ISSN 0386－5878
土木研究所資料第3836号

土木研究所資料

杭の支持力、変形特性に関する研究

平成13年9月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎チーム

Copyright © (2001) 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、独立行政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、独立行政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3836号2001年9月

杭の支持力、変形特性に関する研究

構造物研究グループ（基礎）　上席研究員　福井　次郎
主任研究員　西谷　雅弘

要　旨

平成13年度に改訂が予定されている道路橋示方書には、プレボーリング杭、鋼管ソイルセメント杭及びバイブロハンマ打込み杭の設計・施工に関する規定が追加される予定である。そこで、それぞれの杭における支持力、変形特性を明らかにするために、これまでの載荷試験データ等のとりまとめを行った。また、既に規定されている場所打ち杭、中掘り杭についても、蓄積された載荷試験データに基づき、支持力、変形特性の分析を行った。

キーワード：杭基礎、打込み杭、場所打ち杭、中掘り杭、プレボーリング杭、鋼管ソイルセメント杭、バイブロハンマ打込み杭、既製杭、鋼管杭、ＰＨＣ杭、支持力特性、変形特性

目　次

第１章　序論 …… 1
1.1　研究の背景 …… 1
1.2　研究の目的 …… 1

第２章　新しい杭基礎工法の概要 …… 2
2.1　概要 …… 2
2.2　プレボーリング杭工法 …… 3
2.3　鋼管ソイルセメント杭工法 …… 6
2.4　バイブロハンマ打込み杭 …… 9
2.5　まとめ …… １１

第３章　支持力特性 …… １３
3.1　概要 …… １３
3.2　プレボーリング杭 …… １４
3.3　鋼管ソイルセメント杭工法 …… ３７
3.4　バイブロハンマ打込み杭 …… ４１
3.5　場所打ち杭工法 …… ４３
3.6　中掘り杭工法 …… ４７
3.7　まとめ …… ６２

第４章　変形特性 …… ６４
4.1　概要 …… ６４
4.2　杭頭鉛直バネ定数 …… ６５
4.3　まとめ …… ７５

第５章　結論 …… ７６

参考文献 …… ７７

第１章　序論

１．１　研究の背景

杭基礎の設計に用いられる支持力推定式は、数多くの現場で実施された載荷試験データに基づいて検討されたものである。平成８年度版の道路橋示方書（以降、「Ｈ８道示」と略す）には、打込み杭、場所打ち杭および中掘り杭についての検討成果が示されており、現在、杭基礎の設計に多く用いられている。

平成13年度に発刊が予定されている道路橋示方書（以降、「Ｈ13道示」と略す）の改訂作業にあたり、（社）日本道路協会が組織する下部構造小委員会の下に新技術ワーキングを設置し、信頼と実績が得られた杭基礎工法の規定化を目標として、検討が行われている。そこでは、新たな杭基礎工法として、バイブロハンマ打込み杭工法、プレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法が取り上げられている。また、これを機会に、各工法の支持力推定式の算出にあたっての考え方を整合させるべく、既に規定されている杭基礎工法においても、最近の載荷試験データを分析し、支持力推定式の見直しについて検討が行われている。

本資料は、上記の成果をとりまとめたものである。

１．２　研究の目的

本検討は、Ｈ13道示に規定を検討しているバイブロハンマ打込み杭工法、プレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法の支持力特性、変形特性を把握することを主な目的とするものである。

支持力特性については、載荷試験データを収集し、各工法ごとに、鉛直支持力と地盤強度との相関性を分析し、支持力推定式を提案することを目的とする。

変形特性としては、特に、鉛直方向バネ定数について検討を行う。これまで鉛直方向バネ定数は、杭種および工法ごとに異なるものとして扱われ、杭種および工法ごとの検討結果が道示に示されている。そこで、本検討においても、まず、杭種および工法ごとにその特性を分析することから始めるが、その後、従来の杭基礎工法も含めて、相互の比較検討を行い、推定精度のばらつき等を考慮したうえで、特性の類似した工法については、できる限り集約することを念頭に検討を行うことにした。

第２章　新しい杭基礎工法の概要

２．１　概要

杭には、図-2.1に示すように、多種多様な施工法がある。

Ｈ８道示においては、打込み杭工法、中掘り杭工法、場所打ち杭工法によって設置された杭の頭部をフーチングと剛結合することにより一体とする形式の基礎を杭基礎と定義されている。

Ｈ13道示の改訂作業にあたって、信頼と実績が得られた３工法、すなわち、バイブロハンマ打込み杭工法、プレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法を取り上げ、それらの設計・施工に関する規定を新たに盛り込むべく検討が行われている。これら３工法は、必ずしも新技術・新工法に該当するものではないが、載荷試験等の実績が蓄積され、下記に示すことが確認されてきたため、取り上げることにしたものである。

１）鉛直載荷試験および水平載荷試験の結果から、支持力特性が明らかである。ここで、支持力特性とは、鉛直方向に対しては極限支持力および沈下特性を、水平方向に対しては水平力～変位関係を示す。

２）杭と地盤の間にゆるみがなく、変位の小さい領域から地盤抵抗が確実に確保できる工法である。

３）杭体が十分な変形性能を有し、曲げ耐力およびせん断耐力の算定方法が、載荷試験結果より明らかである。

４）施工実績の蓄積とともに、施工管理手法が明らかとされており、所定の手法により、上記１）、２）および３）を確実に発揮することができる。

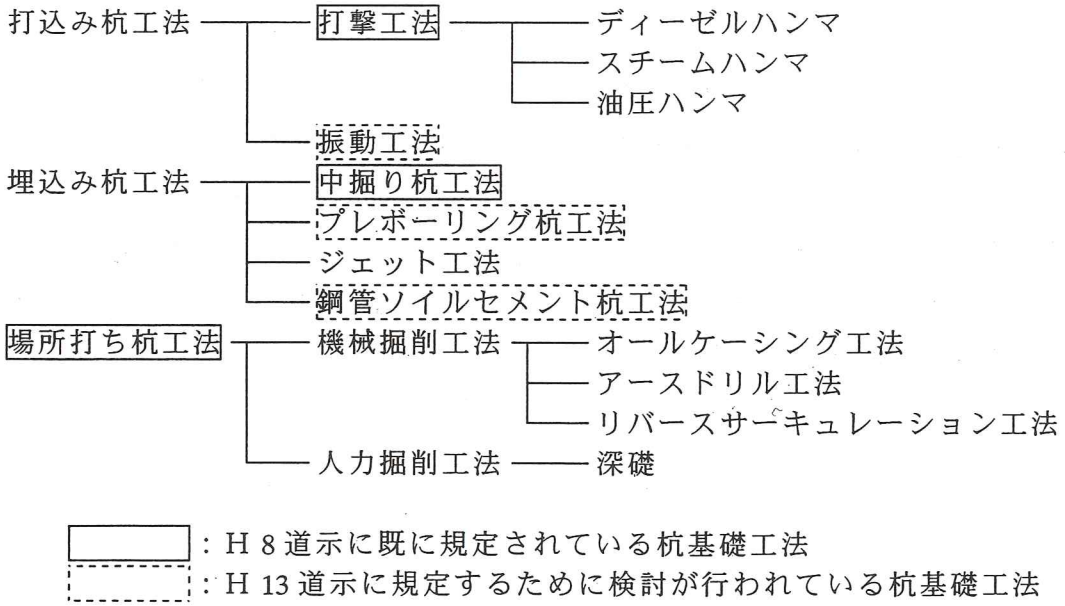


図-2.1　施工法による杭の分類

２．２　プレボーリング杭工法

プレボーリング杭工法は、図- 2.1 に示すように、埋込み杭工法に分類され、現在、多種多様な工法があるが、ここでは、掘削ビットおよびロッドで地盤を掘削し、根固め液および杭周固定液を注入した後、既製コンクリート杭を沈設する工法を検討対象とした。すなわち、プレボーリング杭工法のうち、掘削孔壁と杭体周面との空隙を確実に充填できる工法に限定した。表- 2.1 に、検討の対象とするプレボーリング杭工法（杭周固定液使用先端根固め工法）を示す。これらの工法は、いずれも、プレボーリング杭工法として、建設大臣認定を取得（平成 12 年 4 月現在）している。

表- 2.1 に示すとおり、工法の中には、杭先端根固め部を拡大する工法（「Ａ方法」と呼ぶ）と拡大径のまま最初から掘削する工法（「Ｂ方法」と呼ぶ）の２種類がある。その施工方法の概要は下記のとおりである。

１）Ａ方法

特殊オーガーロッド（各工法によって形状や機能が異なる）により、水または掘削液を注入しながら所定の深度まで掘削する。注入液を根固め液に切り換え、拡大ビットなどにより杭径以上の拡大根固め部を築造して拡大部に根固め液を充填する。引き続き杭周固定液を注入しながら特殊オーガーロッドを引き上げて掘削孔内に杭周固定液を充填する。掘削孔に杭を挿入し、杭の自重または杭に回転を与えることにより杭を所定の深度に定着させる。

２）Ｂ方法

特殊オーガーロッドにより、水または掘削液を注入しながら、拡大径と同径で所定の深度まで掘削した後、Ａ方法と同様に根固め液と杭周固定液の注入、杭の圧入および定着を行う。

図- 2.2 に、それぞれの施工方法を示す。なお、本プレボーリング杭工法には、杭径 300mm ～ 1000mm のＲＣ杭、ＰＨＣ杭およびＳＣ杭が用いられる。

Ｈ 8 道示には、プレボーリング杭工法に関し、「プレボーリング杭工法については、施工法も多種多様であり、道路橋における過去の載荷試験例も少ないことから、一律に評価するには至っていない。したがって、採用にあたっては地盤条件と施工条件を考慮し適切な工法を選定するとともに、支持機構については載荷試験等により別途検討するのがよい。」と解説されている。しかし、今回の検討では、杭先端を支持層中で根固め液の充填された根固め部に定着することによって杭先端支持力を発現し、杭周固定液の使用によって杭周面摩擦力を発現する工法に限定しており、現在では、後述のように、建築分野等において採用事例数が多く、また、載荷試験事例も多数蓄積されてきた。

プレボーリング杭工法には、

１）従来工法より小径の杭径φ 300mm 程度の既製杭から適用が可能である。

２）比較的大きな先端支持力、周面摩擦力を確保することができる。

などの特徴がある。

なお、プレボーリング杭工法の実績は、下記のとおりである。

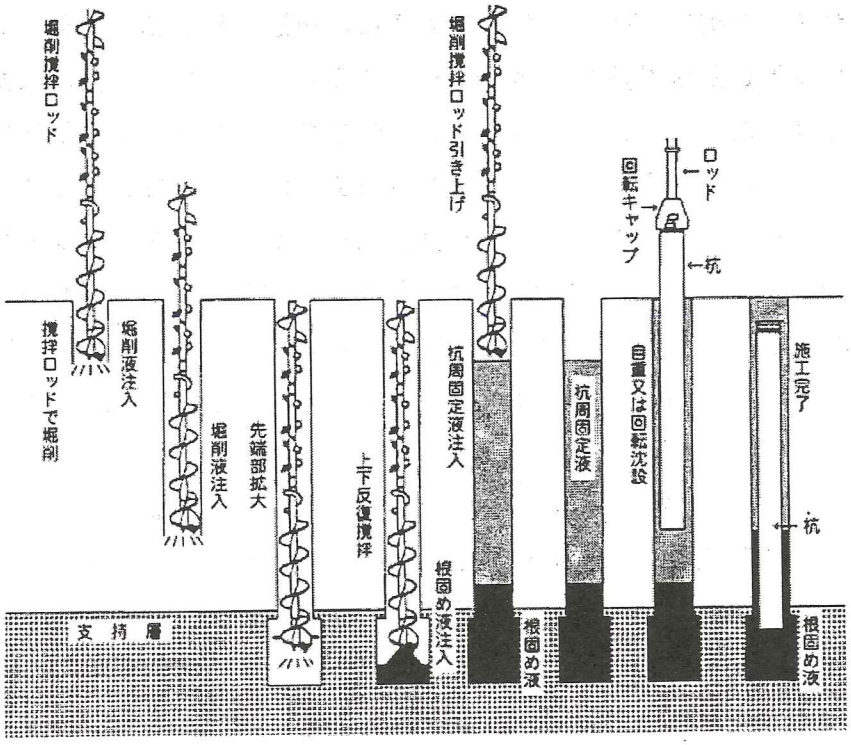
1）平成 10 年度におけるプレボーリング杭工法（建設大臣認定工法：プレボーリング拡大根固め工法）の適用実績は、全国において、既製コンクリート杭全使用量の約 40 %である。なお、既製コンクリート杭の全使用量の約 83 %は建築構造物の基礎に対するものである。

2）プレボーリング杭工法が、道路橋基礎として適用される例はこれまでほとんどなく、実績は不明である。土木構造物の基礎（鉄道・道路、上下水道、河川、農林他）に使用される既製コンクリート杭の実績は、全使用量の約17 %である。

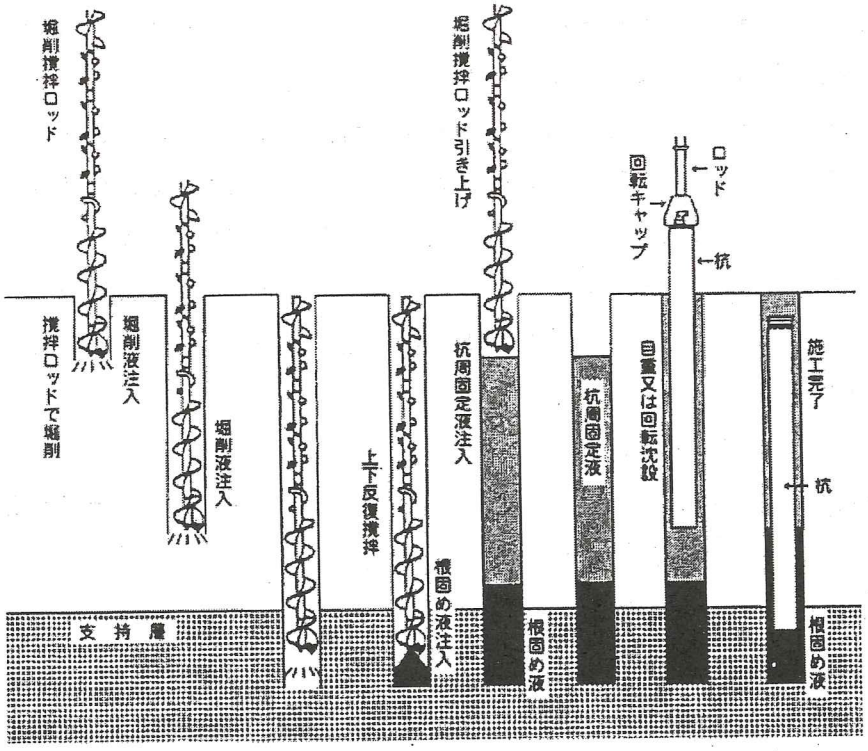
表- 2.1　検討の対象としたプレボーリング杭工法の一覧

工法名		ﾆｰﾃﾞｨﾝｸﾞ	F．I．	RODEX	BRB	ケムン	アトラス	BESTEX
掘削工程	掘削方法	ｵｰｶﾞｰﾛｯﾄﾞ先端より水を噴出しながらﾛｯﾄﾞを回転	ｵｰｶﾞｰﾛｯﾄﾞ先端より水を噴出しながらﾛｯﾄﾞを回転	ｵｰｶﾞｰﾛｯﾄﾞ先端より水を噴出しながらﾛｯﾄﾞを回転	ｵｰｶﾞｰ（正逆巻き）先端より水を噴出しながら回転	ｵｰｶﾞｰ先端より掘削液を噴出しながら回転	ｵｰｶﾞｰﾛｯﾄﾞ先端より水を噴出しながらﾛｯﾄﾞを回転	ｵｰｶﾞｰﾛｯﾄﾞ先端より掘削液を噴出しながらﾛｯﾄﾞを回転
	掘削径（mm）	D＋30	D＋30	D＋50	D＋50	D＋100	D＋100	D＋100～140
	杭周固定液 σ_{28} 強度（N/mm^2）	0.5 以上	0.5 以上	0.5 以上	0.5 以上	0.5 以上	0.5 以上	0.5 以上
杭先端拡大工程	拡大方法	ﾛｯﾄﾞを逆回転して拡大し球根築造	ﾛｯﾄﾞを逆回転してﾋﾞｯﾄ翼を拡大し球根築造	ﾛｯﾄﾞを逆回転して拡大し球根築造	ﾛｯﾄﾞを逆回転して拡大し球根築造	－	－	－
	径（mm）	D＋150～200	D＋200	D＋150～200	D＋150～200	D＋100	D＋100	D＋100～140
	根固め液 W／C（%）	50～60	65	60	60	60	60	60
	根固め液 σ_{28} 強度（N/mm^2）	20 以上	20 以上	20 以上	20 以上	20 以上	20 以上	20 以上

注）ニーディング工法にはＮＥＷニーディング工法を含む。



（１）Ａ方法の施工手順例



（２）Ｂ方法の施工手順例

図-2.2　プレボーリング杭の施工法

２．３　鋼管ソイルセメント杭工法

鋼管ソイルセメント杭は、図- 2.1 に示すように、埋込み杭工法に分類され、原地盤にセメントミルクを注入し混合攪拌して築造するソイルセメント柱と、同時または後から沈設される外面突起付き鋼管（リブ付き鋼管）から構成される杭である。鋼管ソイルセメント杭の概要を図- 2.3 に示す。鋼管ソイルセメント杭工法においては、ソイルセメント柱径は 700mm ～ 1500mm 程度、鋼管径は 500mm ～ 1200mm 程度、ソイルセメント柱の片側のかぶりは 100mm ～ 200mm 程度が通常の範囲である。また、杭長は、約 70m 程度の実績がある。外面突起付き鋼管は、図- 2.4 に示すような仕様が標準とされている。突起形状は、高さ 2.5mm および間隔 40mm、また、鋼管軸直角方向に対する突起の角度は 40 ° 程度以下が標準とされている。

鋼管ソイルセメント杭の施工方法としては、次の２工法がある。

１）拡開・縮小可能な掘削・攪拌翼を有する特殊なオーガーヘッドを鋼管先端に配置し、ヘッド先端からセメントミルクを吐出して地盤と混合攪拌しながらソイルセメント柱を造成し、同時に鋼管を回転圧入により埋設して築造する方法（同時沈設方式。代表例：ガンテツパイル工法（Ａ工法））。

２）セメントミルク注入量相当の全部または一部の地盤を先行掘削により排土した後、セメントミルクを注入しながら正逆回転攪拌翼を用いて地盤を掘削攪拌することによりソイルセメント柱を造成した後、ソイルセメントがまだ固まらないうちに鋼管を建て込み埋設して築造する方法（後沈設方式。代表例：ＨＹＳＣ工法（Ｂ工法））。

図- 2.5 に、Ａ工法およびＢ工法の施工手順を示す。

Ａ工法およびＢ工法とも、（財）国土開発技術研究センターの一般土木工法の技術審査証明を取得しており、その適用範囲全般にわたり、鉛直支持力特性や水平抵抗特性が明らかにされている。また、これらの工法では、施工手順の改良や各種データの蓄積も継続的に行われ、その成果は技術審査証明に追加・更新されてきた。これら両工法を統合した設計・施工マニュアルとして、日本道路公団名古屋建設局の「鋼管ソイルセメント杭設計、施工指針（案）」がある。

鋼管ソイルセメント杭工法には、

１）大きな支持力が得られるため、杭径の小径化や杭本数の削減、その結果として、フーチングのコンパクト化が可能である。

２）低振動・低騒音の工法である。

３）発生土量は杭体積の 20 %～ 40 %程度と少なく、環境に及ぼす影響は少ない。

４）原地盤に直接セメントミルクを注入・攪拌するため、被圧水頭をソイルセメント柱重量にて抑えながら施工できる。

などの特徴がある。

平成 13 年 9 月現在、道路橋基礎、鉄道橋基礎、擁壁基礎、水門基礎、建築物基礎など

に 150 程度の実績がある。

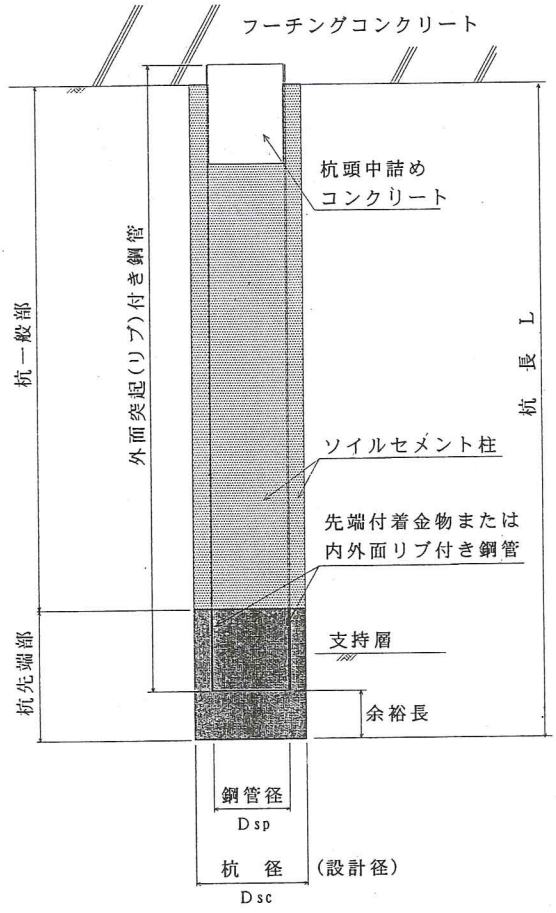


図- 2.3 鋼管ソイルセメント杭の概要

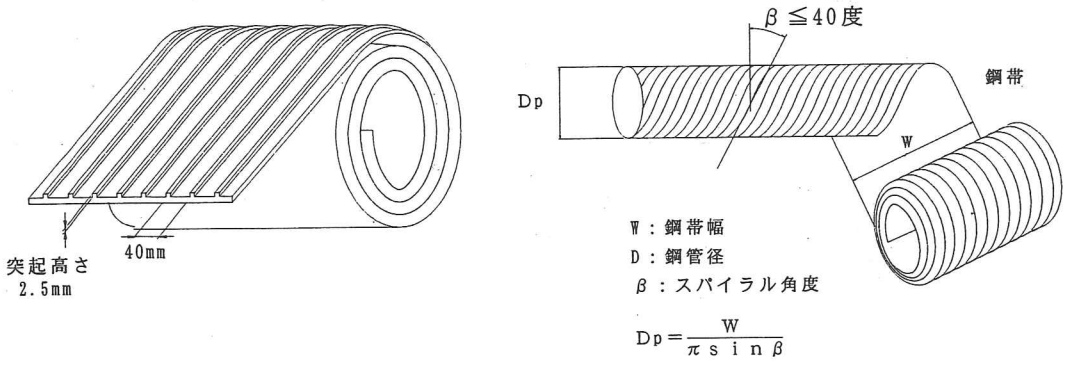
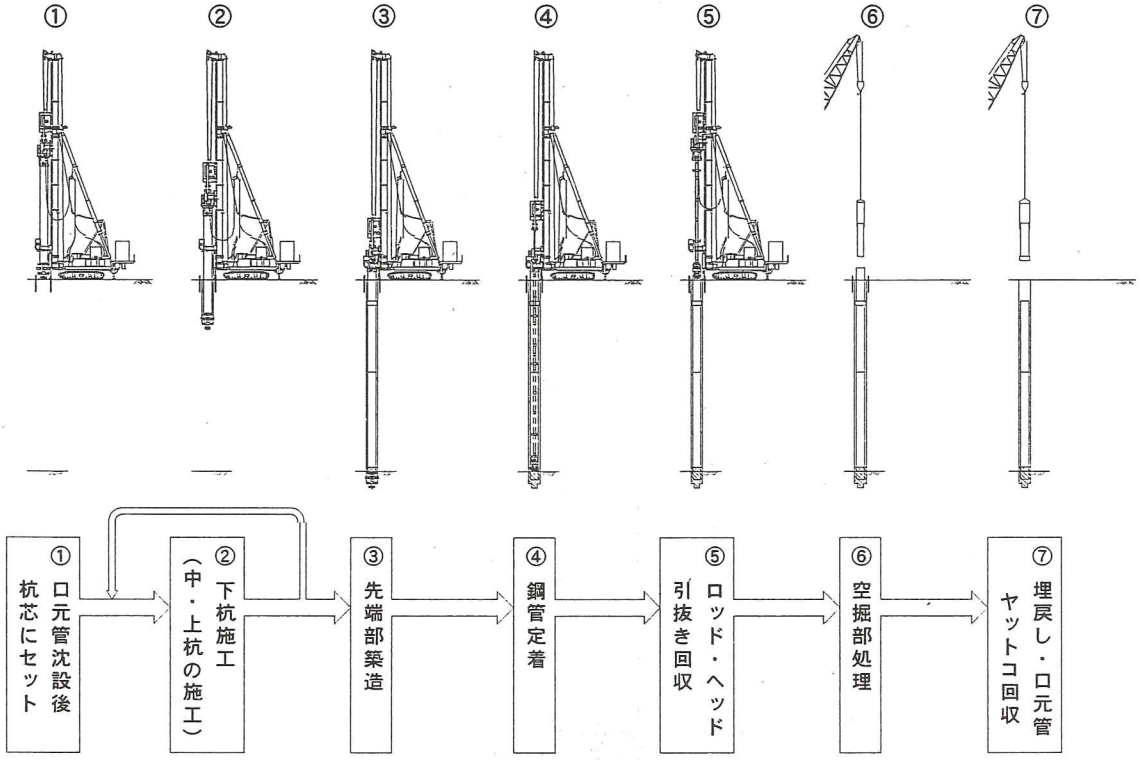
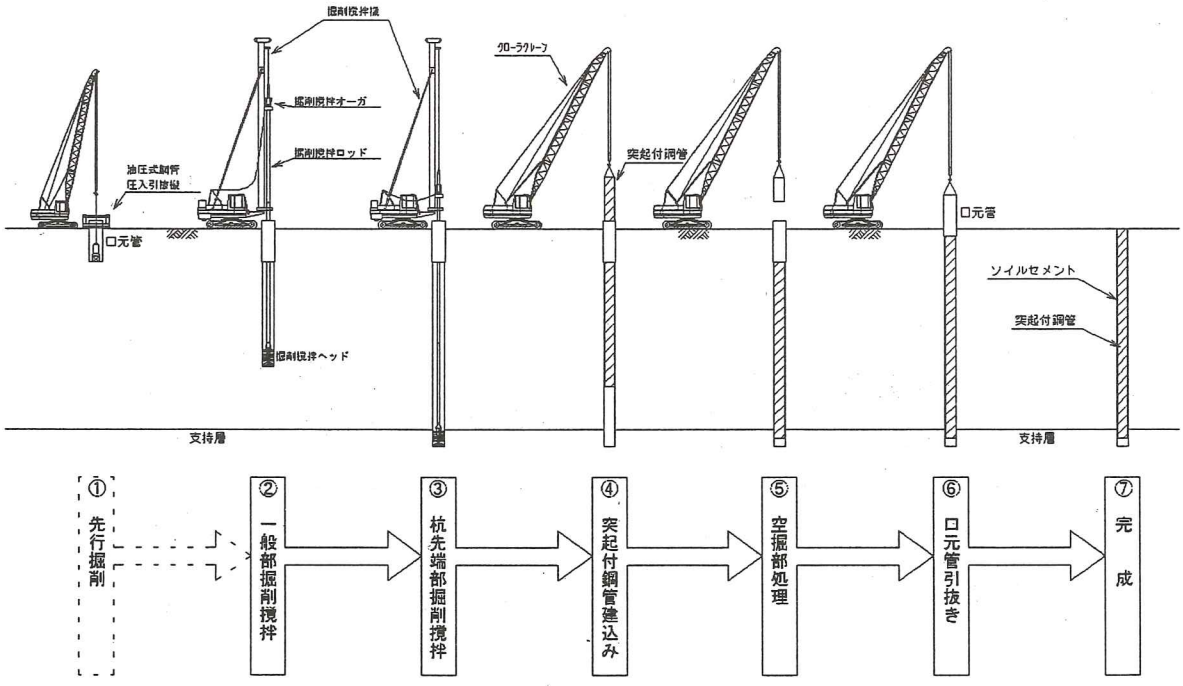


図- 2.4 外面突起付き鋼管（リブ付き鋼管）の概要



（１）Ａ工法の施工手順例



（２）Ｂ工法の施工手順例

図-2.5　鋼管ソイルセメント杭の施工方法

２．４　バイブロハンマ打込み杭

バイブロハンマ工法は、機械の上下運動から発生する振動エネルギーにより、杭先端の地盤抵抗および杭周面の摩擦抵抗を一時的に低減し、杭を貫入させる工法である。バイブロハンマ工法の施工図を図- 2.6 に示す

バイブロハンマを用いた振動打ち込み工法は、バイブロハンマの大型化に伴い、鋼矢板の施工だけではなく、鋼管杭や鋼管矢板の施工にも広く利用されている。

図- 2.1 に示すように、バイブロハンマ打込み杭工法は、打撃工法とともに打込み杭工法に分類される。ここで検討の対象としたバイブロハンマ打込み杭工法は、バイブロハンマを用いて鋼管杭を所定の深さまで打込む工法であり、ウォータージェットを併用しないものである。

バイブロハンマ打込み杭工法には、下記に示すような特徴を有する。

１）施工設備と施工手順が簡易であるため、利便性と効率的な施工による経済性に優れ、工費縮減に有効である。

２）振動・騒音が比較的小さい。

施工時の騒音測定によると、バイブロハンマ打設位置から 30 m程度離れると騒音や振動に対する規制値以下となることが確認されている。3 箇所の現場における騒音、振動の測定結果を図- 2.7 および 2.8 に示す。

３）河川・港湾付近の水際の施工において仮設工を省力化できる。したがって、工期・工費の縮減が可能である。

バイブロハンマ打止め時の管理方法は、杭の根入れ長さ、杭の貫入速度、バイブロハンマのモータ出力、杭の発生振幅、動的支持力などを考慮し、総合的に判断して打止める必要がある。なお、動的支持力に関しては、打撃工法と同様な打止め管理式が提案されているが、その結果だけではなく、他の打止め条件を総合的に検討したうえで打止める必要がある。

バイブロハンマ打込み杭工法を適用した実績は、平成 11 年度末現在、橋梁基礎で 10 例、桟橋基礎で 21 例、岸壁基礎・その他で 20 例程度ある。

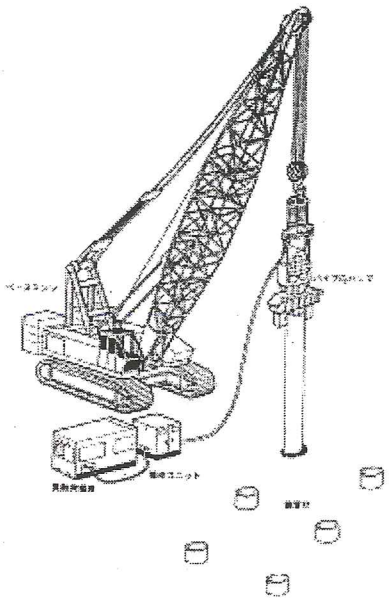


図- 2.6　施工図

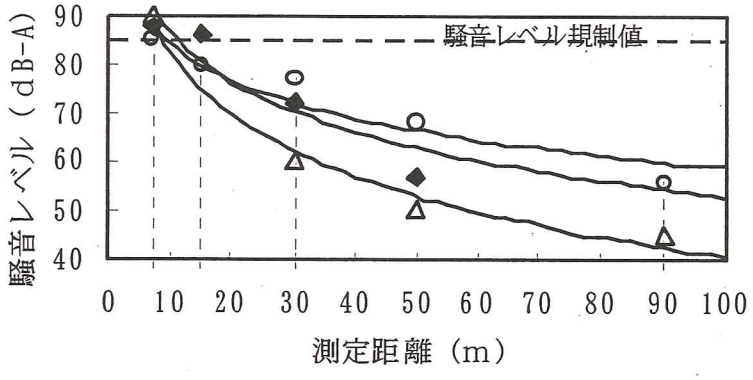


図- 2.7　騒音測定結果

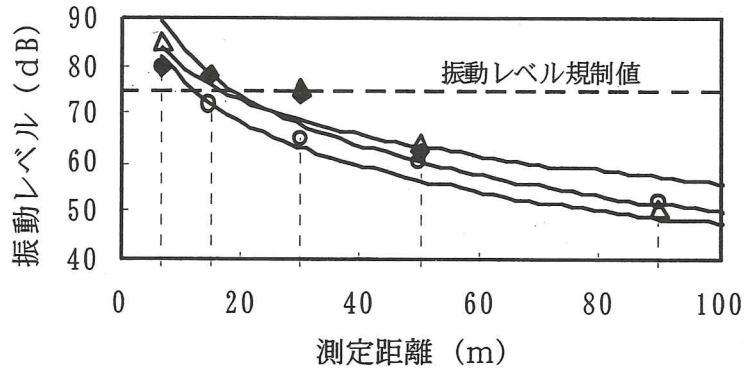


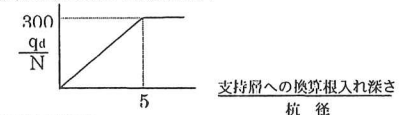
図- 2.8　振動測定結果

２．５　まとめ

Ｈ 13 道示の改訂作業にあたり規定化の対象とした新しい杭基礎工法（バイブロハンマ打込み杭工法、プレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法）の概要を表- 2.2 に示す。

３工法とも、載荷試験データ等の蓄積に伴い、支持力特性、変形特性等が明らかとされてきており、規定化に必要な要件は十分整っているものと判断できる。

表-2.2　新しい杭基礎工法の概要

項　目			鋼管ソイルセメント杭工法	プレボーリング杭工法 （杭周固定液使用先端根固め杭工法）	バイブロハンマ打込み杭工法
工法概要			原地盤中にセメントミルクを混合・撹拌しながら造成した固化体（ソイルセメント柱）と外面突起付鋼管（リブ付き鋼管）との合成杭を築造する工法である。固化体を造成しながら鋼管を挿入していく工法と固化体を造成した後鋼管を挿入する工法がある。 対象工法　２工法	アースオーガやロッドなどを用いて、あらかじめ地盤中の所定深さまで掘削し、根固め部を築造し、杭周固定液を注入しながらロッドを引き上げた後、杭を挿入し根固め部に杭先端を定着させる工法である。 対象工法　７工法	バイブロハンマにより支持層まで鋼管杭を打設する工法。ウォータジェットを併用しないものとする。
工法の特徴			低振動・低騒音の工法で、発生残土量が少なく、環境に配慮した工法である。	低振動・低騒音の工法で、発生残土量が少ない。小径の既製杭でも適用でき、適用杭径の範囲が広い。	振動・騒音が比較的小さい。また、仮設工が省略でき、特に、水際での施工が容易。
1	鉛直載荷試験		軸力分布把握可能な載荷試験１３例 先端　砂　：　６例　／　砂礫　７例 周面　砂系：２３層　／　粘性系：２７層（うちｃ値(qu/2)測定　１３例）	軸力分布把握可能な載荷試験４７例（うち摩擦杭５例） 先端　砂　：　２７例　／　砂礫　：１７例 粘性土：　３例 周面　砂質系：　２７層　／　粘性系：２０層 その他　載荷試験例全１３９例	軸力分布把握可能な載荷試験９例（摩擦のみ２例） 先端　砂　：　４例　／　砂礫　：　３例 周面　砂質系：１６層　／　粘性系：１６層
2	鉛直支持力算定式		鉛直載荷試験データより、固化体の外径を設計径として評価 ①杭先端極限支持力度(kN/m²) 砂：150N　／　砂礫：200N ②周面摩擦力度(kN/m²) 砂：10N（≦200）　／　粘性土：cor10N（≦200）	鉛直載荷試験データより、杭の外径を設計径として評価 ①杭先端極限支持力度(kN/m²) 砂：150N　／　砂礫：200N ②周面摩擦力度(kN/m²) 砂：5N（≦150）　／　粘性土：cor10N（≦100）	鉛直載荷試験データより、打撃工法と同等と評価 ①杭先端極限支持力度(kN/m²)  ②周面摩擦力 砂：2N（≦100）　／　粘性土：Cor10N（≦150）
3	鉛直方向バネ定数		載荷試験データより鋼管と固化体の合成で評価	載荷試験データより評価	載荷試験データより評価
4	水平載荷試験		水平載荷試験６例【φ800,1000,1100,1200,1400】	水平載荷試験３例【φ350(2),600】	水平載荷試験２例【φ800(2)】
5	水平方向バネ定数		水平載荷試験データより、固化体の外径を設計径として評価	杭外径を設計径として評価	杭外径を設計径と評価
6	公的機関の認証（技術審査制度、委員会等での承認）		①Ａ工法、Ｂ工法とも（財）国土開発技術研究センターの技術審査証明を取得 ②日本道路公団の設計・施工指針（案）	７工法は建築における建設大臣認定工法	仮設用途としては、「道路土工　仮設構造物設計指針(H11.3)」に支持力記述。先端：打撃と同等、周面：先端×0.9の支持力
7	施工管理手法		（財）国土開発技術研究センターの技術審査証明資料 Ａ工法、Ｂ工法を統合した日本道路公団設計・施工指針（案）	建築における建設大臣認定で規定	①バイブロモータ出力（電流、電圧）、②杭振幅の変化、③打ち止め管理式等により支持層を確認。
8	実績	橋梁基礎	橋梁基礎　１００件程度（Ｈ１３年９月）	――――――	橋梁基礎　６件
		その他	水門基礎、建築物基礎　５０件程度（Ｈ１３年９月）	建築物基礎では多数（既製ｺﾝｸﾘｰﾄ杭の 40％）	桟橋、建築物基礎で多数

第３章　支持力特性

３．１　概要

本章では、各杭基礎工法の支持力推定式を算出することを目的に検討を行う。

杭の極限支持力は、一般に式(3.1) に示すように、第一項の先端支持力と第二項の周面摩擦力の和で表される。

$$R_u = q_d \cdot A + U \cdot \Sigma l_i f_i \qquad (3.1)$$

ここに、R_u ：地盤から決まる杭の極限支持力（kN）

A ：杭先端面積（m^2）

q_d ：杭先端で支持する単位面積あたりの極限支持力度（kN/m^2）

U ：杭の周長（m）

l_i ：周面摩擦力を考慮する層の層厚（m）

f_i ：周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度（kN/m^2）

ここで、先端の極限支持力度q_dおよび最大周面摩擦力度f_iは、それぞれ、地盤の強度を表す指標と相関をとって表される。ここで、指標となる地盤の強度は、砂質土では標準貫入試験のＮ値、粘性土では粘着力ｃ（kN/m^2）またはＮ値が用いられている。本検討では、各杭基礎工法において、Ｎ値とq_dおよびf_iとの相関を分析する。

Ｈ８道示では、表- 3.1 のように、各杭基礎工法のq_dおよびf_iが示されている。なお、中掘り杭工法の杭先端の極限支持力度q_dは、セメントミルク噴出攪拌方式の推定式である。

表- 3.1　支持力推定式一覧

			Ｈ８道示（kN/m^2）
打込み杭	先端 q_d	砂質土	300N（N ≦ 40）
		粘性土	
	周面 f_i	砂質土	2N（≦ 100）
		粘性土	c または 10N （≦ 150）
場所打ち杭	先端 q_d	砂質土	3,000（N ≧ 30）
		粘性土	3 q_u
	周面 f_i	砂質土	5N（≦ 200）
		粘性土	c または 10N （≦ 150）
中掘り杭	先端 q_d	砂質土	150N（≦ 7,500）
		砂礫土	200N（≦ 10,000）
	周面 f_i	砂質土	N（≦ 50）
		粘性土	0.5c または 5N （≦ 100）

本検討にあたって、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法およびバイブロハンマ打込み杭工法については、これまでに蓄積された載荷試験データを基に、先端の極限支持力度および最大周面摩擦力度について、その特性を把握した。

また、場所打ち杭工法については、これまでに蓄積された載荷試験データを基に、砂質地盤における先端の極限支持力度の再評価を試みた。

さらに、中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）については、これまでに蓄積された載荷試験データを基に、先端の極限支持力度および最大周面摩擦力度の再評価を試みた。

Ｈ８道示に示される各工法（打込み杭工法、場所打ち杭工法および中掘り杭工法）の支持力特性については、「単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究」（建設省土木研究所資料、第 2919 号、1991 年 1 月）にまとめられている。本検討における載荷試験データの整理、分析は、下記に示すように、上記土研資料の考え方に準じて行うものとし、従来工法と新工法の比較、従来工法の再評価が行えるように配慮した。

１）杭先端の極限支持力度

杭先端の極限支持力度は、次により求めた先端支持力より算定する。

極限支持力：①　実測R_{u10}（杭頭沈下量が杭径Ｄの 10 %時における杭頭荷重）

②　実測R_{u10}がない場合には、最大荷重P_{max}

ここで、杭頭沈下量が杭径Ｄの 10 %時における荷重とは、荷重～沈下曲線から杭頭沈下量が杭径Ｄの 10 %になる荷重の値を採用した。

２）最大周面摩擦力度

各地層の周面摩擦力度f_iと杭と地盤の相対沈下量Ｓの関係を示すf_i～Ｓ曲線において、ピークを有するもの、または、f_iが収束しているとみなしうるデータを採用した。

３．２　プレボーリング杭

プレボーリング杭の施工法は多種多様であるが、先端処理方法によって、（ａ）根固め、（ｂ）拡大根固めおよび（ｃ）最終打撃の 3 つに分類される。ここで対象とする工法は、２．１の１）～４）を満足する工法であり、（ｂ）に分類される表- 2.1 に示す７工法である。

ここで、土研資料「単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究（第 2919 号）」には、その時点で収集されたプレボーリング杭工法（セメントミルク工法、ケムン工法、ＲＯＤＥＸ工法、ニーディング工法およびネオパイル工法）における支持力特性の検討結果が示されている。今回検討対象の工法とは一部異なるものである。

（１）先端極限支持力度q_d～Ｎ値の関係

プレボーリング杭工法における杭先端の極限支持力度q_d～Ｎ値の関係を、地盤別（砂

地盤および砂礫地盤）および工法別に、図- 3.1 ～ 3.15 に示す。図に示すＮ値は杭先端位置のＮ値である。図中には、比較のために、Ｈ８道示における中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）の支持力推定式を点線で示す。また、図- 3.16 ～ 3.19 は、プレボーリング杭工法に用いるＰＨＣ杭の杭径を小径（φ 300mm ～ 600mm）および大径（φ 700mm ～ 1000mm）に分け、地盤別（砂地盤および砂礫地盤）にｑ$_d$～Ｎ値の関係を表したものである。

各試験値とも、Ｈ８道示の中掘り杭工法の支持力推定式（実線）を十分上回っていることが確認できる。また、工法によるｑ$_d$の違いもほとんどないものと考えられる。検討対象としたプレボーリング杭工法における先端処理方法は中掘り杭工法のそれとほぼ同様であることから、砂層および砂礫層におけるプレボーリング杭工法の杭先端の極限支持力度の推定式は、中掘り杭工法のそれと同等としてよいものと考えられる。なお、図- 3.1 ～ 3.19 に示すように、載荷試験データは支持力推定式を十分上回っているが、杭先端の極限支持力度に関しては、杭先端面積が限られていること、地盤強度の推定にあたってばらつきが大きいことなどを考慮し、載荷試験データの下限値となるように支持力推定式を設定するのが妥当と考えられる。また、図- 3.16 ～ 3.19 に示すように、ＰＨＣ杭の杭径による杭先端の極限支持力度への影響はほとんどない。したがって、プレボーリング杭工法の適用杭径は、φ 300mm ～ 1000mm として、特に問題はないと考えられる。ただし、これをこえるようなさらに大径の既製コンクリート杭を用いてプレボーリング杭工法を適用する場合には、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

以上のことから、プレボーリング杭工法における杭先端の極限支持力度の推定式として、次式が提案できるものと考えられる。

砂層の場合　：$q_d = 150\,N$（≦ 7,500）（kN/m^2）

砂礫層の場合：$q_d = 200\,N$（≦ 10,000）（kN/m^2）

ここに、Ｎは杭先端地盤における標準貫入試験のＮ値である。

土研資料「単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究（第 2919 号）」に示されているプレボーリング杭のｑ$_d$～Ｎ値の関係を図- 3.20 に示す。土研資料には、データ数が少なく、施工法に対してデータのばらつきが大きいと記述されている。また、先端処理方法が「根固め」のセメントミルク工法（ＣＭ工法）は、場所打ち杭のｑ$_d$以下であり、工法によっては十分な支持力が得られないと記述されている。

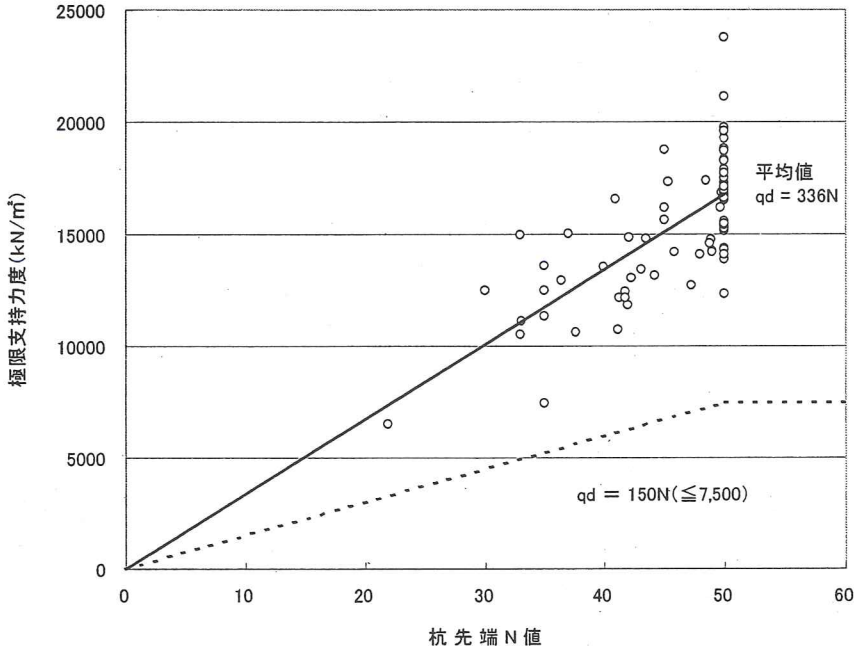


図- 3.1　プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

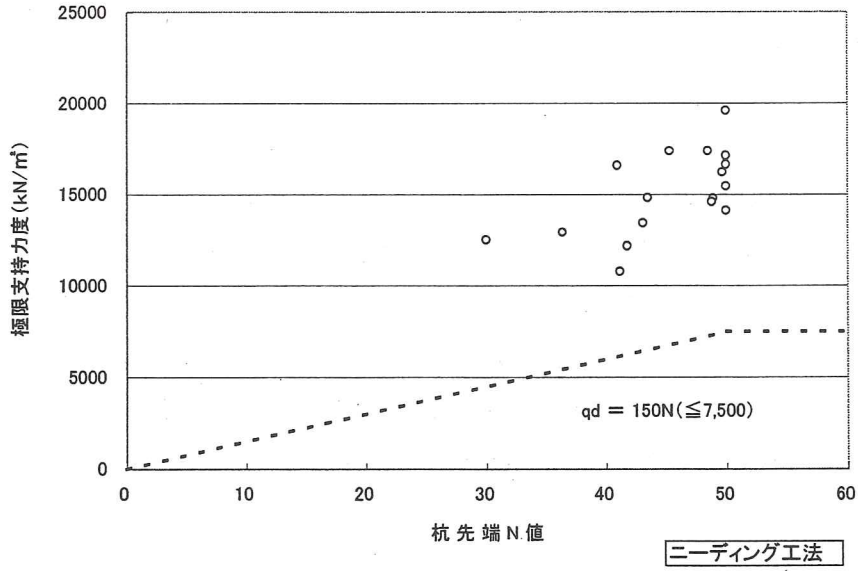


図- 3.2 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

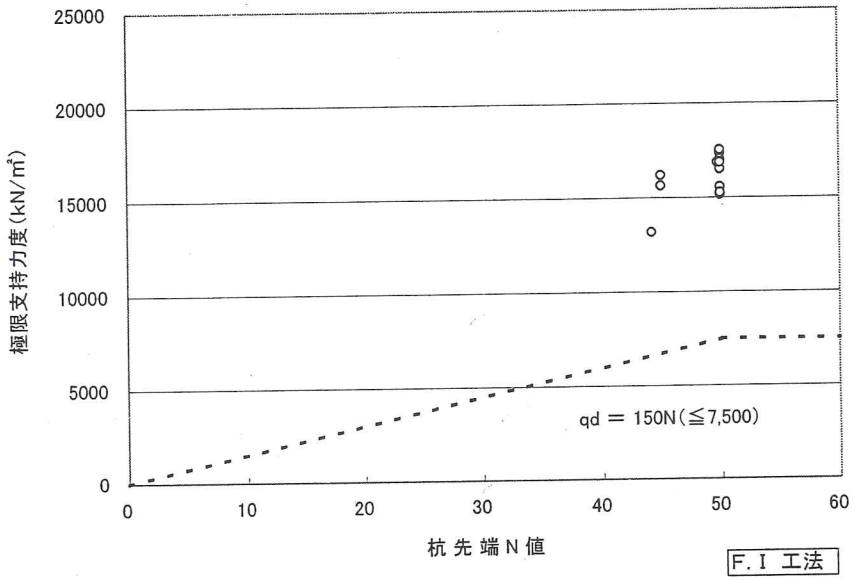


図- 3.3 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

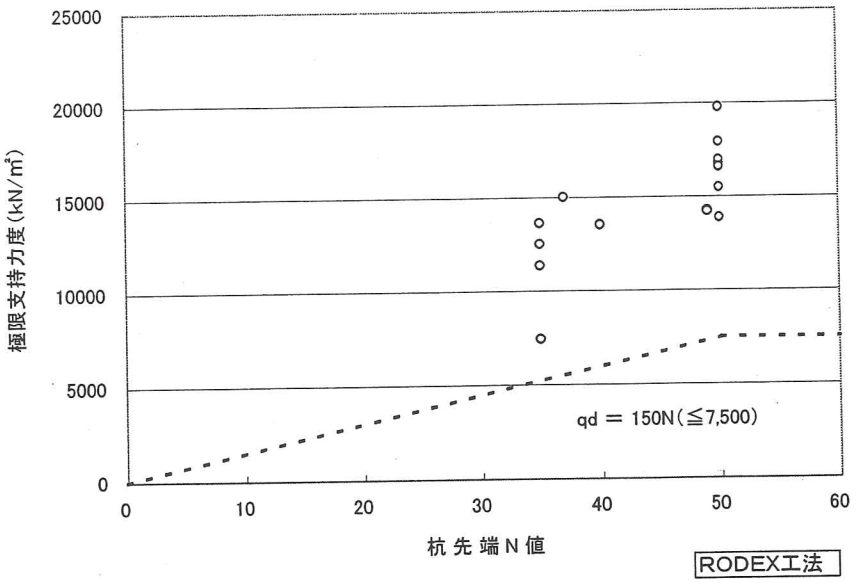


図- 3.4 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

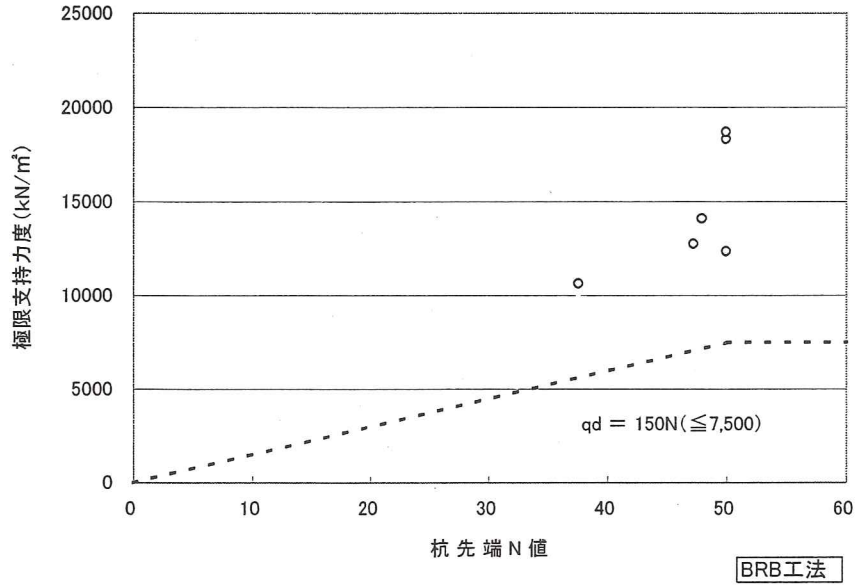


図- 3.5 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

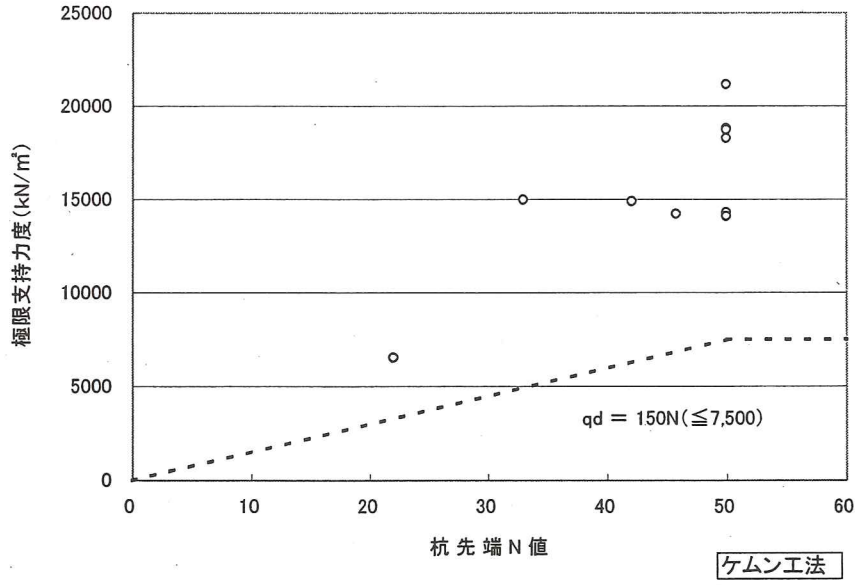


図- 3.6 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

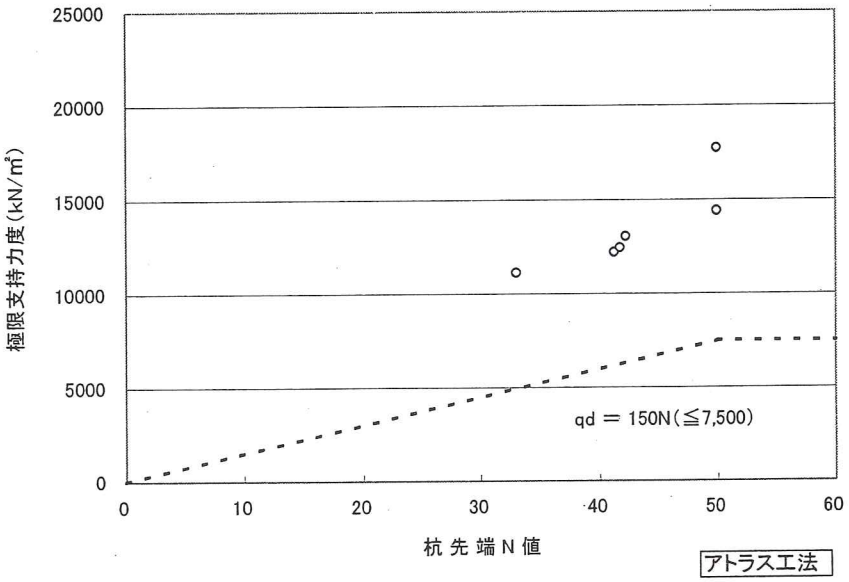


図-3.7 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

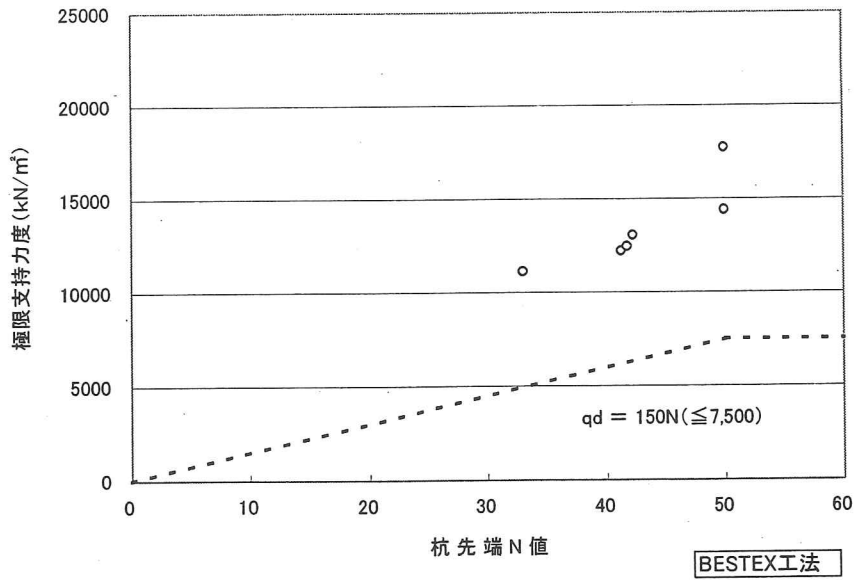


図- 3.8 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

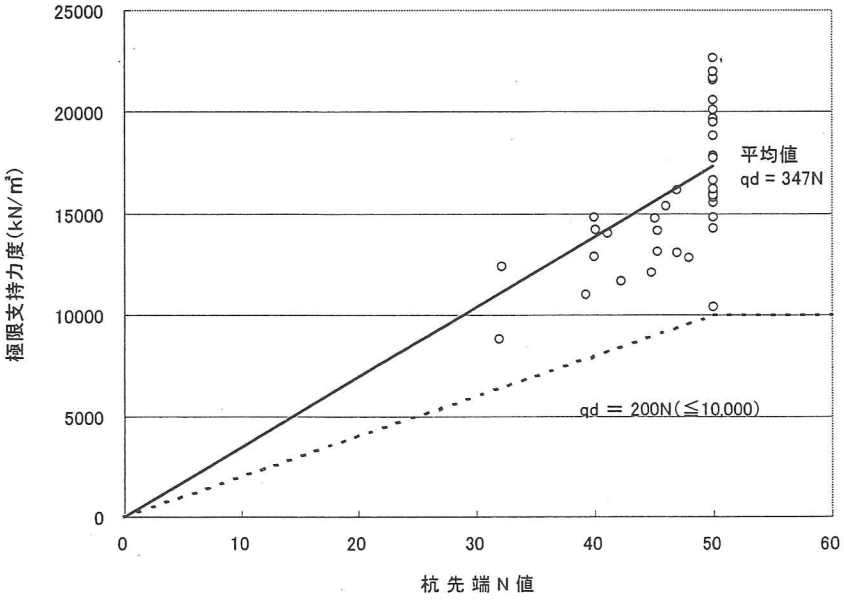


図- 3.9 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

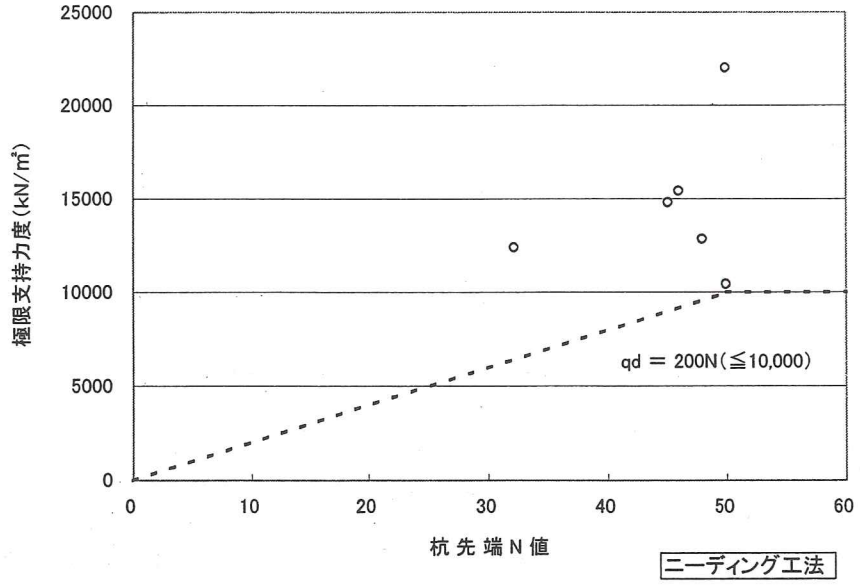


図- 3.10 プレボーリング杭の極限支持力度と杭先端N値の関係(砂礫層)

