

●複合ポリマー型地盤改良剤（液状化対策用地盤注入材） Complex Polymer Grouting Material

坪内 隆太郎
Ryutaro Tsubouchi

Key Word : Grouting Material, Complex Polymer, Liquefaction Countermeasure

1 緒言

土木建築工事において、地盤や岩盤中に硬化性の流体を注入して固結させ、漏水防止や強度増加を図る工法を注入工法と言い、注入される流体を注入材、グラウトなどと呼ぶ。注入材はセメント、水ガラス、ウレタン、PVAなど複数存在するが、その中の一つにアクリル酸塩がある^{1, 2)}。当社は止水用途でアクリル酸多価金属塩を主剤とした注入材を販売しており³⁾、当研究所でその用途展開を検討している。アクリル酸塩は安全性が高く、多価金属塩の存在下で重合すると金属架橋により不溶性のゲルを形成する。ゲルの強度や弾性率は架橋剤の種類や量により調節でき、力学物性を広範囲で設計可能である。

初期検討において、架橋剤として特にポリ塩化アルミニウムを用いた場合、得られるゲル（複合ポリマー）が地盤の液状化対策に必要な強度などの基礎物性を満たすことを確認できた。これを受け、液状化対策用地盤注入材として本格的な開発に着手した。

力学評価に加えて、注入材として必要な特性である浸透性、土中での硬化性、長期耐久性を評価した。

現在、公共工事に使用できる注入材は旧建設省暫定指針により水ガラス系に限られている。これは、安全性重視の観点から、地中での性質が明確でない注入材の使用を制限するも

のである（研究の進展に伴い見直され得る）。そのため、開発注入材の環境影響の評価にも取り組んだ。

以上の検討を行った結果、アクリル酸塩を用いた液状化対策用注入材の完成に至った。さらに、水ガラス系注入材が適さないアルカリ性地盤においても適用可能という優位性を有することも確認できた。

本稿では、開発品である複合ポリマー型地盤改良剤（以下、本注入材）の特徴を述べるとともに、浸透性、土中での硬化性、長期耐久性、環境影響の各評価結果について報告する。また、試験施工により実現場での施工性および注入地盤の品質を本注入材が満足することを確認できており、その試験施工の概要と結果も併せて報告する。

2 本注入材の特徴および各評価結果

2.1 ゲル化機構

本注入材は、主に、主剤（アクリル酸マグネシウム）、重合開始剤、架橋剤（ポリ塩化アルミニウム）、水から成る。

図1にゲル化の機構を示す。アクリル酸マグネシウムはラジカル重合性の炭素-炭素二重結合を有する。これにラジカルを生じる重合開始剤を加えると二重結合が連鎖的に付加反応を起こし、炭素-炭素結合を主骨格とする高分子鎖（ポリマー）が生じ、更にポリ塩化アルミニウムと多点でイオン結

