

地盤工学会関東支部 平成 19 年度
性能設計に向けた原位置試験の役割に関する研究委員会

目次

1. はじめに高橋 邦夫（基礎地盤コンサルタンツ㈱）
2. 性能設計と原位置試験菅野 高弘（(独)港湾空港技術研究所）
 - 2.1 原位置試験の性能設計への適用
3. 性能設計の前提と地盤調査法神田 政幸（(財)鉄道総合技術研究所）
 - 3.1 地盤の変形係数の現状
 - 3.2 性能設計に求められる地盤の変形係数
4. 性能設計に向けたサウンディングの役割澤田 俊一（応用地質㈱ 東京本社）
 - 4.1 性能設計に求められる設計用値
 - 4.2 性能設計に向けた新しいサウンディングの一例
5. 性能設計に向けた孔内載荷試験（SB-IFT）新田 洋一（基礎地盤コンサルタンツ㈱ 東京支社）
 - 5.1 SB-IFT の概要
 - 5.2 試験の実施例¹⁾
 - 5.3 今後の性能設計へ向けて
6. 性能設計に向けた多重セル型自動孔内水平載荷試験益田 和夫（㈱マスダ技建）
 - 6.1 現行の孔内水平載荷試験法と問題点
 - 6.2 多重セル型自動孔内水平載荷試験装置の特徴
 - 6.3 改良ビットによる孔壁乱れの軽減策
 - 6.4 各種地盤定数の判定法
 - 6.5 あとがき
7. FWD 試験が土構造物の性能設計に果たし得る役割平川 大貴（東京理科大学）
 - 7.1 FWD 試験
 - 7.2 性能設計に向けた FWD 試験の利点
 - 7.3 今後の展望
8. 設計から動態観測・圧密管理における地盤調査の役割
—地盤改良を例として—片桐 雅明（㈱日建設計シビル技術開発部）
 - 8.1 浚渫粘土埋立地における圧密促進のための地盤改良設計の考え方と評価方法
 - 8.2 新北九州空港の事例
 - 8.3 まとめ

1. はじめに

地盤工学会関東支部から出された「首都圏を直下地震から守るために―地盤工学からの提言―」（平成 17 年 12 月）において、「従来のように標準貫入試験（ N 値）に過度に依存することなく、地盤の変形性を重視した精度の高い実用的な地盤調査法の開発と普及により、地盤物性の評価システムの改善を図る必要がある。」と謳われた。これに対応すべく、平成 18 年 10 月本委員会が設立された。その設立趣旨は次の通りである。

（委員会設立趣旨）

構造物の設計について、設計方法そのものを規定した従来型から、現在は、構造物に求められる性能のみを規定し、その性能を満足するための設計方法は自由とする性能設計への動きが進んでいる。性能設計を有効に展開するためには、構造物の変位・変形等を支配することになる地盤の特性について、これまでよりも高度な情報が求められるようになってくる。一方、原位置試験は、現在主流であり非常に便利に使われている標準貫入試験の他に、各種の地盤情報を原位置においてより適切に捉えることの可能なものがあり、またその使い方などにもこれまでに多くの工夫がされてきている。このような原位置試験の手法をうまく使いこなすことにより、適切な地盤の特性を把握して性能設計に活用することが非常に有望であると考えられる。現時点において、この点を追求するための検討を行うことは極めて有意義である。

性能設計そのものについての正面切った議論は我々の目的とするところではない。性能設計において、地盤特性の把握が有効に活用されるべきであるということが論点である。性能設計に向けて地盤調査の切り口から、実質的に役に立つ一歩を進める議論をしたい。“提案”に謳われているように、 N 値から離れる方向で、模索していきたいと思う。そこで本委員会では、性能設計に向けた地盤調査について、その中でも原位置の特性を直接把握するところから、特に原位置試験が有効であるという議論をしたいと考えている。その意味で今回の報告では、原位置試験が活かされた事例、あるいは活かされると想定されるケースを紹介している。

技術的に高度な地盤調査、あるいは地盤の変化にきめ細かに対応した丁寧な地盤調査を行えば、調査費用はどうしても増大することになる。しかし、たとえ地盤調査にかかるコストが増大しても、工事費とトータルすれば全体費用が大幅減になるということが、性能設計という土俵の上であれば強く期待される。

本委員会が目指すところは高遠で、期待される内容の全体は膨大であるが、今回はその第 1 歩として夢のある方向を示したいと考えている。また今回は、活動を開始してから 1 年程の中間段階での報告であり、これからの後半の議論に向けて、貴重なご意見を頂ければ大変ありがたい。

2. 性能設計と原位置試験

性能設計は、目的：当該施設を必要とする理由，要求性能：目的を達成するために当該施設が保有しなければならない性能，性能規定：要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定，性能照査：目的・要求性能・性能規定に対して，数値解析・模型実験などの適切な手法によって，その性能が満足されることを照査することになる。

土木学会の包括設計コード¹⁾においては，性能照査のアプローチについて，A：設計者は，性能規定を一定のある適当な信頼性で満足することを示す。B：設計者は，当該構造物の事業者が指定する固有基本コード等に基づいて性能を照査する。とされている。

- 1) 要求性能 (図-2.1)： 要求性能は，基本的要求性能（作用に対する施設の構造的な応答：変形，応力等に対する性能であり，施設の重要度や機能に応じて，安全性・修復性・使用性に分類される。），その他の要求性能（施設の供用や利便性の観点から必要とされる供用性，施工性・維持管理性・環境性等）として規定される。
- 2) 作用と設計状態 (図-2.1)：性能照査にあたって，作用の状態を，永続状態・変動状態（概ね年超過確率 0.01 程度以下）・偶発状態として規定し，これらに対して損傷程度を決定することになる。例えばレベル1地震動は変動作用，レベル2地震動は偶発作用と定義される。
- 3) 性能規定： 性能規定は，要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定であり，具体的な照査が可能となるように対象施設の照査において考慮すべき時間の影響・作用の組み合わせを規定したものである。
- 4) 性能照査： 対象施設の性能照査に用いられる手法として，信頼性に基づく方法，施設的作用-応答を適切に評価可能な数値解析手法・模型実験・過去の経験に基づく方法が挙げられる。

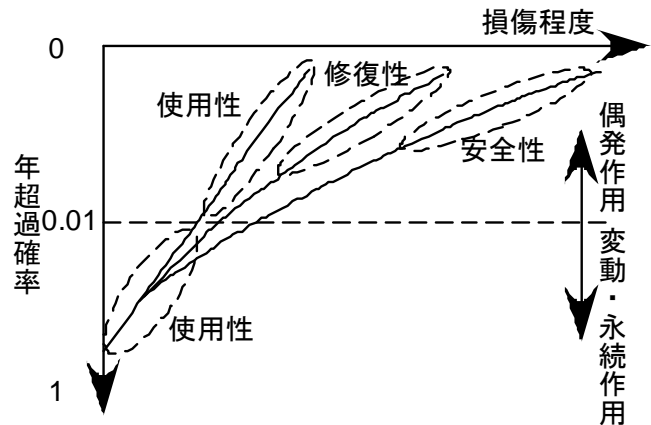


図-2.1 施設に要求される性能の概念

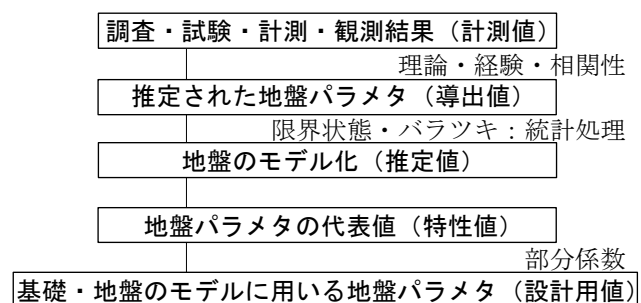


図-2.2 地盤定数の設計用値の設定概念

信頼性設計法は，施設の破壊の可能性を確率論に基づく手法によって制御する方法であり，各々レベル3：構造物の破壊確率，レベル2：信頼性指標，レベル1：部分係数を用いた性能照査式によって設計するものである。土構造物の場合，現時点では主にレベル1が用いられることが多い。地盤定数の設定においては，地盤工学会基準 JGS4001 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原理²⁾に基づき，対象土層の設計値を決定する。一般的に，実務においては地盤調査結果のばらつき・地形・地学的な考察を加味し地盤のモデル化を実施することが多いことから，図-2.2 においては地盤のモデル化に基づく設計用値を設定する流れとしている。

2.1 原位置試験の性能設計への適用

性能設計を導入することにより自由度の高い設計が可能となる。従来の仕様設計との違いの概念として，仕様設計：レディーメイド紳士服を購入，性能設計：オーダーメイドあるいはオーダーメイドの紳士服を購入することに相当すると考えられる。

設計者が，性能照査のアプローチとして，「A:設計者は，性能規定を一定のある適当な信頼性で満足することを示す。」を選択した場合には，図-2.1の横軸の損傷程度を適切に評価する必要があることから，強度のみならず変形特性を適切に表現する必要がある。

