

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¹・中野 浩之²・笹谷 輝勝¹

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

²正会員 工修 株式会社フジタ 東京支店 土木技術部（〒151-8503 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2）

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^{1), 2)}。

キーワード：高耐力マイクロパイル，耐震補強，配水池，斜杭，施工事例

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



写真-1 亀戸給水所配水池の全景（上部から撮影）



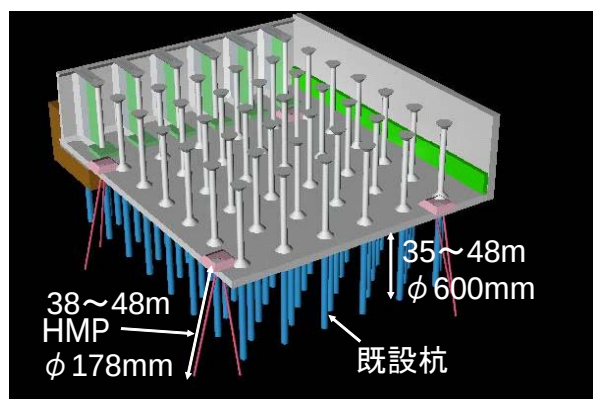
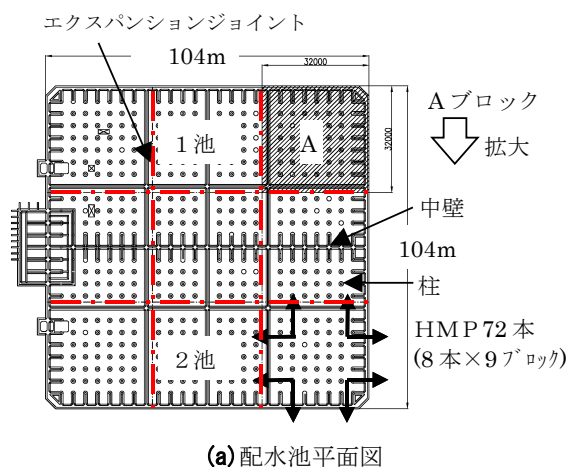
写真-2 亀戸給水所配水池（地上部から撮影）

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60,000m³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φ600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、M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を既設杭の間を縫うように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)。



(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

(1) 既設杭とHMPの接触と施工精度

HMP(φ200)は既設杭(φ600)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±1度であるが、既設杭に芯ずれ(許容値最大D/4;D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)。

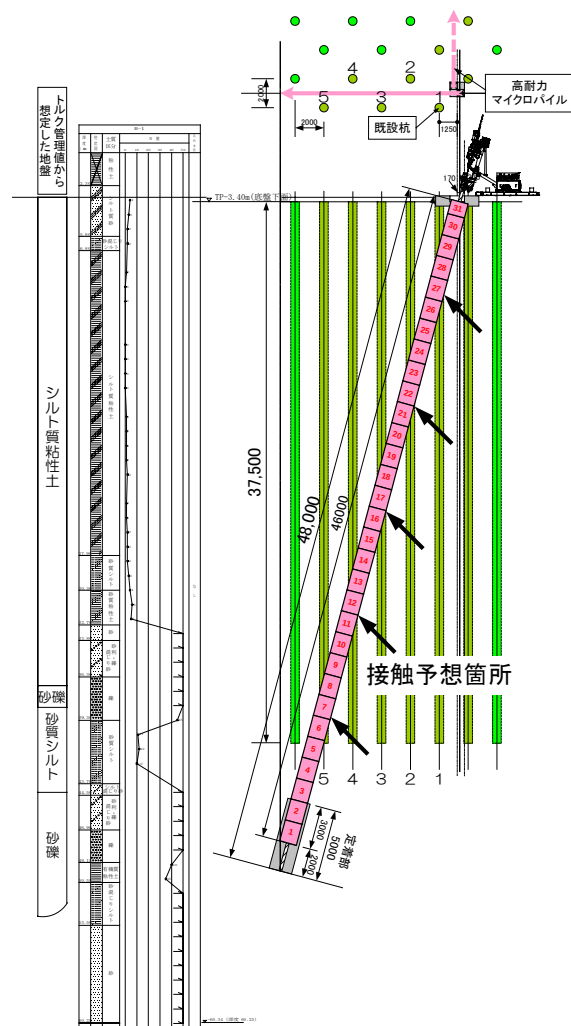


図-2 地盤および既設杭とHMP(48m)の位置の例

(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

(1) 既設杭との接触対策とHMP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査削孔を実施した(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³⁾に追加して、下記の3項目を実施した。

a) 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。

b) 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。

c) 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。

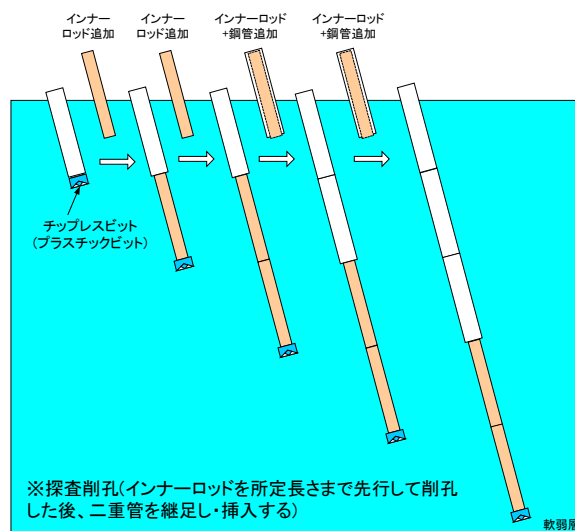


図-3 先行探査削孔方法(軟弱層)



写真-4 角度計の設置状況



写真-3 プラスチックインナービット

(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、削孔機的能力不足や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文献³⁾を参照されたい。



写真-5 鋼管継手

(左;ジャミング抑制用継手, 右;標準の継手)

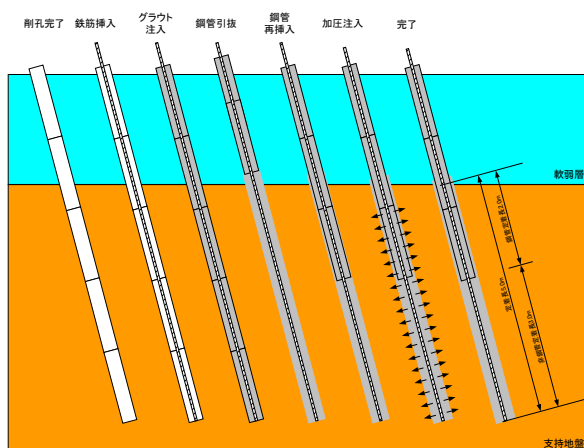


図-4 新施工手順(支持層)

5. 施工管理結果と考察

(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．ただし、ここでは回転トルクの増減に着目しているため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．

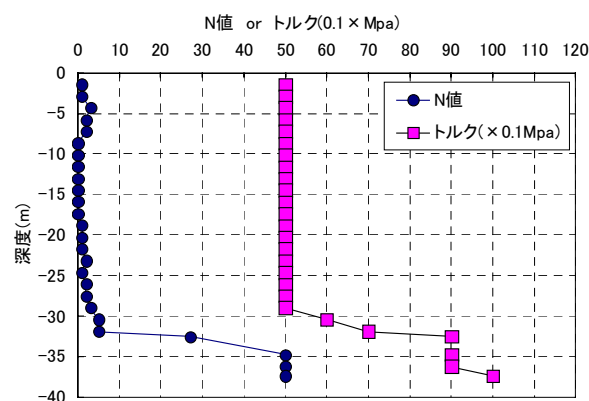


図-5 N 値と削孔時の回転トルク

(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° 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

