

複合ポリマー型地盤改良剤の開発と液状化対策工事への適用

Development of Synthetic Polymer Grouting Material and Application to Liquefaction Countermeasure Construction

後藤 宇^{*1} 加藤 満^{*2} 大山 将^{*3}
Hisashi Goto Mitsuru Kato Sho Oyama
小山 孝^{*2} 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。筆者らは、その注入剤として高分子系薬液である複合ポリマー型地盤改良剤を新たに開発した。本注入剤は、安全性、浸透性に優れ、水ガラス系薬液では適用困難となる pH 9 程度以上のアルカリ性地盤に対しても安定して設計強度と耐久性を確保できるという特徴を有している。

本報告では、開発した複合ポリマー型地盤改良剤（CXP）の概要および硬化・耐久性メカニズムを述べるとともに、水生生物安全性確認試験、強度試験、耐久性試験の各結果について報告する。また、名古屋市内の埋立地で試験施工として行った危険物屋外タンク直下地盤の液状化対策工事の概要についても、あわせて報告する。

キーワード：液状化対策 薬液注入 安全性 耐久性 アルカリ性地盤

1. はじめに

薬液注入による液状化対策技術は、小規模な設備で既設構造物直下の地盤改良ができる希少な技術であり、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、これまで数多くの施工実績を有している。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、ゲルの溶解度が pH 9 程度のアルカリ性領域で上昇し始め、pH 10 程度以上では急激に溶解度が上昇する傾向²⁾にあることが知られており、たとえば工場施設等の基礎地盤で散見されるアルカリ性を呈する地盤に対しては、適用困難と判断される場合が多い。そのため、社会に大きな影響を及ぼす供用中の重要施設であっても、南海トラフ巨大地震や首都直下型地震等の大規模地震対策を躊躇しているケースもあり、施設の「強靱化」や「安心・安全」を図る上で大きな支障となっている。そこで著者らは、アルカリ性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改良剤を開発した¹⁾。

本報告では、開発した複合ポリマー型地盤改良剤（以下、CXP と称す）の概要および硬化・耐久性メカニズムを述べるとともに、安全性確認試験、強度試験、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試験施工として行った既設構造物直下地盤の液状化対策工事の概要を報告する。

2. CXP の概要

2.1 概要

CXP は、A 液と B 液から成る 2 液系の薬液である。A 液は、土木工事において止水剤としての実績があるアクリル酸マグネシウム（以下、AA-Mg とする）を主剤とし、添加剤、反応促進剤、水から構成される。B 液は、架橋剤のポリ塩化アルミニウム（以下、PAC とする）、硬化剤、水から構成される（写真 1、表 1）。

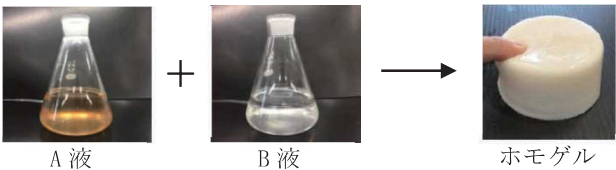


写真 1 CXP の A 液、B 液とホモゲル

表 1 CXP の配合と薬液濃度の目安

	成 分	濃度 (wt%)
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 (硬化剤)	0.1~0.2
	水	46~49
合 計		100

※ 液状化対策の場合、薬液濃度 (AA-Mg + PAC) の目安は 3~12 wt%
AA-Mg と PAC の濃度比は概ね 2:1

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

開発した薬液 CXP は、粘度が極めて小さく 3~8mPa・s 程度である。A 液と B 液の 2 液混合後、0.1~90 分経過すると粘度が急激に上昇して 100mPa・s 以上になり（ゲル化）、その後 1,000mPa・s 以上に達する。液状化対策用として本薬液を注入する際は、原則として、地上の注入パイプ頭部で A 液と B 液を混合して地中へ注入する「1.5 ショット方式」³⁾を適用する。ゲル化に至る時間を指すゲルタイムは、硬化剤と添加剤の量の増減によって制御することができる。また、反応促進剤（塩化カルシウム）は粘土鉱物等の細粒分に吸着し、高い陽イオン交換容量を有する地盤における重合阻害を防止する役割を果たしている。

本薬液の 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 pH 4 程度、高塩基度の PAC 使用時に pH 6 程度である。このため、注入工事の適用場所や用途等に応じて、弱酸性から中性の薬液として使い分けることができる。

