

14.1 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（治水勘定）

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。しかし、従来の堤体及び放流設備の設計方法に基づく設置可能な放流設備規模が大きく制限され、洪水調節操作の必要ない中小出水時にも水位上昇が生じ、土砂等の流下状況がダム建設前と異なることが避けられない。そのため、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。

上記の要請に対し、本研究では、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うことを目的としている。平成 19 年度は、重力式コンクリートダム堤体の 1 ブロック内に設けることができる可能な空洞規模、及び隣接 2 ブロックに渡る空洞の周辺応力状態を 2 次元及び 3 次元 FEM 解析等により評価検討を実施した。

キーワード：コンクリートダム、治水専用ダム、FEM 解析、ブロック

1. 研究概要

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の計画が増加しつつある。しかし、従来の堤体及び放流設備の設計方法に基づく設置可能な放流設備規模が大きく制限され、洪水調節操作の必要ない中小出水時にも水位上昇が生じ、土砂等の流下状況がダム建設前と異なることが避けられない。そのため、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。

上記の要請に対し、本研究では、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うことを目的としている。平成 19 年度は、重力式コンクリートダム堤体の 1 ブロック内に設けることができる可能な空洞規模、及び隣接 2 ブロックに渡る空洞の周辺応力状態を 2 次元及び 3 次元 FEM 解析等により評価検討を実施した。

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。平成 19 年度は、ダム堤体の 1 ブロック内にブロック幅の $1/3$ 以上の径を持つ空洞の最大規模の検討、および空洞を 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空洞構造を有したダム構造について検討を行った。図-1 に平成 19 年度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 2 次元解析及び 3 次元解析、応力集中係数からの推定式による算出を行い、放流管周辺部の応力状態を把握するとともに解析手法による比較を行った。

4 章では、隣接 2 ブロックに渡る大規模空洞を配置した構造を検討するために、横継目の影響も考慮したダム軸方向の 2 次元 FEM 解析により、検討を行った。

3章 1ブロック内に設ける空洞の検討

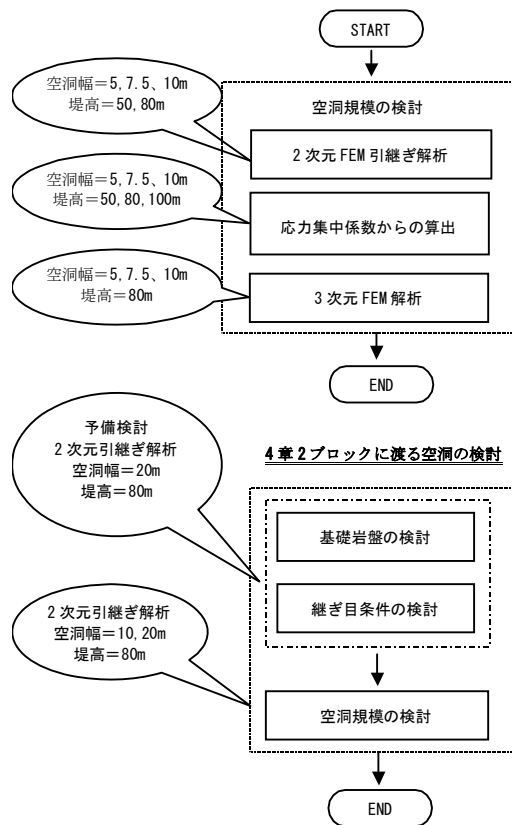


図-1 平成19年度の検討フロー

3. 1ブロック内に設ける放流管規模の検討

3.1 概要

3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する。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。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2次元及び3次元FEM解析等により求め、解析手法の違いによる結果の比較とともに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 解析モデル

解析対象は、図-2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（50, 80, 100m）の堤高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、治水専用ダム（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载荷した。

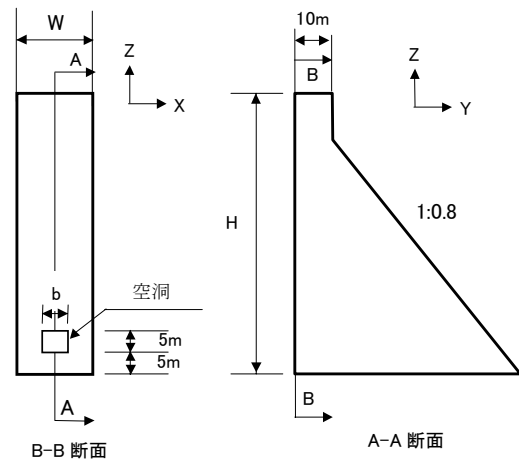


図-2 解析モデル

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	

3.3 解析方法

空洞周りの応力は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。

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		○	

a) 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-3参照)。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(X方向)は、鉛直及び水平方向ともにフリーとした。

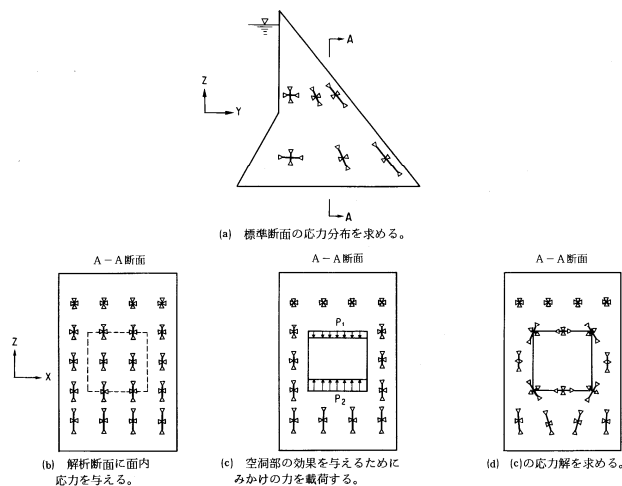


図-3 2次元FEM引継ぎ解析

b) 応力集中係数からの応力値の算定

a)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りの最大引張応力 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 を用い、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⁾。

c) 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。

3.4 解析結果と考察

図-4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-5に3次元FEM解析により求められた主応力 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。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-6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-6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の拡がりや増大は堤体の表面付近に限定されているということがわかる。

