

# 各種条件下における礫混じり砂の力学挙動の違いとそのシミュレーション

## Difference of mechanical behavior of gavel-mixed sand under various conditions and their simulations

森 涼香<sup>1</sup>, 小高猛司<sup>2</sup>, 崔 瑛<sup>3</sup>

- 1 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 2 名城大学・理工学部建設システム工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 名城大学・理工学部建設システム工学科

### 概 要

河川堤防の浸透時のすべり破壊に対する安定性評価には、室内三軸試験で得られる強度定数が用いられる。その際、粒度調整した再構成供試体での試験が実施されるが、供試体作製方法、供試体密度、粒度調整方法等について明確には定められていないのが現状である。本研究では、比較的広範な粒度の河川堤防土を用いて室内三軸試験を実施し、せん断時の排水条件も含めて、供試体の寸法・密度・作製方法、粒度調整法のいずれもが、せん断挙動に大きな影響を及ぼす因子となることを示した。さらに、SYS カムクレイモデルを用いたシミュレーションを実施し、供試体密度、供試体作製方法の影響について考察した。

キーワード：河川堤防，礫混じり砂，三軸試験，供試体作製，要素シミュレーション

## 1. はじめに

平成 16 年に頻発した豪雨災害を受けて、国を挙げて河川堤防の浸透時のすべり破壊に対する詳細点検がなされてきた。詳細点検で用いる強度定数は、再構成試料による室内試験で求められるが、その際の再構成供試体の作製方法、密度、粒度調整の方法等の諸条件については明確に定められていないのが現状である。一方、本年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震においては、国内 3,000 箇所以上の河川堤防が被災し、堤防の耐震性向上が改めて大きな課題となった。もちろん、堤防の耐震性照査についても、国を挙げてすでに数年前から実施されてきているが、浸透時の詳細点検と同様に、室内試験での土質定数の評価についての問題が常につきまとっている。特に、耐震性照査においては、精緻なモデルに基づく動的数値解析が用いられているにも拘わらず、入力パラメータの設定に関して細心の注意が払われているとは言い難い。例えば、堤防は広範な粒度の土で構成されており、室内試験を実施する際には大きな砂礫を除外して供試体を再構成せざるを得ないが、その粒度調整法や供試体密度によって得られる力学特性は大きく異なる<sup>1)</sup>。

本論文では、小高ら<sup>1)</sup>の大型および小型三軸試験の特徴的な結果を示すとともに、供試体作製法による単調および繰返しせん断特性の違いについても新たに示す。また、SYS カムクレイモデル<sup>2)</sup>を用いて、単調荷試験のシミュレーションを実施し、試験条件の影響について検討する。

## 2. 大型および小型三軸試験<sup>1)</sup>

### 2.1 実験試料および供試体作製法

実験試料は、鳥取県小鴨川の堤防で採取された砂礫である。本研究では、原粒度試料を用いた大型三軸試験とせん頭粒度試料を用いた小型三軸試験を実施した。供試体の直径は、大型供試体で 30cm、小型供試体で 5cm であり、小型供試体においては供試体径の 1/5 以上の礫を入れないように配慮し、9.5mm 以上の礫を取り除いた。図 1 に原粒度ならびにせん頭粒度試料（通常粒調試料と表記）の粒径分布を示す。粒度調整によって、せん頭粒度試料は礫混じり砂に分類される。

供試体は再構成して作製されるが、乾燥密度を 1.7 および 1.8g/cm<sup>3</sup> の 2 種とした。これは別途実施した突固めによる土の締固め試験（JIS A1210 A-a 法）によって最大乾燥密度が 2.0g/cm<sup>3</sup> と求められたことから、締固め度 85 および

