

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246086

研究課題名(和文) 液状化した土の変形特性・流動性の評価 - 液状化研究の第2ステージへの展開 -

研究課題名(英文) Evaluation of deformation and fluidization properties of liquefied soils -
Development to the second stage liquefaction research

研究代表者

風間 基樹 (Kazama, Motoki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20261597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,800,000円

研究成果の概要(和文)：液状化過程やその後の土の変形特性や靱性を評価できる新しい要素試験方法を提案した。また、土の繰返しせん断後に収縮できる最小の間隙比を、細粒分含有率の異なる様々な土に対して実験的に検討した。その結果、細粒分を多く含む砂質土ほど圧縮性が高くなるとともに、液状化後のせん断ひずみ増大に伴う強度回復が小さいことを明らかにした。また、給排水条件下での土の変形挙動も実験的に検討した。以上は要素試験に関する成果である。室内調査法に関しては、液状化時の土のベーンせん断試験装置・ドラム式回転試験装置を開発し、土の流動性を検討した。また、限定的残留変形から脆性的破壊までを連続的に表現できる弾塑性構成モデルを検討した。

研究成果の概要(英文)：New element test being able to evaluate liquefaction process, and deformation property and ductility nature of the liquefied soils is proposed. Minimum void ratio after cyclic shear applied was studied experimentally for various soils containing the fine contents. It was made clear that the soils containing the larger amount of fines have the higher compressibility and the smaller stiffness recovery during the shearing after liquefaction. Furthermore, shear deformation property of soils under volume change condition is studied. Results described above are the results obtained from element test studies. Vane-shear testing apparatus and new drum-type fluidization testing apparatus were developed for evaluating the fluidization property as a laboratory investigation apparatus. Furthermore, elastoplastic constitutive model to represent from the limited residual deformation to brittle failure continuously was studied.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 流動性 最小間隙比 液状化試験法 流動性評価法 構成側 要素試験 間隙水の移動

1. 研究開始当初の背景

土の液状化に関する研究は 1964 年新潟地震やアラスカ地震の被害を契機に土質力学の主要な研究テーマとなり、液状化が発生するまでのメカニズムやその対策工まで一通りの第 1 ステージの研究が済んだ感がある。しかし、液状化した後の土の残留変形特性やその後の流動性については、本格的体系的な研究が行われておらず、数値解析コードでの残留変形予測結果の信頼性に大きな疑問が残されている。

阪神大震災後、設計で考慮すべき地震動のレベルが格段に大きくなるとともに、それに対応して構造物の耐震設計が性能仕様型に移行した。地盤の液状化についても同様であり、地震動を受けた地盤の液状化の発生予測に加えて、地盤-構造物系の残留変形量を予測する数値解析も普通に設計に使われるようになってきた。しかし、液状化の被害(変形量)を照査するための土の材料変形特性の解明が不十分なまま行われている数値解析コードによる予測技術の信頼性には大きな疑問が残されている。

例えば、実験では液状化に至る過程で発揮できるせん断応力は徐々に小さくなり、最後にせん断応力に抵抗できなくなる一方、せん断ひずみはその付近から一方向に急激に発達しはじめる。地盤の地震後の残留変形を支配するのは、液状化してからの土の変形挙動であって(本文では、液状化という用語を、有効応力が非常に小さくなった場合として使用する。以下同じ)、液状化に至るか否か(過剰間隙水圧が所定の値になるかどうか)が問題ではない。したがって、残留変形予測のための数値解析コードの信頼性を向上させるためには、液状化後の変形挙動を体系的に研究し、それを材料変形特性のモデル化に反映させなければならない。第 1 ステージの液状化評価である現状の応力制御型の非排水繰返しせん断試験から得られる液状化強度曲線を模擬できるだけでは、数値解析の残留変形量の信頼性は担保されない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの液状化研究のように液状化するまでの過程の研究ではなく、液状化した後の変形特性や流動性を明らかにすることにある。いわば、液状化研究の第 2 ステージへの展開を目指したものである。本研究により、液状化による被害の新たな概念の合意形成や数値解析コードから計算される液状化地盤の地震時残留変形量予測の信頼性を向上させることが期待される。

