

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226012

研究課題名(和文)海溝型連発大地震も視野に入れた我が国沿岸域の耐震性再評価と地盤強化技術の検討

研究課題名(英文)Reevaluation of the seismic resistance of coastal areas in the event of large-scale serial ocean trench earthquakes, with a consideration of foundation reinforcement technologies

研究代表者

野田 利弘(Noda, Toshihiro)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授

研究者番号：80262872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 61,000,000円、(間接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：日本の重要な社会資本は、沖積平野や海上埋立人工地盤といった地震被害が懸念される軟弱地盤上に多く蓄積されている。本研究では、特に沿岸域に立地する社会基盤施設を対象に、長周期成分を含み継続時間が数分にも及ぶ海溝型巨大地震が発生した際の耐震性再評価と耐震強化技術の再検討を実施した。既往の被害予測手法は地震時安定性評価に主眼が置かれ、地震後の長期継続する地盤変状を予測することはできない。「地盤に何が起こるかを教えてくれる」本解析技術による評価を既往手法と並行して実施することで、予測精度の向上とともに、被害の見落としを防ぐ役割を果たすことを示した。

研究成果の概要(英文)：Many important infrastructures in Japan are located on the soft ground, such as Alluvial plain and coastal artificial reclaimed ground where extensive seismic damages are expected to occur. This research tries to reevaluate the seismic resistance of coastal areas in the event of large-scale serial ocean trench earthquakes with a consideration of ground reinforcement technologies. Existing damage prediction methods focus primarily on seismic stability assessment during an earthquake and are inadequate to forecast ongoing long-term ground settlement which inevitably occurs after an earthquake. To use a new numerical technology to evaluate the seismic and post-seismic resistance capabilities of natural and artificial soils in systems, in parallel with the existing methods, it will be responsible not only for an accuracy enhancement but also for preventing oversight of the serious seismic damages.

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学

キーワード：地震防災 耐震性評価 地震応答解析 中間土 自然堆積地盤 人工地盤 砂の液状化 粘土の長期大沈下

## 1. 研究開始当初の背景

阪神淡路大震災以降、強振動観測網の充実等、集中的な地震研究投資が奏功して、特に我が国沿岸域における地震危険度評価は、以前に比べ格段に精密を極めてきた。しかし、これに応えるべき対地震の地盤工学は、地震学のこの急速な進歩に十分追いついてはいない。液状化解析一つを取り上げても、実用技術としては、緩い砂の非排水に近い応答に特化した構成式が中心の、微小変形解析が、もう 20 年近く主流を占めたままである。これは圧密変形や支持力など静的ないし準静的な計算地盤力学の進歩とも整合していない。だから、海溝型巨大地震の特性も視野に入れた、粘土や砂の互層からなる自然堆積地盤とその上の中間土からなる人工島・盛土など、地盤と(土)構造物システムの、地震中・地震後の全面的な地震応答解析と、これを受けた地盤強化技術は、まだむしろこれからの課題と言ってもよい。

## 2. 研究の目的

### (1) 水～土骨格連成有限変形解析の高度化と構成式研究の進展

自然堆積粘土や密度の異なる砂、そして細粒分を多く含む中間土まで、一貫して記述する弾塑性構成式を基礎に(All Soils)、変形から破壊までを(All States)、動的・静的を問わずあらゆる外力条件のもとで(All Round)、統合的に解析する新技術を確立し、あわせて三次元計算を日常のものとするべく、大容量化と計算速度の向上(並列計算等)を実現する。

### (2) 海溝型 Strong Ground Motion が及ぼす特別な効果の把握

長周期成分を含み継続時間が 2 分にも及ぶと言われる海溝型地震は、たとえ瞬間加速度が直下型より小さいとしても、予期しない地盤挙動/地震被害をもたらす可能性が高い。従来は砂質地盤の地震中挙動、つまり液状化ばかりが目目を浴びていたが、砂地盤だけでなく、細粒分を多く含む中間土の液状化や液状化後の圧密変形までの地盤挙動を把握する。また、粘性土地盤であっても、地震中の構造の劣化/破壊は十分に起こる可能性を秘めており、二次圧密と同じメカニズムで、きわめて長年月にわたる沈下や変形が地震後になって現れる危険性を指摘する。

