

砂防堰堤の3次元FEM解析による内的安定性評価および段階的な補強対策に関する検討

日本工営株式会社 ○中村ゆかり・窪寺洋介・麻生あすみ
三池 力・保谷智之・伊藤隆郭

1. はじめに

砂防堰堤は長期的に土砂災害防止・軽減機能を発揮することが求められており、その長寿命化は近年の重要な課題である。今後限られた予算の中で多数の堰堤の補強・補修を実施するには、事業の低コスト化とそれを可能にする設計法や工法の開発が急務である。従来の砂防堰堤の安定計算では、水通し中央部の2次元断面の堤体が地盤上にある条件（摩擦を考慮）で転倒、滑動、堤体および基礎地盤の破壊に対する安全性の検討を行っている¹⁾。

しかし、実際の堰堤形状は左右対称ではなく、断面も一樣形状ではない。また、堤体の一部が周囲の岩盤や地盤に嵌入された状態で供用されており、堤体の嵌入や根入れ箇所は地盤等による支持や押さえを受けている（図1）。既設堰堤の適切な安定性評価や合理的な補強対策の検討を行うためには、従来の条件項目だけでなく、現地の実態に即した条件を反映して評価を行う必要がある^{2),3)}。本稿では、堰堤の周辺地盤への嵌入や根入れ、堰堤の全体形状、周辺の地盤条件の反映が可能な3次元FEM解析を用いて安定性評価を行い、現地条件の考慮による内的安定性の確保や段階的な補強対策の可能性について示した。

2. 解析条件と解析ケース

本検討では、堤高22.0mの砂防堰堤を検討対象とした。荷重条件および解析物性値を表1に示す。荷重の組合せは、現行基準に準拠し、堰堤の高さと型式から平常時荷重として考慮されている「静水圧、堆砂圧、揚圧力、地震時慣性力、地震時動水圧」とした。なお、現地条件を反映するため、揚圧力は浸透流解析から求めた揚圧力係数により作用させた。既設堤体や地盤条件は、現地調査データや設計要領より設定した。なお、ひび割れの発生を目安となる引張強度は圧縮強度の1/10とした。

各解析ケースの解析条件を表2に示す。解析モデルを図2に示す。Case1とCase2は堤体の嵌入・根入れ部分の上下流の地盤の有無による影響を検討するために、図2(b)の赤斜線部の地盤要素の有無でモデル化した。なお、地盤・堤体界面の条件は、嵌入・根入れ部はJoint線形、それ以外はJoint非線形とした。Case3では、地盤と堤体の界面条件の影響を検討するために、堤体の地盤嵌入等によらずJoint線形としてモデル化した。現地では堤体の地盤嵌入がない部分でも間詰擁壁やコンクリートなどが設けてあり、これらによる堤体の支持が期待できることを考慮した条件である。Case4は、部分補強による効果を検討したケースである。現地条件を反映した外力等の条件緩和（設計震度、浸透流解析による揚圧力係数、下流側静水圧）を考慮した安定計算の結果から得られた5.5mの下流側腹

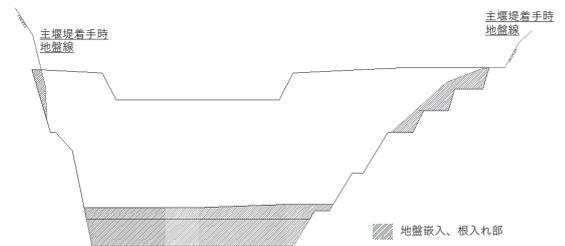


図1 堰堤の嵌入・根入れ部

表1 荷重条件および解析物性値

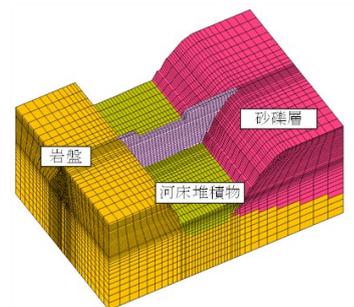
水圧分布		堆砂圧分布		揚圧力分布		
静水圧分布 越流水深0.0m		クーロン土圧（満砂） 土圧係数 $C_e=0.3$		$\mu=0.7$		
材料	単位体積重量 (kN/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ポアソン比	弾性係数 (kN/mm^2)	備考
既設堤体	19.7	22.6	2.26	0.2	22.1	旧堤体
	22.1	19.2	1.92	0.2	26.9	嵩上げ堤体
補強堤体	23.05	18.0	1.80	0.2	22.0	-

