

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02263

研究課題名(和文)地盤の耐液状化性能設計法の構築とその実用化-設計地震動を超える外力への対応-

研究課題名(英文)Development of performance based design against to liquefaction and its practical application-Response to external force exceeding design seismic motion-

研究代表者

風間 基樹(Kazama, Motoki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20261597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,200,000円

研究成果の概要(和文)：地盤の地震時の液状化に対する安全性を評価する枠組みは、これまで液状化する・しないの二極的な判定が実務に使われてきた。本研究では、液状化に程度があることを認識した上で、地盤の耐液状化性能をどのように評価するかに取り組んだ。地盤の液状化被害は地震が終わった時点で残った変形量で評価できるので、地盤を構成する土の種類・密度によって、その性能がどのように評価されるかを明らかにしている。本研究成果は、液状化に対する耐性の程度を評価できるため、設計で考慮した地震動を超過した外力が作用した場合の粘り強さも評価できることになる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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り、耐震設計は性能仕様型に移行した。液状化設計においても、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技術、あるいは設計地震動を超える外力が作用した場合の液状化耐性を評価する設計手法が求められている。本研究課題では、土質材料の靱性評価や間隙水の移動による進行性破壊現象を設計に取り入れるため、特に地盤の地震後の残留変形を支配する土質物性を根本から吟味し、変形が限定的で有限の範囲内で収まる場合と流動的な振る舞いをして致命的破壊につながる場合を明確に区別判定できる手法を用いた性能設計の枠組みを提案した。

研究成果の概要(英文)：In the framework of assessing the safety against liquefaction during earthquakes, bipolar judgment of liquefaction / non-liquefaction has been used in practice so far. In this study, we recognized the degree of liquefaction and studied how to evaluate the liquefaction resistance of the ground. Since the liquefaction damage of the ground can be evaluated based on the amount of deformation remaining after the earthquake, it is clarified how the performance is evaluated depending on the type and density of the soil that composes the ground. Since the results of this research can evaluate the degree of resistance to liquefaction, it can also evaluate the toughness when an external force exceeding the ground motion considered in the seismic design.

研究分野：地盤工学、地震工学

キーワード：液状化 性能設計 流動性 液状化判定 噴砂 繰返しせん断 沈下 残留変形

## 様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

～液状化被害予測、耐液状化性能設計研究における課題の背景～

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。一方、東日本大震災の教訓は、設計で考えた外力以上のものが作用した場合でも、致命的な破壊に至らせない配慮を性能設計として、どのように設計に組み込むかということであった。

しかし、地盤の液状化に対する設計においては、二つの大震災を経ても、性能設計を目指した技術革新の動きが見えない。これは東日本大震災で高架橋の柱に代表される RC 系の構造物被害がそれほど大きくなかったのに対し、東京湾岸域の液状化被害が震動の大きさの割に非常に大きかった(図1参照)にもかかわらず、改善がないことに如実に現れている。二つの大震災を経て、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技術、あるいは設計地震動を超える外力が作用した場合の液状化耐性を評価する設計手法の開発が求められている。

申請者は、震災以前から、液状化設計では土質材料の靱性評価や間隙水の移動による進行性破壊現象の考慮などが必要であることを指摘してきた。また、東日本大震災の液状化被害を経験して現状の液状化研究に欠けている具体的視点を列挙している。また、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り、単に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や変形があるレベルまで到達するか否か)が問題ではないこと念頭に、平成 23～26 年度の科学研究費【基盤研究(A): 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 -】において、土の液状化後の残留変形予測のため、液状化後の変形挙動を体系的に研究した。その結果、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)と流動的な振る舞いをして Catastrophic failure につながる場合を明確に区別判定できる手法を提案するなどの成果を得た。この成果を使えば、図 2 に示すような液状化に関する地盤の性能設計の実用的枠組みが提案できる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、現状の液状化発生予測判定法を脱皮し、土質材料の流動性、液状化した後の変形特性や間隙水の移動を考慮した、レベル 2 地震動あるいはそれをを超えるような外力にも対応できる地盤の耐液状化性能設計法の枠組みを構築し、実用化を目指すことにある。

