

◆ 報 文 ◆

# 既設ダムへの放流管増設時の堤体応力特性

佐々木 隆\* 金縄健一\*\* 石橋正義\*\*\* 山口嘉一\*\*\*\* 木藤賢一\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

ダムの効率的な利用の観点から、新規ダムの建設に加え、既設のダムの貯水池を有効に活用することが望まれている。既設ダム貯水池の効率的利用を目的とした再開発技術としては、ダム堤体嵩上げによる貯水容量の増大、放流設備等の改造・新設による貯水池運用の変更、複数ダム連携による貯水池運用などが考えられる。その中で、放流設備の改造・新設により貯水池運用を変更させる場合には、既設ダム堤体を削孔し、新たに放流管の新設が行われる事例が少なくない。既設ダムへの放流管増設を実施した国土交通省関東地方整備局の重力式コンクリートダムである五十里ダムの断面を図-1に、既設ダム堤体の削孔状況を写真-1に示す<sup>1)</sup>。

既設ダム堤体を削孔し、放流管を増設する場合には、施工時および運用時に空洞部周辺のコンク

リートに発生する引張応力に対する安全性を確認することが必要となる。特に、放流管増設箇所が堤体の下部となると、空洞部周辺には大きな引張応力が発生し、堤体コンクリートにひび割れが発生する可能性がある。

重力式コンクリート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径の削孔を行い、放流管設置後、既設ダム堤体には堤体自重および水圧荷重による応力が発生した状態で、放流管と削孔箇所の空隙をコンクリートにより充填する。この際、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鉄筋量の設計を行っている事例が多い。しかし、既設ダムに放流管を増設する場合の放流管周辺の発生応力は、新設ダムの放流管周辺に発生する応力と比較して、引張応力発生箇所や発生応力値が異なることが予想される。そこで、放流管増設時の合理的な設計方法の提案を目的として、放流管増設の際に放流管周辺の堤体コンクリートに発生する応力特性に関する検討を進めてきている。ここでは、その結果の一部を報告する。

## 2. 解析方法

### 2.1 検討項目

#### (1) 既設堤体および充填コンクリートに発生する応力特性

既設堤体に放流管を増設する場合、新規に建設されたダムと比較して、放流管周辺部コンクリートに発生する応力が異なると思われる。そこで、放流管を増設する際の施工手順を考慮した場合の放流管周辺の既設堤体および充填コンクリートに発生する応力特性について検討を実施した。

#### (2) 施工時水位による影響

施工時水位により、放流管周辺コンクリートに発生する応力は変化する。そこで、施工時水位の影響について把握するため、施工時水位を変えた場合の放流管周辺部コンクリートに発生する応力特性について検討を実施した。

#### (3) 充填コンクリート内に配置される鉄筋の効果

既設堤体に放流管を増設する際、比較的狭い空間である充填コンクリート部に配置される鉄筋が複雑に入り組むため、施工時には多大な苦勞を伴っている。そこで、鉄筋の効果を評価する解析を行い、その結果に基づいて鉄筋配置の合理化の可能性について検討を実施した。

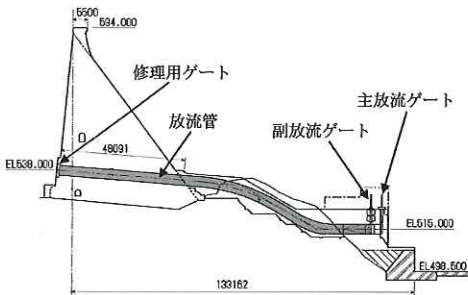


図-1 放流管増設した五十里ダムの断面



写真-1 既設ダム堤体の削孔状況 (五十里ダム)

2.2 解析条件

解析モデルは図-2に示すように、堤高100mの重力式コンクリートダム1ブロック(幅15m)を切り出した三次元モデルである。施工時水位を56m(基本ケース)とした状態で、堤体底部からダム堤高の1/3(33m)の位置に、径5.0mで削孔し、管径3.8mの放流管を設置後、空隙をコンクリートにより充填するという施工手順を想定した。また完成後、貯水位を運用時水位に設定した100mまで上昇させることとした。

