

原位置せん断・摩擦試験による周面摩擦力・変形係数の測定結果と 実杭の載荷試験結果との比較と考察

A Comparative Investigation of the Surface Friction and Modulus of Deformation Measured by In-Situ Friction Tests and the Results Measured by Pile Loading Tests

松方健治 Kenji MATSUKATA ((株)ドゥーユー大地)
 中谷隆生 Takao NAKATANI ((株)ドゥーユー大地)
 徐 光黎 Guangli XU (中国地質大学工学部土木工学研究科)
 土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)

原位置で、ボーリング孔を利用して、杭などの設計に用いる軸方向摩擦力、地盤の変形係数などを推定することを主な目的とする試験装置である SBIFT(Self Boring In-situ Friction Test)を開発してきた。本稿では、SBIFT装置の概要を示した。また、高速道路の高架橋の設計において、合理的な基礎形式を採用するために行った実杭の載荷試験の実測値とSBIFTによる地盤定数を比較検討し、SBIFTが原位置において高精度で地盤の強度、変形特性を把握できることを実証し、本試験法の実務への適用性について検討した。

キーワード：SBIFT、周面摩擦力、地盤反力係数、換算係数 α (IGC：C-8, D-6, E-4)

1. はじめに

地盤工学において地盤の強度・変形定数をいかに評価し、実務へ適用するかは最も重要な課題である。地盤定数を適切かつ積極的に設計に取り入れることで、コスト面を大幅に改善できる可能性がある。地盤定数を求める方法は、1) 室内要素試験及び、2) 原位置試験の二つに大別される。

室内要素試験は排水条件、ひずみ条件、拘束応力条件などの制御が可能で、高い試験精度と再現性が確保できるものである¹⁾。しかし、室内要素試験の結果を直接実務に反映できない場合も多い。特に杭の周面摩擦力などを代表とする構造物基礎の地盤の強度・変形定数の決定の際には注意を要する。地盤と構造物の接触面における境界条件により発現される地盤の強度が変化すること、室内要素試験では試料のサンプリング過程における応力解放や機械的攪乱の影響を避けることができないこと、からである。一方、地盤の原位置試験としては、標準貫入試験、コーン貫入試験、ベーンせん断試験、孔内水平載荷試験などが実務に用いられている¹⁾。原位置試験は、原位置で地盤の力学特性を直接測定できるためサンプリング時の攪乱の影響がない利点があるが、土要素の応力、ひずみ、間隙水圧などが一様でなく、試験時における地盤の力学的な条件がはっきりしないため結果の解釈が問題となるケースもある^{2)~5)}。特に、現在実務に多用されている標準貫入試験のN値を用

いた種々の地盤定数推定は、多くの構造物の載荷試験と比較した結果に基づく経験的方法としての性格をもっているが、地盤力学的挙動を詳細に評価することに用いるには限界があると考えられる⁶⁾。以上のように、室内要素試験及び原位置試験にもそれぞれ得失があり、その結果を実務に適用するには多くの技術的課題があるといえる。一方、最近の巨大地震による構造物の被災などの経験から、構造物の基礎の挙動を大変形領域まで合理的に評価し、経済的な構造物を建設する重要性が認識されてきており、これらに対応できる新たな地盤の設計定数の評価方法が求められている。

このような背景から、著者らは、原位置で杭などの設計に用いる軸方向摩擦力、地盤の変形係数などを直接推定する試験方法であるSBIFT(Self Boring In-situ Friction Test)を開発してきた^{7)~11)}。本試験の最大の特徴は、既往の原位置試験の欠点である試験地点での応力解放問題を解決するため、調査深度までセルフボーリング型ビットを用いて削孔し、その状態で試験を行うことができることである。SBIFTは、杭などの軸方向摩擦力を測定するのが第一の目的であるが、装置表面粗度を変化させれば地盤の強度定数の評価も可能であり、さらに試験法の特徴から地盤の変形係数も求めることができると考えている。

