

杭基礎構造物の限界状態設計法と施工管理の役割

Role of Construction Control of Pile Foundation in the Limit State Design

基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会

施工・品質管理ワーキンググループ

1. ま え が き

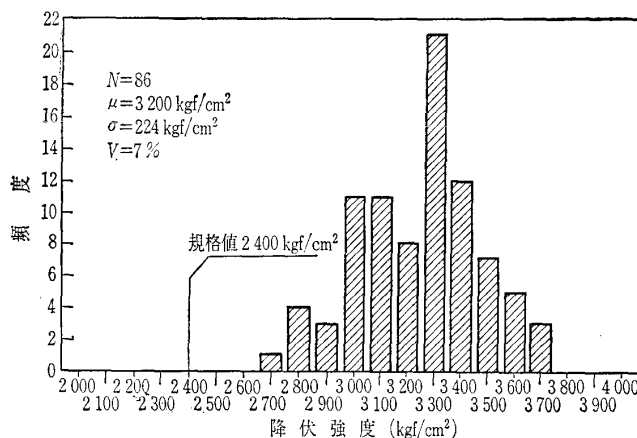
基礎構造物の限界状態設計法を確立するためには、基礎および地盤の性状を定量的に把握することが重要であり、その結果に基づいて基礎および地盤の各部位での抵抗係数を決めていくことが必要となる。例えば杭基礎の鉛直支持力についていえば、鉛直載荷試験データを十分に蓄積して、その結果を分析することにより抵抗係数が決められていく。ところが、その設計法の前提となっている載荷試験杭と実際に施工された杭との間にどの程度の違いがあるのかについてのデータは少ない。

新しい設計法を導入しようとするときには、施工全体としてあらかじめ設計で設定されているものとの違いを再評価し、設計法構築の前提としなくてはならないし、現在の施工管理で不足しているものがあれば、今後の課題としなくてはならない¹⁾。

本報告は、いくつかの施工管理データを調査することにより、限界状態設計法を成立させるための前提条件としての施工管理の実際と今後の方向性について述べたものである。

2. 既製杭の製造管理とその結果

既製杭の場合、工場製品としてある品質管理のもとで生産され出荷されており、その検査項目と規格

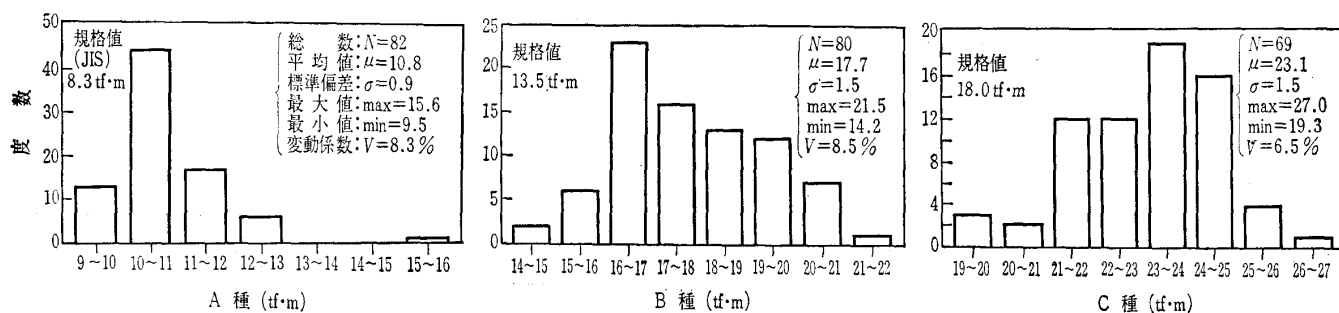


図—1 鋼管杭の降伏強度分布

値については JIS²⁾ に詳しく記述されている。ここでは、鋼管杭と PHC 杭の工場検査データを集めた結果について述べる。

2.1 鋼管杭

図—1 に、杭径 600 mm で肉厚 9 mm の SKK400 鋼管杭の降伏強度の頻度分布を示す。統計データの平均値 μ は規格値と比較して十分な安全性があり、この差は標準偏差 σ の 3.6 倍である（本報告では材料規格値に対する信頼性指標として、 $\beta = (\mu - \text{規格値}) / \sigma$ を定義する。ここでは $\beta = 3.6$ となる）。なお変動係数は 7% であり、これは同径で肉厚 12 mm の SKK490 鋼管杭でもほとんど同じ（6%弱）であった。



