

バイプロハンマ工法を用いた 杭の支持力特性の評価

バイプロハンマ工法技術研究会、鋼管杭・鋼矢板技術協会

1. はじめに

バイプロハンマ工法は、バイプロハンマとクレーンからなるシンプルな重機構成で、高い鉛直精度を確保しながら杭を施工できることや、杭とバイプロハンマをクレーンで吊下げる施工方法のためロングスパンでの手延べ施工ができること、また、打撃工法に比べて騒音が小さいことなど他工法にはない特長を有している。このことから、港湾の栈橋や河川内の橋梁の基礎杭等では、施工機械が配置される水面上と水中の地盤面との間に距離があるため、杭の建ちが安定するまで、手延べ施工で鉛直精度を維持できるバイプロハンマ工法が用いられている。また、鋼管矢板基礎においては、鋼管矢板の継手を嵌合しつつ閉合する必要があり、高い施工精度が求められるため、打込み杭工法による場合は、建込み時の精度確保と打設中の精度維持が可能なバイプロハンマ工法が不可欠な施工技術として用いられている。

一方、H14年道路橋示方書においては、バイプロハンマ工法は「打撃工法と同じ打込み杭工法の一つ」として区分されてきたが、H29年度の改定にあたり、バイプロハンマ工法は道路橋示方書で扱われている他の工法と比較して支持力に関する統計量の分析に必要な載荷試験数が限られていたことや、油圧ハンマによる打撃工法の支持力特性と異なる傾向が見られたこと（後掲の図11、14、17参照）な

どの理由から、支持力推定式の記載が見送られた¹⁾。

しかしながら、バイプロハンマ工法は、上記の通り他工法にはない特長を有しており実工事において欠くことのできない技術であることから、バイプロハンマ工法技術研究会と鋼管杭・鋼矢板技術協会は、2018年に新たに3件の載荷試験を実施し、既往の試験と併せた12件の試験結果をもとにバイプロハンマ工法で施工した杭（以下、バイプロハンマ打込み杭と略称）の支持力特性を再整理した。本報では、今般実施した載荷試験と支持力特性の整理結果について報告する。

表1 2018年度押込み試験の鋼管杭諸元一覧

	試験杭A	試験杭B	試験杭C
①直径 (mm)	1,000	500	500
②板厚 (mm)	14	10	10
③杭長 (m)	15.0	14.0	14.0
④根入れ長 (m)	14.3	13.3	13.3
⑤支持層への根入れ長 (m)	2.0	1.0	1.0
根入れ比 (⑤/①)	2.0	2.0	2.0
断面積 (cm ²)	433.7	153.9	153.9
規格	SKK490	SKK490	SKK490
耐力 (kN)	13,660	4,850	4,850

表2 鋼管杭の打込みに供したバイプロハンマの諸元

	試験杭A	試験杭B	試験杭C
モータ出力 [※] (kW)	180	139	142
起振力 (kN)	1,116	767	929
偏心モーメント (kg・m)	160	10	30
振動周波数 (Hz)	13.3	45	28

※) バイプロハンマの動力源は試験杭Aが電動式、試験杭B、Cが油圧式

2. 載荷試験

2.1 試験方法

載荷試験は静的な押込み試験によって行い、東播建機（株）のヤード（兵庫県加古郡播磨町新島17-1）で2018年5月に実施した。載荷の対象とした鋼管杭の諸元を表1に、鋼管杭の打込みに供したバイプロハンマの諸元を表2に、試験地盤の条件を図1に示す。なお、表2中のモータ出力Pw (kW) は、バイプロハンマの動力源に応じて、下式で求めた値である²⁾。

・電動式バイプロハンマ

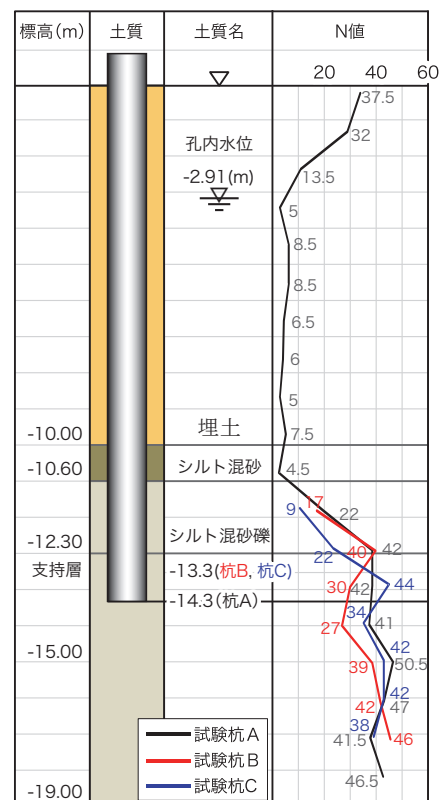


図1 2018年押込み試験における地盤条件

$$: P_w \cong 1.3 \times I_A \times E \times 10^{-3}$$

ここに、 I_A ：定格電流値 (A)

E ：定格電圧値 (V)

・油圧式パイロハンマ

$$: P_w = \delta \times P - \beta$$

ここに、 P ：モータ圧力 (MPa)

δ ：圧力換算係数

(kW/MPa = ℓ /sec)

β ：圧力変換係数 (kW)

また、試験地盤のうち -12.3m 以深の支持層は洪積層、その上は沖積層または埋土である。

荷重は、杭打ち込みから約1ヶ月 (28～32日後) 養生した後、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版」(地盤工学会)³⁾に基づき、多サイクル方式により行った。荷重装置は、荷重を載荷する油圧ジャッキ、反力を反力杭に伝える載荷桁および反力杭から成る構成とした。杭の打設状況を写真1に、載荷試験状況を写真2に示す。また、杭およびボーリング孔の配置を図



写真1 杭打設状況 (試験杭A)



写真2 載荷試験状況 (桁組と杭頭載荷状況)

2に、ひずみゲージ等の計器取付け位置を図3に示す。

試験杭は、実工事における杭の支持力特性を忠実に再現できるように、一般的な工事に倣い杭基礎施工便覧 (平成27年3月、日本道路協会) に掲載される既製杭の管理基準の例に準拠し、管理

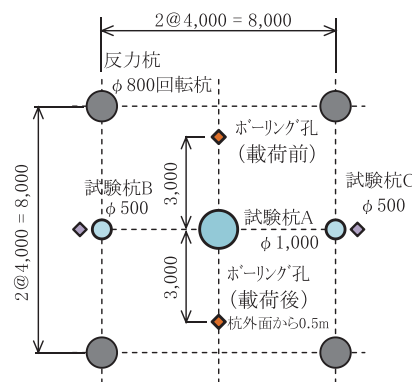


図2 杭とボーリング孔の配置

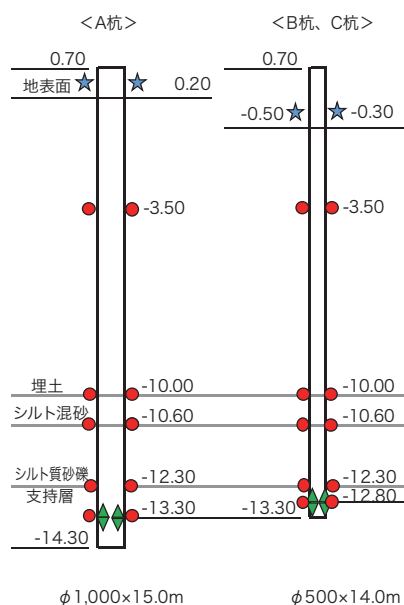


図3 ひずみゲージ等計器取付け位置

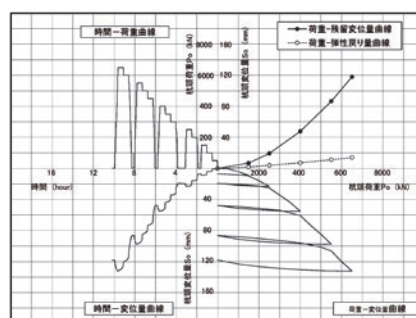


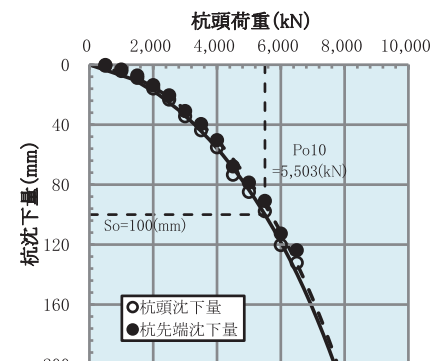
図4 試験結果総合図 (試験杭A)

基準を十分に満足する精度で施工した。

2.2 試験結果

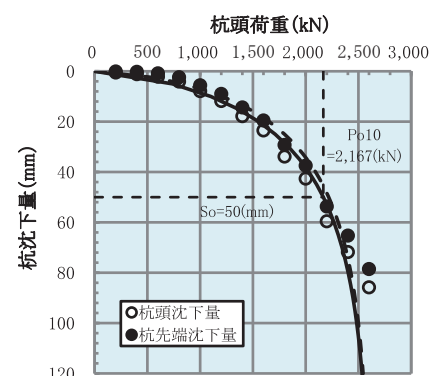
代表的な試験結果を図4～8に示す。

図5～7には、土木研究所資料第4374



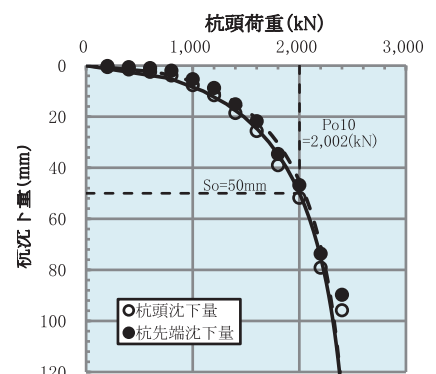
項目	値
杭頭における極限持続力	P_{ou} (kN) 13,942
変位指数	m 0.675
杭頭変位の特性値	S_{os} (mm) 277.57

図5 杭頭荷重と杭沈下量 (試験杭A)



項目	値
杭頭における極限持続力	P_{ou} (kN) 2,637
変位指数	m 0.721
杭頭変位の特性値	S_{os} (mm) 23.49

図6 杭頭荷重と杭沈下量 (試験杭B)



項目	値
杭頭における極限持続力	P_{ou} (kN) 2,567
変位指数	m 0.619
杭頭変位の特性値	S_{os} (mm) 25.60

図7 杭頭荷重と杭沈下量 (試験杭C)

号⁴⁾(以下「土木研究所資料」)に基づき設定したWeibull分布近似曲線と、同曲線から求めた杭頭沈下量が杭径の10%に達したときの杭頭荷重; Po10を併せて示している。

3. 支持力特性の整理

3.1 対象とする載荷試験

支持力特性は、上記3件の載荷試験、およびこれまでに実施された9件の載荷試験結果を整理した。試験に用いた鋼管杭とパイプロハンマの諸元、杭打設から載荷までの経過時間を表3に示

す。パイプロハンマの振動周波数は6.7～45Hzであり、低周波～高周波域に至る広範な周波数帯を対象にしている。試験の対象とした杭径は500mm～1,016mmである。また、杭打設から載荷までの養生期間は、記録が残っているものについては概ね1ヶ月弱以上である。

3.2 支持力特性の整理条件

支持力特性は、土木研究所資料の手法に準拠し整理した。したがって、極限支持力時の沈下量は杭頭が杭径の10%に達したときを採用しており、「港湾の施設の技術上の基準」⁵⁾(以下

「港湾基準」)で採用している杭先端が杭径の10%に達したときとは異なる。しかしながら、対象とした12件の試験についてみると、図9に示す通り、港湾基準に準拠の杭先端沈下量が杭径の10%に達した時の杭頭荷重は、土木研究所資料に準拠した時の荷重より約7%大きく、両者の相関も相関係数0.999と高いことから、本報の検討結果は、港湾構造物の設計にも安全側の評価として参考とすることができる。

3.2.1 周面抵抗力度

(1) 砂質土

砂質土について試験結果を表4に、推定式の強度変化点の算定図を図10に示す。図10より、近似曲線の交点の傾き $y/x = 2.01$ と y 座標 $= 53.14$ の端数を切り捨てると、砂質土の周面抵抗力度の推定式は $f = 2N (\leq 50) \text{ kN/m}^2$ で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図11に、推定精度の評価を表5に示す。なお、参考として、図11には打撃杭の試験値と推定式を併せて掲載している。また、推定精度について、土木研究所資料から抜粋して他工法により施工された杭との比較を図12に示す。

これらの図表より、N値の高い領域で試験値が推定式より大き目の値にばらついているものの、パイプロハンマ打込み杭の砂質土における推定比(試験値/推定式による計算値)は平均(幾何平均)で1.083となり、ここで採用した推定式によると平均的特性をよく表しているといえる。また、推定式のばらつきを表す変動係数についてみ

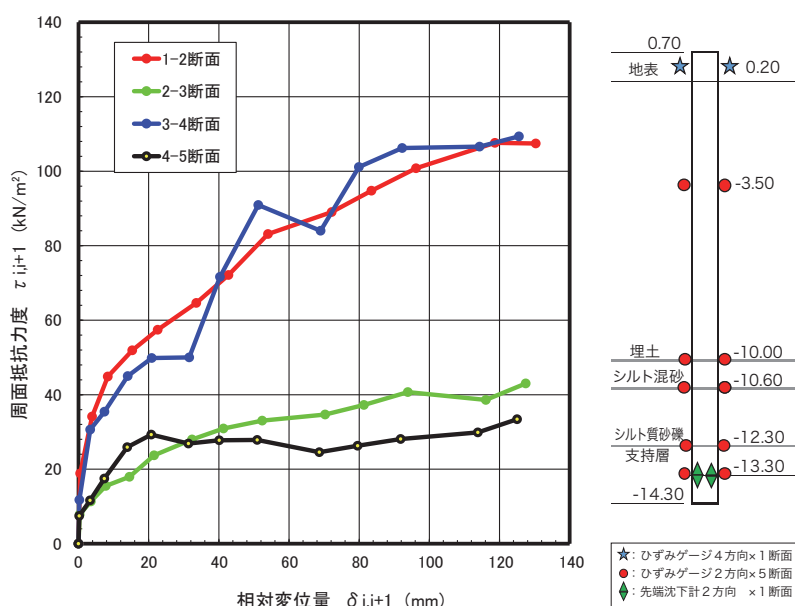


図8 周面抵抗力度と相対変位量(試験杭A)

表3 鋼管杭およびパイプロハンマ

試験No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
①直径(mm)	800	600	800	1000	600	610	600	660	1016	1000	500	500
板厚(mm)	16	12	14	14	14	17.4	14	10.3	10.3	14	10	10
杭長(m)	16.1	12.1	49.3	60.0	28.0	32.4	15.5	20.0	20.0	15.0	14.0	14.0
根入れ長(m)	15.2	11.2	48.3	58.7	27.0	31.4	14.5	19.4	19.4	14.3	13.3	13.3
②支持層への根入(m)	4.0	3.0	2.3	1.7	3.0	1.8	1.5	1.9	1.9	2.0	1.0	1.0
根入れ比(②/①)	5.0	5.0	2.9	1.7	5.0	2.95	2.5	2.9	1.9	2.0	2.0	2.0
モータ出力(kW)	120 150	120	200 240	240	200	240	150	75	120	180	139	142
起振力(kN)	748 627	632	1330 1830	1830	1330	1830	1050	491	687	1116	767	929
偏心モーメント(kg・m)	71 150	62.5	280 360	360	280	360	150	223	390	160	10	30
振動周波数(Hz)	16 10.3	16	11 11.3	11.3	11	11.3	13.3	7.5	6.7	13.3	45	28
杭打設から載荷までの経過時間	1～2ヶ月	1ヶ月弱	2～3ヶ月	不明	1～2ヶ月	25日	23日	不明	不明	28日	31日	32日

※1. 2018年度押込み試験：試験No.10～12 (No.10：試験杭A, No.11：試験杭B, No.12：試験杭C)

※2. 試験No.1では深度12.2mでパイプロを交換(上段→下段)、試験No.3では深度40.5mでパイプロを交換(上段→下段)

※3. パイプロハンマの動力源は、試験1～10が電動式、試験11、12が油圧式

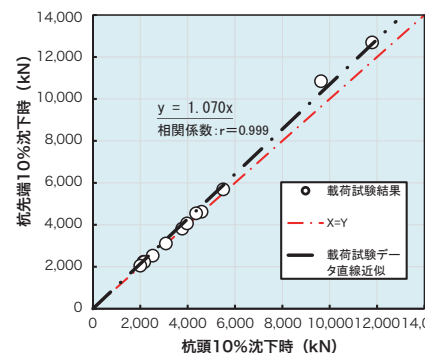


図9 杭頭荷重の比較(kN)

ると、図12よりバイプロハンマ打込み杭の砂質土における値は0.712であり、他工法と同等または比較的高い精度を有する結果であった。

(2) 粘性土

粘性土について試験結果を表6に、推定式の強度変化点の算定図を図13に示す。図13より、近似曲線の交点の傾き $y/x = 1.01$ と y 座標 = 30.19 の端数を切り捨てると、粘性土の周面抵抗力度の推定式は $f = c (\leq 30) \text{ kN/m}^2$ で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図14に、推定精度の評価を表7に、土木研究所資料から抜粋して他工法により施工された杭との推定精度の比較を図15に示す。なお、参考として、図14には打撃杭の試験値と