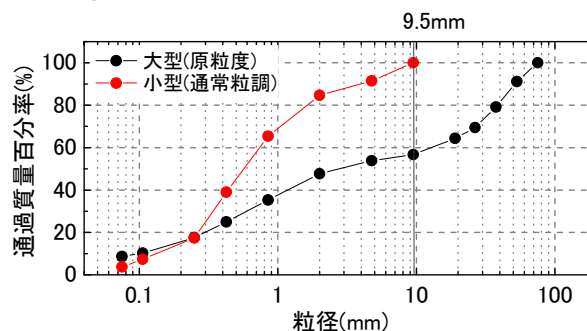


図 1 小鴨川試料の粒度曲線

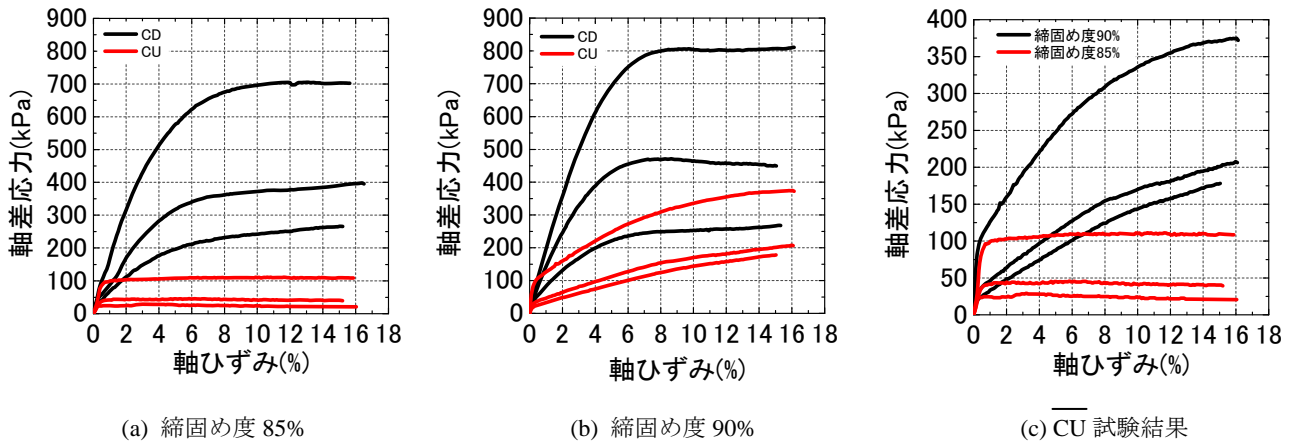


図2 応力～ひずみ関係（大型三軸試験）

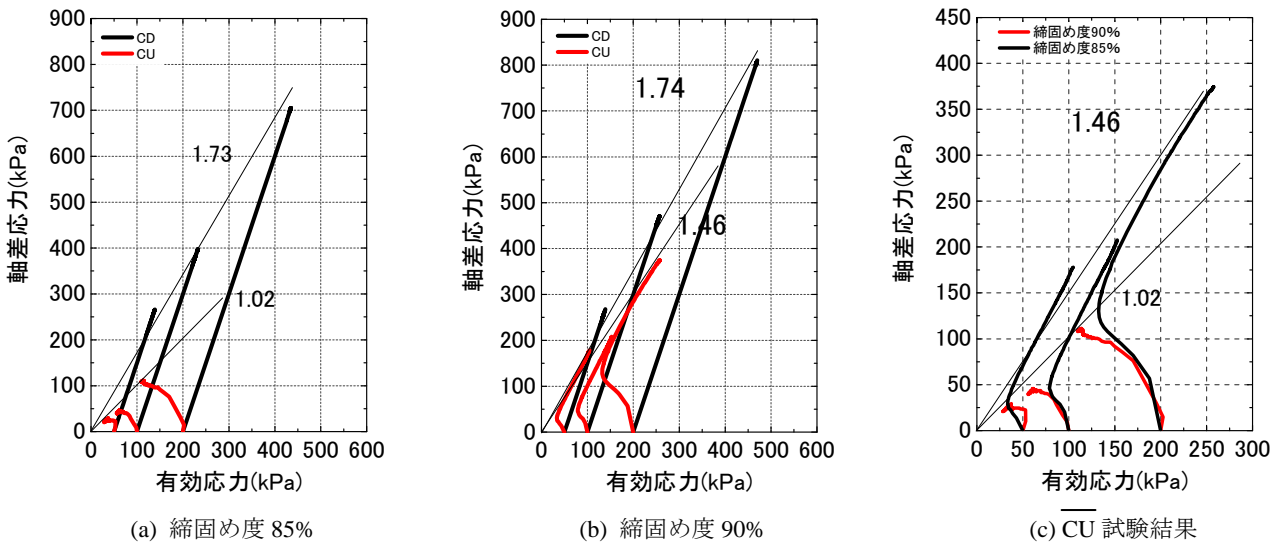


図3 有効応力経路（大型三軸試験）

90%に相当する。また、供試体作製には、大型三軸試験では自然乾燥試料を用いた空中落下法を採用し、小型三軸試験では含水比 14%に調整する湿潤締固め法を用いた。いずれの試験においても、モールド内で5層ずつ密度管理をしながら軽く締固めて、供試体を作製した。その後、大型三軸試験では二酸化炭素置換法、小型三軸試験では二重負圧法を用いた飽和化過程を経て、所定の有効拘束圧（50, 100, 200kPa）で等方圧密し、載荷速度 0.1%/min でせん断を行った。試験条件は $\overline{CU}$ およびCDである。また、一連の大型三軸では、試験後の試料を自然乾燥させることにより繰り返し用いた。

