

## 様式C-19

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 3 月 31日現在

研究種目：基盤研究(C)  
研究期間：2006～2008  
課題番号：18580241  
研究課題名（和文） 農業用ダムにおける水理破碎の原因となる亀裂の発達条件  
研究課題名（英文） Development condition of crack which causes hydraulic fracturing in agricultural reservoir  
研究代表者 西村 眞一 (NISHIMURA, Shinichi)  
岐阜大学・応用生物科学部・准教授  
研究者番号：90228221

研究成果の概要：農業用ダムにはフィルダムが多いが、その基礎は必ずしも水平ではなくある程度の凹凸（谷部や山部）が存在が考えられる。その場合、盛土の弾性係数が基礎の弾性係数より小さければ、谷底部は盛土の自重により引張力を受け、漏水や決壊の原因となる縦方向の亀裂が生じやすくなると考えられる。このことを確認するために、圧縮試験や引張試験等の室内実験を行うとともに有限要素法による3次元解析を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,600,000	0	2,600,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	300,000	3,900,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業土木・農村計画学

キーワード：土質力学

### 1. 研究開始当初の背景

水理破碎に関する研究は主に石油採掘に関連する岩盤力学の分野で発達している。土木工学の分野でティートンダムの崩壊等によりその発生メカニズムが定性的に調査されてきたが主に大ダムにおいてである。日本においては、農業用の老朽化したため池が改修直後に決壊するなどの事故が生じその原因の一つとして水理破碎が考えられ

ているが、まだ調査による定性的な結果を得ているにとどまっている。実際に水理破碎で漏水を生じていると思われるダムの基礎で人工的に水理破碎を生じさせ、その定性的な性質を確かめることはできたが定量的には検討されていないのが現状である。したがって、本研究は水理破碎の発生メカニズムを定量的に明確にするとともに、フィルダムの設計あるいは改修における水理

破碎の防止方法を提案するうえでの基礎となるものである。

## 2. 研究の目的

フィルタイプのダムにおいては、内部侵食による漏水の問題を抱えているものが少なくない。この内部侵食は水理破碎（ハイドロリックフラクチャリング）によると推定される場合が多いことが最近の研究により明らかになってきている。水理破碎発生の主な原因の一つに堤体および基礎地盤中の亀裂の存在がある。亀裂にはせん断亀裂と引張（伸び）亀裂があるが、引張亀裂はせん断亀裂に比べ鉛直方向に生じやすい。また、一般に鉛直土圧に比べ水平土圧は低いため鉛直に生じた縦亀裂は水理破碎の原因となりやすい。

通常、引張亀裂は応力が圧縮から引張側へ変化し、さらに引張強度を超えた場合に生じるとされている。しかし、オーガー孔を利用した現場実験や厚肉円筒試料を用いた室内実験では圧縮の応力条件下であっても、伸びによる縦亀裂が生じる場合が確認されている。したがって、鉛直方向の圧縮による側方への伸びにより、縦亀裂が生じる可能性がある。さらに、せん断強度よりも低い荷重で縦亀裂が生じるのであれば、水理破碎の発生を検討する上で十分に考慮すべき内容と考えられる。

本研究ではフィルダムにおける水理破碎の発生を推定するうえで、その原因となる亀裂の発生および発達条件について検討する。実際の基礎は必ずしも水平ではなくある程度の凹凸（谷部や山部）が存在が考えられる。その場合、谷部に盛土をすることになるが、盛土の弾性係数が基礎の弾性係数より小さければ、谷底部は盛土の自重により引張力を受けることになる。したがって、谷部に盛土する場合は水平部分に盛土する場合よりも伸びによる縦亀裂が生じや

すくなると考えられる。このことを室内実験により確認するとともに、有限要素解析により亀裂発生時の応力・ひずみ量を算定する。また、生じた亀裂の発達条件については金属の破壊力学で用いられているパラメーター（ $J$ 積分）が土にも適用できるかを検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 概要： $J$ 積分の値は有限要素法による数値計算で算定されるが、亀裂が発達する直前の亀裂先端付近の応力状態は引張であるため、用いる試料における引張側の応力～ひずみ関係を調べる必要がある。したがって、初年度は直接引張試験を行い、伸びによる亀裂の発生を検討する上で必要な引張強度および限界伸びひずみを測定し、厚肉円筒供試体を用いた間接引張試験の結果と比較し妥当性を検討する。また、この結果をもとに $J$ 積分の値を算定するための実験を行う。それぞれの方法については以下の通りである。

(2) 直接引張試験：この試験では金属等に用いられている市販の引張試験機は使用できないため、試験器（ペDESTAL）を独自に作成し三軸圧縮試験機を利用して行う。実際に漏水を生じた農業用フィルダムから採取した火山灰粘性土を試料として用い、直径 10cm のモールドにより締め固めた後、直径 7cm 高さ 10cm の円柱形に成形する。その後、供試体の中央 6cm（高さで 2～8cm）の範囲のみ直径を 5cm に削り取る（図-1）。この供試体の上下に引張用のペDESTAL（特注）を取り付け、上部ペDESTALを三軸圧縮試験機の加圧部分に、下部ペDESTALを三軸圧縮試験機の荷重台に設置する。三軸圧縮試験の荷重計は引張力の測定には使用できないため供試体と三軸圧縮試験機の加圧部分の間にテンションゲージを取り付け、供試体の上部ペDESTALが

設置されている加圧部分を上昇させることにより引張力を測定する。

(3) 厚肉円筒供試体による引張試験：直接引張試験と同一の試料を直径 15cm のモールドで締め固める。その後高さ 13cm、直径 10cm、内径 5cm の厚肉円筒供試体に成形する。供試体の内側と外側にそれぞれゴムスリーブを密着させ内圧と外圧(拘束圧)を同時に上昇させ一定値にする。これにより供試体は圧縮応力を等方的に受ける。その後、内圧のみを徐々に上昇させ供試体内側の円周方向に引張力を作用させる。この時の供試体中央部の側方ひずみを測定するとともに、供試体側面に生じる亀裂の観察を行う。この試験により得られた値を、厚肉円筒に関する式により解析し、供試体内部に生じる応力(引張強度)とひずみ(限界伸びひずみ)を算定する。

(4) エネルギー解放率の算定試験：金属においては亀裂のある供試体に対し引張試験や三点曲げ試験により亀裂進展のパラメータを測定している。しかし、土に三点曲げ試験を行った場合、供試体に支点が食い込み正確な値が得られないと考えられるため今回は引張試験とした。岩のように堅い試料における直接引張試験ではチャックで供試体の両端を固定し引張力を作用させることができるが、粘性土においてこの方法を用いることはできない。引張力に耐えうる力で供試供試体を固定するとその部分で破壊が生じるからである。したがって、通常土質試験で用いられる円柱供試体は使用できない。そこで、本試験における供試体の形状は I 字形とし、上下端部の突出部に試験器を固定させ引張力を作用させる。

試料は 15cm モールドと 4.5kg ランマーを用い円柱形に締め固め、厚さ 20mm 高さ 120mm 幅 90mm の板状に切り出した後、成形する。供試体には千枚通しで中央部に穴を空けた後、ワイヤーにより初期亀裂を

作成する。なお、供試体中央の初期亀裂長  $a$  は 15.0、20.0、25.0mm の 3 種類とする。

この室内実験では、初期亀裂を入れた供試体を引張ることにより初期亀裂が進展する時の引張力を測定する。その後、有限要素法によりエネルギー解放率を算定する。

(5) 弾性係数の異なる 2 層の圧縮試験：弾性係数の異なった土が層を成し凸凹の角度をもたせた場合における、伸びによる縦亀裂の発生状況を観察するとともに、縦亀裂が発生する圧縮応力・ひずみ状況について検討する。なお、この試験では同一の試料において、含水比を約 55% と約 65% とすることで弾性係数に差を生じさせた。

(6) 3 次元築堤解析：水理破碎の発生を予測するためには、地盤内に発生する応力やひずみの算定が重要である。そのためには、有限要素法解析が有効であると考えられる。有限要素法は、解析対象を有限個の要素に分割する方法であり、次元が増加するに従い計算量も増加するため、比較的簡易な二次元解析が多く用いられてきたが、より正確な推定を行うためには三次元解析が望ましい。そこで、本研究では解析対象としたダムを長円形に近似し、三次元築堤解析を行い二次元解析との比較を行った。

#### 4. 研究の成果

(1) 直接引張試験：今回行った直接引張試験では、引張強度測定用の供試体と応力-ひずみの関係測定用の供試体でそれぞれ別の試験によって測定することが望ましいと考えられた。引張強度を測るための形状は中央部に切れ込みが入れてあり応力集中により実際の引張強度より小さくなる可能性があるが、中空厚肉円筒供試体による試験結果と比較しても問題がないと思われる。また、応力～ひずみ関係を得る実験については、中空厚肉円筒供試体による試験よりも

容易で、破断にいたるまで連続したデータを得られると考えられる。図-1 に用いた供試体の形状を、図-2 に形状別の引張強度、図-3 に形状 (d) による応力～ひずみ関係を示す。

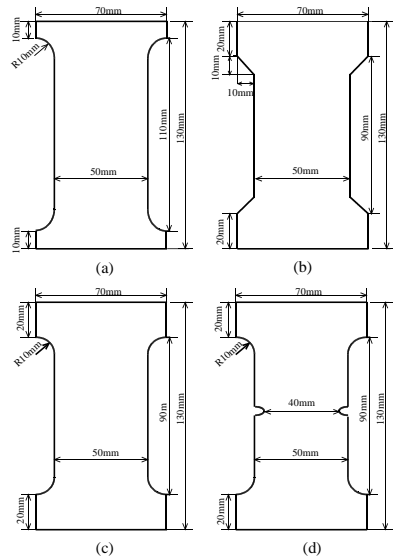


図-1 供試体形状

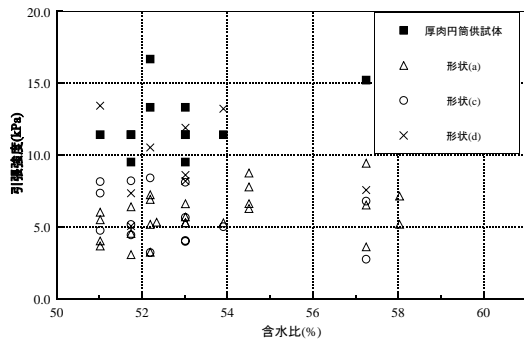


図-2 供試体別引張強度と含水比の関係

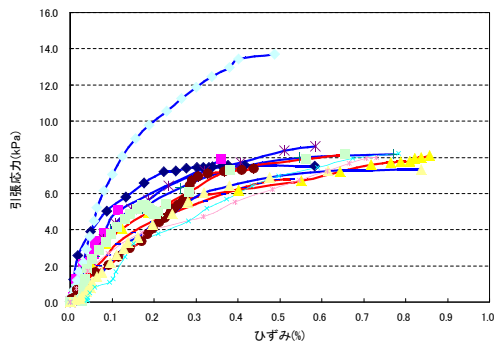


図-3 応力～ひずみ関係

一般に堤体内では引張強度が生じないないように設計されるため、引張強度は考慮

されることはない。しかし、弾性係数の異なる試料を重ねた圧縮試験では圧縮の応力下での伸びによる縦亀裂の発生も確認されており、水理破碎の原因となる亀裂の発生条件を検討する上で引張強度や限界伸びひずみの測定は重要と考えられる。

(2) 厚肉円筒供試体による引張試験：今回用いた試料における引張強度は設定した含水比の範囲では側圧に関係無く 5 ～ 20kPa となった (図-4)。圧縮試験では供試体全体の平均的な値が強度として得られるが、引張試験では最も弱い部分の値が供試体の強度として得られる。したがって、供試体の内部での強度分布が必ずしも均一でないことを考えると妥当な結果と思われる。試験後の供試体を図-5 に示す。

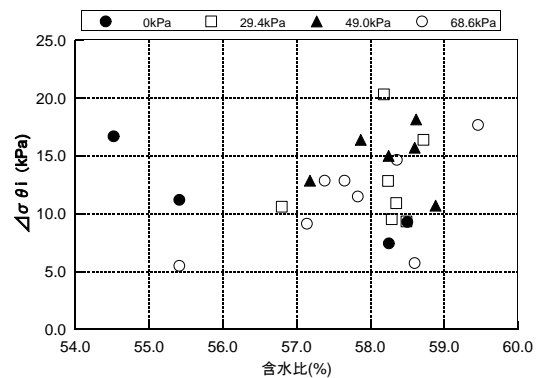


図-4 含水比と引張強度

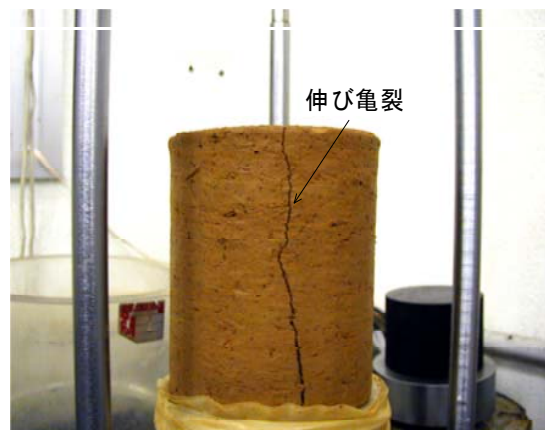


図-5 試験後の厚肉円筒供試体

(3) エネルギー解放率の算定試験：本試験では、供試体の初期亀裂長(2a)や中央部長

(H<sub>i</sub>)を変化させることによって、エネルギー解放率にどのような影響があるかを検討した。図-6 に供試体形状、図-7 と図-8 に最大引張強度と H の関係、エネルギー解放率と H の関係をそれぞれ示す。

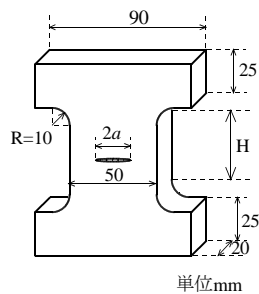


図-6 供試体形状

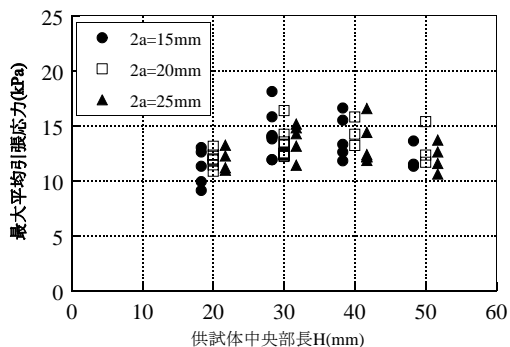


図-7 最大平均引張応力

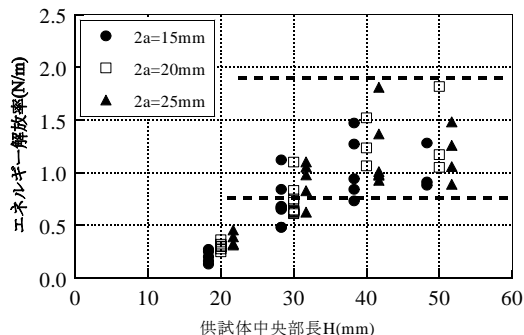


図-8 エネルギー解放率

その結果、初期亀裂長と供試体中央部長を適当な値にすることで、初期亀裂先端での応力集中を制御できることが明らかになった。これにより、エネルギー解放率が比較的小さくかつ最大平均引張応力が大きくなる H=30mm、2a=15mm の形状で引張強度を測定できると考えられる。また、応力集中しやすい H=50mm の形状ではエネルギー

解放率が測定できる。したがって、今回用いた形状の供試体と試験器により引張強度とエネルギー解放率の測定が可能と考えられる。

(4)弾性係数の異なる 2 層の圧縮試験：含水比（弾性係数）の異なる二層供試体による圧縮試験では谷部の角度(5°,10°,30°)が大きくなるにしたがい、伸び亀裂の生じる圧縮応力は小さくなることが分かった(図-9)。試験後の供試体を図-10 に示す。また、二層の含水比（弾性係数）が同じであれば谷部の角度が大きくても伸び亀裂の発生は見られなかった。したがって、谷部へ築堤する際は谷部と築堤材の弾性係数に大きな差が無いように管理することが水理破碎の原因となる伸び亀裂の発生を防ぐために有効と考えられる。

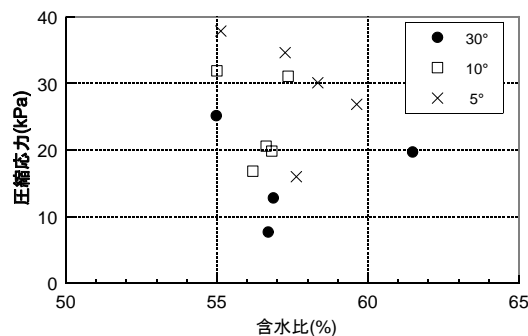


図-9 亀裂発生時の圧縮応力

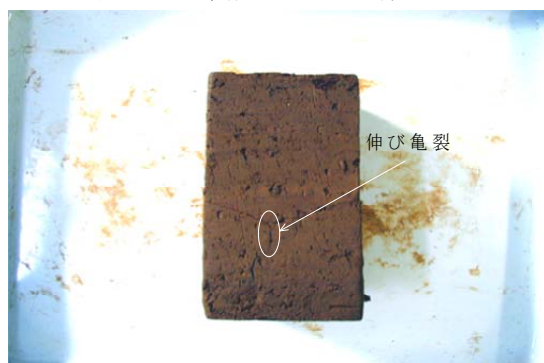


図-10 試験後の供試体

(5)3次元築堤解析：実存するフィルダムを角丸四角形に近似しその 1/4 を解析した。モデル概要図を図-11 に示す。解析の結果、基礎が平坦な場合において、堤軸方向の応力は 2次元解析と 3次元解析はほぼ

一致したが、基礎に谷部が存在する場合(図-12)では谷部付近で大きな違いが生じ、2次元解析が大きくなる傾向を示した。また、堤軸方向のひずみは2次元解析で求めることはできないため、平面ひずみが仮定できない形状の場合、3次元解析による値が安全側と考えられる。なお、基礎8層目では限界を超える伸びひずみが算定された(図-13)。

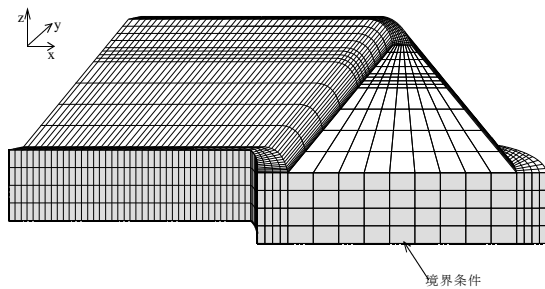


図-11 解析モデル概要図

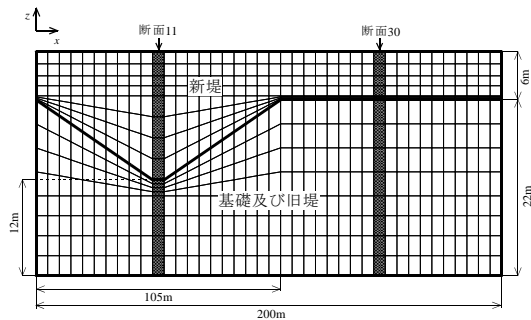


図-12 解析モデル縦断面

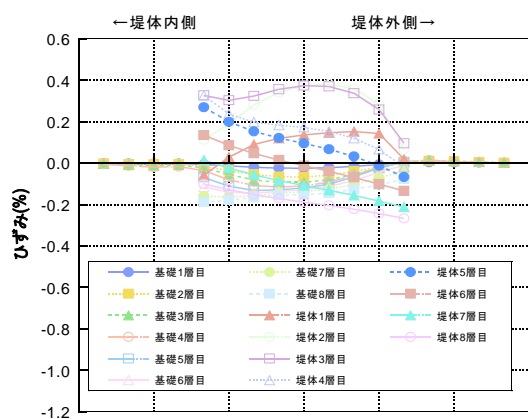


図-13 断面11におけるひずみ

(6)まとめ：水理破碎の原因となる伸びによる縦亀裂の発生条件について検討した例は少ない。一般的に引張応力下でなければ伸びによる亀裂は発生しないと考えられて

おり、フィルダム建設の際にも引張応力が生じないように設計されている。

本研究では圧縮条件下でも伸びによる亀裂が生じる可能性があることを厚肉円筒供試体を用いた引張試験により確かめた。また、弾性係数の異なる2層の試料からなる供試体を用いた圧縮試験では、圧縮による側方への伸びで縦亀裂が生じること、谷部ではより小さな圧縮応力で縦亀裂が生じること等が分かった。

これらの実験結果をふまえ、実際に漏水を生じた農業用フィルダムの3次元築堤解析を行った。その結果、旧堤の谷部に新堤を盛土することにより谷部に伸びヒズミが生じ縦亀裂が生じる危険性があった。

以上の結果はフィルダムの水理破碎の危険性を推定する方法として有効であると考えられるが、引張強度及び伸びヒズミの効率的な測定方法は確立されていないため、今後も検討が必要である。

## 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)

[その他]  
農業農村工学会論文集へ投稿中1件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 眞一 (NISHIMURA, Shinichi)  
岐阜大学・応用生物科学部・准教授  
研究者番号：90228221

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし