

二種混合体の微視的モデルに基づく遠心場の支持力特性 に与える大粒子含有率の影響の評価

Evaluation of the Effect of Large Particle Content on the Bearing Capacity Characteristics of Centrifuge Fields

Based on a Microscopic Model of Binary Granular Mixture

田上 聖人¹⁾, 中田 幸男²⁾, Jonathan A. BLACK³⁾

1) Masato TAUE, 博士研究員, 山口大学大学院 日本学術振興会, mtaue@yamaguchi-u.ac.jp

2) Yukio NAKATA, 教授, 山口大学大学院創成科学研究科, nakata@yamaguchi-u.ac.jp

3) Jonathan A. BLACK, Lecturer, Queen's University Belfast, j.black@qub.ac.jp

大粒子と小粒子で構成される二種混合体の強度は、大粒子含有率の変化に伴って、小粒子骨格挙動、中間骨格挙動、大粒子骨格挙動に分かれるため、それぞれの境界となる限界大粒子含有率を把握することが重要である。本研究では、遠心支持力模型実験により、拘束圧作用下の骨格挙動の限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルによる評価を行った。その結果、拘束圧の増加による小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の増加、拘束圧の増加と堆積構造の破壊による大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の減少により、中間骨格挙動の大粒子含有率の範囲は狭くなると推察された。

キーワード：支持力，遠心模型実験，粒径

(IGC : D-06, E-03)

1. はじめに

2mm以上の礫や石を含む粗粒土は、自然界に広く分布し、土構造物や基礎地盤に幅広く利用される地盤材料である¹⁾。粗粒土には、土全体として均質ではあるが、礫分と砂分で粒度分布が分級した土がある。こうした土は、礫分と砂分の混合率に応じて、それぞれの強度が現れる程度が変動し、土全体の強度が大きく変化する。その代表例として、自然地盤では、「サンゴ礫混じり土(写真-1)」があげられる。

サンゴ礫混じり土とは、死骸化したサンゴが礫として砂や土に混じった混合土のことで、サンゴの生息域である沖縄県や世界中の温暖で浅い海に広く存在している。サンゴ礫混じり土は、サンゴ礫に由来する破碎性やいびつな礫形状などの特殊性を有する³⁾。この特殊性も、分級した土の特徴に従い、大粒子(礫分)含有率の変化に伴って、出現する程度が変化するため、大粒子含有率ごとの性質の変化を把握することが重要である。

礫分と砂分の混合率による強度の変化を、より簡易かつ、明確に把握するための試料に、二種混合体試料がある。二種混合体とは、礫分を代表した1種類の大粒子試料と、砂分を代表した1種類の小粒子試料を混ぜ合わせた試料をいう。本研究においても、分級した粗粒土のモデルとして二種混合体を用いる。二種混合体は、大粒子含有率が低く、小粒子のみの試料と同じ強度である「小粒子骨格挙動」、大粒子含有率が高く、大粒子のみの試料と同じ強度である「大粒子骨格挙動」、その間に位置し、大粒子含有率に応じて強度が変化する「中間骨格挙動」

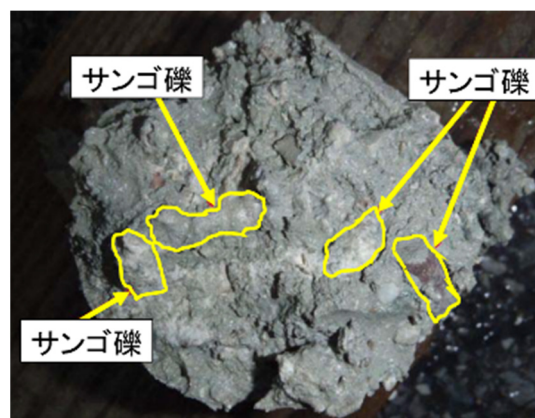


写真-1 サンゴ礫混じり土(河合ら²⁾より一部加工)

に分かれる。さらに、小粒子骨格挙動と中間骨格挙動の境界となる大粒子含有率を「小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 V_L^p (%)」、中間骨格挙動と大粒子骨格挙動の境界となる大粒子含有率を「大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 V_L^g (%)」と呼称する。3つの骨格挙動のうち、中間骨格挙動が分級した土の性質を表すため、その大粒子含有率の範囲となる限界大粒子含有率を把握することが、二種混合体を取り扱う上で、非常に重要となる。

著者ら^{4),5)}は、様々な形状・粗度の大粒子と小粒子で構成される二種混合体に対して、安息角実験を実施し、安息角と大粒子含有率の関係を取得することで、二種混合体の安息角を指標とした、中間骨格挙動と骨格挙動の限界大粒子含有率に与える粒子特性の影響を評価した。その結果、大粒子の粗度が大きい場合、形状がいびつで、小粒子の間隙比が小さいほど、小粒子骨格挙動の限界大

粒子含有率が小さくなることが分かった。一方、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率と形状や粗度などの粒子特性は、明確な関係が見られないことを明らかにした。

二種混合体の骨格挙動の限界大粒子含有率の評価方法には、実験で実際に強度と大粒子含有率の関係を取得して、評価する方法のほかに、微視的モデルを用いる方法がある。Lade et al.⁶⁾や Ueda et al.⁷⁾は、大粒子試料と小粒子試料の粒径や間隙比から、大粒子間の距離を理論的に推定し、それに基づく二種混合体の骨格構造と骨格構造の限界大粒子含有率を推定する微視的モデルを提案している。著者ら^{4),5)}は、Lade et al.と Ueda et al.のモデル、さらに安息角実験で得られた、二種混合体の安息角を指標とした、中間骨格挙動と骨格挙動の限界大粒子含有率に与える粒子特性の影響をもとに、大粒子配置の異方性や大粒子形状を考慮した微視的モデルを提案した。ここで骨格構造とは、大粒子試料と小粒子試料の粒径や間隙比をもとに、微視的モデルから理論的に推定される構造である。骨格構造の限界大粒子含有率は、拘束圧が非常に低い安息角を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率と一致することが確認されている^{4),5)}。

