

高シリカ濃度特殊シリカ液を用いた薬液注入工法の開発

東亜建設工業株式会社 正会員 大野 康年

1. はじめに

著者は、従来の特殊シリカ液と比較して高い圧縮強さが得られる高シリカ濃度の特殊シリカ液を用いた薬液注入工法の開発に取り組んでいる。従来の特殊シリカ液は、薬液シリカ濃度 10%程度が最大で、その固結砂の強度は、砂の粒度組成、密度等にもよるが、一軸圧縮強さで $q_u=100\text{kPa}$ 程度であった。本工法は、特殊シリカ液の改良と新たに専用プラントを開発することにより、10%～16%濃度の高シリカ濃度特殊シリカ液の注入を可能にしたものである。本報告では、高シリカ濃度特殊シリカ液および専用プラントを含めた注入工法の概要を示すとともに本薬液を用いた固結砂の強度特性および現地注入実験結果について示す。

2. 工法概要

2. 1 高シリカ濃度特殊シリカ液の概要¹⁾

従来の特殊シリカ液は、コロイダルシリカ、特殊水ガラスおよび酸性反応材の三種類の主剤により構成される。同薬液は中性領域でゲル化するが、シリカ濃度が高くなるとゲル化速度が速くなることから 10%を超える高いシリカ濃度においては薬液配合時に部分ゲルが発生し、薬液の調製が困難であった。

本工法にて使用する薬液は、従来の特殊シリカ液に緩衝剤を添加することでシリカ粒子の表面に電荷を与え、シリカ粒子間に反発力を生じさせることによって薬液配合時の部分ゲル発生を抑制する。これにより高いシリカ濃度においてもゲル化速度を抑制し、安定的な調製が可能となっている。図 1 に本薬液(14%濃度)と従来の特殊シリカ液(6%濃度)の粘度～時間/薬液ゲル化時間関係の比較を示す。薬液ゲル化時間は、薬液の粘度が $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ に到達した時間として定義している。従来の特殊シリカ液の粘度が薬液ゲル化時間近傍で急激に上昇するのに対して、本薬液の粘度は、緩衝材を添加することで比較的緩やかに粘度が上昇していることがわかる。本薬液の薬液ゲル化時間は、配合により数時間～15 時間程度まで設定可能である。また、本薬液はホモゲルの体積収縮、シリカの溶脱がほとんど無く、固結砂の強度が長期的に低下しない性質を有する。

2. 2. 注入工法の概要

本工法では、薬液の逸走防止性能を向上させた薬液注入工法²⁾を使用する。同工法は、図 2 に示すように 20 秒以内で硬化する瞬結材にて注入管と地山との隙間を充填することで、注入管と地山との隙間への薬液の逸走

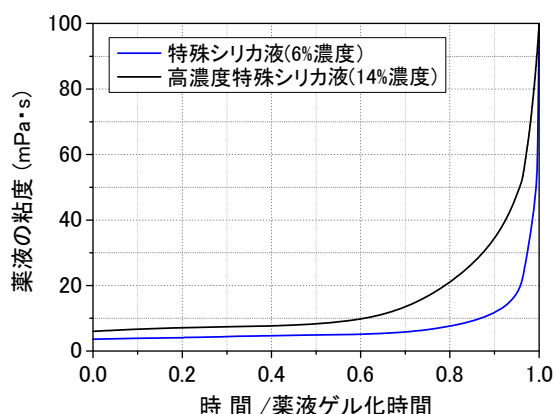


図 1 薬液の粘度～時間/薬液ゲル化時間関係

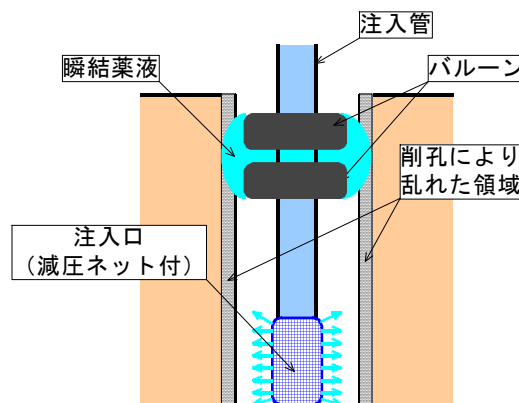


図 2 注入概要図

キーワード 高濃度特殊シリカ液、薬液注入、液状化対策、側方流動対策

連絡先 〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1 新宿パークタワー31F 東亜建設工業株式会社 TEL 03-6757-3861

