

砂や薬注改良体の初期サイクリックモビリティ後のシミュレーション

サイクリックモビリティ、応力ひずみ関係、薬液注入

清水建設(株) 国際会員 ○福武毅芳、社本康広
伊藤忠テクノソリューションズ 非会員 馬淵倉一
東北学院大学 国際会員 吉田 望

1. はじめに 著者らは三次元ダイレイタンスーモデル(おわんモデル)と三次元に拡張したR-Oモデルを併用し、種々の有効応力解析を実施している。この構成式は累積せん断ひずみを元におわんモデルから過剰間隙水圧を算定し、有効応力の変化に応じてR-Oモデルのパラメータ(剛性や基準ひずみ)を逐次更新していた^{1),2)}。ただし増分接線剛性のイメージで更新していたので、有効応力低減による大きなひずみが必要でも表現できていたわけではなかった。ここでは、応力 τ をひずみと有効応力の関数とし、全微分形にして、陽な形でひずみ成分と有効応力成分に分離した。さらに圧縮指数 C_c と膨潤指数 C_s を有効応力増分の正負によって使い分けた。この改良した構成式を用いて、種々の密度の砂、薬液注入改良体のシミュレーションを行った。

2. 構成式改良の概要

○改良点1: 応力 τ をひずみ γ と有効応力 σ' の関数とし(式(1))、応力増分 $\Delta\tau$ を全微分形にして、式(2)に示すような陽な形でひずみ成分と有効応力成分に分離した。

図1には改良した履歴則を示す。R-Oモデルでは、ひずみからダイレクトに応力を算出できないので、収束計算を行っている。同図(1)のように σ'_m の変化が大きいき、曲線も大きく低下し、接線勾配が負になることがあるが、運動方程式のDマトリックス作製に当っては増分剛性を $d\tau/d\gamma$ で算定し、負にならないようにしている。

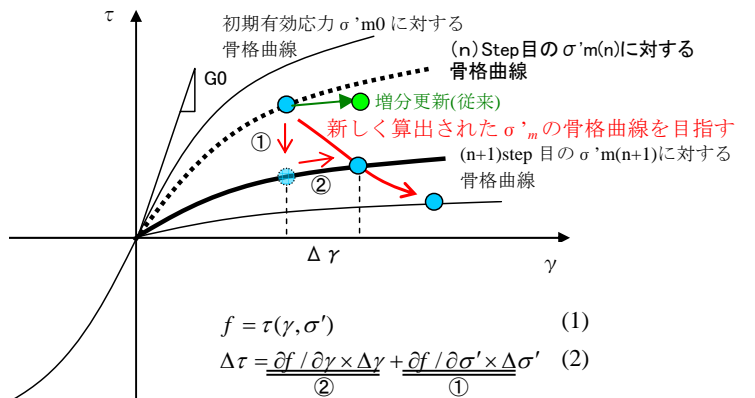
○改良点2: 従来のおわんモデルでは、ダイレイタンスー量を σ'_m の変動量に換算するとき、膨潤指数 C_s のみを用いていたが、今回は圧縮指数 C_c も用いた。すなわち式(3)において、 $\Delta\sigma'_m < 0$ のとき C_s 、 $\Delta\sigma'_m > 0$ のとき C_c を用いた。

$$d\sigma'_m = -\frac{\sigma'_m}{0.434(C_c \text{ or } C_s)} \cdot d\varepsilon_v^s \quad (3)$$

