

堤体削孔により放流管増設を行う 既設重力式コンクリートダムの大規模地震時挙動の推定

藤田将司・金銅将史・榎村康史

1. はじめに

既存ストックを有効利用しつつ、流域の治水・利水需要の変化に対応するため、既設ダムの改造などにより機能増強を図るダム再開発が注目されている。その代表的な方式の一つとして既設ダムの堤体削孔により放流管を増設する方式があり、近年大規模な施工事例も出てきている。

一方、大規模地震に対する土木構造物の耐震性能の評価が求められている。ダムにおいても耐震性能照査¹⁾の取り組みが進みつつあるが、再開発ダム特有の条件をどのように考慮すべきかについては体系立った整理が十分でなく、個々の事業において個別に検討されている状況である。

そこで、我が国において最も一般的な既設重力式コンクリートダムを運用しながら堤体削孔により放流管増設を行うケースを対象に、大規模地震時の挙動を明らかにすることを目的に数値解析による検討を行った。なお、新設ダムでの放流管設置は、その設置標高への堤体の打ち上がりに伴い行われるが、既設ダムを削孔して設置する場合は、多くの場合、既設ダムを運用しながらの施工が求められる。このため、施工過程は図-1に示すように貯水状態での既設堤体に削孔し、放流管及び鉄筋の設置、充填コンクリートの施工を行った後、運用時水位へ水位上昇を行う手順となる。よって、数値解析では、この手順（施工過程）に伴う荷重状態の変化のほか、施工中の水位条件の違いにより、同形状の新設ダムとは異なるものとなると考

えられる再開発（削孔）ダムでの常時（非地震時）の応力状態が大規模地震時における放流管ブロックの挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 解析モデルおよび解析条件

重力式コンクリートダムでは、温度ひび割れを防ぐため、通常幅15m程度のブロックとなるよう横継目が設けられる。既設堤体への削孔は構造上横継目を避けて行われるが、その削孔径は空洞周辺の応力集中を考慮し、ブロック幅の1/3程度以内とされている。これより、本検討では削孔径5mのケースを想定した。また、削孔する放流管ブロックの堤高は100mとし、既往事例を参考に放流管設置標高は堤敷より33mとした。解析モデルは、この放流管増設（削孔）を行うブロックを抽出し、これと貯水池および基礎地盤からなる3次元有限要素モデル（図-2）とした。ただし、計算を効率化するためブロック中央断面にシンメトリ境界を設定し、1/2のみをモデル化した。放流管周りに配置される補強鉄筋はロッド要素でモデル化した。なお、比較のため、同一断面形状の新設ダムを想定したケースとして、堤体削孔での施工過程や施工中の水位条件を考慮しないケースも実施した。解析に用いた物性値等を表-1および図-3に、解析ケースを表-2に示す。

再開発（削孔）ダムの常時（非地震時）応力は、図-1に示した施工過程と荷重条件を考慮して、同図の(a)および(b)をステップ1、(c)をステップ2、(d)をステップ3とするステップ解析により求めた。

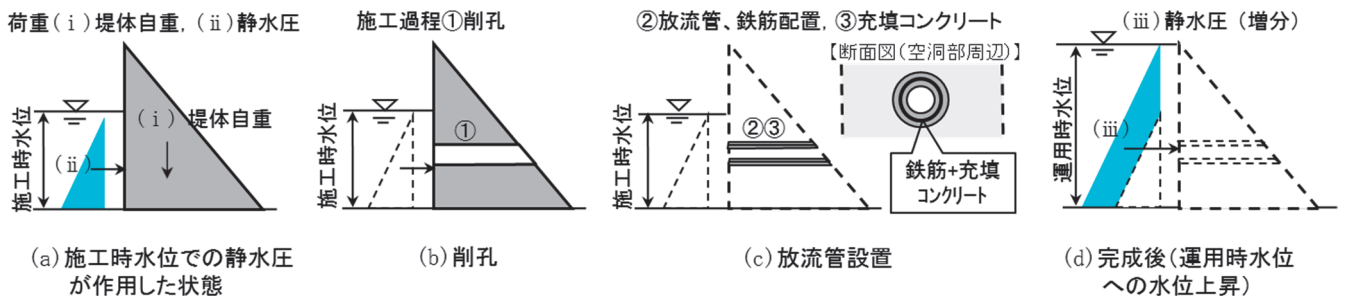
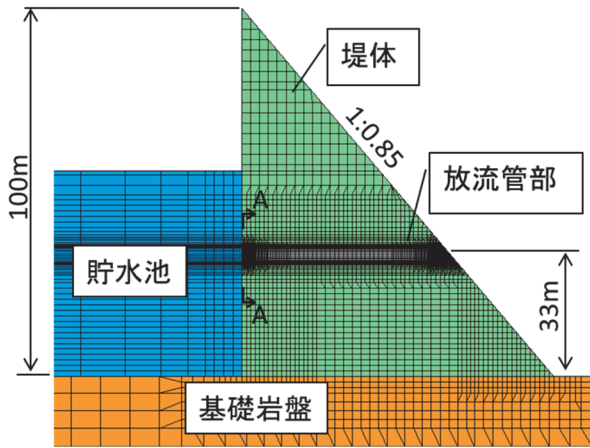
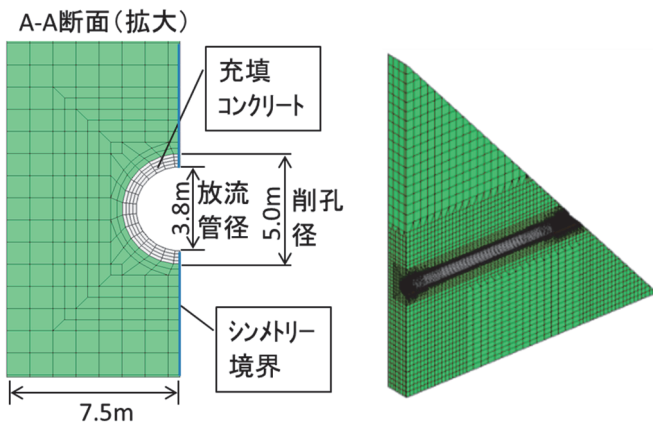


図-1 再開発（削孔）ダムの施工過程と荷重条件



(a) 上下流方向断面



(b) 堤体上流面放流管部 (拡大)

(c) 堤体部 (1/2 ブロック) 鳥瞰

図-2 解析モデル

その上で、運用中に大規模地震による地震動を受けた場合の動的挙動を線形動的解析および堤体コンクリートの引張軟化を考慮した非線形動的解析により推定した。大規模地震による地震動としては、ダムの耐震性能照査で用いられる下限加速度応答スペクトル（最大水平加速度300cm/s²）適合波を用いた。

3. 解析結果

非線形動的解析により推定される大規模地震時の引張軟化範囲を表-2の新設ダム（ケース1）と再開発（削孔）ダムのうち施工時水位を空虚としたケース2-1及び既設ダムの運用時水位のまま水位低下しないで施工するケース2-5について図-4に示す。同図より、引張軟化は放流管空洞部の側部に水平方向、上部に鉛直方向に生じる可能性があることがわかる。このうち側部の引張軟化領域は、堤体安定に影響を及ぼすおそれのある水平方

表-1 物性値一覧

モデル	堤体および 充填コンクリート	岩盤	鉄筋
密度(Kg/m ³)	2,300	2,300	
弾性係数 (N/mm ²)	25,000	25,000	200,000
ポアソン比	0.2	0.3	0.3
引張強度 (N/mm ²)	2.0	—	—
破壊エネルギー (N/m)	300(堤体) 90(充填)	—	—
引張軟化 構成則	2直線モデル ²⁾ により 図-3のとおり設定	—	—

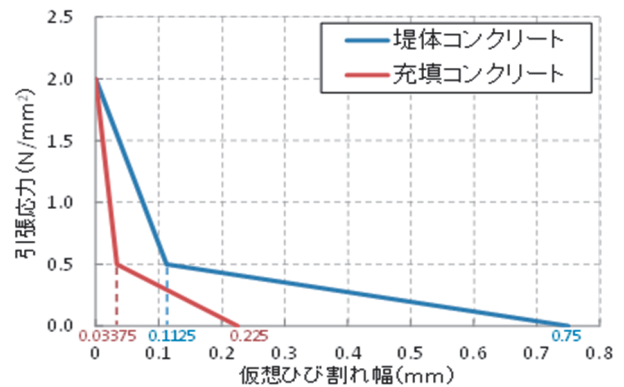


図-3 非線形解析における引張軟化構成則

表-2 解析ケース

モデル	ケース	水位	
		施工時 (m)	運用時 (m)
新設ダム	1	—	100
	2-1	0	〃
再開発(削孔)ダム	2-2	33	〃
	2-3	56	〃
	2-4	78	〃
	2-5	100	〃

向であるため注意が必要であるが、再開発（削孔）ダムのケースでは新設ダムに比べ上下流面から放流管に沿ってより内部まで発生する結果となっている。したがって、既設ダムに削孔して放流管を増設する場合には、放流管側部の引張軟化領域の進展に注意を払う必要があると考えられる。ただし、本検討条件では再開発（削孔）ダムの場合でも引張軟化領域は放流管設置ブロック内で上下流方向に連続するものとはなっておらず、堤体の安定性は確保されるものと考えられる。なお、上流側については引張軟化領域にひび割れが生じた場合に貯水が浸入して揚圧力が発生する可能性も考えられるが、本検討ではこのような揚圧力を考慮しても地震後で引張軟化領域が拡大しないことを確認している。また、図-4に示した削孔中の水位（施工時水位）が異なる条件（ケース2-1、2-5）

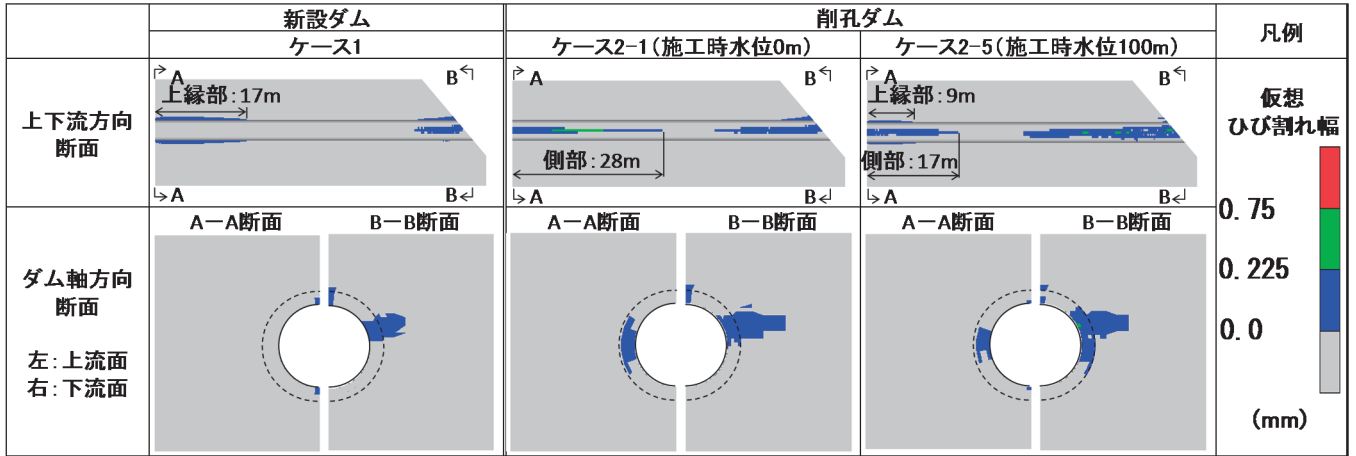
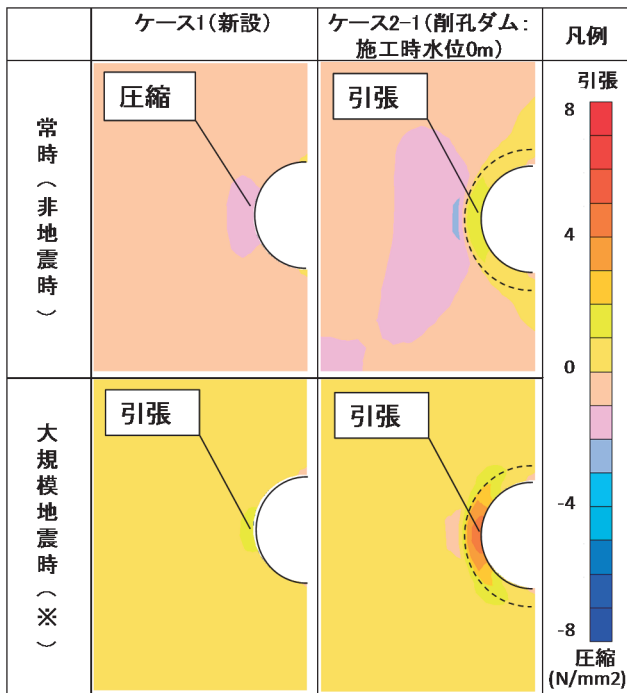


図-4 非線形解析による引張軟化範囲 (凡例の着色は図-3の引張軟化構成則による仮想ひび割れ幅)



※引張応力(最大主応力)の最大値発生時

図-5 放流管ブロック上流面の鉛直応力(線形解析)

で放流管沿いに上流側の側部に生じる引張軟化領域の範囲を比較すると、施工時水位を満水としたケース2-5(17m)より空虚としたケース2-1(28m)の方が広く(長く)なっている。

4. 考察

新設ダムと再開発(削孔)ダムの違いや再開発(削孔ダム)での施工時水位条件の違いにより、図-4の引張軟化範囲が異なってくる理由について、線形動的解析で得られた最大発生応力の分布により考察した。

4.1 施工過程の違いによる影響

新設ダム(ケース1)と再開発(削孔)ダム(ケース2-1)での相違について、常時(非地震時)

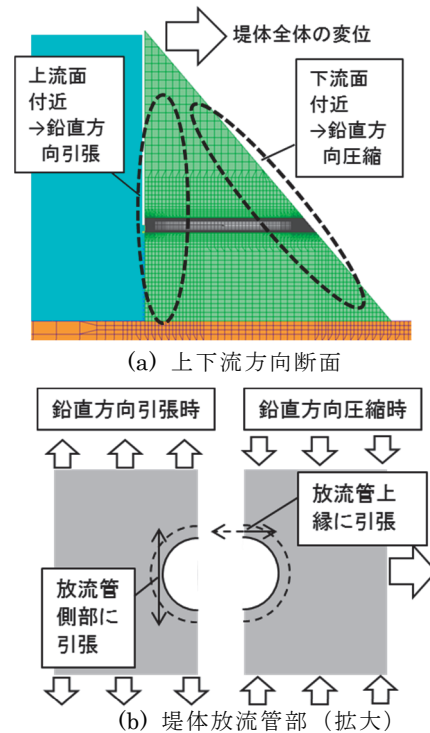


図-6 応力状態模式図

及び線形解析による大規模地震時の放流管上流面周辺の発生応力の分布を図-5に示す。

常時応力は、新設ダム(ケース1)の放流管側部では圧縮状態となっているが、再開発(削孔)ダム(ケース2-1)では既に引張応力が生じている。これは、再開発(削孔)ダムの場合、十分に硬化した既設堤体を削孔した後に充填コンクリートを施工することから、放流管周辺(充填コンクリート部)では応力再配分がほとんど生じず初期応力がほぼ無応力状態であるため、運用時の貯水位上昇に伴う静水圧の増加により図-6のように堤体上流端付近の放流管側部に鉛直方向の引張応力が集中しやすくなるためと考えられる。これにより、図-4に示す非線形動的解析でも新設ダムに比

べ引張軟化領域が広がったものと考えられる。
 なお、図-4の各ケースで発生している放流管下流側上縁部の引張軟化は地震時に堤体が下流側に変位した際に下流面側が鉛直方向に圧縮されることで発生する引張応力によるものと考えられる。

4.2 施工時水位の相違による影響

再開発（削孔）ダムで施工時水位条件が異なる各解析ケース（ケース2-1～2-5）での放流管上流端側部に発生する常時及び線形解析による大規模地震時の最大発生応力（最大主応力）の比較を図-7に示す。同図より、施工時水位が放流管設置標高よりある程度高くなると、常時、地震時とも発生応力が減少することがわかる。これより、施工

中の放流管設置標高より上部の貯水による静水圧が放流管周辺の初期応力（最大主応力）を低減させる効果があると考えられる。図-4において施工時水位を空虚とした場合（ケース2-1）の方が満水とした場合（ケース2-5）より放流管上流側側部の引張軟化領域が広がったのはこのためと考えられる。

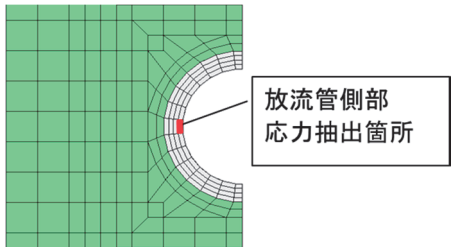
5. まとめ

既設ダム堤体を削孔して放流管を増設する再開発ダムでは、同一内径の放流管を有する新設ダムに比べ、大規模地震時に放流管側部の引張応力が大きくなり、ひび割れ範囲が広がる可能性がある。また、再開発（削孔）ダムの放流管側部の発生応力は施工時水位の影響を受ける。これらことから、再開発（削孔）ダムの耐震性能照査は、新設ダムとは異なる図-1に示すような施工過程や施工中の水位条件を考慮して行う必要があると考えられる。なお、実際の削孔工事では、放流管設置標高より高い貯水位を維持して施工する場合、放流管上流端をドライにするため、仮締切を設置して施工が行われる。本検討では仮締切による荷重条件への影響は考慮していないが、実ダムでの解析では必要に応じて考慮するのが良いと考えられる。

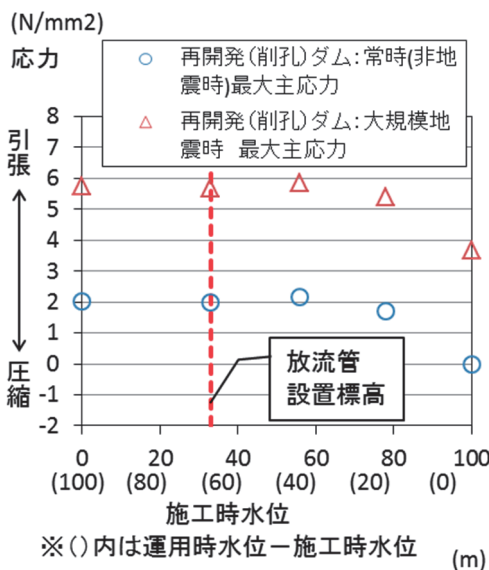
今後は、これらの知見を再開発ダムの耐震性能照査や設計上の留意点として取りまとめていく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）、2005.3
- 2) 公益社団法人土木学会、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]、pp.37～38、2013.3



(a) 放流管側部応力抽出箇所



(b) 抽出箇所での最大主応力

図-7 施工時水位と放流管上流端側部応力の関係

藤田将司



土木研究所水工研究グループ
 水工構造物チーム 主任研究員
 Masashi FUJITA

金銅将史



土木研究所水工研究グループ
 水工構造物チーム 総括主任研究員
 Masafumi KONDO

榎村康史



土木研究所水工研究グループ
 水工構造物チーム 上席研究員
 Yasufumi ENOMURA