### (3) 沿岸域重要施設の耐震性再評価と耐震強化技術の効果の再検討

名古屋港浚渫土砂埋立地(名港ポートアイランド)、上越火力人工島、羽田 D 滑走路人工島、名古屋港南五区耐震護岸、木曾川下流河川/海岸堤防、君津・戸畑地区の超重量構造物、九州電力管内の火力発電所、四日市富田地区国道一号線盛土、若狭舞鶴自動車道、第 2 東名三ヶ日地区高盛土など、特に沿岸域

を中心とした重要施設の具体事例を取り上げ、耐震性を再評価するとともに耐震強化ポイントを抽出し、耐震強化技術を再評価する。

### (4) 性能設計開発・実施における本解析技術の利用法の検討

現在、地盤構造物の設計においても性能設計の思想が導入されている。性能設計では、最終的に出来上がる構造物の要求性能は、基本的にユーザーによって決められ(少なくとも性能の明示が必要)、技術者はこれに応じて、要求性能を満足させる設計を行う必要がある。地盤構造物の性能設計を開発・実施する上で、従来の対象を決めてから対象毎に使い分ける解析技術(コレクション)では果たすことができず、「地盤に何が起こるかを教えてくれる」本解析技術でしか果たすことができない役割と位置づけを整理し、本解析技術の利用法を検討する。この際、特に沿岸域の人工地盤・土構造物の耐震設計法の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、申請者らが開発した静的・動的荷重に対応する、SYS カムクレイモデルを搭載した、有限変形・水～土骨格連成・3 次元有限要素プログラム(All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration, GEO ASIA)を用いた地震応答解析を実施している。この計算プログラムの数学/力学的な特徴を以下の 4 点に要約する。水と土骨格の 2 層混合対理論に基づいた連続式(質量保存則)を導入していること、「加速度項」がダルシー則に(自ずと)導入されていること、直接の計算対象は土骨格の運動であること、運動方程式の増分形に対して弱形式を取っており、したがって基礎方程式に直接弾塑性構成式が載ること、である。

この計算技術の地盤工学的な特徴を述べる。この計算に地盤物性として粘土のパラメータ・初期値を用いると、自動的に(二次圧密を含む)時間～圧密変形が算出される。荷重～変位に関して言えば、変形から地盤破壊まで完全に対応する。動的荷重に対する応答はもちろん粘土地盤のものが算出される。一方この計算に砂のパラメータ・初期値を導入すると、液状化・締固め・揺すり込み変形が時間軸に対して算出される。静的荷重に対しては、変形・支持力が算出される。以上のように、静的/動的を問わない点が最初の特徴である。第 2 の特徴は、砂から中間土、粘土まで材料を問わない点にある。ここでもっとも強調すべき点は、当研究で用いる計算プログラムが、既存の「液状化解析専用プログラム」とは異なり、事前の液状化判定をまったく必要としない点にある。既存の専用プログラムでは、そのプログラムを使用するのに適した砂地盤かどうかの判定(液状化判定)が事前に必要である。そして外力の強さとの

