



室内試験に基づく繰り返し挙動を表現できる構成モデルのパラメータ同定方法

加藤, 知彦
山本, 百華
竹山, 智英
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24:44-52

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013255>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013255>



室内試験に基づく繰り返し挙動を表現できる 構成モデルのパラメータ同定方法

An identification of parameters for constitutive model to describe
cyclic behavior based on laboratory tests

加藤 知彦¹⁾

Tomohiko Kato

山本 百華²⁾

Momoka Yamamoto

竹山 智英³⁾

Tomohide Takeyama

飯塚 敦⁴⁾

Atsushi Iizuka

概要

鉄道盛土の地震動に対する性能照査にはニューマーク法が用いられている。ニューマーク法は破壊形態やすべり面発生位置などを仮定して応答値を求めるため、現実の事象に即した厳密な手法とは言い難い。本論文では支持地盤や盛土体の揺すり込み沈下などを考慮できる有限要素法を用いて鉄道盛土の地震時挙動を評価する。また、繰り返し挙動を表現できる弾塑性構成モデルを用いた有限要素法によって計算を行うには多数のパラメータを決定する必要があるが、複数の要素試験結果を満足するように手動で同定することは困難である。仮にそのようなパラメータセットを偶然見つけることができてもそれが一意であると言い切れない。そこで、本研究ではグリッドサーチとベイズ最適化を用いて複数の要素試験に適合するようなパラメータを同定することを目的とする。また、同定したパラメータを用いて遠心模型実験の再現解析を行い、提案手法の妥当性を検討した。

キーワード：盛土，遠心模型実験，数値解析

1. 研究目的

本研究では、盛土体/支持地盤一体型土水連成動的有限要素法を用いて地震時における鉄道盛土の変形挙動を再現すること、解析に必要なパラメータを実験から同定することを目的とする。具体的には要素試験から解析パラメータを同定し、それらのパラメータを用いて、遠心模型実験の再現解析を行う。現在、鉄道盛土の設計基準は「鉄道構造物等設計標準」

によって規定されている。他の構造物と比較すると、盛土には構成材料の品質のばらつき（不均質性）や締固め密度比や飽和度のばらつき（不均一性）といった特徴がある。変形挙動を評価するには、上述した不揃い特性に加え盛土体や支持地盤の動的応答特性や応力履歴特性などを考慮する必要がある。動的有限要素法であればこれらの特性を考慮できるが、同定すべきパラメータが多く取り扱いが難しいため鉄道盛土の設計応答値算定手法として用いられていない。そこで現在は設計応答値算定手法として比較的取り扱いが容易なニューマーク法が用いられている。ニューマーク法は図 1-1 に示す変形のうち滑動による沈下のみを扱う手法である。

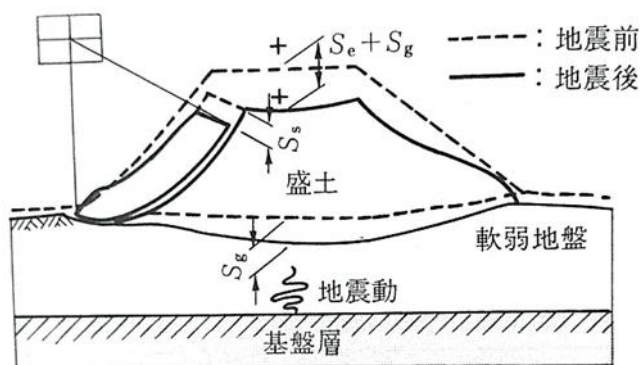


図 1.1 盛土地震時挙動の概念図⁴⁾

ここに、 S_s ：滑動による沈下量、 S_e ：盛土の揺すり込み沈下量、 S_g ：地盤の揺すり込み沈下量である。ニューマーク法は盛土の変形・破壊形態やすべり面発生位置を規定して応答値を求めるため厳密な手法とはいえない。その一方で、理論の簡便さに比べて妥当な結果を与えるという利便性があるためニューマーク法の運用が妥当であるとしている。よって、動的有限要素法を応答算定値手法として用いるためには①多数のパラメータを容易に決定する手法を提案すること②有限要素法によって得られる結果が妥当であると検証することが必要となる。本研究では①を満たすため、多数のパラメータをベイズ最適化で決定し、②を満たすため遠心模型実験結果を動的有限要素法を用いて再現する。

