ＩＳＳＮ ０３８６－５８７８

土木研究所資料第 4374 号

土 木 研 究 所 資 料

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に関する研究

平成３０年３月

国立研究開発法人土木研究所

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

Copyright © (2018) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第 4374 号 2018 年 3 月

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

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　上席研究員　七澤　利明
主任研究員　河野　哲也
交流研究員　宮原　清*
交流研究員　大城　一徳

*交流研究員在職期間：　平成 27 年 4 月～平成 29 年 3 月

要 旨

本研究では，杭の軸方向の支持力及びばね定数に係る特性値を求めるための推定式の見直し，並びに推定精度の評価に関する検討を行う。推定式の見直しでは，載荷試験データの分析結果に基づき，先端抵抗力，周面抵抗力，軸方向ばね定数の推定式について，平均的な挙動を再現できかつ精度のよいものへの見直しを検討する。また，提案する推定式の推定精度を評価する。

キーワード：杭，支持力，軸方向ばね定数

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

目次

1. 序論……1
1.1 研究の概要……1
1.2 対象とする杭工法……2
1.3 収集データ……2
1.4 荷重–変位関係の整理……5
1.4.1 荷重-変位関係の近似……5
1.4.2 杭頭及び杭先端の荷重-変位関係……7
1.5 使用する統計量……9
2. 支持力推定式……10
2.1 極限支持力……10
2.2 採用データ……12
2.3 データの整理……15
2.3.1 杭体軸力……15
2.3.2 先端抵抗と杭先端の *N* 値……16
2.3.3 周面抵抗と採用する土層……18
2.4 推定式算定の標準化……19
2.5 先端抵抗力の推定式算定……22
2.5.1 *N* 値による推定式……22
2.5.2 L_b/D による推定式……28
2.5.3 算定した q_d の推定式に関する考察……30
2.6 周面抵抗力の推定式算定……32
2.6.1 *c* 値及び *N* 値による推定式……32
2.6.2 算定した f_i の推定式に関する考察……39
2.7 推定精度の検証……41
2.7.1 先端抵抗力の推定精度……42
2.7.2 周面抵抗力の推定精度……44
2.7.3 極限支持力の推定精度……51
2.7.4 先端伝達率の推定精度……54
2.8 支持力推定式の提案……56

3. 軸方向ばね定数の推定式……57
3.1 降伏支持力……57
3.2 採用データ……58
3.3 従来式の課題……62
3.4 既往の研究……65
3.5 支持杭の軸方向ばね……66
3.5.1 先端伝達率の推定式……66
3.5.2 杭体変形量の推定式……69
3.5.3 杭先端変位の推定式……72
3.5.4 軸方向ばね定数の推定式……75
3.5.5 推定精度の検証……75
3.6 摩擦杭の軸方向ばね……77
3.6.1 軸方向ばね定数の推定式……77
3.6.2 推定精度の検証……78
4. 結論……80
参考文献……81

付属資料……83
1. バイブロハンマ工法の支持力推定式……85
1.1 先端抵抗力の推定式算定……86
1.2 周面抵抗力の推定式算定……88
1.3 まとめ……90
2. 打撃工法における杭寸法の変遷……91
3. 収集した鉛直載荷試験データ一覧……92
参考文献……104

図表目次

図 1.3.1　収集データの寸法範囲 ……4
図 1.4.1　Weibull 分布曲線とその特性点……6
図 1.4.2　Weibull 分布関数による近似曲線の描き方 ……6
図 1.4.3　4 本の Weibull 曲線 ……8
図 2.2.1　採用データの寸法範囲（支持力） ……14
図 2.3.1　杭体軸力の計測と外挿の例 ……15
図 2.3.2　周面抵抗力の考慮範囲の基本的な考え方……15
図 2.3.3　先端 N 値の評価範囲と支持地盤種別の決定例……16
図 2.3.4　N 値の平均値 $\overline{N}$ の計算方法（等価平均） ……17
図 2.3.5　N 値の平均値 $\overline{N}$ の計算方法による結果の比較 ……17
図 2.3.6　周面抵抗力度を評価する際の地盤種別の扱い……18
図 2.4.1　バイリニア関係と仮定する場合の強度係数決定法の例……19
図 2.4.2　強度変化点判定図を利用した推定線の算定例……20
図 2.5.1　先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（N 値） ……24
図 2.5.2　先端抵抗力度 q_d の推定線（N 値）……27
図 2.5.3　先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（L_b/D）……28
図 2.5.4　先端抵抗力度 q_d の推定線（L_b/D）……29
図 2.6.1　周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定……34
図 2.6.2　周面抵抗力度 f_i の推定線（c 値，粘性土）……36
図 2.6.3　周面抵抗力度 f_i の推定線（N 値，粘性土）……37
図 2.6.4　周面抵抗力度 f_i の推定線（N 値，砂質土）……38
図 2.7.1　先端抵抗力 R_{up} の実測値–推定値関係 （従来式・一次提案式）……43
図 2.7.2　先端抵抗力 R_{up} の推定精度 （従来式・一次提案式）……43
図 2.7.3　粘性土の一軸圧縮強度 q_u と N 値との関係（文献に加筆）……44
図 2.7.4　周面抵抗力 R_{uf} の実測値-推定値関係 （一次提案式，CASE-A1・A2）……46
図 2.7.5　周面抵抗力 R_{uf} の推定精度 （一次提案式，CASE-A1・A2）……46
図 2.7.6　周面抵抗力 R_{uf} の実測値-推定値関係 （一次提案式，CASE-B1・B2）……47
図 2.7.7　周面抵抗力 R_{uf} の推定精度 （一次提案式，CASE-B1・B2）……47
図 2.7.8　周面抵抗力 R_{uf} の実測値-推定値関係 （従来式・一次提案式，CASE-A3） 49
図 2.7.9　周面抵抗力 R_{uf} の推定精度 （従来式・一次提案式，CASE-A3）……49
図 2.7.10　周面抵抗力 R_{uf} の実測値-推定値関係（従来式・一次提案式，CASE-B3） 50

図 2.7.11　周面抵抗力 R_{uf} の推定精度　（従来式・一次提案式，CASE-B3）…… 50
図 2.7.12　極限支持力 R_u の実測値-推定値関係　（従来式・一次提案式，CASE-A3）52
図 2.7.13　極限支持力 R_u の推定精度　（従来式・一次提案式，CASE-A3）…… 52
図 2.7.14　極限支持力 R_u の実測値-推定値関係　（従来式・一次提案式，CASE-B3）53
図 2.7.15　極限支持力 R_u の推定精度　（従来式・一次提案式，CASE-B3）…… 53
図 2.7.16　先端伝達率 γ_u の実測値-推定値関係　（従来式・一次提案式，CASE-A3）· 55
図 2.7.17　先端伝達率 γ_u の比較　（実測値・従来式・一次提案式，CASE-A3）…… 55
図 2.7.18　先端伝達率 γ_u の推定精度　（従来式・一次提案式，CASE-A3）…… 55
図 3.1.1　Weibull 特性点以外を降伏点とする場合の判定例 …… 58
図 3.2.1　載荷荷重の大きさと log P_o - log S_o 関係における折れ点の有無の例 …… 59
図 3.2.2　採用データの寸法範囲（軸方向ばね）…… 61
図 3.3.1　実測 K_v - EA / L 関係 …… 63
図 3.3.2　a - L / D 関係…… 64
図 3.5.1　実測 γ_y –実測 γ_u 関係 …… 67
図 3.5.2　実測 γ_y 及び実測 γ_u …… 67
図 3.5.3　実測 γ_y –推定 γ_u 関係 …… 68
図 3.5.4　実測 γ_y 及び推定 γ_u …… 68
図 3.5.5　周面抵抗力の深度方向分布 …… 69
図 3.5.6　ΔL_y / D の実測値-推定値関係　（補正前，推定 γ_y ）…… 71
図 3.5.7　S_{py} / D の実測値–推定値関係（補正前，推定 γ_y ）…… 74
図 3.5.8　K_v の実測値–推定値関係　（従来式・提案式，推定 γ_y ）…… 76
図 3.5.9　K_v の推定精度（従来式・提案式，推定 γ_y ）…… 76
図 3.6.1　摩擦杭の ΔL_y / D の実測値–推定値関係　（補正前，推定 γ_y ）…… 78
図 3.6.2　摩擦杭の K_v の実測値–推定値関係　（従来式・提案式）…… 79
図 3.6.3　摩擦杭の K_v の推定精度（従来式・提案式）…… 79

表 1.3.1　収集した鉛直載荷試験数 ……3
表 2.1.1　杭の有効径 …… 11
表 2.2.1　データの採用条件（支持力） …… 12
表 2.2.2　土研資料 4139 号で条件-1 に並べて示されていた採用条件【参考】 …… 12
表 2.2.3　採用した鉛直載荷試験数（支持力） …… 13
表 2.5.1　先端抵抗力度 q_d の推定式（N 値，算定）　（kN/m^2） …… 26
表 2.5.2　先端抵抗力度 q_d の推定式（L_b/D，算定）　（kN/m^2） …… 29
表 2.5.3　先端抵抗力度 q_d の推定式（一次提案）　（kN/m^2） …… 31
表 2.6.1　周面抵抗力度 f_i の推定式（算定）　（kN/m^2） …… 35
表 2.6.2　推定式算定における粘性土の f_i の推定比の変動係数 …… 39
表 2.6.3　周面抵抗力度 f_i の推定式（一次提案）　（kN/m^2） …… 40
表 2.7.1　周面抵抗力 R_{uf} 推定の検証ケース …… 44
表 2.8.1　先端抵抗力度 q_d の推定式（最終提案）　（kN/m^2） …… 56
表 2.8.2　周面抵抗力度 f_i の推定式（最終提案）　（kN/m^2） …… 56
表 3.1.1　降伏点の扱い …… 58
表 3.2.1　データの採用条件（軸方向ばね） …… 59
表 3.2.2　採用した鉛直載荷試験数（軸方向ばね） …… 60
表 3.3.1　従来式に用いる工法別係数の値 …… 62
表 3.5.1　実測γ_y - 実測γ_u 関係 …… 67
表 3.5.2　実測γ_y - 推定γ_u 関係 …… 68
表 3.5.3　推定$\Delta L_y / D$ の計算に用いる軸剛性 EA …… 70
表 3.5.4　$\Delta L_y / D$ の補正前の推定精度と補正係数ζ_e …… 71
表 3.5.5　変形係数 E_0（kN/m^2）の算定式 …… 72
表 3.5.6　S_{py} / D の補正前の推定精度と補正係数ζ_d …… 74
表 3.5.7　K_v の補正係数λ_{yu}，ζ_e，ζ_d …… 75
表 3.6.1　摩擦杭の$\Delta L_y / D$ の補正前の推定精度と補正係数ζ_e' …… 78

1. 序論

1.1　研究の概要

平成 29 年に改定された道路橋の設計基準である道路橋示方書[1)]では，平成 24 年改定の道路橋示方書[2)]と比べて新たに信頼性に基づく部分係数設計法が導入された。本研究は，この平成 29 年の道路橋示方書における杭の軸方向の支持力及びばね定数に係る特性値を求めるための推定式に関する検討を行ったものであり，推定式の見直し，並びに推定精度の評価に関する検討を行っている。推定式の見直しでは，載荷試験データの分析結果に基づき，先端抵抗力，周面抵抗力，軸方向ばね定数の推定式について，平均的な挙動を再現できかつ精度のよいものへの見直しを検討する。また，提案する推定式の推定精度を評価する。以下に各章の概要を示す。

「1. 序論」では，研究の概要に加えて，対象とする杭工法，土木研究所で収集した杭の鉛直載荷試験データ，データにおける荷重 - 変位関係を近似する方法，使用する統計量について述べている。

「2. 支持力推定式」では，収集した鉛直載荷試験データを用いて，平成 24 年の道路橋示方書に示されている各杭工法の極限支持力における先端抵抗力度及び周面抵抗力度の推定式の見直しを行い，併せて見直しの過程において，推定式の算定方法の標準化を行う。推定式の見直しは，土木研究所資料第 4139 号[3)]や土木研究所資料第 4297 号[4)]（以降，それぞれ，土研資料 4139 号，土研資料 4297 号と呼ぶ）にも示され，本研究でも同資料に示す方法に準じて分析を行っているが，試験データの選定方法及び評価方法について，データの信頼性向上や基準に示す考え方との整合を踏まえて一部見直しており，また，今回の見直しにより提案する推定式の推定精度を評価する。

「3. 軸方向ばね定数の推定式」では，軸方向ばね定数の推定式について，平成 24 年の道路橋示方書に示す推定式の見直しを行っている。具体的には，土研資料 4139 号に示す推定式の式形が一部修正された土研資料 4297 号と同じ式形を用いて，「2. 支持力推定式」と同様の方法により杭の押込み試験データを一定の方法により分析し，推定式に用いる補正係数を杭工法別に設定している。また，実測値と見直した推定式による推定値との比（推定比）を各試験データに対して計算し，見直しにより提案する推定式の推定精度を杭工法別に評価している。

「4. 結論」では，本研究のまとめと今後の課題を示している。

なお，本研究では，杭の抵抗力に関する主な用語として，道路橋示方書で使用される「極限支持力」「許容支持力」「降伏支持力」，地盤工学会の基準[5)]で使用される「先端抵抗力」「周面抵抗力」を使用する。

1.2　対象とする杭工法

平成 2 年の道路橋示方書[6]に示される杭工法は，打撃工法，場所打ち杭工法及び中掘り杭工法の 3 種類であった。その後，平成 14 年に改定された道路橋示方書[7]には，新たに 3 工法（バイブロハンマ工法，鋼管ソイルセメント杭工法及びプレボーリング杭工法）が示され，平成 24 年に改定された道路橋示方書では，回転杭工法が新たに示され，計 7 工法が示されている。

本研究は，上記の 7 工法（打撃工法，バイブロハンマ工法，場所打ち杭工法，中掘り杭工法，プレボーリング杭工法，鋼管ソイルセメント杭工法，回転杭工法）を対象とする。このうちバイブロハンマ工法については，分析に必要な試験数や試験情報が十分でなく，分析結果は暫定的であると考えられることから，別途，巻末の付属資料に分析結果を示している。

1.3　収集データ

整理に用いるデータは，土木研究所が過去から収集を継続してきた杭の鉛直載荷試験結果である。収集先は，各地方整備局，都道府県及び旧道路 4 公団であり，さらに新しい杭工法に関しては，建設技術審査証明報告書等に記載された試験結果を用いた。

ここで，打撃工法は，先端形状により先端開放型（開端）と先端閉塞型（閉端）に分け，先端に十字リブが付いた杭の試験データは開端に含めている。また，中掘り杭工法はセメントミルク噴出撹拌方式のみを対象としている。場所打ち杭工法及びプレボーリング工法では杭径が深度方向に一定であるもの（いわゆるストレート杭）を対象とし，杭先端径が杭径に対して拡大されたもの（いわゆる拡底杭）を含まない。

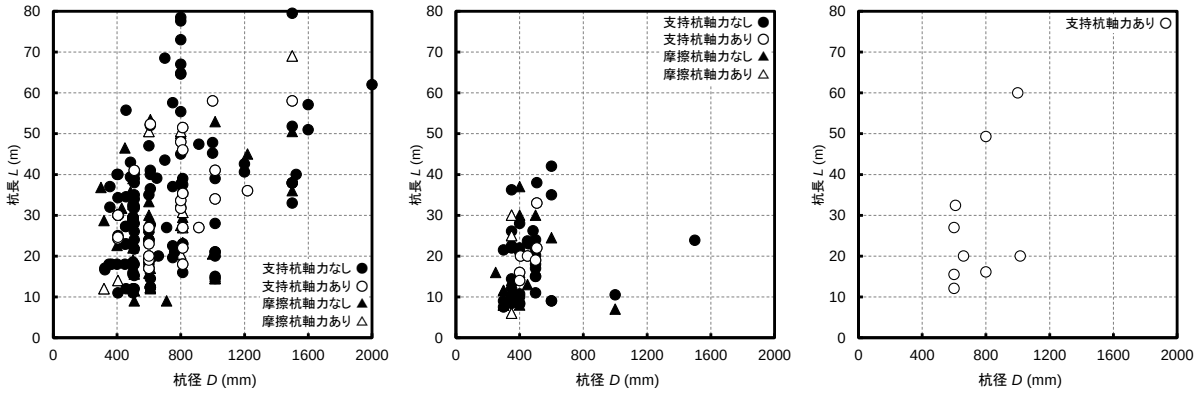
支持形式の区分は，道路橋示方書に定義される支持杭であるか否かとする。すなわち，平成 24 年の道路橋示方書に定義される支持層に該当する層として砂層・砂れき層は *N* 値が 30 程度以上，粘性土は *N* 値 20 程度 or 一軸圧縮強度 0.4 N/mm^2 程度以上の層に杭先端が設置されているものを支持杭，これ以外のものを摩擦杭と区分する。

なお，支持力及び軸方向ばね定数の推定式算定に用いることが出来るのは軸力が計測されているデータのみであり，推定精度の検証などでは軸力計測されていないデータも用いる。

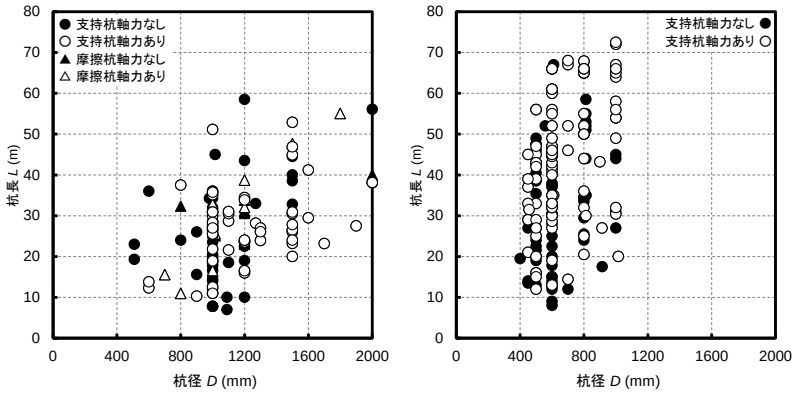
表 1.3.1 に収集した載荷試験数の一覧を，図 1.3.1 にその杭径および杭長の範囲を示す。

表 1.3.1 収集した鉛直載荷試験数

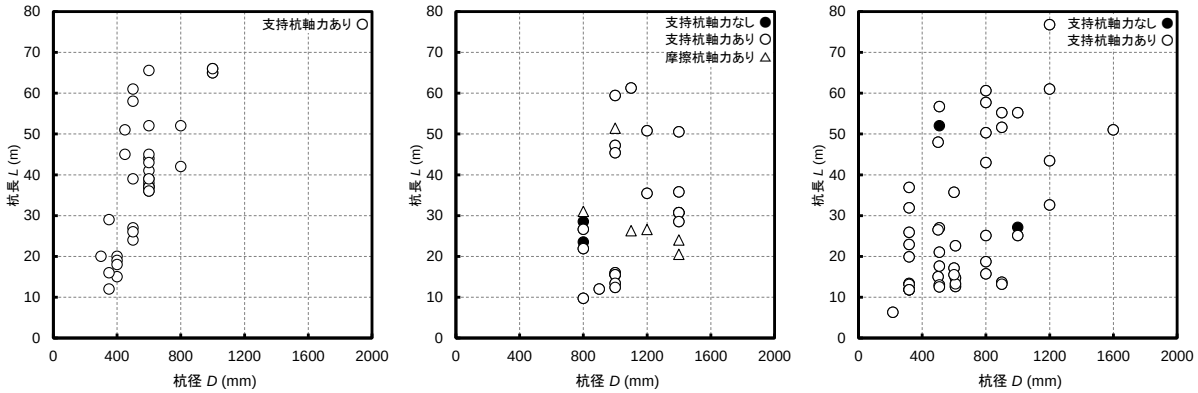
杭工法	全数	軸力あり	支持形式	全数	軸力あり
打撃（開端）	217	38	支持杭	155	28
			摩擦杭	62	10
打撃（閉端）	68	10	支持杭	45	7
			摩擦杭	23	3
バイブロハンマ	9	9	支持杭	9	9
場所打ち杭	126	63	支持杭	98	52
			摩擦杭	28	11
中掘り杭	165	103	支持杭	165	103
プレボーリング杭	36	36	支持杭	36	36
鋼管ソイルセメント杭	28	26	支持杭	22	20
			摩擦杭	6	6
回転杭	47	45	支持杭	47	45
全種類	696	330		696	330



(a) 打撃（開端）　(b) 打撃（閉端）　(c) バイブロハンマ



(d) 場所打ち杭　(e) 中掘り杭



(f) プレボーリング杭　(g) 鋼管ソイルセメント杭　(h) 回転杭

図 1.3.1 収集データの寸法範囲

1.4　荷重−変位関係の整理

1.4.1 荷重−変位関係の近似

極限支持力 P_{ou} や降伏支持力 P_{oy} は，一般には P_o - S_o 曲線の形状から判定されるが，判定結果の人為的誤差を排除するために，Weibull 分布関数によって近似もしくは外挿した曲線を利用する。Weibull 分布関数は，強度分布を統計的に表すために考案されたものであるが，あてはめの融通性が高いことから，時間に対する劣化現象や寿命を統計的に記述する場合等，幅広い分野で応用されており，杭の軸方向の荷重・変位曲線では，式（1.4.1）が提案されている[8)]。

図 1.4.1 に，P_o - S_o 関係における Weibull 分布曲線の例を示す。杭頭変位の特性値 S_{os} 及び変位指数 m の値によって曲線は様々な形状となり，Weibull 分布曲線のあてはめの融通性が高いことが分かる。文献 [8)]によると，杭頭変位の特性値 S_{os} は，載荷荷重がする仕事量と関連付けられる基準となる点であり，式（1.4.1）において $S_o = S_{os}$ とおけば，$P_o / P_{ou} = 1 - e^{-1} \fallingdotseq 0.63$ の関係が常に成立する。本研究では，杭頭変位の特性値 S_{os} 及び変位指数 m がいかなる値であっても曲線が必ず通る座標（S_{os}, P_{os}）で示される点を特性点と呼ぶことにする。なお，$P_o = P_{ou}$ の時の杭頭変位は，$S_o = \infty$（無限大）となる。また，変位指数 m は，曲線の曲がり具合を表す。すなわち，変位指数 m の値が大きいと初期には線形的であり，変位が大きくなると一定の荷重に落ち着く，弾完全塑性型のような傾向となる。一方，変位指数 m の値が小さいとその形状は初期から非線形性を帯び，変位が大きくなっても荷重が漸増するという 2 次勾配を有する弾塑性型のような傾向となる。

P_o - S_o 曲線のデータ整理では，一つ一つの鉛直載荷試験から得られた P_o - S_o 曲線を Weibull 分布曲線で近似・外挿し，各試験結果を最も精度よく近似できる極限支持力 P_{ou}，杭頭変位の特性値 S_{os}，変位指数 m を求め，工法及び支持形式毎に各々の値の統計量を求める。Weibull 分布曲線を描くための各パラメータ P_{ou}，S_{os}，m の具体的な決定方法は次のとおりである。

$$\frac{P_o}{P_{ou}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_o/D}{S_{os}/D}\right)^m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.1)$$

ここに，P_o　：杭頭における任意の軸方向荷重（杭頭荷重）

P_{ou}　：杭頭における極限支持力

e　：自然対数の底

S_o　：任意の杭頭荷重によって生ずる杭頭変位

S_{os}　：杭頭変位の特性値

D　：杭径

m　：変位指数

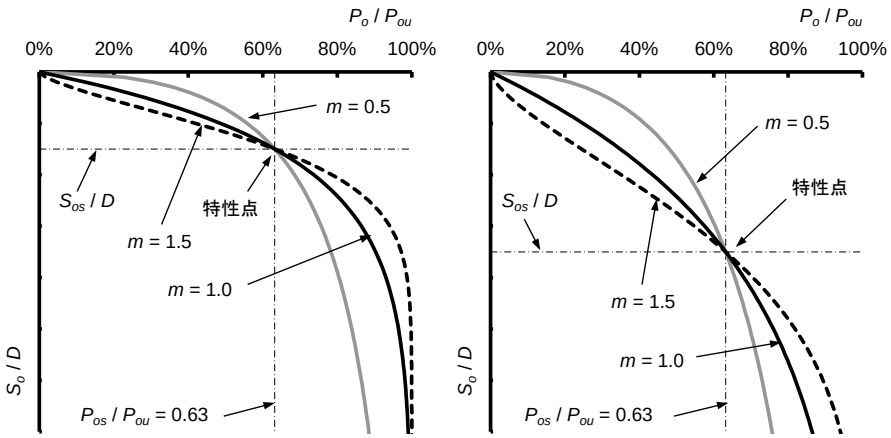
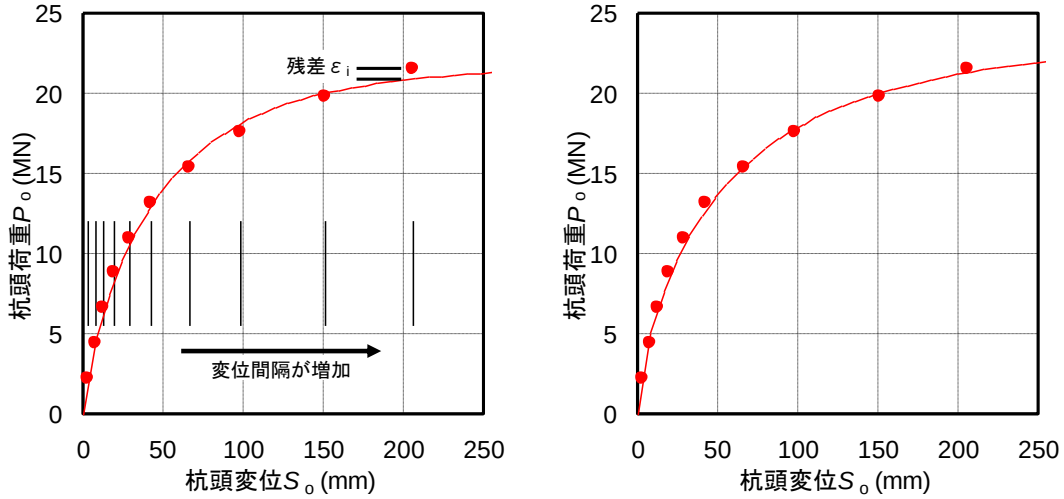


図 1.4.1 Weibull 分布曲線とその特性点

図 1.4.2(a) は，一般的な最小二乗法により決定した各パラメータに基づく近似曲線（Weibull 分布曲線）と実測値とを併せて示したものであるが，実測最大荷重の近傍において，近似曲線が実測値からやや乖離していることが分かる。載荷試験は一般に荷重制御で実施されるため，荷重間隔が一定であっても，地盤の非線形挙動によって荷重が大きいほど変位間隔も大きくなる。よって，一般的な最小二乗法により決定されたパラメータによって描かれる近似曲線は，結果として変位の実測値の間隔が密である変位（荷重）の小さな領域を尊重したものとなる。

この問題を解消するために，式（1.4.2）に示すように，近似曲線は実測変位の間隔を考慮したものとした。すなわち，実測変位の間隔 $S_{o(i)} - S_{o(i-1)}$の重み付けを考慮した残差平方和 $\sum \varepsilon_{(i)}^{\,2}$ が最小となるような近似曲線の係数を求めることとした。図 1.4.2(b) は，式（1.4.2）によって補正した近似曲線である。最大荷重近傍での近似精度が向上していることが分かる。



(a) 通常の最小二乗法（全データ均等） **(b) 重み付け最小二乗法（変位間隔考慮）**

図 1.4.2 Weibull 分布関数による近似曲線の描き方

なお，ごく微小な変形領域に着目した検討を行う場合には，変位の実測値の間隔の疎密があまり影響しないことから，上記のような補正が必要ないと考えられる。あるいは，計測される変位間隔の差が大きくならないように，試験における載荷荷重の間隔を調整するか，変位制御によって行うことも考えられる。

$$\sum \varepsilon_{(i)}{}^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[P_{o(i)} - P_{ou} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S_{o(i)}}{S_{os}} \right)^m} \right\} \right]^2 \left(S_{o(i)} - S_{o(i-1)} \right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.2)$$

ここに，$P_{o(i)}$　：i 番目の杭頭荷重の実測値

$S_{o(i)}$　：i 番目の杭頭変位の実測値

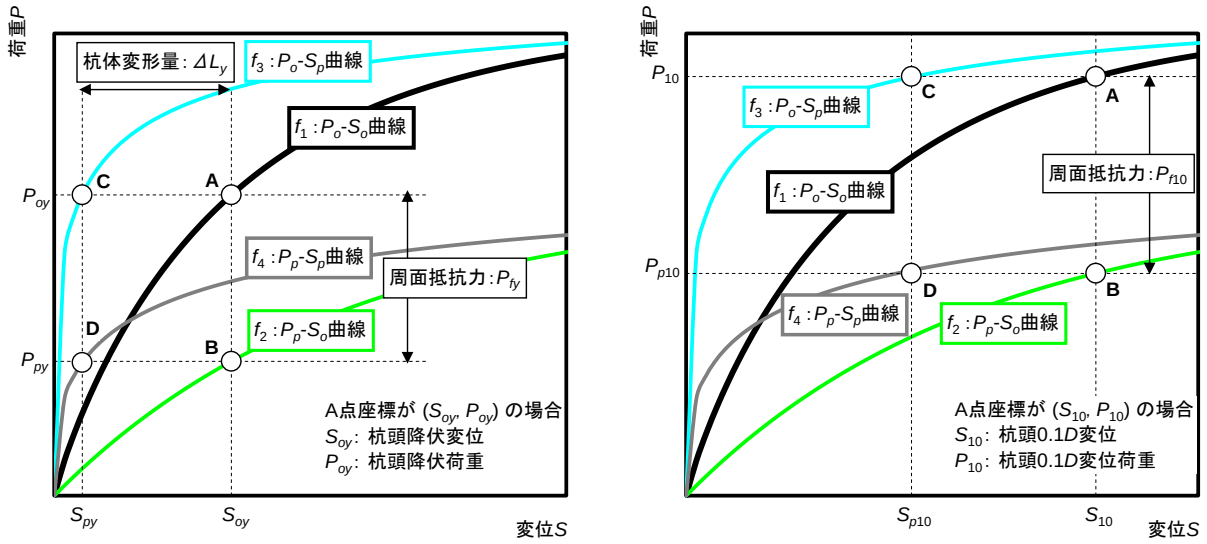
1.4.2 杭頭及び杭先端の荷重−変位関係

検討に用いる杭頭及び杭先端の荷重 P 及び変位 S は，次のように求める。

図 1.4.1 に示した例と同様に，杭頭と杭先端における荷重と変位それぞれの実測値を用いると，図 1.4.3 及び式（1.4.3）～式（1.4.6）で表されるように 4 本の Weibull 分布曲線を描くことができる。図 1.4.3(a)における f_1： P_o - S_o 曲線上の A 点を杭頭降伏荷重 P_{oy} 及び杭頭降伏変位 S_{oy} とすると，A 点を通る変位軸に平行な直線が f_3： P_o - S_p 曲線と交わる点（C 点）の変位座標の値が杭頭降伏時の杭先端変位 S_{py} であり，線分 AC の長さは杭頭降伏時の杭体変形量 ΔL_y の大きさとなる。同様に，A 点を通る荷重軸に平行な直線が f_2： P_p - S_o 曲線と交わる点（B 点）の荷重座標の値は杭頭降伏時の杭先端荷重 P_{py} であり，線分 AB の長さは杭頭降伏時の周面抵抗力となる。

「3. 軸方向ばね定数の推定式」では，図 1.4.3(a)に示すように，検討に用いる杭頭降伏時の杭先端荷重 P_{py} や杭先端変位 S_{py}（D 点）は，必ずしも f_4： P_p - S_p 曲線から求められる降伏荷重や降伏変位であるとは限らない。杭頭降伏時の杭先端変位 S_{py} を A 点 ⇒ B 点 ⇒ D 点の順に求め，杭頭降伏時の杭体変形量 ΔL_y を線分 BD の長さから求めることも可能であるが，誤差の累積を避けるため，ここでは上記の方法により B 点や C 点を求めた。つまり，杭頭降伏時の杭先端変位 S_{py} は A 点 ⇒ C 点，杭先端荷重 P_{py} は A 点 ⇒ B 点の順に求めている。

同様に「2. 支持力推定式」では，図 1.4.3(b)に示すように，検討に用いる極限支持力時（杭頭変位が杭径 D の 10%）の杭先端荷重 P_{p10} を A 点 ⇒ B 点の順に求め，この時の線分 AB の長さを周面抵抗力 P_{f10} としている。



(a) 杭頭降伏時　　**(b) 極限支持力時（杭頭 0.1*D* 変位時）**

図 1.4.3　4 本の Weibull 曲線

$$f_1 : P_p = P_{u1} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S_o}{S_{s1}}\right)^{m_1}} \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.3)$$

$$f_2 : P_p = P_{u2} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S_o}{S_{s2}}\right)^{m_2}} \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.4)$$

$$f_3 : P_o = P_{u3} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S_p}{S_{s3}}\right)^{m_3}} \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.5)$$

$$f_4 : P_p = P_{u4} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S_p}{S_{s4}}\right)^{m_4}} \right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4.6)$$

ここに，P_o　：杭頭荷重

P_p　：杭先端荷重

S_o　：杭頭変位

S_p　：杭先端変位

P_{u1}～P_{u4}　：各 Weibull 分布曲線の極限荷重（$P_{u1} = P_{u3}$，$P_{u2} = P_{u4}$）

S_{s1}～S_{s4}　：各 Weibull 分布曲線の変位の特性値

m_1～m_4　：各 Weibull 分布曲線の変位指数

1.5 使用する統計量

本研究では，「2. 支持力推定式」及び「3. 軸方向ばね定数の推定式」の各検討段階において，検討で得られた式による推定値と，鉛直載荷試験データの実測値との推定比（＝実測値／推定値）に関して，以下の式に示す統計量を用いて推定精度を検証する。

一般に，地盤構造物設計における地盤定数やそれらを用いた特性値等は不確定要素が大きいため正規分布を仮定すると偏差や分散が大きくなる傾向があることから，対数正規分布を仮定するのが一般的である。これについて，土木研究所資料第 2919 号[9]（以降，土研資料 2919 号と呼ぶ）では，杭の支持力については，施工法，支持形式，支持力式の推定精度誤差，地盤強度のばらつきなどの不確定要素が一般に大きいことが示されており，また，杭頭変位の特性値 S_{os} を杭径 D で正規化した値 S_{os}/D は，概ね対数正規分布に適合することが示されている。これを受け，土研資料 4139 号，土研資料 4297 号，その他の既往の研究[10),11)]において，対数正規分布を仮定した統計量整理が行われていることから，本研究においても，杭の支持力及び軸方向ばね定数は対数正規分布を仮定し，推定式の算定に用いる偏りの指標となる統計量は，基本的に式（1.5.2）に示す幾何平均 GM とする。ただし，算定の結果得られた提案式の推定精度の検証（2.7，3.5.5，3.6.2）では，基礎としての平均的な挙動（平均 M＝1.0）に対する推定値の再現性を確認するため，偏りの指標として式（1.5.1）に示す算術平均 M（以降，単に平均と呼ぶ）を用いている。

なお，土研資料 4139 号では式（1.5.3）に示す変動係数 CV があまり大きくない範囲では幾何標準偏差 $GSD = \exp(SD)$ ≒ 変動係数 CV であることが確認されており，また，既往の研究[10),11)]においても対数正規分布に従う変数のばらつきの指標として変動係数 CV を用いていることから，本研究においても，ばらつきの大きさ表す指標は全ての検討段階において変動係数 CV を用いた。

$$M = \frac{1}{n}\sum x_i = \frac{1}{n}\left(x_1 + x_2 + \cdots + x_n\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.5.1)$$

$$GM = \left(\prod x_i\right)^{\frac{1}{n}} = \left(x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_n\right)^{\frac{1}{n}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.5.2)$$

$$CV = \frac{SD}{M} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.5.3)$$

ここに，

M ：n 個のデータ x_i の算術平均（＝相加平均）

GM ：n 個のデータ x_i の幾何平均（＝相乗平均）

CV ：n 個のデータ x_i の変動係数

SD ：n 個のデータ x_i の標準偏差

2. 支持力推定式

本章では，土木研究所で収集した杭の鉛直載荷試験データを用いて，平成 24 年の道路橋示方書に示されている各杭工法の極限支持力における先端抵抗力度及び周面抵抗力度の推定式の見直しについて検討し，併せて検討の過程において，推定式の算定方法の標準化を行う。推定式の見直しの検討は，土研資料 4139 号[3]や土研資料 4297 号[4] にも示されており，本研究でも同資料に示す方法に準じて分析を行っているが，試験データの評価方法について，データの信頼性向上や基準に示す考え方との整合を踏まえて一部見直し，また，今回の見直しにより提案する推定式の推定精度を評価する。

なお，本章では，平成 24 年の道路橋示方書に示されている「従来式」に対して，見直しの検討段階によって「算定式」，「一次提案式」，「最終提案式」と区別して示している。

2.1　極限支持力

従来の平成 24 年の道路橋示方書における杭基礎の軸方向の安定性については，式（2.1.1）を用い，杭頭荷重が許容支持力を超えないことが照査されていた。

$$P_o \leqq R_a = R_u / n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1.1)$$

ここに，P_o　：杭頭に作用する軸方向荷重

R_a　：許容支持力

R_u　：設計上の極限支持力

n　：安全率で常時は 3，レベル 1 地震時は 2

ここで，極限支持力 R_u は，鉛直載荷試験で得られた杭頭部の荷重 - 沈下関係において，沈下量の軸に平行とみなせるときの荷重とすることを基本としている。しかし，実際の載荷試験では，変位の増大に伴って抵抗力が漸増することが多く，文字通り抵抗力の最大値である極限支持力が明確に確認できることは少ない。数多くの載荷試験結果を対象に軸方向荷重・変位曲線を整理すると，極限荷重（極限支持力）$P_{ou} \fallingdotseq P_{10}$（$P_{10}$：杭頭における軸方向変位が杭径の 10%に達する時の杭頭荷重）とみなしうることが土研資料 2919 号で明らかにされている。そこで，平成 2 年に改定された道路橋示方書[6]からは，杭頭部の沈下量が杭径の 10%を超えても荷重 - 沈下関係が沈下量の軸に平行とみなせない場合には，杭頭部の沈下量が杭径の 10%に達した時の杭頭荷重 P_{10} を設計上の極限支持力 R_u と定義している（$R_u = P_{ou} \fallingdotseq P_{10}$）。

設計上の極限支持力 R_u を推定するための支持力推定式は，極限支持力 R_u を先端抵抗力 R_{up} と周面抵抗力 R_{uf} との和で表した式（2.1.2）が道路橋示方書に示されており，杭の寸法（杭径，杭長）から決まる杭体の先端及び周面の表面積に，杭の工法や地盤種別・強度に応じて定められた先端及び周面の抵抗力度（q_d，f_i）を乗ずることによって極限支持力が推定できるようになっている。

本研究において，見直しの検討対象とする支持力推定式は，式（2.1.2）とし，極限支持力（杭頭変位が杭径の 10%に達する時の杭頭反力の実測値 P_{10}）を推定できるように，先端抵抗力度 q_d 及び周面抵抗力度 f_i の推定式を提案する。

なお，載荷試験は一般に荷重制御で行われるため，杭頭変位が杭径の 10%に達した時に載荷荷重や変位が計測されたものは，偶然の場合を除けば基本的にはない。よって，杭頭変位が杭径の 10%に達する時の杭頭反力の実測値 P_{10} は，載荷試験で得られた軸方向荷重・変位曲線を近似した Weibull 分布曲線上の点とする。

$$R_u = R_{up} + R_{uf} = q_d A + U \sum L_i f_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1.2)$$

ここに，R_u ：地盤から決まる極限支持力（kN）

R_{up} ：極限支持力のうち杭の先端抵抗力（kN）

R_{uf} ：極限支持力のうち杭の周面抵抗力（kN）

q_d ：杭先端の有効断面積あたりの先端抵抗力度（kN/m^2）

A ：杭先端の有効断面積（$= \pi D_2^2 / 4$）（m^2）

U ：杭の有効周長（$= \pi D_1$）（m）

L_i ：周面抵抗力を期待する土層の層厚（m）

f_i ：周面抵抗力を期待する土層の周面抵抗力度（kN/m^2）

D_1 ：杭の有効径（m）（表 2.1.1 参照）

D_2 ：杭先端の有効径（m）（表 2.1.1 参照）

表 2.1.1 杭の有効径

杭工法	杭及び杭先端の有効径 D_1，D_2
打撃，バイブロハンマ 場所打ち杭 中掘り杭 プレボーリング杭	$D_1 = D_2 =$ 杭体の直径 D
鋼管ソイルセメント杭	$D_1 = D_2 =$ ソイルセメント柱径 D_{sc}
回転杭	$D_1 =$ 杭体一般部の直径 D_p $D_2 =$ 杭先端の羽根外径 D_w

