

弾塑性構成モデルによる細粒分を含む築堤材料の骨格構造の評価

河川堤防 骨格構造 力学特性

名城大学

セントラルコンサルタント（元名城大院）

名城大学大学院

名城大学

中部土質試験協同組合

日本工営

特別会員 ○江本菜々美

正会員 藤田 薫

正会員 山下 隼史

国際会員 小高 猛司

国際会員 久保 裕一

国際会員 李 圭太

1. はじめに

河川堤防の質的強化や樋管等の構造物の設計の際には、堤防の築堤材料としてある基準の粒度の幅に調整された購入土が用いられることが多い。購入土の築堤材料には、締め固めやすく、また、透水性を低下させる目的で適度な細粒分を含むように粘土やシルトが混入される場合がある。我々の研究グループは、細粒分を適度に含む砂質土は締め固め時の初期含水比によって形成される骨格構造が大きく異なることを示し、粒度・密度が等しい土であっても骨格構造の変化が力学特性に影響を及ぼすことも示してきた¹⁾。本報では、実河川堤防の整備に使用された築堤材料を用いて、締め固め時に形成される微視的な骨格構造をマイクロスコープで示すとともに、その骨格構造を有する実河川堤防土の力学特性について、CUB 三軸試験と SYS カムクレイモデル²⁾によるそのシミュレーションを通して、骨格構造の評価を試みる。

2. 試験概要・試験条件

図 1 に試験に使用した築堤材料の粒径分布を示す。直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体による三軸試験の実施にあたり、粒径 9.5mm 以上の礫を取り除くせん頭粒度調整を行った。粒度調整前の築堤材料の粒度が図 1 の青線であり、粒度調整後の粒度が赤線である。円柱供試体は、外部の鋼製モールドで 5 層に分けて締め固めることによって作製した。その際、自然乾燥状態の試験試料を霧吹きで加水し、供試体作製時の初期状態での含水比（以降、「初期含水比」と呼ぶ）を 5%、10% と 14%（最適含水比）の 3 種類に調整し、締め固め度 90%となる間隙比

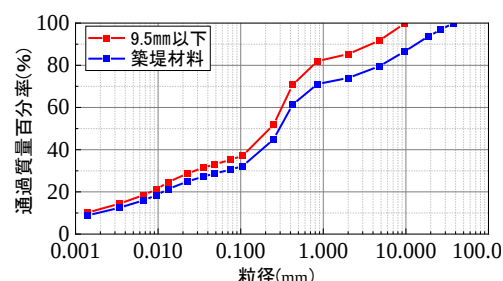


図 1 実河川堤防土の粒度分布

($e=0.753$) で供試体を作製した。なお、供試体密度（間隙比）の算出にあたっては、原粒度の築堤材料での締め固め試験で得られた最大乾燥密度の 90%に対して、礫を除外した分の密度補正を行った。供試体を三軸試験装置に設置後、二重負圧法で完全飽和化し、初期有効拘束圧 50, 100, 150kPa で等方圧密した後、非排水条件でせん断した。

3. 供試体の観察

写真 1 に初期含水比が異なる供試体の表面をマイクロスコープで撮影したものを示す。写真 1 より、供試体作製時の初期含水比が高くなるにつれて、細粒分同士の凝集性（団粒化）が高くなっていることが分かる。また、初期含水比 10%では、団粒化した細粒分の塊が、粒径の大きい土粒子同士の隙間に入り込んでいる様子が確認できる。さらに、最適含水比である初期含水比 14%では、細粒分の団粒化がより発達しているように見える。写真 2 は完全飽和後に撮影した供試体表面である。供試体が飽和してサクションが消失しても、それぞれの初期含水比ごとに形成された細粒分の団粒化の様子は概ね変化していない。我々の研究グループでは、目視でも観察できるこの粗粒分と細粒分で形成される微視的な構造の違いが、砂質土においてのいわゆる「骨格構造」と考えているが、次章でそれを明らかにする。



