

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 7月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360184

研究課題名（和文）地盤材料の構成モデルの体系化と一貫性のある地盤の変形・破壊予測

研究課題名（英文）Schematization of constitutive models for geomaterials and coherent prediction of the deformation and failure on ground behaviors

研究代表者

中井 照夫 (NAKAI TERUO)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：00110263

研究成果の概要（和文）：研究代表者らが行ってきた地盤材料の構成モデルと地盤の応力・変形解析に関する研究をベースに、一般応力条件下の地盤材料の諸特性を簡単且つ精緻に説明できる構成モデルを提示するとともに、地盤工学の諸問題に適用する。その結果、これまで問題によって個別の方法で対応してきた地盤の変形・破壊予測を一貫性のある方法で行うことが可能となり、合理的な設計法に結びつけることができる。

研究成果の概要（英文）：On the basis of the past researches on constitutive modeling of geomaterials and its application to geo-engineering problems which have been done in our laboratory, a simple and sophisticated model which can describe uniquely various soil features in general stress systems is presented. Also, this model is applied to the analyses of various geotechnical problems. The present research enables the ration and coherent predictions from ground deformation to the failure, though practical predictions of the deformation and failure have been done separately.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土の構成モデル、砂、粘土、3次元応力、弾塑性、地盤の変形解析

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 周知の Cam clay model はいわゆる圧密とせん断を同一に説明できる最初の弾塑性モデルであるが、基本的に信頼性を持って適用できるのは三軸圧縮条件下の練返し正規圧密粘土の挙動に限られる。Cam clay model 以後、その限界を克服すべく多くの構成モデルが提案されてきたが、諸特性を考慮しようとするあまりその構造が非常に複雑化し、更に物理的意味の曖昧なパラメーターが多く実

際の解析に使えないもしくは使うのに苦労するものが多い。

(2) 現在の実務すなわち地盤の破壊（安定）と変形は別々の方法でそれらの予測が行われている。そのため設計では大きな安全率が必要とされ、精度のよい予測が難しいため現場計測による対処等で設計・施工が進められている。今後、合理的且つ信頼性のある設計・施工を行うためには、地盤の変形から破

壊までを一貫性を持って説明できる予測法の確立が不可欠である。そのためには、種々の地盤材料の力学特性を統一的に記述できる構成モデルが必要とされる。

## 2. 研究の目的

研究代表者らが行ってきた地盤材料の構成モデルと地盤の応力・変形解析に関する研究をベースに、一般応力条件下の地盤材料の諸特性を簡単且つ精緻に説明できる構成モデルを提示するとともに、地盤工学の諸問題に適用する。

## 3. 研究の方法

(1) 通常地盤材料の構成モデルははじめから多次元で定式化されるが、本研究では地盤材料の基本的な性質を1次元の応力～間隙比関係で検討する。その結果、土の基本的性質におよぼす種々の影響のモデル化の意味が明確になる。

(2) 1次元で開発した、構成モデルをすでに提案している修正応力  $t_{ij}$  の概念を使って3次元化をはかる。また、モデルの有効性と適用性を三軸圧縮試験および3主応力制御試験結果で検証する。

(3) 開発した構成モデルを使って地盤工学の諸問題の変形解析を実施し、併せて対応するモデル実験も実施する。これらの解析および実験を通して、解析法の妥当性を検証するとともに既往の解析法との比較を行い、より合理的な地盤の変形・破壊予測法の開発をめざす。

## 4. 研究成果

社会基盤施設整備のための地上や地下の開発はもとより、地震災害などの自然災害も地盤と密接に関係する。一方、地盤は砂から粘土まで、同じ土でも緩い土から密なものまであり、これらは弾塑性の性質を示すとともに、種類によっては時間効果特性も顕著である。このような多種多様な土が不均質に堆積した自然地盤の変形・破壊を正確に予測するには、材料の種類や様態によらず、その特徴的な挙動を定量的に評価できる構成モデルは欠かせない。