## 2.2 大型三軸試験と排水条件

はじめに小鴨川試料を用いた大型三軸試験の結果を示す。2種類の乾燥密度（締固め度）を採用し、 $\overline{CU}$ 試験とCD試験を実施した。図2および図3に、応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。応力～ひずみ関係を見ると、CD試験では、供試体の締固め度や有効拘束圧で多少の違いは見られるが、軸ひずみ7～8%付近で軸差応

力の増加が止まる傾向は共通である。一方、 $\overline{CU}$ 試験においては、締固め度90%では軸差応力は単調増加するのに対し、締固め度85%では軸差応力はせん断初期に増加するのみで、その後ほぼ一定値となり、供試体締固め度による試験結果の差が大きい。図3の有効応力経路を見てみると、締固め度90%の $\overline{CU}$ 試験では、せん断初期に少し塑性圧縮を示し、その後正のダイレイタンスの発現により軸差応力が大きく増加している。また、 $\overline{CU}$ 試験での破壊応力比は1.46、CD試験での破壊応力比は1.74となっており、CD試験での値は比較的大きな値となった。締固め度85%の $\overline{CU}$ 試験においては、せん断初期から大きく塑性圧縮し続ける傾向があり、破壊応力比は1.02で極めて小さい値となった。一方、CD試験では、 $\overline{CU}$ 試験とは対照的に、せん断中の排水の効果により破壊応力比は1.73と非常に大きくなった。締固め度90%のCD試験と締固め度85%のCD試験での破壊応力比を比較すると、ほぼ同じ値となっている。また締固め度90%の $\overline{CU}$ 試験と締固め度85%の $\overline{CU}$ 試験の有効応力経路を見ると、正のダイレイタンスに変相するまでの経路は非常に近いことがわかる。

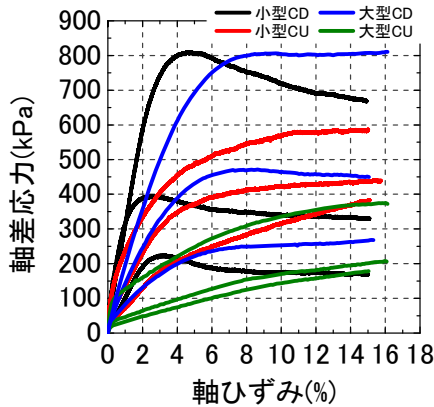
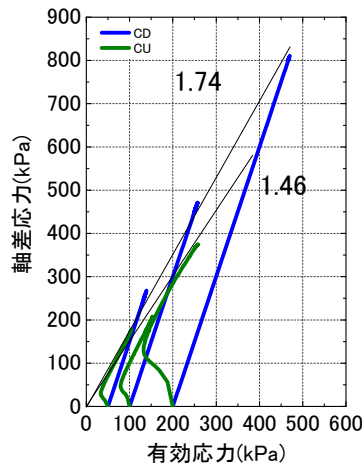
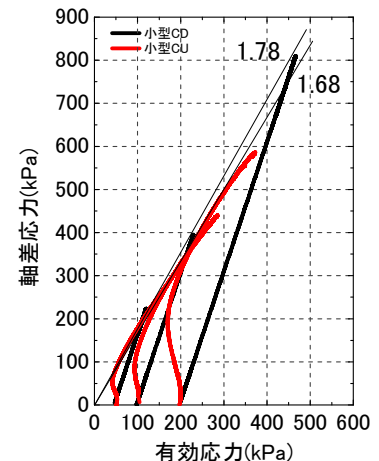


図4 応力～ひずみ関係(締固め度 90%)



(a) 大型三軸試験



(b) 小型三軸試験

図5 有効応力経路(締固め度 90%)