図-1に、微視的モデルの骨格構造モデルを示す。微視的モデルは、二種混合体の大粒子含有率による性質の変化を、大粒子間の距離に着目して、そのメカニズムを説明している。図-1中の状態①～⑥ごとに解説を行う。

(1) 状態① (大粒子含有率 $V_L = 0\%$)

空間に小粒子しか存在しないため、土全体の強度の主体は小粒子である。

(2) 状態② ($0 < V_L < V_L^b\%$)

空間に少数の大粒子が存在するが、大粒子同士の距離が離れているため、大粒子の影響が現れず、土全体の強度の主体は小粒子である。

(3) 状態③ ($V_L = V_L^b\%$)

空間に占める大粒子の割合が増加することで、大粒子同士が接近する。大粒子の配置は、構造異方性の影響で、水平方向に比べて鉛直方向の方が接近している。堆積状態では、重力の影響で鉛直方向が最大主応力、水平方向が最小主応力となる。また、個別要素法(DEM)による安息角実験の再現解析から、最大主応力方向(鉛直方向)と最小主応力方向(水平方向)で、大粒子間の距離が異なり、最大主応力方向の距離の方が短いことが確認されている。そのため、それぞれの大粒子間の距離を、最大主応力方向の限界大粒子距離 d 、最小主応力方向の限界大粒子距離 d' と定義している。このとき、最大主応力方向の大粒子間に存在する小粒子が、大粒子の影響を媒介することで、土全体に大粒子の影響が現れ始める。中間骨格構造($V_L^b < V_L < V_L^a\%$)では、大粒子同士の距離が小さくなっていくため、土全体の強度の主体が、小粒子から大粒子に移行していく。

(4) 状態④ ($V_L = V_L^a\%$)

状態②や状態③のように、大粒子と大粒子の間に

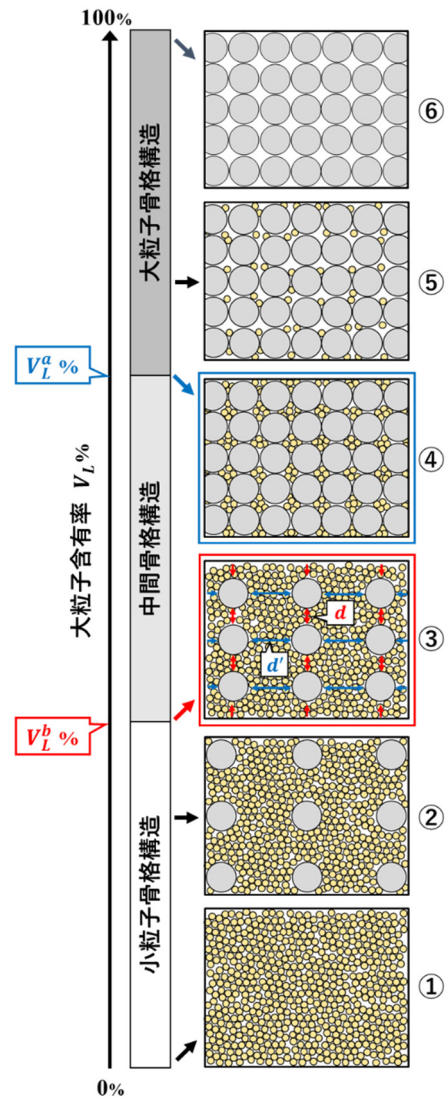


図-1 大粒子含有率による骨格構造の変化と大粒子の配置を表した微視的モデルの骨格構造モデル

小粒子を挟まず、直接接触しているため、土全体の強度の主体は、大粒子になる。このとき、大粒子が形成する間隙が、すべて小粒子で満たされており、二種混合体としての密度が最大となる。

(5) 状態⑤ ($V_L^a < V_L < 100\%$)

大粒子同士が直接接触しており、大粒子が形成する間隙に、少数の小粒子が存在している状態であり、土全体の強度の主体は大粒子である。ただし、粒径比が大きい場合、通常の重力下では小粒子が空間中を浮遊せずに落下し、下部が大粒子含有率 $V_L^b\%$ の二種混合体、上部が大粒子含有率 100%の大粒子になるため、二種混合体として存在できない。

(6) 状態⑥ (大粒子含有率 $V_L = 100\%$)

空間に大粒子しか存在しないため、土全体の強度の主体が大粒子である。

上記の状態③が小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ であり、状態④が大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ である。微視的モデルの理論式⁵⁾は、それぞれの状態における大粒子と小粒子の幾何学的配置をもとに、

立式されており、式(1)～式(3)を用いて小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b %を算出し、式(4)を用いて大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a %を算出する。式(1)に関しては、本研究で用いる大粒子のように、おおそ球体として捉えられる大粒子に対して適した式である。

$$V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_S)}{(D_L+d)(D_L+d')^2(1+e_L)+D_L^3e_S} \quad (1)$$

$$d = mD_S \quad (2)$$

$$d' = (-7.89e_S + 9.88)L \quad (3)$$

$$V_L^a = \frac{100(1+e_S)}{e_L+e_S+1} \quad (4)$$

式中の D_L は大粒子の粒径、 D_S は小粒子の粒径、 e_L は大粒子のみで構成される試料の間隙比、 e_S は小粒子のみで構成される試料の間隙比、 m は最大主応力方向の大粒子間の距離を小粒子の直径で割った無次元パラメータ、 L は大粒子の最大長さ、 d は最大主応力方向の限界大粒子距離、 d' は最小主応力方向の限界大粒子距離である。

このように、これまででは拘束圧が低い状態の二種混合体の骨格挙動の限界大粒子含有率を、実験と微視的モデルから把握することが出来ている。しかし、実地盤のように拘束圧が作用する状態における骨格挙動の限界大粒子含有率は、把握することが出来ていない。そこで本研究では、実地盤に近い条件の支持力実験を実施することで、拘束圧作用下の支持力特性を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率を取得する。さらに、実験で得られた拘束圧作用下の骨格挙動の限界大粒子含有率と、微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率を比較することで、二種混合体の骨格挙動の限界大粒子含有率に与える拘束圧の影響を明らかにする。

