

浅い土被りの地中構造物に対する耐震性向上のための高圧噴射攪拌工法の施工方法改善

中部電力(株) 正会員 河村精一 市橋豊隆 遠藤大輔
 (株)シーテック 渋谷旬
 鹿島建設(株) 正会員 藤崎勝利

1. はじめに

軟岩のような比較的剛性の高い地盤に直接支持された土被りの浅い既設地中鉄筋コンクリート構造物の耐震性を向上するには、構造物側方地盤を支持地盤の剛性相当に固化することが地震時発生断面力低減に有効であることが別途行った解析検討からわかっている^{1),2)}。また、その発生断面力低減効果は、地盤改良範囲が同じ場合、地盤改良による地盤のせん断剛性の上昇程度による²⁾。既設構造物周辺を開削して置換コンクリートを施工できる場合は、せん断剛性の上昇程度も高く、費用対効果を考えると効率的であるが、既設地中構造物の周囲に移設困難な埋設物があり、構造物の周辺地盤の開削ができないような場合は、表層地盤を残した地盤改良が必要となる。この場合、比較的強度や剛性の高い改良が可能な高圧噴射攪拌工法の適用が考えられる。しかし、一般にはある程度の土被りを有する地中部に仮設として施工されることが多く、土被りが浅い場合に適用し、かつせん断剛性を確認した事例は少ない。さらに、技術資料³⁾に示される標準的な施工仕様においては、目標とするせん断剛性が得られないことが想定された。そこで、浅い土被り条件下で、想定される改良対象地盤と同程度の地盤を対象に高圧噴射攪拌工法の試験施工を行った結果、施工方法を改善することで、目標とするせん断剛性が得られること、ならびに所要の連続性を有する改良体の造成が可能であることを確認した。本稿では、一連の検討結果について報告する。

2. 工法概要および改良対象地盤

試験施工は、設計改良径最大5mのスーパージェット工法(以下、SJ工法)、設計改良径最大3.5mのスーパージェットミディ工法(以下、SJM工法)を対象にした。工法概要を表-1に示す。改良対象地盤は、砂地盤、砂礫地盤および掘削軟岩の盛土地盤(以下、軟岩ずり地盤)である。各地盤の物理的性質を表-2に示す。SJ工法およびSJM工法の設計改良体径は、砂地盤ではそれぞれ5m、3.5m、砂礫地盤および軟岩ずり地盤では粒径の大きな礫の含有率が高いため改良径が若干小さく考えたことからそれぞれ4.5m、3mと想定した。改良深度は3.5~4m程度であり、GL-0.7mまで改良体を造成することから、改良体径と比較して表層土層が薄く、土被りが浅い条件である。

表 - 1 工法概要

工法名称	スーパージェット工法(SJ工法)	スーパージェットミディ工法(SJM工法)
改良径	設計改良径:最大5.0m	設計改良径:最大3.5m
工法分類	エア-グラウト噴射系	
切削方式	固化材ミルク切削(2系統)	
置換方式	切削時の固化材ミルクで置換	
概要	高圧の固化材ミルクを圧縮空気とともに地盤中で噴射して、地盤を切削するとともに、地盤と固化材ミルクの混合攪拌を行う。	
模式図		

表 - 2 改良対象地盤の物理的性質

改良対象地盤	砂	砂礫	軟岩ずり	
一般				
含水比 w_0	%	11.2	80.1	29.7
土粒子の密度 s	Mg/m ³	2.675	2.661	2.668
粒度				
最大粒径 D_{max}	mm	37.5	75.0	106.0
礫分(2mm以上)含有率	%	11.2	80.1	29.7
細粒分含有率 F_c	%	1.7	8.6	6.5
分類				
工学的分類名・分類記号	礫まじり細粒分質砂 (SF-G)	細粒分まじり砂質礫 (GFS)	細粒分まじり礫質砂 (SG-F)	

3. 試験施工による施工方法の改善

(1) 施工方法

高い剛性を有する改良体を造成するため、同一箇所でも2段階(1次改良、2次改良)の改良を行う「2度施工」と称する施工方法を基本とした。「2度施工」の施工ステップを図-1に示す。1次改良および2次改良の固化材ミルクの