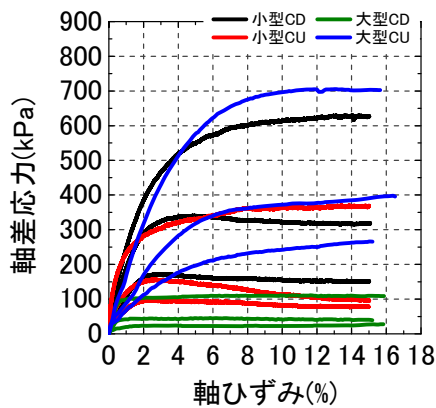
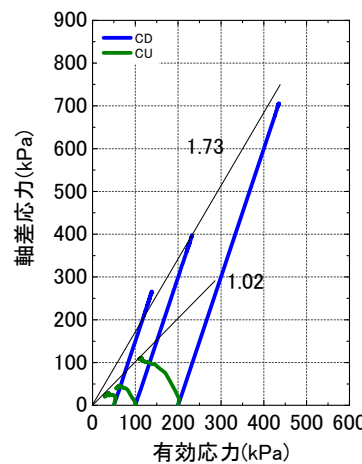
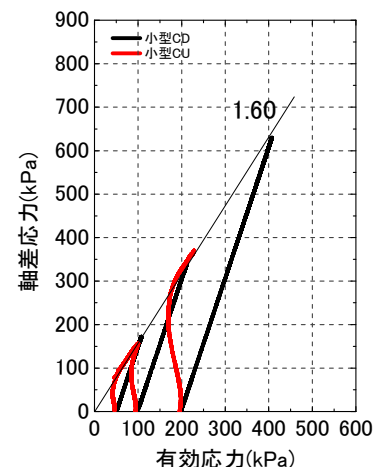


図6 応力～ひずみ関係(締固め度 85%)



(a) 大型三軸試験



(b) 小型三軸試験

図7 有効応力経路(締固め度 85%)

### 2.3 供試体寸法と排水条件の違い

次に小型三軸試験を実施し、供試体乾燥密度(締固め度)と排水条件の両者を考慮しつつ、大型三軸試験結果との比較を行う。具体的には、大型三軸試験と同様に、締固め度90%および85%の小型供試体を準備し、 $\overline{CU}$ とCDの2種の排水条件で試験を実施した。図4および図5に締固め度90%の供試体における応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。有効応力経路に着目すると、 $\overline{CU}$ 試験では、大型三軸試験、小型三軸試験ともに、せん断初期に塑性圧縮を示し、その後、正のダイレイタンスの発現により塑性膨張に転じて軸差応力が増加するが、小型三軸試験の方がより軸差応力は増大するとともに、破壊応力比も大きくなる。一方、CD試験では、破壊応力比に大きな差は見られない。図6および図7に締固め度85%の供試体における応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。有効応力経路に着目すると、 $\overline{CU}$ 試験の場合、大型三軸試験では、せん断初期から大きく塑性圧縮したままであるのに対して、小型供試体では、せん断後半に塑性膨張に転じている。また、大型三軸試験の破壊応力比は小型

三軸試験よりもかなり小さな値を示し、大型三軸試験では比較的ゆる詰めめの砂の挙動を示すことがわかる。一方、CD試験では破壊応力比に大きな差は生じない。

## 3. 供試体作製方法による力学挙動の違い

### 3.1 空中落下法と湿潤締固め法

2章の試験結果では、大型と小型によって試験結果が異なることが示された。両者の力学挙動が大きく異なるのは、供試体寸法の違いに起因して、供試体内の礫分や細粒分の組成が変わるためと考えられる<sup>1)</sup>。しかし、前章で述べたように、大型と小型では供試体作製方法が異なるため、その影響についても検討しておく必要がある。

本章では、せん頭粒度試料を用いた小型供試体について、空中落下法と湿潤締固め法の2つの方法を用いて供試体を作製し、両者の試験結果を比較する。その際、湿潤締固め法については、より均質に供試体を作製できるように調整含水比を10%に変更した。いずれの供試体においても、モールド内で5層ずつ密度管理をしながら軽く締固めて、供

