

## 高耐力マイクロパイルを用いた亀戸給水所配水池基礎の耐震補強

相良昌男 笹谷輝勝  
中野浩之<sup>\*1</sup> 岡野幹雄

### 概 要

東京都水道局亀戸給水所配水池を耐震診断した結果、耐震補強が必要と判定された。当施設の基礎部の補強を検討した際、配水池外周からの補強は配水管等により困難な状況で、配水池内からの補強が必要であったが、狭隘かつ高さ制限がある等の施工制約条件が課題となった。これらの課題を解決するため、既設基礎の耐震補強工法として高耐力マイクロパイル工法(HMP)が採用された。本報告では、課題克服のために行われた HMP の新しい施工手順とその妥当性を確認するための施工管理および引抜き試験について紹介する。その結果、施工管理結果は良好で、引抜き試験結果から杭性能についても十分に満足していることが確認された<sup>1),2)</sup>。

### Seismic Retrofit of the Kameido Water Service Station in Tokyo using HMP (High-Capacity-Micropile)

#### Abstract

The seismic capacity of the Kameido Water Service Station in Tokyo was evaluated, and it was concluded that seismic retrofit was necessary. Retrofitting the foundations from outside the facility would have been extremely difficult due to the number of pipes buried around the facility. However, reinforcement from within the facility was also difficult due to the relatively small working space available. To solve these problems, HMP(High-Capacity-Micropile) was selected to retrofit the existing foundations.

In this paper, a newly developed method for installing HMPs was outlined, and the results of execution control performance and pull-out test results of the piles confirmed the practical applicability of this method.

キーワード: 高耐力マイクロパイル, 配水池,  
耐震補強, 斜杭, 施工事例

\*1 東京支店

## §1. はじめに

兵庫県南部地震以後、既設構造物の耐震補強の必要性が高まり、最近では新潟県中越地震、福岡県西方沖地震等、全国各地で地震が多発しており、構造物への耐震補強は急務となっている。

東京都水道局亀戸給水所配水池(以下、配水池と略)は、1970 年に完成された半地下形式の RC 構造物で、当施設は震災時の応急給水拠点かつ広域避難所である(写真 1, 写真 2 参照)。兵庫県南部地震を期に改定された「水道施設耐震工法指針・解説(日本水道協会)」に基づき同施設を診断した結果、構造的な耐震補強が必要と判定された。対策として、配水池本体の補強は耐震壁の増設と中壁の壁厚を増す工法が採用された。

一方、基礎部の補強については、配水池のような面状構造物では、国内ではほとんど事例がなかった。また、当施設の基礎部の補強を検討した際、配水池周辺には配水管および用地境界等の問題から、配水池外周からの補強は困難な状況であり、配水池内からの補強が必要であった。しかしながら、配水池内からの補強については、狭隘かつ空頭制限がある等の厳しい施工制約条件が課題となっていた。これらの課題を解決するため、当施設の既設基礎の耐震補強工法として高耐力マイクロパイル(以

