

既存杭活用のための杭性能評価技術の開発

勝 二 理 智 藤 森 健 史

Development of Evaluation Methods on Soundness and Lateral Resistance of Existing Piles

Michito Shoji Takeshi Fujimori

Abstract

Existing piles can be used when a building is being rebuilt as these piles can reduce construction costs and wastes. We develop new methods for evaluating soundness and lateral resistance of the piles: 1) prior to the reuse of existing piles, the appropriateness of the piles is empirically inspected for reuse using the pile integrity test. Therefore, an objective method for evaluating the pile soundness is developed with the proposed crack factors. 2) reusing damaged piles as well as fine piles can be useful. Hence, a method for evaluating the lateral resistance is developed so as to consider the decrease in the elastic modulus and the hinge action of the flexural yielding part of the pile.

概 要

都心では建物新築時の建替えが多く、既存杭を活用できれば、環境負荷低減や工期短縮等の利点を期待できる。一方で、既存杭の健全性評価法や性能による制約等に関する課題があるため、次の技術を開発した。

(1) 既存杭の健全性評価法 健全性を確認する弾性波探査試験は、経験に基づく高度な判断が必要で、定量的な評価は困難であった。そこで、数多くの実測データより考案した独自の損傷係数と評価マップを用いて、健全性を定量的に評価できる方法を開発した。

(2) 損傷した既存杭の水平抵抗評価法 杭が損傷していても残存性能を活用できるよう、定量評価した杭の健全性に対応させて断面性能を評価し、さらに杭の水平抵抗力も評価できる技術を開発した。

1. 開発の背景

近年、都心部では、新築建物における建替えの割合が非常に大きくなっている。森ビル(株)の調査レポート「2015年度 東京23区の大規模オフィスビル市場動向調査¹⁾」より引用した、今後5年間の建替え計画の割合をFig. 1に示す。都心3区(千代田区、中央区、港区)の建替え割合は72%であり、今後もこの傾向は続くと考えられる。このような背景から、2003年に(社団法人)建築業協会より「既存杭利用の手引き²⁾」が発刊されたことを皮切りに、国交省³⁾や東京都⁴⁾、(一般社団法人)日本建築構造技術者協会⁵⁾からも設計マニュアルが発刊されており、官民双方から既存杭活用に向けた機運が高まりつつある。

既存杭を活用して新たな杭基礎建物を建築することは、解体作業や残材搬出量の縮減に伴う、環境負荷低減、工期短縮、ローコスト化等の利点を期待できる。また、新たな杭を製造するエネルギーや、施工に伴うエネルギーを節約できることから、CO2排出量の削減に繋がる。地盤工学の観点からは、杭の引抜きによる地盤の緩みや、鉄道函体等の地下構造物への影響を回避することができ、有益である。なお、ここで対象とする既存杭の杭種は、都市部で多く採用されている場所打ち杭と既製杭とした。また、本論文で紹介する「既存杭の健全性評価法」(2.1節, 3章)は、杭の健全性評価技術としては国内で初めて、(一般財団法人)日本建築センターの一般評定を取得した技術である(BCJ評定-FD0445-01)。

2. 既存杭活用の課題と開発した対応技術

2.1 既存杭の健全性評価法

既存杭の活用にあたっては、既存杭の健全性や耐久性等を確認することが不可欠となる。実施する調査の一覧をTable 1に示す。調査は、杭のひび割れの有無・大きさ・位置を確認する健全性調査、杭の劣化状況を確認する耐久性調査、杭の支持力を直接確認する支持力調査の3つに大別される。各調査は、設計から解体、新築に至る工程の中で適宜実施される。耐久性調査と支持力調査は手間やコストがかかるため、抜き取り調査になる場合が多い。一方で、杭の健全性を調べる弾性波探査試験(Fig. 2)は、ポータブルな計測器とハンドハンマーのみを用いて簡便に実施できるため、既存杭全数に対して実施されることが多く、既存杭を活用する上で重要な試験となっている。

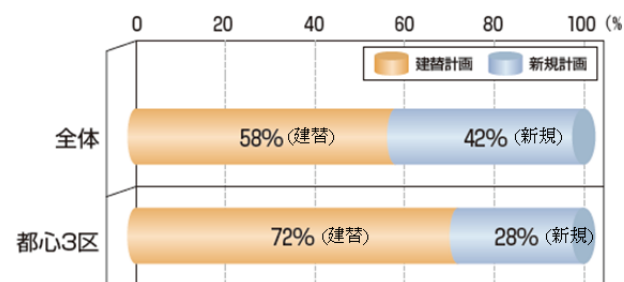


Fig. 1 オフィスビル供給量のうち建替え計画の割合¹⁾

Rate of Rebuild

場所打ち杭での試験により得られた実測波形をFig. 3に示す。図の横軸は杭頭からの深さ、縦軸は杭頭打撃の最大振幅で正規化した振幅である。Fig. 3cは施工中に被災した杭での試験波形であり、ボアホールカメラによりひび割れ観察が行われ、ひび割れの位置(杭頭からの深さ)とその幅が明らかになっている^{6), 7)}。新設杭の波形Fig. 3aでは、杭頭打撃と杭先端反射の振幅のみが生じ、その間に負側に振幅が生じていないことから、健全な杭と判断できる。Fig. 3bも新設杭の波形であるが、Fig. 3aと異なり、杭頭打撃と杭先端反射の間にわずかではあるが0軸を負側に超えた振幅をいくつか確認できる。これらは、ひび割れを示すものではなく、試験上のノイズと解釈されるが、技術者が経験に基づき定性的に判断しており、その判断にはばらつきが避けられない。続いて、損傷杭の波形Fig. 3cでは、ひび割れ反射の深さは、観察されたひび割れ位置と整合しており、試験によりひび割れ位置の推定が可能であることを確認できる。

以上、この試験の課題として、ひび割れの有無や位置を概ね推定可能ではあるが、経験に基づく高度な判断が必要であり、評価結果が個人の技量に左右され、健全性の定量的な判断が困難であることが挙げられる。本技術開発では、一連の開発技術のひとつとして、この杭の弾性波探査試験の有用性を高めるため、試験結果を合理的に判断し、健全性を定量的に評価できる手法を新たに開発した(3章)。この手法は、簡易性も高く、既存杭活用をスムーズに進めることができるというメリットがある。