例えば、港湾施設の重力式係船岸（岸壁）の性能規定(国交省告示)では、以下のように記述されている。

第四十九条 重力式係船岸の性能規定は、次の各号に定めるものとする。

- 一 主たる作用が自重である永続状態に対して、地盤のすべり破壊の生じる危険性が限界値以下であること。
- 二 主たる作用が土圧である永続状態及び主たる作用がレベル1地震動である変動状態に対して、壁体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力不足による破壊の生じる危険性が限界値以下であること。

このように、設性能設計では、設計者が「文字で書かれた性能規定」を基に設計を実施しなければならない。性能照査は法的な拘束力は無く、設計者自らが性能照査手法の選択根拠・精度、性能照査に用いる部材・地盤定数の設定根拠等が適切であることを説明し、照査結果が妥当であることを示す必要がある。妥当性の確認手法としては、国土交通大臣又は国土交通大臣の登録を受けた者（登録確認機関）に対して確認申請を行い、確認証（適合）・通知書（不適合）を受け取る手続きとなる。特に、耐震強化施設は以下のような性能規定となる。緊急物資輸送に対応した耐震強化施設の場合には、緊急物資、避難者、建設機械等の海上輸送のための船舶の接岸、荷役が可能な程度の損傷（変形量）とする必要がある。

第四十八条

2 前項に規定するもののほか、耐震強化施設の岸壁の性能規定にあつては、主たる作用がレベル2地震動である偶発状態に対して、要求性能に応じて、作用によるシオン章の程度が限界値以下であることとする。

設計者は、告示で示された性能規定を、工学的指標に置き換え、この指標を満足することを照査することになる。例えば、緊急物資等の荷役が行えることに関しては荷役機械によりトラックに物資を積込むことからトラックが岸壁までアクセスできることを考慮し、例えば岸壁背後の段差が **20 cm** 以下という工学的指標を設計者自らが設定（何故、30 cm ではなく 20 cm なのか？ 設定根拠の合理性・妥当性の説明も必要となる。）し、地震作用後の状況を照査することになる。レベル2地震動を対象とした場合、従来型の安全率だけでは照査が十分とは言えず、数値解析や模型実験による照査が必要となる。

図-2.3 に示すようにレベル2地震動を対象とした場合にはひずみレベルが大きくなるが、現状の試験法では動的変形特性試験といゆる液状化試験の間のひずみレベルに関する動的特性を得る手法が確立されていない。また、ひずみレベルが大きくなれば、原位置においては載荷速度と排水条件の関係から室内試験とは異なった現象が発生しているものと推察される。本稿では岸壁の耐震設計を例に示したが、他の施設についても同様であり、性能規定の工学的指標への変換・想定する作用に応じて性能規定を満足しているか否かを照査する。

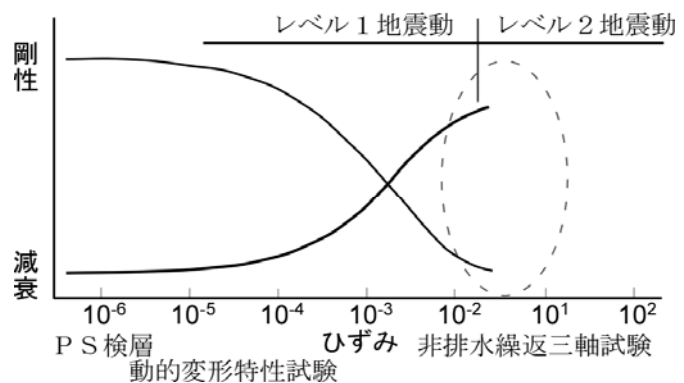


図-2.3 ひずみレベルと動的設計用値概念図

以上のような背景から、性能設計への原位試験の適用性は高いと言え、a)サンプリングによる乱れの無い測定、b)ひずみレベルを考慮した測定、c)応力-ひずみ関係を直接求める計測、d)変形特性を求める測定、e)測定値の空間分布をきめ細かく求める測定等のアドバンテージが挙げられる。但し、従来型の仕様設計手法と比較して、登録確認機関に対する「説明」に努力を要することは否めないが、これらの事例を積み重ねることにより、より合理的・経済的な施設設計が可能になるものと期待される。

参考文献

- 1) 土木学会：包括設計コード(案)～性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 第一版～，2003.3.
- 2) 地盤工学会基準 JGS4001-2004：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則，2006.

3. 性能設計の前提と地盤調査法

土・基礎を含む構造物の構築は、図-3.1に示すように地盤調査から始まり、調査結果を評価しつつ（調査計画と地盤調査）、構造物を計画し、構造物の性能レベルを設定し、構造物の設計が成され（構造計画と設計）、所定の品質管理・施工管理の下、構造物の構築が成される（施工計画と施工）一連の作業の結果である。各段階で定量的で正確な情報伝達が、構造物の品質保証・性能保証の大前提となるとともに、構造物の維持管理の前提条件でもあり得る。

性能設計とは、構造物に求められる性能のみを規定し、その性能を満足するための設計手法は自由とするものである。いわば実構造物の一生の限界状態に関するバーチャルな载荷試験と言える。したがって、設計手法は自由といえども、その前提条件である、施工条件や材料の品質、材料定数の特性値、設計値は、構造解析手法・構成モデルに基づいた明確な定義の基、明示される必要がある。つまり、構造解析手法や構成モデルが異なれば、使用する材料定数の特性値や設計値が異なる可能性があり、設計モデルと設計値は一対一の関係にあることを忘れてはならない。

本章では、構造物の変形量を求める際用いる地盤の変形係数に着目し、地盤の変形係数の現状と性能設計に求められる地盤の変形係数の考え方の方向性を示すこととする。

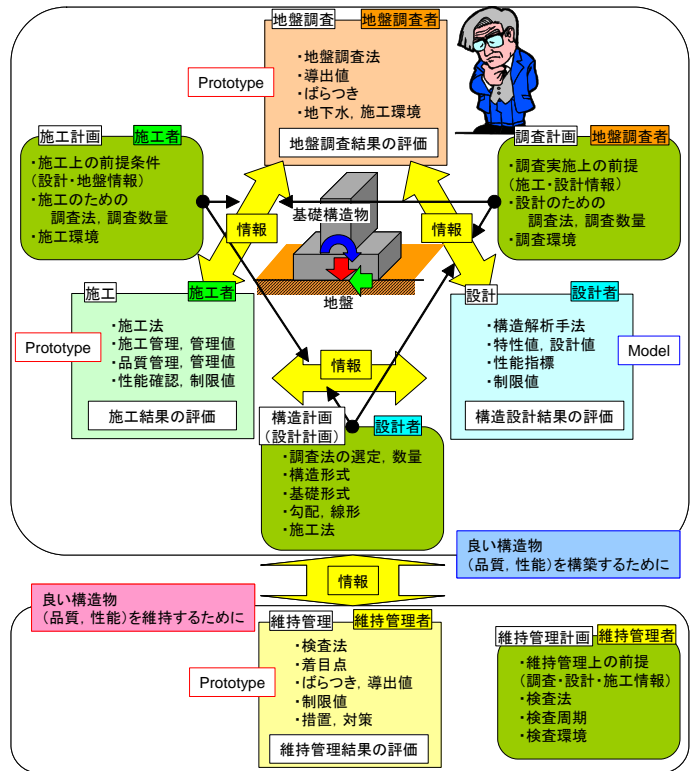


図-3.1 地盤調査，設計，施工，維持管理の流れ

3.1 地盤の変形係数の現状

基礎設計では、地盤調査法別に異なる変形係数 E_x が得られるため、表-3.1に示す地盤調査法に対する補正係数 α を E_x に乗じた αE_x を地盤の変形係数としている。補正係数 α は、他の地盤調査法による変形係数を平板载荷試験の値 E_p と同等になるよう補正するものである。これは、基礎設計に用いる設計地盤反力係数が、平板载荷試験から得られる地盤反力係数 k_{30} から寸法効果を補正して求めているためである。すなわち、地盤調査法の変形係数 E_x から基礎設計に用いる地盤反力係数は図-3.2の左に示す補正を重ねて算出される。これらの補正の考え方は、以下の問題点がある。

表-3.1 補正係数 α

E_x の算定方法	補正係数 α
平板载荷試験 E_p	1
孔内水平载荷試験 E_b	4
一軸圧縮試験 E_{50UC}	4
三軸圧縮試験 E_{50UU}, E_{50CU}	4
標準貫入試験 ($E_N=2.5NMPa$)	1
PS 検層 E_f	0.125

