

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650588

研究課題名(和文) 掘立柱建物の在りし日の姿の地盤力学的推定法の開発

研究課題名(英文) Development of a geomechanical method for estimating size of ancient pillar-supported structure

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで柱穴の径や柱間距離から経験的に類推してきた掘立柱建物の規模を、確かな地盤力学の理論に基づいて予測する解析技術を開発した。提案手法では、地盤の密度と粒度には過去に受けた最大の応力履歴が色濃く反映されることを利用して、柱穴地盤の密度・粒度の現地調査、圧縮性・破砕性に関する室内試験および密度と粒度の変化を考慮した土のモデルによる解析を組み合わせ、往時の建造物の自重を逆算する。まず、粒子破砕現象と密度変化を考慮した土の構成則を開発した後、構成則の検証と改良を行い、構成則に基づく有限要素解析コードを開発して古代建造物の重量推定法を提案した。

研究成果の概要(英文)：A geomechanical method for estimating size of ancient pillar-supported structures is developed in this study to improve precision of current empirical estimation using radius and spacing of the pillar holes. As the past maximum stress history would be reflected on the current density and particle size distribution of the ground at the bottom of pillar holes, the developed method consists of field observation of the density and particle size distribution of the ground around pillar holes, laboratory tests on compressibility and crushability of the ground material and numerical back calculation. In this study, a constitutive model incorporating the effects of variations of density and particle size distribution is firstly developed and its validity is checked by comparing with past experimental evidences. A finite element code based on the proposed model is then developed and applied to back calculate the maximum load which used to act on the bottom ground of the pillar hole.

研究分野：地盤工学、応用力学、文化財科学

キーワード：掘立柱建物 密度 粒度 粒子破砕 構成モデル 有限要素法 数値解析 柱穴

### 1. 研究開始当初の背景

2009年、奈良県桜井市纏向遺跡で3世紀前半の大型建物跡の発見が報告された(写真1)。この遺構は同時代の構造物としては国内最大級で、柱穴が計画的に配置された掘立柱建物として最古の例であることから、邪馬台国の有力候補地として注目を集めた。これまで邪馬台国の所在地論争は、魏志倭人伝の解釈と考古学的知見の両面から行われてきたが、近年は客観的事実である後者に基づく議論が盛んで、遺跡の年代や規模、構造物の大きさや建築様式、土器等の出土資料の量と質が重要な論拠となっている。まず発掘調査により遺跡の規模や出土品の量と質が明らかにされ、その後、主に層序や他の遺構との切り合い関係、出土する遺物から年代を推定する。最近では、木の年輪幅の違いを利用した年輪年代測定法など科学的手法も用いられている。一方で、在りし日の建物の姿は、柱穴の径や間隔をもとに建物の規模を類推して経験的に復元しているのが現状であり、確かな理論に基づいて掘立柱建物の大きさを推定する手法はまだない。

一方、地盤工学の分野では、この半世紀にわたり地盤の変形や破壊の予測を目的として、土の応力と変形の関係式(構成モデル)の開発が盛んに行われてきた。1960年代にはSchofield & Wrothが圧密(体積変化)とせん断(形状変化)を統一的に記述するCam clayモデルを提案し、その後幾つかの拡張が施されて高度化してきた。ただ、これまで土粒子の破碎等による粒度特性の変化を考慮できるモデルはなかったが、2010年によく研究代表者(菊本)と英・豪の研究者による共同チームによって「土が圧縮応力を受けて密度増加し(土粒子が密に詰まり)、土粒子が破碎して粒度分布が変化する様子を考慮できる構成モデル」が実現された。



写真1 巨大柱跡に関する新聞記事

### 2. 研究の目的

本研究では、「土は外力を受けると粒子の間隙が詰まって密度が増加し、土粒子の破碎を生じて細粒分が増える。このため現在の密度や粒度には、過去に受けた最大の応力履歴が明確に反映される。」という実験事実を利用して、研究代表者らが開発した土の力学モデルを応用して、掘立柱建物の規模を力学的に逆算する手法の開発を目指す。提案手法で

