

三成分コーン貫入試験を用いた杭周面摩擦力の推定法

Evaluation of Skin Friction of Pile using Three-Sensor Cone Penetrometer Test

玉田 隆志* 西川 純一** 野並 光昭*** 日下部祐基****

Takashi TAMADA, Jun'ichi NISHIKAWA,

Mitsuaki NONAMI and Yuki KUSAKABE

本研究は、杭の周面摩擦力を、従来の方法よりも簡易で経済的な調査法を用いて、精度良く推定することを目的としている。

簡易で経済的な調査法として三成分コーン貫入試験を取り上げ、実杭の鉛直載荷試験箇所において調査を行った。

三成分コーンの周面摩擦力度 (f_s) や貫入抵抗 (q_c) と鉛直載荷試験の周面摩擦力度の関係を調べ、 f_s , q_c を用いて杭 1 本当たりの周面摩擦力を算定する方法を検討した。その結果、 f_s , q_c を用いて杭 1 本当たりの周面摩擦力を精度良く推定できることがわかった。

《杭；周面摩擦力；三成分コーン；鉛直載荷試験》

This study is intended to accurately measure the skin friction of piles by the use of a research method which is simpler and more economical than conventional ones.

Three sensor cone penetration test was selected as a simple and economical in-situ test and was used to conduct research at the site where the vertical loading test of the piles was conducted.

We studied the relationship between skin frictions (f_s) and penetration resistance (q_c) measured by three sensor cone penetration test and the skin friction measured by the vertical loading test. Also, we examined a method to estimate the skin friction per pile using f_s and q_c . As a result we found that the skin friction per pile can be accurately using f_s and q_c .

keywords : pile, skin function, three-sensor cone, vertical loading test.

1. まえがき

杭の周面摩擦力を推定する方法は種々提案されているが、最も精度の高い方法は、実杭による鉛直載荷試験によるものである。しかし、この試験は多大な費用と時間を要することから実施されるケースは少ない。実施されても本杭を

試験杭や反力杭に用い、施工段階における支持力確認が目的となっているため、試験結果が設計に用いられることも希である。また、1本の杭の載荷試験結果を離れた位置で適用する場合、詳細な地盤調査や土質調査を併せて行わなければ利用できないなどの問題もある。杭の周面摩擦力の一般的な推定方法としては、N値から推

*土質基礎研究室員 **同室長 ***同室副室長 ****同室研究員

定する方法（道路橋示方書¹⁾、以下道示）がある。この推定方法は、N値と杭の鉛直載荷試験から得られた周面摩擦力度との関係より求められたものであるが、それほど高い精度を持っているわけではない。したがって、これらの問題を解決するためには、簡易でかつ経済的な調査法による精度の高い推定法の確立が必要である。

そこで、簡易な調査法として、最近の土質調査法で注目されている三成分コーン貫入試験²⁾を取り上げ、5年間、杭の鉛直載荷試験が実施されている現場で調査した。過去の報告³⁾では、三成分コーンの周面摩擦力度（fs）と鉛直載荷試験結果の関係について示したが、今回は、貫入抵抗（qc）との関係も調べた。その結果、fs、qcと鉛直載荷試験結果に有意な関係を見だし、このfs、qcから精度良く杭周面摩擦力を推定できることがわかったので、その推定法について提案する。

