

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06028

研究課題名(和文)土材料の地震時の真の圧縮性を反映した密度指標による液状化被害ポテンシャル評価

研究課題名(英文)Liquefaction damage potential evaluation based on density index considering the genuine compressibility of soil material during the earthquake

研究代表者

金 鍾官 (Kim, Jongkwan)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90757733

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では土材料の地震時の真の圧縮性(ここでは繰返し最小間隙比と定義)を反映した密度指標(余裕間隙比)による液状化評価について研究を行った。まず、より簡便に繰返し最小間隙比を求めるために小型繰返しせん断装置を製作し、様々な土に対して繰返し最小間隙比をより簡便に求められる方法確立した。また、繰返し余裕間隙比(現在の間隙比と繰返し最小間隙比の差)を密度指標とした液状化強度評価の可能性を試みた結果、従来の指標ではできなかった、砂から中間度まで資料の種類に関係なく一つの指標で液状化評価ができることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, liquefaction assessment based on a new density index considering the genuine compressibility, namely cyclic minimum void ratio, of soil material during the earthquake was performed. First, a simplified cyclic shear box was developed to make easy to obtain the cyclic minimum void ratio acquired from the repetition of liquefaction and drainage, and a simple procedure for cyclic minimum void ratio was established. In addition, liquefaction resistance was evaluated based on the margin of void ratio which obtained from the cyclic minimum void ratio has been tried. The results showed the possibility of the simple estimation of liquefaction resistance using the margin of void ratio as a density index, and it was also found that the density index can be applied to the materials from sand to intermediate soil regardless of the type of material.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 最小間隙比

1. 研究開始当初の背景

2011年発生した東日本大震災の際、千葉県浦安市では広範囲に及ぶ液状化が発生、大量の噴砂、液状化被害が生じた。液状化被害が発生した地域の土には細粒分が50%以上含まれていることが特徴であった。過去の地震でも細粒分が多く含まれている地盤の液状化報告もあり、細粒分を含んだ土の液状化に関する研究は行われてきた。しかし、液状化への細粒分の影響に関する研究を比べると、液状化強度に及ぼす細粒分含有率の影響が研究者ごとに異なる結果を示し、定言がない。これは、研究者によって用いる試料が異なった理由もあるが、用いる密度指標が適切ではないことが原因の一つとして考えられる。細粒分含有率が液状化後の変形量に及ぼす影響について、相対密度、乾燥密度、骨格間隙比、余裕間隙比を用いて検討した結果、密度指標によって結果が大幅に変わることは良く知られている。土の挙動は土固有の性質だけではなく、現在の状態や境界条件に大きく依存する。これを表す密度指標は液状化強度及び液状化後の被害を評価するために重要である。土の密度を表す指標としては色々あるが、現在の土が最大間隙比と最小間隙比のどこにいるかを表す相対密度が一番幅広く使われている。しかし、最大・最小間隙比を求める現行の方法は細粒分含有率5%以下の試料に限られているにも関わらず、細粒分を多く含む土に対しても拡大適用されているため、その適用性に疑問があり、土から中間土まで適用できる密度指標がないことは細粒分を研究するにあたって大きな障害となっている。

2. 研究の目的

地震による地盤の液状化は建物やインフラに被害を及ぼす一つの大きな原因であり、1964年新潟地震以来活発な研究がなされ、その評価法まで提案されている。しかし、2011カンタベリー地震や東日本大震災のように細粒分を多く含む地盤に対しては適切な評価ができてない。これは、これまでの評価法がきれいな砂の試験結果を基に構築され、細粒分の影響を詳細に検討しないまま拡大適用しているのが原因である。特に、細粒分が液状化強度やその後の被害に及ぼす影響を検討することにあたって、砂から中間土まで適用できる密度指標がないことは細粒分研究において大きな障害である。

本申請研究の目的は、まず現状の密度指標から脱皮し、土の地震時の真の圧縮特性に基づいた新しい密度指標を提案する。さらにその指標の土材料の液状化強度及び液状化被害ポテンシャル評価への適用及び実証することである。