対比で、液状化するかしないかだけしか算出されない。しかしこの研究での計算では、液状化するか締め固まるかなどは、計算の結果が教えてくれるのであって、だから例えば計算機に粘土を入れれば、液状化・締め固めではなくて自動的に圧密が算出されてくる。中間土などは、圧密するか液状化が起こるか、あるいは締め固め・揺すり込み変形が起こるかは、我々が知りたいのであって、事前に判定する筋合いのものではない。だからこそ計算によって解析するのである。SYS カムクレイモデルとこの計算プログラムと組み合わせることによって、総合的な地盤解析技術になってくることがわかる。第3の特徴は、「既存の液状化専用プログラム」が液状化後、地震外力の去ったあとの地盤変形（圧密）を事実上取り扱えない点を、完全に克服していることにある。第4の特徴は、計算が地盤造成・締め固め地盤改良の過程そのものをシミュレートできるため、対象地盤の初期値・地盤プロフィールを「勝手に与える」必要のない点にある。

#### 4. 研究成果

##### (1) 弾塑性構成式の精緻化

これまでに、代表者が開発の土の弾塑性構成式 SYS カムクレイモデルは、構造・過圧密・異方性で表される土の骨格構造概念に基づいて、粘土から砂、そして両者の混在した中間土の力学挙動を統一的に説明できることを示してきた。各種土材料の繰返しせん断試験結果の詳細な観察から、鋭敏な自然堆積過圧密粘土の高い延性、中間土や砂の Cyclic Mobility や再液状化現象には構造高位化概念が必要であることを指摘するとともに、構造の発展則に新たに塑性膨張に伴う構造高位化概念を導入し、構成式の更なる精緻化を行った。

##### (2) 水～土骨格連成有限変形解析の高度化と pre-post processor の整備

OpenMP による並列化、ソースコードスキームの改良によって、計算の大容量化、高速化を行った。スーパーコンピュータを用いた計算も可能となり、大規模な三次元解析も実施している。また、解析条件の入力および解析結果の出力を支援するソフトウェアの拡張を行った。これにより、地盤の複雑なモデル化や三次元解析等、計算の大容量化と高速化に対応可能となった。

##### (3) 海溝型 Strong Ground Motion が及ぼす特別な効果の把握

軟弱な砂と粘土地盤の振動特性の把握

地盤被害を最小限にとどめるためには、地盤がどのように揺れるのが正確に把握しなければならないが、軟弱地盤と言っても、砂質土～粘性土まで稠密に存在し、振動特性は異なる。異なる地盤の振動特性を数値的に把

握することを試み、1) 粘性土地盤の固有周期は概して砂質地盤の固有周期よりも大きい。そのため、長周期帯で共振現象が生じて粘性土地盤は表層での揺れが大きくなりやすいこと、2) 工学的基盤面から上層に向かうにつれて地震動は増幅すると言われているが、地盤の状態や外力の大きさによっては、地盤の種類によらず、地震波の減衰の可能性を示した、3) 軟弱地盤における地震波の減衰は砂質土の液状化に代表されるように、土の塑性変形進展に伴う履歴減衰効果であることを示した。

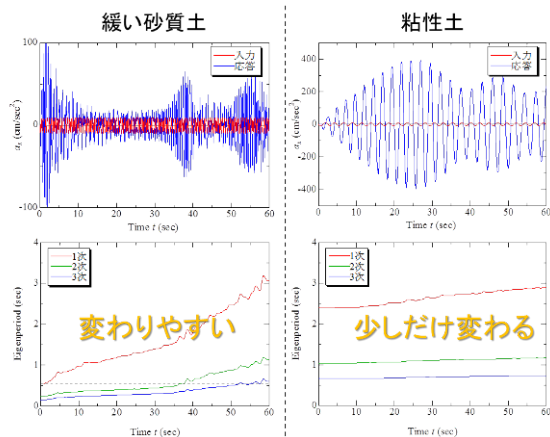


図1 規則波入力時の砂地盤と粘性土地盤の地表面加速度応答の違いと固有周期の変化

##### 軟弱粘土地盤の乱れに伴う地震被害

近年、重要な土木構造物は、軟弱な沖積地盤や海上人工島、埋立地といった人工地盤上に建設されることが多い。軟弱地盤における地震時被害という点、砂質土の液状化現象が注目されがちであるが、本研究では軟弱砂の液状化に伴う上部構造物の不安定さを指摘するだけではなく、護岸をはじめとする重量構造物直下のように、上載荷重によって大きなせん断力が作用している粘性土地盤においては、地震中に粘土層が乱されることによって地震中の沈下だけではなく、地震後の長期にわたって継続する大沈下を生じる危険性があることを指摘した。

