

地盤固化工法を用いた 水管橋の杭基礎耐震補強事例

八木原 義哲¹・竹内 清²・柴田 正行³・浦野 和彦⁴・足立 有史⁴

¹正会員 東京都水道局 東部建設事務所（〒160-0004 東京都江東区亀戸4-28-1）

²正会員 大豊建設㈱ 東京支店（〒160-0004 東京都中央区新川1-24-4）

³正会員 ハザマ 関東土木支店（〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5）

⁴正会員 ハザマ 技術研究所（〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1）

東京都水道局の「綾瀬川水管橋」は、綾瀬川を横断するφ2,200 mmの重要な配水管であり早急な耐震が必要であった。水管橋下部構造の耐震補強については、近接する構造物（首都高速橋脚基礎、河川護岸等）等の制約条件から、従来工法である増し杭工法の補強が困難な状況にあった。

そのため、地盤固化工法を用いた新しい杭基礎耐震補強工法である CPR 工法と増し杭工法との併用により耐震補強を実施した。CPR 工法とは、杭の中間深さ付近の地盤をセメントなどの固化材で改良し、地震などの水平力に対して抵抗力の高い杭と補強体の複合構造体を築造する工法である。

極めて制約された施工条件の中で、適切な施工管理を行うことにより、初期の目的を達成する杭基礎の耐震を無事施工することができた。

キーワード：耐震補強，杭基礎，水管橋，地盤改良，CPR工法

1. はじめに

近年、阪神・淡路大震災による地震動レベルの見直しや今後想定される東海地震や首都圏直下型地震などの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。

水道施設についても、大規模地震が発生しても早期の応急給水ができる体制を整えるため、水管橋や浄水場などの耐震補強に取り組んでいる。特に水管橋については、橋脚の耐震補強とともに、増し杭や地盤改良などによる基礎の耐震補強も進められている。

本補強工事は、東京都金町浄水場から足立区と北区の一部約56万人に送水する鹿浜線の内、1日たりとも断水できない重要路線で、綾瀬川を横断している綾瀬川水管橋（図-1、写真-1参照）を大地震にも耐えられるよう耐震補強を行うものである。

補強工事は、水管橋全体の補強を考えて、上・下部構造に対して実施された。上部工は耐震継手や落橋防止装置等の設置、また、下部工については、橋脚に対する鉄筋コンクリート巻立て工と基礎に対する増し杭工法と杭基礎耐震補強工法「CPR工法」の併用による補強を行った。ここでは主に杭基礎のCPR工法による耐震補強について報告する。



図-1 工事場所



写真-1 全景

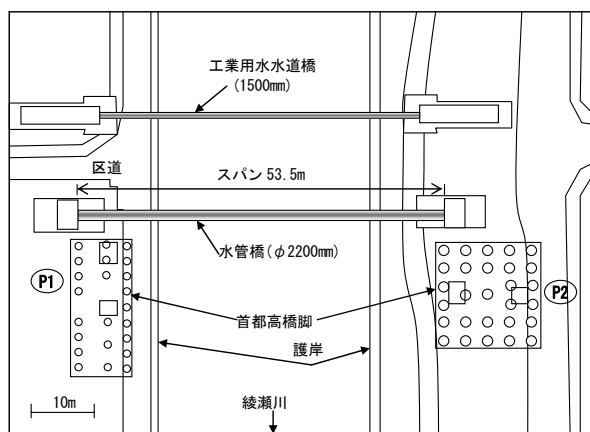


図-2 平面図

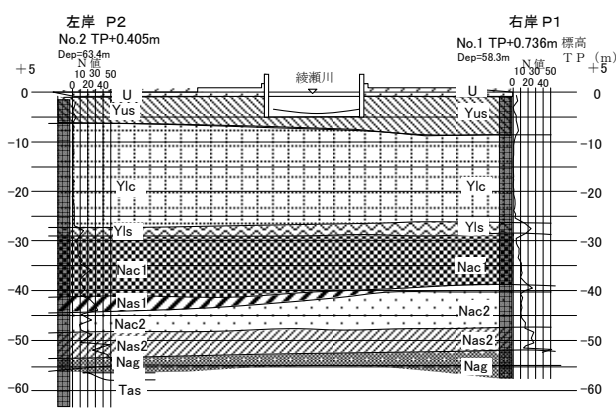


図-3 地質図

2. 工事概要

本工事は、図-2に示すように首都高速道の橋脚基礎と工業用水水道管橋の基礎及び河川構造物との近接、加えて上空の首都高速道上部工により空頭制限を受けることなど極めて制約された条件下で施工するものである。

以下に工事概要を示すが、工事内容については基礎の耐震補強工事のみについて記述している。

工事名称：綾瀬川水管橋(φ2200mm)耐震補強工事
 企業者：東京都水道局 東部建設事務所
 施工会社：大豊建設(株) (CPR工法施工担当ハザマ)
 施工場所：東京都足立区西加平1-4・加平2-2
 工期：平成16年4月21日～平成18年2月24日
 工事内容：

①P1橋脚

増し杭：場所打ち杭 (φ1.2m, L=49.8m) 4本
 地盤改良：MJS工法519.4m³, RJP工法352.8m³

②P2橋脚

増し杭：場所打ち杭 (φ1.2m, L=49.8m) 4本
 地盤改良：MJS工法668.9m³, RJP工法302.4m³

表-1 地質内容

地 層 名		記号	層 相
埋土層		U	瓦礫、アスファルト塊を混入する粘性土からなる埋土。
上部 有楽町層	砂質土	Yus	粒子不均一な細粒砂で、シルトを不規則に混入し、介在する。貝殻片を少量混入する。
下部 有楽町層	粘性土	Ylc	極めて軟質なシルトで、細粒砂を少量混入し、薄層状に介在する。
	砂質土	Yls	粒子不均一な細粒砂で、シルトを不規則に混入する。
七号地層	第1 粘性土	Nac1	含水少なく、凝固～半固結状なシルトで微細～細粒砂を混入し、No. 2 地点では細粒砂 (N=24) を挟在する。
	第1 砂質土	Nas1	粒子不均一な細粒砂でNo. 2 地点ではシルトを挟在する。
	第2 粘性土	Nac2	含水やや少なく、凝固状なシルトで、細粒砂及び腐植土を介在する。
	第2 砂質土	Nas2	粒子不均一な細粒砂で、腐植物及び褐色のシルトが介在する。
	礫質土	Nag	φ2～30mm 程度の円礫～亜円礫が主体で、マトリックスは細粒～中粒砂である。最大礫径はφ60mm。
東京層群 高砂層	粘性土	Tac	No. 2 地点の GL-56. 80～58. 15m 間に挟在するシルト・腐植土で、凝固状を呈する。
	砂質土	Tas	No. 2 地点の GL-58. 15m 以深に分布する粒子がほぼ均一な微細粒砂で、所に凝灰質シルトが介在する。下部は、シルト混じり細粒砂を呈する。

3. 設計

(1) 杭基礎の補強方法の選定

図-3及び表-1に水管橋周辺の地質概要を示すが、表層から液状化層である砂質土層 (Yus)、その下がN値1の軟弱な粘性土層 (Ylc) という構成になっている。

レベル1、レベル2地震動について震度法、地震時保有水平耐力法によって実施した耐震診断の結果、下部構造については、地盤の液状化対策、基礎の耐震性の向上、柱部材 (橋脚) の耐震性向上が必要となった。

基礎の補強方法を選定する上での制約条件および施工条件として、以下の5項目が考慮された。

- ①首都高速道の橋脚基礎に近接している。
- ②工業用水の水管橋基礎に近接している。
- ③近接する区道への占用を極力少なくすること。
- ④河川構造物に影響を与えないこと。
- ⑤上空に首都高速道があり、空頭制限を受ける。

本基礎に増し杭工法を適用した場合、P1、P2橋脚ともに設計上12本の増し杭が必要であったが、実際には首都高速道側には増し杭は施工できず、工業用水水管橋側に4本のみ増し杭が施工可能であった。そのため、占用面積が増えず、狭隘な場所でも施工可能で周辺への影響も小さいCPR工法の採用が提案された。そして、増し杭工法とCPR工法の併用案とCPR工法単独案との比較検討を行った結果、経済性とこれまでの施工実績から増し杭工法とCPR工法の併用案が最終的に採用された。

