

送電用鉄塔基礎杭の引抜き抵抗の評価法に関する考察

A STUDY ON ESTIMATION OF UPLIFT RESISTANCE OF PILES FOR TRANSMISSION TOWERS

伊藤圭典*・前原雅幸**・大木 正***・古賀 明****

By Keisuke ITOH, Masayuki MAEHARA, Tadashi OHKI and Akira KOGA

In this paper, the results of tests on various kinds of in-situ piles are summarized, and the following knowledge has been obtained regarding the evaluation methods of the uplift resistance of transmission tower foundations: (1) The majority of the uplift resistance of piles is borne by the skin friction. (2) When the skin friction of steel pipe displacement and non-displacement piles in sandy soil are compared, the friction of the former is greater than that of the latter. However, there is observed to be no significant difference in the skin friction of both of them in soft clayey soil. (3) The maximum skin friction is evaluated to be $f_s=1/5 N (\leq 10 \text{ tf/m}^2)$ for sand and $f_c=N (\leq 3 \text{ tf/m}^2)$ for clayey soil. (4) Where the allowable bearing capacity is 1/3 of the Ultimate Capacity, any hazardous effect will not be caused on the superstructure.

Keywords: pile, transmission tower, uplift resistance, skin friction, in-situ test

1. ま え が き

送電用鉄塔に加わる荷重には、鉄塔、架渉線、がいしなどの重量が恒久的に作用する固定荷重と、風、氷雪などの自然の外力による変動荷重がある。以上の固定荷重成分と変動荷重成分の和が、押込み荷重、水平荷重、引抜き荷重として基礎へ伝達される。鉄塔の種類、規模により荷重成分割合は異なるが、一般に強風による繰返し荷重が支配的である。さらに、引抜き荷重は押込み荷重と同程度に作用することがある。このため、引抜き荷重により基礎の規模が決まることが多い。

しかしながら、杭の引抜き抵抗力の評価法については、現在のところ確立されているとはいえない¹⁾。引抜き時の周面摩擦力は押込み時よりも低下するとの見解²⁾⁻⁴⁾がある一方、押込み時と差異はないとの見解⁵⁾⁻⁸⁾もあるのが実情である。

著者らは、実規模大の各種の杭を用いて現場実験を行

い^{9),10),12)}、引抜きと押込みとは、粘性土の周面摩擦力に有意な差がないとの結果を得た。

本文は、著者らが行った実験結果を示すとともに、他の引抜き実験結果を整理し、送電用鉄塔基礎の引抜き抵抗力評価法について考察したものである。

2. 現場引抜き実験

(1) 実験概要

Table 1 は、一連の現場引抜き実験の概要を示したものである。ここでは、同表に示した実験の中で著者らが行った①、②の実験結果^{9),10)}に基づいて、引抜き抵抗に関する基本的特性について述べることにする。

①は埼玉県大宮市における杭径 (D) 508 mm, 根入れ長 (L) 12 m の鋼管 (いずれも先端開放) の打込み杭 (D-1, D-2), 埋込み工法の中掘り杭 (I-1, I-2) ならびにプレボーリング杭 (P-1, P-2) の引抜き実験である。なお、埋込み杭の先端部は杭径の3倍程度を打撃により貫入させている。地質は GL -5.8 m までは N 値 1 以下の粘性土 (一軸圧縮強度 $q_u=0.57 \text{ kgf/cm}^2$, 粘着力 $c=0.24 \text{ kgf/cm}^2$), それ以深は N 値 10~30 の砂質土である。

②は千葉県船橋市における杭径 (D) 800 mm, 根入れ長 (L) 17 m のオールケーシング工法による場所打

* 正会員 工博 東京電設サービス(株)取締役

(〒220 横浜市西区高島 2-5-12)

** 正会員 東京電力(株)工務部

(〒100 千代田区内幸町 1-1-3)

*** 正会員 東電設計(株)送変電土木部

(〒105 港区西新橋 1-4-6)

**** 正会員 (株)奥村組土木技術部

(〒107 港区元赤坂 1-3-10)

Table 1 Results of Pull-out Tests.

