

初期含水比の違いが河川堤防砂の力学特性に及ぼす影響と その三軸試験シミュレーション

Effects of degree of initial water content on mechanical properties of sand in river embankment and its numerical simulation of triaxial test

兼松祐志¹, 森 涼香¹, 小高猛司², 崔 瑛², 李 圭太³

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 建設技術研究所

概 要

河川堤防の耐震性照査に用いられている土質定数は、粒度調整試料による再構成供試体を用いた室内試験により求められている。しかし、室内試験時の供試体作製における再構成方法、密度、粒度調整法等の諸条件について明確に定められていない。そこで、本論文では、礫混じり砂を対象とした三軸試験を行い、その際の供試体作製時の含水比の違いが力学特性にどのような影響を及ぼすのかについて検討した。その結果、初期含水比の違いによって力学特性は大きく異なることが示された。次に、その力学特性の違いは供試体内に形成される骨格構造の違いが関係していると考えて、SYS カムクレイモデルを用いたシミュレーション解析を行った。その結果、各供試体が有する初期構造の程度とその劣化のしやすさを表す構造劣化指数の2つのパラメータを系統的に変化させることで、各供試体の締固め度と初期含水比の違いによる力学挙動の変化を表現できることを示した。

キーワード：河川堤防、礫混じり砂、三軸圧縮試験、構造、構成式、シミュレーション

1. はじめに

河川堤防の浸透時のすべり破壊に対する安定性照査に用いる強度定数を求める際には、基本的に攪乱試料で供試体を再構成して室内試験が実施される¹⁾。試験で求める土質定数は、安定性照査にとって極めて重要であるにも拘わらず、再構成供試体の作製方法や粒度調整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。小高らは礫から細粒分まで含む河川堤防砂礫を用いて、原粒度試料による大型三軸試験と粒度調整試料による通常の小型三軸試験を実施し、供試体寸法、粒度調整方法、供試体密度、試験時の排水条件が砂礫の力学特性に大きな影響を及ぼすことを示した²⁾。本論文では、供試体作製時の含水比の違いによって、三軸試験で得られる砂礫の力学特性が大きく異なることを示す。均一粒径砂では、供試体作製法を変えることによって、同一の初期有効応力下でも異なる間隙比の供試体が作製でき、それぞれの非排水せん断挙動が異なることがIshihara³⁾によって示されている。本論文では、堤体材料として一般的な砂礫（粒度調整後には礫混じり砂に分類）を対象とし、異なる供試体作製法ではあるがほぼ同一の間隙比の供試体を再構成し、それぞれの力学特

性が大きく異なることを示すことがIshiharaの研究³⁾とは大きく異なる。

本論文の後半では、前半で示す「供試体再構成時の含水比の違いによって、同じ間隙比の供試体でも力学挙動が大きく異なる」試験事実を、「供試体毎に骨格構造が異なるため」という仮説を立て、それを実証するために行った数値シミュレーションの結果を示す。具体的には、土の構造、過圧密、異方性を表すことのできる SYS カムクレイモデル⁴⁾を用いて、同じ間隙比であっても、構造ならびに過圧密度が異なる供試体を模擬して非排水せん断試験をシミュレートすることにより、三軸試験結果を無理なく説明できることを示す。

2. 試験の概要

(1) 試験試料

試験試料は鳥取県小鴨川の河川堤防で採取しており、図1の黒のプロットに原粒度試料を、赤のプロットに粒度調整試料を示す。本試験の供試体直径は5cmであるため、せん頭粒度法を用いて9.5mm（直径のおよそ1/5）以上の礫を除外した粒度調整試料を用いた。また、突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210 A-a 法）により最大乾燥密度が

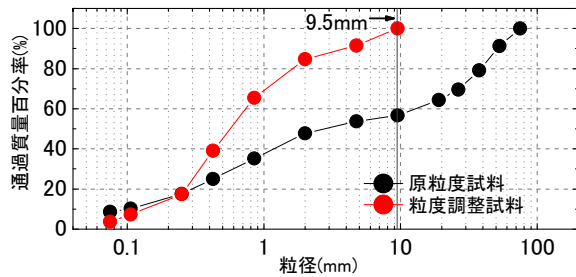


図 1 実験試料の粒度分布

表 1 単調載荷試験の供試体の圧密終了後の間隙比

供試体作製時の 初期含水比 (%)	締固め度 (%)		
	80	85	90
0	0.565	0.519	0.465
3	0.549	0.492	0.475
5	0.554	0.503	0.451
10	0.589	0.513	0.439
14	0.598	0.499	0.439