(1) 既設堤体および充填コンクリートに発生する応力特性

三次元有限要素法解析により、施工手順を考慮して、既設堤体の削孔箇所周辺および充填コンクリートに発生する応力を算出した。図-3に検討フローを示す。まず、ダム堤体の自重と施工時水位による静水圧を考慮してダム堤体内発生応力を算出する。次に、径5mで削孔し、削孔箇所周辺の堤体内発生応力を算出する。最後に、厚さ0.6mの充填コンクリートを打設し、貯水位を運用時水位に上げて、既設堤体の削孔箇所周辺および充填コンクリート部の発生応力を算出する。解析に用いた材料物性を、表-2に示す。考慮した荷重は、堤体自重および静水圧である。

(2) 施工時水位による影響

(1)と同様の解析条件により、施工時水位のみを空虚(0m)、放流管設置高さと同放流管設置位置と堤頂を三等分した高さ(33、56、78、100m)と変化させて解析を実施した。

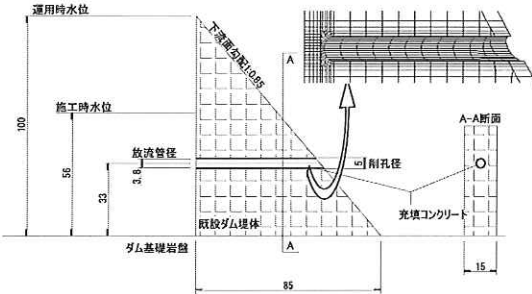


図-2 モデルダムの規模・削孔箇所の諸元(単位:m)

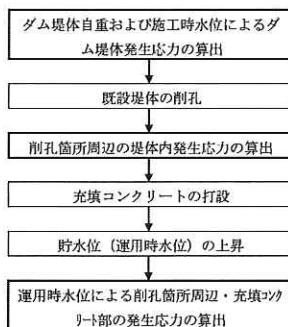


図-3 三次元有限要素法解析検討フロー

(3) 充填コンクリート内に配置される鉄筋の効果  
コンクリートの引張応力によるひび割れ発生および鉄筋設置を考慮した二次元有限要素法解析により解析を実施した。

解析にあたっては、ダム軸方向に直交する二次元断面モデルにて発生する鉛直応力を求め、ダム軸方向の二次元断面モデルの初期応力として与え、空洞部に相当する要素を削除することにより応力解を求める手法<sup>2)</sup>を応用した。

また、コンクリートのひび割れはジョイント要素で考慮することとし、ジョイント要素に発生する引張応力が引張強度を超えた場合、ただちに開口することとした。配置位置については、コンクリートへのひび割れ発生が予想される鉛直および水平方向とした。また、鉄筋は軸力のみが発生するロッド要素として考慮した。ジョイント要素およびロッド要素の配置位置を図-4に、解析に使用した材料物性を表-3に示す。考慮した荷重は、堤体自重、静水圧である。なお、モデル化した鉄筋量(面積)は一般的に行われる設計手法(設計震度を0.15とし、新設ダムと同じ放流管径の空洞を設けた場合に、空洞部周辺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)に基づき設定した。

3. 解析結果

(1) 既設堤体および充填コンクリートに発生する応力特性

図-5に削孔時における既設堤体削孔箇所周辺

表-2 解析に用いた材料物性値一覧

対象箇所	物性	設定値
堤体部 (充填コンクリート部を含む)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	25,000
	ポアソン比	0.2
	単位体積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	2.3
岩盤部	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	2,500
	ポアソン比	0.2