2. 構成モデル

構成モデルとして、EC モデルと拡張下負荷面モデルを使用する。EC モデルは大野により提案されたモデルであり、ダイレタンシーによる体積変化-応力比変化を指数関数と捉え降伏関数を定義している¹⁾。下負荷面モデルは橋口により提案されたモデルであり、古典弾塑性モデルで表現できなかった応力変化による降伏曲面内の塑性ひずみの進展を表現するモ

デルである²⁾。これらのモデルを使用するために表1のパラメータを同定する必要がある。

表1 解析に必要なパラメータ一覧

λ	圧縮指数	κ	膨潤指数
Λ	非可逆比	M	限界応力比
ν	ポアソン比	OCR	過圧密比
m	下負荷面パラメータ	n_E	ECモデルパラメータ

3. パラメータ決定方法

本論文では表1のパラメータ同定に定ひずみ圧密試験と中空ねじりせん断試験を用いる。定ひずみ圧密試験は $e - \log p$ 関係で整理し、正規圧密曲線と過圧密曲線の傾きから λ, κ を同定する。また、 $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$ の関係から Λ を決定する。中空ねじり繰り返しせん断試験は載荷→除荷→再載荷を行う実験条件①と実験条件①を繰り返し行う実験条件②の2通りがある。実験条件①の体積ひずみ-応力比($\varepsilon_v - \eta$)関係から M 、せん断応力-工学ひずみ($\tau - \gamma$)関係から ν を同定する。せん断試験のOCRは正規圧密曲線と初期応力点の関係から求める。 $\lambda, \kappa, \Lambda, \nu, M$ は要素試験から明示的に求めることができるが、 n_E, m のようなフィッティングパラメータを求めることは難しい。そこで、フィッティングパラメータについてはグリッドサーチとベイズ最適化を用いてパラメータを決定し、比較を行う。

グリッドサーチとはモデルの精度を向上させるために、フィッティングパラメータの探索空間を格子状(グリッド)に区切り、交点となる全てのパラメータの組み合わせについてモデルを構築し、最も精度の高い組み合わせを選択するという手法である。探索するパラメータの範囲は $1.0 \leq n_E \leq 3.0$ 、 $0.2 \leq m \leq 10.0$ とした。また、グリッド間隔は全て0.2と設定した。グリッドサーチを用い、フィッティングパラメータの探索を行った結果、 $n_E = 2.2$ 、 $m = 0.4$ という最適解が得られた。図3-1で誤差の分布をヒートマップにより可視化する。

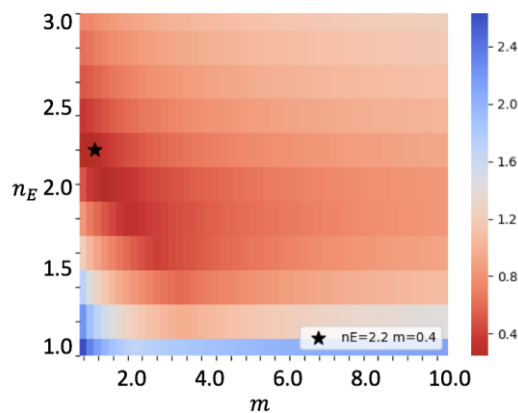


図3-1 フィッティングパラメータ探索の結果(グリッドサーチ)

ベイズ最適化はある未知の目的関数が最大値を取るような入力を求めることを目的としている。そこで、目的関数を「実験結果と解析結果の誤差に-1 をかけた値」とすることで実験結果と解析結果の差が最も小さくなるような入力を求めることができる。本論文ではN+1 回目に入力空間内のどこを探索するかを規定する獲得関数に信頼性上限関数を、目的関数の性質を規定するカーネル関数に Mate'rn カーネルを使用する。ベイズ最適化を用いたフィッティングパラメータ探索結果を図 3-2 に示す。最適解は $n_E=2.12$, $m=0.466$ となった。

