

III-261

液状化解析における砂の繰返しモデルの検討（その2 初期塑性せん断剛性のひずみ依存性）

大成建設（株） 正員 田口 洋輔 大成建設（株） 正員 立石 章
岐阜大学 正員 岡 二三生 岐阜大学 正員 八嶋 厚

1. 研究目的

砂の繰返しモデルでは、せん断ひずみや体積ひずみの発生について実挙動に近づけるため様々な工夫を凝らしているが、サイクリックモビリティ時の挙動については実挙動の再現が難しいのが実情である。本研究では、砂の非排水繰返し試験結果の分析を通じて、既に提案している砂の繰返しモデルで採用している初期塑性剛性のひずみ依存性を拡張し、サイクリックモビリティ時の挙動を改良した。さらに、別途報告しているストレスダイレイタンス特性の拡張を含めて、実地震観測記録のシミュレーション解析を実施したので報告する。

2. 砂の非排水繰返しせん断試験結果の分析

分析に用いる試験結果は、中空ねじりせん断試験機を用いて相対密度60%の飽和豊浦砂を対象に行った¹⁾もので、本検討では等方圧密および異方圧密 ($K_0=0.5$) からの繰返し単純せん断試験結果を対象とする。検討に用いる砂の繰返しモデル²⁾では、単純せん断載荷におけるせん断応力比 τ/σ'_m と塑性せん断ひずみ γ_{ps}^* の関係は次式で表される。

$$\sqrt{2}\tau/\sigma'_m = A^* \{1 - \exp(-B^* \sqrt{2}/2\gamma_{ps}^*)\} \quad A^* = M_f^* / G^p \quad B^* = G^p / M_f^* \quad (1)$$

ここに、 M_f^* は破壊時の相対応力比、 G^p は正規化された初期塑性せん断剛性である。(1)式は破壊強度 M_f^* を与えると、初期塑性せん断剛性 G^p が試験結果のせん断応力、せん断ひずみ、平均有効応力より陽に求められる。図-1に、試験結果より(1)式を用いて求めた繰返しせん断中の G^p と反転点からの塑性せん断ひずみ γ_{ps}^* との関係の一例を示す。ここに、 γ_{ps}^* としては全せん断ひずみを用いた。図-1より、 G^p は反転点から γ_{ps}^* の増加とともに低下し、サイクリックモビリティに入ると $G^p \sim \gamma_{ps}^*$ 関係が全体的に落ちてくる事がわかる。

一方、本検討の砂の繰返しモデルでは、 γ_{ps}^* の増加に伴う G^p の低下を既に次式で表している²⁾。

$$G^p = (G_{max}^p - G_{min}^p) \exp(-C_f^* \gamma_{ps}^*) + G_{min}^p \quad (2)$$

ここに、 G_{max}^p 、 G_{min}^p 、 C_f^* はパラメータである。試験結果の $G^p \sim \gamma_{ps}^*$ 関係の(2)式による回帰曲線を図-1に実線で示す。図より(2)式が試験結果をよく模擬できることがわかる。そこで、(2)式の各パラメータがサイクリックモビリティ時にどのように変化するかを、前回の塑性せん断ひずみ両振幅との関係で調べた。図-2に G_{max}^p と塑性せん断ひずみ両振幅との関係を示す。図よりサイクリックモビリティに入ると塑性せん断ひずみ両振幅の増加とともに G_{max}^p が低下しており、原らの研究結果³⁾とはほぼ同様な傾向を示すことがわかった。

3. モデルの拡張

本検討の砂の繰返しモデルでは、サイクリックモビリティに入るとループが閉じてしまい、有効応力がそれ以上低下しない場合がある。そこで、前述の分析結果に基づき、サイクリックモビリティ時の G_{max}^p を次式で表す。

$$G_{max}^p = G_{max0}^p / (1 + \gamma_{DA}^* / \gamma_f^*) \quad \text{ただし、} G_{max}^p \leq G_{min}^p \text{ のとき } G_{max}^p = G_{min}^p \quad (3)$$

ここに、 G_{max0}^p は G_{max}^p の初期値、 γ_{DA}^* は前回の塑性せん断ひずみ両振幅、 γ_f^* は G_{max}^p が初期値の1/2に低下するときの γ_{ps}^* を表す。図-2には試験結果を(3)式的双曲線関数で回帰した結果を太い実線で示した。このようなサイクリックモビリティ時の剛性低下は弾性せん断剛性についても考慮することが考えられる。

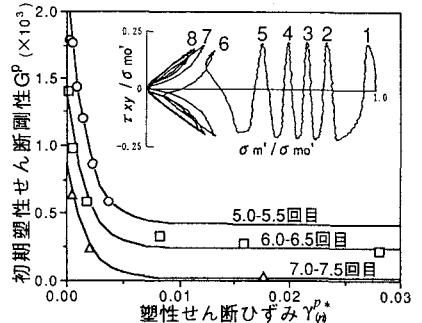


図-1 非排水繰返し試験の $G^p \sim \gamma_{ps}^*$

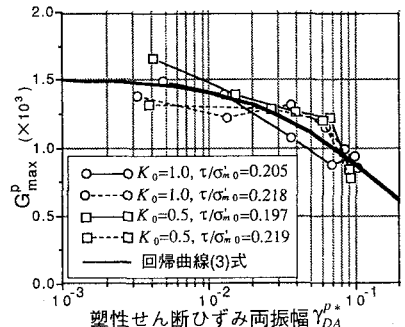


図-2 非排水繰返し試験の $G_{max}^p \sim \gamma_{DA}^*$

拡張したモデルの妥当性を検討するため、等方圧密からの繰返し単純せん断試験結果をシミュレーションした。図-3にせん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力径路を示す。同図には、サイクリックモビリティ時の G_{max}^p の低下を考慮したケースと考慮しないケースを試験結果と比較してあるが、 G_{max}^p の低下を考慮するとサイクリックモビリティ時に有効応力が大きく低下し液状化に至るという結果が得られている。