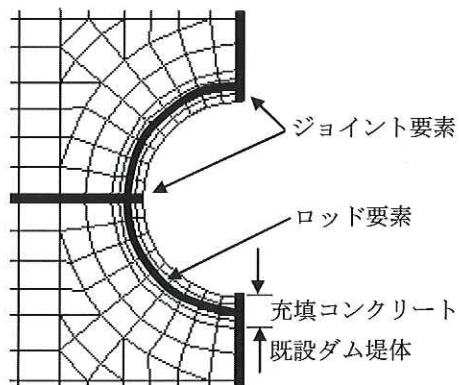


図-4 各要素の配置位置

表-3 解析に使用した材料物性値一覧

対象箇所	要素種類	物性	設定値
堤体部 (充填コンクリート部を含む)	平面要素	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	25,000
		ポアソン比	0.2
		単位体積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	2.3
岩盤部	平面要素	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	2,500
		ポアソン比	0.2
引張破壊箇所	ジョイント要素	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1.0
鉄筋部	ロッド要素	断面積 (m <sup>2</sup> )	0.006
		弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	200,000
		ポアソン比	0.3

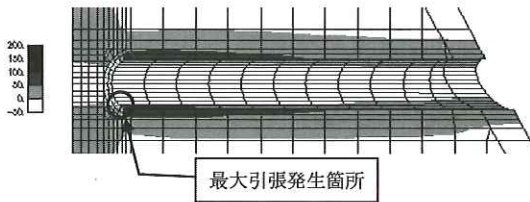


図-5 既設堤体削孔箇所周辺の水平応力分布 (削孔時) (単位:  $\times 10^{-2}$  N/mm<sup>2</sup>)

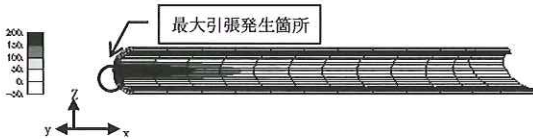


図-6 充填コンクリート部の鉛直応力分布 (運用水位時) (単位:  $\times 10^{-2}$  N/mm<sup>2</sup>)

のダム軸方向の直応力 (以下、水平応力という) 分布を、図-6に充填コンクリート部の鉛直方向の直応力 (以下、鉛直応力という) 分布を示す。なお、応力は引張応力を正值とする。これらの図より、削孔箇所周辺においては、削孔時に既設堤体削孔箇所下部にて水平応力の最大引張応力が発生する。また、充填コンクリート部については、打設後から運用開始までは無応力状態とされているが、運用水位時に充填コンクリート側部にて鉛直応力の最大引張応力が発生することがわかる。

そこで、図-7に示すように応力の着目点として、既設堤体削孔箇所下部、充填コンクリート側部の要素に着目し、水平応力および鉛直応力のダム上下流方向に沿った分布を図-8、図-9に示す。図-8より、既設堤体の削孔箇所周辺では、上流面付近にて運用水位時ではなく削孔時に引張応力の最大値が発生していることがわかる。図-9より、充填コンクリート部では、上流面付近にて運用水位時に引張応力の最大値が発生していることがわかる。

