

流水型ダムにおける空洞部の設置可能規模

岩下友也* 切無沢 徹** 山口嘉一*** 佐々木 晋****

1. はじめに

近年、人々の河川環境保全への関心の高まりやダムの有効活用や利水需要の変化等により、洪水調節を専用目的とする流水型ダムの計画が増加している。この型式のダムは、洪水時に下流への放流を制御するため一時的に貯水するが、洪水調節用の放流設備を河床標高付近に設けて通常時は貯水しないため、河道を自然の河川の流れに近い状況に保つことができると期待されている。現在、10基程度の国土交通省所管の流水型ダムが建設中、または計画途中である。

流水型ダムの放流設備の空洞部は、洪水時以外は河道を自然の河川の流れに近い状況に保つため普段の川幅程度に広いことが理想である。しかし、洪水時には洪水調節のためその放流口規模を絞り込む必要があるため、空洞部へのゲート設置等で2つの目的を両立することが検討されている¹⁾。

本報文では、流水型ダムとして重力式コンクリートダムを対象に、その堤体底部に設ける空洞規模について、空洞幅のほか、堤体形状、ブロック幅及び空洞形状の影響も考慮して、構造的な観点から解析的手法により検討し、構造上設置可能な空洞部規模について提案を行った。

2. 検討方法

大規模な空洞幅を有するコンクリートダム堤体について、河川管理施設等構造令に基づく現行設計法で規定する滑動・転倒に対する安定性及び発生応力の要件を確認した上で、設置可能な空洞規模を以下の解析手法・条件により検討した。

2.1 解析手法

空洞周辺の発生応力を算出する方法として、2次元FEM引継ぎ解析¹⁾を用いた。2次元FEM引継ぎ解析は、ダム上下流方向の2次元断面モデルにて発生する鉛直応力 σ_z を求め、ダム軸方向断面モデルの初期応力として引継ぎ、空洞の要素を削除することによりダム軸方向断面内の応力分布を

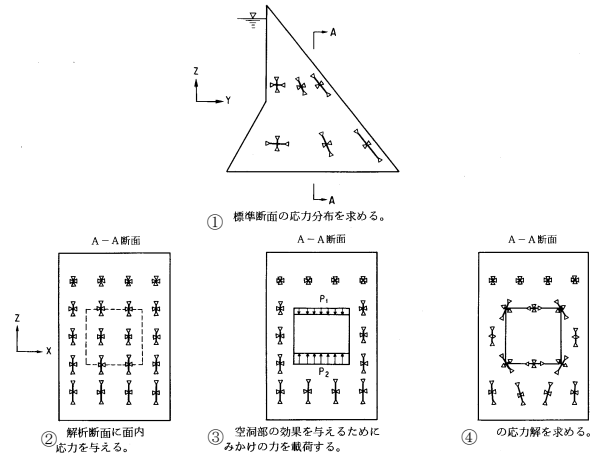


図-1 2次元FEM引継ぎ解析の手順

求める手法²⁾である。解析手順を図-1に示す。

2.2 解析条件

解析は図-2に示す1ブロック（ブロック幅 $W=15m$ ）を抽出した堤高 $H=80m$ の重力式コンクリートダムモデルを基本とした。平常時の河床高を想定して、空洞部の最下端は堤敷から $5.0m$ 上の標高に設けた。また、空洞部は高さを $5.0m$ とし、空洞幅 b を $5.0m$ 、 $7.5m$ 、 $10.0m$ ($b/W=1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$)とした。なお、図-2におけるダム軸方向モデル(B-B断面)の側方境界条件は、鉛直(Z)及び水平(X)方向ともにフリーとし、堤体底面は固定境界とした。基本条件とする解析モデルの主要諸元を表-1に、物性値を表-2に示す。