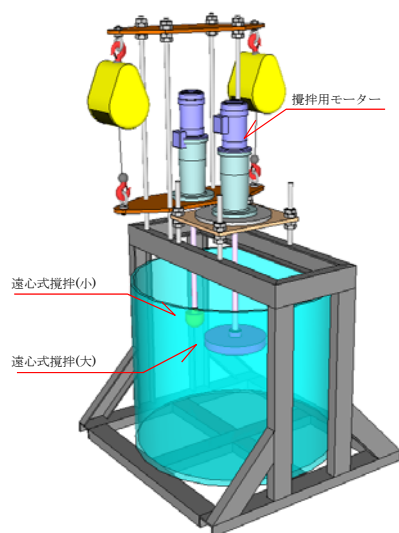


図3 専用プラント概要図

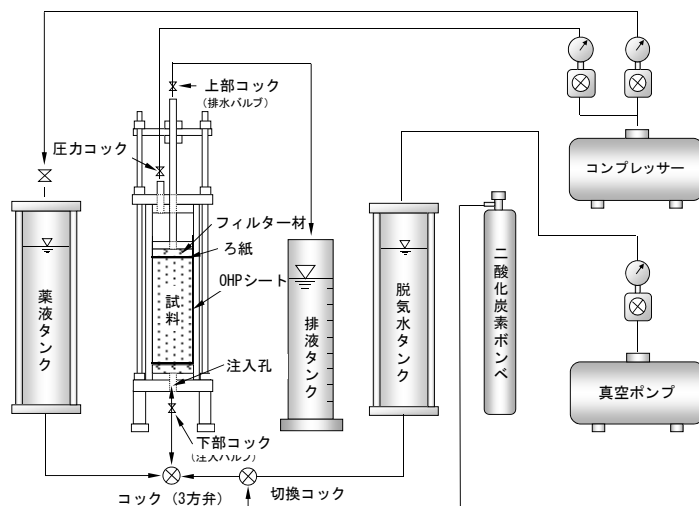


図4 特殊モールド³⁾

表1 試験条件（三軸等方圧密試験）

薬液シリカ濃度	10%	12%	14%
初期間隙比 e	0.702	0.679	0.672
材 令 (日)	28	28	28

表2 試験条件（三軸 CD 試験）

試 料	改良豊浦砂								
薬液シリカ濃度	10%			12%			14%		
圧密圧力 (kPa)	300	600	1200	400	800	1600	500	1100	2200
ひずみ速度 (%/min)	0.05			0.05			0.05		
初期間隙比 e_0	0.721	0.696	0.735	0.698	0.702	0.716	0.693	0.696	0.690
材 令 (日)	28			28			28		

防止性能が向上している。

図3に本薬液の専用プラントの概要図を示す。同プラントは、従来の薬液配合にて使用している攪拌翼を用いたミキサーとは異なり、特殊攪拌機にて遠心力を発生させることでバッチ内の薬液をより均一に配合することができる。これにより、従来の攪拌翼を用いたミキサーで発生する攪拌ムラによる薬液の部分ゲル化を防止し、高シリカ濃度薬液の配合が可能となっている。

3. 改良固結砂の強度特性

本薬液を用いて改良された改良地盤の強度特性を明らかにするため、室内にて作製した改良砂供試体を用いて一軸圧縮試験、等方圧密試験、圧密排水三軸圧縮試験(CD)を実施した。