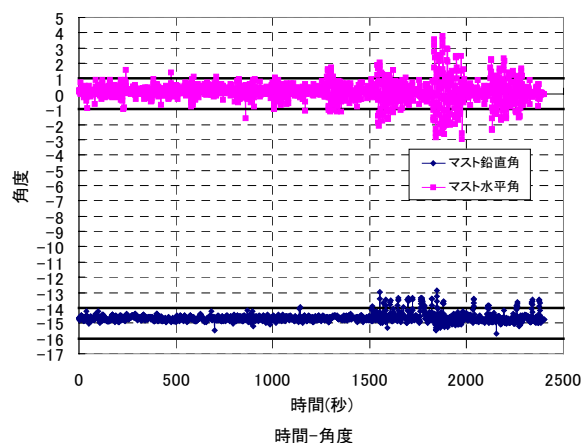


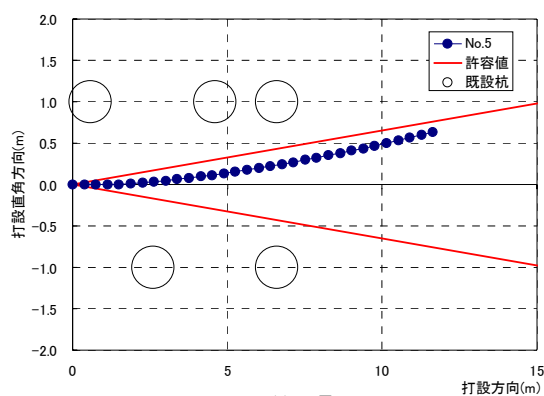
図-6 支持層到達時の角度計計測結果
(計測時間 1500 秒過ぎで支持層到達)

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。

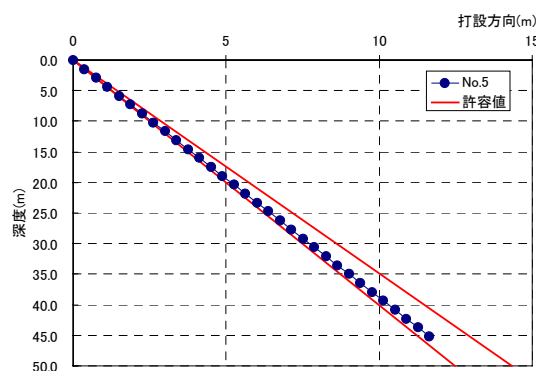
施工完了後、HMPの出来形を把握するため、傾斜計により斜杭 15° の施工精度を確認した。図-7に傾斜計の計測結果の一例を示す。図はHMPの平面と断面の打設位置を示している。図からも明らかなように、当現場での杭長が約38~48m程度と長いにも関わらず、杭角度は許容値以内であり、HMPが精度良く施工されたことが分かる。また、図-7(b)から分かるように、杭はほぼ直進しており、杭先端部での自重による垂れ下がり等はほとんど無いと判断された。これは、HMPでは高強度の油井鋼管を用いており、継ぎ手は目が細かいネジ式機械式継ぎ手であることから、鋼管を継足して杭を施工しても、直線性が保持されると考えられる。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

(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



(a) 平面図



(b) 断面図

図-7 傾斜計測定結果(15° , 杭長 48m)

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⁴⁾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

