

一軸圧縮試験による EPS の変形強度特性

東京理科大学大学院修士課程

川辺 翔平

Cairo University, Egypt (東京理科大学理工学部客員助教授) Gihan Elsaied Abdelrahman
東京理科大学理工学部

平川 大貴

塚本 良道

龍岡 文夫

千代田 健

株式会社 JSP

1. はじめに

EPS は、その軽量性から、軟弱地盤上の盛土の沈下を抑制したりすべり破壊を防止する目的で盛土の建設材料として用いられている。また、土圧軽減や地盤振動の遮蔽材として用いられることがある。鉄道や道路など長期交通荷重による即時変形と残留変形の許容値が小さい盛土構造物を設計する場合は、EPS の変形強度特性（特に降伏前の小ひずみレベルにおける変形特性）を正確に把握しておく必要がある。

EPS にはさまざまな密度を有するものが存在し、その変形と強度に関わる物性も異なってくる。本報告では、一種類の EPS 材料（密度 20 kg/m³）を用いて一軸圧縮試験ができるだけ正確に行ない、実験方法の詳細とその変形強度特性の測定値に及ぼす影響について考察する。

2. 実験方法

EPS の変形強度特性は、通常 50 mm 角の正六面体供試体を用いた一軸圧縮試験によって測定される¹⁾。しかし、本試験では変形強度特性をできるだけ正確に測定するために、通常よりも大きめの供試体を用いた。嵩密度 20 kg/m³（真密度 32 kg/m³）のブロックから、直径 75 mm × 高さ 150 mm の円柱供試体を、サーマルワイヤにより切り出した²⁾。

図-1 に本試験で用いた試験機の全体図を示す。軸荷重載荷装置には、AC サーボモーターと電磁クラッチ式軸荷重載荷装置を用いた。電磁クラッチにより滑らかな載荷方向の反転と、AC サーボモーターにより最大 3000 倍の軸ひずみ速度急変が可能であり、最大軸荷重容量は 5 tf である。この載荷装置は任意の軸ひずみ速度での単調載荷、単調載荷途中での軸ひずみ速度の急変、一定荷重での荷重保持載荷等を連続的に実施できる。

軸ひずみ ε_a は、載荷軸に設置された LVDT (外部変位計) と LDT (Local Deformation Transducer) を用いて測定した。LDT を用いることにより、供試体上下端面でのベディングエラーを含まない局所的な軸ひずみの正確で感度が高い測定が可能になる。LDT は供試体側面での直径両端の 2ヶ所で測定した。供試体の側方ひずみ ε_r は、供試体高さの 1/6、3/6、5/6 の位置に配置した 3つの Clip Gauge (以下、CG) で測定した。測定誤差が生じないように、LDT と CG のヒンジはピンで供試体に差込み、その上からゴムバンドで固定した。

供試体上下端面での摩擦を軽減するため、キャップおよびペデスタルに摩擦軽減層を施した。

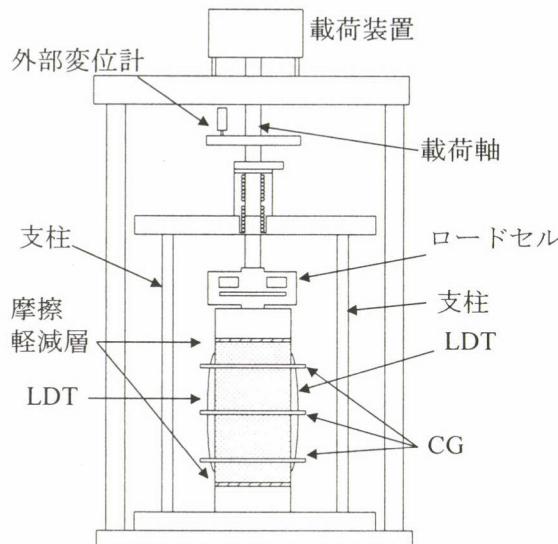


図-1 試験機の全体図

摩擦軽減層は、まずキャップおよびペデスタルの周囲にメンディングテープ（厚さ 0.05 mm）を貼った後、表面にグリースを塗り、へらで均等な厚さ（メンディングテープの厚さ）になるようする。その上に供試体断面と同形同面積のメンブレン（0.3 mm）を空気が入らないように乗せて作製した。