2. 二種混合体に対する遠心支持力模型実験

安息角実験よりも、より実地盤の状態に近い、拘束圧下の支持力特性における中間骨格挙動と限界大粒子含有率を取得するために、二種混合体に対する支持力試験を実施するのが望ましい。しかし、礫を用いた支持力試験は、試験装置の大型化が必要であり、それに伴う試料の使用量、実験時間の増加のため、実施が難しい。また、支持力試験装置の性質上、拘束圧を与えることは困難である。そこで、本研究では、支持力試験装置と遠心載荷実験を組み合わせた遠心支持力模型実験を行う。遠心載荷装置を用いることで、遠心力による拘束圧を与えられるほか、スケール則によって、砂相当の粒径の粒子を、礫相当の粒子として扱うことができる^{8),9)}。これにより、支持力試験装置の小型化と、試料の使用量、実験時間を抑えることが出来る。

2.1 実験装置

写真-2に、土槽および載荷装置を設置した遠心載荷装置を示す。遠心載荷装置は、英国シェフィールド大学の

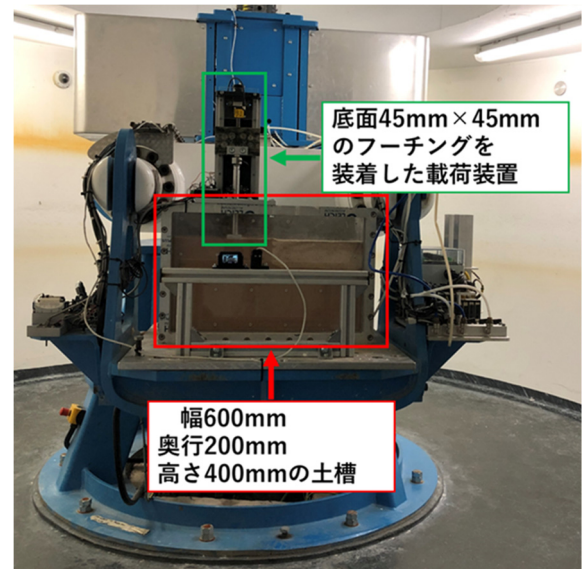


写真-2 土槽および載荷装置を設置した遠心載荷装置

ビーム型遠心力載荷模型実験装置を使用した。この装置は、アーム長さが2.0m、プラットフォームサイズが幅800mm、奥行800mmであり、最大50Gの遠心加速度を与えることが出来る。土槽は、幅600mm、奥行200mm、高さ400mmで、前面のみがアクリル製で、その他がスチール製であり、載荷中の供試体が観察できるようになっている。載荷装置は、最大載荷力2kNのモーター速度制御式のものに、底面が45mm×45mmのステンレス製のフーチングを装着している。

2.2 二種混合体試料

写真-3にサンゴ砂、写真-4にCH95珪砂、図-2にサンゴ砂およびCH95珪砂の粒度分布を示す。試料は、大粒子と小粒子の粒径比を可能な限り大きくなるように選定した。小粒子に関しては、砂に分類される可能な限り粒径の小さい試料を対象とした。これは、本研究が対象とする二種混合体の小粒子が砂であることと、砂よりも粒径が小さいシルトや粘土になると、挙動が根本的に異なるためである。これらを踏まえ、小粒子試料には、平均粒径0.125mm、土粒子密度2.626g/cm³のCH95珪砂を採用した。大粒子に関しては、寸法効果の影響が出ない範囲で、最大の試料を対象とした。ここで寸法効果とは、試験装置のフーチングや土槽などに対して試料粒径が大きい場合、装置と試料の接触の影響が、実験結果に作用

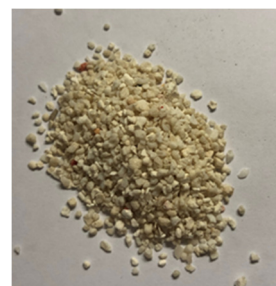


写真-3 サンゴ砂



写真-4 CH95珪砂

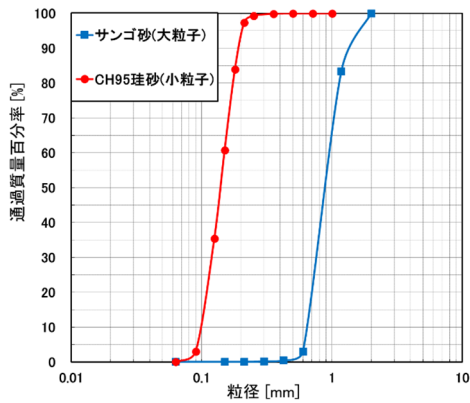


図-2 サンゴ砂および CH95 珪砂の粒度分布

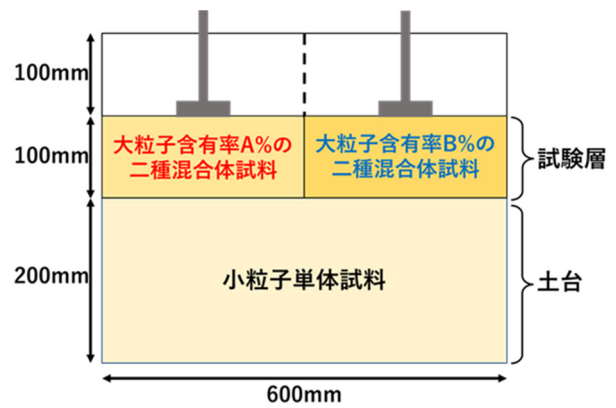


図-3 土槽内の試料の配置

してしまうことを指す。岡村ら¹⁰⁾は、遠心場における支持力試験の最大粒径は、フーチング幅の 1/100 以内とされ、それ以上大きい粒径では、荷重沈下曲線に大きな乱れが生じるなどの影響が出ることを報告している。ここでは、予備試験を実施し、最大粒径が概ねフーチング幅 45mm の 1/30 以下である 1.5mm 以内であれば、荷重沈下曲線に乱れが生じないことを確認できた。これらを踏まえ、大粒子試料には、平均粒径 0.90mm、土粒子密度 2.675g/cm³ のサンゴ砂を採用した。

