

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 429

December 2007

重力式コンクリートダムの三次元地震応答解析 - 札内川ダムの三次元解析 -

水資源研究室

3D-seismic response analysis of concrete gravity dam - Satsunaigawa dam analysis -

Water Management and Dam Division

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

重力式コンクリートダムの三次元地震応答解析 - 札内川ダムの三次元解析 -

安田 成夫^{*)} 島本 和仁^{**)}
筋野 晃司^{***)} 佐野 貴之^{****)}
吉岡 英貴^{*****)} 清水 康記^{*****)}
平田 俊二^{*****)}

3D-seismic response analysis of concrete gravity dam — Satsunaigawa dam analysis —

Nario Yasuda Kouji Sujino
Kazuhito Shimamoto Takayuki Sano
Hidetaka Yoshioka Koki Shimizu
Shunji Hirata

概要

本資料は、札内川ダムにおいて実際に観測された加速度時刻歴波形を入力動に用いて三次元地震応答解析を行い、解析結果と観測結果の比較を行うことにより、重力式コンクリートダムの三次元解析の再現性について検討したものである。

キーワード：重力式コンクリートダム、地震応答解析、3次元解析、十勝沖地震

Synopsis

This document describes the three-dimensional seismic response analysis of a gravity-type concrete dam. We used a acceleration record monitored at Satsunaigawa dam for input and carried out the three-dimensional seismic response analysis and compared an analysis result and the observed value.

Key Words : concrete gravity dam、seismic response analysis、three-dimension analysis、Tokachioki earthquake

河川研究部 水資源研究室	Water Management and Dam Division, River Department
^{*)} 室長	Head
^{**)} 主任研究官	Senior Researcher
^{***)} 前) 主任研究官	Senior Researcher
^{****)} 前) 主任研究官	Senior Researcher
^{*****)} 前) 研究員	Researcher
^{*****)} 前) 交流研究員	Guest Research Engineer
^{*****)} 交流研究員	Guest Research Engineer

まえがき

世界有数の地震国である我が国は、過去に多くの大規模地震により多大な被害を受けてきた。中でも1995年1月の兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）を契機に大規模地震発生時の土木構造物の耐久性確認に対する社会的要請は従来にも増して高まっており、大規模地震に対するダムを含む土木構造物の安全性の評価に関する調査研究が精力的に行われている。

これらの情勢をふまえ、レベル2地振動に対するダムの耐震性能とその合理的な照査方法を示した『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説』が平成17年3月に策定され、現在試行されているところである。こうしたことから、大規模地震に対する耐震性能及びその挙動を把握することは必要不可欠となっている。

こうしたダムの地震に対する挙動に当たっては、有限要素法を用いた動的解析が用いられることが一般的である。しかし、その適用に当たっては、材料物性、モデルや境界条件の設定方法、入力地震動の設定方法等の多様な課題が残されている。実際の解析事例についても二次元解析を用いることが主流となっているのが現状である。

本資料は、最近解析事例が増えつつある三次元地震応答解析を用いた再現解析についてのとりまとめである。十勝沖地震等地震観測データの豊富な札内川ダムをモデルダムとして実際にダムサイトで観測された加速度時刻歴波形を入力動に用いて、構造物－貯水池－基礎岩盤の相互作用を考慮した連成系の三次元地震応答解析を行った。再現性を考慮しつつ各物性値等の設定し、三次元解析の特徴を踏まえた解析結果と観測結果比較することにより、三次元解析による再現性と堤体全体の応力状態の確認を行った。

平成19年12月

国土技術政策総合研究所 河川研究部 水資源研究室長 安田 成夫

目 次

1. 概要	1
2. ダム諸元および地震観測	
2. 1 ダム・基礎岩盤・貯水池の概要	7
2. 1. 1 ダム	7
2. 1. 2 基礎岩盤	7
2. 1. 3 貯水池	7
2. 2 地震観測	11
2. 2. 1 地震計の設置状況	11
2. 2. 2 観測された主な地震動	11
2. 2. 3 十勝沖地震時の地震動記録と分析	18
2. 3 物性値についての調査	19
3. 解析モデルの作成	
3. 1 メッシュサイズと時間刻みの設定基準	30
3. 2 ダム本体	31
3. 3 基礎岩盤	34
3. 4 貯水池	34
3. 5 境界条件	36
3. 6 モデル化結果	36
4. 解析手法	
4. 1 三次元ダムー貯水池ー基礎岩盤連成解析	44
4. 1. 1 連成解析の基本方程式	44
4. 1. 2 連成条件	46
4. 1. 3 境界条件	46
4. 2 粘性境界の解析手法	47
4. 2. 1 エネルギー逸散について	47
4. 2. 2 自由地盤の影響について	50
5. ダムおよび基礎岩盤物性の同定	
5. 1 物性同定手順	54
5. 2 ダムの剛性係数の概略的推定	55
5. 2. 1 堤体の剛性係数について	55
5. 2. 2 堤体の固有振動数について	55

5. 3	物性の同定	58
5. 3. 1	解析条件	58
5. 3. 2	入力地震動	59
5. 3. 3	動的解析による物性の同定	63
5. 4	まとめ	71
6.	初期応力解析と固有値解析	
6. 1	初期応力解析	100
6. 1. 1	解析条件	100
6. 1. 2	初期応力解析結果	102
6. 2	固有値解析	118
6. 2. 1	解析条件	118
6. 2. 2	固有値解析結果	118
6. 3	まとめ	120
7.	十勝沖地震時のダムの挙動再現解析	
7. 1	解析条件	141
7. 1. 1	物性条件	141
7. 1. 2	境界条件	141
7. 1. 3	入力地震動	141
7. 1. 4	出力項目	142
7. 2	解析結果	147
7. 3	再現性についての考察・評価	187
7. 3. 1	再現解析について	187
7. 3. 2	地震計の設置について	189
7. 4	地震時ダムの応力状態	190
7. 5	まとめ	209
	参考文献	211

本文

1. 概要

本資料は、重力式コンクリートダム地震時における挙動の再現性を、多数の地震計が配置され、地震記録を豊富に有する札内川ダムをモデルダムとして三次元地震応答解析を実施したものである。実際に観測された加速度時刻歴波形から、地震時における構造物－貯水池－基礎岩盤の相互作用を考慮して実施した三次元応答解析の結果と実際の地震時の観測結果を比較することで当該ダムの地震時の物性値を同定した上で、地震時のダムの挙動について考察するものである。

1.1 解析手順

ダム三次元応答解析および地震時挙動の再現性について、以下の手順にて行った。

1) 解析条件

①解析コード

エネルギーの吸収効率のよい境界条件の設定法である「三浦の粘性境界の理論」¹⁾を用いた、解析コードUNIVERSE²⁾を用いた。

②入力地震動

地震波形は、三次元引き戻し計算を実施しモデル底面から地震動として入力した。

2) モデル作成条件

作成するモデルの概要を図 1-1 と図 1-2 に示す。モデルは、ダムおよび基礎岩盤を有する三次元モデルとし、堤体三面図、ダム周辺地形図、貯水池を含む平面図等の資料に基づいて、適切に簡略化した。

①要素

地震計設置位置近傍が節点となり、地震時の貯水位を設定した。

②物性値

工事誌等から物性値を整理して初期値として用いるものとする。

③基本境界条件

モデル底面と側面を「三浦の粘性境界の理論」¹⁾を用いた粘性境界とした。

④荷重条件

初期応力解析および固有値解析を行った上で、動水圧を考慮した三次元応答解析を行う。

3) 解析

重力式コンクリートダムの 3 次元モデルにより観測記録の再現解析を行う³⁾。

4) 考察

再現解析結果と実測記録を比較し、地震時のダムの挙動を考察する。

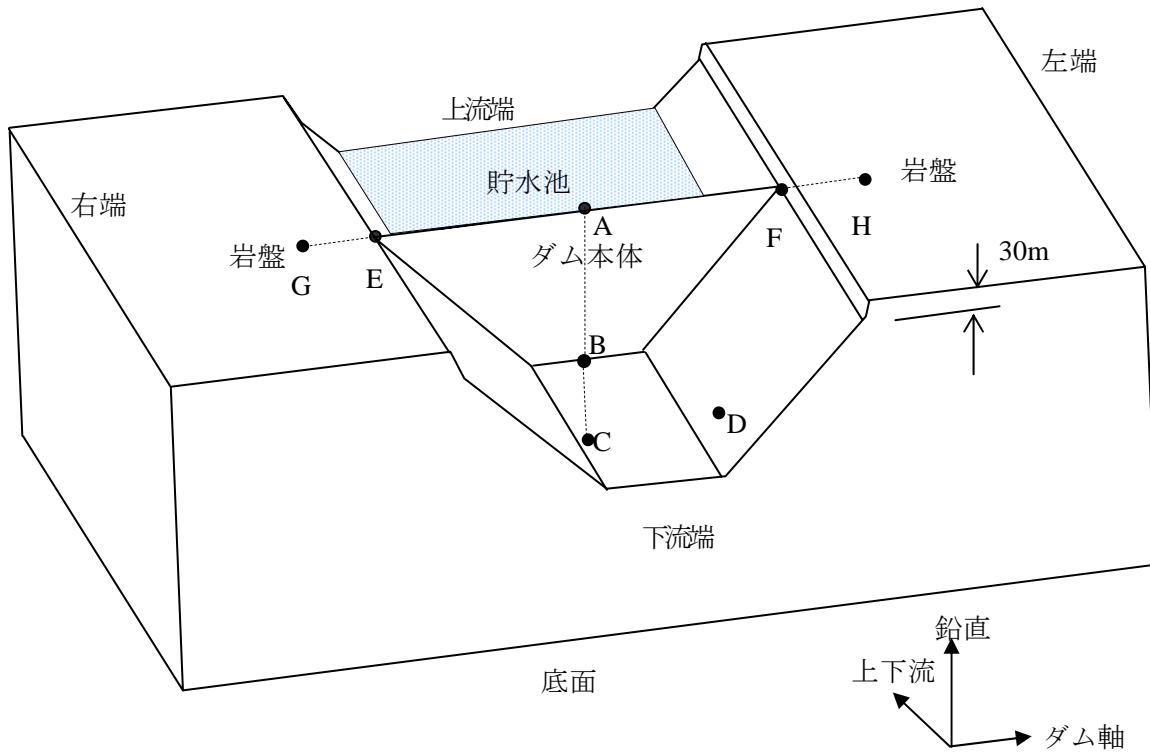


図 1-1 解析モデルのイメージ図

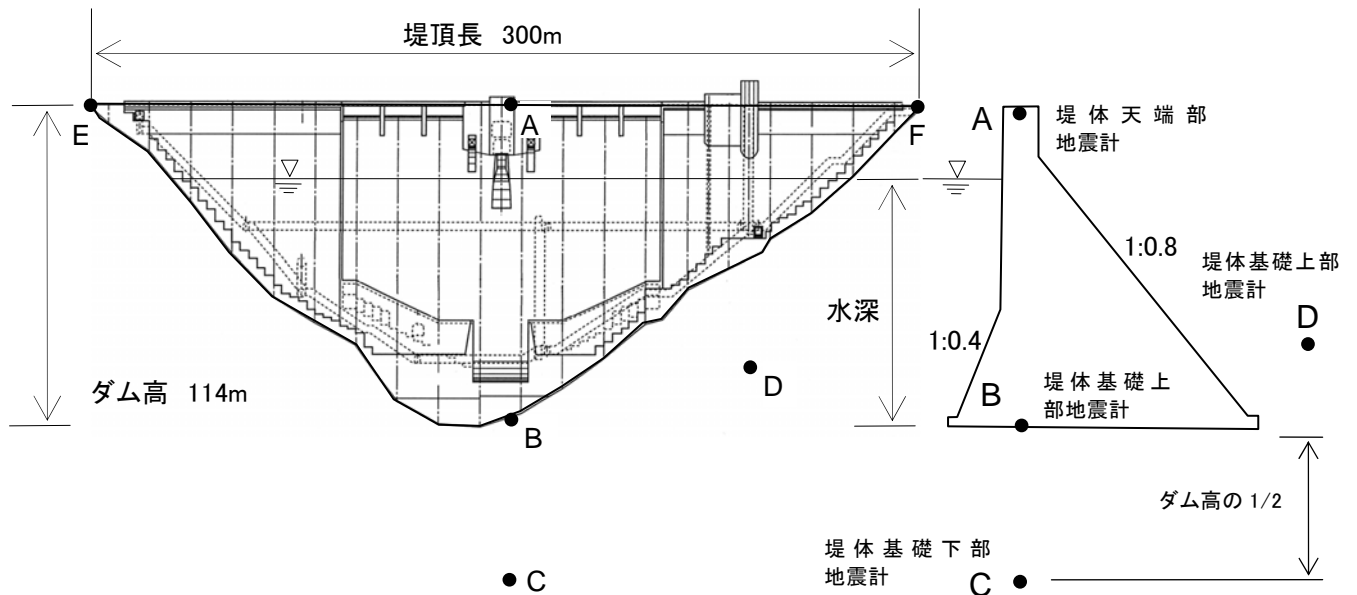


図 1-2 地震計の設置位置図

1.2 検討内容

1.2.1 ダムの解析モデルの作成

汎用ソフトFEMAP (Ver.9.0) を用いて、ダムおよび基礎岩盤の有限要素メッシュを8節点要素により作成する。また、貯水池の基本寸法および分割数を規定し、UNIVERSE²⁾により差分メッシュを作成する。

(1) 堤体

堤体の三面図に基づき、堤体の有限要素モデルを作成する。モデル化に伴い以下の点に着目した。

- [堤体の詳細形状]：堤体の地震時挙動の再現性に着目し、地震観測記録に影響を与える要因を分析した上で、考慮すべき堤体の詳細形状をモデルに導入する。常用洪水吐およびゲート操作室は複雑な構造であるが、天端中央の地震時挙動に対する影響が大きいと考えられ、詳細な構造（ゲート操作室、上段オリフィス空洞、下段オリフィス空洞、呑口部、吐口部等）を最大限にモデル化する。一方、エレベーターおよび取水塔などはダム堤体の地震時挙動に対する影響、特に観測された地震記録に対する影響は小さいと考え、モデル化はしない。
- [岩着部]：堤体と基礎岩盤との結合面については、後述する（式（1）参照）基準により定められたサイズの要素で反映し得る詳細な岩着部形状をモデル化する（要素毎の直線からなる線で岩着部の形状とする）。
- [その他]：モデル化の際に、貯水池の水面に合わせて有限要素のメッシュ線を、地震観測位置の節点に一致するように配置する。

(2) 基礎岩盤

[範囲]：

UNIVERSE²⁾を用いた解析では、基礎岩盤周辺の自由地盤が解析に取り込まれているため、基礎岩盤のモデル化範囲を堤体と基礎岩盤の相互作用領域より大きく取った場合、解析結果の精度が保証されると考え、地震観測位置および地震動レベルを考案して、以下の範囲をモデル化した（図1-1参照）。

- 左端　　：ダム天端の左端よりダム高さの1.5倍（左岸側の岩盤範囲を左岸リムトンネル内の地震観測点より70m奥までの範囲とする。）。
- 右端　　：ダム天端の右端よりダム高さの1.5倍（右岸側の岩盤範囲を右岸リムトンネル内の地震観測点より80m奥までの範囲とする。）。
- 下流端　：ダム底部下流端からダム高さの2.0倍（下流開放基盤面の地震観測点Dはダム上流面より約260mのところにあるため、下流側の岩盤範囲をこの観測点より75m大きなものにする。）。
- 上流端　：ダム底部上流端からダム高さの1.0倍。
- 地山　　：ダム天端より高さ30m（リムトンネル内の地震挙動を再現するため、観測点上方の地山をできるだけモデル化する）上端面を高くする。
- 底面　　：ダム底部からダム高さの1.0倍（岩盤下部地震観測点Cはダム底部よりダム高さの1/2下方にあり、この点よりさらにダム高さの1/2、深い範囲とする。）。

[地形] :

ダムに接する上下流方向の地形の変化はあまりなく、本業務ではチャンネル状の単純な谷形状とする。

(3) メッシュサイズと時間刻みの設定基準

解析結果の精度を確保するために、式(1)に示すような物性値（せん断波速度 V_s ）、要求される解析精度（解析結果に含まれる振動成分の最小周期 T_{min} ）と要素サイズとの制約条件を用い、最大許容メッシュサイズ（ ΔL ）を決定する。

$$\frac{\Delta L}{V_s} \leq \frac{T_{min}}{\pi} \quad (1)$$

時間領域における地震応答解析の時間刻みは式(2)により設定する。

$$\Delta t < \frac{T_{min}}{\pi} \quad (2)$$

ダムサイトにおける 2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震観測結果を基に得られたダム底面(岩盤上部)に対する天端中央の加速度の伝達関数から、本ダムの 7 次、又は 8 次モードの固有周期は約 0.06 秒であると判断できる。この振動成分まで解析の精度を保証するため、本解析で $T_{min} = 0.05$ 秒、即ち、精度保証最大周波数は 20Hz とした。

ダム本体について、せん断波速度 V_s を 3200 m/s と仮定し（弾性係数は約 25000 MPa）、式（1）により求められたダム本体の最大メッシュサイズは 50.9m、式（2）により得られた時刻歴解析の時間刻みは 0.0159 秒であるが、より精度の高い解析結果を得るために、ダム本体の最大メッシュサイズを 10m、時刻歴解析の時間刻みを 0.01 秒と定めた。

次に、基礎岩盤のメッシュについては、上述手順と同じ、式（1）により定めた要素サイズを用いて、モデル化を行う。後述する物性条件でわかるように、基礎岩盤のせん断波速度 V_s は 3060 m/s であるので、堤体と同じ解析精度（最大振動数 20Hz）を維持するために、式（1）により得られた基礎岩盤の最大許容メッシュサイズは 48.7m である。そこで、基礎岩盤の最大メッシュサイズを 25m と設定した。

よって、ダム本体および基礎岩盤のメッシュ分割ならびに時刻歴解析の時間刻みは、表 1-1 に示す仕様となる。

表 1-1 メッシュ分割および時刻歴の時間刻み

	FEM メッシュサイズ(m)		時間刻み(秒)	
	理論の許容値	実際使用値	理論の許容値	実際使用値
ダム本体	50.9	10	0.0159	0.01
基礎岩盤	48.7	25		

(4) 貯水池

貯水池のダム軸方向断面の形状は、堤体上流面のダム軸方向断面への投影形状と同じとし、上流側へは水深の 3 倍の範囲（メッシュサイズ 10.0m）とした。貯水池のモデル化は差分法に基づき、プログラム UNIVERSE²⁾により解析の際に自動的に行われる。

(5) 境界条件

[ダム堤体]：上流面は連成条件を介して貯水池と連成し、岩着部は基礎岩盤と剛結とした。

[基礎岩盤]：初期応力解析では基礎岩盤の側方境界は鉛直ローラー、底面では固定条件とした。動的解析では側方境界および底面境界では粘性境界とした。さらに、基礎岩盤の周辺に自由地盤をモデル化する。

[貯水池]：底面および両側の地山斜面では部分吸収条件、上流端は完全吸収条件、表面は表面波条件を用いる。ただし、貯水池と基礎岩盤との連成は考慮していない。

(6) 物性条件

観測されたダム底部の最大地震加速度は 70 gal 以下であるので、ダム堤体および基礎岩盤は線形弾性材料と仮定した。物性値は、工事誌および地震観測結果により、基礎岩盤並びにダム堤体の弾性係数および減衰係数を推定し、再現解析の初期物性とした。

ボーリングコアを利用した岩石試験（工事誌：表-2-2-6 岩石試験結果総括表）によると、ダムサイトの岩盤は主に砂岩と泥質岩であり、平均値として、密度 2.74 g/cm^3 、せん断波速度 $V_s 3060 \text{ m/s}$ である。基礎岩盤の減衰係数としては、地震観測結果を基にハーフパワー法により求める（ただし、このように求められた減衰係数には岩盤および貯水池へのエネルギー逸散が含まれていることを踏まえる必要がある。）。

ダムコンクリートについては、コンクリート配合区分として外部コンクリートやRCD用コンクリートなどに区分されているが、RCD用コンクリートの体積の割合が圧倒的に大きいため、再現解析に用いる初期物性値として、RCD用コンクリートの試験値を用いた。その密度は 2.44 g/cm^3 （材齢 28 日）である（工事誌：表-4.6.22 品質管理結果一覧表）。ダムコンクリートの弾性係数については、固有値解析の 1 次固有振動数と地震観測結果から得られた天端中央のダム底部に対する加速度伝達関数の 1 次ピーク振動数とが一致するように調整する。堤体の減衰係数については、地震観測結果を基にハーフパワー法により求めた。

1.2.2 固有値解析

ダム本体の弾性係数および固有振動特性を把握するために、固有値解析を行う。固有値解析の 1 次固有振動数と地震観測結果から得られたダム本体の加速度伝達関数の 1 次ピーク振動数が一致するように、ダム本体の弾性係数を調整する。ただし、観測結果により得られた伝達関数のピーク振動数が貯水池の影響を受けていることを考慮した。ダム本体の弾性係数を同定した上、空虚状態のダム堤体の 1 次～10 次の固有振動数と固有振動モードを求める。そのうちの 1 次固有振動数は地震応答解析におけるレーリー型の減衰評価に用いた。

1.2.3 静的応力解析

地震時のダムの応力状態を把握するために、初期の静的応力解析を行う。その際に、ダム本体の築堤過程を数ステップに分けた逐次築堤過程解析および地震時水位の静的水圧を考慮した。

1.2.4 地震時挙動の再現性解析

(1) 再現性解析

上述した解析条件を用い、三次元ダム本体—基礎岩盤—貯水池連成系の地震応答解析を行い、2003年9月26日4:50に発生した地震時のダムの挙動を再現する。

解析に用いる入力地震動は、岩盤下部の地震観測点で計測された地震動を三次元引き戻し計算を実施し、解析モデルの底面で得られた地震動とする。引き戻し計算は三次元動的解析に基づく伝達関数法により行う。

再現性解析結果について、以下の項目を出力する。

- ① 地震観測点の加速度時刻歴。
- ② 地震観測点の加速度時刻歴のフーリエスペクトル。
- ③ 基礎下部観測点に対する基礎上部観測点およびリムトンネル内の観測点における加速度の伝達関数。
- ④ 基礎上部に対する天端中央および堤体両端観測点の加速度の伝達関数。
- ⑤ 最大加速度応答分布。
- ⑥ 地震時の応力状態。

(2) 考察・検討

解析結果に対して以下の項目に着目し、考察・検討する。

- ① 地震時において、ダム本体および基礎岩盤の物性値の設定について。
- ② 地震計設置位置の妥当性。
- ③ 再現解析手法の妥当性。

1.3 主な成果

札内川ダムの堤体—基礎岩盤—貯水池を対象にして、解析プログラムUNIVERSE (Ver.5.1)²⁾を用い、2003年9月26日に発生した十勝沖地震時のダムの動的挙動を再現解析した。解析により以下の観測結果が概ね再現された。

- ① ダム天端中央および底部の加速度応答並びにダム底部から天端までの加速度の増幅率。
- ② 基礎岩盤の下部観測点から上部観測点までの加速度の増幅率。
- ③ ダム本体の一次固有振動数。

これにより、観測点のみでなく、地震時当該ダムの動的挙動（加速度応答、応力応答など）を詳細に把握することができた。

しかし、ダム天端の両端および両岸地山の観測点における解析結果と観測結果の差が比較的大きく、基礎岩盤の地質構造を反映したモデル化手法等が今後の課題として考えられる。

2. ダムの諸元および地震観測

2.1 ダム・基礎岩盤・貯水池の概要

2.1.1 ダム

札内川ダムは、十勝川水系札内川の北海道河西郡中札内村地先に建設された多目的ダムである。施工は、RCD（Roller Compacted Concrete for Dam）工法である。

解析対象とするダムの諸元は以下の通りである。

形式	: 重力式コンクリートダム（RCD）
堤高	: 114.0 m
堤頂長	: 300.0 m
堤体積	: 770.0 千 m^3
天端標高	: EL.488.0 m
越流標高	: EL.484.0 m
最低基礎面標高	: EL.374.0 m
設計震度	: 0.12g

ダムの平面図、標準断面図、上流面図および下流面図をそれぞれ図 2-1、図 2-2、図 2-3 および図 2-4 に示す。

札内川ダム工事誌（第 1 章事業計画、1.3 計画の概要、表-1.3.2 札内川ダム計画概要（2））により、ダム堤体の設計用物性は以下の通りである。

単位体積重量	: 2.3 tf/m^3
弾性係数	: 330,000 kgf/cm^2 (32362 MPa)
ポアソン比	: 0.2

2.1.2 基礎岩盤

ダムサイトの基礎の状況を図 2-5 に示す。ダム基礎の地質は主にヤオロマップ砂岩、一部は泥質であり、大規模な断層破碎帯はない。岩級区分は図 2-5 に示すとおりであり、ダム下方岩盤は B 級、両岸地山は CH 級、または CM 級に属する。

札内川ダム工事誌（第 2 章調査、2.2.4 ダムサイトの地形地質とダム軸の選定、表-2.2.6 岩石試験結果総括表）により、基礎岩盤の物性値は以下のとおりである。