3. 研究の方法

土の挙動は粒度分布、細粒分含有率、粒子形状、鉱物などの物理特性と土の状態に大きく依存する。土の状態というのは現在の土がどの状態にあるか、つまり密か緩いかを示すことである。密度指標は液状化強度・被害を評価するに当たってとても大事なパラメーターであり、その重要性は言うまでもない。

しかし、一般的に用いられている最大・最小間隙比(JIS 1224)はその適用範囲が従来の研究対象であった砂に限られており、一般的に細粒分を含んでいる実地盤の試料を対象にした場合、実際の挙動を正確に評価することが困難である。

最小間隙比は打撃エネルギーや試料の状態によって変化する。また、最小間隙比試験によって求めた最小間隙比が実地盤のどの状態に相当するかが不明である。そこで、液状化によって形成できる一番密な状態を想定し、液状化と排水を繰り返すことで求まる最小間隙比を繰り返し最小間隙比と定義した。本研究では中空ねじりせん断試験機を用いて、液状化と排水を繰り返し、繰り返し最小間隙比を求めた。図1は繰り返し液状化と排水試験の例を示す。一定ひずみ振幅で繰り返し载荷を行い、剛性が最低限になると排水を行うという一連の過程を液状化が発生しなくなるまで行った。図2(a)は異なるひずみ振幅、拘束圧、初期密度でのきれいな砂の試験結果を示す。結果をみると、繰り返しせん断中のひずみ振幅、拘束圧、初期密度が異なってもほぼ同じ値を示していることから、ひずみ振幅と拘束圧は繰り返し最小間隙比に大きな影響を及ぼさないと考えられる。図2(b)は異なる初期密度でのきれいな砂、浦安土、荒砥沢土の試験結果を示す。細粒分を多く含む浦安土と荒砥沢土の場合、多少差はあるものの、材料の違いによる差よりは小さいことから、ばらつきとしてみなせる。この結果より、初期密度、拘束圧、ひずみ振幅の大きさが繰り返し最小間隙比に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図3は乾燥状態で求めた最小間隙比と繰り返し液状化と排水によって求めた繰り返し最小間隙比を示す。細粒分を含む土の乾燥最大密度(最小間隙比)は繰り返し最大密度に比べ、過小評価されることが分かる。しかし、きれいな砂は乾燥状態で求めた最小間隙比が繰り返し最小間隙比とほぼ差がないことから、現行の最小間隙比試験法はきれいな砂だけに適していると言える。しかし、中空ねじりせん断試験機を用いる場合は、正確なデータ測定は可能であるものの、1試料に所要する時間がかかり長く(最大10日ほど)、多様な資料に対する試験が困難である。また、繰り返し载荷と排水を繰り返しことによって供試体の形状の変状が発生する問題が挙げられる。そこで、本研究では、簡易繰り返しせん断装置を製作した(図4)。制作した装置は小型せん断土層、エアバック、载荷用モーターで構成されており、エアバックを用いることで拘束圧を加えた状態で载荷することができる。また、せ