本研究では、まず地盤材料の諸特性（例えば、密度、年代効果、時間効果等の影響）を同じ考え方で考慮する方法を1次元で説明した。その後、金属塑性論をはじめとして多くの材料の構成モデルで用いられている正八面体面(Octahedral Plane)に基づく理論構成ではなく、土は摩擦則に従う粒状性材料であるとの発想から生まれた空間活動面(Spatially Mobilized Plane)に着目し、3次元応力下の地盤材料の力学特性を唯一的に表現

できる考え方(修正応力  $t_{ij}$  の概念)をベースに、一般性があり且つシンプルな多次元の構成モデルを開発した。そして、開発した構成モデルを有限要素解析プログラムに組み込み地盤工学の諸問題(トンネル掘削問題、山留掘削問題、支持力問題、補強土問題)に適用し、これまで変形と破壊は別物として、また問題によって個別に考えていた地盤工学の諸問題を同じ手法で解析した。また、これらの解析結果の信頼性は対応するモデル実験で検証した。以下に、本研究で得られた代表的な成果を示す。

(1) 1次元モデルの解析例として、**図1**に自然堆積粘土のひずみ速度を変えた定ひずみ速度(CSR)圧密試験の解析結果(間隙比  $e \sim \log \sigma$  関係)を示す。解析結果は擬似降伏応力までは剛性が大きい、降伏応力を過ぎると急激な剛性の低下がみられ最終的には正規圧密粘土の  $e \sim \log \sigma$  の直線関係に漸近するよく知られている自然堆積土の挙動を的確に表現している。また、ひずみ速度が遅くなるに従い、圧密降伏応力が小さくなり、 $e \sim \log \sigma$  関係も下方にシフトする時間効果特性も表現している。更には、ひずみ速度を途中で変えたときには、そのときのひずみ速度に対応する  $e \sim \log \sigma$  関係に移っていく(Isotache)も表現できていることが判る。

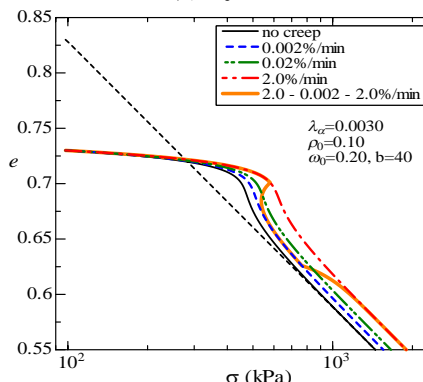


図1 提案モデルによる自然堆積粘土のシミュレーション(太線は途中で速度を変化)

(2) **図2**は密度を変えた砂の三軸圧縮および三軸伸張試験結果(プロット)と提案モデルによる解析曲線を示す。ここに、挿入図に示すように、三軸圧縮では土を上から押しつぶすような载荷で、三軸伸張は横から握りつぶすような载荷である。そして、一般的な3次元状態はこれらの間ある。同図から提案多次元構成モデルが圧縮、伸張の差すなわち中間主応力の影響だけでなく、密度の影響も含めて土の変形・強度特性を統一的に説明できることが判る。なお、これらの解析は材料が決まれば中間主応力や密度によらず一意的に決められる材料パラメーターを使って行われている。また、図は省略するが、提案モデルは粘性土についても適用可能である。

