

載荷試験から見た大口径鋼管杭の鉛直支持力について

VERTICAL BEARING CAPACITY OF LARGE DIAMETER STEEL PIPE PILES BASED ON LOADING TEST DATA

しろ 白 いし 石 てる 輝 よし 義*
くす 楠 もと 本
かた 片 やま 山 たけし 猛*
みさお 操**

はじめに

近年、鋼管杭の製作技術が向上し、構造物の設計・施工技術の進歩と相まって鋼管杭を用いた杭基礎が飛躍的に発展し、今日では、年間約100万tもの鋼管杭が使用されるようになってきた。こうした鋼管杭は一般に開端杭として使用されており、杭径の増大に伴い、杭先端閉そくの程度が問題となってきている。本報告では杭径700mm以上の大口径鋼管杭の鉛直載荷試験結果を基にして、各種推定支持力値との比較を行うとともに、支持力について考察する。

1. 杭の鉛直支持力の推定⁶⁾

杭の鉛直支持力は杭先端支持力と杭周面摩擦力の和として考えられており、支持力を推定する方法としては一般に以下の方法がある。

- a) 載荷試験による推定法
- b) 静力学支持力公式による推定法
- c) 動力学支持力公式による推定法

本報告では、載荷試験から求めた杭の鉛直支持力と静力学、動力学支持力公式による推定支持力との比較検討を行う。なお支持力の検討に用いる静力学支持力公式として、表一1に日本道路協会、日本建築学会の支持力推定式を示す。また動力学支持力公式としてハイリー (Hiley) 公式を基に定めた以下に示す推定式を用いた。

表一1 各基準における支持力推定式

制定機関	先端支持力 (tf)	先端支持力 最大値 (tf/m ²)	周 面 摩 擦 力 (tf/m ²)	
			砂 質 土	粘 性 土
日本道路協会	$q_u A_p$ (最大30NA _p)	—	$\frac{N}{5} (\leq 10)$	$N_{or} c (N \leq 15)$
日本建築学会	30 NA _p	1800(砂礫) 2000(軟岩)	$\frac{N}{5}$	$\frac{q_u}{2} (q_u = 2+0.4Z)$

*新日本製鐵(株) 設備技術本部

**新日本製鐵(株) 建材販売部

- i) 日本道路協会

$$R_u = \frac{e_f W_H H \left[1 - \frac{W_p}{W_H + W_p} (1 - e^2) \right]}{S + C/2}$$

- ii) 日本建築学会

$$R_u = \frac{e'_f \cdot W_H \cdot H}{S + C/2}$$

ただし、 R_u : 杭の極限支持力 (tf)

e_f : ハンマー効率 ディーゼルハンマー 0.7,
ドロップハンマー 0.5

e'_f : ハンマー効率 0.5

W_H : ハンマーあるいはラムの自重 (t)

H : ハンマーの落下高、ディーゼルハンマー
の場合は $2H$ をとる。(cm)

W_p : 杭の自重 (t)

e : 反発係数 鋼杭 0.8, やっとこ使用の場
合はこの値の 80%

S : 杭の貫入量 (cm)

C : 杭のリバウンド量 (cm)

2. 載荷試験結果

本報告では、杭径が1000mmクラスの大口径鋼管杭載荷試験4例について検討する。

各載荷試験は500tジャッキを複数台使用し、急速多サイクル方式で行った。

各々の試験名称、載荷試験結果から求めた支持力、および静力学支持力公式や動力学支持力公式から求めた支持力推定値を表一2に示す。なお一部試験例についてはマイヤーホフ (Meyerhof) 式、山肩式等による支持力推定値を併記した。

2.1 新日本製鐵名古屋製鐵所大口径鋼管杭載荷試験¹⁾

1) 試験結果

本載荷試験はφ1000mm杭 (V₁杭), φ508mm杭 (V₂杭) と径の異なる2種類の鋼管杭に関するものである。試験場所の地質は図一1に示すように地表面下11.5m程度以

