

粒子フィルタを用いた弾塑性モデル/パラメータの同定

Identification of elastoplastic constitutive model and its parameters using the particle filter

○新村 隼人*, 片岡 資晴*, 村上 章*, 大野進太郎**

Hayato Shimmura, Motoharu Kataoka, Akira Murakami, Shintaro Ohno

1. はじめに

土構造物の設計を行うに際し、土の弾塑性構成式を用いた有限要素シミュレーションが用いられる。この時せん断速度や側方変形の効果を説明しようとする、オリジナル Cam-clay モデルと修正 Cam-clay モデルを使い分ける必要が生じる場合がある。つまり、比較的速いせん断速度でせん断した時は修正 Cam-clay の再現性が良く、非常にゆっくりとした速度でせん断される時にはオリジナル Cam-clay が適する傾向がある。一方、地盤中の側方変形を再現しようとするれば、修正 Cam-clay の方が適しているとされる。解析にあたっては、いずれかのモデルに依らざるを得ないが、その選択は解析技術者の判断に委ねられる。さらには、その事象に対して適切なモデルを選択したものの、モデルパラメータが適切でないため、解析の予測精度が向上しない場合もある。

本論文の目的は、地盤挙動の観測値を用いて、どの構成式が適切であるか、同時にそのモデルのもとで、どのようなパラメータ値が事象を良く表現できるかについて、粒子フィルタ (PF) と水～土連成有限要素法 (FEM) を用いたデータ同化¹⁾により解決することにある。上記の目的でモデルを統一的に説明するために、大野らによる EC/LC モデル²⁾ (Exponential/Logarithmic Contractancy model) によるのが合理的であると思われる。このモデルでは、降伏曲面の形状を n_E (EC モデル) もしくは n_L (LC モデル) というパラメータで連続的に変形させることが可能で、それによりダイレイタンシー発現の違い、ひいては異なる降伏曲面を表現することができる。観測される地盤挙動を把握するのに、PF と FEM を用いたデータ同化により、降伏曲面を定めるパラメータ (n_E もしくは n_L)、また同時に構成式中のモデルパラメータを同定する。それによりせん断速度や、要素試験レベルと現場レベルのスケールの影響を把握し、あるいは側方変形予測の精度向上を目指す。

2. EC/LC モデル²⁾

EC モデルの降伏関数は次式で表される。

$$f(p', q, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{q}{M} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

式(1)に $n_E=1.0$ を代入するとオリジナル Cam-clay モデル (関口・太田モデル) に帰着し、 $n_E=1.5$ で修正 Cam-clay モデルとほぼ同等になる。図1に等方圧密状態を想定した EC モデルの p' - q 面上での降伏曲面形状を示す ($M=1.0$ とした)。 n_E を変化させることにより、徐々に降伏曲面形状も変化していくことがわかる。LC モデルも EC モデルと同等とみなせるフィッティング性能を有しているが、使用の際にはいづかによる必要があるため、本稿では EC モデルを用いる。PF により、変位、間隙水圧の観測値からパラメータ (特に n_E) の同定をはかることで、

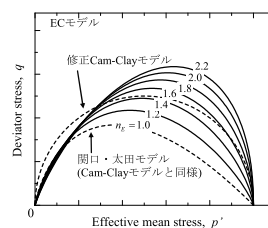


図1 ECモデルの降伏曲面²⁾
Yield surface for EC model

*京都大学農学研究科 Kyoto University **鹿島建設 Kajima Co.

動を表現しているモデルを推定する。

3. 実験結果とその検討

実地盤挙動に対する本手法の適用性を検討すべく、神戸空港島護岸建設工事に伴う基礎地盤の変形挙動観測データ^{3), 4)}のうち、特に沈下挙動観測結果に基づいて FEM 解析を行った。地盤構成を図 2 に示す。解析に際しては、埋立土（護岸部、埋土部）および洪積砂層（Ds1-3）には線形弾性モデルを適用し、沖積粘性土（Ma13）や洪積粘性土層（Ma12）は弾塑性モデル（EC モデル）を用いた。同定するパラメータとして、 n_E のみ（Case 1：粒子数 200）、 n_E と透水係数 k （Case 2：粒子数：1000）、 n_E と非可逆比 Λ （Case 3：粒子数 500）の三組を選定した。