下、HMP)工法が適用された。

本報告では、課題克服のために行われた HMP の施工方法とその妥当性を確認することを目的として行われた施工管理方法と結果について紹介する。

## §2. 東京都水道局亀戸給水所配水池の概要

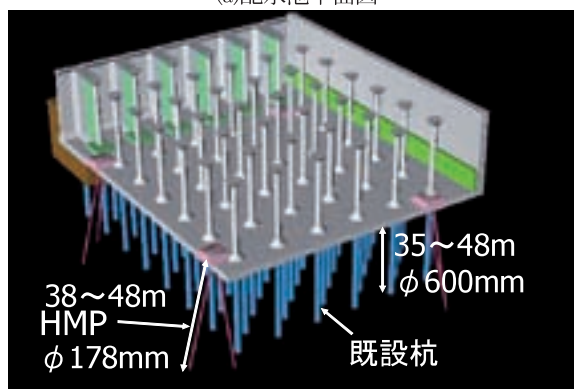
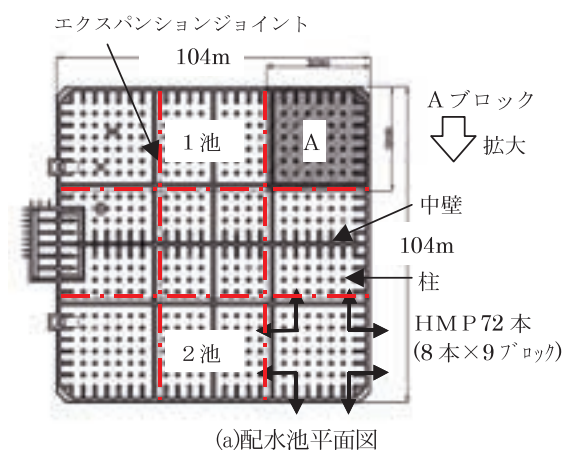
当配水池は、縦横約 104m、深さ約 7m、貯水量 60,000m<sup>3</sup>の水を供給する 2 つの池からなる。基礎には長さ 35m~48m の PC 杭  $\phi$  600 が約 1700 本、2m 間隔で千鳥配置されている。配水池は中壁で 16 室に区切られ、構造上はエクспанションジョイントにより 9 つのブロックに分かれている。地層は、深度 35m までは軟弱で、 $N$  値 0~3 の有楽町層が存在する。既設杭は深度 35m の段丘砂礫層に支持されているが、建設当時の施工記録によると既設杭 1700 本の内、61 本は杭長が 48m であり、施工中に第 1 支持層を突き抜けて第 2 支持層である東京礫層に達している。配水池での HMP の施工は、9 つのブロック毎の 4 隅 4 箇所において、打設角度 15°、長さ約 38~48m の HMP を既設杭の間に縫うように 2 本ずつ打設する。すなわち、1 ブロックに 8 本施工するので、合計 8×9 で 72 本(L=38.3m×48 本、L=48.3m×24 本)の施工となる(図 1 参照)。



写真 1 亀戸給水所配水池の全景(上部から撮影)



写真 2 亀戸給水所配水池(地上部から撮影)



(b)補強イメージ(A ブロック拡大図)  
図 1 配水池平面図と補強イメージ

### §3. 施工上の課題

#### 3.1 既設杭とHMPの接触と施工精度

HMP( $\phi 200$ )は既設杭( $\phi 600$ )が2mの千鳥配置で存在する中、1mの水平離隔位置に38～48mの深さで斜杭を施工する。HMPの施工精度は $\pm 1$ 度であるが、既設杭に芯ずれ(許容値最大  $D/4D$  は杭の直径)や傾斜(許容値最大  $1/100$ )があった場合、削孔時に既設杭を損傷することが懸念される。HMP工法で標準的に用いられている高強度鋼管は油井鋼管であり、継ぎ手はネジ式機械式継ぎ手で、鋼管を継足しても直線性は失われず、その施工精度は良い。

しかしながら、本工事におけるHMPは約50mとそれまでの施工実績を上回る長杭でしかも斜杭であることから、地中内で直進性が失われることも懸念される。すなわち、削孔機の据付に十分に配慮して施工を実施したとしても、著しく長い斜杭であるため、自重と材料の性質により直進性の精度が低下し、その結果、HMPと既設杭が接触する可能性もありうると考えられた(図2参照)。

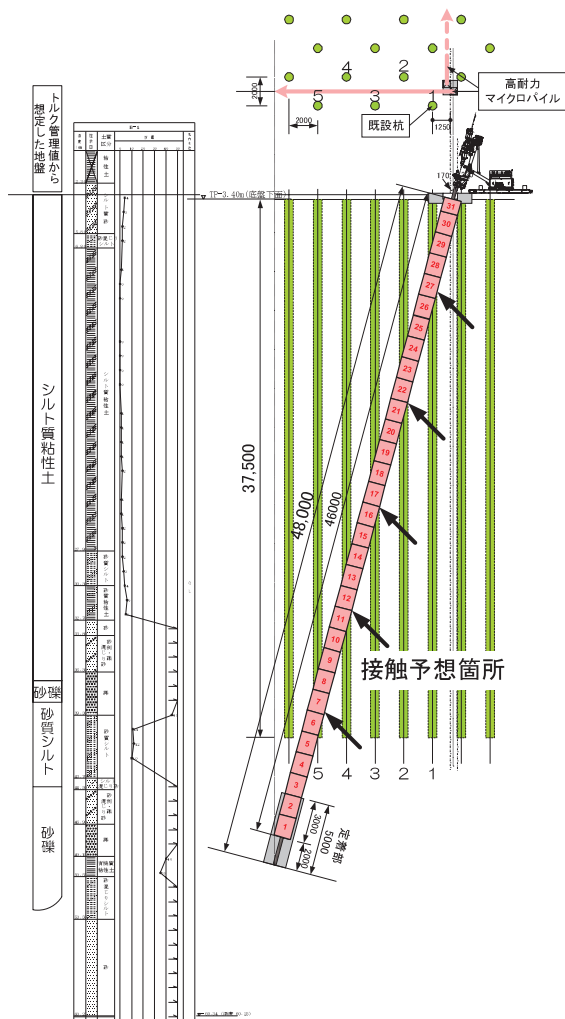


図2 地盤および既設杭とHMP(48m)の位置の例

#### 3.2 削孔機の施工能力

狭隘な空間なため機械の大きさは制限を受ける。また、配水池内での作業のため、削孔機のディーゼルエンジン等による排気ガスの排出を避ける必要があり、配水池内での施工機械の動力源は全て電力である必要があった。このように施工機械の大きさと動力源に制限を受ける中、約50mという掘削深さを施工するため、削孔時と鋼管引抜き・回転に対する機械のトルク不足が心配された。

### §4. 対策と施工管理方法

#### 4.1 既設杭との接触対策と施工精度の確認方法

一般に、HMPは2重管削孔が行われている。当現場においてはインナー管にプラスチックビットを用い(写真3参照)、インナー管を外管よりも先行させた先行探索削孔を実施した(図3参照)。この削孔方法により、万一削孔中に既設杭とHMPが接触したとしても、プラスチックビットが損傷し既設杭の損傷は無い。また、既設杭との接触およびHMPの施工精度を確認するため、一般施工管理項目<sup>3)</sup>に追加して、下記の3項目を実施した。



写真3 プラスチックインナービット

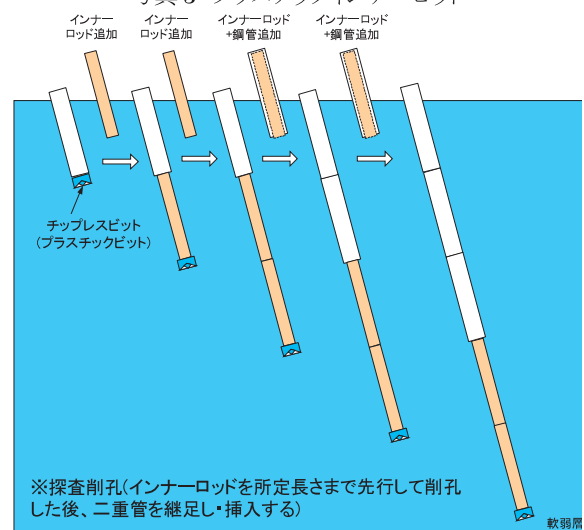


図3 先行探索削孔方法(軟弱層)

#### 4.1.1 削孔機のトルク管理

削孔中に何かの障害物と接触した場合、削孔機に負荷が生じて回転トルク値が上昇するのは明解である。そこで、既設杭との接触の有無、支持層到達への確認を目的として、削孔機の回転トルクを計測した。

#### 4.1.2 施工中の削孔機の角度測定

削孔機に角度計を設置し、施工中の削孔角度を確認し HMP の施工精度の向上を図る。写真 4 に地盤削孔中における角度計の設置状況を示す。写真中の手書き○内に示した鋼製ボックスが角度計であり、ボックス内には水平・垂直の角度を示すセンサーが内蔵されている。

#### 4.1.3 傾斜計による出来形管理

施工完了後、斜杭 15°の HMP の出来形を把握するため、傾斜計により施工精度を確認した。

### 4.2 削孔機の施工能力向上と新しい施工手順の提案

削孔機の動力源については、その上位機種種の動力源を転用するなどの改良を加えて能力向上を図った。鋼管については、鋼管と鋼管外周の削孔泥土の屑(スライム)による削孔機械の故障・停止(ジャーミング現象)の発生を抑制するために、鋼管継手部に削孔泥土の排除を促すための突起を設けた(写真 5 参照)。加えて、削孔機の能力不足や 50m という掘削深さ分だけの水頭差によるグラウト材の脱水、硬化等々、HMP 築造のための阻害要因を回避するため、支持層での HMP 築造においては新たな施工手順を提案し(図 4 参照)、引抜き試験によりその性能を確認した。なお、標準的な施工手順については参考文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

## §5. 施工管理結果と考察

### 5.1 既設杭と HMP の接触とトルク管理

軟弱層での削孔中にコンクリートガラ等の硬い障害物に接触した場合には、削孔機の回転トルクは著しく増大する。そこで、既設杭への接触または支持層到達を確認するため、削孔機の回転トルクに着目し測定、検討した。