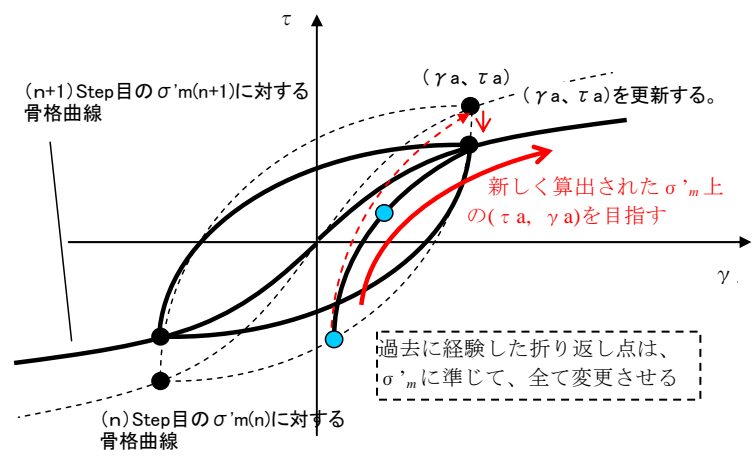
$$1 + e_0$$

上式より以下のことが分かる。 σ'_m が小さいときで、サイクリックモビリティ時に有効応力増分が増加に転じたとき、 C_c を用いるとその増加量 $\Delta\sigma'_m$ は C_s を用いたときよりも小さくなる($C_s < C_c$ であるので)。そのため、有効応力が小さい状態が長く続くので、 $\tau=0$ 付近でひずみが多く発生することになる。これにより、ポスト液状化の液體的性質(せん断応力が小さいときにせん断剛性が非常に小さくなりひずみが伸びる現象)が表現できる。

3. 計算結果 試料は全て豊浦砂であり、検討ケースと実験条件を表1に示す。構成式の豊浦砂に対するパラメータの値は、既往の試験結果³⁾⁻⁶⁾を元に設定した。初期せん断剛性は $G_0=700 \cdot (2.17-e)^2/(1+e) \times \sigma'_m{}^{0.5}$ (kgf/cm²)より設定した。



(1) 骨格曲線上を進行する場合(载荷)



(2) 履歴曲線上を進行する場合(再载荷)

図1 履歴の追跡方法

表1 要素試験条件と検討ケース(豊浦砂: $e_{max}=0.977, e_{min}=0.597$)

試験方法	試料	間隙比 e	相対密度 D_r (%)	応力比 $R = \tau_{cy}/\sigma'_m$	初期拘束圧 σ'_{m0} (kPa)	せん断応力振幅 τ_{cy} (kPa)
1	繰返し ねじり試験	0.809	44	0.21	294	60.6
2		0.738	63	0.30	98	29.4
3		0.676	79	0.33	294	95.5
4	繰返し 三軸試験	0.730	65	1.05	100	105

Simulation of post cyclic mobility behavior of loose sand, dense sand & chemical grouting sand,

K.Fukutake, Y.Shamoto (Shimizu Corporation), S.Mabuchi (Itochu Techno-Solutions Corporation), N.Yoshida (Tohoku Gakuin University)

図2には、豊浦砂のシミュレーション結果を示す。サイクリックモビリティ状態になった後、砂の密度によって1サイクル当りのひずみ増加量は異なる。すなわち緩い砂では急激であり、密になると緩慢になるが、シミュレーションではそのひずみ増加傾向を定量的に表現できている。

C_c の影響を見るために、 $D_r=44\%$ の下図には、 $C_c/(1+e_0)=0.007$ (本来の値は 0.009^6)とし $C_s/(1+e_0)$ の値と同じにした場合の計算例を示す。式(3)で説明したように、 C_c の値を小さくすると、ポスト液化化時のひずみ増加量が小さくなり、最終的には定常な履歴ループになっている。

図3には、特殊シリカ系のグラウト剤(パーマロック)を4%で浸透させた薬液注入改良体の繰返し三軸試験結果と計算結果(単純せん断)の比較を示す。特徴としては、①応力～ひずみ関係が逆S字型となる、②ひずみ振幅が有限の大きさで留まる、③有効応力経路は平均有効応力がゼロに至らず20%程度の有効応力が残存した状態でサイクリックモビリティに似た経路となる、ことである。最近の設計では入力地震動は相当大きく設定されることが多いので、図のように大きなせん断応力が作用した場合の改良体の非線形性も忠実にモデル化することは重要である。

