

土木研究所資料

洪水調節専用（流水型）ダムの 空洞部規模に関する構造解析

平成22年1月

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

Copyright © (2010) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

洪水調節専用（流水型）ダムの 空洞部規模に関する構造解析

ダム構造物チーム	上 席 研 究 員	山 口 嘉 一
	総 括 主 任 研 究 員	岩 下 友 也
	元 研 究 員	佐 々 木 晋
	研 究 員	切 無 沢 徹
	元 交 流 研 究 員	黒 目 剛
	元 交 流 研 究 員	原 基 樹

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洪水調節専用（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可能な空洞規模を解析により検討評価し、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：洪水調節専用（流水型）ダム、FEM 解析、放流管、
重力式コンクリートダム

Structural Analysis on Conduit Size of a Dry Dam (Single purpose dam for flood mitigation)

Yoshikazu YAMAGUCHI

Principal Researcher, Hydraulic Engineering Research Group
Public Works Research Institute

Tomoya IWASHITA

Senior Researcher, ditto

Susumu SASAKI & Toru KIRINASHIZAWA

Former Researcher & Researcher, ditto

Tsuyoshi KUROME & Motoki HARA

Former Visiting Researcher, ditto

Synopsis

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.

Keywords : *Single purpose dam for flood mitigation (Dry dam), FEM analysis, Conduit, Concrete gravity dam*

目 次

第 1 章	はじめに.....	1
第 2 章	研究方針.....	2
第 3 章	1 ブロック内に設ける空洞規模の検討	3
3. 1	概要.....	3
3. 2	解析手法の検討.....	3
3. 2. 1	解析手法	3
(1)	2 次元 FEM 引継ぎ解析.....	3
(2)	応力集中係数からの応力値の算定	6
(3)	3 次元 FEM 解析.....	6
3. 2. 2	解析条件	7
(1)	2 次元 FEM 引継ぎ解析.....	7
(2)	応力集中係数からの応力値の算定	8
(3)	3 次元 FEM 解析.....	8
3. 2. 3	解析結果と考察	9
(1)	解析評価断面	9
(2)	2 次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算出による方法の比較評価.....	10
(3)	2 次元 FEM 引継ぎ解析と 3 次元 FEM 解析との次元の違いによる応力値の比較評価	12
3. 3	解析条件の検討.....	15
3. 3. 1	荷重条件の違いによる応力値の評価.....	15
(1)	解析条件	15
(2)	解析結果と考察.....	16
3. 3. 2	境界条件の違いによる応力値の比較評価	17
(1)	解析条件	17
(2)	解析結果と考察.....	19
3. 4	堤高、空洞幅の違いによる応力状態の検討	21
(1)	解析条件	21
(2)	解析結果と考察.....	21
3. 5	拡張したブロック幅のダムモデルによる検討	25
(1)	解析条件	25
(2)	解析結果と考察.....	25

3.6	ダム形状の違いによる検討.....	31
(1)	解析条件	31
(2)	解析結果と考察.....	31
3.7	発生圧縮応力の評価	34
3.8	1ブロック内に設ける空洞構造型式の解析結果のまとめと空洞規模の検討結果.....	36
第4章	2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討	38
4.1	解析条件の検討.....	38
4.1.1	基礎岩盤の弾性係数に関する検討	38
4.1.2	ジョイント要素の条件設定に関する検討	40
4.2	解析条件.....	42
4.2.1	解析手法.....	42
4.2.2	解析断面.....	42
4.2.3	材料物性値	42
4.2.4	ジョイント要素の条件設定.....	42
4.2.5	荷重条件.....	42
4.2.6	応力の引継ぎ.....	43
4.3	解析ケース	46
4.4	解析結果.....	48
4.4.1	底部空洞部周辺の応力分布	48
4.4.2	横継目に生じる変形・変位・発生応力	50
(1)	横継目の変形（開き、ズレ）	50
a)	垂直変位（開き）	50
b)	せん断変位（ズレ）	50
(2)	横継目に作用する応力.....	52
a)	垂直応力	52
b)	せん断応力.....	53
4.5	2ブロックに渡って設ける空洞構造型式の解析結果のまとめと空洞規模の検討結果.....	54
第5章	全体のまとめ	55
	参考文献.....	57

第1章 はじめに

近年、ダムの有効活用や利水需要の変化に伴う同一水系で複数のダムによるダム群連携運用や、人々の河川環境保全への関心の高まり等から、洪水調節を専用目的とする洪水調節専用（流水型）ダムの計画が増加している。現在、国土交通省所管ダムで洪水調節専用（流水型）ダムとして、既設、建設中、計画中の主なダムを「巻末資料7」に示す。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、通常時は貯水しないため、放流設備を河床標高付近に設けて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。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。

洪水調節専用（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に普段の川幅程度に広いことが理想である。しかし、その場合洪水時には放流量を制限するためその空洞口（放流口）を絞り込むか、あるいは別の小規模の放流口に切り替える必要があるため、空洞口へのゲート設置等で常時の河川状態と洪水時のダムの貯留機能の2つの目的を両立することが検討されている（イメージ図を図-1に示す）。

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型式・構造及び可能な空洞規模についての提案を行った。

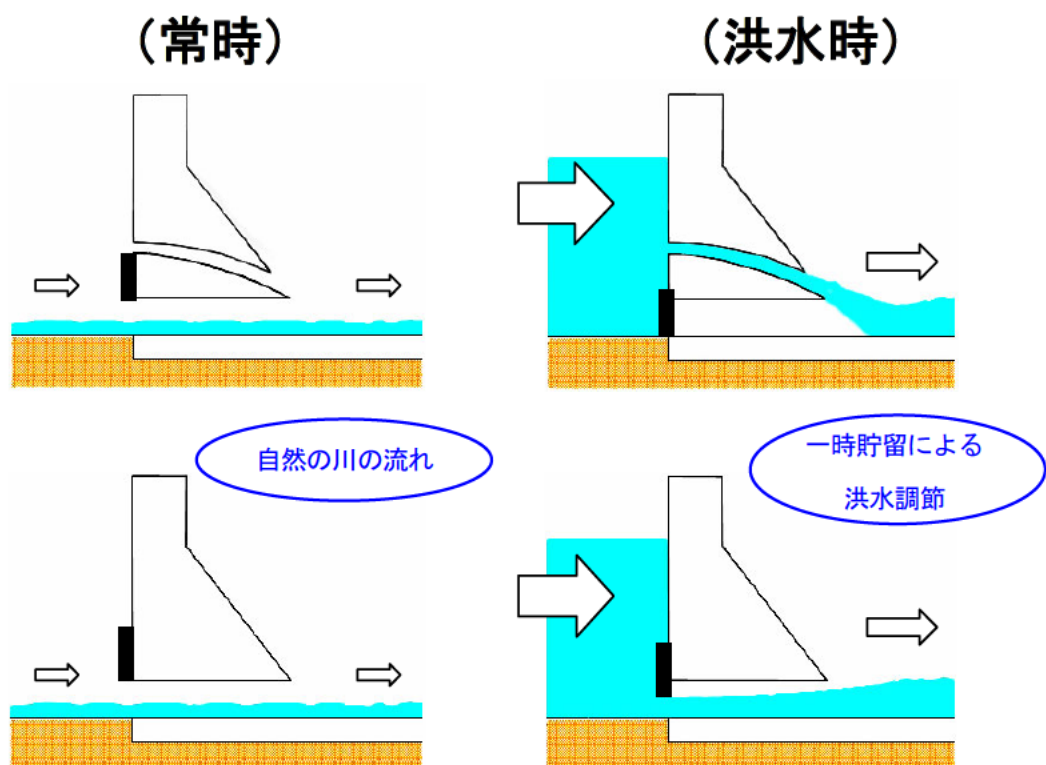


図-1 上流面にゲートを設置した洪水調節専用（流水型）ダムのイメージ図

第2章 研究方針

ダムの構造規定を定める「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解析等によって厳密に応力を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-2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空洞規模について、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周りの応力状態の検討、②洪水調節専用（流水型）ダムは常時は貯水のない空虚な状態であることから、ダム形状として上流面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検討を行った。

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検討を行った。

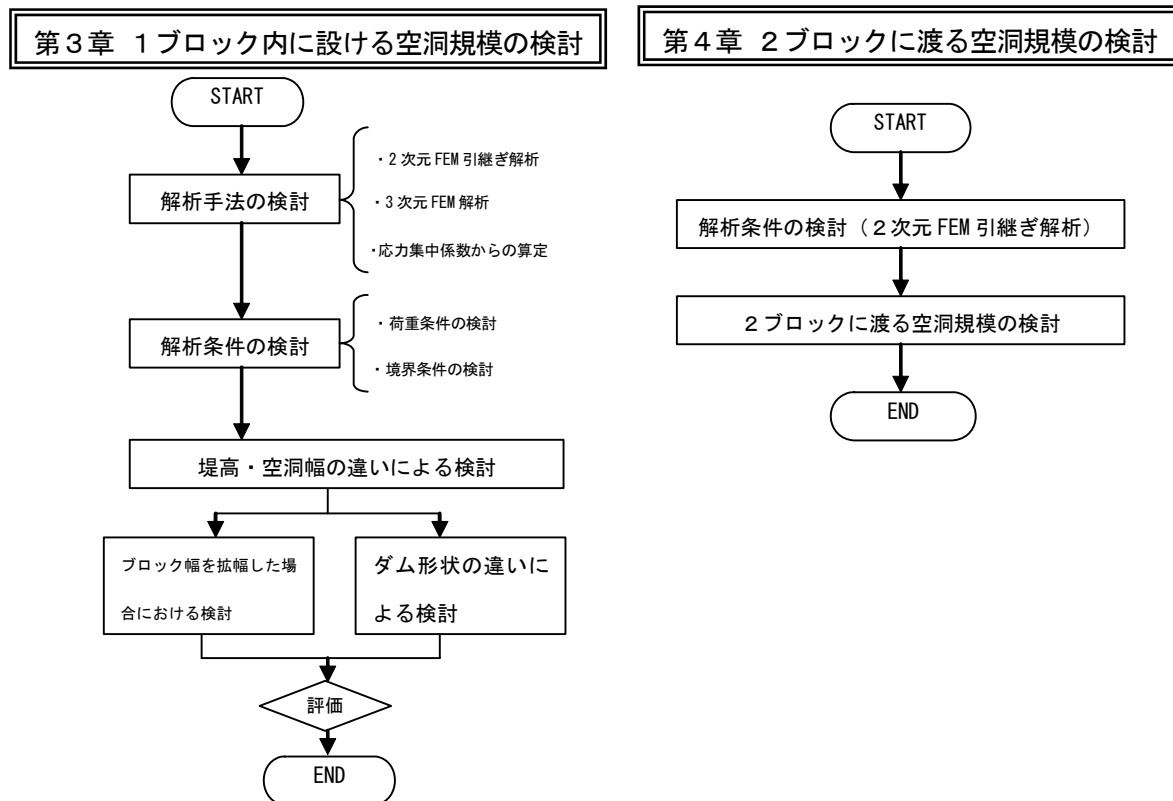


図-2 研究検討フロー

第3章 1 ブロック内に設ける空洞規模の検討

3.1 概要

「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解析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。

- ・ 2次元FEM引継ぎ解析
- ・ 応力集中係数からの応力値の算定
- ・ 3次元FEM解析

(1) 2次元FEM引継ぎ解析

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応力分布を求める手法²⁾である。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-4参照)。

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FEM解析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

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。

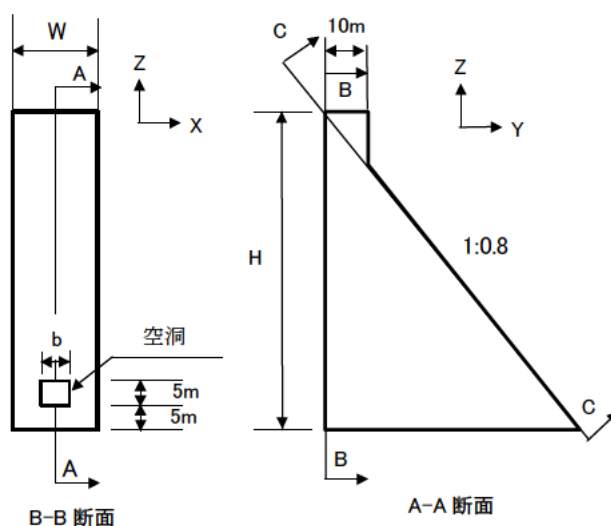
③空洞部の影響を考慮するためのみかけの荷重の設定

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

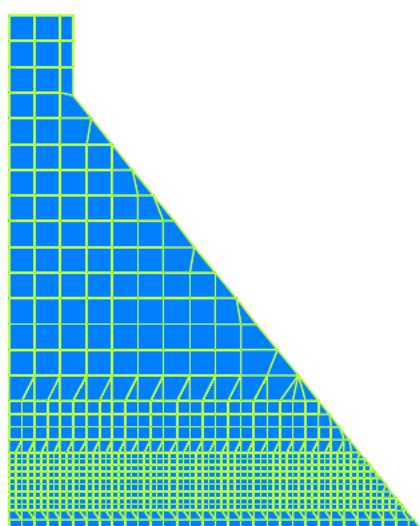
されないで、その方向の応力 σ_z は 0 である。よって、図の面内応力を与えた状態で前記の条件を満足させるために、その点の応力 σ_z に等しいみかけの分布荷重 P1 および P2 を作用させる。この場合の応力 σ_z は圧縮応力であるから、P1 および P2 の方向は空洞内部へ向かうよう作用させる。

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。

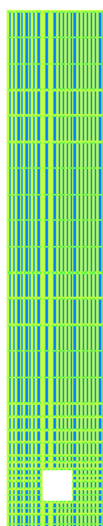


【モデル形状と解析断面位置】

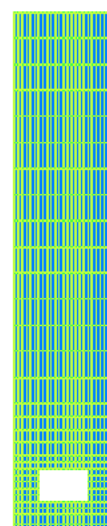


(1) A-A 断面：上下流方向断面

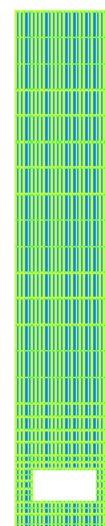
(空洞部周辺メッシュサイズ：1.0m×1.0m)



a) 空洞幅 5.0m



b) 空洞幅 7.5mm



c) 空洞幅 10.0m

(2) B-B 断面：ダム軸方向断面（上流面）

(空洞部周辺メッシュサイズ：0.625m×1.0m)

【メッシュ図（堤高 80m の例）】

図-3 解析モデルと解析断面位置図（2次元 FEM 解析）

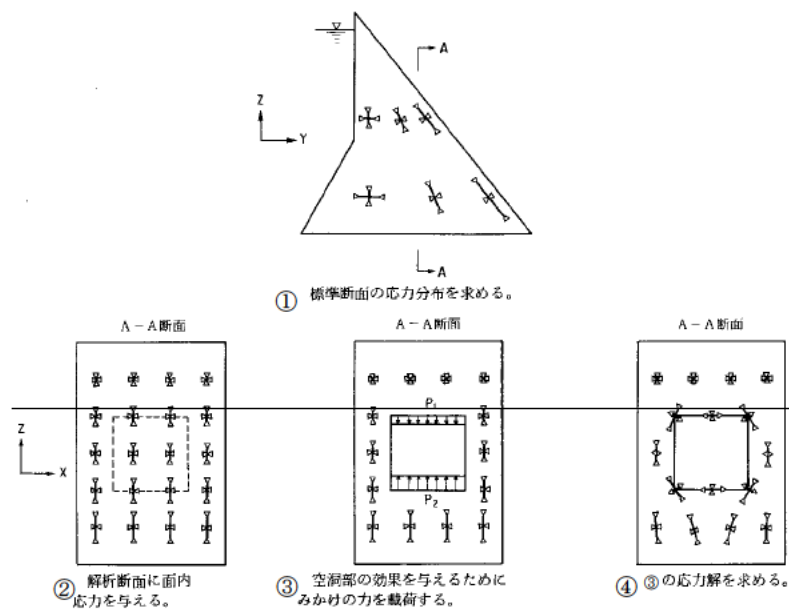


図-4 2次元 FEM 引継ぎ解析

(2) 応力集中係数からの応力値の算定

当算定方法は、先の(1) 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。

(3) 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 2 次元 FEM 引継ぎ解析と同一とした。

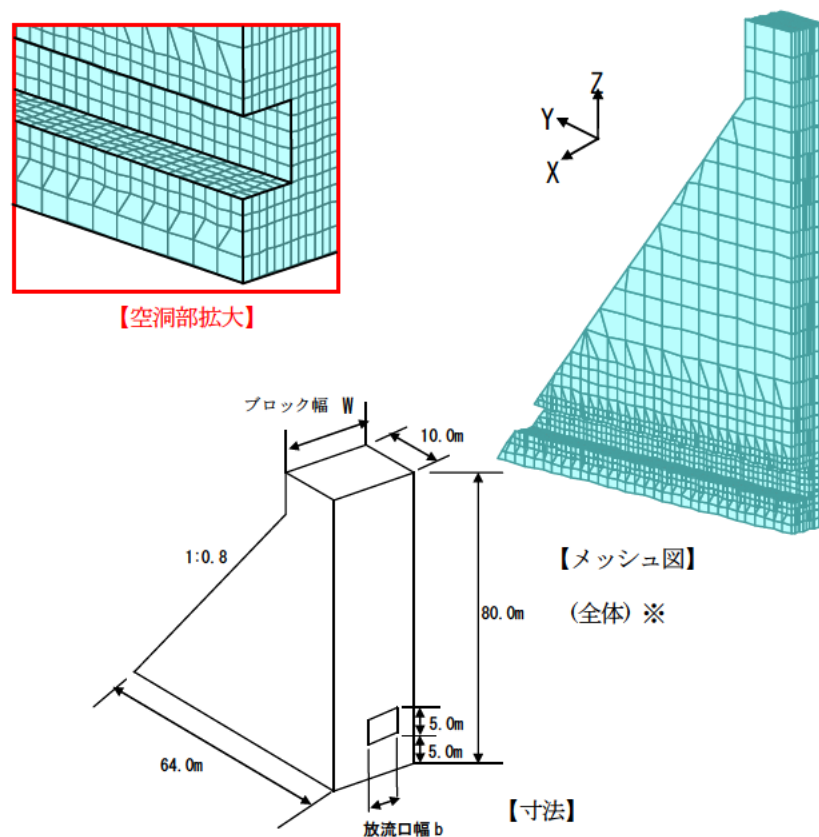


図-5 解析モデル (3次元 FEM 解析)

※空洞部中心で左右対称であるため、ブロックの半断面をモデル化して 3 次元 FEM 解析を行った。

3.2.2 解析条件

(1) 2次元 FEM 引継ぎ解析

解析対象は前述の図-2 に示す1ブロック（ブロック幅 $W=15\text{m}$ ）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 5.0m、7.5m、10.0m ($b/W=1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$) 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で十分整合性が良いことを確認している。そこで、本研究の対象となる洪水調節専用（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をモデル化しないモデルとした。

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、洪水調節専用（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)	50m, 80m
堤頂幅	10m
貯水位 (SWL)	H-5m (45m, 75m)
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

荷重		常時（空虚）	洪水時 (SWL : H-5m)
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 洪水調節専用（流水型）ダムのため、常時は貯水池空虚である。

※2 Westergaard 式による。

(2) 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、(1)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 を用いた。まず、それぞれの堤高における応力集中係数 ($C_\sigma = \sigma_{tmax} / \sigma_z$) 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することによって、応力集中係数による検討の妥当性を検証した。

(3) 3次元 FEM 解析

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

なお、堤体モデルについては、図-5 を参照されたい。

3.2.3 解析結果と考察

(1) 解析評価断面

本検討に先立ち、堤高 80m、空洞幅 7.5m のモデルで荷重条件を常時（空虚）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、2次元 FEM 引継ぎ解析の常時（空虚）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、洪水時（サーチャージ水位：H-5m）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。また、図-6 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上下流方向の応力分布を示す。

表-4、図-6 より、2次元 FEM 引継ぎ解析、3次元 FEM 解析のいずれの解析結果においても、常時（空虚）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ことが確認された。このため、以後の解析においては、荷重条件を常時（空虚）とし、評価断面は、ダム上流面側とすることとした。

表-4 2次元 FEM 引継ぎ解析による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)	1.70	上流面側 (B-B)
洪水時 (SWL:H-5m)	0.87	下流面側 (C-C)

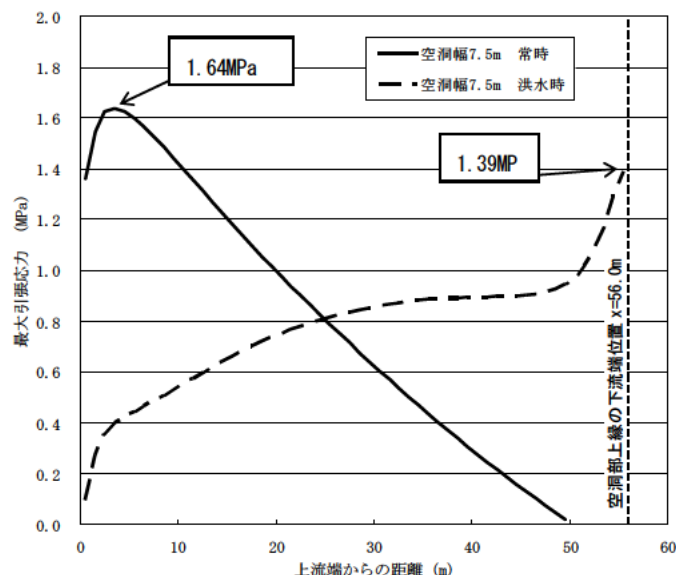


図-6 3次元 FEM 解析の最大引張応力分布図

(2) 2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算出による方法の比較評価

図-7 に、2次元 FEM 引継ぎ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。

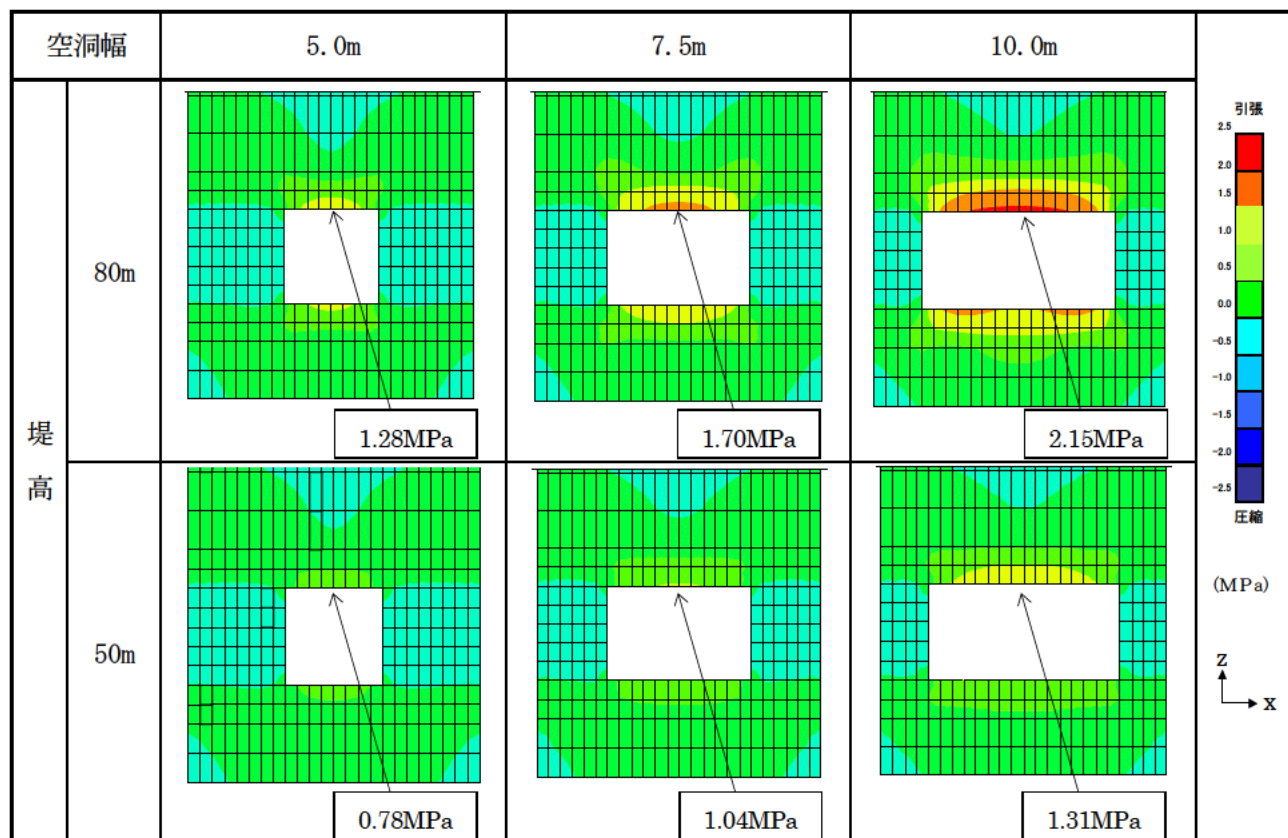


図-7 2次元 FEM 引継ぎ解析 σ_1 主応力分布図 (B-B 断面)

図-8 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-9 に、空洞周辺部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 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 引継ぎ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 ($C_c = \sigma_{t\max} / \sigma_z$) から算出した最大引張応力の値は、表-5 に示すとおりである。2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算出結果は、その差がわずか 1 % 程度であり、高い整合性がある。

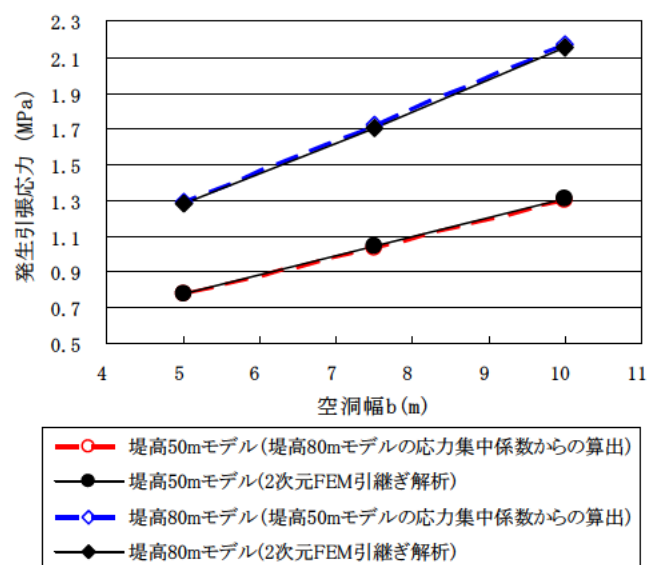


図-8 2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算出値の発生応力の比較

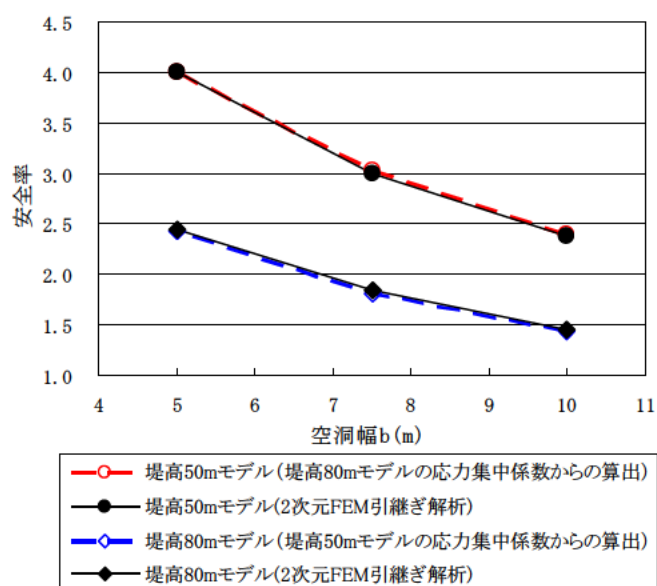


図-9 2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算出値の安全率の比較

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

表-5 2次元 FEM 引継ぎ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)					
	空洞幅5.0m		空洞幅7.5m		空洞幅10.0m	
	堤高50m	堤高80m	堤高50m	堤高80m	堤高50m	堤高80m
① 2次元FEM引継ぎ解析	0.78	1.28	1.04	1.70	1.31	2.15
② 応力集中係数からの算出	0.78	1.29	1.03	1.72	1.30	2.17
③ = ①/②	1.00	0.99	1.01	0.99	1.01	0.99

(3) 2次元 FEM 引継ぎ解析と3次元 FEM 解析との次元の違いによる応力値の比較評価³⁾⁴⁾

図-10 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 FEM 解析では、両者ともに最大引張応力は空洞上縁部で生じている。また、最大引張応力は、2次元 FEM 引継ぎ解析の方が3次元 FEM 解析より大きい値を示している。

次に、図-11 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、上流面側の方が大きく、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 引継ぎ解析及び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-12 に、空洞幅と安全率の関係を図-13 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 引継ぎ解析と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 引継ぎ解析は、3次元 FEM 解析より応力値がやや大きくなっている。

以上(1)～(3)までの検討結果より、以下のことが言える。

- ① 常時(空虚)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)に発生する上流面側の引張応力の方が厳しい条件となる。
- ② 2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数からの算定値の整合性は高い。
- ③ 2次元 FEM 引継ぎ解析と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 引継ぎ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すダム上流面側を評価断面とした。また、解析手法としては(1) 2次元 FEM 引継ぎ解析を基本とし、補足的に(2) 応力集中係数からの算定も用いることとした。

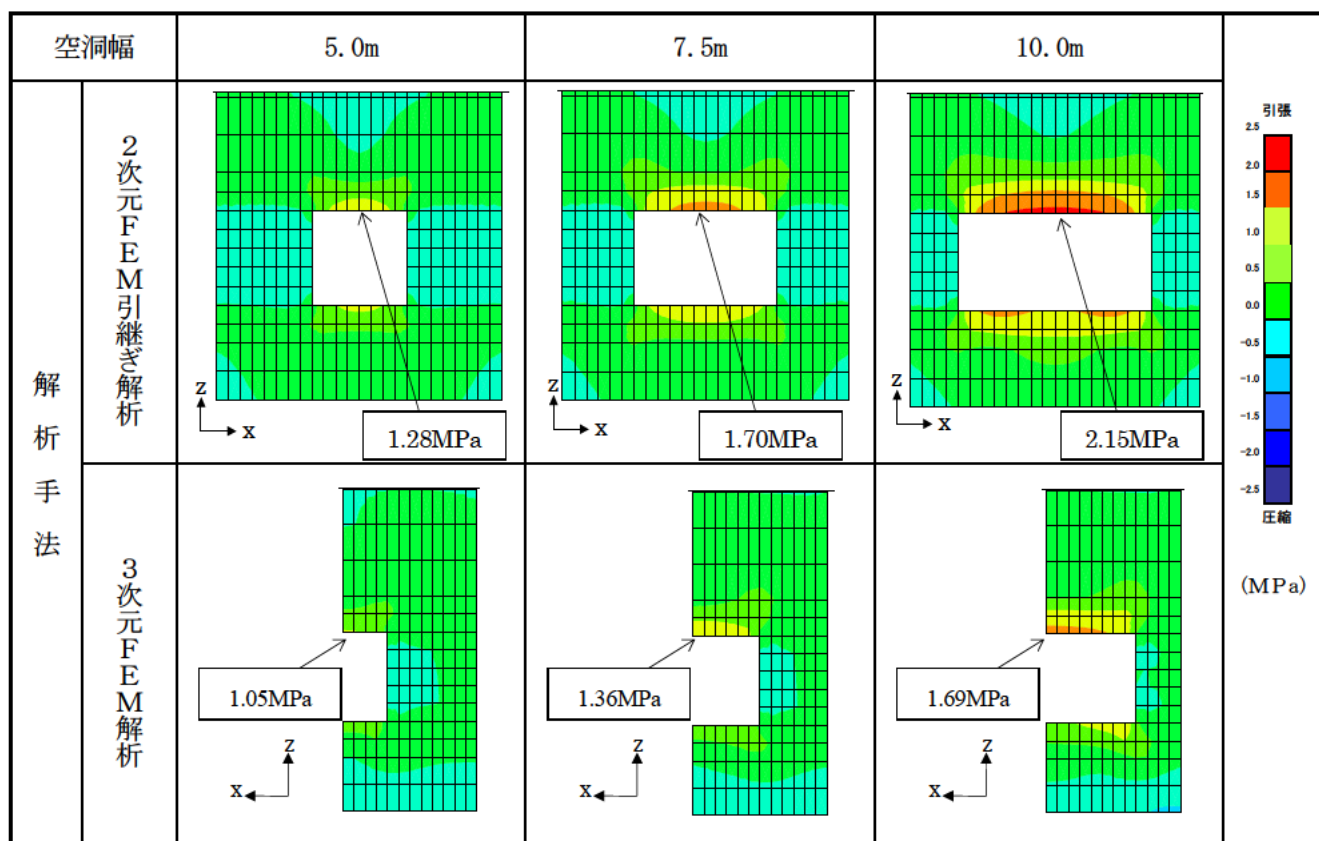


図-10 2次元FEM引継ぎ解析と3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図 (B-B断面：堤高80m)

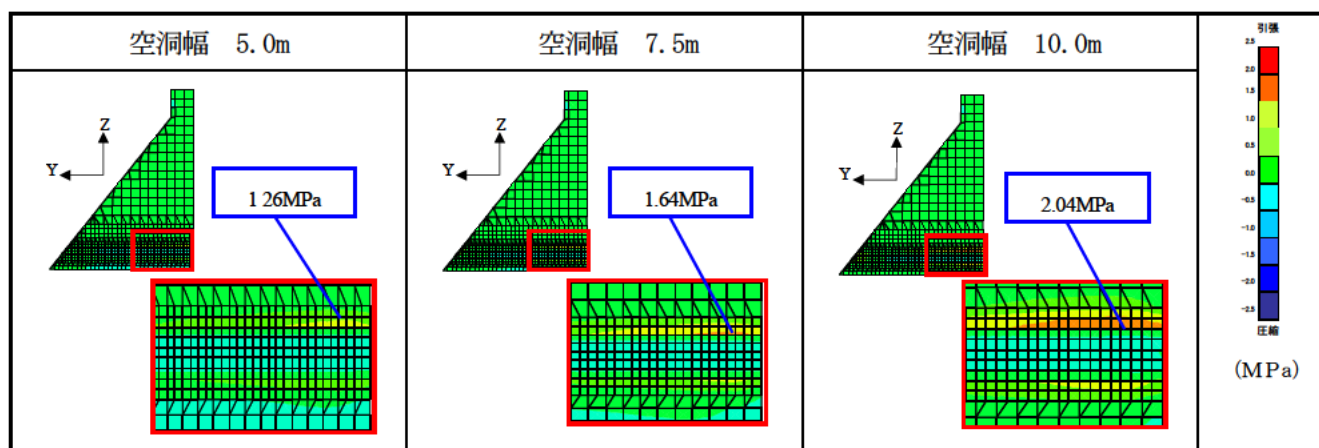


図-11 3次元FEM解析 σ_1 主応力分布図 (A-A断面：堤高80m)

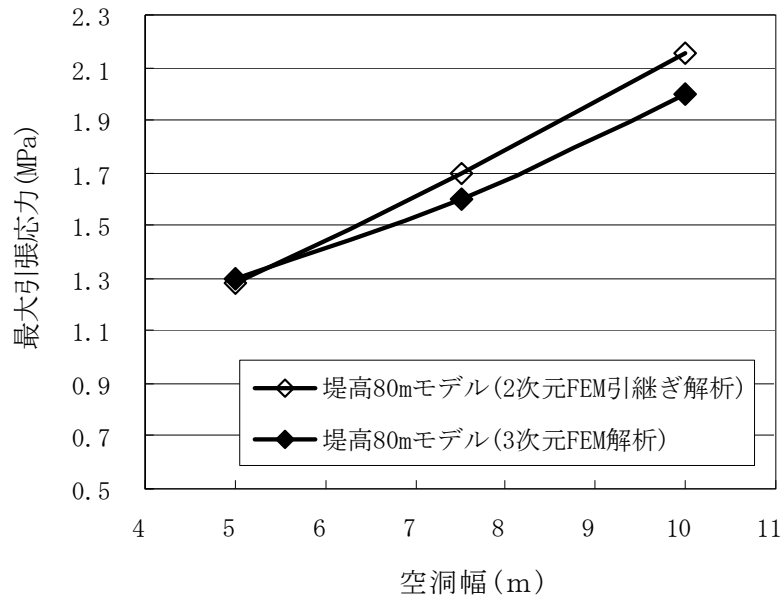


図-12 2次元 FEM 引継ぎ解析と 3次元 FEM 解析の発生応力の比較

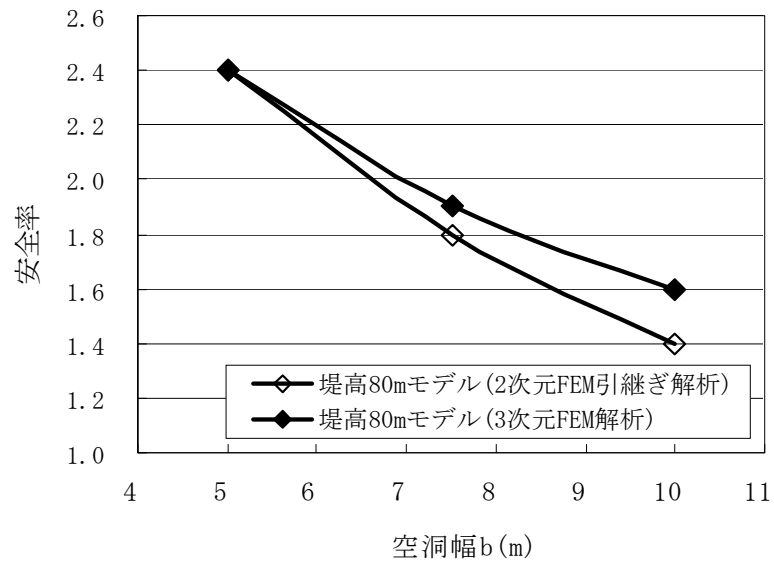


図-13 2次元 FEM 引継ぎ解析と 3次元 FEM 解析の安全率の比較

引張強度 2.4N/mm^2 と仮定した場合 (地震時引張強度 $= 3.12\text{N/mm}^2$: 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、実際のコンクリートダムを考慮して隣接するブロックの存在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 引継ぎ解析により行った。解析対象としたモデルの主要諸元を表-6 に示す。

また、荷重条件の違いは、表-7 に示すとおりであり、本検討では、洪水調節専用（流水型）ダムの常時（空虚）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-6 解析モデルの主要諸元

項目	諸元		
堤高 (H)	50m, 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)	5.0m	7.5m	10.0m
b/W	1/3	1/2	2/3

表-7 検討ケース

Case	荷重条件：常時(空虚)		
地震荷重あり	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	
地震荷重なし	水平力	なし	
	鉛直力	堤体自重	

(2) 解析結果と考察

図-14、表-8 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、図-15 に地震荷重の有無の違いを安全率により示す。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、地震荷重あり条件における強度は $1.3\sigma_T$ となる。表-9 に表-8 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-9 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荷重ありの条件下における安全率が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、地震荷重なしの条件の方が地震荷重ありの条件より厳しいといえる。

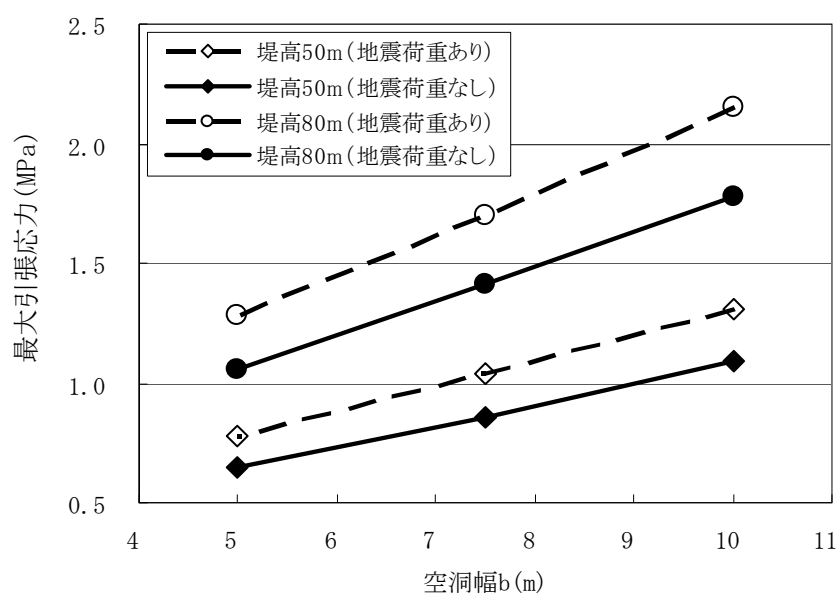


図-14 地震荷重の有無による空洞幅と発生応力の関係の違い

表-8 地震荷重の有無による最大引張応力の違い

堤高 空洞幅	最大引張応力 (MPa)					
	50m			80m		
	5.0m	7.5m	10.0m	5.0m	7.5m	10.0m
①地震荷重あり	0.78	1.04	1.31	1.28	1.7	2.15
②地震荷重なし	0.65	0.86	1.09	1.06	1.41	1.78
①/②	1.20	1.21	1.20	1.21	1.21	1.21

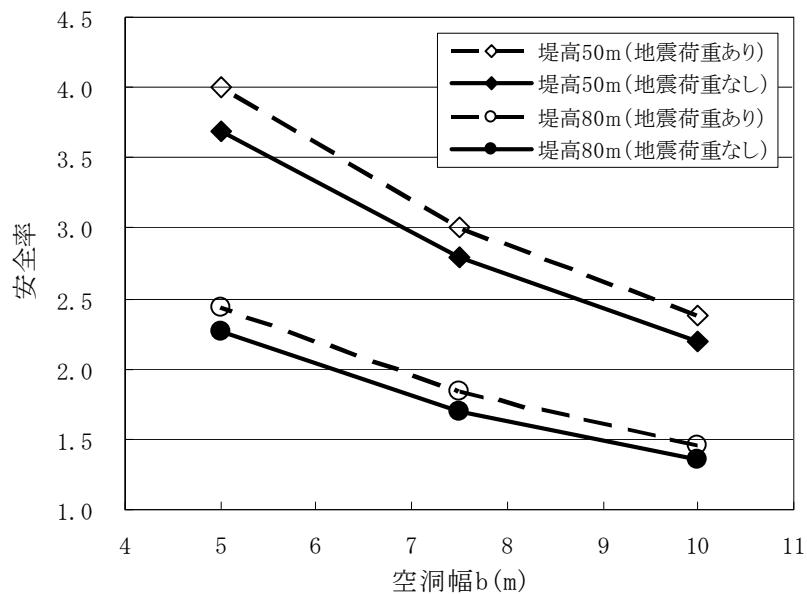


図-15 地震荷重の有無による空洞幅と安全率の関係の違い

表-9 地震荷重の有無による安全率の違い

	最大引張応力 (MPa)					
	50m			80m		
堤高						
空洞幅	5.0m	7.5m	10.0m	5.0m	7.5m	10.0m
①地震荷重あり	$1.3 \sigma_T / 0.78$	$1.3 \sigma_T / 1.04$	$1.3 \sigma_T / 1.31$	$1.3 \sigma_T / 1.28$	$1.3 \sigma_T / 1.70$	$1.3 \sigma_T / 2.15$
②地震荷重なし	$\sigma_T / 0.65$	$\sigma_T / 0.86$	$\sigma_T / 1.09$	$\sigma_T / 1.06$	$\sigma_T / 1.41$	$\sigma_T / 1.78$
③=①/②	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08

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、空洞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-10 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 引継ぎ解析を行った。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-16～図-18 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) を与えた。境界条件として各ブ

ロックの底面は固定条件とし、隣接ブロック側方は水平方向固定、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-18)。これは、実際のダムを考えた場合、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のキーと接触していることが考えられる。このため、ブロックがキー構造を介して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-11 に解析ケース一覧を示す。なお、荷重条件は 3.2 節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-12 に示す。

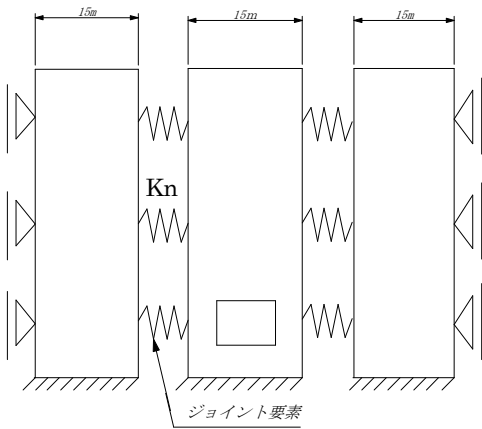


図-16 隣接ブロックありモデルの模式図
(隙間なし:Case2 の場合)

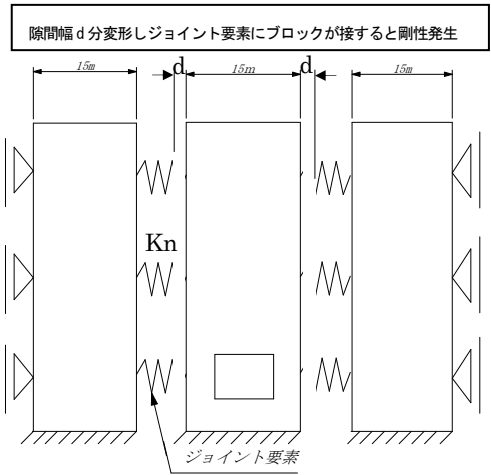


図-17 隣接ブロックありモデルの模式図
(隙間あり: Case3, Case4 の場合)

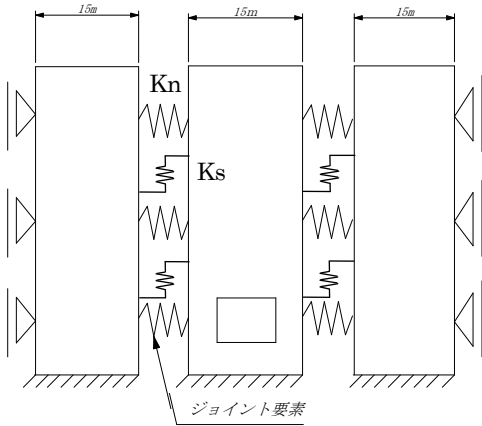
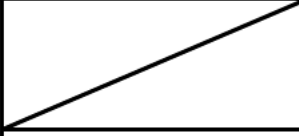


図-18 隣接ブロックありモデルの模式図
(隙間なし, せん断バネあり: Case5 の場合)

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)	15m
空洞幅 (b)	7.5m
b/W	1/2

表-11 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	3, 000, 000 (Ec×100)	
Case3		0. 01		
Case4		0. 1		
Case5		0		12, 500※

※ $K_s = E_c / \{2(1+\nu)\}$

表-12 荷重条件（常時：空虚）

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

Case 1～4 までの隣接ブロックとの隙間幅 d 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-19 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 程度であることから、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においては、隣接ブロックと接触しないことになる。図-19 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24%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。

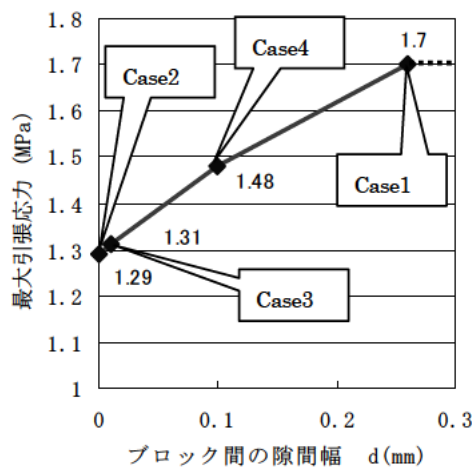


図-19 隣接ブロックとの隙間幅の違いによる最大引張応力の違い

注) ブロック間の隙間幅 d が、側方境界フリー条件における解析での側方変位量の最大値 (0.26mm) 以上の時は、側方境界の拘束状態はフリー条件と同等となるので、 d がそれ以上のときは発生応力に変化は生じない。

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-20 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て解析したものである。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 であることに對し、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 35%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 ブロックを抽出し、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に設定した条件で検討した。

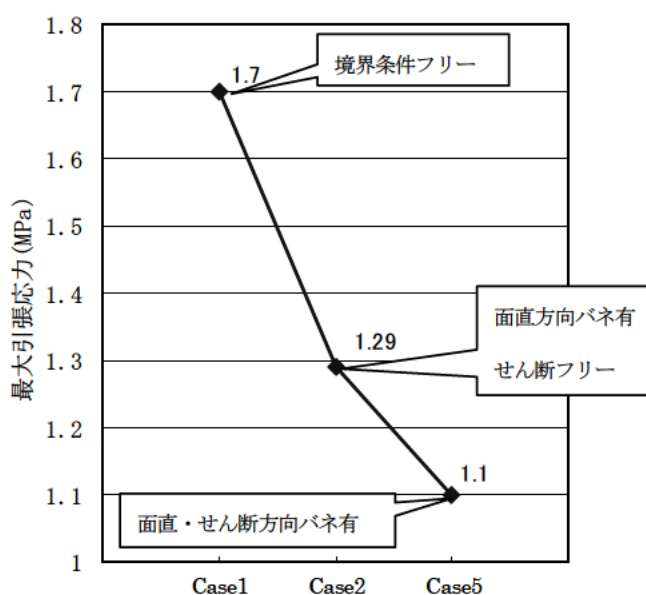


図-20 ジョイント要素の設定条件の違いによる最大引張応力の違い

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解析条件を用いて、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について解析的検討を行った。

(1) 解析条件

本検討は、2次元 FEM 引継ぎ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-13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-14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。

表-13 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		
空洞底標高ーダム敷標高(c)	5m		
空洞高(a)	5m		
ブロック幅 (W)	15m		
空洞幅 (b)	5.0m	7.5m	10.0m
b/W	1/3	1/2	2/3

表-14 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-21 に、2次元 FEM 引継ぎ解析及び応力集中係数の方法により求められた最大引張応力を示す。

3.2.3(2)でも示したとおり、2次元 FEM 引継ぎ解析と応力集中係数の方法で求めた発生最大引張応力の整合性は高い。堤高 50m モデルと堤高 80m モデルから算出した応力集中係数は、各空洞幅についてはほぼ同程度であることから、図-21 に示した堤高 50m 及び 80m モデルから算出した堤高 100m モデルの発生最大引張応力はほぼ等しい結果となっている。各堤高モデルの堤体に発生する最大引張応力は、堤高が高いほど、また空洞幅が広くなるほど大きな引張応力が発生している。

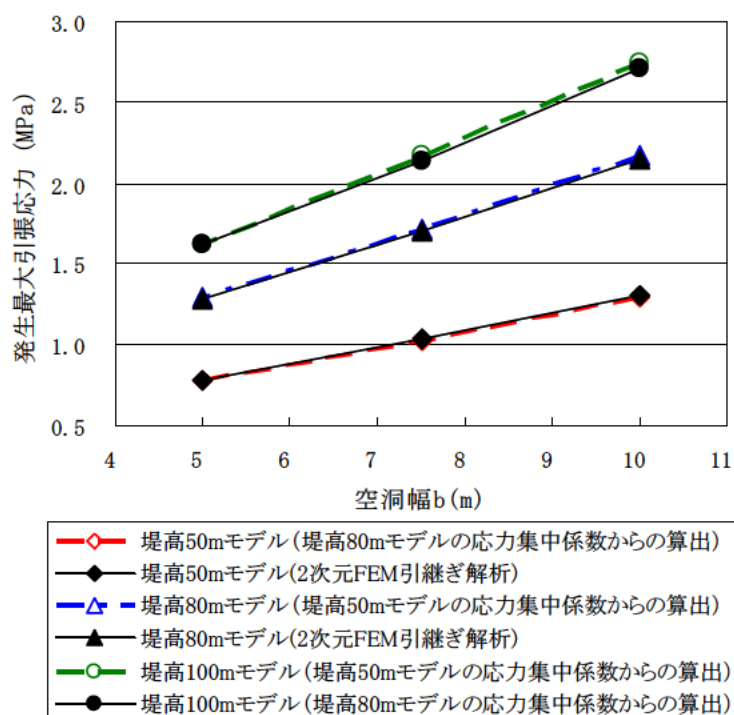


図-21 発生最大引張応力の比較

発生最大引張応力 $\sigma_{1\max}$ は、2次元 FEM 引継ぎ解析法や応力集中係数法からわかるように、空洞に作用する鉛直応力が大きく寄与する。また、洪水調節専用ダムであることから、常時は貯水がなく空洞部に作用する鉛直応力は自重によるところが大きい。これらのことから、発生最大引張応力 $\sigma_{1\max}$ を空洞上縁より上部標高の重量に相当する $\rho g (H-a-c)$ で式(3.1)のように無次元化した。

$$\sigma_1 \max / \rho g (H - a - c) \quad \text{式(3.1)}$$

ρ : コンクリートの単位容積質量

g : 重力加速度

H : ダム堤高

a : 空洞高

c : 空洞部底の標高ーダム敷き標高

図-21 の発生最大引張応力を式(3.1)で無次元化したものを図-22 に示す。堤高によらず、空洞幅と無次元化引張応力の関係はほぼ同程度となっている。無次元化発生最大引張応力は、堤高が低い 50m モデルのほうが、80m モデルより 1 割程度大きくなっている。その理由のひとつとしてはモデルの形状に起因していることが挙げられる。解析モデルは堤高にかかわらず堤頂幅を全て 10m に固定しており、堤頂部の形状は全ての堤高モデルで同じである。そのため、形状が堤高に比例しない堤頂部が、上載荷重として作用することで上下流断面の FEM 解析によって発生する鉛直応力 σ_z に影響を及ぼすことになる。したがって、堤

