河川堤防砂の構造の程度が力学特性の評価に 及ぼす影響

EFFECTS OF SOIL STRUCTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF SAND IN RIVER EMBANKMENT

小高猛司¹・崔瑛²・李圭太³・森涼香⁴・兼松祐志⁴ Takeshi KODAKA, Ying CUI, KyuTae LEE, Suzuka MORI and Yuji KANEMATSU

¹正会員 工(博) 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)
²正会員 工(博) 名城大学助教 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)
³正会員 工(博) 株式会社建設技術研究所 大阪本社水工部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)
⁴学生会員 名城大学大学院 理工学研究科修士課程 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

Soil parameters using for a stability inspection of river embankment against seepage failure are very important. However, triaxial test results using reconstituted sand specimens easily change by specimen preparation method. In the present paper, a series of conventional undrained triaxial test is performed using specimens of same void ratio but different initial water content. Even though the specimens were fully saturated before consolidation process, the shear behavior remarkably changes with difference of initial water contents. It can be assumed that initial suction in soil sample during specimen preparation may produce the various soil structures. Next, a numerical simulation by SYS Cam-clay model is carried out to confirm the assumption. The numerical simulation can reproduce the experimental various shear behaviors of gravel-mixed sand deriving from the different soil structure.

Key Words : river embankment, gravel-mixed sand, triaxial test, soil structure, specimen preparation method, numerical simulation

1. はじめに

河川堤防の浸透時すべり破壊の安定性照査に用いる強 度定数は、砂質土や礫質土であれば基本的に攪乱試料の 供試体を用いた室内試験で決定される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. 著者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. 試験試料と試験手順

(1) 試験試料

図-1に試験試料の鳥取県小鴨川の河川堤防から採取し



図-1 試験試料の粒径分布

た砂礫を示す. 再構成する供試体は直径5 cm, 高さ10 cmであるため, 9.5 mm (直径のおよそ1/5) 以上の礫を 取り除く粒度調整試料(せん頭粒度試料)を用いた(図 -1に併記). この粒度調整試料を用いて, 締固め試験を 行った結果,最大乾燥密度は2.0 g/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

供試体は締固め度80,85および90%(それぞれ乾燥 密度1.6,1.7および1.8g/cm³)の3種類を作製した.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,自然乾燥試料(含 水比0%)から霧吹きで所定の含水比となるまで加水し てから,モールドに5層に分けて入れ,所定の締固め度 となるまで締め固めた.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、二重負圧法によって完全飽和(B値0.95 以上を確認)させており、せん断試験中にサクションな どが作用することはない.

なお、いずれの試験においても、有効拘束圧100 kPa で1時間等方圧密した後に、載荷速度0.1 %/minで非排水 せん断を行った.

3. 三軸試験結果

(1) 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.応力~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シー挙動が見られる. 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シー 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) 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、礫分が多い所と細粒 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、サクションの 作用によって粗粒分の周りに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.



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)

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、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、 ー様変形場における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、構造は載荷時の塑 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-1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.

表-1 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 弾塑性	圧縮指数 Â	0.100		
	膨潤指数 <i>к</i>	0.011		
	限界状態定数 M	1.460		
	NCLの切片N	1.570		
	(q=0, P'=98.1kPaの時の比体積)			
	ポアソン比 v	0.300		
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 mb		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	l
	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 '(kPa)		9.80	

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 $\bar{\lambda}$ は図-4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 $\bar{\kappa}$ 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 '=9.8kPa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-5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-5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.



図-4 CRS 圧密試験結果と三軸試験での圧密前後の比体積変化

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、コラ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-4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-6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/R₀^{*}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/R₀*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.



図-5 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



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-7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/R₀は、先述のように表-1に示す1/R₀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

- (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.
- 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.

(2012.4.5受付)