次に、上流面付近に着目して引張応力分布特性

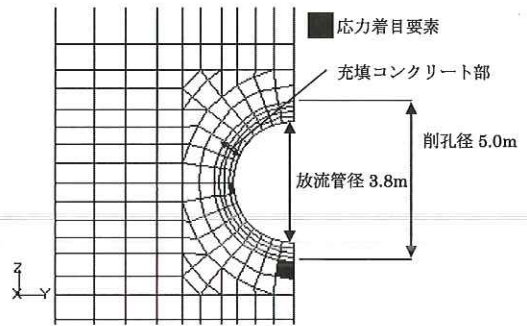


図-7 応力の着目位置

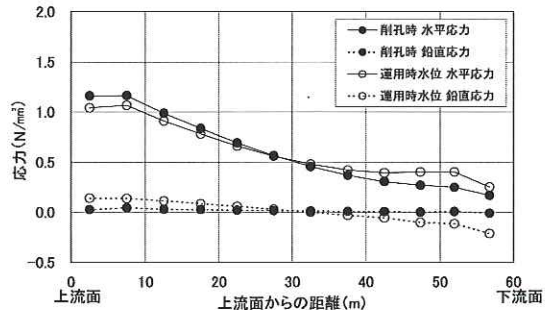


図-8 既設堤体削孔箇所下部の応力のダム上下流方向に沿った分布

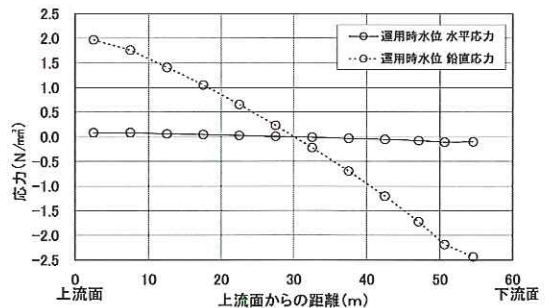


図-9 充填コンクリート側部の応力のダム上下流方向に沿った分布

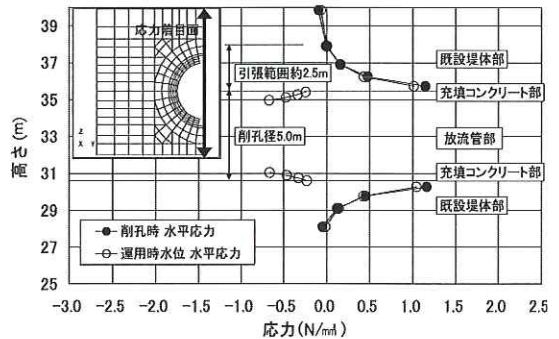


図-10 水平応力の鉛直方向に沿った分布 (上流面)

を把握するため、上流面を構成する要素（以下、上流面という）における水平応力の鉛直方向に沿った分布（削孔部中心を通る面において）を図-10に、鉛直応力のダム軸方向に沿った分布（削孔部中心を通る面において）を図-11に示す。図-10より、既設堤体削孔箇所周辺の引張応力は、削孔径の1/2（2.5m）の範囲で発生していることがわかる。また、充填コンクリートがあるにもかかわらず、運用水位時における既設堤体内の引張応力の値は、削孔時より大きくは低減していないことがわかった。図-11より、放流管周辺部側部における引張応力は、充填コンクリート部全域にわたり発生するが、隣接する既設堤体側は大きな圧縮応力が発生している領域であることがわかる。

(2) 施工時水位による影響  
前項にて着目した2箇所以外に、下流面の削孔箇所上部の要素（図-12に示す2箇所の応力着目位置）の水平応力にも比較的大きな引張応力が発生したため、図-5、6での着目箇所とあわせて計4要素に着目して、施工時水位を変化させた場合の応力変化を図-13および図-14に示す。

図-13より、既設堤体の削孔箇所付近では、運用時水位100mに対して施工時水位が0m～78mの範囲までは、削孔時に、上流面の削孔箇所下部において、最大引張応力が発生する。この範囲での最大引張応力の発生は、施工時水位が56mのときであり、施工時水位が上昇するに従いこの引張

応力は減少するが、施工時水位が低下してもほとんど変化しない。一方、施工時水位が100mの場合は、下流面の削孔箇所上部にて、最大引張応力が発生する。

図-14より、充填コンクリート部では、上流面の充填コンクリート側部にて、施工時水位が56mのとき、最大引張応力が発生する。この位置での引張応力は、施工時水位が上昇するに従い急激に減少するが、施工時水位が低い範囲では、施工時水位が低下してもほとんど減少しないことがわかる。

(3) 充填コンクリート内に配置される鉄筋の効果  
①下流面付近  
別途実施した解析により、今回設定したコンクリートの引張強度の条件では、充填コンクリート内の鉄筋の有無にかかわらず、下流面では、水位上昇後も引張応力によるひび割れが発生しない結果となった。そこで、下流向きに震度0.15の慣性力および動水圧を作用させた。なお、地震時慣性力はWestergaardの式により考慮した。図-15は、鉄筋を配置した場合と配置しない場合のひび割れ発生状況を示す。図より、鉄筋を配置しない場合は、放流管上部で放流管壁から1.1m、放流管下部で2.4mのひび割れが発生したが、鉄筋を配置した場合にはひび割れは発生しなかった。

既設ダムへの放流管増設時に充填コンクリート内に鉄筋を配置した場合としない場合の、水平応力の鉛直方向に沿った分布（削孔部中心を通る面

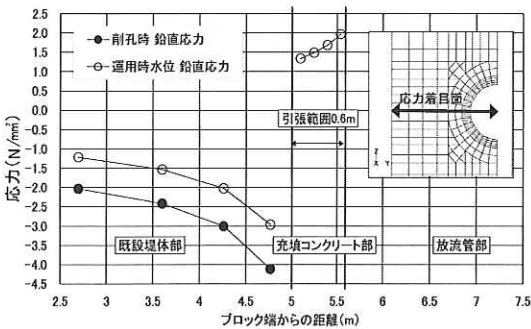
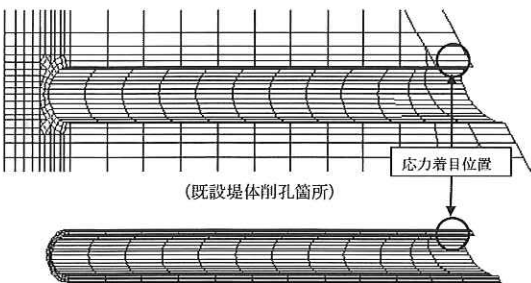


図-11 鉛直応力のダム軸方向に沿った分布 (上流面)



(充填コンクリート部)  
図-12 応力の着目位置

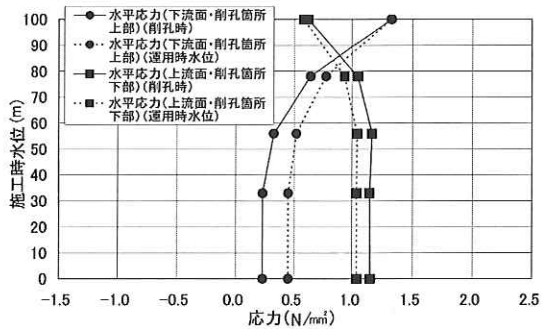


図-13 上流面および下流面における施工時水位による発生応力の変化

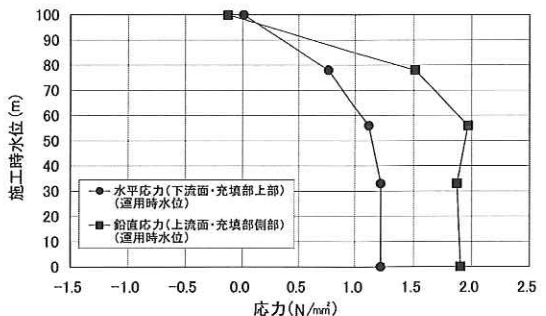
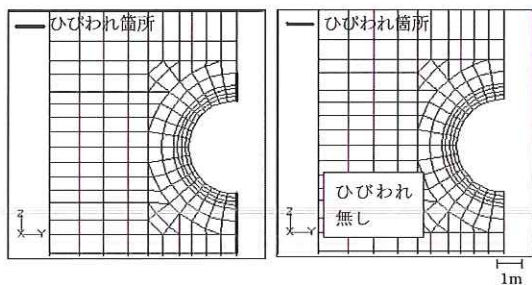
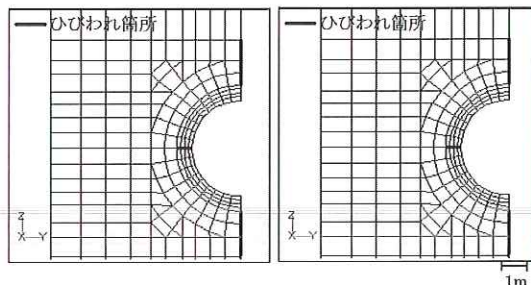


