

東京湾横断道路大口径鋼管杭鉛直載荷試験

Vertical Loading Test on Large-Diameter Steel-Pipe Piles
for Trans-Tokyo Bay Highway

樫山 好幸 (もみやま よしゆき)
日本道路公団課長

本間 政幸 (ほんま まさゆき)
東京湾横断道路(株) 係長

片山 猛 (かたやま たけし)
鋼管杭協会

丸山 隆 (まるやま たかし)
鋼管杭協会

1. はじめに

東京湾横断道路では、航路部橋梁の基礎および木更津立坑部の基礎形式として、それぞれ $\phi 1600\text{mm}$, $\phi 2000\text{mm}$ の大口径鋼管杭を採用している。大口径鋼管杭の支持力機構については不明確な点が多く、また載荷試験の事例も少ないことから、設計・施工に先立ち現位置で載荷試験を実施し、杭の打込み性と極限支持力を確認した。本報文は、平成元年9月

から平成2年11月まで実施した橋梁部と立坑部での試験工事とその解析結果について報告するものである。

2. 試験概要

航路部橋梁の水中橋脚は、鋼管杭基礎 ($\phi 1600\text{mm}$) で計画されており、平成元年9月に2本の試験杭 (T_1 杭, T_2 杭) を打設した。 T_1 杭は、ディーゼルハンマー (KB-80) で D_{3s} 層まで打設し、 T_2

表—1 試験杭仕様・試験項目

試験	試験杭	杭径 (mm)	杭長 (mm)	肉厚 (mm)	杭重量 (tf)	先端バンド (mm)	試験項目				
							動的試験項目		静的試験項目		
							打撃記録	杭体内応力	鉛直載荷	引抜き	長期載荷
橋梁部 (その1)	T_1	1600	50950	24	53	外, $L=300$ $t=9$	○	○	○ (2400)	○ (1300)	○ (1100)
	T_2	1600	57050	24	54	バンド無し	○	○	○ (2400)		
立坑部 (その2)	T	2000	62000	34	107	外, $L=300$ $t=9$	○	○	○ (4200)	○ (1700)	

() 内は計画最大荷重, tf

表—2 打撃記録・動的支持力

試験	試験杭	材質	根入れ長 (mm)	ハンマー (ラム重量, tf)	総打撃数 (回)	最終打撃				動的支持力(tf)			
						貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	ラム高 (m)	杭体内 応力 (kgf/cm ²)	道示式(手書き)		道路 公団式	Hiley 式
										(1)*	(2)*		
橋梁部 (その1)	T_1	SKK50	26650	ディーゼル (8.0)	2670	2.0	7	1.5	1080	2760	1686	1868	2798
	T_2	SKK50	37750	油 (12.0)	5472	0.2	15	1.4	870	3690	2463	2174	2077
立坑部 (その2)	T	SKK50	30600	スチーム (50.0)	1173	9.9	15	1.5	1238	4490	4144	2374	1821

* (1): $e_0 = 1.5 \cdot W_h / W_p$ (2): $e_0 = (1.5 \cdot W_h / W_p)^{1/2}$
 W_h : ラム重量 W_p : 杭重量

杭は、油圧ハンマー (PMJ-200) を用い、完全管内掘削を実施しながら D_{4c} 層まで打設した。2本の試験杭に対して、平成元年11月に鉛直載荷試験を実施し、 T_1 杭については平成2年10月から11月にかけて、長期載荷試験および引抜き試験を行った (その1試験)。一方、立坑部では、平成2年3月に試験杭 (T 杭) をスチームハンマー (MRBS-5000) で N 値 50 以上の D_{8s} 層まで打設し、同5月に鉛直載荷試験と引抜き試験を実施した (その2試験)。

表-1は、試験杭の仕様と試験項目をまとめたものである。また、試験杭の打設記録を表-2に示す。

載荷試験は、道路公団試験方法に従い行った。載荷方法は、その1・その2試験とも反力杭方式とし、反力杭は試験杭と同径とした。加力装置は、その1試験では杭頭に 500 tf (ストローク 250 mm) 油圧ジャッキを4台配置し、その2試験では 850 tf (ストローク 500 mm) 油圧ジャッキを6台配置し、主桁、副桁、上部反力梁を介してストランドで反力杭に反力を伝える構造とした。

3. 載荷試験結果

図-1から図-3に鉛直載荷試験の杭頭荷重 (P) と海底部沈下量 (S_0) の関係を示す。また、降伏荷重と極限荷重に対する軸力分布を図-4と図-5に示す。その1試験の T_2 杭は、完全管内掘削杭のため杭先端に荷重が伝達していないことがわかる。表-3に、各試験で得られた降伏荷重、極限荷重をまとめた。

4. 考 察

4.1 先端支持

(1) 支持層への根入れ比と地盤の支持力度

今回実施した載荷試験結果から求めた杭の支持層への根入れ比 (L/D) と杭先端地盤の極限支持力度 (q_a) を表-4に示す。その1試験では TP-37.7 m 以深に存在する洪積砂層 (D_{8s}) を、その2試験では TP-37.4 m 以深の洪積砂層 (D_{8s}) を支持層としている。また、この結果とほかの載荷試験結果^{4),6)}

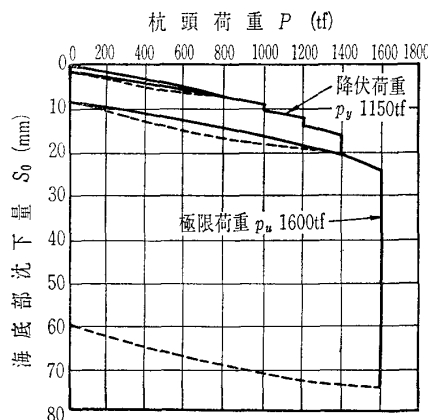


図-1 荷重-沈下量 (T_1 杭)

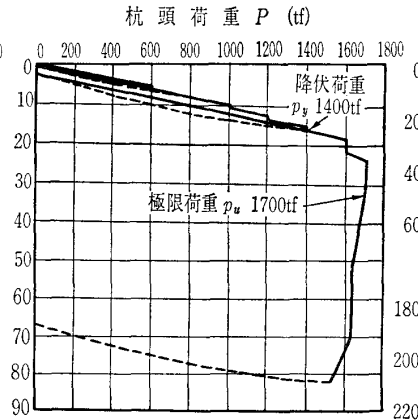


図-2 荷重-沈下量 (T_2 杭)

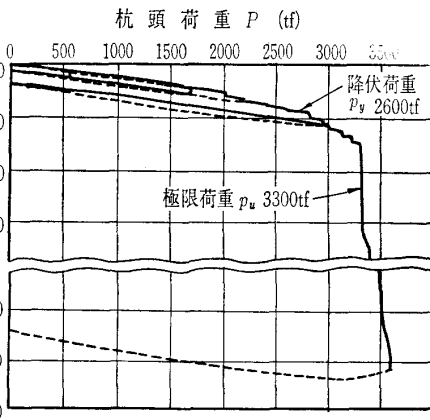


図-3 荷重-沈下量 (T 杭)