耐液状化性能設計においては、土質材料としての力学的性質に加えて、境界値問題としての設計の枠組みの革新も必要である。研究代表者は、【平成 13～15 年度の基盤研究(B): 間隙水の流入流出に着目した砂地盤の地震後流動メカニズムの解明】において、液状化後の間隙水の移動現象が、その後の地盤の軟化や浸透破壊をもたらすことを、実験的解析的に明らかにした。間隙水の伝播による進行性の遅れ破壊現象については、新潟地震の昭和大橋の落橋から、現象的に認識されていたものの、これに対する設計的配慮は一切ない。2011 年東日本大震災での東京湾岸地帯の大規模な液状化被害は、継続時間の長い地震動によって、震動中に間隙水の移動が生じ、非排水繰返しせん断であつたら液状化しなかった土が液状化するとともに、噴砂も大量に発生したと考えられる。一方、沈下量の評価において、噴出土砂量の予測も課題になった。すなわち、図 3 に示すように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。ここでは、これに関する性能設計の枠組みも研究する。

当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義としては、以下のことが挙げられる。

- (1) 地盤の液状化に対する性能設計の枠組みは、現状で全く手をつけられていない課題である。液状化した土はすべて大被害につながるわけではないので、上部構造物の重要性や修復性などを考慮したより柔軟性に富む設計が可能になる。
- (2) 土が持つ終局的な耐液状化靱性を評価しようとする試みは地盤耐震工学の主課題である。設計地震動を想定せず、繰返しせん断によって乱された土が示す残留変形量の最大値を定量



図 1: RC 系構造物被害に対し液状化被害は、震動の割に非常に大きかった。浦安における噴砂の様子: エイト日本技術開発

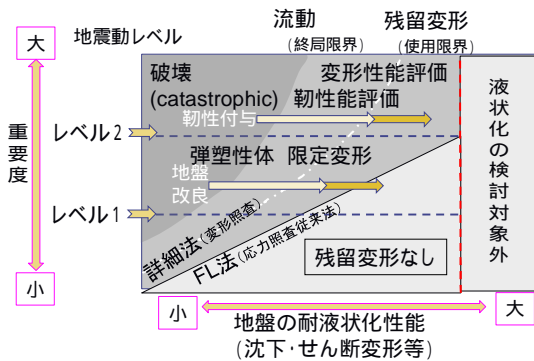


図 2 目指した耐液状化性能設計の枠組み

的にかつ系統的に調べ、限定的変形から流動や Catastrophic な破壊といった被害につながる破壊モードを明確化する。この成果は、液状化の概念の新たな合意形成や液状化対策の考え方の抜本的改善をもたらすものとなる。

### (3) 液状化の検討対象外の土質・地盤を物理指標で明確化する

現状で問題となっているシルトや礫混じり地盤のうち、検討対象にならないものが明確化されれば、詳細調査により費用と労力をかけることができ、設計技術の合理化・信頼性が向上する。ここで提案しようとしている地盤の耐液状化性能設計の枠組みは、我が国主導の液状化関連技術であり、世界に先駆けてそれをするには大きな意義がある。

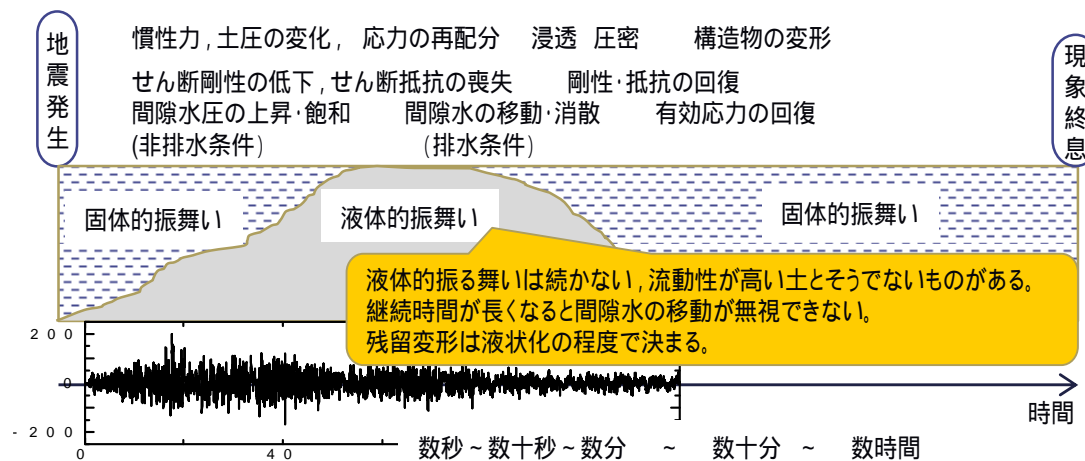


図3 液状化被害を決定づけるもの

## 3. 研究の方法

本研究が目指す耐液状化性能設計の枠組(図2)のうち、研究方法は以下の通りである。

- (1) 耐液状化に関する性能設計の枠組みを考える上で、特に設計を超える外力に対しても適用できる地盤の耐液状化性能評価を明確化する。これには、まず、東日本大震災で見られた液状化研究の課題を整理した上で、性能設計の要件について、明らかにする。
- (2) 次に、土質材料の物性評価の枠組みとして、目指すべき仕様液状化検討の対象外の土質・地盤条件の明確化のため、主に土が液状化の過程で費やすことのできる累積損失エネルギーに着目し、土の靱性能と液状化後の地盤要素の終局的な残留変形量(沈下量, 水平変形量)の関係を、要素試験や解析で評価する。
- (3) また、境界値問題としての耐液状化性能を吟味するため、排水性を考慮した遠心模型振動実験や原位置地盤調査手法による検討を行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 性能設計仕様の明確化に関する成果

- (1) 東日本大震災で発生した液状化被害とその解釈から、読み取れる現状の液状化研究の課題を取り上げた。
 

地盤の液状化予測判定法に関する課題としては、地盤材料の繰返しせん断に対する粘りの評価が必要であること、液状化被害予測の目的に合わせて液状化の評価をすべきである。

液状化による地盤の沈下量評価に関する課題としては、細粒分を含む土質で構成される地盤の沈下評価に土の排水圧縮性と噴砂量の評価に問題がある。

河川堤防の液状化被害に見る課題については、被害事例や実験結果に基づいて設計法との関連で課題を論じた。

いずれも、2011年東日本大震災の被害を現状技術の延長線上でとらえることに限界があることを示し、新たな概念に基づく液状化被害予測技術開発の必要性を示した。
- (2) 液状化被害予測技術の現状と展望をまとめた。まず、耐液状化設計の目標は地盤-基礎構造物系の耐震性照査であって、液状化現象の発生そのものを予測・判定することはない。また、地盤-構造物系のための耐液状化設計の手順を示し、現時点においても、液状化現象そのものの明確化・定量化が不十分であることを指摘した。対象とする地盤-基礎構造物系の形式や重要度(人命損失の可能性, 社会的経済的重要性, 修復の困難性等)が異なれば、その要求性能も当然異なるので、照査法も異なって良い。地盤-基礎構造物系の耐液状化性能評価の手順としては、まず START として、対象となる地盤-基礎構造物系の地震作用レベルごとの性能仕様を明確化した上で、被害の予測・判定は、被害の可能性の有無を判定する簡易判定(一次スクリーニング)と、そこで「液状化の可能性あり」と判定された場合にさらに行う詳細な被害程度評価(二次詳細照査)の二段階に分けることを提案した。
- (3) 地盤の詳細な液状化の予測判定を行う場合、原位置からのサンプリング試料を用いて非排水

繰返し試験によって土の液状化特性が評価されるが、原地盤そのものに不均質性、サンプリング時の乱れ、要素試験法自身の問題などのため、得られる液状化強度曲線には一定の不確実性がある。土木研究所が実施した原位置試料による室内試験結果から液状化強度曲線の信頼性を検討し、液状化強度曲線に含まれるばらつきの原因の傾向を明らかにし、液状化の程度をエネルギー的観点で評価することの優位性を示した(図4)。

