

締固め時に形成する骨格構造が細粒分を含む堤体の力学特性に及ぼす影響
Effects of soil structure formed during compaction on the mechanical characteristics
of the river embankment containing fine particle fractions

藤田 薫¹, 小高猛司²久保裕一³, 李 圭太⁴, 道下桜太郎⁵, 山下隼史⁵

- 1 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 中部土質試験協同組合・技術部
- 4 日本工営・コンサルティング事業統括本部
- 5 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

概 要

河川堤防を築堤する際には、ある基準の粒度幅に調整された購入土が用いられ、その購入土の粒度調整には、粘土やシルトといった細粒分を混入させることが多い。そして、我々の既往の研究から細粒分をある程度含む砂質土は粒度・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与えることを示してきた。本論文では、実河川堤防の整備に使用された築堤材料を用いて、締固め時に形成する微視的な骨格構造を視覚的な面から検討した後に、その骨格構造を有する築堤材料の力学特性について、CUB 三軸試験と浸透耐性を評価することができる吸水軟化試験によって検討する。さらに、供試体作製時の締固め度にも着目し、締固め度がその築堤材料の骨格構造と力学特性に与える影響を併せて検討する。

キーワード：骨格構造，築程土，細粒分，三軸試験

1. はじめに

河川堤防の築堤材料として用いられる購入土は、ある基準を下に粒度の幅を調整したものが用いられることが多い。その粒度調整の際には、締固めをしやすい、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ことが一般的である。

我々の研究グループでは、独自に珪砂と細粒分を混合させた模擬試料を作製し、その試料を用いて、骨格構造に関する研究をこれまで行ってきた。その既往研究成果では、細粒分を適度に含んだ砂質土においては、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が示された¹⁾。また、この骨格構造の変化は、粒度・密度が等しい土であっても力学特性に影響を及ぼし、せん断挙動が変化することも示した²⁾。したがって、細粒分をある程度含ませた築堤材料において、堤防の法すべりや液状化危険度を正確に評価するためには、粒度や密度といった基礎的な条件に加え、骨格構造に関しても考慮しなければならないと考える。

本論文では、実河川堤防の整備に使用された築堤材料を用いて、締固め時に形成される骨格構造をマイクロスコopによって可視化するとともに、その骨格構造を有する築堤材料の力学特性について、CUB 三軸試験と我々の研究

グループがこれまで提案してきた吸水軟化試験³⁾を実施し、検討していく。

また、河川堤防の築堤の際には、河川土工マニュアルに従い、締固め度 $D_c=90\%$ 以上になるように設計・施工するよう定められている⁴⁾が、特に細粒分を適度に含む築堤材料において $D_c=90\%$ で満足できる浸透すべり破壊耐性が得られるのか十分に検証する必要がある。したがって、実河川堤防に用いられた築堤材料の骨格構造に関する検討に併せて、締固め度がせん断特性の差異に与える影響について検討し、細粒分を含む築堤材料の適切な締固め度について考察する。

2. 試験概要

吸水軟化試験とは、三軸試験機を用いた試験法である。初期せん断を受けた堤体の浸透すべり耐性を評価することができ、降雨や河川水の浸透時の有効応力状態を探索することを目的とする。実験手順としては、圧密過程までは通常の三軸試験と同様である。せん断仮定では、排水条件で所定の軸差応力まで初期せん断を与え、その後、軸差応力を一定に保ちながら、間隙水圧を 1kPa ずつ徐々に上昇させ破壊に至らしめる。なお、破壊に至る直前まで間隙水圧を上昇させても供試体内への吸水は発生せず、軸ひずみ

もほとんど変化しないが、ある有効応力に到達した途端に急激な軸ひずみが発生して破壊に至る。したがって、低有効応力条件下に置かれた土の「軟化」の閾値を精度良く見つけることが可能である。

