

研究解説

セメント改良土の引張強度特性

Tensile Strength Properties of Cement-treated Soil

古 関 潤 一*・佐 藤 剛 司*

Junichi KOSEKI and Takeshi SATO

1. はじめに

軟弱な粘性土地盤を改良する工法の一つとして、原地盤土にセメントを添加・混合して固化させる深層混合処理工法が開発され、港湾施設等で利用されてきた¹⁾。

近年においては、地震時に液状化する恐れのある砂地盤に対しても深層混合処理工法が適用されている²⁾。写真1は、信濃川堤防の基礎地盤の液状化対策として、深層混合処理工法による地盤改良を実施している状況である。1995年の兵庫県南部地震において基礎地盤の液状化により大きく被災した淀川堤防(写真2)を復旧する際にも、セメント改良工法が用いられた³⁾。

改良コストを低減するために、地盤全体を改良するのではなく、一部を格子状または壁状に改良する工法(写真3)

が開発されている。写真1の事例でもこの工法が適用された。このように断面を絞った改良地盤に地震時水平慣性力が作用すると、部分的に引張応力が発生することがある²⁾。この引張応力により改良地盤が破壊するか否かが、設計上の支配要因となる場合があるため、引張強度を精度よく評価する手法の確立が早急に必要とされている。

ここでは、セメント改良土の引張強度に関する既往の研究を粘性土と砂質土に分けて概説し、さらに、セメント改良砂質土を対象とした三軸・一軸引張試験と割裂試験による引張強度の比較検討例⁴⁾を紹介する。



写真1 信濃川堤防における深層混合処理工法の施工



写真2 兵庫県南部地震で被災した淀川堤防



写真3 格子状のセメント改良地盤の例

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

2. セメント改良土の引張強度特性に関する既往の研究

2.1 セメント改良粘性土の引張強度特性

川崎ら⁵⁾は、3種類の室内再構成試料の一軸引張試験と割裂試験を行い、一軸引張強度のほうが割裂引張強度よりも大きくなり、これは強度の小さいコンクリートと同様な傾向であることを示した。それぞれの引張強度は、一軸圧縮強度の0.20～0.28倍、および0.10～0.18倍の範囲であった。一軸引張試験のみを実施した他の試料の結果では、一軸圧縮強度の0.18～0.31倍の範囲が得られた。一軸引張試験は供試体の乱れと偏心荷重の影響を受けやすく、そのために結果がばらつきやすいことを指摘している。

寺師ら⁶⁾は、室内再構成試料の割裂試験と曲げ試験を行った。一軸圧縮強度が1.5 MPa以下の場合には、割裂引張強度がその約0.15倍となり、一軸圧縮強度が1.5 MPaを超えると割裂引張強度は0.2 MPa前後の一定値となった。一方、曲げ試験の結果は割裂試験よりもばらつきが大きく、一軸圧縮強度の0.1～0.6倍の範囲であった。

小林⁷⁾は、中空円筒供試体に作用する内セル圧を外セル圧より大きくすることにより供試体内に引張応力を作用させて、室内再構成試料の引張強度を測定した。その結果、この試験方法では進行性破壊の影響により引張強度が過小評価されている可能性があるが、それでも割裂試験による測定値よりは大きな値となることを示した。セメント改良土に割裂試験を適用すると、応力集中の生じた部分が先に降伏するために供試体内の応力分布が必ずしも弾性論による理論値とは一致しない可能性があることを指摘している。

佐々木ら⁸⁾は、室内再構成試料と原位置採取試料の一軸圧縮試験と割裂試験を行い、一軸圧縮強度がおおむね2～9 MPaの範囲において、割裂引張強度がその0.05～0.20倍であることを示した。原位置からの試料採取には軟岩用ダブルコアチューブを用いたが、多くのクラックが発生し、一軸圧縮強度のバラツキも室内再構成試料より大きかった。しかし、割裂引張強度と一軸圧縮強度の比率に関しては、室内再構成試料と原位置採取試料の間で有意な差は見られなかった。

斎藤⁹⁾は、室内でセメント改良した2種類の粘性土の割裂試験および一軸引張試験による引張強度と一軸圧縮強度の比較を行った。一軸圧縮強度が1～6 MPaの範囲では、割裂引張強度はその0.09～0.13倍で、一軸圧縮強度の増加とともにこの比率は若干減少した。一方、一軸引張強度は一軸圧縮強度の0.08～0.27倍で、割裂試験よりも一軸強度の大きさの影響が強く現れた。これらの結果として、一軸圧縮強度が6 MPa程度では割裂引張強度と一軸引張強度がほぼ一致する場合があったが、それ以外では一軸引張強度のほうが大きかった。