2.2 損傷した既存杭の水平抵抗評価法

Table 1に挙げた調査によって、杭は健全である、または損傷していると判断され、一般的には、健全な場合のみ再利用される。ここで、杭が損傷している場合でも、その残存性能を生かして、あるいは適切な補強を施して活用できれば、設計の自由度が高まる上、経済的で合理的な設計となり得る。しかし、これまで、損傷杭の水平傷杭の活用は困難であった。本技術開発では、実大規模の損傷杭の載荷実験を行うことにより、損傷杭の水平抵抗力を、その損傷状況に対応させて定量的に評価できる手法を新たに開発した(4章)。

Table 1 既存杭活用のための調査一覧
Survey for Reusing Existing Piles

分類	No	調査項目	調査方法
健全性調査	1	杭健全性(ひび割れ有無)	弾性波探査試験
	2	杭の直接観察	杭頭目視 ボアホールカメラ
耐久性調査	1	コンクリート強度	圧縮強度試験
	2	コンクリート中性化	中性化試験
	3	鉄筋の強度	鉄筋引張試験
支持力調査	1	鉛直支持力	押し込み試験 急速載荷試験
	2	水平抵抗力	水平載荷試験

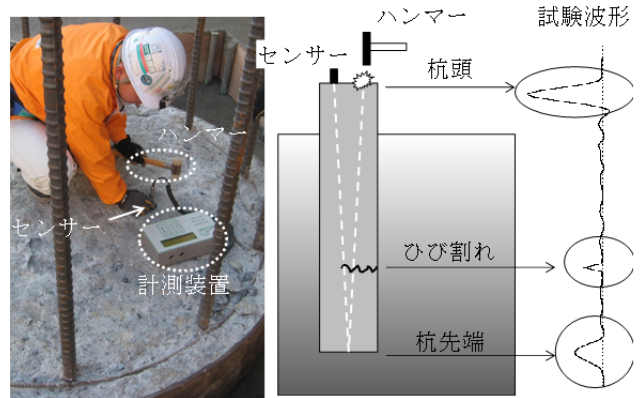
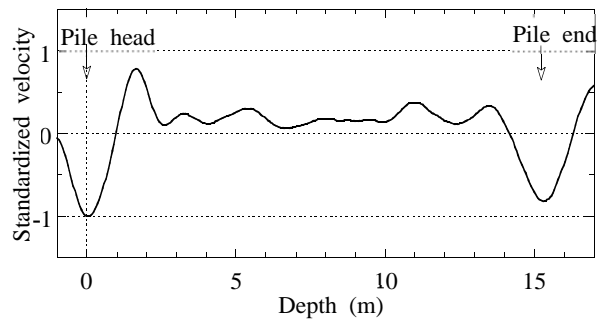
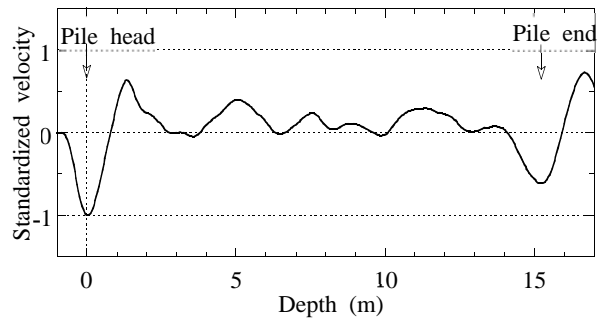


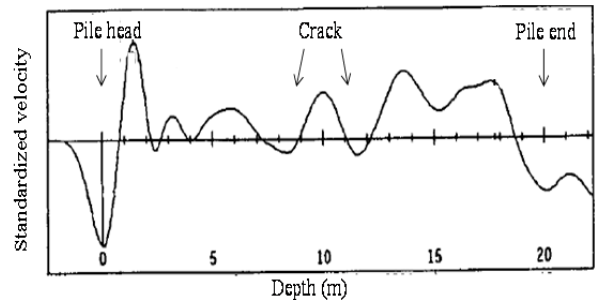
Fig. 2 杭の弾性波探査試験の概要
Outline of Pile Integrity Test (PIT)



(a) 健全杭 (杭径2000mm, 杭長15.30m)



(b) 健全杭 (杭径2000mm, 杭長15.34m)



(c) 損傷杭 (杭径1700mm, 杭長17.60m)⁷⁾

Fig. 3 弾性波探査試験による実測波形
Test Waves of Cast-in-place Concrete Piles Obtained from PIT

3. 既存杭の健全性評価法

3.1 評価法の概要

本開発技術は、杭の弾性波探査試験(Fig. 2)により得られる波形を用いて、Fig. 4のフローに従い杭の健全性を評価するものである。なお、弾性波探査試験では、杭

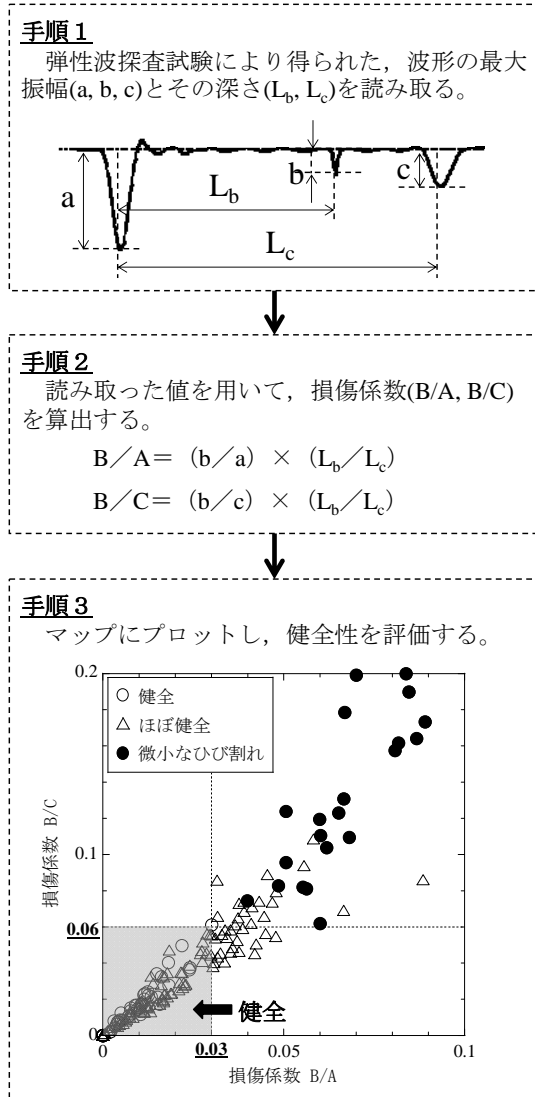


Fig. 4 弾性波探査試験に基づく杭健全性評価法
Evaluation of Pile Soundness Using PIT and Crack Factors

