高強度薬液固結砂の長期強度特性および針貫入試験を用いた強度推定に関する検討

早稲田大学　学生会員　○山崎　知
早稲田大学　学生会員　中道　馨
早稲田大学　学生会員　山本　馨
早稲田大学　フェロー会員　赤木　寛一
ケミカルグラウト（株）　川村　淳　渡邊　陽介

1. 研究背景

世界中で発生する M6.0 以上の地震のおよそ 2 割が日本近辺で発生しているとも言われており，わが国は世界有数の地震大国として知られている．かねてより大規模な地震および液状化による被害が各地で発生している．既設構造物直下の地盤の液状化対策には薬液注入工法が有効であるとされているが，現在使用されている薬液注入材により改良された地盤強度は q_u＝100~200kN/m^2 程度であるため，大地震時に強度面において適用不可となる場合がある．本研究では薬液固結砂の適用範囲拡大を目指し，一般配合と比較してシリカ濃度の高い薬液注入材を使用し，q_u＞400kN/m^2 を目標値として設定して，540 日の長期間養生した薬液改良体に対して一軸圧縮試験を実施することで強度特性を確認した．

施工現場において，薬液注入工法による改良地盤の長期耐久性を期待する場合では，施工後に改良地盤の強度確認を行うことが義務付けられている．しかし，施工現場において，一軸圧縮試験を実施することが可能なサイズを持ちなおかつ自立できる供試体を得ることができないこともあり，強度確認試験が直接的に実施できない状況も存在する．その場合，現在では現場で採取した薬液改良体のシリカ含有量を測定し，事前の室内試験時に得られるシリカ濃度と一軸圧縮強さの推定式から間接的に換算する方法がある．しかし，この手法が間接的な強度推定方法であること，シリカ含有量の測定に時間がかかることから，より簡易的かつ短時間で強度の推定を行える手法が求められる．そこで針貫入試験を実施し，得られた貫入力を地盤の強度に変換することができれば，少量の試料に対しても簡易的に強度を評価する新たな手法になり得ると考え，一軸圧縮試験と同時に針貫入試験を実施し，一軸圧縮強さと針貫入勾配との関係を取りまとめた．

2. 実験内容

2.1 試験条件

特殊中性・酸性系薬液 A および珪砂 7 号を使用し，浸透注入法により供試体を作製した．供試体の目標寸法はφ50mm×h100mm，シリカ濃度は 6.2%および 11.8%，目標相対密度 60%である．作製した薬液改良体は密閉容器内に保管し，容器底面に水を張ることで温度 22℃程度，湿度 90%以上の湿潤状態を保ちながら養生を行った．

珪砂 7 号の物性値を表 2.1 に示す．

2.2 試験手順

・浸透注入法による供試体作製

浸透注入法の様子を図 2.1 に示す．アクリルモールド(φ50×150mm)に，高さが 100mm になるように砂を詰めてケース内に設置し，薬液注入時の改良体の飽和度を高めるためにケースの中を脱気し．脱気完了後に薬液をモールド内に浸透させていく．

・針貫入試験(JGS 3431)

中道らの研究 [4]より，自動針貫入試験機の試験結果のばらつきと，携行型試験機の試験結果のばらつきはほぼ同程度とされている．したがって本研究では携行型試験機（図 2.2）を使用して針貫入試験を実施した．

針の貫入長さが 10mm に達するか，貫入荷重がその試験機の最大(本試験機では 100N)に達した時点で針の貫入長さ L と貫入荷重 P を読み取り，針貫入勾配 NP を算出する(式 2.1)．

携行型針貫入試験は各材齢 2 本ずつ，合計 22 本の供試体に対して実施した．針貫入試験を実施した箇所を図 2.3 に示す．各供試体の上部，中部，下部について，それぞれ 4 方向から，合計 12 か所について試験を実施した．

針貫入勾配 NP＝貫入荷重 P÷貫入長さ L　…(式 2.1)
(N/mm)　(N)　(mm)

・一軸圧縮試験(JGS 0511)

