

調査法や施工法の精度・品質に応じた道路橋下部構造の信頼性評価技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：七澤利明，西田秀明，河野哲也，
谷本俊輔

【要旨】

道路橋基礎や橋台の施工時・地震時に生じる不具合は、地盤調査や施工品質の精度が低いことや不足していることが要因となる事例が少なくない。このため、地盤調査の充実やより適切な施工管理方法が行われるよう規定が改定されてきているものの、信頼性の向上に見合った設計の合理化を行う手法がないことが課題となっている。また、次期道路橋示方書改定では部分係数設計法の導入が予定されている。そこで本研究は、設計の合理化を図り、信頼性の高いインフラの整備につなげることを目的として、調査精度や施工品質に応じた信頼性の評価手法及び部分係数の設定法について提案することを目的として行うものである。

平成 25 年度は、杭基礎の鉛直支持力の照査について、粘性土層での評価法等の違いが支持力の推定精度に及ぼす影響について検討を行った結果について報告する。

キーワード：部分係数設計法，杭基礎，支持力，粘性土

1. はじめに

平成 24 年道路橋示方書IV下部構造編（以下、H24 道示 IV）においては、杭の押し込み支持力に対して、杭の載荷試験を用いる場合と支持力推定式を用いる場合で安全率に差があり、前者を用いることにより設計上有利に扱うことができる。これは、支持力推定式が全国の地盤の平均的な値を算出し示されたものであるに対して、載荷試験は原位置での支持力を直接確認することができ、得られる支持力の信頼性が高いことによる。

ここで、H24 道示において支持力推定式を用いる場合の安全率は杭の施工法や地盤条件によらず一律であるものの、支持力推定式による推定精度は杭の施工法や地盤条件により異なるため、これらの違いを反映した合理的な設計ができる体系となっていない。

そこで、杭基礎の鉛直支持力（押し込み支持力）の照査について、信頼性に基づき施工法や調査法の違いによる極限支持力の推定精度の違いを考慮した部分係数の提案を目的として、粘性土層での評価法等の違いが支持力の推定精度に及ぼす影響についての検討結果を示す。

2. 支持力の推定精度に関する影響についての検討方法

2.1 検討の対象及び評価方法

杭基礎における押し込み支持力に対しては、杭頭反力から 1 本の杭の軸方向許容押し込み支持力を超えないことを照

査する。

ここで、1 本の杭の許容押し込み支持力 R_a は、H24 道示 IV12.4.1 に規定される式 (1) で求められる。

$$R_a = \frac{\gamma}{n} (R_u - W_s) + W_s - W \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、

n ：安全率（支持杭については常時 3、L1 地震時 2）

γ ：極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数
（載荷試験の場合 1.2，支持力推定式の場合 1.0）

R_u ：地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)

W_s ：杭で置換えられる部分の土の有効重量 (kN)

W ：杭及び杭内部の土の有効重量 (kN)

ここで、地盤から決まる杭の極限支持力 R_u を支持力推定式から求める場合は式 (2) で求められる。

$$R_u = q_d A + U \sum L_i f_i \quad \dots \text{式(2)}$$

ここに、

q_d ：杭先端における単位面積あたりの極限支持力度
(kN/m²)

A ：杭先端面積 (m²)

U ：杭の周長 (m²)

L_i ：周面摩擦力を考慮する i 層の層厚 (m)

f_i ： i 層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

式 (2) に含まれる変数のうち、杭の施工法の違いの影響

があるものは、杭先端における単位面積あたりの極限支持力度 q_d と最大周面摩擦力度 f_i がある。さらに最大周面摩擦力度は、粘性土地盤の場合、標準貫入試験から得られた N 値から推定する場合と、一軸圧縮試験 q_u から求めた粘着力 c より推定する方法があり、地盤調査方法の違いの影響もある。

これらを考慮して、支持力の推定精度について、後述する確率変数に対する統計量を用いて、「杭基礎設計便覧」(日本道路協会, H19年1月)の参考資料4.に示される方法を参考に評価を行った。

極限支持力 R_u は、杭先端支持力度及び周面摩擦力度を確率変数とすると式(3)のように表すことができる。

$$R_u = \alpha_{qd} A + U \sum \alpha_{fi} L_i \quad \dots \text{式(3)}$$

ここに、

α_{qd} : 杭先端の極限支持力度 (確率変数)

α_{fi} : i 層の杭周面摩擦力度 (確率変数)

ここで、各地層間の相関性がないとすると、杭の極限支持力の平均値 \bar{R} と分散 σ_R^2 は式(4)及び式(5)で求めることができる。

$$\bar{R}_u = \bar{\alpha}_{qd} A + U \sum \bar{\alpha}_{fi} L_i \quad \dots \text{式(4)}$$

$$\sigma_R^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{af}^2 \quad \dots \text{式(5)}$$

ここに、

$\bar{\alpha}_{qd}$, σ_p : 杭先端の極限支持力度の平均値, 分散

$\bar{\alpha}_{fi}$, σ_{af} : i 層の杭周面摩擦力度の平均値, 分散

また、杭の極限支持力の変動係数 V_R は式(6)より求められる。

$$V_R = \sqrt{\sigma_R^2 / \bar{R}_u} \quad \dots \text{式(6)}$$

これを後述する解析条件の下で算出し、変動係数の傾向について検討した。

なお、摩擦杭の場合は、上述の式より先端支持力度に関する項を除き評価を行った。また、杭頭反力に関するばらつきについては考慮せず、確定値として扱った。

2.2 解析条件、推定式及び統計量の設定

本検討において考慮した地盤条件に関するパラメータ

を表2.1に示す。パラメータは、支持層までの深さ、設計上の地盤面から支持層までの層(中間層)に占める粘性土層層厚の割合、粘性土層の地盤定数とした。このうち、粘性土層の地盤定数は、最大周面摩擦力度を N 値から推定する場合と粘着力 c から推定する場合を想定して設定した。

杭工法及び杭種は、場所打ち杭工法(杭径1.2m)、打撃工法及び中掘り杭工法(鋼管杭、杭径1.0m)の3ケース、杭の支持条件は、支持杭及び摩擦杭をそれぞれ検討した。杭工法及び杭種、支持層までの深さは、過去の施工実績が比較的多い範囲で設定した。

杭の周面摩擦力度及び杭先端の極限支持力度は、表2.2及び表2.3に示す推定式を用いた。ただし、本検討の支持力計算においては、確率論的な取扱いを行う必要から f 及び q_d の上限は無視した。

表2.2及び表2.3に示した支持力推定式のモデル誤差(実験値/推定値の比)の統計量を表2.4に示す。これらの統計量は、土研で収集した杭の鉛直載荷試験データ³⁾の分析に基づいて設定したものである。載荷試験データは、載荷荷重・変位、杭寸法および地盤条件等の基本情報が揃っているもののうち、Weibull分布曲線で近似したときに、杭頭変位が杭径の10%に達する時の杭頭反力を実測値とみなすことができるだけの十分な載荷がなされていると考えられる、次のa), b), c)の条件を満足するものを採用した。

- a) 載荷試験時に荷重保持が確認できたもの
- b) 杭体に周面摩擦力を低減させる処置(例えばSL剤塗布)を施していないもの
- c) 杭頭における実測最大荷重 P_{omax} が、Weibull分布関数にあてはめた結果得られる降伏荷重 $P_{\text{oy}} \doteq 0.63 P_{\text{ou}}$ の1.2倍以上であるもの ($P_{\text{omax}} \geq 1.2 P_{\text{oy}} \doteq 0.76 P_{\text{ou}}$)

一般に、杭の支持力は、周面抵抗力と先端抵抗力との和で表され、前者は載荷試験で計測された杭体の軸力(軸ひずみ×軸剛性 EA)の差分により、後者は杭頭反力と周面抵抗力との差分によりそれぞれ評価される。今回の検討では、杭体の先端から杭径分だけ上方の位置を境に、これより下方を杭先端抵抗力を考慮する範囲、上方を周面抵抗力を考慮する範囲としてそれぞれ扱い実験値を整理した。

表 2.1 検討で考慮した地盤条件に関するパラメータ

項目		パラメータ
支持層までの深さ(m)		15, 30, 45
中間層に占める粘性土層厚の割合(%)		20, 40, 60, 80, 100
地盤定数	粘性土層	1) N 値=1, c=40kN/m ² 2) N 値=5, c=62.5kN/m ² 3) N 値=10, c=125kN/m ²
	砂質土層	N 値=10(中間層) N 値=50(支持層)

表 2.2 杭先端の極限支持力度 q_d (kN/m²) の推定式 (砂層)

杭工法	地盤の種類	杭先端の極限支持力度 q_d (kN/m ²)
場所打ち杭工法		3,000
打撃工法 (先端開放)		30(L _b /D)N (L _b /D ≤ 5, N ≤ 50)
中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式)		200N (≤ 10,000)

※L_b: 支持層への根入れ深さ

表 2.3 杭の周面摩擦力度 f (kN/m²) の推定式

杭工法	地盤の種類	
	砂質土	粘性土
場所打ち杭工法	5N (≤ 200)	c 又は 10N (≤ 150)
打撃工法	10N (≤ 100)	c 又は 8N (≤ 75)
中掘り杭工法	4N (≤ 75)	c 又は 5N (≤ 50)

3. 検討結果

3.1 極限支持力の推定精度の試算結果と考察

極限支持力の推定精度を試算した結果、中間層に占める粘性土層厚の割合と極限支持力の変動係数の関係を図 3.1~3.6 に、極限支持力の設計値(表 2.2 及び表 2.3 を式(3)に代入して求めた値)に対する粘性土層の周面摩擦力の設計値の比と極限支持力の変動係数の関係を図 3.7, 図 3.8 に示す。

3.1.1 場所打ち杭

場所打ち杭における極限支持力の変動係数は、一般的には粘性土層の割合が多くなるほど大きくなること、また、周面摩擦力を N 値から推定した場合の方が粘着力から推定した場合より大きいものの、N 値が 1 の場合で中間層に占める粘性土層の割合が 60~100% の範囲ではこの傾向が逆転していることがわかる。

N 値の影響をみると、N 値=1 の場合では、中間層に占める粘性土層厚の割合が 20%~60% までは極限支持力の変動係数が小さくなるが、それ以降は変動係数が大

表 2.4 支持力推定式のモデル誤差に関する統計量

(a) 杭先端の極限支持力度

杭種・杭工法	データ数	平均値	変動係数
場所打ち杭工法	14	1.24	0.56
打撃工法 (鋼管杭)	17	1.67	0.54
中掘り杭工法 (鋼管杭)	13	0.97	0.17

(b) 周面摩擦力度 (粘性土)

推定方法		粘着力から		N 値から	
杭種・杭工法	データ数	平均値	変動係数	平均値	変動係数
場所打ち杭工法	6	1.21	1.03	2.26	1.18
打撃工法 (鋼管杭)	18	1.64	0.72	1.79	0.74
中掘り杭工法 (鋼管杭)	19	2.15	2.37	3.44	1.33

(c) 周面摩擦力度 (砂質土)

杭種・杭工法	データ数	平均値	変動係数
場所打ち杭工法	72	1.06	0.84
打撃工法 (鋼管杭)	112	0.96	0.91
中掘り杭工法 (鋼管杭)	140	1.19	0.90

きくなり、V 字形の傾向がみられた。これは、粘性土層厚の割合が少ない場合には、極限支持力に占める粘性土層の周面摩擦力の割合が相対的に小さく、粘性土のばらつきの影響が小さくなったためと考えられる。一方、N 値が N=5 または N=10 の場合においては、中間層に占める粘性土層厚の割合が多くなるにつれて、極限支持力の変動係数が大きくなる傾向がみられる。これは、周面摩擦力度の変動係数の影響と、砂質土の周面摩擦力度 (5N) が粘性土の周面摩擦力度 (10N) に比べて小さいため、相対的に粘性土層の周面摩擦力が支持力全体に寄与する割合が大きくなり、ばらつきの影響が現れたものと考えられる。

極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比 p と極限支持力の変動係数の関係は、周面摩擦力度の変動係数の影響から p が 0.3 程度以上になると変動係数が大きくなる傾向がある。同様に p が 0.3 程度以下では周面摩擦力を粘着力から推定した場合と N 値から推定した場合は同程度であるが、右上がりの部分では周面摩擦力を粘着力から推定した場合よりも N 値から推定した場合のほうが極限支持力の変動係数が大きい。また、粘着力や N 値の大きさによらず同じ傾向を示している。

3.1.2 打込み杭

打込み杭 (鋼管杭) における極限支持力の変動係数は、中間層に占める粘性土層の割合が小さい範囲では、周面

摩擦力を N 値から推定した場合よりも粘着力から推定した場合の方が小さい傾向があるが、粘性土層の割合が大きくなると逆転する傾向がみられた。

極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比 p と極限支持力の変動係数の関係を見ると、粘着力や N 値の大きさ、周面摩擦力の推定方法によらず同傾向を示す。

粘性土層の N 値によらず、中間層に占める粘性土層厚の割合と極限支持力の変動係数や、極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比と極限支持力の変動係数が V 字になる。これは、打撃工法の場合、周面摩擦力度のモデル誤差の変動係数が粘性土と砂質土で同程度であることや、周面摩擦力度の推定式も粘性土(8N)と砂質土(10N)で大きな差がないためと考えられる。

3.1.3 中掘り杭

中掘り杭(鋼管杭)における極限支持力の変動係数は、周面摩擦力を粘着力から推定した場合よりも N 値から推定した場合の方が、極限支持力の変動係数が小さい傾向が見られる。これは、周面摩擦力度の変動係数が、 N 値から推定した場合の方が粘着力から推定した場合に比べて小さいことの影響が大きい。

また、極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比 p が大きくなると極限支持力の変動係数が大きくなる。

3.1.4 支持杭と摩擦杭の比較

摩擦杭の場合の極限支持力は、先端支持力を考慮せず周面摩擦力と一致するため、変動係数は支持層までの深さには影響しない。支持杭と比較して摩擦杭の方が極限支持力の変動係数そのものは大きい、中間層に占める粘性土層厚の割合と極限支持力の変動係数の関係では、支持杭と摩擦杭は同じ傾向である。

4. まとめ

杭基礎の鉛直支持力照査を対象として、粘性土層に対する地盤調査法や、中間層に占める粘性土層の割合等の違いが支持力の推定精度に及ぼす影響について検討を行った。

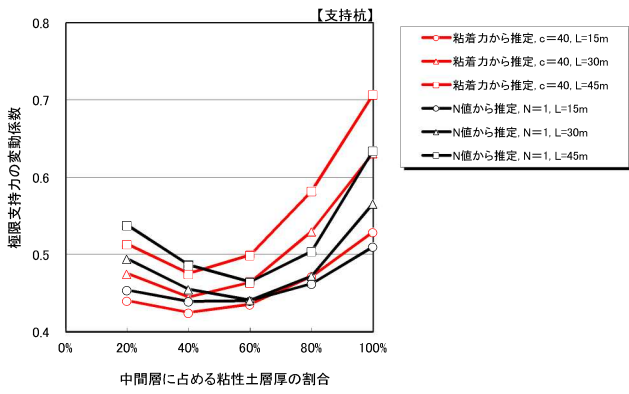
この結果、極限支持力の推定精度(変動係数)は、中間層厚に占める粘性土の割合、地盤調査法の違いによる周面摩擦力の推定法、杭工法の違いにより影響があることが明らかとなった。

この結果より、今後、鉛直支持力の照査に用いる常時及びレベル1地震時における部分係数を検討する場合には、杭先端の極限支持力度や周面摩擦力度の不確実性のみならず、中間層の構成割合も考慮する必要があるといえる。

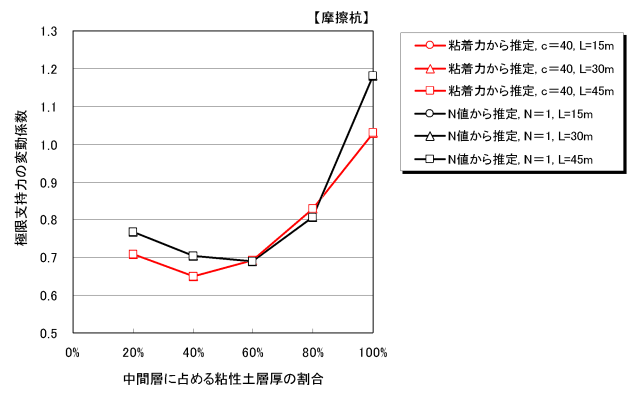
ただし、杭の載荷試験を行う際、多くのケースでは同時に標準貫入試験を行っているため N 値に関するデータは比較的多く得られているのに対して、粘着力 c を得るために必要となる一軸圧縮試験を行っている事例は限定的である。また、仮に一軸圧縮試験を行っていても、 N 値が 1m ピッチで試験しているのに比べると少ない。このため、周面摩擦力度を粘着力 c から求めた場合の不確実性の評価についてはデータ数が少ないことが平均値や変動係数の評価にも影響している可能性があることから、今後さらなるデータの蓄積を行い、適宜見直していく必要があると考えられる。今後、以上のような点も併せて検討したうえで、部分係数の提案を行う予定である。

参考文献

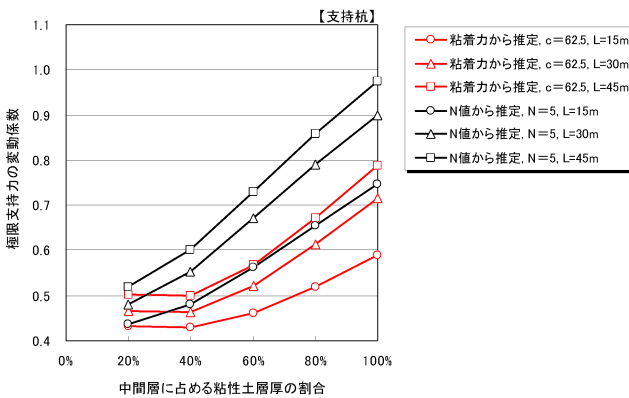
- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3
- 2) 日本道路協会：杭基礎設計便覧，2007.1
- 3) 中谷，白戸，河野，中村，野村，横幕，井落：性能規定体系における道路橋基礎の安定照査法に関する研究，土木研究所資料第4136号，2009.3
- 4) 七澤，西田：道路橋設計法の部分係数と杭の載荷試験の活用，基礎工8月号，2013.9



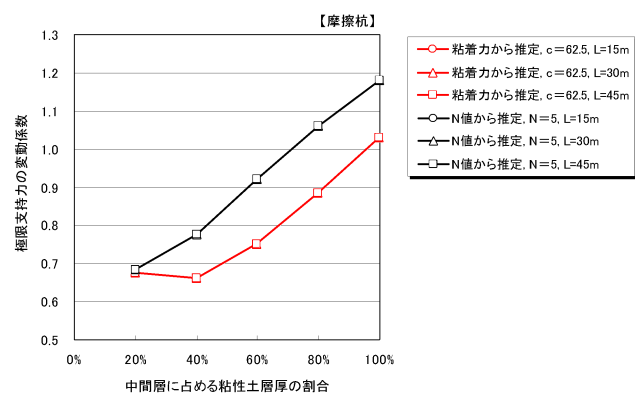
(a)N=1



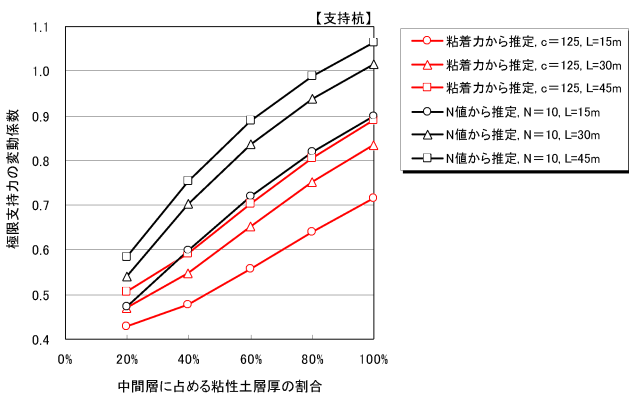
(a)N=1



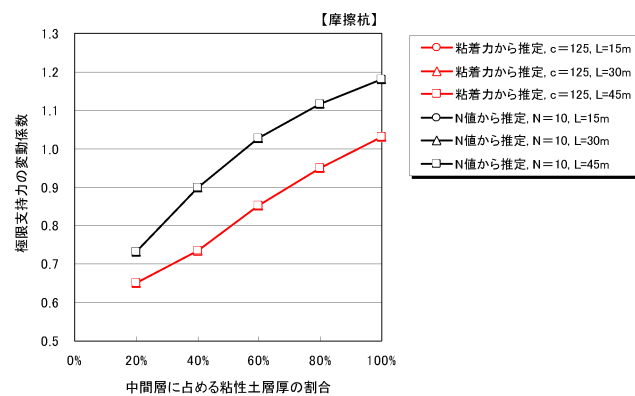
(b)N=5



(b)N=5



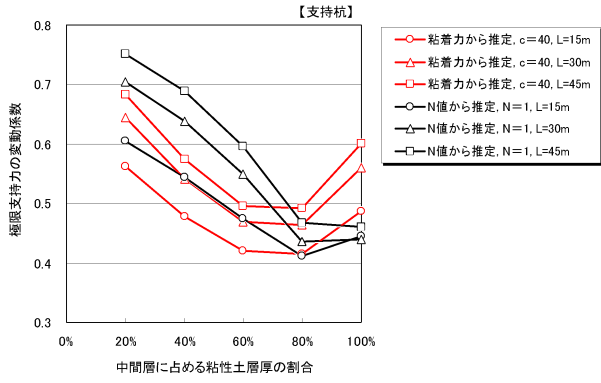
(c)N=10



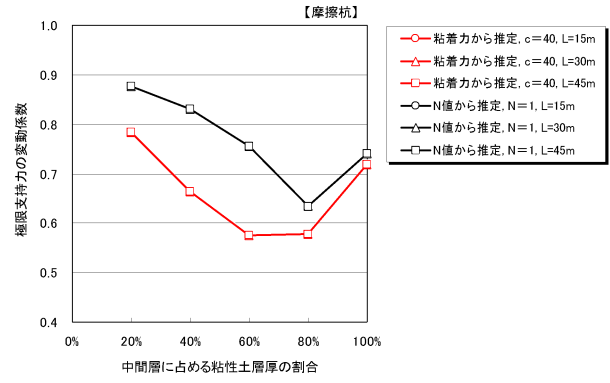
(c)N=10

図 3.1 極限支持力の変動係数
場所打ち杭工法（支持杭）

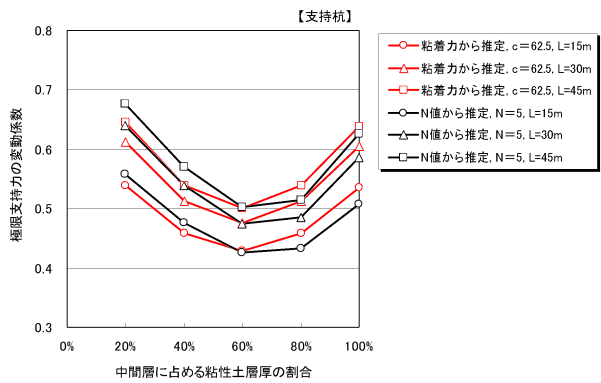
図 3.2 極限支持力の変動係数
場所打ち杭工法（摩擦杭）



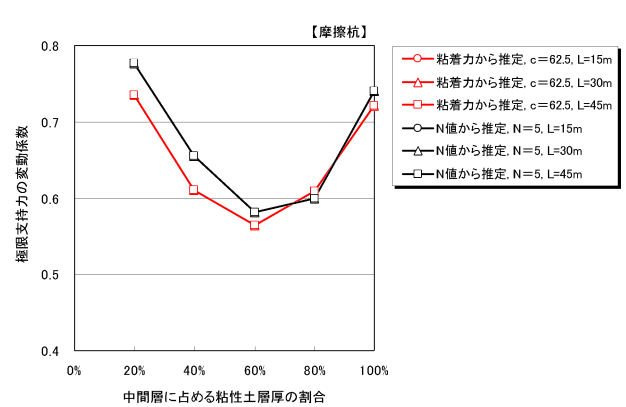
(a)N=1



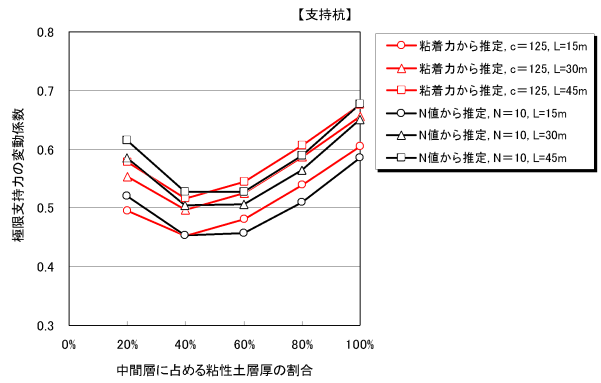
(a)N=1



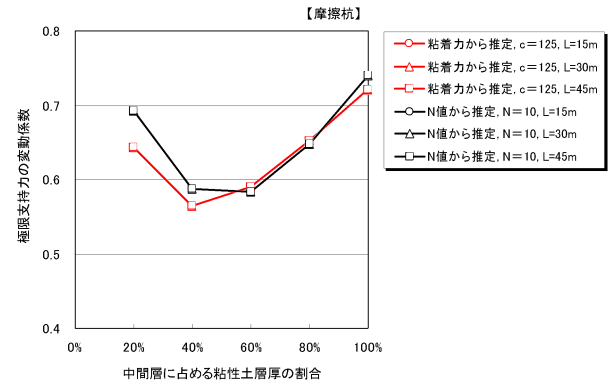
(b)N=5



(b)N=5



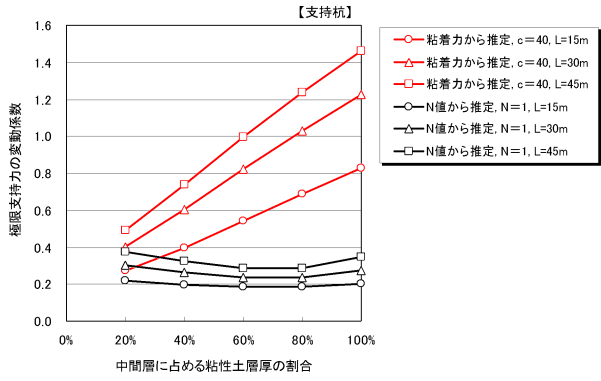
(c)N=10



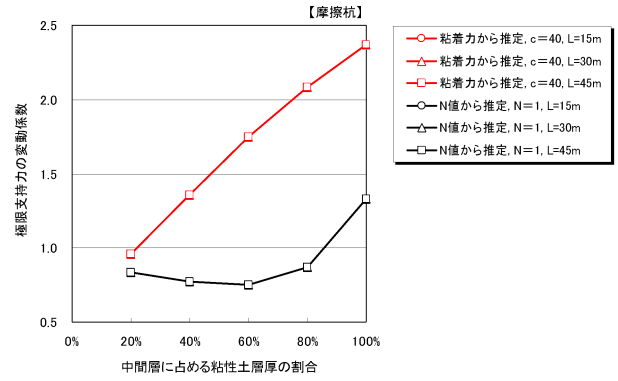
(c)N=10

図 3.3 極限支持力の変動係数
打撃工法（支持杭）

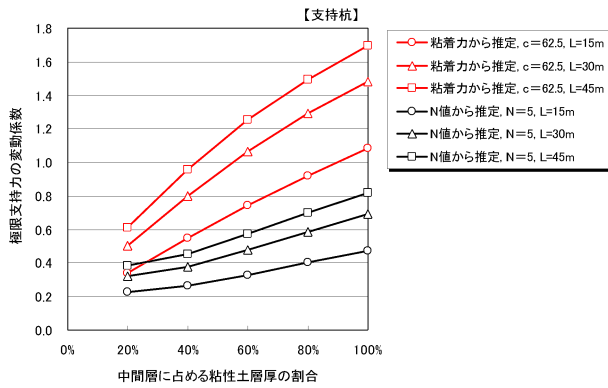