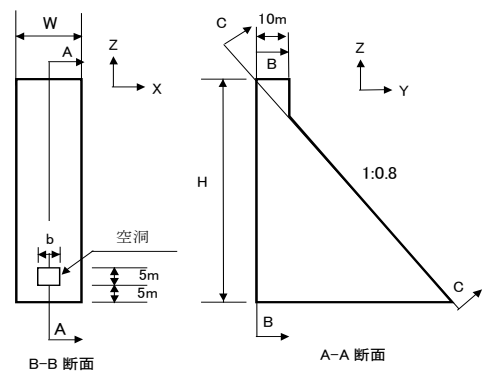


図-2 ダムモデル形状と解析断面

表-1 解析モデルの主要諸元

項目	諸元		
堤高 H (m)	80		
堤頂幅 (m)	10		
上流面勾配	鉛直		
下流面勾配	1:0.8		
空洞高 (m)	5		
ブロック幅 W (m)	15		
空洞幅 b (m)	5.0	7.5	10.0
b/W	1/3	1/2	2/3

表-2 解析モデルの物性値

単位体積質量(kg/m ³)	2,300
弾性係数(N/mm ²)	30,000
ポアソン比	0.2
圧縮強度(N/mm ²)	24
引張強度(N/mm ²)	2.4
せん断強度(N/mm ²)	4.8
内部摩擦係数	1.0

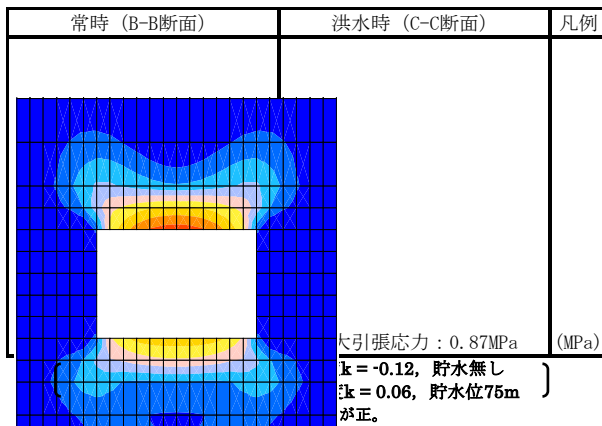


図-3 空洞幅7.5mの空洞部周辺応力分布

地震を考慮した条件において、貯水位条件が常時（空虚）の荷重条件でダム上流面に発生する引張応力は、洪水時に下流面に発生する引張応力よりも大きくなった（一例として図-3参照）ため、以降の解析においては常時（空虚）のダム上流面（B-B断面）を評価断面とした。

空洞周辺部のコンクリートは構造用コンクリートとなるので、圧縮強度24N/mm²、引張強度2.4N/mm²（圧縮強度の1/10）と仮定した。地震時において強度割増30%を見込んだ強度を用いると、安全率では非地震時の方がより厳しくなったため、以降の2次元FEM引継ぎ解析による検討では、非地震時における解析結果を示す。

また、滑動に対する安定計算に用いるせん断強度は4.8N/mm²（圧縮強度の1/5）、内部摩擦係数は1.0とした。

3. 堤高の違いによる検討

堤高の異なるダムモデルでの解析により、空洞幅の違いによる空洞部周辺の発生応力を検討した。解析モデルの主要諸元は表-1の基本条件に、堤高50mの条件を追加し、2種類の堤高を用いて比較評価した。

