

# 千年ダム構想実現のためのダム本体の管理・点検に関する研究

研究予算：0

研究期間：平 19～平 20

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、林 直良

## 【要旨】

21 世紀の重大テーマは「社会の持続可能な発展」であり、それを達成するための重要な課題となっているのが水問題である。水問題を解決するための最も効率的な対策の一つにダム建設がある。しかし、わが国では、現時点において、逼迫した財政事情や環境問題から新規のダム建設が困難となってきているため、既設ダムを有効利用する再開発事業が増加しつつある。また、より効率的かつ効果的に既設ダムの有効利用を図るためには、個々の既設ダムをできる限り長期にわたって健全な状態に保つ必要がある。そのためには、ダムの診断点検を効果的に実施し、できるだけ低コストで超長寿命化を図ることが望まれる。

本研究方針研究では、上記の目標を達成できる具体的な研究方針を探るために、①ダムの老朽化原因を踏まえた老朽化形態把握のための事例調査、②各種老朽化形態がダムの安全性に与える影響の概略分析、③各種老朽化形態に対する現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出を行った。

キーワード：ダム、再開発、有効利用、老朽化、点検、補修

## 1. はじめに

わが国のみならず世界的に観て、ダムが治水・利水面で大きい効果を発揮していることは論をまたない。今後の長期的な展望としても、地球温暖化による気象変化や社会生活環境の変化による水管理に関する新しい課題が次々と発生することが予想され、ダムの役割はより重要になると考えられる。このような事態に鑑み、他の構造物に比べてはるかに長い寿命が期待される社会資本であるダムの機能を長期的に維持・向上し、より効果的に利用することが、安心、安全の国土づくりにとって欠くことのできない命題といえる。

近年、わが国においては、ダムサイトとしての適地の減少、投資余力の減少、自然環境保全の高まりから新規のダム建設が容易でない状況になってきており、投資効率の面からも既設のダムの有効利用を促進しようとする動きが活発化しており、既に数多くの事業が各地で展開されている。ダムの再開発は、個々のダムやそれを取巻く流域環境の特性を踏まえて、新しい社会的要請に応えるために適切な手法を選択しなければならない。いま、ダム再開発の手法は、機能面から、「機能の向上」、「機能の長期化」、「機能の回復」の3つに分類できるが、具体的には、嵩上げや排砂による容量増大、取水・放流設備の増強による貯水池の有効利用、ダムの目的や容量配分の見直しによる弾力的運用などが考えられ、さらに水系内の複数ダムの再編や連携に

よって水系全体として最適な治水利水管理を図るなど、ハード、ソフト面での対応が検討されている。

しかし、より効率的かつ効果的に既設ダムの有効利用を図るためには、個々の既設ダムをできる限り長期にわたって健全な状態に保つ必要がある。そのためには、ダムの診断点検を効果的に実施し、できるだけ低コストで超長寿命化を図ることが望まれる。これが「千年ダム構想」である。この千年ダム構想を実現するためには、ダムの老朽化の形態やそれがダムの安全性に与える影響を踏まえた管理・点検方法を確立し、できる限り早期の段階で、低コストの維持管理・補修を適切に施すことで超長寿命化コストの最小化を図る必要がある。

本研究方針研究では、上記の目標を達成できる具体的な研究方針を探るために、①ダムの老朽化原因を踏まえた老朽化形態把握のための事例調査、②各種老朽化形態がダムの安全性に与える影響の概略分析、③各種老朽化形態に対する現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出を行った。

## 2. 検討対象のダム型式と検討方針

ダムは、その建設材料により、コンクリートダムとフィルダムに大別できる。このうちフィルダムは、土や岩石といった自然材料のみで築造される。一方、コンクリートダムは、セメントの化学反応により一体

化・強度発現した人工材料であるコンクリートを用いているため、温度応力や凍結融解により発生した亀裂、打継目部の施工不良箇所などといった局所的な弱部においてその劣化が選択的に深部に及ぶ可能性がある。よって、フィルダムの完成後の耐久性は、コンクリートダムに比べて相対的に低下しにくいと考える。さらに、維持管理、補修などに関わる費用が大きいため、社会的な影響度合いが高い、ある程度規模の大きいダムについては、コンクリートダムの数が多い。以上より、本研究では、コンクリートダムを検討の対象とする。

本研究における具体的な検討方針は以下のとおりである。

- ① ダムの老朽化原因を踏まえた老朽化形態把握のための事例調査
- ② 各種老朽化形態がダムの安全性に与える影響の概略分析
- ③ 各種老朽化形態に対する現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出

なお、ここでは、劣化の原因が老朽化だけでない場合も含めて老朽化と称している場合があるので注意されたい。



図-3.1 文献調査の流れ

### 3. ダムの老朽化形態把握のための文献調査

ダムの老朽化形態を把握するために、ダムで発生している劣化や老朽化の事例を文献により調査した。調査対象とするコンクリートダムは、国土交通省所管のダムよりも経過年数の古いダムが多く、劣化や老朽化の事例報告がなされている可能性が高いと考えられる電力会社や農林水産省所管のダムも調査の対象とした。また、わが国よりも経過年数の長いダムが多い海外のダムについても、国内の文献で調査できる範囲で調査対象とした。

#### 3.1 文献調査方法

調査した文献は、電力土木、大ダム、農業農村工学書誌（学会誌、論文集および講演集含む）およびダム日本の4文献である。文献調査の流れは、図-3.1に示すとおりである。

#### 3.2 文献調査結果

文献調査結果、老朽化形態表の作成対象としたダム数は、国内で22、海外で10である。

老朽化形態ごとの事例数を、国内および海外のダムごとに整理したものを、表-3.1に示す。また、各老朽化形態が全事例数に占める割合は、図-3.2に示すとおりである。なお、調査対象としたコンクリートダムには、重力式コンクリートダムだけでなく、重力式アーチダム、マルチプルアーチダムおよびバットレスダムも含まれていることに注意されたい。また、漏水については、亀裂や劣化等が原因で発生した老朽化形態である場合も多いと考えられるため、厳密には表面劣化や亀裂等と同様な老朽化形態として扱えない。しかし、漏水の原因や浸透経路を特定することが困難な事例も多く、ここでは、漏水があった事実を「漏水」という形態として計上した。

調査結果より、国内では漏水、海外では亀裂による

表-3.1 国内および海外ダムの老朽化形態別事例数

| 老朽化形態    | 事例数 |    |
|----------|-----|----|
|          | 国内  | 海外 |
| 漏水（堤体）   | 9   | 0  |
| 漏水（基礎）   | 4   | 1  |
| 凍害       | 8   | 0  |
| 表面劣化     | 3   | 2  |
| コンクリート変質 | 5   | 1  |
| 亀裂       | 3   | 8  |
| 揚圧力      | 1   | 1  |
| 不明       | 2   | 2  |
| 合計       | 35  | 15 |

