

ベンダーエレメント試験による薬液改良砂の強度発現メカニズムの解明

東京都市大学 学生会員 ○栗田将和

東京都市大学大学院 学生会員 杉浦陽子

東京都市大学 正会員 末政直晃 正会員 伊藤和也

強化土エンジニアリング(株) 正会員 佐々木隆光

1. はじめに

日本は世界有数の地震大国であり、2011年3月に発生した東日本大震災でも、浦安市などで大規模な液状化被害が確認された。写真1はその一部である。このような液状化の対策工法の一つに薬液注入工法がある。薬液注入工法は、砂質系地盤に注入管を通じて、任意に固化時間を調整できる薬液を浸透注入することで、地盤の強度増加や止水性の向上が期待できる。しかし、薬液注入に伴う薬液の強度発現メカニズムが不明確であり、地盤特性の違いや薬液改良体の出来型や改良強度に及ぼす影響が把握されていないなどの課題がある。このような課題を解決することにより施工時間の短縮、コスト削減、性能面での向上に繋がり、優れた薬液注入を行なうことが可能となる。そこで本研究では、波動試験の一つであるベンダーエレメント(Bender Element:以下 BE)試験を用い、改良強度の発現メカニズムの解明を目的とする。BE試験は、非破壊試験であるため、供試体を測定する際に同一部位から測定可能、また比較的安価に試験が可能となっている。しかし、試験の結果への解釈など統一的な見解がなされていないという現状がある²⁾。本報告では、ゲルタイム測定を行い、試料の異なる供試体に対する初期せん断弾性係数(以下:G)の変化を検討した。また、拘束圧実験を行い、負圧の増加におけるGの変化を検討した。さらに、一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強度とGの関係性について検討した。

2. BE 試験概要

図1にBEの概要図、図2試験装置の概略図を示す。中心にあるニッケルで構成されたシム材は弾性補強かつ電極の役割を果たしている。この両面に厚み方向に分極された圧電素子を張り合わせている。このような構造はバイモルフと呼ばれており、BEとは振動子の呼称である。これに電圧を印加すると圧電効果により上部の圧電素子は縮み、下部の圧電素子は伸びる。その結果、上部方向に曲がる。また、変形を加えると電圧を発生する特性があり、これを利用して送信用ベンダーに電圧を加えることで土中にせん断波を発生させ、他方の受信用ベンダーでせん断波を受信することにより、土中を伝播するせん断波速を測定することができる。せん断波速度の解析は、送信・受信波の立ち上がりからせん断波の送信時間・到

