

環境負荷を最小にする治水専用ダムに関する研究（1）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、岩下友也、佐々木晋

【要旨】

河川環境保全の観点から洪水調節用放流設備を河床標高付近に設置することで、常時の水位上昇を抑えるとともに土砂等の河川流下物の流下を促進する治水専用ダム（流水型ダム）の計画が増加しつつある。環境負荷を更に小さくし、かつ貯水容量を有効に活用する洪水防御施設として、洪水調節操作の必要ない流量については現況河道状況のまま流下させ、必要のある大出水時のみ貯留を行う形式のダム構造が求められている。

本研究では、重力式コンクリートダム堤体に設けることができる可能な空洞規模を解析的手法により検討評価し、堤体底部に大規模空洞を有するダム堤体形式・構造及び可能な空洞規模の提案を行った。

キーワード：重力式コンクリートダム、治水専用ダム、FEM 解析、放流管

1. 研究概要

近年、人々の河川環境保全への関心の高まりや利水需要の低下などから、洪水調節を専用目的とする治水専用ダム（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、常時は洪水調節用の放流設備を河床標高付近に設けることで貯水しない。このため、河道を自然の河川の流れに近い状況を保つことができるダムである。また、この型式のダムは、貯水池内の堆砂を減らすことができることなど、土砂管理の面からもその優位性が注目されている。

治水専用ダム（流水型ダム）の洪水吐き等の空洞部は、洪水調節の目的から、洪水時にその規模を絞り込む必要がある。しかし、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。このため、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が検討されている。

本研究では、重力式コンクリートダム堤体に設けることが可能な空洞規模を、構造的な観点から解析手法により検討・評価し、堤体底部に大規模空洞を有するダム堤体形式・構造及び可能な空洞部規模の提案を行った。

2. 研究方針

ダムの構造規定を詳細に定める「河川砂防技術基準(案)」¹⁾では、放流管等の空洞部を堤体内に設置する場合、空洞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空洞周りの応力状態を検討

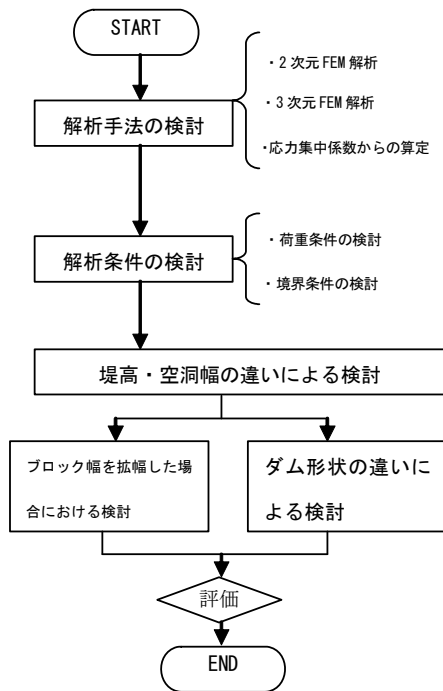
するが、空洞の径が堤体ブロック幅の 1/3 を超えるような場合は FEM 等によって厳密に応力検討することとしている。

本研究では、ダム堤体の 1 ブロック内にブロック幅の 1/3 以上の径を持つ場合を考え、空洞部の最大規模の検討を行った。さらに、空洞部を 1 ブロック内で設けるのではなく 2 ブロックに渡るような大規模な空洞構造を対象とし、その応力状態や構造上の可能な規模等についても検討を行った。図-1 に本研究の検討フローを示す。

3 章では、ダム堤体の 1 ブロック内に設ける放流管規模について、まず、解析手法による違いの検討及び境界条件が与える影響の分析を行った。次に、その結果を踏まえ堤高の違い・空洞幅の違いによる応力状態の検討を行った。さらに、大きな空洞を設けるために、①ダムのブロック幅を拡幅することによる空洞造成時の応力状態の検討、②治水専用ダムは通常運用時は貯水のない空虚な状態であることから、より最適なダム形状として上流側に勾配を設けることによる発生応力の低減度合いの検討、を行った。これらの結果により、1 ブロック内に設けることが可能と考えられる空洞規模の提案を行った。

4 章では、堤体により大規模な空洞の造成の可能性の検討として隣接 2 ブロックに渡る空洞を配置した際の応力状態の検討を行い、構造上の可能な空洞規模の提案を行った。

3章 1ブロック内に設ける空洞の検討



4章 2ブロックに渡る空洞の検討

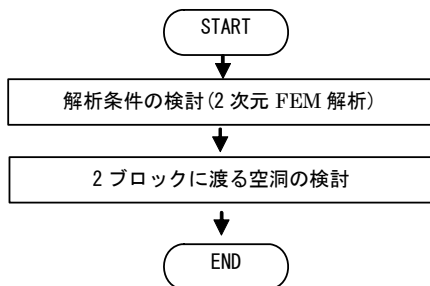


図-1 研究フロー

3. 1ブロック内に設ける放流管規模の検討

3.1 概要

ダムの構造規定を詳細に定める「河川砂防技術基準(案)」¹⁾では、放流管等の空洞部を堤体内に設置する場合、空洞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空洞周りの応力状態を検討するが、空洞の径が堤体ブロック幅の1/3を超えるような場合はFEM等によって厳密に応力検討することとしている。

本章では、ダム堤体の1ブロック内に大規模な空洞を設けることを想定し、ダム堤体の底部標高付近に設置されたブロック幅の1/3を超える大規模空洞の周辺の応力状態をFEM解析等により求め、1ブロックに設けることが可能な空洞規模について検討を行った。

3.2 解析手法の検討

3.2.1 解析手法

空洞周辺の発生応力を算出する方法として、下記の3手法を用いて比較検討した。

a) 2次元FEM解析

2次元FEM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。

なお、図-3におけるダム軸方向モデル(B-B断面)の側方境界条件は、設計上安全側の考え方から鉛直(Z)及び水平(X)方向ともにフリーとした。

2次元FEM引継ぎ解析の解析手順を以下に示す(図-2参照)。

- ① 上下流方向断面(Y-Z面)の2次元応力解析
空洞部のないブロックを想定し、2次元有限要素により上下流方向断面の応力分布を求める。
- ② ダム軸方向断面(X-Z面)の断面内初期応力の設定
解析しようとするダム軸方向断面の断面内応力に、①の解析結果より得られた断面内応力(σ_z)を与える。この場合、重力ダムが上下流方向断面に対して平面応力状態を有する構造物であると仮定し、ダム軸方向応力 σ_x 、せん断応力 τ_{xy} は0とする。
- ③ 空洞部の影響を考慮するためのみかけの荷重の設定
ダム軸方向断面における空洞部の効果を考えると、空洞部の上下流境界は境界面に垂直な方向に拘束されないため、その方向の応力 σ_z は0である。よって、図の面内応力を与えた状態で前記の条件を満足させるために、その点の応力 σ_z に等しいみかけの分布荷重P1およびP2を作用させる。この場合の応力 σ_z は圧縮応力であるから、P1およびP2の方向は空洞内部へ向かうよう作用させる。
- ④ ダム軸方向断面(X-Z面)の2次元応力解析
②の初期応力のもとで③の応力解を求める。

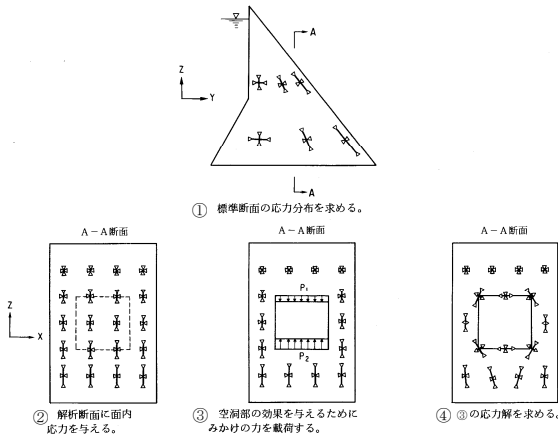


図-2 2次元 FEM 引継ぎ解析

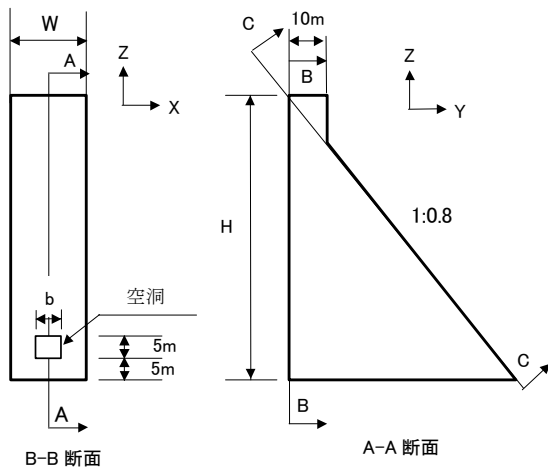


図-3 解析モデルと断面位置図 (2次元 FEM 解析)

b) 応力集中係数からの応力値の算定

当算定方法は、a) 2次元 FEM 引継ぎ解析の方法のうち、ある堤高条件のモデルによる上下流方向断面の解析 (①) 結果を用いて、ダム軸断面への応力の引継ぎを行わない簡易的な手法により応力の最大値を求める方法である。具体的には、1つの堤高モデルについて2次元 FEM 引継ぎ解析から求められた空洞周りの最大引張応力 σ_{tmax} と上下流断面の解析で求めた鉛直応力 σ_z から応力集中係数 ($C_c = \sigma_{tmax} / \sigma_z$) を算出する。そして、空洞の形状と大きさが同一であれば、応力集中係数は一定である²⁾との関係から、堤高の異なるモデルの上下流方向断面の鉛直応力 σ_z を求め、1つの堤高モデル (当検討では堤高 80m) により求められた応力集中係数 (C_c) から別の堤高モデルによる応力値の算出を行う。

c) 3次元 FEM 解析

3次元 FEM 解析は、堤体 1 ブロックをモデル化

して実施した。図-4 に解析モデルの概要を示す。側方境界条件 (YZ 面) は水平 2 方向 (Y および Z) 及び鉛直 (Z) 方向ともにフリーとし、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とした。

なお、解析に使用した物性値、荷重条件は、後述する 2次元 FEM 解析と同一とした。また、実際のダムの施工方法を考慮した「築堤解析」と a) の 2次元 FEM 解析による引継ぎ解析と同様に空洞の要素を削除する「掘削解析」の両者の比較を予備的に行った。

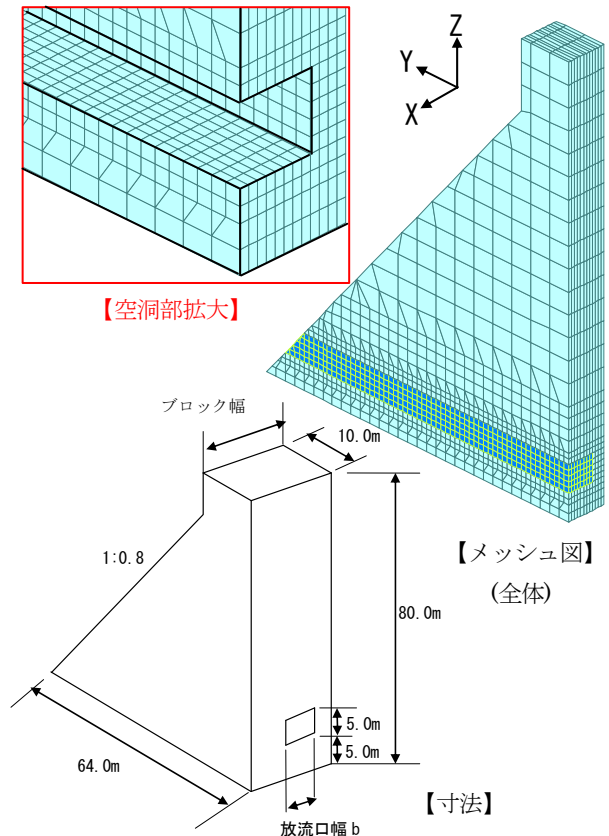


図-4 解析モデル (3次元 FEM 解析)

3.2.2 解析条件

a) 2次元 FEM 解析

解析対象は図-3 に示す 1 ブロック (ブロック幅 $W=15m$) を抽出した堤高 50m、80m の重力式コンクリートダムモデルとした。平常時の実河床高を想定して、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 7.5m ($b/W=1/2$) と設定した。解析モデルの主要諸元を表-1 に示す。なお、基礎岩盤については、当チームにおける既往検討において、貯水位変化に伴う実ダムのプラムラインによる計測データの変位と 2次元 FEM 解析による変位の相関は、低水位条件では岩盤なしモデルの方が

