

せん断ひずみ履歴に基づく液状化後の体積収縮量の評価

五洋建設(株)正会員 海野寿康, 小野大和, 林健太郎

日本大学 正会員 仙頭紀明

東北大学 フェロー会員 風間基樹, 徳島大学 正会員 渦岡良介

1. はじめに

砂地盤の液状化および液状化後の沈下や流動などの残留変形はライフラインや構造物に大きな被害をもたらす¹⁾。著者らはこれまで液状化後の沈下問題の核となる負のダイレイタンスによる体積収縮特性について検討し, その結果, 液状化後の体積収縮特性は, 繰返しせん断中の応力履歴ではなくひずみ履歴にのみ依存し, せん断ひずみ履歴をもって体積収縮量を評価できる等の知見を得ている^{1),2)}。ただし, これらの成果は三軸試験や中空ねじり試験を用いた要素試験上の結果である。これらの知見を実地盤に展開するには模型実験や現場実験を行い, 知見が成立するか把握する必要がある。そこで本報告では, せん断土槽を用いた1G場の震動台実験による液状化後の沈下に上記知見の成否について要素試験の結果を踏まえ検討を行った。

2. 繰返しせん断履歴の評価方法

本研究では, 繰返し載荷履歴の評価について累加せん断ひずみを評価指標とした。累加せん断ひずみは, 有効応力解析等にて土の損傷を表現するために内部変数として使われる量である。累加せん断ひずみは以下の式で定義した。

$$\gamma_{acm} = \int_0^t |\dot{\gamma}(t)| dt \quad (1)$$

ここで $\dot{\gamma}(t)$ は時刻 t におけるせん断ひずみ速度。

3. 地盤材料

模型地盤材料には, 相馬砂5号を用いた。試料の諸元について図-1に示す。砂砂の比重は2.654であり, 最大・最小間隙比は其々 $e_{max}=1.14$ と $e_{min}=0.694$ である。

4. 要素試験結果

模型試験を行う前に要素試験上土試料の繰返しせん断変形特性と液状化後の体積収縮特性について把握を行った。実験には中空ねじりせん断試験装置を

用いた。供試体は外径7cm, 内径3cm, 高さ10cmの中空円筒状である。供試体作製は負圧法で行い中空落下法により相対密度 $Dr=60(\%)$ に調整した。供試体の圧密条件は有効拘束圧 100kPa の等方圧密とする。圧密終了後非排水条件・せん断ひずみ速度 0.5%/min にて応力振幅一定の繰返しせん断を行った。繰返し載荷はせん断ひずみが両振幅で10% ($DA=10\%$) に至るまで継続した。非排水繰返しせん断が終了した後に排水量を測定し体積変化量を求めた(要素試験の詳細は, 参考文献3)に詳しい)。

試験の結果を図-2に示す。図には仙頭ら(2004)が提案する体積ひずみ ε_v ~ 累加せん断ひずみ γ_{acm} 関係の経験式も示してある。仙頭らの式は次の通りである。

$$\varepsilon_v = \rho \cdot \ln\left(\frac{p' + p'_i}{p'_i}\right) \quad (2)$$

$$p'_i = p'_0 \times 10^{-x} \quad (3)$$

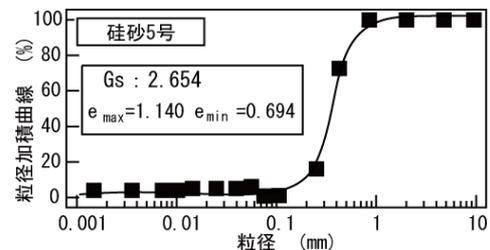


図-1 砂砂5号の諸元

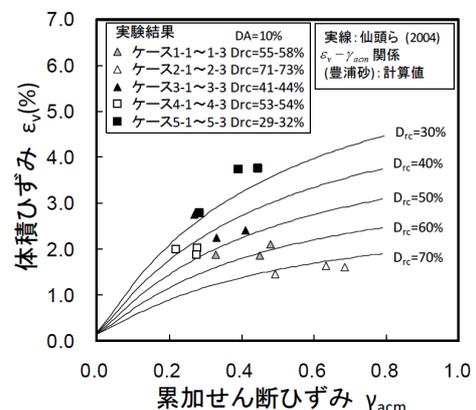


図-2 中空ねじり試験の結果³⁾

液状化, 繰返しせん断ひずみ履歴, 震動台試験

〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534 - 1 五洋建設(株)技術研究所

$$\rho = 0.00272 - 1.020 \times 10^{-3} \cdot (D_{rc}/100) \quad (4)$$

$$x = \frac{a \cdot \gamma_{acm}}{1 + \gamma_{acm}/b} \quad (5)$$

$$a = -0.32D_{rc} + 35.8 \quad (6)$$

ここで、パラメータ a, b は豊浦砂の実験式であり $b = 0.5$ で固定している。要素試験の結果、硅砂 5 号の液状化後の体積収縮特性を繰返しせん断ひずみ履歴で評価できることが示された。この結果を模型試験に応用する。