は、掘立柱建物の柱穴跡の地盤の密度と粒度分布(粒子径の分布)を調査し、提案モデルによる数値シミュレーションにより観測した密度・粒度に達するまでに要する外力(当時の掘立柱の支持力に等しい)を算出した後、すべての柱について算出した支持力を合計して当時の上部構造物の自重(大きさ)を判定する。具体的には以下の手順に従う。

掘立柱遺跡の柱穴(竪穴)底面から土を採取して、間隙比と粒度分布を調べる。掘立柱遺跡の柱穴周辺から同一地層の(柱荷重を受けていない)土供試体を採取して、間隙比と粒度分布を調べるとともに、力学特性に関する要素試験(圧密試験および三軸試験)を行い、密度と粒度の変化を考慮した土の構成モデルのパラメータを決定する。

土粒子の密度(間隙比)と粒度(あるいは粒子の破碎量)は過去に受けた応力レベルの最大値によって決まり、大きな応力を受けているほど密度が高く、破碎量も多い。で決定したパラメータを用いて、掘立柱への(柱に作用する建物の自重に相当する)鉛直載荷を行う数値シミュレーションにより再現し、で観測した密度と粒度に達する応力レベルを算出する。

で算出した応力レベルは、柱穴底の地盤に作用した(柱を含む)上部構造物の自重に相当する。すべての柱の作用荷重を求めて合計し、建設当時の上部構造物の総重量を得る。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために、次の手順を実施する。

掘立柱建物の柱穴およびその周辺地盤の土試料の採取と密度・粒度試験

現場で採取した土試料の室内力学試験とパラメータの同定

粒子破碎現象を考慮した掘立柱の2次元支持力モデル実験と、密度と粒度の変化を考慮した土のモデルに基づく地盤解析コードの検証

実際の掘立柱建物の柱穴を対象とした数値シミュレーションと掘立柱建物の規模推定、および既往研究との比較による提案手法の検証

### 4. 研究成果

本課題では、これまで柱穴の径や柱間距離から経験的に類推してきた掘立柱建物の規模を、地盤工学分野の最新の成果を活かして確かな地盤力学の理論に基づいて予測することである。開発技術では、地盤の密度と粒度には過去に受けた最大の応力履歴が色濃く反映されることを利用して、柱穴地盤の密度・粒度の現地調査、圧縮性・破碎性に関する室内試験および密度と粒度の変化を考慮した土のモデルによる解析を組み合わせ、

往時の構造物の自重を逆算する。H24 は粒子破砕現象と密度変化を考慮した土の構成モデル (図 1,2) の開発に取り組み, H25 は構成モデルの検証 (図 3,4) と改良を行い, 支持力問題の数値解析を実施したが、最終年度となる H26 は開発した構成モデルに基づく解析コード (図 5) を用いた古代構造物の重量推定法 (図 6) を提案した。