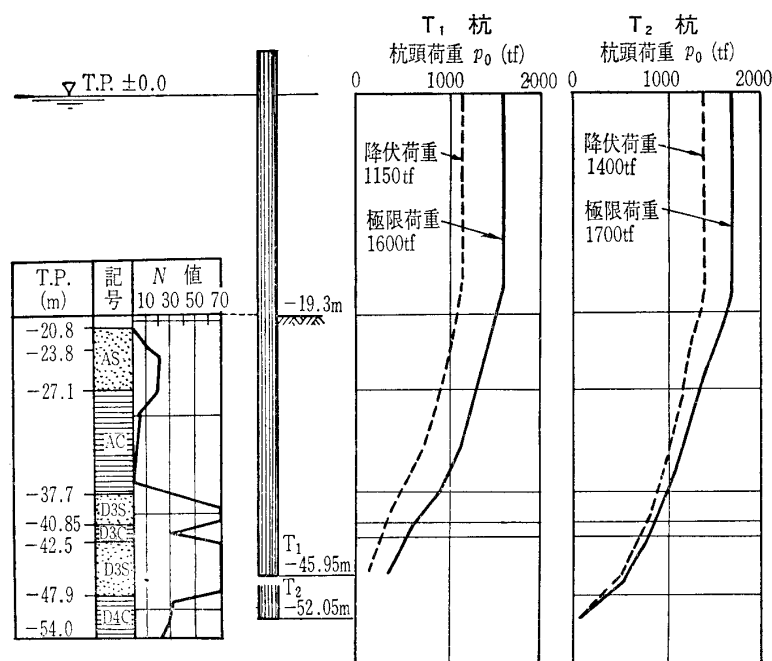
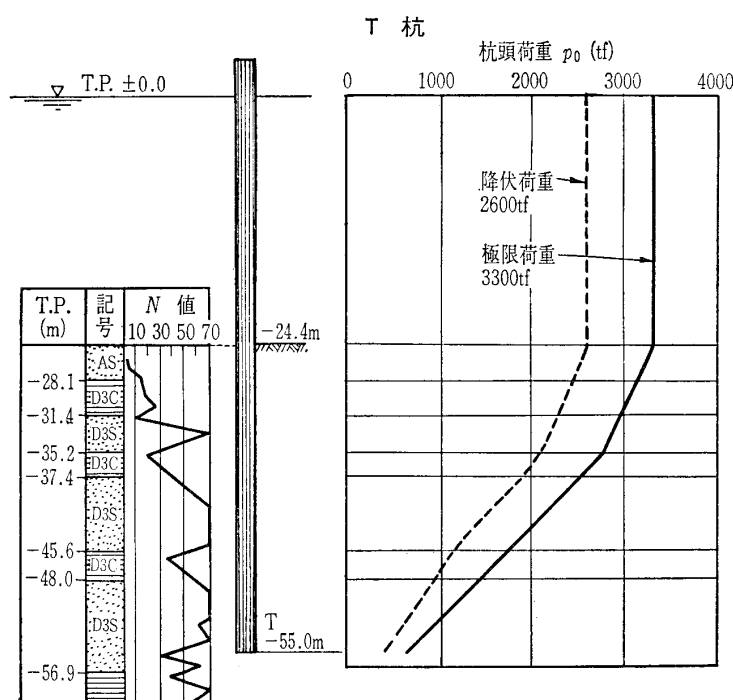
表-3 極限荷重時の周面摩擦力・先端支持力

試験杭	試験	降伏荷重 (tf)	極限荷重 (tf)	極限荷重時の分担	
				周面摩擦力 (tf)	先端支持力 (tf)
T_1	鉛直	1150	1600	1280 (80%)	320 (20%)
	長期載荷	—	1100 ^{*2}	869 (79%)	231 (21%)
	引抜き	970	1200	978 (81%)	222 (19%)
T_2^{*1}	鉛直	1400	1700	1700 (100%)	0 (0%)
T	鉛直	2600	3300	2666 (81%)	634 (19%)
	引抜き	1100	1700 ^{*2}	1269 (75%)	431 (25%)