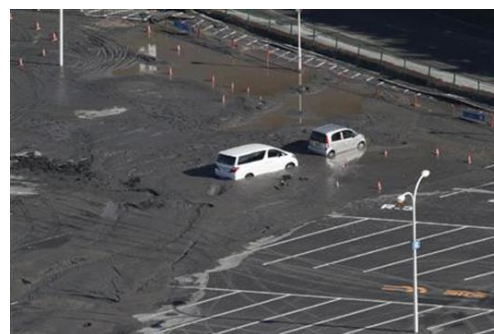


写真1 液状化被害事例¹⁾

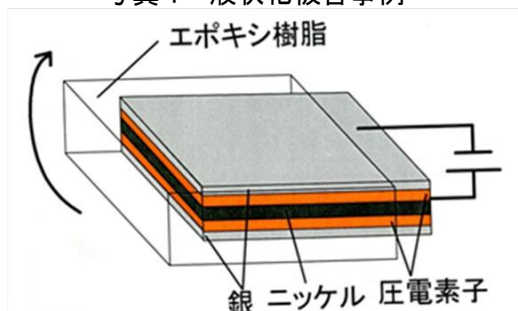


図1 BE概要図

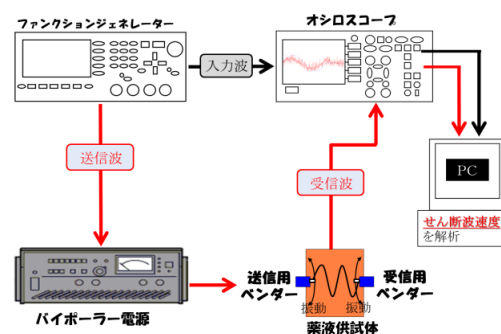


図2 試験装置概略図

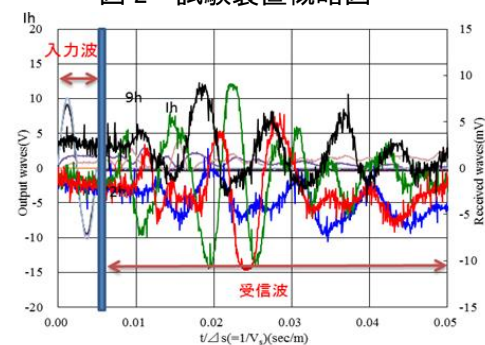


図3 受信波・送信波

キーワード：ベンダーエレメント，初期せん断弾性係数，せん断波速度

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL.03-5707-0104 E-mail:g1218030@tcu.ac.jp

達時間を読み取り、その差分を伝播時間とする start-to-start 法²⁾を用いた。求めたせん断波速度は、以下の(1)式を用いて砂の初期せん断弾性係数を求めることができる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

G は初期せん断弾性係数、 ρ は土の湿潤密度、 V_s はせん断波速度を示す。初期せん断弾性係数は微小なひずみレベルにおける変形係数であり、破壊試験で考慮する必要のあるダイレイタンスー効果の影響を受けないため、密度や応力レベルに依存する材料固有の定数となっている。そのため初期せん断弾性係数は地盤の変形問題を扱う場合に有効なパラメータとして用いられている。図3に本実験で得られた入力波と受信波を示す。各供試体とも一回の計測につきファンクションジェネレータから送信用BEに入力した電圧波形を $\pm 10V$ の単一 sin 波とし、使用周波数帯を 5~15kHz で行った。この際、オシロスコープのトリガ機能と連動したアベレーシング集積機能により複数の受信波からランダム波(主に高周波ノイズ)を除去し、受信波形を記録した。

3. 粒子特性の変化による初期せん断弾性係数 G の影響

3.1 試験目的および概要

本試験は、粒子の大きさによる違いから G にどのような影響を及ぼすか検討するため試験を行った。表1に珪砂 2~7 号の特性値、図4に珪砂 2~7 号の粒径加積曲線、図5に実験で用いた供試体の概略図を示す。薬液注入時からの低強度においてもせん断波速度の測定が可能のため、配合、注入時より 1 時間毎に G の測定を行い、以降 12 時間まで継続的に計測を実施し、薬液のゲルタイムの確認を行った。図5にBE試験を適用した供試体の設置状況を示す。図5のように、鉛直方向にBEを設置し、供試体に対してBEを5mm貫入させ測定した。BE試験に用いる電源は、波形の乱れを少なくするために、無停電装置(オムロン株式会社:BU75RW)を用いた。また、使用する薬液のゲルタイムを調節するため(株)エー・アンド・デ이의粘度測定器 VIBRO VISCOMETER SV-10 を用い、粘性を計測した。

3.2 供試体作製方法

試料には珪砂 2~7 号、薬液は活性シリカコロイド 8%、シリカゾル 8%を用いた。供試体は、直径 50mm、高さ 50mm の土槽内に薬液を入れ、その後、相対密度が 80%になるように管理し、水中落下法にて砂を充填した。

3.3 試験結果

表2に試験条件、図6に乾燥砂の測定結果、図7に活性シリカコロイド 8%のみの測定結果を示す。図6より粒径の小さい珪砂 7 号より G が大きい結果が得られた。また図7より図6と同じように粒径の小さい珪砂 7 号より、 G が大きい傾向を示した。これは、砂の

表 1 珪砂 2~7 号の特性

試料	土粒子密度 (cm^3/s^2)	最大密度 (cm^3/s^2)	最小密度 (cm^3/s^2)
珪砂2号	2.62	1.54	1.32
珪砂3号	2.62	1.53	1.32
珪砂4号	2.63	1.53	1.31
珪砂5号	2.63	1.56	1.30
珪砂6号	2.64	1.58	1.27
珪砂7号	2.65	1.61	1.21