※永久荷重以外は、2倍の値を用いる

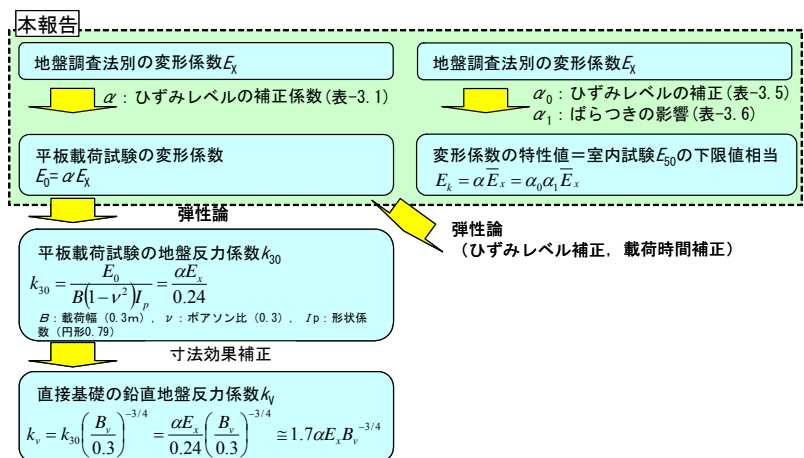


図-3.2 地盤の変形係数と地盤反力係数

課題 1). 同一地点の地盤調査法で補正係数 α を乗じても、地盤の変形係数 αE_X が一致しない。課題 2). 平板载荷試験の基準変位が未定義のため、地盤の変形係数のひずみレベルが不明である。また設計値 αE_X が下限値か？平均値か？不明である。課題 3). 各地盤調査法の精度が設計値に反映されていない。

地盤の変形係数 E_X の統計処理を N 値との比である E_X/N について行った¹⁾²⁾³⁾。ただし、 N 値がゼロのデータおよび N 値 >50 のデータは対象外とした。一例として粘性土の $\log(E_X/N)$ のヒストグラムを図-3.3 に示す。ここで、 E_p : 平板载荷試験, E_b : 孔内水平载荷試験, E_{50UC} : 一軸圧縮試験, E_{50UU} : 非圧密非排水三軸圧縮試験, E_{50CU} : 圧密非排水三軸圧縮試験, E_f : PS 検層から得られた地盤の変形係数 E_X である。これらから $\log(E_X/N)$ が正規分布に近いことがわかる。 $\log(E_X/N)$ の平均値 A および標準偏差 σ から、地盤調査法別の E_X/N の分布中心 $10A$ および分布上下限 $10A+\sigma$, $10A-\sigma$ を整理し、補正した $\alpha E_X/N$ の分布を図-3.4 に示す。現補正係数 α では、地盤調査法のひずみレベルの影響が十分に補正されていない。

3.2 性能設計に求められる地盤の変形係数

図-3.2 に示すように室内圧縮試験から得られる変形係数 E_{50} を変形係数の特性値とする補正係数 α_0 , およびばらつきの影響を考慮する α_1 に細分化して、それぞれの影響を個別に評価することとする。なお、ここでは、平板载荷試験 k_{30} とのキャリブレーションから得られるひずみレベル再補正や载荷時間による補正は議論しない。

ひずみレベル補正 α_0 は、 E_X/N の分布中心を室内圧縮試験 E_{50} に揃えるように逆算することで得られる。 $\alpha_0 E_X/N$ の分布範囲を図-3.5 に示す。各地盤試験法の分布中心が、同一レベルに揃っていることがわかる。

各地盤調査法のばらつきとして標準偏差を考慮した上限側補正 α_{1L} , 下限側補正 α_{1U} を算出し、 $\alpha_0 \alpha_1 E_X$ の分布範囲を図-3.6 に示す。信頼性の低い地盤調査法ほど、変形係数の下限側の特性値 $\alpha_0 \alpha_{1L} E_X$ が小さくなる。その結果、合理的な設計を行うには、ばらつきの小さい PS 検層や三軸圧縮試験などの詳細な調査を実施することが有利となるような設計体系が構築可能となる。

参考文献

- 1) 西岡英俊, 神田政幸, 室野剛隆, 棚村史郎: 地盤の変形係数算定に用いる補正係数と地盤調査法の関係, 第57回土木学会年次学術講演会概要集, III, pp.1359-1360, 2002.9.
- 2) 神田政幸, 西岡英俊, 稲葉智明: 特集N値の活用と留意点 各論 鉄道におけるN値の活用と今後の課題, 基礎工, Vol.31, No.2, pp27-30, 2003.3.
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル編 参考資料1 地盤調査法と地盤の変形係数, 2001.3.

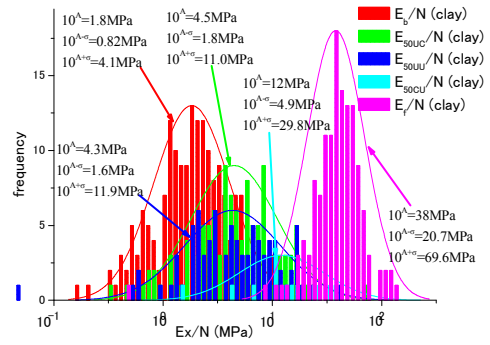


図-3.3 $\log(E_X/N)$ の度数分布 (粘性土) の例

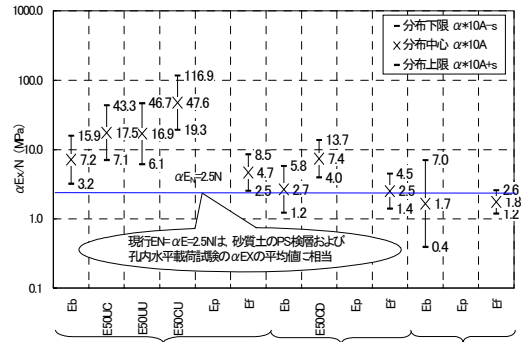


図-3.4 地盤調査法別の $\alpha_0 E_X/N$ の分布範囲

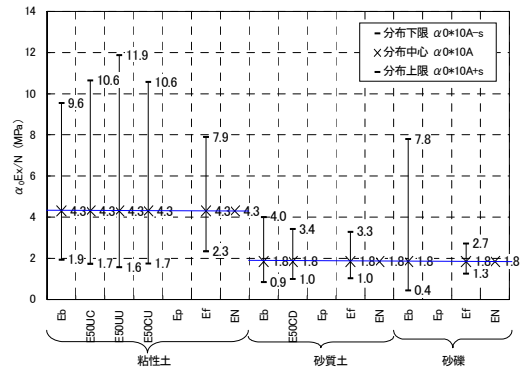


図-3.5 地盤調査法別の $\alpha_0 E_X/N$ の分布範囲

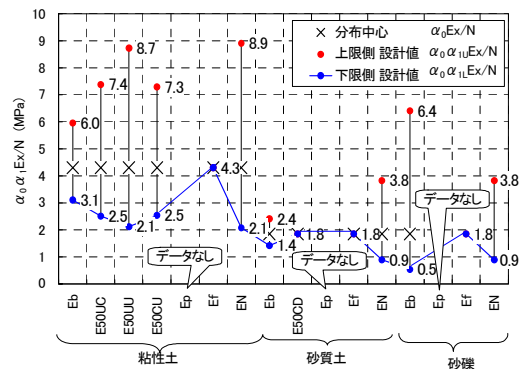


図-3.6 地盤調査法別の $\alpha_0 \alpha_1 E_X/N$ の分布範囲

4. 性能設計に向けたサウンディングの役割

一般にサウンディングとは、標準貫入試験（SPT）やオートマチックラムサウンディング（SRS）に代表される動的貫入試験（DPT）、静的コーン貫入試験（CPT）、スウェーデン式サウンディング（SWS）などの貫入ロッド先端での地盤抵抗を計測する原位置試験を総称する場合が多い。近年の新たなサウンディング技術の開発にはCPTでの多成分化を始め、SRSを軽量化したミニラム¹⁾や携帯を可能としたPanda²⁾など新しい貫入装置が実用化されている。さらに、打撃貫入時の過剰間隙水圧を計測することにより土質区分の推定を可能とした液状化ポテンシャルサウンディング（Piezo Drive Cone³⁾などの性能設計に対応すべく新しい計測項目を試みた装置が実用化されている。本章は、性能設計に向けたサウンディングの役割を述べるとともに、新しいサウンディングの一例としてPiezo Drive Coneを紹介する。

4.1 性能設計に求められる設計用値

性能設計に向けたサウンディングの役割として、本来設計で必要とされる設計値つまり地盤パラメータを如何に適切な信頼度の基で設定するかが問われることになる。性能設計に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（JGS4001-2004）に基づく図-2.2では原位置試験や室内土質試験さらにはモニタリングによって計測された直接的な値は計測値と呼び、その値に1次処理を行って物理量として導き出した値を導出値としている。その後、限界やばらつきを考慮した地盤モデル毎の推定値を設定して、地盤パラメータの代表値となる特性値、そして最後に設計計算において材料係数アプローチを選択する場合には部分係数を適用した設計用値を設定する。この適切な信頼度を基軸とする性能設計法における設計用値の設定に当たっては地盤パラメータ（地盤情報）としての次に示すUnknownを評価する必要がある。それは、地盤パラメータとしての1) 導出値のもつばらつきの幅となる不確実性、2) 空間的な分解能の自己相関距離となる不均質性、さらに、3) 設計計算法におけるモデル化（単純化）で生じる実際との差となるモデル化誤差の3要素である。

これらの地盤パラメータに潜むUnknownを原位置試験で明かにするためには、当然ながら空間的分解能の高い、つまり深度方向にも平面的な広がりについても多くの3次元座標上の地点で計測値を測定する必要がある。図-4.1にはSPTにおける深さ方向1m間隔での計測値： N 値と同地点で実施したPiezo Drive Coneで計測し導出した導出値： N_d 値を比較して示した。同図からも明らかなように1m間隔での原位置試験では地盤の不確実性（ N 値の極大値や極小値の評価）や不均質性（同じ地層区分内のデータのばらつき）の評価が困難であることが明瞭に判る。また、写真-4.1には、建設中の埋立地の上空