3. 実験結果

a) 単調載荷試験結果

図-2に軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a = 0.33 \%/\text{min}$ で行なった単調載荷試験から得られた軸応力 σ_a ~ 軸ひずみ ε_a 関係（図-2a）と接線剛性 E_{\tan} ~ 軸応力 σ_a 関係（図-2b）、側方ひずみ ε_r ~ 軸ひずみ ε_a 関係（図-2c）を示す。図-2aにおいては、軸ひずみ ε_a に関して、LVDTにより計測された外部軸ひずみと、供試体側面 2ヶ所に設置した LDT により計測された局所軸ひずみの平均値を示している。また、図-2a 中には載荷直後の σ_a ~ ε_a 関係の拡大図もあわせて示した。図-2b に示す接線剛性 E_{\tan} は、次に示す式 (1) により算出した。

$$E_{\tan} = \frac{d\sigma_a}{d\varepsilon_a} \quad (1)$$

図-2cにおいて、側方ひずみ ε_r は、個々の CG による計測値とともに、3つの平均値も示している。ここで、LDT では降伏後の軸ひずみの計測ができなかつたため、図-2c では外部軸ひずみを採用している。

まず、図-2aを見ると、外部軸ひずみと局所軸ひずみによる σ_a ~ ε_a 関係には大きな差がある。これは、載荷の初期では、摩擦軽減層のグリースおよびメンブレンの変形および供試体の上下面とキャップとペデスタルとの間の平行度の不完全さのために外部軸ひずみが過大評価されているためである。さらに、その後の σ_a ~ ε_a 関係の傾きにも若干差異が見られる。 $\sigma_a = 30 \sim 60 \text{ kPa}$ の圧力レベルの範囲で接線剛性を比べると、供試体上下面での平行度の不完全さの影響を受け、外部軸ひずみによる接線剛性の方が若干小さくなっている。すなわち、 σ_a ~ ε_a 関係は降伏に至るまではほぼ線形であるが（図-2a）、より詳細には応力の増加に対応して接線剛性は減少する（図-2b）。このことは、後に説明する繰返し載荷試験の結果からも言える（図-3c）。

また、側方ひずみに関して見てみると、降伏応力付近まで膨張特性を示すが、その後収縮に転じ、直径は試験前よりも小さくなっていくことが確認できる。試験前の供試体平均直径は 74.18 mm であったが、試験後の平均直径は 74.06 mm と実際に初期状態よりも収縮していた。この傾向は、他の実験結果においても同様であった。

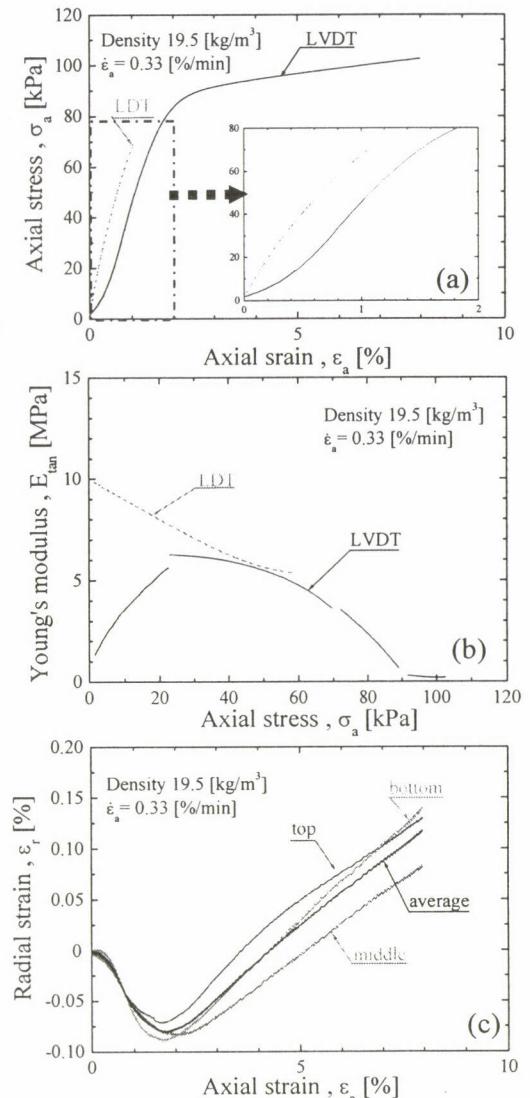


図-2 単調載荷試験結果

- (a) σ_a ~ ε_a 関係とその初期の拡大図
- (b) LDT と LVDT による E_{\tan} ~ σ_a 関係
- (c) CG の計測値とその平均値

b) 繰返し載荷試験結果

図-3に軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a = 0.33\%/\text{min}$ で行なった繰返し載荷試験から得られた $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係（図-3a）と $\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 関係（図-3b）を示す。軸ひずみ ε_a として、外部軸ひずみと、個々の LDT の計測値の平均値（局所軸ひずみ）を示している。一方、側方ひずみ ε_r として、個々の CG の計測値の平均値を示している。

図-3a に示すように、前述の a) 単調載荷試験結果と同様に、外部軸ひずみと局所軸ひずみには差異が生じる。とくに、一時間軸荷重を保持した状態において発生したクリープ軸ひずみ量には顕著な差異が見られる。外部軸ひずみの計測値によると、明らかにクリープ軸ひずみが発生している。これは見かけ上のクリープ変形であり EPS のクリープ変形ではない。一方、LDT の計測値によると、ほとんどクリープ軸ひずみは発生していない。また、図-3b に示すように、軸荷重を保持した状態において、供試体は収縮していることがわかる。

軸応力 $\sigma_a = 20, 40, 60\text{ kPa}$ を一時間一定に保持した後に行なった、両振幅 $10\text{ kPa} \times 5$ 回の繰返し載荷試験の結果から、式(2)により等価割線剛性 E_{eq} を、式(3)よりポアソン比 v_{eq} を算出した³⁾。

$$E_{eq} = \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta \varepsilon_a} \quad (2)$$

$$v_{eq} = -\frac{\Delta \varepsilon_r}{\Delta \varepsilon_a} \quad (3)$$

ポアソン比 v_{eq} の算出には、LDT による局所軸ひずみのみを用いている。

図-3c、d に、 $E_{eq} \sim \sigma_a$ 、 $v_{eq} \sim \sigma_a$ 関係を示す。降伏前の $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係は線形に見えるが、厳密には応力の増加に伴い剛性は減少していることがわかる。局所軸ひずみと外部軸ひずみとの間にも差異が見られる。また、ポアソン比はかなり小さく、剛性と同様に応力の増加とともに減少する傾向にある。

c) ひずみ速度効果（粘性特性）

図-4a に、一定の軸ひずみ速度での単調載荷の途

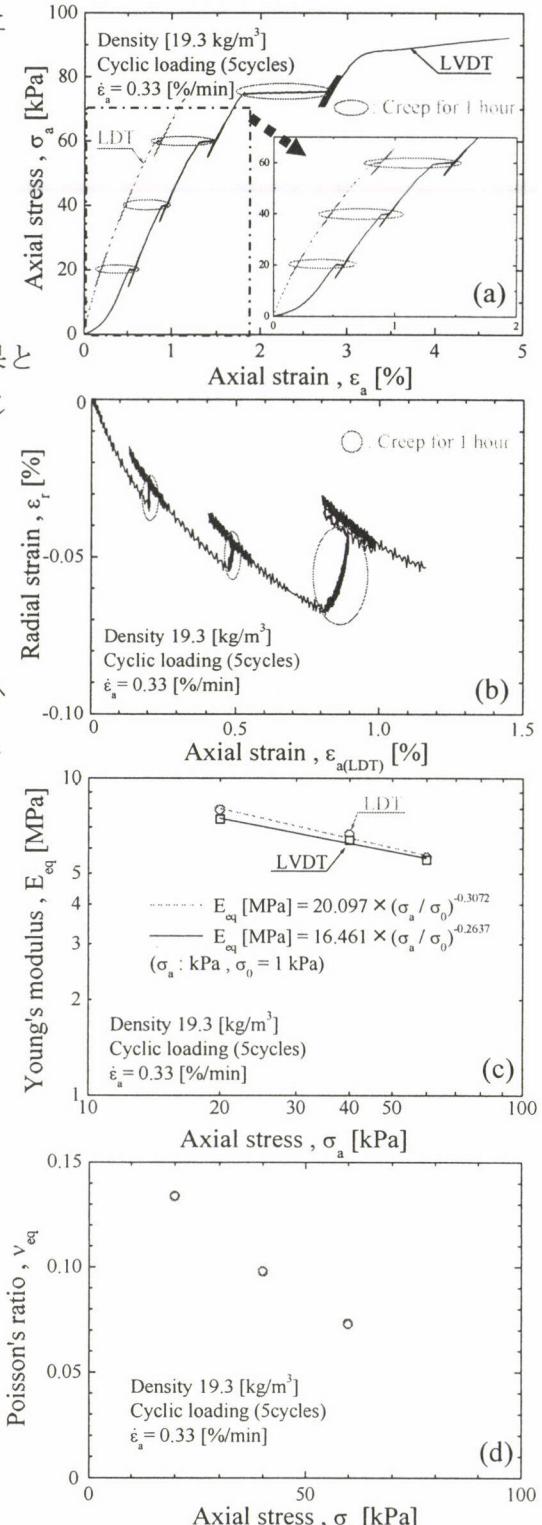


図-3 繰返し載荷試験結果

- (a) $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係とその初期の拡大図
- (b) $\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 関係
- (c) LDT と LVDT による $E_{tan} \sim \sigma_a$ 関係
- (d) $v_{eq} \sim \sigma_a$ 関係

中で軸ひずみ速度の急変を繰り返した「載荷速度急変試験」における $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係を示す。この試験では、 $\sigma_a = 40, 60\text{ kPa}$ でそれぞれ 2 時間の軸荷重保持試験を行なっている。図-4においても、

外部軸ひずみと局所軸ひずみの計測値の間には差異がある。また、 $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係に対するひずみ速度の変化の影響は、降伏前では小さいが、降伏後ではかなり大きくなる。降伏後に着目して、軸ひずみ速度を急変させた時に応力がどの程度変化するかを表す速度感応係数 β を求めると 0.1230 であった（図-4b）。速度感応係数 β は次に示す式 (4) から求めた。

$$\frac{\Delta\sigma_a}{\sigma_a} = \beta \cdot \log \left(\frac{(\dot{\varepsilon}_a^{ir})_{after}}{(\dot{\varepsilon}_a^{ir})_{before}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma_a$ はひずみ速度急変に伴う応力の変化量、 σ_a はひずみ速度急変時の応力、 $(\dot{\varepsilon}_a^{ir})_{before}$ 、 $(\dot{\varepsilon}_a^{ir})_{after}$ はひずみ速度急変前後の不可逆（非回復）ひずみ速度である。豊浦砂などの通常の砂での 0.02 ~ 0.03 という値と比べると非常に大きいことがわかる。

図-4c には、 $\sigma_a \sim$ 全ひずみ ε^t 、弾性ひずみ ε^e 、不可逆ひずみ ε^{ir} 関係を示す。全ひずみは、弾性ひずみと不可逆ひずみとの和で表される。弾性ひずみは繰返し試験の局所軸ひずみを用いて求めた等価割線剛性より算出した。この図を見ると、降伏応力付近までは弾性ひずみが卓越していることは明らかである。すなわち、弾性成分が支配的となるためひずみ速度の影響を受けにくくなっているものと考えられる。

4. 結論

- EPS の正確な変形強度特性を推定するためには、LDT によるベディングエラーを含まない軸ひずみを用いることが必要である。
- EPS の変形強度特性は降伏前後で大きく異なる。また、降伏前には極めて線形的な挙動を示すが、厳密には非線形である。
- EPS の剛性とポアソン比は、ともに応力の増加とともに減少する。特にポアソン比は、降伏後において負の値をとり、供試体の直径は初期よりも収縮する。また、荷重保持載荷中にも供試体の直径は減少する。

これらの特異な現象の物理的メカニズムの解明と工学的な意義の明確化は今後の課題である。

参考文献

- 発泡スチロール土木工法開発機構 (2002) : 「EPS 工法設計・施工基準書 (案)」、pp.11-20,23-25.
- 巻内勝彦、峯岸邦夫 (1988) : 「軽量盛土材 EPS の圧縮および摩擦特性」: 第 23 回土質工学研究発表会、p.1975.
- Hoque, E. and Tatsuoka, F. (1998) : "Anisotropy in elastic deformation of granular materials" : *Soils and Foundations*, Vol.38, No.1, pp.163-179.

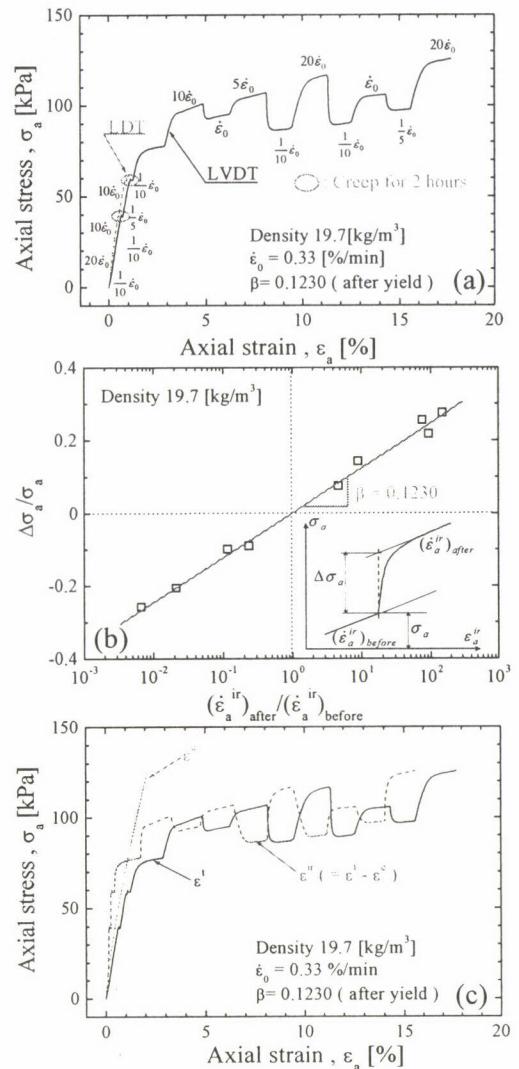


図-4 ひずみ速度急変試験結果

- (a) $\sigma_a \sim \varepsilon_a$ 関係 (b) 速度感応係数
(c) $\sigma_a \sim \varepsilon^t$ 、 ε^e 、 ε^{ir} 関係