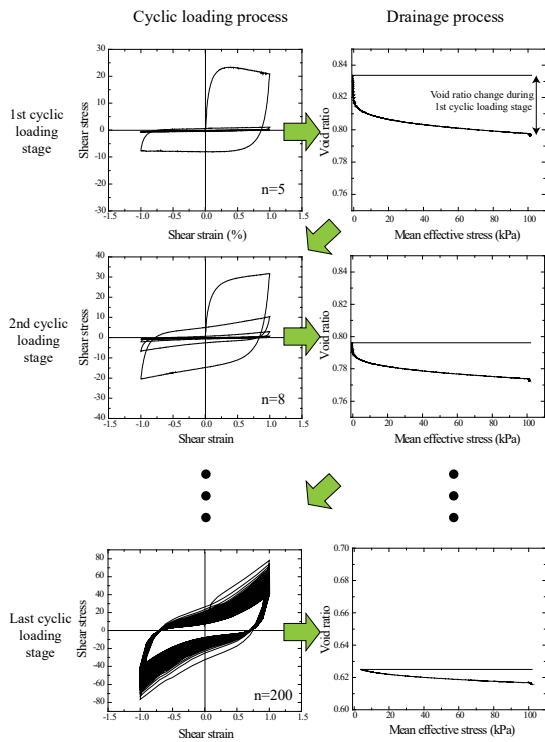


図 1 繰返し液状化と排水試験の例

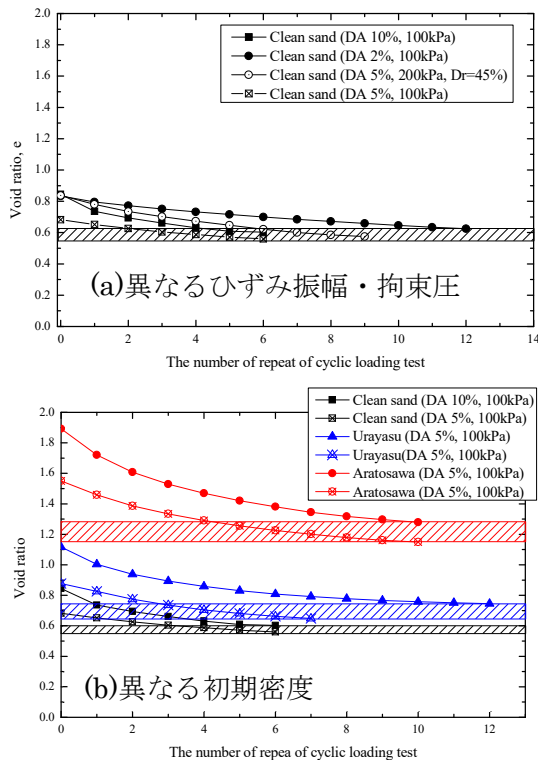


図 2 異なる条件での繰返し最小間隙比

ん断土層の下部に設置されているモーターにより繰返し载荷や下部のバルブより排水を行うことができる装置である。

4. 研究成果

4. (1) 繰返しせん断時の排水条件の影響

繰返しせん断時の排水条件の違いが $e_{min.cyclic}$ に与える影響を検討するため、非排

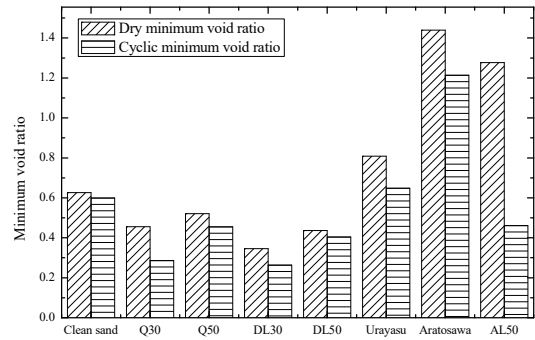


図 3 乾燥最小間隙比と繰返し最小間隙比

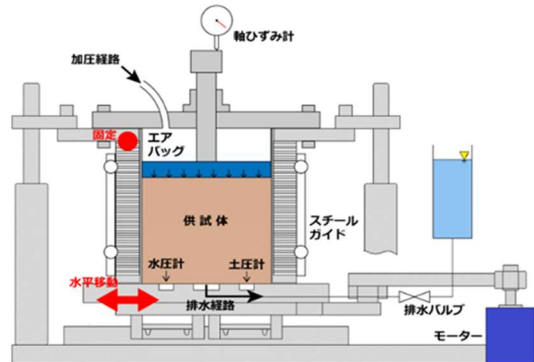


図 4 繰返しせん断による最小間隙比試験装置

水繰返しせん断-排水によって求めた $e_{min.cyclic}$ と、排水繰返しせん断によって求めた $e_{min.cyclic}$ を比較した。本実験は、脱気水と試料を混合したスラリー状の供試体を、上載圧 50kPa で圧密排水したのち、排水繰返しせん断または非排水繰返しせん断-排水を繰り返すことにより、沈下がほとんど見られなくなった時点で試験終了とした。供試体は、飯豊珪砂 7 号(きれいな砂)と、飯豊珪砂 7 号に石英粉を質量比 30% 混合した Q30 の 2 種類の試料を用いて作成した。これらの物性値を表 1 に、試験結果を図 5 に示す。排水条件の違いにかかわらず、非排水繰返しせん断-排水によって得られた $e_{min.cyclic}$ (非排水) は、排水繰返しせん断によって得られた $e_{min.cyclic}$ (排水) と、いずれの砂においても同程度の値となった。