3. 試験試料

3.1 試験試料の諸元

本研究で用いた築堤材料の粒径加積曲線を図 1 に示す。三軸試験を実施するに当たって粒径 9.5mm 以上の礫を取り除き、乾燥密度を補正した。元の築堤材料の粒度分布が図 1 の青線であり、せん頭粒度調整後の粒度分布が赤線である。図 1 の粒径加積曲線から、ある程度の細粒分と礫分を含み、締固めやすい一般的な築堤材料であることがわかる。この試料を用いて作製する供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体であり、三軸セルの外部において鋼製モールド内で所定の締固め度となるよう 5 層に分けて締め固めた。本研究の大きなポイントとなる供試体作製時の含水比は、5%、10%と最適含水比である 14%とした。この初期含水比の違いによって、供試体内に構築される土の骨格構造が変化することがわかっているが、後述するように、最適含水比で締め固められた供試体が、最も高位な骨格構造を有する。供試体作製後は、二重負圧法によって完全飽和化し、所定の有効拘束圧で等方圧密した後、載荷速度 0.1%/min の CUB 三軸試験を実施した。吸水軟化試験では、CUB 三軸試験と同様に二重負圧法で完全飽和化し、等方圧密後に載荷速度 0.1%/min の排水せん断を行い、所定の軸差応力到達後、軸差応力を一定に保ちながら、間隙水圧を徐々に増加させ、破壊に至らしめた。

3.2 試料の観察

本研究では、締固め時に形成される微視的な骨格構造について、マイクロスコープを用いて観察する。写真 1 に $D_c=90\%$ 、写真 2 に $D_c=95\%$ の初期含水比毎の供試体表面を示す。写真 1、2 から、締固め時の初期含水比が高くなるにつれて、細粒分の凝集性（団粒化）が高くなっていることが分かる。そして、初期含水比 10%では、団粒化した細粒分が大きい土粒子同士の結合間に入り込む様子が見られ、団粒化した細粒分が一つの土粒子のように見える。さらに、最適含水比である初期含水比 14%では、団粒化の度合いが初期含水比 10%に比べてより高くなり、その団粒化した大きな塊が大きな粒子と結びつき、構造を形成している様子が観察できる。一方、写真 1 と 2 の比較より、締固め度が細粒分の団粒化の度合いに影響を及ぼす様子は明確に観察できなかった。また、紙面の都合上、掲載できていないが、これらの供試体の完全飽和後も観察している。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完全飽和後も維持されることが別途確認できている。

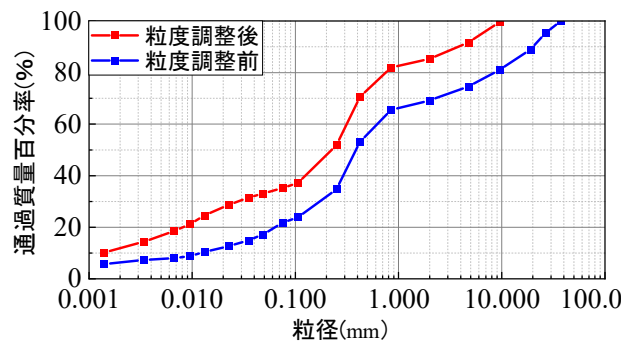


図 1 粒径加積曲線



(a) w=5%



(b) w=10%



(c) w=14%

写真 2 $D_c=90\%$



(a) w=5%



(b) w=10%



(c) w=14%

写真 1 $D_c=95\%$

4. 試験結果

表 1 に各試験条件や圧密後の間隙比等をまとめたものを示す。圧密後の間隙比では、ややばらつきはあるものの、ほぼ等しい値で試験を実施できていることが分かる。そして、図 2 と 3 にそれぞれ $D_c=90$ と 95% の CUB 三軸試験結果 (平均有効応力経路と軸差応力～軸ひずみ関係) を示し、図 4 と 5 にそれぞれ $D_c=90$ と 95% の吸水軟化試験結果 (有効応力経路, $q/p' \sim$ 軸ひずみ関係) を示す。図の赤、青、黒線がそれぞれ初期有効拘束圧 50, 100, 150kPa の CUB 三軸試験結果であり、橙、緑線が初期有効拘束圧 50kPa, 初期せん断軸差応力 15, 30kPa の吸水軟化試験結果である。また、図 2~5 の有効応力経路に示す原点を通る黒の直線は、図 2 と 3 では CUB 三軸試験の破壊線、図 4 と 5 では吸水軟化試験の破壊線を示したものである。表 2 には、CUB 三軸試験結果から得られた粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を示している。