平均せん断波速度	: 3060 m/s
単位体積重量	: 2.74 tf/m^3

2.1.3 貯水池

貯水池の河床平坦部の幅は約 60m で、斜面部の傾斜は約 40° 前後である。

常時満水位	: EL.474.0 m
低水位	: EL.447.5 m
総貯水容量	: 54,000 千 m^3

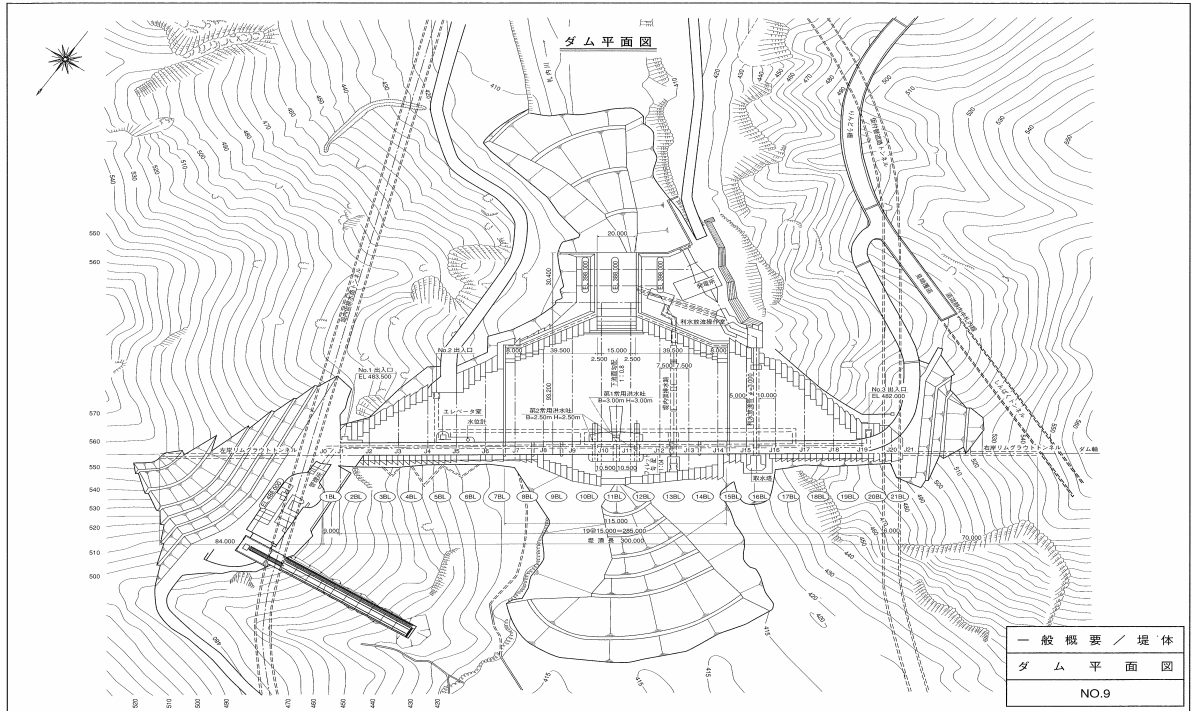


図 2-1 ダムおよび周辺地形の平面図

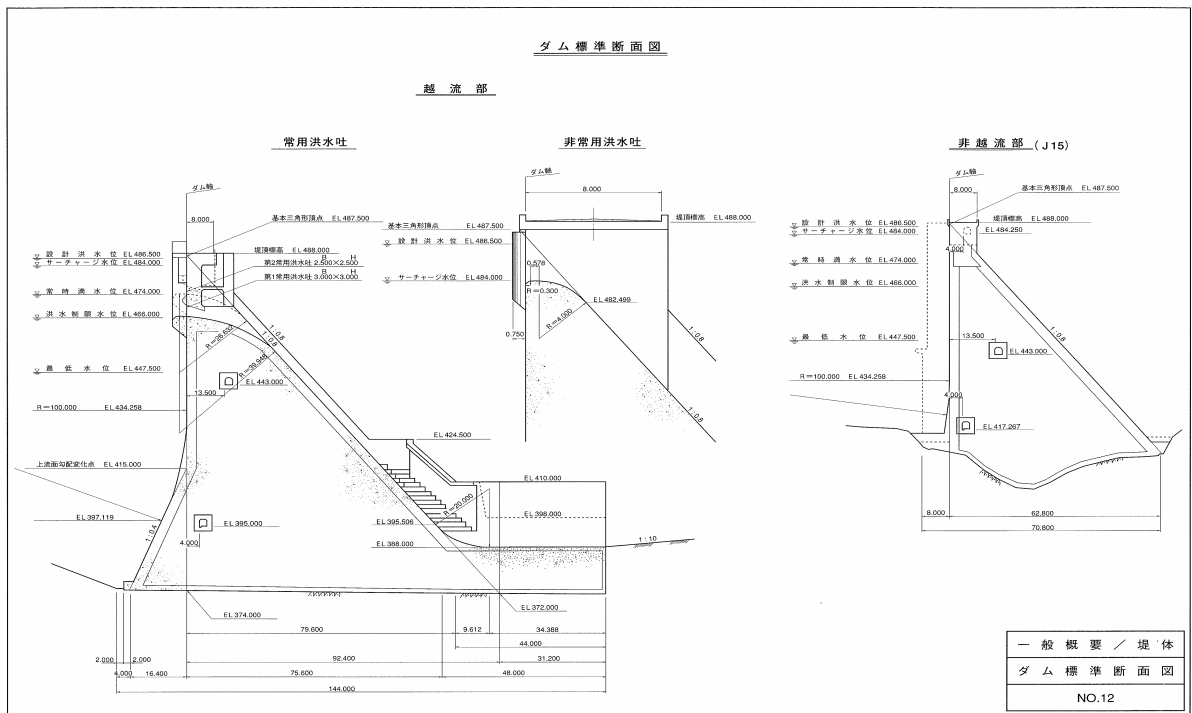


図 2-2 ダムの標準断面図

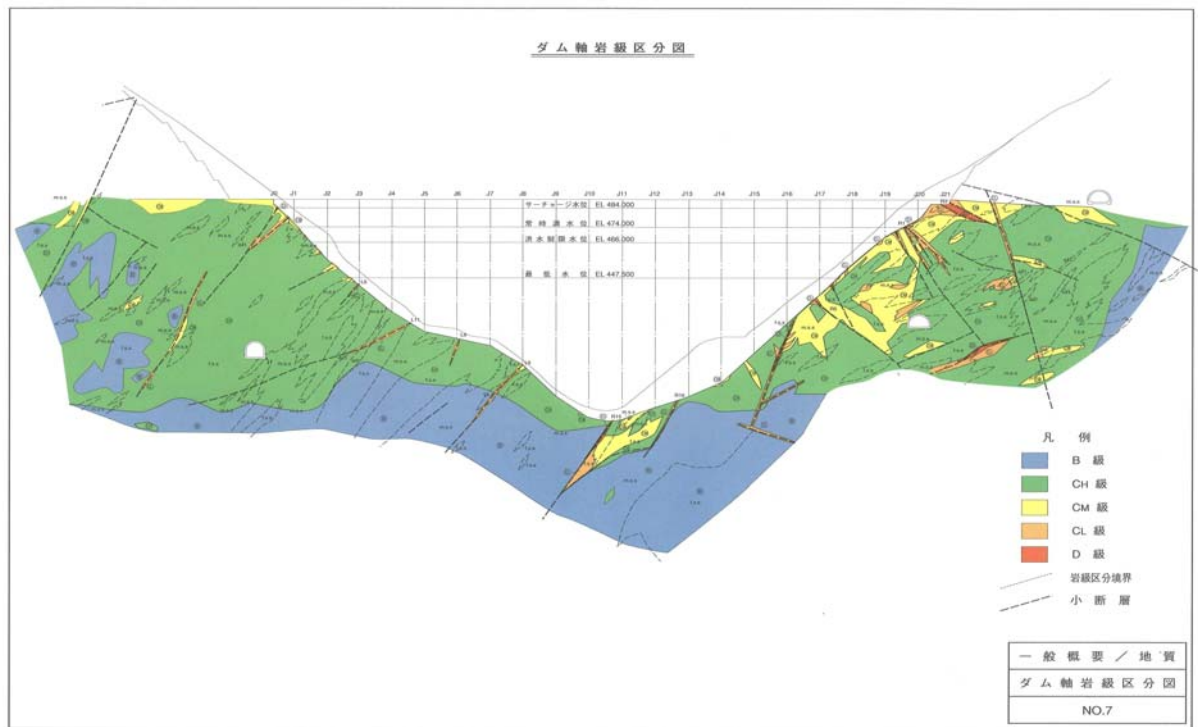


図 2-5 ダムサイトの地形断面と岩級区分

2.2 地震観測

2.2.1 地震計の設置状況

札内川ダムでは、多数の地震計が設置されており、1997 年以来多くの地震記録を得ている。図 2-6 には地震計の設置位置を示し、具体的な個々の情報を表 2-1 に示す。

表 2-1 札内川ダムの地震計設置位置情報

地震計設置場所	標高(m)	ダム軸方向位置	上下流方向位置
岩盤下部	317.0	J11 より左へ約 4m	上流面より下流側約 8.5m
岩盤上部	373.0	J11 より左へ約 4m	上流面より下流側約 7m
下流開放基盤	404.0	J4 と J5 の間	上流面より下流側約 260m
左岸リムトンネル内	488.7	J0 より左へ約 85m	上流面相当
右岸リムトンネル内	488.7	J21 より右へ約 67m	上流面相当
ダム堤体左岸部	484.5	J1 より左へ約 4m	ダム軸
ダム堤体天端部	488.5	J10 より右へ約 4m	上流面より下流側約 9m
ダム堤体右岸部	478.4	J19 より右へ約 1m	上流面より下流側約 6.5m

2.2.2 観測された主な地震動

観測された地震動のうち、図 2-6 に示すダム底面（F2 点）の上下流方向の最大加速度が 10gal 以上の記録を抽出し、各観測点の最大加速度値を表 2-2 に示す。また、これらの地震時、ダム底面に対するダム天端中央（T2 点）の加速度応答の増幅率を表 2-3 に、岩盤下部（F1 点）に対する他の基礎岩盤の加速度増幅率を表 2-4 に示す。

ダム本体の加速度の増幅率については、上下流方向では最小でも 7.8 倍であり、高さ 114m のコンクリート重力式ダムとしてはかなり大きいものである。また、基礎岩盤の増幅率については、場所によって、かなり異なり、地質および地形の特性による現象ではないかと考える。

表 2-2 における上位 4 個の地震記録の加速度応答スペクトルを計算し、その主な箇所の特長を比較し、その主な箇所のスペクトル比を図 2-7～図 2-10 に示す。これらの地震は震源特性、伝播特性などが異なると考えられるが、ダム本体の加速度応答スペクトル比としては、ほぼ同じ周期にピークが表れている。一方、基礎岩盤の加速度応答スペクトル比にはピークの周期が地震によって、ある程度の差が見受けられる。

また、表 2-5 に地震時水位と加速度の増幅率をまとめ、図 2-11 にその対応関係を示す。これは水位がダムの応答に及ぼす影響をみるために整理したものであるが、図 2-11 に示すように、水位 461m～473m の場合、明瞭な水位と加速度の増幅率の変化関係はなかった。

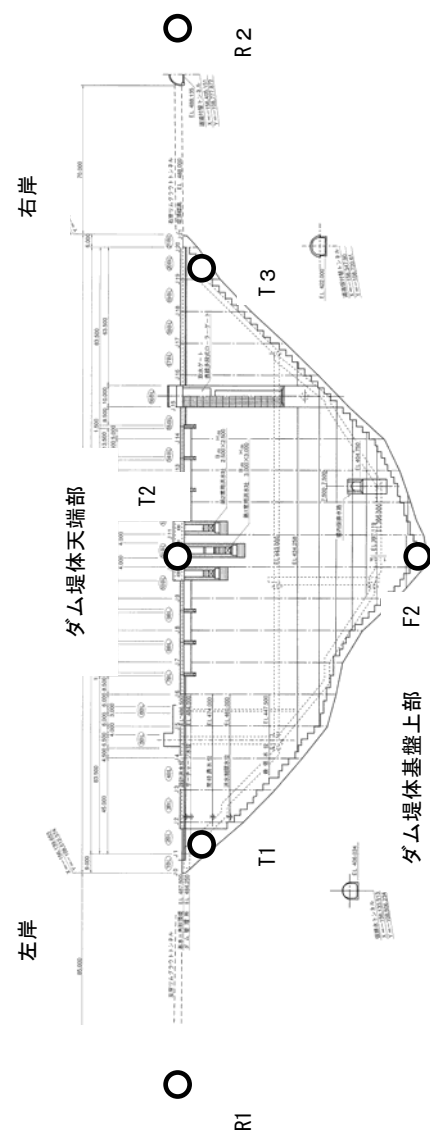
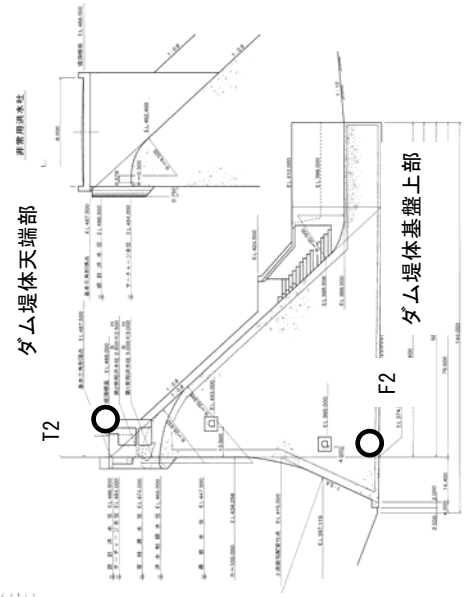
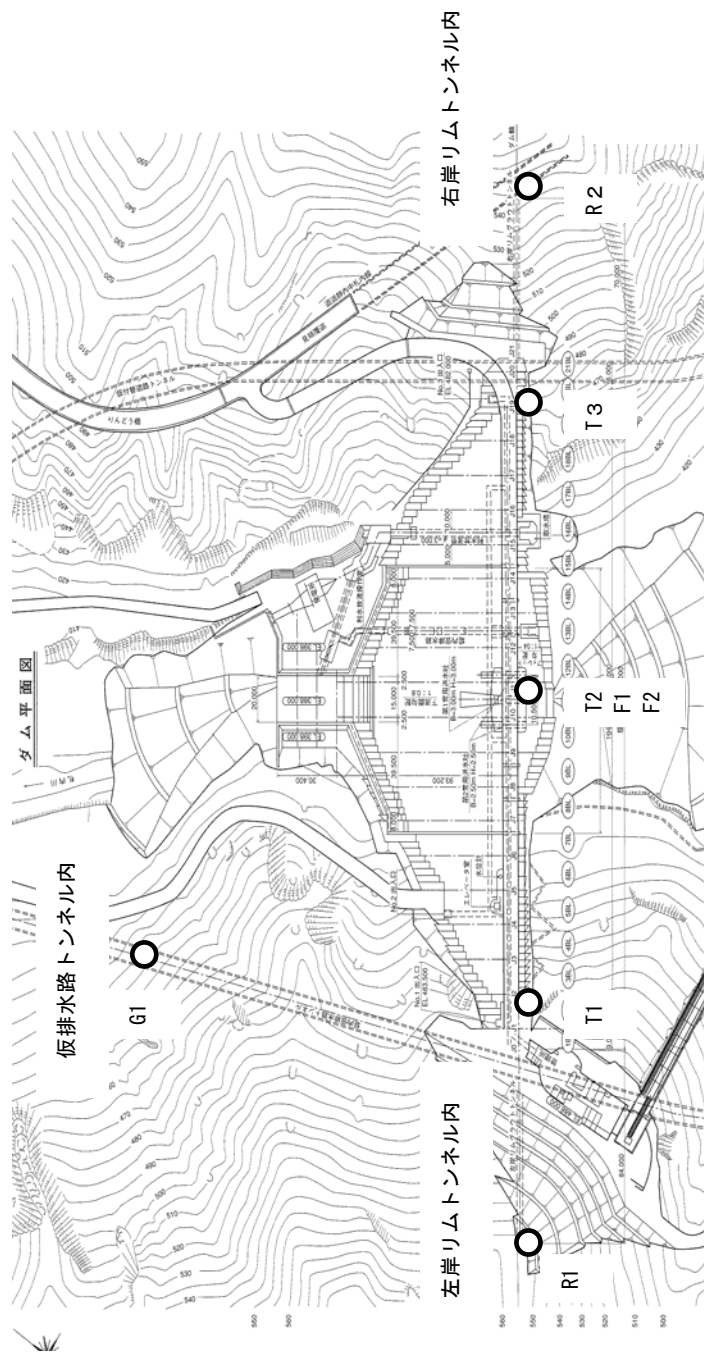


図 2-6 札内川ダム地震設計設置位置

表 2-2 観測された主な地震動（岩盤上部で 10gal 以上）

起動時刻	最大値 (gal)	継続時間 (sec)	堤体天端部			岩盤上部			岩盤下部			左岸リムトンネル内			堤体左肩			堤体右肩			右岸リムトンネル内			ダム下流開放基盤		
			上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直
			001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024
1999/05/13 02:59	296.0	88	296.0	246.2	98.8	37.9	40.9	22.1	23.6	41.1	26.4	37.8	44.1	23.5	118.6	153.6	83.4	95.6	125.8	63.5	41.2	46.5	35.6	31.1	50.9	32.7
2002/07/28 20:31	92.8	52	92.8	35.3	21.6	11.0	7.3	5.6	5.9	5.5	4.5	8.7	7.1	10.6	25.7	17.4	16.1	24.8	21.7	19.7	12.9	10.0	10.3	5.4	5.5	9.2
2003/01/07 03:27	223.0	43	223.0	48.5	30.9	15.0	10.3	6.9	12.1	9.4	6.0	13.9	9.2	6.7	35.5	25.4	15.3	43.8	36.6	22.3	20.3	15.4	11.0	11.7	8.8	10.8
2003/06/18 13:36	100.4	35	100.4	38.0	26.8	10.2	6.5	6.3	9.3	6.4	3.8	8.1	6.7	7.9	24.5	20.7	14.7	33.3	15.3	13.4	18.0	7.9	7.0	7.7	7.9	10.6
2003/09/26 04:50	676.7	204	676.7	303.5	206.8	61.5	67.0	56.3	51.0	68.9	46.6	66.1	64.7	72.1	199.3	216.2	116.9	214.1	195.6	151.5	79.1	98.2	103.3	59.1	74.8	69.0
2003/09/26 06:08	182.8	121	182.8	81.3	40.9	22.8	15.8	17.1	18.6	13.7	14.2	22.9	18.5	23.6	41.5	38.6	33.4	55.0	52.6	34.0	28.6	29.6	25.3	17.7	15.5	21.3
2003/11/24 21:18	123.8	61	123.8	50.0	38.4	13.6	9.5	9.9	11.3	9.1	7.4	10.5	11.4	14.2	36.4	41.8	20.6	34.7	33.8	26.0	18.0	18.1	15.5	9.8	7.8	8.9
2004/11/29 03:32	123.6	103	123.6	34.5	21.3	10.6	9.8	10.1	8.5	11.2	9.0	14.9	13.0	14.9	25.4	22.4	13.9	28.5	26.3	20.8	14.3	12.7	16.9	13.0	9.6	11.4

表 2-3 主な地震時のダム本体の増幅率 (T2/F2)

起動時刻	最大値 (gal)	応答倍率		
		上下流	ダム軸	鉛直
1999/05/13 02:59	296.0	7.8	6.0	4.5
2002/07/28 20:31	92.8	8.5	4.8	3.9
2003/01/07 03:27	223.0	14.8	4.7	4.5
2003/06/18 13:36	100.4	9.8	5.8	4.3
2003/09/26 04:50	676.7	11.0	4.5	3.7
2003/09/26 06:08	182.8	8.0	5.1	2.4
2003/11/24 21:18	123.8	9.1	5.3	3.9
2004/11/29 03:32	123.6	11.7	3.5	2.1
平均		10.1	5.0	3.7

表 2-4 主な地震時岩盤下部(F1)に対する基礎岩盤の増幅率

起動時刻	岩盤上部(F2/F1)			左岸リムトンネル内(R1/F1)			右岸リムトンネル内(R2/F1)			ダム下流開放基盤(G1/F1)		
	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直
1999/05/13 02:59	1.6	1.0	0.8	1.6	1.1	0.9	1.7	1.1	1.3	1.3	1.2	1.2
2002/07/28 20:31	1.8	1.3	1.2	1.5	1.3	2.4	2.2	1.8	2.3	0.9	1.0	2.0
2003/01/07 03:27	1.2	1.1	1.2	1.2	1.0	1.1	1.7	1.6	1.8	1.0	0.9	1.8
2003/06/18 13:36	1.1	1.0	1.6	0.9	1.0	2.1	1.9	1.2	1.8	0.8	1.2	2.8
2003/09/26 04:50	1.2	1.0	1.2	1.3	0.9	1.5	1.6	1.4	2.2	1.2	1.1	1.5
2003/09/26 06:08	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.7	1.5	2.2	1.8	1.0	1.1	1.5
2003/11/24 21:18	1.2	1.0	1.3	0.9	1.3	1.9	1.6	2.0	2.1	0.9	0.9	1.2
2004/11/29 03:32	1.2	0.9	1.1	1.7	1.2	1.7	1.7	1.1	1.9	1.5	0.9	1.3
平均	1.3	1.1	1.2	1.3	1.1	1.7	1.7	1.6	1.9	1.1	1.0	1.7

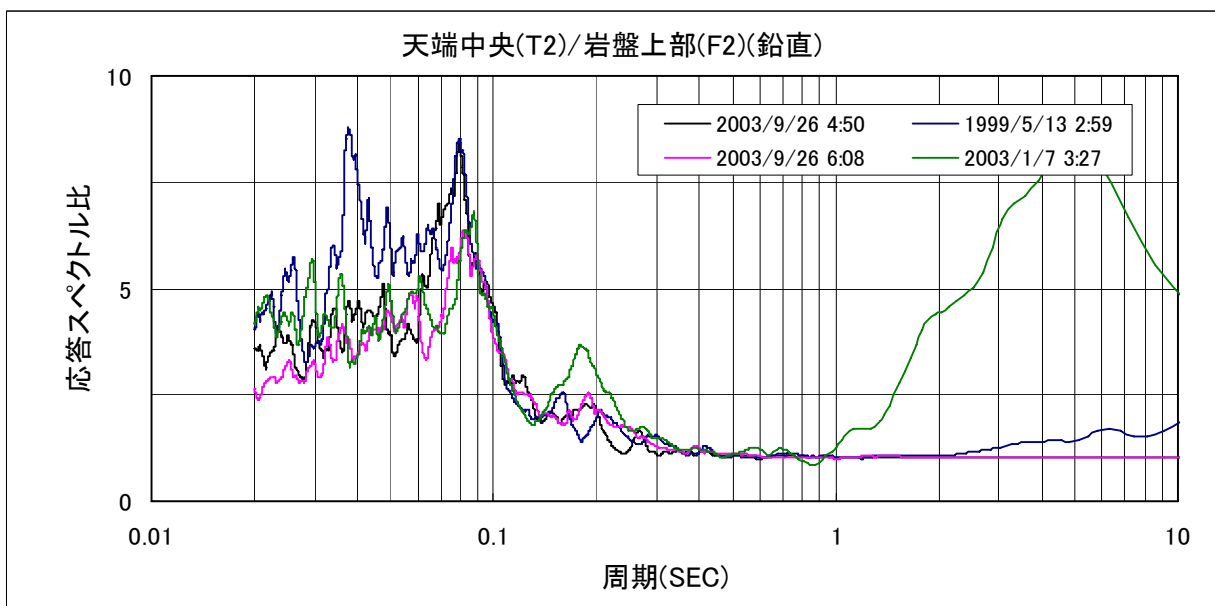
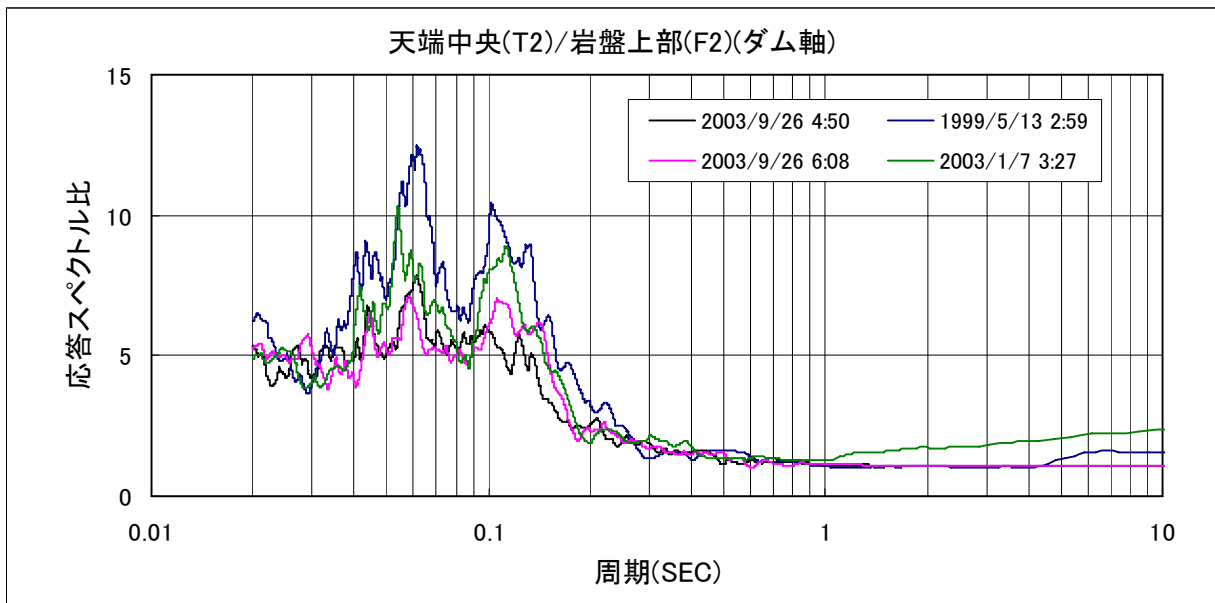
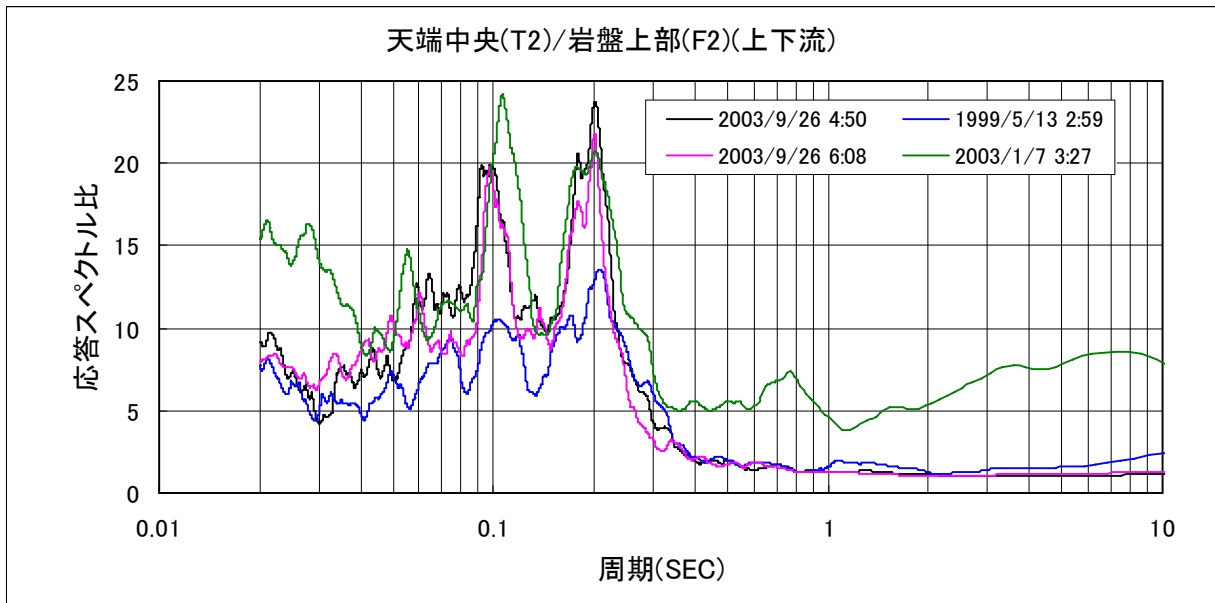