頭をハンマーで軽打し低ひずみの弾性波を発生させ、杭体からの反射波を杭頭に取り付けたセンサーで計測することで、杭の途中にひび割れがあれば、その反射が波形に現れる。本開発技術の特長は、以下の通りである。

- 1) 地中にある既存杭の健全性を、簡単・迅速かつ合理的に定量評価できる。
- 2) 上記1に伴い、調査や設計業務に係る時間を短縮できるため、工程を遅延させずに既存杭活用をスムーズに進めることが可能となる。
- 3) 既存杭の健全性担保が明確化され、施主や建築主事等への説明が容易となる。

3.2 損傷杭を用いた実験による検証

提案した健全性評価法について、損傷杭を用いた実験や実建物での現場計測結果による検証を行った⁸⁾。実験

Table 2 実験ケース

Test Cases			
名称	PHC_T1	PHC_T2	RC_T1
杭種	PHC杭	PHC杭	場所打ち杭
杭径 (mm)	800	400	400
杭長 (m)	13	7	3
試験条件	気中	気中/地中	気中
試験数	24	4	27
ひび割れ幅 w (mm)	0~0.67	0~0.7	0~0.57

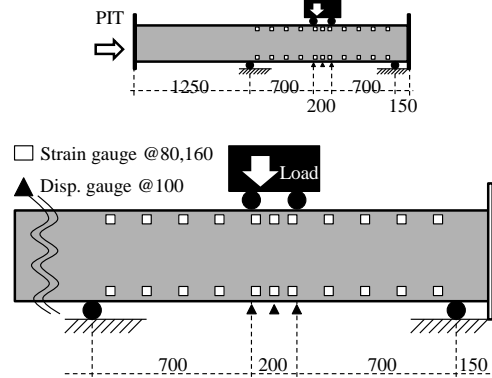


Fig. 5 RC_T1の实验概要(上: 全体, 下: 詳細(×2.5))
Test Equipment of RC_T1

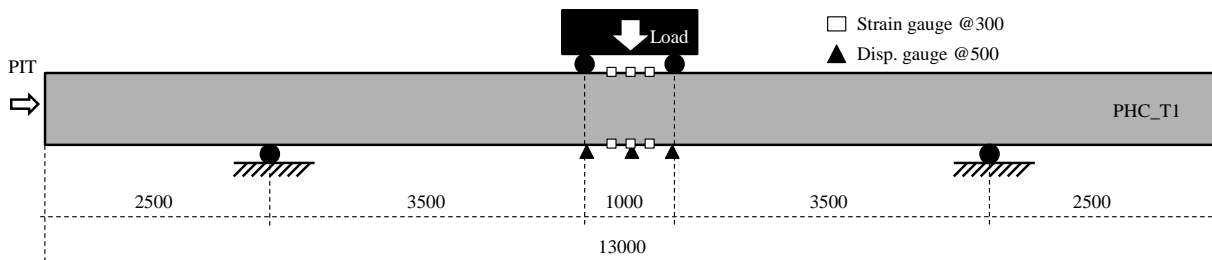


Fig. 6 PHC_T1の实验概要
Test Equipment of PHC_T1

ケースをTable 2, 実験概要をFigs. 5, 6, 7に示す。PHC_T1とRC_T1では、杭の曲げ試験により、載荷荷重を大きくすることで発生するひび割れを大きくし、各荷重の除荷時に弾性波探査試験を実施した。PHC_T2では、健全な杭試験体1体と、あらかじめ曲げ試験によりひび割れを生じさせた杭試験体3体について、気中で2点支持し弾性波探査試験を実施した。T2_2では設計破壊荷重まで載荷し、0.025mm幅の軽微なひび割れが杭中間部に生じた。T2_3では設計破壊荷重をやや超えた段階まで載荷し、0.5mm幅のひび割れが杭頭部に生じた。T2_4ではPC鋼材が切れるまで載荷し、0.7mm幅のひび割れが杭中間部に生じた。気中での試験後、プレボーリング工法により実地盤に打

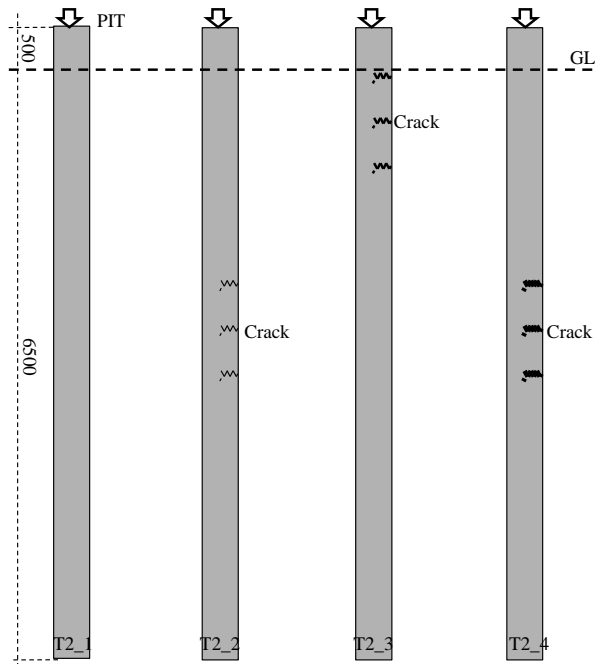
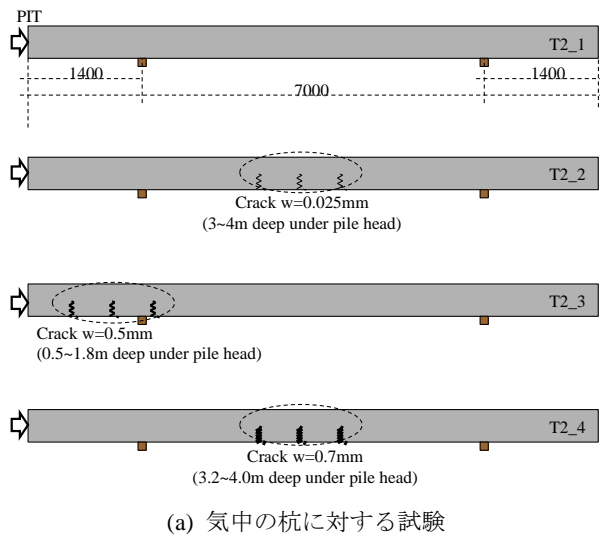