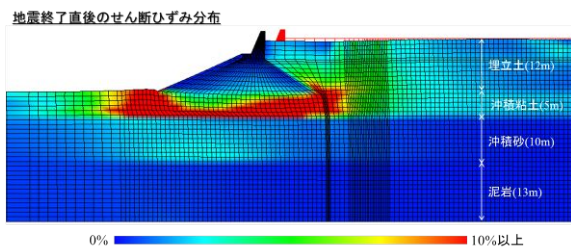


図2 地震中の軟弱粘性土の乱れが原因となって生じた護岸の側方流動 (地震終了直後のせん断ひずみ分布)

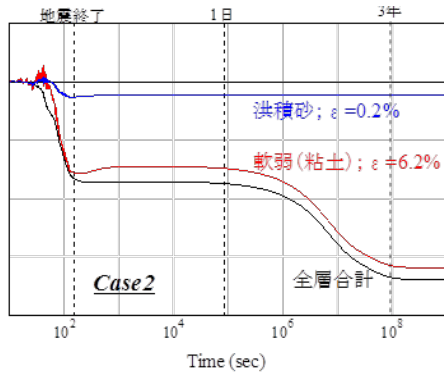


図3 地震後に発生する軟弱粘性土層の長期圧密沈下（護岸直下の層別沈下量）

深部地層構成に着目した液状化地盤の地震時安定性評価

東日本大震災で甚大な液状化被害が発生した浦安市や高速道路盛土の崩壊現場から採取した土をもとに詳細な地盤のモデル化を行うとともに、深部地盤構成や基盤傾斜の影響が表層液状化に及ぼす影響について、系統的に検討した。1) 液状化層以深に堆積する粘土層の存在が、地震波をやや長周期の範囲で増幅させ、液状化しにくい中間土であっても液状化しうることを、2) 傾斜基端部から表面波が生成されることによって主要動終了後も比較的強い揺れが継続する「後揺れ現象」が発生して液状化被害が拡大すること、3) 表面波と下部からの実体波が複雑に干渉することで均質な地盤状態を仮定しても地表面の変状が不均一化すること、等の新しい知見を示すと同時に、特に重要構造物の耐震性評価においては、弾塑性力学に基づく最新の計算地盤力学の必要性を示唆した。