高が低いモデルほど堤体全体のスケール比率より大きな堤頂部を有することになり、堤頂部による堤体全体への発生応力の影響も大きくなることから、無次元化した発生最大引張応力は堤高 50m モデルが堤高 80m モデルよりやや大きくなったと考えられる。

洪水調節専用（流水型）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、解析において地震荷重ありの条件としたため、地震時の強度割増 $30\%^{1)}$ を見込んだ引張強度 3.12N/mm^2 を用いて安全率を算出した。各ケースの安全率を図-23 に示す。地震荷重ありの条件においては、空洞幅 5.0m のケースでは、堤高 50m モデルでは引張応力に対する安全率は 4.0 程度であり、堤高 100m モデルの安全率でも 2.0 程度ある。一方、空洞幅を 10.0m のケースでは、堤高 50m モデルでは安全率が 2.4 程度であるが、堤高 80m 及び堤高 100m モデルでは安全率は 1.5 以下となっている。ただし、3.3.1 で述べたように、地震荷重なしの条件の解析の方が地震荷重ありの条件の解析による安全率（図-23）より小さくなる。地震荷重なしの条件の解析による安全率については後述の図-28(2) で示す。

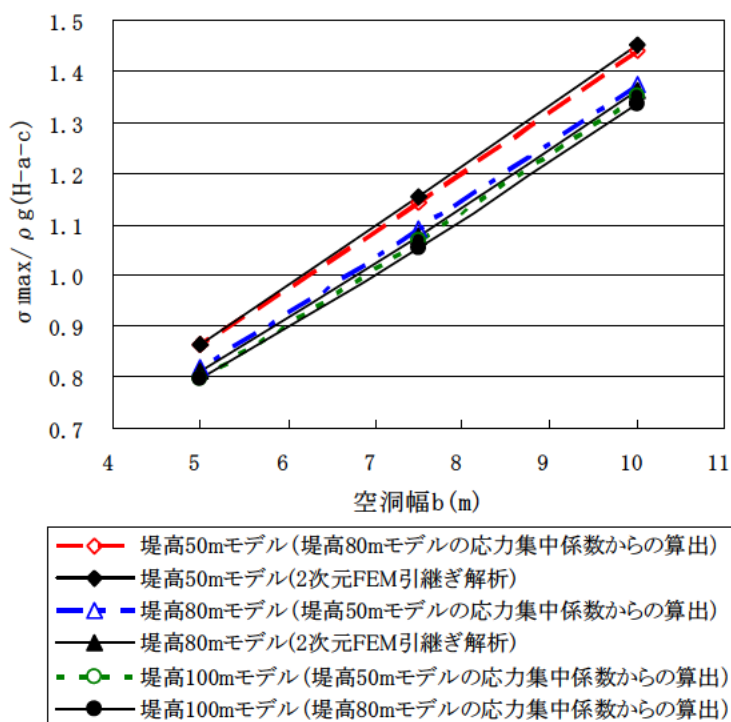


図-22 発生最大引張応力の比較（堤高で無次元化）

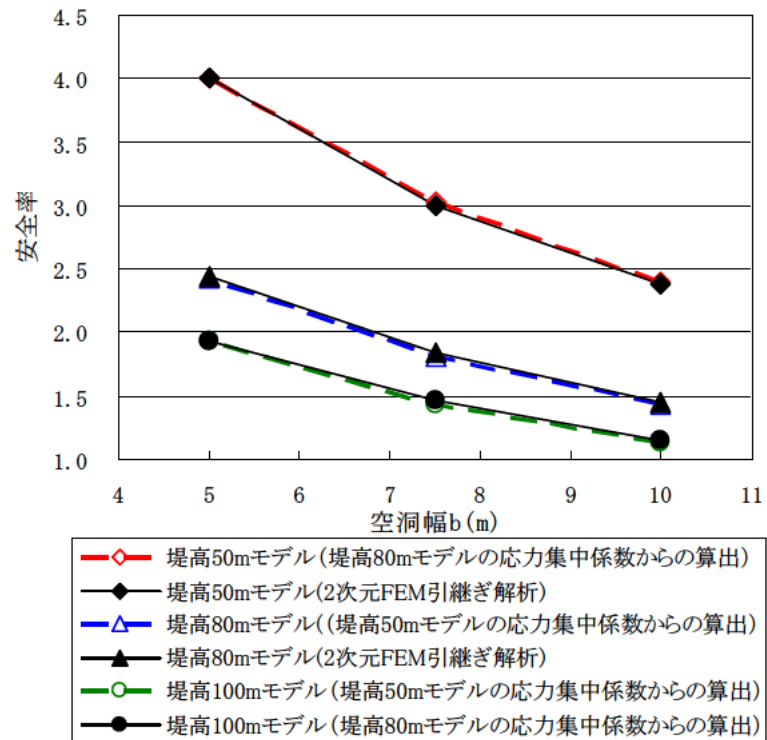


図-23 安全率の比較

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

3. 5 拡幅したブロック幅のダムモデルによる検討

前節までの検討は、モデル上下流断面形状を直角三角形とし、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、コンクリートダム堤体のブロック幅（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事例がある（表-15）。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-15 放流管ブロックとして15mよりも大きなブロック幅を採用したダムの例⁵⁾

ブロック幅	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

(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15mに加えて実ダムで実績のある18m、21mとし、空洞幅bはブロック幅Wに対して $b/W=1/3$ 、 $b/W=1/2$ と設定した。表-16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。空洞部周辺のFEM要素の大きさは、ブロック幅15mのモデルは $0.625m \times 1.0m$ 、ブロック幅18m、および21mのモデルは $0.5m \times 1.0m$ の四角形要素を基本とした。荷重条件は、ブロック幅の全ケースについて地震荷重ありの条件で解析したが、ブロック幅15m、21mのモデルについては地震荷重なしの条件についても解析を行った。

(2) 解析結果と考察

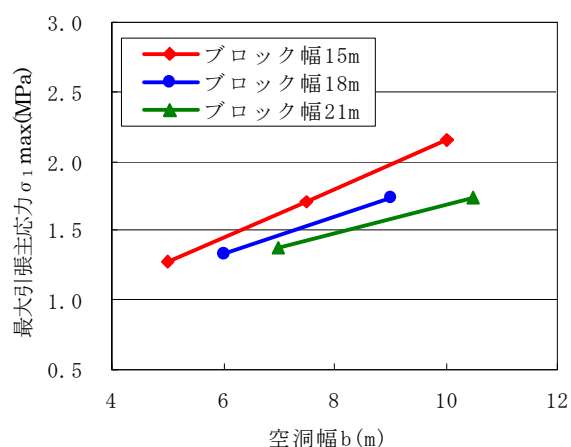
ブロック幅15, 18, 21mのモデルによる解析により求められた最大引張応力を図-24に示す。また、安全率で評価したものを図-25に示す。ここで安全率の評価に用いる引張強度は、地震荷重ありの条件では前節と同様に30%の割増しを見込むこととした。図-24、図-25からは、空洞周辺に発生する応力は、ブロック幅を拡げることにより低減し、より大きな空洞を設けることが可能となることがわかる。例えば、今回の検討モデルにおいて7.5mの空洞を設置することを考えると、ブロック幅を15mから21mに拡幅することによって16%程度応力が低減している。

次に、図-26、図-27に、図-24、図-25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-26、図-27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若干大きな応力が発生しており、例えば $b/W=1/3$ でのブロック幅21mでは15mより最大引張応力が7%程度大き

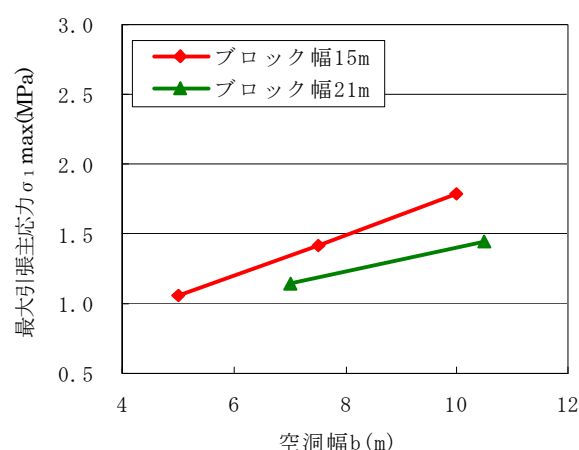
い。これは、今回の検討においては、全ダムモデルについて空洞の高さ a を 5m で一定としたため、同じ b/W でも、ブロック幅 W を広げることにより、空洞形状がより扁平な形状となることも起因していると推察される。

表-16 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						
空洞底標高ーダム敷標高(c)	5m						
空洞高(a)	5m						
ブロック幅 (W)	15m			18m		21m	
空洞幅 (b)	5.0m	7.5m	10.0m	6.0m	9.0m	7.0m	10.5m
b/W	1/3	1/2	2/3	1/3	1/2	1/3	1/2

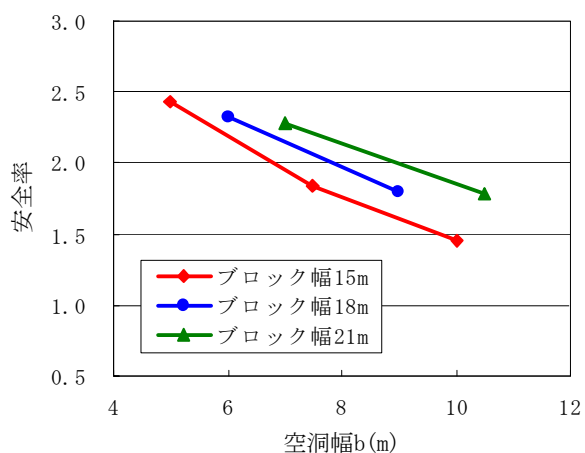


(1) 地震荷重あり

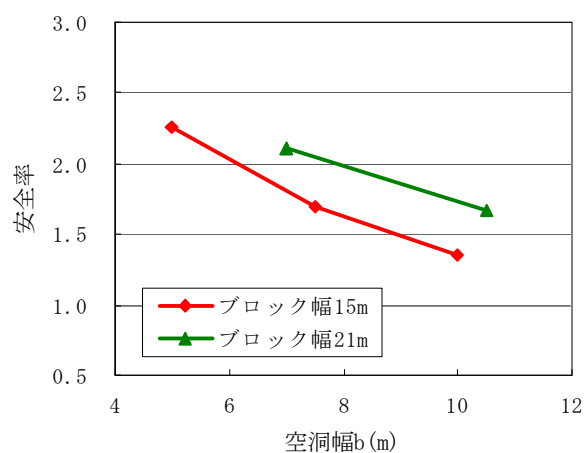


(2) 地震荷重なし

図-24 ブロック幅の違いによる最大引張応力の比較 (X 軸：空洞幅(b))



(1) 地震荷重あり

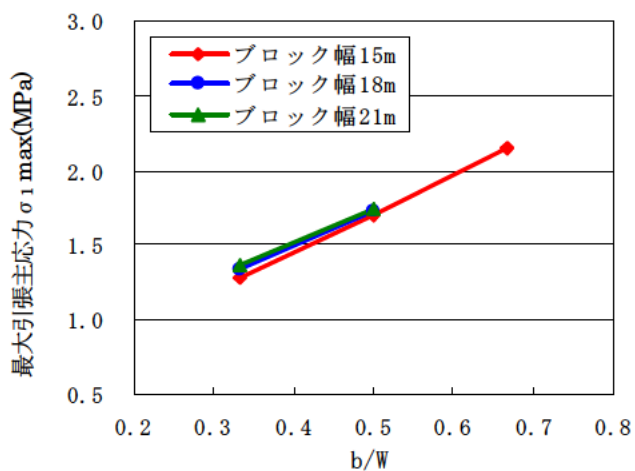


(2) 地震荷重なし

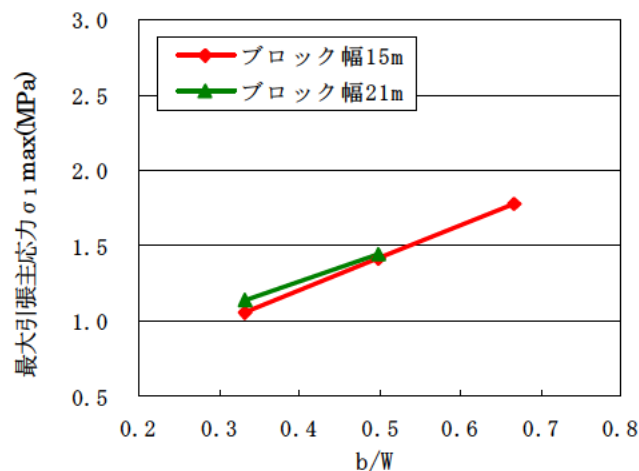
(地震時引張強度=3.12N/mm²：地震時割増 30%を見込む)

(引張強度=2.4N/mm²：地震時割増 30%を見込まない)

図-25 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：空洞幅(b))



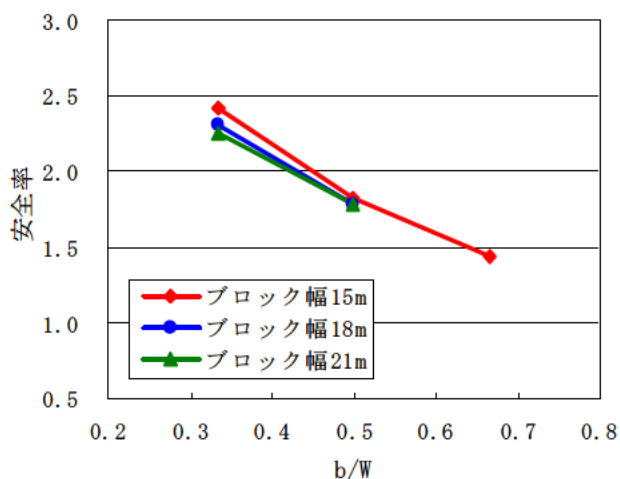
(1) 地震荷重あり



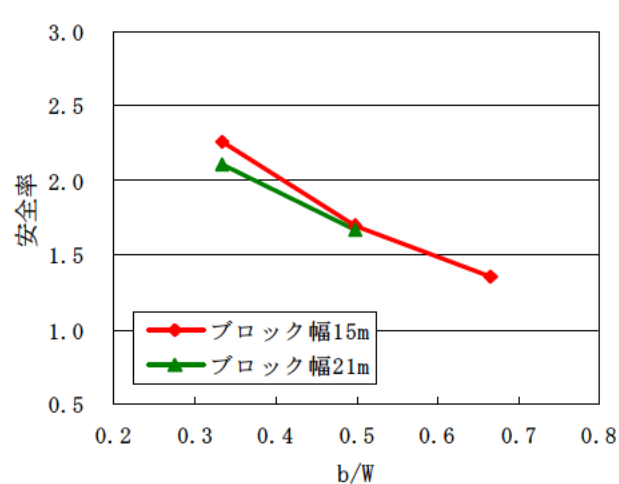
(2) 地震荷重なし

図-26 ブロック幅の違いによる最大引張応力の比較

(X 軸：空洞幅 (b) / ブロック幅 (W))



(1) 地震荷重あり



(2) 地震荷重なし

(地震時引張強度=3.12N/mm²：地震時割増 30%を見込む)

(引張強度=2.4N/mm²：地震時割増 30%を見込まない)

図-27 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：空洞幅 (b) / ブロック幅 (W))

図-24 の発生最大引張応力について無次元化し、堤高 50m の結果を加えたものを図-28 に示す。堤高 80m モデルにおけるブロック幅 W を変化させたケースの無次元化した発生最大引張応力のばらつきは、堤高を 50m に変化させた程度の違いの範囲であった。

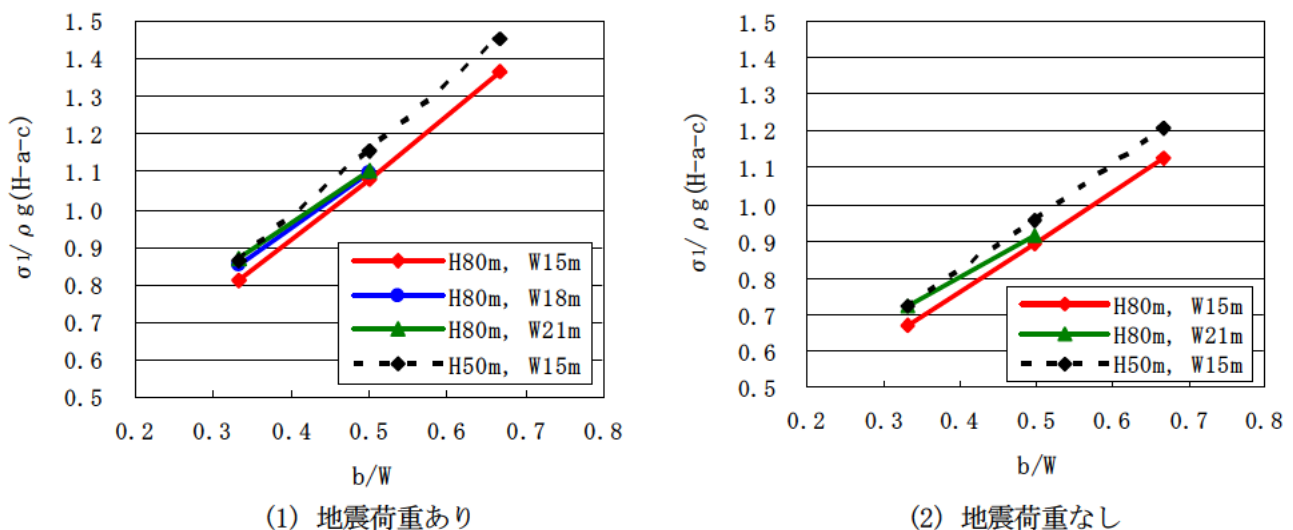


図-28 ブロック幅の違いによる最大引張応力の比較（堤高で無次元化）

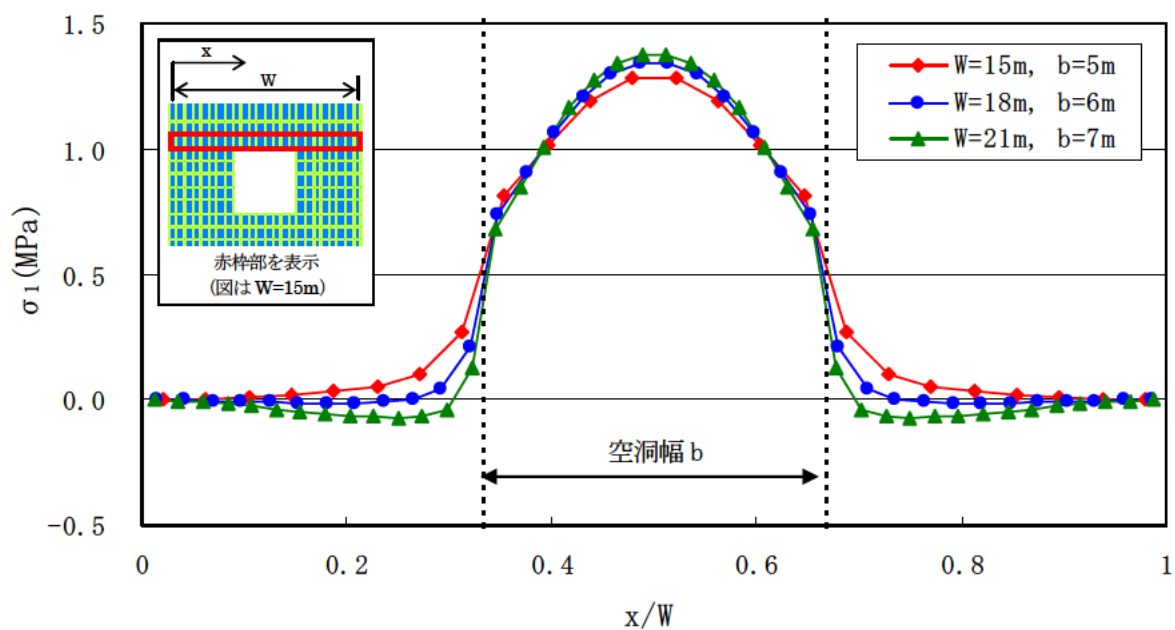
(X 軸：空洞幅 (b) / ブロック幅 (w))

図-29、図-30 に、空洞上縁部標高メッシュの、地震荷重ありの条件における引張側最大主応力 σ_1 及び圧縮側最小主応力 σ_3 のダム軸方向の水平方向分布を示す。X 軸はブロック側面を 0 とした水平距離 x をブロック幅 W により無次元化した。

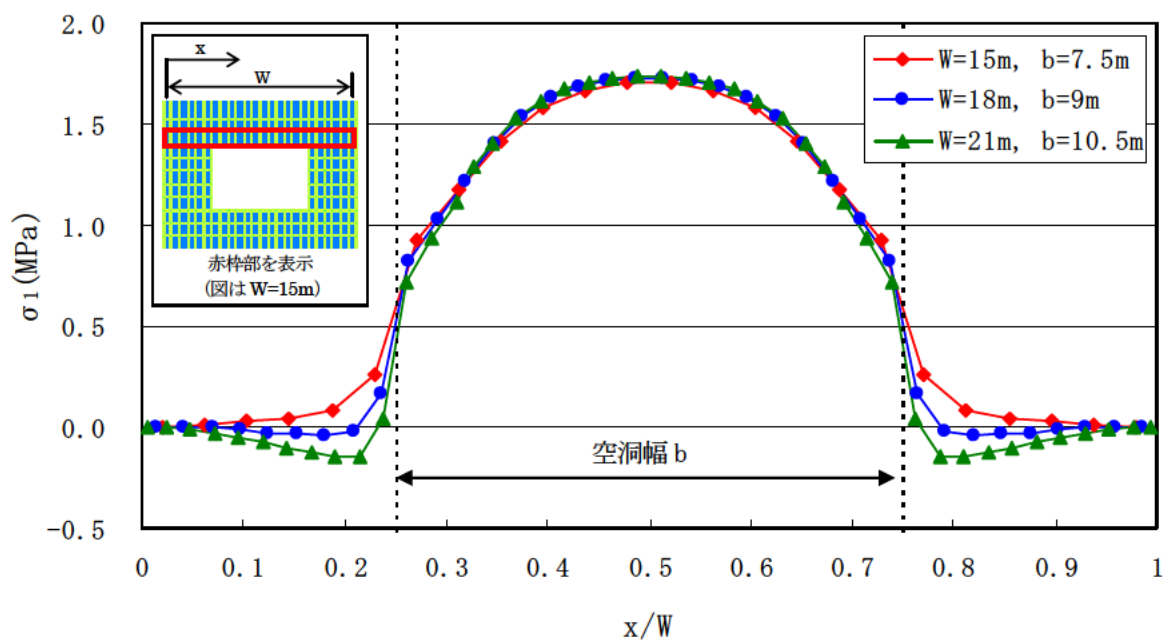
図-29 に示す引張側主応力 σ_1 の分布では、同じ b/W であっても最大値はブロック幅 W が広いほうが σ_1 は大きく、 $b/W=1/2$ より $b/W=1/3$ の方がその差は大きい。 $b/W=1/2$ の場合は、空洞幅 b が広く、 σ_1 のピークは、空洞上縁部の中央部分に幅をもって広がっているため、ブロック幅の違いによる σ_1 の違いはほとんど無いくらいに小さいが、 $b/W=1/3$ の場合では、空洞幅が狭く σ_1 のピークは空洞上縁部中央で極大値をとっている。そのため、ブロック幅が大きいほど σ_1 のピーク値は若干大きくなっている。ただし、3.5(1) で示したとおり、 $W=18, 21\text{m}$ モデルの要素メッシュ幅 0.5m に対して、 $W=15\text{m}$ モデルでは 0.625m と若干大きいので、引張応力のピーク値は相対的に若干小さくなっている理由も付記する。 $b/W=1/2$ よりも $b/W=1/3$ のほうが中央部付近の応力分布が凸になっていることから、その影響が顕著に現れたと考えられる。なお、図-29、図-30 では X 軸を x/W として応力分布を示しているため、同じスケールでの応力分布はブロック幅が広いほど緩やかになることから、ブロック幅が広い方がメッシュサイズによる解析結果への影響を受けにくくなる。

また、図-30 に示す圧縮側主応力の分布では、空洞の隅角部付近でブロック幅が広いほうが応力は大きくなった。堤体に空洞を設けることにより空洞上部の堤体重量を空洞側部で支えることになり、その荷重は特に空洞に面した側に集中して作用する。空洞幅が広い場合は、 b/W が同じ条件においても空洞上部の堤体重量は大きくなるため、空洞部に面する隅角部にはより大きな荷重が加わることから、ブロック幅が広いほど最大発生圧縮応力は大きくなる。

以上の結果から、ブロック幅を拡幅することにより、空洞部周辺の発生応力は低減し、この観点からは空洞幅を広げることが可能であることを確認した。ただし、ブロック幅の拡幅率に比例して空洞幅を広げることはいできない。



(1) $b/W=1/3$



(2) $b/W=1/2$

図-29 空洞上縁部標高における引張側最大主応力 σ_1 の水平方向分布（地震荷重あり）

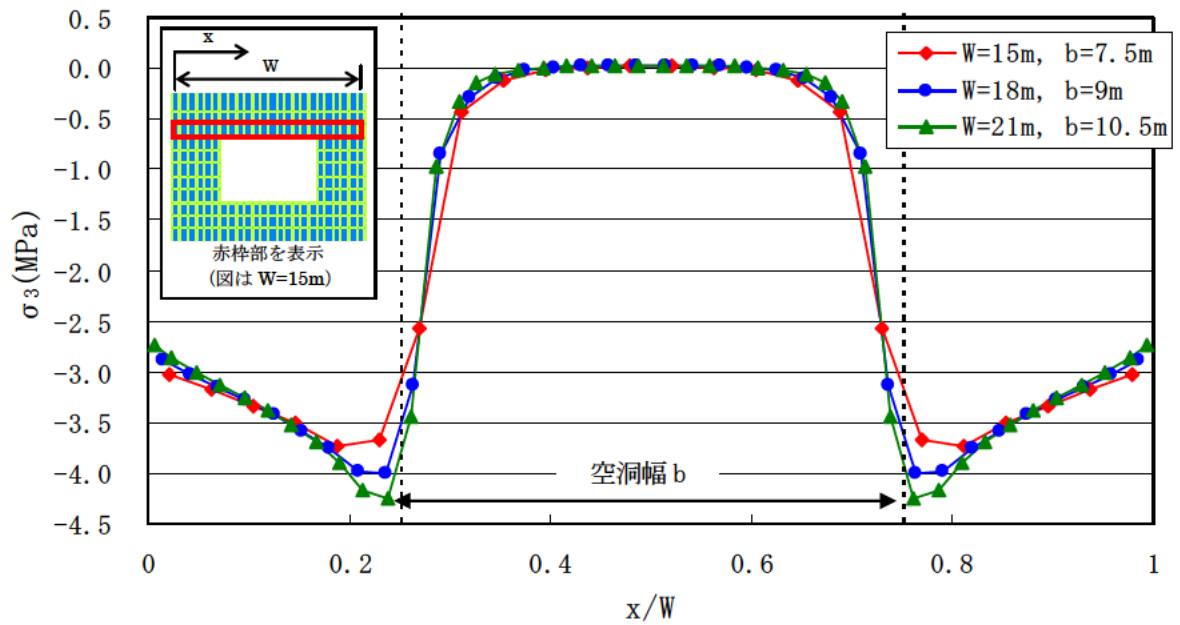
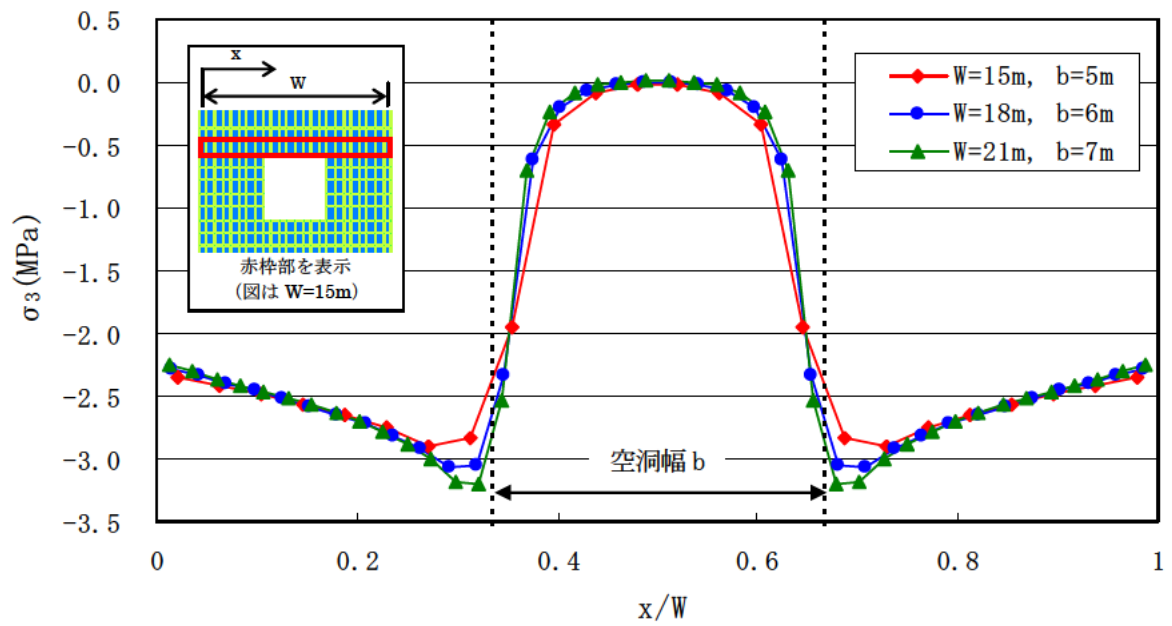


図-30 空洞上縁部標高における圧縮側最小主応力 σ_3 の水平方向分布（地震荷重あり）

3.6 ダム形状の違いによる検討

これまでの検討は、堤体上下流断面形状を直角三角形としたダムモデルを用いた。しかし、洪水調節専用（流水型）ダムでは断面の安定計算からは、常時である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、ダムモデルのダム上流面に勾配を持たせることにより、ダム軸上流面側の空洞部周辺に発生する応力がどの程度まで低減するかを検討した。

(1) 解析条件

本検討は、2次元 FEM 引継ぎ解析を用いた。解析モデルの概要を図-31 に、主要諸元を表-17 に示す。解析モデルは、堤高 80m、ブロック幅 15m のダムモデルに対し、現在設計中の洪水調節専用（流水型）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にし、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 種類を設定した。また、ブロック幅 21m のダムモデルに対し、同様の上流面勾配 1:0.12 の勾配を設けた形状とし、空洞幅を 7.0m ($b/W=1/3$)、10.5m ($b/W=1/2$) の 2 種類を設定した。

発生応力を評価するダム軸方向断面は、ダム軸（B1-B1）と、上流面から空洞上縁部で 4.4m、空洞下縁部で 5.0m 内部に入った鉛直面（B2-B2）とした。

荷重条件は、地震荷重ありと地震荷重なしの両条件について解析した。ただし、ブロック幅 21m のモデルについては、地震荷重なしの条件でのみ解析を行った。

(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-32 に示す。また、安全率で評価したものを図-33 に示す。ここで安全率の評価における引張強度の設定は前節と同様に地震荷重ありのケースでは 30%の割増しを見込むこととした。

図-32、図-33 から、空洞部周辺に発生する応力は、モデル形状の上流面に勾配を設けることによってダム軸断面（B1-B1）、上流表面付近の断面（B2-B2）ともに低減している。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、上流面勾配を 1:0.12 としたことにより、空洞部周辺に発生する最大引張応力は、20%程度低減している（表-18 参照）。

また、地震荷重の有無による影響は、上流面に勾配を持たせた形状のダムにおいても、3.3.1 同様に地震荷重ありの方が最大引張応力は 20%程度大きくなり、安全率は 7~8%程度高くなることが確認できた。

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上流面が鉛直の直角三角形断面形状のダムに比べて低減し、より大きな幅の空洞を設けることができるようになることを確認した。

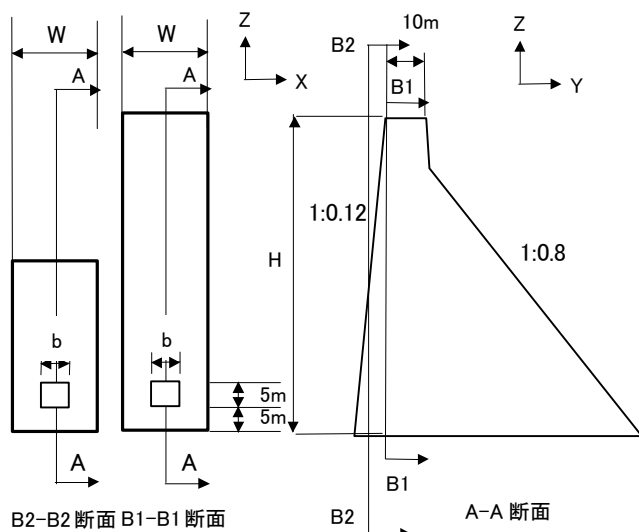


図-31 解析モデル

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	1:0.12				
下流面勾配	1:0.8				
空洞高 (a)	5m				
ブロック幅 (W)	15m		21m		
空洞幅 (b)	5.0m	7.5m	10.0m	7.0m	10.5m
b/W	1/3	1/2	2/3	1/3	1/2

表-18 上流面勾配の有無による発生する引張応力の違い

ブロック幅W=15m (地震荷重あり)

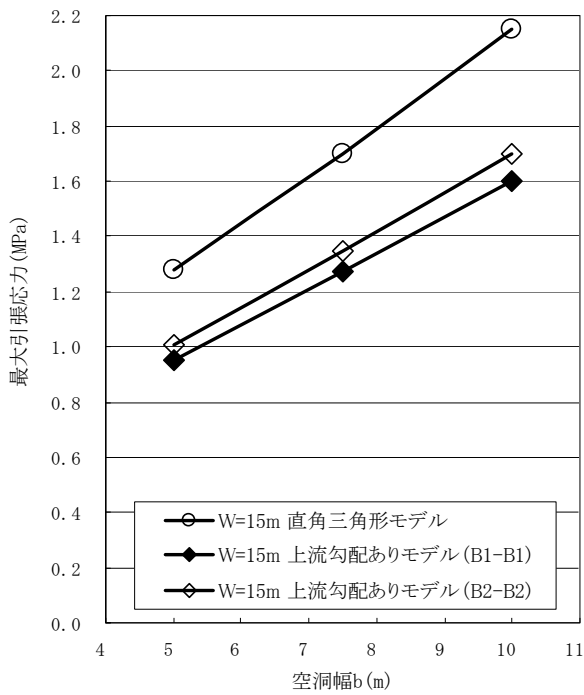
評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B1-B1断面 (ダム軸)	5.0	1.28	0.95	26%
	7.5	1.70	1.27	25%
	10.0	2.15	1.60	26%
評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B2-B2断面	5.0	1.28	1.01	21%
	7.5	1.70	1.35	21%
	10.0	2.15	1.70	21%

ブロック幅W=15m (地震荷重なし)

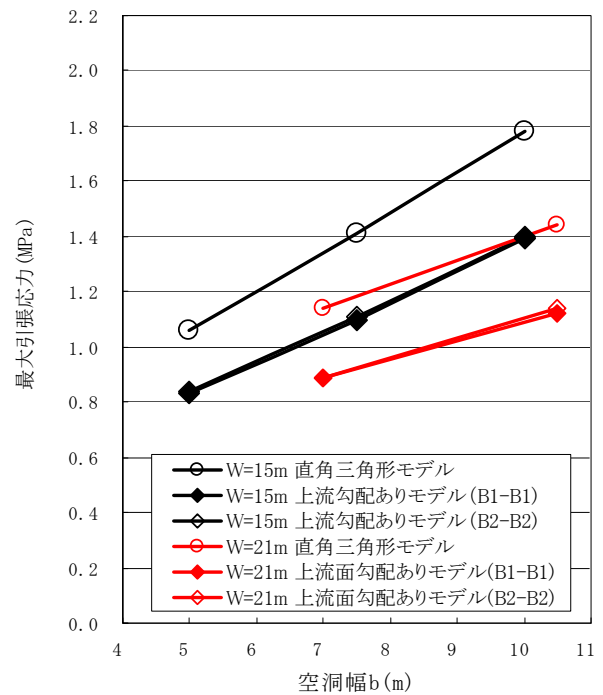
評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B1-B1断面 (ダム軸)	5.0	1.06	0.83	22%
	7.5	1.41	1.10	22%
	10.0	1.78	1.39	22%
評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B2-B2断面	5.0	1.06	0.84	21%
	7.5	1.41	1.11	21%
	10.0	1.78	1.40	21%

ブロック幅W=21m (地震荷重なし)

評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B1-B1断面 (ダム軸)	7.0	1.14	0.89	22%
	10.5	1.44	1.12	22%
評価断面	空洞幅 b (m)	引張応力 (MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし	②上流面勾配あり	
B2-B2断面	7.0	1.14	0.89	22%
	10.5	1.44	1.14	21%

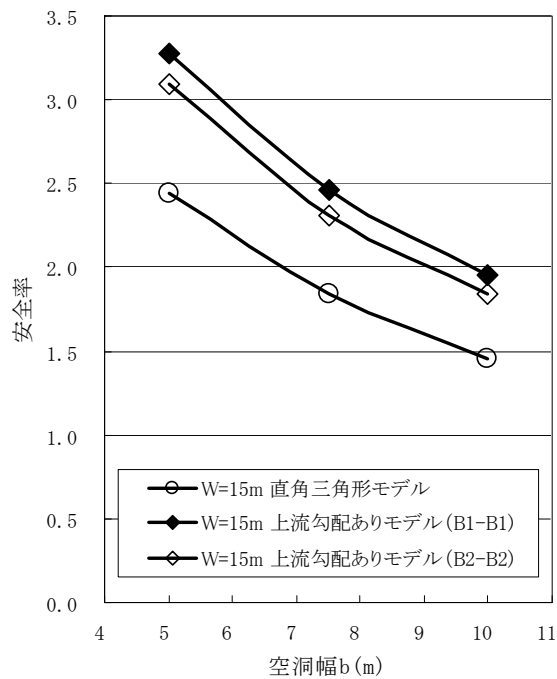


(1) 地震荷重あり

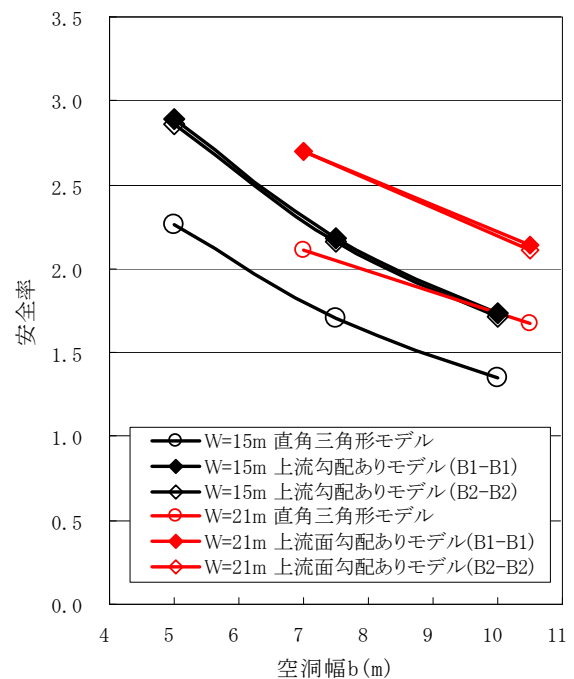


(2) 地震荷重なし

図-32 上流面勾配の有無による最大引張応力の比較



(1) 地震荷重あり



(2) 地震荷重なし

(地震時引張強度=3.12N/mm² : 地震時割増 30%を見込む)

(引張強度=2.4N/mm² : 地震時割増 30%を見込まない)

図-33 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 発生圧縮応力の評価

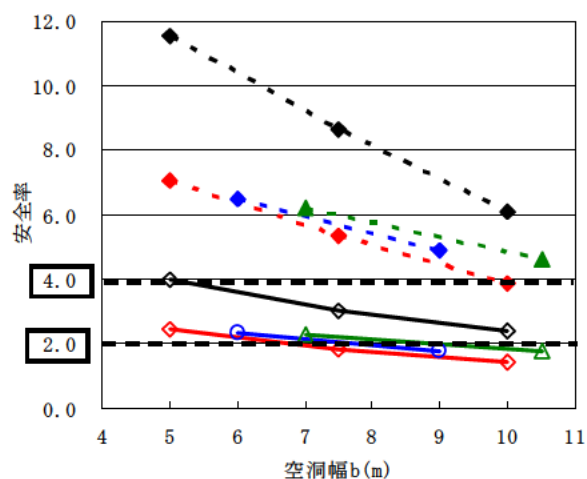
3章では1ブロック内に設置可能な空洞幅を検討するため、堤高・ブロック幅・上流面勾配を変えた条件について最大引張応力に対する安全率の値を論じてきた。それは、発生引張応力に対する安全性を確保することで発生圧縮応力に対する所要安全率は満足しているという前提であった。そこで本節では、これまで検討してきた条件において、発生圧縮応力に対する安全率と発生引張応力に対する安全率を比較し、どちらが構造設計上支配的となるかを検討した。

ブロック幅及び空洞幅の違いによる最大引張応力に対する安全率（図-25）について最大圧縮応力に対する安全率を追加したものを図-34に示す。また、上流面勾配の有無及び空洞幅の違いによる最大引張応力に対する安全率（図-33）について最大圧縮応力に対する安全率を追加したものを図-35に示す。

図-34(1)の空洞幅と安全率の関係から、堤高 80m、ブロック幅 15m、上流面勾配鉛直、地震荷重ありの条件で最大圧縮応力に対する所要安全率 4.0 となるのは空洞幅約 10m であり、同じ空洞幅条件では最大引張応力に対する安全率は 1.5 程度となる。また、図-34(2)の地震荷重なしの条件についても同様であり、図-34、図-35における他条件においても外挿した線で考えると、最大圧縮応力に対する安全率が 4.0 となる空洞幅での引張応力に対する安全率は 1.4～1.8 程度となる。

本章で想定した 1 ブロック内に空洞を設置する構造形式では、圧縮応力に対する所要安全率を 4.0 以上確保し、引張応力に対する安全率を圧縮応力に対する所要安全率の 1/2 である 2.0 以上となることを要求すると、引張応力に対する安全率が圧縮応力に対する安全率よりも支配的となる。

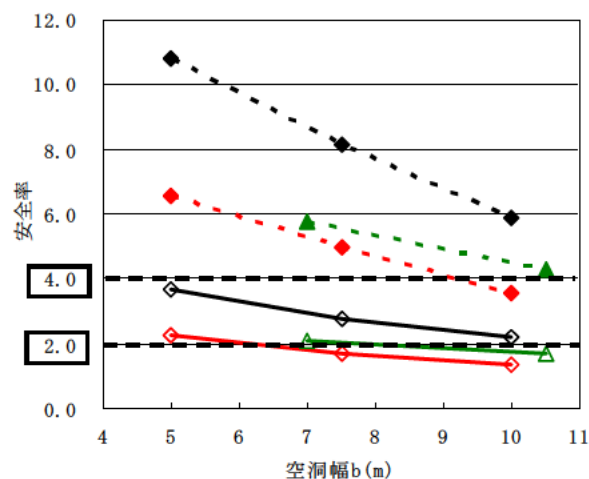
ここで、本章においては、空洞周辺部のコンクリートについて一般的な構造用コンクリートの圧縮強度で 24N/mm^2 、引張強度/圧縮強度=1/10 と仮定したが、より高強度のコンクリートを用いた場合は、引張強度/圧縮強度は 1/10 より小さくなるため、引張応力に対する安全率がより支配的となる。



堤高H	80m			50m
ブロック幅W	15m	18m	21m	15m
凡例	引張	—○—	—△—	—◇—
	圧縮	- -○- -	- -△- -	- -◇- -

(1) 地震荷重あり

(地震時引張強度=3.12N/mm²、地震時圧縮強度=31.2N/mm²：地震時割増30%を見込む)

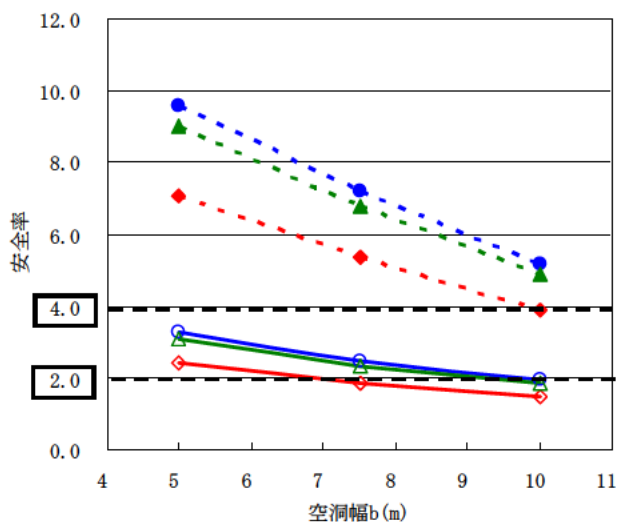


堤高H	80m		50m
ブロック幅W	15m	21m	15m
凡例	引張	—△—	—◇—
	圧縮	- -△- -	- -◇- -

(2) 地震荷重なし

(引張強度=2.4N/mm²、圧縮強度=24N/mm²：地震時割増30%を見込まない)

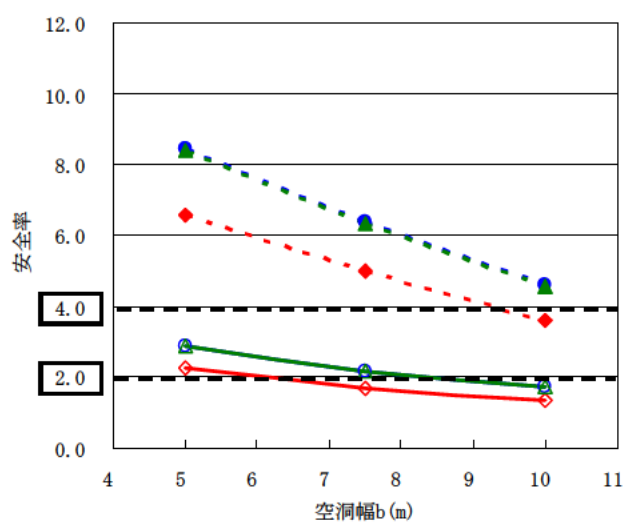
図-34 ブロック幅の違いによる安全率評価



上流面勾配	鉛直	勾配1:0.12	
評価断面	上流面	B1-B1*	B2-B2*
凡例	引張	—○—	—△—
	圧縮	- -○- -	- -△- -

(1) 地震荷重あり

(地震時引張強度=3.12N/mm²、地震時圧縮強度=31.2N/mm²：地震時割増30%を見込む)



上流面勾配	鉛直	勾配1:0.12	
評価断面	上流面	B1-B1*	B2-B2*
凡例	引張	—○—	—△—
	圧縮	- -○- -	- -△- -

(2) 地震荷重なし

(引張強度=2.4N/mm²、圧縮強度=24N/mm²：地震時割増30%を見込まない)

*凡例表の評価断面 B1-B1 はダム軸、B2-B2 は空洞標高において上流面より4.4～5.0m 内部に入った位置 (図-31 参照)

図-35 上流面勾配の有無による安全率評価

3.8 1 ブロック内に設ける空洞構造型式の解析結果のまとめと空洞規模に関する検討結果

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、設置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 空洞部を設けることにより、空洞上縁部に引張応力が発生する。
- ② 2次元 FEM 解析による引継ぎ解析と応力集中係数からの算定値の整合性は高い。
- ③ 2次元 FEM 引継ぎ解析と3次元 FEM 解析では、上流面側の空洞部周辺に発生する応力値では、やや2次元 FEM 引継ぎ解析の方が大きな値を示す。

(解析条件の検討)

- ④ 本解析による空洞部周辺の発生応力値は、地震荷重ありの条件の方が大きくなるが、地震時のコンクリートの強度割増(30%増)を考慮すると、安全率評価では非地震時(地震荷重なし)条件の方が危険側となる。
- ⑤ 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における応力解析に用いられてきた手法である、1 ブロックの側方境界条件をフリーに設定してきたモデル解析は、安全性に余裕がある結果となることを確認した。しかし、その余裕の度合いはブロック間の隙間幅や接触状態によって大きく異なり、定量的把握は難しい。
- ⑥ 空洞部上縁に発生する引張応力の最大値は、堤高が高いほど、また空洞幅が広くなるほど大きくなる。

(発生引張応力と圧縮応力の評価)

- ⑦ 1 ブロック内に設置可能な空洞幅を検討する上で、圧縮応力に対する所要安全率を 4.0 以上確保し、引張応力に対する安全率を圧縮応力に対する安全率の 1/2 である 2.0 以上を要求することを仮定すると、引張応力に対する安全率が圧縮応力に対する安全率より支配的となる。

(堤高、空洞幅の違いによる応力状態の検討)

- ⑧ 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 5m など)において、空洞部周辺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、危険側となる地震荷重なし条件において、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引張応力に対する安全率が 2.2 程度であるが、堤高 80m モデルの空洞幅 10m のケースでは安全率は 1.3 程度となる。

(拡幅したブロック幅を持つダムモデルによる検討)

- ⑨ ブロック幅を拡幅することにより、空洞部周辺の発生引張応力は低減する。この観点からは空洞幅を

広げることが可能であることを確認した。ただし、ブロック幅の拡幅率に比例して空洞幅を広げることとはできない。

(ダム形状の違いによる検討)

- ⑩ 上流面に勾配を持たせたダム形状とすることにより、上流面が鉛直形状のダムに比べて上流面側の空洞部周辺に発生する応力値は低減し、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型式における可能な底部空洞規模)

- ⑪ 本研究の検討における基本とした条件（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 5m など）において、空洞部周辺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圧縮強度を 24N/mm^2 、引張強度をその $1/10$ とした 2.4N/mm^2 と仮定し、荷重条件ではより危険側となる地震荷重なしの条件において、圧縮応力に対する所要安全率 4.0 以上を確保した上で、引張応力に対する安全率 2.0 以上とする条件で評価すると、堤高 50m では空洞幅 10m でも安全率が 2.2 程度となり、堤高 80m では設置可能な空洞幅は 6m 程度以下となる。

同様に、堤高 80m では基本とした条件からブロック幅をこれまで建設実績のある最大ブロック幅である 21m とした場合、引張応力に対する安全率 2.0 以上とする条件で評価すると、設置可能な空洞幅は 8m 程度以下となる。

さらに、基本仮定条件からダム断面形状を上流面勾配 1:0.12 とした堤高 80m の場合、ブロック幅 15m に対して可能な空洞幅は 8.5m 程度以下となり、ブロック幅 21m に対しては 11m 程度となる。

堤高 100m の場合は、荷重条件として地震荷重ありの条件での応力集中係数による方法の解析しか実施しなかった。引張応力に対する安全率は、引張強度の地震時割増（30%増）を考慮しない地震荷重なしの条件の方が地震荷重ありの条件の解析結果に比べ 8%程度の安全率の低下が見込まれるため、上記と同様な方法で空洞規模を評価する場合、その判断基準とした引張応力に対する安全率 2.0 以上に 8%程度を見込んだ安全率 2.16 程度以上で評価することと同等となる。そこで、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、設置可能な空洞幅は 1m 程度減少すると考えられる。したがって、直角三角形断面形状の堤高 100m ではブロック幅 15m のケースで、設置可能な空洞幅は 4m 程度以下と考えられる。

ここで、圧縮応力に対する所要安全率 4.0 は、河川管理施設等構造令（昭和 51 年政令第 199 号）及び同施行規則（昭和 51 年建設省令第 13 号）において規定されているが、引張応力に対する安全率の規定はない。上記の推定においては、仮定として、引張応力に対する安全率を 2.0 以上とする条件で評価したものであることに留意する必要がある。

なお、上記の推定は、側方境界条件を最も安全側となるフリー（無拘束条件）と仮定した結果に基づいて述べたものであり、境界条件のより厳密な設定によっては空洞幅を広くすることが可能となることが考えられる。

第4章 2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討

3章が1ブロック内における空洞規模の検討であるのに対し、本章では、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において、解析モデルは複数ブロックを有するダム全体をモデル化したものとする必要がある。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、本節で用いる解析モデルは、後述の4.2節以降の本解析とでは、空洞より下部のモデル形状等が若干異なるが、他の主なモデル基本条件は同様である。

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 N/mm² (C_M級相当)、20,000 N/mm² (堅固なC_H級相当)、3,000,000 N/mm² (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。

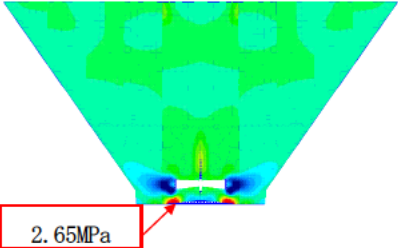
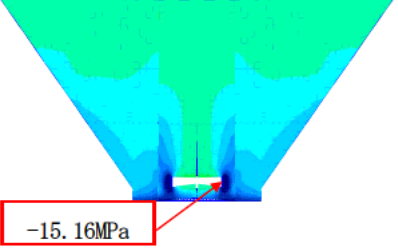
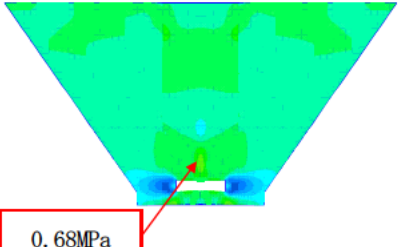
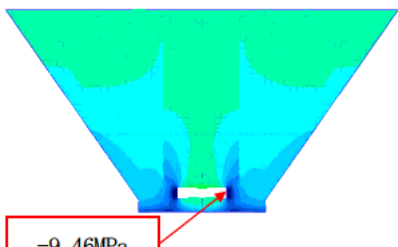
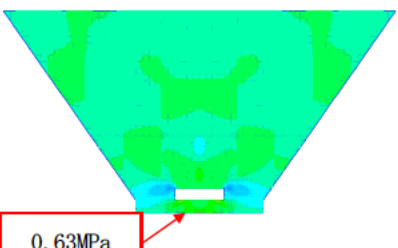
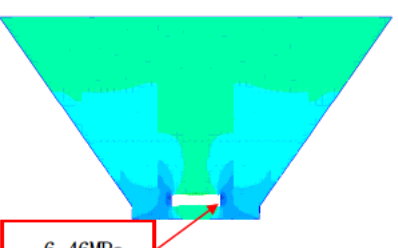
解析結果として、表-20に主応力コンター一覧を示す。最小主応力(圧縮応力)については、その堤体内の集中箇所はどのケースも同じであるが、その最大値は岩盤の弾性係数が小さいほど大きくなっている。