実験に使用した改良砂供試体は、豊浦砂を用い、図4に示す特殊モールド³⁾内に空中落下法にて $Dr=40\%$ の密度になるよう堆積させた豊浦砂を炭酸ガスおよび脱気水にて飽和後、50kPaの拘束圧を試料に作用させた状態で薬液をモールド下部より注入し、養生した。

豊浦砂の物理特性は、土粒子密度 $\rho_s=2.633\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=0.2\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=1.6$ 、最大間隙比 $e_{\max}=0.975$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.614$ である。

表1および表2に三軸等方圧密試験および圧密排水三軸圧縮試験の試験条件を示す。圧密排水三軸圧縮試験(CD)における圧密圧力は、三軸等方圧密試験結果より得られた圧密降伏応力に基づいて設定した。

(1) 一軸圧縮強さ

改良豊浦砂の一軸圧縮強さ q_u と薬液シリカ濃度および変形係数 E_{50} の関係を図 4(a) および図 4(b) に示す。一軸圧縮強さは、薬液シリカ濃度 10～16% に対して $q_u=500\sim1,200\text{kPa}$ の範囲に分布し、一軸圧縮強さは薬液シリカ濃度に比例して増加する。また、一軸圧縮強さと変形係数は比例的な関係にあり、 $E_{50}=105q_u$ で近似される。

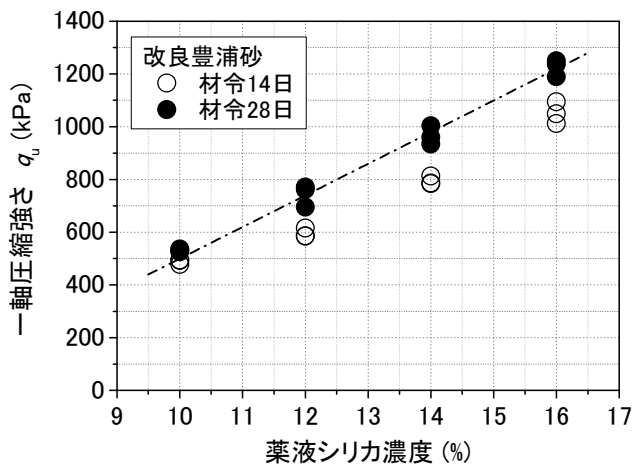


図 4(a) 一軸圧縮強さ～薬液シリカ濃度関係

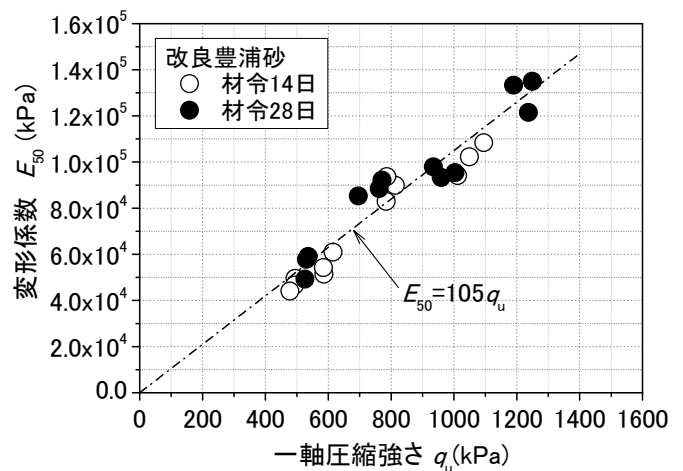


図 4(b) 変形係数～一軸圧縮強さ関係

(2) 圧縮指数，膨潤指数

シリカ濃度 10,12,14% の改良豊浦砂の圧縮指数 λ ，膨潤指数 κ を表 3 に示し、薬液シリカ濃度 14% の改良豊浦砂の $e \sim \ln p'$ 曲線を図 5 に示す。改良豊浦砂の圧縮指数 λ ，膨潤指数 κ は、薬液シリカ濃度によらずほぼ同じ値を示している。

