

繰返し載荷がセメント改良砂の強度変形特性に及ぼす影響

Effects of cyclic loading on strength and deformation properties of cement-treated sand

古 関 潤 一*・レヒーナ サラスモンヘ**・佐藤 剛 司*

Junichi KOSEKI, Regina SALAS-MONGE and Takeshi SATO

1. はじめに

軟岩やセメント改良土などの硬質地盤材料の強度変形特性に関する巨大地震時を想定した研究例は限られている^{1,2,3)}。ここではセメント改良土の平面ひずみ圧縮試験を行い、繰返し載荷履歴がピーク強度に及ぼす影響と、画像解析によるせん断ひずみ分布の特性について検討した結果を報告する。

2. 試験装置および試験方法

供試体は断面 60×80 mm、高さ 160 mm の矩形で、豊浦砂と普通ポルトランドセメント、ベントナイト、および蒸留水をそれぞれ 66.3, 10, 5, 18.7% の重量比で混合したものをを用いて約 7 日間の密閉養生を行って作製した。

硬質地盤材料用に新規製作した平面ひずみ圧縮試験装置を図 1 に示す。せん断層発生後の最小主ひずみ（圧縮方向を正とする） ε_3 方向への水平変位を拘束しないために、ペダスタルの下にベアリングを設置した。中間主ひずみ ε_2 方向への水平変位を抑える拘束板の片側（図の左側）はアクリル製で、これを通して供試体の変形状況をデジタルカメラに記録した。記録画像の例を写真 1 に示す。メンブレン上に 5 mm グリッドとして設置した標点の変位を画像解析で求め、局所的なひずみ分布を算定した。平均的なひずみは最大主ひずみ ε_1 を供試体側面に設置した局所変形測定装置（LDT⁴⁾）と外部変位計の 2 通りの方法で計測し、さらに、 ε_2 と ε_3 はそれぞれ LDT と非接触変位計で計測した。

載荷システムの概要を図 2 に示す。鉛直方向の最大主応力 σ_1 は、油圧アクチュエータを高荷重微小変位制御載荷システム⁵⁾で制御することによって載荷した。一方、水平