2.0g/cm³となり、最適含水比は 10.5%となった。

(2) 供試体作製と試験手順

供試体作製時の乾燥密度は 1.6, 1.7 および 1.8g/cm³ (それぞれ、締固め度 80, 85 および 90%に相当)とした。また、いずれの締固め度の供試体においても、試験試料を含水比 0, 3, 5, 10 および 14%の 5 種類に含水調整してから、供試体の作製を行った。具体的には、供試体を作製するために必要分の自然乾燥状態の試験試料を準備し、所定の含水比となるように、試料を霧吹きで加水し、水分が均一に行きわたるようにかき混ぜる。初期含水比 0%の供試体に関しては、自然乾燥試料をそのまま使用した。試料は、モールドに 5 層に分けて入れるため、含水比調整後の試料を 5 等分しておく。その後、直径 5cm、高さ 10cm のモールド内で軽く突き固めて作製した。なお、突固め後に自立できない含水比が低い供試体においては、三軸試験機のペダスタルに設置した 2 つ割りモールドの内側にあらかじめメンブレンを張っておき、モールド内にて軽く締固めを行うことで、供試体を作製した。この後、キャップを設置して、供試体に負圧をかけることで自立させた。本論文では、供試体作製時に含水調整した際の含水比を「初期含水比」と呼ぶ。ただし、いずれの初期含水比の供試体であっても、三軸試験を実施する際には、二重負圧法により飽和化しており、B 値が 0.95 以上となっていることを確認している。なお、飽和化に伴い供試体内部でコラプス現象が発生していると予想されるが、その量はわずかであると考えている。その理由は、二重負圧法による飽和化の過程において、供試体は有効拘束圧 20kPa という低拘束圧条件下にあり、しかもセル内に作用させる負圧による載荷ロッドの引き込みを防ぐために、供試体の軸方向変位は固定されており、供試体内のサクション消失に伴う骨格構造の急激な崩壊を極力防いでいるからである。また、供試体飽和後にはサ

クションは消失しており、次章で示す試験結果には影響していないことを付記する。

飽和化終了後、有効拘束圧 20kPa のまま慎重に背圧を 200kPa まで増加させた後、有効拘束圧 100kPa に増加させて 1 時間の等方圧密を行う。表-1 は等方圧密後の供試体の間隙比である。飽和化の過程における微小な体積変化は反映できていないが、有効拘束圧増加に伴う堆積圧縮は反映されている。表より、圧密後の間隙比にばらつきは見られるが、供試体作製時の初期含水比に依存したばらつきであるとは言えず、有意な差ではないと判断した。

等方圧密後の供試体は、単調載荷試験においては、軸変位速度 0.1%/min で非排水せん断を行い、繰返しせん断試験においては、所定の繰返し応力比を用いて非排水条件下で、0.1Hz の周波数による繰返しせん断を実施した。

3. 試験結果

(1) 単調載荷試験結果

図 2 に軸差応力～軸ひずみ関係を示す。締固め度 80 % の場合、初期含水比が 14%と 10%のケースでは、軸差応力が最大値に達した後、ひずみ軟化挙動が見られる。初期含水比 5%のケースでは、初期含水比 14%と 10%のケースに比べて軸差応力の最大値は小さくなっているが、ひずみ軟化の度合いが小さいために最終的な軸差応力は大きい。初期含水比 3%および 0%では、ひずみ軟化がごくわずかに見られた後に硬化に転じた後、軸差応力が増加してゆく。軸差応力～軸ひずみ曲線の初期立ち上がりは、初期含水比によらずほぼ同一であるが、せん断後半になるにつれて各ケースの試験結果の差が顕著になる。この差は、締固め度が高くなるにつれて一層顕著になる。

図 3 に有効応力経路を示す。締固め度 80 % の場合、初期含水比 14 %と 10 %のケースでは、特にゆる詰め傾向を示している。初期含水比 5%のケースではひずみ軟化の程度が小さくなり、さらに初期含水比 3 %と 0 %のケースとなると正のダイレイタンスー挙動が見られる。また、最大軸差応力に至るまでの経路を見ると、初期含水比が高いケースほど、せん断初期に有効応力がほぼ一定のまま軸差応力が増加する弾性挙動が顕著に現れていることがわかる。締固め度 85 %の場合には、さらに上述の傾向が顕著になり、初期含水比 14 %と 10 %のケースでは、弾性挙動を示した後に急激な脆性破壊に伴うひずみ軟化を呈し、初期含水比 5%以下のケースでは、せん断初期から塑性圧縮が顕著に見られ、とりわけ初期含水比 3%と 0%のケースでは変相後の正のダイレイタンスーが発現している。締固め度 90 %の場合には、いずれの初期含水比でも密詰め傾向のせん断挙動を示しているが、やはり初期含水比の高い 14 %と 10 %では、せん断初期に弾性挙動を顕著に示している。