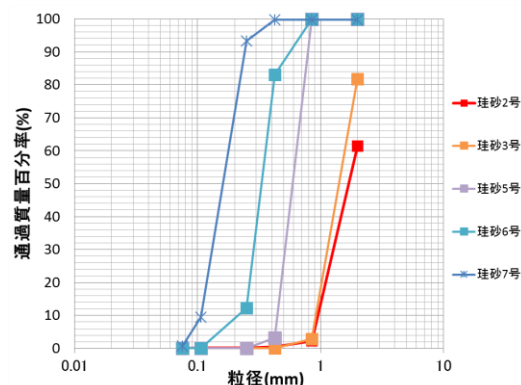
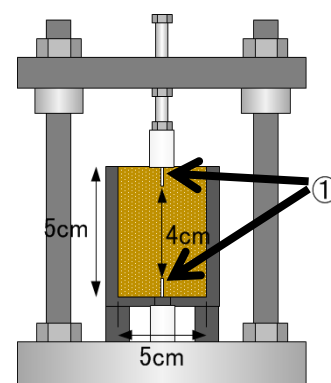


図 4 粒径加積曲線



①: ベンダーエレメント

図 5 実験で用いた供試体

表 2 供試体条件

	試料	薬液
case1	珪砂2号	活性シリカコロイド8%
case2	珪砂4号	
case3	珪砂7号	
case4	珪砂2号	シリカゾル8%
case5	珪砂4号	
case6	珪砂7号	

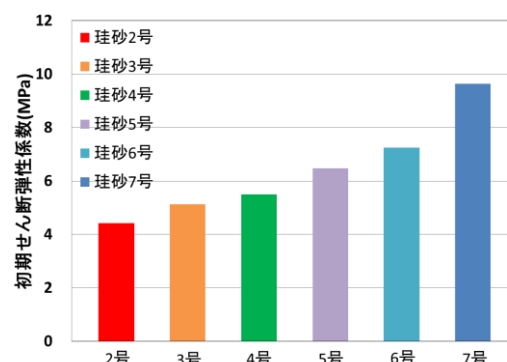


図 6 試料ごとの G の変化

湿潤密度や間隙の体積による違いなどといった影響が関係しているのではないかと考えられる。また、case1, case3 においては6時間程度、case6 は5時間程度で G が大きくなる傾向が見られる。この部分がゲルタイムではないかと推測した。このようにゲルタイムが発生した原因としては、薬液が土粒子の間隙内に粘着力を持つ薄い膜を形成しながら固化することが影響していると考えられる。また、同じ試料を使っているのにもかかわらずゲルタイムに差異が生じている理由としては、薬液、室温、土粒子の pH 値等の化学的な性質が関係していると考えられる。

4. 養生日数に伴う G の変化について

4.1 試験目的および概要

本試験は、薬液供試体の養生日数の変化に伴う G の変化を検討するため試験を行った。養生日数は3, 7, 10, 14, 21, 28日として BE 試験を行った。

4.2 供試体作製方法

試料には珪砂 2〜7号、薬液は活性シリカコロイド 8%を用いた。供試体は、直径 50mm、高さ 100mm のプラモールド内に薬液を入れ、相対密度 80%になるように管理し、水中落下法にて砂を充填し、作製した。作製した薬液供試体は脱型後、高さ 90mm に成形し、室内で養生した。

4.3 試験結果

図 8 に試験結果を示す。図 8 よりばらつきはあるものの養生日数が増えるにつれて G が大きくなる傾向が見られた。これは、土粒子間の薬液が徐々に固まっていたことによる影響ではないかと考えられる。また粒径の小さい珪砂 7号より G が大きくなる傾向を示した結果となった。これは、間隙の体積の違いなどといった粒子特性による違いが影響しているのではないかと考えられる。

5. 拘束圧試験による負圧と G の関係性について

5.1 試験目的および概要

本試験は、大きさの異なる負圧をかけることで、異なる試料により G にどの程度変化がみられるか検討するため試験を行った。図 9 に試験装置概略図を示す。真空ポンプを用いて、モールド内に大きさの異なる負圧をかけることによって拘束圧状態を再現した。この時の負圧は、5〜100kPa までの低圧力状態において 5kPa ごとに変化させた。このように設置した供試体に対して BE 試験を適用する。

5.2 供試体作製方法

試料は珪砂 2〜7号の乾燥砂を用い、試験を行った。供試体は、直径 50mm、高さ 100mm のモールド内で、相対密度 80%に管理するため、空中落下法にて砂を充填した。

