

河川堤防の進行性破壊に対する礫混合土置換工法の安定計算方法に関する検討

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○西村圭右, 石原雅規, 佐々木哲也

1. 目的

文献¹⁾では、進行性破壊に対する対策工として、法面付近を礫混合土で置き換える礫混合土置換工法の効果検証のための大型模型実験を実施している。その結果として、礫混合土置換工法により、堤体法面のせん断強度は強化され、進行性破壊に対する対策工としての有効性が確認されたものの、一定程度堤体内水位が上昇すると、礫混合土が全体的に滑动するような変状が生じることが確認された。本研究では、文献¹⁾で示された大型模型実験の変状発生状況を解析により再現し、設計に利用可能な安定計算方法について検討した。

2. 解析対象と解析方法

実験模型の概要は図1に示すとおり、関東ロームで作製した厚さ30cmの基盤上に、高さ3m、天端幅1m、奥行き6.5m、法面勾配1:2.0の大きさ・形状の半断面模型を作製した。堤体部は基本的に山砂を用いて作製したが、法尻部の底幅2m、高さ2mの範囲を山砂、5号砕石、6号砕石を4:1:1で混合した礫混合土で置き換えた。実験の結果、給水槽の水位を2.4mに保持した場合に、水位上昇開始後4時間45分が経過した時点で礫混合土上端部（法尻より水平距離3m）の位置でクラックが発生し、礫混合土置換範囲が全体的に滑动の様子が確認された。文献¹⁾では断面形状の観察や、貫入試験の結果より、礫混合土自体は破壊せず、礫混合土がいくつかのブロックに分かれ、全体的に滑动・沈下したと考察している。本研究ではこの変状の再現計算を2手法により試みた。なお、水圧はいずれの手法も静水圧を仮定した。1つ目の手法は図2に示す、礫混合土の土塊の安定計算を実施する手法（方法1）である。礫混合土置換範囲の内、赤のハッチングの範囲を斜面に沿って崩壊する土塊（以下、土塊1）として扱い、その土塊からの作用を考慮したうえで、緑のハッチングの範囲の土塊（以下、土塊2）が滑动に対する安定性を満足するか検討した。具体的な計算手法としては、まず、土塊1に作用する力 P_a を鉛直・水平方向の釣り合いより求める。土塊2に作用する力 P_a を考慮し、土塊2の滑动に対する安全率を求めた。以下に、 P_a および安全率 F_s の算出式を示す。

$$P_a = \frac{W'_1 \cdot \sin(\theta_1 - \phi_1) + P_{wh1} \cdot \cos(\theta_1 - \phi_1) - C_{o1} \cdot \cos \phi_1}{\cos(\delta_1 - \theta_1 + \phi_1)} \quad (1)$$

$$F_s = \frac{(W'_2 + P_a \cdot \sin \delta_1) \cdot \tan \phi_2 + c_2 \cdot B}{P_a \cdot \cos \delta_1 + P_{wh2}} \quad (2)$$

ここに、 W'_1 、 W'_2 ：土塊1、2の有効重量、 θ_1 ：礫混合土背面の角度、 ϕ_1 ：礫混合土と山砂との境界面（以下、境界面1）で考慮する内部摩擦角、 C_{o1} ：境界面1に作用する粘着力の合計、 P_{wh1} 、 P_{wh2} ：土塊1、2に作用する静水圧、 δ_1 ：壁面摩擦角（道路土工-擁壁工指針²⁾を参考に法面勾配と同等で設定）、 c_2 、 ϕ_2 ：礫混合土と関東ロームとの境界面（以下、境界面2）で考慮する強度定数、 B ：礫混合土置換範囲底幅。2つ目の手法は、図3に示すような、一般的に浸透によるすべりの照査に用いられる修正フェレニウス法による円弧すべり計算（方法2）である。以下に安全率の算出式を示す。