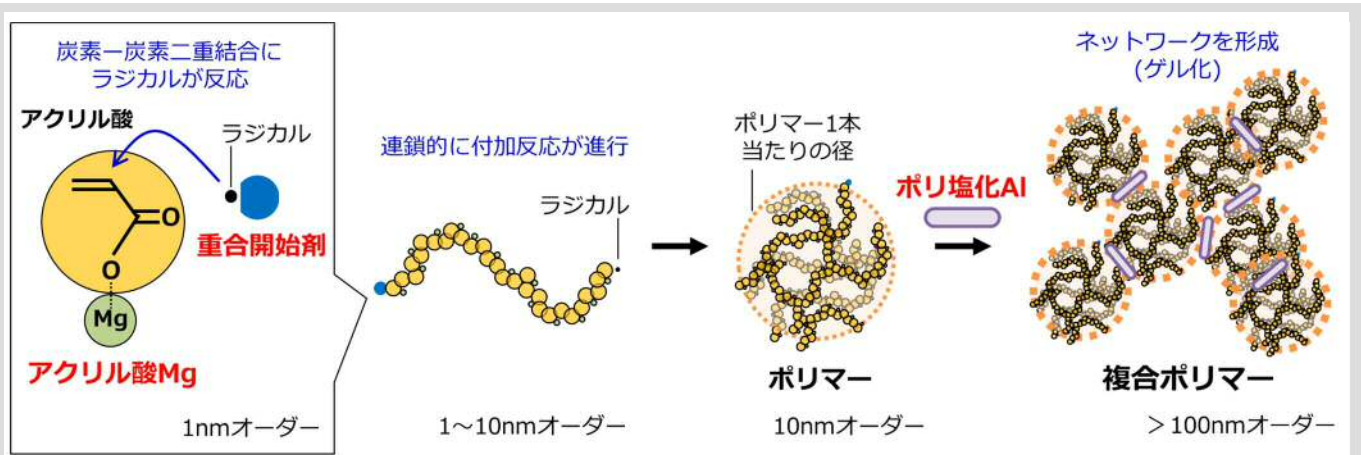


図1 ゲル化機構

東亜合成株式会社 R&D総合センター 製品研究所
New Products Research Laboratory, General Center of R&D, TOAGOSEI CO., LTD.

合してネットワークを形成し、高架橋密度のゲル（複合ポリマー）を形成する。

2.2 性質

本注入材はA液、B液の二液系として用いることができる（図2）。A液はアクリル酸マグネシウム、添加剤および塩化カルシウム（反応促進剤）から成る水溶液であり、B液はポリ塩化アルミニウムおよび重合開始剤から成る水溶液である（表1）。添加剤はレドックス重合の還元剤として、反応促進剤は土共存下での重合反応促進に寄与する。

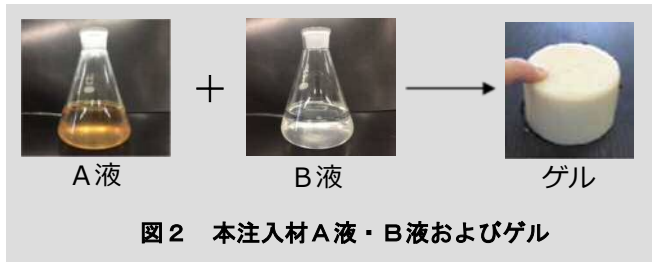


図2 本注入材A液・B液およびゲル

表1 注入材配合

	成分	濃度[wt%]
A液	アクリル酸マグネシウム (主剤)	2~8
	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	ポリ塩化アルミニウム (架橋剤)	1~4
	重合開始剤	0.1~0.2
	水	46~49

注入材濃度(アクリル酸マグネシウム+ポリ塩化アルミニウム)
… 3~12wt%

ゲルの強度はアクリル酸マグネシウムおよびポリ塩化アルミニウムの濃度に比例する。以降、これらの合計濃度を「注入材濃度」とする。

この二液は混合後5~60分でゲル化する。ゲル化が始まる時間（ゲルタイム）は重合開始剤と添加剤の量の増減により制御可能である。

本注入材薬液のpHはポリ塩化アルミニウムの塩基度に依存する。市販品のうち、標準的な塩基度のポリ塩化アルミニウム使用時にpH4程度、高塩基度のポリ塩化アルミニウム使用時にpH6程度である。このため本注入材は、使用環境や用途などに応じて、弱酸性から中性の薬液として使い分けることができる。

2.3 力学物性

本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。供試体は

注入材と豊浦砂を水中落下法によりモールド（直径5 cm、高さ10 cm）に投入して作製した。砂の相対密度は60%程度に調整した。また、アルカリ環境での強度確認のため、水酸化カルシウム、水酸化ナトリウムおよび酸化マグネシウムをそれぞれ豊浦砂にpH11（5倍量の水で希釈したときの値）となるよう添加したものについても同様に供試体を作製した。

注入材濃度と一軸圧縮強さの関係を図3に示す。一軸圧縮強さは注入材濃度の増加とともに増加し、液状化対策として一般に要求される50~100 kN/m²（室内強度は2倍の100~200 kN/m²）⁴⁾を満足できることが確認された。

また、アルカリ環境でも非アルカリ環境と同等の一軸圧縮強さが得られた。

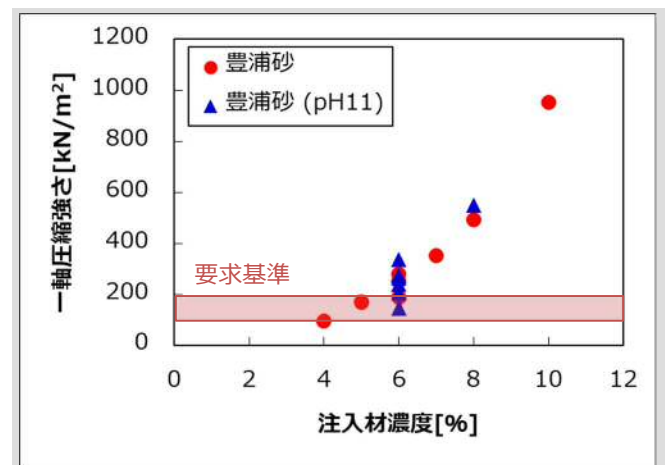


図3 改良土の一軸圧縮強さ

注入材濃度と、液状化試験から得られる液状化強度比 R_{L20} ⁵⁾の関係を図4に示す。液状化強度比が大きいほど液状化に対する耐性が高いことを示し、「~0.28 : 小さい」、「0.25~0.38 : 中位」、「0.35~ : 大きい」が目安の値である⁶⁾。豊浦砂のみ（注入材なし）では液状化強度比は0.15である。それは注入材濃度の増加により増加し、液状化対策として一般的に要求される値である0.3~0.6⁴⁾を満足できること確認した。この値は実地盤の液状化判定により算出されるものであり、マグニチュード6.5以上の地震に耐えることが可能な水準である。

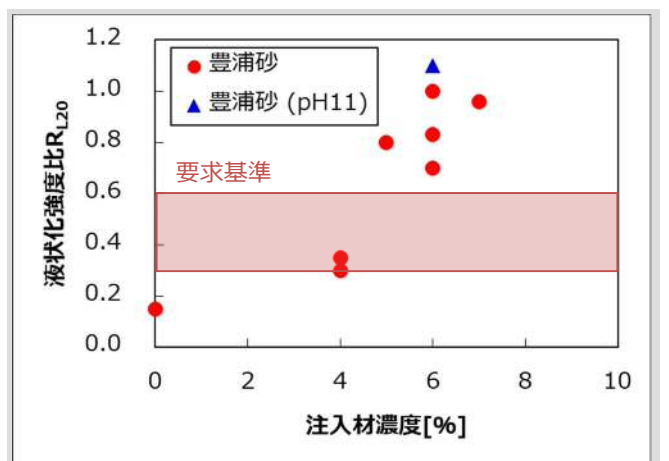


図4 改良土の液状化強度比

また、アルカリ条件（水酸化カルシウムを添加した豊浦砂、pH11）でも非アルカリ環境と同等の液状化強度比が得られた。

これらから、本注入材による改良土は液状化対策工に求められる力学特性を有することが確認された。さらに、pH11程度のアルカリ環境に対しても適用可能であることが示された。

注入材濃度をさらに大きくすれば、非常に高強度の改良土を作製できる。濃度14.5%（アクリル酸マグネシウム9.5%、ポリ塩化アルミニウム5%）の本注入材による豊浦砂ゲル（相対密度90%）の一軸圧縮試験から得た応力-ひずみ曲線を図5に示す。濃度6%（アクリル酸マグネシウム4%、ポリ塩化アルミニウム2%）のもの（相対密度60%）も合わせて示す。これから確認できるように、本注入材によるサンドゲルの一軸圧縮強さは3000 kN/m²以上の高強度を達成できる。このような注入材は、例えば地下水圧の高い大深度地下の湧水抑制対策などに使用できると期待される。