整合性が良いことが判明している。そこで、本研究の対象となる治水専用ダム（流水型ダム）では、常時の貯水池は空虚であることから基礎岩盤無しモデルとした。

解析に使用した物性値を表-2に、荷重条件を表-3に示す。物性値は、本節以降の解析においては、全てこれらの値によるものとする。解析評価断面は、治水専用ダム（流水型ダム）の常時（非洪水時）の貯水池が空虚である時に、空洞周辺の引張応力条件が厳しくなるダム上流面（B-B断面）と洪水時に水位が上昇した時に引張応力が厳しくなる下流面（C-C断面）を対象とした。

表-1 解析モデルの主要諸元

項目	諸元
堤高 (H)	50, 80m
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)	5m, 7.5m, 10m

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

荷重		空虚時	洪水時
水平力	静水圧 ^{※1}	—	○
	地震時動水圧 ^{※2}	—	○
	地震時慣性力	設計震度 0.12 方向：下流→上流	設計震度 0.06 方向：上流→下流
鉛直力	堤体自重		

※1 治水専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

※2 Westergaard式による。

b) 応力集中係数からの応力値の算定

応力集中係数からの応力値の算出は、a)で求められた堤高50m、80mモデルにおける最大引張応力の値と、それぞれのモデルでの上下流断面における解析で求められた鉛直応力 σ_z を用いて行った。まず、それぞれの堤高における応力集中係数($C_c = \sigma_{t,max} / \sigma_z$)を求め、堤高50mの応力集中係数については、堤高

80mの鉛直応力 σ_z を、堤高80mの応力集中係数については、堤高50mの σ_z を乗じることにより応力集中係数からの最大引張応力の算出を行い、両者に差がないことを確認して応力集中係数による検討の妥当性を検証した。

c) 3次元 FEM 解析

3次元 FEM 解析は、2次元 FEM 解析との比較を目的とすることから堤高80mのモデルのみ実施した。荷重条件、物性値など条件は2次元解析と同条件とした。

3.2.3 解析結果と考察

a) 評価断面

本検討に先立ち、荷重条件を通常運用時（空虚時）と洪水時を対象として解析を行い、検討に用いる評価断面を検証した。表-4に、ダム高80mモデル、2次元 FEM 解析の空虚時の荷重条件に対しダム上流面（B-B断面）で発生した最大引張応力と、洪水期の荷重条件に対しダム下流面（C-C断面）で発生した最大引張応力を示す。

表-4 上流面と下流面の最大発生引張応力比較

荷重条件	最大引張応力 (MPa)	発生箇所
常時(空虚時)	1.70	上流面側 (B-B)
洪水時	0.87	下流面側 (C-C)

また、図-5に3次元 FEM 解析によって最大引張応力が発生した空洞直上部について、堤体上流端から堤体下流端の応力分布を示す。

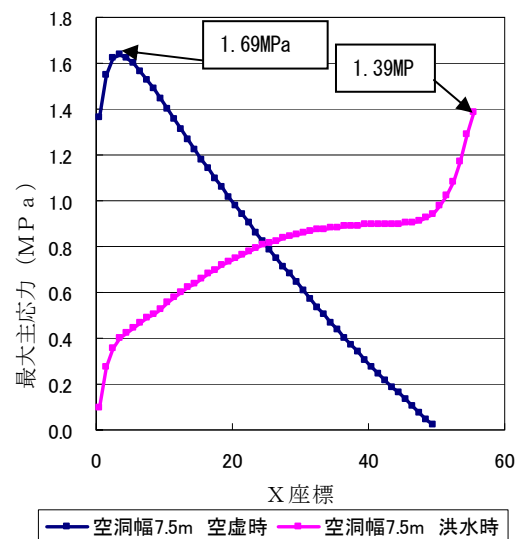


図-5 3次元解析の最大引張応力分布図

表-4、図-5より、2次元 FEM 解析、3次元 FEM 解析のいずれの解析結果においても、通常運用時(空虚時)の荷重条件でダム上流部に発生する引張応力は、洪水時よりも大きくなる事が確認された。このため、以後の解析においては、荷重条件を常時(空虚時)とし、評価断面は、ダム上流端とすることとした。

b) 2次元解析と応力集中係数からの算出による方法の比較評価³⁾⁴⁾

図-6に、2次元 FEM 解析により上流面側のダム軸方向(B-B断面)主応力 σ_1 分布を示す。

発生する最大引張応力は、発生位置がダムの堤高の違いに関わらず空洞幅中央直上であり、また、その値は堤高が高いほど大きな引張応力が発生している。

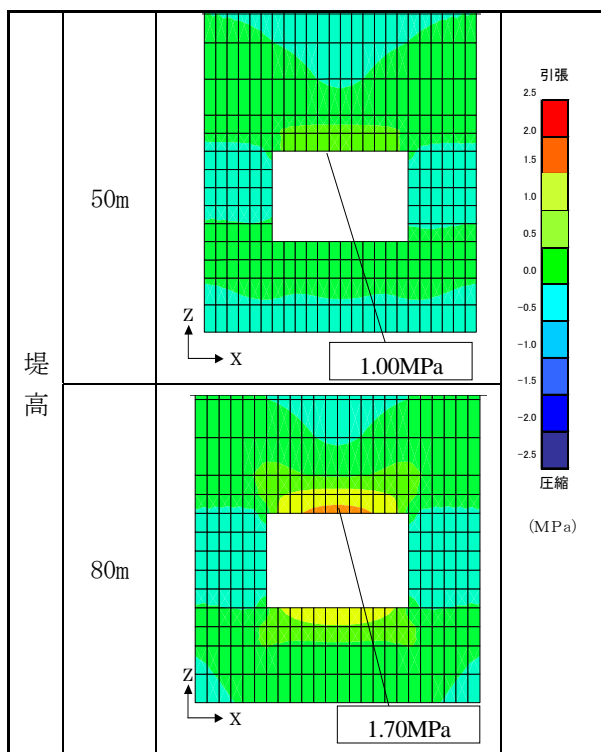


図-6 2次元引継ぎ解析 σ_1 主応力分布図 (B-B断面：空洞幅 7.5m)

図-7に、堤高50m、80mの2次元 FEM 引継ぎ解析及び応力集中係数により求められた最大引張応力を示す。また、図-8に、コンクリートの引張強度を一般的な構造用コンクリートの引張強度を 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 3.12N/mm^2 に対する安全率を示す。

2次元 FEM 解析により求められた堤高50m、80m

モデルにおける最大引張応力の値(B-B断面)と、それぞれの堤高に対し、応力集中係数($C_c = \sigma_{t,max} / \sigma$)から算出した最大引張応力の値は、表-5に示すとおりであり、2次元 FEM 解析と応力集中係数からの算出は、その比が0.96、1.04であり、高い整合性がある。

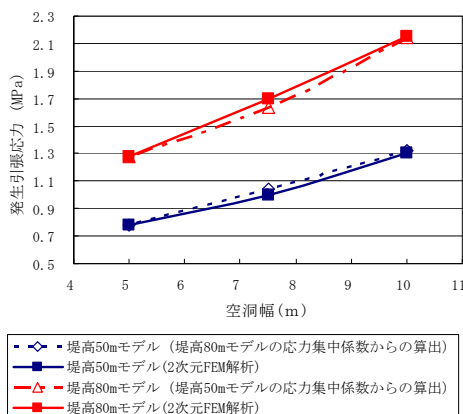


図-7 発生応力の比較

(2次元 FEM 解析と応力集中係数からの算出値の比較評価)

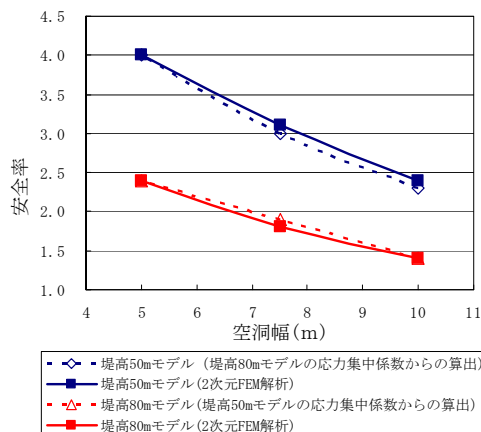


図-8 安全率の比較

(2次元 FEM 解析と応力集中係数からの算出値の比較評価)

引張強度 2.4N/mm^2 と仮定した場合

(地震時引張強度 $=3.12\text{N/mm}^2$ ：地震時割増 30% を見込む)

表-5 2次元 FEM 解析と応力集中係数からの算出値の比較評価

	最大引張応力 (MPa)	
	堤高 50m	堤高 80m
① 2次元 FEM 解析	1.00	1.70
② 応力集中係数からの算出	1.04	1.64
③ = ①/②	0.96	1.04

c) 3次元解析における築堤解析と掘削解析の解析

手法の違いによる応力値の比較評価

3次元 FEM 解析は、実際のダムの施工方法を考慮した築堤解析と2次元 FEM 解析と同様に空洞の要素を削除する掘削解析の2種の解析法の比較を行った。これらの解析手法の違いによる発生引張応力の値を表-6に示す(B-B断面)。この結果から、本検討における3次元 FEM 解析の掘削解析と築堤解析では解析手法による最大引張応力値はほぼ同値を示し、大きな差違がなかった。

表-6 3次元 FEM 解析における掘削解析と築堤解析の違い(堤高80m)

	最大引張応力 (MPa)
①掘削解析	1.36
②築堤解析	1.37
③=①/②	0.99

d) 2次元解析と3次元解析との次元の違いによる応力値の比較評価³⁾⁴⁾

図-9に2次元 FEM 引継ぎ解析により求めた上流面ダム軸方向(B-B断面)主応力 σ_1 分布図と3次元 FEM 解析により求められた主応力 σ_1 分布図を示す。2次元 FEM 引継ぎ解析と3次元解析では、両者ともに最大引張応力は空洞直上部で生じている。また、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、2次元 FEM 解析の方が3次元 FEM 解析より大きい値を示している。

次に図-10に3次元 FEM 解析で求めた上下流方向(A-A断面)の主応力 σ_1 分布を示す。ダム軸断面(B-B断面)の空洞直上部で発生する引張応力は、上流側の方が大きく、その最大値の発生位置は堤体の上流表面から3.5m 堤体内部の位置となっている。

2次元 FEM 解析及び3次元 FEM 解析で求めた最大引張応力と空洞幅の関係を図-11に、空洞幅と安全率の関係を図-12に示す。なお、3次元 FEM 解析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、安全率は、コンクリートの引張強度を一般的な構造用コンクリートの引張強度を 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 3.12N/mm^2 に対するものである。

2次元 FEM 解析と3次元 FEM 解析の結果を比較すると、最大引張応力はほぼ同値を示すが、2次元 FEM 解析は、3次元 FEM 解析より応力値がや

や大きくなっている。

以上a)~d)までの検討結果より、以下のことが言える。

- ① 常時(空虚時)に上流面側に発生する引張応力と洪水時(サーチャージ水位時)に下流側で発生する引張応力では、常時(空虚時)に発生する上流部の引張応力の方が厳しい条件となる。
- ② 2次元 FEM 解析と応力集中係数からの算定値の整合性は高い。
- ③ 3次元解析における築堤解析と掘削解析による応力値の差違は小さい。
- ④ 2次元 FEM 解析と3次元 FEM 解析では、常時の上流面側で発生する応力値では、2次元 FEM 解析の方がやや大きな値を示す。

したがって、以降の検討においては、発生する応力が大きな値を示し、安全側に評価できるダム上流面側を評価断面とした。また、解析手法としてはa) 2次元 FEM 引継ぎ解析を基本とし、補足的にb) 応力集中係数からの算定も用いることとした。

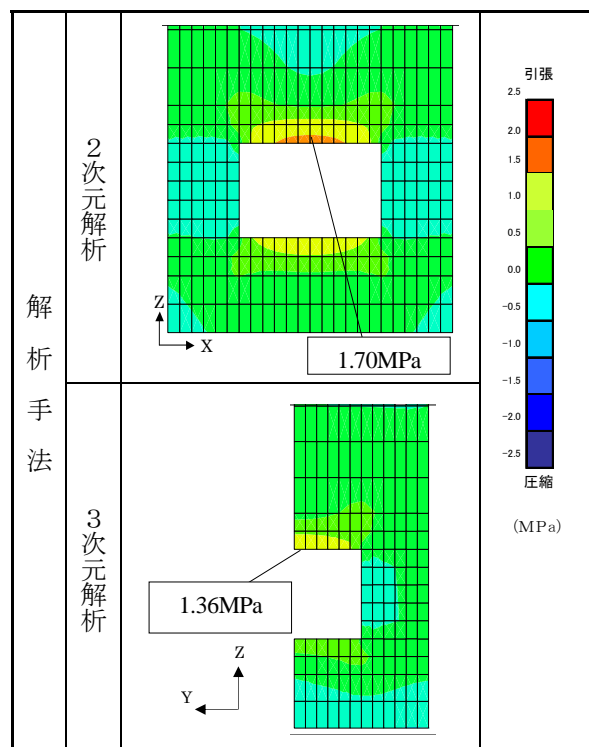


図-9 3次元 FEM 解析 σ_1 主応力分布図
(B-B断面: 堤高80m、空洞幅7.5m)

