

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289144

研究課題名(和文) 1948年型地盤工学からの脱却に向けての研究

研究課題名(英文) Study on a departure from 1948 model in geotechnical engineering

## 研究代表者

中井 照夫 (NAKAI, Teruo)

中部大学・工学部・客員教授

研究者番号：00110263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)： 現在の実務設計の考え方は、基本的には1948年に出版されたTerzaghi & PeckやTaylorの教科書に代表される土質力学の域を出ていない。そこでは、地盤の変形と破壊は別物として扱われ、同じ地盤であっても解くべき問題によって異なる方法で解析されてきた。有限要素法に代表される数値解析法の発展があるにも拘わらず、このような状態にあるのは、地盤材料の変形から強度までを唯一的に表せる構成モデルがなかったことによる。本研究では、研究代表者が中心となって取り組んできた構成モデルとその応用に関する研究を発展させることにより、解くべき問題や地盤によらない地盤工学の新たな体系化をはかった。

研究成果の概要(英文)：The present design methods of geotechnical problems have been still based on the classic soil mechanics described in the textbooks published by Terzaghi and Peck and by Taylor in 1948. In these methods, the ground has been assumed to be different things depending on the problems to be solved. The reason why the practical design methods have been remaining unchanged is that constitutive models which can describe the soil behavior uniquely from the deformation and failure of ground in general stress systems have not been developed, regardless that advanced numerical methods become popular. In the present research, new design system in which the deformation and failure of various geotechnical problems can be analyzed in a uniform manner is presented, by extending and developing the research on constitutive modeling and its applications.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤の変形 地盤の破壊 地盤材料の構成モデル 数値解析 モデル実験 実務設計

### 1. 研究開始当初の背景

地盤工学のベースとなる土質力学(地盤力学)は70年程前 Terzaghi によってその体系が作られた。そこでは、同じ地盤材料を解くべき問題によって、鉄と同じような弾性体、水は通すが絶対に壊れない剛体、壊れるまでは一切変形しないが壊れると無限に変形する剛塑性体というように、便宜上異なった材料として扱ってきた。つまり地盤の変形と破壊は全くの別物として扱われている。その後の発展はあるが、現在でも実務設計は基本的にこの体系で行われている。その結果、地盤工学では他の分野に比して極端に大きな安全率を用いることになる。これは、地盤が自然物であり、不均質であるからともいわれるが、例えば均質であっても同じである。一方、鋼構造に代表される上部構造では静的・動的問題を含め、変形から破壊までを同じ考え方で解析・設計し、用いる安全率はきわめて小さい。

これは一に地盤材料の変形から破壊までの材料特性を唯一的に表せる信頼性のある構成モデルが完成されていないことによる。この構成モデルが出来れば、後は少なくとも上部構造と同じやり方・同じ精度で地盤の変形と破壊の予測が出来ることになる。

一方、市販の有限要素解析プログラムの普及により、近年実務でも非線形有限要素解析が行われるようになってきたが、地盤材料の力学特性や結果に対する検証はあまりなされていない。非線形解析(例えば弾塑性解析)と言っても、構成モデルの能力によって結果は大きく異なる。そのような意味からも、信頼性のある地盤の変形・破壊予測に地盤材料の基本的な応力・ひずみ挙動を適切に表せる構成モデルは欠かせない。

### 2. 研究の目的

これまで地盤の設計では、地盤の変形と破壊は別物として扱われ、同じ地盤であっても解くべき問題によって異なる方法で解析されてきた。このような状態にあるのは、種々の地盤材料の変形から強度までを唯一的に表せる構成モデルがなかったことによる。本研究では、研究代表者が中心となって取り組んできた構成モデルとその応用に関する成果を発展させるとともに、実務の諸問題に適用し、そのメカニズムを明確にし、解くべき問題や地盤によらず同じ考え方で解ける地盤工学の体系を創ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

地盤の変形・破壊予測へのアプローチは、大別して遠心载荷実験に代表されるモデル実験による方法(Physical modeling)と数値解析による方法(Numerical modeling)になる。遠心载荷実験は、現場に近い応力状態でモデル実験を行うものであるが、相似率や地盤条件の問題を含む。一方、数値解析では、地盤材料の構成モデルの精度が問題となる。本研究

