

流水型ダムの放流口規模の解析的検討

佐々木晋* 岩下友也** 山口嘉一*** 黒目 剛****

1. はじめに

近年、利水の需要低下もあり、洪水調節専用目的のダムの計画が増加しつつある。このようなダムでは、洪水時以外は貯水する必要はない。放流設備を河床標高付近に設置し、洪水時以外は自然な河川の流れのままとし、河川の上下流方向の連続性を確保できるダム（流水型ダム）として計画される。土砂も貯水池に堆積させることなく、下流に流下させることになる。

流水型ダムでは、洪水時は下流への放流を制限し洪水ピークをカットし貯水するため、放流管口径はある程度絞り込む必要がある。一方、洪水時以外は普段の川幅程度に大きな放流管空洞がダムにあることが理想である。放流管に求める洪水時と非洪水時の要求を、ゲート設置等で両立することを検討することも必要である。本稿では、非洪水時に求められるダム堤体の底部標高付近の大規模な放流口規模（空洞）の設置可能性について、基礎的な検討を行う。ダムの構造規定を定める河川砂防技術基準（案）では、堤体内放流管を設置する場合、放流管規模が小さい場合は無限平板における空洞周りの応力分布から放流管周りの応力状態を検討するが、放流管の径が堤体ブロック幅の1/3を超えるような場合はFEM解析等によって厳密に応力検討することとしている¹⁾。本稿では、設置空洞規模毎にその空洞周辺の応力状態を2次元及び3次元FEM解析等により求め、空洞の設置可能規模について検討するとともに、解析方法の比較検討についても実施した。

2. 解析モデル

解析対象は、図-1に示す1ブロック（ブロック幅 $W=15\text{m}$ ）を抽出した3種類の堤高（50,80,100m）の重力式コンクリートダムモデルとした。堤体の堤敷から5.0m上の標高に設けた空洞の規模は高さを5.0mとし、空洞幅 b を5.0m ($b/W=1/3$)、7.5m ($b/W=1/2$)、10.0m ($b/W=2/3$)

の3種類設定した。解析モデルの主要諸元を表-1に示す。なお、このモデルにおいては基礎岩盤を考慮していない。解析に使用した物性値を表-2に、荷重条件を表-3に示す。以下の解析において、流水型ダムは、非洪水時に貯水池が空虚であることから、応力解析断面は空虚時に応力、特に、引張応力条件が厳しくなるダム上流面のみを解析評価対象とし、地震力は下流から上流に向けて載荷した。

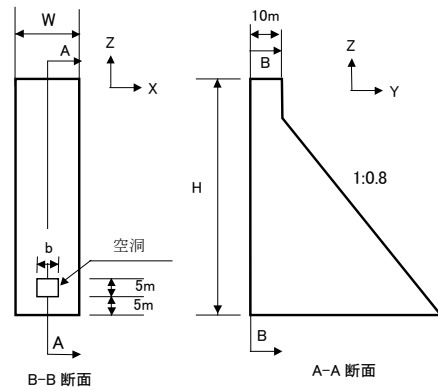


図-1 解析モデル

表-1 解析モデルの主要諸元

項目	諸元
堤高 (H)	50m, 80m, 100m
堤頂幅	10m
上流面勾配	鉛直
下流面勾配	1:0.8
空洞高	5m
ブロック幅 (W)	15m
空洞幅 (b)	5.0m, 7.5m, 10.0m

表-2 物性値

材料物性		堤体	貯水
単位容積質量	ρ (kg/m ³)	2,300	1,000
弾性係数	E (N/mm ²)	30,000	—
ポアソン比	ν	0.2	—

表-3 荷重条件

水平力	地震時慣性力	設計震度 0.12 方向：下流→上流
鉛直力	堤体自重	

3. 解析方法

空洞周辺の応力は2次元及び3次元FEM解析、並びに応力集中係数を用いた推定式により算定した。各解析方法の詳細は下記に述べる。表-4に解析方法別の実施ケースを示す。

Structural Investigation on the Scale of the Bottom Outlet of a Dry Dam

表-4 解析方法と実施ケース

解析方法	堤高		
	50m	80m	100m
2次元FEM引継ぎ解析	○	○	
応力集中係数からの算出	○	○	○
3次元FEM解析		○	

3.1 2次元FEM解析

2次元FEM解析は、堤高50及び80mモデルについて行った。解析手法は、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き継ぎ、空洞の要素を削除することにより応力分布を求める手法²⁾（以下、2次元FEM引継ぎ解析という）を用いた。図-1におけるダム軸方向モデル（B-B断面）の側方境界条件（X方向）は、鉛直及び水平方向ともにフリーとした。