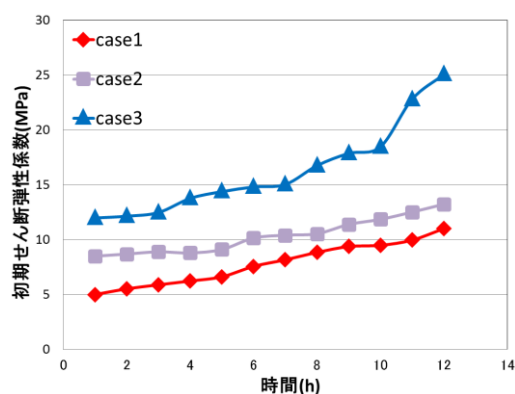


図 7 各時間ごとの G の推移

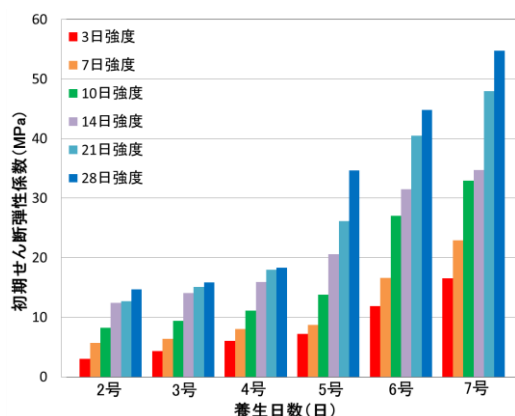


図 8 養生日数に伴う G の変化

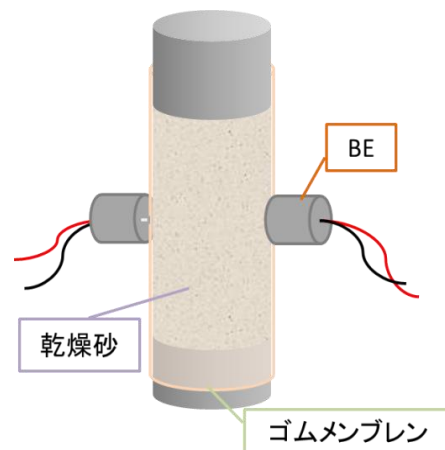


図 9 拘束圧試験概要図

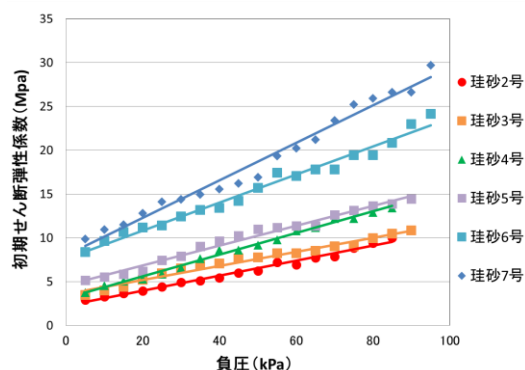


図 10 負圧と G の関係

5.3 試験結果

図 10 に試験結果を示す。図 10 より粒径の小さい珪砂 7 号より、 G が大きい傾向を示した結果になった。これは粒子特性による影響が関係していると考えられる。また、図 10 を近似線で示したグラフと図 8 の横軸を負圧に直したグラフを合わせたグラフを図 11 に示す。図 11 より負圧と薬液供試体の G は線形で表せるのではないかと推測した。

6. G と一軸圧縮強度の関係性について

6.1 試験概要

本試験は、養生した薬液供試体の G と一軸圧縮強度の相関性を検討するために行った。BE 試験は、試験の結果への解釈など統一的な見解がなされていないという現状がある。そのため、破壊試験の一つであり一般的に用いられる一軸圧縮試験との関係性を明確にするために行った。供試体は、活性シリカコロイド 8%を用い作製し、28 日養生した薬液供試体に BE 試験を行った後、一軸圧縮試験を行った。既往の研究において薬液注入後、 G および一軸圧縮強度は、28 日を過ぎると両値ともに強度の安定が見られるという結果³⁾が表れており、本実験では 28 日養生した供試体について一軸圧縮試験を実施した。