現状の液状化の研究に欠けている以下の重要課題を解決することを目的としている。

まず、液状化による変形にとって、継続時間が長い地震動は、短いものより単純に繰返し回数が多くなるだけではない。地震動の継

続時間が長くなれば、液状化してからの時間が長くなるだけでなく、間隙水の移動に伴う物性の変化や浸透破壊も同時に考慮しなければならない。仙頭らは、液状化によって生じた過剰間隙水圧の差に起因する間隙水の移動による地盤の浸透破壊機構を研究し

【Sento et al. Possibility of Post-liquefaction Flow Failure due to Seepage, J. of Geotechnical. and Geoenvironmental. Eng., ASCE, 130(7), pp.707-716, (2004).】、液状化による地盤の変形は、地震動が終息した後も進行し、残留変形予測の鍵となることを示した。これに関する材料変形特性の研究も、第 1 ステージの液状化研究の枠外の話になっているが、これを研究する。

加えて、これまで液状化と言え、低地部や臨海部埋立地に特有な現象と考えられてきたが、最近、斜面や山地地震災害でも液状化現象が大きく関わっていることが分かってきた。風間らは 2003 年三陸南地震の際に発生した築館町の流動性崩壊は、火砕流堆積物である砂質土の保水性が高いために、不飽和であっても振動時に液状化を起し、それが土砂の流動性崩壊につながる機構を明らかにした。しかし、土要素の液状化機構と流動性は似て非なるもので、例えばきれいな砂は液状化してもそれ自身が流動性を持つことはない。また、2008 年岩手・宮城内陸地震では、荒砥沢ダム上流部で巨大な地すべりが、滑り面の角度 2~5 度といった低角で発生しているが、滑り面を構成する砂岩・シルト岩互層が液状化しなければ、このような地すべりは生じなかったと考えられている。土が液状化してから流動性を保つかどうかや剛性が回復しないまま Catastrophic な崩壊につながるか否かの材料力学的判定手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 液状化した土の変形特性評価(要素試験)

液状化した後の土の材料的挙動としては、変形が限定的で有限の範囲内で収まる場合(いわゆる Cyclic Softening や Cyclic Mobility) と流動的な振舞いをして Catastrophic Failure につながるケースの二つが考えられる。これまで、両者は現象論として定性的にはその挙動が理解されている。しかし、実際にある応力状態のある粒度組成・ある密度の土に、あるせん断履歴が作用したときに、どちらの挙動を示すのかを明確に評価できる手法は存在しない。まず、この両者を明確に判定する手法を確立する。流動的で Catastrophic な破壊につながる土の材料力学的研究として

- ・ひずみ制御で土のせん断履歴を与えることによって、液状化した後(有効応力が非常に小さくなった場合)の土のせん断履歴を変化させる。逆に言えば、従来の応力制御試験で

は、原理的に液状化した後の土の変形挙動を追いかけることはできない。

・Catastrophicな破壊を対象とすることから、非常に緩い状態や拘束圧の高い領域までを対象とする。非常に緩い土骨格を再現する方法として、不飽和状態からの供試体作成や間隙水の注入を制御した実験を行う。

(2) 液状化土の流動性評価(室内試験)

斜面地震災害をも対象とした液状化研究として、崩壊や液状化によって乱された土砂の流動性を材料物性の面から定量的に示す手法を検討し、液状化後に流動性を示す土の判定手法を開発する。

(3) 液状化後の変形特性・流動性のモデル化(数値解析)

次に、その検討過程で得られた実験結果を基に、限定的な変形で収まる場合と流動破壊につながる場合の両者をシームレスに考慮できる構成モデルを検討する。また、数値解析コードの実務的利用を念頭におき、原位置試験のシミュレーションによる材料パラメータの決定を試みる。

限定的な変形からCatastrophicな破壊の両者をシームレスに考慮できる構成モデルの開発：液状化した土は大きなひずみの発達とともに、その内部構造を大きく変化させる。その過程での体積圧縮挙動の変化が残留変形の発達に重要な役割を果たす。そこで、間隙比と異方性の変化を考慮することで、除荷時の大きな体積圧縮挙動の変化を表現できるモデルを構築する。このような取り扱いによって、間隙水の出入りによる任意の体積変化を受ける場合でも、Catastrophicな破壊に至る変形特性を表現することが可能となる。

原位置試験のシミュレーションによる材料パラメータの設定：液状化ポテンシャルサウンディング(PDC)試験などではサウンディング中の過剰間隙水圧や貫入量などの連続的データが得られる。これを三次元有効応力解析により再現することで、室内試験で設定した材料パラメータとの整合性を確認する。サンプリング試料の乱れの影響を受けず、地盤の不均質も考慮した材料パラメータの設定が可能となることが期待される。

