

既存場所打ちコンクリート杭の性能調査

渡邊 徹*¹・長尾 俊昌*¹・真島正人*¹・西尾 博人*²

Keywords : existing pile, bored pile, reuse, integrity test, durability test, rapid load test

既存杭, 場所打ち杭, 再利用, 健全性調査, 耐久性調査, 急速載荷試験

1. はじめに

杭支持された建物の建替えに際して、環境負荷低減やコスト・工期縮減の観点から、既存杭を解体することなく有効利用しようとする機運が高まっている^{1), 2)}。特に、杭径が大きく解体に要するエネルギーが莫大となる場所打ちコンクリート杭（以下、場所打ち杭）を中心に、今後、既存杭を積極的に利用する事例が増加すると考えられる。

既存杭の利用に当たっては、既存杭の状態を調査し、性能を評価した上で、最適な利用形態を選択することが重要である。本研究は、既存杭の利用時に必要となる調査技術や評価方法を検討することを目的として実施している。本論文は、築後約25年経過した既存場所打ち杭に対して、今後、適用性の高いと判断した方法による一連の調査を実施した内容について報告するものである。

2. 既存杭と地盤の概要

既存杭は、RC造4階建ての工場の基礎として使用されていた。上部建物解体時に、杭頭部は解体されたものの、杭の大部分は地中に残され地盤の余力として利用されている。写真-1に既存杭杭頭部の状況を、表-1に既存杭の概要を示す。杭種は場所打ち杭で、アースドリル工法により施工されており、試験時(2002～2003年)には、建物竣工後、約25年経過していた。

地盤調査位置を図-1に、調査結果の概要を図-2に示す。図-2中には、地盤調査位置近傍の杭断面を併記している。調査地の地盤は、地表面から段丘堆積物の粘性土と砂質土が互層状に堆積し、G.L. -10～-20m付近で砂礫層が出現する地層構成となっている。杭の先端支持層である砂礫層の出現深度は、敷地内で変化しており、これに伴って建物内の各杭長が異なっている。

表-1 既存杭の概要

Outline of existing pile	
杭種	場所打ち コンクリート杭 アースドリル工法
杭径(mm)	約700～1900
杭長(m)	約10～22
杭本数(本)	約180
竣工年	1978～1980

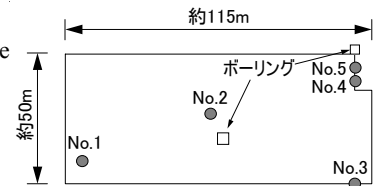


図-1 調査位置図

Location of investment



写真-1 既存杭の杭頭部の状況 (No. 5杭, 杭径: 約750mm)

Pile head of existing pile (Pile No.5, $\Phi \approx 750\text{mm}$)