では、要素試験でその有効性と適用性を確かめた構成モデルを用いて実施した数値解析の精度を、対応するモデル実験で十分確かめた後に、実際の地盤工学の諸問題に適用した。その結果、上部構造の設計と同じ設計精度の地盤工学を構築することが可能となる。本研究の基本的な流れを図1の太い矢印で示す。

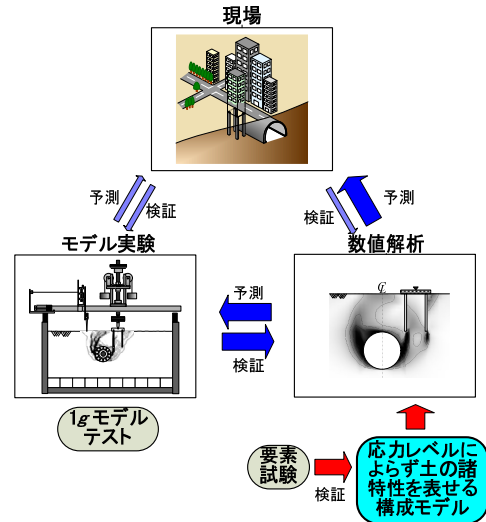


図1 地盤の変形・破壊予測へのアプローチ

### 4. 研究成果

地盤材料(正規圧密土から自然堆積土まで)の諸特性を簡単且つ適切に表現できる構成モデルを用いた応力・変形解析を通して、これまでバラバラに考えられてきた地盤工学の諸問題を基本的に同じ考え方で、変形から破壊までを統一的に説明できるようにした。同時に、その妥当性を対応するモデル実験や現場実測値で検証した。

まず、基本的な問題(トンネルおよび山留め掘削問題、擁壁土圧問題、支持力問題、補強土問題等)およびこれらの複合問題の解析とモデル実験、ならびにこれらの問題の実地盤を対象とした解析を行った。

また、動的問題に備え、構成モデルの精緻化と試験機の改良をはかった。そして、繰返し载荷要素試験実施し、改良した構成モデルの適用性を検証した。

以下に、本研究で得られた代表的な成果を示す。

#### (1) 繰返し载荷時の構成モデルの精緻化

図2は緩詰め砂の平均主応力一定条件下の両振り繰返し排水三軸試験結果(主応力比振幅  $R=3.0$ )を示す。(a)図は応力比~偏差ひずみ関係、(b)図は間隙比~応力比関係を表す。繰返し载荷によって特に逆振り载荷時に体積圧縮が起こるが、载荷回数増加に伴い偏差ひずみ、体積圧縮とも減少し最終的に定常化に至っていることが分かる。図3は等方硬化型モデルによる解析結果を示すが、密度の増加に伴う剛性の増加は見られるものの、繰返し载荷回数増加に伴う体積ひずみの定常化は表現できない。図4に回転硬化モデルに定常化のプロセスを導入し発展させたモ

デルによる解析結果を示すが、応力~ひずみ関係や体積変化の定常化を含め図2の実測値とよい対応を示す。両振りの一例しか示していないが、拡張したモデルは両振り片振りの違い、密度の違い、応力経路の違い(相異なる3主応力下)に拘わらず実測値を説明するものである。