表-2 載 荷 試 験 結 果

No.	名 称	杭 諸 元 (mm) (径)×(肉厚)×(長さ)	杭 先 端 設 計 値 N	載 荷 試 験 結 果				打 込 み 公 式 に よ る 支 持 力				静 力 学 的 支 持 力			
				降 伏 荷 重 (tf)	極 限 荷 重 (tf)	許 容 支 持 力 (tf)	降 伏 時 杭 頭 変 位 (mm)	同 杭 先 端 変 位 (mm)	杭 先 端 支 持 力 比 率 (%)	公 式	極 限 支 持 力 (tf)	貫 入 量 (mm)	使 用 ハ ン マ ー	公 式	極 限 支 持 力 (tf)
2-1	名古屋製鐵所大 口径鋼管杭の載 荷試験	1 000×22×22 400 (根入れ 10.5m)	40	900	1 500	450	10.2	0.88	11.8	ハイレ 簡略式	3 177	2.16	MB-70	道 路 橋 マイヤー ホフ	1 443 2 380
		508×12×24 000	"	350	600	175	12.8	0.13	—	"	933	3.39	M-33	道 路 橋 マイヤー ホフ	540 855
2-2	堺製鐵所外周 T 護岸工事鋼管杭 載荷試験	T ₁ 開 端 杭 900×16×35 000	20 (25)	350	450	150	14.5	6	29.5~35.5 (200~450 tf)	" ハイレ 公式	759 774	4.8	MB-40	道 路 橋 日本建築 学会	498 591 (N=25)
		T ₂ 閉 そ く 杭 900×16×35 000	"	390	475	158	20	11.5	23~28.4 (200~450 tf)	ハイレ 簡略式 ハイレ 公式	1 140 1 167	2.1		道 路 橋 日本建築 学会	498 591 (N=25)
2-3	芦屋浜高層住宅 プロジェクト基 礎鋼管杭載荷試 験	V ₁ 開 端 杭 1 117.6×16×37 550	40	—	2 100 (最大1 200)	700	23.5 (1 200 tf)	17.2 (1 200 tf)	8.3 (1 200 tf)	ハイレ 簡略式	1 940	1.3	MB-70	日本建築 学会	2 180
		V ₂ (先端十字リブ付杭) 1 171.6×16×37 550	"	—	2 200 (")	733	23.5 (1 200 tf)	2.15 (1 200 tf)	10.83 (1 200 tf)	"	2 480	0.8		"	2 180
		V ₃ 開 端 杭 914 4×14×38 000	"	—	1 800 (最大 900)	600	21.5 (900 tf)	1.55 (900 tf)	8.8~11.1 (900 tf)	"	1 640	2.8		"	1 670
2-4	南港ポートタウ ン鋼管杭載荷試 験	L ₁ 杭 1 000×22/19/16×55 000	40	1 020	1 160 中立点以下 1 012	337	53.0	6	53	—	—	—	MB-70	道 路 橋 建築施工 基準 山 肩 式	891 552 876
		L ₂ 杭 1 000×22/19/16×55 000	"	930	1 120 中立点以下 931	310	48	6	62	ハイレ 公式	1 068	2.5		道 路 橋 建築施工 基準 山 肩 式	612 444 624

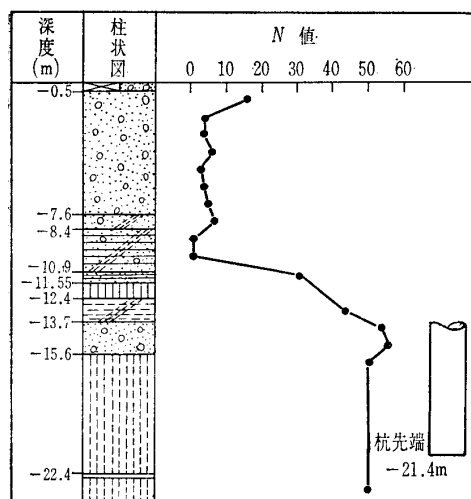


図-1 土質柱状図

深がN値50以上の固結シルト、砂質土となっている。

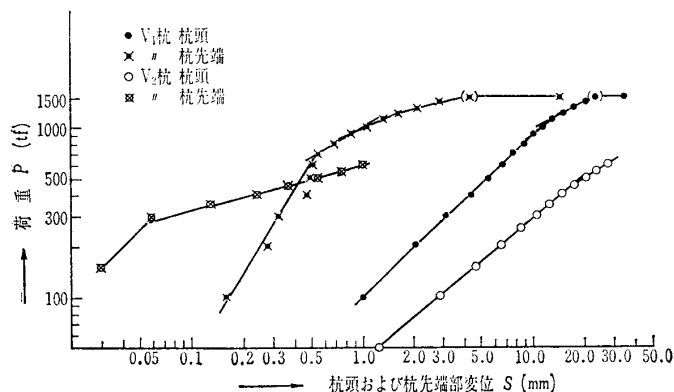
載荷試験結果から降伏荷重を求める方法としては前述の3方法があるが、そのうち $\log P \sim \log S$ 法による結果を図-2に示す。表-2に示すように V_1 杭、 V_2 杭の降伏荷重、極限荷重は V_1 杭で900 tf、1500 tfであり、 V_2 杭で350 tf、600 tf以上であった。