2.3 実験条件

図-3 に、土槽内の試料の配置を示す。本研究では、試料量、試験時間を縮小するために、土槽の下部 200mm を土台として、小粒子試料である CH95 珪砂を充填し、上部 100mm の試験層を左右で分割して、異なる大粒子含有率の二種混合体試料を充填した。土台に小粒子試料を充填した理由は、上部の試験層の試料が、土台に落下するのを防ぐためである。試験層の二種混合体試料は、原らの研究¹¹⁾を参考にして、空中落下法ではなくスコップを用いて、地表面との落下高さなるべく発生しないように充填した。これは、空中落下法を用いると、大粒子と小粒子が分離し、均質な二種混合体試料を作製できないためである。

遠心加速度については、荷重装置の最大載荷力 2kN で地盤を破壊可能な最大値として、図-3 の試験層表面に 30G(回転速度 125rpm)が作用するように設定した。この場合、図-3 の試験層表面の遠心場における平均粒径は、スケール則により、大粒子であるサンゴ砂では 27.0mm、小粒子である CH95 珪砂では 3.75mm となる。

2.4 実験手順

以下の手順で、遠心支持力模型実験を行った。

- (1) 土槽の下部 200mm に、土台として小粒子試料を充填する。
- (2) 土槽の上部 100mm の試験層を左右に分け、それぞれ異なる大粒子含有率の二種混合体を充填し、充填した試料の質量から間隙比を計算する。
- (3) 荷重装置を設置し、荷重と沈下量の測定を開始する。

- (4) 測定開始 30 秒後、50rpm(遠心加速度 5G)で回転開始。
- (5) 測定開始 1 分後、100rpm(遠心加速度 19G)に回転速度変更。
- (6) 測定開始 1 分 30 秒後、125rpm(遠心加速度 30G)に回転速度変更。
- (7) 測定開始 2 分後、0.5mm/min の速度で載荷開始。
- (8) 測定開始 32 分後、実験終了。
- (9) 粒子破碎の有無を調べるために、フーチング直下の試料に対して、粒度試験を実施。

二種混合体試料の大粒子含有率を変更しながら、(2)~(9)の工程を繰り返し、実験を行った。ただし 70%を超える大粒子含有率では、図-1 状態⑤で示したように、大粒子と小粒子が分離して、均質な二種混合体試料を作製できなかったため、実験を行っていない。なお、本実験では、以降の実験結果で示す大粒子含有率は、試料充填時の大粒子含有率である。

2.5 実験結果

図-4 に、載荷応力と沈下量の関係、写真-5 に、大粒子含有率 0%(CH95 珪砂のみ)の最終沈下量における供試体画像、写真-6 に、大粒子含有率 40%の最終沈下量における供試体画像、写真-7 に、大粒子含有率 100%(サンゴ砂のみ)の最終沈下量での供試体画像を示す。写真中の点は、アクリルに描かれた標点であり、土試料への影響はない。実験は、大粒子含有率 0%と 100%を 3 ケースずつ、5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 55, 60, 65, 70%を 1 ケースずつ行っている。

図-4 において、まず、大粒子含有率 0%に着目すると、取得した 3 つのケースの載荷応力-沈下量の曲線にはバラツキがあり、最も小さいケースは 5%の曲線と同等であり、最も大きいケースは 15%の曲線と同等であった。大粒子含有率 20%を超えると、曲線は明確に増加傾向を示し、40%で 100%の最も小さいケースと同等になった。40%以上では、60%を除いて、100%の最も大きいケースを超える曲線は現れなかった。60%のみ 100%の曲線よりも大きくなる現象は、著者らが実施した安息角実験^{4),5)}でも確認されており、微視的モデルが着目している「大粒子同士の接近・接触」のほかに、二種類の粒子が混ざり合うことによる相互作用等の影響が原因と考えられる。

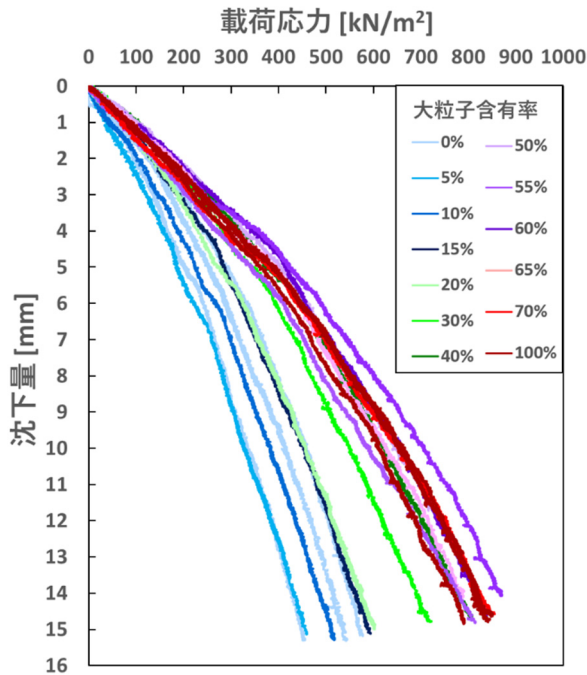


図-4 載荷応力と沈下量の関係

大粒子含有率 0~100%のすべてのケースにおいて、載荷応力-沈下量の曲線は、明瞭な破壊点を示さずに徐々に沈下が進んでいるため、局所せん断破壊が発生したと考えられる。局所せん断破壊が発生したのは、本研究では、試験層の二種混合体試料を締めめずに、遠心加速度 30G のみで拘束圧を加えているため、密度が低かったことが原因である。実際に、最終沈下量における供試体画像を観察したところ、写真-5~写真-7 に示すように、すべてのケースにおいて、すべり線は確認できなかったことから、局所せん断破壊が発生したと判断した。