キーワード 河川堤防, 浸透, 礫混合土, 安定計算

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 国立研究開発法人 土木研究所 TEL029-879-6771

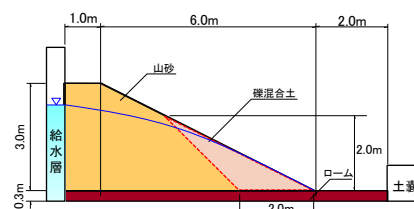


図1 実験模型概要

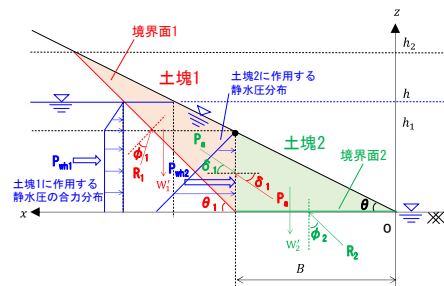


図2 方法1 土塊安定計算法

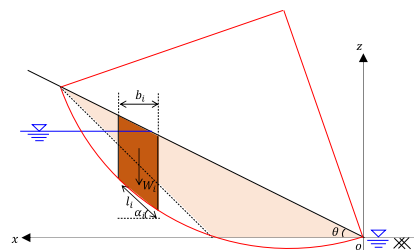


図3 方法2 円弧すべり計算

表1 強度定数

	単位体積重量		強度定数	
	湿潤	飽和	吸水軟化試験	
	kN/m ³	kN/m ³	c	φ
山砂	15.94	18.59	0.0	41.8
礫混合土	19.01	20.48	1.8	28.8
関東ローム	14.00	15.00	10以下	20
			NEXCO設計要領	

表2 解析結果（方法1 土塊の安定計算）

Case	境界面1(山砂, 礫混合土境界面)			境界面2(礫混合土, 基盤境界面)			安全率 Fs
	c ₁	φ ₁	設定根拠	c ₂	φ ₂	設定根拠	
	kN/m ²	°		kN/m ²	°		
A	0.0	41.8	山砂吸水軟化	1.8	28.8	礫混合土 吸水軟化試験	1.158
B	1.8	28.8	礫混合土吸水軟化				1.393
C	0.0	41.8	山砂吸水軟化	3.0	20.0	NEXCO設計要領	1.167
D	1.8	28.8	礫混合土吸水軟化				1.420
E	0.0	41.8	山砂吸水軟化	2.0	20.0	NEXCO設計要領	0.968
F	1.8	28.8	礫混合土吸水軟化				1.148
G	0.0	41.8	山砂吸水軟化	1.0	20.0	NEXCO設計要領	0.725
H	1.8	28.8	礫混合土吸水軟化				0.868

$$F_s = \frac{\sum \{c_i \cdot l_i + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi_i\}}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (3)$$

ここで、 l_i ：スライス底面長さ、 W_i ：スライス重量、 α_i ：スライス底面の傾斜角度、 u_i ：スライス底面に作用する間隙水圧、 b_i ：スライス幅。