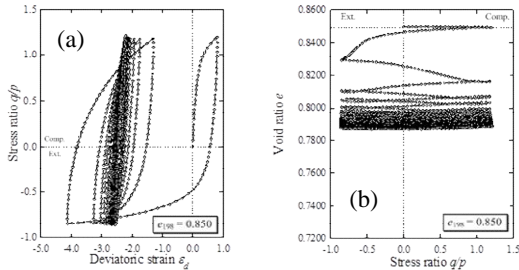


図2 緩詰め砂の両振り繰返し排水三軸試験結果

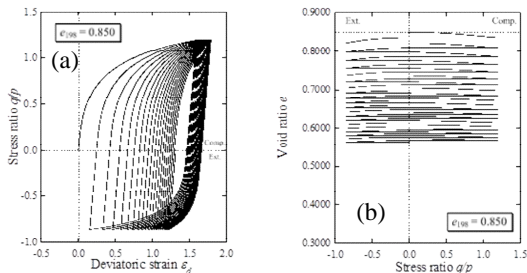


図3 等方硬化型 subloading tij model による解析結果

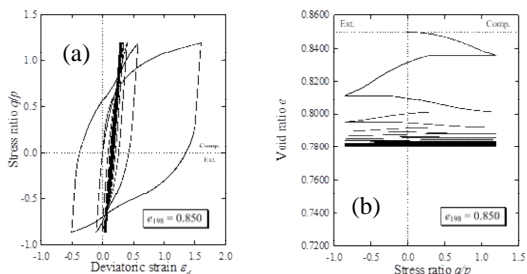


図4 ひずみの定常化を考えた回転硬化型モデルによる解析

(2) アンカー式山留め問題への適用

アンカー式山留めにおいて、最も効率的なアンカーの傾斜角を検査するため、提案構成モデルを用いた有限要素解析を行うとともに、その妥当性をモデル実験で検証した。モデル実験の概要を図5に示す。図6に壁体の変位分布を示す。ここに、Case1-A はアンカーを水平方向から 15°、Case1-B は 30°、Case1-C は 45° 方向に設置している。Case1-A や Case1-B では壁体変形のモードに明確な違いが見られず、掘削深度  $d=180\text{mm}$  までは壁体変位が抑制され、掘削深度  $d=240\text{mm}$  で地盤が崩壊することがわかる。一方 Case1-C では、掘削深度  $d=180\text{mm}$  までは Case1-A、1-B と比較して明確な違いがみられないものの、掘削深度  $d=210\text{mm}$  で壁体が大きくはらみ出している。また、図7に偏差ひずみ分布を示す。いずれのケースも 1, 2 段目のアンカー体の外側にすべり面が発生しており、その範

囲やひずみ量に明確な違いがみられないが、Case1-C では Case1-B と比較してより浅い掘削深度で偏差ひずみ量が多い領域が広がることになる。これはアンカーが軸方向のみに対して剛性を発揮するためであり、より水平に近い傾角で設置されたアンカーが水平方向の変位を抑制するのに最も効果的であると考えられる。これらの図では実験結果とともに解析結果も示しているが、いずれのケースも壁体の変形モードや実測された偏差ひずみ分布を適切に捉えており、本数値解析は山留め掘削、グラウンドアンカーおよび周辺地盤の応答を予測する有用なツールになるといえる。

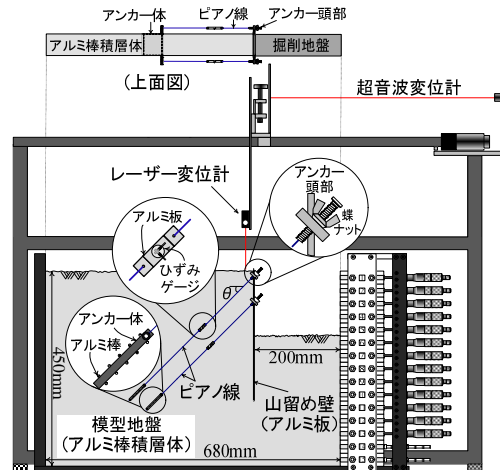


図5 2次元模型実験の概略図

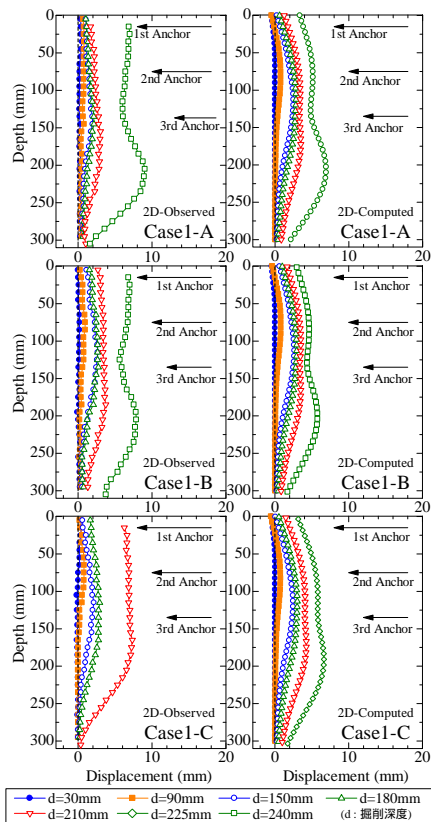


図6 壁体の変位分布 (左: 実験 右: 解析)