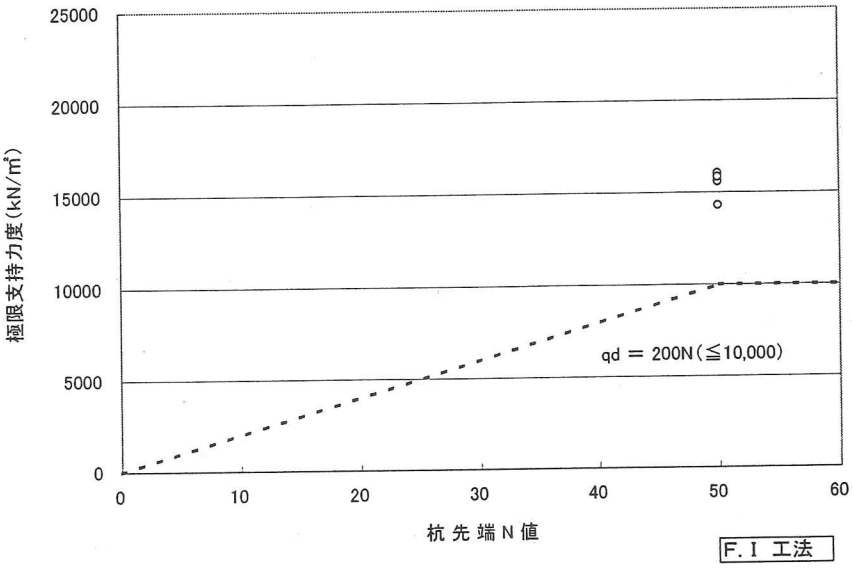


図- 3.11 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

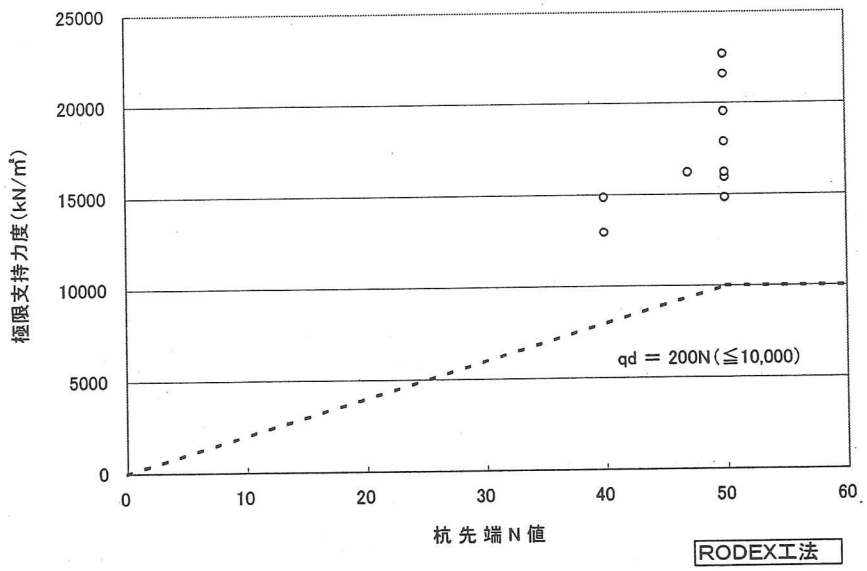


図- 3.12 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

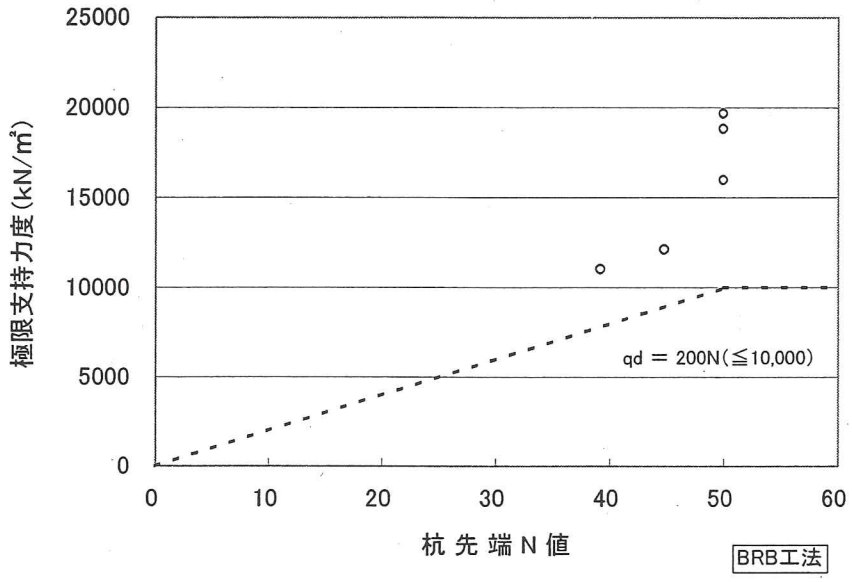


図-3.13 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

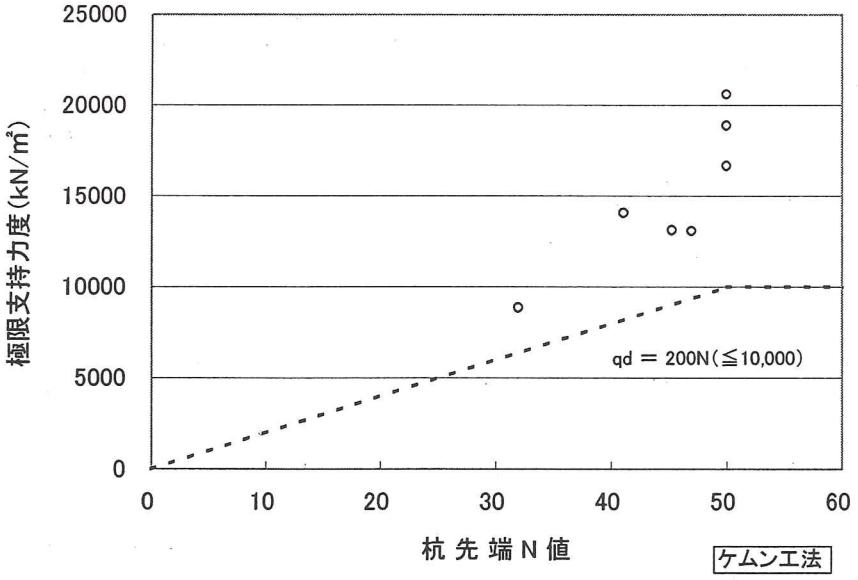


図-3.14 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

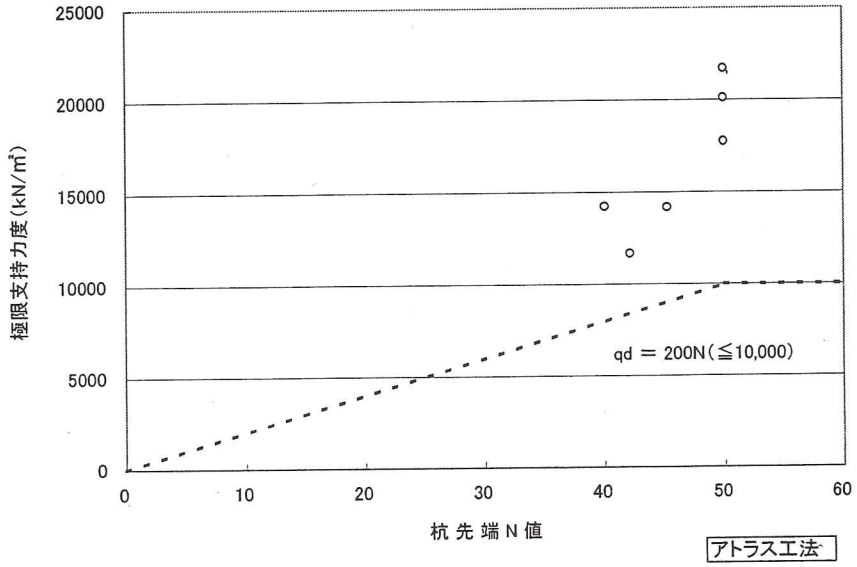


図-3.15 プレボーリング杭の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

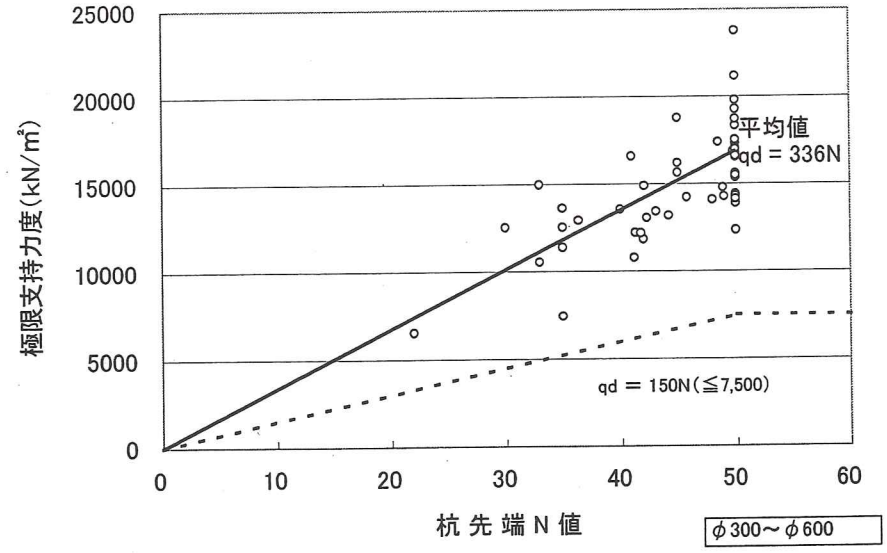


図-3.16 プレボーリング杭(小径)の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

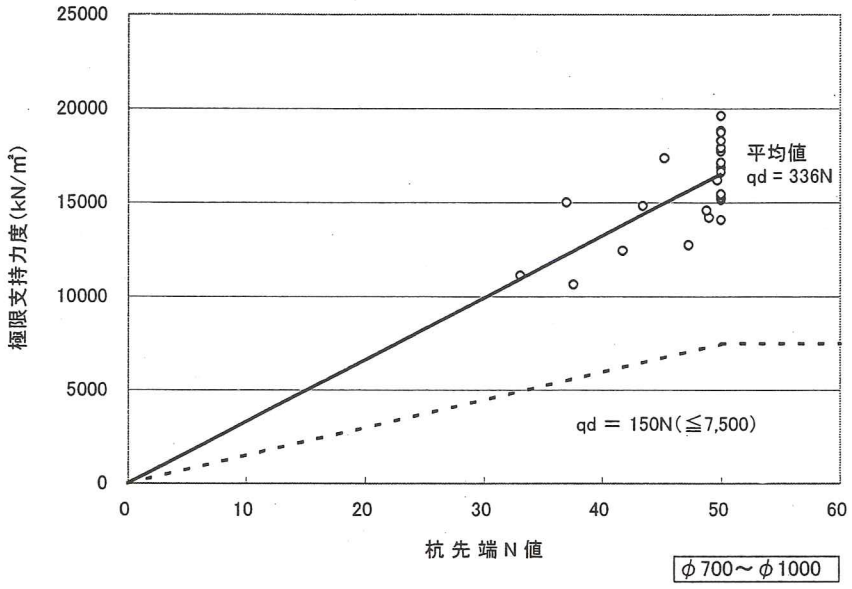


図-3.17 プレボーリング杭(大径)の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂層)

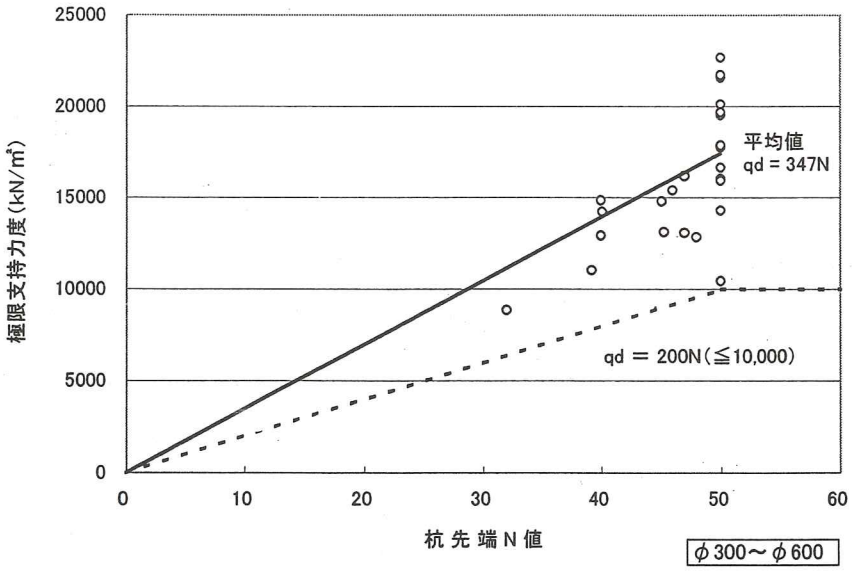


図-3.18 プレボーリング杭(小径)の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

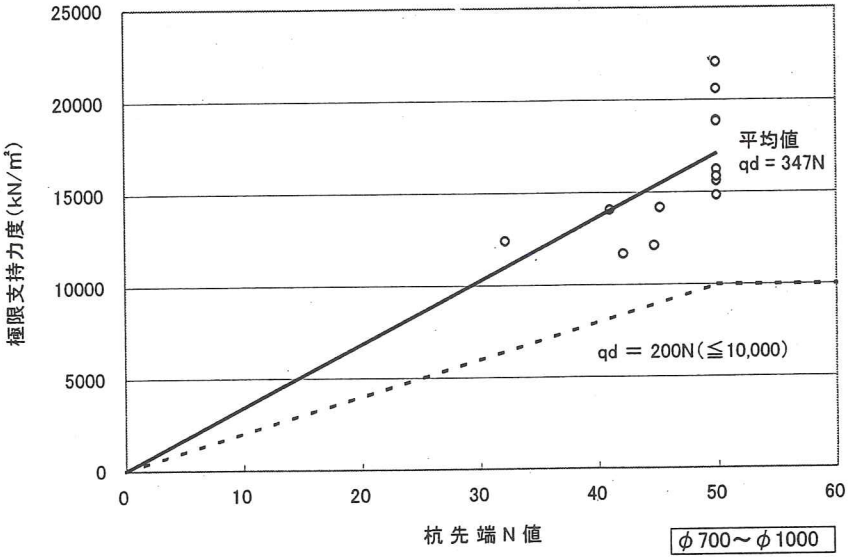


図-3.19 プレボーリング杭(大径)の杭先端の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係(砂礫層)

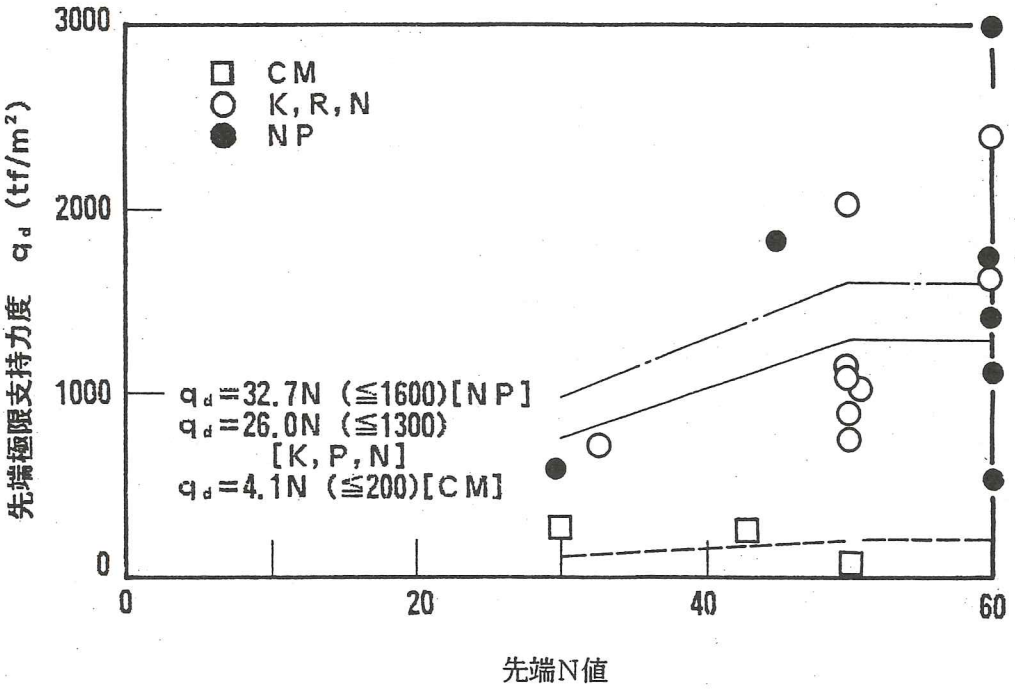


図- 3.20 プレボーリング杭の極限支持力度q_dと杭先端N値の関係

(土研資料第2919号より抜粋)

（２）最大周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係

プレボーリング杭工法における杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係を、地盤別（砂質土および粘性土）に、図- 3.21 ～ 3.36 に示す。図には、比較のために、Ｈ８道示における場所打ち杭工法の支持力推定式を点線で示している（上限値は異なる）。また、図- 3.37 ～ 3.40 は、ＰＨＣ杭の杭径を小径（φ 300mm ～ 600mm）および大径（φ 700mm ～ 1000mm）に分けてプロットしたものである。

各試験値とも、Ｈ８道示の場所打ち杭工法の支持力推定式（点線）とほぼ同等であることが確認できる。また、工法によるｆｉの違いもほとんどないものと考えられる。ｆｉの推定にあたっては、地盤強度の推定に関するばらつきは大きいものの、杭先端の極限支持力度の推定と異なり、杭周面積は非常に大きく、また、多様な地盤の影響を受けることなどを考慮し、載荷試験データに基づいたｆｉ～Ｎ値の関係において、平均的な摩擦力度が得られるように支持力推定式を設定することが妥当と考えられる。図- 3.21 および図- 3.29 に、砂質土層および粘性土層における平均値を示す。また、図- 3.37 ～ 3.40 に示すように、ＰＨＣ杭の杭径による周面摩擦力度への影響はほとんどないと考えられる。したがって、プレボーリング杭工法の適用杭径は、φ 300mm ～ 1000mm として、特に問題はないと考えられる。ただし、これをこえるようなさらに大径の既製コンクリート杭を用いてプレボーリング杭工法を適用する場合には、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