3，7，14，28，90，180，360，540 日間養生時に一軸圧縮試験を実施した．試験本数は各材齢 4 本ずつ，合計 32 本の供試体に対して試験を行った．各材齢において，供試体 4 本の内 2 本は針貫入試験を実施した後のものを使用した．

表 2.1　珪砂 7 号：物性値

項目	記号	単位	数値
土粒子密度	ρ_s	g/cm^3	2.62
最大間隙比	e_{max}	-	0.931
最小間隙比	e_{min}	-	0.613
60%粒径	D_{60}	mm	0.18

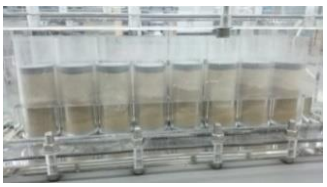

図 2.1 浸透注入法

図 2.2 携行型針貫入試験機

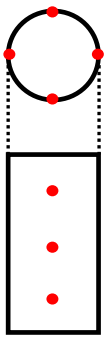

図 2.3 針貫入試験箇所

キーワード　薬液注入　高強度　針貫入勾配
連絡先　〒169-8555　東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室　TEL. 03-5286-3405 E-mail：s.ariura@kurenai.waseda.jp

3. 実験結果

図 3.1 に一軸圧縮試験結果を示す. シリカ濃度 11.8%の薬液改良体について，一軸圧縮強さが増加していく傾向を示し，540 日養生時において平均強度 769.8kN/m² を得た．これは，本試験における目標強度 qu>400kN/m² を満たす結果であり，従来使用されているシリカ濃度 6.2%の薬液改良体と比較して 2 倍程度高い強度となる．したがって，シリカ濃度を高めた薬液改良体は 540 日養生時においてその強度を十分に保持することを確認した．

図 3.2 に一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係を示す．一軸圧縮強さの増加に伴って，変形係数も増加する傾向を示し，両者の相関性を示すことができる．試験結果の関係式は以下のようになり，既往研究 [1] と比較しても妥当な結果を示している．

$$E_{50}=76q_u \quad \text{…(式 3.1)}$$

図 3.3 に携行型試験機による針貫入試験の結果を示す．針貫入試験は各材齢 2 本の供試体に対して 12 か所実施したため，針貫入勾配の全体平均値は，その計 24 か所の計測結果の平均値を用いている．この結果より，シリカ濃度 6.2%の薬液改良体の針貫入勾配は材齢 28 日時点で 1.0N/mm 程度であるが，シリカ濃度 11.8%の薬液改良体は材齢 28 日時点で 2.92N/mm 程度と高水準の結果を示した．また，180 日時点では 3.54N/mm 程度，更に 540 日時点では 4.00N/mm 程度となった．針貫入勾配は養生日数の経過に伴い増加する傾向が見られ，一軸圧縮強さと同様の推移を示した．

図 3.4 に針貫入勾配と一軸圧縮強さの関係を示す．針貫入勾配と一軸圧縮強さの間には相関性が確認でき，以下の関係式を得られた．

$$q_u= 285NP^{0.607} \quad \text{…(式 3.2)}$$

なお，室内試験データと関係式の決定係数は $R^2 = 0.657$ であった．既往研究 [2]の通り，薬液改良土において針貫入勾配と一軸圧縮強さの相関関係は確認でき，一軸圧縮強さは針貫入勾配の指数関数として表せる結果が得られた．今回のように関係式が得られれば，施工現場において針貫入試験を実施することにより，間接的に一軸圧縮強さを推定することができる．また，針貫入試験は少量の試料に対しても行える試験であることから，強度推定の簡易化が望める．

4. まとめ

シリカ濃度 11.8%の薬液改良体に関して，養生期間の経過に伴って一軸圧縮強さが増加していく傾向が得られた. 540 日養生時で目標強度 qu>400kN/m² を満たす結果を示し，シリカ濃度 6.2%の薬液改良体と比較すると 2 倍程度高い強度を発現した．高強度薬液固結砂は長期的にその強度を十分に保持することを確認できた．

また，薬液固結砂に対して針貫入勾配と一軸圧縮強さの相関関係を示すことができた．施工現場においてこの関係式を用いることで，薬液改良地盤の一軸圧縮強さを簡易的に推定することが可能になると期待できる．