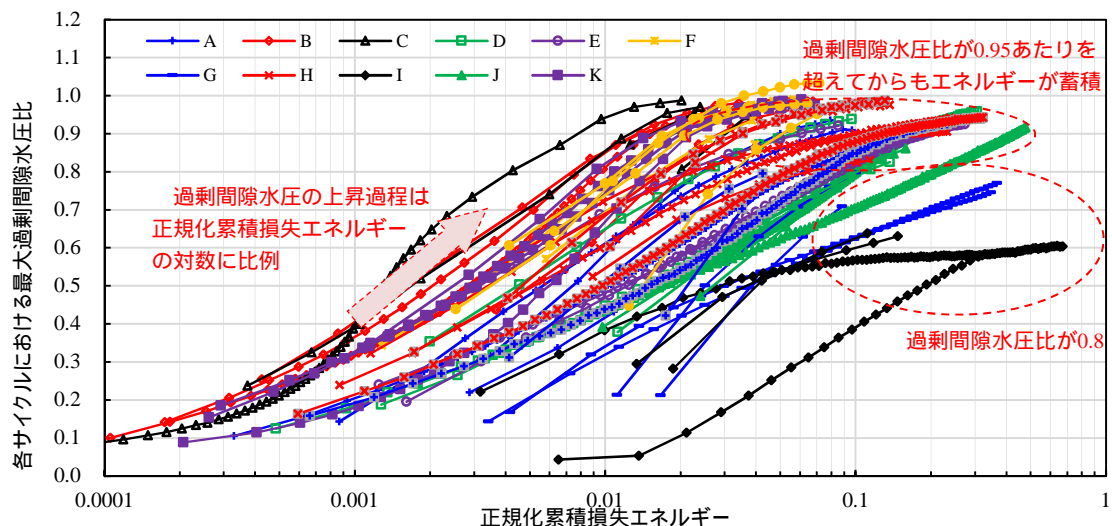


図4 応力比一定試験の正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係

#### 4.2 土質の靱性能の評価方法に関する成果

(1) 最小間隙比は、土の収縮特性や密度が最も高い状態を示すために広く使用されている指標である。従来の試験方法で得られた最小間隙比は、細粒分FC5%以下という制限に縛られずFCに関係なく土の密度を表すために利用されてきた。本研究では、打撃回数、間隙水、およびそれらの主要な特性の影響を考慮して、細粒分を含む土への最小間隙比の適用性を自動締め固め装置で調べた。細粒分FCが多い土では、規定の打撃回数では不十分であることを確認すると同時に、間隙水の存在はFCを含む土の最小間隙比に大きな影響を与えることを明らかにした(図5)。

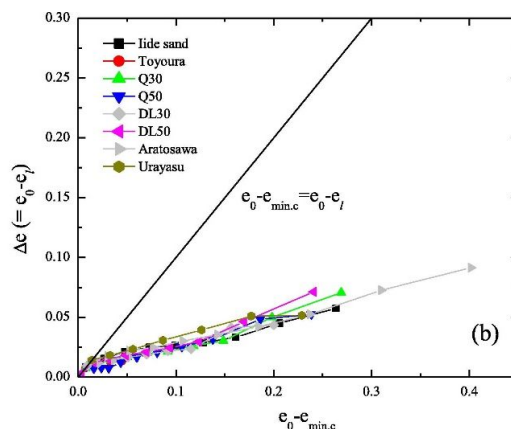


図5 Variation in void ratio during the cyclic liquefaction and drainage test against difference in initial void ratio and cyclic minimum void ratio.

(2) 地震により液状化が発生すると地盤の残留変形により土構造物に被害が生じる。地盤の残留変形には側方(水平)変位と沈下があるが、両者が相互に及ぼす影響、具体的には沈下に及ぼす側方変位の影響を実験的に研究した。本研究では、きれいな砂を対象として、中空ねじり試験装置を用いて液状化試験を実施し、試験後にせん断ひずみを調整して与えてから排水して再圧密試験を実施した。その結果、再圧密体積ひずみは残留せん断ひずみが大きくなるほど小さくなり、緩い砂では最大で約2割、密な砂では約5割減少することがわかった。これは、再圧密による体積収縮が、残留せん断ひずみに伴う正のダイレイタンスで相殺されたものと考えられる(図6)。