Test Site	Soil Description			Pile Description		Ultimate Loads		Reference											
	Depth (m)	Soil	N-Value (Average)	Methods	Size (m)	Loads (tf)	Displacement (mm)												
① OHMIYA Saitama	0- 5.8 5.8-12.0 12.0-	Loam, Clay Sand Sand	0.8 21.0 -	(D-1)○ Steel Pipe	D=0.506, L=12.0	160	25.4	9)											
				(D-2)○ "	Open end Pile	160	25.9												
				(I-1)△ "		90	28.0												
				(I-2)△ "		100	29.7												
				(P-1)▲ "		62	25.5												
(P-2)▲ "		65	29.4																
② FUNABASHI Chiba	0- 2.8 2.8-11. 11.-17.0 17.0-	Loam Clay, Silt Sand Sand	3 4.5 2.8 >50.0	(C-1)□ Overall	D=0.80, L=17.0	360 320	48.4 66.8	10) 12)											
				Casing															
				(C-2)□ "															
③ HATOGAYA Saitama	0-21.5 21.5-27.0 27.0-	Silt Fine Sand Fine Sand	1.9 14.3 -	(T-NI)▲ Steel Pipe	D=0.506, L=27.0	150	22.8	13)											
				Open end Pile															
④ ADACHI Tokyo	0- 2.5 2.5- 7.8 7.8-24.5 24.5-29	(Cut) Fine Sand Silt Fine Sand	- 5.8 1.4 43.8	(C-1)△ Steel Pipe	D=0.506, L=34.5	210	25.0	14)											
				(C-2)△ "		205	25.2												
				(C-3)△ "		180	20.5												
				(C-4)△ "		195	35.0												
				(C-5)△ "		205	25.0												
⑤ KIKUCHI Kumamoto	0- 4.0 4.0-14.5 14.5-	(Cut) Clay Tufty	4~8	(T-1)○ Steel Pipe	D=0.319, L=11.2	69	8.4	15)											
				(T-2)○ "	D=0.319, L=10.4				97	9.2									
⑥ ICHIHARA Chiba	0- 5.2 5.2-27.7 27.9-38.7	(Cut) Silt Sand	- 2.8 30.3	○ Steel Pipe	D=0.65, L=38.9	300	23.5	16)											
				⑦ ICHIHARA Chiba	0- 5.3 5.3-13.7 13.7-21.3 21.3-28.0	(Cut) Sand Silt Sand	- 25.4 22.0 47.0	○ Steel Pipe	D=0.66, L=26.5	>300	>20.0	16)							
													⑧ ICHIHARA Chiba	0- 5.3 5.3-11.3 11.3-16.0	Sand Sand Silt	16.9 21.8	(C-7)○ Prestressed Concrete pipe	D=0.40, L=7.5	52
(A-7)□ PIP	D=0.40, L= 7.5	45	15.0																
(A-5)□ PIP	D=0.40, L=15.5	70	23.0																
⑨ INASHIKI Ibaragi	0- 4.7 4.7-12.8 12.8-15.9 15.9-17.8 17.8-23.0	Sand Silt Sand Clay Sand	2.8 1.3 10.3 27.5 28.0	(A-6)□ BH	D=0.70, L=24.5	120	14.0	16)											
				(A-2)□ BH	D=0.70, L=24.5	120	13.4												
				(A-4)□ BH	D=0.70, L=13.5	76	8.0												
				⑩ HACHIOHJI Tokyo	0- 7.0	Sand with Gravel	38.4		(B-1)□ Overall	D=1.00, L=7.0	>330	>21.5	17)						
(B-2)□ " Casing	>330	>31.1																	
(B-3)□ "	>330	>27.6																	
⑪ KOHTOH Tokyo	0- 6.7 6.7-11.8 11.8-16.4 16.4-32.4 32.4-60.0	Silt Silt Sand Silt Sand with Gravel	3.1 7.6 15.5 3.0 19.1	○ Steel Pipe	D=0.61, L=62.5	>460	>82.0	16)											
				⑫ KURASHIKI Okayama					0-18.2 18.2-	Clay Sand with Gravel	2.8 >50	○ Steel Pipe	D=0.66, L=19.5	130	52.0	16)			
																	⑬ KARIHA Niigata	0- 7.0 7.0-12.0 12.0-14.4 14.4-16.4 16.4-19.2 19.2-25.0	(Cut) Clay Sand Sand Sand Clay
				(A-2)○ "					D=0.40, L=18.0	280	32.0								
				⑭ YOKOHAMA Kanagawa					0- 8.5 8.5-10.5	Loam Clay with Sand	3.3 13	PIP-6□ PIP	D=0.35, L=9.0	108	40	20)			
PIP-7□ PIP	D=0.35, L=9.0	108	20																

