

既存杭再利用における杭の性能評価

— 体育館増改築工事におけるPCパイルの再利用事例 —

沼上 清* 矢島 淳二*
三浦 正悟* 阪井 由尚**

要約： 建築物の建替え工事に際して、既存杭を再利用することが可能であれば、建設資材の有効利用や工期短縮という効果が期待できる。しかし、現状では、既存杭の品質確認方法や再利用設計の技術指針などが未整備であるため、実際の施工に至る事例はあまり多くない。

筆者らは、約 27 年前に竣工したRC造2階建ての体育館増改築工事において、既存のPCパイルを再利用した基礎の設計・施工を行う機会を得た。既存PCパイル施工時の杭打ち記録の分析結果をもとに、再利用における性能確認方針を設定し、既存PCパイルの鉛直載荷試験、水平載荷試験、健全性試験等の各種の試験を実施した。これら一連の試験の結果、既存PCパイルは鉛直支持力、水平抵抗力ともに十分期待することができ、耐久性、健全性においても問題のないことが明らかとなったことから、これらを再利用した杭基礎の設計・施工が可能となった。

キーワード： 増改築工事、PCパイル、再利用、鉛直支持力、水平抵抗

- 目次：**
1. はじめに
 2. 再利用計画の概要
 3. 杭打ち記録の分析
 4. 鉛直支持力の評価

5. 水平載荷試験による水平抵抗の評価
6. 杭体の健全性の評価
7. まとめ

1. はじめに

建築物の建替え工事に際して、既存杭を再利用することが可能であれば、建設資材の有効利用や工期短縮という効果が期待できる。しかし、現状では既存杭の品質確認方法や再利用設計の技術指針などが未整備であるため、実際の施工に至る事例はあまり多くない¹⁾。

今回、筆者らは、約 30 年前に竣工したRC造2階建ての体育館増改築工事において、既存のPCパイルを再利用した設計・施工を行う機会を得た。

本報では、既存PCパイルを再利用するための検討方針や、既存杭施工時の杭打ち記録に対する分析結果を示し、既存杭の鉛直支持力、水平抵抗、杭体の健全性等を確認する目的で実施した各種試験の概要とそれらの結果をまとめて報告する。

2. 再利用計画の概要

2.1 既存杭再利用の経緯

環境意識の向上を教育理念として掲げる学校法人より、体育館の増改築工事に際して、過去の建築に携わった先人の足跡を残し、同時に建設産業廃棄物の発生を抑制する施工技術についての検討依頼を受けた。そこで、既往の設計図書類および施工記録を調査した結果、油圧ハンマを用いた打込み工法で施工されたPCパイルの施工記録が保存されており、杭再利用の可能性が高いと判断された。

建築確認申請機関と数回にわたる事前相談を行い、既存杭の再利用に際しては、その耐久性、健全性、支持力特性を検証するための各種試験を行い、試験結果を基礎の実設計に反映することで、現行基準に則した設計が可能であることを確認した。

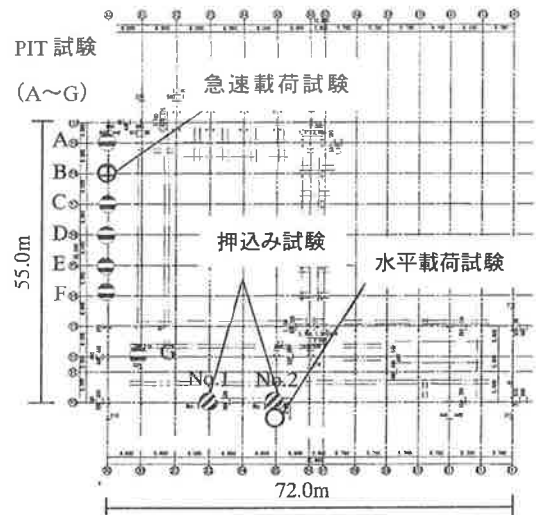


図1 既存杭配置図・試験位置

表1 試験項目と目的

試験の種類	目的	試験数
押込み試験	鉛直支持力の評価	2
急速載荷試験	同上	1
水平載荷試験	水平地盤反力係数の評価	1
杭体の圧縮試験	杭体強度・ヤング係数評価	1
PIT試験	杭体の健全性確認	9