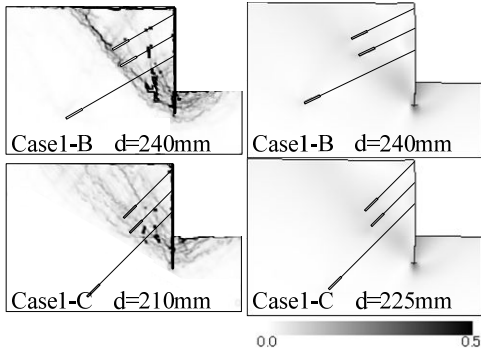


図7 偏差ひずみ分布 (左: 実験 右: 解析)

(3) 双設トンネル掘削問題

都市部でのトンネル掘削では考えなければいけない問題として双設トンネル問題がある。現在の設計では合理的にその影響を評価することが難しく、とりあえず弾性有限要素解析などで土圧や変形の許容値を求めて対処しているのが現状である。双設トンネル掘削問題についても、モデル実験と弾塑性有限要素解析を通して検討した。

図8, 9に先行トンネルの真下に後続トンネルを掘削したときの地盤内偏差ひずみ分布, 先行トンネル周面土圧変化の実験結果および解析結果を示す。図8より, 後続トンネルでも掘削時に先行トンネル同様スプリングライン下方から偏差ひずみの大きい領域が発達するが, それに加えて先行トンネルと後続トンネルの間の地盤の偏差ひずみも大きくなる。次に, 先行トンネルの周面土圧分布の変化について検討する。図9において破線は初期土圧分布( $K_0$ 土圧)を表し, 三角プロットをつないだ実線は先行トンネル掘削後の周面土圧分布を, 四角プロットをつないだ実線は後続トンネル掘削後の土圧分布を示す。先行トンネルの周面土圧は先行トンネル掘削時には単設トンネルで説明したように小さくなるが, 後続トンネルの掘削によって先行トンネルの水平方向の土圧が大きくなるのが分かる。

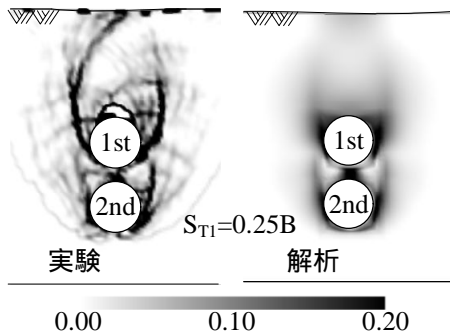


図8 地盤内偏差ひずみ分布 (左: 実験 右: 解析)

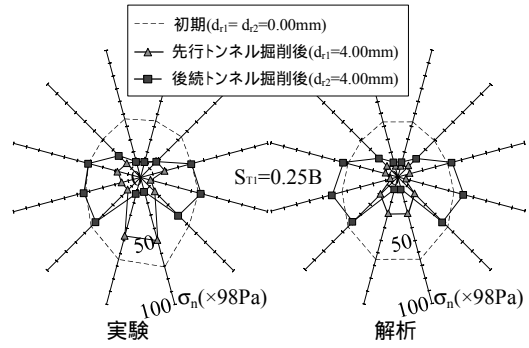


図9 地盤内偏差ひずみ分布 (左: 実験 右: 解析)

(4) 補強土の支持力問題

軟弱地盤上の地耐力を確保するために、構造物基礎直下に繊維補強材(ジオシンセティック)を敷設する補強方法がある(図10参照)。しかし、補強材の適切な設置深さや設置範囲などに関しては未だ合理的な解釈がなされておらず、その機能や効果を評価することは難しい。本研究では、これまでの研究成果(補強材長さ、補強材端部による影響)を参考に、補強材設置深度が補強効果に及ぼす影響(中心鉛直載荷), 及び偏心鉛直載荷時の挙動について、実験および解析を通して検討を行った。