以上のように、セメント改良粘性土については、各種の

試験方法で検討がなされ、多くのデータが公表されている。しかし、3章で示す三軸引張試験については、これまで実施例がない。

2.2 セメント改良砂質土の引張強度特性

塩澤ら¹⁰⁾は、砂質土にセメントを250～300 kg/m³、ベントナイトを0～22 kg/m³添加して改良した地盤から採取した試料の一軸試験と割裂試験を行い、割裂引張強度が一軸圧縮強度のほぼ0.10～0.15倍であることを示した。この比率は前述した粘性土に対する結果とほぼ一致するが、砂質土を対象とした検討データの公表事例は極めて限定されており、今後もデータの蓄積が必要である。

3. 三軸・一軸引張試験と割裂試験による強度の比較例⁴⁾

3.1 試験装置

三軸引張試験装置を図1に示す。供試体寸法は直径5 cm、高さ10 cmで、凹型の固定ホルダー内に石膏を流し込み、その中に供試体を入れて端面と側面の一部を固定した。固定ホルダーはキャップとペDESTALにボルト締めして剛結し、これらを載荷軸と接続する部分にユニバーサルジョイントを介することにより、供試体に曲げモーメントが作用しないようにした。

この装置を用いて円柱供試体に対する引張試験を実施したところ、図2に示すように、固定ホルダー端部との境界部分で破壊が生じた。これは、ホルダーに固定した供試体側面の近傍で応力集中が生じているためと考えられる。そこで、引張応力の分布ができるだけ均一な断面で破壊を生じさせるために、供試体の中央高さ部分の直径が4 cmとなるようにトリマーを用いて成形し(図1参照)、以下に述べる一連の試験を行った。その結果、供試体の破壊は常に中央高さ部分で生じた。

実際のセメント改良地盤には深度に応じた拘束圧が作用しており、また、透水性が低いために地震中はほぼ非排水

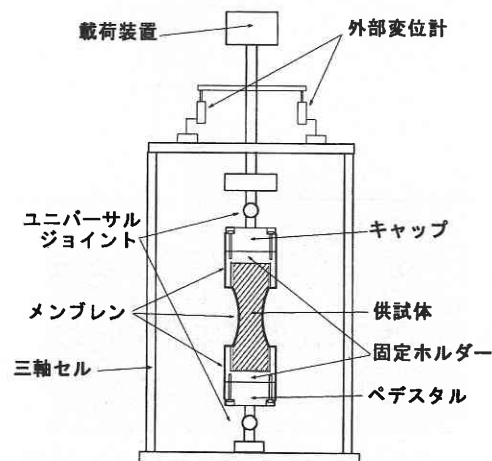


図1 三軸引張試験装置⁴⁾

条件になると見なせる。図1に示す三軸引張試験は、図3に示す割裂試験と比較すると、供試体をメンブレンでシールすることにより拘束圧と排水条件の制御が可能になるという利点を有する。また、供試体内に引張力を伝える治具を埋め込む必要がないので、原位置で採取した乱さない試料の試験にも適用可能である。

3.2 試験方法および試験条件

気乾状態の豊浦砂（平均粒径 0.2 mm）に、普通ポルトランドセメントとベントナイトおよび水を 66.3 : 10.0 : 5.0 : 18.7 の質量比で配合した試料を用いて供試体を作成した。

内径 5 cm、高さ 10 cm のプラスチックモールド内に 5 層に分けて試料を投入し、各層の湿潤密度がほぼ等しくなるようにあらかじめ検定した回数での締固めを行った。締固め後の平均値は湿潤密度が 1.94 g/cm³、含水比が 19.6 % で、7 日養生後の一軸圧縮強度の平均値は 2.2 MPa である。

1 回のバッチで 5 個程度の供試体をまとめて作成し、3 日間水中密封養生を行った後でモールドを脱型した。その後再度密封して計 7 日間の養生を行い、以下に示す試験を実施した。一軸・三軸試験時の軸ひずみ速度は 0.01 % / min とし、割裂試験時の平均ひずみ速度は 0.1 % / min とした。

