

複合ポリマー型地盤改良剤の開発

(株)鴻池組	正会員	○後藤 宇	(株)鴻池組	正会員	加藤 満
(株)鴻池組	正会員	大山 将	(株)鴻池組	正会員	小山 孝
東亜合成(株)		後藤彰宏	東亜合成(株)	正会員	坪内隆太郎
東亜合成(株)	正会員	中野 駿	京都大学大学院	正会員	勝見 武

1. はじめに

薬液注入による液状化対策技術は、既設構造物の直下および直近部の地盤改良が可能であること等から、既設護岸の背面地盤や既設タンクの基礎地盤等を中心としてこれまで数多く適用されている。しかし、その注入材として主に用いられている水ガラス系薬液の多くは、pH10 程度以上のアルカリ領域においてゲルの溶解度が急激に上昇する傾向¹⁾にあることが知られており、例えば工場施設等の基礎地盤で散見されるアルカリ地盤に対しては、適用困難となる場合が多い。そこで著者らは、安全で浸透性に優れ、アルカリ性を呈する地盤に対しても安定して設計強度を確保でき、長期耐久性にも優れた地盤改良剤（注入材）を開発した²⁾。

本報告では、著者らが新たに開発した注入材の概要および特徴を述べるとともに、名古屋市内の臨海部の埋立地で行った薬液注入工事の試験施工結果について報告する。

2. 注入材の開発

(1) 注入材の概要

著者らは、アクリル酸マグネシウム（以下、AA-Mg）を主剤とし、ポリ塩化アルミニウム（以下、PAC）、重合開始剤、添加剤を混合・添加した新しい注入材を開発した。AA-Mg から成る高分子鎖は、架橋剤となるPACによりネットワークを形成し、高い架橋密度かつ高強度のゲル（複合ポリマー）になる（図-1）。また、この高分子鎖の主鎖骨格は、化学的に安定な炭素-炭素結合からなるため、劣化要因となる加水分解等の分解反応が発生しない。このため経時安定性が高く、長期的な地盤改良効果が得られる。

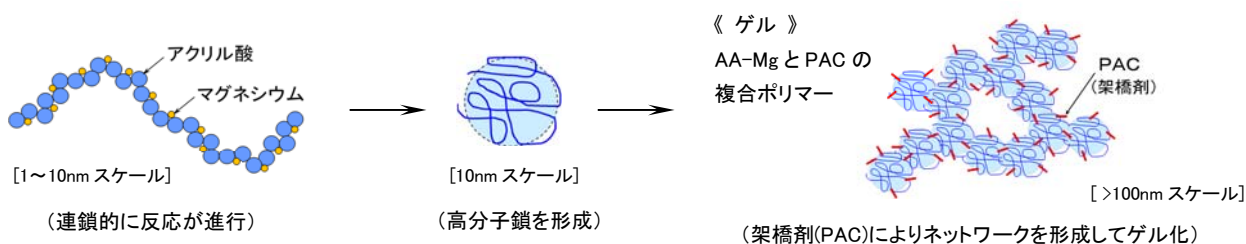


図-1 ゲル形成のイメージ

(2) 注入材の性質

開発した注入材は、A 液、B 液の二液系として用いられる（写真-1）。A 液は AA-Mg（主剤）、チオ硫酸ナトリウム（添加剤）および塩化カルシウム（反応促進剤）から成る溶液であり、B 液は PAC（架橋剤）および t-アミルヒドロペルオキシド（重合開始剤）から成る溶液である（表-1）。添加剤は重合開始剤の活性調節のため、また、反応促進剤は砂共存下での反応促進を図るために添加する。A 液と B 液を混合すると 5～60 分程度でゲル化するが、ゲルタイムは重合開始剤と添加剤の量の増減によって制御可能である。

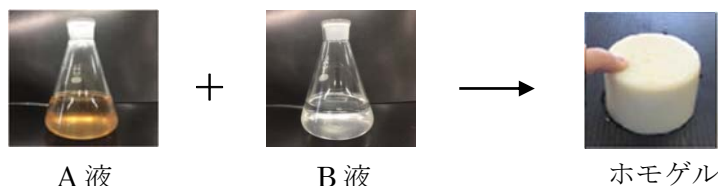


写真-1 注入材の A 液、B 液とホモゲル

キーワード 複合ポリマー、薬液注入、液状化対策、地盤改良

連絡先 〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1 本社 技術本部 土木技術部 TEL 06-6245-6567