Note: ○ Driven pile

△ Bored precast pile (Inner excavation) ▲ (Preboring)

□ Cast-in place concrete pile

D=Pile diameter L=Pile length in the ground

Cut:Friction cut

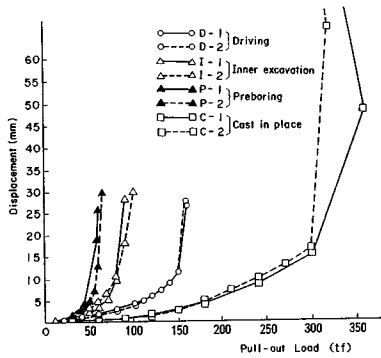


Fig. 1 Pull-out Load vs. Displacement Curves of Piles.

ち杭 (C-1, C-2) の引抜き実験である。地質は、GL-11 m までは N 値 3~5 の粘性土 (粘着力 $c=0.29\sim 0.55 \text{ kgf/cm}^2$)、それ以深は N 値 20~50 の中位~締まった砂質土である。

Fig. 1 は各杭の荷重と変位量の関係を示したものである。どの杭も変位量は 10 mm を超えると急激に増加している。最大荷重時の変位量は、打込み杭、埋込み杭で 25~30 mm であり、場所打ち杭で 50~60 mm 程度に達している。

(2) 杭周辺地盤の挙動

Fig. 2 に打込み杭 (D-2)、場所打ち杭 (C-1) の周辺地盤の変位分布を示す。変位の分布は、杭周面より杭径の 3~4 倍程度離れた地点から、杭に近づくに従い増加する傾向にあり、各地点の変位量は荷重の増加に伴って大きくなる。しかし、両杭とも杭の変位量が 5 mm を超えると杭周面から杭径分 (D) 離れた地点の変位量は 1 mm 程度でほぼ上限に達し、杭の変位に追従しない。したがって、施工法に関係なく、杭が引き抜かれるときの影響範囲は杭径以内の杭近傍に限定されると考えられる。

また、場所打ち杭においては、杭を引抜き後周辺地盤を掘削し、地盤に発生したクラック状況を観測した。その結果地表面から 1 m 程度の深さの地点においては、コーン状のクラックが形成されていたが、1 m 以深においては、クラックが認められなかった¹⁰⁾。

以上のことから、杭引抜き時のすべり面はおおむね杭周面に沿って生じ、引抜き抵抗力の大半が杭周面で発揮されると考えられる。

(3) 周面摩擦力の特性

a) 排土杭と非排土杭の特性

Fig. 3 に、打込み杭 (D-2)、中掘り杭 (I-2)、プレボーリング杭 (P-2) の周面摩擦力と変位の関係を示す。これらの工法を支持力特性から分類¹¹⁾すると (D-1) 杭は排土杭 (Displacement Pile)、(P-2) 杭は非排土杭