上記に基づき、プレボーリング杭工法における杭周面摩擦力度の推定式として、次式が提案できるものと考えられる。

砂質土の場合：ｆ＝ 5 Ｎ（≦ 150）（kN/m^2）

粘性土の場合：ｆ＝ 10 Ｎ（≦ 100）（kN/m^2）

ここに、Ｎは、標準貫入試験のＮ値である。

プレボーリング杭工法は、杭先端支持力および周面摩擦力の両者が期待できる工法と考えられる。

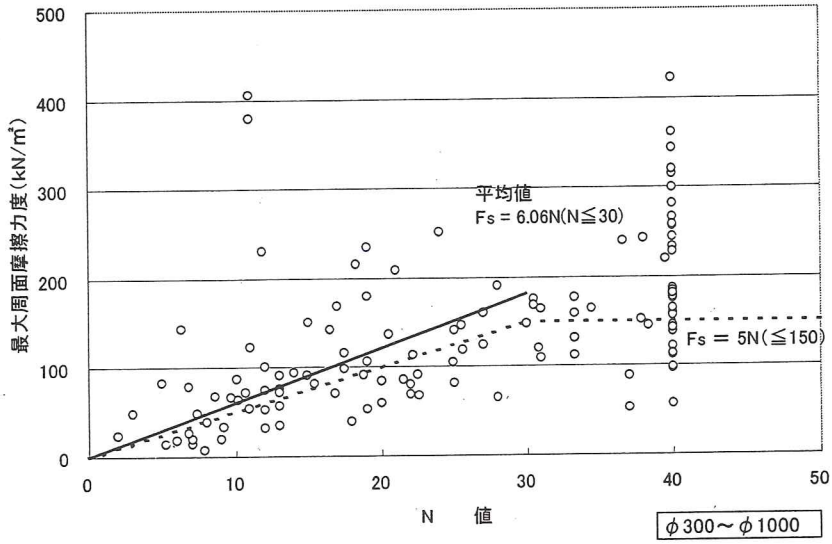


図- 3.21 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

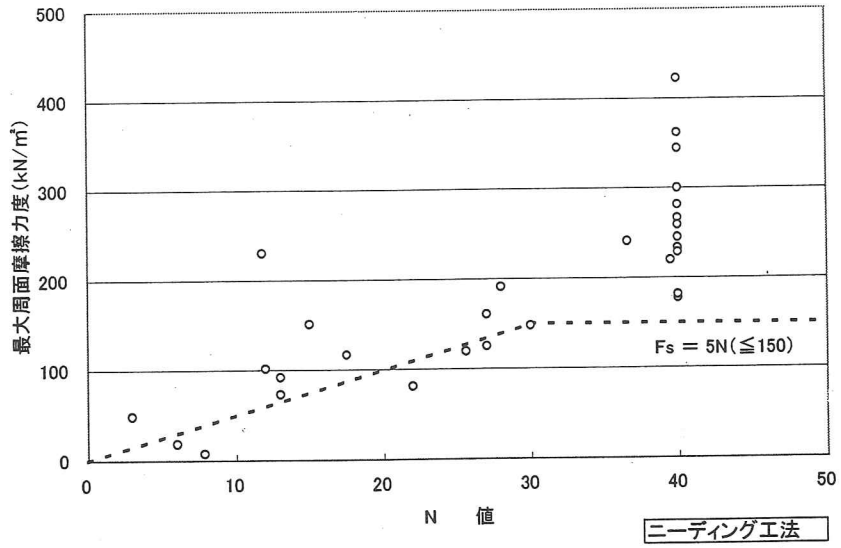


図- 3.22 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

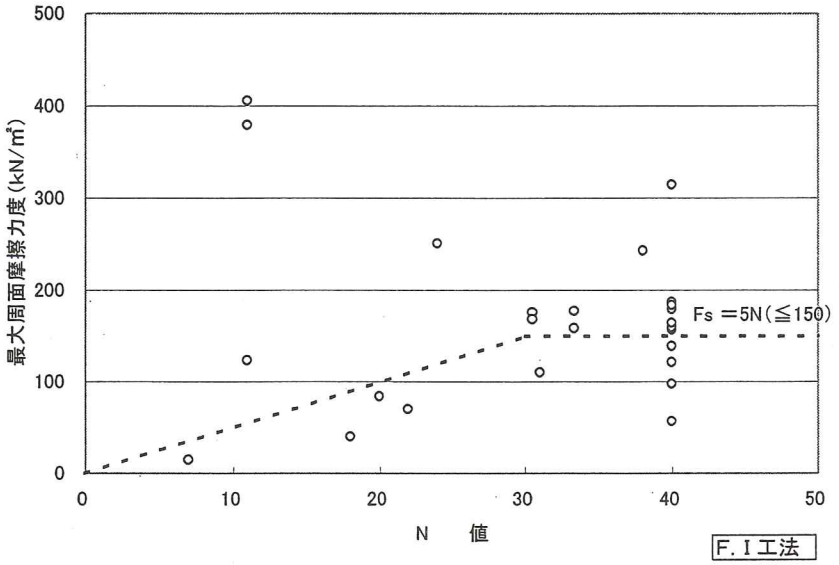


図- 3.23 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

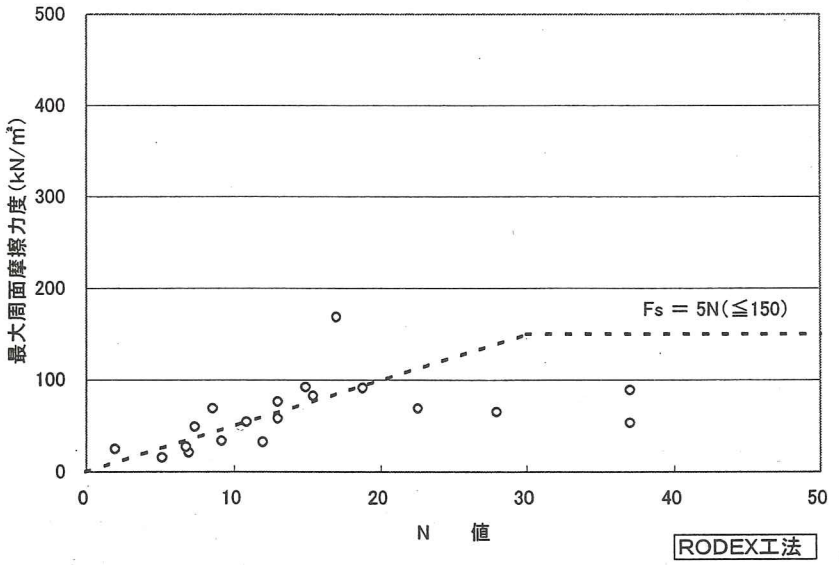


図- 3.24 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

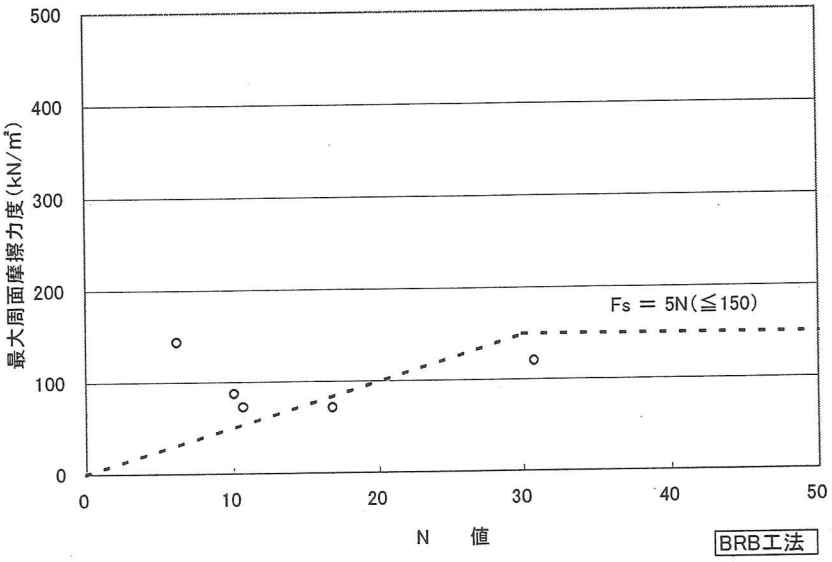


図- 3.25 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

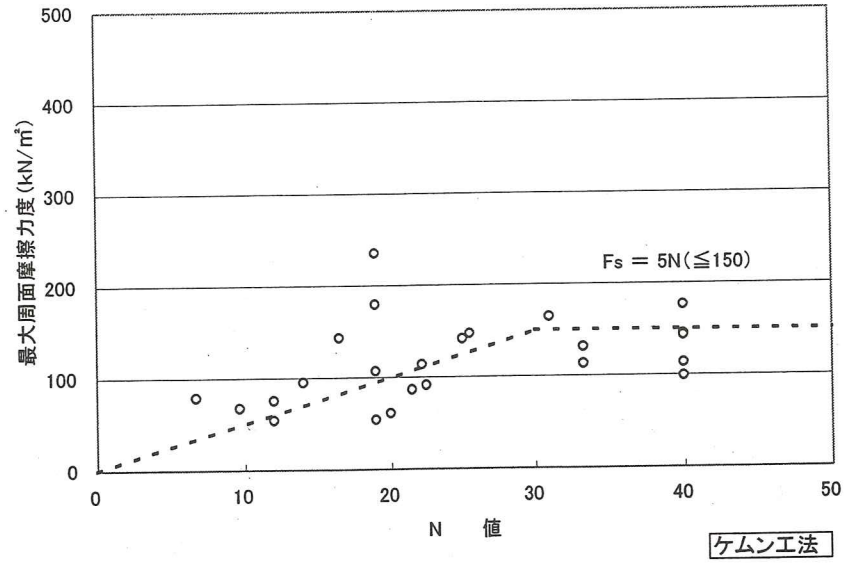


図- 3.26 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

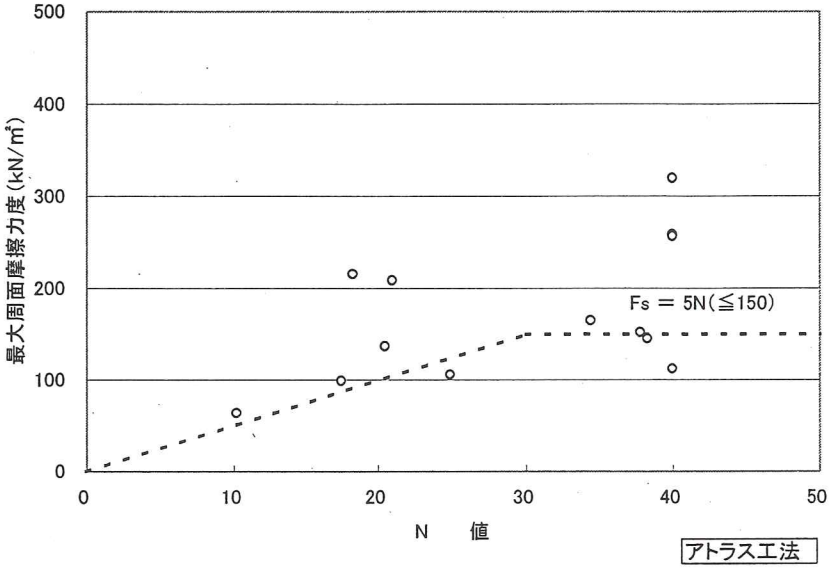


図- 3.27 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

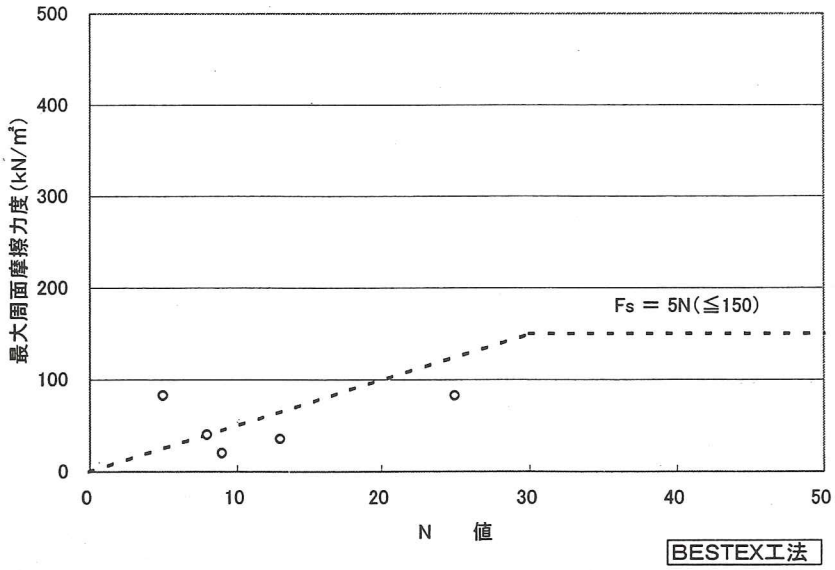


図- 3.28 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

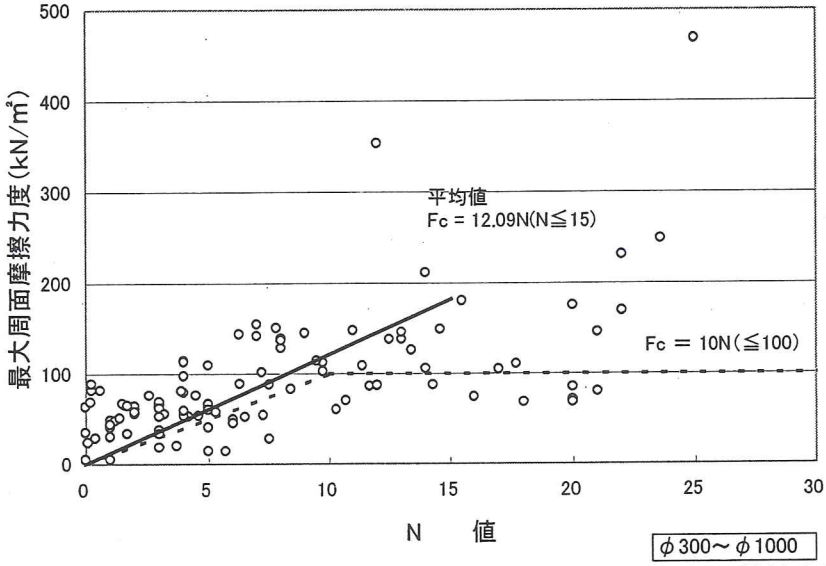


図- 3.29 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

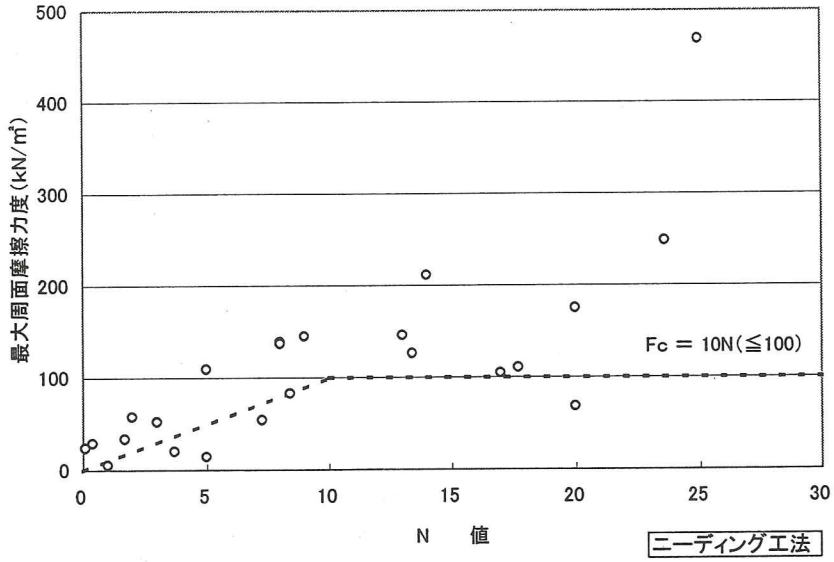


図- 3.30 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

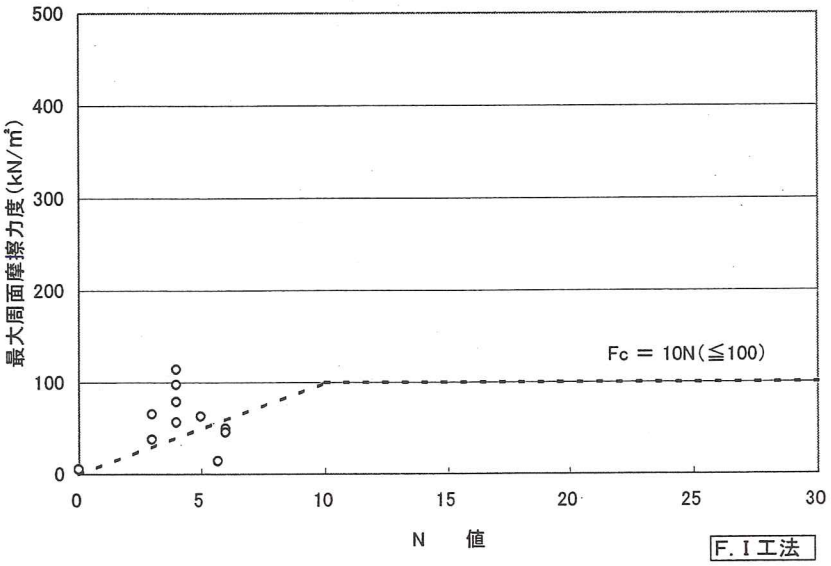


図- 3.31 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

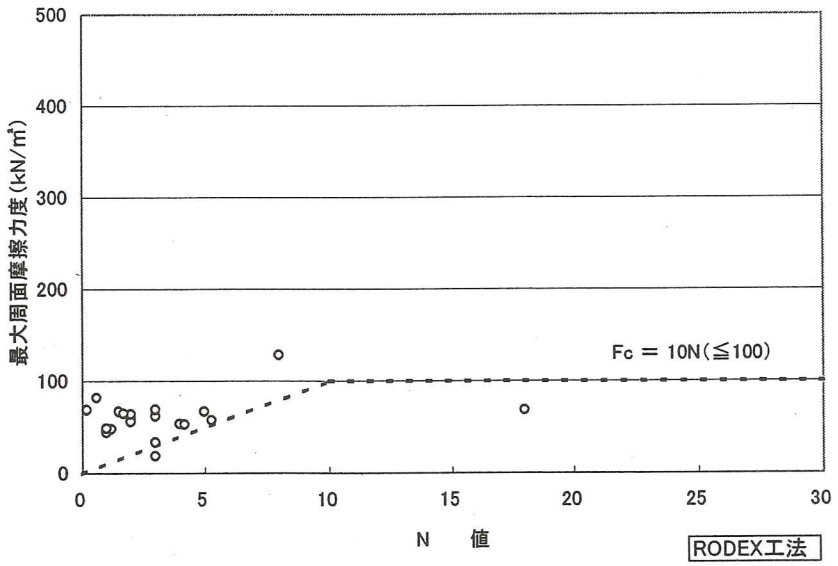


図- 3.32 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

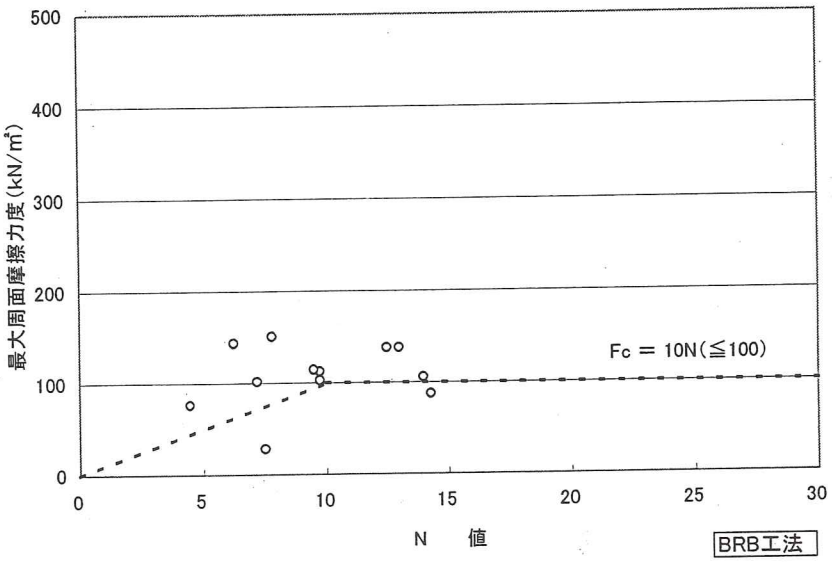


図- 3.33 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

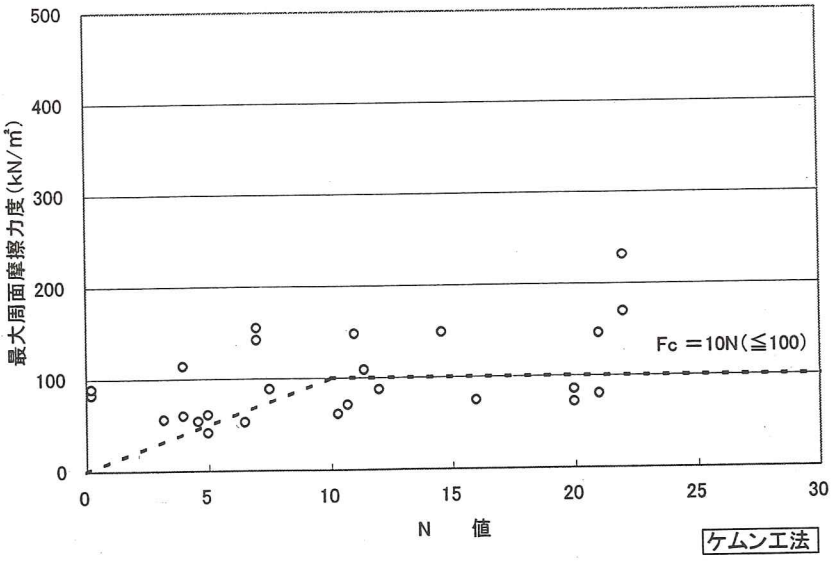


図- 3.34 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

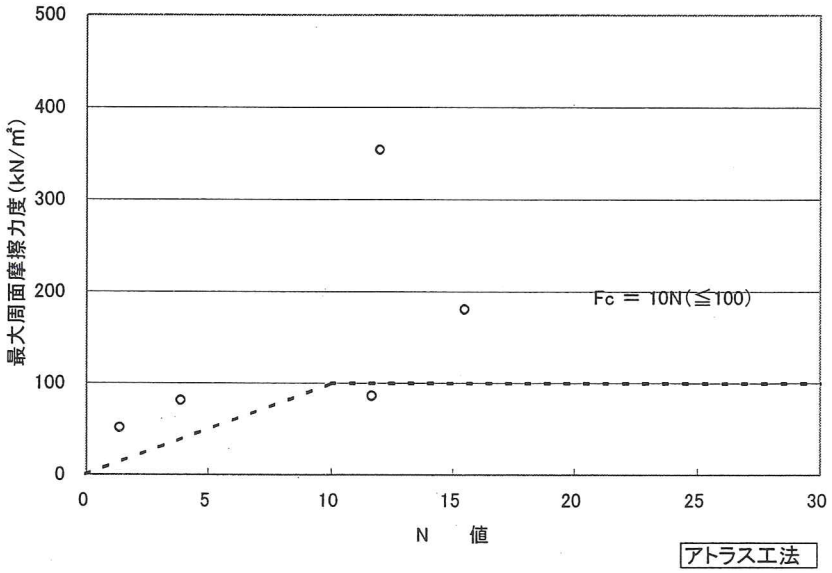


図- 3.35 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

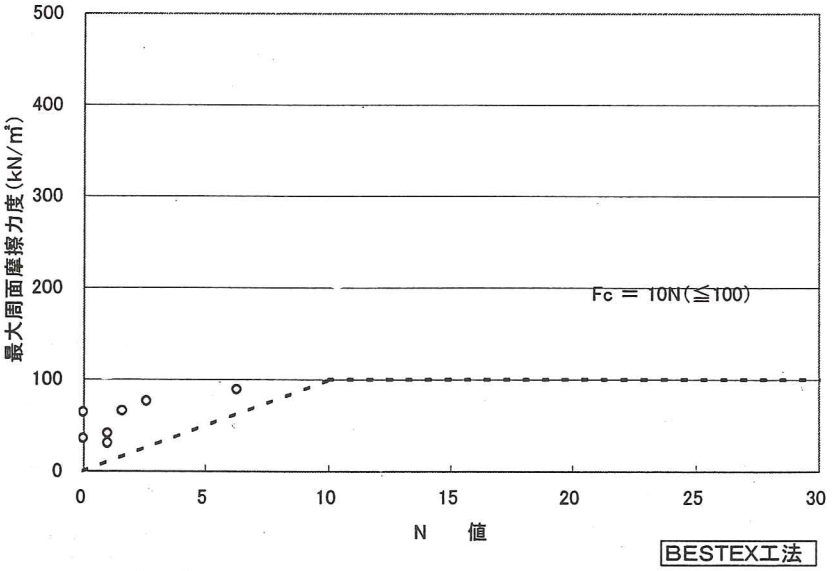


図- 3.36 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

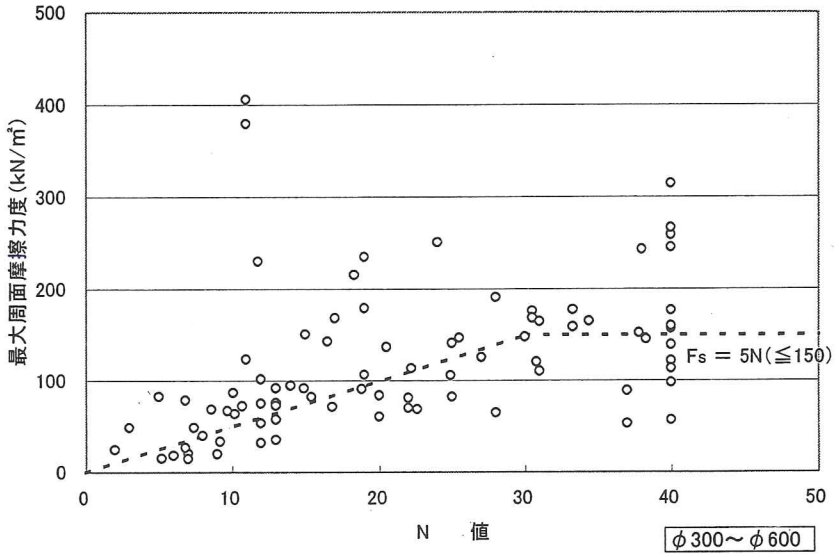


図- 3.37 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

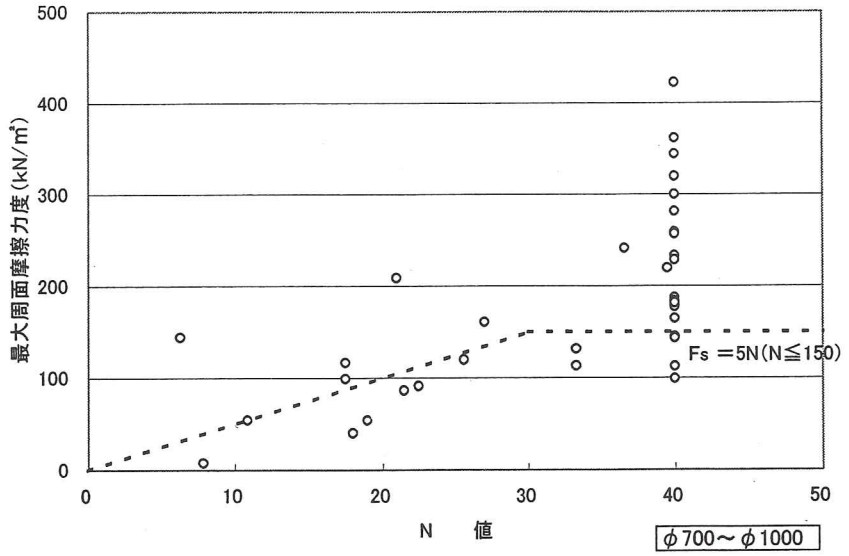


図- 3.38 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(砂質土層)

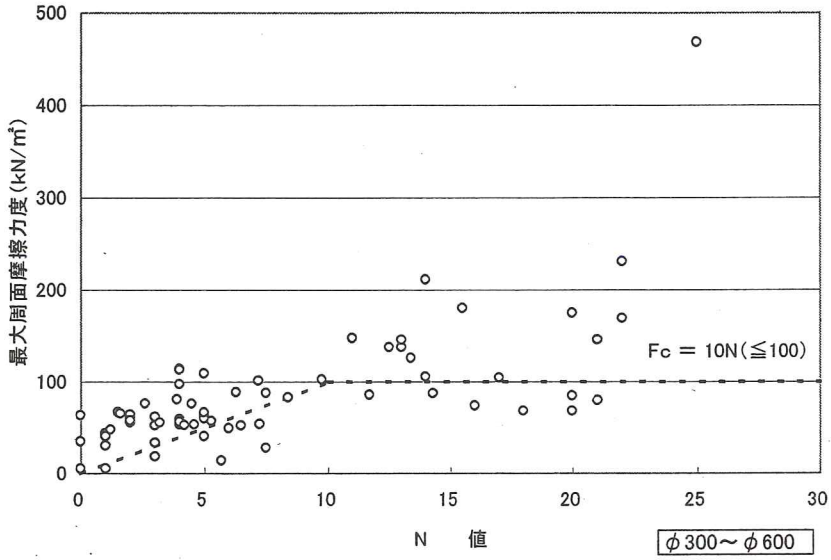


図- 3.39 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

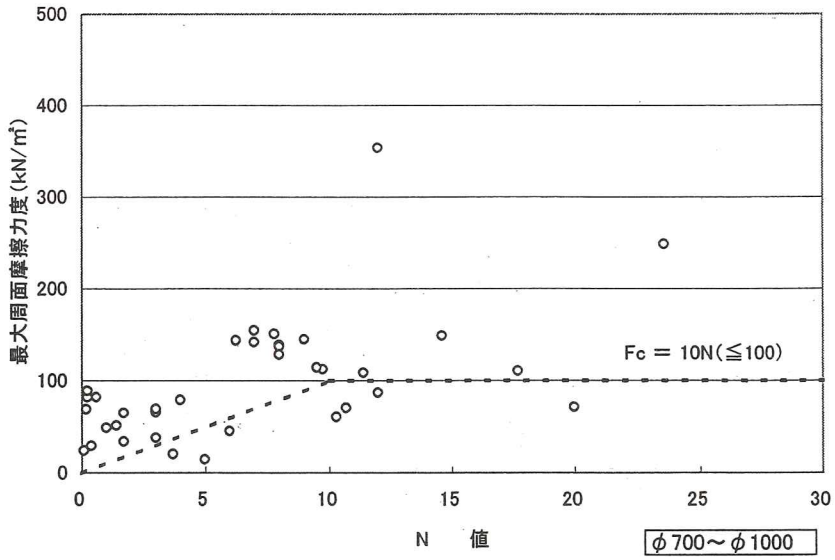


図- 3.40 プレボーリング杭の最大周面摩擦力度f_iとN値の関係(粘性土層)

３．３　鋼管ソイルセメント杭工法

鋼管ソイルセメント杭の極限支持力の算出にあたっては、式（3.1）中のＡにはソイルセメント柱の底面積、Ｕにはソイルセメント柱の周長を用いることが、参考文献８）および９）に示されている。これは、Ａ工法およびＢ工法とも、外面突起付き鋼管とソイルセメントとの付着は、室内付着強度試験により、十分確保されることが確認されており、また、実大杭による鉛直載荷試験において、鋼管とソイルセメント柱とが一体となって沈下挙動することが確認されているためである。

（１）先端極限支持力度ｑ$_d$～Ｎ値の関係

鋼管ソイルセメント杭工法における杭先端の極限支持力度ｑ$_d$～Ｎ値の関係を、地盤別（砂地盤および砂礫地盤）に、図- 3.41 および図- 3.42 に示す。図中には、比較のために、Ｈ８道示における中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）の推定式を点線で示す。

各試験値とも、Ｈ８道示の中掘り杭工法の支持力推定式（点線）を上回っていることが確認できる。プレボーリング杭工法と同様に、ｑ$_d$に関しては、杭先端面積が限られていること、地盤強度の推定にあたってはばらつきが大きいことなどを考慮し、載荷試験データの下限値となるように支持力推定式を設定するのがよいと考えられる。また、鋼管ソイルセメント杭工法の施工方法の違いによるｑ$_d$への影響はほとんどないものと考えられる。

なお、載荷試験により支持力特性が把握された鋼管ソイルセメント杭は、２．３に示す範囲のものである。これらの範囲をこえるような鋼管ソイルセメント杭の適用にあたっては、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

鋼管ソイルセメント杭工法におけるｑ$_d$の推定式として、次式が提案できるものと考えられる。

砂層の場合　：$q_d = 150\,N$（≦ 7,500）（kN/m^2）

砂礫層の場合：$q_d = 200\,N$（≦ 10,000）（kN/m^2）

ここに、Ｎは、杭先端地盤における標準貫入試験のＮ値である。

なお、本支持力式の適用にあたっては、次に示す杭先端部（図- 3.43）を満足する必要がある。

① 支持層へ押込み力を伝達する杭先端部のソイルセメント強度はプラントから採取したコアにおいて 20N/mm^2（σ_{28}）程度以上とする

② 支持層への杭先端部の根入れ深さは、ソイルセメント柱径 Dsc 程度以上とする。

③ 杭先端部への鋼管の貫入深さは鋼管径 Dsp の 1.5 倍程度以上とする。なお、鋼管先端から鋼管径 Dsp の 1.25 倍程度以上の範囲の鋼管内面には、リブまたは付着金物を必要とする。

④ 鋼管先端からソイルセメント柱先端までの長さは、ソイルセメント柱径 Dsc の 0.5 倍程度以上とする。

（２）最大周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係

鋼管ソイルセメント杭工法における杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係を、地盤別（砂質土および粘性土）別に、図- 3.44 および図- 3.45 に示す（実線は提案推定式）。図には、比較のために、Ｈ８道示における場所打ち杭工法の推定式を点線で示す。

いずれの試験値とも、Ｈ８道示の場所打ち杭工法の支持力推定式を概ね上回っていることが確認できる。ｆｉの推定にあたっては、プレボーリング杭工法と同様に、載荷試験データに基づいたｆｉ～Ｎ値の関係において、平均的な摩擦力度が得られるように支持力推定式を設定することが妥当と考えられる。

なお、載荷試験により支持力特性が把握された鋼管ソイルセメント杭は、２．３に示す範囲のものである。これらの範囲をこえるような鋼管ソイルセメント杭の適用にあたっては、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

上記に基づき、鋼管ソイルセメント杭工法における杭周面摩擦力度の推定式として、次式が提案できるものと考えられる。

砂質土の場合：ｆ＝ 10 Ｎ（≦ 200）（kN/m^2）

粘性土の場合：ｆ＝ 10 Ｎ（≦ 200）（kN/m^2）

ここに、Ｎは、標準貫入試験のＮ値である。

上記提案式は、場所打ち杭の支持力推定式とほぼ同等か、それを上回るものである。

鋼管ソイルセメント杭工法は、杭先端支持力および周面摩擦力の両者が期待できる工法と考えられる。

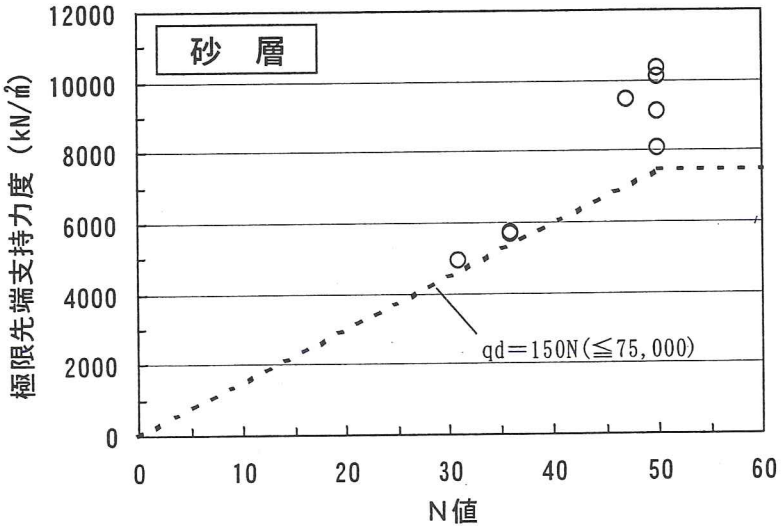


図- 3.41　杭先端の極限支持力度ｑｄ～Ｎ値の関係（砂地盤）

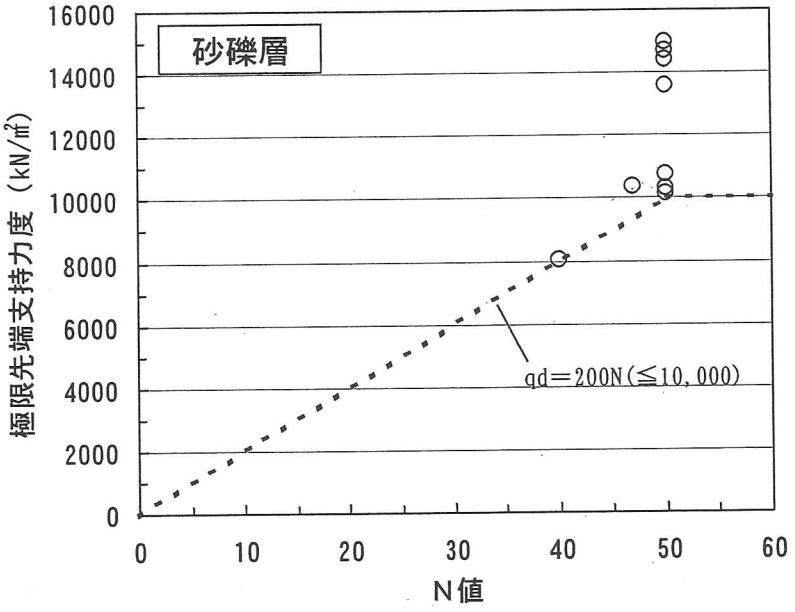
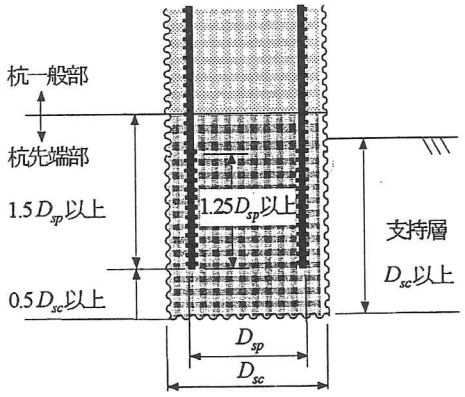