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_H級岩盤相当として岩盤の弾性係数を20,000 N/mm²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	備考
単位容積質量 ρ (kg/m ³)	2,300	2,300	
弾性係数 E (N/mm ²)	30,000	5,000	岩盤：C _M 級を想定
		20,000	岩盤：堅固なC _H 級を想定
		3,000,000	岩盤：剛基礎を想定
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）

岩盤 弾性係数	①-①断面（上流面）（常時）	
	最大主応力 σ_1 コンター	最小主応力 σ_3 コンター
$E = 0.5 \times 10^4$ N/mm ²	 2.65MPa	 -15.16MPa
$E = 2 \times 10^4$ N/mm ²	 0.68MPa	 -9.46MPa
$E = 300 \times 10^4$ N/mm ²	 0.63MPa	 -6.46MPa

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-36 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。なお、本第 4.1.2 の解析では岩盤の弾性係数を堤体コンクリートと同じ $30,000\text{N/mm}^2$ とした。また、本節の解析では空洞の底標高より下部の堤体部分はジョイントを入れていない。

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の両方で同じであり、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

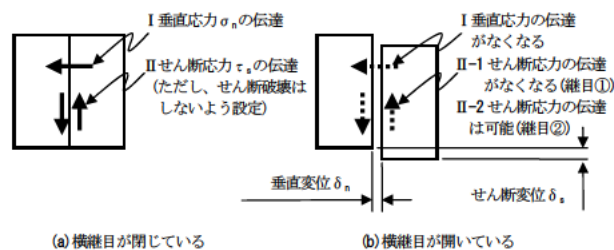
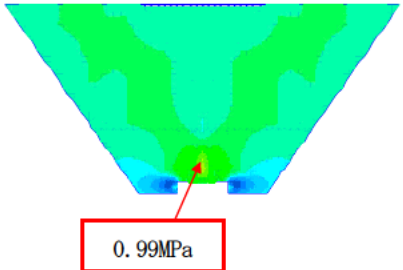
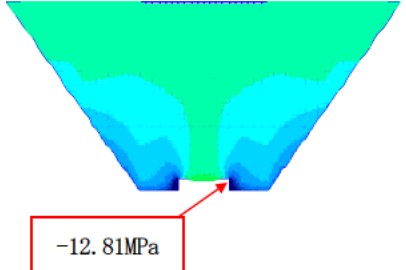
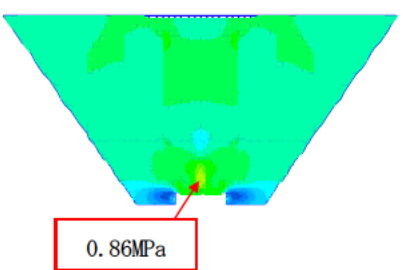
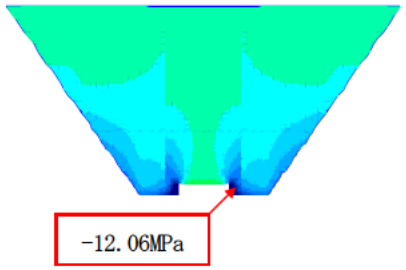


図-36 ジョイント要素の変位と応力伝達のイメージ

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）

条件名	①-①断面（上流面）（常時）	
	最大主応力 σ_1 コンター	最小主応力 σ_3 コンター
継目 ①	 0.99MPa	 -12.81MPa
継目 ②	 0.86MPa	 -12.06MPa

4.2 解析条件

2ブロックに渡って設ける空洞規模の検討における解析条件を以下に示す。

4.2.1 解析手法

本検討では、2次元 FEM 引継ぎ解析を用いた。

4.2.2 解析断面

解析断面は、図-37 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）とした。洪水調節専用（流水型）ダムは、洪水時にしか貯水をしていないので、河床部に空洞がある構造では、常時（空虚）のダム上流面に発生する応力が大きくなる（1ブロックにおける検討解析は、3.2.3(1)を参照）。そこで、本解析においても、2次元 FEM 引継ぎ解析の評価断面は、ダム上流面①-①断面とする。

図-38 と図-39 に解析モデル、表-23 に解析モデルの主要諸元を示す。

4.2.3 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。

4.2.4 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（ $c=1.0 \times 10^6 \text{N/mm}^2$ ）を与えた。

4.2.5 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。地震荷重についてはありとなしの両条件について解析した。洪水調節専用（流水型）ダムでは、常時（非洪水時）は水を貯めないため、地震荷重の載荷方向は堤体の安定性上厳しい条件とし、下流から上流へ載荷することとした。

4.2.6 応力の引継ぎ

図-40 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、河床ブロックに対しては（イ）①a-a 断面（河床部）で代表させる方法、およびアバット斜面部ブロックに対しては、（ロ）②a-a 断面と b-b 断面（アバット部）で補間する方法の 2 つの方法とした。

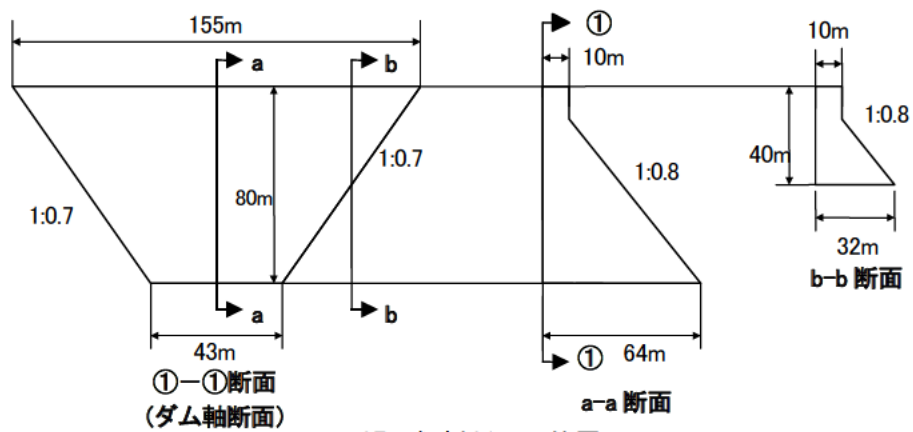
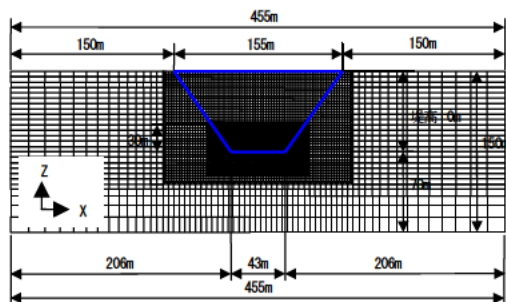
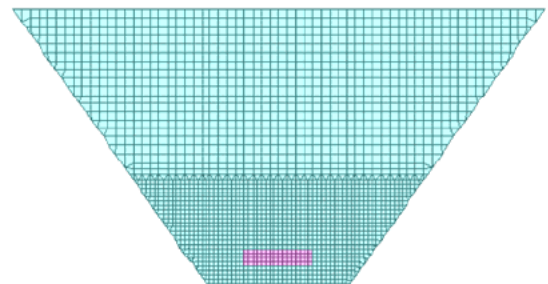


図-37 解析断面の位置

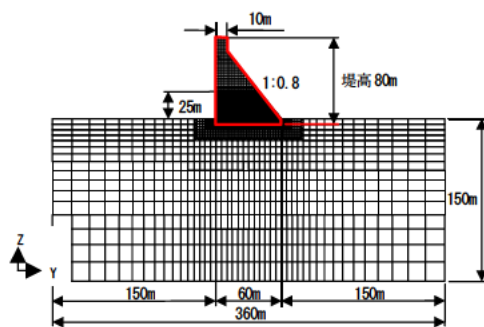


(1) モデル全体のメッシュ図 (①-①断面)

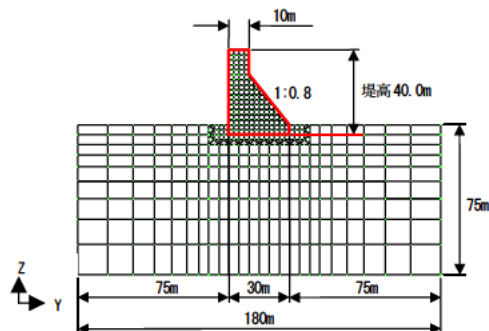


(2) ダム堤体のメッシュ図

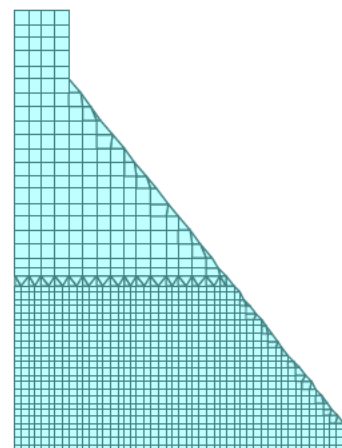
図-38 ダム軸方向断面の解析モデル



(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)



(3) ダム堤体のメッシュ図

(河床部最大断面 (a-a断面)：H=80m)

図-39 上下流方向断面の解析モデル

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	
	要素分割 の大きさ	標高 0～30m	1.25m	
		標高 30～80m	2.5m	
貯水位			空虚	
岩盤	上下流方向幅		360m	a－a 断面，堤敷幅×6
			180m	b－b 断面，堤敷幅×6
	深さ		150m	a－a 断面，堤高×2
			75m	b－b 断面，堤高×2

(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	80m×0.7×2+43m
	要素分割 の大きさ	標高 0～30m	1.25m	
		標高 30～80m	2.5m	
貯水位			空虚	
岩盤	ダム軸方向幅		455m	ダム軸方向：堤頂長×3
	深さ		150m	深さ：堤高×2

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
単位容積質量	ρ (kg/m ³)	2,300	2,300
弾性係数	E (N/mm ²)	30,000	20,000
ポアソン比	ν	0.2	0.3

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	Kn (N/mm ²)	3×10^4	Ec
せん断方向のバネ剛性	Ks (N/mm ²)	1.25×10^4	$Kn / \{2(1 + \nu)\}$

※) Ec : コンクリートの弾性係数

表-26 上下流方向断面の応力解析の荷重条件

荷重		常時 (空虚)	
		地震荷重あり	地震荷重なし
水平力	静水圧 ^{注)}	—	—
	地震時動水圧	—	—
	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	○	○

注) 洪水調節専用 (流水型) ダムのため、常時は貯水池空虚である。

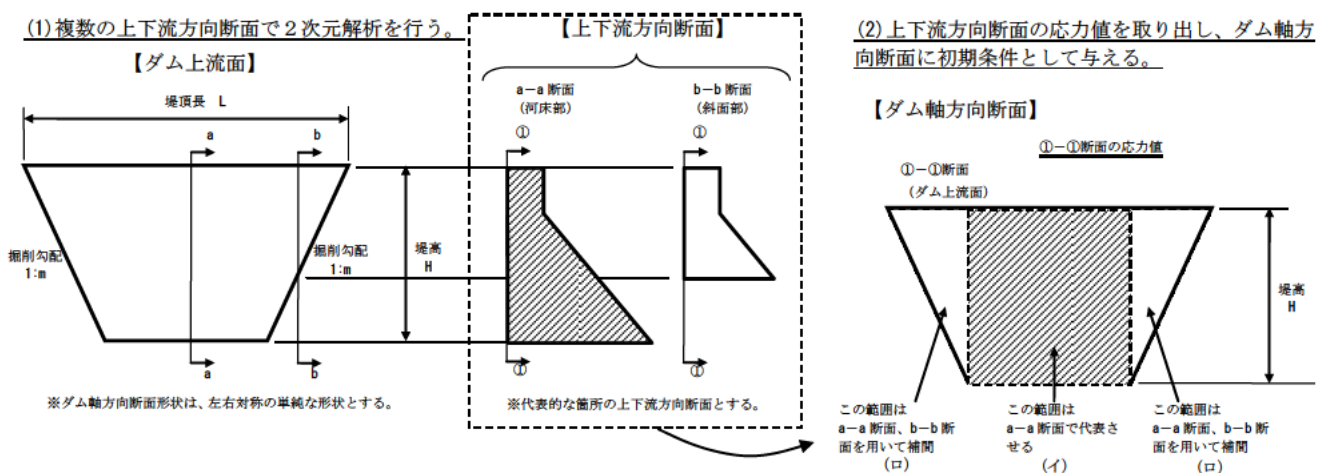
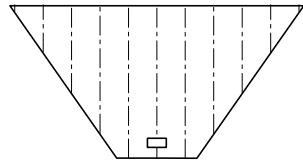
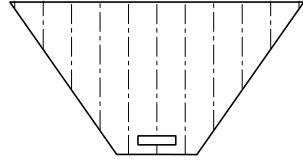


図-40 ダム軸方向断面の応力引継ぎのイメージ

4.3 解析ケース

堤体の隣接2ブロック（1ブロック幅：15m）に渡って空洞（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-27 解析ケース一覧

ケース名	空洞		横継目	ブロック割	縦断面図	地震荷重
	形状	規模				
Case1	矩形	幅 10m× 高さ 5.0m	あり	空洞中央で 2ブロック をまたぐ		あり
Case2-1		幅 20m× 高さ 5.0m				
Case2-2						なし

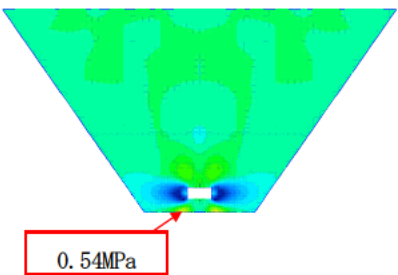
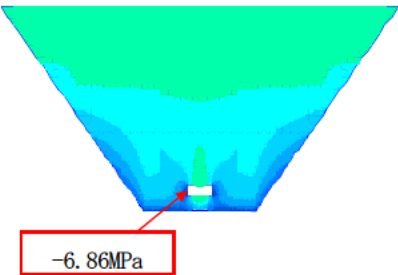
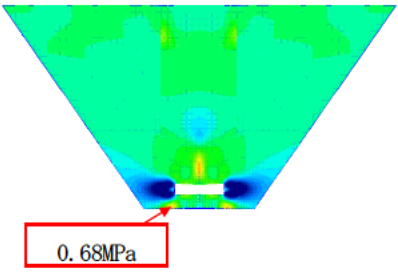
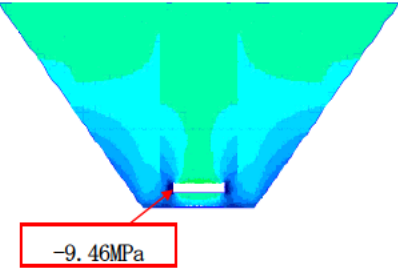
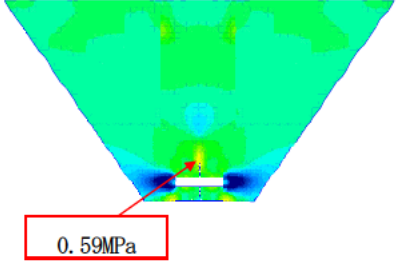
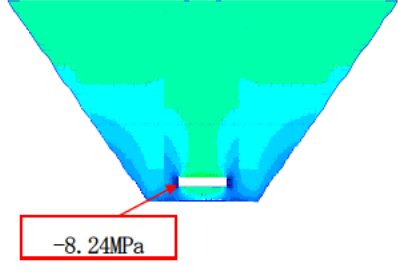
4.4 解析結果

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無く、最大値は空洞幅 10m で 0.54MPa、空洞幅 20m で 0.68MPa 程度となる。また、発生圧縮応力の集中域は、空洞の側部に発生しており、最大値は空洞幅 10m で 6.9MPa、空洞幅 20m で 9.5MPa である。これは、図-41 に示すように、空洞を有するブロックの構造が、空洞の側部にある“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。

表-28 主応力コンター一覧

ケース	①-①断面 (上流面) (常時)	
	最大主応力 σ_1 コンター	最小主応力 σ_3 コンター
Case1 (空洞幅 10m) (地震荷重あり)	 0.54MPa	 -6.86MPa
Case2-1 (空洞幅 20m) (地震荷重あり)	 0.68MPa	 -9.46MPa
Case2-2 (空洞幅 20m) (地震荷重なし)	 0.59MPa	 -8.24MPa

3章と同様に空洞周辺部のコンクリートを一般的な構造用コンクリートの強度（圧縮強度：24N/mm²、引張強度：2.4N/mm²、地震荷重あり条件では割増30%を見込む）と仮定し、算出した安全率を図-42に示す。圧縮応力に対する安全率は引張応力に対する安全率より小さくなるため、設置可能な空洞幅を圧縮と引張の安全率から評価する場合、引張応力に対する安全率よりも圧縮応力に対する安全率の方が支配的となる。

圧縮応力に対する所要安全率4.0以上となる条件で設置可能な空洞幅を評価した場合、地震荷重ありの条件における空洞幅と安全率の関係から約14m以下と推測できる。しかし、空洞幅20mの地震荷重の有無による安全率の関係から、地震荷重なしの条件は地震荷重ありの条件より安全率が12%程度低下することが見込まれるため、地震荷重ありの条件で設置可能な空洞幅を評価する場合、地震荷重なしの条件を加味して安全率を12%程度上乗せすることとほぼ同等であると考えられる。そこで地震荷重ありの条件で安全率4.0に12%上乗せした安全率が約4.5以上となる空洞幅を評価すると、図-42に示すように、設置可能な空洞幅は10m程度以下となる。

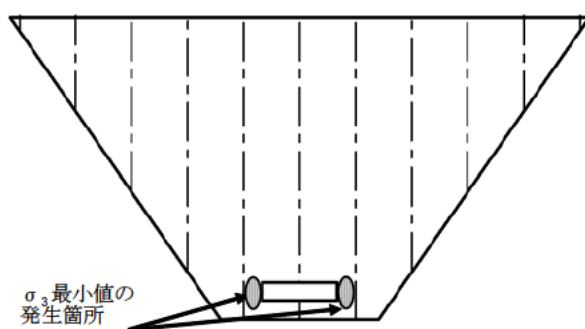
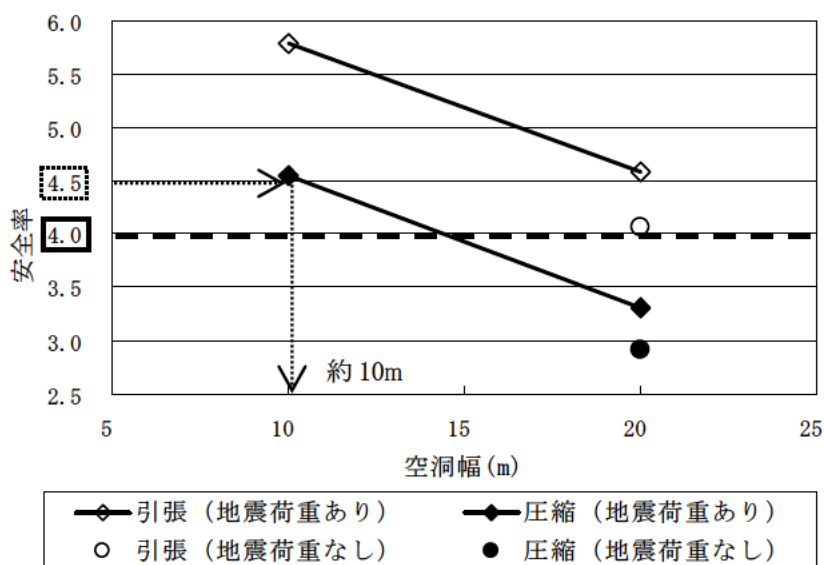


図-41 圧縮側主応力 σ_3 最小値の発生箇所



地震荷重なし：引張強度=2.4N/mm²、圧縮強度=24N/mm²：地震時割増30%を見込まない

地震荷重あり：地震時引張強度=3.12N/mm²、地震時圧縮強度31.2N/mm²：地震時割増30%を見込む

図-42 空洞幅と安全率の関係

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-43 に示す J5, J6 横継目とした。

(1) 横継目の変形（開き、ズレ）

表-29 に Case1 と Case2-1 における横継目の変形分布（垂直変位、せん断変位）を示す。

a) 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-44 に示すとおり、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、低標高部については、空洞の上下面において、空洞部に位置する横継目 J6 は、Case1 で 1mm 程度、Case2-1 で 2mm 程度開いている。なお、J5 の開口量は、空洞上面より 15m 程度上標高部（Y=22.5m）で最大をとるが、1mm 未満と小さい。

b) せん断変位（ズレ）

表-29 より、Case1、Case2-1 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 0.2mm 程度、Case2-1 では 0.9mm 程度とわずかである。

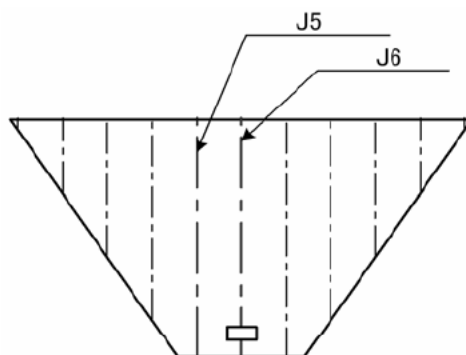


図-43 着目する横継目の位置

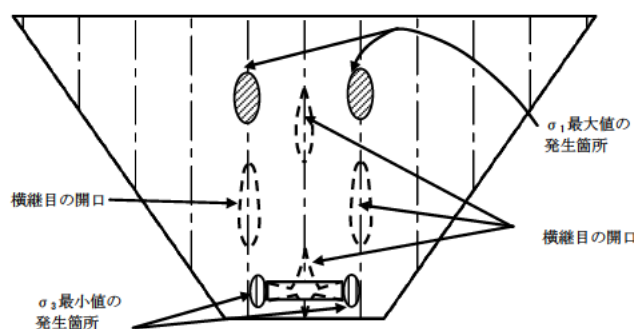
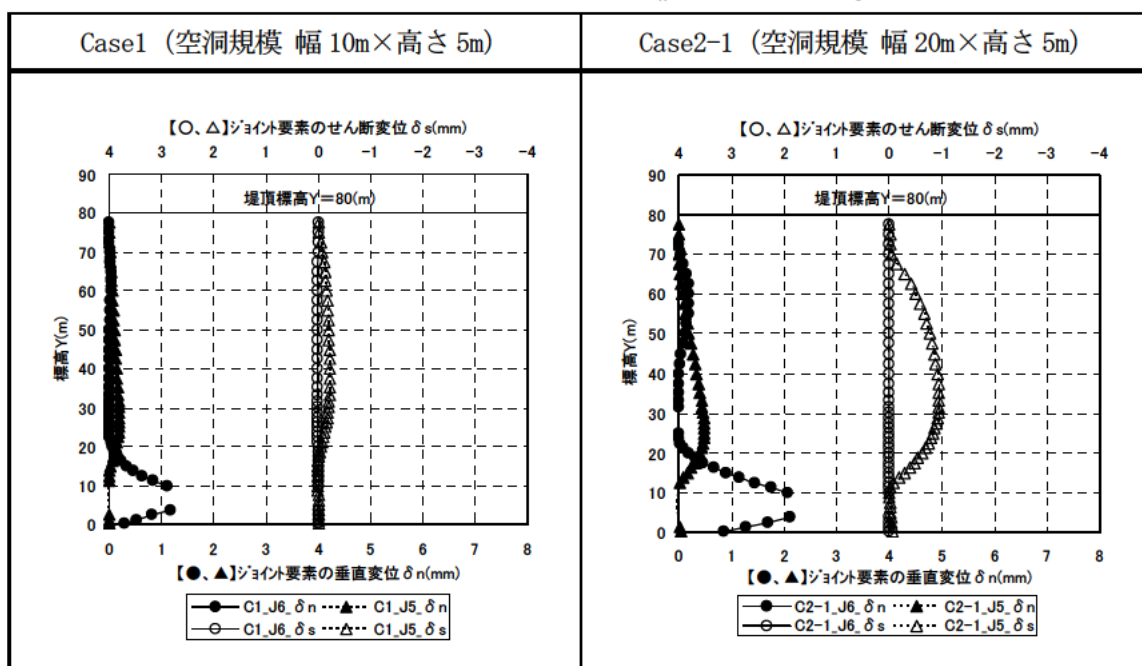
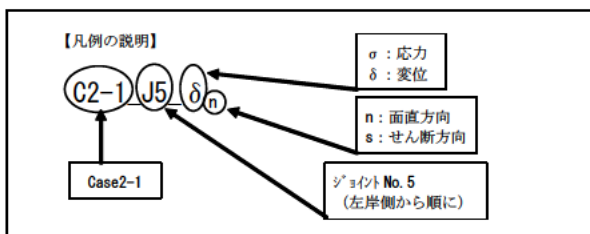
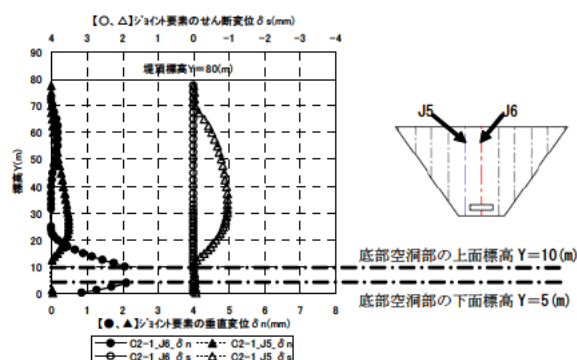


図-44 σ_1 最大値・ σ_3 最小値の発生箇所の模式図

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



(備考) 凡例は図-45 参照



【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)。

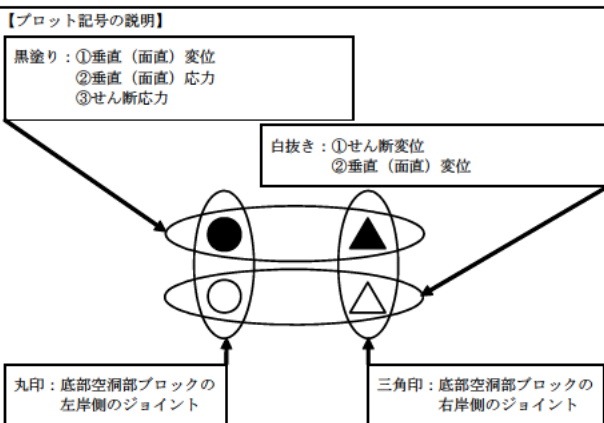


図-45 凡例 : 標高別のジョイント要素の垂直変位・せん断変位の関係 (例 : Case2-1, ①-①断面)

(2) 横継目に作用する応力

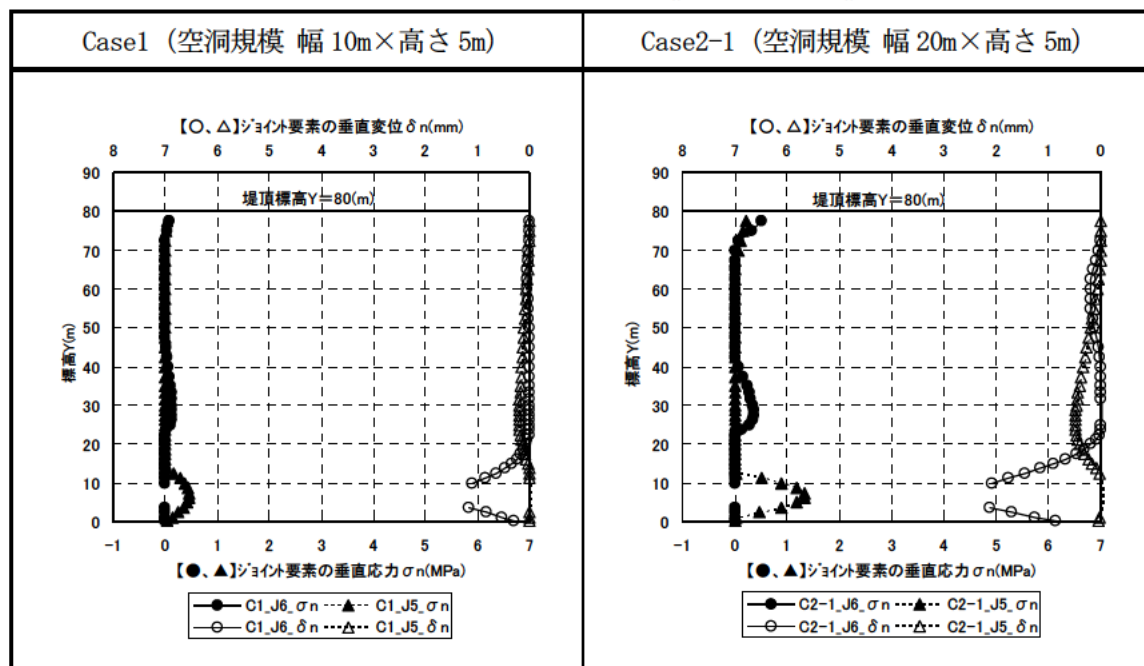
a) 垂直応力

Case1 と Case2-1 における横継目の垂直応力分布（垂直変位分布も併記）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）。

発生垂直応力の最大値は、Case1 で 0.5MPa 程度、Case2-1 で 1.3 MPa 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-45 参照

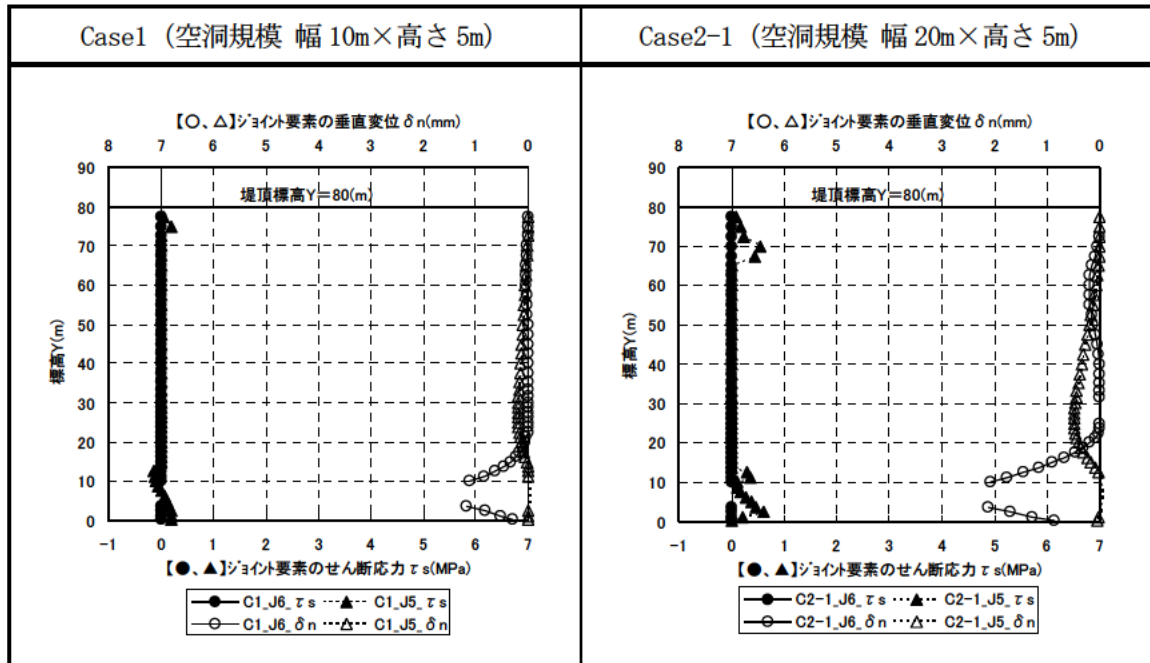
b) せん断応力

Case1 と Case2-1 における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）。

発生した最大せん断応力は、Case1 で 0.2MPa 程度、Case2-1 で 0.6MPa 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-45 参照

4.5 2ブロックに渡って設ける空洞構造型式の解析結果のまとめと空洞規模の検討結果

4章では、堤高 80m 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型式についてダム全体をモデル化した2次元 FEM 引継ぎ解析により検討した。以下に本章の検討結果をまとめる。

- ① 2ブロックに渡って設置可能な空洞幅を圧縮と引張の安全率から評価した場合、圧縮応力に対する安全率が引張応力に対する安全率より支配的となる。
- ② 圧縮応力は、空洞の側部に集中して発生し、堤高 80m モデルにおいて、その最大値は、空洞幅 10m の場合は 6.9MPa、空洞幅 20m の場合は 9.5MPa となる。空洞周辺部のコンクリートの強度を一般的な構造成用コンクリート強度（圧縮強度 24N/mm²、引張強度 2.4N/mm²、地震荷重ありの条件では割増 30%を見込む）と仮定した場合、地震荷重ありの条件における空洞幅と安全率の関係、および空洞幅 20m での地震荷重の有無による安全率の関係から、圧縮応力に対する安全率 4.0 以上となる空洞幅は 10m 程度以下となる。
- ③ 空洞部にかかる横継目の開きは、空洞幅 10m の場合は 0.2mm 程度、空洞幅 20m の場合は 0.9mm 程度とわずかである。

本章では、2ブロックに渡って空洞部を設ける構造型式をモデル化した。2次元 FEM 引継ぎ解析では、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、モデル設定仮定の不確実性が多く、解析結果をそのまま実ダムに適用するには、更なる詳細な検討が必要であると考ええる。通常のコンクリートダムでは堤高 150m 程度以上のダムでなければ圧縮破壊に対する構造要件はクリティカル要素とならないが、本構造型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。

第5章 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規模について解析的検討を行った。構造型式としては、堤体1ブロック内に空洞部を設ける場合と、隣接する2ブロックに渡って空洞部を設ける場合の2型式を検討対象とした。

ダムモデルでは、底部空洞はダム建設時の現河床の掘削も考慮し、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、空洞部の高さは5m固定とした。

本研究において、解析モデルの基本条件として以下の①～④を仮定した。

- ① 直角三角形断面形状（上流面勾配鉛直）
- ② ブロック幅：15m
- ③ 空洞高さ：5m
- ④ 空洞周辺部のコンクリート強度：一般的な構造用コンクリートの強度（圧縮強度： 24N/mm^2 、引張強度： 2.4N/mm^2 （地震時割増30%を見込むと圧縮強度： 31.2N/mm^2 、引張強度： 3.12N/mm^2 ））

（1）1ブロック内に空洞部を設ける構造型式の場合

上記の基本仮定条件の下で、圧縮応力に対する所要安全率を4.0以上確保した上で、引張応力に対する安全率が2.0以上とすることを条件として1ブロック内に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の方が圧縮応力に対する安全率より支配的となる。よって、1ブロック内に空洞部を設ける構造形式の解析については発生最大引張応力から設置可能な空洞幅を評価した。

堤高50m、80m、100mモデルでの検討から、堤高が高いほど空洞部周辺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ることで、さらに発生引張応力を抑制することできる。

上記①～④の基本仮定条件の下で、設置可能な空洞幅を評価した。その結果、設置可能な空洞幅は、堤高80mでは6m程度以下となる。堤高50mでは、解析結果の外挿となるが、空洞幅11mm程度以下は解析上可能となる。また堤高100mモデルでは、地震荷重ありの条件での解析結果のみであるため、地震荷重なしの条件を考慮するために、安全率2.0に8%程度上乗せした安全率2.16程度以上で設置可能な空洞幅を評価すると、堤高100mでは4m程度以下となる。

同様に、堤高80mでの基本仮定条件からブロック幅を拡幅して、これまで建設実績のある最大ブロック幅である21mとしたモデルでは、引張応力に対する安全率を2.0以上とする条件で評価した場合、設置可能な空洞幅は8m程度以下となる。また、ダムの上下流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が低減され、より大きな幅の空洞部を設けることができ、堤高80mでブロック幅15mのモデルでは設置可能な空洞幅は8.5m程度以下、ブロック幅21mのモデルでは11m程度以下となる。

ここで、圧縮応力に対する所要安全率 4.0 は、河川管理施設等構造令（昭和 51 年政令第 199 号）及び同施行規則（昭和 51 年建設省令第 13 号）において規定されているが、引張応力に対する安全率の規定はない。上記の推定においては、引張応力に対する安全率を 2.0 以上とする条件で評価したものであることに留意する必要がある。

なお、上記の推定は、境界条件を最も安全側となるフリーと仮定した結果に基づいて述べたものであり、境界条件のより厳密な設定によっては空洞幅を広くすることが可能となることが考えられる。

（2）2ブロックに渡って空洞部を設ける構造型式の場合

前頁の基本仮定条件①～④の下で2ブロックに渡って設置可能な空洞幅を評価すると、圧縮応力に対する安全率の方が引張応力に対する安全率より支配的となる。よって、2ブロックに渡って空洞部を設ける構造形式の解析については発生圧縮応力から設置可能な空洞幅を評価した。解析は堤高 80m モデルを用いた。

空洞部周辺に発生する引張応力は、横継目の影響で1ブロック内の空洞構造型式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発生する。堤高 80m モデルでは地震荷重ありの条件の下で、その最大発生圧縮応力は、空洞幅 10m の場合は 6.9MPa、空洞幅 20m の場合は 9.5MPa となる。2ブロックに渡って設ける空洞幅について、基本仮定条件の下で地震荷重有無の条件も考慮し、圧縮応力に対する所要安全率 4.0 以上を確保することを条件とした場合、設置可能な空洞幅は 10m 程度以下となる。

2ブロックに渡って空洞部を設ける構造型式は、モデル解析上は1ブロック内に空洞を設けるよりも大き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仮定の不確実性が多く、解析結果をそのまま実ダムに適用するには、更なる詳細な検討が必要であると考え。通常のコンクリートダムでは堤高 150m 程度以上のダムでなければ圧縮破壊に対する構造要件はクリティカル要素とならないが、本構造型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、継目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本体の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線上であり、また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。なお、空洞部周辺には、鉄筋を背筋することになるので、構造上大問題となる引張亀裂が進展することはない。従って、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型式を基本として、大規模空洞を有するダムの構造設計を考えていくことが実用的であると考え。今後は、最適なダムの断面形状やブロック幅を拡幅した詳細構造検討、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て、構造的な可能空洞規模を検討していきたい。

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, 第 5 部門(V-566), pp. 1131-1132, 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, pp. 14-17, (財) 土木研究センター, 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.

卷 末 資 料

巻末資料 目次

1. 2次元FEM引継ぎ解析 (堤高 50m, 80m 1 ブロックモデル)	巻末-1
1.1 解析条件.....	巻末-1
(1) 解析モデル.....	巻末-1
(2) 解析方法	巻末-2
(3) 物性値および荷重条件.....	巻末-2
1.2 解析結果.....	巻末-3
2. 応力集中係数からの応力値の算定 (堤高 50m, 80m, 100m 1 ブロックモデル)	巻末-13
2.1 概要.....	巻末-13
2.2 解析条件.....	巻末-13
2.3 解析結果.....	巻末-13
(1) 2次元FEM解析結果	巻末-13
(2) 「応力集中係数による応力値の算定」の検証	巻末-15
(3) 応力集中係数による応力値の算定 (堤高 100m)	巻末-18
3. 2次元FEM引継ぎ解析 (堤高 80m 1 ブロックモデル ブロック幅 18m, 21m の場合)	巻末-20
3.1 解析条件.....	巻末-20
(1) 解析モデル.....	巻末-20
(2) 解析方法	巻末-21
(3) 物性値および荷重条件.....	巻末-21
3.2 解析結果.....	巻末-22
4. 2次元FEM引継ぎ解析 (堤高 80m 1 ブロックモデル 境界条件の検討)	巻末-30
4.1 解析条件.....	巻末-30
(1) 解析モデル.....	巻末-30
(2) 解析方法	巻末-31
(3) 物性値および荷重条件.....	巻末-31
(4) 検討ケース	巻末-32
4.2 解析結果.....	巻末-33
(1) ジョイント要素の剛性を変化させた場合 (検討ケース 1))	巻末-33
(2) ブロック間の隙間幅を変化させた場合 (検討ケース 2))	巻末-37
(3) 隣接ブロックの弾性係数を変化させた場合 (検討ケース 3))	巻末-41

5. 2次元FEM引継ぎ解析（堤高80m 1ブロックモデル 上流面勾配を設けた場合）	巻末-44
5.1 解析条件	巻末-44
(1) 解析モデル	巻末-44
(2) 解析方法	巻末-45
(3) 物性値および荷重条件	巻末-45
5.2 解析結果	巻末-46
6. 3次元FEM解析（堤高80m 1ブロックモデル）	巻末-56
6.1 解析条件	巻末-56
(1) 解析モデル	巻末-56
(2) 物性値および荷重条件	巻末-58
6.2 解析結果	巻末-59
7. 洪水調節専用（流水型）ダム的事例	巻末-75

1. 2次元FEM 引継ぎ解析（堤高 50m, 80m 1ブロックモデル）

1.1 解析条件

(1) 解析モデル

堤高 80m、50m、1ブロック幅 15m とした 2次元モデルを用いて、空洞幅をパラメータとした 2次元 FEM 引継ぎ解析を行った。解析モデルの諸元を表-1、概要図を図-1 に示す。解析評価断面は、洪水調節専用（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。

図-2 に解析モデルのメッシュ図を示す。

表-1 解析モデルの主要諸元

項目	諸元		
堤高 (H)	50m, 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
b/W	1/3	1/2	2/3
境界条件	底面：固定，側方：フリー		

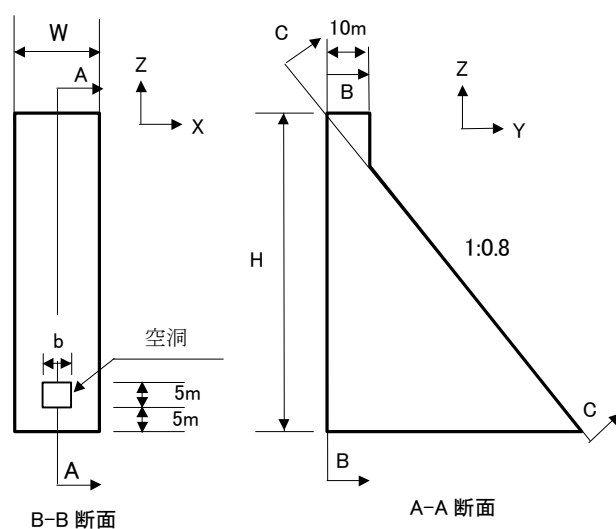
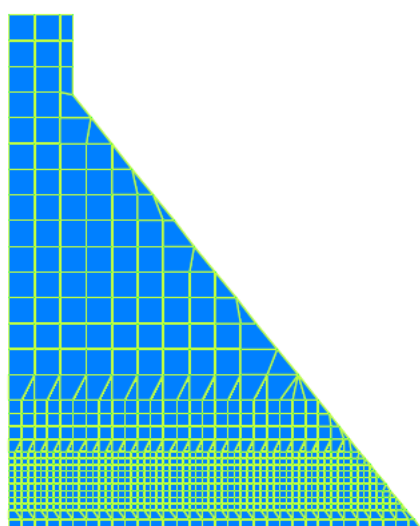
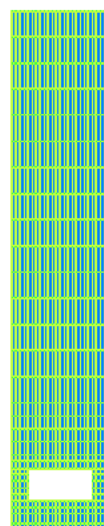
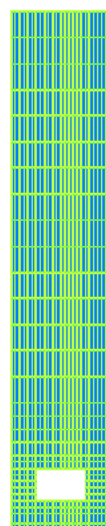
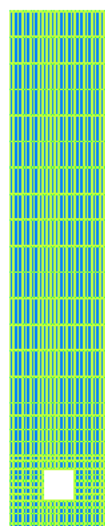


図-1 モデル形状と解析断面位置図（2次元 FEM 解析）



(1) A-A 断面：上下流方向断面



a) 空洞幅 5.0m b) 空洞幅 7.5mm c) 空洞幅 10.0m

(2) B-B 断面：ダム軸方向断面（上流面）

図-2 解析モデル メッシュ図（堤高 80m の例）

(2) 解析方法

2次元 FEM 引継ぎ解析とした。詳細は本編 3.2.1 に記載。

(3) 物性値および荷重条件

解析に使用した材料物性値を表-2 に、荷重条件を表-3 に示す。

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		常時（空虚）	洪水時（SWL:H-5m）
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 洪水調節専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

※2 Westergaard 式による。

1.2 解析結果

A-A断面の解析結果を表-4に、B-B断面の解析結果を表-5～表-16に示す。また、空洞幅と発生応力の関係を図-3に、空洞幅と安全率の関係を図-4に示す。

表-4 A-A断面 常時・地震時 応力コンター (堤高 80m の場合)