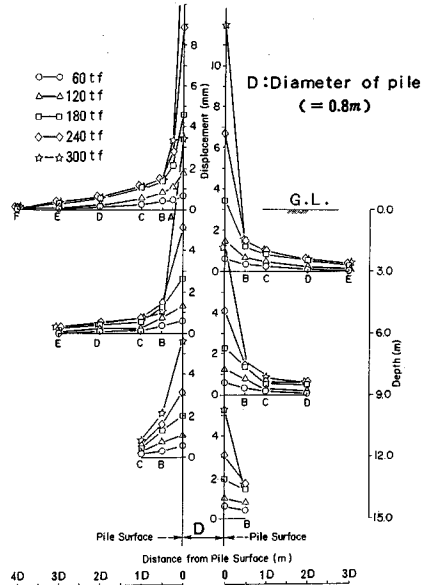
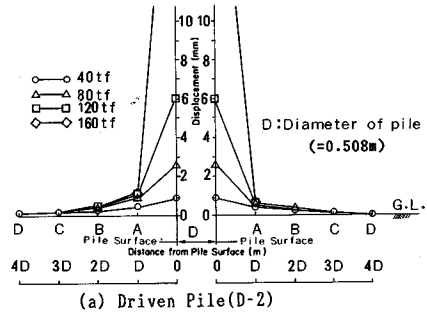


Fig. 2 Observed Vertical Displacement of Pile and Ground¹⁰⁾.

(Non-Displacement Pile), (I-2) 杭は両者の中間的な杭に相当する。同図において、上側が引抜き時、下側が押し込み時の結果である。

ここで杭周面摩擦力はひずみ計測データより得られた軸力の深度分布から各測点の軸力差を求め、その区間における平均杭周面積で除すことにより求めている。同図における杭周面摩擦力と変位量は上部の粘性土層と下部の砂質土層のおおのの平均値を示している。

砂質土の引抜き時の周面摩擦力は、各杭とも変位量が 10 mm を超えると最大に達している。最大周面摩擦力は、(D-2) 杭が大きく、以下 (I-2) 杭、(P-2) 杭の順になっている。そのことは、Meyerhof の行った砂質土における打込み杭と埋込み杭の押し込み方向の周面摩擦力の関係²¹⁾に類似している。

粘性土の引抜き時の周面摩擦力は、各杭とも 5~10 mm 程度でほぼ最大に達している。また最大周面摩擦力は (P-2) 杭がわずかに小さいが、施工法の違いによる

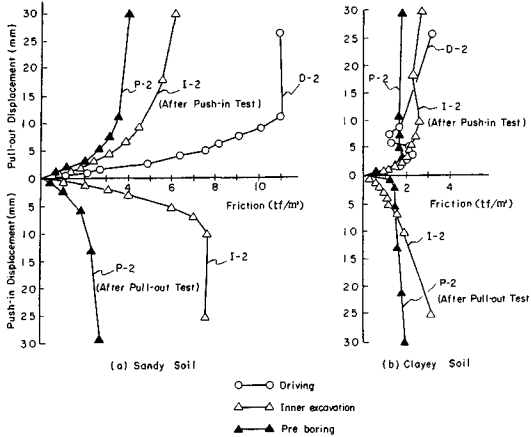


Fig. 3 Friction vs. Displacement of Driven and Bored Piles.

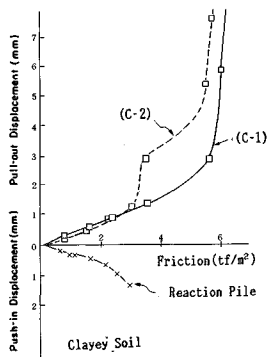


Fig. 4 Friction vs. Displacement of Cast-in Place Concrete Piles¹⁰⁾.

顕著な差は認められない。

したがって、 N 値 10~30 程度の砂質土の周面摩擦力は、打込み杭のような排土杭では非排土杭に比べて大きな値を示すが、軟弱な粘性土では排土杭、非排土杭による差異は少ないと考えられる。

b) 押し込みと引抜きの比較

Fig. 3 における (I-2) 杭は最初にほぼ極限状態に達するまで押し込み、その 33 日後に引き抜いており、(P-2) 杭は、最初にほぼ極限状態に達するまで引き抜き、その 106 日後に押し込んだ結果である。

砂質土における引抜き時と押し込み時の最大周面摩擦力を比較すると、(I-2) 杭では引抜き時は押し込み時の 80% 程度であり、(P-2) 杭では押し込み時が引抜き時の 70% 程度になっている。

すなわち、砂質土では押し込み、引抜きの方向にかかわらず先に大変形を与えた後の摩擦力が低下している。一方、粘性土においては両杭とも同程度の最大周面摩擦力を示している。