(2) 繰返し載荷試験結果

締固め度 80%の場合における応力～ひずみ関係および

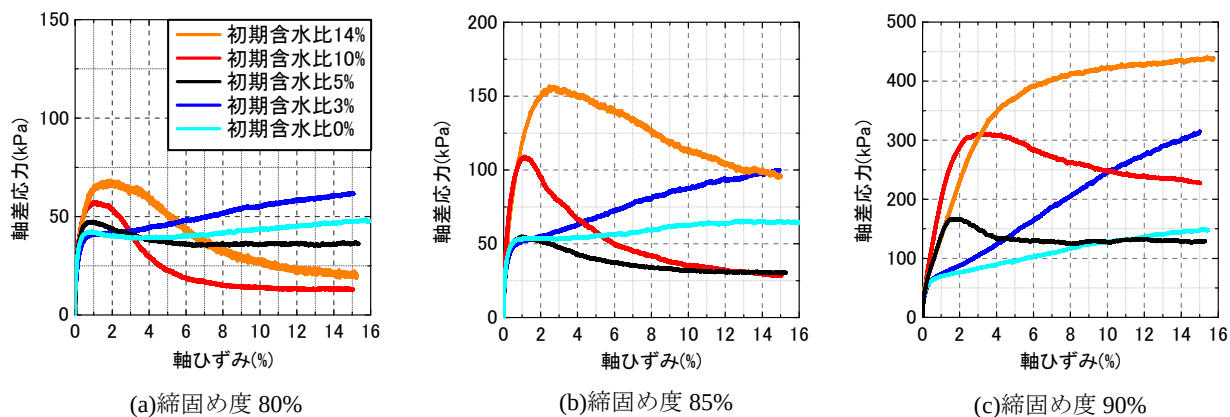


図 2 応力～ひずみ関係

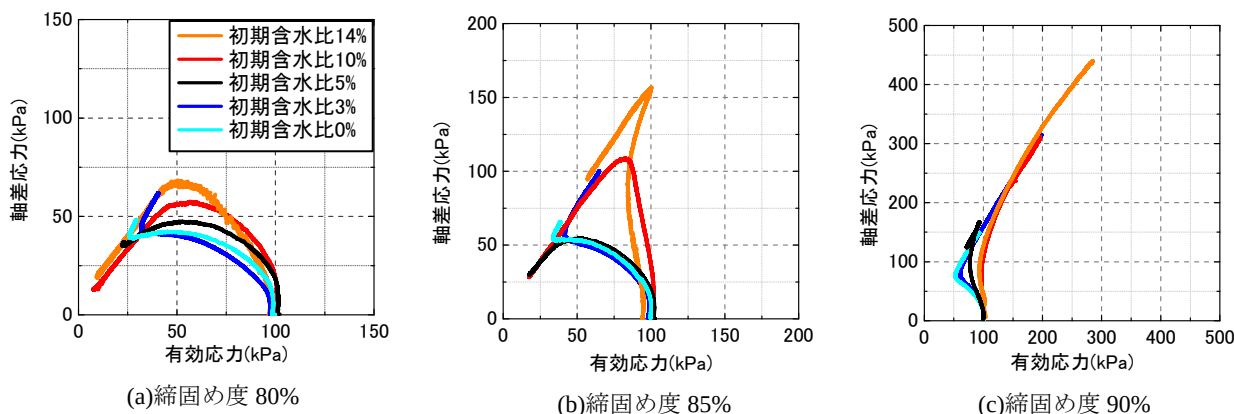


図 3 有効応力経路

有効応力経路をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。いずれの供試体でも変相線に近づくまでの繰返し過程においては、軸ひずみの発生は非常に小さいが、初期含水比 10% の供試体では、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、初期含水比 0% の供試体では、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、初期含水比 10% の供試体の方が、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の発現が見られないことと一致している。

締固め度 90% の場合における応力～ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。いずれの供試体も、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っている。しかし、1 回の繰返しに伴う有効応力の低下量に着目すると、締固め度 80% の結果よりも顕著に、その差が見られることがわかる。

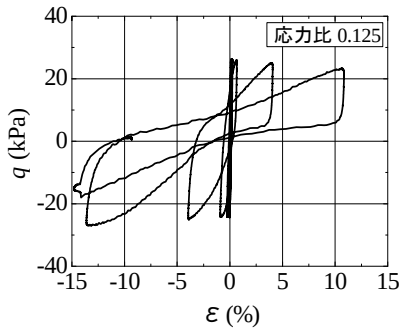
図 8 は過剰間隙水圧比 95% で定義した液状化強度曲線である。締固め度が大きいほど、曲線はグラフの上部へ位置している。初期含水比 0% と初期含水比 10% の差に着目すると、締固め度 80% においては、両供試体で液状化強度曲線に差は見られないが、締固め度 90% では差が現れ、例えば、繰返し載荷回数 20 回での液状化強度比は含水比 0%

のほうが 0.04 程小さい値となる。

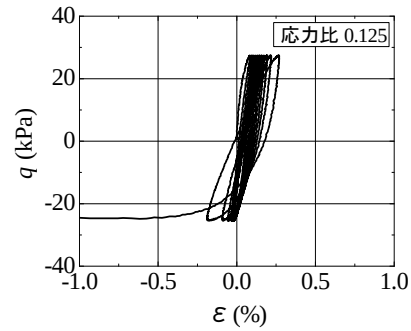
密詰めの場合には液状化強度に顕著に差が生じることはわかるが、ゆる詰めの場合には液状化強度曲線に大きな差がない。しかし、応力～ひずみ関係や有効応力経路には大きな差があり、有効応力解析を実施する際には注意が必要である。

(3) 考察～供試体内に形成される構造～

供試体作製時の初期含水比によってせん断挙動が大きく異なることが明らかとなった。この理由として、各供試体が有する骨格構造が関係していると考えられる。写真 1 および 2 に、初期含水比 10% および 0% の供試体の作製直後の供試体全体写真とマイクロスコープで供試体表面を撮影した写真を示す。いずれも締固め度は 90% の供試体である。供試体の全体写真から、初期含水比 10% の供試体は均質的な表面となっていることがわかる。しかし、初期含水比 0% の供試体では、礫が多い所と細粒分が多い所に分かれており、目視でも不均一性が確認できる。供試体表面の写真の正確な縮尺が計測できていないが、いずれも写真の横幅が数 mm 程度に相当する。これらの写真より、初期含水比 10% では礫のまわりに細粒分がついているが、初期含水比 0% では礫の周りには細粒分が少なく、礫の形がはっきりと見て取れる。初期含水比 10% の供試体は、あらかじめ含水比調整を行ったため、モールドに試料を投入する以前から、サクシジョンの作用によって粗粒分の周りに

