報 告

杭基礎耐震補強工法CPR工法による上下水道施設の補強事例

浦野和彦 *1・足立有史 *1・西尾竜文 *1・塚越浩三 *2・岡田　宙 *3

杭基礎耐震補強工法「CPR工法」は，杭周辺の地盤をセメント系の材料を用いて改良することで地震に強い杭基礎構造を構築する工法である。本工法については，水管橋や道路橋等に適用されているが，適用実績が増えるとともに工法の改良すべき点も明らかとなり，さらなる施工の効率化や高品質化を目標に工法の改良が行われている。本報では最新のCPR工法の概要および高性能の高圧噴射攪拌工法V-JET工法を用いた上下水道施設への適用事例について報告する。

キーワード： CPR工法，杭基礎，耐震補強，高圧噴射攪拌工法，上下水道

1．はじめに

東日本大震災以降，地震動レベルの見直しや今後想定される東海・東南海・南海地震等の大規模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，空頭制限等のため，補強方法が限られているのが現状である。

杭基礎耐震補強工法「CPR 工法」は，杭周辺の地盤をセメント系の材料を用いて改良することで地震に強い杭基礎構造を構築する工法である。本工法は，既存の杭基礎にも適用可能で，その施工方法や補強効果等は振動台実験や実大実験等によって確認されている[1)]。また，水管橋および道路橋の杭基礎耐震補強工事への適用事例[2,3)]もあり，適用実績は増加している。しかし，適用実績が増えるとともに工法の改良すべき点も明らかとなり，さらなる施工の効率化や高品質化を目標に，CPR 工法研究会を中心に工法の改良が行われている。

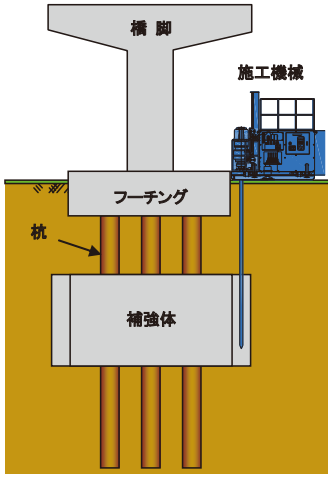
本報では最新の CPR 工法の概要および高性能の高圧噴射攪拌工法 V-JET 工法を用いた上下水道施設への適用事例について報告する。

2．杭基礎耐震補強工法「CPR 工法」

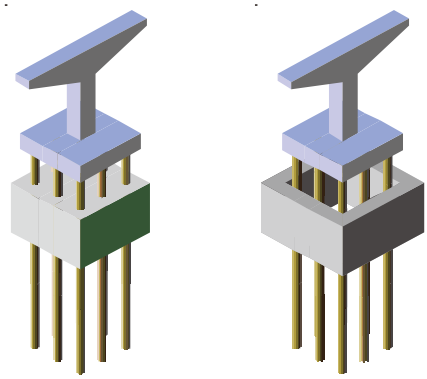
2．1　CPR 工法概要

CPR（Confining Pile Reinforcement）工法[4)]は，**図－1**に示すように，杭周辺の地盤をセメント等の固化材で改良し，杭周辺に補強体（改良体）を造成するものである。**図－2**のようにブロック状と壁状の２種類があるが，ともに補強体により複数の杭が拘束され，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。また，杭に作用する地盤変位も補強体により低減される。

補強体の造成には，地盤改良工法である高圧噴射攪拌工法を用い，小型施工機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等の制約された厳しい施工



図－1　CPR 工法の概要



(a) ブロック状補強体　　(b) 壁状補強体

図－2　補強体の概要

*1 土木研究部　*2 青山機工株式会社　*3 東興ジオテック株式会社

条件にも適している。

本工法の補強効果については，振動台実験や実大規模の施工実験・載荷試験[1]等により確認しており，補強目的や施工条件，地盤条件により適切な補強体の形状を採用している。実物件への初適用となった東京都水道局綾瀬川水管橋耐震補強工事[2]では，極めて制約された施工条件や軟弱層が非常に厚かったため，ブロック状補強体が採用された。一方，道路橋への初適用となった新潟県昭栄大橋耐震補強工事[3]では地盤条件や施工条件から施工効率等を重視して壁状補強体が採用された。また，せん断補強が必要となる場合には一般的に壁状補強体が有効であることが多い。

２．２　施工法

CPR 工法の補強体は，**表－１**に示す高圧噴射撹拌工法により造成（地盤改良）する。当初 CPR 工法に適用可能な工法は MJS 工法[5]と RJP 工法[6]の 2 工法のみであったが，検討事例および適用事例の増加とともに，現在は PJG 工法[7]等 3 工法を加え 5 工法となっている。**表－１**の①～④の工法については既に CPR 工法への適用実績があり，出来型や品質等についても実施工で確認されている。特に，④の V-JET 工法[8]は，従来工法と比べて大幅なコスト・工期の短縮が可能な工法であり，適用実績が増加している。また，⑤のファイバージェット工法[9]は，短繊維を混合することによって，引張に弱いという地盤改良体の弱点を補うことができ，今後の展開が期待される工法である。

以下に，引張に強い改良体の施工が可能なファイバージェット工法と高速施工で大口径の改良体の施工が可能な V-JET 工法の概要について示す。

(1) ファイバージェット工法

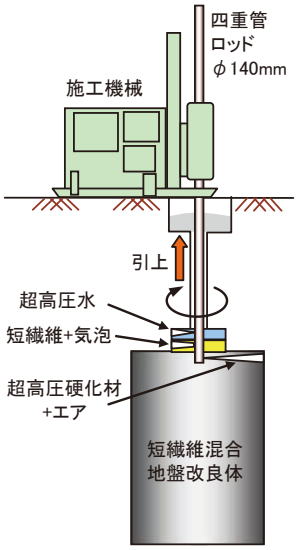
ファイバージェット工法は，**図－３**に示す短繊維を均一に混合できる施工システムを開発することによって，高圧噴射撹拌工法の地盤改良体のねばり強さ（引張強度，曲げ強度，靭性）を大幅に向上させることに成功した。

そのため，従来の高圧噴射撹拌工法に比べて改良範囲を最大２～３割減らすことも可能となり，効率的な地盤改良を行うことができる。しかも，従来の施工設備に，四重管式の特殊造成装置と「短繊維＋気泡」の供給システムを組み合わせることで施工することが可能である。

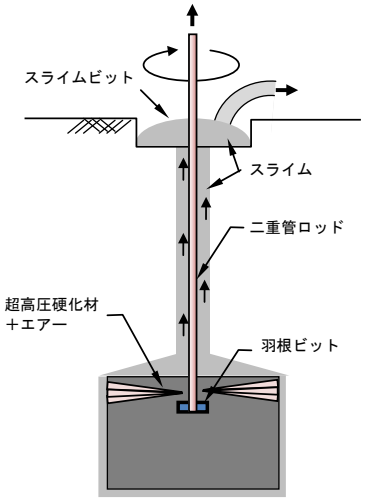
施工手順も従来工法と同様で，ボーリング削孔後に造成装置を引上げながら，①造成装置の上段噴射口から高圧水を噴射して地盤を緩めて，②中段吐出口から滑らかなシェービングクリーム状の気泡と混合した短繊維（Φ

表－１　CPR 工法に適用可能な高圧噴射撹拌工法

No.	工法名	使用ロッド	特徴
①	MJS 工法	多孔管	水平・斜め施工可
②	RJP 工法	三重管	大口径・揺動施工
③	PJG 工法	二重管	大口径・揺動施工
④	V-JET 工法	二重管	大口径・高速施工
⑤	ファイバージェット工法	四重管	短繊維混合



図－３　ファイバージェット工法の概要



図－４　V-JET 工法の概要

表－２　V-JET 工法の標準施工仕様

タイプ		V1		V2		V3	
造成仕様	硬化材噴射圧 (MPa)	35					
	硬化材噴射量 (ℓ/min)	180		360		540	
	標準造成時間 (分/m)	7	11	10	14	14	18
最大造成径 (m)		2.0	2.5	3.5	4.0	5.0	5.5

16 μ m × 12mm 程度のビニロン繊維）を注入し，③下段噴射口から超高圧硬化材を噴射することで，短繊維が均一に混合された改良体を造成する。短繊維と共に注入した気泡は硬化材に添加した消泡剤によって消泡する。

なお，出来型や品質等は実大施工実験[10]により確認されている。

(2) V-JET 工法

V-JET 工法は，**図－4** に示すセメント系硬化材の超高圧噴射により，地盤を切削し，円柱状の改良体を高速施工で造成する高圧噴射撹拌工法である。本工法で用いる施工システムでは，段差対向噴射機構を持つ特殊専用モニターにより，より効率的な切削が可能となり，施工の高速化と改良体の大径化を図っている。

V-JET 工法は従来の高圧噴射撹拌工法と比較して次のような特徴を有する。

① **表－2** に示す 3 タイプの特殊専用モニターと噴射仕様の組合せにより，改良体造成径を幅広く設置することができる。

② 直接削孔方式を採用したことにより，コンパクトな設備で効率的な施工が可能である。

③ 噴射撹拌効率の向上により，改良体積当たりの噴射量を少なくでき，排泥発生量の低減が可能である。

④ 大口径化，高速施工，排泥減量化により，従来工法に比べて大幅なコスト・工期の縮減が可能である。

3 章では V-JET 工法の上下水道施設への適用事例について示す。

3．V-JET 工法の上下水道施設への適用事例

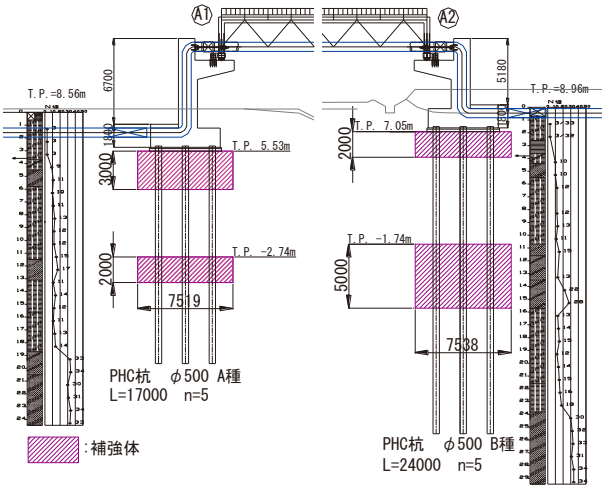
3．1　水管橋下部工への適用事例

(1) 工事概要

首都圏の水道事業者では，首都直下地震等のレベル 2 地震動（震度 6 以上）に対する水道施設の耐震診断を実施し，耐震性能を満足していない水管橋については本線・支線および口径等の優先度を考慮して耐震補強工事を順次実施している。

写真－1 に示す高井水管橋は，千葉県南房総市に位置し，橋長 59.2m の 1 径間単純トラス補剛形式で送水する水管橋（φ 700mm 送水管）である。耐震診断結果から杭基礎が耐震性能を満足することができないため，杭基礎に対する耐震補強を実施することとなった。本工事は，**図－5** に示す A1，A2 橋台が対象であり，道路等の敷地制限や上部工による空頭制限を受けること等の制約された条件下で施工することから，増し杭工法等の従来工法の適用は難しい状況であった。そこで，このような厳しい施工条件にも適用可能な CPR 工法が選定された。

写真－1　高井水管橋全景（A2 橋台側から）



図－5　高井水管橋の概要

表－3　V-JET 工法および S-RJP 工法の計画造成径

工法名	V-JET 工法	S-RJP 工法
改良対象地盤	砂質土：N 値≦ 30，粘性土：N 値≦ 3	
標準造成時間(分 /m)	10	15
標準設計有効径（m）	3.5	2.6
施工誤差（m）	0.15	0.15
計画造成径（m）	3.35	2.45

(2) 施工手順

本工事における CPR 工法の補強体は，地盤条件や施工効率等を考慮して壁状補強体を採用した。また，補強体の深さ方向の形状は，杭頭の断面力を低減する杭頭部の補強体と液状化が懸念される砂質土層を対象とした杭中間部の補強体からなる 2 層の形状とした。

補強体の造成には 2 種類の高圧噴射撹拌工法（V-JET

工法，S-RJP 工法）を用いた。敷地制限を満足するため，**図－６**に示すように，敷地境界部はS-RJP 工法を用いた揺動施工により先行して補強体の壁を造成し，その壁の内側については高速施工で大口径の補強体が造成可能なV-JET 工法で施工を行った。V-JET 工法には造成径に応じて３つのタイプ（V1，V2，V3）があるが，改良体の組合せの効率からV2 タイプ（噴射圧力 35MPa，硬化材吐出量 360 ℓ／分）を本工事では選定した。

また，本工事で採用したS-RJP（Speed-RODIN JET PILE）工法は，RJP 工法の中で高速施工および揺動施工が可能な高圧噴射攪拌工法（噴射圧力 40MPa，硬化材吐出量 190 ℓ／分）である。

改良体の計画造成径は，**表－３**に示すように，V-JET 工法は 3.35m，S-RJP 工法は 2.45m とした。

図－６に改良体の打設配置図を示す。A1 橋台はV-JET 工法の標準施工 11 本（V1 ～ V11，回転角度 360 度），S-RJP 工法の揺動施工６本（S1 ～ S6，回転角度 180 度，S4 のみ 151 度），A2 橋台はV-JET 工法の標準施工 12 本（V12 ～ V23，回転角度 360 度），S-RJP 工法の揺動施工５本（S7 ～ S11，回転角度 180 度，S8 のみ 184 度）の計 34 本を１日１本のペースで施工することとした。施工状況を**写真－２**に示す。

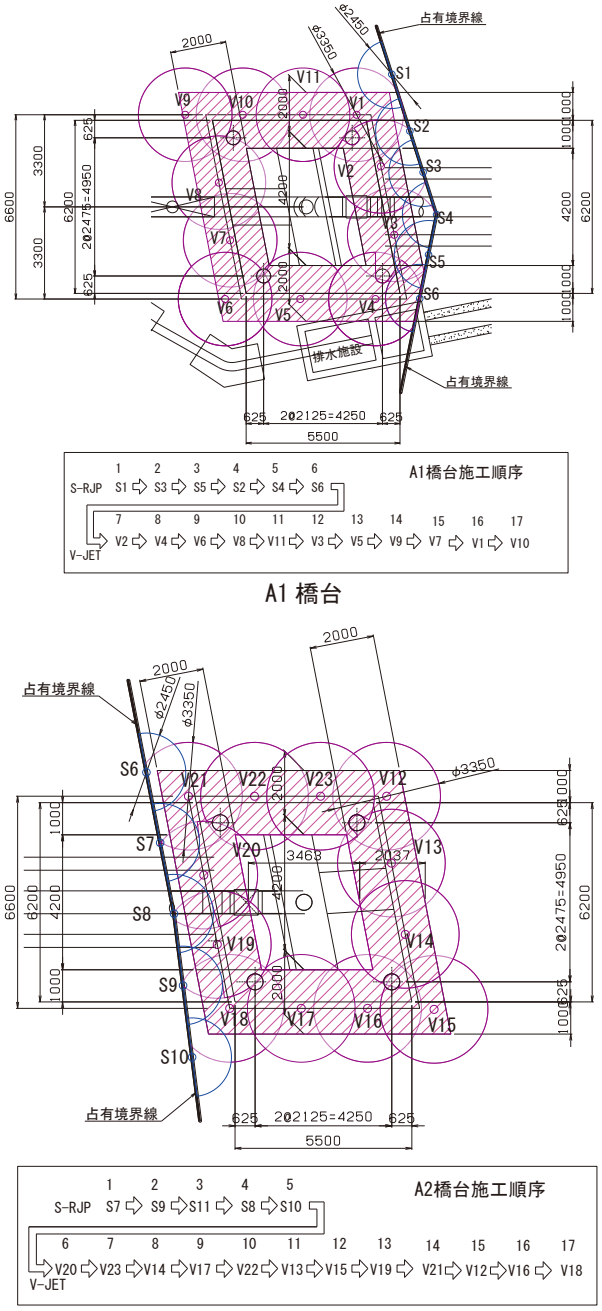
(3) 出来型管理

補強体の出来型管理は，①施工前のマイク集音と②施工後のコアボーリングによる２方法で実施した。

本工事では，各橋台の RJP 工法およびV-JET 工法の１本目（A1 橋台：S1,V2，A2 橋台：S7,V20）を試験施工として，マイク集音による造成径の確認を行った。ここで，マイク集音による方法とは，**図－７**に示すように，ガイド管内に水中マイクロフォンを挿入し，観測された音により，硬化材の到達を判定する方法である。**図－７**に示すV-JET 工法の集音波形から，噴射した硬化材の到達による音圧レベルの増加が回転の周期の半分（半回転）にあたる５秒の等間隔で確認され，確実に改良体が構築されていることが示された。

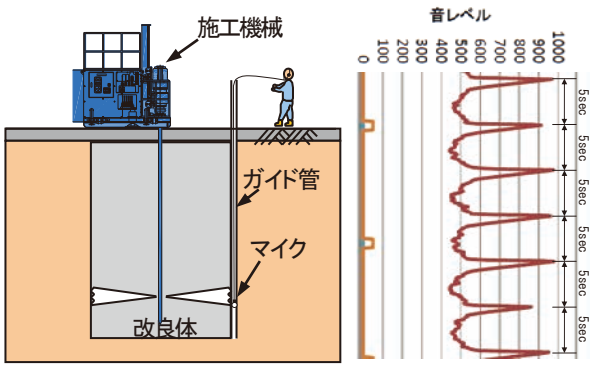
コアボーリングによる方法は，A1 橋台で３箇所（V6,V9,V4），A2 橋台で３箇所（V16,V23,V14）の合計６箇所で実施した。補強体の圧縮試験結果を**表－４**に示すが，いずれも設計強度（粘性土 1.0MN/m^2，砂質土 3.0MN/m^2）を満足しており，補強体の品質が確認された。

本工事はCPR 工法へのV-JET 工法の初適用であったが，制約された現場条件の中，要求品質を満足し，杭基礎の補強を予定工期内で無事完了することができた。



図－６　V-JET 工法および RJP 工法打設配置図

写真－２　施工状況（A1 橋台）



図－7　マイク集音の概要と集音波形

表－4　圧縮強度試験結果

橋台	No.	標高 T.P. (m)	圧縮強度 (MN/m^2)	平均値 (MN/m^2)
A1	V6	3.53 ～ 2.53 付近	5.18	6.05
			6.52	
			6.45	
	V9	5.53 ～ 4.53 付近	3.68	3.38
			3.08	
			3.37	
	V4	-3.74 ～ -4.74 付近	3.53	3.54
			3.09	
			4.00	
A2	V16	6.05 ～ 5.05 付近	3.89	3.30
			3.09	
			2.92	
	V23	-5.74 ～ -6.74 付近	2.95	3.08
			3.20	
			3.08	
	V14	-1.74 ～ -2.74 付近	2.75	3.93
			3.53	
			5.50	

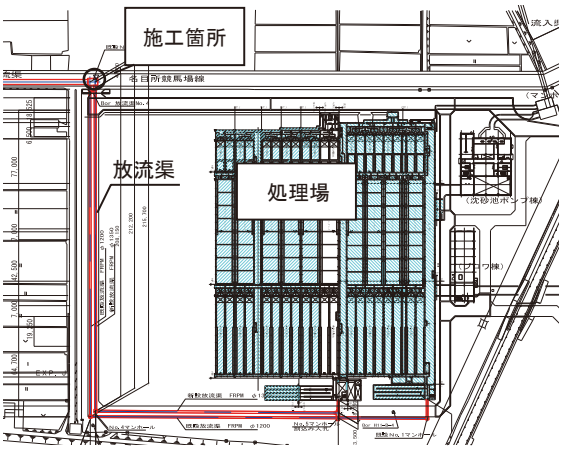
３．２　特殊マンホール基礎工への適用事例

(1) 工事概要

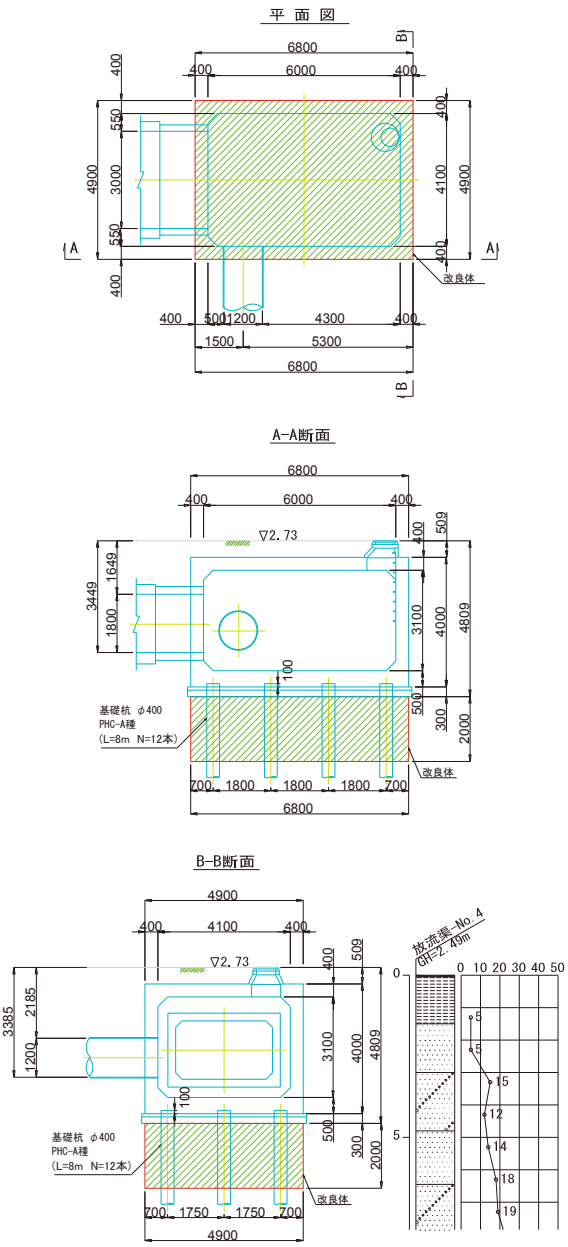
新井郷川浄化センターは新潟県新潟市に位置し，3 市 1 町（新潟市，新発田市，阿賀野市，聖籠町）を処理区域とする処理能力水量 79,500m^3/ 日の下水処理場である。本工事は，当処理場の放流渠施設の一部である No.3 特殊マンホールの基礎杭耐震化工事の事例である。**図－8** に当処理場の平面図を示す。また，**図－9** に No.3 特殊マンホールの補強計画図を示す。当該特殊マンホールは，PHC 杭 φ 400, L=8.0m × 12 本で支持されている。本工事は，既存杭の耐震性能を CPR 工法による向上させる目的で実施したものである。

(2) 施工手順

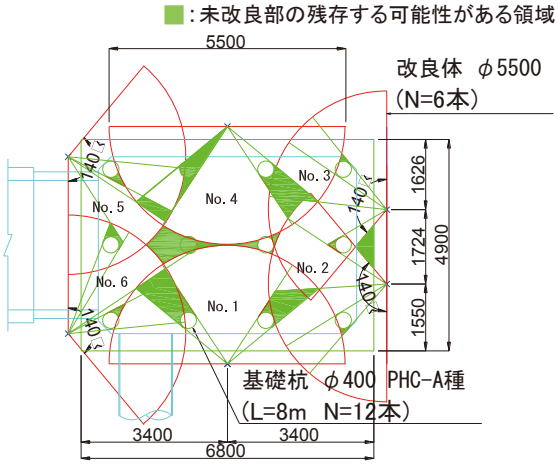
本工事における CPR 工法の補強体は，地盤条件や施工効率等を考慮してブロック状補強体を採用した。



図－8　平面図（処理場全体）



図－9　特殊マンホールの補強計画図



図－10 改良体配置図

写真－3 施工状況（特殊マンホール）

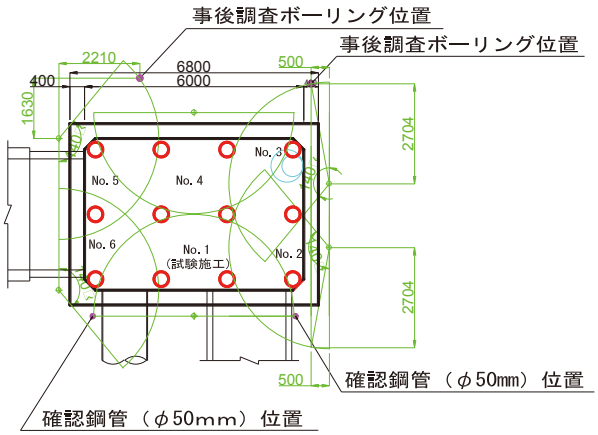
表－5 V-JET 工法の施工仕様

揺動角度（度）	360 （標準仕様）	180	140
改良対象地盤	砂質土：N 値≦ 50 粘性土：N 値≦ 3		
噴射圧力（MPa）	35		
硬化材噴射量 （L/ 分）	540	270 （片ノズル噴射）	
造成時間（分 /m）	18	18	14
有効径（m）	5.5		

補強体の造成には高圧噴射攪拌工法の中でも，施工性，経済性に優れる V-JET 工法を採用した。供用中の道路上での片側交互通行規制を伴う施工において，既設埋設物を避けながら効率的なブロック状補強体の造成方法を検討した結果，V-JET 工法の 3 つの施工仕様のうち造成径が最も大きい V3 タイプの揺動仕様を選定した。

敷地境界が近接しているため限定された施工範囲に対応するため，揺動施工により**図－10** に示すように，揺動角度 180 度 2 本（No. 1, 4），揺動角度 140 度 4 本（No. 2, 3, 5, 6）の計 6 本の施工を行った。また，既設 PHC 杭が噴射スラリーを遮ることで V-JET 工法による改良体に一部未改良部が発生することが想定された。これに対

写真－4 特殊専用モニター



図－11 調査位置平面図

表－6 圧縮強度試験結果

No.	供試体位置	圧縮強度 (MN/m^2)	平均値 (MN/m^2)
3	上	9.20	12.02
	中	13.30	
	下	13.56	
5	上	12.97	15.56
	中	15.43	
	下	18.27	