劣化形態が最も多く、続いて凍害や表面劣化、そしてコンクリートの変質の順に多いことがわかる。

漏水は、発生箇所によって堤体と基礎の2つに分類できる。国内の漏水事例については、発生原因や浸透経路が厳密にはわからないが、堤体表面の亀裂から浸透した水が漏水となって堤体下流面に現れる事例もあることから、水平打継目など弱部になり易い箇所が原因となっていると考えられる。また、調査対象とした粗石コンクリートや石積み等により築造されたコンクリートダムにおいても漏水が発生しており、建設当時の設計技術およびコンクリート材料並びに施工技術の差によるものとも考えられる。

コンクリート変質については、アルカリ骨材反応や中性化などがあり、岩着部付近についてはコンクリート中のセメント水和物が周囲の水に溶解することで徐々に水和組織の空隙化が進行する溶による変質もある。これにより岩着部付近の浸透水量が増加したり、コンクリート強度が低下して堤体の安定性に影響を与えたりする可能性がある。

凍害は国内のダムで多い結果となっており、ダムサイトが山間部にあり冬期の内陸部の気候の影響を受けて表面が徐々に劣化していくことが考えられる。表面劣化は、凍害が原因によるものとは異なり、越流部の侵食や摩耗、経年劣化による剥離等がある。また、こ

れらについて、終戦以前に築造されたコンクリートダムに関しては、施工技術などによる要因も考えられる。

これらの文献調査結果より、代表的な老朽化形態として以下の3つを抽出した。

- ① 水平打継目等の堤体内の弱部沿いに発生した上下流方向の亀裂およびそれ沿いの漏水
- ② 岩着部のコンクリートと岩盤の接合面における変質と漏水
- ③ 堤体表面のすり減り・剥離および凍害等による劣化

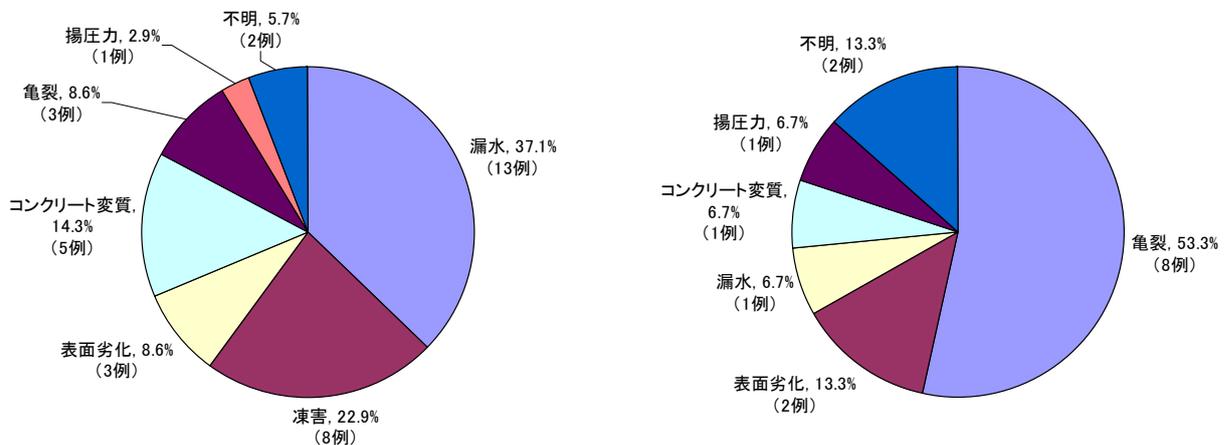
#### 4. 老朽化形態がダムの安全性に与える影響の解析的検討

##### 4.1 ダムの安全性に影響を与える老朽化形態の選定

文献調査結果より、ダムの安全性に影響を与える老朽化形態と発生箇所は、以下に示す3パターンの可能性が大きいと考えられる。

- ① 水平打継目沿いの上下流方向の亀裂と漏水(図-4.1 (1))
- ② 堤体と岩盤の接合面における劣化と漏水(図-4.1 (2))
- ③ 堤体表面のすり減りや剥離等による表面劣化(図-4.1 (3))

これらの3パターンの老朽化に対して、数値安定解



(a) 国内 (全 35 事例) (b) 海外 (全 15 事例)

図-3.2 国内および海外ダムの各老朽化形態の割合

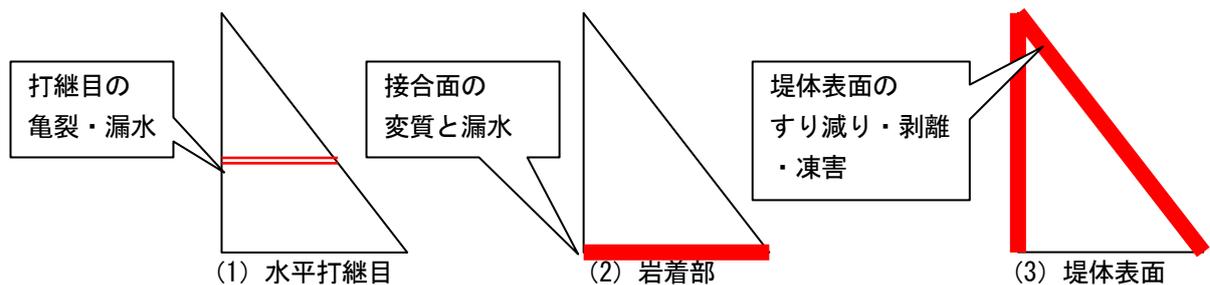


図-4.1 ダムの安全性に影響を与える老朽化形態と発生箇所

析を実施し、それぞれのパターンがダムの安定性に与える影響度の分析を行う。

#### 4.2 解析基本条件および解析モデル

解析モデルを設定するための解析の基本条件を表-4.1に示す。解析モデルは、表-4.1に示す条件で行った安定計算の結果より、せん断に対する安全率が4以上で、あまり大きすぎない安全率(4.2程度)になる上流面勾配を鉛直、下流面勾配を1:0.8とした。図-4.2に解析モデルの形状を示す。

解析結果に対する評価は、コンクリートダムの安定性の基準として一般的に用いられている以下に示す項目とする。

##### (1) 転倒に対する安定性(ミドルサードの条件)

堤体上流端に引張が発生しないこととする。

$$e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} - \frac{B}{2}$$

$$\sigma_u = \frac{\Sigma V}{B} \left( 1 - \frac{6e}{B} \right), \quad \sigma_d = \frac{\Sigma V}{B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (1)$$

ここに、 $e$ : 応力を求める水平断面の中心軸から鉛直力  $\Sigma V$  の作用点までの距離 (m)、 $\sigma_u$ : 上流端鉛直

表-4.1 解析基本条件

| 項目        | 条件                                  |                                     |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| モデル形状     | 基本三角形<br>(フィレットなし)                  |                                     |
| 堤高        | 100m                                |                                     |
| 設計震度      | 0.15 (震度法)                          |                                     |
| 対象水位      | 90m (常時満水位相当)                       |                                     |
| 波浪位       | 考慮しない                               |                                     |
| 下流水位      | 地表面に一致                              |                                     |
| 堆砂        | 考慮しない                               |                                     |
| 基礎排水孔と揚圧力 | 考慮しない<br>(揚圧力係数: 上流端=1/3、<br>下流端=0) |                                     |
| 岩着面       | せん断強度                               | 220tf/m <sup>2</sup> (NダムにおけるCH級岩盤) |
|           | 内部摩擦係数                              | 1 (NダムにおけるCH級岩盤)                    |

