

繰返し載荷履歴後における構成則の予測法

早稲田大学 正会員 ○宋 炳雄  
茨城大学 正会員 安原一哉

1. 研究の背景と目的

繰返し荷重を受けた飽和土の強度と剛性低下は地盤や土構造物の変状に関わる重要事項の一つであるが、繰返し載荷履歴後に土の応力-ひずみ関係を表す構成則の予測法は良く知られていない。

本研究では繰返し単純せん断試験機を用いて土供試体の繰返し履歴後の強度と剛性低下特性を調べ、その実験結果に基づいて構成則を提案することを目的とした。特に、細粒土である塑性・非塑性シルト、粘性土の劣化特性の違いについて議論した。

その結果、土の構成則で繰返し載荷履歴後の応力-ひずみ関係を予測することは、過剰間隙水圧が非常に高いときを除く表現できた。この予測法を用いたら繰返し載荷後の地盤の状態を検討するときに約に立つと思われる。

2. 解析方法

Yasuhara<sup>1)</sup>と Song et al.<sup>2)</sup>によると繰返し荷重によって発生する強度と剛性の低下は過剰間隙水圧の増加と関係があることが提案されている。その関係を表す方法を Hardin-Drnevich<sup>3)</sup>が提案した土の構成則に代入したら、繰返し試験を行わずに過剰間隙水圧の増加による応力-ひずみ関係を提案した。

3. 繰返し履歴後強度と剛性低下の予測法

Yasuhara<sup>1)</sup>は Ladd et al.<sup>4)</sup>と Wroth and Houlsby<sup>5)</sup>がそれぞれ実験結果に基づいて提案した経験式を用いて式(1)と(2)のように、繰返し載荷によって発生する過剰間隙水圧比 (=過剰間隙水圧 Δu / 初期拘束応力 σ'v,NCi)から強度や剛性の予測法を提案した。

$$\frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NCi}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,NCi}}\right)^{1 - \frac{\Lambda_0}{1-\lambda}} \quad (1)$$

ここで、τ<sub>f,NCi</sub> と τ<sub>f,cy</sub> はそれぞれ繰返し履歴前後の

静的せん断強度、Δu は過剰間隙水圧、σ'v,NCi は繰返し応力前鉛直拘束応力、Λ<sub>0</sub> は Ladd et al.<sup>4)</sup>が提案した経験式での常数、λ は膨潤指数(Cs)と圧縮指数(Cc)の比である。なお、過剰間隙水圧比 Δu / σ'v,NCi は 0 から 1 までの範囲の中で分布する。

$$\frac{G_{cy}}{G_{NCi}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,NCi}}\right) \cdot \left\{1 - \frac{C}{1-\lambda} \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_{v,NCi}}\right)\right\} \quad (2)$$

ここで、G<sub>NCi</sub> と G<sub>cy</sub> はそれぞれ繰返し履歴前後の剛性、C は Wroth and Houlsby<sup>5)</sup>の経験式からの常数である。

式(1)と(2)の長所は繰返し試験を行わずに静的実験結果から得られる静的構成則と係数Λ<sub>0</sub>、λ、C が分かれば、繰返し載荷によって低下された強度と剛性の予測ができることである。

4. 細粒土の強度と剛性低下特性

本研究で用いた試料はイギリスの Kueper Marl Clay(以下、KM 粘土;粘土)、荒川シルト(塑性シルト)と DL クレイ (非塑性シルト)、以上3種類の土を比較して検討した。試料の具体的特性は表-1に表した。

表-1. 試料の特性<sup>2)</sup>

Items	KM 粘土	荒川シルト	DL シルト
Particle Density s (kN/m <sup>3</sup> )	27.4	26.2	24.8
Liquid Limit w <sub>L</sub> (%)	38.6	45.1	25.1
Plastic Limit w <sub>P</sub> (%)	19.0	27.8	-
Plasticity Index I <sub>p</sub>	19.6	17.3	-
Cohesion c' (kPa)	0	0	0
Friction Angle φ' (°)	25	24	23
Compression Index C <sub>c</sub>	0.23	0.27	0.10
Swelling Index C <sub>s</sub>	0.042	0.046	0.003
Parameter Λ <sub>0</sub>	0.76	0.64	0.72
Parameter C	0.27	-0.5	0.65

キーワード 強度, 剛性, 過剰間隙水圧, 構成則

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 55-S-803 濱田研究室 TEL03-5286-3406

また、単純せん断試験の詳しい条件は参考文献に載せている<sup>2)</sup>。

**5. 繰返し载荷構成則予測法**

Hardin and Drnevich(1972)は式(3)のように双曲線で応力-ひずみ関係を表す構成則(H-D モデル)を提案した<sup>3)</sup>。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \gamma/\gamma_r} \tag{3}$$

ここで、 $G_0$ は微小ひずみレベルでのせん断剛性(=最大剛性)、 $\gamma_r$ は標準ひずみ(=せん断強度 $\tau_f$  / 最大剛性  $G_0$ )である<sup>3)</sup>。本研究では式(3)に式(1)と(2)を代入すると式(4)になる。式(4)によると繰返し载荷試験とその後の単調試験を行わずに、繰返し载荷後の応力-ひずみ関係の予測ができる。ここで、 $\tau_{f,cy}$ は式(1)、 $G_{cy}$ は式(2)であり、**図-1**は繰返し単純せん断試験後単調試験結果と提案した予測式との比較した結果である。

$$\tau = \frac{G_{cy} \cdot \gamma}{1 + \frac{G_{cy} \cdot \gamma}{\tau_{f,cy}}} \tag{4}$$

**6. 終わりに**

本研究では繰返し履歴後、構成則を予測する方法を紹介した。H-D モデルは緩い砂に適用されるモデルであるが、本研究で使われた試料は細粒土であり、試料が緩くなかったため予測式との差が見える。しかし、この提案法は繰返し試験がなくとも、常数 $\Lambda_0$ 、 $\lambda$ 、 $C$ が分かれば、繰返し载荷によって低下された強度と剛性の予測ができることである。

**謝辞**

本研究は日本学術振興会の特別研究奨励費で行った研究結果であります。日本学術振興会に感謝の意を表します。

**参考文献**

1. Yasuhara, K. (1994), "Postcyclic Undrained Strength for Cohesive Soils", J. of Geotechnical Eng, ASCE, Vol. 120, No.11, pp.1961~1979.
2. Song, B., Yasuhara, K., and Murakami, S. (2004), "An

estimating method for post-cyclic strength and stiffness of fine-grained soils in direct simple shear tests", Jour. of the KGS, Vol. 20, No. 2, pp. 15-26.

3. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves", Jour. of the Soil Mech. and Foundations Division, ASCE. Vol. 98, No. 7, pp. 667-692.
4. Ladd, C. C. et al (1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", Proc. 9<sup>th</sup> ICSMFE, vol.2, pp.421~494.
5. Wroth, C. P. and G. T. Houlsby (1985), "Soil Mechanics, Property Characteristics and Analysis", Proc. 11<sup>th</sup> ICSMFE, vol.1, pp. 1~55.

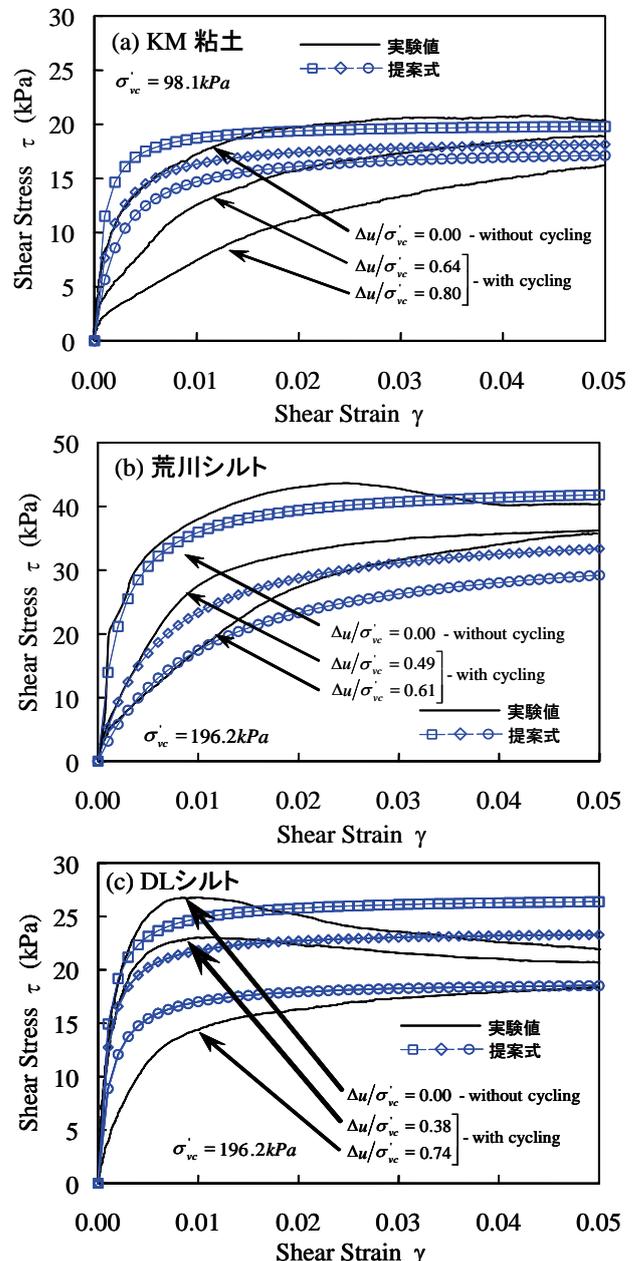


図-1. 繰返し後単調試験結果と予測式の比較