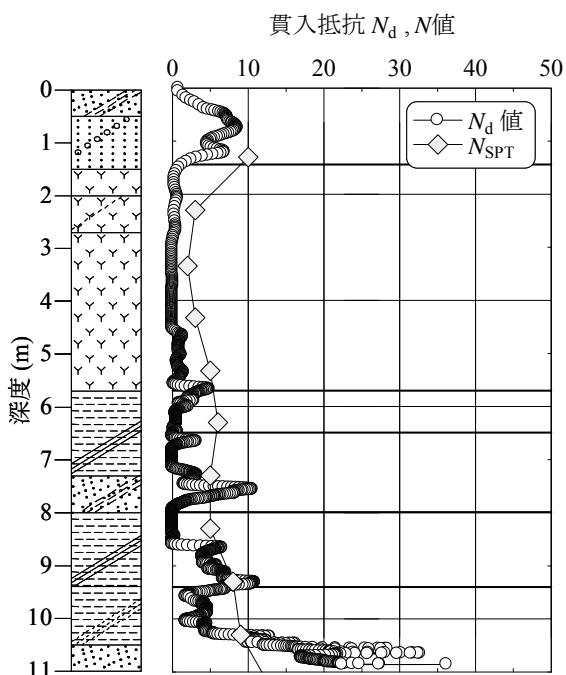


図-4.1 地盤の N 値分布（深度方向）



写真-4.1 建設中の埋立地の空中写真

からの写真を示したが、埋立方法や手順によっても地盤は不均質性を持ち、またそのばらつきの程度となる不確実性も埋立完成した地表面からの数点の調査ボーリングのみでは適切な信頼度が得られないことは容易に想像が出来る。このことから、調査ボーリングを補間するサウンディングの実施が有効となる。なお、礫材などの混入する埋立地では静的に貫入するCPTでは大きな反力が必要となり、貫入が困難となる場合もあり、人工地盤などの不均質性の高い地盤では動的貫入試験の方が有利となる場合も多い。

4.2 性能設計に向けた新しいサウンディングの一例

性能設計に向け、新しく開発されたサウンディングの一例として液状化ポテンシャルサウンディング(Piezo Drive Cone³⁾)を紹介する。図-4.2に装置の概要を示す。Piezo Drive Coneは、打撃貫入するコーン先端位置で過剰間隙水圧を測定する動的貫入試験であり、得られた計測値から液状化判定に必要なN値、細粒分含有率(FC)と地下水位が推定される。最大の特徴は動的(打撃)貫入時の瞬時の計測を行うことで、破壊強度を示す歪み領域における非排水条件下での地盤の抵抗とダイレイタンス特性が推定できることである。このことにより、液状化に関する地盤の過剰間隙水圧の応答特性を直接計測出来る。撃貫入装置には限定しておらずSRSやミニラム²⁾での実施が可能である。これまでのサウンディングの欠点となる貫入深度位置での土質区分の推定が可能となり、性能設計で評価が求められる地盤の空間的分解能の向上に貢献するサウンディングである。写真-4.2にミニラムを貫入装置に用いた場合の実施状況、そして写真-4.3に先端コーンを示す。さらに、図-4.3に土質区分の推定結果例を示すとおり、地盤の不均質性が深度方向に高い分解能で評価出来ていることが明瞭となっている。

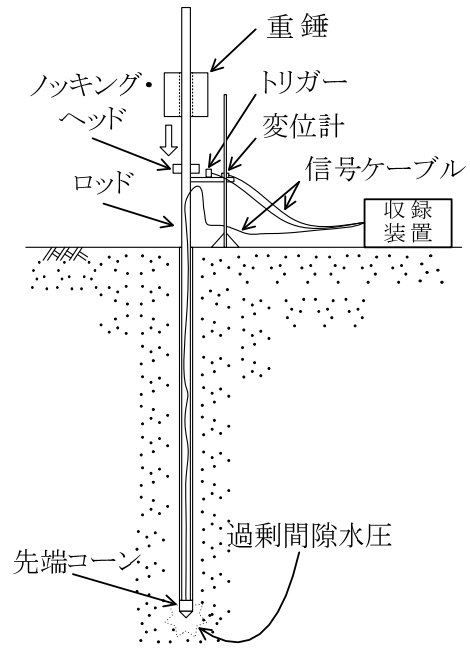


図-4.2 装置の概要

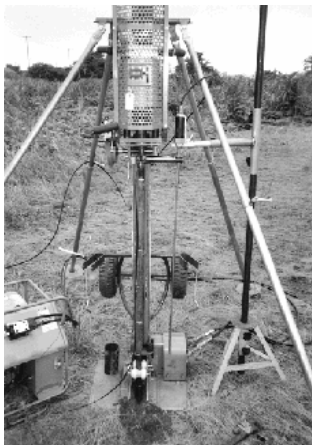


写真-4.2 実施状況
(貫入装置：ミニラム)



写真-4.3 先端コーン

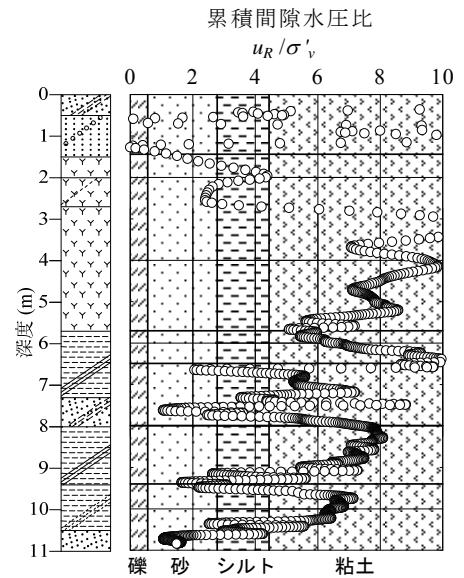


図-4.3 土質区分の推定例

参考文献

- 1) 伊藤義行, 小川重之, 村田芳信, 佐藤将: 小型オートマチックラムサウンディング試験による地盤評価, 第37回地盤工学研究発表会, pp.103-104, 2002.
- 2) 菅原・鈴木・菅原: 小型動的貫入試験機の開発とその利用, 全地連・技術フォーラム'97, 東京, pp.461-464, 1997.
- 3) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而: 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その6 液状化強度—, 第50回地盤工学シンポジウム, pp.1-6, 2005.

5. 性能設計に向けた孔内载荷試験 (SB-IFT)

ボーリング孔内を対象にしたせん断試験は1969年に原位置せん断試験 IST(In-Situ Shearing Test)として誕生し、1970年代に入りその活用が進められてきた。また、1995年頃より孔内の応力解放などの影響を極力排除するセルフボーリング型装置の開発が行われるようになった。現在、性能設計や限界状態設計に向けた動きの中で、サンプリングが難しい地盤の土質定数の信頼性向上などに対して原位置試験の有効性が期待されている。それらの試験方法の中で、SB-IFT(Self Boring Typed In-Situ Friction Test)を紹介し、性能設計へ向けた地盤調査方法としての可能性についてふれるものである。

5.1 SB-IFT の概要

(1) 試験の利点

当試験機は自己掘削機能を備え、孔壁面のゆるみや乱れが少ない状態で試験を行う事が出来る原位置試験機で、地盤から直接地盤情報を得る事が出来るものである。

試験で求められるのは、主に次のものである。

- 1) 原位置の強度定数(c , ϕ), 変形係数(E_b), 杭の周面摩擦力度(f)が得られる
- 2) ボーリングによる孔内変形の大きな土質(応力解放の影響を受けやすい軟弱粘土など)の変形係数(E_b)
- 3) サンプリングが困難な土(砂礫, 珊瑚, 崖錐堆積物)の強度定数や変形係数の測定

(2) 試験法の概要

- 1) ボーリング: 試験深度上端まで予め掘削
- 2) 測定管の設置: セルフボーリングにより測定管を試験深度に設置
- 3) 摩擦試験: 側圧を加えて測定管を地盤に密着させて引き上げて摩擦力を測定
- 4) 側圧変化: 加える側圧を数回変化させて摩擦力の測定を繰り返す
この試験から原位置の強度定数(c , ϕ)が得られる
- 5) 载荷試験: 摩擦試験終了後、再度、側圧を加えて水平方向の载荷を行う
- 6) この試験から変形係数(E_b)が得られる

試験器具の内、測定管と加圧部、セルフボーリングのためのトリコンビットを写真-5.1に示した。ボーリングマシンにセットした変位計と油圧ジャッキの状況を写真-5.2に示した。

5.2 試験の実施例¹⁾

SB-IFTの実施例の一つとして、新北九州空港連絡橋の空港島2A橋台のプレロードによる変形係数増加を考慮した杭基礎の設計事例を紹介する。この事例は「地盤の変形特性」を重視したものである。SB-IFTは変形係数 E_b を求める事ができ、増加後の変形係数をSB-IFTで確認した事例である。