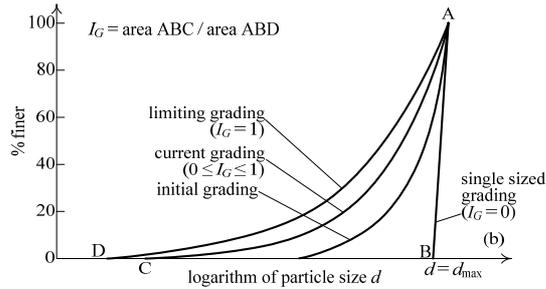


図 1 粒子破砕の指標  $I_G$  の定義

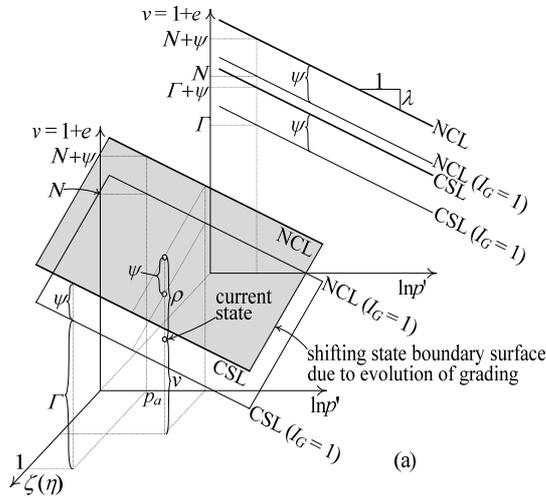


図 2 粒度変化による NCL と CSL の移動

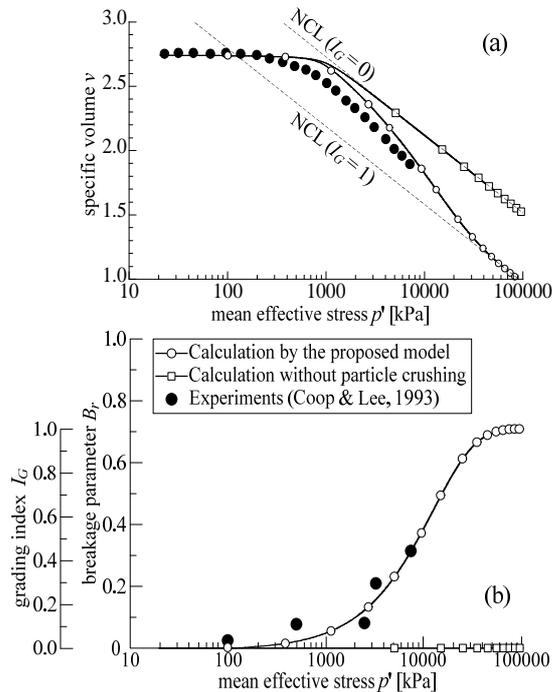


図 3 等方圧密試験と解析との比較

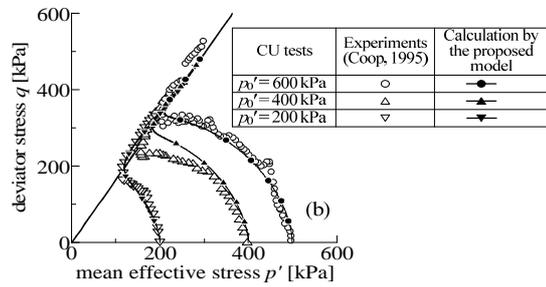


図 4 非排水三軸試験と解析との比較

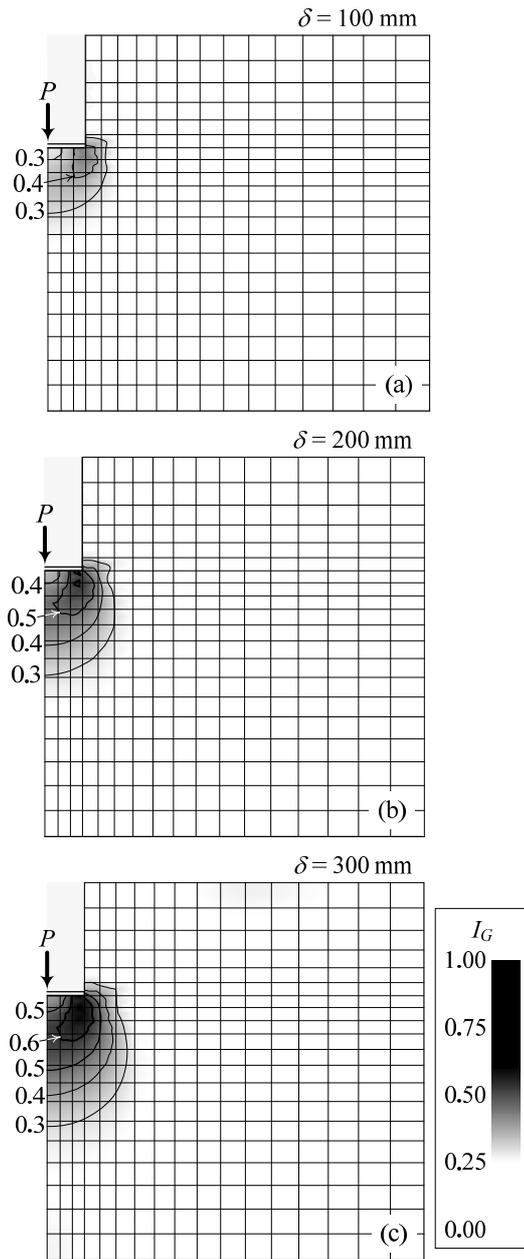


図 5 粒子破砕の進展の様子 (解析結果)