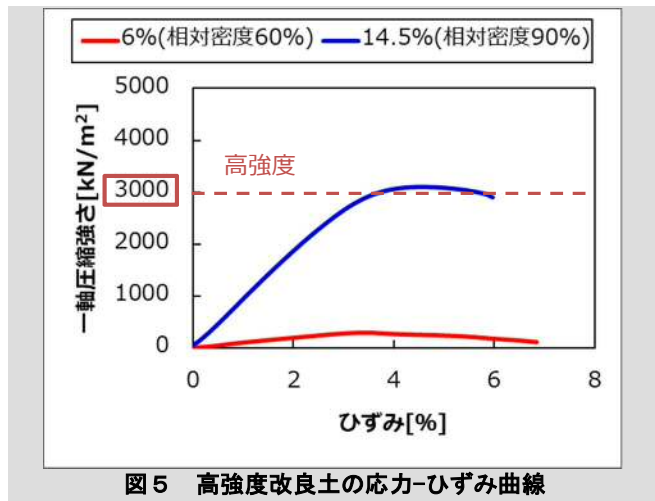


図5 高強度改良土の応力-ひずみ曲線

2.4 浸透性

本注入材が地盤中に円滑に浸透し強度を発現することを実験的に確認するため、一次元浸透試験を行った。製作した一次元浸透試験装置の全景および概念図を図6に示す。長さ1 mの透明な塩化ビニル管内にフィルター材（ガラスビーズ）を詰めた後、砂を相対密度60%程度になるように均一に充填し、その上部にもフィルター材を詰めた。次に、下端部から通水して砂全体を水飽和させた。そして、注入材薬液を下端部から20 g/min程度の一定速度で注入しつつ、上端部から排水した。注入量は、砂の充填量および間隙率から飽和水量を算出し、それ以上の量とした。砂には豊浦砂、珪砂7号を用いた。注入材濃度は6%（アクリル酸マグネシウム4%、ポリ塩化アルミニウム2%）とした。

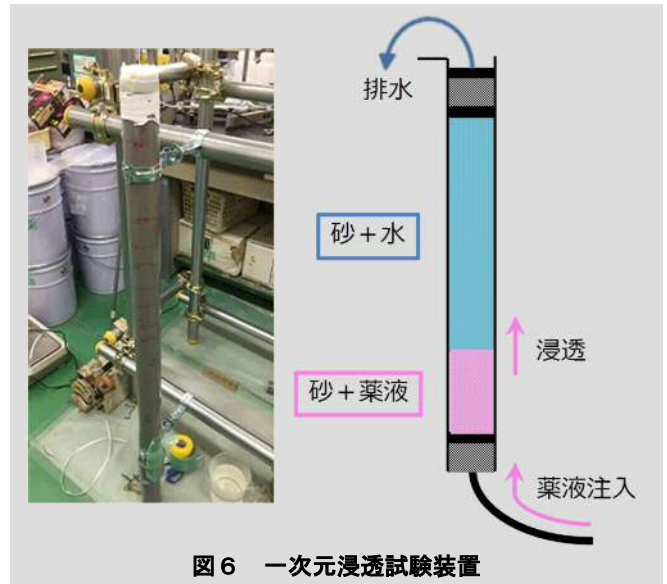


図6 一次元浸透試験装置

注入材硬化後、改良土から供試体（直径5 cm、高さ10 cm）を切り出し、一軸圧縮試験を行った。浸透距離と一軸圧縮強さの関係を図7に示す。2種類の砂共に、浸透距離20 cmから80 cmの箇所まで一軸圧縮強さは概ね一定であった。これにより本注入材は高い浸透性を有し、浸透後強度を発現することが確認された。

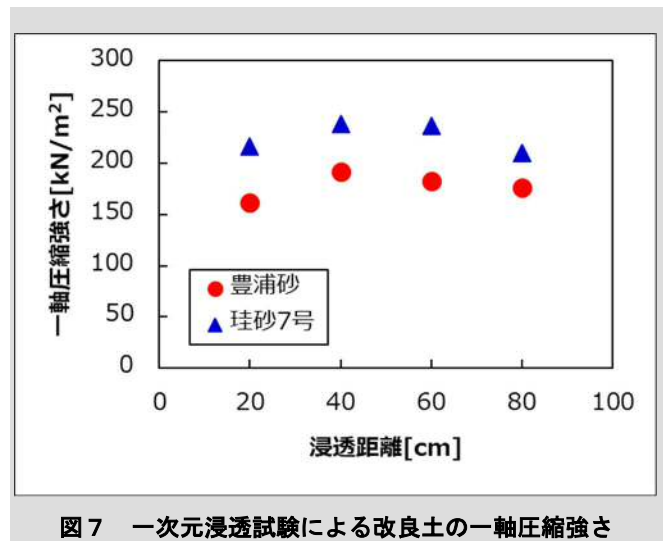


図7 一次元浸透試験による改良土の一軸圧縮強さ

2.5 土中での硬化性

本注入材が実際の地盤中でも硬化し十分な強度を発現することを確認するため、実地盤の土を用いた改良土の一軸圧縮試験を行った。土には、名古屋市内臨海地域の埋立地にて、ボーリング掘削により取得した地下2~3 mおよび3~4 mに位置する砂質土を用いた。細粒分含有率はそれぞれ6.2%（地下2~3 m）、38.3%（地下3~4 m）である。供試体は水中落下法によりモールド（直径5 cm、高さ10 cm）にて作製した。相対密度は60%程度に調整した。