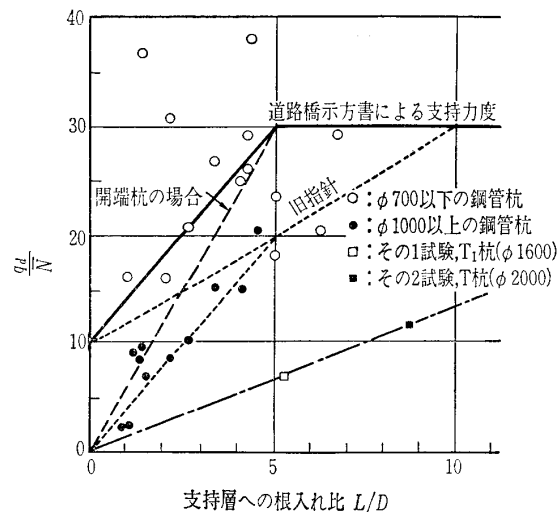
*1 完全管内掘削杭 *2 極限状態に達していないため、最大荷重表示

表—4 杭先端地盤の極限支持力と支持層への根入れ比

杭	杭 径 D (mm)	支持層への 根 入 れ 長 L (m)	載荷試験による 極限支持力 R_u (tf)	周面摩擦力の 計 算 値 $U\Sigma L_f$ (tf)	杭の投影 断 面 積 A (m^2)	杭先端地盤 の設計 N 値 $\bar{N}$	杭先端地盤の 極限支持力度 q_a^* (tf/m^2)	支持層への 根 入 れ 比 L/D	q_a/N	閉そく 率 (%)
T ₁	1600	8.3	1600	925	2.056	40	328	5.2	8.2	27
T	2000	17.6	3300	1762	3.198	40	481	8.8	12.0	40

*ここで $q_a = (R_u - U\Sigma L_f) / A$ 図—4 軸力分布 (その1試験, T₁・T₂ 杭)

図—5 軸力分布 (その2試験, T 杭)

図—6 杭先端地盤の極限支持力と支持層への根入れ比⁴⁾

を、道路橋示方書の手法により図—6に整理した。図—6から、今回実施した $\phi 1600$ mm と $\phi 2000$ mm の大口径鋼管杭では、支持層への根入れ比 (L/D) が5以上あっても十分な先端閉そく効果は発現していないことがわかる。

(2) 杭実肉厚断面の極限支持力

杭の先端支持を、先端補強バンドを含む杭の実肉厚断面 (A_p) による抵抗で考えた際の極限状態での先端支持力度 (Q_a) を表—5に示す。表—5から Q_a は、T₁ 杭, T 杭それぞれ 1810 tf/m^2 , 2380 tf/m^2 となる。山肩ら⁵⁾ は、杭先端の極限支持力度を $40 N$ (N : 杭先端 N 値) で表しており、

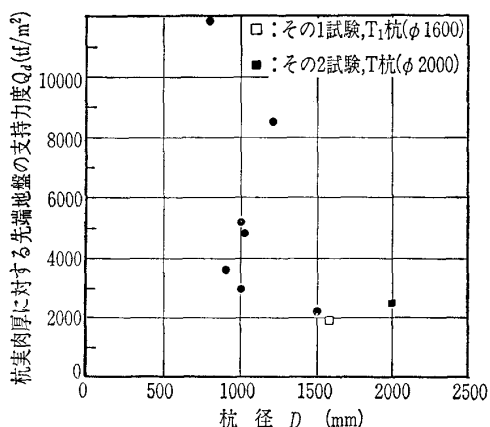
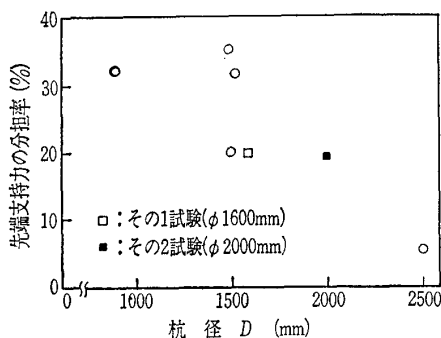
表—5 杭の先端支持力度

杭	杭の実肉 厚断面 A_p (m^2)	杭の極限時の 先端支持力 (載荷試験結果) R_p (tf)	先 端 支持力度 R_p/A_p (tf/m^2)	逆算 N 値 $N = R_p / 40 A_p$
T ₁	0.1767	320	1810	45
T	0.2668	634	2380	59

表一6 土層ごとの極限周面摩擦力度, 地盤定数 (ϕ 1600 mm, その1 試験)

区 分	層 厚 (m)	土質調査結果		周面摩擦力度 (載荷試験結果) $f_i(\text{tf/m}^2)$			極限時の各層の周面摩擦力 $R_f(\text{tf})$		
		N値	$c(\text{tf/m}^2)$	T ₁ 杭鉛直	T ₂ 杭鉛直	T ₁ 杭引抜き	T ₁ 杭鉛直	T ₂ 杭鉛直	T ₁ 杭引抜き
A _s	6.3	12		8.4	8.1	6.0	266	256	190
A _c	10.6	2	8.0	7.1	7.2	6.0	378	383	320
D _{3s}	3.15	70 (220)		14.3	8.3	10.2	226	131	162
D _{3c}	1.65	28	18.0	17.1	8.9	14.0	142	73	116
D _{3s}	3.45	70 (124)		15.5	10.9	11.0	268	295	190
D _{4c}		26	24.2	—	26.2	—	—	562	—
				周 面 摩 擦 力 (tf)			1 280	1 700	978
				先 端 伝 達 荷 重 (tf)			320	0	222
				計 (tf)			1 600	1 700	1 200

() 内 N 値は換算 N 値。上限を 70 とした。

図一7 杭径と地盤の支持力度⁴⁾図一8 極限支持力に対する杭実肉厚部先端支持力の分担率⁴⁾

今回の2事例について, N 値を逆算すると T_1 杭で45, T 杭で59となる。

一般に, 杭径の増加に従い閉そく効果は低減していくことが考えられるが, このことは図一7に示す杭径 (D) と極限状態での先端支持力度 (Q_a) の関係からも言える。図一7の縦軸 Q_a は, 軸力分布から求めた杭先端の極限支持力を杭の実肉厚断面積で

除した値であり, 先端閉そく効果が大きい程 Q_a も大きな値を示す。杭径 1000 mm 付近を境に先端閉そく効果が現れていることがわかる^{4), 6)}。

同様に, 杭の極限支持力のうち, 杭の先端実肉厚部での支持力分担比率を, 杭径 (D) をパラメーターにして図一8に示す。この分担率は, 杭径 (D) が大きくなるにつれて小さくなっており, 杭径の増加に従い閉そく効果が低減していることがわかる。

4.2 周面摩擦抵抗

(1) 地層ごとの周面摩擦力度

表一7 土層ごとの極限周面摩擦力度, 地盤定数 (ϕ 2000 mm, その2 試験)

区分	層厚 (m)	土質調査結果		周面摩擦力度 (載荷試験結果) $f_i(\text{tf/m}^2)$		極限時の各層の 周 面 摩 擦 力 $R_f(\text{tf})$	
		N値	$c(\text{tf/m}^2)$	T 杭 鉛 直	T 杭 引抜き	T 杭 鉛 直	T 杭 引抜き
A _s	3.8	9		7.6	3.1	182	74
D _{3c}	3.3	23	7.7	7.3	1.1	152	23
D _{3s}	3.8	38		8.4	3.9	201	92
D _{3c}	2.2		14.5	14.0	1.9	193	26
D _{3s}	8.1	70 (133)		17.5	5.1	891	261
D _{3c}	2.5	35	17.3	18.5	12.0	291	189
D _{3s}	6.9	70 (95)		17.4	13.9	756	604
				周面摩擦力 (tf)		2 666	1 267
				先端伝達荷重 (tf)		634	431
				計 (tf)		3 300	1 700

() 内 N 値は換算 N 値。上限を 70 とした。

引抜き試験は, 極限状態に達していないため, 最大荷重時の値。

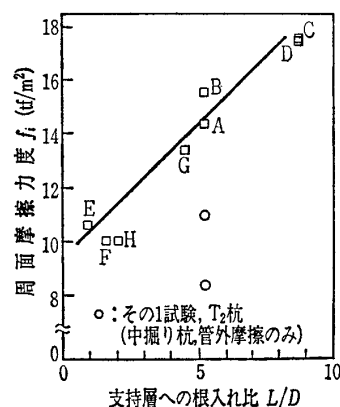
軸力分布から求めた周面摩擦力と土質試験結果から得た地盤定数を各地層ごとに表—6と表—7に整理した。ここで、周面摩擦力度 (f_i) は杭に作用する周面摩擦力を杭外周面積で除した値で示している。その1試験 (T_1 杭) では、極限状態での鉛直載荷試験の周面摩擦力度に対する引抜き試験の周面摩擦力度の比は、各層で0.71~0.85になっている。全土層の合計で比較すると、鉛直載荷時の極限周面摩擦力 (1280 tf) に対する引抜き時の極限周面摩擦力 (978 tf) の比は、0.76であった。一方、その2試験の引抜き試験では、計画最大荷重の1700 tf を載荷しても極限状態に至らなかったが、Van・der・veen (ファンデルビーン) の手法によって極限引抜き力を推定すると2250 tf となる⁴⁾。この極限引抜き力は、極限鉛直荷重 (3300 tf) に対して、0.63の比となった。

(2) 管外面摩擦力と管内面摩擦力

その1試験のうち T_2 杭は杭打設後リバース工法

表—8 支持層における摩擦力度⁴⁾

	記号	杭 径 D (mm)	支持層へ の根入れ長 L (m)	L/D	摩擦力度 f_i (tf/m ²)	備 考
事例1 (その1試験)	A	1600	8.3	5.2	14.3	外バンド
	B				15.5	外バンド
事例2 (その2試験)	C	2000	17.5	8.8	17.5	外バンド
	D				17.4	外バンド
事例3	E	1500	1.4	0.93	10.6	バンドなし
事例4	F	1000	1.6	1.6	10.0	バンドなし
事例5	G	2500	11.3	4.52	13.4以上	バンドなし
事例6	H	1219	2.4	2.0	10	外バンド



図—9 砂質支持層における周面摩擦力度⁴⁾

表—9 周面摩擦力度と土質定数
(ϕ 1600 mm, その1試験)

区 分	周 面 摩 擦 力 度	
	鉛 直 載 荷 試 験	引 抜 き 試 験
A_s	0.2 N	0.2 N
A_c	c	0.5 c
D_{3s}	0.2 N	0.12 N
D_{3c}	c	0.6 c
D_{3s}	0.2 N	0.14 N
D_{3c}	c	0.6 c

・太枠内は管内外面摩擦の和 ・ N 値の最大値を70とする

表—10 周面摩擦力度と土質定数
(ϕ 2000 mm, その2試験)

区 分	周 面 摩 擦 力 度	
	鉛 直 載 荷 試 験	引 抜 き 試 験
A_s	0.2 N	0.1 N
D_{3c}	c	0.5 c
D_{3s}	0.2 N	0.1 N
D_{3c}	c	0.5 c
D_{3s}	0.25 N	0.1 N
D_{3c}	c	0.7 c
D_{3s}	0.25 N	0.2 N

・太枠内は管内外面摩擦の和 ・ N 値の最大値を70とする

により管内を掘削した完全管内掘削杭で、通常の打設杭による T_1 杭と比較することにより鋼管内外面の摩擦力度の分離が可能である。すなわち、 T_1 杭と T_2 杭の周面摩擦力度の差が管内面摩擦力度と考えられ、さらにこの管内面摩擦力は支持層で発揮していることが表—6からわかる。表中、支持層は、太枠で示した。山肩らは杭の支持力を、杭先端実肉厚断面による抵抗と管外周面摩擦抵抗と支持層での管内面摩擦抵抗の和で評価している。今回の載荷試験結果は、この考え方で説明できた。

(3) 支持層への根入れ比と周面摩擦力度

表—8と図—9に、砂質支持層での支持層への根入れ比と周面摩擦力度の関係を示す。図—9より、支持層への根入れ比が増えるにつれ管内外面の合計としての周面摩擦力度が増加しており、これは管内面摩擦力度が増加しているためと推定できる。また、粘性土の摩擦力は一軸圧縮強度の1/2である粘着力 c に一致した。