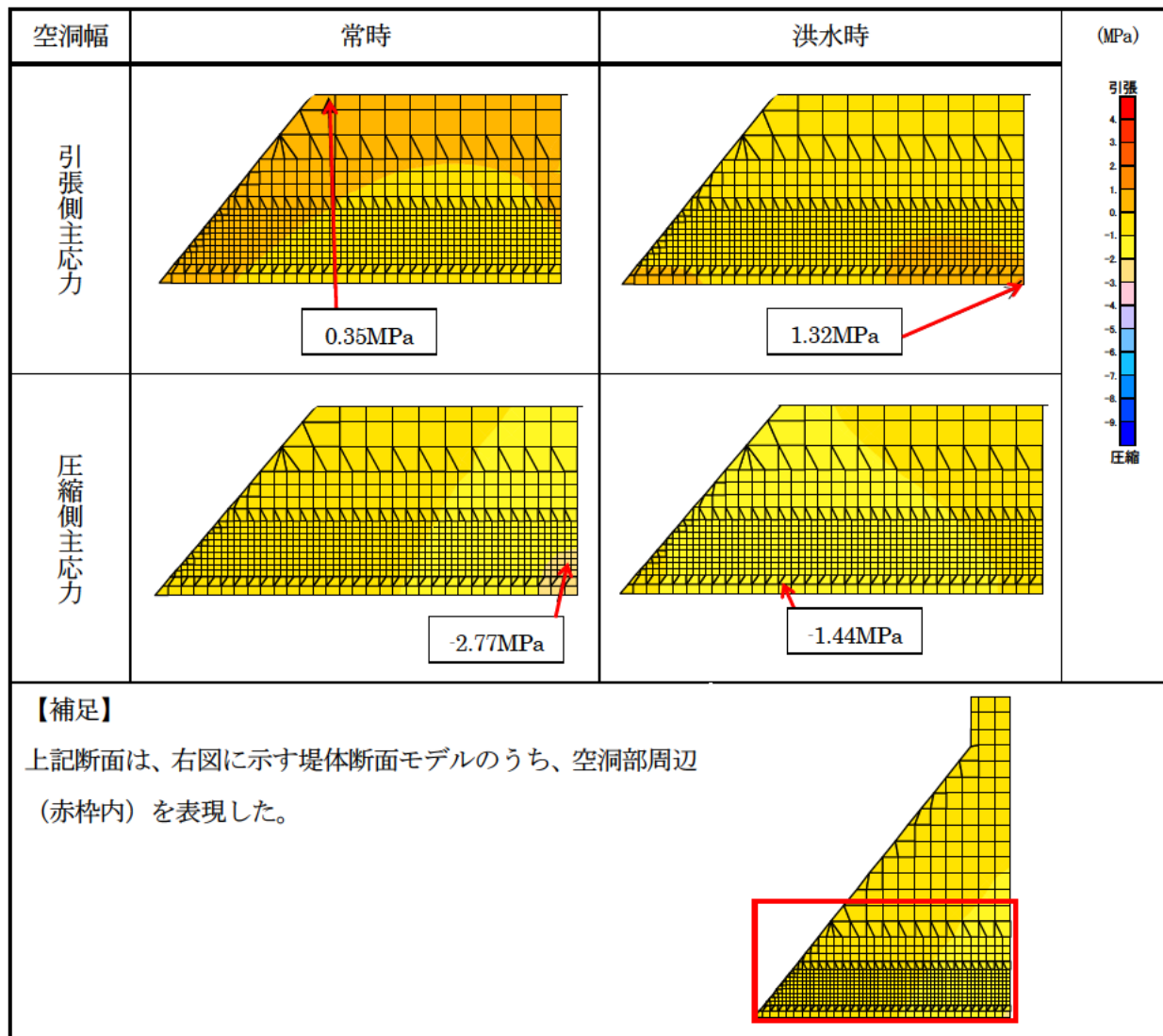


表-5 堤高 80m 上流面 (B-B 断面) σ_1 引張側主応力コンター

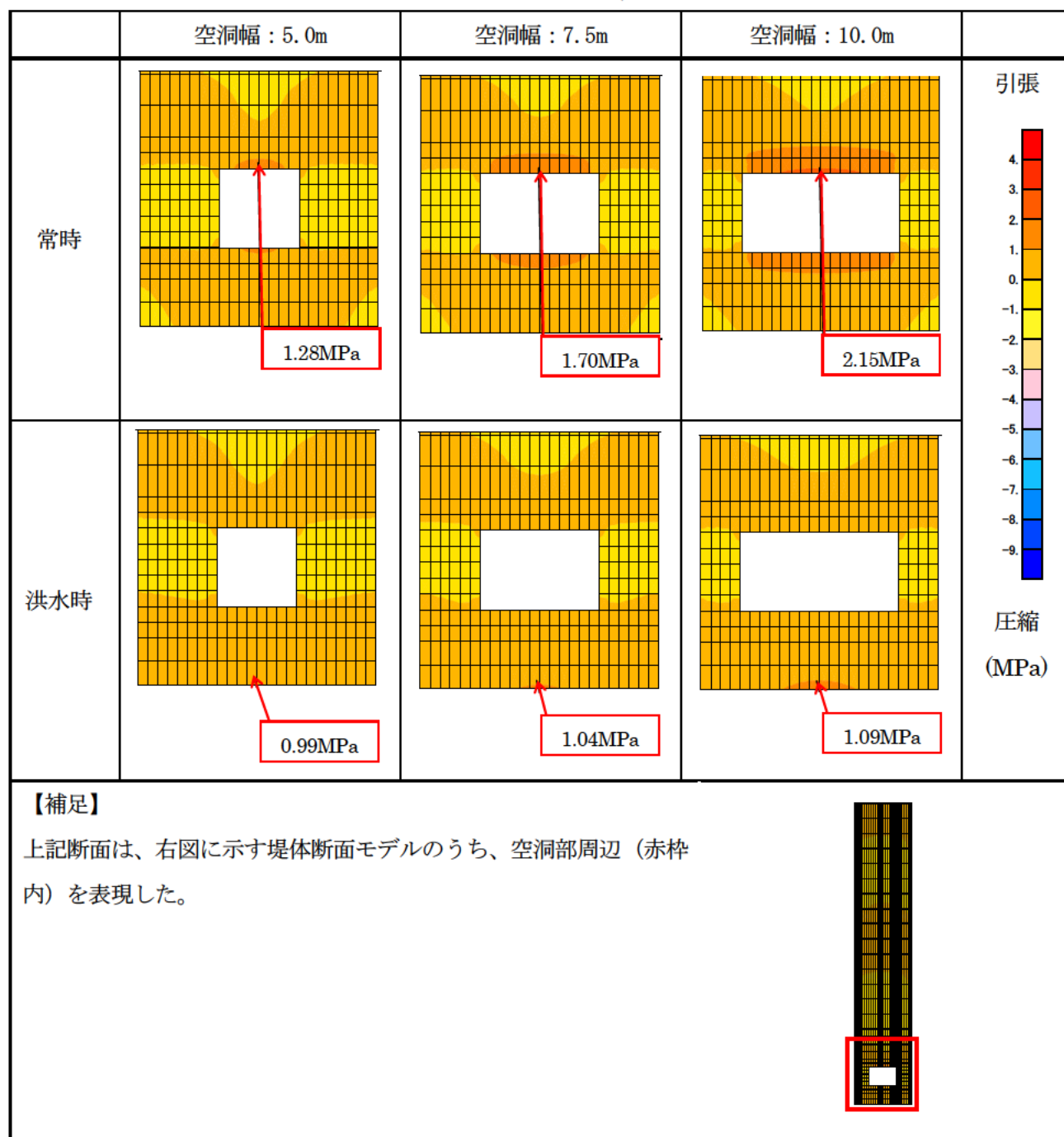


表-6 堤高 80m 上流面(B-B断面) σ_3 圧縮側主応力コンター

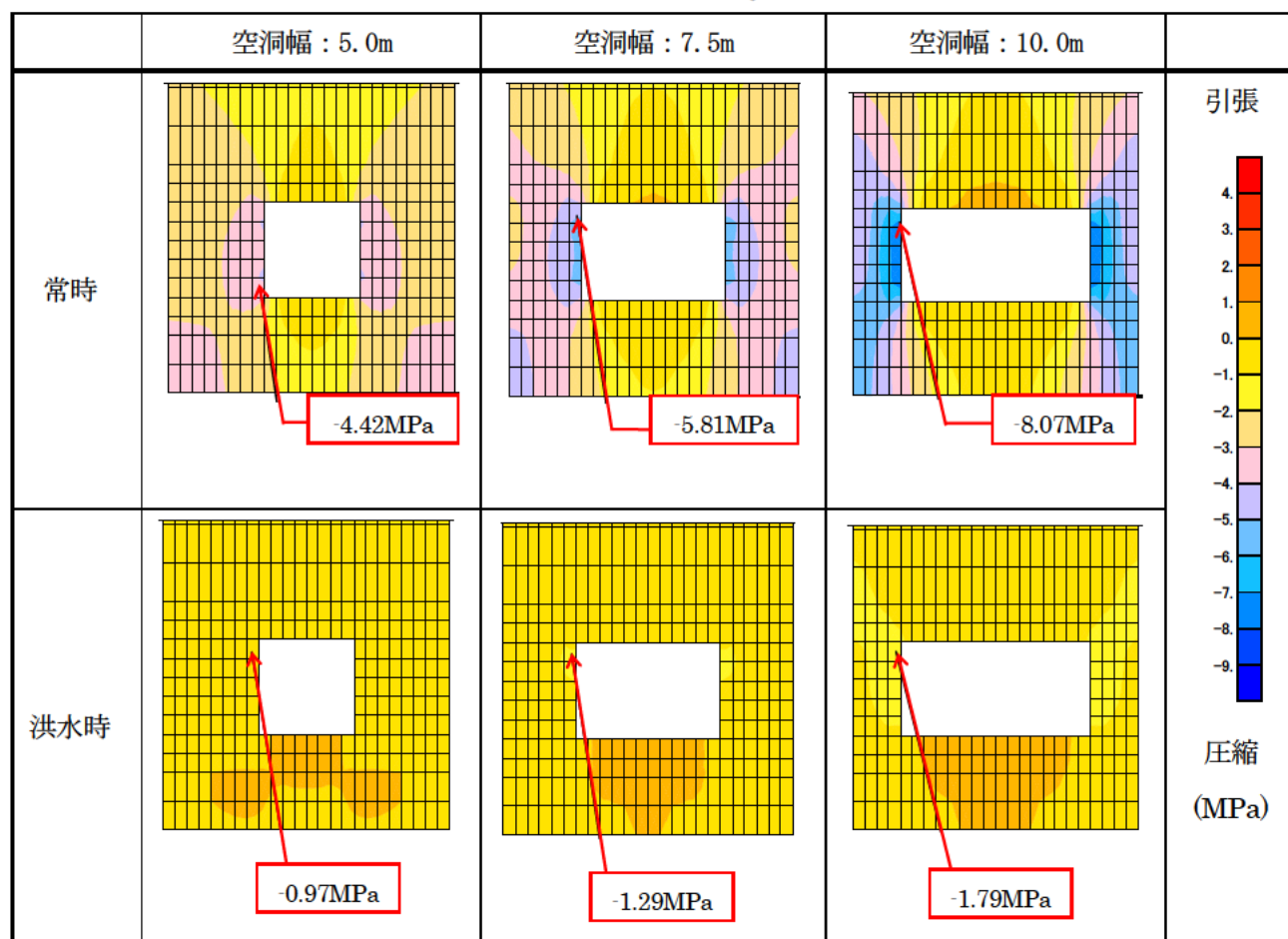
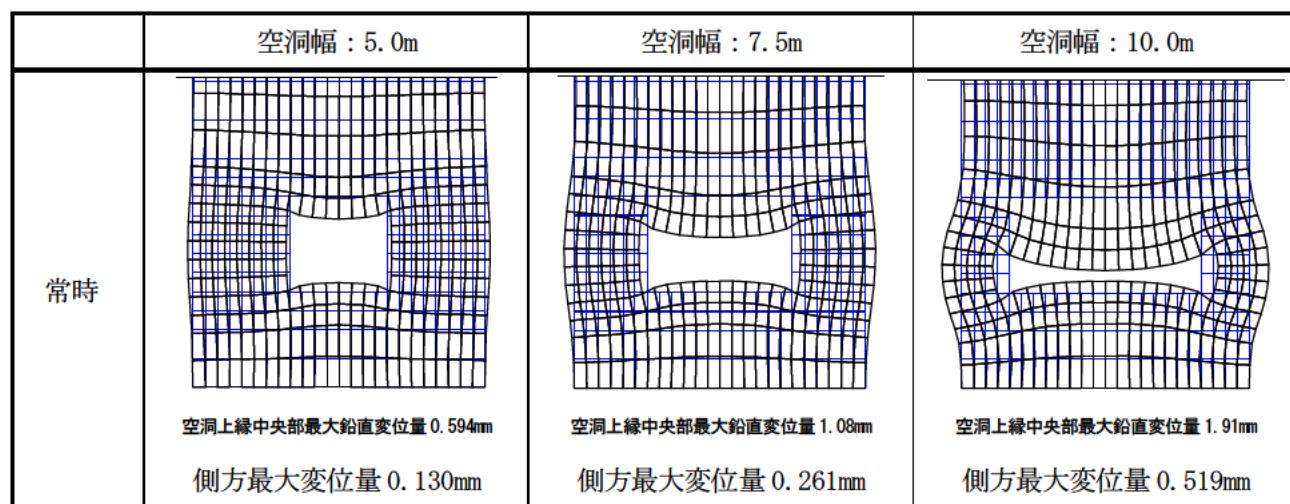
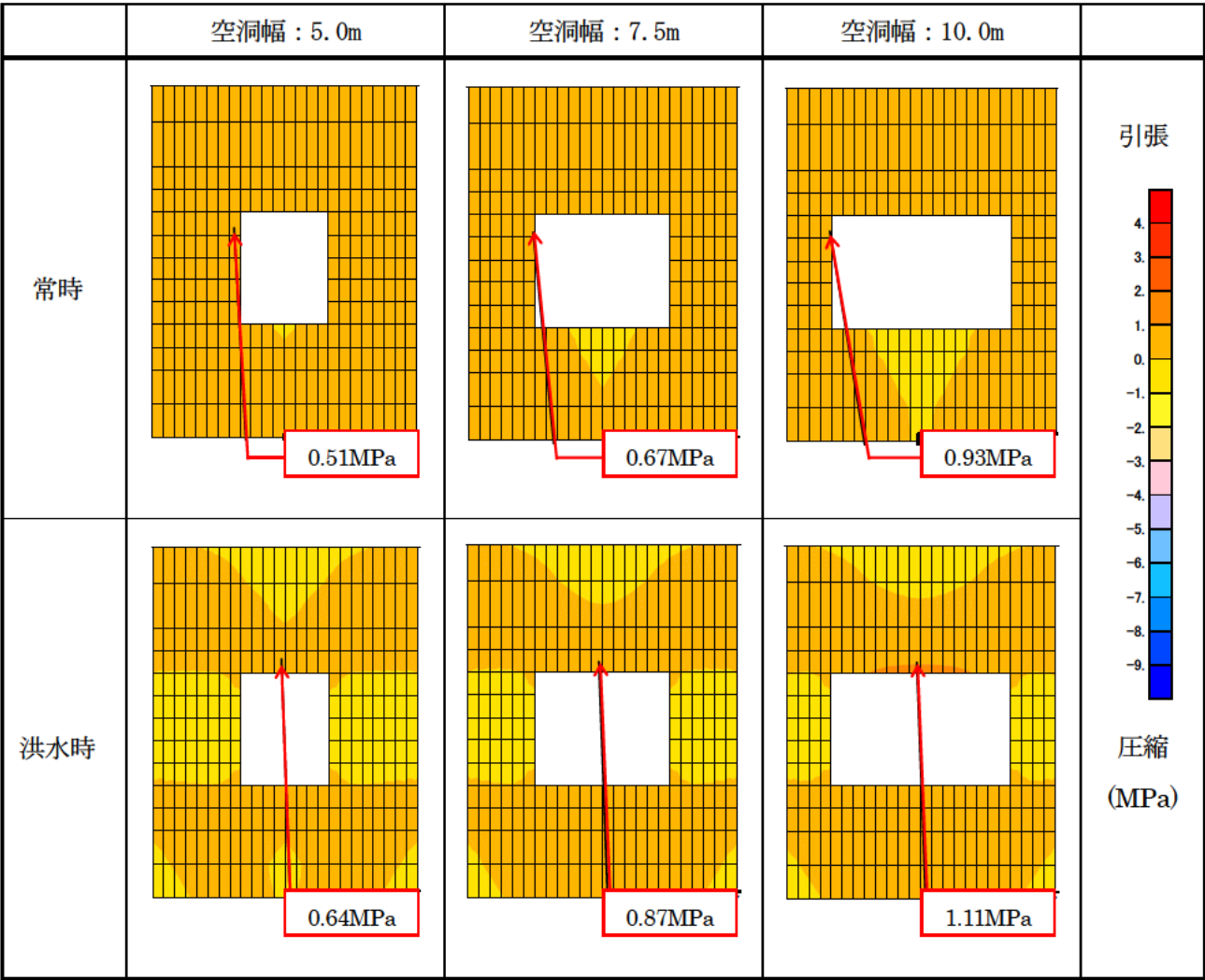


表-7 堤高 80m 上流面(B-B断面) 変形図



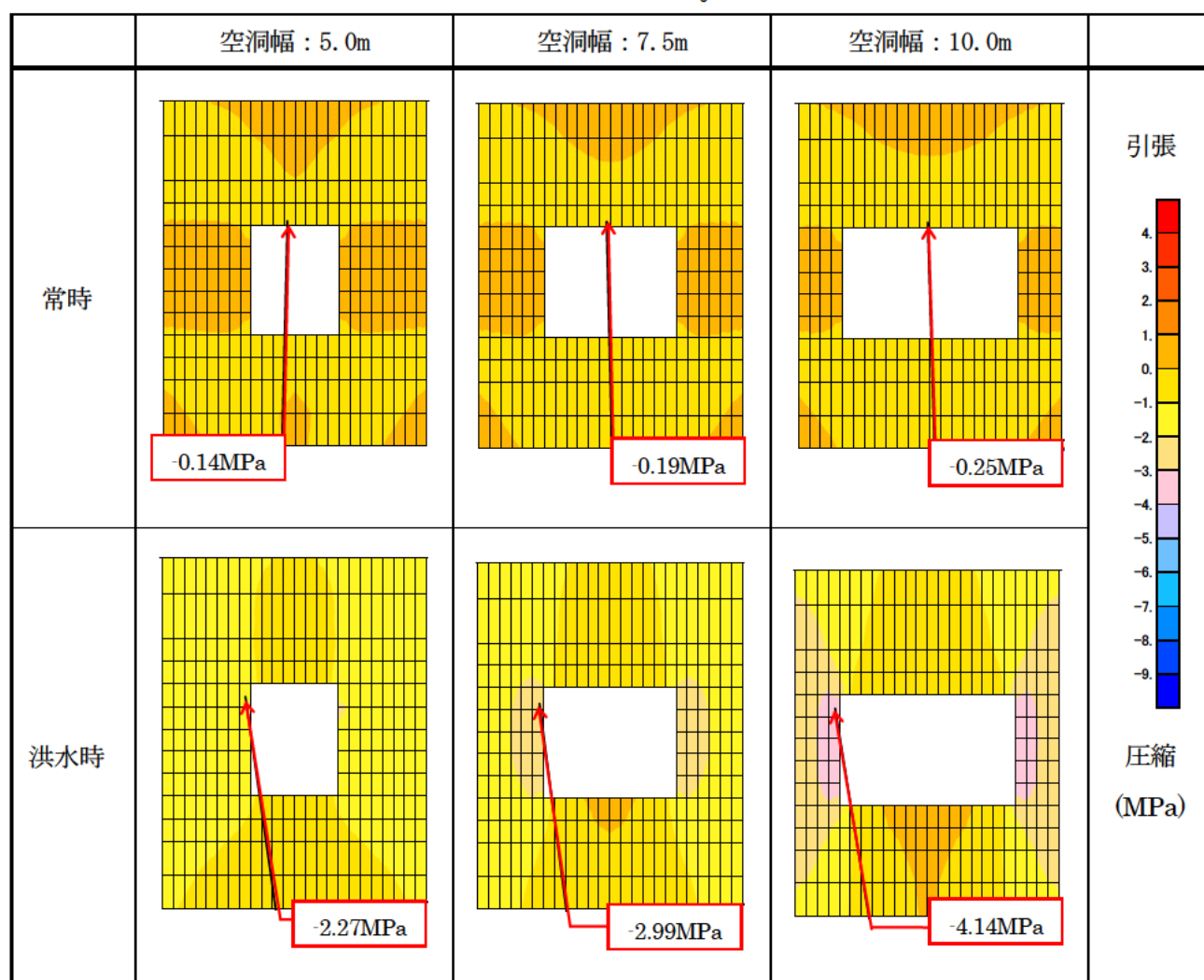
※変位量は縮尺を 2,000 倍して表示した。以下の変形図でも同様である。

表-8 堤高 80m 下流面 (C-C 断面) σ_1 引張側主応力コンター



※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-9 堤高 80m 下流面 (C-C 断面) σ_3 圧縮側主応力コンター



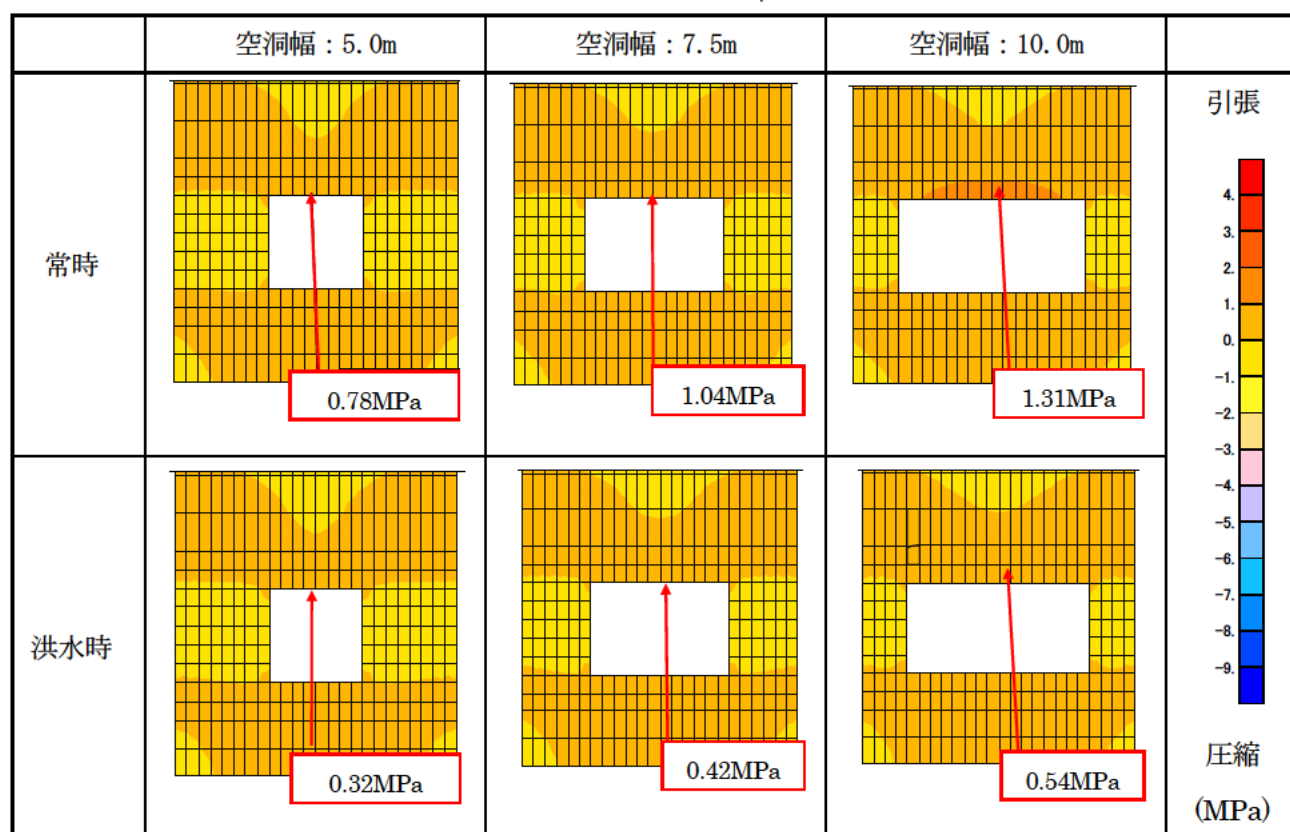
※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-10 堤高 80m モデル 最大・最小主応力

断面	空洞幅 (m)	引張側主応力 σ_1 (MPa)		圧縮側主応力 σ_3 (MPa)	
		常時	洪水時	常時	洪水時
上流面 (B-B断面)	10.0	2.15	1.09	-8.07	-1.79
	7.5	1.70	1.04	-5.81	-1.29
	5.0	1.28	0.99	-4.42	-0.97
下流面 (C-C断面)	10.0	0.93	1.11	-0.25	-4.14
	7.5	0.67	0.87	-0.19	-2.99
	5.0	0.51	0.64	-0.14	-2.27

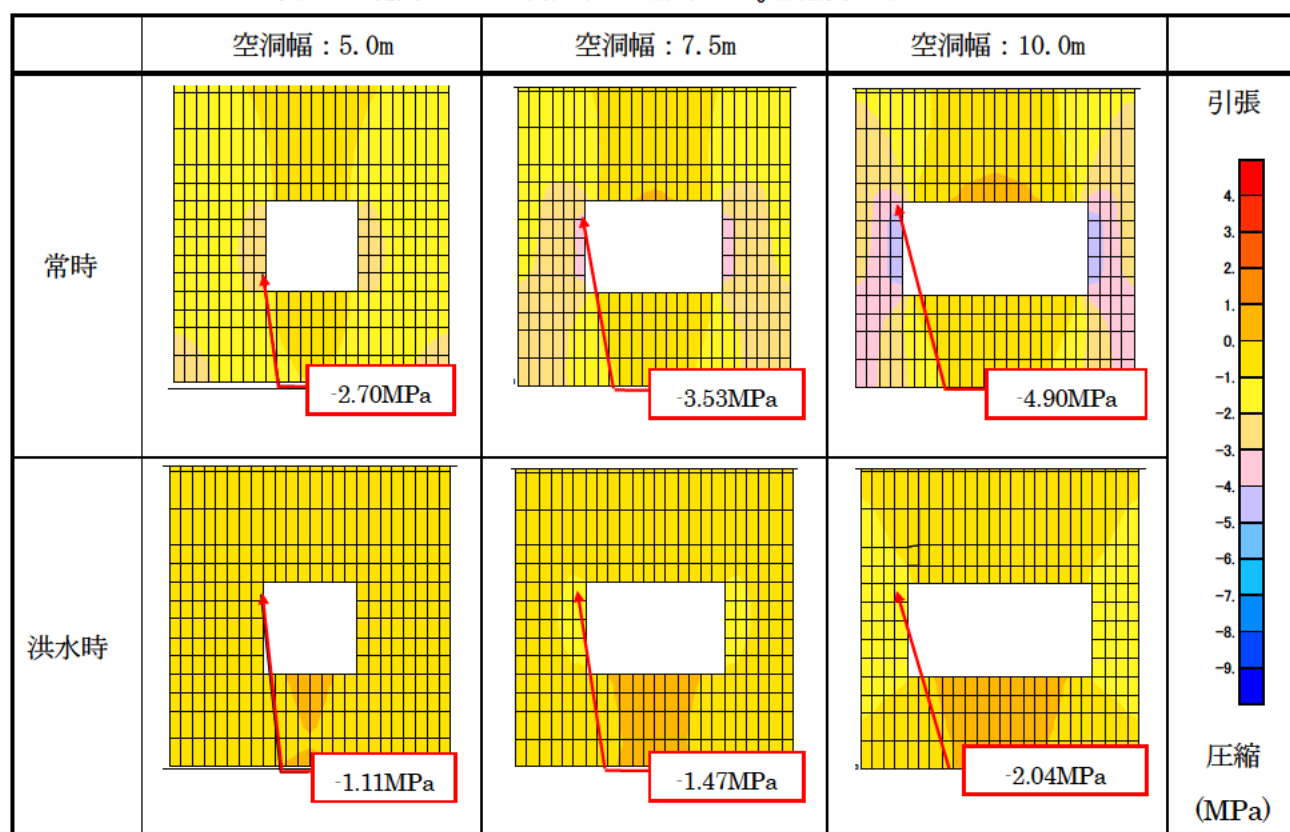
※着色した応力値を図-3 に示す。

表-11 堤高 50m 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力コンター



※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-12 堤高 50m 上流面(B-B断面) σ_3 圧縮側主応力コンター



※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-13 堤高 50m 上流面(B-B断面) 変形図

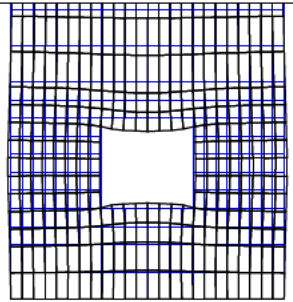
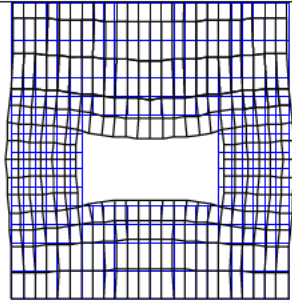
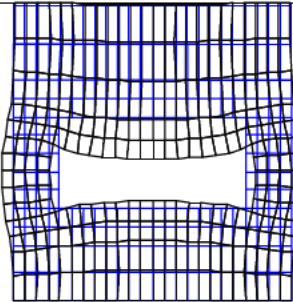
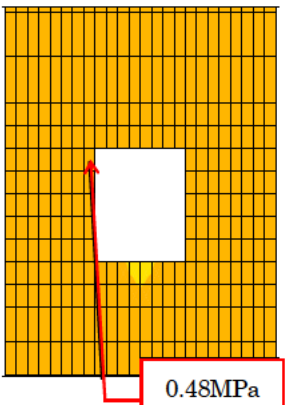
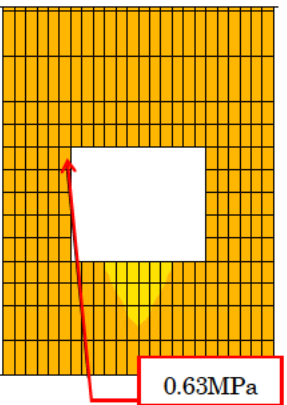
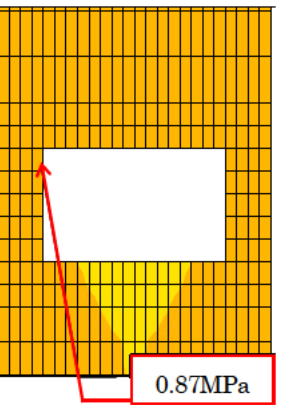
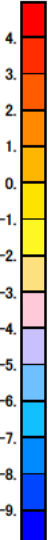
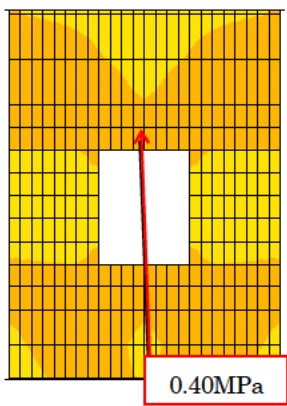
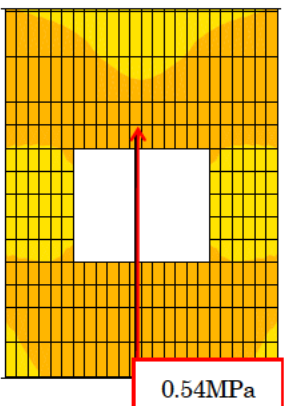
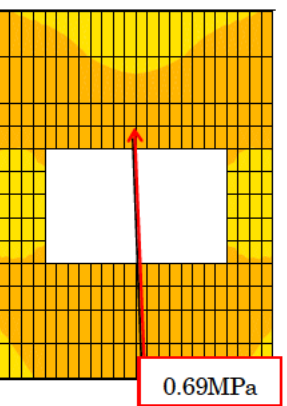
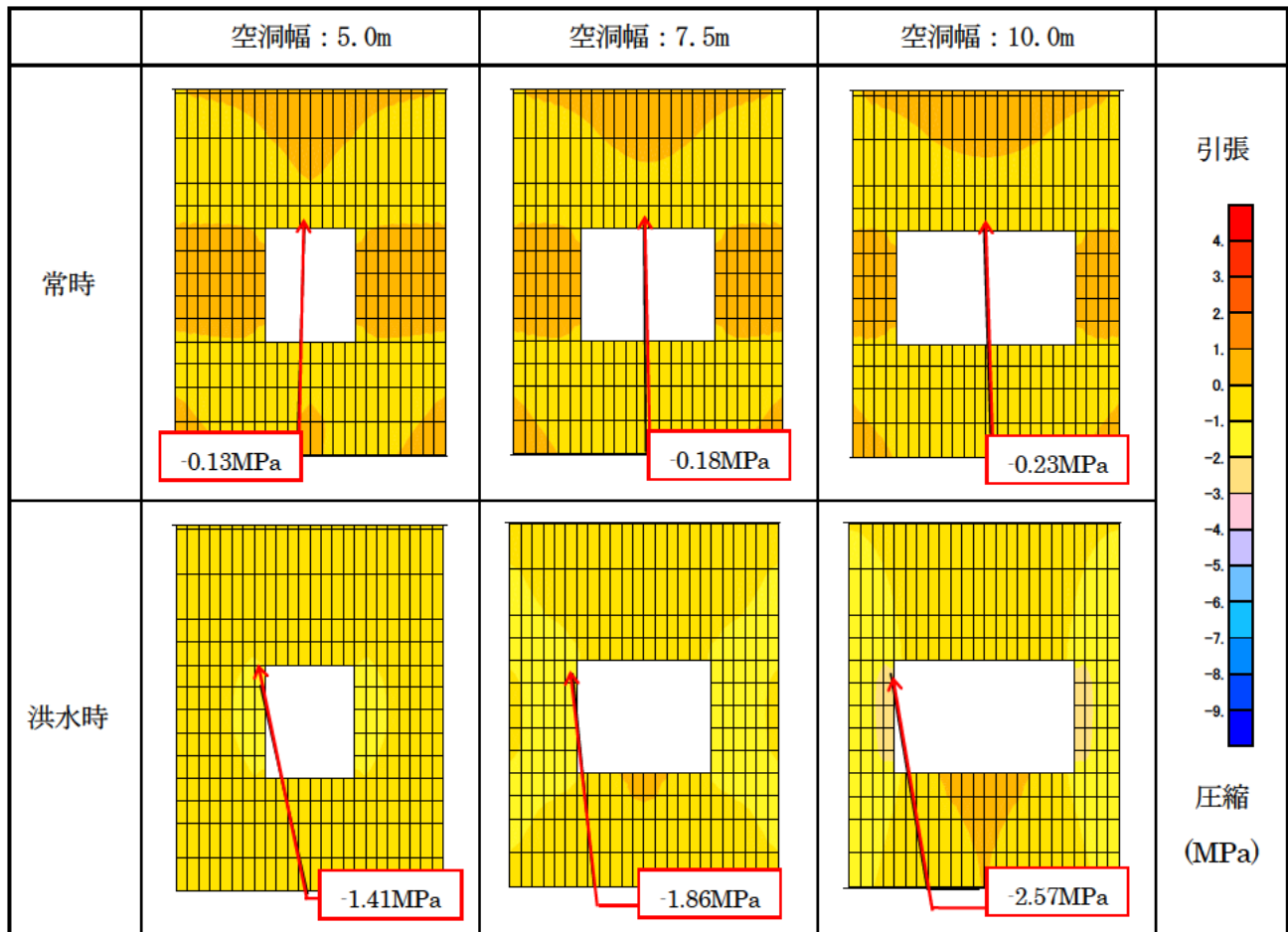
	空洞幅 : 5.0m	空洞幅 : 7.5m	空洞幅 : 10.0m
常時	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.361mm 側方最大変位量 0.079mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.655mm 側方最大変位量 0.159mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.16mm 側方最大変位量 0.315mm

表-14 堤高 50m 下流面(C-C断面) σ_1 引張側主応力コンター

	空洞幅 : 5.0m	空洞幅 : 7.5m	空洞幅 : 10.0m	
常時	 0.48MPa	 0.63MPa	 0.87MPa	引張  圧縮 (MPa)
洪水時	 0.40MPa	 0.54MPa	 0.69MPa	

※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-15 堤高 50m 下流面 (C-C 断面) σ_3 圧縮側主応力コンター

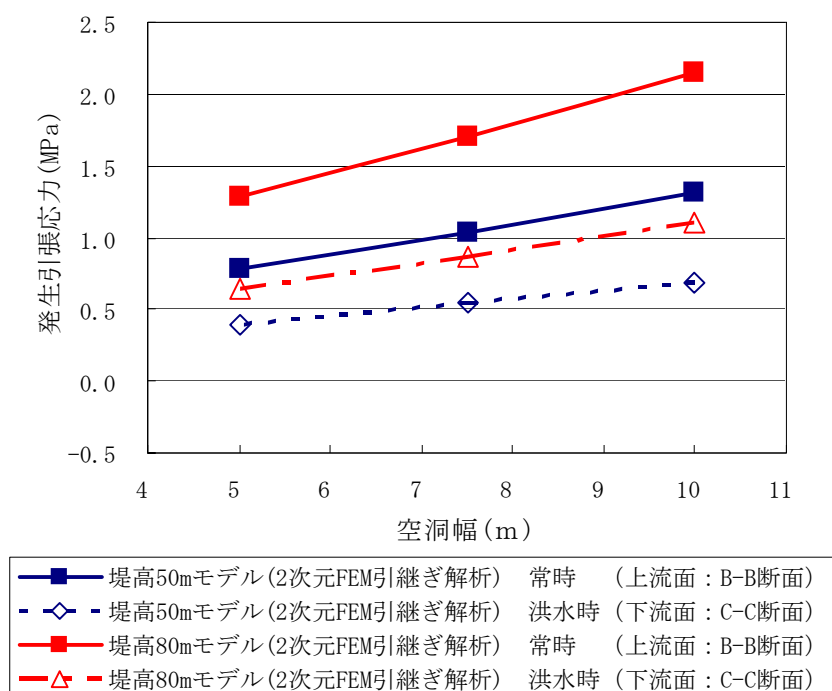
※応力コンターの表現範囲は表-5 と同一

表-16 堤高 50m 最大・最小主応力

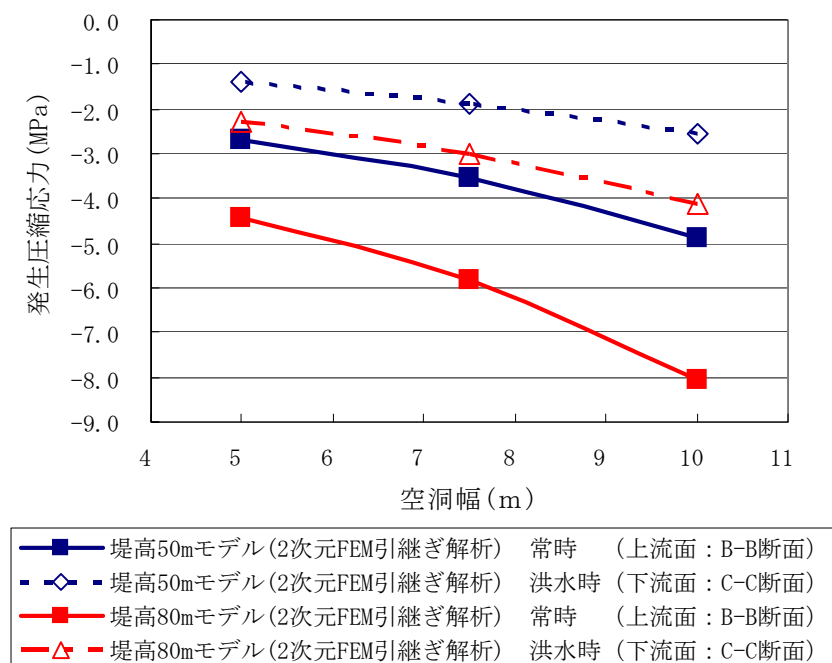
断面	空洞幅 (m)	引張側主応力 σ_1 (MPa)		圧縮側主応力 σ_3 (MPa)	
		常時	洪水時	常時	洪水時
上流面 (B-B断面)	10.0	1.31	0.54	-4.90	-2.04
	7.5	1.04	0.42	-3.53	-1.47
	5.0	0.78	0.32	-2.70	-1.11
下流面 (C-C断面)	10.0	0.87	0.69	-0.23	-2.57
	7.5	0.63	0.54	-0.18	-1.86
	5.0	0.48	0.40	-0.13	-1.41

※ 着色した応力値を図-3 に示す。

※ 堤高 50m モデルでは、表-10 に示す堤高 80m モデルと異なり、下流面 (C-C 断面) の引張側最大主応力は洪水時より常時 (空虚) の方が大きくなった。常時における空洞の無い上下流断面の解析では下流面に最大引張応力が生じるため、下流面内応力を引継いだ下流面に空洞部の掘削効果を与えることで、空洞側部に引張応力が集中する。本研究では、空洞は基礎からの高さを固定しており、堤高の低いモデルほど、常時における上下流断面での最大引張応力発生箇所は空洞部に近くなる。そのため堤高 50m は堤高 80m と異なり、下流面での最大引張応力は常時の方が大きくなった。図-3 には堤高 80m と同じく、下流面の最大引張応力は洪水時での値を示したが、いずれにせよ、堤高にかかわらずモデル全体での引張側主応力 σ_1 が最大となるのは、常時 (空虚) の上流面における空洞上縁部である。

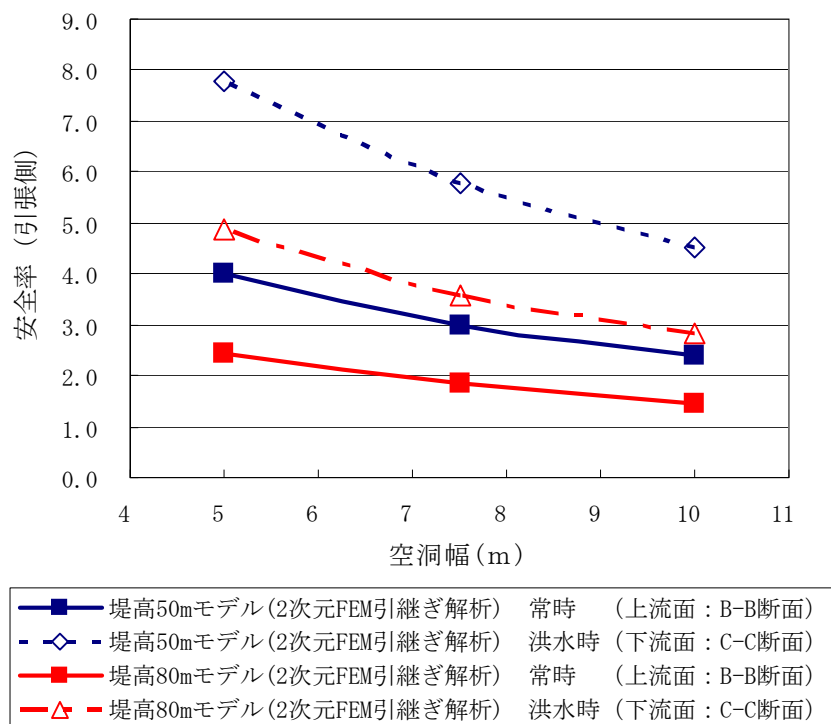


(1) 引張側最大発生主応力 (σ_1)



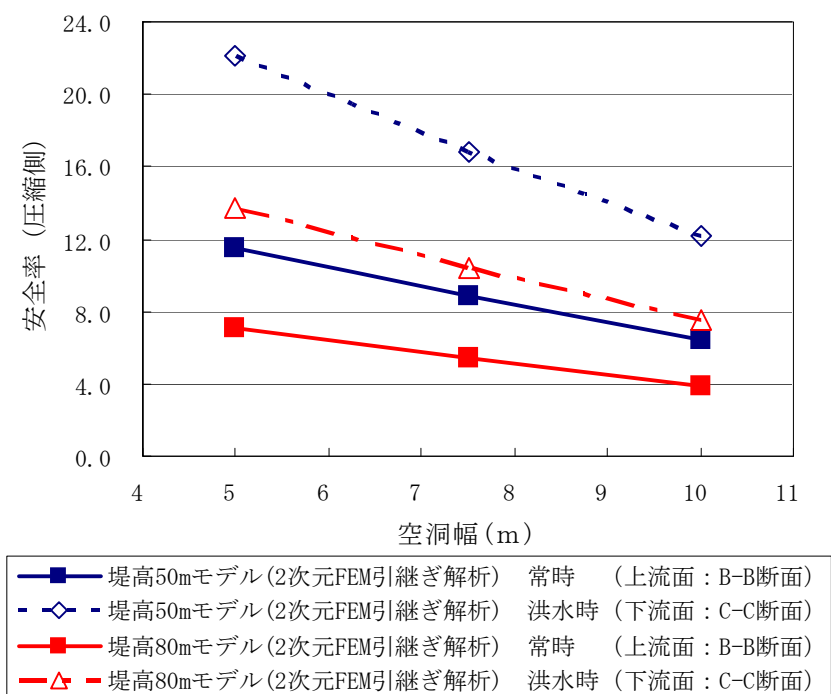
(2) 圧縮側最大発生主応力 (σ_3)

図-3 空洞幅と最大発生応力の関係 (2次元 FEM 引継ぎ解析)



(1) 安全率(引張側)

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)



(2) 安全率(圧縮側)

圧縮強度 24N/mm^2 と仮定した場合 (地震時圧縮強度 $= 31.2\text{N/mm}^2$: 地震時割増 30%を見込む)

図-4 空洞幅と安全率の関係 (2次元 FEM 引継ぎ解析)

2. 応力集中係数からの応力値の算定（堤高 50m, 80m, 100m 1 ブロックモデル）

2.1 概要

当算定方法は、「1. 2次元 FEM 引継ぎ解析」の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。

2.2 解析条件

応力集中係数からの応力値の算出は、「1. 2次元 FEM 引継ぎ解析」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 ($C_c = \sigma_{tmax} / \sigma_z$) 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った。

2.3 解析結果

(1) 2次元 FEM 解析結果

堤高 50, 80m の2次元 FEM 引継ぎ解析による空洞部周辺の応力算定結果は、表-17 に示すとおりである。この結果を σ_{tamx80} (堤高 80m), σ_{tamx50} (堤高 50m) とした。

表-17 2次元 FEM 引継ぎ解析 引張側主応力

空洞幅 (m)	引張側主応力 σ_1 (MPa)			
	堤高 80m		堤高 50m	
	常時	洪水時	常時	洪水時
10.0	2.15	1.11	1.31	0.69
7.5	1.70	0.87	1.04	0.54
5.0	1.28	0.64	0.78	0.40

次に、上下流方向断面の2次元 FEM 解析による空洞部周辺の発生応力は、表-18, 表-19 に示すとおりであり、この結果を σ_{y80} (堤高 80m), σ_{y50} (堤高 50m) とした。なお、洪水時については、下流面沿いに発生する最大圧縮応力 (σ_y') を用いた。

表-18 2次元FEM解析 空洞部周辺の発生応力図（単位：MPa）

堤高	50m	80m	100m
常時 上流端			
洪水時 下流端			
備考	数値 ・ 上段：σ_x ・ 中段：σ_y ・ 下段：τ_{xy}		

表-19 2次元FEM解析 空洞部周辺の発生応力（単位：MPa）

堤高 (m)	常時	洪水時			
	σ_y	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_{y'}$
80	-1.89	-0.40	-0.66	0.51	-1.00
50	-1.14	-0.25	-0.41	0.31	-0.61
100	-2.38	-0.51	-0.83	0.64	-1.26

$$\ast: \sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$$

(2) 「応力集中係数による応力値の算定」の検証

当算出法を検証するため、堤高 50m の応力集中係数を用いて堤高 80m の空洞部周辺の応力値を求め、堤高 80m モデル 2 次元 FEM 引継ぎ解析の結果と比較した。堤高 50m の応力集中係数の算定結果は、表-20 に示すとおりである。この応力集中係数による堤高 80m の応力値を表-21 に示す。また、2 次元 FEM 引継ぎ解析の結果との比較を表-22、図-5 に示す。

表-20 応力集中係数の算定（堤高 50m モデルの解析結果より）

荷重条件	ブロック幅 W (m)	空洞幅 b (m)	空洞高 a (m)	b/W	a/b	σ_{tmax50} (MPa)	σ_{y50} (MPa)	$C_c = \sigma_{tmax50} / \sigma_{y50}$
常時	15	10.0	5.0	0.67	0.50	1.31	-1.14	-1.15
		7.5		0.50	0.67	1.04		-0.91
		5.0		0.33	1.00	0.78		-0.68
洪水時	15	10.0	5.0	0.67	0.50	0.69	-0.61	-1.13
		7.5		0.50	0.67	0.54		-0.89
		5.0		0.33	1.00	0.40		-0.66

表-21 堤高 80m の最大発生応力算定（堤高 50m モデルの応力集中係数 C_c より）

荷重条件	断面	空洞幅b (m)	C_c ($\sigma_{tmax50} / \sigma_{y50}$)	σ_{y80} (MPa)	σ_{tmax80} (MPa)
常時	B-B断面 (上流面)	10.0	-1.15	-1.89	2.17
		7.5	-0.91		1.72
		5.0	-0.68		1.29
洪水時	C-C断面 (下流面)	10.0	-1.13	-1.00	1.13
		7.5	-0.89		0.89
		5.0	-0.66		0.66

表-22 「応力集中係数による算定応力値」と「2 次元 FEM 引継ぎ解析」の比較（堤高 80m）

	空洞幅 b (m)	①応力集中係数により 算定した応力値 (MPa)	②2次元FEM引継ぎ 解析 (MPa)	比率 ③=②/①
常時	10.0	2.17	2.15	0.99
	7.5	1.72	1.70	0.99
	5.0	1.29	1.28	0.99
洪水時	10.0	1.13	1.11	0.98
	7.5	0.89	0.87	0.98
	5.0	0.66	0.64	0.97

引張側主応力 σ_1 (MPa)

次に、同様に堤高 80m の応力集中係数を用いて堤高 50m の空洞部周辺の応力値を求め、堤高 50m モデル 2 次元 FEM 引継ぎ解析の結果と比較した。堤高 80m の応力集中係数の算定結果は、表-23 に示すとおりである。この応力集中係数による堤高 50m の応力値を表-24 に、また、2 次元 FEM 引継ぎ解析の結果との比較を表-25、図-5 に示す。

以上より、応力集中係数の算定結果は、2 次元 FEM 引継ぎ解析の結果を比較すると最大引張応力値で最大でも 3%程度の違いしかなく、高い整合性があると言える。

表-23 応力集中係数の算定（堤高 80m モデルの解析結果より）

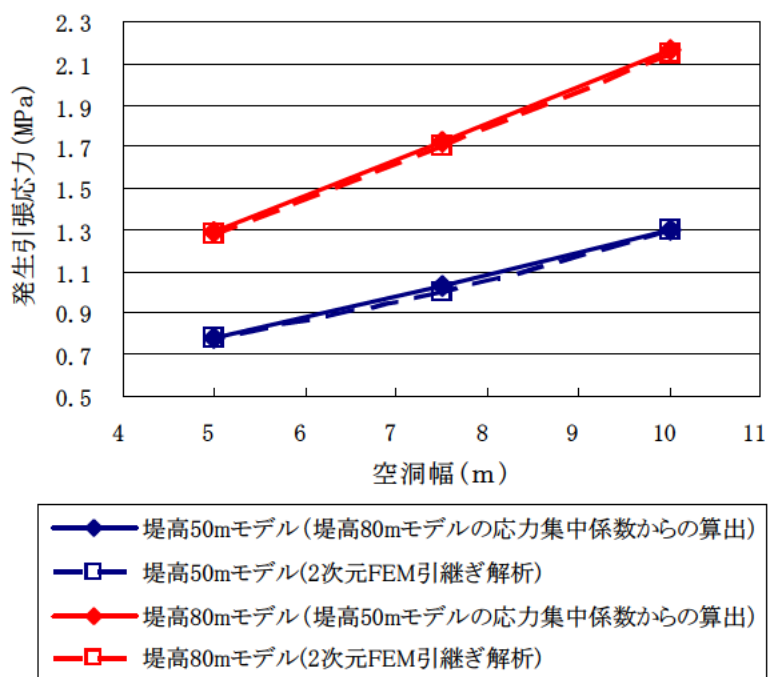
荷重条件	ブロック幅 W (m)	空洞幅 b (m)	空洞高 a (m)	b/W	a/b	σ_{tmax80} (MPa)	σ_{y80} (MPa)	$C_c = \sigma_{tmax80} / \sigma_{y80}$
常時	15	10.0	5.0	0.67	0.50	2.15	-1.89	-1.14
		7.5		0.50	0.67	1.70		-0.90
		5.0		0.33	1.00	1.28		-0.68
洪水時	15	10.0	5.0	0.67	0.50	1.11	-1.00	-1.11
		7.5		0.50	0.67	0.87		-0.87
		5.0		0.33	1.00	0.64		-0.64

表-24 堤高 50m の最大発生応力算定（堤高 80m モデルの応力集中係数 C_c より）

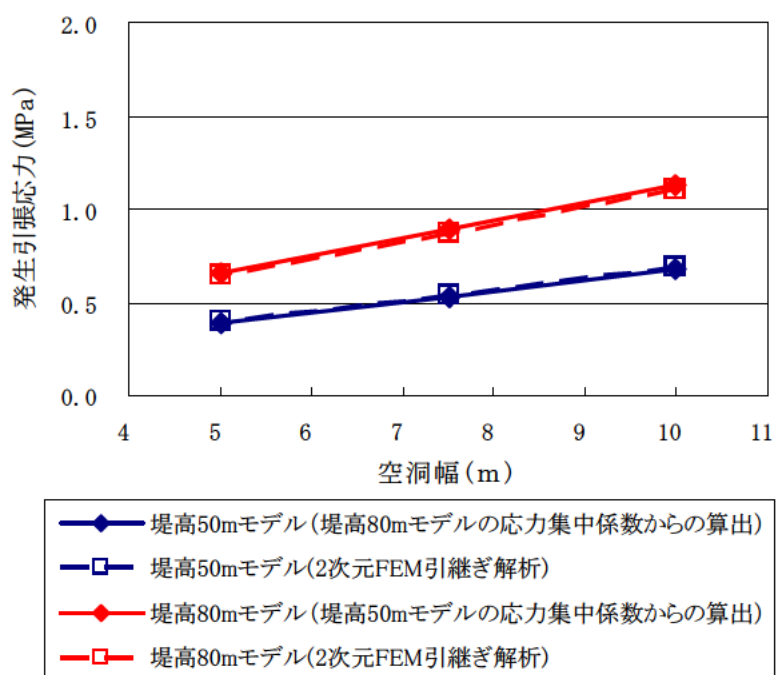
荷重条件	断面	空洞幅b (m)	C_c ($\sigma_{tmax80} / \sigma_{y80}$)	σ_{y50} (MPa)	σ_{tmax50} (MPa)
常時	B-B断面 (上流面)	10.0	-1.14	-1.14	1.30
		7.5	-0.90		1.03
		5.0	-0.68		0.78
洪水時	C-C断面 (下流面)	10.0	-1.11	-0.61	0.68
		7.5	-0.87		0.53
		5.0	-0.64		0.39

表-25 「応力集中係数による算定応力値」と「2次元 FEM 引継ぎ解析」の比較（堤高 50m）

	空洞幅 b (m)	①応力集中係数により 算定した応力値 (MPa)	②2次元FEM引継ぎ 解析 (MPa)	比率 ③=②/①
常時	10.0	1.30	1.31	1.01
	7.5	1.03	1.04	1.01
	5.0	0.78	0.78	1.00
洪水時	10.0	0.68	0.69	1.01
	7.5	0.53	0.54	1.02
	5.0	0.39	0.40	1.03



(1) 常時 (B-B断面: 上流面)



(2) 洪水時 (C-C断面: 下流面)

図-5 「応力集中係数による算定応力値」と「2次元FEM引継ぎ解析」の比較 (堤高 50m, 80m)

(3) 応力集中係数による応力値の算定（堤高 100m）

堤高 100m に対し、堤高 80m の応力集中係数(表-23)、堤高 50m の応力集中係数(表-20)を用いて応力値を算定した。算定結果を表-26～表-28, 図-6 に示す。使用する応力集中係数の違いによる空洞部周辺の最大発生引張応力値の違いは最大 2%程度と大きな差がないことを確認した。

表-26 堤高 100m の最大発生応力算定（堤高 80m モデルの応力集中係数 C_c より）

荷重条件	断面	空洞幅b (m)	C_c ($\sigma_{tmax80}/\sigma_{y80}$)	σ_{y100} (MPa)	$\sigma_{tmax100}$ (MPa)
常時	B-B断面 (上流面)	10.0	-1.14	-2.38	2.71
		7.5	-0.90		2.14
		5.0	-0.68		1.62
洪水時	C-C断面 (下流面)	10.0	-1.11	-1.26	1.40
		7.5	-0.87		1.10
		5.0	-0.64		0.81

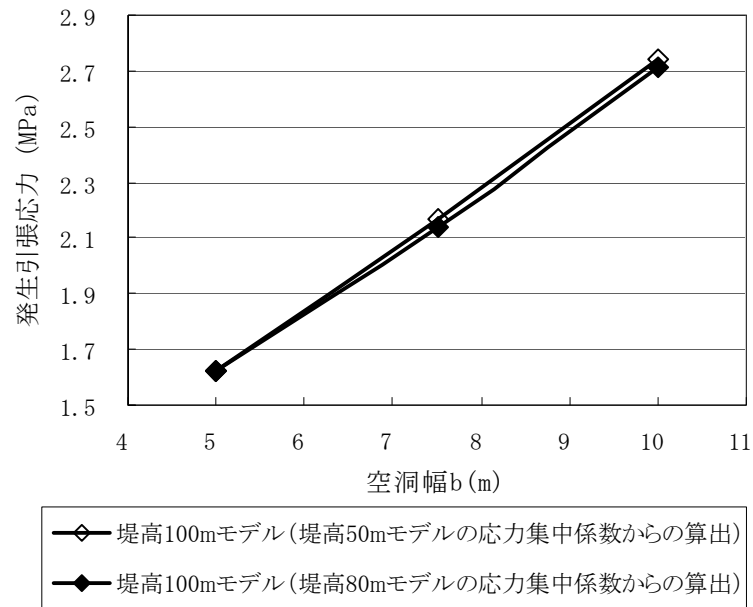
表-27 堤高 100m の最大発生応力算定（堤高 50m モデルの応力集中係数 C_c より）

荷重条件	断面	空洞幅b (m)	C_c ($\sigma_{tmax50}/\sigma_{y50}$)	σ_{y100} (MPa)	$\sigma_{tmax100}$ (MPa)
常時	B-B断面 (上流面)	10.0	-1.15	-2.38	2.74
		7.5	-0.91		2.17
		5.0	-0.68		1.62
洪水時	C-C断面 (下流面)	10.0	-1.13	-1.26	1.42
		7.5	-0.89		1.12
		5.0	-0.66		0.83

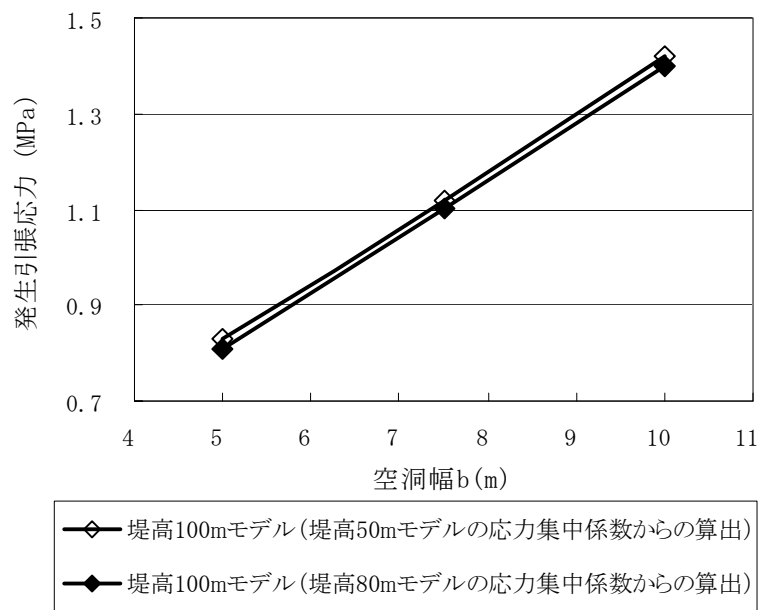
表-28 応力集中係数の違いによる最大発生引張応力の比較（堤高 100m）

	空洞幅 b(m)	①堤高80mモデルの 応力集中係数により 算定した応力値(MPa)	②堤高50mモデルの 応力集中係数により 算定した応力値(MPa)	比率 ③=②/①
常時	10.0	2.71	2.74	1.01
	7.5	2.14	2.17	1.01
	5.0	1.62	1.62	1.00
洪水時	10.0	1.40	1.42	1.01
	7.5	1.10	1.12	1.02
	5.0	0.81	0.83	1.02

引張側主応力 σ_1 (MPa)



(1) 常時 (B-B 断面：上流面)



(2) 洪水時 (C-C 断面：下流面)

図-6 応力集中係数の違いによる最大発生引張応力の比較 (堤高 100m)

3. 2次元FEM引継ぎ解析（堤高80m 1ブロックモデル ブロック幅18m, 21mの場合）

3.1 解析条件

(1) 解析モデル

堤高80m、1ブロック幅18m、21mとした2次元モデルを用いて、空洞幅をパラメータとした2次元FEM引継ぎ解析を行った。空洞幅は、ブロック幅の1/2、1/3とした。

なお、解析モデルの諸元を表-29、概要図を図-7に示す。解析評価断面は、1ブロック幅15mの場合と同様に、ダム上流面（B-B断面）と下流面（C-C断面）とした。

表-29 解析モデルの主要諸元（1ブロック幅18m, 21mの場合）

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)	6m	9m	7m	10.5m
b/W	1/3	1/2	1/3	1/2
境界条件	底面：固定，側方：フリー			