図 3.4 極限支持力の変動係数
打撃工法（摩擦杭）



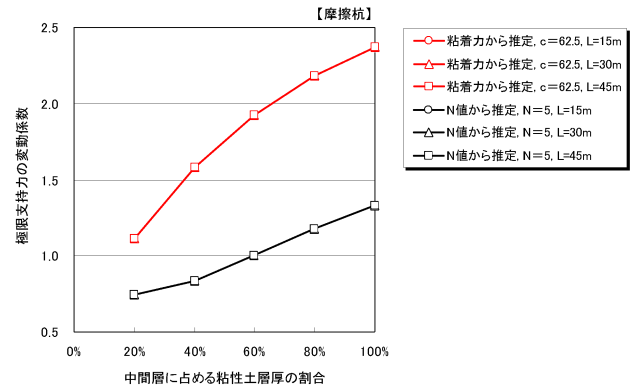
(a)N=1



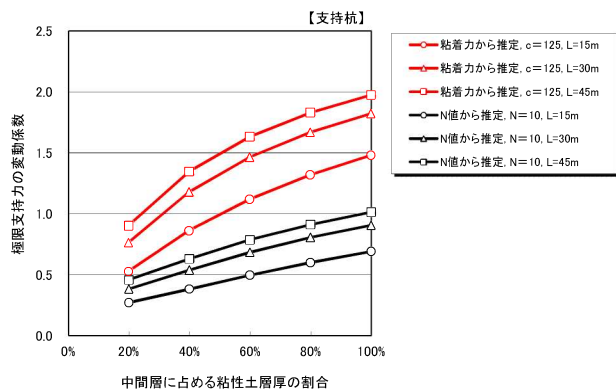
(a)N=1



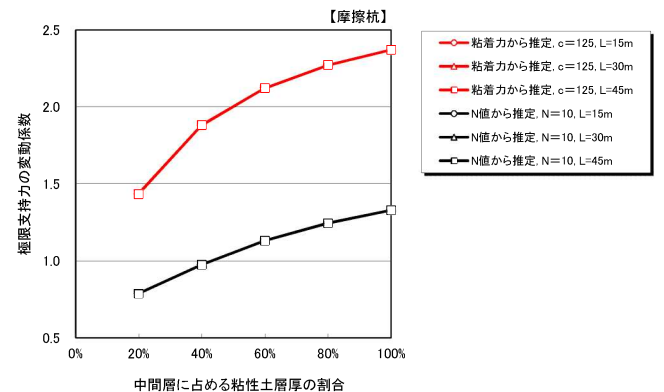
(b)N=5



(b)N=5



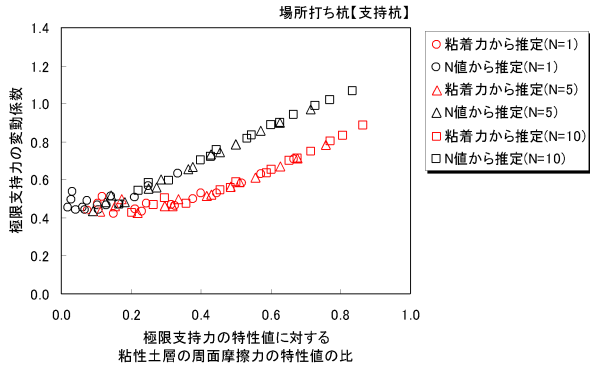
(c)N=10



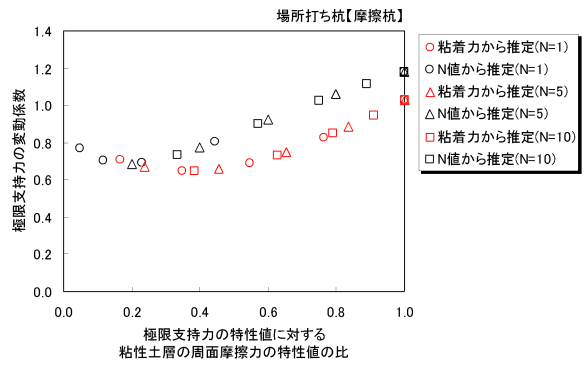
(c)N=10

図 3.5 極限支持力の変動係数
中掘り杭工法 (支持杭)

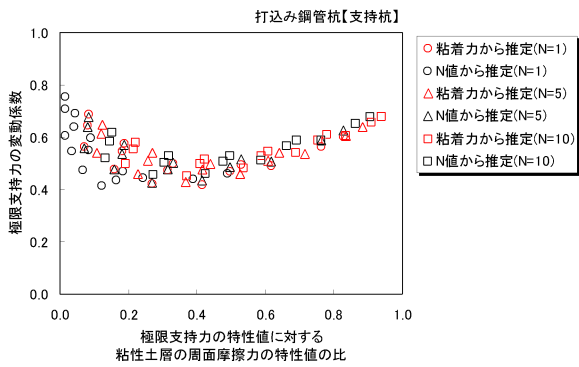
図 3.6 極限支持力の変動係数
中掘り杭工法 (摩擦杭)



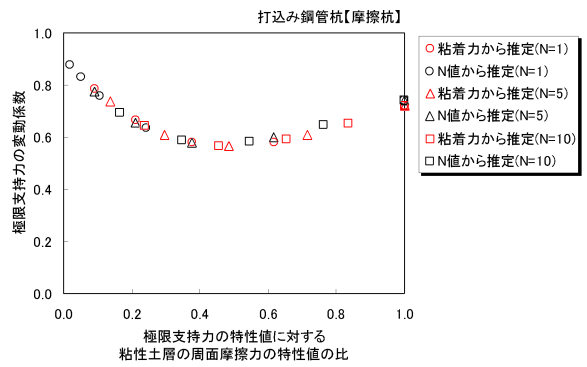
(a)場所打ち杭



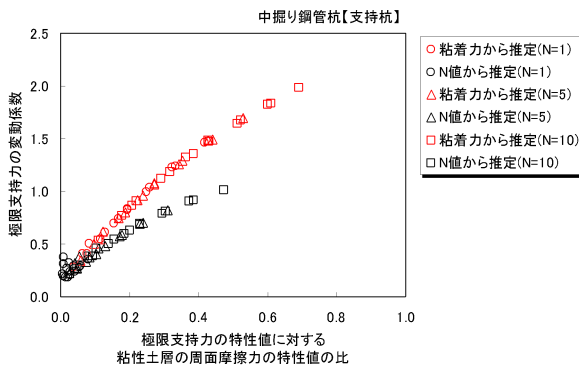
(a)場所打ち杭



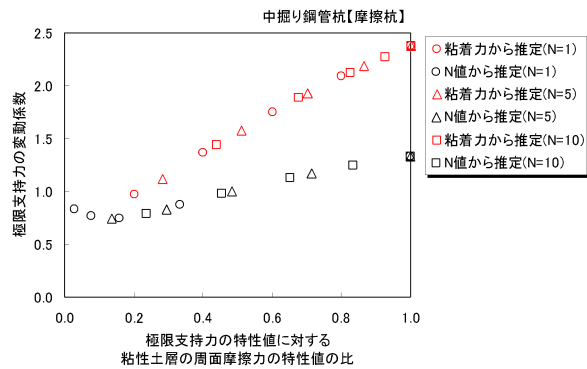
(b)打撃工法



(b)打撃工法



(c)中掘り杭工法



(c)中掘り杭工法

図 3.7 極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比 (特性値) と極限支持力の変動係数の関係 (支持杭)

図 3.8 極限支持力に対する粘性土層の周面摩擦力の比 (特性値) と極限支持力の変動係数の関係 (摩擦杭)

A STUDY ON RELIABILITY EVALUATION METHODS OF SUBSTRUCTURES DEPENDING ON THE ACCURACY OF GEOTECHNICAL SURVAY AND CONSTRUCTION QUALITY

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2013-2015

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : NANAZAWA Toshiaki

NISHIDA Hideaki

KOHNO Tetsuya

TANIMOTO Shunsuke

Abstract : Japanese highway design specifications of road bridges have been revised to do the geotechnical survey more sufficient and to apply the high quality construction management methods. This is because we have a lot of examples that it becomes the malfunction of the substructures of road bridges due to insufficient of geotechnical survey and construction quality. However, it is no way to be applied for the design of the structure even if surveyor or constructor would make an effort to do with high quality. The purpose of this study is to propose the verification method and setting up method of partial factors of the substructures, which depend on the accuracy of geotechnical survey and construction quality, based on reliability based method.

In FY2013, the estimation accuracy of bearing capacity of the pile foundations was investigated in the point of view of the difference of the estimation methods of skin friction in cohesive soil.

Key words : partial factor design method, pile foundation, bearing capacity, cohesive soil