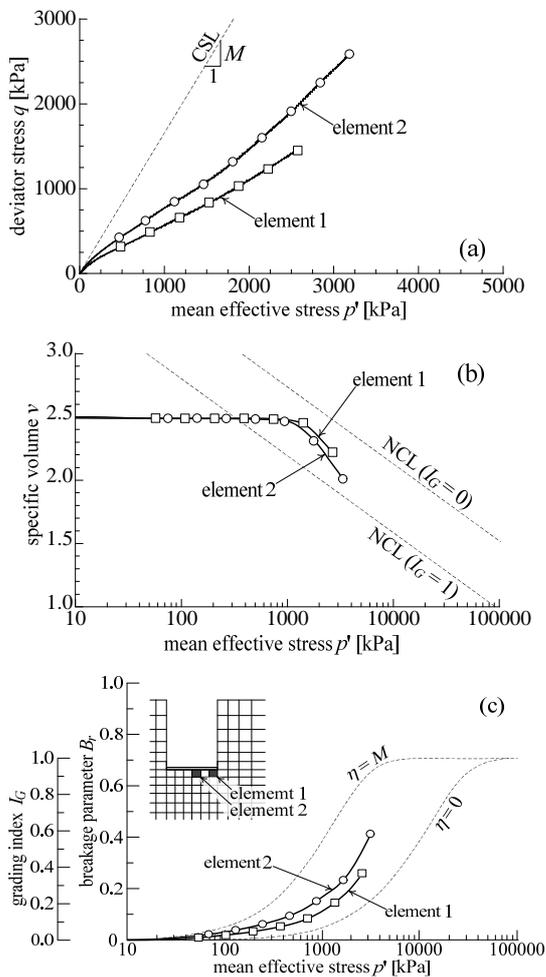


図6 柱穴中央および端部の要素の応力経路および密度、粒度の変化（解析結果）

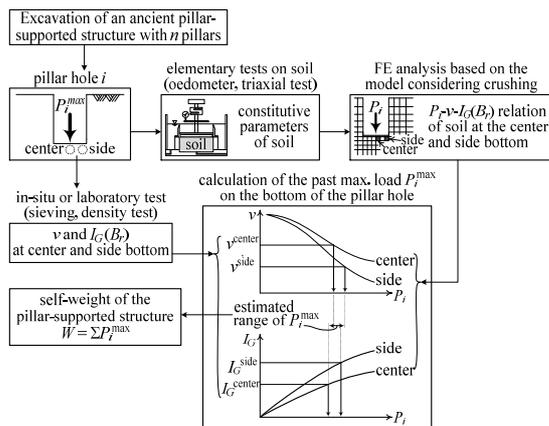


図7 柱穴の地盤情報から掘立柱建物の規模を予測する手法（フローチャート）

## 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2件）

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Saito, T. and Mimura, M. : Stability analysis of masonry structure in Angkor ruin considering the construction quality of the

foundation, Journal of Civil Engineering Research, DOI: 10.5923/c.jce.20140213, 4(3A), 78-82, 2014.

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y. and Ohnishi, Y. : Application of coupled elasto-plastic NMM-DDA procedure for stability analysis of Prasat Suor Prat N1 Tower, Cambodia, Geosystem Engineering, 796-805, 2013.

〔学会発表〕（計14件）

橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 三村衛: 応力浸透連成 NMM-DDA の開発と検証解析, 第50回地盤工学研究発表会, 札幌市, 講演集(CD-ROM), 2015年7月.

橋本涼太, 小山倫史, 齋藤徹, 菊本統: NMM-DDAによるアンコール遺跡バイヨン寺院と地盤の安定解析, 第69回土木学会年次学術講演会, 大阪市, 講演概要集(CD-ROM), 2014年9月.