3.2 応力集中係数からの応力値の算定

3.1で堤高50及び80mモデルの2次元FEM引継ぎ解析から求められた空洞周辺の最大引張応力 σ_{tmax} と当該両モデルで空洞がない状態と仮定し、上下流方向断面の2次元解析により求めた鉛直応力 σ_z を用いて応力集中係数（ $C_c = \sigma_{tmax} / \sigma_z$ ）を算出した。そして3種類の堤高モデルの上下流方向断面（A-A断面）のFEM解析によって求めた σ_z から、別堤高モデルから上記のように算出された応力集中係数 C_c を使い、3種類の堤高モデルにおける最大引張応力を算出した²⁾。

3.3 3次元FEM解析

3次元FEM解析は堤高80mモデルについてのみ行った。解析にあたっては2次元FEM引継ぎ解析と同様に堤体に荷重を載荷した状態から空洞要素を削除する方法を用い、解析の次元のみによる違いの比較ができることを考慮した。また、側方境界条件（YZ面）は水平及び鉛直方向ともにフリーとした。なお3次元FEM解析のモデルは左右対称であることから半断面解析とした。

4. 解析結果と考察

図-2に2次元FEM引継ぎ解析により求められたダム軸方向（B-B断面）主応力 σ_1 分布図一覧を、また図-3に3次元FEM解析により求められたダム軸方向（B-B断面：最上流端要素（以下、同様））主応力 σ_1 分布図一覧を示す。2次元引継ぎ解析、3次元解析のいずれのケースにおいても、最大引張応力は空洞直上部で生じており、空洞幅

が大きいほど大きい。また、2次元FEM引継ぎ解析の堤高による比較からは、堤高が高いほど大きい最大引張応力が発生していることがわかる。ダム軸方向断面（B-B断面）における2次元FEM引継ぎ解析と3次元FEM解析の比較では、最大引張応力は全てのケースにおいて、2次元FEM解析の方が大きい値を示していることがわかる。図-4に3次元FEM解析により求められた上下流方向（A-A断面）の主応力 σ_1 分布図一覧を示す。図-4からは、ダム軸断面（B-B断面）で確認された空洞直上部で発生する引張応力は上流側の方が大きい、その最大値の発生位置は堤体の表面付近ではあるが、最上流端部（B-B断面）ではないことがわかる。

図-5に、2次元FEM引継ぎ解析、応力集中係数、及び3次元FEM解析により求められた最大引張応力をまとめた。ここで3次元FEM解析では最大の引張応力を示したA-A断面における値を使用している。図-5の堤高50m及び80mモデルにおける2次元引継ぎ解析と応力集中係数 C_c による推定応力値を比較すると、2次元FEM引継ぎ解析と応力集中係数 C_c からの推定応力値の整合性が高いことがわかる。つまり、空洞形状・大きさが同じであれば、堤高によらず応力集中係数 C_c はほぼ同じ値となることを示している。また、2次元FEM解析と3次元FEM解析の結果の比較から2次元FEM解析の結果は最大引張応力が若干大きくなることがわかる。

既設ダムにおける放流管増設等の場合と異なり、新設するダムでは放流管周辺部位に所要強度の構造用コンクリートを打設し、鉄筋を必要量配筋することが可能である。そこで、コンクリートの許容引張強度を一般的な構造用コンクリートの引張強度 2.4N/mm^2 と仮定し、地震荷重の引張強度割増 30% ¹⁾ を見込んだ引張強度 3.1N/mm^2 に対して、各ケースの安全率を算出した結果を図-6に示す。所要安全率の値については議論があるところではあるが、この図からは、堤高50mモデルでは、空洞幅が10m ($b/W=2/3$) のケースにおいても安全率が2.0以上あり、また最も条件の厳しい堤高100mモデルの空洞幅10.0m ($b/W=2/3$) のケースにおいても安全率は1.0以上あることがわかる。ここでの安全率は引張応力をコンクリートの引張強度のみで受け持つとした場合の結果である。