- ・三軸引張試験（図1参照、排水と非排水の2種類）
- ・一軸引張試験（図1でメンブレン使用せず）
- ・割裂試験（図3参照）

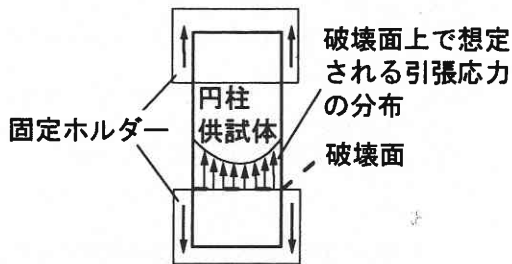


図2 円柱供試体の一軸引張試験時の破壊面位置と引張応力の分布（模式図）

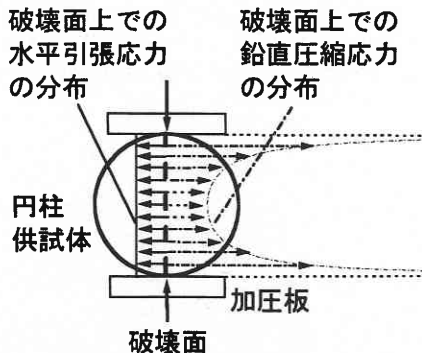


図3 割裂試験時の破壊面位置と水平引張応力・鉛直圧縮応力の分布（等方線形弾性体仮定時）

3.3 試験結果および考察

一軸引張強度と養生時間の関係を図4に示す。4種類の異なるバッチの供試体の結果が含まれているが、バッチの違いの影響は明確には見られず、引張強度のばらつきを最大で 13 % 程度に抑えることができた。このばらつきの原因としては、供試体の成形精度と若干の偏心荷重の影響が考えられる。これらの点について今後試験方法を改善する必要がある。また、養生時間の影響も、10 時間程度の違いの範囲内では明確には見られなかった。

同一バッチの供試体を用いた一軸引張強度と割裂引張強度の比較を図5に示す。一般的に一軸引張強度のほうが大きくなった。この理由として、割裂引張試験では供試体を等方線形弾性体と仮定して線圧縮荷重に対する引張応力を算定するが、実際の試験では載荷点付近での応力集中により進行性破壊が生じ、さらに、圧縮応力レベルが高くなるほど供試体の剛性が増加するためにこの応力集中の程度が高まって、引張強度を過小評価した可能性が考えられる。この点について、今後も検討を継続する必要がある。

排水・非排水三軸試験で得られた引張強度の比較を図6に示す。拘束圧の大きさに関わらず、非排水引張強度のほうが大きくなった。これは破壊時の有効応力の違いに起因すると考えられたが、図7に示すように、拘束圧 0.1 MPa の場合には非排水条件下で若干有効応力が回復したのに対

