

地盤固化工法を用いた杭基礎の耐震補強工法の実大実験

足立有史*・浦野和彦*・佐久間孝夫**・末広修三***・河邑 眞****

杭基礎の耐震補強は地盤中であることや敷地の問題等の制約条件の関係もあり、補強方法が限られているのが現状である。筆者らはこれまで、既存の杭基礎にも適用可能な新たな耐震補強方法を提案し、1g場での模型振動台実験および数値シミュレーションによりその効果を確認している¹⁾。この耐震補強方法は地盤中に複数の杭を包含するように地盤固化体を板状に作製し、その拘束効果による杭基礎の剛性を高めるものである。ここでは、提案した補強方法の施工性および品質を確認する目的で実規模レベルの杭基礎を用いたフィールド実験を実施した。実大実験では水平載荷試験、起振機試験および掘削による補強体観察による品質および施工性等について検討し、本工法の実施工への適用性を確認した。

キーワード：杭，耐震補強，高圧噴射工法，実大実験，水平載荷試験，起振機試験

1. はじめに

近年、地震動レベルの見直しや今後想定される大規模な地震に備えた既存構造物およびそれらの基礎構造に対する耐震補強工法の必要性が高まっている。特に杭基礎の補強は地盤中であることや敷地制限、空頭制限のため、補強方法が限られているのが現状である。筆者らはこれまで、既存の杭基礎にも適用可能な新形式の耐震補強方法として、杭基礎周辺地盤の一部を地盤固化工法により杭を包含するように固化させ複数の杭を拘束する方法を提案している。これは、杭とフーチングと新たに設置した固化体（補強体）による2層ラーメン構造を構築することによる効果で地震に強い杭基礎構造を得るもので、1g場での振動台模型実験および数値シミュレーションによりその効果を確認している¹⁾。ここでは、提案した補強方法に対する実規模レベルの杭基礎における施工性および品質を確認する目的で実施した実大実験について報告する。

外側にひずみゲージを取り付け、それを保護するためのプロテクター（L型鋼）を設置している。また、フーチング底面はコンクリートと地盤との摩擦をカットする目的で、厚さ5cmの発砲スチロールを配置した。地盤は地表から2m程度の盛土の下部にN値が1程度の軟弱なローム、粘性土が約5m続き、さらにN値5～10の粘土が1.5m存在し、それ以深はN値40程度の砂層が存在する。杭先端はN>40程度の砂質土層に約1m根入れした。

2. 実験概要

2.1 実大模型の概要

実験に用いた杭基礎および地盤概要を図-1に示す。杭基礎は、本実験の実施を目的に新たに作製したものであり、杭は4本で外径406.4mm、肉厚9.5mm、杭長10mの鋼管杭を杭間隔2.0mとした。杭の打設は中掘り根固め工法（セメントミルク噴出攪拌方式）にて行った。杭頭処理はRC製のフーチング（3.8×3.8×0.6m）に埋め込み長0.5mとし、杭頭剛結条件とした。2本の鋼管杭の