4. 研究成果

(1) 液状化した土の変形特性評価(要素試験)

①液状化後の変形特性を評価できる新しい繰返しせん断試験—非塑性細粒分を多く含む土の変形特性—

液状化に至るまでの過程や液状化後の土の靱性を評価できる新しい要素試験方法を提案した。図1は、その詳細を示したものである。試験は、液状化の可能性のある土に対して、詳細にその土の変形特性を評価するものでSTEP1から4までの4段階構成になっている。

応力振幅一定試験(STEP 1)

応力振幅一定繰返しせん断は地震力の大き

さを想定した応力比を載荷することで行う。所定のひずみに達するまでの繰返しを行う。この部分は、従来の液状化強度を求める試験と同じである。土の密度が高い場合や粘性土の場合、ある応力比では繰返し載荷を続けても過剰間隙水圧もひずみも増大しなく、一定の応力-ひずみループに収束する場合があるが、その場合は液状化しない材料と判断し、排水後実験を終了する。

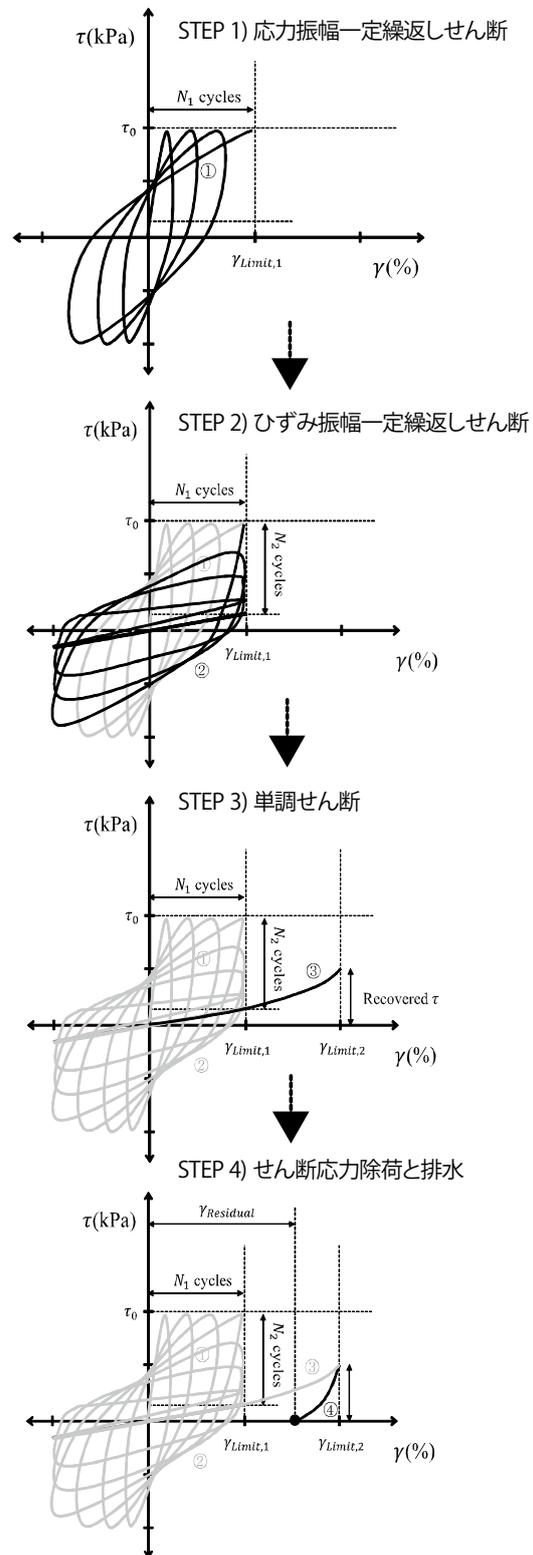


図1 提案する新しい試験方法の模式図

ひずみ振幅一定試験(STEP 2)

一定のひずみ振幅で応力-ひずみループが安定するまで繰返し载荷を行う。繰返し载荷によって応力-ひずみループが安定すると（繰返し载荷を続けても剛性が低下しない）材料の剛性が最低限まで低下したと判断し、単調せん断過程に移行する。ひずみ振幅一定試験によって、材料の繰返し载荷による剛性の低下特性（靱性）を評価できる。

