

杭基礎耐震補強工法 CPR 工法の概要と適用事例

(株)安藤・間 正会員 ○浦野 和彦 青山機工(株) 正会員 塚越 浩三
 東興ジオテック(株) 正会員 佐久間孝夫 (株)エステック 正会員 小川 恒郎
 (株)K S K 正会員 峯岸 淳一

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及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、杭の深さ方向の中間付近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している¹⁾。また、水管橋²⁾及び道路橋³⁾の杭基礎耐震補強工事への適用実績も増えてきている。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 工法の概要及び水管橋への適用事例について紹介する。

2. CPR 工法の概要

(1) 工法の概要

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。杭基礎は地震時の慣性力や地盤変位などの水平外力が作用した場合、図-2 (a) に示すように、杭頭部に断面力が集中し、特に巨大地震等の想定外の (設計値を超える) 外力を受けると大きな損傷を受ける場合がある。CPR 工法を適用することで、図-2 (b) に示すように、杭とフーチングと補強体からなる 2 層ラーメン構造が構築されるため、変形を抑制するとともに杭頭部に集中していた断面力を分散させることが可能である。このように、水平外力による杭頭部の断面力を低減させ、構造全体の耐震性能を向上させるこ

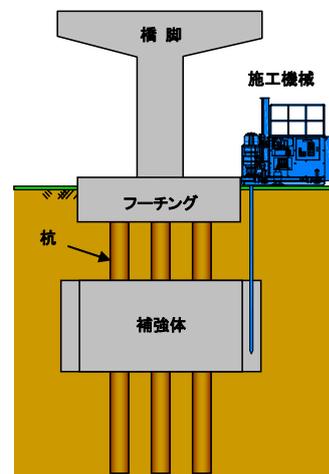
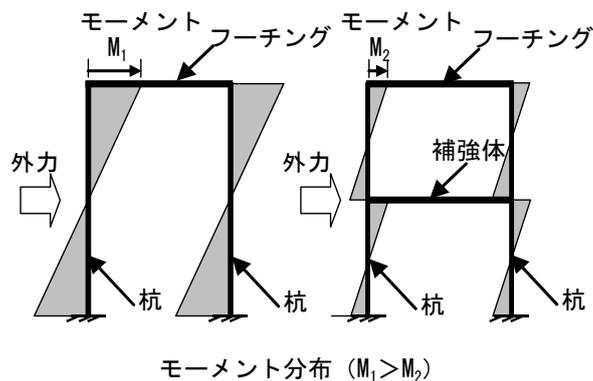
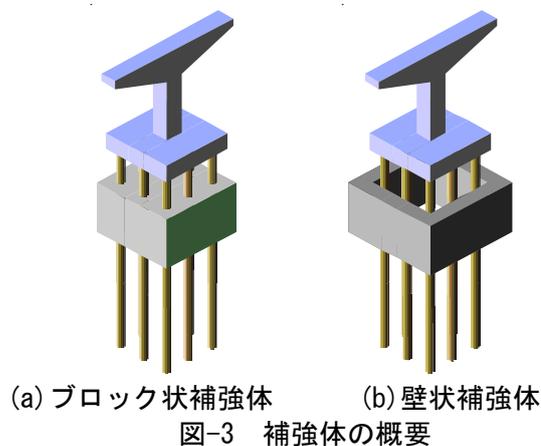


図-1 CPR 工法の概要



(a) 補強前 (b) 補強後

図-2 補強効果の原理



(a) ブロック状補強体 (b) 壁状補強体
 図-3 補強体の概要

キーワード 杭基礎, 耐震補強, 地盤改良

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ技術研究所 TEL 029-858-8813

とが CPR 工法の基本原理である。

補強体の形状は、図-3 に示す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。

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。写真-1 に示す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) 新工法の概要

CPR 工法の補強体は、表-1 に示す高圧噴射攪拌工法により造成（地盤改良）する。当初は MJS 工法⁵⁾と RJP 工法⁶⁾の 2 工法であったが、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。⑤のファイバージェット工法は、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、高速施工で大口径の改良体の施工が可能な V-JET 工法と新工法であるファイバージェット工法の概要について示す。

a) V-JET 工法

V-JET 工法⁸⁾は、図-4 に示すように、セメント系硬化材の超高压噴射により、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攪拌工法である。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。