図- 3.42　杭先端の極限支持力度ｑｄ～Ｎ値の関係（砂礫地盤）



ここに、

Ｄｓｐ：鋼管径

Ｄｓｃ：ソイルセメント柱径

図- 3.43　鋼管ソイルセメント杭の杭先端部

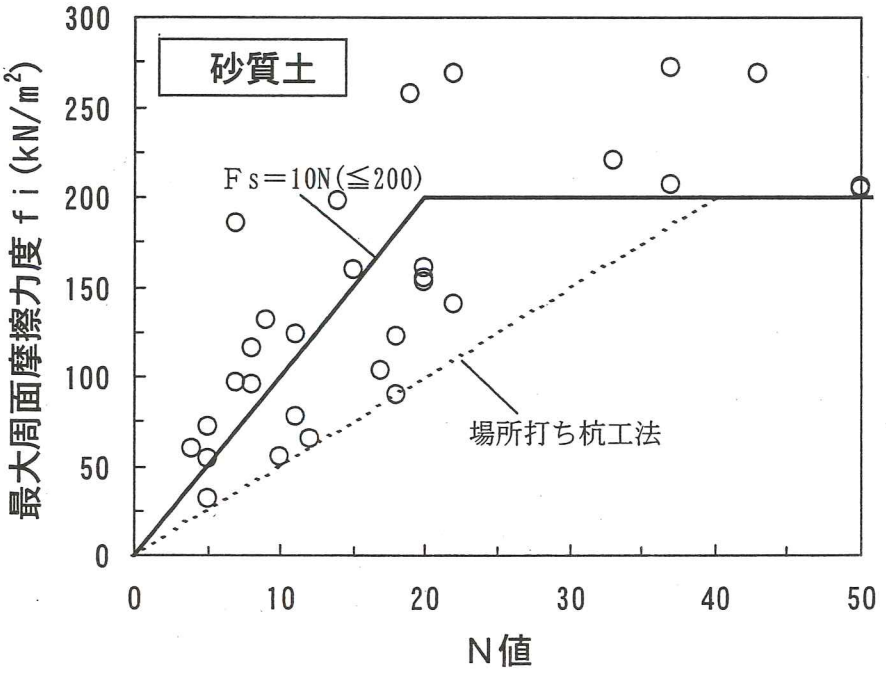


図-3.44　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（砂質土）

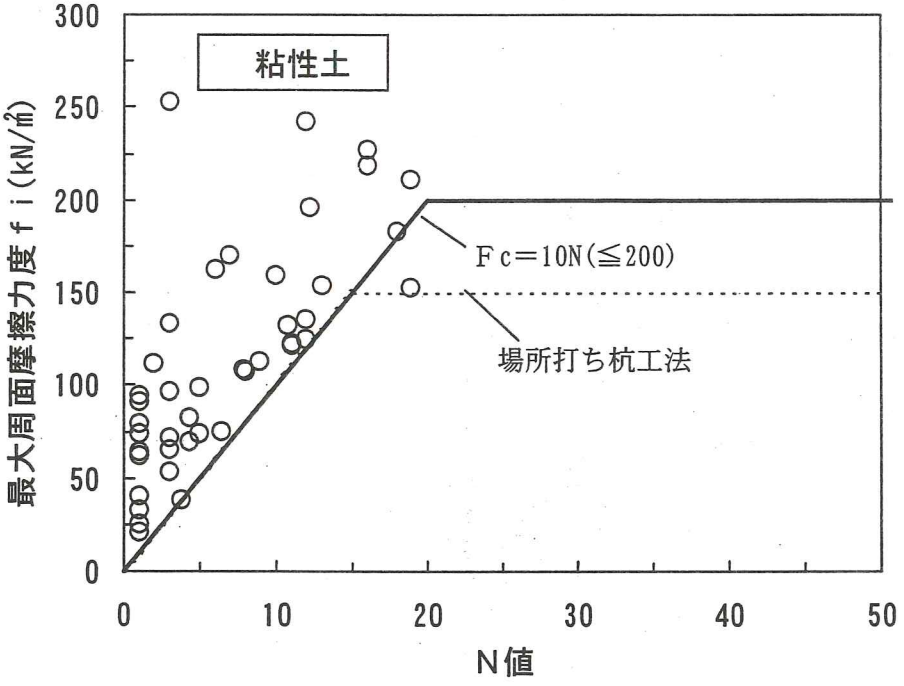


図-3.45(a)　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（粘性土）

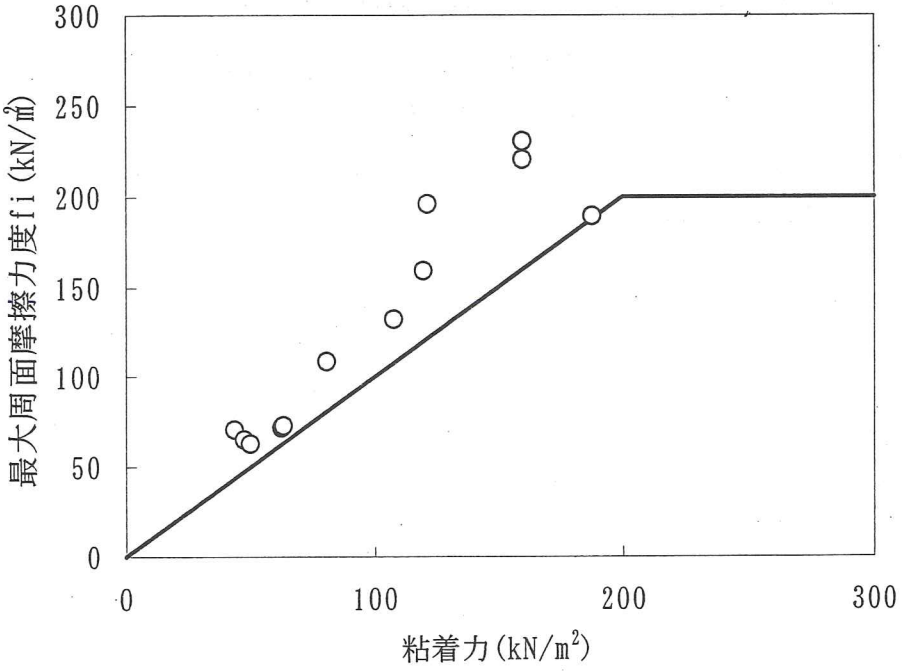


図- 3.45(b)　杭周面摩擦力度ｆ$_i$～粘着力ｃの関係（粘性土）

３．４　バイブロハンマ打込み杭

（１）先端極限支持力度ｑ$_d$～Ｎ値の関係

バイブロハンマ打込み杭工法における杭先端の極限支持力度とＮ値との比ｑ$_d$／Ｎと換算根入れ深さの関係を図- 3.46 に示す。図には、比較のために、Ｈ８道示における打込み杭工法（打撃工法）の推定式を点線で示す。

各試験の平均は、Ｈ８道示の打込み杭工法（打撃工法）の支持力推定式（点線）とほぼ同等であることが確認できる。ｑ$_d$に関しては、プレボーリング杭工法などと同様に、載荷試験データの下限値となるように支持力推定式を設定するのがよいと考えられることから、バイブロハンマ打込み杭工法におけるｑ$_d$の推定式としては、打撃工法と同様に次式が提案できるものと考えられる。

$q_d = 60\,N\,(L/D)$　　$(0 \leqq L/D \leqq 5)$

$q_d/N \leqq 300$

ここに、

Ｎは、標準貫入試験のＮ値（$N \leqq 40$）

Ｌ：支持層への換算根入れ深さ

Ｄ：杭径

（２）最大周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係

バイブロハンマ打込み杭工法における杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係を、地盤別（砂質土および粘性土）に、図- 3.47 および図- 3.48 に示す。図には、比較のために、Ｈ８道示における打込み杭工法（打撃工法）の推定式を点線で示す。

砂質土および粘性土における結果とも、その平均値は、Ｈ８道示の打込み杭工法（打撃工法）の支持力推定式（点線）を若干上回っているが、概ね打撃工法とほぼ同等の周面摩擦力度が得られていることが確認できる。

したがって、バイブロハンマ打込み杭工法におけるｆｉの推定式として、打撃工法と同様に次式が提案できるものと考えられる。

砂質土の場合：ｆ＝ ２Ｎ（≦ 100）（kN/m^2）

粘性土の場合：ｆ＝ 10 Ｎ（≦ 150）（kN/m^2）

ここに、Ｎは、標準貫入試験のＮ値である。

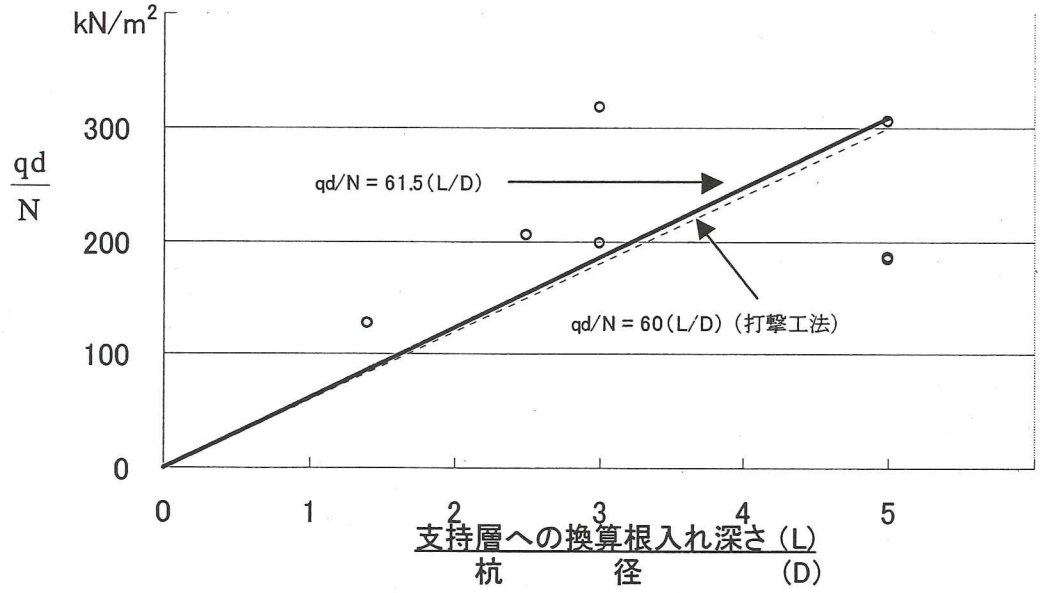


図- 3.46　杭先端の極限支持力度ｑｄ

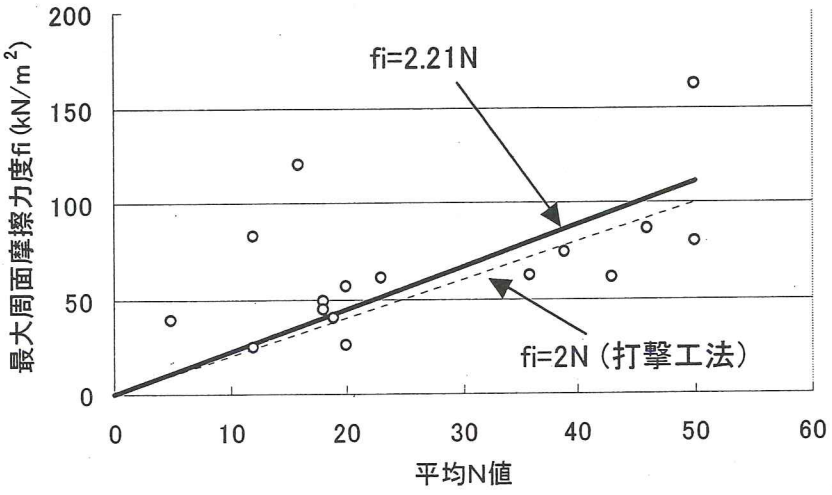


図- 3.47　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（砂質土）

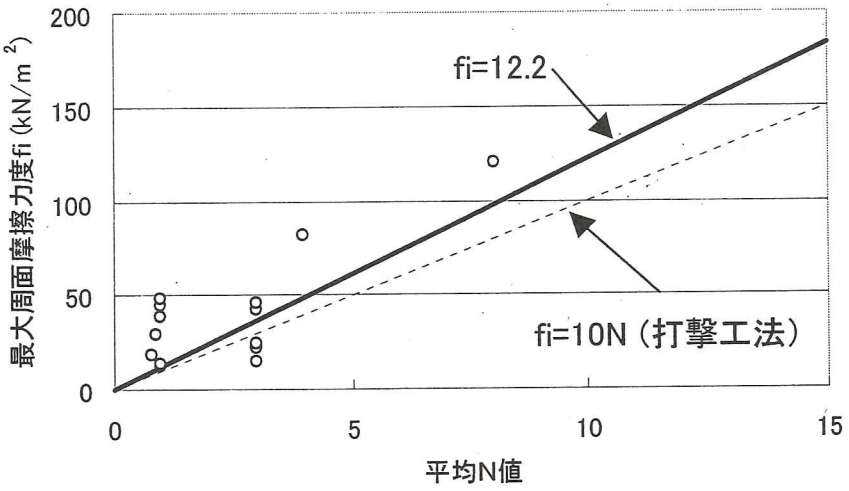


図- 3.48　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（粘性土）

３．５　場所打ち杭工法

（１）先端極限支持力度ｑｄ～Ｎ値の関係

場所打ち杭先端の極限支持力度ｑｄについては、一般に施工による地盤の乱れの影響が大きいと考え、Ｈ８道示には、表- 3.1 に示す値が示されている。特に、砂質地盤の場合には、施工による地盤の乱れの影響が大きいことから、Ｎ値 30 程度以上の場合は、地盤強度にかかわらず一定の値を用いるものとされている。

ここでは、これまでに蓄積された場所打ち杭の載荷試験結果によるｑｄ～Ｎ値の関係に基づき、ｑｄの見直しについて検討するものとした。

場所打ち杭工法におけるｑｄ～Ｎ値の関係を図- 3.49 に示す。

図- 3.49 に示す試験結果のいくつかは極限まで達してはいないが、Ｎ値 50 程度以上の良

好な砂礫地盤の場合には、q_dとして概ね5000kN/㎡が期待できるものと考えられる。

図-3.49に示す載荷試験データの一覧を表-3.2に示す。図-3.49および表-3.2を考慮すると、N値50程度以上の層が概ね5m以上続き、十分固結した良好な砂礫層を支持層とする場合には、q_dを5,000kN/㎡としてよいものと考えられる。ここで、図-3.49より、機械掘削方法の違いによるq_dへの影響はあまりないものと考えられる。

なお、その適用にあたっては、次に示す事項について十分に注意する必要がある。

① 杭先端は良質な支持地盤に杭径程度根入れすること。

② 杭の施工中はボイリングの発生に注意し、かつスライム処理を十分に行うこと。

特に、後者については、十分な管理が必要である。

（2）最大周面摩擦力度f_i～N値の関係

場所打ち杭工法における杭周面摩擦力度f_i～N値の関係を、地盤別（砂質土および粘性土）に、図-3.50および図-3.51に示す。図には、H8道示に示される場所打ち杭工法の杭周面摩擦力度の推定式を点線で示す。

砂質土および粘性土におけるf_iは、いずれもほぼH8道示の支持力推定式（点線）の周囲に分布していることが確認できる。

したがって、場所打ち杭工法におけるf_iの推定式は、従来どおりとすることに特に問題はないものと考えられる。また、杭先端の支持力度と同様に、機械掘削方法の違いによる影響は特にないものと考えられる。

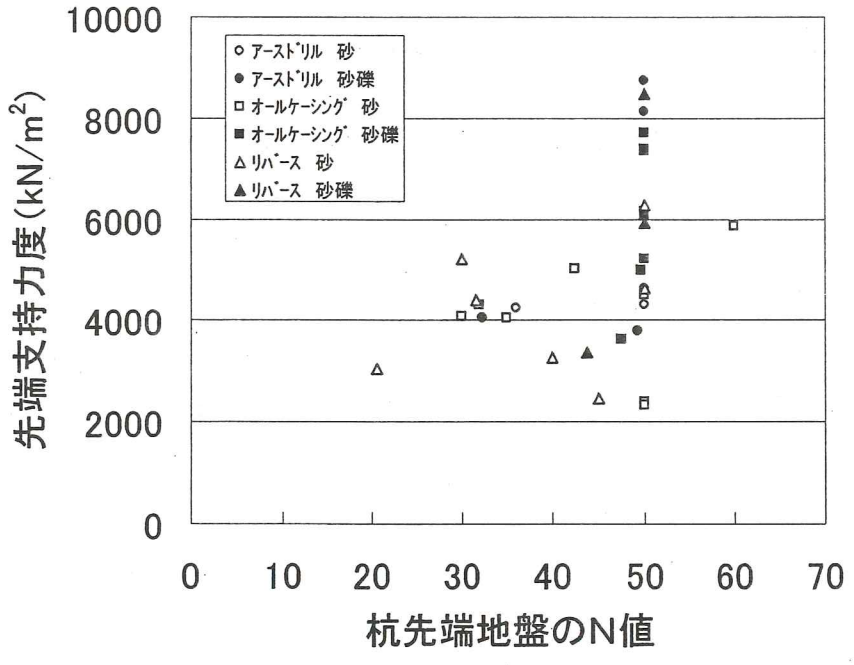


図-3.49 杭先端の極限支持力度q_d～N値の関係

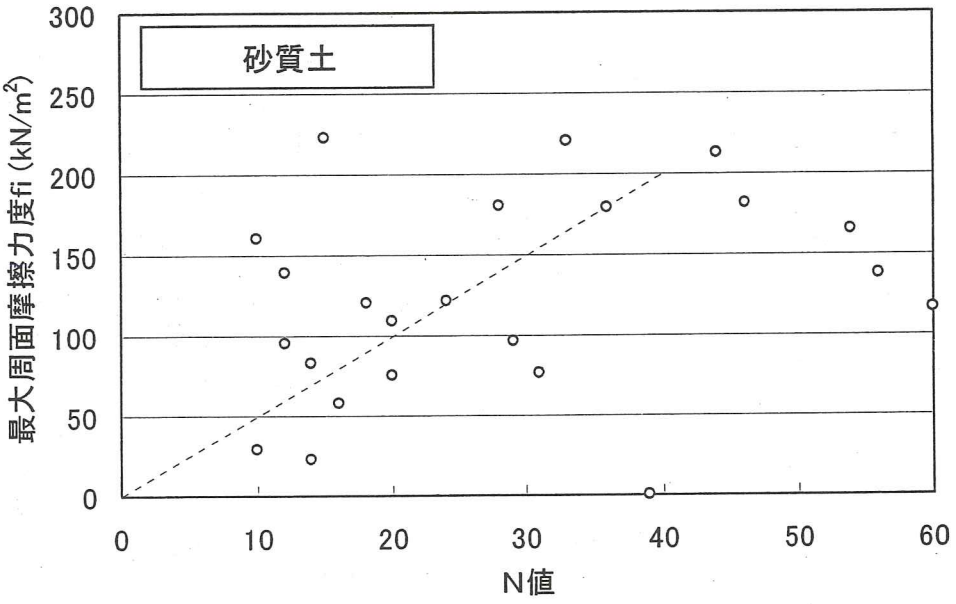


図- 3.50　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（砂質土）

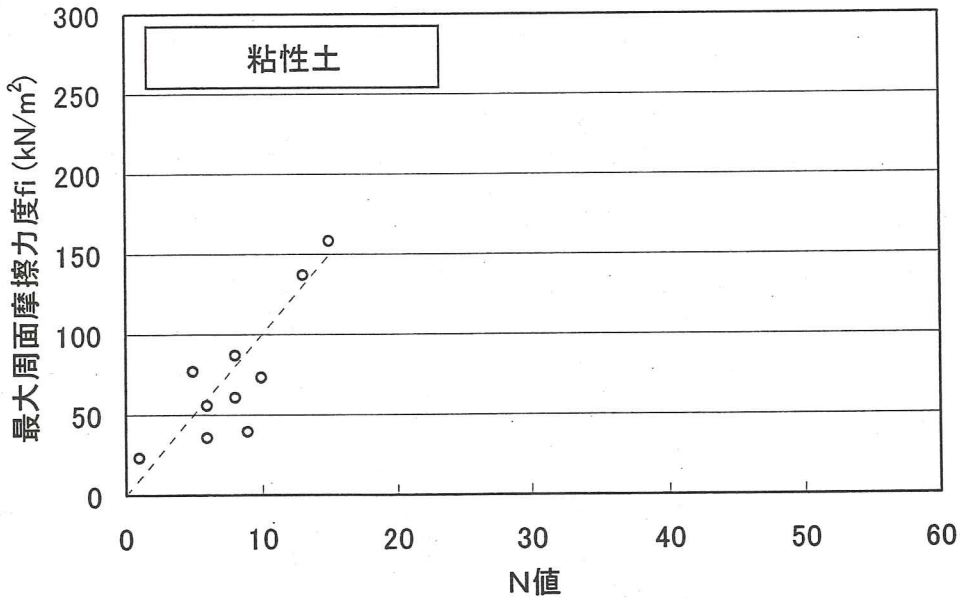


図- 3.51　杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係（粘性土）

表- 3.2　場所打ち杭の載荷試験データ一覧

杭No	外的基準							
	実測値 Rp(kN)	qd (kN/m²)	施工法	杭長 L(m)	杭径 D(mm)	先端 土質	支持層厚 ll(m)	先端 N 値
(その1)								
Ca-1	4220	2390	オールケーシング	26.00	1500.0	砂	6.5	50
Ca-2	4110	2330	〃	30.50	1500.0	〃	13.0	50
Ca-3	10380	5870	〃	20.00	1500.0	〃	3.5	60
Ca-4	5900	5220	〃	23.50	1200.0	砂礫	14.3	50
Ca-5	13020	7370	〃	44.90	1500.0	〃	5.5	50
Ca-7	24230	7710	〃	38.00	2000.0	〃	9.0	50
Cb-4	3200	4070	〃	12.00	1000.0	砂	1.5	30
Cb-12	2870	3650	〃	27.95	1000.0	砂礫	2.3	50
Cb-24	4850	4290	アースドリル	15.30	1200.0	細 砂	3.8	50
Cb-25	1410	2810	〃	37.00	800.0	〃	12.5	33
Cc-4	5780	7360	オールケーシング	18.20	1000.0	砂礫	7.0	50
Cc-6	4870	4310	〃	15.50	1200.0	砂質土	5.5	32
Cd-1	4820	6140	〃	14.50	1000.0	砂礫	4.0	50
Cd-10	3400	4510	〃	35.00	980.0	細 砂	10.0	50
Cd-17	8970	5080	リバース	40.00	1500.0	砂	11.0	45
Cd-18	11110	6290	〃	44.40	1500.0	細 砂	6.0	50
Cd-19	15000	8490	〃	32.80	1500.0	砂礫	10.0	50
Cd-20	21160	11970	〃	47.40	1500.0	〃	10.0	50
Cd-22	8160	4620	〃	26.50	1500.0	砂	12.0	50
Cd-25	1700	2160	〃	27.00	1000.0	砂質土	19.0	42
Cd-26	3700	3270	〃	34.40	1200.0	〃	10.0	40
Cd-28	2730	2410	〃	33.85	1200.0	砂	10.0	35
Cd-30	3100	2450	〃	28.15	1270.0	細 砂	8.0	45
Cd-33	4580	4050	オールケーシング	16.50	1200.0	砂質土	16.0	35
Cd-34	1570	2000	アースドリル	14.00	1000.0	粘性土	4.5	45
Cd-35	1870	2940	〃	15.00	900.0	細 砂	8.5	50
Cd-39	2400	3060	オールケーシング	12.00	1000.0	粘性土	3.5	35
Cd-42	2000	2550	〃	19.50	1000.0	砂	3.5	50
Cd-44	5600	3170	アースドリル	27.80	1500.0	〃	4.5	42
Cd-45	4400	4630	〃	21.10	1100.0	〃	4.5	50
Cd-49	9210	5210	リバース	23.15	1500.0	〃	3.0	30
B-9	4700	4160	オールケーシング	16.50	1200.0	砂質土	10.0	33
1	3170	4036	アースドリル	26.50	1000.0	砂礫		32
2	1320	1681	オールケーシング	45.40	1000.0	〃		50
3	660	840	アースドリル	22.50	1000.0	砂		42
4	1070	1362	〃	25.80	1000.0	〃		39
5	2690	4228	〃	10.60	900.0	〃		36
6	1970	2073	〃	24.40	1100.0	砂礫		50
7	710	747	〃	24.00	1100.0	〃		44
8	6280	8001	〃	35.70	1000.0	〃		50
9	3915	4985	オールケーシング	14.00	1000.0	〃		50
10	7722	3035	リバース	55.00	1800.0	砂		20
11	1210	1541	〃	25.80	1000.0	〃		13
12	4900	4333	アースドリル	24.00	1200.0	砂礫		50
13	4640	5908	リバース	21.80	1000.0	〃		50
14	1030	1084	アースドリル	28.80	1100.0	〃		45
15	3950	5029	オールケーシング	30.90	1000.0	砂		43
16	1710	1111	アースドリル	30.30	1400.0	〃		44
17	3800	603	オールケーシング	27.10	1300.0	〃		37
18	9550	3368	リバース	29.60	1900.0	砂礫		44
19	5890	2077	アースドリル	27.50	1900.0	〃		50
20	7790	4408	リバース	23.20	1500.0	砂		32
21	550	486	オールケーシング	42.30	1200.0	固結粘土		39
22	2130	938	リバース	41.90	1700.0	砂礫		50
23	5600	2785	アースドリル	28.50	1600.0	〃		49
24	5120	2897	〃	26.00	1500.0	砂		50
25	4050	2292	〃	52.90	1500.0	〃		50
26	2740	2423	〃	29.00	1200.0	砂礫		50
27	6620	3746	〃	30.90	1500.0	〃		49
28	1360	883	〃	54.50	1400.0	砂		50
29	4235	3191	〃	23.90	1300.0	砂礫		45
30	1400	1238	〃	26.20	1200.0	砂		50
31	547	576	リバース	40.50	1100.0	砂礫		50
32	19600	11091	オールケーシング	30.90	1500.0	砂		50
33	3095	3941	アースドリル	23.50	1000.0	〃		30
34	1600	905	オールケーシング	38.70	1500.0	〃		50
35	3620	4609	〃	26.50	1000.0	砂礫		50
36	6430	3639	〃	23.50	1500.0	〃		48
37	2689	2378	〃	23.50	1200.0	砂		39
38	605	770	アースドリル	32.80	1000.0	〃		17
39	1665	2120	オールケーシング	28.40	1000.0	砂礫		36
40	5030	3790	アースドリル	26.10	1300.0	〃		49
41	830	1057	〃	25.50	1000.0	火山灰		50
42	9180	8117	〃	56.50	1200.0	砂礫		50
43	5250	2313	〃	33.40	1700.0	〃		42
44	1030	2049	リバース	27.20	800.0	粘土		15
45	3720	13157	アースドリル	12.30	600.0	砂		43
46	3200	11318	〃	13.80	600.0	〃		50
47	1000	2598	〃	15.50	700.0	〃		20
48	1100	1157	〃	32.00	1100.0	〃		44
49	2070	2636	〃	30.50	1000.0	固結粘土		4
50	2540	3234	〃	31.00	1000.0	砂礫		50

３．６　中掘り杭工法

中掘り杭工法は、図- 2.1 に示すとおり、埋込み杭工法に分類される。中掘り杭工法は、その施工方法上、ＰＨＣ杭、鋼管杭などの既製杭を所定の位置に沈設するまでに周辺地盤を緩めることが避けられないため、一般に杭周面摩擦力度が小さいと指摘されている。したがって、Ｈ８道示における中掘り杭の最大周面摩擦力度の推定式は、上記を考慮し、安全側に配慮して設定されたものと考えられる。

ここでは、バイブロハンマ打込み杭工法、プレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法における杭先端の極限支持力度および杭周面摩擦力度の推定式を検討した場合と同様の考え方に基づき、中掘り杭工法のそれらを検討することにした。

中掘り杭は、先端処理方法によって、（ａ）最終打撃による方法、（ｂ）セメントミルク噴出攪拌による方法および（ｃ）コンクリート打設による方法の３つに大別されるが、ここでは、（ｂ）方法を対象とする。すなわち、ここで検討対象とした中掘り杭工法は表- 3.2(a)、(b)に示す工法である。これらの工法は、これまでに、技術審査証明や建設大臣認定を取得している工法である。「杭基礎施工便覧」には、鋼管杭について 3 工法、既製コンクリート杭について 4 工法が示されているが、その後、鋼管杭について 3 工法が技術審査証明を取得した（杭基礎施工便覧 P111 に示される鋼管杭のＣ工法は、現在使用されていないため、表- 3.2(a)には掲載していない）。