図—2 PHC 杭の曲げ破壊強さ分布

2.2 既製コンクリート杭

図-2は、高温高压蒸気養生で杭径400mmのPHC杭の曲げ破壊強さ分布（複数業者）を示したものである。全データは、規格値をクリアしている。統計量で表現するとA、BおよびC種でそれぞれ、変動係数は8.3%、8.5%、6.5%、 β は2.78、2.80、3.40であり、安全性はA、B種で同程度、C種で比較的大きい。以上の傾向はほかの杭径（ $\phi 700$ 、 $\phi 800$ ）や常温蒸気養生の場合でも同様であった。

3. 杭種別の施工管理とその結果

3.1 打込み杭

打込み杭は、大きな貫入量試験を現場で実際に行っているようなもので、打止め時の杭貫入量などから杭1本1本の支持力推定が行える。そこで、埋込み杭や場所打ち杭と比べ、支持力のばらつきを小さく抑えることができ、設計における支持力の抵抗係

数を大きく設定できる可能性がある。

一例として、図-3に示すような地盤で $\phi 800\text{mm} \times 73 \sim 76.5\text{m}$ の鋼管杭を油圧ハンマー（10t）で施工した結果を示す。所定の根入れ長の確保を第一の施工管理項目としたが、打止め時に杭打ち式による支持力算定を行い、打止め位置の妥当性を全数チェックしている。

図-4は、杭打ち式による支持力の頻度分布である。打止め管理にはHileyの式³⁾が用いられ、設計支持力290tfに対して平均302tf、変動係数5.2%と良好な管理結果となっている。しかし、図に併記した5Sの式³⁾によると、変動係数は1.7%と更になさくなるが、すべて設計支持力より小さくなっている。なお、現場で実施した载荷試験では、許容支持力は500tfと判定されており、杭打ち式との差は大きい。

一方、従来の杭打ち式に代わって、“波動理論による支持力推定技術”⁴⁾により、打込み杭の動的貫入抵抗のリアルタイムの測定が可能となっている。図-5は、近接して施工した3本の鋼管杭（ $\phi 400\text{mm} \times 12\text{m}$ ）の動的貫入抵抗の測定結果⁵⁾である。いずれの杭も同程度の値が得られており、波動理論による支持力推定技術が打込み杭に対して有効な施工管理手法になりうることを示しているといえる。しかし、打込み杭の支持力は施工後の経過時間によって増加するため、動的貫入抵抗（動的支持力）で杭の支持力を推定するためには、载荷試験結果との比較検討が不可欠である。図-6はそのことを考慮して、打込み後の経過時間を同じにして実施した、

