

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04690

研究課題名（和文）土粒子の破碎に及ぼす高圧応力履歴の影響に関する研究

研究課題名（英文）Crushing characteristics of soil particles under high pressure stress paths

研究代表者

山本 春行（Yamamoto, Haruyuki）

広島大学・国際協力研究科・名誉教授

研究者番号：60158293

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：粒子破碎現象が発生すると粒状体に急激な体積減少が生じると同時にせん断強度が大きく低下していくため地盤の支持力が減少し、特に杭基礎先端支持力設計においては相当厳しい問題となる上、急激な沈下の原因となる。高圧応力履歴を考慮した破碎実験から得た体積ひずみならびに偏差ひずみを塑性成分と弾性成分に分離し、それぞれの成分毎に平均応力 $p$ と偏差応力 $q$ から成る近似関数式を導いた。これらの増分形式に変換した近似関数を用いて粒子破碎を考慮した体積減少量を $p$ ならびに $q$ の経路に沿って積分することにより推定できる。したがって、粒子破碎を考慮した地盤に関わる問題の数値解析における非線形構成関係式として用いることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土粒子の集合体である地盤の破壊現象の解析では、通常モール・クーロンの破壊規準を用いて定式化されている。ただし、高圧拘束下での土粒子には破碎現象が生じるため、容易に拡張できないことは自明である。本研究の学術的意義は、高圧拘束下における地盤の変形強度特性を表す構成関係を土粒子の破碎現象そのものを基に構築しようとするもので、高圧拘束下における土粒子の破碎に伴う地盤の体積収縮傾向や土粒子の微細化に伴う内部摩擦角の急激な減少傾向が定量的に説明できるようになる。高圧拘束下の粒子破碎現象を考慮した地盤の変形や破壊現象が合理的に推定できるようになれば、より安全で合理的な設計根拠となる点に社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：In practice, it may be important that the behavior of volume shrinkage and decreasing of shear strength due to particle crushing around pile tip in crushable sandy soils. The particle crushing of sandy soils are reasons of the rapid increasing of settlements and the decreasing of pile tip bearing capacity. This study focused on the particle crushing of sandy soils; further, a series of particle-crushing experiments of Toyoura silica sand was conducted using high-compression apparatus. First, the volumetric and deviatoric strains obtained in the particle-crushing experiments were divided into plastic and elastic components. Then, an approximation regression formula containing mean stress  $p$  and deviatoric stress  $q$  was defined to obtain the value of each component. These incremental approximation regression formulas are useful as non-linear constitutive relations in the numerical analysis of soil in consideration of particle crushing.

研究分野：地盤・基礎工学

キーワード：粒子破碎 せん断強度 三主応力制御型高圧圧縮試験機 応力経路 平均応力 偏差応力 粒子破碎量 杭先端支持力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

粒子破碎による圧縮性が増加する地盤を対象にした杭の支持力に関する研究はほとんど無く、圧縮性あるいは破碎性を有する地盤の強度変形特性を明らかにすることは、深い基礎のより合理的な設計のためには大変重要である。一方、粒状材料の力学的挙動や破碎特性を調べるために三軸圧縮試験や一次元圧縮試験が数多くの研究者によって利用されてきた。一次元圧縮試験は試料の側方変形を完全に拘束した状態で載荷試験を行うため、試料は $K_0$ 状態として扱われる。これは地盤中の杭の先端中心部直下におけるせん断破壊が生じない部分を対象としたものであり、杭先端周辺のせん断応力が卓越する部分での粒子破碎は考慮されていない。粒子破碎現象は杭の先端中心部直下よりもせん断破壊が生じる杭の先端角部直下において顕著であることより、平均応力  $p$  と偏差応力  $q$  との組み合わせ応力下での破碎現象の研究の蓄積が望まれる。

2. 研究の目的

一般に材料の降伏・破壊現象の解析モデルは連続体理論に基づく弾塑性理論を応用して定式化される場合がほとんどであり、土粒子の集合体である地盤の破壊現象もモール・クーロンのせん断破壊規準を用いて定式化されている。ただし、モール・クーロンのせん断破壊規準には土粒子の破碎が発生しないという前提があり、高压拘束下での土粒子には破碎現象が生じる為、高压拘束下の地盤の挙動の解析には容易に拡張できないことは自明である。本研究の目的は高压拘束下における地盤の変形強度特性を表す構成関係を土粒子の破碎現象そのものを基に再構築しようとするもので、高压拘束下における土粒子の破碎に伴う地盤の体積収縮傾向や土粒子の微細化に伴う内部摩擦角の急激な減少傾向が定量的に説明できるようになる。高压拘束下の地盤の変形や破壊現象が合理的に推定できるようになれば、杭先端地盤等の変形・支持力の推定精度が向上し、さらに繰返し効果をも考慮すれば地震時の杭先端支持力問題にも応用できるものと考えられ、より安全で合理的な設計根拠となる点に実用的な意義がある。