(a) 初期含水比 5%



(b) 初期含水比 10%

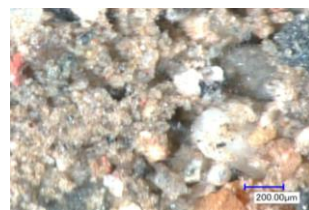


(c) 初期含水比 14%

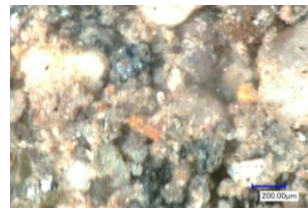
写真 1 初期含水比が異なる供試体の表面（湿潤状態）



(a) 初期含水比 5%



(b) 初期含水比 10%



(c) 初期含水比 14%

写真 2 初期含水比が異なる供試体の表面（完全飽和後）

4. 試験結果とそのシミュレーション

図 2～4 に、CUB 三軸試験結果とそのシミュレーション結果を示す。まず、試験結果に着目する。初期含水比の違いによって、同じ間隙比でありながらも力学挙動が大きく異なる。初期含水比が高いほど軸差応力のピーク値が大きく、そこに至るまでの塑性圧縮量が小さい。その一方で、明確な軸差応力のピーク後には、脆性破壊を示唆する急激なひずみ軟化挙動を示す。すなわち、高い初期含水比で作製した供試体ほど、骨格構造が高位なことが示唆される。図 2 の初期含水比 5% の試験結果からは、比較的大きな塑性圧縮挙動を示した後に、正のダイレタンシーの拘束によるひずみ硬化挙動が示された。これは、低位な構造の中密な砂質土の一般的な力学挙動である。

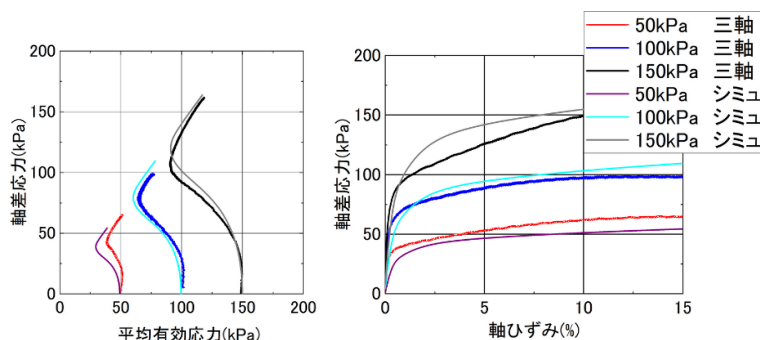
図 2～4 には、土の骨格構造を記述できる弾塑性構成モデルである SYS カムクレイモデル²⁾を用いたシミュレーション結果も示している。表 1 の各種パラメータを使用した。すなわち、骨格構造に関連するもの以外はすべて共通のパラメータを用いた。供試体設置時の有効拘束圧 20kPa から所定の有効拘束圧まで等方圧密し、その後非排水せん断したことを模擬している。骨格構造に関するパラメータのみを初期含水比毎に設定したが、具体的には、図 5 のような骨格構造である。すなわち、図の縦軸の $1/R^*$ が大きい程、骨格構造が高位であることを示すが、このシミュレーションでは、初期含水比が高い供試体ほど、 $1/R^*$ の初期値を大きくし、かつ、塑性ひずみの発生に伴い劣化する速度を抑えるように発展則を設定している。その結果、図 2～4 に示すように、全ての試験結果を、概ね精度良く説明できている。