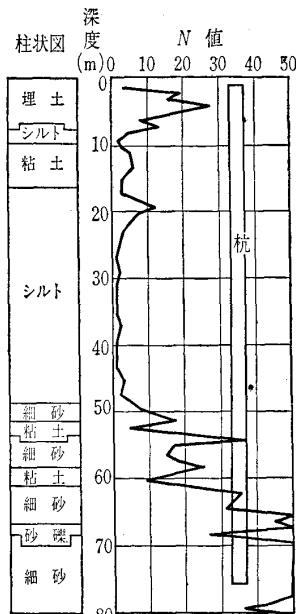


図-3 地盤概要

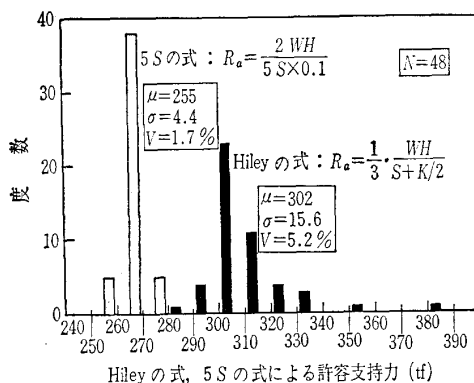


図-4 Hiley式、5S式による支持力の頻度分布

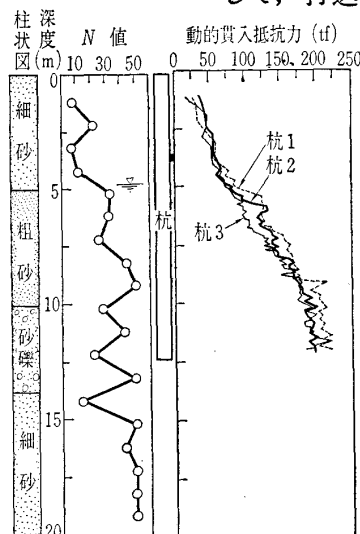


図-5 杭打ち時の動的貫入抵抗⁵⁾

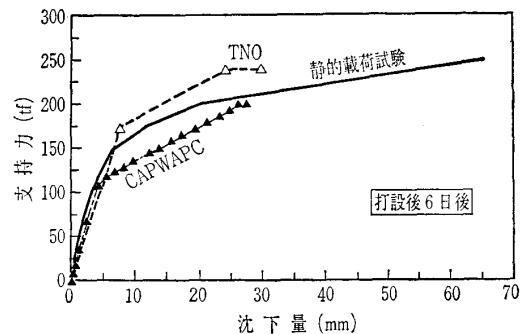


図-6 動的および静的载荷試験結果の比較⁵⁾

表—1 AASHTO⁶⁾における杭支持力の抵抗係数

支持力推定手法	支持力の抵抗係数
標準貫入試験による推定	0.45
コーン貫入試験による推定	0.55
波動理論による支持力推定	0.7
静的載荷試験による推定	0.8

静的載荷試験と動的支持力測定と比較⁵⁾である。図に示した二つの動的支持力測定システムでは算定値に多少差はあるが、静的支持力とほぼ一致している。

なお、AASHTOの限界状態設計法⁶⁾では、基礎杭の抵抗係数を表—1のように設定することが提案されており、静的な載荷試験だけでなく動的支持力測定によっても抵抗係数が大きく設定できる可能性があり、今後我が国においても検討が期待される。

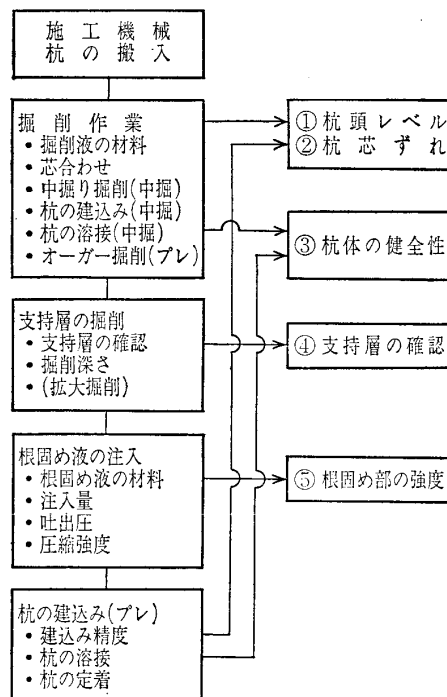
3.2 埋込み杭

埋込み杭の代表的な施工法としてはプレボーリング工法と中掘り工法がある。両工法とも支持層への荷重伝達を確実にするために最終打撃することもあるが、最近ではセメントミルクによる杭先端部の根固め工法の採用が多い。

埋込み杭は打込み杭とは異なり、施工時に支持力を直接評価できる管理方法はなく、確実に所定のものが施工されていることを確認することが重要となる。杭の鉛直支持性能は、施工が終了した杭に対して鉛直載荷試験で確認するしかないのが現状である。このような観点で施工の管理項目を見直し、管理値に対して実際はどのようになっているのかを調査した。項目は図—7の管理項目を考慮して五つに分けて、その管理データと必要ではあるが現在はまだ実施されていない項目なども含めて述べる。

作業手順と管理項目

施工結果



図—7 埋込み工法の作業手順と施工管理項目

(1) 杭頭レベルと杭芯ずれ

表—2は、5地点での杭頭レベルおよび杭芯ずれの管理値・施工結果をまとめたものである。表では、管理値内に入らないデータが全体的に多少見受けられる。杭頭レベルおよび杭芯ずれの平均値はそれぞれ10 mm～50 mm程度および40 mm～50 mm程度であり、ここを中心にデータが集中している。