3. 研究の方法

(1) 本研究では最大 200MPa まで加圧可能な三主応力制御型高压圧縮試験機<sup>①</sup>を用いて破碎実験を行った。図1に示すように、三方向からの同時加圧が可能な角部を平らにした 50×50×50mm の特殊な立方体形状容器を試験機中央に設置し、その中に試料砂を詰める。試験体は約 10 層に分けて作成し、各層毎に棒突きとタンピングを行って初期相対密度が 90%以上になるように締固めを行った。主な破碎試験では様々な土質実験においてよく利用される豊浦珪砂を用いており、豊浦珪砂は円みをおびたほぼ単一粒径の粒子から成り、組成はそのほとんどがシリカ ( $SiO_2$ ) である。一般的な方法で豊浦砂の粒度試験を行うと、粒径が 125  $\mu m$ ~297  $\mu m$  の間の粒子の重量割合が多く、74  $\mu m$  以下の粒子はほとんど無い。

(2) 図2には本試験で設定した応力経路を示している。まず、等方圧縮破碎試験を3ケース (A, B, C -  $R_0$ ) 行い、次に等方圧縮後に平均応力  $p$  を一定に保持したままで偏差応力を加えていくせん断試験を9ケース (A, B, C -  $R_{1, 2, 3}$ ) 行った。同図中の黒丸の位置は、各試験における最大平均応力の作用レベル (A, B, C) と最大偏差応力の作用レベル ( $R_{0, 1, 2, 3}$ ) とを表しており (表1参照)、これらの点まで載荷した後はそれぞれ同じ応力経路を辿って除荷した。なお、平均応力の作用レベルは一般的な支持杭の先端の近傍地盤中に発生すると予想される範囲であり、偏差応力の作用レベルはせん断破壊線 (SFL) に近接する  $R_3$  と等方圧縮  $R_0$  の間をほぼ均等に分割して配置した  $R_{1, 2}$  である。本報告では平均応力  $p = 14.5, 30.0, 50.0$  MPa を載荷する場合を A, B, C 試験、各平均応力に対する偏差応力  $q$  のレベルを小さい順に  $R_0$  ( $q = 0$ ; 等方圧縮のみ),  $R_1, R_2, R_3$  と定義し、試験体記号は「A -  $R_0$ 」のように表す。なお、SFLは最大主応力  $\sigma_1$  方向の変位が急増し始め、 $\sigma_1$  がほぼ増加しなくなった時点の偏差応力  $q$  の値を連ねて定めた。

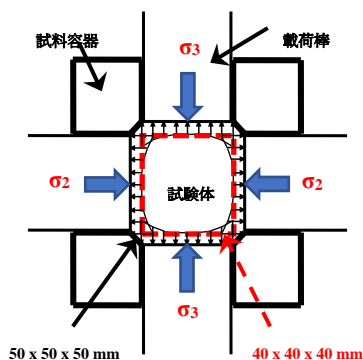


図1 試験体の水平断面図

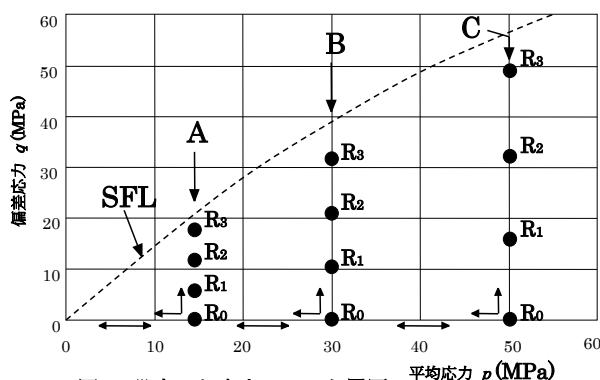


図2 設定した応力レベルと履歴

4. 研究成果

(1) 図3中の  $\epsilon_v^p$ ,  $\epsilon_v^e$  は、体積ひずみの非回復(塑性)成分と回復(弾性)成分である。平均応力  $p$  の増加時の平均応力  $p$  と体積ひずみ  $\epsilon_v$  との関係は初期より非線形性(ひずみ硬化)がありその勾配を直接特定し難いため、塑性成分と弾性成分とを別々に評価することとした。