14.1 環境負荷を最小にする治水専用ダムに関する研究（１）

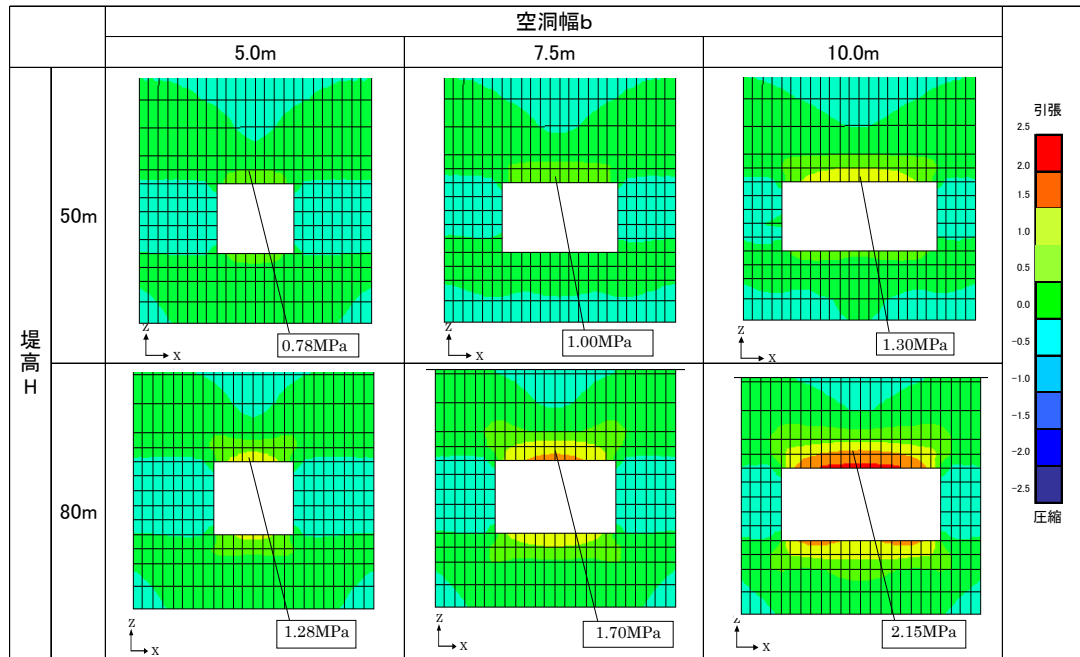


図-4 2次元引継ぎ解析 σ_1 主応力分布図（A-A断面）

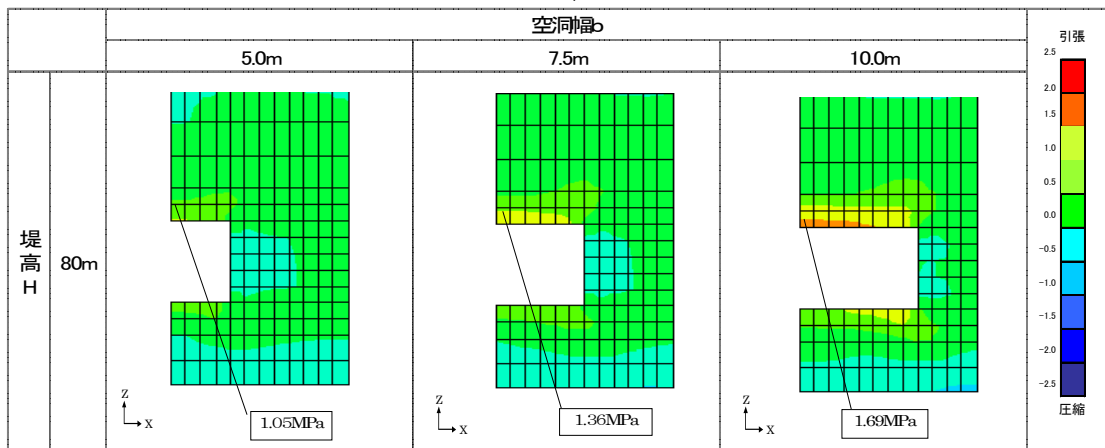


図-5 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図（A-A断面）

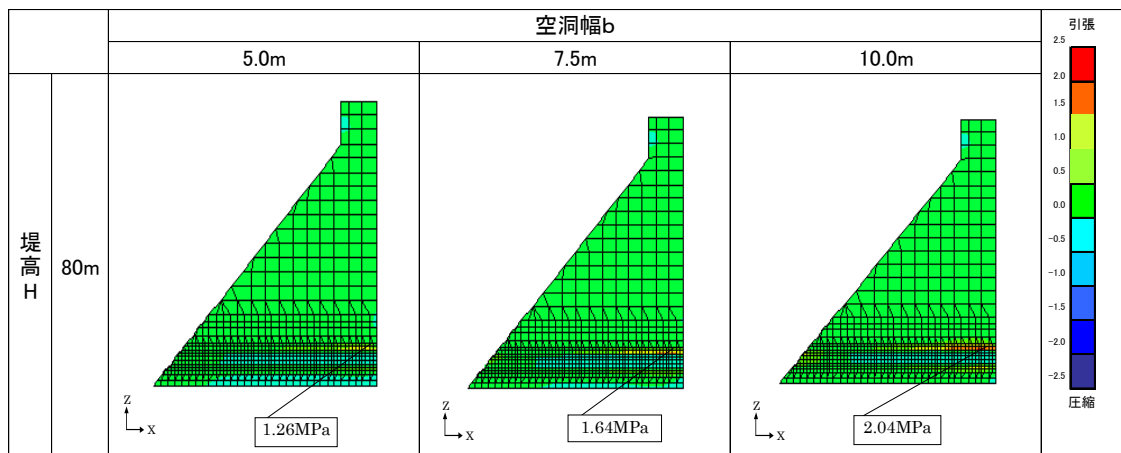


図-6 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図（B-B断面）

図-7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。図-7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めとなることわかる。

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-8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った場合の結果であり、引張応力に対する鉄筋への応力分担など考慮すれば安全率は高まる余地はあると考える。今後は、基礎岩盤による影響など更なる検討を進めていく必要がある。

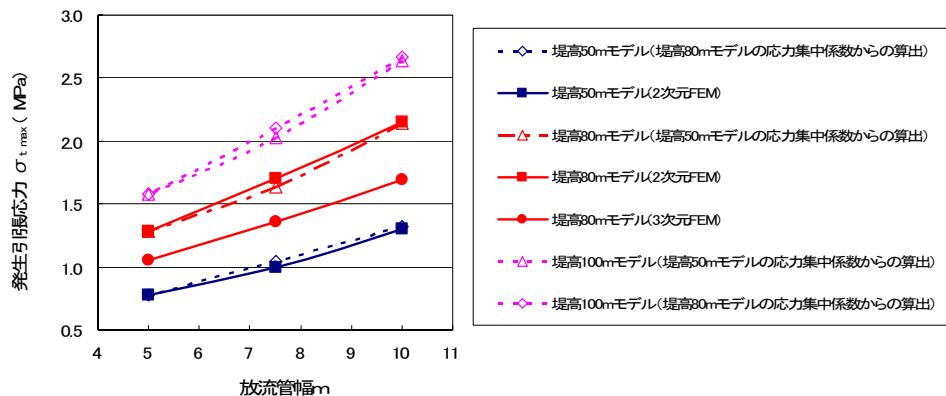


図-7 発生最大引張応力の比較

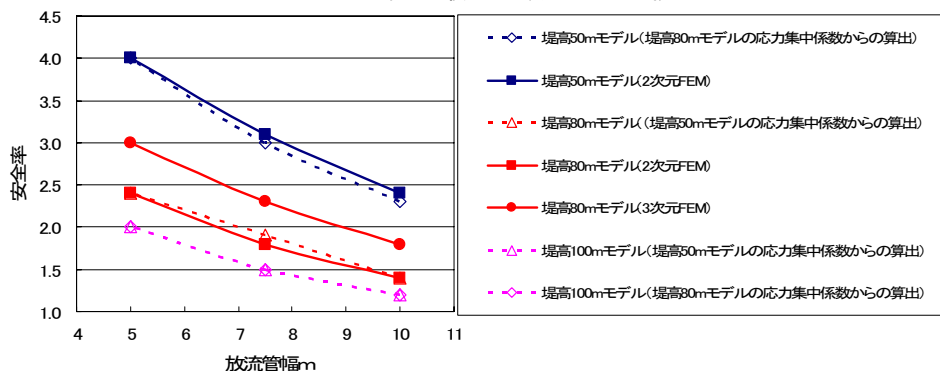


図-8 安全率の比較 (許容引張強度 2.4N/mm^2 と仮定した場合)

3.5 まとめ

3章での検討結果を以下にまとめる。

- ① 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。
- ③ 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めとなる。

- ④ 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

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。

4. 2 ブロックに渡って設ける空洞規模の検討

本章は、3 章で検討したコンクリートダム 1 ブロック内における空洞規模よりさらに大規模な空洞を設けることを想定して、2 ブロックに渡って空洞を設ける場合を検討する。

4.1 予備検討

平成 18 年度は、コンクリートダムの数ブロックにまたがる空洞の構造解析検討を実施した。その際、基礎岩盤の影響（弾性係数の影響）と横継目間のせん断応力伝達（ジョイント要素の条件設定）については、今後の課題となっていた。そこで、本章の解析検討の予備的検討として、ダム軸方向 2 次元断面 FEM 解析における基礎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。

本章では、比較的大きな幅を有する底部空洞部を、ダム堤体の隣接 2 ブロックに渡って配置する場合を想定し、構造上の可能性に関する検討を行う。

4.1.1 基礎岩盤の弾性係数に関する検討

後の検討に先立ち、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予備検討を行った。予備検討解析に用いた材料物性値を表-5 に示す。

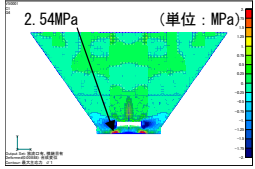
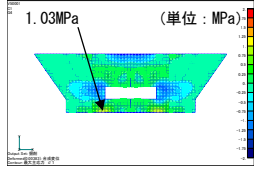
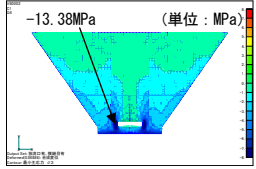
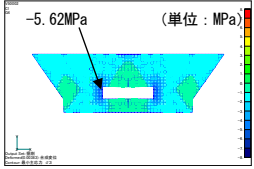
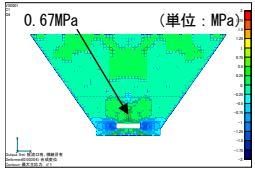
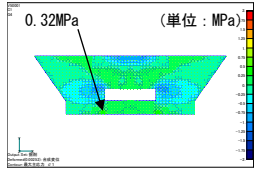
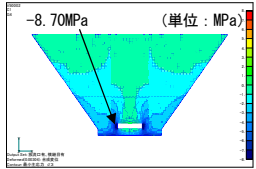
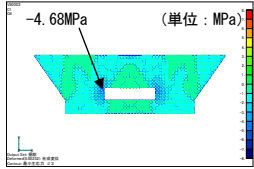
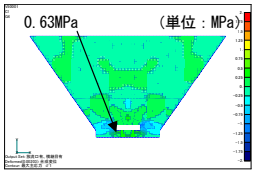
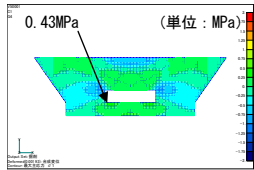
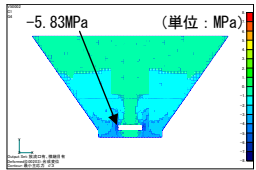
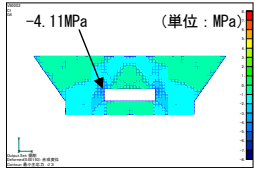
表-5 岩盤の弾性係数に関する予備検討に用いた材料物性値

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	—

岩盤の弾性定数を 5,000 N/mm² (CM級相当)、20,000 N/mm² (堅固なCH級相当)、3,000,000 N/mm² (剛基礎相当) の 3 種類のケースで解析した。解析結果として、

表-6に主応力コンター一覧を示す。表中の常時とは、非洪水時のことを示しており、本章の以下でも同様な意味で使用している。最小主応力（圧縮応力）については、そ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くなるほど、大きくなっている。4.2 以降の本解析においては、80m級のダムモデルであることを鑑み、CH級岩盤相当として岩盤の弾性係数を 20,000 N/mm²に設定した。

表-6 岩盤の弾性係数に関する予備検討結果（主応力コンター）

	最大主応力 σ_1 コンター		最小主応力 σ_3 コンター	
	(1) 常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2) 洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）	(2) 常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2) 洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）
$E = 0.5 \times 10^4$ N/mm ²	 最大値=2.54MPa	 最大値=1.03MPa	 最小値=-13.38MPa	 最小値=-5.62MPa
$E = 2 \times 10^4$ N/mm ²	 最大値=0.67MPa	 最大値=0.32MPa	 最小値=-8.70MPa	 最小値=-4.68MPa
$E = 300 \times 10^4$ N/mm ²	 最大値=0.63MPa	 最大値=0.43MPa	 最小値=-5.83MPa	 最小値=-4.11MPa

	最大値=1.86MPa	最大値=0.43MPa	最小値=-5.83MPa	最小値=-4.11MPa
--	-------------	-------------	--------------	--------------

4.1.2 ジョイント要素の条件設定に関する検討

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予備検討を行った。

平成18年度の検討結果によると、横継目の垂直変位（開き）が最大でも5mm程度と小さかったことから、仮に“鉛直方向に噛み合う”構造が横継目にあると仮定した場合、横継目が開いてもせん断応力の伝達は可能（完全に伝達されないにしても、“全く伝達されない”ということはない）と考え、この予備検討を実施したものである。

表-7、図-9にジョイント要素の条件設定に関する予備検討に用いた条件設定内容を示す。比較ケースは表-7中の「継目②」であり、ジョイント要素の垂直変位 $\delta > 0$ （横継目が開く）となった場合、面直応力は伝達しないが、せん断応力は完全に伝達する設定とした。

表-7 ジョイント要素の条件設定に関する予備検討

条件名	ジョイント要素の垂直変位 δ	ジョイント要素を解しての応力伝達	
		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