図 3 は解析対象の有限要素メッシュと観測点を示している。 k と Λ については、海底面から厚さ約 33m にわたり分布する軟弱粘性土層に打設されたサンドドレーン（SD）による改良域を一つの層とみなし、荷重条件、排水条件、応力状態など、SD の打設により複雑となった地盤条件をすべて包括した地盤定数として同定を試みた。 n_E については、EC モデルを用いた全土層に対して一括で同定を試みた。観測データとして、海底面の沈下量（観測点 3BC-1, 3BC-2, 3BC-4, KC-5 の計 4 点）を用いた。各サンプルの発生範囲は $0.5 \leq n_E \leq 7.0$, $1.0 \times 10^{-7} \leq k \leq 1.0 \times 10^2$, $0.40 \leq \Lambda \leq 0.95$ である。また、分散 σ^2 は見込まれる最大沈下量を S とし、 $\sigma^2 = (0.2S)^2$ とした。

4. まとめ

経過日数 510 日までの観測データ（沈下量）を用いてデータ同化を行った。それぞれの Case における同定パラメータを用いた解析結果を地点別に図 4 に示す。全ての Case において予測精度は良好であり、本手法が実地盤に対して適用可能であることを示している。従来のデータ同化⁵⁾では、観測地点によっては精度が向上しにくいという欠点を孕んでいた。本手法では、地盤定数の同定を行うことに加えて、弾塑性モデルも同時に選定する。

このため観測地点を問わず、良好な予測結果を得ることが可能となると考えられる。

■参考文献 1) 村上 章ら：粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化，応用力学論文集，Vol.12，pp.99-105，2009. 2) 大野進太郎ら：非線形コントラクタンシー表現関数を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集，Vol.9，pp.407-414，2006. 3) 神戸空港変形解析検討会：神戸空港変形解析報告書（平成 14 年 10 月），60，2003. 4) 長谷川憲孝ら：神戸空港海底地盤における沖積層の圧密特性，土木学会論文集 C，63(4)：923-935，2007. 5) 珠玖隆行ら：粒子フィルタによる神戸空港島沈下挙動のデータ同化，応用力学論文集，Vol.13，pp.67-77，2010.

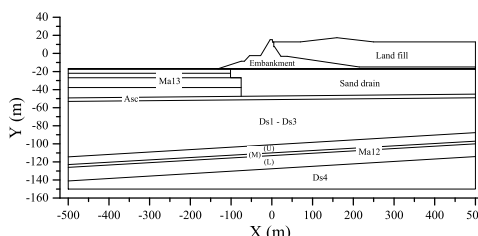


図 2 神戸港沖海底地盤の地盤構成^{3), 4)}
Ground composition in Kobe Airport

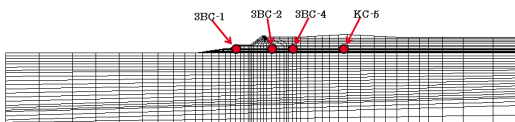


図 3 神戸港沖海底地盤の解析メッシュ
Finite element model in Kobe Airport

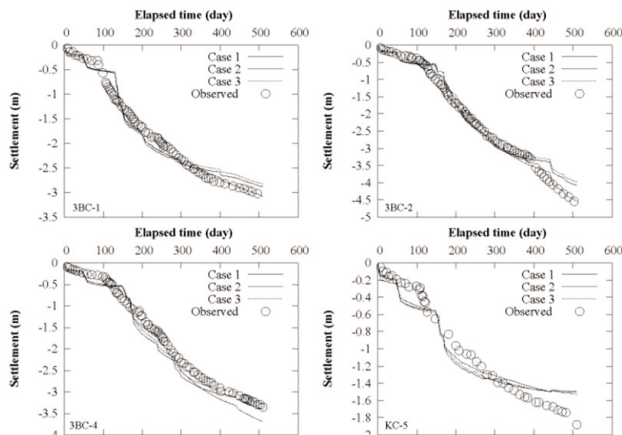


図 4 同定パラメータを用いた解析結果
Analysis results using the identified parameters