図-14 充填コンクリート部における施工時水位による発生応力の変化



(鉄筋なし) (鉄筋あり)  
図-15 下流面の空洞部周辺のひび割れ状況



(鉄筋なし) (鉄筋あり)  
図-17 上流面の空洞部周辺のひび割れ状況

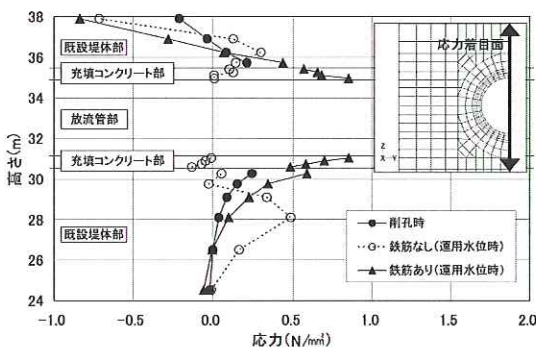


図-16 下流面での水平応力の鉛直方向に沿った分布

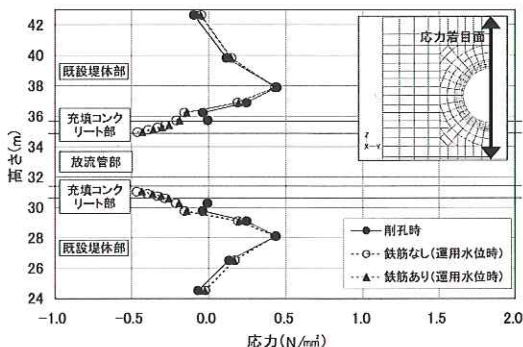


図-18 上流面での水平応力の鉛直方向に沿った分布

において)を 図-16に示す。コンクリートの引張破壊を考慮せず鉄筋を配置しない場合、上下流方向の単位長さ当たりの放流管下部に発生する引張領域の引張力を足しあわせた累計の引張力は1.22MNであり、これを今回設定した量の鉄筋(表-3参照)で全て受け持つと仮定すると、鉄筋には204N/mm<sup>2</sup>の引張応力が作用することとなる。しかし、引張破壊を考慮し鉄筋を配置した場合には鉄筋に5.4N/mm<sup>2</sup>の引張応力しか作用していなかった。また、放流管鉛直方向には、コンクリートの引張強度1.0N/mm<sup>2</sup>に近い大きな引張応力が発生している。

この場合、鉄筋の配置によって、コンクリートに発生する応力がわずかながら低下したため、放流管上下部における引張応力が引張強度を下回り、ひび割れの発生が抑制されている。つまり、鉄筋は、コンクリートのひび割れの発生を抑制する役割を果たしたものの、コンクリートにひび割れが発生していないため、本来期待している引張力を発揮していない。よって、コンクリートの引張強度を現実に即して考慮することにより、この位置での鉄筋量は削減できる可能性があると考えられる。

②上流面付近

今回設定したコンクリートの引張強度の条件では、充填コンクリート内に鉄筋を配置した場合と配置しない場合の、放流管上流面でのコンクリートひび割れ発生状況を 図-17に示す。図に示すように、削孔時に削孔箇所上下部において削孔壁か

ら長さ1.8mのひび割れが発生した。その後、充填コンクリート内の鉄筋の有無に関わらず、運用水位時に充填コンクリート側部において放流管壁から長さ0.6mのひび割れが発生した。しかし、削孔時に既設堤体に発生していたひび割れは進展しなかった。

応力状況を詳細に評価するため、放流管鉛直方向にひび割れが生じた箇所に隣接する水平応力の鉛直方向に沿った分布(削孔部中心通る面において)を 図-18に示す。図より、充填コンクリート部での応力は圧縮領域であり、また、既設堤体に発生している引張応力は、水位が上昇してもほとんど上昇していない。これより、上流面で削孔時に放流管鉛直方向のひび割れが発生した場合でも、鉄筋の有無にかかわらず、完成後に水位が上昇した場合にそのひび割れは進展しにくいことがわかる。

今回の解析条件においては、削孔時に既設堤体の上流面に発生したひび割れに対しては、充填コンクリート内に配置した鉄筋によるひび割れ抑制の効果はほとんど見られない。一方でひび割れそのものは延伸しにくいいため、今回の検討で考慮した荷重に対する堤体の安全性に与える影響は小さく、鉄筋による堤体安定性を高める効果は小さいと考えられる。

次に、上流面での鉛直応力のダム軸方向に沿った分布(削孔部中心を通る面において)を 図-19に示す。引張破壊を考慮せず鉄筋を配置しない場合、放流管側部に発生する引張力を足しあわせた