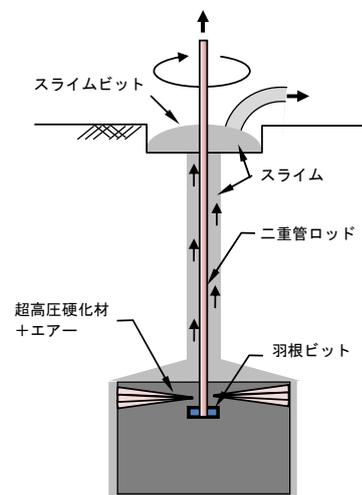
V-JET 工法は従来の高圧噴射攪拌工法と比較して次のような特徴を有する。



写真-1 綾瀬川水管橋の耐震補強工事状況

表-1 CPR 工法に適用可能な高圧噴射攪拌工法

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



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

図-4 V-JET 工法の概要

- ①3 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噴射攪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。

また、「3. 適用事例」で示す高井水管橋の施工時点では未完成であったが、現在は揺動施工によって半円断面や1/4円断面等の造成も可能である。

b) ファイバージェット工法

ファイバージェット工法⁹⁾は、図-5 に示すように、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、図-6 の割裂引張試験結果に示すように、高压噴射攪拌工法の地盤改良体のねばり強さ（引張強度、曲げ強度、靱性）を大幅に向上させることに成功した。

そのため、従来の高压噴射攪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、四重管式の特種造成装置と写真-2 に示す「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できる。

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压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（Φ16μm×12mm程度のビニロン繊維）を注入し、③下段噴射口から超高压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。

3. 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・支線及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-3 に示す高井水管橋は、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（Φ700mm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

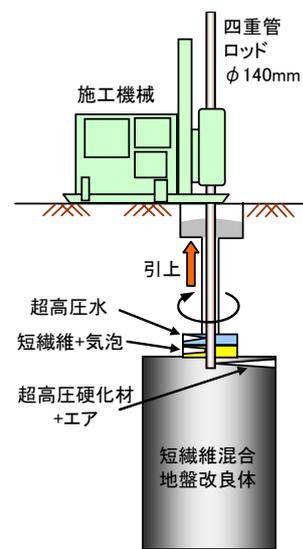


図-5 ファイバージェット工法の概要

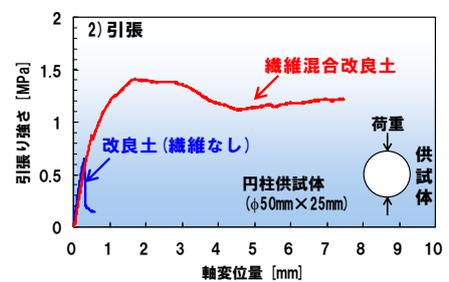


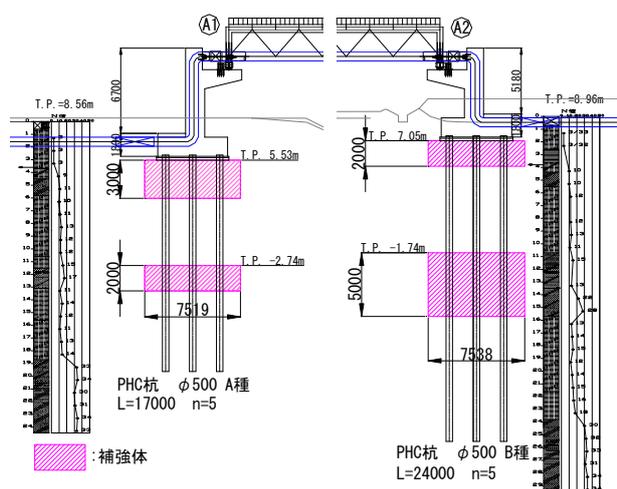
図-6 強度試験結果の一例



写真-2 気泡+短繊維の圧送状況



写真-3 高井水管橋全景（A2橋台側から）



A1 橋台 A2 橋台

図-7 高井水管橋の概要

表-2 V-JET 工法及び 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

ないため、杭基礎に対する耐震補強を実施する。本工事は、図-7 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ものであり、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。