4.1 CUB 三軸試験結果

図 2 の $D_c=90\%$ の有効応力経路では、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ことが顕著に示された。具体的には、初期含水比が高い供試体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分かる。すなわち、高い初期含水比で作製した供試体ほど剛性が高く骨格構造が高位であることを示唆している。そして、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、初期含水比 10% と 14% の試験結果では、明確な軸差応力のピーク値を示した後に、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軸差応力のピーク値まで耐えられる一方で、崩壊が始

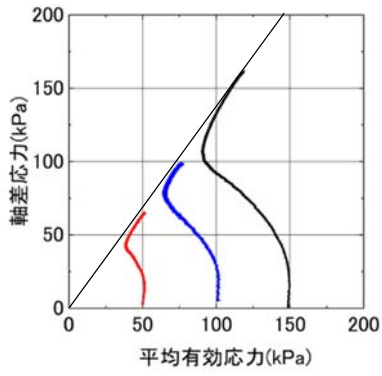
まると容易に止まらない材料であることがわかる。そして、このような挙動は、骨格構造が卓越したやや緩詰め砂質土によく見られる挙動である。初期含水比 5% では、初期含水比 10%, 14% の試験結果に比べて大きな塑性圧縮挙動を示した後に、正のダイレイタンスの拘束によるひずみ硬化挙動が示された。この挙動は、低位な骨格構造を有する中密な砂質土によく見られる挙動である。

図 3 の $D_c=95\%$ の有効応力経路では、せん断初期から高い剛性を示し、変相後も正のダイレイタンスの拘束に伴う硬化が顕著に現れ、負の間隙水圧が発生する場合も確認された。このような挙動は密詰め砂質土によく見られる挙動である。また、 $D_c=90\%$ の試験結果に比べて骨格構造の変化による顕著な挙動の違いは見られなかったが、有効応力経路に示した破壊線の傾きは初期含水比が高くなるにつれて、わずかではあるが大きくなっている。さらに、表 2 で示した内部摩擦角 ϕ も高い初期含水比で作製した供試体の方が大きな値を示した。この結果は、 $D_c=90\%$ の CUB 三軸試験結果と整合しており、 $D_c=95\%$ の CUB 三軸試験結果においても、骨格構造の変化が影響を与えることが分かった。

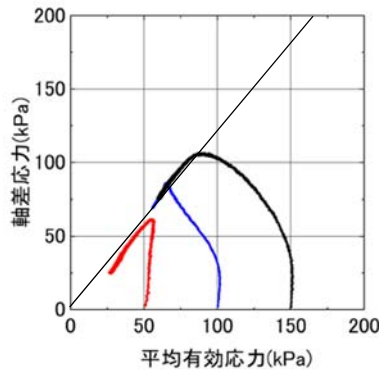
$D_c=90\%$ に比べて $D_c=95\%$ の CUB 三軸試験結果が、より高いせん断強度を示すことは明らかであるが、CUB 三軸試験結果の有効応力経路の挙動は大きく異なるものとなった。さらに、CUB 三軸試験結果の内部摩擦角を比較しても大きな違いがある。今回用いた築堤材料は、人為的に細粒分を含ませた購入土ではあるが、 $D_c=95\%$ でようやく密詰め砂質土としての性質を発揮することが分かり、堤体盛土の締固め度の重要性があらためて示された。また、 $D_c=95\%$ に比べて $D_c=90\%$ の試験結果では骨格構造の変化がせん断挙動に与える影響の度合いが大きいことも併せて示された。細粒分が適度に含まれた砂質土による築堤において、河川土工マニュアルに従い $D_c=90\%$ で締め固める際には、骨格構造を十分に考慮する必要がある。

表 1 各試験の諸元

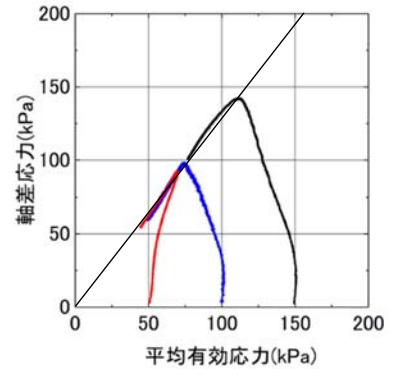
試験方法	D_c (%)	w (%)	拘束圧 (kPa)	圧密後間隙比	試験方法	D_c (%)	拘束圧 (kPa)	w (%)	q (kPa)	圧密後間隙比
CUB	90	5	50	0.769	吸水軟化	90	50	5	15	0.738
			100	0.732					30	0.769
			150	0.722					15	0.755
		10	50	0.763				30	0.788	
			100	0.730				15	0.747	
			150	0.714				30	0.746	
		14	50	0.782			5	15	0.644	
			100	0.758				30	0.658	
			150	0.737				10	15	0.661
		95	5	50			0.674		30	0.652
				100			0.662		15	0.665
				150			0.645	30	0.657	
	10	50	50	0.685	吸水軟化	95	50	5	15	0.661
			100	0.659					30	0.652
			150	0.663					15	0.665
		14	50	0.629				30	0.657	
			100	0.651				10	15	0.665
			150	0.630					30	0.657



(a) $w=5\%$

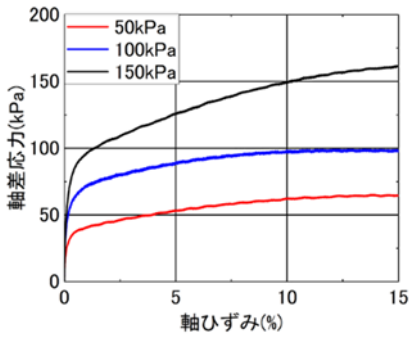


(b) $w=10\%$

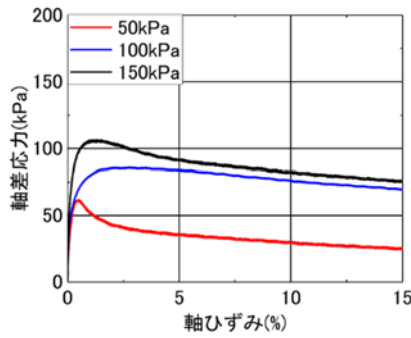


(c) $w=14\%$

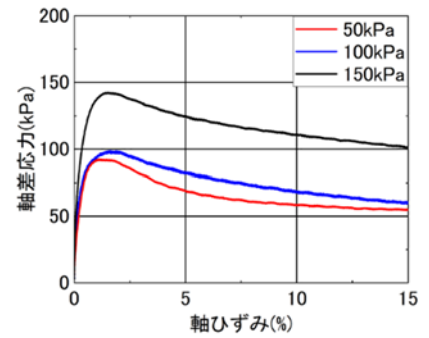
I) 平均有効応力経路



(a) $w=5\%$



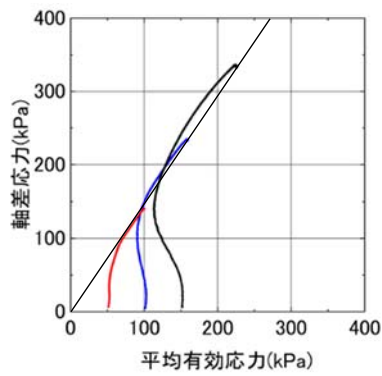
(b) $w=10\%$



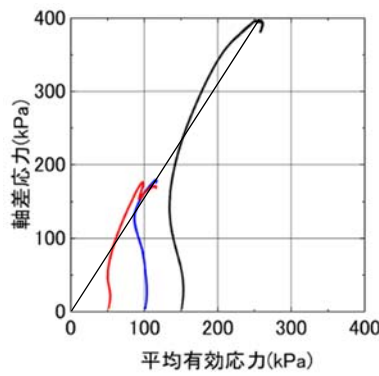
(c) $w=14\%$

II) 軸差応力～軸ひずみ関係

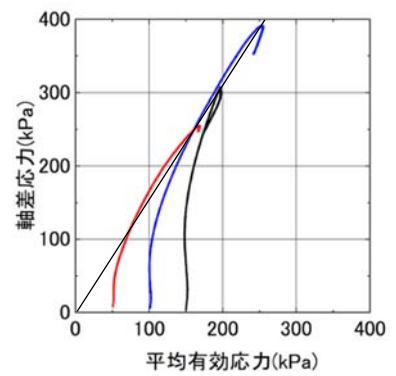
図 3 $D_c=90\%$ CUB 三軸試験結果



(a) $w=5\%$

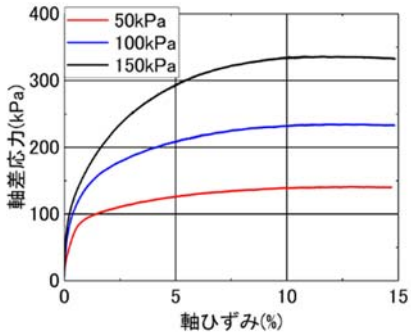


(b) $w=10\%$

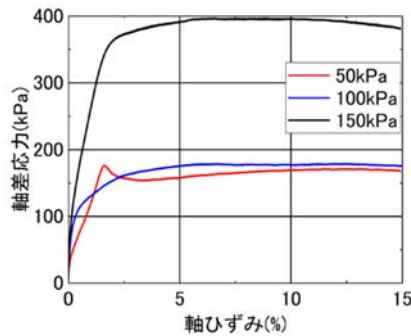


(c) $w=14\%$

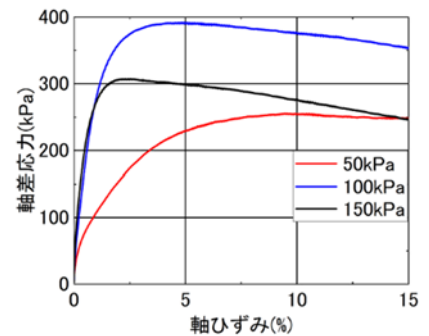
I) 平均有効応力経路



(a) $w=5\%$



(b) $w=10\%$



(c) $w=14\%$

II) 軸差応力～軸ひずみ関係

図 2 $D_c=95\%$ CUB 三軸試験結果

表2 CUB 三軸試験から得られた土質定数

D _c (%)	w (%)	φ (°)	c (kPa)
90	5	29.1	0
	10	29.7	
	14	31.3	
95	5	37.5	
	10	39.0	
	14	39.0	

4.2

吸水軟化試験結果

図4と5の上図に示す吸水軟化試験の有効応力経路には、比較のためにCUB三軸試験結果も示している。また、図4と5の下図は吸水軟化試験中の有効応力比 q/p' ～軸ひずみ関係であり、過剰間隙水圧の上昇によって有効応力比が高まり、それに伴い軸ひずみが増加する様子が示されている。有効応力比 q/p' のピーク値を破壊応力比と呼び、その値が高いほど、その試料は高い浸透すべり耐性を有していると考えられる。図4、5の下図に示すように、有効応力が減少して破壊応力比に到達する時の軸ひずみは、わずか1～3%程度であり、到達後に大きく軸ひずみが増加する。図には示していないが、破壊応力比の到達前には、ほとんど発生していない体積ひずみも、到達後に軸ひずみの増加とともに急激に増加する。すなわち、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

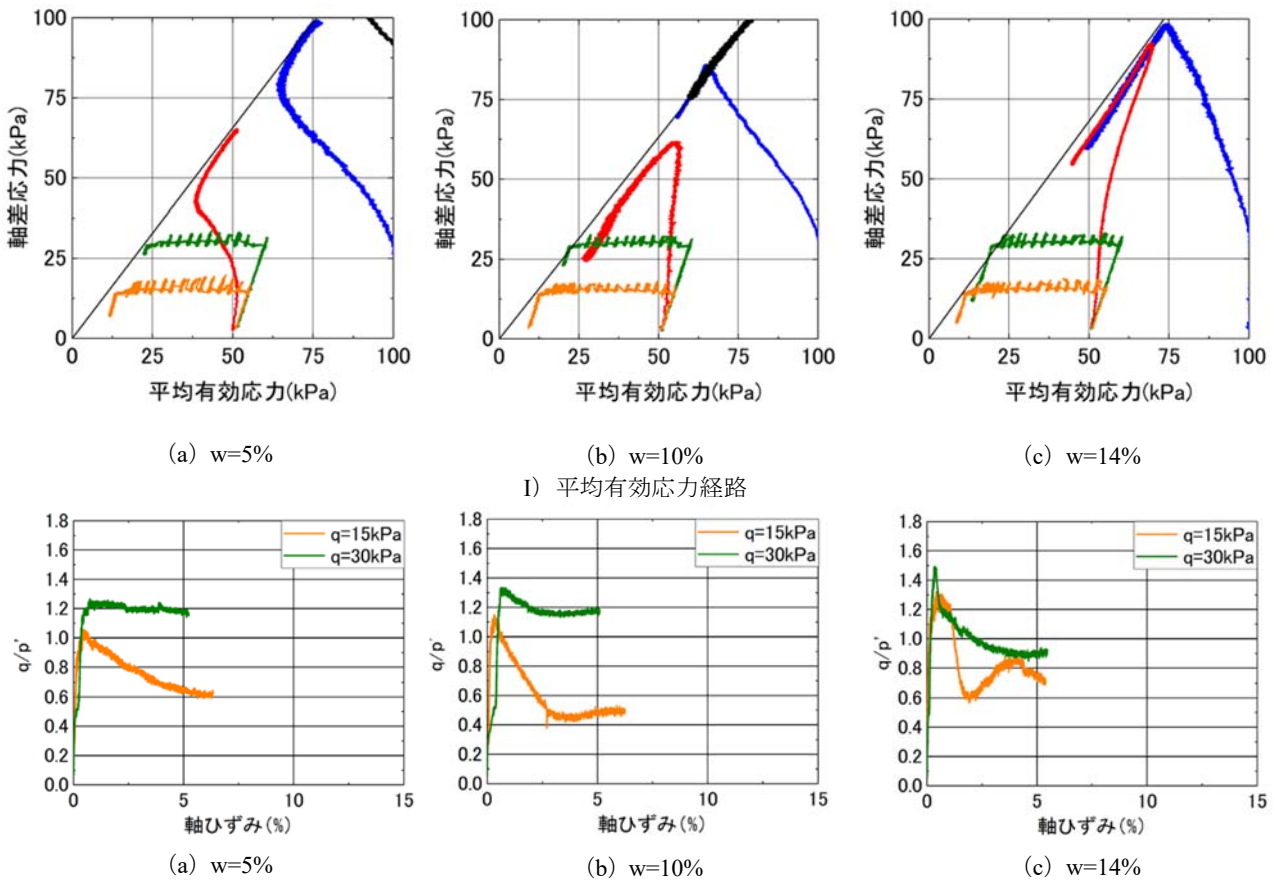
応力状態である。

図4のD_c=90%の吸水軟化試験結果では、初期含水比5%～14%の破壊応力比が1.06～1.49となり、D_c=95%の吸水軟化試験結果では、1.22～1.68となった。締固め度が高くなるにつれて、CUB三軸試験では、せん断強度が増加することが示されたが、吸水軟化試験でも同様に浸透すべり耐性が高くなることが示された。

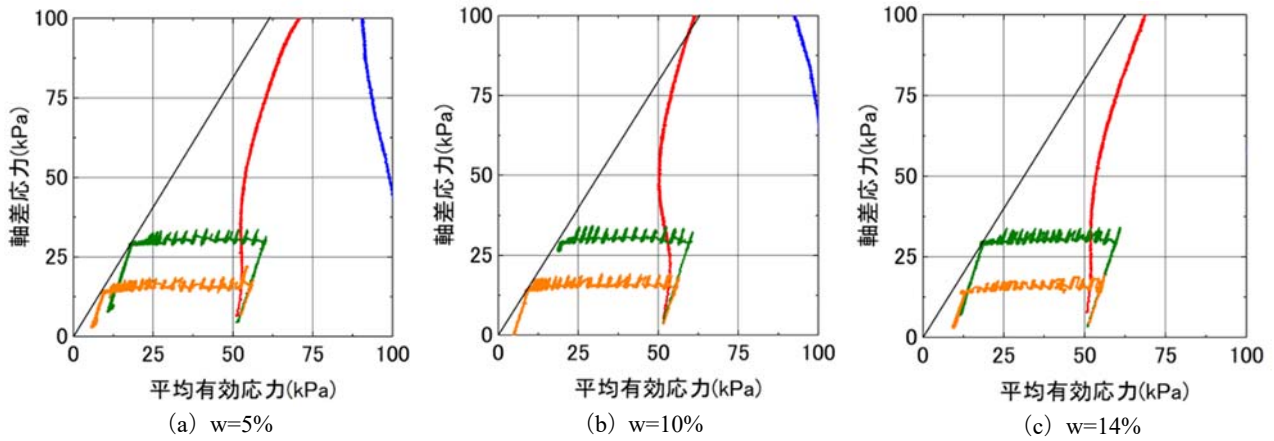
小高らは吸水軟化試験を用いて、堤体土の浸透すべり破壊耐性を以下の3パターンで評価している⁵⁾。

- 1) CUB三軸試験と吸水軟化試験の破壊応力比が同程度の値を示し、低有効応力下においても高いせん断強度が期待できず、浸透に脆弱である。
- 2) 低有効応力下でのみ高い破壊応力比を示し、高有効応力下では、CUB三軸試験の破壊応力比と同程度となる。
- 3) どの有効応力下においても、高いせん断強度を発揮し、CUB三軸試験よりも高い破壊応力比を示す

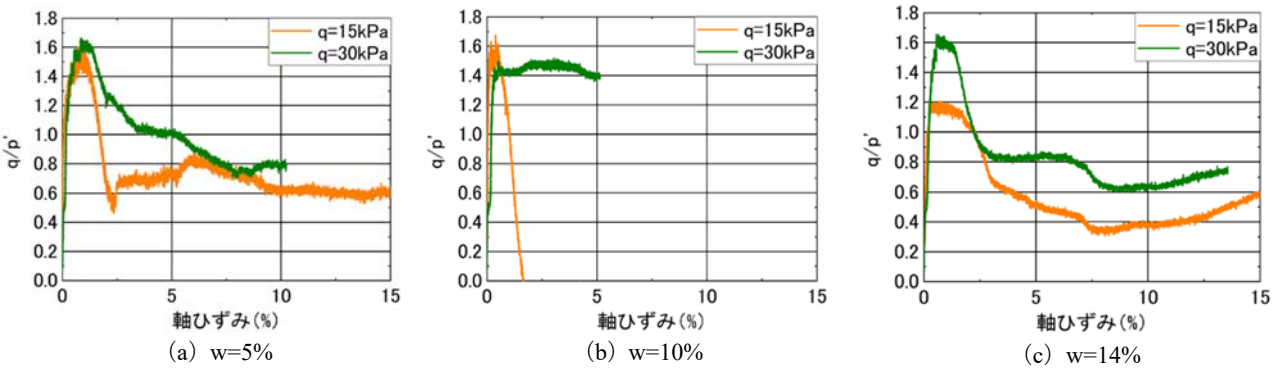
今回用いた築堤材料のD_c=90%とD_c=95%の吸水軟化試験の破壊応力比は、CUB三軸試験の破壊応力比とほぼ同じであり、パターン1に分類できる。したがって、浸透に対して脆弱な試料であることが示された。パターン1は砂質土堤防の典型であり、細粒分を混合していてもせん断強さに粘性を起因する成分は期待できないことがわかる。さらに、CUB三軸試験で得るφを用いることになるが、今回の試験ではD_cが低い場合には、吸水軟化試験の破壊応力比はCUB三軸試験の破壊応力比を下回る事例もあるため、CUB三軸試験のφを用いる際にも注意する必要がある。