図-4に、各堤高モデルの空洞部上縁に発生する最大引張応力を示す。最大引張応力は堤高が高いほど、また空洞幅が広がるほど大きくなる。

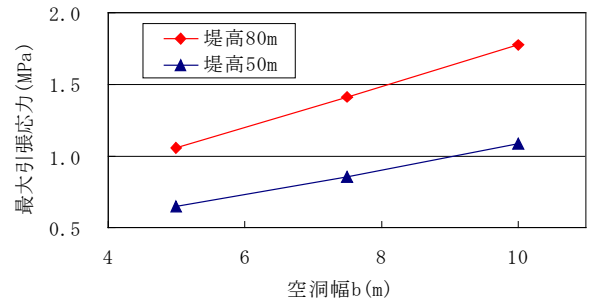


図-4 堤高の違いによる空洞幅と最大引張応力の関係

4. ブロック幅の拡幅による検討

一般に、コンクリートダム堤体のブロック幅（横継目間隔）は15mである。15mより大きなブロック幅を採用する場合には、温度応力に十分配慮する必要がある。本章では、より大きな空洞を設置することを目的として、高压放流管を設置するブロックとして国内で事例がある21mのブロック幅のモデルと前章で検討したブロック幅15mのモデルとの解析結果を比較検討した。ブロック幅Wが21mのモデルは、空洞幅bを7.0m、10.5m（b/W=1/3、1/2）とし、他解析条件については表-1に示した基本条件と同じ設定とした。

ブロック幅の違いによる空洞部上縁に発生する最大引張応力を図-5に示す。ブロック幅を15mから21mに大きくすることにより空洞部上縁に発生する最大引張応力は15~20%程度低減した。ただし、同じb/Wであれば発生する最大引張応力はほ

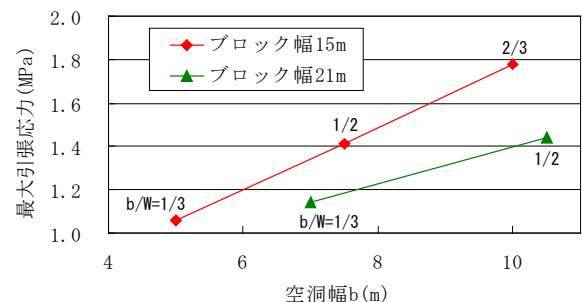


図-5 ブロック幅の違いによる空洞幅と最大引張応力の関係

ば同程度である。

5. ダム形状の変更による検討

ダム上流面に勾配を有するモデルにより解析を行い、上流面勾配が空洞部周辺に発生する応力に及ぼす影響について検討した。

解析モデルを図-6に示す。解析モデルは表-1の基本条件に対し、現在計画の流水型ダムの事例も参考にして、上流面勾配を1:0.12とした。発生応力を評価するダム軸方向断面は、ダム軸（B1-B1断面）と、ダム軸より上流側の鉛直面（B2-B2断面）で解析を行った。

上流面勾配の違いによる空洞部上縁に発生する最大引張応力を図-7に示す。上流面勾配を鉛直から勾配1:0.12とした場合、空洞部上縁に発生する最大引張応力は20%程度低減した。

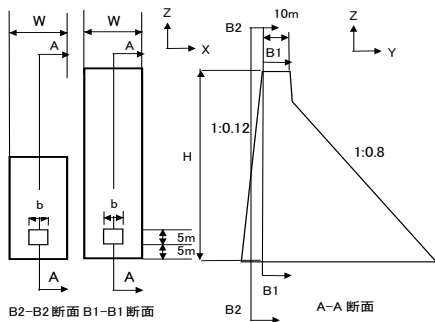


図-6 上流面勾配を有する解析モデル

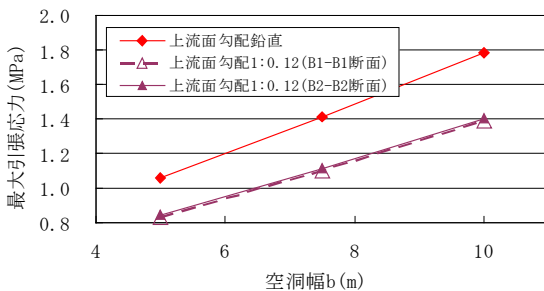


図-7 上流面勾配の違いによる空洞幅と最大引張応力の関係

6. 空洞形状の変更による検討

空洞の上縁に曲率をもたせたアーチ形状について、矩形（曲率0）のケースと比較し検討した。解析モデルは表-1を基本とし、空洞幅は7.5mの場合を検討対象とした、空洞中央部の高さは5m一律とすることで、空洞上縁部中央の上載荷重が同一となるような形状とした。そのため、曲率が大きくなる程、空洞断面積が小さくなっていることに留意する必要がある。