単調せん断(STEP 3)

単調せん断では、繰返しせん断試験で剛性が小さくなった供試体を単調せん断させ、応力の回復特性を見る。この過程では、'せん断応力が所定の応力レベルまで回復'あるいは'せん断ひずみがあるレベルにまで達する'の2つの条件の内1つを満たすとこの過程を終了させる。液状化した土の流動特性を評価するためには、液状化後の剛性回復特性を調べる必要がある。液状化した土を単調せん断させると次第に応力が回復するので、ある地盤条件を考えた場合、流動が発生しないための所定の応力が算定できる。

せん断応力の除荷後排水(STEP 4)

水平地盤では地震が終わるとせん断応力はゼロに戻ることを考慮して、単調せん断によって発生したせん断応力をゼロに除荷する。その後排水を行うことで体積ひずみを求める。

以上の一連の実験を行うことより、1つの材料に対して液状化抵抗から、液状化後のねばり強さ、単調せん断による応力回復特性、体積圧縮特性まで求められる。結論として、その材料が液状化に至るか否か、至ったのち、限定的変形で留まるか Catastrophic な破壊に至るか否かは、STEP3の結果から図2に示したように判定できる。

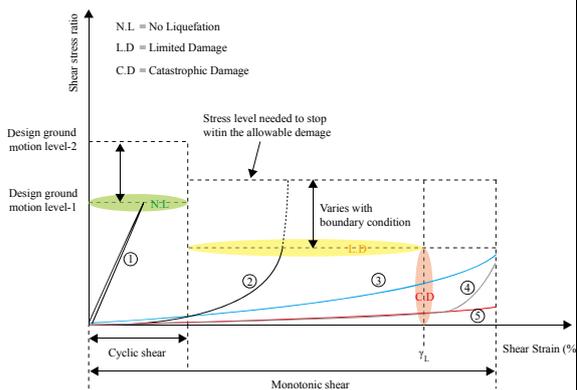


図2 液状化被害ポテンシャル評価の概念

次に、土の液状化に至る過程やその後の変形のしやすさは、その土が繰返しせん断を受けたときに現在の密度からどこまで体積収縮できるかどうかにかかっていることに着目し、その土の最小間隙比を細粒分含有率の異なる様々な土に対して実験的に研究した。独自に開発した試験装置を用いて体積収縮特性を検討するとともに、乾燥状態だけでなく水浸状態や非排水繰返しせん断後の排水

の繰返しによって詳しく検討した。

その結果、細粒分を多く含む砂質土ほど圧縮性が高く、細粒分の種類や粒子形状等に影響されることを明らかにし、新しい最小間隙比の測定法を提案した。また、液状化した土の変形特性を左右する土の密度指標について検討した。

②超緩詰め土の低拘束圧下での液状化後の変形特性試験 — 流動的で Catastrophic な破壊につながる土の材料力学的研究 —

土が液状化した後に限定的変形で留まるのかそれとも Catastrophic な破壊に至るかの境界を吟味するため、超緩詰め状態の試験体で低拘束圧下での実験を行った。その結果、細粒分を5%程度含むことで、液状化後の強度回復が小さくなることがわかった。

③間隙の再配分を考慮した液状化強度評価のための部分排水繰返しせん断試験

せん断中に体積変化（間隙水の流入流出による）を受ける土のけ変形挙動を、せん断ひずみ速度と体積ひずみ速度比をパラメータにした要素試験を行った。その結果、体積ひずみ速度が正負のそれぞれの場合で、せん断変形に及ぼす影響を明らかにした。

(2)液状化した土の流動性評価（室内実験）

①液状化時のベーンせん断試験

液状化地盤の物性変化を検討するため、高振動数の振動台を用いて振動前・液状化過程・振動後のベーンせん断試験を実施した。拘束圧の影響を吟味するため、遠心力場での実験も試みたが、残念ながら成功に至らなかった。

②回転式土砂流動試験

回転体中の底部での土砂せん断力・鉛直応力・間隙水圧の測定方法や回転速度、水密性の確保などの技術的問題をクリアした後、この試験機を用いて、様々な土砂の流動性の系統的実験を行った。開発した試験機の実験中の写真を示す。