橋本涼太, 小山倫史, 齋藤徹, 菊本統: NMM-DDAによるアンコール遺跡バイヨン寺院の基壇掘削時安定解析, 第49回地盤工学研究発表会, 北九州市, 講演集(CD-ROM), 2014年7月.

齋藤徹, 菊本統, 橋本涼太, 小山倫史: アンコール遺跡バイヨン寺院の版築および周辺の自然地盤の力学特性, 第49回地盤工学研究発表会, 北九州市, 講演集(CD-ROM), 2014年7月.

Hashimoto, R., Koyama, T. and Kikumoto, M. : Development of elasto-plastic NMM-DDA and its application to the stability analysis of masonry structures in Angkor Thom, Cambodia, Proc. Discussion Sym. on the Restoration of the Platform Mound of Central Tower, Bayon, Angkor Thom, Siem Reap, Cambodia, Dec. 2014.

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Saito, T., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y. and Ohnishi, Y. : Stability analysis of the Bayon Central Tower with NMM-DDA considering the excavation of the foundation, Proc. of ISRM Int. Sym. 2014 and 8th Asian Rock Mech. Sym., Paper ID: OS2-1 (9 pages), Sapporo, Japan, Oct. 2014.

Hashimoto, R., Koyama, T., Mimura, M., Kikumoto, M., Saito, T., Yamada, S., Araya, M. and Iwasaki, Y. : Numerical study on the influence of traditional soil foundation on the stability of masonry structure in Angkor with NMM-DDA, Proc. of the 14th Int. Conf. of the Int. Assoc. for Computer Methods and Advances in Geomechanics

(14th IACMAG), Kyoto, Japan, pp. 211-216, Sep. 2014.

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y. and Ohnishi, Y. : Development of elasto-plastic NMM-DDA with modified Cam-clay model considering subloading surface and its application to the stability analysis of masonry structure in Angkor Thom, Cambodia, Proc. 11th Int. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation, Fukuoka, Japan, pp.357-363, Aug. 2013.

橋本涼太, 小山倫史, 三村衛, 菊本統, 山田俊亮, 新谷真人, 岩崎好規: 下負荷面 Cam-clay モデルを導入した NMM-DDA の石積構造物の安定解析への適用, 第 48 回地盤工学研究発表会, 富山市, 講演集 (CD-ROM), 2013 年 7 月 .

Hashimoto, R., Koyama, T., Ohnishi, Y., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M. and Iwasaki, Y. : Stability analysis of masonry structures in Angkor Thom, Cambodia using elasto plastic NMM-DDA with subloading Cam-clay model, Proc. 47th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, USA, June 2013.

橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 山田俊亮, 新谷真人, 岩崎好規, 大西有三: 弾塑性 NMM-DDA によるプラサート・スープラ N1 塔の安定解析および補修効果の事後検討, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム, 宜野湾市, 講演論文集 (CD-ROM), 2013 年 1 月 .

橋本涼太, 小山倫史, 菊本統, 山田俊亮, 新谷真人: 弾塑性 NMM-DDA による石積構造物と地盤の相互作用を考慮した安定性評価, 第 67 回土木学会年次学術講演会, 名古屋市, 講演概要集 (CD-ROM), 2012 年 9 月 .

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y. and Ohnishi, Y. : Stability analysis of masonry structure at Angkor Thom in Cambodia using Elasto-plastic NMM-DDA, Proc. of the 4th Central Asian Geotechnical Symposium on Geo-Engineering for Construction and Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites -Challenges and Solution-, Samarkand, Uzbekistan, pp.84-89, Sep. 2012.

Hashimoto, R., Koyama, T., Kikumoto, M., Yamada, S., Araya, M., Iwasaki, Y. and Ohnishi, Y. : Development of elasto-plastic NMM-DDA and its application to the stability analysis of Prasat Suor Prat, Angkor, Proc. of the 7th Asian Rock Mechanics Symposium,

Seoul, Korea, pp.796-805, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし