

バイブロハンマ打込み杭の支持力特性に関する検討

バイブロハンマ 支持力 鋼管杭

バイブロハンマ工法技術研究会 正会員 ○北村卓也

バイブロハンマ工法技術研究会 高橋洋敬

(一般社団法人) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 辰見夕一

(一般社団法人) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 正会員 相和明男

1. はじめに

バイブロハンマ工法は、バイブロハンマとクレーンからなるシンプルな重構成で、高い鉛直精度を確保しながら杭を施工できることや、クレーンの特長を活かしてロングスパンでの手延べ施工できること、あるいは打込み杭に比べ騒音が小さく三点支持式杭打機が入れないような現場での施工が可能であること等、他工法にはない特長を有している。このことから、手延べ施工で打設される河川内の橋梁の基礎杭等では、水面から河床まで杭がフリーの状態になるため、杭の建ちが安定するまで鉛直精度を維持できるバイブロハンマ工法が不可欠な技術として活用されている。また、山間部に架かる橋梁の基礎等、一般の杭打機のアクセスが困難な現場でも精度確保のために適用されることが多い。

一方、H14 年道路橋示方書において、バイブロハンマ工法は「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 年度の改訂にあたり、バイブ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統計量の分析に必要な載荷試験数が限られていたこと、及び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との理由から、支持力推定式の規定が見送られた。

しかしながら、バイブロハンマ工法は、上記の通り他工法にはない施工性を有しており実工事において不可欠な技術であることから、バイブロハンマ工法技術研究会および(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会では、今般新たに3件の載荷試験を実施し既往の試験と合わせた12件の試験結果を基に、バイブロハンマ打込み杭の支持力特性を再検討した。なお、再検討に当たって、データの選定や評価は土木研究所資料第4374号(平成30年3月)に記載される手法に基づき行った。

2. 試験杭の諸元

表-1 鋼管杭およびバイブロハンマ諸元一覧

試験に用いた鋼管杭とバイブロハンマの諸元を表-1に示す。

バイブロハンマの振動周波数は6.7~45Hzであり、低周波~高周波域に亘る広範な周波数帯を対象にしている。また、杭径は500mm~1016mmを対象とした。

試験No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
鋼管杭	直径①	800	600	800	1000	600	609.6	600	660	1016	1000	500	500
	板厚	16	12	14	14	14	17.4	14	10.3	10.3	14	10	10
	杭長	16.100	12.080	49.300	60.000	28.000	32.400	15.500	20.000	20.000	15.000	14.000	14.000
	根入れ長	15.200	11.180	48.300	58.700	27.000	31.400	14.500	19.400	19.400	14.300	13.300	13.300
(mm)	支持層への根入れ長②	4,000	3,000	2,300	1,700	3,000	1,800	1,500	1,900	1,900	2,000	1,000	1,000
	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
バイブロハンマ	モータ出力(kW)	120	120	200	240	200	240	150	75	120	180	242	242
	起振力(kN)	748	631.5	1,330	1,830	1,330	1,830	1,050	491	687	1,116	767	929
	偏心モーメント(N・m)	696	558.4	2,740	3,530	2,740	3,530	1,472	2,188	3,826	1,570	94.1	294
	振動周波数(Hz)	16	16	11	11.3	11	11.3	13.3	7.5	6.7	13.3	45	28

※1. H30年度追加試験: No.10~12
 ※2. 試験No.1では深度12.2mでパイロを交換(上段→下段)、試験No.3では深度40.5mでパイロを交換(上段→下段)
 ※3. 油圧式バイブロハンマ(試験11、12(他の試験は電動式))は、パワーユニットの出力でモータ出力を表記

3. 試験結果と支持力推定式

3.1 周面抵抗力度

3.1.1 砂質土

砂質土について試験結果を表-2に、強度変化点および推定式の計算を表-3に示す。また、表-3に基づき作成した周面抵抗力度の強度変化点判定図を図-1に示す。図-1より、aXとbの交点をラウンドし境界点として採用すると、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、

表-2 試験結果一覧(砂質土の周面抵抗力度)

試験No.	土層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	No.1	-0.2	8.8	2.5	17.4	6.98	細砂
4	No.4	43.7	50.7	32.2	27.3	0.85	細砂
5	No.2	15.8	18.5	14.8	8.7	0.59	礫混り砂
	No.3	18.5	22	41.7	59.3	1.42	砂礫
6	No.1	0	10.3	17.9	16.4	0.92	粘土質砂
	No.3	13.3	25.4	25.6	23.9	0.93	砂~砂礫
7	No.2	3.5	6.5	24.0	54.6	2.28	砂礫
	No.3	6.5	11.5	38.6	86.1	2.23	細砂
	No.4	11.5	13.5	60.3	96.2	1.60	細砂
10	No.2	3.5	10	6.7	40.7	6.06	砂質土
	No.4	10.6	12.3	22.0	28.1	1.28	シルト質砂礫

載荷試験による実測値との対比を図-2に示し、推定精度の評価を表-4に示す。これらの図表より、N値の高い領域で実測値が推定式より大きな値にばらついているものの、推定比(実測値/推定式による計算)は1.005となり、安全側かつ実際に近い値が得られることがわかる。

表-3 強度変化点および推定式の計算表

境界点N値	a(相乗平均)(kN/m ²)	境界点のaN(kN/m ²)	b(相乗平均)(kN/m ²)	交点のずれaN-b	誤差2乗和
2.5	6.98	17.4	32.9	-15.5	9.052
6.7	6.50	43.7	35.1	8.6	8.617
14.8	2.92	43.2	34.5	8.6	9.233
17.9	2.18	39.1	41.0	-1.9	8.140
22.0	1.96	43.2	46.8	-3.6	7.019
24.0	2.01	48.3	50.9	-2.7	6.672
25.6	1.80	46.1	50.2	-4.1	6.329
32.2	1.64	52.8	60.5	-7.7	4.679
38.6	1.70	65.5	78.9	-13.4	3.764
41.7	1.67	69.5	75.5	-6.0	3.827
60.3	1.66	100.1	96.2	3.9	3.385

※1. a: N値が境界点以下の領域における傾き: f/Nの相乗平均(f: 周面抵抗力度)
 ※2. b: N値が境界点以上の領域における周面抵抗力度fの相乗平均

Consideration about load bearing ability of steel pipe piles driven by a vibratory pile driver T.Kitamura,H.Takahashi(Technical research association for Vibratory hammer method),Y.Tatsumi,A.Sowa(Japanese Association for Steel Pipe Piles)

3.1.2 粘性土

粘性土の試験結果を図-3に、推定式の評価結果を表-5に示す。なお、図-3には打撃杭の試験結果と推定式を併せて示す。また、推定式は砂質土と同様な方法により求めたため、計算過程に係る図表は割愛する。

バイプロハンマ打込み杭の推定式は、打撃杭と傾きは同じになるが、試験が非排水せん断強度の比較的小さな地盤に限られていたため、最大値は30kN/m²と試験で確認した範囲に留めている。

表-5より、バイプロハンマ打込み杭の推定式は推定比が0.982であり、改定後の道路橋示方書に示される他工法と同程度の推定精度になった。一方で、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。このことから、より大きなせん断強度のデータがあれば、バイプロハンマ打込み杭の試験値は、打撃杭と同様な傾向になる可能性も示唆される。しかしながら試験により確認されていないため、現時点では図-3に示す推定式 $f = cu (\leq 30) \text{ kN/m}^2$ を提案し、今後のデータの蓄積を待ちたい。

3.2 先端抵抗力度

先端抵抗力度について、試験結果を図-4に、推定式の評価を表-6、7に示す。なお、推定式の評価は、载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。表-6より、安全側の検討として、傾き a を 10 kN/m^2 単位で切り捨ててラウンドし、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 $qu = 130N (\leq 6500) \text{ kN/m}^2$ で表わせる。

同式について载荷試験による実測値との対比を図-4に、推定精度の評価を表-7に示す。表-7より推定比は1.069となり、推定式は安全側かつ実際に比較的近い値を与えることがわかる。

4. まとめ

バイプロハンマ打込み杭について鉛直支持力特性を検討した。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。なお、今回の検討は限られた試験データに基づく整理のため、今後さらなる試験データの蓄積や支持力発現のメカニズムの解明に取り組んでいきたい。

<参考文献>

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

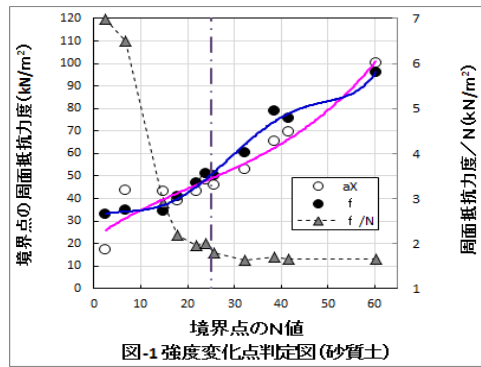


図-1 強度変化点判定図(砂質土)

表-4 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(砂質土)

試験No.	土層No.	平均N値	周面抵抗力度: $f(\text{kN/m}^2)$		推定比(実測値/推定値)	土質
			実測値	推定式		
3	No.1	2.5	17.4	5.0	3.490	細砂
4	No.4	32.2	27.3	50.0	0.546	細砂
5	No.2	14.8	8.7	29.6	0.294	礫混り砂
	No.3	41.7	59.3	50.0	1.186	砂礫
6	No.1	17.9	16.4	35.8	0.458	粘土質砂
	No.3	25.6	23.9	50.0	0.477	砂~砂礫
7	No.2	24.0	54.6	48.0	1.138	砂礫
	No.3	38.6	86.1	50.0	1.721	細砂
10	No.2	6.7	40.7	13.4	3.031	礫質土
	No.4	22.0	28.1	44.0	0.638	シルト質砂礫
			幾何平均: GM		1.005	
			変動係数: CV		1.034	

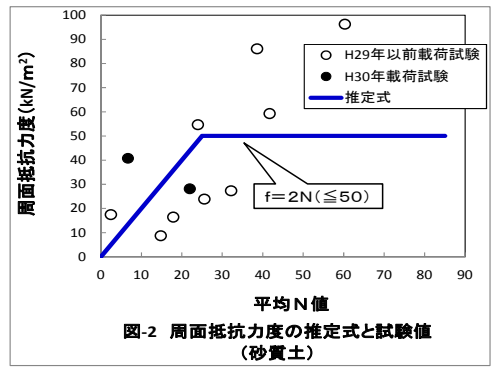


図-2 周面抵抗力度の推定式と試験値(砂質土)

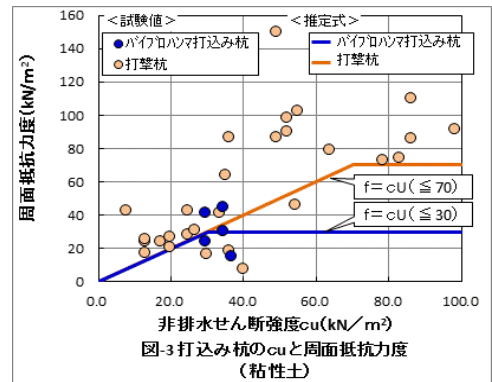


図-3 打込み杭のcuと周面抵抗力度(粘性土)

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評価(粘性土)

試験No.	土層No.	非排水せん断強度 $cu (\text{kN/m}^2)$	周面抵抗力度: $f(\text{kN/m}^2)$		推定比(実測値/推定値)
			実測値	推定式	
5	No.1	36.7	15.6	30.0	0.518
	No.1	29.4	41.1	29.4	1.399
8	No.3	34.3	44.6	30.0	1.488
	No.1	29.4	24.5	29.4	0.835
9	No.3	34.3	30.4	30.0	1.015
				幾何平均: GM	
			変動係数: CV		0.359

表-6 強度変化点および推定式の計算表

境界点 N値	a(相乗平均) (kN/m ²)	境界点のaN (kN/m ²)	b(相乗平均) (kN/m ²)	交点のずれ aN-b	誤差 2乗和
29.0	146.6	4.253	6.328	-2.075	59,201.918
38.0	117.9	4.479	6.614	-2.134	57,802.246
46.3	108.6	5.028	7.136	-2.108	64,456.051
48.3	133.6	6.455	7.680	-1.225	49,091.225
53.0	124.8	6.613	7.126	-513	51,972.538
56.3	131.9	7.424	7.642	-218	49,541.631
63.8	131.6	8.395	7.184	1,211	50,025.082
87.2	122.8	10,708	6.850	3,858	53,940.801
89.1	116.4	10,375	6.978	3,397	57,491.217
141.0	107.2	15,115	7.179	7,936	66,126.296

※1. a: N値が境界点以下の領域における傾き: qu/N の相乗平均 (qu : 先端抵抗力度)
 ※2. b: N値が境界点以上の領域における先端抵抗力度 qu の相乗平均

<< 交点の座標 >>

境界点 N値	a (kN/m ²)	b (kN/m ²)
57.4	131.8	7.336

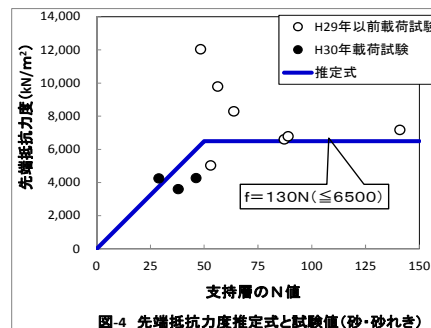


図-4 先端抵抗力度推定式と試験値(砂・砂れき)

表-7 バイプロハンマ打込み杭の先端抵抗力度の精度(砂・砂れき)

試験No.	支持層のN値	先端抵抗力度: $qu(\text{kN/m}^2)$		推定比(実測値/推定値)
		実測値	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
		変動係数: CV		0.356