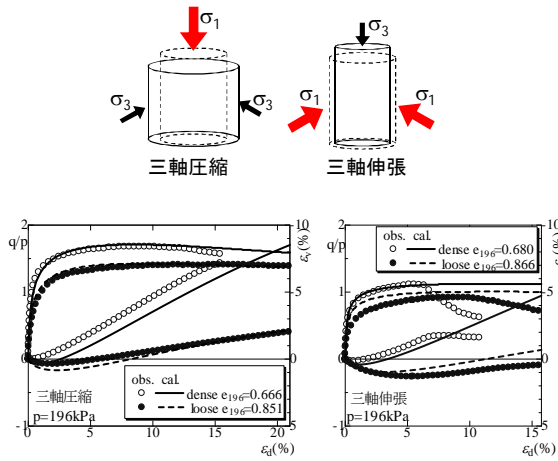


図2 密詰め(dense)および緩詰め(loose)砂の三軸圧縮および伸張試験の応力・ひずみ関係の実測値(プロット)と計算曲線

(3) 提案した構成モデルを用いた地盤工学問題の解析結果を対応するモデル実験結果とともに示す。一例として、都市部で特に問題となる既設構造物近くでの掘削問題を取り上げる。図3は既設構造物(杭基礎)近くでのトンネル掘削モデル実験(写真)における実験結果と解析結果を示す。大深度地下トンネル(深さ40m, 杭基礎先端との距離10m)を想定し1/100のスケールでモデル実験を行っている。地盤内のせん断ひずみ分布を示すが、大深度といえども杭基礎に向かって緩みが生じ、既設構造物に大きく影響する。また、図4は切梁を有する山留め掘削(写真に示すように、壁を地中に造り水平梁を掛けながら地表面から掘削するよく行われる工法)の実験結果と対応する解析結果を示す。結果は壁体近くに既設構造物(ベタ基礎)がない場合とある場合の壁体後方の地表面沈下を表す。ここでも、既設構造物がある場合、その荷重位置で大きな沈下が生じることが判る。これらの現象を、解析結果は定性・定量的に十分な精度で再現している。一方、実務でも使われている従来法では、複合問題に対処できないし、地盤材料の応力・ひずみ挙動を適切に評価できないので、図に示すような現実的な解析結果は得られない。

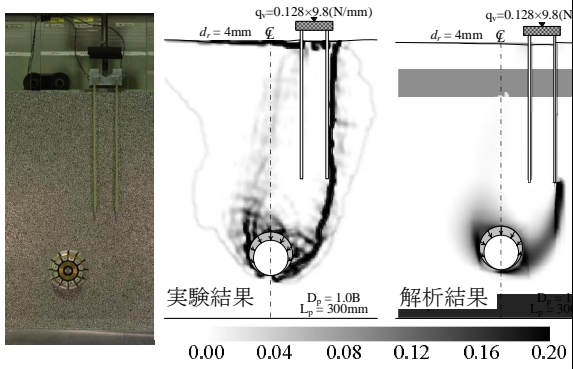


図3 既設構造物近くで大深度トンネル掘削時の地盤内せん断ひずみ分布

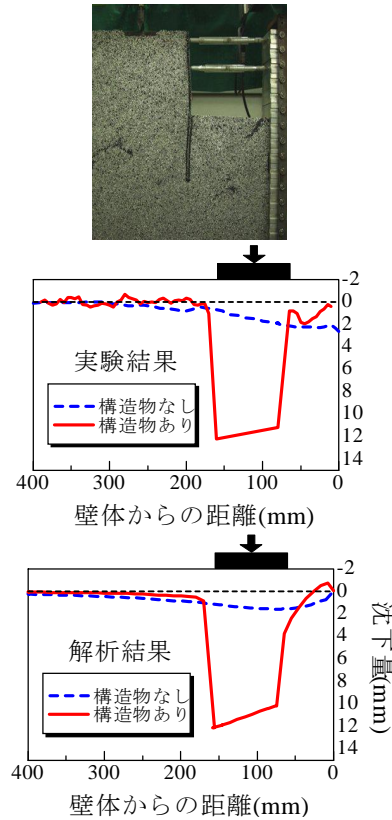


図4 既設構造物がある場合とない場合の山留め掘削時の地表面沈下プロフィール

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- 1) 岩田敏和, 中井照夫, Shahin H.M., 菊本統, 石井健嗣 (2011): 新しい双設トンネル掘削実験とその解析, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学特集号), 67(3), 33-44.
- 2) 菊本統, 中井照夫, Shahin H.M., 石井健嗣, 岩田敏和 (2011): 実際の内空変位と周面土圧分布を考慮した単設トンネル掘削モデル実験とその解析, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学特集号), 67(3), 57-65.
- 3) Nakai T., Shahin H.M., Kikumoto M., Kyokawa H., Zhang F. and Farias, M.M. (2011a): A simple and unified one-dimensional model to describe various characteristics of soils, Soils and Foundations, 51(6), 1129-1148.
- 4) Nakai T., Shahin H.M., Kikumoto M., Kyokawa H., Zhang F. and Farias, M.M. (2011b): A simple and unified three-dimensional model to describe various characteristics of soils, Soils and Foundations, 51(6), 1149-1168.