本注入材は実地盤の土であってもサンドゲルを形成できた。注入材濃度と一軸圧縮強さの関係を図8に示す。図3にある豊浦砂ゲルでの関係も併せて示す。実地盤土ゲルの一軸圧

縮強さは、豊浦砂ゲルのものよりは小さいが、注入材濃度を増やすと大きくなり液状化対策として一般に要求される50～100 kN/m²（室内強度は2倍の100～200 kN/m²）を満足できると分かった。これにより、本注入材は実地盤中でも硬化し液状化を防ぐのに十分な強度を発現できることが確認された。

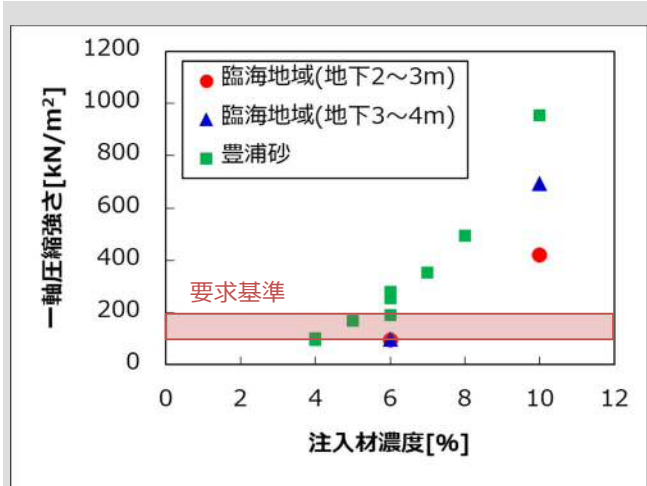


図8 改良実地盤土の一軸圧縮強さ

2.6 長期耐久性

本注入材の長期耐久性を評価するため、劣化促進試験を行った。注入材ゲルの劣化過程には、ゲルの「分解」とそのゲル分解物の「溶出」の2段階があると考えられる。そこで、「分解」を促進するために、サンドゲルを熱水中に浸漬する加熱試験を行った。また、「溶出」を促進すべく、サンドゲルを流水下に置く流水試験を行った。

2.6.1 加熱試験

注入材と豊浦砂を水中落下法によりモールド（直径5 cm、高さ10 cm）に投入してサンドゲルを作製した。砂の相対密度は60%程度に調整した。注入材は濃度6%（アクリル酸マグネシウム4%、ポリ塩化アルミニウム2%）のものを用いた。ただし、配合は開発段階のものであり、表1の成分に加え水酸化ナトリウム（pH調整剤）を2.5%、クエン酸（架橋助剤）を2.4%含む。本注入材ゲルの構造はポリマーとポリ塩化アルミニウムのネットワークによるものなので、この配合によるゲルは表1によるゲルと同質だと考えられる。

ふた付きの容器内で図9のようにサンドゲルを水に浸漬し、80℃にて試験した。一定期間後にサンドゲルを取り出して一軸圧縮試験を行った。



図9 水浸漬したサンドゲル

結果を図10に示す。一軸圧縮強さは180日（実日数189日）以上経過しても初期値を維持し、サンドゲルの体積減少も認められなかった。一般的な化学反応の速度は温度が10℃上昇するごとに2倍になる⁷⁾。実環境温度を20℃として概算すると本試験は180×2⁶日相当となり、本注入材による改良土はおよそ30年相当の耐久性を有すると判断した。

