 土質力学 応用編、丸善、pp. 276-303、1970
- 3) 佐藤康平：橋梁工学・基礎の設計及施工、1929
- 4) 中央開発：社報 No. 8、p. 21、1962
- 5) 森博：土質調査における新しい二つの試みについて、土と基礎 創刊号、pp. 25-31、1953

## 2. 標準貫入試験の問題点

### 2.1 標準貫入試験の準拠する規格

標準貫入試験方法は、2005年に国際規格（ISO22476-3）として規格化され、これに伴いJIS規格もISO規格に準じるかたちで2013年に改定された。ISO規格では、サンプラー形状が従来のJIS規格と異なっており、このサンプラーで得られる $N$ 値は設計に用いることができず、設計に用いる場合は従来のJIS規格で規定されていたSPTサンプラーを用いる<sup>1)</sup>こととなっている。

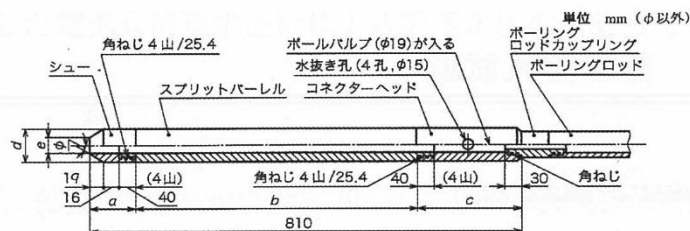
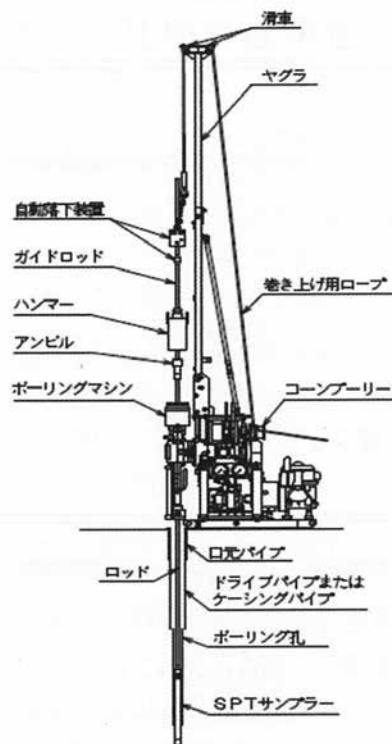
### 2.2 標準貫入試験の概要

標準貫入試験の概要図を図2-2-1に示す。標準貫入試験で得られる $N$ 値とは、質量 $63.5\text{kg} \pm 0.5\text{kg}$ の鋼製ハンマーを $760\text{mm} \pm 10\text{mm}$ の高さから自由落下させて、ロッド頭部に取り付けたアンビルを打撃し、ロッド先端に取り付けたSPTサンプラー（図2-2-2参照）を地盤に $300\text{mm}$ 打ち込むのに必要な打撃回数のことである。

SPTサンプラーは、シューと二つ割りにできるスプリットバーレル及びカップリングからなる鋼製のものである。シューは、損傷しにくい熱処理を施した構造用合金鋼製のもので、外面及び内面は、摩擦の少ない仕上げ面をもつものである。

落下装置は、ハンマーを吊上げて自由落下させることができるもので、設計に用いる $N$ 値を求める場合には、自由落下（全自動落下型または半自動落下型）とする必要がある。

従来は、手動落下法（コーンプリー法、トンビ法）がしばしば用いられていたが、2013年のJIS改定から、設計 $N$ 値に用いる場合にはこれらの方法は使用できないこととなった。



| 各部 | 全長            | シュー長<br>$a$  | バーレル長<br>$b$  | ヘッド長<br>$c$   | 外径<br>$d$    | 内径<br>$e$    | シュー角度<br>$\phi$       | 刃先肉厚<br>$t$     |
|----|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------|
| 寸法 | $810 \pm 1.0$ | $75 \pm 1.0$ | $560 \pm 1.0$ | $175 \pm 1.0$ | $51 \pm 1.0$ | $35 \pm 1.0$ | $19^\circ 45' \pm 8'$ | $1.15 \pm 0.05$ |

図2-2-1 標準貫入試験装置の概要図<sup>2)</sup>

図2-2-2 SPTサンプラーの形状と寸法<sup>2)</sup>

## 2.3 標準貫入試験の方法

標準貫入試験は、以下の手順で実施する。

- ①所定の試験深度まで試験孔を掘削し、試験孔底のスライムを取り除く。その際に孔底以深の地盤を乱してはならない。
- ②ロッドの先端にSPTサンプラーを取り付け、試験孔底へ降ろす。そして、打撃装置を取り付ける。この時点での貫入量を記録する。軟弱地盤で自沈を生じる場合は、ロッド自沈あるいはハンマー自沈に分けて記録する。
- ③ロッドの上端部にアンビルを接続し、63.5kg±0.5kg のハンマーを静かにアンビルにセットし、ガイドロッドを接続する。接続後は、ロッドにチョークにて印をする。（予備打ち 150mm、本打ち 100mm、200mm、300mm など）
- ④ハンマーを 760mm±10mm の高さから自由落下させ、試験孔底から 150mm まで（自沈を含む）予備打ちを行う。予備打ちは、軟弱な地盤ではハンマー落下高を小さくして、軽打撃によって貫入抵抗を確認しながら貫入する。また、*N* 値 50 以上と想定される地盤では、予備打ちを本打ちに代えることができる。
- ⑤予備打ち後、ハンマーを 760mm±10mm の高さから自由落下させ、SPT サンプラーを 300mm 貫入する。必要な打撃回数は、100mm 貫入毎に記録する。ただし、打撃 1 回毎の貫入量が 100 mm を超えた場合は、その貫入量を記録する。
- ⑥本打ちの打撃回数は、特に必要のない限り 50 回を限度とする。予備打ち後に 300mm 貫入させるに必要な全打撃回数をその試験区間の *N* 値とする。
- ⑦所定の打撃回数で、貫入量が 300mm に達しない場合、打撃回数に対する貫入量を記録する。特に予備打ち及び本打ちにおける 50 回の打撃に対して累計貫入量が 10mm 未満の場合は貫入不能として記載する。なお、必要に応じて打撃回数を 100 回まで増やしてもよい。
- ⑧測定を終了した後、地表に SPT サンプラーを引き上げ、シュー及びカップリングを取り外し、スプリットバーレルを二つに割り、採取試料の観察を行う。代表的な試料を透明な容器に保存する。なお、採取試料が複数の土層にまたがる場合は、試料の上下関係を保ったまま、試料間に仕切り板などを挟んで試料を保存する。

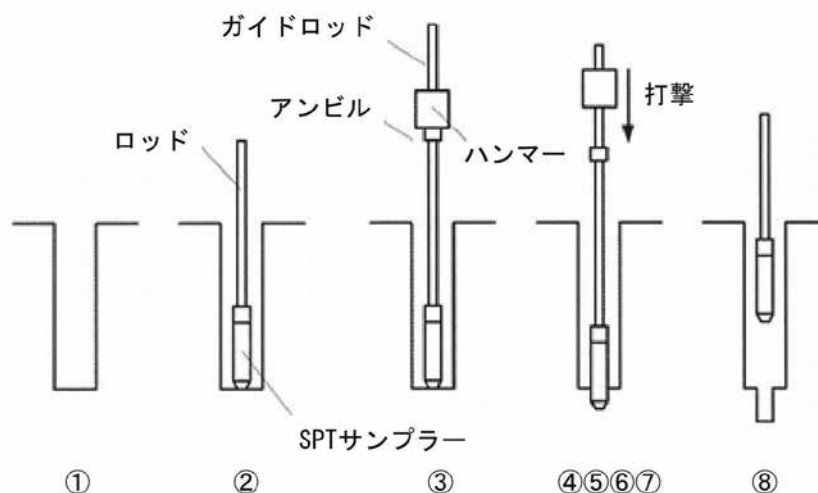


図 2-3-1 標準貫入試験方法の概要図 <sup>3)</sup>をもとに加筆編集

① 試験孔底のスライムを取り除く



- ・試験開始深度となる孔底まで確実にスライムを取り除く。

② ロッドにSPTサンプラーを取り付け、孔底に降ろす



- ・SPTサンプラーにゆるみがないか確認し、孔底まで下す。
- ・ロッドをゆっくり下す。このとき、SPTサンプラー先端が孔底深度以上に入らないよう注意する。

③ アンビルを取り付ける



- ・ロッドとアンビルを確実に接続する。
- ・ロッドとアンビルが緩んでいると、打撃エネルギーが吸収され、試験結果に影響を与える。

④ ハンマーをアンビルに設置する



- ・ハンマーはゆっくり設置し、試験前にハンマー打撃を与えないよう注意する。

⑤ ガイドロッドを接続する



- ・ガイドロッドは確実に接続する。
- ・ガイドロッドが緩むとハンマー落下位置が微妙にずれ、試験結果に影響を与える。
- ・試験中も緩むため、随時、締めなおす必要がある。

⑥ ロッドにチョーキングする



- ・孔底深度とロッドの長さを確認する。
- ・予備打ち150mmと100mm間隔でマーキングする。
- ・礫層などでは例えば5cmなど10cmよりも細かい間隔でマーキングし、打撃回数を記録すると、礫障害の判定ができる。

⑦ ハンマー打撃による貫入試験を実施する



- ・ハンマーが所定の高さ（760mm±10mm）から自由落下させる。
- ・ハンマーが自由落下できるよう、ガイドロッドを保持する。

⑧ 打撃回数を記録する



- ・試験後は速やかに100mm毎の打撃回数と貫入深度を記録する。
- ・誤記録とならないように注意する。



## 2.4 信頼における $N$ 値測定のための留意事項

信頼における  $N$  値を得るために、標準貫入試験の実務において発生しがちな測定誤差発生  
の要因を整理し、現場測定に際して、留意すべき事項について整理した。

$N$  値の精度に、悪影響を及ぼす可能性がある標準貫入試験実施上の要因としては、(1)鉛直性（ハンマーの自由落下）の確保に関する事項、(2)装置・器具の整備管理に関する事項、(3)試験孔の掘削技術（技能）に関する事項、(4)ハンマー落下高さの安定性（ぶれ・ばらつき）に関する事項で、装置・器具の構造・性能上の問題及び人為的な誤差発生・ミスの問題などが挙げられる。これらの要因の具体的な内容について、参考文献<sup>4)</sup>をもとに整理した。

### (1)鉛直性（ハンマーの自由落下）の確保に関する事項

標準貫入試験時には、いかにハンマーの自由落下による打撃エネルギーを損失なく確実に地中の SPT サンプラーに伝達させるかが重要となる。そのためには、ハンマーの自由落下の補助ならびに鉛直方向へのエネルギー伝達の媒介としての役割をなすボーリングロッドなどの鉛直性の確保が求められる。表 2-4-1 にこれに関する  $N$  値の測定誤差発生要因を整理する。

表 2-4-1 測定誤差発生要因(1)（鉛直性の確保に関わる事項）

| 測定誤差発生の要因となる事項<br>( $N$ 値測定に影響を及ぼす事項) |
|---------------------------------------|
| 鉛直性の確保に関する事項                          |
| ①作業台の水平性と安定性                          |
| ②ボーリング機械据え付け固定における水平性と安定性             |
| ③鉛直性確保を考慮したボーリング足場の仮設                 |
| ④ガイドロッド→ボーリングロッド→サンプラー接続の鉛直性と安定性      |
| ⑤ガイドロッド・アンビル・ボーリングロッド・サンプラー等の接続ねじの緩み  |
| ⑥アンビル上面(受圧面)の水平性                      |
| ⑦ハンマー底面(受圧面)の水平性                      |
| ⑧ボーリング機械のスピンドルの使用(地上部での鉛直性補助)         |
| ⑨ボーリング孔の鉛直性(孔曲りが無い)                   |
| ⑩ボーリング掘進中および試験前等における鉛直性(水平性)の計測       |



スピンドルを使用していない

ロッドの鉛直性を確保していない

写真 2-4-1 鉛直性の確保に関する留意事項(例)



(2) 装置・器具の整備管理に関する事項

装置・器具の不統一や整備不足も、 $N$ 値の精度に大きく影響する。表 2-4-2 にこれに関する  $N$  値の測定誤差発生要因を整理する。これらの要因への対応としては、ボーリングロッド、シューの接続ねじ部、アンビルなどは損傷しやすいため、期日を決めてチェックし、変状が認められたら、すぐに交換をすることが重要である。その中でもロッドの直線性に関するチェックの頻度の目安としては、調査地点への移動毎、ならびに少なくとも 20 回以上の試験を行う毎に目視による確認をしなければならないとされている。

表 2-4-2 測定誤差発生要因(2) (装置・器具の整備管理に関する事項)

| 測定誤差発生の要因となる事項<br>( $N$ 値測定に影響を及ぼす事項)    |
|------------------------------------------|
| 装置・器具の管理(調整, 整備, 修理, 取替え等)に関する事項         |
| ①装置・器具の仕様(形状, 規格寸法等)はJIS規格に適合しているか       |
| ②スプリットバーレル接合面は段つき(溝つき)構造となっているか          |
| ③スプリットバーレルの内面・外面は正常か(摩耗, 傷, 付着物, 錆等)     |
| ④シューの長さ, 外径・内径, 角度, 刃先の肉厚等はJISの規格どおりか    |
| ⑤シューの刃先は破損(変形)していないか(破損, 摩耗, 屈曲の有無)      |
| ⑥ボーリングロッド, シュー等の接続ねじ部は正常か(破損, 摩耗, 劣化の有無) |
| ⑦アンビル受圧面の平滑性(摩耗, 傷, 付着物, 錆等)             |
| ⑧ハンマー受圧面の平滑性(摩耗, 傷, 付着物, 錆等)             |
| ⑨SPTサンプラーの水抜き孔, ボールバルブは正常機能状態か           |
| ⑩試験中での的確な器具の調整等                          |



シューの摩耗・破損



接続部の破損

写真 2-4-2 装置・器具の管理の留意事項(例)

(3)試験孔の掘削技術（技能）に関する事項

掘削技術者の経験や技術力も  $N$  値の精度に大きく影響する。表 2-4-3 にこれに関する  $N$  値の測定誤差発生要因を整理する。これらの要因への対応としては、孔底地盤の乱れを抑止するのが重要であり、孔底地盤のボーリング、循環流体の過剰送水による孔底地盤の乱れ、150mm 以上の大口径のボーリングなどに注意が必要である。

表 2-4-3 測定誤差発生要因 (3) (試験孔の掘削技術（技能）に関する事項)

| 測定誤差発生の要因となる事項<br>( $N$ 値測定に影響を及ぼす事項) |
|---------------------------------------|
| 試験孔の掘削技術(技能)に関する事項                    |
| ①掘進内容(目的, 調査内容, 掘進長, 孔径, 試験実施深度等)は正確か |
| ②掘削技術者は適任か(ベテラン技術者, 地質調査技士)           |
| ③使用するボーリング機械, 資材(種類, 規格, 質, 量等)は的確か   |
| ④掘進工法(オイルフィード, 加重圧・油圧, 回転, 送水等)は最適か   |
| ⑤泥水の必要性の判定と最適掘削流体(無水, 清水, 泥水)の適用      |
| ⑥使用する泥水の内容(種類, 量, 濃度等)は適正か            |
| ⑦孔内水(湧水, 逸水, 流動)及び孔内噴気(ガス等)の処理は的確か    |
| ⑧乱さない試料等のサンプリング実施との関連性                |
| ⑨各種孔内原位置試験実施との関連                      |
| ⑩孔壁の保護工法(ケーシング, 泥水, セメンテーション等)は的確か    |
| ⑪孔底の掘削工法は的確か(負圧, 攪乱, 緩み等の発生防止, 水処理)   |
| ⑫試験前の孔底処理(スライム, 落下物等の排除)は的確か          |
| ⑬孔曲りは生じていないか                          |
| ⑭現場管理者が常駐しているか                        |

また、表 2-4-3 の⑪に該当する孔底地盤を緩める要因を下記に記す。

1) 孔底部掘削における工法の不適合・工法適用ミス

掘削器具の選定、掘削孔径の決定、ビット・サンプラーの選択と適用、掘削流体の選択と適用、孔底最終掘削時（試料採取）の掘進長不良、孔壁保護工の不適合などが  $N$  値測定に影響を及ぼす可能性がある。

2) 孔底部掘削における技術力の差異による孔底地盤攪乱への影響

標準貫入試験の経験・熟練度（技能）、地域特性をもつ地盤・類似地盤での経験、掘削機械の操作技術、試験装置・器具の使用経験、掘進中の掘進荷重・ビット荷重・油圧・トルク・回転数（掘進速度）・送水圧・送水量などのコントロールが重要であり、孔底の礫残り・土砂残り防止、泥水・スライムの管理、負圧の発生防止（コアチューブの急激な引

揚げ)、孔内水位の急激な変動防止(急降下によるボイリングの誘発)、泥水の排除、スライムの沈積防止と排除、落下物の排除などに留意する必要がある。

孔底地盤のスライムを孔外に排除する必要がある、対象地盤によっては、保孔(ケーシング)を十分に行い、孔底にスライムや孔壁崩壊土砂が溜まらないようにする。

### 3) 試験孔内でのトラブル発生防止技術の良否

掘削済み試験孔の孔壁保護工(崩壊・膨張・押出し・礫などの肌落ちなどの防止対策工)、孔壁とコアチューブの貼付き現象、ジャーミング防止、資材などの落下防止などの技術の良否が  $N$  値測定に影響を及ぼす可能性がある。

### 4) 特殊な地盤の孔底掘削技術

被圧地下水の湧水対策、孔内水の逸水対策、送水による不飽和地盤への水の浸透、熱水湧出対策、ガス発生地盤対策、孔底の巨礫対策などの適否が  $N$  値測定に影響を及ぼす可能性がある。

### 5) 掘削後の放置

掘削後に試験孔を長期間放置すると、応力解放、水の浸透、沈殿物の堆積、地盤の土粒子の構造的変化などの要因が  $N$  値測定に影響を及ぼす可能性がある。

### (4) ハンマー落下高さの安定性(ぶれ・ばらつき)に関わる事項

設計  $N$  値を求める場合に採用できないこともあり、実施の機会は少ないが、手動落下で標準貫入試験を実施する場合には、表 2-4-4 に示すとおり、自動落下に比較してオペレータの技量が  $N$  値の精度に大きく影響する。

表 2-4-4 測定誤差発生要因(4)(ハンマーの落下高さの安定性に関わる事項)

| 測定誤差発生要因となる事項<br>( $N$ 値測定に影響を及ぼす事項) | 手動落下※       |     | 自動落下 |     |
|--------------------------------------|-------------|-----|------|-----|
|                                      | コーン<br>プーラー | トンビ | 半自動  | 全自動 |
| 標準貫入試験実施における落下高の安定性(ぶれ・ばらつき)に関わる事項   |             |     |      |     |
| ①吊上げ用ロープは常にハンマーに接続され落下時にも繋がっている      | ○           | —   | —    | —   |
| ②落下高を760mm ±10mmに正確に合わせるのが困難         | ○           | ○   | —    | —   |
| ③人力によるハンマーの落下では1打毎に打撃エネルギーが変動しやすい    | ○           | ○   | —    | —   |
| ④打撃速度(ハンマーの吊上・落下作業の繰返し)が一打毎に変化       | ○           | ○   | ○    | —   |

※設計  $N$  値を求める場合には、適用できない

凡例 ○: 測定誤差発生要因となりうる —: 測定誤差発生に無関係または無視してよい

## 2.5 $N$ 値の測定誤差と地盤のばらつき

地層は僅かに位置が変わっただけでも、複雑に変化することがあり、標準貫入試験の実施には様々な留意事項があり、試験実施者の個人差も加わるため、 $N$ 値には相応のばらつきが生じることが自明といえる。

ここでは、既往論文を基に  $N$  値のばらつきについて整理した。なお、以降で紹介する研究については、標準貫入試験方法自体が現行の JIS 規格が適用される以前のものである点に留意が必要である。特にハンマー落下方法については、多くの場合、現在設計に用いる  $N$  値を求める場合に認められている自動落下法ではなく、コーンプリー法やトンビ法が採用されていること、また記載の中で落下方法の区別がなされていないものがある点に留意されたい。

### (1) 近接地点で測定した $N$ 値のばらつき①<sup>5)</sup>

図 2-5-1 は、極めて均一であると考えられる地盤で、しかも非常に近接した場所での  $N$  値を比較した結果である。このような条件においても、 $N$  値には 2 倍程度の差があることがわかり、ばらつきが大きいものと判断できる。

### (2) 近接地点で測定した $N$ 値のばらつき②<sup>6)</sup>

図 2-5-2 は、近接した 3 地点で測定した砂礫層の  $N$  値を比較した結果である。砂礫層での  $N$  値では深度によっては、2 倍程度の差があることがわかり、GL-12~13m に分布している粘土質中砂においては、3~4 倍程度の差があることがわかり、ばらつきが大きいものと判断できる。

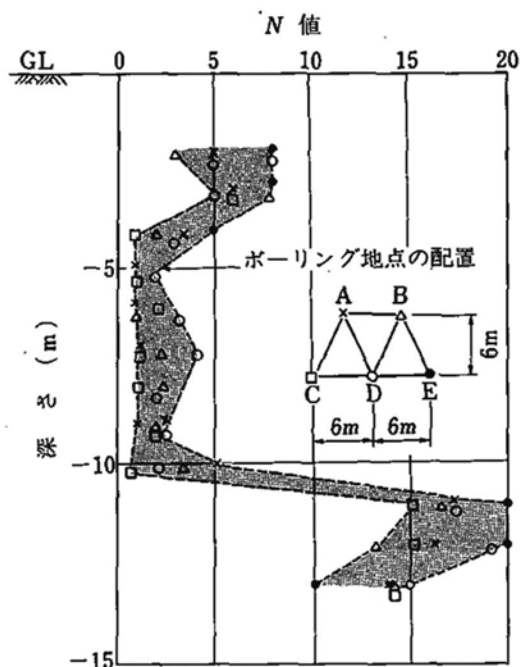


図 2-5-1 近接地点の  $N$  値のばらつき①<sup>5)</sup>

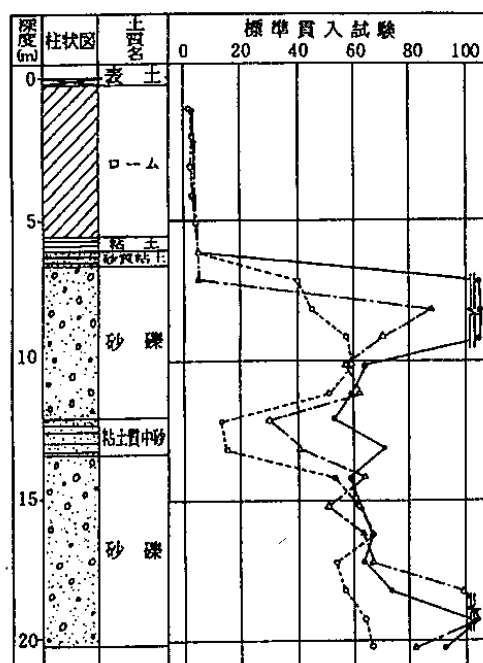


図 2-5-2 近接地点の  $N$  値のばらつき②<sup>6)</sup>

### (3) 掘削方法の違いによる $N$ 値のばらつき <sup>7)</sup>

以下に示すのは、札幌市手稲区内の均質な海浜性砂地盤を試験地を選び、同一敷地内で5名のオペレータによる15孔の試験ボーリングを実施して、ボーリング孔の削孔方法の違いが  $N$  値に与える影響を検討したものである。比較対象とした削孔方法は、次の3通りである。

- ① A 法：循環泥水によるノンコア掘削
- ② B 法：循環泥水を用いない無水コア掘削
- ③ C 法：B 法でコアチューブを急速に引上げる乱暴な作業を行ったもの

図2-5-3は全15孔の標準貫入試験結果と5地点で実施したオランダ式二重管コーン貫入試験を比較したものである。オランダ式二重管コーン貫入試験の  $q_c$  値は試験者によるばらつきが小さいのに対して、標準貫入試験の  $N$  値は平均値に対して2倍程度のばらつき幅がみられる。

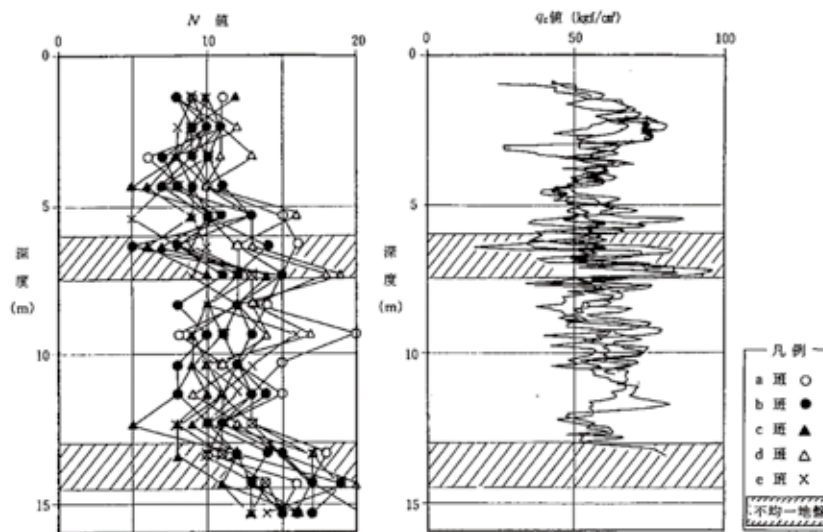


図2-5-3 試験者による  $N$  値のばらつき <sup>7)</sup>

A 法ではスライムの沈積がなかったが、B 法ではスライム量が約10~30cm、C 法では約10~50cmと非常に多い。孔底に沈積したスライムが、少なからず  $N$  値に影響を与えていると予測し、スライムの沈積がないA法の  $N$  値を基準にして、B 法とC法の  $N$  値の差分を、スライム量と対比して図2-5-4に示した。

スライム量が少ない場合においても、 $N$  値が最大40%減少しており、無水掘削による孔底地盤の乱れが原因と考えられる。スライム量が多い場合は、SPTサンプラーの先詰まりなどが原因となって、 $N$  値が最大50%増加している。

削孔方法の比較結果から、無水コア掘削による孔底地盤の乱れやスライムの沈積が、 $N$  値に多大な影響を与えることが述べられている。

標準貫入試験の精度向上のためには、孔底のスライムを除去し、孔底に崩壊土砂が溜まらないようにすることが重要となる。

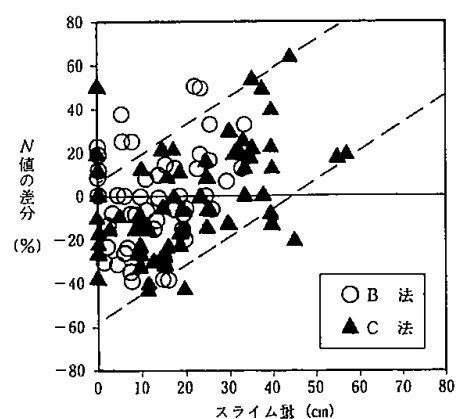


図2-5-4 スライム量と  $N$  値の差分相関図 <sup>7)</sup>



(4)ハンマー落下方法の違いによる砂地盤の  $N$  値のばらつき <sup>7)</sup>

以下に示すのは、石狩市内の均質な海浜性砂地盤を試験地を選び、ハンマーの落下方法や試験器具の違いによる  $N$  値の影響を検討したものである。比較試験は2班で実施され、削孔方法は循環泥水によるノンコア掘削に統一されている。

比較対象の落下方法は、トンビ法(To)、コーンブーリー法(Cp)、自動落下方法(At) の3方法とした。図2-5-5に両班の落下方法別の測定  $N$  値、表2-5-1に落下方法別の平均  $N$  値を示す。落下効率が最も良いと考えられる To 法の  $N$  値と比較すると、Cp 法の  $N$  値はロープや滑車の摩擦抵抗が原因して約10%増加している。At 法の  $N$  値は平均で約5%の増加がみられる。

慎重に試験を行った場合は、ハンマーの落下方法の違いが  $N$  値に与える影響は10%未満と、それほど大きくない結果となった。しかし、ハンマーの落下高さの違いや、コーンブーリー法では熟練度の違いがある場合、 $N$  値には更に大きな差異が生じると考えられる。