表 3 改良豊浦砂の圧縮指数，膨潤指数

試料名		圧縮指数 λ	膨潤指数 κ
改良 豊浦砂	10%濃度	0.005	0.003
	12%濃度	0.005	0.003
	14%濃度	0.004	0.003

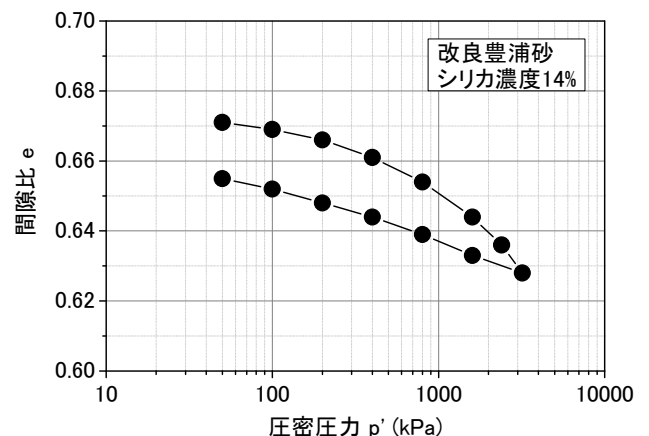


図 5 間隙比～圧密圧力関係

(3) 粘着力，内部摩擦角

豊浦砂($D_f=40\%$)とシリカ濃度 10,12,14% の改良豊浦砂の内部摩擦角 ϕ_d ，粘着力 c_d の一覧を表 4 に示し、豊浦砂とシリカ濃度 14% の改良豊浦砂のモールの応力円を図 6 に示す。豊浦砂の試験結果は参考文献³⁾の試験結果を引用している。

豊浦砂と改良豊浦砂を比較すると、内部摩擦角 ϕ_d の変化はほとんど見られないが、改良豊浦砂の粘着力 c_d は、125～210 kPa 増加している。これは高濃度特殊シリカ液においても改良が在来土の元来所有している強度を低下させることなく、注入材により粘着力が付加されたことを示している。また、改良豊浦砂の粘着力は、薬液シリカ濃度に比例して増加する。

図 7 に粘着力 c_d と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す。一軸圧縮強さは図 4(a) に示す試験結果の平均値を採用し

表 4 改良豊浦砂の c_d , ϕ_d

試料名		粘着力 c_d (kPa)	内部摩擦角 ϕ_d (degree)
豊浦砂		0	35.5
改良 豊浦砂	10%濃度	125	35.4
	12%濃度	165	35.0
	14%濃度	210	35.2