写真 4 角度計の設置状況

ただし、ここでは回転トルクの増減に着目しているので測定は削孔機に設置されている回転トルクの増減を表す油圧計を読み値とした。図 5 に事前の土質調査結果( $N$  値)とトルク(油圧計の読み値)の関係を示す。図から分かるように、削孔中に支持地盤に到達時の深度と回転トルクが著しく増大する深度はほぼ同一であった。その他の HMP の施工において、支持層に到達した深度に多少の前後はあったものの、全ての杭において支持層到達時と回転トルク値の増加はほぼ一致しており、支持層到達以前に既設杭と HMP の接触はなかったと判断された。また、支持層到達後は、削孔泥土を目視により確認したが、その泥土は明らかに砂礫等の地盤であり、既設杭のコンクリートの破片等は含まれなかった。このことから、軟弱層および支持層において、既設杭と HMP の接触はなかったと判断される。以上、削孔機のトルク管理は、削孔泥土の確認と併用することで、既設杭との接触確認および支持地盤到達を確認する有効な施工管理手法の一つであると考えられた。

### 5.2 HMP 杭の施工精度(杭角度)

斜杭の施工精度を把握するため、通常の杭頭部での杭角度の確認に加えて、削孔機に角度計を設置して施工中の削孔角度を確認した。図 6 に支持層到達時の角度



写真 5 鋼管継手  
(左:ジャーミング抑制用継手, 右:標準の継手)

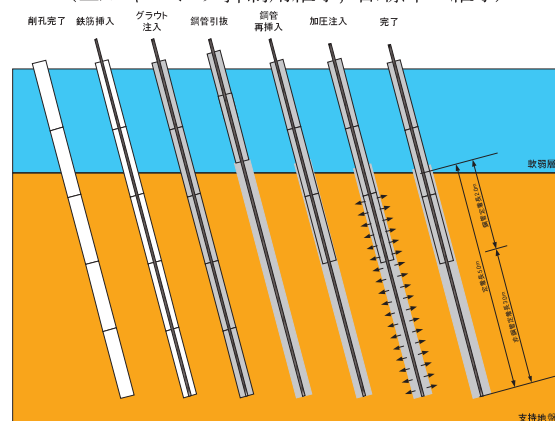


図 4 新施工手順(支持層)

計の計測結果を示す。角度の許容値は、水平方向を測定したマスト水平角は  $0 \pm 1^\circ$ 、鉛直方向を測定したマスト鉛直角は、 $15^\circ$ の斜杭であるから  $15 \pm 1^\circ$ である。図中で、角度計は軟弱層では許容値内にあったのに対して、支持層到達時は角度が大きく振れて許容値を超えていた。しかし、これは、削孔中に支持層に到達したため、削孔機のマストに振動が伝わったためであり、削孔を停止すると許容範囲内に収束した。したがって、施工中はほぼ  $\pm 1^\circ$  以内で管理基準を満たしていたと考えられる。

施工完了後、HMP の出来形を把握するため、傾斜計により斜杭  $15^\circ$ の施工精度を確認した。図 7 に傾斜計の計測結果の一例を示す。図はHMPの平面と断面の打設位置を示している。図からも明らかなように、当現場での杭長が約 38～48m 程度と長いにも関わらず、杭角度は許容値以内であり、HMP が精度良く施工されたことが分かる。また、図 7(b)から分かるように、杭はほぼ直進しており、杭先端部での自重による垂れ下がり等はほとんど無いと判断された。これは、HMP では高強度の油井鋼管を用いており、継ぎ手は目が細かいネジ式機械式継ぎ手であることから、鋼管を継足して杭を施工しても、直線性が保持されることが考えられる。以上のように、HMP は高精度で施工が可能であることが確認された。当現場では全ての杭で杭角度は  $\pm 1^\circ$ の施工精度が保たれた。この値は、一般の杭頭部での施工管理値  $\pm 2.5^\circ$ よりも良好な値であった。

### 5.3 新施工手順と引抜き試験

HMP 築造に際して、種々の阻害要因を回避するため、本工事の支持層においては、再挿入を先行して行いグラウト材を加圧注入するなど、合理的な新施工手順を提案し、引抜き試験<sup>4)</sup>により新施工手順の妥当性を確認した。引抜き試験は、以下の 2 つの試験を実施した。

- ① 設計荷重(設計時の極限引抜き力)を最大引抜き荷重とした段階載荷方式・多サイクルによる引抜き試験
- ② 許容値を最大引抜き荷重とした段階載荷方式・1 サイクルによる本杭 3 本の引抜き試験

#### 5.3.1 設計荷重(設計時の極限引抜き力)を最大引抜き荷重とした引抜き試験

当現場における HMP の杭性能を把握するため、HMP の設計荷重(極限荷重 1730kN)を最大荷重とした杭の引抜き試験を実施した。試験に供した試験杭は杭長 38m の斜杭である。載荷方法は 10 段階・4 サイクルで実施した。最大載荷荷重については、計画時には設計時の極限荷重である 1730kN を設定していた。しかしながら、載荷試験中において設計荷重 1730kN 以上の引抜き力を有することが明確であると判断されたので、1600kN の

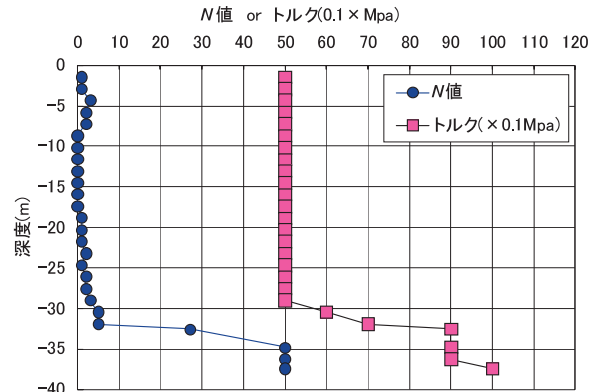


図 5 N値と削孔時の回転トルク

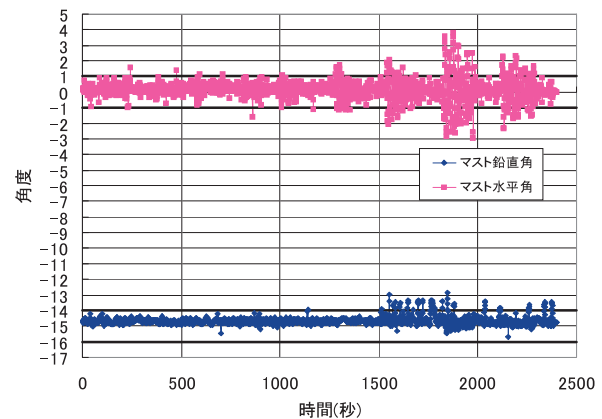
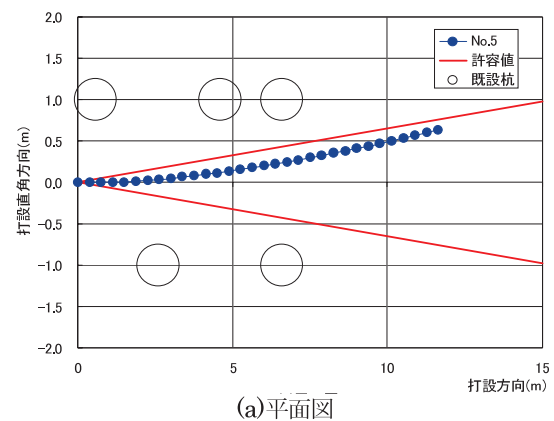
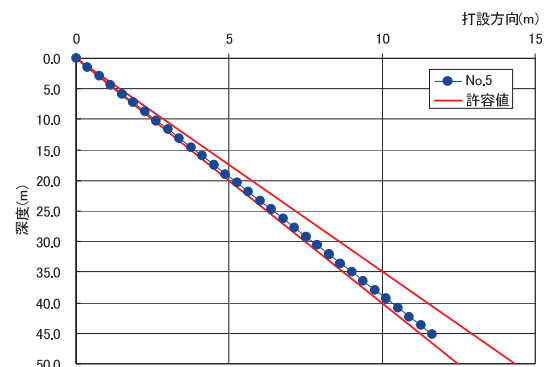


図 6 支持層到達時の角度計計測結果  
(計測時間 1500 秒過ぎて支持層到達)



(a)平面図



(b)断面図

図 7 傾斜計測定結果( $15^\circ$  , 杭長 48m)

次の荷重段階を 1800kN とし、それ以降 2000kN まで載荷を実施した。

図 8 に荷重～変位量曲線(P～S 曲線)を示す。図から明らかなように、引抜き荷重(2000kN)は、設計荷重(極限荷重 1730kN)以上の値を示しており、当現場で施工した HMP が求められる性能を十分に満足していることが確認された。本試験において、引抜き荷重 2000kN は、図示していないが S-logt 曲線図において第 1 限界抵抗力に僅かに近づいていると思われたが、明確な判断を得ることはできなかった。したがって、第 1 限界抵抗力、第 2 限界抵抗力のいずれも 2000kN 以上であると判断された。

