

特集：次世代に向けた新技術開発……現状と将来の方向性

千年ダム構想に向けた老朽化の形態調査と安全性への影響評価 —次世代のダム管理に向けて—

山口嘉一* 林 直良** 吉永寿幸*** 下山顕治**** 塚越雅之*****

1. はじめに

21世紀の重大テーマである「社会の持続可能な発展」を達成するための重要な課題が水問題であり、これを解決するための最も効率的な対策の一つとしてダム建設がある。しかし、わが国では、現在、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たため、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、既設ダムの有効利用を図るためには、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。

本稿では、ダムの老朽化形態についての事例調査を行い、主たる老朽化形態を明らかにするとともに、それがダムの安全性に与える影響を解析的に検討した。なお、本稿では、劣化の原因が老朽化だけでなく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。

2. ダムの老朽化形態把握のための調査

2.1 調査方法

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基づき調査した。ここでは、フィルダムに比べて老朽化が安全性低下に与える影響が大きいと考えられるコンクリートダムを対象とした。調査の流れは、図-1に示すとおりである。

2.2 調査結果

老朽化形態の調査対象ダム数は、国内で22、海外で10である。

老朽化形態ごとの事例数及び各老朽化形態が全

事例数に占める割合を、図-2に示す。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のほか、重力式アーチダム、連続したアーチ構造のマルチプルアーチダムおよび水圧を受けるコンクリート版を扶壁（バットレス）で支える構造のバットレスダムも含まれている。

調査結果より、国内では漏水、海外では亀裂による劣化形態が最も多く、続いて凍害や表面劣化、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。漏水事例が多い国内の場合については、発生原因や経路が厳密にはわからないが、堤体上流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場合には、水平打継目など弱部が基本的な老朽化の原因となっているとも考えられる。

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等があり、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疎化が進行する溶脱による変質もある。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る可能性がある。

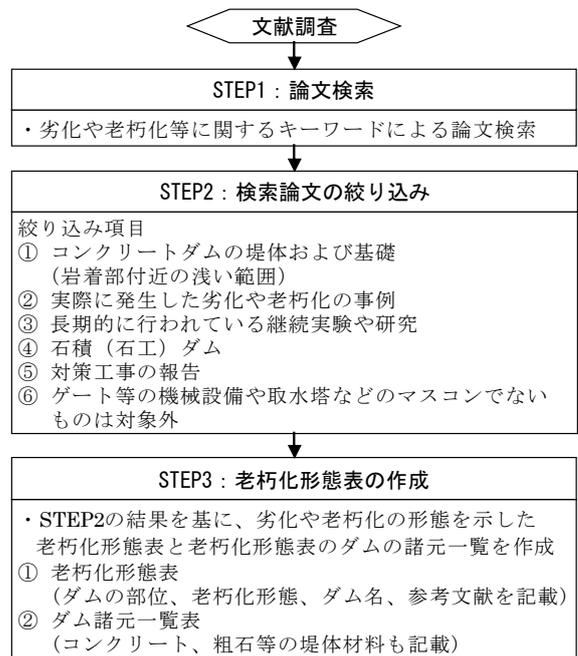


図-1 老朽化形態調査の流れ

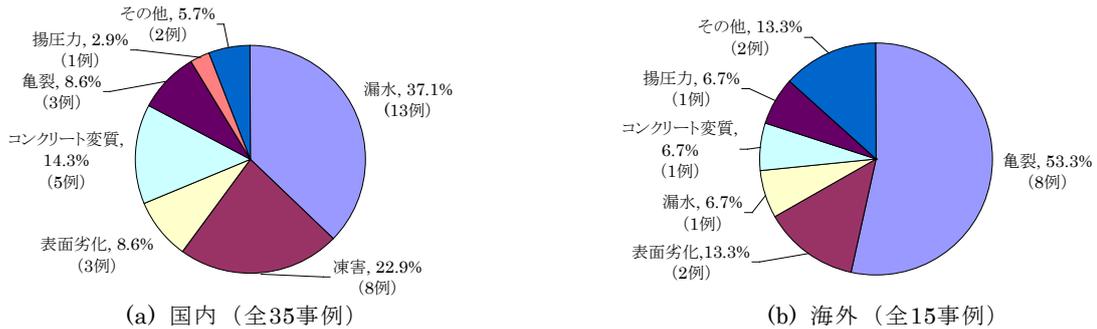


図-2 国内および海外ダムの各老朽化形態の割合

凍害は、国内のダムの調査では多い結果となっている。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である。

以上より、ダムの安全性に影響を与える主たる老朽化形態と発生箇所は、以下に示す3パターンになると考えられる。

- ① 水平打継目沿いの上下流方向の亀裂と漏水 (図-3 (1))
- ② 堤体と岩盤の接合面における変質と漏水 (図-3 (2))
- ③ 堤体表面のすり減り、剥離、および凍害等 (図-3 (3))

3. 老朽化形態がダムの安全性に与える影響の解析的検討

3.1 ダム安全性に影響を与える老朽化形態の選定

劣化形態調査の結果から影響が考えられる3パターンの老朽化に対して、安定解析を実施し、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った。ただし、本稿においては、紙幅の都合上、①のパターンのみ詳細な解析的検討結果について報告することとし、②および③については結果の概要のみの報告とする。

3.2 解析基本条件 (パターン①)

解析モデルを設定するための解析の基本条件を表-1に示す。解析モデルの断面形状は、表-1に示す条件で行った現行の設計法¹⁾に基づく安定計算

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。

安定性の評価は、以下の2項目とした。

- (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。
- (2) せん断に対する安定性 (ヘニーの式)
せん断摩擦安全率 $F_s \geq 4$ を条件とする。

3.3 水平打継目沿いの上下流方向の亀裂の安定性に与える影響

3.3.1 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に解析のフロー図を示す。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~

表-1 解析基本条件

| 項目 | 条件 | |
|-----------|------------------------------|-------------------------------------|
| モデル形状 | 基本三角形 (フィレットなし) | |
| 堤高 | 100m | |
| 設計震度 | 0.15 | |
| 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 (揚圧力係数: 上流端=1/3、下流端=0) | |
| 岩着面 | せん断強度 | 2.2MN/m ² (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) |

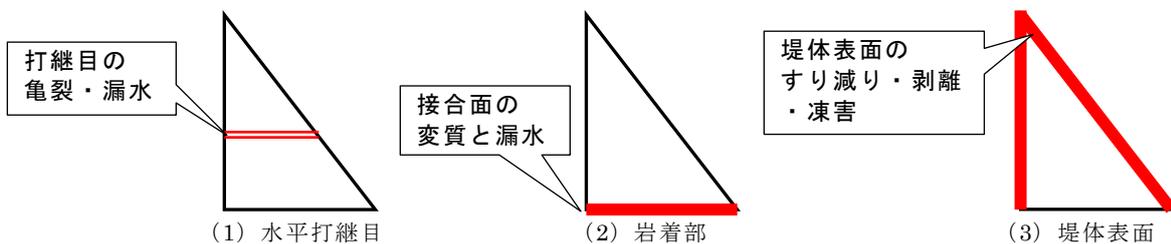


図-3 ダムの安全性に影響を与える老朽化形態と発生箇所

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とも同じ長さで発生すると仮定し、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、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。

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。

これらより、検討ケースは表-2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し、計

325(=5×5×(4+5+4))ケースについて解析した。

3.3.2 解析結果

(1) 転倒に対する安定性

図-5に、亀裂のせん断強度および内部摩擦角がともに0である場合における、上下流ともに亀裂が発生した場合の亀裂率(せん断抵抗を考える水平長さに対する亀裂長さの割合と定義)と上流端の鉛直応力の関係を示す。

- ・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られる。

(2) せん断に対する安定性

図-6に、上下流ともに亀裂が発生した場合の亀裂率と正規化したせん断摩擦安全率(各状態での安全率を各打継目位置での健全な状態(亀裂無し)の安全率で除したもの)の関係を示す。

- ・安全率Fs=4を満足しないケースが打継目位置80mを除く全ての打継目位置で出現した。
- ・最小亀裂率は打継目位置60mで約65%、打継目位置40mで約43%、打継目位置20mで約26%、打継目位置0mで約12%である。