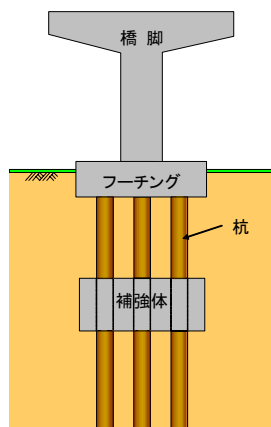


図-4 CPR工法概要図

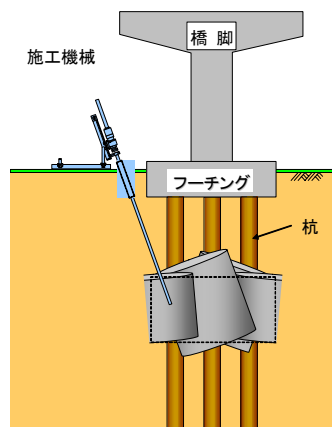


図-6 CPR工法施工概略図

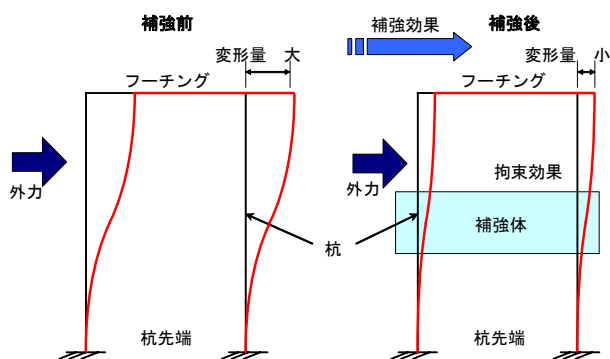


図-5 CPR工法の補強原理



写真-2 補強体掘削状況 (実大実験) ²⁾

(2) CPR工法の概要

CPR (Confining Pile Reinforcement)工法は、図-4に示すように、杭の中間深さ付近の地盤をセメント等の固化材で改良し、杭を包含する厚さ2～6m程度の板状の補強体（改良体）を造成する。この補強体により複数の杭が拘束され、図-5に示すように、杭と補強体からなる2層ラーメン構造をなし、地震等の水平力に対して抵抗力の高い構造体が構築される。

補強体の造成には、図-6に示すように、既存の地盤改良工法である高圧噴射攪拌工法を使用するため、以下のような特徴がある。

- ① 物理的な制約を受ける場合に有効：増し杭工法等の従来工法で必要なフーチングの拡幅では占用面積等に制約を受け、施工が不可能な場合には有効である。
- ② 厳しい施工条件にも対応可能：小型施工機（ボーリングマシン程度）による地上からの施工のみであるため、空頭制限や敷地制限などの厳しい施工条件にも適している。
- ③ 幅広い設計条件に適用可能：セメント等固化材で補強体を造成することから、補強体の厚さ、位置の調整により、適切な補強効果の設定が可能である。

る。

本工法の補強効果については、振動台実験¹⁾や実大杭基礎模型を用いた水平載荷試験²⁾などにより確認している。また、施工性については、写真-2に示すように、実大実験における試験施工で高圧噴射攪拌工法（MJS工法）による斜め施工で造成した補強体（平面寸法3.8m×3.8m、厚さ2m）を掘り出し、補強体の出来形と品質を確認した²⁾。

(3) CPR工法の設計

今回のCPR工法の設計は2次元動的有限要素法により実施し、レベル1地震動に対して杭の鉄筋応力及びコンクリート応力が許容応力以内に収まるように補強体の位置、厚さを決定した³⁾。ここで、補強体の位置は軟弱層の中間付近、また、補強体の厚さは曲げや引張等による応力集中が補強体に起こらないように厚さ T と幅 W の比 T/W が0.5～2の範囲を目安に初期値を設定し、図-7に示すように基準値を満足するまで繰り返し計算を行った。

解析結果より、補強体の寸法は、図-8に示すように、平面寸法はフーチングと同じで、厚さは $P1$ 、 $P2$ 橋脚ともに6.0mとした。補強体の設計強度は、粘性土地盤である

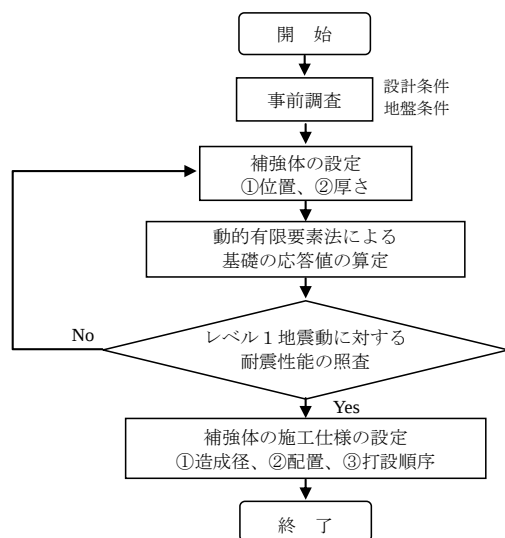


図-7 CPR工法における設計フロー

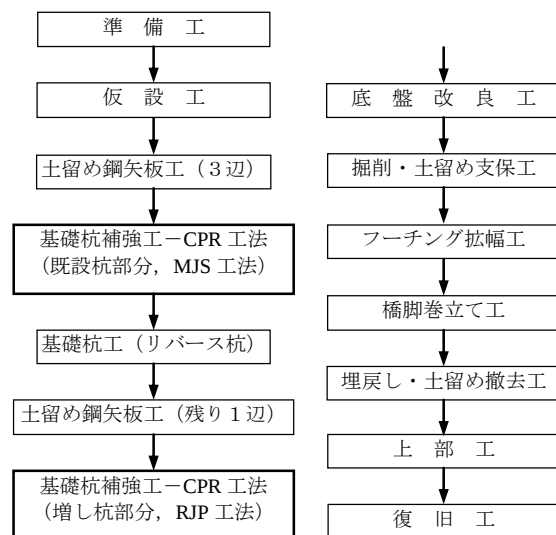
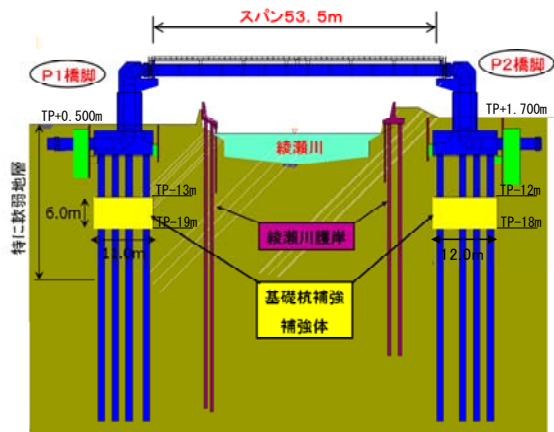
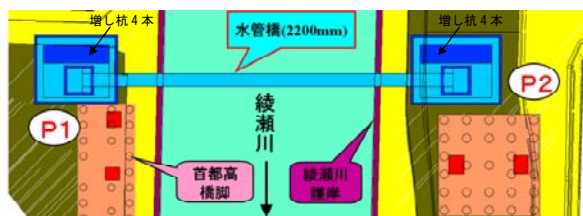


図-9 耐震補強工事の施工フロー



(a)断面図



(b)平面図

図-8 補強概要

ため、 1.0MN/m^2 とした。また、CPR工法と併用して増し杭（場所打ち杭、杭径1.2m、杭長49.8m）を工業用水水管橋側に各4本施工することとした。

4. 施工

(1) 施工手順

a) 概要

耐震補強工事全体の施工フローを図-9に示す。また、

CPR工法の全体工程（平成16年12月～平成17年7月）を表-2に示す。

既設杭部分のCPR工法補強体は高圧噴射攪拌工法（MJS工法）による斜め施工で造成した。そして、増し杭部分は高圧噴射攪拌工法（RJP工法）による鉛直施工で造成した。なお、CPR工法では鋼矢板は通常不要であるが、今回は増し杭及びフーチング拡幅のための土留めとして周辺に打設した。

以下に、MJS工法とRJP工法による施工概要について示す。

b) MJS工法による施工

MJS（METRO JET SYSTEM）工法⁴⁾は、多孔管ロッドを改良深度まで削孔設置後、圧縮空気を伴った高圧硬化材を地盤中に揺動回転させながら改良体を作成する。発生するスライムを専用の排泥管にて吸引する特殊な排泥機構を有しているため、水平・斜め施工が可能である。

MJS工法の打設位置を図-10、施工状況を写真-3に示すが、削孔角度 $55\sim 63^\circ$ の斜め方向から直径3.0mの改良体をP1側20本、P2側24本を2日で1本のペースで施工した。

また、機械配置を図-11に示すが、プラントの配置に必要な最小面積は、 $30\text{m}\times 4\text{m}=120\text{m}^2$ が目安である。なお、本工事では、施工位置とプラントは同じ敷地内にあるが、距離が100m離れていても問題はない。

c) RJP工法による施工

RJP（RODIN JET PILE）工法⁵⁾は、三重管ロッドを改良深度まで削孔設置後、造成装置上段より圧縮空気を伴った高圧水、装置下段より圧縮空気を伴った高圧硬化材を噴射しながら回転引き上げし、改良体を作成する。

RJP工法（鉛直施工）の打設位置を図-12に示すが、直径3.0mの改良体をP1側15本、P2側17本を1日1本のペースで施工した。

表-2 全体工程（CPR工法）

工種		数量	単位	12	1			2			3			4			5			6			7
				20	1	10	20	1	10	20	1	10	20	1	10	20	1	10	20	1	10	20	1
P1	MJS工 φ3000	20本	514.9m ³	プラント搬入段取り							リバース杭組立・打設			鋼矢板打設									
				2日	5日						3日・10日			3日									
	RJP工 φ3000	15本	352.8m ³	MJS施工20本				プラント解体			RJPプランク段取り			RJP施工15本									
						44日			6日				4日			22日							
P2	MJS工 φ3000	24本	668.9m ³	プラント搬入段取り							リバース杭移設・打設			鋼矢板打設									
				6日							3日・11日	撤去		3日	6日								
	RJP工 φ3000	17本	302.4m ³	MJS施工24本				プラント解体			P1からP2へプラント移設			RJP施工17本									
						60日			3日				4日			22日							解体・搬出 3日

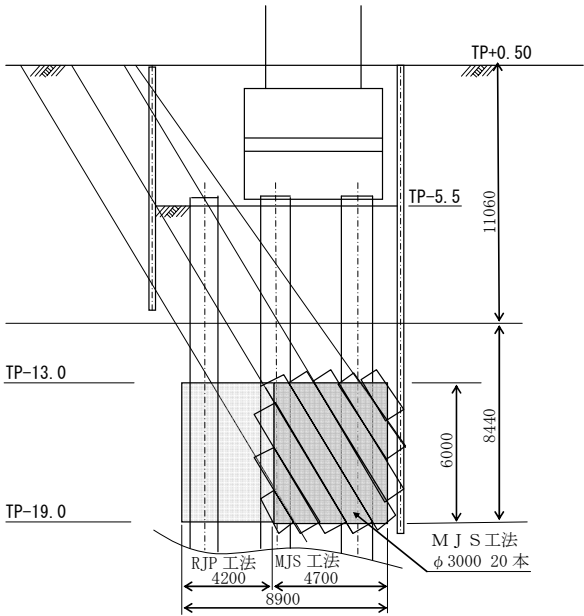


図-10 MJS工法打設位置（P1橋脚）

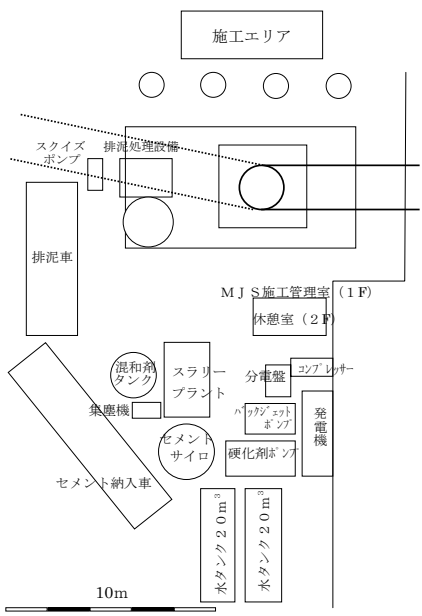


図-11 機械配置図（P1橋脚）



写真-3 施工状況（MJS工法）

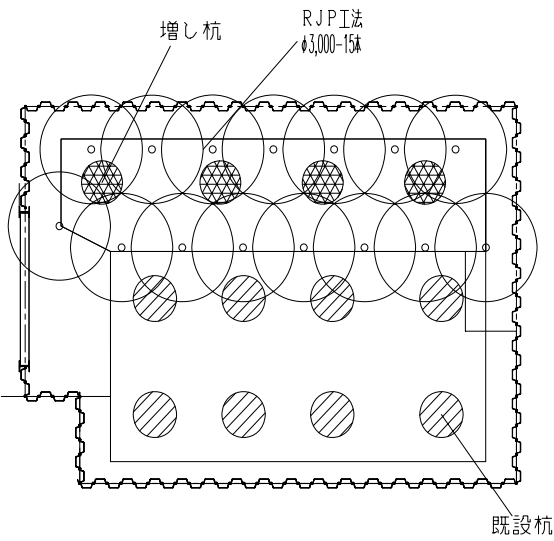


図-12 RJP工法打設位置（P1橋脚）

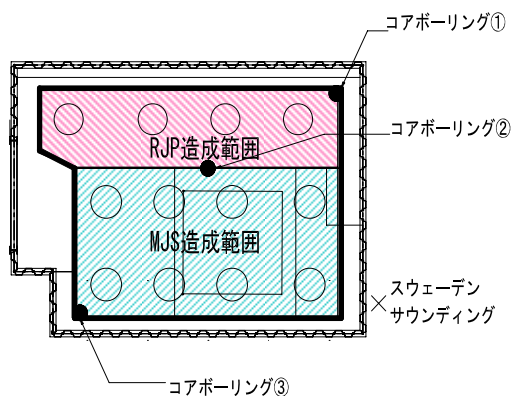


図-13 計測位置図 (P1橋脚)

(2) 品質管理

CPR工法の補強体の品質管理は、以下に示す施工管理と出来形管理によって実施する。

施工管理としては、材料等の現場確認の他に、築造管理日報（削孔・造成長、硬化材使用量・比重、硬化材・エア圧力等）及び施工管理チェックシート（削孔前・中・後の角度等）を作成して確実な管理に努めた。