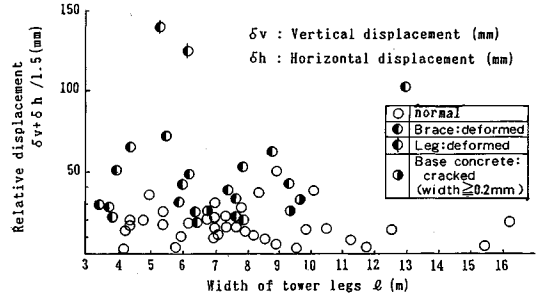


Fig. 5 Relation between Relative Displacement and Conditions of Towers²³⁾.

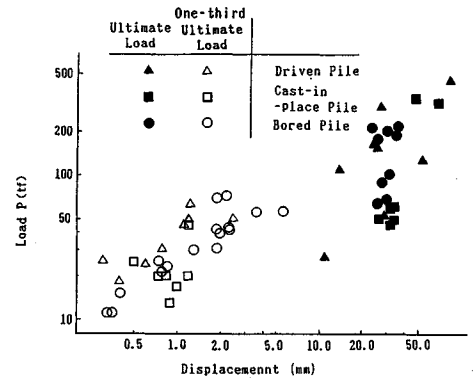


Fig. 6 Pull-out Load vs. Displacement of Piles.

Fig. 4 は、場所打ち杭の粘性土層中にある引抜き杭と反力杭（押し込み）の周面摩擦力と変位の関係を示したものである。同図から、反力杭の最大変位量 1.4 mm に至る摩擦力は引抜き杭と同じ値を示しているのがわかる。Cooke ら⁵⁾、O'Neil ら⁷⁾も粘性土における押し込みと引抜きの現場実験から、両者の差はないとしている。

以上のことから、粘性土における引抜き時の周面摩擦力は押し込み時と同等に評価できると考えられる。

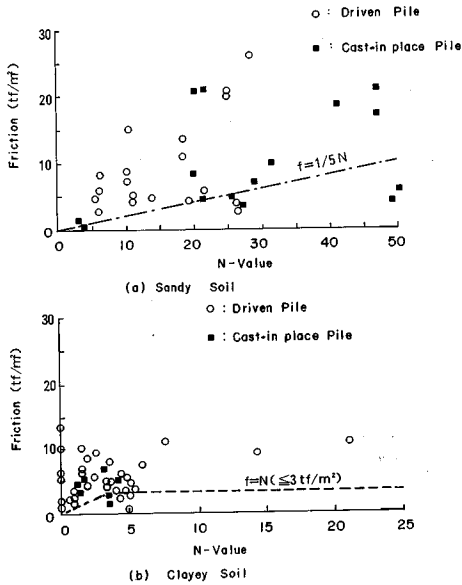
また砂質土の両者の摩擦力の大小関係は、載荷方法等の条件により異なっているので、現段階では評価が困難である。

3. 引抜き抵抗力の評価

引抜き抵抗力の評価方法について、著者らに行った実験（実験①、②）に加え、Table 1 に示した他の実規模引抜き実験をあわせ計 14 地点、既製杭 21 本、場所打ち杭 12 本の実験結果をもとに考察を行った。

(1) 送電用鉄塔基礎の許容変位量

送電用鉄塔基礎は、通常各脚ごとに独立しているため、絶対変位量よりも脚間相対変位量が上部構造物に有害な影響を与える。一般に鉄塔構造体としての裕度、ボルトクリアランスによる変位量の吸収を考慮すれば、相対変

Fig. 7 Pull-out Skin Friction vs. N -values.

