

複合ポリマー型地盤注入材の開発

Development of Complex Polymer Grouting Material

加藤 満*1	後藤 宇*1	大山 将*2
Mitsuru Kato	Hisashi Goto	Sho Oyama
小山 孝*3	後藤 彰宏*4	勝見 武*5
Takashi Koyama	Akihiro Goto	Takeshi Katsumi

要旨

薬液注入による液状化対策技術は、既設護岸の背面地盤や既設タンクの基礎地盤等を中心に、これまで数多くの実績を積み重ねている。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は、pH9 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ことから、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、アルカリ地盤に対しても安定して設計強度を確保できるとともに、安全で浸透性や耐久性に優れた地盤注入材を開発した。

本報告では、開発した注入材の概要および特徴を述べるとともに、安全性確認試験、浸透試験、耐久性試験の各結果について報告する。また、名古屋市内の臨海地域の埋立地で行った試験施工結果についても、あわせて報告する。

キーワード：液状化対策 薬液注入 注入材 浸透性 耐久性 試験施工

1. はじめに

有数の地震国である我が国では、近い将来に発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震等の大規模地震に備え、既存施設の甚大な液状化被害の防止が急務となっている。

今日まで、液状化対策として締固め砂杭工法や固結工法、薬液注入工法等が全国各地で適用され、改良域での液状化被害を防止するなどの役割を果たしてきた。このうち前者2工法は、通常三点式杭打ち機等の大型重機での施工となるため、既設構造物の直下地盤および直近部への適用が困難であるという施工上の課題を有している。先の東日本大震災（2011年）では、港湾施設や新市街地の民家において、構造物直下地盤および周辺地盤の液状化に起因する傾斜、段差等の被害が多数発生したことも記憶に新しい。

一方、薬液注入工法は狭隘地や構造物直下地盤へ適用できる希少な工法である。しかし、注入材である水ガラス系薬液の多くは、pH9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性質を有するため¹⁾、化学工場や機械工場等で散見されるアルカリ地盤に対しては、改良地盤の強度や耐久性が課題となる場合が多い。そのため、この課題を解消する注入材の開発に関心が高まっている。

そこで著者らは、既存施設を供用したまま構造物直下地盤の液状化対策工事を行うことができる薬液注入工法に着目し、アルカリ地盤に対しても安定して設計強度を確保でき、安全で浸透性や耐久性に優れた複合ポリマー型地盤注入材を開発した。

本報告では、開発した注入材の概要および特徴を述べるとともに、安全性確認試験、浸透試験、耐久性試験の各結果について報告する。また、名古屋市内の臨海地域で行った試験施工の概要を示し、その結果もあわせて報告する。

2. 注入材の開発

2.1 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、高密度・高強度のゲル（複合ポリマー）になる（図 1）。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。

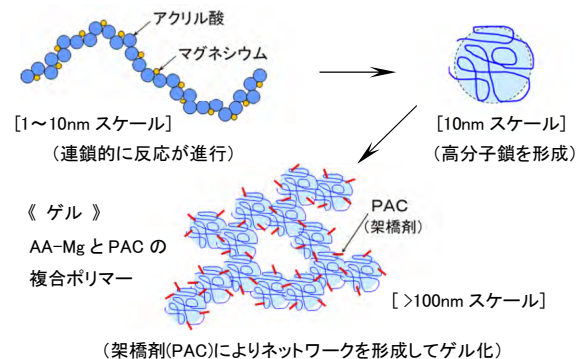


図 1 ゲル形成のイメージ

*1 土木技術部 *2 環境エンジニアリング部 *3 技術企画部 *4 東亜合成(株) *5 京都大学大学院 地球環境学堂

2.2 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、反応促進剤は砂地盤中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。

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、たとえば重量濃度 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。

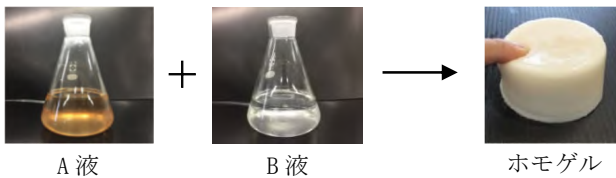


写真 1 注入材の A 液、B 液とホモゲル

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%））

2.3 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 0.3%を添加した豊浦砂（pH10.5）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。