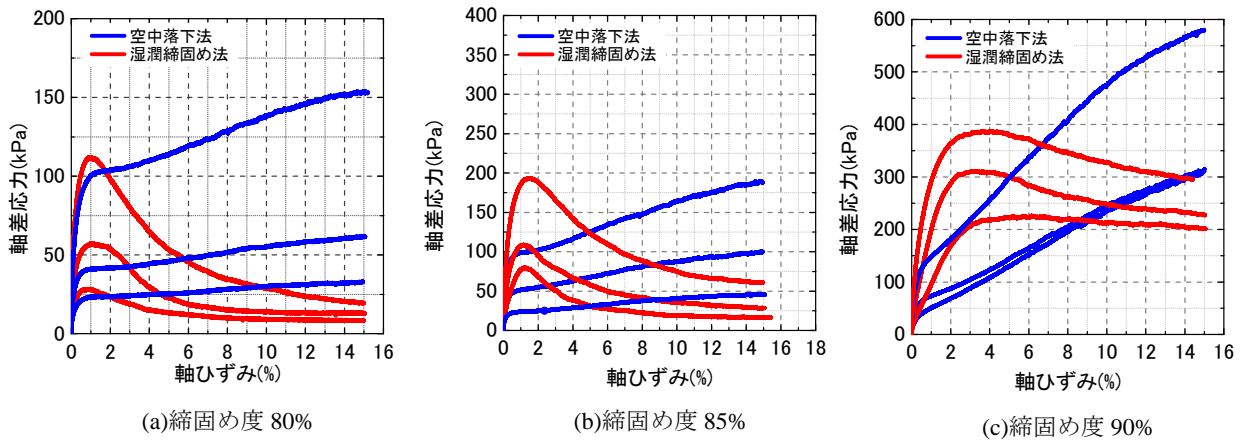


図8 応力～ひずみ関係（単調載荷試験）

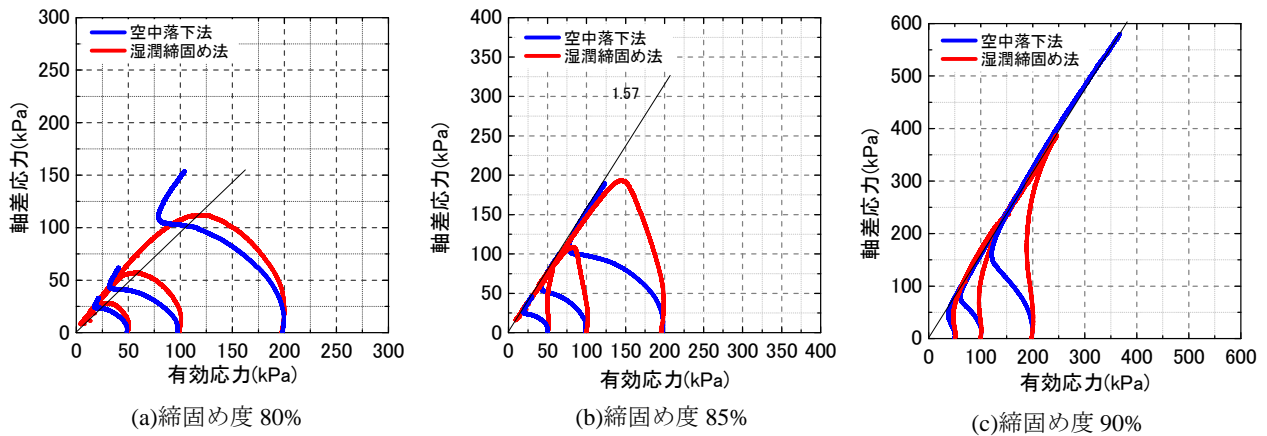


図9 有効応力経路（単調載荷試験）

試体を作製した結果、同一の有効応力状態において、ほぼ同一の間隙比を有する供試体を作製することができた。Ishihara<sup>3)</sup>は、均質な砂を用いた三軸試験において、供試体作製法の違いにより力学挙動が異なることを示したが、あくまで同一の初期有効応力下でも異なる間隙比の供試体であった点が本研究と大きく異なる。なお、本章では、締固め度 80%（乾燥密度 1.6g/cm<sup>3</sup>）の供試体も新たに検討に加えることとした。

以下、単調載荷試験と繰返し載荷試験を通して、2つの供試体作製法と供試体密度の違いによる力学挙動の相違について検討する。

### 3.2 単調載荷試験結果

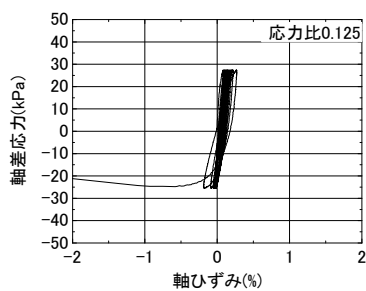
単調載荷試験結果を図8および図9に示す。図8の応力～ひずみ関係を見ると、湿潤締め法の供試体では、ピーク強度後にひずみ軟化挙動が見られるが、空中落下法による供試体では、一貫して軸差応力は増加し続ける。一方、図9の有効応力経路を見ると、空中落下法の供試体では、いずれの締固め度の供試体であっても、最終的に正のダイレイタンスが発現しているが、せん断のごく初期においては大きく有効応力が減少（すなわち塑性圧縮）している。湿潤締め法による供試体では、いずれの締固め度であっても、最終的には大きな塑性圧縮を伴う軟化を示しているが、ピーク強度までは空中落下法による供試体ほど有効応力の低下は見られない。特に締固め度の高い供試体におい