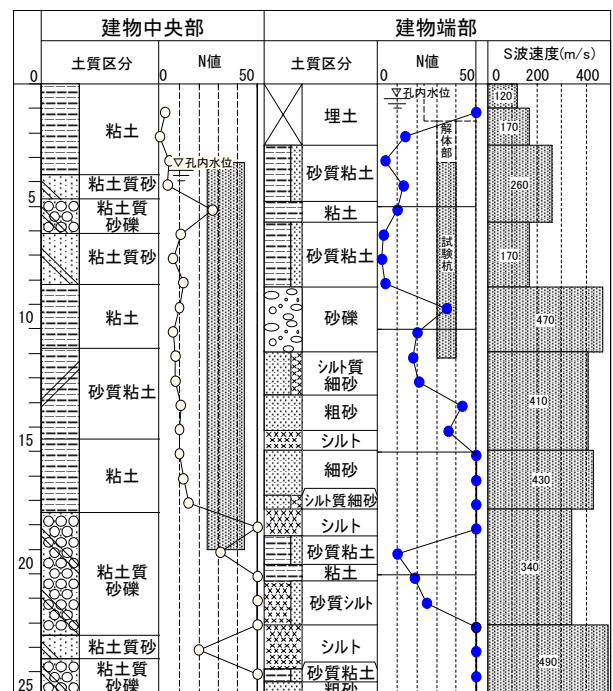


図-2 土質柱状図と杭断面

Profiles of soil condition and test piles

* 1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

* 2 設計本部構造グループ

既存場所打ちコンクリート杭の性能調査

表-2 調査概要

Outline of investment

調査分類	調査項目	調査方法	調査数量				
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
健全性	杭長・地中部 損傷状況	コアボーリング（杭先端地盤の土質も調査）	-	-	-	1	1
		インテグリティ試験（IT試験）	-	-	-	1	1
		地中部：ボアホールカメラによる確認	-	-	-	-	1
耐久性	コンクリート圧縮強度・ヤング率	コアサンプリングした試験体で圧縮試験・ヤング率測定（JIS A 1107-1998に準拠）	9	9	9	-	6
	中性化深度	水平コアによる試験体採取後、試験体を2分割し、破砕面でフェノールフタレイン法による試験	3	3	3	-	-
	鉄筋の引張り強度	中性化試験位置近傍で試験体を研り出し、切断採取後、引張り試験（JIS G 3112-1992に準拠）	3	3	3	-	-
	鉄筋の発錆状態	試験体採取直後に目視調査	3	3	3	-	-
支持性能	鉛直載荷試験	急速載荷試験（軟クッション重錘落下方式）（JGS1815-2002に準拠）	-	-	-	1	1
その他	振動・騒音測定	急速載荷試験時の騒音・振動計（地表面）	-	-	-	1	1
	地盤調査	ボーリング、PS検層、物理試験、強度試験（1軸、3軸）	-				



写真-2 コアボーリングによる杭長調査結果 (No. 5杭 杭長=8.09m)

Measurement result of pile length by core boring (Pile No.5 L=8.09m)

3. 調査概要

各種調査は、図-1中に示す5本の既存杭（No. 1～No. 5）を対象として、表-2に示す項目について行った。表では、調査項目を文献^{1)、2)}に従って分類している。ここに、健全性とは、杭が設計図書通りの形状（杭径・長さ）で施工されていることであり、耐久性とは、杭体が所定の性能（強度・品質）を維持していることを指すものとする。なお、調査方法には、既存杭の調査として、適用性の高いと判断した方法を主として採用している。



写真-3 IT試験の状況 (No. 5杭)

Measurement of pile length by IT System

4. 健全性調査

4.1 杭長調査

杭長調査は、コアボーリング及び弾性波を利用したインテグリティ試験（IT試験）により実施した。写真-2は、No. 5杭のコアボーリングにより採取したコンクリートコアである。コアの累積長さ及びボーリング孔長から求めたNo. 4杭及びNo. 5杭の杭頭切断部からの杭長は、それぞれ6.86mと8.09mであった。なお、コアボーリングに要した時間は約1.5日/本であった。

写真-3はIT試験の実施状況である。IT試験は、杭頭をハンマーで軽打し、打撃によって発生するパルスに対する杭の振動応答を測定して、杭長を推定する手法で、非破壊かつ数分で結果評価が出来ることが特徴である。図-3にNo. 5杭の測定波形の一例を示す。IT試験による推定杭長

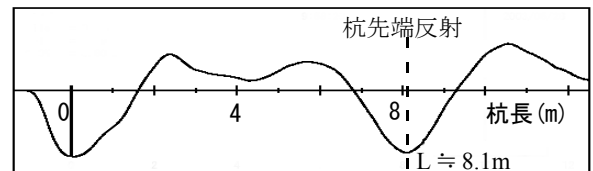


図-3 IT試験による波形 (No. 5杭)

Measurement result by IT System(Pile No.5)

は、いずれも、コアボーリングによる調査結果とほぼ一致した。

4.2 損傷調査

損傷調査は杭全長を対象として、(1)コアサンプリングしたコアの観察、(2)IT試験の波形分析、(3)ボアホールカメラにより実施した。

(3)の調査は、写真-4に示す小型カメラをボーリング孔

に挿入し、孔壁を撮影した映像を基に損傷の有無や程度を調査する方法である。写真-5は、No. 5杭の孔壁を撮影した映像を展開したものである。写真-6に加え前述のコアボーリング(写真-3)やIT試験(図-3)から、杭全長に渡って損傷が無く、健全であることが確認できる。

5. 耐久性調査

5.1 試験体の採取方法

No. 1～No. 3杭の試験体の採取位置を図-4に模式的に示す(No. 5杭は杭中心位置で、杭頭と杭先端から採取)。圧縮強度・ヤング係数測定用の試験体は、鉛直方向に、中性化試験は外周面から水平方向に、コアボーリングして採取した。鉄筋(SD30)は、水平コアを行った近傍から研り出し、切断採取した。

