

◆特集：既設ダム有効利用のための技術開発◆

重力式コンクリートダム堤体への増設放流管の補強鉄筋効果に関する検討

佐々木 隆* 金縄健一** 高藤 啓*** 山口嘉一**** 倉橋 宏*****

1. はじめに

ダムの効率的利用を目的としたハード技術的な再開事業としては、貯水容量を増やすための既設堤体の嵩上げ、貯水容量の有効利用を目的とした放流設備の更新や増設があげられる。放流設備は、ダム建設当初の貯水池運用計画に基づいて計画、設置されるため、貯水池運用計画の変更により、既存の設備で対応できない場合には、計画の変更に合わせて更新や増設を行う必要がある。

既設の重力式コンクリートダムに大規模な放流設備を増設する場合、設計の基本的な考え方、方法は新設設備と同様であるが、増設する堤体内への補強用鉄筋の配筋が困難という制約がある。そのため、新たに出現する堤体内空洞が既設堤体に及ぼす構造的な影響の評価と対応が必要になる。

既設ダムに放流管を増設する場合、設置する放流管より大きな開口部を設け、放流管設置後、既設ダム堤体に堤体自重および水圧荷重による応力が発生した状態で、放流管と開口部の空隙がコンクリートにより充填される。これは、ダムを運用しながら施工する関係上、水位が十分に下げられず、水圧荷重がかかっていることが多いためである。その際、新規にダムを建設する場合と同じような考え、つまり放流管径と同幅の空洞部があると仮定して求めた放流管周辺の引張応力を対象に、充填コンクリート内に配筋する補強鉄筋量の設計を行っている事例が多い。しかし、既設堤体と充填コンクリートの応力状態の違いから、既設ダムに放流管を増設する場合の放流管周辺発生応力は新設ダムのそれと比較して、引張応力発生箇所や発生応力値が大きく異なる¹⁾。そこで放流管を既設堤体へ増設する場合について、その施工手順を考慮した3次元有限要素解析による検討に基づいて増設放流管の空洞周辺の応力特性と補強鉄筋の

効果を検討した。さらに大規模地震による荷重も考慮したうえで、補強鉄筋量の合理的な決定方法の一提案を行った。

2. 検討方法

2.1 概要

重力式コンクリートダムに設置される放流管の周辺応力は3次元的な分布となるが、コンクリートを線形弾性体として考えた場合には、放流管を増設する場合でも、2次元解析によって応力状態を評価できる²⁾。しかし、本報告では、堤体コンクリートのひび割れの影響に加えて、さらに補強鉄筋の効果を詳細に検討するため、解析手法として3次元有限要素解析を用いて検討を実施した。

2.2 解析モデル

2.2.1 検討対象モデル

検討対象として、堤高100mの重力式コンクリートダム（上流面鉛直、下流面勾配1:0.85）を想定した。図-1に示すように、施工手順は施工時に水位を維持した状態で、開口径5.0mで水平に削孔し、その中に3.8m径の放流管を設置後、放流管と削孔された空洞との間の空隙をコンクリートにより充填し、その後貯水位を運用水位に上昇させる段階までを一連の施工手順と考えた。放流管増設の施工手順を考慮した3次元有限要素法での解析手順を図-2に示す。

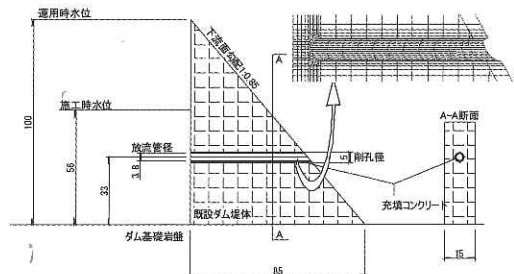


図-1 対象ダムの規模・開口部諸元 (単位:m)

Study on Effectiveness of Re-Bars around Conduit Pipe Installed in Existing Concrete Gravity Dam