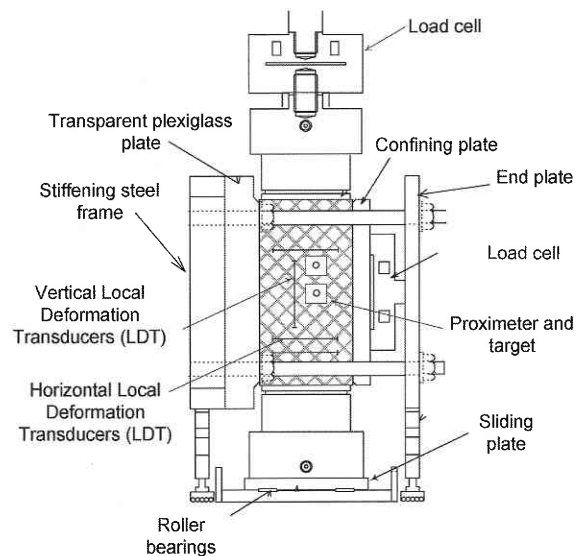


図 1 硬質地盤材料用平面ひずみ圧縮試験装置

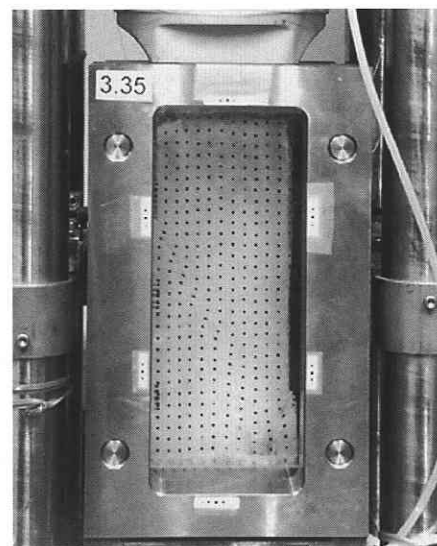


写真 1 供試体側面の変形状況の例

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

**CORIEM S.A., COSTA RICA (元東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻)

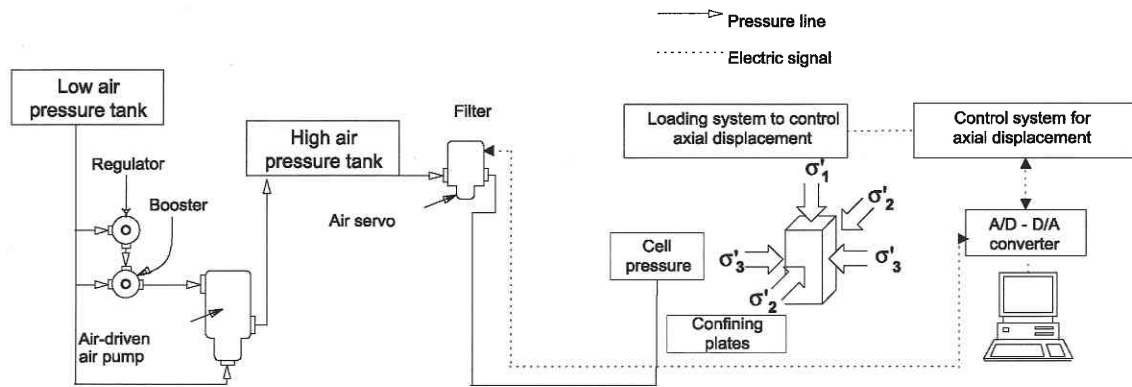


図2 載荷システムの概要

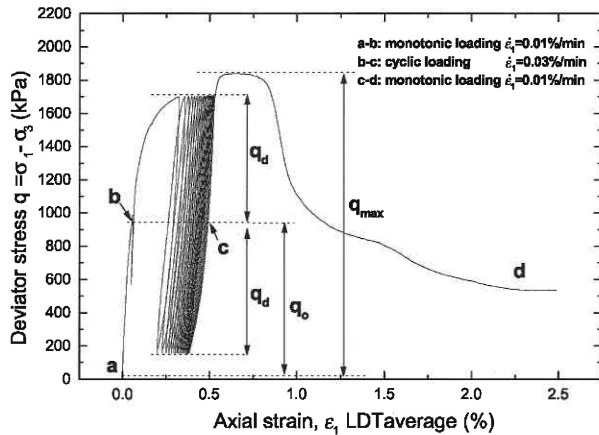


図3 せん断時の応力ひずみ関係の例

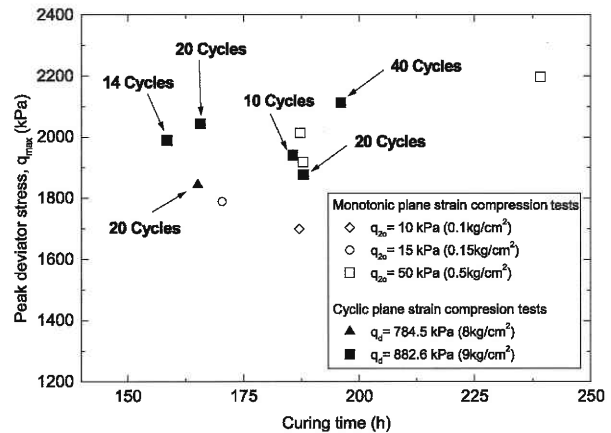


図4 ピーク強度に及ぼす養生時間と繰返し載荷の影響

方向の最小主応力 σ_3 は、本来はサーボ弁で制御した空気圧によりセル圧として載荷できるようになっているが、本研究では画像撮影の都合上、圧力セルを使用せずに負圧を供試体の背圧として与えることによって等方的な拘束圧として作用させた。

せん断時の平均軸ひずみと軸差応力 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ の関係の例を図3に示す。29 kPaの負圧で供試体を自立させ、拘束板を設置してからセル圧を加えずに非排水状態とし、軸方向に980 kPaの初期軸差応力 q_0 を加えた状態から約800 ~ 900 kPaの片振幅 q_d で繰返し載荷した。最後に非排水状態を維持したまま単調載荷を行い、得られた最大軸差応力 q_{max} をピーク強度とした。比較用に単調載荷のみの試験も実施した。

3. 繰返し載荷履歴がピーク強度に及ぼす影響

ピーク強度と養生時間の関係を図4に示す。図中に示し

た数値は繰返し載荷の回数である。ほぼ同一の養生時間で比較した場合、繰返し載荷履歴がピーク強度に及ぼす影響は明確には見られず、むしろ単調載荷のみの場合(図中に白抜きで示したデータ)よりも大きなピーク強度を示したケースもあった。同様な傾向が、堆積軟岩を対象とした既往の繰返し三軸試験結果³⁾でも得られている。

なお、単調載荷のみの試験は、せん断開始時の中間主応力 σ_2 を3通りに変えて実施した。図4中の凡例に示した q_{20} はせん断開始時の $\sigma_2 - \sigma_3$ の値である。その結果、 q_{20} が大きいほうが ϵ_2 方向への水平変位の拘束の程度が高まって大きなピーク強度が得られたため、繰返し載荷試験は最も大きな q_{20} の値 (= 50 kPa) のもとで実施した。