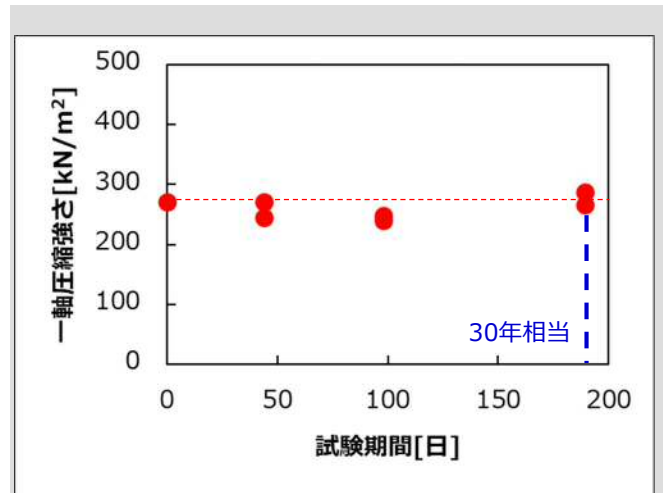


図10 加熱試験結果

2.6.2 流水試験

ゲル分解物の溶出は、ゲル表面の単位面積当たりに、単位時間に触れる水の量（単位水量）が大きくなるのに比例して加速されると考えられる。そこで、実環境として直径2 mの球状改良体が一般的な流速5 m/day⁸⁾の地下水流下にある状況を想定し、試験での単位水量が実環境の10倍になるように流水試験の流量を設定した。すなわち、本試験の促進倍率は10倍である。

流水下にサンドゲルを置くため、既往の研究における実験装置⁹⁾を参照して、水槽間で水を循環させる装置を作製した（図11）。2.6.1に記載の方法で作製したサンドゲルを装置内に置いた。



図11 流水試験装置

循環水流量の設定は次のように行った(表2)。まず、層流である流水下の球に対して、流速と単位水量の関係をシミュレーションにより算出した。供試体に円柱状サンドゲルを用いることにし、円柱に対する関係も同様に求めた。次に、試験の単位水量が実環境のもの10倍になる試験流速を求めた。そして、サンドゲルを浸ける水の水流方向の断面積から、試験流速を循環水流量に換算した。

表2 流水試験流量の設定

	実環境	試験
改良体形状	球	円柱(直径:高さ=1:2)
流速 v	5 m/day	55.63 m/day
単位水量 U	4.388 m/day	43.88 m/day
v と U の関係	$U=0.8775v$	$U=0.7887v$

試験流速から循環水流量に換算

$$\begin{aligned}
 &55.63 \text{ m/day} \\
 &= 3.863 \text{ cm/min} \\
 &= 1406 \text{ cm}^3/\text{min} \text{ (断面積 } 364 \text{ cm}^2\text{)} \\
 &\cdots\text{循環水流量を } 2000 \text{ cm}^3/\text{min} \text{ 程度に設定}
 \end{aligned}$$

循環水には水道水と炭酸カルシウム飽和水 (pH9) の2種類を用いた。炭酸カルシウム飽和水はアルカリ環境における評価を想定している。試験開始以降、一定期間後にサンドゲルの一軸圧縮試験を行った。

循環水に水道水、炭酸カルシウム飽和水を用いた場合の結果を図12、図13に示す。一軸圧縮強さは400日(実日数416日)以上経過しても初期値を維持し、サンドゲルの体積減少も認められなかった。促進倍率は10倍であり、本試験は400×10日相当となることから、本注入材による改良土はおおよそ10年相当の耐久性を有することを確認できた。さらに、炭酸カルシウム飽和水中というアルカリ環境でも10年以上劣化しないことを示すことができた。