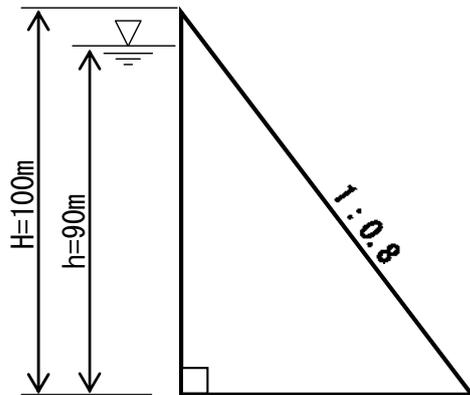


図-4.2 解析モデル

応力 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $\sigma_d$ : 下流端鉛直応力 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $\Sigma V$ : せん断面に作用する鉛直力 ( $\text{tf/m}$ )、 $\Sigma M$ : 底面中心軸に作用するモーメント ( $\text{tf}\cdot\text{m}$ )、 $B$ : せん断抵抗を考える長さ、である。

##### (2) せん断に対する安定性(せん断摩擦安全率 $F_s$ : ヘニーの式)

$$F_s = \frac{f \times \Sigma V + \tau_0 \times B}{\Sigma H} \geq 4.0 \quad (2)$$

ここに、 $F_s$ : せん断摩擦安全率、 $f$ : 内部摩擦係数、 $\tau_0$ : せん断強度 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $\Sigma H$ : せん断面に作用するせん断力 ( $\text{tf/m}$ )、である。

#### 4.3 水平打継目沿いの上下流方向の亀裂

##### 4.3.1 検討条件

水平打継目沿いに上下流方向の亀裂が発生したと仮定し、その亀裂が堤体の安定性に与える影響を検討する。

図-4.3.1に本検討のフロー図を示す。亀裂の存在を考慮する水平打継目位置は、地表面からの高さ0~80m(20m刻み)の5箇所とし、亀裂は水平打継目沿いに上流からのみ、下流からのみおよび上下流同時に発生すると仮定し、亀裂長さや亀裂のせん断強度を変化させ、安全性の評価を行う。

上流からの亀裂については亀裂部分に作用する揚圧力が上昇する可能性を考慮し、亀裂面には上流端に作用している静水圧と同じ揚圧力(揚圧力係数1.0)を作

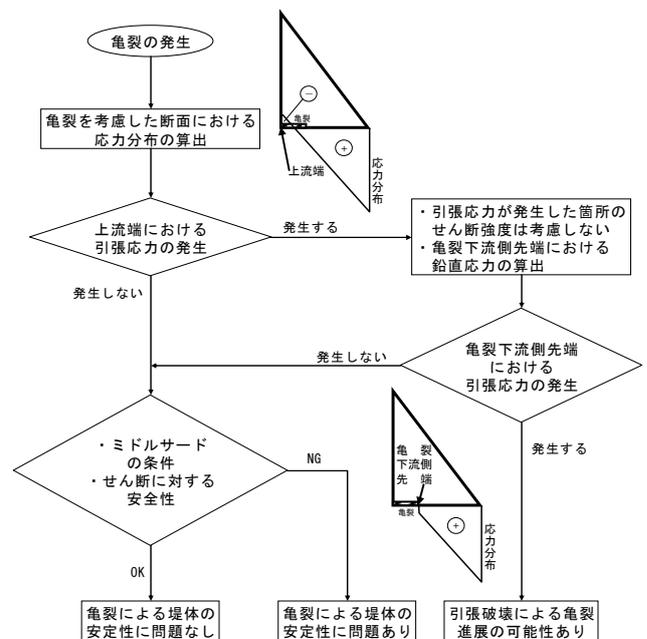


図-4.3.1 水平打継目沿いの上下流方向に発生した亀裂が堤体の安定性に与える影響の検討における解析フロー図

用させる。未亀裂部分の揚圧力は基礎排水孔を考慮しない、あるいは存在しないとし、排水孔のないダム断面と同様に上流端に作用している静水圧の 1/3 (揚圧力係数 1/3) とする。下流端 (下流からの亀裂先端も同様とみなす) の静水圧は 0 とする。

せん断強度は、亀裂のせん断強度を考慮した平均せん断強度とする。なお、亀裂の分布範囲内に引張応力が発生した場合は、その範囲の亀裂のせん断強度は考慮しない。

水平打継目断面内の亀裂長さについての情報はほとんど無いため、コンクリートダムの表面劣化のうち、継目に関する具体的な劣化状況を参考に亀裂長さを設定した。事例調査結果において継目の劣化状況で最も大きいものとして、堤体上流面の一部の継目部では竣工 33 年後で約 50cm の凍害、堤体下流面では水平打継目処理不良による 3~5cm の凍害がある。本解析では、これらの数値を考慮したうえで、亀裂長さはかなり長いものまで想定するようにした。

さらに、上流側の引張応力が亀裂に与える影響を確認するために、亀裂の下流側先端における鉛直応力  $\sigma_v$  を確認する (引張破壊による亀裂進展の確認)。

これらより、検討ケースは、表-4.3.1 に示すように、水平打継目位置や亀裂発生パターン、亀裂のせん断強度および亀裂長さを組み合わせて設定する。

### 4.3.2 解析結果

#### (1) 転倒に対する安定性

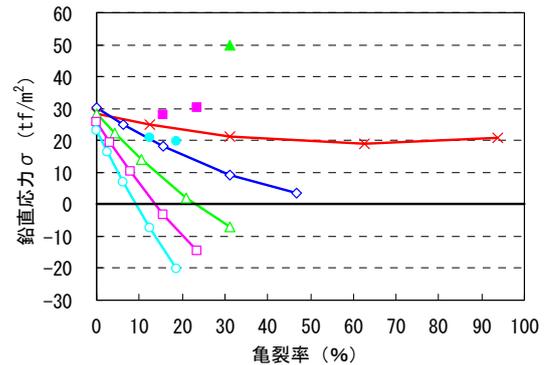
図-4.3.2 に亀裂率 (せん断抵抗を考慮する長さに対する亀裂長さの割合と定義) と鉛直応力の関係を示す。なお、上流端に引張応力が発生した場合は、亀裂下流側先端の鉛直応力も併せて示す。鉛直応力の正は圧縮応力、負は引張応力を示す。

- 上流側のみの亀裂について、引張応力は低標高部 (打継目位置 0~40m) で発生しており、引張応力が発生する最小亀裂率は打継目位置 0m で約 9% 程度である。
- 下流側のみの亀裂について、引張応力は発生していない。
- 上下流同時の亀裂について、引張応力の発生標高は上流側のみの亀裂とほぼ同様である。引張応力が発生する最小亀裂率は打継目位置 0m で約 18% 程度であり、上流側のみの亀裂における最小亀裂率よりも大きい。これは、亀裂長さが上流側と下流側の亀裂長さの和であるためである。
- 上流端に引張応力が発生したケースについて、上流側亀裂の下流側先端に引張が発生していないため、引張破壊によるこれ以上の亀裂の進展は無いと考え

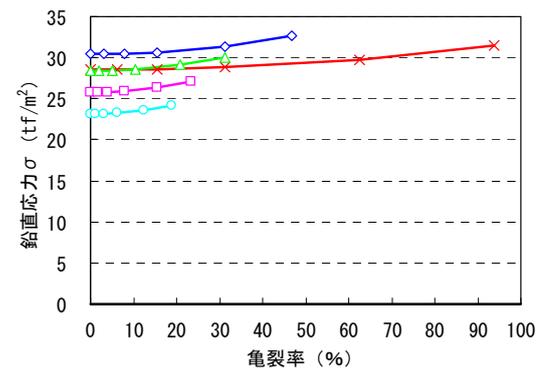
表-4.3.1 検討ケースの組合せ

| 水平打継目位置 | 亀裂のせん断強度  |  | 亀裂発生パターンおよび亀裂長さ (m) |       |                   |
|---------|---|--|---------------------|-------|-------------------|
|         | せん断強度, 内部摩擦角 ( $\tau_0$ (tf/m <sup>2</sup> ), $\phi$ (°)) |  | 上流側のみ               | 下流側のみ | 上下流 <sup>※2</sup> |
| 80m     | ( 0, 0)   |  | 2                   | 1     | 2                 |
| 60m     | ( 0, 45)  |  | 5                   | 2.5   | 5                 |
| 40m     | ( 50, 45)   |  | 10                  | 5     | 10                |
| 20m     | (150, 45)   |  | 15                  | 10    | 15                |
| 0m      | (250, 45) <sup>※1</sup>                                   |  |                     | 15    | 15                |

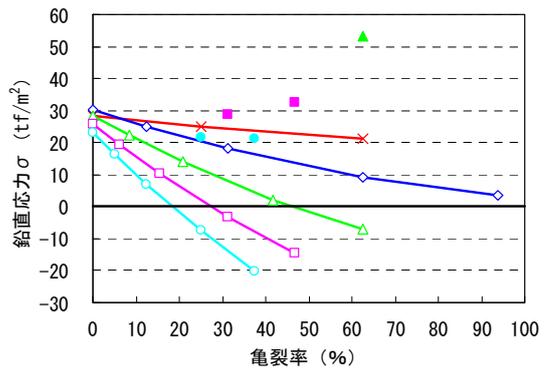
※1: 解析モデルの基とした実ダムにおけるコンクリートのせん断強度  
 ※2: 上下流での亀裂長さは同じ



(a) 上流側のみの亀裂



(b) 下流側のみの亀裂



(c) 上下流同時の亀裂

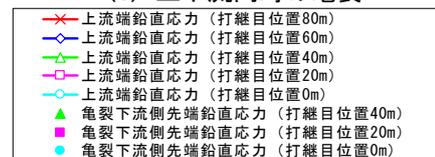


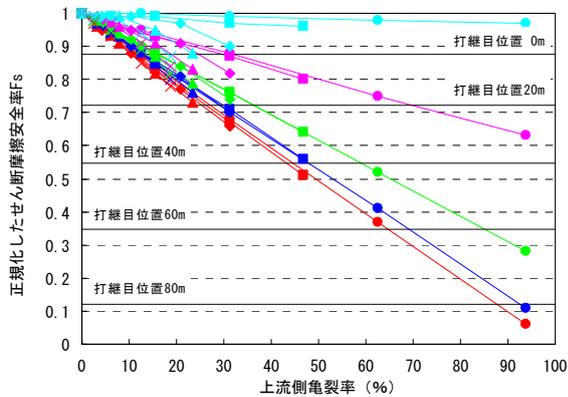
図-4.3.2 亀裂率と上流端鉛直応力および亀裂下流側先端鉛直応力の関係

られる。

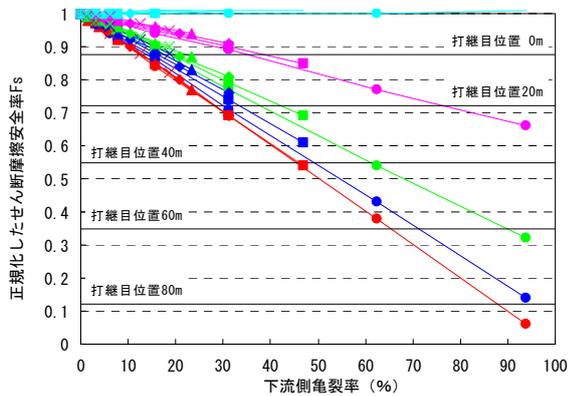
(2) せん断に対する安定性

図-4.3.3 に亀裂率と正規化したせん断摩擦安全率の関係を示す。

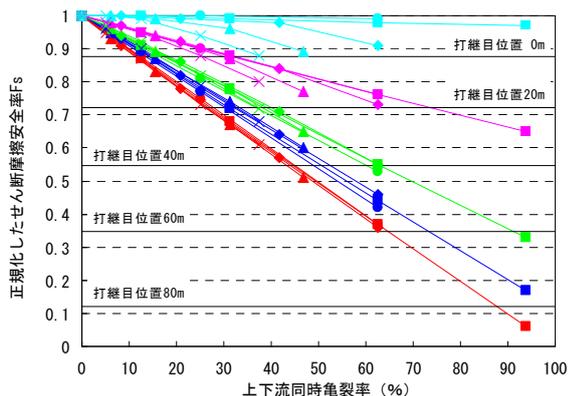
- ・上流側のみの亀裂について、せん断摩擦安全率  $F_s$  は打継目位置 80m および 0m で安全率  $F_s=4$  を満足



(a) 上流側のみの亀裂



(b) 下流側のみの亀裂



(c) 上下流同時の亀裂

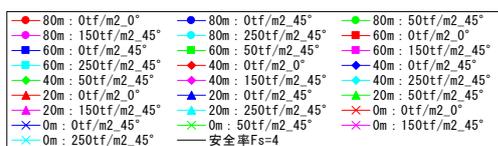


図-4.3.3 亀裂率と正規化したせん断摩擦安全率  $F_s$  の関係

しないケースが出現し、その最小亀裂率は打継目位置 80m で約 88%、打継目位置 0m で約 11%である。  
 $F_s$  の低下は当然のことながら打継目位置に関係なく、「 $\tau_0=0\text{tf/m}^2$ ,  $\phi=0^\circ$ 」のパターンが最も大きく、「 $\tau_0=250\text{tf/m}^2$ ,  $\phi=45^\circ$ 」のパターンが最も小さく、亀裂のせん断強度に大きく影響を受ける。

- ・下流側のみの亀裂について、 $F_s$  は上流側のみの亀裂と同様に打継目位置 80m および 0m で安全率  $F_s=4$  を満足しないケースが出現し、最小亀裂率は打継目位置 80m で約 88%、打継目位置 0m で約 13%である。 $F_s$  の低下に与える亀裂のせん断強度の影響は上流側のみの亀裂と同様である。
- ・上下流同時の亀裂について、 $F_s$  は打継目位置 80m を除く全ての打継目位置で安全率  $F_s=4$  を満足しないケースが出現し、最小亀裂率は打継目位置 60m で約 66%、打継目位置 40m で約 44%、打継目位置 20m で約 26%、打継目位置 0m で約 12%である。 $F_s$  の低下に与える亀裂のせん断強度の影響は上流側のみの亀裂と同様である。

4.4 堤体と岩盤の接合面における劣化と漏水

4.4.1 検討条件

ここでは、堤体と岩盤の接合面における劣化と漏水に対して検討を行う。堤体との接合面における岩盤の劣化による強度低下については調査事例や具体的なデータが存在しないため考慮せず、岩着面の漏水によりコンクリートのカルシウム分等が溶脱され、劣化部沿いのコンクリートの強度が低下すると仮定し、岩着面のコンクリートの強度低下のみを考慮する。漏水経路の拡大は、揚圧力の増加により表現する。

①劣化の範囲

コンクリートのカルシウム分等が浸透、漏水により溶脱することを想定すると、着岩部で上下流に連続した水みちがあることが前提になると考え、劣化は岩着面の上下流全域に及ぶものとする。

②劣化部の強度低下

岩着面コンクリートの強度低下は、東京電力(株)の研究<sup>1)</sup>によると完成から 90 年経過したダムにおいて岩着面の内部摩擦係数を健全部と同等とすると、純せん断強度は 2 割程度の低下が予想されるとある。今回の条件では、岩着面の岩盤せん断強度が  $220\text{tf/m}^2$  で、コンクリートのせん断強度  $250\text{tf/m}^2$  が 12% 低下した値であるため、この値よりも強度低下が大きい状態について検討する。よって、表-4.4.1 に示す 3 パターンとする。なお、前述したように岩盤の強度低下は考慮しない。

### ③揚圧力

漏水経路の進展状況を表現する揚圧力については、基礎排水孔を考慮せず、上流側の揚圧力は $h$ を対象水位（常時満水位相当：90m）として揚圧力係数を1/3から1で変化させ、下流側の揚圧力は0とする三角形分布とする。揚圧力パターンを表-4.4.2に示す。

#### 4.4.2 検討結果

##### (1) 転倒に対する安全性

図-4.4.1に揚圧力係数と堤体上流端の鉛直応力の関係と揚圧力係数と堤体上流端に引張応力が生じた時の引張応力領域の長さの関係を示す。

- ・揚圧力係数を1/3から1まで変化させた場合、揚圧力係数1/3のとき上流端の鉛直方向の圧縮応力は約 $23\text{tf/m}^2$ で、揚圧力係数0.59程度で上流面に引張応力が発生する。
- ・揚圧力係数1のとき、上流端に生じた引張応力の領域の長さは約13.5m（堤敷長80mに対して約17%）である。

##### (2) せん断に対する安定性

図-4.4.2に揚圧力係数と底面せん断摩擦安全率の関係を、図-4.4.3に着岩部の強度低下率と底面せん断摩擦安全率の関係を示す。

また、表-4.4.3に揚圧力係数と $F_s=4$ となる場合の着岩部の強度低下率をまとめて示す。これより、揚圧力係数の上昇や着岩部の強度低下により $F_s$ の低下に比較的大きい影響を与えているものと考えられる。

#### 4.5 堤体表面のすり減りや剥離等による表面劣化

##### 4.5.1 表面劣化のモデル化

検討する劣化形態は、劣化深度 $t$ として、安全側の対応として一様に断面欠損すると仮定する。

断面欠損は、①上流面のみ、②下流面のみ、③両方の3パターンとした。

安定計算は、図-4.5.1に示す荷重条件で行った。

##### 4.5.2 検討条件

3章の結果より、コンクリートダムの表面劣化は、凍害や中性化を要因とした事例が報告されている。劣化深度と竣工後年数の関係を図-4.5.2に示す。凍害については、堤体表面全体について、表面から10cm程度、継目や水平打継目部で50~90cm程度の事例が報告されている。ここで、雨竜第一、雨竜第二ダムについては、竣工12年で最大35cm程度の凍害による劣化が報告されている。表面全面と継目部の明確な区別はないが、特に凍害の被害が大きいのは継目部や冬期の水際付近との記述があることから、表面全体の劣化深度は35cmよりも小さいものと考えられる。中性化深

表-4.4.1 劣化部強度低下パターンとせん断強度

| 材質      | 強度低下率(%)   | せん断強度( $\text{tf/m}^2$ ) |
|---------|------------|--------------------------|
| コンクリート  | 12, 15, 20 | 250                      |
| 岩盤(CH級) | 0          | 220                      |

表-4.4.2 揚圧力パターン

| 箇所  | 揚圧力                        |
|-----|----------------------------|
| 上流側 | $h/3, h/2, 0.59h, 2h/3, h$ |
| 下流側 | 0                          |

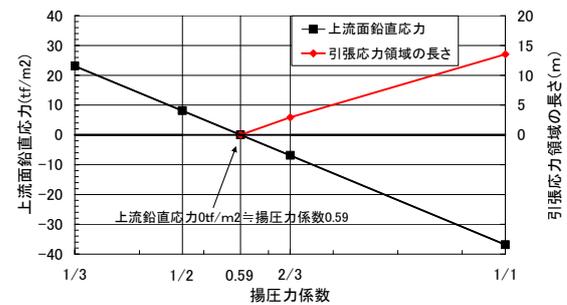


図-4.4.1 揚圧力係数と上流端鉛直応力と引張応力領域の長さの関係(圧縮:正)

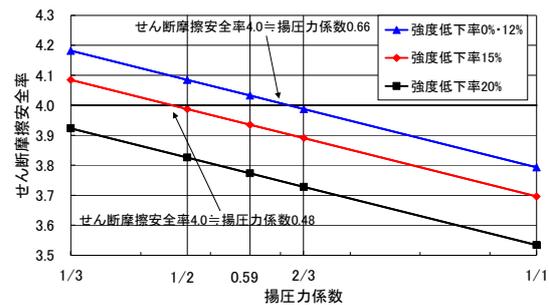


図-4.4.2 揚圧力係数と底面せん断摩擦安全率の関係

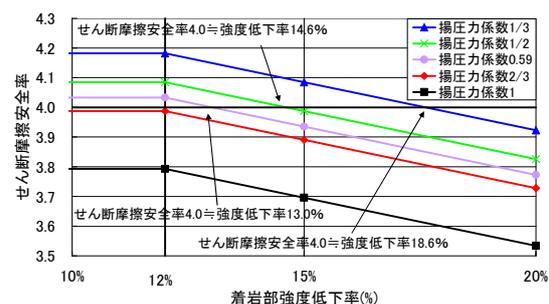


図-4.4.3 着岩部の強度低下率と底面せん断摩擦安全率の関係

表-4.4.3 揚圧力係数と着岩部の強度低下率

| 揚圧力係数 | 初期 $F_s$ | $F_s=4$ となる強度低下率(%) |
|-------|----------|---------------------|
| 1/3   | 4.18     | 19                  |
| 1/2   | 4.08     | 15                  |
| 0.59  | 4.03     | 13                  |
| 2/3   | 3.99     | -                   |
| 1     | 3.79     | -                   |

度については、最大で表面から 10cm 程度の事例が報告されている。

これらの結果から、表面劣化の深度は、水際や継目などで大きくなる傾向があるが、表面全体の劣化は 10cm 程度である。本検討では、安全側の検討として、表面全面の劣化が 1000 年間進行することを想定し、想定する劣化深度の最大値を 3m とした。表-1 に検討ケースを示す。

安定計算を行う断面は、底面および中間標高部（底面より 20m, 40m, 60m, 80m 上方）とした。

#### 4.5.3 検討結果

以下に、検討結果のうち、最も安全率の小さくなった底面に対する検討結果を示す。

図-4.5.3 に堤体の劣化深度  $t$  と堤体上流端の鉛直応力の関係を示す。図-4.5.4 に堤体の劣化深度  $t$  とせん断摩擦安全率の関係を示す。表面劣化が堤体の安定性におよぼす影響には以下の傾向がみられた。

##### (1) 転倒に対する安定性

- ・上流側のみ欠損の場合、劣化深度 0m での上流端鉛直応力(0.227MPa)、劣化深度の上限を 3m とした今回の検討では、全てのケースでミドルサードの条件を満足する。
- ・下流側のみ欠損の場合、劣化深度 3m 程度でミドルサードの条件を満足しなくなる。
- ・両側欠損の場合、劣化深度 1.5m 程度でミドルサードの条件を満足しなくなる。

劣化場所に関わらず劣化深度と上流端鉛直応力はほぼ直線的な関係となり、劣化深さが深いほど鉛直応力が小さくなった。

- ・同じ劣化深度では、初期状態からの鉛直応力の減少量は、上流面のみ<下流面のみ<両面の順に大きくなる。

##### (2) せん断に対する安全性

- ・上流側のみ欠損の場合、劣化深度 0m でのせん断摩擦安全率 4.18 に対して、劣化深度の上限を 3m とした今回の検討では、全ての劣化深度でせん断摩擦安全率は 4 以上であった。
- ・下流側のみ欠損の場合、劣化深度 3m 程度でせん断摩擦安全率が 4 を下回った。
- ・両側欠損の場合、劣化深度 1.5m 程度でせん断摩擦安全率が 4 を下回った。
- ・劣化場所に関わらず劣化深度と安全率はほぼ直線的な関係となり、劣化深さが深いほど安全率が低くなる。
- ・同じ劣化深度では、安全率の低下率は、上流面のみ

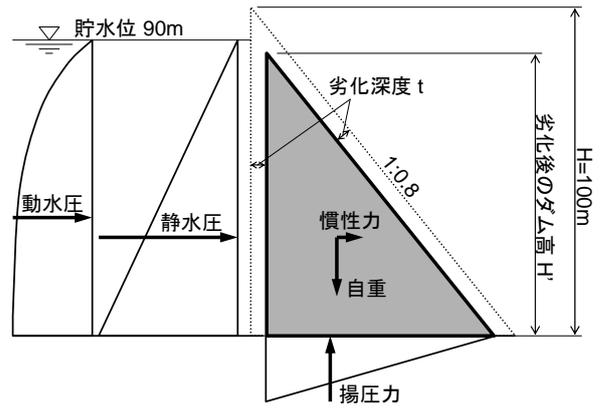


図-4.5.1 劣化形態のモデルへの反映と荷重条件の模式図(両面が劣化する場合の例)

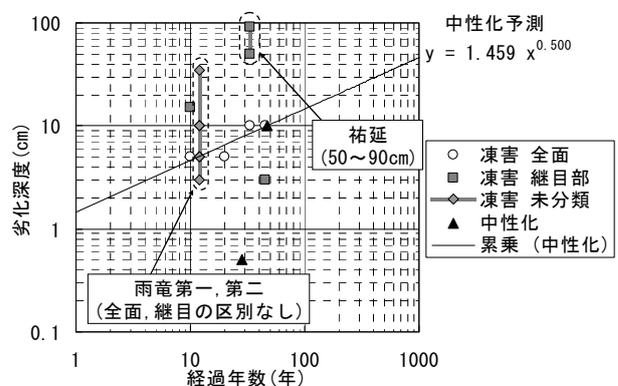


図-4.5.2 経過年数と劣化深度の関係

表-4.5.1 検討ケース

| 劣化パターン | 劣化なし | 劣化深度 $t$ (m) |     |   |     |   |   |
|--------|------|--------------|-----|---|-----|---|---|
|        |      | 0.1          | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 |
| 上流面    |      | ○            | ○   | ○ | ○   | ○ | ○ |
| 下流面    | ○    | ○            | ○   | ○ | ○   | ○ | ○ |
| 両方     |      | ○            | ○   | ○ | ○   | ○ | ○ |

<下流面のみ<両面の順に大きくなる。

以上の検討より、表面劣化が堤体の安定性に影響をおよぼす劣化深度は、上下流面の両面が欠損したとしても 1.5m 程度である。一方、文献調査から得られた表面全面におよぶ表面劣化の深度は竣工後 40 余年で 10cm 程度と非常に小さいことから、表面劣化が堤体安定性に影響を及ぼす規模に達するにはかなり長期間が必要であることが想定される。また、表面劣化は、他の劣化パターン (①水平打継目の亀裂と漏水、②堤体と岩盤の接合面における劣化と漏水) のように、漏水経路の拡大等による揚圧力の増大等の劣化の急激な進行は考えにくいことから、他の劣化パターンよりもその影響度は小さいものと考えられる。

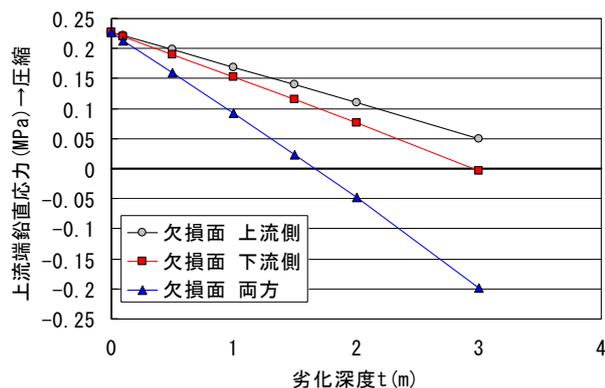


図-4.5.3 劣化深度と上流端鉛直応力の関係

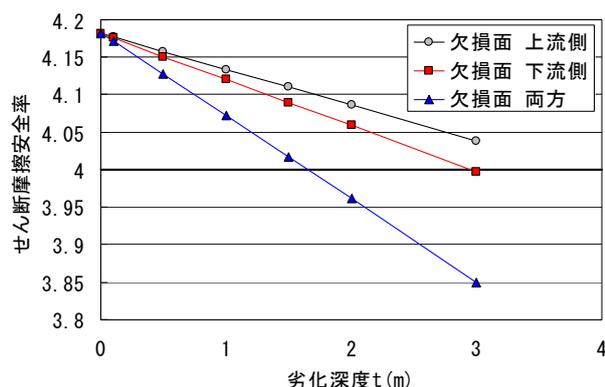


図-4.5.4 劣化深度と底面せん断摩擦安全率の関係

## 5. 現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出および維持管理コストの検討

### 5.1 現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出

現行の安全管理基準は、河川管理施設等構造令<sup>2)</sup>によると、ダム形式毎の計測項目は表-5.1.1のとおりである。また、ダムの安全管理の期間の区分と計測、巡視の標準的な頻度を表-5.1.2に示す<sup>3)</sup>。しかし、これらの計測や巡視は、老朽化や劣化による影響を十分考慮したものとなっていない。

事例調査結果を踏まえて設定した劣化形態をモデル化した安定計算の結果からは、岩着部を含む水平打継目沿いの亀裂による堤体内揚圧力の増加やせん断強度の低下、岩着部付近の漏水・浸透に伴うコンクリートのカルシウム分溶脱に伴う揚圧力の増加やコンクリート強度の低下などが安全性の低下に与える影響が大きいが判明した。一方、堤体表面全面からの凍害や中性化に伴う劣化（亀裂沿いなどの弱部の選択的劣化は除く）が安定性に与える影響は比較的小さいことも判明した。

以上の結果を踏まえて、「千年ダム構想」を実現する

表-5.1.1 ダム形式毎の計測項目<sup>2)</sup>

| 区分           |                      | 計測事項       |
|--------------|----------------------|------------|
| ダムの種類        | 堤高(m)                |            |
| 重力式コンクリートダム  | 50未満                 | 漏水量 揚圧力    |
|              | 50以上                 | 漏水量 変形 揚圧力 |
| アーチ式コンクリートダム | 30未満                 | 漏水量 変形     |
|              | 30以上                 | 漏水量 変形 揚圧力 |
| フィルダム        | ダムの堤体がおおむね均一の材料によるもの | 漏水量 変形 浸潤線 |
|              | その他のもの               | 漏水量 変形     |

表-5.1.2 ダムの安全管理の期間の区分と計測、巡視の標準的な頻度<sup>3)</sup>

| 項目  | コンクリートダム |      |       | フィルダム |      |       |
|-----|----------|------|-------|-------|------|-------|
|     | 第I期      | 第II期 | 第III期 | 第I期   | 第II期 | 第III期 |
| 漏水量 | 1回/日     | 1回/週 | 1回/月  | 1回/日  | 1回/週 | 1回/月  |
| 変形  | 1回/日     | 1回/週 | 1回/月  | 1回/週  | 1回/月 | 1回/3月 |
| 揚圧力 | 1回/日     | 1回/週 | 1回/月  | —     | —    | —     |
| 巡視  | 1回/日     | 1回/週 | 1回/月  | 1回/日  | 1回/週 | 1回/月  |

ためのダム本体の管理・点検について検討を進めていくことを考えると、以下に示すような具体的な課題や視点が抽出される。

- (1) 堤体表面で認められる亀裂、特に水平打継目沿いの亀裂については、漏水の有無によらずその深さやその経年的な進行状況に関する調査が重要となる。
- (2) 上流側に発生した亀裂については、亀裂内の揚圧力分布を亀裂の劣化状態に応じて明らかにする調査が重要となる。
- (3) 亀裂沿いのせん断強度の評価に関する調査が重要となる。
- (4) コンクリートと基礎岩盤の境界部における劣化程度、強度、透水性に関する調査およびそれらの経年的な変化に関する調査が重要である。

### 5.2 維持管理コストの検討

劣化の進行が安全性や補修コストへ与える影響を仮定し、維持管理コストの観点から検討を行った。

#### 5.2.1 各項目のモデル化

##### (1) 劣化深度と安全率の関係

4章における解析的検討の結果より、劣化深度と安全率は概ね直線関係を示すことが明らかとなった。このことから、安全率は、完成時を1.0として、劣化深度に対して直線的に低下すると仮定した(図-5.2.1)。

##### (2) 劣化深度と補修コストの関係

劣化の進行に伴い、補修コストが段階的に増加するモデル(モデル1)、補修コストが曲線的に増加するモデル(モデル2)の2モデルを想定した(図

—5.2.2)。

### (3) 劣化の進行速度

表面劣化の進行は、個々のダム位置における気象条件や劣化形態等により異なると考えられるが、ここでは、一例として中性化深度予測式を参考に、劣化深度が経過年数の平方根に比例するモデルを想定した(図-5.2.3)。

#### 5.2.2 経過時間・安全率に関する整理

図-5.2.3に示す劣化深度の経時変化をもとに、安全率および補修コストを経過年数について整理した。図-5.2.4に経過年数と劣化深度、安全率および補修コストの関係を示す。劣化深度は経過年数の平方根に比例するため、経過年数0~50年の勾配が大きく、その後徐々に進行が緩やかになる。

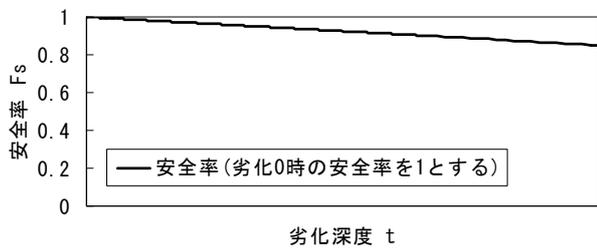


図-5.2.1 劣化深度と堤体の安全率の関係

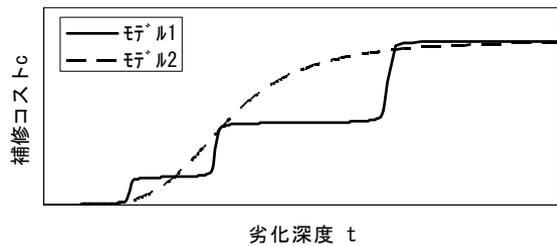


図-5.2.2 劣化深度と補修コストの関係

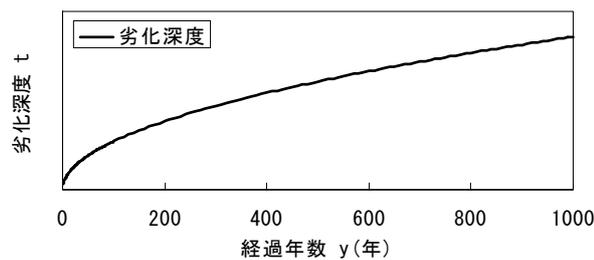


図-5.2.3 経過年数と劣化深度の関係

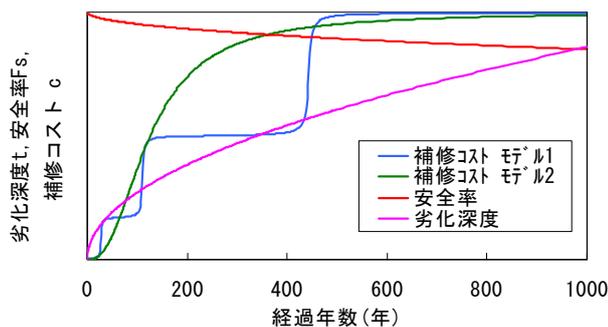


図-5.2.4 各項目の経過年数に対する整理

安全率は劣化深度と直線関係にあるため、初期の安全率の低下が大きく、その後低下の割合が小さくなる。

補修コストについては、モデル1は補修コストの最も小さな1段階目の期間が短く補修コストが大きな段階ほど期間が長くなる。モデル2は、補修コストが上昇する年数が早期に現れ、補修コストが急上昇するが、その後上昇が緩やかになる傾向がみられる。

#### 5.2.3 補修サイクルとトータルコストの関係

堤体の補修を定期的に行う場合、補修の間隔と維持管理費の関係を概略検討した。

モデル1、2について、補修のサイクルを25年、100年、200年と変化させて1000年後のトータルコストを比較した。図-5.2.5にモデル1、図-5.2.6にモデル2

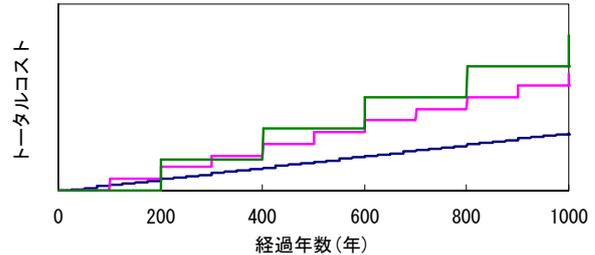
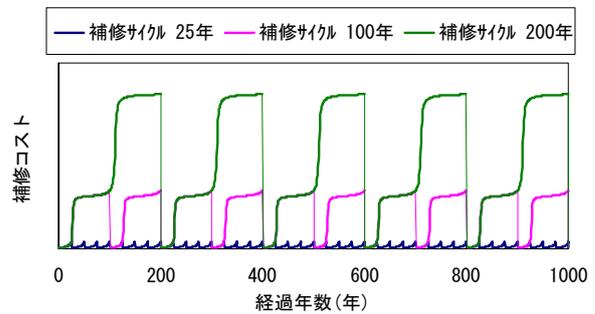


図-5.2.5 安全率、維持管理コスト、トータルコストの経時変化(モデル1)

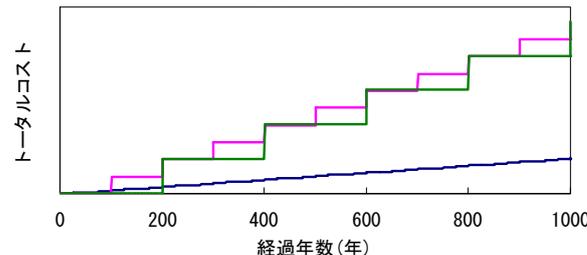
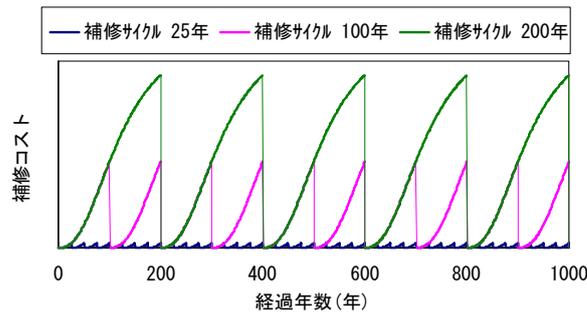


図-5.2.6 安全率、維持管理コスト、トータルコストの経時変化(モデル2)

に関する結果を示す。これらの結果によると、ある程度以上に劣化の程度が大きくなならないうちに補修を行うことにより補修のトータルコストを低下させる効果があることがわかる。

以上の結果は、あくまでモデル計算に基づいたものである。よって、現実的な形でコスト評価を実施するためには、劣化深度と補修コストの関係を補修工法や施工期間などを踏まえて明らかにするとともに、劣化速度についての調査を実施する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、ダム診断点検を効果的に実施し、できるだけ低コストでダムの超寿命化を図る「千年ダム構想」を実現するための具体的な研究方針を探るために、①ダムの老朽化原因を踏まえた老朽化形態把握のための事例調査、②各種老朽化形態がダムの安全性に与える影響の概略分析、③各種老朽化形態に対する現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出を行った。

①の事例調査では、限られた数の事例についての調査であったが、代表的な老朽化は、水平打継目等の弱部沿いに発生した上下流方向の亀裂による漏水、岩着部のコンクリートと岩盤の接合面における変質と漏水、堤体表面のすり減り・剥離および凍害等による劣化の3つ老朽化形態に分類できた。

②の解析的検討では、3つの代表的な老朽化形態をモデル化して安定解析を行った。安定解析の結果からは、岩着部や水平打継目といったダムに対して上下流方向の水平な劣化が、ダムの安全性の低下に与える影響が大きいことがわかった。

③の現行安全管理方法の妥当性評価と必要な視点の抽出では、②の数値解析から得られたダムの安全性の低下に与える影響がある劣化に対して、現行の安全管理基準では十分に対応できないことを明らかにし、ダムの管理・点検に関する今後の検討を進めていくうえでの課題点を抽出した。

今後は、本研究の調査に加えて、大規模地震時の安定性についての評価もあわせて行うとともに、劣化の程度に応じた適切な補修方法、補修費用を考慮した適切な補修時期の検討など、様々な観点からの総合的な研究が必要になってくる。

これらを踏まえて、平成21年度から「ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究」を戦略研究として実施していく予定である。

## 参考文献

- 1) 内田善久, 蓮本清二, 橋本 淳, 新村 亮: Q.82-R.32 コンクリートダム着岩部の経年劣化に関する研究, 大ダム, No.185, pp.51-60, 2003.10.
- 2) (財) 国土開発技術研究センター編: 改定 解説・河川管理施設等構造令, 山海堂, pp.95-97, 2000.
- 3) ダム管理研究会編著: ダム管理の実務, (財) ダム水源地環境整備センター, pp.215-243, 1999.

## RESEARCH ON MANAGEMENT AND INSPECTION OF DAMS FOR 1000-YEAR-OLD DAMS

Abstract : A major theme of 21st century is "Sustainable Development of Society", and the water issue has become an important task to achieve it. Construction of a dam is in one of the most efficient measures to solve the water problem. However, in our country is now, the new dam construction will be difficult because of the tight fiscal situation and the environmental conservation, while the redevelopment project will increase to effectively use existing dams. In addition, to ensure the effective use of existing dams, the individual existing dam must behave safely over the long term. Therefore, a diagnostic inspection of dams, should be made to promote low-cost management for dams and ultra-long life dams.

In this research, the following investigations are made to find a specific policy to achieve the above objectives, ①case studies to determine the cause of aging and deterioration, ②numerical simulation to analyze the impact on the safety of aging and deterioration, ③extraction of perspective and the necessary validation of current safety management for various forms of aging and deterioration.

Keywords : dam, redevelopment, effective use, aging, inspection, repair