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} 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）³⁾、 $R_{L20}=0.3\sim0.6$ 程度³⁾を確保できることが明らかになった。また、図 2 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が得られており、開発した注入材は pH10 程度のアルカリ地盤に対しても適用可能であると考えられる。

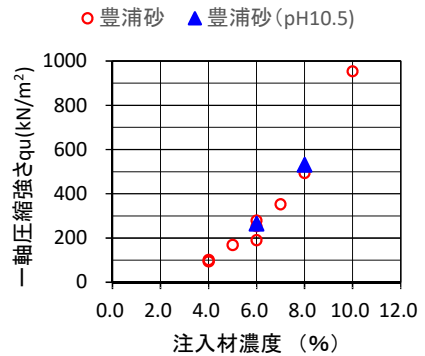


図 2 注入材濃度と q_u （室内）の関係

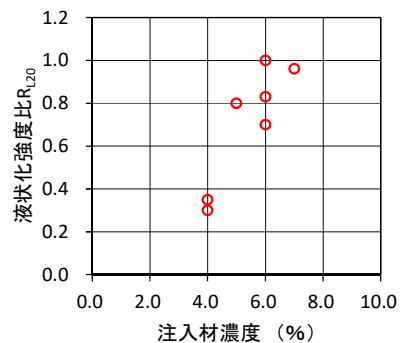


図 3 注入材濃度と R_{L20} の関係

2.4 注入材の安全性

2.4.1 土壌汚染に関する評価

薬液注入した改良地盤からの溶出成分に起因する土壌汚染が発生しないことを確認するため、「平成 15 年環境省告示第 18 号」⁴⁾に基づき溶出試験を行った。サンドゲル作製にあたり、砂には豊浦砂を用いた。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濃度 12%の薬液（濃度 8%の AA-Mg と濃度 4%の高塩基性 PAC を加えた薬液）を使用した。

試験結果を表 2 に示す。表 2 から、特定有害物質の溶出量は全項目で基準を満足し、本注入材による改良土は土壌汚染対策法に適合することが明らかになった。

表 2 特定有害物質の溶出量

評価項目	基準 (mg/L)	実測値 (mg/L)	評価項目	基準 (mg/L)	実測値 (mg/L)
カドミウム	<0.01	<0.001	シス-1,2ジクロロエチレン	<0.04	<0.004
全シアン	ND	ND	1,1,1-トリクロロエタン	<1	<0.001
有機リン	ND	ND	1,1,2-トリクロロエタン	<0.006	<0.001
鉛	<0.01	<0.005	トリクロロエチレン	<0.03	<0.002
六価クロム	<0.05	<0.01	テトラクロロエチレン	<0.01	<0.001
砒素	<0.01	<0.005	1,3ジクロロプロペン	<0.002	<0.001
総水銀	<0.0005	<0.0005	チウラム	<0.006	<0.0006
アルキル水銀	ND	ND	シマジン	<0.003	<0.0003
ポリ塩化ビフェニル	ND	ND	チオベンカルブ	<0.02	<0.002
ジクロロメタン	<0.02	<0.002	ベンゼン	<0.01	<0.001
四塩化炭素	<0.002	<0.001	セレン	<0.01	<0.002
1,2-ジクロロエタン	<0.004	<0.001	フッ素	<0.8	<0.08
1,1-ジクロロエチレン	<0.1	<0.002	ホウ素	<1	0.5

2.4.2 生物影響評価

水生環境に対する無害性を確認するため、OECD（経済協力開発機構）の「毒性試験テストガイドライン」⁵⁾に準拠し、ヒメダカの急性毒性試験を行った。注入材濃度は 2.4.1 の溶出試験と同様に、安全側の 12%とした。

急性毒性試験の結果、中央致死濃度 LC₅₀ は LC₅₀=409～479mg/L (>100mg/L) であった。このことから、開発した注入材は、「化学品の分類および表示に関する世界調和システム (GHS)」⁶⁾における水生環境有害性物質の急性区分 1～3 (表 3) のいずれにも該当せず、水生環境に対して有害でないことが確認された。

表 3 水生環境有害性の急性区分⁶⁾

区分	LC ₅₀	化合物 (例)
急性1	<1mg/L	35%塩酸、イソオクタン
急性2	1～10mg/L	フェノール、トルエン
急性3	10～100mg/L	酢酸、酪酸
区分外	>100mg/L	エタノール、アセトン