Ｈ８道示では、中掘り杭工法の適用にあたって、ＰＨＣ杭の場合、杭径 500mm ～ 800mm 程度、鋼管杭の場合、杭径 500mm ～ 1000mm 程度が通常の範囲とされている。最近、中掘り杭においては、大径のＰＨＣ杭の適用実績が多くなってきたことから、支持力特性の確認と合わせ、その適用範囲の見直しを検討するものとする。

また、中掘り杭を施工する場合には、その杭先端に、施工性を考慮して、フリクションカッターが用いられることが多い。Ｈ８道示では、フリクションカッターの形状寸法を定めるにあたっては、地震時の安定性を高めるために水平変位を小さく制限していること、杭周面摩擦力の回復が期待できること等を考慮し、フリクションカッターを取り付ける場合、その厚さは、打撃鋼管杭に用いられる補強バンドと同じ厚さ（9mm）とするものとされている。ここでは、杭周面摩擦力度 f_i～Ｎ値の関係を整理するにあたって、フリクションカッター厚さをパラメータとし、中掘り杭の杭径ごとに、f_iが確保できることを前提として、フリクションカッター厚さを検討するものとする。

（１）先端極限支持力度 q_d～Ｎ値の関係

中掘り杭工法における杭先端の極限支持力度 q_d～Ｎ値の関係を、地盤別（砂地盤および砂礫地盤）および杭種別（ＰＨＣ杭および鋼管杭）に、図- 3.52 ～ 3.55 に示す。図には、比較のために、Ｈ８道示における中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）の支持力推定式を点線で示す。また、図- 3.52 および図- 3.53 には中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の

杭径を小径（φ 450mm ～ 700mm）および大径（φ 800mm ～ 1000mm）に分けてプロットしている。

各試験値（ＰＨＣ杭および鋼管杭）とも、Ｈ８道示の中掘り杭工法の支持力推定式（点線）を十分上回ることが確認できる。ただし、杭先端の極限支持力度q_dに関しては、他の工法と同様に、載荷試験データの下限値とすることが妥当であることから、Ｈ８道示に示される支持力推定式の適用に、特に問題はないと考えられる。また、中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の杭径の差が、q_dに及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。したがって、中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の適用杭径は、Ｈ８道示に示される杭径 500mm ～ 800mm から、杭径 500mm ～ 1000mm に見直しても、特に問題はないものと考えられる。ただし、これをこえるようなさらに大径の既製杭を用いて中掘り杭工法を適用する場合には、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

中掘り杭工法における杭先端の極限支持力度の推定式として、現行と同様、次式とするのがよいと考えられる。

砂層の場合　：$q_d = 150\ N$（≦ 7,500）（kN/m²）

砂礫層の場合：$q_d = 200\ N$（≦ 10,000）（kN/m²）

ここに、Ｎは、杭先端地盤における標準貫入試験のＮ値である。

表-3.2(a)　中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式、鋼管杭）

工法名	① ＴＡＩＰ工法	② ＴＮ工法	③ ＴＢＳ工法	④ ＦＢ９工法	⑤ ＫＩＮＧ工法
掘削方法	先端刃付きｼｬﾌﾄ＋水（ｼｬﾌﾄは杭体と共に回転）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋ｴｱ（杭内径より小さなﾍｯﾄﾞを付けたｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋ｴｱ（特殊拡大機構をもつﾋﾞｯﾄを取り付けたｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋ｴｱ（管内付着土ｸﾘｰﾆﾝｸﾞ装置＋特殊拡大機構をもつﾋﾞｯﾄを取り付けたｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋ｴｱ（特殊拡大機構をもつﾋﾞｯﾄを取り付けたｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ使用）
沈設方法	回転圧入	圧入	圧入	圧入	圧入
杭先端処理方法	根固め用ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸを先端より吐出。土砂と混合し固結。	根固めﾛｯﾄﾞと取替え、高圧水を水平噴射して予備掘削。ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸを高圧噴射し、土砂と混合し固結。	杭先端部で掘削ﾋﾞｯﾄを拡翼し、拡大掘削。ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸを吐出し、土砂と混合し固結。	杭先端部で拡大ﾍｯﾄﾞを拡翼し、拡大掘削。ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸを吐出し、土砂と混合し固結。	杭先端部で掘削ﾋﾞｯﾄを拡翼し、拡大掘削。ｾﾒﾝﾄﾐﾙｸを低圧噴射し、土砂と混合攪拌。

表- 3.2(b)　中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式、既製コンクリート杭）

工法名	① ＣＭＪ工法	② NAKS 工法	③ ＳＴＪ工法	④ ＢＢＢ工法
掘削方法	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋エア（杭内径より小さなヘッドを付けたスパイラルオーガ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋エア（特殊拡大機構をもつビットを取り付けたスパイラルオーガ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋エア（杭内径より小さなヘッドを付けたスパイラルオーガ使用）	ｽﾊﾟｲﾗﾙｵｰｶﾞ＋エア（杭内径より小さなヘッドを付けたスパイラルオーガ使用）
沈設方法	圧入	圧入	圧入	圧入
杭先端処理方法	根固めロッドと取替え、高圧水を水平噴射して予備掘削。セメントミルクを高圧噴射し、土砂と混合し固結。	杭先端部で拡大ヘッドを拡翼し、拡大掘削。セメントミルクを吐出し、土砂と混合し固結。	掘削ビット先端部からセメントミルクを高圧噴射し、土砂と混合し固結。	掘削ビットを拡大ビットに取り替えた後、拡大掘削。セメントミルクを吐出し、土砂混合し固結

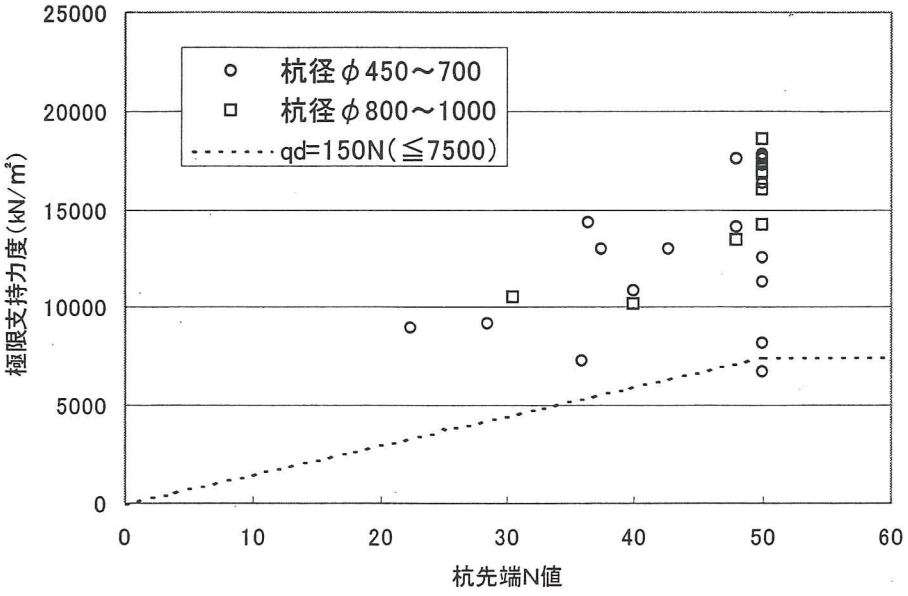


図- 3.52　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の杭先端極限支持力度ｑｄと先端Ｎ値の関係（砂層）

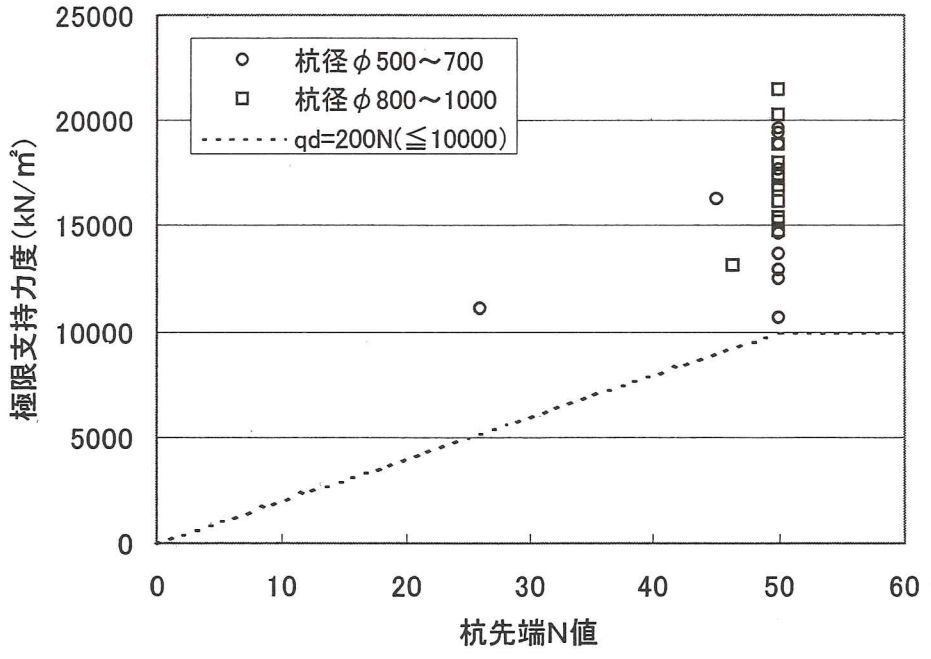


図- 3.53　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の杭先端極限支持力度ｑｄと先端Ｎ値の関係（砂礫層）

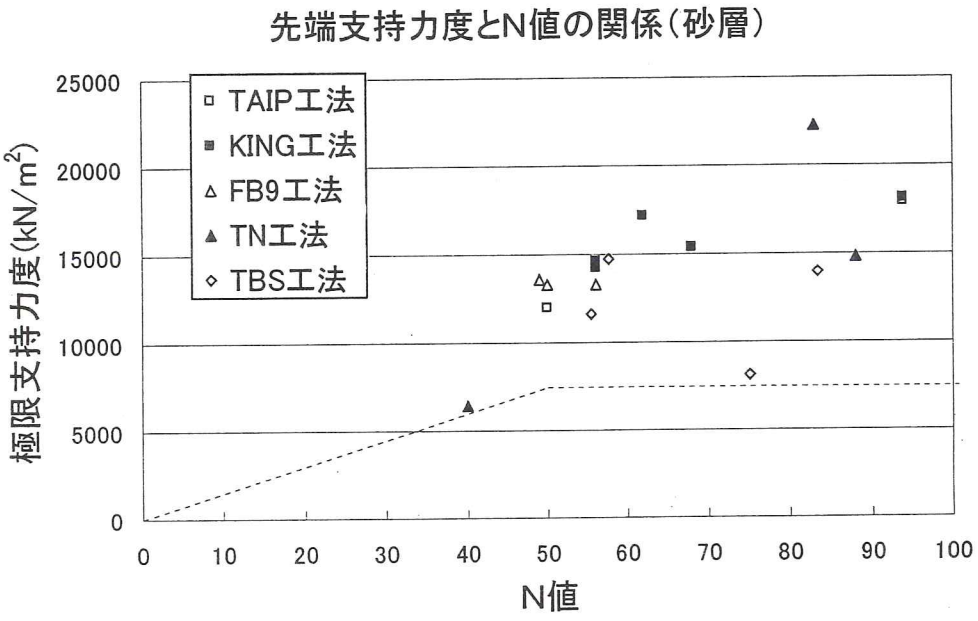


図- 3.54　中掘り杭（鋼管杭）の杭先端極限支持力度ｑｄと先端Ｎ値の関係（砂層）

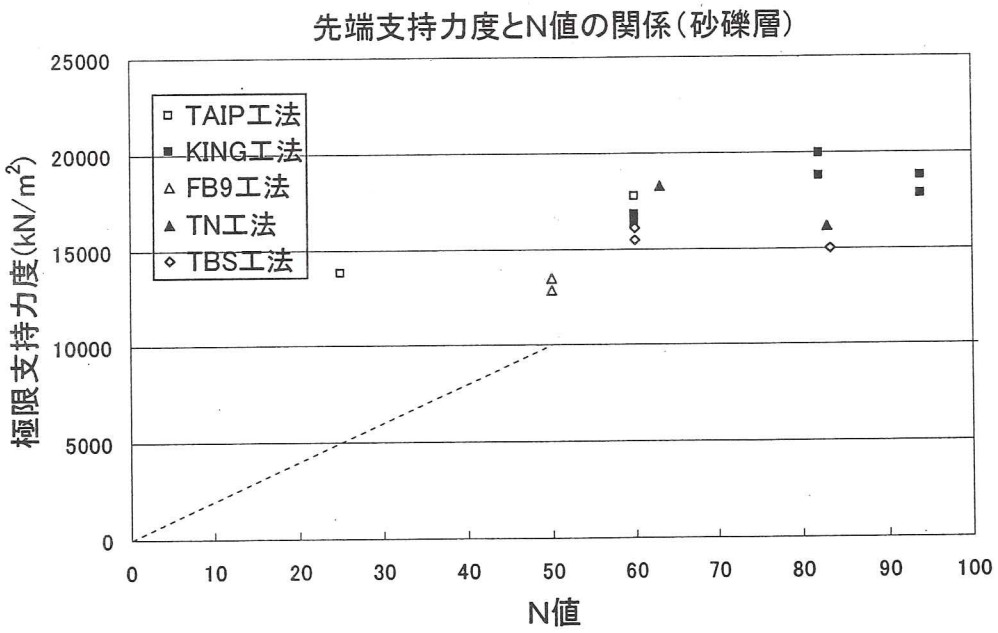


図- 3.55　中掘り杭（鋼管杭）の杭先端極限支持力度ｑｄと先端Ｎ値の関係（砂礫層）

（２）最大周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係

中掘り杭工法における杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係を、地盤別（砂質土および粘性土）および杭種別（ＰＨＣ杭および鋼管杭）に、図- 3.56 ～ 3.59 に示す。なお、図- 3.61 および図 -3.62、図- 3.64 および図- 3.65 には、中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の杭径を小径（φ 450mm ～ 700mm）および大径（φ 800mm ～ 1000mm）に分けてプロットしている。

ＰＨＣ杭および鋼管杭の場合とも、それぞれの全試験値の平均は、Ｈ８道示の支持力推定式（点線）を上回っているものと考えられる。他の工法と同様、載荷試験データに基づいた杭周面摩擦力度ｆｉ～Ｎ値の関係において、平均的な支持力値が得られるように支持力推定式を設定することが妥当である。

そこで、中掘り杭工法におけるｆｉの算定式として、次式（図- 3.56 ～図- 3.59 の点線）が提案できるものと考えられる。

砂質土の場合：ｆ＝ ２Ｎ（≦ 100）（kN/m²）

粘性土の場合：ｆ＝ ８Ｎ（≦ 100）（kN/m²）

ここに、Ｎは、標準貫入試験のＮ値である。

提案式は、ＰＨＣ杭および鋼管杭のいずれの既製杭を用いる場合にも適用することができるものである。提案式は、いずれも平均値よりも若干小さめと考えられるが、従来の推定式に比べて載荷試験結果を踏まえた推定式となっている。

また、図- 3.61 および図 -3.62、図- 3.64 および図- 3.65 より、中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の杭径の差の影響はほとんどないことが確認できる。したがって、中掘り杭工法に用いるＰＨＣ杭の適用杭径は、杭先端の極限支持力度における検討結果と同様、ｆｉに関しても、φ 500mm ～ 1000mm として特に問題はないと考えられる。ただし、これをこえるようなさらに大径の既製杭を用いて中掘り杭工法を適用する場合には、支持力、沈下特性などを載荷試験により確認する必要がある。

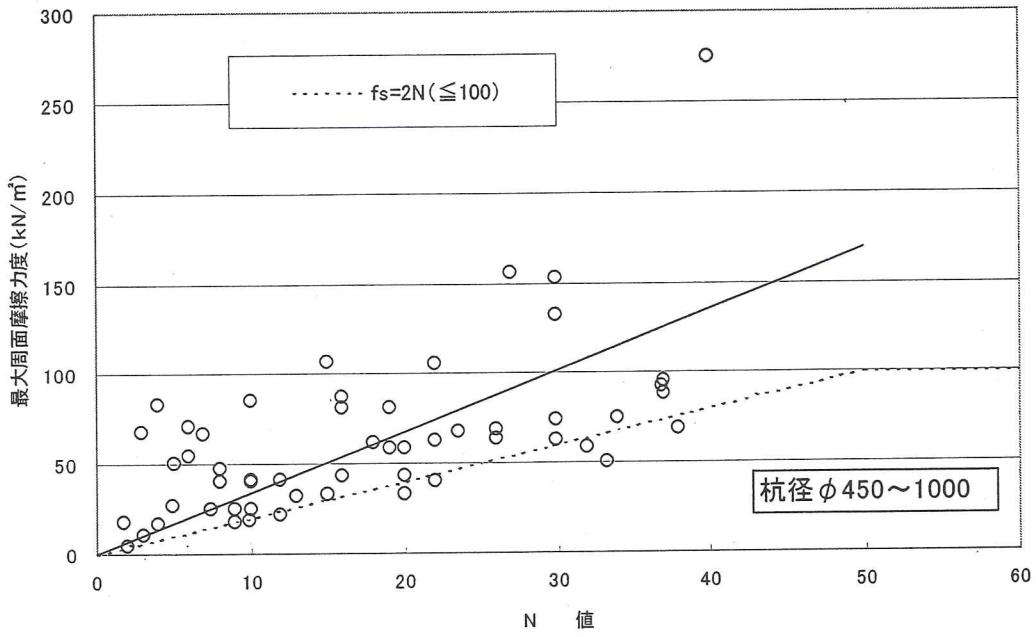


図- 3.56　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとN値の関係（砂質土層）

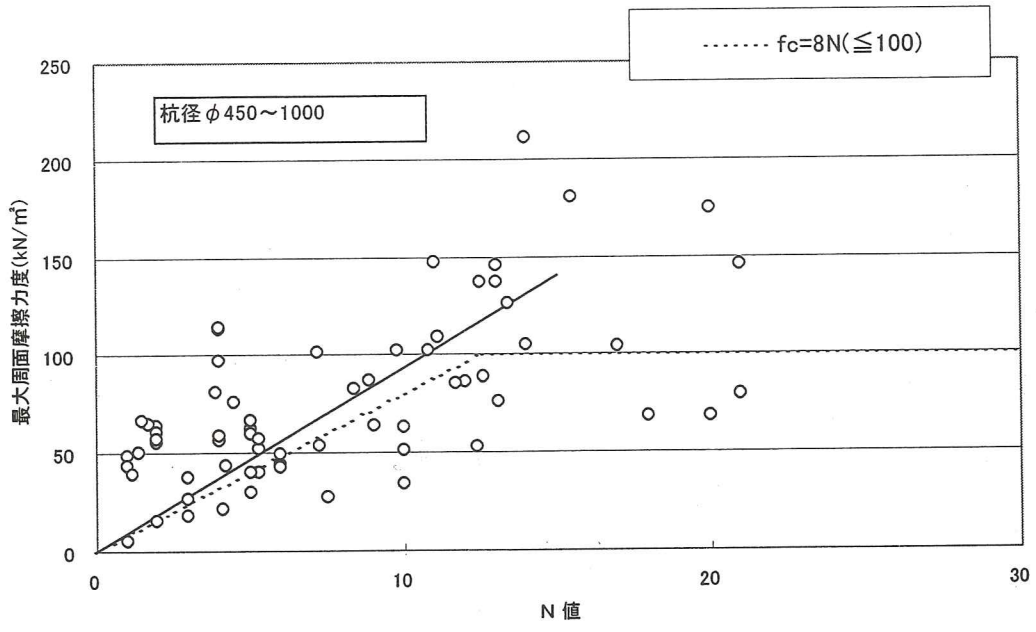


図- 3.57　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土層）

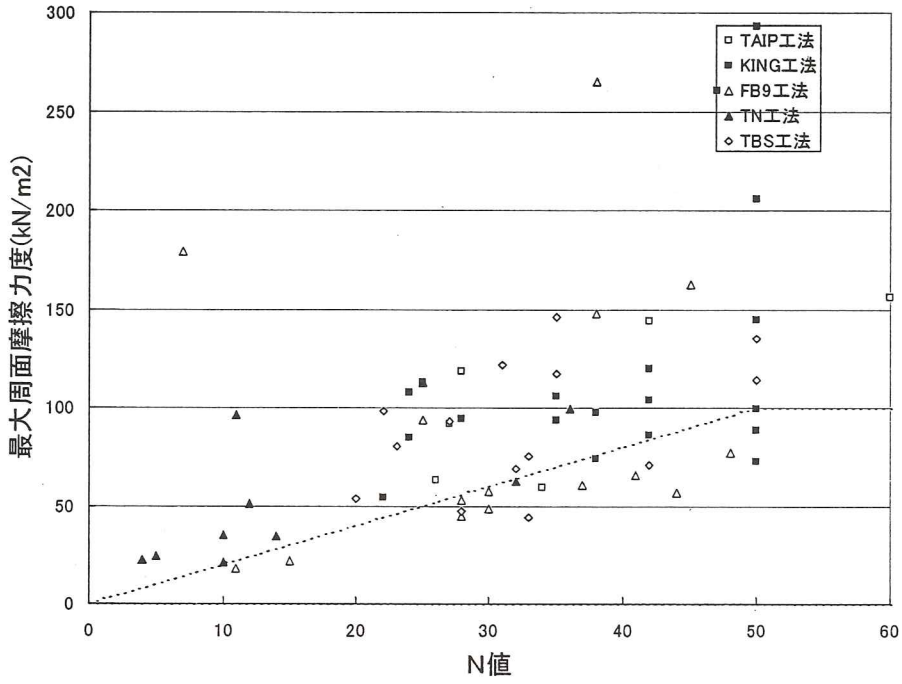


図- 3.58　中掘り杭（鋼管杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（砂質土層）

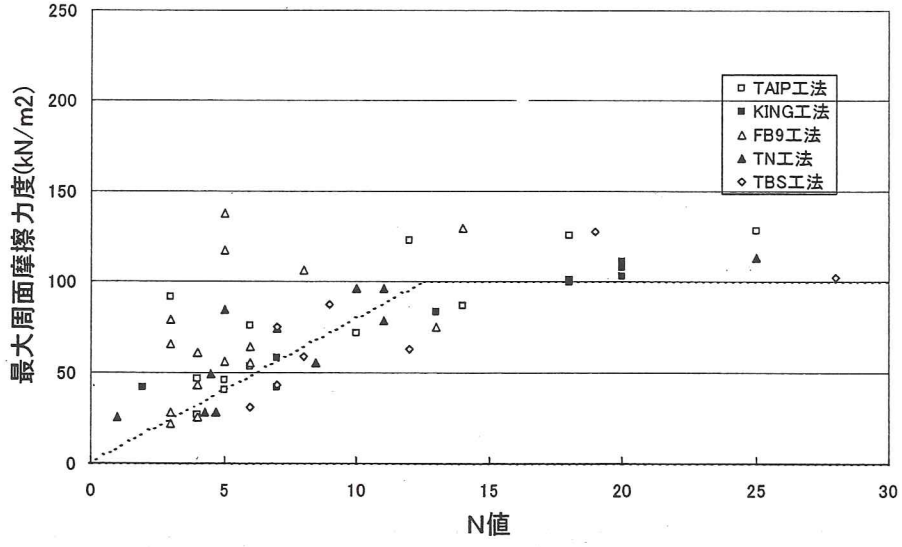


図- 3.59　中掘り杭（鋼管杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土層）

次に、中掘り杭工法に用いるフリクションカッター厚さについて考察する。

検討対象とした中掘り杭工法の載荷試験データは、建設大臣認定を取得している工法で、主に建築基礎に適用されている工法である。中掘り杭工法に用いられる杭先端部のフリクションカッター厚さは、各工法、杭径および杭長によって異なるが、杭径に対しては、表-3.3に示すフリクションカッター厚さが適用されている。

中掘り杭工法における杭周面摩擦力度 f_i ～N値の関係について、フリクションカッター厚さをパラメータとして、杭径別、地盤別（砂質土および粘性土）および杭種別（ＰＨＣ杭および鋼管杭）に表したものを、図-3.60～3.67に示す。図中には、Ｐ５２に示す新たに提案する周面摩擦力度 f_i の推定式を合わせて示している。