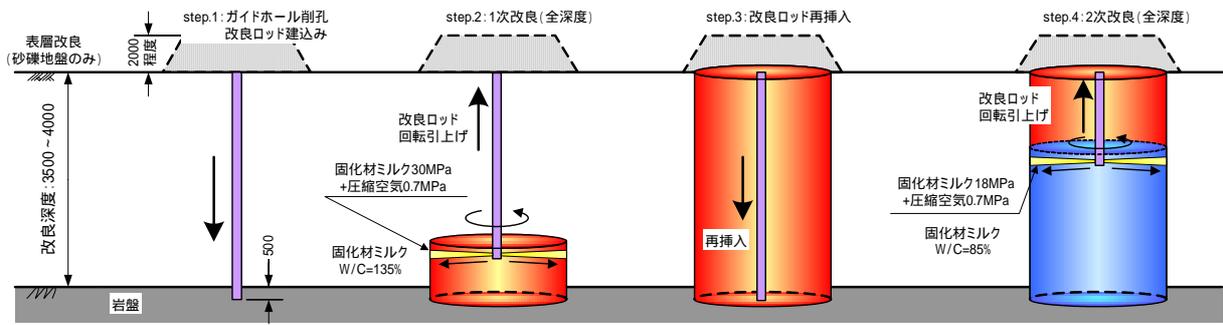


図 - 1 施工ステップ(SJ 工法および SJM 工法)

水固化材比 W/C はそれぞれ 135% , 85% , 固化材ミルク噴射圧力はそれぞれ 30MPa , 18MPa , 圧縮空気圧力は 1 次改良 , 2 次改良ともに 0.7MPa に設定し , 岩盤下 50cm から噴射を開始した . また , 浅い土被り条件を考慮して , 砂地盤では表層土の崩落を許容し , 土被りのない条件で施工した . 一方 , 砂礫地盤では , 表層盛土 (セメント改良) を行い , 土被りのある条件で試験施工を行った .

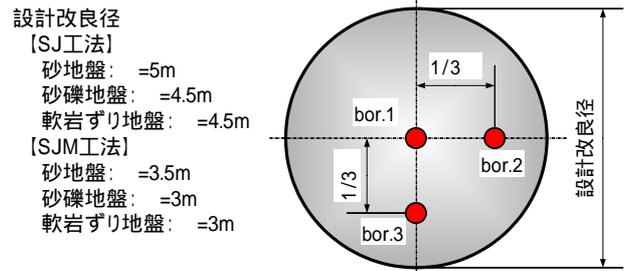


図 - 2 コア採取ボーリング位置

(2) 改良体の調査結果

改良後 , 図-2 に示す位置でコアを採取し , 目視観察を行った . コア採取位置は , 改良体の平面的かつ深度方向の固化状況を把握するため , 改良体あたり 2 ~ 3 箇所 (bor.1 ~ 3) とした . 観察の結果 , 砂層では改良体下端部のほぼ全面 , 砂礫層では改良体下端部の外周付近に固化が不良な部分が確認された . コア観察から推定した改良体の出来形を図-3 に示す . 改良体連続性の指標として , 指針⁴⁾に記載されているコア採取率 (コアサンプラーの掘進長に対する採取されたコアの固化部分の割合) の平均値を用い , コア採取率 95% 以上を判定の目安とすると , コアの連続性は不十分となった .

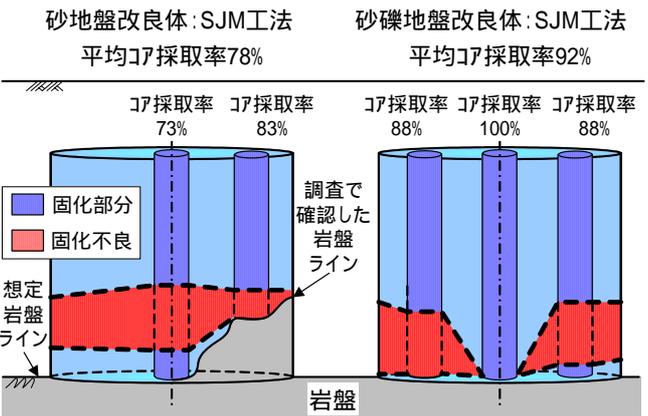


図 - 3 推定した改良体の出来形

(3) 固化不良部の発生要因と施工方法の改善

施工状況と改良体の調査結果から , 図-4 に示す固化不良部が生じた要因を推定するとともに , 各要因への対策として施工ステップを図-5 に示すように改善した .