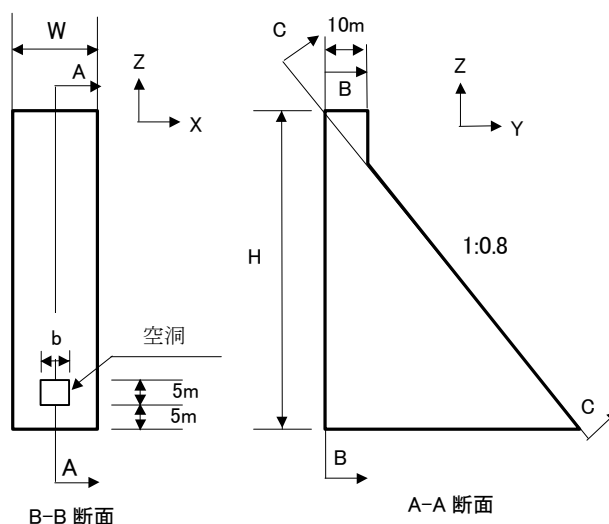


図-7 モデル形状と解析断面位置図（2次元FEM解析）

(2) 解析方法

2次元 FEM 引継ぎ解析とした。詳細は本編 3.2.1 に記載。

(3) 物性値および荷重条件

解析に使用した材料物性値を表-30 に、荷重条件を表-31 に示す。

なお、1ブロック幅を 21m とした場合の検討は、荷重条件のうち、常時のみを実施した。

表-30 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-31 荷重条件

荷重		常時（空虚）	洪水時 ^{※1} （SWL:H-5m）
水平力	静水圧 ^{※2}	—	○
	地震時動水圧 ^{※3}	—	○
	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 1ブロック幅 21m については、洪水時の条件を省略した。

※2 洪水調節専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

※3 Westergaard 式による。

3.2 解析結果

堤体1ブロック幅を18m、空洞幅を6.0mおよび9.0mとした場合の解析結果を表-32～表-36に、堤体1ブロック幅を21m、空洞幅を10.5m、7.0mとした場合の解析結果を表-37、表-38に示す。

また、解析結果のまとめを表-39に示す。ブロック幅・空洞部と発生応力の関係を図-8に、また安全率との関係を図-9に示す。

表-32 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力コンター (堤体1ブロック幅:18m)

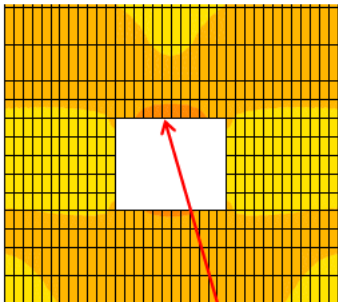
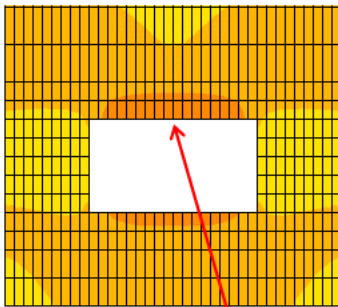
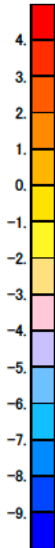
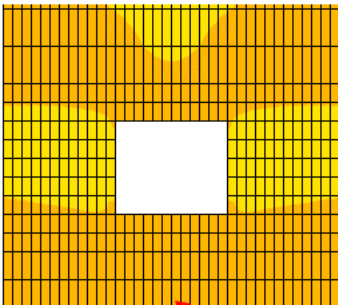
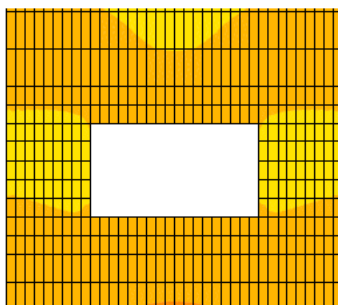
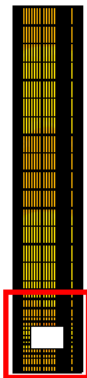
条件		ブロック幅：18m 空洞幅：6.0m	ブロック幅：18m 空洞幅：9.0m	
σ_1	常時	 1.34MPa	 1.73MPa	引張  圧縮 (MPa)
	洪水時	 1.01MPa	 1.07MPa	
備考		【補足】 上記断面は、右図に示す断面モデルのうち、空洞部周辺（赤枠内）を表現した。 		

表-33 上流面(B-B断面) σ_3 圧縮側主応力コンター (堤体1ブロック幅: 18m)

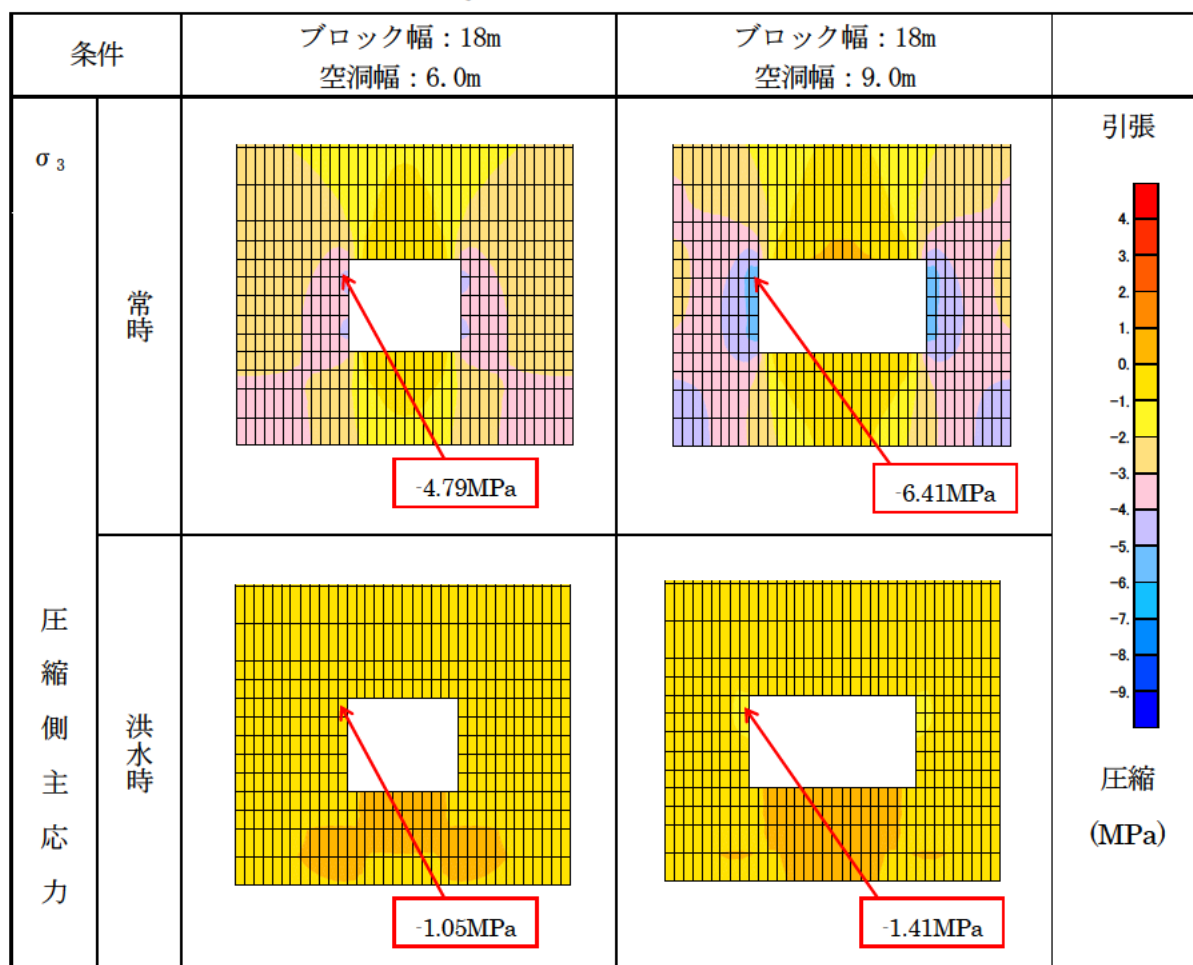


表-34 上流面(B-B断面) 変形図 (堤体1ブロック幅: 18m)

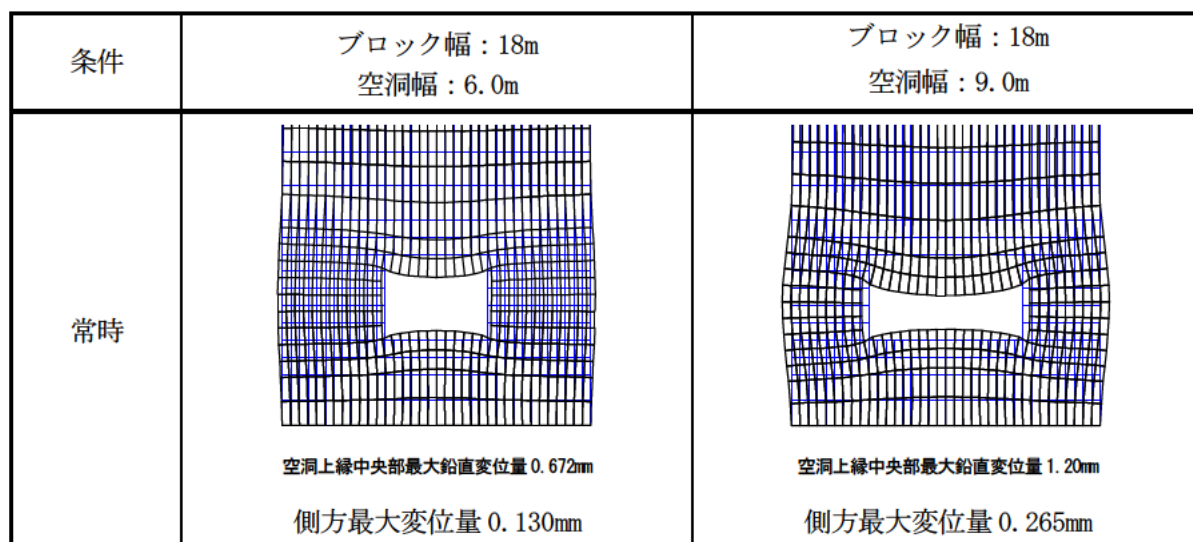


表-35 下流面(C-C断面) σ_1 引張側主応力コンター (堤体1ブロック幅: 18m)

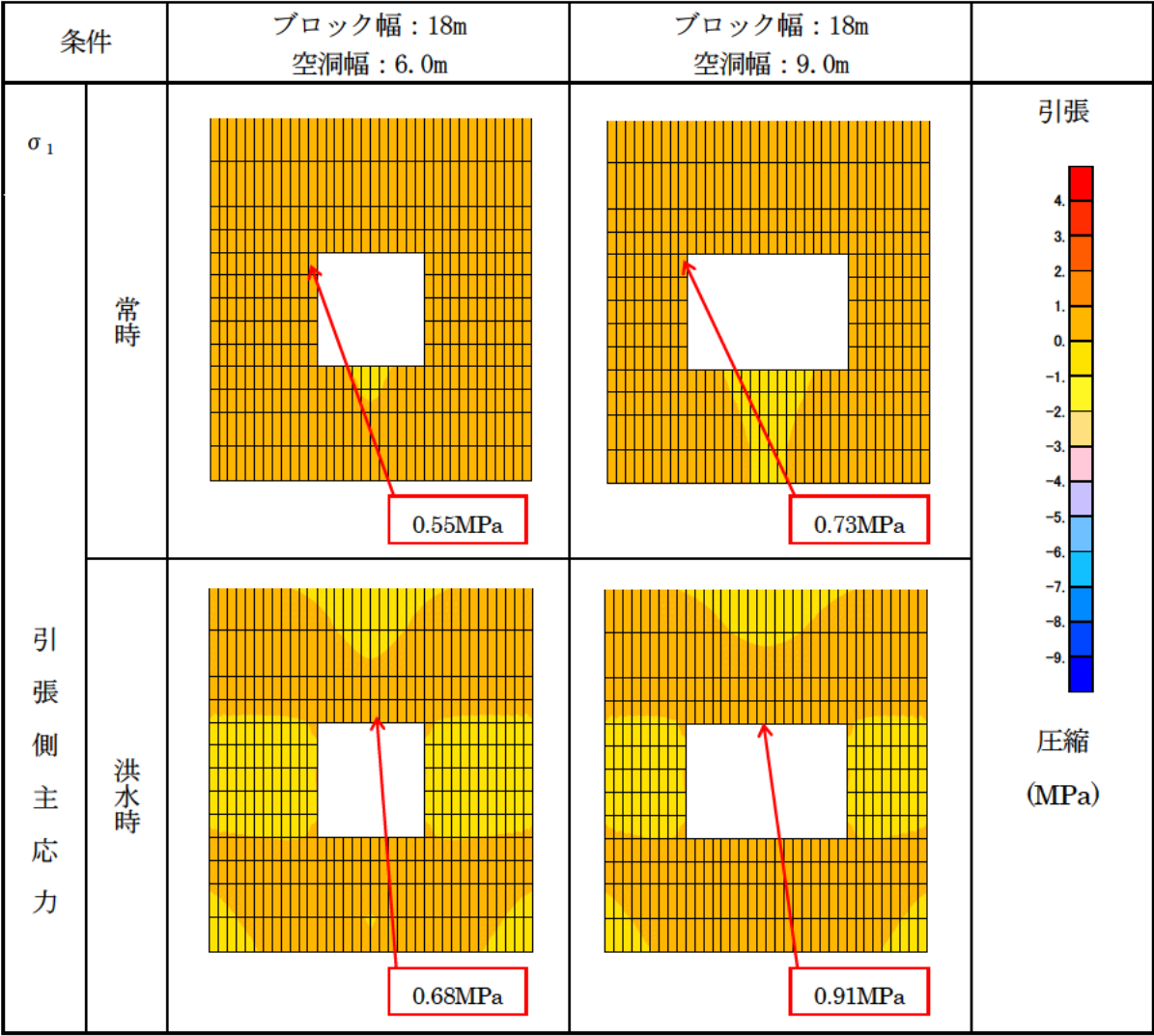


表-36 下流面(C-C断面) σ_3 圧縮側主応力コンター (堤体1ブロック幅: 18m)

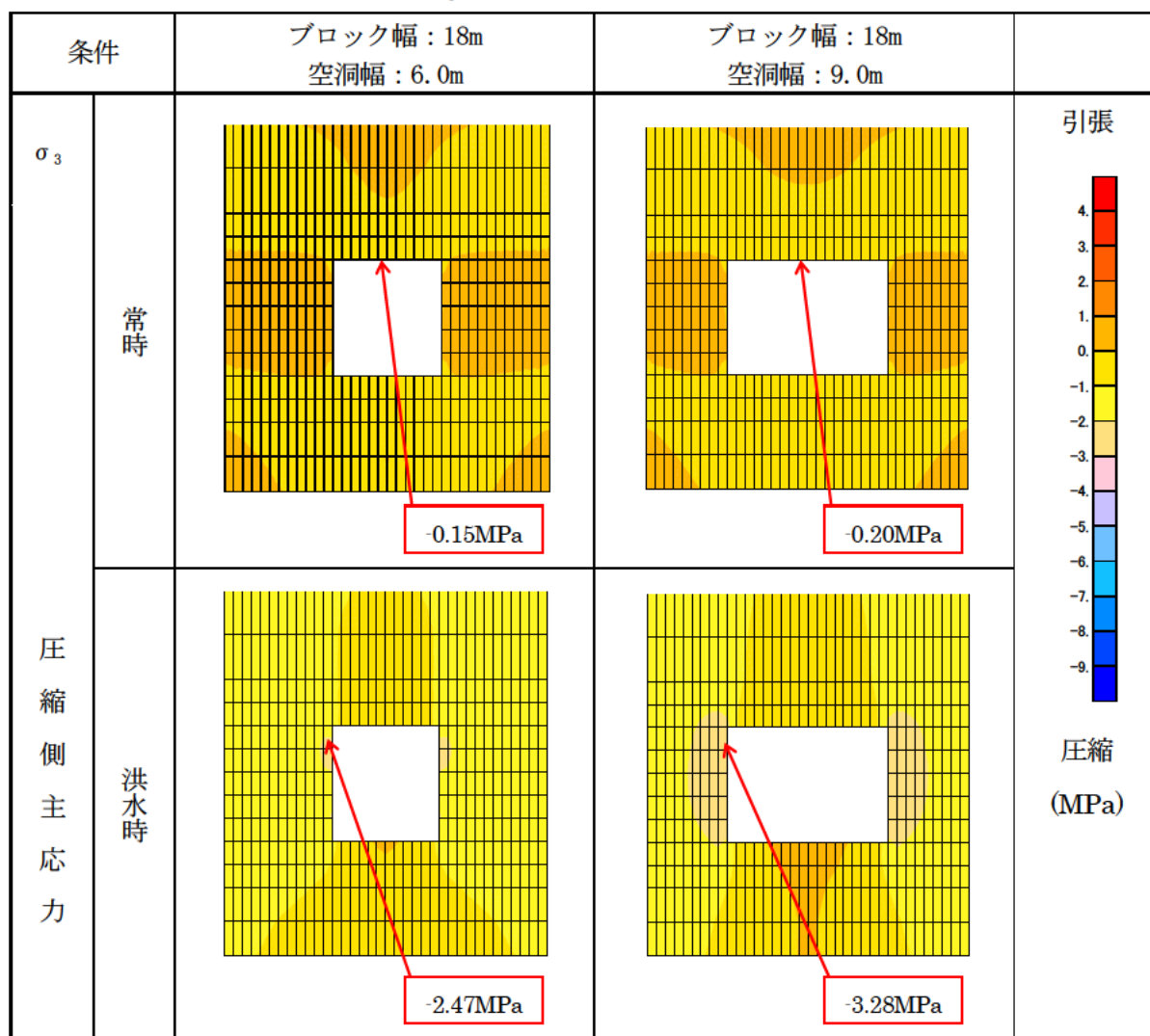


表-37 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力 σ_3 圧縮側主応力コンター (堤体1ブロック幅:21m)

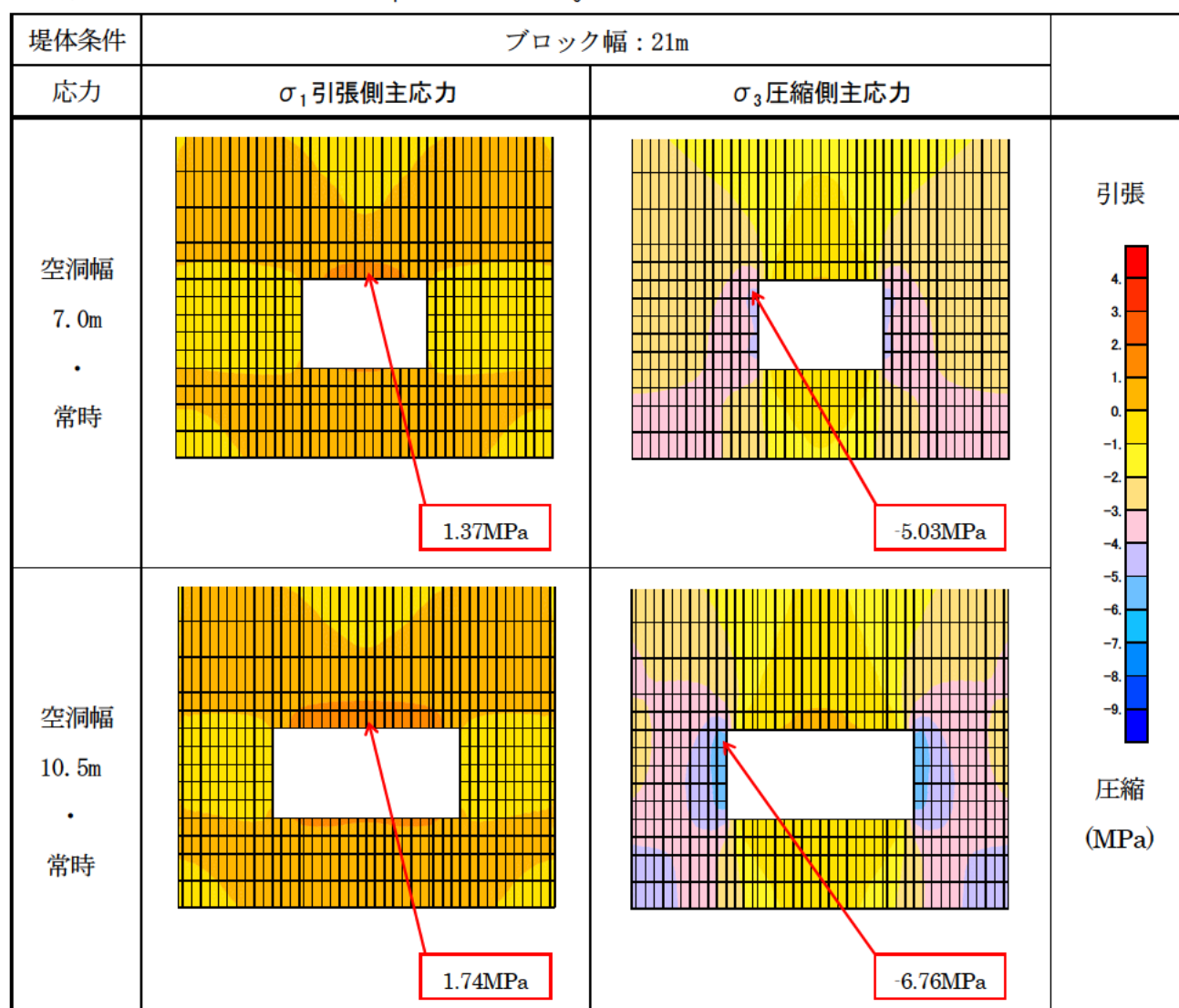


表-38 上流面(B-B断面) 変形図 (堤体1ブロック幅:21m)

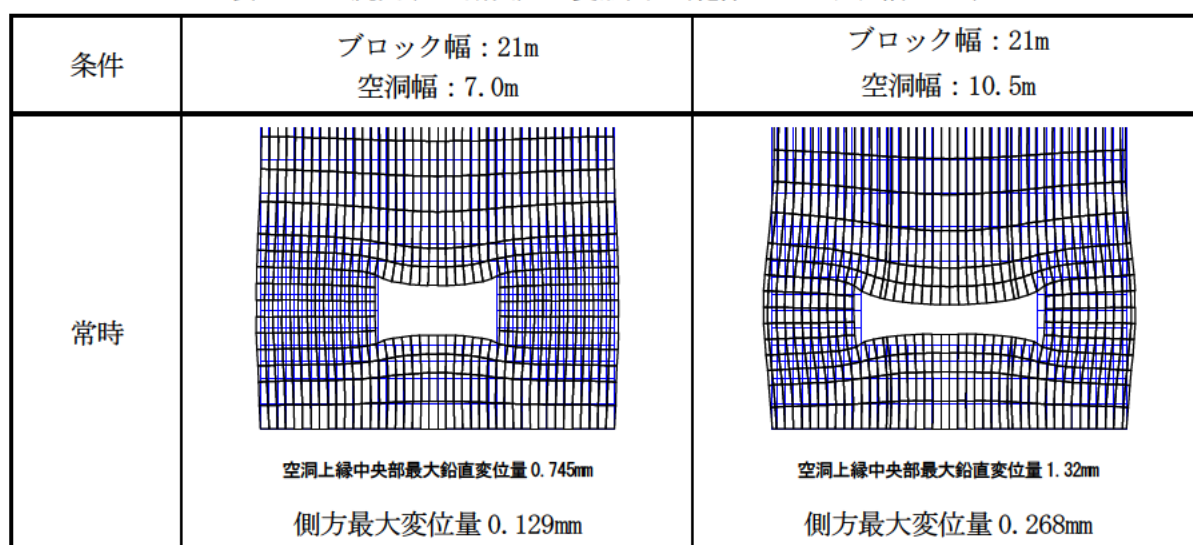


表-39 ブロック幅を変更した場合の解析結果一覧

(σ_1 引張側最大主応力値、 σ_3 圧縮側最大主応力値) (堤高 80m)

ブロック幅 W=21m

断面	空洞幅 b (m)	b/W	引張側主応力 σ_1 (MPa)		圧縮側主応力 σ_3 (MPa)	
			常時	洪水時	常時	洪水時
上流面 (B-B断面)	10.5	0.5	1.74	—	-6.76	—
	7.0	0.3	1.37	—	-5.03	—

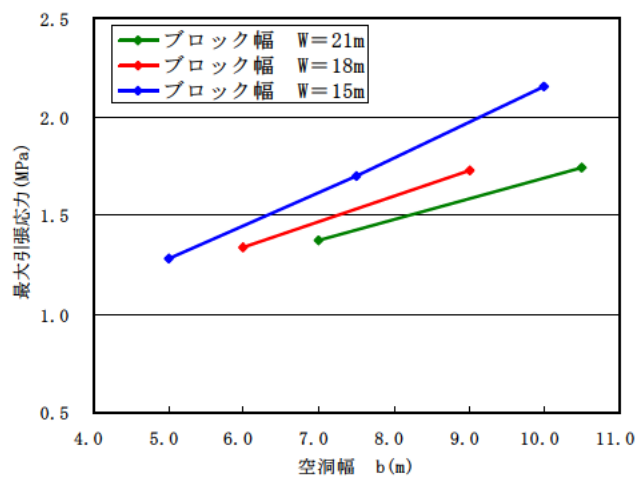
ブロック幅 W=18m

断面	空洞幅 b (m)	b/W	引張側主応力 σ_1 (MPa)		圧縮側主応力 σ_3 (MPa)	
			常時	洪水時	常時	洪水時
上流面 (B-B断面)	9.0	0.5	1.73	1.07	-6.41	-1.41
	6.0	0.3	1.34	1.01	-4.79	-1.05
下流面 (C-C断面)	9.0	0.5	0.73	0.91	-0.20	-3.28
	6.0	0.3	0.55	0.68	-0.15	-2.47

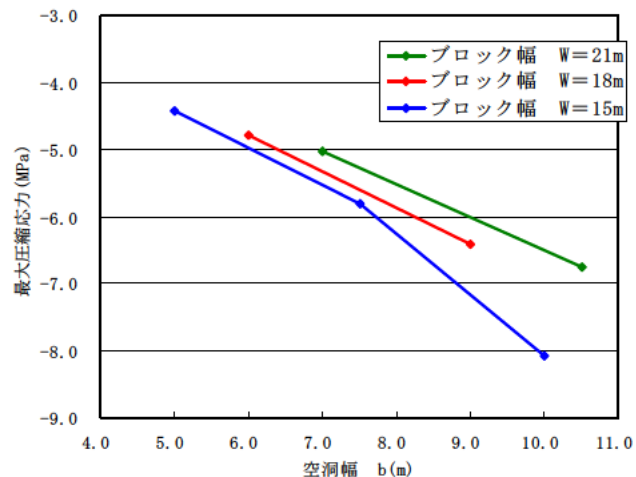
【参考】 ブロック幅 15m の場合

断面	空洞幅 b (m)	b/W	引張側主応力 σ_1 (MPa)		圧縮側主応力 σ_3 (MPa)	
			常時	洪水時	常時	洪水時
上流面 (B-B断面)	10.0	0.7	2.15	1.09	-8.07	-1.79
	7.5	0.5	1.70	1.04	-5.81	-1.29
	5.0	0.3	1.28	0.99	-4.42	-0.97
下流面 (C-C断面)	10.0	0.7	0.93	1.11	-0.25	-1.79
	7.5	0.5	0.67	0.87	-0.19	-1.29
	5.0	0.3	0.51	0.64	-0.14	-0.97

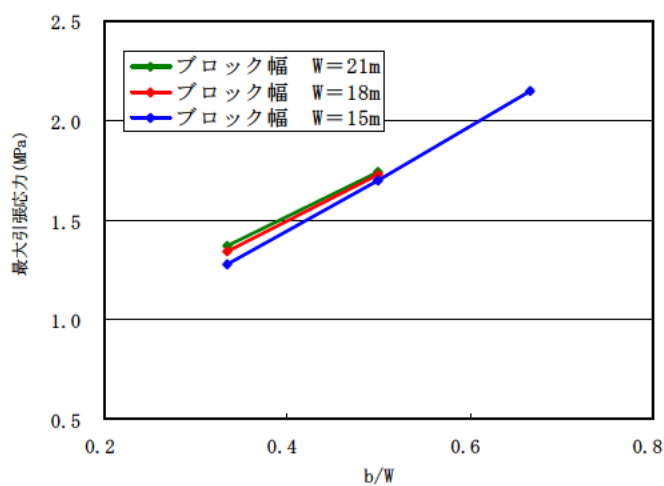
※着色した応力値を図-8 に示す。



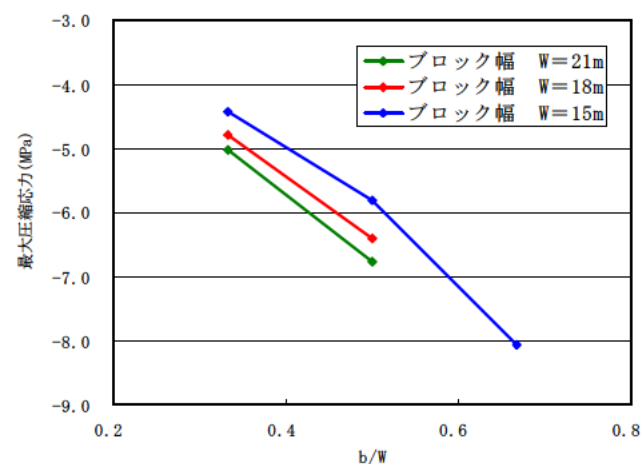
(1) 空洞幅と最大引張応力の関係



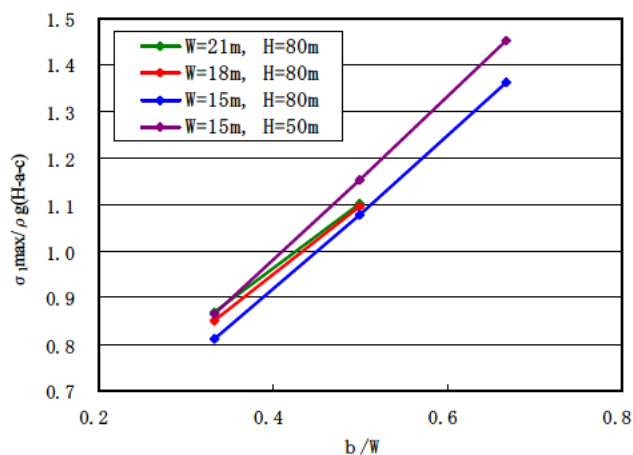
(3) 空洞幅と最大圧縮応力の関係



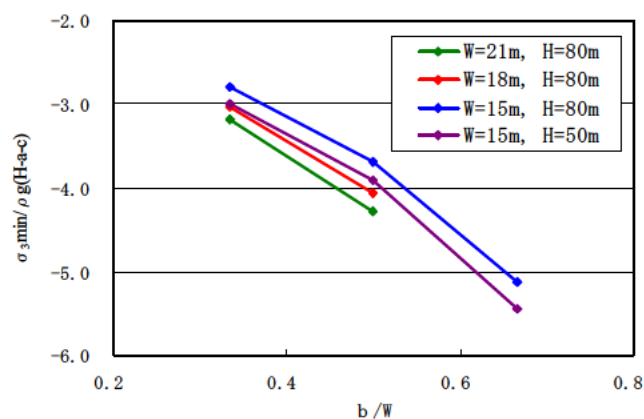
(2) b/W と最大引張応力の関係



(4) b/W と最大圧縮応力の関係

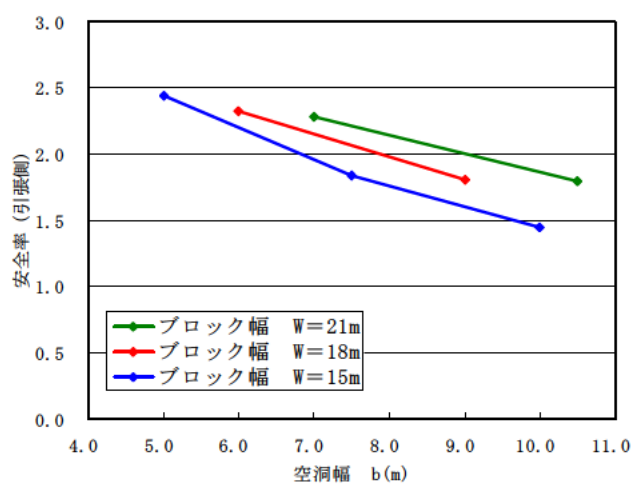


(5) b/W と最大引張応力の関係 (堤高で無次元化)

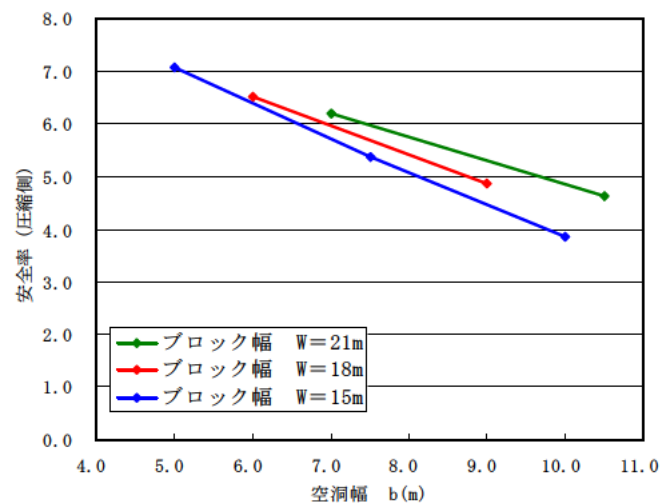


(6) b/W と最大圧縮応力の関係 (堤高で無次元化)

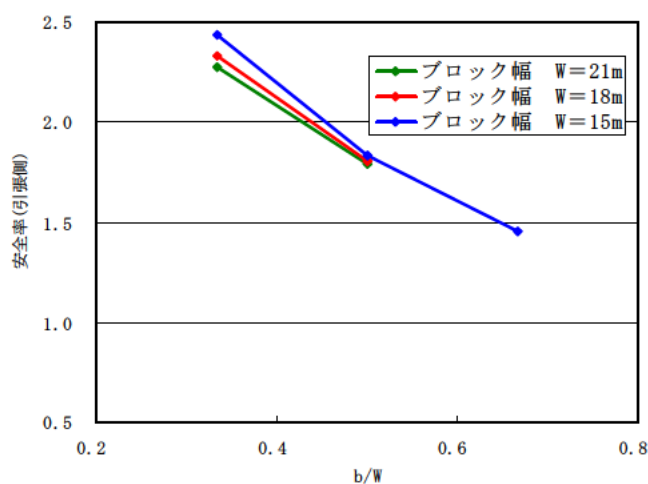
図-8 堤体ブロック幅を変更した場合の空洞幅と最大引張・圧縮応力の関係



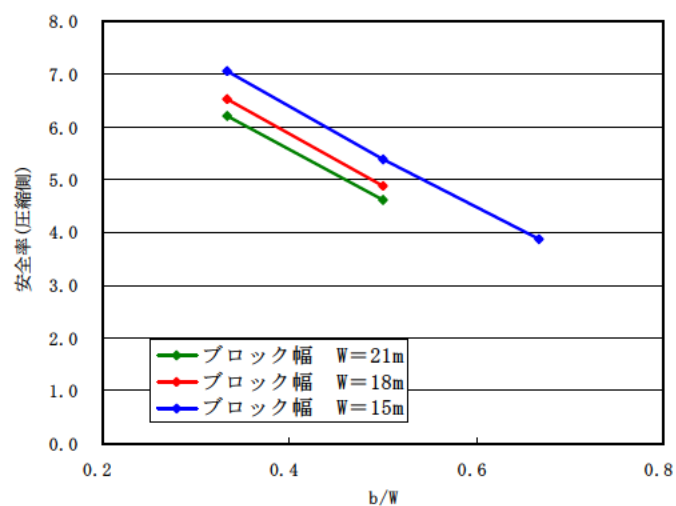
(1) 空洞幅と安全率(引張側)の関係



(3) 空洞幅と安全率(圧縮側)の関係



(2) b/W と安全率(引張側)の関係



(4) b/W と安全率(圧縮側)の関係

図-9 堤体ブロック幅を変更した場合の空洞幅と安全率の関係

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)

圧縮強度 24N/mm^2 と仮定した場合 (地震時引張強度 $= 31.2\text{N/mm}^2$: 地震時割増 30%を見込む)

4. 2次元FEM 引継ぎ解析（堤高 80m 1ブロックモデル 境界条件の検討）

4.1 解析条件

(1) 解析モデル

堤高 80m、1 ブロック幅 15m とした 2 次元モデルを用いて、側方境界条件(ジョイント要素の設定、隣接ブロックとの隙間幅、隣接ブロックの弾性係数)をパラメータとした 2 次元 FEM 引継ぎ解析を行った。解析モデルの諸元を表-29、概要図を図-10 に示す。

解析評価断面は、他の 2 次元 FEM 引継ぎ解析の検討の結果から、発生応力が大きくなるダム上流面 (B-B 断面) のみを対象とした。

表-40 解析モデルの主要諸元（境界条件の検討）

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(a)	5m
ブロック幅 (W)	15m
空洞幅 (b)	7.5m
b/W	1/2
境界条件	底面：固定，側方：検討パラメータ

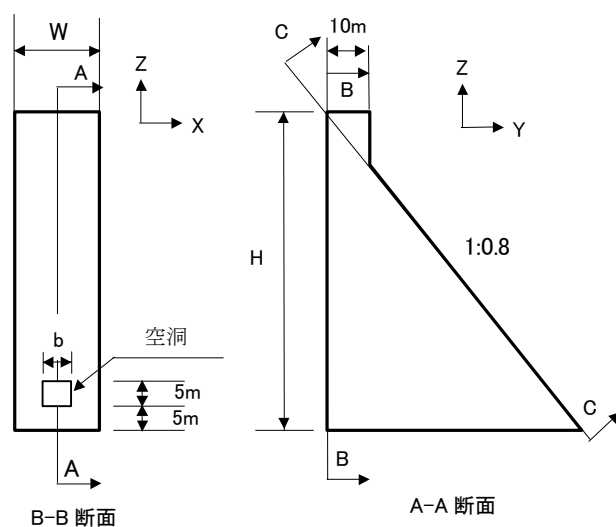


図-10 モデル形状と解析断面位置図（2次元FEM 解析：境界条件の検討）

(2) 解析方法

2次元 FEM 引継ぎ解析とした。詳細は本編 3.2.1 に記載。

(3) 物性値および荷重条件

解析に使用した材料物性値および荷重条件を表-41、表-42 に示す。

表-41 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-42 荷重条件

荷重		常時(地震あり)	常時(地震なし)※1
水平力	静水圧※2	—	—
	地震時動水圧	—	—
	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	○	○

※1 常時(地震なし)は「2):ブロック間の隙間幅」の検討時のみ考慮した。

※2 洪水調節専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

(4) 検討ケース

側方境界条件の検討として、下記の3種類の検討項目を変化させて、発生応力、変位を求めた。

検討ケース 1) ジョイント要素の剛性

検討ケース 2) ブロック間の隙間幅

検討ケース 3) 隣接ブロックの弾性係数

各境界条件に対する検討ケースを表-43～表-45に示す。

表-43 検討ケース 1) (ジョイント要素の剛性)

ケース	隙間幅 (m)	隣接ブロックの 弾性係数 (N/mm ²)	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)				本編3.3.2で のケース番号 (本編 表-11)
			面直方向 Kn		せん断方向 Ks		
Case1)-1	∞	フリー (考慮しない)	0	フリー	0	フリー	Case 1
Case1)-2			30,000	Ecと同一	0	フリー	—
Case1)-3			3,000,000	Ec×100	12,500	Ks=Ec/2 {(1+ν)}	Case 5

全て堤高80m、空洞幅7.5m

表-44 検討ケース 2) (ブロック間の隙間幅)

ケース	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)				隣接ブロックの 弾性係数(N/mm ²)	荷重条件	隣接ブロック との隙間幅	本編3.3.2で のケース番号 (本編 表-11)
	面直方向 Kn		せん断方向 Ks					
Case 2)-1	0	フリー	0	フリー	フリー (考慮しない)	常時：地震あり (自重+地震慣性力)	0mm	Case 2
Case 2)-2	0	フリー	0	フリー		常時：地震なし (自重のみ)	0.01mm	Case 3
Case 2)-3	0	フリー	0	フリー			0.1mm	Case 4
Case 2)-4	0	フリー	0	フリー			∞	Case 1

全て堤高80m、空洞幅7.5m

表-45 検討ケース 3) (隣接ブロックの弾性係数)

ケース	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)				隙間幅 (m)	隣接ブロックの弾性係数 (N/mm ²)	
	面直方向 Kn	せん断方向 Ks					
Case3)-1	0	フリー	0	フリー	∞	300,000	(Ec×10)
Case3)-2	0	フリー	0	フリー		30,000	(Ec)
Case3)-3	0	フリー	0	フリー		3,000	(Ec×0.1)
Case3)-4	0	フリー	0	フリー		300	(Ec×0.01)
Case3)-5	0	フリー	0	フリー		フリー	

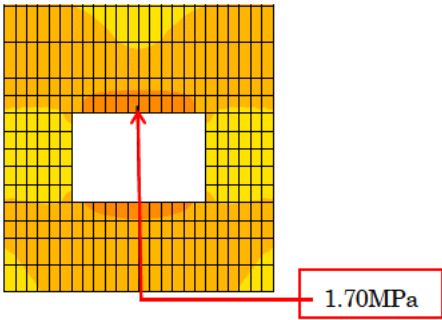
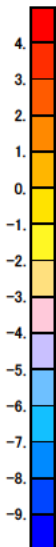
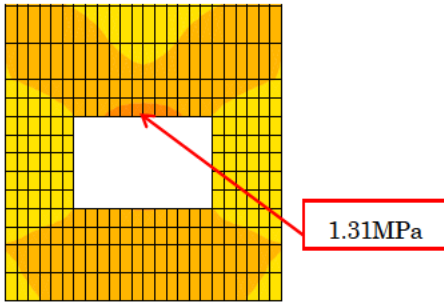
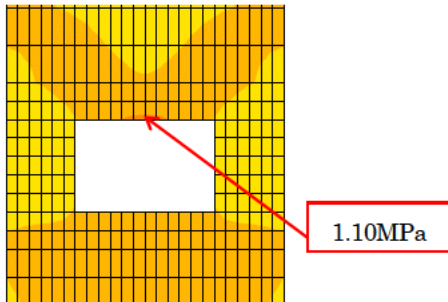
全て堤高80m、空洞幅7.5m、荷重条件は常時(地震あり)

4.2 解析結果

(1) ジョイント要素の剛性を変化させた場合（検討ケース 1）

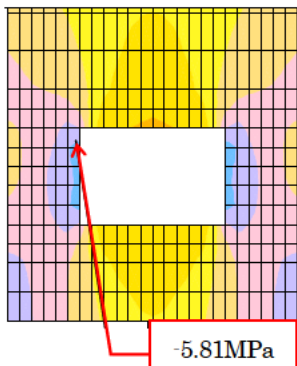
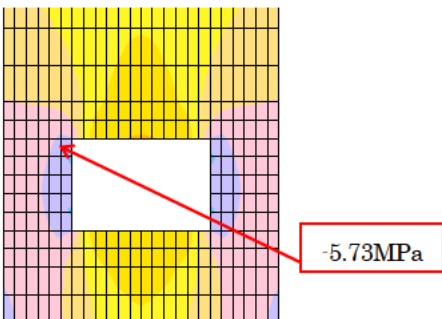
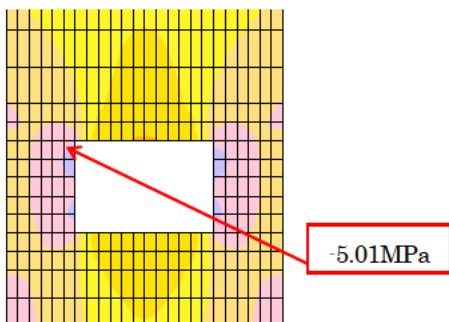
ジョイント要素の剛性を変化させた場合の解析結果を表-46～表-49 に示す。また、ジョイント要素の剛性の設定と発生応力の関係を図-11、図-12 に示す。

表-46 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力コンター（ジョイント要素の剛性の検討）

ケース	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)		σ_1 : 引張側主応力分布 ダム軸断面上流側 (B-B 断面)	
	面直方向 Kn	せん断方向 Ks		
Case 1)-1	0	0		引張  圧縮 (MPa)
Case1)-2	30,000 (Ec) [※]	0		
Case1)-3	3,000,000 (Ec × 100) [※]	12,500		
解析条件		堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件 : 常時 : 地震あり (自重+地震慣性力) 側方隙間幅 : 0.0mm		

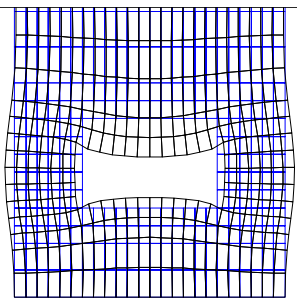
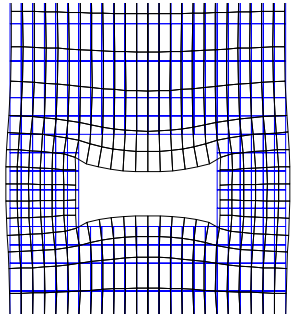
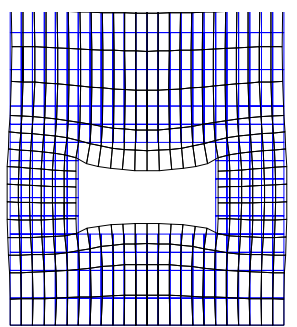
※ Ec は、コンクリートの弾性係数(30,000N/mm²)である。

表-47 上流面(B-B断面) σ_3 圧縮側主応力コンター(ジョイント要素の剛性の検討)

ケース	ジョイント要素の剛性(N/mm ²)		σ_3 : 圧縮側主応力分布 ダム軸断面上流側 (B-B 断面)	
	面直方向 Kn	せん断方向 Ks		
Case 1)-1	0	0		引張 4. 3. 2. 1. 0. -1. -2. -3. -4. -5. -6. -7. -8. -9. 圧縮 (MPa)
Case1)-2	30, 000 (Ec) [※]	0		
Case1)-3	3, 000, 000 (Ec × 100) [※]	12, 500		
解析条件		堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件 : 常時 : 地震あり (自重+地震慣性力) 側方隙間幅 : 0.0mm		

※ Ec は、コンクリートの弾性係数(30,000N/mm²)である。

表-48 上流面(B-B断面) 変形図 (ジョイント要素の剛性の検討)

ケース	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)		変形図 ダム軸断面上流側 (B-B断面)
	面直方向 Kn	せん断方向 Ks	
Case 1)-1	0	0	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.08mm 側方最大変位量 0.261mm
Case 1)-2	30,000 (Ec) [※]	0	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.02mm 側方最大変位量 0.111mm
Case 1)-3	3,000,000 (Ec×100) [※]	12,500	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.767mm 側方最大変位量 0.076mm
解析条件		堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件 : 常時:地震あり (自重+地震慣性力) 側方隙間幅: 0.0mm	

※ Ec は、コンクリートの弾性係数(30,000N/mm²)である。

表-1 上流面(B-B断面) 発生応力のまとめ
(検討ケース 1) : ジョイント要素の剛性を変化させた場合)

ケース	ジョイント要素の剛性 (N/mm ²)		σ_1 引張側主応力 (MPa)	σ_3 圧縮側主応力 (MPa)	本編3.3.2での ケース番号 (本編 表-11)
	面直方向 Kn	せん断方向 Ks			
Case 1)-1	0	0	1.70	-5.81	Case1
	フリー	フリー			
Case 1)-2	30,000	0	1.29	-5.73	—
	Ecと同一	フリー			
Case 1)-3	3,000,000	12,500	1.10	-5.01	Case5
	Ec×100	Ks=Ec/2 {(1+ ν)}			

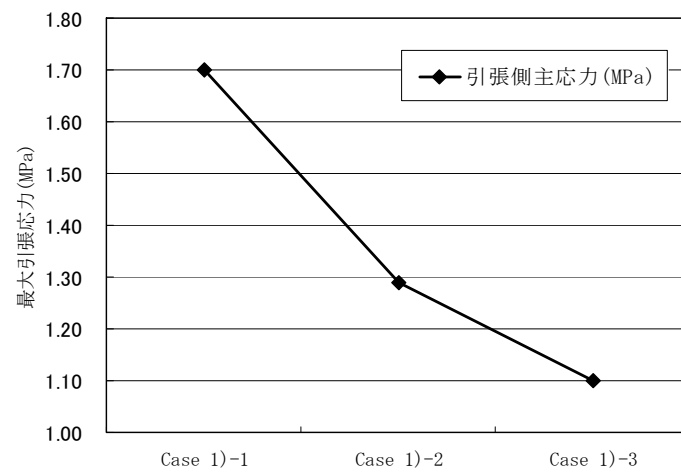


図-1 ジョイント要素の剛性を変化させた場合の設定ケースと最大引張応力の関係

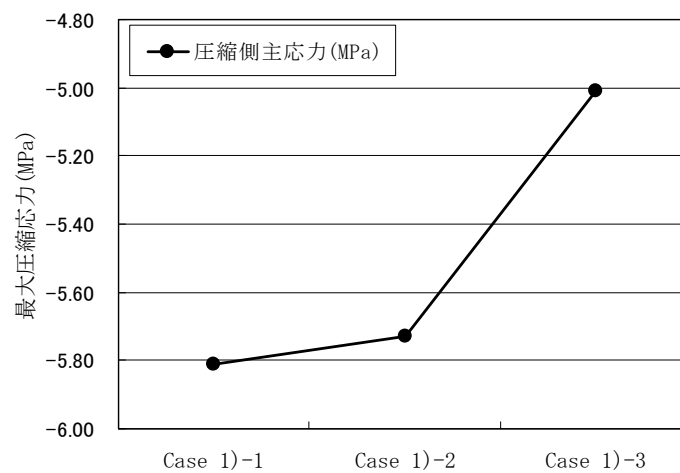


図-2 ジョイント要素の剛性を変化させた場合の設定ケースと最大圧縮応力の関係

(2) ブロック間の隙間幅を変化させた場合（検討ケース 2）

ブロック側方の隙間幅を変化させた場合の解析結果を表-50～表-53に示す。また、隙間幅と発生応力の関係を図-13、図-14に示す。

表-50 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力コンター(側方の隙間幅)

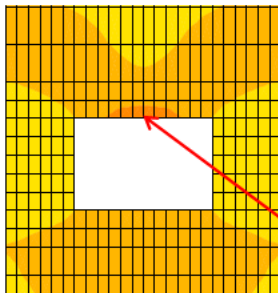
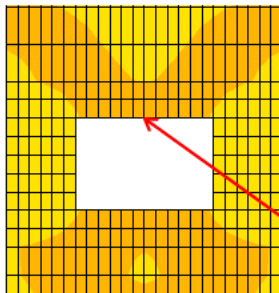
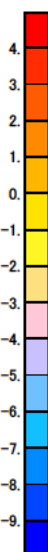
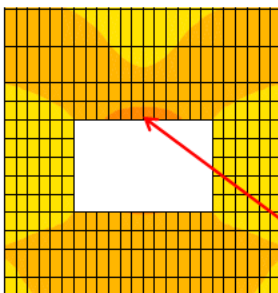
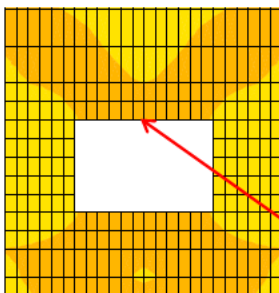
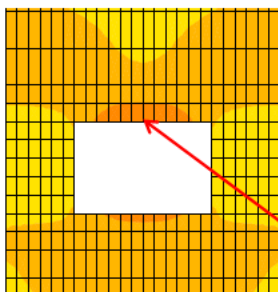
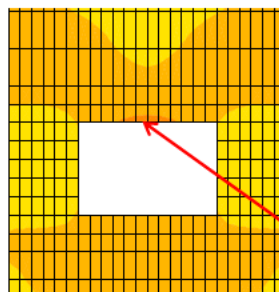
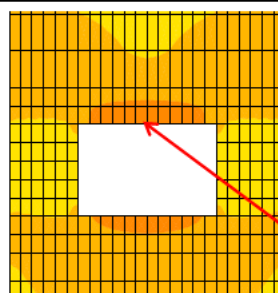
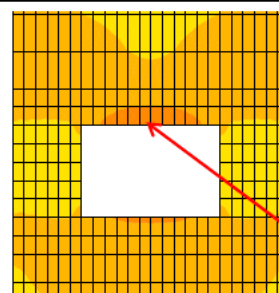
隣接ブロックとの隙間幅	地震あり	地震なし	
Case2)-1 0mm	 1.29MPa	 0.82MPa	引張  圧縮 (MPa)
Case2)-2 0.01mm	 1.31MPa	 0.86MPa	
Case2)-3 0.1mm	 1.48MPa	 1.15MPa	
Case2)-4 ∞	 1.70MPa	 1.41MPa	
解析条件	堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件 : 常時 (自重+地震慣性力ありと自重のみ(地震慣性力なし))		

表-51 上流面(B-B断面) σ_3 圧縮側主応力コンター(側方の隙間幅)