補強体の出来型確認としては、補強体の位置、厚さ、強度等の確認を目的としたコアボーリングによる方法を実施した。図-13に示すように、対角点およびMJS工法とRJP工法の重なる部分の計3箇所を実施し、コア採取は補強体全層を対象とした。採取したコアの圧縮試験結果（28日強度の平均値）は、P1側が 3.65MN/m^2 、P2側が 3.29MN/m^2 で設計強度を満足しており、補強体の品質が確認された。

(3) 周辺への影響確認

補強体造成に伴う周辺への影響を確認するために、周辺地盤の変位の計測を行ったが、造成前後で変化は見られなかった。また、補強体外縁から約1.5m離れた地点で実施したスウェーデンサウンディング試験の結果を図-14に示すが、造成前後で貫入抵抗の変化が見られないことから、硬化材の浸透等による周辺地盤への影響がないことを確認した。なお、補強体造成時の騒音・振動についても計測を実施したが、騒音は73dB（基準値85dB）、振動は68dB（基準値75dB）とともに基準値以内であることを確認した。

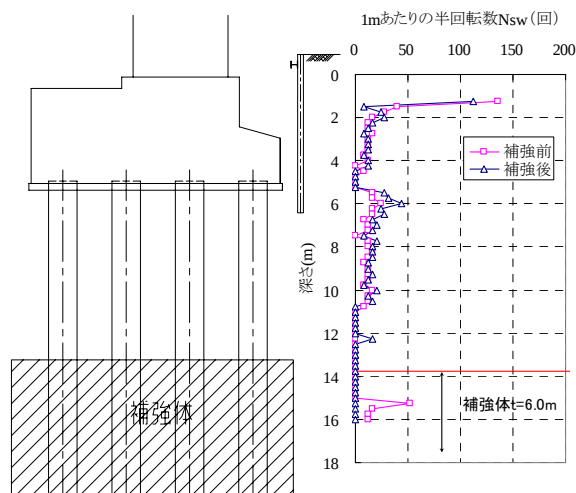


図-14 スウェーデンサウンディング試験結果

5. おわりに

本工事はCPR工法の初めての適用例であったが、極めて制約された現場条件の中、増し杭工法との併用により初期の目的を達成する杭基礎の耐震補強を無事施工することができた。また、既設の杭基礎の間に斜め施工によって補強体を造成するには、ピンポイントの施工が求められるため、本工事でも実施したが、事前の埋設物調査が重要である。

水道施設には、水管橋等まだまだ厳しい条件下での耐震補強の必要な施設が存在する。今後、ライフラインの耐震化を進めていく上で、本工事事例が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 足立有史, 河邑眞, 浦野和彦, 三原正哉: 既設杭を対象とした耐震補強工法の検討, 土木学会建設技術研究委員会土木建設シンポジウム 2004 論文集, 2004.
- 2) 浦野和彦, 足立有史, 佐久間孝夫, 丹澤宣彦, 河邑眞: 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, 土木学会建設技術研究委員会土木建設シンポジウム 2006 論文集, 2006.
- 3) CPR 工法研究会: CPR 工法技術資料, 2005.
- 4) MJS 協会: MJS 工法技術・積算資料, 2005.
- 5) RJP 協会: RJP 工法技術資料, 2005.