図11, 12は補強材の(a)端部自由および(b)端部固定条件下におけるモデル実験および解析で得られる基礎の荷重~変位関係を表している。(a)図より端部自由では $L/B \geq 2$ でほぼ同じ補強効果が得られているが、(b)図の端部固定では $L/B=1$ で最大の補強効果が得られ、それは端部自由の場合に比べ大きいことも判る。実測値と解析結果は支持力の大きさを含めよい対応を示すことが判る。

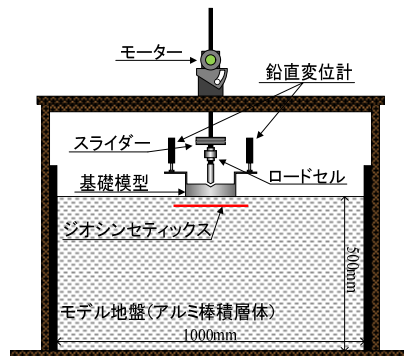


図10 補強土地盤のモデル実験

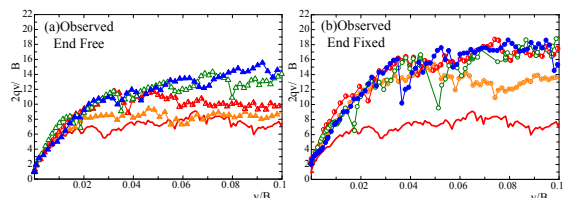


図11 中心載荷時の基礎の荷重~変位関係の実測値(左: 端部自由 右: 端部固定)

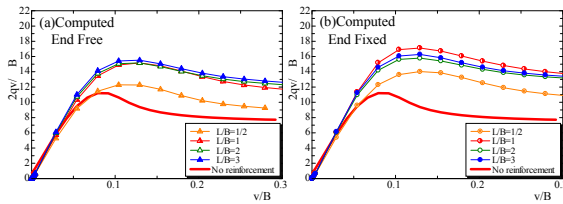


図12 中心載荷時の基礎の荷重～変位関係の解析結果(左：端部自由 右：端部固定)

### 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) Shahin H.M., Nakai T., Ishii K. Iwata T and Kuroi S. (2016): Investigation of influence of tunneling on existing building and tunnel – model tests and numerical simulations, Acta Geotechnica, (to be published), 査読有.
- 2) 磯部有作, Shahin H.M., 中井 照夫, 酒井亮佑, 吉田 泰規 (2015): 矢板による地盤の変位抑制効果 - モデル試験と数値解析による比較 - ,地盤工学ジャーナル ,10(1), 141-155, 査読有.
- 3) 中井照夫, 奥野哲夫, Shahin H.M. (2015): NATM とシールドトンネルの設計と実際 – 6. トンネルの設計における数値解析の役割, 地盤工学会誌, 講座, 63(2), 65-76. 査読無
- 4) 山田俊子, 櫻井英行, 鈴木 誠 (2015): 有限要素法を用いた浸透流解析における注水・揚水孔の実用的な簡易モデル, 土木学会論文集 C, 71(4).407-417, 査読有.
- 5) 杉山博一, 奥野哲夫, 西村和夫(2015): トンネルと地盤の境界条件を考慮した上載荷重の影響評価と算定モデルの検討, 土木学会論文集 F1, 71(1), 54-65, 審査有
- 6) 森河由紀弘, 田中雄也, 前田健一, 張鋒 (2015): 水圧消散効果に着目した地中連続排水壁による液状化対策, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol. 18), 437-I-448, 審査有
- 7) Isobe Y., Shahin H.M. and Nakai T. (2014): Effectiveness of reinforcement in embankment ground subjected to repeated shear deformation, Int. Jour. of Geotechnique, Construction Materials and Environment, 7(2), 1111-1116, 査読有.

[学会発表](計15件)

- 1) Kaya L.H., Ooi P.S.K., Nakai T., Adams M.T., Nicks A.J.E. and Shahin H.M. (2016): Numerical load testing of geosynthetic reinforced foil, Proc. of CECAR7, Honolulu(USA), 発表予定. 2016. 8. 30-9.2.
- 2) Nakai T., Shahin H.M. and Kyokawa H. (2016): New description of time-dependent behavior of geomaterials not using ordinary viscoplastic theories, Plasticity2016, Big

Island (USA), CD, 2016. 6. 29.

- 3) Isobe Y., Shahin H.M. and Nakai T. (2015): Reinforcing in embankment ground subjected to repeated shear deformation, Proc. of International Conference on Soft Ground. Singapore (Singapore). 2015. 12. 10.
- 4) Shahin H.M., Nakai T. and Kurori S. (2015): Interaction of tunneling and existing structure considering the location of foundation, Proc. of 15th Asian Regional Conf. on SMGE, 福岡国際センター(福岡県・福岡市), CD. 2015.11. 13
- 5) Nakai T., Shahin H.M., Morikawa Y., Masuda S. and Mio S. (2015): Effective reinforcing method for increasing bearing capacity with geosynthetics, Proc. of 15th Asian Regional Conf. on SMGE, 福岡国際センター(福岡県・福岡市), CD. 2015.11. 9.
- 6) Nakai T., Shahin H.M. and Kyokawa H. (2015): Simple modeling of time-dependent behavior for normally consolidated soil and structured soils, Proc. 49th US Rock Mechanics/Geomechanics, Symposium, SanFrancisco (USA), 15-716, CD. 2015. 6. 30.
- 7) Nakai T. and Shahin H.M. (2015): Meaning of  $t_{ij}$  from the viewpoint of Satake's fabric tensor, EMI2015, Stanford(USA), abstract. 2015. 6. 18.
- 8) Shahin H.M., Morikawa Y., Masuda S., Nakai T. and Mio S. (2014): Bearing capacity of reinforced sandy ground, Int. Conf. on Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics (Proc. of the 14th IACMAG), 京都国際会議場(京都府・京都市), 935-940.2014. 9. 24.
- 9) Nakai T., Shahin H.M., Kuroi S. and Iwata T. (2014): Investigation of the influence of deep tunneling on existing building, Int. Conf. on Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics (Proc. of the 14th IACMAG), 京都国際会議場(京都府・京都市), 2011-2016. 2014. 9. 22.
- 10) Shahin H.M., Nakai T., Okuda K. and Kato M. (2014): Support mechanism of anchor type retaining wall and influence of existing structure in braced excavation, Proc of Int. Symp. On Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014), Cambridge (UK), 921-926. 2014. 9. 4.
- 11) Nakai T., Shahin H.M., Hinokio M. and Kyokawa H. (2014): Why do constitutive models using (p and q) have problems?, Proc of Int. Symp. On Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014), Cambridge (UK), 683-688.2014. 9. 2.
- 12) Nakai T., Shahin H.M., Okuda K. and Kato M. (2014): Reinforcing mechanism of anchor type retaining wall – model test and numerical analysis, Proc. of the 8th

International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (TC204 ISSMGE, IS-SEOUL, 2014) Seoul(Korea), 73-78. 2014. 8.27.

- 13) Shahin H.M., Nakai T. and Kuroi S. (2014): Effect of repeated shear deformation on twin tunneling – model test and finite element analysis, Proc. of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (TC204 ISSMGE, IS-SEOUL, 2014), Seoul(Korea), 67-72. 2014. 8. 25.
- 14) Nakai T., Shahin H.M. and Kyokawa H. (2014): Simple Modeling of Time-Dependent Behavior for Structured Soils, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Hongkong (China), doi 10.1007/978-3-319-13506-9\_48, 331-338., 2014. 5. 30.
- 15) Morikawa, Y., Maeda, K. and Zhang, F.(2014): Countermeasure due to liquefaction using crushed tile, Geotechnical Special Publication of American Society of Civil Engineers (ASCE) on Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, Shanghai(China), 208-218, 2014. 5. 27.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

中井 照夫 (NAKAI, Teruo)  
中部大学・工学部・客員教授  
研究者番号：00110263

### (2)研究分担者

シャヒン ホサイン モハマド  
( SHAHIN, Hossain, Md. )  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：00516495  
(平成 25 年度～26 年度)

森河 由紀弘 ( MORIKAWA, Yukihiaro )  
名古屋工業大学・工学研究科・助教  
研究者番号：20710239

檜尾 正也 ( HINOKIO, Masaya )  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：00335093

鈴木 誠 ( SUZUKI, Makoto )  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号：90416818

杉山 博一 ( SUGIYAMA, Hirokazu )  
清水建設株式会社技術研究所・研究員  
研究者番号：50443750