3. 一次元浸透試験

開発した注入材は、セメント等を混入したいわゆる懸濁液とは異なるため、注入中に注入材粒子による砂粒子間での目詰まりやそれに起因する浸透阻害は発生しにくいと考えられる。しかし、過去に液状化対策用注入材として適用された実績が無いことから、本注入材の浸透特性を把握しておくことは、実工事に適用する上で重要である。そこで、注入孔から 1～2m 程度離れた砂質土中にも円滑に浸透し、かつ所定の強度を発現することを確認するため、室内で一次元浸透試験を行った。

3.1 試験方法

既往の研究における試験装置^{7),8)}を参考にして製作した一次元浸透試験装置の全景および概要を写真 4、図 4 に示す。内径 51.3mm、長さ 1m と 2m の透明の塩化ビニル管内に透水性の高いフィルター材（砂利、ビーズ）を詰めた後、砂を Dr=60%程度になるようにできるだけ均一に充填し、その上部に再度フィルター材（ビーズ）を詰め、フィルター材の上部からペロフラムシリンダーにより 70kPa で載荷した。そして、円筒パイプ下端部の注入孔から脱気水をゆっくり通水して砂柱全体を飽和した後、同じ注入孔から薬液を 20mL/min 程度の一定速度で注入しつつ、円筒パイプ上端から排水した。砂には 7 号珪砂（細粒分含有率 Fc=7%）、8 号珪砂 (Fc=54%) を用いた。7 号珪砂および 8 号珪砂の粒径加積曲線を図 5 に示す。

注入材の配合試験は、改良土の設計強度を 150～250kN/m² と想定して事前に行い、濃度 6%の薬液（濃度 4%の AA-Mg と濃度 2%の高塩基性 PAC を加えた薬液）を使用することとした。注入量は砂長および間隙率を考慮し、パイプ長 1m (砂長 85cm) で 7 号珪砂の場合は 870mL、8 号珪砂の場合は 900mL、パイプ長 2m (砂長 185cm) で 7 号珪砂の場合は 1,900mL とした。注入後には 20℃の恒温室で 1 週間養生した。

用いた注入材は中性で、かつ、飽和砂中においては目視による水との区別が困難なため、注入中に飽和砂内での到達位置を把握するのは困難であった。そこで予備試験として、高塩基性 PAC に替えて標準的な塩基度の PAC を用いた浸透試験を実施し、注入中に円筒上部からの排出水の pH を連続的に測定することで、上記の所定量を注入すれば円筒上端まで注入材がほぼ到達することを事前確認した。ここに、注入初期に飽和砂から排出される水の pH は 6.5～7.0 であり、円筒上端付近まで注入材が到達したときの排出水の pH は、4.2～4.5 であった。



写真4 一次元浸透試験装置（全景）

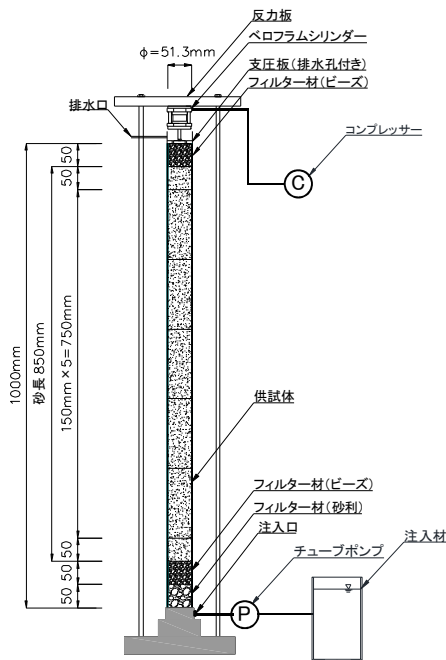


図4 一次元浸透試験装置の概要（L=1m）

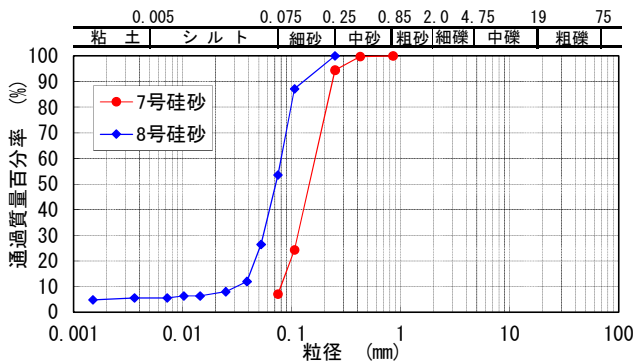


図5 使用砂の粒径加積曲線

3.2 試験結果

硬化したサンドゲルの強度を確認するため、一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強さ q_u と注入孔からの距離との関係を図6～図8に示す。図6、図7は7号珪砂を用い、パイプ長 L がそれぞれ1m、2mの場合の試験結果である。また、図8は8号珪砂を用い、 $L=1m$ の場合の試験結果である。