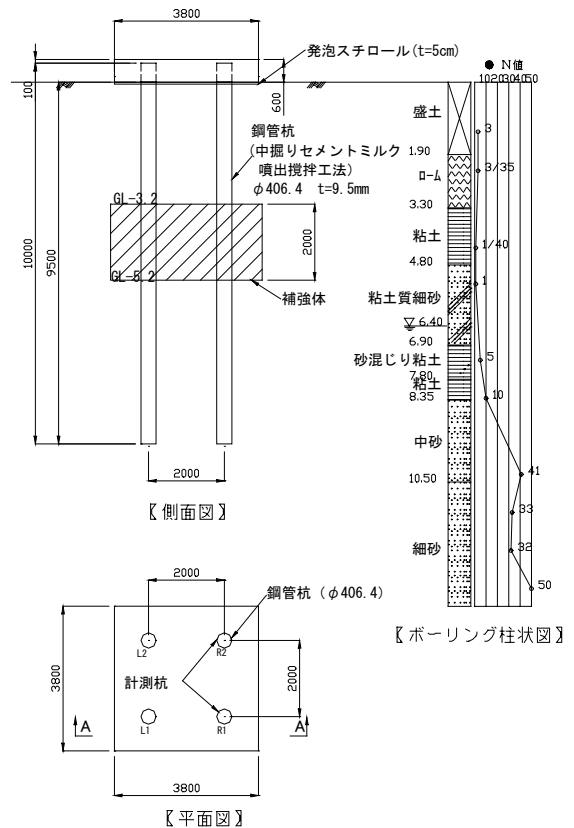


図-1 実大実験模型概要図

* 技術研究所 ** 東興建設 *** 青山機工 **** 豊橋技術科学大学

表-1 鋼管杭物性一覧

鋼管杭	φ406.4 t=9.5 L=10.0m	
外半径	R (m)	0.2032
内半径	r (m)	0.1937
断面積	A (m ²)	0.011846
断面2次モーメント	I (m ⁴)	0.000233
断面係数	Z (m ³)	0.001149
ヤング率	E (kN/m ²)	2.1 × 10 ⁸
曲げ剛性	EI (kN・m ²)	4901.1

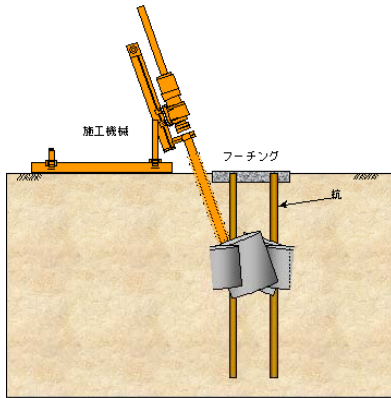


図-2 補強体造成イメージ

表-2 実大実験の工程

	2003.12月	2004.1月	2004.2月	2004.3月
①杭基礎設置	開始	完了		
②水平載荷試験				
③起振機試験				
④補強体作製			養生	
⑤起振機試験			1回目 2回目	
⑥水平載荷試験				
⑦掘削補強体観察				終了

補強体は地中部に地盤固化改良を複数の杭を包含するように板状に作成し、2層ラーメン構造を構築することで、その拘束効果により杭基礎の剛性を高めるものである。補強体はGL-3.2m~5.2m（厚さ2m）の範囲とし、平面的にはフォーチングと同様3.8m×3.8mである。補強体の造成は、斜め施工が可能なセメント系高圧噴射工法を用い、12箇所から噴射することで所定の範囲を造成した。補強体の設計強度は1MN/m²である。地中部の造成イメージを図-2に示す。

