

細粒分含有率が河川堤防の安全性に及ぼす影響に関する研究

Effect of Fine Fraction Content in Soil Materials on Stability of River Dike

金 秉洙	Byeong-Su KIM	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
小林 弘昌	Hiromasa KOBAYASHI	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
加藤 正司	Shoji KATO	(神戸大学大学院工学研究科)
朴 成完	Seong-Wan PARK	(Dankook 大学(韓国)土木環境工学科)
竹下 祐二	Yuji TAKESHITA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)

本研究では、豪雨時の浸透・侵食による河川堤防の地盤強度の低下に関連する様々な要因の中で細粒分含有率に注目し、河川堤防から採取したまき土のみで細粒分含有率の異なる試料を作製し、細粒分含有率による河川堤防の安全性への影響について検討した。試料の基本的な物理特性試験や飽和試料の透水試験、保水性試験の結果に基づいて降雨浸透流解析を行い、その後、浸透流解析結果や力学特性試験結果に基づいて不飽和状態の堤防斜面の安定解析を行った。得られた結果から、堤防材料の細粒分含有率が 25%以上になれば、降雨時の浸透に対して高い飽和状態($S_r=70\%$ 以上)でも、安全に堤防の維持管理が期待されると考えられる。

キーワード：不飽和土、細粒分含有率、堤防の地盤材料、不飽和浸透流解析、斜面安定解析 (IGC : E06, E07)

1. はじめに

一般的に河川堤防は、大きな礫から細粒分まで含む土によって構成されている。降雨時には、雨水の浸透・侵食によって細粒分が最初に流出され、内部侵食による地盤の不安定化と共に堤防の破壊まで至ると考えられる^{1),2)}。また、細粒分は、地盤のせん断強さや浸透特性に影響を及ぼすため、細粒分含有率の影響は重要な検討項目である。しかし、現在まで河川堤防の安全性照査のため、地盤工学的検討として、細粒分含有率の条件を変化させながら地盤強度及び変形特性を定量的に評価してきたものの、それらのほとんどの研究が原試料と異なるシルト分や粘土分を混合した試料を用いて実験が行われてきた^{3),4)}。このような結果より、河川堤防材料の細粒分含有率による安全性への影響を評価するには、限界があると判断される。

また、実験条件として飽和状態での実験を行って得られた結論に止まっているので、不飽和状態で存在する自然河川堤防の力学特性及び浸透特性を定量的に評価したとは言えない。そして、河川土工マニュアル(H21.4)⁵⁾では堤体材料の細粒分含有率は不透水性を確保する為に 15%以上、乾燥時にクラックが入らないように 50%以下と定められているが、このような細粒分含有率の違いによる堤体の力学特性及び浸透特性への影響を調べる必要がある。よって、本研究では、岡山県内の河川堤防から採取した試料を用い、試験条件に合わせて原試料から細粒分含有率を減少させた。このような試料を用いて実験することにより、自然河川堤防において細粒分が流出した際の不飽和状態での力学特性、浸透特性の定量的評価及び施工時の堤体材料の細

粒分含有率の提案が可能となると考えられる。

河川堤防材料の細粒分含有率の影響に関する研究として金ら⁶⁾は、細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響について研究を行った。彼らは、まず対象となる河川堤防から採取したまき土について物理特性試験を行ない、土の基本的物性を把握した(次章参照)。その後、試料の細粒分含有率を減少させながら締固め試験を行い、各細粒分含有率における締固め曲線を求めて、各締固め度の結果が堤防設計の基準を満足しているかを評価した。次に変水位透水試験を行い、各細粒分含有率における飽和透水係数を求め、さらに保水性試験を行って得られた水分特性曲線を利用して不飽和透水係数を推定し、市販の不飽和浸透流解析プログラム⁷⁾を用いて浸透特性を評価した。この結果により、細粒分含有率が増加するほど降雨浸透しにくくなり、細粒分含有率 40%と 50%では浸潤前線が形成されていないことが確認された。

本研究においては、金ら⁶⁾の研究結果を踏まえて、細粒分含有率の影響を検討する力学試験を行い、現地の河川堤防斜面を対象として不飽和浸透流解析や安定解析を実施した。力学試験に関しては、飽和状態での圧密非排水三軸圧縮試験($\bar{\sigma}$ 試験)を行い、細粒分含有率による粘着力と内部摩擦角への影響を把握した。その後、各細粒分含有率の条件による不飽和浸透流解析を行い、さらに市販の安定解析プログラム⁸⁾を用いて、細粒分含有率が不飽和土堤防斜面の安全性に与える影響を検討した。これらの結果に基づき、細粒分含有率による力学特性及び浸透特性への影響を考慮して総合的に河川堤防の安全性を評価し、安全に堤防の維持管理が期待できる堤体材料の細粒分含有率につ

表-1 まさ土の物理特性⁶⁾

項目	物理値
土粒子の密度(ρ_s)	2.58 (g/cm ³)
液性限界(w_L)	N.P
塑性限界(w_P)	24.60 (%)
最大乾燥密度(ρ_{dmax})	1.88 (g/cm ³)
礫分(75~2mm)	2.80 (%)
砂分(2~0.075mm)	78.78 (%)
細粒分(0.075mm以下)	18.42 (%)
細粒分含有率	18.42 (%)

表-2 細粒分含有率による飽和透水試験結果⁶⁾

F_c (%)	飽和透水係数, k_{15} (m/s)
10	3.34×10^{-6}
25	6.61×10^{-7}
40	3.19×10^{-7}
50	1.32×10^{-7}