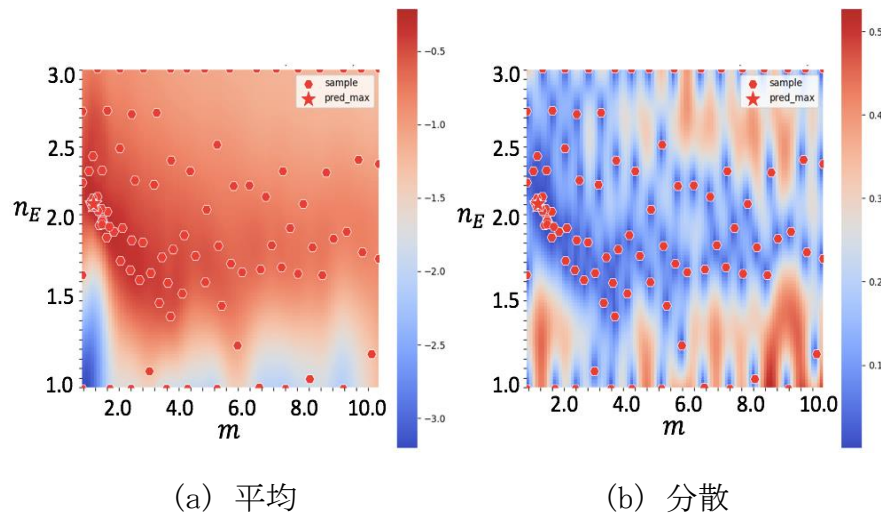


図 3-2 フィッティングパラメータ探索の結果(ベイズ最適化)

以上より、グリッドサーチとベイズ最適化のいずれを用いても、ほぼ同様の最適解が得られることが分かった。パラメータの最適解の誤差については、グリッドサーチを行う際にグリッド間隔を細かくすることによってベイズ最適化の最適解に近づくと考えられる。また、ベイズ最適化は 100 試行で最適解を得られるが、グリッドサーチでは 550 試行必要となることから、ベイズ最適化は効率的な探索が可能であると考えられる。フィッティングパラメータの最適な組み合わせを $n_E=2.12$, $m=0.466$ とし、同定されたパラメータ一覧を表 2 に示す。

表 2 解析に用いるパラメータ一覧

λ	0.088	κ	0.0017
Λ	0.98	M	0.8
ν	0.468	OCR	1.09
m	0.466	n_E	2.12

4. 要素試験再現解析結果

表 2 のパラメータを用いて要素試験の再現解析を行った結果を図 4-1, 図 4-2 に示す. どの再現解析も要素試験結果を再現できているが中空ねじりせん断試験(条件①)の ε_v - η 関係のみ結果が大きくずれている. これは塑性硬化モデルに下負荷面モデルのみを使っている影響であり, 更に高度なモデルを使うことで再現できると考えている. ただし, 本論文では外力に除荷過程が存在せず(対象が地震動であるため), 解析条件②では ε_v の挙動を正しく再現できていることから下負荷面モデルで十分とした.

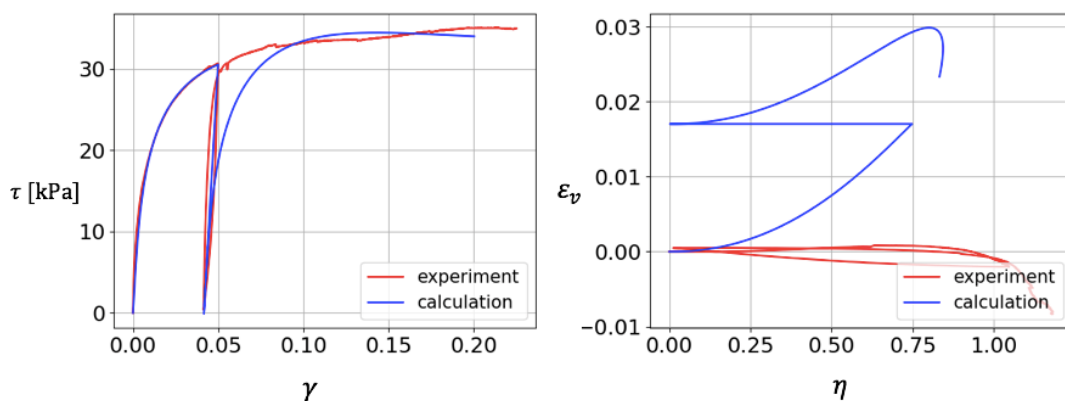


図 4-1 中空ねじり繰り返しせん断試験(条件①)結果

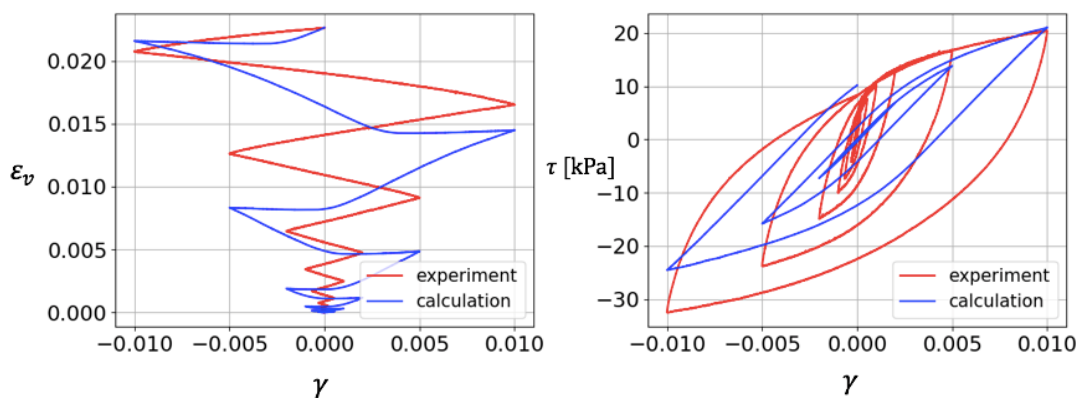
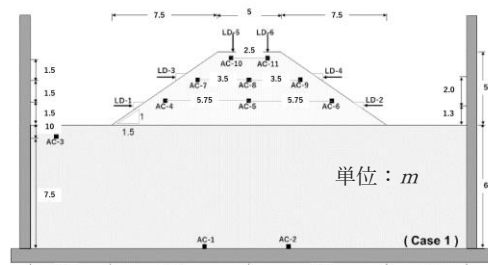


図 4-2 中空ねじり繰り返しせん断試験(条件②)結果

5. 遠心模型実験再現解析結果

遠心模型実験の盛土断面を図 5-1 に示す. 実際は法面勾配 1:1.5 と法面勾配 1:0.5 について実験が行われているが紙面の都合上 1:1.5 断面について記載する.