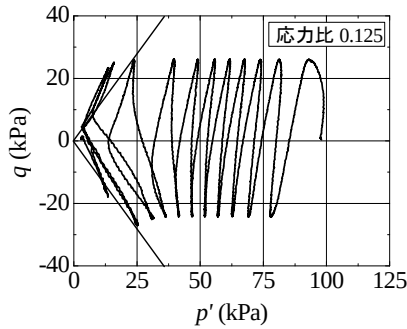


(a) 初期含水比 0%

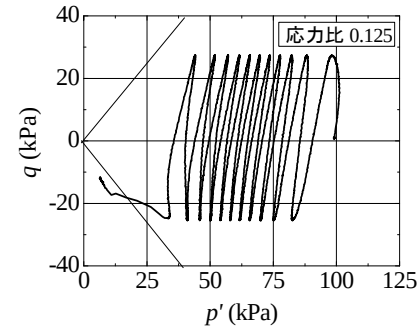


(b) 初期含水比 10%

図4 応力～ひずみ関係（締固め度 80%）

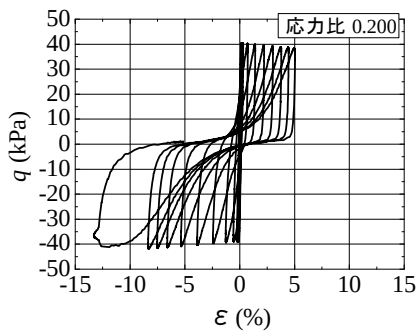


(a) 初期含水比 0%

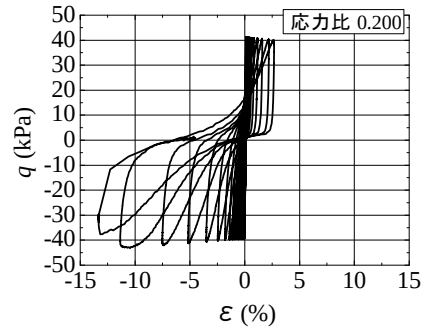


(b) 初期含水比 10%

図5 有効応力経路（締固め度 80%）

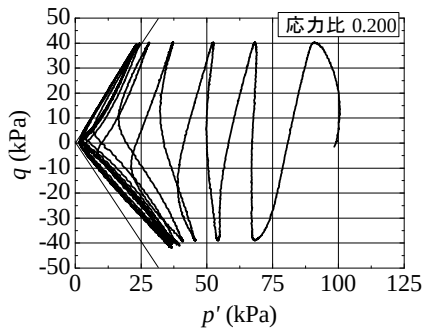


(a) 初期含水比 0%

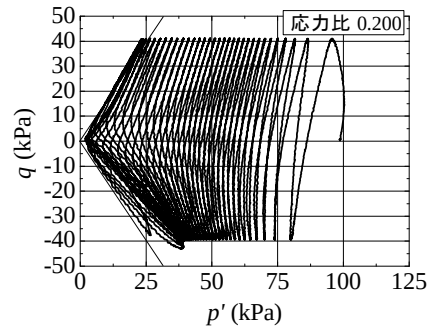


(b) 初期含水比 10%

図6 応力～ひずみ関係（締固め度 90%）



(a) 初期含水比 0%



(b) 初期含水比 10%

図7 有効応力経路（締固め度 90%）

均一に細粒分が分布するため、比較的卓越した骨格構造が形成されるものと考えられる。一方、初期含水比 0%の供試体では、乾燥試料を自然落下させ、突き固めた際に細粒分と粗粒分との分級が進み、骨格構造が形成されづらかったと考えられる。供試体作製時の含水比が高い供試体ほど、締固めて供試体を作製する際には強く突き固める必要が

あったが、これは含水比が高い供試体ほど骨格構造が高位であることと調和的である。

以上より、骨格構造が卓越した初期含水比 14 % と 10 % の供試体の単調載荷試験においては、せん断初期に弾性挙動を呈する反面、せん断が進行すると急激な脆性破壊を呈する傾向が強い。一方、高位な骨格構造を持たない初期含

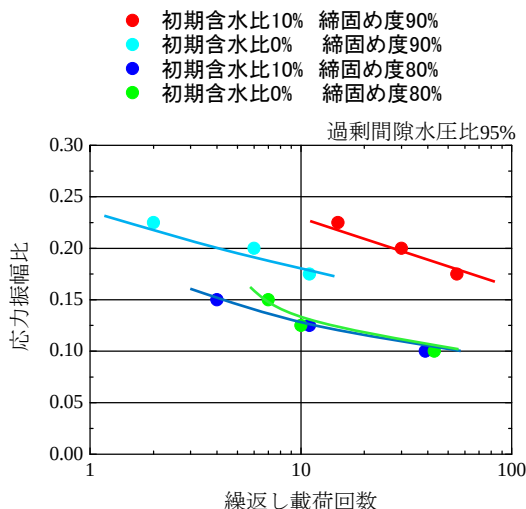


図 8 液状化強度曲線

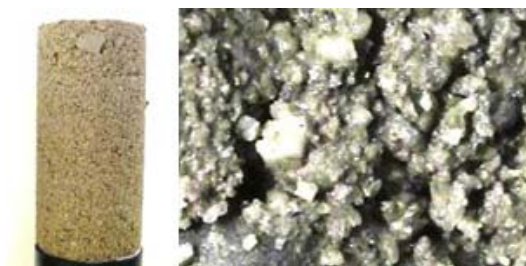


写真 1 初期含水比 10 % で作製した供試体の全体 (左) と
マイクロスコープによる供試体表面の写真 (右)