写真1 開発したドラム式流動試験装置

(3)液状化後の変形特性・流動性のモデル化（数値解析）

①原位置シミュレーションによる材料パラメータの設定手法の研究

液状化ポテンシャルサウンディング(PDC)試験などのようにサウンディング中の過剰間隙水圧や貫入量などの連続的なデータが得られる。このデータを三次元有効応力解析により再現することで、室内試験等で設定した材料パラメータの確認を行った。原位置試験から地盤の不均質性も考慮した数値解析用材料パラメータの設定を目指す。液状化ポテンシャルサウンディング(PDC)試験と不攪乱試料サンプリングによる要素試験を比較した。

②弾塑性構成モデルの検討

限定的残留変形に留まる液状化からCatastrophicな破壊までをシームレスに表現できる弾塑性構成モデルを検討した。繰返し载荷を受けた砂は、大きなひずみの発達とともにその内部構造を大きく変化させる。最大圧縮応力軸方向への接触点の集中と直交方向の接触点の減少が起こり、除荷時に大きな体積圧縮をもたらす。これまで現象論的にこの挙動を表現する弾塑性モデルは提案されているが、内部構造の変化は適切に考慮されておらず応力空間での便宜的な取り扱いに留まっている。ここでは、接触状況を考慮した修正応力による異方性の表現に加えて、間隙の大きさも考慮して、除荷時の大きな体積圧縮挙動を表現できるモデルを構築することを試みた。

③粒子法を用いた一面せん断試験のシミュレーション

液状化過程、つまり固体から液体への変化を連続的に解析可能な粒子法(MPM)に過剰間隙水圧の発生を考慮した構成モデルを導入した。さらに、粒子法を用いた解析上の課題である計算時間を短縮するため、GPGPUを用いたコード化を実施し、FEMと同様の計算時間、入力情報により、より高精度な液状化時、後の地盤変状の評価手法によって、一面せん断試験のシミュレーションを行った。

5. 主な発表論文等

① [雑誌論文] (計8件)

- 1) 海野寿康・渦岡良介・仙頭紀明・風間基樹：不飽和砂質土の繰返しせん断変形解析における間隙空気圧のモデル化の影響，土木学会論文集C(地圏工学)，査読有，Vol.69, No.3, 386-403, 2013, 10.2208/jscejge.69.386.
- 2) 仙頭紀明，海野寿康，液状化後の体積ひずみ測定に及ぼす残留せん断ひずみの影響，地盤工学会誌，査読有，Vol.61, No.10 Ser.669, pp. 22-23, 2013.10.01.
- 3) 山口 晶，飛田善雄，猿舘裕也，奈良聡大：砂地盤の液状化後のせん断抵抗，東北学院大学工学部研究報告，査読有，第47巻，第

1・2号，pp.32-36, 2013年2月.

- 4) M. Kazama, T. Noda, T. Mori and J. Kim, Overview of the Geotechnical Damages and the Technical Problems Posed after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 査読有，Vol.43, No.2, 49-56, 2012.
- 5) Akira Yamaguchi, T. Mori, M. Kazama and N. Yoshida, Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Soils and Foundations, 査読有，Vol.52, No.5, 811-829, 2012, 10.1016/j.sandf.2012.11.005.
- 6) Motoki Kazama & T. Noda, Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake), Soils and Foundations, 査読有，Vol.52, No.5, 780-792, 2012, 10.1016/j.sandf.2012.11.003.
- 7) 風間基樹，2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題，地盤工学ジャーナル，査読有，Vol.7, No.1, pp.1-11, 2012.3, 10.3208/jgs.7.1
- 8) 若井明彦，佐藤真吾，三辻和弥，森友宏，風間基樹，古関潤一，東北地方太平洋沖地震による被害調査報告：地域別編，地盤工学ジャーナル，査読有，Vol.7, No.1, pp.79-90 2012.3, 10.3208/jgs.7.79

② [学会発表] (主なもの計16件)

他口頭発表23件

- 1) 風間基樹，河井 正，森 友宏，金鍾官，山崎智哉：東日本大震災の液状化被害に見る液状化研究の課題，第14回日本地震工学シンポジウム，2014.12.4-6，幕張メッセ(千葉県，幕張市)。
- 2) 豊田浩史，高田晋，原 忠，竹澤請一郎。液状化被害調査と室内要素試験から考える液状化特性，第14回日本地震工学シンポジウム，2014.12.4.-6，幕張メッセ(千葉県，幕張市)。
- 3) Toyota, H. and Takada, S., Variation of Liquefaction Strength during Cyclic Undrained Loading Process, Proceedings of the International Symposium on Geohazards: Science, Engineering and Management (Geohazards 2014), November 20-21, 2014. Kathmandu, Nepal.
- 4) Yoshida, N., Uzuoka, R., Ishikawa, H.: Liquefaction potential of natural deposit during and after an earthquake by effective stress analysis, Geotechnics for Catastrophic Flooding Events - Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, GEDMAR 2014, 2014.9.16-18, 京都大学宇治おうばくプラザ(京都府，宇治市)。
- 5) 金鍾官，風間基樹，河井正，森友宏，非塑性