図1には、既存PCパイルの配置図と各試験位置を示すとともに、表1には、建築確認申請機関と合意した品質確認試験の種類・目的・数量を示した。

2.2 杭と地盤の概要

図2には、当該地盤と既存杭の概要を示す。当該地は多摩川の沖積低地に位置し、地表より軟弱な粘土層が約11mの層厚で堆積し、その下部に河床堆積の砂礫層と土丹層（上総層群）が堆積する地層構成である。

竣工図書によれば、186本のPCパイル（φ350mm，L=14~15m）が1柱1~4本で配置され、1本あたりの長期許容支持力は、当時の行政支持力である60tf（588kN）が採用されていた。また、工事報告書によれば、杭工事（1974年8月）は、油圧ハンマ（24.5kN，落下高1.8~2.2m）による打込み工法で、全杭について打止め管理を目的とした最終打撃時の貫入量・リバウンド量が記録されていた。

2.3 増改築計画と既存杭の再利用計画

建物の増改築計画は、既存建物のキープランをできるだけ尊重し、建物の階数を部分的に増やす計画とした。なお、設計荷重増の基礎については、新設杭による増杭を行うとともに、表1に示した品質確認試験によって既存杭の鉛直支持力や水平抵抗力を再評価し、新設杭との荷重分担を考慮した設計とした。なお、打止め管理における5S式の算定支持力が700kNを下回る杭については、増杭にて対応する設計とした。

3. 杭打ち記録の分析

既存PCパイル全186本の杭打ち記録の分析結果を図3に示す。

(a)には、打止め管理の結果、最終的に根入れされた杭先端深度の頻度分布を示した。杭の打止め先端深度は、GL-11.3~15.0mの範囲にばらついているが、GL-14.0mより浅く打止められた杭の割合が全体の88%を占めている。これは、GL-11m以深の砂礫層がかなり締まっていたため、当初設計で想定した土丹層まで先端が到達していない杭が多いことを示している。

(b)には、打止め管理で採用された最終打撃時の杭貫入量の頻度分布を示した。杭の打止め時貫入量は、1.0~7.7mmの範囲で管理されているが、4.0mm未満で管理された杭が全体の84%を占め、比較的ばらつきは少ないと言える。なお、油圧ハンマの落下高さは、1.8m，2.0m，2.2mの3種類が選定されているが、ほとんどの施工は、2.0mの落下高となっている。

(c)には、5S式による算定支持力の頻度分布を示した。油圧ハンマの落下高がほぼ一定で、打止め時の貫入量にばらつきが少ないため、同支持力公式で算定される値も比較的まとまった結果となっている。施工時管理では、5S式による算定支持力が設計支持力の588kN(60tf)を上廻る条件にて施工管理がなされていたが、実際の算定支持力は800kN/本以上の杭が全体の93%を占め、長期許容支持力の1.4倍程度以上で施工管理されていることが確認できた。

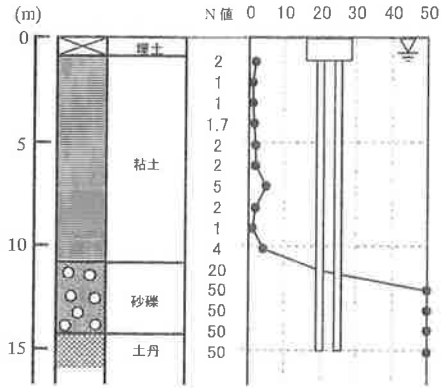
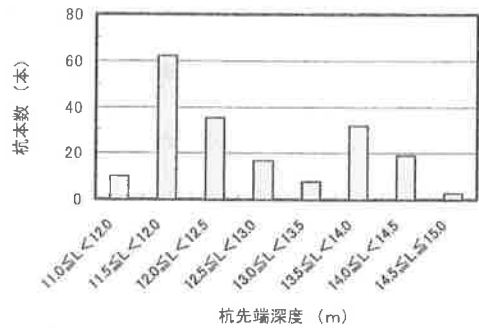
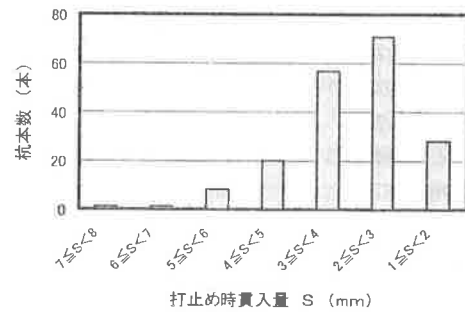