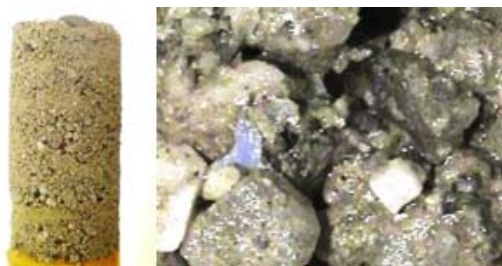


写真 2 初期含水比 0 % で作製した供試体の全体 (左) と
マイクロスコープによる供試体表面の写真 (右)

水比 3 % と 0 % では、せん断初期から塑性的なせん断特性を示したと考えられる。

4. SYS カムクレイモデルによるシミュレーション

(1) シミュレーションの概要

前章における供試体作製時の締固め度と初期含水比による三軸試験結果の違いは、供試体内に形成される骨格構造に起因すると考えられる。本章では、骨格構造の変化を記述することができる上下負荷面カムクレイモデル (SYS カムクレイモデル⁴⁾) を用いて、単調载荷試験結果をシミュレートすることにより、上記の考えの理論的な裏付けを行う。具体的には、各供試体が有する骨格構造の程度とその劣化のしやすさを系統的に設定することにより、一様変形場における SYS カムクレイモデルの構成式応答が各供

表 2 シミュレーションに用いた各種パラメータ

	締固め度 (%)	80	85	90
パ ラ メ ー タ	圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.100		
	膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.011		
	限界状態定数 M	1.460		
	NCL の切片 N ($q=0$, $P'=98.1\text{kPa}$ の時の比体積)	1.570		
	ポアソン比 ν	0.300		
ラ 発 展 則 パ ラ メ ー タ	構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	図-5 参照		
	正規圧密土化指数 m	0.030		
	回転硬化指数 b_r	1.00		
	回転硬化限界定数 m_b	0.001		
初 期 値	初期比体積 v_0	1.637	1.536	1.457
	初期構造の程度 $1/R_0^*$	図-5 参照		
	初期過圧密度 $1/R_0$	図-5 参照		
	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'	9.80		

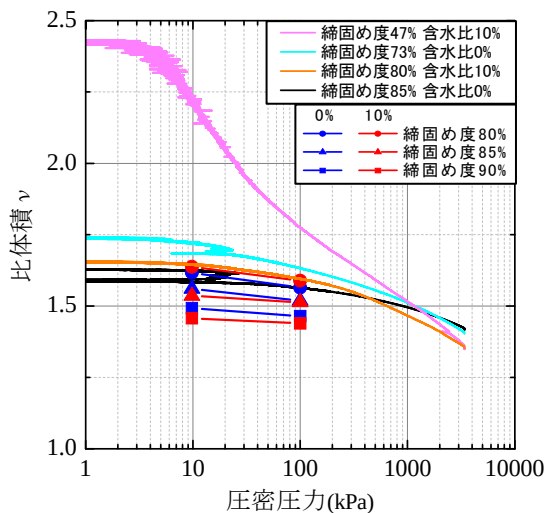
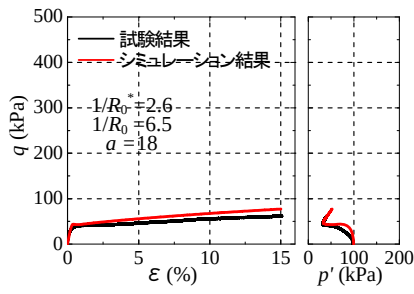


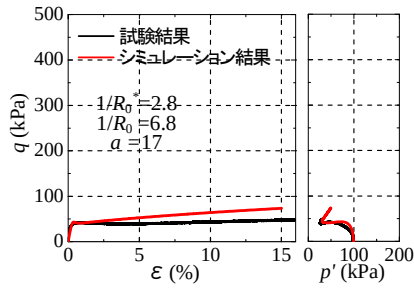
図 9 CRS 圧密試験結果と三軸試験での圧密前後の比体積変化

試体の三軸試験結果を説明できることを示す。なお、SYS カムクレイモデルは、カムクレイモデルに骨格構造 (以下、単に構造と呼ぶ) ・過圧密・異方性の 3 つの概念を導入した構成モデルであり、構造は载荷時の塑性変形の進展に伴って次第に低位化 (劣化) するが、その際の構造劣化の速さの大小によって、様々な土の力学挙動を統一的に記述することが可能となる⁴⁾。

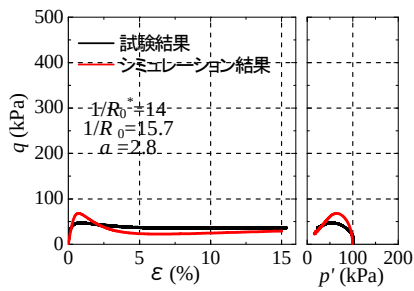
表 2 に弾塑性パラメータ、発展則パラメータ、初期状態を示す。本章の解析では、各供試体の初期の構造の程度を表す $1/R_0^*$ 、初期の過圧密度 $1/R_0$ および構造劣化の速さを表す構造劣化指数 a のみが異なるものとし、その他の土質定数は共通とした。なお、構造の程度 $1/R_0^*$ が大きいほど構造が高位である (嵩張っている) ことを示す。また、 $1/R_0^*$ と $1/R_0$ は従属関係にあり、 $1/R_0^*$ を設定すれば、 $1/R_0$ は初期比体積 v_0 と NCL の切片 N の値から自ずと決定される。一方、構造劣化指数 a, b, c は正の材料定数であるが、本章の解析では簡単のため $b=c=1.0$ とした。なお、 a が大きいほど構造の劣化が速い。