第 1 に改良層中の礫が沈降し (図-4 中 , 要因) , 固化前に下端付近に堆積したことが考えられるため , 1 次改良後に下端 1m 部分を再改良する「下端改良」と称するステップ (図-5 中 , step.4) を追加した .

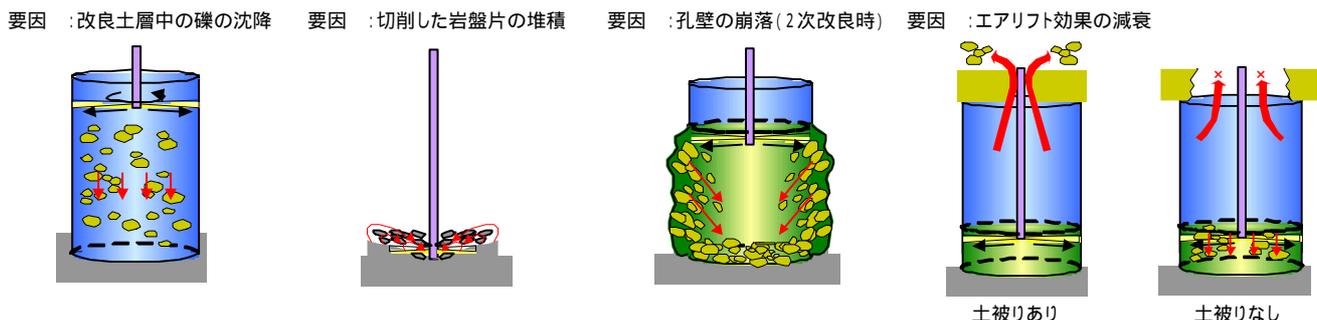


図 - 4 推定した改良体固化不良部の発生要因

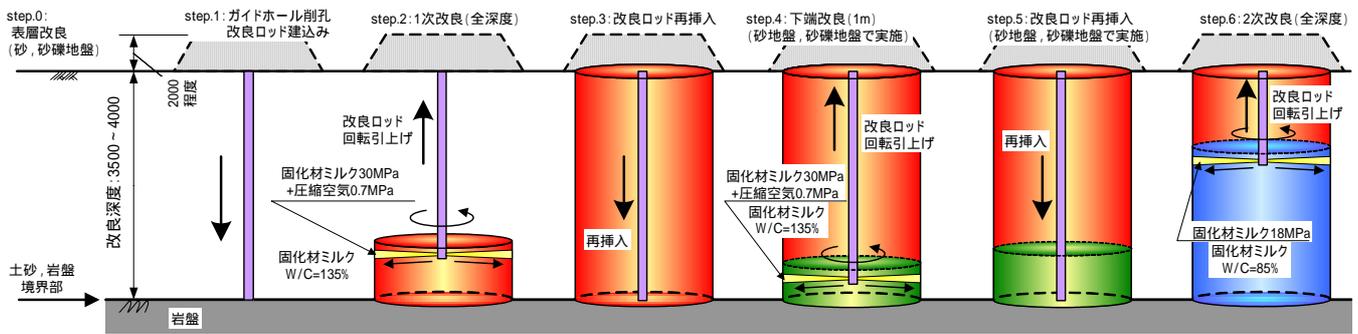


図 - 5 改善した施工ステップ

第 2 に、コア観察の結果、切削された岩盤片が下端部に堆積(図-4 中、要因)していることから、噴射位置を土砂と岩盤の境界部(図-5 中、step.2,4,6)に変更した。

第 3 に、2 次改良時にも使用した圧縮空気によって孔壁が乱れ(図-4 中、要因), 崩落した土砂が未固化のまま残ったことが推定された。このため 2 次改良時は、圧縮空気を用いずに固化材ミルクのみの噴射(図-5、中 step.6)とした。

第 4 に、圧縮空気が地表面に抜ける際のエアリフト効果³⁾によって、切削土砂が攪拌され、ガイドホールを通りスライムとして排出(図-4 中、要因 左図)されるが、土被りのない場合には自由面が広いのでエアリフト効果が失われる(図-4 中、要因 右図)。そこで、エアリフト効果を確保するため、砂層においても表層盛土(セメント改良)を行わない(図-5 中、step.0)、表層土の崩落を防止することとした。

以上のような改善策を講じて、表-3 に示す 9 ケースについて再度試験施工を実施した。

表 - 3 再試験施工ケース

改良ケース		工法名	施工仕様
砂地盤	SJ-S	スーパージェット	2度施工+下端施工
	SJM-S	スーパージェットミディ	2度施工+下端施工
砂礫地盤	SJ-G	スーパージェット	2度施工+下端施工
	SJM-G	スーパージェットミディ	2度施工+下端施工
軟岩ずり地盤	SJ-R	スーパージェット	2度施工
	SJM-R	スーパージェットミディ	2度施工



写真 - 1 砂地盤改良体の状況(SJ 工法)

4. 改善策を踏まえた試験施工の結果

改善策を講じた試験施工で造成した SJ 工法による砂地盤の改良体の状況を写真-1 に示す。

(1) 原位置 P S 検層結果とせん断剛性

PS 検層は、改良体中心部(bor.1)と改良体外周部(bor.2)で行った。図-6 に PS 検層結果を示す。各改良ケースの S 波速度は、砂地盤で 1,400m/s 程度、砂礫地盤で 1,100 ~ 1,300m/s 程度、軟岩ずり地盤で 800 ~ 900m/s 程度となった。また、改良体の P 波速度は 2,000 ~ 3,400m/s であり、既往文献のデータ⁵⁾と比較すると改良体は軟岩相当と言える。初期せん断弾性係数 G_0 は、砂地盤で 3,700 ~ 4,100N/mm² 程度、砂礫地盤で 2,800 ~ 3,700N/mm² 程度、軟岩ずり地盤で 1,300 ~ 1,700N/mm² 程度であり、高いせん断剛性を有することが確認できた。

(2) 改良体の連続性

指針⁴⁾によれば、連続性を満たす一応の目安として、コア採取率が砂質土で 95% 以上、粘性土で 90% 以上が示さ

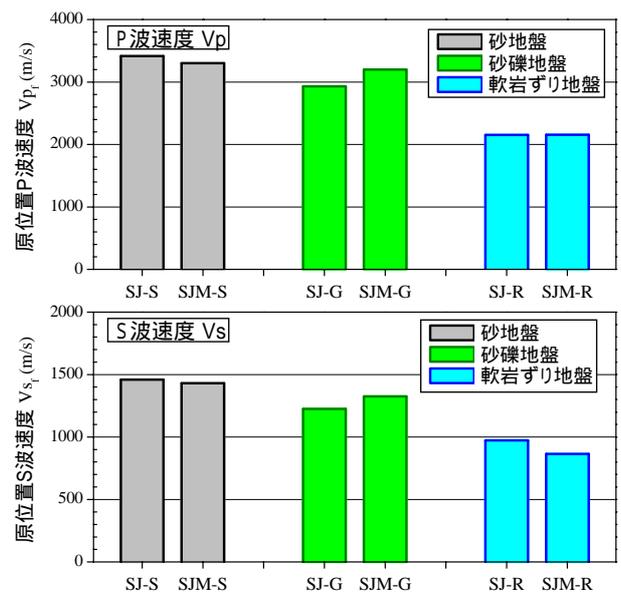


図 - 6 PS 検層結果

れているが、各改良体のコア採取率は地盤によらず全て 95% ~ 100%となっており、十分な連続性を有する改良体が造成できた。なお、コアの固化部分は目視観察で抽出するが、コアボーリング時のコアばれなどによりコアが破損した場合は、ボアホールスキャナーによって孔壁を観察し、固化状態を確認している。

