

混合微粒子を用いた地盤注入工法の開発

東京都市大学 学生会員 ○田代 怜 正会員 末政 直晃
強化土エンジニアリング株式会社 正会員 佐々木 隆光
佐藤工業株式会社 正会員 永尾 浩一

1. 社会背景

日本では軟弱地盤において液状化による被害が多く発生している。液状化対策工法における施工面積と対策費用の関係を図-1 に示す。現在、様々な液状化対策工法があるが、図の赤枠で示される、改良費用が安価で住宅地など狭隘地で施工可能な工法の開発が求められる。本研究ではその一つとして微粒子注入工法に着目し、ジオポリマー系材料を地盤内に注入する工法の開発を試みた。ジオポリマー(以下 GP)は、古代ローマ時代の建造物やエジプトのピラミッドなどに建材として用いられていたことで知られ、現代でも高い強度が維持されている。本報告では微粒子の固化可能性を探るため、複数の微粒子を混合し、固化可否及び一軸圧縮試験を実施した。

2. 注入材の固化特性

注入材を検討するため、GP 及び薬液の固化特性に着目した。GP²⁾とは、セメントの代わりに水とアルカリシリカ溶液、活性フィラー(アルカリに活性のある成分を含む非晶質粉体)を用いるものである。アルカリシリカ溶液ではケイ酸ナトリウム、活性フィラーではフライアッシュ(以下 FA)、高炉スラグ微粉末(以下 BS)といった産業副産物が該当する。GP は図-2 に示されるような活性フィラーから溶出した金属イオンがケイ酸と接することで珪酸錯体を架橋しポリマー化する。また、米倉、島田ら³⁾によると薬液注入に用いられる注入材は一般的な傾向として pH が中性に近づくことで固化する特徴がある。

3. 実験概要

本実験では、微粒子を用いた薬液の固化可否及び pH 測定、一軸圧縮試験を行った。まず、微粒子をビーカー内で混合し、室温(25 度±3)に静置し、混合後 1, 3, 7 日後に固化可否及び pH 測定を行った。ここでの固化は、目視及び直径 3mm の金属棒を貫入した際の抵抗の有無によって判断した。本実験の配合(表-1)は、シリカ及び MgO をベースとし、水酸化マグネシウム(以下 Mg(OH)₂)、水酸化カルシウム(以下 Ca(OH)₂)、水酸化アルミニウム(以下 Al(OH)₃)、FA、BS を用い、シリカは二次粉砕された粉末状のものを使用した。また一軸圧縮試験は、表-1に示すケースの中から、十分な固化を示した 4 ケースの配合について実施した。注入材を添加した珪砂 6 号を相対密度 Dr=60%になるよう密度調整して改良供試体を作製し、常温で湿潤養生を行い、養生 3, 7, 28 日において一軸圧縮試験を実施した。

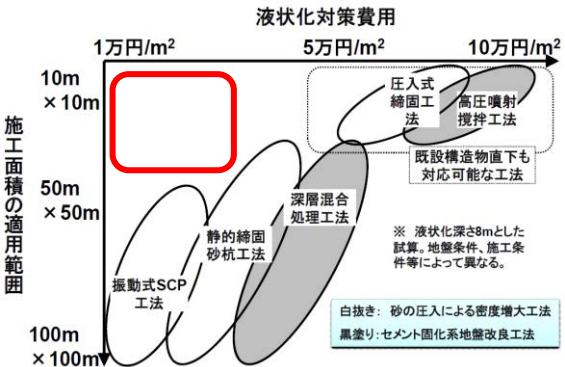


図-1 地盤改良における施工面積と対策費用の関係の模式図¹⁾

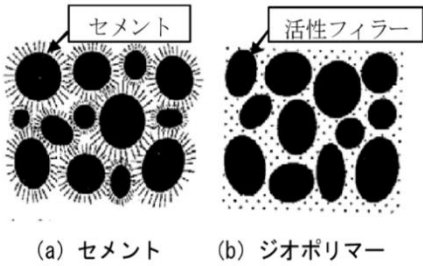


図-2 GP の固化概念イメージ²⁾

表-1 配合条件及び実験結果

Case	pH確認 (Day)				固化確認 (Day)				基本配合 (g)				P/W
	0	1	3	7	0	1	3	7	SiO ₂	Mg(OH) ₂			
A1	9.0	9.1	8.7	8.6	×	×	×	○	8.999	1.010			0.1
A2	9.2	9.1	9.0	8.8	×	×	×	△	SiO ₂	Mg(OH) ₂	FA		0.1
									4.490	1.010	4.490		
A3	9.2	9.3	9.1	8.8	×	×	×	×	SiO ₂	Mg(OH) ₂	BS		0.1
									4.490	1.010	4.490		
A4	9.2	9.3	9.1	8.8	×	×	×	△	SiO ₂	Mg(OH) ₂	FA	BS	0.1
									2.990	1.010	2.990	2.990	
B1	12.2	10.3	10.0	9.9	△	○	○	○	SiO ₂	Ca(OH) ₂			0.1
									8.999	1.010			
B2	12.5	10.1	9.8	9.4	×	○	○	○	SiO ₂	Ca(OH) ₂	FA		0.1
									4.490	1.010	4.490		
B3	12.3	11.7	11.3	10.8	×	○	○	○	SiO ₂	Ca(OH) ₂	BS		0.1
									4.490	1.010	4.490		
B4	12.5	12.3	11.1	10.9	×	○	○	○	SiO ₂	Ca(OH) ₂	FA	BS	0.1
									2.990	1.010	2.990	2.990	
C1	8.3	6.3	6.9	7.9	×	○	○	○	SiO ₂	Al(OH) ₃			0.1
									8.999	1.010			
C2	7.7	7.2	6.9	7.9	×	○	○	○	SiO ₂	Al(OH) ₃	FA		0.1
									4.490	1.010	4.490		
C3	7.7	7.2	6.9	7.2	×	×	○	○	SiO ₂	Al(OH) ₃	BS		0.1
									4.490	1.010	4.490		
C4	8.3	8.2	8.2	8.1	×	×	○	○	SiO ₂	Al(OH) ₃	FA	BS	0.1
									2.990	1.010	2.990	2.990	
D1	10.5	12.4	10.1	9.9	×	△	○	○	MgO	FA			0.1
									8.999	1.010			
D2	10.5	12.4	12.2	11.5	×	△	○	○	MgO	BS			0.1
									8.999	1.010			
D3	10.4	12.2	11.9	11.2	×	△	○	○	MgO	FA	BS		0.1
									8.999	0.505	0.505		
D4	10.5	12.2	11.9	9.8	×	○	○	○	MgO	FA			0.1
									1.010	8.999			
D5	10.5	12.2	11.7	-	×	○	○	○	MgO	BS			0.1
									1.010	8.999			
D6	10.5	11.9	10.9	-	×	○	○	○	MgO	FA	BS		0.1
									1.010	4.500	4.500		

キーワード: ジオポリマー, 液状化, 薬液注入, 微粒子注入, pH

4. 実験結果及び考察

固化及び pH の実験結果を表-1 に、各ケースの pH の変化を図-3 に示す。表-1 より薬液が固化したものを○、ビーカーを傾けた際に薬液は傾くが金属棒を貫入・攪拌させた際に穴が塞がらなかったものを△、固化しなかったものを×と定義した。ほとんど全ての配合で固化が確認されたが、Mg(OH)₂ を添加した配合では養生 7 日目においても固化しないケースがあった。また、図-3 より各ケースにおける pH の変化をみると、Mg(OH)₂ における配合では pH の変化は小さく、その他のケースでは初期(1 日目から 3 日目)に pH の変化が大きく、固化が確認された。このことから、固化にアルカリを消費するため、pH が減少すると考えられる。

充分な固化を示した CaseB2, B3, C2, D5 における固化の様子を図-4 に示す。これらのケースにおいて一軸圧縮試験を実施した。試験後の供試体の様子を図-5 に 3, 7, 28 日養生における最大圧縮応力の結果を図-6 に示す。図-5 より、CaseB2 では縦割れ、CaseB3 ではせん断破壊、CaseD5 では縦割れが確認された。供試体は珪砂 6 号のみでは自立しないのに対し、全てのケースにおいて改良供試体は自立したことから、薬液が固化していることが確認された。しかし、CaseC2, D5(7日養生)では改良供試体は一時的に自立したが、一軸圧縮試験に必要な自立を維持することができなかったため、最大圧縮応力は 0 とした。CaseC2: Al(OH)₃+SiO₂ の配合では pH は中性であり、Ca(OH)₂ や MgO の配合に比べ pH の変化が小さいため、自立を維持出来なかったと考えられる。次に CaseB2, B3 に着目すると、Ca(OH)₂+SiO₂ の配合では pH は初期に中性に向かって低下しており、FA より BS を用いることで強度が発揮されることが分かった。また、CaseD5: MgO+BS の配合では、CaseB3 より強度を得られなかったことから、pH が初期に中性ではなく、アルカリ性に向かって上昇し、薬液としては固化したが、強度増加に繋がらなかったのではないかと考えられる。以上より、pH の変化により薬液は固化するが、時間が経過すると共に、強度も低下する可能性が示唆された。そのため、CaseB3 のような初期に pH が大きく低下し、アルカリ消費が活発な配合ほど、高強度を呈するものと考えられる。

5. 今後の展望

図-6 より、全ての試料において 7 日養生試料は 3 日養生試料に比べて強度が低下したが、28 日養生試料は 3 日目養生を上回る結果となった。今後、微粒子系薬液における高強度、長期耐久性を目標に、それぞれの微粒子に対して固化に適した配合を再検討していくと共に、pH の変化が薬液固化に与える影響について検討を行っていく。

＜参考文献＞

1)薬液注入工法の調査・設計から施工まで編集委員会:薬液注入工法の調査・設計から施工まで、社団法人地盤工学会, pp.1-4, 2014
2)コンクリート協会:ジオポリマー, <http://www.jci-net.or.jp>,
3)米倉亮三, 島田俊介:薬液注入の長期耐久性及び恒久グラウト本設注入工法の設計施工, 近代科学社, pp.7-75, 2016

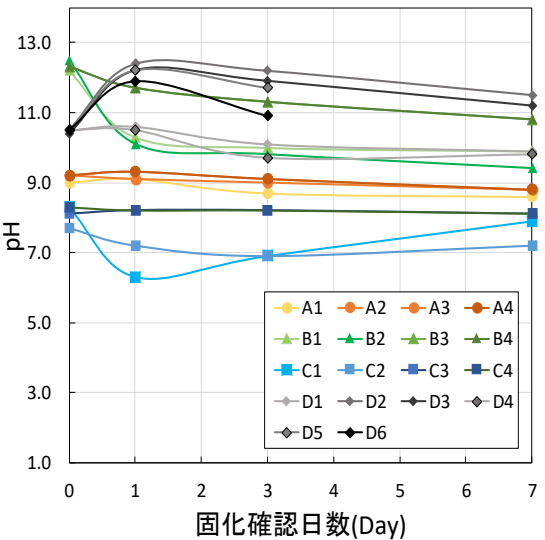


図-3 各ケースの pH の変化

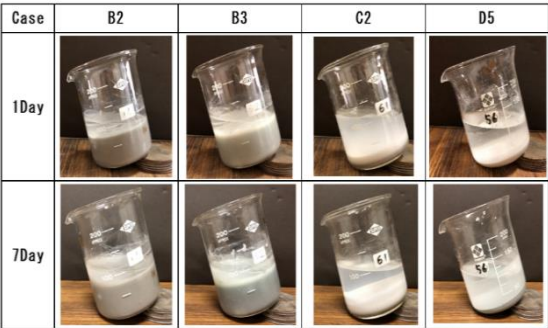


図-4 各ケースにおける固化の様子

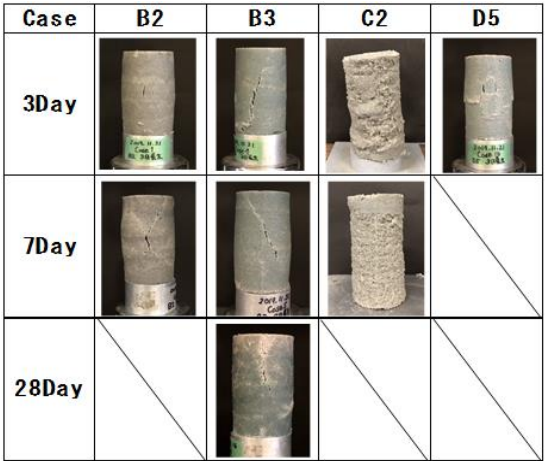


図-5 一軸圧縮試験結果(供試体)

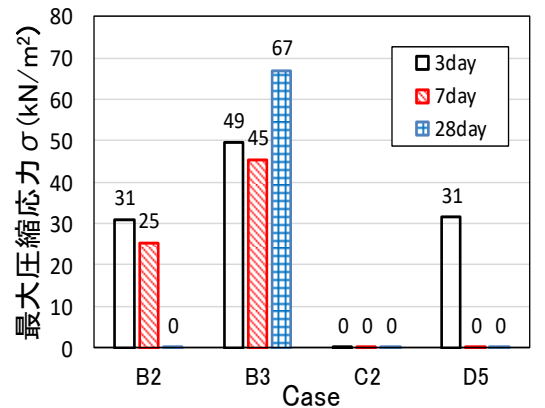


図-6 一軸圧縮試験結果(最大圧縮応力)