4.3 支持力の算定式

今回実施した載荷試験では、極限状態での杭実肉厚部の先端支持力が得られ、また各地層ごとの管内外面摩擦力の分離とその定量的評価ができた。試験結果に基づいた各地層での地盤定数と摩擦力度の関係を表-9と表-10に整理する。また杭先端の極限支持力(R_{pc})を

$$R_{pc}=40 NA_p \dots\dots\dots(1)$$

N : 杭先端 N 値(N 値の最大値は50~60)

A_p : 杭先端実肉厚断面積(m^2)

表-11 鉛直支持力の比較

試験(試験杭)	支持力	式(2)(tf)	載荷試験結果(tf)
その1(T ₁ 杭)	周 面	1089 (85%)	1280
	先 端	353 (110%)	320
	合 計	1442 (90%)	1600
その2(T杭)	周 面	2505 (94%)	2666
	先 端	640 (101%)	634
	合 計	3145 (95%)	3300

()内は載荷試験結果に対するパーセント

とし、表-9、表-10の関係から得られる周面摩擦力を加え極限支持力を求めるとすれば、極限支持力の算定式は以下式(2)、式(3)で示すことができる。

$$\text{鉛直支持力: } R_{uc}=R_{pc}+R_{bc}+R_{fc} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{引抜き抵抗力: } R_{ut}=R_{fc} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

$$R_{bc}=(\sum f_{bs} \cdot L_{bs} + \sum f_{bc} \cdot L_{bc}) \times U$$

$$R_{fc}=(\sum f_s \cdot L_s + \sum f_c \cdot L_c) \times U$$

それぞれの項は、

R_{bc} : 支持層での管内面摩擦抵抗 (tf)

R_{fc} : 管外面摩擦抵抗 (tf)

f_{bs} : 支持層での砂層の管内面摩擦力度 (tf/ m^2)

L_{bs} : 支持層での砂層厚 (m)

f_{bc} : 支持層での粘性土の管内面摩擦力度 (tf/ m^2)

L_{bc} : 支持層での粘性土厚 (m)

f_s : 砂層での管外面摩擦力度 (tf/ m^2)

L_s : 砂層厚 (m)

f_c : 粘性土層での管外面摩擦力度 (tf/ m^2)

L_c : 粘性土厚 (m)

U : 杭の外周長 (m)

式(2)から算出した極限支持力と載荷試験結果を表-11に比較する。式(2)による計算値は、載荷試験結果に対して90~95%となった。

5. ま と め

今回実施した載荷試験では、 $\phi 1600$ mm と $\phi 2000$ mm の大口径鋼管杭の極限支持力が確認できた。さらに杭の鉛直支持力を先端の実肉厚部の支持と管外面摩擦力および支持層での管内面摩擦力の総和で評価すると、定量的に説明できることがわかった。しかし、この支持力算定式は、東京湾横断道路における一例であり、土質条件や土層構成の異なる場所では別途検討する必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) 樺山・高橋・安達・安永・中本: 東京湾横断道路大口径鋼管杭鉛直載荷試験, 第25回土質工学会発表会, 土質工学会, pp. 1289~1290, 1990.
- 2) 樺山・安達・本間・荒田・木村: 東京湾横断道路大口径鋼管杭鉛直載荷試験(その2), 第26回土質工学会発表会, 土質工学会, pp. 1347~1350, 1991.
- 3) 樺山・安達ほか: 東京湾横断道路 大口径鋼管杭鉛直載荷試験の計画および結果について, 杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定法に関するシンポジウム, 土質工学会, pp. 21~24, 1991.
- 4) 駒田・宇都・岸田・日下部・冬木ほか: 鋼管杭載荷試験データ検討報告書, 財高速道路調査会, 1990.
- 5) 山肩邦男ほか: 開端鋼管ぐいの支持力に関する考察(その2), 日本建築学会論文報告書, 第213号, 1973.
- 6) 春日正己ら: 鋼管杭—その設計と施工—, 鋼管杭協会, 1990.

(原稿受理 1991.11.20)