II) 軸差応力～軸ひずみ関係
図4 D_c=90% 吸水軟化試験結果



I) 平均有効応力経路



II) 軸差応力～軸ひずみ関係

図 5 $D_c=95\%$ 吸水軟化試験結果

5. まとめ

本論文は、細粒分を人為的に混合した実河川堤防の築堤材料を用いて、締め固め時に形成される骨格構造がせん断挙動に及ぼす影響を明らかにし、また、締め固め度がせん断特性の差異に与える影響についても検討したものである。本研究から得られた結論を以下に示す。

- ① マイクロスコープを用いることで、目視による土の骨格構造が確認でき、供試体作製時の含水比を変化させることで、異なる骨格構造が形成されることを明確に示すことができた。そして、その変化した骨格構造は完全飽和した後も、さらには等方圧密した後も残存し続け、力学挙動に大きな影響を与えることがわかった。具体的には、高い初期含水比で作製した供試体ほど塑性圧縮量が小さく、弾性膨張が抑えられ、高位な骨格構造を形成することが示された。
- ② 今回用いた築堤材料は、細粒分を人為的に混合させたものであるが、 $D_c=90\%$ と $D_c=95\%$ のどちらの場合であっても、CUB 三軸試験の限界応力比と吸水軟化試験の破壊応力比が同程度の値を示した。したがって、細粒分をある程度混合させていても粘性に起因する成分は期待できず、浸透に対して脆弱であることが示され、粘着力を有さない砂質土として扱うのが妥当であることが示された。
- ③ CUB 三軸試験結果における $D_c=90\%$ と $D_c=95\%$ では、

大きく異なる力学挙動を示し、 $D_c=90\%$ では、 ϕ は小さく、かつ脆性を示し、 $D_c=95\%$ でようやく密詰め砂質土の性質を示すことがわかった。さらに、 $D_c=95\%$ に比べて $D_c=90\%$ の試験では、骨格構造の変化がせん断挙動に与える影響の度合いが大きいことも併せて示された。また、吸水軟化試験においても $D_c=90\%$ に比べて $D_c=95\%$ の破壊応力比は高い値を示し、締め固め度が高くなるにつれて、浸透すべり耐性が高くなることが示された。

参考文献

- 1) 小高猛司, 崔 瑛, 李 圭太, 森 涼香, 兼松祐志: 河川堤防の構造の程度が力学特性の評価に及ぼす影響, 河川堤防技術論文集, 18, 339-344, 2012.
- 2) 御手洗翔太, 小高猛司, 崔 瑛, 李 圭太, 久保裕一, 長瀬聡良: 砂質土の構造が単調ならびに繰り返し載荷に及ぼす影響, 第 54 地盤工学研究発表会, 2019.
- 3) 小高猛司, 崔 瑛, 李 圭太: 弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数に関する考察, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 2015.
- 4) 国土技術研究センター: 河川土工マニュアル, pp62~70, 2009.
- 5) 小高猛司, 李 圭太, 久保裕一, 中山雄人, 梅村逸遊, 森 智彦: 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.