

# 締固め時に形成する骨格構造と浸透時すべり破壊を考慮した築堤材料の力学特性の評価

砂質土 せん断 力学特性

名城大学大学院 学生会員 ○藤田 薫  
 名城大学 国際会員 小高猛司  
 中部土質試験協同組合 国際会員 久保裕一  
 日本工営 国際会員 李 圭太  
 元名城大学学生 早坂 直

## 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<sup>1)</sup>。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、通常のCUB三軸試験と本研究グループがこれまで提案してきた吸水軟化試験<sup>2)</sup>によって検討する。

## 2. 試験概要・試験条件

吸水軟化試験とは、比較的低い一定軸差応力条件下で、間隙水圧を徐々に増加させ、低有効拘束圧、低ひずみレベル条件下で破壊に到達する有効応力を高精度で探索する試験法である。

図1に今回対象とした築堤材料の粒度分布を示す。試験を実施するに当たって、粒形9.5mm以上の礫を取り除き、乾燥密度を補正した。粒度調整前の築堤材料の粒度分布が図1の青線であり、粒度調整後の試料の粒度分布が赤線である。今回の試験で用いた供試体は、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体であり、外部の鋼製モールドで5層に分けて作製した。CUB三軸試験では、供試体作製時の初期含水比を5%、10%と最適含水比である14%の3種類に調整し、締固め度90%となる間隙比( $e=0.753$ )で供試体を作製した。その後、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、非排水せん断条件下で三軸試験を実施した。吸水軟化試験では、表1に示す初期含水比、締固め度で供試体を作製し、CUB三軸試験と同様に二重負圧法で完全飽和化した後に所定の拘束圧、軸差応力で試験を実施した。

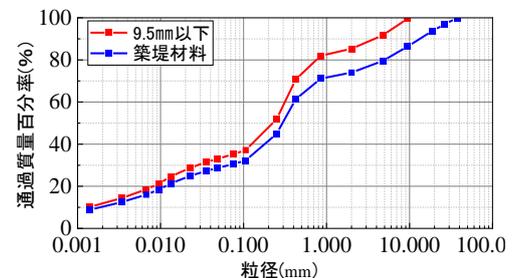


図1 実河川堤防土の粒度分布

表1 吸水軟化試験の供試体諸元

初期含水比 (%)	拘束圧 (kPa)	締固め度 (%)	軸差応力 (kPa)
10	50	90	12.5
	100		25
14	50		50
			15
			30

## 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から、締め固め時の初期含水比が高くなるにつれ

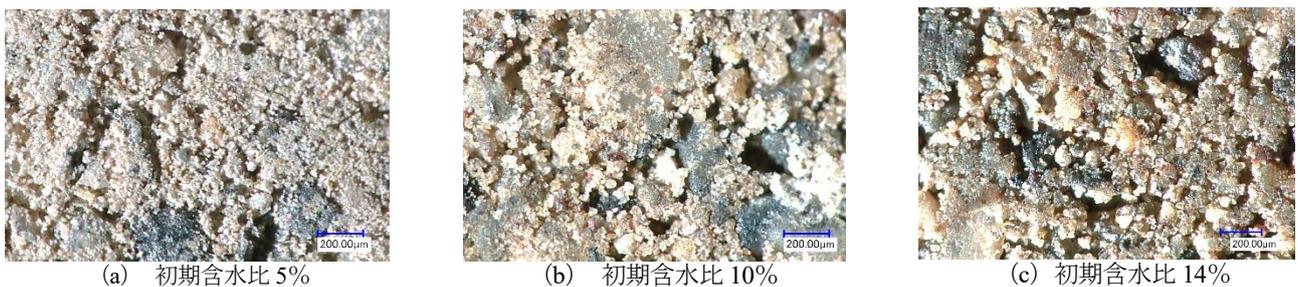


写真1 初期含水比が異なる供試体の表面 (湿潤状態)

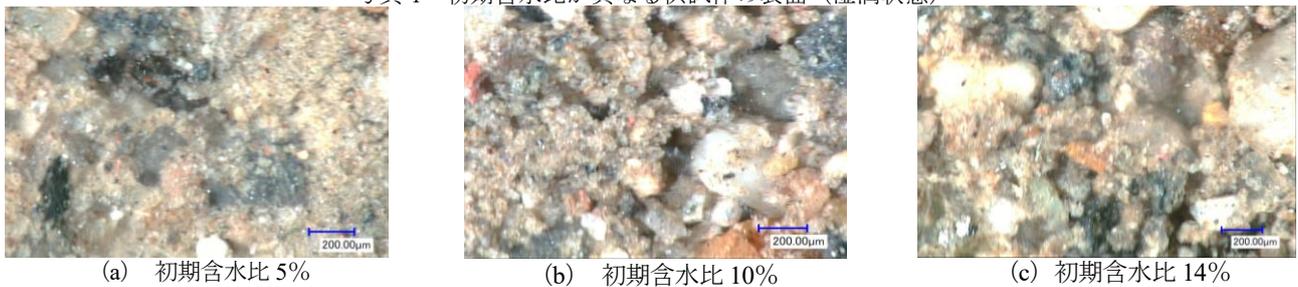


写真2 初期含水比が異なる供試体の表面 (完全飽和後)

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、粒形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%の供試体では、団粒化した細粒分の塊が一つの粒子として噛み合わり、構造を形成しているように見える。写真 2 に完全飽和後の供試体表面を示す。供試体の完全飽和時にサクシジョンの消失による構造の劣化は見られず、供試体作製時の構造が維持されていることが確認できる。

#### 4. 試験結果

図 2~4 に有効応力経路、軸差応力～軸ひずみ関係を示し、表 2 に各試験から得られた土質定数を示す。図 2~4 の赤、青、黒線が、それぞれ初期有効拘束圧 50、100、150kPa の CUB 三軸試験結果である。供試体作製時の初期含水比を変化させたことで、完全飽和後の試験結果が大きく異なる。そして、初期含水比が高いほど軸差応力のピーク値が大きく現れ、ピーク値に至るまでの塑性圧縮量が小さく、弾性膨張が抑えられていることがわかる。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を示唆している。表 2 の CUB 三軸試験から得られた土質定数においても、初期含水比が高くなるにつれて、内部摩擦角が大きくなっている。また、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している。供試体作製時に形成された高位な骨格構造によって高いピーク強度まで耐えられる一方で、崩壊を始めたらずには止まらない。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、正のダイラテンシーの拘束によるひずみ硬化挙動が示された。この挙動は、構造が低位な砂質土によく見られる挙動である。

図 3 と 4 に表 1 の条件で作製した供試体の吸水軟化試験結果（緑、橙、水色）も示し、表 2 の下部に吸水軟化試験結果から得られた土質定数を示す。排水せん断によって表 1 に示す所定の値まで到達させた軸差応力を一定に保ちながら、今度は間隙水圧を徐々に上昇させていく。有効応力は徐々に減少していき、破壊応力比に到達後、一気に軸ひずみが増加する。したがって、吸水軟化試験によって決定される破壊状態は、骨格構造が急激に崩壊する有効応力状態と解釈できる。

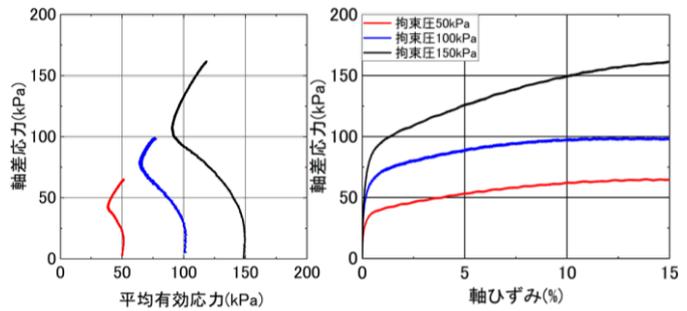
図 3 と 4 には、CUB 三軸試験から得られる限界応力比と吸水軟化試験から得られる破壊応力比を原点と直線で結んだものを示している<sup>3)</sup>。また、表 2 の吸水軟化試験結果から得られた内部摩擦角は、対応する同条件の CUB 三軸試験結果に比べてやや小さい値を示している。

以上の 2 点から、今回用いた築堤材料は、細粒分を含んでいたとしても、低有効応力下においても両試験の応力比が同程度の値を示して有意な粘着成分は期待できず、浸透に対して高いせん断強度は期待できない。初期含水比を変化させることによって相違を与えた骨格構造の影響については、初期含水比が高く高位な構造を有する供試体ほど、せん断の初期において剛性の高い弾性的な性質が卓越し、破壊応力比（内部摩擦角）も大きくなることを示している。

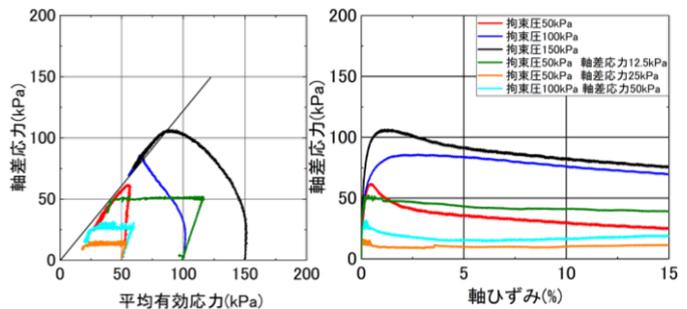
#### 5. まとめ

不飽和状態で形成された骨格構造は、完全飽和して、さらに等方圧密履歴を受けても残存し続ける。その結果、骨格構造が異なることにより、力学挙動は大きく異なるものとなった。また、吸水軟化試験結果による浸透すべり破壊に対する強度評価については、締固め度 90%では極めて浸透すべり耐性が低いことが示された。

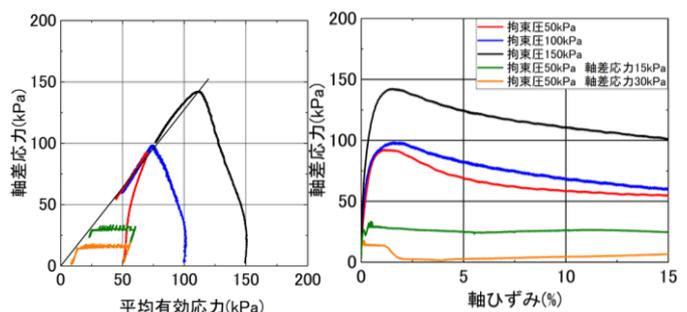
参考文献 1) 御手洗ら：砂質土の構造が単調ならびに繰り返し載荷挙動に及ぼす影響，第 54 回地盤工学研究発表会，2019。2) 小高ら：弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数の考察，第 70 回土木学会年次学術講演会，2015。3) 小高ら：河川堤防の浸透破壊と堤体材料の土質特性との関連，第 6 回河川堤防技術シンポジウム，2018。



(a) 有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係  
図 2 初期含水比 5%の試験結果



(a) 有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係  
図 3 初期含水比 10%の試験結果



(a) 有効応力経路 (b) 軸差応力～軸ひずみ関係  
図 4 初期含水比 14%の試験結果

表 2 各試験から得られた土質定数

試験方法	初期含水比 (%)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kPa)
三軸試験	5	29.1	0
	10	29.7	0
	14	31.3	0
吸水軟化試験	10	27.4	0
	14	29.0	0