※引張強度は圧縮強度の1/10（ひび割れ発生の目安）

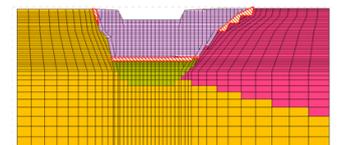
地盤区分	単位体積重量 (kN/m^3)	粘着力 (kN/m^2)	せん断抵抗角 (度)	ポアソン比	弾性係数 (MN/m^2)	変形係数 (MN/m^2)
砂礫層	19	0	35	0.35	-	84
河床堆積物	19	0	35	0.35	-	56
岩盤	26	1,500	38	0.25	2,700	-

表2 解析ケース

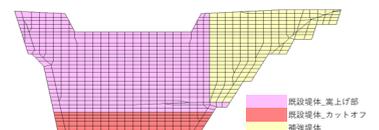
	堤体モデル	嵌入・根入れ部地盤要素	地盤・堤体界面条件 (Joint設定)	
			嵌入・根入れ部	左記以外
Case1	既設堤体	なし	線形	非線形
Case2	既設堤体	あり	線形	非線形
Case3	既設堤体	あり	線形	線形
Case4	補強後堤体	あり	線形	線形



(a) 全体モデル



(b) 嵌入・根入れ部



(c) 補強後堤体

図2 解析モデル

付け補強を部分的に行った場合の安定性確保について検討を行った。なお、Case4は調査結果の蓄積により一部解析条件と既設堤体（カットオフ部を追加）を変更した結果であることに留意されたい。解析にはセンチュリテクノ社のISCEFを用いた。

3. 検討結果

検討結果を図3, 図4, 表3に示す。地盤嵌入部等の地盤要素の有無を比較したCase1,2では、堤体右袖部で引張強度(1.92N/mm²)を超過する応力が発生しているが、Case2はCase1よりも超過範囲と発生最大値が小さい。表1のとおり堤体右袖部は砂礫層で、堤体左側の岩盤と異なり軟弱な地盤であるが、堤体右側の地盤接触部の半分程度が堤体上下流面の地盤要素により支持を受けることで水通しから堤体右側での変位量が小さくなり、変形抑制の効果があることが分かった。また、堤体左側上流面においても発生引張応力はCase1よりもCase2の方が小さくなる傾向であった。

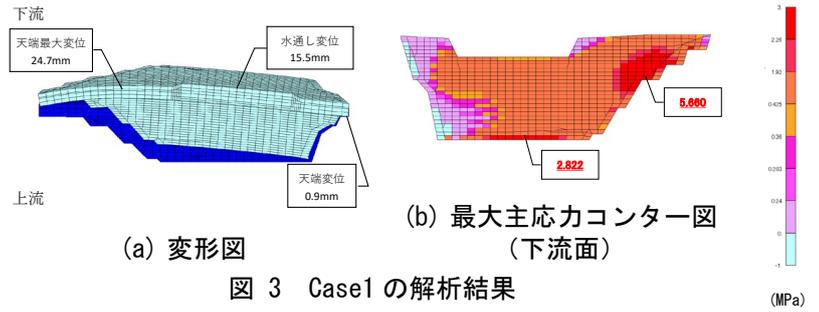


図3 Case1の解析結果

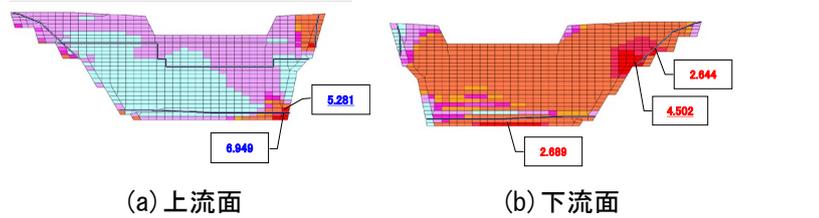


図4 Case2 最大主応力コンター図 (σ₁)

嵌入部等の地盤要素ありで、嵌入等によらず堤体と地盤界面条件をJoint線形としたCase3では、嵌入部とそれ以外で堤体と地盤界面をJoint線形と非線形としたCase2と比較して水通し中央から堤体左側にかけて0.36MPa(地震時の許容引張応力度)以下となる範囲が増加するとともに、Case2の6.949MPa(引張強度の3倍以上)に対して、Case3では2.237MPaと許容値内となった。

表3 発生最大主応力(σ₁)一覧

単位: MPa=N/mm²=1000kN/m²

Case	嵌入部等 地盤要素	地盤-堤体 界面条件 (埋設部-非埋設部)	旧堤体			嵩上げ堤体		
			堤体	地盤内 堤体	引張強度	堤体	地盤内 堤体	引張強度
Case1	なし	Joint線形-非線形	8.907	(5.357)	2.26	5.66	(2.822)	1.92
			NG	NG		NG	NG	
Case2	あり	Joint線形-非線形	5.281	6.949	2.26	4.502	2.689	1.92
			NG	NG		NG	NG	
Case3	あり	Joint線形-線形	3.724	2.237	2.26	4.346	2.529	1.92
			NG	OK		NG	NG	
Case4	あり	Joint線形-線形	2.714	2.153	2.26	1.797	2.085	1.92
			NG	OK		OK	NG	

※表内の【堤体】は地盤非埋設の範囲の最大発生応力、【地盤内堤体】は地盤埋設の範囲の最大発生応力を示す
※引張強度は圧縮強度の1/10に設定

既設堤体で引張強度を超過する堤体右側下流面を部分的に腹付け補強(図2(c))したCase4は、Case3と比較して下流面の既設堤体(嵩上げ堤体)の応力が4.346MPaから1.797MPaと許容値内となった。堤体右側の下流面腹付け補強のため堤体左側には直接的な補強とはなっていないが、上流面堤体でも3.724MPaから2.714MPaと応力低減が見られ、補強効果が確認された。

4. おわりに

本稿では、現地条件を反映した3次元解析により内的安定性の観点から検討を行った。堤体の地盤嵌入範囲および埋設地盤については、堤体の部分的な嵌入や軟弱な地盤においても、上下流面の嵌入部地盤をモデル化することで変形抑制に効果があり、発生応力の低減に寄与することが確認された。このため、施設台帳や現地調査結果から地盤特性や嵌入範囲を適切に判断することが重要である。地盤-堤体の界面条件については、検討の結果、現時点では実現象に近い挙動を得られる設定として、地盤と堤体の界面条件をジョイント線形でモデル化を行うことが望ましいと考えられる。ただし、地盤定数に基づくばね定数の設定などによって実現象に近づける可能性があるため、今後も検討を継続したい。また、現行基準に準拠する場合、現状では下流面全面腹付け等の補強が必要となるが、本検討のように既設堤体の弱部を把握した上で、必要な箇所に対して補強対策を実施し、安定性評価を行うことで、段階的な補強対策による合理的な整備が進められる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 建設省: 河川砂防技術基準(案)同解説 設計編[II], p.10-11
- 2) 土岐敬祐: 砂防堰堤の設計について, 新砂防, 1965年17巻4号 p.22-24
- 3) 平尾公一: 砂防堰堤の三次元的安定について, 新砂防1962年15巻2号 p.16-24