5. まとめ

供試体作製時の初期含水比の違いで、CUB 試験時の力学挙動が大きく異なる。初期含水比が異なることにより、細粒分の団粒化の程度が視覚的にも明確に異なることを示した。さらに、その視覚的な相違は砂質土の骨格構造の違いであることが、今回の SYS カムクレイモデルによるシミュレーションを通して弾塑性力学の範疇で合理的に説明できることが明らかとなった。最後に、シミュレーションにあたり、名古屋大学中井健太郎准教授ならびにジオアジア研究会高稲敏浩事務局長に大変お世話になった。記して謝意を表します。

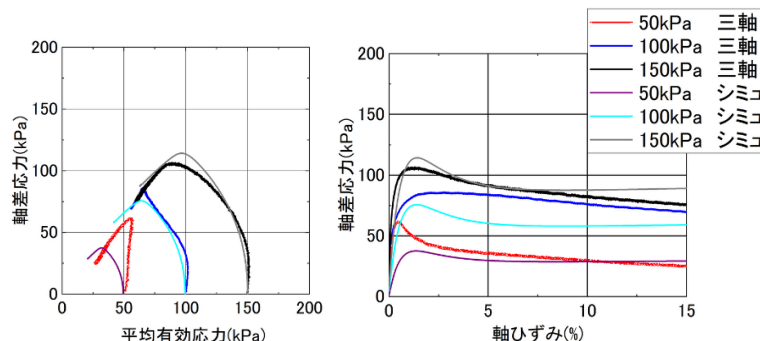
参考文献 1) 例えば、御手洗ら：砂質土の構造が単調ならびに繰り返し載荷挙動に及ぼす影響、第 54 回地盤工学研究発表会、2019。

2) A.Asaoka et al : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 2002.



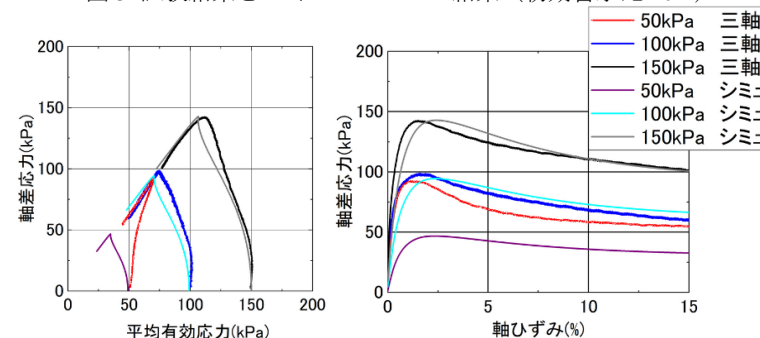
(a)有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係

図 2 試験結果とシミュレーション結果（初期含水比 5%）



(a)有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係

図 3 試験結果とシミュレーション結果（初期含水比 10%）



(a)有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係

図 4 試験結果とシミュレーション結果（初期含水比 14%）

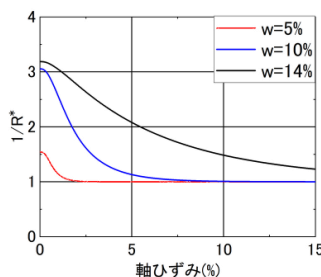


図 5 骨格構造の設定

表 1 SYS カムクレイモデルの各種パラメータ

	初期含水比(%)	5	10	14
弾塑性	圧縮指数 λ	0.045		
	膨潤指数 κ	0.016		
	限界状態定数 M	1.252		
	NCL の切片 N	1.681		
	ポアソン比 ν	0.300		
発展則	構造劣化指数 $a(b=c=1.0)$	3.967	0.850	0.233
	正規圧密土化指数 m	0.030		
	回転硬化指数 b_r	2.000		
	回転硬化限界定数 m_b	0.500		
初期値	初期比体積 v_0	1.753		
	土粒子密度 ρ_s	2.685		
	初期構造の程度 $1/R_0^*$	1.600	3.100	3.200
	初期過圧密度 $1/R_0$	2.500	1.400	1.500
	初期異方性 ζ	0.010		
	初期平均有効応力 p_0'	20kPa		