本報告では、濃度は質量パーセント濃度（wt%）で表すこととし、強度に直接寄与する AA-Mg および PAC の合計濃度を薬液濃度とする。

2.2 硬化メカニズム

硬化メカニズムの概要を図 1 に示す。AA-Mg 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

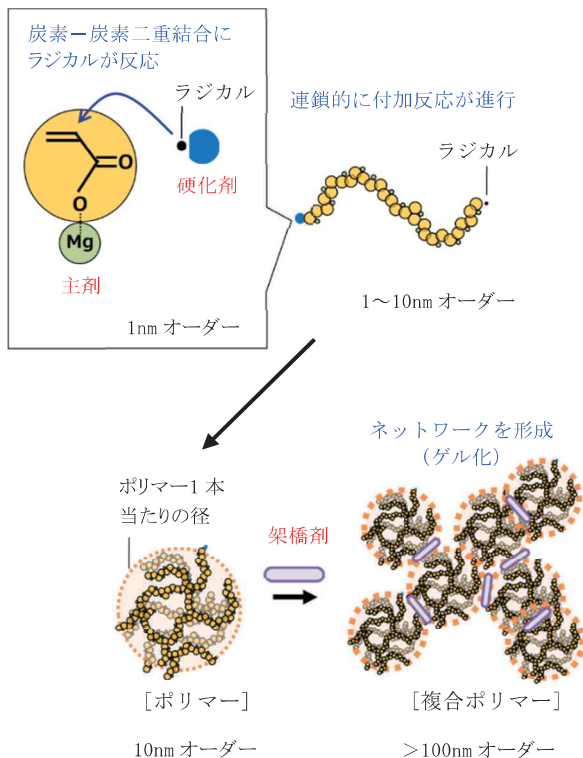


図1 硬化メカニズム

を生じる硬化剤を加えると、二重結合が連鎖的に付加反応を起こし、炭素-炭素を主骨格とするポリマー（高分子鎖）が生じる（図2）。さらに架橋剤の役割を果たす PAC により多点でイオン結合してネットワークを形成し、高い架橋密度のゲル（複合ポリマー）を形成する（図3）。

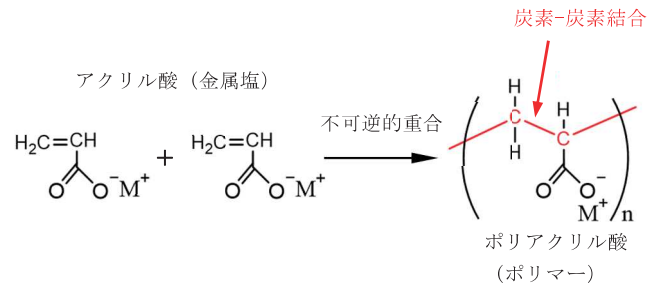


図2 ポリマーの生成

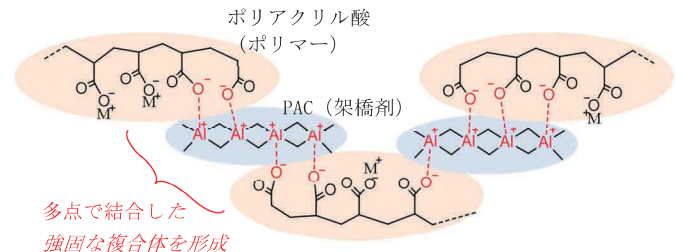


図3 複合ポリマーの生成イメージ

2.3 耐久性メカニズム

アクリル酸同士の不可逆的な重合により成るポリアクリル酸と PAC の複合体で硬化させた固結砂（サンドゲル）は、極めて高い耐久性を有する。

ポリアクリル酸の骨格の安定性は、ポリアクリル酸の化学構造により説明できる（図2）。ポリアクリル酸の主骨格は安定な炭素-炭素結合により成ることから、加水分解や生分解を受ける結合は持たない。このため、重合度の低下を伴う反応が生じない⁴⁾⁵⁾。

PAC による架橋構造の安定性は、PAC とポリアクリル酸間の強い相互作用により説明ができる。Al イオンはポリアクリル酸と定量的に反応し、多点で結合した複合体を形成する⁶⁾。特に PAC は複数の Al イオンが連結した多核構造であり、複合体形成能は単核 Al イオンの 2 倍と非常に高い⁷⁾。よって図3に示すように、PAC とポリアクリル酸は多点で結合した非常に強固な複合体を形成すると考えられる。一般に、PAC は pH 変化などに応じて重合度および電荷の大きさが変化するが、強力な配位子が共存すると Al と OH⁻ との反応が阻害され、構造変化が大きく抑制される⁷⁾⁸⁾。すなわち、ポリアクリル酸と複合化することで PAC の構造は安定

に維持され、架橋度や架橋密度分布も変化しないと推測される。

これらのことから、ポリアクリル酸および PAC の複合体は長期にわたり構造が変化しにくく、良好な耐久性を示すと考えられる。

3. 安全性

3.1 AA-Mg の安全性と急性毒性

CXP の主剤 (AA-Mg) は、アクリル酸とマグネシウムで構成されている。アクリル酸は海で自然発生している⁹⁾ことや、ペンギンがオキアミを経由して体内に取り込み、腸内で抗菌剤として利用している¹⁰⁾等の報告があり、海生生物にとって身近な成分である。また、好気条件においても嫌気条件においても良好な生分解性が確認されている¹¹⁾ことから、環境中に放出されても生分解によって速やかに除去され、持続性や生物蓄積の可能性は小さいと考えられている¹²⁾。マグネシウムは、人体に必要不可欠な栄養素でもあり、毒性は小さい。