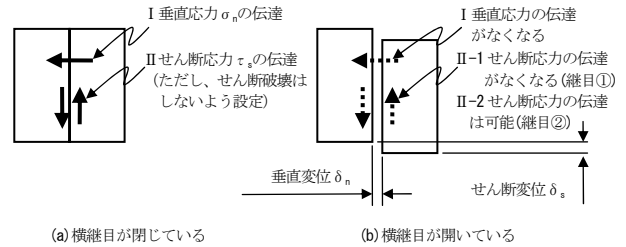


図-9 ジョイント要素の変位と応力伝達のイメージ

解析結果として、継目①の条件においても、空洞中央部につながるジョイントに最大でも0.002mm程度の開きしか発生せず、継目②の条件でもジョイントの開きの位置はほぼ同じである。また、表-8に主応力コンター一覧を示す。表-8から、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る条件でも、させない条件においても、最大主応力および最小主応力の集中発生箇所は同じであり、その最大値もほぼ同じである。以上より、4.2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とした。

表-8 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）

	最大主応力 σ_1 コンター		最小主応力 σ_3 コンター	
	(1) 常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2) 洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）	(2) 常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2) 洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）
継目①	 最大値=0.99MPa	 最大値=0.19MPa	 最小値=-12.91MPa	 最小値=-4.39MPa
継目②	 最大値=0.86MPa	 最大値=0.20MPa	 最小値=-12.06MPa	 最小値=-4.34MPa

14.1 環境負荷を最小にする治水専用ダムに関する研究（１）

4.2 解析条件

(1) 解析手法

本検討は、3章で用いた2次元FEM引継ぎ解析により実施する。

(2) 解析断面

解析断面として、図-10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、底部空洞部の吐口付近：②-②断面）を代表断面とした。

図-11と図-12に解析モデル、表-9に解析モデルの主要諸元を示す。

表-9 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
	堤頂幅	40m
		b-b断面
貯水位	堤頂幅	10m
	下流面勾配	1:0.8
	貯水位	75m
		サーチャージ水位を想定 70mか？
要素分割の大きさ	標高0～30m	1.25m
		空胴部高さ(5m)×1/4+床版 5m
	標高30～80m	2.5m

(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	ダム軸	①-①断面
	ダム軸下流46m	②-②断面
		底部空洞部の上下流端から10m上流側
堤体	堤高	80m
		モデル上面は堤頂
	アバット部勾配	22.5m
		モデル上面は堤体下流面
要素分割の大きさ	底面幅	0.7
		43m
	堤頂長	155m
		75×0.7×2+50
要素分割の大きさ	標高0～30m	1.25m
		空胴部高さ(5m)×1/4+床版 5m
	標高30～75m	2.5m

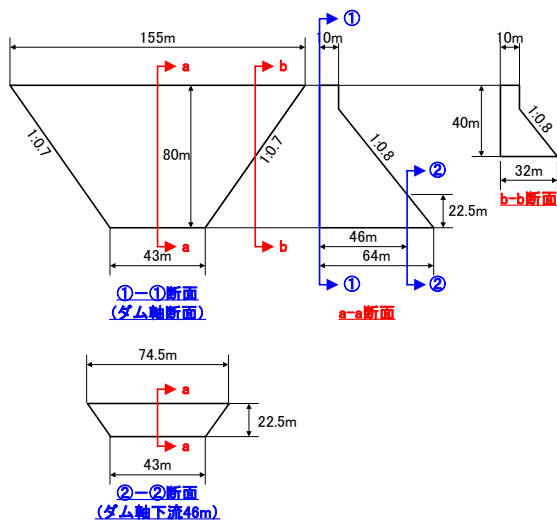
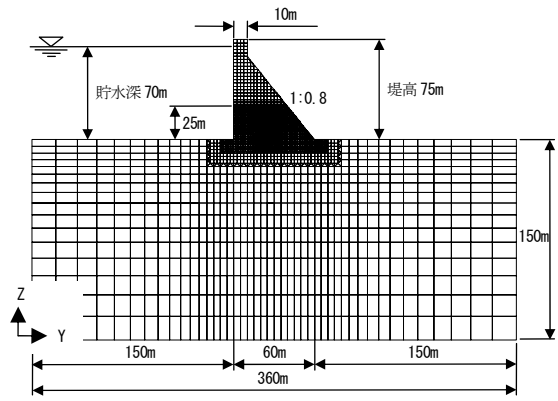
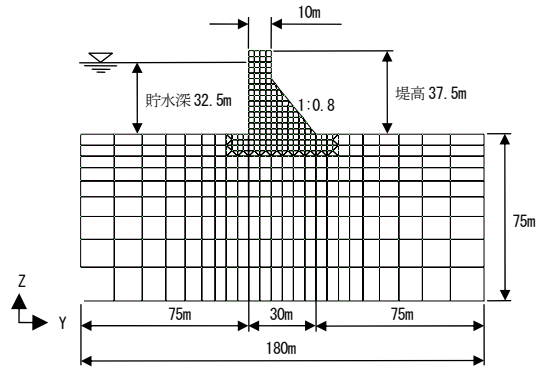


図-10 解析断面の位置

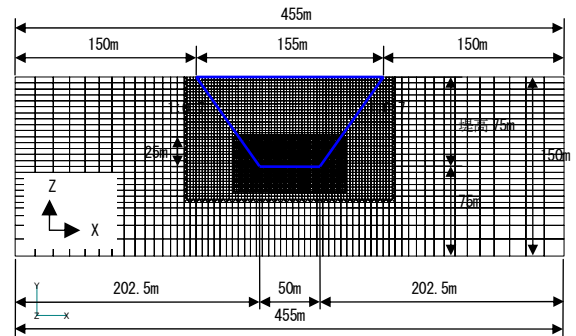


(1) a-a断面（河床部最大断面：H=80m）

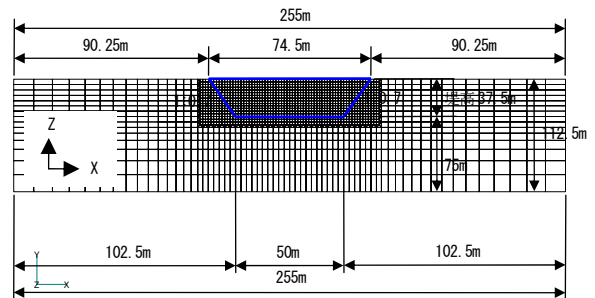


(2) b-b断面（アバット部中央断面：H=40m）

図-11 上下流方向断面の解析モデル



(1) ①-①断面（ダム上流面）



(2) ②-②断面（底部空洞部の吐口付近）

図-12 ダム軸方向断面の解析モデル

(3) 材料物性値

14.1 環境負荷を最小にする治水専用ダムに関する研究（1）

表-10に上下流方向断面の応力解析に用いる材料物性値を示す。

表-10 上下流方向断面の応力解析に用いる材料物性値

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	—

(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-11にジョイント要素の物性値を示す。

表-11 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	値	備考
粘着力	c (MPa)	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 (MPa)	3×10^6 $E_c \times 100$
せん断方向のバネ剛性	K _s (MPa)	1.25×10^6 $K_n / \{2(1 + \nu)\}$