なお、図-2において V_1 杭……700 tf、 V_2 杭……300 tf 近辺でその沈下性状に変化点が見られるが、両杭とも杭頭沈下性状に変化は見られない。また沈下量も V_1 杭……約0.55 mm、 V_2 杭……約0.06 mmと小さく、杭の降伏現象としては扱い得ないと考えられる。

次に、 V_1 杭と V_2 杭の沈下性状を比較すると、 V_1 杭では杭先端部で杭頭降伏荷重時の沈下性状に変化が見られるが V_2 杭では先端沈下量は0.13 mmと小さく、沈下が直線的に変化しているなど降伏現象は見られなかった。

なお、 V_1 杭表面にてん付したワイヤーストレインゲージから読み取った杭先端から500 mm 上部の杭体の伝達荷重は、杭先端沈下性状に変化が表れた700 tf以上で載荷重の7～8%，極限荷重1500 tf時でも12%程度であった。

2) 試験結果と静力学・打込み支持力公式による支持力の比較

図-2 $\log P \sim \log S$

試験結果と静力学公式から求めた極限支持力を比較すると表-2に示すようにマイヤーホフの支持力公式による推定支持力は V_1 杭で2380 tf、 V_2 杭で855 tfと試験値の1500 tf、600 tfに比べ1.5倍程度の値となっている。

一方道路橋示方書（道路協会）に示されている支持力の推定式より求めた値は V_1 杭で1443 tf、 V_2 杭で540 tfであり、ほぼ載荷試験結果と同等の値を示している。

次に、打込み公式による極限支持力の推定値は、 V_1 杭、 V_2 杭で3177 tf、933 tfであり、試験結果の2～1.5倍程度の値を示している。

2.2 新日本製鐵堺製鐵所外周 T 護岸工事鋼管杭載荷試験²⁾

1) 試験結果

本載荷試験は、杭先端が開端 (T_1 杭)、閉端 (T_2 杭) の2種類の $\phi 900$ mm 鋼管杭について行ったものである。

試験場所の地質は図-3に示すように、O.P. -20 m 近辺まで厚いシルト質の軟弱地盤が存在し、それ以深は砂（砂礫）層とシルト層の互層からなり、-26 m 近辺にN値50以上の薄い砂礫層（厚さ1.15 m）の中間支持層が存在するものであり、試験杭はこの薄い砂礫層を打止まり層としている。

載荷試験のうち、 $\log P \sim \log S$ 曲線を図-4に示す。各杭の載荷試験結果は表-2に示すように、 T_1 杭（開端）で降伏荷重350 tf、極限荷重450 tfであり、 T_2 杭（閉端）では390 tf、475 tfであった。

次に、開端杭 (T_1 杭) と閉端杭 (T_2 杭) の沈下性状を比較した場合、杭頭、杭先端とも沈下量にほとんど差が出ていない。また、杭表面にてん付したワイヤーストレイン

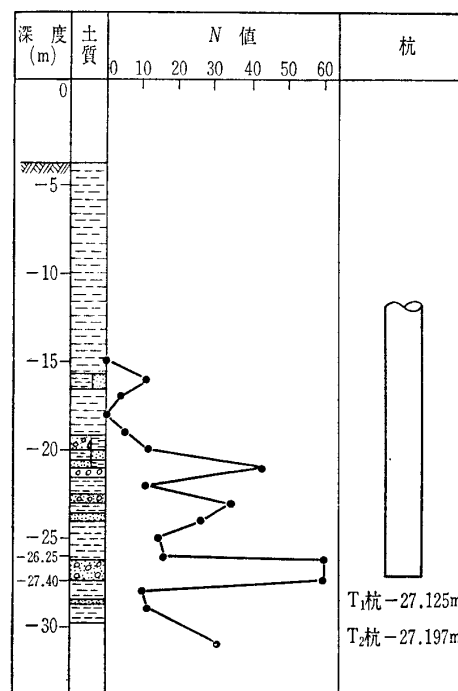
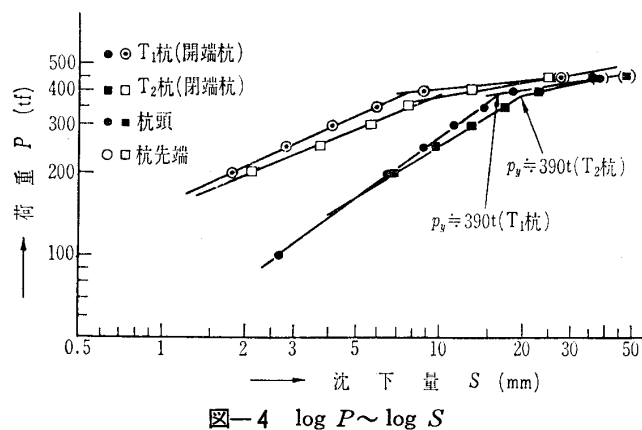