表-3.3　中掘り杭のフリクションカッター厚さ

杭径Ｄ（mm）	フリクションカッター厚さｔ（mm）
４００～　６００	９～１９（２２）
７００～　８００	１２～２２
９００～１０００	１６～２５

注）杭径Ｄが400mm～600mmの場合、フリクションカッター厚さｔは、ＰＨＣ杭では19mm、鋼管杭では22mmが最大である。

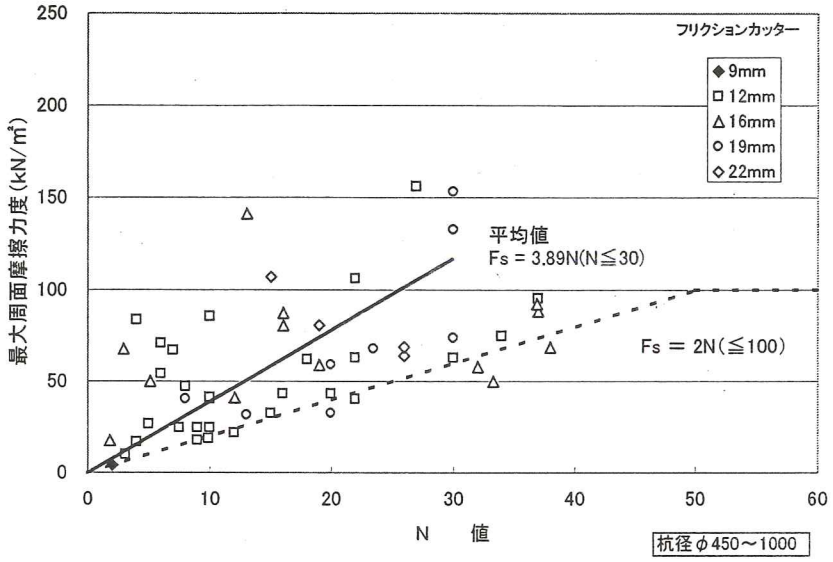


図- 3.60　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（砂質土層）

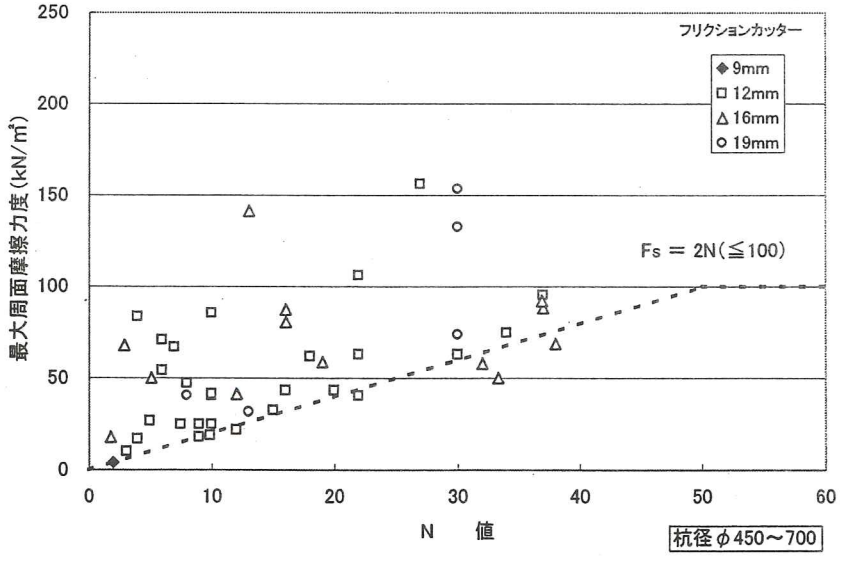


図- 3.61　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（砂質土層）

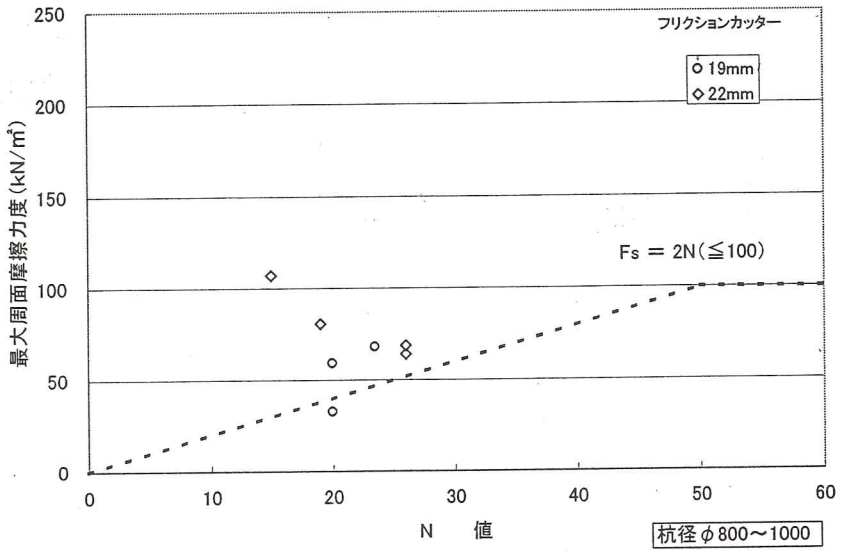


図- 3.62　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（砂質土層）

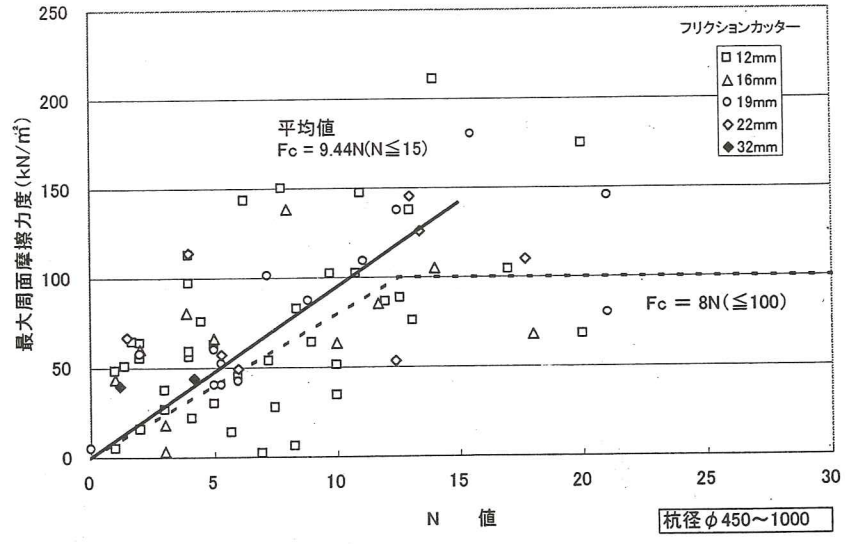


図- 3.63　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土層）

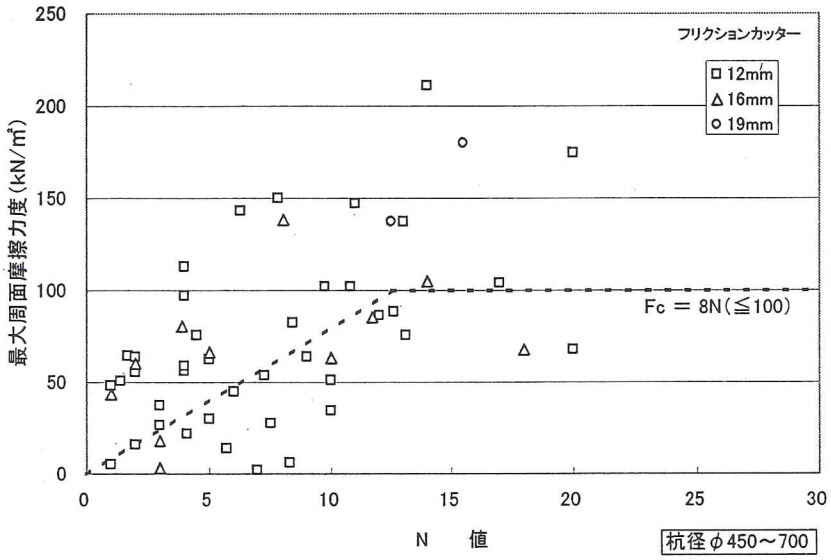


図- 3.64　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土層）

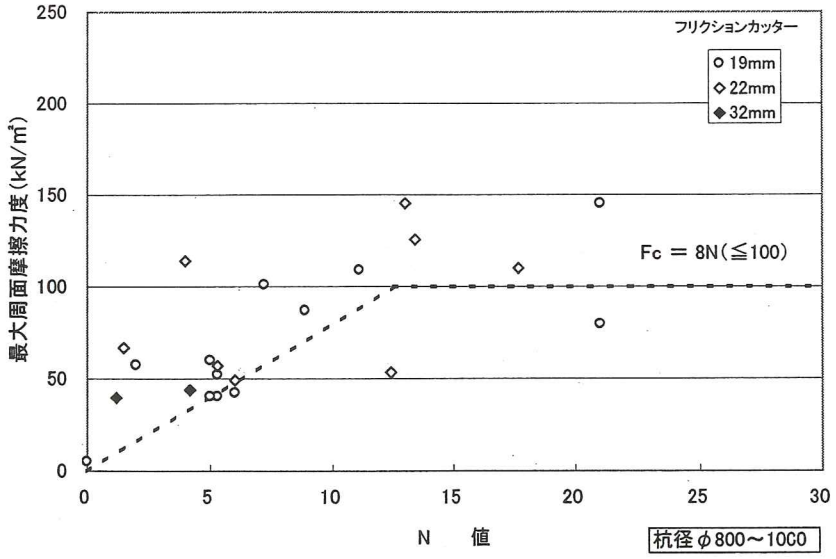


図- 3.65　中掘り杭（ＰＨＣ杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土層）

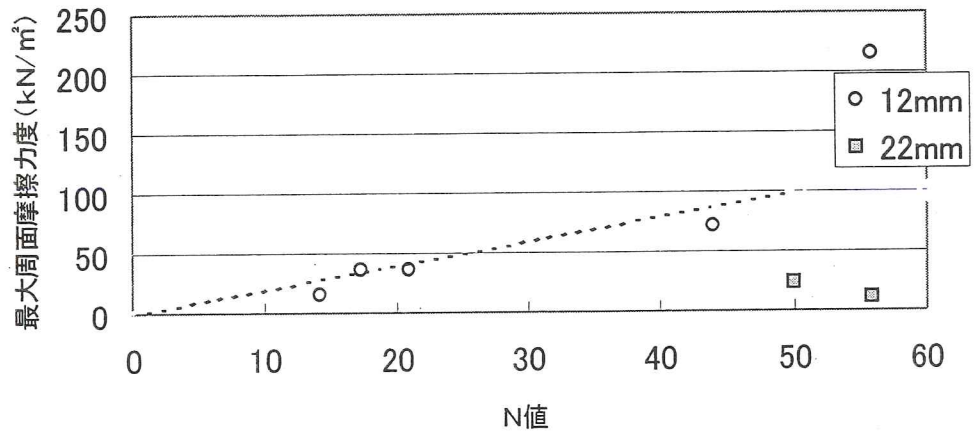


図- 3.66 中掘り杭（鋼管杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（砂質土）

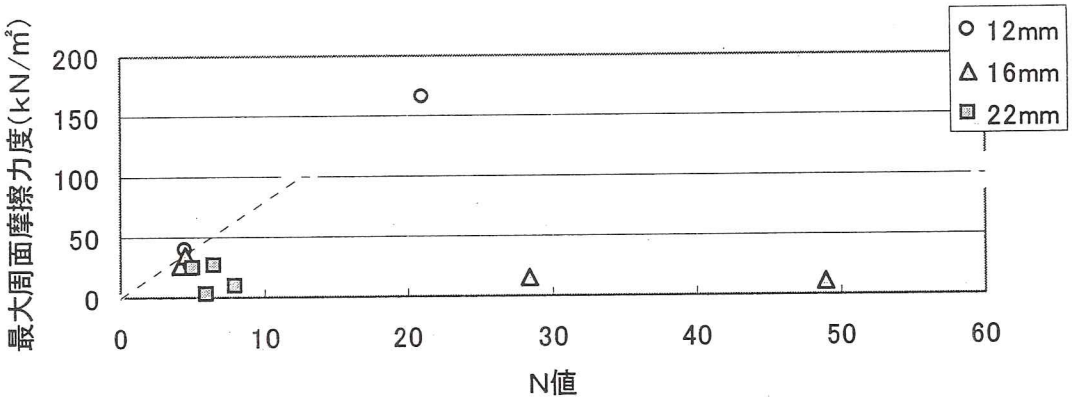


図- 3.67 中掘り杭（鋼管杭）の最大周面摩擦力度ｆｉとＮ値の関係（粘性土）

ＰＨＣ杭の場合、12mm 以上の厚さのフリクションカッターが用いられている工法は 6 工法あり、その採用実績がかなり多いのに対し、鋼管杭の場合には 1 工法（ＴＮ工法）のみであり、採用実績も少ない。ＰＨＣ杭の場合、図- 3.61 に示すように、砂質土層における小径の杭においては、フリクションカッター厚さに関係なく、杭周面の最大摩擦力度 f_i は平均値以上に確保されている。しかし、図- 3.64 に示すように、粘性土層における小径の杭においては、f_i は、ばらつきが大きいことが確認できる。大径の杭においては、砂質土層および粘性土層とも試験データが少ないが、ほぼ平均値程度であり、その傾向はほぼ同じである。しかし、鋼管杭の場合、厚いフリクションカッターを採用した実績は少ないが、図- 3.66 および図- 3.67 に示すように、フリクションカッター厚さの増加に伴って杭周面の最大摩擦力度 f_i が減少することが確認できる。このように、鋼管杭において、ＰＨＣ杭と傾向が異なる理由は不明である。ただし、鋼管杭の場合でも、フリクションカッター厚さが 12mm の場合は、通常用いられる 9mm の場合と同等の周面摩擦力度が得られることが確認できる。

上記の結果を踏まえ、周面摩擦力度を低下させないことを条件に、Ｈ８道示に示されるフリクションカッター厚さを表- 3.4 のように変更することに特に問題はないと考えられる。

表- 3.4　中掘り杭のフリクションカッター厚さの提案値

杭径Ｄ（mm）	フリクションカッター厚さｔ（mm）
８００未満	９以下
８００以上	１２以下

フリクションカッターを厚くすると、杭周面の摩擦力度の低下が懸念されるとともに、水平方向に対する安定性が低下することが考えられる。道路橋の基礎では、建築の基礎と異なり、地震時の安定性を高めるために水平変位を小さく制限しており、フリクションカッターを厚くすると、これを満足しなくなることが考えられる。そこで、ＰＨＣ杭を用いた中掘り杭工法（フリクションカッター厚さは 12mm）において実施された水平載荷試験データにより、水平方向地盤反力係数の実測値と計算値を比較し、通常考えられているばらつきの範囲内にあることを確認するものとする。表- 3.5 に水平載荷試験の結果を、また、図- 3.68 に水平方向地盤反力係数の実測値と計算値の比較結果を示す。図- 3.68 より、フリクションカッター厚さが 12mm 以下であれば、水平方向の安定性について、特に問題が生じることはないものと考えられる。

表- 3.5　水平載荷試験結果

No	杭種	杭径 D (mm)	杭長 L (m)	最大荷重 P max (tf)	最大変位 f (mm)	載荷位置 h (mm)	実測ｋ値 f=10mm (N/mm^3)	計算ｋ値 (N/mm^3)	FC 厚さ (mm)
1	PC-A	500	14	17.5	121.74	500	0.1211	0.0969	12
2	PC-A	500	14	17.5	115.06	500	0.1407	0.0969	12
3	SC(t=6) +PHC-A	600	28	20.0	19.15	150	0.1436	0.1467	12
4	SC(t=6) +PHC-A	600	28	32.0	69.46	150	0.1033	0.1467	12
5	PHC-B +PHC-A	1000	52	72.0	51.28	200	0.1280	0.0177	28

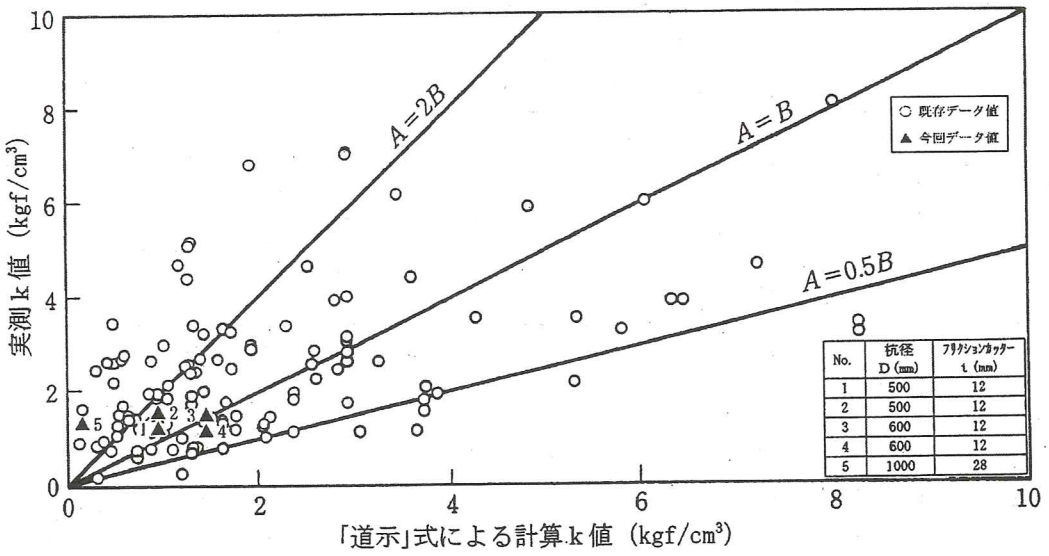


図- 3.68　水平方向地盤反力係数の実測値と計算値

３．７　まとめ

これまでに得られた支持力推定式を表-3.6にまとめて示す。

表-3.6　支持力推定式一覧（kN/m²）

			H８道示	提案式（斜体）
打込み杭	先端	砂質土	300N（N≦40）	同左
		粘性土		
	周面	砂質土	2N（≦100）	同左
		粘性土	c または 10N （≦150）	同左
場所打ち杭	先端	砂質土	3,000（N≧30）	3,000（N≧30） *5,000（N≧50）（砂礫）*
		粘性土	3 q_u	同左
	周面	砂質土	5N（≦200）	同左
		粘性土	c または 10N （≦150）	同左
中掘り杭	先端	砂質土	150N（≦7,500）	同左
		砂礫土	200N（≦10,000）	同左
	周面	砂質土	N（≦50）	*2N（≦100）*
		粘性土	0.5c または 5N （≦100）	*0.8c または 8N （≦100）*
鋼管ソイルセメント杭	先端	砂質土	――――	*150N（≦7,500）*
		砂礫土	――――	*200N（≦10,000）*
	周面	砂質土	――――	*10N（≦200）*
		粘性土	――――	*c または 10N （≦200）*
プレボーリング杭	先端	砂質土	――――	*150N（≦7,500）*
		砂礫土	――――	*200N（≦10,000）*
	周面	砂質土	――――	*5N（≦150）*
		粘性土	――――	*c または 10N （≦100）*

（１）先端支持力

先端支持力について、下記のことが確認できた。

・中掘り杭、鋼管ソイルセメント杭およびプレボーリング杭は、ほぼ同等の支持力特性を有する結果が得られたが、それぞれの施工法の特徴を考慮すると、これは概ね妥当と考えられる。

・鋼管ソイルセメント杭は、同径で掘削する工法であり、鋼管表面の突起の効果により荷重伝達が行われるので、ソイルセメント径を設計径として先端支持力を考慮しても、中掘り杭と同等の支持力が得られるものと考えられる。

・プレボーリング杭は、先端を拡大して根固めを行う工法であるが（拡大径で掘削する工法も含む）、各工法によって先端の拡大径、先端の荷重伝達機構が異なるものと考えられる。したがって、先端支持力度が大きなものもあるが、ばらつきも大きく、安全側に判断すれば、中掘り杭と同等の支持力と評価するのがよいと考えられる。
・鋼管杭およびＰＨＣ杭の中掘り杭工法については、最近新しい工法が開発されてきており、先端支持力の伝達機構も改良され、Ｈ８道示に示される支持力よりも大きな支持力が得られる工法もあることが確認できた。しかし、ばらつきが大きいため、安全側に判断すれば、従来と同等の支持力と評価するのがよいと考えられる。
・バイブロハンマ打込み杭工法については、打込み杭工法（打撃工法）とほぼ同等の支持力特性を有することが確認できた。

（２）周面摩擦力

周面摩擦力について、下記のことが確認できた。
・周面摩擦力の支持力特性としては、コンクリート、ソイルセメント等を介して荷重を伝達する場所打ち杭、鋼管ソイルセメント杭およびプレボーリング杭と、介さない打込み杭（打撃工法）、バイブロハンマ打込み杭および中掘り杭に分類される。
・打込み杭（打撃工法）、バイブロハンマ打込み杭および中掘り杭を比較すると、砂質地盤においては、ばらつきが大きいがほぼ同等の周面摩擦力を有することが確認できた。しかし、粘性土地盤においては、中掘り杭は他の２工法に比べて小さいことが確認できた。
・場所打ち杭、鋼管ソイルセメント杭およびプレボーリング杭を比較すると、砂質地盤においては、ソイルセメント径を杭径として比較しても、鋼管ソイルセメント杭の周面摩擦力が大きいことが確認できた。なお、場所打ち杭とプレボーリング杭はほぼ同等である。粘性土地盤においても、鋼管ソイルセメント杭の周面摩擦力が大きい、プレボーリング杭は他の２工法に比べて若干小さいことが確認できた。
・中掘り杭とプレボーリング杭を比較すると、砂質地盤においてはプレボーリング杭の方が大きいが、粘性土地盤においてはほぼ同等であることが確認できた。

第４章　変形特性

４．１　概要

杭基礎の設計に用いる鉛直方向バネ定数K_vの推定法として、いくつかの方法が提案されているが、道示で適用されているのは、載荷試験に基づき、式（4.1）における係数ａを杭の根入れ比Ｌ／Ｄで評価し、推定する方法である。

$$K_v = a \cdot A_P E_P / L \qquad (4.1)$$

ここに、K_v　：杭の軸方向バネ定数（kN/m）

A_P　：杭の純断面積（m^2）

E_P　：杭体のヤング係数（kN/m^2）

Ｌ　：杭長（m）

ａ　：表-4.1により算定する。

表-4.1に示すように、ａ値は慣例的に、$a = \alpha (L/D) + \beta$のような式で表現されている。

ここで、各種杭工法のK_vを評価するにあたっては、ａ値の推定式を検討するものとし、載荷試験データによる実測K_vから、式（4.2）による逆算ａ値とＬ／Ｄの直線回帰により求める。

$$\text{逆算 } a = \text{実測} K_v \Big/ \frac{A_P E_P}{L} \qquad (4.2)$$

表-4.1　ａ値の推定式

施工法	データ数	ａ値の推定式	相関係数	標準偏差
打込み鋼管杭	42	0.014(L/D)+0.78	56%	0.46
打込みＰＨＣ杭	30	0.013(L/D)+0.61	50%	0.46
場所打ち杭	42	0.031(L/D)-0.15	75%	0.25
中掘り鋼管杭	20	0.009(L/D)+0.39	62%	0.28
中掘りＰＨＣ杭	22	0.011(L/D)+0.36	74%	0.25

最初に、Ｈ 13 道示の改訂にあたり、規定化を検討しているプレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法およびバイブロハンマ打込み杭工法に対して、ａ値の推定式を求めることにする。

なお、鋼管ソイルセメント杭においては、K_vの算出は、式（4.2）により行われる。

$$K_v = a \cdot (A_{SP} E_{SP} + A_{SC} E_{SC}) / L \qquad (4.2)$$

$$E_{SC} = 500\, q_u$$

ここに、K_v ：杭の軸方向バネ定数（kN/m）

A_{SP}：鋼管（杭頭部）の純断面積（m^2）

E_{SP}：鋼管のヤング係数（kN/m^2）

A_{SC}：ソイルセメント柱の純断面積（m^2）

E_{SC}：ソイルセメント柱のヤング係数（kN/m^2）

L　：ソイルセメント柱長（m）

q_u ：ソイルセメントの一軸圧縮強度（kN/m^2）

一般には、q_u＝ 1,000kN/m^2 とする。

次に、その結果を踏まえ、また、ａ値推定上のばらつきを考慮して、工法的に類似性が高いと考えられる工法、あるいは推定式が類似している工法について、ａ値の推定式を合算して、ａ値を再評価するものとする。