推定式を併せて掲載している。

図15より、バイプロハンマ打込み杭の粘性土における推定式は推定比が平均(幾何平均)で0.982、変動係数が0.341であり、他工法と同程度の精度であることがわかる。なお、図14に示されたとおり、バイプロハンマ打込み杭の推定式は打撃杭と同じ傾きになるが、粘着力の比較的小さな地盤に試験が限られていたため、最大値は 30 kN/m^2 と試験で確認できた範囲に留めている。ただし、図14においてバイプロハンマ打込み杭の試験結果は打撃杭の推定式に比較的好く沿っており、試験結果も類似した傾向を示す。しかしながら、粘性土における既往の載荷試験データ数が限られていることから、現時点では推定式 $f = c (\leq 30) \text{ kN/m}^2$ を提案し、今後のデータの蓄積を待ちたい。

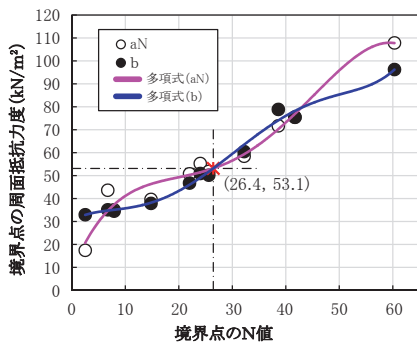


図10 強度変化点判定図(砂質土)

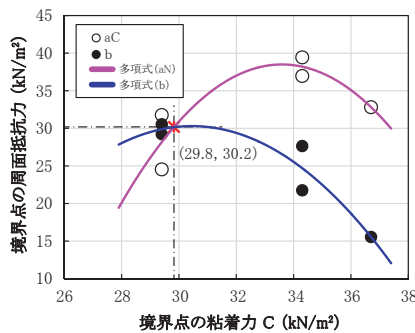


図13 強度変化点判定図(粘性土)

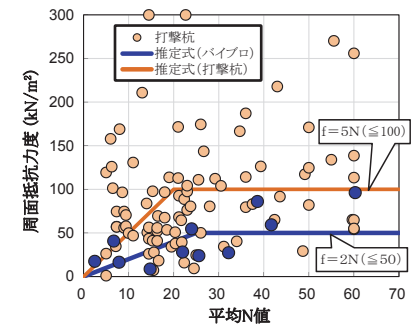


図11 周面抵抗力度の試験値と推定式(砂質土)

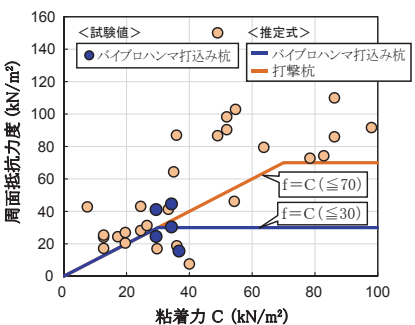


図14 周面抵抗力度の試験値と推定式(粘性土)

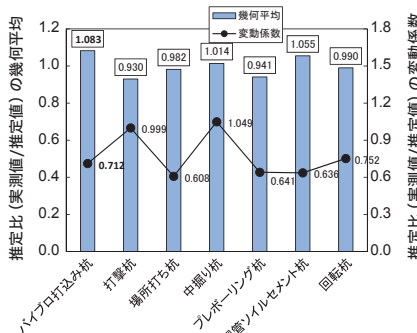


図12 周面抵抗力度推定式(砂質土)の精度

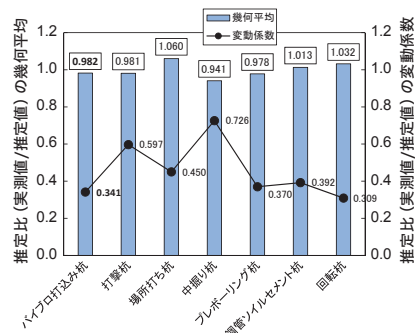


図15 周面抵抗力度推定式(粘性土(C値))の精度

3.2.2 先端抵抗力度

先端支持力度の整理は、載荷試験データが得られている砂および砂れき地盤について行った。試験結果を表8

表4 試験結果一覧(砂質土)

試験No.	深度(m)		平均N値	周面抵抗力度 f (kN/m ²)	傾き a (f/N)	土質
	上面	下面				
3	-0.2	8.8	2.5	17.4	6.98	細砂
4	43.7	50.7	32.2	27.3	0.85	細砂
5	15.8	18.5	14.8	8.7	0.59	礫混り砂
	18.5	22	41.7	59.3	1.42	砂礫
6	0	10.3	7.9	16.4	0.92	粘土質砂
	13.3	25.4	25.6	23.9	0.93	砂～砂礫
7	3.5	6.5	24.0	54.6	2.28	砂礫
	6.5	11.5	38.6	86.1	2.23	細砂
	11.5	13.5	60.3	96.2	1.60	細砂
10	3.5	10	6.7	40.7	6.06	礫質土
	10.6	12.3	22.0	28.1	1.28	シルト質砂礫