5.2 調査結果

表-3に調査結果の概要を示す。表中の数値は、調査結果の平均値であり、括弧内の値が計測値の範囲を示している。力学試験については、図-5～図-7に示すように度数分布で整理した。図中には、正規分布と仮定した場合の曲線と、データ数(N)、平均値($\bar{x}$)、標準偏差(s)、および変動係数(Cv)の各値も併記している。

図-5より、圧縮強度の値は、ややばらついているものの、いずれも施工時の設計基準強度(約21N/mm²)を上回っていることが確認できる。採取位置による強度については、中央と端部ではほぼ同等、杭先端部でやや大きい値を示した。ただし、サンプル数が十分ではなく、全体の傾向を得るには至っていない。

ヤング係数については、全体の平均測定値が 2.70×10^4 N/mm²であり、建築学会等で示されている強度から推定される値(約 2.75×10^4 N/mm²)とほぼ一致した。図-6に示すように、採取位置によらず、概ね一定の値を示していることが分かる。図-7に示す鉄筋の引張り降伏強度からは、鉄筋(SD30)いずれも製品の降伏強度(約300N/mm²)を上回っていることが確認できる。

中性化深度は、表-4に示す通り、最大値は1.2mmであった。既往の方法³⁾による推定値は、約18mm(W/C=60%、中性化比率=1と仮定)であり、測定結果は約1/15と小さいことが分かる。鉄筋の発錆調査では、いずれの杭とも錆は確認されず健全な状態であった。

耐久性調査より、杭材の劣化は確認されず、既存杭が施工時と同等の材料品質を維持していることが確認された。従来から指摘されているように、地中に設置されているという既存杭の養生条件が、杭材の品質を維持する上で有利に作用したと考えられる。



写真-4 ボアホールカメラによる調査

Borehole camera

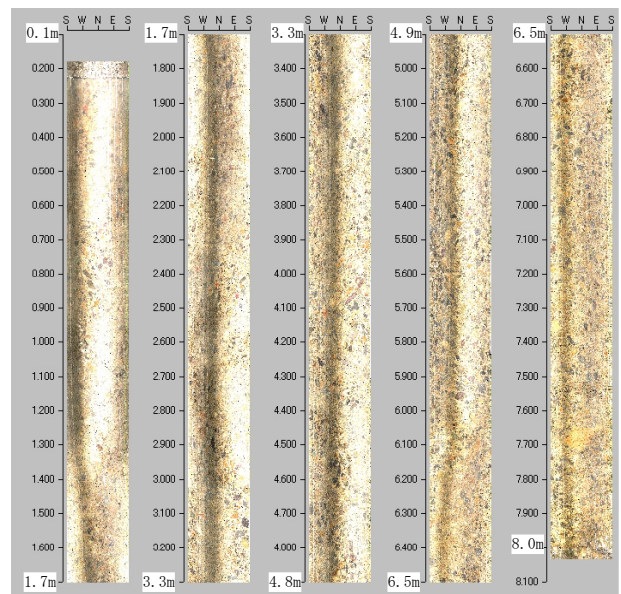


写真-5 コアボーリング孔壁展開映像(No. 5杭)

Image of borehole wall face

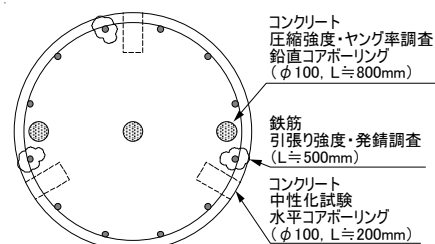


図-4 耐久性試験の試験体採取位置

Location of core sampling for durability tests

表-3 耐久性試験結果の概要

Results of durability tests

材料	調査項目	No.1	No.2	No.3	No.5
コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)	30.4 (26.7~34.4)	33.3 (28.5~41.4)	33.3 (25.6~38.5)	38.8 (35.5~42.1)
	ヤング率($\times 10^4$ N/mm ²)	2.83 (2.23~3.17)	2.72 (2.53~3.06)	2.67 (2.22~2.90)	2.31 (2.00~2.65)
	中性化深度(mm)	0 (0)	0.4 (0~0.7)	0.7 (0.4~1.2)	-
鉄筋	降伏強度(N/mm ²)	400 (399~401)	414 (398~426)	374 (369~375)	-
	発錆状態	錆無し	錆無し	錆無し	-