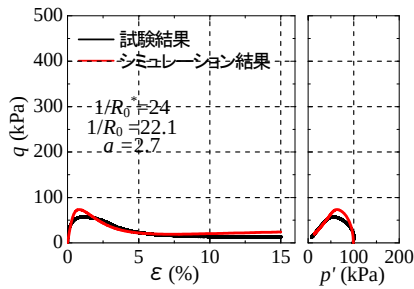
初期含水比 0 %



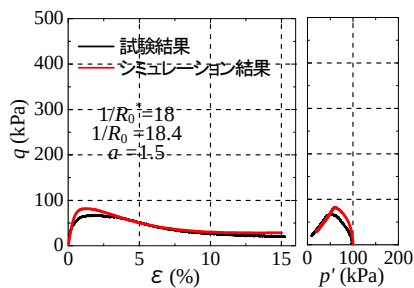
初期含水比 3 %



初期含水比 5 %

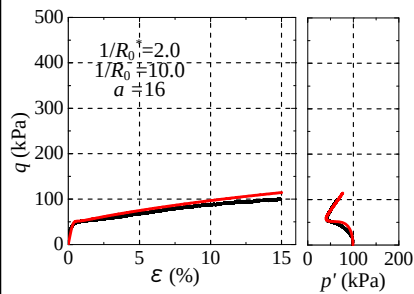


初期含水比 10 %

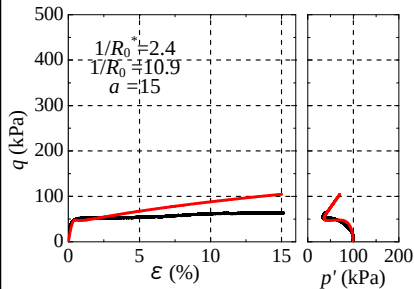


初期含水比 14 %

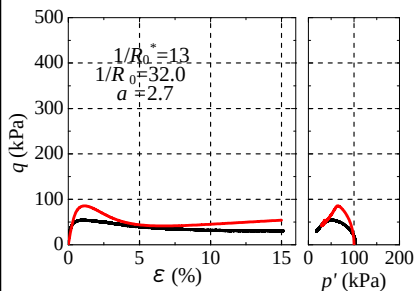
(a) 締固め度 80 %



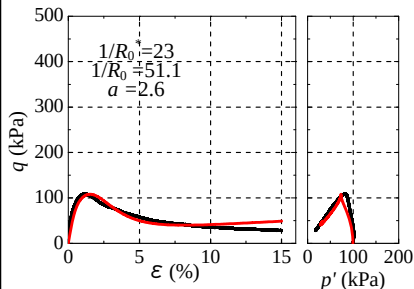
初期含水比 0 %



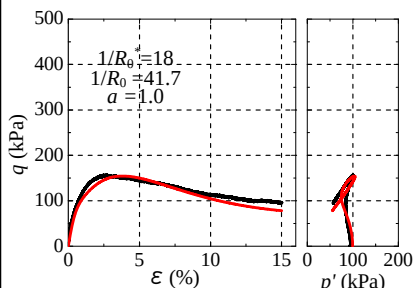
初期含水比 3 %



初期含水比 5 %

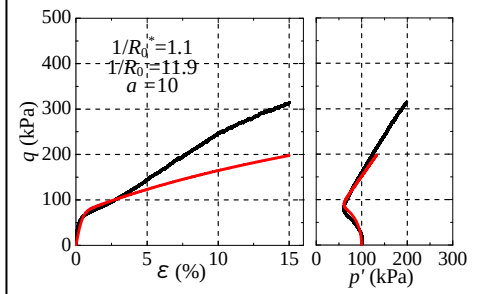


初期含水比 10 %

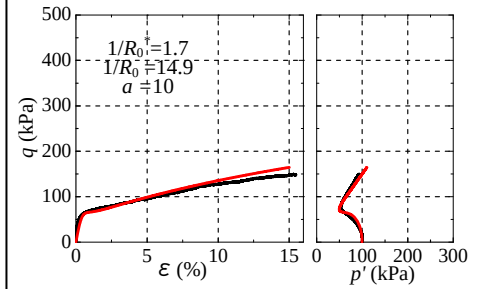


初期含水比 14 %

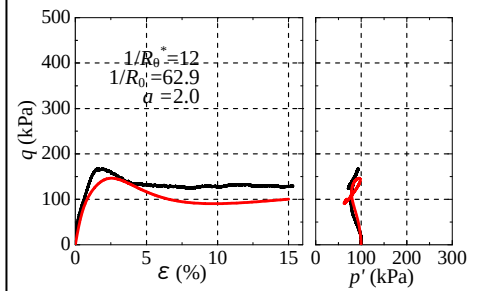
(b) 締固め度 85 %



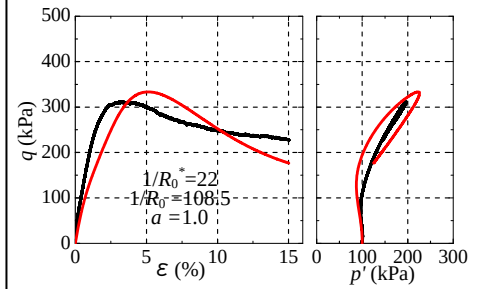