して改良率が低下した条件での設計検討を追加実施，当初設計の杭頭部 2m の補強範囲で PHC 杭の耐震安全性が確保できることを確認した。

写真－3 に V-JET 工法による施工状況を示す。また，**表－5** に V-JET（V3 タイプ）による施工仕様を示す。通常，V-JET 工法では超高圧硬化材を相反する 2 方向に噴射する特殊専用モニターを使用しているが，本工事では片ノズル噴射による揺動仕様であるため，片側ノズルを閉塞させた特殊専用モニターおよび特殊ロッド等の専用ツールスを使用した。**写真－4** に特殊専用モニターを示す。

(3) 出来型管理

補強体の出来型管理は，①試験施工によるマイク集音と②施工後のコアボーリングにより実施した。**図－11** に調査位置平面図を示す。

試験施工として造成した No. 1 の計画造成径端部 2 個所に計測用ガイド管を建て込み，スラリー到達音の確認

を行った（**図－7**参照）。ロッド回転周期に合わせスラリー到達音が確認でき，ガイド管上端部から直接切削音も聞き取れたため，所定の噴射距離を満たすものと判断した。

コアボーリングによる方法は，No.3，5において1箇所ずつの合計2個所で実施した。補強体の圧縮試験結果を**表－6**に示す。いずれも平均強度が設計強度（一軸圧縮強さ qu ≧ 3.0MN/m^2）を満足しており，補強体の品質が確認された。

本工事はCPR工法へのV-JET工法の揺動仕様の初適用であったが，施工条件に様々な制約を受ける中，要求品質を満足し，杭基礎の補強を予定工期内で無事完了することができた。

4．おわりに

本報では最新のCPR工法の概要とV-JET工法を用いた上下水道施設の適用事例について紹介した。本適用事例をまとめるに当たりご指導いただきました関係各位に深く感謝いたします。

今後，大口径，自由形状が可能で環境負荷の少ないV-JET工法等を用いたCPR工法が，複雑化する施工条件での既存構造物の補強工事をはじめとした社会資本整備の一助となれば幸いである。

参　考　文　献

1）足立有史，浦野和彦，竹之下朋章，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，土木学会論文集C Vol.63，No.3，2007.

2）渡辺洋二，竹内清，柴田正行，浦野和彦，足立有史：水管橋の杭基礎耐震補強の施工事例，基礎工，Vol.34，No.6，2006.

3）丹澤宣彦，浦野和彦，足立有史：道路橋の杭基礎補強の施工事例，基礎工，Vol.38，No.8，2010.

4）CPR工法研究会：CPR工法技術資料 第4版，2020.

5）MJS協会：MJS工法技術・積算資料，2020.

6）RJP協会：RJP工法技術資料，2020.

7）PJG協会：PJG工法・PJG-L工法技術・積算資料，2015.

8）V-JET協会：V-JET工法技術・積算資料，2020.

9）CPR工法研究会：ファイバージェット工法技術・積算資料，2014.

10）TECHNICAL VIEW：耐震補強に効果を発揮する強靭な地盤改良，建設技術，pp60-61，2013.

Construction examples of water and sewage facilities using the CPR method for an earthquake resistant reinforcement of pile foundations

Kazuhiko URANO, Yuji ADACHI, Tatsufumi NISHIO, Kozo TSUKAGOSHI and Hiroshi OKADA

The CPR method is a new earthquake resistant reinforcement method for pile foundations, in which piles are confined in the ground with a soil solidification body. The novel method has been adopted in practice for the reinforcement of road bridges and aqueducts to reduce earthquake damage in urban areas where the land area required for reinforcement work does not exist. The soil solidification body is usually constructed using the high-pressure jet grouting method with a strength and shape (block, wall) determined by design. In this report, we report the case of applying the large diameter high pressure jet grouting (V-JET) method to the earthquake resistant reinforcement work of the pile foundation such as the substructure of the water pipe etc. designed by the CPR method.