実大実験における実施項目は主に以下の3項目である。

- (1) 水平載荷試験
- (2) 起振機試験
- (3) 掘削による補強体の観察

実験工程を表-2に示す。次節以降にこれらの実施項目の概要および試験結果を以下に示す。

3. 水平載荷試験

3.1 試験概要

水平載荷試験は、補強前後において実施し、杭基礎の挙動の比較を行った。載荷方法は2台の油圧ジャッキを用いて、一方向多サイクル方式により行った²⁾。

計測は変位計、傾斜計、荷重計およびひずみゲージを図-3に示すように配置した。ここで、ひずみゲージは押し込み側の杭1本に1組、引き抜き側の杭1本に10組設置した。

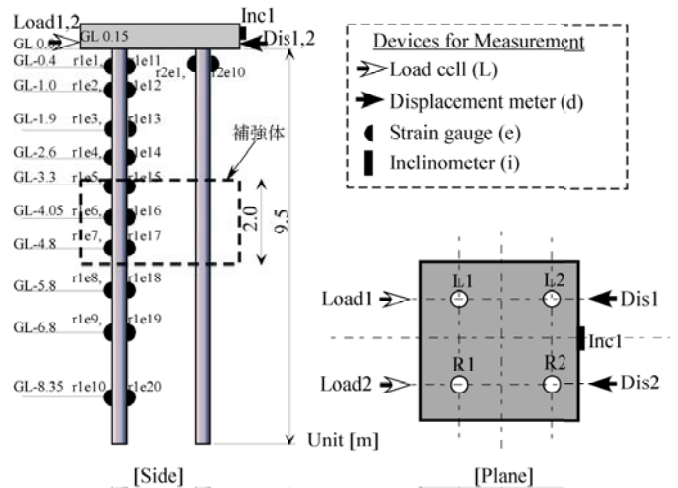


図-3 計測装置（水平載荷試験）

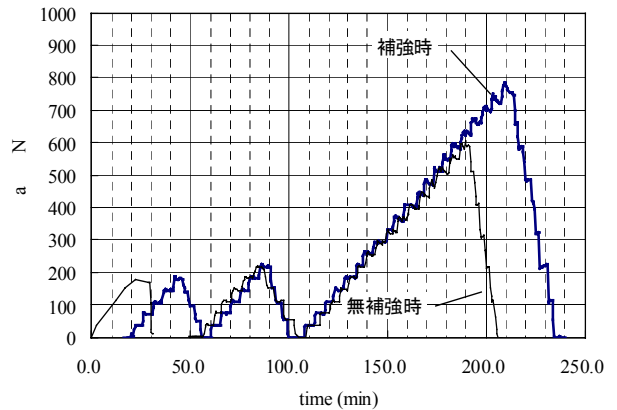


図-4 荷重-時間曲線

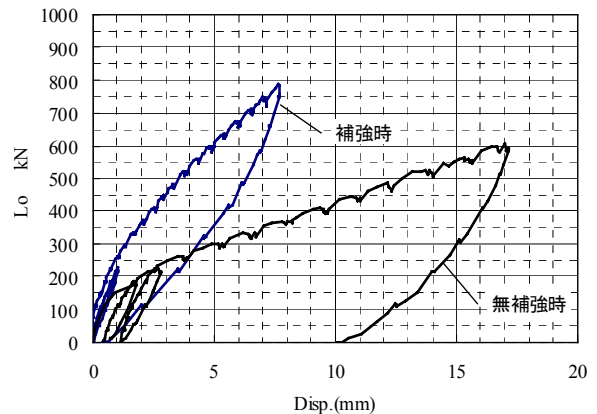


図-5 荷重-変位図 (GL+0.15m)

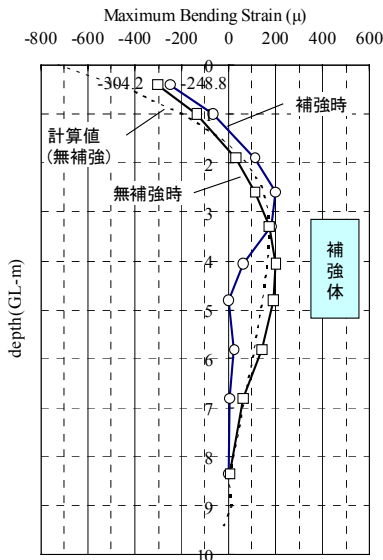
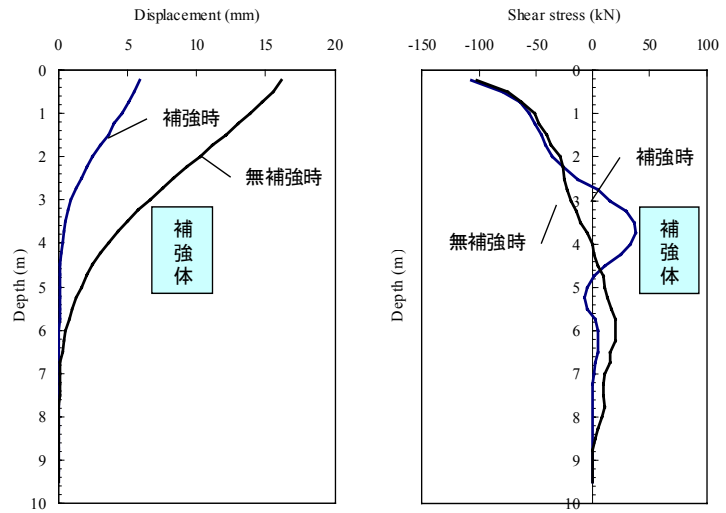


図-6 曲げひずみ分布(載荷重600kN時)



(a) 水平変位分布

(b) せん断力分布

図-7 曲げひずみ分布から求めた変位, せん断力分布(載荷重600kN時)

3.2 試験結果

(a) 荷重-変位関係

補強前後の水平載荷試験の荷重-時間曲線および杭頭部の荷重-水平変位曲線をそれぞれ図-4および図-5に示す。最大荷重は補強前, 補強後においてそれぞれ600kNおよび787.5kNである。600kN載荷時のフーチング水平変位量は補強前が17.2mmに対して補強後では4.8mmと低下する結果となった。補強後の載荷試験では補強前に比べ200kN程度大きな荷重を載荷したが, 最大荷重付近においても荷重-変位関係はほぼ線形的な弾性挙動を示した。なお, フーチング側面に設置した傾斜計から, 600kN載荷時のフーチング傾斜角は補強前, 補強後においてそれぞれ+0.0956度および+0.0608度(載荷方向への回転を+)であった。

(b) 曲げひずみ分布

600kN載荷時の補強前後での曲げひずみ分布を図-6に示す。また, 同図には杭頭固定条件での弾性床上的のはり(Changの方法)として算定した無補強時の曲げひずみ分布を合せて示す。無補強時については, 計算値と概ね良い一致を示していることがわかる。補強前と比べ補強後は, 杭中間部に設置した補強体の拘束効果により, 杭頭付近の曲げひずみが低下し, 逆に補強体天端付近で増加した。また, 補強体以深杭下部での曲げひずみはほとんど生じていない。これらの挙動は杭基礎-フーチング系の構造が補強体を設置することで2層ラーメン構造を形成したことによるものと考えられる。

図-6に示した曲げひずみ分布から弾性たわみ曲線式を用い, 数値的な積分及び微分を行い, 杭の水平変位分布およびせん断力分布を算定した結果を図-7に示す。算定時の深度方向の微小区間距離は $dx=0.25\text{m}$ となるようひずみ曲線の補間を行った。図-7より, 杭の水平変

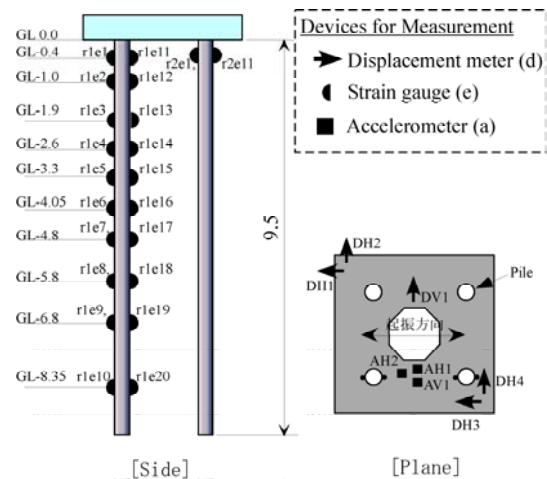


図-8 計測装置(起振機試験)

位分布は補強体の設置により, GL-3.0m以深での変位が大きく低減している。また, 今回のケースでは, せん断力については, 補強体天端付近で補強前に比べせん断力が増加していることが確認された。そのため, 実設計においては, 補強体厚さ, 位置を調整し, せん断耐力を十分考慮する必要がある。

4. 起振機試験

4.1 試験概要

起振機試験は実構造物の振動特性を把握するために実施される³⁾。本実大実験では補強前後において実施し, 杭基礎の振動特性(変位振幅, 固有振動数)を把握することを目的として実施した。試験は図-1に示す実大杭模型のフーチング上面中央に最大加振力40kNの起振機(EX-400DL型起振機)を設置し, 1~15Hzの周波数の正弦波で段階的に起振するものである。起振は水平, 上下に

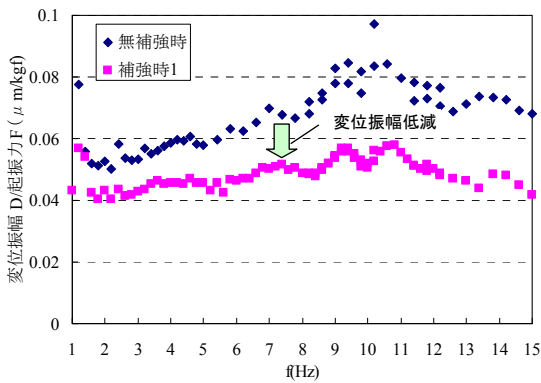
対して実施した。表-3に加振方法を示す。計測はフーチング上面に微小変位計，加速度計を図-8に示すように配置して行った。また，杭体についても水平載荷試験同様，ひずみゲージでの計測を行った。

表-3 起振機試験加振方法

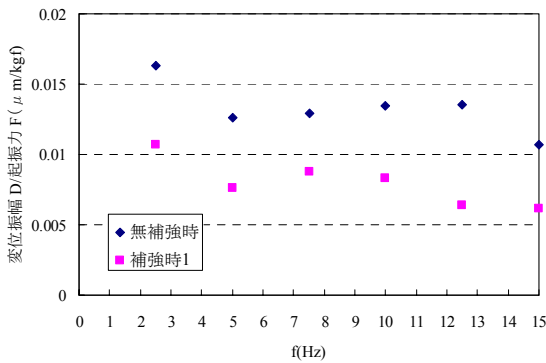
加振振動数	1~15Hz	
振動数ピッチ	水平加振	0.2~0.4Hz
	鉛直加振	2.5Hz
加振モーメント	水平加振	400kgf・cm (1.0~10.0Hz)
		200kgf・cm (10.0~12.2Hz)
		50kgf・cm (10.0~12.2Hz)
	鉛直加振	200kgf・cm (2.5~15.0Hz)

4.2 試験結果

図-9に起振周波数と起振力で正規化変位振幅の関係をプロットした。ここでは，補強後に実施した2回の起振機試験のうち，1回目の結果について示す。事前の検討の結果，杭-フーチング系（地盤なし）の固有振動数は，無補強で1.6Hz，補強時で2.1Hz，また，地盤の固有振動数は常時微動測定の結果，約3.1Hzであった。図-9を見る限り今回の試験では，補強前後とも固有振動数を明確に確認することが出来ず，杭基礎構造の固有振動数の変化を確認することは困難であった。しかしながら，



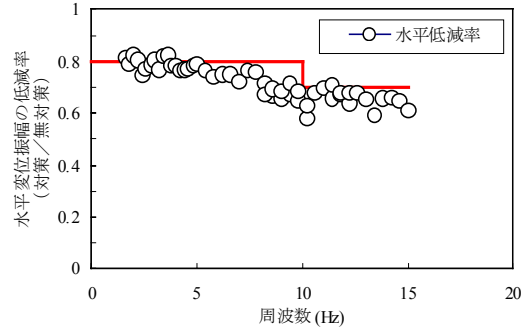
(a) 水平加振



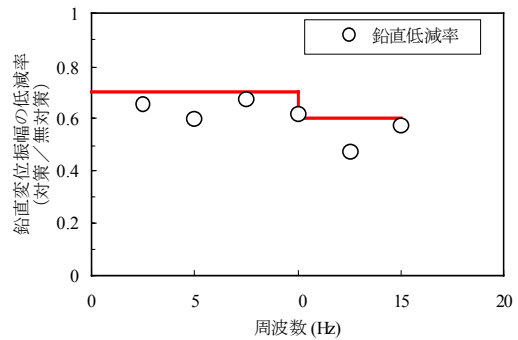
(b) 鉛直加振

図-9 変位振幅スペクトル

起振周波数1~15Hzの全周波数帯において補強前に比べ補強後の変位振幅が減少していることがわかる。これは，補強体による杭基礎構造の補強効果により，杭基礎構造の剛性が増加したためであると考えられる。図-10に補強前後での変位振幅の低減率を示す。この図から，水平加振時で2~3割，鉛直加振時で3~4割の変位低減効果があることがわかった。



(a) 水平加振



(b) 鉛直加振

図-10 変位振幅低減率

5. 掘削による補強体の観察

5.1 試験概要

水平載荷試験，起振起試験終了後，補強体の出来形および品質を確認するため，掘削を行って補強体の実物を観察した。

掘削は，補強体の外形，側面が観察できるようにGL-3.5mまで行った。補強体の掘削状況を写真-1，2に示す。当初計画した平面寸法3.8×3.8を満足し，また，杭と補強体との接合についても，良い密着を示した。深度方向に対しては，連続コア採取を図-11に示す3箇所について実施し，補強体の厚さを確認した。その結果，GL-3.2m~GL-5.2mの区間において均質な補強体が構築されていることを確認した。写真-3に採取されたコアの状況を示す。さらに，採取したコアを用いた一軸圧縮試験を実施し，その強度特性を確認した。補強体造成後約1ヶ月後および7ヵ月後に実施した圧縮試験結果を図