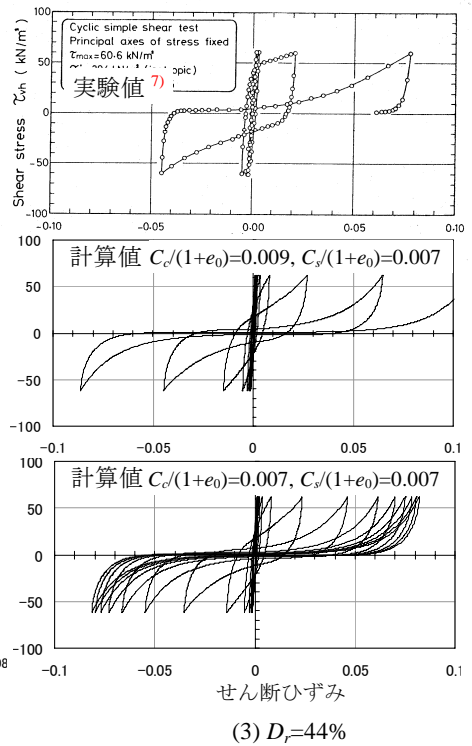
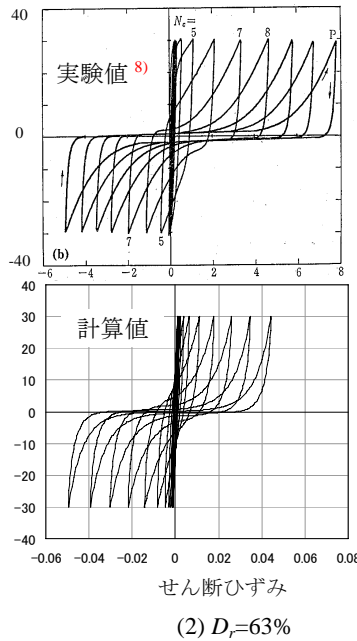
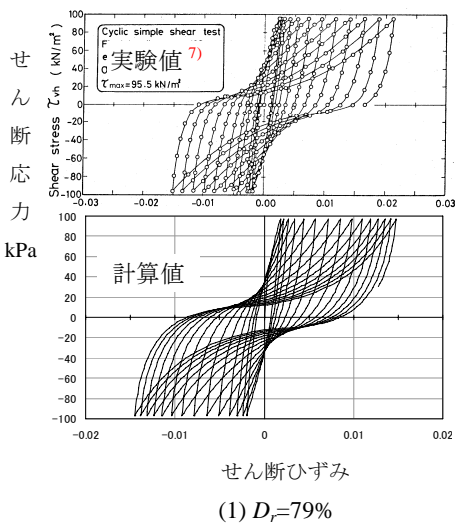


図2 豊浦砂の応力～ひずみ関係(繰返しねじり試験)

4. おわりに ここでは構成式を改良し、種々の密度の砂で液化後のひずみの蓄積を定量的に評価した。さらに薬液注入改良体のようにあるひずみ振幅で定常状態となることも表現できた。最後に有益なご助言を頂いた名古屋工業大学の中井照夫教授に感謝の意を表します。

参考文献: 1) 福武: 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997 2) 吉見・福武: 地盤液化の物理と評価・対策技術(5章), 技報堂出版, 2005. 3) 今津・福武: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp.509-512, 198 4) Toki, S., Tatsuoka, F. et al: Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program, Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.117-128, 1986 5) 佐々木・岩崎: 地震応答解析のための土の動的性質, 土と基礎, Vol.33, No.11, pp.85-91, 1985 6) Nakai, T. and Hinokio, M.: A Simple Elastoplastic Model for Normally and Over Consolidated Soils with Unified Material Parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004 7) 東畑: 砂の繰返しせん断変形特性に及ぼす主応力軸回転の影響, 東京大学博士論文, 1981 8) プラダン, テージ, B.S.・龍岡・原: 非排水繰返しねじりせん断における砂の応力-ひずみ特性, 土木学会第40回年次学術講演回III, 1985 9) 社本・風間・島田・米倉: 恒久グラウトと本設地盤改良⑤, 活性シリカコロイドを用いた液化化対策工の設計と改良効果の評価法, 土木施工7月号, pp.106-111, 2006

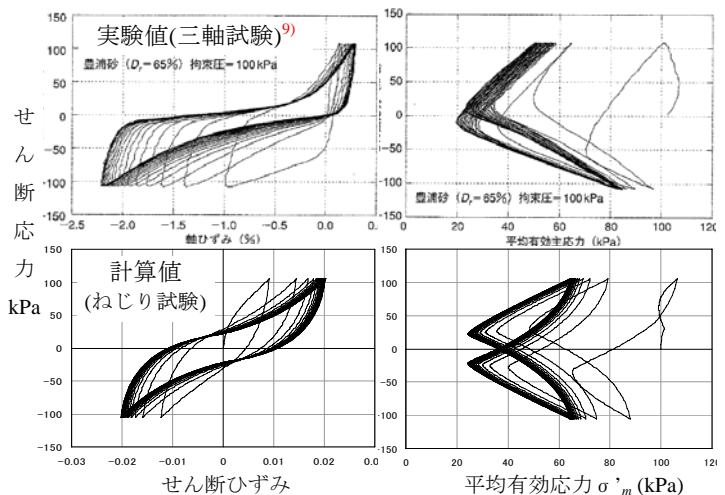


図3 薬液注入改良体の応力・ひずみ関係と有効応力経路(特殊シリカ系薬剤4%浸透, $D_r=65\%$)