位置は鉛直方向で脚間距離の1/1200、水平方向で1/800程度まで許容できるとされている²²⁾。Fig. 5は、沖積地盤における鉄塔各脚間の実測相対変位量と鉄塔の損傷状況との関係を示したものである²³⁾。ここで実測相対変位量は鉄塔の変状を示す管理尺度として使用しているもので、鉛直方向の相対変位量 δ_v と水平方向の相対変位量 δ_H の1/1.5の和としている。

同図から実測相対変位量が20 mmを超えると鉄塔に何らかの変状を与えているのがわかる。

Fig. 6は、Table 1に示した実験の結果をもとに、極限荷重時と極限荷重の1/3の荷重時の杭頭変位量を示したものである。極限荷重時の杭頭変位量は、10~70 mm程度であるが、1/3の荷重時の杭頭変位量は5 mm以下である。

一般に杭頭の水平変位量を10 mmで制限していることを考慮すれば、引抜き許容支持力を極限荷重の1/3とすることにより上部構造物に有害な影響を与える変位量は生じないと考えられる。

(2) 周面摩擦力の評価

Fig. 7はTable 1に示した実験結果の中からひずみ計測を行ったデータを選び、各測点間の最大周面摩擦力とその間の平均 N 値との関係を砂質土、粘性土に分けて示したものである。同図には、「送電用支持物設計標準」²²⁾(以下設計標準と称する)における摩擦力の評価法を破線で示している。またFig. 8に引抜き極限荷重の実測値と設計標準による計算値との関係を示す。

以上の結果から、設計標準は周面摩擦力を控えめに評価していると判断できる。しかし、降伏荷重を超えた荷

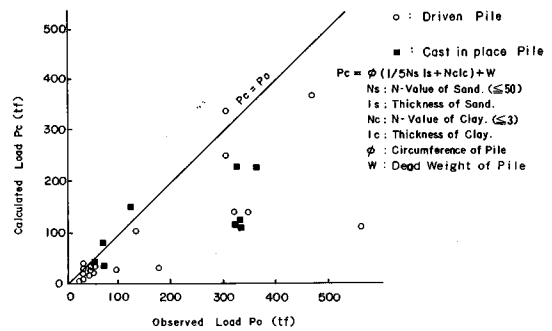


Fig. 8 Comparison of Observed and Calculated Pull-out Resistance of Piles.

重で繰返し引抜き試験を行った結果によると、繰返し回数に応じて杭頭変位量が累加する傾向にあること^{24)~26)}、また長期的に継続して作用する引抜き力によるクリープ現象の影響が粘性土で顕著であることを考慮すれば、引抜き摩擦力を控えめに評価することは現在のところやむを得ない処置であると考えられる。

4. まとめ

現場引抜き実験を踏まえ、送電用鉄塔基礎杭の引抜き抵抗力の評価法に関する考察を行った。以下にその結果を要約する。

(1) 杭周辺地盤の挙動の観測結果から、杭引抜き時のすべり面は、おおむね杭周面に沿って生じることを確認した。すなわち、杭の引抜き抵抗力はその大半を周面摩擦力で負担する。

(2) 鋼管杭における排土杭と非排土杭の周面摩擦力の実測値の比較結果から、砂質土においては、排土杭の方が大きく、軟弱な粘性土においては両者に有意な差が生じないことを確認した。

(3) 粘性土の周面摩擦力の引抜き時と押込み時の実測比較から、両者に有意な差は認められなかった。このことは、粘性土における引抜き時の周面摩擦力は、押込み時と同等に評価できることを示唆している。

(4) 極限荷重の1/3の荷重における杭頭変位量は、おおむね5 mm程度以下である。したがって、許容支持力を極限荷重の1/3とすれば上部構造物に有害な影響を与えるおそれは少ないと判断できる。

(5) 実測周面摩擦力と N 値との関係および引抜き最大荷重の実測値と計算値の関係から、送電用鉄塔基礎における打込み杭、場所打ち杭の周面摩擦力は設計標準の砂質土で $f = 1/5 N (\leq 10 \text{ tf/m}^2)$ 、粘性土で $f = N (\leq 3 \text{ tf/m}^2)$ で評価できることを確認した。