解析結果の応力分布を図-8に、アーチの曲率の

違いによる空洞部上下縁に発生する最大引張応力を図-9に示す。アーチの曲率を大きくするほど、空洞上縁に発生する最大引張応力は小さくなり、曲率0.260のケースは矩形より最大引張応力が2割程度低減した。しかし、曲率を大きくするほど下縁に発生する引張応力が増大し、曲率0.260のケースにおける最大引張応力は、上縁より下縁の方が大きくなった。

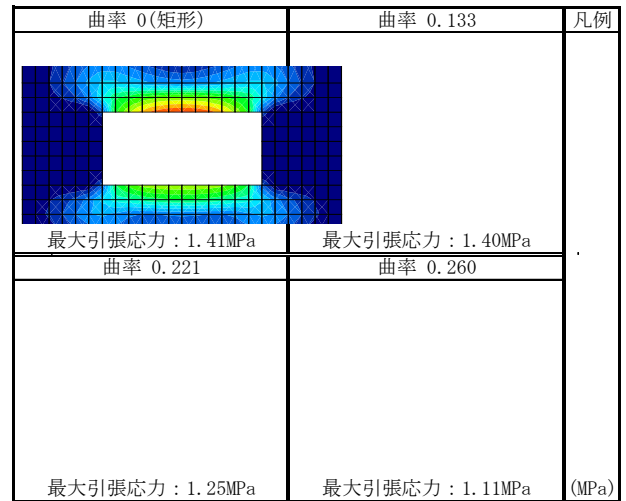


図-8 空洞形状の異なる空洞部の最大主応力分布

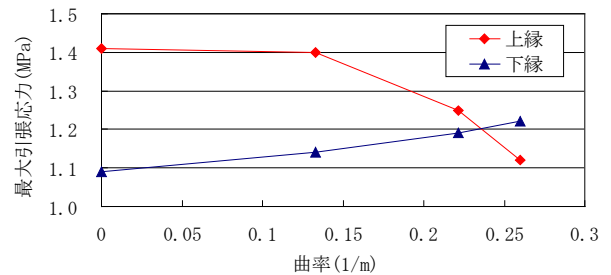
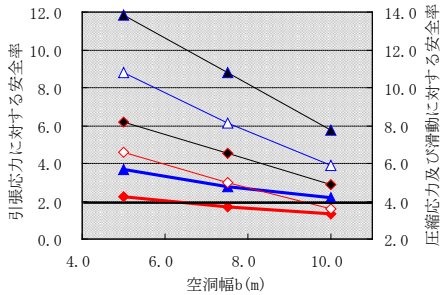


図-9 空洞上縁の曲率と上下縁の最大引張応力の関係

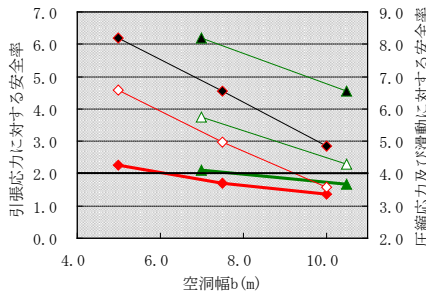
7. 設置可能な空洞幅の評価

本報文では、底部に大規模空洞を有する重力式コンクリートダム堤体について、①堤高：80m、②ブロック幅：15m、③上流面勾配：鉛直、④空洞形状：矩形、高さ5m、⑤空洞部周辺のコンクリート強度：圧縮強度24N/mm²、引張強度2.4N/mm²、の基本条件を仮定し、堤体の構造・形状の影響を考慮した解析的検討を行った。前述の3～6章では、①～④の各条件を変更し、空洞部上縁に発生する最大引張応力への影響について比較評価した。ここで、前述の3～6章に示した空洞部上縁に発生する最大引張応力に対する安全率、同手法により空洞側部に発生する最大圧縮応力に対する安全率、ヘニーの式による空洞部標高面に