Fig. 7 PHC_T2の実験概要
Test Equipment of PHC_T2

設し、再び弾性波探査試験を実施した。曲げ試験はJIS A 5373 (2010)⁹⁾に基づき、2点支持2点載荷方式で行い、中央載荷曲げスパンは1mとした。杭のひび割れ幅はクラックスケール等を用いて読み取り、発生したひび割れの中で最大のひび割れ幅を代表値 w として採用した。弾性波探査波形は、一回の計測につき4波計測した。

弾性波探査試験により得られた波形について、Fig. 4の手順1に従い各振幅(a, b, c)とその深さ(L_b , L_c)を読み取り、手順2の提案式により損傷係数 B/A , B/C を算出した。横軸に損傷係数 B/A , 縦軸に損傷係数 B/C をとり、ひび割れ幅を評価した結果をFig. 8に示す。ここで、基礎指針¹⁰⁾やコンクリート関連の指針^{11), 12)}を参考に、場所打ちRC杭の性能に影響しないひび割れ幅を0.2mmとした。PHC杭については、ここでは0.1mmとした。概ね対角線上に分布しており、杭のひび割れ幅が大きくなるにつれて、図の原点から遠ざかる位置に分布するようになる傾向も確認できる。なお、図の網掛け部分は、前述した杭性能に影響しないと考えられるひび割れ幅の範囲である： $w \leq 0.1\text{mm}$ (PHC杭), $\leq 0.2\text{mm}$ (場所打ちRC杭)。

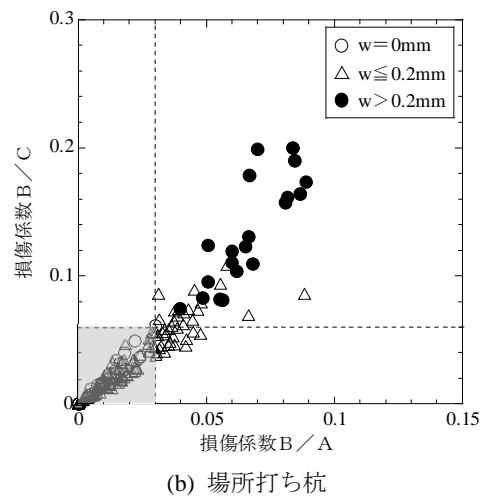
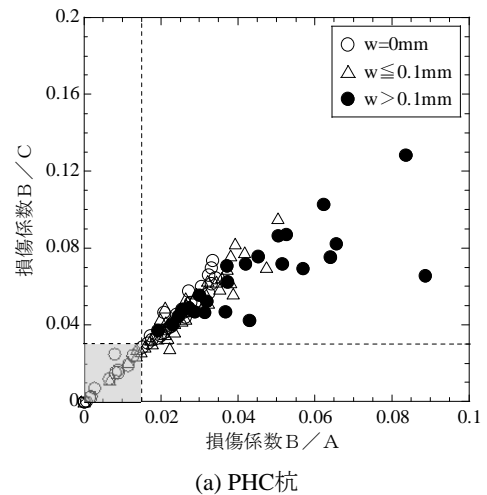


Fig. 8 損傷係数を用いた杭健全性評価
Evaluation of Pile Crack Width Using Crack Factors B/A , B/C

3.3 実建物での現場計測結果による検証

実験により構築したFig. 8について、実建物での現場計測結果により検証した。現場計測の一覧をTables 3, 4, 検証結果をFig. 9に示す。これらは、施工中または供用中の建物の杭や、兵庫県南部地震で被災した杭に対して行われた弾性波探査試験結果^{6), 7), 13)-17)}である。併せて、杭頭目視やボアホールカメラによる杭のひび割れ観察も行われ、ひび割れの位置とその幅が明らかになっている。

Fig. 9より、ひび割れのない又は微小なケースを示す白抜きの結果は図の左下の範囲(杭性能に影響しないと考えられる範囲)の内側に分布し、ひび割れが軽微なケースを示す黒塗りの結果は範囲外に分布している。このように、実建物での現場計測結果より算出した損傷係数の分布は実験結果と概ね調和的であり、損傷係数を用いた提案手法は有効であると考えられる。また、プロットされる位置から、ひび割れ幅を推定することも可能である。

4. 損傷した既存杭の水平抵抗評価法

4.1 評価法の概要

本開発技術は、前述した既存杭の健全性評価法(3章)により定量評価した既存杭の健全性に対応させて、損傷した既存杭の断面性能を評価し、さらに地中の既存杭の水平抵抗力も評価するものである。なお、既存杭の健全性とその断面性能および水平抵抗力の関係については、あらかじめ代表的な杭条件や地盤条件について整理しマップ化しておくことで、既存杭の活用をよりスムーズに進められるよう工夫した(Figs. 11, 12, 19)。本開発技術の特長は、以下の通りである。

- 1) 既存杭の健全性に応じてその杭性能を評価できるため、杭の残存性能を十分に活用できる。
- 2) 上記1に伴い、有効活用できる既存杭の本数が増えるため、環境負荷低減等の効果がより高まる。