AA-Mg、アクリルアミド、食品の漂白剤に使用される過酸化水素、食塩、エタノールの急性経口毒性の比較を図 4 に示す。急性経口毒性のデータ^{13)~16)}は、厚生労働省やメーカーにより公表されている値を記した。また、安全性の差異をより一層明確に表現するため、ここでは半数致死量 LD_{50} の逆数 ($1/LD_{50}$) で表示した。図 4 から、AA-Mg の構成成分の急性経口毒性は食塩やエタノールと同程度であり、非常に小さいことが分かる。

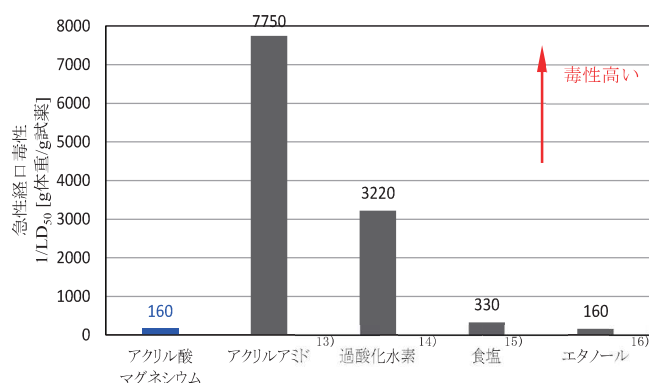


図 4 アクリル酸マグネシウムの急性経口毒性

3.2 PAC の安全性と急性毒性

架橋剤として用いるポリ塩化アルミニウム (PAC) は、上水道用水処理や工場排水の処理等の凝集剤として広く使用されている。土木工事においても、たとえば山岳トンネル工事の濁水処理の凝集剤として使用されている。PAC の安

全性については以下の報告があり、人体に与える影響は小さいと考えられる。

- ・マウスを用いた急性毒性試験において、PAC 原液を経口投与した際の LD_{50} は、12,700mg/kg との報告¹⁷⁾がある。この値を $1/LD_{50}$ に換算すると 80 (体重(g)/試薬(g)) となり、図 4 に示した AA-Mg、食塩、エタノールと同様に安全性が高い。
- ・ラットを用いた急性毒性試験として、PAC の原液 100mg/L を含む水道水を飲料水として 1 ヶ月間自由採取させたところ、死亡せず、PAC を含まない水道水を飲料水としたラット群と動作等に有意な差が認められなかった¹⁷⁾。
- ・ヒメダカを用いた急性毒性試験として、PAC 原液を 3000、5000、10,000mg/L の濃度下でそれぞれ 96 時間飼育した時の死亡率は、いずれも 0%であった¹⁷⁾。

3.3 生物安全性評価

CXP 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) の毒性試験ガイドラインおよび水産庁の海産生物毒性試験指針に準拠し、ヒメダカ (魚類) の急性毒性試験¹⁸⁾、オオミジンコ (甲殻類) およびチグリオパス (動物プランクトン) の急性遊泳阻害試験¹⁹⁾²⁰⁾、スケレトネマ (珪藻類)、クロレラ (緑藻類)、ボウバアマモ (海草)、スサビノリ幼葉 (藻類) の生長阻害試験^{20)~22)}を行った。試験結果を表 2 に示す。薬液濃度は、液状化対策工事における上限濃度と想定される 12wt% (濃度 8wt% の AA-Mg と濃度 4wt% の高塩基性 PAC を加えた薬液) と、標準濃度と想定している濃度 6wt% (濃度 4wt% の AA-Mg と濃度 2wt% の高塩基

表 2 生物安全性確認試験結果

試験名称	生物種	薬液濃度 (wt%)	試験結果	判定 ^(※)
急性毒性試験 ⁽¹⁸⁾	ヒメダカ (魚類)	12	$LC_{50} > 100$ mg/L	○
急性遊泳阻害試験 ⁽¹⁹⁾²⁰⁾	オオミジンコ (甲殻類)	12	$EC_{50} > 100$ mg/L	○
	チグリオパス (動物プランクトン)	6	$EC_{50} > 100$ mg/L	○
生長阻害試験 ^(20)~22)	スケレトネマ (珪藻類)	6	$EC_{50} > 100$ mg/L	○
	クロレラ (緑藻類)	6	$EC_{50} > 100$ mg/L	○
	ボウバアマモ (海草)	12	$EC_{50} > 100$ mg/L	○
	スサビノリ幼葉 (藻類)	6	$EC_{50} > 100$ mg/L	○

※ GHS区分 (水生環境有害性)²³⁾において、有害性の「区分外」に該当する場合を「○」とした。また、OECD推奨種のヒメダカおよびオオミジンコ以外についても、GHS区分を参考にした。