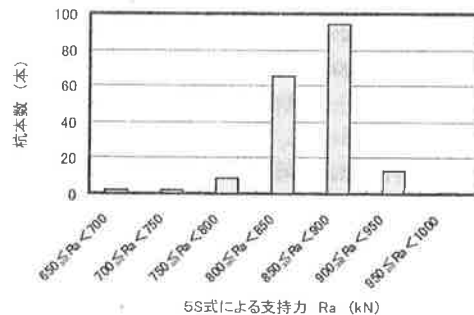
図2 地盤と既存杭の概要



(a) 杭先端深度分布



(b) 打止め時貫入量分布



(c) 5S式による支持力分布

図3 杭打ち記録の分析

4. 鉛直支持力の評価

4.1 押込み試験による鉛直支持力の評価

4.1.1 試験概要

押込み試験は、今回の増改築計画で、再利用されない杭を用いて2ヶ所で行うこととした。試験は地盤工学会基準²⁾に準じて行った。押込み試験の概要を表2に、試験位置を図1に示す。試験は、既存体育館の玄関部においてフーチング下の地盤を掘り込んで行う計画とした。上部躯体の自重や梁柱の断面剛性を考慮したフレーム解析により必要な補強を施し、上部躯体を試験の反力として利用した。また、試験杭頭部をパイロカッターにて切り取り、切断した上下端をモルタルでキャッピングした後、載荷用の油圧ジャッキを挿入した。載荷装置の概観を写真1に示す。

4.1.2 試験結果

図4に荷重-変位量関係を、図5に $\log P - \log S$ 関係を示す。試験杭 No.1 では、荷重の増加とともに変位量も増加し、変位量 11.2mm で最大荷重 (Pmax) 2363kN に至った。また、 $\log P - \log S$ 関係では、1450kN (変位量: 4.0mm) 付近に折点が認められた。従って、第1限界抵抗力を 1450kN、第2限界抵抗力を 2363kN と判断した。

また、試験杭 No.2 では、 $\log P - \log S$ 関係において 1500kN (変位量: 4.3mm) 付近に折点が認められ、変位量 8.2mm で最大荷重 (Pmax) 2330kN に至った。従って、第1限界抵抗力を 1500kN、第2限界抵抗力を 2330kN と判断した。両者は、1500kN 程度以下の荷重では良い一致を示している。

押込み試験から得られる杭の長期許容支持力 (Ra) を降伏荷重 (第1限界抵抗力) の 1/2 かつ最大荷重 (第2限界抵抗力) の 1/3 とすると、押込み試験から決まる Ra は以下の通りとなる。

試験杭 No.1 Ra=725kN

試験杭 No.2 Ra=750kN

増改築工事の設計に用いるPCパイルの長期許容支持力 (Ra) としては、施工当時の杭材設計強度 (JIS A5335-1968 : 500kgf/cm²) を考慮して Ra=667kN(68tf)/本とした。

4.2 急速載荷試験による鉛直支持力の評価

4.2.1 試験概要

急速載荷試験は、押込み試験に比べて比較的容易に実施できるため、既存杭の支持力確認における一つの有効な方法とされている³⁾。今回は、押込み試験とあわせて実施し、両者の結果を比較することとした。