表 1 珪砂と Q30 の物性値

試料	ρ (g/cm ³)	$e_{max,JIS}$	$e_{min,JIS}$
珪砂	2.69	1.015	0.626
Q30	2.705	1.20	0.465

4. (2) 繰返しせん断時の上載圧の影響

次に、繰返しせん断時の上載圧の違いが $e_{min.cyclic}$ に与える影響を検討するため、上載圧を 10kPa, 30kPa, 50kPa に設定し、実験を行った。実験は排水繰返しせん断により行い、

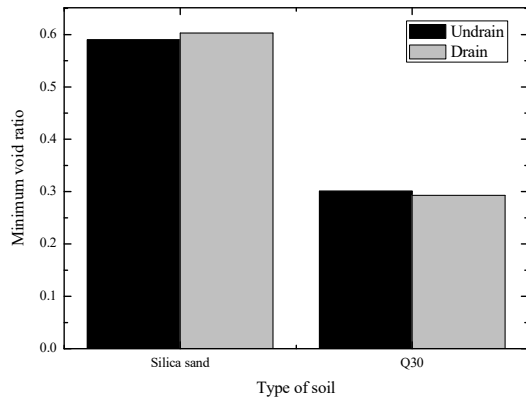


図 5 排水条件による影響

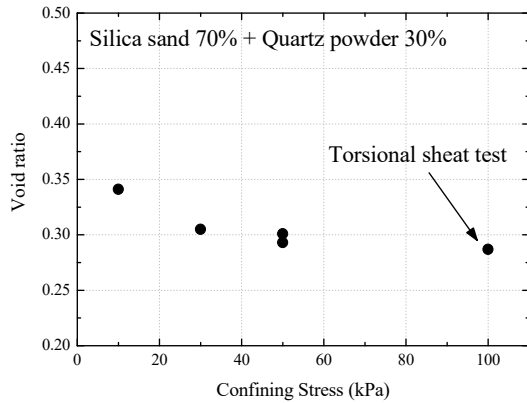


図 6 上載圧による影響

試料には Q30 を用いた。図 6 に本実験の結果を示す。 $e_{min.cyclic}$ は上載圧の増加に伴い減少し、一定の値に収束する傾向がみられた。この結果より、今回の実験で用いた上載圧 50kPa は繰返し最小間隙比を求めるにおいて妥当であったといえる。

4. (3) 様々な粒度分布をもつ砂の最小間隙比

以上で検討した $e_{min.cyclic}$ の求め方を踏まえて、さまざまな粒度分布を持つ砂の最小間隙比試験を行った。用いた試料と試験結果を表 2 に示す。試験時の上載圧はすべて 50kPa とし、繰返しせん断時の排水条件は、浦安及び荒戸沢は非排水繰返しせん断、その他の試料は排水繰返しせん断とした。用いた資料の粒径加積曲線を図 7 に示す。続いて、それぞれの試料の細粒分含有率に対する、本試験で得