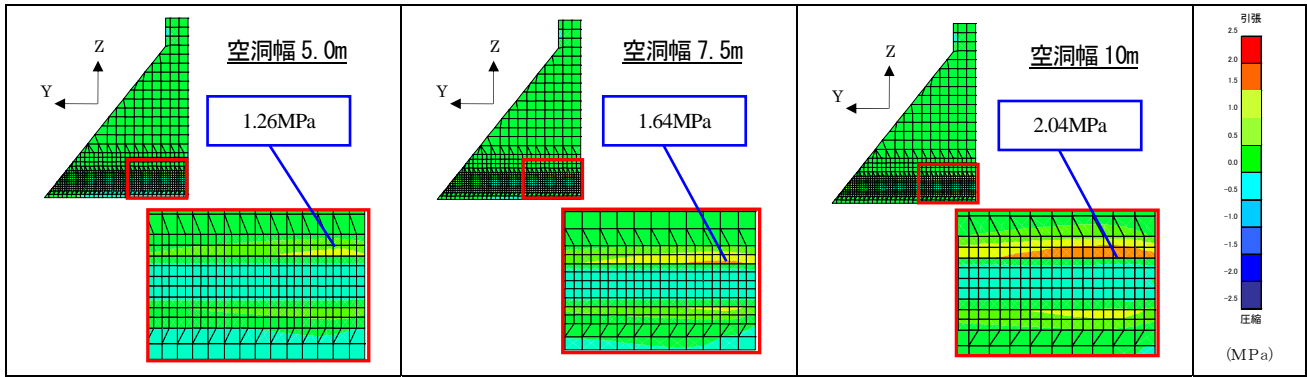


図-10 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図 (A-A断面：堤高80m)

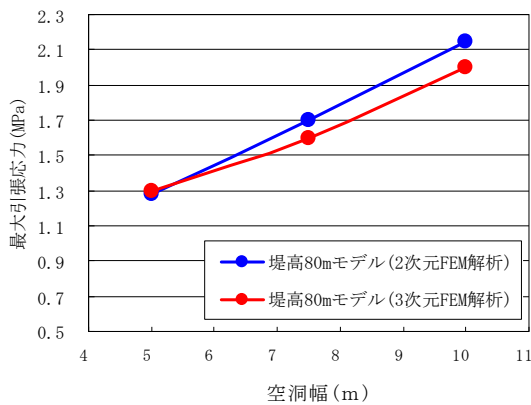


図-11 発生応力の比較

(2次元FEM解析と3次元FEM解析の比較評価)

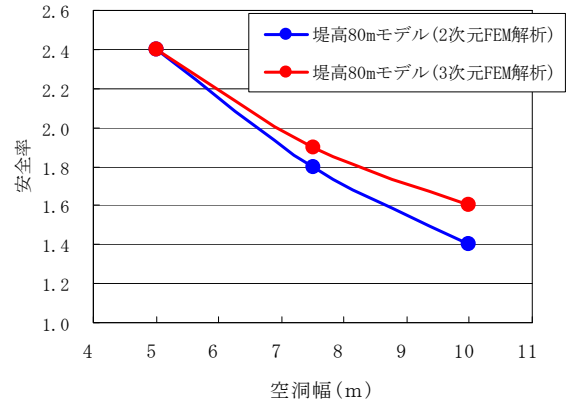


図-12 安全率の比較

(2次元FEM解析と3次元FEM解析の比較評価)

引張強度 2.4N/mm^2 と仮定した場合

(地震時引張強度 $= 3.12\text{N/mm}^2$: 地震時割増30%を見込む)

3.3 解析条件の検討

解析条件の検討として、まず、地震荷重の有無による安全率の検討を行った。これは、ダムコンクリートは、地震荷重作用時に通常の引張強度に対し、30%の割増しを見込むことができることを考慮した対応である。次に、3.1節の検討において設定していた境界条件（解析モデルの側方境界条件を、鉛直 (Z) 及び水平 (X) 方向ともにフリーとする）に対し、実際のダムを考慮して隣接するブロックによって空洞部の変形が拘束されることを条件に付加した応力状態の分析を行った。

3.3.1 荷重条件の違いによる応力値の評価

(1) 解析条件

荷重条件の違いによる応力値の評価は、2次元FEM解析により行った。解析対象としたモデルの主要諸元を表-7に示す。なお、主要諸元は前節の表-1に比べて空洞幅をパラメータとしたことが異なる。

また、荷重条件の違いは、表-8に示すとおりであり、本検討では、治水専用ダムの常時（空虚時）の

応力状態を検討することから、荷重条件は地震時慣性力の有無の違いのみとなる。

表-7 解析モデルの主要諸元

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

表-8 検討ケース

Case	荷重条件：常時(空虚時)		
	地震力有	水平力	地震時慣性力
鉛直力		堤体自重	
地震力無	水平力	なし	
	鉛直力	堤体自重	

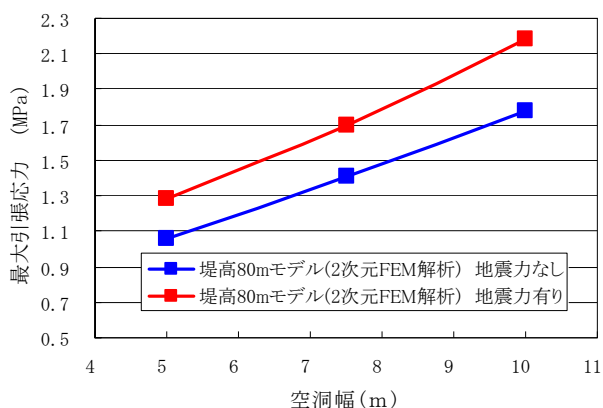


図-13 地震荷重の有無による空洞幅と発生応力の関係の違い

表-9 地震荷重の有無による最大引張応力の違い

最大引張応力 (MPa)			
空洞幅	5.0m	7.5m	10.0m
①地震力有	1.28	1.70	2.18
②地震力無	1.06	1.41	1.78
①/②	1.21	1.21	1.23

表-10 地震荷重の有無による安全率の違い

Case	空洞幅		
	5.0m	7.5m	10.0m
①地震力有	$1.3\sigma_T/1.28$	$1.3\sigma_T/1.7$	$1.3\sigma_T/2.18$
②地震力無	$\sigma_T/1.06$	$\sigma_T/1.41$	$\sigma_T/1.78$
③=①/②	1.08	1.08	1.06

(2) 解析結果と考察

図-13、表-9 に、地震荷重の有無の違いによる最大引張応力値を示す。地震荷重がある場合、空洞部周辺に発生する最大引張応力は、地震荷重がない場合に比べ、空洞幅に関わらず 2 割程度大きな応力が発生している。

次に、地震荷重の有無の違いを安全率により評価した。ここで、仮に引張強度を σ_T と設定すると、地震時の引張強度は割増 30%¹⁾を見込めば、地震荷重有条件における強度は $1.3\sigma_T$ となる。表-10 に表-9 の応力値を安全率評価したものを示す。安全率での評価は、表-10 の③に示すように強度 σ_T にどの値を与えても常に地震力有の条件下における安全率が 6~8%程度高い結果であった。

以上より、地震荷重の有無による空洞部周りの応力発生状態は、応力値でみれば、地震荷重あり条件

の方が大きくなるが、安全率では、地震時の強度割増を考慮すると、非地震時の条件の方が地震有りの条件より厳しいといえる。

ただし、これ以降の検討については、安全率は仮定する引張強度により異なることから、発生する引張応力が大きくなる地震荷重有りの条件を用いることとした。なお、地震荷重なしの条件は、空洞幅に関する最終的な評価において安全率に 6~8%の上乗せすることで考慮することとした。

3.3.2 境界条件の違いによる応力値の比較評価

前述までの検討では、解析モデルの側方境界条件は、鉛直 (Z) 及び水平 (X) 方向ともにフリーとすることとし、設計上安全側 (応力を大きめに評価する) の評価を実施していた。これは、一般的な既往ダムにおける放流管周辺応力の解析において採用されている手法である。このモデルの境界条件では、ブロック側方への変位拘束がないことから、放流管断面の変形が大きくなり、引張応力が大きくなる。しかし、実際のコンクリートダムは、空洞部の変形は隣接するブロックによって拘束されることが考えられる。このため、本項では隣接するブロックによる拘束の影響について検討した。

(1) 解析条件

表-11 に示す空洞幅を 7.5m とした解析モデルを用いて 2次元 FEM 解析を行った。本検討では、隣接ブロックの影響を見るために隣接ブロックのモデル化を行った。図-14~16 に隣接ブロックを含めたモデル模式図を示す。隣接ブロックは、剛性をコンクリートと同じ値 (E_c) を与え、境界条件として、各ブロックの底面を固定、隣接ブロック側方を水平方向固定、鉛直方向をローラーとした。また、空洞部を含むブロックと隣接ブロックの境界は、ジョイント要素を介して、最初から完全に接触する場合と隙間幅 (d) を介して接触した際にジョイント要素の剛性が発生する場合を考慮して設定した(図-15)。これは、実際のダムを考慮した場合、ブロックと隣接ブロックが横継目において完全に接しているわけではなく、ある程度の間隙があることが考えられるためである。さらに、横継目にキー構造を有する場合、ブロックが上下流方向に撓んで変形していれば、そのキー構造の一部が隣接ブロックと接触していることが考えられる。このため、ブロックが部分的に接触している効果として、ジョイント要素のバネ剛性をパラメ

ータとして変化させて検討した。

表-12 に解析ケース一覧を示す。なお、荷重条件は 3.2 の解析結果との比較を行うため地震荷重ありとした。荷重条件を表-13 に示す。

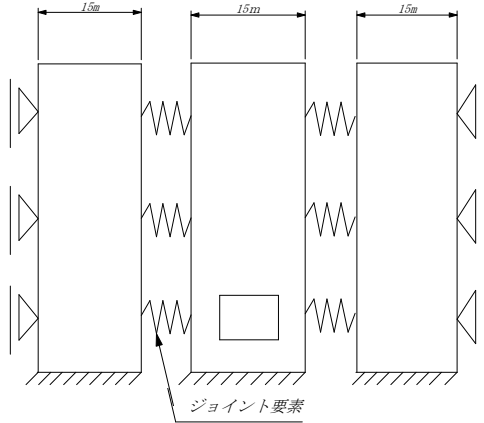


図-14 隣接ブロックありモデルの模式図(隙間なし)
(Case2 の場合)

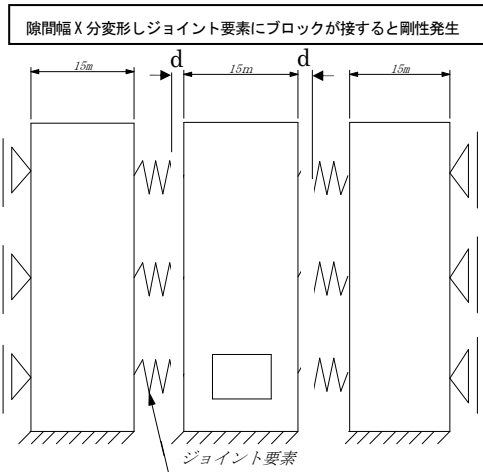


図-15 隣接ブロックありモデルの模式図(隙間あり)
(Case3, Case4 の場合)

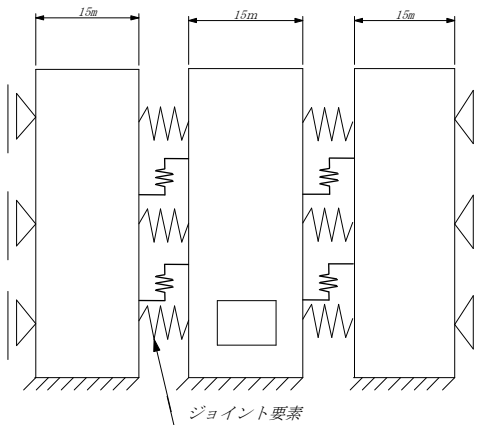


図-16 隣接ブロックありモデルの模式図(隙間なし)
(Case5 の場合)