本稿では、軟弱地盤地帯に計画される高速道路の橋梁の基礎構造について、経済的で合理的な基礎構造を選定する

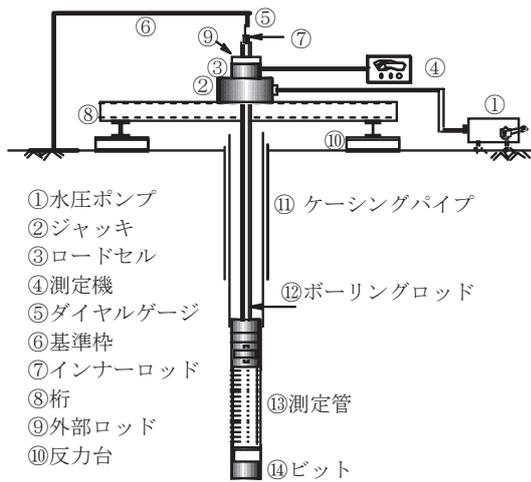


図-1 SBIFT 装置の概要¹²⁾

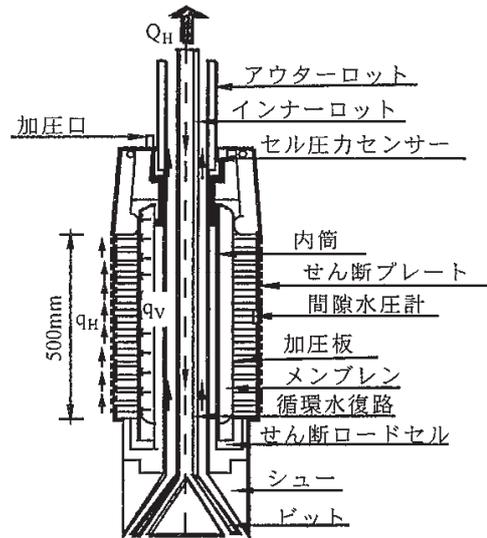


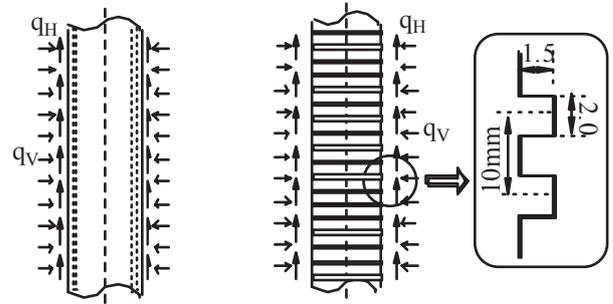
図-2 測定管の概要¹²⁾

ことを目的として実施された杭の載荷試験結果と SBIFT 測定値による設計結果を比較検討し、SBIFT の実務への適用性について検討を行った。

2. SBIFT 試験装置の概要^{7)~12)}

図-1 は SBIFT 装置概要図である。図のように SBIFT 装置は、ボーリングロッドなどの自己掘進システムと、測定管システム、ジャッキ・反力台などの載荷加圧システム及び計測システムで構成されている。自己掘削システムは、応力解放の影響を小さくするために導入したもので、試験位置直前の深さまで径 116mm のケーシングを打設し、試験区間ではビットによる自己掘削方式（径 86mm）に切替える。図-2 に測定管の概要図を示すが、測定管は主に円筒、加圧板、メンブレン及びせん断プレートで構成され、先端にせん断型ロードセルと間隙水圧計が取り付けられている。測定管では、地上から注入された高水圧によりゴムスリーブを膨張させることにより、ボーリング孔の壁面に垂直応力を加える。さらにインナーロッドによって壁面水平方向にせん断力を加える機構となっている。

実際の基礎躯体の表面の粗滑の程度は使用材料や施工方法により異なるため^{13)~15)}、SBIFT では地盤との接触面の粗度が変化できるように工夫し、図-3 に示すタイプ I とタイプ II の 2 種類の測定管表面形状が用いられている。タイプ I は表面がスムーズな形状で鋼管杭のような境界条件に対応する。一方、タイプ II には図に示すように明確な凹凸を設けてあり、この場合得られる強度は地盤のせん断強度に近くなると考えられる。なお、本稿で検討する原位置測定データは、タイプ II の表面形状を用いて測定したものである。



(a) タイプ I :スムーズ (b) タイプ II :ラフ

図-3 測定管表面形状のタイプ¹²⁾

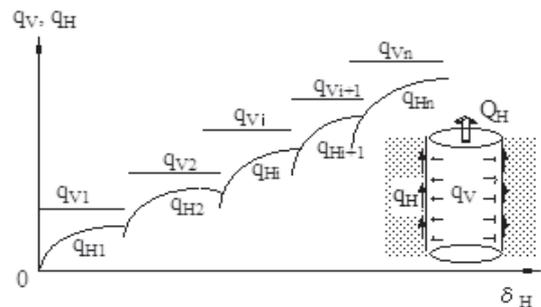


図-4 載荷システム概念図¹²⁾

表-1 SBIFT 装置の仕様¹²⁾

寸法	載荷能力
測定管長さ $L=300\text{mm}$	最大垂直応力 $q_{v\max}=1.5\text{MPa}$
測定管直径 $D=86\text{mm}$	最大せん断応力 $q_{H\max}=0.65\text{MPa}$ 各段階の最大せん断変位
プレボ・リンク径 $\phi=116\text{mm}$	$\delta_{Hi\max}=20\text{mm}$
セルフボ・リング径 $\phi=86\text{mm}$	最大測定深さ $Z_{\max}=50\text{m}$

図-4 は載荷システムの概念図である。SBIFT 試験の荷重載荷は、垂直応力 q_{vi} を多段階で載荷し、その値を保持したまま壁面平行応力 q_{Hi} を変位制御方式で載荷し、各 q_{vi}

