

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18780183  
 研究課題名（和文） ダムの劣化における安全・安心のための破壊解析手法に対する検討  
 研究課題名（英文） A study on methods of failure analysis to maintain the safe and reliable dams against deterioration  
 研究代表者  
 西山 竜朗（NISHIYAMA TATSURO）  
 愛媛大学・農学部・准教授  
 研究者番号：30294440

研究成果の概要：長期の供用を経てきたダムでは「劣化を含む現状が危険に対してどのような位置付けにあるのか」すなわち進行性破壊の機構を十分に知った上での判断が必要である。本研究では、既設ダムの劣化による危険有無の判定を目的とし、数値解析の援用を含め、経験的に知られている破壊機構に矛盾することのない、実用的な解析手法に対する検討を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

研究分野： 農学  
 科研費の分科・細目： 農業工学 ・ 農業土木学・農村計画学  
 キーワード： 土質力学・応用力学、材料・施工、土壌保全・防災、地盤工学、地質工学、土木材料、解析・評価、国際研究者交流

## 1. 研究開始当初の背景

長期供用を経てきたダムには、堤体や余水吐、さらには周辺地山の劣化により安全性が懸念されるに至っているものがある。その改修計画には、十分な安全性の維持という施設の機能上の問題に加え、経済的な合理性も求められる。すなわち、現在から近い将来までの危険は必ず取り除かねばならないが、そうでないものに構う余裕はないということである。したがって、改修計画の策定においては「劣化を含む現状が危険に対してどのような位置付けにあるのか」を判定しなければなら

ない。

その判定においては、進行性破壊の機構を十分に知った上での判断が求められる。しかしながら、構造物の破壊機構というものは常々最先端の研究課題となる難解事項である。たとえば、従来のダムの設計では想定されるすべり面全体に対して平均された安全率を用いるのが常套手段とされてきているが、その解析条件が実際の破壊機構と適合しない場合があることはよく知られるところである。

一方、構造物の安全性に対する検討として、

少なくとも研究レベルでは様々な数値解析が実施され、有効な成果が多く発表されている。しかし、破壊現象を精緻に再現するために多様なモデルが投入された結果として、広く実務で用いるためには難解すぎたり、あるいは「どのモデルを適用すれば実用における要求が満たされるのか」がよく分からなかったりするのも実情である。したがって、構造物の安全・安心という観点から、ここでひとたび基本に立ち返り、いろいろな危険事象に対する解析条件や安全率について再検討・整理しておくことには大きな意義があると考えられる。

## 2. 研究の目的

従来の解析手法が実際の破壊現象に適合しない場合があるという事実は、実務技術者もよく知るところであり、具体的な検討結果も示されるに至っている。

ここに、近年においては数値計算環境の発達により、従来の設計では黙殺されてきた解析条件の矛盾が、数値解析で比較的容易に解決できる状況となりつつある。破壊解析手法として、最新のものではたとえば高速切削加工の再現に至っているような手法は、モデルの高度さもさることながら、実現象再現の精緻さにおいても最高位にあるといえる。

ただし、このような解析手法はより原始的な、言わば低位の手法では再現できない現象を扱おうとして生み出されたのであり、ダムにおける実用の安全性診断としては、より単純な解析手法によって有効な結果が得られるケースも多いと思われる。本研究では、手法の新旧や難易を問わず、どのような現象の解析にはどのような手法が必要であるかを追求しようとした。

本研究では、全体構想として、既設ダムの劣化による危険の有無の判定を目的とし、数値解析を援用しながら、経験的に知られている破壊機構に矛盾することのない実用の解析手法を確立しようとした。なお、ここでいう解析手法としては、理論式、数値計算、あるいは実験というような特定の手法への限定をせずに考えている。

具体的には、第一にダムにおける劣化の現状を把握することを目的とし、事例を十分に収集し、劣化様式の整理を行おうとした。そして第二に、整理された各々の劣化様式について、理論的な解釈を進めた上で、各々の劣化現象について安全診断時に援用すべき解析法を検討しようとした。対象とする劣化様式については破壊現象には危険性が高いと考えられるものを優先することとし、まず亀裂の発生・進展に関するもの、次いで材料劣化に関するものを想定した。