※) E_c : コンクリートの弾性係数

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（前述図-9参照）。

これは、実際のダムの横継目キーを考えた場合、横継目の開口幅がキーの高さ未満であれば、キーの噛み合わせによりせん断抵抗する（ただし、せん断変位にほぼ直交するようにキーの凹凸がある場合）が、ここでは安全側（わずかでも横継目が開くとその箇所での応力伝達がなくなり、周辺への応力再配分がなされる）の検討とする条件設定を行ったものである。

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（表-11参照）。

(5) 荷重条件

表-12、図-13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、非洪水時の常時は水を貯めないため貯水池が空虚である。そこで、地震力の載荷方向は、堤体の安定上厳しい条件とし、常時（下流→上流）、洪水時（上流→下流）で載荷することとした。

表-12 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。

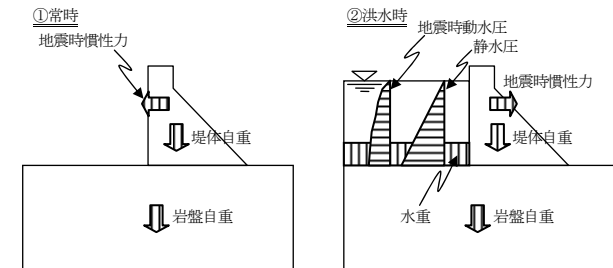
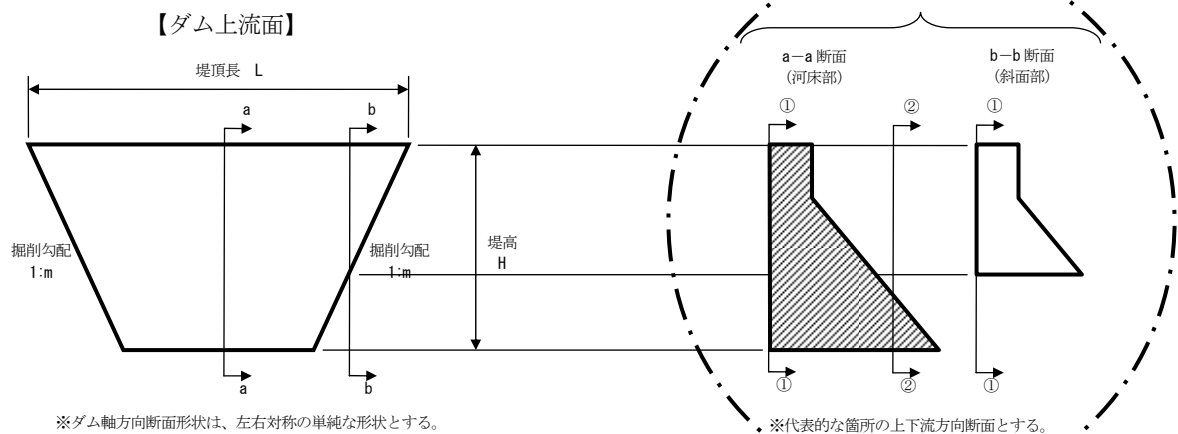


図-13 上下流方向断面の応力解析の荷重条件のイメージ

(6) 応力の引継ぎ

図-14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イメージを示す。図-14に示すように、ダム軸方向断面への応力引継ぎは、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）で補完する、の2つの方法による。

(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

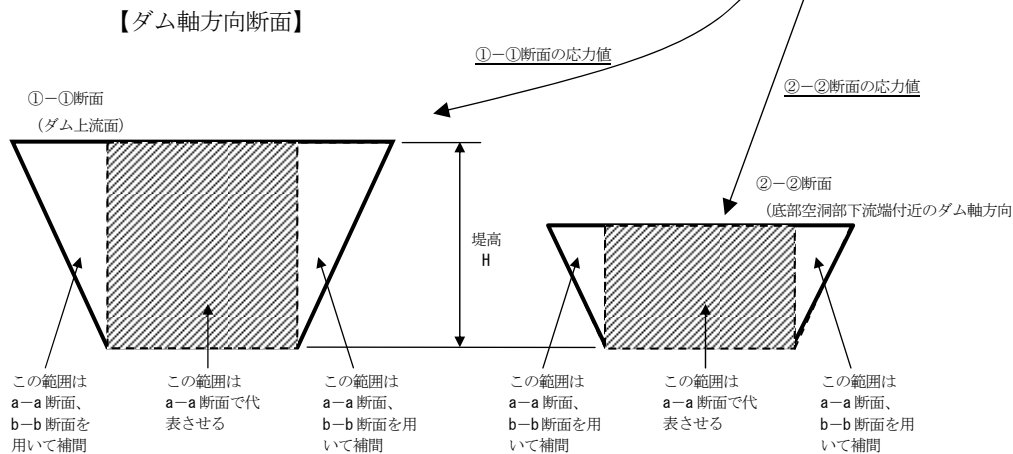


図-14 ダム軸方向断面の応力引き継ぎのイメージ

4.3 解析ケース

表-13に解析ケースを示す。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 ケースについて、構造検討を行うものである。

4.4 解析結果

4.4.1 底部空洞部ブロックの応力分布

表-14に主応力コンター一覧を示す。表-14では、常時 (貯水池空虚、地震力を上流方向に载荷) は①-①断面、洪水時 (貯水位有り、地震力を下流方向に载荷) は②-②断面に着目して整理した。これは、前掲の図-13 (上下流方向断面の応力解析の荷重条件のイメージ) に示したとおり、水平荷重の作用方向は、常時は上流側、洪水時は下流側であり、本検討の対象断面とした①-①断面 (ダム軸: 底部空洞部の上流端)、②-②断面 (ダム軸下流 46m: 底部空

洞部の下流端) において、応力的に厳しい荷重条件となるのは、常時は①-①断面、洪水時は②-②断面であることによる。

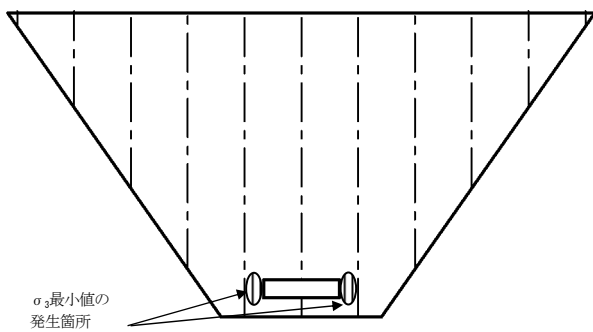
表-14から、本解析モデルがジョイント要素を有しているため、特に大きな引張応力が集中する箇所は無く、最大値も常時のCase1 で 0.53MPa、Case2 で 0.67MPa程度でコンクリートの引張強度に比し、小さい。圧縮応力の集中は、底部空洞の側部に発生しており最大値はCase1 で 6.2MPa Case2 で 8.7MPa である。これは、図-15に示すように、底部空洞部ブロックの構造が、底部空洞部の側部にある“柱状の部分”で堤体自重を支える構造となっていることが原因と考えられる。圧縮強度を 20N/mm^2 と仮定すると、安全率はそれぞれ、3.2 及び 2.3 となり、4 を大きく下回る結果となる。