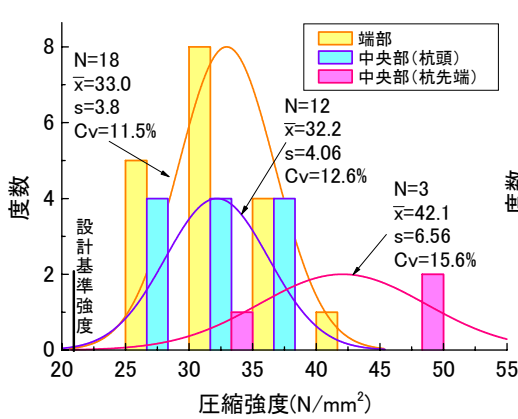


図-5 コンクリート圧縮強度
Histogram of compressive strength

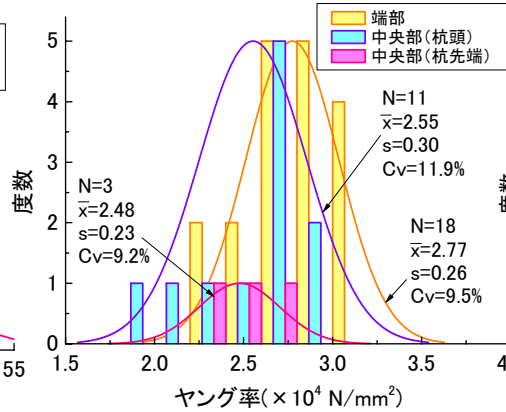


図-6 コンクリートヤング率
Histogram of Young's modulus

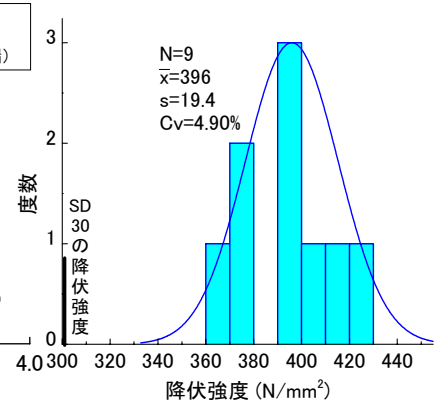


図-7 鉄筋の引張り降伏強度
Histogram of tension strength

6. 支持性能調査

6.1 支持性能調査概要

既存杭の支持性能を確認する方法として、敷地条件、試験期間、試験費用等から、反力杭を必要としない急速荷重試験(JGS1815-2002)が一つの有効な方法であるといわれている^{1)、2)、4)}。中でも、軟クッション重錘落下方式^{4)~7)}は、火薬を使用しないことや比較的低騒音であること等の特徴があり、市街地での使用に適している手法である。今回は、本方式による急速荷重試験を、No. 4及びNo. 5杭に対して実施した。

表-4、写真-6、及び図-8に荷重試験及び装置の概要を示す。試験杭への荷重は、重さ約39kNのモンケンをガイドを介して自由落下させることにより行った。杭頭部のクッション材には、既報^{6)、7)}の特性を有する発泡ウレタン材を用いている。杭頭が地中(約G.L. -3.0m)にあるた

め、杭頭部には長さ約3.5mの鋼製荷重治具を設置している。荷重は、落下高さhを段階的に変化させて、多サイクルに実施する加力する方式とした。

計測は杭頭の荷重と変位を、荷重治具に貼付したひずみゲージ、及び光学式変位計を用いて行った。光学式変位計は、試験杭から約15mの位置に設置した。

表-4 急速荷重試験の概要

Outline of rapid load test

杭名称	No.4杭	No.5杭
杭径	約700mm	約750mm
杭長	6.86m	8.09m
重錘	モンケン: 重量M=39.2kN (4.0tf)	
クッション材	発泡ウレタン 直径410mm, 厚みt=130mm	
荷重サイクル	8サイクル	9サイクル
落下高さh(m)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0
杭頭荷重	ひずみゲージによる測定	
杭頭変位	光学式変位計	



写真-6 急速荷重試験状況
Tset setup

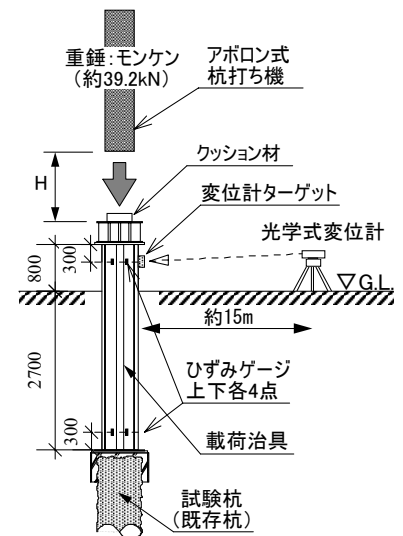


図-8 荷重装置の概要
Outline of loading system

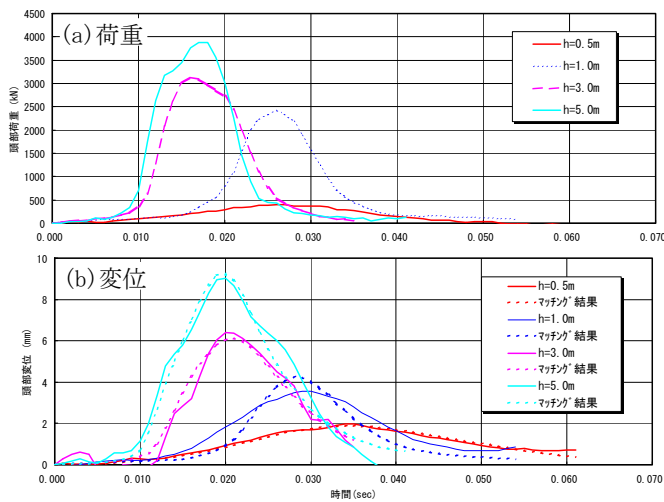


図-9 治具頭部の荷重・変位～経過時間関係
Time history of load and settlement

6.2 試験結果

図-9(a)にNo. 5杭の載荷治具の頭部（以下頭部）の荷重と経過時間の関係を示す（荷重は載荷治具のキャリブレーション試験結果を基に算定）。図には、 $h=0.5\text{m}$ 、 1.0m 、 3.0m 、 5.0m の結果を示している。図-9(b)には、頭部変位と経過時間の関係を示した。図には、動的な抵抗因子を取り除くために行った簡易マッチング法⁷⁾の結果も併記している。マッチング結果は、実測値と良い対応を示している。

図-10は、No. 5杭の各荷重段階における頭部の荷重と変位（残留変位を加算）の関係に、簡易マッチング法の結果をプロットしたものである。簡易マッチング法による結果は、実測変位が最大となる点に対応した値である。簡易マッチング法から求めた荷重と変位の関係は、滑らかな関係とはなっていない。これは、各荷重段階における荷重～変位曲線が必ずしも相似形とならないためと思われる。落下高さ $h=3.0\text{m}$ や 3.5m のように比較的矩形に近い形状では、実測最大荷重に近い荷重が得られるのに対して、 $h=1.0\text{m}$ や 2.5m のように荷重ピークが鋭い形状では、小さい荷重が算定される傾向にある。図には、簡易マッチング法の結果を双曲線により近似した曲線を示している。この曲線によれば、No. 5杭の推定極限支持力は約3600kNとなる（No. 4杭も約3600kNであった）。

図-11には試験時の振動・騒音の計測結果を示した。試験杭から10mならびに20m離れた地表面の計測値である。振動レベルは、落下高さに応じて増加する傾向があるが、いずれの計測値ともに振動に関する法律で規定される敷地境界での基準値(75dB)を下回った。騒音レベルについては、落下高さとの相関は不明瞭であった。騒音レベルの最大値は、反力体慣性力方式の計測値⁸⁾（10mで約100dB、載荷荷重：約2300kN）に比較して小さい値であった。

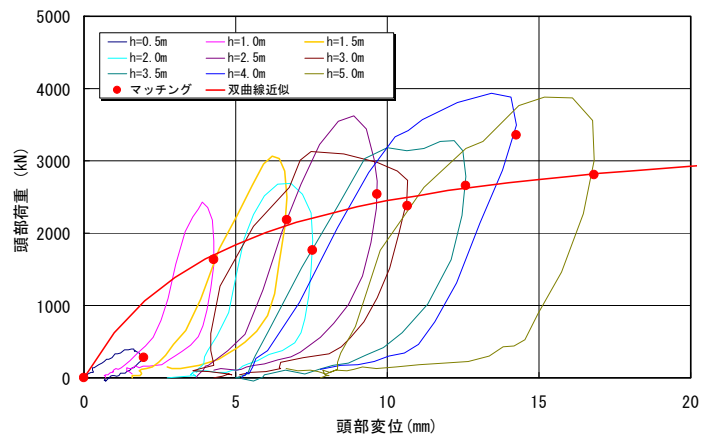


図-10 荷重～変位量関係

Load - settlement relationship

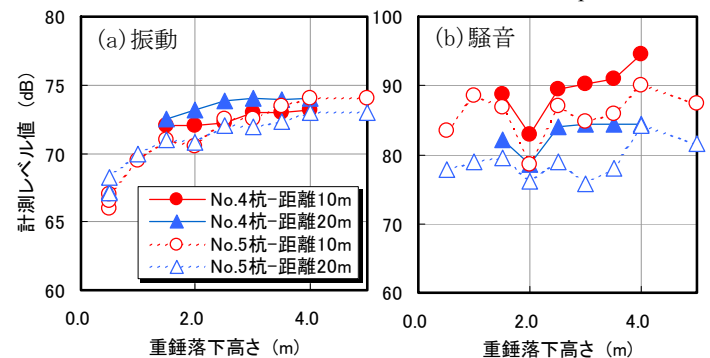


図-11 載荷試験時の振動・騒音測定結果

Vibration and noise level during rapid load test

6.3 載荷試験のシミュレーション

地盤調査結果を基に、試験杭の荷重～変位関係をハイブリッド法により解析した。図-12に土質柱状図と解析モデルの関係を示す。図では杭先端はシルト質細砂層となるが、杭先端地盤が砂礫であることを確認しているため、解析モデルでは杭先端1mが砂礫層に根入れされているものと仮定し、地盤を4層でモデル化した。杭は全長を8mとして16分割した（杭体は梁要素）。杭周面ならびに先端にはそれぞれの抵抗を模擬するバネを設け、杭の各節点間には、Mindlin解による相互作用を考慮している。両者のバネにはともに非線形性を考慮し、以下のようにして設定した。

摩擦バネ：摩擦～変位関係に双曲線を仮定した。摩擦力が杭円周に等分布に作用するものとして、Mindlinの解を用いて初期剛性を算定した（地盤の変形係数にはPS検層より得られた E_0 を使用）。最大摩擦力は地盤のせん断強度とした。

先端バネ：荷重度（ R_p ）－変位（ S_p ）関係を(1)式⁹⁾で仮定した。

$$(S_p / D) / 0.1 = 0.12(R_p / R_{pu}) + 0.88(R_p / R_{pu})^{3.31} \quad (1)$$

(1)式は先端載荷試験結果から提案された式であり、杭径

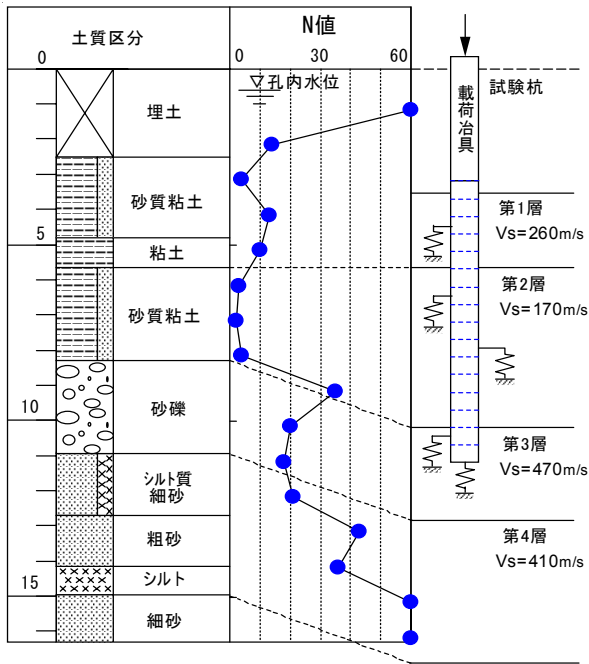


図-12 解析モデル
Numerical Model

(D_p) と極限荷重度 (R_{pu} : 杭径の10%の沈下時の値) から一義的に決定されるものである。

表-5に解析に使用した地盤定数を示す。地盤のせん断強度は、第2層では1軸圧縮強度 q_u の1/2を第3層ではN値が30であると仮定して、 $3.3N$ で求めた。第1層については、 V_s と q_u の関係式(10)を参考にして第1層の q_u を基に 100kN/m^2 と仮定した。