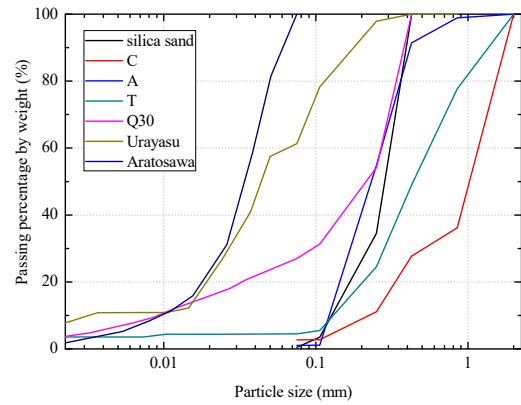


図 7 種々の砂の粒径加積曲線

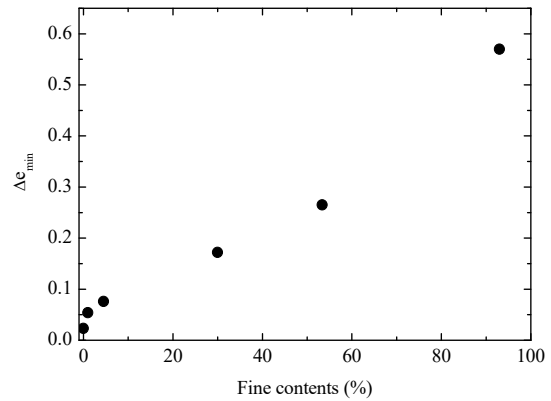


図 8 Δe_{min} と細粒分含有率の関係

られた最小間隙比 ($e_{min.cyclic}$) と JIS 法で得られた最小間隙比 ($e_{min.JIS}$) の差分 ($\Delta e_{min} = e_{min.JIS} - e_{min.cyclic}$) の関係を図 8 に示す。細粒分含有率が小さい砂と比較して、細粒分含有率が大きい砂は、 Δe_{min} が大きくなっている。この結果は、細粒分含有率が大きいほど、JIS 法が最小間隙比をより過大評価してしまうことを示している。新しいせん断装置を用いた結果は従来中空ねじりせん断試験を用いて行った結果と比べると、細粒分含有率の大きい浦安土 (FC=53%) と荒戸沢土 (FC=90%) で大きな差を表した。新しいせん断装置を用いた場合、従来の結果より小さい最小間隙比が得られている。これは、中空ねじり試験の場合、液状化と排水を繰返しことによって供試体の要素性が失われて、供試体が全体的にせん断されるのではなく、局所的にせん断されたため

表 2 様々な砂の $e_{min.cyclic}$

試料	FC (%)	$e_{min.cyclic}$	$e_{min.JIS}$
珪砂	0.0	0.603	0.626
C	2.7	0.606	0.563
A	1.0	0.832	0.886
T	4.5	0.441	0.517
Q30	30.0	0.293	0.465
浦安	53.4	0.615	0.880
荒砥沢	93.0	0.940	1.510

であると思われる。新しい装置はその影響が小さく、かつモデルの大きさが大きいと、誤差の少ない実験ができることもメリットである。今後は試料の種類をもっと増やすことにより、簡便に予測できる手法の提案できると期待される。

4. (4) 最小間隙比における液状化強度

一般的に、密度の大きい地盤の液状化強度は大きいということが知られている。しかし、最も密な状態の土に対して、どの程度の液状化強度を期待できるのかは明らかにされていない。そこで、非常に密な状態における砂質土地盤の液状化強度評価のための基礎的研究として、可能な限り密な状態にした様々な砂質土供試体に対し、非排水繰返し三軸試験を実施した。

ここで重要となるのが、試験時の供試体がどの程度密な状態であるかを把握することである。地盤の密度評価指標のひとつに余裕間隙比があり、以下の式によって定義できる。

$$e_f = e - e_{min}$$

ここで、 e_f は余裕間隙比、 e は現在の間隙比、 e_{min} は最小間隙比である。砂の最大密度試験 JIS A 1224 は細粒分含有率 5%以上の砂質土に対して適用できない。既往の研究では、適用範囲以上の細粒分を含む試料に対して、突固めによる土の締固め試験から最大密度を求めた例がある。一方、本研究では新たな最大密度試験として、液状化・排水を繰返し行い、体積収縮が収束した状態を最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ とする方法を提案している。そこで、締固め試験より求めた最大密度時の間隙比と最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ の比較検討を行ったところ、液状化と排水を繰返す方法のほうがより密な状態になることができた。自然地盤の場合、地震動が作用し、液状化と排水を繰返す過程を経て密な状態になると考えられる。これらの結果をふまえ、液状化・排水を繰返すことにより求めた最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ を最も密な状態と定義し、それを用いて算出した余裕間隙比と様々な砂質土の密な状態における繰返しせん断抵抗との関係について考察をおこなった。

三軸試験の供試体は突固め・モールドタンピング法もしくは締固め法を用いて作製した。供試体の寸法は直径 7cm、高さ 10cm、メンブレン厚さは 0.3mm である。供試体をいずれかの方法で作製・設置した後、飽和させる。その後、JGS の方法に準じて非排水繰返し三軸試験を行う。試験終了条件は、軸ひずみの両振幅が 5%に達した時とする。ただし、軸ひずみの両振幅が 5%に達していない状態で、繰返し回数が 200 回を超えた場合、試験を終了する。