3. 解析結果

表1に安定計算に用いた土質定数の一覧を示す。山砂および礫混合土の強度定数には、吸水軟化試験³⁾より得られた強度定数を用いて検討を実施した。吸水軟化試験は近年研究が進められている強度試験方法である。初期せん断を与えた後に軸差応力を一定に保ちながら徐々に間隙水圧を上昇させる試験であり、低拘束圧下での強度の評価に適した試験方法である。本研究で対象となるすべり面において拘束圧は水位上昇前の最大値でも境界面1で14kN/m²、境界面2で20kN/m²程度であり、今回の検討に用いる試験方法としては吸水軟化試験が適切であると考えられる。表2に方法1による結果を示す。安全率は全て堤体内水位を1.3m（クラック発生時の礫混合土内の平均水位）とした場合の滑動に対する安全率を示す。境界面1, 2で接するそれぞれの材料の強度定数を設定し、感度分析を行った。関東ロームの定数についてはNEXCO設計要領⁴⁾を参考に、粘着力を1~3kN/m²の範囲で3通り設定し、感度分析を実施した。感度分析の結果、境界面2で礫混合土の強度定数を考慮した場合は、境界面1の強度定数に山砂・礫混合土いずれの値を用いた場合でも、安全率が1以上となり、滑動が生じない結果となった。一方、境界面2で関東ロームの粘着力を2.0kN/m²とした場合は、境界面1での強度定数に山砂の値を用いた場合に安全率が1以下に、礫混合土の値を用いた場合には安全率が1以上となり、文献¹⁾で示された通り、礫混合土自体は破壊せずに全体的に滑動した実験結果に即した計算結果となった。表3に方法2による解析結果を示す。円弧すべり計算時には、礫混合土置換範囲の外縁に接するような円弧を指定した場合と、円弧を指定せず、安全率が最小となる場合のすべり面を探索する方法の2種類の安全率を求めた。方法1と同様に関東ロームの強度定数に関して感度分析を実施した結果、基盤層の粘着力を2.0kN/m²とした場合に最も実験時の変状状況に即した結果となった。図4に礫混合土置換範囲外縁に沿う形で指定したすべり面と、CaseJにおいて最小安全率となる場合のすべり面の形状を示す。最小安全率時のすべり面形状の方が若干深く基盤層に切り込む形のすべり面となるが、概ね同様の形状となっている。また、最小安全率（この場合概ね1）となるすべり面が礫混合土内を通過しないことから、礫混合土内部ではすべりが発生しにくいことも併せて確認できる。これらの結果より、いずれの手法を用いた場合であっても礫混合土置換時の照査が可能であることが確認された。しかし、境界面1, 2の長さが大きく異なる場合等、置換範囲の形状によっては、円弧すべり面と置換範囲境界との形状の乖離が大きくなり、その結果、得られる安全率も乖離することも考えられる。その場合には土塊の安定計算を用いる等の使い分けも考えられる。

5. まとめと今後の課題

礫混合土置換工法の安定性確認手法として、2手法で再現計算を実施し、いずれの手法も実験時の変状状況を再現可能であることを確認した。今後は、礫混合土の強度設定方法についても検討する必要がある。

参考文献 1) 佐々木ら：河川堤防の進行性破壊に対する礫混合土置換工法の安定計算方法に関する検討，第77回年次学術講演会，2022(投稿中)，2) (社)日本道路協会：道路土工擁壁工指針，2012，3) 小高ら：吸水軟化試験による河川堤防土の低拘束圧下のせん断強度の評価，第5回河川技堤防技術シンポジウム，2017，4) NEXCO：設計要領 第一集 土工，2016

表3 解析結果（方法2 円弧すべり計算）

Case	山砂			礫混合土			関東ローム			解析結果	
	c	φ	設定根拠	c	φ	設定根拠	c	φ	設定根拠	指定すべり面(外縁)	最小安全率
	(kN/m ²)	(°)		(kN/m ²)	(°)		(kN/m ²)	(°)		Fs	Fs
I	0.0	41.8	吸水軟化	1.8	28.8	吸水軟化	3.0	20	NEXCO設計要領	1.1526	1.1294
J							2.0			1.0517	1.0102
K							1.0			0.9508	0.8933

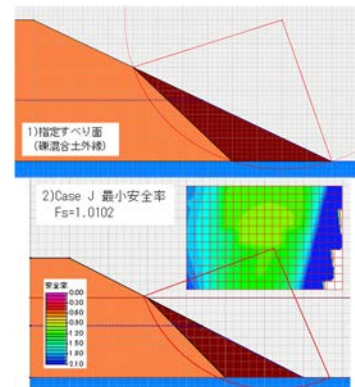


図4 円弧すべり面形状の例