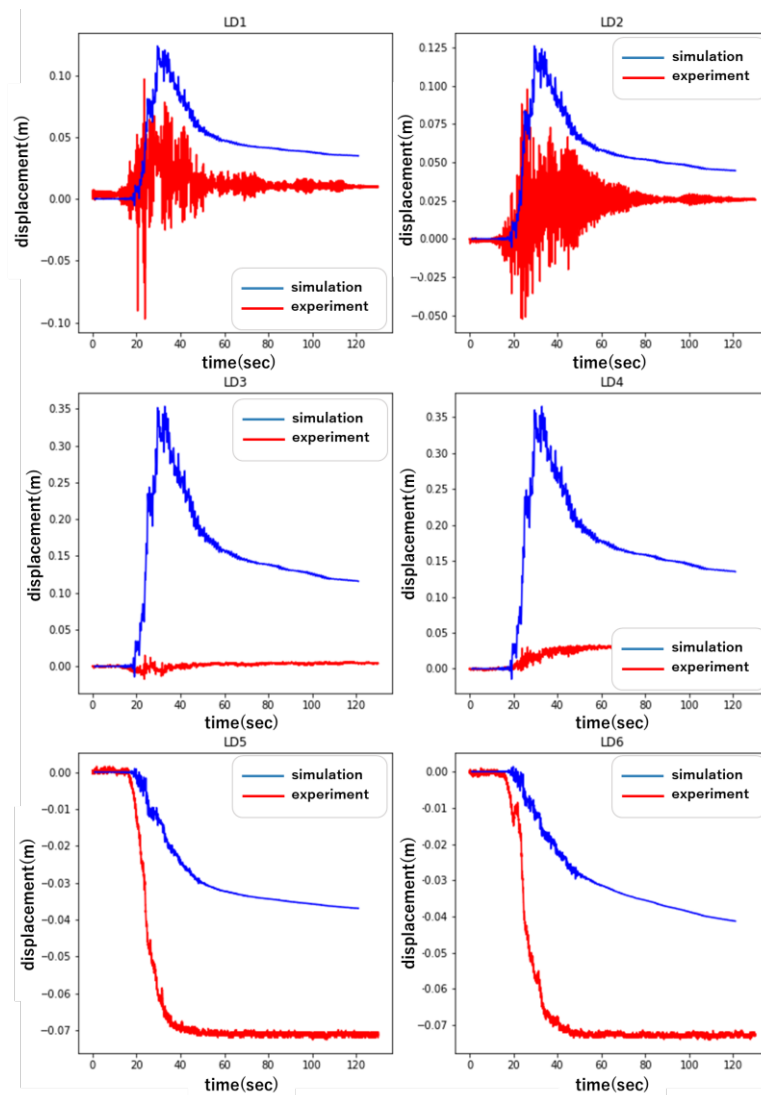


図 5-2 連成解析での変位計の応答

表 3 非連成と連成での結果の比較

変位計	実験の最終変位 (m)	非連成での 最終変位 (m)	連成での 最終変位 (m)
LD_1	0.0098	0.1020	0.0348
LD_2	0.0254	0.0253	0.0446
LD_3	0.0040	0.2238	0.1161
LD_4	0.0320	0.1368	0.1349
LD_5	0.0710	0.2618	0.0369
LD_6	0.0730	0.2013	0.0413

6. 結論

ベイズ最適化を用いたパラメータ同定法により複数のパラメータを複数の実験に適合させることができると分かった。さらに、それらのパラメータを用いることで遠心模型実験の再現解析に妥当な結果を与えることも分かった。しかし、本論文では Rayleigh 減衰や排水条件の適切な設定にまで至らなかった。これらの設定手順の確立と結果に与える影響を考察することが今後の課題である。

謝辞：本研究を行うにあたり、鉄道総合技術研究所地震動力学研究室および東京工業大学高橋章浩教授から貴重な実験データをご提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集 Vol. 9, p. 407～414, 2006
- 2) 橋口公一：弾塑性論の新体系-下負荷面の概念-, 土木学会論文集 Vol. 3, No. 3, 2007

筆者：1) 加藤知彦 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 学生；2) 山本百華 神戸大学工学部市民工学科 学生；3) 竹山智英 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 准教授；4) 飯塚敦 都市安全研究センター 教授；

An identification of parameters for constitutive model to describe cyclic behavior based on laboratory tests

Tomohiko Kato

Momoka Yamamoto

Tomohide Takeyama

Atsushi Iizuka

Abstract

The Newmark method is used to check the performance of railway embankment against earthquake motion. Since the Newmark method obtains the response value assuming the fracture form and the slip surface occurrence position, it is hard to say that it is a strict method that matches the actual event. In this paper, the seismic behavior of railway embankment is evaluated by using the finite element method which can take into account the subsidence of supporting ground and embankment. In addition, it is necessary to determine a large number of parameters in order to perform calculations by the finite element method using an elasto-plastic constitutive model that can express the repetitive behavior. However, it is not possible to identify manually so as to satisfy multiple element test results. Even if such a parameter set can be found by accident, it cannot be said that it is unique. Therefore, the purpose of this research is to identify parameters that are suitable for multiple element tests using grid search and Bayesian optimization. In addition, we performed a reproducibility analysis of the centrifuge model experiment using the identified parameters, and examined the validity of the proposed method.

©2020 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.