表-11 解析モデルの主要諸元

項目	諸元
堤高 (H)	80m
堤頂幅	10m
上流面勾配	鉛直
下流面勾配	1:0.8
放流管高	5m
ブロック幅 (W)	15m
空洞幅 (b)	7.5m

表-12 解析ケース一覧

Case	隣接ブロックの剛性 (Ec) (N/mm ²)	隙間幅 (d) (mm)	ジョイント要素		
			面直方向のバネ剛性 Kn (N/mm ²)	せん断方向のバネ剛性 Ks (N/mm ²)	
Case1	フリー				
Case2	30,000	0	100Ec	/	
Case3		0.01			
Case4		0.1			
Case5		0			12,500※

※ $K_s = K_n / \{2(1+\nu)\}$

表-13 荷重条件 (常時：空虚時)

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	

(2) 解析結果と考察

はじめに Case 1～4 までの隣接ブロックとの隙間幅に着目し、隙間幅と空洞造成時の最大引張応力の関係を図-17 に示す。ここで、フリー条件(Case1)の隙間幅は、側方境界条件をフリーとした 1 ブロック解析の結果からでは X 方向最大変形量が 0.26mm 程度であったことから隙間幅 0.26mm 以上では、空洞ブロックは、空洞に起因する側方変形では、隣接ブロックには接触しないことになる。図-17 より、発生する最大引張応力は、Case1 (側方・鉛直フリーの条件) が 1.7MPa であるのに対し、隣接ブロックが完全に全接触していると仮定した Case2 では 1.29MPa となり、隣接ブロックによる変位拘束を考慮することにより約 30%低減される結果となった。ただし、ジョイント要素の剛性条件で、低減割合は変化する。

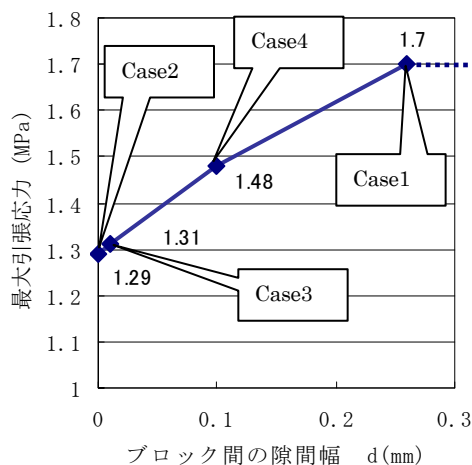


図-17 隣接ブロックとの隙間幅の違いによる最大引張応力の違い

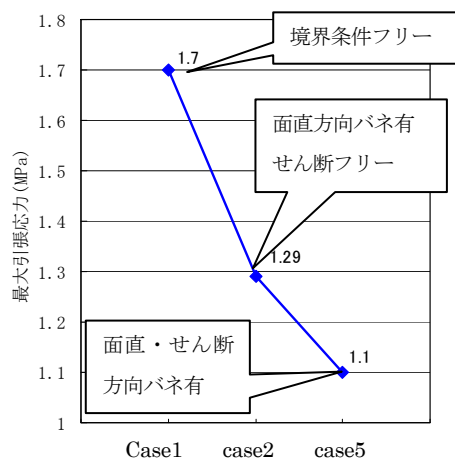


図-18 ジョイント要素の設定条件の違いによる最大引張応力の違い

次に、隙間幅(d)を固定し、ジョイント要素の設定条件を変化させた Case1, 2, 5 による解析結果について考察する。図-18 に、ジョイント要素の設定条件の違いによる最大引張応力を示す。これは、ジョイント要素にバネ要素（面直及びせん断）を設定し、側方変位の面直方向及びせん断方向への抵抗の有無を変化させた場合を試算したものである。発生する最大引張応力は、Case1（側方・鉛直フリーの条件）が 1.7MPa であることに対し、隣接ブロックとの間のジョイント要素の面直、せん断バネを考慮した Case5 では 1.1MPa となり、約 54% 低減している。

以上の検討結果により、空洞部周辺に発生する応力は、隣接ブロックによる側方変位抵抗条件を付与することで低減され、これまでダムの放流管ブロックの応力解析において使用されている 1 ブロックの抽出し、側方境界条件をフリーに設定した FEM モデルは、ある程度の安全の余裕を見込んだ結果となることを確認した。

ただし、本項で検討した隣接ブロックとの隙間幅、ジョイント要素のバネ剛性値については、実ダムにおいては、どの程度の値と推定できるかは不明であることから、本項における検討は、ダム堤体の空洞周辺の発生応力値に対する余裕代の確認を行ったことに留めておく。したがって、以降の解析においては、側方境界条件をフリーと設定した条件で検討した。

3.4 堤高、空洞幅の違いによる応力状態の検討³⁾⁴⁾

本節では、前節までの検討により検証した条件を用いて、ダム堤体の堤高及び空洞幅をパラメータとし、ダム堤体へ設けることができる空洞部の規模を検討した。

(1) 解析条件

本検討は、2次元 FEM 解析及び応力集中係数からの算定手法を用いた。解析対象としたモデルの主要諸元を表-14 に示す。解析モデルの主要諸元は表-1 の条件に、堤高、空洞幅をパラメータとした条件を追加したものである。堤高は 3 種類(50, 80, 100m)、ブロック幅 (W) は 15m、空洞規模は空洞幅 b を 5.0m (b/W=1/3)、7.5m (b/W=1/2)、10.0m (b/W=2/3) の 3 種類とし、解析方法と実施ケース一覧を表-15 に示す。荷重条件は、発生する応力値として大きな値を示す地震荷重ありとした。なお、以降の解析においては、全て地震荷重ありとしている。

表-14 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-15 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	○	○	○

(2) 解析結果と考察

図-19に、2次元FEM引継ぎ解析及び応力集中係数により求められた最大引張応力を示す。堤体に発生する最大引張応力は、堤高が高いほど、また空洞幅が広いほど大きな応力が発生している。

治水専用ダムは、既設ダムへの放流管増設等の場合などとは異なり、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することが可能である。このため、コンクリートの引張強度として一般的な構造用コンクリートの引張強度 2.4N/mm^2 を仮定し、地震荷重の引張強度割増 30% ¹) を見込んだ引張強度 3.12N/mm^2 に対して安全率を算出した。各ケースの安全率を図-20に示す。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 以上であるが、最も条件の厳しい堤高 100m モデルの空洞幅 10.0m ($b/W=2/3$) のケースでは安全率は 1.0 程度となっている。

3.5 拡幅したブロック幅を持つダムモデルによる検討

前節までの検討は、モデル断面形状を基本直角三角形とし、モデル化したブロック幅を通常施工で用いられることが多い 15m として行った。本節では、より大きな空洞を造成することを目的として検討を行った。一般に、コンクリートダムの横継目間隔は 15m とされている事例が多いが、高圧放流管を設置するブロック等では 15m よりも拡幅した横継目間隔を設けた実例がある (表-16)。そこで、本節では、空洞を造成するブロック幅が 15m 以上としたダムモデルを作成し、前節で検討した 15m ブロックのモデルによる解析結果との比較検討を行った。

表-16 放流管ブロックに対して 15m よりも大きな横継目間隔を採用したダムの例 ⁵)

横継目間隔	ダム名
21m	破間川
18m	田瀬、破間川、猫山、式見、玉川
17m	刈谷田川
16m	滝

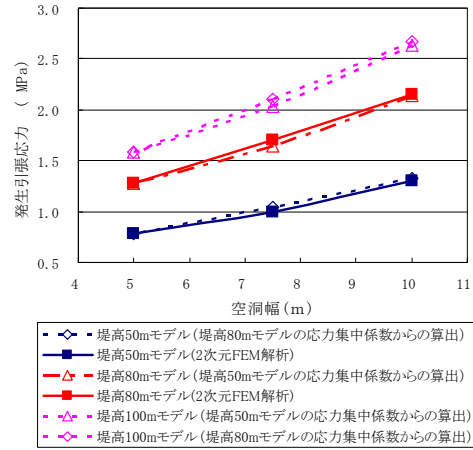


図-19 発生最大応力の比較

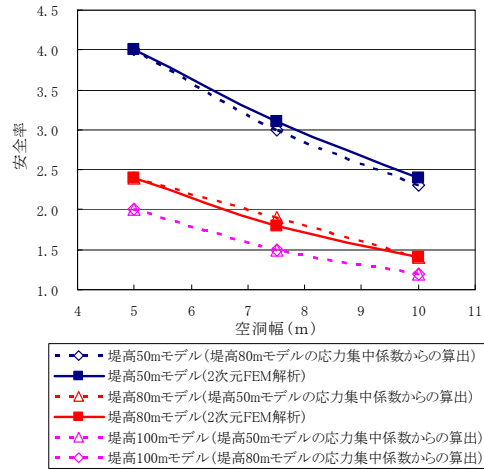


図-20 安全率の比較

引張強度 2.4N/mm^2 と仮定した場合
(地震時引張強度 = 3.12N/mm^2 : 地震時割増 30% を見込む)

(1) 解析条件

本検討は、2次元 FEM 引継ぎ解析を用いた。ブロック幅 (W) は実ダムで実績のある 18m、21m とし、空洞幅 (b) はブロック幅に対して $b/W(1/3)$ 、 $b/W(1/2)$ と設定した。表-17 に解析モデルの諸元を示す。解析モデルは、ブロック幅、空洞幅以外の諸元については、3.2 節における 80m の堤高のダムモデルと同条件とした。

(2) 解析結果と考察

ブロック幅 15, 18, 21m のモデルによる解析により求められた最大引張応力を図-21 に示す。また、安全率で評価したものを図-22 に示す。ここで安全率の評価に用いる引張強度は、前節と同様と 30% の割増しを見込むこととした。図-21, 図-22 からは、空洞周辺に発生する応力は、ブロック幅を拡げることにより緩和され、より大きな空洞を設けることが可

能となることわかる。例えば、今回の検討モデルにおいて7.5mの空洞を造成することを考えると、ブロック幅を15mから21mに拡幅することによって3割程度応力が緩和されている。

次に、図-23、図-24に、図-21、図-22のX軸を空洞幅 (b) とブロック幅 (w) の比率に変換したものを示す。図-23、図-24 より、ブロック幅に対する空洞幅の比率で見ると、同じ b/w ではブロック幅が広いほど僅かではあるが大きな応力が発生することとなっている。これは、今回の検討においては、全ダムモデルについて空洞の高さを5mで一定としたため、ブロック幅を拡げることにより、空洞形状がより扁平な形状となることも起因していると推察される。

以上の結果から、ブロック幅を拡幅することにより、ブロック幅に対する比率としては若干不利とな

るものの、ブロック幅を拡幅することにより、発生応力の観点から、空洞幅を拡げることが可能であることを確認した。

表-17 解析モデルの主要諸元

項目	諸元	
堤高 (H)	80m	
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)	18m	21m
空洞幅 (b)	6.0m, 9.0m	7.0m, 10.5m

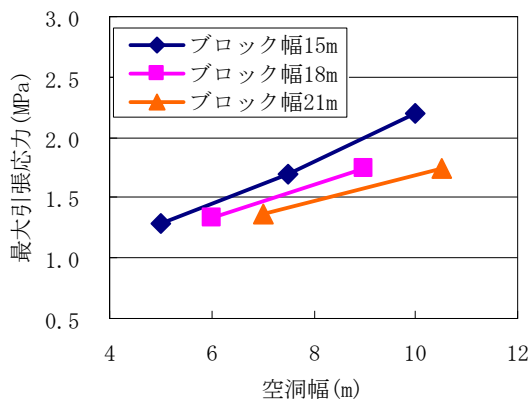


図-21 ブロック幅の違いによる最大引張応力の比較 (X軸を空洞幅としたもの)

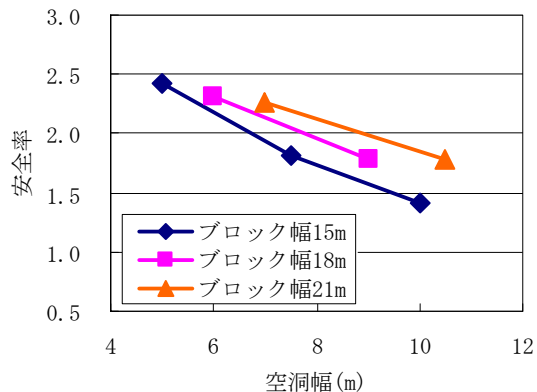


図-22 ブロック幅の違いによる最大引張応力の安全率評価 (X軸を空洞幅としたもの)
引張強度 2.4N/mm² と仮定した場合
(地震時引張強度=3.12N/mm² : 地震時割増 30%を見込む)