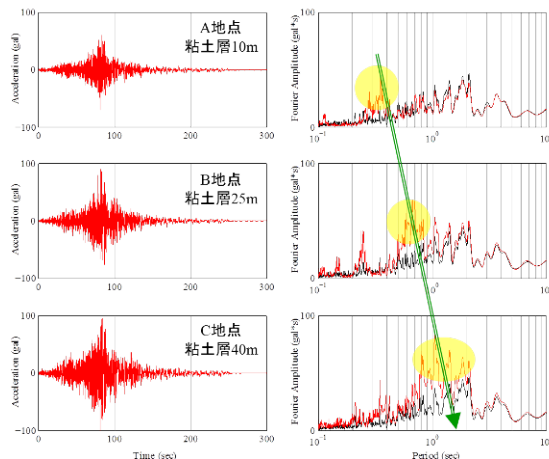


図4 深部粘土層厚増加に伴う長周期成分の増幅（粘土層通過前後での加速度応答の比較）

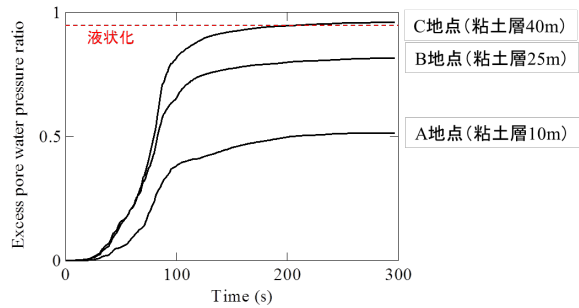


図5 深部粘性土層厚の差異による表層地盤の液状化危険度（過剰間隙水圧比関係図）

#### (4) 沿岸域重要施設の耐震性再評価と耐震強化技術の効果の再検討

産・官との連携を取りながら、沿岸域重要施設の耐震性を数値解析的に再評価した。具体事例として、名古屋港内の浚渫土砂埋立地（名港ポートアイランド）および高潮防波堤（知多堤）、羽田 D 滑走路人工島、上越火力人工島、名古屋港南五区耐震護岸、若狭・舞鶴自動車道盛土、等の耐震性を数値解析的に再評価した。地盤のモデル化では、海底地盤の掘削・埋立や盛土の施工、構造物の建設など、実際の施工履歴を有限要素メッシュ追加の手法を用いて可能な限り忠実に模擬している。こうすることによって、埋立等の大荷重によって生じる地盤の性状変化を追従することができ、自然地盤および人工地盤の複雑な弾塑性プロファイルを精密に記述することができる。以下のような成果を得た。

- 1) 直下に軟弱な沖積粘土層厚が厚く堆積する高潮防波堤は、サンドドレーン工法を用いて建設されている。サンドドレーン工法では、高潮防波堤建設時の圧密促進効果は期待できるものの、地震中～地震後の沈下量は抑制することはできない。主に粘土層が地震中に乱される影響で、地震中から地震後にかけて大沈下を生じる危険性を指摘した。
- 2) 現状の名古屋港ポートアイランドを忠実にモデル化した地震応答解析結果から、レベル1地震動では築堤は大きな崩壊はしないものの、レベル2地震動発生時には築堤が大きく滑り崩壊してしまうことを示した。浚渫土砂の仮置き場として利用されているポートアイランド埋立地盤高さは現在、海拔15mにまで達しており、築堤崩壊時には仮置き浚渫土が航路を埋めてしまい、主要国際貿易港としての機能を低下させてしまう危険性を指摘した。
- 3) 沖合の軟弱地盤上に建設された羽田 D 滑走路では、サンドコンパクションパイル工法やサンドドレーン工法によって軟弱地盤を改良したあと、管中混合固化処理工法を用いて海上空港用地を造成している。忠実なモデル化の後で、各種地震波を用いて地震時応答特性調べた結果、これら地盤改良の効果を確認することができた。

4) 耐震強化技術の効果の再検討として、砂圧入式静的締固めによる周辺地盤および近接構造物に及ぼす影響を、3次元水-土連成有限変形解析により検討した。砂圧入式静的締固め施工時の、周辺砂地盤の地表面および地中発生変位の距離に伴う減衰（距離減衰）や、近接構造物に与える地盤反力（側圧）分布は施工位置からの距離に応じて減少することなどを示した。「締固め」を原理とした地盤改良工法の周辺地盤・構造物に及ぼす影響については、事前に定量的に予測/評価することが困難であり、これまでは実績や逆解析的な手法に頼る場合がほとんどであった。本研究成果では、施工過程をできる限り再現して周辺影響を検討できるため、施工条件を解析的に照査することができることを示した。