図6から、改良土の q_u はおおむね $200 \sim 250 \text{ kN/m}^2$ の範囲で分布しており、注入孔から約90cm離れた箇所でも大幅な強度低下は認められなかった。また、パイプ長を2倍にした試験結果（図7）では、砂充填時に相対密度が若干大きくなった影響で強度増加した注入孔付近を除き、改良土の q_u はおおむね $180 \sim 250 \text{ kN/m}^2$ の範囲であった。細粒分が多い8号珪砂を用いた場合（図8）は、改良土の q_u はおおむね $250 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ の範囲であった。

図7および図8では、砂柱の上端部付近で若干の強度低下が認められる。砂柱上端部付近、換言すれば浸透境界面付近においてこのように強度低下する傾向は、既存の水ガラス系薬液を用いた一次元浸透試験でも確認されており、約50%の強度低下事例が報告されている⁸⁾。原因として、注入材の希釈の影響等が考えられることから、実工事の設計にあたっては留意が必要である。

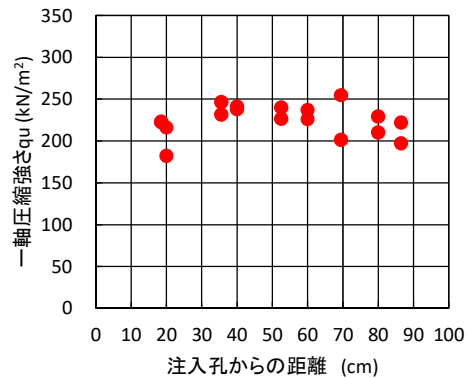


図6 注入孔からの距離と q_u の関係（7号珪砂、 $L=1m$ ）

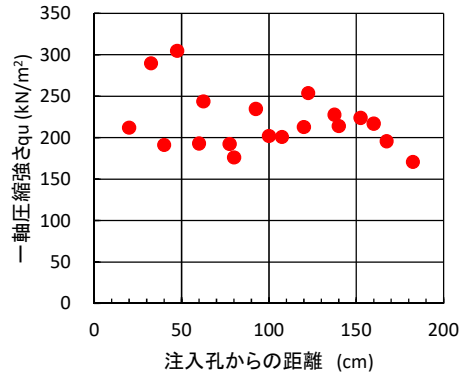


図7 注入孔からの距離と q_u の関係（7号珪砂、 $L=2m$ ）

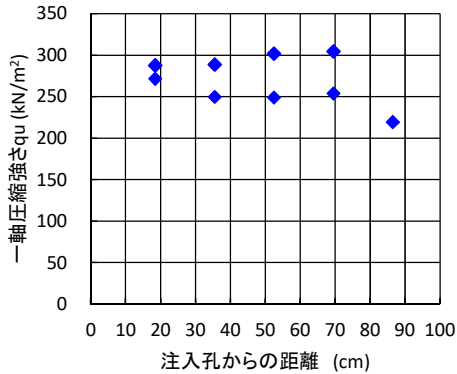


図8 注入孔からの距離と q_u の関係 (8号珪砂、L=1m)

以上の試験結果から、砂柱の上端部付近では若干の強度低下傾向が認められる場合があったが、細粒分が少ない7号珪砂の場合も細粒分が多い8号珪砂の場合も、配合試験で設定した値 (150~250kN/m²) と同等の改良強度が砂柱全長で得られた。これにより、開発した注入材は高い浸透性を有することが確認された。

4. 耐久性確認試験

開発した注入材による改良土の耐久性について、次の方法で確認を行っている (2018年5月現在、継続中)。

- ① 室内試験による長期耐久性の確認
- ② 実地盤における長期耐久性の確認

ここでは、①の室内試験 (劣化促進試験) により現在までに得られている結果を示す。②については、後述する試験施工で造った改良土の強度等を今後も定期的に調査し、長期耐久性を確認する予定である。