5. 模型実験の概要

実験には、横 200cm×縦 100cm×高さ 100cm のせん断土槽を使用した。地盤は要素試験同様 5 号硅砂で水中落下法により作成し相対密度は 60% に調整した。この地盤の透水係数を定水位透水試験で確かめたところ 0.010cm/sec であった。地表面には予め水で膨潤させたベントナイトを 2cm 敷設し不透水層を模擬した。入力加速度は、正弦波を使用し、波数は 20 波、200 波を用意し加振した(200 波の実験ケースは、20 波の実験ケース終了後に沈下量を計測、その後、180 波を追加で加振)。周波数は 10Hz と 2Hz を用いた。

計測器は、せん断土槽側方に配置した変位計(せん断ひずみ計測用)と土槽上・中・下段にそれぞれ配置した間隙水圧計、加速度計である(図-3 参照)。鉛直変位計は直下の間隙水圧の挙動との相関を調べるために間隙水圧計の直上に配置した。

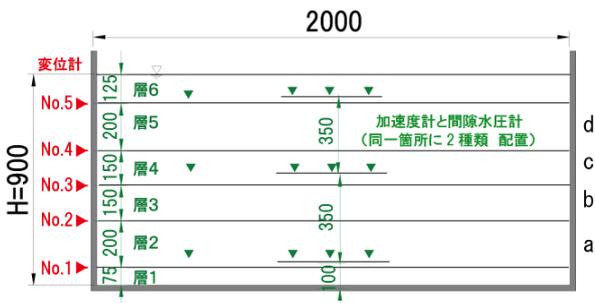


図-3 模型せん断土槽の断面およびセンサー配置図

6. 模型試験結果

加振中における模型地盤内の計測加速度、過剰間隙水圧比、沈下量の時刻歴を図-4 に示す。模型地盤は、加振履歴によって液状化した。時刻歴を見ると加振による地表面の沈下は、過剰間隙水圧比が 1.0 に至る前の加振後、比較的早い時期から徐々に生じており、加振終了後も水圧が消散するまで沈下が継続していることが分かる。

実験結果について、せん断土槽の a ~ d の各深度の

せん断ひずみを用いて体積ひずみ $v \sim$ 累加せん断ひずみ γ_{acm} 関係を求めたものを図-5 に示す。なお、せん断土槽を用いての模型実験におけるせん断ひずみ算定方法は参考論文 4)の方法を用いており、体積ひずみは、地表面の沈下量より模型土槽全体の値として求めた。図より要素試験から求めた $v \sim \gamma_{acm}$ 関係が模型試験のせん断土槽の各種層板より得られた $v \sim \gamma_{acm}$ 関係とよい相関を持つ結果が得られた。

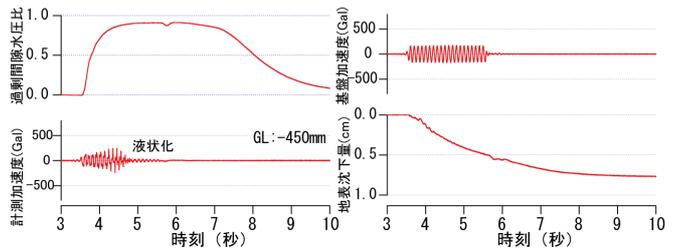


図-4 加震中の各種計測データの一例(加振 20 波)

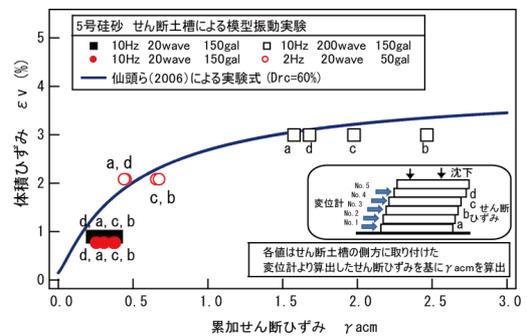


図-5 模型試験における $v \sim \gamma_{acm}$ の関係

7. まとめ

本報告より得られた知見は以下のとおりである。

1. 要素試験の結果より、細粒分の無い硅砂 5 号では、繰返しせん断中のせん断ひずみ履歴と体積ひずみには明確な関係があり、その関係は豊浦砂の試験結果より提案された仙頭らの実験式をもって表現が可能である。
2. 硅砂 5 号を用いた模型振動台実験の結果、要素試験同様、模型地盤の沈下量(体積ひずみ)には、加震中のせん断ひずみ履歴(累加せん断ひずみ)とよい相関が見られる知見が得られた。

参考・引用文献 1) 仙頭紀明 他(2004): 非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集, No.764/ 3-67, pp.307-317. 2)海野寿康 他(2006): 同一繰返しせん断履歴における乾燥砂と飽和砂の体積収縮量の関係, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.757-766. 3) 仙頭紀明 他(2010): 非塑性細粒分を含む砂質土の液状化後の再圧密特性, 地盤工学会第 45 回研究発表会(投稿中). 4) 風間基樹 他(1996):遠心振動実験から求めた砂地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文集,535/III-34, pp. 73-82