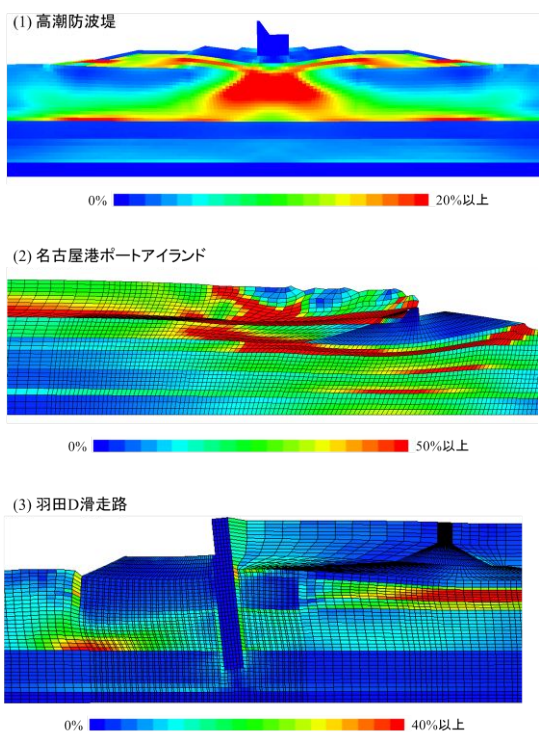


図6 沿岸域重要施設の耐震性評価と弱点箇所抽出（せん断ひずみ分布）

#### (5) 性能設計開発・実施における本解析技術の利用法の検討

既往の被害予測手法は地震時安定性評価に主眼が置かれ、地震後の長期継続する地盤変状を予測することはできない。また、粘性土層はすべて弾性体としてモデル化するため地盤変状を過小予測するだけでなく、実際の地震発生時に予測を超えた変状が発生して甚大な被害に繋がりがねない。特に重要構造物や軟弱地盤の耐震性評価の際には、既往の予測手法に加えて、本解析技術による評価も並行して実施することで、予測精度の向上とともに、被害の見落としを防ぐ役割を果たすことが可能となることを示した。

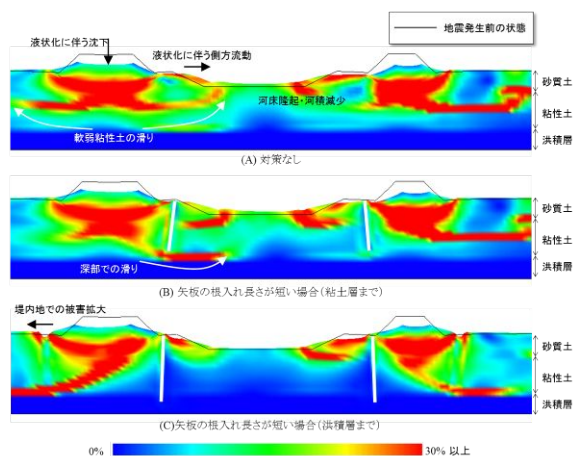


図7 軟弱地盤上に建設された河川堤防に対する矢板補強効果の検証（せん断ひずみ分布）

#### 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18件）

竹内秀克, 河村精一, 野田利弘, 浅岡顕 (2013): ゆるい砂地盤における砂圧入締固めによる周辺地盤への3次元影響評価解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.239-249, 査読あり.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/8/2/8\\_239/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/8/2/8_239/_pdf)

Takaine, T., Xu, B., Nakai, K. and Noda, T. (2012): A three-dimensional analysis of gas-governor located on a liquefiable soft ground, Proc. of 6th International Workshop on New Frontiers in Computational Geomechanics, pp.177-182, 査読あり.

Noda, T., Asaoka, A. and Takeuchi, H. (2011): Anti-seismic mechanism of a sandy ground improved by SCP method, Proc. of 14th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.1536-1541, 査読あり.

Noda, T., Asaoka, A. and Nakai, K. (2010): Modeling and seismic response analysis of a reclaimed artificial ground, ASCE Geotechnical Special Publication No.201, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp.294-299, 査読あり.

Doi: 10.1061/41102(375)36

Noda, T., Nakai, K. and Asaoka, A. (2010): Seismic response analysis of a coastal artificial reclaimed ground containing a soft layer, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.10, CD, No.012107, 査読あり.