空港島は浚渫粘土による埋立地盤で、自重圧密が進行中の超軟弱な地盤であった。

この埋立地盤上へ2A橋台を構築する際に、側方移動と残留沈下対策としてプレロードが選定された。サーチャージを含めた実盛高は約10mにおよぶ。

プレロードの効果は上記の対策のみならず、結果的には変形係数も増加させる事になる。一般に軟弱地盤内の杭基礎の



写真-5.1 測定管



写真-5.2 測定状況

本数は水平方向の支持力で決まる事が多いため、せっかくプレロードを実施しても、プレロード前の現地盤の変形係数を用いて設計を行うと、杭の本数が過大になる場合が多い。

そこで2A橋台ではプレロード後の変形係数あらかじめ予測して設計を行い、プレロード撤去時にこの予測値の妥当性を確認することとした。

プレロード後の変形係数を求める方法として、三軸圧縮試験(CU条件, 等方状態)を利用し、この試験で得られた変形係数(E_{50} 相当)と圧密圧力 p との関係からプレロード荷重を考慮して予測した。

プレロード後の変形係数の増加を期待した場合と無視した場合の杭本数の比較結果は次のとおりである。

- ・プレロード効果見込む：40本
- ・プレロード効果を無視：53本

プレロード効果を期待した場合、杭の必要本数は13本減少し、17%のコスト縮減が可能となる結果である。

沈下がほぼ収束した時期とプレロード撤去時に一軸圧縮試験の他に、プレシオメータ試験やSB-IFTを行った。プレロード撤去前後の変形係数を図-5.1に示した。

図-5.1では孔内水平載荷試験の変形係数 E_p を除いては、プレロードを撤去した場合でも予測値よりかなり大きな値を示す事が分かる。軟質な粘土地盤では、孔内水平載荷試験は応力解放などの影響を受けやすいようである。

SB-IFTと一軸圧縮試験から求めた変形係数は、深度GL-5～8m付近でほぼ $E=15,000 \text{ kN/m}^2$ 前後にプロットされている。

ここで、プレロード撤去後の変形係数の最低値に近い $E=10,000 \text{ kN/m}^2$ を用いて現設計本数で側方変位の照査を行うと、杭の変位は0.5mmとなり、十分に安全性は保たれると言う結果であった。

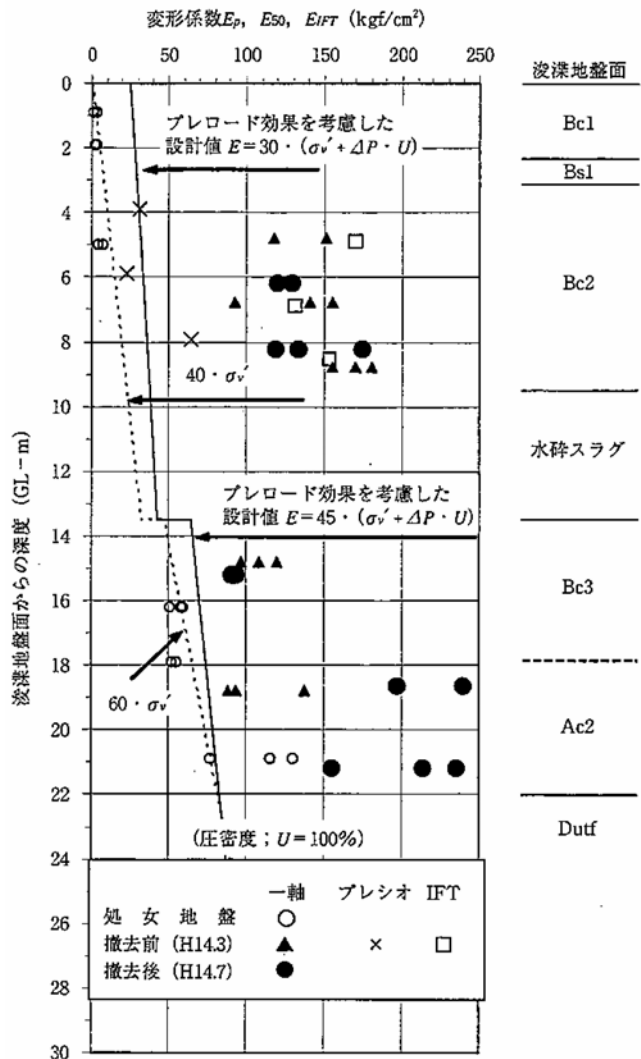


図-5.1 プレロード撤去前後の変形係数

5.3 今後の性能設計へ向けて

今後、合理的で経済的な設計・施工を進めるに当たり、土質力学に基づいた設計方法と効果的な地盤定数の決定が重要なポイントになるものと考えられる。それには設計に必要な熟練した設計技術者と調査技術者が対等の立場で設計方法を選定し、それに必要な地盤定数を得るための地盤調査・土質試験の項目を実施し、予測結果については現地で載荷試験、動態観測を実施して確認を行い、その後の設計に反映させていく事が必要であると考えられる。このような方法は、今後の性能設計法や限界状態設計法への具体的な取り組みの第一歩と考えられる。

新北九州空港連絡橋の事例では、SB-IFTの試験結果を直接設計に反映させたものではなく、確認試験としての位置付けで他の試験データとの比較を試みたものである。その結果は十分に設計に反映させる事が可能と考えられ、次の性能設計へ向けてSB-IFTには十分な期待が持てると考えられる。

参考文献

- 1) 落合英俊, 安田進, 前田良刀, 藤原常男, 田上裕: 埋立地に基礎をもつ橋脚・橋台の事例, 基礎工, VOL.31, NO.5, pp.59~62, 2003.

6. 性能設計に向けた多重セル型自動孔内水平載荷試験

地盤構造物への性能設計法の導入には、従来の N 値を主体とした地盤調査法から脱却し、数値解析等を用いた変形量の推定に資する地盤調査法の枠組みの刷新と、手法の高度化が必要とされている¹⁾。

このような背景の中、何れの地盤にも対応でき、変形特性や液状化強度比などを原位置で計測可能とする「多重セル型自動孔内水平載荷試験」の技術開発を、(独)港湾空港技術研究所、(株)ダイヤモンドコンサルタント、川崎地質(株)、(株)マスタ技建の4機関が行なっているため、この新技術について紹介する。

6.1 現行の孔内水平載荷試験法と問題点

現行の孔内水平載荷試験法は「プレボーリング型」と「セルフボーリング型」に大別できるが、大半は1室型プローブの「プレボーリング型」であり、また制御も含めた自動測定型は普及していないのが現状である。これらの試験法の問題点は、手動測定型であることとボーリング孔壁の乱れの影響を受けて、地盤定数の測定結果と予測値のばらつきが相対的に大きくなるのが指摘されている²⁾。

したがって、個人差が入りにくい自動制御/測定型に移行させ、同時に削孔時の孔壁の乱れを軽減させることが、この種の試験法の評価を高め、有効活用されることにつながると云えよう。

6.2 多重セル型自動孔内水平載荷試験装置の特徴

- 1) プローブは連結された5つのセル(図-6.1)より構成され、この内II、IVセルが動的繰り返し荷重を孔壁に作用させて、圧力～変位～間隙水圧の関係を自動計測する試験装置である。
- 2) 自動測定型のため人為的誤差が混入しにくく、特に中～大ひずみ領域での変形特性と液状化強度などが計測可能である。
- 3) 泥水の比重を高めて応力開放を軽減し、かつ改良されたビットとコアチューブを使用して孔壁の乱れを軽減することで、試験精度の向上が期待できる。
- 4) セルフボーリング型の孔内水平載荷試験機に比べて、安価、操作も容易であり、汎用性の高い試験装置である。

6.3 改良ビットによる孔壁乱れの軽減策

ボーリング孔壁の品質を如何に確保するかは現状としては決定的な解決策はない³⁾。ここでは孔壁の乱れの要因を図-6.2に、乱れを軽減する改良ビットを図-6.3にそれぞれ示す。