表1 試験体記号と最大  $p, q$  の組み合わせ

Test No.	$p_{max}(MPa)$	$q_{max}(MPa)$
A-R0	14.7	0.2
B-R0	30.2	0.3
C-R0	50.2	0.4
A-R1	14.6	6.1
B-R1	30.2	10.7
C-R1	50.5	16.6
A-R2	14.6	12.1
B-R2	30.3	21.3
C-R2	50.2	32.6
A-R3	14.6	18.1
B-R3	30.3	31.9
C-R3	50.3	49.0

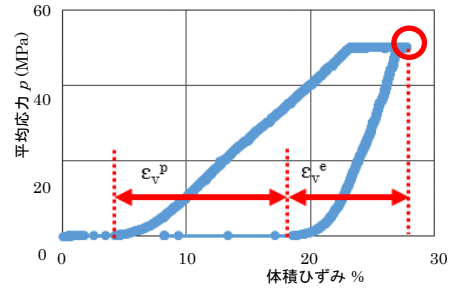


図3  $p \sim \epsilon_v$  関係の例 (C-R2)

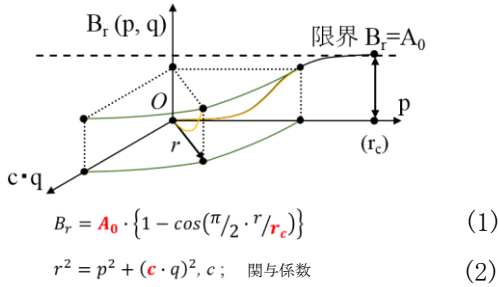


図4  $Br \sim (p, q)$  関係の模式図

粒子破砕量  $B_r$  と平均応力  $p$ 、偏差応力  $q$  との間には図4中の式(1)、(2)に示すような近似関係 ( $R^2=0.976$ ) があつた ( $A_0=0.31$ ,  $r_c=102$  MPa,  $c=1.40$ )。さらに、両者共に非可逆性の塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  と粒子破砕量  $B_r$  の間には密接な関係があるので式(3)の線形近似式を仮定し、最小二乗法により係数(図5参照,  $a=55.9$ ,  $b=3.06$ ,  $R^2=0.979$ )を決定した。

$$\epsilon_v^p = a \cdot B_r(p, q) + b \quad (3)$$

弾性体積ひずみ  $\epsilon_v^e$  は既往の研究<sup>③</sup>より式(4)を用いて近似した。同式中の  $p_a$  は大気圧 ( $p_a = 0.1$  MPa) であり、塑性体積ひずみに関する式(3)の場合と同様に未定係数は最小二乗法により決定した(図6参照,  $C_e = 0.139$ ,  $m = 0.659$ ,  $R^2=0.986$ )。なお図3中の赤丸部分は平均応力  $p$  が一定の元で偏差応力  $q$  を除荷する経路での体積ひずみの回復量であるが、いずれの試験体においてもかなり少量であることより、回復する弾性体積ひずみ  $\epsilon_v^e$  は平均応力  $p$  のみの関数で表した。

$$\epsilon_v^e = C_e \cdot \left(\frac{p}{p_a}\right)^m \quad (4)$$

式(3)と(4)を合算した体積ひずみ  $\epsilon_v$  から増分式(5)を求め、破砕実験の応力経路に沿って数値積分を行い、体積ひずみの近似推定値を求めた。

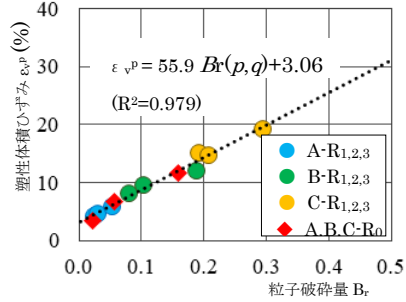


図5 塑性体積ひずみ  $\epsilon_v^p$  の推定近似度

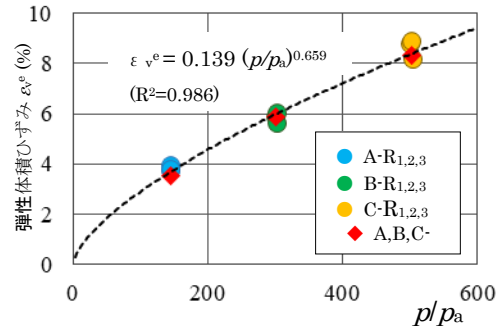
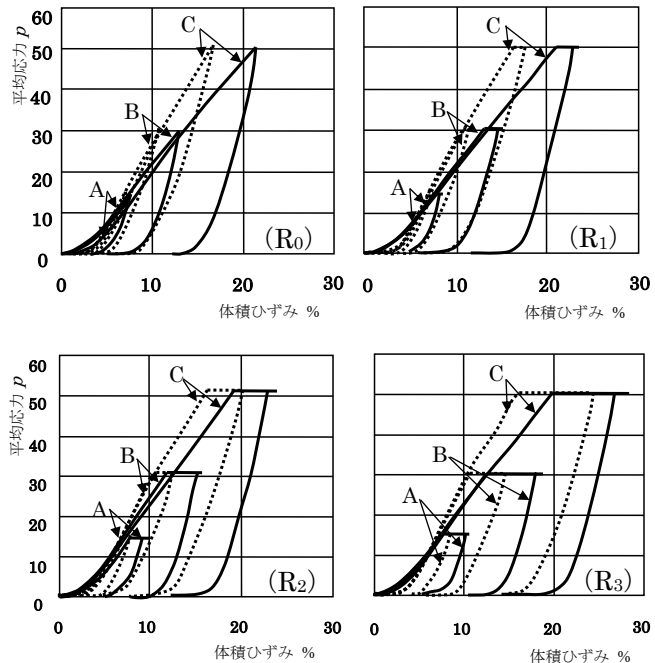


図6 弾性体積ひずみ  $\epsilon_v^e$  の推定近似度



( — : 実験値, ..... : 帰帰近似値 )

図7 平均応力  $p \sim$  体積ひずみ  $\epsilon_v$  関係の比較

$$d\varepsilon_v = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p} dp + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial q} dq \quad (5)$$

以上の方法により求めた体積ひずみの近似推定値と実験結果とを比較して図7に示す。同図より回帰近似値は実験値に対して2～3割程度小さめの体積ひずみの部分もあるが、履歴形状はよく整合していることがわかる。

(2) 図8中の  $\varepsilon_d^p$ ,  $\varepsilon_d^e$  は、偏差ひずみの非回復(塑性)成分と回復(弾性)成分である。偏差応力  $q$  の増加時の偏差応力  $q$  と偏差ひずみ  $\varepsilon_d$  との関係は前述の平均応力～体積ひずみ関係と同様に初期より非線形性(ひずみ硬化)がありその勾配を直接特定し難いため、塑性成分と弾性成分とを別々に評価することとした。塑性偏差ひずみ  $\varepsilon_d^p$  の推定に必要な条件は、偏差応力が作用しなければ塑性偏差ひずみは生じない( $q=0$  のとき  $\varepsilon_d^p = 0$ ) と、偏差応力が大きくなるにつれて塑性偏差ひずみが徐々に大きくなることである。この条件から考えられる回帰推定式を式(6), (7), (8)のように定めた。なお、式(6)中の  $a(p)$ ,  $b(p)$  には拘束圧の違いが影響するものと考えられるので、式(7), (8)を  $p$  に関する一次関数とした。したがって  $a(p)$ ,  $b(p)$  式の未知係数 ( $A_1, A_2, B_1, B_2$ ) を最小二乗法により定め、それぞれ図9と図10に示す。

$$\varepsilon_d^p = a(p) \cdot (e^{b(p) \cdot q} - 1) \quad (6)$$

$$a(p) = A_1 \cdot p + A_2 \quad (7)$$

$$b(p) = B_1 \cdot p + B_2 \quad (8)$$

一方、通常のせん断剛性  $G$  と図8中の偏差応力  $q$ ～弾性偏差ひずみ関係におけるせん断剛性  $G'$  との間には式(9)に示すような関係があり、式(10)のように書き換える

$$\frac{q}{\varepsilon_d} = 3G = G' \quad (9)$$

$$\varepsilon_d^e = \frac{1}{G'} \cdot q \quad (10)$$

図11と図12に、せん断弾性係数  $G'$  と平均応力  $p$  ならびに偏差応力  $q$  との関係を示す。これらの図からどちらにも線形関係が存在していることがわかるので  $G'$  の回帰推定式を式(11)のように仮定し、未知係数 ( $A_3=45.554, B_3=-21.588, C_0=1195.573$  [MPa]) を最小二乗法により定めた。

$$G' = A_3 \cdot p + B_3 \cdot q + C_0 \quad (11)$$

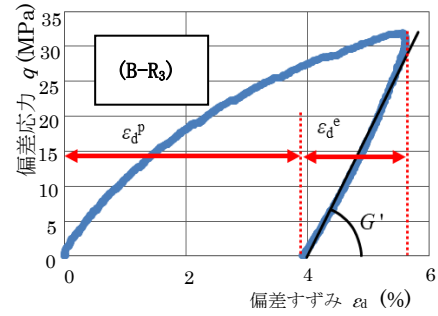


図8 偏差応力  $q$  と偏差ひずみ  $\varepsilon_d$  関係の例

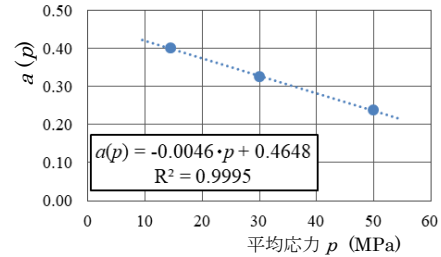


図9  $a(p)$  ～ 平均応力  $p$  関係

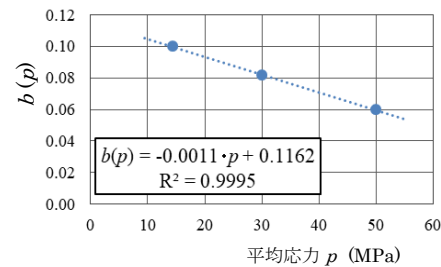


図10  $b(p)$  ～ 平均応力  $p$  関係

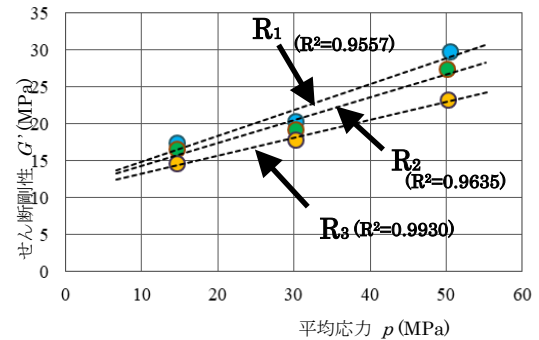


図11 せん断剛性  $G'$  ～ 平均応力  $p$  関係

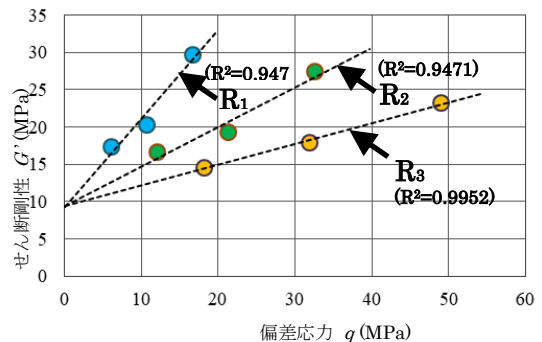


図12 せん断剛性  $G'$  ～ 偏差応力  $q$  関係

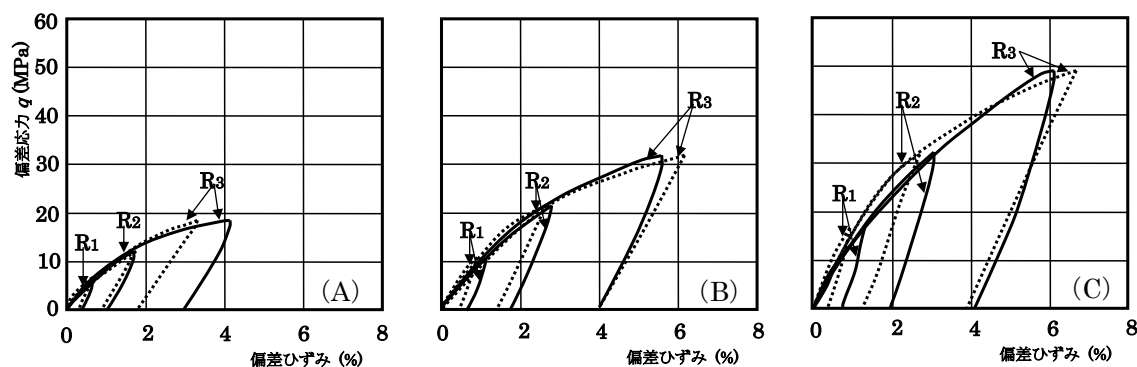


図 13 偏差応力  $q$  ~ 偏差ひずみ  $\varepsilon_d$  関係の比較 ( — : 実験値 , ..... : 回帰近似値 )