写真-1 補強体掘削状況 (上側から撮影)



写真-2 補強体掘削状況 (杭周囲の状況)

図-12示す。載荷は圧縮ひずみ速度 1%/minで実施した。試験結果より設計圧縮強度 1MPaを十分上回る強度が確認された。

6. 補強体造成中の杭体への影響

今回の実大実験では補強体作成方法としてセメント系高圧噴射工法を用いた。補強体造成時には高圧噴射ノズルから約40MPaの高圧力でセメントミルクを噴射するため、造成中の杭への影響が懸念された。そのため、補強体造成期間中、杭体に設置したひずみゲージの計測を連続で実施した(図-2参照)。計測結果を図-13に示す。補強体は計12箇所から噴射し、それぞれの造成体が組み合わさることで計画された形状の補強体を形成する。図中に示すNoはそれぞれの造成体のセメントミルク噴射の時間帯である。

これによると、杭のひずみゲージは噴射の時期に連動し反応しているが、その値は最大で約100 μ と、杭の損傷を与えるような値ではない。また、施工前後約3週間での杭のひずみ変化量を図-14に示すが、最大30 μ 程度であった。これより、高圧噴射工法によって、杭基礎に

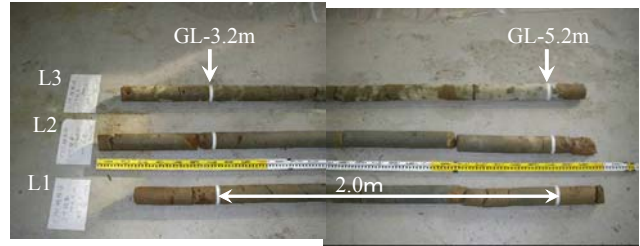


写真-3 コア採取状況

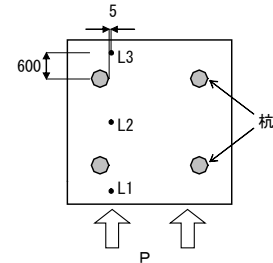
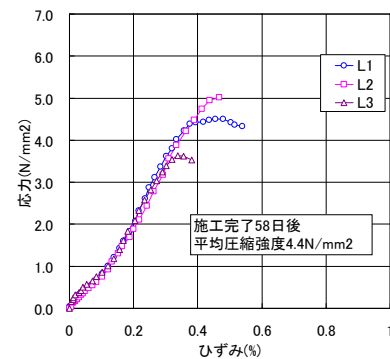
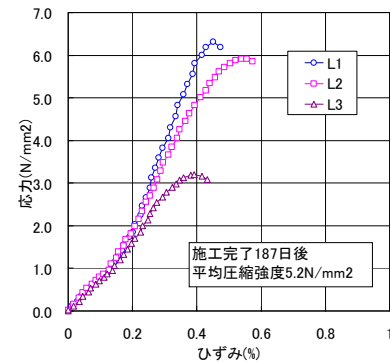


図-11 コア採取位置



(a) 施工58日後



(b) 施工187日後

図-12 圧縮試験結果 (応力-ひずみ)