したがって、ハンマーの落下方法は、落下高さの管理が容易で熟練度による個人差が生じ難い自動落下方法が適切であるといえる。

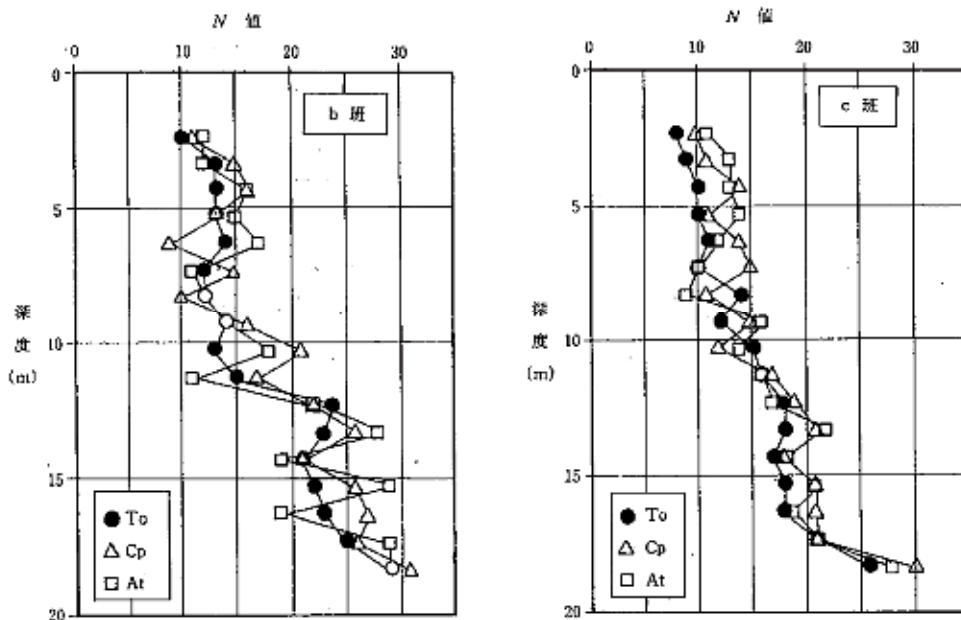


図2-5-5 落下方法別の  $N$  値のばらつき <sup>7)</sup>

表2-5-1 落下方法別の平均  $N$  値一覧 <sup>7)</sup>

| 条 件 | 平均 $N$ 値 |      | $\overline{N_c}/\overline{N_b}$ |
|-----|----------|------|---------------------------------|
|     | b 班      | c 班  |                                 |
| To  | 17.4     | 14.8 | 0.84                            |
| Cp  | 18.9     | 16.5 | 0.85                            |
| At  | 18.4     | 16.1 | 0.85                            |
| Ats | 15.6     | 18.3 | 1.17                            |

$\overline{N_b}$ : b 班の平均  $N$  値

$\overline{N_c}$ : c 班の平均  $N$  値

Ats: b 班と c 班のサンプラーを交換したケース

※凡例・条件に関する補足

To: トンビ法

Cp: コーンブーリー法

At: 自動落下方法

(5)ハンマー落下方法の違いによる粘性土地盤の  $N$  値のばらつき<sup>8)</sup>

図 2-5-6 は粘性土について、自動落下による打撃とコーンプリー法による打撃の  $N$  値を比較した結果である。全体的に自動落下による  $N$  値の方が小さく、ばらつきも少ない。

(6)SPT サンプラーの違いによる  $N$  値のばらつき<sup>7)</sup>

以下に示すのは、使用器具により測定された  $N$  値がどのように異なるかを調べた事例である。

前述の表 2-5-1 に示すように b 班と c 班の同一方法での測定  $N$  値には、常に約 15% の一定の割合で差異がみられている。ここで、使用器具の確認のため、両班の SPT サンプラーを比較すると、ネジ部の形状や刃先の肉厚などの規格が異なっていることが判明した。

表 2-5-1 の Ats 法は、自動落下法で b 班と c 班の SPT サンプラーを交換した結果であるが、両班の測定  $N$  値の関係が逆転しており、b 班と c 班の約 15% の  $N$  値の差異は、SPT サンプラーの違いによることが明らかになった。

次に、SPT サンプラーを統一した場合の両班の測定  $N$  値を図 2-5-7 に示す。削孔方法はノンコア掘削に、落下方法は同一規格の装置を用いた自動落下法に統一している。

諸条件を統一した場合は、試験者の違いによる  $N$  値の差異はほとんど認められない結果となり、規格の統一による品質管理が重要であるといえる。

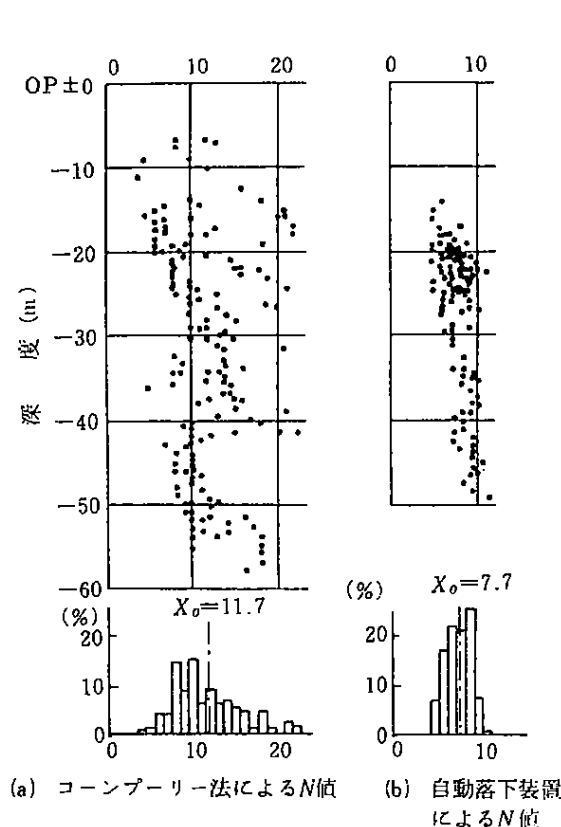


図 2-5-6 ハンマー落下方法の違いによる  $N$  値のばらつき<sup>8)</sup>

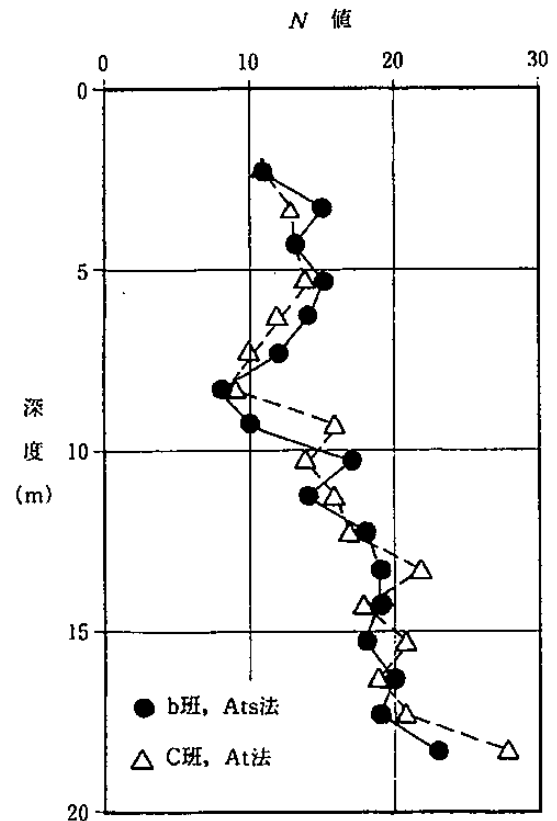


図 2-5-7 SPT サンプラーを統一した場合の  $N$  値のばらつき<sup>7)</sup>

(7) 地盤の不均質性による  $N$  値のばらつき<sup>9)</sup>

以下に示すのは、地盤の不均質性が測定された  $N$  値にどのような影響を与えるかを調べた事例である。

関東地質調査業協会がハンマー落下方法による比較試験を川口と千葉で、同じく吉見、時松、大岡ら<sup>10)</sup>が新潟 A、新潟 B、筑波などで比較実験している。これらの地点は、比較試験の性格上、水平方向に連続性がよく、均質な地盤として選定されており、測定された  $N$  値の差がハンマーの落下方法による差と考えられていた。藤田(1987)が、それぞれの比較試験におけるボーリング孔毎の  $N$  値の合計( $\Sigma N$ )は同様に試験方法の差を示すのではないかと予想してとりまとめたのが図 2-5-8 であるが、そのような結果は得られなかった。

図 2-5-8 では、自動落下法とトンビ法が 100%以下に、コーンブーリー法 (+ ストッパー法を含む) は 100%以上の位置にプロットされるべきであるが、必ずしもそのような結果になっておらず、2つのグループのハンマー落下方法には有意な差は認められない。また、ロックポートや戸畑においては、2種類のロッド径で標準貫入試験を実施した場合の  $N$  値のばらつきについて比較試験が行われたが、その場合の合計  $N$  値( $\Sigma N$ )のばらつきと、前述の落下方法別の比較試験  $\Sigma N$  のばらつきとの間に、優位な差異は認められない。

これを図 2-5-9 のヒストグラムにまとめると、ハンマーの落下方法は  $\Sigma N$  にそれほどの影響を与えることがなく、ヒストグラムに示されるばらつきは他に原因があると考えられる。

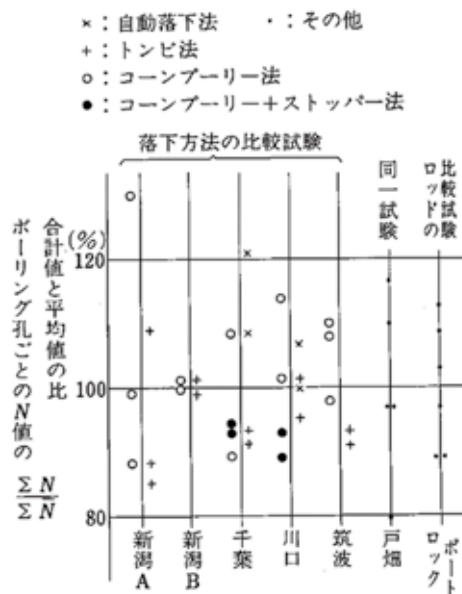


図2-5-8 各比較試験における落下方法別  
合計  $M$  値と平均合計  $M$  値との比 (藤田・1987)<sup>9)</sup>

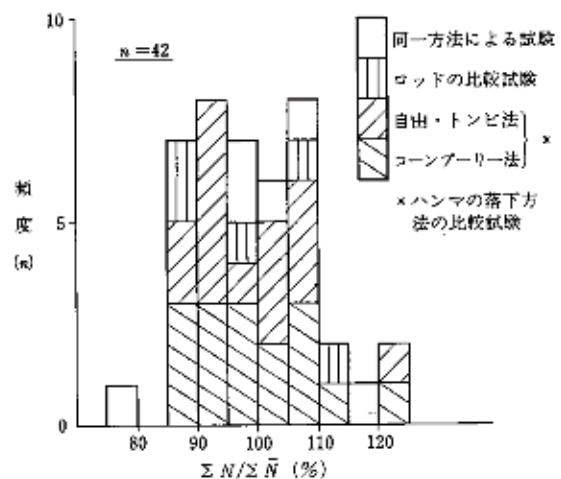


図2-5-9 各比較試験におけるSPT- $M$ 値の  
ボーリング毎の合計値の  
平均値に対するばらつきの  
ヒストグラム (藤田・1990)<sup>9)</sup>

表 2-5-2 近接ボーリング孔における標準貫入試験の  $N$  値のばらつき (戸畑地点) (藤田・1987)<sup>9)</sup>

| 深 度<br>(m)                                          | 各ボーリング孔の $N$ 値                  |            |                          |             |             | 2 ボーリング間の $N$ 値の差 (絶対値) …… $\Delta N$ |                               |     |                                  |                               |     |                                 |                               |     |                               |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------|------------|--------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----|----------------------------------|-------------------------------|-----|---------------------------------|-------------------------------|-----|-------------------------------|
|                                                     | A                               | B          | C                        | D           | E           | A-B                                   | C-D                           | D-E | C-A                              | A-D                           | D-B | B-E                             | A-E                           | B-C | C-E                           |
| 2                                                   | 5                               | 3          | 5                        | 8           | 8           | 2                                     | 3                             | 0   | 0                                | 3                             | 5   | 5                               | 3                             | 2   | 3                             |
| 3                                                   | 6                               | 8          | 5                        | 6           | 8           | 2                                     | 1                             | 2   | 1                                | 0                             | 2   | 0                               | 2                             | 3   | 3                             |
| 4                                                   | 5                               | 2          | 1                        | 3           | 3           | 3                                     | 2                             | 0   | 4                                | 2                             | 1   | 1                               | 2                             | 1   | 2                             |
| 5                                                   | 1                               | 1          | 1                        | 2           | 2           | 0                                     | 1                             | 0   | 0                                | 1                             | 1   | 1                               | 1                             | 0   | 1                             |
| 6                                                   | 1                               | 1          | 2                        | 3           | 3           | 0                                     | 1                             | 0   | 1                                | 2                             | 2   | 2                               | 2                             | 1   | 1                             |
| 7                                                   | 1                               | 2          | 1                        | 4           | 2           | 1                                     | 3                             | 2   | 0                                | 3                             | 2   | 0                               | 1                             | 1   | 1                             |
| 8                                                   | 2                               | 2          | 1                        | 2           | 3           | 0                                     | 1                             | 1   | 1                                | 0                             | 0   | 1                               | 1                             | 1   | 2                             |
| 9                                                   | 1                               | 2          | 2                        | 2           | 2           | 1                                     | 0                             | 0   | 1                                | 1                             | 0   | 0                               | 1                             | 0   | 0                             |
| 10                                                  | 5                               | 3          | 1                        | 2           | 1           | 2                                     | 1                             | 1   | 4                                | 3                             | 1   | 2                               | 4                             | 2   | 0                             |
| 11                                                  | 17                              | 17         | 15                       | 17          | 20          | 0                                     | 2                             | 3   | 2                                | 0                             | 0   | 3                               | 3                             | 2   | 5                             |
| 12                                                  | 16                              | 19         | 15                       | 19          | 20          | 3                                     | 4                             | 1   | 1                                | 3                             | 0   | 1                               | 4                             | 4   | 5                             |
| 合 計<br>$\Sigma N$ or $\Sigma \Delta N$<br>(%) or 小計 | 60<br>(97)                      | 60<br>(97) | $\Sigma N$<br>49<br>(79) | 68<br>(110) | 72<br>(117) | 14                                    | $\Sigma \Delta N$<br>19<br>43 | 10  | 15                               | $\Sigma \Delta N$<br>18<br>63 | 14  | 16                              | $\Sigma \Delta N$<br>24<br>41 | 17  | $\Sigma \Delta N$<br>23<br>23 |
| 平 均<br>$\Sigma N$ or $\Sigma \Delta N$              | $\Sigma \bar{N}$<br>61.8 (100%) |            |                          |             |             | $\Sigma \Delta \bar{N}$<br>14.33      |                               |     | $\Sigma \Delta \bar{N}$<br>15.75 |                               |     | $\Sigma \Delta \bar{N}$<br>20.5 |                               |     | $\Sigma \Delta \bar{N}$<br>23 |
| 平 均<br>$\bar{N}$ or $\Delta \bar{N}$                | $\bar{N}$<br>5.62               |            |                          |             |             | $\Delta \bar{N}$<br>1.30              |                               |     | $\Delta \bar{N}$<br>1.43         |                               |     | $\Delta \bar{N}$<br>1.86        |                               |     | $\Delta \bar{N}$<br>2.09      |
| 2 ボーリング孔間の距離 (m)                                    |                                 |            |                          |             |             | 6.00                                  |                               |     | 6.37                             |                               |     | 10.82                           |                               |     | 12.0                          |

表 2-5-2 では、各ボーリング孔の  $N$  値とその合計値を与えているが、同様のばらつきがあり、その最大値と最小値は平均値に対してそれぞれ 117%と 79%である。5 地点のボーリング孔の相互距離 ( $L$ ) は、6.0m、6.37m、10.82m もしくは 12.0m であるが、各ボーリング孔の同一標高で得られた  $N$  値を比較し、その差の絶対値 ( $\Delta N$ ) を求め表 2-5-2 に記入した。比較した 2 つのボーリング孔毎に  $\Delta N$  の合計値 ( $\Sigma \Delta N$ ) を計算し、1 回の  $N$  値当りの平均値 ( $\Delta \bar{N}$ ) を求めたのち、ボーリング孔間の距離 ( $L$ ) 毎に整理した経過が表 2-5-2 に示されている。

以上の結果は図 2-5-10 のようになり、ばらつき  $\Delta \bar{N}$  と距離 ( $L$ ) の関係はほぼ直線的になることがわかった。すなわち、この地盤は距離とともに  $N$  値の違いが大きくなるという、極めて常識的な結論となった。この図において、距離が 0 における  $\Delta \bar{N}$  を推定すると 0.68 となるが、これは同一地点における  $N$  値のばらつき、すなわち  $N$  値測定に伴う誤差であると考えべきである。この結果、戸畑地点における  $N$  値のばらつきは、測定誤差のほかに距離  $L$  (m) に対しておよそ  $0.115L$  相当の地盤のばらつきからなると結論づけられる。

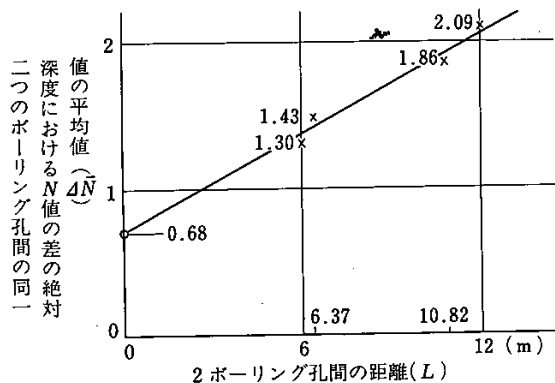


図2-5-10  $\Delta \bar{N}$  と  $L$  の関係 (戸畑) (藤田・1987)<sup>9)</sup>

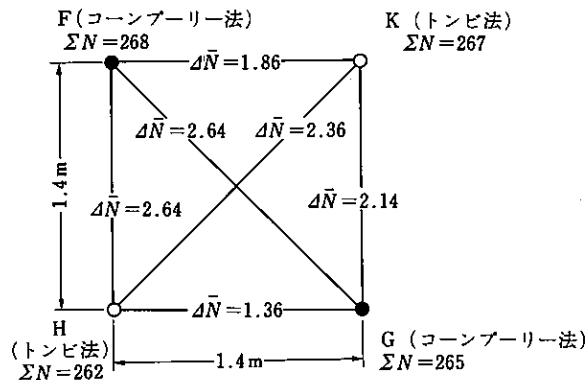


図2-5-11 ボーリング孔配置図と

$\Sigma N$ 、 $\Delta \bar{N}$  (藤田・1988)<sup>9)</sup>

新潟 B 地点での試験結果を同様の方法を適用し、整理した結果の要点が、図 2-5-11 に示されている。この地点では、一辺が 1.4m の正方形のコーナーにボーリング孔を設け、コーンプリー法 (F 孔と G 孔) とトンビ法 (H 孔と K 孔) の比較試験を行っているが、同一方法のボーリング孔は対角線上に配置され、その距離は 2m (正確には 1.96m) である。

4 つのボーリング孔では同じ標高で各 14 ヶ所の  $N$  値が測定されたが、各孔の合計値 ( $\Sigma N$ ) は図示されているように、コーンプリー法の場合は 268 と 265 であるのに対して、トンビ法の場合は 262 と 267 であった。それぞれの合計  $N$  値は 533 と 529 となり、確かにトンビ法による方が  $N$  値はわずかに小さくなるが、その差はほとんどなく、しかも K 孔の場合は G 孔よりも大きいという逆の結果もみられる。

また、ボーリング孔間の  $N$  値における差の絶対値の平均値 ( $\Delta \bar{N}$ ) は、2m 離れた同じ方法による  $\Delta \bar{N} = 2.50$  (2.64 と 2.36 の平均) は、1.4m 離れた異なった方法による  $\Delta \bar{N} = 2.00$  (1.86、2.14、1.36、2.64 の平均) よりも大きいことが、図 2-5-11 から読み取ることができる。これは、異なった方法よりも地盤のばらつきの方を問題として取上げるべきことを意味している。

各比較試験のデータを以上の方法によって整理したところ、同じような結果が得られたので、これを図 2-5-12 のようにまとめた。比較試験を行うために選定された地盤が、わずか数 m の範囲であっても著しいばらつきを示していることと、 $N$  値の測定誤差がおよそ 1 前後であることから、 $N$  値評価には地盤のばらつき評価が重要であるといえる。

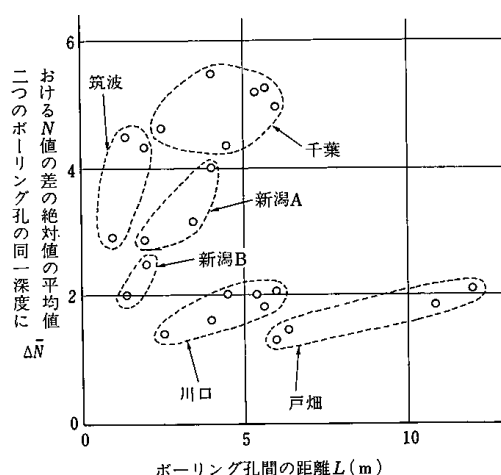


図 2-5-12 ボーリング孔間の距離 ( $L$ ) と  $N$  値の差の平均値 ( $\Delta \bar{N}$ ) の関係 (藤田・1987) <sup>9)</sup>

#### <引用・参考文献>

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp. 279-294、2013
- 2) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp. 284-295、2013
- 3) 全国地質調査業協会連合会：地質調査技士登録更新講習会テキスト令和元年・2 年度版、pp. 137-140
- 4) 福富幹男：信頼における  $N$  値の測定方法、基礎工 2003 年 2 月号、pp. 44-49、2003
- 5) 藤田圭一：土質調査試験の解釈と適用例－第 2 章標準貫入試験 (藤田圭一)、pp. 33-90、1979
- 6) 阪口理： $N$  値による地盤の評価、基礎工 1990 年 3 月号、pp. 30-39、1990
- 7) ニッ川健二・遠藤秀博：器具・掘削方法などが  $N$  値に及ぼす影響、基礎工 1997 年 12 月号、pp. 120-123、1997
- 8) 竹中準之介・西垣好彦：標準貫入試験に関する基礎的研究 (Ⅲ)、第 9 回地盤工学研究発表会、pp. 13-16、1974
- 9) 藤田圭一： $N$  値の解釈と適用、基礎工 1990 年 3 月号、pp. 19-29、1990
- 10) 吉見吉昭・時松考次・大岡弘：コーンプリー法とトンビ法による値の比較試験、第 18 回土木工学研究発表会 (郡山)、1983. 6、pp. 47-48



### 3. 標準貫入試験以外のサウンディングによる換算リスク

サウンディングには標準貫入試験以外にも多くの試験が提案実施されている。JIS で規定されている試験としては、「機械式コーン貫入試験」、「スクリーウエイト貫入試験」があり、地盤工学会が規程している試験としては、「原位置ベーンせん断試験」、「ポータブルコーン貫入試験」、「簡易動的コーン貫入試験」、「電気式コーン貫入試験」などがある。更に、現時点で規格・基準化されていない試験も数多くあり、”地盤調査の方法と解説”<sup>1)</sup>では「動的コーン貫入試験」、「土層強度検査棒貫入試験」、「ダイラトメーター試験」などについて記載されている。

本章では、標準貫入試験以外のサウンディング結果と標準貫入試験結果の  $N$  値との関係を整理し、合わせて、 $N$  値換算に関する留意点を示す。

#### 3.1 標準貫入試験以外のサウンディングと $N$ 値との相関式

標準貫入試験以外のサウンディング結果と  $N$  値との相関式についてまとめる。

##### 3.1.1 鉄研式動的コーン貫入試験

鉄研式動的コーン貫入試験<sup>1)・2)</sup>には、標準貫入試験とハンマー重量、落下高さを同じとした大型コーンと全体に小型化した中型コーンがある。

表 3-1-1 鉄研式動的コーン貫入試験の試験概要

| 型式    | コーン底面積 (cm <sup>2</sup> ) | ロッド (mm) | ハンマー (kg) | 落下高さ (cm) | 貫入量 (cm) | 記号           |
|-------|---------------------------|----------|-----------|-----------|----------|--------------|
| 大型コーン | 20.3                      | 40.5     | 63.5      | 75        | 30       | $N_d$        |
| 中型コーン | 19.9                      | 33.5     | 30.0      | 35        | 10       | $N_{d35/30}$ |
|       |                           |          |           | 70        |          | $N_{d70/30}$ |

大型コーンは 30cm の貫入に要する打撃回数を  $N_d$  値として記録するものであり、 $N$  値との相関式として  $N=0.87N_d$  が提案されている。大島ら<sup>5)・6)</sup>は、砂質土と粘性土に対してそれぞれ、下式を提案している。

$$N=(N_d-2.7)/1.54 \text{ もしくは } N=(N_d-2.8)/0.9 \quad (\text{砂質土})$$

$$N=(N_d-0.7)/3.17 \text{ もしくは } N=(N_d-3.1)/1.65 \quad (\text{粘性土})$$

中型コーンは 30kg のハンマーを 35cm の高さから落下させることを標準とし、貫入抵抗が大きい時には落下高さを 70cm としており、いずれも 10cm の貫入量に対する打撃回数を記録するものであり、 $N$  値との相関式として  $N=0.1N_{d35/30}$  が提案されており、落下高さの違いに対して  $2N_{d35/30}=N_{d70/30}$  で換算される。

##### 3.1.2 オートマチックラムサウンディング<sup>3)</sup>

オートマチックラムサウンディングはスウェーデンで開発された動的コーン貫入試験で、日本には 1974 年に導入されている。

表 3-1-2 オートマチックラムサウンディングの試験概要

| コーン底面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | ロッド<br>(mm) | ハンマー<br>(kg) | 落下高さ<br>(cm) | 貫入量<br>(cm) | 記<br>号 |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 15.9                         | 32.0        | 63.5         | 50           | 20          | $N_d$  |

標準貫入試験結果の  $N$  値との相関としては、佐藤ら<sup>3)</sup>によって砂質土あるいは砂礫に対して  $N = N_d$  が提案されている。

また、大島<sup>8)</sup>は、粘性土に対しては  $N = (N_d - 3.5) / 1.62$  が成立するとしており、土質による違いは貫入メカニズムの違いと考えられている。

### 3.1.3 チューブ型動的貫入試験

チューブ型動的貫入試験は、標準貫入試験が適用し難い密な砂や砂礫地盤あるいは風化岩盤を対象として開発された試験である。

表 3-1-3 チューブ型動的貫入試験の試験概要

| チューブ型<br>(mm) | ロッド<br>(mm) | ハンマー<br>(kg) | 落下高さ<br>(cm) | 貫入量<br>(cm) | 記<br>号 |
|---------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 700×73        | 60.0        | 100.0        | 150          | 30          | $N_d$  |

吉田ら<sup>4)</sup>は、標準貫入試験で問題となる先端閉塞に伴う貫入抵抗の増大と試料取り込みを改善するため、打撃エネルギーを増大させた試験装置を開発した。

試験結果は、砂地盤と砂礫地盤に対してそれぞれ下式を提案している。

$$N = 1.5 N_d \text{ (砂)} \quad , \quad N = 2.0 N_d \text{ (砂礫)}$$

### 3.1.4 中型貫入試験(ミニラム)<sup>7)、8)、9)</sup>

オートマチックラムサウンディングのエネルギーを 1/2 に小型化して宅地用にしたものであり、試験概要を表 3-1-4 に示す。

表 3-1-4 中型貫入試験(ミニラム)の試験概要

| コーン底面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | ロッド<br>(mm) | ハンマー<br>(kg) | 落下高さ<br>(cm) | 貫入量<br>(cm) | 記<br>号 |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 10.5                         | 28.0        | 30.0         | 35           | 20          | $N_d$  |

試験結果の  $N_d$  値と  $N$  値の相関は下式のように提案されており、大島<sup>8)</sup>は、砂質土ではオートマチックラムサウンディングの結果と整合するとしている。

$$N = (N_d - 3.1) / 0.95$$

$$N = (N_d - 2.5) / 0.97 \text{ もしくは } N = (N_d - 3.9) / 0.89 \text{ (砂質土)}$$

$$N = (N_d - 3.5) / 1.62 \text{ (粘性土)}$$

### 3.1.5 土研式動的コーン貫入試験<sup>10)</sup>

道路の土工および路床土の調査・管理のために開発されたものであり、コーン外径 3.0cm (コーン底面積 7.1cm<sup>2</sup>) である。

表 3-1-5 土研式動的コーン貫入試験の試験概要

| コーン底面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | ロッド<br>(mm) | ハンマー<br>(kg) | 落下高さ<br>(cm) | 貫入量<br>(cm) | 記<br>号 |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 7.1                          | 25.0        | 5.0          | 50           | 15          | $N_d$  |

$N$ 値との相関は  $N = 0.8N_d$  が提案されている。

### 3.1.6 簡易動的コーン貫入試験

土研式動的コーン貫入試験装置を急傾斜の斜面調査用に小型軽量化したものであり、コーン外径は 2.5cm (コーン底面積 4.9cm<sup>2</sup>) でロッド径も 16mm に小型化されている。

表 3-1-6 簡易動的コーン貫入試験の試験概要

| コーン底面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | ロッド<br>(mm) | ハンマー<br>(kg) | 落下高さ<br>(cm) | 貫入量<br>(cm) | 記<br>号 |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 4.9                          | 16.0        | 5.0          | 50           | 10          | $N_d$  |

試験結果の  $N_d$  値と  $N$  値との相関は、下記のように各種の相関式が提案されている。

大久保ら<sup>11)</sup> :  $N = (0.33 \sim 1) N_d$

新<sup>12)</sup> :  $N = 0.67 N_d$

岡田ら<sup>13)</sup> は、 $N_d$  値・土質の違いで

$N_d \leq 4$  :  $N = 0.50 N_d$  (礫質土)       $N = 0.66 N_d$  (砂質土)       $N = 0.75 N_d$  (粘性土)

$N_d > 4$  :  $N = 0.7 + 0.34 N_d$  (礫質土)       $N = 1.1 + 0.30 N_d$  (砂質土)       $N = 1.7 + 0.34 N_d$  (粘性土)

更に、甚野ら<sup>14)</sup> は、下式を提案している。

$$N = 1.50 \sqrt{N_d + 0.75}$$

### 3.1.7 機械式コーン貫入試験 (旧 オランダ式二重管コーン貫入試験)<sup>17)</sup>

コーンを静的に地盤に貫入させることによって、地盤構成・土の分類・地盤物性値を把握しようとするものでありオランダで開発された。日本に導入した際に 1968 年に学会基準案が制定され、1976 年には JIS に制定された。

機械式コーン貫入試験結果の  $q_c$  値と  $N$  値の関係としては、Meyerhof<sup>15)</sup> が細砂、シルト質細砂を対象として下式を提案している。

$$N = 0.25 q_c \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

また、Kruizinga<sup>16)</sup> は、下式を提案している。

$$N = (2 \sim 5) q_c \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad (\text{粘性土})$$

$$N = (1 \sim 5) q_c \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad (\text{砂質土})$$

$$N = (0.56 \sim 5) q_c \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad (\text{礫質土})$$

更に、室町らは  $q_c$  値と  $N$  値と平均粒径  $D_{50}$  の関係から下式を提案している。

$$q_c / N = 5.48 + 1.36 \log D_{50} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

### 3.1.8 スクリューウエイト貫入試験（旧 スウェーデン式 サウンディング試験）

スクリューウエイト貫入試験は、荷重による貫入と回転による貫入を併用した貫入試験であり、スウェーデンで 1917 年に開発され、日本では 1954 年に堤防地盤調査で初めて使用され、現在では、戸建住宅など小規模構造物の支持力判定として『小規模建築物基礎設計指針』に採用されている。

$N$  値の関係としては、種々の相関式が提案されている。

稲田<sup>18)</sup>が土質に応じて下式を提案している。

$$N = 0.002 W_{sw} + 0.067 N_{sw} \quad (\text{礫質土、砂質土に対して})$$

$$N = 0.003 W_{sw} + 0.050 N_{sw} \quad (\text{粘性土、礫混じり粘性土に対して})$$

また、上田<sup>19)</sup>は、下式を提案している。

$$N = 0.318 N_{sw}^{0.755}$$

更に、三木<sup>10)</sup>は、砂と赤土を対象として、下式を提案している。

$$N = 1/12 N_{sw} \quad (\text{砂}) \quad , \quad N = 1/9 N_{sw} \quad (\text{赤土}) \quad N_{sw} < 90$$

立元<sup>20)</sup>は鉋さいを対象として下式を提案している。

$$N = 0.27 N_{sw} - 2 \quad (\text{鉋さい}) \quad N_{sw} < 90$$

新納ら<sup>21)</sup>は  $N_{sw} > 100$  の場合に限定して下式を提案している。

$$N = 0.300 N_{sw}^{0.604} \quad (\text{粘性土}) \quad , \quad N = 0.755 N_{sw}^{0.345} \quad (\text{砂質土})$$

### 3.1.9 ダイラトメーター試験

ダイラトメーター試験は、ダイラトメーター・ブレードを地盤内に貫入させ、貫入停止後にブレードに内蔵された載荷板により地盤を水平方向に載荷する試験である。試験結果のダイラトメーター係数  $E_D$  と  $N$  値の関係<sup>22)</sup>としては、下式が提案されている。

$$N = E_D / (1.9 + 1.5 \log I_D)$$

$$N = 0.8 E_D \quad (\text{MN/m}^2) \quad \text{粘性土}$$

$$N = 0.4 E_D \quad (\text{MN/m}^2) \quad \text{砂質土}$$

### 3.1.10 電気式コーン貫入試験（CPTU）

電気式コーン貫入試験は、地盤特性を連続的に経済的にリアルタイムで把握できる試験方法であり、1980 年代のエレクトロニクス技術の飛躍的な発展に伴って機械式コーン貫入試験に代わって使われている。電気式コーン貫入試験の特徴は、コーン先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧を測定することができることであり、これによって地盤構成の評価と地盤の判定を精度よく把握できる。

電気式コーン貫入試験結果の  $q_t$  値と  $N$  値の関係としては、コンシステンシー指数  $I_c$  との関係を含めて下式<sup>23)</sup>が提案されている。

$$N = 0.341 I_c^{1.94} (0.001 q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)} \quad (\text{kN/m}^2)$$

### 3.1.11 土層強度検査棒貫入試験

土層強度検査棒貫入試験は、簡易動的コーン貫入試験よりも簡便に利用できることを目的とした試験方法であり、試験装置の重量も簡易動的コーン貫入試験の 16kg 程度に対して 5kg 程

度と一人での運搬を可能としており、作業効率も 2～3 分/試験程度である。

土層強度検査棒貫入試験結果の  $N_{dk}$  値と  $N$  値の関係あるいは簡易動的貫入試験結果の  $M_d$  値の関係<sup>24)</sup>としては、下式が提案されている。

$$N=0.03N_{dk} \quad , \quad M_d=0.02N_{dk}$$

### 3.2 標準貫入試験以外のサウンディングと $N$ 値との関係

本節においては、3.1 節に示した標準貫入試験以外のサウンディングと  $N$  値との関係について整理する。

#### 3.2.1 標準貫入試験結果の $N$ 値と標準貫入試験以外の貫入試験結果の $N_0$ との関係

標準貫入試験結

果の  $N$  値と標準貫

入試験以外の貫入

試験結果の  $N_0$  値と

の関係については、

図 3-2-1 のように

整理できる。図中

において、ハンマー重

量 63.5kg あるいは

100kg を使用して

いる大型貫入試験

を□印あるいは◇

印の記号で示し、ハ

ンマー重量 30kg を

使用している中型

貫入試験を△印で、

ハンマー重量 5kg

の貫入試験は○印

で示している。また、

機械式コーン貫入

試験は小さめの○

印で示している。更

に、土質別では、礫

質土を橙色系統色

で、砂質土を黄色系

統色で、粘性土を青

色系統色で示して

いる。

図 3-2-1 では各種

貫入試験結果の  $N_0$  値と標準貫入試験結果の  $N$  値では、 $N=0.25N_0 \sim 2.0N_0$  の範囲にばらついていることが読み取れるが、ハンマー重量あるいは土質による違いは明瞭ではない。

そこで、ハンマー重量別に図 3-2-2～図 3-2-3 に相関図を示した。図 3-2-2 によれば、ハンマー重量が重いチューブ型動的貫入試験が大型貫入試験あるいはオートマックラムサウンデ

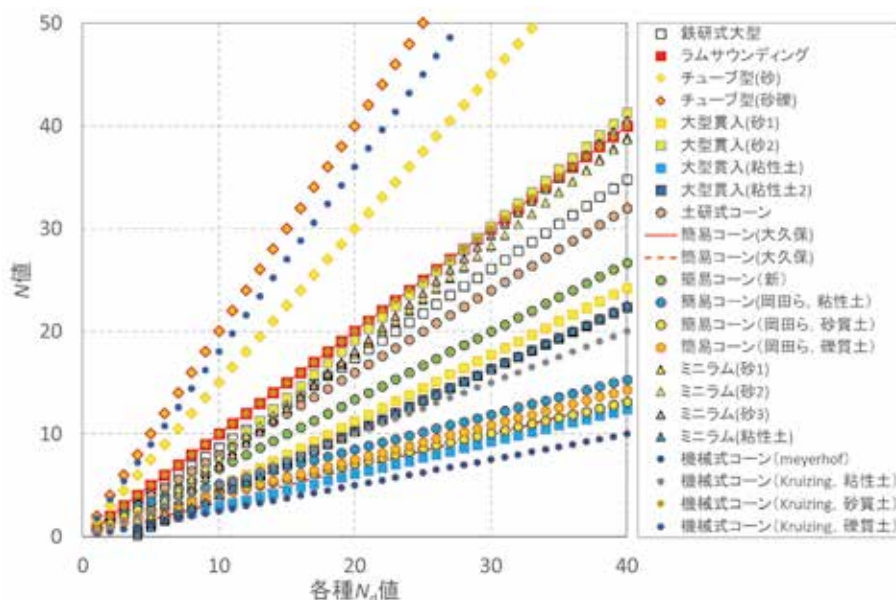


図 3-2-1 標準貫入試験以外の貫入試験の  $N_0$  値と  $N$  値の相関図

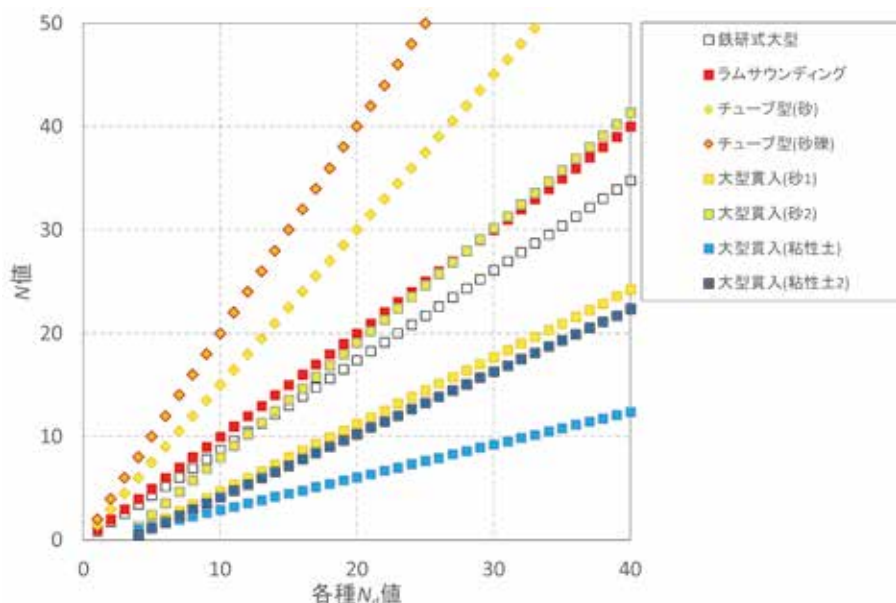


図 3-2-2 大型動的貫入試験の  $N_0$  値と  $N$  値の相関図



イングよりも  $N_0$  値に対して  $N$  値が大きく得られる傾向があり、土質別では、粘性土→砂質土→礫質土の順で  $N_0$  値に対して  $N$  値が大きく得られる傾向を示す。これは、チューブ型動的貫入試験では、礫などの粒状土をチューブ内に取り込むのに対して、先端がコーン形状である貫入試験では礫などを押しのけるのにエネルギーを費やすためであると考えられる。また、標準貫入試験では、試験機構として標準貫入試験用サンプラーを貫入させる際に周面摩擦の影響を受ける

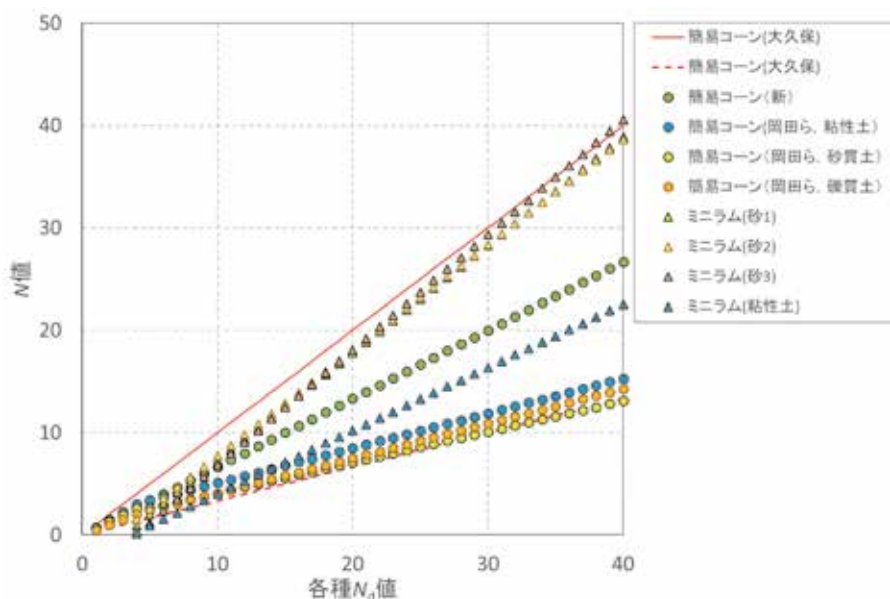


図 3-2-3 中型～小型動的貫入試験の  $N_0$  値と  $N$  値の相関図

のに対して、コーン貫入試験ではコーン貫入時の周面摩擦の影響が小さいことが考えられ、特に粘性土においてその相違が明瞭に現れているとも読み取れる。

図 3-2-3 は、中型～小型動的貫入試験の  $N_0$  値と標準貫入試験結果の  $N$  値の相関を示す。

全体に  $N=0.33N_0 \sim 1.0N_0$  の範囲にあり、中型貫入試験(ミニラム)では、大型動的貫入試験と同様に粘性土→砂質土の順で  $N_0$  値に対して  $N$  値が大きく得られる傾向を示すが、簡易動的コーン貫入試験では明瞭な関係は認められない。

### 3.2.2 標準貫入試験の $N$ 値と静的コーン貫入試験との比較

図 3-2-4 に静的コーン貫入試験結果の  $q_c$  値あるいは  $q_t$  値と標準貫入試験結果の  $N$  値との関係を示す。

試験種別では、 $N$  値に対して機械式コーン貫入試験結果の  $q_c$  値より電気式コーン貫入試験結果の  $q_t$  値が大きい傾向がある。

また、土質別にみると、粘性土→砂質土→礫質土の順に  $q_c$  値あるいは  $q_t$  値に対して  $N$  値が大きくなる傾向が認められる。

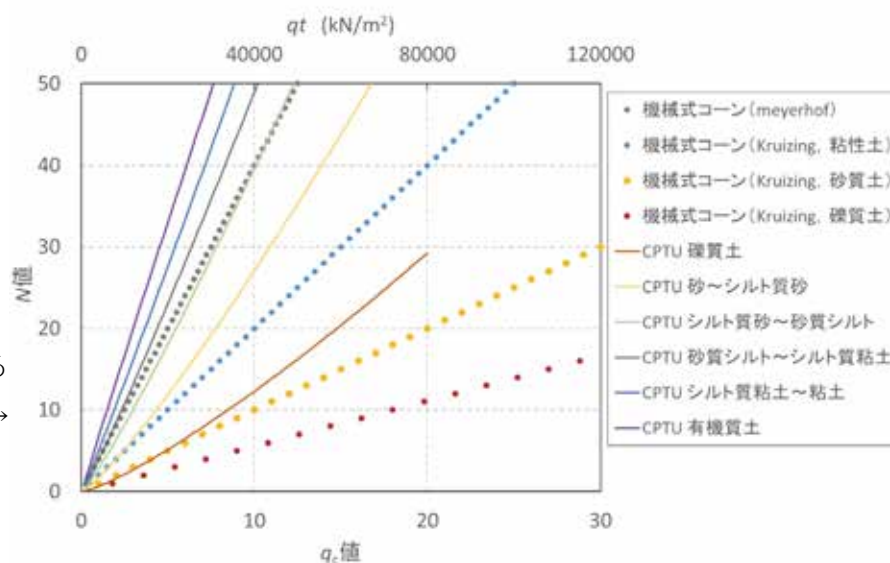


図 3-2-4 静的コーン貫入試験結果の  $q_c$  値、 $q_t$  値と  $N$  値の相関図

以上のように、標準貫入試験以外の貫入試験には、打撃エネルギーあるいはエネルギーの伝達機構によって様々な試験があり、各試験の得失を理解したうえで結果を解釈することが望まれる。また、サンプラーを貫入させる標準貫入試験あるいはチューブ型動的貫入試験とコーンを貫入させる標準貫入試験以外の貫入試験では貫入機構の違いから土質によってエネルギー伝達に違いがあることに留意する必要がある。

### 3.2.3 動的貫入試験の打撃エネルギーでの比較

動的貫入試験では、試験方法によってハンマーの重量、落下高さ、コーン断面積などが一様ではないため、各種動的貫入試験結果を直接的に評価することには問題がある。

そこで、打撃エネルギーに着目して図 3-2-5 には各種動的貫入試験結果の  $N_0$  値を単位面積あたりの打撃エネルギーで除したものと  $N$  値との相関を示す。

図 3-2-5 によると、打撃エネルギーが大きいほど  $N_0$  値に対して  $N$  値が大きくなる傾向が認められ、試験結果を打撃エネルギーで除する前の図 3-2-1 ではみられなかった打撃

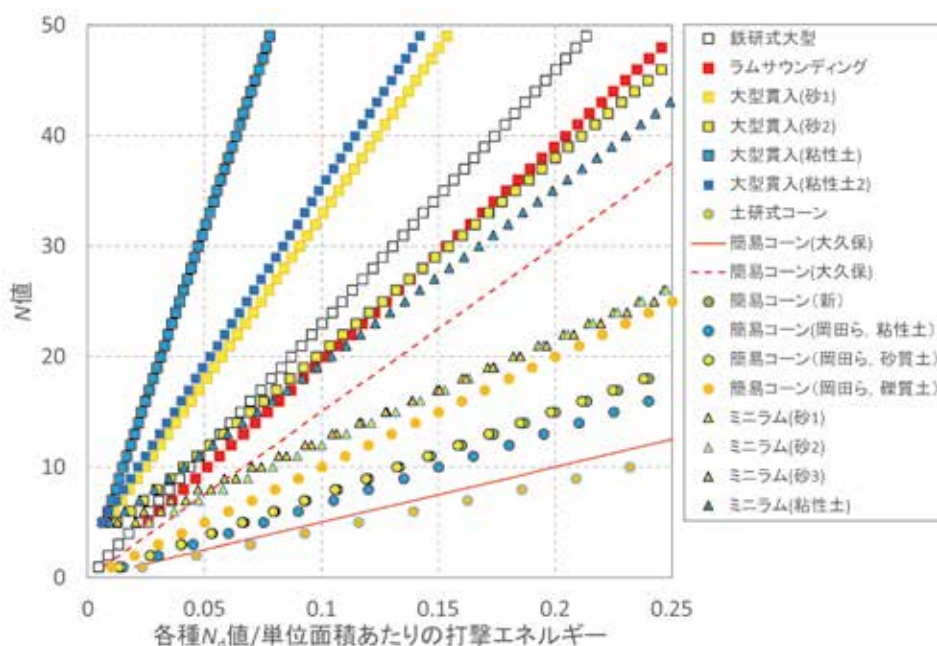


図 3-2-5 各種  $N_0$  値/単位面積あたりの打撃エネルギーと  $N$  値の相関図

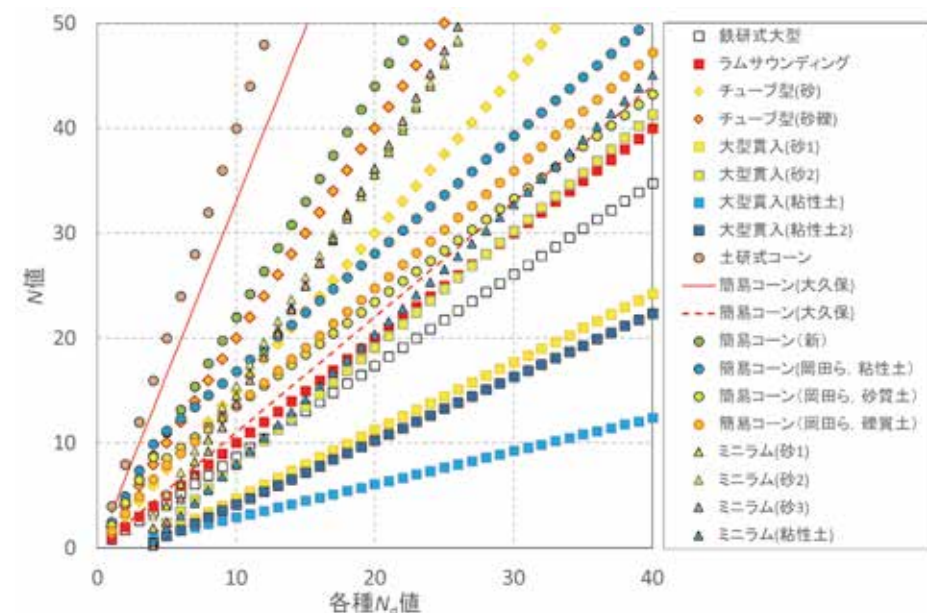


図 3-2-6 正規化した各種  $N_0$  値と  $N$  値の相関図

エネルギー別の  $N_0$  値と  $N$  値との相関が現れているようである。

次に、オートマックラムサウンディングの打撃エネルギーを標準とした正規化を試みた。

$$\text{正規化打撃エネルギー} = \frac{\text{各種サウンディングの単位断面積あたり打撃エネルギー}}{\text{ラムサウンディングの単位断面積あたり打撃エネルギー}}$$

図 3-2-6 に正規化した  $N_0$  値と  $N$  値の関係を示す。打撃エネルギーで正規化して同じ打撃エネルギーで各種動的貫入試験結果を比較しても明瞭な関係は認められず、 $N_0=0.33N \sim 4.0N$  の範囲でばらつきが大きい。この原因は、エネルギー伝達機構あるいは地盤内で発生するひずみ範囲など様々な要素が絡み合っていると想定される。

### 3.3 スクリューウエイト貫入試験（旧 スウェーデン式 サウンディング試験）の整理

スクリューウエイト貫入試験で得られる  $N_{sw}$  値と  $N$  値との関係を図 3-3-1 に示した。

全体的な特徴から以下のことがいえる。

- ・  $N_{sw}=40\sim80$  の間で、①②稲田、③上田、⑤三木の 4 式での換算  $N$  値は近似する。
- ・  $N_{sw}$  が大きくなるに従い、土質の差もあるが換算  $N$  値にばらつきが大きくなる。（ $N_{sw}$  が 250 で最大  $N=11$  回の差がある）
- ・ ①、②稲田の他は  $N_{sw}$  が考慮されていないため、 $N_{sw}<20$  では換算値がばらつき、過少評価の結果となる。
- ・ 適用範囲を超えるとばらつきが大きくなる。
- ・ ⑥鉦さいは、他と異なる傾向にあり、適用範囲は  $N_{sw}=10\sim20$  程度と考えられる。

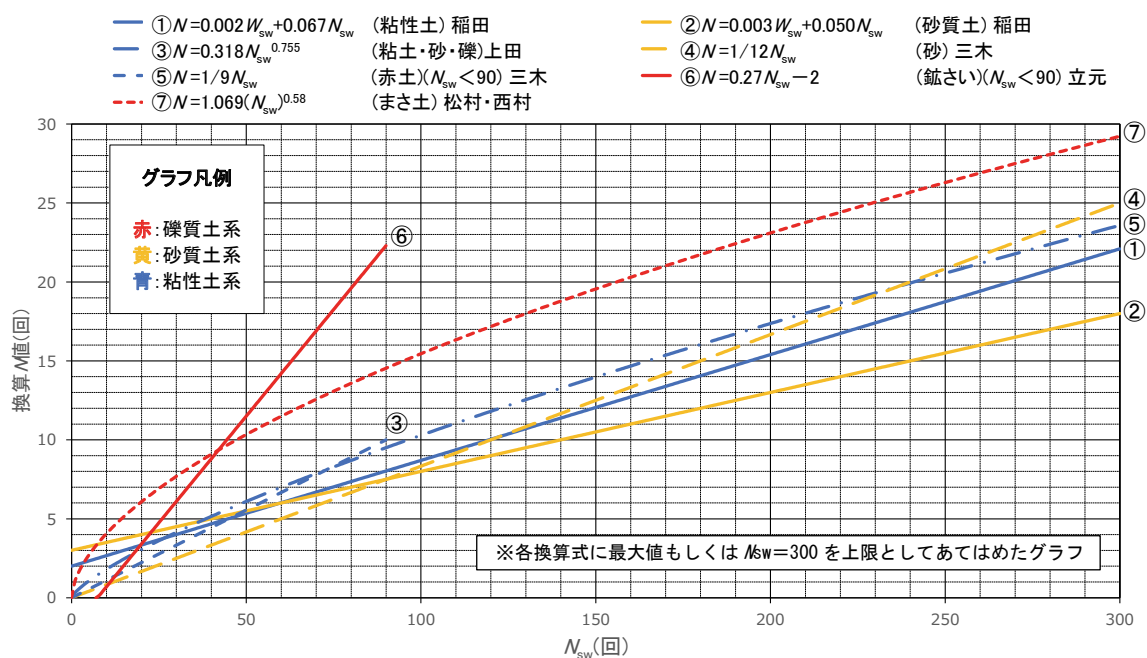


図 3-3-1  $N_{sw}$  と換算  $N$  値との相関図

### 3.4 まとめ

各種貫入試験には、実験や実際の試験の集計結果から得られた  $N$  値との関係を示した相関式がある。本項では、各種貫入試験結果と  $N$  値との相関式をまとめ、動的、静的それぞれの貫入試験の種類別および土質別による換算  $N$  値を比較し、その相関性を検証した。さらに、比較結果の留意点と試験ごとの特性から把握されたばらつきの仕組みをまとめた。

貫入試験の換算  $N$  値との相関関係から以下のような結果が得られた。

- 1) 静的貫入試験と動的貫入試験それぞれ試験方法によって換算  $N$  値にばらつきがある。
- 2) 礫質土、砂質土、粘性土、それぞれ土質の違いによって換算  $N$  値に違いがある。
- 3) 土質による換算  $N$  値の違いの要因として、試験機構の違いあるいはエネルギー伝達機構の違いが関係していると考えられる。
- 4) 試験機構、土質条件と試験時の排水条件、粒径など、換算  $N$  値に与える要因は複雑であり、 $N$  値との相関性は、これらの条件を踏まえて検討することが必要である。

標準貫入試験の  $N$  値と標準貫入試験以外の貫入試験との相関をみると、試験機構、土質条件と試験時の排水条件、粒径などによって相関性に違いはあるものの、ある程度相互関係を平準化することができ、地質調査で求められる地質構造のモデル化の補間的な要素で用いられる場合などでは、 $N$  値を基準とした柱状図と同等にその信頼性を確保することができる。

標準貫入試験以外の貫入試験はボーリングに比べて試験機構が簡易的で、現在では自動化されたものもあり、不整地でも機動性に富むクローラ式のものもある。そのため、ボーリングよりも短時間で多くの箇所を測定できる利点がある。

一方、標準貫入試験以外の貫入試験は簡易的であるが故に試験荷重が限定される面があり、試験深度、対象土質、地盤の締まり具合によっては適用に限界があると考えられる。

また、標準貫入試験以外の貫入試験結果と  $N$  値との相関性は、サンプラーを使用する標準貫入試験と試験構造自体が異なる点、エネルギーの伝達機構や、貫入時の地盤のひずみ発生メカニズムなどが異なる点など様々な要因でばらつきが認められることも事実である。

標準貫入試験についても、試験の適用には限界がある点を踏まえなければならない。軟弱地盤に対してはエネルギーが大き過ぎるが故に地盤物性値との相関性が低いことも事実である。 $N$  値の上限値は 50 回または 60 回と設定されることが多いが、これは試験実施者に対する効率化維持、もしくは機器の破損防止などを理由としている面がある。

このように、各種試験には一長一短がある。試験結果を利用する上では、これら試験方法の違いを理解したうえで適切な手法を用いて物性値との関係を検討することが強く求められる。