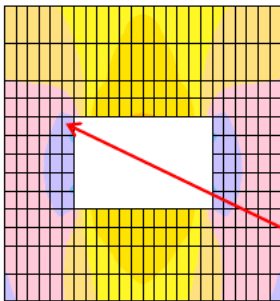
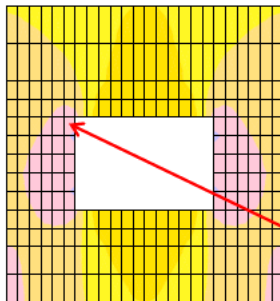
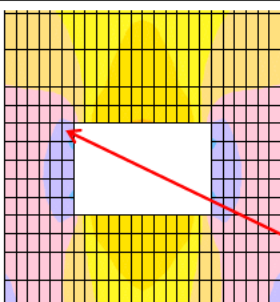
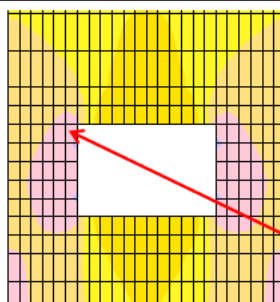
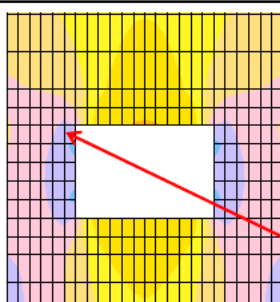
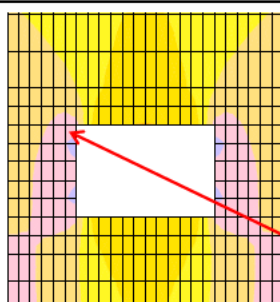
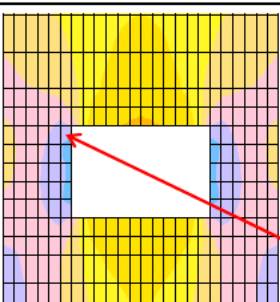
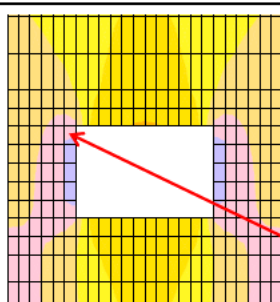
隣接ブロックとの隙間幅	地震あり	地震なし	
Case2)-1 0mm	 -5.73MPa	 -4.70MPa	引張 4. 3. 2. 1. 0. -1. -2. -3. -4. -5. -6. -7. -8. -9. 圧縮 (MPa)
Case2)-2 0.01mm	 -5.73MPa	 -4.71MPa	
Case2)-3 0.1mm	 -5.77MPa	 -4.77MPa	
Case2)-4 ∞	 -5.81MPa	 -4.82MPa	
解析条件	堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件 : 常時 (自重+地震慣性力ありと自重のみ(地震慣性力なし))		

表-52 上流面(B-B断面) 変位量 (側方の隙間幅)

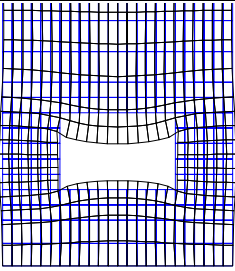
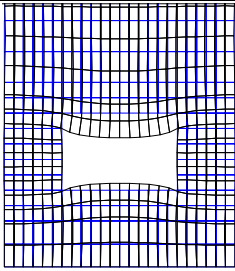
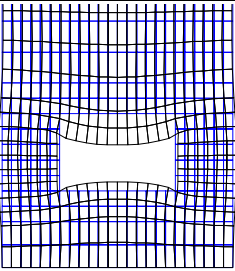
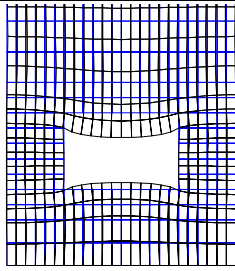
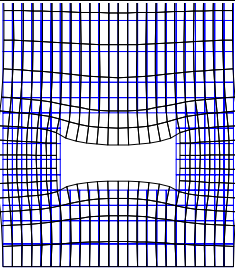
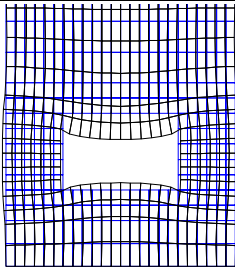
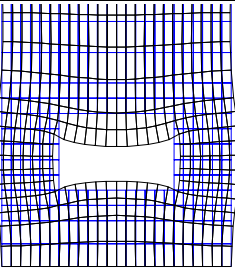
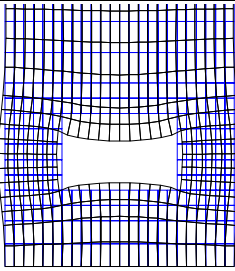
隣接ブロックとの隙間幅	地震あり	地震なし
Case2)-1 0mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.01mm 側方最大変位量 0.102mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.803mm 側方最大変位量 0.001mm
Case2)-2 0.01mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.03mm 側方最大変位量 0.109mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.808mm 側方最大変位量 0.010mm
Case2)-3 0.1mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.04mm 側方最大変位量 0.164mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.852mm 側方最大変位量 0.101mm
Case2)-4 ∞	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.08mm 側方最大変位量 0.261mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.895mm 側方最大変位量 0.215mm
解析条件	堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件: 常時 (自重+地震慣性力ありと自重のみ(地震慣性力なし))	

表-53 解析結果のまとめ（検討ケース 2）：ブロック間の隙間幅を変化させた場合）

ケース	ブロック間の隙間幅d	σ_1 ：引張側主応力 (MPa)		σ_3 ：圧縮側主応力 (MPa)		本編3.3.2での ケース番号 (本編 表-11)
		地震なし	地震あり	地震なし	地震あり	
Case 2)-1	0	0.82	1.29	-4.70	-5.73	Case 2
Case 2)-2	0.01mm	0.86	1.31	-4.71	-5.73	Case 3
Case 2)-3	0.1mm	1.15	1.48	-4.77	-5.77	Case 4
Case 2)-4	∞	1.41	1.70	-4.82	-5.81	Case 1

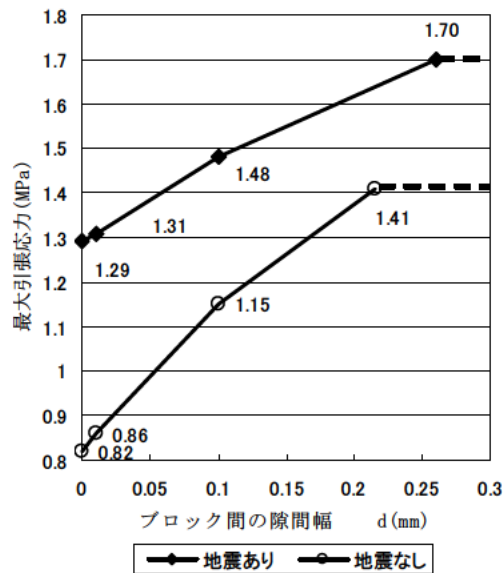


図-13 ブロック間の隙間幅と最大引張応力の関係

注) ブロック間の隙間幅 d が、側方境界フリー条件における解析での側方変位量の最大値（地震ありの場合は 0.26mm、地震なしの場合は 0.22mm）以上の時は、側方境界の拘束状態はフリー条件と同等となるので、d がそれ以上のときは、発生応力に変化は生じない。図-14 も同様。

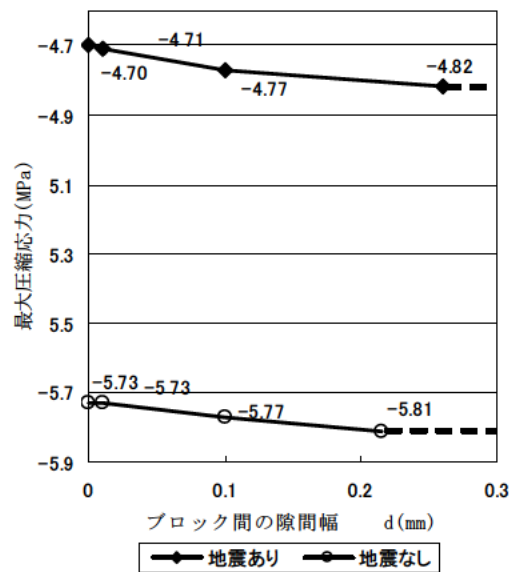
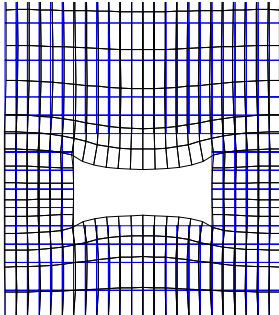
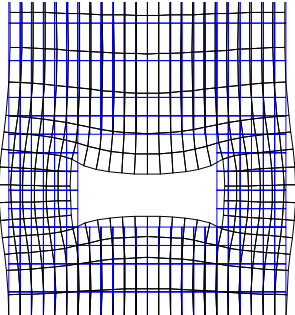
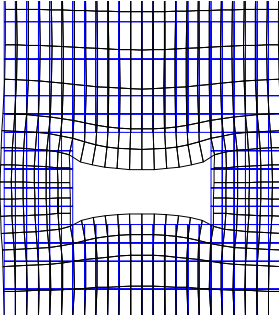
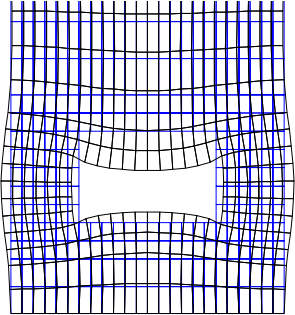
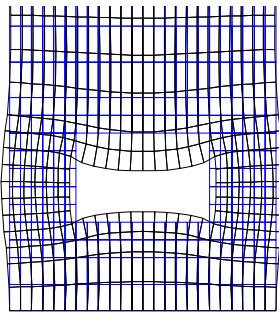


図-14 ブロック間の隙間幅と最大圧縮応力の関係

(3) 隣接ブロックの弾性係数を変化させた場合（検討ケース 3）

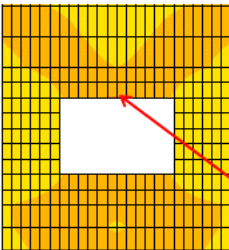
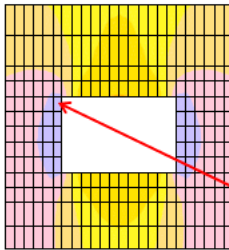
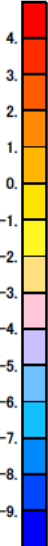
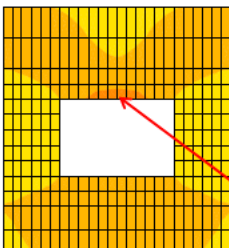
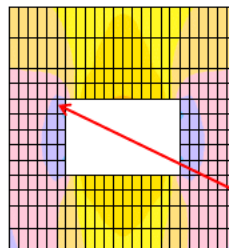
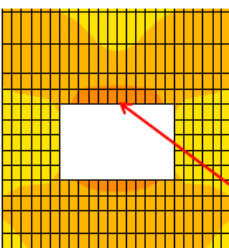
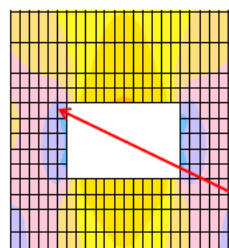
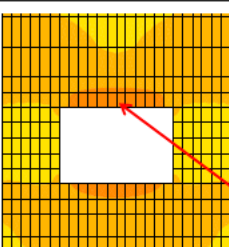
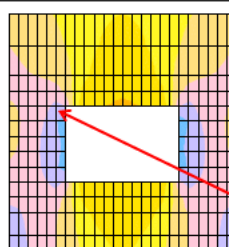
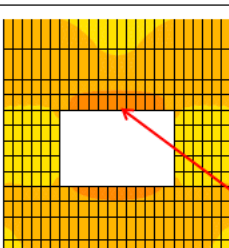
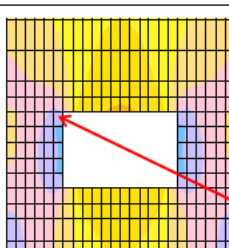
隣接ブロックの弾性係数を変化させた場合の解析結果を表-54～表-56 に示す。また、隣接ブロックの弾性係数と発生応力の関係を図-15、図-16 に示す。

表-54 上流面(B-B断面) 変形図(隣接ブロックの弾性係数)

隣接ブロックの 弾性係数 (N/mm ²)	変形図 ダム軸断面上流側(B-B断面)	隣接ブロック の弾性係数 (N/mm ²)	変形図 ダム軸断面上流側(B-B断面)
Case 3)-1 300,000 ($E_c \times 10$)※	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.974mm 側方最大変位量 0.016mm	Case 3)-4 300 ($E_c \times 0.01$)※	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.08mm 側方最大変位量 0.257mm
Case 3)-2 30,000 (E_c)※	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.01mm 側方最大変位量 0.102mm	Case 3)-5 フリー (考慮しない)	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.08mm 側方最大変位量 0.261mm
Case 3)-3 3,000 ($E_c \times 0.1$)※	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.06mm 側方最大変位量 0.226mm		
解析条件	堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件: 常時 地震あり (自重+地震慣性力) 隣接ブロックとの隙間幅: 0mm		

※ E_c は、コンクリートの弾性係数(30,000N/mm²)である。

表-55 上流面(B-B断面) σ_1 引張側主応力・ σ_3 圧縮側主応力コンター(隣接ブロックの弾性係数)

隣接ブロックの弾性係数 (N/mm ²)	σ_1 : 引張側主応力分布 ダム軸断面上流側(B-B断面)	σ_3 : 圧縮側主応力分布 ダム軸断面上流側(B-B断面)	
Case 3)-1 300,000 ($E_c \times 10$)※			引張  圧縮 (MPa)
Case 3)-2 30,000 (E_c)※			
Case 3)-3 3,000 ($E_c \times 0.1$) ※			
Case 3)-4 300 ($E_c \times 0.01$)※			
Case 3)-5 フリー (考慮しない)			
解析条件	堤高 : 80m 空洞幅 : 7.5m 荷重条件: 常時 地震あり (自重+地震慣性力) 隣接ブロックとの隙間幅: 0mm		

※ E_c は、コンクリートの弾性係数(30,000N/mm²)である。

表-56 隣接ブロックの剛性を変化させた場合の最大発生応力（検討ケース 3）

ケース	隣接ブロックの剛性 (N/mm ²)	σ_1 引張側主応力 (MPa)	σ_3 圧縮側主応力 (MPa)
Case3)-1	300, 000 ($E_c \times 10$)	1. 04	-5. 68
Case3)-2	30, 000 (E_c)	1. 29	-5. 73
Case3)-3	3, 000 ($E_c \times 0. 1$)	1. 62	-5. 79
Case3)-4	300 ($E_c \times 0. 01$)	1. 69	-5. 81
Case3)-5	フリー	1. 70	-5. 81

※ E_c : コンクリートの弾性係数(30, 000 N/mm²)

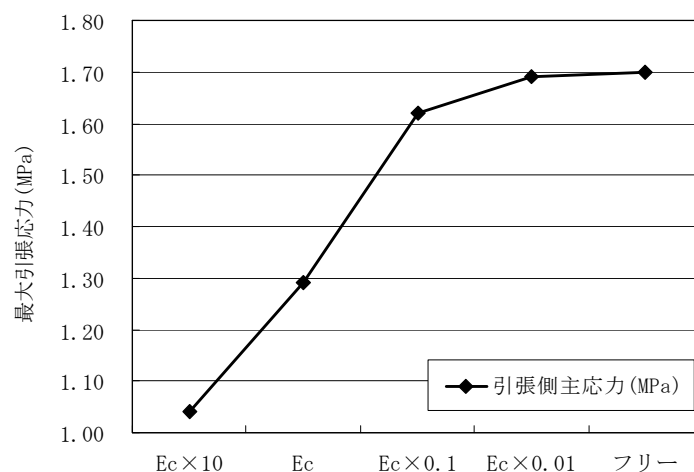


図-15 隣接ブロックの弾性係数を変化させた場合の弾性係数と最大引張応力の関係

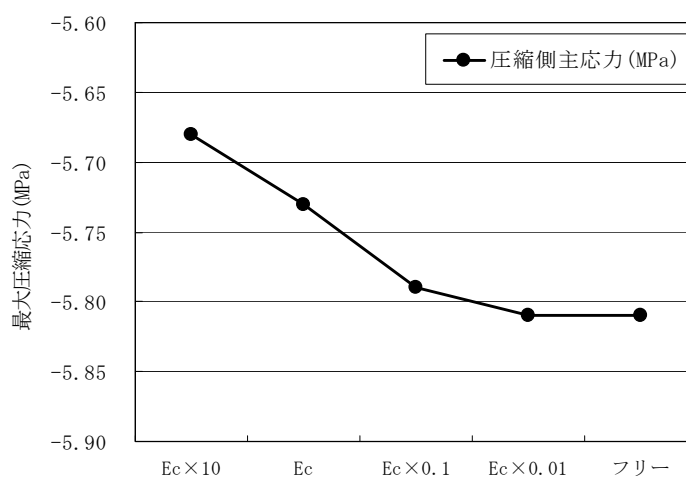


図-16 隣接ブロックの弾性係数を変化させた場合の弾性係数と最大圧縮応力の関係

5. 2次元FEM 引継ぎ解析（堤高 80m 1ブロックモデル 上流面勾配を設けた場合）

5.1 解析条件

(1) 解析モデル

上流面勾配が鉛直の直角三角形形状断面のダムモデルに対し、現在計画中の洪水調節専用(流水型)ダムの設計断面形状の事例を参考にして、上流面勾配 1:0.12 とし、堤高 80m、1 ブロック幅 15m の 2 次元モデルを用いて 2 次元 FEM 引継ぎ解析を行った。

解析モデルの諸元を表-57、概要図を図-17、メッシュ図を図-18 に示す。解析評価断面は、他の 2 次元 FEM 引継ぎ解析の検討の結果から、発生応力が大きくなるダム上流面（B1-B1 断面及び B2-B2 断面）のみを対象とした。

表-57 解析モデルの主要諸元（2次元 FEM 解析：上流面勾配あり）

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
b/W	1/3	1/2	2/3

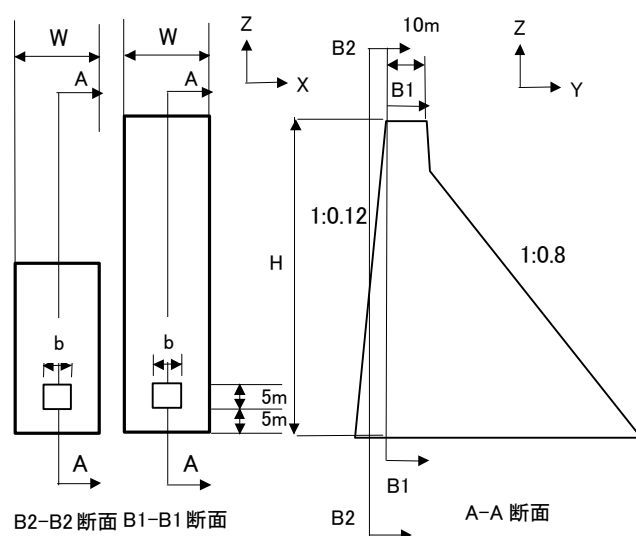


図-17 モデル形状と解析断面位置図（2次元 FEM 解析：上流面勾配あり）

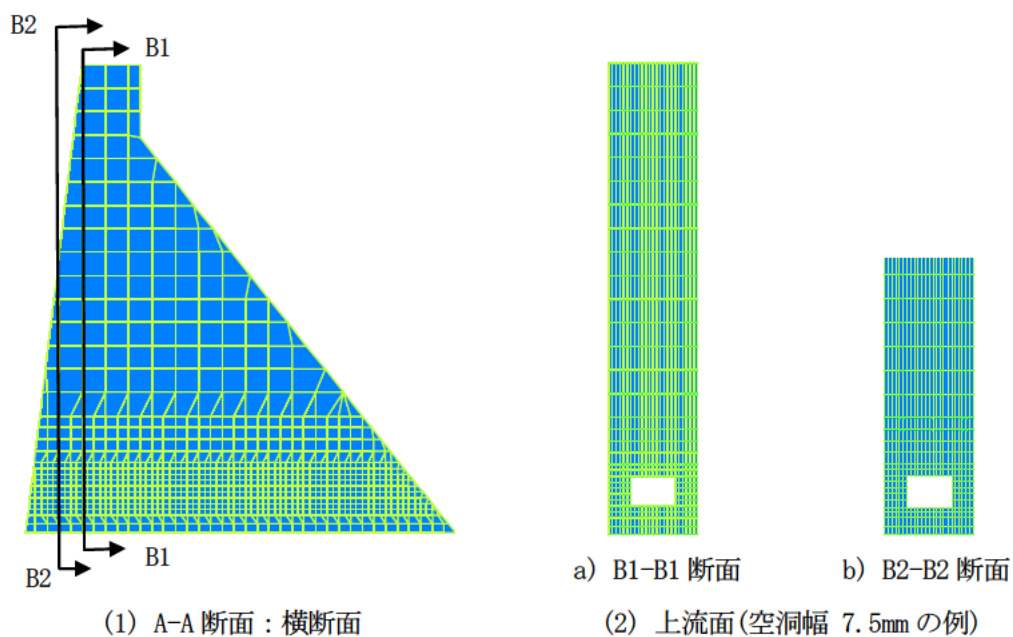


図-18 解析モデルメッシュ図（２次元 FEM 解析：上流面勾配あり）

(2) 解析方法

２次元 FEM 引継ぎ解析とした。詳細は本編 3.2.1 に記載。

(3) 物性値および荷重条件

解析に使用した材料物性値および荷重条件を表-58、表-59 に示す。

表-58 物性値（２次元 FEM 解析：上流面勾配あり）

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-59 荷重条件（２次元 FEM 解析：上流面勾配あり）

荷重		常時(地震あり)	常時(地震なし)
水平力	静水圧※1	—	—
	地震時動水圧	—	—
	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	○	○

※1 治水専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

5.2 解析結果

堤体上流面に勾配を設けたモデルによる解析結果を表-60～表-68 に示す。また、堤体上流面に勾配を設けたモデルと鉛直モデルの発生応力の関係を図-19、安全率の比較を図-20 に示す。

表-60 A-A断面 常時・地震時 応力コンター (堤高 80m の場合)

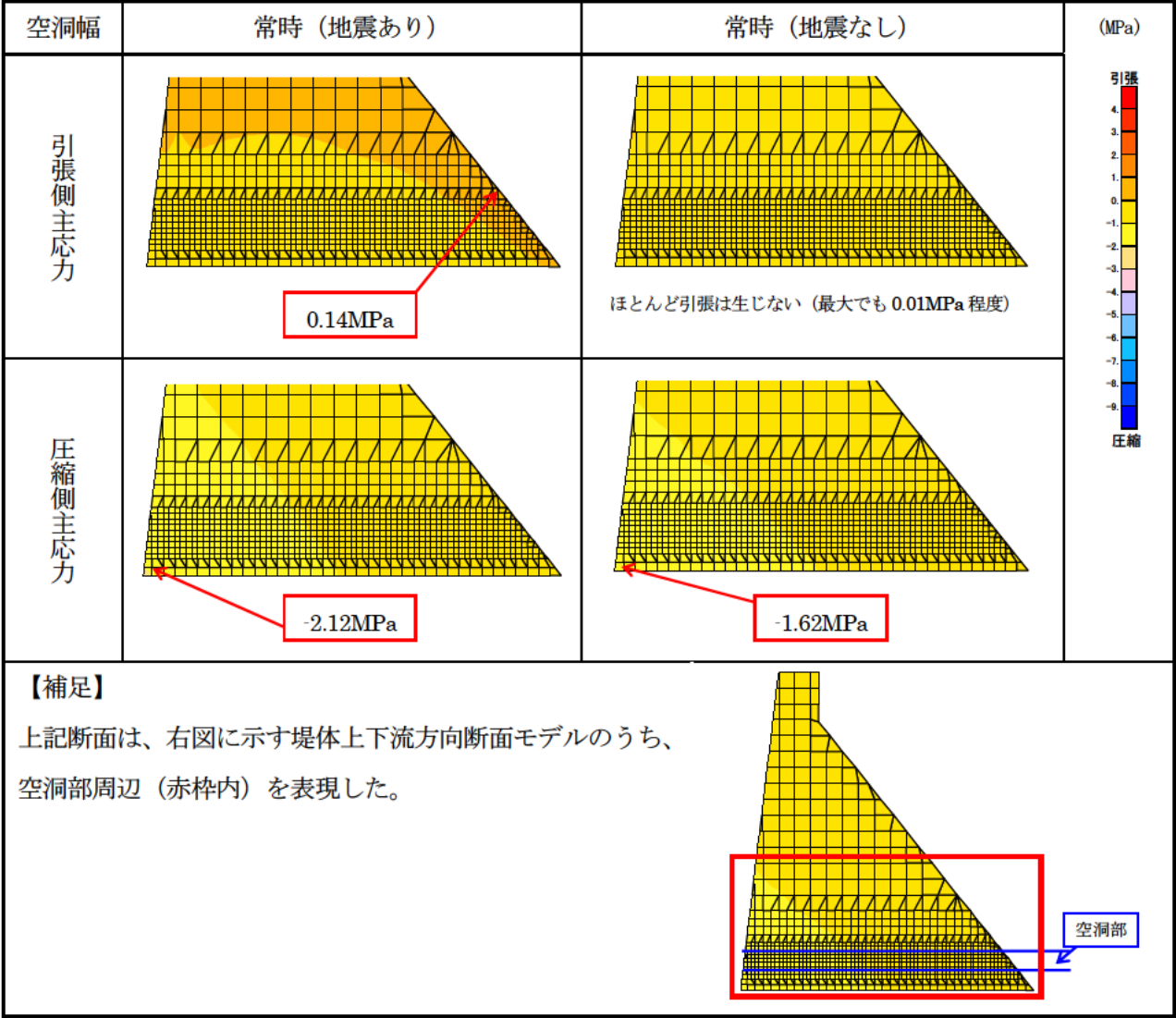


表-61 堤高 80m 上流面 (B1-B1 断面) σ_1 引張側主応力コンター

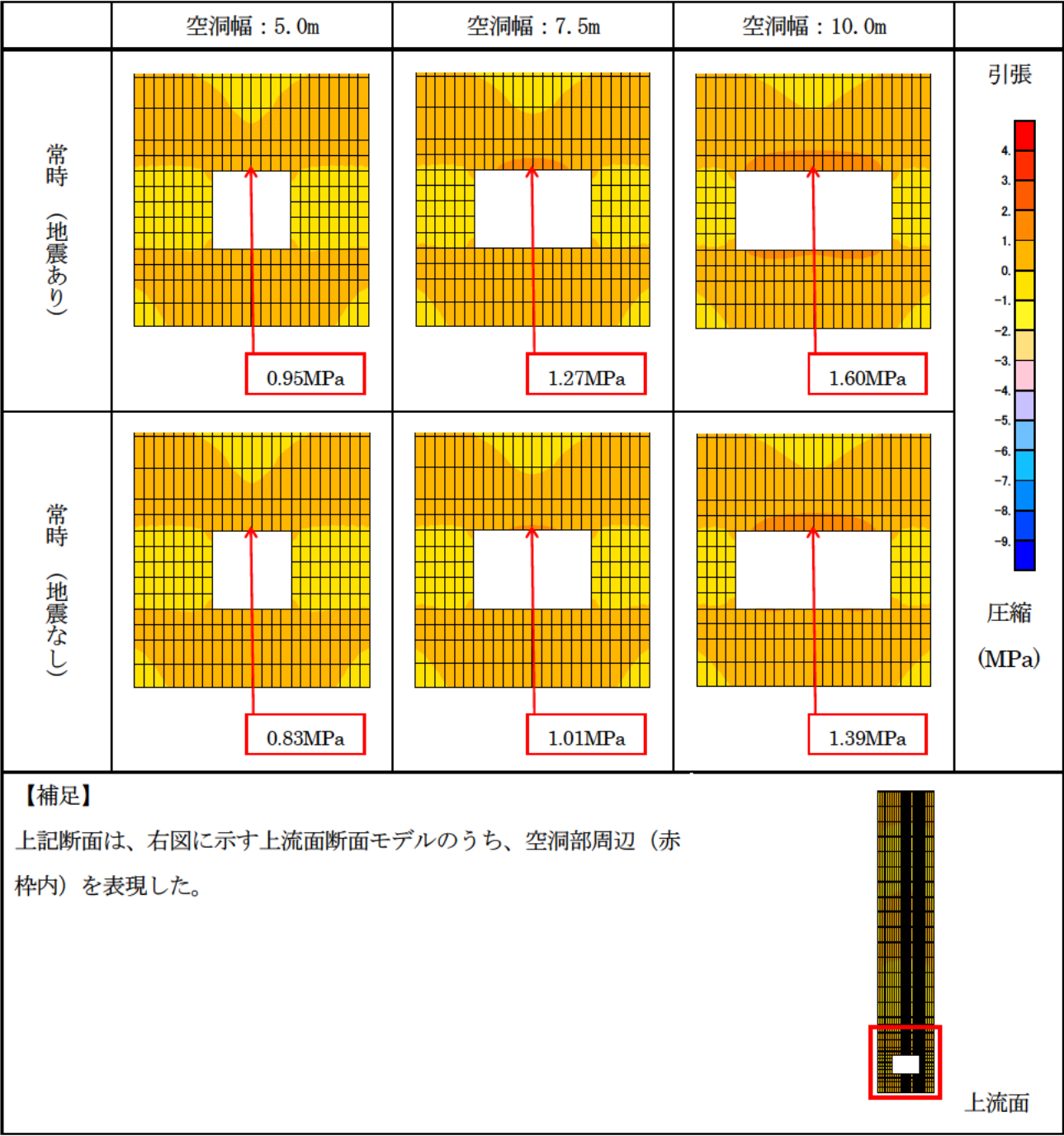


表-62 堤高 80m 上流面 (B1-B1 断面) σ_3 圧縮側主応力コンター

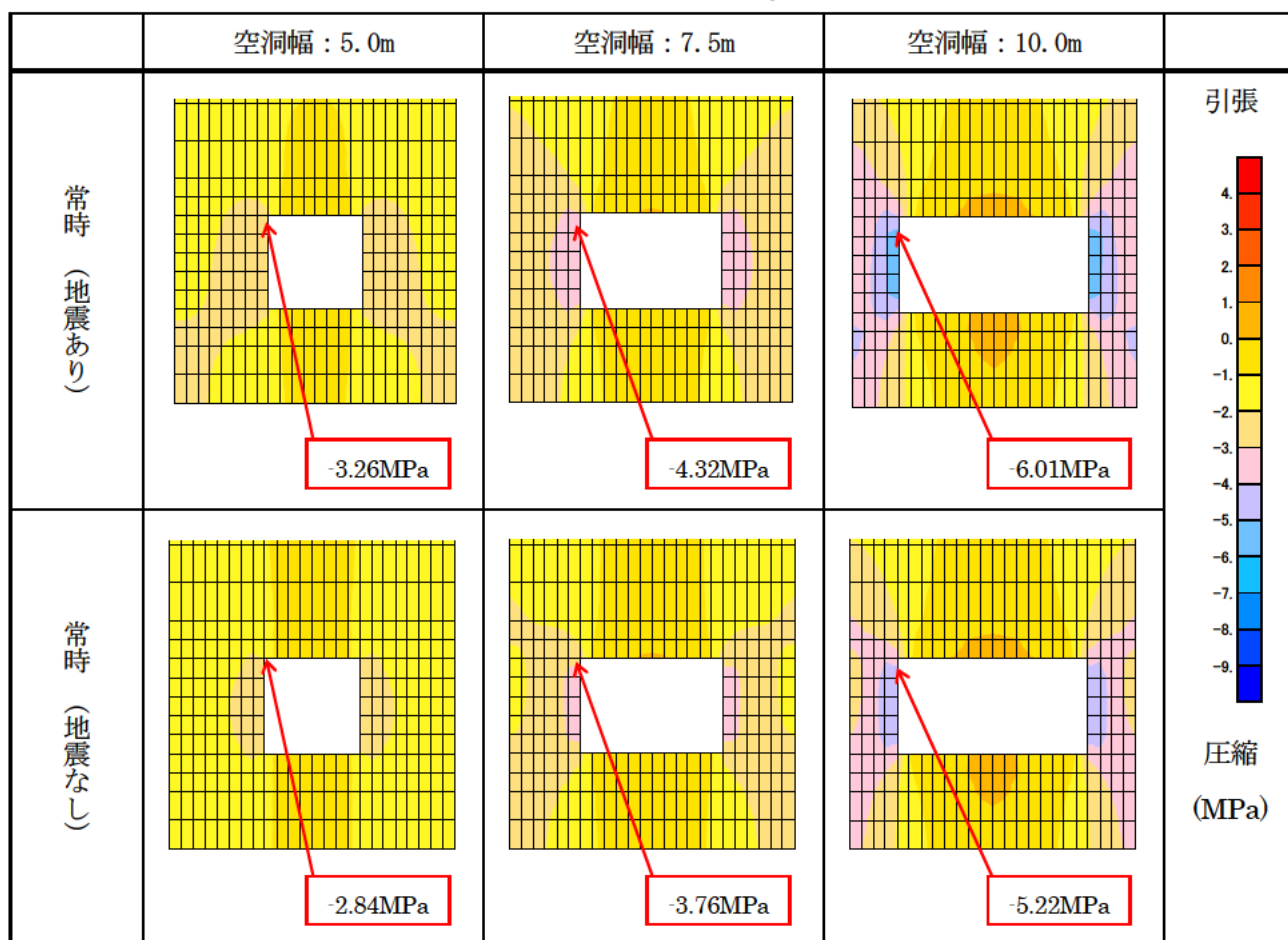


表-63 堤高 80m 上流面(B1-B1 断面) 変形図

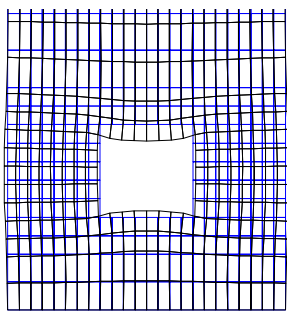
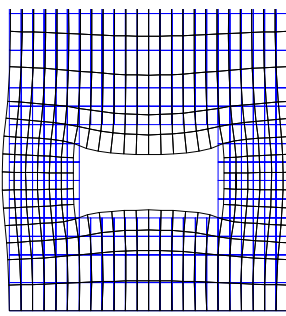
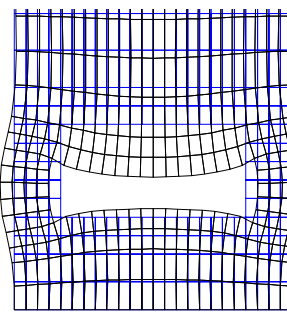
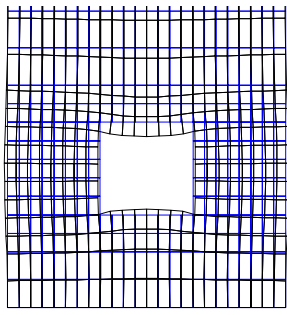
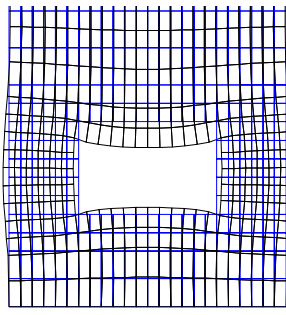
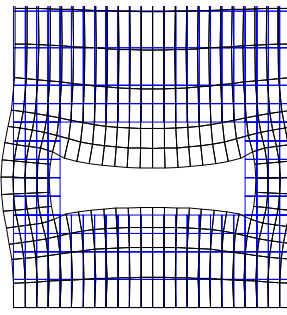
	空洞幅：5.0m	空洞幅：7.5m	空洞幅：10.0m
常時 (地震あり)	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.442mm 側方最大変位 0.096mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.803mm 側方最大変位 0.193mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.42mm 側方最大変位 0.384mm
常時 (地震なし)	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.385mm 側方最大変位 0.083mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.699mm 側方最大変位 0.168mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.23mm 側方最大変位 0.334mm

表-64 堤高 80m 上流面 (B2-B2 断面) σ_1 引張側主応力コンター

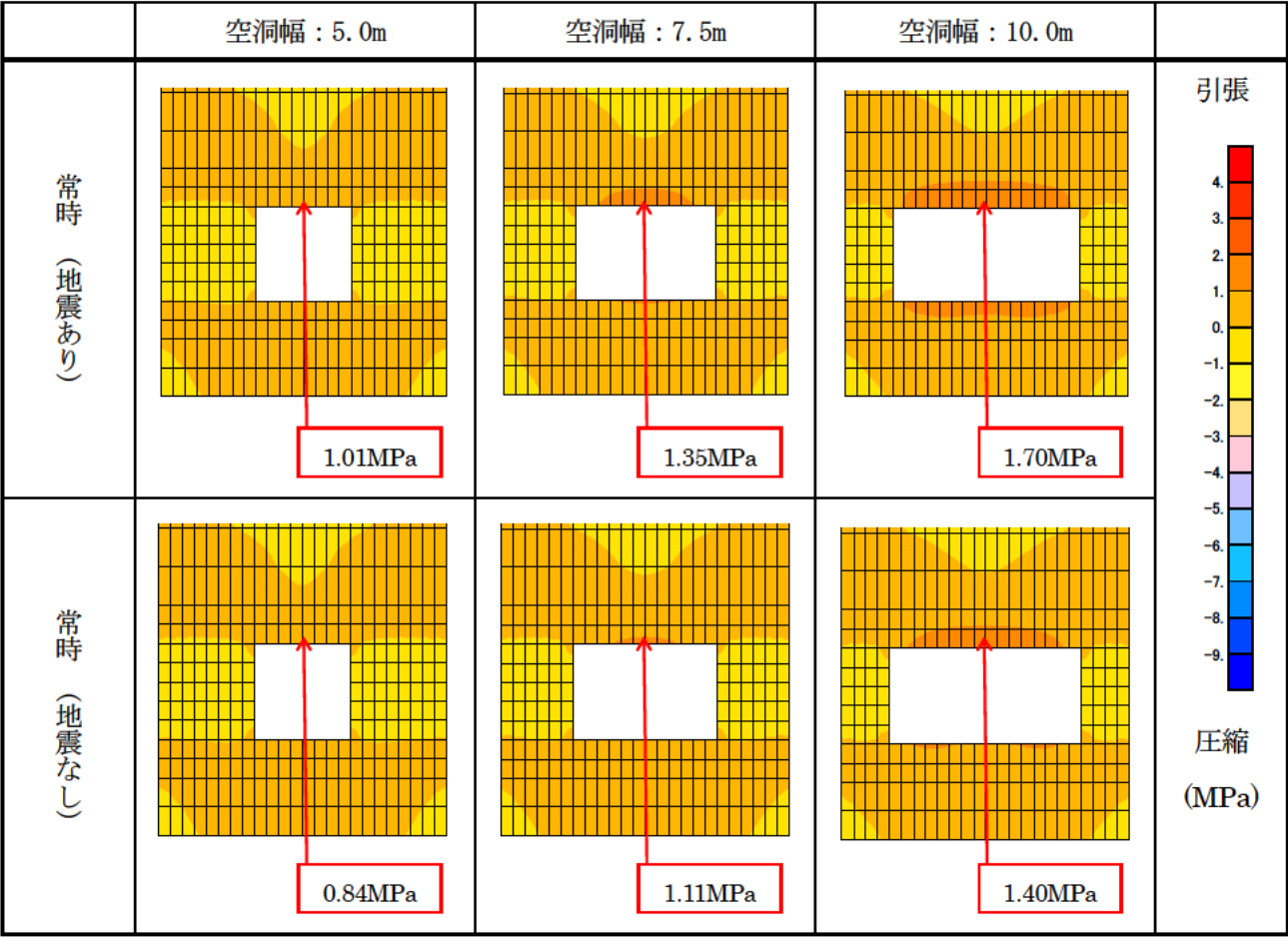


表-65 堤高 80m 上流面 (B2-B2 断面) σ_3 圧縮側主応力コンター

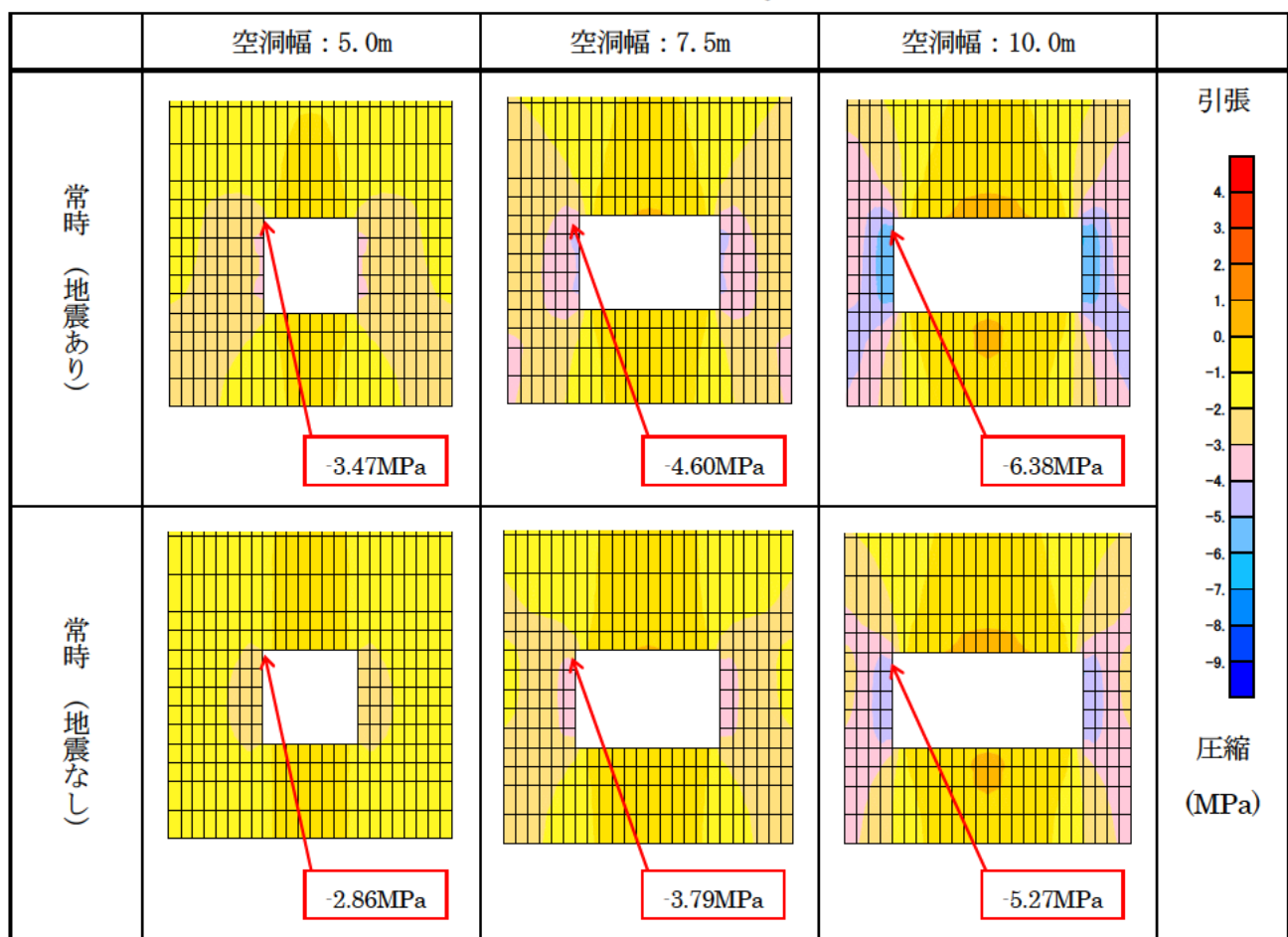


表-66 堤高 80m 上流面(B2-B2 断面) 変形図

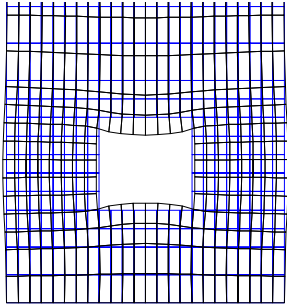
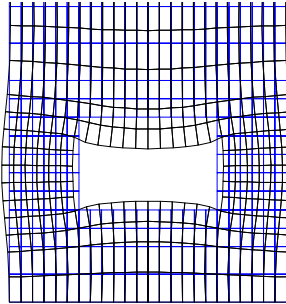
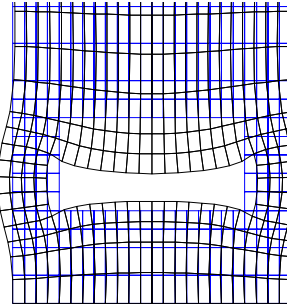
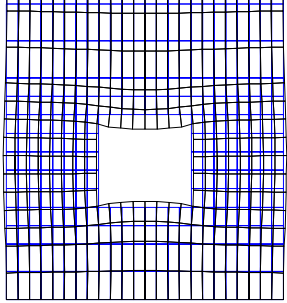
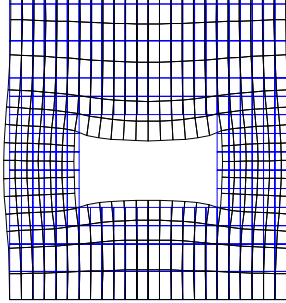
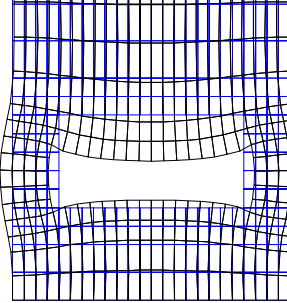
	空洞幅：5.0m	空洞幅：7.5m	空洞幅：10.0m
常時 (地震あり)	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.470mm 側方最大変位 0.102mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.853mm 側方最大変位 0.205mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.51 mm 側方最大変位 0.409mm
常時 (地震なし)	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.388mm 側方最大変位 0.084mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 0.704mm 側方最大変位 0.169mm	 空洞上縁中央部最大鉛直変位量 1.24mm 側方最大変位 0.338mm

表-67 解析結果一覧（上流面勾配の影響検討）

(1) 常時(地震あり：自重＋地震時慣性力)

堤高 H(m)	ブロック幅 W(m)	上流勾配	評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力 (MPa)	安全率
80	15	無し (鉛直)	ダム軸 B1-B1断面	5.0	1.28	2.44
				7.5	1.70	1.84
				10.0	2.15	1.45
		1:0.12		5.0	0.95	3.28
				7.5	1.27	2.46
				10.0	1.60	1.95
			ダム軸 B2-B2断面	5.0	1.01	3.09
				7.5	1.35	2.31
				10.0	1.70	1.84

地震時引張強度=3.12N/mm²：地震時割増30%を見込む

(2) 常時(地震なし：自重のみ)

堤高 H(m)	ブロック幅 W(m)	上流勾配	評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力 (MPa)	安全率
80	15	無し (鉛直)	ダム軸 B1-B1断面	5.0	1.06	2.26
				7.5	1.41	1.70
				10.0	1.78	1.35
		1:0.12		5.0	0.83	2.89
				7.5	1.10	2.18
				10.0	1.39	1.73
			ダム軸 B2-B2断面	5.0	0.84	2.86
				7.5	1.11	2.16
				10.0	1.4	1.71

引張強度=2.4N/mm²

(3) 安全率の比較

堤高 H(m)	ブロック幅 W(m)	上流勾配	評価断面	空洞幅 b(m)	安全率		
					①地震あり	②地震なし	比率(①/②)
80	15	無し (鉛直)	ダム軸 B1-B1断面	5.0	2.44	2.26	1.08
				7.5	1.84	1.70	1.08
				10.0	1.45	1.35	1.07
		1:0.12		5.0	3.28	2.89	1.13
				7.5	2.46	2.18	1.13
				10.0	1.95	1.73	1.13
			ダム軸 B2-B2断面	5.0	3.09	2.86	1.08
				7.5	2.31	2.16	1.07
				10.0	1.84	1.71	1.08

表-68 上流面勾配の違いによる発生引張応力の比較

常時(地震あり：自重＋地震時慣性力)

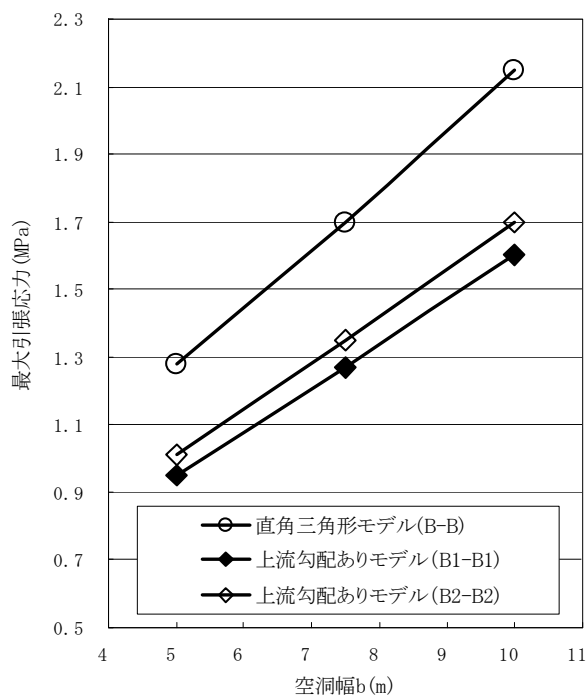
評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力(MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし (鉛直)	②上流面勾配あり (1:0.12)	
①B-B断面 (上流面)	5.0	1.28	0.95	26%
②B1-B1断面 (ダム軸)	7.5	1.70	1.27	25%
	10.0	2.15	1.60	26%

評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力(MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし (鉛直)	②上流面勾配あり (1:0.12)	
①B-B断面 (上流面)	5.0	1.28	1.01	21%
②B2-B2断面 (ダム軸)	7.5	1.70	1.35	21%
	10.0	2.15	1.70	21%

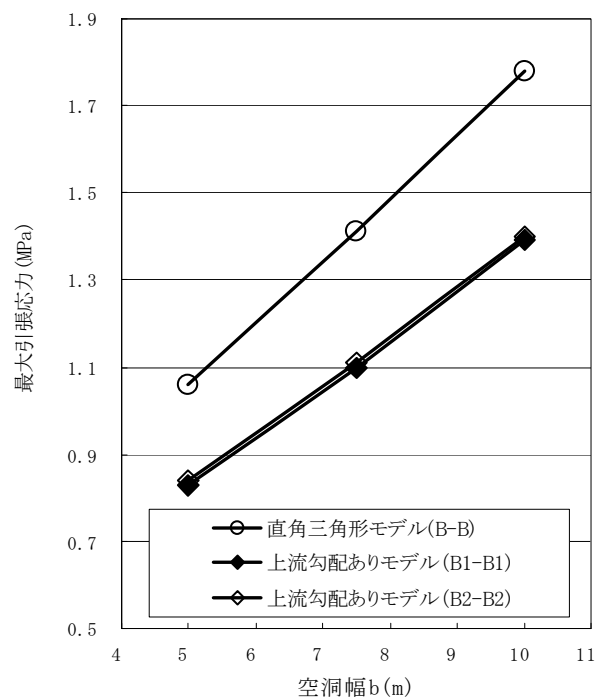
常時(地震なし：自重のみ)

評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力(MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし (鉛直)	②上流面勾配あり (1:0.12)	
①B-B断面 (上流面)	5.0	1.06	0.83	22%
②B1-B1断面 (ダム軸)	7.5	1.41	1.10	22%
	10.0	1.78	1.39	22%

評価断面	空洞幅 b(m)	引張応力(MPa)		(①-②)/①
		①上流面勾配なし (鉛直)	②上流面勾配あり (1:0.12)	
①B-B断面 (上流面)	5.0	1.06	0.84	21%
②B2-B2断面 (ダム軸)	7.5	1.41	1.11	21%
	10.0	1.78	1.40	21%

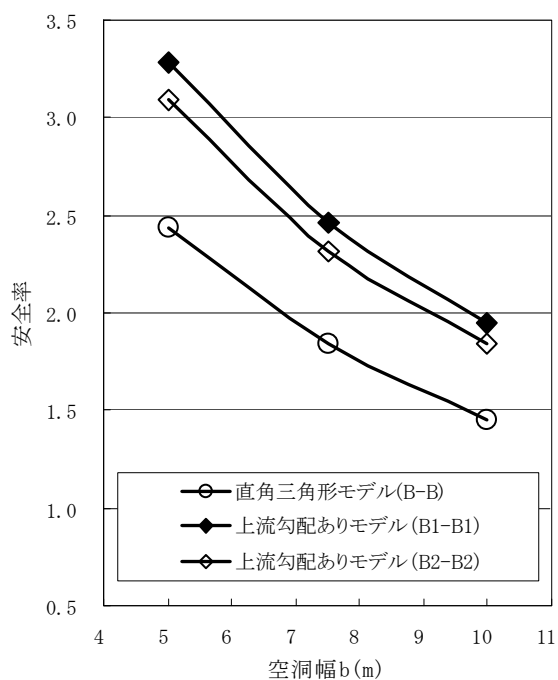


(1) 常時(地震あり：自重＋地震時慣性力)



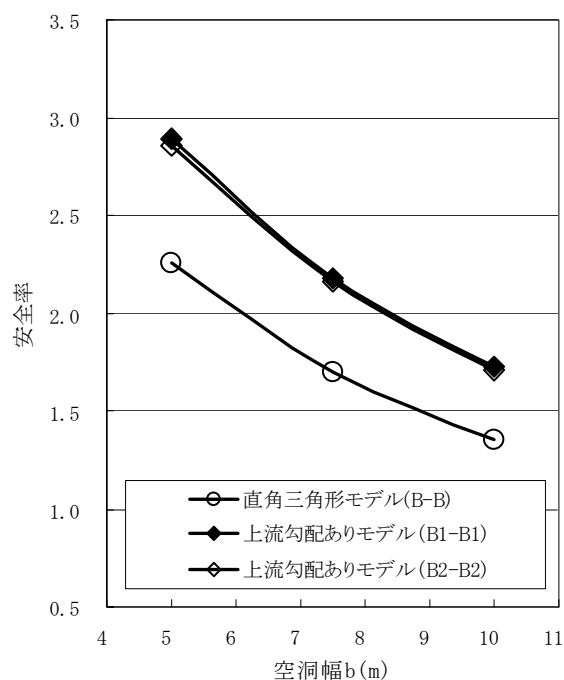
(2) 常時(地震なし：自重のみ)

図-19 上流面勾配の有無による最大引張応力の比較



(1) 常時(地震あり：自重＋地震時慣性力)

(地震時引張強度=3.12N/mm²：地震時割増30%を見込む)



(2) 常時(地震なし：自重のみ)

(地震時引張強度=2.4N/mm²：地震時割増30%は見込まない)