上記のような研究により、実用における解

析手法の進歩に直結した提案、あるいは少なくともそれに向けた検討結果を示そうとした。

## 3. 研究の方法

ダムの劣化および地すべりに関する事例収集および現地調査を行い、収集された情報を吟味した上で、上記のように当初から想定した(1)ダム基礎の局所破壊 および(2)ロックフィル材料の劣化に加え、さらに(3)斜面安定解析における安全率の妥当性に注目した検討を行った。

(1) ダム基礎の局所破壊に対する評価の妥当性向上を目的として、有限要素法による破壊解析手法の開発を進めた。

解析においては局所における脆性破壊の発生・進展に注目した。破壊規準、数値解析手法ともに既往の研究を応用することとし、前者にはHoek-Brown破壊規準を、後者には界面内蔵要素(図1)を採用した。

過去に岩盤の直接せん断を想定して行った模型実験(図2)を解析対象とし、実験結果に対して数値計算の結果を用いた解釈を与えることにより、岩盤基礎の局所破壊、また結果として発揮される強度に対する考察を進めた。

(2) 長期供用を経たロックフィルダムの中に、堤体の材料劣化が確認されるケースがあることを受け、ロックフィル材料の劣化を評価するための室内試験法を開発した。

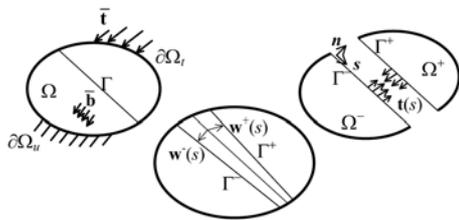
対象とする材料について、一次元圧縮試験(図3)によって測定される圧縮降伏応力の値を劣化の前後に対して求め、これらを比較することによって、劣化後の材料の劣化度合いを表した。

(3) 現在普及している斜面安定解析において用いられている安全率、さらには「逆算法」によって推定される強度定数の位置付けを明らかにすることを目的として、地すべり事例に対する計算の再検討を行うとともに、数値計算結果との比較を行った。

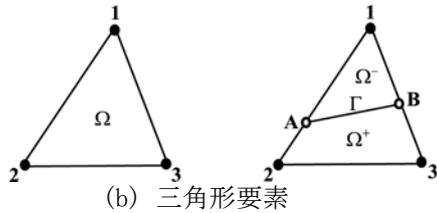
数値計算は、当初は最も一般的と言える有限要素法によることを前提としたが、研究の過程ですべり面の扱いを検討した上で、剛体ばねモデルによることとした。

## 4. 研究成果

(1) 過去の知見から、ここで解析対象としている材料の直接せん断においては拘束圧による破壊機構の相違が現れ、タイプが異なる破壊機構の解析に困難を伴うことが分かっていたが、少なくとも模型実験において考慮



(a) 概念図



(b) 三角形要素

図1 界面内蔵要素

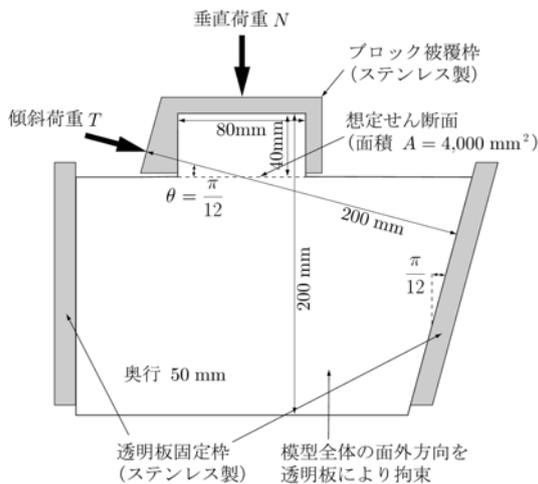


図2 解析対象とした模型実験の概略

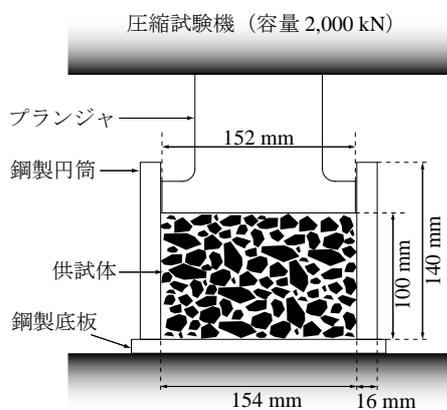


図3 ロックフィル材料の一次元圧縮試験

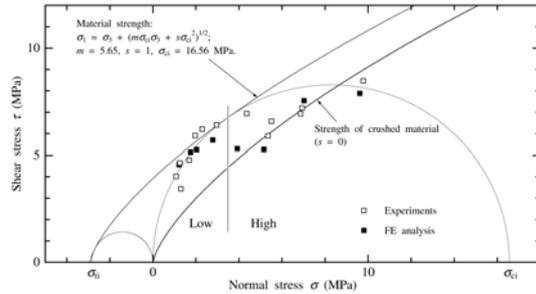


図4 せん断抵抗：実験と計算を比較して示す。

すべき全ケースに対して、せん断抵抗すなわちここでの支持力ピークの発現までの過程について、妥当な計算結果を得るに至った。

計算から得られた全8ケースのせん断抵抗を示す図4には、垂直応力に伴うせん断抵抗発現特性の変化が現れており、計算結果は実験において模型に作用した応力を妥当に再現していると考えられる。

図4に示す計算結果のうちから、低圧（図中「Low」）および高圧（同「High」）から各一例を図5および図6に示す。これらの図には、破壊機構および応力分布特性の相違が現れており、せん断抵抗の発現特性に対する解釈が与えられる。

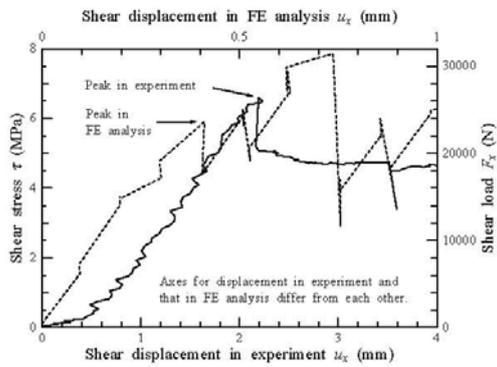
これらの成果は、国内外における岩盤の強度評価における未解明事項を明らかにしようとするものであり、今後のさらなる結果整理により、有用な知見に直結すると考えられる。また、特に亀裂の分布に対する知見から、ダム基礎における致命的な局所破壊様式の特定に至れるものと考えられる。

この成果について、国際会議での発表を行った。また、成果の根幹をなす数値計算手法に関して、共同研究者（イタリア国）との打合せおよび共同研究者（オーストラリア国）との研究討議を行った。

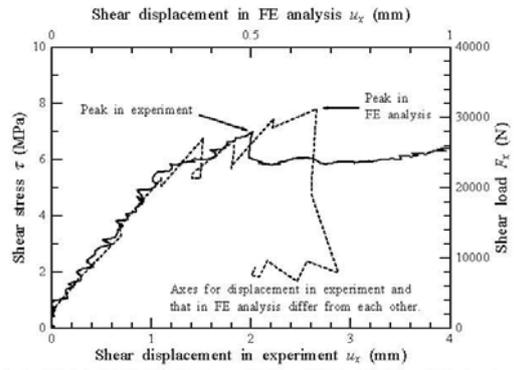
(2) ロックフィル材料の劣化を表すための指標を提案するに至った。図7に、耐劣化性が異なることが分かっている2種の材料に関する結果を例示する。同図は、人工劣化による圧縮降伏応力 $p_c$ の低下度合い $r$ の値が砂岩でより大きく、砂岩の方がより耐劣化性に優ることを表している。

現在、ロックフィル材料について、劣化による耐破碎性の低下を直接的に表現するための手法はない。この成果は、ダムの長期供用という場において求められる新しい診断手法を提案するものである。

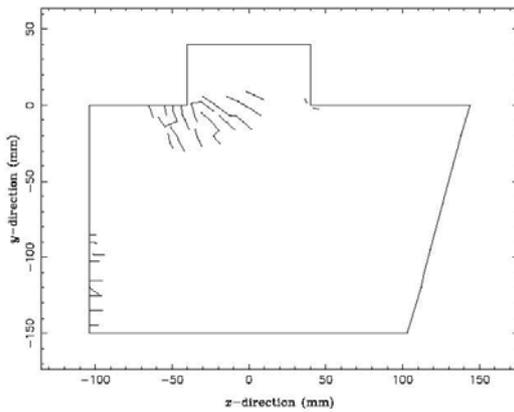
(3) 最近の設計基準でも採用されている斜面安定解析の古典的手法について、事例収集によって得られている多くのケースを解析対象として、有限要素法および剛体ばねモデルによる解析結果との比較を基本として手



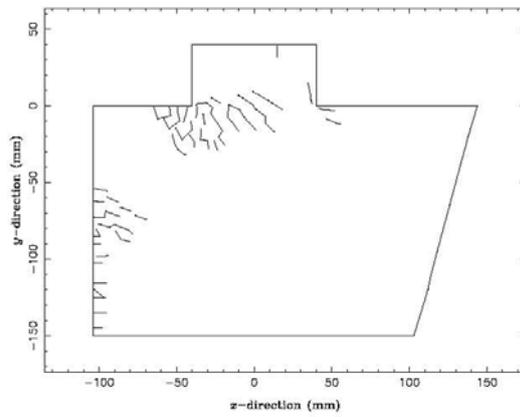
(a) 傾斜荷重載荷面の変位-荷重 関係 (想定せん断面に沿う方向)



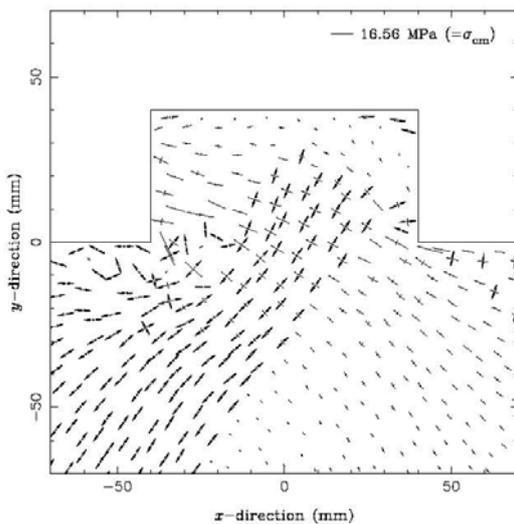
(a) 傾斜荷重載荷面の変位-荷重 関係 (想定せん断面に沿う方向)



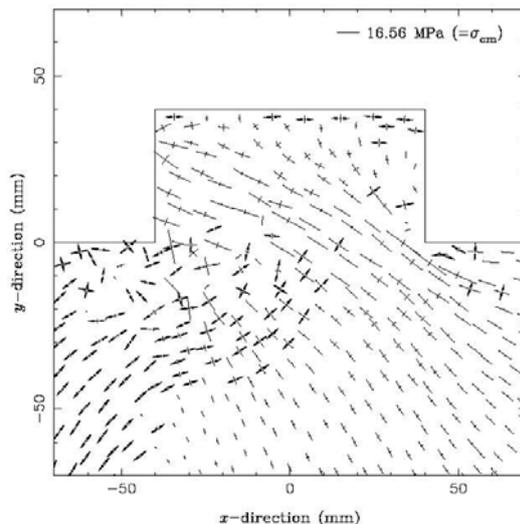
(b) 破壊点における亀裂の分布 (有限要素解析)



(b) 破壊点における亀裂の分布 (有限要素解析)



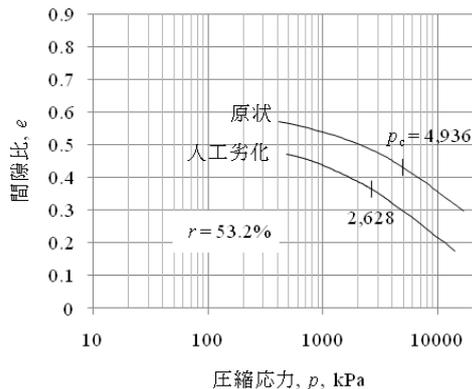
(c) 破壊点における主応力の分布 (有限要素解析)



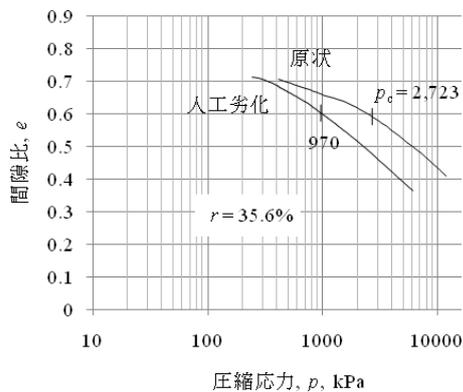
(c) 破壊点における主応力の分布 (有限要素解析)

図5 低圧下でのせん断過程

図6 高圧下でのせん断過程



(a) 砂岩



(b) 粘板岩

図7 砂岩と粘板岩の耐劣化性の比較

法の妥当性に対する検討を行った。

その結果、古典的手法による計算結果は必ずしも妥当でなく、特に解析過程での仮定に問題があることが推測されるに至った。また、山間地すべりにおいては、均質材料の破壊機構というよりもむしろ地盤内の弱面による影響が強いことが再確認されるに至った。

この課題については、既往の関連研究に加えて実務に貢献し得る知見を得る段階には至っていない。ここで得られた検討材料を活かし、今後のさらなる研究進展につなげたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 西山竜朗、長谷川高士、千原英司、構造物設計における材料のせん断強度の表現法について、Journal of Rainwater Catchment Systems (日本雨水資源化システム学会誌)、13、43-48、2008、査読有
- ② 西山竜朗、笠松 諭、千原英司、長谷川

高士、村上 章、西村伸一、ロックフィル材料の劣化を評価するための試験法に対する検討、農業農村工学会論文集、89-92、2007、査読有

- ③ Nishiyama, T., Chihara, E., Hasegawa, T. and Murakami, A., A study to estimate the deterioration of rockfill materials, Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media, 501-505, 2006, 査読有
- ④ Zhao, C., Nishiyama, T. and Murakami, A., Numerical modeling of spontaneous crack generation in brittle materials using the particle simulation method, Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, 23, 566-584, 2006, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 藤井章子、西山竜朗、藤井 陸、長谷川高士、ロックフィル材料の一次元圧縮試験における手法の改善、平成20年度農業農村工学会大会講演会、2008年8月28日、秋田市
- ② Nishiyama, T. and Hasegawa, T., Stress analysis for the direct shear of rock masses adopting a triangular finite element with an embedded interface, Eighth World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and the Fifth European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), 2008年7月3日、イタリア国ベニス市
- ③ 笠松 諭、西山竜朗、千原英司、村上 章、長谷川高士、ロックフィルダム堤体劣化の評価手法に対する検討、土質工学セミナー報告会、2006年8月10日、松江市
- ④ 笠松 諭、西山竜朗、千原英司、村上 章、長谷川高士、ロックフィルダム堤体劣化の評価手法に対する検討、平成18年度農業土木学会大会講演会、2006年8月8日、920-921、宇都宮市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 竜朗 (NISHIYAMA TATSURO)

愛媛大学・農学部・准教授

研究者番号：30294440