2. 調査概要

2.1 三成分コーン貫入試験

三成分コーン貫入試験は、コーン先端部で貫入抵抗（qc）、周面摩擦力度（fs）および間隙水圧（ u_T ）を、同時にかつリアルタイムに計測で

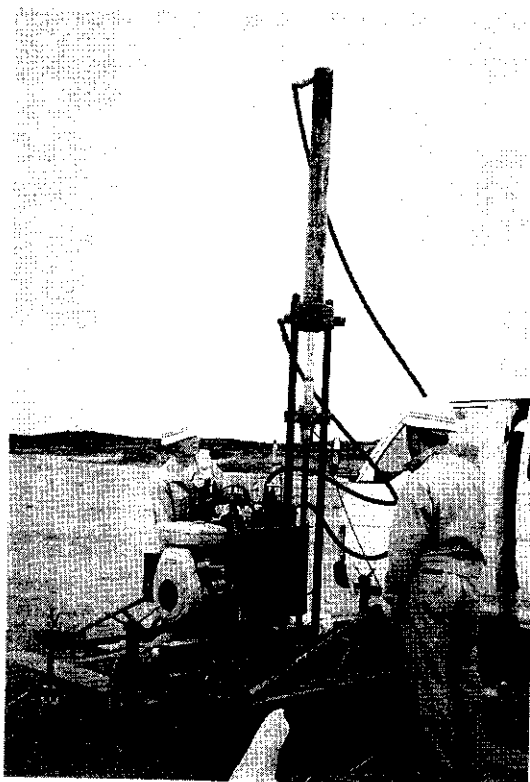


写真-1 試験状況

きる静的貫入試験である。貫入装置は、10t用のオランダ式コーン貫入試験機を使用し、貫入速度を約2 cm/sとしている（写真-1）。図-1には、三成分コーンの構造図を示している。先端部で計測しているのでロッドの自重等の補正を必要としないことから、自沈するような軟弱地盤の場合にも有効である。使用したコーンは2種類あり、両機種とも測定部の形状寸法はほぼ同一であるが、測定値の定格容量が異なるものである。また、本装置を用いた研究には地層の土質分類⁴⁾⁵⁾や液状化強度の判定⁶⁾などの検討がなされている。なお、N値が30以上の硬い地層が中間にある場合には、コーンが貫入不能になるため、硬い中間層をコーン直径と同程度の径（35 mm）でボーリングをして、再度試験を実施した。

2.2 対象現場概要

対象としたのは、鉛直載荷試験を実施している打ち込み杭現場5箇所と場所打ち杭現場5箇所の計10箇所（図-2）である。杭形状は、杭径 $\phi 400 \sim 1219.2$ mm、杭長 $L=16 \sim 39$ mであり、いずれの杭においても極限支持力までは載