これら5例のデータのみで埋込み杭全体の施工管理の実態を議論することはできないが、おおまかな傾向は読み取ることができる。

(2) 杭体の健全性

施工後の杭体の健全性の検査はまだ一般的には実

表—2 地盤条件・杭の諸元および施工結果

地 点	地 盤		工 法	杭 材	杭 径 (mm)	杭長	杭										杭 芯 ず れ					
	杭周	杭先端					杭頭レベル					杭 芯 ず れ										
							本数	管理値	施 工 結 果 (mm)			本数	管理値	施 工 結 果 (mm)								
									最小値	最大値	平均値			標 準 偏 差	管理値以 外	最小値	最大値	平均値	標 準 偏 差	管理値以 外		
A	沖積・洪積粘性土	N $\geq$ 50 砂	中掘り	鋼管杭	ϕ 812.8	58.0～64.9m	89	設計 $\pm$ 100mm以内	-10	300	50	50	12.4%	101	100mm以内	0	110	39	21	2.0%		
B	沖積粘性土	N $\geq$ 50 泥岩	中掘り	PHC杭(A・C種)	ϕ 600 700 800	21.0m	74	設計 $\pm$ 100mm以内	-300	80	11	49	1.4%	74	100mm以内	0	100	45	22	0.0%		
C	沖積粘性土	N $\geq$ 50 泥岩	中掘り	PHC杭(A・C種)	ϕ 600 700 800	21.0～42.0m	100	設計 $\pm$ 100mm以内	-160	100	14	38	3.0%	100	100mm以内	0	300	95	79	36.0%		
D	洪積砂質土	N $\geq$ 50 砂	プレボーリング	PHC杭(A種)	ϕ 400	9.0m	42	設計-60～+20mm	-20	20	0.5	10	0.0%	42	100mm以内	11	150	51	27	2.4%		
E	洪積砂質土	N $\approx$ 30 砂	プレボーリング	PHC杭(A・B種)	ϕ 600	18.0m	144	設計-60～+20mm	-50	30	-12	14	0.7%									

施されていないが、少なくとも杭の性能の前提となるような杭体の損傷とか、支持性能の極端な不足は何らかの方法でチェックされるべきものであろう。この方法としての可能性のあるものに、非破壊試験法の一つである低ひずみの波動を使った方法（Pile Integrity Test）がある⁷⁾。この方法は装置、試験法が簡便であり、全数検査も可能であること、今後の発展も見込まれることより、近い将来には杭の施工管理に取り入れられる可能性が高い。

(3) 支持層の確認

道路や鉄道などの線状構造物の杭の施工にあたっては、特に地層の変化が予想されるため、事前および施工時の支持層の確認が必要不可欠である。埋込み杭施工時のオーガスクリーナの積算電流値による支持層の確認で得られた結果を図-8、9に示す。図-8より、積算電流値で確認した支持層への施工根入れ深さの平均値とボーリング柱状図から求めた設計値とで相関があることが分かる。なお、支持層の N 値と積算電流値の関係は、図-9に示すようにおおむね相関はあるものの、十分とはいえない。しかしながら、今後多くの地盤で実績を積むことによって、土質とその強度を定量的に判断できるようになることが期待される。

(4) 根固め部の強度

図-10に、プレボーリング工法の杭先端根固め部（ $W/C=60\%$ ）のコアボーリング供試体の圧縮強度分布を示す。目標強度 150 kgf/cm^2 以上の範囲で大きくデータがばらついている。また全般的な傾向として、杭先端地盤の土質によらず深さ方向に強度が

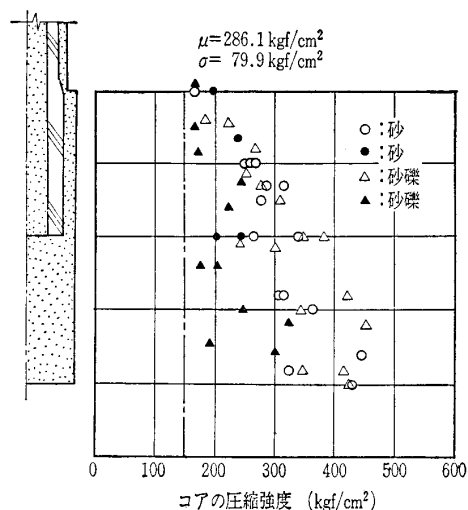


図-10 根固め部のコア強度（プレボーリング工法）

増大している。変動係数は、27.9%であり、中掘り工法でもほぼ同様の結果であった。

3.3 場所打ちコンクリート杭

場所打ちコンクリート杭は現場でコンクリートを打設して杭を造成するが、施工管理の役割は埋込み杭で述べたことと基本的には同じであろう。ここでは関東近辺において最近施工された場所打ちコンクリート杭（10例-1051本）についての管理の実態を調査した結果を示し、打設コンクリート強度と孔底スライム量および根切り終了時に確認された鉄筋かごの建込み精度を中心に述べる。