初期含水比 0 %



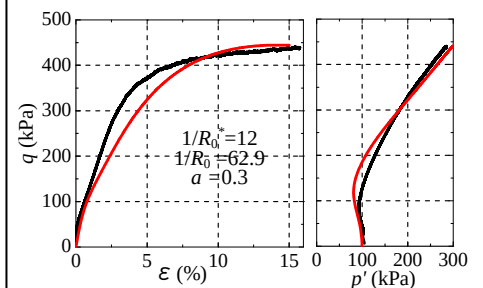
初期含水比 3 %



初期含水比 5 %



初期含水比 10 %



初期含水比 14 %

(c) 締固め度 90 %

図 10 試験結果とシミュレーションにおける応力～ひずみ関係と有効応力経路

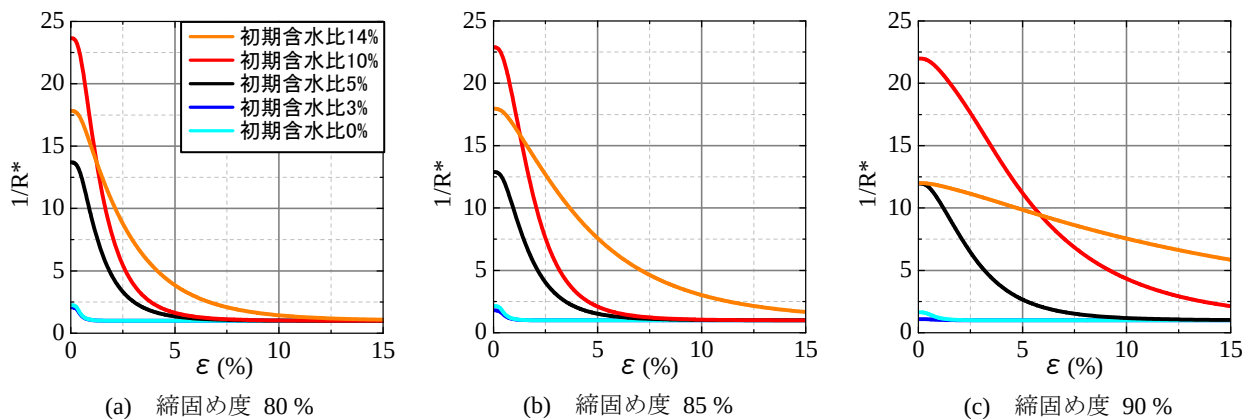


図 11 セン断に伴う構造の程度の変化

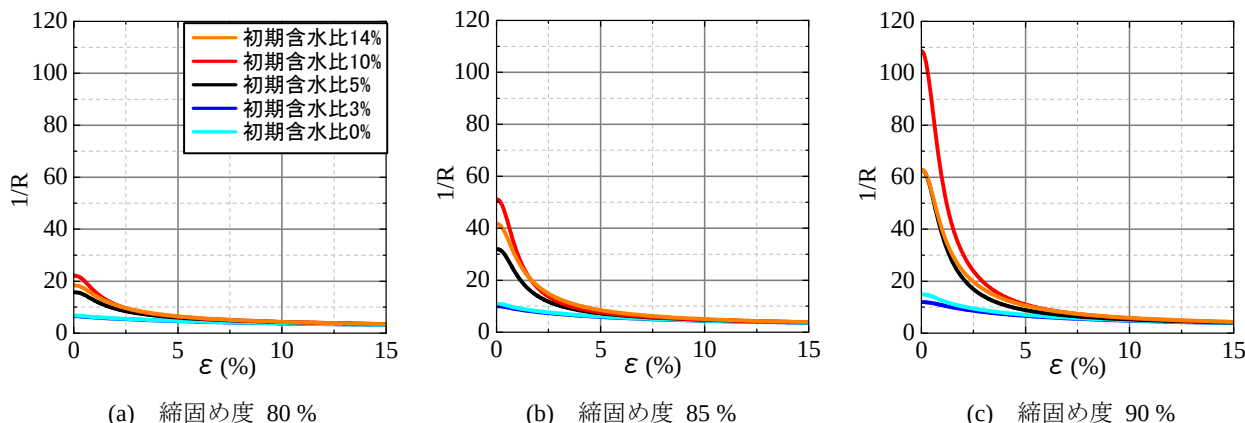


図 12 セン断に伴う過圧密度の変化

初期比体積 v_0 は、初期含水比 10%の供試体の試験値を代表値として選定した。圧縮係数 λ は図 9 に示すように、初期含水比 0%と 10%の試料を用いた定ひずみ速度圧密試験 (CRS 圧密試験) により求めた。限界状態定数 M と膨潤指数 κ は、三軸試験結果を参考に決定し、その他のパラメータは試験結果に合うように決定した。

いずれのケースにおいても、初期平均有効応力は供試体作製時のサクションに近い $p_0' = 9.8 \text{ kPa}$ とし、実際の三軸圧縮試験と同様に 100kPa まで等方圧密をした後に非排水せん断を行う過程を忠実にシミュレートした。