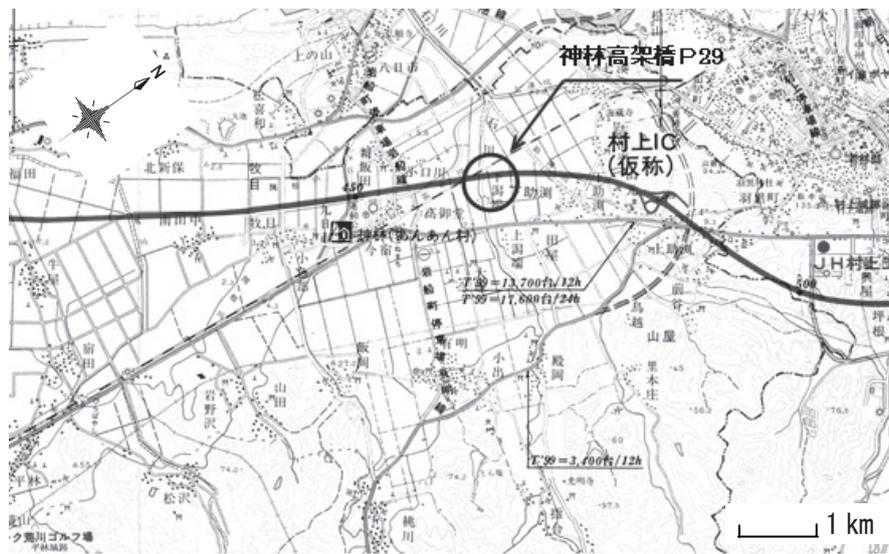


図-5 神林高架橋位置図

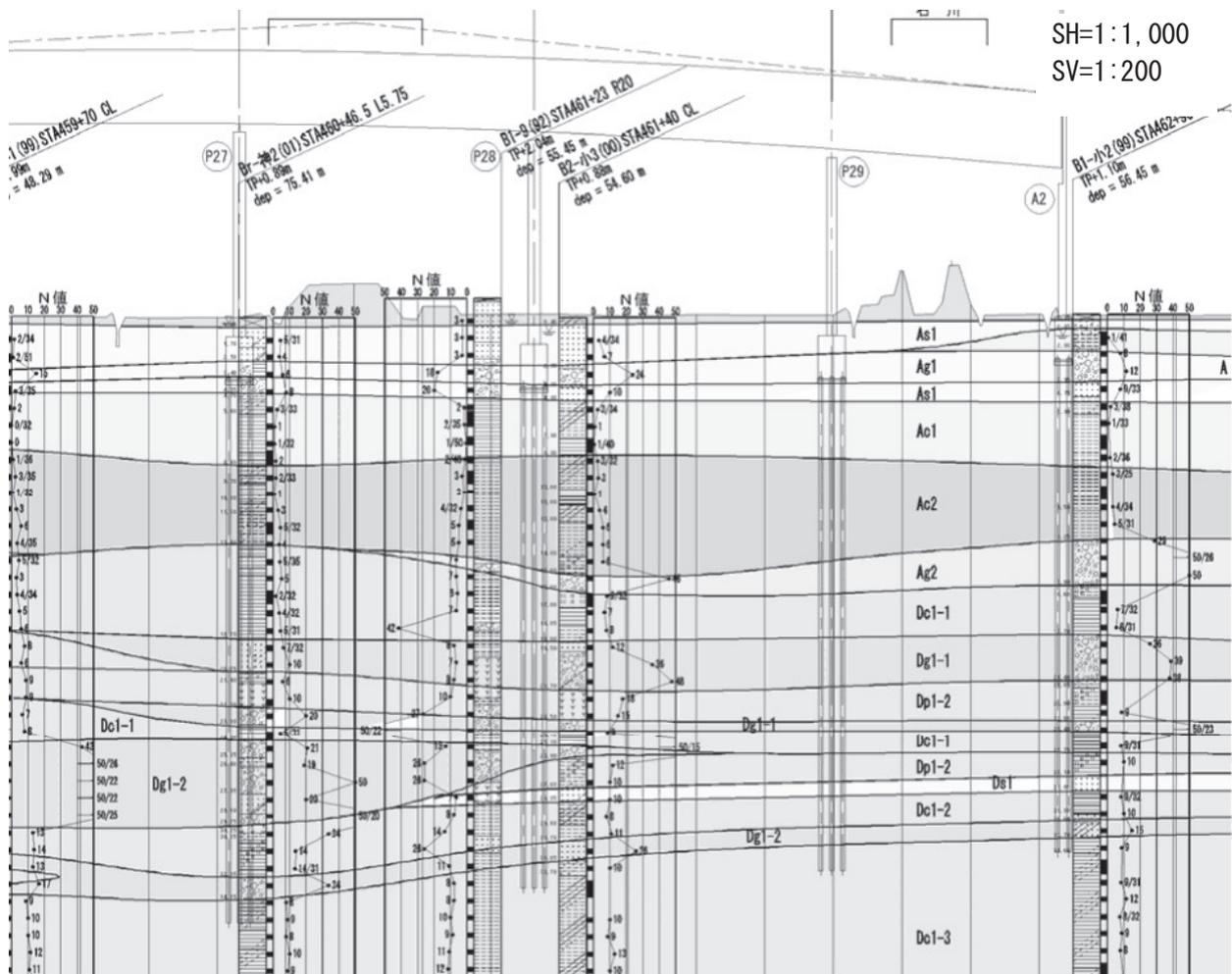


図-6 高架橋付近の土質縦断面図

に対する q_{Hi} のピーク値が確認された後、次の段階の q_{vi+1} と q_{Hi+1} に移行するという方法で行った。これにより垂直応力 q_{vi} と平行応力 q_{Hi} の関係が得られる。表-1 には本稿で検討した SBIFT 装置の仕様を示した。

3. 神林高架橋における杭の載荷試験の概要

3.1 調査実施地点の地盤条件と杭の載荷試験の目的

対象橋梁である神林(かみはやし)高架橋は、日本海東北自動車道の荒川 IC(仮称)～村上 IC(仮称)間に計画されている(図-5)。図-6 に高架橋付近の土質縦断面図を示すが、

架橋位置の地盤条件はN値10以下の粘性土層と緩い砂質土層および砂礫土層が互層状に堆積している軟弱地盤地帯である。事前調査において橋梁の基礎と成り得る支持地盤層が起点側では深さ約40m程度、終点側では約80m以深との結果を得ていることから、神林高架橋の基礎工は大規模になることが予想された。そこで、神林高架橋の基礎構造について、地盤条件や橋梁形式に応じた合理的な基礎構造を選定することを目的として、図-6に示すP29位置で、杭の載荷試験を実施した。

基礎杭としては鋼管ソイルセメント杭を採用する計画であり、GL.-30m~-40mに明確な支持層がないことから、杭先端をN値10程度の粘性土層に根入れさせた杭の鉛直支持力を確認することを目的として、長期および短期の押し込み試験を実施した。また、載荷試験前にSBIFTを実施し、ボーリング孔の壁面水平方向せん断力の測定、地盤の横方向地盤反力係数の測定を行った。杭の押し込み試験終了後、水平載荷試験を実施し、SBIFTの測定値より求めた横方向地盤反力係数との比較検討、試験結果を短期押し込み試験から求めた杭の周面摩擦力との比較検討を行った。

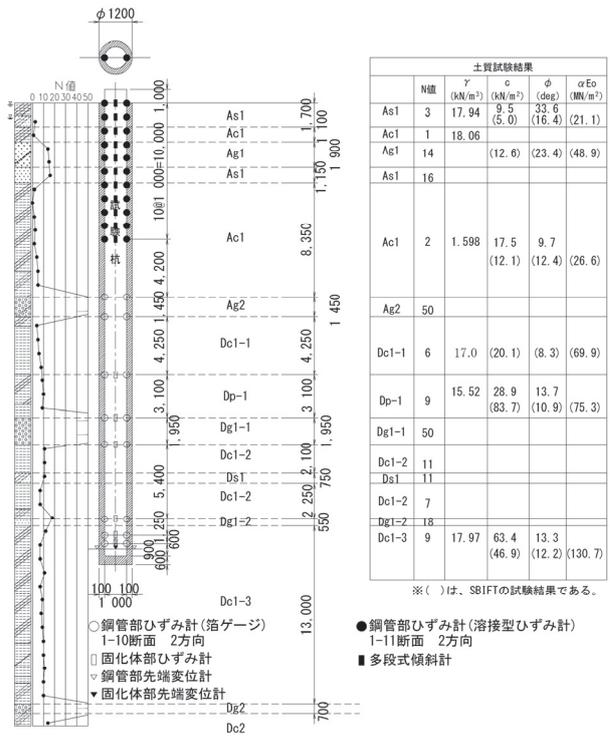


図-7 試験杭位置の土質試験結果と計器設置位置

試験結果より、長期的な発生が懸念される杭の沈下量を予測し、目安値として橋梁設計や維持管理に反映させることである。本試験の結果とそれを用いた解析は本稿の目的と直接関係がないので割愛する。

3.2 杭の押し込み試験と水平載荷試験の概要

(1) 杭の長期押し込み試験

P29 橋脚の本杭に常時荷重相当の $P_{max}=2,500\text{kN}$ を載荷し、試験杭の長期安定性を確認した。本試験の目的は載荷

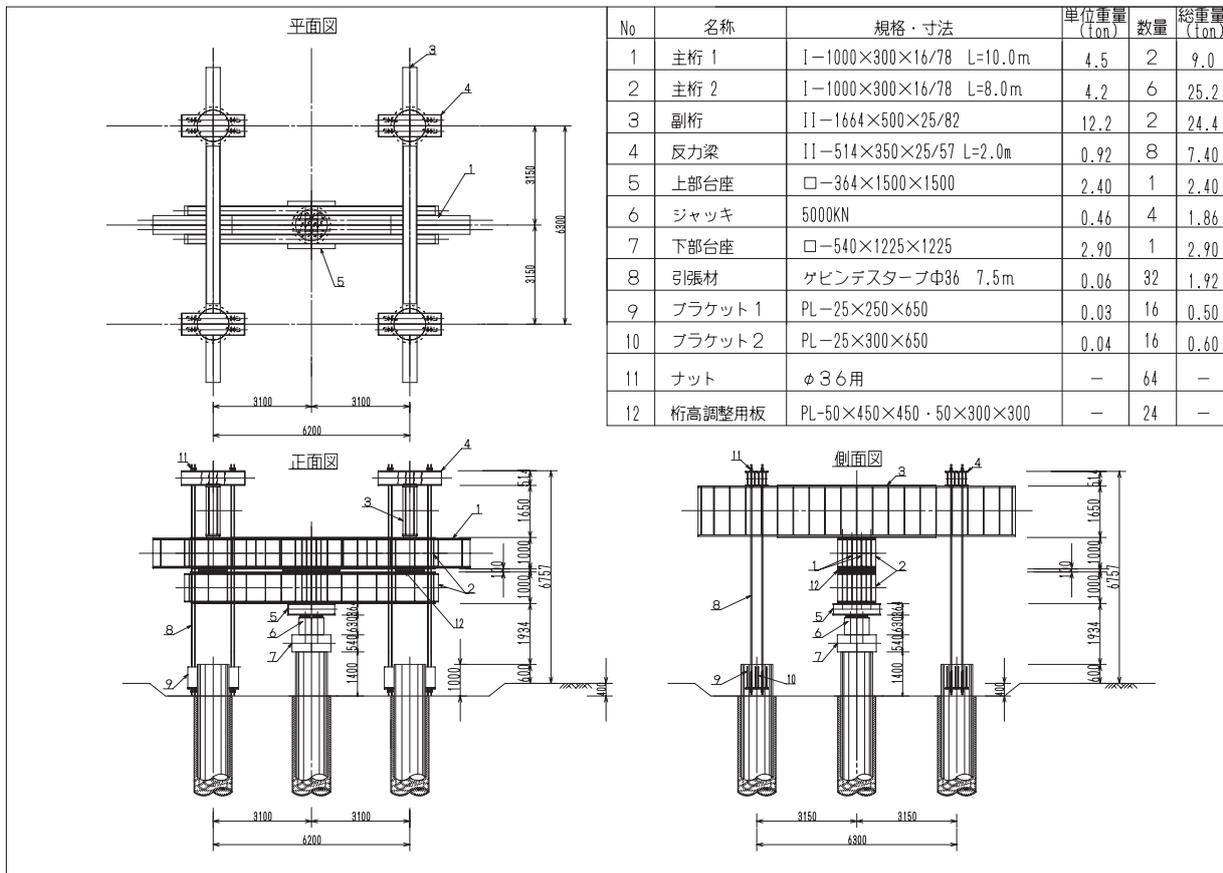


図-8 杭の短期押し込み試験における試験装置の概要

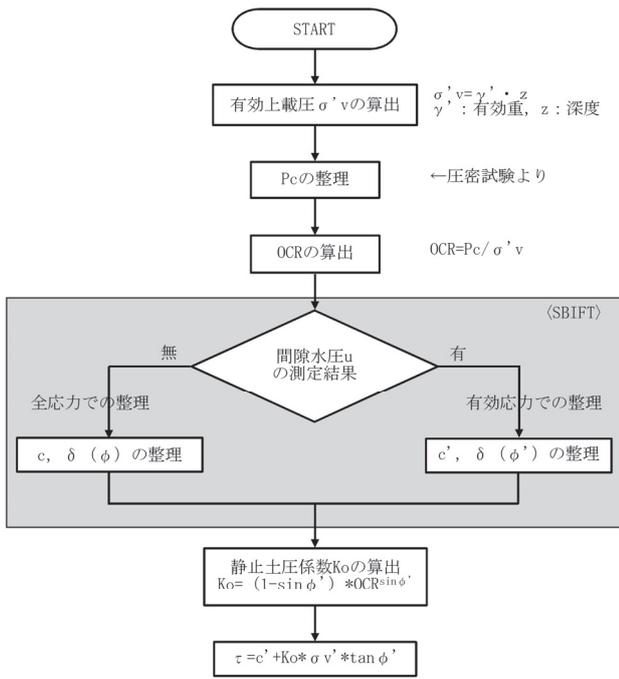


図-9 SBIFT 試験からの周面摩擦力算定法

(2) 杭の短期押込み試験

長期押込み試験の終了後に短期押込み試験を実施した。本試験により周面摩擦力を実測し SBIFT 試験値と比較することで、SBIFT 試験値の妥当性を検討した。載荷荷重は、極限支持力の 120%に相当する Pmax=15,000kN とした。

(3) 水平載荷試験

沖積層における地盤反力係数を確認すること、載荷試験の地盤反力係数(k_{sp})から変形係数に乘じる補正係数 α_{SBIFT} の検証を行うことを主目的とした。試験時の荷重載荷方法は、変位制御方式で行い、杭径の 8%~12%(弾塑性解析での杭体降伏相当)を目安に荷重載荷を行った。

4. 杭の載荷試験実測値と SBIFT 測定値の比較

SBIFT では、地盤の強度定数(c, φ)や地盤の変形係数(E)を 1 回の試験で同時に求めることができる。SBIFT より求めた地盤定数(c, φ, E)を用いて算出した杭の周面摩擦力と杭の横方向地盤反力係数を実際の杭の載荷試験による実測値と比較し、その妥当性を検討した。また、SBIFT 試験と同じ層で採取した乱れの少ない試料を用いて実施した圧密非排水試験結果も合わせて比較検討した。

4.1 短期押込み試験から求めた杭の周面摩擦力と SBIFT および各種の方法から推定した値との比較検討

図-7 に載荷試験位置の土質試験結果と計器設置位置を示す。また、図-8 に杭の短期押し込み試験における試験

装置の概要を示す。

図-9 は SBIFT 試験から周面摩擦力を推定する方法を示している。まず土質調査結果より、調査深度における有効土被り圧 σ_{v0}' と圧密降伏圧力 p_c を求め、両者から過圧密比 OCR を計算した。ここで、周面摩擦力は、SBIFT 試験で間隙水圧が測定されている層については間隙水圧を考慮して有効応力を用い、間隙水圧が測定されていない箇所では全応力を用いて整理した。せん断強度算出時の側圧係数 K(=静止土圧係数 K₀)は、対象となる粘性土層が過圧密粘土層であったため、過圧密比 OCR を用いて次式から算出している。

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'} \quad (1)$$

図-10 は図-6 に示した土層毎に、各種試験(一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、SBIFT)より算出した杭の周面摩擦力と載荷試験による実測値をまとめて示したものである。三軸圧縮試験は、圧密後、非排水条件で間隙水圧を測定しながらせん断する CU 条件で試験を実施した。同図には、道路橋示方書に示されている鋼管ソイルセメント杭の周面摩擦力推定式¹⁶⁾

$$f = 10N \quad (2)$$

による値も示している。図-10 より以下が考察できる。

- SBIFT 試験による推定値は、Ac1 層、Ac2 層では載荷試験で求めた値よりも小さく Dc1 層ではほぼ一致している。N 値と式(2)による推定値と比べると、いずれの層でも載荷試験の値に近いといえる。今後、鋼管ソイルセメント杭に適合する測定管表面形状を検討していけば、より載荷試験に近い値が得られる可能性があると考えられる。
- 各土質において、SBIFT により推定した値と載荷試験位置で実施した三軸圧縮試験から求めた値は、比較的良好に一致していた。一般に三軸圧縮試験で求めた原位置のせん断強度の精度は高いので、SBIFT が高い精度で地盤の強度を測定できていることを示すと考えられる。
- Ac1 層、Ac2 層において、載荷試験位置で実施した一軸圧縮試験より求めた値と三軸圧縮試験より求めた値は比較的良好に一致した。一方で、Dc1 層では、実測値を超えており、一軸圧縮試験結果より周面摩擦力を推定する場合には、注意を要する。

4.2 水平載荷試験による変形係数(E)の検証

地盤反力係数の推定に用いる換算係数は、設計要領¹⁷⁾ に記述されている地盤反力係数を算定するために、各種試験で求めた変形係数に乘じる係数であり、平板載荷試験の値を基準とし試験方法により表-2 のように示されている。

表-2 変形係数 E_0 と α ¹⁷⁾

変形係数 E_0 の推定方法	地盤反力係数の推定に用いる係数 α	
	常時, 暴風時	地震時
直径 0.3m の剛体円板による平板載荷試験の繰返し曲線から求めた変形係数の 1/2	1	2
孔内水平載荷試験で測定した変形係数	4	8
供試体の一軸圧縮試験又は三軸圧縮試験から求めた変形係数	4	8
標準貫入試験の N 値より $E_0=2,800\text{N}$ で推定した変形係数	1	2
SBIFT で測定した変形係数	2	4

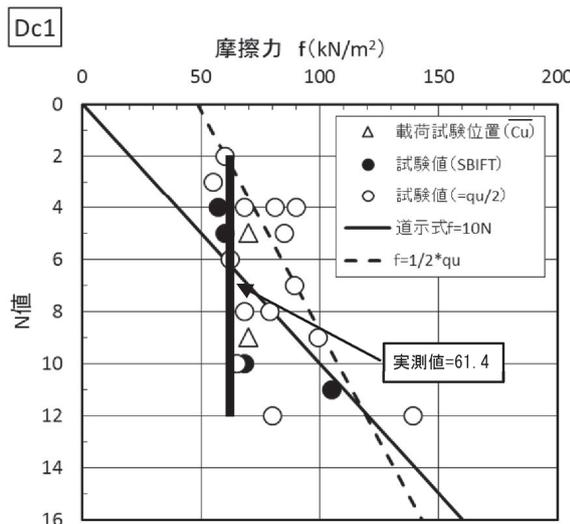
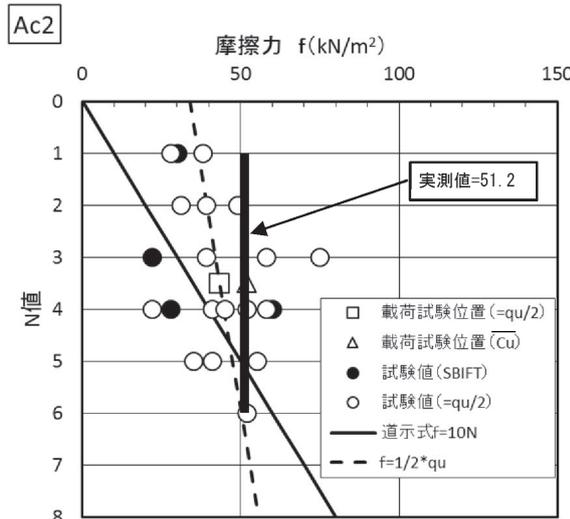
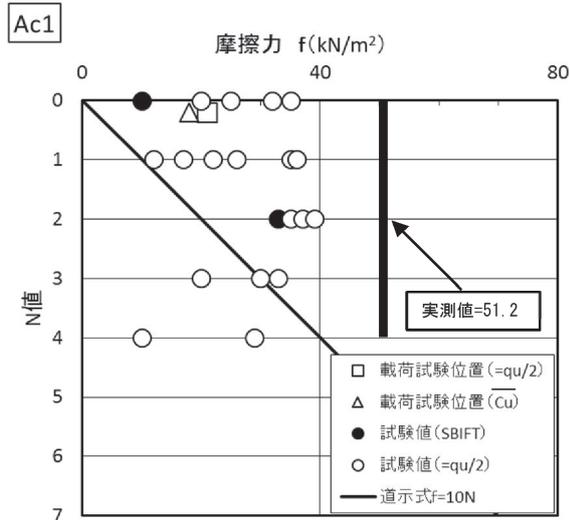