6.2 試験結果

図 12 に一軸圧縮応力と変形係数の関係、図 13 に G と一軸圧縮強度の関係を示す。図 12 よりばらつきはあるもののどの試料においても変形係数は一軸圧縮強度の増加とともに大きくなっていることから線形近似で表せると推測した。既往の文献より養生初期の変形係数から養生 28 日強度の一軸圧縮強度を推定できるという報告がある⁴⁾。また、図 13 よりばらつきはあるものの変形係数の増加とともに G が大きくなる傾向が見られた。

7. まとめ

粒子の大きさの異なる試料ではゲルタイムに大きな差が生じる。また、薬液の種類によってゲルタイムに差が生じることから試料、薬液の種類を考慮する必要がある。 G は有効拘束圧に大きく依存し、他の影響を受けにくいと考えられる。また、負圧と薬液供試体の G は線形で表せるのではないかと推測した。しかし、本試験では低圧力状態での試験であったため、データ数を増やすためにも高圧力状態での検討も必要であると考えられる。養生日数が増えるにつれ G が大きくなる結果が得られた。また、 G と変形係数は線形で表せるのではないかと推測した。

<参考文献>

- 1) http://blogs.yahoo.co.jp/sakura_3939_ing/GALLERY/show_image.html?id=19537197&no=1
- 2) 地盤工学会 T c 29 : International Parallel Test on the Measurement of G_{max} Using Bender Elements Organized https://www.jiban.or.jp/file/e/tc29/be_international_parallel_test.pdf
- 3) 三浦耕平：ベンダーエレメント試験を用いた薬液供試体の強度予測に関する研究 東京都市大学論文 2013.3
- 4) 岡田和成・内田義博・佐々木隆光・末政直晃 活性シリカコロイド系注入材により浸透固結された礫質砂の力学・変形特性第 11 回地盤改良シンポジウム論文集 2014.11

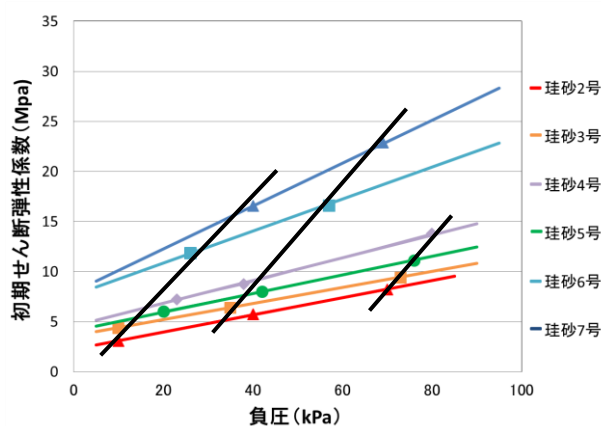


図 11 負圧と薬液強度の関係

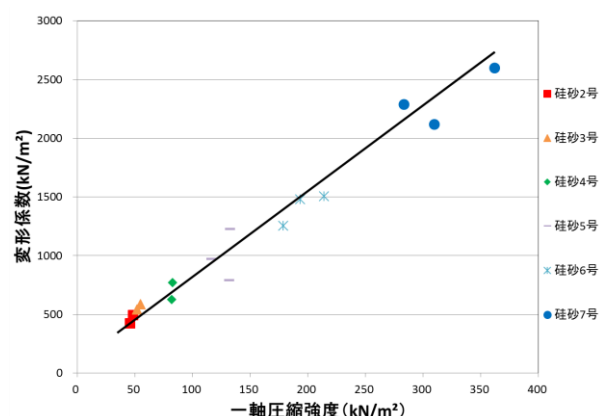


図 12 一軸圧縮強度と変形係数の関係

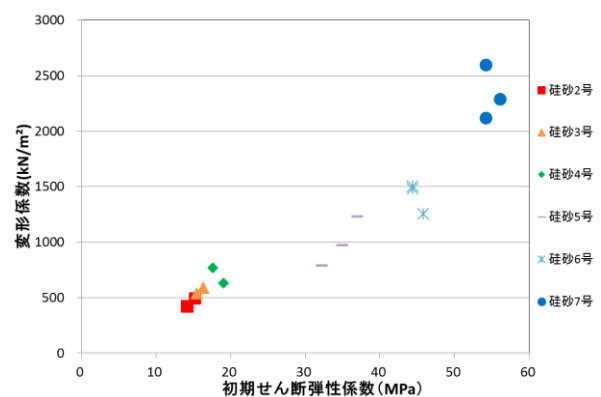


図 13 G と変形係数の関係