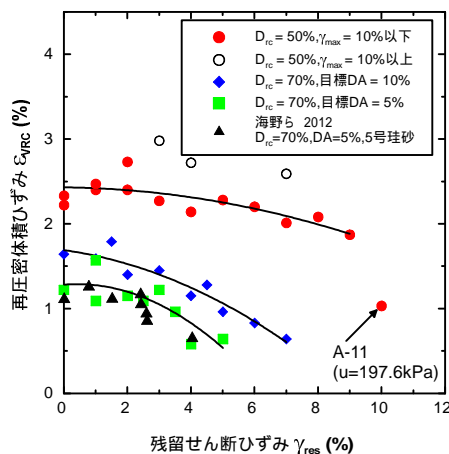


図6 再圧密体積歪と残留せん断歪の関係

以上の他、地盤材料の靱性能に関して、三軸繰返し荷重作用時の砂や各種改良しらす土の挙動

を累積損失エネルギーで評価した研究、水分状態を変化させた不飽和土の繰返しせん断変形特性に関して成果を得ている。

#### 4.3 境界値問題、土質調査法に関する成果

- (1) 液状化後の沈下量には、A:排水（一般の噴砂）による土骨格の圧縮と、B:噴砂（移動）による質量の減少が関わっているものと推測し、後者（B）に係わる検討を実施した。噴砂（移動）が生じるためには、過剰間隙水圧が蓄積した状態が長時間続くこと（せん断変形に対する抵抗力がない状態が長く続き大きく変形すること）が必要であるため、微小抵抗領域の大きさと噴砂量を関係づけた。また、それは現在の間隙比と真の最小間隙比の差とも関係しており、その間隙比の差から噴砂量を予測できる可能性を小模型実験で確認した。
- (2) コーン貫入試験(CP)結果は、一般に直接的に強度定数と関係づけられることが多いが、実際には、CP という現象は境界値問題であり、境界条件（例えば対象層の上下の層の特性、排水境界）が異なれば同じ強度定数であっても、異なる貫入抵抗値が得られる。数値解析（GEOASIA）によって貫入現象の計算を実施し、土のダイレイタンス特性等がどのように抵抗値に影響するか三層地盤への貫入シミュレーションで検討した。同じ応力・ひずみ関係であっても、ダイレイタンス特性の相違によって大きく貫入抵抗が異なることを確認した。

- (3) 密な砂の液状化後の変形量評価手法の構築は、重要構造物の性能評価にとって重要である。その場合、非常に小さな変形範囲の予測精度というよりも、大きな変形が生じた場合に、それが局所化して、例えば斜面の場合はすべり面などが形成される可能性が無いか？（滑らない場合は、水平変位は大きくとも、小さな沈下量で許容値を満足できることなどが想定される）などの検討も必要である。しかし、室内試験でそのような液状化後の挙動を実験した場合、小さな供試体の初期の不均質さや実験方法による境界条件の影響で、現実では生じない局所化（せん断面）が発生する可能性も考えられる。そこで、大変形まで小さな抵抗力で変形可能なせん断土槽を作製し(図 7)、要素試験的に振動台実験を行った。水平成層地盤のサイクリックモビリティ時の挙動と室内試験におけるサイクリックモビリティの挙動との対応関係を確認した結果、せん断土槽で実験した場合、ある程度以上に高密度になると、鉛直方向の応答モードが変わり、変位・ひずみの上限値のようなものが存在する可能性が示された。



図 7 大変形せん断土層

- (4) シルト層を有する傾斜地盤の液状化現象を対象に、透水性の低いシルト層と下部の砂層の境界部における過剰間隙水圧の再分配に着目して、加振後の側方流動に対する定量的な評価を試みた。砂 - シルト傾斜地盤に対する遠心模型実験より、過剰間隙水圧の再分配による間隙流体の停滞と、加振後における時間遅れを伴うシルト層の側方流動の発生が確認された(図 8, 9)。また、シルト層の細粒分含有率が加振後の側方流動変位に及ぼす影響を評価するため、細粒分含有率の異なるケースの応答を比較したところ、細粒分含有率が最小のケースで側方流動変位が最大となる結果が得られた。その要因としては、液状化した砂層から流入する間隙流体によって、シルト層の非排水せん断強度が低下するが、その値がシルト層の細粒分含有率で異なることが考えられた。