これらの内容を踏まえ、 $N$  値と標準貫入試験以外の貫入試験結果との相関式は絶対的なものではなく、一つの指標として扱うのが望ましいと思われる。

<引用・参考文献>

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp. 460-470、2013
- 2) 室町忠彦：貫入試験による地盤断面調査の実施例、土と基礎、pp. 5-9、1958
- 3) 佐藤勝英・岩崎恒明：オートマチックラムサウンドの試験装置と結果の一例について、サウンディングシンポジウム発表論文集、pp. 213-222、1980
- 4) 吉田保夫・國生剛治：砂礫地盤への貫入試験の適用法の提案、電力中央研究所報告、p32、1988
- 5) 平田茂良・山本明弘・渡辺佳勝・大島昭彦・山田卓・柴田芳彦：長野県諏訪市における地盤調査－斉試験（その 2：大型動的コーン貫入試験）、第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 159-160、2016
- 6) 高橋秀一・平田茂良・市村仁志・野澤直樹・渡辺佳勝・大島昭彦・野山優一・田中さち：大型動的コーン貫入試験の  $N_0$  値と  $N$  値、 $s_u$  値との関係、第 53 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 189-190、2018
- 7) 深井公・大島昭彦・峯翔太郎・京矢侑樹・佐藤将・山田卓・松谷裕治：中型動的コーン貫入試験による地盤強度と土質判定の調査例、第 50 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 89-90、2015
- 8) 大島昭彦：宅地の液化化判定のための動的コーン貫入試験の開発、第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 15-16、2016
- 9) 深井公・松谷裕治・平田茂良・市村仁志・野澤直樹・渡辺佳勝・大島昭彦・山田卓・京矢侑樹・野山優一：うめきた 2 期地区での地盤調査結果（その 2：動的コーン貫入試験）、第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 115-116、2017
- 10) 三木五三郎：赤土台地における各種サウンディング方法の比較実験とその実用性の検討、土と基礎、1959 年特集号、pp. 14-23、1959
- 11) 大久保駿・上坂利幸・船崎昌継：簡易貫入試験の斜面地盤調査への適用、地すべり、Vol. 8、No. 4、pp. 21-29、1972
- 12) 新 任修：既存資料の重要性と面的調査、地質と調査、1986 年第 1 号、pp. 73-76、1986
- 13) 岡田勝也・杉山友康・野口達雄・村石尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性、土と基礎、pp. 11-16、1992
- 14) 甚野慶右・野田信也・城戸博彦：住宅等小建築物の地盤調査について、第 18 回地盤工学研究発表会、pp. 65-68、1983
- 15) G. G. Meyerhof：Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils、Proc. of the ASCE、Journal of the SMF Vol. 82、No. 1、1956
- 16) 藤田圭一・大野睦雄・三反田勇・松本江基： $q_c/N$  値の利用と品質評価、土木学会第 60 回年次学術講演会論文集、pp. 963-964、2005
- 17) 室町忠彦・小林精二： $q_c/N$  値の粒度による変化の実測例について、サウンディングシンポジウム発表論文集、pp. 151-154、1980
- 18) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について、土と基礎、pp. 13-18、1960
- 19) 上田嘉男：スウェーデン式サウンディングロッドについて、土と基礎、pp. 9-12、1960



- 20) 立元勉：鉋さいダムにおけるスウェーデン式貫入試験と標準貫入試験の実施例、土と基礎、pp. 17-20、1960
- 21) 新納秀樹・奥田悟・安川郁夫：*N*値に代わる調査　ー スウェーデン式サウンディング試験結果の活用、基礎工、pp. 82-86、2003
- 22) 岩崎公俊・亀井健史：フラットダイラトメーター試験による砂質土のせん断抵抗角の評価、土木学会論文集 No. 499、pp. 221-224、1994
- 23) 鈴木康嗣・時松孝次・實松俊明：コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係、日本建築学会構造系論文集第 566 号、pp. 73-80、2003
- 24) 土木研究所：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)、土木研究所資料、pp. 16-20、2010
- 25) Robertson, P. K. : Soil Classification Using the Cone Penetration Test、Canadian Geotechnical Journal、Vol. 27 No. 1、pp. 151-158、1990
- 26) 宮坂享明・岡信太郎・亀井秀一・山本伊作：CPT 換算 *N*値と標準貫入試験 *N*値、最近のサウンディング技術と地盤評価シンポジウム発表論文集、pp. 127-130、2009
- 27) 深沢健・日下部治：粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性、土木学会論文集 No. 799、pp. 153-170、2005
- 28) 末松直晃・片桐雅明・飯沢誠：コーン貫入一斉試験 2007、地盤工学会誌、pp. 16-19、2009

## 4. $N$ 値による換算リスク

標準貫入試験は、地盤の硬・軟、締まり具合の判定や土層把握のための試料採取を目的としているが、試験より得られる  $N$  値は、既往研究により地盤物性値との相関性が示されている。

現在では、設計のための地盤定数として  $N$  値そのものを取り扱うケースも多く、 $N$  値との相関式より推定した物性値を地盤定数として設定しているケースが認められる。

しかし、 $N$  値は機材の状態や実施手順などによる誤差が含まれる値であり、さらに  $N$  値と各地盤物性値との相関は、経験的な関係から導かれており、相関式には誤差が含まれる。

### 4.1 $N$ 値によるせん断抵抗角の推定による誤差

#### 4.1.1 $N$ 値によるせん断抵抗角の推定

$N$  値によるせん断抵抗角の推定は、研究成果や各指針・基準にて示される相関式が複数あり、これらの代表的な式<sup>1)</sup>を表 4-1-1 に示す。

本節では、各分野の指針・基準にて示されている④～⑦の相関式の特徴を以下に示す。

表 4-1-1  $N$  値によるせん断抵抗角の推定式の代表式一覧

| No | せん断抵抗角の推定式                                                                                                                                      | 備 考                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| ①  | $\phi = \sqrt{(12 \times N) + 15}$ (粒子丸, 粒度様)<br>$\phi = \sqrt{(12 \times N) + 20}$ (粒子丸, 粒度良)<br>$\phi = \sqrt{(12 \times N) + 25}$ (粒子角, 粒度良) | ダナム (Dunham) の式                   |
| ②  | $\phi = 0.3 \times N + 27$                                                                                                                      | Peck の式                           |
| ③  | $\phi = \sqrt{(20 \times N) + 15}$                                                                                                              | 大崎の式                              |
| ④  | $\phi_d = (20 N_1)^{0.5} + 20$ ( $3.5 \leq N_1 \leq 20$ )<br>$\phi_d = 40$ ( $N_1 > 20$ )<br>$N_1 = N / (\sigma_v' / 100)^{0.5}$                | 建築基礎構造設計指針 (2019)                 |
| ⑤  | $\phi = 4.8 \log N_1 + 21$ ( $N > 5$ ) log: 自然対数<br>$N_1 = 170 N / (\sigma_v' + 70)$                                                            | 道路橋示方書・同解説 下部構造編 (H29.8)          |
| ⑥  | $\phi = 25 + 3.2(100 N / (70 + \sigma_v'))^{0.5}$                                                                                               | 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (H30)            |
| ⑦  | $\phi = 1.85(N / (0.01 \sigma_v' + 0.7))^{0.6} + 26$<br>$\phi = 0.5 N + 24$ (地震時の上限値)                                                           | 鉄道構造物等設計基準・同解説基礎構造物・抗土圧構造 (H12.6) |

※表中の単位、 $\phi$ : 度,  $\sigma_v'$ : kN/m<sup>2</sup>

#### (1) 建築における推定式 (④推定式)

当初、大崎の式 ( $\phi = \sqrt{(20N) + 15}$ : 推定式③) が採用されていたが、同式は東京地盤図作成時に東京の沖積層・段丘礫・東京層の砂層について求められた式であり、地域性・ばらつきが大きいことが課題とされている。

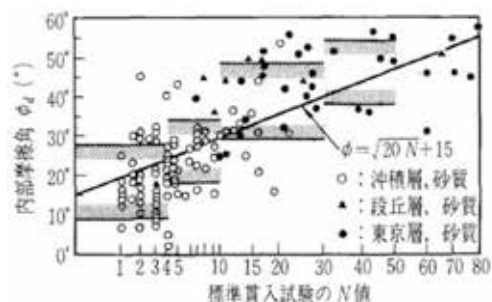


図 4-1-1 従来の  $N$  値と  $\phi_d$  の相関<sup>2)</sup>

現在の指針にて示されている推定式は、上載圧を考慮した  $N$  値を用いることとし、高品質なサンプリングによる試料での室内試験結果との比較により、以下に示す推定式を導いている。

$N$  値が大きい範囲では  $\phi = \text{一定}$  とし、 $\phi$  の上限値を設定している。

$$\begin{aligned}\phi_d &= (20N_1)^{0.5} + 20 \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20) \\ \phi_d &= 40 \quad (N_1 > 20) \\ N_1 &= N / (\sigma_v' / 100)^{0.5}, \quad \sigma_v' \text{ (kN/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

また、高品質なサンプリングとは、凍結サンプリングなどを示しており、細粒分は概ね 20% 以下の試料による試験値であることに注意が必要である。

## (2) 道路橋における推定式 (⑤推定式)

従来利用されていた推定式は、 $\phi = \sqrt{15N} + 15$  であった。しかし、相関にばらつきがあることや  $N$  値は上載荷重の影響を受けることから、上載圧を考慮した補正  $N$  値と室内試験結果との相関より、推定式を下式で設定している。

$$\begin{aligned}\phi &= 4.8 \log N_1 + 21 \quad (N > 5) \\ N_1 &= 170N / (\sigma_v' + 70) \quad , \quad \sigma_v' \text{ (kN/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

推定式は、室内試験値と補正  $N$  値の関係を自然対数  $\ln N_1 - \phi$  の関係で整理し、相関誤差を差し引いて設定している。この相関誤差は、支持層と判断される  $N$  値 30 程度で従来の推定値との比較を考慮して決定されている。

同推定式は、 $N$  値  $> 5$  の範囲が適用範囲である。 $N$  値  $\leq 5$  となる緩い砂の実測データが少ないことや、緩い砂地盤では  $N$  値のばらつきなどを考慮して適用範囲外とされている。

また、低拘束圧は、 $\sigma_v' = 50 \text{ kN/m}^2$  とすることや、 $N$  値  $\leq 20$  の範囲については、 $N$  値の変動に対する  $\phi$  の変動が大きいので、計測及び評価は慎重に行う必要性が留意事項とされる。

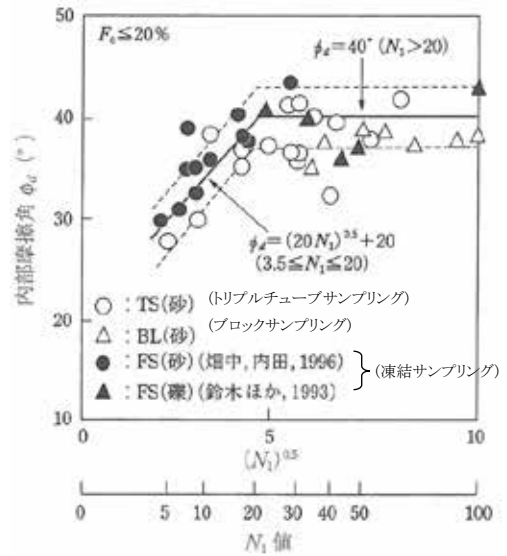


図 4-1-2 実測値と相関式の関係<sup>2)</sup>

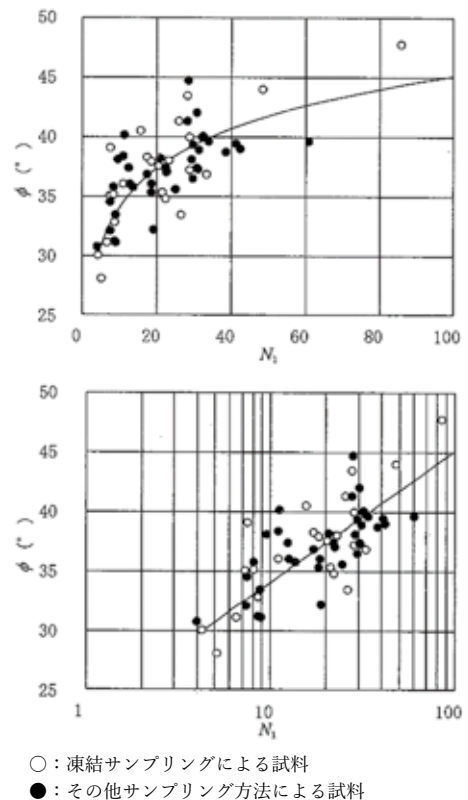


図 4-1-3 砂質土の三軸圧縮試験結果と  $N_1$  の関係<sup>3)</sup>

### (3) 港湾構造物における推定式 (⑥推定式)

従来の基準においては、せん断抵抗角  $\phi$  は、ダナム (Dunham) の式 (推定式①) にて求められていた。

田中ら (1997)<sup>4)</sup> は、今までの土質力学の知見を取り入れ、「 $N$  値と相対密度」・「相対密度と内部摩擦角」の相関より下式 (推定式) を導いている。

$$\phi = 3.2N_1^{0.5} + 25$$

$$N_1 = 100N / (\sigma_v' + 70), \quad \sigma_v' \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$N$  値に影響する因子は複数あるが、有効土被り圧を考慮した  $N$  値による推定式としている。

上記の推定式により、1 度刻みでの推定が可能であるが、推定精度が向上したわけではなく、基となる相関に含まれる誤差を十分に理解し、精度については留意した活用が必要である。

### (4) 鉄道における推定式 (⑦推定式)

以前は、 $\phi = 0.3N + 27$  (推定式②) であったが、青木ら (1985)<sup>7)</sup> により、上載荷重の影響を考慮した  $N$  値を用い、「相対密度と  $N$  値の関係」および「相対密度とせん断抵抗角  $\phi$  の相関」より、せん断抵抗角を推定する式 (下式) を設定している。

$$\phi = 1.85 \left( N / (0.01 \sigma_v' + 0.7) \right)^{0.6} + 26$$

$$\sigma_v' \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\phi = 0.5N + 24 \quad (\text{地震時の上限値})$$

$N$  値とせん断抵抗角の相関式は実験式 ( $\phi_{\text{cal}}$ ) であることから、高品質な不攪乱試料による試験値 ( $\phi_{\text{test}}$ ) と実験式 ( $\phi_{\text{cal}}$ ) との比較より、推定誤差の影響を考慮して  $2^\circ$  低減した式 ( $\phi_{\text{design}}$ ) を推定式としている。この式による推定値は、試験値の 0.8~1.4 倍程度の値となる。

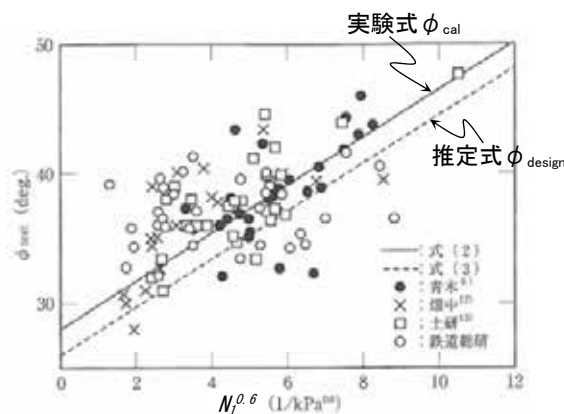


図 4-1-6  $\phi_{\text{test}}$  と補正  $N$  値 ( $N_1^{0.6}$ ) の関係<sup>9)</sup>

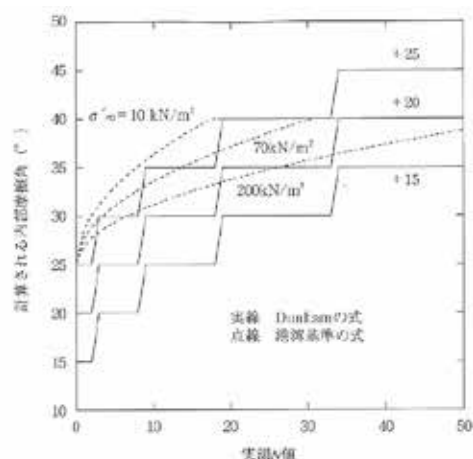


図 4-1-4 新旧の基準における推定内部摩擦角の違い<sup>5)</sup>

表 4-1-2 砂の粒子形状別の  $N$  値と  $\phi$  の関係 (ダナム (Dunham) による)<sup>6)</sup>

|                | せん断抵抗角 $\phi$ (度)                  |
|----------------|------------------------------------|
| 丸い粒子で粒径が一樣     | $\phi = \sqrt{(12 \times N)} + 15$ |
| 丸い粒子で粒径分布がよい   | $\phi = \sqrt{(12 \times N)} + 20$ |
| 角ばった粒子で粒径が一樣   | $\phi = \sqrt{(12 \times N)} + 25$ |
| 角ばった粒子で粒径分布がよい | $\phi = \sqrt{(12 \times N)} + 25$ |

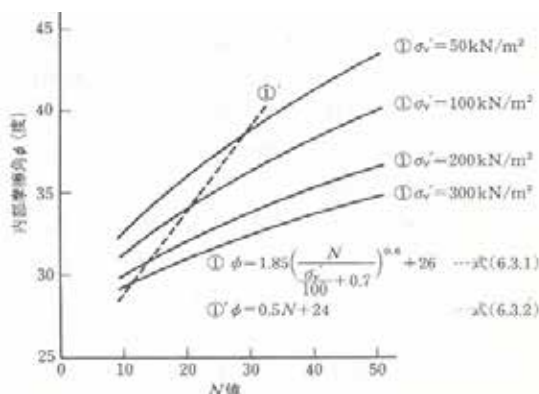


図 4-1-5 推定式による  $N$  と  $\phi$  の関係<sup>8)</sup>

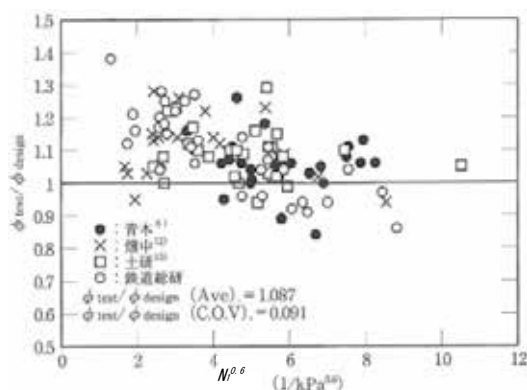


図 4-1-7  $\phi_{\text{test}}/\phi_{\text{design}}$  と補正  $N$  値 ( $N_1^{0.6}$ ) の関係<sup>9)</sup>

#### 4.1.2 各推定式の比較

##### (1) 各推定式の比較

表 4-1-1 に示した  $N$  値によるせん断抵抗角の推定式の比較結果を、以下に示す。

- a) ①～③式は、相関についての研究初期の式 1) であり、推定式に用いる  $N$  値は、有効上載圧を考慮した補正  $N$  値(以降, 補正  $N$  値)ではない。
- b) ④～⑦式については  $N$  値と上載圧には相関があることが判明し、上載圧を考慮した補正  $N$  値を用いた推定式となる。  
補正  $N$  値を活用した推定式は、鉄道分野において 1985 年の論文<sup>7)</sup>にて提案されており、港湾分野は 1997 年<sup>4)</sup>・建築分野は 1999 年<sup>2)</sup>・道路分野は 2002 年<sup>3)</sup>にそれぞれ論文などにより提案されている。
- c) ④⑤式は、補正  $N$  値と室内試験結果の  $\phi_d$  の関係より推定式を導いている<sup>2)</sup>。  
この室内試験に用いた試料は、凍結サンプリングやチューブサンプリングにより採取され、細粒分含有率 20%以下の粒度組成が主となる。
- d) ⑥⑦式は、「相対密度と  $N$  値(補正  $N$  値)の相関」と「せん断抵抗角  $\phi$  と相対密度の相関」より相対密度を共通項として、補正  $N$  値とせん断抵抗角  $\phi$  の相関式を導いている<sup>3)</sup>。

以上より、 $N$  値(補正  $N$  値)からせん断抵抗角の推定式には以下の特徴がある。

- $N$  値(補正  $N$  値)と室内試験値  $\phi_d$  の関係よりある程度のばらつきの中での推定式である。
- 室内試験値は、凍結サンプリングなどの試料を用いているため、細粒分含有率 20%以下となるような粒度組成が主体であり、限定的な砂質土による結果である。
- $N$  値に関する二つの推定式「 $N$  値—相対密度」「相対密度—せん断抵抗角」を用いて、相対密度を共通項として、間接的に求めた推定式である。

(2) 各推定式による推定せん断抵抗角の違い

表 4-1-1 に示される推定式による  $N$  値とせん断抵抗角の相関図を図 4-1-8 に示す。各推定式による推定値の違いを以下に示す。

- a) ①ダナム (Dunham) の式は、粒子・粒度の違いで最大で  $10^\circ$  の差が発生する。
- b) ②～⑦の場合、 $N$  値  $< 5$  の範囲で各式による推定値の差が大きく、さらに  $N=20$  付近で推定値の差が最も大きくなる。

(現行基準の推定式④～⑦について)

- c) ④式(建築における推定式)は、 $6 \leq N \leq 35$  の範囲にて、4 式の中で最も大きい推定値となる。
- d) ⑤式(道路橋における推定式)では、 $N \leq 6$  の範囲にて、 $N$  値の低下による  $\phi$  の変化が最も大きく、小さい推定値となる。
- e) ⑥式(港湾における推定式)では、 $N \leq 6$  の範囲にて、推定値が最も大きくなる。また、 $N \geq 37$  の範囲にて、最も大きい推定値となる。
- f) ⑦式(鉄道における推定式)では、 $N > 6$  の範囲にて、道路橋における推定式と近似した分布となる。
- g)  $N \geq 5$  では、 $N=20$  付近で、各推定式の差が最も大きくなり、現行基準での比較においては  $6^\circ$  の差が生じる。
- h)  $N$  値が大きい範囲 ( $N \geq 37$ ) においては、 $N$  値の差がほぼ一定となる。

以上より、推定式により  $N$  値からせん断抵抗角を推定する場合、同一  $N$  値においても採用する推定式で推定値に相違が発生し、その相違の程度も  $N$  値の値によって異なる。

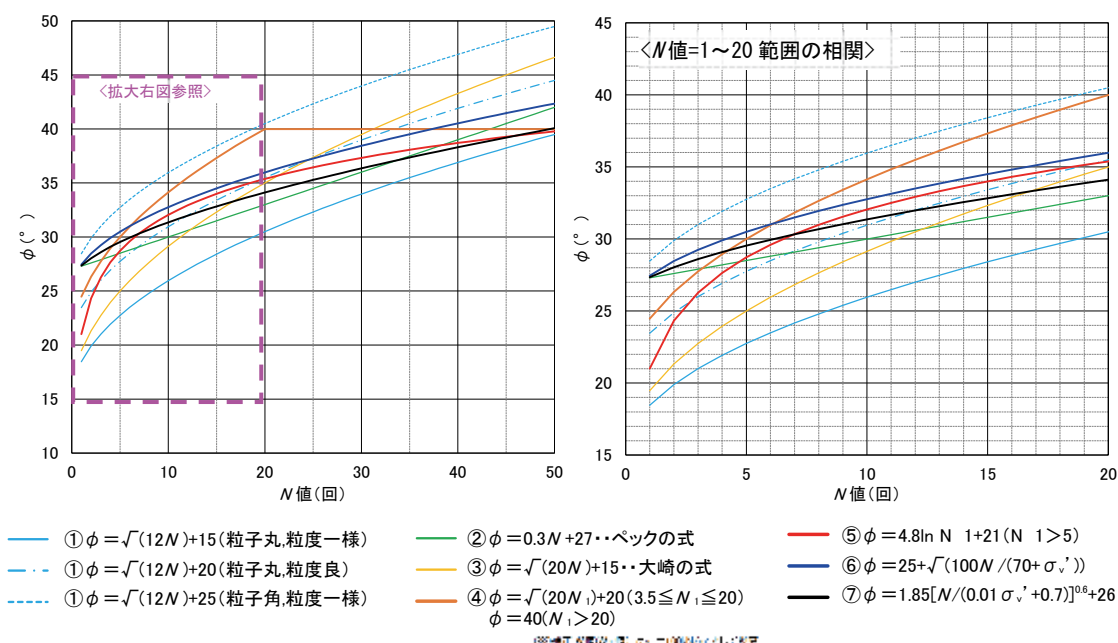


図 4-1-8 せん断抵抗角と  $N$  値の相関式の比較



#### 4.1.3 セン断抵抗角推定の留意点

各推定式の特徴や比較により、 $N$ 値によるせん断抵抗角の推定においては、以下に示すような留意点がある。

- ①推定式は、経験式より設定されており、誤差が大きく相関が低いものもある。
- ②推定式には、特定の地域のデータを基として設定された式も存在する。
- ③室内試験結果との比較においては、サンプリング仕様により、限られた粒度組成の砂質土に対する試験値との比較となる。
- ④ $N$ 値の小さい緩い地盤においては、 $N$ 値のばらつきが大きく、一部の推定式では適用範囲外としている。
- ⑤現行の指針・基準では、有効上載圧を考慮した補正  $N$  値を用いているが、各推定式により補正方法が異なる。
- ⑥推定式により  $N$  値からせん断抵抗角を推定する場合、同一  $N$  値においても採用する推定式で推定値に相違が発生し、その相違の程度も  $N$  値の値によって異なる。

以上より、推定式を活用する場合は、その推定式の特徴や適用範囲・推定精度を十分理解した上で用いることが必要である。

## 4.2 $N$ 値による粘着力の推定による誤差

$N$ 値による粘着力の推定は、数多くの推定式が提案されているが、これらは  $N$  値から一軸圧縮強さを推定し、粘着力を導いている。

### 4.2.1 各種の推定式

表 4-2-1、図 4-2-1 は各種文献で提案されている  $N$  値と一軸圧縮強さの関係<sup>1), 10)</sup>を示したものである。推定式の違いにより、一軸圧縮強さの推定値には最大 6.7 倍 (①と⑥) の差が生じる。これらの推定式は、次のような問題を含んでいる。

- 1) 基データのばらつきが大きい。
- 2) 安全側で、下限値を推定している場合が多い。
- 3) 特に  $N$  値の小さい範囲で、データと推定式の乖離が大きい。

次に、利用頻度の高い表中の⑤Terzaghi and Peck 及び⑦大崎の式について述べる。

表 4-2-1  $N$  値と  $q_u$  の関係式

| No | 一軸圧縮強さの推定式             |                      | 備 考                           |
|----|------------------------|----------------------|-------------------------------|
|    | (kgf/cm <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) |                               |
| ①  | $N/2$                  | $50N$                | 土質工学ハンドブック(1982)              |
| ②  | $N/4$                  | $25N$                | 米国海軍省 DESINGMANUAL7, 柳瀬       |
| ③  | $N/6$                  | $17N$                | Peck シカゴ粘土                    |
| ④  | $N/6.7$                | $15N$                | 米国海軍省 DESINGMANUAL7           |
| ⑤  | $N/8$                  | $12.5N$              | Terzaghi and Peck「地盤調査の方法と解説」 |
| ⑥  | $N/13.3$               | $7.5N$               | 米国海軍省 DESINGMANUAL7           |
| ⑦  | $0.4+N/20$             | $40+5N$              | 大崎(1959)「東京地盤図」               |
| ⑧  | $N/7.5$                | $13N$                | 三木(④と⑤の間)                     |

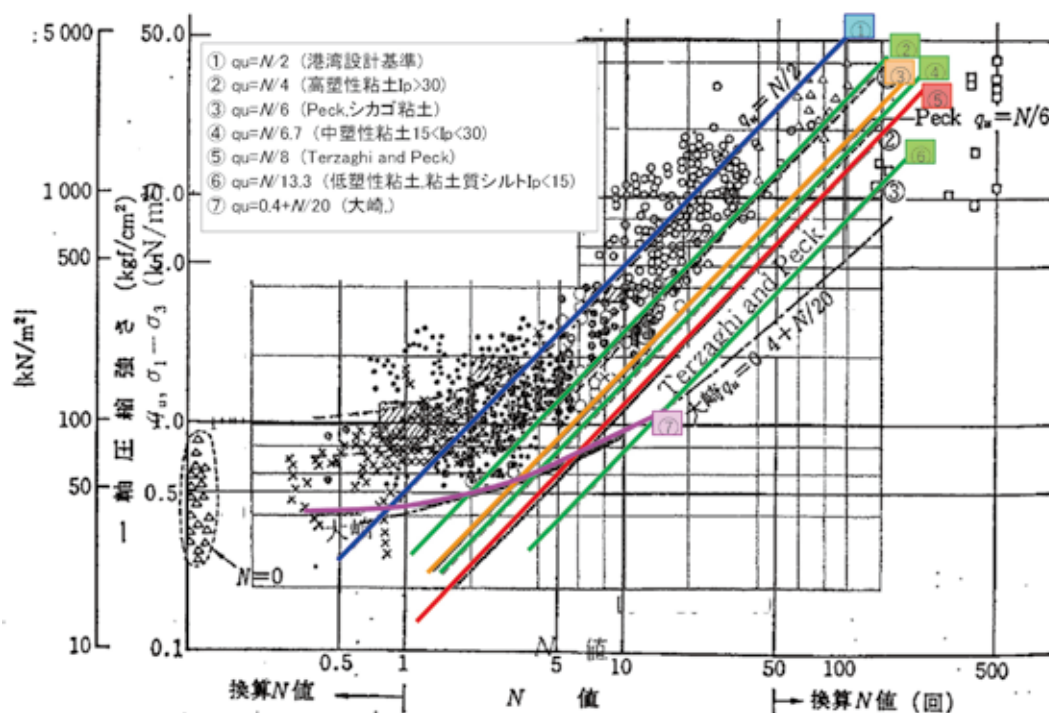


図 4-2-1  $N$  値と  $q_u$  の関係<sup>(1), 10)</sup>に一部加筆)

#### 4.2.2 ⑤Terzaghi and Peck 式 ( $q_u=12.5N$ )

この式の基となっているのは、Terzaghi and Peck(1955)に示される表 4-2-2 である。

これは、 $N$ 値の範囲と一軸圧縮強さの範囲の対比でありリニアな関係ではない。また、「与えられた 1ft 当たりの打撃回数  $N$  に対して、対応する  $q_u$  の値の平均値からの分散は非常に大きい」としており、試験データは示されていないが、データのばらつきは大きいと推察される。

表 4-2-2 粘土のコンシステンシーと試料採取用スプーンの打撃回数  $N$  と一軸圧縮強さの関係 <sup>1)</sup>

| コンシステンシー                      | 非常に軟らかい | 軟らかい      | 普通の       | 硬い        | 非常に硬い     | 固結した  |
|-------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| $N$                           | <2      | 2~4       | 4~8       | 8~15      | 15~30     | >30   |
| $q_u$ (単位 t/ft <sup>2</sup> ) | <0.25   | 0.25~0.50 | 0.50~1.00 | 1.00~2.00 | 2.00~4.00 | >4.00 |

表 4-2-2 の  $q_u$  の単位を  $\text{kN/m}^2$  に変換し、 $N$  値と  $q_u$  の範囲をグラフであらわしたものが図 4-2-2 である。一般に使われている下式は、図 4-2-2 の斜線の範囲のほぼ中央を通る直線で表されたものである。

$$q_u = 12.5 \times N$$

したがって、上式はあまり意味のあるものではなく、かなりの誤差を含んでいる。

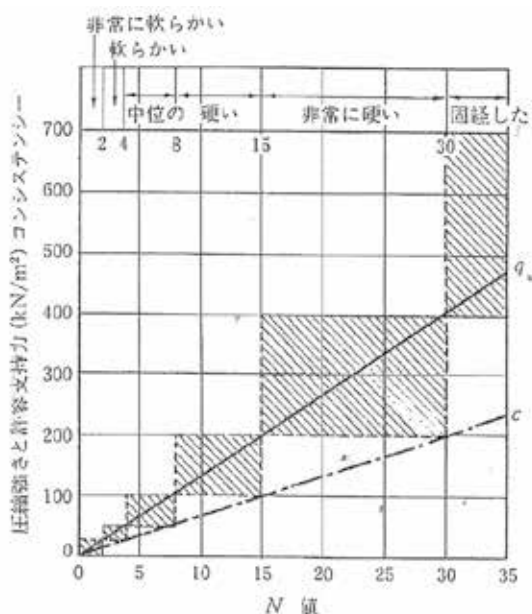


図 4-2-2  $N$  値と粘土のコンシステンシー、一軸圧縮強さとの関係 <sup>1)</sup>

さらに、Terzaghi and Peck(1955)によると一軸圧縮試験に用いた試験試料は、SPT サンプラーで採取した試料であるとの記載があり、乱れによる強度低下などの懸念がある。

このように、Terzaghi and Peck 式による  $q_u$  の  $N$  値からの推定には次のような問題点がある。

- ①  $N$  値の範囲と一軸圧縮強さの範囲を対比させたものでリニアなものではない。
- ② データのばらつきが大きい。
- ③ SPT サンプラーで採取した乱された試料で一軸圧縮試験を実施している。

#### 4.2.3 ⑦大崎式 ( $40+5N$ )

下式は、東京地盤図に示されているもので、表 4-2-3 及び図 4-2-3 より導かれたものである。

$$q_u = 40 + 5 \times N \quad (\text{kN/m}^2)$$

表 4-2-3 粘土質地盤に対する  $N$  値と一軸圧縮強度<sup>12)</sup>

| $N$ 値                           |     | 0 ~ 2       | 2 ~ 4       | 4 ~ 8       | 8 ~ 15      |
|---------------------------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| コンシステンシー                        |     | 非常に柔らかい     | 柔らかい        | 中位の         | 堅い          |
| 一軸圧縮強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 平均値 | 0.392       | 0.598       | 0.670       | 0.989       |
|                                 | 範囲  | 0.18 ~ 0.61 | 0.27 ~ 0.93 | 0.36 ~ 0.98 | 0.72 ~ 1.26 |

東京地盤図(1959)では、⑦式を以下の条件下において導いている。

- ・東京区部での試験結果を基本としている。
- ・東京層の結果は、試験値のばらつきが大きく、統計から除外してある。

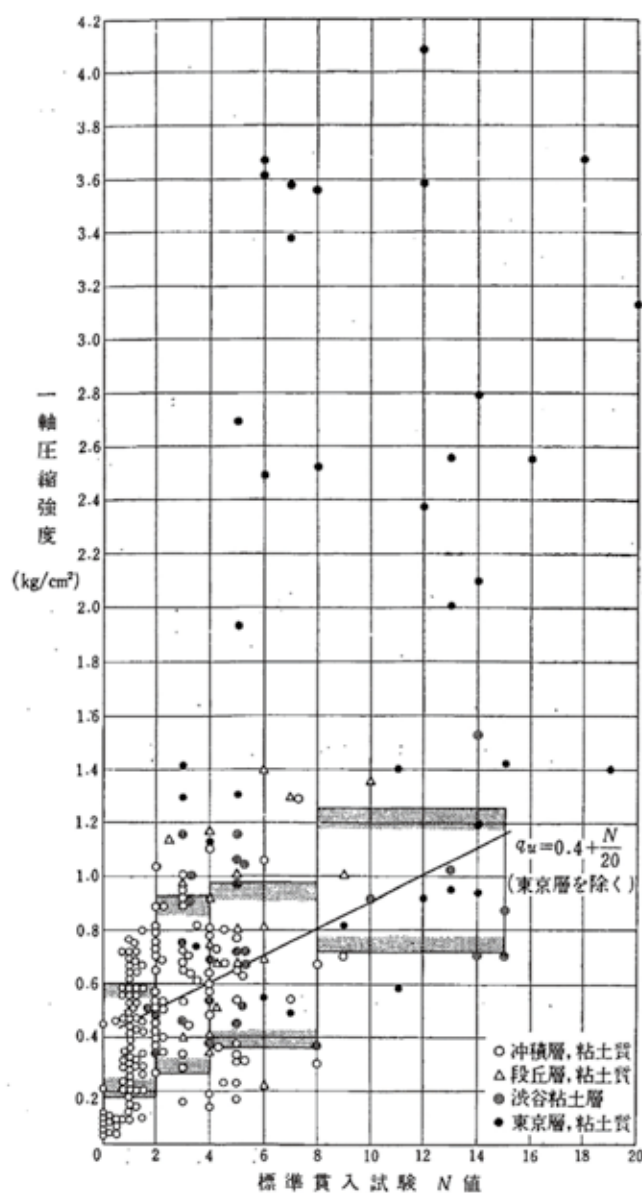


図 4-2-3 粘土質地盤に対する  $N$  値と一軸圧縮強度の関係<sup>12)</sup>

#### 4.2.4 基準・指針における $N$ 値による粘着力推定の現状

##### (1) 道路橋示方書<sup>3)</sup>

粘性土において、標準貫入試験の  $N$  値から非排水せん断強度（粘性土の粘着力  $c_u$ ）を推定することがある。しかし、特に  $N$  値が 5 未満であるような軟弱な粘性土の場合、大きな打撃エネルギーを有する標準貫入試験の結果からせん断強度を推定することは適当でないので、乱れの少ない試料による室内試験や原位置での他の試験から粘着力  $c_u$  を求める必要がある。

##### (2) 道路土工 軟弱地盤対策工指針<sup>13)</sup>

予備検討の初期の段階で、 $q_u$  値が直接求められていないような場合は、 $N$  値、コーン貫入抵抗  $q_c$ 、スクリーウェイト貫入試験（旧スウェーデン式サウンディング試験）の結果から推定することができる。標準貫入試験の  $N$  値からは、下式で推定できる。

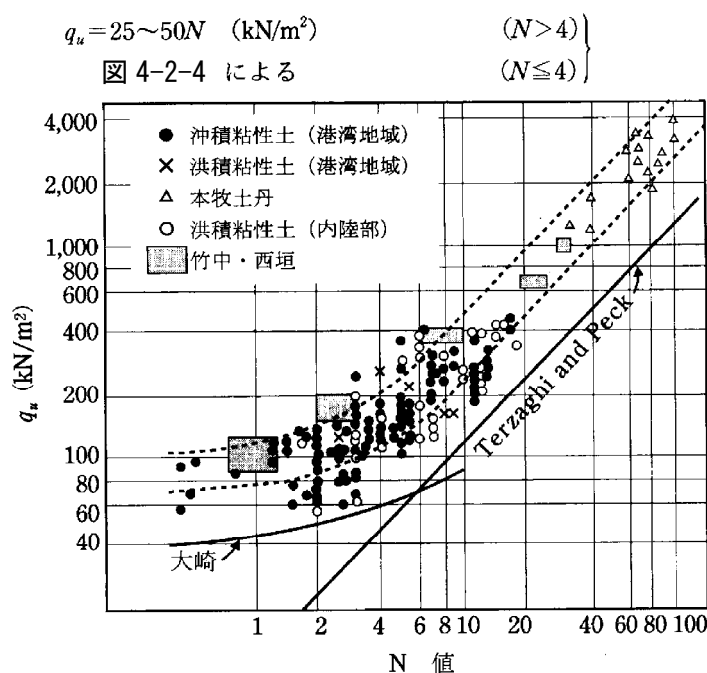


図 4-2-4 一軸圧縮強さ  $q_u$  と標準貫入試験の  $N$  値の関係

設計のための地盤定数の決定は、求められた土質試験結果の平均値または代表値を用いる。安定計算に用いる軟弱層の非排水せん断強度としては、一般に一軸圧縮強さの 1/2 をとる。

##### (3) 港灣の施設の技術上の基準・同解説<sup>14)</sup>

土質試験（一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、一面せん断試験）結果を用いるか、原位置ベーンせん断試験から求める。

##### (4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物<sup>8)</sup>

粘性土の粘着力は、一般に、試料を採取し非圧密非排水三軸圧縮試験により求めることを推奨するが、試料の一軸圧縮強さから簡便に求める場合には、下式による。

$$c = q_u / 2$$

(5) 建築基礎構造設計指針(2019) <sup>15)</sup>

粘性土の強度特性である粘着力は、原位置で採取した乱さないサンプリング試料を用いた一軸圧縮試験や三軸圧縮試験から求めることが基本である。粘性土の一軸圧縮強さと  $N$  値の関係に関する経験式も提案されているが、 $N$  値が小さいところで信頼性が低いため、用いるべきではない。

#### 4.2.5 $N$ 値による粘着力推定の問題点

これまで述べてきたように、 $N$  値による粘着力推定には次のような問題点がある。

- ①データのばらつきが大きく、必ずしも一つの推定式で表されるものではない。
- ②特に、 $N$  値が小さい (4 以下) 部分ではデータと推定式の乖離が大きく、軟弱地盤には適用できない。
- ③データのばらつきが大きいため、安全側でデータの下限値を推定する式が多く、実際より小さな粘着力を与え過大設計となる可能性が大きい。
- ④推定式を求める際に用いられているデータは限られた地域のものが多く、どこでも使えるものではない。

以上のような問題点があるため、各種機関の基準・指針類では、現在は  $N$  値からの推定式を用いず、土質試験や原位置試験から粘着力を求めることを推奨している。

### 4.3 $N$ 値による変形係数の推定による誤差

ここでは、標準貫入試験の  $N$  値と各種変形係数（孔内载荷試験、平板载荷試験）の関係について取りまとめる。

#### 4.3.1 $N$ 値と孔内载荷試験

Schultze-Menzenbach(1961)は12種類の土の  $N$  値と変形係数  $E_s$  との関係を求め、土の種類によってその関係が相当変わりうることを示した。

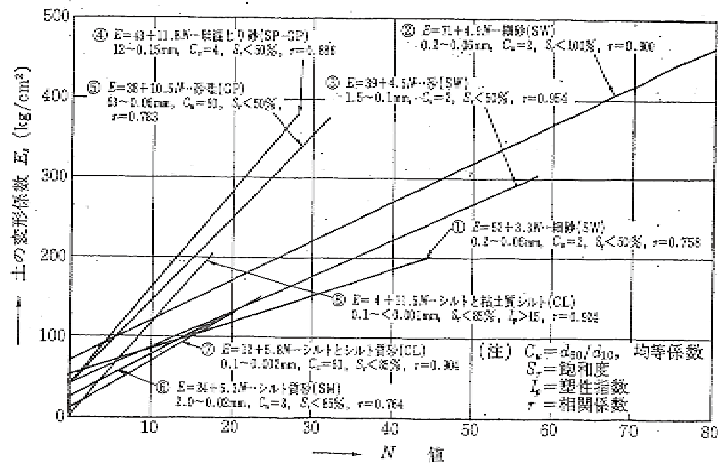


図 4-3-1 土の  $N$  値と変形係数  $E_s$  との関係<sup>16)</sup>

日本において、 $N$  値と孔内载荷試験による変形係数との関係は吉中（1967）が多くのデータを用い次の関係式を示している。

$$E = 0.678 N^{0.9985} \quad \text{MN/m}^2 \quad (E: \text{変形係数} \quad N: N\text{値})$$

図 4-3-2 では砂礫地盤の補正方法が不明である。砂礫を除くと  $N$  値は概ね 20 以下である。重要な点として、吉中は粘性土の強度は  $N$  値から推定できないとして、上式は粘性土には適応不可としている。

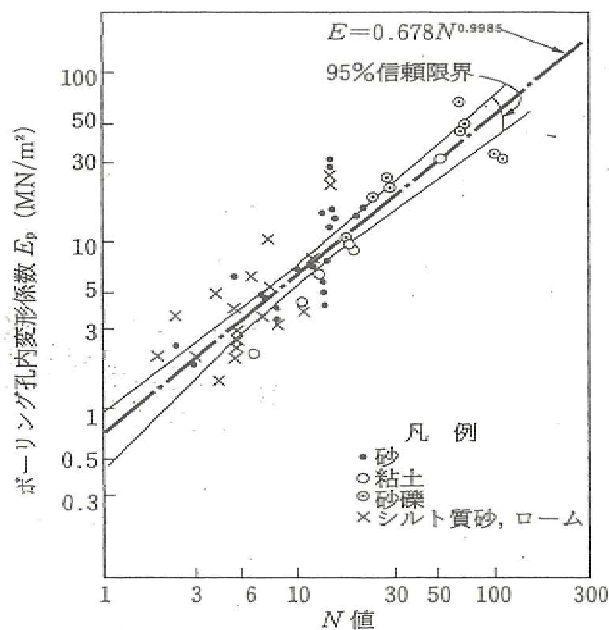


図 4-3-2  $E_p(E_0)$  と  $N$  値の関係<sup>17)</sup>



また宇都（1967）は同様にプレシオメーターによる変形係数と  $N$  値との関係を示した。

図 4-3-3 には、以下の 3 式が示されている。

$$E = 4N \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$E = 7N \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$E = 10N \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

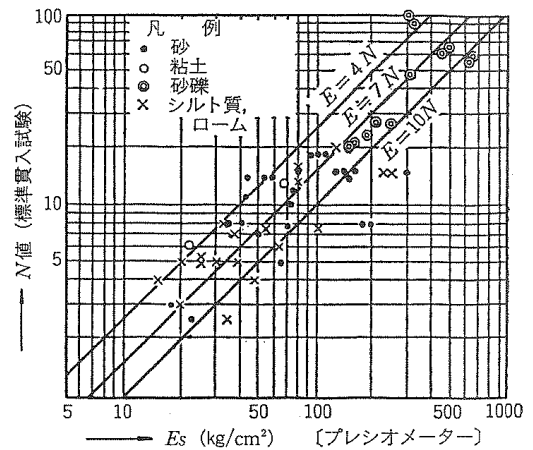


図 4-3-3  $N$  値とプレシオメーターによる変形係数の関係<sup>18)</sup>  
(宇都一馬:「基礎地盤の調査」構造物の基礎。土木学会関東支部 42.10.12 に  $E=4N$  を加筆)

下式は沖積層、洪積層、ピート、岩盤を一括して示したものとなっている。

さらに土屋等(1980)は吉中(1964)のデータに加筆することにより、両対数グラフにより下式を導いている。

$$E = 670N^{0.986} \quad (\text{kN/m}^2)$$

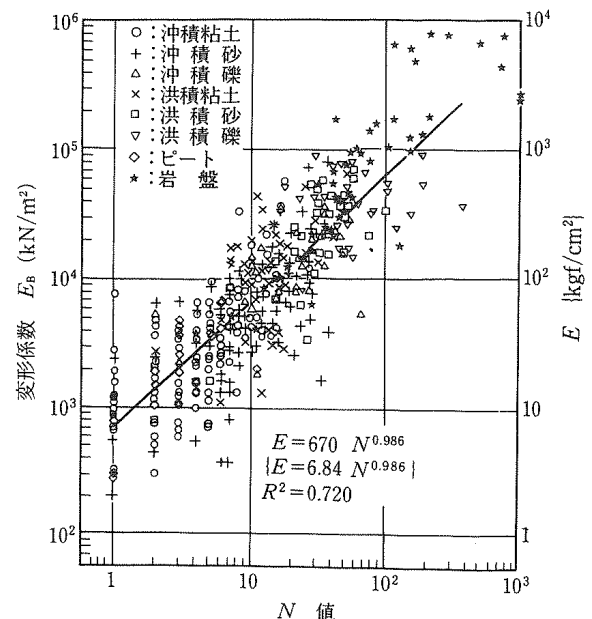


図 4-3-4 孔内载荷試験より得られた変形係数と  $N$  値との関係<sup>19)</sup>

日本建築学会<sup>20)</sup>では首都圏の 700 試料について孔内载荷試験と推定  $N$  値との関係を示した。データは埋土、沖積層、洪積層に分け粘土層と砂質土層に示している。図 4-3-5, 図 4-3-6 には吉中式( $E=700N$ )を参照として示しているが洪積層、沖積層が大きくはずれていることが明らかである。また個々のばらつきも大きく必ずしも相関を得ているとは考えにくい。

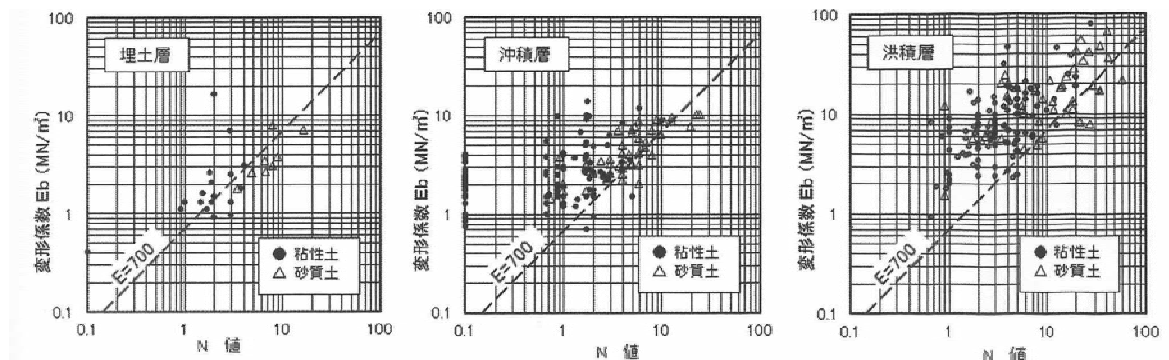


図 4-3-5  $N$  値と孔内水平载荷試験から求めた変形係数  $E_b$  の関係(首都圏 700 試料)<sup>20)</sup>

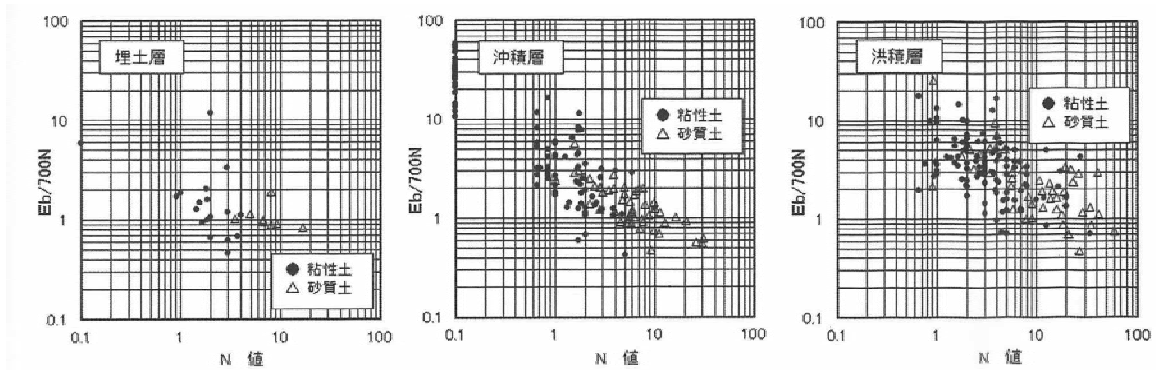


図 4-3-6  $N$ 値と  $E_b/700N$ の関係(首都圏 700 試料)<sup>20)</sup>

また  $N$ 値を軟岩に適用した事例も認められる。

$N$  値に対して深度方向の鉛直方向の変形係数も研究されている。 $N$  値の打撃回数はサンブラーの貫入量と打撃回数をもとに貫入量 30cm と仮定したときの打撃回数(換算  $N$  値)を線形補間して求めるものである。ここでは道路橋示方書、鉄道標準示方書に示された  $E_b=700N$  の関係が軟岩領域でも成立するようだと述べている。

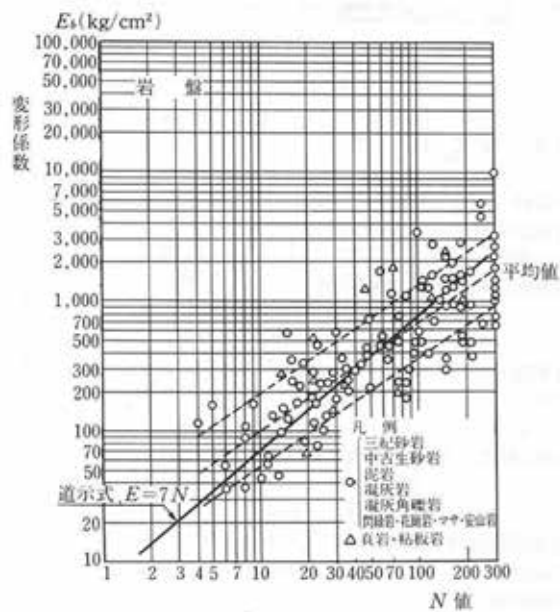


図 4-3-7 換算  $N$ 値と変形係数  $E_b$ の関係<sup>21)</sup>

### 4.3.2 $N$ 値と平板載荷試験

$N$ 値に対する鉛直方向の変形係数との相関性についても検討されている。

最も基本的なものとしては、図 4-3-8 に示すように砂層の正規圧密状態ならびに過圧密状態において  $N$ 値と変形係数の関係を分けて示している。

建築基礎構造設計指針(2001)では、平板載荷試験ならびにフーチングの鉛直変位から弾性式を用いて逆算で変形係数を求めて、 $N$ 値との相関を検討している。

$N$ 値からの推定式では、地下水面下の正規圧密状態にて  $E=0.7N(\text{MN/m}^2)$ 、地下水面下の過圧密状態にて  $E=1.4N$ 、過圧密状態にて  $E=2.8N$  が示されている。

また鉄道における路盤・路床においては、平板載荷試験で求められる  $K_{30}$  を用いて列車荷重が作用する路床表面では  $K_{30}$  値が  $7\text{kgf/cm}^2$  であるとしている。そして平板載荷試験が実施されていない箇所では図 4-3-9 を用いて  $N$ 値との関係から概略推定される場合があったとされている。

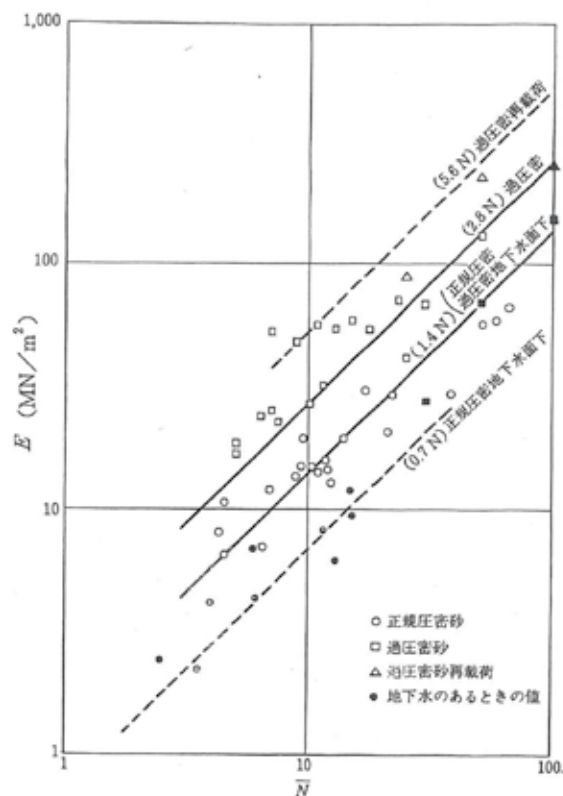


図 4-3-8 砂地盤の  $E$  と  $\bar{N}$  の関係<sup>22)</sup>

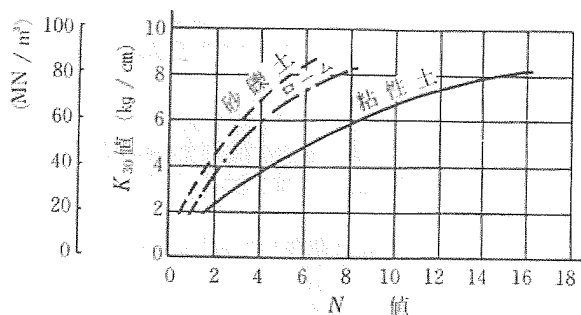


図 4-3-9  $N$ 値と  $K_{30}$  の関係<sup>23)</sup>

### 4.3.3 各推定式の比較

$N$ 値による変形係数の推定では、表 4-3-1 に示すように様々な推定式<sup>16)~18), 22), 24)</sup>が提案されている。

表 4-3-1  $N$ 値と変形係数の推定式一覧

| No | 推定式                                                                                                                                                                                                        | 単位                  | 備考                                                                               |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| ①  | a) $E=52+3.3N$ (細砂)<br>b) $E=71+4.9N$ (細砂)<br>c) $E=39+4.5N$ (砂)<br>d) $E=43+11.8N$ (礫混じり砂)<br>e) $E=38+10.5N$ (砂礫)<br>f) $E=24+5.3N$ (シルト質砂)<br>g) $E=12+5.8N$ (シルトとシルト質砂)<br>h) $E=4+11.5N$ (シルトと粘土質シルト) | kgf/cm <sup>2</sup> | 土質基礎工学ライブラリー<br>土質調査試験結果の解釈と<br>適用例 <sup>16)</sup><br>Schultzen-Menzenbach(1961) |
| ②  | a) $E=4N$<br>b) $E=7N$<br>c) $E=10N$                                                                                                                                                                       | kgf/cm <sup>2</sup> | プレシオメータ<br>基礎地盤の調査<br>宇都一馬(1967) <sup>17)</sup> に加筆                              |
| ③  | $E=0.678N^{0.9985}$                                                                                                                                                                                        | MN/m <sup>2</sup>   | 孔内載荷試験<br>吉中龍之進(1967) <sup>18)</sup>                                             |
| ④  | $E=670N^{0.986}$                                                                                                                                                                                           | kN/m <sup>2</sup>   | 孔内載荷試験<br>土屋尚、豊岡義則(1980) <sup>22)</sup>                                          |
| ⑤  | a) $E=0.7N$ (正規圧密地下水面下)<br>b) $E=1.4N$ (正規圧密過圧密地下水面下)<br>c) $E=2.8N$ (過圧密)<br>d) $E=5.6N$ (過圧密再載荷)                                                                                                         | MN/m <sup>2</sup>   | 平板載荷試験・フーチング<br>建築基礎構造設計指針<br>(2001) <sup>24)</sup>                              |

水平方向の変形係数と  $N$ 値の推定式は、③式の吉中(1967)に代表される。相関の特徴としては、データのばらつきが大きく、推定値と試験値では 5 倍程度の差異がある。④式は、データを追加し再整理したものであるが、やはりデータのばらつきは大きく、 $N$  値=5 では  $E=800\sim 10000\text{kN/m}^2$ 、 $N$  値=10 では  $E=1500\sim 20000\text{kN/m}^2$  と約 10 倍もの差異が認められる。よって  $N$  値からの推定には設計では無視できない大きな誤差が含まれる。

鉛直方向の変形については、建築基礎構造設計指針(2001)<sup>22)</sup>にて⑤式としてまとめられている。本推定式は、平板載荷試験ならびにフーチングにおける鉛直変位量より弾性論を用いて逆算した変形係数と  $N$ 値との相関によるものである。

したがって変形の影響範囲に違いがあり、弾性式の適応においても誤差が含まれる。鉛直方向の変形と水平方向の変形係数が 3~4 倍の差があることは知られており、これは過圧密な状況に関係していると考えられる。そのため正規圧密状態においては、水平方向、鉛直方向の変形性に大きな差異はない。

$N$  値より変形係数を推定する場合は、基礎データの地域性・土質特性・堆積環境・年代などで変形特性が異なるという適応限界を理解する必要がある。吉中(1967)は、粘性土には推定式の適用は不適であると述べている。

日本建築学会<sup>20)</sup>においても  $N$  値 4 以下の粘性土は  $N$  値との相関は皆無として示されている。また、 $N$  値 20 以上でも相関には大きなばらつきがあり適応には無理がある。換算による推定値のみで地盤定数として設定することは、大きなリスクを含むと考えられる。

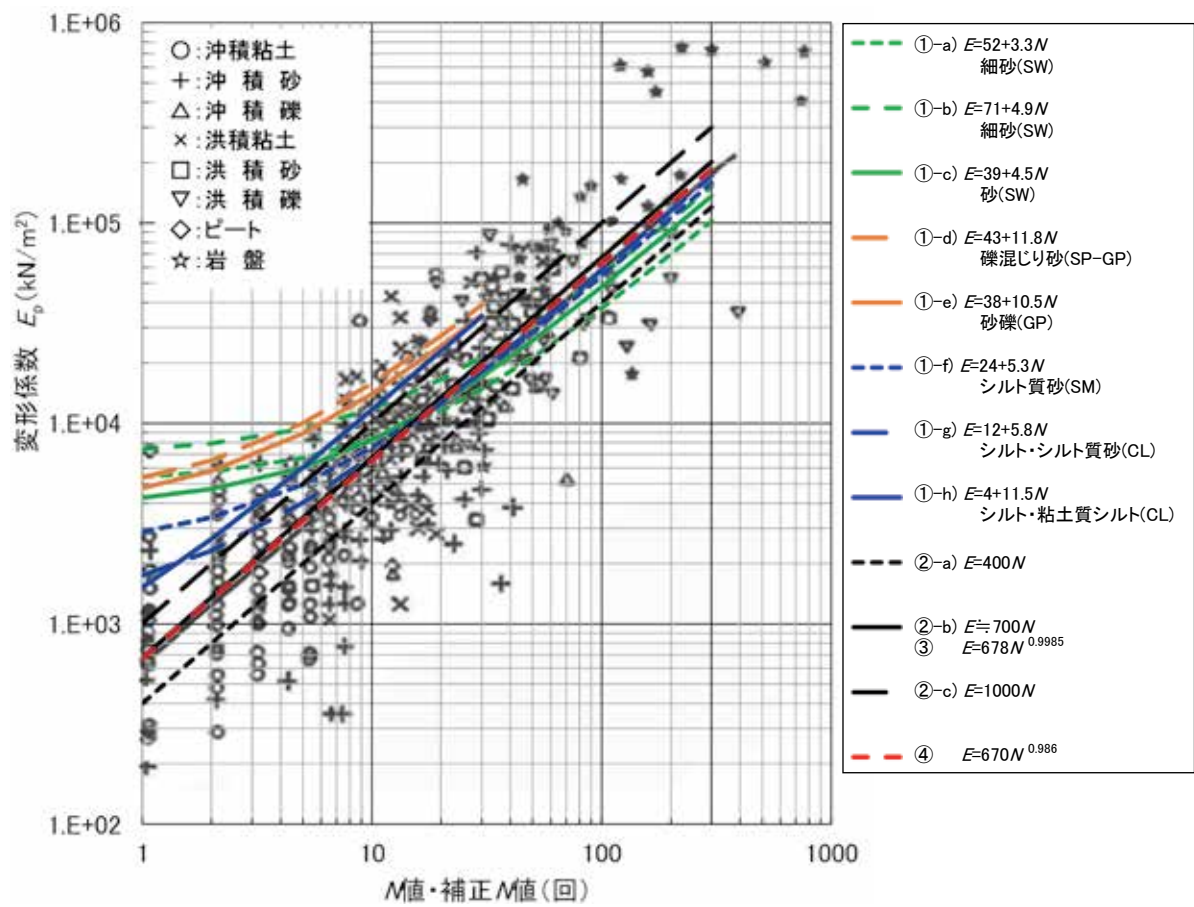


図 4-3-10 各推定式と  $N$  値と変形係数（孔内载荷試験）の比較<sup>(24)</sup> に一部加筆

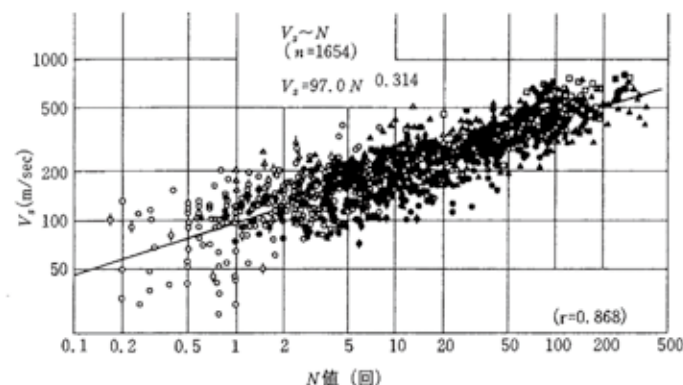
#### 4.4 $N$ 値によるその他の地盤物性値の推定による誤差

##### 4.4.1 セン断波速度の推定

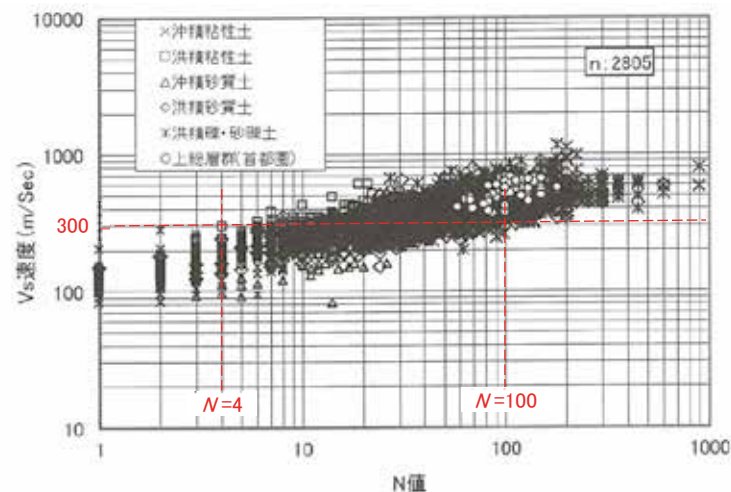
地盤のせん断波速度は、地震時の地盤振動特性として重要な地盤物性値として扱われている。特にボーリング孔を利用した試験より取得される結果は、耐震検討のための工学的基盤面の設定などに不可欠な地盤物性値である。

せん断波速度については、図 4-4-1 に示すように土質による区別なく  $N$  値との対比により相関式を求めて、せん断波速度を推定するケースが多い。これらの相関図は、両対数による関係図であり、ばらつきのある分布の中で相関式を導いていることに注意が必要である。

図 4-4-1(b)によると、工学的基盤として評価される  $V_s=300\text{m/s}$  に対応する  $N$  値の範囲は、 $N$  値=4~100 と 25 倍程度の差となる。



(a) 全国の都市圏のデータ <sup>25)</sup>



(b) 首都圏、関西圏、名古屋圏、九州圏のデータ <sup>20)</sup>

図 4-4-1  $N$  値とせん断波速度 ( $V_s$ ) の相関図

せん断波速度の推定においては、表 4-4-1 に示すように数多くの推定式が提案されている。これらの推定式には、堆積時代や土質の違いにより係数が異なる推定式も提案されている。

また、日本建築学会 <sup>20)</sup> では、堆積時代や土質の違いを考慮した相関においても地域性があることを示している。 $N$  値よりせん断波速度を推定する際には、上記に示すばらつきや地域性があることを十分な留意が必要であるとし、せん断波速度から工学的基盤の設定においてはボーリング孔を利用した PS 検層の実施が必要としている。

表 4-4-1 せん断波速度の推定式一覧<sup>8), 15), 25)~32)</sup>

| No   | 推定式                                                                            | 備考(条件、係数等)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 備考(出典)                                                    |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|-------|------|-----|----|------|-------|-----|-------|-------|------|----|------|----|------|----|-------|-------|------|------|------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|-----|------|-----|-----|
| ①    | $V_{si}=100N_i^{1/3}$ ( $1 \leq N_i \leq 25$ )                                 | 粘性土の場合 ( $N_i$ :i番目の地層の平均N値)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 道路橋示方書・同解説<br>耐震設計編 H29 <sup>26)</sup>                    |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ②    | $V_{si}=80N_i^{1/3}$ ( $1 \leq N_i \leq 50$ )                                  | 砂質土の場合 ( $N_i$ :i番目の地層の平均N値)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                           |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ③    | $V_s=100N^{1/3}$ ( $2 \leq N \leq 25$ )<br>$V_s=120(q_u/100)^{0.36}$ ( $N<2$ ) | ③粘性土の場合<br>( $q_u$ :一軸圧縮強度の特性値(kN/m <sup>2</sup> ))<br>④砂質土の場合                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 鉄道構造物等設計標準・同解説<br>基礎構造物・抗土圧構造物 H12.6 <sup>8)</sup>        |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ④    | $V_s=80N^{1/3}$ ( $1 \leq N_i \leq 50$ )                                       | 設計用とする場合は、地盤調査係数fg,<br>低減係数 $\alpha_g$ を掛けて設定                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                           |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑤    | $V_s=69N^{0.17}(H/H_0)^{0.2}Y_g \cdot St$                                      | N: 層の平均N値<br>H: 地表面から層中心までの深度<br>H0: 基準深度<br>Yg:地質年代係数(沖積1.0,洪積1.3)<br>St: 土質に応じた係数<br>(粘性土1.0、砂質土・砂礫1.1、礫質土1.4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 建築基礎構造設計指針(2019) <sup>15)</sup>                           |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑥    | $V_s=aN^b+c$                                                                   | <table><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td><td>c</td></tr><tr><td rowspan="3">沖積層</td><td>粘性土</td><td>50</td><td>0.42</td><td>80</td></tr><tr><td>砂質土</td><td>90</td><td>0.30</td><td rowspan="2">0</td></tr><tr><td>礫質土</td><td>80</td><td>0.38</td></tr><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td><td>c</td></tr><tr><td rowspan="3">洪積層</td><td>粘性土</td><td>130</td><td>0.29</td><td rowspan="3">0</td></tr><tr><td>砂質土</td><td>110</td><td>0.30</td></tr><tr><td>礫質土</td><td>140</td><td>0.26</td></tr></table> |                                                           | 土質区分 |       | a    | b   | c  | 沖積層  | 粘性土   | 50  | 0.42  | 80    | 砂質土  | 90 | 0.30 | 0  | 礫質土  | 80 | 0.38  | 土質区分  |      | a    | b    | c                                                                       | 洪積層                                      | 粘性土  | 130  | 0.29                                                                                                                    | 0 | 砂質土 | 110 | 0.30 | 礫質土 | 140 |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         | c    |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 沖積層  | 粘性土                                                                            | 50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.42                                                      | 80   |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 砂質土                                                                            | 90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.30                                                      | 0    |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 礫質土                                                                            | 80                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.38                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         | c    |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 洪積層  | 粘性土                                                                            | 130                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.29                                                      | 0    |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 砂質土                                                                            | 110                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.30                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 礫質土                                                                            | 140                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.26                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑦    | $V_s=97.0N^{0.314}$                                                            | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 今井・他(1975): 日本の地盤における弾性波速度と力学的性質 <sup>31)</sup>           |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑧    | $V_s=76N^{0.33}$                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 今井常雄, 吉村正義: 軟弱地盤における弾性波速度と力学特性,土と基礎,Vol.18 <sup>27)</sup> |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑨    | $V_s=84N^{0.31}$                                                               | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 大場新太郎, 鳥海勲: 大阪地盤の振動特性に関する研究 <sup>28)</sup>                |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑩    | $V_s=aN^b$                                                                     | <table><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td></tr><tr><td rowspan="2">沖積</td><td>粘土</td><td>102</td><td>0.29</td></tr><tr><td>砂</td><td>81</td><td>0.33</td></tr><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td></tr><tr><td rowspan="2">洪積</td><td>粘土</td><td>114</td><td>0.33</td></tr><tr><td>砂</td><td>97</td><td>0.32</td></tr></table>                                                                                                                                                                               | 土質区分                                                      |      | a     | b    | 沖積  | 粘土 | 102  | 0.29  | 砂   | 81    | 0.33  | 土質区分 |    | a    | b  | 洪積   | 粘土 | 114   | 0.33  | 砂    | 97   | 0.32 | Imai,T. : P and S wave velocities of the ground in Japan <sup>31)</sup> |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 沖積   | 粘土                                                                             | 102                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.29                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 砂                                                                              | 81                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.33                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 洪積   | 粘土                                                                             | 114                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0.33                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 砂                                                                              | 97                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0.32                                                      |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑪    | $V_s=69N^{0.17} \cdot D^{0.2} \cdot E \cdot F$                                 | <table><tr><td rowspan="2">E</td><td colspan="2">沖積世</td><td colspan="2">洪積世</td><td colspan="2"></td></tr><tr><td>1.0</td><td>1.3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="2">F</td><td>粘土</td><td>細砂</td><td>中砂</td><td>粗砂</td><td>礫混じり砂</td><td>砂礫</td></tr><tr><td>1.00</td><td>1.07</td><td>1.09</td><td>1.14</td><td>1.15</td><td>1.45</td></tr></table>                                                                                                                                                     | E                                                         | 沖積世  |       | 洪積世  |     |    |      | 1.0   | 1.3 |       |       |      |    | F    | 粘土 | 細砂   | 中砂 | 粗砂    | 礫混じり砂 | 砂礫   | 1.00 | 1.07 | 1.09                                                                    | 1.14                                     | 1.15 | 1.45 | Ohta, Y. and Goto, N. : Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes <sup>29)</sup> |   |     |     |      |     |     |
| E    | 沖積世                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                           | 洪積世  |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 1.0                                                                            | 1.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                           |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| F    | 粘土                                                                             | 細砂                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 中砂                                                        | 粗砂   | 礫混じり砂 | 砂礫   |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 1.00                                                                           | 1.07                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1.09                                                      | 1.14 | 1.15  | 1.45 |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑫    | $V_s=aN^b$                                                                     | <table><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td></tr><tr><td rowspan="2">沖積層</td><td></td><td>87.5</td><td>0.305</td></tr><tr><td>段丘層</td><td>146.0</td><td>0.210</td></tr><tr><td colspan="2">土質区分</td><td>a</td><td>b</td></tr><tr><td colspan="2">大阪層群</td><td>182.0</td><td>0.201</td></tr><tr><td colspan="2">全データ</td><td>90.5</td><td>0.345</td></tr></table>                                                                                                                                                            | 土質区分                                                      |      | a     | b    | 沖積層 |    | 87.5 | 0.305 | 段丘層 | 146.0 | 0.210 | 土質区分 |    | a    | b  | 大阪層群 |    | 182.0 | 0.201 | 全データ |      | 90.5 | 0.345                                                                   | 地盤の基礎構造物の耐震設計 地盤工学会実務シリーズ <sup>32)</sup> |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 沖積層  |                                                                                | 87.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.305                                                     |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
|      | 段丘層                                                                            | 146.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.210                                                     |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 土質区分 |                                                                                | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | b                                                         |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 大阪層群 |                                                                                | 182.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.201                                                     |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| 全データ |                                                                                | 90.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.345                                                     |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |
| ⑬    | $N=1.6 \times 10^{-6} \times V_s^{2.9}$                                        | 沖積層堆積物を対象                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き <sup>33)</sup>                  |      |       |      |     |    |      |       |     |       |       |      |    |      |    |      |    |       |       |      |      |      |                                                                         |                                          |      |      |                                                                                                                         |   |     |     |      |     |     |

現在の代表的な各指針における取扱いについて以下に示す。

<道路橋示方書：①式、②式>

土質に応じて①式、②式による推定式が示されているが、弾性波探査やPS 検層によって測定することが望ましいとしている。推定式の利用においては、地盤の基本固有周期を区分する上では、十分な精度を確保できるとしている。



<鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物：③式、④式>

せん断弾性波速度の特性値  $V_s$  は、実測値に基づいて定めることを原則としている。やむをえず  $N$  値より推定する場合は、地盤調査係数  $f_g$  を 0.85 としている(実測値の場合  $f_g=1.0$ )。

<建築基礎構造設計指針(2019)：⑤式、⑥式>

せん断剛性や変形係数を導く定数として利用されるせん断波速度は、PS 検層から求めることを基本としている。事前調査や概略検討段階では、推定式で推定しても良いとしている。

<港湾の基準>

港湾に関する基準においては、 $V_s$  値は検層を行うことを基本としている。

地盤の動的変形・強度特性の検討においては、室内試験および原位置試験にて取得した試験値を採用することを基本とし、試験が実施できない場合は、実験式より  $N$  値や一軸圧縮強度よりせん断弾性係数を推定することができるとしている。ただし、この推定においては、推定結果のばらつきが大きく留意すべきとしている。

#### 4.4.2 杭の周面摩擦・先端支持力の推定

地盤から決まる杭の極限支持力は、周面摩擦力と先端支持力の和で求まる。その支持力推定式は、一般に次式のように表される。

$$R_u = q_d A + U \sum L_i F_i$$

ここに、

$R_u$  : 地盤から決まる極限支持力 (kN)

$q_d$  : 杭先端における単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m<sup>2</sup>)

$A$  : 杭先端面積 (m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長 (m)

$L_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

$F_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m<sup>2</sup>)

これは、Meyerhof 系の推定式と呼ばれ、各機関の基準類はほとんどこの形式となっている。この式の先端支持力  $q_d$  および周面摩擦力度  $F_i$  を推定するのに  $N$  値がよく利用される。

表 4-4-2 および表 4-4-3 には主な基準類の先端支持力および周面摩擦力の推定式を示す。これらの推定式は、多数の杭の支持力試験を行い、その結果と  $N$  値もしくは粘着力  $c$  との関係性を求めた経験式である。これらの経験式は、地盤種別、杭種、施工法ごとに整理され、表 4-4-2 および表 4-4-3 のような推定式が得られている。また、杭の載荷試験などのデータが多くなるとともに、さらに新たな杭の工法が開発されるとともに推定式は改訂・追加されて現在に至っている。

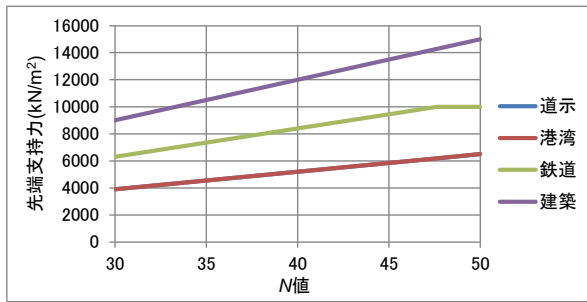
この表の推定式のうち、打込み杭（閉端杭）、場所打ち杭、プレボーリング杭について  $N$  値と先端支持力・周面摩擦力の関係をグラフにまとめたものが、図 4-4-2 および図 4-4-3 である。これによれば、先端支持力、周面摩擦力ともに各機関の値に差があることがわかる。

表 4-4-2 先端支持力の推定式 <sup>3), 6), 8), 15)</sup>

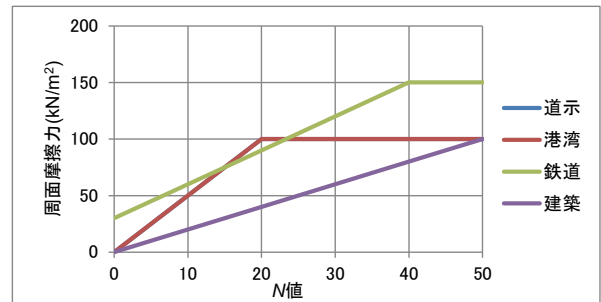
| 基準                                            | 杭種                                   | 土質                | 先端支持力(kN/m <sup>2</sup> )           |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 道路橋示方書 <sup>3)</sup>                          | 打込み杭                                 | 砂礫、砂              | 130N ≤6500                          |
|                                               |                                      | 粘性土               | 90N ≤4500                           |
|                                               | 場所打ち杭                                | 粘性土及び砂層           | 110N ≤3300                          |
|                                               |                                      | 砂礫層               | 160N ≤8000                          |
|                                               | 中掘り杭                                 | 最終打撃方式            | 打込み杭の算定法を適用する。                      |
|                                               |                                      | セメントミルク<br>噴出攪拌方式 | 220N(≤11000) 砂層<br>250N(≤12500) 砂礫層 |
|                                               |                                      | コンクリート打設方式        | 場所打ち杭の算定法を適用する。                     |
|                                               |                                      |                   |                                     |
|                                               | プレボーリング杭                             | 砂層                | 240N(≤12000)                        |
|                                               |                                      | 砂礫層               | 300N(≤15000)                        |
|                                               | 鋼管ソイルセメント杭                           | 砂層                | 190N(≤9500)                         |
|                                               |                                      | 砂礫層               | 240N(≤12000)                        |
| 港湾施設の技術上の基準<br>・<br>同解説 <sup>6)</sup>         | 打込み杭(先端閉塞杭)                          | 砂質土地盤             | 300N                                |
|                                               |                                      | 粘性土地盤             | 6c <sub>p</sub>                     |
|                                               | 場所打ち杭・中掘り杭<br>プレボーリング杭<br>鋼管ソイルセメント杭 |                   | 道路橋示方書を参照する。                        |
|                                               |                                      |                   |                                     |
| 鉄道構造物等設計標準<br>・<br>同解説<br>基礎構造物 <sup>8)</sup> | 打込み杭<br>(先端閉塞杭)                      | 砂質土               | 210N ≤10000                         |
|                                               |                                      | 砂礫                | 210N ≤15000                         |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | 6.3c ≤20000 (70N ≤20000 参考式)        |
|                                               | 打込み杭<br>(先端開放鋼管杭)<br>D ≤0.8m         | 砂質土               | ℓ/D ≤5 35(ℓ/D)N ≤8000               |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 175N ≤8000                   |
|                                               |                                      | 砂礫                | ℓ/D ≤5 35(ℓ/D)N ≤12000              |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 175N ≤12000                  |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | ℓ/D ≤5 1.1(ℓ/D)c ≤16000             |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 5.5c ≤16000                  |
|                                               | 打込み杭<br>(先端開放鋼管杭)<br>D >0.8m         | 砂質土               | ℓ/D ≤5 (28/D)(ℓ/D)N ≤8000           |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 (140/D)N ≤8000               |
|                                               |                                      | 砂礫                | ℓ/D ≤5 (28/D)(ℓ/D)N ≤12000          |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 (140/D)N ≤12000              |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | ℓ/D ≤5 (0.88/D)(ℓ/D)c ≤16000        |
|                                               |                                      |                   | ℓ/D >5 (4.4/D)c ≤16000              |
|                                               | 中掘り根固め杭                              | 砂質土               | 150N ≤10000                         |
|                                               |                                      | 砂礫                | 150N ≤12000                         |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | —                                   |
|                                               | プレボーリング根固め杭                          | 砂質土               | 150N ≤10000                         |
|                                               |                                      | 砂礫                | 150N ≤12000                         |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | —                                   |
|                                               | 鋼管ソイルセメント杭                           | 砂質土               | 150N ≤10000                         |
|                                               |                                      | 砂礫                | 150N ≤12000                         |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | —                                   |
|                                               | 回転杭                                  | 砂質土               | 150N ≤10000                         |
|                                               |                                      | 砂礫                | 150N ≤12000                         |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | —                                   |
|                                               | 場所打ち杭                                | 砂質土               | 60N ≤3500                           |
|                                               |                                      | 砂礫                | 60N ≤7500                           |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | 5.1c ≤9000 (51N ≤9000 参考)           |
|                                               | 先端強化型<br>場所打ち杭                       | 砂質土               | 110N ≤5500                          |
|                                               |                                      | 砂礫                | 110N ≤8000                          |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | —                                   |
|                                               | 深礎杭                                  | 砂質土               | 60N ≤3500                           |
|                                               |                                      | 砂礫                | 60N ≤7500                           |
|                                               |                                      | 硬質粘性土または軟岩        | 5.1c ≤9000 (51N ≤9000 参考)           |
| 建築基礎構造設計指針 <sup>15)</sup>                     | 打込み杭                                 | 砂質土               | 300ηN ≤18000                        |
|                                               |                                      | 粘性土               | 6c <sub>u</sub> ≤18000              |
|                                               | プレボーリング杭                             | 砂質土               | 150N ≤9000                          |
|                                               |                                      | 粘性土               | 150N ≤9000                          |
|                                               | 中掘り杭                                 | 砂質土               | 150N ≤9000                          |
|                                               |                                      | 粘性土               | 6c <sub>u</sub> ≤9000               |
|                                               | 回転杭                                  | 砂質土               | 150ηN ≤9000η                        |
|                                               |                                      | 粘性土               | 150ηN ≤9000η                        |
|                                               | 場所打ち杭                                | 砂質土               | 120N ≤7500                          |
|                                               |                                      | 粘性土               | 6c <sub>u</sub> ≤7500               |

表 4-4-3 周面摩擦力の推定式 <sup>3), 8), 14), 15)</sup>

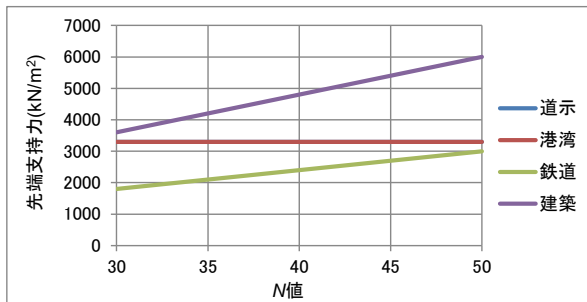
| 基準                                                | 杭種                                   | 土質       | 周面摩擦力度(kN/m <sup>2</sup> )   |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------------|
| 道路橋示方書 <sup>3)</sup>                              | 打込み杭                                 | 砂質土      | $5N \leq 100$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $c$ 又は $6N \leq 70$          |
|                                                   | 場所打ち杭                                | 砂質土      | $5N \leq 120$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $c$ 又は $5N \leq 100$         |
|                                                   | 中掘り杭                                 | 砂質土      | $2N \leq 100$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $0.8c$ 又は $4N \leq 70$       |
|                                                   | プレボーリング杭                             | 砂質土      | $5N \leq 120$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $c$ 又は $7N \leq 100$         |
|                                                   | 鋼管ソイルセメント杭                           | 砂質土      | $9N \leq 300$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $c$ 又は $10N \leq 200$        |
| 港湾施設の技術上の基準<br>・<br>同解説 <sup>6)</sup>             | 打込み杭                                 | 砂質土地盤    | $2N$                         |
|                                                   |                                      | 粘性土地盤    | $c$                          |
|                                                   | 場所打ち杭・中掘り杭<br>プレボーリング杭<br>鋼管ソイルセメント杭 |          | 道路橋示方書を参照する。                 |
|                                                   |                                      |          |                              |
| 鉄道構造物等<br>設計標準<br>・<br>同解説<br>基礎構造物 <sup>8)</sup> | 打込み杭<br>(先端閉塞杭)                      | 砂質土または砂礫 | $3N+30 \leq 150$             |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $6N \leq 120, 0.4c \leq 120$ |
|                                                   | 打込み杭<br>(先端開放鋼管杭)                    | 砂質土または砂礫 | $3N \leq 120$                |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $6N \leq 120, 0.4c \leq 120$ |
|                                                   | 中掘り根固め杭                              | 砂質土または砂礫 | $1N \leq 40$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $1N \leq 40, 0.07c \leq 40$  |
|                                                   | プレボーリング根固め杭                          | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $l/D > 5$                    |
|                                                   | 鋼管ソイルセメント杭                           | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $l/D > 5$                    |
|                                                   | 回転杭                                  | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $l/D > 5$                    |
|                                                   | 場所打ち杭<br>(先端強化型場所打ち杭を含む)             | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      |                              |
|                                                   |                                      | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      |                              |
|                                                   | 深礎杭                                  | 砂質土または砂礫 | $l/D \leq 5$                 |
|                                                   |                                      | 粘性土      |                              |
|                                                   |                                      | 砂質土または砂礫 | 吹付けコンクリート                    |
|                                                   |                                      | 粘性土      |                              |
| 建築基礎構造<br>設計指針 <sup>15)</sup>                     | 打込み杭                                 | 砂質土      | $2.0N \leq 100$              |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $0.8c_u \leq 100$            |
|                                                   | プレボーリング杭                             | 砂質土      | $2.5N \leq 125$              |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $1c_u \leq 125$              |
|                                                   | 中掘り杭                                 | 砂質土      | $1.5N \leq 75$               |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $0.4c_u \leq 50$             |
|                                                   | 回転杭                                  | 砂質土      | $2.0N \leq 100$              |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $0.5c_u \leq 62.5$           |
|                                                   | 場所打ち杭                                | 砂質土      | $3.3N \leq 165$              |
|                                                   |                                      | 粘性土      | $1c_u \leq 100$              |



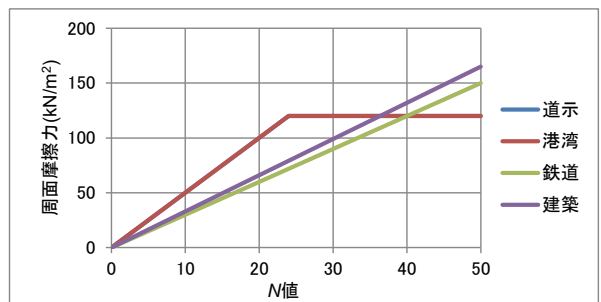
① 打込み閉端杭  
(道示、港湾は同じ値)



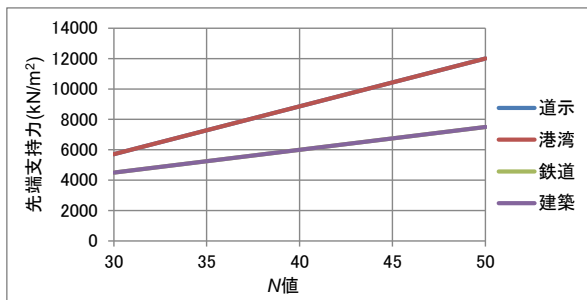
① 打込み閉端杭  
(道示、港湾は同じ値)



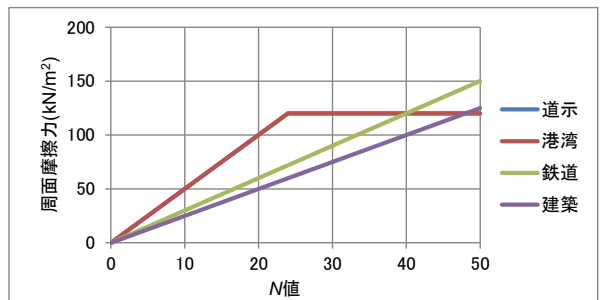
② 場所打ち杭  
(道示、港湾は同じ値)



② 場所打ち杭  
(道示、港湾は同じ値)



③ プレボーリング杭  
(道示、港湾は同じ値)  
(鉄道、建築は同じ値)



③ プレボーリング杭  
(道示、港湾は同じ値)

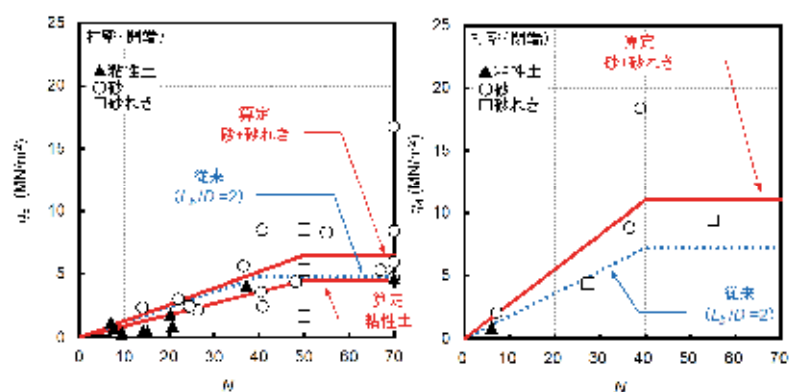
図 4-4-2 各機関の先端支持力と  $N$  値の関係

図 4-4-3 各機関の周面摩擦と  $N$  値の関係

図 4-4-4 および図 4-4-5 は、土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ(2018)<sup>33)</sup>による、道路橋示方書の先端支持力および周面摩擦力(砂質土)の推定式を求めるために、 $N$ 値と載荷試験から求めた先端支持力および周面摩擦力の関係を示したものである。先端支持力、周面摩擦力ともかなりのばらつきがあることがわかる。

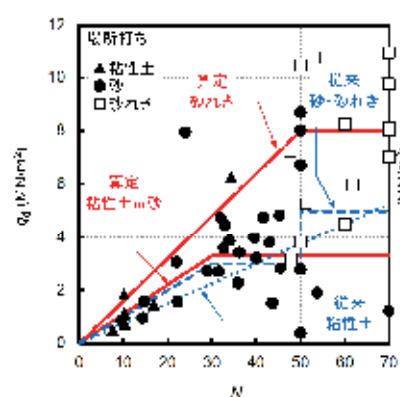
また、図 4-4-6～図 4-4-9 には、先端支持力と周面摩擦力の推定精度を示している。これによれば、従来式(2012)より精度が向上している。これは、載荷試験のデータが多くなったためと考えられる。

なお、同書においては、粘性土について「周面摩擦力の推定精度は粘着力  $c$  によるほうが  $N$  値によるものより高い。今後は粘着力  $c$  のさらなる蓄積により、 $N$  値に比べて推定精度の高い粘着力  $c$  を基本とする推定式を提案していくことが考えられる。」としている。

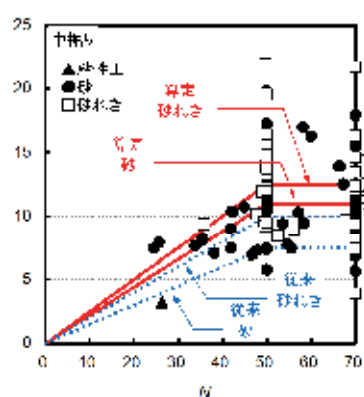


(a) 打撃(開端)

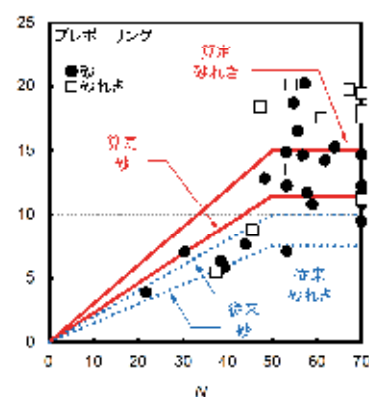
(b) 打撃(閉端)



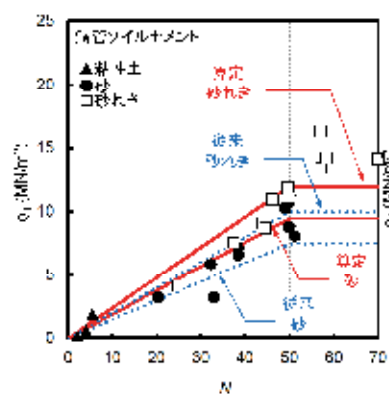
(c) 場所打ち杭



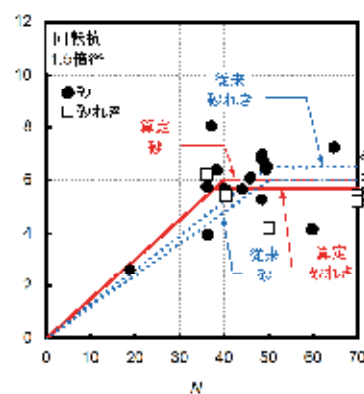
(d) 中掘り杭



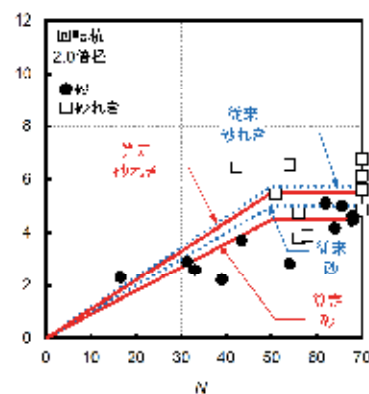
(e) プレボーリング杭



(f) 鋼管ソイルセメント杭



(g) 回転杭(1.5 倍径)



(h) 回転杭(2.0 倍径)

図 4-4-4 先端支持力の推定線<sup>34)</sup>

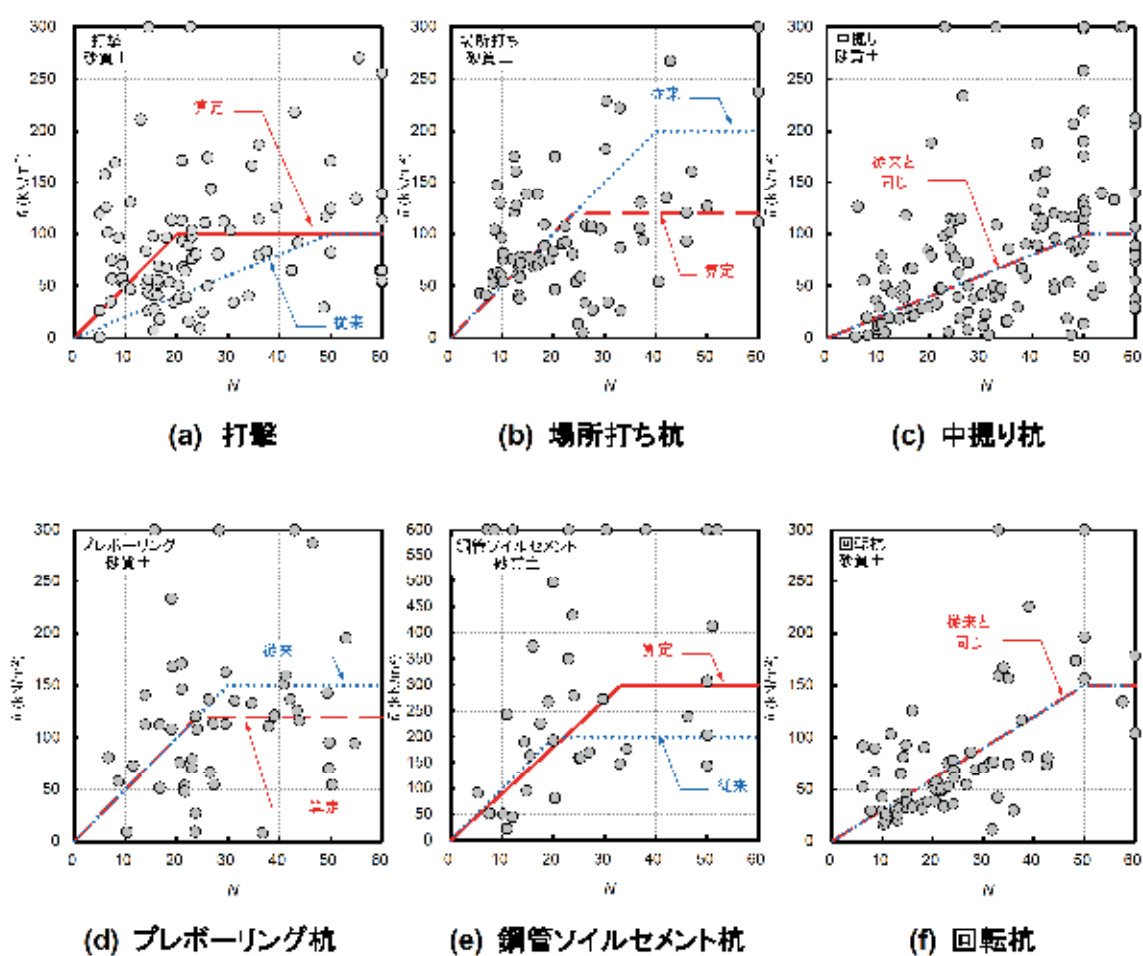


図 4-4-5 周面摩擦力（砂質土）の推定線<sup>34)</sup>

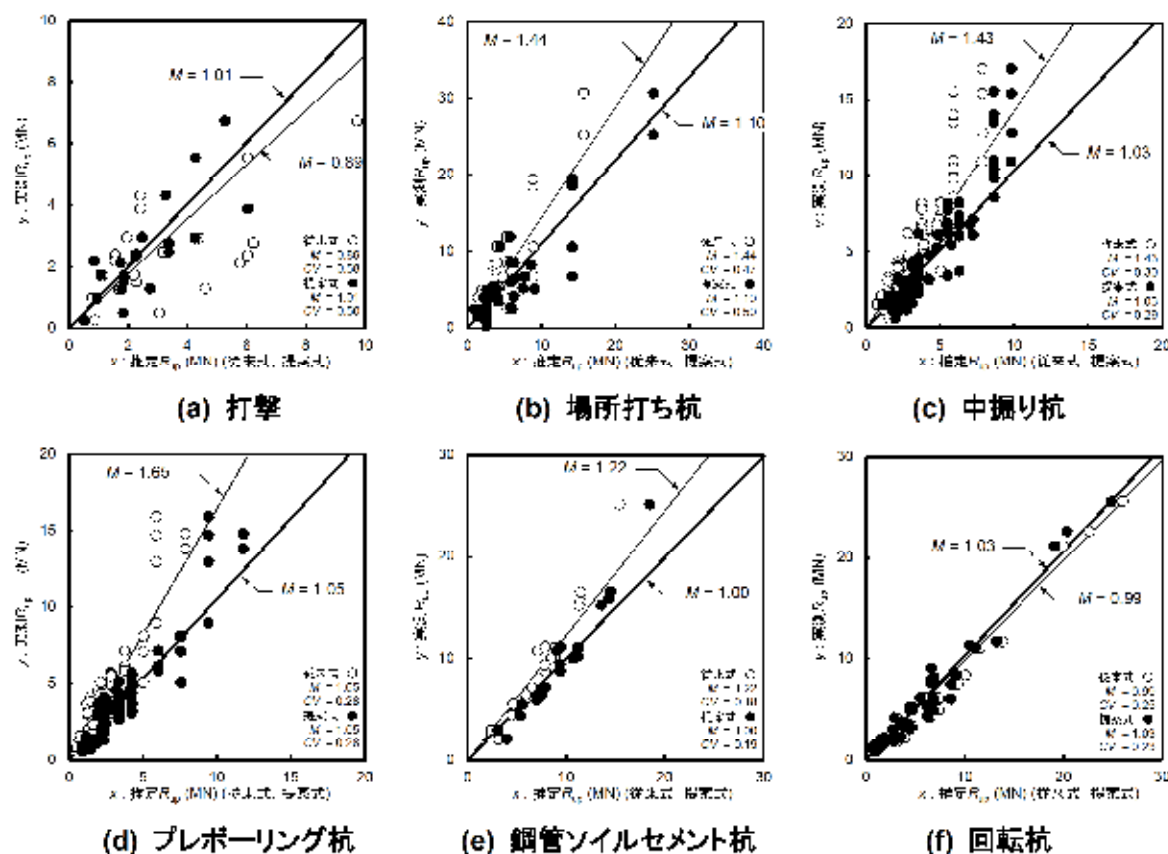


図 4-4-6 先端抵抗の実測値－推定値関係<sup>34)</sup>

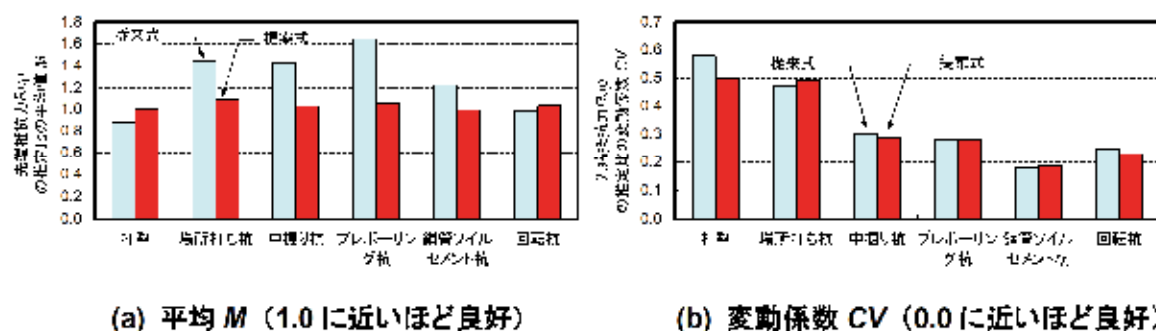


図 4-4-7 先端支持力の推定精度<sup>34)</sup>



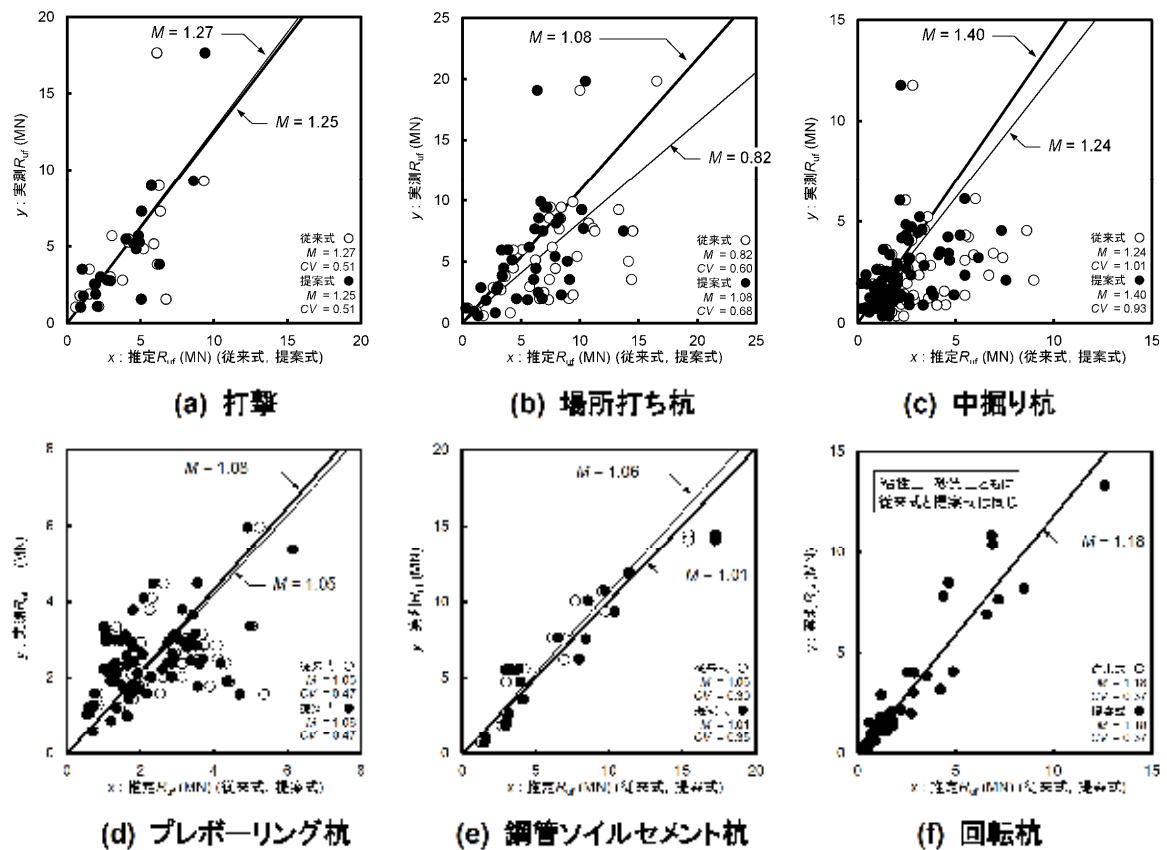


図 4-4-8 先端抵抗の実測値—推定値関係<sup>34)</sup>

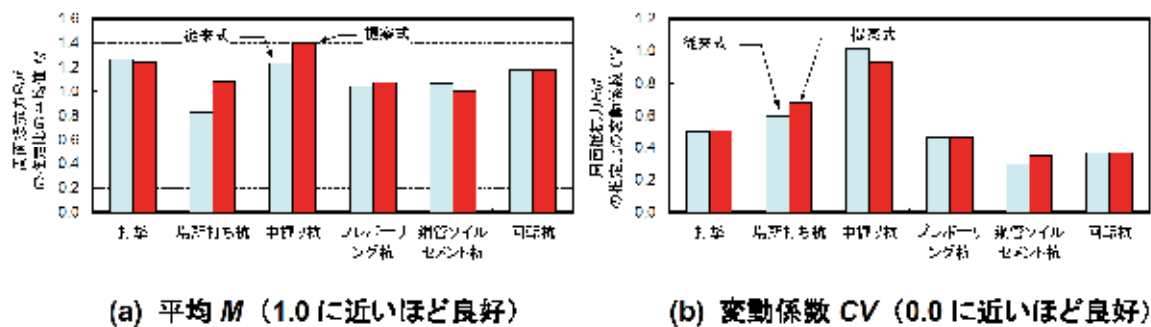


図 4-4-9 周面摩擦力の推定精度<sup>34)</sup>

#### 4.5 まとめ

本章では、 $N$ 値より推定されるせん断抵抗角・粘着力・変形係数を例とし、換算に関わる問題点とその適応性の限界について示してきた。

その結果として以下のことが明らかとなってきた。

- 1) 推定式は経験式であり、ばらつき・誤差を含む。
- 2) 推定式は複数あり、採用する式により推定値が異なる。
- 3) 採用する式により適用限界が明確に示されている。
- 4) 関連の基データには地域性などの限定的なものがある。
- 5) 地質技術者が相関式の適用限界や、適正な  $N$  値の利用範囲を理解するとともに、室内試験や原位置試験の結果を踏まえて設定することが重要である。

これまで示されてきた  $N$  値と地盤物性値の関係は、標準貫入試験により得られる  $N$  値を基準に考えられたものである。これは高度成長時代に、インフラ整備に伴う地質調査の効率性を高め、公共事業の繁栄をもたらすための一策として JIS 規格として採用し、日本全国に標準貫入試験を汎用化していくことが根底にあったのかもしれない。

そのため  $N$  値と各地盤物性値との相関図は、基準軸（横軸）が  $N$  値であり、 $N$  値に対しての地盤物性値（縦軸）の範囲を示している。しかしながら、本来地盤物性値を考えるのであれば、地盤の定数（ $\phi$ 、 $c$ 、 $E$ ）は不変値であり、これを基軸（横軸）とすべきであり、不変の値に対する不安定な値の分布を求めることが一般的である。すなわちこれまでの機材の違いや手法による  $N$  値の差異を考慮するのであれば、地盤物性値（横軸）に対して  $N$  値の分布（縦軸）を議論すべきであると考えられる。そのように考えるならば、 $N$  値の分布はばらつきが大きく、相関として成り立たないものも認められることになる。当然、土性そのものだけではなく地域性や地下水状況、圧密状態、深度分布などにも影響し、地盤物性値としてではなく、変数として捉えられるものであるとも考えられる。

相関を示すために対数表示や指数関数式を代入しているが、本来相関といえないものまでもが「一律、相関あり」として数式が示されている。文中に示したが、同じ  $\phi$  値でも  $N$  値では 10～50 のばらつきがあり、粘着力  $c$  でも 5 倍以上、変形係数  $E$  では 10 倍以上も異なるケースが存在する。平均という概念は明確ではなく、中間値として利用しているケースや下限値を利用する場合もあり、設計上は過大設計となることは多々考えられる。

ここで重要なことは、 $N$  値を基準に考えるのではなく、地盤物性値を基準として考え、 $N$  値のばらつきをみることが重要であるということである。そのためには地域別に地盤物性値と  $N$  値の関係を整理することが重要であり、そのうえで  $N$  値から地盤物性値の換算を広域的に実施することが重要と考える。

<引用・参考文献>

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、pp. 305-309、pp. 686-687、2013
- 2) 畑中宗憲・内田明彦・田屋裕司：砂地盤の内部摩擦角  $\phi_d$  と正規化された標準貫入試験の  $N$  値 ( $N_1$ ) の関係、土と基礎、47-8、pp. 5-8、1999
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、p. 62、pp. 536-537
- 4) 総合土木研究所：基礎工Vol. 25、No12、pp. 77-81、1997
- 5) 総合土木研究所：基礎工Vol. 31、No2、p. 32、2003
- 6) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1989
- 7) 青木一二三：砂の内部摩擦角の新算定式、構造物設計資料、No82、日本鉄道施設協会、1985
- 8) 運輸省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物、鉄道総合技術研究所編、pp. 85-87、p. 117、2000
- 9) 総合土木研究所：基礎工Vol. 31、No2、p. 30、2003
- 10) 土質工学会：土質工学ハンドブック、pp. 480-481、1982
- 11) テルツァギ・ペック：土質力学 応用編、小野薫・星埜和・加藤渉・三木五三郎共訳、pp. 271-272、1955
- 12) 建設省建築研究所・東京都建築局監修：東京地盤図、東京地盤調査研究会編、pp. 18-19、1959
- 13) 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)、p45、平成24年8月
- 14) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、pp. 329-332、2018
- 15) 一般社団法人日本建築学会：建築基礎構造設計指針2019改定、pp. 30-34、2019
- 16) 社団法人土質工学会：土質基礎工学ライブラリー土質調査試験結果の解釈と適用例、pp. 54-55、1979
- 17) 吉中竜之進：地盤反力係数とその載荷幅による補正、土木研究資料第299号、p. 15、1967
- 18) 藤田圭一：土質調査試験結果の解釈と適用例 (第1回改訂版)、土質工学会、pp. 54-56、pp. 101-108、1980
- 19) 地盤工学会：地盤調査方法、p. 254、1995
- 20) 日本建築学会：建築基礎構造設計のための地盤評価Q & A、pp. 78-79、p. 101
- 21) 総合土木研究所：基礎工Vol. 18、No3、p. 67、1990
- 22) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp. 146-147、2001
- 23) 日本国有鉄道：構造物設計標準解説、1978
- 24) 土谷尚・豊岡義則：SPTのN値とプレシオメーターの測定値(Pf、Ef)の関係について、サウンディングシンポジウム、土質工学会、pp. 101-108、1980
- 25) Imai, T. and Tonouchi, K. : Correlation of  $N$ -Value with  $S$ -Wave Velocity and Shear Modulus、Proceeding of the 2nd ESPT、1982.
- 26) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp. 69-70、2017
- 27) 今井常雄・吉村正義：軟弱地盤における弾性波速度と力学特性、土と基礎、Vol. 18、No. 1、pp. 17-22、1970
- 28) 大場新太郎・鳥海勲：大阪地盤の振動特性に関する研究、日本建築学会大会梗概集、1970.