2.2 採用データ

本研究では，多数の載荷試験データを取り扱う際，軸方向荷重・変位曲線を Weibull 分布曲線で近似もしくは外挿して整理・考察を行うため，外挿された曲線が信用できるものであるとみなすためには，載荷試験において杭の最大抵抗力近くまで載荷されていることが望ましい。

支持力推定式の見直しでは，表 1.3.1 に示した収集データのうち，載荷荷重・変位，杭寸法及び地盤条件等の基本情報が整っているものを対象とし，先端地盤が岩盤のものは対象外とする。また，Weibull 分布曲線上の P_{10}（杭頭変位が杭径の 10%に達する時の杭頭反力）を実測値とみなす観点において十分な載荷がなされたと考えることのできる条件として，表 2.2.1 に示す条件を満足するものを対象とする。

ここで，土研資料 4139 号では，表 2.2.1 の条件に表 2.2.2 の条件を並べ，2 つの条件のいずれかを満足するものを支持力の検討における採用データとしていた。ただし，結果として，表 2.2.2 を満足するものは全て表 2.2.1 を満足していたことから，本研究では，表 2.2.1 のみを支持力推定式の検討に用いるデータの採用条件としている。

なお，表 2.2.1 の条件において P_{10} の 0.76 倍以上としているのは，表 2.2.2 に示すように土研資料 4139 号では，土木研究所資料第 4036 号[12)]（以降，土研資料 4036 号と呼ぶ）を参考に試行錯誤の末， 図 1.4.1 で示した杭頭荷重の特性値 P_{os} ≒ $0.63P_{ou}$ の 1.2 倍（＝極限荷重 P_{ou} の 76%）まで載荷荷重が付与された試験結果を近似した Weibull 分布曲線はその全領域を使用できるものとし，外挿の最大幅を P_{ou} の 76%～100% としていたことから，これと同程度の外挿幅とするために，表 2.2.1 の条件では，$P_{omax} \geqq 0.76\,P_{10}$ としている。

表 2.2.1 データの採用条件（支持力）

採用条件	内容
条件-1	杭頭における実測最大荷重 P_{omax} が，杭頭変位が杭径の 10%に達した時の杭頭荷重 P_{10} の 76%以上であるもの（$P_{omax} \geqq 1.2 \times 0.63P_{10} \fallingdotseq 0.76P_{10}$）： 【$P_{10}$ 信頼性】

表 2.2.2 土研資料 4139 号[3)]で条件-1 に並べて示されていた採用条件【参考】

採用条件	内容
【参考】	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杭頭荷重の特性値 P_{os} ≒$0.63P_{ou}$ の 1.2 倍以上であるもの（$P_{omax} \geqq 1.2P_{os}$ ≒$0.76P_{ou}$）

表 2.2.3 採用した鉛直載荷試験数(支持力)

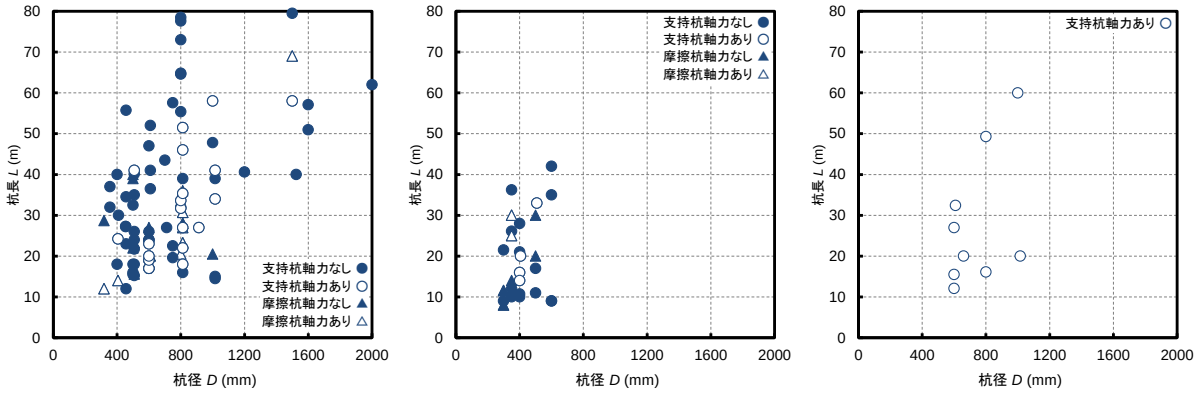
杭工法	全数	軸力あり	支持形式	全数	軸力あり
打撃（開端）	99	27	支持杭	77	20
			摩擦杭	22	7
打撃（閉端）	30	6	支持杭	20	4
			摩擦杭	10	2
バイブロハンマ	9	9	支持杭	9	9
場所打ち杭	82	49	支持杭	62	38
			摩擦杭	20	11
中掘り杭	124	98	支持杭	124	98
プレボーリング杭	36	36	支持杭	36	36
鋼管ソイルセメント杭	24	23	支持杭	20	19
			摩擦杭	4	4
回転杭	46	44	支持杭	46	44
全種類	450	292		450	292

表 2.2.3 に採用した載荷試験数の一覧を，図 2.2.1 にその杭径および杭長の範囲を示す。

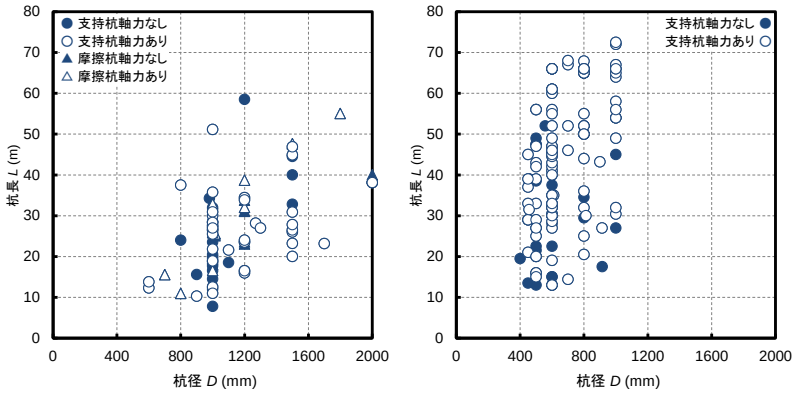
表 2.2.3 に示す採用データの全数は，表 1.3.1 に示した収集した鉛直載荷試験数の半分強であり，打撃工法，場所打ち杭工法及び中掘り杭工法では採用できないデータが非常に多い。また，打撃工法及び場所打ち杭工法では，軸力分布が不明のデータの割合が多い。

支持力推定式の算定では，式（2.1.2）に示すように杭頭荷重の実測値 P_{10} を先端抵抗力と周面抵抗力に分離する必要があることから，杭体軸力が計測されたデータのみが対象となる。一方，支持力推定式は，実測値に対する推定結果の偏りやばらつきが小さいほど優れたものであると言える。また，推定結果の偏りやばらつきを評価する場合，実測値に対する検証数が多いほど信頼性は高くなる。よって，できるだけ多くのデータに対して検証が行えるように配慮する観点から，「2.5 先端抵抗力の推定式算定」，「2.6 周面抵抗力の推定式算定」では支持杭と摩擦杭を合わせたデータを用いて検討を行った。また，「2.7.3 極限支持力の推定精度」では，杭頭での値を比較することとなるため，杭体軸力が計測されていないデータも含めて検証を行った。

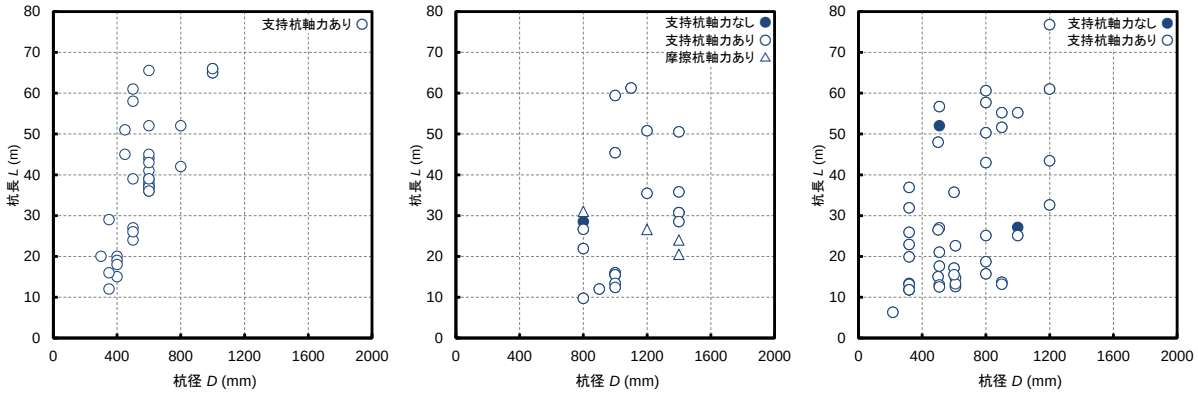
なお，表 2.2.3 に示すバイブロハンマ工法については，分析に必要な試験数や試験情報が十分でなく，分析結果は暫定的であると考えられることから，別途，巻末の付属資料に分析結果を示している。



(a) 打撃（開端）　(b) 打撃（閉端）　(c) バイブロハンマ



(d) 場所打ち杭　(e) 中掘り杭



(f) プレボーリング杭　(g) 鋼管ソイルセメント杭　(h) 回転杭

図 2.2.1 採用データの寸法範囲（支持力）

2.3　データの整理

2.3.1 杭体軸力

式（2.1.2）のように，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。ここで，部材端部は局部応力を受けやすく杭体下端の軸力を直接計測するのは困難であるため，何らかの方法によって外挿してこれを予測せざるを得ない（図 2.3.1）。しかし，外挿の方法そのものや，杭体以外の根固め部等の軸剛性の評価方法によって予測値は不確実なものとなる。

よって，ここでは，土研資料 4139 号と同様に，支持層の上端位置を設計上の杭先端位置とみなすことを基本とし，図 2.3.2 に示すように，設計上の杭先端位置より下方の周面抵抗力は先端抵抗力に含まれるものと考え，これによって杭体軸力の外挿の不確実性を極力排除することとした。このことは，昭和 39 年の基準に既に解説されている[13)]方法である。

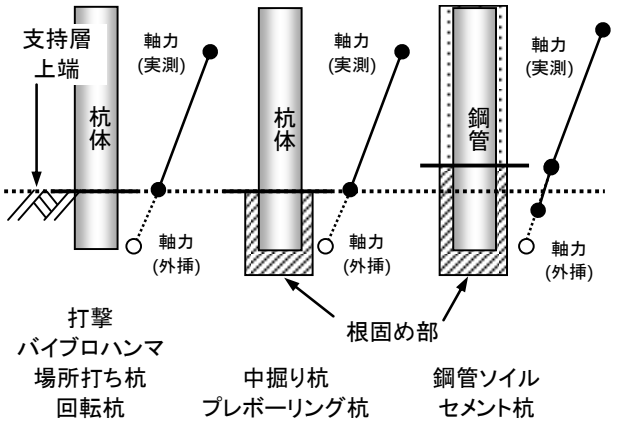


図 2.3.1 杭体軸力の計測と外挿の例

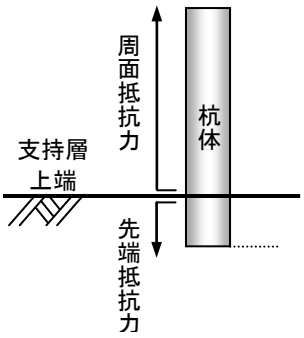


図 2.3.2 周面抵抗力の考慮範囲の基本的な考え方

2.3.2 先端抵抗と杭先端の *N* 値

先端抵抗力度 q_d は，2.1 に示した方針に基づき，杭頭反力が設計上の極限支持力に達した時の先端抵抗力度に着目し，これと地盤定数（*N* 値の平均値 $\overline{N}$ ）との関係を評価する。なお，載荷試験結果において *N* >50 であるデータのうち，50 回打撃時の貫入量が示されているものについては，式（2.3.1）により求められる換算 *N* 値を用いている。

換算 *N* 値 = 50 回 × 30 cm /（50 回打撃時の貫入量 cm）・・・・・・・・・ （2.3.1）

図 2.3.3 に示すように，最近の成果を含めた既往の研究成果[14), 15), 16), 17)]を参考に，先端抵抗力の推定に用いる平均 *N* 値の評価範囲を杭体先端から杭径の 3 倍下方までの範囲に見直した。また，データ整理上，杭先端の支持地盤の種別は，道路橋示方書に示される各杭工法の杭の先端位置から杭径の 3 倍下方までの範囲の支配的な（層厚で 3/4 以上を占める）地盤とする。なお，ここでの杭径とは，表 2.1.1 に示した杭先端の有効径 D_2 (m)である。

図 2.3.4 (a) に示すように，評価に用いる *N* 値の平均値 $\overline{N}$ は，深度・*N* 値関係で囲まれる部分の面積を区間長 3*D* で除した値（等価平均）とした。ただし，杭径の 3 倍下方以深に *N* 値データがない場合には，図 2.3.4 (b) に示す方法により最下端までの *N* 値データを用いて平均値 $\overline{N}$ を求めた。なお，図 2.3.5 に示すように，着目区間内の *N* 値の単純平均により求めた場合にも平均値 $\overline{N}$ は大差ないことから，設計実務においては，単純平均を用いても実質的に問題ないと考えられる。

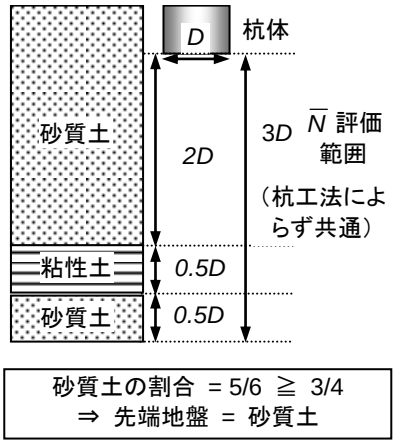
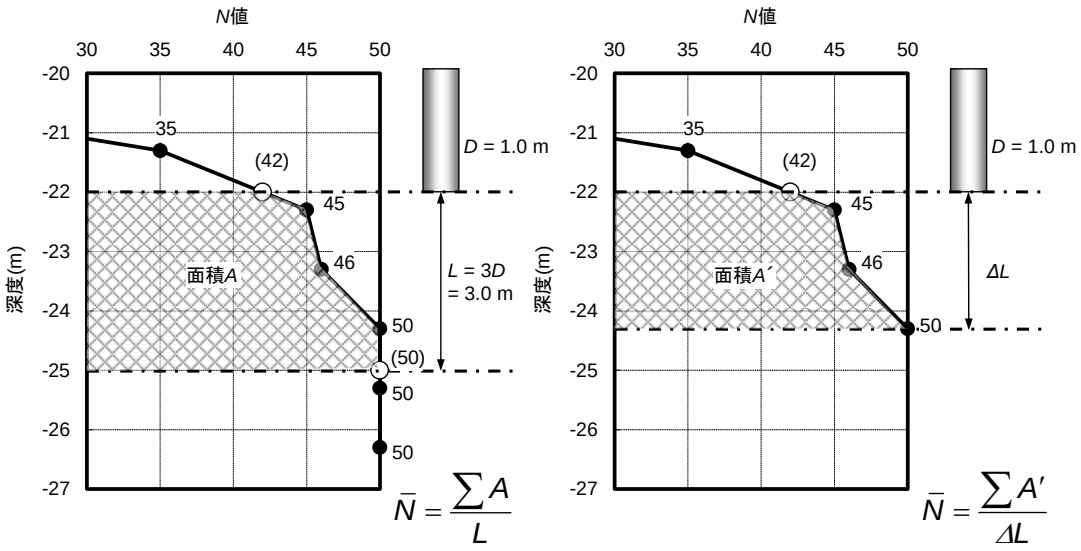


図 2.3.3 先端 *N* 値の評価範囲と支持地盤種別の決定例



(a) 3*D* 以深に *N* 値データがある　　**(b) 3*D* 以深に *N* 値データがない**

図 2.3.4 *N* 値の平均値 $\bar{N}$ の計算方法（等価平均）

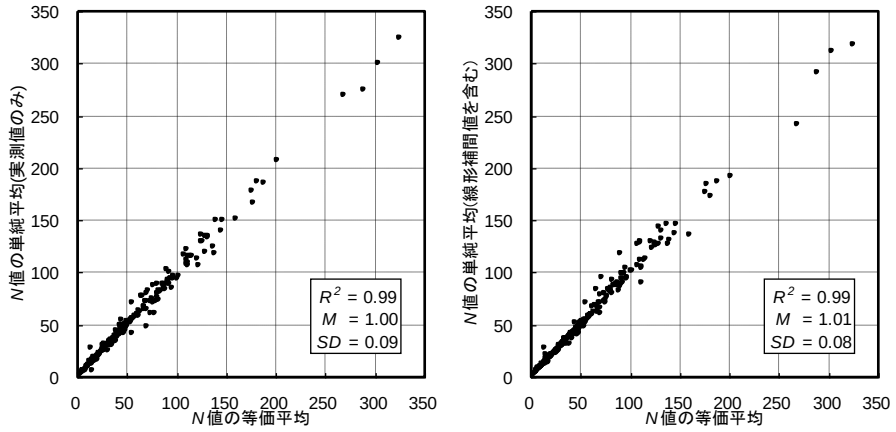


図 2.3.5 *N* 値の平均値 $\bar{N}$ の計算方法による結果の比較

2.3.3 周面抵抗と採用する土層

周面抵抗力度 f_i は，2.1 に示した方針に基づき，杭頭反力が設計上の極限支持力に達した時の周面抵抗力度に着目し，これと地盤定数との関係を評価する。着目する土層の周面抵抗力は，土層の上端及び下端において計測された軸力の差分によって評価し，中間深度における軸力（ひずみ）の計測値は用いずに評価する。また，着目区間において層厚で 70%以上が粘性土であるものを粘性土，層厚で 70%以上が砂質土であるものは砂質土として扱い，層厚が 70%以上となるものがない区間は整理の対象から除外する（図 2.3.6）。

また，杭体表面にすべり材料等を施して周面抵抗力を意図的に低減させた区間は，周面抵抗力を過小評価するおそれがあるため，整理の対象から除外する。

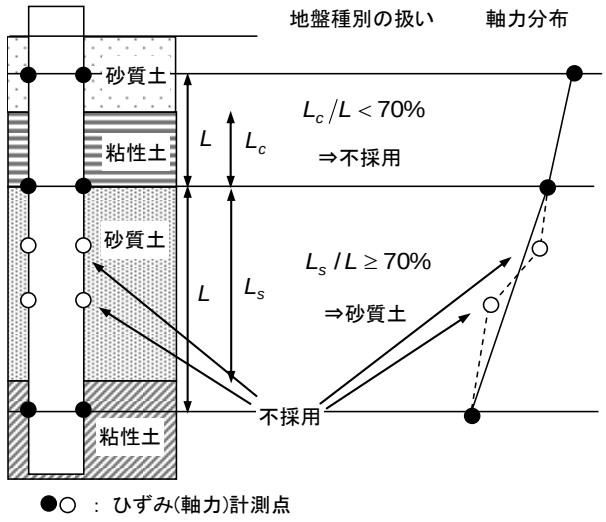


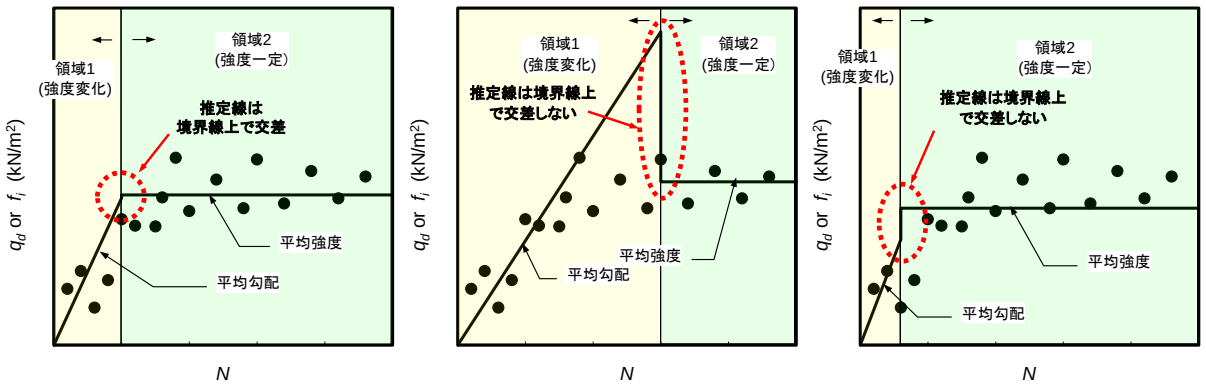
図 2.3.6 周面抵抗力度を評価する際の地盤種別の扱い

ここで，既往の研究[18)]において，粘性土に対しては，標準貫入試験だけではなくより質の高い地盤調査を行うことによって基礎の建設コストが削減できる可能性のあることが示されており，また道路橋示方書でも，N 値が 5 未満の軟弱層は粘着力を N 値によって推定することは困難なため，室内試験により粘着力を評価するのがよいと解説されている。このため，土研資料 4139 号では，粘性土における N 値からの周面抵抗力度の推定式算定時には洪積層データのみを対象としていたが，本研究では，単純に N <5 のデータを除外し，砂質土層・粘性土層ともに沖積層・洪積層を問わず N≧5 のデータを対象として周面抵抗力度の推定式を求めた。なお，c 値からの周面抵抗力度の推定式算定時には，N≦5 のデータも対象としている。

2.4　推定式算定の標準化

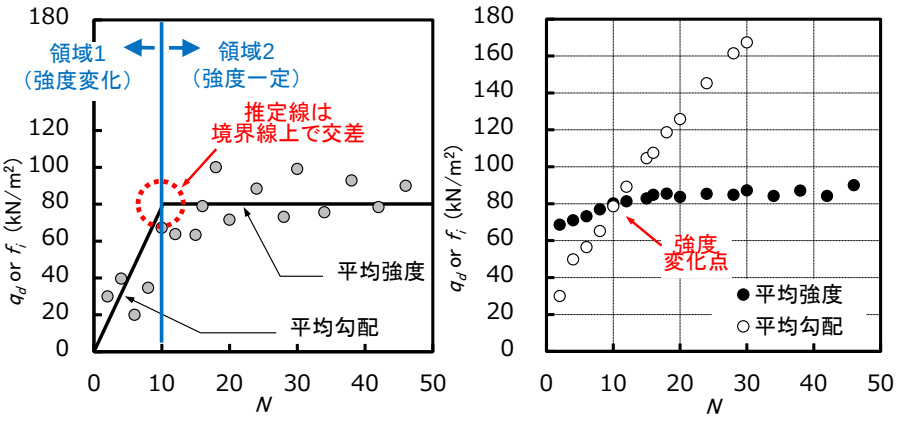
従来，数多くの載荷試験データから人為差の少ない方法で支持力推定式を定めるための標準化された方法はなく，土研資料 4139 号，4297 号においても標準化された方法は示されていなかった。そこで，本研究では，近年確立されているバイリニア型の支持力推定線を前提として，次の要領で推定式算定方法を標準化した。

1) 強度-地盤定数関係は，2 次勾配を有しないバイリニアモデルとする。すなわち，ある *N* 値を境界とし，*N* 値の増加に伴い強度が上昇する領域（領域 1）と *N* 値の増加に関わらず強度が上昇しない領域（領域 2）があるとする。
2) 領域 1 における推定線の勾配は，領域 1 に含まれるデータの平均勾配とし，領域 2 における推定線は，領域 2 に含まれるデータの平均強度線とする。
3) 図 2.4.1(a)に示すように「領域 1 における推定線」と「領域 2 における推定線」とが 2 つの境界線上で交わるように境界線の位置を決定するためには，バイリニアモデルにおける強度変化点を適切に定める必要があり，境界線の位置が不適切であると，2 つの領域における推定線が境界線上で交差しない（図 2.4.1(b)(c)）。そこで，強度変化点は，図 2.4.2(b)に示す強度変化点判定図を利用して定める。
4) 図 2.4.2(b)に示すように，領域 1 と領域 2 の境界 *N* 値を任意に仮定し，平均勾配（○分布）と平均強度（●分布）の分布図において○分布と●分布の交点を強度変化点とする。ここに，○分布は *N* 値の小さなデータから順に採用した平均勾配線上端の分布であり，●分布は *N* 値の大きなデータから順に採用した平均強度の分布である。
5) 図 2.4.2(b)において明確な強度変化点が得られなかった場合には，杭先端の極限支持力度 q_d では *N* 値の大きな範囲（領域 2）を重視して平均強度（●分布）の傾向を優先，周面摩擦力度 f_i では *N* 値の小さな範囲（領域 1）を重視して平均勾配（○分布）の傾向を優先することにより強度変化点を定める。



(a) 境界位置が適切　　(b) 境界位置が右過ぎ　　(c) 境界位置が左過ぎ

図 2.4.1　バイリニア関係と仮定する場合の強度係数決定法の例



(a) バイリニア型推定線　　(b) 強度変化点判定図

図 2.4.2 強度変化点判定図を利用した推定線の算定例

なお，本研究においては，前述の標準化した方法に加えて以下の要領を参考に強度変化点を定めた。

① 図 2.4.2(b)の右軸に，推定式の強度係数（▲分布）を追加し，強度係数が一定の値に収束する点を参考とする。なお，ある *N* 値における強度係数（▲分布）にその *N* 値を掛けたものが平均勾配（○分布）である。

② データの空白部があり強度変化点の判定が困難なものについては，○分布や●分布に対して，線形近似曲線や多項式近似曲線を用いることによりデータ空白部を補てんする。

③ ○分布と●分布の交点が得られない場合には，○分布と●分布が最も接近する点を交点とみなす。

④ 図 2.4.2(b)から定める強度変化点は，換算 *N* 値の信頼性や従来の設計法との整合を考慮して上限値を *N*=50 とした。また，支持層と考えることができる地盤条件を考慮し，先端抵抗力度 q_d では下限値を *N*=30 とした。周面抵抗力度 f_i では，地盤調査結果の信頼性を考慮し，下限値を *N*=5 とした。

2.5 以降に示す強度変化点判定図内には，データ数 n ，算定式による推定値とデータ実測値との推定比（＝実測値／推定値）の統計量として式(1.5.2)に示した幾何平均 GM ,式(1.5.3)に示した変動係数 CV を示している。なお，ここでの検討に上記の統計量を用いることについては，1.5 で述べたとおりである。

推定比の幾何平均 GM の値は，強度変化点を定める際の端数の切り上げ・切り下げのための参考値として用いているのみであり，例えば，幾何平均 GM が 1.0 に最も近づくような点を強度変化点として定めているわけではない。これは，平均勾配（○分布）や平均強度（●分布）の傾向を差し置いて GM=1.0 を狙って強度変化点を定めてしまうと，各杭工法の工学的強度特性を誤って評価しかねないからである。例えば，バイリニアモデルとする前提条件が無視されたような最大強度付近が強度変化点となる推定線が算定されたり，実測値に対して平均的な値とならない推定線が算定される，などの例が挙げられる。

最後に，ここで示す周面抵抗力度 f_i は，地層ごとの実測データであり，後の「2.7 推定精度の検証」に示す杭 1 本ごとの値とは異なる点に注意が必要である。

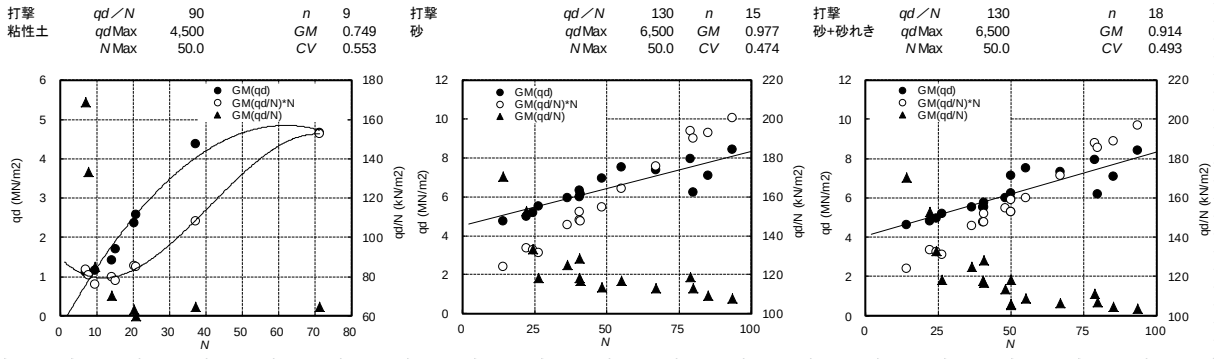
2.5　先端抵抗力の推定式算定

「2.4　推定式算定の標準化」に示した方法により，先端抵抗力度 q_d の強度変化点を定め，推定式を算定する。ここで，打撃工法の先端抵抗力度 q_d については，q_d と N 値の関係の検討に加え，従来の道路橋示方書に示されていた q_d/N と換算根入れ深さ L_b/D（L_b： 支持層への根入れ深さ，D： 杭径）の関係についても検討する。

2.5.1 N 値による推定式

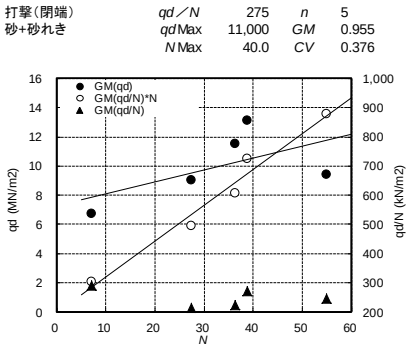
「2.4　推定式算定の標準化」に示した方法により，強度変化点判定図を作成し，強度変化点を求めることにより N 値による推定式を算定する。

図 2.5.1 に，各工法における先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定図を示す。



ⅰ）粘性土　　**ⅱ）砂**　　**ⅲ）砂+砂れき**

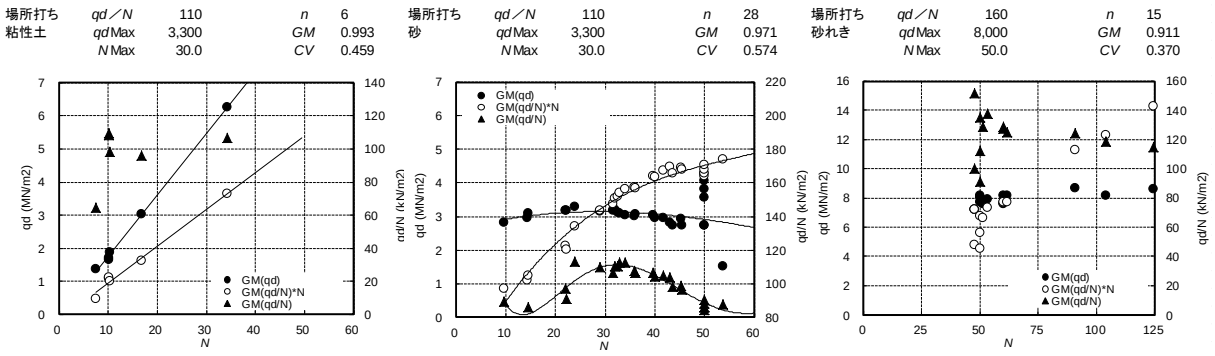
(a) 打撃（開端）



砂+砂れき

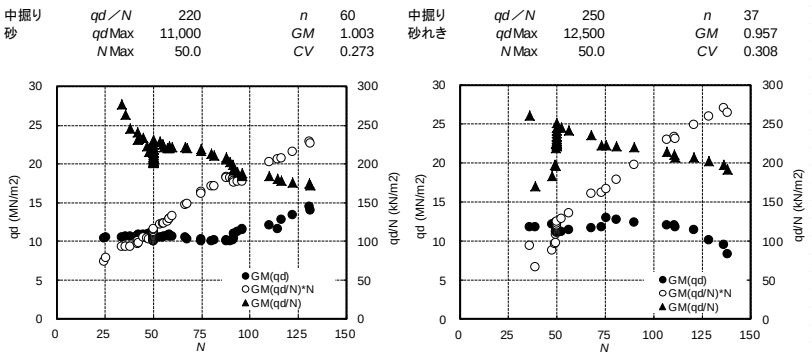
(b) 打撃（閉端）

図 2.5.1 先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（N 値）



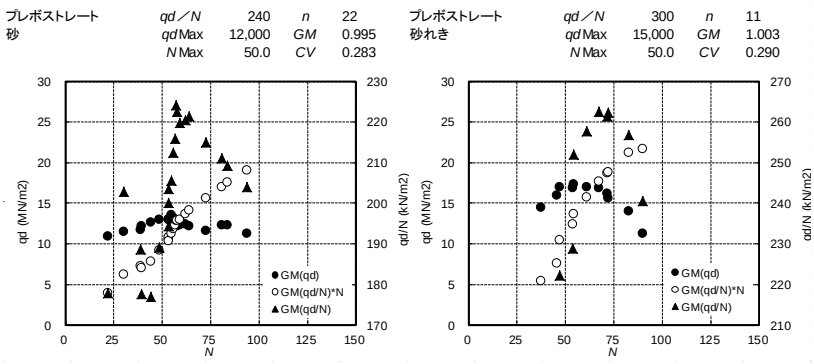
i) 粘性土　　ii) 砂　　iii) 砂れき

(c) 場所打ち杭



i) 砂　　ii) 砂れき

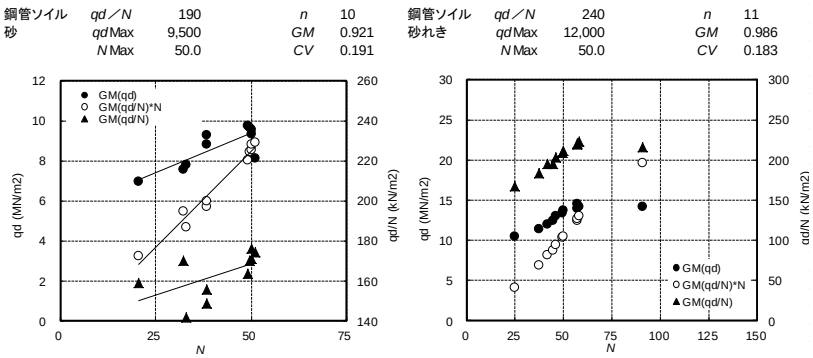
(d) 中掘り杭



i) 砂　　ii) 砂れき

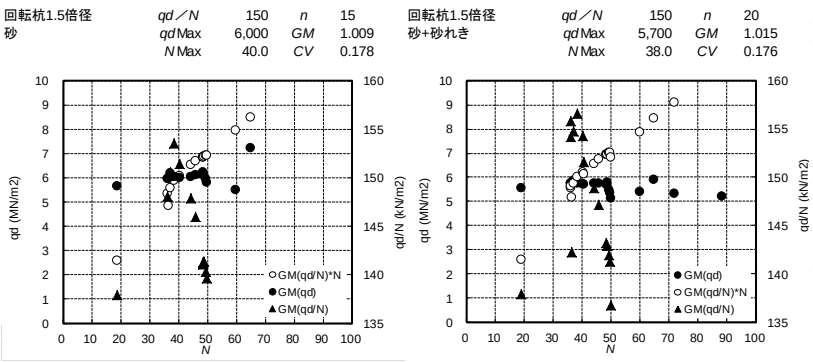
(e) プレボーリング杭

図 2.5.1 先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（N 値）



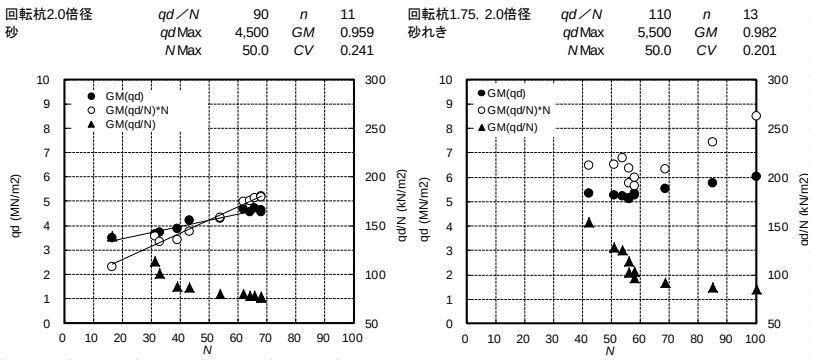
ⅰ) 砂　　ⅱ) 砂れき

(f) 鋼管ソイルセメント杭



ⅰ) 砂　　ⅱ) 砂+砂れき

(g) 回転杭（1.5 倍径）



ⅰ) 砂　　**ⅱ) 砂れき**（※1.75 倍径データを含む）

(h) 回転杭（2.0 倍径）

図 2.5.1 先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（*N* 値）

図 2.5.1 から判定される各工法の強度変化点は，次のとおりである。なお，ここに示す括弧内の値は，強度変化点での値（N 値，q_d (kN/m^2)）である。

表 2.5.1 に強度変化点から得られる推定式の算定結果を，図 2.5.2 にその推定線を示す。

(a) 打撃（開端）

粘性土： ○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，4,500）。

砂： ○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，6,500）。

砂+砂れき： 砂れきデータが n=3 と少ないので，砂と合算して評価する。
○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，6,500）。

(b) 打撃（閉端）

粘性土： データが n=1 であることから，検討不可。

砂+砂れき： 砂データが n=3，砂れきデータが n=2 と少ないので合算して評価する。
○と●の交点は（45，11,000）。

(c) 場所打ち杭

粘性土： ○と●の交点は得られないが，30≦N を考慮し（30，3,300）。

砂： ○と●の交点から（30，3,300）。

砂+砂れき： ○と●の交点から（50，8,000）。

(d) 中掘り杭

粘性土： データが n=1 であることから，検討不可。

砂： ○と●の交点から（50，11,000）。

砂れき： ○と●の交点から（50，12,500）。

(e) プレボーリング杭

粘性土： データが n=3 と少ないので，検討対象外とする。

砂： ○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，12,000）。

砂れき： ○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，15,000）。

(f) 鋼管ソイルセメント杭

粘性土： データが n=0 であることから，検討不可。

砂： ○と●の交点から（50，9,500）。

砂れき： ○と●の交点は，N 値 50 を超えているが N≦50 を考慮し（50，12,000）。

(g) 回転杭（ 1.5 倍径 ）

粘性土： データが n=0 であることから，検討不可。

砂： ○と●の交点から（40，6,000）。

砂+砂れき： 砂れきデータが n=5 と少ないので，砂と合算して評価する。
○と●の交点から（38，5,700）。

(h) 回転杭（ 2.0 倍径 ）

粘性土： データが n=0 であることから，検討不可。

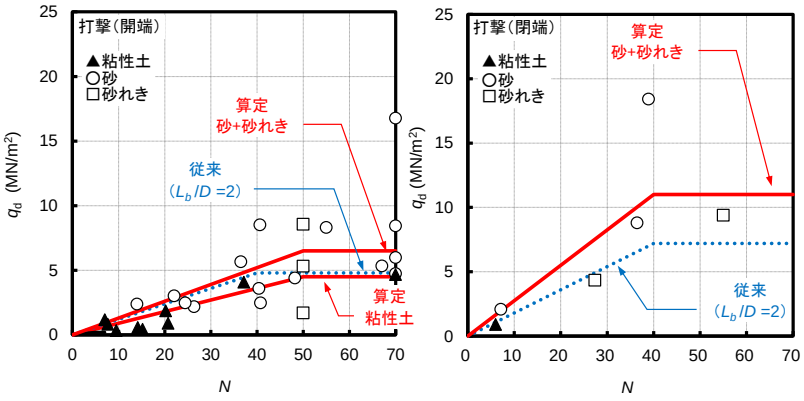
砂： ○と●の交点から（50，4,500）。

砂れき： ○と●の交点は得られないが，N≦50 を考慮し（50，5,500）。

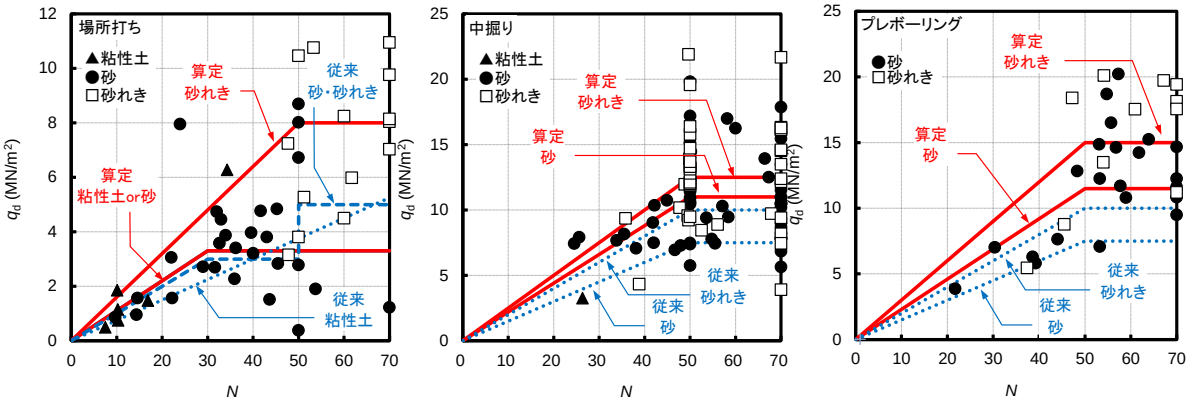
表 2.5.1 先端抵抗力度 q_d の推定式（N 値，算定）（kN/m²）

杭工法	先端地盤	従来式（H24 道示）	算定式（強度変化点判定）
打撃工法（開端）	粘性土	$q_d / \overline{N}$ = 60(L_b/D)　(≦300) ($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	90 $\overline{N}$ (≦ 4,500)
	砂		130 $\overline{N}$ (≦ 6,500)
	砂れき		130 $\overline{N}$ (≦ 6,500)
打撃工法（閉端）	粘性土	$q_d / \overline{N}$ = 40(L_b/D)+100 (≦300) ($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	－
	砂		275 $\overline{N}$ (≦11,000)
	砂れき		275 $\overline{N}$ (≦11,000)
場所打ち杭工法	粘性土	$3q_u$	110 $\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂	3,000 (30≦ $\overline{N}$ ≦40)	110 $\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂れき	5,000 (50≦ $\overline{N}$ の良質な砂れき層)	160 $\overline{N}$ (≦ 8,000)
中掘り杭工法（セメントミルク噴出撹拌方式）	粘性土	－	－
	砂	150 $\overline{N}$ (≦ 7,500)	220 $\overline{N}$ (≦11,000)
	砂れき	200 $\overline{N}$ (≦10,000)	250 $\overline{N}$ (≦12,500)
プレボーリング杭工法	粘性土	－	－
	砂	150 $\overline{N}$ (≦ 7,500)	240 $\overline{N}$ (≦12,000)
	砂れき	200 $\overline{N}$ (≦10,000)	300 $\overline{N}$ (≦15,000)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	－	－
	砂	150 $\overline{N}$ (≦ 7,500)	190 $\overline{N}$ (≦ 9,500)
	砂れき	200 $\overline{N}$ (≦10,000)	240 $\overline{N}$ (≦12,000)
回転杭工法 1.5 倍径	粘性土	－	－
	砂	120 $\overline{N}$ (≦ 6,000)	150 $\overline{N}$ (≦ 6,000)
	砂れき	130 $\overline{N}$ (≦ 6,500)	150 $\overline{N}$ (≦ 5,700)
回転杭工法 2.0 倍径	粘性土	－	－
	砂	100 $\overline{N}$ (≦ 5,000)	90 $\overline{N}$ (≦ 4,500)
	砂れき	115 $\overline{N}$ (≦ 5,750)	110 $\overline{N}$ (≦ 5,500)