2.6 載荷応力と大粒子含有率の関係

明瞭な破壊点が現れなかったため、ここでは、沈下量 13mm (フーチング幅の 29%に相当)の載荷応力を指標として、載荷応力と大粒子含有率の関係を考察した。図-5 に、沈下量 13mm の載荷応力と大粒子含有率の関係を示す。図-5 より、沈下量 13mm の載荷応力は、大粒子含有率が約 10%で増加し始め、約 40%で 100%の結果と同等になっていることから、10%~40%が中間骨格挙動であることと考えられる。また、それぞれの骨格挙動では、載荷応力が大粒子含有率に応じて、線形に推移し、特に、中間骨格挙動では、増加傾向を示している。図-5 中の破線は沈下量 13mm の載荷応力の傾向線、一点鎖線は中間骨格挙動の限界大粒子含有率を表す。大粒子含有率が、 $0 \sim V_L^b\%$ の小粒子骨格挙動を白色、 $V_L^b \sim V_L^a\%$ の中間骨格挙動を薄いグレー、 $V_L^a \sim 100\%$ の大粒子骨格挙動を濃いグレーで色分けしている。さらに、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ 、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ を、二乗近似の方法で判定した。二乗近似の方法では、大粒子含有率 0%における載荷応力の実験値の平均 $\bar{\alpha}_s$ と、大粒子含有率 100%における載荷応力の実験値の平

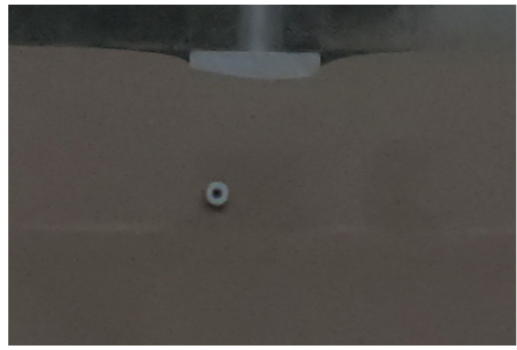


写真-5 大粒子含有率 0%(CH95 珪砂のみ)の最終沈下量での供試体画像

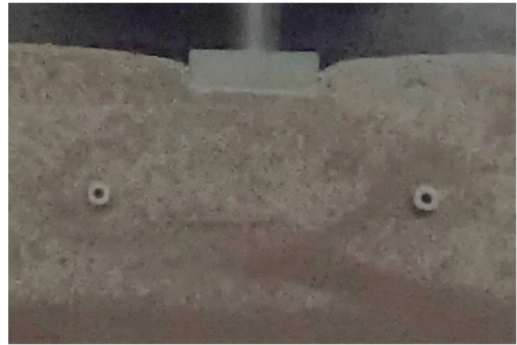


写真-6 大粒子含有率 40%の最終沈下量での供試体画像

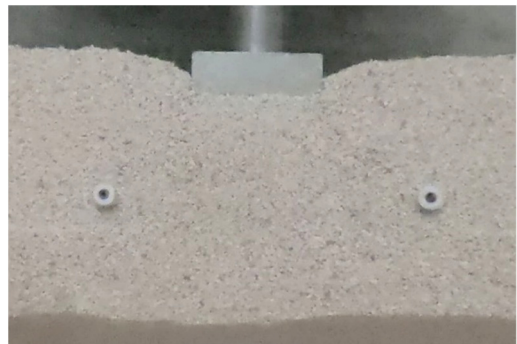


写真-7 大粒子含有率 100%(サンゴ砂のみ)の最終沈下量での供試体画像

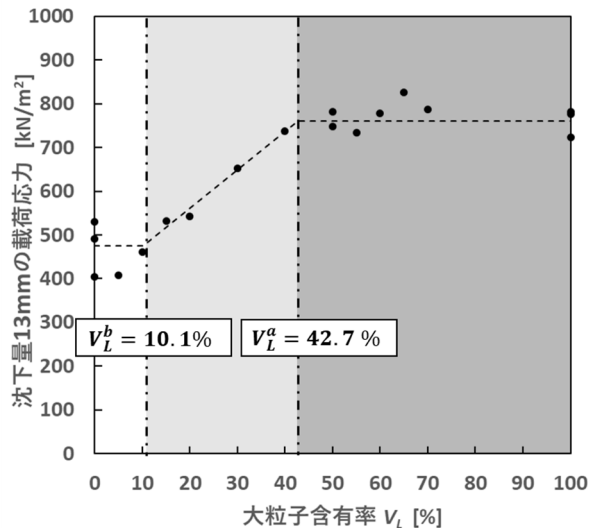


図-5 沈下量 13mm の載荷応力と大粒子含有率の関係

均 $\bar{\alpha}_L$ の差を α とする。 $\bar{\alpha}_S + \alpha/10$ 以上になる実験値から、 $\bar{\alpha}_L - \alpha/10$ 以下になる実験値に対して、最小二乗法で近似直線を求める。0%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_S$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^b\%$ とし、100%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_L$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^a\%$ とした。今回の実験結果では $V_L^b = 10.1\%$ 、 $V_L^a = 42.7\%$ であった。

3. 微視的モデルを用いた遠心場の限界大粒子含有率の評価

実験で得られた沈下量13mmの載荷応力を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率と、微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率を比較することで、遠心場における骨格挙動の限界大粒子含有率に与える拘束圧の影響を明らかにする。

表-1に、微視的モデルの計算に用いたパラメータを示す。表-1のパラメータと式(1)~(4)を用いて、微視的モデルの計算を行った。ここで、表-1中の間隙比は、いずれも遠心力を掛ける前の重力下の自然乾燥状態における間隙比である。また、式(2)の無次元パラメータ m は、Ueda et al.の研究を参考に2とした。式(3)の大粒子の最大長さ L は、今回用いた大粒子であるサンゴ砂の粒子形状や寸法を定量的に測定することが出来なかったため、球形形状であるとみなし、 $L = D_L$ としている。これらの計算の結果、微視的モデルの小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 5.2\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 58.3\%$ であった。

図-6に、図-5に微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率を追記した図を示す。図-6では、実験で確認した骨格挙動の限界大粒子含有率を一点鎖線で表し、微視的モデルから算出した小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ を赤色の実線、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ を青色の実線で示している。また、図-5とは異なり、微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率である実線を基準に、小粒子骨格構造を白色、中間骨格構造を薄いグレー、大粒子骨格構造を濃いグレーで色分けしている。

実験で得られた沈下量13mmの載荷応力を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率は、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 V_L^b が10.1%、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率 V_L^a が42.7%であった。実験の中間骨格挙動の範囲と微視的モデルの中間骨格構造の範囲を比較すると、中間骨格挙動の方が、 V_L^b で4.9%大きく、 V_L^a で15.6%小さく、中間骨格挙動と中間骨格構造で、どちらの限界大粒子含有率についても差が生じている。この差について考察していく。