図-20 上流面勾配の違いによる最大引張応力の安全率評価

6. 3次元FEM解析（堤高80m 1ブロックモデル）

6.1 解析条件

(1) 解析モデル

堤高 80m、1 ブロック幅 15m としたブロックの 3次元モデルを用いて、空洞幅をパラメータとした 3次元 FEM 解析を行った。解析モデルの諸元を表-69、概要図を図-21、解析モデルのメッシュ図を図-22 に示す。

なお、評価断面は、上下流方向：2 断面（a 断面, b 断面）、ダム軸方向：2 断面（1 断面, 2 断面）とした（図-23）。

表-69 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)	15m		
空洞幅 (b)	5.0m	7.5m	10.0m
b/W	1/3	1/2	2/3
境界条件	底面：固定，側方：フリー		

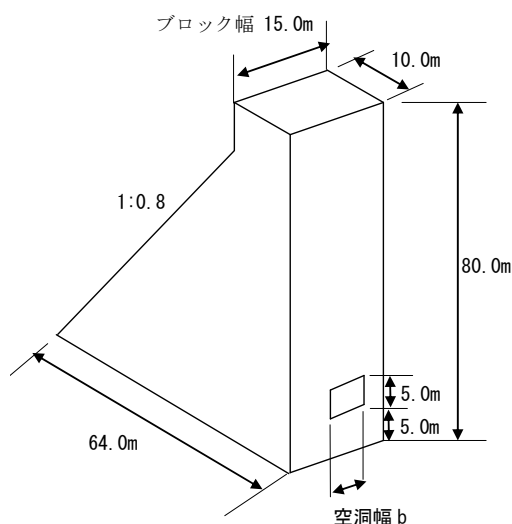
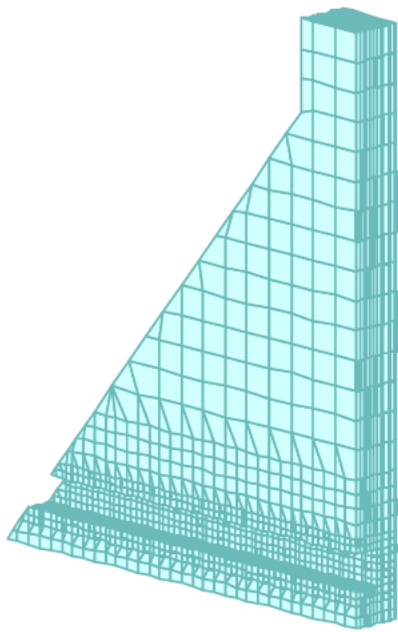
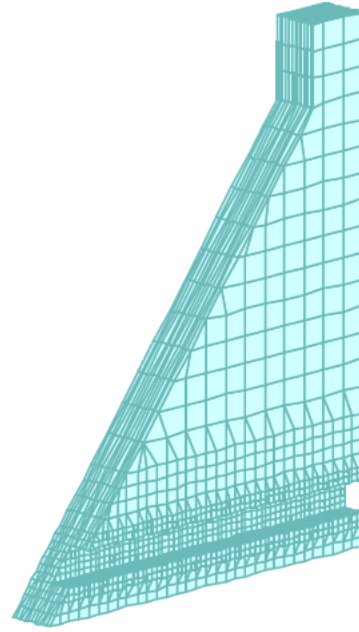


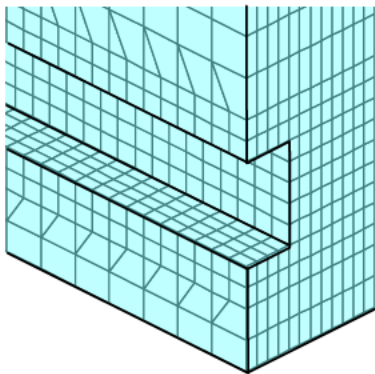
図-21 モデル形状の概要図（3次元FEM解析）



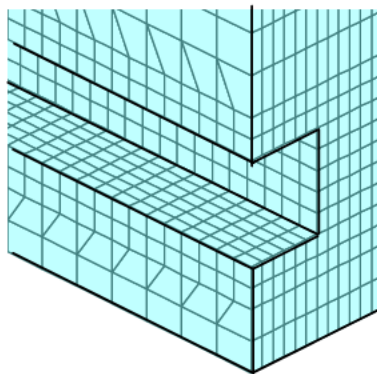
(1) 解析モデル全体(上流面側より望む)
(空洞幅 7.5m の例)



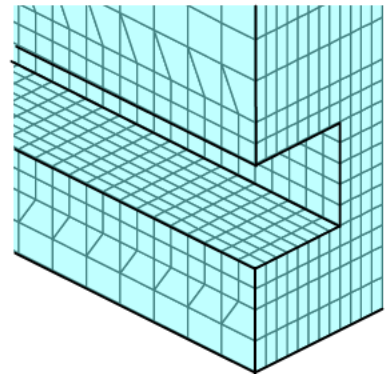
(2) 解析モデル全体(下流面側より望む)
(空洞幅 7.5m の例)



(3) 空洞部拡大
空洞幅 5.0m



(4) 空洞部拡大
空洞幅 7.5m



(5) 空洞部拡大
空洞幅 10m

図-22 解析モデル メッシュ図 (堤高 80m)

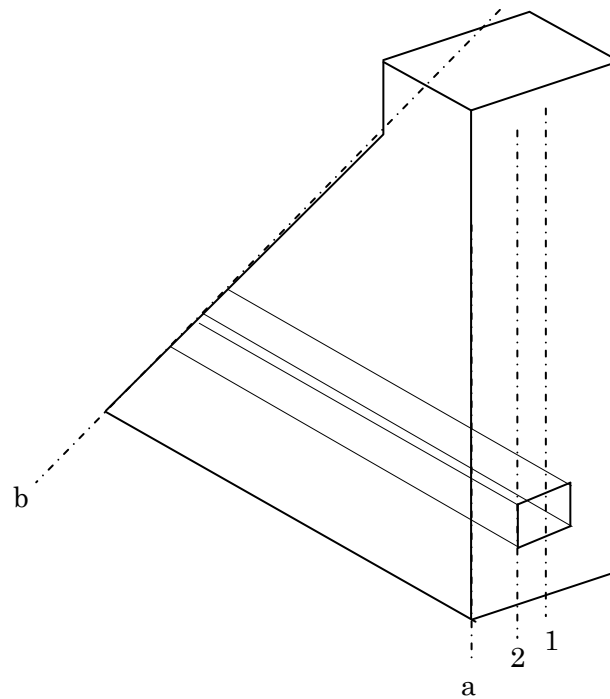


図-23 解析モデルの評価断面位置図（3次元 FEM 解析）

(2) 物性値および荷重条件

解析に使用した材料物性値を表-2 に、荷重条件を表-3 に示す。

表-70 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-71 荷重条件

荷重		常時(空虚)	洪水時(SWL:H-5m)
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 洪水調節専用ダムのため、常時は貯水池空虚である。

※2 Westergaard 式による。

6.2 解析結果

堤高 80m モデルの 3 次元 FEM 解析結果を表-72～表-79 に示す。また、空洞部上縁部の最大引張応力分布を表-80、図-24 に示す。

表-72 1断面 σ_1 引張側主応力コンター

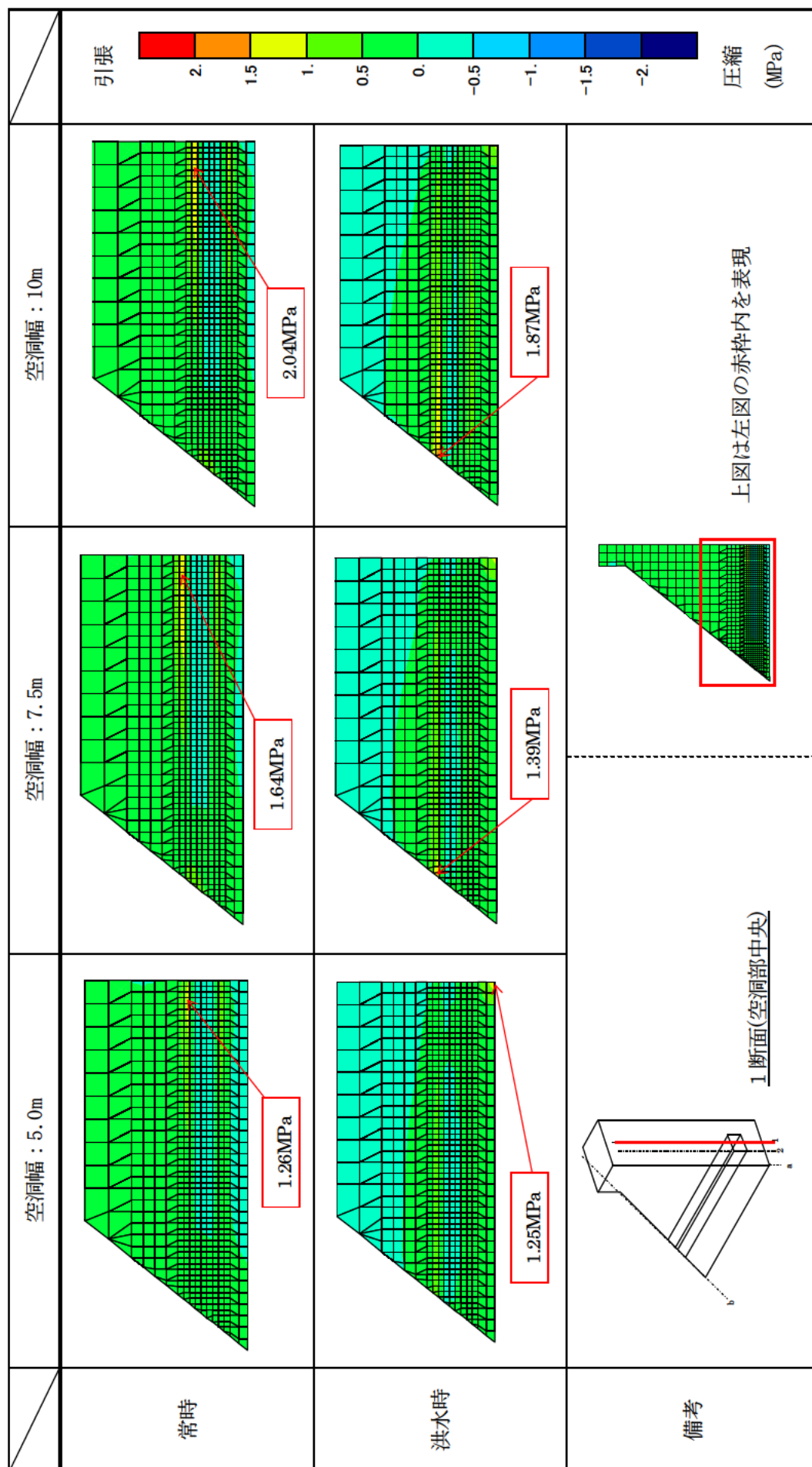


表-73 1断面 σ_3 圧縮側主応力コンター

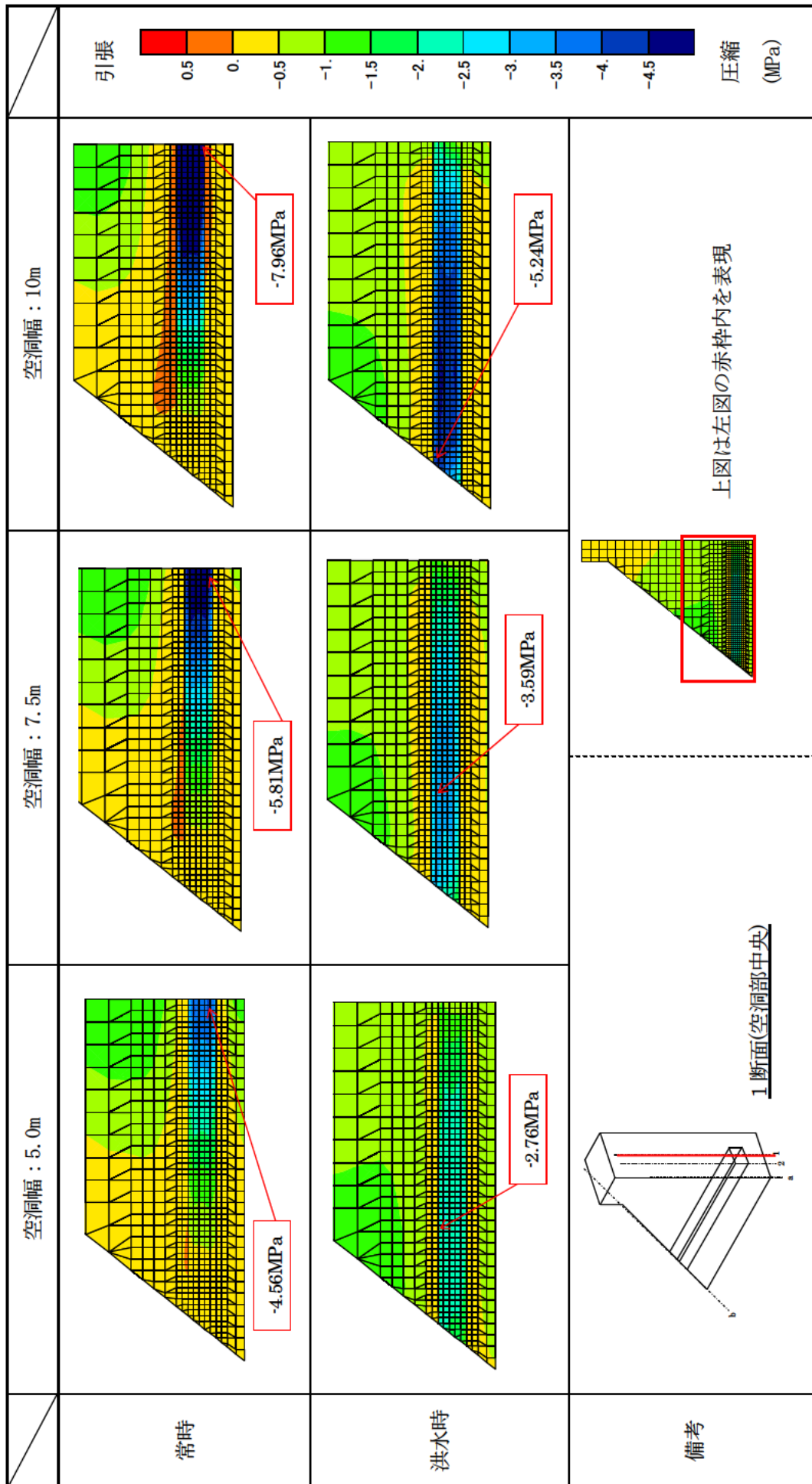


表-74 2断面 σ_1 引張側主応力コンター

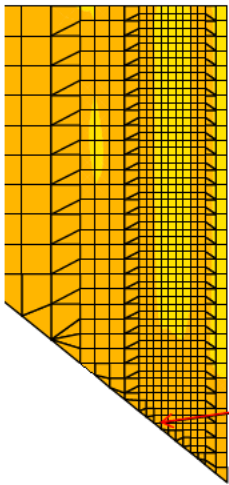
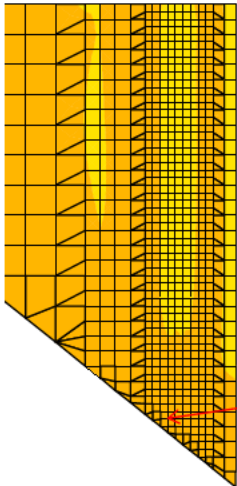
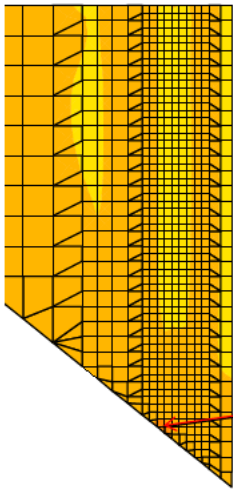
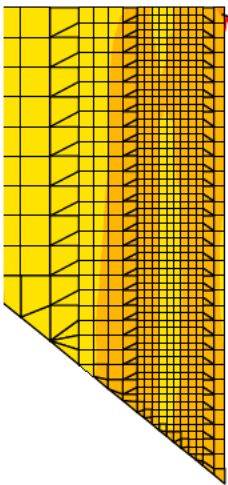
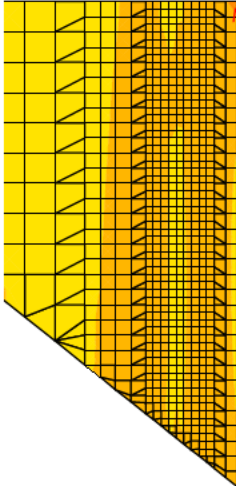
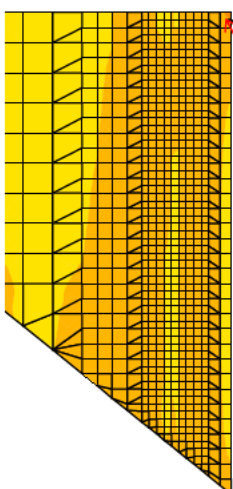
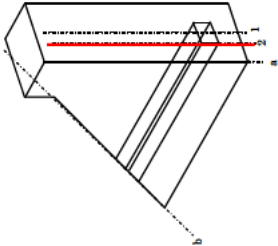
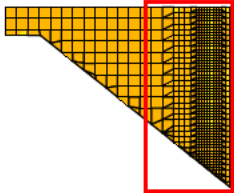
	空洞幅：5.0m	空洞幅：7.5m	空洞幅：10m	引張 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 圧縮 (MPa)
常時	 0.59MPa	 0.86MPa	 1.35MPa	
洪水時	 1.28MPa	 1.26MPa	 1.19MPa	
備考	 2断面(空洞部側面)			 上図は左図の赤枠内を表現

表-75 2断面 σ_3 圧縮側主応力コンター

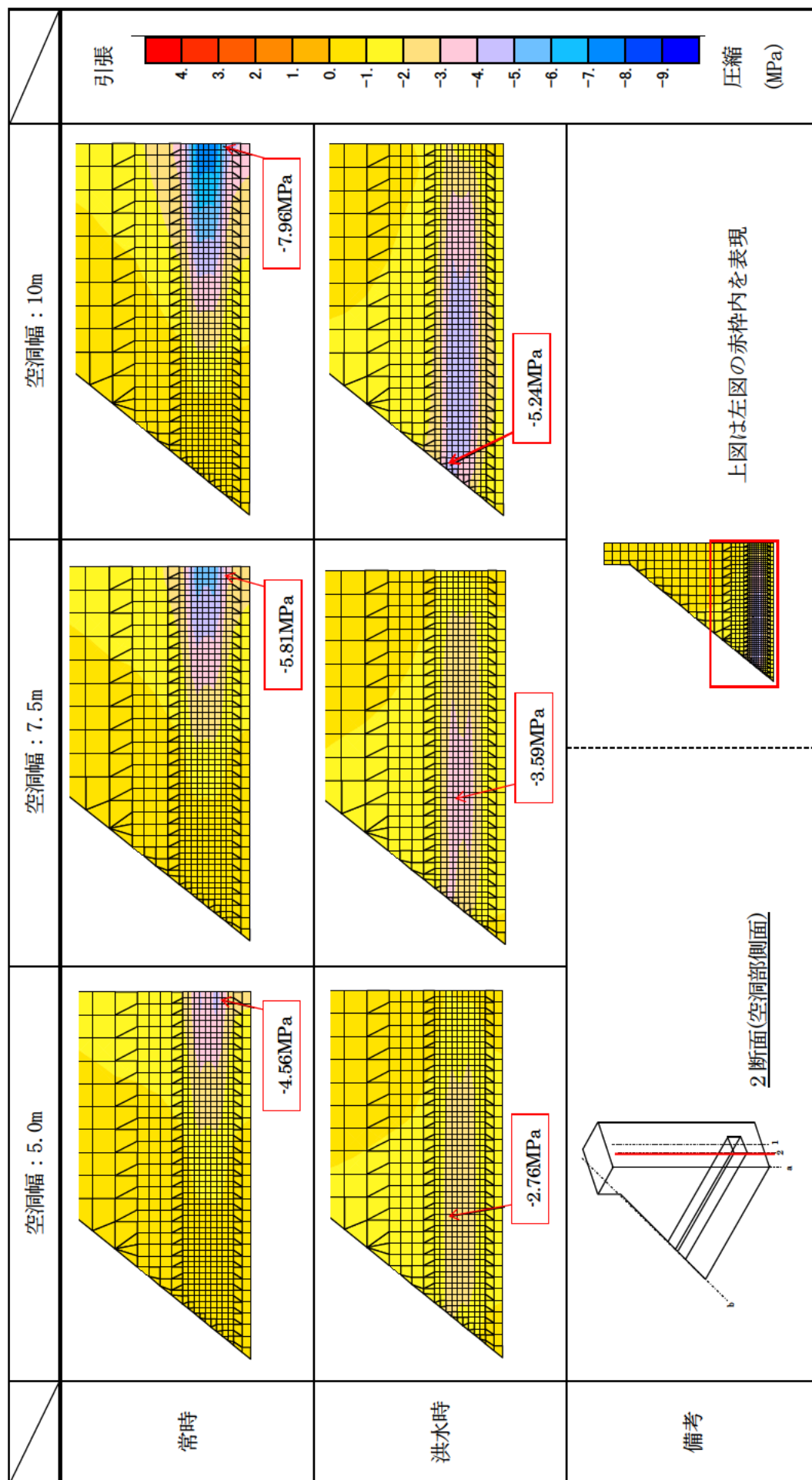


表-76 a断面 σ_1 引張側主応力コンター

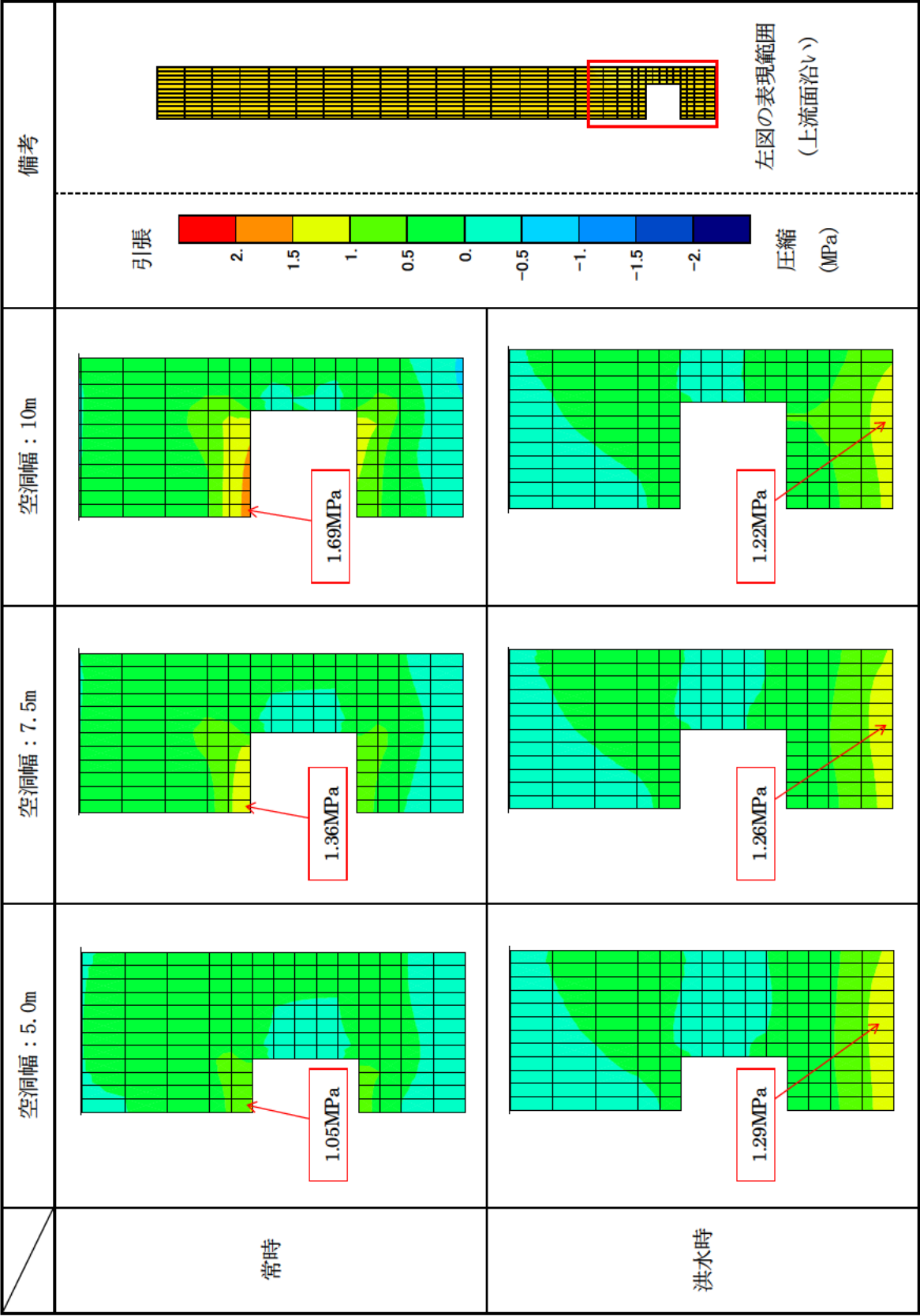


表-77 a断面 σ_3 圧縮側主応力コンター

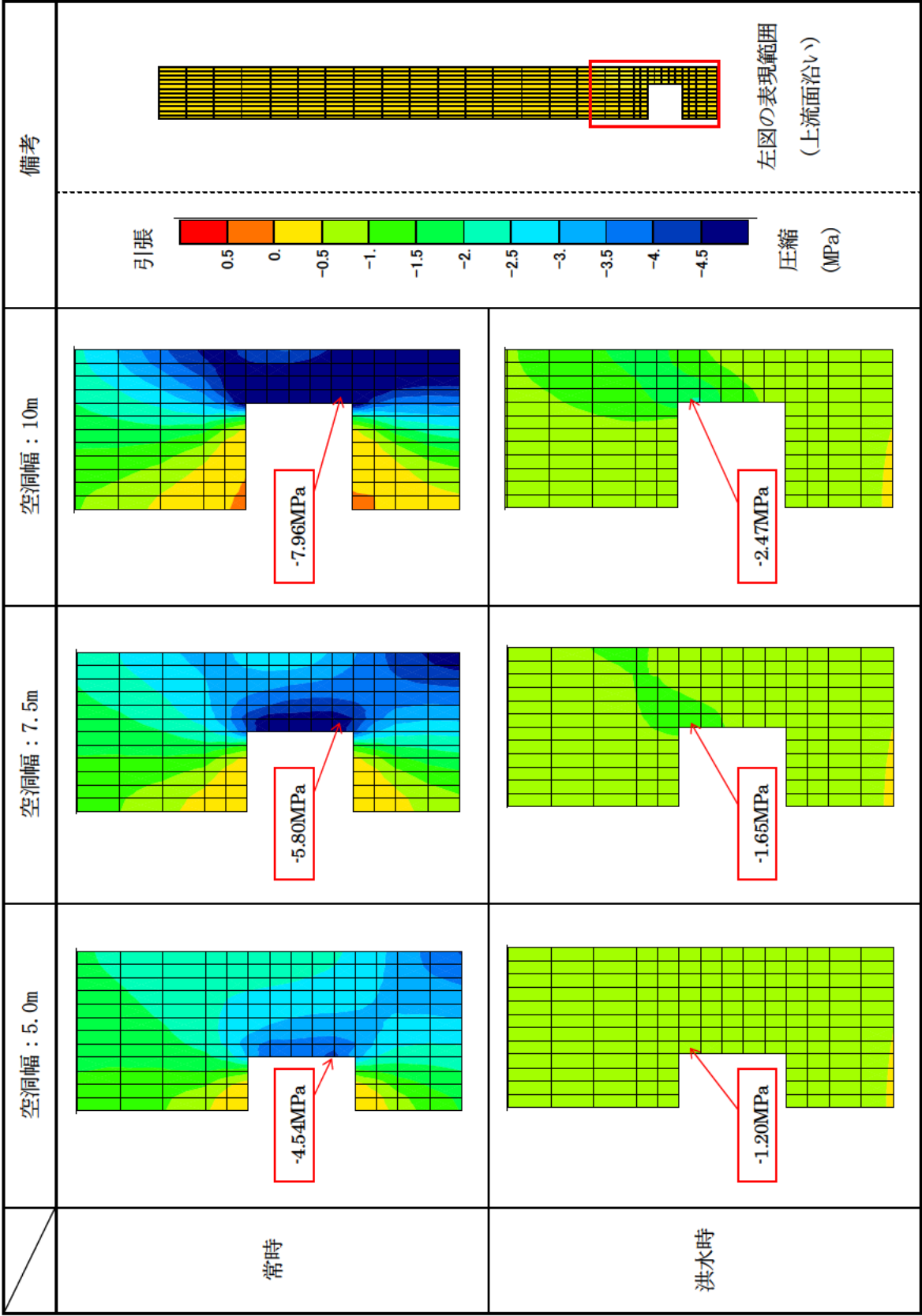


表-78 b断面 σ_1 引張側主応力コンター

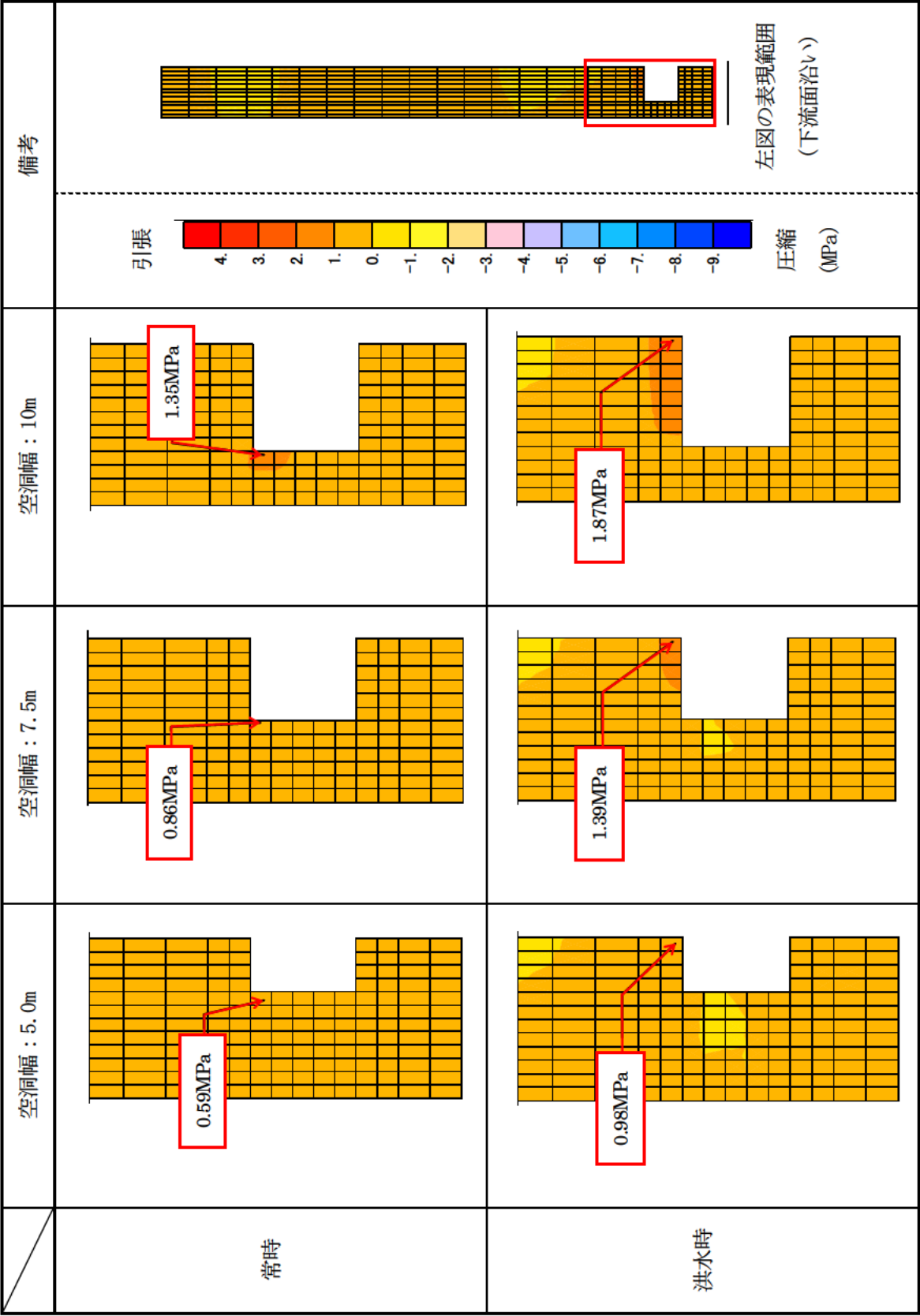


表-79 b断面 σ_3 圧縮側主応力コンター

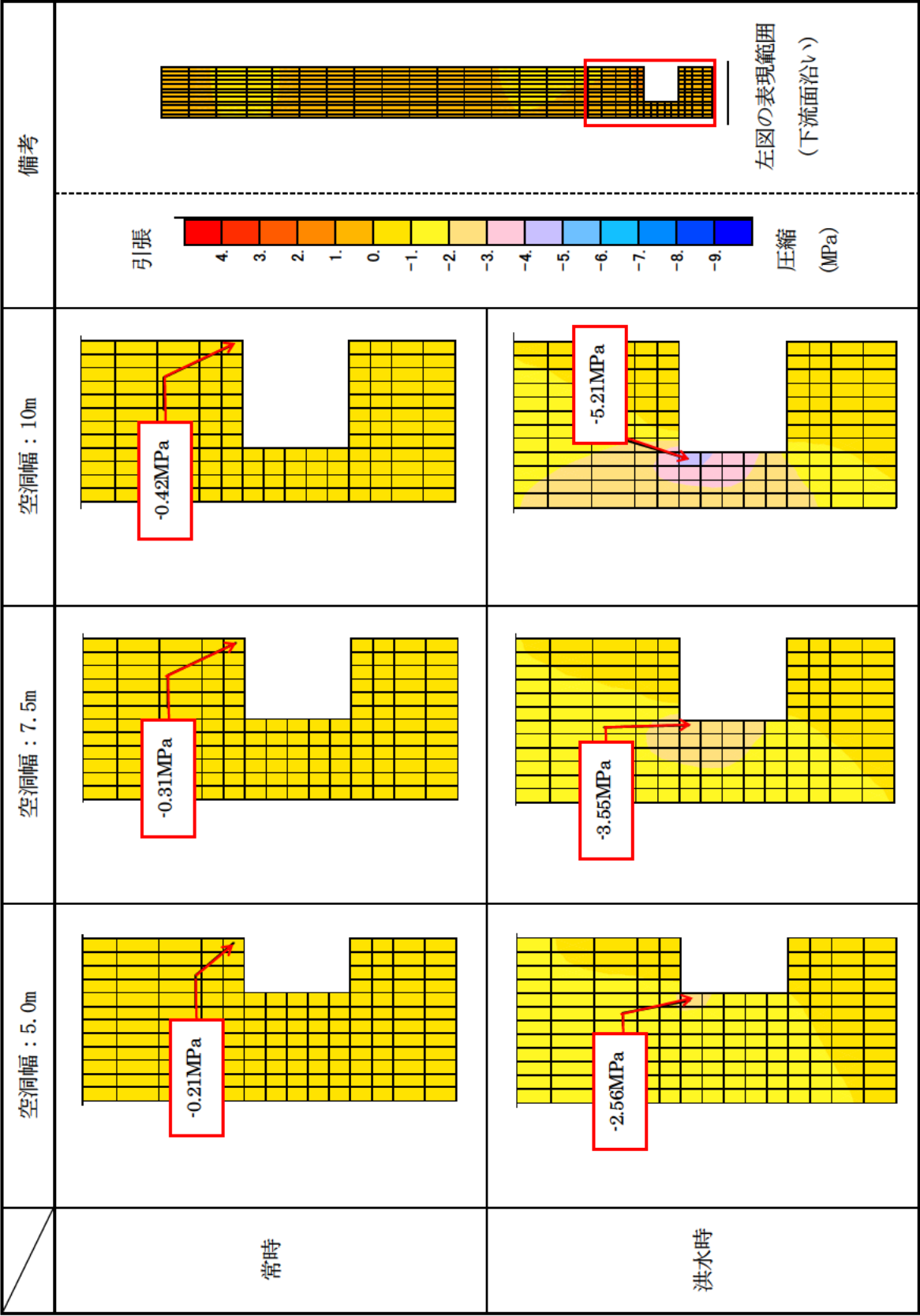
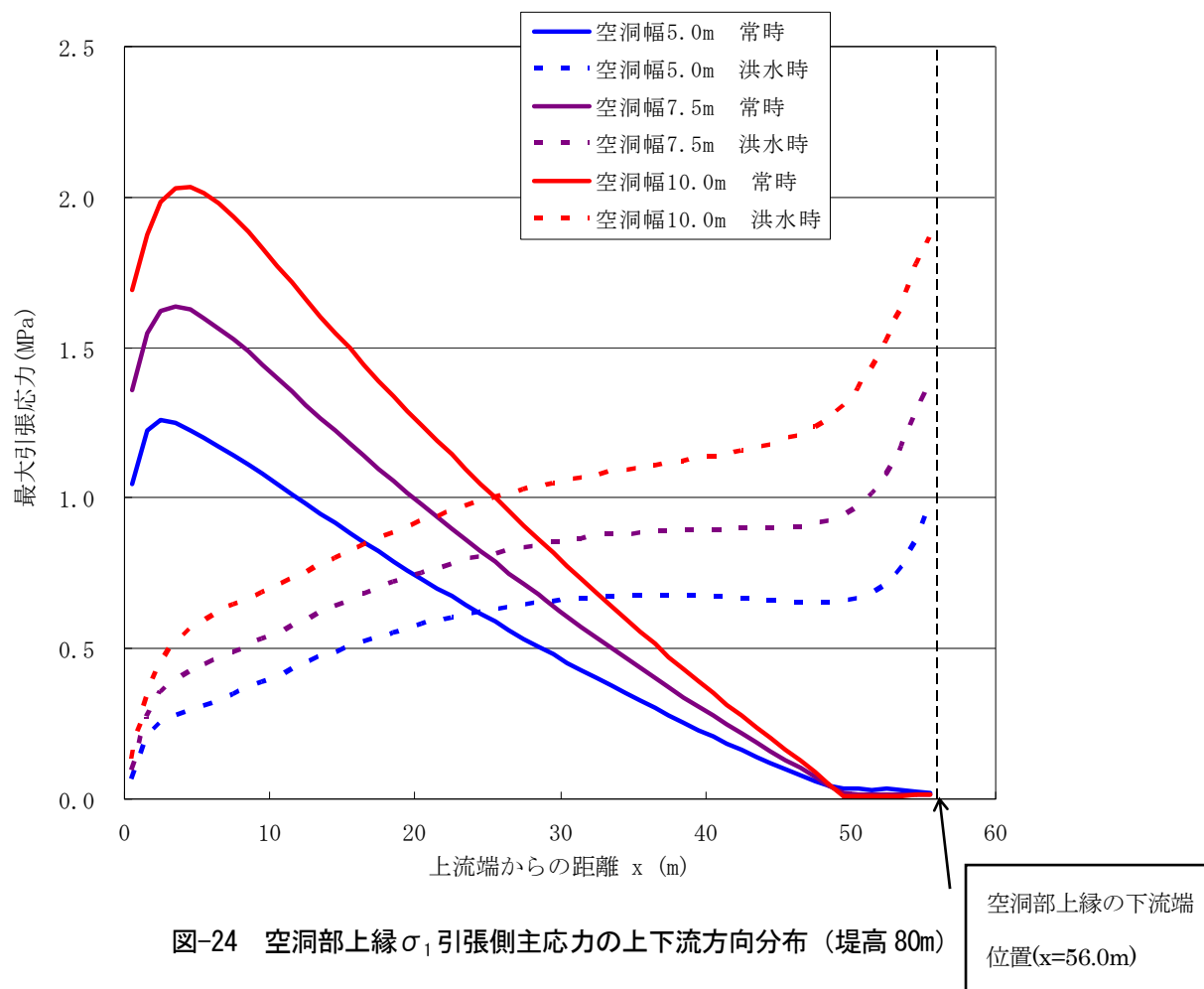


表-80 空洞部上縁 σ_1 引張側主応力

空洞幅	5.0m		7.5m		10.0m	
荷重条件	常時	洪水時	常時	洪水時	常時	洪水時
上流端からの距離(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0.5	1.05	0.06	1.36	0.09	1.69	0.14
1.5	1.23	0.21	1.55	0.27	1.87	0.34
2.5	1.26	0.26	1.62	0.36	1.98	0.46
3.5	1.25	0.28	1.64	0.40	2.03	0.53
4.5	1.23	0.29	1.62	0.42	2.04	0.57
5.5	1.20	0.31	1.60	0.44	2.01	0.60
6.5	1.17	0.33	1.56	0.46	1.98	0.62
7.5	1.14	0.35	1.53	0.49	1.93	0.64
8.5	1.11	0.37	1.49	0.51	1.88	0.66
9.5	1.08	0.39	1.44	0.53	1.83	0.69
10.5	1.05	0.41	1.40	0.55	1.77	0.71
11.5	1.01	0.43	1.35	0.57	1.72	0.73
12.5	0.98	0.45	1.31	0.60	1.66	0.75
13.5	0.95	0.47	1.27	0.62	1.60	0.78
14.5	0.92	0.49	1.22	0.64	1.55	0.80
15.5	0.88	0.51	1.18	0.66	1.50	0.82
16.5	0.85	0.52	1.14	0.68	1.44	0.84
17.5	0.82	0.54	1.10	0.70	1.39	0.86
18.5	0.79	0.55	1.06	0.72	1.34	0.88
19.5	0.76	0.57	1.02	0.73	1.29	0.90
20.5	0.73	0.58	0.98	0.75	1.24	0.92
21.5	0.70	0.59	0.94	0.77	1.19	0.94
22.5	0.67	0.60	0.90	0.78	1.14	0.96
23.5	0.64	0.61	0.86	0.79	1.10	0.97
24.5	0.62	0.62	0.82	0.80	1.05	0.99
25.5	0.59	0.63	0.79	0.82	1.00	1.00
26.5	0.56	0.64	0.75	0.83	0.96	1.01
27.5	0.53	0.64	0.71	0.84	0.91	1.03
28.5	0.51	0.65	0.68	0.84	0.86	1.04
29.5	0.48	0.66	0.64	0.85	0.82	1.05
30.5	0.45	0.66	0.61	0.86	0.77	1.06
31.5	0.43	0.66	0.57	0.87	0.73	1.07
32.5	0.40	0.67	0.54	0.87	0.69	1.08
33.5	0.37	0.67	0.50	0.88	0.64	1.08
34.5	0.35	0.67	0.47	0.88	0.60	1.09
35.5	0.32	0.67	0.44	0.88	0.56	1.10
36.5	0.30	0.67	0.40	0.89	0.51	1.11
37.5	0.28	0.67	0.37	0.89	0.47	1.11
38.5	0.25	0.67	0.34	0.89	0.43	1.12
39.5	0.23	0.67	0.31	0.89	0.39	1.13
40.5	0.21	0.67	0.28	0.89	0.35	1.14
41.5	0.18	0.67	0.25	0.90	0.31	1.15
42.5	0.16	0.67	0.22	0.90	0.28	1.15
43.5	0.14	0.66	0.19	0.90	0.24	1.17
44.5	0.12	0.66	0.16	0.90	0.20	1.18
45.5	0.10	0.66	0.13	0.90	0.16	1.19
46.5	0.08	0.65	0.10	0.91	0.13	1.21
47.5	0.06	0.65	0.08	0.91	0.09	1.24
48.5	0.04	0.65	0.05	0.92	0.05	1.27
49.5	0.03	0.65	0.02	0.94	0.01	1.31
50.5	0.03	0.66	0.02	0.97	0.01	1.36
51.5	0.03	0.68	0.02	1.02	0.01	1.43
52.5	0.03	0.72	0.02	1.08	0.01	1.53
53.5	0.03	0.78	0.02	1.17	0.01	1.64
54.5	0.03	0.87	0.02	1.29	0.01	1.77
55.5	0.02	0.98	0.02	1.39	0.01	1.87



3次元 FEM 解析による空洞部側部の側方向の変形状況を、図-25 に示す水平スライス断面を用いて表すと表-81 のとおりである。水位条件及び地震力の载荷方向により、側方変形の上下流方向分布形が逆になっているのがわかる。空洞幅 5.0m、7.5m、10m のケースについて、常時における 3次元 FEM 解析による各々の空洞幅での最大側方変位は 0.22mm、0.34mm、0.57mm に対し、2次元 FEM 引継ぎ解析では 0.13mm、0.26mm、0.52mm である。2次元 FEM 引継ぎ解析と 3次元 FEM 解析とでは、常時の最大引張応力は 2次元 FEM 引継ぎ解析の方が大きくなったが、側方変位では 3次元 FEM 解析の方が大きくなった。これは、常時における 2次元 FEM 引継ぎ解析による上流面での応力解析では、面直方向（上下流方向）の変形が拘束される平面応力条件のため、発生応力に対して面直方向以外の変位も小さくなるが、3次元 FEM 解析の上流面では、上流方向への変形は拘束されず全方向への変位量は大きくなる。

しかし、空洞上縁部の最大引張応力については、前述のとおり、3次元 FEM 解析の方が 2次元 FEM 引継ぎ解析よりも小さくなっている。それは、3次元 FEM 解析では、上流面の面直方向（上下流方向）に拘束を受けないので、応力が開放されるため、上下流方向に変位拘束を受ける 2次元 FEM 引継ぎ解析よりも発生応力が小さくなると考えられる。

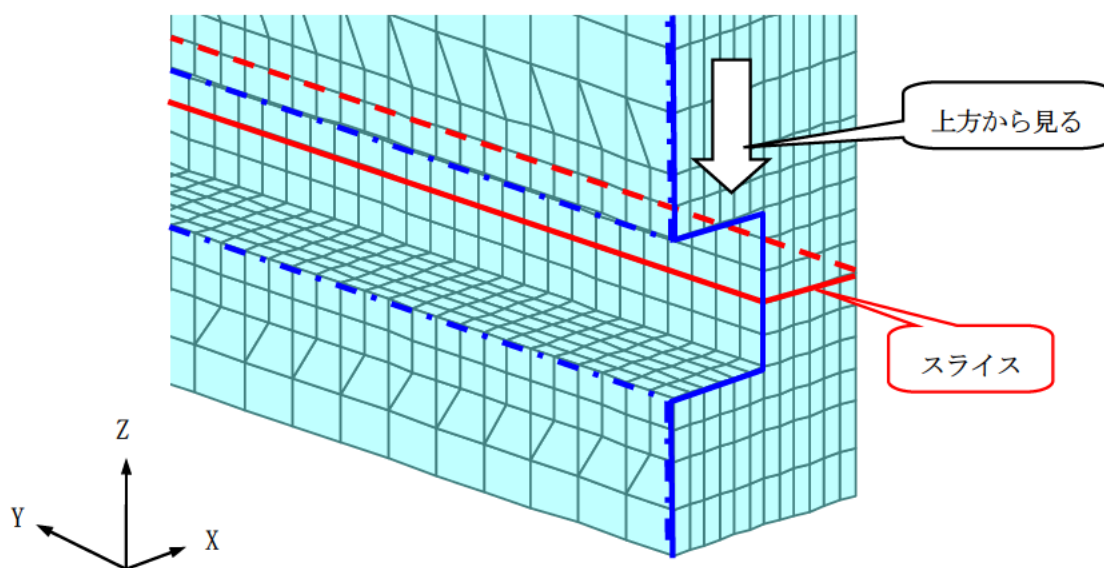


図-25 空洞部側部のスライス断面位置

表-81 空洞部側部の側方方向（X 方向）の変形図

	空洞幅 5.0m	空洞幅 7.5m	空洞幅 10.0m
変形図			
変位量	継目側の最大側方変位 常時 : 0.22mm (上流端) 洪水時 : 0.13mm	継目側の最大側方変位 常時 : 0.34mm (上流端) 洪水時 : 0.19mm	継目側の最大側方変位 常時 : 0.57mm (上流端) 洪水時 : 0.32mm
備考	— 常時(地震あり) — 洪水時(地震あり)		
	変形図は変形量の縮尺を 5,000 倍して表示してある		

表-82 空洞部側部の側方向（X 方向）の変形量(空洞幅 5m の場合)

空洞幅5.0mの場合

節点番号		上流端からの距離	変形量(mm)			
			常時(地震あり)		洪水時(地震あり)	
横継目側	空洞側	(m)	横継目側	空洞側	横継目側	空洞側
4057	4529	0	-0.2187	-0.1334	-0.0668	-0.0339
4058	4530	1	-0.2149	-0.1289	-0.0659	-0.0325
4059	4531	2	-0.2129	-0.1265	-0.0658	-0.0322
4060	4532	3	-0.2117	-0.1252	-0.0667	-0.0328
4061	4533	4	-0.2101	-0.1239	-0.0683	-0.0340
4062	4534	5	-0.2079	-0.1222	-0.0705	-0.0354
4063	4535	6	-0.2049	-0.1202	-0.0730	-0.0370
4064	4536	7	-0.2013	-0.1178	-0.0758	-0.0388
4065	4537	8	-0.1971	-0.1151	-0.0788	-0.0406
4066	4538	9	-0.1925	-0.1122	-0.0819	-0.0425
4067	4539	10	-0.1877	-0.1091	-0.0850	-0.0444
4068	4540	11	-0.1826	-0.1059	-0.0881	-0.0464
4069	4541	12	-0.1775	-0.1027	-0.0912	-0.0483
4070	4542	13	-0.1723	-0.0994	-0.0941	-0.0501
4071	4543	14	-0.1671	-0.0962	-0.0970	-0.0519
4072	4544	15	-0.1618	-0.0930	-0.0997	-0.0537
4073	4545	16	-0.1566	-0.0898	-0.1024	-0.0553
4074	4546	17	-0.1514	-0.0867	-0.1048	-0.0569
4075	4547	18	-0.1463	-0.0836	-0.1072	-0.0584
4076	4548	19	-0.1411	-0.0806	-0.1094	-0.0597
4077	4549	20	-0.1361	-0.0776	-0.1115	-0.0610
4078	4550	21	-0.1310	-0.0746	-0.1135	-0.0622
4079	4551	22	-0.1260	-0.0717	-0.1153	-0.0634
4080	4552	23	-0.1211	-0.0688	-0.1170	-0.0644
4081	4553	24	-0.1161	-0.0660	-0.1185	-0.0654
4082	4554	25	-0.1112	-0.0631	-0.1199	-0.0662
4083	4555	26	-0.1064	-0.0603	-0.1212	-0.0670
4084	4556	27	-0.1016	-0.0576	-0.1224	-0.0677
4085	4557	28	-0.0968	-0.0548	-0.1235	-0.0684
4086	4558	29	-0.0920	-0.0521	-0.1244	-0.0689
4087	4559	30	-0.0873	-0.0494	-0.1253	-0.0694
4088	4560	31	-0.0826	-0.0468	-0.1260	-0.0699
4089	4561	32	-0.0780	-0.0442	-0.1266	-0.0702
4090	4562	33	-0.0734	-0.0416	-0.1271	-0.0705
4091	4563	34	-0.0689	-0.0390	-0.1275	-0.0707
4092	4564	35	-0.0644	-0.0365	-0.1277	-0.0709
4093	4565	36	-0.0600	-0.0339	-0.1279	-0.0710
4094	4566	37	-0.0556	-0.0315	-0.1279	-0.0710
4095	4567	38	-0.0513	-0.0291	-0.1278	-0.0710
4096	4568	39	-0.0470	-0.0267	-0.1277	-0.0709
4097	4569	40	-0.0428	-0.0243	-0.1274	-0.0707
4098	4570	41	-0.0386	-0.0220	-0.1270	-0.0705
4099	4571	42	-0.0345	-0.0197	-0.1265	-0.0702
4100	4572	43	-0.0305	-0.0175	-0.1258	-0.0699
4101	4573	44	-0.0265	-0.0153	-0.1251	-0.0696
4102	4574	45	-0.0226	-0.0132	-0.1244	-0.0692
4103	4575	46	-0.0188	-0.0111	-0.1235	-0.0688
4104	4576	47	-0.0150	-0.0090	-0.1226	-0.0684
4105	4577	48	-0.0113	-0.0069	-0.1217	-0.0681
4106	4578	49	-0.0076	-0.0049	-0.1208	-0.0678
4107	4579	50	-0.0040	-0.0028	-0.1199	-0.0676
4108	4580	51	-0.0004	-0.0009	-0.1190	-0.0675