4.2 損傷杭の断面性能評価

杭のひび割れと断面性能の関係について、杭の曲げ試験とそのシミュレーション解析により評価した。3.2節で示した曲げ試験のほか、建築基準整備促進事業(以下、基整促)「基礎ぐいの地震に対する安全対策の検討」¹⁸⁾の曲げ試験(杭径400~1200mmのPHC杭A, B, C種)を検討対象とした。基整促の曲げ試験については、ひび割れに関する情報が不足していたため、非線形FEM解析プログラムFINAL[®]を用いた3次元シミュレーション解析により、ひび割れを評価した。解析では、スパイラル筋をフープ筋に置き換え、鉄筋を梁要素、コンクリートをソリッド要素でモデル化した。コンクリートのひび割れは、要素内に一様なひび割れ状態を仮定する分布ひび割れモデルにより表現しており、荷重モーメント一定区間の中央に生じた、ひび割れ直交方向の引張ひずみに要素幅を乗じた値をひび割れ幅と定義した。ひび割れモーメント M_{cr} はコンクリートの引張ひずみ急増時、終局モーメント M_u は鉄筋降伏時の荷重モーメントの値とした。

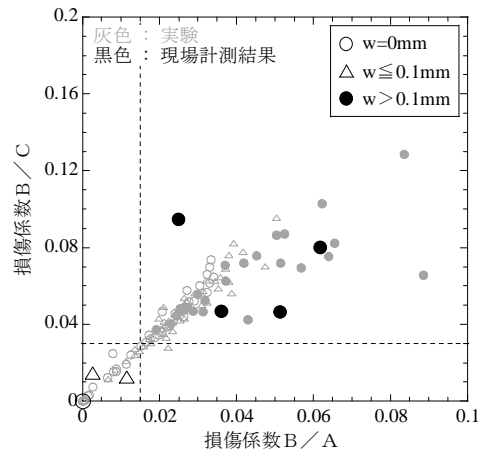
Table 3 現場計測ケース
Field Measurement Cases

(a) PHC杭

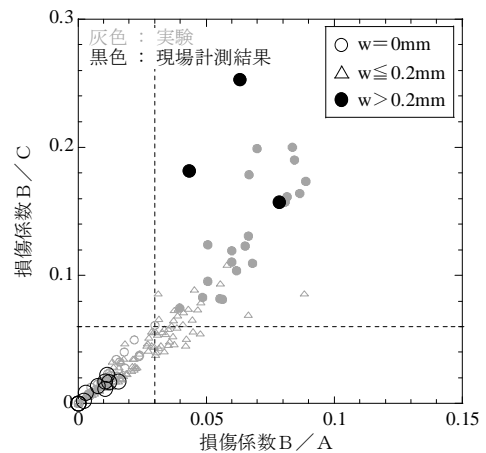
名称	PM1	PM2	PM3	PM4
杭種	PHC杭			
杭径 (mm)	450	450	450	500
杭長 (m)	15~16	35	17	33
試験条件	地中	地中	地中	地中
試験数	4	2	1	2
ひび割れ幅 w (mm)	0~0.5	0.5	0.1~0.2	0~0.5

(b) 場所打ち杭

名称	RM1	RM2	RM3	RM4
杭種	場所打ち杭			
杭径 (mm)	2000	1700	1000	1200
杭長 (m)	15	18	35	29
試験条件	地中	地中	地中	地中
試験数	3	1	2	2
ひび割れ幅 w (mm)	0	1.0	0.6~1.9	1.0



(a) PHC杭



(b) 場所打ち杭

Fig. 9 現場計測結果による妥当性検証
Inspection of Tests' B/A-B/C Relation Using Field Measurements

試験で得られたひび割れモーメントと終局モーメントを解析結果と比較し、Fig. 10に示す。Fig. 10は横軸を試験結果、縦軸を解析結果とした図で、概ね対角線上に分布しており、3次元FEM解析で実験結果を精度良く表現できている。次に、解析で得られた弾性係数とひび割れ幅の関係を図11に示す。ここで、弾性係数は、荷重モーメントを初期の断面2次モーメントと断面の曲率で除して算出している。比較のため、3.2節で示した曲げ試験結果を併せて示している。Fig. 11の解析結果によれば、ひび割れが大きくなるにつれて弾性係数は低下しており、あるひび割れ幅に対応する弾性係数の値にはやや幅があるものの、曲げ試験結果との対応は良好である。さらに、断面欠損率とひび割れ幅の関係を図12に示す。ここで、断面欠損率は、杭の円周方向へのひび割れ長さを、杭の周長で除して算出している。Fig. 12より、ひび割れ幅が大きくなると、円周方向のひび割れ長さも長くなるため、断面欠損率は大きくなる傾向を確認できる。Fig. 10と同様に、あるひび割れ幅に対応する断面欠損率の値にはやや幅があるものの、曲げ試験結果と概ね調和的である。

4.3 損傷杭の水平抵抗評価

4.3.1 評価方法

4.2節で示したFigs. 11, 12により杭の健全性からその杭の断面性能を評価し、Fig. 13に示す解析モデルを用いた直接反復法により、損傷杭の水平抵抗を評価する¹⁹⁾。Fig. 13の解析モデルでは、杭を梁要素、地盤の水平抵抗をばね要素でモデル化し、非線形特性については、杭の曲げ剛性EIおよび水平地盤反力係数 k_h を、 $M-\phi$ 関係および $p-y$ 関係の割線剛性として与え収斂計算させて評価する。水平地盤ばねは基礎指針¹⁰⁾を参考に、以下の式(1)-(3)で基準水平地盤反力係数 k_{h0} およびBromsの極限地盤反力 P_y を与え、変位の(-0.5)乗で低減させた。後述する解析では $\alpha=80$ 、 $E_0=E_{50}$ 、 $C_u=q_u/2$ 、 $\mu=1.4$ 、 $\lambda=9.0$ とした。

$$k_{h0} = \alpha \times E_0 \times B^{-3/4} \quad (1)$$

$$\frac{z}{B} \leq 2.5 \text{ の場合} \quad \frac{P_y}{\gamma B} = 2 \left(1 + \mu \frac{z}{B} \right) \frac{C_u}{\gamma B} \quad (2)$$

$$\frac{z}{B} \geq 2.5 \text{ の場合} \quad \frac{P_y}{\gamma B} = \lambda \frac{C_u}{\gamma B} \quad (3)$$

- α : 評価法別の定数
- E_0 : 変形係数
- B : 杭径
- z : 深さ
- γ : 地盤の単位体積重量
- C_u : 非排水せん断強度
- μ, λ : 群杭の影響を考慮した係数