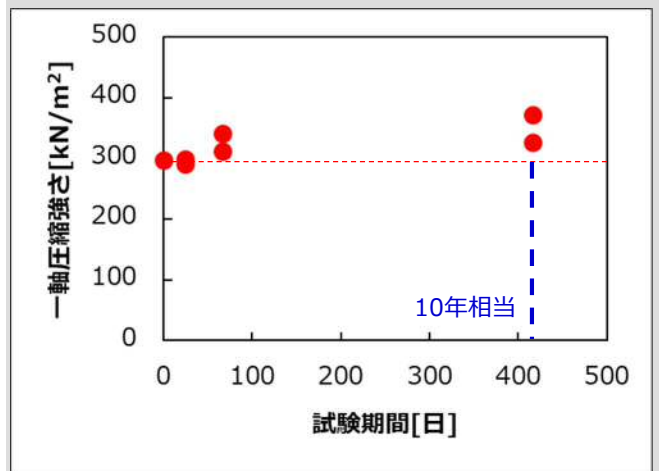


図12 流水試験結果：水道水

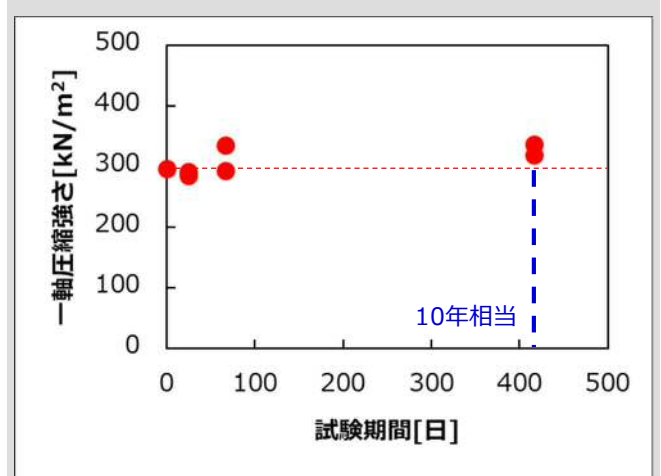


図13 流水試験装置：炭酸Ca飽和水 (pH9)

2.7 環境影響

2.7.1 土壤汚染に関する評価

注入材に由来する成分が施工箇所から外部に拡散することで土壤汚染が発生する可能性について調べるため、平成15年環境省告示第18号¹⁰⁾に基づき土壌溶出量試験を行った。供試体としたサンドゲル作製にあたり、砂には豊浦砂を用い、相対密度は60%に調節した。また、注入材濃度は安全側の設定として、液状化対策工事での上限濃度になると想定される12% (アクリル酸マグネシウム8%、高塩基性ポリ塩化アルミニウム4%)とした。

試験の結果、特定有害物質の全項目で溶出量は基準を下回り、本注入材による改良土は土壤汚染対策法で定められた基準に適合することが明らかになった。

2.7.2 生物安全性評価

注入材薬液の水生生物に対する安全性を確認するため、OECD (経済協力開発機構) の毒性試験テストガイドライン¹¹⁾に準拠し、ヒメダカでの急性毒性試験を行った。注入材濃度は2.7.1と同じく12%とした。

試験の結果、中央致死濃度 LC_{50} は $LC_{50} > 100$ mg/Lであった。このことから、本注入材は「化学品の分類および表示に関する世界調和システム（GHS）」における水生環境有害物質の急性区分1～3のいずれにも該当しないことが確認された。

2.7.3 鉄腐食性評価

注入材使用により地盤中の鉄材（構造物基礎杭、配管など）の腐食トラブルが発生しないことを確認するため、熱促進試験を行った。試験状況の概念図を図14に示す。本注入材を用いて、ふた付きビン中に鉄片が内部に埋め込まれた豊浦砂ゲルを作製し、ふたをして60℃にて試験した。一定期間後に鉄片を取り出し、錆を落として、鉄片の初期からの重量減少を算出した。注入材濃度は6%（アクリル酸マグネシウム4%、高塩基性ポリ塩化アルミニウム2%）とし、砂の相対密度は60%に調節した。また、比較のため、3%塩化ナトリウム水溶液で満たした豊浦砂を用いて同一の試験を行った。この条件は港湾付近の地盤を模しており、このときの腐食量と同等以下であれば、鉄材に設けられた腐食しろにより、腐食トラブルは生じないと考えている。



図14 鉄腐食性試験

結果を図15に示す。本試験は密閉された完全閉鎖系の非常に厳しい条件であるが、重量減少率は190日（実日数191日）経過しても1%未満であった。また、腐食量は3%塩化ナトリウム水溶液条件と同程度であり、鉄腐食性に問題はないことが確認された。