４．２　杭頭鉛直バネ定数

ａ値の推定式を検討するにあたって、各杭種、工法ごとに、ａ値を設定した際のばらつきを把握する。

（１）従来の杭工法

１）打込み鋼管杭

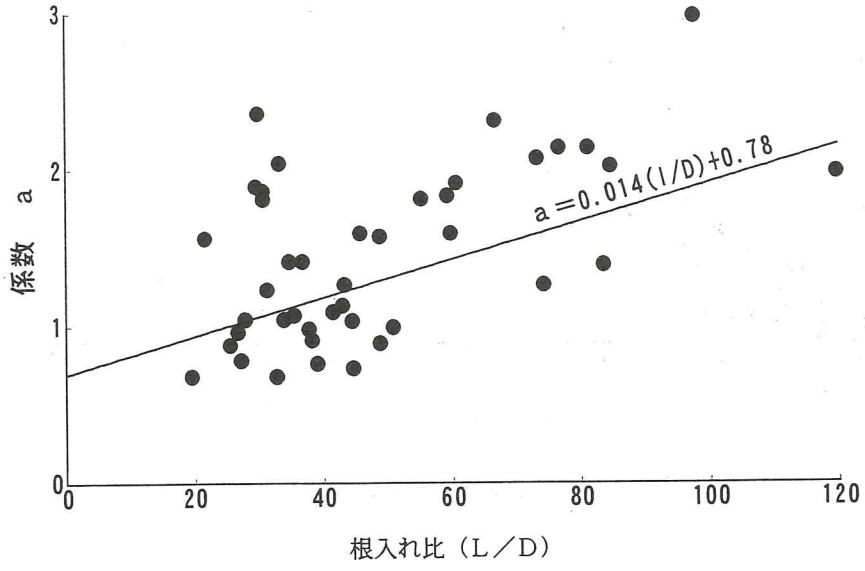


図- 4.1　ａ値と根入れ比（Ｌ／Ｄ）の関係

2）打込みＰＨＣ杭

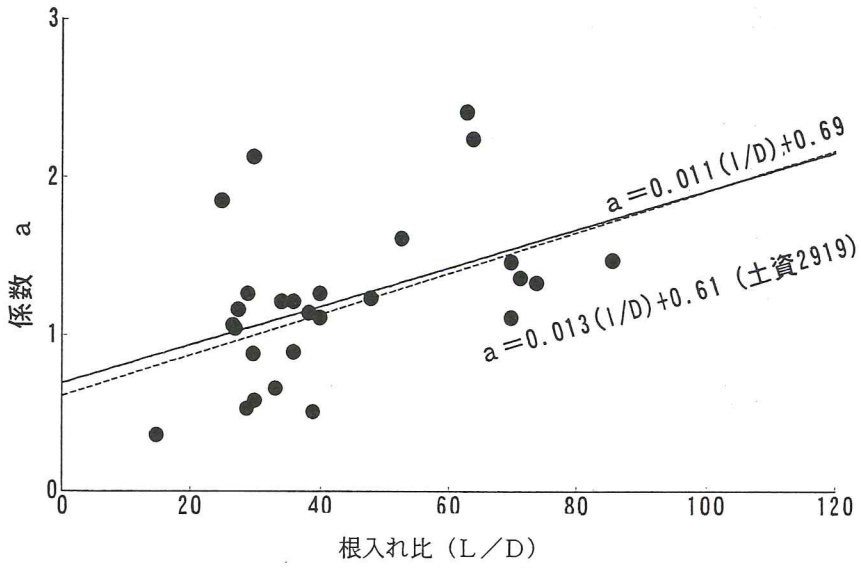


図- 4.2　ａ値と根入れ比（Ｌ／Ｄ）の関係

3）場所打ち杭

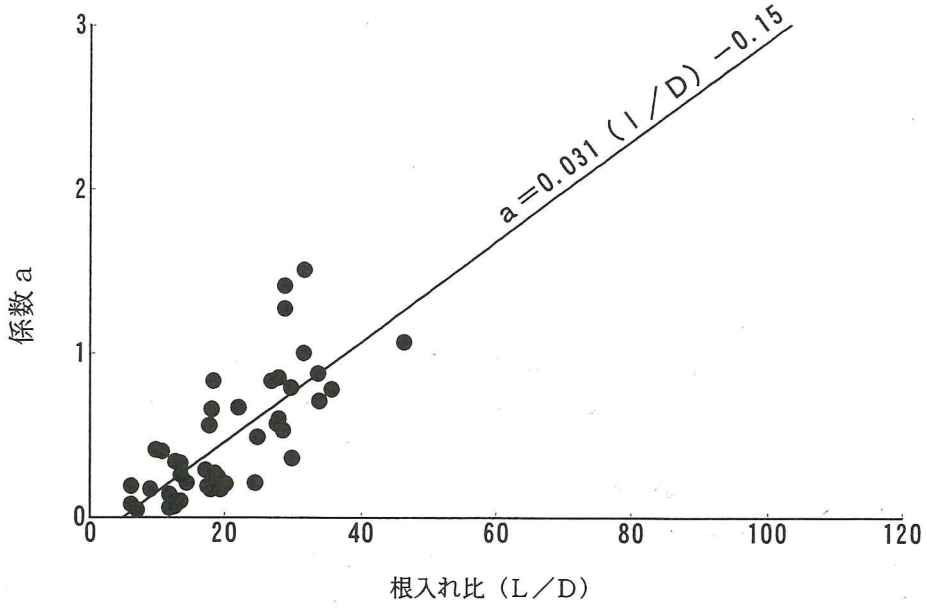


図- 4.3　ａ値と根入れ比（Ｌ／Ｄ）の関係

4）中掘り鋼管杭

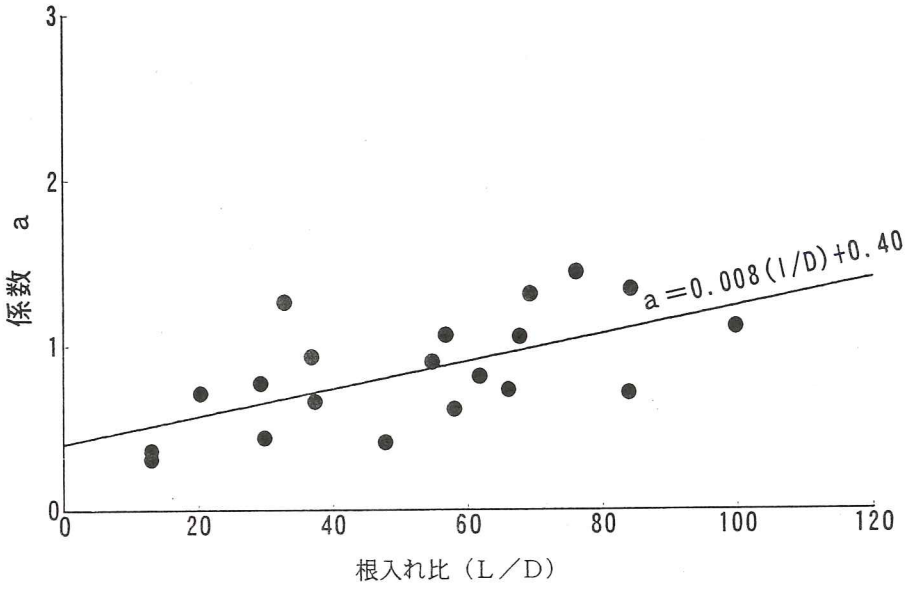


図- 4.4　a 値と根入れ比（L／D）の関係

5）中掘りＰＨＣ杭

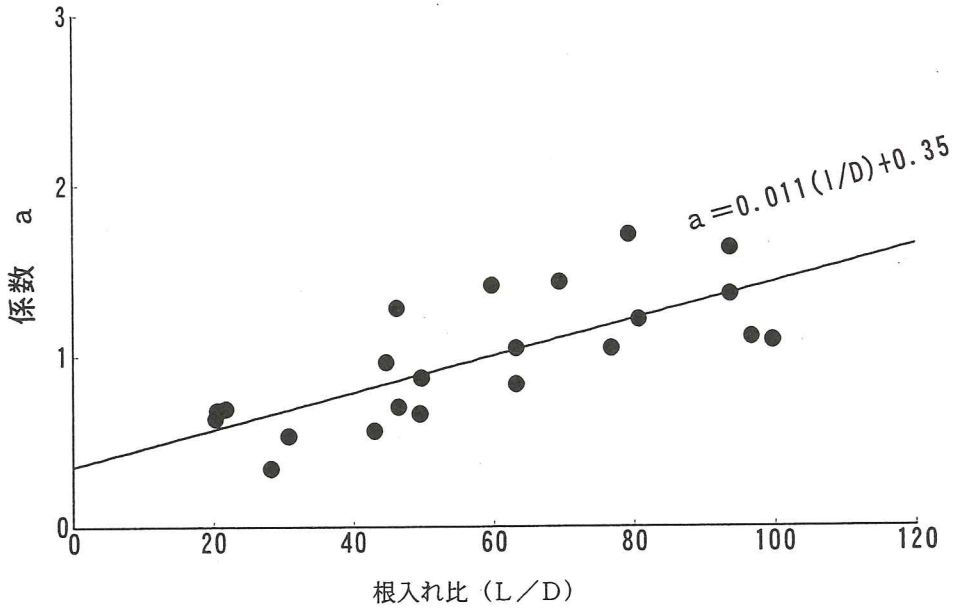


図- 4.5　a 値と根入れ比（L／D）の関係

（２）プレボーリング杭工法

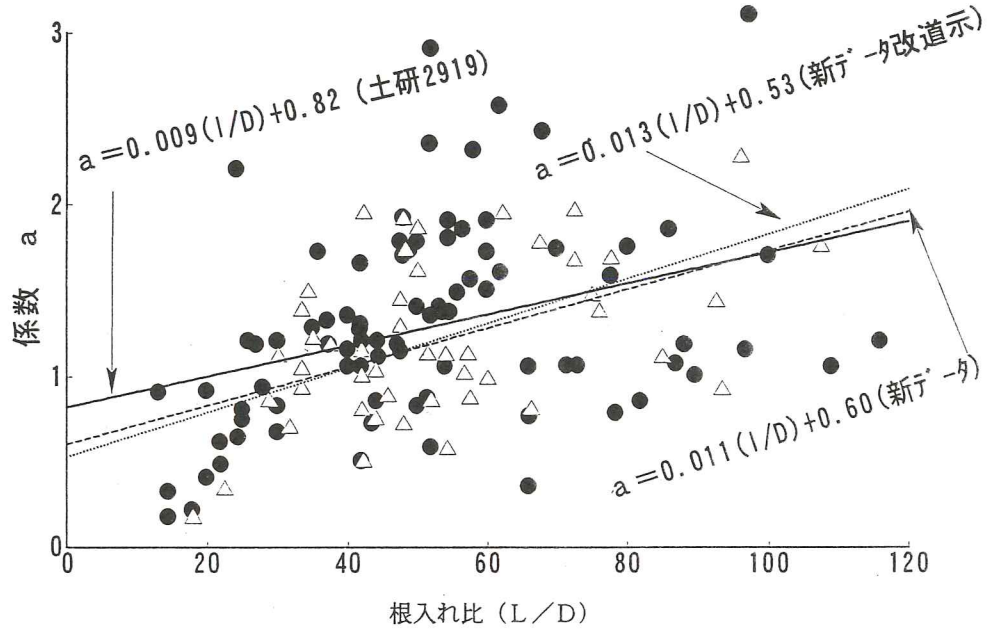


図-4.6　a値と根入れ比（L／D）の関係

（３）鋼管ソイルセメント杭工法

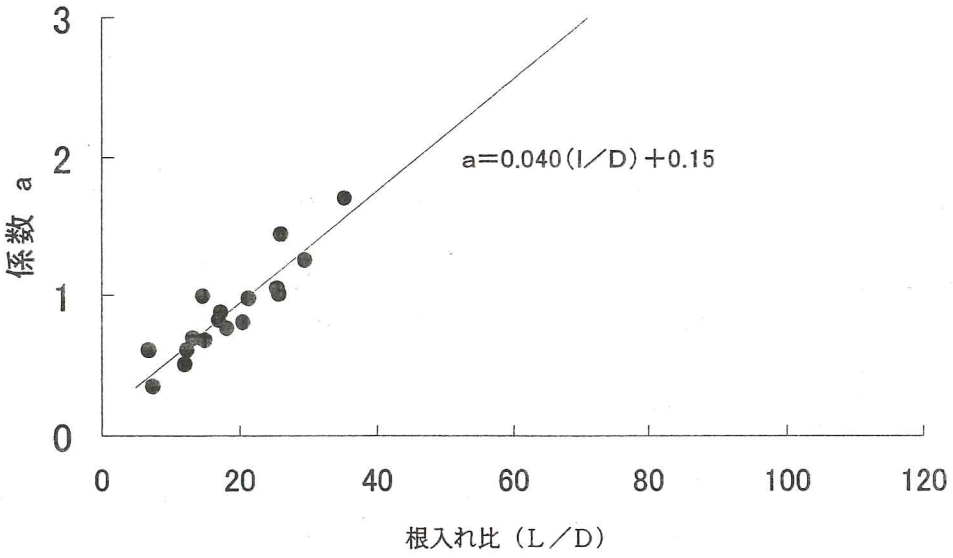


図-4.7　a値と根入れ比（L／D）の関係

（４）バイブロハンマ打込み杭工法

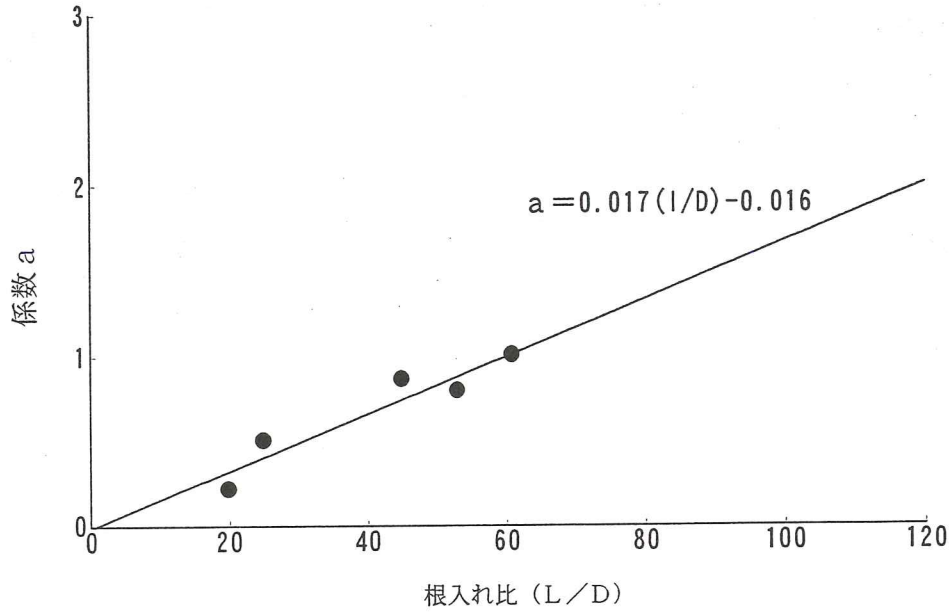


図- 4.8　ａ値と根入れ比（Ｌ／Ｄ）の関係

（５）ａ値の再評価

図- 4.1 ～ 4.8 に示すように、工法によってばらつきの度合いが異なることが確認できる。打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭およびプレボーリング杭については、非常にばらつきが大きく、ａ値と根入れ比の間にあまり相関が見られない（図- 4.1、4.2、4.6）。しかし、中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭、場所打ち杭、鋼管ソイルセメント杭およびバイブロハンマ打込み杭（図- 4.3、4.4、4.5、4.7、4.8）については、ａ値と根入れ比にある程度相関があることが確認できる。

表- 4.1 に、上記（２）～（４）で得られた結果を合わせて示す。また、表- 4.2 に示される各工法のａ値をまとめると図- 4.9 のようになる。

表- 4.2　a 値の推定式

施工法	データ数	a 値の推定式	相関係数	標準偏差
打込み鋼管杭	42	0.014 (L/D) +0.78	56%	0.46
打込みＰＨＣ杭	30	0.013 (L/D) +0.61	50%	0.46
バイブロハンマ打込み杭	7	0.017 (L/D) -0.014		
場所打ち杭	42	0.031 (L/D) -0.15	75%	0.25
中掘り鋼管杭	20	0.009 (L/D) +0.39	62%	0.28
中掘りＰＨＣ杭	22	0.011 (L/D) +0.36	74%	0.25
鋼管ソイルセメント杭	17	0.040 (L/D) +0.15	92%	0.13
プレボーリング杭	47	0.013 (L/D) +0.53		

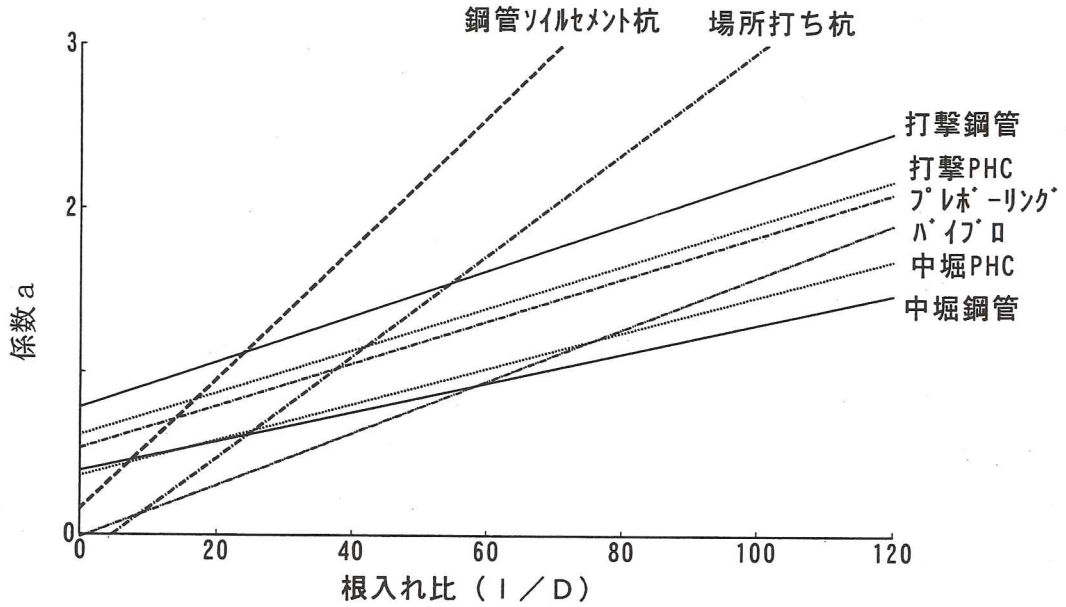


図- 4.9　各工法の a 値推定式

表- 4.2 および図- 4.9 から、a 値の推定式は傾きの大きさにより、２種類に分類することができる。

① 傾きの大きな工法

場所打ち杭、鋼管ソイルセメント杭

② 傾きの小さな工法

打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭、バイブロハンマ打込み杭、中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭、プレボーリング杭

場所打ち杭、鋼管ソイルセメント杭を比較したものを図- 4.10 に示す。

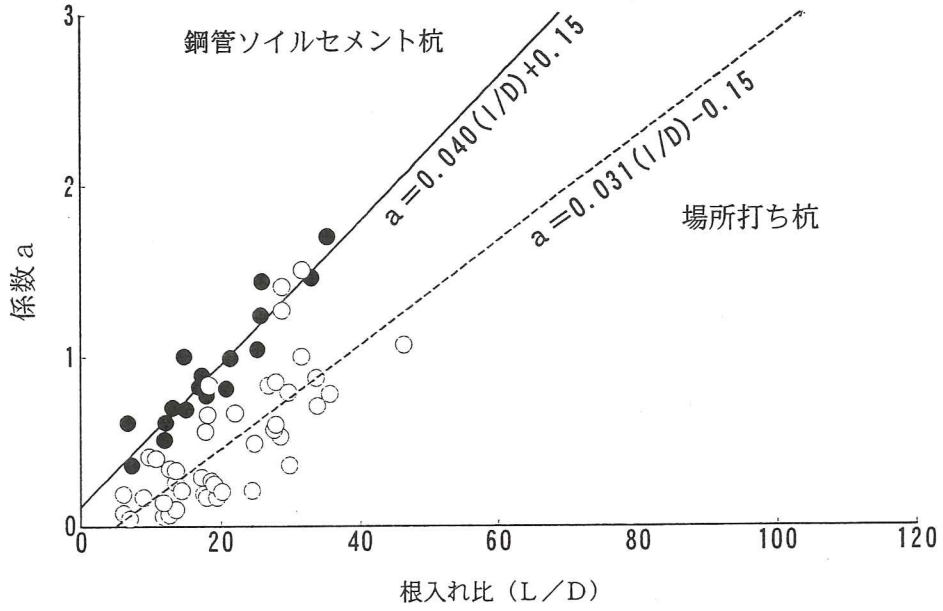


図- 4.10　場所打ち杭および鋼管ソイルセメント杭のａ値推定式の関係

図- 4.10 に示すように、両工法ともａ値は、ほぼ原点付近を通り、根入れ比の増加とともに増加する傾向がある。いずれも根入れ比とａ値との間に相関があり、傾きが大きいという点で類似している。ただし、実測データは明らかに鋼管ソイルセメント杭の方が大きく、両者を統合することには無理があると考えられる。

図- 4.9 に示す傾きの小さな打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭、バイブロハンマ打込み杭、中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭およびプレボーリング杭については、次に示すように、大きく２つに分類することができる。

②１）実測データが右上がりに増加する傾向が明らかな工法
　　バイブロハンマ打込み杭、中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭

②２）実測データのばらつきが非常に大きい工法
　　打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭、プレボーリング杭

②１）に分類される３工法は、比較的ａ値が小さく、また、②２）に分類される工法はａ値が比較的大きいことも特徴である。

②１）の特徴を踏まえると、中掘り鋼管杭および中掘りＰＨＣ杭は、施工法も類似しており、現行のａ値推定式も類似していることから、統合しても特に問題はないと考えられる（図- 4.11）。また、バイブロハンマ打込み杭については、データが少ないため傾きが異なるように思われるが、中掘り鋼管杭および中掘りＰＨＣ杭と同じ図にデータをプロットすると、ほぼ同様と考えられ、中掘り杭と統合して評価することも可能と考えられる（図- 4.12）。

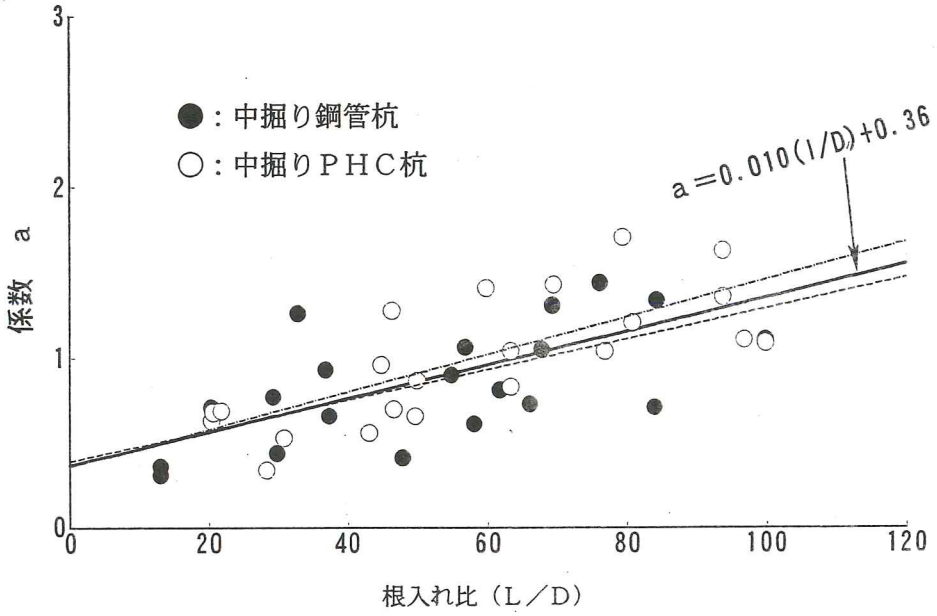


図- 4.11　中掘り鋼管杭および中掘りＰＨＣ杭のａ値推定式の関係

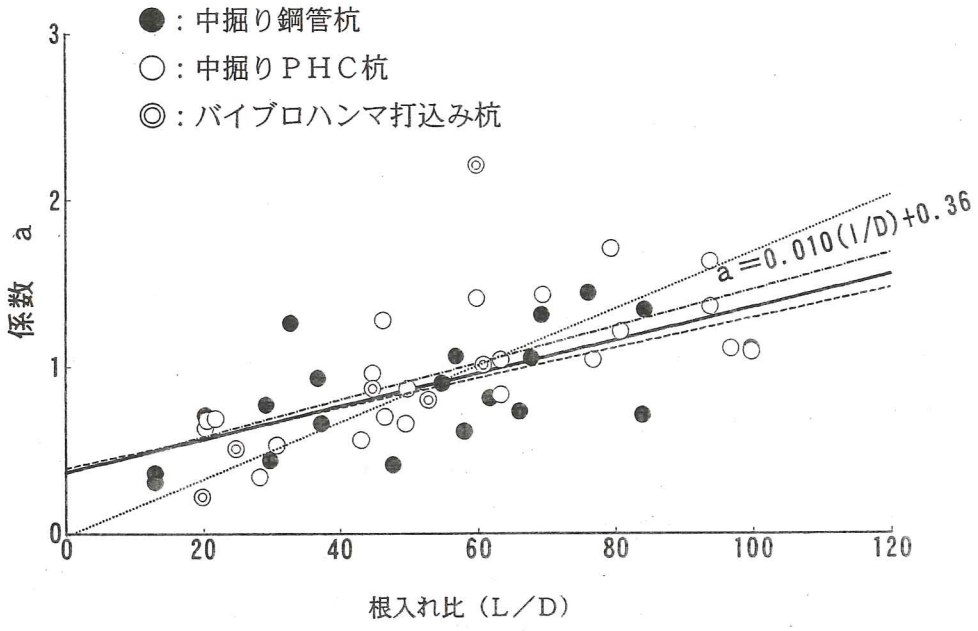


図- 4.12　中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭およびバイブロハンマ打込み杭の
ａ値推定式の関係

②２）に分類される工法に関しては、打込み鋼管杭および打込みＰＨＣ杭は、施工法は類似しているが、現行のａ値推定式には若干の違いがある。しかし、両者のデータの相関を考慮すると、統合しても特に問題はないと考えられる（図- 4.13)。また、打込みＰＨＣ杭とプレボーリング杭はａ値推定式がほぼ同じであり、ばらつきの程度も同じであることから、統合して評価することに特に問題はないと考えられる（図- 4.14)。

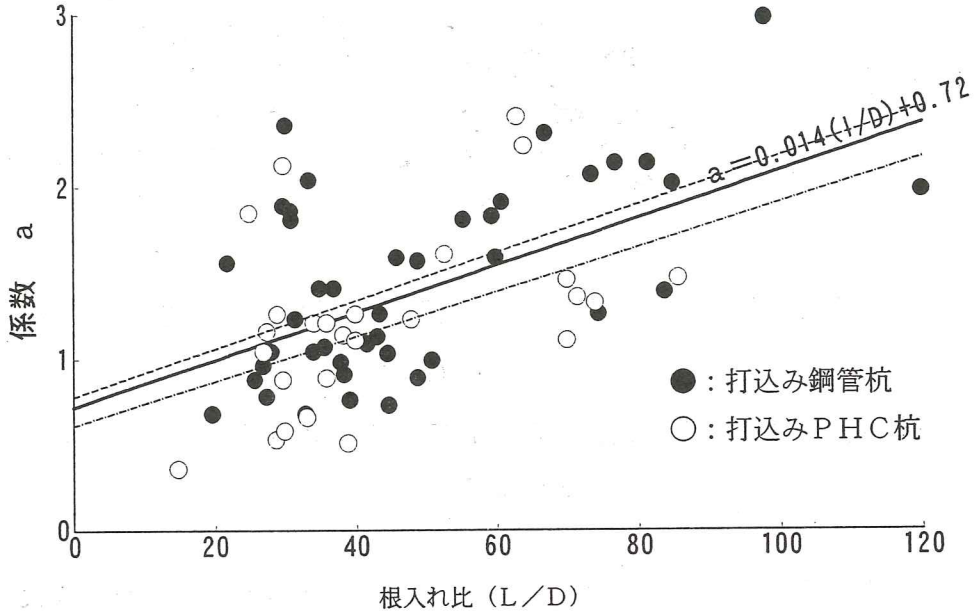


図- 4.13　打込み鋼管杭および打込みＰＨＣ杭のａ値推定式の関係

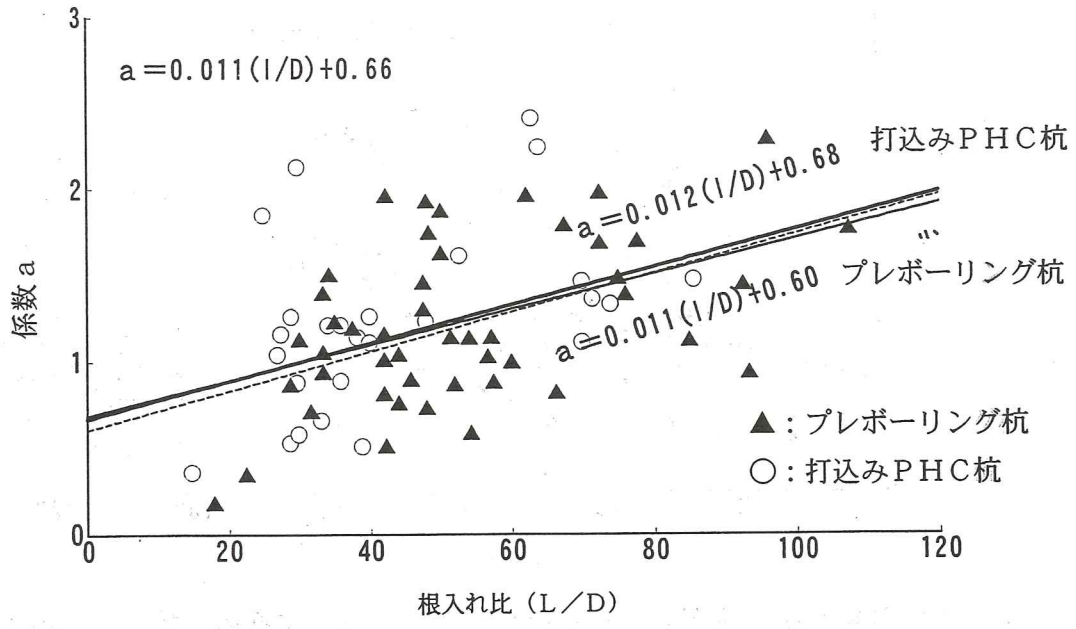


図- 4.14　打込みＰＨＣ杭およびプレボーリング杭のａ値推定式の関係

ここで、打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭およびプレボーリング杭を統合した場合のａ値推定式は、図-4.15のようになる。

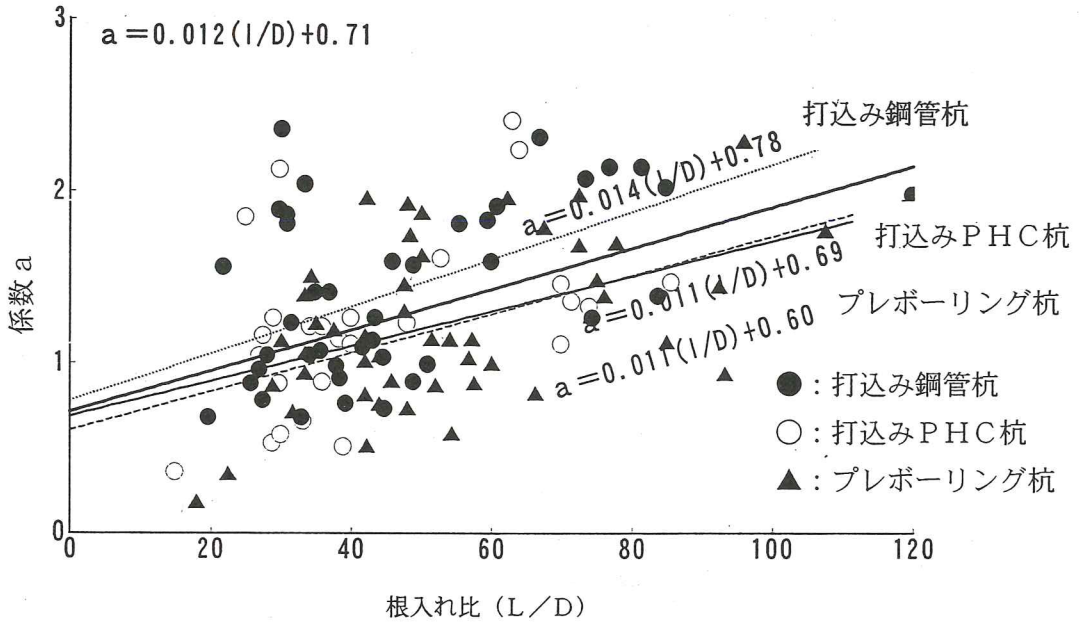


図-4.15　打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭およびプレボーリング杭のａ値推定式の関係

なお、②に分類される６工法をすべて統合すると、ａ値推定式は、図-4.16のようになる。

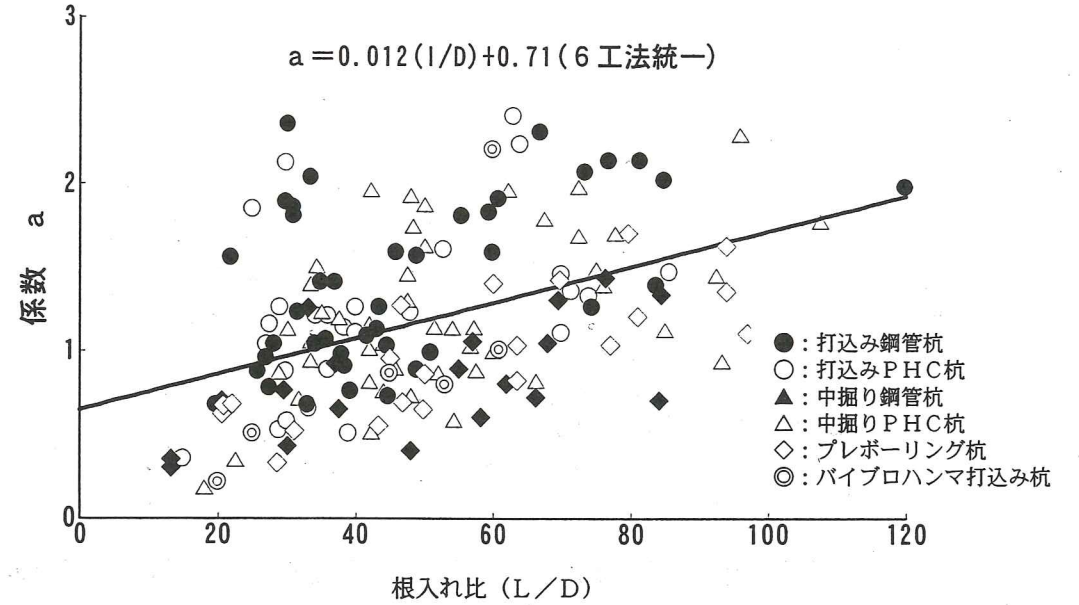


図-4.16　中掘り鋼管杭、中掘りＰＨＣ杭、バイブロハンマ打込み杭、打込み鋼管杭、打込みＰＨＣ杭およびプレボーリング杭のａ値推定式の関係

４．３　まとめ

ａ値推定式の再評価にあたって、現行のａ値推定式の傾向およびその根拠となる実測データの特性を考慮すると、いくつかの統合案が考えられる。しかし、これまでの設計実務、各工法の施工上および支持力特性上の類似性等を考慮すると、表- 4.3 に示すような再評価案が妥当と考えられる。

表- 4.3　ａ値の推定式

施工法	Ｈ８道示におけるａ値推定式	提案推定式
打込み鋼管杭	0.014（L/D）+0.78	0.014（L/D）+0.72
打込みＰＨＣ杭	0.013（L/D）+0.61	
バイブロハンマ打込み杭	―――	0.017（L/D）-0.014
場所打ち杭	0.031（L/D）-0.15	0.031（L/D）-0.15
中掘り鋼管杭	0.009（L/D）+0.39	0.010（L/D）+0.36
中掘りＰＨＣ杭	0.011（L/D）+0.36	
鋼管ソイルセメント杭	―――	0.040（L/D）+0.15
プレボーリング杭	―――	0.013（L/D）+0.53

第５章　結論

本研究において得られた知見をまとめると次のとおりである。

（１）これまでに道示に支持力推定式が示されていなかった鋼管ソイルセメント杭工法、プレボーリング杭工法およびバイブロハンマ打込み杭工法の載荷試験結果を分析することにより、これら３工法の支持力推定式を推定することができた。

（２）場所打ち杭工法の載荷試験結果を分析することにより、先端の極限支持力度を見直すことが妥当と考えられる。

（３）中掘り杭工法の載荷試験結果を分析することにより、最大周面摩擦力度の推定式を見直すことが妥当と考えられる。また、中掘り杭工法により施工されるＰＨＣ杭の適用杭径は、その範囲を広げることが可能であることが確認できた。

中掘り杭工法に用いられるフリクションカッター厚さの実績を整理し、載荷試験結果を分析することによって、最大周面摩擦力度に影響を与えない範囲において、より合理的な施工が可能となるように、フリクションカッター厚さを見直すことが妥当と考えられる。

（４）各工法における鉛直載荷試験結果を分析し、施工法の特徴を考慮したうえで、杭頭の鉛直バネ定数の推定式を提案した。ばらつきの程度を考慮すると、Ｈ８道示の推定式を見直し、統合して示すことが可能と考えられる。

参考文献

1）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、建設省土木研究所資料、第2919号、1991年1月

2）（社）日本道路協会：杭基礎設計便覧、1992年10月

3）（社）日本道路協会：杭基礎施工便覧、1992年10月

4）（社）コンクリートパイル建設技術協会：プレボーリング工法による杭の支持力特性について、1995年3月

5）（社）コンクリートパイル建設技術協会：プレボーリング工法設計・施工指針（案）－土木編－、1996年1月

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「同時埋設合成鋼管杭工法（ガンテツパイル）」、1995年3月

7）（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「ソイルセメント合成鋼管杭工法」、1991年2月

8）（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「ガンテツパイル（鋼管ソイルセメント杭工法）」、2000年3月

9）（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年12月

10）斉藤、高橋ほか：バイブロ施工鋼管杭の支持力提案式（その２）載荷試験による検証、地盤工学研究発表会、2000年7月

11）鋼管杭協会：鋼管杭の中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）施工要領、2000年10月

12）鋼管杭協会：バイブロハンマ工法　施工管理要領（案）、2000年2月

13）鋼管杭協会：バイブロハンマ工法　－その設計と施工－、2000年4月

本研究は、H 13 道示の検討にあたり、（社）日本道路協会、下部構造小委員会の下に設置された新技術ＷＧにおける検討成果をとりまとめたものである。

本資料をまとめるにあたり、下記の方々のご協力をいただいた。

飯島　啓秀
首都高速道路公団　計画部
板谷　彰
旭化成建材株式会社パイル・土木資材技術部
内島　隆
社団法人　コンクリートパイル建設技術協会
大岩健次郎
日本コンクリート工業株式会社　技術開発部
坂　　英昌
株式会社熊谷組技術本部土木技術開発部
龍田　昌毅
新日本製鐵株式会社　建材開発技術部　土木基礎建材技術グループ
津田　　和義
日本ヒューム株式会社　開発営業部