図-10 各種試験による杭の周面摩擦力の比較

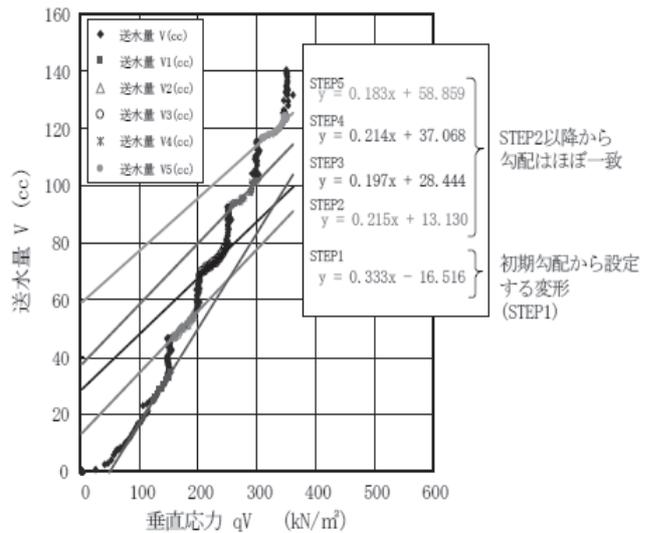


図-11 SBIFTにおける送水量と垂直応力の関係

SBIFT の α は、杭の載荷試験から求まる逆算 K_H を取ることとしており、本稿で示す例はその一例である。

孔内水平載荷試験と原位置せん断摩擦試験(SBIFT)は同じ試験機構であることから、得られる両者の変形係数は基本的に同じであり、その補正係数は $\alpha=4$ として考えてよいとされている。しかし、以下に示すように、 $\alpha=2$ として設定できるものと考えられる。図-11にSBIFTにおける送水量と垂直応力との関係を示す。SBIFTは、図-4に示すとおり、垂直応力を段階的に載荷する。図-11からわかるように、SBIFTでは1回目の送水であるSTEP1の初期勾配から得られる変形係数と、2回目以降の送水であるSTEP2以降の勾配から得られる変形係数が異なる。初期勾配から求めた値は、実際の地盤の変形係数値を過少評価していると考え、繰返し載荷から得られた値のほうが、信頼性が高いとされている¹⁸⁾。また、SBIFTのデータを統計的に処理した結果、STEP2以降の変形係数の平均は、初期勾配によるものと比べて約2倍の関係になることが経験的に導かれている。よって、設計要領¹⁷⁾では、STEP2以降の勾配の平均値から導かれた値が採用されており、その補正係数 α はこれらの知見を取り入れて $\alpha=2$ として設定している。

ここでは、試験値の杭頭変位と載荷荷重の関係から求めた多層地盤の逆算平均地盤反力係数 k_H と設計で求まる多層地盤の平均地盤反力係数 k_H の比較を行った。(図-12)

設計値は SBIFT から求まる変形係数に補正係数を乗じない場合 ($\alpha_{SBIFT}=1$) と、補正係数を乗じた場合 ($\alpha_{SBIFT}=2$)、および N 値からの推定値の 3 ケースとした。各土質調査で得られる変形係数から求まる k_H については、道示式から算出しているため、 $S/D=1.0\%$ の結果であるが、 $S/D=1.0\%$ 以外の値については $k_H' = k_H \times (S/D)^{-0.5}$ (19) で算出した。また、図-13、図-14 に $\alpha_{SBIFT}=2$ として k_H を算出し線形解析を行った結果を示した。

1) 逆算 k_H の比較

図-12 より、載荷試験の逆算 k_H はいずれの変位レベルでも $\alpha_{SBIFT}=2$ として求めた k_H を上回っており、かつ $S/D=1\%$ の状態では載荷試験の逆算 k_H と一致する。現状の設計で用いている $\alpha_{SBIFT}=2$ という補正係数は、孔内水平載荷試験から得られる変形係数 E_p との E_2 の関係から求めた係数であった。今回の載荷試験で $\alpha_{SBIFT}=2$ とすることの妥当性が確認できたことにより、神林高架橋位置の地盤では、 $\alpha_{SBIFT}=2$ として求めた k_H は安全側かつ合理的な k_H となっていると考えられる。

今後、他のケースでも杭の水平載荷試験を実施し、実測値と比較検討すれば、 $\alpha > 2$ の値を採用できる可能性もあり、その場合、より合理的な k_H の設定が可能となる。

2) 実測値と逆算 k_H を用いた設計値の比較

図-13 より、杭頭変位はよく一致する。また、図-14 より、設計曲げモーメントは、実測値を上回っていることから、安全側の設計となることが分かった。

5. まとめ

SBIFT (Self Boring In-situ Friction Test) はセルフボーリング型ビットを用いて削孔し、横方向載荷試験を行うとともに周面摩擦力を測定する原位置試験である。軟弱地盤地帯に計画される高速道路の橋梁の基礎構造について、経済的で合理的な基礎構造を選定することを目的として実施された杭の載荷試験結果と SBIFT 測定値による設計結果を比較検討し、SBIFT の実務への適用性について検討を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) SBIFT で測定した c 、 ϕ より杭の周面摩擦力を推定し、杭の実測値と比較した結果、推定値は、各土層において載荷試験から求められた値よりも小さいかほぼ一致していた。道路橋示方書による N 値を用いた推定式による値と比べると、いずれの層でも SBIFT の値の方が