4.1 劣化促進の考え方

本注入材による改良土の劣化過程には、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、ゲルの「分解」に対しては、サンドゲルを熱水中に浸漬させて分解の促進を図る加熱試験を行った。また、ゲル分解物の「溶出」に対しては、サンドゲル表面に単位時間あたりに接触する水量を多くして溶出の促進を図る流水試験を行った。

4.2 加熱による分解促進試験

4.2.1 試験方法

既往の研究⁹⁾を参考に、加熱による分解促進試験を行った。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、注入材には濃度6%の薬液 (濃度4%のAA-Mgと濃度2%の

PACを加えた薬液) を使用し、砂の相対密度 D_r は60%程度に調整した。

次に写真5に示すように、作製した供試体を容器に置き、供試体全体をイオン交換水に浸漬した。そして容器に蓋をした後、80℃の乾燥機に入れ、一定期間後に供試体を取り出して一軸圧縮試験を行った。



写真5 イオン交換水に浸漬した供試体 (加熱前)

4.2.2 試験結果

改良土の加熱養生日数と一軸圧縮強さ q_u との関係を図9に示す。 q_u は180日以上 (実日数189日) 経過しても初期値を維持し、供試体のサイズ減少も認められなかった。

一般に、化学反応の速度は温度が10℃上昇するごとに2倍になるとされている¹⁰⁾。この考えに基づき、実環境温度を20℃として換算すると、本試験での180日経過時点は180×2⁶日 (≒31.6年) 相当となる。したがって、少なくとも30年は「分解」による劣化が生じないと考えられる。今後、さらに長期の耐久性を確認する予定である。

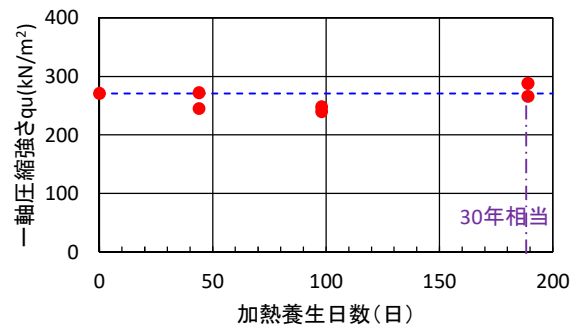


図9 q_u の経時変化

4.3 流水による溶出促進試験

4.3.1 試験方法

流水下に供試体 (直径5cm、高さ10cm) を置く必要があるため、既往の研究における実験装置¹¹⁾を参考にして、水槽間で水を循環させる流水試験装置 (写真6) を作製した。流速は、砂質土層の一般的な地下水流速が5m/day程度¹²⁾であることから、供試体表面に単位時間あたりに接触する水の量が10倍になるよう2L/分に設定した。注入

材濃度、砂の相対密度、供試体の作製方法は、4.2 加熱による分解促進試験の試験方法と同様である。

循環水には、水道水と炭酸カルシウム飽和水 (pH9.0) の 2 種類を用いた。炭酸カルシウム飽和水は、pH が高いアルカリ環境を模擬している。



写真6 流水試験装置 (全景)

4.3.2 試験結果

循環水に水道水、炭酸カルシウム飽和水を用いた場合の q_u の経時変化を図 10、図 11 に示す。 q_u は 400 日以上 (実日数 416 日) 経過しても初期と同等の値を維持し、供試体のサイズ減少も認められなかった。4.3.1 で述べたように促進倍率は 10 倍に設定しており、本試験での 400 日経過時点は 400×10 日 (≈ 11.0 年) 相当となることから、本注入材による改良土は流水に対して 10 年以上の耐久性を有することが分かった。また、pH9 程度のアルカリ環境でも 10 年以上の耐久性を有することが分かった。今後、さらに長期の耐久性を確認する予定である。

5. 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。

5.1 対象地盤

試験施工に先立ち、施工ヤード中央で地盤調査を行った。ボーリング柱状図を図 12、埋土層および砂質土層の主な室内土質試験結果を表 4 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層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、液状化する可能性がある地下水位 (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 Fc は 15% 程度、液状化強度比 R_{L20} は 0.20~0.25 程度であった。

