

ホモゲルの体積収縮に基づく薬液固結砂の強度発現について

早稲田大学 学生会員 ○小川 航平
 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一
 ケミカルグラウト(株) 正会員 川村 淳
 ケミカルグラウト(株) 正会員 渡邊 陽介

1. はじめに

我が国は世界有数の地震大国であり、昨年の東日本大震災をはじめとして地震による液状化の被害は甚大である。さまざまな液状化防止対策が考案・検討されているが、既存施設直下地盤の液状化対策として有効な工法に薬液注入工法がある¹⁾。この薬液注入工法における固結砂の強度発現に関しては、ホモゲルの収縮に着目した研究²⁾があるが、未解明の点が多い。ここでは、薬液ホモゲルの脱水・収縮に基づくみかけの拘束圧に着目して、薬液固結砂の強度発現メカニズムについて実験的検討を行った。

2. 実験内容

(1) 供試体条件

実験では表 1 に示す配合の特殊中性・酸性薬液を用いて、珪砂 4 号とその平均粒径に近いガラスビーズを用いて薬液改良供試体を作製した。それぞれの物理的性質は表 2 と表 3 に示すとおりであり、この表には別途行った CD 三軸試験で得られた有効内部摩擦角を示した。また、薬液改良供試体の大きさは φ5cm×10cm で、相対密度が 60% となるように水中落下法によりプラモールド中の薬液に投入して作成した。

(2) 実験概要

ここでは、まず薬液ホモゲルの脱水・収縮試験を行い、その後にガラスビーズと珪砂を用いた一軸圧縮試験を実施し、強度発現に寄与していると考えられる薬液ホモゲルの体積収縮に起因するみかけの拘束圧について実験的に考察した。

(a) 薬液ホモゲルの脱水・収縮について

薬液ホモゲルが土粒子骨格に対して拘束圧を及ぼす要因として、ホモゲルがゲル化する際の脱水・収縮が考えられる。薬液が注入された地盤は、間隙水が薬液に置き換えられた後、薬液がゲル状の物質へと変化することにより、地盤の強度増加をもたらす。その過程で、薬液は溶液状からゲル化物状へと変化する際に体積変化を起こす可能性があり、またゲル化に伴い水（離しょう水）が出ることも考えられる。

実験では、表 1 の配合に基づき薬液を作製した。これを濃度の基準 100% とする。次に薬液に加水して所定の濃度になるよう希釈する。ここで希釈濃度 = {薬液量 / (薬液量 + 加水量)} × 100 (%) と定義し、希釈濃度 40%、60%、80%、100% の 4 ケースの薬液を作製した。プラモールド φ5cm×10cm にそれぞれの希釈濃度の薬液を 100ml ずつ投入し、水の蒸発を防ぐため塩化ビニレフィルムで包み、20°C の恒温養生を行った。所定の日数（1 日、3 日、5 日、8 日、10 日、14 日、18 日、22 日）の経過時に、ゲル化を確認した後にホモゲルをプラモールドから脱形し、離しょう水の体積をメスシリンダーで測定した。離しょう水体積の測定後、残留した薬液ホモゲルの直径・高さをノギスで測り、ホモゲルの体積を求めた。

(b) 土粒子骨格に作用するみかけの拘束圧の評価

薬液で改良した砂供試体とガラスビーズ供試体を作製し、その一軸圧縮強度の違いから、固体粒子骨格に作用するみかけの拘束圧を算出した。このみかけの拘束圧をもとにして評価することにより、薬液固結砂の強度発現メカニズムについて考察した。

表 1. 薬液 1ℓ 当りの配合表

A液		B液	
主剤	250(ml)	硬化剤	25(ml)
水	650(ml)	pH調整剤	10(g)
		水	69(ml)

表 2. ガラスビーズの物理的性質

ガラスビーズ密度(g/cm ³)	2.51
平均粒径D ₅₀ (mm)	0.95
内部摩擦角φ'(°)	24

表 3. 珪砂 4 号の物理的性質

土粒子密度(g/cm ³)	2.62
平均粒径D ₅₀ (mm)	0.85
内部摩擦角φ'(°)	36

キーワード 薬液注入 ホモゲル 離しょう水 体積収縮 拘束圧

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 西早稲田キャンパス 58 号館 205 号室 TEL 03-5286-3405

3. 実験結果

(a) 薬液ホモゲルの脱水収縮について

図 1. に薬液ホモゲルの経過日数と離しょう水体积の関係を示す。この離しょう水は薬液の反応が進むに伴い生じる水と考えられる。図 1. より、経過日数が経つにつれ、離しょう水の体积が大きくなり、一定の値に収束する結果となっている。また、希釈濃度 100% のホモゲルは反応が早く、離しょう水体积は早期に一定値に収束していた。なお、希釈濃度 60% と 40% のケースは 2 日目時点でゲル化していなかったため、5 日目から測定した。図 2. に経過日数と薬液ホモゲル体積の関係を示す。ホモゲルは経過日数に伴い体積収縮し、その値は図 1. の離しょう水体积にほぼ対応したのとなっていることがわかる。また、離しょう水体积と同様に、ホモゲル体積は全体としてほぼ一定の値に収束した。このホモゲル試験の結果より、この実験で用いた特殊中性・酸性薬液はゲル化に伴い、脱水し体積収縮が起きることが明らかとなった。

