

ベンダーエレメント試験による薬液固結砂のせん断弾性係数の評価

早稲田大学 正会員 ○兵動 太一 平岡 陽 赤木 寛一
ケミカルグラウト(株) 正会員 小林 正志

1. はじめに

薬液注入工法は、軟弱地盤の強度増加や止水性の向上のためしばしば都市部で用いられている。近年、既設構造物直下の地盤改良を可能とする工法が開発され、都市土木においてさらに重要な施工方法の一つとして使用されている。しかしながら、施工後の強度発現メカニズムや初期強度が明確でなく施工管理に経験則が取り入れられることも少なくない。薬液固結砂の強度発現メカニズムを明確にすることで、性能評価やコスト等で従来よりも効果的な施工が可能になると考えられる。本研究では、珪砂を非シリカゾル系の中酸性薬液で固結した供試体を用いてベンダーエレメント (BE) 試験を実施し、2種類のシリカ濃度に設定した薬液を用いて作成した薬液固結砂のせん断弾性係数 G の経時変化を測定し、比較した。また、試験機内で1週間養生した供試体に拘束圧を加え、せん断弾性係数 G の拘束圧依存性を検討した。

2. 試験概要

2.1 試料と試験装置 本研究では、実験試料として日光珪砂 6号($D_{50}=0.26\text{mm}$)を用い、注入剤として非シリカゾル系の中酸性薬液であるエコリオン(Ecoryon)を用いた。実験で使用した日光珪砂 6号の物理的性質を表 1 に示す。BE を装着した三軸試験装置の概要図を図 1 に示す。BE は図 1 に示した三軸試験装置のキャップ ($\phi=50\text{mm}$) とペDESTAL ($\phi=50\text{mm}$) の中央部分に取り付けた。三軸試験装置には地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」(JGS 0541-2000) を実施するのに用いられる典型的な試験装置を使用した。

2.2 試験方法 供試体 ($\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$) は、水中落下法の要領であらかじめ薬液を入れたモールドに相対密度 $Dr=60\%$ になるように砂を加え作成した。薬液はシリカ濃度を通常現場で使用される 5.8%に加えて、4.5%になるよう配合した。作成した固結砂を約半日静置し、トリミング法で三軸試験装置に設置した。脱気水で十分通水した後に拘束圧を作用させ、200kPa の背圧を加え飽和化を図った。その後、等方応力条件で有効拘束圧を $\sigma_c'=50\text{kPa}$ 载荷した。固結砂を供試体作成から 7 日目まで試験機中で養生し、経過時間に伴うせん断弾性係数 G の測定を行った。

さらに、供試体作成より約 7 日が経過した後に有効拘束圧を $\sigma_c'=100$ 、200kPa と段階的に载荷し、それぞれの拘束圧下において BE 試験を実施した。BE 試験では、送信波を起振電圧 $V=10\text{V}$ の正弦波を用い、周波数 $f=1\sim 10\text{kHz}$ に変化させて送受信波形の時刻暦を取得した。また、せん断弾性波速度 V_s を求めるのに必要なせん断弾性波伝達距離 L は送受信 BE の先端間の距離とし、

表 1 日光珪砂 6 号の物理的性質

土粒子密度(g/cm^3)	最大間隙比	最小間隙比
2.66	0.982	0.619

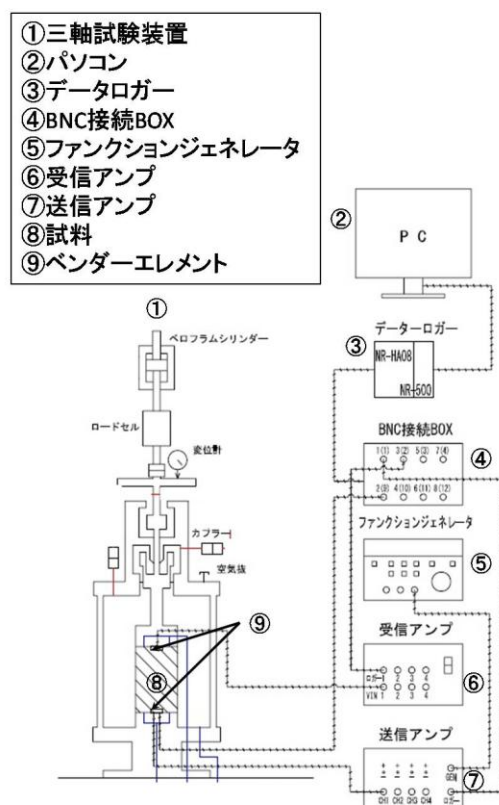


図 1 BE 試験装置の概要

キーワード：薬液注入 ベンダーエレメント せん断弾性係数 シリカ濃度 拘束圧

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学赤木研究室 TEL 03-5286-3405

せん断弾性波伝達時間 Δt は start-to-start 法によって決定した¹⁾。

3. 実験結果と考察

図2にシリカ濃度 5.8、4.5%におけるせん断弾性係数 G と供試体作成からの経過時間の関係を示す。経過時間が 2 日まではシリカ濃度の違いによる G の大きさの差は見られない。シリカ濃度 5.8%の供試体において、経過時間が 2 日を超えたあたりから、 G の値は上昇し、5 日以降は G の値の変化はあまり見られなかった。シリカ濃度 4.5%においては、設置後時間の経過とともに G は緩やかに上昇する。

図3に、経過時間 7 日後に測定したシリカ濃度 5.8、4.5%におけるせん断弾性係数 G と拘束圧の関係を示す。薬液のシリカ濃度に関係なく、有効拘束圧が大きくなるほど G も大きくなることを見て取れる。また同じ有効拘束圧下では、 G はシリカ濃度が大きくなることが見られる。

地盤材料の G は、Hardin and Richard の考え方²⁾に基づき次式の形で表現されることが多い。

$$G = A \cdot f(e) \cdot \left(\frac{\sigma_c'}{\sigma_r'} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 A は G と同じ単位を持つ実験定数、 $f(e)$ は間隙比関数、 σ_c' は平均有効主応力、 σ_r' は基準応力である。BE 試験では $\gamma=10^{-6}$ のひずみに対応したせん断弾性係数が得られるとされ、動的変形試験などで求められた初期せん断断線係数 G_0 に相当するといわれている。Iwasaki and Tatsuoka は、細粒分を含まないクリーンな砂に対して G を定式化している³⁾。等方応力状態において、 $\gamma=10^{-6}$ のときの G は、

$$G = 14091 \cdot f(e) \cdot \sigma_c'^{0.4} \quad (2)$$

となる。ここで、間隙比関数は $f(e) = \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ となり、 G の単

位は kPa である。図4に、シリカ濃度 5.8%における実測値の G

と式(2)より算出した理論値の G と拘束圧の関係を示す。 $\sigma_c' = 50\text{kPa}$ においては実測値、理論値ともにほぼ同じ値である。しかしながら、有効拘束圧が大きくなるほど、実測値と理論値の差が大きくなることを見て取れる。これは拘束圧の上昇とともに、固結砂の間隙中の薬液が G の値に影響を与えていると考えられる。今後、式(1)の薬液固結砂における実験定数 A を明らかにし、エコリヨン改良砂の理論式の定式化を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた成果を要約すると、以下の通りである。(1) $\sigma_c' = 50\text{kPa}$ の等方応力条件の BE 試験より、薬液固結砂の G はシリカ濃度に関係なく時間経過に伴い大きくなる。(2) 有効拘束圧を段階的に変化させたとき、薬液固結砂の G はシリカ濃度に関係なく拘束圧に依存する。(3) Iwasaki and Tatsuoka 式より算定される G は、薬液固結砂では拘束圧が大きくなるほど実測値との差が大きくなる。

参考文献 1) Japanese Domestic Committee for TC-29: International Parallel Test on the Measurement of $G_{\max}$ Using Bender Elements Organized by TC-29, 2006, 2) Hardin, B.O. and Richard Jr. F.E.: Elastic wave velocities in granular soils, Proc. ASCE., Vol.89, SM1, pp.33-65, 1963, 3) T. Iwasaki and F. Tatsuoka: Effects of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sand, Soils and Foundations, vol.17, No.3, 1977

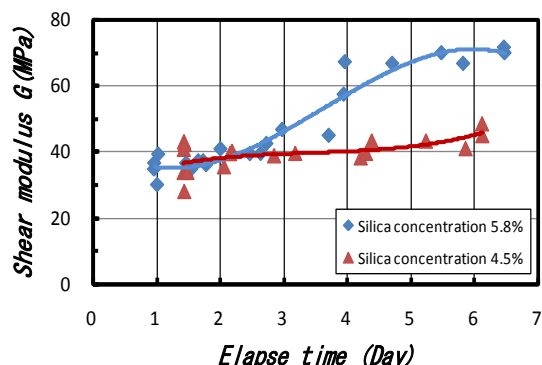


図2 せん断弾性係数と経過時間の関係

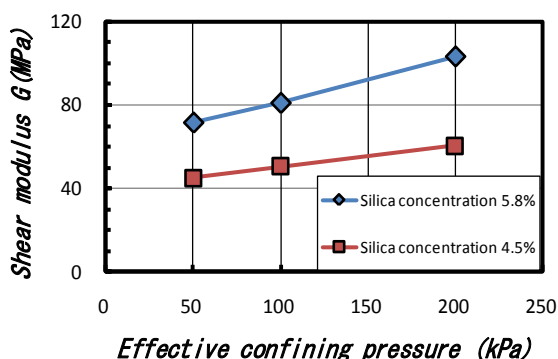


図3 せん断弾性係数と有効拘束圧の関係

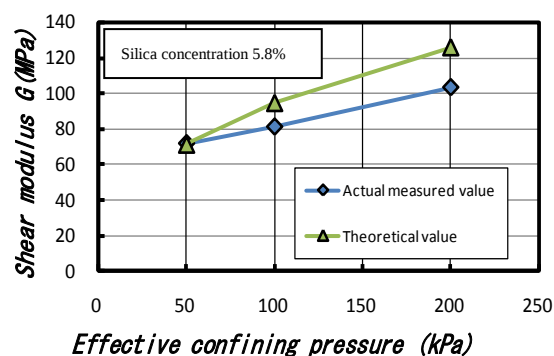


図4 実測値と理論値の比較