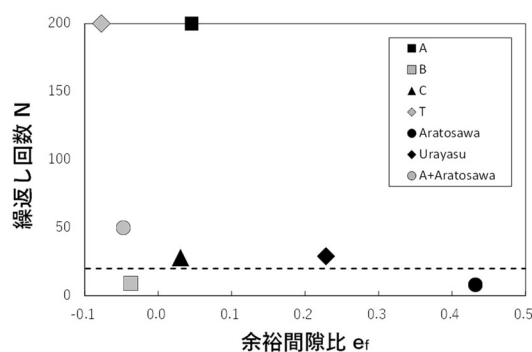


図 9 余裕間隙比と応力比 0.5 における繰返し回数の関係

本研究では、限られた時間の中で、より多くの試料のデータを得るため、繰返しせん断応力比を 0.5 に固定し、液状化に至る繰返し回数を比較し、相対的に液状化強度の大きさを把握するものとした。図 9 のとおりである。

本研究では、液状化・排水を繰返すことで求めた最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ を最も密な状態と定義したが、試料 B, T, A+Aratosawa の場合、その状態よりも密な状態が存在した。最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ の再現性などが不明確であるため、今回の結果が誤差の範囲内であるか判断することは難しい。今後最小間隙比 $e_{min.cyclic}$ の詳細について明らかにすることが課題である。

繰返し回数 20 回における応力比を液状化強度比と定義した場合、試料 A や試料 T などのように、非常に密な状態において液状化強度比 0.5 以上の大きな強度をもつ試料が存在すると推測できる。しかしその一方で、試料 B の結果から、非常に密な状態であるにも関わらず液状化強度比 0.5 を超えるほど大きな強度を期待できない試料が存在することが示された。今回は繰返し回数で液状化強度の大きさを相対的に評価しているため、液状化強度のばらつきを把握することはできなかった。そのため、様々な試料の液状化強度比を求め、そのばらつきを把握することで、非常に密な状態において期待できる液状化強度の予測に繋ぐことができると考えられる。

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)

- ① J. Kim, T. Kawai, M. Kazama, and T. Mori: Density index for estimating the postliquefaction volumetric strain of silty soils, International Journal of Geomechanics, 16(5), C4015005, 2016. (査読有)
- ② M. Kazama, T. Kawai, J. Kim, and T. Mori: The geotechnical issues of the damage caused by the great east Japan disaster and reconstruction for the

Tohoku region, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.32, pp.1148-1153, 2016. (査読有)

[学会発表] (計 7件)

- ① J. Kim, T. Kawai, and M. Kazama: Evaluation of contraction potential of silty soils based on the minimum void ratio, 3rd International conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering, Vancouver, Canada, July 16-19, 2017. (査読有)
- ② 百間幸春, 河井正, 風間基樹, 金鍾官: 様々な粒度分布を持つ砂質土の液状化抵抗評価のための最小間隙比の求め方について, 平成28年度土木学会東北支部技術研究発表会, III-25, CD-ROM, 2017.3.04, 東北工業大学(仙台市). (査読無)
- ③ Masayuki Tomita, Motoki Kazama, Tadashi Kawai & Jongkwan Kim: The effect of strain history in cyclic loading on the stiffness recovery characteristics after liquefaction, pp.59-60, Pingtung, Taiwan, Sep 21-22, 2016. (査読有)
- ④ Adachi, N., Kazama, M., Kawai, T., Kim, J. & Tomita, M.: The liquefaction strength of the sandy soils in extremely dense state, pp.73-74, Pingtung, Taiwan, Sep 21-22, 2016. (査読有)
- ⑤ Kim, J., Kawai, T. & Kazama, M. Consideration on the effect of non-plastic fines on post-liquefaction shear behavior, pp.65-66, Pingtung, Taiwan, Sep 21-22, 2016. (査読有)
- ⑥ 安達夏紀, 風間基樹, 河井正, 金鍾官: 砂質土の一次的性質と密な状態における液状化強度との関係について, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, III-36, 2016.3.5, 岩手大学(岩手市). (査読無)
- ⑦ 富田真之, 風間基樹, 河井正, 金鍾官: 最小間隙比まで締固めた砂の液状化強度について, 第50回地盤工学研究発表会, 979-980, 2015.9.1-3, 北海道科学大学(札幌市). (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 鍾官 (KIM, Jongkwan)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90757733