試験は地盤工学会基準²⁾に準じて行った。今回実施した急速載荷試験の載荷装置図を図6に、試験位置を図1に示す。試験は、クッション材を置いた杭頭部に杭打ち用のモンケン (19.6 kN) を落下させ、荷重計と光学レベルによって荷重と沈下量の関係を測定する方法で行った。モンケンの落下高さ (H) を 1.5m~3.0m まで4段階に変化させることによって、杭頭に加わる荷重を変える多サイクル載荷方式とし、急速載荷試験による荷重-変位量関係の評価を試みた。

表2 押込み試験の概要

試験杭 (2ヶ所)	PCパイル φ:350mm 杭先端深度: 12.0m(No.1), 11.3m(No.2)
計画最大荷重	2363kN
荷重段階数	9段階
サイクル数	4サイクル

杭先端深度は杭打ち記録による。

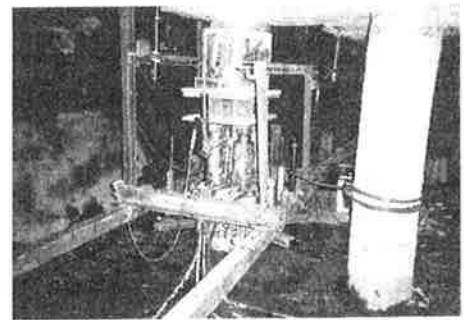


写真1 載荷装置 (押込み試験)

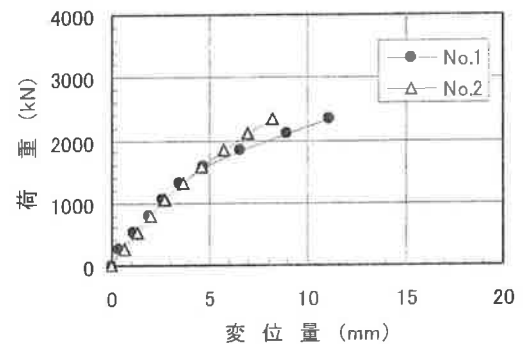


図4 荷重-変位量関係

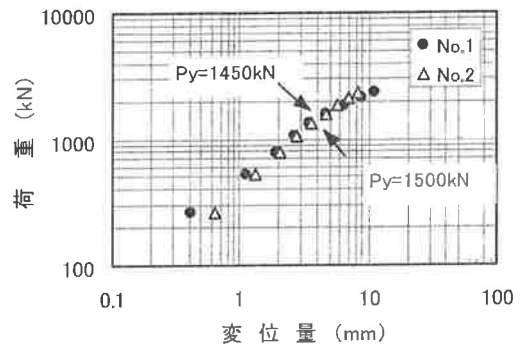


図5 $\log P - \log S$ 関係

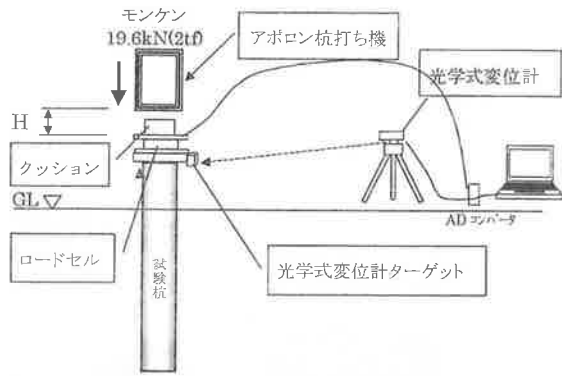


図6 載荷装置図(急速載荷試験)

4.2.2 試験結果

図7に荷重-時間曲線を、図8に変位量-時間曲線を示す。落下高さが高くなるほど各落下高さにおける荷重および変位量の最大値は大きくなり、H=3.0mでは荷重の最大値は1578kNに、変位量の最大値は6.4mmに達している。

図9に荷重-変位量関係を示す。急速載荷試験の計測値には、静的抵抗成分の他に杭体の慣性力や地盤との粘性抵抗等による動的抵抗成分が含まれている。急速載荷試験の結果を押込み試験結果と比較するためには、静的抵抗成分を抽出することが必要である。本報では、履歴減衰の抵抗因子を考慮した簡易マッチング法³⁾と除荷点法によって静的抵抗成分の荷重-変位量関係を評価した。図中には押込み試験の結果も合わせて示した。今回の急速載荷試験では、押込み試験と比較して杭頭に加えられた最大荷重は小さいが、押込み試験の第1限界抵抗力である1500kN程度以下では、押込み試験と同様にほぼ直線状の関係が得られている。ただし、急速載荷試験の方が同一荷重時に変位量がやや大きくなる傾向を示した。