4. せん断ひずみ分布の特性

単調載荷のみの試験における局所的な最大せん断ひずみ $\gamma_{max} (= \epsilon_1 - \epsilon_3)$ の分布状況の例を、対応する応力ひずみ関

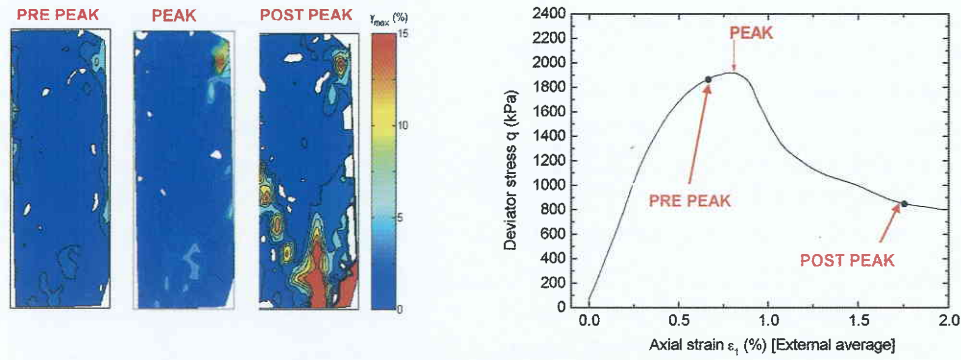


図5 単調荷荷のみの試験の局所ひずみ分布と応力ひずみ関係の例 (その1)

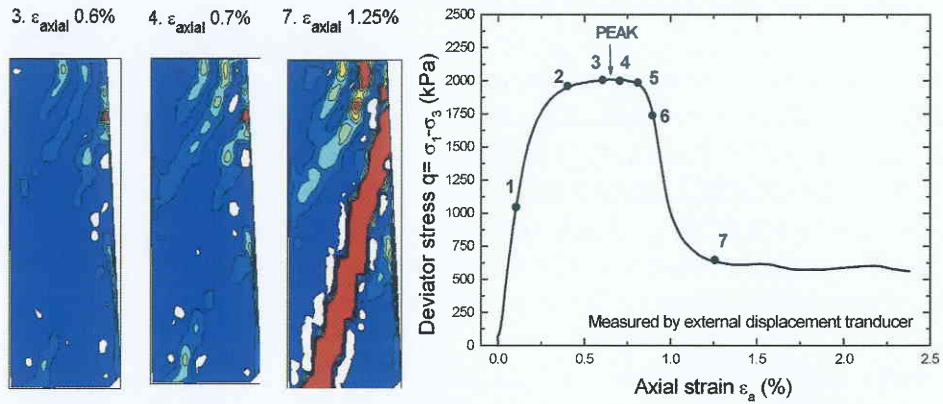


図6 単調荷荷のみの試験の局所ひずみ分布と応力ひずみ関係の例 (その2, 局所ひずみの凡例は図5を参照)