- 細粒分を含む材料の液状化強度・被害の評価に係わる密指標の再考，地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-，2014.5.14-15，東京電機大学(東京都，足立区)。
- 6) 河井正，風間基樹，森友宏，野田利弘，種々の条件が地震時の盛土のり先周辺の残留水平変位に及ぼす影響，地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-，2014.5.14-15，東京電機大学(東京都，足立区)。
- 7) 山崎智哉，風間基樹，河井正，森友宏，金鐘官，遠心力模型実験による細粒分含有率の異なる砂の沈下特性，地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-，2014.5.14-15，東京電機大学(東京都，足立区)。
- 8) J. Kim, T. Mori, T. Kawai and M. Kazama, Effect of Non-plastic fines on post liquefaction deformation, 5th KGS-JGS Geotechnical Engineering Workshop, October 17, 2013. Seoul, Korea.
- 9) J. Kim, M. Kazama and T. Mori, Effect of Relative Density and Number of Cycles on Residual Strain characteristics after undrained Cyclic Loading, New Advances in Geotechnical Engineering, Yangping YAO, Youich WATABE and Wei Hu Editors, 2013.5. 18-19, Chengdu, China.
- 10) 仙頭紀明，嶋崎彰則，飽和砂斜面に作用する余震の影響に注目した非排水繰返しせん断試験，大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム，2013.5.17，地盤工学会(東京都，文京区)。
- 11) 金鐘官，河井正，風間基樹，森友宏，液状化被害を推定するための室内試験法の提案，大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム，2013.5.17，地盤工学会(東京都，文京区)。
- 12) 神部大樹，風間基樹，河井正，森友宏，大ひずみ・継続時間の影響を考慮できる累積損失エネルギーの液状化程度評価への活用，大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム，2013.5.17，地盤工学会(東京都，文京区)。
- 13) M. Kazama, T. Mori, T. Noda and J. Kim: Geotechnical problems in relation to the revival from the gigantic earthquake in 2011, International Workshop on Geotechnical Natural Hazards -The 5th Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall-, 2012.11.12-15 Tainan, Taiwan.
- 14) G. Seo, T. Mori, M. Kazama and K. Matsushita: Change of Dynamic Properties of Ground Before and After the Great East Japan Earthquake, International Workshop on Geotechnical Natural Hazards -The 5th Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall-, 2012.11.12-15, Tainan, Taiwan.
- 15) J. Kim, M. Kazama and T. Mori: Effect of Relative Density and Number of Cycles on Residual Strain characteristics after undrained Cyclic Loading, International Workshop on Geotechnical Natural Hazards -The 5th Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall-, 2012.11.12-15, Tainan, Taiwan.
- 16) Jongkwan KIM, Junya YOSHIDA, Tomohiro MORI and Motoki KAZAMA: Residual deformation considering pore water migration during cyclic shear, International symposium on Earthquake Engineering, JAEE, 2012.11.8, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都，渋谷区)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

風間 基樹 (KAZAMA, Motoki)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：20261597

(2) 研究分担者

飛田 善雄 (TOBITA, Yoshio)
 東北学院大学・工学部・教授
 研究者番号：40124606

山口 晶 (YAMAGUCHI, Akira)
 東北学院大学・工学部・教授
 研究者番号：30337191

中村 晋 (NAKAMURA, Susumu)
 日本大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：40307806

仙頭 紀明 (SENTO, Noriaki)
 日本大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：40333835

渦岡 良介 (UZUOKA, Ryosuke)
 徳島大学
 大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
 研究者番号：40333306

豊田 浩史 (TOYOTA, Hirofumi)
 長岡技術科学大学・工学部・准教授
 研究者番号：90272864

森田 年一 (MORITA, Toshikazu)
 群馬工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授
 研究者番号：10353236

(3) 連携研究者

海野 寿康 (UNNO, Toshiyasu)
 宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50570412