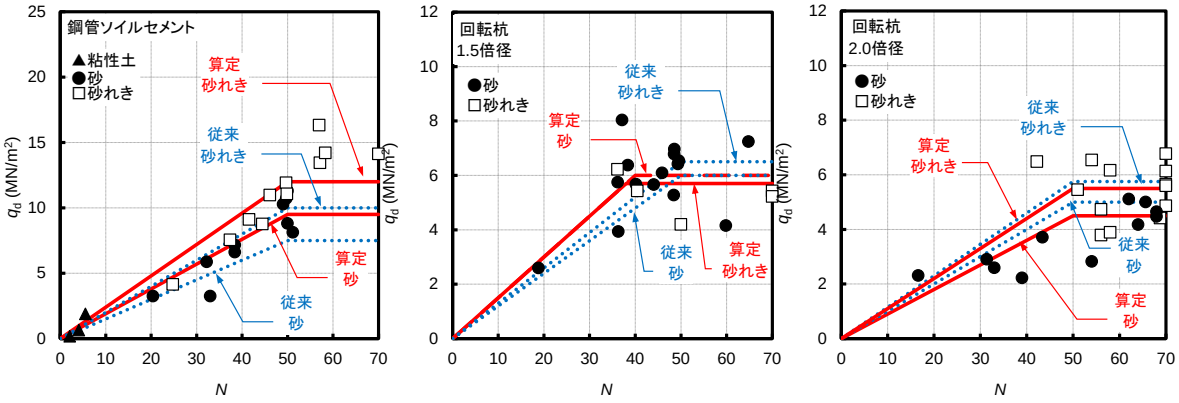
$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径，　q_u：一軸圧縮強度（kN/m²）



(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



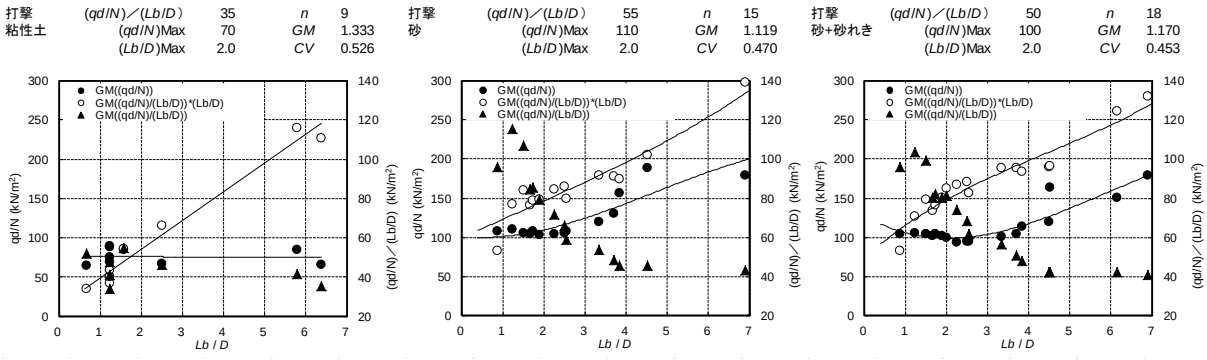
(f) 鋼管ソイルセメント杭　　(g) 回転杭（1.5 倍径）　　(h) 回転杭（2.0 倍径）

図 2.5.2 先端抵抗力度 q_d の推定線（N 値）

2.5.2 L_b/D による推定式

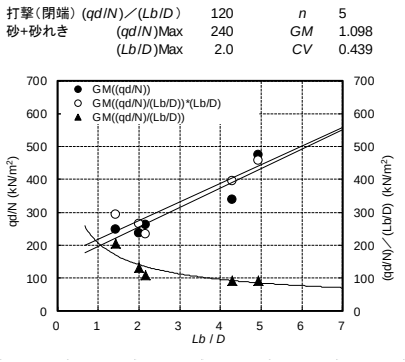
「2.4　推定式算定の標準化」に示した方法により，打撃（開端），打撃（閉端）において，換算根入れ深さ L_b/D による推定式を算定する。

図 2.5.3 に，各工法における先端抵抗力度 q_d/N の強度変化点判定図を示す。



ⅰ）粘性土　　ⅱ）砂　　ⅲ）砂+砂れき

(a) 打撃（開端）



砂+砂れき

(b) 打撃（閉端）

図 2.5.3　先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（L_b/D）

図 2.5.3 から判定される各工法の強度変化点は，次のとおりである。なお，ここに示す括弧内の値は，強度変化点での値（L_b/D，q_d/N (kN/m^2)）である。

表 2.5.2 に，強度変化点から得られる支持力推定式を，図 2.5.4 に，その推定線を示す。

(a) 打撃（開端）

粘性土： ○と●の交点から（2，70）。

砂： ○と●の交点は得られない。

砂+砂れき： 砂れきデータが n=3 と少ないので，砂と合算して評価する。
○と●の交点は得られない。

(b) 打撃（閉端）

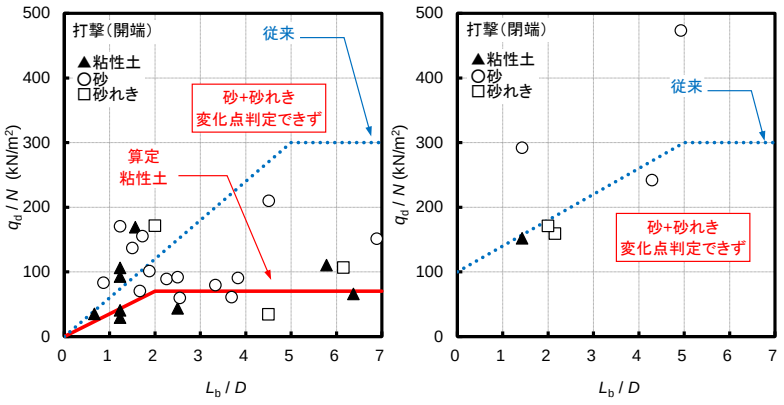
粘性土： データが n=1 であることから，検討不可。

砂+砂れき： 砂データが n=3，砂れきデータが n=2 と少ないので合算して評価する。
○と●の交点は得られない。

表 2.5.2 先端抵抗力度 q_d の推定式（L_b/D，算定）（kN/m^2）

杭工法	先端地盤	従来式（H24 道示）	算定式（強度変化点判定）
打撃工法（開端）	粘性土	$q_d/\overline{N}$ = 60(L_b/D)　(≦300)	$q_d/\overline{N}$ = 35(L_b/D) (≦ 70)
	砂	($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	—
	砂れき		—
打撃工法（閉端）	粘性土	$q_d/\overline{N}$ = 40(L_b/D)+100 (≦300)	—
	砂	($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	—
	砂れき		—

$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径



(a) 打撃（開端）　　**(b) 打撃（閉端）**

図 2.5.4 先端抵抗力度 q_d の推定線（L_b/D）

2.5.3 算定した q_d の推定式に関する考察

(1) 打撃工法の開端・閉端について

表 2.5.2 に示すように，平成 24 年の道路橋示方書では，打撃工法の先端抵抗力度 q_d の推定式は，先端開放型（開端）と先端閉塞型（閉端）とで別々の推定式が示されていた。

図 2.5.2(a)(b)は，それぞれ打撃工法（開端），打撃工法（閉端）の先端抵抗力度 q_d と N 値の関係における推定線を示している。図では，打撃工法（閉端）は，打撃工法（開端）と同程度以上の先端抵抗力度 q_d が得られることが確認できる。この結果を踏まえ，打撃工法（閉端）の載荷試験数が少ないことや，近年の道路橋では一般に先端開放型（開端）の杭が用いられていることを考慮すると，閉端の先端抵抗力度 q_d の推定式は，ここで算定した開端と同じ推定式にまとめるのがよいと考えられる。

(2) N 値と L_b/D について

表 2.5.2 に示すように，平成 24 年の道路橋示方書では，打撃工法の先端抵抗力度 q_d の推定式は，q_d/N と支持層への換算根入れ深さ L_b/D（L_b： 支持層への根入れ深さ，D： 杭径）の関数とされていた。打撃工法において，図 2.5.2 には N 値による推定線を，図 2.5.4 には L_b/D による推定線を示している。

砂及び砂れきデータでは，開端，閉端どちらの工法も，図 2.5.3(a)(b)に示す強度変化点判定において強度変化点が得られなかったため，図 2.5.4(a)(b)において推定線が得られていない。この理由として，比較的杭長が長い近年の載荷試験結果も含め改めて分析したところ，本研究では q_d/N と L_b/D の間に明確な相関が確認できなかったことがあげられる。また，粘性土についても，打撃工法（開端）では推定式を算定したものの，上限値が従来式と比べて著しく小さく，あまり相関がないと解釈することもできる。こうしたことから，どの地盤条件においても，表 2.5.1 に示す N 値からの推定式を用いるのがよいと考えられる。なお，打撃工法（閉端）では，全ての地盤条件で算定に必要なデータ数が得られていない。

(3) 回転杭工法 1.5 倍径の推定式について

図 2.5.2(g)に示すように回転杭工法 1.5 倍径の算定式は，図 2.5.1(g)に基づき N 値 40 付近を強度変化点として定めた。ただし，回転杭工法は他の杭工法と異なり，従来式においても載荷試験データに対して平均値を再現する中で上限値を N=50 としていたこと，また，他の杭工法との整合も考慮すると，強度変化点は N=50 とするのがよいと考える。結果，砂及び砂れきデータ共通の強度変化点として，N=50，q_d =6,000 (kN/m^2) を提案する。なお，この強度変化点における q_d の推定比の幾何平均及び変動係数（GM, CV）は，砂で（1.127, 0.208），砂+砂れきで（1.087，0.225）である。

以上より，ここで一次的に提案する先端抵抗力度 q_d の推定式を表 2.5.3 に示す。

表 2.5.3 先端抵抗力度 q_d の推定式（一次提案）（kN/m²）

杭工法	先端地盤	従来式（H24 道示）	一次提案式
打撃工法 （開端・閉端）	粘性土	開端： $q_d / \overline{N} = 60(L_b/D)$ (≦300)	$90\overline{N}$ (≦ 4,500)
	砂	閉端： $q_d / \overline{N} = 40(L_b/D)+100$ (≦300)	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)
	砂れき	開端，閉端ともに ($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)
場所打ち杭工法	粘性土	$3q_u$	$110\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂	3,000 (30≦ $\overline{N}$ ≦40)	$110\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂れき	5,000 (50≦ $\overline{N}$ の良質な砂れき層)	$160\overline{N}$ (≦ 8,000)
中掘り杭工法 （セメントミルク 噴出撹拌方式）	粘性土	－	－
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$220\overline{N}$ (≦11,000)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$250\overline{N}$ (≦12,500)
プレボーリング 杭工法	粘性土	－	－
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$240\overline{N}$ (≦12,000)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$300\overline{N}$ (≦15,000)
鋼管ソイル セメント杭工法	粘性土	－	－
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$190\overline{N}$ (≦ 9,500)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$240\overline{N}$ (≦12,000)
回転杭工法 1.5 倍径	粘性土	－	－
	砂	$120\overline{N}$ (≦ 6,000)	$120\overline{N}$ (≦ 6,000)
	砂れき	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)	$120\overline{N}$ (≦ 6,000)
回転杭工法 2.0 倍径	粘性土	－	－
	砂	$100\overline{N}$ (≦ 5,000)	$90\overline{N}$ (≦ 4,500)
	砂れき	$115\overline{N}$ (≦ 5,750)	$110\overline{N}$ (≦ 5,500)

$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径，　q_u：一軸圧縮強度（kN/m²）

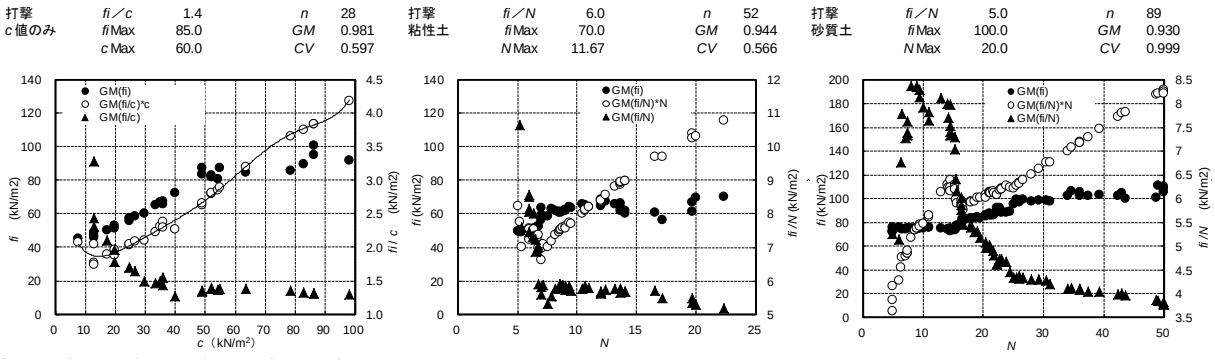
※ バイブロハンマ工法については付属資料を参照のこと

2.6　周面抵抗力の推定式算定

2.6.1　*c* 値及び *N* 値による推定式

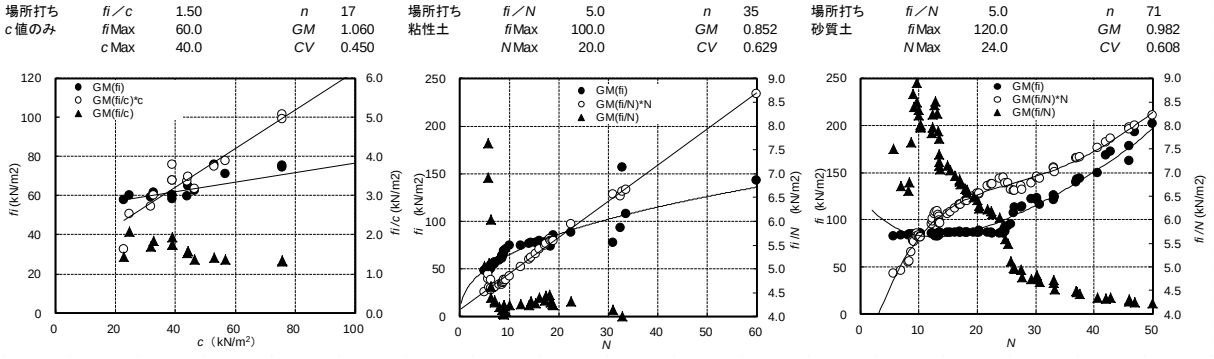
「2.4　推定式算定の標準化」に示した方法により，周面抵抗力度 f_i の強度変化点を定め，*c* 値及び *N* 値による推定式を算定する。ここでは，周面地盤が粘性土，もしくは砂質土の場合による *N* 値での評価に加え，粘着力 *c* 値が計測されているデータのみを抽出し，*c* 値のみの場合の周面抵抗力度の評価も行う。

図 2.6.1 に，各工法における周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定図を示す。



ⅰ）*c* 値　　ⅱ）粘性土　　ⅲ）砂質土

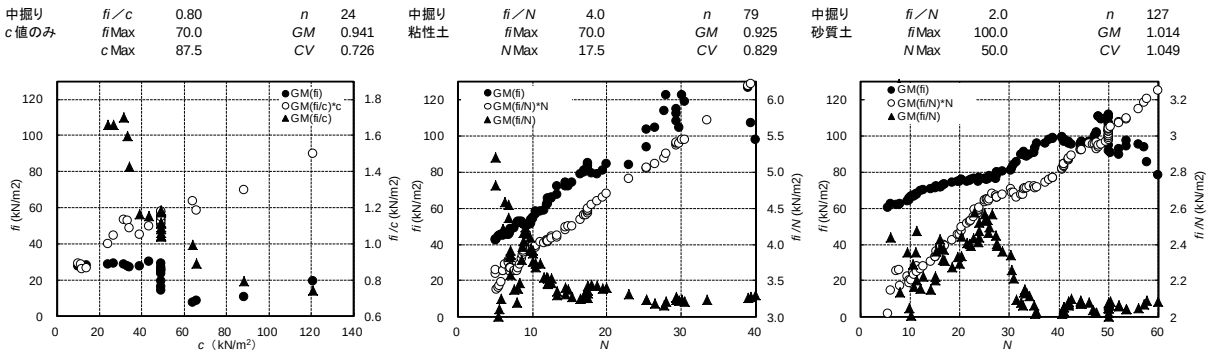
(a) 打撃



ⅰ）*c* 値　　ⅱ）粘性土　　ⅲ）砂質土

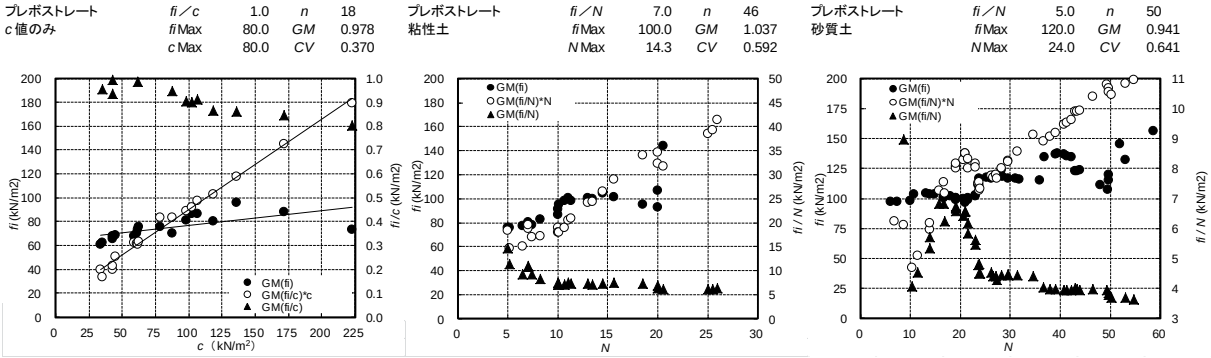
(b) 場所打ち杭

図 2.6.1 周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定



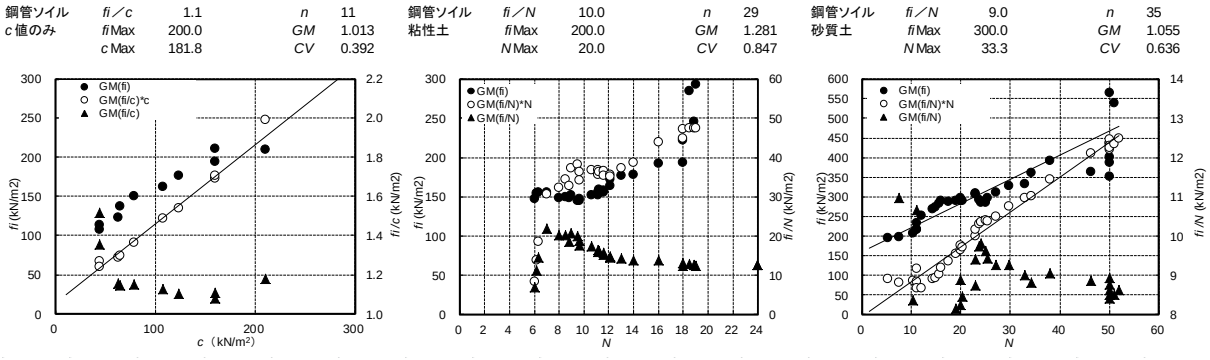
ⅰ） *c* 値　　ⅱ） 粘性土　　ⅲ） 砂質土

(c) 中掘り杭



ⅰ） *c* 値　　ⅱ） 粘性土　　ⅲ） 砂質土

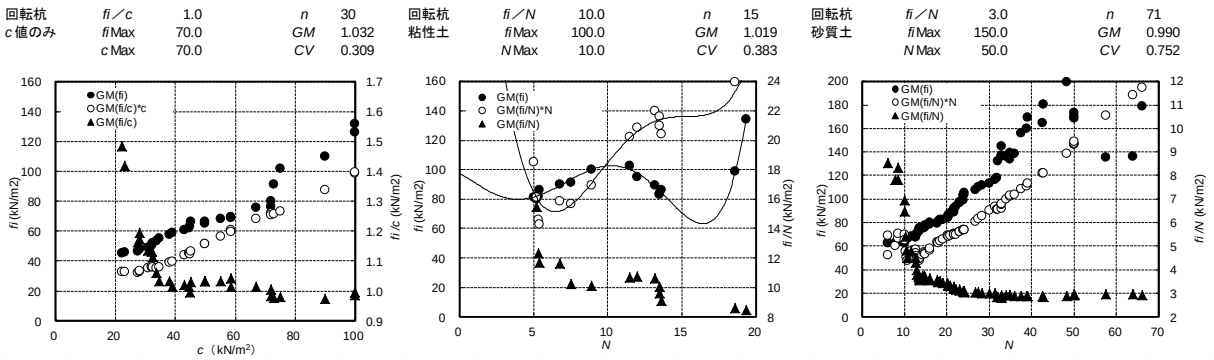
(d) プレボーリング杭



ⅰ） *c* 値　　ⅱ） 粘性土　　ⅲ） 砂質土

(e) 鋼管ソイルセメント杭

図 2.6.1 周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定



ⅰ) *c* 値　　ⅱ) 粘性土　　ⅲ) 砂質土

(f) 回転杭

図 2.6.1 周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定

図 2.6.1 から判定される各工法の強度変化点は，次のとおりである。なお，ここに示す括弧内の値は，強度変化点での値（*c* 値，f_i (kN/m^2)）または（*N* 値，f_i (kN/m^2)）である。

表 2.6.1 に，強度変化点から得られる支持力推定式を，図 2.6.2，図 2.6.3，図 2.6.4 に，その推定線を示す。

(a) 打撃

c 値のみ：　○と●の交点から（60，85）。

粘性土：　○と●の交点から（12，70）。

砂質土：　○と●の交点は得られないが，○と●の分布が最も接近する点から（20，100）。

(b) 場所打ち杭

c 値のみ：　○と●の交点から（40，60）。

粘性土：　○と●の交点から（20，100）。

砂質土：　○と●の交点は得られないが，▲分布の抵抗力係数 f_i/N が一定の値に収束し始める *N* 値から（24，120）。

(c) 中掘り杭

c 値のみ：　○と●の交点は得られないが，▲分布の抵抗力係数 f_i/c が一定の値に収束し始める *c* 値から（88，70）。

粘性土：　○と●の交点は得られないが，▲分布の抵抗力係数 f_i/N が一定の値に収束し始める *N* 値から（17.5，70）。

砂質土：　○と●の交点から（50，100）。

(d) プレボーリング杭

c 値のみ： ○と●の交点から（80，80）。

粘性土： ○と●の交点から（14，100）。

砂質土： ○と●の交点から（24，120）。

(e) 鋼管ソイルセメント杭

c 値のみ： ○と●の交点から（180，200）。

粘性土： ○と●の交点は得られないが，▲分布の抵抗力係数 f_i/N が一定の値に収束し始める *N* 値から（20，200）。

砂質土： ○と●の交点は得られないが，▲分布の抵抗力係数 f_i/N が一定の値に収束し始める *N* 値から（33，300）。

(f) 回転杭

c 値のみ： ○と●の交点は得られないが，○と●の分布が最も接近する点から（70，70）。

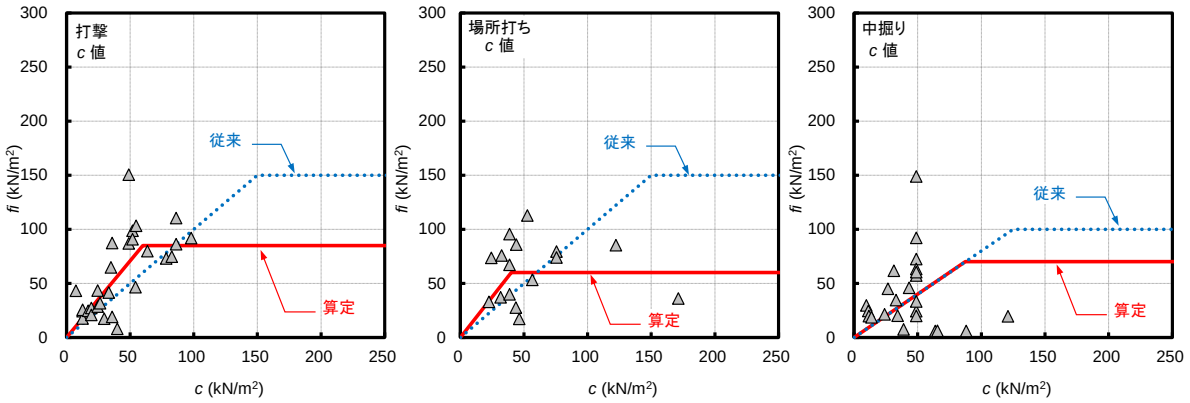
粘性土： ○と●の交点から（10，100）。

砂質土： ○と●の交点から（50，150）。

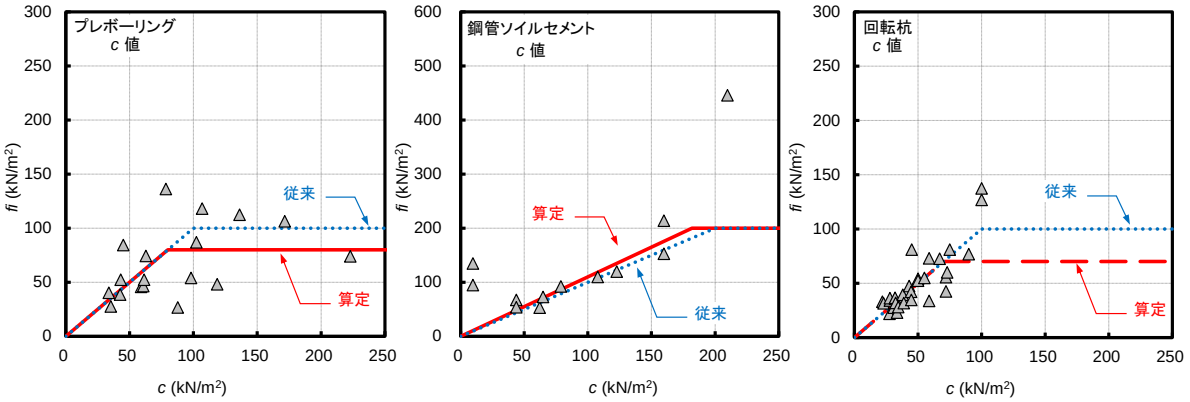
表 2.6.1 周面抵抗力度 f_i の推定式（算定）（kN/m²）

杭工法	周面地盤	従来式（H24 道示）	算定式（強度変化点判定）	
打撃工法	粘性土	*c* または 10*N* (≦150)	1.4*c* (≦ 85)	6*N* (≦ 70)
	砂質土	2*N* (≦100)	-	5*N* (≦100)
場所打ち杭工法	粘性土	*c* または 10*N* (≦150)	1.5*c* (≦ 60)	5*N* (≦100)
	砂質土	5*N* (≦200)	-	5*N* (≦120)
中掘り杭工法	粘性土	0.8*c* または 8*N* (≦100)	0.8*c* (≦ 70)	4*N* (≦ 70)
	砂質土	2*N* (≦100)	-	2*N* (≦100)
プレボーリング杭工法	粘性土	*c* または 10*N* (≦100)	*c* (≦ 80)	7*N* (≦100)
	砂質土	5*N* (≦150)	-	5*N* (≦120)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	*c* または 10*N* (≦200)	1.1*c* (≦200)	10*N* (≦200)
	砂質土	10*N* (≦200)	-	9*N* (≦300)
回転杭工法	粘性土	*c* または 10*N* (≦100)	*c* (≦ 70)	10*N* (≦100)
	砂質土	3*N* (≦150)	-	3*N* (≦150)

N：杭周面地盤の平均 *N* 値，　*c*：粘性土の粘着力（kN/m²）

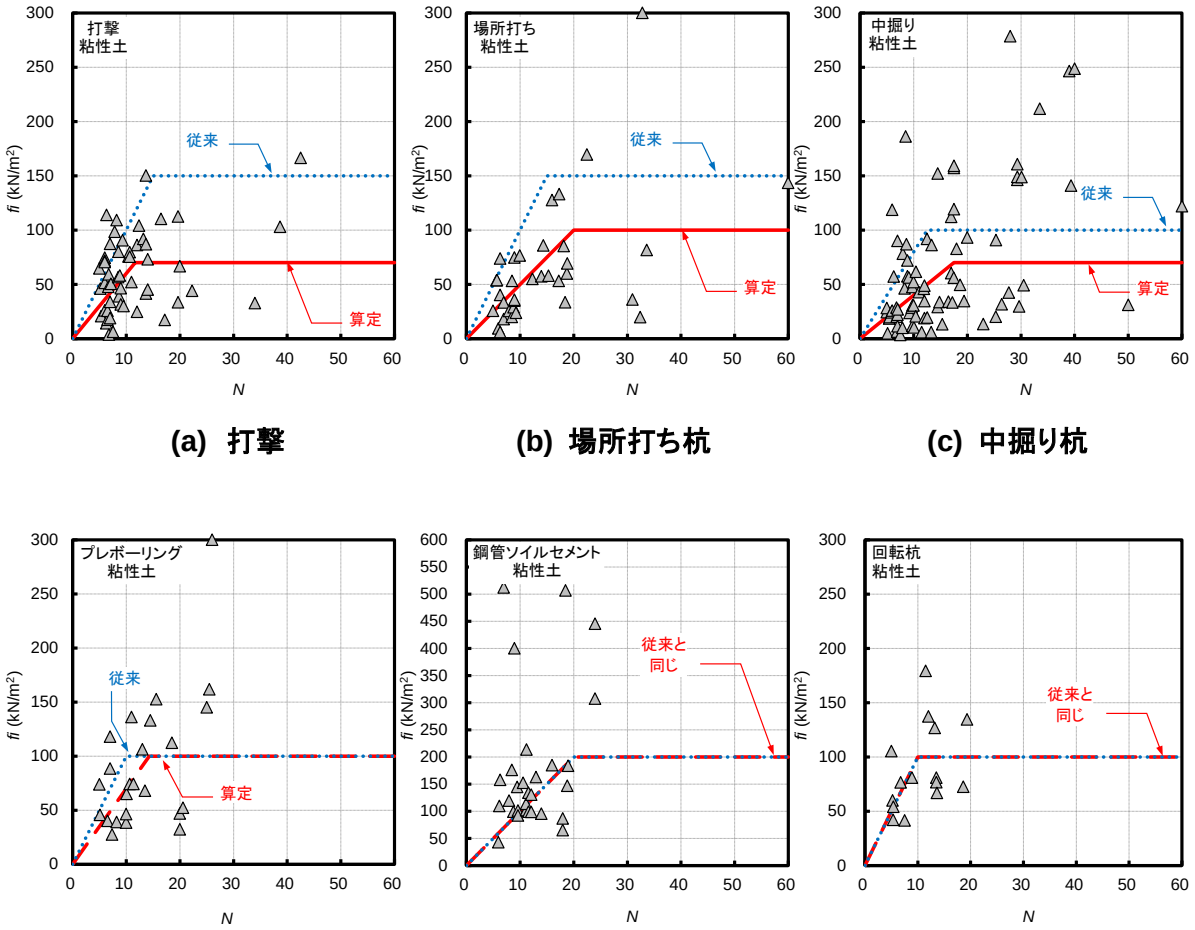


(a) 打撃　　(b) 場所打ち杭　　(c) 中掘り杭



(d) プレボーリング杭　　(e) 鋼管ソイルセメント杭　　(f) 回転杭

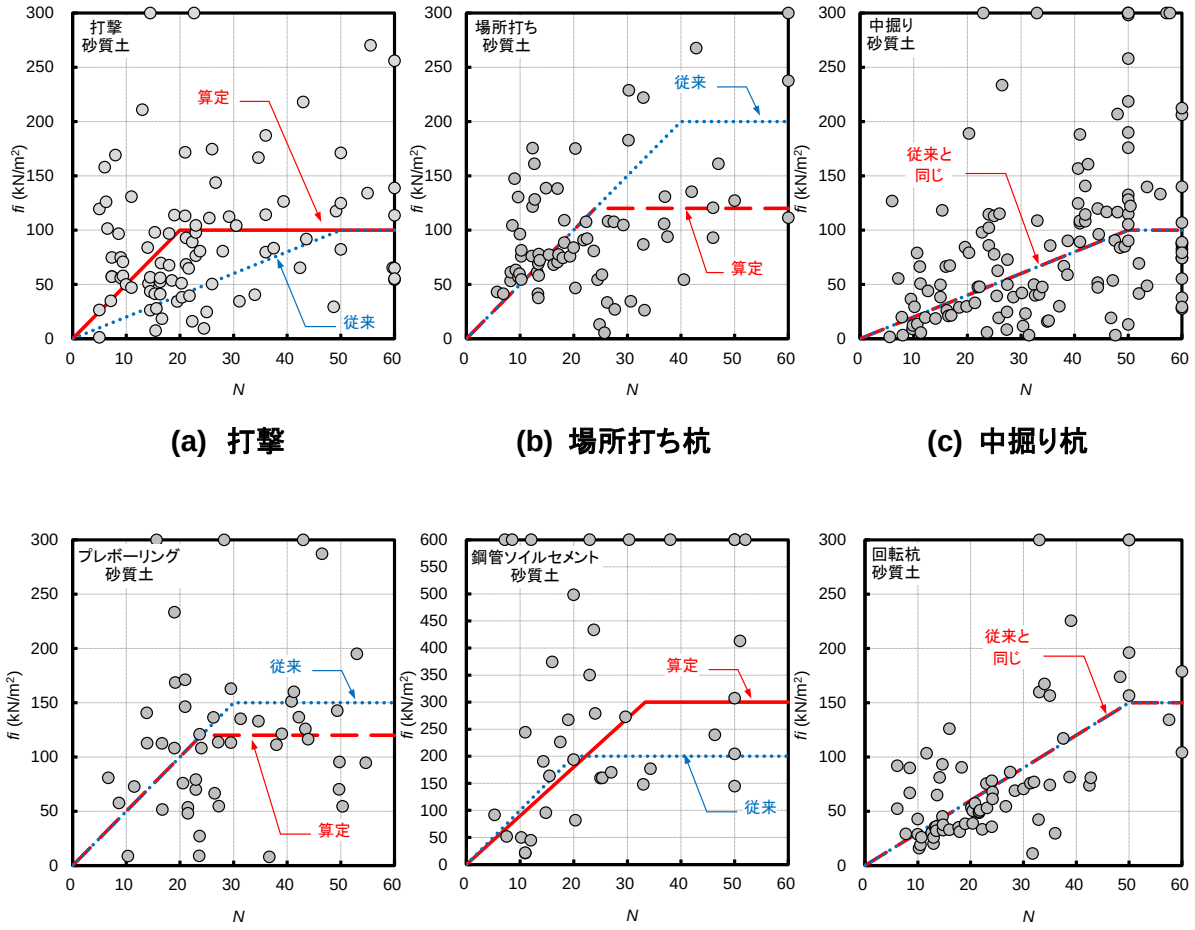
図 2.6.2 周面抵抗力度 f_i の推定線（c 値，粘性土）



(a) 打撃　(b) 場所打ち杭　(c) 中掘り杭

(d) プレボーリング杭　(e) 鋼管ソイルセメント杭　(f) 回転杭

図 2.6.3 周面抵抗力度 f_i の推定線（N 値，粘性土）



(a) 打撃　(b) 場所打ち杭　(c) 中掘り杭

(d) プレボーリング杭　(e) 鋼管ソイルセメント杭　(f) 回転杭

図 2.6.4 周面抵抗力度 f_i の推定線（N 値，砂質土）

2.6.2 算定した f_i の推定式に関する考察

c 値による推定式について

今回の算定では，粘着力 *c* 値が計測されている地盤については，*c* 値を用いた周面抵抗力度 f_i の評価も行ったことから，表 2.6.1 に示した推定式の算定結果では各工法において *c* 値による推定式と *N* 値による推定式を示している。ここで，周面抵抗力度 f_i の上限値は，一部の工法を除き，*c* 値による推定式と *N* 値による推定式で異なる。図 2.6.1 に示すように *c* 値のデータ数は *N* 値のデータ数の半分程度以下であることや，○と●の明確な交点が得られていないものもあることから，本研究では，f_i の上限値は *N* 値による推定式の上限値に統一することを提案する。

表 2.6.1 に示すように，*c* 値による推定式の係数は，打撃工法，場所打ち杭工法，鋼管ソイルセメント杭工法において 1 より大きな値となったが，周面抵抗力度 f_i が粘着力 *c* 値より大きくなることは考えにくいため，本研究では，上記 3 工法においても係数= 1 を提案する。

なお，上記の提案により *c* 値による推定式に関して従来式と異なる係数の値の提案は見送ることとするが，表 2.6.2 に示すように *c* 値による推定比の変動係数 *CV*（ばらつき）は *N* 値による推定比のばらつきよりも小さな値となっており，*N* 値に比べて *c* 値の方が精度のよい地盤調査結果であると言える。今後は，*c* 値データのさらなる蓄積により，*N* 値に比べて推定精度の高い *c* 値を基本とする推定式を提案していくことが考えられる。

表 2.6.2 推定式算定における粘性土の f_i の推定比の変動係数

杭工法	*c* 値による推定		*N* 値による推定	
	データ数 *n*	変動係数 *CV*	データ数 *n*	変動係数 *CV*
打撃工法	28	0.597	52	0.566
場所打ち杭工法	17	0.450	35	0.629
中掘り杭工法	24	0.726	79	0.829
プレボーリング工法	18	0.370	46	0.592
鋼管ソイルセメント杭工法	11	0.392	29	0.847
回転杭工法	30	0.309	15	0.383

以上より，ここで一次的に提案する周面抵抗力度 f_i の推定式を表 2.6.3 に示す。

表 2.6.3 周面抵抗力度 f_i の推定式（一次提案）（kN/m²）

杭工法	周面地盤	従来式（H24 道示）	一次提案式
打撃工法	粘性土	c または 10N (≦150)	c または 6N (≦ 70)
	砂質土	2N (≦100)	5N (≦100)
場所打ち杭工法	粘性土	c または 10N (≦150)	c または 5N (≦100)
	砂質土	5N (≦200)	5N (≦120)
中掘り杭工法	粘性土	0.8c または 8N (≦100)	0.8c または 4N (≦ 70)
	砂質土	2N (≦100)	2N (≦100)
プレボーリング杭工法	粘性土	c または 10N (≦100)	c または 7N (≦100)
	砂質土	5N (≦150)	5N (≦120)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	c または 10N (≦200)	c または 10N (≦200)
	砂質土	10N (≦200)	9N (≦300)
回転杭工法	粘性土	c または 10N (≦100)	c または 10N (≦100)
	砂質土	3N (≦150)	3N (≦150)