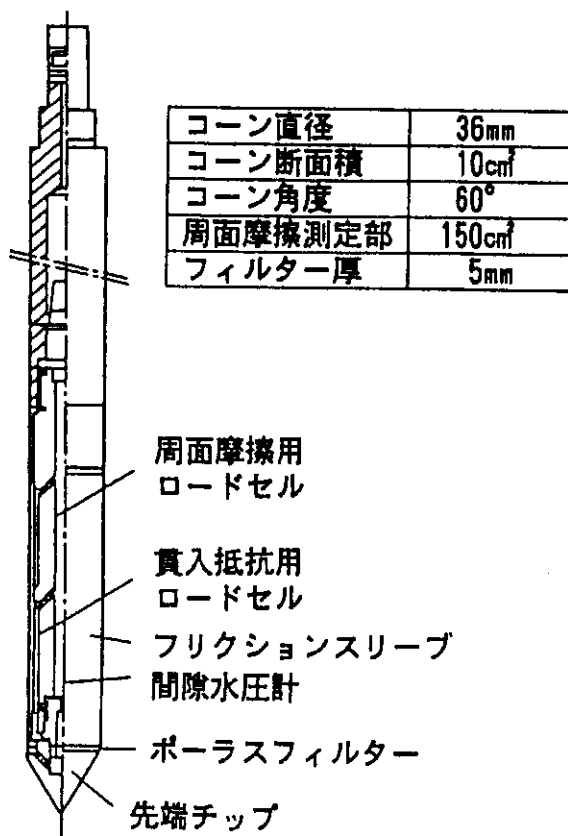


図-1 三成分コーン構造図

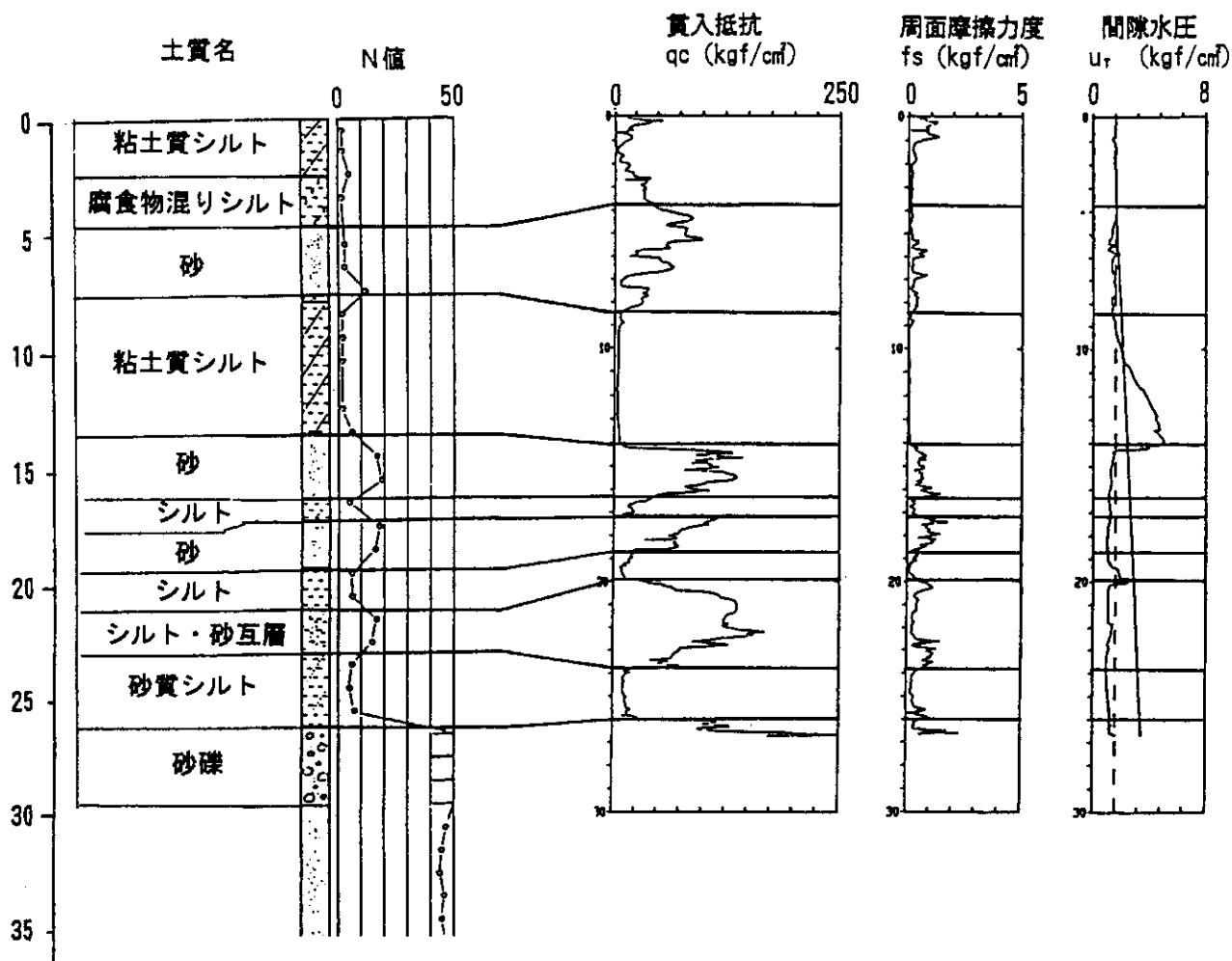


図-3 試験結果の深度方向分布（札幌市栄北地区の例）

4. 試験結果と考察

4.1 各層の最大周面摩擦力度

鉛直載荷試験による各層の最大周面摩擦力度 (f_p) と N 値, 三成分コーン f_s , 三成分コーン q_c との関係を施工法別, 地盤の種類別に示す。(図-4~6)

図-4 は, f_p と N 値の関係を示したものである。打込み杭の粘性土では, 道示による $f_s = N$ の付近に分布し, 砂質土では道示による $f_s = 0.2N$ に沿っているが, 下回っているものが多い。道示による推定は, 最大周面摩擦力度を過少評価する傾向にある¹⁰⁾といわれているが, この結果では, 過大に評価している所が多い。場所打ち杭では, 打込み杭のように粘性土と砂質土のはっきりとした傾向がみられず, ばらつきが大きい。

図-5 は, f_p と三成分コーン f_s の関係を示したものである。打込み杭では, 地盤の種類別

に傾向がみられ, 粘性土では載荷試験の f_p に対して小さく, 砂質土では大きくなっている。また, 載荷試験の各層の周面摩擦力度と変位量の関係が, 降伏または極限に達している層だけを対象に, 載荷試験の f_p と三成分コーンの f_s の回帰計算を行ったところ, 粘性土では $f_p = 1.6f_s$, 砂質土では $f_p = 0.5f_s$ の関係が得られた。場所打ち杭では, ある程度2つの方向に分布している傾向がみられるが, 地盤の種類別の傾向がみられない。沖積粘性土では $f_p = 2.5f_s$, 洪積粘性土および砂質土では $f_p = 0.6f_s$ の報告¹¹⁾もあり, ある程度の相関があるとみられる。打込み杭と同様に回帰計算を行ったところ, 粘性土では $f_p = 1.8f_s$, 砂質土では $f_p = 1.2f_s$ の関係があった。