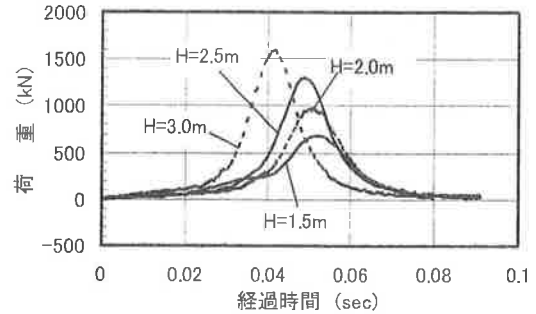


図7 荷重-時間曲線

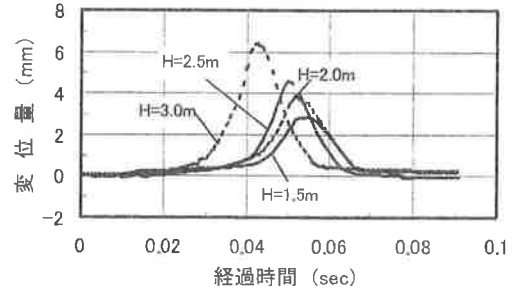


図8 変位量-時間曲線

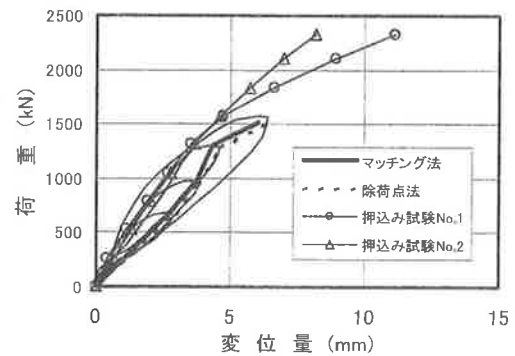


図9 荷重-変位量関係

5. 水平載荷試験による水平抵抗の評価

5.1 試験概要

水平載荷試験は、押込み試験と同様に、今回の増改築工事上、再利用されない杭を用いて行うこととした。試験は地盤工学会基準⁴⁾に準じて行った。水平載荷試験の概要を表3に、試験位置を図1に示す。試験は、写真2に示すようにフーチング下の既存杭を反力として、試験杭の杭頭部を水平方向に油圧ジャッキで加力した。加力点高さは試験GL+100mmである。

5.2 試験結果

図10に荷重と加力点における水平変位量の関係を示す。荷重の増加に伴って水平変位量も増加しているが、45kN以下では水平変位量の増加は僅かであり、弾性的な挙動を示している。45kNを超えると水平変位量は大きくなり、60kNで26.1mm、75kNで70.0mmに達した。杭体のひび割れモーメントは35.3kN・mであり、今回の載荷試験では53kN程度でひび割れモーメントに達したものと考えられる。従って、45kN以上では、表

表3 水平載荷試験の概要

試験杭	PCパイプ φ:350mm 杭先端深度:12.5m
計画最大荷重	75kN
荷重段階数	10段階
サイクル数	5サイクル

杭先端深度は杭打ち記録による。

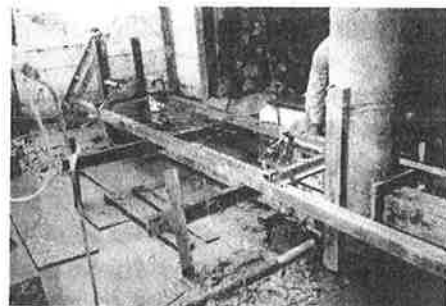


写真2 載荷装置(水平載荷試験)