図 2-7 岩盤上部に対する天端中央の加速度応答スペクトル比

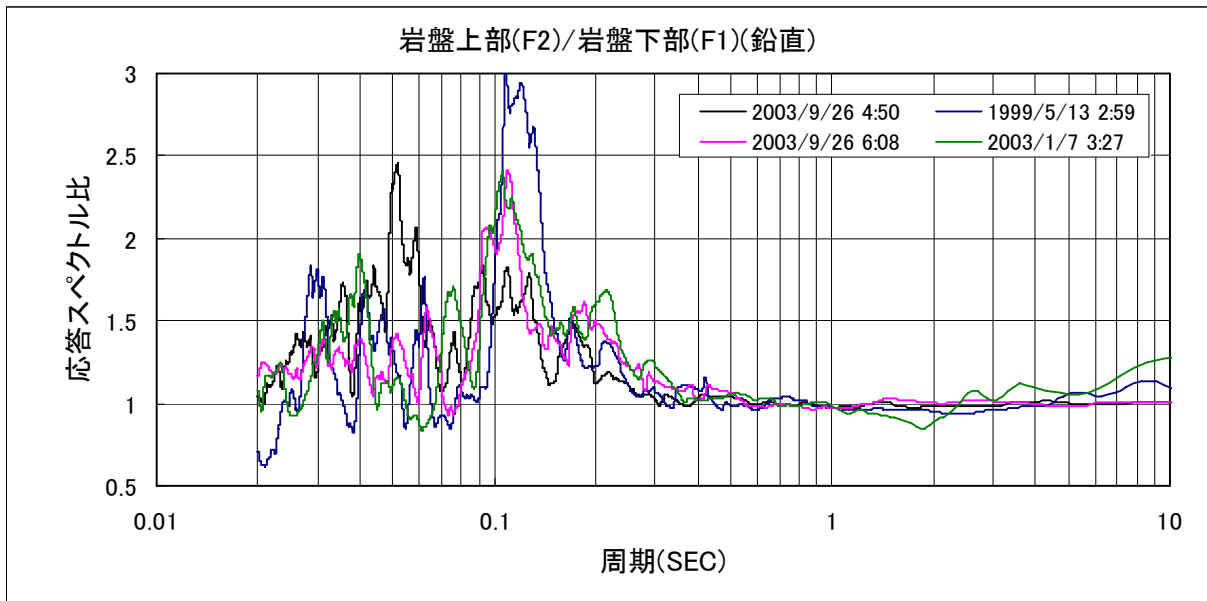
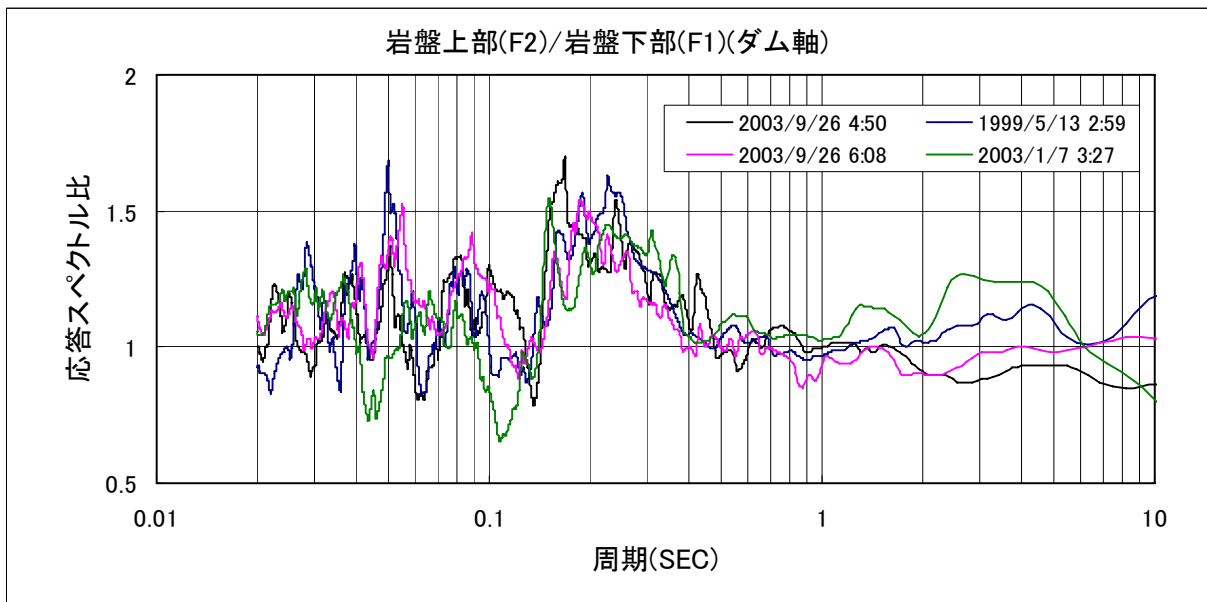
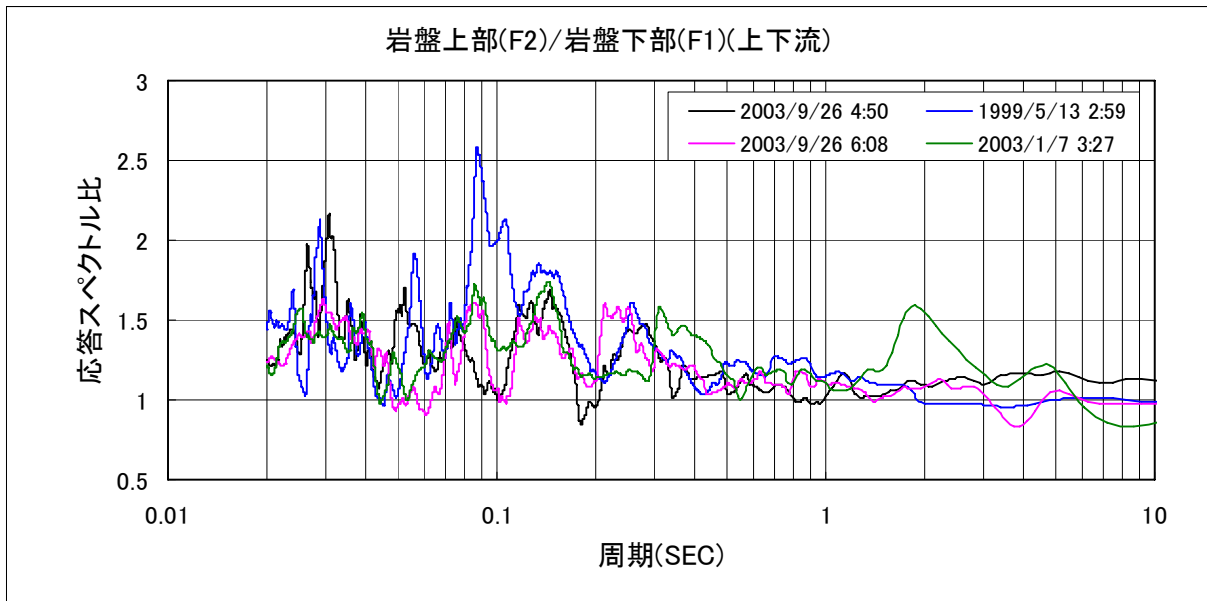


図 2-8 岩盤下部に対する岩盤上部の加速度応答スペクトル比

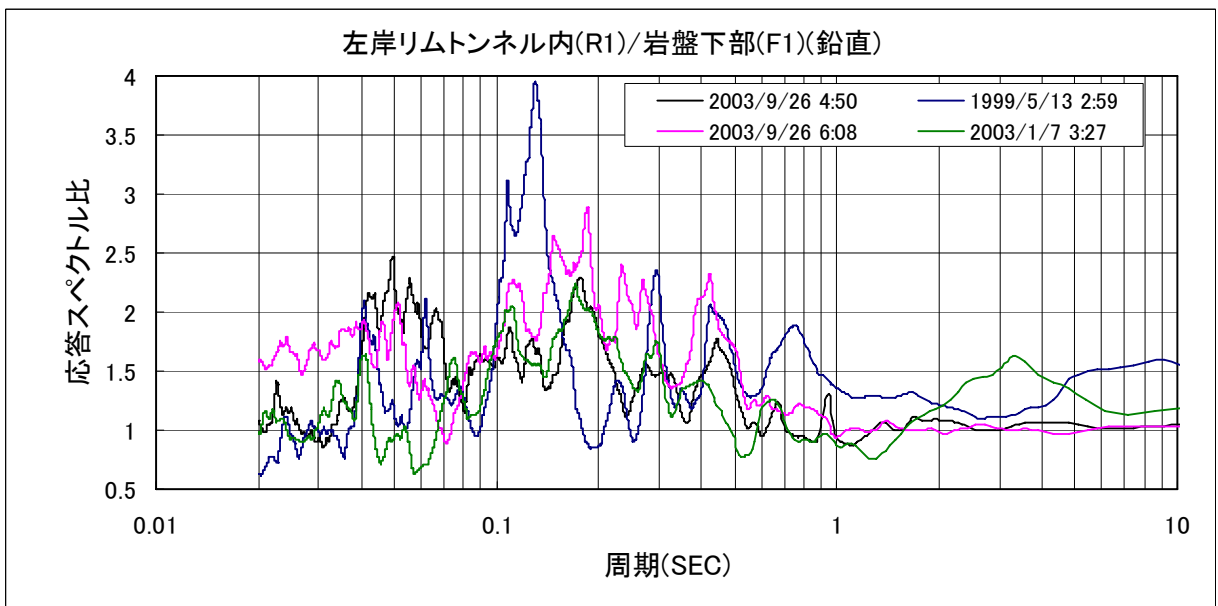
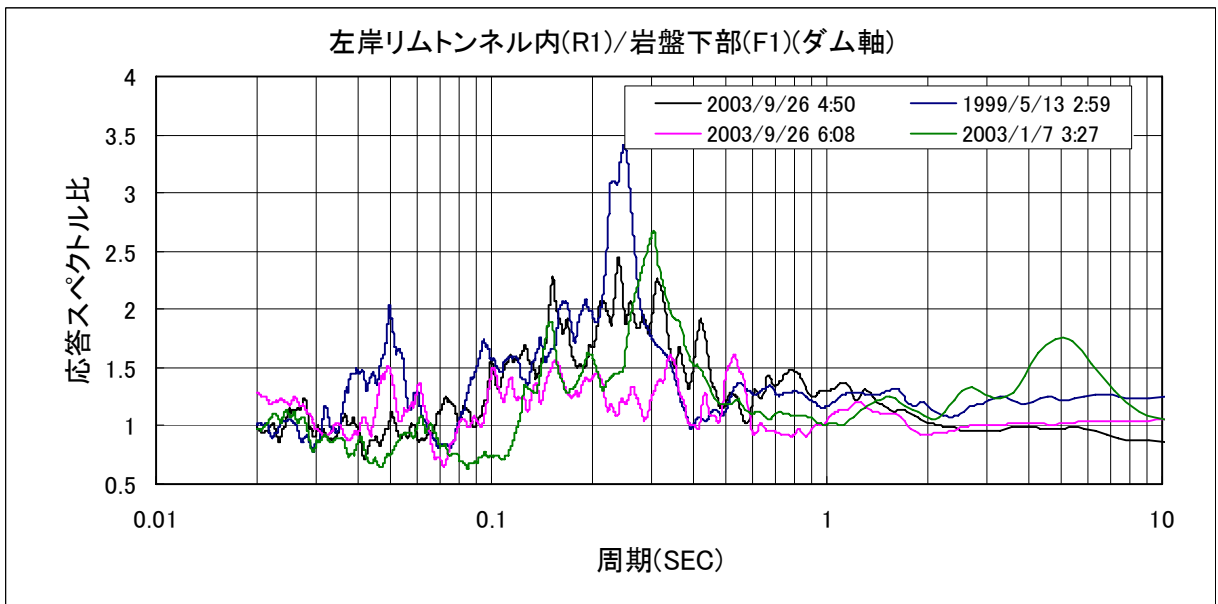
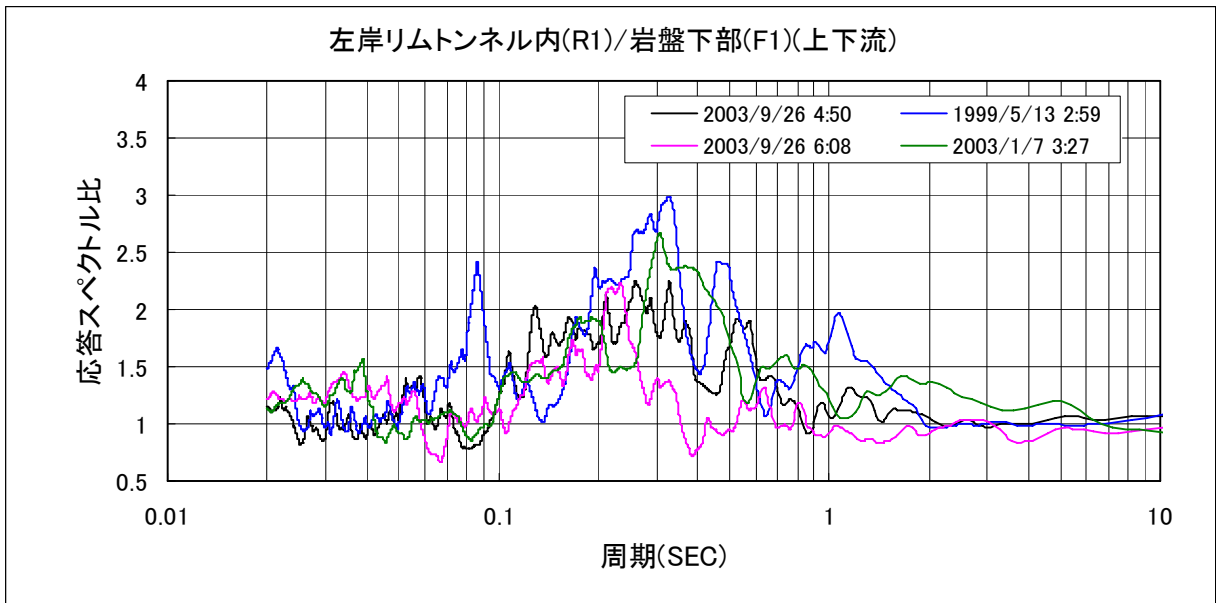


図 2-9 岩盤下部に対する左岸リムトンネル内の加速度応答スペクトル比

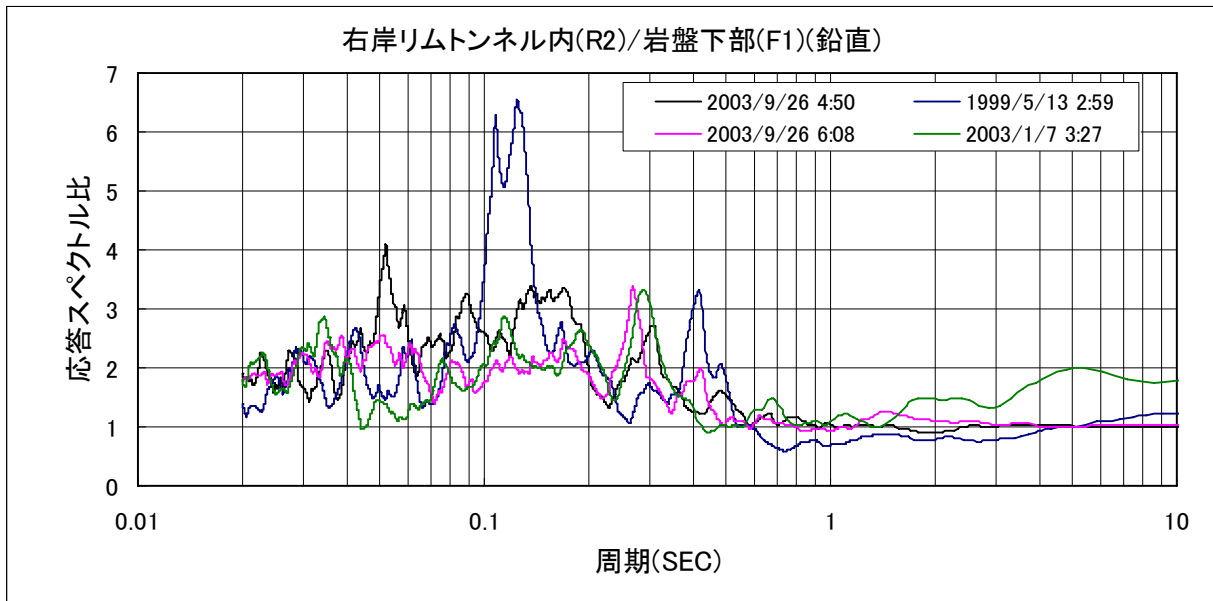
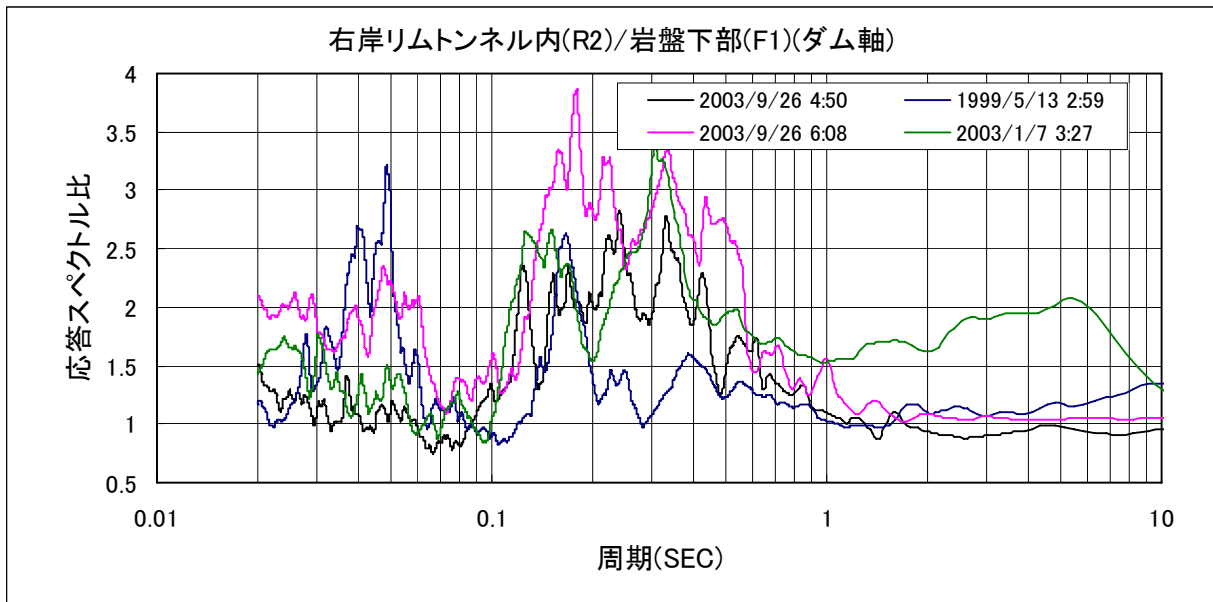
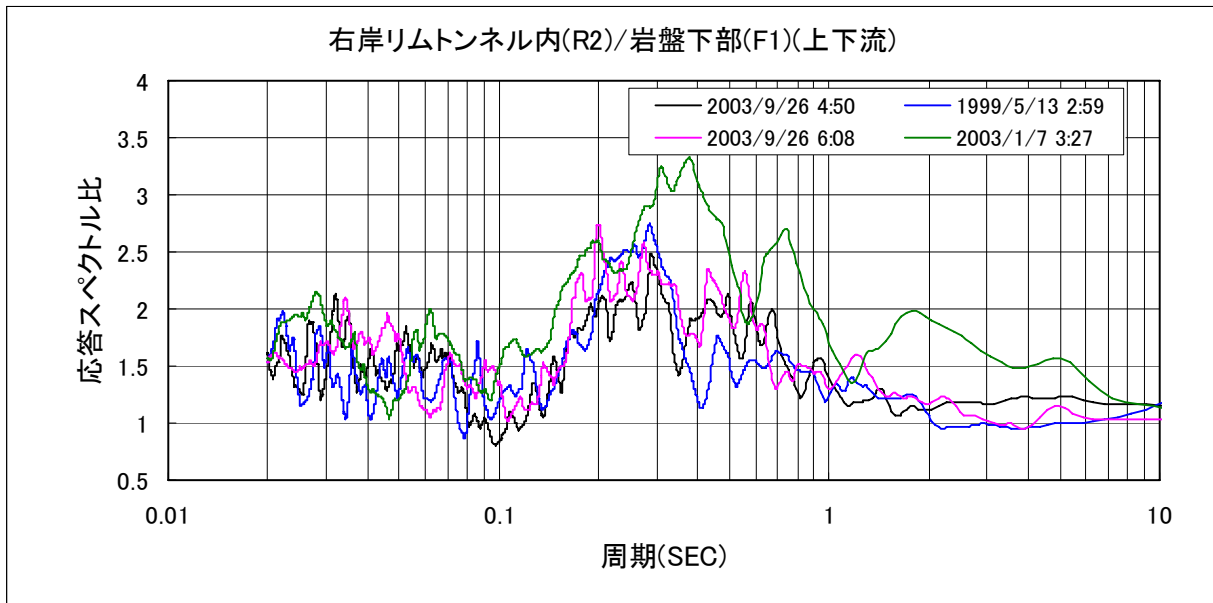


図 2-10 岩盤下部に対する右岸リムトンネル内の加速度応答スペクトル比

表 2-5 地震時水位と加速度の応答倍率（天端中央/ダム底面）

No.	起動時刻	最大値 (gal)	水位 (m)	応答倍率		
				上下流	ダム軸	鉛直
41	1999/05/13 02:59	296.0	469.7	7.8	6.0	4.5
109	2002/07/28 20:31	92.8	461.0	8.5	4.8	3.9
126	2003/01/07 03:27	223.0	469.8	14.8	4.7	4.5
144	2003/06/18 13:36	100.4	468.3	9.8	5.8	4.3
154	2003/09/26 04:50	676.7	461.8	11.0	4.5	3.7
163	2003/09/26 06:08	182.8	461.9	8.0	5.1	2.4
206	2003/11/24 21:18	123.8	472.9	9.1	5.3	3.9
241	2004/11/29 03:32	123.6	472.5	11.7	3.5	2.1

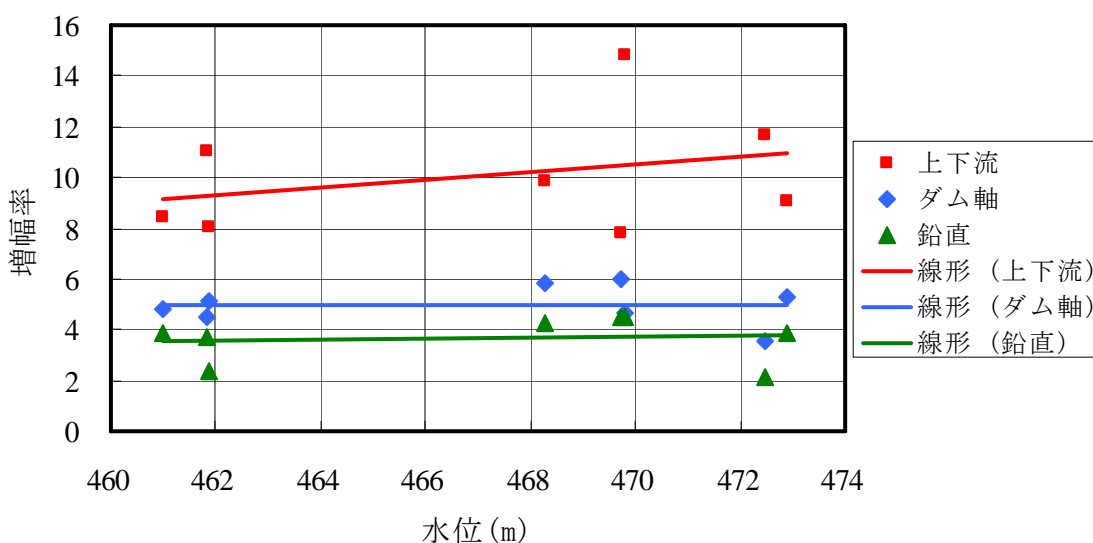


図 2-11 地震時水位と加速度の増幅率

2.2.3 十勝沖地震時の地震動記録と分析

2003年9月26日午前4時50分頃、十勝沖（北緯41度47分，東経144度05分，震源深さ約42km）を震源とするマグニチュード8の地震が発生した（釧路地方気象台平成15年9月26日8時30分発表データ）。十勝地域で最大震度6弱が記録され，多くの道路，河川，港湾および農業施設が被害を受けた。

図2-12に札内川ダムの各観測点における地震動の時刻歴を示す。ダム天端中央の上下流方向の最大加速度が677galであり，ダム底面の最大加速度の比は11.0倍となっている。高さ114mの重力式コンクリートダムに対しては，これほどの増幅率が生じたのは極めて稀である。これは堤体の増幅に対する常用洪水吐および天端中央のゲート操作室などの地震応答による影響が寄与したものではないかと推測される。

図2-13には，天端中央観測点とダム底面観測点の加速度応答スペクトル比を示す。この図からダム本体の固有振動数を推定することができる。図に○数値で示しているのは推定されたダム本体の固有モードの次数である。そのうち，堤体上下流方向の1次固有振動モードの周期は約0.202秒である。

2.3 物性値についての調査

札内川ダムおよび基礎岩盤の物性値について、工事誌および地震観測記録により調査し、表 2-6 に示す物性が得られている。

表 2-6 札内川ダムの物性値に関する調査結果

	動弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数
堤体	35000 (*1)	2.44 (*2)	0.20 (*3)	観測記録(2003/09/26,04:50)に基づき、ハーフパワー法で求めた(1.97%)(*6)
岩盤	33000 (*4)	2.74 (*5)	0.24 (*3)	同上(ダム直下の観測点F2の記録から2.24~4.35%と推定した)(*6)

注：*1：工事誌，p.444，コンクリート試験の結果を用いた。

$$E = \frac{10,000 \cdot t}{0.1922 + 0.02927 \cdot t} \quad (\text{外部配合}) \quad E_{RCD} = \frac{10,000 \cdot t}{0.1930 + 0.02807 \cdot t} \quad (\text{RCD})$$

$t = \infty$ の時は、 $E \cong 35000 \text{MPa}$

*2：工事誌，表-4.6.22 品質管理結果一覧表

*3：工事誌，表-9.5.9 物性値一覧

*4：岩盤の動的弾性係数については、以下の静的試験および動的試験のデータから推定した。

① 岩盤の静的弾性係数は、各打設年次における解析結果と岩盤変位計の値を比較し、逆解析により求めた。 $E_s=1700 \text{MPa}$ が得られている(札内川ダム工事誌p.444 参照)。動的弾性係数は静的試験から得られた値の2倍程度の値がだいたいの目安である⁴⁾ことを踏まえ、ここでは、 $E_d=34000 \text{MPa}$ 程度であろうと推定した。

② 一方、工事誌，表-2-2-6 岩石試験結果総括表には、岩石の平均せん断波速度が 3060m/s であることが記述されている。せん断波速度と動的せん断弾性係数の関係により、

$$G = \rho V_s^2 = 2.74 \times 3060^2 / 9.8 = 2617986 \text{tf/m}^2 \approx 25656 \text{MPa}$$

であることがわかる。しかし、基礎岩盤の動的弾性係数は、岩石の弾性波試験から得られた値の約 1/2 に相当する⁴⁾から、

$$G = 12828 \text{MPa}, \quad E_d = 2(1+\nu)G = 2(1+0.24) \times 12828 = 31813 \text{MPa}$$

となる。

以上をまとめると、基礎岩盤の動的弾性係数は約 33000MPa であると推定した。

*5：工事誌，表-2-2-6 岩石試験結果総括表

*6：本業務の再現解析対象 2003 年 9 月 26 日 04:50 十勝沖地震時計測されたデータに基づき、ハーフパワー法により求めた。図 2-14 には、ハーフパワー法によるダム堤体および基礎岩盤の減衰係数の求め方を示す。ダム堤体の減衰係数は 1.97% であり、ダム直下岩盤の減衰係数は 2.27%~4.35% であると推定されている。