AA-Mg は、硬化すると弾力性に富むゴム状のホモゲルになる。このホモゲルは、AA-Mg の濃度を下げるにつれて軟らかくなり（写真-2）、重量濃度 3～4%程度以下になると硬化しなくなる。しかし、例えば重量濃度 4%程度であっても PAC を少量混合すると、硬化後には石鹸状のホモゲルになる（写真-3）。著者らはこの特徴に着目し、AA-Mg と PAC の適切な配合によって改良土に必要な液状化強度を確保することとした。以後、濃度は重量濃度で表すこととし、強度に直接寄与する AA-Mg +PAC の合計濃度を「注入材濃度」とする。本注入材の pH は PAC の塩基度に依存し、市販の PAC の内、標準的な塩基度の PAC 使用時に pH4.2 程度、高塩基度の PAC 使用時に pH6.0 程度となる。このため本注入材は、適用場所や用途等に応じて、弱酸性～中性の薬液として使い分けることができる。

(3) 改良強度

開発した注入材による改良土（サンドゲル）の一軸圧縮試験および繰返し非排水三軸試験（液状化試験）を行った。供試体（直径 5cm、高さ 10cm）は水中落下法により、モールド中で注入材と豊浦砂を混合して作製した。また、アルカリ条件での強度確認のため、酸化マグネシウムを添加した豊浦砂（pH10.5）、水酸化カルシウムを添加した豊浦砂（pH10,11,12）についても、本注入材による改良土の供試体を作製した。豊浦砂の相対密度 D_r は、60%程度に調整した。供試体の養生日数は 3～5 日とした。

注入材濃度と一軸圧縮強さ q_u との関係を図-2、注入材濃度と液状化強度比 R_{L20} ³⁾との関係を図-3 に示す。図-2 および図-3 から、注入材濃度が増加するとともに q_u も R_{L20} も増加する傾向が認められ、液状化対策として一般的に要求される $q_u=50\sim100\text{kN/m}^2$ 程度（室内強度は 2 倍の $100\sim200\text{kN/m}^2$ 程度）⁴⁾、 $R_{L20}=0.3\sim0.6$ 程度⁴⁾を確保できることが明らかになった。また、図-2 および図-3 から、アルカリ条件下でも非アルカリ条件と同等の一軸圧縮強さと液状化強度比が得られており、開発した注入材は pH10～12 程度のアリカリ地盤に対しても適用可能であると考えられる。

表-1 注入材の配合と注入材濃度の目安

	成 分	濃度（重量%）
A液	AA-Mg（主剤）	2～8
	チオ硫酸ナトリウム（添加剤）	0.1～0.2
	塩化カルシウム（反応促進剤）	1
	水	42～48
B液	PAC（架橋剤）	1～4
	<i>t</i> -アミルヒドロペルオキシド（重合開始剤）	0.1～0.2
	水	46～49
合 計		100

※ 注入材濃度（AA-Mg+PAC）の目安は3～12%
AA-MgとPACの濃度比は概ね2:1



写真-2 ホモゲル
(AA-Mg (濃度 7%))



写真-3 ホモゲル
(AA-Mg (濃度 4%)+PAC (濃度 2%))

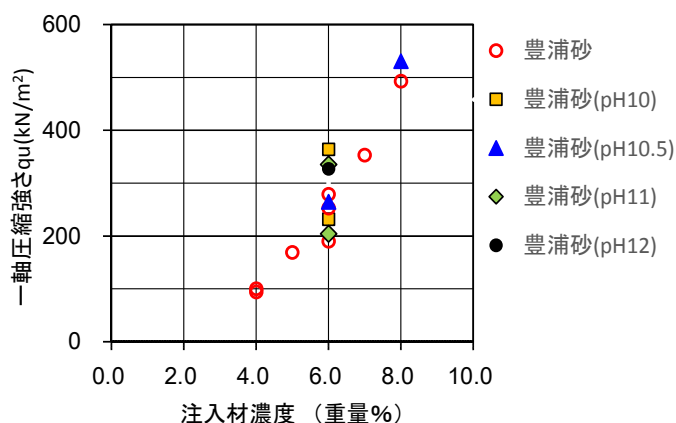


図-2 注入材濃度と q_u (室内) の関係

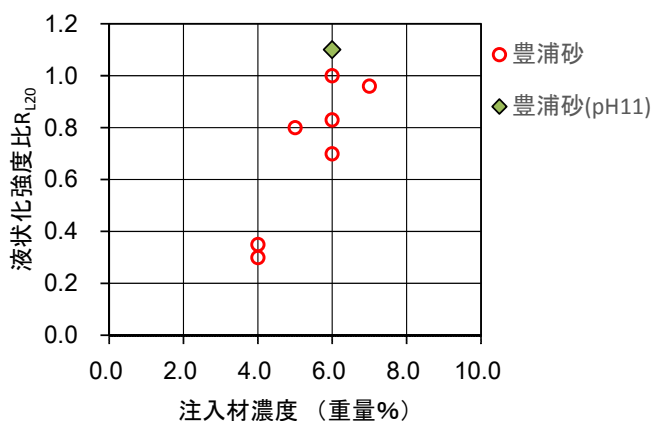


図-3 注入材濃度と R_{L20} の関係

3. 試験施工

本章では、開発した注入材を実地盤に適用した試験施工結果について報告する。試験施工は、名古屋市内の臨海地域の埋立地において 2017 年 9 月に実施し、その後品質および出来形等の確認を行った。

(1) 対象地盤

試験施工に先立ち、施工ヤードの中央で地盤調査を行った。ボーリング柱状図を図-4、埋土層および砂質土層の室内土質試験結果を表-2 に示す。当該地盤は、GL-3.0m 以浅が礫やシルトが混じった砂質土から成る埋土層であり、GL-3.0m～4.1m は沖積砂質土層、それ以深は沖積粘土層である。薬液注入は、液状化する可能性のある地下水位（GL-1.45m）以深の埋土層および沖積砂質土層を対象に行った。対象土層の N 値は 5～10、細粒分含有率 F_c は 15%程度、液状化強度比 R_{L20} は 0.2～0.25 程度であった。

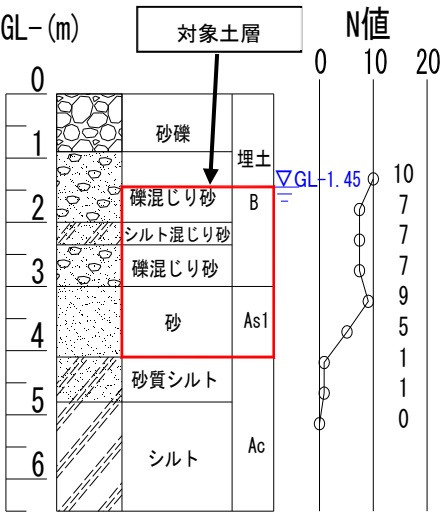


図-4 試験施工箇所のボーリング柱状図

表-2 室内土質試験結果

地層名	採取深度 (GL-m)	pH	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	土粒子の 密度 ρ_s (g/cm ³)	含水比 (%)	礫 (%)	砂 (%)	シルト + 粘土 (%)	最小密度 $\rho_{d\min}$ (g/cm ³)	最大密度 $\rho_{d\max}$ (g/cm ³)	液状化 強度比 R_{L20}
B(埋土)	1.5～2.3	—	1.817	2.64	28.3	0.5	84.3	15.2	1.218	1.491	0.197
As1(砂)	3.0～3.9	8.9	1.888	2.653	27.8	3	82.5	14.5	1.228	1.511	0.247

(2) 注入材の設計基準強度および配合

注入材の設計基準強度は、次のような手順で設定した。まず、「高压ガス設備等耐震設計指針」⁵⁾（高压ガス保安協会）に基づきレベル 2 地震に対する液状化判定を行い、当該地盤での発生が予想される最大せん断応力比 $L_{\max}$ を算出して、液状化防止に必要な液状化強度比 R_{L20} ($=0.427$) を求めた。次に、その R_{L20} を本注入材における $R_{L20} \sim q_u$ 関係式（図-5）に当てはめ、設計基準強度（原位置強度） 60kN/m^2 を得た。図-5 に示す $R_{L20} \sim q_u$ 関係図および関係式は、データが少ない現時点での暫定的な図および回帰式であり、今後のデータ集積によってより高精度な関係式へ見直す予定である。このようにして得られた設計基準強度（原位置強度）に対し、地盤の不均質性等の影響を勘案して安全率 2⁶⁾を暫定的に乘じ、設計基準強度（室内強度）を 120kN/m^2 とした。

現地砂を用いた配合試験により定めた注入材の配合を表-3 に示し、その配合の注入材による改良土の q_u （室内強度）を表-4 に示す。

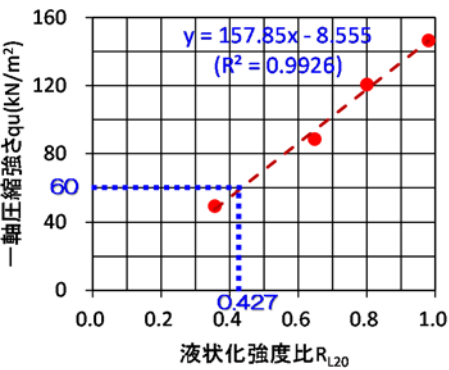


図-5 本注入材におけるサンドゲルの R_{L20} と q_u の関係（暫定）

表-3 注入材の配合（試験施工）

A液（pH6.6程度）		B液（pH4.5程度）	
AA-Mg（35%）	55ℓ	高塩基性PAC（23%）	35ℓ
水	140ℓ	水	165ℓ
チオ硫酸ナトリウム （添加剤）	0.85kg	t-アミルヒドロペル オキシド（重合開始剤）	0.42kg
塩化カルシウム （反応促進剤）	4.3kg	—	—
小計	200ℓ	小計	200ℓ
混合後400ℓ（pH5.8程度）			

※注入材濃度8%
※ゲルタイム50～60分（地中温度25℃（実測値））

高塩基性 PAC を使用した注入材の pH (=5.8) は、ほぼ中性領域である。ゲルタイムはチオ硫酸ナトリウム（添加剤）と重合開始剤の添加量で調整し、50～60 分とした。ゲルタイムとチオ硫酸ナトリウムの添加量には図-6 に示す関係があり、実測地中温度がほぼ一定の 25℃であったことから、試験施工で使用する注入材の配合のチオ硫酸ナトリウムは 2.12g/l (0.85kg/400l) とした。また、重合開始剤の添加量はチオ硫酸ナトリウムとモル比で 1 : 1 とした。

表-4 改良土の一軸圧縮試験結果（室内）

土層	qu (kN/m ²)	
	試験値	設計基準強度 (室内)
B	176	120
	191	
	205	
As1	486	

※ 砂の相対密度は60%程度

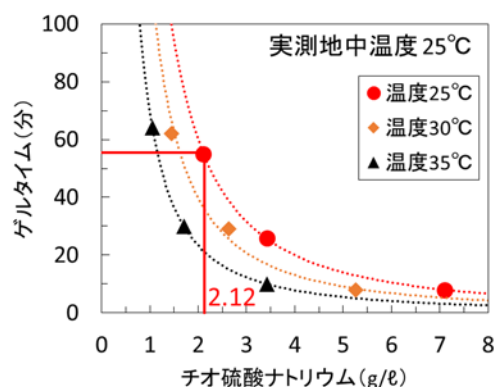


図-6 ゲルタイムとチオ硫酸ナトリウムの関係
(試験施工配合(注入材濃度 8%)の場合)

(3) 試験施工方法

改良体配置の平面および断面を図-7 に示す。注入施工はダブルパッカにより、表-5 に示す諸元で行った。平面図（図-7）の注入箇所 No.1～8 は鉛直注入を行い、既設の基礎スラブの直下である No.9, No.10 は、基礎スラブの外側から斜め注入を行った。注入速度は、現地での限界注入速度試験結果に基づき、割裂注入とならない最適速度である 10l/分に設定した。また、削孔部にシールグラウトを充填することにより（図-8）、孔壁保護や注入材の地表面へのリーク防止を図った。

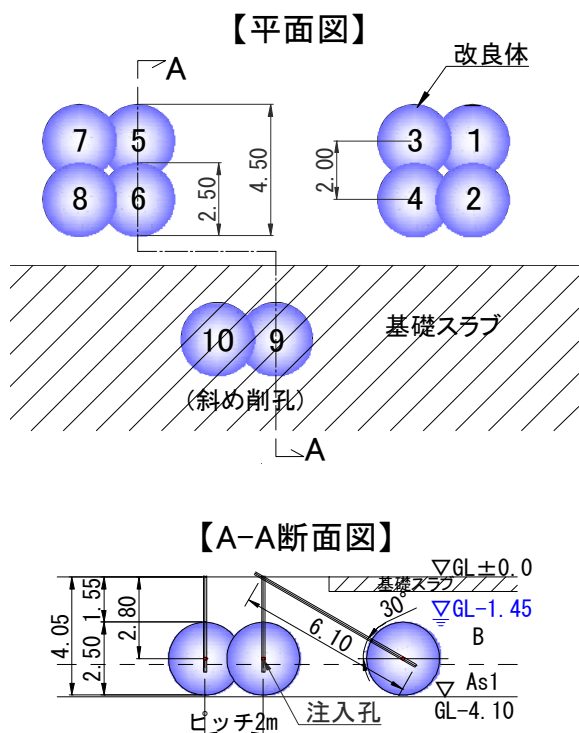


図-7 改良体の配置

表-5 注入諸元（試験施工）

改良直径	2.5m
改良ピッチ	2.0m
注入率	25%
注入量	2,000l/球
注入速度	10l/分

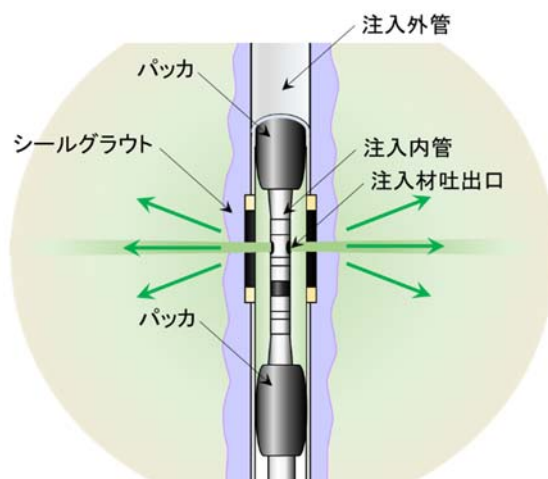


図-8 シールグラウト方式による注入

体の個数が少ないことや地盤条件により注入圧があまり上昇しなかった影響も考えられる。注入による地表面変位の影響については、今後データの集積を行っていく必要がある。



図-10 地表面変位測定箇所

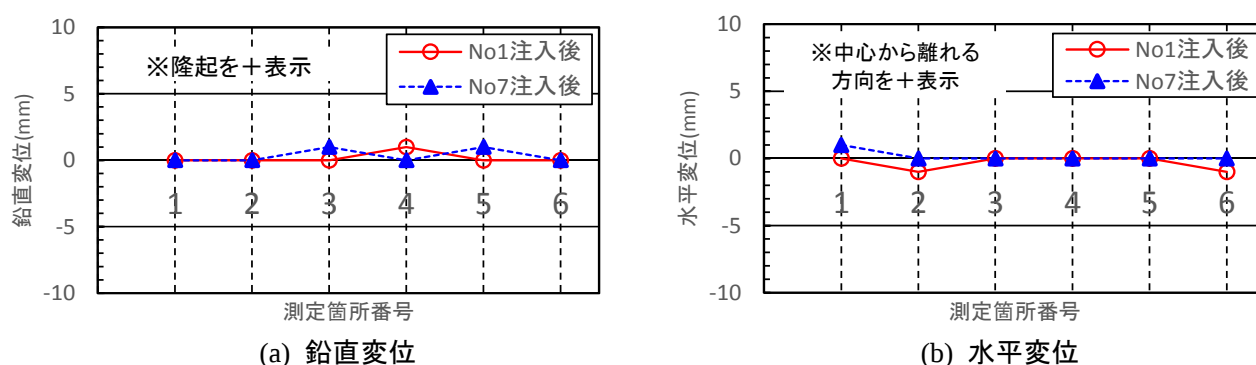


図-11 地表面変位測定結果（試験施工）

7. おわりに

本報告では、新たに開発した液状化対策用注入材の特徴を述べるとともに、非アルカリ条件下およびアルカリ条件下での強度試験結果と実地盤での試験施工結果を示した。今後も注入材の環境安全性やアルカリ条件下での改良土の長期耐久性の確認を継続的に実施し、この注入材の信頼性・確実性をさらに高めたいと考えている。

最後に、試験施工の計画および注入工において、日本基礎技術株式会社に多大な協力を得た。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 米倉亮三ほか：薬液注入の長期耐久性と恒久グラウト本設注入工法の設計施工 ―環境保全型液状化対策工と品質管理―，近代科学社，p.41，2016.
- 2) 加藤ほか：複合ポリマー型地盤改良剤の開発と試験施工，日本材料学会第13回地盤改良シンポジウム，投稿中
- 3) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.730-749，2009.
- 4) (一財)沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル，p24，2010.
- 5) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル2耐震性能評価（解説）編，pp.66-67，2012.
- 6) (一財)沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル，p55，2010.