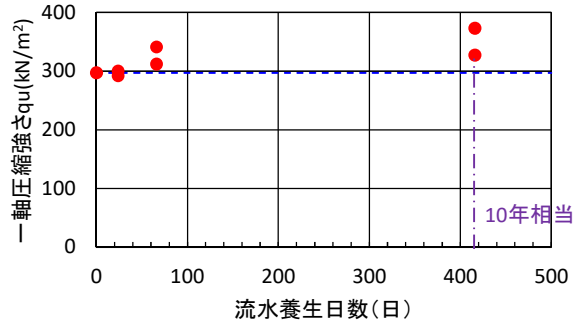


図 10 流水試験結果 (水道水使用)

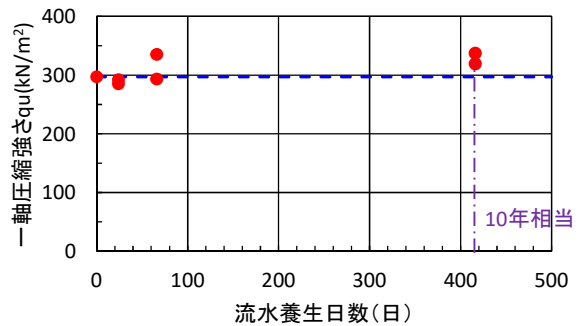


図 11 流水試験結果 (炭酸カルシウム飽和水 (pH9) 使用)

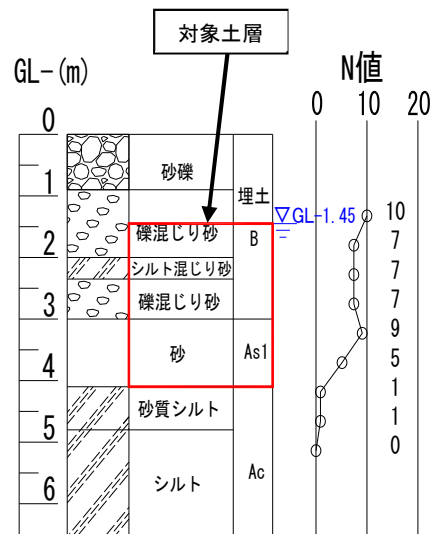


図 12 試験施工箇所のボーリング柱状図

表 4 主な室内土質試験結果

地層名	採取深度 (GL-m)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	細粒分含有率 Fc (%)	液状化強度比 R_{L20}
B (埋土)	1.5~2.3	1.817	15.2	0.197
As1 (砂)	3.0~3.9	1.888	14.5	0.247

5.2 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、「高圧ガス設備等耐震設計指針」¹³⁾（高圧ガス保安協会）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13）に当てはめ、設計基準強度（原位置強度） 60kN/m^2 を得た。図13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²³⁾を暫定的に乘じ、目標強度（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5に、その配合の注入材による改良土の q_u （室内強度）を表6にそれぞれ示す。ゲルタイムはチオ硫酸ナトリウム（添加剤）の添加量で調整し、50～60分とした。

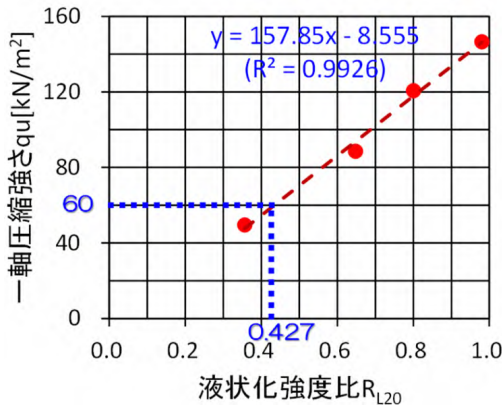


図13 本注入材におけるサンドゲルの R_{L20} と q_u の関係（暫定）

表5 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	35ℓ
水	140ℓ	水	165ℓ
チオ硫酸ナトリウム（添加剤）	0.85kg	TAH（85%）（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））