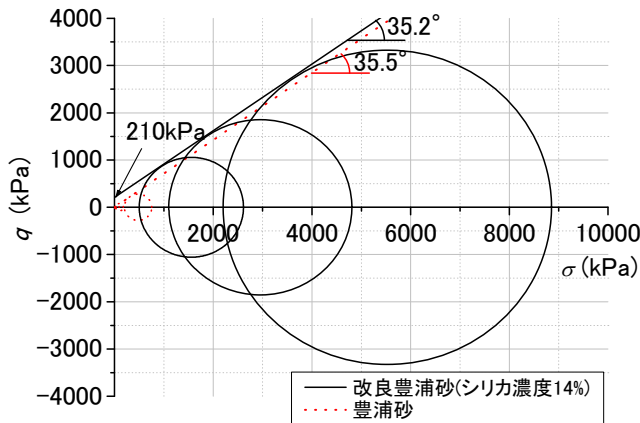


図 6 モールの応力円

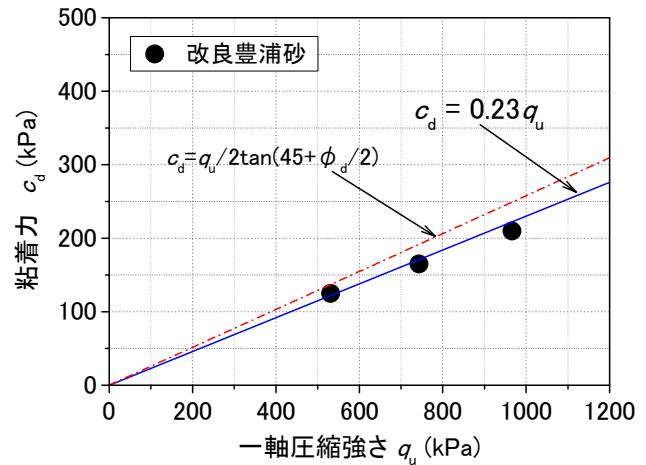


図 7 粘着力～一軸圧縮強さ関係

ている。粘着力 c_d は、一軸圧縮強さに比例し、 $c_d=0.23q_u$ で近似することができる。

(4) まとめ

豊浦砂を用いて作製した改良砂の試験結果より、改良砂の力学特性は、以下の 1)～3) に示すとおりである。

- 1) 改良豊浦砂の一軸圧縮強さ q_u (室内) は、シリカ濃度 10～16% に対して $q_u=500\sim1200\text{kPa}$ の範囲にある。
- 2) 改良豊浦砂の圧縮指数 λ ，膨潤指数 κ は、薬液シリカ濃度にはよらず $\lambda=0.005$ ， $\kappa=0.003$ 程度である。
- 3) 改良豊浦砂の粘着力 c_d は、シリカ濃度 10～14% に対して $c_d=125\sim210\text{kPa}$ の範囲で増加する。また、 c_d と q_u には、 $c_d=0.23q_u$ の関係がある。

4. 現地注入実験

本実験は、本工法の実地盤における適用性を確認する目的で現地注入実験を実施した。

(1) 実験サイトの概要

実験サイトは、千葉県袖ヶ浦市南袖の埋立て地盤で、地層は地表面から GL-1.7m まで盛土、その下部に浚渫土である細砂が続いている。図 8 に改良体造成位置と柱状図および標準貫入試験結果を示す。注入対象とする細砂層は N 値が 3～7、地下水位は GL-1.35m である。細砂層の物理特性は、土粒子密度 $\rho_s=2.707\text{g/cm}^3$ ，平均粒径 $D_{50}=0.159\text{mm}$ ，細粒分含有率 $F_c=10.3\%$ である。