(b) 土粒子骨格に作用する見かけの拘束圧の評価

ここでは、薬液固結砂の強度増加はホモゲルの体積収縮に基づく見かけの拘束圧によるものと仮定する。すると、固結砂の強度増加は図 3. に示すような全応力と有効応力に関するモールの応力円で評価することができる。図 3. の有効応力に関するモールの ΔOAB について考えると、 $(U + \frac{q_u}{2}) \cdot \sin \phi' = \frac{q_u}{2} \Leftrightarrow U = \frac{q_u}{2} \cdot (\frac{1 - \sin \phi'}{\sin \phi'})$

ここで、 U : ゲルによる見かけの拘束圧 (kN/m^2)
 q_u : 一軸圧縮強度 (kN/m^2) ϕ' : 有効応力に関する内部摩擦角 ($^\circ$) という式が成立する。次に、珪砂 4 号とガラスビーズを用いて得られた希釈濃度 100% に相当する 4 日養生の薬液固結砂の一軸圧縮強度の平均値と内部摩擦角を表 4. に示す。上記で求めた式を利用して、珪砂骨格に働く見かけの拘束圧 U_s とガラスビーズ骨格に働く見かけの拘束圧 U_g をそれぞれ求めると、 $U_s = \frac{90.3}{2} \cdot (\frac{1 - \sin 36^\circ}{\sin 36^\circ}) = 31.7$ $U_g = \frac{44.4}{2} \cdot (\frac{1 - \sin 24^\circ}{\sin 24^\circ}) = 32.4$ となり、 U_s と U_g はほぼ等しい値になっていることがわかる。すなわち、内部摩擦角の異なるガラスビーズと珪砂を骨格に持つ固結砂の見かけの拘束圧はほぼ等しい結果が得られた。したがって、同等の体積収縮を起こす希釈濃度 100% に相当する薬液固結体の固体骨格に作用する見かけの拘束圧は同等の値となっていることがわかる。

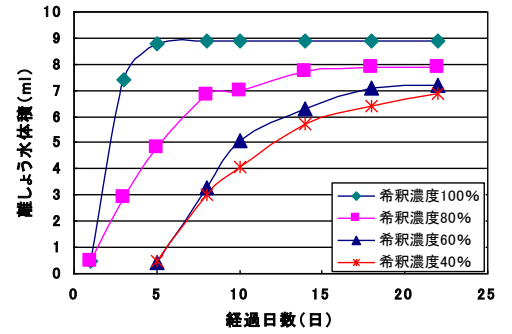


図 1. 経過日数と離しょう水体积の関係

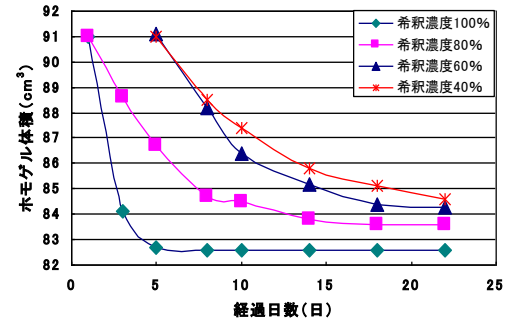


図 2. 経過日数とホモゲル体積の関係

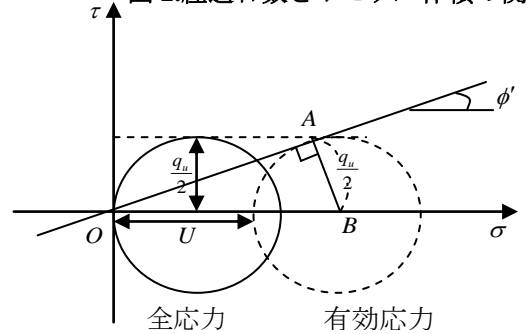


図 3. 見かけの拘束圧付加による強度増加

表 4. 一軸圧縮強度の平均と有効内部摩擦角

	一軸圧縮強度 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
珪砂4号	90.3	36
ガラスビーズ	44.4	24

4. まとめ

ここでは、薬液ホモゲルの脱水・収縮に基づく薬液固結砂の強度発現メカニズムについて調査した。実験的検討から得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 薬液ホモゲルは、経過日数に伴い脱水・体積収縮を起こす。その大きさは希釈濃度により異なる。
- 2) ホモゲルの体積収縮によって薬液固結体骨格に作用する見かけの拘束圧は、内部摩擦角の異なる珪砂とガラスビーズで同等の値であった。

参考文献

- 1) 平岡、赤木、澤田：“弾性波試験による薬液改良砂の劣化評価について” 土木学会第 66 回年次学術講演会、2011.9
- 2) 末政、島田、佐々木：“低シリカ濃度の薬液を用いた改良体の強度増加メカニズム” 土木学会第 61 回年次学術講演会、2006 年 9 月