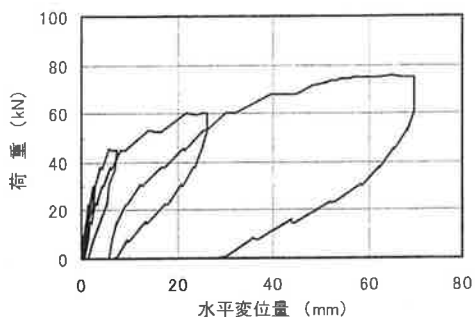


図 10 荷重－水平変位量関係

層部の地盤反力が塑性状態に達して杭体にもひび割れが生じ、水平変位が増大したものと推察される。

図 11 には水平変位量の増加に伴う水平地盤反力係数の推移を示す。水平地盤反力係数は載荷試験結果より、Chang 式を逆算して算出した。図中には、水平変位量 10mm における水平地盤反力係数を基準水平地盤反力係数 (kh_0) とし、変位量の平方根に反比例するとして近似曲線も併記した。 kh_0 より逆算される地盤の変形係数は 2500kN/m^2 となり、N 値 1 程度の沖積粘性土としては比較的大きな値であることが確認された。

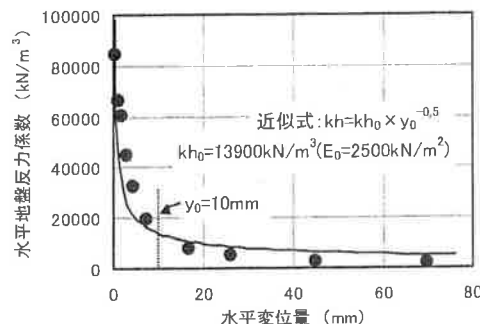


図 11 水平地盤反力係数の推移

表 4 圧縮試験結果一覧

項目	結果
圧縮強度	80.62 N/mm ²
ヤング係数	5.078×10^4 N/mm ²

6. 杭体の健全性の評価

6.1 杭体の圧縮強度およびヤング係数の評価

6.1.1 試験概要

押込み試験 No.1 の杭頭より切り出した杭体片を用いて圧縮試験を行い、杭体の圧縮強度とヤング係数を評価した。試験体は高さ 450mm に整形し、10,000kN アムスラー圧縮試験機を用いて圧縮試験を行った。加力試験に先立ち、試験体にはあらかじめ 4ヶ所にひずみゲージを貼り付けておいた。

6.1.2 試験結果

表 4 に圧縮試験結果一覧を、図 12 に応力度－ひずみ関係を示す。杭施工当時の杭材設計強度は $F_c 500\text{kg/cm}^2$ (49kN/mm^2) であることを考慮すると、今回の圧縮強度は F_c の 1.65 倍となる。また、ヤング係数も比較的大きな値が得られたことから、杭体強度の経年劣化は生じていないものと判断された。

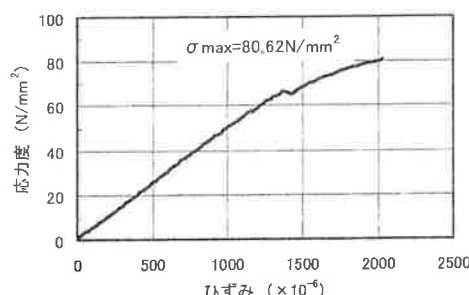


図 12 応力度－ひずみ関係

6.2 非破壊試験による杭体の健全性の評価

6.2.1 試験概要

載荷試験杭 3 本と再利用対象の本杭 6 本（試験位置：図 1 参照）に対して、弾性波による非破壊試験（PIT 試験）を実施した。杭頭を一部切り取った載荷試験杭に対する試験状況を写真 3 に示す。本杭に対しては、フーチングを研り、杭頭を露出させた状態で試験を行った。

6.2.2 試験結果

図 13 には、A 杭の弾性波試験の波形を示す。杭長 12.5m の深度において明確な反射波が認められ、それ以浅には有意な反射波が認められないことから、杭体は健全であるものと判断された。他の試験杭 8 本についても同様な波形が得られ、再利用する既存 PC パイルは、総じて健全であることが確認できた。