表-13 解析ケース一覧

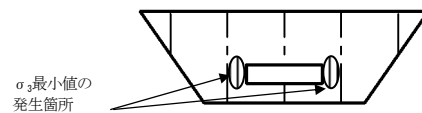
ケース名	底部空洞部		横継目	ブロッグ割	縦断面図
	形状	規模			
Case1	矩形	幅 10m×高さ 5.0m	有り	底部空洞部中心で 2 ブロックをまたぐ	
Case2		幅 20m×高さ 5.0m			

表-14 主応力コンター一覧

	最大主応力 σ_1 コンター		最小主応力 σ_3 コンター	
Case1	(1) 常時 ①-①断面 (底部空洞部上流端) 最大値=0.53MPa (底面)	(2) 洪水時 ②-②断面 (底部空洞部下流端付近) 最大値=0.24MPa (底面)	(2) 常時 ①-①断面 (底部空洞部上流端) 最小値=-6.24MPa	(2) 洪水時 ②-②断面 (底部空洞部下流端付近) 最小値=-2.73MPa
Case2	(1) 常時 ①-①断面 (底部空洞部上流端) 最大値=0.67MPa J6 Y=20m 付近	(2) 洪水時 ②-②断面 (底部空洞部下流端付近) 最大値=0.30MPa	(2) 常時 ①-①断面 (底部空洞部上流端) 最小値=-8.70MPa (隅角部)	(2) 洪水時 ②-②断面 (底部空洞部下流端付近) 最小値=-4.33MPa



(a) ①-①断面



(b) ②-②断面

図-15 σ_3 最小値の発生箇所

表-15に示す位置の横継目に着目し、表-16に横継目の変形分布（垂直変位、せん断変位）を示す。

4.4.2 横継目の変形（開き、ズレ）

(1) 垂直変位（開き）

i) 高標高部

高標高部の横継目は開口していない。これは、図-15に示したように、底部空洞部ブロックに隣接したブロックが両側から倒れ込んでくる（下端を中心とした回転により）ため、両側から押さえ付けられるためと考えられる。なお、②-②断面のJ5では、上部で継目の開きが見られるが、これは底部空洞部の上面中央で落ち込みが生じるためと考えられる。

ii) 低標高部

底部空洞部の上下面において、底部空洞部にかかる横継目J6は、Case1で1mm程度、Case2で2mm程度開いている。②-②断面のジョイント開口量は、①-①断面の1/2程度であるが、同様な形態の開きが発生している。

なお、J5の開口量は、底部空洞部上面より15m程度上部（Y=22.5m）で最大で1mm未満と小さい。
(2) セン断変位（ズレ）

表-16より、Case1、Case2とも、横継目の垂直変位（開口）が生じてセン断変位（ズレ：鉛直下方にずり落ちる）が発生していることがわかる。

4.4.3 横継目の垂直（面直）応力の分布傾向

表-15に示す位置の横継目に着目し、表-17に横継目の垂直応力分布（垂直変位分布と併記）を示す。

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）。

なお、②-②断面のJ5の頂部付近で大きな応力が発生しているが、これはブロックが両側から倒れ込んでくる（下端を中心とした回転により）ため、両側から押さえ付けられるためと考えられる。

4.4.4 横継目のせん断応力の分布傾向と局所安全率

(1) セン断応力の分布傾向

表-15に示す位置の横継目に着目し、表-18に横継目のせん断応力分布（垂直変位分布と併記）を示す。

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）。

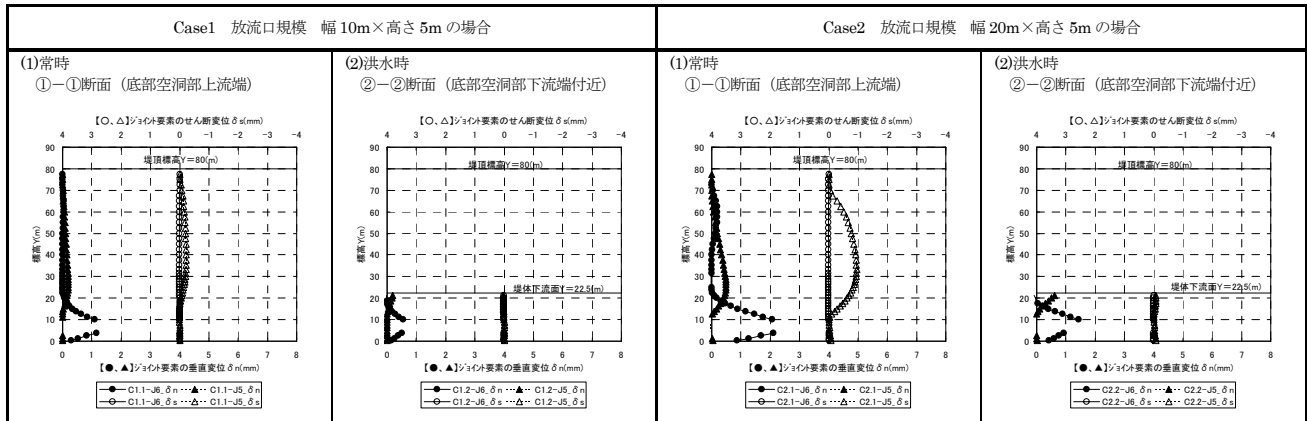
(2) セン断応力に関する局所安全率

i) コンクリートのせん断強度

コンクリートのせん断強度は、モール・クーロンの破壊基準により $\tau_R = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$ （ c ：コンクリートの粘着力、 σ_n ：せん断面に作用する垂直応力）とし、コンクリートの内部摩擦角 $\phi = 45^\circ$ と仮定すると、 $\tau_R = c + \sigma_n$ (N/mm²)となる。

表-15 着目する横継目の位置

Case1 放流口規模 幅10m×高さ5mの場合		Case2 放流口規模 幅20m×高さ5mの場合	
(1)常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2)洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）	(1)常時 ①-①断面（底部空洞部上流端）	(2)洪水時 ②-②断面（底部空洞部下流端付近）

表-16 ジョイント要素の垂直変位 δ_n ・せん断変位 δ_s の分布

(備考)

(1) 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）。

(2) 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）。

(3) プロット記号

- 黒塗り（●, ▲）・・・垂直変位
 白抜き（○, △）・・・せん断変位
 丸プロット（●, ○）・・・横継目 J6（空洞部）
 三角プロット（▲, △）・・・横継目 J5