表5 バイプロハンマ打込み杭の周面抵抗力度推定式の精度(砂質土)

試験No.	平均N値	周面抵抗力度: f (kN/m ²)		推定比 (試験値/推定値)	土質
		試験値	推定式		
3	2.5	17.4	5.0	3.490	細砂
4	32.2	27.3	50.0	0.546	細砂
5	14.8	8.7	29.6	0.294	礫混り砂
	41.7	59.3	50.0	1.186	砂礫
6	7.9	16.4	15.8	1.038	粘土質砂
	25.6	23.9	50.0	0.477	砂～砂礫
7	24.0	54.6	48.0	1.138	砂礫
	38.6	86.1	50.0	1.721	細砂
	60.3	96.2	50.0	1.925	細砂
10	6.7	40.7	13.4	3.031	礫質土
	22.0	28.1	44.0	0.638	シルト質砂礫
幾何平均: GM				1.083	
標準偏差: σ				1.002	
変動係数: CV				0.712	

表6 試験結果一覧(粘性土)

試験No.	深度(m)		平均N値	粘着力 c (kN/m ²)	周面抵抗力度 f (kN/m ²)	傾き a (f/N)
	上面	下面				
5	0	18	0.4	36.7	15.6	0.42
8	0.9	4.1	2.9	29.4	41.1	1.40
	7.3	13.2	1.4	34.3	44.6	1.30
9	0.9	3.9	2.9	29.4	24.5	0.83
	6.9	12.9	1.3	34.3	30.4	0.89

表7 バイプロハンマ打込み杭の周面抵抗力度推定式の精度評価(粘性土)

試験No.	粘着力 c (kN/m ²)	周面抵抗力度: f (kN/m ²)		推定比 (試験値/推定値)
		試験値	推定式	
5	36.7	15.6	30.0	0.518
8	29.4	41.1	29.4	1.399
	34.3	44.6	30.0	1.488
9	29.4	24.5	29.4	0.835
	34.3	30.4	30.0	1.015
幾何平均: GM				0.982
標準偏差: σ				0.359
変動係数: CV				0.341

に、推定式の強度変化点算定図を図16に示す。図16より、近似曲線の交点の傾き $y/x=130.08$ の端数を切り捨て、 y 座標 = 56.8より境界点のN値に計測上の上限値50を採用すると、推定式は $q_u = 130\text{N} (\leq 6500) \text{ kN/m}^2$ で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図17に、推定精度の評価を表9に示す。なお、参考として、図17には打撃杭の試験値と推定式を併せて掲載している。また、土木研究所資料から抜粋して、他工法により施工された杭との推定精度の比較を図18、19に示

す。図18は砂地盤における先端抵抗力度推定式の精度であり、図19は砂れき地盤における推定式の精度であるが、バイプロハンマ打込み杭は試験データ数が少ないため両者共通の値としている。

表9より、試験値と推定式による計算値の比である推定比は平均（幾何平均）で1.069となり、推定式によると平均的特性をよく表していることがわかる。また、図18、19より、バイプロハンマ打込み杭の変動係数は0.318であり、他工法と同等の精度を有していることがわかる。

4. まとめ

バイプロハンマ打込み杭について、既往の試験に追加して3件の载荷試験（押込み試験）を実施した。これにより12件となった押込み試験結果に基づき、バイプロハンマ打込み杭の鉛直支持力特性を整理した。その結果、砂質土および粘性土の周面抵抗力度と砂・砂れき地盤の先端抵抗力度について推定式を得た。

しかしながら、今回の検討は限られた試験データ数に基づく整理であること、特にバイプロハンマ工法で施工した杭支持力の回復特性（セットアップ率）については、未解明な部分が多いため、今後さらに試験データの蓄積と支持力発現のメカニズムの解明を図るとともに、バイプロハンマ工法を支持杭として用いたときの打ち止め管理手法の確立等に向けて、引き続き取り組んでいきたい。

表9 バイプロハンマ打込み杭の先端抵抗力度推定式の精度（砂・砂れき）

試験No.	支持層のN値	先端抵抗力度： q_u (kN/m ²)		推定比 (試験値／推定値)
		試験値	推定式	
1	141	7,179	6,500	1.104
2	87.2	6,601	6,500	1.016
3	89.1	6,783	6,500	1.044
4	53	5,024	6,500	0.773
5	56.3	9,788	6,500	1.506
6	48.3	12,034	6,279	1.917
7	63.8	8,285	6,500	1.275
10	46.3	4,267	6,019	0.709
11	29	4,253	3,770	1.128
12	38	3,601	4,940	0.729
幾何平均：GM				1.069
標準偏差：σ				0.356
変動係数：CV				0.318

表8 試験結果一覧（先端支持力度（砂・砂れき））

試験No.	支持層の平均N値	極限支持力 $P_{0.10}$ (kN)	極限支持力時の杭先端抵抗力度と抵抗力度		傾き a $q_{p.10}/N$	支持層の土質
			杭先端抵抗力度 $P_{p.10}$ (kN)	抵抗力度 $q_{p.10}$ (kN/m ²)		
1	141.0	4,591	3,609	7,179	50.9	細砂
2	87.2	2,136	1,866	6,601	75.7	粘土質砂礫
3	89.1	9,634	3,409	6,783	76.1	礫混じり細砂
4	53.0	11,793	3,946	5,024	94.8	礫混じり粗砂
5	56.3	3,772	2,768	9,788	173.9	砂礫
6	48.3	4,359	3,512	12,034	249.1	砂礫
7	63.8	3,975	2,343	8,285	129.9	細砂
10	46.3	5,503	3,351	4,267	92.2	シルト混り砂礫
11	29.0	2,167	835	4,253	146.6	シルト混り砂礫
12	38.0	2,002	707	3,601	94.8	シルト混り砂礫

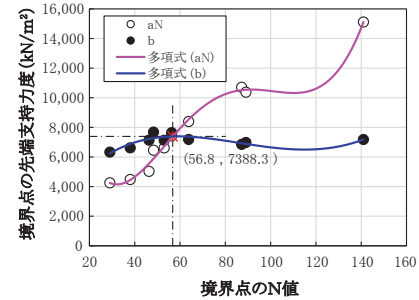


図16 強度変化点判定図（砂・砂れき）

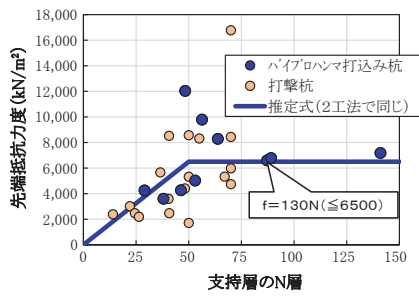


図17 先端抵抗力度の試験値と推定式（砂・砂れき）

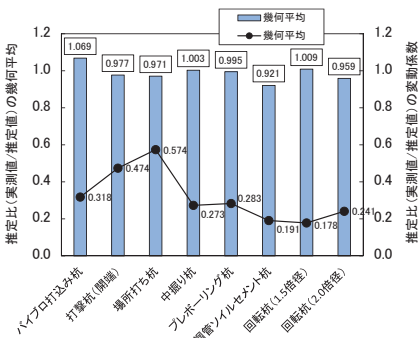


図18 先端抵抗力度推定式（砂地盤）の精度

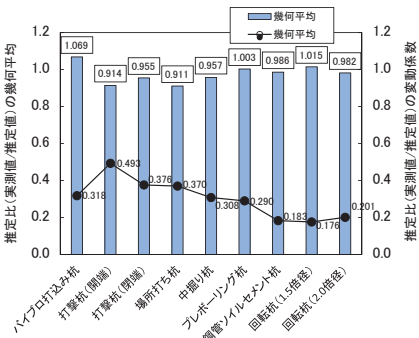


図19 先端抵抗力度推定式（砂れき地盤）の精度

【参考文献】

- 1) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，改訂版第1刷，平成29年11月
- 2) バイプロハンマ工法技術研究会：バイプロハンマ設計施工便覧，平成27年10月
- 3) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直载荷試験方法・同解説，第一回改訂版，2002.5.
- 4) 七澤利明，河野哲也，宮原清，大城一徳：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，土木研究所資料，第4374号，2018.3.
- 5) 国土交通省港湾局監修，公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.7

＜参考資料＞

実工事におけるパイプロハンマ併用打撃工法の採用事例

主に港湾栈橋施設や臨港道路の鋼管杭・鋼管矢板基礎の整備では、特に表層～中層の軟弱地盤における杭の打設精度を確保するためパイプロハンマを用いて杭の建て込みを行った後、油圧ハンマにより打撃し打ち止め管理を行う「パイプロハンマ併用打撃工法」が用いられることが多い。

ここでは至近の実工事においてパイプロハンマ併用打撃工法が採用された事例について紹介する⁶⁻⁸⁾。

「東京国際クルーズターミナルの整備」での工事事例

(1) 整備概要

東京都では、港湾機能と都市機能が有機的に統合した「世界に誇る都市型総合港湾・東京港」の創造を目指し港湾施設の整備に取り組んでいる。

近年、世界のクルーズ市場は、客船の大型化とクルーズの大衆化により急成長しており、世界のクルーズ人口は2,000万人を超え、10年前の2倍程度に増加している。特にアジアではクルーズ人口の急増が見込まれており、我が国でも、2017年の訪日クルーズ旅客数は前年比27.0%増の252.9万人、我が国港湾への寄港回数は前年比37.0%増の2,764回となり、過去最高となっている（国土交通省資料）。また、政府は2020年の訪日クルーズ旅客数の目標値を100万人から500万人に引き上げるなど、さらなる増加が見込まれている。

現在、東京港では、晴海客船ふ頭でクルーズ客船を受け入れているが、同ふ頭はレインボーブリッジの内側に位置して



写真3 鋼管杭打設状況

表10 ジャケット諸元一覧表

ジャケット	高さ (m)	面積 (m ²)	重量 (t)
A	48.0	1,968	538
B	70.0	2,870	1,340
C	72.0	2,952	1,343
D	60.0	2,460	1,150
計	250.0	10,250	4,371

いるため、利用できるのは桁下（海面より52m）を通過できるおおむね7万総トン級までのクルーズ客船に限られている。

このため、レインボーブリッジ外側の臨海副都心地域に、世界最大級のクルーズ客船が利用できるよう、東京2020年オリンピック・パラリンピック競技大会開催までに、新たな客船ふ頭である「東京国際クルーズターミナル」（図20）を整備する。

(2) 東京国際クルーズターミナルの主要スペック

ターミナル基礎は、鋼管杭84本（南北方向に21本×4本）、鋼製のジャケット4基（表10参照）からなる全長252m、幅41mの栈橋構造であり、新築のターミナルビルは、ジャケットB、C上に建設され、ターミナル基礎と一体構造となる。鋼管杭はターミナルビルの建築柱と一体化構造とし、4階建てのビルの荷重を支えるため大口径鋼管杭（直径2,000mm）を採用している。

(3) 杭施工方法

鋼管杭は、1,600t吊旋回式起重機船

追加ボーリング（No.1杭位置）

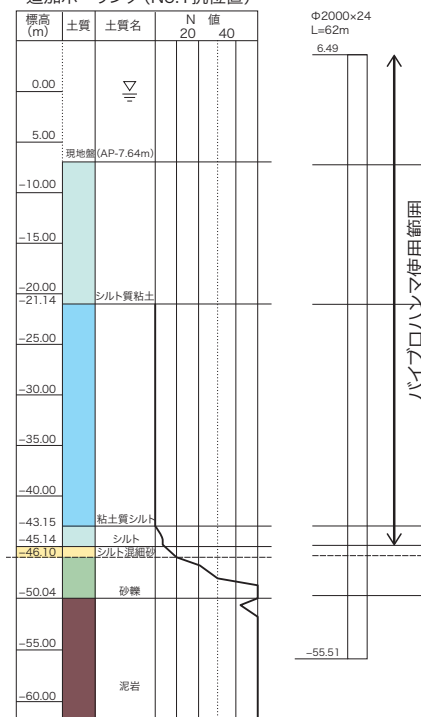


図21 鋼管杭打設方法と深度の関係

（写真3）を使用してパイプロハンマ（ZERO-320MR）による1次打設、油圧ハンマ（最大打撃エネルギー280kJ）による2次打設で施工した（図21参照）。油圧ハンマには吸遮音材を、ヤットコ内には反響防止材を設置して周囲への騒音低減対策を行った。

鋼管杭はジャケット据付前の先行杭（ジャケットB、Cで8本／基）と後行杭（ジャケットB、Cで16本／基）に分けて打設した。

【参考文献】

- 一般社団法人経済調査会：東京国際クルーズターミナルの整備状況について、けんせつ Plaza (<http://www.kensetsu-plaza.com/kiji/post/25518>)
- 森野亮吾、黒米郁、宮司剛志、山下晃三、水谷崇亮、山下久男：東京港新客船ふ頭における大口径鋼管杭の載荷試験（その1）、第53回地盤工学研究発表会、2018.7
- 長山英樹、宮司剛志、亀井秀一、小林剛：東京港新客船ふ頭の大口径鋼管杭の載荷試験、基礎工、Vol.47、No.8、P28～31、2019.8.



図20 完成予想図