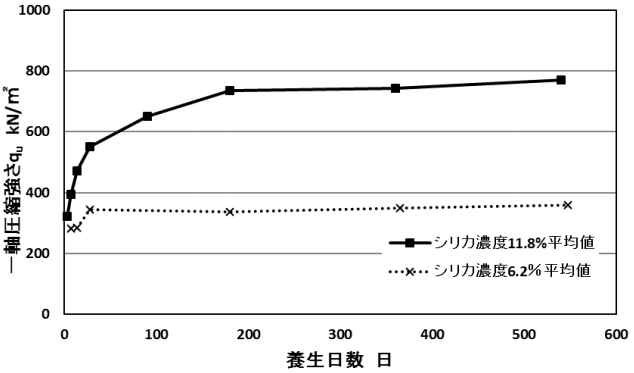

図 3.1 一軸圧縮試験結果

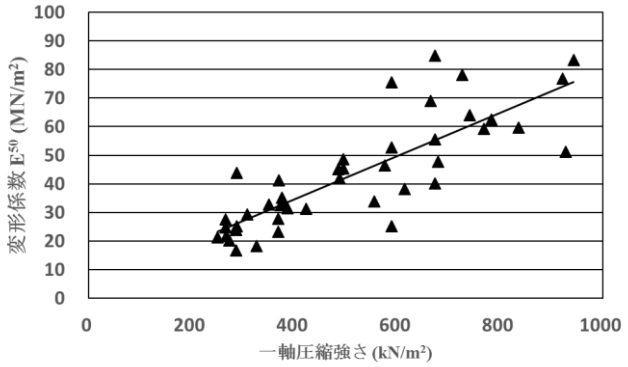

図 3.2 一軸圧縮強さと変形係数の関係

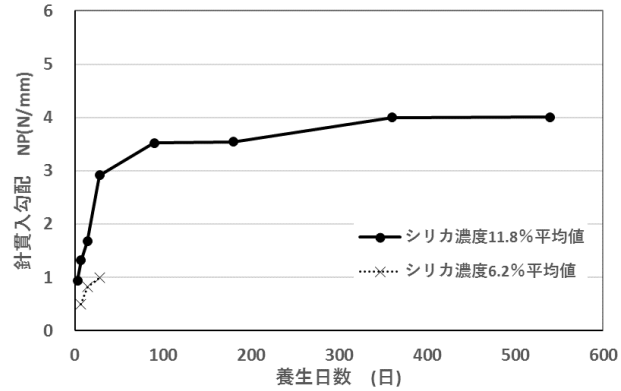

図 3.3 携行型試験機を用いた針貫入試験結果

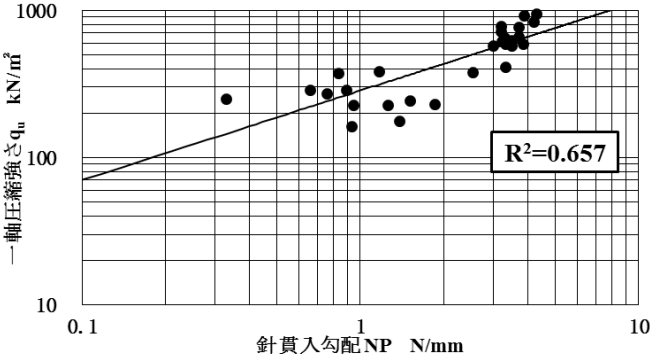

図 3.4 針貫入勾配と一軸圧縮強さの関係

＜参考文献＞
1) 財団法人 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”p96，平成 20 年 10 月
2) 宗村・北村：針貫入試験による一軸圧縮強度の推定例全地連「技術ｅ-フォーラム 2009」，2009 年
3) 山崎，赤木：薬液固結砂の長期強度特性について（その 1），第 52 回地盤工学会研究発表会，2017 年
4) 中道，赤木：高濃度薬液固結砂の長期強度特性について（その 2），第 52 回地盤工学会研究発表会，2017 年

キーワード 薬液注入 高強度 針貫入勾配
連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室 TEL. 03-5286-3405 E-mail：s.ariura@kurenai.waseda.jp