N：杭周面地盤の平均 N 値，　c：粘性土の粘着力（kN/m²）

※ バイブロハンマ工法については付属資料を参照のこと

2.7　推定精度の検証

ここでは，表 2.5.3，表 2.6.3 に示した一次提案式の推定精度を検証する。検証では，一次提案式と，平成 24 年の道路橋示方書に示す従来式のそれぞれを用いて算出した推定値と実測値を比べ推定比（＝実測値／推定値）を求める。検証に用いる極限支持力時の先端抵抗力，周面抵抗力，極限支持力の実測値は式（2.7.1）より，推定値は 2.1 で示した式（2.1.2）に従い表 2.5.3，表 2.6.3 に示した一次提案式を用いて算出する。なお，ここでの検証に用いる実測値及び推定値は，杭 1 本あたり（＝載荷試験ごと）の値である。

$$P_{10} = P_{p10} + P_{f10} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7.1)$$

ここに，P_{10}　：図 1.4.3(b)に示した方法により求める杭頭荷重（＝極限支持力）

P_{p10}　：図 1.4.3(b)に示した方法により求める杭先端荷重（＝先端抵抗力）

P_{f10}　：図 1.4.3(b)に示した方法により求める杭の周面抵抗力

検証では，この推定比について，杭工法ごとに式（1.5.1）に示した平均 M，式（1.5.3）に示した変動係数 CV を求め，推定精度の検証を行う。なお，ここでの検討に上記の統計量を用いることについては，1.5 で述べたとおりである。また，打撃工法（閉端）については近年の道路橋では一般に使用されていないことから，ここでの検証においてはその実測データは除外した。すなわち，表 2.5.3，表 2.6.3 に示した一次提案式における打撃工法の推定精度は，開端の実測データのみを用いて検証している。

2.7.1 先端抵抗力の推定精度

表 2.5.3 の一次提案式による先端抵抗力 R_{up} の推定精度を検証する。

なお，場所打ち杭工法における従来式の推定値では，先端地盤が粘性土の場合，一軸圧縮強度 q_u は式（2.7.2）を用いることにより，先端抵抗力度は $q_d = 3\,q_u = 75\,N$ により推定する。この $q_d = 3\,q_u$ の関係は，過去の基準[19)]においてケーソン基礎の底面地盤の極限支持力推定式に準じて示されたものである。以下，$q_d = 3\,q_u$ の根拠について示す。

支持力係数の値は，道路橋示方書に与えられた図から読み取ることができ，せん断抵抗角 ϕ を $\phi = 0$ と置くと，$N_c = 5$ 程度である。また，この時，$N_\gamma = N_q = 0$ であるから，式（2.7.2）における右辺の第 2 項及び第 3 項は 0 となる。また，基礎底面の形状係数 α の値は，円形の場合 $\alpha = 1.3$ であるから，式（2.7.2）より，$q_d = 1.3 \times c \times 5 = 6.5\,c = 3.25\,q_u \fallingdotseq 3\,q_u$ となる。

$$q_d = \alpha c N_c + \frac{1}{2}\beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(2.7.2)}$$

ここに，q_d ：基礎底面地盤の極限支持力度（kN/m^2）

c ：基礎底面より下にある地盤の粘着力（kN/m^2）

γ_1 ：基礎底面より下にある地盤の単位重量（kN/m^3）

γ_2 ：基礎底面より上にある地盤の単位重量（kN/m^3）

α ：基礎底面の形状係数（円形の場合 $\alpha = 1.3$）

β ：基礎底面の形状係数（円形の場合 $\beta = 0.6$）

B ：基礎幅（m）

D_f ：基礎の有効根入れ深さ（m）

N_c, N_γ, N_q ：支持力係数（せん断抵抗角 ϕ によって決定される）

図 2.7.1，図 2.7.2 に，表 2.5.3 に示した従来式からの推定精度と一次提案式からの推定精度を比べた結果を示す。図では，各工法の平均 M において従来式に比べ一次提案式の推定精度が向上していることが確認できるが，回転杭工法の平均 M については，一次提案式に比べ従来式の方が推定精度がよい。

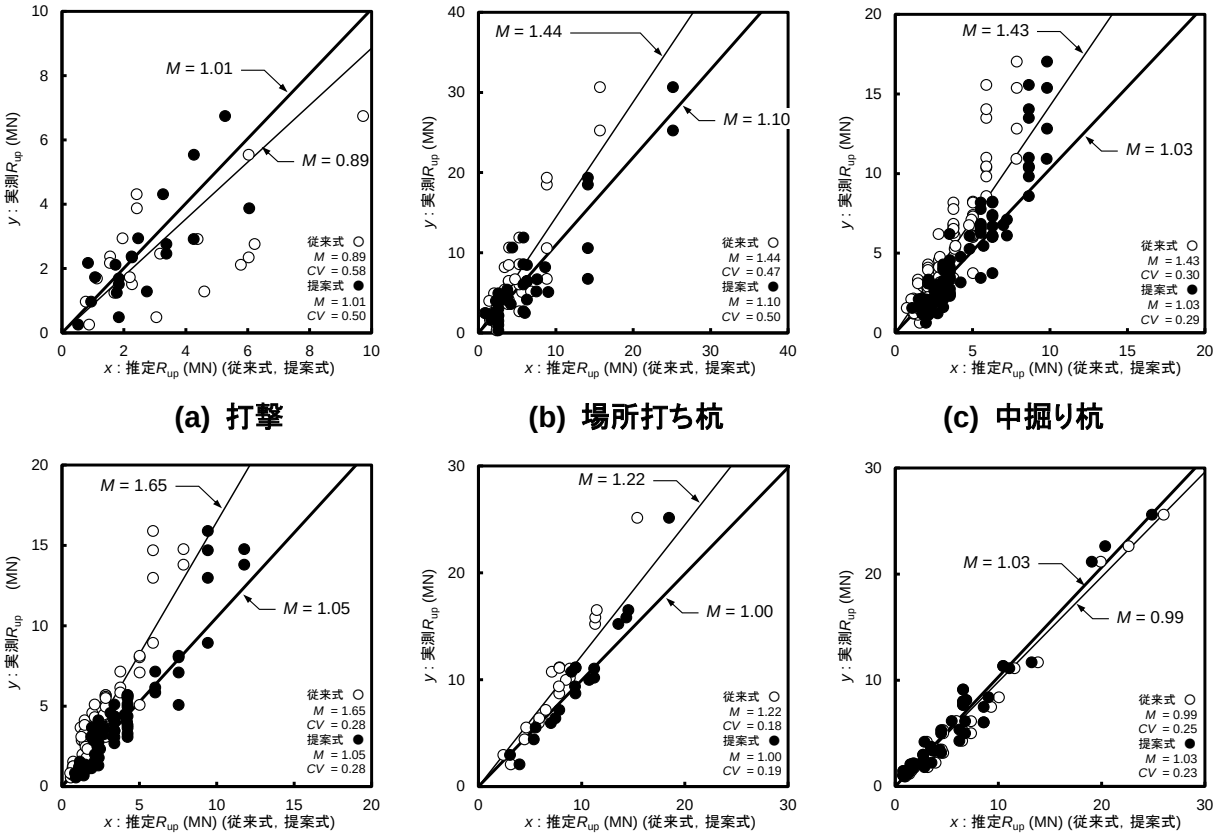


図 2.7.1 先端抵抗力 R_{up} の実測値−推定値関係（従来式・一次提案式）

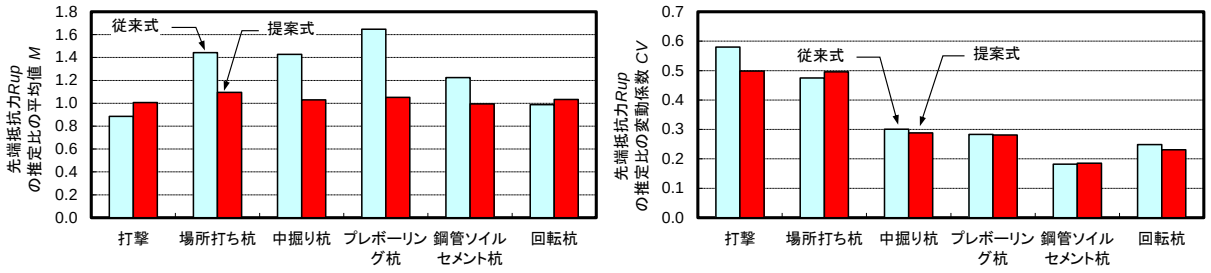


図 2.7.2 先端抵抗力 R_{up} の推定精度（従来式・一次提案式）

2.7.2 周面抵抗力の推定精度

表 2.6.3 の一次提案式による周面抵抗力 R_{uf} の推定精度を検証する。検証では，表 2.7.1 に示すように粘性土の周面抵抗力の推定方法についてケース分けした。

表 2.7.1 周面抵抗力 R_{uf} 推定の検証ケース

ケース	支持形式	推定に用いる地盤定数	粘性土の周面抵抗力の推定方法
CASE-A1	支持杭	N 値のみ	全て N 値から推定
CASE-A2	支持杭	c 値のみ	c 値が得られているデータ： c 値 c 値が得られていないデータ： 式 (2.7.3) 式 (2.7.4)
CASE-A3	支持杭	c 値，N 値	c 値が得られているデータ： c 値 c 値が得られていないデータ： N 値
CASE-B1	摩擦杭	N 値のみ	全て N 値から推定
CASE-B2	摩擦杭	c 値のみ	c 値が得られているデータ： c 値 c 値が得られていないデータ： 式 (2.7.3) 式 (2.7.4)
CASE-B3	摩擦杭	c 値，N 値	c 値が得られているデータ： c 値 c 値が得られていないデータ： N 値

ここで，粘性土において粘着力 c 値が得られているデータは，層厚の比率で 13%と少ない。よって，周面抵抗力の推定において，CASE-A2 及び CASE-B2 では，式（2.7.3）及び式（2.7.4）を用いて N 値から c 値を推定する。

$N \geqq 5$ の時： $c = q_u / 2 = 12.5\,N$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (2.7.3)

$N < 5$ の時： $c = 0.5\,(40 + 5\,N)^{1.15}$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (2.7.4)

ここに，c：粘着力（kN/m^2），q_u：一軸圧縮強度（kN/m^2）である。これらの推定式は，図 2.7.3 に示すように，既往の研究[20]において文献[21]を参考にして平均値を与えるように設定されたものである。

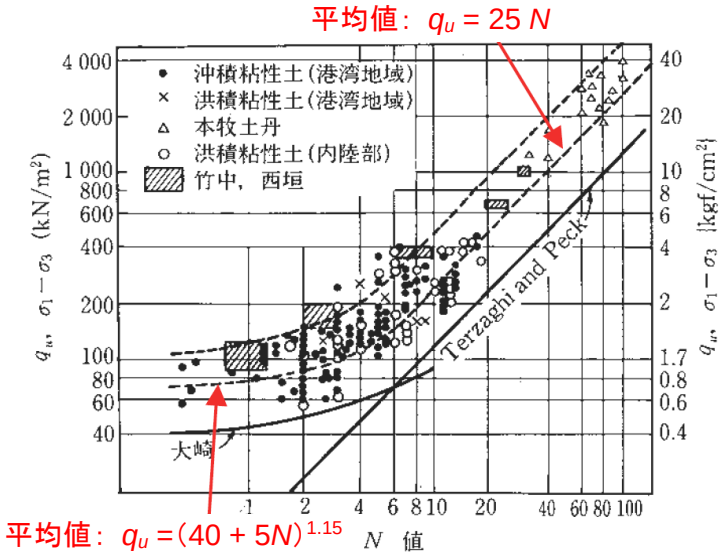


図 2.7.3 粘性土の一軸圧縮強度 q_u と N 値との関係（文献[21]に加筆）

N 値による周面抵抗力 R_{uf} の推定では，道路橋示方書において $N < 5$ の軟弱層では粘着力を N 値により推定することは適当でないため別途土質試験により粘着力を求め周面抵抗力度を推定するのがよいと解説されていることにより，実設計においては $N < 5$ の周面抵抗力度を $f_i = 0$ と推定する実例も少ないないことから，ここでの検討においても c 値が得られていないデータのうち $N < 5$ の周面抵抗力度は $f_i = 0$ として推定する。

杭体表面にすべり材料（例えばスリップレイヤーコンパウンド剤，以下 SL 剤）等を施して周面抵抗力を意図的に低減させた区間の周面抵抗力の推定値については，支持力推定式によらず実測値とする。

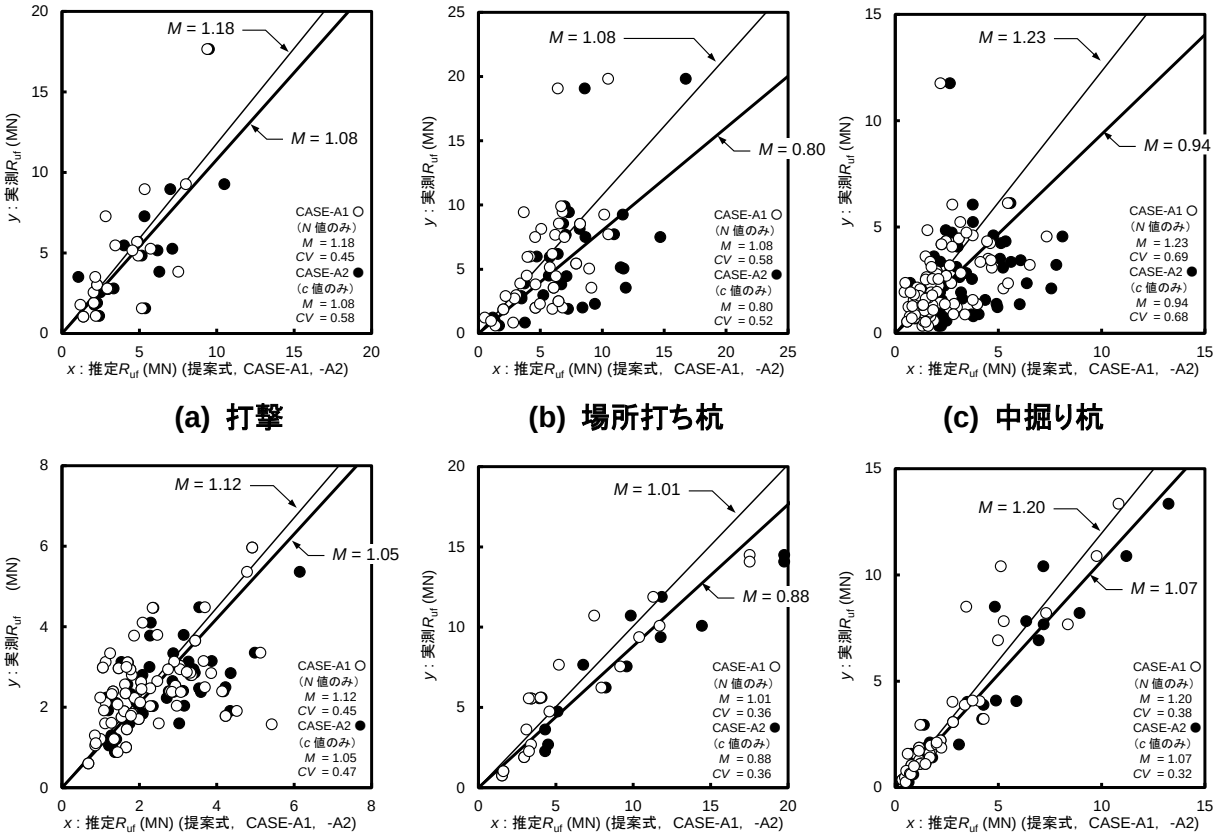
(1) CASE-A1・A2, CASE-B1・B2 について

表 2.7.1 に示すケースにおいて，CASE-A1 と CASE-A2，CASE-B1 と CASE-B2 を比べることで，N 値による推定値と c 値による推定値に対する比較検討を行う。

図 2.7.4, 図 2.7.5 に, 表 2.6.3 に示した一次提案式からの推定精度を, 支持杭の CASE-A1 と CASE-A2 で比べた結果を示す。図では，工法全体の傾向として計算される支持力の値は CASE-A2 に比べて CASE-A1 の方が小さめの推定値であることが確認できる。これは，上記で述べたように，N 値による推定では実設計を想定し $N < 5$ の周面抵抗力度は $f_i = 0$ としたことから，N 値のみの推定である CASE-A1 の方が小さな推定値になったことによる。

図 2.7.6, 図 2.7.7 に, 表 2.6.3 に示した一次提案式からの推定精度を, 摩擦杭の CASE-B1 と CASE-B2 で比べた結果を示す。図では，CASE-A1，CASE-A2 の比較結果と同様に，CASE-B2 に比べて CASE-B1 の方が小さめの推定値であることが確認できる。

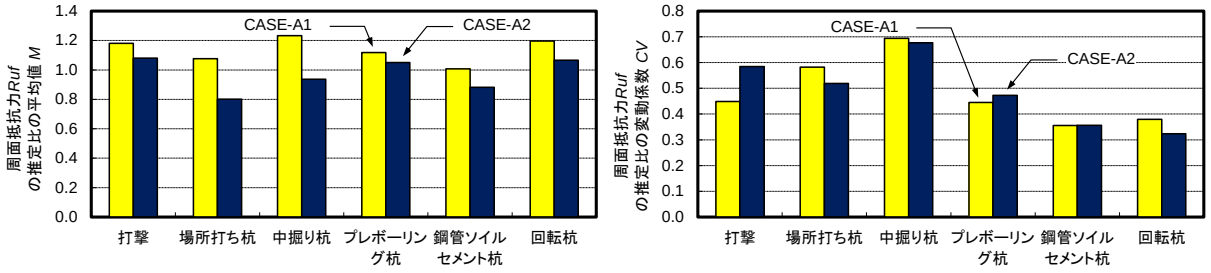
N 値からのみ推定する CASE-A1・CASE-B1 の結果と，c 値からのみ推定する CASE-A2・CASE-B2 の結果を比較することは, N 値推定と c 値推定による推定支持力の部分係数（調査・解析係数）算定の参考資料となり得る。しかし今回の検討では，粘性土において粘着力 c 値が得られているデータが層厚の比率で 13%と少なく式（2.7.3）及び式（2.7.4）を用いた換算 c 値を多用しており，N 値推定と c 値推定とで異なる部分係数（調査・解析係数）を提案することは難しいと考えられる。



(a) 打撃　　**(b) 場所打ち杭**　　**(c) 中掘り杭**

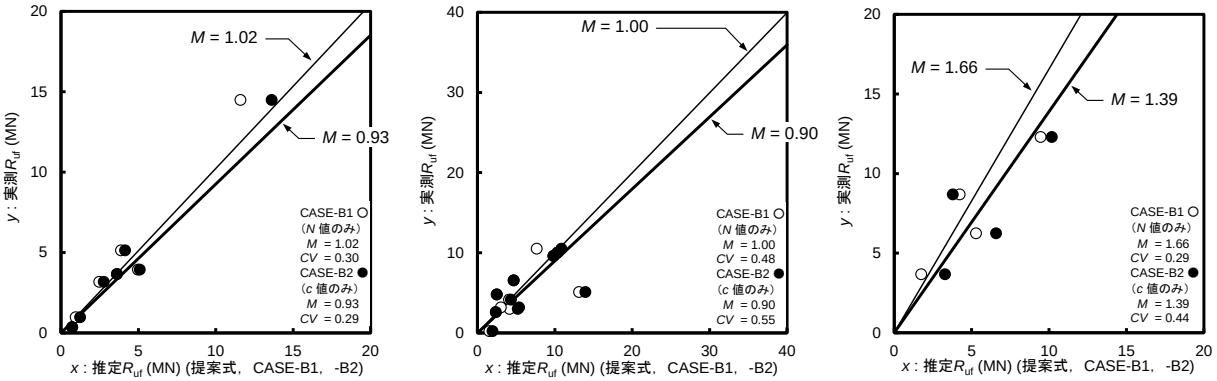
(d) プレボーリング杭　　**(e) 鋼管ソイルセメント杭**　　**(f) 回転杭**

図 2.7.4 周面抵抗力 R_{uf} の実測値−推定値関係（一次提案式，CASE-A1・A2）



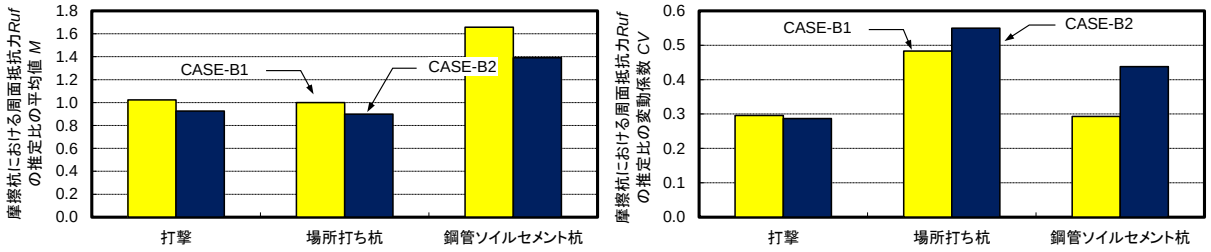
(a) 平均 *M*（1.0 に近いほど良好）　　**(b) 変動係数 *CV*（0.0 に近いほど良好）**

図 2.7.5 周面抵抗力 R_{uf} の推定精度（一次提案式，CASE-A1・A2）



(a) 打撃　　(b) 場所打ち杭　　(c) 鋼管ソイルセメント杭

図 2.7.6 周面抵抗力 R_{uf} の実測値−推定値関係（一次提案式，CASE-B1・B2）



(a) 平均 M（1.0 に近いほど良好）　　(b) 変動係数 CV（0.0 に近いほど良好）

図 2.7.7 周面抵抗力 R_{uf} の推定精度（一次提案式，CASE-B1・B2）

(2) CASE-A3, CASE-B3 について

表 2.7.1 に示すケースにおいて，CASE-A3 及び CASE-B3 は，それぞれ支持杭，摩擦杭における実務での設計を想定したケースであり，表 2.6.3 に示した一次提案式の実質的な推定精度であると考えられる。

図 2.7.8，図 2.7.9 に，CASE-A3 において，表 2.6.3 に示した従来式からの推定精度と一次提案式からの推定精度を比べた結果を示す。図では，打撃工法，場所打ち杭工法，鋼管ソイルセメント杭工法において，従来式に比べ一次提案式の平均 M の推定精度向上が確認できる。一方，中掘り杭工法では，従来式の偏りが M ＝1.24 であるのに対し一次提案式の偏りは M ＝1.40 であり，従来式の方が推定精度がよい。これは，中掘り杭工法はフリクションカッターを用いるといった工法の特性上，図 2.7.9(b)に示すように他の杭工法に比べて周面抵抗力の変動係数 CV（ばらつき）が大きくなるが，結果として今回の一次提案式が低い側にばらついた場合に合うような式となったことが理由であると考えられる。

図 2.7.10，図 2.7.11 に，摩擦杭の CASE-B3 において，表 2.6.3 に示した従来式からの推定精度と一次提案式からの推定精度を比べた結果を示す。図では，打撃工法，場所打ち杭工法において，従来式に比べ一次提案式の推定精度が向上していることが確認できる。鋼管ソイルセメント杭工法では，従来式と一次提案式で同程度の結果であるがその推定精度は良好とは言えないが，データ数が n=4 と相対的に少なく，推定精度の判断に十分なデータ数であるとは言えない。したがって，摩擦杭に関しては，さらに載荷試験データを蓄積することが今後の課題である。

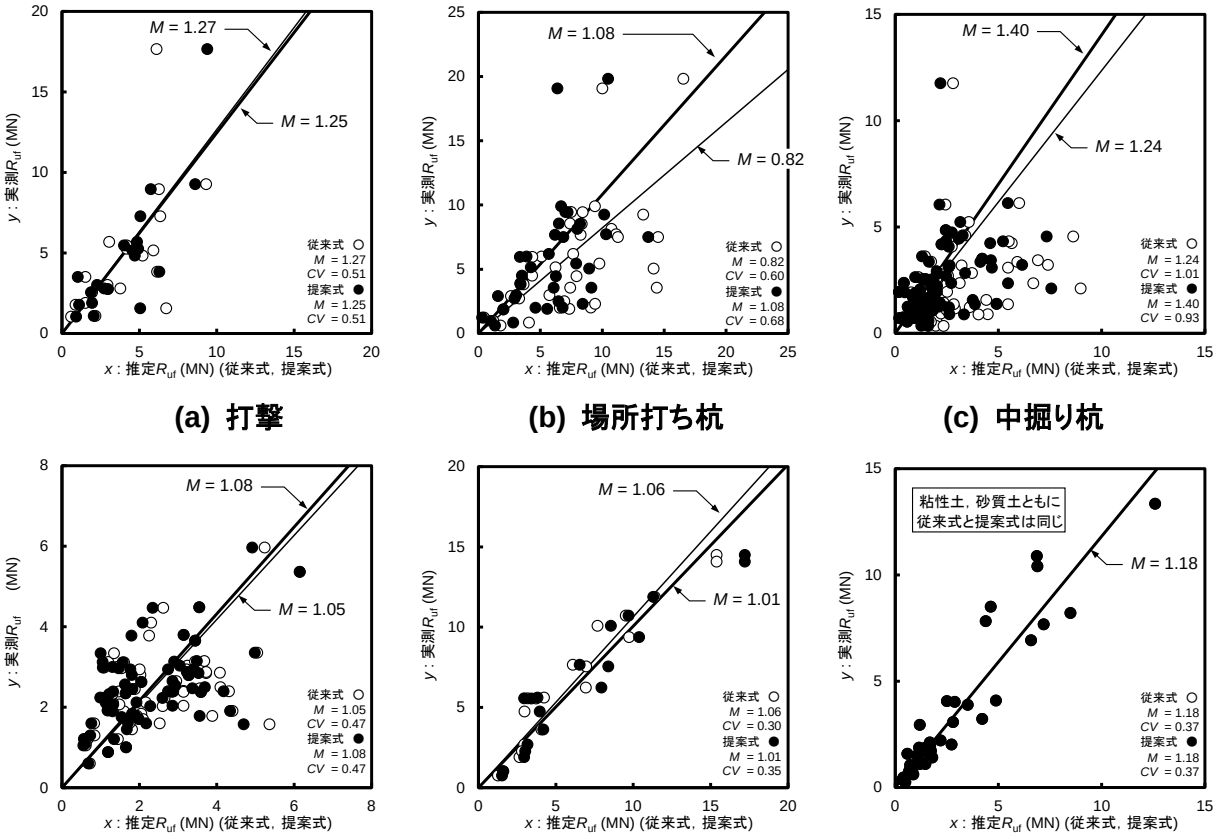


図 2.7.8 周面抵抗力 R_{uf} の実測値−推定値関係（従来式・一次提案式，CASE-A3）

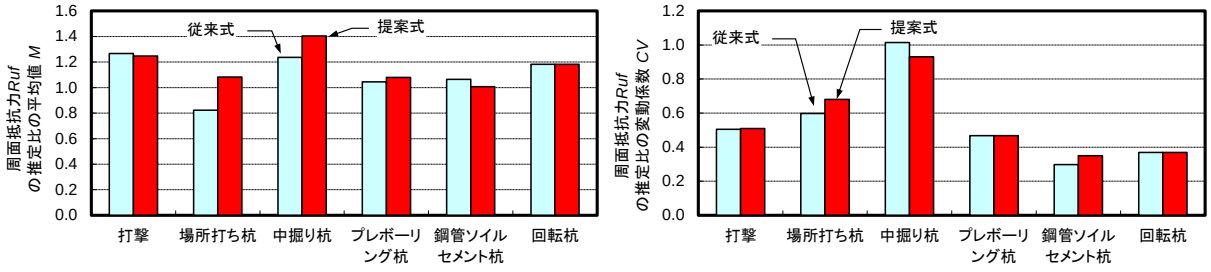
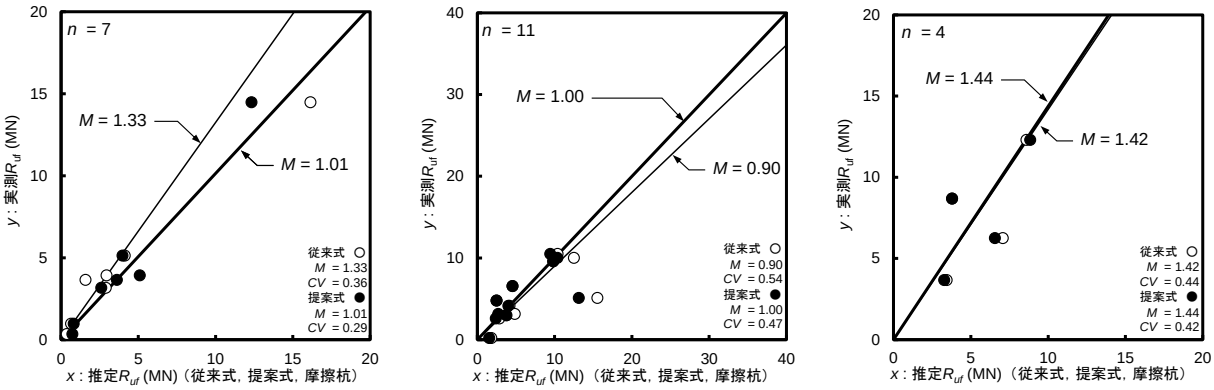
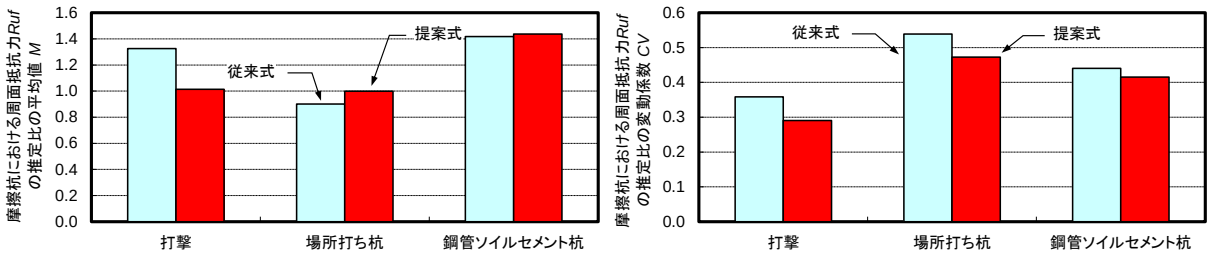


図 2.7.9 周面抵抗力 R_{uf} の推定精度（従来式・一次提案式，CASE-A3）



(a) 打撃　　**(b) 場所打ち杭**　　**(c) 鋼管ソイルセメント杭**

図 2.7.10 周面抵抗力 R_{uf} の実測値−推定値関係（従来式・一次提案式，CASE-B3）



(a) 平均 M（1.0 に近いほど良好）　　**(b) 変動係数 CV（0.0 に近いほど良好）**

図 2.7.11 周面抵抗力 R_{uf} の推定精度（従来式・一次提案式，CASE-B3）

2.7.3 極限支持力の推定精度

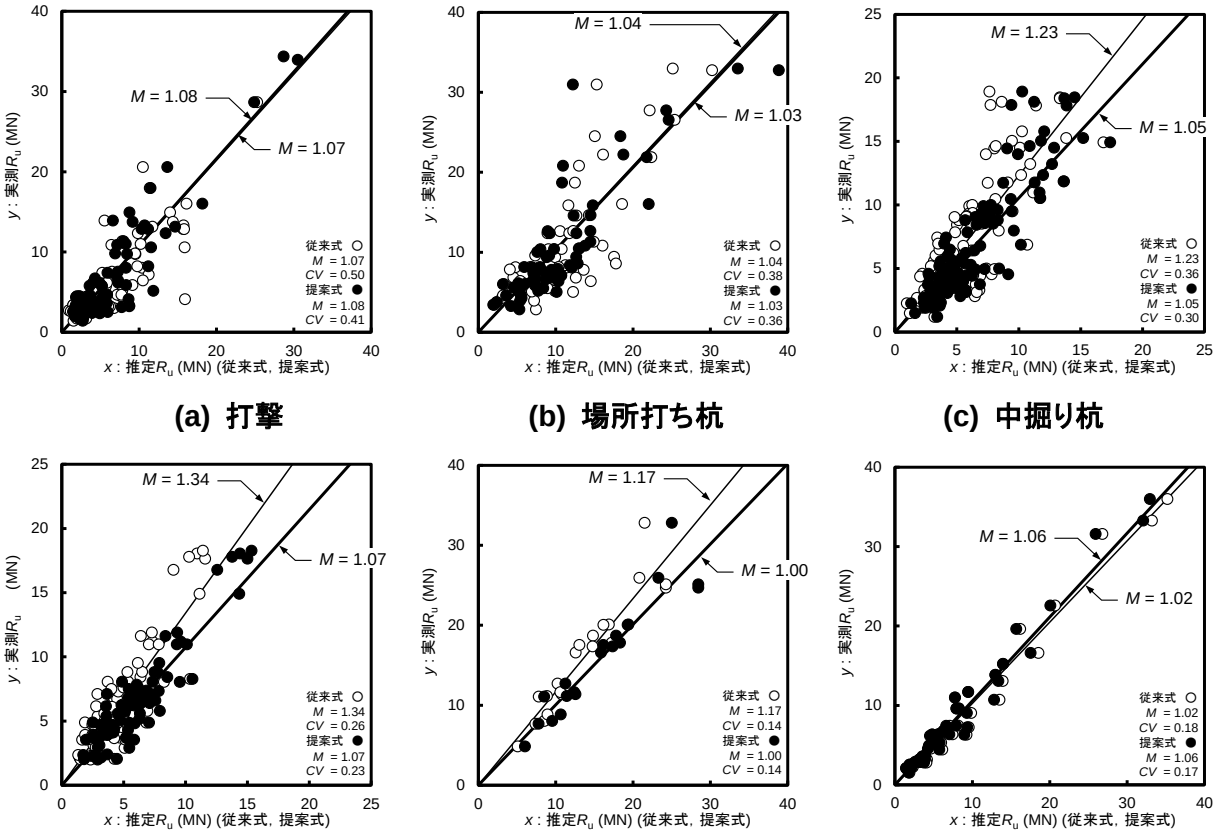
表 2.5.3，表 2.6.3 の一次提案式を用いた場合の極限支持力 R_u の推定精度を検証する。極限支持力 R_u は，2.7.1 で求めた先端抵抗力 R_{up} と，2.7.2 で求めた推定値のうち実務での設計を想定した CASE-A3 もしくは CASE-B3 における周面抵抗力 R_{uf} を用いて，杭 1 本あたり（＝載荷試験ごと）の推定値を算出する。算出した推定値と実測値を比べ推定比（＝実測値／推定値）を求める。

図 2.7.12，図 2.7.13 に，CASE-A3 において，表 2.6.3 に示した従来式の推定精度と一次提案式の推定精度を比べた結果を示す。図では，各工法の平均 M において従来式に比べ一次提案式の推定精度が向上していることが確認できるが，図 2.7.1，図 2.7.2 に示した先端抵抗力 R_{up} の結果と同様に回転杭工法の平均 M は，一次提案式に比べ従来式の推定精度がよい。

回転杭工法の推定式は，平成 24 年の道路橋示方書改定の際に新たに示されたものであり，他の杭工法と異なり従来式においても平均的な値の推定を意図して定められている。これは，今回の検討方針と合致するものであり，また，従来式の方が推定精度がよいことから，回転杭工法においては周面抵抗力度 f_i の推定式同様に先端抵抗力度 q_d の推定式についても，従来式を最終的な提案式とする。

ここで，場所打ち杭工法の先端抵抗力に触れておく。場所打ち工法の載荷試験データ整理では，図 2.3.1 に示したように支持層への根入れ長分の周面抵抗力が先端抵抗力に含まれており，その根入れ長は概ね杭径に比べて大きな値である。一方，推定値の算出では，従来の平成 24 年の道路橋示方書で解説されるように杭先端の杭径程度分の周面抵抗力が先端抵抗力に含まれており，実測値と推定値とで周面抵抗力と先端抵抗力の分離位置が異なる場合があることから，極限支持力の推定値は，実測値と比べて過小評価する懸念がある。一方，図 2.7.12，図 2.7.13 に示す極限支持力 R_u の推定精度をみてみると，場所打ち杭における一次提案式の推定比の平均 M ＝1.03 であり，精度は良好であると言える。したがって，場所打ち杭工法の先端抵抗力推定において一次提案式を用いる場合にも，従来の道路橋示方書と同様に杭先端の杭径程度分の周面抵抗力が先端抵抗力に含まれているとして実用上問題ないと考えられる。

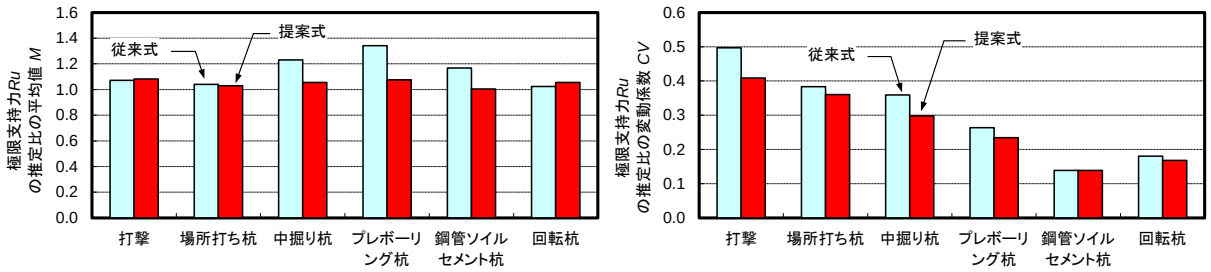
先端抵抗力 R_{up}（図 2.7.1，図 2.7.2），周面抵抗力 R_{uf}（図 2.7.8，図 2.7.9），極限支持力 R_u（図 2.7.12，図 2.7.13）の推定精度を比べると，R_{up} と R_{uf} を足し合わせて求められる極限支持力 R_u の推定精度が最もよいことから，実際に設計計算で用いられる R_u の推定式として，表 2.5.3，表 2.6.3 の一次提案式が適切であることが確認できる。



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 中掘り杭**

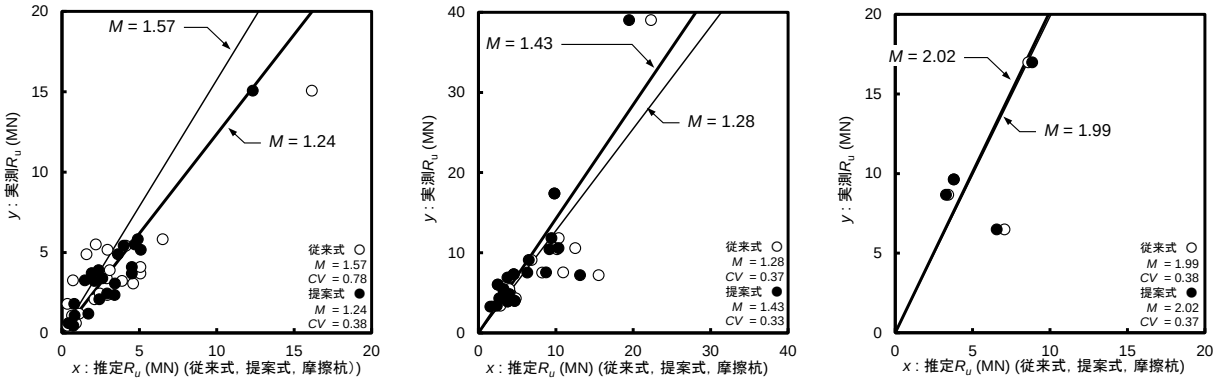
(d) プレボーリング杭 **(e) 鋼管ソイルセメント杭** **(f) 回転杭**

図 2.7.12 極限支持力 R_u の実測値−推定値関係（従来式・一次提案式，CASE-A3）



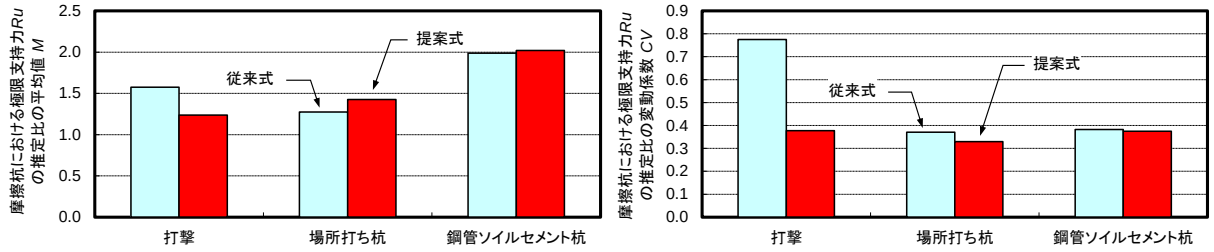
(a) 平均 M（1.0 に近いほど良好） **(b) 変動係数 CV（0.0 に近いほど良好）**