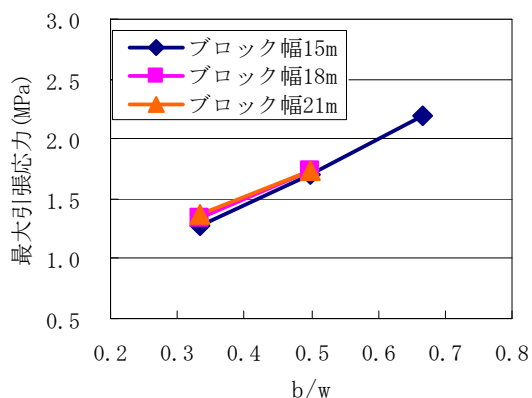


図-23 ブロック幅の違いによる最大引張応力の比較 (X軸を空洞幅 (b) / ブロック幅 (w) としたもの)

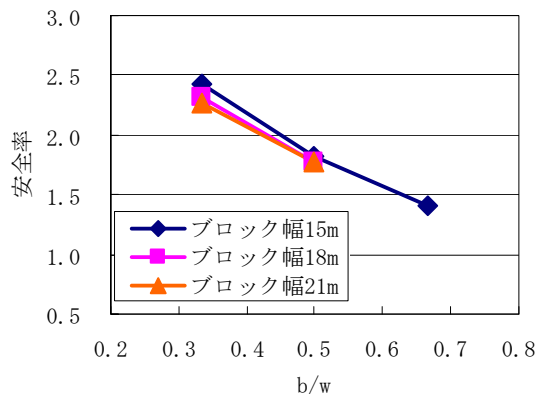


図-24 ブロック幅の違いによる最大引張応力の安全率評価 (X軸を空洞幅 (b) / ブロック幅 (w) としたもの)
引張強度 2.4N/mm² と仮定した場合
(地震時引張強度=3.12N/mm² : 地震時割増 30%を見込む)

3.6 ダム形状の違いによる検討

これまでの検討は、堤体形状を基本直角三角形と

したダムモデルを用いた。しかし、治水専用ダムでは、断面の安定計算からは、常時の貯水のない空虚状態で上流面に発生する応力がクリティカルな条件となる。このため、本節では、ダムモデルのダム軸上流に勾配を持たせることにより、ダム軸上流側の空洞周辺に発生する応力がどの程度緩和されるかを検討した。

(1) 解析条件

本検討は、2次元 FEM 解析及び応力集中係数からの算定手法を用いた。解析モデルの概要を図-25に、主要諸元を表-18に示す。解析モデルは、これまでの検討モデル(堤高 80m のダムモデル)に、現在設計中の治水専用ダムの事例を参考に上流面に 1:0.12 の勾配を設けた形状であり、空洞規模は空洞幅 b を 5.0m ($b/W=1/3$)、7.5m ($b/W=1/2$)、10.0m ($b/W=2/3$) の 3 種類を設定した。

応力を評価するダム軸方向断面は、ダム軸 (B1-B1) と空洞標高において上流端部より約 4m (2 要素) 内部に入った位置 (B2-B2) とした。

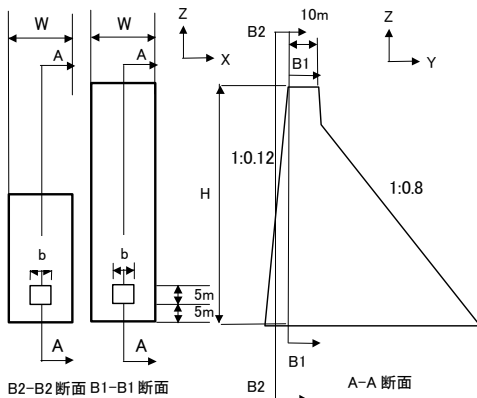


図-25 解析モデル

(2) 解析結果と考察

モデル形状の違いによる空洞部周辺に発生する最大引張応力値を図-26に、また、安全率で評価したものを図-27に示す。ここで安全率の評価における強度の設定は前節と同様に30%の割増しを見込むこととした。図-26、図-27からは、空洞部周辺に発生する応力は、モデル形状の上流部に勾配を設けることによってダム軸断面 (B1-B1)、上流端付近の断面 (B2-B2) とともに緩和されている。そして、上流面に勾配を設けたモデルにおいて、上流端表面付近の断面 (B2-B2) と直角三角形モデルで発生した応力の比較からは、上流面に勾配を持たせることにより、空洞部周辺に発生する最大引張応力は、25%~30%程度緩和されている。

以上の結果から、上流面に勾配を持たせたダム形状とすることにより、空洞部周辺に発生する引張応力値は緩和され、より大きな空洞を設けることができるようになることを確認した。

表-18 解析モデルの主要諸元

項目	諸元
堤高 (H)	80m
堤頂幅	10m
上流面勾配	1:0.12
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

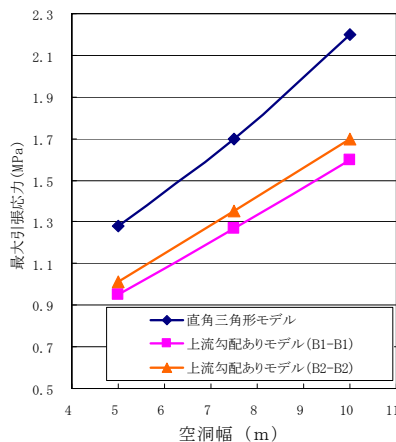


図-26 上流面勾配の有無による最大引張応力の比較

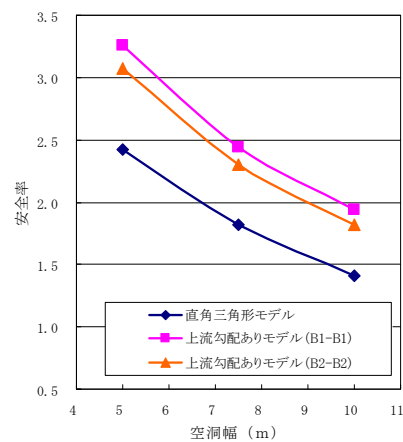


図-27 上流面勾配の有無による最大引張応力の安全率評価

3.7 1 ブロック内に設ける空洞規模に関する検討

結果のまとめ

3章では、1ブロック内に収まる空洞を設けることを前提として、1ブロック内に設けることが可能な空洞規模の検討を行った。以下に検討結果をまとめる。

(解析手法の検討)

- ① 解析手法の検討から2次元 FEM 解析による引継解析と応力集中係数からの算定値の整合性は高い。
- ② 2次元 FEM 解析による引継ぎ解析と3次元 FEM 解析では、上流面側の空洞周りに発生する応力値では、やや2次元 FEM 解析の方が大きな値を示す。
- ③ 3次元解析における築堤解析と掘削解析による解析手法による最大引張応力値の差違は小さい。

(解析条件の検討)

- ④ 空洞周りの応力値は、地震荷重あり条件の方が大きくなるが、地震時の強度割増(30%増)を考慮すると安全率評価では非地震時の条件における方が厳しい。
- ⑤ 空洞周りに発生する応力は、隣接ブロックによる側方変位拘束条件を付与することにより低減され、これまでダムの放流管ブロックの応力解析において用いられてきた1ブロックを抽出し、側方境界条件をフリーに設定してきたモデル解析では、安全側の余裕がある結果となることを確認した。

(堤高、空洞幅の違いによる応力状態の検討)

- ⑥ 本研究検討において基本とした条件(直角三角形断面形状、ブロック幅15m、空洞高さ5mなど)において、空洞周りのコンクリートの引張強度として一般的な構造用コンクリートの引張強度 2.4N/mm^2 を仮定した場合(地震時割増30%を見込むと強度 3.12N/mm^2)、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($b/W=2/3$)のケースでは安全率は1.0程度となる。

(拡張したブロック幅を持つダムモデルによる検討)

- ⑦ ブロック幅を拡張することにより、同じブロック幅に対する空洞幅の比率ではやや不利となるものの、空洞幅はより拡げることが可能となる。

(ダム形状の違いによる検討)

- ⑧ 上流面に勾配を持たせたダム形状とすることにより、上流側面の空洞周りに発生する応力値は緩和され、より大きな空洞を設けることができる。

(1ブロック内に空洞を設ける構造形式における可能な底部空洞規模)

- ⑨ 本研究検討において基本とした条件(直角三角形断面形状(上流面勾配鉛直)、ブロック幅15m、空洞高さ5mなど)において、空洞周りのコンクリートの引張強度 2.4N/mm^2 (地震時割増30%を見込むと 3.12N/mm^2)と仮定し、引張に対する安全率2.0以上を確保できるという条件で評価すると、堤高50mでは空洞幅10mでも安全率が2.4程度となり、堤高80mでは可能な空洞幅は7m程度、堤高100mでは5m程度となる。

同様に、引張に対する安全率2.0以上を確保できるという条件で評価した場合、堤高80mでは基本条件からブロック幅を21mとした場合に可能空洞幅は9m程度となる。また、基本条件からダム断面形状を上流面勾配1:0.12とした場合には可能空洞幅は9m程度となる。

ただし、上記の検討は、地震荷重あり条件で引張強度に地震時割増(30%増)を考慮した強度を用いて算定した安全率によるものである。しかし、直角三角形断面形状の安全率は、地震時割増を考慮しない非地震時の方が地震時に比べ6~8%程度の安全率の低下が見込まれる。このため、上記と同様な方法で空洞部規模を評価する場合、その判断基準と仮定した安全率2.0以上に6~8%を見込んだ2.12~2.16程度以上で評価することと同等となることから、各条件における安全率と空洞幅の関係図から推定すると、設置可能な空洞幅が1m程度減少すると考えられる。

4. 2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討

本章では、3章の1ブロック内における空洞規模の検討に対し、さらに大規模な空洞を設ける可能性を検討するために、堤体の隣接2ブロックに渡って空洞を設ける場合を想定し、構造上可能な規模の検討を行った。

4.1 解析条件の検討

2ブロックに渡る空洞部の検討では、解析モデルは複数ブロックを有するダム全体を模したものとする必要があります。この場合、基礎岩盤と横継目のモデル化設定が解析結果に大きな影響を及ぼすことから、2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討に先立ち、岩盤の弾性係数の影響及びジョイント要素のせん断方向の応力伝達条件について検討した。

なお、解析モデル条件は、後述の4.2節以降の本解析と同じである。

4.1.1 基礎岩盤の弾性係数に関する検討

岩盤の弾性係数の違いが堤体の応力状態に与える影響について検討を行った。解析に用いた材料物性値を表-19に示す。岩盤の弾性係数は、 $5,000 \text{ N/mm}^2$ (C_{II} 級相当)、 $20,000 \text{ N/mm}^2$ (堅固な C_{II} 級相当)、 $3,000,000 \text{ N/mm}^2$ (剛基礎想定) の3種類のケースとした。