ては、ピーク強度までは弾性体に近い挙動を示し、その後一気に脆性的に破壊していることが見て取れる。また、総じて湿潤締め法供試体の方が変相角は小さいが、締固め度が高くなると両者の差は小さくなる。

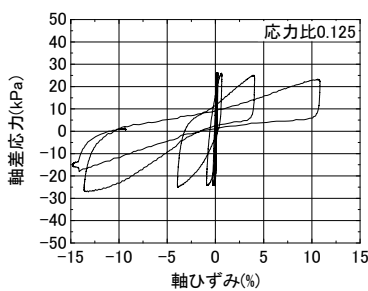
以上のことから、供試体作製時の乾燥密度が同じであっても、湿潤締め法で作製された供試体の方が高位な骨格構造を有しており、小さなひずみレベルであれば、空中落下法での供試体より大きなせん断強度を有することがわかる。

### 3.3 繰返し載荷試験結果

繰返し載荷試験における応力～ひずみ関係および有効応力経路を図10および図11にそれぞれ示す。代表として締固め度 80%の供試体の試験結果のみを示した。いずれの供試体でも変相線に近づくまでの繰返し過程では、軸ひずみの発生は非常に小さいが、湿潤締め法による供試体では、大きなひずみが発生した途端に一気に液状化に至る。一方、空中落下法による供試体では、変相線到達後もサイクリックモビリティによる有効応力の増加・減少を繰り返す、徐々にひずみが大きくなる。変相線到達までの挙動に着目すると、湿潤締め法による供試体の方が、1回の繰返しに伴う有効応力の低下量は小さく、単調載荷試験で観察された小ひずみレベルでの弾性挙動と調和している。また、一気に液状化に至る点も、単調載荷時に正のダイレイタンスが発現が見られないことと一致している。

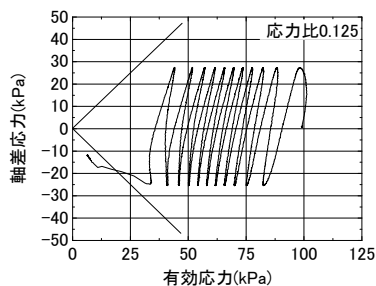


(a) 湿潤締固め法

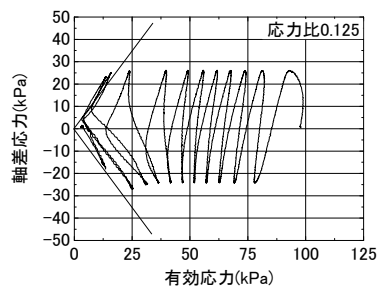


(b) 空中落下法

図 10 応力～ひずみ関係 (繰返し载荷試験)



(a) 湿潤締固め法



(b) 空中落下法

図 11 有効応力経路 (繰返し载荷試験)

図 12 は過剰間隙水圧比 95%で定義した液状化強度曲線である。締固め度が大きいほど、曲線はグラフの上部へ位置している。空中落下法と湿潤締固め法での差に着目すると、締固め度 80%においては、両供試体で液状化強度曲線に差は見られないが、締固め度 90%では差が現れ、例えば、繰返し载荷回数 20 回での液状化強度比は空中落下法のほうが 0.04 程小さい値となる。

#### 4. SYS カムクレイモデルによる小型三軸試験結果のシミュレーション

本章では、2章に示した小型三軸試験を対象として、一応変形場における SYS カムクレイモデル<sup>2)</sup>の構成式応答と試験結果をフィッティングすることにより、供試体密度の違いにより礫混じり砂の力学挙動が大きく異なることについて、供試体作製時の骨格構造および過圧密の程度によって表現することを試みた。なお、2章では示していないが、締固め度 80%の供試体についても試験を実施し、本章のシミュレーションに供した。

計算に用いた材料定数(弾塑性パラメータと発展側パラメータ)を表 1 に示す。圧縮指数  $\tilde{\lambda}$  は試験結果を参考に決定し、 $\tilde{\kappa}$ ,  $N$  はフィッティングにより決定した。また、各種骨格構造の発達を制御する発展側パラメータ ( $m$ ,  $a$ ,  $m_b$ ) もフィッティングで決めている。本解析では簡単のため、 $b_r = 0$  とし、せん断中に異方性が変化しないと仮定した。以上のパラメータは、同じ礫混じり砂であれば供試体密度が異なっても共通の値になると仮定した。