a) 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。

図-8に試験に供した試験杭を示す。

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。

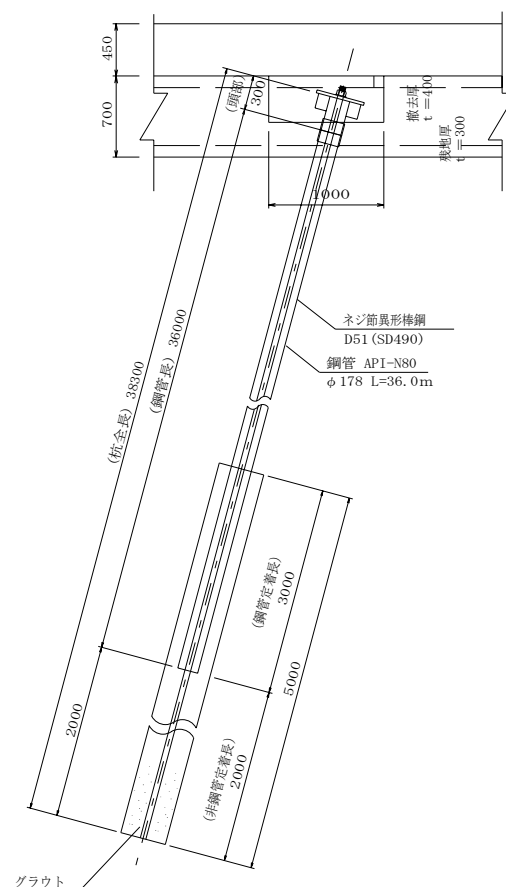
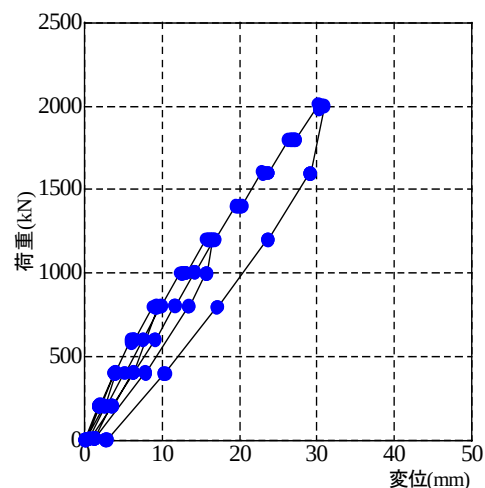
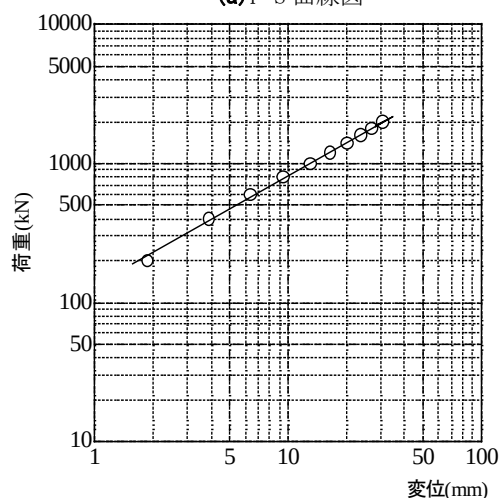


図-8 高耐力マイクロパイル試験杭の断面図

図-9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。



(a) P-S 曲線図



(b) logP-logS 曲線図

図-9 荷重(P)～変位(S)関係図

b) 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-10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、0.3～0.7mm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。

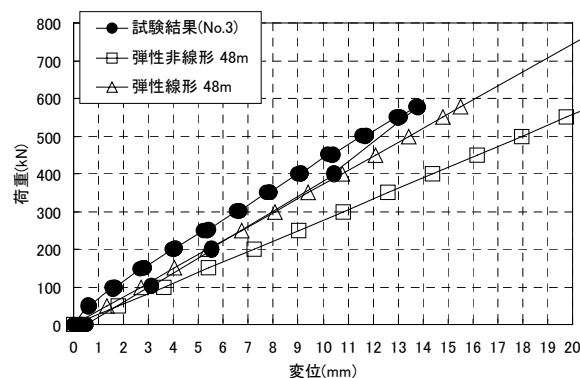


図-10 荷重-変位(HMP48m)

6. まとめ

以上のように、HMPの施工精度は良好で、なおかつ、既設杭との接触はなかった。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。

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―第一回改訂版―, pp105-132, (社)地盤工学会, 2002.5