損傷を与える可能性はほとんどないものと考えられる。

7. まとめ

実大規模の杭基礎を対象に実施した地盤固化工法を用いた耐震補強工法の実大実験から以下のことを確認した。

- ① 杭基礎補強前後の水平載荷試験 (600kN載荷時) の比較から、補強により曲げモーメントおよび変位量が低減しており、提案方法の補強効果を確認した。

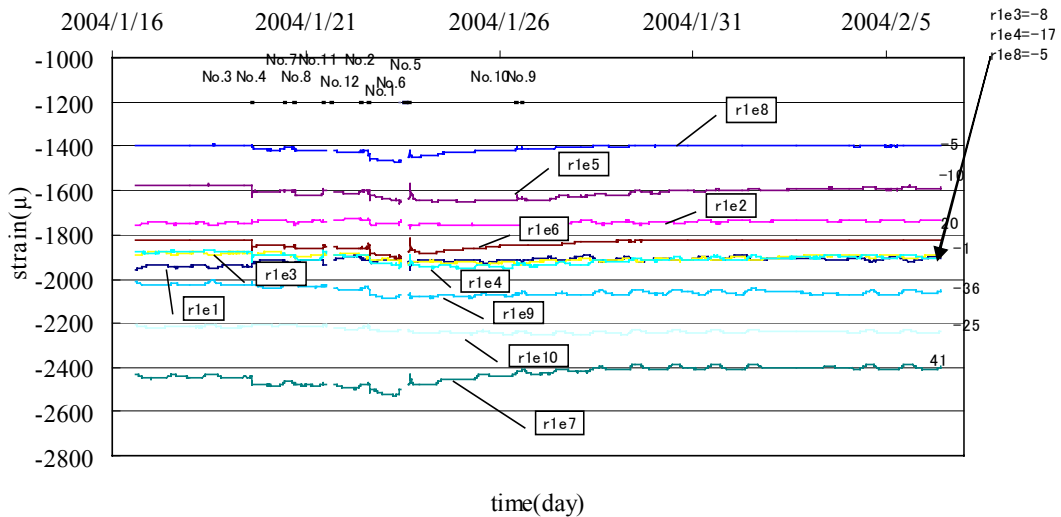


図-13 施工中の杭の計測結果

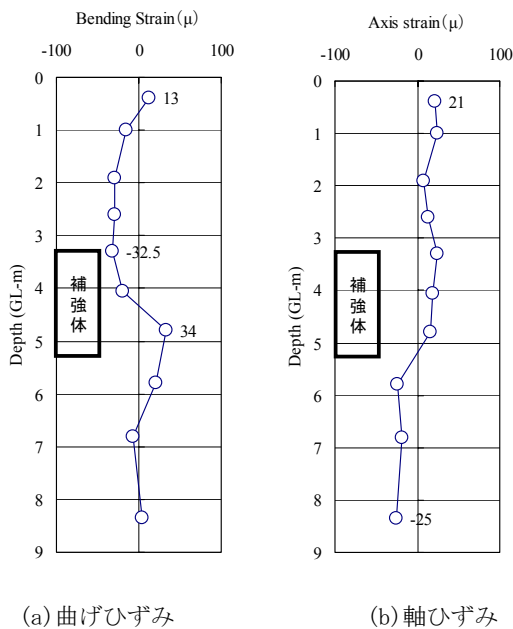


図-14 施工期間中の変化量

② 起振機試験により、1～15Hzの加振周波数に対して水平加振時で2から3割、鉛直加振時で3～4割程度の変位抑制効果があることがわかった。

③ 補強体造成中の杭体の計測結果から高圧噴射施工が杭に与える影響は小さいことがわかった。

④ 掘削による補強体観察により、計画通りの寸法が造成されていること、補強体と杭がよく密着していることを確認した。また、補強体の圧縮試験結果から設計強度を十分満足する強度を有していることがわかった。以上のことから、本工法の実構造物への適用は十分可能であることを確認した。今後は、これらのデータをもとに、地盤状況、杭基礎、補強体の仕様等の影響について詳細に検討し、簡易設計法の確立を目指す。

参考文献

- 1) 足立, 浦野, 三原: 液状化時の杭基礎構造物の挙動および補強方法に関する一検討, 第47回地盤工学シンポジウム, pp.187-192, 2002.
- 2) 土質工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983
- 3) 井上, 永井, 田中, 境, 加藤, 簗口: 変圧器起訴の振動試験, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.407-408, 1996.

Full-Scale Model Test for Earthquake Resistant Reinforcement Method for Pile Foundations Based on Ground Solidification Techniques

Yuji ADACHI, Kazuhiko URANO, Takao SAKUMA, Shuzo SUEHIRO and Makoto KAWAMURA

Applications of earthquake resistant reinforcement methods to pile foundations are limited because of various unfavorable construction conditions. The authors proposed a new method for the earthquake resistant reinforcement which is applicable to both new and existing pile foundations, and was confirmed by model shaking table tests under 1.0g gravitational field and numerical simulation analyses. A full-scale model test of the proposed method was conducted to examine the construction performance and the quality of reinforcement body in the pile foundation. The full-scale test includes horizontal load tests, vibration tests, and excavation of the reinforcement body for observation. Based on the test results, applicability of the proposed reinforcement method for a real pile foundation was confirmed.