(2) シミュレーション結果と考察

SYS カムクレイモデルによる各供試体のシミュレーション結果を図 10 に示し、それぞれの解析に用いた初期構造の程度 $1/R_0^*$ と構造劣化指数 a 、過圧密度 $1/R_0$ の値も併記する。本論文では、3 章の三軸試験結果より、初期含水比が高いほど供試体に高位な構造が作られていると仮定し、総じて初期含水比が高いほど構造の程度 $1/R_0^*$ を大きく設定した。さらに、初期含水比が高いほど構造が劣化しにくいと仮定し、構造劣化指数 a も小さく設定した。一方、締固め度の小さい供試体ほど構造は高位であり、かつその構造は劣化しやすいと考え、総じて締固め度が小さいほど初期構造の程度 $1/R_0^*$ ならびに劣化指数 a をともに大きく設定した。

図 10 に示すように、シミュレーション結果は概ね三軸試験結果をよく再現できている。すなわち、基本的な材料定数群を共通なものとし、構造に関するパラメータのみを変えることにより、供試体の初期含水比と締固め度に応じた三軸試験結果の違いを無理なく説明できている。したがって、前章の試験における初期含水比と締固め度の違いによって、構造が異なる供試体が形成されるという考えは、このシミュレーションによって、概ね妥当であることが裏付けられたと考えて良い。

ただし、初期含水比 14%の試験結果に関しては、他のケースと傾向が若干異なっており、構造の程度 $1/R^*$ を 10%のケースより小さく設定しないと、試験結果を適切再現することができなかった。実際の試験においては、初期含水比 14%の供試体は飽和化ならびに圧密の過程において、コープスを伴う大きな圧縮変形が観察されており、実際の比体積はさらに小さい可能性が高い。

また図 9 の圧密試験結果に、初期含水比 10%の供試体における等方圧密前の比体積 (9.8kPa 時) と、100kPa まで等方圧密した後のせん断前の比体積を併せて示す。中実のシンボル (▼▲◆) は三軸試験結果を示し、中空のシンボル (▽△◇) はシミュレーション結果である。等方圧密後の比体積を比較すると、いずれの締固め度においてもシミュレーション結果は三軸試験結果とほぼ同じ値を示し、三軸圧縮試験におけるせん断前の等方圧密過程も適切に表現

することができている。

(3) 骨格構造の変化

図 11 に、せん断過程での構造の程度 $1/R^*$ の劣化履歴を示す。いずれの初期含水比においても、せん断が進むにつれ、構造の程度 $1/R^*$ は 1.0 (構造が完全に消失した状態) に近づいていく。締固め度が同じ供試体の挙動を比較すると、初期含水比が大きいほど初期構造の程度 $1/R_0^*$ が大きく、かつ構造が劣化しやすいと設定していることを反映し、初期含水比が大きいほど構造が完全に消失する時点のせん断ひずみは大きい。一方、初期含水比が低い場合には、比較的早く構造が劣化し、消失している。

同一の初期含水比で比較すると、締固め度に応じて初期構造の程度 $1/R_0^*$ の差はあまり大きくないが、構造の劣化しやすさは締固め度が小さいほど大きいと設定していることを反映し、締固め度が低いほど比較的小さなせん断ひずみで構造が完全に消失している。一方、締固め度が大きいほど、せん断とともにゆっくり劣化していく。結果として締固め度 90%、初期含水比 10 % の供試体は、せん断完了後でも高位な構造を維持している。

図 12 に、せん断中の過圧密度 $1/R$ の変化を示す。初期過圧密度 $1/R_0$ は、先述のように表-1 に示す $1/R_0$ 以外の 4 つの初期値により自動的に決定される。初期含水比が高い場合は、初期過圧密度が大きく、せん断開始と同時に急激に低下しているが、初期含水比が低い場合には初期過圧密度は低く、せん断開始から緩やかに低下する。また、初期含水比が同じ供試体を比較すると、締固め度が大きいほど過圧密度が大きいことが反映されている。なお、すべてのケースでせん断完了後でも、過圧密度は完全には消失せず残留していることがわかる。

5. おわりに

供試体作製時の初期含水比と締固め度の違いによって、完全飽和後のせん断試験においても礫混じり砂の力学特性が大きく異なることが示された。その理由は、初期含水比と締固め度の違いによって異なる骨格構造の供試体が再構成されているためであることが、本論文のシミュレーションを通して示すことができた。特に、初期含水比が高いほど高位かつ強固な構造が形成されるが、逆に初期含水比が低い場合には構造は低位であり、かつ劣化しやすいことが示された。実務の室内試験では気中落下法で供試体を作製することが多いが、乾燥試料では湿潤試料のような構造が生成されないため、試験結果は現実の土構造物の挙動とは異なる可能性が高い。また、締固め度が低い場合には、構造は高位であるものの、簡単に劣化するのに対し、締固め度が大きい場合には、低位であるが劣化しにくい構造が生成される。したがって、再構成試料を用いた三軸試験によって、堤防の材料定数を決定する際には、現地堤防の密度と含水比などを反映した供試体を作製する必要がある。

謝辞：本論文のシミュレーションにあたり、名古屋大学の野田利弘教授に有益なご助言をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 国土技術センター：河川堤防の構造検討の手引き (改訂版)，pp.29-30, 2012.
- 2) 小高猛司・板橋一雄・中島康介・牧田祐輝・李圭太・上村俊英・坪田邦治・加藤雅也：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.
- 3) Ishihara, K.: Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes, *Géotechnique*, 43(3), 351-451, 1993.
- 4) 例えば，Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, 42(5), 47-57, 2002.