図-3 土質柱状図



ゲージから求めた杭先端から 1 000 mm 上部の杭体の伝達荷重も荷重 200～450 tf の間で T_1 杭で載荷重の 30～35%， T_2 杭で 23～29% であり両者とも差はほとんどなかった。

このことは、杭先端に作用している支持力は、開端杭の場合も -26.25～-27.4 m の中間支持層の部分で杭体に伝達されており、杭先端は閉そく状態となっていることを示している。これは、杭が薄い中間支持層に打ち止められ、その下層が N 値 10 程度の比較的軟弱な層となっているためである。つまり、中間層が支持層として働かず、先端支持力がその下の弱い層で規定されるために、支持層への打込みが短くても、開端杭が閉そくされた状態になったものと考えられる。

2) 試験結果と静力学、打込み支持力公式による支持力の比較

試験結果と静力学支持力公式による支持力推定値を比較すると、杭の先端閉そく効果を 100% とした場合の道路橋示方書による極限支持力推定値は 498 tf であり、試験値の 450～475 tf とよくあっている。なお、この場合の先端支

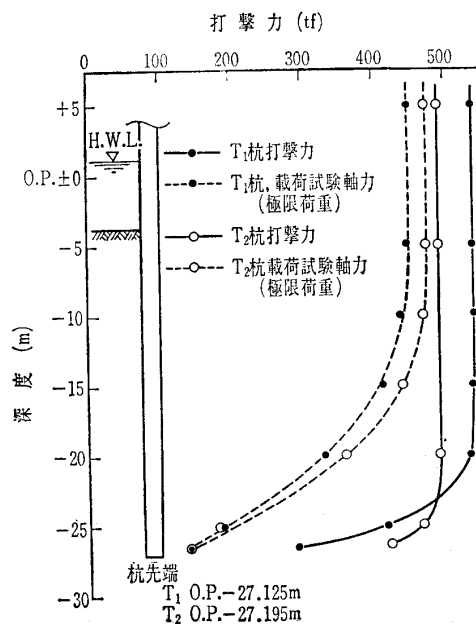


図-5 杭 打 撃 力

持力の算定は -28～-30 m の地層の N 値が 10～20 層を考慮して道路橋示方書により設計 N 値を 20 程度として行った。次に杭打ち時の打撃力は図-5 に示すように各杭とも 500 tf 程度であり、載荷試験値とほぼ等しい値であった。しかし杭打ち公式により推定した支持力は T_1 杭 759 tf, T_2 杭 1 140 tf であり、大きな値を推定している。特に開端 (T_2) 杭の場合には 2 倍程度の過大な支持力と推定しており、杭打ち公式により支持力を推定する場合には注意する必要がある。

2.3 芦屋浜高層住宅プロジェクト基礎鋼管杭載荷試験³⁾

1) 試験結果

本載荷試験は図-6 に示す地盤上に打ち込まれた $\phi 1117.6$ mm の開端鋼管杭 (V_1 杭)、同径の先端十字リブ付鋼管杭 (V_2 杭) および $\phi 914.4$ mm の開端鋼管杭 (V_3 杭) について実施したものである。

試験結果のうち、 $\log P \sim \log S$ 曲線を図-7 に示す。これによると、各杭とも降伏荷重が不明りょうであり、最大荷重 (V_1 杭, V_2 杭の場合 1 200 tf, V_3 杭の場合 900 tf) 以下では降伏状態に至らなかったものと判断される。