3.4 その他の老朽化形態パターンの解析結果

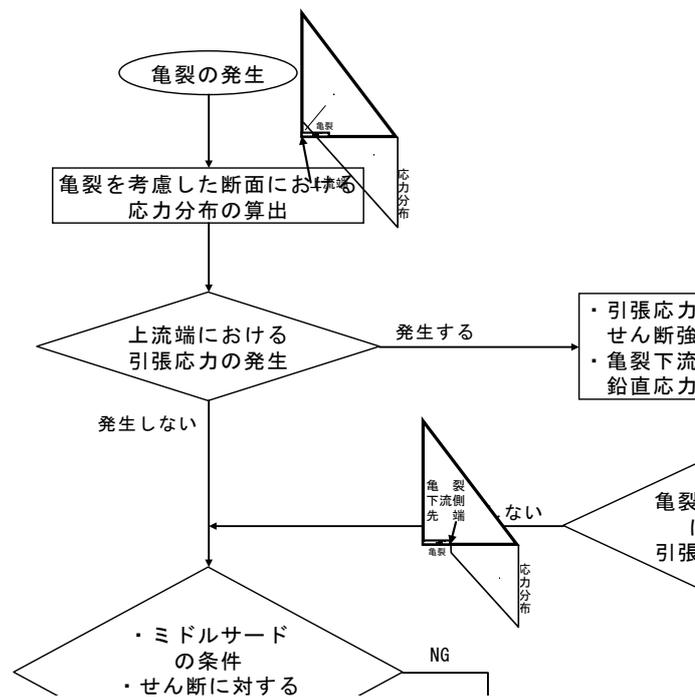


図-4 水平打継目沿いの上下流方向に発生した亀裂が堤体の安定性に与える影響の検討における解析フロー図

表-2 検討ケースの組合せ

| 水平打継目位置 (5ケース) | 亀裂のせん断強度 (5ケース) | 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 (τ_0 (MN/m ²), ϕ (°)) | 上流側の のみ (4ケース) | 下流側の のみ (5ケース) | 上下流※2 (4ケース) |
| 80m | (0, 0) | 2 | 1 | 2 |
| 60m | (0, 45) | 5 | 2.5 | 5 |
| 40m | (0.5, 45) | 10 | 5 | 10 |
| 20m | (1.5, 45) | 15 | 10 | 15 |
| 0m | (2.5, 45) ^{※1} | 15 | 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

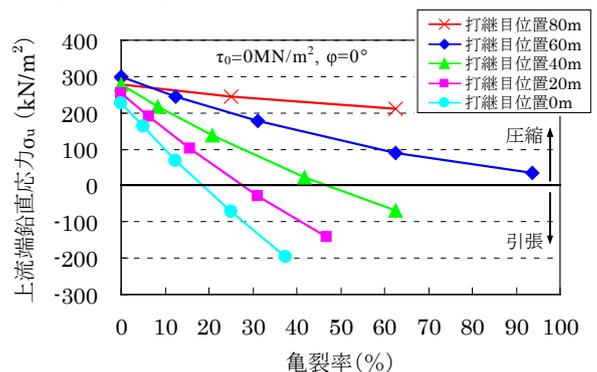


図-5 亀裂率と上流端鉛直応力の関係(上下流同時の亀裂)

老朽化形態調査により抽出した3パターンのうち、②堤体と岩盤の接合面における変質と漏水、および③堤体表面のすり減り、剥離、および凍害等による表面劣化の解析結果について、簡潔に述べる。

②については、コンクリートの溶脱等により漏水経路の拡大を想定し、揚圧力係数1/3から1に上昇すると堤体上流端に作用する鉛直応力が次第に減少し、揚圧力係数0.59程度で上流面に引張応力が発生することから、揚圧力係数の上昇や着岩部の強度低下が安全率Fs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。

③については、表面劣化が堤体の安定性に影響を及ぼす劣化深度は、上下流面が欠損したとしても1.5m程度であり、形態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、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、表面劣化の影響度は、他の劣化パターンよりも小さいものと考えられる。

4. 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、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を行った。

①の事例調査では、限られた数での調査であったが、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

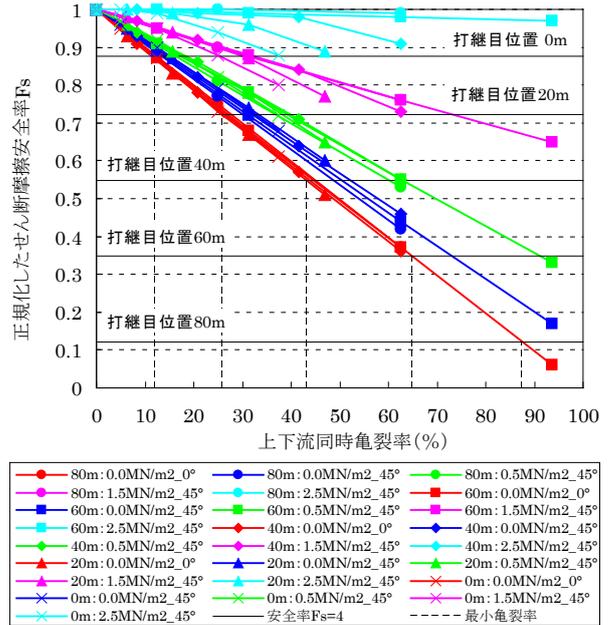


図-6 亀裂率と正規化したせん断摩擦安全率Fsの関係 (上下流同時の亀裂)

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つの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。

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を行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説、設計編 [I]、(社)日本河川協会、1997.10.

山口嘉一*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム 上席研究員、工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

林 直良**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム 研究員、工修
Naoyoshi HAYASHI

吉永寿幸***



西日本技術開発株式会社
(前独立行政法人土木研
究所つくば中央研究所水
工研究グループダム構造物
チーム 交流研究員)
Hisayuki YOSHINAGA

下山顕治****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループダム構造物
チーム 交流研究員、工修
Kenji SHIMOYAMA

塚越雅之*****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループダム構造物
チーム 交流研究員
Masayuki TSUKAGOSHI