表-3 調査対象

地点	地 盤		杭				
	杭 周	杭 先 端	工 法	杭 径	本数	削孔長	実 長
M	洪 積 砂 質 土	$N \geq 50$ 砂	RCD	$\phi 2.8$	4	48.58m	37.77m
				$\phi 3.0$	6	48.58m	35.00m
				$\phi 1.5 \sim 1.9$	11	32.00m	21.19m
				$\phi 2.0 \sim 2.9$	12	32.00m	21.19m
F	洪 積 砂 質 土	$N \geq 50$ 砂	ED	$\phi 1.2$	62	32.00m	21.19m
				$\phi 1.5$	45	32.00m	21.19m
				$\phi 1.6$	68	34.00m	21.25m
				$\phi 2.4 \sim 3.1$	44	34.50m	21.75m
A	洪 積 砂 質 土	$N \geq 50$ 砂	ED	$\phi 2.0 \sim 2.8$	16	43.38m	28.03m
				その他	23		
	沖 積 粘 性 土	$N \geq 50$ 砂礫	AC	$\phi 1.5$	19	34.00m	27.50m
				その他	31		
T	洪 積 砂 質 土	$N \geq 50$ 砂	AC+ED	$\phi 2.1$	13	25.90m	13.30m
				その他	43		
K	洪 積 砂 質 土	$N \geq 50$ 砂	RCD	$\phi 2.2$	53	40.00m	15.60m
				$\phi 2.4 \sim 4.0$	46		
				$\phi 2.4 \sim 3.6$	38		
				その他	30		
Y	沖 積 粘 性 土	$N \geq 50$ 土丹	RCD	$\phi 2.5$	123	22~28m	22~28m
				$\phi 2.6$	204	16~29m	16~29m
				$\phi 2.8$	72	28.00m	28.00m
	沖 積 粘 性 土	$N \geq 50$ 土丹	RCD	$\phi 2.6$	88	21.4~	17.0~
				$\phi 2.5$	123	31.4m	27.0m
				$\phi 2.5$			

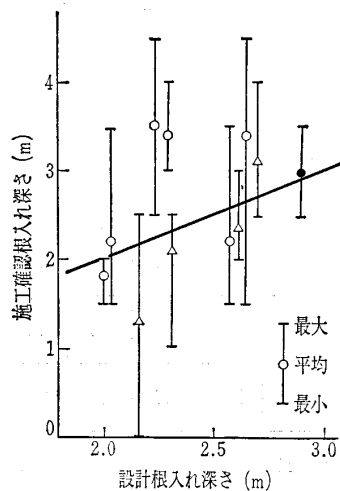


図-8 支持層への根入れ深さ

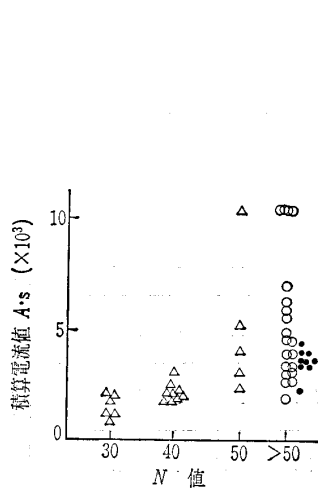


図-9 支持層の N 値と積算電流値

(1) 調査対象と管理項目

調査対象は表-3に示すとおり、リバース(RCD)工法、アースドリル(ED)工法およびオールケーシング(AC)工法である。先端掘底杭も多く採用されており、5~25m程度の空掘りを伴っている。各現場で行われている管理は、削孔精度(長さ、径、鉛直性等)、泥水の品質、コンクリート強度等で、その項目と管理値はほとんど共通している。