表-1 微視的モデルの計算に用いたパラメータ

物性値	単位	サンゴ砂	CH95 珪砂
平均粒径 D_{50}	mm	0.900	0.125
間隙比 e	-	1.385	0.940

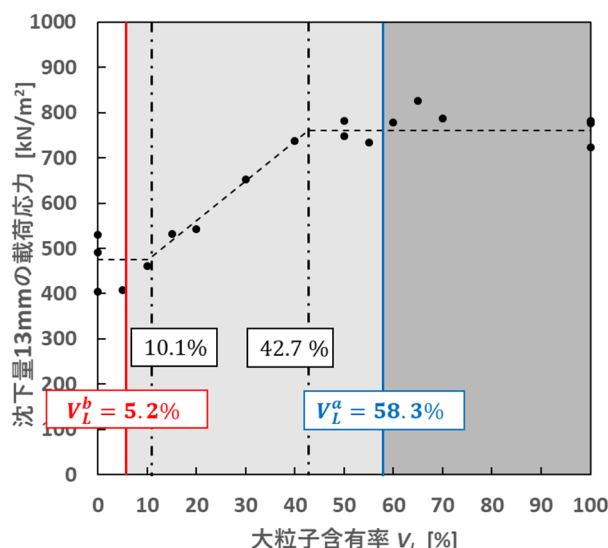


図-6 図-5 に微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率を追記した図

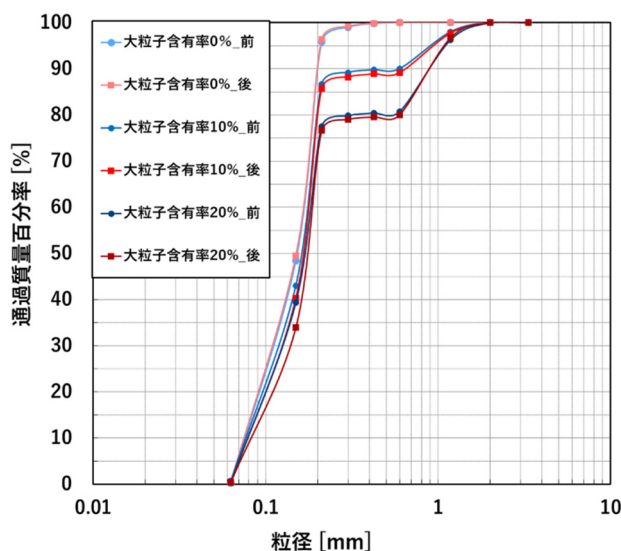


図-7 大粒子含有率 0,10,20%の実験前後の粒度分布

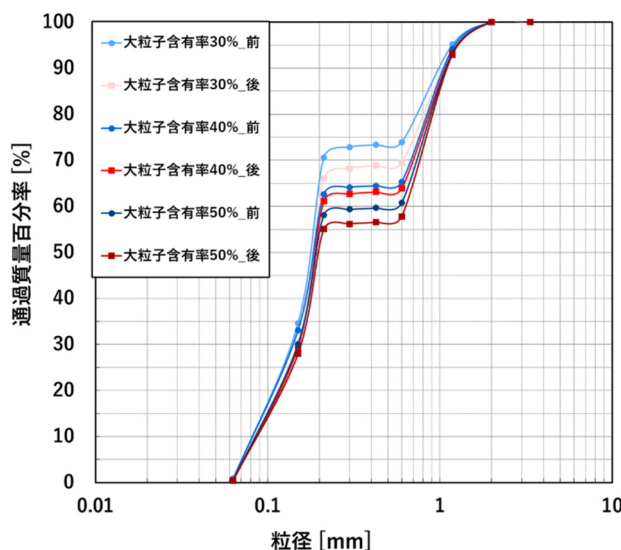


図-8 大粒子含有率 30,40,50%の実験前後の粒度分布

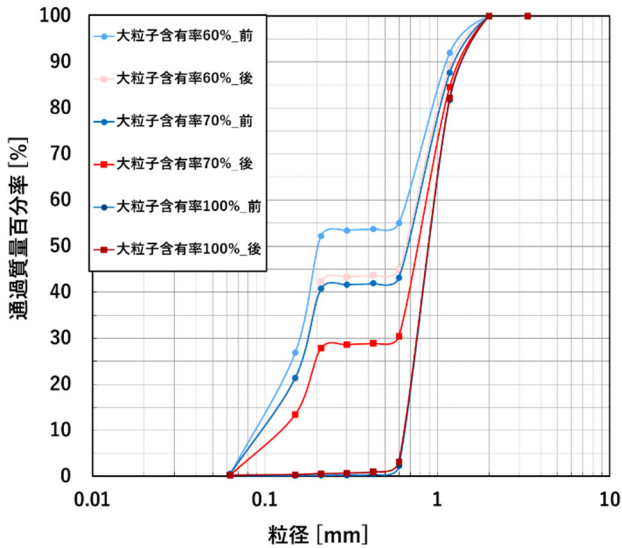


図-9 大粒子含有率 60,70,100%の実験前後の粒度分布

まず、供試体作製時の粒度分布と試験後のフーチング直下の粒度分布を比較することで、粒子破碎の有無を明らかにする。図-7に、大粒子含有率 0,10,20%の実験前後の粒度分布、図-8に、大粒子含有率 30,40,50%の実験前後の粒度分布、図-9に、大粒子含有率 60,70,100%の実験前後の粒度分布を示す。図-7から、大粒子含有率 0,10,20%では、実験の前後でほとんど粒度分布の変化は確認できない。一方、図-8と図-9の30%から70%では、実験の前後で粒度に変化が現れ、すべてのケースで試験後の粒度分布が下に位置しており、大粒子含有率が高いケースほど、粒度分布の変化が大きくなっている。これは、フーチング直下の大粒子の割合が増加していることを示している。100%では、0%から20%と同様に粒度分布に変化は見られない。粒子破碎が発生すると、粒子が砕かれて小さくなることから、粒度分布に変化が現れ、小粒子の割合が増加する。しかし、今回の結果では、粒度分布に変化は見られるが、小粒子ではなく大粒子の割合が増加している。さらに、最も粒子破碎が発生しやすいと考えられる100%のケースで、粒度分布の変化が見られないことから、粒子破碎は発生していないと考えられる。