- 5) Shahin H.M., Nakai T., Zhang F., Kikumoto M. and Nakahara E. (2011): Behavior of ground and response of existing foundation due to tunneling, *Soils and Foundation*, 51(3), 395-409.
- 6) Nakai T., Shahin H.M., Zhang F., Hinokio M., Kikumoto M., Yonaha S. and Nishio A. (2010): Bearing capacity of reinforced foundation subjected to pull-out loading in 2D and 3D conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(3), 268-280.
- 7) 京川裕之, 菊本統, 中井照夫 (2010): 修正応力を用いた等方硬化モデルによる誘導異方性の表現, *地盤工学ジャーナル*, 5(4), 533-544.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- 1) Nakai T., Shahin H.M. and Iwata T. (2013): Model test and numerical simulations of tunneling considering existing building and tunnel, *Proc of 5<sup>th</sup> China-Japan Geotechnical Symposium*, Chengdu, 308-313.
- 2) Shahin H.M., Nakai T., Yoshida Y. and Mio S. (2013): Effective reinforcing method for increasing bearing capacity, *Proc of 5<sup>th</sup> China-Japan Geotechnical Symposium*, Chengdu, 372-877.
- 3) Shahin H.M., Nakai T., Zhang F., Kikumoto M., Ito F. and Baba S. (2012): Investigation of failure mechanism during slope excavation and its counter-measure by elastoplastic FE analysis, *Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Sym. On Landsides*, Banff, 1765-1771.
- 4) Nakai T. (2012): Application and meaning of the *tij* concept, *Proc. of Int. Symp. On Constitutive Modeling of Geomaterials*, Beijing, 277-281.
- 5) Nakai T. and Shahin H.M. (2012): Simple and unified modeling of time-dependent behavior for various geomaterials, *Proc. of Int. Symp. On Constitutive Modeling of Geomaterials*, Beijing, 617-625.
- 6) Nakai T., Shahin H.M., Kikumoto M., Kyokawa H., Zhang F. and Farias M.M. (2011): New approach for modeling time-dependent behavior of geomaterials, *Proc. of COMGEO II*, Dubrovnik, 49-62.
- 7) Kikumoto M., Kyokawa H. and Nakai T. (2011): Simple modeling of stress-strain behavior of unsaturated soils, *Proc. of 14<sup>th</sup> ARCSMGE*, Hong Kong, CD-ROM.
- 8) Nakai T., Shahin H.M., Kyokawa H. and Miyahara Y. (2011): Modeling of one-dimensional consolidation behavior for clays, *Proc. of 14<sup>th</sup> ARCSMGE*, Hong Kong, CD-ROM.
- 9) 岩田敏和, 菊本統, Shahin H.M., 中井照

- 夫, 石井健嗣 (2011): 応力・変位混合型境界のトンネル掘削実験とその解析, 第 56 回地盤工学シンポジウム論文集, 53-60.
- 10) 菊本統, 加藤盛大, 奥田一彰, Shahin H.M., 中井照夫 (2011): アンカー式土留め工法における支保メカニズムと効果的な支保パターン, 第 56 回地盤工学シンポジウム論文集, 137-144.
- 11) 加藤盛大, 菊本統, 中井照夫, 奥田一彰, Shahin H.M. (2011): 切梁式土留め掘削が周辺の基礎構造物に及ぼす影響—モデル実験と数値解析による検討, 第 56 回地盤工学シンポジウム論文集, 145-152.

〔図書〕 (計 1 件)

- 1) Nakai T. (2012): *Constitutive Modeling of Geomaterials: Principles and Applications*, 単著(376pages), CRC Press, Boca Raton/London/New York

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中井 照夫 (Nakai Teruo)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・特命教授

研究者番号 : 00110263

### (2) 研究分担者

ホサイン モハマド・シャヒン  
(Hossain Md. Shahin)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 00516495

菊本 統 (Kikumoto Mamoru)

横浜国立大学・都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号 : 90508342