そこでバンデルビーン (Van der Veen) 法により各試験杭の極限支持力を推定した。その結果、表-2 に示すように V_1 杭, V_2 杭および V_3 杭の極限支持力は 2 100 tf, 2 200 tf および 1 800 tf であり、 V_1 杭と V_2 杭の支持力に差はなく、また載荷時の杭頭および杭先端沈下量にも差が出ていない。

次に、杭壁にてん付したワイヤーストレインゲージから

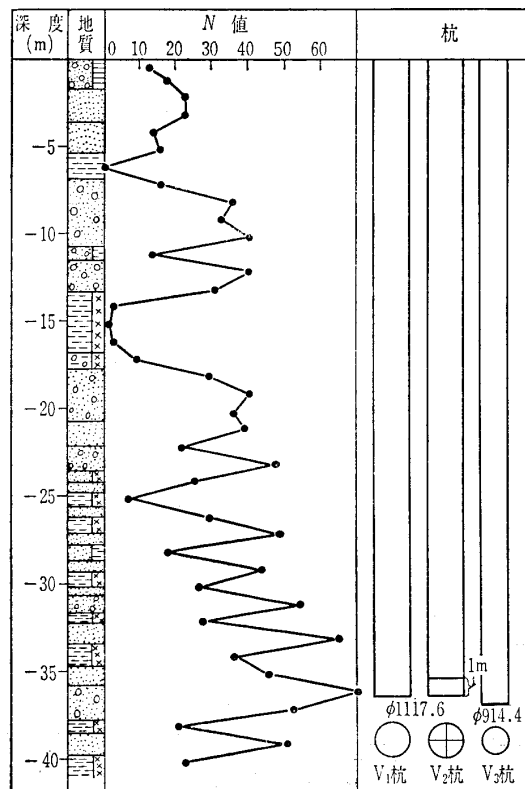
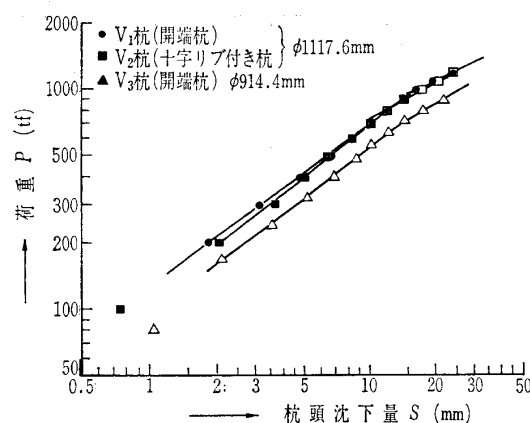


図-6 土質柱状図および杭形状

図-7 $\log P \sim \log S$

求めた杭先端から 1 000 mm 上の位置の杭体の伝達荷重は最高荷重時で V_1 杭……約 8 %, V_2 杭……約 10 % であり両者ともほぼ同等の値を示している。

また杭打設時の打込み回数は -35m 以浅では V_1 杭, V_2 杭ともそれぞれ 3 380 回, 3 250 回であり差はなかったが, -35m 以深では開端杭 (V_1 杭) の打込み回数が 1 040 回であるのに対し, 先端十字リブ付開端杭 (V_2 杭) では 1 500 回と堅い地盤では V_2 杭の打込み回数のほうが 5 割程度多かった。

2) 試験値と静力学, 打込み支持力公式による支持力の比較

本試験杭は支持層に 10m 程度打ち込まれたものであり, 杭内部が完全に閉そくされたとして求めた静力学公式による極限支持力値は表-2 に示すように, V_1 杭, V_2 杭で 2 180 tf, V_3 杭で 1 670 tf であった。今回の載荷試験による支持力はバンデルビーン法により推定したものであり, その取扱いには注意を要するが, 両者の値が同程度であることからすると, 開端杭 (V_1 杭) も先端が閉そくされた状態になっていると推察される。

次に, 動力学支持力公式から推定した支持力は, V_1 , V_2 , V_3 杭で 1 940 tf, 2 480 tf および 1 640 tf であり, この場合は試験値とよく合っている。

2.4 大阪南港ポートタウン鋼管杭載荷試験^{4),5)}

1) 試験結果

本載荷試験は図-8 に示すように軟弱地盤を通して N 値 100 以上の支持地盤に打設された $\phi 1 000$ mm 鋼管杭 (L_1 杭, L_2 杭) に関するものである。なお試験杭には 図-9 に示すように中立点近くまでネガティブフリクション低減用のビチューメンが塗布されている。