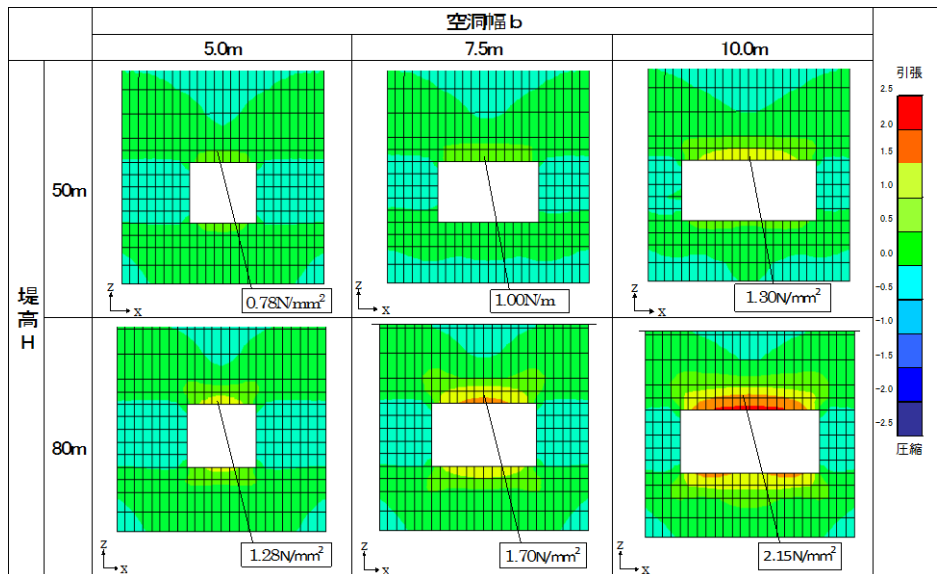


図-2 2次元引継ぎ解析 σ_1 主応力分布図 (B-B断面)

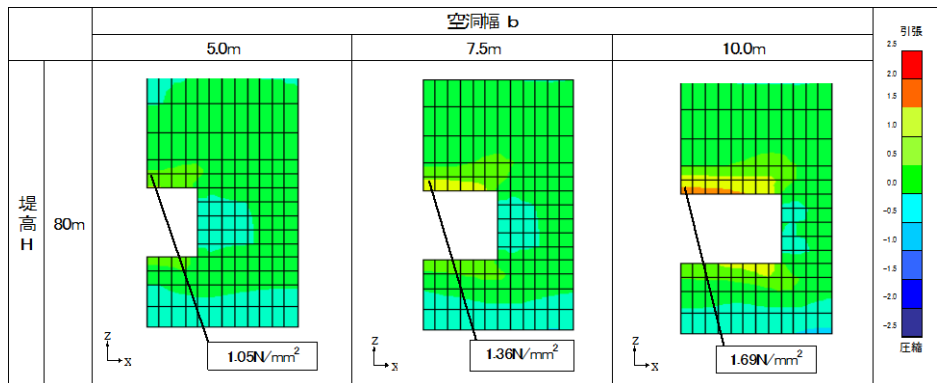


図-3 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図 (B-B断面)

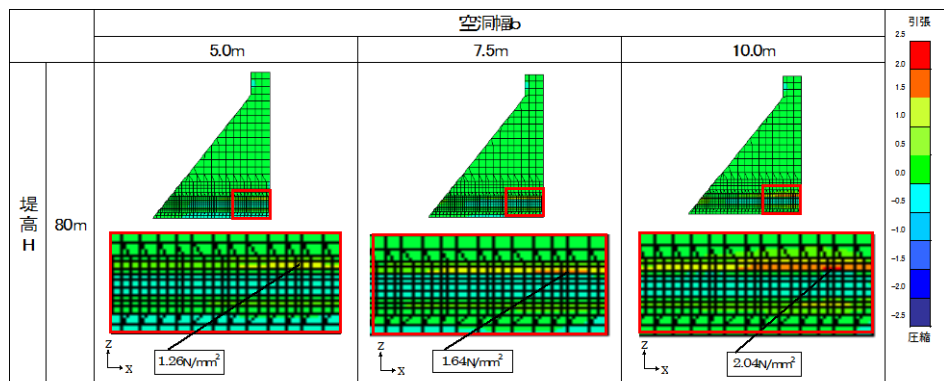


図-4 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図 (A-A断面)