(2) 施工管理の実態

i) 施工一般 今回収集した現場記録の範囲からは総じて良い管理状態にある。杭の平面位置精度に影響するスタンドパイプの芯ずれは平均1.8cmであり、管理値を外れたデータは0.3%以下である。超音波計測は施工数の10%程度行われているが、目標削孔精度(鉛直性・径)は十分確保されている。泥水の品質も管理値の範囲にあるが、施工中の変化は記録されていない。コンクリートの打設時食込み率の平均値は4.7~9.6%と管理値を下回っているが、20%以上を示すものも認められる。掘削長はほぼ設計どおりであることから、食込み率は断面増に起因するものと考えられる。

ii) 打設コンクリート強度 コンクリートの品質は受入れ時検査として行われる標準養生供試体強度(28日材齢)によって管理されている。T地点の施工事例では、平均値は呼び強度の1.23倍、変動係数は7.03%であり、竹下ら⁹⁾に追加データを加えた鉄道構造物設計標準に関する委員会の報告(平均値は呼び強度の1.2~1.3倍、変動係数は6~8%)を補強する結果となっている。先に示した既製杭の製造管理の場合と大差ない結果である。一方同報告や谷口らの報告⁹⁾は、コアボーリングによる採取試料の圧縮強度について、その平均値が呼び強度の1.02~1.05倍、変動係数は15~20%程度、95%信頼値は呼び強度の0.73~0.77倍(設計基準強度の0.91

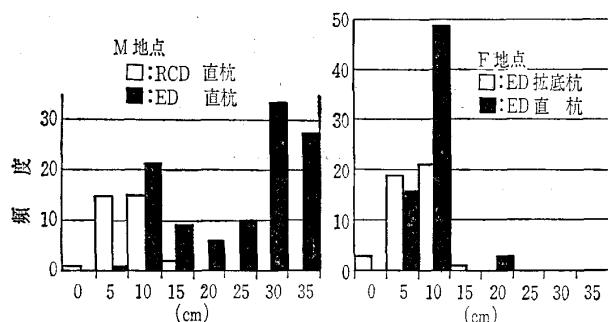


図-11 二次処理時に確認されたスライム量

倍)であることも示している。このことは、各種の団体において、水中で施工する場所打ち杭のコンクリートの設計基準強度が呼び強度を低減しているなどの対応の妥当性を示すと共に、設計基準強度を満足しきれない場合のデータがあることも示している。

iii) 孔底スライム量 ED工法の孔底スライム一次処理はバケットを用いて行われ、沈殿待ち時間は沈殿試験結果から決められている。図-11は、二次処理前のスライム量を示したものである。ED工法の沈積量は、M地点(砂質土)ではRCD工法に比べて多いが、F地点(粘性土)では、M地点ほど多くない。二次処理時の管理値は「スライム量=0」で、削孔終了時と同一またはより深いレベルの確認を意味する。これについて、関係協会より提供された掘底杭(EDおよびRCD工法)のデータをまとめたものが図-12である。管理値(「スライム量=0」)を満足する割合はRCD掘底杭の約9割に対し、ED掘底杭では約6割であった。

iv) 鉄筋かごの建込み精度 杭頭部における中心位置のずれは、鉄筋かごの中心位置のずれ(以下芯ずれ)を直交座標で管理することが多いので、実際の芯ずれとはその意味合いが異なる。今回収集し

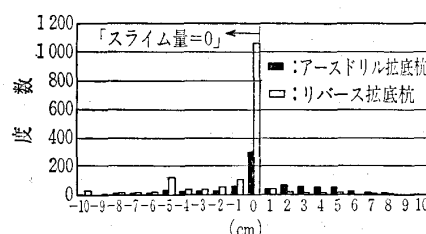


図-12 掘削完了時の深度とスライム処理後の深度の差

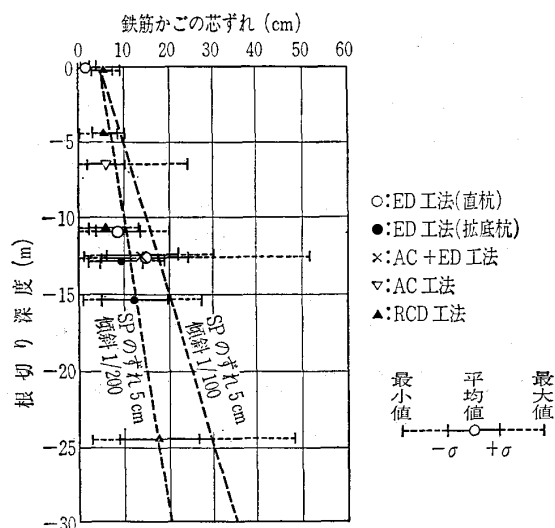


図-13 鉄筋かごの芯ずれと根切り深度との関係

たデータを極座標で整理すると、掘削時にはスタン
ドパイプの位置や削孔精度が十分確保されているに
もかわらず、管理値である 10 cm を大幅に越える
事例が多々見受けられた。今回新たな観点に立って
芯ずれと、根切り深度（杭掘削時の空掘り長）との
関係を整理したのが図-13である。図には、各深度
ごとに芯ずれの平均値、標準偏差 σ 、実測された最
大・最小値とともに、杭掘削時の管理値に従った直
線を示している。深度 12.5m 付近の礫層を対象とす
る事例等で芯ずれが大きくなる場合も見られるが、
総じて芯ずれの平均値とばらつきはともに、深度方
向に増加しているのが分かる。