また, f_p と三成分コーン q_c との関係は図-6に示すように, 打込み杭, 場所打ち杭のどちらの施工法でも, 地盤の種類別に一定の傾向が

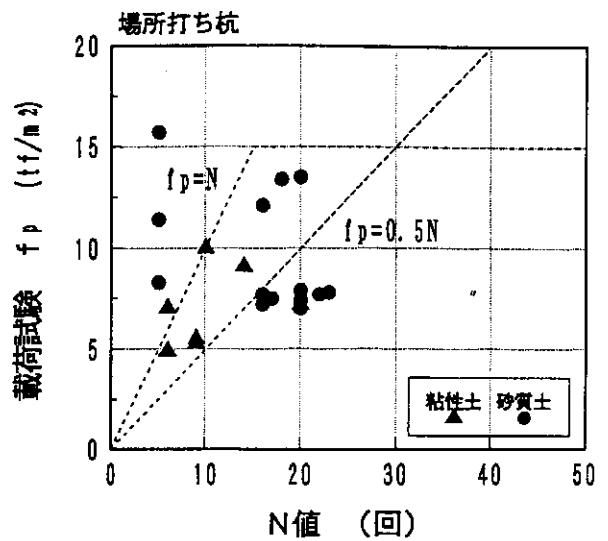
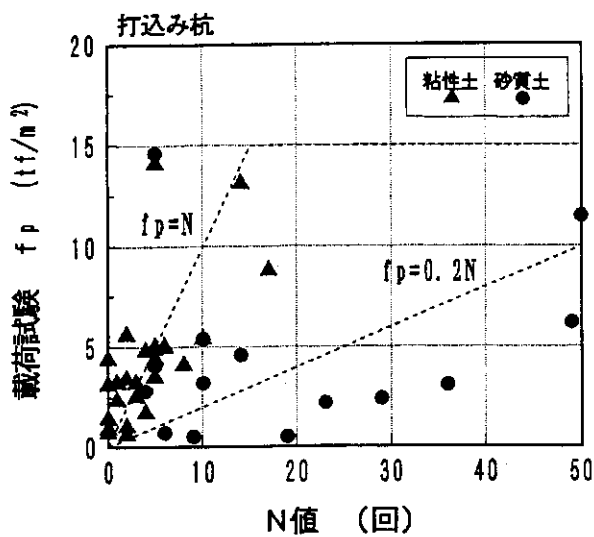


図-4 各層のN値と載荷試験結果の関係

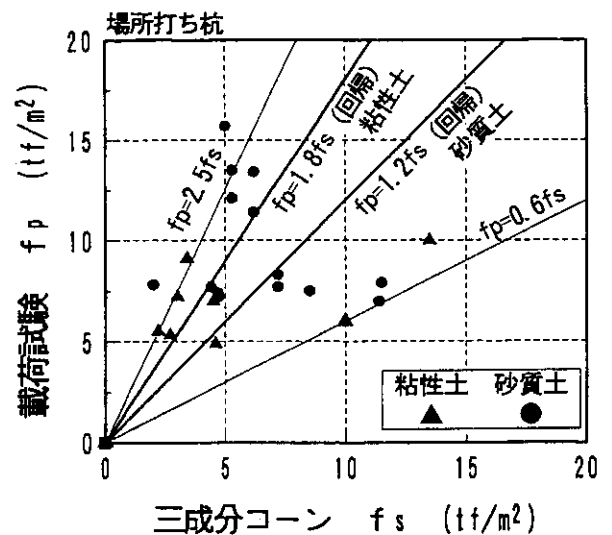
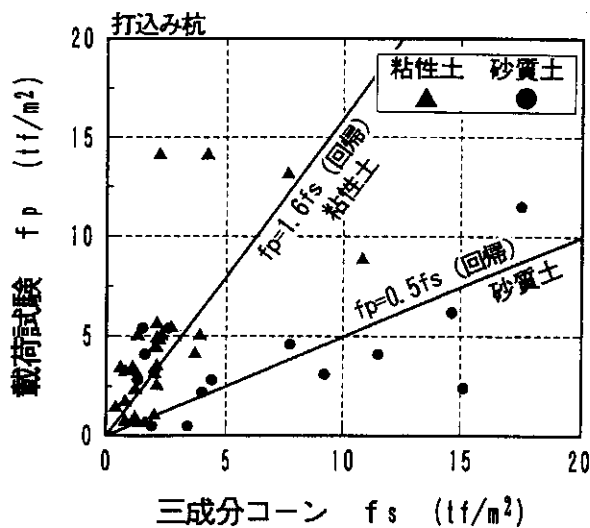


図-5 各層の三成分 f_s と載荷試験結果の関係

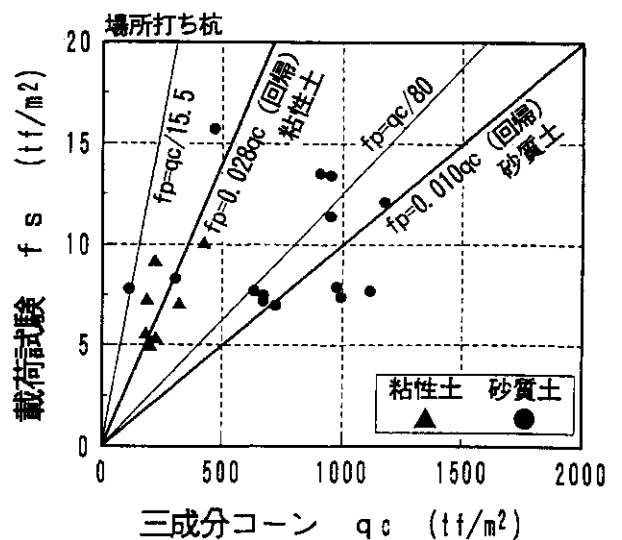
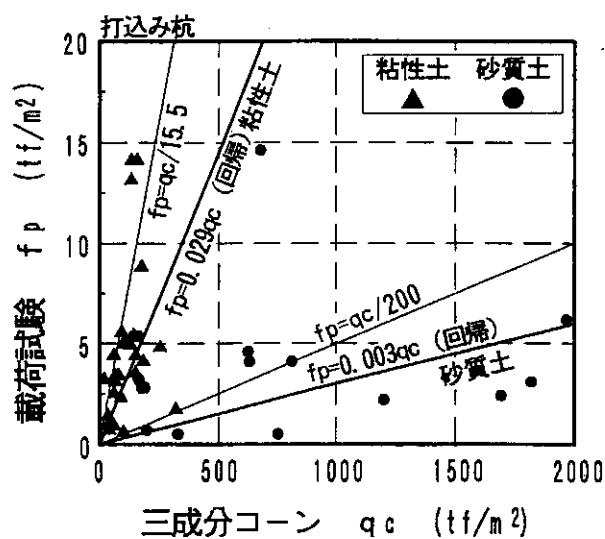


図-6 各層の三成分 q_c と載荷試験結果の関係

見られる。これらの関係について回帰計算を行ったところ、粘性土ではどちらの施工法においてもおよそ $fp=0.03 qc$ と同様な結果で、砂質土は打込み杭 $fp=0.003 qc$ 、場所打ち杭 $fp=0.010 qc$ と施工法によって大きく異なる。これは、道示によるN値から推定する場合の施工法別、地盤の種類別係数の大小関係と同じ傾向にある。粘性土で同様な係数となったのは、周面摩擦力が生じるせん断面が杭表面と地盤の境界ではなく、杭周面の地盤内に生じたためと推測される。また、砂質土では打込み杭と場所打ち杭の杭表面粗さの違いが係数の差に現れたと考えられる。土質調査法¹²⁾では、粘土で $qc=14\sim17 Cu$ (Cu : 非排水せん断強度)、砂質土については Meyerhof による $qc=4 N$ の関係が示されている。これらの関係と道示にある、 Cu およびN値と最大周面摩擦力度の関係を用いて fp と qc の関係式を求めると打込み杭 $fp=qc/200$ 、場所打ち杭 $fp=qc/80$ となる。図-6に示す各回帰直線は、これらの関係式と近似している。

これらの関係の回帰計算による相関係数はいずれも低いため、相関係数で各測定値の推定精度を比較することは困難である。しかし、場所打ち杭の周面摩擦力度 (fs) を除くと、三成分コーンによる周面摩擦力度 (fs)、貫入抵抗 (qc)

と載荷試験の fp の関係は、施工法・地盤の種類別に傾向が見られることから、測定値を回帰計算より求めた係数 (以下回帰係数) で補正することにより、杭1本当りの周面摩擦力を推定する上で有効であると考えられる。また、 qc に間隙水圧 U_T を差し引いた $qc-u_T$ や土被り応力 σ_v を差し引いた $qc-\sigma_v$ と鉛直載荷試験結果との関係も調べたが、 qc の場合と大差なかった。したがって、回帰計算の結果より、三成分コーンの fs 、 qc を用いて表-2のように最大周面摩擦力度を推定することとした。

4-2 杭1本当りの周面摩擦力の比較

図-7, 8, 9に、鉛直載荷試験より求めた杭1本当りの周面摩擦力 (F_p) と表-3のようにN値, fs 測定値, fs 回帰係数補正 (fs 測定値に回帰係数を乗じた値), qc 回帰係数補正 (fs と同様) から求めた杭1本当りの周面摩擦力との比較を示した。

どの値を用いた場合においても良い対応を示しているが、N値の場合の場所打ち杭で大きくはずれているものがある。この杭は火山灰主体の現場で施工されたものである。火山灰は設計時において、ほとんどの場合砂質土と判断する。今回は砂質土として道示による $fp=0.2N$ を用いた結果、載荷試験の F_p に対して、かなり小さな値となった。これに対して、 fs 、 qc を用

表-2 回帰計算による最大周面摩擦力度 (tf/m^2)

地盤の種類 \ 施工法	打込み杭工法	場所打ち杭工法
粘性土	$1.6 fs$ または $0.03 qc$	$1.8 fs$ または $0.03 qc$
砂質土	$0.5 fs$ または $0.003 qc$	$1.2 fs$ または $0.01 qc$