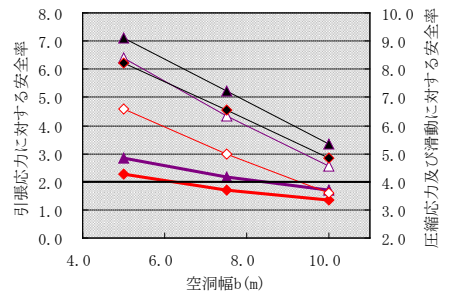
		ダム高	80m	50m
凡例	引張応力に対する安全率	-	-	-
	圧縮応力に対する安全率	-	-	-
	滑動に対する安全率	-	-	-

図-10 堤高の違いによる空洞幅と安全率の関係



		ブロック幅	15m	21m
凡例	引張応力に対する安全率	-	-	-
	圧縮応力に対する安全率	-	-	-
	滑動に対する安全率	-	-	-

図-11 ブロック幅の違いによる空洞幅と安全率の関係



		上流面勾配	鉛直	1:0.12*
凡例	引張応力に対する安全率	-	-	-
	圧縮応力に対する安全率	-	-	-
	滑動に対する安全率	-	-	-

*上流面勾配1:0.12の引張応力及び圧縮応力に対する安全率は、より大きな応力が発生したB2-B2断面の結果を示す。

図-12 上流面勾配の違いによる空洞と安全率の関係幅

おける滑動に対する安全率（コンクリートのせん断強度と摩擦力によるせん断摩擦抵抗力の作用するせん断力に対する比率）を図-10～12に示す。同じ堤高では、ブロック幅を大きくする、またダム上流面勾配をつけることで、安全率が大きくなり、空洞幅をより大きくすることができる。ただし、ブロック幅を大きくする場合にはマスコンクリートとしての温度応力の検討が重要となる。

空洞部周辺について圧縮応力に対する安全率及び滑動に対する安全率を4.0以上確保した上で、引張応力に対する安全率を2.0以上とすることを条件として設置可能な空洞幅を評価すると、引張応力に対する安全率確保がほぼ支配的となる。ここに、転倒に対する安定性は、本検討におけるいずれのダムモデルにおいても安定条件を満足していることを確認している。

そこで、以上の安全率の条件から設置可能な空洞幅を評価すると、堤高80mモデルでは6m程度以下となり、堤高50mモデルでは10m程度以下となった。また、基本条件からブロック幅を21mに大きくした場合は8m程度以下、上流面勾配を

1:0.12とした場合は8.5m程度以下となった。また、空洞の上縁に曲率をもたせたアーチ形状とすることで最大引張応力が低減され、さらに空洞幅を広げることができると考えられる。

8. おわりに

流水型ダムにおける底部の空洞部周辺に発生する応力をFEM解析により算出し、ブロック幅、堤体形状、空洞形状の影響を考慮した上で設置可能な空洞規模を検討した。実際の実設計時には発生応力以外の設計・施工条件等を十分考慮する必要があるが、構造設計上はブロック幅を拡幅したり、上流面に勾配を設けたり、空洞部の上縁形状をアーチ形状としたりすることにより、空洞部の最大発生引張応力が低減され、空洞部規模を大きくすることが可能であることを明らかにした。

参考文献

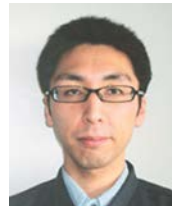
- 1) 箱石憲昭、宮脇千晴、海野仁：環境負荷を最小にする治水専用ダムに関する研究(2)、平成20年度重点プロジェクト研究報告書、土木研究所、2009
- 2) 藤澤侃彦、永山功、自閑茂治、尾畑伸之：重力ダムの放流管理設ブロックの応力解析、土木研究所資料、第2291号、1985.12

岩下友也*



国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所長(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 総括主任研究員)
Tomoya IWASHITA

切無沢 徹**



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水工構造物チーム 研究員
Toru KIRINASHIZAWA

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水工構造物チーム 上席研究員、工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

佐々木 晋****



国土交通省北海道開発局夕張シェーパロダム総合建設事業所(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)
Susumu SASAKI