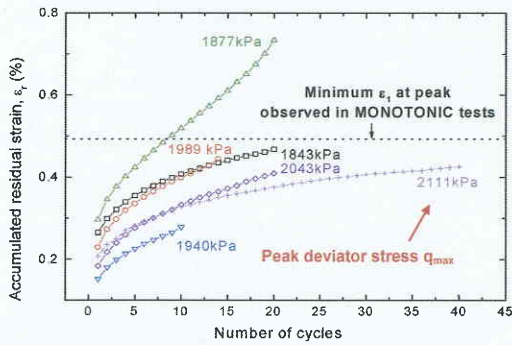


図7 繰返し荷荷回数と平均軸ひずみの関係

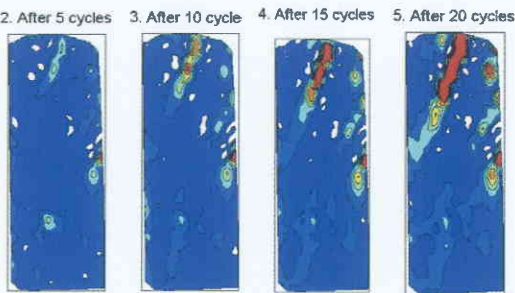
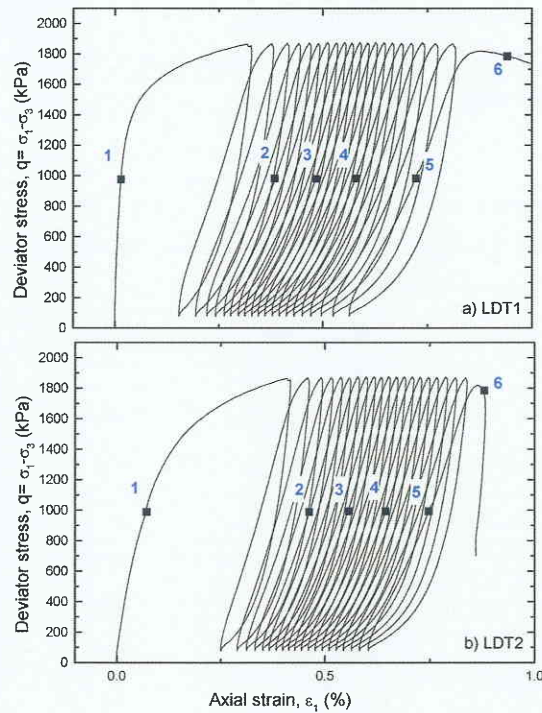


図8 平均軸ひずみが0.5%を超えた繰返し荷荷試験の結果 (局所ひずみの凡例は図5を参照)



研 究 速 報

係とあわせて図5に示す。ピーク強度を發揮した時点では12～15%程度の γ_{max} が局所的に生じていたが、この例に示すように、最終的に形成されるせん断層は必ずしもこの部分を通るとは限らなかった。また、この時点における平均軸ひずみは0.5%程度であった。なお、図6に示すように、ピーク強度付近で応力ひずみ関係がフラットな形状を示すケースでは、潜在的なせん断層が複数の位置に形成される傾向が見られた。

繰返し載荷を行った試験における平均軸ひずみ（軸差応力が q_0 に戻った時点での値）と繰返し載荷回数との関係を図7に示す。1つのケースのみで、繰返し載荷回数の増加とともに平均軸ひずみの増分が徐々に大きくなる傾向が見られた。

上記のケースの局所的なひずみ分布と個別のLDTによる応力ひずみ関係を図8に示す。10回の繰返し載荷を行った段階（図中の番号3）で平均軸ひずみ0.5%程度が生じ、同時に12～15%程度の γ_{max} が局所的に生じていることから、この段階が単調載荷でのピーク強度發揮時と同様な状態であったことがわかる。最終的に形成されたせん断層をまたいで設置されていたLDT1とまたがずに設置されていたLDT2による平均軸ひずみ増分を比較すると15～20回の繰返し回数に違いが現れ、さらに、この段階ではせん断層の形成がほぼ完了していたことが局所ひずみ分布からわかる。なお、このケース以外では、繰返し載荷中のひずみの局所化は明確には観察されなかった。繰返し載荷中にひずみの局所化が生じる条件について今後も検討を継続する必要がある。

5. ま と め

本研究で用いたセメント改良砂の場合、繰返し載荷履歴がピーク強度に及ぼす影響は明確には見られなかった。単

調載荷のみの試験でピーク強度を發揮した時点では5mmグリッドで定義した γ_{max} が12～15%程度局所的に生じ、繰返し載荷時にもこのような状態に至ったケースがあった。しかし、最終的に形成されたせん断層が必ずしもその部分を通るとは限らなかった。

セメント改良砂では、今回検討対象とした圧縮側の強度変形特性に加えて、引張側の強度変形特性⁶⁾も地震時の挙動を検討するうえでは重要である。今後は、繰返し載荷が引張側の強度変形特性に及ぼす影響についても検討する予定である。

謝 辞

供試体作成方法について（株）錢高組（元 日本大学大学院生産工学研究科）の三平伸吾氏のご教示を受けた。ここに記して深謝の意を表す。

(2003年8月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 岡村未対ら：東京湾港海底軟岩の繰返し三軸試験、軟岩と硬質土のロータリー式サンプリング技術と物性評価に関するシンポジウム，地盤工学会，1999.
- 2) 加島延行ら：大規模橋梁基礎の地震後残留沈下量推定手法の検討（その2），第55回土木学会年次学術講演会概要集，第1部門，2000.
- 3) 古関潤一ら：堆積軟岩の繰返し三軸試験時における残留軸ひずみの累積特性のモデル化，第37回地盤工学研究発表会講演集，2002.
- 4) 例えば生研リーフレット No. 189「土の微小ひずみ測定システム」，1989 および No. 243「地盤材料の三軸試験における横方向直ひずみの横置きLDTによる測定」，1994.
- 5) 生研リーフレット No. 250「高荷重微小変位制御載荷システム」，1994.
- 6) 古関潤一，佐藤剛司：セメント改良土の引張強度特性，生産研究，Vol. 53, Nos. 11-12, 2001.