表-3 杭周面摩擦力の算定式

	打込み杭工法	場所打ち杭工法
1) N値	$F_N = (\sum N_i L_i + \sum 0.2 N_j L_j) \times U$	$F_N = (\sum N_i L_i + \sum 0.5 N_j L_j) \times U$
2) 三成分コーン測定値 fs	$F_s = (\sum f_{si} L_i + \sum f_{sj} L_j) \times U$	
3) 三成分コーン補正 fs	$F_{s'} = (\sum 1.6 f_{si} L_i + \sum 0.5 f_{sj} L_j) \times U$	$F_{s'} = (\sum 1.8 f_{si} L_i + \sum 1.2 f_{sj} L_j) \times U$
4) 三成分コーン補正 qc	$F_q = (\sum 0.03 q_{ci} L_i + \sum 0.003 q_{cj} L_j) \times U$	$F_q = (\sum 0.03 q_{ci} L_i + \sum 0.010 q_{cj} L_j) \times U$

N_i : 粘性土の平均N値

N_j : 砂質土の平均N値

f_{si} : 粘性土の平均 fs (tf/m^2)

f_{sj} : 砂質土の平均 fs (tf/m^2)

q_{ci} : 粘性土の平均 qc (tf/m^2)

q_{cj} : 砂質土の平均 qc (tf/m^2)

L_i : 粘性土の層厚 (m)

L_j : 砂質土の層厚 (m)

U : 杭周長 (m)

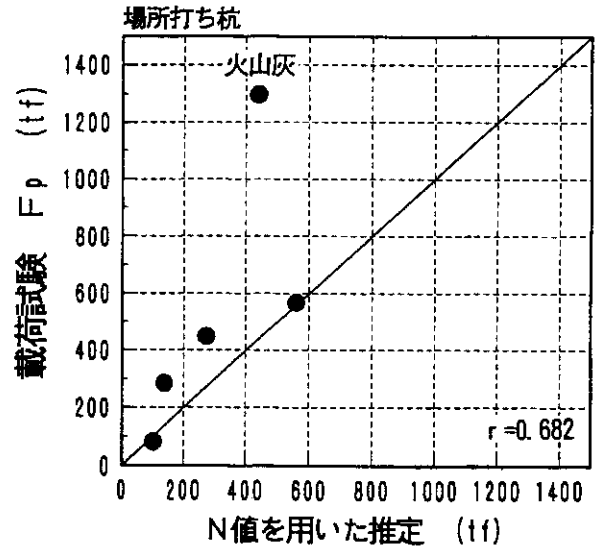
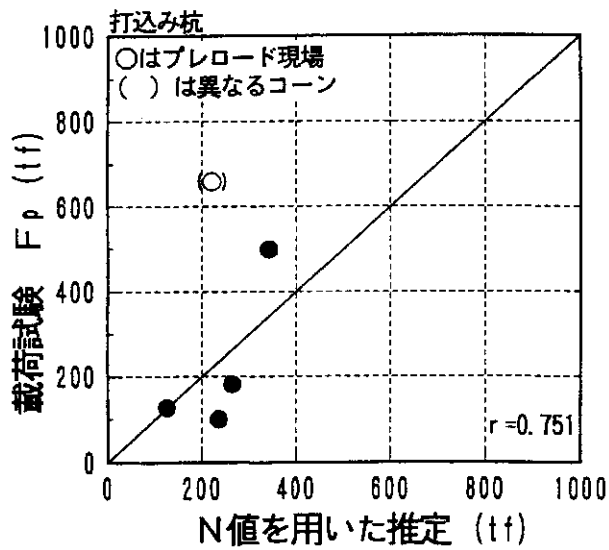


図-7 杭の周面摩擦力の比較 (N 値を用いた推定と載荷試験)

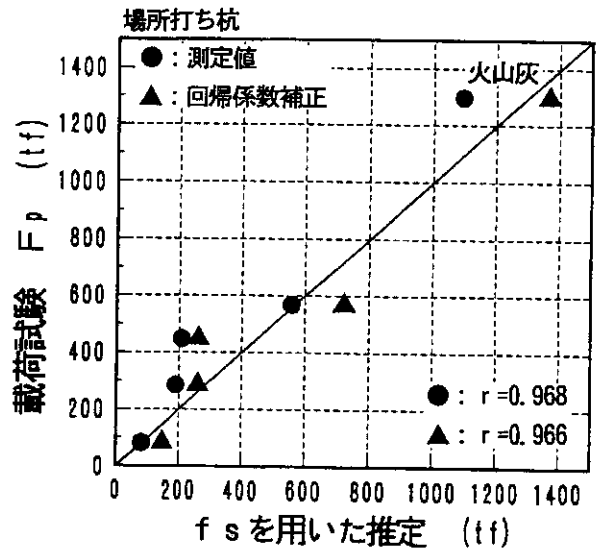
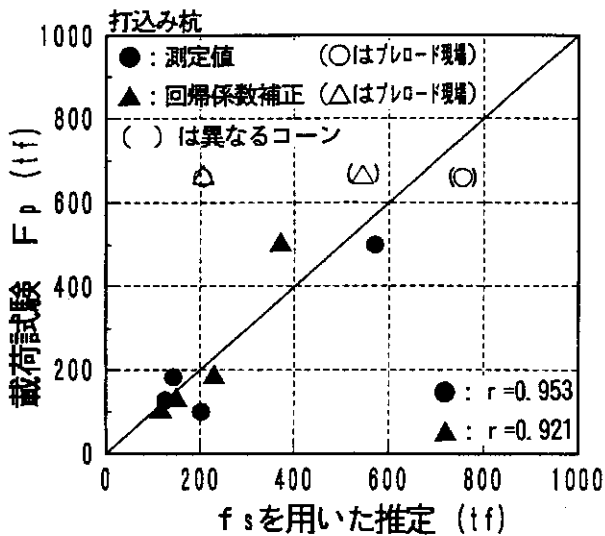


図-8 杭の周面摩擦力の比較 (f_s を用いた推定と載荷試験)

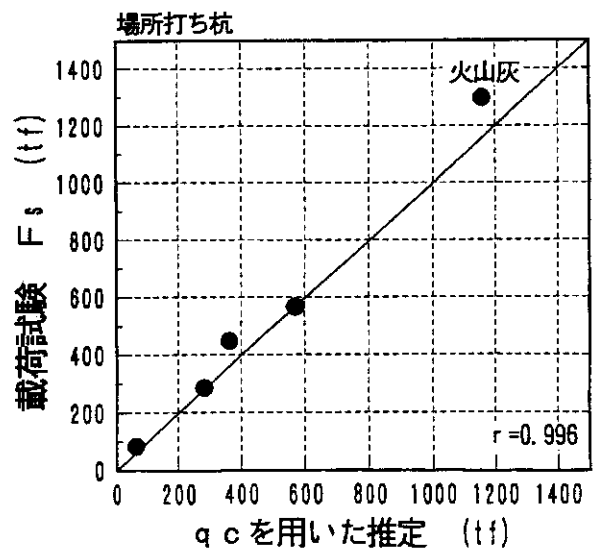
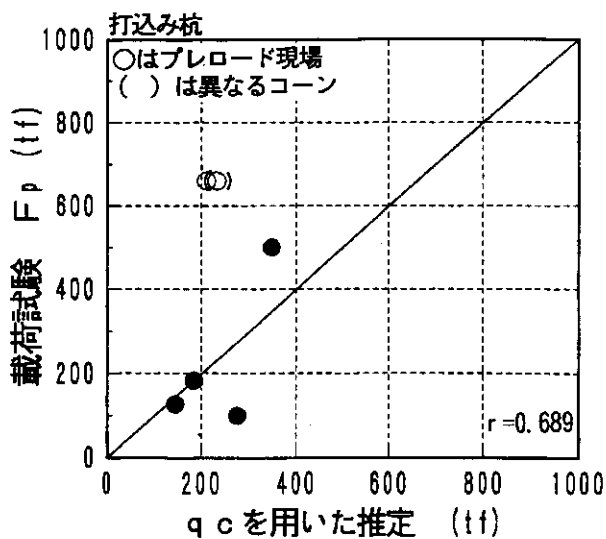


図-9 杭の周面摩擦力の比較 (qc を用いた推定と載荷試験)

いた推定では、良い対応がみられ、三成分コーンの有用性がうかがえる。

fs測定値とfs回帰係数補正では大きな差は現れていないが、回帰係数補正の場合の方が小さな値の範囲でよい相関が見られる。場所打ち杭では各層のfp、fsの関係が地盤の種類別に相関が見られなかったが、杭1本当たりではよい結果を得たことから、各層の周面摩擦力度の誤差が相殺され、結果的に良くなったことが考えられる。また、図-8、9の打込み杭では、プレロードを行っている現場において、2種類のコーンで試験を行っている。その結果、fsではかなり値の差があるが、qcではあまり差がないことから、ほぼ同一の地盤で試験を行っていると考えられる。したがって、三成分コーンのqcにおいては機種の違いは現れないが、fsではばらつくようである。