以下に工事概要を示すが、本報では CPR 工法による基礎の補強について記述する。

工事名称：高井水管橋下部工耐震補強工事

発注者：南房総広域水道企業団

施工場所：千葉県南房総市

工期：平成 26 年 9 月～10 月（CPR 工法）

工事内容：CPR 工法による杭基礎補強工

地盤改良（高圧噴射攪拌工法）：

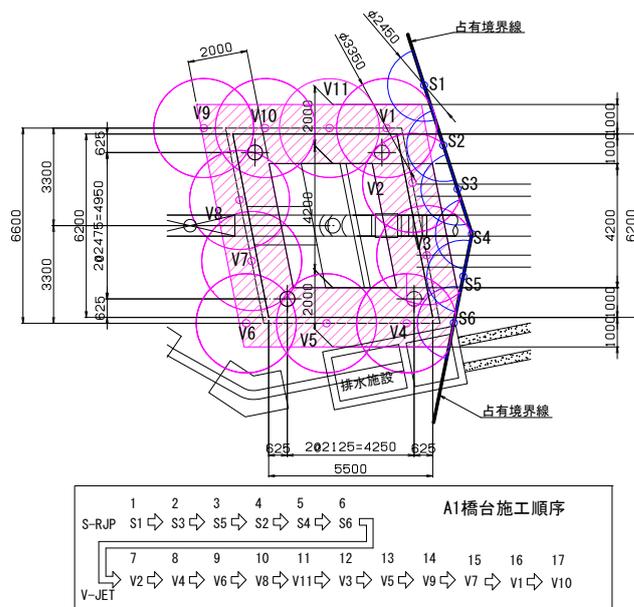
外寸 7.519m×8.2m×5.0m 壁厚 2.0m（A1 橋台）

外寸 7.538m×8.2m×7.0m 壁厚 2.0m（A2 橋台）

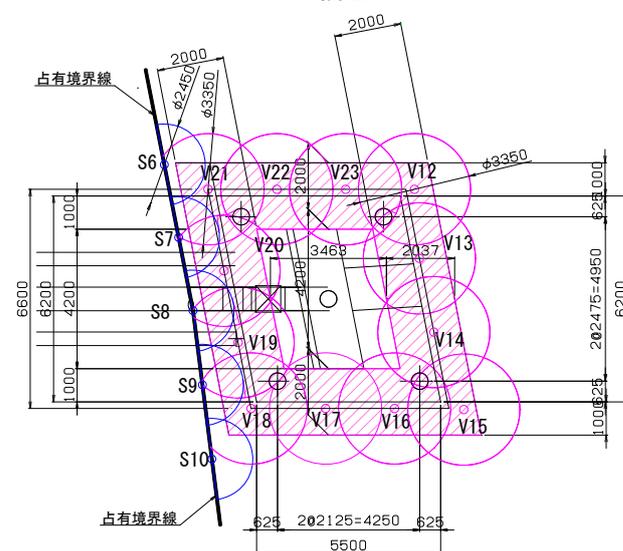
(2) 施工手順

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 種類の高圧噴射攪拌工法（V-JET 工法, S-RJP 工法）を用いた。敷地制限を満足するため、



A1 橋台



A2 橋台

図-8 V-JET 工法及び RJP 工法打設配置図



写真-4 施工状況（A1 橋台）

図-8 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 360ℓ/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及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 190ℓ/分) である。

改良体の計画造成径は、表-2 に示すように、V-JET 工法は 3.35m, S-RJP 工法は 2.45m とした。

図-8 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。

(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 工法及び 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-9 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-9 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 箇所で行った。補強体の圧縮試験結果を表-3 に示すが、設計強度 (粘性土 1.0MN/m², 砂質土 3.0MN/m²) 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、初期の目的を達成し杭基礎の補強を無事施工することができた。

4. おわりに

本報では最新の CPR 工法の概要及び高井水管橋へ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南房総広域水道企業団工務課 和田正善様に感謝いたします。

今後、杭基礎構造物の耐震補強を進めていく上で、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, 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, pp.752-762, 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, pp.104-107, 2006.

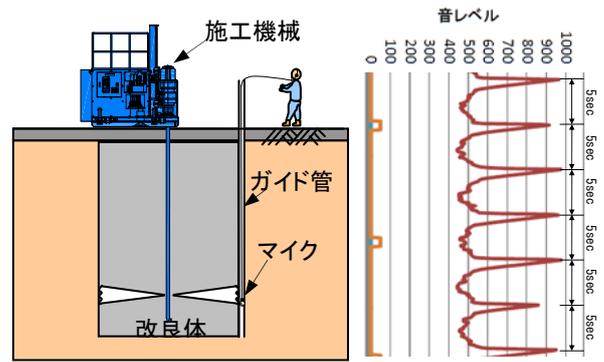


図-9 マイク集音の概要と集音波形

表-3 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) 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, pp.084-087, 2010.
- 4) CPR 工法研究会: CPR 工法技術資料 第3版, 2014.
- 5) MJS 協会: MJS 工法技術・積算資料, 2014.
- 6) RJP 協会: RJP 工法技術資料, 2014.
- 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, 2015.
- 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靱な地盤改良, 建設技術, pp.60-61, 2013.