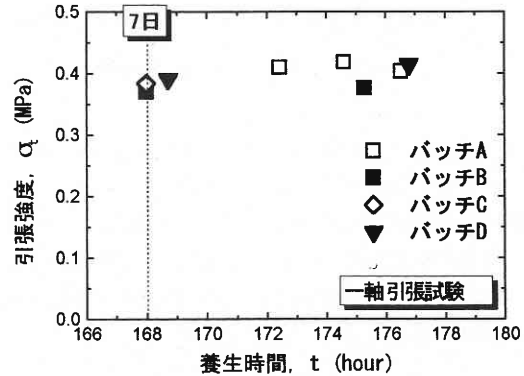


図4 異なるバッチの一軸引張強度の比較⁴⁾

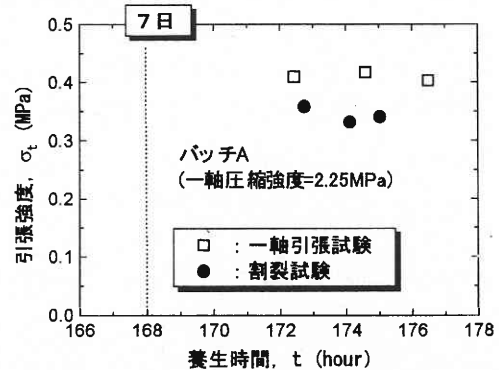


図5 一軸引張強度と割裂引張強度の比較⁴⁾

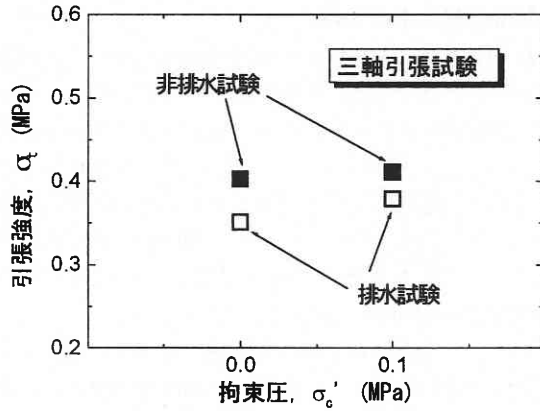


図6 三軸引張強度に及ぼす排水条件の影響⁴⁾

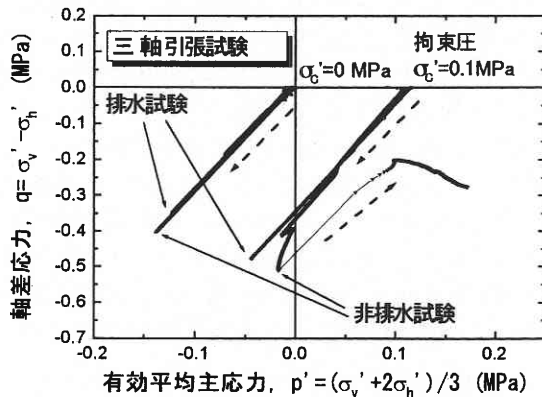


図7 三軸引張試験時の有効応力経路⁴⁾

し、拘束圧を加えない場合には、有効応力経路に違いが見られなかった。これらの試験では供試体に通水してできるだけ飽和度を高めたが、B 値は 0.91～0.92 にとどまったため、拘束圧を加えない試験では厳密な非排水条件が成立していなかった可能性がある。この点についても、今後の検討が必要である。

4. ま と め

1) 既往の研究では、セメント改良土の割裂試験による引張強度は、粘性土の場合は一軸圧縮強度の 0.05～0.20 倍で、砂質土の場合も 0.10～0.15 倍と同程度である。ただし、後者について公表されているデータ数は極めて限られている。

2) 一軸引張試験による引張強度は、粘性土で改良強度があまり大きくない場合は割裂試験よりも大きい。砂質土の場合も、3 章の結果によれば一軸引張強度のほうが大きい。

3) セメント改良砂質土の三軸引張試験による引張強度は、非排水条件下のほうが排水条件下よりも大きくなる可能性がある。

4) 上記の各試験における供試体内での応力集中の影響について今後検討する必要がある。

謝 辞

3 章で紹介した試験は、日本大学大学院生産工学研究科の三平伸吾氏が実施した。また、既往の研究事例について、鹿島建設(株)の山中宏之氏より情報提供を受けた。ここに記して深謝の意を表す。

(2001 年 8 月 13 日受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、地盤工学会編：地盤工学ハンドブック，pp. 1238-1242, 1999.
- 2) 例えば、建設省土木研究所ほか：液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)，共同研究報告書第 186 号，478 p., 1999.
- 3) 日経 BP 社：淀川一元の堤防の高さまで土を盛る一，日経コンストラクション，4 月 14 日号，pp. 67-69, 1995.
- 4) 三平伸吾，古関潤一：セメント改良砂の一軸・三軸引張試験，土木学会第 56 回年次学術講演会，第三部門投稿中，2001.
- 5) 川崎孝人，新名昭士，斎藤聡，馬場崎亮一：セメント系改良土の工学的特性に関する研究，竹中技術研究所報告第 19 号，1978.
- 6) 寺師昌明，田中洋行，光本司，新留雄二，本間定吉：石灰・セメント系安定処理土の基本特性に関する研究(第 2 報)，港湾技術研究所報告第 19 巻第 1 号，1980.
- 7) 小林晃：セメントによる混合固結土の特性，東京大学修士論文，1982.
- 8) 佐々木伸・木山正明・奥村隆一：大阪北港地区における深層混合処理工法，基礎工，Vol. 12, No. 8, pp. 101-105, 1984.
- 9) 斎藤聡：深層混合処理工法による改良土の調査と工学的性質，基礎工，Vol. 13, No. 2, pp. 108-114, 1985.
- 10) 塩澤俊彦，中谷内信一，酒井洋一，斎藤聡，木下佳人：セメント系改良材により改良された砂地盤の土質性状，第 28 回土質工学研究発表会，pp. 2559-2562, 1993.