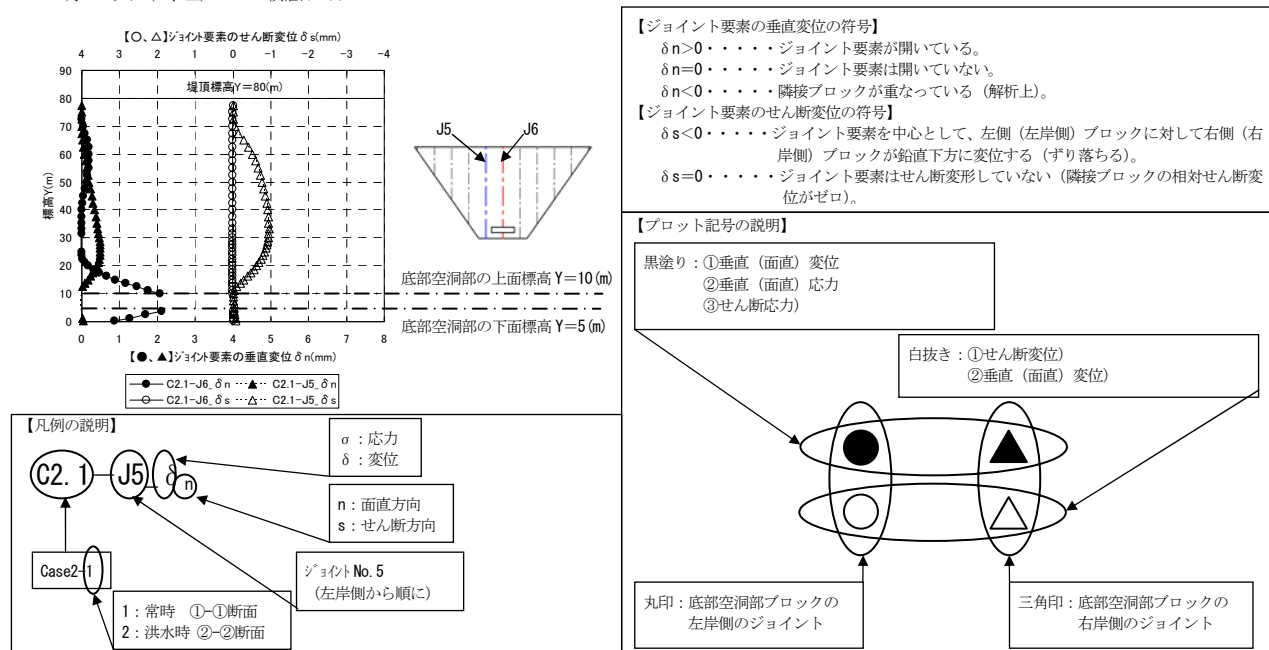
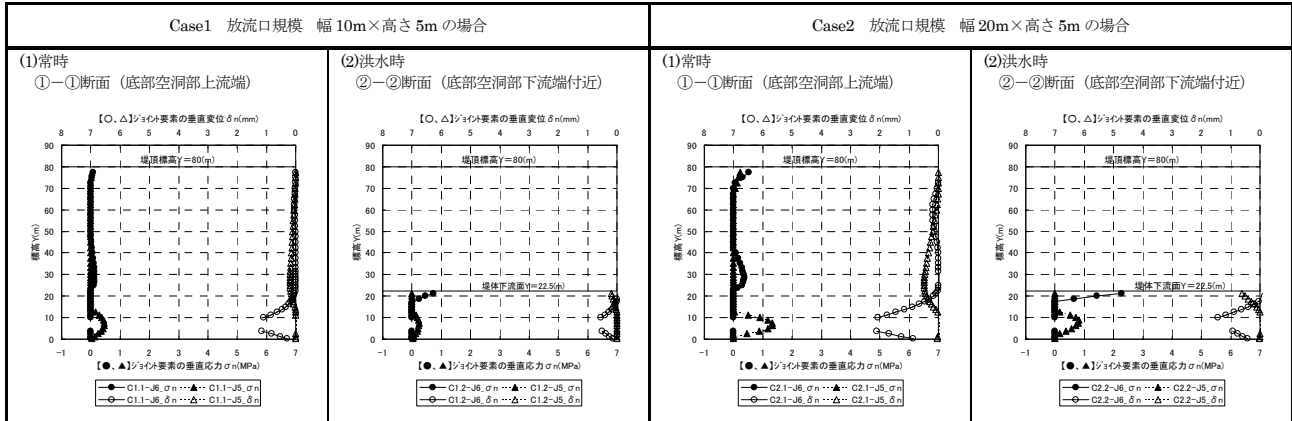


図-16 標高別のジョイント要素の垂直変位・せん断変位の関係（例：Case2, ①—①断面）

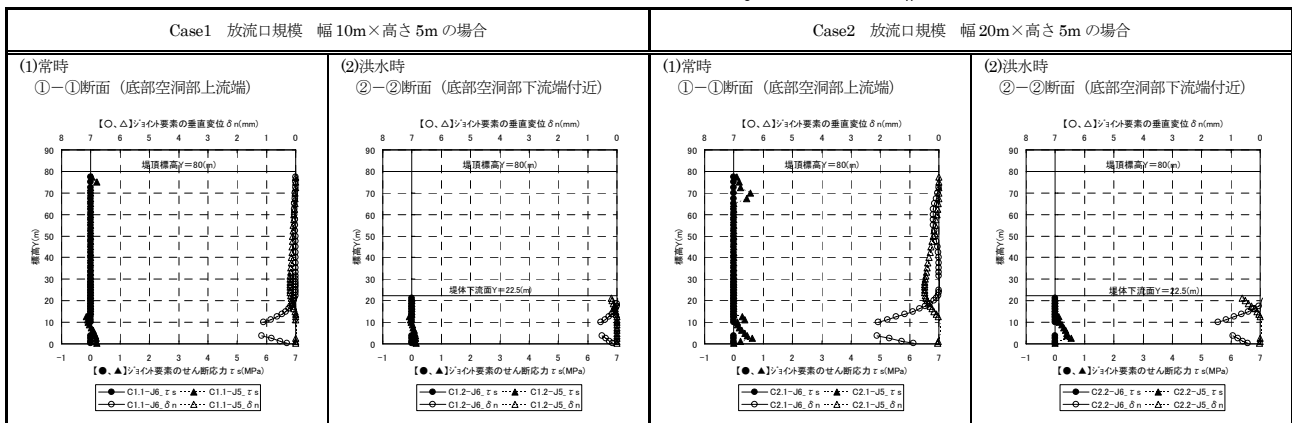
コンクリートの粘着力は、一般に圧縮強度の 1/5 程度であることから、ダムコンクリートの圧縮強度 $\sigma_c = 20 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ とすると、コンクリートの粘着力 $c = 5 \text{ N/mm}^2$ 程度となる。しかし、横継目のキー構造を考慮すると、ダム堤体の横継目のせん断面積は堤体ブロックの側面積の 1/2 程度であるため、ダム堤体の横継目の粘着力として期待できる値は $c = 2.5$