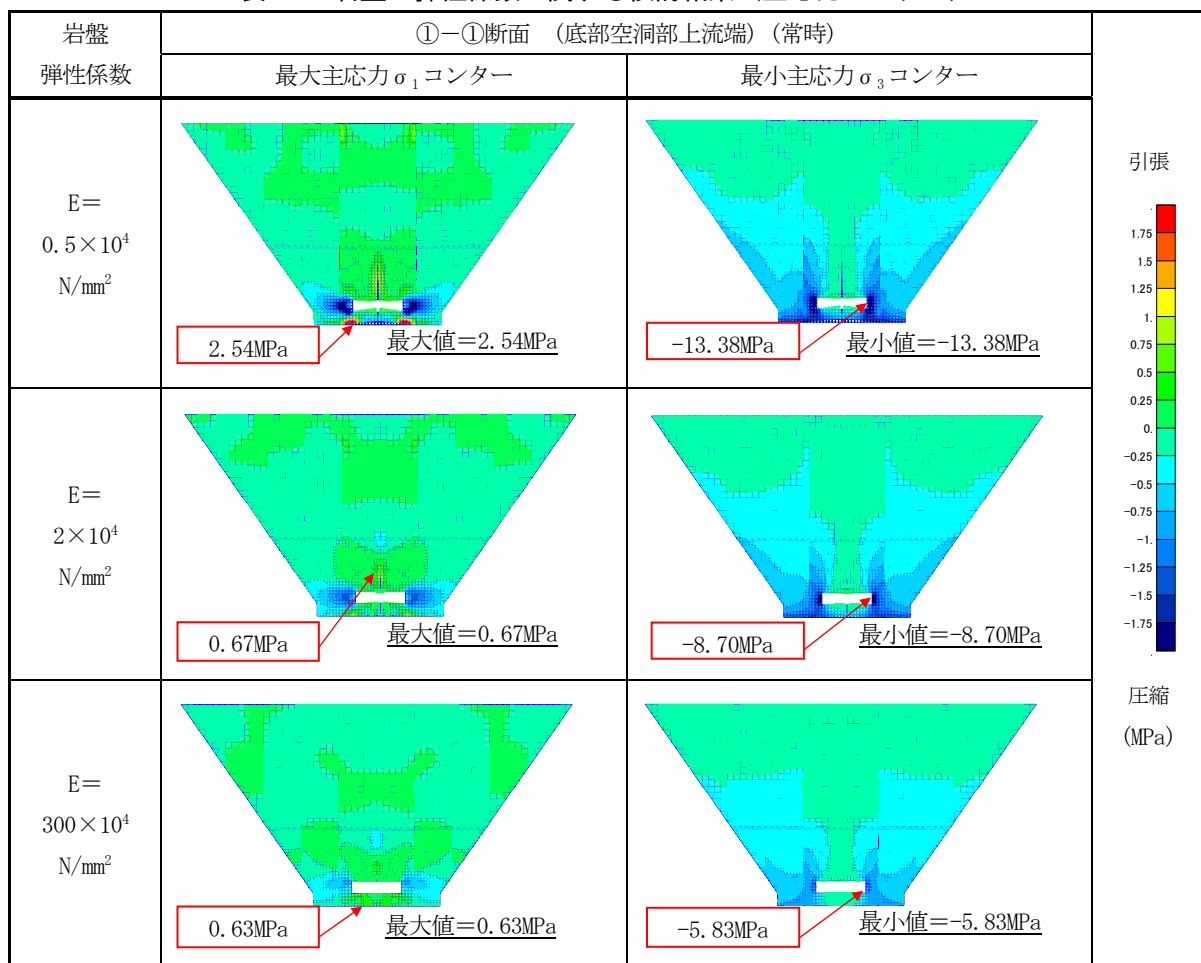
なお、横継目のジョイント要素の設定条件は、後述4.1.2の継目①とした。

解析結果として、表-20に主応力コンター一覧を示す。最小主応力(圧縮応力)については、その堤体内の集中箇所はどのケースも同じであるが、その最大値は岩盤の弾性係数が小さいほど大きくなっている。4.2節以降の本解析では、80m級のダムモデルを基本として検討することに鑑み、 C_{II} 級岩盤相当として岩盤の弾性係数を $20,000 \text{ N/mm}^2$ を用いることとした。

表-19 岩盤の弾性係数に関する予備検討に用いた材料物性値

材料物性	堤体	岩盤	貯水
単位容積質量 ρ (kg/m ³)	2,300	2,300	1,000
弾性係数 E (N/mm ²)	30,000	5,000	—
		20,000	
		3,000,000	
ポアソン比 ν	0.2	0.3	—

表-20 岩盤の弾性係数に関する検討結果 (主応力コンター)



4.1.2 ジョイント要素の条件設定に関する検討

横継目のジョイント要素の条件設定の違いが堤体

の応力状態に与える影響について検討を行った。

表-21、図-28 にジョイント要素の設定に関する検討に用いた条件を示す。表-21 に示すとおり、ジョイントが開いた時のジョイント要素を介したせん断応力の伝達の有無について比較した。

解析結果として、表-22 に主応力コンター一覧を示す。

ジョイントが開いたとき、ジョイント要素を介してせん断応力を伝達させないジョイント要素条件である継目①では、ジョイントの開きが空洞中央部で

最大となるが 0.002mm 程度である。また、せん断応力を伝達させる条件の継目②では、ジョイントの開きが生じる位置は継目①とほぼ同じである。

また、最大主応力および最小主応力の集中発生箇所は継目①、②の両者で同じであり、それぞれの最大値及び最小値もほぼ同じである。以上より、4.2 節以降の本解析においては、ジョイントが開いたときはジョイント要素を介してせん断応力を伝達させない設定（継目①）とした。

表-21 ジョイント要素の条件設定に関する検討

条件名	ジョイント要素の垂直変位 δ	ジョイント要素を介する応力伝達	
		面直方向	せん断方向
継目①	$\delta > 0$ (開く)	全く伝達しない	全く伝達しない
継目②			完全に伝達する

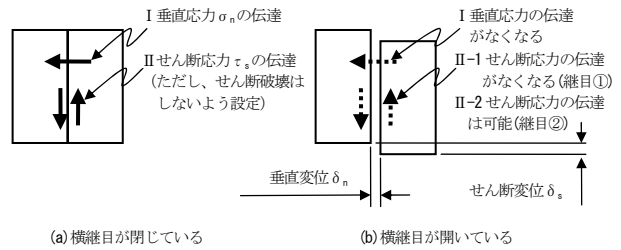
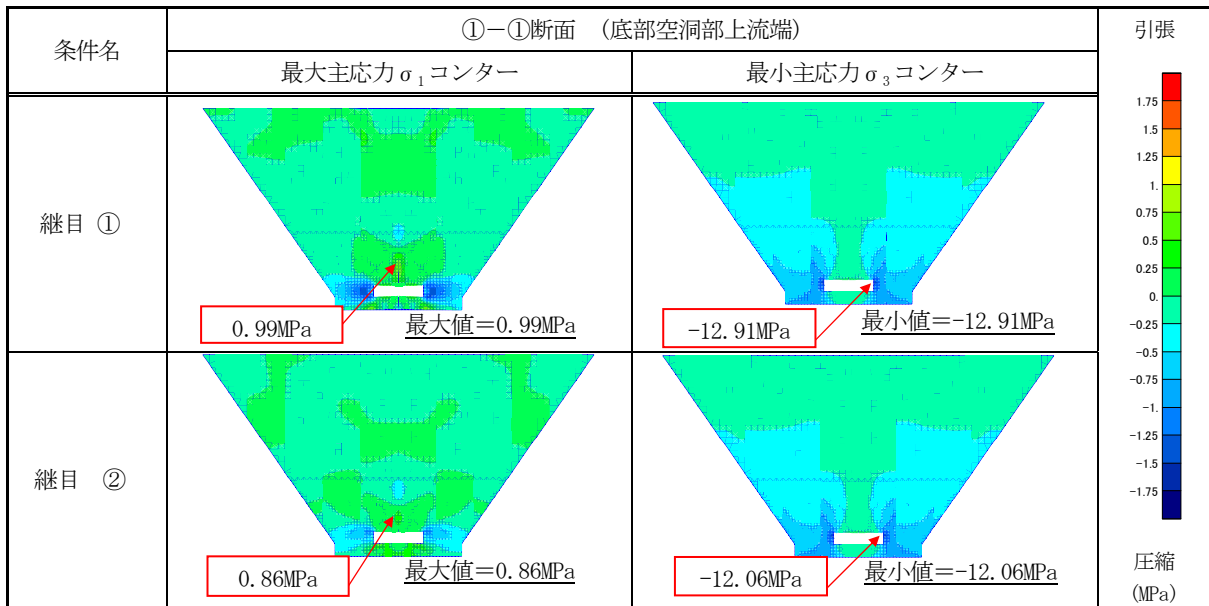


図-28 ジョイント要素の変位と応力伝達のイメージ

表-22 ジョイント要素の条件設定に関する予備検討結果（主応力コンター）



4.2 解析条件

2ブロックに渡って設ける空洞規模のための本解析の解析条件を以下に示す。

(1) 解析手法

本検討では、2次元 FEM 引継ぎ解析を用いることとした。

(2) 解析断面

解析断面は、図-29 に示す上下流方向断面（河床部 a-a 断面、アバット部中央 b-b 断面）およびダム軸方向断面（ダム上流面：①-①断面）を代表断面とした。

図-30 と図-31 に解析モデル、表-23 に解析モデルの主要諸元を示す。

表-23 解析モデルの主要諸元

(1) 上下流方向断面

項目	諸元	備考	
堤体	堤高	80m	a-a 断面
		40m	b-b 断面
	堤頂幅	10m	
	下流面勾配	1:0.8	
貯水位 (サージン水位を想定)	75m	a-a 断面	
	35m	b-b 断面	
要素分割 の大きさ	標高 0~30m	1.25m	空洞部高さ(5m)× 1/4+床版 5m
	標高 30~80m	2.5m	

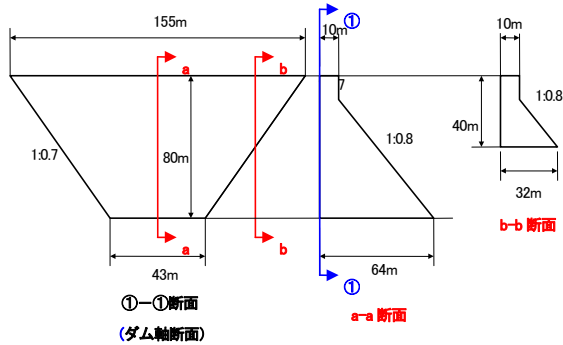


図-29 解析断面の位置

(2) ダム軸方向断面

項目	諸元	備考	
検討対象 ダム軸方向断面の位置	ダム上流面	①-①断面	
堤体	堤高	80m	モデル上面は堤頂
	アバット部勾配	1:0.7	
	底面幅	43m	
	堤頂長	155m	$75 \times 0.7 \times 2 + 50$
74.5m		$22.5 \times 0.7 \times 2 + 43$	
要素分割 の大きさ	標高 0~30m	1.25m	空洞部高さ(5m)×1/4 +床版 5m
	標高 30~75m	2.5m	

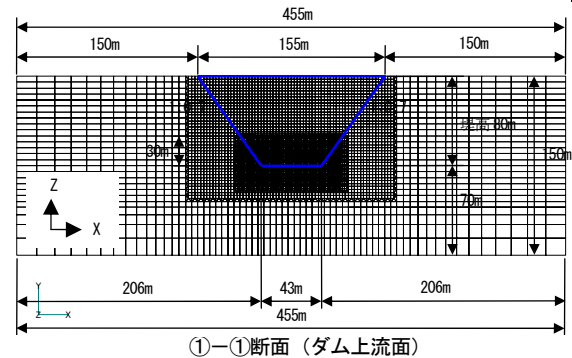
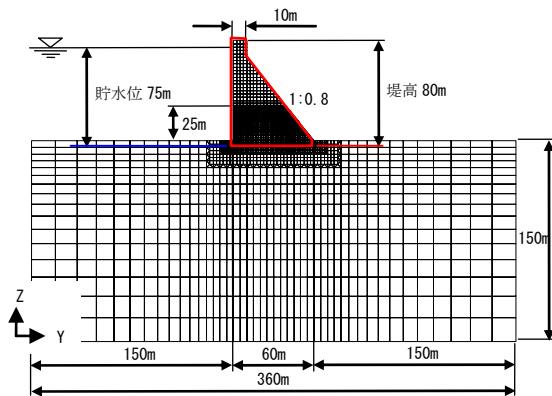
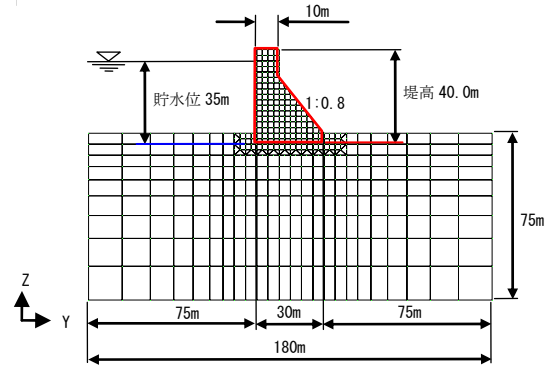


図-30 ダム軸方向断面の解析モデル



(1) a-a 断面 (河床部最大断面: H=80m)



(2) b-b 断面 (アバット部中央断面: H=40m)

図-31 上下流方向断面の解析モデル

(3) 材料物性値

表-24 に上下流方向断面の応力解析に用いた材料物性値を示す。

(4) ジョイント要素の条件設定

ダム軸方向断面の応力解析では、横継目をジョイント要素でモデル化した。表-25 にジョイント要素の物性値を示す。

① 横継目の変位と応力伝達

本検討では、ジョイント要素が開くと、ジョイント要素を介して垂直応力、せん断応力とも伝達しな

いよう条件設定した(前述「4.1.2 ジョイント要素の条件設定に関する検討」参照)。

② 横継目のせん断破壊

本検討では、ジョイント要素が閉じた状態におけるせん断破壊は考慮しないものとし、ジョイント要素の粘着力 c には非常に大きな値 ($c = 1.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) を与えた。

(5) 荷重条件

表-26 に上下流方向断面の応力解析の荷重条件を

示す。治水専用ダムでは、常時(非洪水時)は水を貯めないため貯水池空虚条件となる。このため、地震力の载荷方向は、堤体の安定上厳しい条件とし、常時においては下流から上流へ载荷することとした。

(6) 応力の引継ぎ

図-32 に上下流方向断面の応力解析結果(鉛直応力 σ_z)を上下流方向断面からダム軸方向断面に引き継ぐ概念を示す。ダム軸方向断面への応力引継ぎは、

表-24 上下流方向断面の応力解析に用いた材料物性値

材料物性	堤体	岩盤	貯水
単位容積質量 ρ (kg/m ³)	2,300	2,300	1,000
弾性係数 E (N/mm ²)	30,000	20,000	—
ポアソン比 ν	0.2	0.3	—

表-26 上下流方向断面の応力解析の荷重条件

荷重		常時	洪水時
水平力	静水圧 ^{注1)}	—	○
	地震時 動水圧 ^{注2)}	—	○
	地震時 慣性力	設計震度 0.12 方向: 下流→上流	設計震度 0.06 方向: 上流→下流
鉛直力	堤体自重	○	○

注1) 治水専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。
注2) Westergaardの式による。

①a-a断面(河床部)で代表させる、②a-a断面とb-b断面(アバット部)で補間する、の2つの方法とした。

4.3 解析ケース

堤体の隣接2ブロック(1ブロック幅:15m)に渡って底部空洞部(幅が10mおよび20m)を配置した2ケース(表-27)を解析ケースとした。

表-25 ジョイント要素の材料物性値

ジョイント要素の材料物性	設定値	備考
粘着力 c (N/mm ²)	1.0×10^5	せん断破壊を考慮しないため、大きな値とした。
内部摩擦角 ϕ (°)	45	
面直方向のバネ剛性 K_n (N/mm ²)	3×10^6	$E_c^* \times 100$
せん断方向のバネ剛性 K_s (N/mm ²)	1.25×10^6	$K_n / \{2(1+\nu)\}$

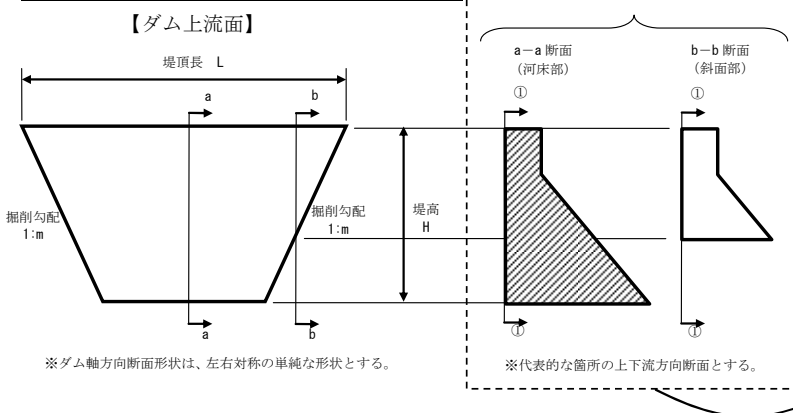
※) E_c : コンクリートの弾性係数

表-27 解析ケース一覧

ケース	底部空洞部		横継目	ブロック割
	形状	規模		
Case1	矩形	幅10m×高さ5.0m	有り	底部空洞部中心で2ブロックをまたぐ
Case1		幅20m×高さ5.0m		

模式図 Case1	模式図 Case2

(1) 複数の上下流方向断面で2次元解析を行う。



(2) 上下流方向断面の応力値を取り出し、ダム軸方向断面に初期条件として与える。

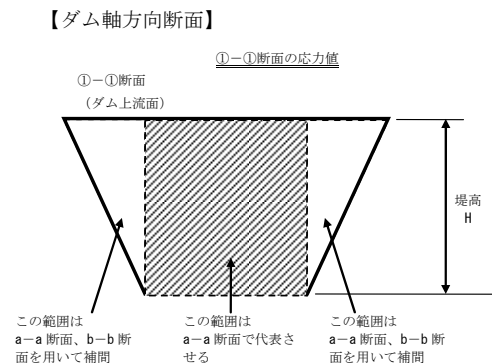


図-32 ダム軸方向断面の応力引き継ぎのイメージ

4.4 解析結果

4.4.1 底部空洞部周辺の応力分布

解析結果として表-28 に主応力コンター一覧を示す。

発生引張応力は、本解析モデルがジョイント要素を有しているため、特に大きな引張応力が集中する箇所がなく、最大値が Case1 で 0.53MPa、Case2 で 0.67MPa 程度とコンクリートの引張強度に比べて小さい。

また、発生圧縮応力の集中域は、底部空洞の側面部に発生しており、最大値が Case1 で 6.2MPa、Case2 で 8.7MPa である。これは、図-33 に示すように、底部空洞部ブロックの構造が、底部空洞部の側面部にある“柱状の部分”で堤体ブロック自重を支える構造となっていることが原因と考えられる。3章と同様に空洞周辺部のコンクリートを構造用コンクリートとし、圧縮強度を 24N/mm^2 と仮定して地震時割増

30%を考慮すれば、圧縮強度は 31.2N/mm^2 となり、安全率は Case1 で 5.0、及び Case2 で 3.6 となり、空洞幅 10m では安全率 4 を上回るが、20m では 4.0 を下回る結果となる。圧縮に対する所要安全率 4.0 以上となる空洞幅は、単純に比例計算すれば、17m 程度以下と推定できる。

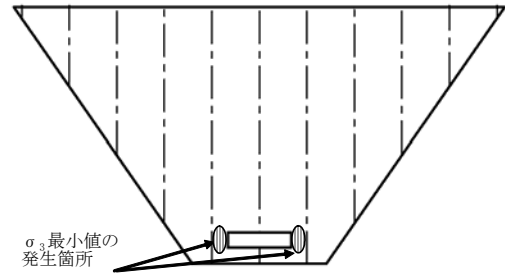


図-33 圧縮側主応力 σ_3 最小値の発生箇所

表-28 主応力コンター一覧

ケース	①-①断面 (底部空洞部上流端)		引張 1.75 1.5 1.25 1.0 0.75 0.5 0.25 0 -0.25 -0.5 -0.75 -1.0 -1.25 -1.5 -1.75 圧縮 (MPa)
	最大主応力 σ_1 コンター	最小主応力 σ_3 コンター	
Case1	<p>0.53MPa 最大値=0.53MPa</p>	<p>-6.24MPa 最小値=-6.24MPa</p>	
Case2	<p>0.67MPa 最大値=0.67MPa</p>	<p>-8.70MPa 最小値=-8.70MPa</p>	

4.4.2 横継目に生じる変形・変位・発生応力

横継目に生じる変形（開き、ズレ）、変位、及び発生応力に着目した。なお、着目する横継目は、図-34 に示す J5, J6 横継目とした。

(1) 横継目の変形（開き、ズレ）

表-30 に横継目の変形分布（垂直変位、せん断変位）を示す。以下に考察を述べる。

1) 垂直変位（開き）

高標高部の横継目は開口していない。これは、図

-35 に示すとおり、底部空洞が設置されたブロック同士が両側から倒れ込み（下端を中心とした回転し）、両側から押さえ付けられるためと考えられる。

また、低標高部は、底部空洞部の上下面において、底部空洞部に位置する横継目 J6 は、Case1 で 1mm 程度、Case2 で 2mm 程度開いている。なお、J5 の開口量は、底部空洞部上面より 15m 程度上部 ($Y=22.5\text{m}$) で最大で 1mm 未満と小さい。

2) せん断変位（ズレ）

表-29 より、Case1、Case2 とも、横継目の垂直変

位（開口）が生じて、発生したせん断変位（ズレ：鉛直下方にずり落ち）は、Case1では最大1mm程度、

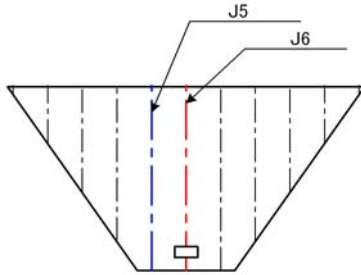


図-34 着目する横継目の位置

Case2では2mm程度とわずかである。

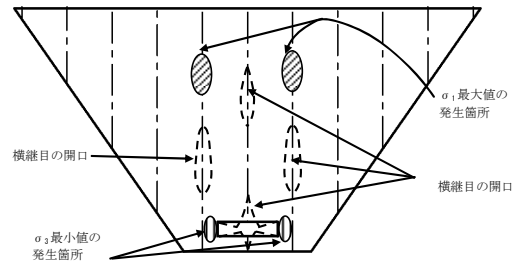
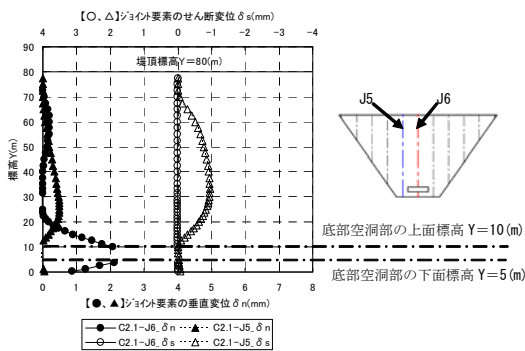
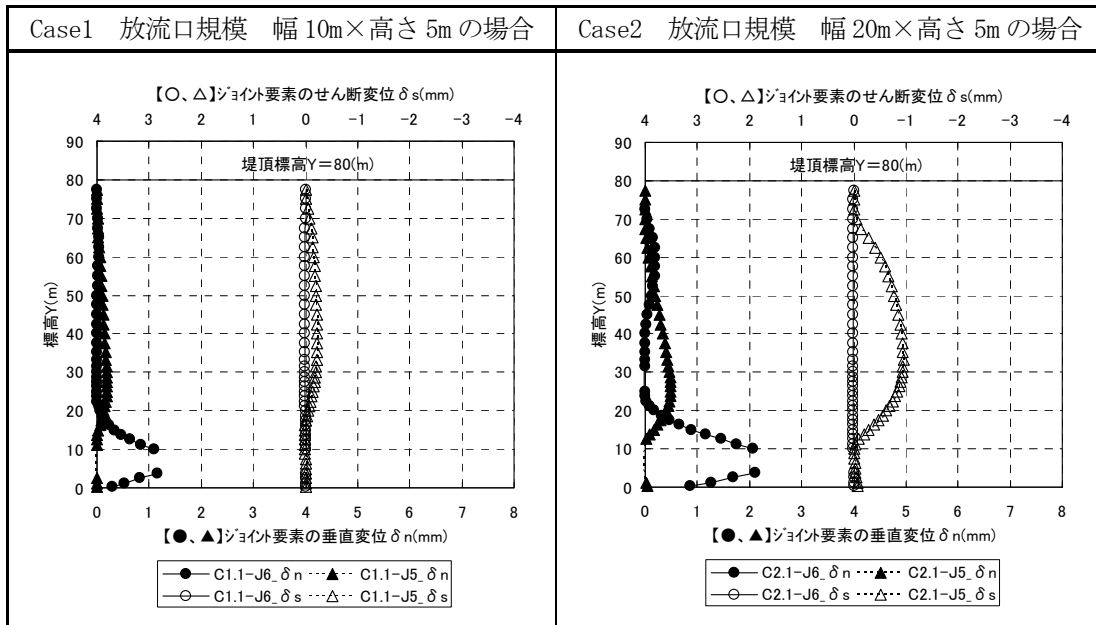


図-35 σ_1 最大値・ σ_3 最小値の発生箇所

表-29 ジョイント要素の垂直変位 δ_n ・せん断変位 δ_s の分布



【ジョイント要素の垂直変位の符号】
 $\delta_n > 0$ ジョイント要素が開いている。
 $\delta_n = 0$ ジョイント要素は開いていない。
 $\delta_n < 0$ 隣接ブロックが重なっている（解析上）。

【ジョイント要素のせん断変位の符号】
 $\delta_s < 0$ ジョイント要素を中心として、左側（左岸側）ブロックに対して右側（右岸側）ブロックが鉛直下方に変位する（ずり落ちる）。
 $\delta_s = 0$ ジョイント要素はせん断変形していない（隣接ブロックの相対せん断変位がゼロ）。
 $\delta_s > 0$ ジョイント要素を中心として、左側（左岸側）ブロックに対して右側（右岸側）ブロックが鉛直上方に変位する（ずり上がる）。