(2) 実験方法

実験は、薬液シリカ濃度 14% の特殊シリカ液を図 8 に示す位置に注入し、 $\phi 2.5$ の改良体を 8 体造成した。

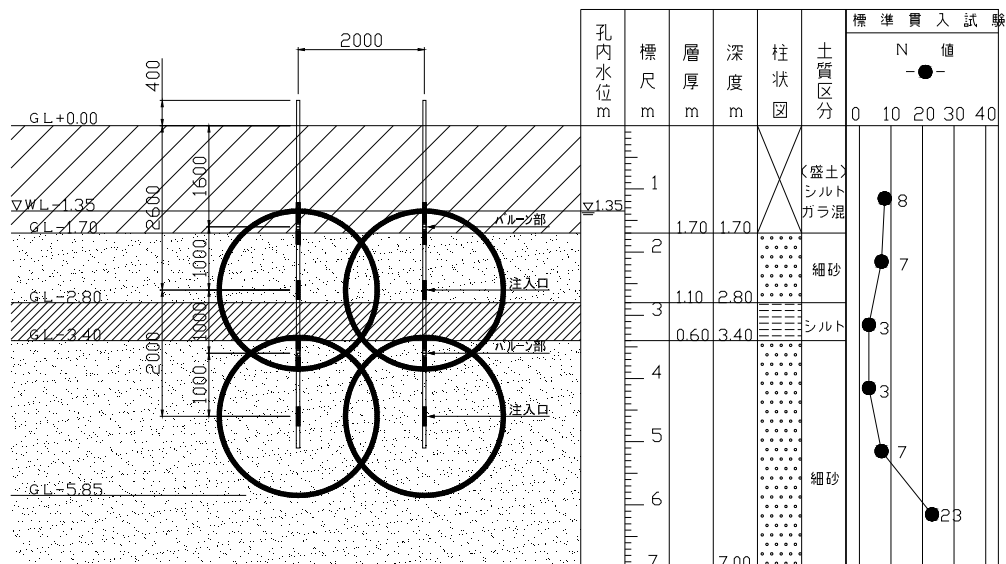


図 8 改良体造成位置と柱状図

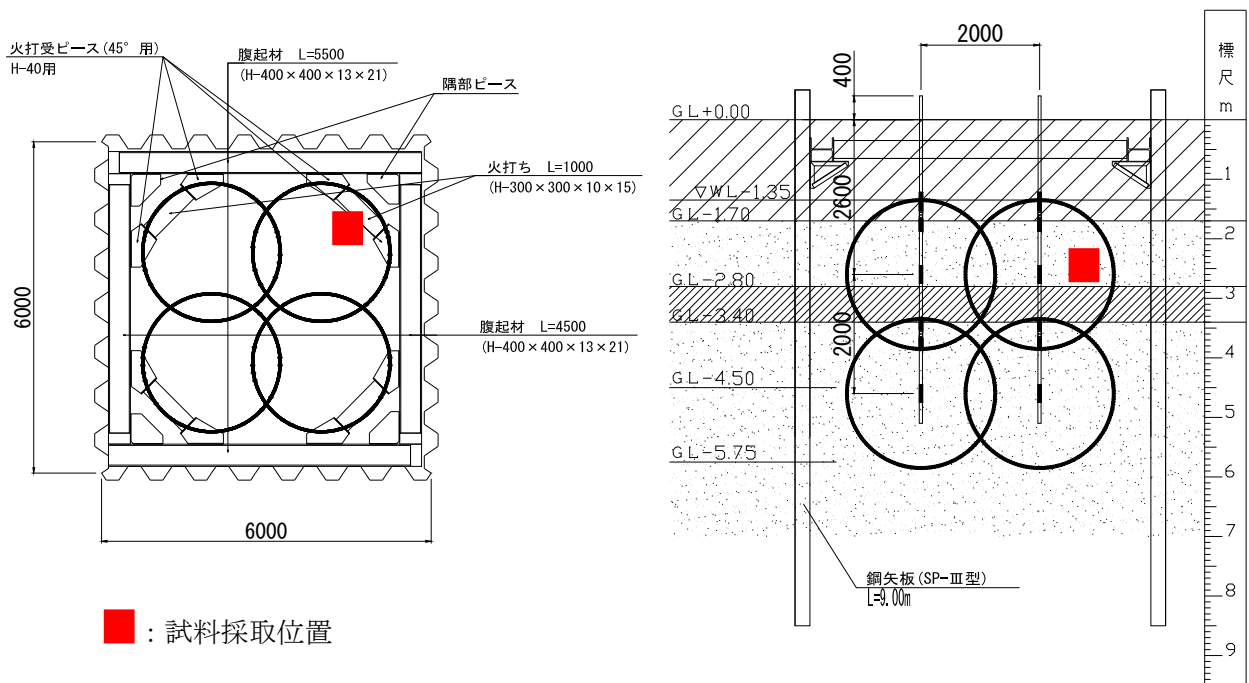


図 9 改良体発掘平面・断面図

薬液注入率 λ は事前調査結果より注入率 $\lambda=43\%$ とし、注入速度は現地注水試験より浸透形態の注入が可能になるよう毎分 6 リットルとした。1 改良体当たりの注入量は 3,440 リットルとなる。

薬液注入完了 14 日後に改良体を発掘し、出来型を確認するとともに改良体をブロックサンプリングし、一軸圧縮試験（材令 28 日）を実施した。採取位置は、上部改良体の半径の 1/2 位置である。また、現地強度と室内強度との比較のため、改良対象層の砂を事前に採取し、室内にて改良砂を作製し、一軸圧縮強さを確認した。

(3) 改良体出来型

改良体の発掘は、GL-4.5m まで行い、改良体の出来型を確認した。図 9 に改良体の発掘平面・断面図を示す。写真 1 に発掘した改良体の全景を示す。写真 1 中の赤色マーキングは、計画改良径である。改良体天端は、計画天端 GL-1.35m に対して実測天端 GL-1.30m とほぼ計画値を満足していた。また、改良体径は計画径 $\phi 2.5$ m



写真1 改良体発掘全景 (GL-1.30m)

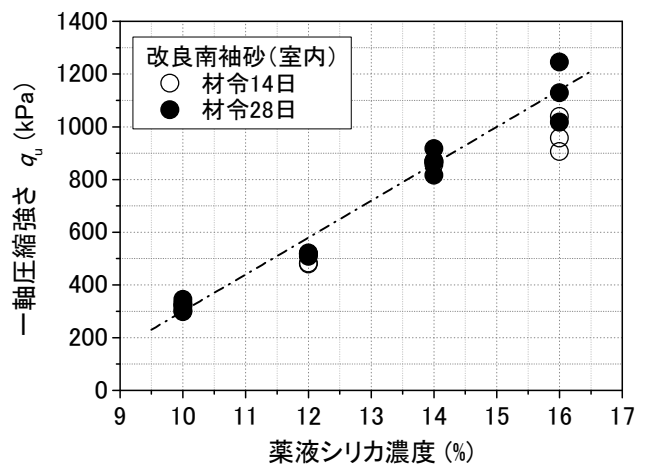


図10 一軸圧縮強さ(室内)～薬液シリカ濃度関係

をほぼ満足し、改良範囲内には未改良領域は見られず、連続した一体固結体となっている。

(4) 改良体の一軸圧縮強さ

図10に改良南袖砂の一軸圧縮強さ(室内)～薬液シリカ濃度関係を示す。薬液シリカ14%濃度改良砂の一軸圧縮強(室内)さは、 $q_u=900\text{kPa}$ 程度であり、従来型の10%濃度改良砂と比較して約2.5倍の発現強度となっている。現地改良砂の一軸圧縮強さは、 $q_u=396.7\sim 724.7\text{kPa}$ の範囲にあり、平均で $q_u=543.9\text{kPa}$ であった。また、一軸圧縮強さの現地強度と室内強度の比 η （現地強度/室内強度）は、 $\eta=0.6$ 程度であった。

5. まとめ

本報告では、高シリカ濃度特殊シリカ液および専用プラントを含めた注入工法の概要を示すとともに本薬液を用いた固結砂の強度特性および現地注入実験結果について示した。現地注入実験の結果、造成された改良体の一軸圧縮強さは、 $q_u=540\text{kPa}$ 程度であり、従来の特殊シリカ液による改良強度($q_u=150\text{kPa}$ 室内試験より推定)と比較して3倍程度の発現強度が得られていることがわかった。

今後は、現地および室内試験データを蓄積するとともに、既存岸壁および護岸の側方流動対策等に本工法を提案して行きたいと考える。

参考文献

- 1)大野康年(2013)：高濃度特殊シリカ液による改良砂の強度特性，第48回地盤工学研究発表会講演集。
- 2)大野康年(2012)：バルーングラウト工法，地震時における地盤災害の課題と対策 2011年東日本大震災の教訓と提言(第二次)，pp.306-307,地盤工学会。
- 3)岡二三生，大野康年，小高猛司，関口宏二(2002)：一定拘束圧下の薬液浸透注入による安定化処理砂の供試体作製方法，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.843-844。
- 4)岡二三生，小高猛司，大野康年，高戸順一，田久勉，西松範介(2002)：浸透注入改良砂の排水三軸試験による改良効果の観察，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-094，pp.187-188。