次に、粒度分布の変化から判別できるフーチング直下の大粒子の割合が増加している現象について考察する。まず、考えられるのは、遠心加速度による拘束圧で大粒子の間の小粒子が下方へ移動した可能性である。しかし、通常の重力下と、フーチング载荷前の遠心加速度 30G が作用している場合で、フーチングの変位がほとんど観測されなかったことから、供試体の体積変化がほとんど発生していないと推察されるため、遠心加速度による小粒子の下方への移動は、ごくわずかであったと考えられる。さらに、小粒子が供試体の大部分を占めている30%のケースでも、粒度分布の変化から判別できる大粒子の割合が増加しているため、遠心加速度による小粒子の下方への移動の影響は限定的であるといえる。可能性が高い要

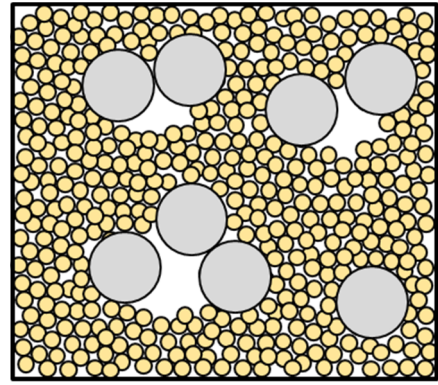


図-10 大粒子同士の接近や接触で発生する間隙

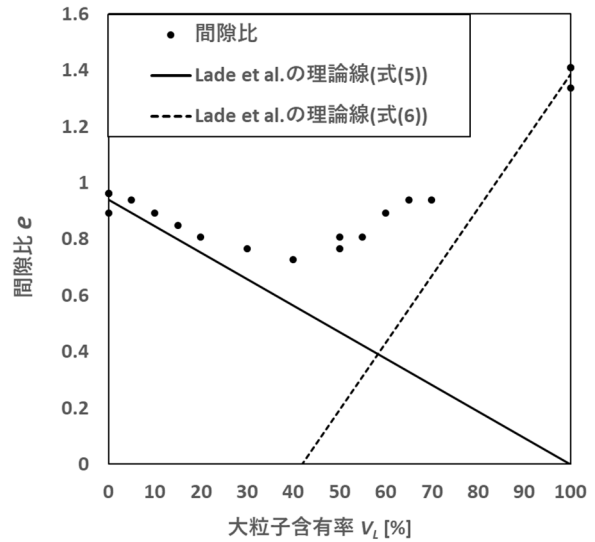


図-11 間隙比と大粒子含有率の関係

因としては、図-10に示す「大粒子同士の接近や接触で発生する間隙」が挙げられる。図-10は、土の中で大粒子同士の接近や接触が起こると、その周辺に小粒子が入り込めない間隙が発生することを表している。また、図-10は、土全体を平均的に見てモデル化した図-1の状態③および中間骨格構造の状態を、より実際の土の中のバラツキのある粒子配置を想定したイメージである。ここで示す間隙の存在は、間隙比からも確認できる。図-11に、間隙比と大粒子含有率の関係を示す。図中の実線と破線は、Lade et al.⁶⁾の間隙の理論線であり、交点となる大粒子含有率は、微視的モデルの大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a である。実線は式(5)、破線は式(6)で描かれる。

$$e_{0 \sim V_L^a} = e_s \left(1 - \frac{V_L}{100} \right) \quad (5)$$

$$e_{V_L^a \sim 100} = (1 + e_L) \frac{V_L}{100} - 1 \quad (6)$$

式中のパラメータの意味は、微視的モデルの理論式(1)~(4)と同じであり、 e_L は大粒子のみで構成される試料の間隙比、 e_s は小粒子のみで構成される試料の間隙比である。また、 V_L は任意の大粒子含有率である。Lade et al.⁶⁾

の理論線は、大粒子同士の接近や接触で発生する間隙が発生せず、理想的な粒子配置で堆積した場合の間隙比を表す。そのため、間隙が発生すると、間隙比の実験値は理論線よりも上にプロットされる。図-11に注目すると、大粒子含有率30%から間隙比の実験値が理論線よりも大幅に上方にプロットされていることため、30%から間隙が発生したと判断出来る。また、30%から大粒子含有率の増加に伴って、上昇幅が大きくなっている。これは、粒度分布に変化が見られ始めた大粒子含有率や、大粒子含有率の増加に伴って実験前後の粒度分布の変化が大きくなる傾向と一致する。この間隙が粒度分布の変化を引き起こすメカニズムとしては、フーチングの載荷による供試体の圧縮やせん断などの堆積構造の破壊に伴って崩れた間隙空間に、小粒子が落下する。しかし、大粒子は粒径が大きいため落下することが出来ないため、供試体上部の小粒子が減少し、大粒子の割合が多くなることが考えられる。

ここで再度、載荷応力を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率と、微視的モデルによる骨格構造の限界大粒子含有率について考察する。

上記より、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率($V_L^b = 10.1\%$)と小粒子骨格構造の限界大粒子含有率($V_L^b = 5.2\%$)は、いずれも粒子破碎や粒度分布の変化、間隙の発生に伴う間隙比の変化が発生していない大粒子含有率20%以下に位置する。そのため、双方の条件の違いは、遠心加速度による拘束圧であり、拘束圧が増加すると小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率は、増加すると推察される。拘束圧の増加に伴って小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率が増加する原因としては、拘束圧が増加したことで、空間の大部分を占める小粒子の強度が強くなり発現したためと考えられる。また、本研究では、サンゴ砂の粒子形状や寸法を定量的に測定することが出来なかったため、球体の理論式とサンゴ砂の平均粒径0.900mmを用いて小粒子骨格構造の限界大粒子含有率($V_L^b = 5.2\%$)を算出している。小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b の理論式は、大粒子の最大長さ L が大きくなると、 V_L^b が小さく算出される。仮にサンゴ砂を、長軸長さ $A(=L) = 1.2\text{mm}$ 、中軸長さ $B(=D_L) = 0.9\text{mm}$ 、短軸長さ $C = 0.6\text{mm}$ の扁平楕円体として、扁平楕円体の理論式を用いて計算を行った場合、 $V_L^b = 3.8\%$ となり、拘束圧作用下の小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率($V_L^b = 10.1\%$)との差が大きくなる。