したがって、三成分コーンから杭の1本当たりの周面摩擦力を推定する場合は、推定誤差を考慮していくつかの方法で推定し最小値を用いることがよいと考える。

5. 杭の周面摩擦力の推定法の提案

これまでの検討結果から、三成分コーン貫入試験による杭の周面摩擦力の推定法を提案する。

(1) 試験結果の整理

三成分コーン貫入試験の深度方向の貫入抵抗(qc)と、ボーリングによる土質柱状図および標準貫入試験のN値の分布から土層を判断し、その区間の平均値を各土層の貫入抵抗(qc)、周面摩擦力度(fs)とする。また、ボーリングや標準貫入試験を行っていない場合は、三成分コーンによる土質判別をもとに、土層を判定し、その区間の平均値を各土層の貫入抵抗(qc)、周面摩擦力度(fs)とする。

(2) 杭の周面摩擦力

打込み杭：表-3の2)、3)、4)から推定し、その最小値を極限周面摩擦力とする。

なお、各層の周面摩擦力度の上限値を図-7、8を参考にして道示に準じ、砂質土10 tf/m²、粘性土15 tf/m²とする。

場所打ち杭：表-3の2)、4)から推定し、その最小値を極限周面摩擦力とする。

なお、各層の周面摩擦力度の上限値を打込み杭と同様に考えて、砂質土20 tf/m²、粘性土15 tf/m²とする。

また、両杭とも三成分コーンが貫入不可能な層については、N値から道示による方法で周面摩擦力度を求め代用する。

6. まとめ

1) 三成分コーンの測定値fs、qcと載荷試験のfpとの関係は、施工法、地盤の種類別に傾向がある。

2) 杭1本当たりの周面摩擦力は、N値からの推定よりも三成分コーン貫入試験からの推定の方が精度が高い。

3) 三成分コーン貫入試験から杭の周面摩擦力を推定する方法として、打込み杭では測定値fs、fs回帰係数補正、qc回帰係数補正から、場所打ち杭では測定値fs、qc回帰係数補正から求め、その最小値を推定値とする方法を提案する。

7. あとがき

今回、三成分コーン貫入試験による杭の周面摩擦力の推定法を提案した。三成分コーン貫入試験は、ボーリングを併用する標準貫入試験に比べて安価であり、作業も簡単で早いことから、本研究の目的を果たしたと考える。

今後の問題点としては、粘性土と砂質土の2種類の分類だけではなく、さらに細分化することを検討する必要がある。今回の検討では火山灰やれき混り砂も砂質土と判断しているため各層の周面摩擦力度の比較では砂との違いは判らないが、砂と傾向が異なる点も多くみられた。また、機種の違いによる誤差が発生することもあるので、コーンの統一性を計る必要がある。N値30以上の貫入不可能な層についての対策も必要であり、貫入装置の大型化あるいは動的装置、ボーリング装置の追加配備などが考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・下部構造編，1990年。
- 2) 土谷尚，酒井幸雄，岩崎公俊，山本芳裕：新しい貫入試験，ダイラトメーターなどの我が国に

おける適用性, 土と基礎 Vol.37, No.7, pp.53-58, 1989年.

- 3) 玉田隆志, 能登繁幸, 日下部祐基, 松田泰明: 新しい原位置試験による杭の周面摩擦力の評価, 開発土木研究所月報 No.466, pp.10-16, 1992年.
- 4) 玉田隆志, 高柳美樹人, 斉藤和夫: 多成分コーンによる軟弱地盤の土質判別, 全地連「技術フォーラム91大阪編」, pp.23-26, 1991年.
- 5) 土谷尚, 酒井幸雄, 岩崎公俊, 室町忠彦: 三成分コーン試験結果による土質判別の試み, 土木学会第40回年次学術講演会, pp.763-764, 1985年.
- 6) 岩崎公俊, 酒井幸雄, 土谷尚, 室町忠彦: 三成分コーン貫入試験による液状化強度の簡易判定の試み, 第20回土質工学研究発表会, pp.45-46, 1985年.
- 7) 宇都一馬, 冬木衛, 近藤博, 桜井学: クイの載

荷試験結果の一整理法, 第13回土質工学会研究発表会, pp.813-816, 1978年.

- 8) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 載荷試験から得られた荷重-変位曲線の非線形回帰計算について(その2), 土木学会第37回年次学術講演会, pp.515-516, 1982年.
- 9) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 載荷試験から得られた荷重-変位曲線の非線形回帰計算について(その3), 土木学会第38回年次学術講演会, pp.607-608, 1983年.
- 10) 富澤幸一, 片倉浩二: 杭の載荷試験結果による設計地盤定数の評価, 土と基礎 Vol.38, No.7, pp.57-62, 1990年.
- 11) 村中俊裕, 中村正司, 今田和夫: 静的コーン貫入試験を用いた杭の支持力評価手法, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.928-929, 1991年.
- 12) 土質工学会編: 土質調査法, 1985年改訂.

*

*

*