表 2 にシミュレーションの初期値を示す。供試体密度(締固め度)の相違を、初期比体積(比体積=間隙比+1)の違いだけではなく、初期構造の程度を変えることによって

- 湿潤締固め法(締固め度80%)
- 湿潤締固め法(締固め度85%)
- 湿潤締固め法(締固め度90%)
- 空中落下法(締固め度80%)
- 空中落下法(締固め度90%)

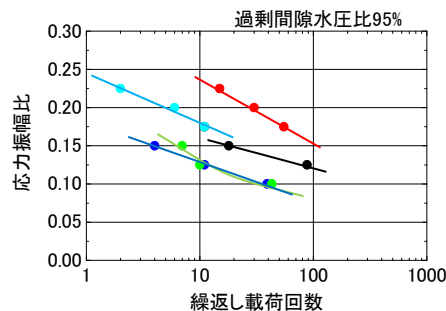


図 12 液状化強度曲線

表 1 計算に用いた材料定数

弾塑性パラメータ	
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.06
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.01
限界状態定数 $M$	1.46
NCL の切片 $N$ ( $q=0, p'=98.1\text{kPa}$ の時の比体積)	1.60
ポアソン比 $\nu$	0.30
発展側パラメータ	
構造劣化指数 $a$	0.90
正規圧密土化指数 $m$	0.04
回転硬化指数 $b_r$	0
回転硬化限界定数 $m_b$	0

表 2 計算に用いた初期値

締固め度 (%)	80	85	90
初期比体積 $v_0$	1.65	1.56	1.47
初期構造の程度 $1/R_0^*$	7.00	5.70	3.00
初期過圧密度 $1/R_0$	7.3	16.3	37.4
初期異方性 $\zeta = \sqrt{(2/3)\beta_0 \cdot \beta_0}$	0.01		
初期平均有効応力 $p'_0$ (kPa)	9.80		

表現する。すなわち、三軸試験では、いずれの供試体も締固めの程度を変えることにより密度を変えているが、それらの締固めの履歴を解析で表現することは困難であるため、本解析では、締固め終了時の供試体を対象として、それぞれ異なる初期値の設定をした。いずれのケースでも初期平均有効応力は  $p'_0 = 9.8 \text{ kPa}$  とし、50, 100 および 200 kPa までの等方圧密過程をシミュレートした後に、非排水せん断を行った。また、簡単のため全ケースに対し、初期異方性も一様に設定した。

図 13 にシミュレーション結果を示す。いずれの締固め度のほとんどの解析ケースにおいて、試験結果を適切に表現できている。すなわち、図 13(a)に示す締固め度 80%の