Fig. 13に示す損傷杭については、損傷部の弾性係数を低下させ、あらかじめヒンジを有するモデルを設定する。ここで、局所的に断面2次モーメントを低下させてヒンジを考慮する($I \rightarrow I'$)。断面2次モーメント I' の算出方法をFig. 14、算出式(4)-(7)を以下に示す。

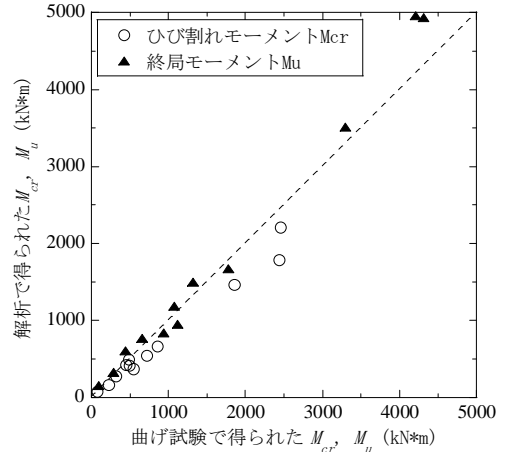


Fig. 10 曲げ試験結果と3次元FEM解析結果の比較
Comparison between Bend Tests and Simulation Analyses

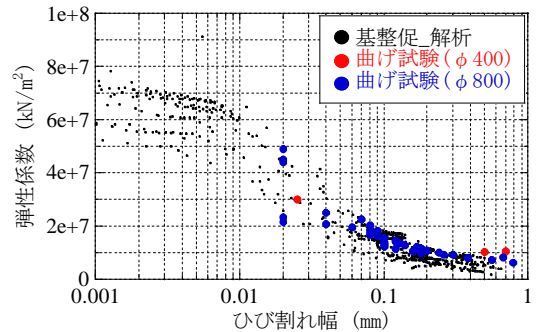


Fig. 11 弾性係数とひび割れ幅の関係
Relation between Elastic Modulus and Crack Width of Pile

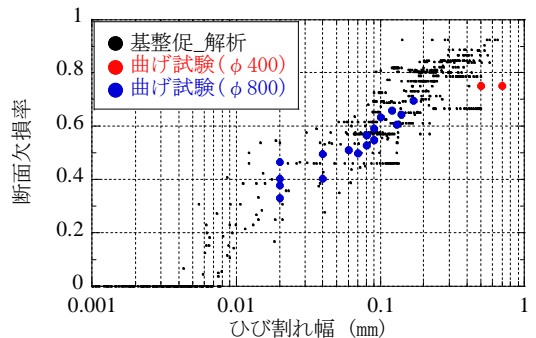


Fig. 12 断面欠損率とひび割れ幅の関係
Relation between Crack Ratio and Crack Width of Pile

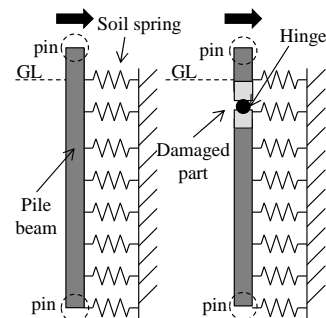


Fig. 13 解析モデル(左:健全杭, 右:損傷杭)
Analytical Models of Fine Pile and Damaged Pile

$$A = \iint r dr d\theta = \frac{\alpha}{4}(D^2 - d^2), \left\{ \frac{d}{2} \leq r \leq \frac{D}{2}, -\alpha \leq \theta \leq \alpha \right\} \quad (4)$$

$$S = \iint y r dr d\theta = \frac{1}{12} \sin \alpha (D^3 - d^3) \quad (5)$$

$$e = \frac{S}{A} = \frac{\sin \alpha (D^3 - d^3)}{3\alpha (D^2 - d^2)} \quad (6)$$

$$I' = \iint (y - e)^2 r dr d\theta = \frac{1}{64} (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) (D^4 - d^4) - \frac{\sin^2 \alpha (D^3 - d^3)^2}{36\alpha (D^2 - d^2)} \quad (7)$$

- A : 断面積
- S : 断面1次モーメント
- e : 重心軸-X軸間の距離
- α : 角度(健全な断面の割合)
- D, d : 外径, 内径

4.3.2 損傷杭の水平抵抗特性 提案した水平抵抗評価法について、損傷杭を用いた水平載荷実験²⁰とそのシミュレーション解析により検証した。実験に用いた杭諸元をTable 5, 地盤諸元をTable 6, 地盤条件をFig. 15に示す。地盤は、表層からGL-7m付近まではN値2~4の関東ロームが主体で、その下にN値50以上の砂礫層がほぼ水平に堆積している。水平載荷実験に先立って、損傷杭を作製するために曲げ試験⁸⁾を実施した。杭の損傷位置については、事前検討した杭の特性長 $1/\beta$ を参考に設定した。 $1/\beta$ は、杭の水平抵抗に支配的な影響を及ぼす地盤の深さ範囲を表すパラメータである¹⁰⁾。地盤調査結果と杭の物性値より算出すると、 $1/\beta=2.0\text{m}$ (杭頭変位1cm)となったため、杭の水平抵抗への影響が大きい場合として杭頭から2mの範囲(以下、杭頭部と称する)、影響が小さい場合として杭頭から3~4mの範囲(以下、杭中間部と称する)に、それぞれ損傷を生じさせた。杭の損傷程度は、ひび割れを肉眼で確認することが困難なほど損傷が軽微な場合(No.2)と、ひび割れがプレストレスで閉じないほど損傷が激しい場合(No.3, 4)の2種類とした。

解析にあたっては、杭の非線形特性は、No.4杭の曲げ試験結果を参考にトリリニアで設定した。損傷部には曲げ試験結果より求めた弾性係数(Fig. 11)を設定し、ヒンジの断面2次モーメントは、No.3杭が3/4周程ひび割れていたことから式(4)-(7)より $I'=0.00871 \times I$ とした。杭周地盤は全長にわたり関東ロームとして、地盤調査結果より一軸圧縮強度 q_u と変形係数 E_{50} を設定した(Table 6)。