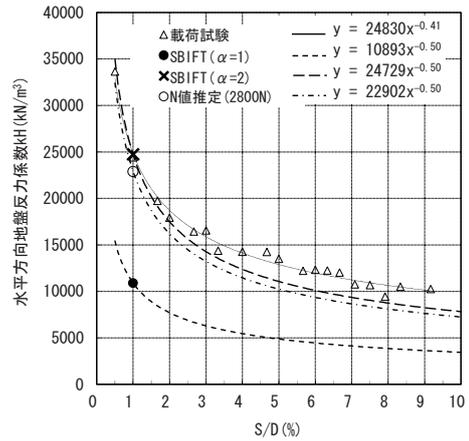


図-12 逆算 k_H の比較

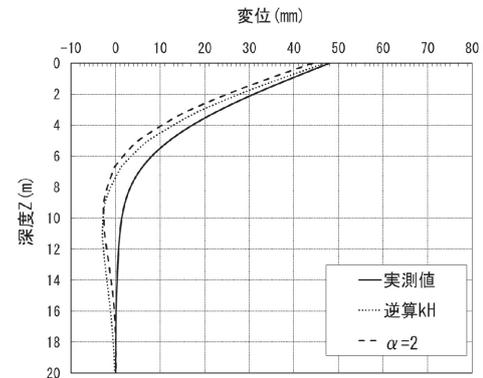


図-13 変位量の比較

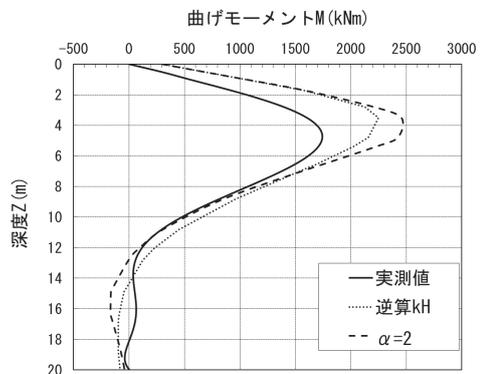


図-14 曲げモーメントの比較

載荷試験の値に近かった。今後、今回試験を行った鋼管ソイルセメント杭に適合する測定管表面形状を採用すれば SBIFT によってより載荷試験に近い値が得られる可能性があると考えられる。

- (2) SBIFT によって $\alpha=2$ として求めた k_H はいずれの変位レベルでも杭の水平載荷試験の逆算 k_H より小さく、 $S/D=1\%$ の範囲では逆算 k_H と一致した。したがって、神林高架橋位置の地盤では、SBIFT の測定値から $\alpha=2$ として求めた k_H は安全側かつ合理的な k_H となっていると考えられる。

参考文献

- 1) 太田秀樹：土の強さと地盤の破壊入門, 3. 3. 4 原位置試験の解釈, 土質工学会, pp. 253-261, 1987.
- 2) 太田秀樹, 深川良一, 西原晃：原位置試験による変形, 強度定数の決定と設計への適用性, 土木学会論文集, 第346号/Ⅲ-1, pp. 77-86, 1984.
- 3) Wroth, C. P.: The interpretation of in situ soil tests, *Geotechnique*, Vol. 34, No. 4, pp. 449-489, 1984.
- 4) 谷和夫, 杉田信隆, 西尾伸也, 田中達吉：講座地盤材料の小ひずみでの非線形特性と地盤変形問題への適用, 4. 原位置試験法, 土と基礎, Vol. 45, No. 6, pp. 61-66, 1997.
- 5) 谷和夫, 園田玉紀, 菅原紀明, 鍛冶義和：講座「地盤材料の小ひずみでの非線形特性と地盤変形問題への適用, 4. 原位置試験法 (その 2)」, 土と基礎, Vol. 45, No. 7, pp. 59-64, 土と基礎, 1997.
- 6) 森田悠紀雄：Q&A コーナー「強度定数 N 値による評価について」, 土と基礎, Vol. 45, No. 10, pp. 35-37, 1997.
- 7) 前田良刀, 落合英俊, 安福規之, 坂田隆博, 森田靖章：SBIFT から得られたデータの支持力理論的考察, 九州共立大学研究報告, 第 21 号, pp. 95-101, 1997.
- 8) 徐光黎, 前田良刀, 落合英俊, 安福規之, 森田悠紀雄：ボーリング孔内での原位置摩擦試験による強度定数とその特徴, 第 41 回地盤工学シンポジウム, pp. 79-84, 1997.
- 9) Maeda, Y., Xu, G. L., Ochiai, H., Sakata, T. and Uno, K.: Pile and the results measured in SBIFT, *Int. Conf. on Foundation Failures*, Singapore, pp. 317-326, 1997.
- 10) Maeda, Y., Xu, G. L., Sakata, T., Ochiai, H., Yasufuku, N. and Sakate, M.: Laboratory studies of the S. B. I. F. T. test in sand, *Bulletin of Kyushu Kyoritsu Uni.*, No. 22, 1998, pp. 85-94, 1998.
- 11) Maeda, Y., Xu, X. L., Ochiai, H., Sakate, M., Sakata, T., Ogata and Uno K.: A New Self Boring In-situ Friction Testing Technique, *1st Int. Conf on Site Characteristics*, Atlanta, USA, pp. 831-836, 1998.
- 12) 徐光黎, 前田良刀, 落合英俊, 安福規之, 坂手道明：原位置摩擦試験による地盤の強度・変形定数の推定と実務への適用, 土木学会論文集, 第 617 号/Ⅲ-46, pp. 191-200, 1999.
- 13) Yoshimi, Y. and Kishida, T.: A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces, *Geotechnical Testing J.*, No. 4, pp. 145-152, 1981.
- 14) Kishida, H. and Uesugi, M.: Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus, *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 45-52, 1987.
- 15) 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖, 大野司郎, 三倉義教：粘土-鋼材間の摩擦特性試験の過圧密粘土への適用, 九州大学工学集報, Vol. 70, No. 2, pp. 159-166, 1997.
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, p. 395, 2012.
- 17) 西日本高速道路(株)：設計要領, 第二集, 橋梁建設編, p. 4-39, 2014.
- 18) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説, 孔内載荷試験, p. 687, 2013.
- 19) 日本道路協会：杭基礎設計便覧, p. 324, 2015

(2015 年 6 月 19 日 受付)