5. 本施工の状況

試験施工で得られた知見を基にして本施工を実施した。本施工完了後にはコアボーリングおよび PS 検層、コアを用いた各種室内試験を行った。採取したボーリングコアを目視確認した結果、地盤に関わらず改良体中心部・外周部とも良好に固化しており、コア採取率は全て 95% ~ 100%と数値の上でも改良体の連続性を確認することが出来た。ボーリングコアの一例として、砂地盤部分の地盤改良体コアを写真-2、写真-3に示す。写真-2に示すように改良状況は良好であり、写真-3に示すように岩盤と改良体がしっかり密着していることが確認できる。なお、深度 4.5mの部分でコアが切れているのは、改良体と岩盤の密着状況を確認するため、コアリフトする位置を調整したことによるものである。

また、PS 検層で得た改良体の剛性は、すべての改良体において目標として設定した管理値以上の剛性が得られており、改良体が支持地盤（軟岩）相当の剛性を有していることが確認できた。

6. まとめ

浅い土被り条件において、高圧噴射攪拌工法を用いて既設地中構造物の耐震性を向上するために必要な高品質の改良体を造成するための施工方法の改善を提案し、その効果を検証した結果、所要の耐震性を確保するための地盤改良が可能であることを確認した。以下に、得られた知見を示す。

改良層中の礫の沈降や切削した岩盤片の堆積等により、改良体の下端部は未固化となる傾向にあり、下端改良ステップの追加は有効な対策となる。

土被りのない場合にはエアリフト効果が失われ、攪拌および排泥能力が低減する。このため、浅い土被り条件では、表層改良を行い、エアリフト効果を確保することが重要である。

改良体の原位置 S 波速度はおよそ 800m/s 以上、初期せん断弾性係数 G_0 はおよそ $1,300\text{N/mm}^2$ 以上であり、軟岩相当となった。

コア採取率は 95% ~ 100%となり、連続性のある改良体が造成できた。

【参考文献】

- 1)河村, 東川, 亀谷他: 地中構造物周囲の地盤改良による耐震補強効果, 第 40 回地盤工学研究発表会(函館), 2005 年 7 月
- 2)室谷, 西山他: 矩形地下構造物の各種地震対策工による断面力低減効果の比較(その 2), 地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会報告/シンポジウム発表論文集, 2006 年 6 月
- 3)Superjet 研究会: Superjet 工法技術資料, 平成 16 年 12 月
- 4)建築物のための改良地盤の設計および品質管理指針, 平成 9 年 7 月, 日本建築センター
- 5)地盤工学会: 地盤工学への物理探査技術の適用と事例, pp.7

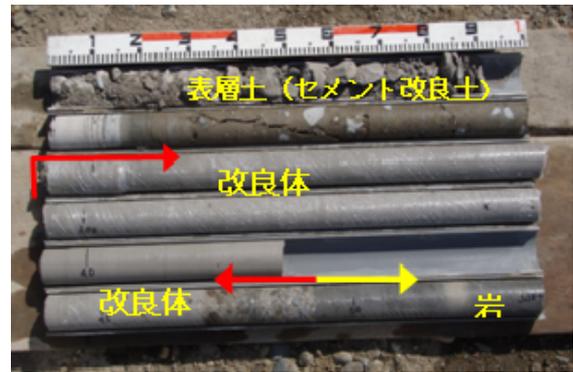


写真 - 2 ボーリングコアの一例 (砂地盤)

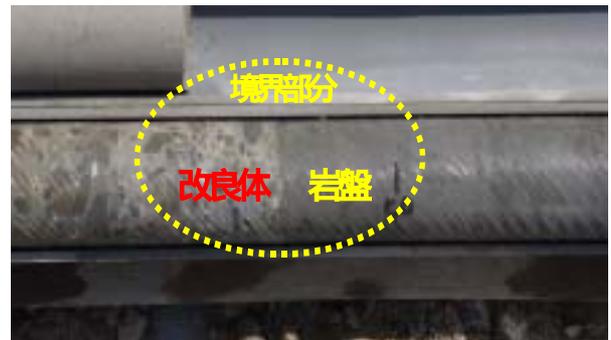


写真 - 3 改良体と岩盤境界部の状況