図 2.7.13 極限支持力 R_u の推定精度（従来式・一次提案式，CASE-A3）



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 鋼管ソイルセメント杭**

図 2.7.14 極限支持力 R_u の実測値−推定値関係（従来式・一次提案式, CASE-B3）



(a) 平均 M（1.0 に近いほど良好） **(b) 変動係数 CV（0.0 に近いほど良好）**

図 2.7.15 極限支持力 R_u の推定精度（従来式・一次提案式, CASE-B3）

図 2.7.14, 図 2.7.15 に, 摩擦杭の CASE-B3 において, 表 2.6.3 に示した従来式の推定精度と一次提案式の推定精度を比べた結果を示す。ここで示す極限支持力 R_u の推定値は, 図 2.7.10, 図 2.7.11 に示した周面抵抗力 R_{uf} の推定値に比べて精度が悪いが, この一因として, 摩擦杭の実測値は杭頭荷重を用いているため実在の先端抵抗力 R_{up} も含まれているが, 推定値は先端抵抗力 $R_{up} = 0$ として計算していることが考えられる。

2.7.4 先端伝達率の推定精度

先端伝達率とは杭先端荷重と杭頭荷重の比 であり，ここでは極限支持力時の先端伝達率γ_uとして，2.7.1 で求めた先端抵抗力 R_{up} と，2.7.3 で求めた極限支持力 R_u の比 $R_{up}/R_u=\gamma_u$ の推定精度を検証する。検証では，一次提案式と，平成 24 年の道路橋示方書に示す従来式のそれぞれを用いて算出した推定値と実測値を比べ推定比（＝実測値／推定値）を求める。

なお，γ_u の実測値は式（2.7.5）より，γ_u の推定値は式（2.7.6）より求めた。

$$\gamma_u = \frac{P_{p10}}{P_{10}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7.5)$$

$$\gamma_u = \frac{R_{up}}{R_u} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7.6)$$

ここに，P_{p10} ：図 1.4.3(b)に示した方法により求める杭先端荷重（＝先端抵抗力）

P_{10} ：図 1.4.3(b)に示した方法により求める杭頭荷重（＝極限支持力）

R_{up} ：式（2.1.2）に従い表 2.5.3 に示した一次提案式から推定する先端抵抗力

R_u ：式（2.1.2）に従い表 2.5.3，表 2.6.3 に示した一次提案式から推定する極限支持力 $R_u = R_{up} + R_{uf}$ で，R_{uf} は実務での設計を想定し表 2.7.1 に示す CASE-A3 により算定する。

先端伝達率γ_uについて，図 2.7.16 に実測値 - 推定値関係を，図 2.7.17 に工法ごとの平均値を，図 2.7.18 に従来式と一次提案式の推定精度を比べた結果を示す。図から，従来式では，場所打ち杭工法，中掘り杭工法，プレボーリング杭工法の推定値は実測値に対して過小評価していることが確認できる。一方，一次提案式では，各工法で推定値は実測値と同程度であり，一次提案式による推定精度の向上が確認できる。

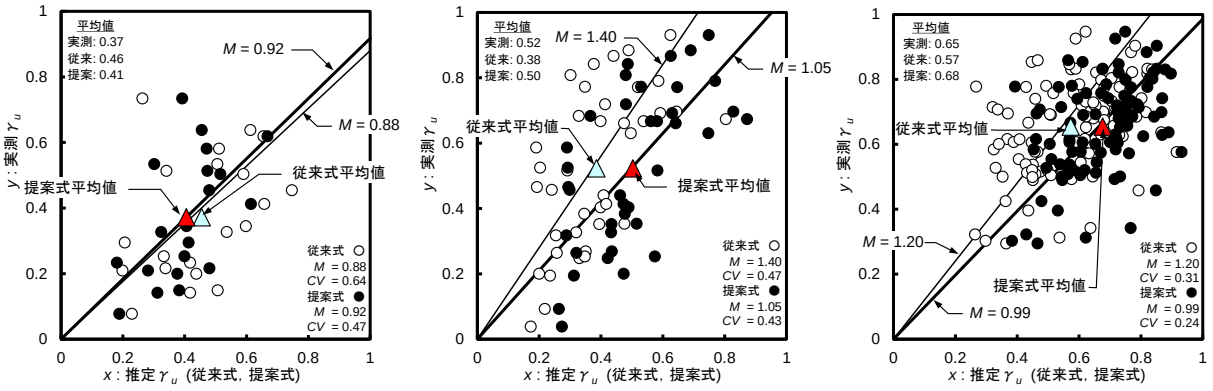


図 2.7.16 先端伝達率γ_uの実測値−推定値関係（従来式・一次提案式，CASE-A3）

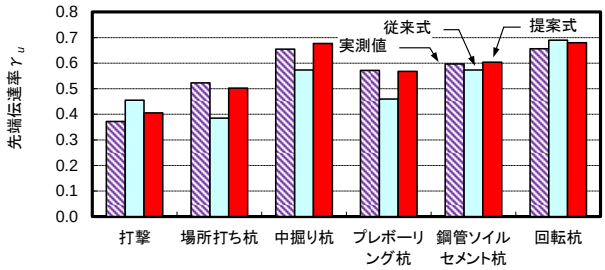


図 2.7.17 先端伝達率γ_uの比較（実測値・従来式・一次提案式，CASE-A3）

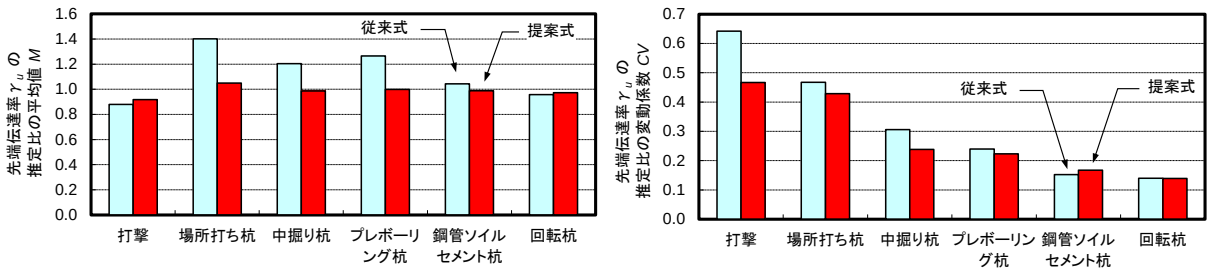


図 2.7.18 先端伝達率γ_uの推定精度（従来式・一次提案式，CASE-A3）

2.8　支持力推定式の提案

以上より，本研究における支持力推定式の最終的な提案式を表 2.8.1，表 2.8.2 に示す。

表 2.8.1 先端抵抗力度 q_d の推定式（最終提案）（kN/m²）

杭工法	先端地盤	従来式（H24 道示）	最終提案式
打撃工法（開端・閉端）	粘性土	開端： $q_d/\overline{N}=60(L_b/D)$ (≦300)	$90\overline{N}$ (≦ 4,500)
	砂	閉端： $q_d/\overline{N}=40(L_b/D)+100$ (≦300)	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)
	砂れき	開端，閉端ともに ($\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5)	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)
場所打ち杭工法	粘性土	$3q_u$	$110\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂	3,000 (30≦ $\overline{N}$ ≦40)	$110\overline{N}$ (≦ 3,300)
	砂れき	5,000 (50≦ $\overline{N}$ の良質な砂れき層)	$160\overline{N}$ (≦ 8,000)
中掘り杭工法（セメントミルク噴出撹拌方式）	粘性土	―	―
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$220\overline{N}$ (≦11,000)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$250\overline{N}$ (≦12,500)
プレボーリング杭工法	粘性土	―	―
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$240\overline{N}$ (≦12,000)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$300\overline{N}$ (≦15,000)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	―	―
	砂	$150\overline{N}$ (≦ 7,500)	$190\overline{N}$ (≦ 9,500)
	砂れき	$200\overline{N}$ (≦10,000)	$240\overline{N}$ (≦12,000)
回転杭工法 1.5 倍径	粘性土	―	―
	砂	$120\overline{N}$ (≦ 6,000)	$120\overline{N}$ (≦ 6,000)
	砂れき	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)	$130\overline{N}$ (≦ 6,500)
回転杭工法 2.0 倍径	粘性土	―	―
	砂	$100\overline{N}$ (≦ 5,000)	$100\overline{N}$ (≦ 5,000)
	砂れき	$115\overline{N}$ (≦ 5,750)	$115\overline{N}$ (≦ 5,750)

$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径，　q_u：一軸圧縮強度（kN/m²）

表 2.8.2 周面抵抗力度 f_i の推定式（最終提案）（kN/m²）

杭工法	周面地盤	従来式（H24 道示）	最終提案式
打撃工法	粘性土	c または $10N$ (≦150)	c または $6N$ (≦ 70)
	砂質土	$2N$ (≦100)	$5N$ (≦100)
場所打ち杭工法	粘性土	c または $10N$ (≦150)	c または $5N$ (≦100)
	砂質土	$5N$ (≦200)	$5N$ (≦120)
中掘り杭工法	粘性土	$0.8c$ または $8N$ (≦100)	$0.8c$ または $4N$ (≦ 70)
	砂質土	$2N$ (≦100)	$2N$ (≦100)
プレボーリング杭工法	粘性土	c または $10N$ (≦100)	c または $7N$ (≦100)
	砂質土	$5N$ (≦150)	$5N$ (≦120)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	c または $10N$ (≦200)	c または $10N$ (≦200)
	砂質土	$10N$ (≦200)	$9N$ (≦300)
回転杭工法	粘性土	c または $10N$ (≦100)	c または $10N$ (≦100)
	砂質土	$3N$ (≦150)	$3N$ (≦150)

N：杭周面地盤の平均 N 値，　c：粘性土の粘着力（kN/m²）

3. 軸方向ばね定数の推定式

道路橋示方書では，軸方向ばね定数 K_v は，杭頭において単位量の軸方向の変位を生じさせる軸方向力として定義されており，杭反力の算定に用いるほか，杭基礎の弾性沈下量を推定するのに用いられる。この K_v は，杭頭部の軸方向荷重・変位曲線から，降伏支持力に対応する割線勾配として求めるか，推定式によって求めてよいとされている。

従来の平成 24 年の道路橋示方書に示されている推定式（以降，従来式と呼ぶ）は，比較的簡易に K_v の評価が可能であり汎用性もあるが，杭先端地盤の影響を直接見込む変数が用いられていないため杭長が短い場合や軸剛性が高い場合などで推定精度が低くなる傾向がある。

そこで，土研資料 4139 号では，このような杭先端地盤の影響が相対的に大きい場合にも一定の推定精度を確保することを目的として，杭体部分だけでなく杭先端の寄与分に関する影響を考慮することができる K_v の推定式が提案され，その後，土研資料 4297 号では，K_v に関する補正係数が見直された。本研究は，2.8 に示した支持力推定式の最終提案式を踏まえ，K_v に関する補正係数を土研資料 4297 号から再度見直す検討を行うものである。

また，摩擦杭については，杭先端地盤の影響は小さいことから，杭体変形量のみの推定式について検討を行う。

3.1　降伏支持力

軸方向ばね定数 K_v を載荷試験結果から算定するには，杭頭部の軸方向荷重・変位曲線における降伏支持力に対応する割線勾配として求める。

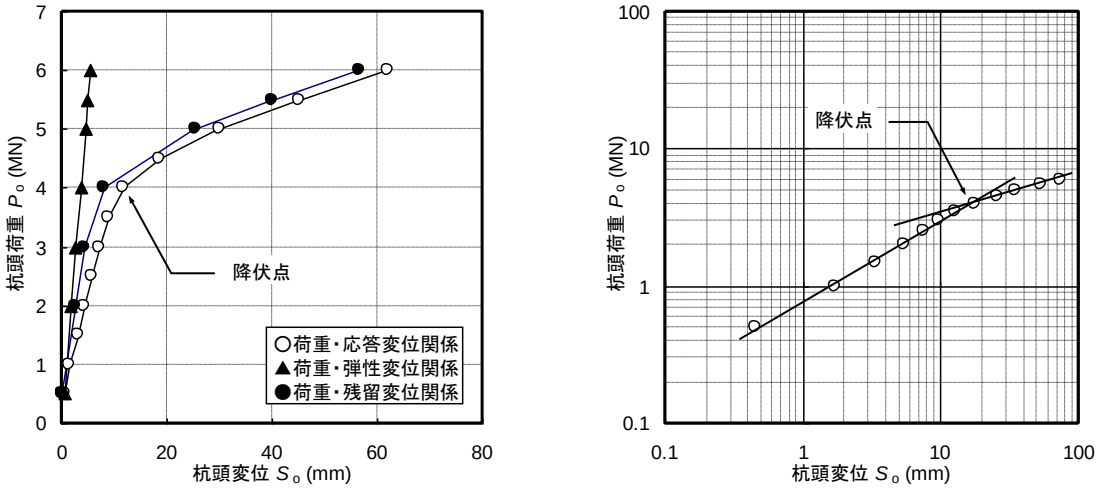
既往の研究[9),22)]において，軸方向荷重・変位曲線を 1.4.1 で示したように Weibull 分布曲線で近似する場合，杭頭変位の特性値 S_{os} は杭頭降伏変位 S_{oy} に，杭頭荷重 $P_o = P_{os}$ は降伏支持力 P_{oy} に相当すると説明されてきた。すなわち，図 1.4.1 で示した Weibull 分布曲線から得られる特性点≒降伏点（降伏支持力）であるとみなされてきた。

その後，土研資料 4139 号では，特性点≒降伏点とみなせる条件として Weibull 分布曲線の変位指数 m に着目し，『$m < 0.7$ かつ $P_{omax} / P_{os} \leqq 1.4$』に該当するデータについては，Weibull 分布曲線の特性点≒降伏点とはみなせないこととし，この該当データについては，図 3.1.1 に示すように，普通目盛で表した P_o - S_o 曲線における変位急増点もしくは両対数目盛での log P_o - log S_o 関係の折れ点を求め，改めて杭頭降伏変位 S_{oy} として見直していた。なお，降伏荷重 P_{oy} については，『$m < 0.7$ かつ $P_{omax} / P_{os} \leqq 1.4$』の該当データにおいても変位急増点などから求める P_{oy} ≒ 特性値 P_{os} であることを確認したことにより，降伏点を見直したデータであっても杭頭荷重の特性値 P_{os} = 降伏荷重 P_{oy} とみなしていた。

本研究における降伏点は，基本的に上記で示した土研資料 4139 号と同様の扱いとするが，

『m < 0.7 かつ P_{omax} / P_{os}≦1.4』に該当し降伏点を見直したデータにおける降伏荷重 P_{oy} については，変位急増点などから求める見直した値を採用することとした。

表 3.1.1 に，本研究における降伏点の扱いを示す。



(a) P_o - S_o 関係　　**(b) log P_o - log S_o 関係**

図 3.1.1 Weibull 特性点以外を降伏点とする場合の判定例

表 3.1.1 降伏点の扱い

条件	降伏変位 S_{oy}	降伏荷重 P_{oy}
m＜0.7 かつ P_{omax} / P_{os}≦1.4	S_{oy} = 見直した値 （荷重・変位曲線における変位急増点または両対数目盛での荷重・変位曲線の折れ点）	P_{oy} = 見直した値 （荷重・変位曲線における変位急増点または両対数目盛での荷重・変位曲線の折れ点）
上記以外	S_{oy} = S_{os}（杭頭変位の特性値）	P_{oy} = P_{os}（杭頭荷重の特性値）= 0.63 P_{ou}

3.2　採用データ

軸方向ばね定数 K_v の推定式見直しでは，表 2.2.3 に示した支持力推定式の検討データに対して表 3.2.1 に示す採用条件を追加した。

条件-1 は，表 2.2.1 に示した支持力推定式の検討におけるデータの採用条件と同じである。

条件-2 は，表 2.2.2 に示した条件と同じであり，載荷荷重不足のために近似精度が不十分であると考えられるデータを排除することを意図している。土研資料 4139 号では，試行錯誤の末，土研資料 4036 号を参考に 1.2 倍という数値を設定しており，降伏荷重 P_{oy}（= 図 1.4.1 で示した杭頭荷重の特性値 P_{os}）の 1.2 倍（極限荷重 P_{ou} の 76%）までの載荷荷重が付与された試験結果を近似した Weibull 分布曲線は，その全領域を信用できるものとして扱っている。条件-2 を満足しないデータは，図 3.2.1 (b)(c)に示すように両対数軸上の杭頭荷重 P_o・杭頭

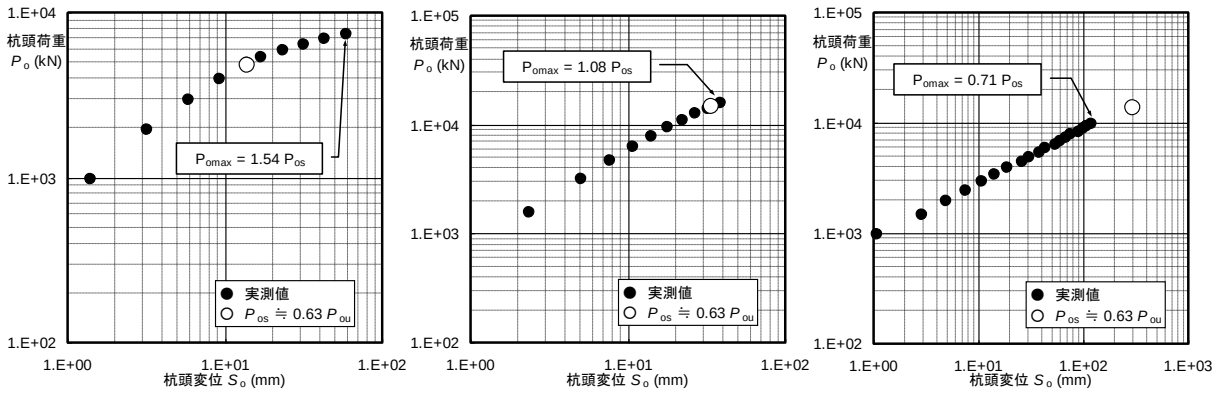
変位 S_o 関係が直線状に分布し，折れ点を明確に見出せない傾向にあったことが土研資料 4139 号で報告されている。これを踏まえ，今回の整理も土研資料 4139 号を踏襲している。

条件- 3 は，杭体に周面抵抗力を低減させる層材料（例えばスリップレイヤーコンパウンド剤，以下 SL 剤）を塗布するなどの処置を施しているデータを排除することを意図している。この処理を施している範囲は周面抵抗力が過小評価され，結果として，杭頭降伏時変位 S_{oy} のうち，杭体変形量 ΔL_y を過大評価，杭先端変位 S_{py} を過小評価するおそれがあるからである。

なお，表 2.8.1 で支持力推定式を示さなかった杭工法や先端地盤条件のデータについては，対象外とした。打撃工法（閉端）については，2.5.3(1)で示したように支持力推定式において開端と同じ評価としたことから，軸方向ばね定数においても以降の検討で示す開端の推定式を閉端にも，適用することとする。また，中掘り杭工法，プレボーリング杭工法，回転杭工法において 1.3 で示した条件により摩擦杭と判定されたデータについても対象外とした。

表 3.2.1 データの採用条件（軸方向ばね）

採用条件	内容
条件-1	杭頭における実測最大荷重 P_{omax} が，杭頭変位が杭径の 10%に達した時の杭頭荷重 P_{10} の 76%以上であるもの（$P_{omax} \geqq 1.2 \times 0.63 P_{10} \fallingdotseq 0.76 P_{10}$）：【$P_{10}$ 信頼性】
条件-2	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杭頭荷重の特性値 $P_{os} \fallingdotseq 0.63 P_{ou}$ の 1.2 倍以上であるもの（$P_{omax} \geqq 1.2 P_{os} \fallingdotseq 0.76 P_{ou}$）：【$P_{oy}$ 信頼性】
条件-3	杭体に周面抵抗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



(a) $P_{omax} = 1.54\ P_{os}$　　(b) $P_{omax} = 1.08\ P_{os}$　　(c) $P_{omax} = 0.71\ P_{os}$

図 3.2.1 載荷荷重の大きさと log P_o - log S_o 関係における折れ点の有無の例

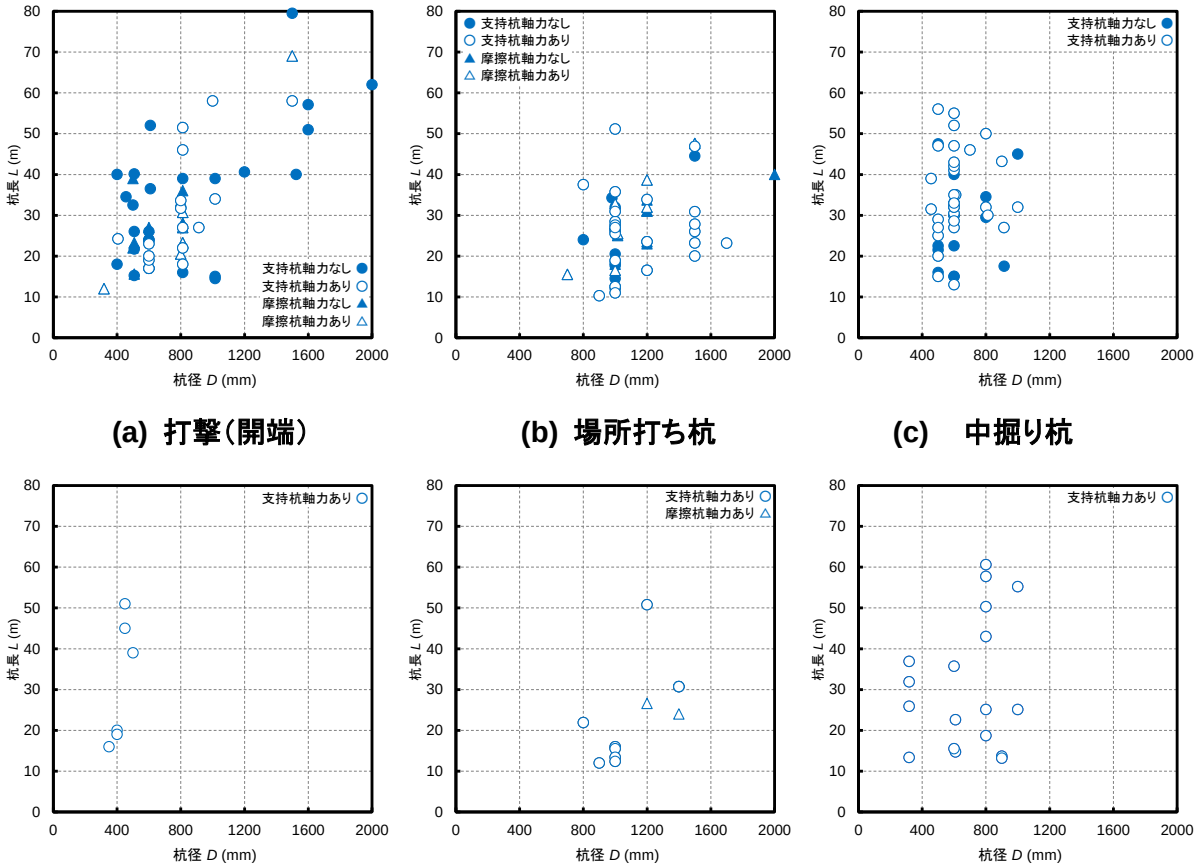
表 3.2.2 採用した鉛直載荷試験数（軸方向ばね）

杭工法	全数	軸力あり	支持形式	全数	軸力あり
打撃（開端）	60	23	支持杭	44	17
			摩擦杭	16	6
場所打ち杭	52	31	支持杭	35	23
			摩擦杭	17	8
中掘り杭	47	33	支持杭	47	33
プレボーリング杭	6	6	支持杭	6	6
鋼管ソイルセメント杭	11	11	支持杭	9	9
			摩擦杭	2	2
回転杭	18	18	支持杭	18	18
全種類	194	122		194	122

表 3.2.2 に採用した載荷試験数の一覧を，図 3.2.2 にその杭径および杭長の範囲を示す。

軸方向ばね定数 K_v の推定式算定では，杭体軸力及び杭先端変位 S_{py} が計測されたデータのみが対象となる。一方，支持力推定式と同様に，軸方向ばね定数 K_v の推定式は，実測値に対する推定結果の偏りやばらつきが小さいほど優れたものであると言え，また，推定結果の偏りやばらつきを評価する場合，実測値に対する検証数が多いほど信頼性は高くなることから，できるだけ多くのデータに対して検証が行えるように配慮した結果，推定精度の検証では杭体軸力及び杭先端変位 S_{py} が計測されていないデータも含めて検証を行った。なお，表 3.2.2 に示す採用データのうち杭体軸力が計測されていたデータは全て杭先端変位 S_{py} も計測されていた。

また，杭先端の地盤抵抗に着目すると，摩擦杭の先端地盤は支持杭の先端地盤に比べて地盤抵抗が小さく傾向が異なるため，以降の検討では，支持杭データと摩擦杭データを区別して検討を行う。



(a) 打撃（開端）　(b) 場所打ち杭　(c) 中掘り杭

(d) プレボーリング杭　(e) 鋼管ソイルセメント杭　(f) 回転杭

図 3.2.2 採用データの寸法範囲（軸方向ばね）

3.3　従来式の課題

従来の平成 24 年の道路橋示方書では，杭頭における残留変位が急増する点を降伏点とし，この限界点に着目した割線勾配 P_{oy} / S_{oy} を軸方向ばね定数 K_v とし，杭の諸元（軸剛性 EA，杭長 L，杭径 D）及び多数の載荷試験結果から経験的に定めた工法別係数 a を用いた K_v の推定式として，式（3.3.1）が示されていた。この推定式は，載荷試験で得られた実測 K_v 及び軸剛性ばね EA / L から式（3.3.1）の a を求め，a の値と杭長杭径比 L / D との関係から表 3.3.1 に示す工法別係数 α，β を求める方法によって得られている。

$$K_v = a\frac{EA}{L} = \left\{\alpha\left(\frac{L}{D}\right) + \beta\right\}\frac{EA}{L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.3.1)$$

ここに，K_v　：軸方向ばね定数（kN/m）

EA　：杭の軸剛性（kN）で，鋼管ソイルセメント杭工法では，鋼管及びソイルセメントの軸剛性を加算する。

L　：杭長（m）

D　：杭径（m）

α，β　：工法別係数であり，表 3.3.1 に示す値である。

表 3.3.1　従来式に用いる工法別係数の値

杭工法	α	β
打撃	0.014	0.72
バイブロハンマ	0.017	−0.014
場所打ち杭	0.031	−0.15
中掘り杭	0.010	0.36
プレボーリング杭	0.013	0.53
鋼管ソイルセメント杭	0.040	0.15
回転杭（1.5 倍径*）	0.013	0.54
回転杭（2.0 倍径*）	0.010	0.36

*：杭一般部径 D_p に対する杭先端部径 D_w の比率 D_w / D_p

図 3.3.1 に，軸方向ばね定数 K_v の実測値と軸剛性ばね EA / L との関係を示す。多くの場合，K_v と EA / L とは正の相関関係が認められるものの，場所打ち杭工法では，両者に相関関係を見出すのは困難で，回帰直線の勾配はわずかに負となる。すなわち，場所打ち杭では，EA / L が小さく杭体変形が生じやすい条件の方がむしろ K_v が大きい傾向にあり，杭先端変位の影響が無視できないことが分かる。このことは，土研資料 4139 号にも示されており，杭頭降伏変位 S_{oy} に占める杭先端変位 S_{py} の割合 S_{py} / S_{oy} は決して無視できる大きさではなく，場所打ち杭の場合，杭体変形量 ΔL_y よりも杭先端変位 S_{py} の方が大きいことが示されている。

この原因としては，図 3.3.1 に示すように，場所打ち杭工法の軸剛性ばね EA / L が他の工

法に比べて大きな値となっていることが考えられる。これは，場所打ち杭が充実断面であるためにその断面積 A が他に比べて大きいことや，先の図 3.2.2 から確認できるように場所打ち杭工法の L/D が他の工法に比べて小さめな傾向であることから，場所打ち杭工法の EA/L が他の工法に比べて大きくなっていると考えられる。

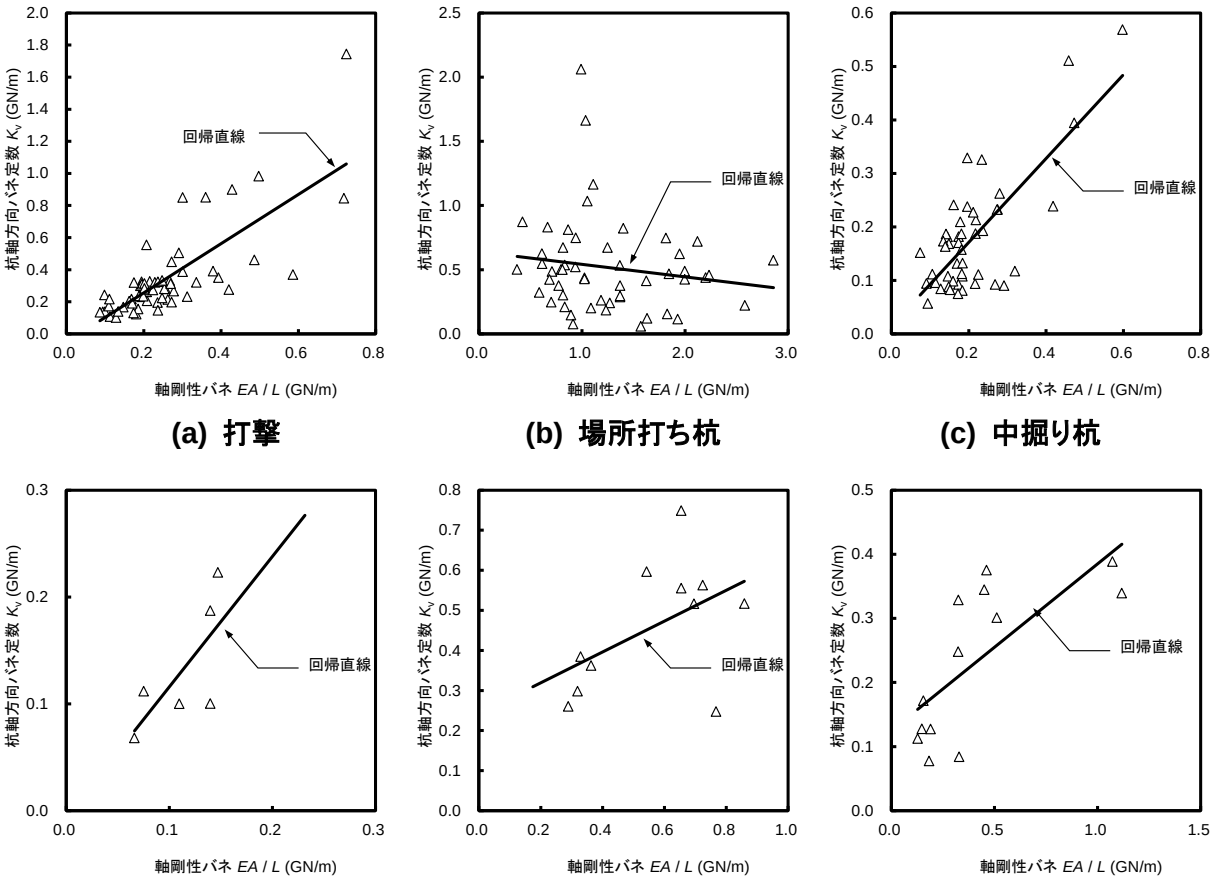
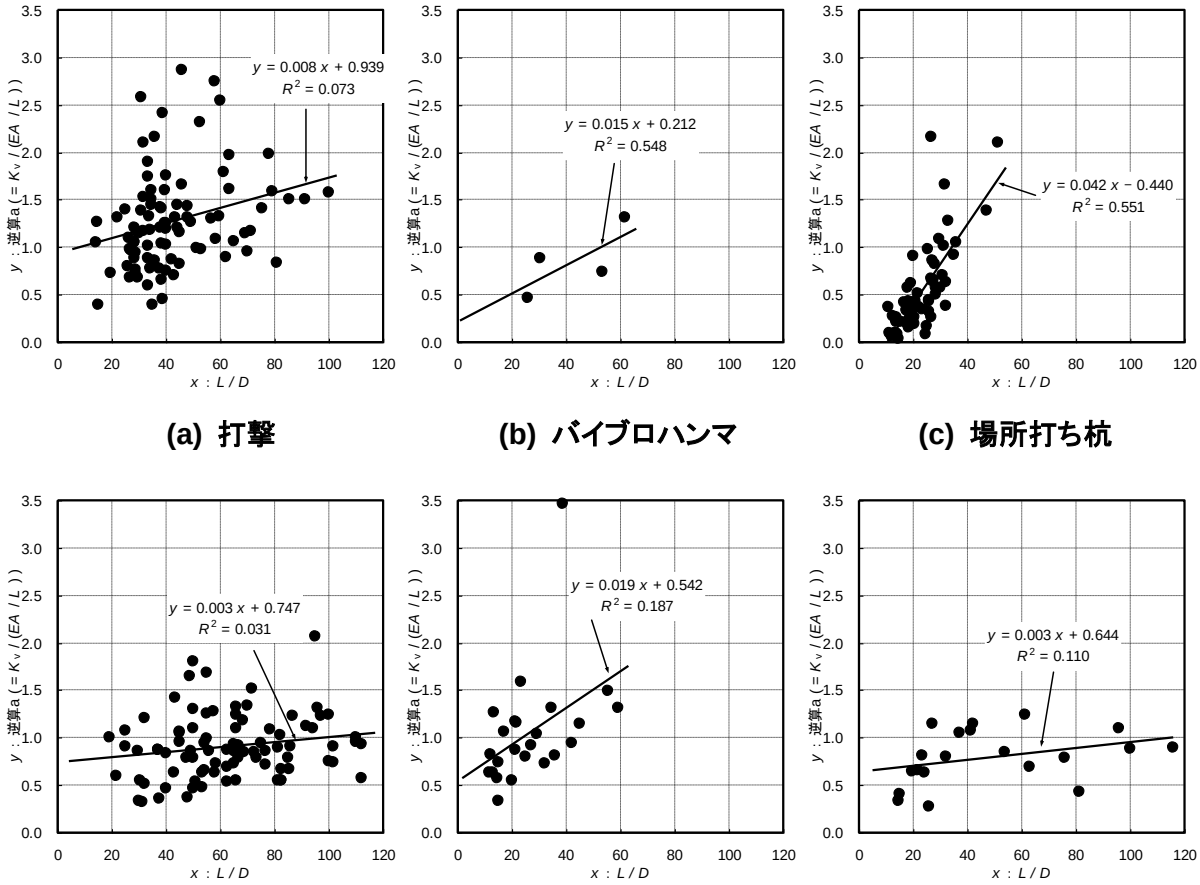


図 3.3.1 実測 K_v - EA/L 関係

式（3.3.1）に示す従来の推定式では，杭先端変位の影響は，係数 a と L/D との相関式において考慮されている。すなわち，L/D の値が小さいほど，杭頭反力に占める杭先端抵抗力の割合が大きく，先端変位の影響は大きいとするものである。図 3.3.2 は，土研資料 4139 号において，従来式の係数 a と L/D との関係を工法別に示されたものである。この図では，杭工法によらず a と L/D とは正の相関関係にあることから，L/D の値が小さいほど杭先端変位の影響が大きくなるとする上記の考えを定性的に説明できている。なお，杭先端変位が 0 であれば，杭の周面抵抗力が 0 でない限り，$K_v \geqq EA/L$ すなわち $a \geqq 1$ となる。よって，少なくとも $a < 1$ となる範囲では，杭先端変位の影響が含まれていることになる。



(a) 打撃　　**(b) バイブロハンマ**　　**(c) 場所打ち杭**

(d) 中掘り杭　　**(e) 鋼管ソイルセメント杭**　　**(f) 回転杭**

図 3.3.2 *a* - *L* / *D* 関係

以上より，軸方向ばね定数 K_v には，杭先端変位の影響が無視できないことが明らかにされている一方で，式（3.3.1）に示す従来の推定式には，杭を支持する地盤強度特性の違いが K_v の推定値に反映されない点が課題として挙げられる。

また，式（3.3.1）に示す従来の推定式では，杭先端変位の影響が，係数 *a* と *L* / *D* との相関式において考慮されていることから，*L* / *D* の値が小さくなると *a* が小さな値となり，本来，杭先端変位の影響が大きいであろう短い杭に対して，逆に杭先端変位の影響が考慮できなくなってしまう不都合である点も課題として挙げられる。

3.4 既往の研究

土研資料 4139 号の知見を踏まえ, さらに推定精度を向上させるため土研資料 4297 号では, 杭体変形量 ΔL_y における深度方向の周面抵抗変化率の考慮や, 杭先端変位 S_{py} における補正係数の考え方を見直し，杭頭降伏時の杭体変形量 ΔL_y ，杭先端変位 S_{py} のそれぞれに対する補正係数 ζ_e ，ζ_d を定め，式（3.4.1）に示す推定式を提案している。

本研究では，表 2.7.1，表 2.8.1 に示した支持力推定式の見直し結果を踏まえ，式（3.4.1）に示す先端伝達率の推定値 γ_y 及び補正係数 ζ_e ，ζ_d の見直しを行う。

$$K_v = \frac{P_{oy}}{S_{oy}} = \frac{P_{oy}}{\Delta L_y + S_{py}} = \frac{1}{\dfrac{L}{2EA}\left(1+\gamma_y-\zeta_e\right)+\zeta_d\dfrac{4\gamma_y}{\pi D_p{}^2 k_v}} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (3.4.1)$$

ここに，P_{oy} ：杭頭降伏荷重 (kN)

S_{oy} ：杭頭降伏変位 (m)

ΔL_y ：杭頭降伏時の杭体変形量 (m)

S_{py} ：杭頭降伏時の杭先端変位 (m)

L ：杭長 (m)

E ：杭体の弾性係数 (kN/m^2)

A ：杭体の断面積 (m^2)

γ_y ：杭頭降伏時の先端伝達率 $\gamma_y = P_{py} / P_{oy}$ の推定値（$0 \leqq \gamma_y \leqq 1$）

ζ_e ：ΔL_y に対する補正係数

ζ_d ：S_{py} に対する補正係数

D_p ：杭先端の径 (m)

k_v ：杭先端の地盤反力係数 (kN/m^3)

3.5　支持杭の軸方向ばね

3.5.1　先端伝達率の推定式

先端伝達率とは杭先端荷重と杭頭荷重の比であり，式（3.4.1）から軸方向ばね定数 K_v を算出する際には，杭頭降伏時の先端伝達率γ_y の値が必要となる。ここでは，極限支持力時の先端伝達率γ_u から杭頭降伏時の先端伝達率γ_yを推定する方法について，載荷試験データにおける実測値と，2 章で示した支持力推定式から求める推定値を用いて検討を行う。なお，ここでの検討に用いる極限支持力時における先端伝達率γ_uについて，実測γ_uは式（2.7.5）より，推定γ_u は式（2.7.6）より求めている。また，杭頭降伏時における先端伝達率γ_y の実測値は，式（3.5.1）より求めた。

$$\gamma_y = \frac{P_{py}}{P_{oy}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.1)$$

ここに，P_{oy}　：表 3.1.1 に示した方法により求める杭頭降伏荷重

P_{py}　：図 1.4.3(a)に示した方法により求める杭頭降伏時の杭先端荷重

表 3.5.1，図 3.5.1，図 3.5.2 に，「3.2 採用データ」の実測値におけるγ_y とγ_uの関係を示す。ここに示す関係は載荷試験データにおける実測γ_y と実測γ_uの関係であるが，設計実務においてγ_uは，表 2.8.1，表 2.8.2 に示した q_d，f_iの推定式から求めるのが一般的であると考えられるため，次に，表 2.8.1，表 2.8.2 から求めた推定値におけるγ_u と実測値のγ_y との関係を検討する。

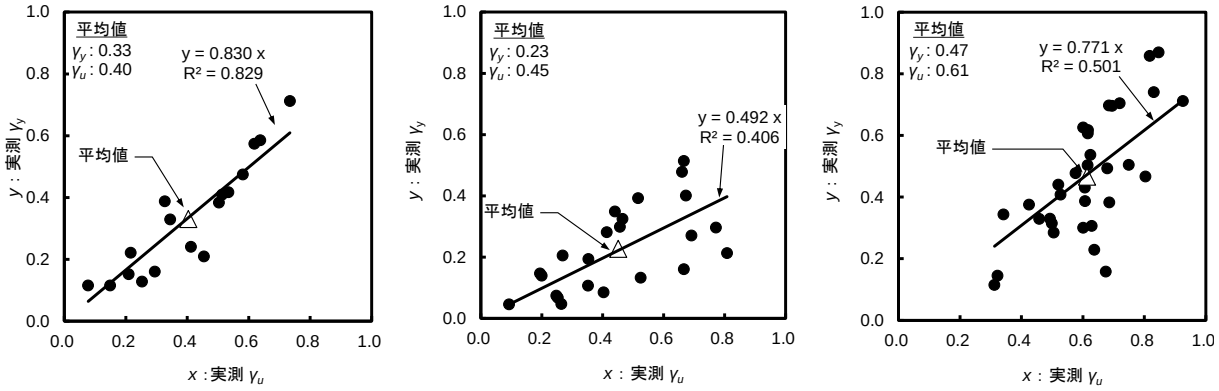
表 3.5.2，図 3.5.3，図 3.5.4 に，実測値のγ_y と推定値のγ_u の関係を示す。回帰線の決定係数R^2値を図 3.5.1 と図 3.5.3 で比べると，実測γ_y- 実測γ_u 関係と比べて実測γ_y- 推定γ_u 関係の方がばらつきが大きく，推定γ_u の推定誤差が含まれていると考えられるが，逆に言えば，推定γ_u を用いてγ_y を推定する場合には，表 3.5.2 に示す実測γ_y - 推定γ_u 関係を用いることで，精度良くγ_yを推定できると考えられる。以上より，表 3.5.2 に示す実測γ_y- 推定γ_u の関係式の係数を杭頭降伏時の先端伝達率γ_yを推定するための補正係数λ_{yu}として提案する。

なお，図 2.7.17 に示す提案式のγ_u の値と図 3.5.4 に示す推定γ_u の値が異なるのは，表 2.2.3 と表 3.2.2 に示す採用データ数の違いによるものである。

また，回転杭の先端抵抗力度 q_dについては，表 2.5.3 に示した一次提案式を用いて検討を行っている。なお，「2.7.3 極限支持力の推定精度」に示したように，回転杭においては，最終提案式と一次提案式の推定精度の差はごくわずかである事から， 一次提案式を用いて検討した以降の検討結果については，実用上問題ないと考えられる。

表 3.5.1 実測γ_y - 実測γ_u 関係

杭工法	関係式
打撃	$\gamma_y = 0.830\ \gamma_u$
場所打ち杭	$\gamma_y = 0.492\ \gamma_u$
中掘り杭	$\gamma_y = 0.771\ \gamma_u$
プレボーリング杭	$\gamma_y = 0.739\ \gamma_u$
鋼管ソイルセメント杭	$\gamma_y = 0.791\ \gamma_u$
回転杭	$\gamma_y = 0.883\ \gamma_u$



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 中掘り杭**

(d) プレボーリング杭 **(e) 鋼管ソイルセメント杭** **(f) 回転杭**

図 3.5.1 実測γ_y −実測γ_u 関係

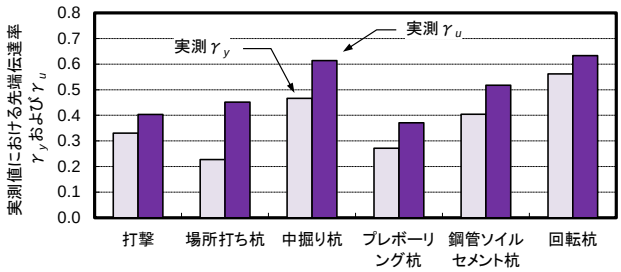
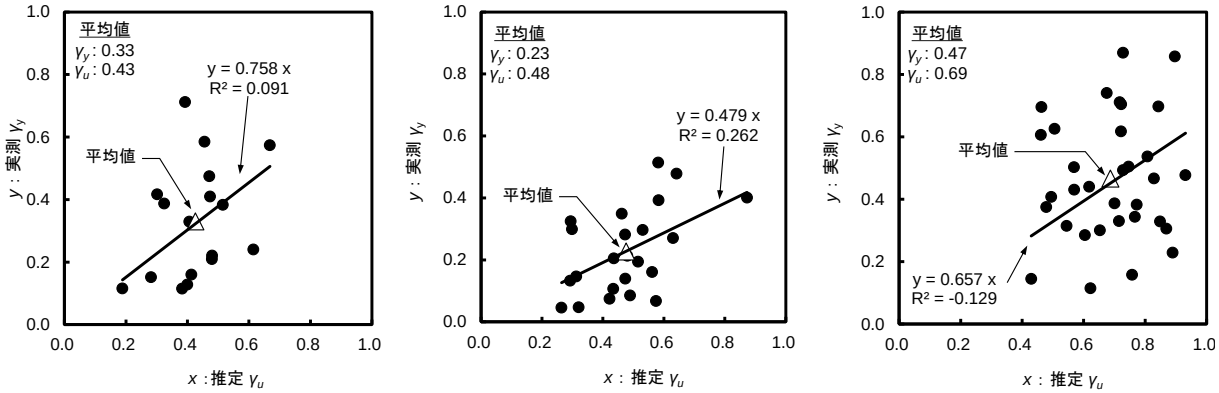


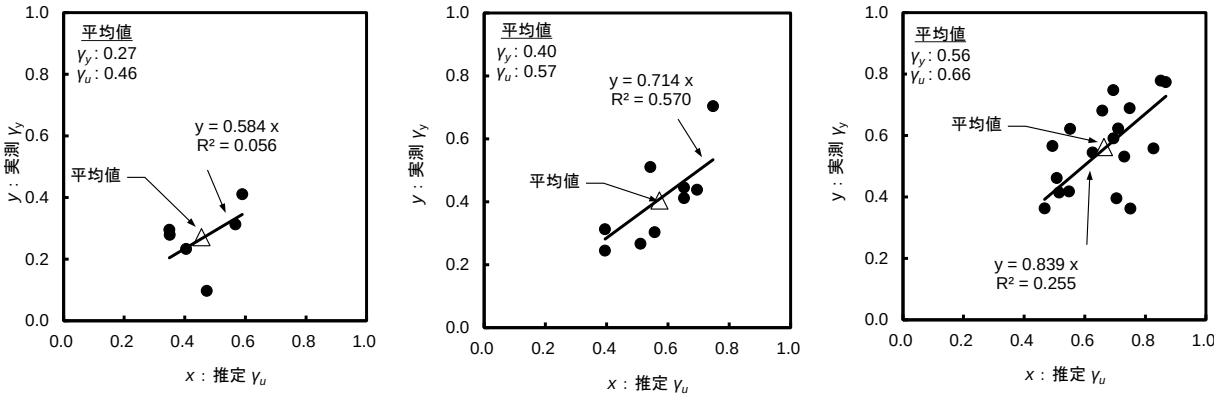
図 3.5.2 実測γ_y 及び実測γ_u

表 3.5.2 実測γ_y - 推定γ_u 関係

杭工法	関係式	補正係数λ_{yu}
打撃	$\gamma_y = 0.758\ \gamma_u$	0.76
場所打ち杭	$\gamma_y = 0.479\ \gamma_u$	0.48
中掘り杭	$\gamma_y = 0.657\ \gamma_u$	0.66
プレボーリング杭	$\gamma_y = 0.584\ \gamma_u$	0.58
鋼管ソイルセメント杭	$\gamma_y = 0.714\ \gamma_u$	0.71
回転杭	$\gamma_y = 0.839\ \gamma_u$	0.84



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 中掘り杭**



(d) プレボーリング杭 **(e) 鋼管ソイルセメント杭** **(f) 回転杭**

図 3.5.3 実測γ_y −推定γ_u 関係

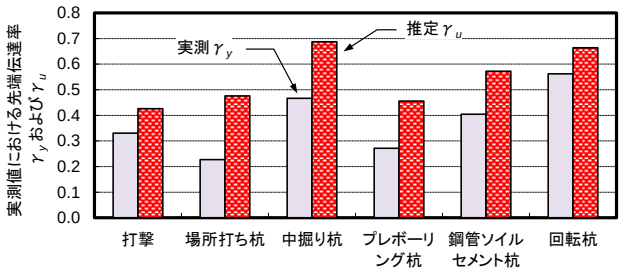


図 3.5.4 実測γ_y 及び推定γ_u

3.5.2　杭体変形量の推定式

式（3.4.1）で示した杭頭降伏変位 S_{oy} は，杭体変形量 ΔL_y と，杭先端変位 S_{py} との和である。ここでは，杭体変形量 ΔL_y の推定値と実測値との乖離を補正するための係数 ζ_e を求める。

土研資料 4139 号では，式（3.5.2），図 3.5.5 に示す周面抵抗力 $f(x)$ における深度方向の変化率 a_f = 0 と仮定し，杭体変形量 ΔL_y として式（3.5.3）を提案している。その後，土研資料 4297 号では，推定精度向上のため周面抵抗変化率 a_f を考慮した補正係数 ζ_e を設け，杭体変形量 ΔL_y の推定式として式（3.5.4）を提案している。本研究においては式（3.5.4）を踏襲する。

$$f(x) = b_f + a_f x \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.2)$$

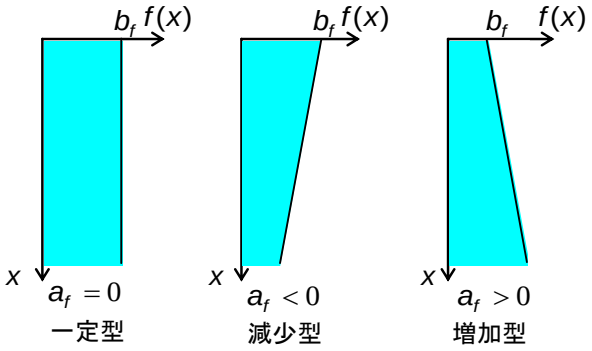


図 3.5.5 周面抵抗力の深度方向分布

$$\Delta L_y = \frac{L}{2EA}\left(1+\gamma_y+\frac{a_f L^2}{6P_o}\right)P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.3)$$

$$\Delta L_y = \frac{L}{2EA}\left(1+\gamma_y-\zeta_e\right)P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.4)$$

表 3.5.3 に，検討に用いる軸剛性 EA の値を示す。ここに，表の引用元に示す道路橋示方書とは平成 24 年版である。このうち，次に示す弾性係数 E の値は，引用元を平成 24 年の道路橋示方書としたことにより，土研資料 4297 号の検討に用いた値から変更となっている。

・PHC 杭の $E = 4.0\times10^4$ (N/mm^2)

・全長 SC 杭のコンクリート部の $E = 3.5\times10^4$ (N/mm^2)

表 3.5.3 推定$\Delta L_y / D$の計算に用いる軸剛性 EA

杭種（材料）	断面積 A	弾性係数 E (N/mm^2)	弾性係数 E の引用元・前提
鋼管杭	杭体+保護鋼材の断面積*	2.0×10^5	道路橋示方書
場所打ち杭	杭体断面積	2.7×10^4	道路橋示方書(1980)**
RC 杭	杭体断面積	3.1×10^4	道路橋示方書σ_{ck}= 40 N/mm^2
PC 杭	杭体断面積	3.3×10^4	道路橋示方書σ_{ck}= 50 N/mm^2
PHC 杭	杭体断面積	4.0×10^4	道路橋示方書
全長 SC 杭	鋼管断面積 コンクリート断面積	2.0×10^5 3.5×10^4	道路橋示方書 道路橋示方書
鋼管ソイルセメント杭	鋼管断面積 ソイルセメント断面積	2.0×10^5 5.0×10^2	道路橋示方書 道路橋示方書 q_u = 1.0 N/mm^2

* ：保護鋼材の断面積が確認できた場合のみ
** ：昭和 55 年版の道路橋示方書

表 3.5.4 に，杭体変形量レベル$\Delta L_y / D$の補正前の推定精度と，補正係数ζ_eの値を示す。図 3.5.6 に，$\Delta L_y / D$ の実測値と補正前の推定値の関係を示す。なお，ΔL_y の実測値は式（3.5.5）より，ΔL_yの補正前の推定値は式（3.5.6）より求めた。

$$\Delta L_y = S_{oy} - S_{py} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.5)$$

$$\Delta L_y = \frac{L}{2EA}\left(1+\gamma_y\right)P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.6)$$

ここに，S_{oy} ：表 3.1.1 に示した方法により求める杭頭降伏変位 (m)
S_{py} ：図 1.4.3(a)に示した方法により求める杭頭降伏時の杭先端変位 (m)
L ：杭長 (m)
E ：表 3.5.3 に示した杭体の弾性係数 (kN/m^2)
A ：杭体の断面積 (m^2)
γ_y ：杭頭降伏時の先端伝達率の推定値 $\gamma_y = \lambda_{yu}\,\gamma_u$（$0 \leqq \gamma_y \leqq 1$）
λ_{yu} ：表 3.5.2 に示した先端伝達率γ_y算出のための補正係数
γ_u ：極限支持力時の先端伝達率の推定値 $\gamma_u = R_{up} / R_u$
R_{up} ：式（2.1.2）に従い表 2.5.3 の一次提案式から推定する先端抵抗力 (kN)
R_u ：式（2.1.2）に従い表 2.5.3, 表 2.6.3 の一次提案式から推定する極限支持力 $R_u = R_{up} + R_{uf}$ (kN)で，R_{uf} は実務での設計を想定し表 2.7.1 に示す CASE-A3 により算定する。
P_{oy} ：表 3.1.1 に示した方法により求める杭頭降伏荷重 (kN)

表 3.5.4 $\Delta L_y / D$ の補正前の推定精度と補正係数ζ_e

杭工法	幾何平均 GM	補正係数 ζ_e
打撃	0.83	0.22
場所打ち杭	0.75	0.30
中掘り杭	0.95	0.07
プレボーリング杭	0.97	0.04
鋼管ソイルセメント杭	0.70	0.42
回転杭	0.84	0.25

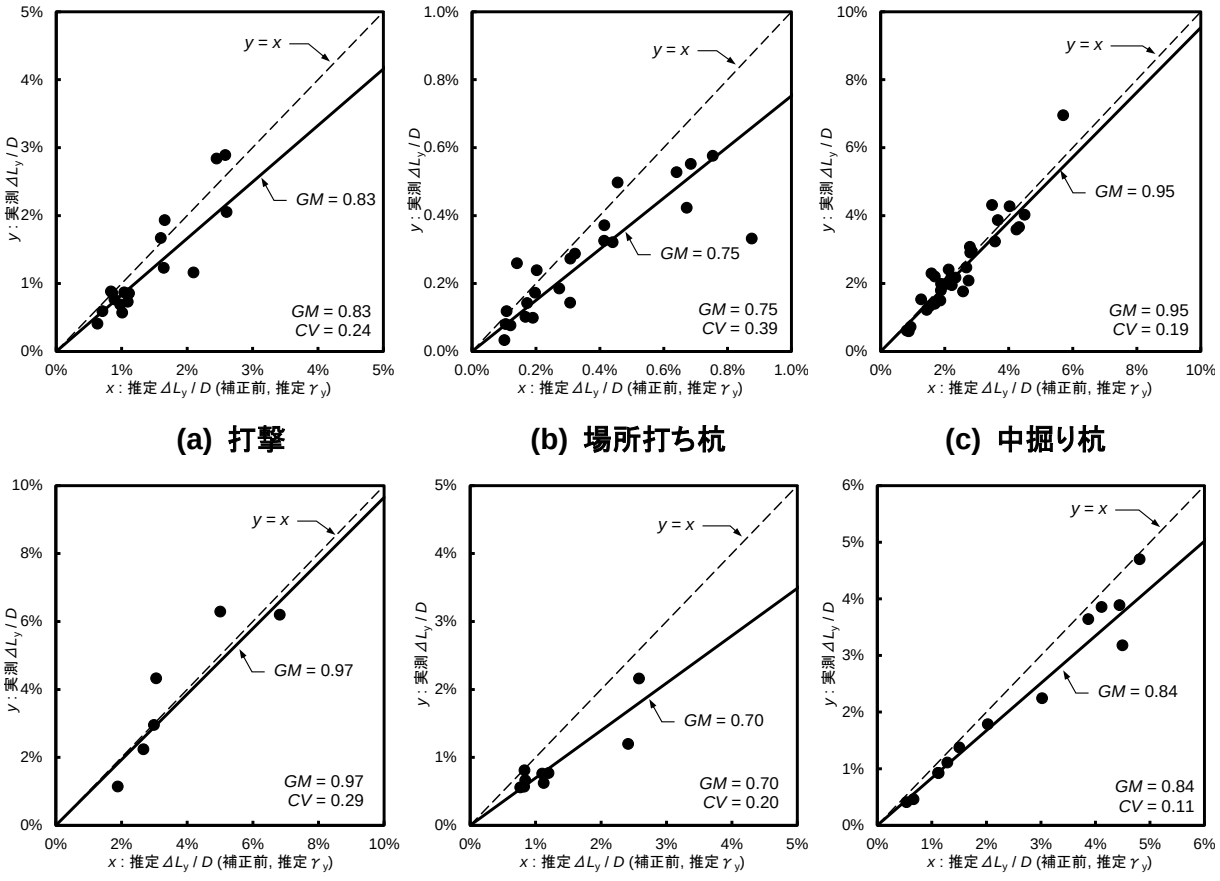


図 3.5.6 $\Delta L_y / D$ の実測値−推定値関係（補正前，推定γ_y ）

表 3.5.4 に示す補正係数ζ_e は，土研資料 4297 号と同様に，推定比（＝実測値 / 推定値）の幾何平均 GM ＝1.0 となるように定めている。したがって，補正前の推定比の幾何平均 GM が 1.0 に近い工法ほど，補正係数ζ_e の値が小さくなっていることが確認できる。また，補正係数ζ_e は，図 3.5.5 に示した周面抵抗力$f(x)$の周面抵抗変化率a_f に関する補正をしていることから，補正係数ζ_e の値が小さい工法ほど杭頭降伏時における深度勾配が小さく，周面抵抗変化率が小さい工法であると考えられる。

3.5.3　杭先端変位の推定式

式（3.4.1）で示した杭頭降伏変位 S_{oy} は，杭体変形量 ΔL_y と，杭先端変位 S_{py} との和である。ここでは，杭先端変位 S_{py} の推定値と実測値との乖離を補正するための係数 ζ_d を求める。

式（3.4.1）から杭先端変位 S_{py} のみを抜き出すと式（3.5.7）となる。ここで，杭先端の地盤反力係数 k_v は，道路橋示方書に示される載荷幅依存性を考慮した鉛直地盤反力係数の推定式として式（3.5.8）を用いる。

$$S_{py} = \zeta_d \frac{4\gamma_y}{\pi D_p{}^2 k_v} P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.7)$$

$$k_v = k_{v0}\left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{-3/4} = \frac{1}{0.3}\alpha E_0\left(\frac{D}{0.3}\right)^{-3/4} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.8)$$

ここに，k_{v0}　：直径 0.3m の剛体円板による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向地盤反力係数 (kN/m^3)

B_v　：基礎の換算載荷幅 (m) で，円形である杭基礎の場合には直径 D

α　：地盤反力係数の換算係数

E_0　：地盤の変形係数 (kN/m^2)

表 3.5.5 変形係数 E_0（kN/m^2）の算定式

地盤種別	変形係数 E_0 の算定式	備考
粘性土，砂質土，砂れき	$E_0 = 2{,}800N$	N 値の上限値は 50

土研資料 4139 号では，式（3.5.8）に示される換算係数 α の値を杭工法と地盤種別ごとに定め，推定値と実測値との乖離を補正するための係数として提案していたが，土研資料 4297 号では補正係数を k_v の外に出し，軸方向ばね定数 K_v の補正係数として ζ_d を提案していた。本研究は，土研資料 4297 号の式型を踏襲し，式（3.5.7）により杭先端変位 S_{py} を推定する。

地盤反力係数 k_v の推定において，換算係数 α は，土研資料 4139 号，4297 号と同様に常時に対する値 α = 1.0 とする。なお，式（3.3.1）で示した従来式における係数 a は，3.3 で述べたように，杭先端変位の影響を含んでいると解釈でき，多数の静的な載荷試験結果に基づき定められている。したがって，静的な載荷試験結果に基づくこの値は，常時の地盤反力係数に相当すると考えられることから，本研究においても常時に対する換算係数 α = 1.0 とすることが妥当と考えられる。

また，変形係数 E_0 は，収集した載荷試験データに杭先端地盤の変形係数 E_0 が測定された三軸圧縮試験値などがないため先端地盤の N 値から算定することとし，土研資料 4139 号，4297 号と異なり平成 24 年の道路橋示方書に従うものとした（表 3.5.5）。ここで，先端地盤

の N 値が 50 を超えると思われるものもあるが，換算 N 値を求められないデータが圧倒的に多いため，ここでの上限値は N = 50 とする。

表 3.5.6 に，杭先端変位レベル S_{py}/D の補正前の推定精度と，補正係数ζ_d の値を示す。

図 3.5.7 に，S_{py}/D の実測値と補正前の推定値の関係を示す。なお，S_{py} の実測値は図 1.4.3(a)に示した方法により，S_{py} の補正前の推定値は式（3.5.9）より求めた。

$$S_{py} = \frac{4\gamma_y}{\pi D_p^{\,2} k_v} P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.9)$$

ここに，γ_y　：杭頭降伏時の先端伝達率の推定値 $\gamma_y = \lambda_{yu}\,\gamma_u$（$0 \leqq \gamma_y \leqq 1$）

λ_{yu}　：表 3.5.2 に示した先端伝達率γ_y算出のための補正係数

γ_u　：極限支持力時の先端伝達率の推定値 $\gamma_u = R_{up}/R_u$

R_{up}　：式（2.1.2）に従い表 2.5.3 の一次提案式から推定する先端抵抗力 (kN)

R_u　：式（2.1.2）に従い表 2.5.3，表 2.6.3 の一次提案式から推定する極限支持力 $R_u = R_{up} + R_{uf}$ (kN)で，R_{uf} は実務での設計を想定し表 2.7.1 に示す CASE-A3 により算定する。

D_p　：杭先端の径で，鋼管ソイルセメント杭の場合にはソイルセメント柱径，回転杭の場合には羽根径 (m)

k_v　：式（3.5.8）に示した杭先端の地盤反力係数 (kN/m^3)

P_{oy}　：表 3.1.1 に示した方法により求める杭頭降伏荷重 (kN)

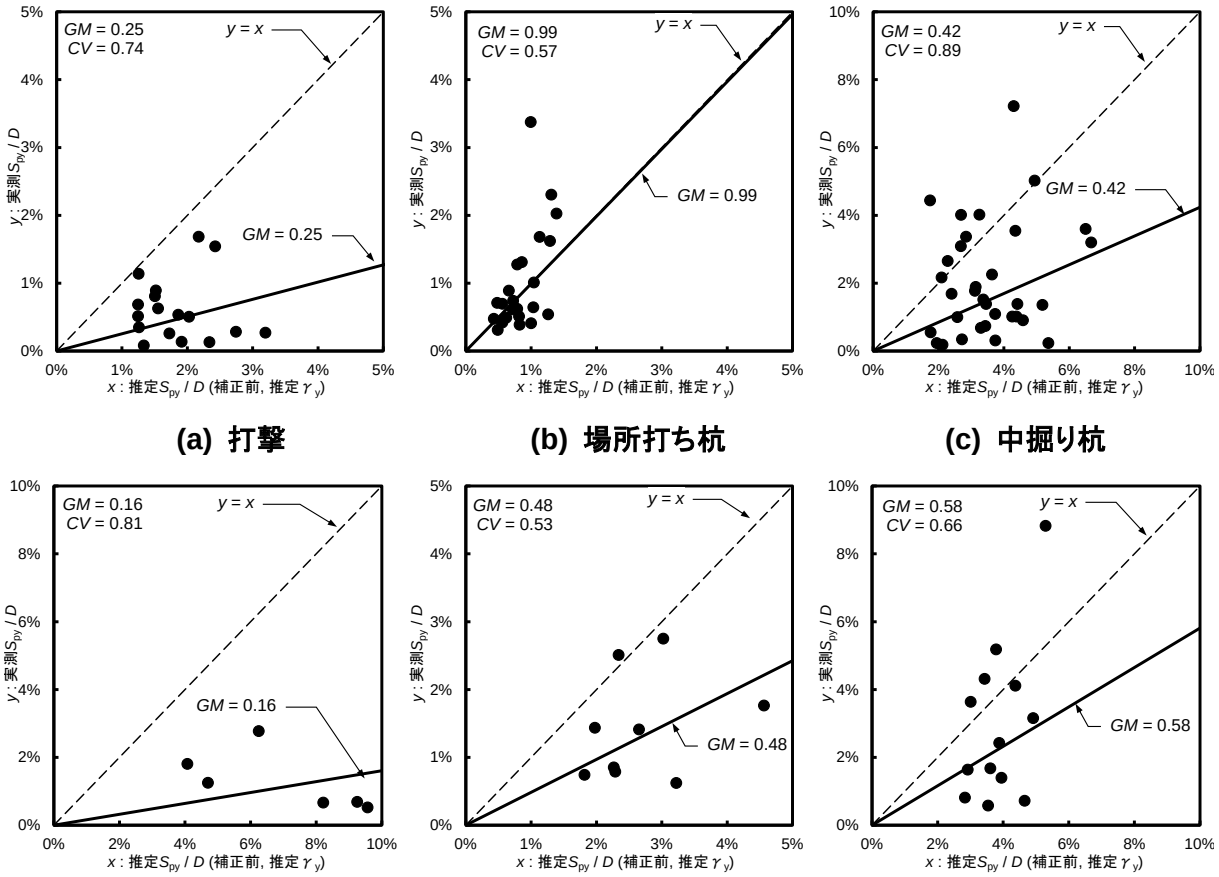
表 3.5.6 に示す補正係数ζ_d は，土研資料 4139 号，4297 号と同様に，推定比（＝実測値 / 推定値）の幾何平均 GM ＝1.0 となるように定めている。

図 3.5.7 では，幾何平均 GM の値に着目すると，工法によって推定結果の偏り方が異なり，場所打ち杭工法では GM = 0.99 であり補正係数ζ_d による補正前の推定値と実測値がほぼ等しい結果になっているのに対し，その他の工法については GM = 0.6 未満と推定値は小さめとなる傾向であり，特にプレボーリング工法では GM = 0.16 と顕著である。

これより，杭先端地盤の荷重・変形特性は，土研資料 2919 号でも指摘されているように，施工の影響により変化していることが伺える。すなわち，自然状態での地盤の変形係数 E_0 と N 値との関係が平均的には表 3.5.5 に示した関係で与えられるものとした場合，場所打ち杭工法では施工後においても施工前の自然状態に近い傾向にあるのに対し，打撃工法では先端地盤が締固められる傾向にあることが考えられる。また，中掘り杭工法，プレボーリング杭及び鋼管ソイルセメント杭工法では，杭先端部に設けられる根固め球根によって見かけの剛性が増加しているものと考えられる。

表 3.5.6 S_{py} / D の補正前の推定精度と補正係数ζ_d

杭工法	幾何平均 GM	補正係数 ζ_d
打撃	0.25	0.25
場所打ち杭	0.99	0.99
中掘り杭	0.42	0.42
プレボーリング杭	0.16	0.16
鋼管ソイルセメント杭	0.48	0.48
回転杭	0.58	0.58



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 中掘り杭**

(d) プレボーリング杭 **(e) 鋼管ソイルセメント杭** **(f) 回転杭**

図 3.5.7 S_{py} / D の実測値−推定値関係（補正前，推定γ_y ）

3.5.4　軸方向ばね定数の推定式

以上より，軸方向ばね定数 K_v の提案式は，次のようにまとめられる。

$$K_v = \frac{P_{oy}}{S_{oy}} = \frac{P_{oy}}{\Delta L_y + S_{py}} = \frac{1}{\frac{L}{2EA}\left(1+\gamma_y-\zeta_e\right)+\zeta_d\frac{4\gamma_y}{\pi {D_p}^2 k_v}} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (3.5.10)$$

表 3.5.7　K_v の補正係数 λ_{yu}，ζ_e，ζ_d

杭工法	補正係数 λ_{yu}	補正係数 ζ_e	補正係数 ζ_d
打撃	0.76	0.22	0.25
場所打ち杭	0.48	0.30	0.99
中掘り杭	0.66	0.07	0.42
プレボーリング杭	0.58	0.04	0.16
鋼管ソイルセメント杭	0.71	0.42	0.48
回転杭	0.84	0.25	0.58

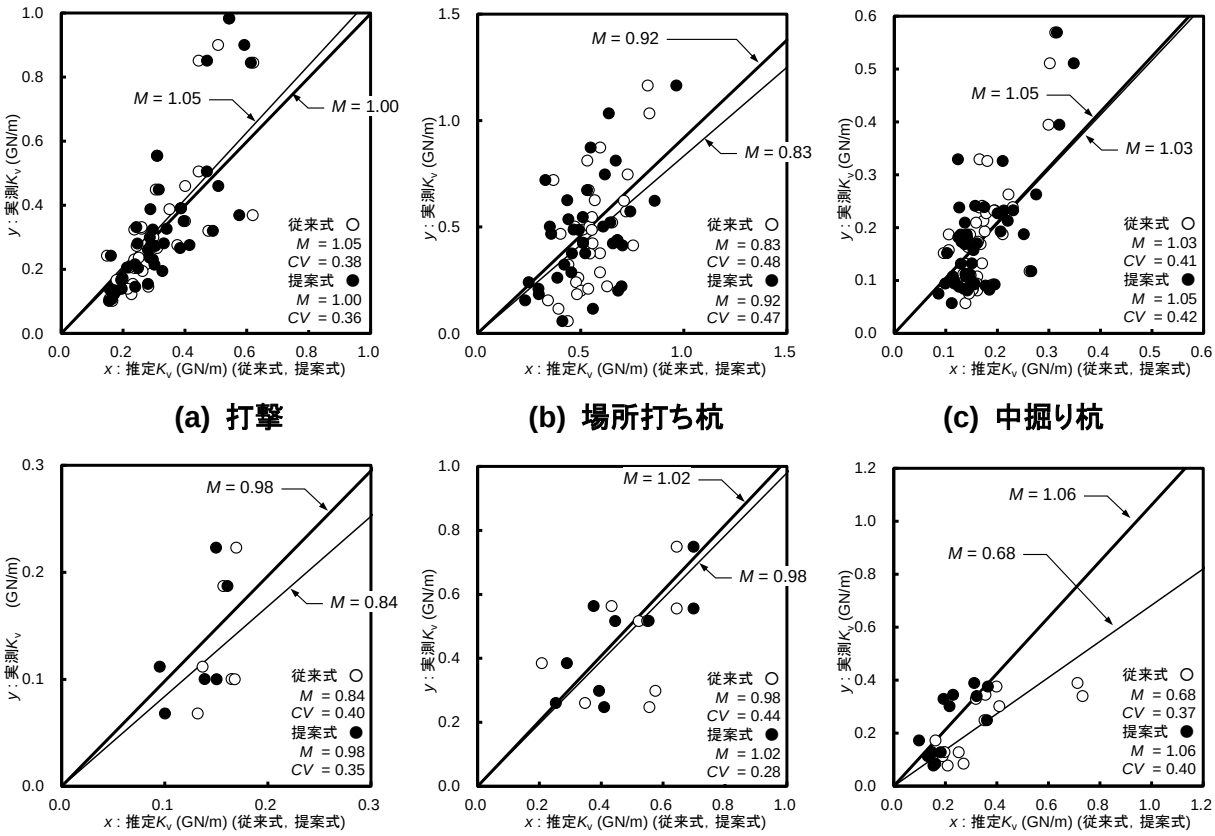
3.5.5　推定精度の検証

式（3.5.10），表 3.5.7 に示した提案式の推定精度を検証する。検証では，提案式と，平成 24 年の道路橋示方書に示す従来式のそれぞれを用いて算出した推定値と実測値を比べ，推定比（＝実測値／推定値）を求める。なお，K_v の実測値及び推定値の必要となる各値は 3.5.1～3.5.3 と同様の方法により算出する。

検証では，この推定比について，式（1.5.1）に示した平均 M，式（1.5.3）に示した変動係数 CV を求め推定精度の検証を行う。なお，ここでの検討に上記の統計量を用いることについては，1.5 で述べたとおりである。

検証結果を図 3.5.8，図 3.5.9 に示す。

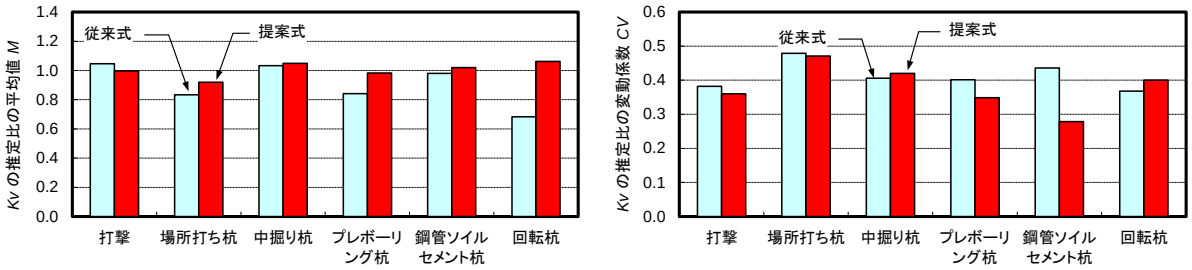
図 3.5.8，図 3.5.9 では，基本的に従来式に比べて提案式の推定精度の向上が確認できる。一方，中掘り杭工法では，提案式と比べてわずかに従来式の推定精度がよいが，従来式の偏りが M ＝1.03 であるのに対し提案式の偏りも M ＝1.05 と，その差はわずかであり，また，十分な推定精度であることから，今回の検討において他の杭工法と同様の手法により定めた提案式を用いても実用上問題ないと考えられる。



(a) 打撃　(b) 場所打ち杭　(c) 中掘り杭

(d) プレボーリング杭　(e) 鋼管ソイルセメント杭　(f) 回転杭

図 3.5.8 K_vの実測値−推定値関係（従来式・提案式，推定γ_y）



(a) 平均 M（1.0 に近いほど良好）　(b) 変動係数 CV（0.0 に近いほど良好）

図 3.5.9 K_vの推定精度（従来式・提案式，推定γ_y）

3.6　摩擦杭の軸方向ばね

摩擦杭は，設計上，周面抵抗力のみを考慮し，先端の地盤抵抗は考慮しないが，実際には先端にも荷重が伝達し，その結果杭先端も沈下する。軸方向ばね定数を求めるにはこの先端地盤の沈下の影響を考慮する必要があるが，摩擦杭の先端地盤は支持杭の先端地盤に比べて地盤抵抗が小さいため，支持杭の載荷試験結果に基づき提案した式（3.5.10）では精度よく推定できない可能性がある。

3.6.1　軸方向ばね定数の推定式

ここでは，摩擦杭に関して，杭先端地盤変位 S_{py} 及び先端伝達率 γ_y を考慮せず，杭体変形量 ΔL_y のみを考慮する次の式（3.6.1）を提案する。ここに，ζ_e' は摩擦杭における推定値と実測値との乖離を補正するための補正係数である。

$$K_v = \frac{P_{oy}}{S_{oy}} = \frac{P_{oy}}{\Delta L_y} = \frac{1}{\frac{L}{2EA}\left(1-\zeta_e'\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.6.1)$$

表 3.6.1 に，杭体変形量レベル $\Delta L_y / D$ の補正前の推定精度と，補正係数 ζ_e' の値を示す。

表 3.6.1 に示す補正係数 ζ_e' は，支持杭と同様に，推定比（＝実測値 / 推定値）の幾何平均 GM ＝1.0 となるように定めている。

図 3.6.1 に，$\Delta L_y / D$ の実測値と補正前の推定値の関係を示す。なお，ΔL_y の実測値は 3.5.2 で示した式（3.5.5）より，ΔL_y の補正前の推定値は式（3.6.2）より求める。

$$\Delta L_y = \frac{L}{2EA} P_{oy} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.6.2)$$

ここに，L　：杭長 (m)

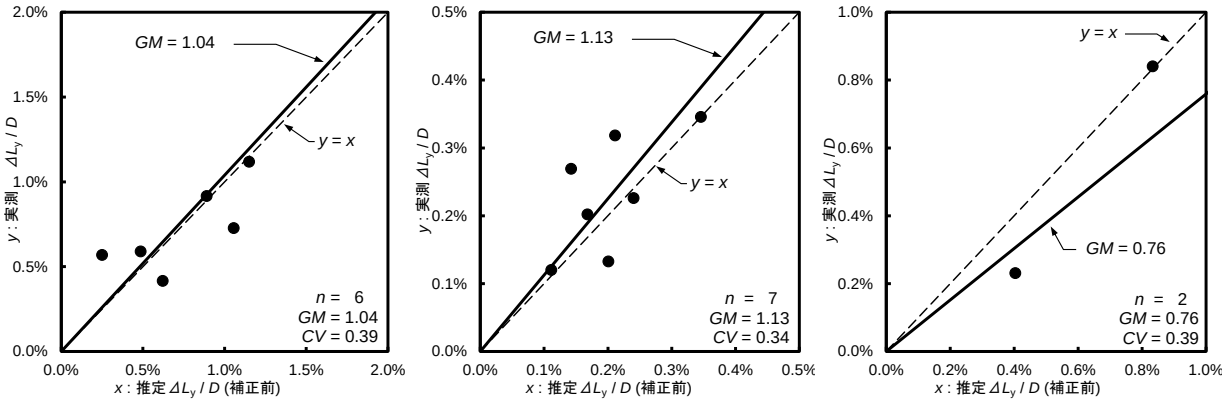
E　：表 3.5.3 に示した杭体の弾性係数 (kN/m^2)

A　：杭体の断面積 (m^2)

P_{oy}　：表 3.1.1 に示した方法により求める杭頭降伏荷重 (kN)

表 3.6.1 摩擦杭の$\Delta L_y / D$ の補正前の推定精度と補正係数ζ_e'

杭工法	データ数 n	幾何平均 GM	補正係数 ζ_e'
打撃	6	1.04	-0.04
場所打ち杭	7	1.13	-0.12
鋼管ソイルセメント杭	2	0.76	0.24



(a) 打撃　　(b) 場所打ち杭　　(c) 鋼管ソイルセメント杭

図 3.6.1 摩擦杭の$\Delta L_y / D$ の実測値−推定値関係（補正前，推定γ_y ）

3.6.2 推定精度の検証

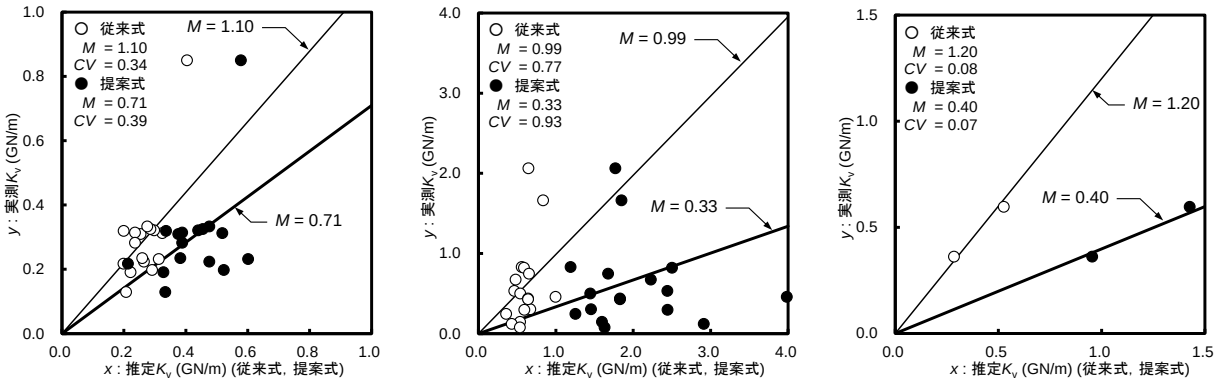
式（3.6.1），表 3.6.1 に示した提案式の推定精度を検証する。検証では，提案式と，平成 24 年の道路橋示方書に示す従来式のそれぞれを用いて算出した推定値と実測値を比べ，推定比（＝実測値／推定値）を求める。なお，K_v の実測値及び推定値の必要となる各値は 3.6.1 と同様の方法により算出する。

検証では，この推定比について，式（1.5.1）に示した平均 M，式（1.5.3）に示した変動係数 CV を求め推定精度の検証を行う。なお，ここでの検討に上記の統計量を用いることについては，1.5 で述べたとおりである。

検証結果を図 3.6.2 及び図 3.6.3 に示す。

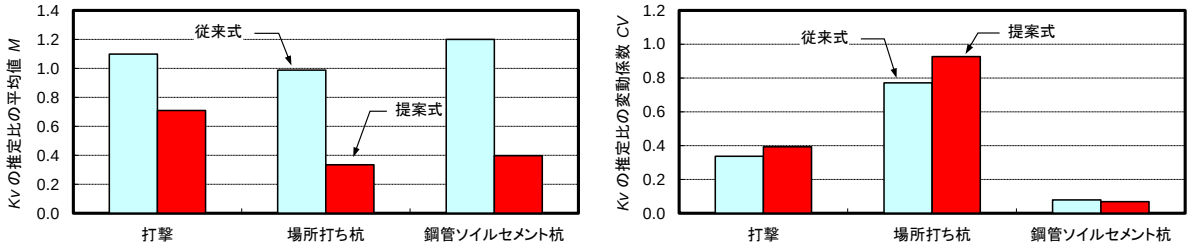
図 3.6.2 では，提案式と比べて従来式の方が推定精度がよい。これは 3.3 で述べたように，式（3.3.1）に示した従来式の係数 a には，杭先端変位の影響が含まれていることが原因であると考えられる。式（3.6.1）に示す提案式には杭先端変位が考慮されていないが，実際には摩擦杭であっても杭頭降伏時の先端地盤はある程度は沈下していると考えられるため，杭先端変位の影響が考慮されている従来式の方が精度良く推定できたと考えられる。

以上より，摩擦杭の軸方向ばね定数の推定では，式（3.3.1）に示す従来式を適用することを提案する。



(a) 打撃 **(b) 場所打ち杭** **(c) 鋼管ソイルセメント杭**

図 3.6.2 摩擦杭の K_v の実測値−推定値関係（従来式・提案式）



(a) 平均 *M*（1.0 に近いほど良好） **(b) 変動係数 *CV*（0.0 に近いほど良好）**

図 3.6.3 摩擦杭の K_v の推定精度（従来式・提案式）

4. 結論

これまでに収集した鉛直載荷試験データを用いて，杭の支持力推定式及び軸方向ばね定数の推定式の見直しについて検討を行った。本研究で得られた知見及び今後の課題は，次のとおりである。

支持力推定式

1) できるだけ人為差が少なく客観的に推定式を算定する方法の標準化を行った。
2) 標準化した方法により算定した推定式について，データの多寡や推定精度を勘案し，最終的な提案式を定めた。
3) 杭頭における極限支持力は，従来式に比べて提案式の推定精度が向上することが分かった。
4) 今後の課題として，さらなる載荷試験データの蓄積が必要である。特に，調査・解析係数の検証を可能とする c 値のデータの蓄積，また，摩擦杭による載荷試験データの蓄積が望まれる。

軸方向ばね定数の推定式

5) 土研資料 4297 号で示された式型を踏襲し，今回提案した支持力推定式を用いて推定される先端伝達率を踏まえ，各杭工法における推定式を提案した。
6) 支持杭の場合，従来式に比べて提案式の推定精度が向上することが分かった。
7) 摩擦杭の場合，提案式と比べて従来式の推定精度がよいことから，従来式のままの適用を提案した。
8) 今後の課題として，さらなる載荷試験データの蓄積が必要である。特に，データ数が相対的に少なかったプレボーリング杭工法及び，摩擦杭による載荷試験データの蓄積が望まれる。

参考文献

1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編, 2017.11.
2) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編, 2012. 3.
3) 中谷昌一, 白戸真大, 横幕清：杭の軸方向の変形特性に関する研究, 土木研究所資料, 第4139 号, 2009. 3.
4) 七澤利明, 西田秀明, 河野哲也, 北浦光章, 鈴木慶吾：杭基礎の鉛直支持力及び地盤ばね定数推定式の見直しと信頼性の評価に関する研究, 土木研究所資料, 第4297 号, 2015. 3.
5) (社) 地盤工学会：地盤工学会基準　杭の鉛直載荷試験方法・同解説　-第一回改訂版-, 2002. 5.
6) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編, 1990. 2.
7) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編, 2002. 3.
8) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法, 基礎工, Vol.10, No.9, pp.21-30, 1982. 9.
9) 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 木村嘉富：単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究, 土木研究所資料, 第 2919 号, 1991. 1.
10) 大竹雄, 本城勇介：地盤構造物設計における変換誤差の定量化, 土木学会論文集 C, Vol.70, No.2, pp.186-198, 2014. 8.
11) 大竹雄, 七澤利明, 本城勇介, 河野哲也, 田辺晶規：地盤調査法とひずみレベルを考慮した設計用地盤変形係数の推定法, 土木学会論文集 C, Vol.73, No.4, pp.396-411, 2017. 8.
12) 中谷昌一, 白戸真大, 井落久貴, 野村朋之：性能規定化における杭基礎の安定照査に関する研究, 土木研究所資料, 第 4036 号, 2007. 1.
13) (公社) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇, 1964. 3.
14) Vesic, A.S.：Design of Pile Foundations, Synthesis of Highway Practice, 42, Transportation Reserch Board, 1977.
15) 高野昭信, 岸田英明：砂地盤中の Non-Displacement Pile 先端部地盤の破壊機構, 日本建築学会論文報告集, No.285, pp.51-62, 1979.11.
16) 佐伯英一郎, 岩松浩一, 木下雅敬：Non-Displacement Pile の先端支持力推定のための地盤の「平均 N 値」に関する解析的一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第535 号, pp.87-94, 2000.9.
17) 小椋仁志：杭の先端支持力算定式に関する一考察（先端平均 N 値の平均範囲を中心として）, 第 45 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.199-204, 2000.10.
18) 福井次郎, 白戸真大, 松井謙二：道路橋基礎の部分安全係数設計法開発へ向けた基礎研究,

土木研究所資料，第 3936 号, 2004. 4.
19) (公社) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計篇, 1976. 8.
20) 中谷昌一，白戸真大，野村朋之：レベル 2 地震時における杭基礎の設計に用いる部分係数の検討，土木研究所資料，第 4102 号, 2008. 3.
21) (社) 地盤工学会：地盤調査法, 1997. 9.
22) 岡原美知夫，高木章次，中谷昌一，田口敬二，坂本昭夫：載荷試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査，土木研究所資料，第 2721 号, 1989. 1.

付属資料

1. バイブロハンマ工法の支持力推定式 …… 85
1.1 先端抵抗力の推定式算定 …… 86
1.2 周面抵抗力の推定式算定 …… 88
1.3 まとめ …… 90
2. 打撃工法における杭寸法等の変遷 …… 91
3. 収集した鉛直載荷試験データ一覧 …… 92
参考文献 …… 104

図表目次

付図 1　採用データの寸法範囲（支持力）.....85
付図 2　先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（バイブロハンマ）.....86
付図 3　先端抵抗力度 q_d の推定線（バイブロハンマ）【参考】.....87
付図 4　周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定（バイブロハンマ）.....88
付図 5　周面抵抗力度 f_i の推定線（バイブロハンマ）【参考】.....89
付図 6　打撃工法における杭寸法等の変遷.....91

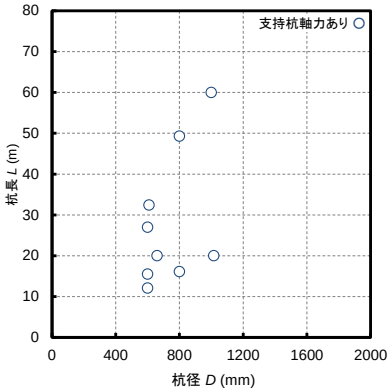
付表 1　採用した鉛直載荷試験数（支持力）.....85
付表 2　先端抵抗力度 q_d の推定式（従来式）　（kN/m^2）.....87
付表 3　先端抵抗力度 q_d の推定式（バイブロハンマ，算定）【参考】（kN/m^2）.....87
付表 4　周面抵抗力度 f_i の推定式（バイブロハンマ）【参考】（kN/m^2）.....89
付表 5　収集した鉛直載荷試験データ一覧.....93

1. バイブロハンマ工法の支持力推定式

土木研究所で収集した杭の鉛直載荷試験データについて，本文 2 章にも示した付表 1 および付図 1 のうち，バイブロハンマ工法の極限支持力における先端抵抗力度及び周面抵抗力度の推定式の見直しについて検討する。試験データの選定方法及び評価方法については，本文に示した他の杭工法と同様である。

付表 1 採用した鉛直載荷試験数（支持力）

杭工法	全数	軸力あり	支持形式	全数	軸力あり
打撃（開端）	99	27	支持杭	77	20
			摩擦杭	22	7
打撃（閉端）	30	6	支持杭	20	4
			摩擦杭	10	2
バイブロハンマ	9	9	支持杭	9	9
場所打ち杭	82	49	支持杭	62	38
			摩擦杭	20	11
中掘り杭	124	98	支持杭	124	98
プレボーリング杭	36	36	支持杭	36	36
鋼管ソイルセメント杭	24	23	支持杭	20	19
			摩擦杭	4	4
回転杭	46	44	支持杭	46	44
全種類	450	292		450	292



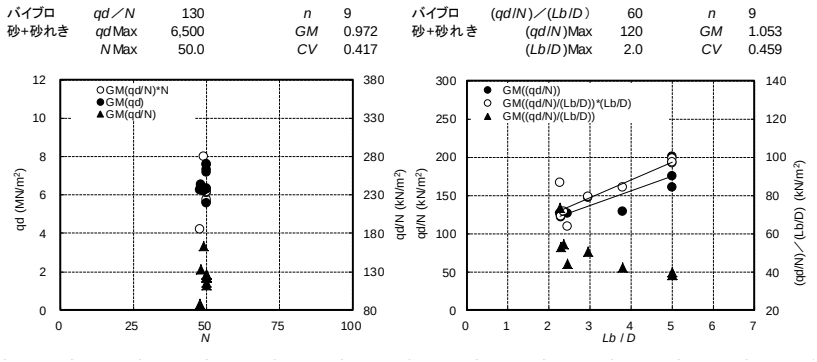
バイブロハンマ

付図 1 採用データの寸法範囲（支持力）

1.1　先端抵抗力の推定式算定

本文 2 章に示した方法により，先端抵抗力度 q_d の強度変化点を定め，推定式を算定する。ここでは， q_d と N 値の関係の検討に加え，付表 2 に示すように，従来の道路橋示方書に示されていた q_d/N と換算根入れ深さ L_b/D（L_b： 支持層への根入れ深さ，D： 杭径）の関係についても検討する。

付図 2 に，先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定図を示す。



砂+砂れき　　**砂+砂れき**

(a) N 値　　**(b) L_b/D**

付図 2 先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定（バイブロハンマ）

付図 2 から判定される強度変化点は，次のとおりである。なお，ここに示す括弧内の値は，強度変化点での値（N 値，q_d (kN/m²)）又は（L_b/D，q_d/N (kN/m²)）である。

付表 3 に強度変化点から得られる支持力推定式の算定結果を，付図 3 にその推定線を示す。

(a) N 値

粘性土：　データが n=0 であることから，検討不可。

砂+砂れき：　砂データが n=4，砂れきデータが n=5 と少ないので合算して評価する。N = 50 近傍にデータが集中しており交点は得られないが，●分布の傾向を優先し，（50，6,500）。

(b) L_b/D

粘性土：　データが n=0 であることから，検討不可。

砂+砂れき：　砂データが n=4，砂れきデータが n=5 データと少ないので合算して評価する。本文に示した打撃工法と同様に，○と●の交点は得られない。

付表 2 先端抵抗力度 q_d の推定式（従来式）（kN/m²）

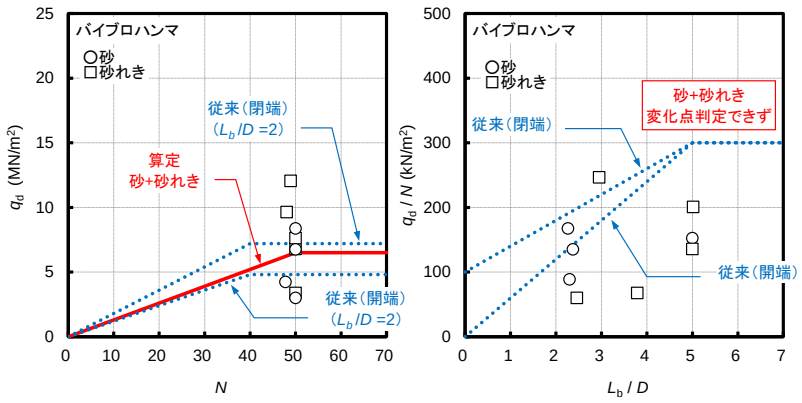
杭工法	先端地盤	従来式（H24 道示）（N 値）	従来式（H24 道示）（L_b/D ）
打撃工法（開端）	粘性土 砂 砂れき	—	$q_d/\overline{N} = 60(L_b/D)$ （≦300） （$\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5）
打撃工法（閉端）	粘性土 砂 砂れき	—	$q_d/\overline{N} = 40(L_b/D)+100$ （≦300） （$\overline{N}$ ≦40, L_b/D≦5）
バイブロハンマ工法	粘性土 砂 砂れき	—	打撃工法と同じ

$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径，　q_u：一軸圧縮強度（kN/m²）

付表 3 先端抵抗力度 q_d の推定式（バイブロハンマ，算定）【参考】（kN/m²）

杭工法	先端地盤	算定式（強度変化点判定）（N 値）	算定式（強度変化点判定）（L_b/D ）
打撃工法（開端）	粘性土	90 $\overline{N}$ （≦ 4,500）	$q_d/\overline{N} = 35(L_b/D)$ （≦ 70）
	砂	130 $\overline{N}$ （≦ 6,500）	—
	砂れき	130 $\overline{N}$ （≦ 6,500）	—
バイブロハンマ工法	粘性土	—	—
	砂	130 $\overline{N}$ （≦ 6,500）	—
	砂れき	130 $\overline{N}$ （≦ 6,500）	—

$\overline{N}$ ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値，　L_b：支持層への根入れ長さ，　D：杭径，　q_u：一軸圧縮強度（kN/m²）



(a) N 値　　(b) L_b/D

付図 3 先端抵抗力度 q_d の推定線（バイブロハンマ）【参考】

付表 2 に示すように，平成 24 年の道路橋示方書では，打撃工法・バイブロハンマ工法の先端抵抗力度 q_d の推定式は，q_d/N と支持層への換算根入れ深さ L_b/D（L_b： 支持層への根入れ深さ，D： 杭径）の関数とされており，また，バイブロハンマ工法は打撃工法と同じ推定式を用いることとされていた。

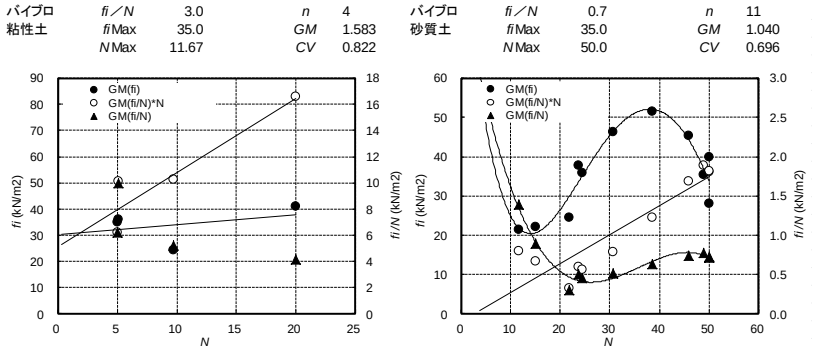
付図 3(a)では，q_d と N 値の関係による推定線を示しているが，その実測データは N=50 近傍に集中しているものであることから，ここでの分析結果は参考扱いとする。

付図 3(b)では，付図 2(b)において q_d/N と L_b/D の関係から強度変化点が判定できなかったため，推定線を示していない。

1.2 周面抵抗力の推定式算定

本文 2 章に示した方法により，周面抵抗力度 f_i の強度変化点を定め N 値による推定式を算定する。なお，バイブロハンマ工法では，粘着力 c 値が計測されているデータが存在しなかったことから，ここでは，c 値のみ場合の周面抵抗力度の評価は行っていない。

付図 4 に，周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定図を示す。



ⅰ) 粘性土　　ⅱ) 砂質土

付図 4 周面抵抗力度 f_i の強度変化点判定（バイブロハンマ）

付図 4 から判定される各工法の強度変化点は，次のとおりである。なお，ここに示す括弧内の値は，強度変化点での値（N 値，f_i (kN/m^2)）である。

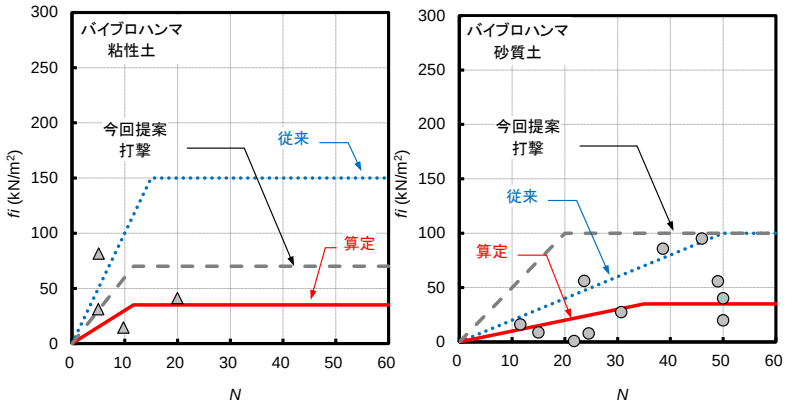
粘性土： データが n=4 と少なく，○と●の交点は得られないが，バイリニアの境界を打撃と同様の N=12 とすると（12，35）。

砂質土： ○と●の交点は（50，35）だが，抵抗力係数の端数を調整し（35，35）。

付表 4 周面抵抗力度 f_i の推定式（バイブロハンマ）【参考】（kN/m²）

杭工法	周面地盤	従来式（H24 道示）	算定式（強度変化点判定）	
打撃工法	粘性土	c または $10N$ (≦150)	1.4c (≦ 85)	6N (≦ 70)
	砂質土	$2N$ (≦100)	-	5N (≦100)
バイブロハンマ工法	粘性土	打撃工法と同じ	-	3N (≦ 35)
	砂質土		-	N (≦ 35)

N：杭周面地盤の平均 N 値，　c：粘性土の粘着力（kN/m²）



ⅰ）粘性土　　ⅱ）砂質土

付図 5 周面抵抗力度 f_i の推定線（バイブロハンマ）【参考】

付表 4 に強度変化点から得られる支持力推定式の算定結果を，付図 5 にその推定線を示す。なお，付図 5 では，参考までに，本文 2 章で提案した打撃工法の推定線も示している。

付表 4 に示すように，平成 24 年の道路橋示方書では，バイブロハンマ工法の周面抵抗力度 f_i の推定式は，打撃工法と同じ推定式を用いることとされていた。今回の算定においてバイブロハンマ工法の周面抵抗力度 f_i は，本文での打撃工法の提案結果と比べて，粘性土で 1/2 程度，砂質土で 1/3 程度の結果となった。ただし，この結果は，粘性土については付図 4ⅰ）に示すようにデータ数が n=4 と少なく限られた数の分析結果であること，また，砂質土については付図 4ⅱ）の●分布や付図 5ⅱ）に示すように周面抵抗力度 f_i と N 値との相関が低いことが確認できることから，付表 4 に示す推定式は参考扱いとする。

1.3 まとめ

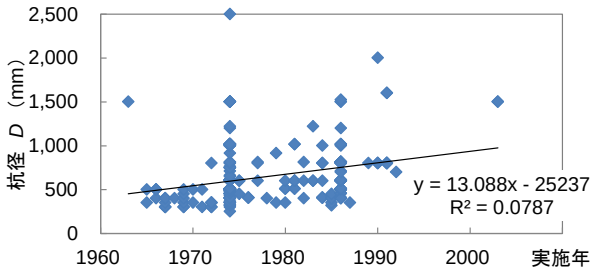
1) バイブロハンマ工法の N 値からの推定する先端抵抗力度は，今回提案した打撃工法と比べて若干低い値となる。また，L_b/D から推定する先端抵抗力度は，打撃工法と同様に q_d/N との間に明確な相関が確認できなかった。

2) バイブロハンマ工法の周面抵抗力度は，今回提案した打撃工法に比べて粘性土で 1/2 程度，砂質土で 1/3 程度となる。

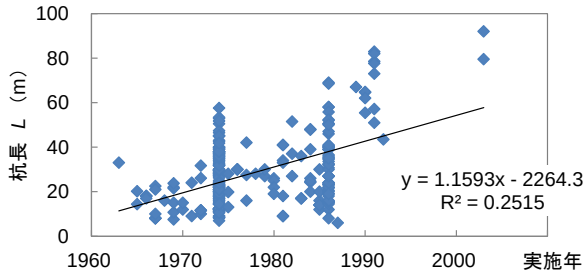
3) 先端抵抗力，周面抵抗力ともに，分析に必要な試験数や試験情報が十分でなく，分析結果は暫定的であると考えられることから，追加の載荷試験や，収集した載荷試験地にて追加の地盤調査などを行い，さらなるデータを蓄積し，推定式の再検討が必要であると考えられる。

2. 打撃工法における杭寸法等の変遷

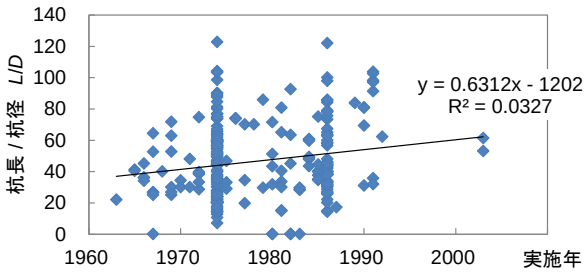
付図 6 に, 収集した鉛直載荷試験データのうち, 打撃工法における杭寸法等の変遷を示す。



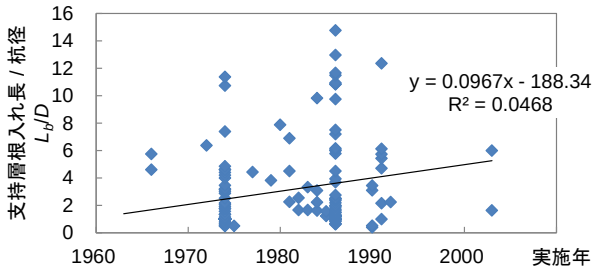
(a) 杭径 *D*



(b) 杭長 *L*



(c) 杭長/杭径 *L* / *D*



(d) 支持層根入れ長/杭径 L_b / *D*

付図 6 打撃工法における杭寸法等の変遷

3. 収集した鉛直載荷試験データ一覧

付表 5 に，収集した鉛直載荷試験データの一覧を示す。
なお，表の注釈については以下のとおりである。

*：杭工法の欄に示す「打撃」，「打撃（閉端）」は，それぞれ本文「1.3 収集データ」で述べた「先端開放型」，「先端閉塞型」の打撃工法を指す。

**：支持力の欄に「○」のあるものは，本文の表 2.2.1 で示した条件を満足し，支持力推定式の検討に用いたデータである。
ばねの欄の「○」のあるものは，本文の表 3.2.1 で示した条件を満足し，軸方向ばね定数の推定式検討に用いたデータである。

***：備考欄には，データの引用元となる参考文献[1),2),3),4),5),6),7),8),9),10),11),12)] の番号を示す。

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5001	鋼管	打撃	支			○			33.0	1500				1963	
5002	鋼管	打撃	支	○	○	○			36.0	1219		165.8	岩盤	1983	
5003	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	31.7	800		71.4	粘性土	1972	
5004	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	34.0	1016		55.0	砂	1981	
5005	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	51.5	813		79.8	砂	1982	
5006	鋼管	打撃	支			○			18.0	600		30.8	砂れき	1981	
5007	鋼管	打撃	支			○	○	○	26.0	600		33.6	砂	1984	
5008	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	17.0	600		67.0	砂	1983	
5009	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	17.0	600		85.2	砂	1983	
5010	鋼管	打撃	支		○		○		47.8	1000		45.6	砂	1984	
5011	鋼管	打撃	支	○		○	○		41.0	1016		40.4	砂	1981	
5012	鋼管	打撃	支	○		○	○		41.0	508		40.6	砂	1981	
5013	鋼管	打撃(閉)	支	○		○	○		33.0	508		36.4	砂	1981	
5014	鋼管	打撃(閉)	支	○		○			22.0	508		22.0	砂	1980	
5015	鋼管	打撃	支			○	○	○	26.0	508		29.7	砂	1980	
5016	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	24.2	406		78.9	砂	1984	
5017	鋼管	打撃	支	○		○			24.6	406			砂	1984	
5018	鋼管	打撃(閉)	支	○		○	○		20.0	406		38.9	砂	1984	
5019	鋼管	打撃	支	○		○			30.0	406		50.0	岩盤	1976	
5020	鋼管	打撃	支	○		○			30.0	406		50.0	岩盤	1976	
5021	鋼管	打撃	支	○		○			30.0	406		49.9	岩盤	1976	
5022	鋼管	打撃	支	○	○	○			48.0	800		66.0	砂	1984	
5023	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	27.0	914		93.5	砂	1979	
5033	鋼管	中掘り	支	○		○	○		30.4	1000		26.4	粘性土	1985	
5034	鋼管	中掘り	支			○			14.0	600					
5035	鋼管	中掘り	支			○			44.0	1000					
5036	鋼管	中掘り	支			○			33.5	800					
5037	鋼管	中掘り	支			○			38.0	600					
5038	鋼管	中掘り	支			○			12.0	600					
5039	鋼管	中掘り	支			○			35.0	813					
5040	鋼管	中掘り	支			○			35.0	813					
5041	鋼管	中掘り	支			○			35.0	600					
5042	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	27.0	914		93.5	砂	1979	
5043	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	43.2	900		50.0	砂	1980	
5044	鋼管	中掘り	支			○			67.8	800					
5045	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	50.0	800		111.2	砂れき	1984	
5046	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	46.0	700		80.2	砂	1984	
5047	鋼管	中掘り	支	○		○	○		14.4	700		33.9	砂	1978	
5048	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	39.0	457		55.5	砂	1981	
5049	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	32.0	800		287.8	砂れき	1980	
5050	鋼管	中掘り	支			○			31.0	1000		73.3	砂	1972	
5051	鋼管	中掘り	支	○		○			20.0	1016		50.0	砂れき	1976	
5052	鋼管	中掘り	支			○			67.0	610		146.6	砂れき	1977	
5053	鋼管	中掘り	支			○	○		52.0	558		60.0	砂れき	1976	
5054	鋼管	中掘り	支			○	○	○	15.0	600		50.0	砂	1977	
5055	鋼管	中掘り	支			○	○	○	15.0	600		50.0	砂	1977	
5056	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	41.0	600		131.5	砂	1982	
5057	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	35.0	610		42.0	砂	1983	
5058	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	33.0	600		128.6	砂れき	1983	
5059	鋼管	中掘り	支	○	○		○		19.1	600		50.0	砂れき	1983	
5060	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○	○	42.0	600		50.0	砂	1983	
5061	鋼管	中掘り	支		○	○	○	○	29.5	800		50.0	砂	1983	
5062	鋼管	中掘り	支		○	○	○	○	22.5	600		50.0	砂	1984	
5063	鋼管	中掘り	支	○	○		○		60.0	600		116.6	砂	1984	
5064	鋼管	中掘り	支		○	○	○		19.5	400		40.9	粘性土	1984	
5065	鋼管	中掘り	支		○	○	○		38.5	500		125.1	砂	1985	
5066	鋼管	中掘り	支	○		○	○		16.0	500		89.6	砂	1981	
5067	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	43.0	600		67.9	砂れき	1986	
5068	鋼管	中掘り	支	○		○	○		35.0	600		136.3	砂れき	1982	
5069	鋼管	中掘り	支	○		○	○		36.0	800		106.8	砂れき	1982	
5070	鋼管	中掘り	支	○			○		67.9	800		114.3	砂	1983	
5071	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	35.0	600		81.5	砂	1983	
5072	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	30.0	813		122.3	砂	1981	
5073	鋼管	中掘り	支	○			○		45.8	600		138.2	砂れき	1984	

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端 平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5074	PHC	打撃(閉)	支	○	○	○	○		16.0	400		55.0	砂れき	1985	
5075	PHC	打撃(閉)	支			○	○		42.0	600		122.4	砂	1977	
5076	PHC	打撃(閉)	支	○	○	○	○		14.0	400		27.3	砂れき	1985	
5077	PHC	打撃(閉)	支	○		○			20.0	450		25.1	砂	1985	
5078	PC	打撃	支			○			18.0	350				1983	
5079	PHC	中掘り	支			○			37.0	600		63.9	砂れき	1985	
5080	PHC	中掘り	支	○		○	○		56.0	600		42.2	砂	1985	
5081	PHC	中掘り	支			○			9.0	600		55.3	砂れき	1981	
5082	PHC	中掘り	支			○			24.0	500		50.8	砂	1984	
5083	PHC	中掘り	支	○		○			45.0	500		181.7	粘性土	1985	
5084	PHC	中掘り	支			○			19.0	500		39.2	粘性土	1985	
5085	PHC	中掘り	支	○			○		33.0	500		58.2	砂	1984	
5086	PHC	中掘り	支	○			○		45.0	450		50.0	砂れき	1983	
5087	PHC	中掘り	支	○	○	○	○	○	27.0	600		50.0	砂	1986	
5088	PHC	中掘り	支		○	○			27.0	450		50.0	砂	1986	
5089	PHC	中掘り	支	○	○	○	○		21.0	450		72.9	砂れき	1985	
5090	PHC	中掘り	支	○			○		37.0	450		87.6	砂	1985	
5091	PHC	中掘り	支			○	○	○	30.0	600		36.5	砂れき	1984	
5092	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	30.0	600		38.8	砂れき	1983	
5093	PHC	中掘り	支	○			○		33.0	450		74.5	砂	1983	
5094	PHC	中掘り	支			○	○		13.0	500		30.8	砂	1984	
5095	PC	中掘り	支			○			20.0	600		60.0	砂れき	1981	
5096	PC	中掘り	支			○			12.0	700		144.9	砂れき	1983	
5097	PC	中掘り	支			○	○		47.0	600		200.9	砂	1983	
5098	PC	中掘り	支			○	○	○	21.5	500		87.2	砂れき	1982	
5099	PC	中掘り	支			○	○	○	22.5	500		47.9	砂れき	1977	
5101	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	39.0	500		38.6	砂		
5105	SC	中掘り	支	○		○	○	○	56.0	500		96.1	砂	1983	
5108	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○	○	26.0	1500		43.6	砂	1982	
5109	場所打ち	場所打ち	支	○		○			30.5	1500		50.0	砂	1982	
5110	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○	○	20.0	1500		61.7	砂れき	1984	
5111	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○	○	23.5	1200		47.7	砂れき	1986	
5112	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		44.9	1500		90.9	砂れき	1986	
5113	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○	○	51.2	1000		101.4	砂	1982	
5114	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○		38.1	2000		125.5	砂れき	1979	
5117	鋼管	打撃	摩	○		○			39.0	800		6.0	砂	1984	
5118	鋼管	打撃	摩	○		○	○		14.0	406		7.7	粘性土	1985	
5119	鋼管	打撃	摩	○	○	○	○	○	12.0	319		7.0	粘性土	1985	
5120	鋼管	打撃	摩			○	○	○	27.0	600		28.5	砂	1982	
5121	鋼管	中掘り	支	○	○	○	○		44.5	600		24.5	砂	1984	
5122	PC	打撃(閉)	摩			○			37.0	400		13.8	砂	1982	
5123	PHC	打撃(閉)	摩			○			30.0	400		8.1	粘性土	1985	
5124	PHC	打撃(閉)	摩			○			8.0	400		8.7	粘性土	1986	
5125	RC	打撃(閉)	摩	○		○			6.0	350		21.6	砂	1987	
5126	RC	打撃(閉)	摩		○	○	○		14.0	350		5.7	粘性土	1985	
5128	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	38.7	1200		10.1	粘性土	1983	
5129	場所打ち	場所打ち	支	○		○			35.1	1000		65.4	岩盤	1985	
5130	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	18.9	1000		31.6	砂	1985	
5131	場所打ち	場所打ち	支		○	○			22.5	1200		34.0	砂	1986	
5134	鋼管	打撃	支	○		○			52.3	610		40.1	砂	1986	
5135	鋼管	打撃	支			○	○	○	36.5	610		50.0	砂	1986	
5136	鋼管	打撃	支			○	○	○	34.5	457		47.0	砂	1986	
5137	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	46.0	813		50.0	砂れき	1986	
5138	鋼管	打撃	支			○	○		55.8	457		50.0	砂	1986	
5139	鋼管	打撃	支			○	○	○	52.0	610		50.0	砂	1986	
5140	鋼管	打撃	支			○			68.5	700		50.0	砂	1986	
5141	鋼管	打撃	支			○	○		27.0	711		50.0	砂	1986	
5142	鋼管	打撃	支			○	○		47.0	600		50.0	砂	1986	
5143	鋼管	打撃	支			○	○		41.0	610		50.0	砂	1986	
5144	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	33.6	800		50.0	砂れき	1986	
5145	鋼管	打撃	支			○	○	○	40.0	400		44.6	砂	1986	
5146	鋼管	打撃	支			○	○		30.0	410		50.0	砂	1986	
5147	鋼管	打撃	支			○	○		12.0	457		50.0	砂れき	1986	
5148	鋼管	打撃	支			○	○		16.0	500		50.0	砂れき	1986	

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端 平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5149	鋼管	打撃	支			○	○		15.5	500		50.0	砂れき	1986	
5150	鋼管	打撃	支			○	○	○	40.1	508		43.5	砂	1986	
5151	鋼管	打撃	支			○	○	○	15.3	508		30.5	砂	1986	
5152	鋼管	打撃	支			○			32.3	508		24.0	粘性土	1986	
5153	鋼管	打撃	摩			○	○	○	23.3	508		17.3	粘性土	1986	
5154	鋼管	打撃	支			○	○	○	23.8	600		40.0	砂	1986	
5155	鋼管	打撃	支			○	○	○	24.0	600		44.2	砂	1986	
5156	鋼管	打撃	支			○	○	○	24.0	600		44.2	砂	1986	
5157	鋼管	打撃	支			○	○	○	39.0	813		50.0	砂れき	1986	
5158	鋼管	打撃	支			○	○	○	39.0	1016		50.0	砂れき	1986	
5159	鋼管	打撃	支			○	○	○	14.5	1016		43.5	砂	1986	
5160	鋼管	打撃	支			○	○	○	40.6	1200		45.0	砂れき	1986	
5161	鋼管	打撃	支			○			37.9	1500			岩盤		
5162	鋼管	打撃	支			○	○	○	40.0	1524		50.0	砂	1986	
5163	鋼管	打撃	支			○	○	○	21.7	508		50.0	砂れき	1986	
5164	鋼管	打撃	支			○	○	○	32.0	800		50.0	粘性土	1986	
5165	鋼管	打撃	支			○			19.1	600		50.0	砂れき	1974	
5166	鋼管	打撃	支		○	○	○	○	16.0	813		50.0	砂れき	1977	
5167	鋼管	打撃	支	○		○	○		35.4	813		40.7	砂	1986	
5168	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	19.0	600		50.0	砂れき	1986	
5169	鋼管	打撃	支			○			18.7	600				1980	
5170	鋼管	打撃	支			○			19.0	600		50.0	砂れき	1980	
5171	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	23.0	600		48.2	砂	1986	
5172	鋼管	打撃	支	○		○			27.0	600		48.3	砂	1986	
5173	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	22.0	813		37.1	粘性土	1986	
5174	鋼管	打撃	支	○		○	○	○	27.0	813		36.5	砂	1986	
5175	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	58.0	1500		26.4	砂	1986	
5176	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	58.0	1000		22.1	砂	1986	
5177	鋼管	打撃	支			○	○		18.0	500		50.0	砂れき	1966	
5178	鋼管	打撃	支			○	○	○	18.0	400		50.0	砂れき	1966	
5179	鋼管	打撃	摩	○		○	○	○	20.5	800		24.4	砂	1986	
5180	鋼管	打撃	摩			○	○	○	39.0	500		17.9	粘性土	1986	
5181	鋼管	打撃	摩			○	○	○	22.0	500		15.1	砂	1986	
5182	鋼管	打撃	摩			○			30.0	500					
5183	鋼管	打撃	支			○	○	○	32.5	500		27.2	粘性土	1986	
5184	鋼管	打撃	摩			○			11.5	508					
5185	鋼管	打撃	摩			○	○	○	15.6	508		25.9	砂	1986	
5186	鋼管	打撃	支			○	○	○	15.0	1016		32.6	砂	1986	
5187	鋼管	打撃	摩			○	○		19.8	600		19.5	砂	1975	
5188	鋼管	打撃	摩			○			50.1	800		9.0	粘性土	1986	
5189	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	20.0	600		20.7	粘性土	1986	
5190	鋼管	打撃	摩		○	○			28.0	600		12.5	粘性土	1975	
5191	鋼管	打撃	摩	○		○			50.5	800		5.1	粘性土	1986	
5192	鋼管	打撃	摩	○		○			50.5	600		4.9	粘性土	1986	
5193	鋼管	打撃	摩	○	○	○	○	○	30.7	813		14.2	粘性土	1986	
5194	鋼管	打撃	摩	○	○	○	○	○	23.2	813		15.2	粘性土	1986	
5195	鋼管	打撃	摩	○	○	○	○	○	27.0	813		14.0	砂	1986	
5196	鋼管	打撃	支	○	○	○	○	○	18.0	813		20.2	粘性土	1986	
5197	鋼管	打撃	摩			○			27.5	800		16.2	粘性土	1977	
5198	鋼管	打撃	摩			○	○	○	36.0	813		6.0	粘性土	1986	
5199	鋼管	打撃	摩	○		○	○	○	69.0	1500		9.5	粘性土	1986	
5200	PC	打撃(閉)	支	○		○			19.0	500		32.1	砂	1986	
5201	PC	打撃(閉)	支			○	○		35.0	600		50.0	砂	1986	
5202	PC	打撃(閉)	支			○			18.0	500		32.0	砂	1966	
5203	PC	打撃(閉)	支			○	○		26.1	350		50.0	砂	1972	
5204	PC	打撃(閉)	支			○			20.2	500		47.2	砂	1965	
5205	PC	打撃(閉)	支			○	○		21.5	300		50.0	砂	1969	
5206	PC	打撃(閉)	支			○			22.0	350		50.0	砂	1969	
5207	PC	打撃(閉)	支			○			23.7	450		38.6	砂	1969	
5208	PC	打撃(閉)	支			○	○		21.0	400		50.0	砂	1967	
5209	PC	打撃(閉)	支			○			15.0	500		46.5	粘性土	1969	
5210	PC	打撃(閉)	支			○	○		10.0	400		31.0	粘性土	1967	
5211	PC	打撃(閉)	支			○	○		10.7	400		46.6	砂	1969	
5212	PC	打撃(閉)	支			○	○		12.0	350		50.0	砂	1970	

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端 平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5213	PC	打撃(閉)	支			○	○		28.0	400		34.0	砂	1978	
5214	PC	打撃(閉)	支			○	○		9.0	600		32.0	砂	1981	
5215	PC	打撃(閉)	支			○	○		9.0	600		32.0	砂	1981	
5216	PC	打撃(閉)	支			○			14.4	350		49.6	砂	1965	
5217	PC	打撃(閉)	支			○			22.5	350		33.1	砂	1967	
5218	PC	打撃(閉)	支			○			8.4	350		33.5	砂	1974	
5219	PC	打撃(閉)	支			○	○		10.0	350		49.5	粘性土	1972	
5220	PC	打撃(閉)	支			○			24.0	500		42.0	砂	1971	
5221	PC	打撃(閉)	支			○	○		9.0	300		42.5	砂れき	1971	
5222	PC	打撃(閉)	支			○			15.0	500		32.0	砂	1970	
5223	PC	打撃(閉)	摩			○	○		8.0	300		13.4	砂	1967	
5224	PC	打撃(閉)	摩			○			8.0	300				1967	
5225	PC	打撃(閉)	摩			○	○		8.0	300		12.9	砂	1967	
5226	PC	打撃(閉)	摩			○			8.0	300		12.9	砂	1967	
5227	PC	打撃(閉)	支			○	○		17.0	500		38.0	砂れき	1966	
5228	PC	打撃(閉)	摩			○			16.0	400		16.0	粘性土	1968	
5229	PC	打撃(閉)	摩			○			13.0	450		17.2	粘性土	1975	
5230	RC	打撃(閉)	支			○			7.5	300		23.0	粘性土	1969	
5231	RC	打撃(閉)	摩			○	○		11.6	350		9.6	砂	1972	
5232	RC	打撃(閉)	摩			○	○		11.5	300		7.3	砂	1972	
5233	RC	打撃(閉)	摩			○	○		11.6	300		12.6	砂	1972	
5234	PC	打撃(閉)	摩	○		○	○		30.0	350		7.1	砂	1979	
5235	PC	打撃(閉)	摩	○		○	○		25.0	350		6.0	粘性土	1980	
5236	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	12.5	1000		29.0	砂	1986	
5237	場所打ち	場所打ち	支			○	○		27.4	1000		20.9	粘性土	1986	
5238	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	28.5	1000		47.8	砂れき	1986	
5239	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	20.5	1000		50.0	砂	1986	
5240	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		16.0	1200		41.7	砂	1986	
5241	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	37.5	800		40.0	砂	1986	
5242	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		30.0	1000		50.0	砂	1986	
5243	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	18.2	1000		50.0	砂れき	1978	
5244	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	17.7	1000		39.4	砂れき	1978	
5245	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	16.5	1200		34.3	砂	1986	
5246	場所打ち	場所打ち	支			○	○		16.5	1000		49.2	砂れき	1969	
5247	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	34.3	980		40.5	砂	1986	
5248	場所打ち	場所打ち	支			○	○		40.0	1500		50.0	砂	1978	
5249	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	44.5	1500		50.0	砂	1976	
5250	場所打ち	場所打ち	支			○	○		32.8	1500		50.0	砂れき	1974	
5251	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	46.9	1500		50.0	砂れき	1975	
5252	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		26.5	1500		50.0	砂	1979	
5253	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	27.6	1000		43.0	砂	1979	
5254	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		34.4	1200		32.9	砂	1980	
5255	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	33.9	1200		34.0	砂	1980	
5256	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		28.2	1270		45.5	砂	1980	
5257	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	16.5	1200		32.6	砂	1978	
5258	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	14.5	1000		46.5	粘性土	1975	
5259	場所打ち	場所打ち	支			○	○		15.6	900		49.0	砂	1978	
5260	場所打ち	場所打ち	支			○	○		18.5	1100		50.0	砂	1978	
5261	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	12.0	1000		49.5	粘性土	1969	
5262	場所打ち	場所打ち	支			○	○		19.5	1000		50.0	砂れき	1969	
5263	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	27.8	1500		45.3	砂	1981	
5264	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		21.6	1100		104.1	砂れき	1980	
5265	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	24.0	800		40.0	砂	1967	
5266	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	23.2	1500		36.2	砂	1982	
5267	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	11.0	1000		32.0	砂	1986	
5268	場所打ち	場所打ち	摩			○	○	○	23.0	1200		26.5	砂	1986	
5269	場所打ち	場所打ち	摩			○	○	○	14.0	1000		27.6	砂	1975	
5270	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	32.0	1000		47.0	砂	1975	
5271	場所打ち	場所打ち	摩	○	○	○	○	○	47.6	1500		10.3	粘性土	1980	
5272	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	23.5	1200		9.0	粘性土	1986	
5273	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	31.0	1200		14.4	粘性土	1980	
5274	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	33.7	1200		10.7	粘性土	1982	
5275	場所打ち	場所打ち	摩		○	○			27.0	1000		13.1	砂	1982	
5276	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	18.0	1000		19.5	砂れき	1982	

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5277	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	25.0	1016		10.2	粘性土	1986	
5278	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	32.0	1200		7.5	粘性土	1987	
5279	場所打ち	場所打ち	摩			○	○	○	40.0	2000		19.2	砂	1976	
5280	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	27.2	1000		16.9	粘性土	1984	
5281	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	16.5	1000		9.7	砂	1979	
5282	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	25.5	1016		10.2	粘性土	1983	
5283	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○		10.9	800		22.2	砂	1979	
5284	場所打ち	場所打ち	支			○			11.0	1000		46.2	砂れき	1966	
5285	PC	中掘り	支	○		○	○		29.0	450		50.0	砂れき	1986	
5286	PC	中掘り	支	○		○	○		29.0	450		50.0	砂れき	1986	
5287	PC	中掘り	支	○		○			13.0	600		49.7	砂れき	1986	
5288	PC	中掘り	支	○		○	○		13.0	600		49.7	砂れき	1986	
5289	PC	中掘り	支	○		○	○	○	13.0	600		38.1	砂	1986	
5290	PC	中掘り	支	○		○	○	○	30.5	600		47.7	砂れき	1986	
5291	PC	中掘り	支	○			○		39.0	500		50.0	砂	1986	
5292	PC	中掘り	支			○			40.5	500		50.0	砂	1986	
5293	PC	中掘り	支			○			35.4	500		50.0	砂	1986	
5294	PC	中掘り	支			○	○		47.5	500		45.0	砂	1986	
5295	PC	中掘り	支			○	○		49.0	500		50.0	砂	1986	
5296	PC	中掘り	支			○	○	○	47.5	500		45.0	砂	1986	
5297	PC	中掘り	支	○		○	○	○	28.6	600		48.8	砂れき	1986	
5298	PC	中掘り	支			○	○	○	16.0	500		47.7	砂	1986	
5299	PC	中掘り	支			○	○		13.5	450		35.8	砂	1986	
5300	鋼管	中掘り	支	○		○	○	○	31.5	457		50.0	砂	1986	
5372	PHC	プレボ	摩	○		○	○		15.0	400		21.7	砂		
5373	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	45.0	450		90.1	砂れき		
5374	PHC	プレボ	摩	○		○	○		27.0	500		30.3	砂		
5375	PHC	プレボ	支	○			○		58.0	500		28.0	粘性土		
5376	PHC	プレボ	支	○			○		61.0	500		44.0	砂		
5377	PHC	プレボ	支	○			○		52.0	600		54.0	砂れき		
5378	PHC	プレボ	支	○			○		65.6	600		187.8	砂		
5379	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	20.0	400		45.5	砂れき		
5380	PHC	プレボ	支	○		○	○		12.0	350		39.3	砂		
5381	PHC	プレボ	支	○		○	○		24.0	500		29.4	粘性土		
5382	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	19.0	400		37.4	砂れき		
5383	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	16.0	350		48.3	砂		
5384	PHC	プレボ	支	○		○	○	○	51.0	450		53.3	砂		
5419	場所打ち	場所打ち	支			○			27.0	1000		35.0	砂	1986	
5420	場所打ち	場所打ち	支			○			7.0	1090					
5421	場所打ち	場所打ち	支			○			10.0	1090					
5422	場所打ち	場所打ち	支			○	○		7.8	1000		50.0	砂れき	1969	
5423	場所打ち	場所打ち	支			○			7.8	1000		50.0	砂れき	1980	
5426	場所打ち	場所打ち	支			○	○	○	26.5	1000		42.5	砂れき	1968	1)
5427	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	10.3	900		39.6	砂	1971	1)
5428	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	35.8	1000		53.3	砂れき	1975	1)
5429	場所打ち	場所打ち	支			○			14.0	1000		51.5	砂れき	1976	1)
5430	場所打ち	場所打ち	摩	○			○		55.0	1800		22.0	砂	1988	1)
5431	場所打ち	場所打ち	摩	○			○		25.8	1000		14.6	砂	1975	1)
5432	場所打ち	場所打ち	支	○		○			23.9	1200		50.0	砂れき	1976	1)
5433	場所打ち	場所打ち	支	○			○		21.8	1000		156.5	砂れき	1977	1)
5434	場所打ち	場所打ち	支	○		○			28.7	1100		50.0	砂れき	1976	1)
5435	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	30.9	1000		50.0	砂	1977	1)
5436	場所打ち	場所打ち	支	○			○		27.0	1300		50.0	砂	1981	1)
5437	場所打ち	場所打ち	支	○		○			29.5	1600			砂れき		1)
5438	場所打ち	場所打ち	支	○		○			27.5	1900		109.8	砂れき	1982	1)
5439	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○	○	23.2	1700		35.9	砂	1982	1)
5440	場所打ち	場所打ち	支		○	○			43.5	1200		39.0	砂	1983	1)
5441	場所打ち	場所打ち	支	○		○			41.2	1600			砂れき		1)
5442	場所打ち	場所打ち	支	○		○			52.9	1500			砂		1)
5443	場所打ち	場所打ち	支	○		○			30.9	1000			砂		1)
5444	場所打ち	場所打ち	支	○		○			23.9	1300		62.8	砂れき	1981	1)
5445	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	30.9	1500		50.0	砂れき	1988	1)
5446	場所打ち	場所打ち	支				○		23.5	1000		42.0	砂	1975	1)
5447	場所打ち	場所打ち	支			○			38.6	1500		50.0	砂れき	1979	1)

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5448	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	26.5	1000		60.0	砂れき	1981	1)
5449	場所打ち	場所打ち	支	○					24.0	1500		60.0	砂れき	1991	1)
5450	場所打ち	場所打ち	支	○			○		24.0	1200		60.0	砂れき	1991	1)
5451	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	32.8	1000		14.3	砂	1973	1)
5452	場所打ち	場所打ち	支	○			○		28.4	1000		51.2	砂れき	1978	1)
5453	場所打ち	場所打ち	支	○					26.1	1300		272.0	砂れき	1981	1)
5454	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	25.5	1000		53.7	砂	1983	1)
5455	場所打ち	場所打ち	支		○		○		58.5	1200		60.0	砂れき	1989	1)
5456	場所打ち	場所打ち	支	○		○			30.5	1100			砂れき		1)
5457	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		12.3	600		50.0	砂		1)
5458	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○		13.8	600		50.0	砂れき		1)
5459	場所打ち	場所打ち	摩	○		○	○	○	15.5	700		23.9	砂	1982	1)
5460	場所打ち	場所打ち	支	○		○	○	○	27.0	1000		34.3	粘性土	1989	1)
5461	場所打ち	場所打ち	支	○		○			31.0	1100		50.4	砂れき	1983	1)
5473	SC+PHC	中掘り	支	○	○		○		72.0	1000		50.0	砂	1996	
5474	SC+PHC	中掘り	支	○			○		64.0	1000		50.0	砂れき	1997	
5475	SC	中掘り	支	○		○	○	○	47.0	600		50.2	砂	1994	
5476	SC	中掘り	支	○		○	○	○	52.0	600		66.4	砂	1994	
5477	PHC	中掘り	支	○			○		54.0	1000		50.0	砂	1989	
5478	PHC	中掘り	支	○	○		○		49.0	1000		80.5	砂れき	1989	
5479	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	32.0	1000		120.5	砂れき	1990	
5480	SC	中掘り	支	○			○		67.0	700		50.0	砂	1992	
5481	SC	中掘り	支	○			○		68.0	700		50.0	砂れき	1994	
5482	SC	中掘り	支	○			○		54.0	1000		50.0	砂	1992	
5483	SC	中掘り	支	○			○		58.0	1000		326.3	砂	1992	
5484	PHC	中掘り	支	○		○	○		55.0	800		130.9	砂	1987	
5485	PHC	中掘り	支	○		○	○		44.0	800		90.1	砂れき	1986	
5486	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	47.0	500		91.8	砂	1981	
5638	鋼管	中掘り	支						55.0	813					2)
5639	鋼管	中掘り	支						53.0	813					2)
5640	鋼管	中掘り	支						51.0	813					2)
5641	鋼管	中掘り	支						44.0	813					2)
5642	鋼管	中掘り	支						58.5	813					2)
5643	鋼管	中掘り	支						52.0	813					2)
5644	鋼管	中掘り	支			○			25.5	800					2)
5645	鋼管	中掘り	支			○			24.0	800					2)
5646	鋼管	中掘り	支			○			25.0	600					2)
5647	鋼管	中掘り	支			○			34.5	800					2)
5648	鋼管	中掘り	支			○	○	○	30.0	600		50.0	砂	1996	3)
5649	鋼管	中掘り	支			○			33.0	600		60.0	岩盤	1997	3)
5650	鋼管	中掘り	支			○	○		37.5	600		50.0	砂	1997	3)
5651	鋼管	中掘り	支			○			17.8	600		50.0	砂れき	1997	3)
5652	鋼管	中掘り	支			○	○		27.0	500		49.5	砂	1998	3)
5653	鋼管	中掘り	支			○	○	○	17.5	914		50.0	砂れき	1997	3)
5654	鋼管	回転杭	支	○		○	○		15.0	500	1000	68.0	砂	1996	4)
5655	鋼管	回転杭	支	○			○		48.0	500	1000	54.0	砂	1996	4)
5656	鋼管	回転杭	支	○		○	○		13.0	508	1016	54.0	砂れき	1997	4)
5657	鋼管	回転杭	支	○		○	○		21.0	508	1016	33.0	砂	1997	4)
5658	鋼管	回転杭	支	○		○	○		27.0	508	1016	58.0	砂れき	1997	4)
5659	鋼管	回転杭	支	○		○	○		11.9	319	637	44.5	砂れき	1998	4)
5660	鋼管	回転杭	支	○		○	○		19.9	319	637	68.0	砂	1998	4)
5661	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	25.9	319	637	51.0	砂れき	1998	4)
5662	鋼管	回転杭	支	○		○	○		22.9	319	637	32.0	砂	1992	4)
5663	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	31.9	319	637	100.0	砂れき	1992	4)
5664	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	36.9	319	637	43.6	砂	1992	4)
5665	鋼管	回転杭	支	○		○	○		56.7	508	1016	58.0	砂れき	1992	4)
5666	鋼管	回転杭	支			○	○		52.0	508	1016	50.0	砂	2000	4)
5667	鋼管	回転杭	支	○		○	○		61.0	1200	2400	62.0	砂	2002	4)
5668	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	60.6	800	1600	64.0	砂	2002	4)
5669	鋼管	回転杭	支			○	○		27.1	1000	1750	50.0	粘性土	2002	4)
5670	鋼管	回転杭	支	○		○	○		43.4	1200	2100	138.0	砂れき	2002	4)
5671	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	43.0	800	1600	120.0	砂れき	2002	4)
5672	鋼管	回転杭	支	○		○	○		12.5	508	762	50.0	砂	1998	5)
5673	鋼管	回転杭	支	○			○		15.7	800	1200	47.0	砂	1998	5)

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端 平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
5674	鋼管	回転杭	支	○		○	○		12.6	610	914	50.0	砂	1998	5)
5675	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	14.7	610	914	42.0	砂	1998	5)
5680	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	50.3	800	1200	50.0	砂れき	1999	5)
5682	鋼管	回転杭	支	○			○		55.2	900	1350	50.0	砂	1999	5)
5685	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	18.7	800	1200	39.3	砂れき	1999	5)
5686	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	22.6	610	914	35.8	砂れき	1999	5)
5690	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	13.7	900	1350	38.0	砂	1999	5)
5691	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	13.2	900	1350	40.0	砂	1999	5)
5692	鋼管	回転杭	支	○			○		13.3	610	914	44.6	砂	1999	5)
5696	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	13.3	319	478	36.0	砂	1999	5)
5697	鋼管	回転杭	支	○			○		13.1	319	478	40.0	砂	1999	5)
5700	鋼管	回転杭	摩	○		○	○		32.6	1200	1800	19.0	砂	1999	5)
5702	鋼管	鋼管ソイル	支	○	○		○		26.6	800	600	44.5	砂れき	1988	6)
5703	鋼管	鋼管ソイル	支				○		28.5	800	600	50.0	砂	1989	6)
5704	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	21.9	800	600	46.1	砂れき	1992	6)
5705	鋼管	鋼管ソイル	支	○			○		9.7	800	600	32.2	砂	1995	6)
5706	鋼管	鋼管ソイル	支			○			23.5	800	600	47.5	砂	1995	6)
5707	鋼管	鋼管ソイル	摩	○		○			26.3	1100	800	4.1	粘性土	1997	6)
5708	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○			47.2	1000	800	50.0	砂	1998	6)
5709	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	50.8	1200	1000	50.0	砂	1999	6)
5710	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	16.0	1000	750	51.2	砂	1988	6)
5711	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○		15.5	1000	800	49.7	砂れき	2000	6)
5712	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	30.7	1400	1200	38.4	砂	2000	6)
5713	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	30.7	1400	1200	38.4	砂	2000	6)
5714	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	15.5	1000	800	49.9	砂れき	2000	6)
5715	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		16.1	800		50.0	砂	1998	7)
5716	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		12.1	600		50.0	砂れき	1998	7)
5717	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		49.3	800		50.0	砂	1999	7)
5718	鋼管	バイブロ	支	○			○		60.0	1000		47.8	砂	1996	7)
5719	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		27.0	600		48.1	砂れき	1999	7)
5720	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		32.4	610		48.9	砂れき	1999	7)
5721	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		15.5	600		50.0	砂	1999	7)
5722	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		20.0	660		50.0	砂れき	1963	7)
5723	鋼管	バイブロ	支	○		○	○		20.0	1016		50.0	砂れき	1963	7)
5724	鋼管	鋼管ソイル	支	○			○		28.5	1400	1000	49.0	砂	1991	8)
5725	鋼管	鋼管ソイル	摩	○	○		○		20.5	1400	1000	20.4	砂	1991	8)
5726	鋼管	鋼管ソイル	支	○			○		50.5	1400	1000	49.7	砂	1991	8)
5727	鋼管	鋼管ソイル	摩	○	○	○	○	○	24.0	1400	1000	2.1	粘性土	1991	8)
5728	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	12.0	900	600	33.0	砂	1990	8)
5729	鋼管	鋼管ソイル	支	○			○		59.4	1000	800	37.3	砂れき	1994	8)
5730	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	13.4	1000	800	90.8	砂れき	1997	8)
5731	鋼管	鋼管ソイル	支	○	○		○		61.3	1100	900	50.0	砂	1997	8)
5732	鋼管	鋼管ソイル	支	○		○	○	○	12.4	1000	800	41.5	砂れき	1997	8)
5733	鋼管	鋼管ソイル	支	○	○		○		35.5	1200	1000	57.1	砂れき	1998	8)
5734	鋼管	鋼管ソイル	支	○	○		○		35.8	1400	1200	57.0	砂れき	1997	8)
5735	鋼管	鋼管ソイル	支	○			○		45.4	1000	800	58.3	砂れき	1998	8)
5736	鋼管	鋼管ソイル	摩	○		○			51.4	1000	700	15.3	砂れき	1999	8)
5737	鋼管	鋼管ソイル	摩	○	○		○		31.0	800	600	5.5	粘性土	1999	8)
5739	鋼管	中掘り	支	○			○		30.0	600		50.0	砂	1997	9)
5740	鋼管	中掘り	支	○			○		20.5	800		50.0	砂れき	1997	9)
5741	鋼管	中掘り	支	○			○		25.0	800		60.0	砂	1997	9)
5742	鋼管	中掘り	支	○			○		52.0	800		50.0	砂	1997	9)
5743	鋼管	中掘り	支	○			○		52.0	800		50.0	砂	1997	9)
5744	鋼管	中掘り	支	○			○		65.0	800		50.0	砂れき	1997	9)
5745	鋼管	中掘り	支	○			○		65.0	800		50.0	砂れき	1998	9)
5746	鋼管	中掘り	支	○			○		65.0	800		50.0	砂れき	1997	9)
5747	鋼管	中掘り	支	○			○		50.0	800		50.0	砂れき	1997	9)
5748	鋼管	中掘り	支	○			○		50.0	800		50.0	砂れき	1998	9)
5749	鋼管	中掘り	支	○			○		66.0	800		50.0	砂	1997	9)
5750	鋼管	中掘り	支	○			○		66.0	800		50.0	砂	1998	9)
5751	鋼管	中掘り	支	○			○		66.0	800		50.0	砂	1997	9)
5752	鋼管	中掘り	支	○			○		72.5	1000		50.0	砂	1999	9)
5753	鋼管	中掘り	支			○	○	○	34.5	800		50.0	砂	2000	9)
5754	鋼管	中掘り	支			○	○	○	45.0	1000		50.0	砂れき	2000	9)

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
6058	PHC	中掘り	支	○			○		61.0	600		52.5	砂れき	1991	
6059	PHC	中掘り	支	○			○		61.0	600		53.6	砂	1991	
6060	PHC	中掘り	支	○			○		66.0	600		56.1	砂れき	1991	
6061	PHC	中掘り	支	○			○		66.0	600		44.9	砂	1992	
6062	SC+PHC	中掘り	支	○			○		56.0	1000		67.3	砂	1990	
6063	SC+PHC	中掘り	支	○			○		65.0	1000		50.0	砂	1991	
6064	PHC	中掘り	支	○			○		66.0	1000		50.0	砂	1991	
6065	PHC	中掘り	支	○			○		67.0	1000		49.9	砂れき	1991	
6066	PHC	中掘り	支	○			○		40.0	600		110.8	砂れき	1994	
6067	PHC	中掘り	支	○			○		46.0	600		58.4	砂	1994	
6068	PHC	中掘り	支	○			○		45.0	600		57.1	砂	1994	
6069	PHC	中掘り	支	○			○		46.0	600		75.2	砂れき	1994	
6070	PHC	中掘り	支	○			○		66.0	1000		41.8	砂	1991	
6071	PHC	中掘り	支	○			○		52.0	700		50.0	砂れき	1985	
6072	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	20.0	500		177.6	砂れき	1981	
6073	PHC	中掘り	支	○		○			43.0	500		100.0	砂		
6074	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	32.0	600		46.7	砂	1981	
6075	PHC	中掘り	支	○			○		56.0	500		96.1	砂	1983	
6076	PHC	中掘り	支			○			46.0	500		50.0	砂	1983	
6077	PHC	中掘り	支			○	○		28.0	600		50.0	砂	1982	
6078	PHC	中掘り	支			○			14.0	450		50.0	砂	1982	
6079	PHC	中掘り	支	○			○		43.0	500		49.7	砂れき	1979	
6080	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	29.0	500		74.7	砂	1979	
6081	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	25.0	500		25.6	砂	1979	
6082	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	27.0	500		47.9	砂	1979	
6083	PHC	中掘り	支	○		○			12.0	500		31.2	砂れき	1979	
6084	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	15.0	500		49.5	砂れき	1980	
6085	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	55.0	600		91.5	砂	1980	
6086	PHC	中掘り	支	○		○	○		49.0	600		54.8	砂	1980	
6087	PHC	中掘り	支	○		○	○		20.0	500		35.5	砂	1981	
6088	PHC	中掘り	支	○		○	○		39.0	450		50.0	砂	1981	
6089	PHC	中掘り	支			○			42.0	600		48.1	砂	1979	
6090	PHC	中掘り	支			○			8.0	600		39.3	砂	1980	
6091	PHC	中掘り	支	○			○		66.0	600		91.0	砂	1984	
6092	PHC	中掘り	支			○	○	○	40.0	600		50.0	砂れき		
6093	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	32.0	600		35.8	砂れき		
6094	PHC	中掘り	支	○		○	○		42.0	500		110.3	砂	1981	
6095	PHC	中掘り	支	○		○	○	○	33.0	600		87.9	砂		
6101	PHC	プレボ	支	○			○		37.0	600		67.2	砂れき		
6102	PHC	プレボ	支	○			○		39.0	600		53.1	砂		
6103	PHC	プレボ	支	○			○		41.0	600		63.9	砂		
6104	PHC	プレボ	支	○			○		38.0	600		60.9	砂れき		
6105	PHC	プレボ	支	○			○		37.0	600		71.5	砂れき		
6106	PHC	プレボ	支	○			○		44.0	600		61.8	砂		
6107	PHC	プレボ	支	○			○		45.0	600		72.4	砂		
6108	PHC	プレボ	支	○			○		18.0	400		59.0	砂		
6109	PHC	プレボ	支	○			○		36.0	600		53.2	砂		
6110	PHC	プレボ	支	○			○		26.0	500		47.2	砂れき		
6111	PHC	プレボ	支	○			○		42.0	800		80.7	砂		
6112	PHC	プレボ	支	○			○		52.0	800		93.7	砂		
6113	PHC	プレボ	支	○			○		66.0	1000		54.8	砂		
6114	PHC	プレボ	支	○			○		37.0	600		72.0	砂れき		
6115	PHC	プレボ	支	○			○		43.0	600		83.9	砂		
6116	PHC	プレボ	支	○			○		39.0	600		56.8	砂		
6117	PHC	プレボ	支	○			○		36.0	600		54.1	砂れき		
6118	PHC	プレボ	支	○		○	○		20.0	300		57.7	砂		
6119	PHC	プレボ	支	○			○		29.0	350		187.1	粘性土		
6120	PHC	プレボ	支	○			○		65.0	1000		55.7	砂		
6121	PHC	プレボ	支	○			○		65.0	1000		82.9	砂れき		
6122	PHC	プレボ	支	○			○		66.0	1000		57.3	砂		
6511	場所打ち	場所打ち	支	○	○	○	○		38.1	2000		124.7	砂れき	1980	
6513	場所打ち	場所打ち	支			○			56.1	2000				1980	
6515	鋼管	打撃	摩			○			28.0	600					
6516	場所打ち	場所打ち	摩			○			27.0	1000					

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ソイル D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
6517	鋼管	打撃	摩			○			30.0	600					
6518	場所打ち	場所打ち	摩			○			30.5	1200					
6519	鋼管	打撃	摩			○			29.5	813					
6520	場所打ち	場所打ち	摩			○			21.0	1000					
6521	鋼管	打撃	摩			○			28.0	813					
6522	鋼管	打撃	摩			○	○	○	28.0	813		14.6	粘性土		
6523	鋼管	打撃	摩			○	○	○	28.0	813		14.6	粘性土		
6524	鋼管	打撃	支			○			23.0	813		50.0	粘性土		
6525	鋼管	打撃	支			○			23.0	813		50.0	粘性土		
6526	鋼管	打撃	摩		○	○	○	○	30.7	813		14.4	粘性土		
6527	鋼管	打撃	摩		○	○	○	○	23.2	813		14.5	粘性土		
6528	場所打ち	場所打ち	支		○	○	○	○	23.5	1200		21.2	粘性土	1981	
6529	場所打ち	場所打ち	摩		○	○	○	○	31.0	1200		14.4	粘性土	1981	
7008	鋼管	鋼管ソイル	摩	○		○	○	○	26.6	1200	1000	24.8	砂れき	2000	8)
7010	鋼管	回転杭	支	○		○			51.0	1600	2400	50.0	岩盤	2003	5)
7019	鋼管	回転杭	支	○		○	○		11.8	319	637	50.0	砂	2001	10)
7020	鋼管	回転杭	支	○		○	○		11.8	319	478	50.0	砂	2001	10)
7021	鋼管	回転杭	支	○		○	○		17.6	508	1016	28.5	砂	2001	10)
7022	鋼管	回転杭	支	○		○	○		26.5	500	1000	48.0	砂れき	2002	10)
7023	鋼管	回転杭	支	○		○	○		17.1	600	1200	50.0	砂れき	2002	10)
7024	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	15.5	600	900	32.0	砂	2002	10)
7025	鋼管	回転杭	摩	○		○	○		6.3	216	433	19.0	砂	2003	10)
7030	鋼管	中掘り	支			○	○		27.0	1000		50.0	砂れき	2002	2)
8001	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	55.2	1000	1750	85.1	砂れき	2004	11)
8002	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	35.7	600	1200	56.0	砂れき	2005	11)
8003	鋼管	回転杭	支	○			○		76.8	1200	2400	107.5	砂れき	2005	11)
8004	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	57.7	800	1200	71.9	砂れき	2006	11)
8005	鋼管	回転杭	支	○			○		51.6	900	1350	88.2	砂れき	2006	11)
8006	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	25.1	800	1200	48.5	砂	2008	11)
8007	鋼管	回転杭	支	○		○	○	○	25.1	1000	1500	49.4	砂	2008	11)
10001	鋼管	打撃	摩			○			36.8	300		20.0	砂	1974	12)
10004	鋼管	打撃	摩			○	○		28.7	319		2.0	砂	1974	12)
10005	鋼管	打撃	支			○			17.1	324		50.0	岩盤	1974	12)
10006	鋼管	打撃	支			○			16.6	324		50.0	岩盤	1974	12)
10007	鋼管	打撃	支			○	○		37.0	356		75.0	砂れき	1974	12)
10008	鋼管	打撃	支			○	○		32.0	356		46.0	粘性土	1974	12)
10009	鋼管	打撃	支			○			18.0	366		78.0	砂	1974	12)
10010	鋼管	打撃	摩			○			22.6	400		13.0	砂	1974	12)
10012	鋼管	打撃	支			○			34.3	406		36.0	粘性土	1974	12)
10013	鋼管	打撃	支			○			25.0	406		46.0	砂れき	1974	12)
10014	鋼管	打撃	支			○			11.0	406		47.0	粘性土	1974	12)
10015	鋼管	打撃	支			○			40.0	406		70.0	砂	1974	12)
10017	鋼管	打撃	支			○			18.0	450		25.0	砂	1974	12)
10018	鋼管	打撃	支			○			22.9	450		50.0	砂れき	1974	12)
10019	鋼管	打撃	摩			○			46.5	450		11.0	砂	1974	12)
10020	鋼管	打撃	支			○	○		27.3	454		50.0	砂れき	1974	12)
10021	鋼管	打撃	支			○	○		27.3	454		50.0	砂れき	1974	12)
10022	鋼管	打撃	支			○	○		23.0	457		50.0	砂れき	1974	12)
10024	鋼管	打撃	支			○			39.4	485		46.0	砂	1974	12)
10025	鋼管	打撃	支			○			43.0	485		34.0	粘性土	1974	12)
10026	鋼管	打撃	摩			○			35.7	485		3.0	粘性土	1974	12)
10027	鋼管	打撃	支			○			11.9	500		40.0	砂れき	1974	12)
10028	鋼管	打撃	摩			○			30.0	500		13.0	砂	1974	12)
10030	鋼管	打撃	摩			○			19.0	500		13.0	砂	1974	12)
10033	鋼管	打撃	支			○			29.0	500		24.0	粘性土	1974	12)
10034	鋼管	打撃	支			○			17.7	500		50.0	砂れき	1974	12)
10037	鋼管	打撃	摩			○			30.0	500		10.0	粘性土	1974	12)
10038	鋼管	打撃	摩			○	○		40.0	500		8.0	砂れき	1974	12)
10039	鋼管	打撃	支			○			29.5	500		36.0	粘性土	1974	12)
10040	鋼管	打撃	摩			○			32.7	500		7.3	砂	1974	12)
10041	鋼管	打撃	支			○			18.5	500		50.0	砂	1974	12)
10042	鋼管	打撃	支			○			29.5	500		50.0	砂れき	1974	12)
10043	鋼管	打撃	支			○			32.0	500		46.0	粘性土	1974	12)
10044	鋼管	打撃	支			○			29.5	500		50.0	砂れき	1974	12)

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ｿｲﾙ D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端 平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
10045	鋼管	打撃	支			○			29.5	500		50.0	砂	1974	12)
10046	鋼管	打撃	支			○			28.3	500		50.0	砂れき	1974	12)
10047	鋼管	打撃	支			○			12.0	500		50.0	砂	1974	12)
10048	鋼管	打撃	支			○			11.0	500		30.0	砂	1974	12)
10049	鋼管	打撃	支			○			28.5	500		50.0	砂れき	1974	12)
10050	鋼管	打撃	支			○			12.0	508		37.0	砂	1974	12)
10051	鋼管	打撃	摩			○			9.0	508		23.0	砂れき	1974	12)
10052	鋼管	打撃	支			○	○		18.0	508		49.0	砂	1974	12)
10055	鋼管	打撃	支			○	○		35.0	508		19.0	砂	1974	12)
10058	鋼管	打撃	支			○			39.0	508		50.0	岩盤	1974	12)
10059	鋼管	打撃	支			○			34.0	508		32.0	砂れき	1974	12)
10062	鋼管	打撃	支			○	○		24.0	508		17.0	粘性土	1974	12)
10063	鋼管	打撃	支			○			28.0	508		50.0	砂れき	1974	12)
10064	鋼管	打撃	支			○			31.8	508		34.0	岩盤	1974	12)
10066	鋼管	打撃	支			○			38.0	508		21.0	粘性土	1974	12)
10067	鋼管	打撃	摩			○			11.5	508		14.0	砂	1974	12)
10073	鋼管	打撃	摩			○			15.8	600		5.5	砂れき	1974	12)
10074	鋼管	打撃	支			○			35.0	600		50.0	砂	1974	12)
10075	鋼管	打撃	支			○			26.9	600		50.0	砂れき	1974	12)
10076	鋼管	打撃	摩			○			33.4	600		26.0	砂	1974	12)
10077	鋼管	打撃	摩			○			12.0	610		10.0	砂	1974	12)
10078	鋼管	打撃	支			○			27.7	610		23.0	粘性土	1974	12)
10079	鋼管	打撃	支			○			12.3	610		27.0	粘性土	1974	12)
10080	鋼管	打撃	支			○			14.5	610		30.0	砂	1974	12)
10081	鋼管	打撃	支			○			12.4	610		42.0	砂	1974	12)
10082	鋼管	打撃	摩			○			53.4	610		4.0	粘性土	1974	12)
10083	鋼管	打撃	摩			○			12.3	610		23.0	砂れき	1974	12)
10084	鋼管	打撃	摩			○			12.3	610		29.0	砂	1974	12)
10085	鋼管	打撃	支			○			40.0	610		31.0	砂	1974	12)
10086	鋼管	打撃	摩			○	○		20.0	610		11.0	砂	1974	12)
10087	鋼管	打撃	摩			○			17.0	610		17.0	砂	1974	12)
10088	鋼管	打撃	支			○			12.3	610		40.0	砂	1974	12)
10089	鋼管	打撃	支			○			12.3	610		30.0	砂	1974	12)
10093	鋼管	打撃	支			○			39.1	650		39.0	粘性土	1974	12)
10094	鋼管	打撃	支			○			20.0	660		30.0	砂れき	1974	12)
10095	鋼管	打撃	摩			○			9.0	711		1.0	粘性土	1974	12)
10096	鋼管	打撃	支			○			37.0	750		45.0	砂	1974	12)
10097	鋼管	打撃	支			○	○		22.5	750		40.0	砂	1974	12)
10098	鋼管	打撃	支			○	○		19.6	750		47.0	砂	1974	12)
10099	鋼管	打撃	支			○	○		57.6	750		42.0	砂	1974	12)
10100	鋼管	打撃	支			○			21.0	762		38.0	砂れき	1974	12)
10101	鋼管	打撃	支			○			37.5	800		35.0	粘性土	1974	12)
10103	鋼管	打撃	支			○			45.0	800		50.0	岩盤	1974	12)
10104	鋼管	打撃	支			○			35.5	813		44.0	砂れき	1974	12)
10106	鋼管	打撃	支			○			37.5	813		30.0	粘性土	1974	12)
10107	鋼管	打撃	支			○			47.4	914		39.0	砂れき	1974	12)
10108	鋼管	打撃	摩			○	○		20.5	1000		19.0	砂	1974	12)
10109	鋼管	打撃	支			○			45.2	1000		50.0	岩盤	1974	12)
10111	鋼管	打撃	摩			○			15.0	1016		20.0	砂	1974	12)
10112	鋼管	打撃	摩			○			52.9	1016		11.0	砂	1974	12)
10113	鋼管	打撃	摩			○			14.5	1016		22.0	砂	1974	12)
10114	鋼管	打撃	摩			○			14.5	1016		22.0	砂	1974	12)
10116	鋼管	打撃	摩			○			14.5	1016		29.0	砂	1974	12)
10117	鋼管	打撃	支			○			20.0	1016		22.0	砂れき	1974	12)
10118	鋼管	打撃	支			○			28.0	1016		50.0	砂れき	1974	12)
10120	鋼管	打撃	支			○			21.0	1016		42.0	砂	1974	12)
10121	鋼管	打撃	摩			○			21.0	1016		28.0	砂	1974	12)
10123	鋼管	打撃	支			○			42.6	1200		35.0	砂れき	1974	12)
10126	鋼管	打撃	摩			○			45.0	1219		17.0	粘性土	1974	12)
10128	鋼管	打撃	支			○			51.8	1500		50.0	粘性土	1974	12)
10129	鋼管	打撃	摩			○			50.5	1500		8.0	粘性土	1974	12)
10130	鋼管	打撃	摩			○			36.0	1500		10.0	粘性土	1974	12)
10131	鋼管	打撃	支			○			37.9	1500		30.0	粘性土	1974	12)
10132	鋼管	打撃	支			○			37.9	1500		33.0	粘性土	1974	12)

付表 5 収集した鉛直載荷試験データ一覧

ID	杭材料	杭工法*	支持形式	ひずみ計	c 値	摩擦低減なし	採用データ** 支持力	採用データ** ばね	杭長 (m)	杭径 D (mm)	鋼管ｿｲﾙ D_{sp} 羽根外径 D_w (mm)	先端平均 N 値	先端地盤	実施時期	備考***
10134	鋼管	打撃	支			○			41.8	2500		50.0	砂	1974	12)
11001	鋼管	打撃(閉)	摩			○			16.0	250		4.0	粘性土	1974	12)
11002	鋼管	打撃	摩			○			31.7	430		15.0	粘性土	1974	12)
11003	鋼管	打撃(閉)	支			○			23.0	457		50.0	砂れき	1974	12)
11004	鋼管	打撃(閉)	支			○			26.2	485		50.0	砂れき	1974	12)
11005	鋼管	打撃(閉)	支			○	○		11.0	500		30.0	砂	1974	12)
11006	鋼管	打撃(閉)	摩			○	○		20.0	500		5.0	砂れき	1974	12)
11007	鋼管	打撃(閉)	支			○			38.0	508		52.0	砂	1974	12)
11008	鋼管	打撃	支			○			21.0	1016		38.0	砂れき	1974	12)
11009	鋼管	打撃(閉)	支			○			23.9	1500		38.0	砂	1974	12)
12001	PC	打撃(閉)	支			○	○		36.3	350		30.0	粘性土	1974	12)
12002	PC	打撃(閉)	摩			○			22.2	350		23.0	砂れき	1974	12)
12003	PC	打撃(閉)	支			○			8.5	400		33.0	砂	1974	12)
12004	PC	打撃(閉)	支			○			22.0	400		40.0	砂	1974	12)
12006	PC	打撃(閉)	支			○			8.2	400		50.0	砂れき	1974	12)
12008	PC	打撃(閉)	摩			○	○		30.0	500		15.0	砂	1974	12)
12009	PC	打撃(閉)	支		○	○			22.0	500		31.0	砂れき	1974	12)
12011	PC	打撃(閉)	支		○	○			22.0	500		31.0	砂れき	1974	12)
12012	PC	打撃(閉)	支		○	○			22.0	500		45.0	砂	1974	12)
12013	PC	打撃(閉)	摩			○			23.0	500		24.0	砂	1974	12)
12015	PC	打撃(閉)	摩			○			24.5	600		14.0	砂れき	1974	12)
12026	PC	打撃(閉)	摩			○			7.0	1000		18.0	砂れき	1974	12)
12029	PC	打撃(閉)	支			○			10.5	1000		16.0	砂	1974	12)
13001	場所打ち	場所打ち	支			○			19.3	510		50.0	砂	1974	12)
13002	場所打ち	場所打ち	支			○			23.0	510		33.0	砂	1974	12)
13003	場所打ち	場所打ち	支			○			36.0	600		30.0	砂れき	1974	12)
13004	場所打ち	場所打ち	摩			○			32.3	800		16.0	砂	1974	12)
13005	場所打ち	場所打ち	支			○			26.0	900		50.0	砂	1974	12)
13006	場所打ち	場所打ち	摩			○			16.2	1000		19.0	粘性土	1974	12)
13007	場所打ち	場所打ち	支			○			36.0	1000		50.0	砂	1974	12)
13008	場所打ち	場所打ち	支			○			34.3	1000		35.0	砂	1974	12)
13009	場所打ち	場所打ち	摩			○			20.0	1000		10.0	砂	1974	12)
13010	場所打ち	場所打ち	支			○			7.8	1000		50.0	砂れき	1974	12)
13011	場所打ち	場所打ち	支			○	○		18.8	1000		50.0	砂	1974	12)
13012	場所打ち	場所打ち	支			○	○		20.0	1000		50.0	砂れき	1974	12)
13013	場所打ち	場所打ち	摩			○			20.0	1000		17.0	粘性土	1974	12)
13014	場所打ち	場所打ち	支			○			36.0	1000		50.0	砂	1974	12)
13015	場所打ち	場所打ち	支			○			45.0	1016		50.0	砂れき	1974	12)
13016	場所打ち	場所打ち	支			○			10.0	1200		50.0	砂れき	1974	12)
13017	場所打ち	場所打ち	支			○			19.0	1200		50.0	砂れき	1974	12)
13018	場所打ち	場所打ち	支			○			33.0	1270		50.0	砂れき	1974	12)
14001	鋼管	打撃	支		○	○	○	○	79.5	1500		84.2	砂れき	2003	
14002	鋼管	打撃	支		○	○	○	○	92.0	1500		175.2	砂	2003	
14003	鋼管	打撃	支		○				67.0	800		81.4	砂	1989	
14004	鋼管	打撃	支				○		82.0	800		92.9	砂	1991	
14005	鋼管	打撃	支				○		82.9	800		160.1	砂	1991	
14006	鋼管	打撃	支				○		78.5	800		303.7	砂れき	1991	
14007	鋼管	打撃	支				○		77.6	800		50.0	砂	1991	
14008	鋼管	打撃	支				○		55.4	800		110.6	砂	1990	
14009	鋼管	打撃	支			○	○		64.6	800		73.3	砂	1990	
14010	鋼管	打撃	支				○		64.8	800		77.7	砂	1990	
14011	鋼管	打撃	支		○		○		73.0	800		95.2	砂	1991	
14012	鋼管	打撃	支				○		43.5	700		70.3	砂	1992	
14013	鋼管	打撃	支			○	○	○	51.0	1600		69.5	砂	1991	
14014	鋼管	打撃	支			○	○	○	57.1	1600		15.6	粘性土	1991	
14015	鋼管	打撃	支			○	○	○	62.0	2000		53.4	粘性土	1990	

参考文献

1) 福井次郎，西谷雅弘：杭の支持力，変形特性に関する研究，土木研究所資料，第 3836 号，2001. 9.
2) (財) 国土開発技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書　TBS 工法（鋼管杭・中掘拡大根固め工法），2002. 5.
3) (財) 国土開発技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書　FB9 工法（鋼管杭中掘先端拡大根固め工法），2004. 9.
4) (財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 先端翼付き回転貫入鋼管杭 つばさ杭，2003. 4.
5) (財) 国土開発技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書　NS-エコパイル工法（回転圧入鋼管杭工法），2004. 1.
6) (財) 国土開発技術研究センター：一般土木工法・技術審査証明報告書　HYSC 杭（鋼管ソイルセメント杭工法），2000. 12.
7) バイブロハンマ技術研究会：バイブロハンマ工法設計施工便覧，2003. 10.
8) (財) 国土開発技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書　ガンテツパイル（鋼管ソイルセメント杭工法），2006. 1.
9) (財) 国土開発技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書 KING 工法（鋼管中掘拡大根固め杭工法），2000. 10.
10) (財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 先端翼付き回転貫入鋼管杭　ジオウィング・パイル，2005. 9.
11) (財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 先端翼付き回転貫入鋼管杭　ジオウィング・パイルⅡ，2009. 2.
12) 駒田敬一，足立義雄，山川朝生，島崎一男，飯島均：鉛直載荷試験による単ぐいの極限支持力の推定，土木研究所資料，第 899 号，1974. 3.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4374 April 2018

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754