なお、定式化の一般化は別途報告する。

4. 地震観測記録のシミュレーション解析

本検討によるサイクリックモビリティ時の初期塑性せん断剛性および弾性せん断剛性の低下、および別途検討したストレスダイレイタンス特性への応力比依存性の導入、の二点を拡張したモデルを用いて実地震観測記録をシミュレーション解析する。解析対象とした記録は、米国カリフォルニア州ワイルドライフにおいて、1987年11月24日に発生したM6.1の地震の際に観測されたものである。表-1に文献⁴⁾を参考に設定した地盤条件を示す。観測記録としては、地表およびGL-7.5mでの加速度と地中の4点での間隙水圧が得られており、今回はGL-7.5mでの加速度記録を一次元地盤モデルに入力した。解析結果として、図-4に地表での加速度およびGL-3.0mでの過剰間隙水圧を観測結果と比較して示す。図より解析結果は観測結果を概ね模擬できていると考えられる。

謝辞

本検討で用いた砂の非排水繰返しせん断試験結果は、北海道大学基礎地盤工学研究室において実施されたものである。末筆ながら、実験を担当して頂いた山下聡助手、千葉隆仁、輪田朝亮両学生に謝意を表します。

参考文献 1) 立石、田口、山下、千葉、輪

田：実地盤を想定した多様な応力状態における砂の液状化特性、第29回土質工学研究発表会、1994。 2) 岡、八嶋、加藤、後藤：非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式の拡張、第28回土質工学研究発表会、pp.489-490、1993。

3) 原、龍岡、佐藤：砂の非排水ねじりせん断における詳細な応力～ひずみ関係、第19回土質工学研究発表会、1984。

4) Prevost, J.H., C.M. Keane, N. Ohno and K. Hayashi : Validation of procedures for analysis of liquefaction of sandy soil deposits, 5th ICSDEE, pp.263-276, 1991。

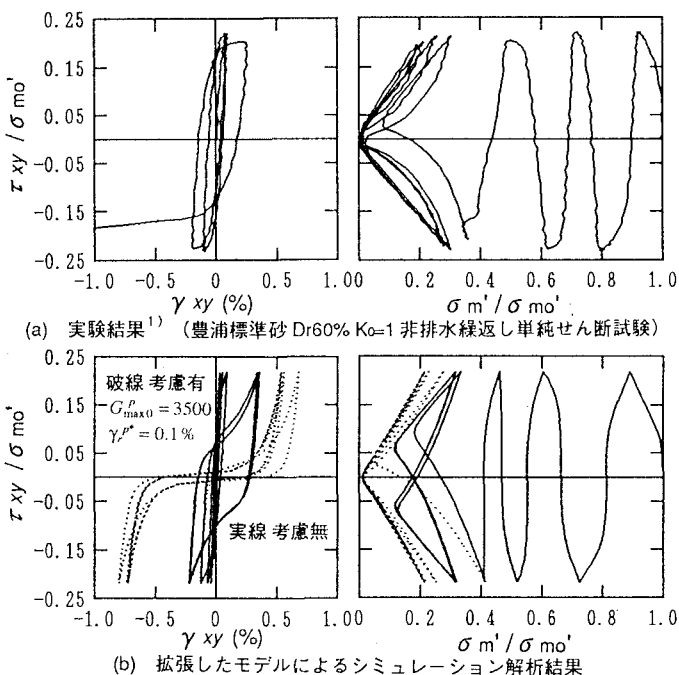


図-3 せん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力径路の比較

表-1 一次元地盤モデル地盤条件

深度(m)	土質	単位体積重量 (t/m ³)	せん断波速度 (m/sec)
▽-1.2	シルト	1.60	99
▽-2.5	シルト	1.94	99
▽-3.5	砂質シルト	1.97	116
▽-6.8	シルト質砂	1.97	116
▽-7.5	粘土	2.00	130

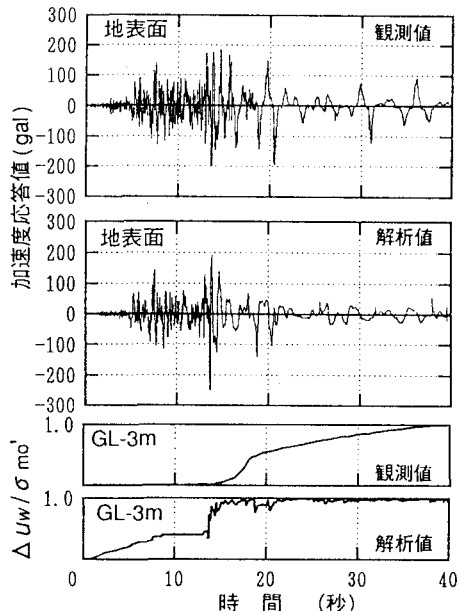


図-4 一次元地盤の観測値と解析値の比較