4. ま と め

杭基礎の限界状態設計法の確立のために、強度の
変動係数が 40% 以上というばらつきの大きい地盤¹⁰⁾
での施工がどのようなになっているか、その実態に迫
るべくデータの収集に努めた。

その結果いくつかの知見が得られた。杭体の強度
については、鋼管杭、既製コンクリート杭の杭体強
度（各々で材料、曲げ強度の違いはあるが）の変動
係数は 6～8% 程度、また場所打ちコンクリート杭
の杭体強度の変動係数は、実際に施工された杭で 20
% 程度のばらつきであった。

埋込み杭の場合、杭先端根固め部の強度は、変動
係数で約 30% 程度となっていた。

今回の調査範囲における施工管理結果は、杭の施
工管理の全体を表現しているとは言えないが、その
一端を垣間見ることではできよう。

5. お わ り に

杭の施工実態を明らかにする目的でデータの収集
に取り組んでみたが、定量化されたものは少なく、
数字を使っただけの評価は難渋を極めたのが実際であ
った。どうしてこのような事態になるのだろうかと思
えるに、現在の施工管理はデータを定量的に取るこ
とのメリットが全くないことが最大の原因と考えら
れた。つまり良い施工であることをデータで示して
も、施工の大きなばらつきの中の 1 点でしかない。

つまり同じ母集団との認識になってしまう。これが
限界状態設計法の導入により、ある地盤条件下では、
施工管理次第で高い性能を保証できる杭が施工可能
となり、その結果が設計法に反映できれば、施工管
理に、より技術的な進歩と努力が払われ、ばらつき
の少ない杭が施工されることになるだろう。

貴重なデータを提供していただいた鋼管杭協会、
(株)日本基礎建設協会および(株)コンクリートパイル建
設技術協会に感謝申し上げる次第である。また本報
文は、基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員
会「施行・品質管理ワーキンググループ」（主査：
加倉井正昭、青木一二三・松本樹典・三反畑勇の各
幹事委員および小椋仁志・笹尾 光・平野孝行・藤
木広一・椿原康則・川端規之・鎌尾彰司の各委員）
の活動成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) Kusakabe, O., Kakurai, M. and Sandanbata, I.: Role of construction control in pile foundations in limit state design, Proc. Int. Symp. on Limit State Design in Geotech. Eng., Copenhagen, Vol. 2/3, pp. 513~522, 1993.
- 2) JIS A 5337: プレテンション方式遠心力高強度プレ
ストレストコンクリート杭, 1993.
- 3) 例えば、鋼管杭協会: 建築用鋼管杭施工指針・同解
説, pp. 66~67, 1986.
- 4) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説, pp. 864~
879, 1985.
- 5) 脇屋泰士・片山 猛・林 正宏・小林洋一: 動的載
荷試験法の支持力推定精度に関する検証実験一砂地
盤への適用性の確認一, 第29回土質工学研究発表会,
pp. 1431~1434, 1994.
- 6) Baker, R.M., Duncan, J.M., Rojiani, K.B., Ooi,
P.S.K., Tan, C.K. and Kim, S.G.: Manuals for
the design of bridge foundations, NCHRP, Re-
port, 343, 1991.
- 7) 加倉井正昭・山下 清: 杭の性能評価技術の最近の
動向, 建築技術, No. 526, pp. 91~97, 1994.
- 8) 竹下貞雄・梅原俊夫・奥村文直: 場所打ち杭の杭体
コンクリートの強度について, 基礎工, Vol. 13, No.
6, pp. 47~51, 1985.
- 9) 谷口善則・渡辺忠明・村田 修: 場所打ち杭コンク
リート強度の実態調査, コンクリート工学, Vol. 32,
No. 4, pp. 22~30, 1994.
- 10) 松井謙二: 地盤の不確定性を考慮した場所打ち摩擦
杭の支持力評価に関する研究, 九州大学学位論文,
1992.

(原稿受理 1994. 4. 21)