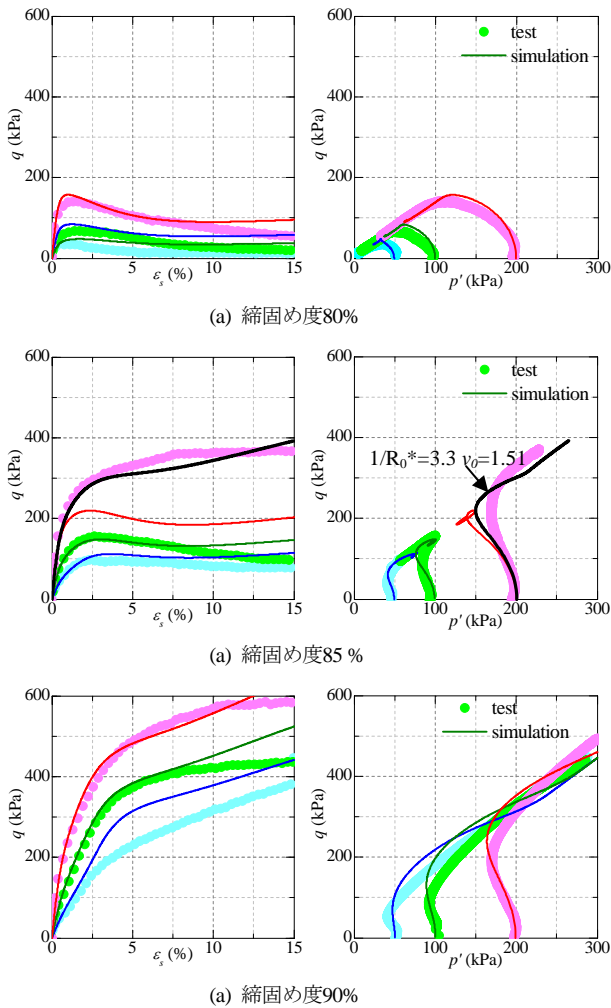


図 13 小型三軸試験結果のシミュレーション

場合では、せん断開始時の有効拘束圧が異なるいずれのケースにおいても、塑性圧縮を伴うひずみ軟化を示す典型的なゆる詰め傾向の試験結果が、シミュレーションで良く表現できている。一方、図 13(c)に示す縮固め度 90%の場合には、塑性膨張を伴うひずみ硬化を示す典型的な密詰め傾向を呈し、先の 80%とは真逆の試験結果となるが、やはりシミュレーションは試験結果を良く表現できている。シミュレーションにおける両者の相違は、縮固め度 80%に比べて 90%方が小さな初期比体積となることは当然であるが、初期構造（嵩張り具合）の程度を表すパラメータ  $1/R_0^*$  も小さくなる。すなわち、密詰め供試体を作製する際には、大きな縮固めエネルギーが加えられるために、供試体の骨格構造が破壊されるものと考えられる。そのため、過圧密の程度は逆に大きくなる。

縮固め度 85% の供試体は 80%（ゆる詰め）と 90%（密詰め）の中間の位置づけで中密にあたるが、図 13(b)に示すせん断開始時の有効拘束圧 50 と 100kPa のケースの試験結果を見ると、正のダイレイタンスを示す密詰め傾向を呈した後に、若干のひずみ軟化が現れている。表 2 に示した初期値を用いて実施したシミュレーションは、その試験結果の傾向を良く表現している。しかし、せん断開始時の

有効拘束圧が 200kPa のケースでは、表 2 の初期値を用いたシミュレーション結果（赤い実線）は、試験結果との差が大きい。すなわち、200kPa の試験結果は、正のダイレイタンスが発現したまま硬化し続ける密詰めの傾向を示しており、明らかに 50 と 100kPa の試験結果の傾向とは異なる。このケースに用いた供試体が、若干密詰めとなっていたと解釈し、シミュレーションにおいても、初期比体積  $v_0$  を若干小さく 1.51 とし、かつ、初期構造の程度を表すパラメータ  $1/R_0^*$  を 3.3 と少し小さく設定し直して再度解析した。その結果が、図 13(b)中に黒い実線としてすでに示している結果であり、試験結果をよく説明していることがわかる。以上のように、中密な供試体においては、密詰めとゆる詰めの間中間的な性質があるために、試験結果の傾向が試験ケース毎に異なる場合があるが、それは供試体作製時のわずかな初期状態の違いに起因することが、このシミュレーション結果から推測できる。

今回、小型三軸試験の供試体密度（縮固め度）が異なる試験結果のシミュレーションを試み、初期の比体積（すなわち間隙比）と構造の程度を変えることにより、概ね試験結果をよく説明できることが示された。今後は、大型三軸試験結果や供試体作製法が異なる試験結果のシミュレーションを実施し、それらの効果を物理的な意味に基づく各種パラメータの違いとして表現してゆく予定である。

## 5. まとめ

供試体密度や供試体寸法、さらに供試体の作製方法によって、礫混じり砂の力学挙動は大きく異なることが本研究の一連の三軸試験によって示された。原粒度の大型三軸試験の結果が真の河川堤防土の力学特性を表していると考えれば、粒度調整土で実施している小型三軸試験の結果は、本来の河川堤防土の力学特性を正確に評価していないことになる。しかしながら、実務上は今後も低コストの小型三軸試験によって解析定数を決定せざるを得ないため、小型三軸試験結果を用いて正確な力学特性を評価する手法を整備することが喫緊の課題である。

一方、本研究で示したように、SYS カムクレイモデルは、礫混じりの河川堤防土の力学特性を比較的正確に評価できる。今後は、大型三軸試験結果や供試体作製法が異なる試験結果の解析事例を増やし、そこで用いる各種パラメータと小型三軸試験でのパラメータの両者を詳細に比較・分析することにより、小型三軸試験結果を用いて真の河川堤防土の力学特性をシミュレーションできる手法が開発できるものと考えている。

## 参考文献

- 1) 小高ら:河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.193-205, 2010.
- 2) 例えば, Asaoka et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 47-57, 2002.
- 3) Ishihara: Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes, Géotechnique, 43(3), 351-451, 1993.