- 29) Ohta, Y. and Goto, N.: Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9, pp. 167-187, 1978
- 30) 今井常雄・麓秀夫・横田耕一郎：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質、第5回日本地震工学シンポジウム講演集、1975
- 31) Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan, Proceedings of 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 257-260, 1977
- 32) 地盤工学会：地盤の基礎構造物の耐震設計 地盤工学会実務シリーズp. 79、140
- 33) 土木研究所・物理探査学会：河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き一、p. 28、2013
- 34) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ：杭の軸方向の支持力及びばね定数推定式の見直しと推定精度の評価に関する研究、土木研究資料第4374号、p. 27、38、43、46、2018

## 5. 標準貫入試験による失敗事例

これまで示してきたように、標準貫入試験ではその利用に関して多くの制限事項とともに地質に関わるリスクを含んでいる。ここでは、これらを踏まえて実際に生じた失敗事例について紹介する。失敗事例は次の4事例であり、次頁以降に各事例の概要を整理した。

- ①  $N$ 値に基づいた切土のり面の崩壊事例
- ②  $N$ 値の妥当性の検討
- ③ 同一敷地内で  $N$ 値が異なる事例
- ④  $N$ 値換算による粘着力の過少評価

各事例をふまえた、課題・留意点について以下に示す。

### ① $N$ 値に基づいた切土のり面の崩壊事例

岩盤ののり面に対して標準貫入試験を実施して  $N$ 値のみで切土のり面の安定性を評価した事例である。本ケースでは標準貫入試験を実施しても、地層の走行傾斜（層理、片理）や風化境界と切土勾配との関係を十分に考慮する必要があった。特に地層の状況をよく観察し、地層の流れ盤と  $N$ 値 50 という値の利用について正確に判断すべきである。

### ② $N$ 値の妥当性の検討

同じ敷地内において試験実施者の違いで  $N$ 値が大きく異なる事例である。特に杭基礎の場合、 $N$ 値の深度分布に応じて支持層の深さが設定されるため、杭長が大きく変化し、施工費に大きく影響する。調査実施位置が異なることが原因の可能性もあるが、敷地の履歴とともに旧地形や周辺環境を十分に注意し、ほぼ同じ地盤条件であるかを確認する必要がある。そのうえで  $N$ 値の分布検証（人為的エラーの可能性）として、各試験実施者の実施条件を確認する。特に、利用している機材、設置状況、実施方法などの検証は必要である。

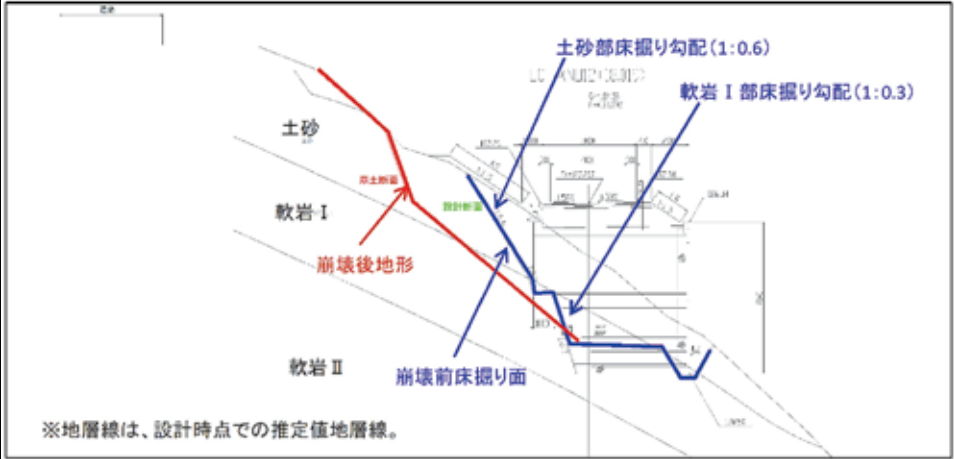
### ③ 同一敷地内で $N$ 値が異なる事例

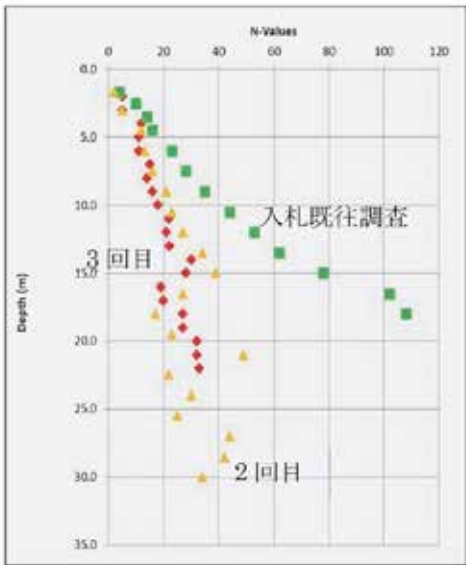
②と同様に同一敷地内において  $N$ 値の分布が異なる事例である。試験実施者が異なる点では②と同じであるが、試験方法が異なっていたことが原因と推定される事例でもある。

試験実施者がかわると実施条件が異なるケースが生じ、微妙に  $N$ 値も異なることが予想されるが、地盤自体がバラツキの大きい材料であるため、たとえ同じ試験実施者が実施しても、同じ試験値は得られるとは限らない。試験実施者の影響の要因としては、試験方法の違い（本事例では、コーンプーリー方式と自動落下方式との違い）が挙げられる。特に、実施年代が異なると試験基準も異なるため、本事例のように古い既存データを活用する業務では既往調査時における適用基準の確認が必要である。

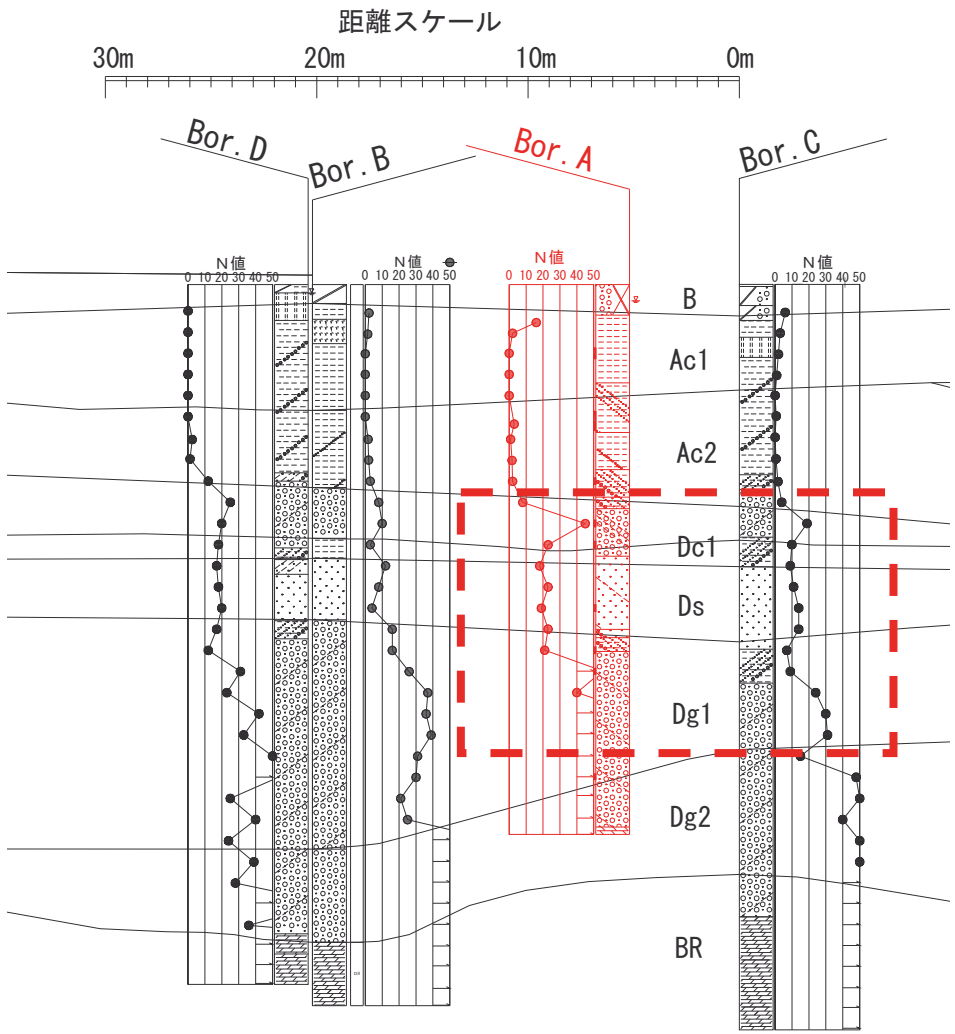
### ④ $N$ 値換算による粘着力の過小評価

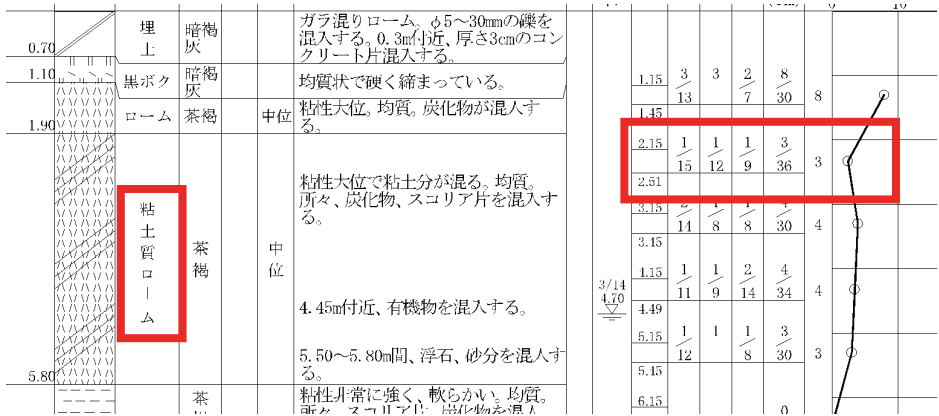
土質定数の提案にあたり、 $N$ 値からの換算式で粘着力を設定することがある。火山灰質粘土などは特殊土であり、換算式に比べて粘着力は大きな値となるケースがあり、 $N$ 値からの換算は過小評価となるケースがある。

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| タイトル      | N値に基づいた切土のり面の崩壊事例                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 対象物       | 床掘掘削切土法面                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 事例の内容     | 床掘掘削法面の表層崩壊                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 発生要因      | 局所的な地山の脆弱化による崩壊発生                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 課題の詳細     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・切土法面は風化岩であるが一部土砂化したD級岩盤が出現する。</li> <li>・調査ボーリングは本計画地では実施されておらず、近傍データを用いた。</li> <li>・近傍のボーリング調査ではN値50以上を示した風化岩盤を確認した。</li> <li>・切土勾配はN値換算から土砂部1:0.6、軟岩部1:0.3と標準的な勾配で計画されていた。</li> <li>・施工済区間でも同様な勾配で施工されており問題なく施工完了していた。</li> <li>・地山の風化深度・亀裂状況などの地質状況を近傍のボーリングデータ（地質状況・N値）を併用し切土勾配を決定して施工したが、掘削時に一部土砂化・細片化した岩盤が出現し、降雨の影響もあり掘削法面で表層崩壊が発生した。</li> </ul> |
| 概要図<br>など |  <p>図-1 補強土壁工 床掘り面の崩壊状況</p>  <p>写真1 崩壊箇所の状況</p>                                                                                                                                                                        |

| タイトル           | N値の妥当性の検討                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                         |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------|----|----------------|----------|------------|----------------|-------|------------|----------|----------|-------------|----------------|-----------|----|-----------|---------|--------|---------|----|-------------------------|
| 対象物            | 海外の発電所工事                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                         |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| 事例の内容          | 試験者による N値のばらつき                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| 発生要因           | 標準貫入試験における不適切行為                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                         |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| 課題の詳細          | <p>タイ中部の発電所工事で入札図書の既往調査と同じ地点でボーリング調査を実施したが、図 1 に示すように N 値が大きく異なった(2 回目)。そこで、第三者による N 値の妥当性を検証した(3 回目)。</p> <p>いずれも現地調査会社が行ったものであるが、2 回目と 3 回目は表 1 や写真 1 の管理を行い、試験を実施したものである。</p> <p>当業務の基礎工事は、設計施工による一括発注であった。検証後の N 値を基にすると杭長は入札時の約 2 倍になり、プロジェクトの採算に大きく影響する事態となった。問題発覚後は、発注者立会の下で検証を行い、既往調査の問題点を指摘することで設計変更とすることができた。</p> <p>※参考：地質リスクマネジメント事例研究発表会 講演論文集 令和元年 11 月 1 日<br/>「海外業務における地質リスク事例」 基礎地盤コンサルタンツ株式会社</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                         |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| 概要図など          | <div><div></div><div></div></div> <p>図 1 三社による N 値の比較</p> <p>写真 1 不良シュウの交換</p> <p>表 1 標準貫入試験における不適切行為と是正および効果</p> <table><tr><th>不適切な項目</th><th>是正内容</th><th>効果</th></tr><tr><td>ボーリングロッドの継手不具合</td><td>良質ロッドに変更</td><td>エネルギーの正常伝達</td></tr><tr><td>サンプラーの先端の破損と摩耗</td><td>新品に交換</td><td>貫入時の過大抵抗低減</td></tr><tr><td>ローププーリー法</td><td>トンピ使用の推奨</td><td>打撃エネルギーの正常化</td></tr><tr><td>ハンマー自由落下高さ不均一性</td><td>同上および厳格管理</td><td>同上</td></tr><tr><td>試験深度の不確実性</td><td>試験深度の計測</td><td>スライム除去</td></tr><tr><td>ケーシング掘り</td><td>禁止</td><td>ケーシング内に溜まったスライム内での試験を排除</td></tr></table> | 不適切な項目                  | 是正内容 | 効果 | ボーリングロッドの継手不具合 | 良質ロッドに変更 | エネルギーの正常伝達 | サンプラーの先端の破損と摩耗 | 新品に交換 | 貫入時の過大抵抗低減 | ローププーリー法 | トンピ使用の推奨 | 打撃エネルギーの正常化 | ハンマー自由落下高さ不均一性 | 同上および厳格管理 | 同上 | 試験深度の不確実性 | 試験深度の計測 | スライム除去 | ケーシング掘り | 禁止 | ケーシング内に溜まったスライム内での試験を排除 |
| 不適切な項目         | 是正内容                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 効果                      |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| ボーリングロッドの継手不具合 | 良質ロッドに変更                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | エネルギーの正常伝達              |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| サンプラーの先端の破損と摩耗 | 新品に交換                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 貫入時の過大抵抗低減              |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| ローププーリー法       | トンピ使用の推奨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 打撃エネルギーの正常化             |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| ハンマー自由落下高さ不均一性 | 同上および厳格管理                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 同上                      |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| 試験深度の不確実性      | 試験深度の計測                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | スライム除去                  |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |
| ケーシング掘り        | 禁止                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ケーシング内に溜まったスライム内での試験を排除 |      |    |                |          |            |                |       |            |          |          |             |                |           |    |           |         |        |         |    |                         |



|           |                                                                                                                                |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| タイトル      | 同一敷地内で $N$ 値が異なる事例                                                                                                             |
| 対象物       | 構造物                                                                                                                            |
| 事例の内容     | 調査者により大きく $N$ 値が異なる                                                                                                            |
| 発生要因      | 断面図に示す Bor. A~C は、実施年度や実施業者 (A~C) が異なっており、理由は不明であるが、Bor. A の赤枠内の $N$ 値が極端に大きい。考えられる理由として自動落下を使用せず、コーンプリー法で実施した可能性がある。          |
| 課題の詳細     | 断面図に示すように、5m 程度しか離れていないのに、地層によっては $N$ 値が 10 近く異なる (赤枠内)。このため、各層の地盤定数や工学的特性の評価が困難になる。                                           |
| 概要図<br>など |  <p style="text-align: center;">地質推定断面図</p> |

| タイトル  | N値換算による粘着力の過少評価                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |           |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|--|-----------|------|--|----|------|----------------------------|------|--|------|------------------------|------|--|------|-----|------|--------|-----------------------|------|------------------|-----|
| 対象物   | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |           |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 事例の内容 | 過小に評価された粘性土                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |           |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 発生要因  | N値評価の考え方                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |           |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 課題の詳細 | <p>火山灰質粘性土は特殊土であるが、地盤定数を設定する際には粘性土として取り扱われ、N値からの換算式で粘着力を設定することが多くある。</p> <p>火山灰質粘性土は、室内土質試験結果（一軸圧縮強度や三軸 UU 試験による粘着力）の方が、N値からの換算値に比べて大きくなるケースがある。</p> <p>結果として、N値からの換算値は、粘着力を過小評価することが多い。</p> <p>例）室内土質試験結果と N 値から換算した値の比較</p> <p>対象層：粘土質ローム（N 値＝3 回）</p> <p>一軸圧縮強度 試験値 <math>q_u=73.3\text{ kN/m}^2</math></p> <p>換算値 <math>q_u=37.5\text{ kN/m}^2</math>（換算式 <math>q_u=12.5N</math>）</p> <p>三軸 UU 圧縮試験 試験値 <math>c=54.5\text{ kN/m}^2</math></p> <p>換算値 <math>c=18.75\text{ kN/m}^2</math>（換算式 <math>c=6.25N</math>）</p>                                                                                                                                                                                                                        |           |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 概要図など | <p>&lt;ボーリング柱状図の抜粋&gt;</p>  <p>&lt;粘土質ロームの室内土質試験結果&gt;</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">深さ(m)</th><th>2.00～2.90</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">地層区分</td><td>Lm</td></tr> <tr> <td rowspan="4">一軸圧縮</td><td>一軸圧縮強度 <math>q_u\text{ kN/m}^2</math></td><td>71.3</td></tr> <tr> <td></td><td>75.3</td></tr> <tr> <td><math>E_{50}\text{ MN/m}^2</math></td><td>4.78</td></tr> <tr> <td></td><td>6.10</td></tr> <tr> <td rowspan="3">せん断</td><td>試験条件</td><td>UU(三軸)</td></tr> <tr> <td>全応力 <math>c\text{ kN/m}^2</math></td><td>54.5</td></tr> <tr> <td>全応力 <math>\phi^\circ</math></td><td>5.5</td></tr> </tbody> </table> |           | 深さ(m) |  | 2.00～2.90 | 地層区分 |  | Lm | 一軸圧縮 | 一軸圧縮強度 $q_u\text{ kN/m}^2$ | 71.3 |  | 75.3 | $E_{50}\text{ MN/m}^2$ | 4.78 |  | 6.10 | せん断 | 試験条件 | UU(三軸) | 全応力 $c\text{ kN/m}^2$ | 54.5 | 全応力 $\phi^\circ$ | 5.5 |
| 深さ(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2.00～2.90 |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 地層区分  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Lm        |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| 一軸圧縮  | 一軸圧縮強度 $q_u\text{ kN/m}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 71.3      |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 75.3      |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|       | $E_{50}\text{ MN/m}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 4.78      |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 6.10      |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
| せん断   | 試験条件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | UU(三軸)    |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|       | 全応力 $c\text{ kN/m}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 54.5      |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |
|       | 全応力 $\phi^\circ$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5.5       |       |  |           |      |  |    |      |                            |      |  |      |                        |      |  |      |     |      |        |                       |      |                  |     |

## 6. 標準貫入試験の取り扱いについて

標準貫入試験は、JIS 規格に採用されて以降、急速に日本全国に広がり利用されてきた。これは 1960 年代以降の高度成長期に社会インフラが精力的に整備され、その拡大事業とともに設計・施工に必要な調査試験法として利用され、今日に至ったためと考えられる。既に JIS 規格化以降 60 年間以上、ほとんど変わらない調査手法で実施されてきている根強い歴史が存在する。

しかしながら、これまで本論で述べてきたようにその簡便さから多くの試験が実施され、結果として地盤物性値への換算が行われてきたことが原因で、現場技術の停滞と共に技術の発展を妨げてきた一因となったことも忘れてはならない。

標準貫入試験による  $N$  値利用の危険性について、最も大きな原因は未だ試験が人為的かつ設備、機器設置の状況に影響されるということである。これに対して、自動貫入試験、半自動貫入試験が提唱されてきてはいるが、設備状況や整備状況は現場判断に任されているのが現状である。

これまで本論では標準貫入試験のリスクをわかりやすく説明するために、 $N$  値に誤差をもたらす人為的条件の可能性について正面から論じてきている（第 2 章）。

現在当協会に属する機長は、これらのリスクを十分に把握したうえで標準貫入試験の実施を行っているが、地質調査業協会に属さない一部のオペレーターは、いまだにコーンプーリー法を利用するなど JIS 規格を遵守しないで実施していることも多いのが現実である。

今後、更なる機長の高齢化と若手技術者の減少で、技術伝承などに大きな課題を残すとも指摘されている。

次に 3 章で示した標準貫入試験に代わる調査試験手法である。JIS 規格化以降様々な試験手法が提案されてきているが、静的コーン・動的コーンともに  $N$  値に対してばらつきが大きく、換算  $N$  値にもその信頼性が薄いことは否めない。これはコーン試験そのものに人為的な動作が伴うことにもよる。 $N$  値と  $N_6$  値との関係には手法によりばらつきが大きく、地盤特性によっても差が大きいことから、最適な手法は確立されていない。

最後に地盤を対象とした土質試験やその他原位置試験から直接得られる地盤物性値への  $N$  値の換算が  $N$  値利用の地盤工学的なリスクになる問題である。 $N$  値に対して換算式により地盤物性値のばらつきが大きく、これらは対象地盤の地域性、地下水、粒度組成、物性などの条件により大きく変化することが明らかにされてきている。一方、土質試験や原位置試験により直接得られた地盤物性値に対して  $N$  値を示すと  $N$  値そのものが大きくばらつくことを 4 章では示してきた。

このような中、どのように  $N$  値から地盤物性値を推定するかについては「建築基礎構造設計のための地盤評価 Q & A 日本建築学会 (2015)」に詳細に示されている。これら最低限の条件に従い、留意していれば大きな問題には発展しない。これら最低限のルールについて何点かを説明する。

表 6.1 *N* 値換算の留意点

| 換算式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 留意点                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi = \sqrt{(20N)} + 15$<br>(建築基礎構造設計指針 日本建築学会 2001, 大崎式)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 拘束圧(有効上載圧)の影響が考慮されていない。                                                                                                                                                   |
| $\phi_d = (20N_1)^{0.5} + 20 \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20)$<br>$\phi_d = 40^\circ \quad (N_1 > 20)$<br>$N_1 = N \cdot (98 / \sigma_v')^{0.5}$<br>(建築基礎構造設計指針 日本建築学会 2001)                                                                                                                                                                                                                                                           | <i>N</i> 値を直接 $\phi_d$ に関係づけるのではなく、 <i>N</i> 値に与える有効上載圧の影響を考慮している。                                                                                                        |
| $q_u = 12.5N \text{ kN/m}^2$<br>(地盤調査の方法と解説 地盤工学会, Terzaghi and Peck 式)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | SPT サンプラーによる一軸圧縮試験利用<br>$N \leq 4$ 領域では相関がなく、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験より直接求める。                                                                                                        |
| $q_u = 25 \sim 50N \text{ (竹中・西垣・奥村) kN/m}^2$<br>(建築基礎構造設計のための地盤評価Q&A 日本建築学会 2015)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $N > 4$ の領域で利用、コーンプーリー利用                                                                                                                                                  |
| $q_u = 40 + 5N \text{ kN/m}^2$<br>(東京地盤図1959 大崎式)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 東京層はデータから除外。<br>推定式データは限られた地域、どこでも利用できるものではない。( <i>N</i> 値は、コーンプーリー利用)                                                                                                    |
| $E = 0.678N^{0.9985} \text{ MN/m}^2$<br>(地盤反力係数とその載荷幅による補正 吉中龍之進(1967))                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | プレシオメーター 同一地盤同一深度(粘土以外の適応したい) 砂質土、シルト質土、礫混じり土が多い。                                                                                                                         |
| $\textcircled{1} E = 0.7N, \textcircled{2} E = 1.4N, \textcircled{3} E = 2.8N, \textcircled{4} E = 5.6N$<br>(建築基礎構造設計指針 日本建築学会 2001)                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $\textcircled{1}$ 正規圧密地下水面下<br>$\textcircled{2}$ 正規圧密・過圧密地下水面下<br>$\textcircled{3}$ 過圧密、 $\textcircled{4}$ 過圧密再載荷<br>土質別・堆積年代別では、埋土層・沖積層は吉中式と一致する。洪積層は吉中式を下限としてより大きな値となる。 |
| $\textcircled{1} E = 52 + 3.3N \text{ (砂)} \quad \textcircled{2} E = 71 + 4.9N \text{ (細砂)}$<br>$\textcircled{3} E = 39 + 4.5N \text{ (砂)} \quad \textcircled{4} E = 43 + 11.8N \text{ (礫混じり砂)}$<br>$\textcircled{5} E = 38 + 10.5N \text{ (砂礫)} \quad \textcircled{6} E = 24 + 5.3N \text{ (シルト質砂)}$<br>$\textcircled{7} E = 12 + 5.8N$<br>$\textcircled{8} E = 4 + 11.5N \text{ (シルトと粘土質シルト)}$<br>(土質基礎工学ライブラリー 土質調査試験結果の解釈と適用例) | $N$ 値の修正が不明である。<br>$N$ 値と変形係数 $E_s$ 間には砂、礫及び乾燥したシルト質土においてよい直線比例関係となる。<br>飽和度が85%以上では、粒径が小さくなると相関が乏しい(間隙水圧の影響)。                                                            |

まず、*N* 値から  $\phi$  を推定する方法として留意すべき点は、*N* 値が地盤の拘束圧の影響を受けるという点である。建築基礎構造設計指針(2001)では、これら拘束圧を考慮して次式を提案している。

$$\phi_d = (20N_1)^{0.5} + 20 \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20)$$

$$\phi_d = 40 \quad (N_1 > 20)$$

$$N_1 = (98 / \sigma_v')^{0.5} N \quad (1998 : \text{畑中宗徳、内田明彦、加倉井正明、青木雅路})$$

上式の条件は細粒分概ね 20% の砂質土で得られたデータから求められているという点である。しかしながら、チェックの意味で一部サンプリング試料を用いた室内土質試験で直接対象地盤の  $\phi_d$  を求めるなど、換算式への適応性を確認するとともに信頼性を高めることが好ましい。

また  $N$  値から  $q_u$  を求める方法としては、標準貫入試験のような動的な試験から静的な地盤物性値を関連付けることに無理があるとされている。最近の知見では、「 $N$  値と  $q_u$  との関係から何らかの関係を作成し、設計に利用することは危険側の設計になる可能性もあり、望ましい方法ではない。」と述べられている。したがって設計に用いる一軸圧縮強度ならびに粘着力( $c$ )は一軸・三軸圧縮試験により直接求めることが望ましい。特に  $N$  値 $<4$  の領域では、過小評価を避けるためにこれらの試験から求めることが望まれる。

そして最後に  $N$  値から変形係数( $E$ )を求める換算式についてである。吉中(1964)が示した  $E=700N$  と孔内載荷試験による変形係数の関係は堆積年代や土質によって補正する必要があることがわかっている。これについても  $N$  値が 4 を下回る場合は、 $N$  値より変形係数( $E$ )を推定すべきでないと考えられる。

一方、砂質土については水平抵抗検討用の変形係数( $E$ )は、孔内載荷試験からの値と  $E=700N$  から推定した値が一致し、関係式を用いてもよさそうである。しかしながら、粘性土については  $N$  値から推定した変形係数は孔内載荷試験から求めた値の  $1/2\sim 1/4$  の値を示している。

したがって基本的には、原位置試験ならびに土質試験から得られる変形係数を用いることが好ましい。

さて、ここまで汎用化してきた  $N$  値に対して、今後どのように取り扱うかは、様々な議論がなされてくるように思える。サウンディングなど新たな原位置試験方法や、標準貫入試験を小規模化した手法により簡略化することも考えられる。

しかしながら、過去 60 年にわたり多利用化され、多くのデータが採取され地盤物性値との関係が明らかにされてきた状況を考えると、最低限の方法として「適正な  $N$  値の利用方法」を考えれば良いものと考えられる。そのためには JIS 規格 (A1219 2013) に準拠することが重要であり、そこから求められた  $N$  値を比較し、利用することが好ましい。

そして、既往文献ならびに実績データを取りまとめた教訓として、 $N$  値から地盤物性値を求めるのではなく、原位置試験や土質試験を確実に実施して設計定数を求め、その値の検証ならびに分布状況について  $N$  値を利用することが最適ではないかと考える。

## 謝辞

本原稿執筆にあたり、多忙な中、名古屋大学利藤房男特任教授には原稿校閲していただき、ありがとうございました。

全地連現場環境改善委員会（委員長：永野正展高知工科大学名誉教授）におかれましては、内容に関して多くのご意見をいただきました。

また、時松孝次東京工業大学名誉教授（現東京ソイルリサーチ）からは、参考論文などを貸与していただくと共に、中央開発株式会社からは貴重な社内資料をご提供いただきました。

この他、多くの方々のご協力によって取りまとめる事が出来ました。ここに深く感謝申し上げます。

## 執筆者一覧

一般社団法人関東地質調査業協会 技術委員会 *N*値リスク検討会

|      |        |                  |
|------|--------|------------------|
| リーダー | 中川 渉   | 応用地質株式会社         |
|      | 渡辺 寛   | 株式会社 日さく         |
|      | 河野 寛   | 日本物理探査株式会社       |
|      | 調 修二   | 基礎地盤コンサルタンツ株式会社  |
|      | 佐渡 耕一郎 | 株式会社 地圏総合コンサルタント |
|      | 橋本 和佳  | 中央開発株式会社         |
|      | 赤坂 幸洋  | 基礎地盤コンサルタンツ株式会社  |
|      | 遠藤 理   | 株式会社 ダイヤコンサルタント  |
|      | 橘 久生   | 興亜開発株式会社         |
|      | 橋口 稔   | 応用地質株式会社         |
|      | 原田 政寿  | 国際航業株式会社         |
|      | 松尾 賢太郎 | 中央開発株式会社         |
|      | 水江 邦夫  | 株式会社 東京ソイルリサーチ   |
|      | 森山 哲朗  | サンコーコンサルタント株式会社  |
|      | 山邊 晋   | 川崎地質株式会社         |