図-13にシミュレーション結果を実験結果(簡易マッチング結果)とともに示す。前述したように試験結果は滑らかな関係とはなっていないが、解析結果との対応は良いと判断できる。解析上の極限支持力(杭先端の沈下量が杭径の10%となる点)は 3900 kN であり、マッチング結果をもとに双曲線で推定した値と概ね整合している。

7. まとめ

築後約25年経過した既存場所打ちコンクリート杭に対して、健全性、耐久性、支持性能に関する調査を実施し、その有用性を検討した。

健全性試験では、IT試験より得られた杭長や損傷調査結果が、コアボーリングやボアホールカメラによる調査結果と対応しており、既存杭についても試験の適用性が高いことを確認した。耐久性試験からは、杭コンクリート・鉄筋に劣化は確認されず、既存杭が施工時と同等の材料品質を維持していることを確認した。

急速載荷試験では、載荷試験結果から簡易マッチング法

表-5 解析に用いた地盤定数

Soil properties used in analysis

層番号	E_0 (kN/m ²)	ν	$\tau_{\max}$ (kN/m ²)
1	$3.12\text{E}+05$	0.3	100
2	$1.38\text{E}+05$	0.3	37
3	$1.36\text{E}+06$	0.3	100
4	$9.38\text{E}+05$	0.3	—

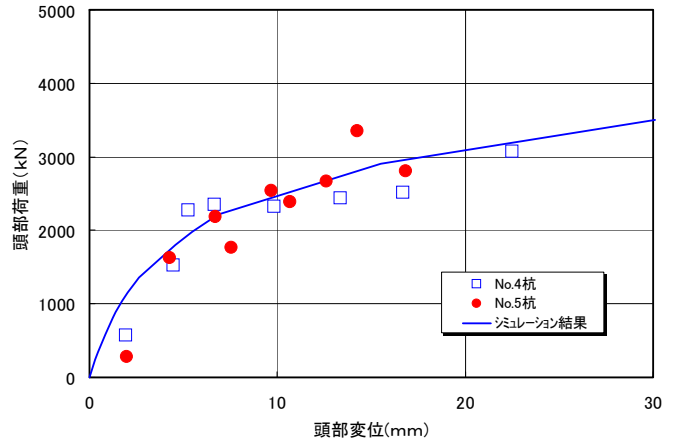


図-13 荷重～変位量関係の比較
Comparison of calculated and measured

により推定した荷重～変位関係と、試験位置の地盤調査結果に基づいたハイブリッド法によるシミュレーション解析の結果と整合する結果が得られた。また、試験時の騒音や振動についての測定も行い、載荷試験が市街地でも適用できることを検証した。これらの調査技術を活用し、既存場所打ち杭の再利用を積極的に推進したいと考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会構造委員会：基礎構造の環境への貢献，日本建築学会，2003.
- 2) 建築業協会：既存杭利用の手引き，2003.
- 3) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp. 163～164，1982.
- 4) 沼上清，矢島淳二，阪井由尚，三浦正悟：体育館増改築工事における既存PCパイルのリサイクル利用，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 553～558，2003.
- 5) 地盤工学会編：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- 6) 阿部秋男，久保豊，桑原文夫：重錘落下による急速載荷試験の実施例と解釈の方法，基礎工，pp. 64～68，2002.
- 7) 久保豊，妹尾博明，桑原文夫，小林淳，阿部秋男：重錘落下方式による杭の急速載荷試験の開発，日本建築学会技術報告集，第19号，pp. 105～108，2004.
- 8) P.Kitiyodom, T.Matsumoto and H.Matsui: STATNOMIC load testing on a bored pile for a bridge foundation and monitoring of load distribution of the piles during construction of the bridge, Int. Symposium on Field Measurement in GeoMechanics, 2003.
- 9) 持田悟，萩原庸嘉，森脇登美夫，長尾俊昌：場所打ちコンクリート杭の支持力性能（その1），日本建築学会大会学