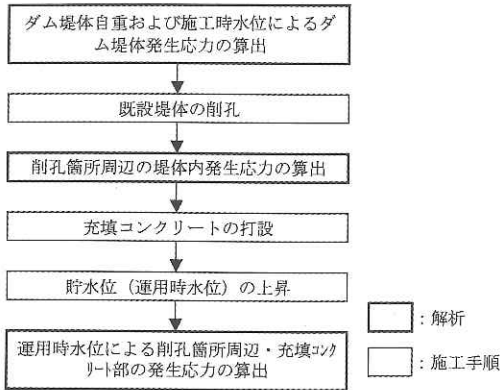


図-2 3次元有限要素解析検討フロー

2.2.2 コンクリートの引張破壊のモデル化

放流管周辺の応力状態を考慮すると、堤体コンクリートのひび割れの発生箇所は放流管上下部および側部と予測される。このため、図-3に示すように、これらの位置に二重節点およびそれらを繋ぐ非線形バネ要素を配置し、コンクリートの引張破壊を考慮することとした。引張破壊に関して、コンクリートの引張強度は考慮したが、破壊エネルギーおよび引張軟化特性は考慮していないため、ひび割れの規模が大きく評価される解析となっている。鉄筋は軸力のみが発生するロッド要素を用いてモデル化した。

2.2.3 材料物性値

解析に使用した材料物性値を表-1に示す。堤体コンクリートと充填コンクリートには同じ物性を与えた。表-1に示した各材料物性は、ダムに用いられる一般的な材料を想定して設定したものである。放流管の周辺には相対的に強度が大きい構造用コンクリートを配すが、その厚さは薄いため、安全側の設定として、堤体部は全て内部コン

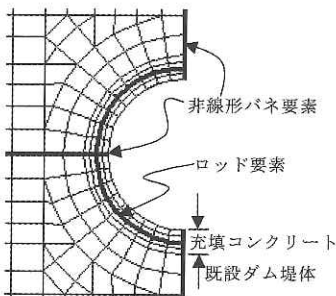


図-3 各要素の配置位置

表-1 解析に用いた材料物性値一覧

要素種類	物性値	記号	設定値
ソリッド要素 (コンクリート)	弾性係数	E	25,000MPa
	ポアソン比	ν	0.2
	単位容積質量	γ	2.3t/m ³
ソリッド要素 (岩盤)	弾性係数	E	2,500MPa
	ポアソン比	ν	0.2
非線形バネ要素 (ひび割れ部)	垂直バネ剛性	K _n	25,000MPa
	せん断バネ剛性	K _s	10,417MPa
	引張強度	f _t	1.0MPa
ロッド要素 (鉄筋部)	断面積	A	0.006m ² /m
	弾性係数	E _s	200,000MPa
	ポアソン比	ν_s	0.3

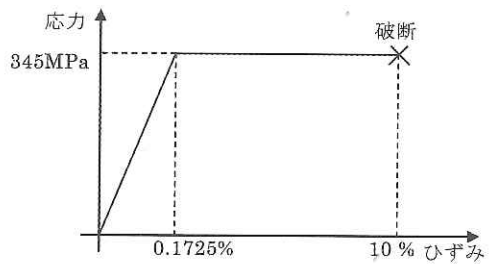


図-4 鉄筋の応力ひずみ関係模式図

クリートを想定している。また、引張強度については、その強度のばらつきが大きいことを考慮して、一般のダムコンクリートの試験値の半分程度の値を設定した。なお、モデル化した鉄筋量は新設ダムの設計手法(新設ダムと同じ放流管径の空洞を設けた場合に発生する引張力を全て鉄筋で受け持つものとして、設計震度0.15で鉄筋量を設定)に基づき設定したものである。なお、鉄筋についてはSD345を想定し、図-4に示す鉄筋の応力ひずみ関係を仮定して解析を実施した。

3. 検討ケース及び検討結果

本報文では以下の1) から3) の検討を行った。検討条件は表-2に示すような条件である。

- 1) コンクリートの引張破壊を考慮した場合の放流管周辺のひび割れ状況・応力特性
- 2) 充填コンクリート内に配置する鉄筋の補強効果
- 3) 大規模地震が堤体に作用した場合における鉄筋の補強効果

表-2 各検討項目における基本条件

検討ケース	引張破壊	鉄筋	地震力
1)	考慮	無し	震度法 $k=0.15$
2)	考慮	有り	震度法 $k=0.15$
3)	考慮	有り	修正震度法 (放流管が無い堤体の上流面に引張強度を超える引張応力が発生する規模の慣性力、天端震度1.42)