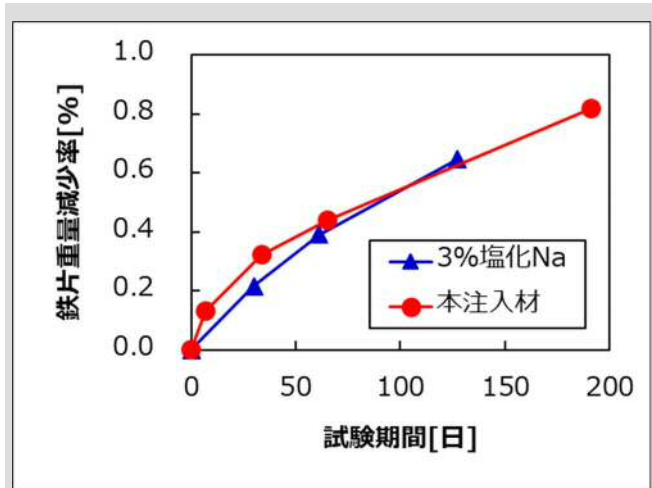


図15 改良土の鉄腐食性

3 試験施工

名古屋市内臨海地域の埋立地において試験施工を実施し、その後改良体の出来形確認および強度試験を行った。

試験施工は名古屋市内臨海地域の埋立地の地下水位（地下1.45 m）以深の砂質土層で行った。対象土層の細粒分含有率は15%程度、液状化強度比は0.2～0.25程度であった。

設計基準強度は次のような手順で設定した。当該地盤についてのレベル2地震による液状化判定¹²⁾を行い、必要な液状化強度比（=0.427）を算出した。次に、この値を本注入材の液状化強度比と一軸圧縮強さの関係式（暫定）に当てはめ得られた値60 kN/m²を設計基準強度に設定した。その室内強度は2倍の120 kN/m²とした。

注入材濃度は、当該地盤の土を用いた室内配合強度試験により、8%（アクリル酸マグネシウム5.5%、高塩基性ポリ塩化アルミニウム2.5%）と決定した。

注入後、掘削による改良体の出来形確認を行った（図16）。現地の制約条件により改良体上部のみの確認となったが、計画半径1.25 mに対して半径1.5 m程度の改良体を確認することができた。



図16 改良体上部の出来形

試料採取をトリプルチューブサンプリングおよびブロックサンプリングによって行い、改良体の一軸圧縮試験および液状化試験を実施した。その結果、一軸圧縮強さおよび液状化強度比は設計基準値を全て満足した¹³⁾。

4 結言

本稿では、新たに開発した液状化対策用地盤注入材である複合ポリマー型地盤改良剤の特徴を述べ、その浸透性、土中での硬化性、長期耐久性、環境影響の各評価結果、および実地盤での試験施工の概要と結果を示した。今後も本注入材の環境影響をはじめとする各種特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。

複合ポリマー型地盤改良剤の開発は、株式会社鴻池組と共同で実施したものです。また、試験施工の計画および注入工においては、日本基礎技術株式会社から多大な協力を得ました。両社に対しここに深く感謝の意を表します。

演集”，(2018) 第VI部門 pp.1965～1966. 「複合ポリマー型地盤改良剤を用いた試験施工」

引用文献

- 1) 松尾新一郎，“高分子加工 別冊10 第22巻増刊号 土質安定用ポリマー”，高分子刊行会（1973）p.1. 「土質安定用ポリマーと薬液注入工法」
- 2) 宮沢健，近藤喜七郎，“高分子加工 別冊10 第22巻増刊号 土質安定用ポリマー”，高分子刊行会（1973）pp.55-63. 「アクリル酸塩系土質安定剤」
- 3) 福島浩一，*JETI*，1999，**47**巻，2号，pp.114～117. 「アクリル酸塩系注入止水材「アロンスーパーグラウト」の技術開発」
- 4) （一財）沿岸技術開発センター，“浸透固化処理工法技術マニュアル”，（2010）
- 5) 地盤工学会，“地盤材料試験の方法と解説”，（2009），pp.730～749.
- 6) 安田進，“液状化の調査から対策工まで”，鹿島出版会（1988）
- 7) 小宮山宏，“反応工学 反応装置から地球まで”，培風館（1995），p.14.
- 8) 日本地下水学会，井田徹治，“見えない巨大水脈 地下水の化学”，講談社（2009）p.106.
- 9) 仲山貴司，澤田亮，平岡陽，赤木寛一，“液注入工法で固化した改良体の耐久性評価に関する研究”，土木学会論文集C（地圏工学），（2013）**69**巻，2号，pp.162～173.
- 10) 環境省，“土壤溶出量調査に係る測定方法を定める件”，平成15年3月6日環境省告示第18号.
- 11) OECD，“毒性試験ガイドライン”，魚類急性毒性試験TG203.
- 12) 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”，（2000）.
- 13) 加藤満，後藤宇，大山将，小山孝，後藤彰宏，坪内隆太郎，勝見武，“土木学会 第73回年次学術講演会発表講