写真 3 杭の非破壊試験

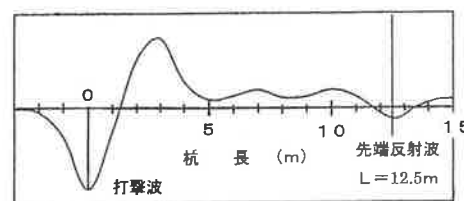


図 13 非破壊試験波形（A 杭）

表5には、これらの非破壊試験によって推定された杭長と杭打ち記録による杭長を比較して示した。両者は比較的良い対応と言えるが、弾性波試験による推定杭長の方が若干長く評価された結果もあった。

7. まとめ

約 27 年前に竣工した RC 造 2 階建ての体育館増改築工事において、既存 PC パイルを再利用した設計・施工を行う機会を得た。PC パイル再利用に際して実施した各種試験や検討の結果を以下に示す。

- (1) 既存 PC パイル施工時の杭打ち記録を分析した結果、打止め管理時の最終貫入量のばらつきは比較的小さく、5 S 式による算定支持力もばらつきは小さいことが確認できた。
- (2) 既存 PC パイル 2 本に対して実施した押込み試験の結果を用いて、再利用における杭の設計支持力を決定した。また、急速載荷試験によっても、第 1 限界抵抗力以下では押込み試験と同様の結果となることを確認した。
- (3) 既存 PC パイルの水平載荷試験から地盤の水平地盤反力係数を評価し、今回設計する基礎杭の水平耐力を確認した。
- (4) 杭体の圧縮試験により杭体のコンクリート強度とヤング係数を確認し、非破壊試験により再利用する PC パイルの

参考文献

- 1) 建築業協会編：既存杭利用の手引き，2003 年 2 月
- 2) 地盤工学会編：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，第 2 編 杭の押込み試験，第 6 編 杭の急速載荷試験，2002 年 5 月
- 3) 久保 豊・桑原文夫他 7 名：急速載荷試験に簡易なマッチング法を用いた静的支持力算定への適用，第 38 回地盤工学研究発表会，2003 年 7 月
- 4) 地盤工学会編：杭の水平載荷試験方法・同解説，1983 年 10 月

表 5 推定杭長一覧

杭 No.	推定杭長 ① (m)	杭打ち記録 ② (m)	比率 ①/②	備考
	12.0	11.0	1.09	押込み試験No.1
	12.0	10.3	1.17	押込み試験No.2
	12.0	11.0	1.09	水平載荷試験
A	12.5	12.6	0.99	本杭
B	12.5	12.0	1.04	本杭
C	12.5	12.7	0.98	本杭
D	12.5	11.5	1.09	本杭
E	13.0	12.9	1.01	本杭
F	12.0	10.8	1.11	本杭

推定杭長は弾性波速度を4200m/secとして算定

健全性を確認した。

以上の検討結果をもとに、既存 PC パイルを再利用した杭基礎を設計・施工した。既存杭の再利用は、今後、社会的な需要が増加すると予想されている。今後は、本事例のような実績を蓄積し、事前調査から品質確認試験，実施設計，施工に至る一連の評価技術の確立が必要である。

PERFORMANCE OF THE PILE ON REUSE OF THE EXISTING PILE

A CASE OF REUSE OF THE EXISTING PRECAST CONCRETE PILES ON THE EXTENSION CONSTRUCTION OF A GYMNASIUM

N.Numakami, J.Yajima
S.Miura, and Y.Sakai

Reuse of the existing pile is effective for decrease of the building materials and shortage of the building process, when the building is reconstructed. However, few cases of reuse of the existing piles are adopted because of lack of a series of guidelines for confirmation of performance and design of the existing piles.

Authors have designed and constructed the extension construction of a gymnasium on which the existing concrete precast piles are reused. Guidelines for confirmation of performance of the existing piles have been determined according to analysis of the report of the pile driving tests. A series of tests, including vertical loading tests, a lateral loading test and integrity tests of the existing piles, have been performed according to the guidelines. This paper shows the results of these pile tests.