実験で得られた健全杭(No.1)の杭頭荷重-杭頭変位関係を解析結果と比較し、Fig. 16に示す。杭の非線形性を考慮することにより、実験で観察された、変位の増加に伴う剛性低下を概ね表現できている。次に、杭頭部損傷杭の杭頭荷重-杭頭変位関係、および水平地盤反力の分布をFig. 17に示す。分布図は、健全杭の曲げモーメントが実測ひび割れモーメントに達した杭頭荷重80kN時の結果である。比較のため、ヒンジを設けない解析結果も

併せて示している。Fig. 17より、損傷部における弾性係数の低下に加えて、ヒンジを適切に考慮することにより、実験結果との整合性が向上している。ヒンジがあると、ヒンジで浅く地盤反力を多く負担ようになるため、杭の変位が急増する変形モードになったと考えられる。より精緻なシミュレーションには有限要素法などを用いる必要があるが、簡便評価法としては、本解析モデルは概ね妥当であると考えられる。

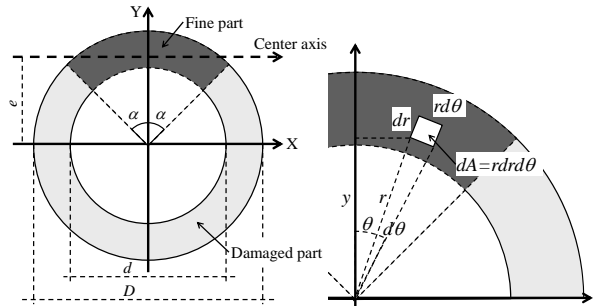


Fig. 14 断面2次モーメント I' の算出方法
Method for Calculating Moment of Inertia of Area I'

Table 5 水平載荷実験を実施した杭諸元
Pile Specifications

名称	No.1	No.2	No.3	No.4
杭種	PHC杭			
杭径と肉厚 (mm)	400, 65			
杭長 (m)	7			
初期弾性係数 E (kN/m ²)	5.88×10^7			
断面2次モーメント I (cm ⁴)	101821			
ひび割れモーメント M_{cr} (kNm)	56			
終局モーメント M_u (kNm)	92			
ひび割れ位置	-	杭中間	杭頭	杭中間
ひび割れ幅 (mm)	-	0.025	0.5	0.7

Table 6 解析に用いた地盤定数
Material Properties of Soil

GL	0 ~ -3m	-3 ~ -5m	-5 ~ -7m
q_u (kN/m ²)	88.0	78.3	82.8
E_{50} (kN/m ²)	4300	3900	4300

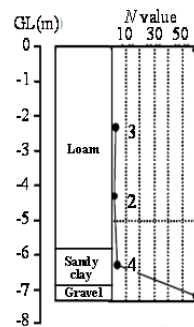


Fig. 15 地盤条件
Soil Condition

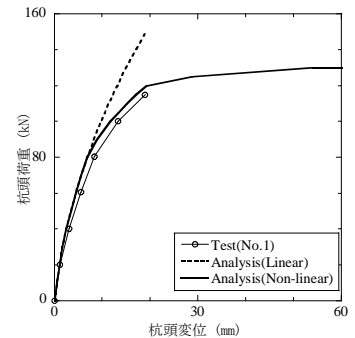


Fig. 16 健全杭の水平抵抗力(No.1)
Lateral Resistance of Fine Pile

一方で、Fig. 18に示す杭中間部損傷杭の場合、損傷部における弾性係数の低下やヒンジを考慮しても、水平抵抗力にあまり違いはみられない。ヒンジを設けることで、ヒンジ周辺の地盤反力に違いはあるものの、地盤反力の大半は杭頭部で負担されており、変形モードが大きく異なるまでには至っていない。実験での地盤条件下では、大変位時においても地盤の浅い範囲が杭の水平抵抗に支配的であったため、やや深い位置にある杭中間部の損傷はほとんど影響しなかったと考えられる。

4.3.3 損傷杭の水平抵抗力の定量的評価 構築した水平抵抗評価法を用いて、損傷深さ(杭頭からの深さ)と損傷程度(ひび割れ幅)をパラメータにした検討を行い、損傷杭の水平抵抗力を定量的に評価した。実験では、杭剛性に比べ相対的に地盤反力の影響が大きく、損傷の影響が現れにくい条件であったと考えられる。そこで、杭剛性と地盤反力の関係に依存せずに、損傷杭の水平抵抗力を定量評価するためには、杭剛性の影響が大きい条件下での検討も必要と考え、杭径は $\phi 300, 400, 600, 800\text{mm}$ とした。損傷部の範囲は1mとし、杭頭から杭先端にかけて損傷深さを変化させた。損傷程度については、損傷が軽微な場合($E'I/EI=1/2$, ヒンジ無し)、やや損傷している場合($E'I/EI=1/3$, 断面欠損率40%)、損傷が激しい場合($E'I/EI=1/6$, 断面欠損率75%)を設定した。杭頭は実験に合わせてピンとした。

評価した損傷杭の水平抵抗力(杭頭ばね剛性)をFig. 19に示す。ここで、縦軸の剛性は健全杭の結果で、横軸の損傷深さは損傷部中心の深さを健全杭の $1/\beta$ (杭頭変位1cm)で、それぞれ正規化している。実験結果のほか、評価結果の対数近似曲線を併せて示している。損傷部の曲げ剛性が健全部の1/2程度である場合、その位置によらず、その杭の水平抵抗力は健全杭とほとんど変わらない。これは、軽微な損傷は地盤反力の分布にほとんど影響を及ぼさないためである。損傷部の曲げ剛性が健全部の1/6程度である場合、損傷位置が $2.1/\beta$ 程度より浅くなるにつれて、その杭の水平抵抗力は健全杭に比べ小さくなり、杭頭変位は増加しやすくなる傾向がある。これは、損傷部がヒンジの働きをすることで、損傷が浅く地盤反力を多く負担するようになり、杭変位が急増する変形モードとなるためである。一方で、損傷位置が $2.1/\beta$ 程度より深ければ、損傷が大きくなっても、健全杭と同程度の水平抵抗力を期待できるという結果を得た。ここで示した $2.1/\beta$ について、一様地盤中の弾性支承梁の解¹⁰⁾と比較すると、第1不動点($\pi(2\beta)$)と曲げモーメント第1ゼロ点(π/β)の間という位置付けにあたる。