式(6)の塑性偏差ひずみと式(10)の弾性偏差ひずみを合算した偏差ひずみ  $\varepsilon_d$  から増分式(12)を求め、破碎実験の応力経路に沿って数値積分を行い、偏差ひずみの近似推定値を求めることができる。

$$d\varepsilon_d = \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial p} dp + \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial q} dq \quad (12)$$

以上の方法により求めた偏差ひずみの近似推定値と実験結果とを比較して図 13 に示す。回帰近似値は実験値に対して異なっているものも一部あるが(A-R<sub>3</sub>, C-R<sub>2</sub>)、同図より偏差ひずみの履歴形状はほぼ整合していることがわかる。

(3) 破碎実験から得た体積ひずみならびに偏差ひずみを塑性成分と弾性成分に分離し、それぞれの成分毎に平均応力  $p$  と偏差応力  $q$  から成る近似関数式を導いた。これらの近似関数の合算式から推定される体積ひずみならびに偏差ひずみは実験値にほぼ整合しており、粒子破碎を考慮した体積減少量を  $p$  ならびに  $q$  の経路に沿って積分することにより推定できる。これらは式(5)、式(12)のように増分形式で求められており、粒子破碎を考慮した地盤に関わる問題の数値解析における非線形構成関係式として用いることができる。ただし、ある一つの応力経路の実験結果から導かれたものであり、今後、 $p$  と  $q$  が同時に変動する応力経路の場合や他の粒状材料への適用性について検討する必要がある。

<引用文献>

- ① Yokura, K., Yamamoto, H. and Wu, Y., *Crushing tests of soil particles by high pressure true tri-axial compression apparatus*, The 6<sup>th</sup> Japan-China Geotechnical Symposium, Sapporo, Japan, 2015, 51-56
- ② Hardin, B.O., *Crushing of Soil Particles*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.111, No.10, 1985, 1177-1192,
- ③ Nakai, T., *An isotropic hardening elastoplastic model considering the stress path dependency in three-dimensional stresses*, Soils and Foundations, 29(1), 1988, 119-139

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yang Wu, Neng Li, Xinzhi Wang, Jie Cui, Yulong Chen, Yihang Wu and Haruyuki Yamamoto	4. 巻 30
2. 論文標題 Experimental investigation on the mechanical behavior and particle crushing of calcareous sand retrieved from South China Sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enggeo.2020.105932	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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H.Yamamoto and K.Fukuda
2. 発表標題 Effect of stress paths on the particle crushing
3. 学会等名 Proceedings of 8th J-P Geotechnical symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HARUYUKI YAMAMOTO
2. 発表標題 ON THE PARTICLE CRUSHING FEATURES OF SANDY SOILS
3. 学会等名 Proceedings of International Structural Engineering and Construction (ASEA SEC-5) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 マサ土の粒子破碎性状について
3. 学会等名 55回地盤工学研究発表会(Web抄録)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に関する研究(その6 シラスについて)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に関する研究(その7 粒子破碎に伴う体積減少について)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 マサ土の粒子破碎性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田慶吾, 山本春行
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に関する研究(その5 粒度分布の影響について)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 HARUYUKI YAMAMOTO
2. 発表標題 On the shear stiffness decrease of sandy soils due to particle crushing progress
3. 学会等名 Proceedings of International Structural Engineering and Construction (ISEC-11) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾, 卜部宏紀
2. 発表標題 粒子破碎に及ぼす応力経路の影響について
3. 学会等名 54回地盤工学研究発表会(Web抄録)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本春行
2. 発表標題 粒子破碎が伴う平均応力・偏差応力～体積ひずみ関係について
3. 学会等名 56回地盤工学研究発表会(Web抄録)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本春行, 福田慶吾
2. 発表標題 土粒子の破碎性状に関する研究(その8 粒子破碎が伴うせん断挙動について)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2022年



〔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
研究協力者	呉 揚 (Wu Yang)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------