表-3 水分特性曲線のフィッティングパラメーター⁶⁾

F_c (%)	Fitting parameters			空気侵入値(kPa)
	a	n	m	
10	3.20	1.72	0.64	1.71
25	6.00	1.19	0.70	2.39
40	14.20	0.98	0.73	5.09
50	29.50	0.78	0.54	9.08

いて検討を行った。

2. 各室内試験について

2.1 物理試験及び飽和透水試験・保水試験

金ら⁶⁾の研究では、対象となる河川堤防から採取したまさ土試料の物理特性の把握のために、原試料を用いた土粒子密度試験、液性・塑性試験、粒度試験を行っている。また、まさ土のみで細粒分含有率(F_c)10%、25%、40%、50%の試料を作製し、各々の飽和透水試験及び保水試験を行っている。以上の各々の試験方法の詳細については、金ら⁶⁾を参照されたい。

金ら⁶⁾の研究で得られたまさ土の物理試験結果と細粒分含有率による飽和透水試験結果を、それぞれ表-1と表-2にまとめている。図-1は、原試料と細粒分含有率(F_c)調整試料の粒度分布曲線を示しており、図-2は、細粒分含有率調整試料の水分特性曲線(排水過程)を示している。表-3では、得られた水分特性曲線に対する水分特性曲線モデル⁷⁾のフィッティングパラメーターをまとめている。また、Fredlund & Xing⁷⁾の相対透水係数式(relative hydraulic conductivity function, K_r)を用いて細粒分含有率(F_c)による不飽和透水係数推定し、その結果を図-3に示している⁶⁾。

2.2 圧密非排水三軸圧縮($\bar{c}\bar{u}$)試験

圧密非排水三軸圧縮試験($\bar{c}\bar{u}$)は、供試体の作製(初期乾

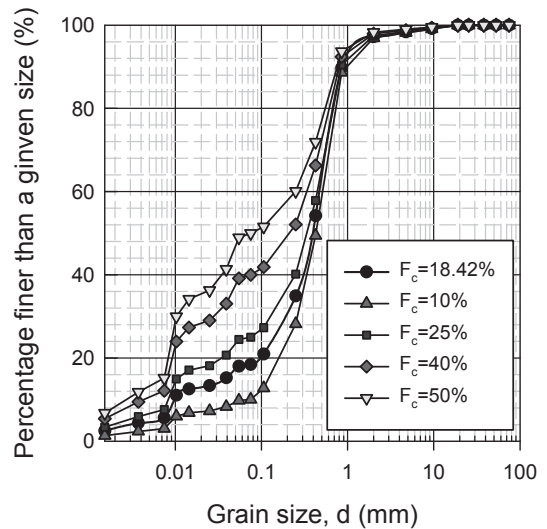


図-1 原試料と細粒分含有率調整試料の粒度分布曲線⁶⁾

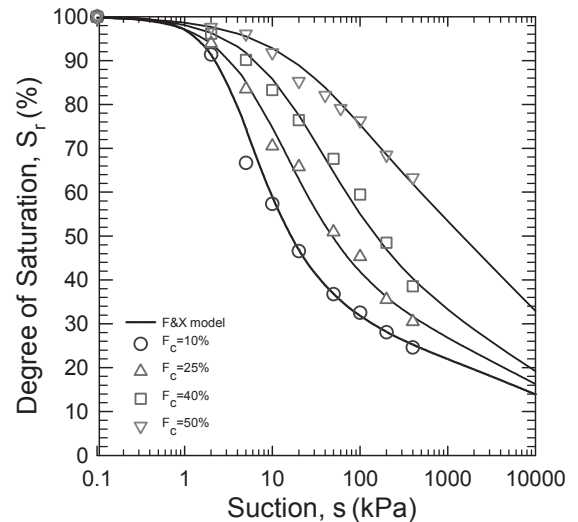


図-2 細粒分含有率調整試料の水分特性曲線(排水過程)⁶⁾

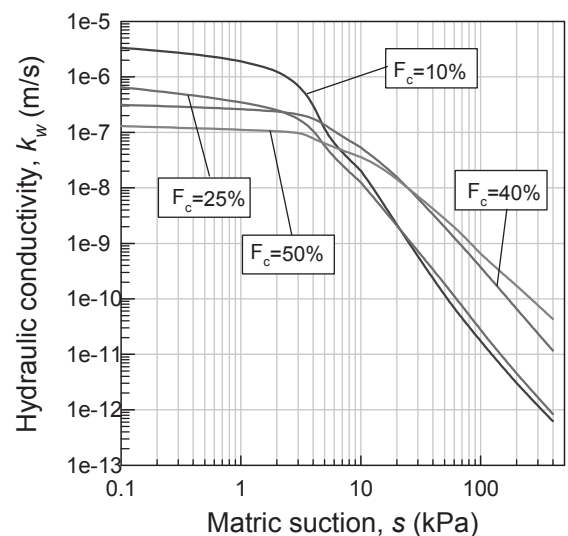


図-3 細粒分含有率(F_c)による不飽和透水係数推定結果⁶⁾

体積変化乾燥密度: 1.698g/cm³, 供試体の設置, 供試体の飽和 (B 値: 0.95 以上), 供試体の圧密, そしてせん断過程 (せん断速度: 0.1%/min) の手順で実験を行ったせん断

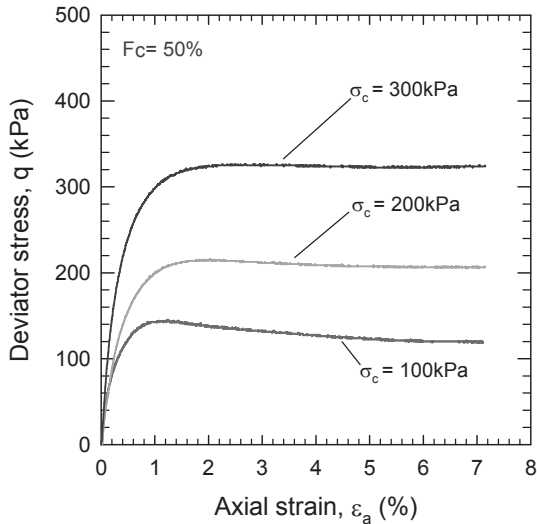


図-4 細粒分含有率(F_c) 50%のケースの軸ひずみ～軸差応力関係

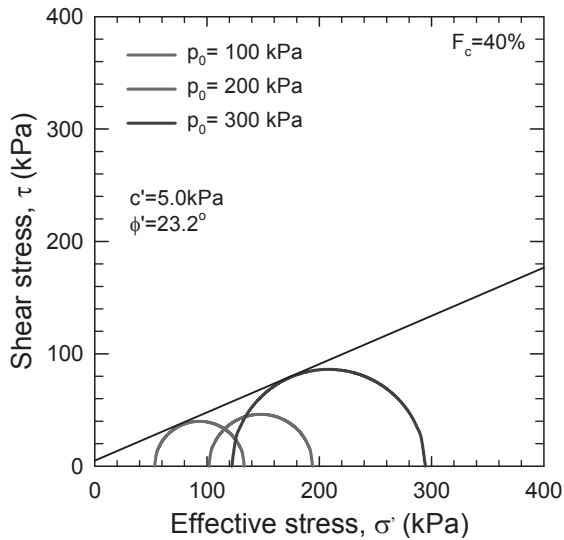


図-5 細粒分含有率(F_c) 40%の場合の破壊線

表-4 細粒分含有率による粘着力と内部摩擦角の結果

F_c (%)	粘着力, c' (kPa)	内部摩擦角, ϕ' (°)
10	0.0	35.5
25	10.0	23.4
40	5.0 (推定:13.1)	23.2 (推定:19.6)
50	16.0	16.2

過程では、センサーによって軸応力を測定し、圧縮による供試体からの吸排水量を二重管ピュレットで測定して供試体量を計測した。図-4 は、細粒分含有率 50%のケースの軸ひずみ～軸差応力関係を例として示している。その他の細粒分含有率のケースでも、この結果と同様に有効拘束圧力が高くなる程、軸差応力も高くなり、軸差応力は、軸ひずみ 2%以下でピークに達して、細粒分含有率が大きくなるほど軸差応力が小さくなることが確認された。また、細粒分含有率が増加するほど、残留状態でのせん断強度は、緩やかに落ちていることが確認された。

細粒分含有率 40%のケースのモールの破壊応力円と破



図-6 解析対象地点の河川堤防斜面の状況

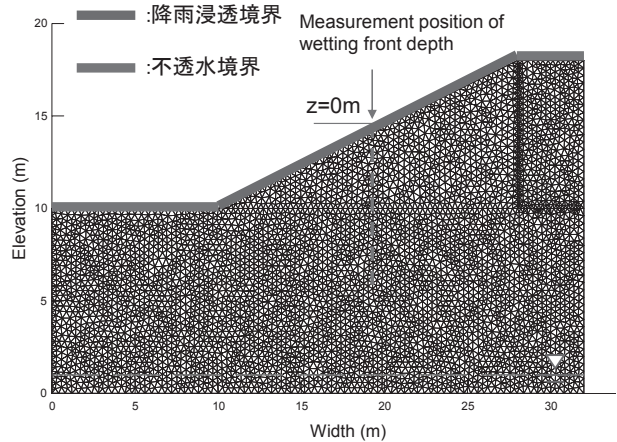


図-7 浸透流解析での河川堤防斜面モデル

壊線を図-5 に示している。その他の細粒分含有率のケースにおいても同様に、有効拘束圧力が 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa と高くなるにつれて、破壊時の 拘束圧と圧縮強さ(主応力差の最大値)に基づいて決定されるモールの破壊線が大きくなっている傾向を示している。得られた三つのモールの破壊線に接線を引くことにより、モール・クーロンの破壊線を得た。このようにして得られた破壊線における粘着力(c')と内部摩擦角(ϕ')を細粒分含有率ごとにまとめて表-4 に示している。細粒分含有率 40%場合、粘着力が 5kPa であり、細粒分含有率 25%の結果より小さい。この結果は、拘束圧 200kPa の破壊強度が他の 2 つの結果に比べて小さく、拘束圧 100kPa と 300kPa の破壊時のモールの応力円より破壊線を決定して、粘着力が小さくなった代わりに内部摩擦角の結果が大きくなっているためである(図-5 参照)。過去に行われた中間土の研究結果⁸⁾では、砂と粘土を混合した場合、破壊時の強度定数は混合割合に応じて粘土から砂の強度定数へ滑らかに変化する傾向を示している。よって、今回の結果も細粒分の増加に対して強度定数は滑らかに変換することが予測される。今回の細粒分 40%の結果は、何らかの影響でその傾向から外れているが、その原因は不明である。このような結果は、後述する降雨浸透による安定解析結果において、不自然な結果をもたらす可能性があるため、 $F_c=10\%$, 25% , 50% のケースの試験結

果における F_c と強度定数との 1 次線形近似関係、式(1)と式(2)を用いて $F_c=40\%$ の結果を推定(粘着力 13.1kPa, 内部摩擦角 19.6° , 表-4 参照)し, その結果を以降の安定解析に用いることにする.

$$c' = 0.384 \times F_c - 2.2 \quad (1)$$

$$\phi' = -0.463 \times F_c + 38.1 \quad (2)$$

3. 不飽和状態の堤防斜面の浸透流解析

3.1 解析概要

本章では, 堤体材料として望ましい細粒分含有率を調べるため, 浸透流解析により, 降雨時に細粒分含有率が不飽和斜面の浸透特性に与える影響を評価した. 浸透流解析では, 市販の解析プログラム SEEP/W⁹⁾を用いた. また, 降雨時の不飽和斜面への降雨侵入による浸潤前線(wetting front depth)形成, すなわち地盤内の間隙水圧がゼロになる飽和状況の境界面に注目し, 斜面の浸透特性において細粒分含有率($F_c=10\%$, 25% , 40% , 50%)が及ぼす影響について調べた.

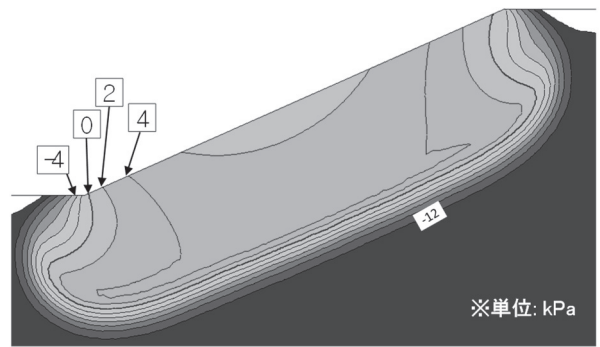
3.2 浸透流解析

(1) 対象斜面

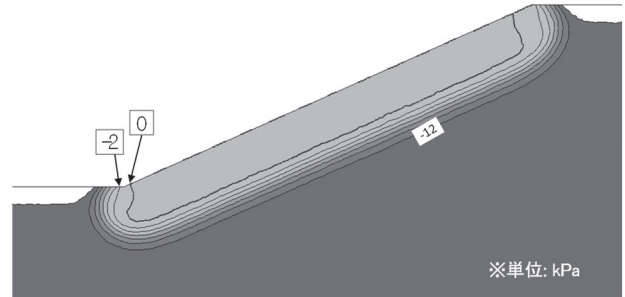
解析対象地点の堤防斜面は, 対象河川のある地点の右岸堤防であり, その状況を図-6 に示している. 堤防の上下部には, アスファルト道路が建設されていることが分かる. 斜面の解析断面および境界条件を図-7 に示している. 解析斜面は, 幅 32.0 m, 高さ 18.0 m であり, 斜面傾斜区間は, 長さ 18.0 m, 高さ 8.0 m (斜面傾斜は, 1:2.3) である. 地下水位は, 降雨時浸透挙動の影響を排除するため, 斜面下部で地下 9.0 m の位置に存在すると設定した.

(2) 解析条件

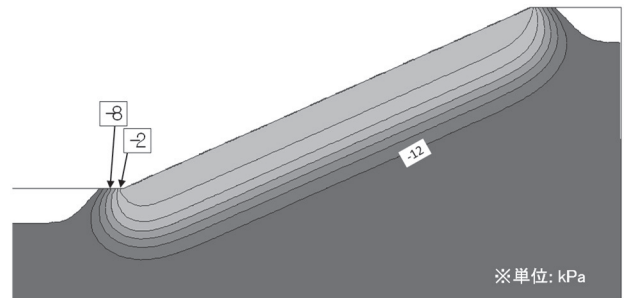
地盤表層の境界条件は, 対象河川堤防と同様にするため, 道路部分是不透水境界とし(図-7 赤色線部分), 舗装されていない斜面の部分(図-7 青色線部分)のみを浸透可能な境界と設定した. また, 細粒分含有率による浸透特性を把握するため, 解析対象斜面は, 1 層としてそれぞれの細粒分含有率の物性値を適用した. 解析時間は, 0hr, 1hr, 3hr, 5hr, 10hr, 24hr, 48hr, 72hr, 96hr の 9 段階に設定しており, 浸透によるサクシジョンの変化を調べた. なお, 細粒分含有率 50% のケースの水分特性曲線の空気侵入値より少し大きい 14.0 kPa を初期サクシジョンとして設定した. また, 不飽和状態の斜面では飽和透水係数より降雨強度(I , rainfall intensity)が低くなると, 浸透が遅くなるため, 堤防内へ十分浸透できる状況, すなわち一番危険な状況を想定し, 細粒分含有率 $F_c=10\%$ のケースの飽和透水係数 ($k_s = 3.34 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 12.0 \text{ mm/hr}$) が一番大きいことを基準として降雨強度(I)を 12.0 mm/hr として適用した. このため飽和浸透係数以上の雨量は, 地盤内に浸透せず, 表面に流れることになる. また, 細粒分含有率の条件によって得られ



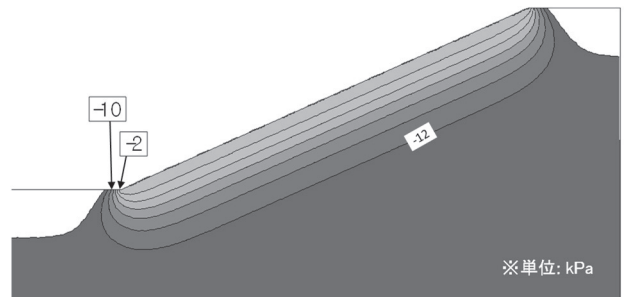
(a) $F_c=10\%$



(b) $F_c=25\%$



(c) $F_c=40\%$



(d) $F_c=50\%$

図-8 降雨浸透による地盤内の間隙水圧変化(解析時間: 96hr)

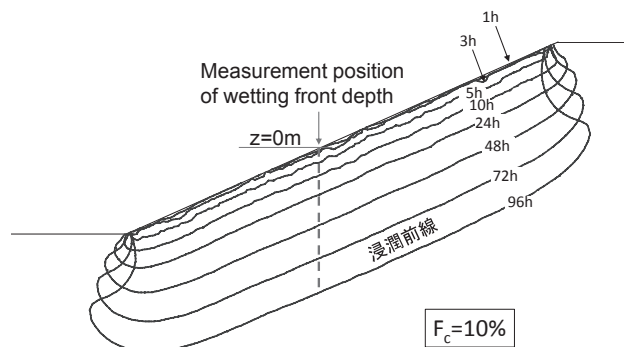


図-9 降雨浸透による浸潤前線の形成の様子($F_c=10\%$)

た水分特性曲線(排水過程)に Fredlund & Xing の理論式⁷⁾を適用し、そのフィッティング曲線を用いて推定された不飽和透水係数を推定した。

3.3 浸透流解析結果

図-8(a)~(d)は、 $F_c=10\%$ 、 25% 、 40% 、 50% のケースにおける解析時間 96hr の浸透流解析結果を示している。図中に記されているコンターライン上の数字「-12」は地盤内の間隙水圧(u_w , kPa)の大きさを示し、各コンターラインは、間隙水圧 2.0 kPa の間隔で示している。間隙水圧の値が 0 kPa に近づくほど、間隙内の水の割合が増え、飽和度が上昇し飽和状態に近づいている。そして、間隙水圧が 0 kPa になると降雨侵入により飽和になったと判断される。このときの飽和境界ラインが浸潤前線(wetting front depth)であると考えられる。図中では、浸潤前線を青色太線として表している(図-8(a) 参照)。 $F_c=10\%$ のケースでの解析時間 96hr の結果では、時間の経過と共に不飽和状態の斜面に降雨が浸透し、浸潤前線が形成され、浸透深度が大きくなっている傾向を示している。図-9 は、 $F_c=10\%$ のケースの 9 段階の解析時間における降雨浸透による浸潤前線の形成の様子を示している。

$F_c=25\%$ のケースでは、解析時間 48hr のときに浸潤前線が形成され、図-8(b)に示すように浸潤前線が観察できる。一方、 $F_c=40\%$ と 50% のケースでは、解析時間 96hr までに地盤内に雨水がほぼ浸透せず、地盤内が不飽和状態を維持していることが確認できる(図-8(c),(d)参照)。 $F_c=40\%$ 、 50% のケースで浸潤前線が形成されない原因は、 $F_c=10\%$ のケースの透水係数の結果を基準とした場合、細粒分含有率(F_c)の増加により、 $F_c=25\%$ が 1/5.0 倍、 $F_c=40\%$ が 1/10.5 倍、 $F_c=50\%$ が 1/25.3 倍の透水係数となり、降雨浸透しにくくなったためである。しかし、 $F_c=40\%$ 、 50% のケースでも降雨が浸透し間隙水圧が時間の経過と共に高くなり、表層から間隙水圧のコンターラインが深くなり、降雨の浸透により飽和状態に近づいていることが分かる。

以上のことから、細粒分含有率 10%のケースでは浸潤前線が早期に形成されるため浸透に対する強度が十分に確保されず、細粒分含有率 25%のケースからは、浸潤前線の形成速度が遅くなることが分かる。一方、細粒分含有率 40%、50%のケースでは浸潤前線が形成されず、十分な浸透強度が確保できていると考えられる。よって、堤体の細粒分含有率が増加するほど、降雨浸透に対する抵抗性が向上し、堤防の安全性が向上するといえる。

4. 不飽和状態の堤防斜面の安定解析

4.1 解析概要

降雨時、細粒分含有率による不飽和土河川堤防斜面の安全性評価のため、斜面安定解析を実施した。安定解析では、浸透流解析での 9 段階(0hr, 1hr, 3hr, 5hr, 10hr, 24hr, 48hr, 72hr, すべり円弧の中心となる範囲と円弧の接線の範囲を