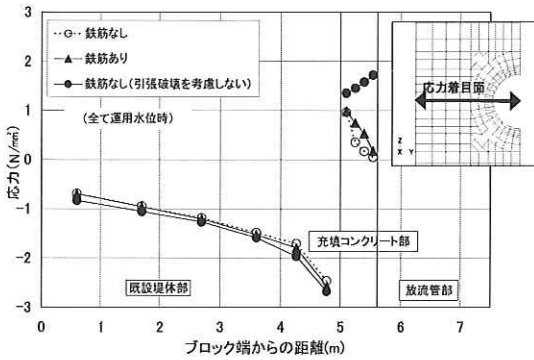


図-19 上流面での鉛直応力のダム軸方向に沿った分布

累計の引張力は0.94MNであり、これを今回設定した量の鉄筋(表-3参照)で全て受け持つと仮定すると、鉄筋には156N/mm<sup>2</sup>の引張応力が作用することとなる。しかし、コンクリートの引張破壊を考慮し鉄筋を配置した場合には、鉄筋に35.5N/mm<sup>2</sup>の引張応力しか作用していなかった。また、ひび割れに隣接している充填コンクリート内には、比較的大きな引張応力が発生している。これより、鉄筋の有無によって、充填コンクリート内の応力分布にわずかな違いが見られるものの、既設堤体内の応力分布には大きな影響を及ぼしていないことがわかった。

このため、現実に即してコンクリートの引張強度を考慮した場合、今回の解析条件においては、上流面の充填コンクリート側部に配置する鉄筋による充填コンクリート内のひび割れ抑制効果はほとんど見られず、このひび割れは既設堤体への延伸はなく、充填コンクリート内のひび割れは、堤体に悪影響を及ぼさない。以上より、今回の検討で考慮した荷重を対象とした場合、上流面付近の充填コンクリート内に配置される鉄筋量は削減できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

既設ダムへの放流管増設に関する検討結果より、以下のことが明らかになった。

- 1) 既設堤体においては、削孔時に既設堤体上流面の削孔箇所下部にて水平応力に最大引

張応力が発生する。

- 2) 充填コンクリート部においては、運用水位時に充填コンクリート側部にて鉛直応力に最大引張応力が発生する。
- 3) 既設ダム堤体削孔箇所周辺および充填コンクリート部においては、施工時水位が堤高の8割以下である場合、同じ箇所に最大引張応力が発生する。
- 4) 現実に即してコンクリートの引張強度を考慮した場合、上流面および下流面付近における充填コンクリート内に配置する鉄筋について合理化できる可能性がある。

今後、堤体コンクリートの引張耐力、ひび割れ進展特性が鉄筋によるひび割れ抑制効果を与える影響を考慮の上、既設堤体の放流管増設時の合理的な設計手法の検討をさらに進めていきたい。

なお、今回の報文では、コンクリートの引張強度を仮定し、堤体内のクラック発生・進展についても考慮したが、クラックに伴う漏水の可能性については検討していない。これについても別途検討が必要である。

参考文献

- 1) 上田、谷田、金岡、蜂須賀、山口、市原：五十里ダムの施設改良工事、大ダム、第185号、pp.61～68、2003.10.
- 2) 藤澤、永山、自閑、尾畑：重力ダムの放流管埋設ブロックの応力解析、建設省土木研究所資料、第2291号、1985.12.

佐々木 隆\*



独立行政法人土木研究所  
水工研究グループダム構造物  
造物チーム主任研究員  
Takashi SASAKI

金縄健一\*\*



独立行政法人土木研究所  
水工研究グループダム構造物  
造物チーム研究員  
Kenichi KANENAWA

石橋正義\*



(前 独立行政法人土木研究所  
水工研究グループダム構造物  
チーム研究員)  
Masayoshi ISHIBASHI

山口嘉一\*\*



独立行政法人土木研究所水工研  
究グループダム構造物チーム上  
席研究員、工博  
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

木藤賢一\*\*\*



(前 独立行政法人土木研究所  
水工研究グループダム構造物  
チーム交流研究員)  
Kenichi KITOU