### 5.3.2 許容値を最大引抜き荷重とした引抜き試験

本杭についても 3 本(HMP の杭長 48m を 2 本、38m を 1 本)を試験対象として、許容値を最大引抜き荷重とし、段階載荷方式・1 サイクルにより引抜き試験を実施した。なお、ここで設定した許容値すなわち最大引抜き荷重とは、設計時の極限引抜き力(1730kN)に安全率を考慮した 577kN である。

試験結果の一例を図 9 に示す。図からも分かるように、荷重と変位はほぼ直線を示す傾向にあり、試験終了後、除荷時の残留変位は、0.3～0.7 mm 程度と本試験が弾性域内で実施され、試験終了後も HMP は機能回復したと考えられる。解析手法の詳細については割愛するが、地盤を完全な弾性体と見なした弾性線形解析結果(図中の△印)よりも試験結果の方が大きく、弾性域内では試験に供した HMP が大きな支持力を有しており、極限引抜き力の 1/3 の荷重レベルまでではあるが、HMP の杭性能が確認された。

## §6. まとめ

以上のように、HMP の施工精度は良好で、なおかつ、既設杭との接触は無かった。また、新たに提案した施工手順については、引抜き試験によりその性能が確保されていることが確認された。

今後は、引続き、新しい施工手順で築造した HMP の試験結果を蓄積し、更に合理的な施工方法の確立に努めたい。

**謝 辞** 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた東京都水道局およびフジタ亀戸給水所配水池基礎耐震補強及び場内整備工事の関係各位に深謝いたします。

### 参考文献

- 1) 笹谷輝勝, 相良昌男, 林 順也, 芦田嗣大; 高耐力マイクロパイルを用いた亀戸給水所配水池基礎の耐震補強((1)課題と対策), 土木学会全国大会第 60 回年次学術講

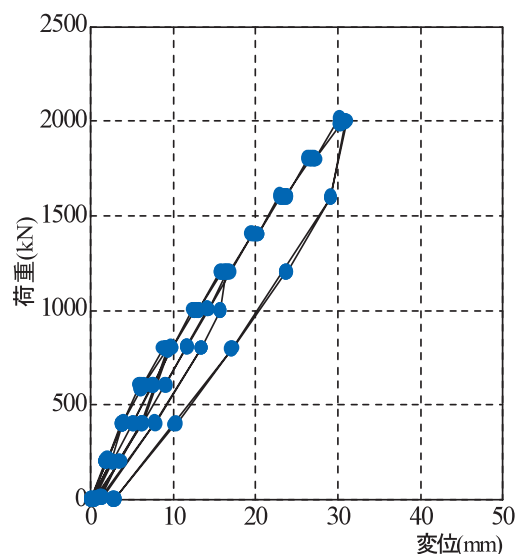


図 8 荷重(P)・変位(S)関係図

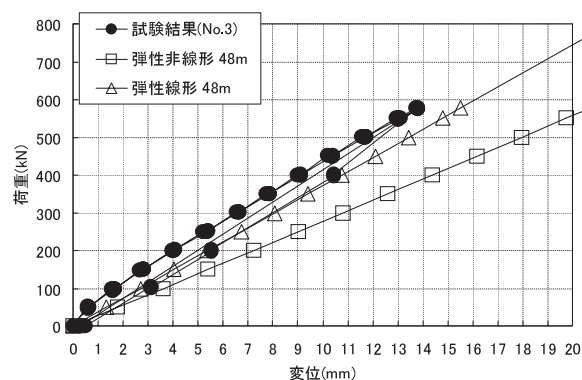


図 9 荷重・変位(HMP48m)

演会, 6-248, 2005

- 2) 相良昌男, 中野浩之, 林 順也, 芦田嗣大; 高耐力マイクロパイルを用いた亀戸給水所配水池基礎の耐震補強((2)施工管理結果), 土木学会全国大会第 60 回年次学術講演会, 6-249, 2005
- 3) 独立行政法人土木研究所他; 既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書(その3), 高耐力マイクロパイル工法設計・施工マニュアル(6 分冊の 2)2002.9
- 4) 地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説一第一回改訂版一, pp105-132, (社)地盤工学会, 2002.5



相良 昌男

### ひとこと

本論文が HMP の施工および研究開発の一助になれば幸いです。また、HMP の更なる開発に努めたいと思います。