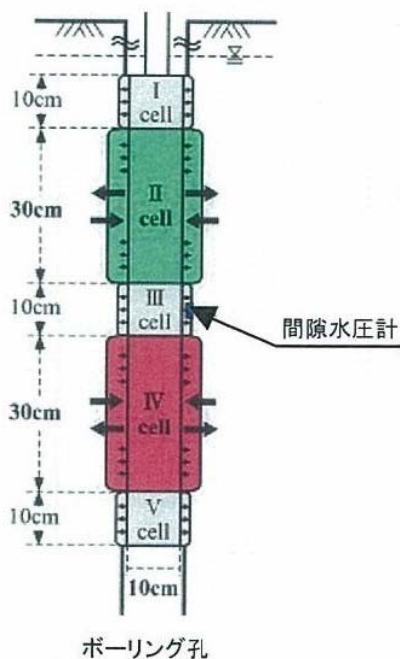


図-6.1 5セル型プローブ

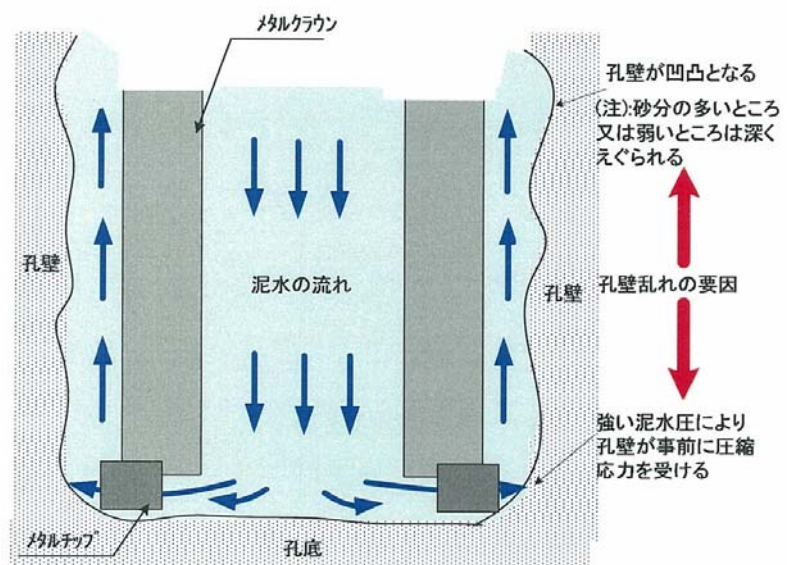


図-6.2 孔壁の乱れの要因

6.4 各種地盤定数の判定法

多重セル型自動孔内水平載荷試験より得られる地盤定数については、現在、理論的解釈を含め検討段階であるが、以下のような暫定判定法で試行している。

- 1) 変形係数はループ接線の一定勾配より求める。
- 2) せん断弾性係数は図-6.4 に示した各ループの平均的傾きとひずみとの関係で求める⁴⁾。
- 3) 補正せん断弾性係数と半径ひずみ振幅との関係を図-6.5 に示す。
- 4) 液状化強度比は過剰間隙水圧の上昇とセルの繰返し振幅圧、これに連動して生ずるIIIセル周辺孔壁部の変位による破壊現象の確認から判定している。
- 5) 静止土圧もリフトオフ法により求まる可能性がある⁵⁾。

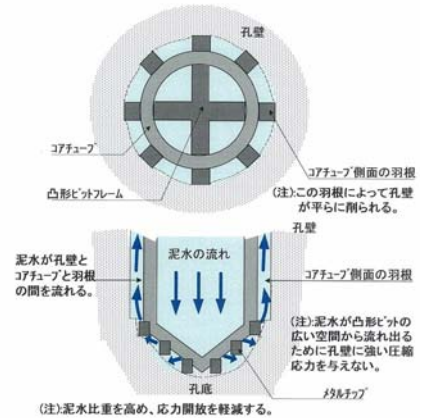


図-6.3 孔壁の乱れを軽減する改良ビット

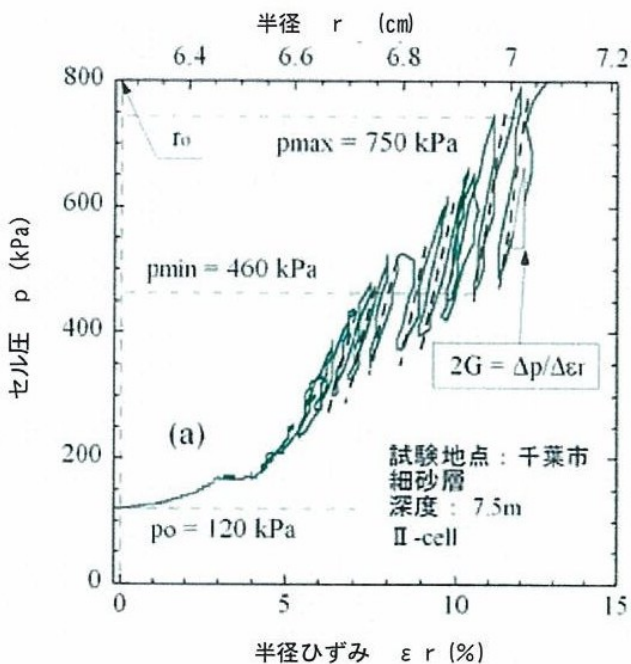


図-6.4 圧力～ひずみ関係図

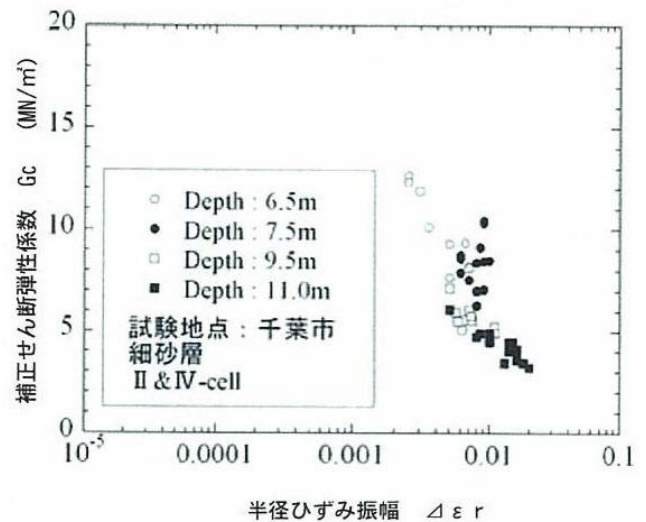


図-6.5 補正せん断弾性係数～半径ひずみ振幅図

6.5 あとがき

多重セル型自動孔内水平載荷試験は、変形量を求める性能規定型設計に必要である中ひずみ領域から大ひずみ領域の変形特性を求めることができ、また液状化強度を求めることも出来るために、経済的かつ効果的な原位置試験と考える。

一般に孔内水平載荷試験は世界的にも広く利用され、ISO 規格にも組み入れられつつある。今後は共通の課題として自動制御／測定化と共に、孔壁の乱れ軽減削孔法の有効性を検証するなどして、孔内水平載荷試験の評価を高め、地盤工学の向上に役立てたいと考えている。

参考文献

- 1) 「首都圏直下地震に対する地盤工学からの提言」策定委員会：首都圏を直下地震から守るために—地盤工学からの提言—，地盤工学会関東支部，pp.1-8，2005。
- 2) 時松孝次：テクニカルセッション1c.原位置試験，土と基礎，Vol.54，No.3，pp.25，2006。
- 3) 関東地質調査業協会：ボーリング孔を利用した原位置試験の技術マニュアル，pp.106，1995。
- 4) 益田和夫他：5連セル型プレッシャーメータによる砂質土の動的性質の推定方法，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.454～457，2006。
- 5) 地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書—平成18年度版—，pp.200，2006。

7. FWD 試験が土構造物の性能設計に果たし得る役割

土構造物の性能設計では、設計時に土構造物の強度と変形性および破壊確率を想定する。しかし、盛土構造物の施工時での締固め管理では乾燥密度 ρ_d による間接管理が主流であり、設計時に設定された強度と剛性が達成されているかで施工管理をしていない。この結果、設計時で想定される土構造物の性能(変形性・強度)と、実際の土構造物の性能とが一致しない可能性が出てくる。すなわち、土構造物の性能設計に対応するためには、地盤の剛性・強度を現位置で精度良く照査し、施工管理に活かすことが重要となる。

7.1 FWD 試験

FWD 試験(Falling Weight Deflectometer Test)は平板載荷試験と同様な剛な平板を用い、重錘の自由落下により平板に載荷重を加える載荷試験である。FWD 試験は、盛土構造物の地表面付近の地盤剛性を素早く、簡便に計測できる特徴を持つ。今日まで FWD 試験は、主に舗装の構造評価に用いられてきた¹⁾。これは、剛平板を介して重錘によって衝撃荷重を作用させ、応答たわみを計測する事によって舗装の損傷箇所を評価する方法である(図-7.1)。