性 PAC を加えた薬液) を、試験ごとに任意に選んだ。

試験の結果、ヒメダカの 96 時間半数致死濃度 LC_{50} は $LC_{50} > 100\text{mg/L}$ 、オオミジンコおよびチグリオバスの 48 時間半数遊泳阻害濃度 EC_{50} は $EC_{50} > 100\text{mg/L}$ 、スケルトネマ、クロレラ、ボウバアマモの 72 時間半数生長阻害濃度 EC_{50} およびスサビノリ幼葉の 240 時間半数生長阻害濃度 EC_{50} は、 $EC_{50} > 100\text{mg/L}$ であった (表 2)。これらの結果は、GHS 区分 (水生環境有害性の区分)²³⁾ によれば有害性の「区分外」に該当することから、本薬液は水生の供試生物に及ぼす影響が非常に小さいと考えられる。今後も引き続き、他の水生生物に対する安全性確認を行う予定である。

4. 改良土の性能

4.1 力学性能

4.1.1 供試体作製

改良土 (サンドゲル) の一軸圧縮試験を行うため、次の手順で供試体を作製した。砂には、表 3 および図 5 に示した物性の豊浦砂を用いた。

表 3 豊浦砂の主な物性

乾燥密度 $\rho_d (\text{g/cm}^3)$	最大密度 $\rho_{dmax} (\text{g/cm}^3)$	最小密度 $\rho_{dmin} (\text{g/cm}^3)$	細粒分含有率 $F_c (\%)$
1.528	1.647	1.337	9.0

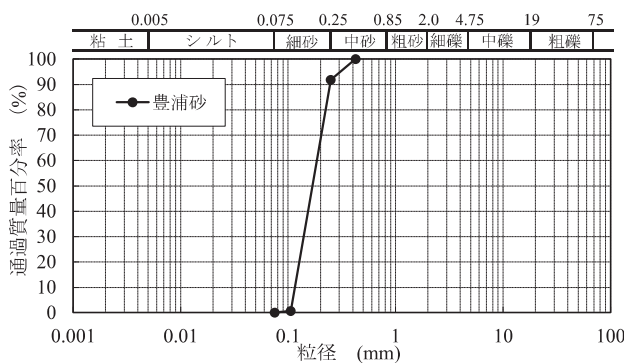


図 5 豊浦砂の粒径加積曲線

〔供試体作製手順〕

- 1) 脱型時の供試体側面の損傷を防止するため、鋼製モールド (直径 5cm、高さ 10cm) の内側に OHP シート (高さ 12cm) を貼り付ける。
- 2) 鋼製モールド内に本薬液を満たし、予め相対密度 60% 程度になるように計量した砂を水中落下法で投入する。

- 3) 投入した砂の高さが 10.5cm 程度になるまで、モールドの側面を軽く叩く。そして供試体上面にラップフィルムを被せて乾燥を防ぎつつ、恒温室 (20℃) で 5 日間養生する。
- 4) 養生後、固結した供試体を脱型して上端と下端を整形し、直径 5cm、高さ 10cm の供試体にする。

また、本研究ではアルカリ性を呈する砂を用いたサンドゲルの強度も測定するため、各種アルカリ性化合物 (水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、水酸化ナトリウム) と各種酸性化合物 (硫酸、塩酸) を豊浦砂と混合してアルカリ性・酸性砂を調製した後、上記 1)～4) の手順で供試体を作製した。

〔アルカリ性砂・酸性砂の調製手順〕

- 1) 表 4 に示すアルカリ性化合物・酸性化合物を各分量で砂と混合し、プラスチック製袋体中で 5 分間振とう撹拌する。
- 2) 作製したアルカリ性砂・酸性砂を 8g 量り取り、純水 40g と混合して振とう撹拌する。その後、この液体の pH をガラス電極式 pH メーターで測定し、その測定値を調整したアルカリ性砂・酸性砂の pH とする。

表 4 アルカリ性・酸性化合物の種類および

砂 100g に対する添加量

アルカリ・酸	化合物の種類	添加量 (mg/100g 豊浦砂)	混合砂の pH
アルカリ	水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$	30 mg	pH 11
		3 mg	pH 10
	水酸化ナトリウム NaOH	200 mg	pH 11
	炭酸カルシウム CaCO_3	500 mg	pH 9
酸	硫酸 H_2SO_4	25 mg	pH 3
		2.5 mg	pH 4
	塩酸 HCl	25 mg	pH 3

4.1.2 改良強度

薬液濃度とサンドゲルの一軸圧縮強さの関係を図 6 に示す。薬液濃度が増加するとともに、サンドゲルの一軸圧縮強さは加速度的に増加する傾向が認められ、特に薬液濃度 12～18wt% の CXP により作製したサンドゲルは 1,000～4,500kN/m² という非常に高い強度となった。各供試体のうち代表的な応力ひずみ曲線を図 7 に示す。CXP によるサンドゲルの破壊ひずみは 2～4% となった。これは、水ガラス系の 2 倍程度の破壊ひずみであり、相対的に高い変形性能を有していることを示している。このことから、CXP による改良土は、巨大地震による大きな繰返しせん断力が作用した場合でも、水ガラス系に比べて破壊しにくいと考えら

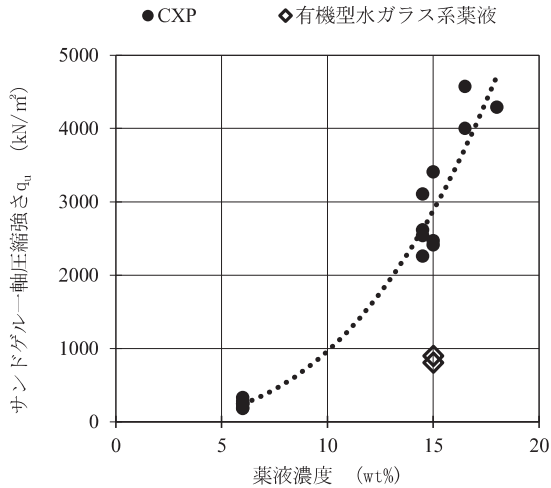


図6 薬液濃度に対するサンドゲル一軸圧縮強さ

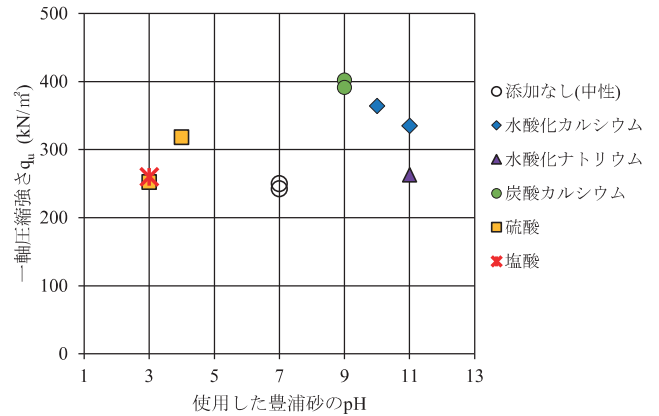


図8 各 pH における一軸圧縮強さ

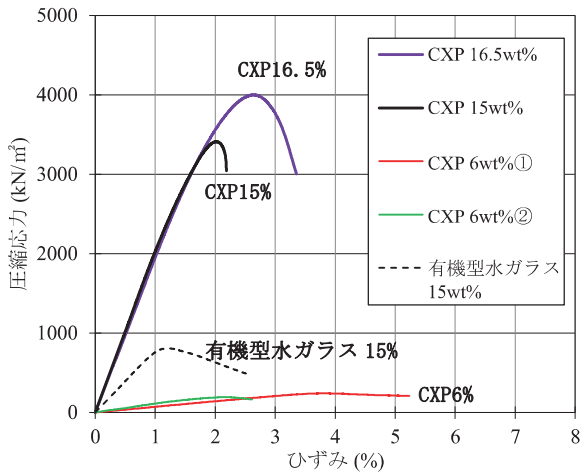


図7 一軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線（代表例）

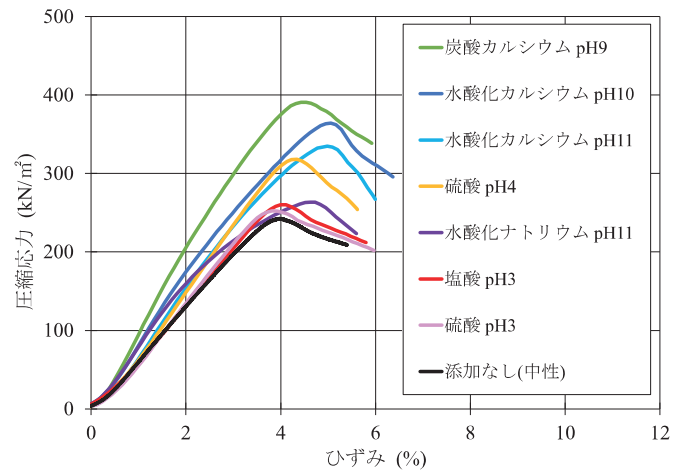


図9 各砂での応力ひずみ曲線

れる。

なお、実際には、より高濃度の CXP を用いた供試体の作製が可能であることが分かっているが、今回の試験では装置上の測定上限が $5,000 \text{ kN/m}^2$ であったため、評価する薬液濃度を 18wt% までとした。

4.1.3 アルカリ性・中性環境における改良強度

高塩基度 PAC を使用した薬液(すなわち $\text{pH} \approx 6$ の CXP 薬液、薬液濃度 6wt%) について、各アルカリ性砂・酸性砂で作製したサンドゲルにおける一軸圧縮強さおよび応力ひずみ曲線を図 8、図 9 に示す。酸性～アルカリ性 ($\text{pH} 3 \sim 11$) のいずれの供試体についても、中性砂を用いた供試体と同等かそれ以上の一軸圧縮強さを示した。特に炭酸カルシウムや水酸化カルシウムを加えた供試体は一軸圧縮強さや弾性率が高くなる傾向となった。これは、カルシウムイオンはナトリウムイオンやマグネシウムイオンよりもポリアクリル酸に取り込まれやすい性質があり、カルシウムイオンが