Doi: 10.1088/1757-899X/10/1/012107

竹内秀克, 中井健太郎, 野田利弘 (2010): 部分的に固化改良したゆるい砂地盤の地震時/地震後応答解析, 応用力学論文集

Vol.13, pp.443-452, 査読あり.  
http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00561/2010/13-0443.pdf  
中井健太郎, 野田利弘 (2010): 軟弱地盤上に設置した仮設構造物の地震時安定性評価と転倒防止対策の一検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.499-510, 査読あり.  
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/5/3/5\_3\_499/\_pdf

〔学会発表〕(計 26 件)

酒井崇之, 軟弱粘土層上の巨大人工島の埋立履歴を考慮したモデル化と地震応答解析, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 5 日, 名古屋大学 (愛知県)  
福永俊樹, 軟弱な砂地盤と粘土地盤の増幅・減衰特性に関する数値解析的検討, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012 年 7 月 16 日, 八戸工業大学 (青森県)  
高稲敏浩, 液状化地盤に敷設されたトップヘビーな小規模構造物の三次元地震応答解析, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012 年 7 月 16 日, 八戸工業大学 (青森県)  
野田利弘, 軟弱地盤上の大型人工埋立地盤の地震中・地震後応答解析, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011 年 7 月 6 日, 神戸国際会議場 (兵庫県)  
竹内秀克, 砂圧入式静的締固め工による周辺影響把握のための 3 次元解析, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011 年 7 月 5 日, 神戸国際会議場 (兵庫県)  
酒井崇之, 入力地震動の周波数が傾斜地盤上の盛土の変形・破壊形態に及ぼす影響, 第 16 回計算工学講演会, 2011 年 5 月 25 日, 東京大学柏キャンパス (千葉県)  
竹内秀克, SCP 改良砂地盤の塑性膨張を伴う硬化による耐震メカニズム, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010 年 8 月 18 日, 愛媛大学 (愛媛県)  
野田利弘, 上載構造物を有する軟弱沖積粘土地盤の地震時変形挙動に及ぼす入力地震波の影響, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010 年 8 月 18 日, 愛媛大学 (愛媛県)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 利弘 (NODA, Toshihiro)  
名古屋大学・減災連携研究センター・教授  
研究者番号: 80262872

(2) 研究分担者

浅岡 顕 (ASAOKA, Akira)  
公益財団法人 地震予知総合研究振興会・  
副主席主任研究員  
研究者番号: 50093175

中野 正樹 (NAKANO, Masaki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 00252263

中井健太郎 (NAKAI, Kentaro)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60402484

(3) 連携研究者

澤田 義博 (SAWADA, Yoshihiro)  
公益財団法人 地震予知総合研究振興会・  
理事  
研究者番号: 90293662

大塚 悟 (OHTSUKA, Satoru)  
長岡科学技術大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 40194203

小高 猛司 (KODAKA, Takeshi)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00252271

高稲 敏浩 (TAKAINE, Toshihiro)  
(株)浅沼組・技術研究所・課長

山田 正太郎 (YAMADA, Shotaro)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70346815

白石 岳 (SHIRAISHI, )  
(株)IRD・代表

竹内 秀克 (TAKEUCHI, Hidekatsu)  
(株)不動テトラ・地盤事業本部・主任

河井 正 (KAWAI, Tadashi)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授

田代 むつみ (TASHIRO, Mutsumi)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 00422759

酒井 崇之 (SAKAI, Takayuki)  
名古屋大学・減災連携研究センター・研究員

河村 精一 (KOMURA, Seiichi)  
中部電力(株)・土木建築部・課長

福武 毅芳 (FUKUTAKE, Kiyoshi)  
清水建設(株)・技術研究所・地盤解析グループ長  
研究者番号: 50426590

濁川 直寛 (NIGORIKAWA, Naohiro)  
清水建設(株)・技術研究所・研究員

野中 俊宏 (NONAKA, Toshihiro)  
名古屋大学・減災連携研究センター・助教