試験結果のうち, $\log P \sim \log S$ 曲線を図-10 に示す。これより求めた L_1 杭の降伏荷重, 極限荷重は表-2 に示すように, 1 020 tf, 1 160 tf であり, L_2 杭では 930 tf, 1 120 tf であった。なお本試験杭表面には上述のようにビチューメンを塗布しており, 中立点以深の極限支持力は, L_1 杭で 1 012 tf, L_2 杭で 931 tf であった。

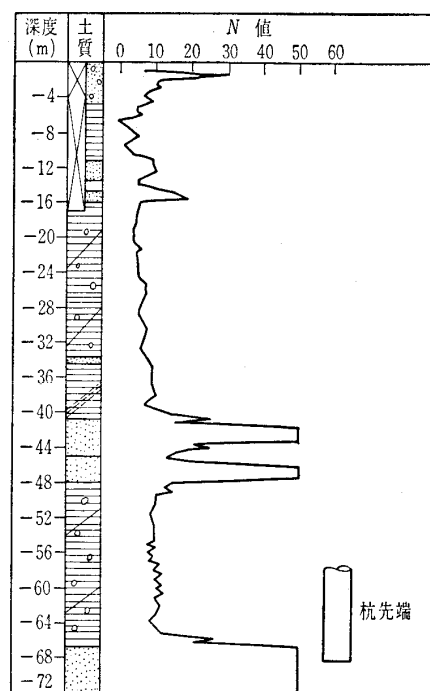


図-8 土質柱状図

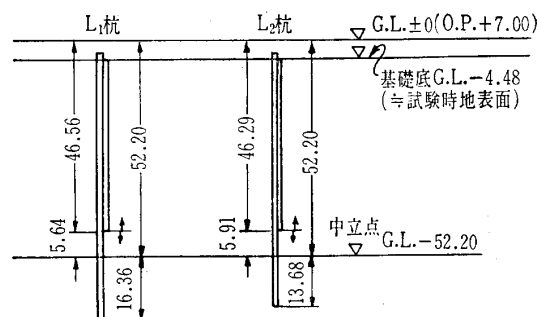
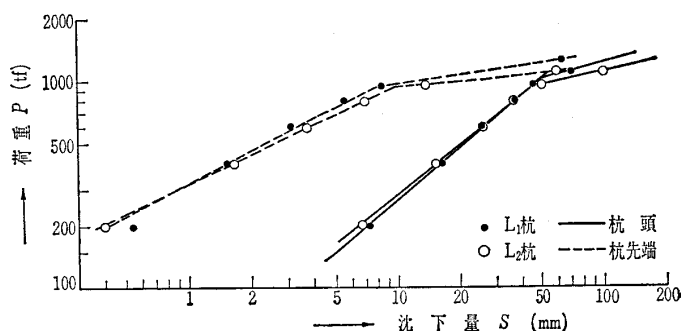


図-9 試験杭側面図

図-10 $\log P \sim \log S$

なお, 杭壁に貼付したワイヤーストレインゲージから求めた杭先端から 2 500 mm 上の位置の杭体伝達荷重は L_1 杭が載荷重の 53 %, L_2 杭が 62 % 程度であった。

2) 試験結果と静力学, 打込み支持力公式による支持力の比較

本試験杭には杭表面にビチューメンが塗布されているので, 中立点以深について支持力を比較する。

静力学支持力公式から求めた推定極限支持力は道路橋示

方書から求めた値で L_1 杭 891 tf, L_2 杭 612 tf であり, 載荷試験値の 1 012 tf, 931 tf に比べ小さい値であった。

こうした差異は静力学支持力公式で推定する際の土質データの取り方にもよるが, L_1 杭の場合, 載荷試験値 1 012 tf のうち上記杭先端部への荷重伝達率 53% から先端支持力を推定すると 536 tf 程度 (周面摩擦力 476 tf) となるのに対し, 計算による推定先端支持力が 377 tf (周面摩擦力 514 tf) であり, 先端支持力の差であろうと考えられる。このことより今回のように杭先端が非常に堅い支持地盤に打ち込まれた場合には, 道路橋示方書による推定値以上の先端支持力が期待できると考えられる。

次に, 打込み公式による推定極限支持力は L_2 杭で 1 068 tf であり, 載荷試験値 931 tf に比べ若干大きいがほぼ同程度の値であった。

3. 考 察

3.1 静力学支持力公式による支持力の推定について

前述の載荷試験 4 例では, 杭の支持力は先端支持力の上限値を $30 N A_p$ (A_p は杭先端閉鎖面積) とし, 支持層への根入れ比 (根入れ長/杭径) により杭先端閉鎖効果を考慮した道路橋示方書の推定値とほぼ等しい値を示している。

次に杭の支持力機構について考慮する。

試験 No. 2-1, 2-2 (表-2) における杭先端付近の杭体伝達荷重を見ると, 静力学支持力公式から求められる値に比べはるかに小さく, 試験 No. 2-1 では静力学支持力公式による推定値が約 65% であるのに対し, 試験結果 (ワイヤーストレインゲージから求めた値) は 10% 程度である。しかしこれは, 開端杭の場合にワイヤーストレインゲージから求めた値は杭軸力を表しているが, 先端地盤への伝達荷重を表していないためである。つまり図-11 に示すように, 開端杭の先端閉鎖は杭内部への進入土と杭内壁の摩擦に起因するものであり, この摩擦力の合力 (F_t) と杭先端部の軸力 (肉厚部の支持力 Q_p) を合計したものが先端支持力となるからである。したがって支持層への打込み長が大きく, 閉鎖率が高い場合には杭先端の軸力伝達率は, 先

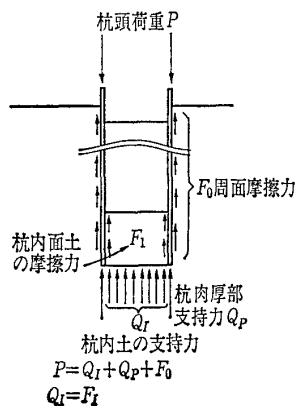


図-11 杭の支持力

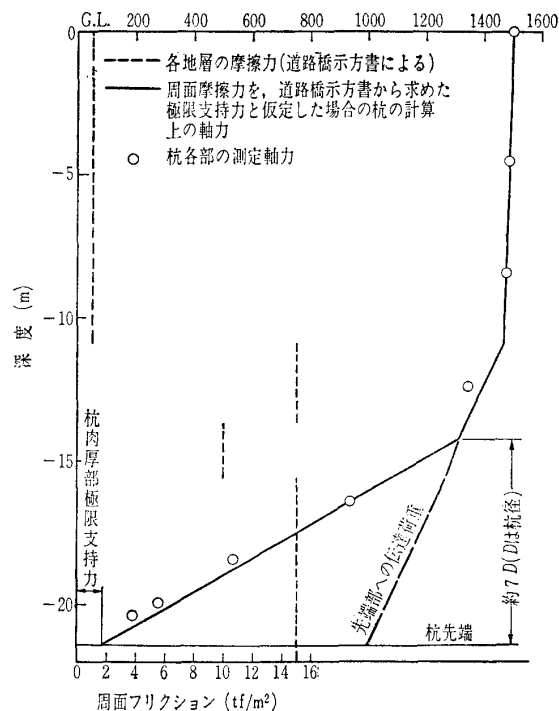


図-12 杭の伝達荷重

端地盤への荷重伝達率に比べて小さな値を示すことになる。図-12 に V_1 杭の極限荷重時 (1 500 tf) の杭体の伝達荷重を示す。

図中の実線は杭外壁周面摩擦力が, 道路橋示方書から求められる極限耐力であるとして杭体の伝達荷重を求めたものである。この図から見ると, G.L. -14 m 以深では杭軸力は杭の伝達荷重推定値と大きく差が出ている。この差は, 杭内土と杭内壁の摩擦を通して先端地盤に伝達されている荷重であり, 本図より見ると杭先端から $7D$ (杭の支持地盤への打込み長) の範囲で杭内面摩擦力を通して先端地盤へ荷重伝達がなされているのが分かる。

しかし, 今回の場合は杭が支持地盤に $7D$ 打ち込まれているためにこのような結果が出たものであり, この結果だけから支持地盤への杭の必要打込み長を決めることはできない。

また, 載荷試験結果のうち周面摩擦力が静力学支持力公式から求めた極限值とすると杭内土の摩擦力を含めた先端支持力率は約 67% となり, 静力学公式から求められる 65% とほぼ一致している。

このことは, 杭先端支持力, 周面摩擦力ともに道路橋示方書の支持力算定式でかなり正確に推定できることを示すとともに, 支持層に十分打ち込まれた杭の場合, その極限支持力を杭先端と周面摩擦力とのそれぞれの極限値の合計として求めることに特に問題がないことを示している。

3.2 動力学支持力公式による支持力の推定について

動的支持力公式による支持力の推定方法は, 実杭の打設時の挙動を基にした推定方法であり, 本方法によりの確に支持力を推定できれば, 載荷試験を行う必要もなく, 最良

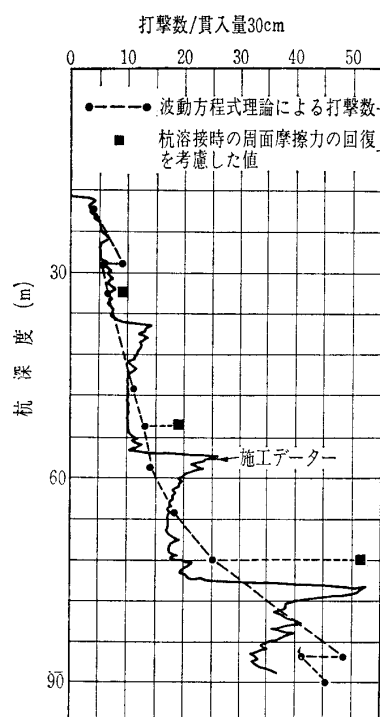


図-13 波動方程式理論による杭挙動の推定

の方法といえる。しかし、現在一般に使われているハイリー（Hiley）公式は杭および地盤の性状によるばらつきが大きく、支持力を推定する場合には十分注意しなければならない。今回の試験例から見ても杭長が短い場合や閉端杭の場合には支持力を大きめに推定するようである。

なお、最近ではスミスらによる弾性波理論⁷⁾を基にした杭打ち解析法が、施工性の検討に用いられることが多くなっており、二階堂らは本解析法を使用して杭打設時のデータを基に極限支持力を推定する方法を提案している⁸⁾。

図-13は本解析法をマレーシア海域の石油掘削ジャケットの杭打ち管理に用いたものであるが、杭の貫入状況がほぼ推定どおりであり、杭打設時の施工管理においてある程度の成果を収めたと考えている。しかし、本方法を使用した支持力推定のデータは数少なく、現在では一般的に使用されるには至っていない。今後、データの蓄積が進め

ば、杭の支持力を推定するに当たって有力な方法の一つになると考えられる。

4. おわりに

杭の鉛直支持力については古くから各種推定方法が示されており、最近では載荷試験例の蓄積とともに実物の挙動をもとにして各種修正がなされてきている。鋼管杭のように開端で使用する杭についてもその先端支持力について各種推定法が示されている。しかし、大口径鋼管杭については、今までにかなりの載荷試験例があるが、いまだ一般的な支持力公式を提供するまでに至っていない。

ここでは、大口径鋼管杭を使用した載荷試験例のうち先端閉そく杭と比較のなされている例、先端支持率の高い例等4例を掲げた。しかし、本試験結果についても土質条件が様々であり、一般的な考えを述べるまでに至っていない。今後、大口径鋼管杭の支持力についての設計法をまとめるに当たり参考になれば幸いである。

最後に、本報告を書くに当たり、各種参考資料、文献を参照させていただきました。本誌上を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 新日本製鐵株：名古屋製鐵所大口径鋼管杭試験，載荷試験報告書，昭和50年4月
- 2) 新日本製鐵株：堺製鐵所外周T護岸（その1），鋼管杭載荷試験工事報告書，昭和53年12月
- 3) 新日本製鐵株：工業化工法による芦屋浜高層住宅プロジェクト基礎鋼管杭載荷試験報告書，昭和49年8月
- 4) 日本建築総合試験所：南港住宅（ポートタウン第2住区）2区建設工事一くい鉛直載荷試験報告書一，昭和52年12月
- 5) 今野正喜・柏原松男・和田紀男：大阪市南港ポートタウンにおける鋼管ぐいについての考察，土木施工，21巻1号，昭和55年1月
- 6) 鋼管杭協会：鋼管ぐい—その設計と施工—，昭和52年9月
- 7) E. A. L. Smith: Pile-Driving Analysis by the Wave Equation, ASCE, Vol. 127, 1962
- 8) 二階堂守夫他：波動方程式の適用による杭打ち管理システム，土木学会誌，1977年2月

（原稿受理 1980. 8. 4）