ゲルに取り込まれて新たな架橋を形成したためであると推測される。

また、破壊ひずみは、いずれの供試体も中性砂を用いた供試体と同等であり、変形性能の低下は見られなかった。

4.2 アルカリ環境下における長期耐久性

ゲルの化学的な分解が発生しないことを確認するため、炭素-炭素結合をはじめとする化学結合の分解を、加熱によって促進する分解促進試験を行った。

加熱による分解促進試験は、既往の研究²⁴⁾を参考にして行った。供試体(直径 5cm、高さ 10cm) は、4.1.1 に示した方法により、表 3 および図 5 に示した物性の豊浦砂に水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を添加した pH が 11 の調製砂を用いて作製した。薬液の濃度は 6wt% (濃度 4wt% の AA-Mg と濃度 2wt% の PAC を加えた薬液) とし、砂の相対密度 D_r は 60% 程度に調整した。作製した供試体は写真 2 に示すように容



写真 2 分解促進試験実施状況

器内に置き、供試体全体をイオン交換水で浸漬した。そして容器に蓋をした後、80℃の恒温機に入れ、100 日後と 162 日後に供試体を取り出して一軸圧縮試験を行った。

供試体を浸けるイオン交換水には水酸化カルシウム飽和水 (pH 12 程度) を使用し、供試体の pH が 11 程度を維持できるようにした。試験期間中は、水酸化カルシウム飽和水の pH が気中二酸化炭素の影響を受けて低下していないことを適宜確認した。

一軸圧縮試験結果を図 10 に示す。一軸圧縮強さは、162 日経過しても初期値から低下せず、供試体の体積減少も認められなかった。

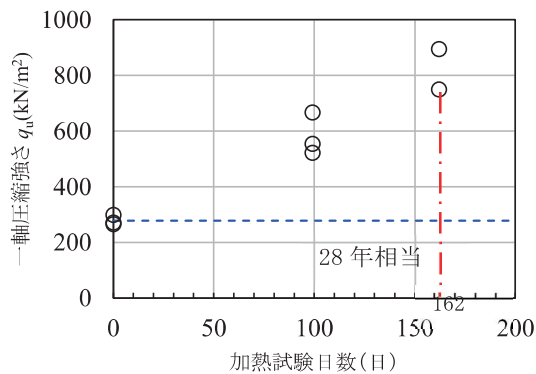


図 10 一軸圧縮強さの経時変化
(アルカリ環境下の分解促進試験)

一般に、化学反応の速度は温度が 10℃上昇する毎に 2 倍になるとされている²⁵⁾。実環境温度を 20℃とすると、本試験は $2^6=64$ 倍促進であり、試験期間を促進期間に換算すると 162×64 日で、およそ 28 年に相当する。

なお、図 10 において一軸圧縮強さが増大した理由は、4.1.3 と同様に、浸漬水中のカルシウムイオンがゲルに取り込まれて新たな架橋を形成したためと考えられる。

5. 既設構造物の液状化対策工事

既設の危険物屋外タンク直下地盤に開発した複合ポリマー型地盤改良剤 CXP を適用し、試験施工を実施した。試験施工は、名古屋市内の臨海地域の埋立地において 2020 年 10 月に実施し、その後、改良体の品質の確認を行った。

5.1 対象地盤

試験施工に先立ち、液状化対策の対象構造物である既設タンク近傍で地盤調査を行った。GL-4.65m 以浅がシルト混じり砂であり、地下水位は GL-1m に存在する。液状化層である砂質土層 (GL-1.0m～-4.65m) の主な土質試験結果を表 5 に示す。対象土層の N 値は 5～9、細粒分含有率 F_c は 10～25%程度で、土壌の pH は 10.3 とアルカリ性地盤であった。

表 5 土質試験結果一覧

地層名	採取深度 (GL-m)	N値	礫 (%)	砂 (%)	シルト+粘土 (%)	pH
B (埋土)	1.15～1.45	5	3.8	72.6	23.6	—
	2.15～2.45	9	4.8	84.6	10.6	—
	3.15～3.45	8	2.6	87.1	10.3	10.3
	4.15～4.45	6	0.5	85.4	14.1	—

5.2 施工方法

注入方法には「ダブルパッカ工法 (シールグラウト方式)」を用い、筆者らが開発した台形波と短波の合成波を繰返し与える動的注入²⁶⁾により施工を行った。シールグラウト方式は、施工時の孔壁崩壊を抑制するために採用している。