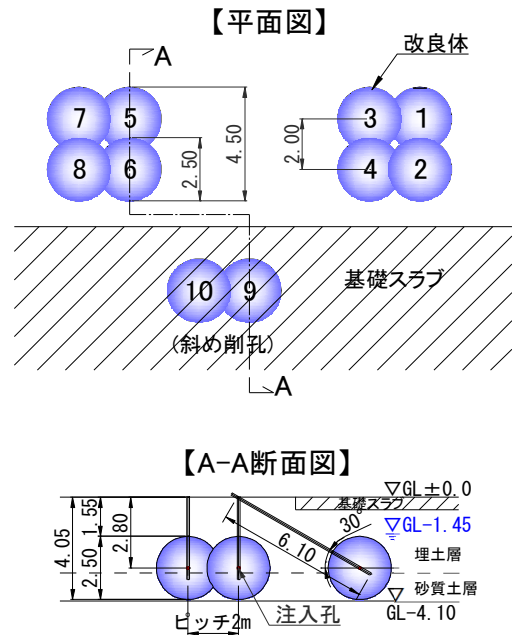
表6 改良土の一軸圧縮試験結果（室内）

土層	q_u (kN/m ²)	
	試験値	目標強度（室内）
B	176	120
	191	
	205	
As1	486	

※ 砂の相対密度は60%程度

5.3 試験施工方法

改良体配置の平面および断面を図14に示す。注入はダブルパッカにより、表7に示す諸元で行った。平面図（図14）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。



（単位：m）

図14 改良体の配置

表7 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

5.4 試験施工結果

No.1~10 の全箇所において、所定の速度で計画量を注入した後、掘削による改良体の出来形確認を行った（写真7）。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 1.25m に対して半径 1.5m 程度の改良体を確認することができた。

改良体からの試料採取位置を図 15 に示す。試料採取は、トリプルチューブサンプリング（直径 116mm）およびブロックサンプリングによって行った。一軸圧縮試験結果および液状化試験結果を表 8、表 9 に示す。改良体の q_u および R_{L20} は、設計基準値を全て満足した。なお、改良強度のばらつきについては、対象土層が砂質土と粘性土の互層であった影響が大きいと考えられる。すなわち、大半のサンプリング試料に含まれた大小の粘土塊には注入材が浸透せず、強度増加しないため、その粘土塊が弱点になり供試体の強度に影響を及ぼしたと考えられる。

表 8 一軸圧縮試験結果
(試験施工)

No	q_u (kN/m ²)		判定
	試験値 (平均値)	設計基準強度 (原位置)	
3	151	60	○
4	270		○
7	139		○
10	82.4		○

表 9 液状化試験結果
(試験施工)

No	R_{L20}		判定
	試験値	必要液状化 強度比 (原位置)	
3	0.445	0.427	○
7	0.530		○
10	0.510		○

6. 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を紹介し、その安全性、浸透性、耐久性に関する検討結果や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 一環境保全型液状化対策工と品質管理一、近代科学社、p.41、2016.10
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、pp.730-749、2009.12
- 3) (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、2010.
- 4) 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、2003.3
- 5) OECD：毒性試験ガイドライン、魚類急性毒性試験、TG203.
- 6) 厚生労働省：化学品の分類及び表示に関する世界調和システム (GHS) について、<http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei07/index.html>.
- 7) 高坂祐介ほか：超微粒子球状シリカ系改良剤により一次元浸透改良した砂質地盤の力学的性質に関する研究、第 49 回地盤工学研究発表会講演集、pp.603-604、2014.7
- 8) 牛田貴士ほか：水ガラス系注入材の強度特性、土木学会第 66 回年次学術講演会発表講演集、III 部門、pp.39-40、2013.9
- 9) 加賀宗彦：水ガラス系注入材の安定性と注入固結砂の長期強度の予測、土木学会論文集、No.652、pp.195-205、2000.6
- 10) 小宮山宏：反応工学 反応装置から地球まで、培風館、1995.6
- 11) 仲山貴司ほか：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)、Vol.69、No.2、pp.162-173、2013.4
- 12) 日本地下水学会、井田徹治：見えない巨大水脈 地下水の科学、講談社、p.106、2009.5
- 13) 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、2012.7



(a)改良体 No. 3



(b)改良体 No. 4

写真 7 改良体の出来形

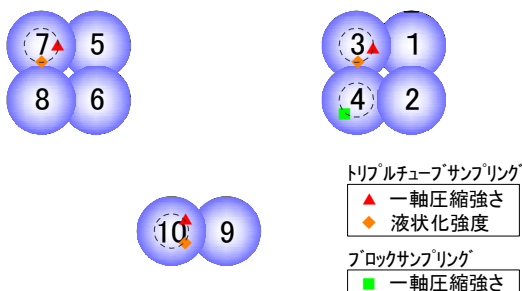


図 15 試料採取位置 (平面図)