5. まとめ

本論文では、既存杭活用の課題とそれに対応した開発技術について述べた。

(1) 既存杭の健全性評価法 健全性を確認する弾性波探査試験は、経験に基づく高度な判断が必要で、定量的

な評価は困難であった。そこで、数多くの実測データより考案した独自の損傷係数と評価マップを用いて、健全性を定量的に評価できる方法を開発した。

(2) 損傷した既存杭の水平抵抗評価法 杭が損傷していても、その残存性能を活用できれば合理的であるが、損傷杭の性能評価方法は確立されていない。そこで、損傷杭の実大載荷実験と3次元有限要素法解析により、定量評価した杭の健全性に対応させて断面性能を評価し、さらに杭の水平抵抗力も評価できる技術を開発した。

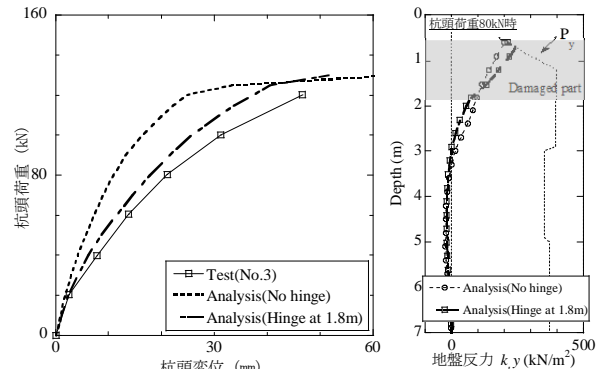


Fig. 17 杭頭部に損傷がある杭の水平抵抗力(No.3) Lateral Resistance of Pile Damaged at Pile Head

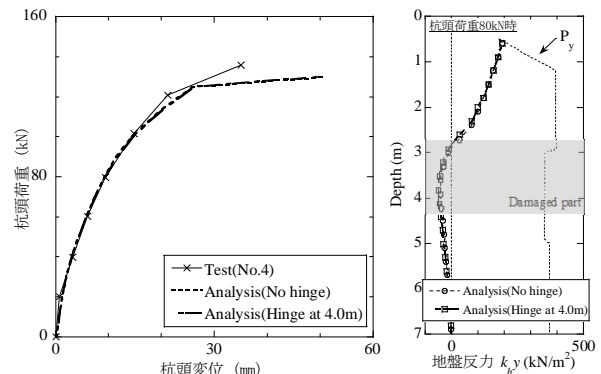


Fig. 18 杭中間部に損傷がある杭の水平抵抗力(No.4) Lateral Resistance of Pile Damaged in the Middle

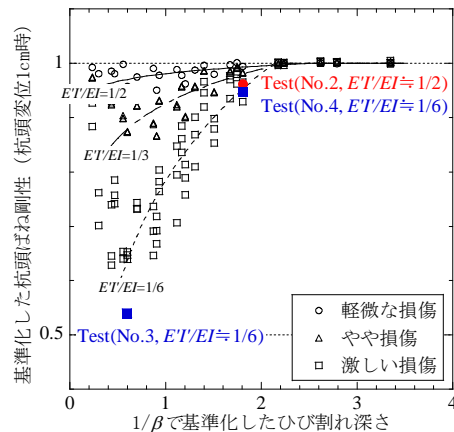


Fig. 19 損傷杭の水平抵抗力の定量的評価 Quantitative Evaluation of Lateral Resistance of Damaged Piles

これらの一連の研究開発で得られた技術は、既存杭の活用を促進し、円滑に進める上で欠かせない技術であり、都心部の建替え需要といった社会ニーズにも合致している。また、CO2排出量の削減等により、環境負荷の低減にも貢献できるものである。

参考文献

- 1) 森ビル株式会社：東京23区の大規模オフィスビル市場動向調査(2015/11/4)，2016/7/19閲覧
<<https://www.mori.co.jp/company/press/research.html>>
- 2) 建設業協会：既存杭利用の手引き，2003.2
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:国総研プロジェクト研究報告 第4号 住宅・社会資本の管理運営技術の開発 B.地域マネジメント編(建築分野) 第I部 建築ストック単体の再生技術の開発 2章 既存杭の再利用技術の開発，2006.1
- 4) 構造法令研究会：既存杭等再使用の設計マニュアル(案)，2008.11
- 5) 日本建築構造技術者協会：既存地下構造再利用の設計事例と方策，2013.11
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－4 木造建築物・建築基礎構造，日本建築学会，1998.3
- 7) 水野二十一，渡辺則雄，佐藤玲圭，濱田尚人：1995年兵庫県南部地震における場所打ち杭の一被害事例と考察 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.609-614，1996.9
- 8) 勝二理智，藤森健史：弾性波探査試験に基づく杭健全性の合理的評価法，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.720，pp.271-280，2016.2
- 9) 日本工業規格：JIS A 5373(2010)プレキャストプレストレストコンクリート製品
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査・補修指針，1980
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説，1997
- 13) コンクリートパイル建設技術協会，コンクリートポール・パイル協会：兵庫県南部地震被害調査報告書(その3)，1996.5
- 14) コンクリートパイル建設技術協会，コンクリートポール・パイル協会：兵庫県南部地震被害調査報告書(その4)，1997.3
- 15) 黒木康文，渡辺則雄，森利弘：兵庫県南部地震で被災した建物の杭基礎被害調査 その1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.445-448，2004.8
- 16) 風早佳子，林隆浩，小野日出男，田中伸治：非破壊試験法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査報告(その1～2)，第31回地盤工学研究発表会，pp.1683-1686，1996.7
- 17) 榎本雅夫，土谷尚，森田悠紀雄，田中勉：非破壊試験(Pile Integrity Tests)を用いた杭の損傷度調査，第31回地盤工学研究発表会，pp.443-444，1996.7
- 18) 平成25年建築基準整備促進事業：基礎ぐいの地震に対する安全対策の検討，2014.3
- 19) 勝二理智，藤森健史：実大載荷実験に基づく損傷杭の水平抵抗評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.705，pp.1637-1645，2014.11
- 20) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説，2010