注入圧力への動的注入の付与は、注入と中断を 0.01～0.05Hz 程度の周期で繰り返す台形波と 1～20Hz 程度の短波の合成波を繰返し付加するものである。

図 11 に合成波による動的注入の模式図を示す。台形波は、切替バルブで流路を交互に切り替えることによりそれぞれの流路に注入と中断を繰り返すことにより付加する。短波は、脈動発生機構を備えた 2 液等量ポンプにより付加する。既存工法の吐出間隔は 2.0m と固定であるのに対して、本注入方法の吐出間隔は 33～100cm 程度の範囲で任意に設定が可能であるため、例えば薄い粘性土層を挟む互層地盤において砂層へ確実に注入できる。合成波による動的注入の特長を以下にまとめる。

- CXP に合成波による動的注入を適用した場合、台形波の速度変化によって初期粘度低下と増粘開始遅延の効果が得られ、さらに短波により浸透性が向上して改良範囲が広がる。
- 一般的な施工 (静的注入) と作業手順が同じであるため、

施工性は同等である。

- ・フィールド試験の結果²⁷⁾により削孔間隔は 2.0m とすることが可能であり、従来のダブルパッカ（シールグラウト方式）と比べて削孔本数を低減できる。

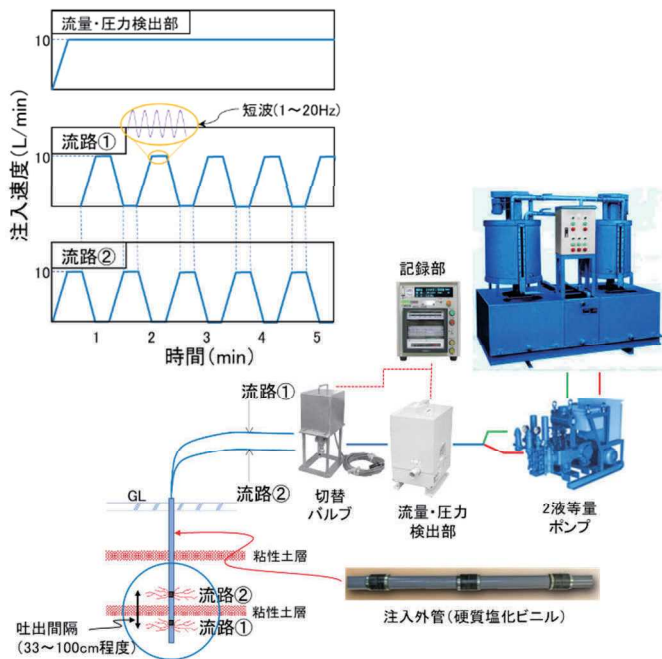


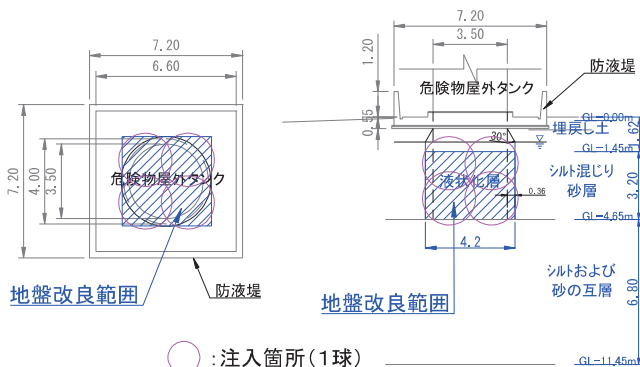
図 11 合成波による動的注入の模式図

表 6 注入緒元

項 目	仕様・規格など	備 考
注 入 工 法	薬液注入	ダブルパッカ工法
注 入 方 式	合成波による動的注入	台形波0.017Hz、短波14.7Hz
改 良 径	φ 2.5m	1球当り（合計8球）
注 入 率	40.5%	
注 入 量	22.9m ³	4.2×4.2×3.2×0.405
注 入 ピッチ	□2m×2m	
注 入 速 度	12 L/min	限界注入速度試験より決定
ゲルタイム	50～60min	15℃（地下水温度）の場合
薬 液 濃 度	6 wt%	AA-Mg4wt% + PAC2wt%
設計基準強度	原位置	47 kN/m ²
	室内	94 kN/m ²

＜改良平面図＞

＜改良断面図＞



○：注入箇所（1球）

図 12 地盤改良範囲

注入は表 6 に示す緒元で実施した。注入は図 12 に示すように、4 球 2 段の計 8 球とした。写真 3 に削孔状況を、写真 4 に注入状況を示す。



写真 3 タンク直下地盤への斜め削孔状況



写真 4 CXP 注入状況

5.3 試験施工結果

注入は計画通りの注入量、注入速度で実施した。改良体の品質確認として、改良体より採取した試料より供試体を作製し一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮強さの結果（表 7）より、アルカリ性・酸性環境下での性能に関して、新しく得られた知見を報告した。

表 7 一軸圧縮強さの結果（改良体採取試料）

No.	qu (kN/m ²)		判定
	試験値	設計基準値 (原位置)	
1	121.4	47	○
2	127.5		○
3	122.5		○
4	183.0		○
5	181.5		○