3.1 コンクリートの引張破壊を考慮した場合の放流管周辺のひび割れ状況・応力特性に関する検討

放流管周辺のコンクリートに引張破壊（ひび割れ）が生じた場合の応力状況およびひび割れ長さを把握するため、コンクリートの引張強度を1MPaとした非線形解析を実施した。この結果をコンクリートに引張破壊を生じさせない場合と比較して、応力特性がいかに変化するかを評価する。なお、図-3に示したようにコンクリートのひび割れの発生は、放流管上下部および側部のみで考慮している。

今回設定したコンクリートの引張強度では、図-5、図-6に示すように、放流管上流側で削孔時に放流管上下に0.5mのひび割れが発生した。その後、充填コンクリート施工後に水位上昇させると、充填コンクリート側部においてひび割れが発生（0.6m）するが、既設ダム堤体に生じていた上下部のひび割れは進展することがなかった。また、充填コンクリートに発生した側部ひび割れが既設堤体へ延伸することもなかった。なお、ひび割れの上下流方向長さでは、充填コンクリート側部に発生したひび割れは上流面から25mの深さまで進展しているものの、既設堤体までひび割れが達していない。削孔時に生じた放流管上下部のひび割れは上流側10m程度にとどまった。

上流面において放流管上下方向にひび割れが生じた部分の水平直応力 σ_y 分布を図-7に示す。ここで、応力は引張側を正で表記している。図中、塗り潰し記号は、コンクリートの引張破壊を考慮しない線形解析、白抜き記号は引張破壊を考慮した非線形解析の結果である。非線形解析結果における空洞直近傍の堤体削孔時のひび割れ領域では、引張破壊を考慮しない線形解析結果に比べ、著しく応力が低下している。そして、ひび割れよりも

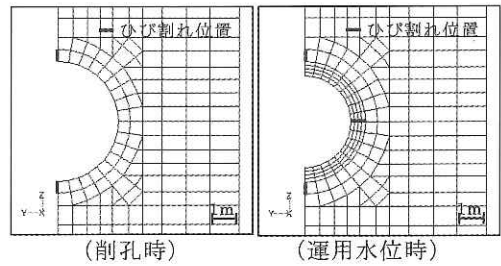
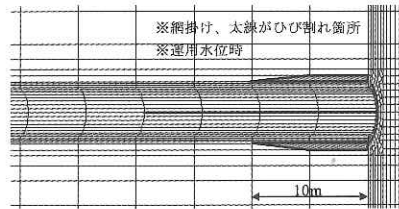
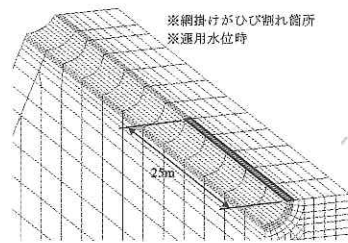


図-5 上流面ひび割れ位置（鉄筋無し：震度法）

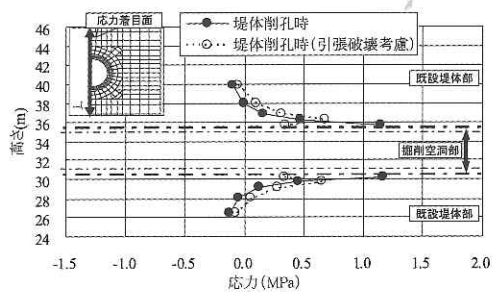


(a) 放流管上下部（上流端）

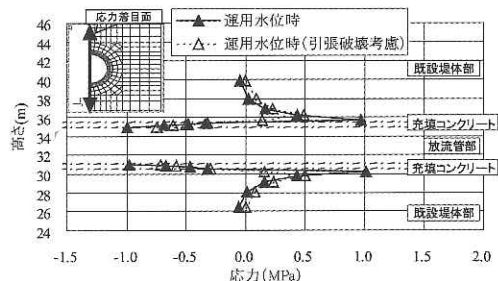


(b) 放流管側部

図-6 上下流方向ひび割れ位置（鉄筋無し：震度法）



(a) 堤体削孔時



(b) 運用水位時

図-7 上流面上下方向の水平応力 σ_y 分布

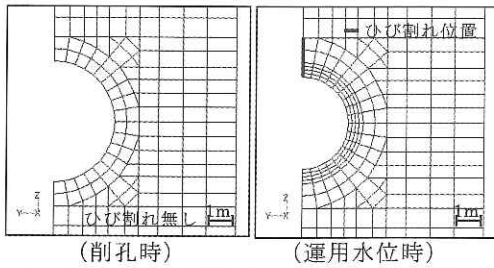


図-8 下流面ひび割れ位置 (鉄筋無し：震度法)

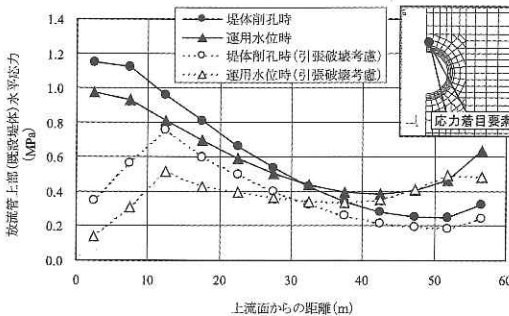


図-9 放流管上部水平応力 σ_y 上下流方向分布

深部のコンクリートは引張応力が増加している。しかし、水位上昇後の充填コンクリート部の応力は、ひび割れの有無にかかわらず圧縮領域であり、また、深部の既設堤体に発生している引張応力の水位上昇後の増加量はそれほど大きくない。そのため、施工時に発生する上下方向ひび割れは、運用水位時に進展しにくいことがわかる。

次いで、放流管下流端（上流端から下流約52.5mに位置する）におけるひび割れ発生位置を図-8に示す。堤体削孔時にはひび割れは発生しないが、運用水位時に放流管上部に1.6mのひび割れが発生する。また、放流管上下部のひび割れは下流端から10mほど上流まで延伸している。さらに、放流管下部では下流面でのひび割れは発生しないが、堤体内部では僅かなひび割れが発生する。

さらに、放流管上部における水平応力 σ_y の上下流方向分布を図-9に示した。図より、ひび割れが発生した上流側に近い要素では、線形解析結果より発生応力が大幅に、かつ低下し、さらに全体分布も低下しており応力開放の影響が全体に渡って波及していることがわかる。

3.2 充填コンクリート内に配置する鉄筋の補強効果に関する検討

鉄筋を考慮した非線形解析により、充填コンクリート内に配置した鉄筋によるコンクリートのひ

表-3 線形解析で発生する引張力を全て鉄筋が受け持つと仮定し算出した鉄筋の引張軸応力

位置	上流端 (MPa)	下流端 (MPa)
上部 σ_y	246	550 ^{※1}
下部 σ_y	250	293
側部 σ_z	394 ^{※1}	-

※1：SD345を想定した場合、鉄筋の降伏強度を大幅に超えているが、仮に鉄筋が全ての引張応力を受け持った場合の値として表示した。

※2：網掛けがひび割れ発生位置。

び割れ抑制効果について検討する。この結果より、ひび割れ長さおよび鉄筋に作用する軸応力の観点から、鉄筋のひび割れ抑制効果の評価を行う。

コンクリート内に鉄筋を配置した場合について、堤体上流側のひび割れは、鉄筋が無い場合のひび割れ位置と一致した。

また、ひび割れ領域の放流管上下部における水平方向応力分布 σ_y および側部の鉛直方向応力分布 σ_z は、鉄筋の有無で充填コンクリート内の応力値に僅かな差があるものの、両者ともほとんど同様の応力分布となった。

一方、下流側のひび割れ位置では、鉄筋が無い場合には放流管上部のひび割れが10m程度上流へ延伸していたのに対し、鉄筋が有る場合には5m程度まで低減し、下流側においては鉄筋の補強効果が発揮される。

表-3に、ひび割れを考慮しない線形解析において、放流管周辺に発生する引張応力を鉄筋が全て受け持つと仮定して算出した鉄筋の軸応力を示す。ひび割れの発生した上流端側部 σ_z と下流端上部 σ_y は、それぞれ394MPa、550MPaとなっている。しかし、鉄筋が有る場合では、これらと同じ箇所の鉄筋に作用している軸応力はそれぞれ58MPa、23MPaであり、上述の応力の15%および4%に過ぎない。これは、放流管周辺の応力は、その開口部からある程度以上離れると堤体全体の応力（圧縮領域）が支配的となり、放流管周辺のひび割れは開口幅が広がらず、結果としてそこに配置された鉄筋にも小さな引張力しか作用しないことが原因である。

以上の結果より、充填コンクリート内に配置した鉄筋は、ひび割れの抑制に対し若干の効果があるものの、設計で期待しているほどの引張力は作用していないことがわかる。

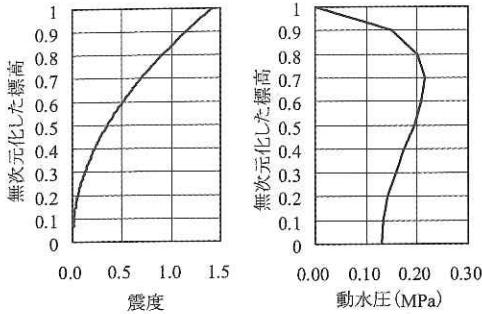


図-10 堤体震度および動水圧の鉛直方向分布

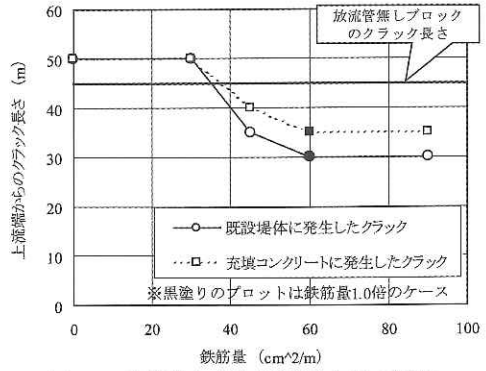


図-11 鉄筋量と水平ひび割れ長さの関係

3.3 大規模地震が堤体に作用した場合における鉄筋の補強効果に関する検討

大規模な地震を想定したダムの耐力に着目して鉄筋の補強効果を評価する。地震力については修正震度法^{3),4)}で与えることとした。修正震度法によって下流向きの地震力を増加させたところ、放流管が無い堤体において天端震度1.42で水平ひび割れが発生した。そこで、この震度を以降の検討で用いている。堤体の震度及び動水圧は図-10に示すとおりである。この結果より、上下流方向の水平ひび割れ長さや鉄筋量との関係を整理するとともに放流管が無いブロックでのひび割れ長さやと比較し、鉄筋の補強効果について評価を行った。

3.2での検討結果から、鉄筋による補強効果はそれほど大きくないとの評価が得られた。しかし、これはあくまで設計時に考慮する荷重に対してのみを考慮した評価である。荷重として不確定的要素が大きく、実際は設計時より大きく作用する可能性がある地震力に着目し、これによって堤体上流面から水平ひび割れが発生した場合について、鉄筋量の変化が与える水平ひび割れ延伸長さへの影響を検討した。

なお、「2. 検討条件」で述べたように、今回の検討ではコンクリートの引張破壊後の軟化領域を考慮していないため、ひび割れ長については、絶対値としてではなく相対的な値の関係として捉えることが適当である。

上流端から下流側へ測った水平ひび割れの長さ(運用水位時)は、放流管が無い場合(鉄筋も無し)には45m、放流管があり鉄筋は無い場合には50m、放流管があり鉄筋もある場合(基本とした鉄筋量)には35mとなった。放流管という空洞部が堤体に存在することで、堤体が相対的に弱い構

造となっていることを意味している。一方、鉄筋で補強されたケースを見ると、ひび割れ長さ約30%抑制される結果となった。

鉄筋による補強効果について、鉄筋量を変えて解析を実施し、鉄筋量と水平ひび割れ長さの関係を求めたものを図-11に示す。

図より、鉄筋量が30cm²/m(当初の0.5倍)を越えた後にひび割れ長さが減少し始め、鉄筋量60cm²/m(当初の1.0倍)まで徐々に減少するものの、それ以上鉄筋量が増えてもひび割れ長さには影響しないという結果が読みとれる。さらに、放流管無しブロックと比較すると、鉄筋量45cm²/m(当初の0.75倍)で、放流管無しブロックより短いひび割れ長さとなっている。

以上より、次のことが考察できる。

- ・鉄筋量を増やすことでその補強効果は増大する。しかし、鉄筋量が一定量以上になるとその伸びは期待できない。
- ・放流管増設堤体が放流管無し堤体と同等の強さ(ひび割れ長さ)を有するための鉄筋量を必要最小限の鉄筋量と考えれば、現行設計法での鉄筋量を数割程度削減できる可能性がある。

なお、鉄筋量が0~30cm²/mの間で一定のひび割れ長さとなっているが、これは鉄筋が破断してひび割れ抑制効果が減じられたことが原因である。

上述の検討では、大規模地震による下流向きの慣性力(堤体慣性力、動水圧)を想定し、これによって発生する上流からの水平ひび割れに着目して、鉄筋量削減の可能性があることを示した。これに対し、上流向きの慣性力が作用した場合、上流側の放流管上下方向鉛直ひび割れの進展が懸念

されるが、鉄筋が無い場合でもこれらのひび割れはそれほど延伸しなかった。堤体の3次元性を考慮すると、上流面における放流管上下方向の鉛直ひび割れが延伸するためには、同時に奥行き方向(下流方向)にもひび割れが延伸しなければならない。逆に言えば、上流面でのひび割れ延伸を、その奥行き方向のコンクリートが抑えている状況にあると言え、これが、ひび割れが大きく延伸しない一因と思われる。

4. まとめ

既設堤体への放流管増設に関する検討により得られた知見を以下にまとめる。

放流管の増設手順を考慮した検討を行った結果、現行設計法において考慮している荷重条件では、鉄筋の補強効果は小さく、その有無によってひび割れの延伸長さおよび応力状態に大きな差が生じないことがわかった。なお、現行設計法における荷重下でのひび割れ規模は、コンクリートの引張強度を一般的な試験値の半分程度に設定した場合でも非常に小さく、構造安定性上影響を及ぼすものではないと考えられる。

しかし、その必要性が重要視されている大規模地震への対応を想定し、現行設計法で考慮する地震荷重よりも大規模な地震荷重を作用させた場合を考えると、堤体の安定性に最も影響が大きいと考えられる放流管側部水平ひび割れに対して、鉄筋が比較的大きな補強効果を有することが確認でき、また水平ひび割れ長さの延伸抑制に対し効率的な鉄筋量が存在することが明らかとなった。個々のダムの放流管増設における条件に左右されるが、今回の検討結果は、水平ひび割れを放流管

の無いブロックと同程度に抑えるという構造性能を設定することで鉄筋量を削減できる可能性があることを示している。

参考文献

- 1) 木藤賢一、佐々木 隆、金縄健一、石橋正義、山口嘉一：既設ダムへの放流設備増設に伴う堤体開口部周辺の応力特性に関する一考察、第58回土木学会年次学術講演会講演概要集、IV-313、2003.9
- 2) 木藤賢一、佐々木 隆、金縄健一、石橋正義、山口嘉一：既設ダムへの放流設備増設時の放流管周辺のひび割れ発生状況に関する検討、第59回土木学会年次学術講演会講演概要集、IV-196、2004.9
- 3) 永山 功、田中 靖、村岡基晴：コンクリートダムの耐震設計法に関する考察、土木技術資料、Vol.29、No.9、1987.9
- 4) 永山 功、自閑茂治：重力ダムの動的挙動特性とその簡易設計法、大ダム、No.119、1987.3

佐々木 隆*



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総括主任研究員、工修
Takashi SASAKI

金縄健一**



国土交通省河川局河川計画課河川情報対策室河川情報係長(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研究員)
Kenichi KANENAWA

高藤 啓***



(株)建設技術研究所九州支社ダム部(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、工修)
Kei TAKAFUJI

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

倉橋 宏*****



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
Hiroshi KURAHASHI