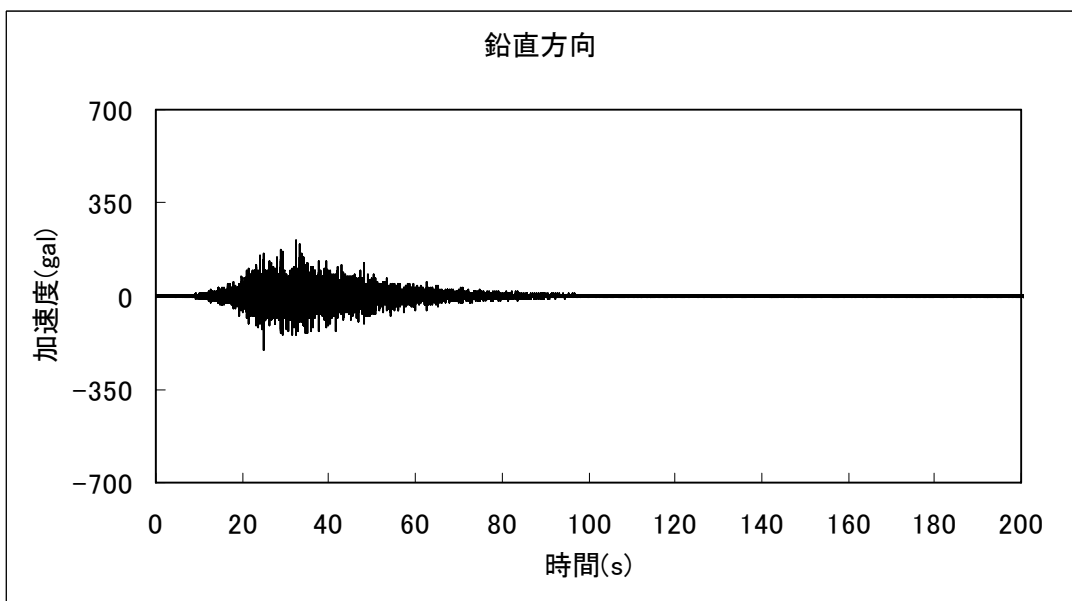
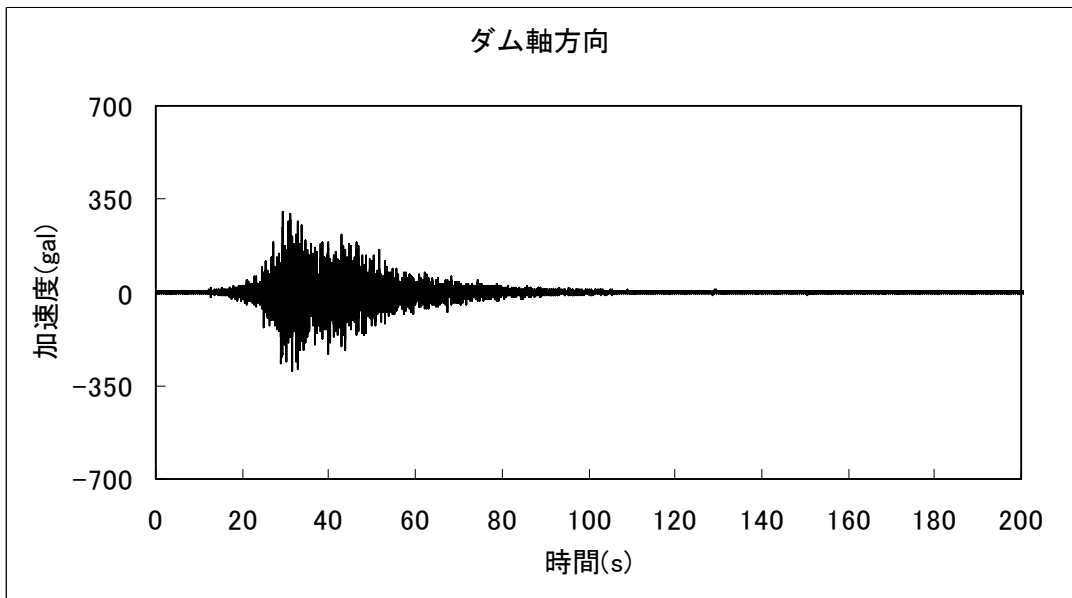
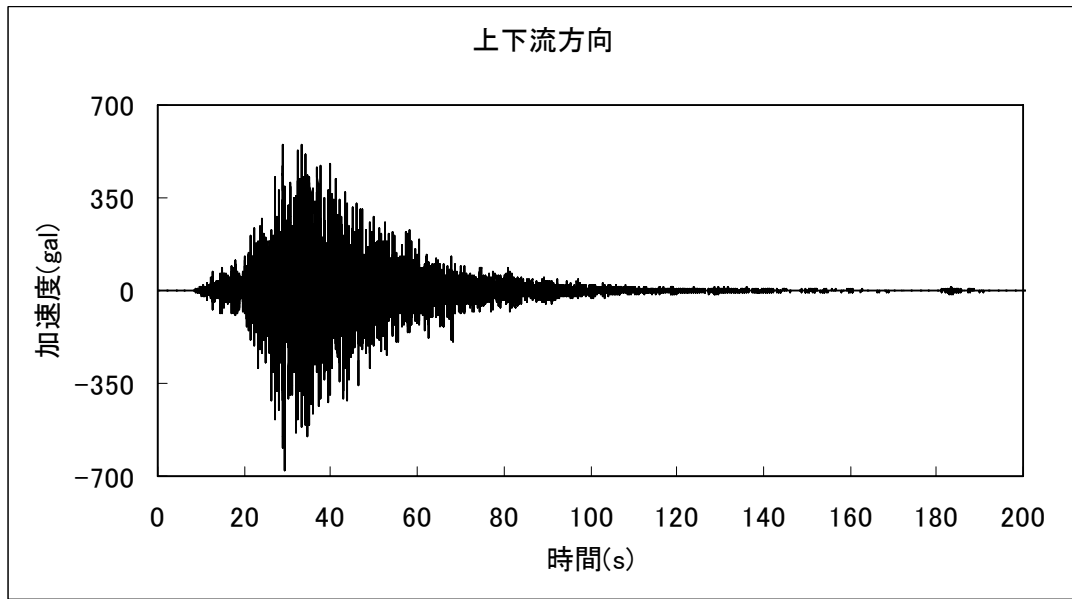


図 2-12(a) ダム天端中央の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

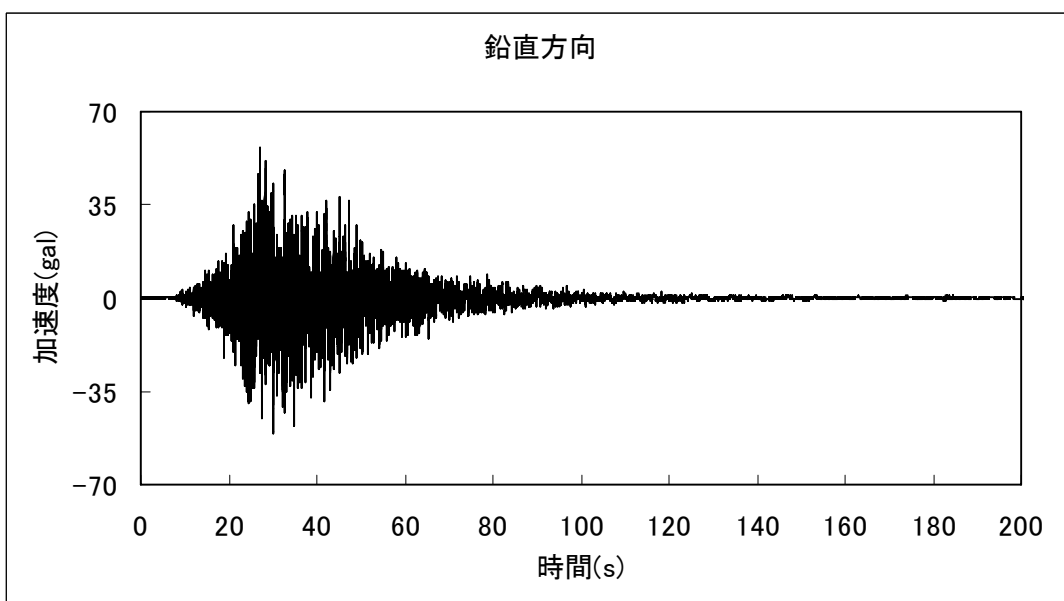
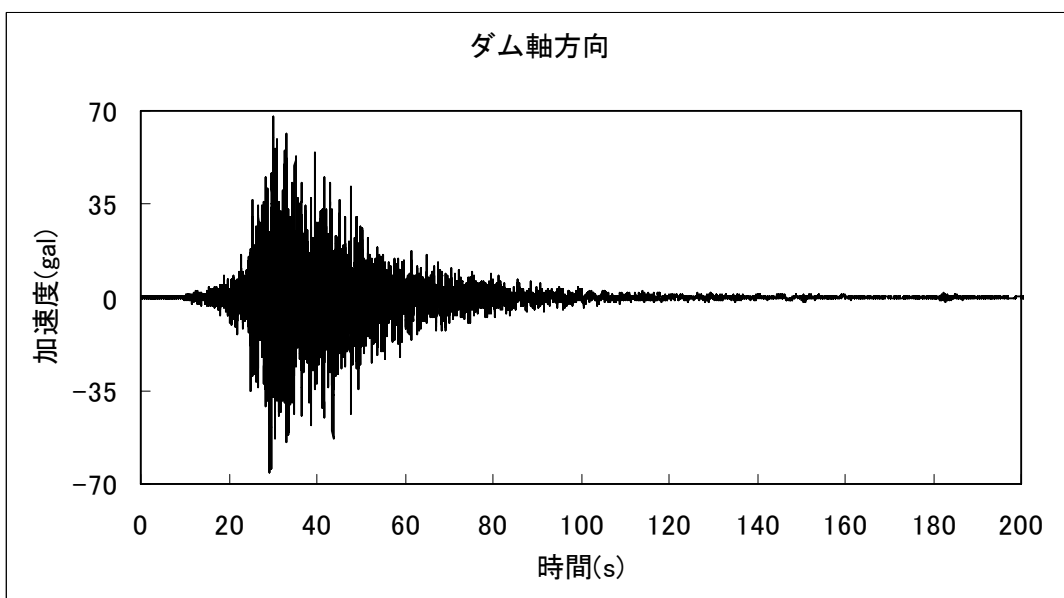
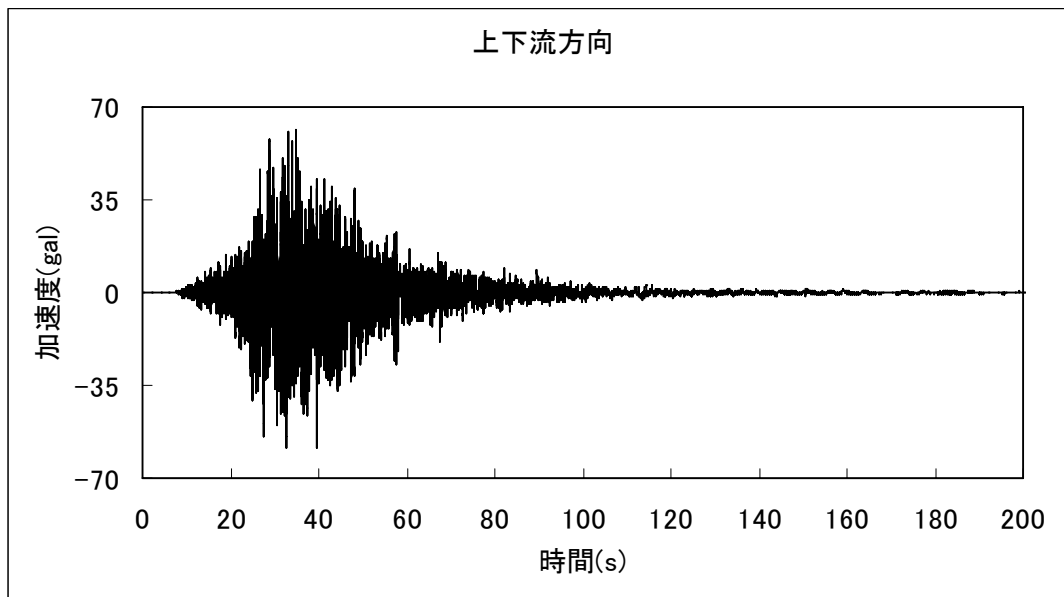


図 2-12 (b) 岩盤上部の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

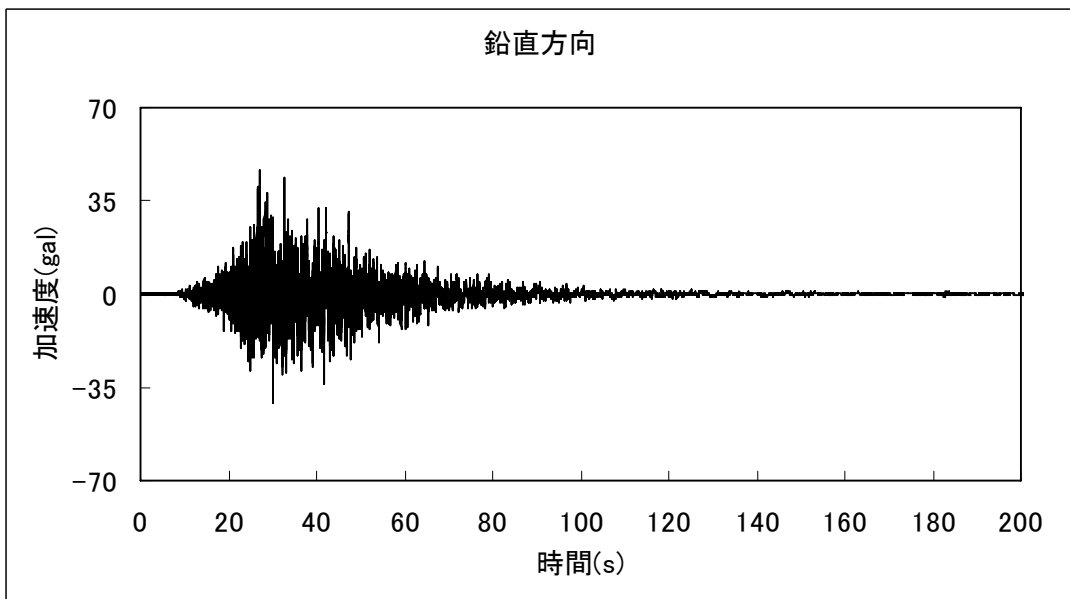
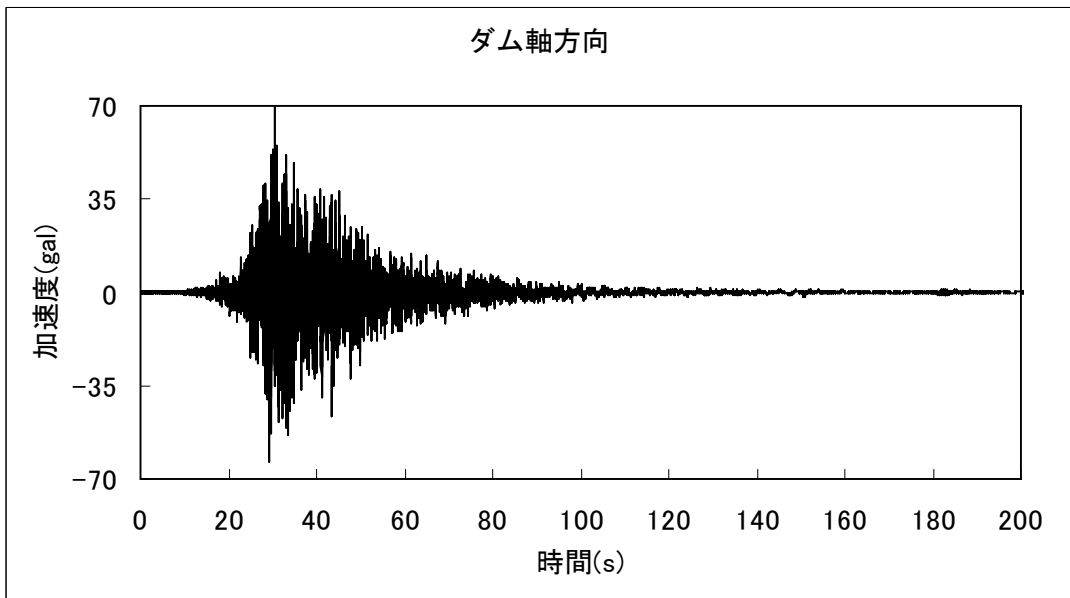
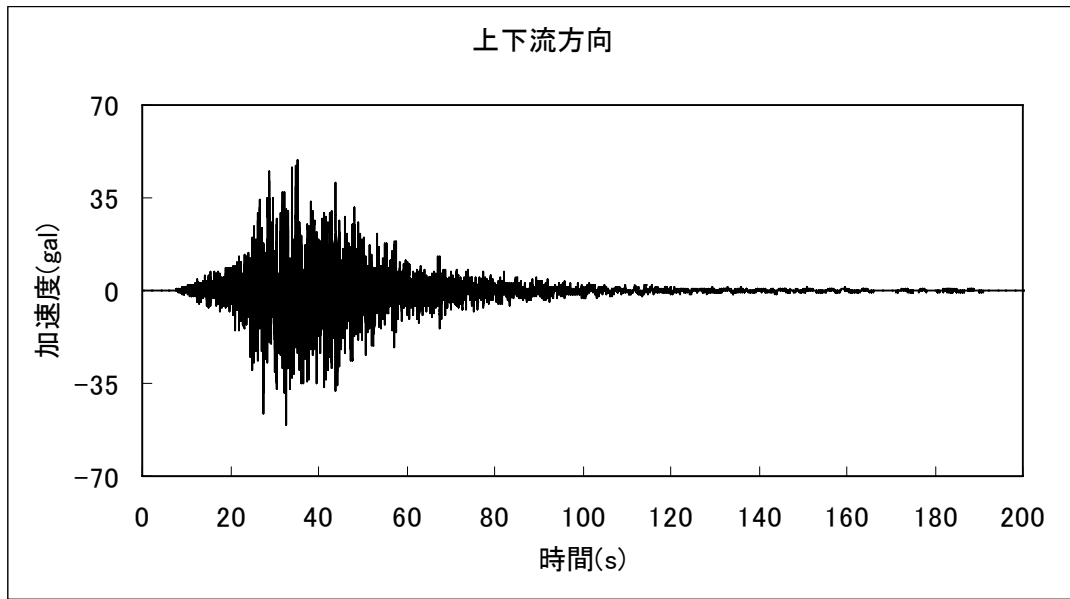


図 2-12(c) 岩盤下部の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

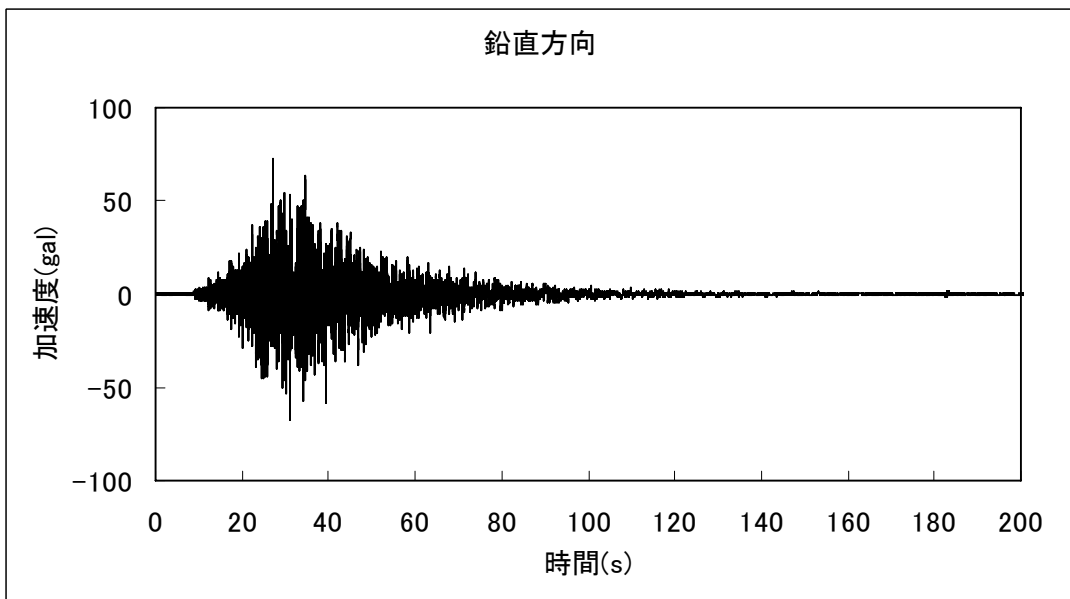
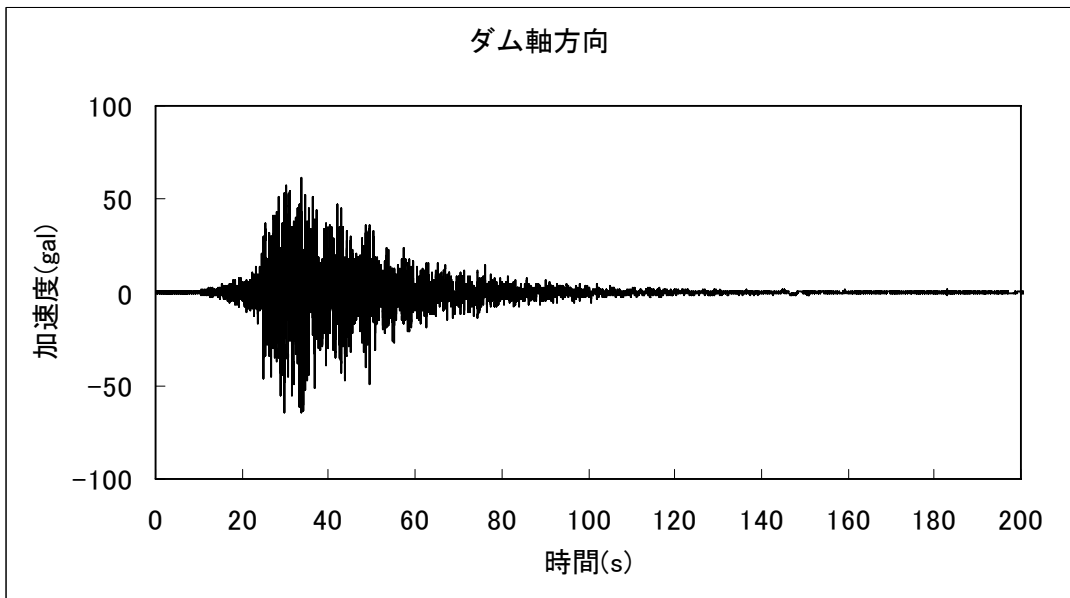
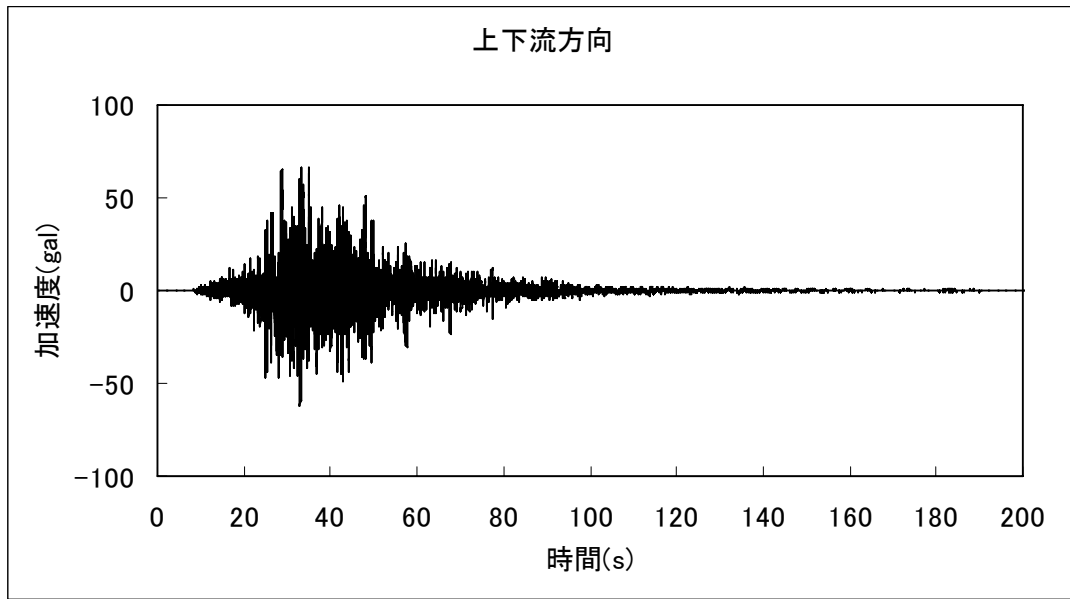


図 2-12(d) 左岸リムトンネル内の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

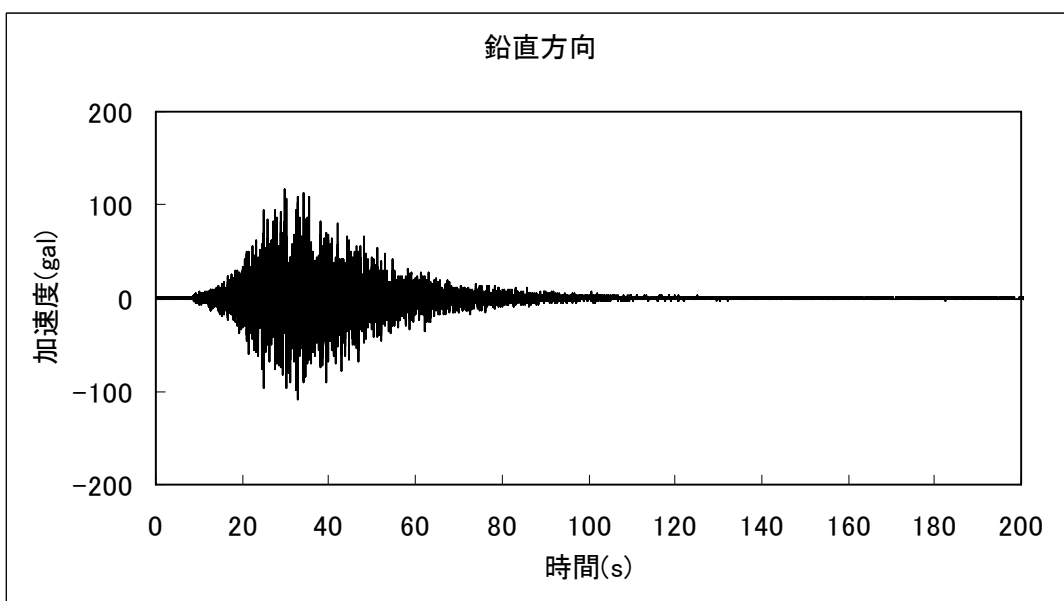
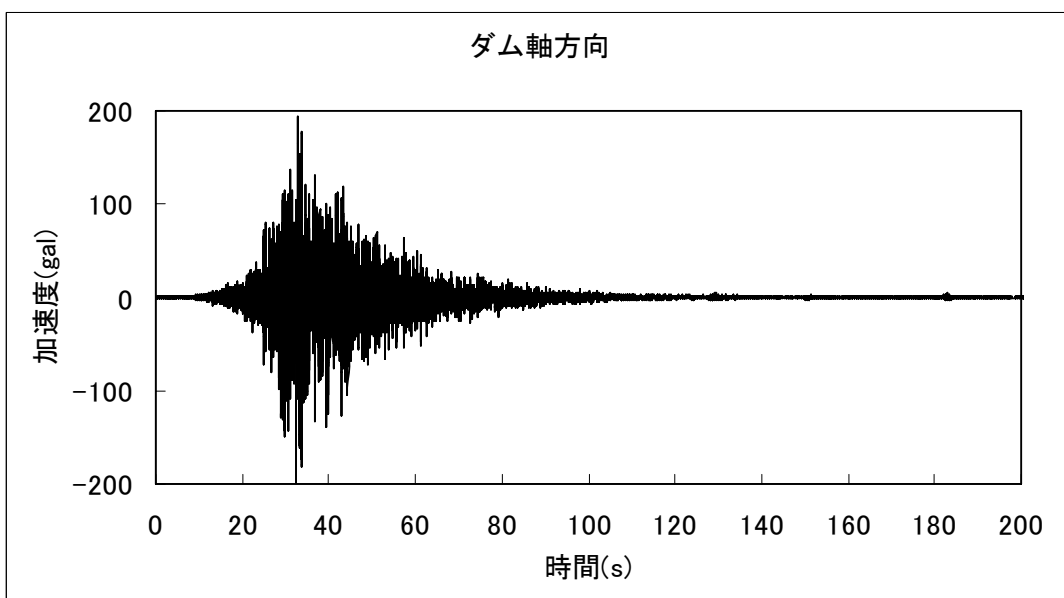
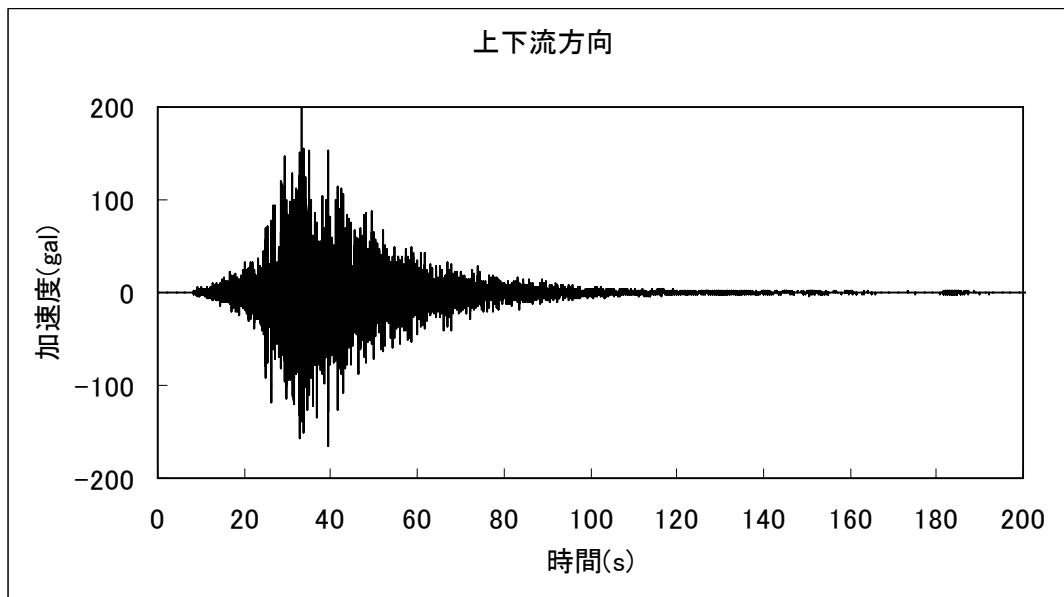


図 2-12(e) ダム天端左肩の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

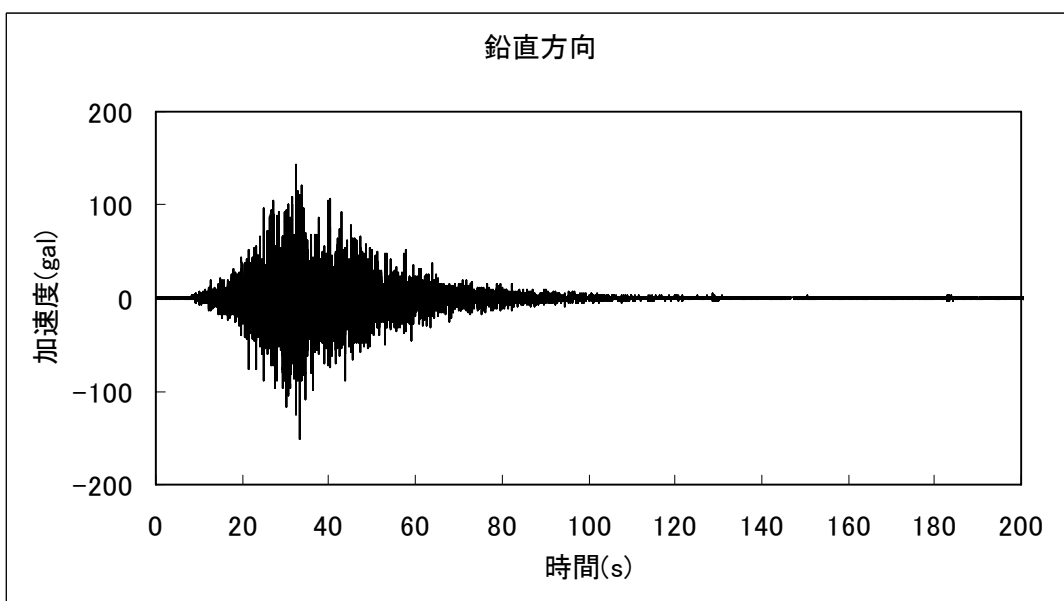
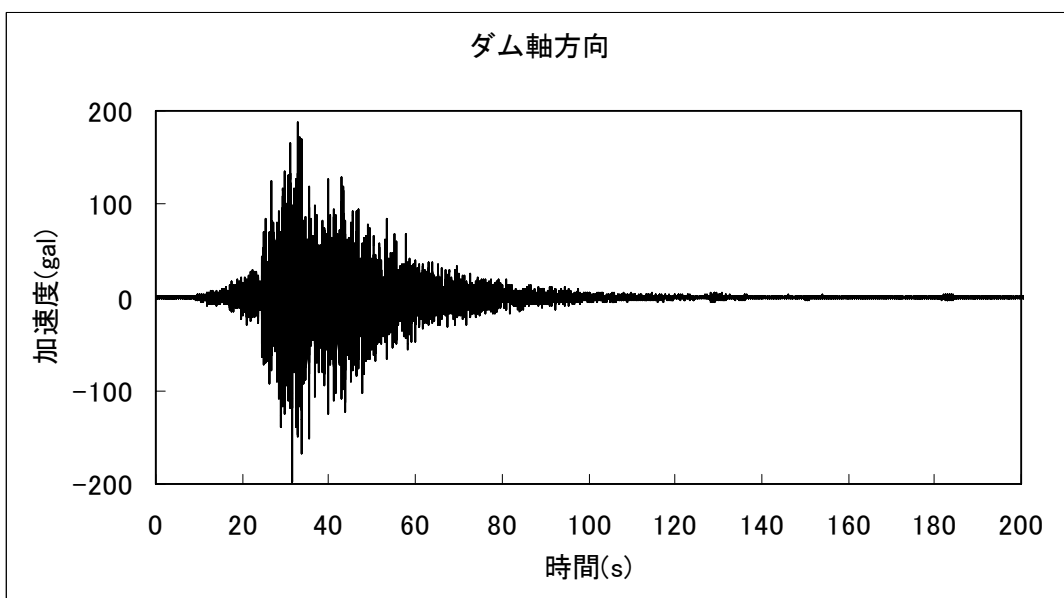
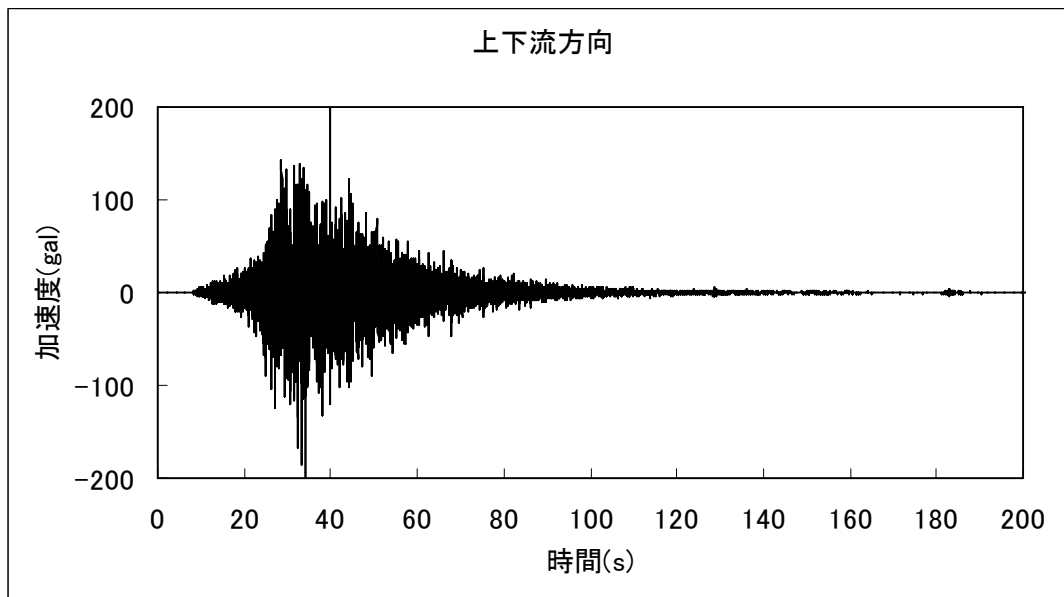


図 2-12(f) ダム天端右肩の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

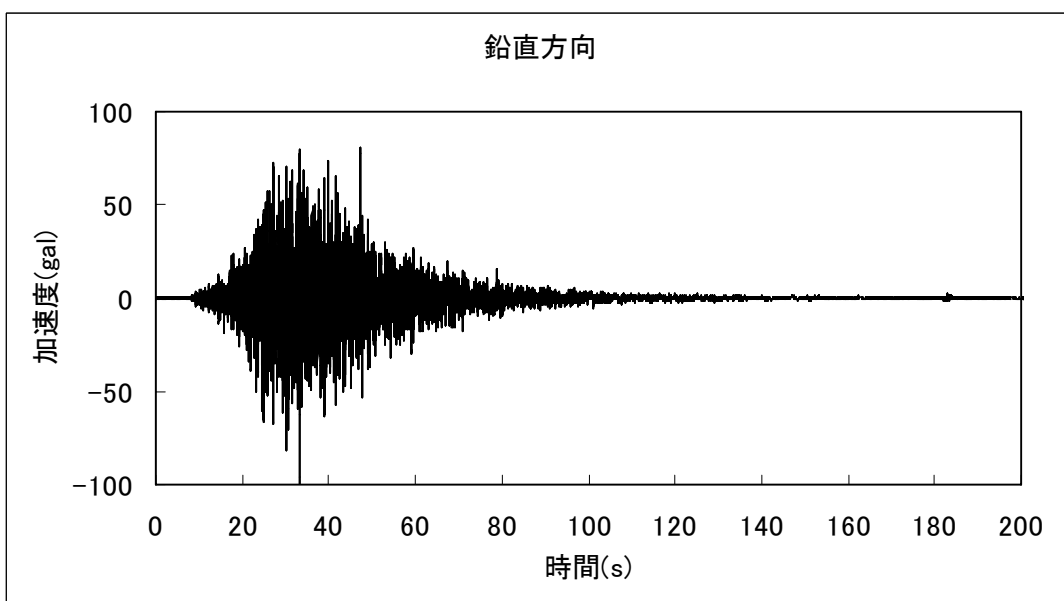
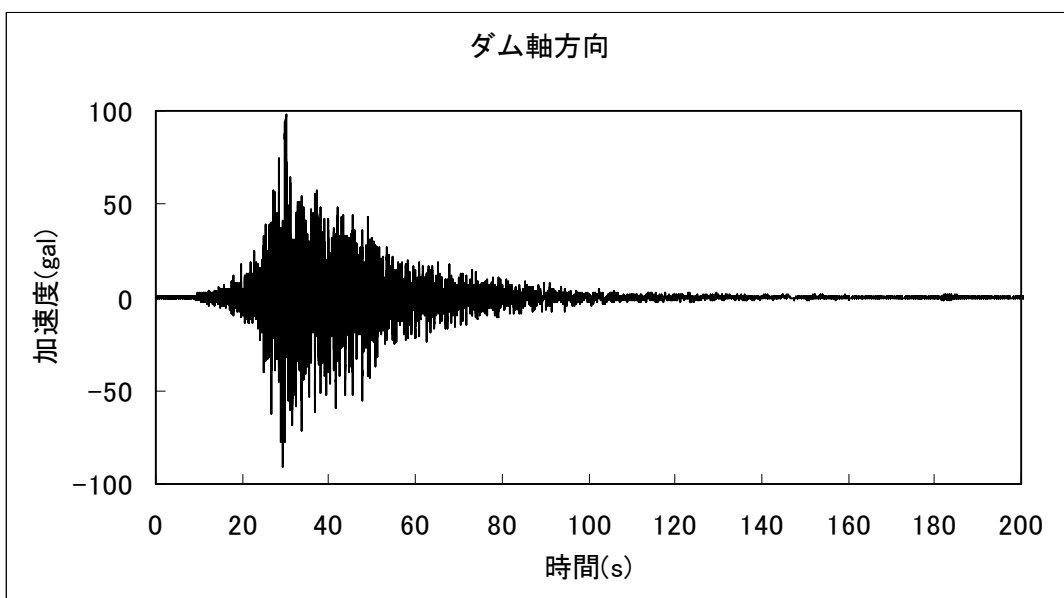
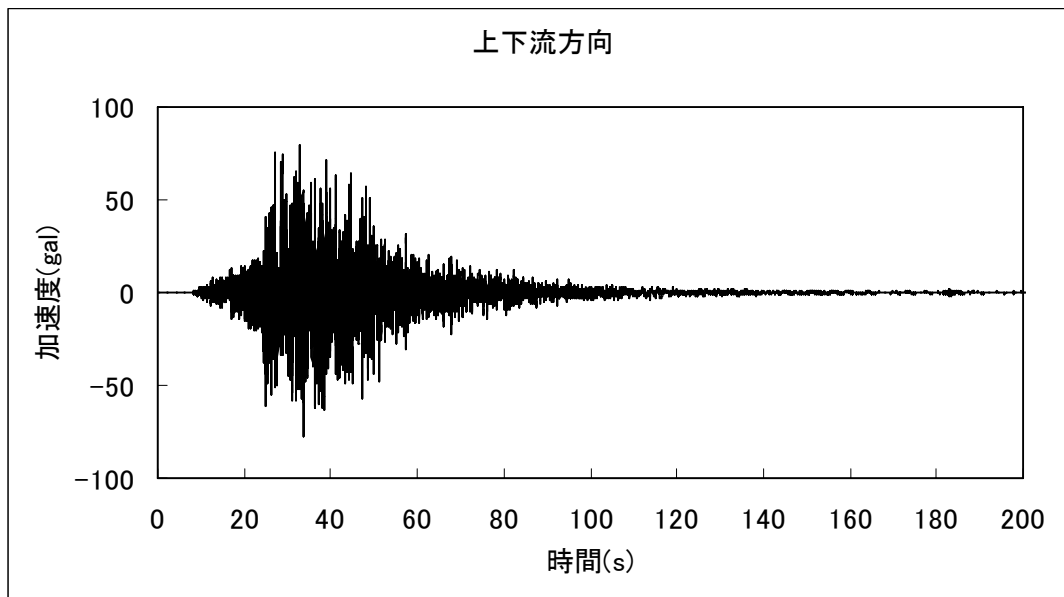


図 2-12 (g) 右岸リムトンネル内の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

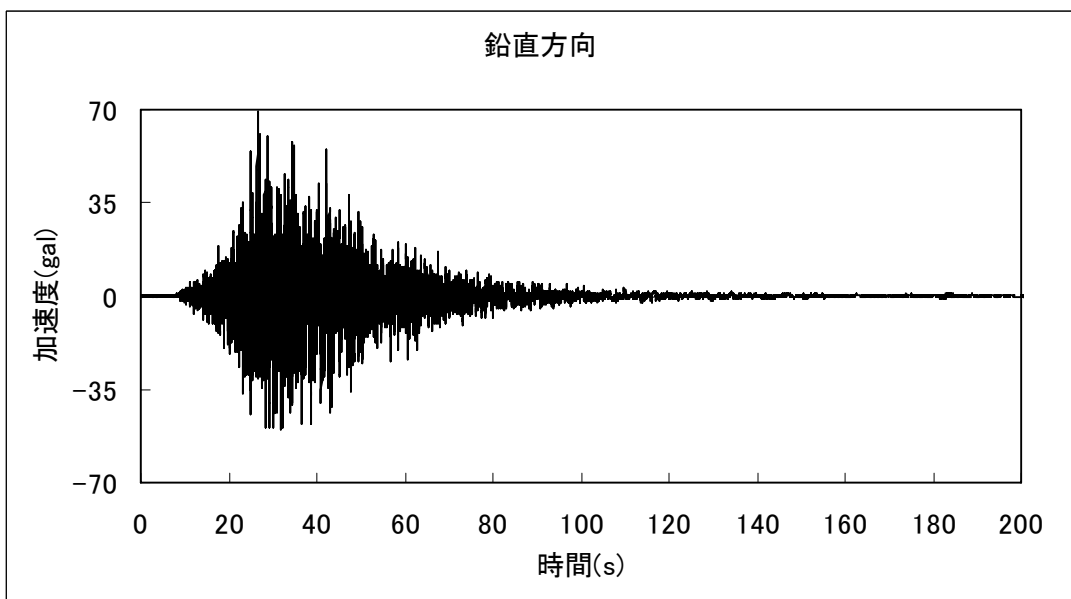
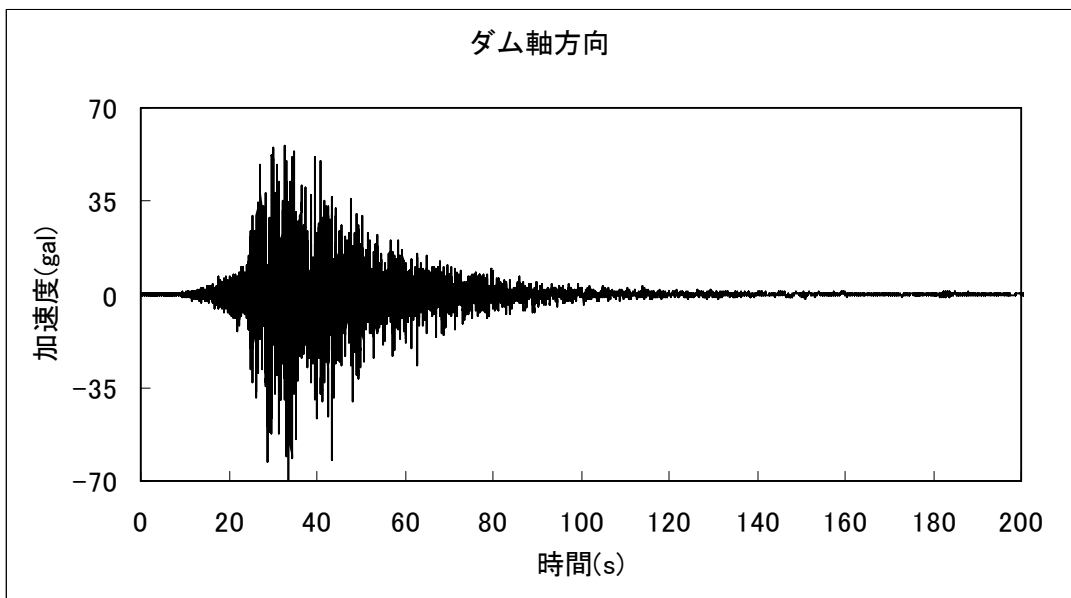
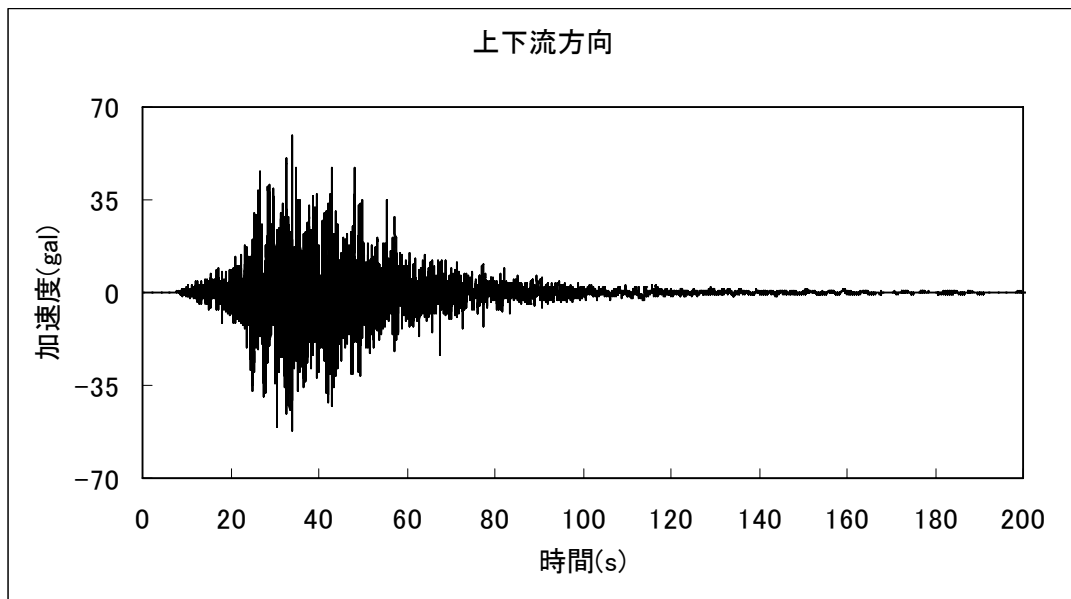


図 2-12(h) 下流側開放基盤面の地震動 (2003 年 9 月 26 日 04:50)

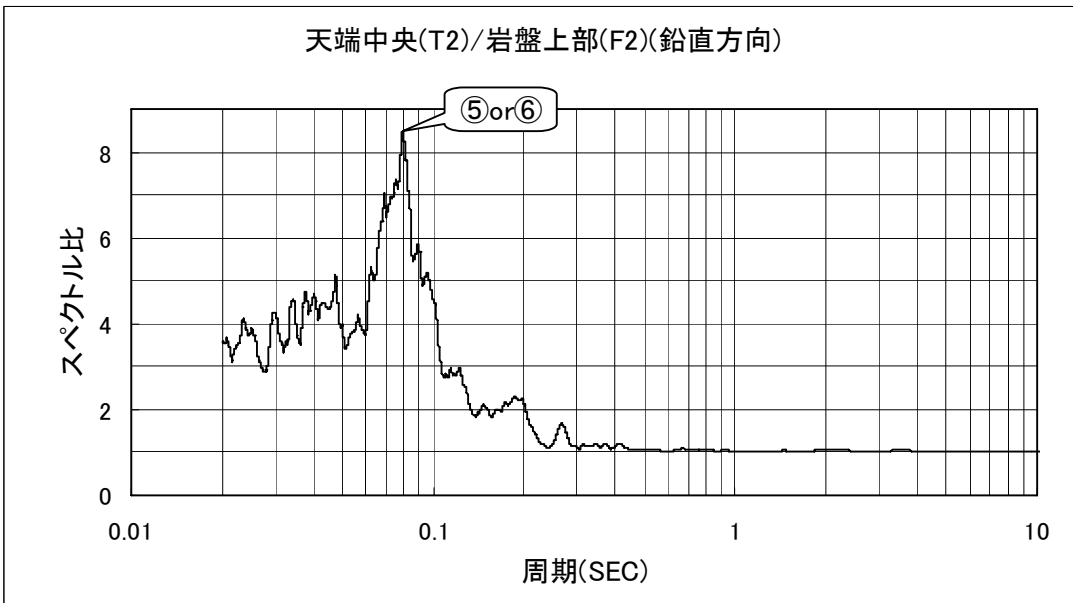
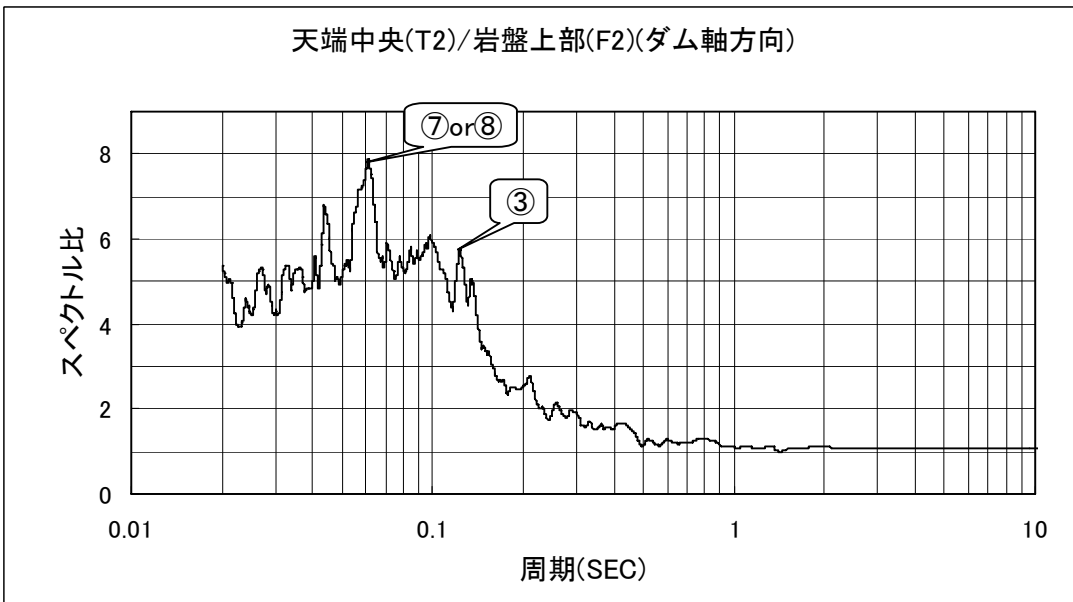
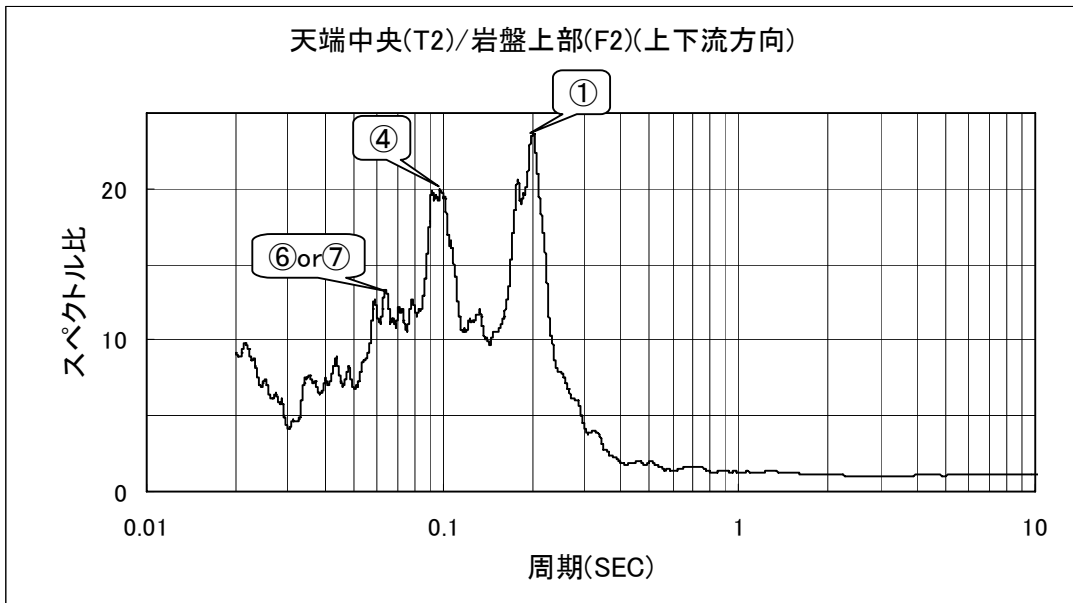


図 2-13 岩盤上部に対する天端中央のスペクトル比

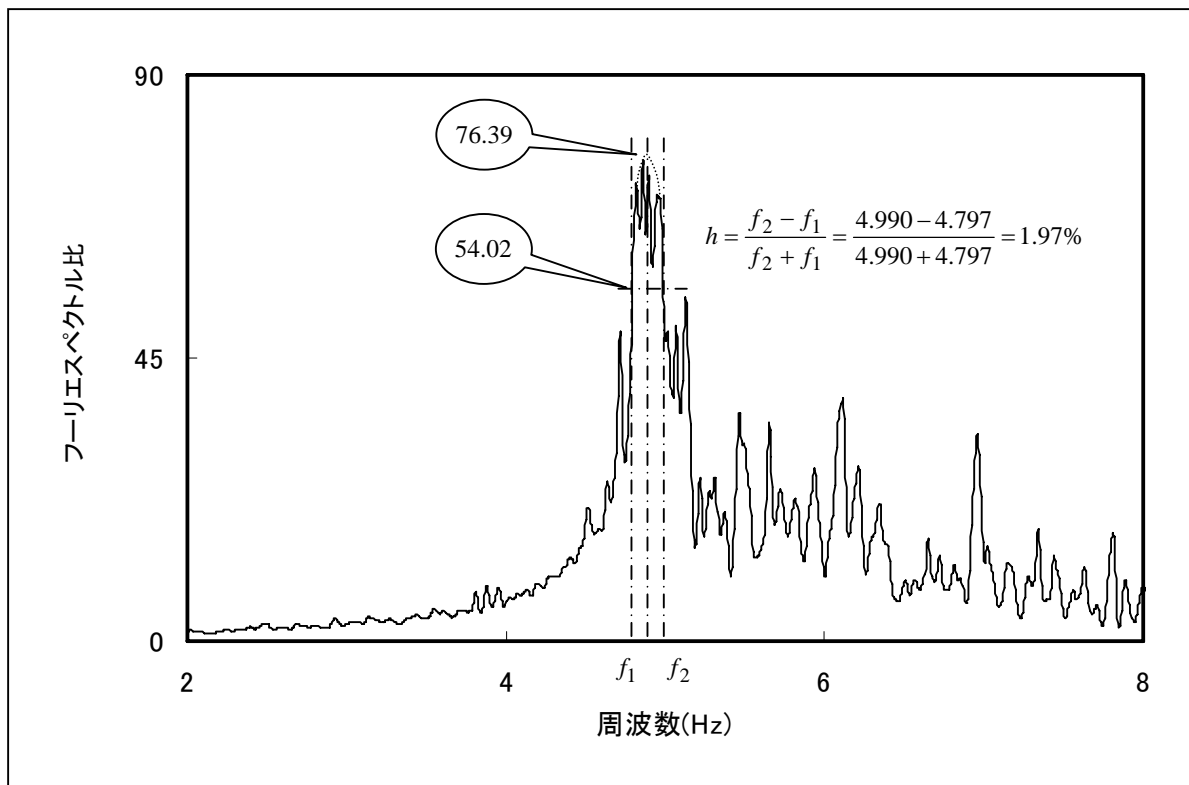


図 2-14(a) 岩盤上部に対するダム天端中央のフーリエスペクトル比

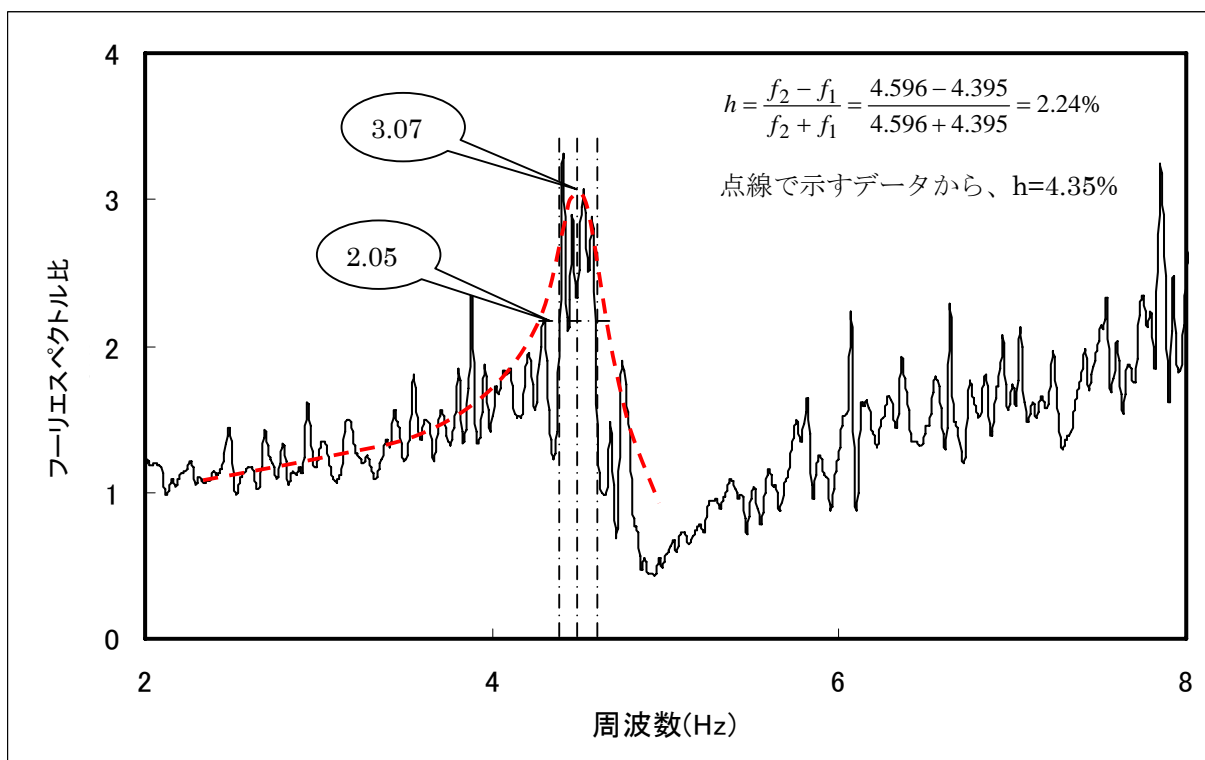


図 2-14(b) 岩盤下部に対する岩盤上部のフーリエスペクトル比

3. 解析モデルの作成

汎用ソフトFEMAP (Ver.9.0) を用いて、ダムおよび基礎岩盤の有限要素メッシュを8節点要素により作成した。また、貯水池の基本寸法および分割数を規定し、UNIVERSE²⁾により差分メッシュを作成した。

3.1 メッシュサイズと時間刻みの設定基準

解析結果の精度を確保するために、堤体・基礎岩盤・貯水池を有限要素でモデル化する際に、要素メッシュの最大サイズならびに解析時間刻みは、物性値および要求される解析精度などの制約条件を満足しなければならない。よって、本業務では、図 3-1 に示す決定手順に基づき、メッシュサイズと解析の時間刻みを決定した。

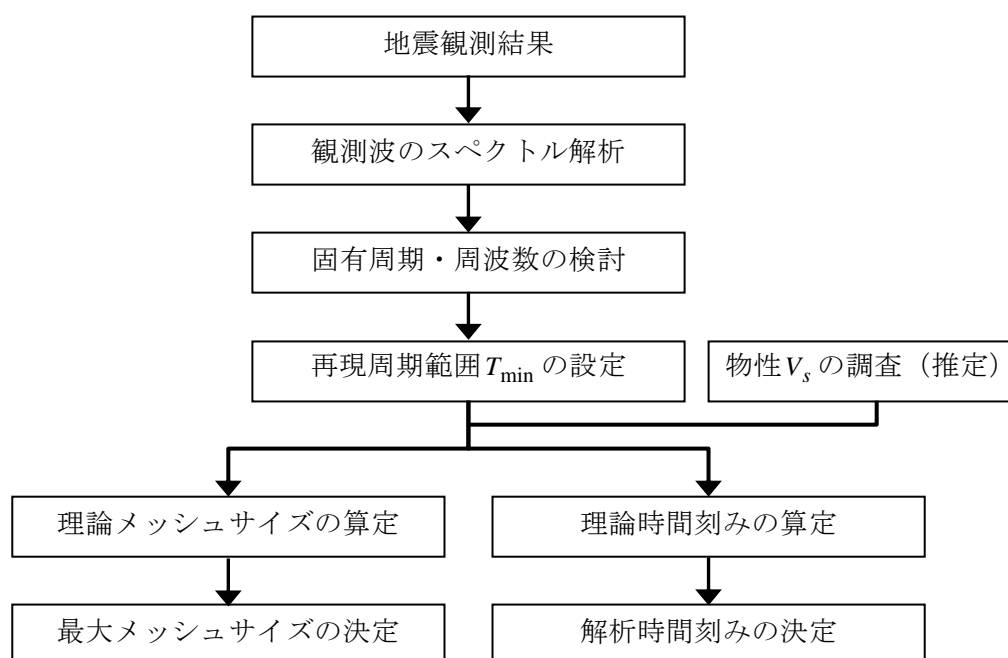


図 3-1 メッシュ最大サイズと解析時間刻みの決定手順

理論メッシュサイズの算定については、式(3.1)に示す物性値（せん断波速度 V_s ）、要求される解析精度（解析結果に含まれる振動成分の最小周期 T_{\min} ）と要素サイズとの制約条件を用い、最大許容メッシュサイズ（ ΔL ）を決定した⁵⁾。

$$\frac{\Delta L}{V_s} \leq \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (3.1)$$

理論時間刻みの算定については、式(3.2)により設定した。

$$\Delta t < \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (3.2)$$

ダムサイトの2003年9月26日の地震観測結果を基に得られたダム底面（岩盤上部）に対する天端中央の加速度の伝達関数から、本ダムの7次、又は8次モードの固有周期は約0.06秒である。この振動成分まで解析の精度を保証するため、本解析で $T_{\min} = 0.05$ 秒、即ち、精度保証最大周波数は20Hzとした。ダム設計用物性（弾性係数は約35000 MPa、単位体積重量 $2.3 \text{ tf}/\text{m}^3$ 、ポアソン比0.2）から、堤体のS波速度が約2400 m/sであることが推測できる。式(3.1)により求められたダム本体の最大メッシュサイズは38.2m、式(3.2)により得られた時刻歴解析の時間刻みは0.0159秒であるが、より精度の高い解析結果を得るために、ここでダム本体の最大メッシュサイズを10m、時刻歴解析の時間刻みを0.01秒と定めた。

基礎岩盤のメッシュについては、上述手順と同じ、式(3.1)により定めた要素サイズを用いて、モデル化を行った。後述する物性条件でわかるように、岩石試験により得られたS波速度は3060 m/sであるので、ダム本体と同じ解析精度（最大振動数20Hz）を維持するために、式(3.1)により得られた基礎岩盤の最大許容メッシュサイズは48.7mである。ここで、基礎岩盤の最大メッシュサイズを25mと設定した。

貯水のP波の速度1400 m/sであり、ダム本体と同じ解析精度（ $T_{\min} = 0.05$ ）を得るために、式(3.1)により貯水池の最大許容メッシュサイズは約22.3mとすべきであるが、ここで、実際の最大メッシュサイズは10mとした。

よって、ダム本体・基礎岩盤および貯水池のメッシュ分割ならびに時刻歴解析の時間刻みは、表3-1に示すとおりとした。

表 3-1 メッシュ分割および時刻歴の時間刻み

	FEM メッシュサイズ(m)		時間刻み(秒)	
	理論の許容値	実際使用値	理論の許容値	実際使用値
ダム本体	38.2	10	0.0159	0.01
基礎岩盤	48.7	25		
貯水池	22.3	10		

3.2 ダム本体

堤体の三面図に基づき、堤体形状を作成した上で、ダムの有限要素モデルを作成した。モデル化の際に以下のことに注意した。

- [堤体の詳細形状]：ダム本体の地震時挙動の再現性に着目し、地震観測記録に影響を与える要因を分析した上で、考慮すべき堤体の詳細形状をモデルに導入した。常用洪水吐（図3-2参照）およびゲート操作室は複雑な構造であるが、天端中央の地震挙動に対する影響が大きいと考え、ゲート操作室、上段オリフィス空洞（図3-3参照）、下段オリフィス空洞（図3-4参照）、呑口部、吐口部等の詳細な構造を最大限にモデル化した。一方、エレベーターおよび取水塔などはダム本体の地震時挙動に対する影響、特に観測された地震記録に対する影響は小さいと考えられ、本業務ではモデル化しなかった
- [岩着部]：ダム本体と基礎岩盤との結合面については、後述する（式(3.1)）基準により定められたサイズの要素で反映し得る詳細な岩着部形状をモデル化した（要素毎の直線からなる折り線で岩着部の形状を取った）。

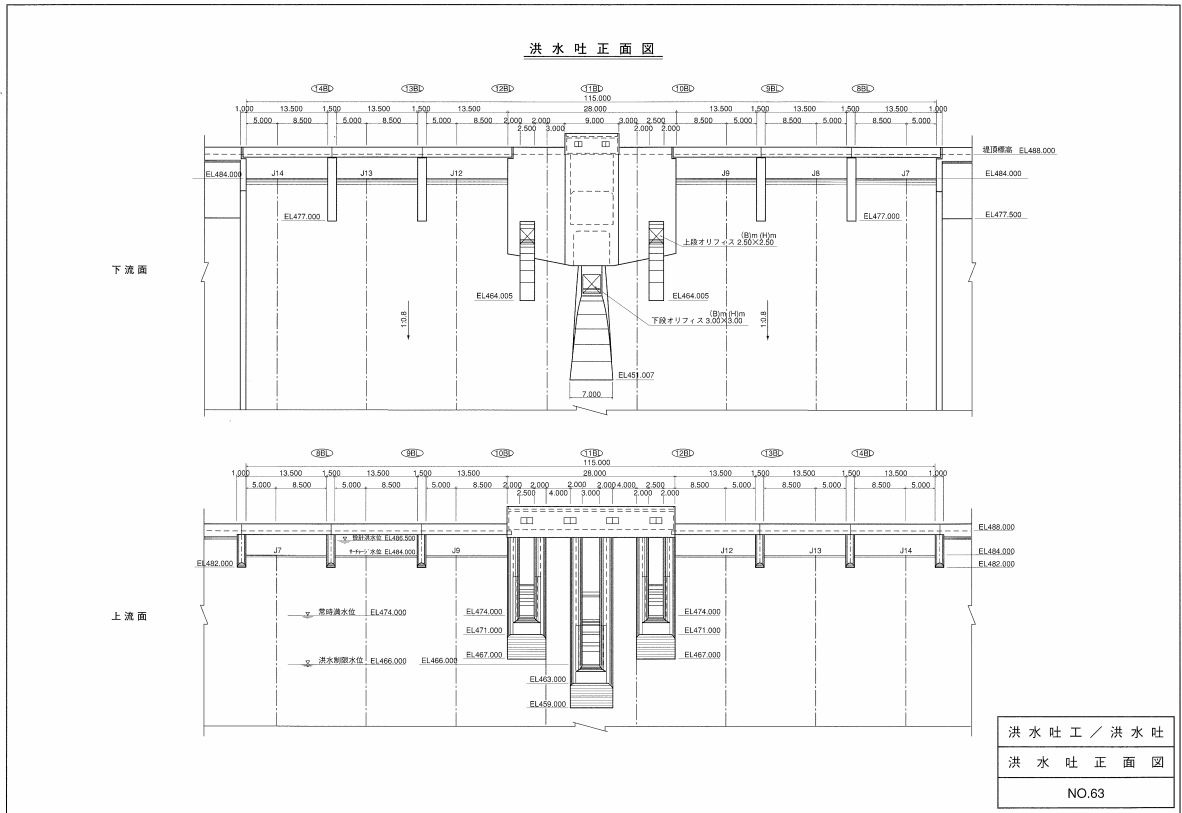


図 3-2 洪水吐の正面図

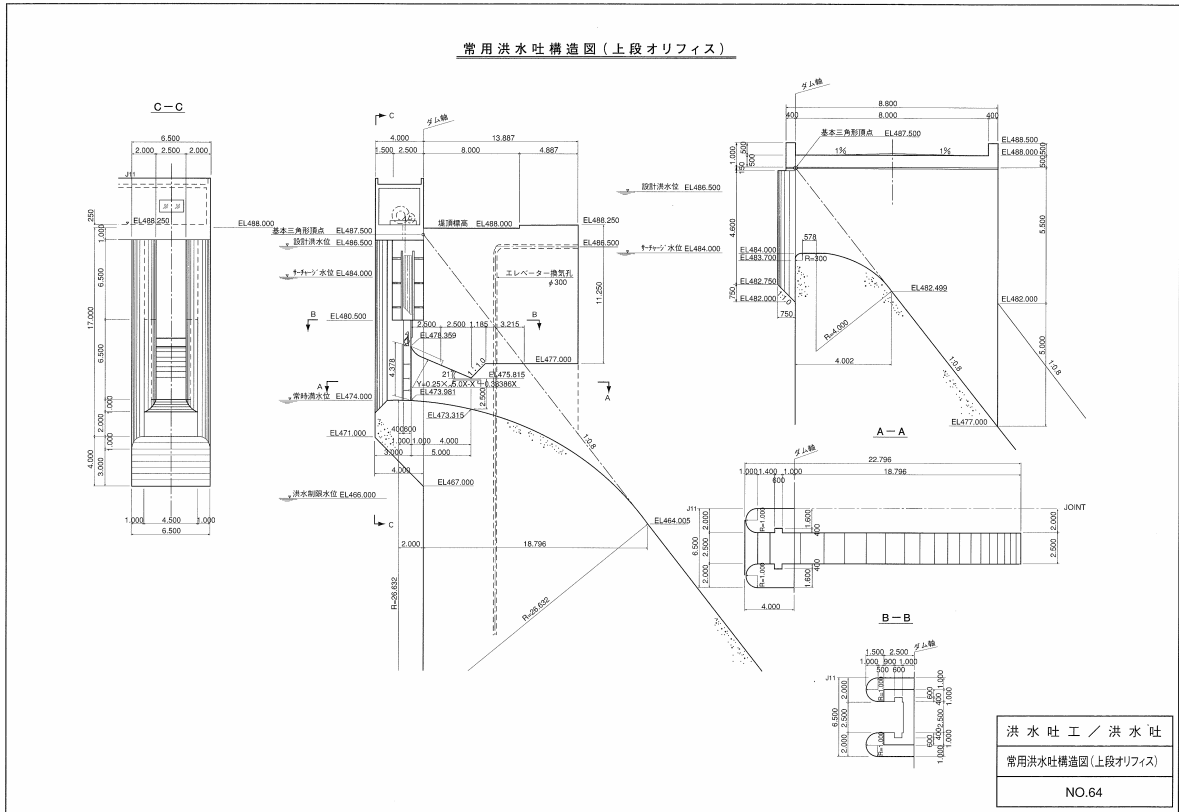


図 3-3 常用洪水吐構造図（上段オリフィス）

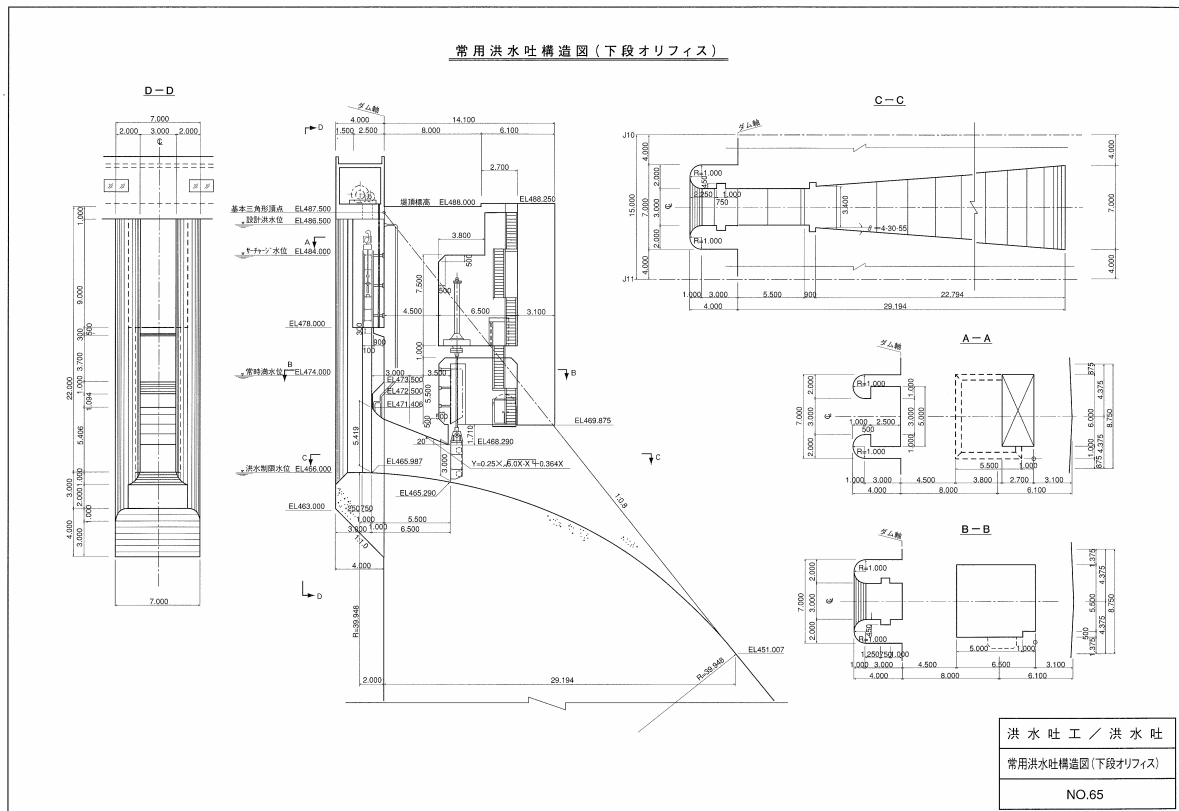


図 3-4 常用洪水吐構造図（下段オリフィス）

- [その他]：モデル化の際に、貯水池の水面に合わせて有限要素のメッシュ線を、地震観測位置に節点を配置した。

3.3 基礎岩盤

[範囲]：UNIVERSE²)を用いた解析では、基礎岩盤周辺の自由地盤が解析に取り組みられているため、基礎岩盤のモデル化範囲をダム本体と基礎岩盤の相互作用領域より大きく取っていただければ、解析結果の精度が保証されると考える。このダム本体と基礎岩盤の相互作用領域の範囲は地震動レベルによって変わるが、今回の再現解析の対象地震がダム底面で約 67galであるので、地震観測位置および地震動レベルを考案した上で、以下の範囲をモデル化した。

- 左端 : ダム天端の左端より 150m (ダム高さの 1.5 倍)
(左岸リムトンネル内の地震観測点より約 70m 大きくとっている。)
- 右端 : ダム天端の右端より 150m (ダム高さの 1.5 倍)
(右岸リムトンネル内の地震観測点より約 90m 大きくとっている。)
- 下流端 : ダム上流面より約 335m (ダム下流端よりダム高さの 2.0 倍)
(下流開放基盤面の地震観測点はダム上流面より約 260m のところにあるため、
下流側の岩盤範囲をこの観測点より約 75m 大きくとっている)
- 上流端 : ダム底部上流端から 114m (ダム高さ)
- 地山 : 地震応答解析では、下方からの地震動の伝播が最も重要であり、ダムより高い地山の振動による影響は地震動のレベル、地山の形状などによって異なると考えられる。ダム軸方向の地形断面図 (図 2-5 参照) から、兩岸の地山が緩やかな斜面を有していることが見受けられる。また、今回の解析対象地震は、それほど強くなく、ダムの応答に対するこのような地山の影響は大きくないと考えられる。よって、ダム天端より上方へ 30m の範囲をモデル化して、ダムの応答に対する地山の影響を精度よく考慮できると判断した。
- 底面 : ダム底部よりダム高さの 1.0 倍
(岩盤下部地震観測点はダム底部よりダム高さの 0.5 倍の下方にあるため、この点よりさらに 0.5 倍のダム高さの範囲をとっている)

[地形]：ダムに接する上下流方向の地形の変化は小さく、本解析ではチャンネル谷形状とした。しかし、下流側開放基盤面に地震観測点 G があり、地震時挙動の解析精度を向上するために、この観測点周辺の地形図 (図 3-5 参照) を基に下流側の左岸の地形をチャンネル地形から修正した。

3.4 貯水池

貯水池のダム軸方向断面の形状は、堤体上流面のダム軸方向断面への投影形状と同じとし、上流側へは水深の 3 倍の範囲とした。貯水池のモデル化は差分法に基づき、プログラム UNIVERSE²)により解析の際に自動的に行った。

左岸岩盤の標高 404m で、緩やかな斜面地形である。下流側の解放基盤面の観測点はここにある。

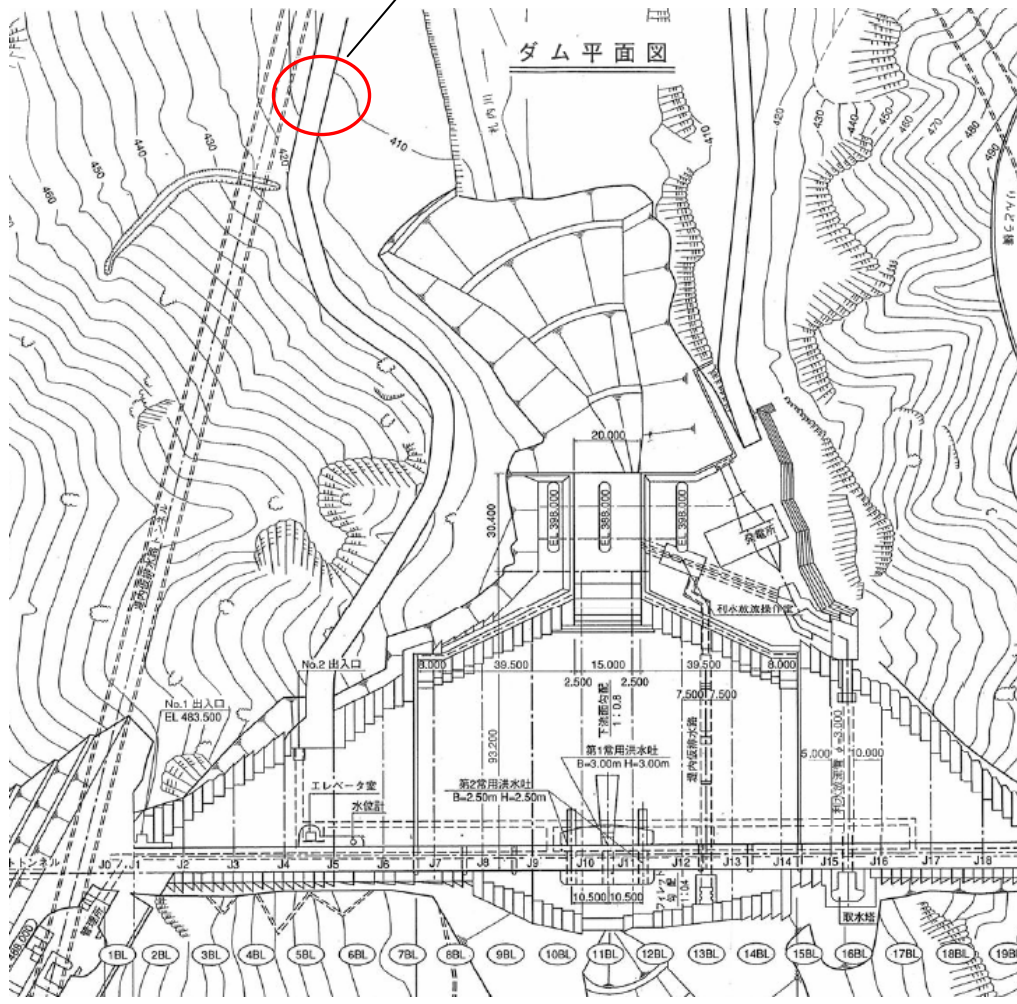


図 3-5 下流側の地形および開放基盤面にある地震計の位置

3.5 境界条件

[ダム本体]：上流面は連成条件を介して貯水池と連成し，岩着部は基礎岩盤と剛結した。

[基礎岩盤]：初期応力解析（静的解析）では基礎岩盤の側方境界は鉛直ローラー，底面では固定条件とした。動的解析では側方境界および底面境界では粘性境界とした。さらに，基礎岩盤の周辺に自由地盤をモデル化し，基礎岩盤と自由地盤との連成を考慮した。

[貯水池]：底面および両側の地山斜面では部分吸収条件，上流端は完全吸収条件，表面は表面波条件を用いた。ただし，貯水池と基礎岩盤との連成は考慮しなかった。

3.6 モデル化結果

図 3-6～図 3-9 に，ダム本体と基礎岩盤の有限要素メッシュ図を示す。

全体モデルのソリッド要素数と節点数はそれぞれ 32958 と 35436 であり，そのうち，ダム本体の要素数と節点数はそれぞれ 5877，6241 であった。

このモデルを使用することにより，動的解析の場合，最小周期 1/20 秒の振動成分を精度よく計算可能となった。

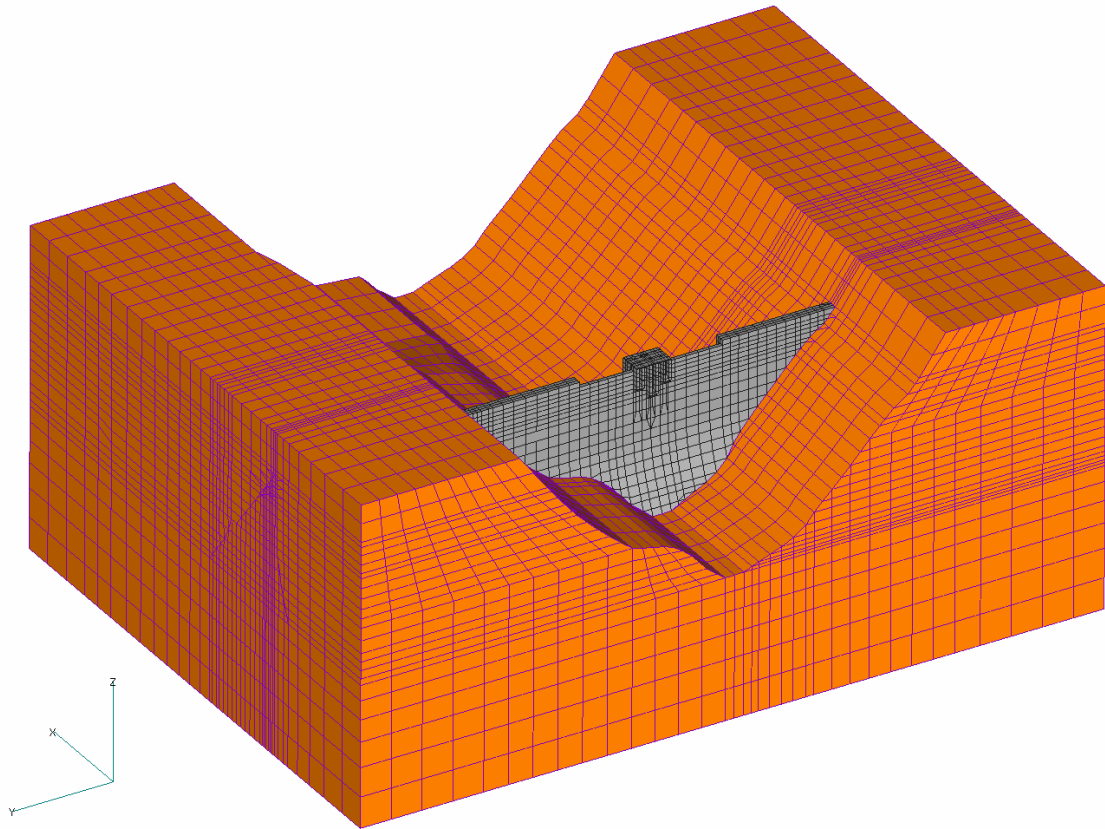


図 3-6(a) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(上流側鳥瞰図)

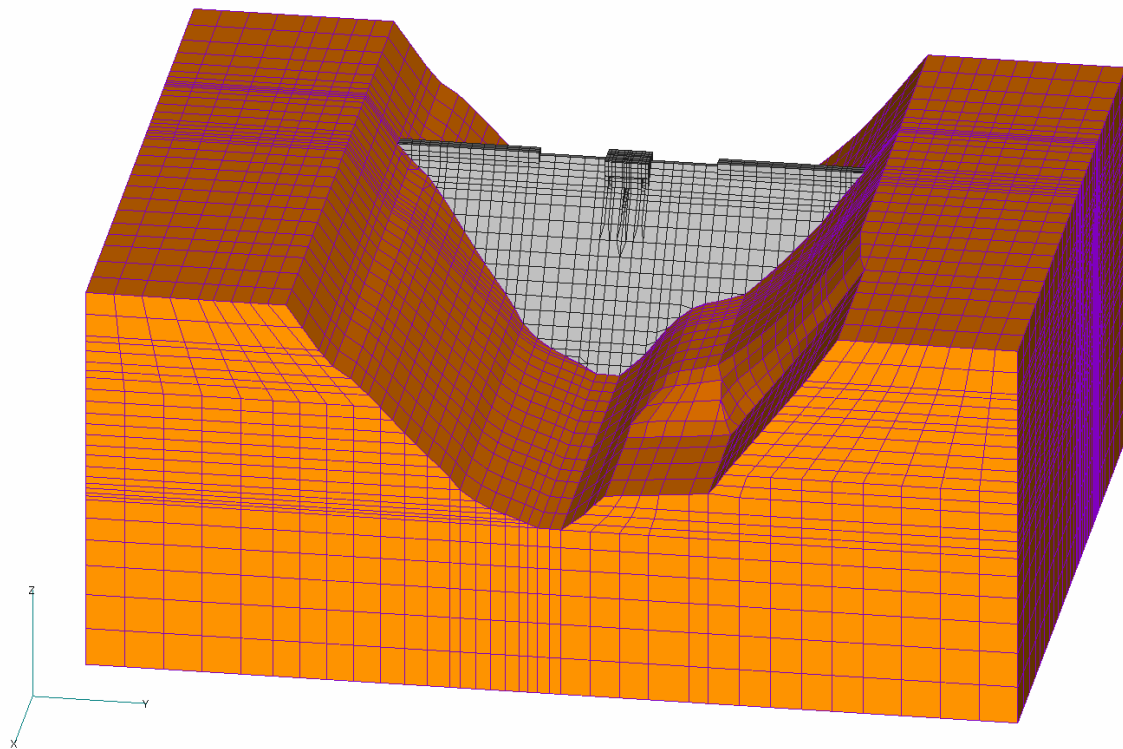


図 3-6(b) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(下流側鳥瞰図)

5

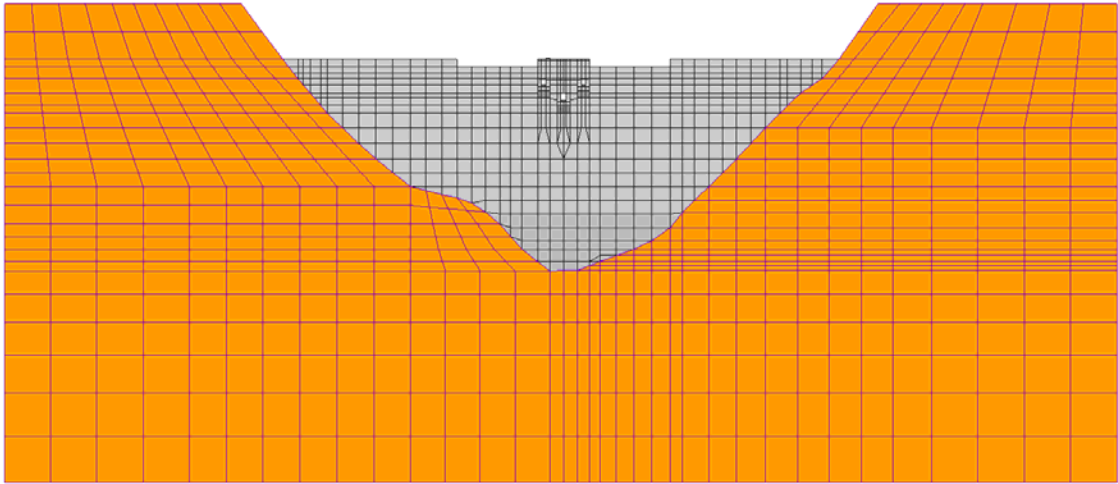


図 3-6(c) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(上流側正面図)

5

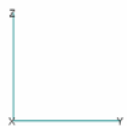
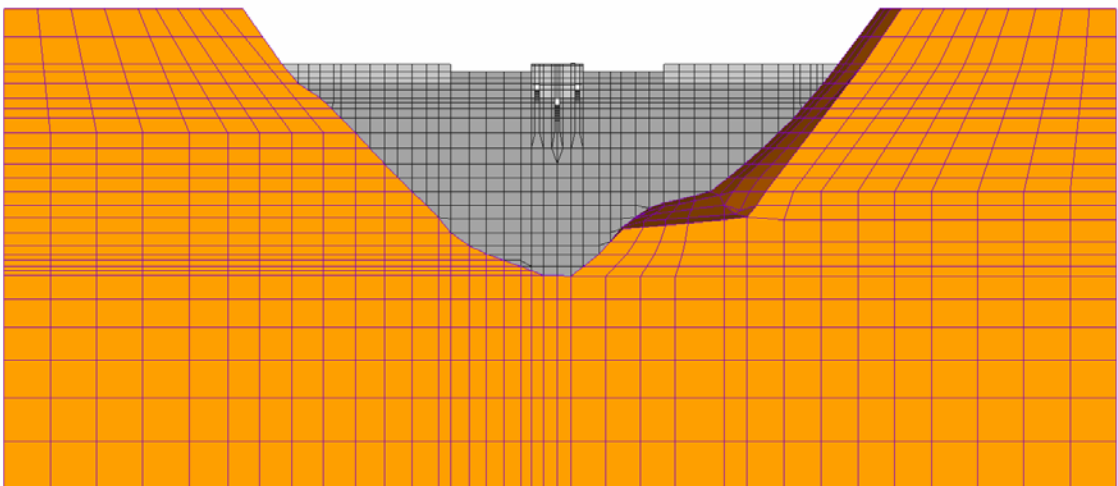


図 3-6(d) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(下流側正面図)

v

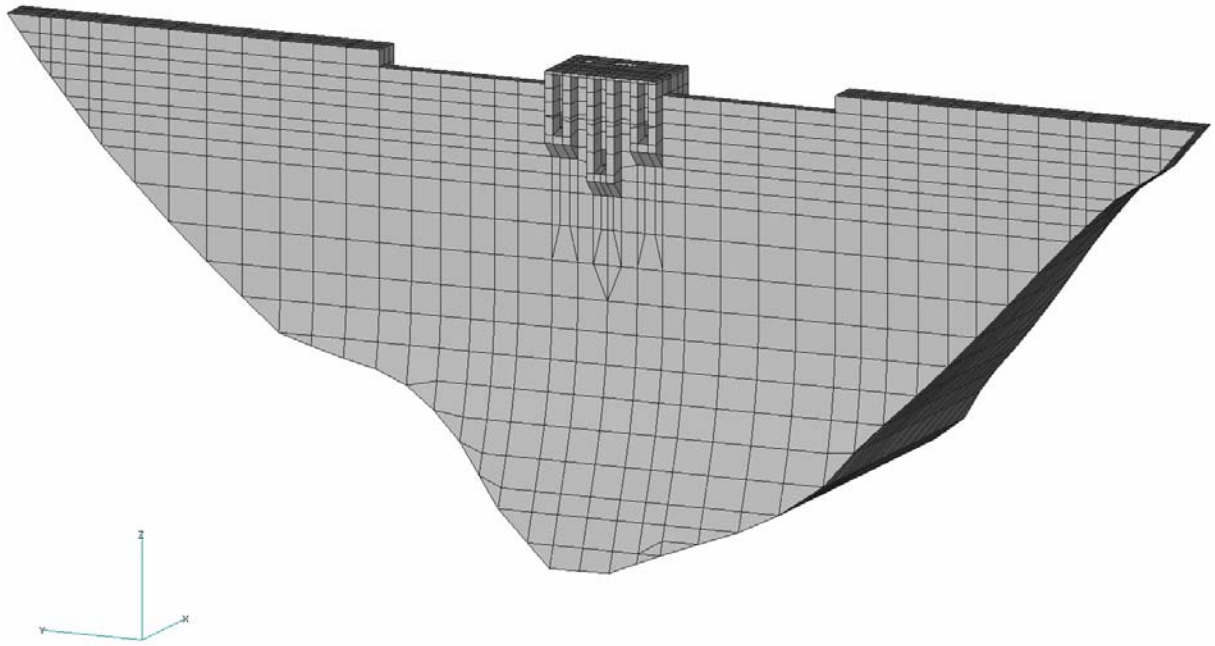


図 3-7(a) 堤体の有限要素メッシュ図
(上流側鳥瞰図)

v

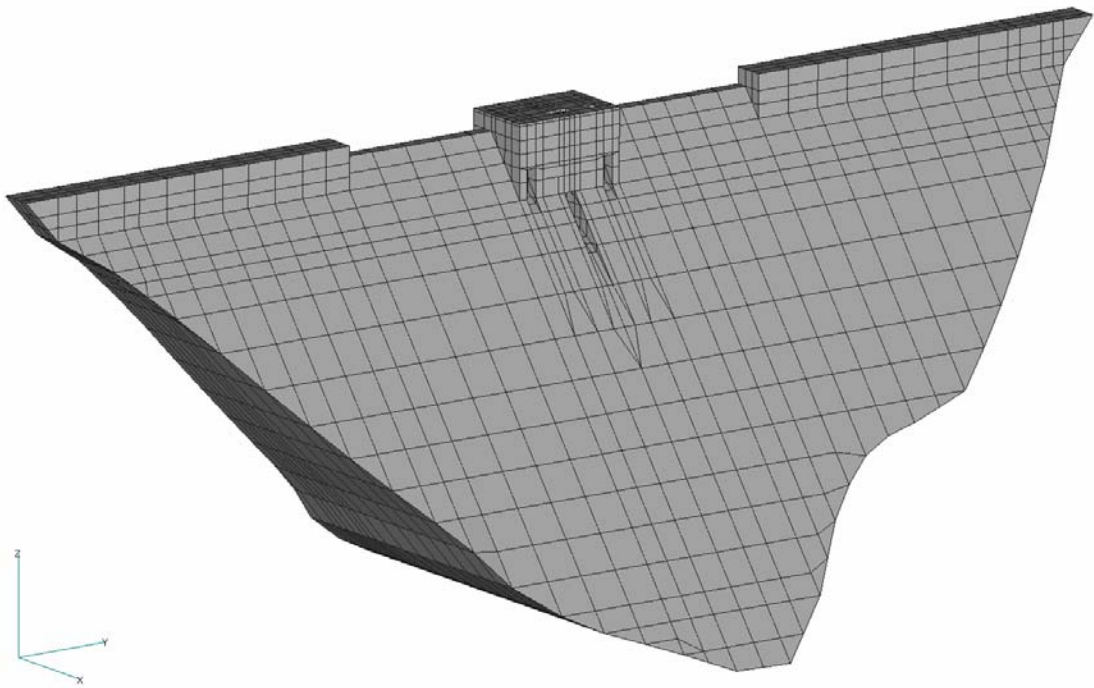


図 3-7(b) 堤体の有限要素メッシュ図
(下流側鳥瞰図)

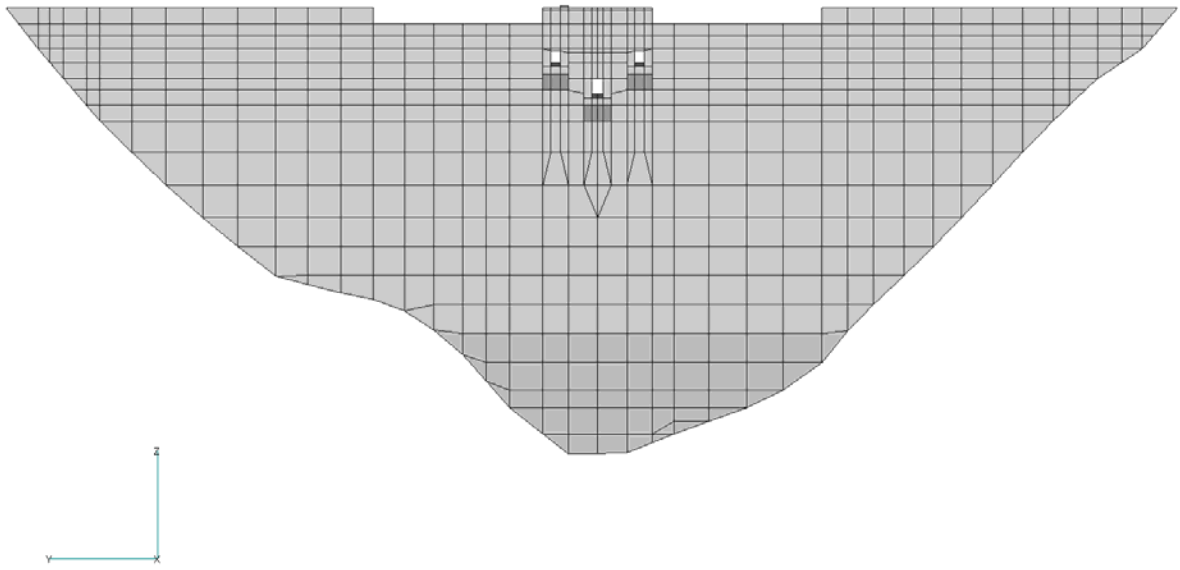


図 3-7(c) 堤体の有限要素メッシュ図
(上流側正面図)

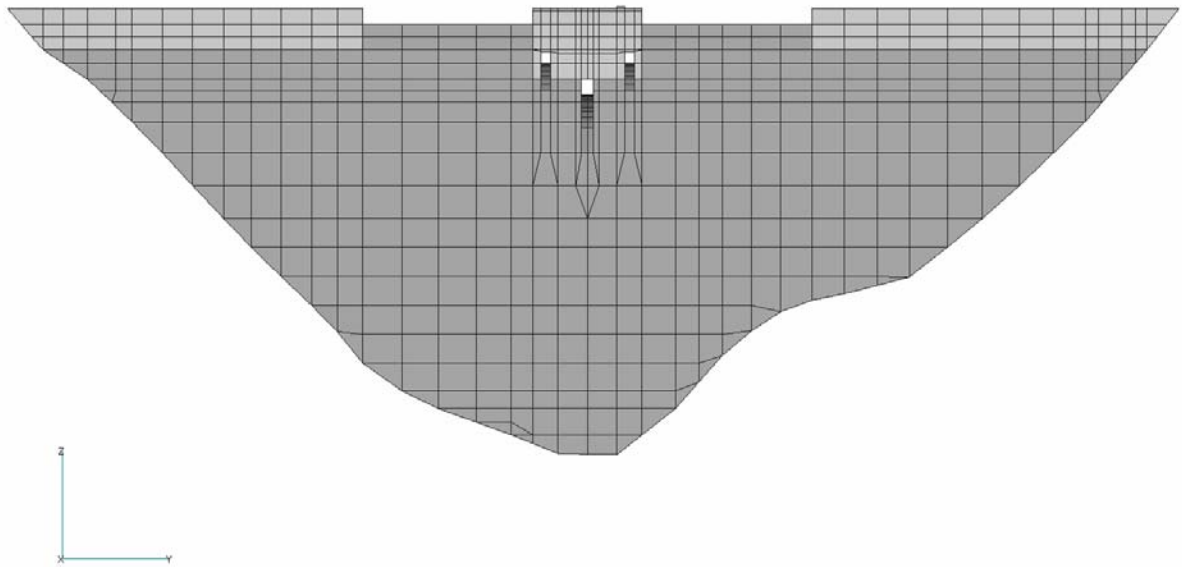


図 3-7(d) 堤体の有限要素メッシュ図
(下流側正面図)

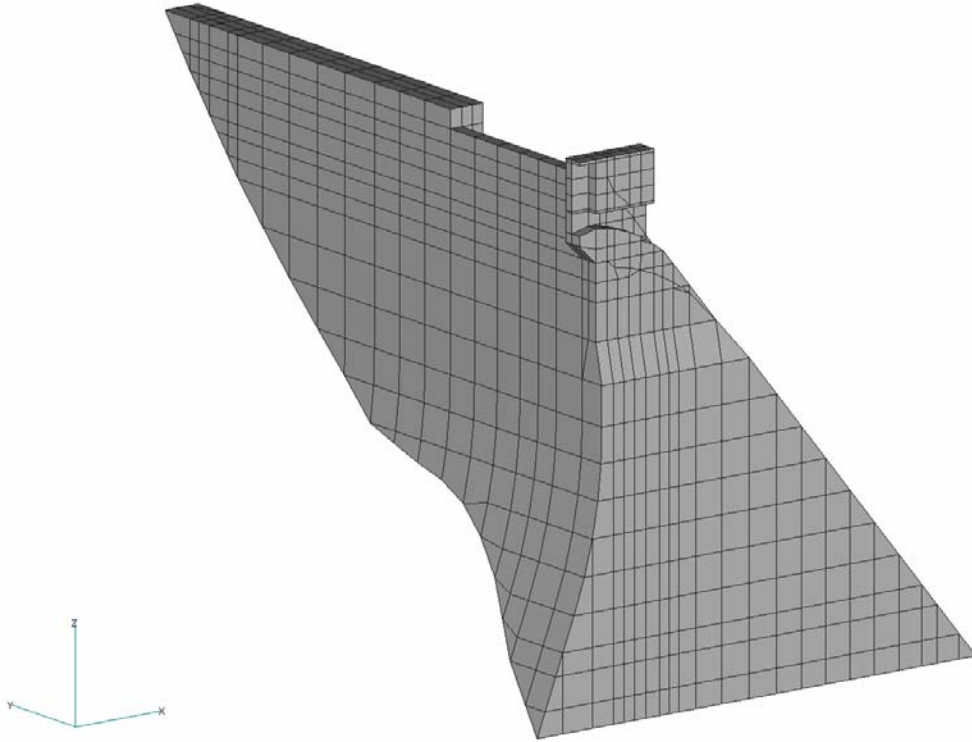


図 3-8(a) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図①)

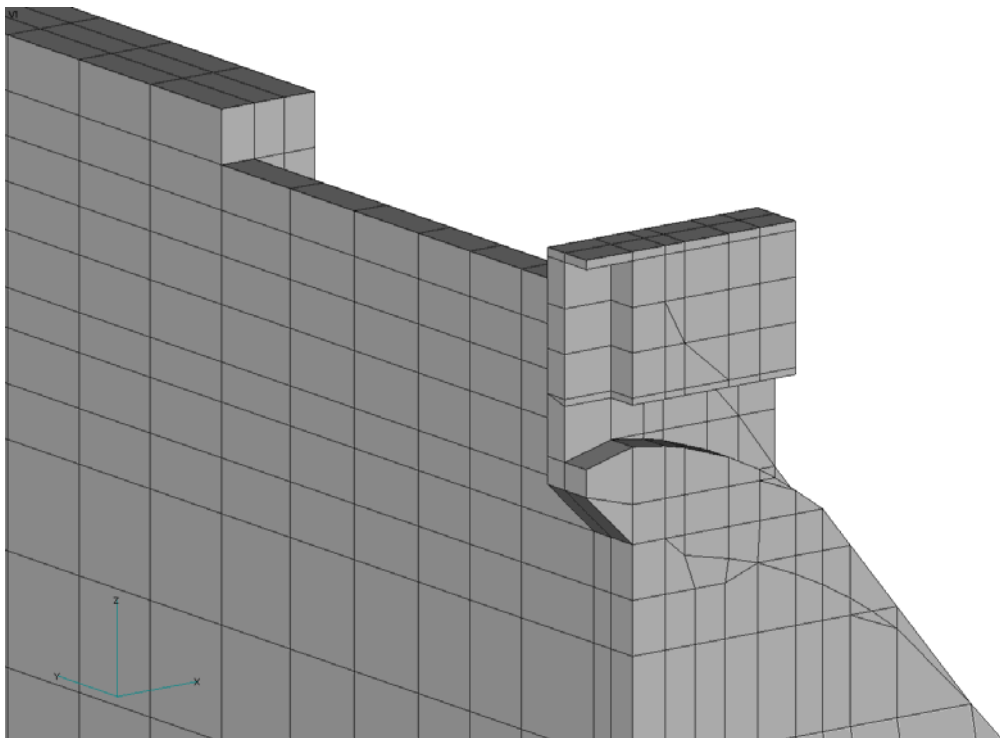


図 3-8(b) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図②)

v1

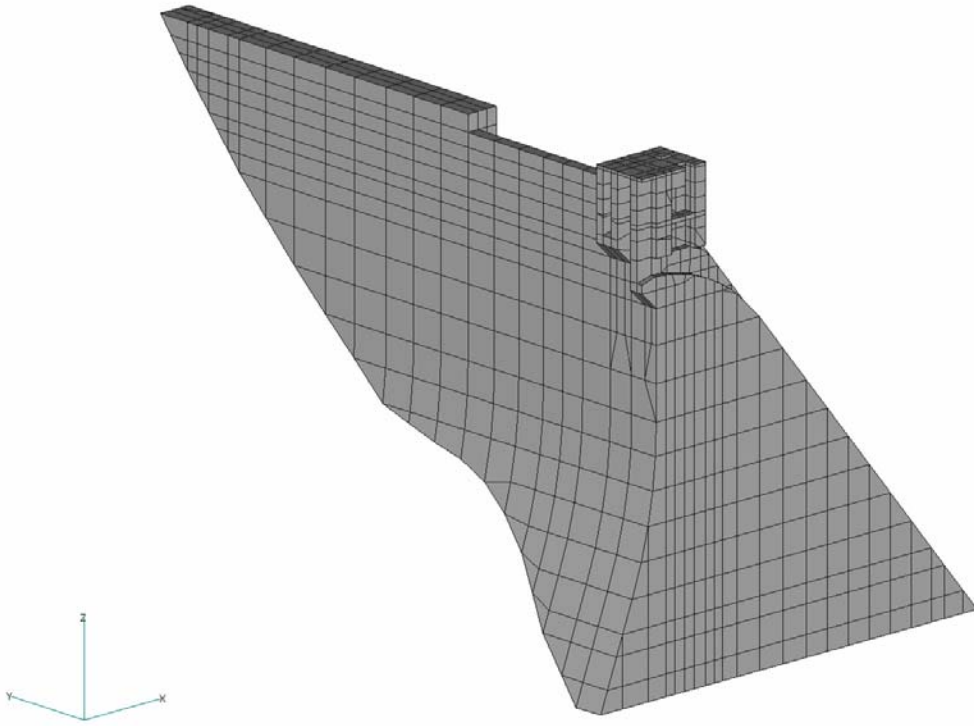


図 3-8(c) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図③)