【プロット記号の説明】

黒塗り：①垂直（面直）変位
 ②垂直（面直）応力
 ③せん断応力

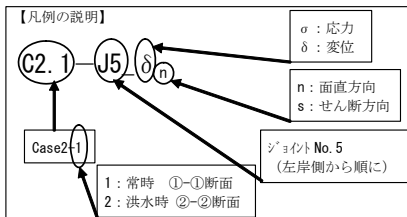
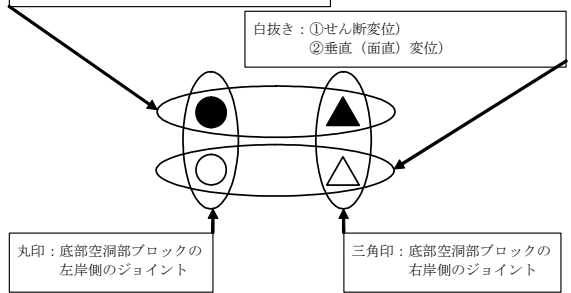


図-36 凡例：標高別のジョイント要素の垂直変位・せん断変位の関係（例：Case2, ①-①断面）

(2) 横継目にかかる応力

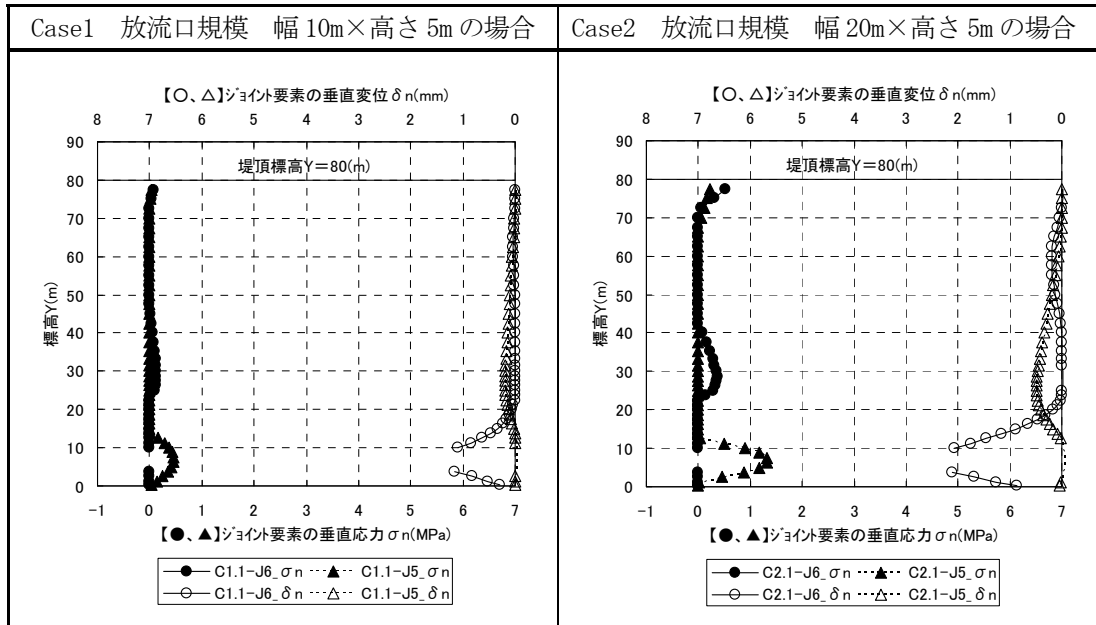
1) 垂直応力

横継目の垂直応力分布（垂直変位分布と併記）を表-30に示す。

ジョイント要素の設定条件（開口すると応力=0）からも明らかであるが、垂直応力の分布は、概ね垂

直変位の分布に対応した傾向となっている（垂直変位>0なら垂直応力=0、垂直変位=0なら垂直応力>0）。発生垂直応力は、Case1で0.5MPa程度、Case2で1.3MPa程度である。

表-30 ジョイント要素の垂直応力 σ_n と垂直変位 δ_n の分布



(備考) 凡例は図-36 参照

2) せん断応力

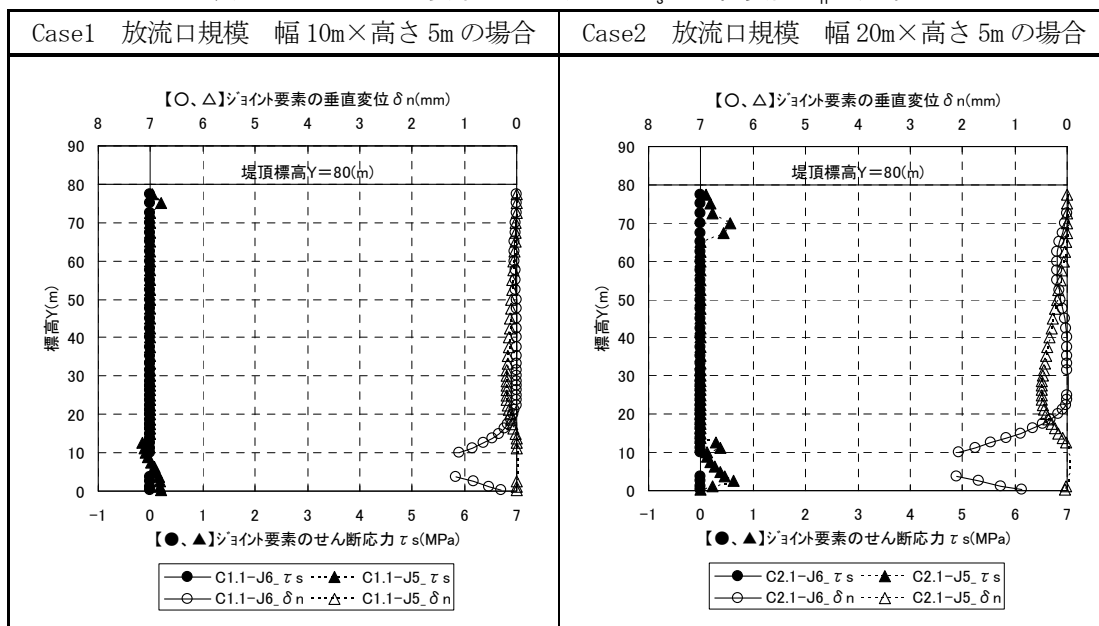
横継目のせん断応力分布（垂直変位分布と併記）を表-31に示す。

ジョイント要素の設定条件（開口すると応力=0）からも明らかであるが、せん断応力の分布は、概ね

垂直変位の分布に対応した傾向となっている（垂直変位>0ならせん断応力=0、垂直変位=0ならせん断応力≠0）。

発生したせん断応力は、Case1で0.5MPa程度、Case2で1.3MPa程度である。

表-31 ジョイント要素のせん断応力 τ_s と垂直変位 δ_n の分布



(備考) 凡例は図-36 参照

4.5 2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討結

果のまとめ

4章では、80m級のコンクリートダムをモデルとして、2ブロックに渡って空洞を設けた構造について解析検討した。以下に本章の検討結果をまとめる。

- ① 発生する圧縮応力の集中は、底部空洞部の側部に発生し、その最大値は、空洞幅10mの場合は6.2MPa、空洞幅20mの場合は8.7MPaとなる。コンクリートの強度を構造コンクリートと想定し、圧縮強度を 24N/mm^2 と仮定すると、安全率はそれぞれ、5.0及び3.6となり、空洞幅10mにおいては安全率4を上回るものの、20mにおいては下回る結果となる。圧縮に対する所要安全率4.0以上となる空洞幅は、比例計算では17m程度以下と推定できる。
- ② 底部空洞部にかかる横継目の開きは、空洞幅10mの場合は1mm程度、空洞幅20mの場合は2mm程度とわずかである。
- ③ 底部空洞部にかかる横継目の垂直応力は、幅10mの空洞の場合で0.5MPa程度、幅20mの場合で1.3MPa程度と小さい。また、せん断応力も幅10mの空洞の場合で0.3MPa程度、幅20mの場合で0.8MPa程度と小さい。

5. 全体のまとめ

本研究では、重力式コンクリートダム堤体の底部に大規模空洞を有するダム堤体の形状・構造及び可能な空洞部規模について解析的検討を行った。

ダムモデルでは、底部空洞はダム建設時の現河床掘り込み掘削も考慮し、ダム基礎標高から5mの標高位置が空洞の底面になるようにし、空洞部高さは5m固定とした。

1ブロック内に空洞部を設ける構造形式の場合、堤高50m、80m、100mモデルで検討し、堤高が高いほど、空洞幅に発生する引張応力が大きくなる。ブロック幅を広くすれば、発生する引張応力が相対的に小さくなり、また、堤体上流面勾配を設ければ、さらに発生引張応力を抑制することができる。

本研究検討において基本とした条件（直角三角形断面形状（上流面勾配鉛直）、ブロック幅15m、空洞高さ5mなど）において、空洞周りのコンクリートの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 （地震時割増30%を見込むと 3.12N/mm^2 ）と仮定し、地震力ありと地震力なしの両者を考慮した

場合、引張に対する安全率2.0以上を確保できるという条件で評価すると、堤高50mでは空洞幅10mでも安全率が2.0程度となり、堤高80mでは可能な空洞幅は6~7m程度、堤高100mでは4~5m程度となる。

同様に、引張に対する安全率2.0以上を確保できるという条件で評価した場合、堤高80mでは基本条件からブロック幅を21mとした場合には可能空洞幅は8~9m程度となる。また、ダム断面形状については、上流面勾配を設けることで空洞部周辺に発生する引張応力を緩和し、より大きな幅の空洞部を設けることができることを確認した。

2ブロックに渡って空洞部を設ける構造形式の場合、空洞部周辺に発生する引張応力は横継目の影響で1ブロック内空洞構造の場合より小さくなるものの、空洞側部に大きな圧縮応力が集中する。堤高80mモデルではその最大圧縮応力値は、空洞幅10mの場合は6.2MPa、空洞幅20mの場合は8.7MPaとなる。空洞周辺コンクリートの強度を構造コンクリートと想定し、圧縮強度を 24N/mm^2 と仮定すると、安全率はそれぞれ5.0及び3.6となった。圧縮応力に対する所要安全率4.0以上となる空洞幅は、比例計算上では17m程度以下と推定できる。

モデル解析上は、2ブロックに渡って空洞部を設ける構造形式では、大規模な空洞を設けることが可能であるという計算結果となったが、横継目ジョイントのモデル化や各ブロックの基礎となる基礎岩盤の不均一性などモデル設定上の仮定における不確実性が多く、解析結果をそのまま実ダムに適用するには、もっと詳細な検討が必要であると考えられる。また、通常のコンクリートダムでは150m程度以上の堤高のダムでなければ構造要件のクリティカル要素とならない圧縮破壊に対して、本構造形式では空洞の側部で大きな圧縮応力が発生することになるので、構造的に好ましくない。さらに、ブロックをまたがる空洞洪水吐きとなるため、ジョイント部における摩耗対策のためのライニング施設機能の確保や水理機能の確保の保証、さらには、ゲート構造など堤体構造以外に詳細な検討事項が多くある。一方、1ブロック内への空洞設置構造は、既存のダムの放流管設置手法の延長上であり、構造要件のクリティカル要素は空洞上縁部に発生する引張亀裂になるので、現時点における技術的見地からは1ブロック内への空洞設置構造形式を基本として、大規模空洞を有する

ダム構造設計を考えていくことが実用であると考える。今後は、最適なダムの断面形状やブロック幅を拡張した構造検討及び、ダムコンクリート材料（強度）の検討など個別ダムにおける設計検討を通じ、構造的な可能空洞幅を検討していくことになる。

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) 藤澤侃彦・永山 功・自閑茂治・尾畑伸之：重力ダムの放流管埋設ブロックの応力解析、土木研究所資料、第2291号、1985. 12.
- 3) 岩下友也，佐々木晋，黒目 剛，山口嘉一：重力式コンクリートダムにおける放流管規模の構造的検討，土木学会第63回年次学術講演会、2008. 9.
- 4) 佐々木晋，岩下友也，山口嘉一，黒目 剛：流水型ダムの放流口規模の解析的検討，土木技術資料 第50巻，第10号，2008. 10.
- 5) 建設省河川局開発課監修，（財）ダム技術センター：改訂コンクリートダムの細部技術、1992. 3.

STUDY ON SINGLE PURPOSE DAMS FOR FLOOD MITIGATION WITH MINIMIZING IMPACT ON ENVIRONMENT

Abstract : From the viewpoint of preservation of river environment, we are strongly required to construct a dry dam, which is a dam for the single purpose of flood mitigation. Large-scale conduits should be installed near the bottom of dam bodies to allow the river channel to flow freely during normal conditions.

In this study, we conducted numerical simulations considering structures of concrete dams, in order to investigate the maximum possible scale for conduits. We analyzed the stress distributions of two types of conduit models, such as a conduit within a block and a conduit between two blocks.

Key words: Concrete dams, Single purpose dams for flood mitigation, FEM analysis, Conduit