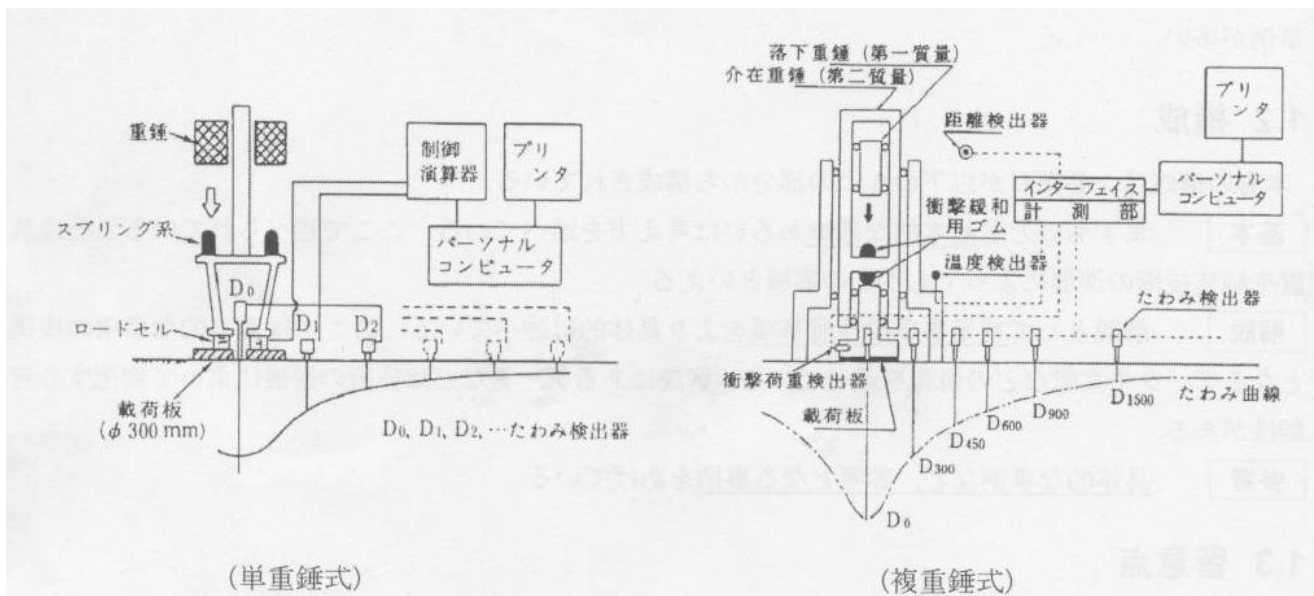


図-7.1 舗装の構造評価法としての FWD 試験¹⁾

7.2 性能設計に向けた FWD 試験の利点

FWD 試験は簡便に地盤剛性を算出する直接載荷試験としても有効な試験法となり得る。直接載荷試験として FWD 試験を用いる場合には平板の沈下量のみを計測すれば良いため、従来の舗装のたわみ評価と比較して試験機はコンパクトになる(図-7.2)。平板載荷試験と比較すると、直接載荷試験としての FWD 試験は以下の様な利点を持つ；

- 1) 反力装置を必要としないため、非常に短時間で計測できる。この結果、FWD 試験は同一時間で多数点の計測が出来る。
- 2) 試験機が小型であるため、移動性が良い。現在では狭隘な箇所での計測を可能にした小型 FWD も開発されている²⁾。
- 3) 広大な建設現場への適用に際しては、FWD 試験の載荷・計測を全自動化し、さらに GPS を搭載する事によって計測点の記憶も同時に行うことによって、計測作業の迅速化・高度化も行われている³⁾。

直接載荷試験として盛土の地盤剛性を計測・評価し、盛土の締固め管理とその評価に反映させることは、土構造物の性能規定化に結びつく。盛土構造物の締固め管理とその評価に対して、直接載荷試

験として FWD 試験を用いる事による利点を以下にまとめる；

- A) 従来の ρ_d による締固め管理法に加えて FWD 試験による地盤剛性値を併用することにより、力学パラメータで対象土構造物の性能評価が出来る。
- B) 簡便で素早く原位置試験が出来れば盛土の三次元的な剛性分布を照査でき、さらに計測精度が高いほどバラツキ評価の精度が向上する。FWD 試験は簡便で素早く地盤剛性を計測出来るため、転圧層毎に地盤剛性を計測することによって盛土の三次元的な剛性分布を照査することが可能である。

一般的に FWD 試験結果は同寸法の平板載荷試験結果と一致しない事が多い。この主要因は、急速載荷試験である FWD 試験結果と緩速載荷試験である平板載荷試験では、載荷速度の違いによる地盤材料の応答特性が異なっているためである⁴⁾。これは大別すると、a) 載荷速度の違いによる盛土材の変形強度特性における載荷速度依存性と、b) FWD 試験の急速載荷時の載荷重の地盤内伝播に伴う応力と変位間の位相差(動的応答)、の異なる 2 要因である。図-7.3 に砂地盤に対して FWD 試験と平板載荷試験結果を比較した結果を示す。要因 b) の影響は FWD 試験の衝撃緩衝材の硬さを調整する事でその影響をほぼ取り除く事が可能であり、さらに平板載荷試験と同等な載荷速度条件となる様に FWD 試験で計測された平板圧力を補正する事で要因 a) の影響も取り除くことが出来る。

7.3 今後の展望

平板載荷試験・FWD 試験共に平板と地盤の接触面のベッディングエラーへの対応や、他の原位置載荷試験法で算出した地盤剛性の関係など(ひずみレベルの違いが地盤剛性に与える影響)などについて検討する必要がある。上述の問題を解決することによって、土構造物の性能照査の精度向上に結びつくと考えられる。

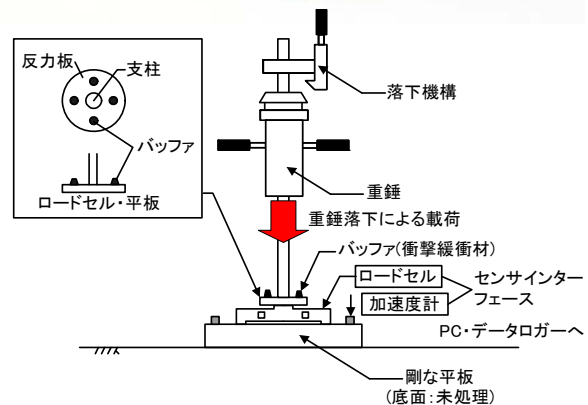
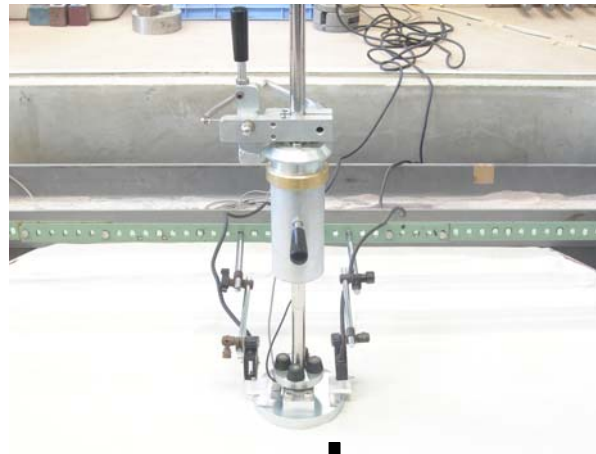


図-7.2 直接載荷試験としての FWD 装置の概要²⁾

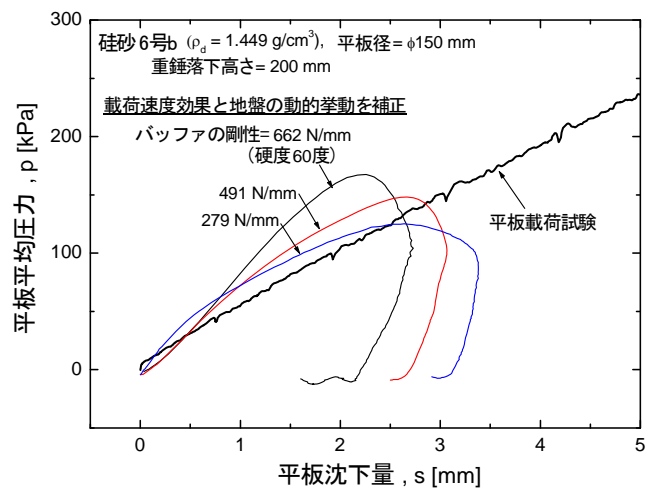


図-7.3 FWD 試験の例⁴⁾

参考文献

- 1) 木学会舗装工学委員会編：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリー-2，2002。
- 2) 関根悦夫，鴨智彦，阿部長門，丸山暉彦：重錘落下試験による鉄道盛土の締固め管理手法，土と基礎，Vol.48，No.4，pp.13-16，2000。
- 3) 川崎廣貴，長澤正明：全自動地盤剛性評価システム(SFWD)の計測法と適用事例，基礎工，Vol.34，No.8，pp.74-80，2007。
- 4) 増田直哉，龍岡文夫，平川大貴，川崎廣貴，長澤正明，M.S.A.Siddiquee，：FWD 試験と平板載荷試験により評価された地盤剛性の関係，第3回地盤工学会関東支部地盤工学研究発表会，pp.386-390，2006。

8. 設計から動態観測・圧密管理における地盤調査の役割 —地盤改良を例として—

粘土地盤を対象とした圧密促進のためのバーチカドレーン（以下、VD）を併用する盛立・覆土工事では、圧密沈下が性能設計の対象となる。すなわち、ある施工期間において、仕上り高さや残留沈下などの整備水準を満足するように、VDの打設間隔と覆土厚さを設定するからである。したがって、設計の妥当性は、ある期間後の沈下が設定した性能を満足しているかどうかである。しかも、その性能が供用前に評価できれば、供用前に対策できる可能性もあり、そのメリットは大きい。

そこで、本文では、浚渫粘土埋立地を有効利用する際に用いられるVDを併用する盛立の設計・施工・動態観測において、性能設計を検証するための地盤調査や室内試験の役割とその実際例を示す。