表-83 空洞部側部の側方向（X 方向）の変形量（空洞幅 7.5m の場合）

空洞幅7.5mの場合

節点番号		上流端からの距離	変形量 (mm)			
			常時(地震あり)		洪水時(地震あり)	
横継目側	空洞側	(m)	横継目側	空洞側	横継目側	空洞側
4057	4411	0	-0.3351	-0.2463	-0.0916	-0.0636
4058	4412	1	-0.3306	-0.2405	-0.0911	-0.0619
4059	4413	2	-0.3298	-0.2386	-0.0920	-0.0620
4060	4414	3	-0.3298	-0.2382	-0.0944	-0.0635
4061	4415	4	-0.3288	-0.2373	-0.0976	-0.0657
4062	4416	5	-0.3261	-0.2352	-0.1015	-0.0685
4063	4417	6	-0.3217	-0.2319	-0.1058	-0.0715
4064	4418	7	-0.3159	-0.2274	-0.1104	-0.0748
4065	4419	8	-0.3091	-0.2222	-0.1150	-0.0781
4066	4420	9	-0.3016	-0.2164	-0.1197	-0.0814
4067	4421	10	-0.2936	-0.2102	-0.1244	-0.0848
4068	4422	11	-0.2854	-0.2039	-0.1290	-0.0881
4069	4423	12	-0.2770	-0.1975	-0.1335	-0.0914
4070	4424	13	-0.2685	-0.1912	-0.1380	-0.0946
4071	4425	14	-0.2601	-0.1848	-0.1422	-0.0977
4072	4426	15	-0.2518	-0.1786	-0.1463	-0.1007
4073	4427	16	-0.2435	-0.1725	-0.1502	-0.1036
4074	4428	17	-0.2353	-0.1665	-0.1540	-0.1064
4075	4429	18	-0.2272	-0.1606	-0.1576	-0.1090
4076	4430	19	-0.2192	-0.1548	-0.1609	-0.1115
4077	4431	20	-0.2112	-0.1491	-0.1641	-0.1138
4078	4432	21	-0.2033	-0.1434	-0.1671	-0.1160
4079	4433	22	-0.1955	-0.1378	-0.1700	-0.1180
4080	4434	23	-0.1878	-0.1323	-0.1726	-0.1200
4081	4435	24	-0.1801	-0.1268	-0.1751	-0.1217
4082	4436	25	-0.1724	-0.1214	-0.1773	-0.1234
4083	4437	26	-0.1648	-0.1160	-0.1795	-0.1249
4084	4438	27	-0.1573	-0.1107	-0.1814	-0.1263
4085	4439	28	-0.1498	-0.1054	-0.1832	-0.1276
4086	4440	29	-0.1424	-0.1002	-0.1848	-0.1288
4087	4441	30	-0.1351	-0.0950	-0.1863	-0.1298
4088	4442	31	-0.1278	-0.0898	-0.1876	-0.1308
4089	4443	32	-0.1205	-0.0847	-0.1887	-0.1316
4090	4444	33	-0.1134	-0.0797	-0.1897	-0.1323
4091	4445	34	-0.1062	-0.0747	-0.1905	-0.1329
4092	4446	35	-0.0992	-0.0698	-0.1912	-0.1334
4093	4447	36	-0.0923	-0.0649	-0.1918	-0.1338
4094	4448	37	-0.0854	-0.0601	-0.1922	-0.1341
4095	4449	38	-0.0786	-0.0553	-0.1924	-0.1343
4096	4450	39	-0.0719	-0.0507	-0.1925	-0.1344
4097	4451	40	-0.0653	-0.0461	-0.1925	-0.1345
4098	4452	41	-0.0587	-0.0415	-0.1924	-0.1345
4099	4453	42	-0.0523	-0.0371	-0.1922	-0.1344
4100	4454	43	-0.0460	-0.0327	-0.1918	-0.1343
4101	4455	44	-0.0398	-0.0284	-0.1914	-0.1341
4102	4456	45	-0.0336	-0.0242	-0.1909	-0.1339
4103	4457	46	-0.0276	-0.0200	-0.1903	-0.1337
4104	4458	47	-0.0216	-0.0158	-0.1898	-0.1336
4105	4459	48	-0.0156	-0.0117	-0.1892	-0.1335
4106	4460	49	-0.0097	-0.0076	-0.1886	-0.1335
4107	4461	50	-0.0038	-0.0034	-0.1880	-0.1335
4108	4462	51	0.0020	0.0007	-0.1875	-0.1337

表-84 空洞部側部の側方向（X 方向）の変形量(空洞幅 10m の場合)

空洞幅10.0mの場合

節点番号		上流端からの距離	変形量(mm)			
			常時(地震あり)		洪水時(地震あり)	
横継目側	空洞側	(m)	横継目側	空洞側	横継目側	空洞側
4057	4293	0	-0.5664	-0.4734	-0.1404	-0.1173
4058	4294	1	-0.5612	-0.4657	-0.1413	-0.1163
4059	4295	2	-0.5629	-0.4657	-0.1449	-0.1182
4060	4296	3	-0.5650	-0.4673	-0.1505	-0.1222
4061	4297	4	-0.5640	-0.4666	-0.1573	-0.1274
4062	4298	5	-0.5592	-0.4626	-0.1647	-0.1332
4063	4299	6	-0.5510	-0.4556	-0.1723	-0.1392
4064	4300	7	-0.5402	-0.4461	-0.1800	-0.1453
4065	4301	8	-0.5275	-0.4351	-0.1876	-0.1515
4066	4302	9	-0.5138	-0.4231	-0.1952	-0.1576
4067	4303	10	-0.4994	-0.4107	-0.2026	-0.1636
4068	4304	11	-0.4849	-0.3981	-0.2099	-0.1695
4069	4305	12	-0.4703	-0.3856	-0.2170	-0.1753
4070	4306	13	-0.4557	-0.3733	-0.2238	-0.1809
4071	4307	14	-0.4414	-0.3611	-0.2305	-0.1864
4072	4308	15	-0.4272	-0.3492	-0.2369	-0.1917
4073	4309	16	-0.4133	-0.3376	-0.2431	-0.1968
4074	4310	17	-0.3994	-0.3261	-0.2491	-0.2017
4075	4311	18	-0.3858	-0.3148	-0.2548	-0.2063
4076	4312	19	-0.3722	-0.3036	-0.2602	-0.2108
4077	4313	20	-0.3588	-0.2925	-0.2653	-0.2151
4078	4314	21	-0.3455	-0.2816	-0.2703	-0.2191
4079	4315	22	-0.3323	-0.2707	-0.2749	-0.2229
4080	4316	23	-0.3191	-0.2600	-0.2793	-0.2266
4081	4317	24	-0.3061	-0.2493	-0.2835	-0.2300
4082	4318	25	-0.2931	-0.2387	-0.2874	-0.2332
4083	4319	26	-0.2802	-0.2282	-0.2911	-0.2362
4084	4320	27	-0.2674	-0.2177	-0.2945	-0.2390
4085	4321	28	-0.2546	-0.2073	-0.2977	-0.2417
4086	4322	29	-0.2419	-0.1970	-0.3007	-0.2441
4087	4323	30	-0.2294	-0.1867	-0.3035	-0.2464
4088	4324	31	-0.2169	-0.1765	-0.3060	-0.2484
4089	4325	32	-0.2044	-0.1664	-0.3083	-0.2503
4090	4326	33	-0.1921	-0.1564	-0.3104	-0.2520
4091	4327	34	-0.1799	-0.1464	-0.3123	-0.2536
4092	4328	35	-0.1678	-0.1366	-0.3139	-0.2550
4093	4329	36	-0.1558	-0.1268	-0.3154	-0.2562
4094	4330	37	-0.1439	-0.1172	-0.3167	-0.2573
4095	4331	38	-0.1321	-0.1076	-0.3178	-0.2583
4096	4332	39	-0.1205	-0.0982	-0.3187	-0.2591
4097	4333	40	-0.1090	-0.0889	-0.3195	-0.2598
4098	4334	41	-0.0977	-0.0797	-0.3202	-0.2605
4099	4335	42	-0.0865	-0.0707	-0.3207	-0.2611
4100	4336	43	-0.0754	-0.0618	-0.3212	-0.2616
4101	4337	44	-0.0645	-0.0530	-0.3216	-0.2622
4102	4338	45	-0.0538	-0.0443	-0.3219	-0.2628
4103	4339	46	-0.0431	-0.0357	-0.3223	-0.2634
4104	4340	47	-0.0325	-0.0271	-0.3226	-0.2641
4105	4341	48	-0.0220	-0.0186	-0.3231	-0.2649
4106	4342	49	-0.0115	-0.0101	-0.3236	-0.2659
4107	4343	50	-0.0011	-0.0016	-0.3241	-0.2670
4108	4344	51	0.0094	0.0070	-0.3246	-0.2681

7. 洪水調節専用(流水型)ダムの事例

現在、国土交通省所管で既設、建設、または実施計画調査段階にある洪水調節専用（流水型）ダムの主なものを表-85 に示す。また、各ダムの標準断面及び下流面図を図-26～図-35 に示す。

表-85 国土交通省所管の洪水調節専用(流水型)ダムの例

ダム名	益田川ダム	津付ダム	最上小国川ダム	辰巳ダム	浅川ダム	矢原川ダム	西之谷ダム	三笠ぼんべつダム	足羽川ダム	立野ダム
所在道県	島根県	岩手県	山形県	石川県	長野県	島根県	鹿児島県	北海道	福井県	熊本県
河川名	益田川水系 益田川	気仙川水系 大股川	最上川水系 最上小国川	犀川水系 犀川	信濃川水系 浅川	三隈川水系 矢原川	新川水系 新川	石狩川水系 幾春別川 支川奔別川	九頭竜川水系 足羽川	城川水系 白川
事業者（管理者）	島根県	岩手県	山形県	石川県	長野県	島根県	鹿児島県	北海道 開発局	近畿地方 整備局	九州地方 整備局
ダム形式	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	台形CSGダム	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム
事業段階	完成	建設中	建設中	建設中	建設中	実調中	建設中	建設中	建設中	建設中
集水面積（km ² ）	87.6	50.3	37.4	77.1	15.2	47.6	6.8	35.4	105.2	383
堤頂長	m	169	165	174	195	226	135.8	161.5	449	205
ダム高	m	48	48.6	41	51	53	51.3	21.5	52	110.2
堤体積	m ³	102,000	105,000	499,000	146,000	166,000	145,000	33,000	216,600	890,000
上流面勾配	鉛直	1:0.12	鉛直	鉛直 フィレットあり 1:0.5	1:0.1 フィレットあり 1:0.8	1:0.12	鉛直 フィレットあり 1:0.60	1:0.8	1:0.12 フィレットあり 1:0.60	
下流面勾配	1:0.76	1:0.67	1:0.76	1:0.74	1:0.8	1:0.72	1:0.78	1:0.8	1:0.66	
湛水面積	km ²	0.54	0.37	0.38	0.42	0.08	0.42	0.13	1.38	2.7
洪水調節容量	m ³	6,500,000	5,350,000	2,100,000	5,800,000	1,060,000	6,700,000	718,000	8,500,000	28,200,000
堆砂容量	m ³	250,000	250,000	300,000	200,000	40,000	300,000	75,000	300,000	500,000
総貯水容量	m ³	6,750,000	5,600,000	2,400,000	6,000,000	1,100,000	7,000,000	793,000	8,800,000	28,700,000
計画洪水流量	m ³ /s	900	1,840	120	1,230	350	1,600	95	370	1,800
・条数 ・規模（幅×高さ） ・ゲートの有無	条 m	常用洪水吐：2 4.45×3.4 （ゲート無）	常用洪水吐：1 1.9×1.9 （ゲート無）	常用洪水吐：2 1.7×1.7 （ゲート無）	常用洪水吐：3 （上段） 4.5×4.5 （下段）×2 2.9×2.9 （ゲート無）	常用洪水吐：1 1.3×1.45 （ゲート無）	常用洪水吐：2 2.3×2.3 （ゲート無）	常用洪水吐：1 1.95×1.65 （ゲート無）	常用洪水吐：1 1.25×1.25 （ゲート無） 排砂設備：1 4.0×4.0 （ゲート有）	常用洪水吐：2 3.6×4.5 （ゲート有） 排砂設備：1 3.2×4.0 （ゲート有）
空洞										常用洪水吐：3 5.05×5.05 （ゲート無）

注）建設中、調査中のダムについては、今後、諸元の変更の可能性がある。

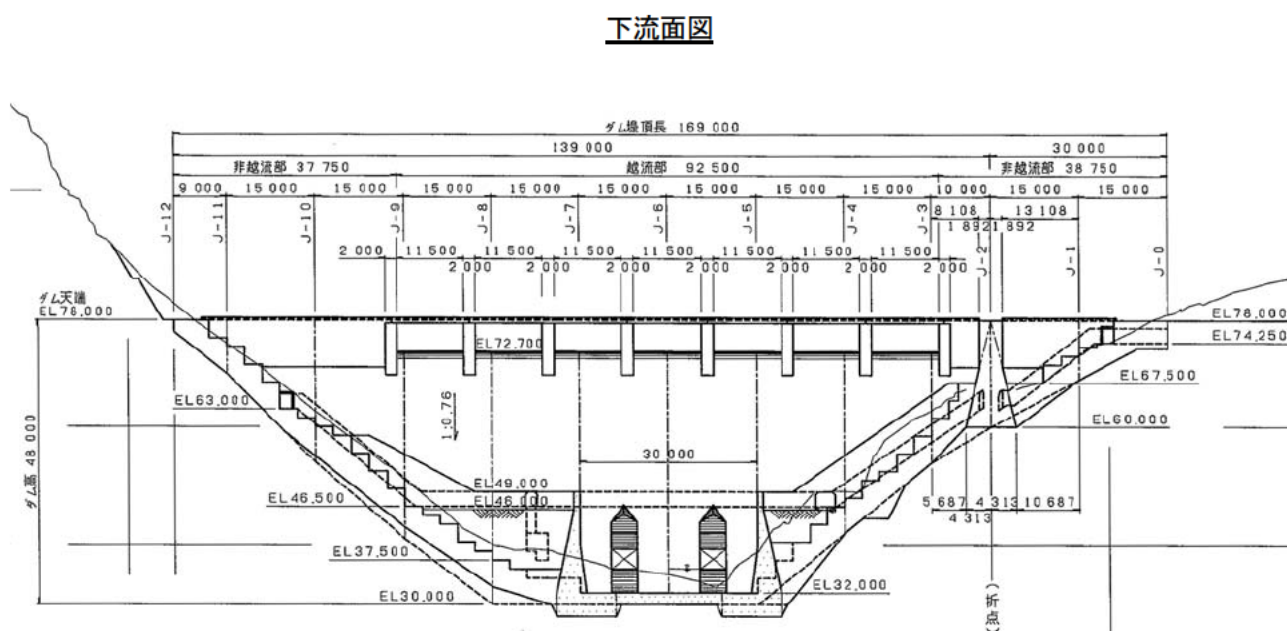
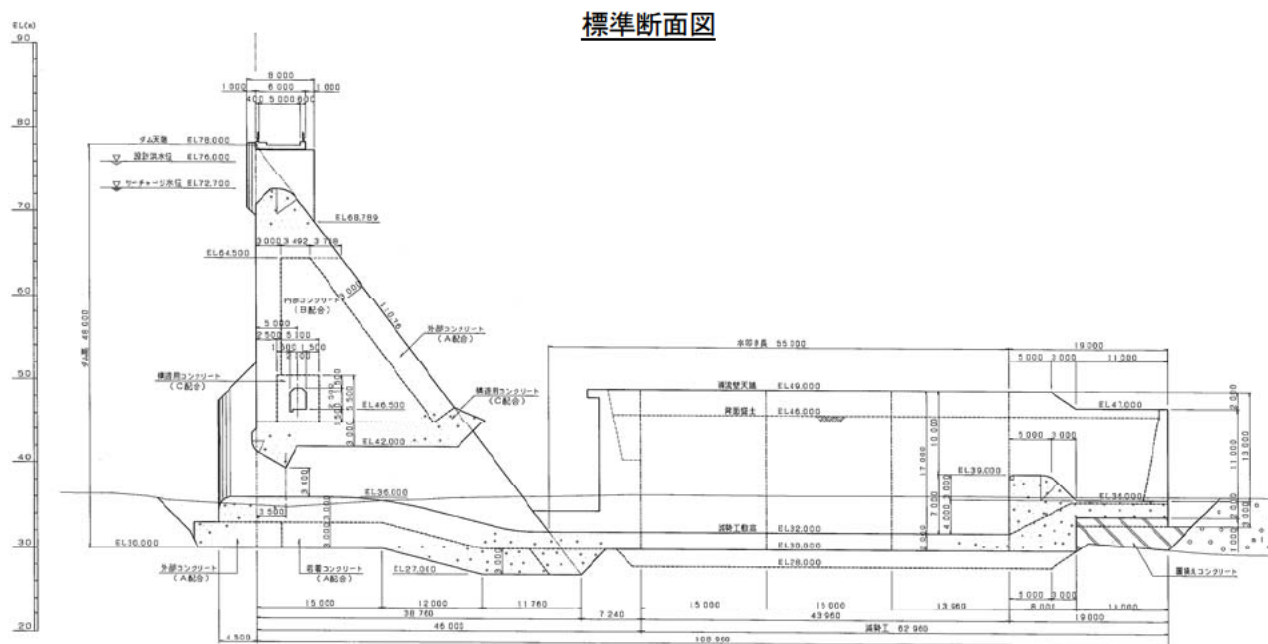
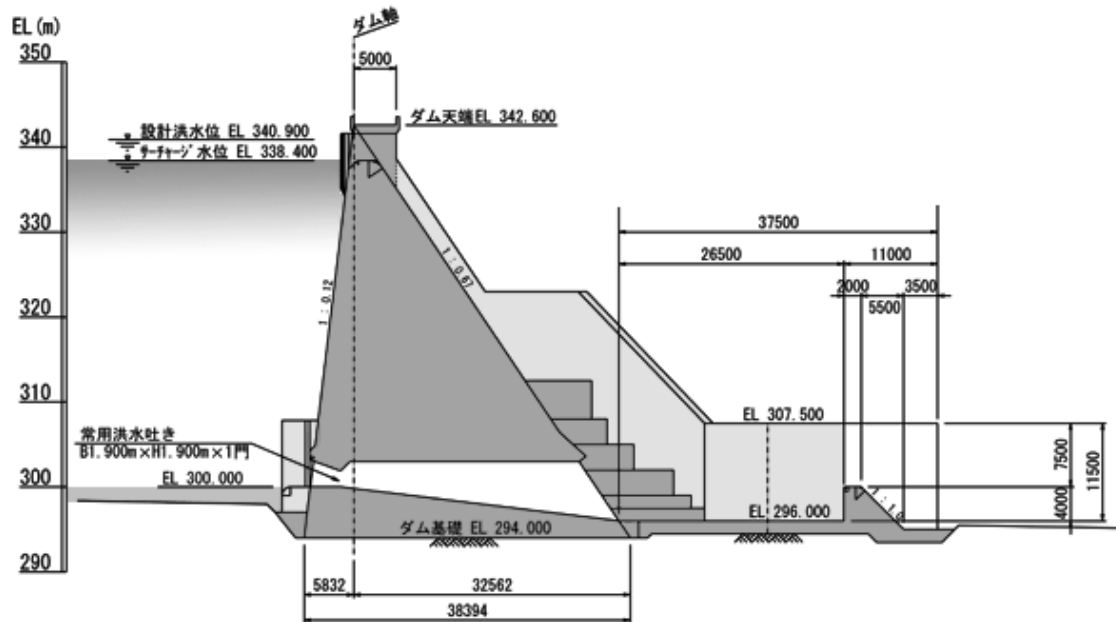


図-26 益田川ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【試験湛水】(H17.8.9) より

標準断面図



下流面図

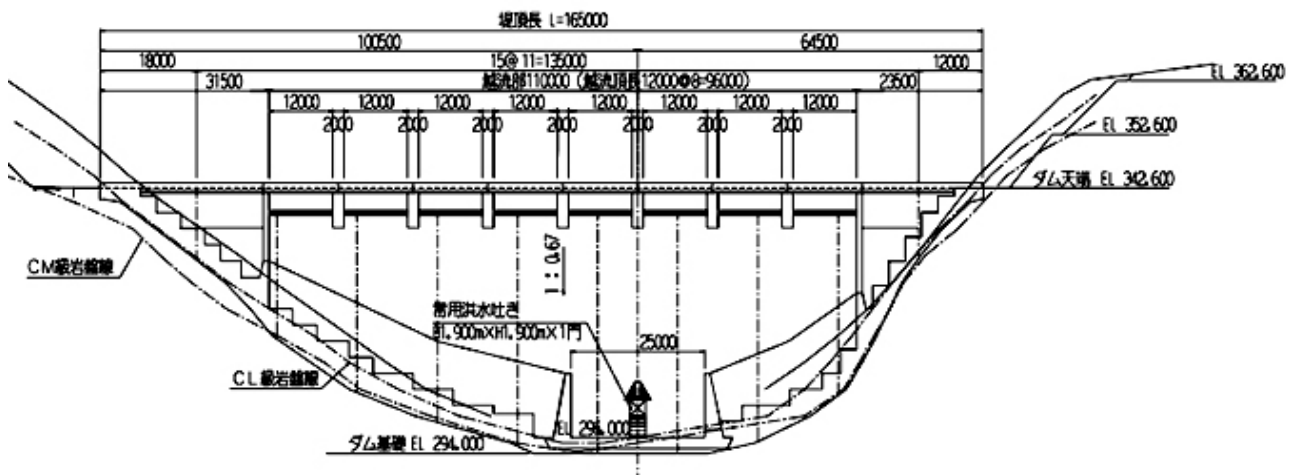
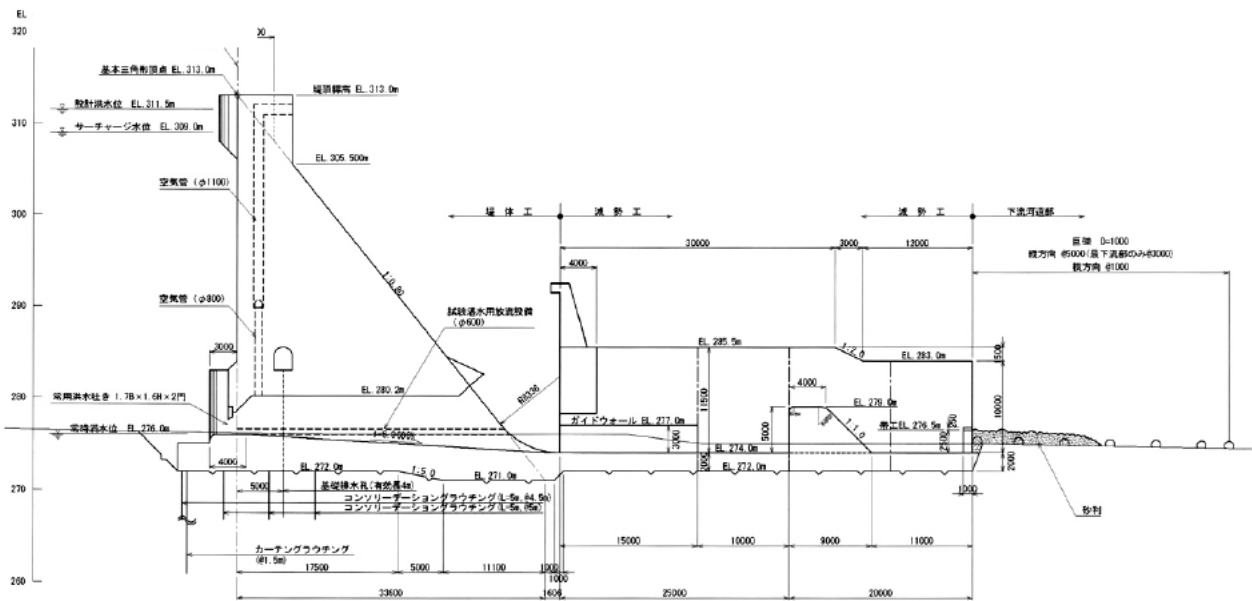


図-27 津付ダム 標準断面及び下流面図

岩手県大船渡地方振興局土木部 津付ダム建設事務所ホームページより

http://www.pref.iwate.jp/~hp4580/damu_gaiyou/danmenzu.html

標準断面図



下流面図

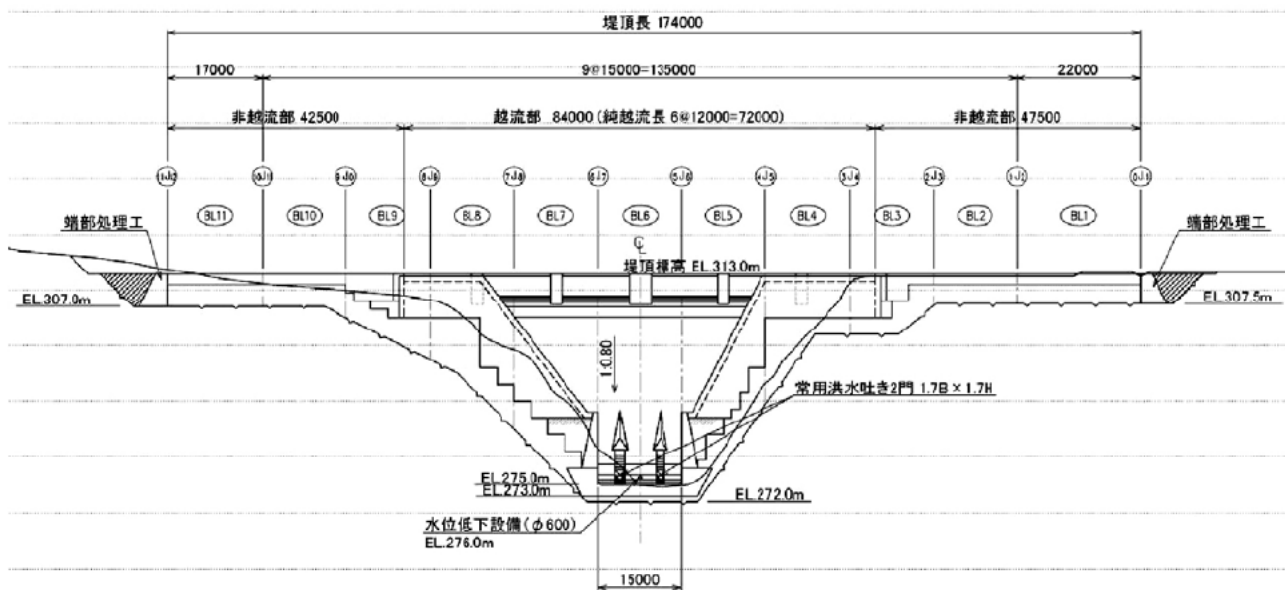
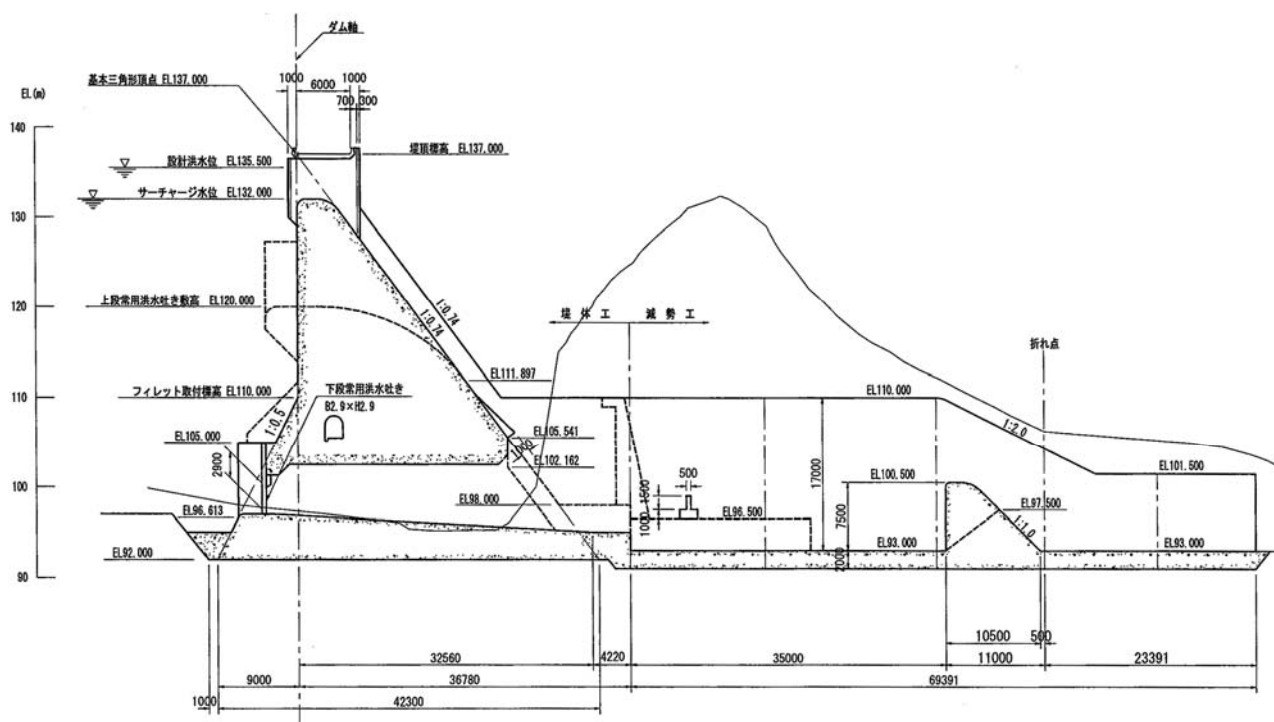


図-28 最上小国川ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【本体実施設計】(案)検討資料 (H22.1.5) より

標準断面図



下流面図

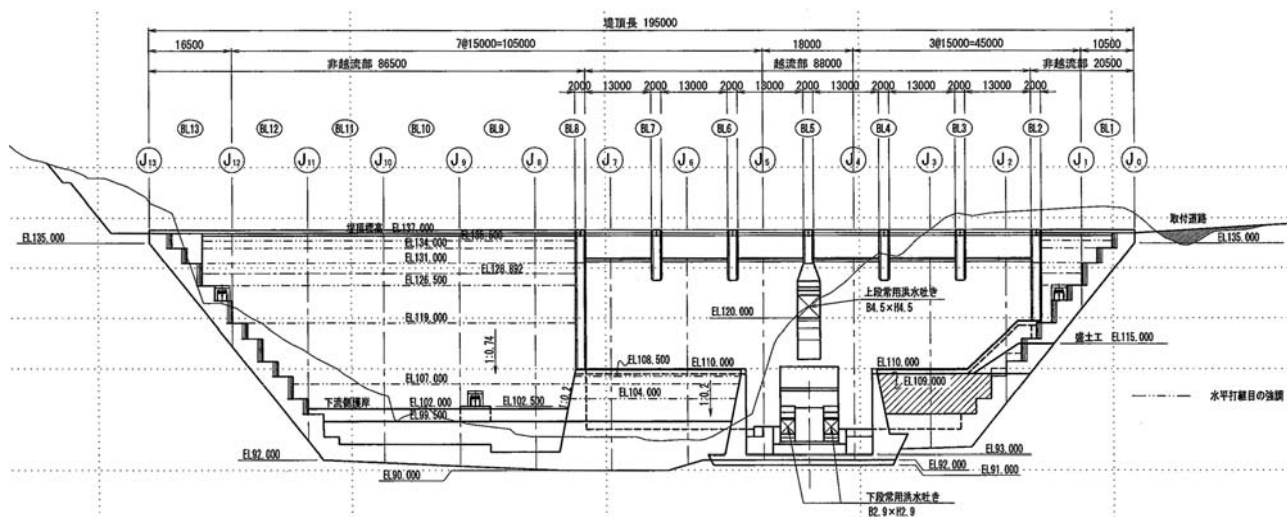
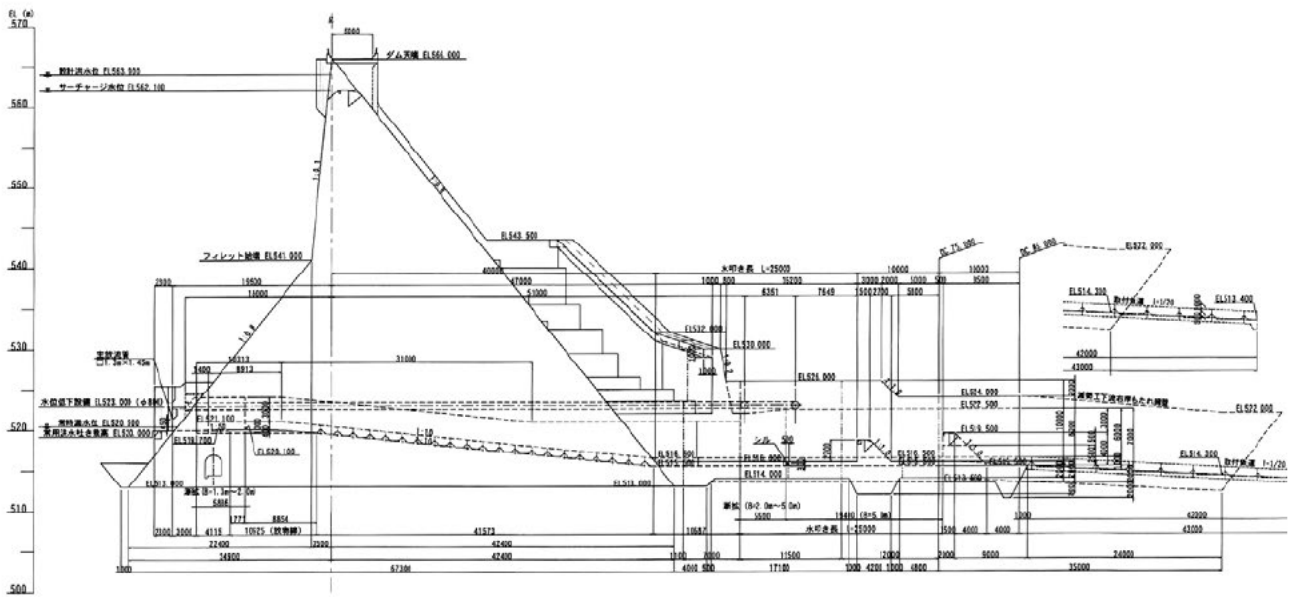


図-29 辰巳ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【本体実施設計】(H19. 2. 27) より

標準断面図



下流面図

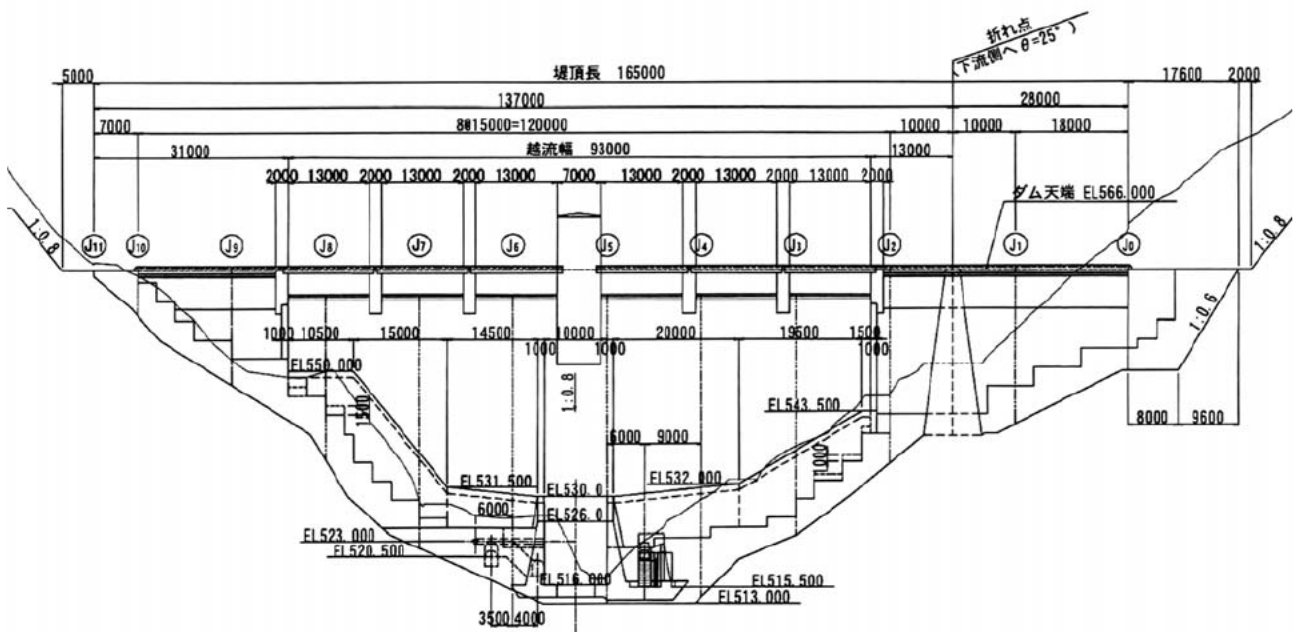
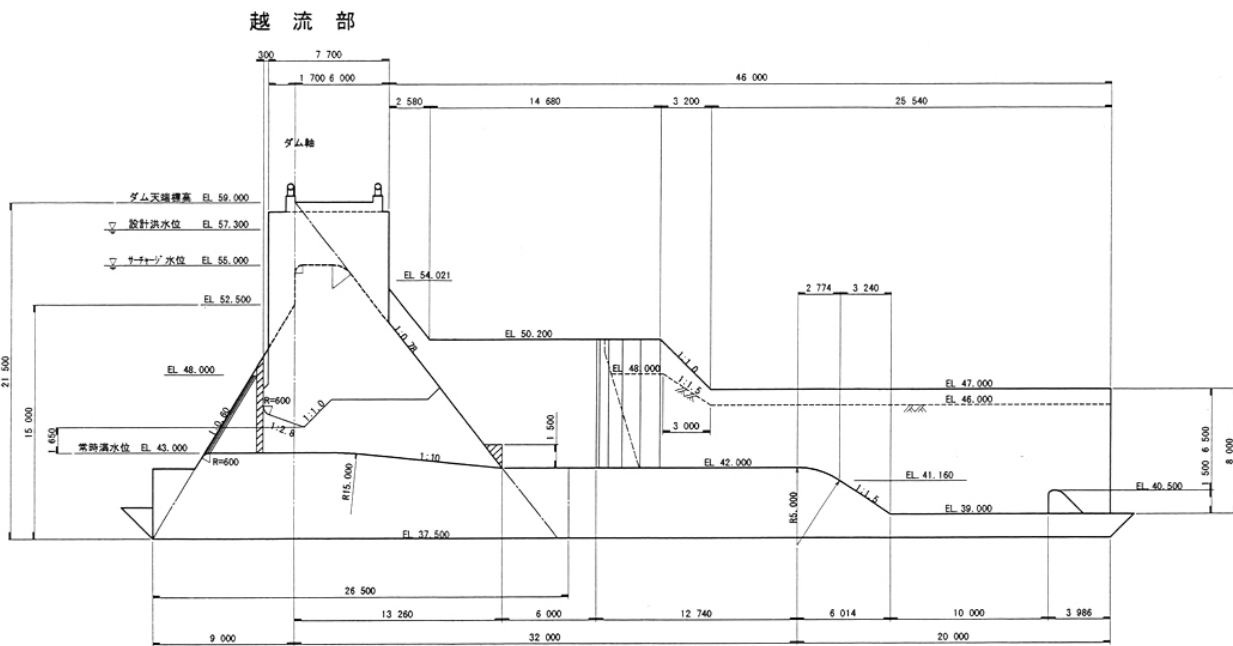


図-30 浅川ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【本体実施設計】(H21. 2. 24) より

標準断面図



下流面図

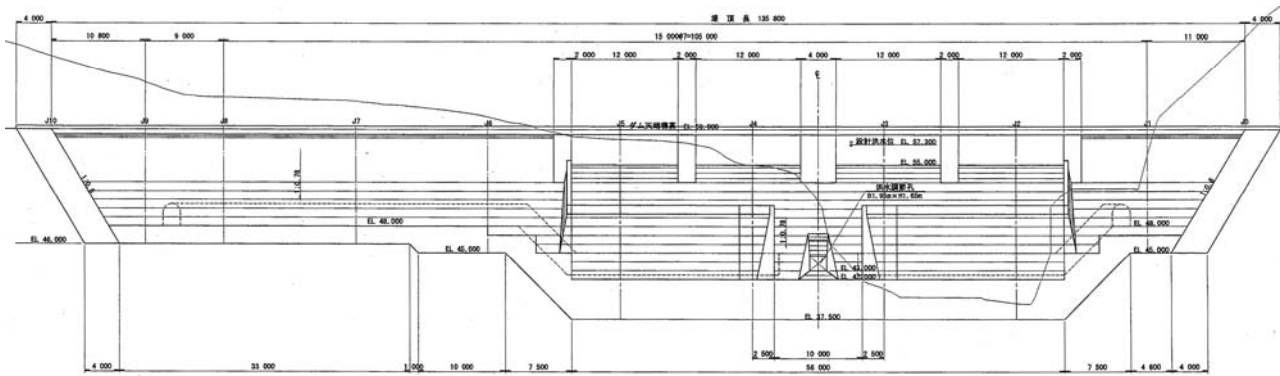
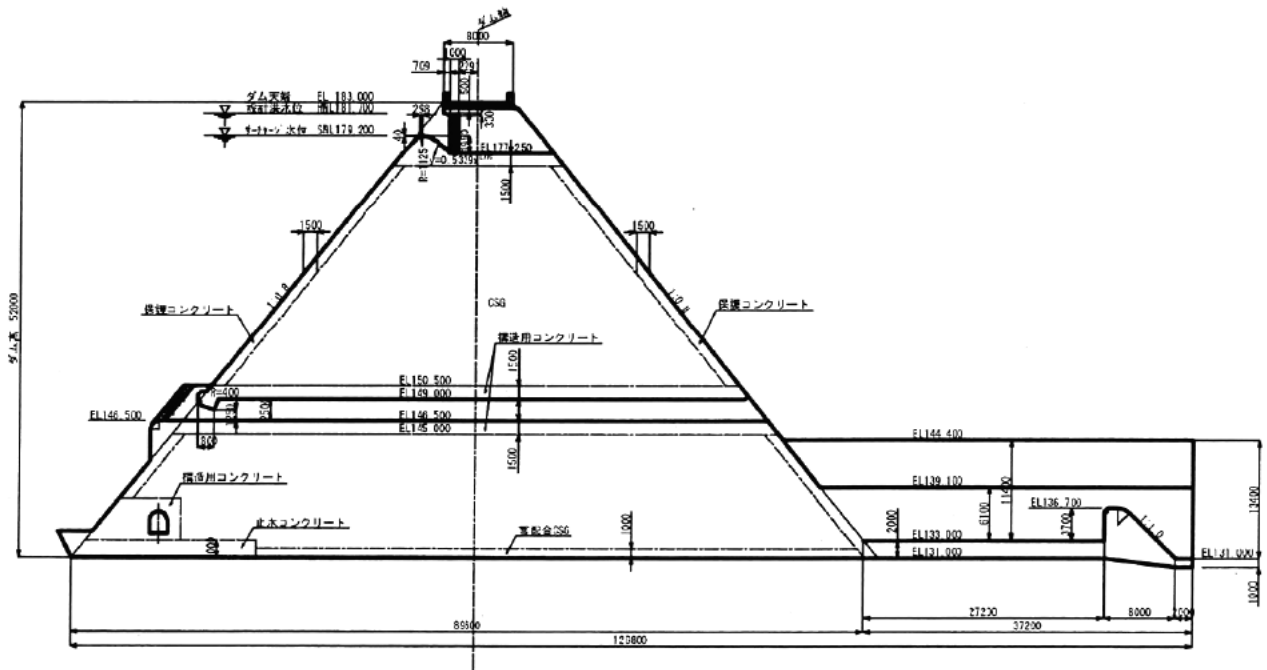


図-32 西之谷ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【本体実施設計】(H14.8.27)より

標準断面図



下流面図

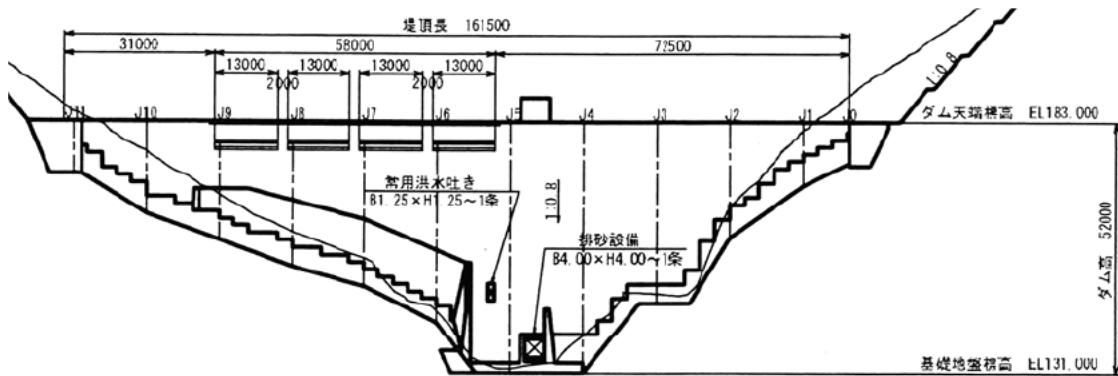
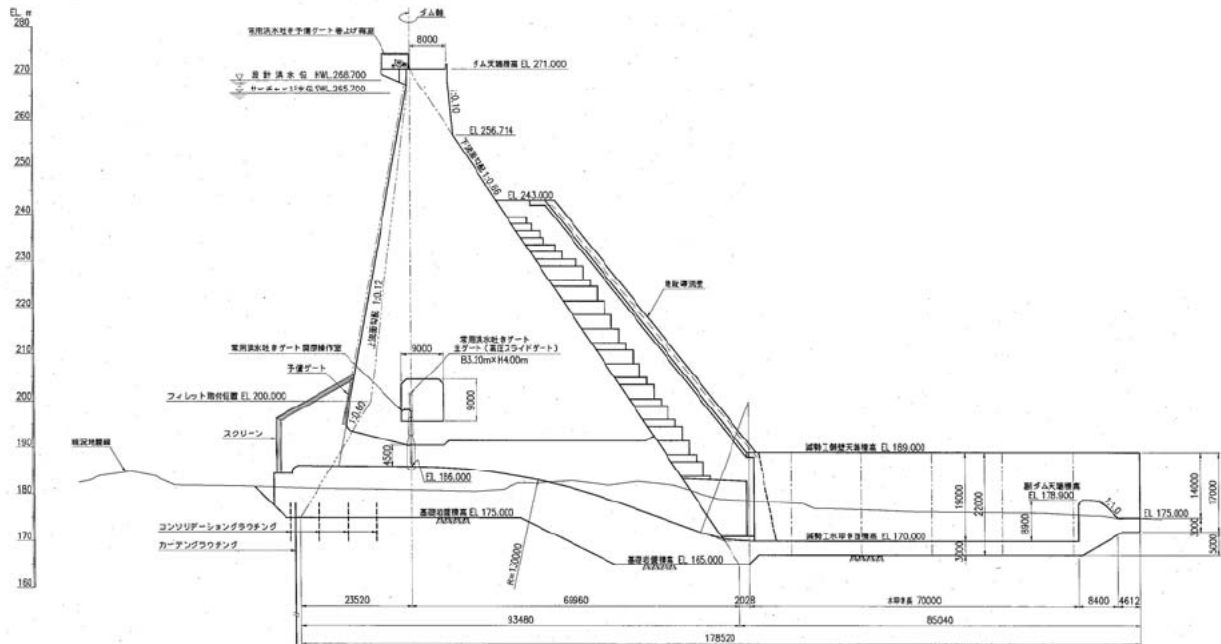


図-33 三笠ぼんべつダム 標準断面及び下流面図

大臣特認申請資料 (H20.9.26) より

標準断面図



下流面図

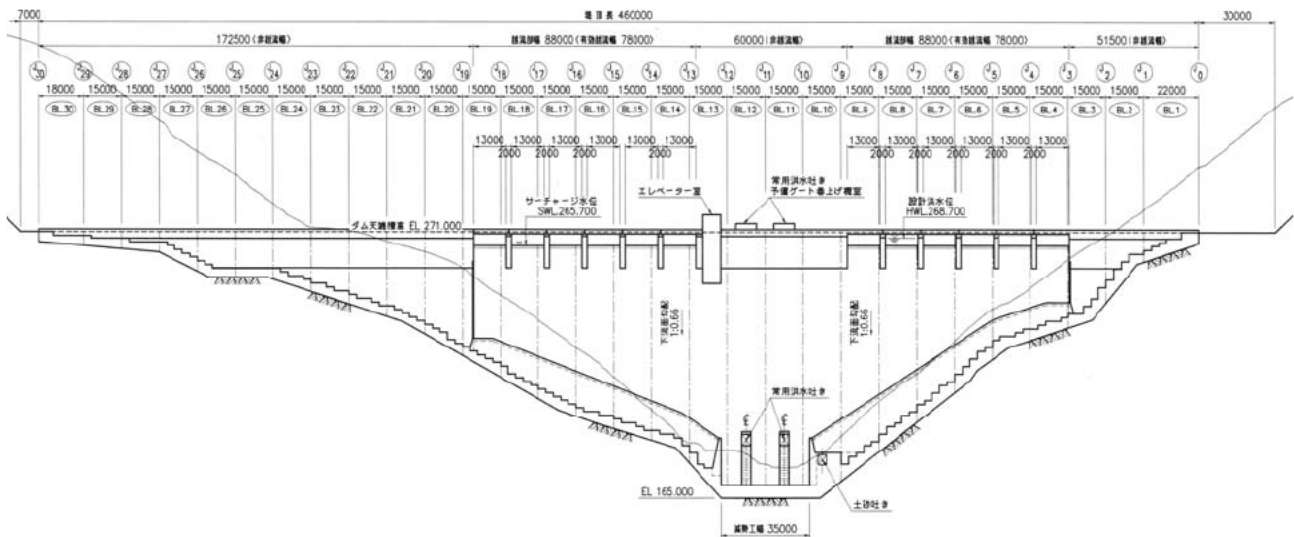
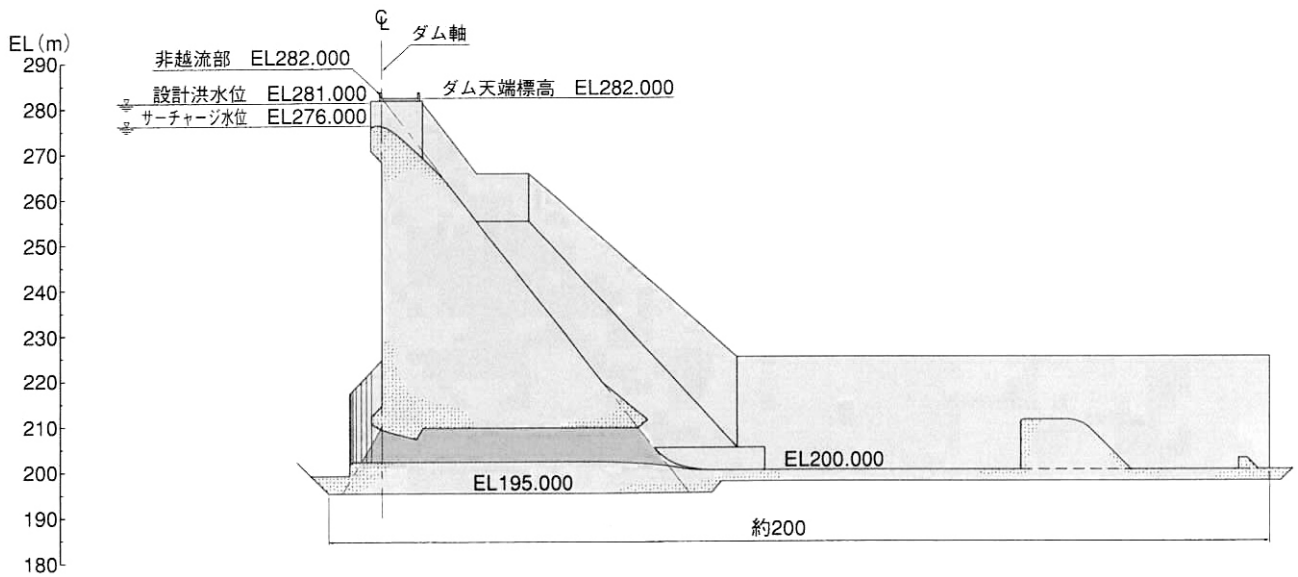


図-34 足羽川ダム 標準断面及び下流面図

基本設計会議資料【サイト・型式】(H20.7.10)より

標準断面図



下流面図

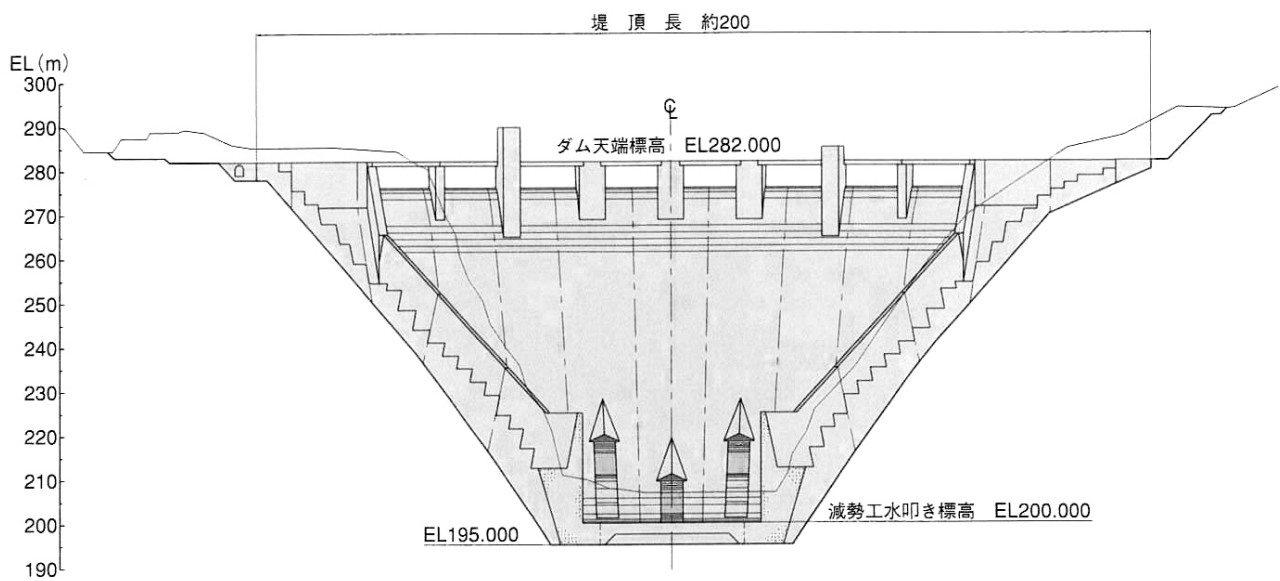


図-35 立野ダム 標準断面及び下流面図

国土交通省 九州地方整備局 立野ダム工事事務所ホームページより

<http://www.qsr.mlit.go.jp/tateno/damujigyo/aramasi.html>

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4173 January 2010

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754