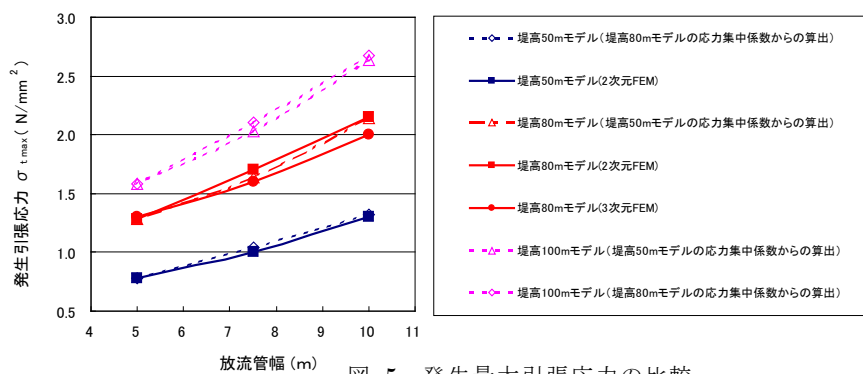


図-5 発生最大引張応力の比較

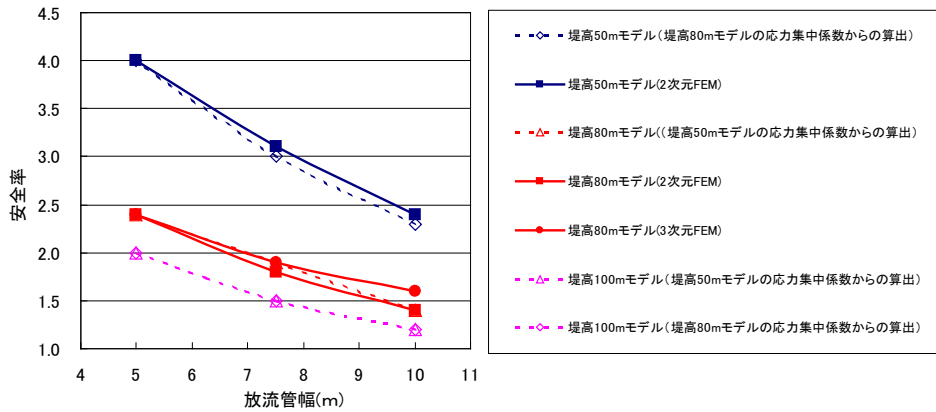


図-6 安全率の比較 (許容引張強度2.4N/mm²と仮定した場合)

5. まとめ

本検討における解析手法の比較検討から、以下のことがいえる。

- ①2次元FEM引継ぎ解析と応力集中係数C_cからの推定応力値の整合性は高い。
- ②空洞形状・大きさが同じであれば、堤高によらず応力集中係数C_cはほぼ同じ値となる。
- ③2次元FEM解析と3次元FEM解析の結果の比較から2次元FEM解析の結果は最大引張応力が若干大きめとなる。

また、ダム堤体の底部標高付近に設置する放流口の設置可能性規模についての解析的検討からは、以下のことがいえる。

- ①コンクリートの許容引張強度を一般的な構造用コンクリートの引張強度2.4N/mm²と仮定した場合、堤高50mモデルでは、空洞幅が10m (b/W=2/3) のケースにおいても安全率が2.0以上となり、最も条件の厳しい堤高100mモデルの空洞幅10.0m (b/W:2/3) のケースにおいても安全率は1.0以上あることがわかった。

6. おわりに

本稿では、ダム堤体の底部標高付近に設置する大規模な放流口規模について、どの程度の規模まで構造的に設置可能であるかを解析的に検討した。今回の解析評価では、堤体ブロック幅を通常15mとし、放流口周りを通常強度の構造用コンクリートで施工した場合を前提とした。したがって、堤体ブロック幅や高強度コンクリートの使用を考慮していくことで、設置可能な放流口規模の更なる大型化や構造的安全性の余裕度の増強を図ることは可能であると考えられる。

なお、本稿では、放流口空洞そのものの規模を対象に検討した。ゲート設置が必要ときには、別途、大規模なゲート構造やゲート収納構造についての検討が必要である。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修、(社)日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編〔I〕、山海堂、1997.10
- 2) 藤沢侃彦・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

佐々木 晋*



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
Susumu SASAKI

岩下友也**



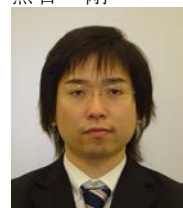
独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム総括主任研究員
Tomoya IWASHITA

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

黒目 剛****



(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)
Tsuyoshi KUROME