謝 辞：本研究の遂行ならびに本文の作成にあた

り、暖かいご助言とご指導を賜った京都大学 柴田 徹博士に深甚な謝意を表する次第である。さらに貴重なご助言を頂いた電力中央研究所 西 好一博士、東京電力(株) 江川 顕一郎氏ならびに東京電設サービス(株) 佐野 俊輔氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：杭基礎の低騒音・低振動施工法と支持力，1986.
- 2) 川辺一洋・青木雄三郎，ほか：砂質土における模型杭の引抜き性状に関する実験，東急建設技法，第4号，pp. 25~28, 1977.
- 3) Rao, K. S. and Venkatesh, K. H. : Uplift Behaviour of Short Piles in Uniform Sand, 土質工学会論文報告集, Vol. 25, No. 4, pp. 1~7, 1985.
- 4) Mansur, C. L. and Hunter, A. H. : Pile Tests Arkansas River Project, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1545~1582, 1970.
- 5) Cooke, P. W. and Price, G. : Strains and Displacements Around Friction Piles, Proc. of 8th ICSMFE, Vol. 2, pp. 53~60, 1973.
- 6) Coyle, Harry M. and Castello Reno R. : New Design Correlations for Piles in Sand, Proc. of ASCE, Vol. 107, No. GT7, pp. 965~986, 1981.
- 7) O'Neil, Michael W., Hawkins Richard A. and Audibert, Jean M. E. : Installation of Pile Group in Overconsolidated Clay, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. GT11, pp. 1369~1386, 1982.
- 8) Ismael, Nabil F. and Klym, Tony, W. : Uplift and Bearing Capacity of Short Piers in Sand, Proc. of ASCE, GT5, pp. 579~594, 1979.
- 9) 伊藤圭典：打込み・埋込み・場所打ち杭の引抜き抵抗力比較測定，第23回土質工学シンポジウム，pp. 1~8, 1978.
- 10) 伊藤圭典・前原雅幸：場所打ち杭の引抜き抵抗に関する実験と考察，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，pp. 59~67, 1986年12月.
- 11) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，pp. 252, 1985.
- 12) 伊藤圭典・前原雅幸・大木 正・古賀 明：場所打ち杭の引抜き抵抗に関する解析，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，pp. 69~75, 1986年12月.
- 13) 東京電力(株)：千代田線 No. 8 鉄塔建替に伴う杭耐力試験報告書，1978年9月.
- 14) 東京電力(株)：千代田線 No. 8 鉄塔建替工事のための鉄塔基礎杭耐力調査報告書，1976年11月.
- 15) 赤司六哉・永津忠治，ほか2名：ボク地盤の鋼管グイの引抜き結果について，第14回土質工学研究発表会，pp. 933~936, 1979.
- 16) 東電設計(株)：送電用鉄塔基礎設計の合理性追求に関する研究—場所打ち杭の挙動解析研究報告書，1968年11月.
- 17) 東京電力(株)：送電用鉄塔基礎工法に関する研究のうち砂礫層における大口径杭ならびにアンカー工の耐力試験報告書，1972.
- 18) 東京電力(株)：柏崎刈羽原子力発電所1号機工事に伴う取水口設計委託のうち鋼管引抜き試験報告書，1984年1月.
- 19) 岸 清・大槻英夫：柏崎刈羽原子力発電所取水口工事の設計施工について，電力土木，No. 201, pp. 78~86, 1986.
- 20) 小粥康夫・坂本 稔：場所打ちモルタル杭の摩擦杭としての特性，土と基礎，pp. 39~46, 1982.
- 21) Meyerhof, G. G. : Scale Effects of Ultimate Pile Capacity, Jour. of the Geotech. Engig. Div., ASCE, Vol. 109, No. 6, pp. 797~806, June, 1983.
- 22) 電気学会：送電用支持物設計標準(JEC-127)，1979.
- 23) 蔵持慈男・島本正雄：軟弱地盤地帯における送変電土木設備の保守について，電力土木，No. 156, pp. 101~103, 1978.
- 24) 伊藤圭典：打込み・埋込み杭の繰返し引抜き抵抗および水平抵抗の比較測定，第14回土質工学研究発表会，pp. 965~968, 1979.
- 25) Begemann, H. K. S. : Alternating Loading and Pulling Tests on Steel I-Beam Piles, Proc. of 8th ICSMFE, Vol. 2, pp. 13~17, 1973.
- 26) 電気協同研究会：電気協同研究，第25巻，第2号，pp. 52~53, 1969.

(1989. 5. 30・受付)