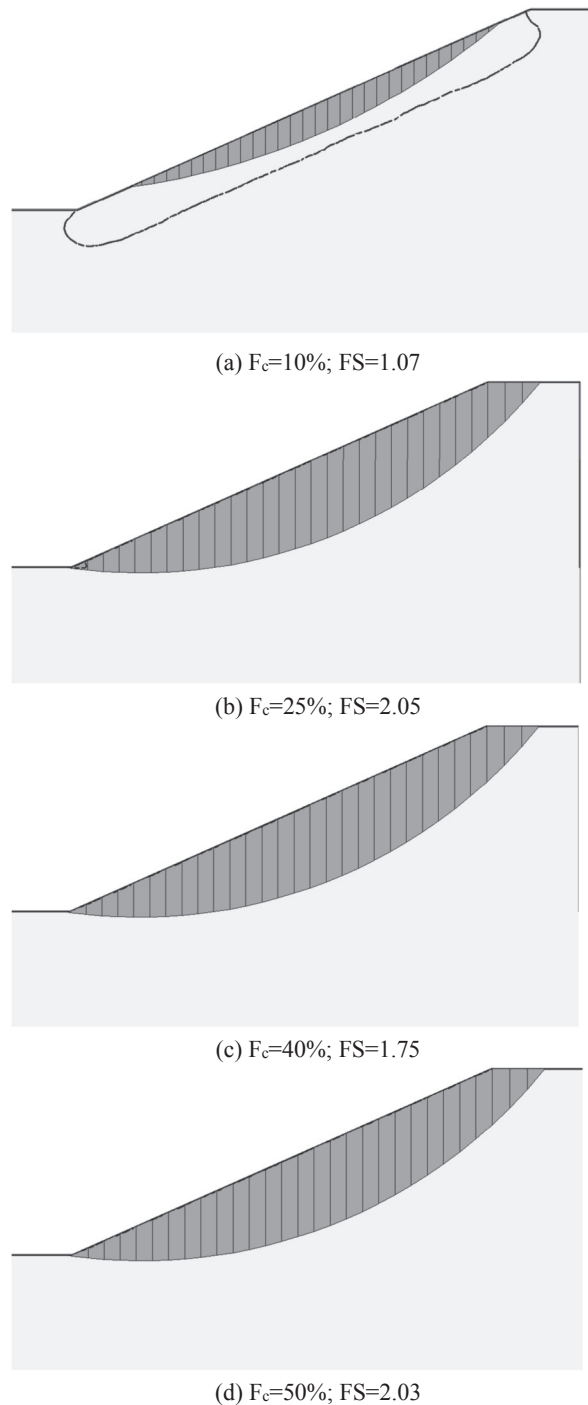


図-10 降雨浸透による堤防斜面のすべり円弧の状況 (解析時間：24h)

設定し、円弧の分割数は 30 とした(参照：図-10)。そして、細粒分含有率の違い($F_c=10\%$ 、 25% 、 40% 、 50%)が降雨時に不飽和状態の堤防斜面の安全性に及ぼす影響について評価した。

4.2 対象斜面

対象斜面は、浸透流解析と同様の斜面を設定した(図-7 参照)。斜面の形は全体 32m、高さ 18m であり、この時の斜面傾斜区間は長さ 18m、高さ 8m (斜面傾斜は、1:2.3) 96hr)の解析時間における堤防斜面内の浸透状態において、

表-5 安定解析に用いた入力パラメーター

F_c (%)	γ_t (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)
10	18.0	0.0	35.5	16.0
25	18.7	10.0	23.4	14.3
40	19.0	13.1	19.6	15.0
50	19.2	16.0	16.2	13.4

解析プログラム SLOPE/W¹⁰⁾を用いて円弧すべりに対する不飽和斜面の安全率(Factor of safety, FS)を求めた。その際、である。

4.3 解析条件

安定解析での基本的な入力パラメーターとしての粘着力(c')と内部摩擦角(ϕ')は、飽和三軸圧縮試験結果を用いる。特に、前述したように降雨浸透による安定解析結果に不自然な結果をもたらす可能性があるため、 $F_c=10\%$ 、 25% 、 50% のケースの試験結果の関係から $F_c=40\%$ の結果を推定(粘着力 13.1kPa, 内部摩擦角 19.6°)し、その結果を用いることにした。また、不飽和斜面の安定解析のためには、サクシオンによる地盤のせん断強度増分である見かけの粘着力(Δc)を考慮しなければならない。安定解析で用いるプログラム¹⁰⁾では、通常、見かけの粘着力(Δc)を Fredlund¹¹⁾の提案式の ϕ^b で考慮している。このため本研究では、以下のような Fredlund¹¹⁾による式(3)と Vanapalli¹²⁾による式(4)に基づいてサクシオンによる強度増分を考慮した。

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\frac{(\theta_w - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \times (\tan \phi') \right] \quad (4)$$

ここに、 ϕ^b =サクシオン ($u_a - u_w$)に関連したせん断強度増加の割合を示す角度、 u_w : 間隙水圧、 u_a : 間隙空気圧、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_w : 体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率。

式(3)と式(4)との関係により、サクシオンによる内部摩擦角 ϕ^b 値は、式(5)と式(6)に基づいて求められる。

$$\Delta c = (u_a - u_w) \tan \phi^b = (u_a - u_w) \left[\frac{(\theta_w - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \times (\tan \phi') \right] \quad (5)$$

$$\therefore \tan \phi^b = \frac{(\theta_w - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \times (\tan \phi') \quad (6)$$

一方、解析斜面内の初期体積含水率(θ_w)は、初期サクシオンである 14 kPa を基準として水分特性曲線上で対応する飽和度とした。また、一般的に残留体積含水率は、水分特性曲線から求めている(図-2参照)。しかし、シルトや粘土質の試料の場合、低いサクシオン値では、残留状態に

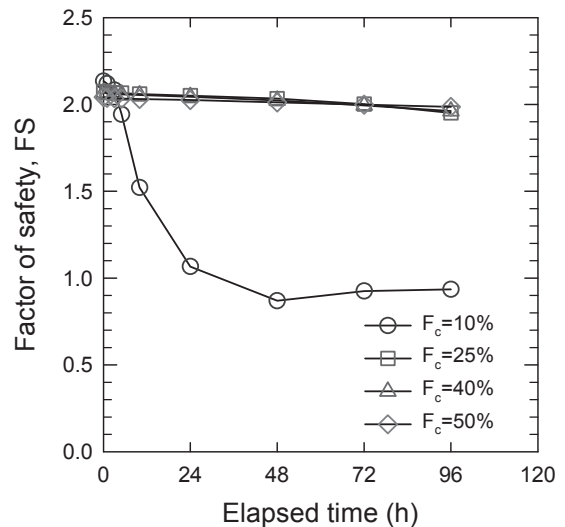


図-11 安全率(FS)の経時変化

表-6 細粒分含有率による安全率の経時変化

Time (hr)	Factor of Safety, F.S			
	$F_c=10\%$	$F_c=25\%$	$F_c=40\%$	$F_c=50\%$
0	2.13	2.07	2.07	2.04
1	2.12	2.07	2.06	2.04
3	2.08	2.07	2.06	2.04
5	1.94	2.07	2.06	2.03
10	1.52	2.06	2.05	2.03
24	1.07	2.05	2.04	2.03
48	0.87	2.03	2.02	2.01
72	0.93	2.00	2.00	2.00
96	0.94	1.95	1.97	1.99

ならない場合が多いので、求めることが難しくなる。よって、本研究では、農業工学分野での萎れ点 (wilting point, 1,500 kPa, 約 4.2 pF) に着目した。萎れ点の 1,500kPa というサクシオンの値は、植物が水分を引き上げる限界値として知られている¹³⁾。蒸散量は、萎れ点と地盤の能力の差と等しい。さらに、Gardner¹⁴⁾と Hillel¹⁵⁾の研究によると、萎れ点、1,500kPa よりサクシオンが大きくなると、メニスカス水が形成されにくいということが判明している。よって、本研究では、水分特性曲線において、1500 kPa のサクシオンに対する飽和度を残留飽和度に定めた。また、湿潤単位体積重量の場合、初期サクシオン 14 kPa を基準として水分特性曲線上で対応する含水比と飽和度に基づいて求めた。安定解析で用いたそれぞれの入力パラメーターを表-5にまとめている。

なお、斜面安定の安全率を算出するために、本研究では、サクシオンによる強度増分を考慮した拡張された簡易 Bishop 法を用いた。この場合、安全率(FS)は式(7)で求められる。ここで、間隙空気圧(u_a)は、大気中を仮定しているためゼロと設定した。

$$FS = \Sigma \frac{c' + \left(\frac{W}{\cos \alpha} - u_w l \right) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{FS}} \bigg/ \Sigma W \sin \alpha \quad (7)$$

ここに、 W : スライス重量, α : スライス底辺の角度, l : スライス底辺の長さ.

4.4 安定解析結果

図-10 は、細粒分含有率 10%, 25%, 40%, 50% のケースにおいて浸透解析時間 24hr に対する降雨浸透による堤防斜面のすべり円弧の状況を示している. 細粒分含有率 10% のケースでは、時間経過による浸透深度が大きくなり、すべり破壊の形状がのり面中央で形成される様子が分かる. 一方、細粒分含有率 25%, 40%, 50% のケースでは、すべり円弧の形状があまり変化していないことが分かる.

(1) 安全率の経時変化

安定解析結果により得られた、細粒分含有率による堤防斜面の安全率(FS)の経時変化を図-11 に示し、表-6 にまとめている. 細粒分含有率 10% のケースでは、5 時間が経過した時から安全率が大きく低下し、48 時間が経過した時点で安全率が 1.0 を下回った. これは、堤防斜面が崩壊するという危険な状況を示している. 一方、細粒分含有率 25%, 40%, 50% のケースでは、安全率の変化は小さく、その差はほぼ見られない. 細粒分含有率 25% の場合、解析時間 24h~48h の間に浸潤前線が形成される浸透解析結果が出されたものの、堤防斜面の安全性には影響する程度ではないと解釈できる. また、細粒分含有率 40% の場合、推定された粘着力と内部摩擦角を用いることでリーズナブルな安全率の変化が求められたと考えられる. しかし、前述したように、この細粒分含有率 40% のケースの強度定数については、今後再試験などの検討が必要と判断する.

以上により、細粒分含有率が高くなるにつれて、降雨による浸透深度の違いをもたらす、安全率の経時変化が小さくなったと考えられる.

(2) 正規化した安全率の経時変化

細粒分含有率による安全率の減少率を比較するために正規化した安全率で検討を行った. 解析時間 0hr での初期安全率を基準として、解析時間 0hr, 1hr, 3hr, 5hr, 10hr, 24hr, 48hr, 72hr, 96hr の 9 段階の安全率に対する正規化を行った. 各細粒分含有率による正規化された安全率(Normalized factor of safety, NFS)の結果を図-12 に示し、表-7 にまとめている.

細粒分含有率 10% のケースでは、解析時間 24hr, 72hr で正規化した安全率(NFS)がそれぞれ 0.50, 0.43 にまで明らかに減少していることが観察できる. 一方、細粒分含有率 25%, 40%, 50% のケースでは解析時間が長く経過してもほとんど変化していないことがわかる. 前述したように、降雨浸透の影響により細粒分含有率 10% のケースに比べ、細粒分含有率 25%, 40%, 50% のケースでは安全率の経時変化が小さくなっている.

以上のことから、細粒分含有率 10% のケースの時には十分なすべり破壊に対する安全性が確保されず、細粒分含有率 25%, 40%, 50% のケースでは十分なすべり破壊に対する安全性が確保できていると予測できた. よって、堤体材料の細粒分含有率が 25% 以上になることで、斜面の円

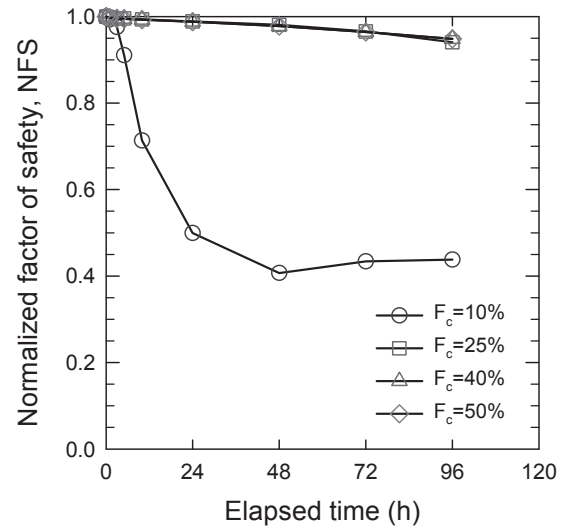


図-12 正規化した安全率(NFS)の経時変化

表-7 細粒分含有率による正規化した安全率の経時変化

Time (hr)	Normalized Factor of safety, NFS			
	F _c =10%	F _c =25%	F _c =40%	F _c =50%
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.99	1.00	1.00	1.00
3	0.98	1.00	1.00	1.00
5	0.91	1.00	0.99	1.00
10	0.71	0.99	0.99	1.00
24	0.50	0.99	0.99	0.99
48	0.41	0.98	0.98	0.99
72	0.43	0.97	0.96	0.98
96	0.44	0.94	0.95	0.97

弧すべりに対する安全率の低下が抑制され、堤防の安全性が向上できると考えられる.

5. 結論

本研究では、岡山県内のある河川堤防斜面を対象として、細粒分含有率が河川堤防の安全性に及ぼす影響について調べた. そのため、現地で採取したまさ土について、まさ土のみで細粒分を調整して、細粒分含有率を変化させた試料を用いて、圧密非排水三軸圧縮試験(CU)を行い、過去の試験結果⁹⁾を踏まえて、不飽和堤防斜面の安定解析を実施した. 以上の結果を不飽和土に関する強度浸透理論に基づいて検討を行った. 得られた結果は以下のようにまとめられる.

- (1) 浸透流解析の結果、細粒分含有率(F_c) 10% のケースでは降雨が浸透して 1 時間が経過した時に、細粒分含有率(F_c) 25% のケースでは解析時間 24h~48h の間に浸潤前線が形成された. 一方、細粒分含有率(F_c) 40, 50% のケースでは浸透されにくい状態が続き、96 時間が経過した場合でも浸潤前線が形成されなかった. よって、堤体の細粒分含有率(F_c)が増加するほど、降雨浸透に対する抵抗性が向上し、堤防の安全性が向上するといえる.

- (2) 斜面安定解析の結果, 細粒分含有率(F_c)10%のケースでは 5 時間が経過した時点から安全率が大きく低下し, 48 時間が経過した時点では安全率は 1.0 を下回った. 一方, 細粒分含有率 (F_c) 25%, 40%, 50%のケースでは 96 時間が経過した場合でも安全率の大きな低下はみられず, 正規化した安全率(NFS)では 0.03~0.10 程度の低下に抑えられ, ほぼ差がないことが分かった. よって, 堤体材料の細粒分含有率(F_c)が 25%以上の場合, 斜面の円弧すべりに対する抵抗性が向上し, 堤防の安全性が向上できると考えられる.
- (3) 堤防材料を用いて力学特性・浸透特性を室内実験で調べた結果に基づいて浸透流解析を行った. その結果, 細粒分含有率(F_c) が 25%より高くなるにつれて透水性が低下し, 浸潤前線が形成されにくいことが確認された. また, 斜面安定解析では, $F_c=25%$ 以上で安全率の低下率が大幅に小さくなることが分かった. よって, 豪雨時のせん断強度及び浸透特性, 斜面の安定性から, 現場で堤防の地盤材料を考える上で, 地盤材料が細粒分含有率 $F_c=25%$ 以上になれば, 降雨時の地盤内の浸透に対して河川堤防が高い飽和状態でも安全に堤防の維持管理が期待されると考えられる.

参考文献

- 1) 前田健一, 今瀬達也, 伊藤嘉, 齋藤啓: 内部侵食による土の不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp. 39-44, 2013.
- 2) 左藤真理, 桑野玲子: 地盤の内部侵食と排水の濁度の関係, 生産研究, Vol. 65, No. 4, pp. 549-552, 2013.
- 3) 笹原克夫, 南哲行: 粒度分布及び間隙比の異なる砂質土の不飽和せん断強度特性, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.1, pp.227-239, 2006.
- 4) 原忠, 國生剛治, 古地祐規: 非塑性な細粒分を含む砂質土の繰返し非排水せん断強度に及ぼす飽和度の影響, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No.3, pp587-596, 2009.
- 5) 財団法人国土技術研究センター: 河川土工マニュアル, pp. 59-79, pp. 62-66, 2009.
- 6) 金 乗洙, 渡 優樹, 加藤 正司, 竹下 祐二: 河川堤防材料の細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響, 地盤と建設, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.34, No.1, pp. 45-51, 2016.
- 7) Fredlund, D.G. and Xing, A.: Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, 1994.
- 8) 例えば, 落合 英俊, 大嶺 聖: 砂と粘土の混合土の圧縮および強度特性, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.41, No.7), pp.11-16, 1993.
- 9) GEO-SLOPE International Ltd.: Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis, Use's guide, Calgary, Canada, 2004.
- 10) GEO-SLOPE International Ltd.: Computer program SLOPE/W for slope analysis, User's guide, Calgary, Alta, Canada, 2004.
- 11) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321, 1978.
- 12) Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. & Clifton, A.W.: Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392, 1996.
- 13) Meyer, P.D., and Gee, G.W.: Flux-based estimation of field capacity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 7, pp. 595-599, 1999.
- 14) Gardner, W.R.: Dynamic aspects of water availability to plants, *Soil Science*, Vol. 89, 63-73, 1960.
- 15) Hillel, D.: Soil and water. Academic Press, New York, 1971.

(2017年5月16日 受付)