大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率($V_L^a = 42.7\%$)と大粒子骨格構造の限界大粒子含有率($V_L^a = 58.3\%$)は、いずれも粒子破碎は発生していないが、粒度分布の変化、間隙の発生に伴う間隙比の変化が発生している大粒子含有率30%以上に位置する。そのため、双方の条件の違いは、遠心加速度による拘束圧とフーチング直下の粒度分布の変化から判別できる大粒子含有率の増加である。小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率は、載荷による堆積構造の破壊に伴う大粒子含有率の増加によって、小さくなった

と考えられる。一方で、図-4の沈下量5mm以下の載荷応力に着目すると、それぞれの大粒子含有率の載荷応力の大小関係が、沈下量13mmの大小関係とほとんど変わらないことが確認できる。フーチング直下の大粒子含有率の増加は、堆積構造の破壊によって起こるため、沈下量が小さいと大粒子含有率の増加量も小さい。そのため、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の場合と同様に、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率も、拘束圧の影響を受けている可能性がある。大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の場合には、拘束圧が増加すると、減少すると推察される。これは、大粒子の間にごく少数の小粒子が挟まった状態でも、拘束圧によって小粒子が固定されるため、大粒子同士が直接接触するときの強度が発現するためと考えられる。さらに、小粒子骨格挙動と小粒子骨格構造の限界大粒子含有率の差(4.9%)に比べて、大粒子骨格挙動と大粒子骨格構造の限界大粒子含有率の差(15.6%)が大きかったのは、大粒子骨格挙動の方は、拘束圧の影響に加えて、粒度分布の変化から判別できるフーチング直下の大粒子含有率の増加の影響を受けているためと推察できる。

これらをまとめると、拘束圧の増加による小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の増加、拘束圧の増加と堆積構造の破壊による大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の減少によって、中間骨格挙動の範囲は狭くなると推察される。

4. まとめ

本研究では、二種混合体の骨格挙動の限界大粒子含有率に与える拘束圧の影響を明らかにするために、遠心支持力モデル実験から、拘束圧作用下の載荷応力を指標とした骨格挙動の限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率との比較評価を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 載荷応力-沈下量の曲線は、大粒子含有率0%の最も小さいケースは5%の曲線と同等であり、最も大きいケースは15%の曲線と同等であった。大粒子含有率20%を超えると、曲線は明確に増加傾向を示し、40%で100%の最も小さいケースと同等になった。40%以上では、60%を除いて、100%の最も大きいケースを超える曲線は現れなかった。また、すべての大粒子含有率のケースにおいて、載荷応力-沈下量の曲線は、明瞭な破壊点を示さず、徐々に沈下が進んでいることから、局所せん断破壊が発生したと考えられる。これは、実験終了時の供試体の画像からも確認された。
- (2) 遠心加速度による拘束圧作用下の沈下量13mmでの載荷応力の挙動を指標とした場合、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率は10.1%、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率は42.7%であった。また、中間骨格挙動では、載荷応力は線形の増加傾向を示した。

- (3) 微視的モデルから計算した小粒子骨格構造の限界大粒子含有率は 5.2%，大粒子骨格構造の限界大粒子含有率は 58.3%であった。
- (4) 遠心支持力模型実験で得られた骨格挙動の限界大粒子含有率は、微視的モデルの骨格構造の限界大粒子含有率に比べて、小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率で 4.9%大きく、大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率で 15.6%小さいことが分かった。粒度分布と間隙比の考察から、拘束圧の増加による小粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の増加、拘束圧の増加と堆積構造の破壊による大粒子骨格挙動の限界大粒子含有率の減少によって、中間骨格挙動の範囲は狭くなると推察された。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 若手研究者海外挑戦プログラム(課題題目:微視的モデルを用いた粗粒土の統一的設計パラメータの評価に関する研究)、および JSPS 科研費 22J15374 の助成を受けたものです。ご支援を頂いた日本学術振興会、遠心支持力模型実験に協力していただいた英国シェフィールド大学の皆様に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 礫質土の力学特性についての研究委員会：礫質土の力学特性に関する技術の現状報告，礫質土の力学特性に関するシンポジウム発表論文集，2001.
- 2) 河合弘泰，園田慎一，渡部要一，松本昭二郎，池田政人，高田誠，北村良介：サンゴ礫混じり土の新サンプリング手法と力学特性について，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.3，pp.415-424，2015.
- 3) 渡部要一，金子崇，佐々真志：サンゴ礫混じり土の力学特性，港湾空港技術研究所報告，第 55 巻，第 3 号，2016.
- 4) 田上聖人，中田幸男，梶山慎太郎：微視的モデルによる二種混合体に対する小粒子骨格構造の限界大粒子含有率の評価，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.78，No.1，pp.32-44，2022.
- 5) 田上聖人：微視的モデルによる二種混合体の中間骨格構造の評価に関する研究，博士論文，山口大学，2023.
- 6) Lade, P. V., Liggio, C. D. and Yamamuro, J. A. : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, Geotechnical Testing Journal, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1998.
- 7) Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada, Y. : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, Granular Matter, Vol. 13, No. 6, pp. 731-742, 2011.
- 8) Taylor R.N. : Geotechnical centrifuge technology, Routledge, 1995.
- 9) 飛田哲男：地盤工学における模型実験の相似則と遠心模型実験，関西大学理工学会誌，第 23 巻，pp.11-17，2016.
- 10) 岡村未対，竹村次朗，上野勝利：遠心模型実験-実験技術と実務への適用- 2. 遠心模型の相似則，実験技術-利用と限界，土と基礎，Vol.52，pp.35-42，2005.
- 11) 原忠，國生剛治：砂礫の最小・最大密度に及ぼす影響因子の分析，土木学会論文集，No.778/III-69，pp.151-162，2004.

(2023 年 6 月 19 日 受付)