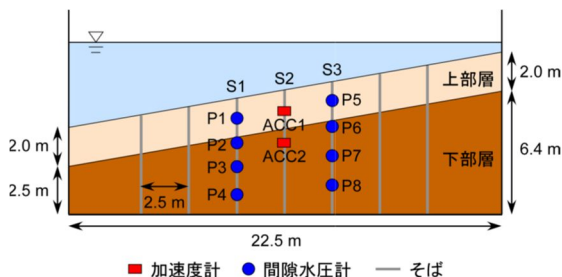


図 8 遠心模型実験における傾斜二層地盤、下部層は珪砂、上部層は細粒分を含む

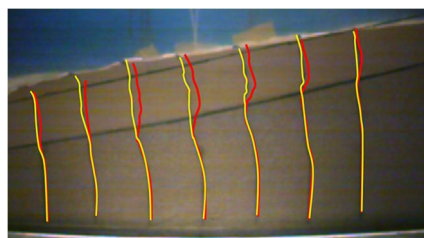


図 9 加振直後(赤線)と200秒経過後(黄線)の地盤変形、時間遅れを伴う側方流動が発生

成果の詳細は、関係の論文を参照されたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Kim Jongkwan, Kawai Tadashi, Kazama Motoki	4. 巻 59
2. 論文標題 Minimum void ratio characteristic of soils containing non-plastic fines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1772 ~ 1786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2019.08.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 TAMAIZUMI Satoshi, UEDA Kyohei, UZUOKA Ryosuke	4. 巻 75
2. 論文標題 LATERAL FLOW OF AN INCLINED GROUND COMPOSED OF SAND AND SILT LAYERS, FOCUSING ON THE REDISTRIBUTION OF EXCESS PORE WATER PRESSURE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_316 ~ I_325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.75.I_316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 UNNO Toshiyasu, MIDORIKAWA Yusuke	4. 巻 19
2. 論文標題 Cyclic Shear Behavior of Unsaturated Soil with Varying Pore Water and Pore Air Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 5_170 ~ 5_183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.19.5_170	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 YAMAGUCHI Teruhiro, KAMURA Akiyoshi, KIM Jongkwan, KAZAMA Motoki	4. 巻 19
2. 論文標題 Variation and Reliability of Undrained Triaxial Shear Test using In-situ Soil Specimens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 5_77 ~ 5_87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.19.5_77	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SENTO Noriaki、GOTO Naonori	4. 巻 19
2. 論文標題 Relation between Residual Shear Strain Following Liquefaction and Reconsolidated Volumetric Strain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 5_88 ~ 5_95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.19.5_88	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 清原 雄康	4. 巻 15
2. 論文標題 三軸繰返し荷重作用時の砂や各種改良しらす土の挙動と基準化累積損失エネルギーによる評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 15 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.15.15	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jongkwan Kim, Tadashi Kawai and Motoki Kazama	4. 巻 57
2. 論文標題 Laboratory testing procedure to assess post-liquefaction deformation potential	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 905-919
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.12.323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 清原雄康	4. 巻 12
2. 論文標題 セメント改良と突固めによる二戸しらすの液状化強度向上効果と土水連成コードによる挙動予測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 235-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.12.235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 風間基樹	4. 巻 64
2. 論文標題 液状化の判定と地盤 - 基礎地盤構造物系の液状化被害予測技術の現状と展	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 6-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清原雄康	4. 巻 72
2. 論文標題 飽和・不飽和二戸しらすの液状化強度および変形特性試験	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 196-203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.72.196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 風間基樹, 河井 正, 森 友宏, 金 鍾官, 山崎 智哉	4. 巻 15
2. 論文標題 東日本大震災の液状化被害に見る液状化研究の課題	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 49-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.15.7_49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計74件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河井 正  (kawai tadashi)  (10371436)	東北大学・工学研究科・准教授    (11301)	



## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清原 雄康 (kiyohara yukoh)  (20369911)	八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授  (51101)	
研究分担者	山口 晶 (yamaguchi akira)  (30337191)	東北学院大学・工学部・教授  (31302)	
研究分担者	渦岡 良介 (uzuoka ryousuke)  (40333306)	京都大学・防災研究所・教授  (14301)	
研究分担者	仙頭 紀明 (sento noriaki)  (40333835)	日本大学・工学部・准教授  (32665)	
研究分担者	森 友宏 (mori tomohiro)  (40552394)	前橋工科大学・工学部・准教授  (22303)	
研究分担者	海野 寿康 (unno toshiyasu)  (50570412)	宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授  (12201)	
研究分担者	加村 晃良 (kamura akiyoshi)  (80761387)	東北大学・工学研究科・助教  (11301)	