N/mm^2 程度（ $= 5 \text{ N/mm}^2 \times 1/2$ 程度）である。したがって、コンクリートのせん断強度 τ は、 $\tau_R = 2.5 + \sigma_n (\text{N/mm}^2)$ となる。なお、前述したように、キー構造がせん断に対して有効に抵抗するのは、せん断方向に対してキーの凹凸がほぼ直交するように設置されている場合であることに注意されたい。

表-17 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)

- (1) 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）。
- (2) 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）。
- (3) プロット記号
 黒塗り（●、▲）・・・垂直応力
 白抜き（○、△）・・・垂直変位
 丸プロット（●、○）・・・横継目 J6（空洞部）
 三角プロット（▲、△）・・・横継目 J5

表-18 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)

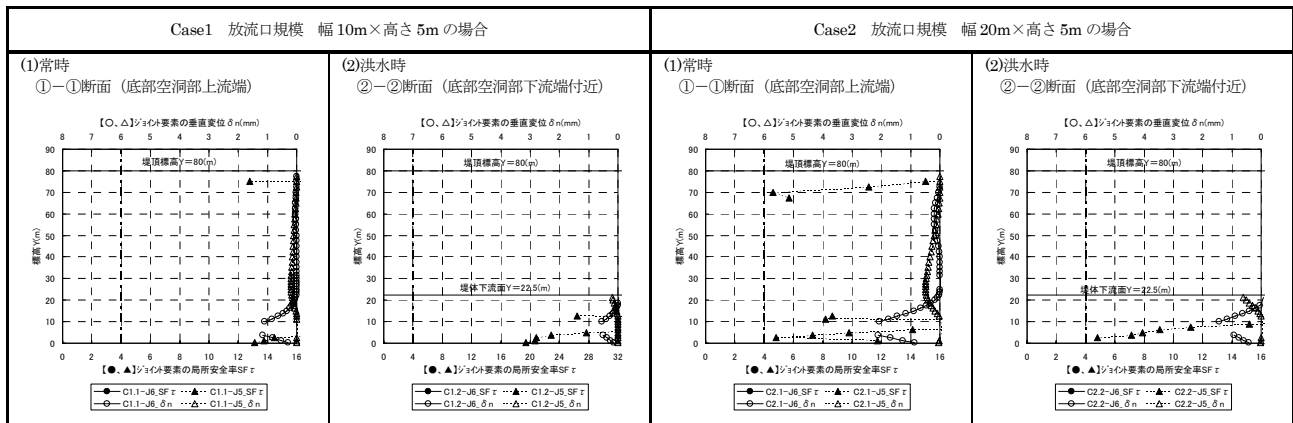
- (1) ジョイント要素の垂直変位の符号
 $\delta_n > 0$ ・・・ジョイント要素が開いている。
 $\delta_n = 0$ ・・・ジョイント要素は開いていない。
 $\delta_n < 0$ ・・・隣接ブロックが重なっている（解析上）。
- (2) ジョイント要素のせん断変位の符号
 $\delta_s < 0$ ・・・ジョイント要素を中心として、左側（左岸側）ブロックに対して右側（右岸側）ブロックが鉛直下方に変位する（ずり落ちる）。
 $\delta_s = 0$ ・・・ジョイント要素はせん断変形していない（隣接ブロックの相対せん断変位がゼロ）。
 $\delta_s > 0$ ・・・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）。
- (3) プロット記号
 黒塗り（●、▲）・・・せん断応力
 白抜き（○、△）・・・垂直変位
 丸プロット（●、○）・・・横継目 J6（空洞部）
 三角プロット（▲、△）・・・横継目 J5

ii) せん断応力に関する局所安全率

ここでは、横継目のせん断応力に関する評価指標として、せん断応力に関する局所安全率 $SF_\tau = \tau_R / \tau_s$ （ τ_R ：せん断強度、 τ_s ：ジョイント要素のせん断応力）を用いる。

表-15に示す位置の横継目に着目し、表-19に横継目のせん断応力に関する局所安全率分布（垂直変位と併記）を示す。横継目におけるせん断応力に関する局所安全率はCase1で12以上を確保し、Case2では4以上を確保していることがわかる。

表-19 ジョイント要素のせん断応力に関する局所安全率 SF_τ と垂直変位 δ_n の分布



（備考）

(1) ジョイント要素のせん断変応力に関する局所安全率

局所安全率 $SF_{\tau} = \tau_R / \tau_s$ (τ_R : せん断強度 ($\tau_R = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$), τ_s : ジョイント要素のせん断応力)

プロットが無い区間・・・ジョイント要素のせん断応力 $\tau_s = 0$ となっている

(2) 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）。

(3) プロット記号

黒塗り (●, ▲)・・・せん断応力に関する局所安全率

白抜き (○, △)・・・垂直変位

丸プロット (●, ○)・・・横継目 J6（空洞部）

三角プロット (▲, △)・・・横継目 J5

4.5 まとめ

4章での検討結果を以下にまとめる。

80m級のコンクリートダムをモデルとして、2ブロックに渡って幅10m及び20mの空洞を設けた構造について検討した。

- ① 圧縮応力の集中は、底部空洞部の側部に発生し、その最大値は幅10mの空洞の場合は6.2MPa、幅20mの場合は8.7MPaと、通常のコンクリートダム内で許容される圧縮応力に比べるとかなり大きい。
- ② 底部空洞部の上下面において、底部空洞部にかかる横継目の開きは、幅10mの空洞の場合は1mm程度、幅20mの場合は2mm程度であり、わずかである。
- ③ 空洞脇の横継ぎ目においてせん断応力に関する評価指標として、せん断応力に関する局所安全率を算出すると、幅10mの空洞の場合は12以上を確保し、幅20mの場合は4以上を確保しており、横継目のせん断安全性は確保されていることがわかった。

5. まとめ

平成19年度は、ダム堤体の1ブロック内に大規模な空洞を有したダム構造、および堤体隣接した2ブロックに渡るような大規模空洞構造を有したダム構造について検討を行った。

1ブロック内に大規模な空洞を有したダム構造の

場合、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。

80m級のコンクリートダムの場合、堤体隣接した2ブロックに渡るような大規模空洞構造を有したダム構造の場合、底部空洞部の側部に圧縮応力が集中し、その最大値は通常のコンクリートダム内で許容される圧縮応力に比べるとかなり大きい。底部空洞部の上下面において、底部空洞部にかかる横継目の開きは、幅10mの空洞の場合は1mm程度、幅20mの場合は2mm程度であり、わずかである。

今後は、堤高や堤体ブロック構造を考慮した解析を実施し、底部に空洞を有する治水専用ダムの堤体構造形式を考慮した可能な空洞規模について提案を行う予定である。

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

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 fiscal year, we conducted numerical simulations considering structures of concrete dams, in order to investigate the maximum possible scale for conduits. We analyzed two types of a conduit within a block and a conduit between two blocks

Key words: Concrete dams, Single purpose dams for flood mitigation, FEM analysis, Dam body Block