6. まとめ

新たに開発した複合ポリマー型地盤改良剤 CXP の生物安全性評価、アルカリ性・酸性環境下での性能に関して、新しく得られた知見を報告した。

生物安全性評価では、藻類、甲殻類、魚類の水生生物に対する安全性試験を行い、水生生物に対する安全性を確認で

きた。また、アルカリ性環境下での強度、長期耐久性についても性能低下がないことを室内試験により確認できた。

試験施工においては、供用中の既設構造物直下地盤に CXP を用いた注入工法の適用を行い、実施工への適用性と必要強度確保の確認ができた。

今後は、引き続き CXP の安全性・耐久性に関するデータ収集を行うとともに、実施工による施工・品質に係るデータを蓄積し、より確実性の高い工法の確立を目指していく。

参考文献

- 1) 加藤満、後藤宇、大山将、小山孝、後藤彰宏、勝見武：複合ポリマー型地盤注入剤の開発、鴻池組技術研究報告 2018、pp.1-8、2018.8
- 2) 米倉亮三、島田俊介：薬液注入の長期耐久性及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
- 3) 地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工、p.4、2009
- 4) 津田健、久保田昌敏：高分子材料の分解、材料と環境、Vol.44、pp.104-111、1995.2
- 5) I.C. McNeill: Polymer degradation and stability、Vol.29、pp.233-246、1990
- 6) M. Etou、Y. Masaki、Y. Tsuji、T. Saito、S. Bai、I. Nishida、Y. Okaue、and T. Yokoyama : Interaction between Al³⁺ and acrylic acid and polyacrylic acid in acidic aqueous solution : A model experiment for the behavior of Al³⁺ in acidified soil solution、Analytical Sciences、Vol.27、No.1、pp.111-115、2011.1
- 7) 後藤克己、四ツ柳隆夫、永山政一：工業用水中のフミン酸の凝集に対する金属イオン凝集剤の効果、工業化学雑誌、72 巻、8 号、pp.1871-1875、1969.8
- 8) 四ツ柳隆夫、後藤克己、永山政一：チロンによるアルミニウムイオンの吸光光度定量 一アルミニウム錯体の溶存状態分析への応用一、日本化学雑誌、88 巻、12 号、pp.1282-1287、1967.12
- 9) D.C. Sigee : Biodiversity and dynamic interactions of microorganisms in the aquatic environment、Freshwater Microbiology、2005.1
- 10) J.M. Sieburth : Antibiotic properties of acrylic acid、a factor in the gastrointestinal antibiosis of polar marine animals、Journal of Bacteriology、Vol.82、No.1、pp.72-79、1961.7
- 11) 環境省：化学物質の環境リスク評価、第3巻、2004.9
- 12) 化学物質評価研究機構：有害性評価書、アクリル酸、2007
- 13) 厚生労働省：職場のあんぜんサイト、化学物質「アクリルアミド」、<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/79-06-1.html> (2020 年 4 月 15 日閲覧)
- 14) 厚生労働省：職場のあんぜんサイト、化学物質「過酸化水素」、<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/0573.html> (2019 年 9 月 18 日閲覧)
- 15) 純正化学株式会社：安全データシート「0.01mol/l 塩化ナトリウム溶液」、2013
- 16) 純正化学株式会社：安全データシート「エタノール」、2017
- 17) (一財) 日本ダム協会施工技術研究会編：ダム建設工事における濁水処理、pp.48-49、2000
- 18) OECD：毒性試験ガイドライン、魚類急性毒性試験、TG203、1992
- 19) OECD：毒性試験ガイドライン、ミジンコ急性遊泳阻害試験、TG202、2000
- 20) 水産庁：動物プランクトンによる急性毒性試験、魚介類水質環境基準検討調査総合報告書(海産生物毒性試験指針)、2000
- 21) OECD：毒性試験ガイドライン、藻類生長阻害試験、TG201、1984
- 22) ISO 10253 (Water quality - Marine algal growth inhibition test with Skeletonema sp. and Phaeodactylum tricornutum)、2016.11
- 23) 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、<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei07/index.html> (2018 年 11 月 9 日閲覧)
- 24) 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
- 25) 小宮山宏：反応工学 反応装置から地球まで、培風館、1995
- 26) 岡田和成、秋本浩平、加藤満、後藤宇、大山将、小山孝、勝見武：軟弱地盤の注入固化において浸透性向上に寄与する新しい動的注入工法の開発、第16回地盤工学会関東支部発表会、pp158-161、2019.10
- 27) 加藤満、後藤宇、大山将、小山孝、後藤彰宏、高田じゅん、坪内隆太郎、中野駿、勝見武：複合ポリマー型地盤改良剤の開発 一アルカリ性を呈する地盤にも有効な薬液注入技術一、地盤工学ジャーナル、Vol.16、No.1、pp.23-24、2021.1