8.1 浚渫粘土埋立地における圧密促進のための地盤改良設計の考え方と評価方法

ポンプ浚渫された海底粘土で海面を埋め立てると、粘土粒子は浮遊・凝集して、海底にゆるく堆積していく。このように堆積した浚渫粘土層は粘土粒子自体の重さで沈下していくが、透水係数が小さいことから沈下は時間遅れを生じる。次々と浚渫土が投入されると、堆積土砂は徐々に積み重なり、粘土層は厚くなるが、未圧密状態であるため、その後圧密沈下が長期に及ぶ。そのため、VDを打設し、排水距離を短くして、早期に圧密を終了させる。また、覆土厚は当初計画されている標高となるように、覆土の自重を考慮して盛立厚さを決定する。これらを算定するためには、対象とする地盤の層構成と圧密特性を把握する必要がある。しかしながら、浚渫粘土埋立地盤は不均質であり、それを把握することは非現実的である。そこで、均質な地盤を想定して、概略の地盤改良設計を行い、動態観測の結果からローカルな挙動を把握して、それを踏まえた予測解析で、覆土厚さや圧密放置期間などを調整して行く観測施工が合理的である。この観測施工における地盤の設定、地盤改良設計、動態観測、各ステージでの地盤調査の組合せの一例¹⁾を、図-8.1に示す。前提は、浚渫土埋立中に浚渫粘土埋立解析から地盤状態と圧密定数を設定し、覆土による沈下予測（初期予測）が行われ、概略の地盤改良設計（打設間隔と覆土厚さ）が行われていることである²⁾。

1) 対象地盤の性状を把握するための地盤調査（1st 調査）

実施時期は、浚渫粘土投入完了後のサンドマット敷設後で、CPT装置が容易に搬入できる条件が実務的となる。行う調査は、CPT、攪乱試料の採取であり、介在している砂層厚の推定と含水比分布を求めることが目的となる。なお、不攪乱試料が採取できるのであれば、圧密試験と一軸圧縮試験を行う。

2) 圧密予測の修正

1)で求めた砂厚を考慮して、先に行った初期予測を修正する。

3) コーンファクター等を決定するための地盤調査（2nd 調査）

不攪乱試料が容易に採取できる程度に圧密した状態で行う調査である。目的は、コーンファクター N_{kt} ならびに強度増加率 m を求めることであり、CPTと不攪乱試料に対する圧密試験と一軸圧縮試験を行う。

4) 動態観測結果による圧密定数の同定と圧密沈下予測の修正

適切に設置した沈下板の結果と、2)の予測を比較する。予測値が実測値に合致しない場合、実測値から圧密定数を同定し、それをを用いた予測を修正予測とし、所定の性能を有する状態がいつになるのかを推定する。

5) 予測の検証のための地盤調査(3rd 調査)

沈下板により同定した圧密定数は、地盤の沈下のみであり、所定の沈下量に達したとしても、内部状況がすべて同じような圧密度になっているかは不明である。そこで、内部状況を検証するための地盤調査が必要となる。そのツールとしてCPTを用いる。その原理は有効鉛直応力に相当するせ

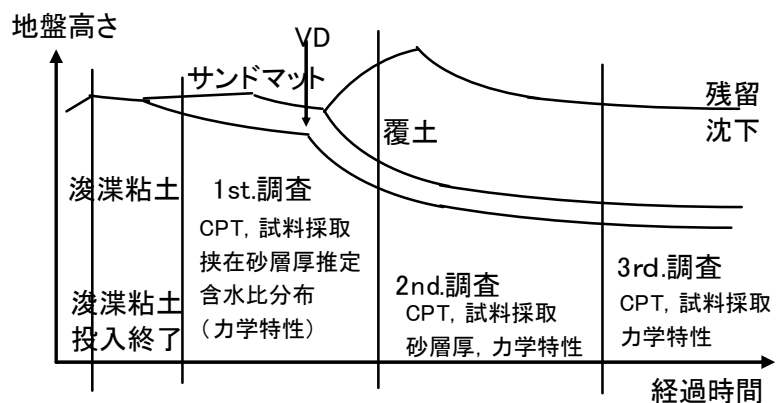


図-8.1 建設工程と提案する調査の実施時期¹⁾

ん断強さでチェックするものである。そのため、 N_{kt} と m を2nd調査までに把握しておくのである。

8.2 新北九州空港の事例

図-8.2は、1st調査(89地点)で求めた介在する全砂層厚さの分布と動態観測位置図¹⁾である。

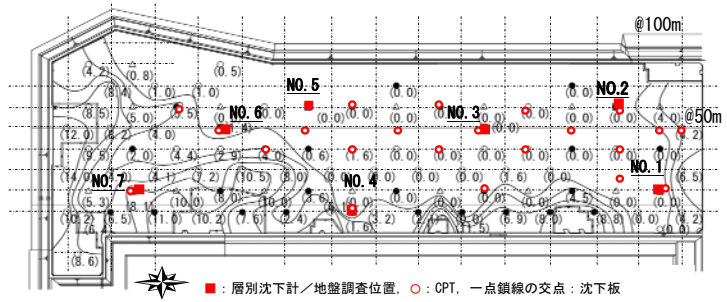
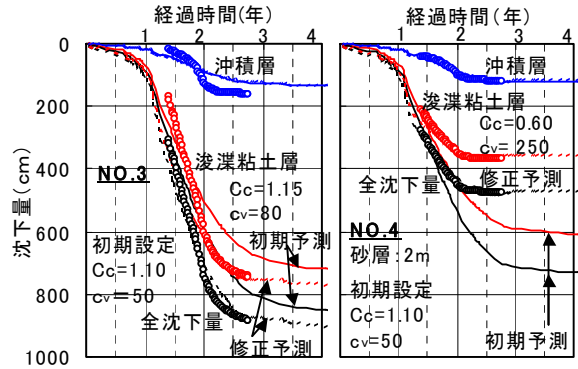


図-8.2 CPTによって推定された介在砂層厚さの分布と動態観測位置図¹⁾

VDを併用した覆土の圧密沈下の修正予測は、各位置における砂層厚さを考慮した地盤構成の下、動態観測結果から同定した圧密定数を用いた。その結果を図-8.3¹⁾に示す。

No.3地点では初期予測よりも沈下が遅れた場合、No.4地点は圧密が想定よりも早まった場合である。ここで、初期予測とは、浚渫粘土埋立中に実施した地盤改良設計で予測した沈下曲線²⁾であり、両地点の圧密定数は同じであるが、異なる仕上り高さのため、沈下量が異なっている。



(a)No.3地点 (b)No.4地点

図-8.3 動態観測結果と修正予測の例¹⁾

覆土施工に行った2nd調査では、圧密試験と一軸圧縮試験から、 m と N_{kt} を0.3と12と決定した。これらを用いて、沈下で設定される圧密度80%（有効応力では65%）となる地盤内確認調査時期を定め、3rd調査を行った。その結果としてのNo.3地点の予測 s_u 分布とCPTの実測結果²⁾を図-8.4に示す。予測値はほぼ様な分布であるが、実測値は浚渫粘土層上部で小さく、有効応力の増加は様でないことがわかる。他方No.4では、圧密がほぼ終了して時点であり、そのときの予測 s_u 分布とCPTの結果が一致していた¹⁾。

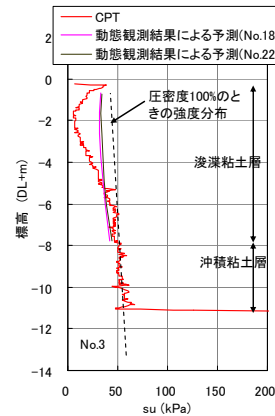


図-8.4 3rd調査での推定 s_u ¹⁾

図-8.5は、3rd調査でNo.3地点から採取した不攪乱試料の q_u と p_c の分布¹⁾である。図中の直線は図-8.4に示す3rd調査実施時の圧密度から算定した予測値である。このように、CPTから推定した s_u は実測した s_u 分布に合致し、用いた手法が妥当であったことがわかる。

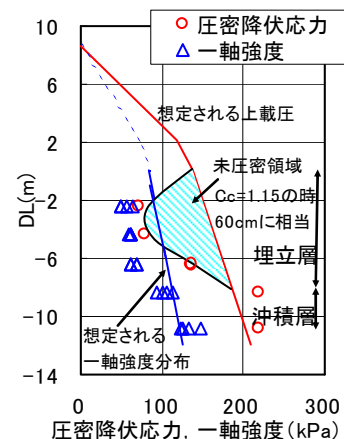


図-8.5 3rd調査での q_u, p_c 分布¹⁾

8.3 まとめ

性能設計では予測した挙動を検証することが重要であり、妥当な手法の提案が望まれる。本文では、VDによる圧密沈下を対象とした性能設計の評価を効果的に行うための地盤調査ならびに室内試験を示し、その妥当性を新北九州空港プロジェクトで検証した。本プロジェクトでは、多くのCPTや沈下板による観測施工が行われ、ローカルな圧密沈下挙動をきめ細かく把握したことが、高精度の予測につながったと思われる。

参考文献

- 1) 吉本靖俊, 吉田秀樹, 池田高則, 木村道夫, 中野則夫, 山崎真史, 村川史朗, 吉福司, 片桐雅明, 寺師昌明: 浚渫粘土埋立地盤の圧密管理に対するCPTの適用, 第40回地盤工学会研究発表会概要集, pp.1025-1026, 2007.
- 2) 吉本靖俊, 吉田秀樹, 東野忠伸, 片桐雅明, 寺師昌明: 新北九州空港建設を支えた浚渫粘土埋立予測解析, 基礎工 2006年7月号, pp.45-47, 2006.