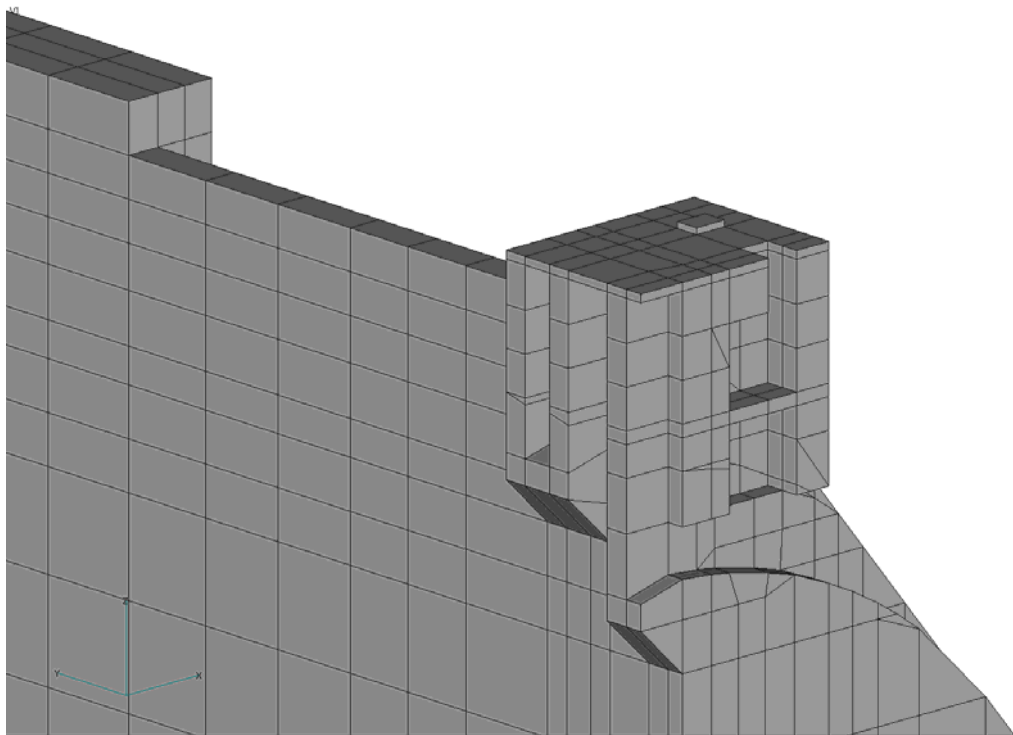


図 3-8(d) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図④)

v

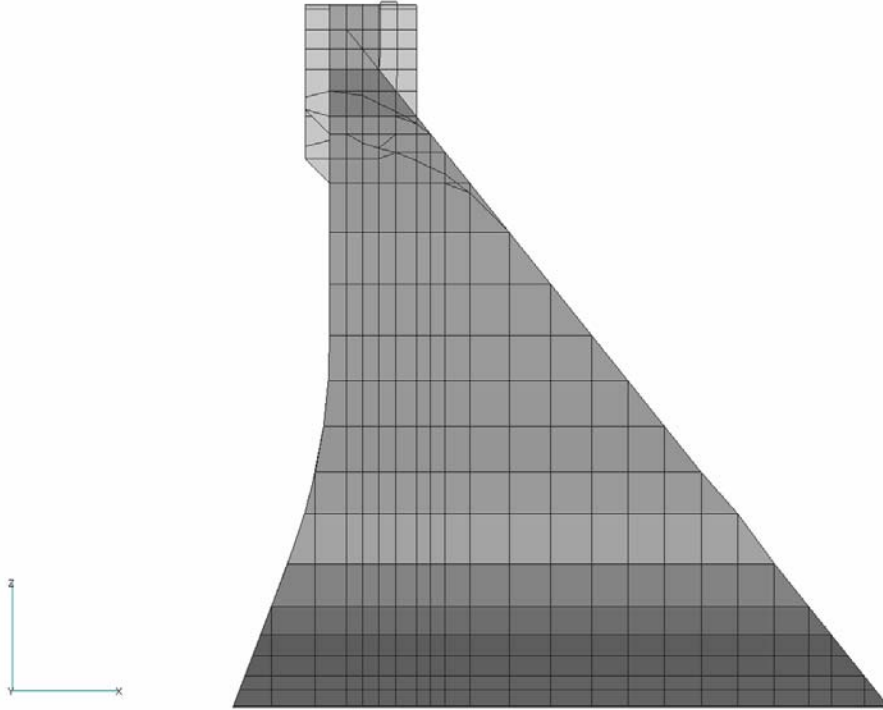


図 3-9 堤体の有限要素メッシュ図
(横断面図)

4. 解析手法

本業務で用いた解析プログラムは、UNIVERSE(Ver.5.1)²⁾である。

市販ソフトと比べ、UNIVERSE²⁾の特徴は、

- ①三次元ダム－貯水池－基礎岩盤の連成解析ができること
- ②半無限大地盤の影響を考慮できることである（三浦の粘性境界）。

ここで、これらの特徴の概要を述べる。

4.1 三次元ダム－貯水池－基礎岩盤連成解析

4.1.1 連成解析の基本方程式

図 4-1 にダム－貯水池－基礎岩盤連成系のイメージ図を示す。この連成系の三次元動的解析の基本方程式は、式(4.1)～(4.3)に示すとおりである。

$$\begin{bmatrix} M_d & M_{df} \\ M_{fd} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_d \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_d & C_{df} \\ C_{fd} & C_f^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d & K_{df} \\ K_{fd} & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_d \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_w \\ T_e + T_f \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{C_0^2 \partial t^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (4.2)$$

$$[M_g] \ddot{u}_g + [C_g] \dot{u}_g + [K_g] u_g = \{T_b\} \quad (4.3)$$

式(4.1)は、ダムと基礎岩盤の運動方程式、式(4.3)は、自由地盤の運動方程式、式(4.2)は、貯水池の波動方程式である。 M 、 C 、 K は、それぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。添字 d 、 df (fd)、 f 、 g は、それぞれダム、ダムと基礎岩盤との連結部、基礎岩盤、自由地盤を意味する。 u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} は、変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトルを表す。 F_w は、貯水の動水圧荷重であり、 T_e と T_f は、それぞれ基礎岩盤の底面に作用する地震荷重と自由地盤の運動により基礎岩盤の側面に与えられる力である。 T_b は、自由地盤底面に作用する地震荷重である。 Φ は、貯水粒子運動速度ポテンシャル関数である。 x 、 y 、 z は、デカルト座標であり、 t は時間である。 C_0 は、水中音速（ $\div 1440$ m/s）である。 C_f^* は、粘性境界の成分を含み、基礎岩盤の減衰マトリックス C_f と粘性境界マトリックス C_b との和（ $C_f^* = C_f + C_b$ ）である。ここで導入している粘性境界マトリックス C_b は、仮想仕事の原理に基づいて導かれたもの¹⁾で、従来の粘性境界マトリックス⁶⁾よりエネルギー吸収能が格段に向上している。

数値計算上では、式(4.1)および式(4.3)は、有限要素法により定式化され、式(4.2)は有限差分法により離散化される。地震荷重を時間刻みで離散化し、各時間ステップにおいて、右辺の T_e および T_b を計算する。与えられた荷重に対して、時間領域の直接積分法により連立方程式の解が求められる。

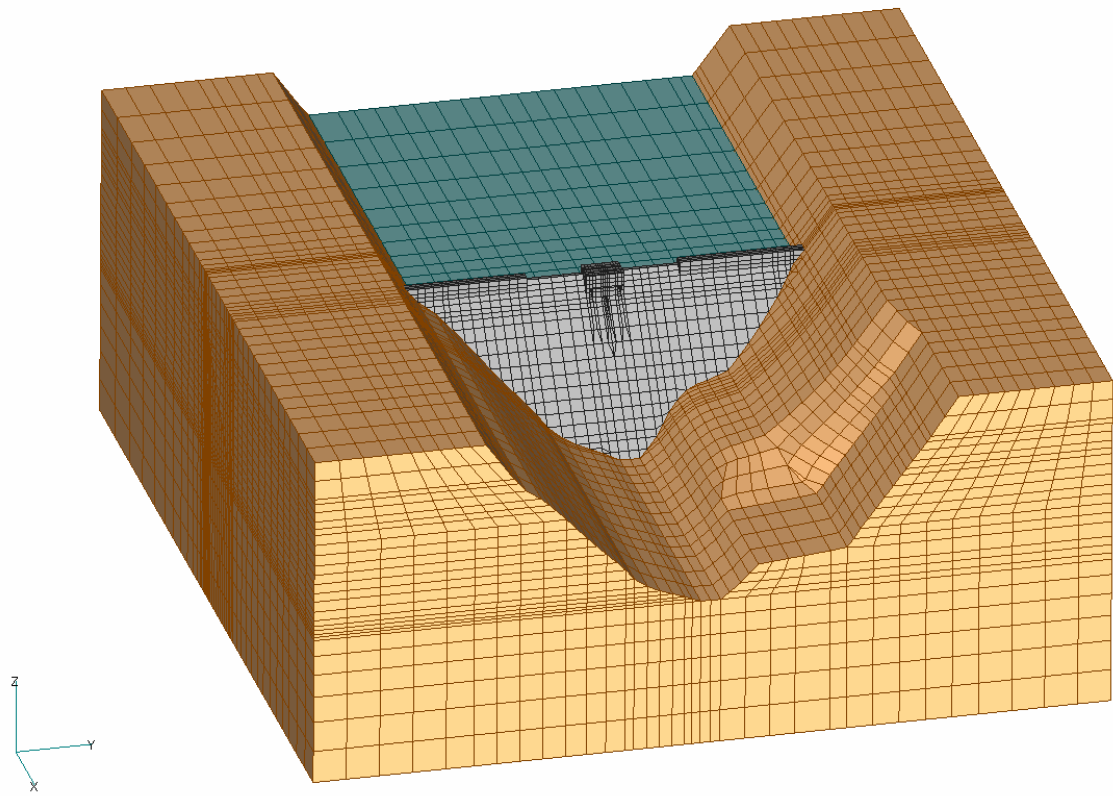


図 4-1 ダム—貯水池—基礎岩盤連成系のイメージ図

4.1.2 連成条件

ダムと貯水池の連成条件は、式(4.4)により表わされる。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_d \\ F_w = P_w \end{cases} \quad (4.4)$$

すなわち、ダムと貯水池の連続面において、水粒子の運動速度 $\partial\Phi/\partial n$ はダムの運動速度と等値であり、この連続面での動水圧 P_w はダムの外荷重と見なされる。

ダムと基礎岩盤との連成については、式(4.1)によって相互作用が考慮される。

4.1.3 境界条件

ダム-貯水池-基礎岩盤連成系に対して、境界は貯水池の底面、上流端、自由表面、基礎岩盤の側方および底面である。そのうち、基礎岩盤の側方境界および底面境界について、解析手法の説明については、4.2節に述べるものとし、ここでは、貯水池の境界条件について述べる。

(1) 貯水池の底面（兩岸の斜面を含む）

貯水池底面では式(4.5)で示す部分吸収条件を用いる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - C_0 \beta_b \frac{\partial \Phi}{\partial n_r} = 0 \quad (4.5)$$

ここに、 n_r は、境界面の法線方向を意味する。 C_0 は、水中音速（ ≈ 1440 m/s）である。 β_b は、境界内外の媒体の波動インピーダンス比であり、次式で定義されている。

$$\beta = \frac{V_{pb} \cdot \rho_b}{C_0 \cdot \rho_w}$$

なお、 V_{pb} と ρ_b は貯水池底面の堆積物のP波速度と密度であり、 ρ_w は貯水の密度である。 $\beta_b = 1$ であれば完全吸収条件となる。

(2) 貯水池の上流端

上流端では、境界の内側と外側がともに水であることから（ $\beta_b = 1$ ）、式(4.5)を貯水池の上流端に適用すると、式(4.6)に示す粘性境界条件が得られる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -C_0 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (4.6)$$

ここに、軸 x が貯水池の上流方向に向いていることを仮定している。水の波動エネルギーが貯水池上流端では完全に吸収されることで、半無限長貯水池での波の伝播を模擬する。

(3) 貯水池の自由表面

自由表面では式(4.7)に示す表面波条件を用いる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (4.7)$$

ここに、 g は重力加速度であり、 z は鉛直座標である

式(4.5)～式(4.7)を貯水池の境界面の節点に適用して、貯水池の内部節点に適用する式(4.2)と合わせて、貯水池の全体の挙動を解くことができる。

4.2 粘性境界の解析手法

地震時、基礎岩盤内部から半無限大地盤へのエネルギーの逸散、同時に半無限大地盤から基礎岩盤内部にエネルギーの流入を忠実に考慮しなければならない。このため、UNIVERSE²⁾では三浦の粘性境界¹⁾ (改良したもの)を用いている。

4.2.1 エネルギー逸散について

式(4.1)のサブマトリックス C_f^* は式(4.8)に示す構成である。

$$C_f^* = C_f + C_b \quad (4.8)$$

ここに、 C_f は基礎岩盤の減衰マトリックスで、 C_b は、いわゆる三浦の粘性境界マトリックスである (図 4-2 参照)。UNIVERSE²⁾では、基礎岩盤との相対位置によって、境界面を図 4-3 に示す符号で呼んでいる。そのマトリックスの内容について、

右側境界 (R) では、

$$[C]_R^e = \frac{\rho h d}{36} \begin{bmatrix} 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 \\ 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s \\ V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

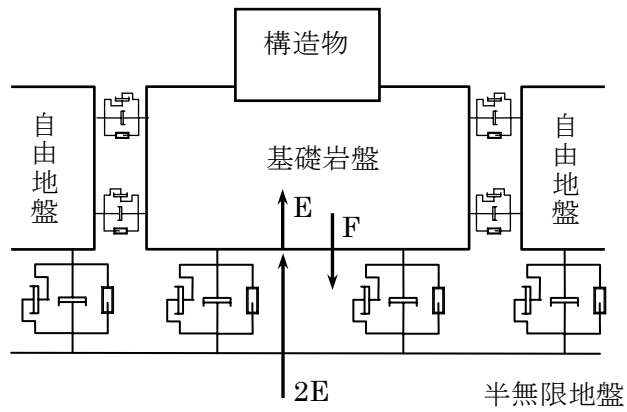


図 4-2 基礎岩盤と粘性境界 (断面イメージ図)

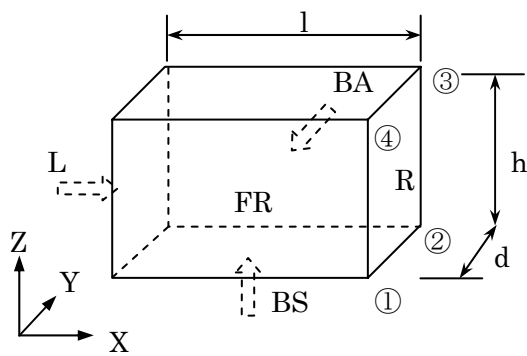


図 4-3 境界面の呼び方

ここに、 ρ は地盤材料の密度であり、 h と d は右側粘性境界メッシュの縦と横の寸法である。 V_s と V_p は S 波と P 波の速度を示す。

左側境界 (L) では、位置関係により式(4.10)が成り立つ。

$$[C]_L^e = [C]_R^e \quad (4.10)$$

また、手前境界 (FR) では、

$$[C]_{FR}^e = \frac{\rho h}{36} \begin{bmatrix} 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 \\ 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 \\ 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 \\ 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s \\ V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 \\ 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 \\ 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s \\ 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 \\ 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 \\ 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ここに、 h と l は手前側粘性境界メッシュの縦と横の寸法である。

同様に、奥側の粘性境界 (BA) では、式(4.12)の関係がある。

$$[C]_{BA}^e = [C]_{FR}^e \quad (4.12)$$

モデルの底面では、

$$[C]_{BS} = \frac{\rho d}{36} \begin{bmatrix} 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 \\ 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p \\ 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p \\ V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p & 0 & 0 & 2V_p \\ 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & 0 & V_s & 0 & 0 & 2V_s & 0 & 0 & 4V_s & 0 \\ 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & V_p & 0 & 0 & 2V_p & 0 & 0 & 4V_p \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ここに、 l と d は底面粘性境界メッシュの縦と横の寸法である。

式(4.9)～式(4.13)は、要素毎のものであり、各境界面においてその面にあるすべての要素の減衰マトリックスを組合せることにより、それぞれの境界減衰マトリックスを構成することができる。

4.2.2 自由地盤の影響について

4.2.1 では、基礎岩盤から半無限大自由地盤へのエネルギーの逸散について、粘性境界の構成を述べたが、逆に、自由地盤の振動による基礎岩盤に与える影響を考慮する必要もある。具体的には、自由地盤の振動による基礎岩盤の境界面に与える力(式(4-1)の T_f)を正確に評価しなければならない。ここでは、この力は図4-4の仮定に基づき、2種類に分けられ、一つは自由地盤の変位によるもの $\{f_d^f\}$ と、もう一つは自由地盤の速度によるもの $\{f_v^f\}$ である。すなわち、基礎岩盤の側方境界節点に次式に定義する力が作用している。

$$\{T_f\} = \{f_d^f\} + \{f_v^f\} \quad (4.14)$$

ここにベクトル $\{T_f\}$ は、図4-5に示す節点構成に対して次式に示すものとなる。

$$\{T_f\} = \{t_{x1}, t_{y1}, t_{z1}, t_{x2}, \dots, t_{x4}, t_{y4}, t_{z4}\}^T \quad (4.15)$$

図4-5に示す三方向の変位による側面境界に与えるべき力を次式で求めることができる。

$$\{f_d^f\}_i = [G]_i^e \{u^f\}^T \quad (i = R, L, FR, BA) \quad (4.16)$$

右側境界 R を例として、図4-5に示すように基礎岩盤が三次元的に変形した場合、接している自由地盤の節点の変位ベクトル $\{u^f\}$ を次のように定義する。

$$\{u^f\} = \{u_1, v_1, w_1, u_2, \dots, u_4, v_4, w_4\}^T \quad (4.17)$$

剛性マトリックス $[G]_R^e$ は式(4.18)により定義されている。

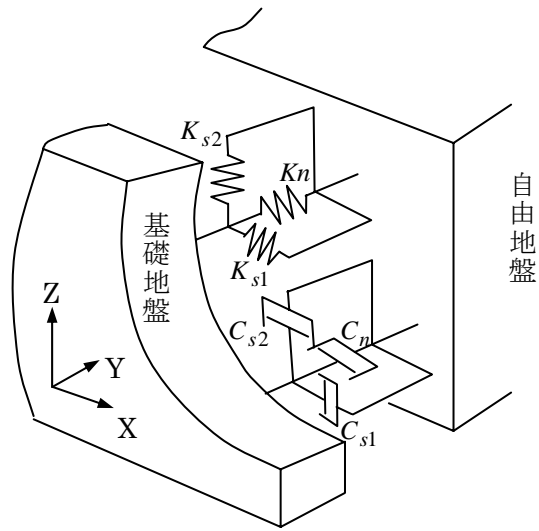


図 4-4 基礎岩盤と自由地盤の接合

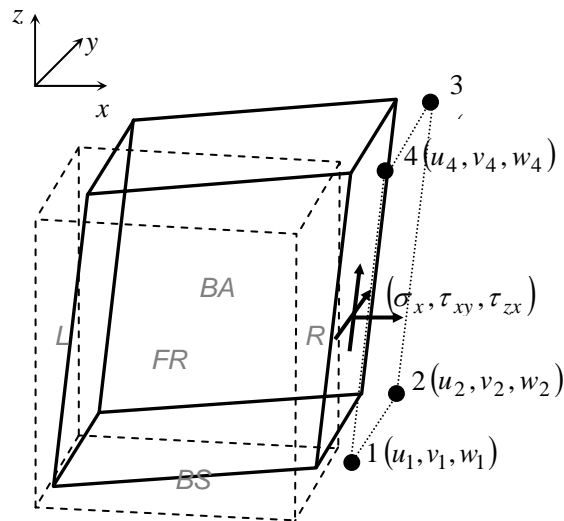


図 4-5 三次元地盤変形と境界面に与える力

$$[G]_R^e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & \theta & 0 & 0 & \theta \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & -\varphi & 0 \\ -\phi & 0 & 0 & -\phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & \theta & 0 & 0 & \theta \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & -\varphi & 0 \\ -\phi & 0 & 0 & -\phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & \theta & 0 & 0 & \theta \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & -\varphi & 0 \\ -\phi & 0 & 0 & -\phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & -\theta & 0 & 0 & \theta & 0 & 0 & \theta \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & -\varphi & 0 \\ -\phi & 0 & 0 & -\phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & \phi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ここに,

$$\begin{cases} \phi = \frac{\mu \cdot d}{8} \\ \varphi = \frac{\mu \cdot h}{8} \\ \theta = \frac{\lambda \cdot d}{8} \end{cases} \quad (4.19)$$

なお, μ はせん断弾性係数を示し, λ はラメの定数であり, $\lambda = 2\mu\nu/(1-2\nu)$ により求める。

境界 **L** の境界剛性マトリックスについては, 境界 **R** との位置関係により次の式が成立する。

$$[G]_L^e = -[G]_R^e \quad (4.20)$$

同様にして, 境界 **FR** の剛性マトリックスは次式となる。

$$[G]_{FR}^e = \begin{bmatrix} \xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & -\eta & 0 & 0 & -\eta \\ 0 & \zeta & 0 & 0 & \zeta & 0 & 0 & -\zeta & 0 & 0 & 0 & -\zeta & 0 \\ \xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 & -\eta \\ 0 & \zeta & 0 & 0 & \zeta & 0 & 0 & -\zeta & 0 & 0 & 0 & -\zeta & 0 \\ \xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & -\eta & 0 & 0 & -\eta \\ 0 & \xi & 0 & 0 & \zeta & 0 & 0 & -\zeta & 0 & 0 & 0 & -\zeta & 0 \\ \xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & -\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & \eta & 0 & 0 & -\eta & 0 & 0 & -\eta \\ 0 & \zeta & 0 & 0 & \zeta & 0 & 0 & -\zeta & 0 & 0 & 0 & -\zeta & 0 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ここに,

$$\begin{cases} \xi = \frac{\mu \cdot h}{8} \\ \zeta = \frac{\mu \cdot l}{8} \\ \eta = \frac{\lambda \cdot l}{8} \end{cases} \quad (4.22)$$

境界 BA の境界剛性は、式(4.14)により定義される。

$$[G]_{BA}^e = -[G]_{FR}^e \quad (4.23)$$

式(4.14)の第 2 項については、式(4.24)によって求める。

$$\{f_v^f\}_i = [C^f]_i^e \{\dot{u}^f\}^T \quad (4.24)$$

ここに、 $[C^f]_i^e$ は、基礎岩盤の側方境界の減衰マトリックスであり、基礎岩盤に対する自由地盤の

速度の影響を評価するものである。 $[C^f]_i^e$ は、側方境界の剛性マトリックス $[G]_i^e$ を用いてレーリー型減衰として求めることとしている。

半無限自由地盤をダムと基礎岩盤の連成系に取込む手順としては、まず、式(4.3)により自由地盤の地震応答を解析する。次に、式(4.14)により自由地盤の振動によって基礎岩盤に与えられる力 T_f を計算する。そして、 T_f を基礎岩盤底面の入力地震動と合わせて式(4.1)に入力する。

5. ダムおよび基礎岩盤物性の同定

本章では、2003年9月26日の十勝沖地震の際に観測されたダムおよび基礎岩盤の地震動に基づき、動的解析手法によりダムおよび基礎岩盤の動的物性値を同定する。

5.1 物性同定手順

動的解析において、解析結果を観測結果と一致させるように物性を調整して、ダムの地震時挙動がもっとも再現された時の物性値はダムの真の物性値と見なす。このような物性の同定手順を、図5-1に示す。

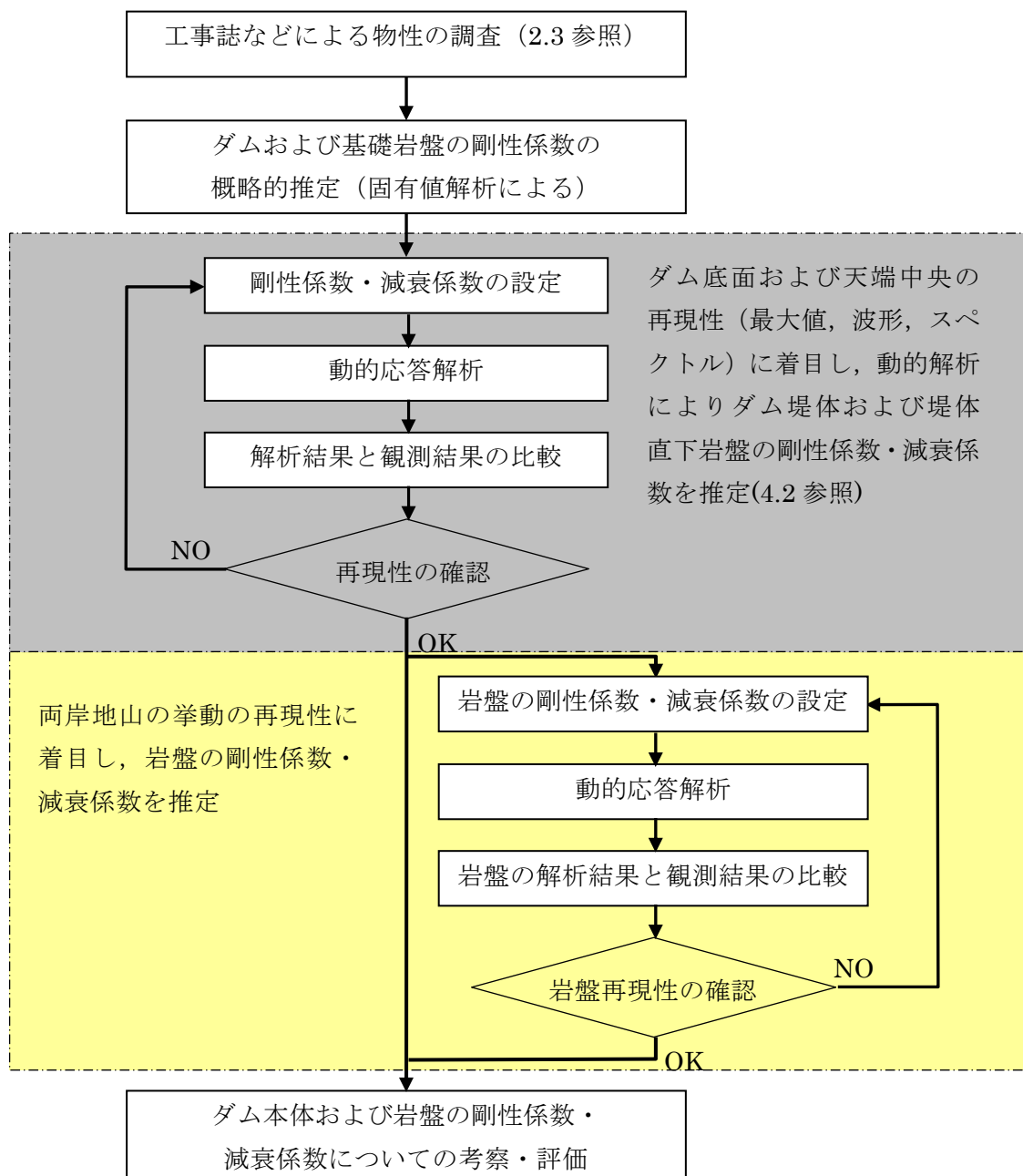


図 5-1 ダム本体および基礎岩盤物性の同定手順

5.2 ダムの剛性係数の概略的推定

5.2.1 ダム本体の剛性係数について

ダム本体および基礎岩盤の剛性係数を同定するために、固有値解析を行った。地震観測により得られたダム本体の加速度伝達関数のピーク振動数とダムの固有振動数が合致するようにダム本体および基礎岩盤の剛性係数を調整した。そのうち、ダム本体の剛性を調整して、上下流方向の一次固有振動数を合わせた上で、ダム軸方向の一次固有振動数が合うように基礎岩盤の剛性を調整した。また、堤体の固有値解析結果に基礎岩盤のモードの影響を除くために、基礎岩盤の密度を0にしている。

固有値解析における初期物性値を表 5-1 に、再現できた時の物性値を表 5-2 にそれぞれ示す。

表 5-1 固有値解析の初期物性値

	弾性係数(MPa)	密度(g/cm ³)	ポアソン比
ダム本体	35000.0	2.44	0.20
基礎岩盤	33000.0	0.00	0.24



表 5-2 ダムの固有振動数が再現できた時の物性値

	弾性係数(MPa)	密度(g/cm ³)	ポアソン比
ダム本体	33000.0	2.44	0.20
基礎岩盤	30000.0	0.00	0.24

5.2.2 ダム堤体の固有振動数について

地震観測結果により得られたダム本体の固有振動数は貯水池の影響を受けて、空虚時のものより低くなっているが、固有値解析により得られる固有振動数は貯水の影響を反映していない。よって、貯水の影響を見込んだ上で固有値解析を行う必要がある。通常、重力式ダムでは、水位が高い時の固有振動数が空虚時に比べ低くなる傾向があるが、本解析では水位条件を踏まえ、ここで1次固有振動数を約5%増して、固有値解析の目標値と設定した。(ダム本体の1次固有振動数は、地震観測では4.96Hz、固有値解析では5.20Hzとした。)表 5-3 に固有値解析で得られた堤体の固有振動数をまとめる。

表 5-3 固有値解析で得られたダム本体の固有振動数

	①観測値(Hz)	②解析値(Hz)	相対差(②-①)/①×100
1次(上下流1次)	4.96	5.20	4.83
2次(上下流2次)	観測値なし	7.10	----
3次(上下流3次)	7.54	8.50	12.73
4次(軸方向1次)	8.18	9.25	13.08

ダム本体の1次～4次の固有振動モードを図 5-2 に示す。
これにより、ダム本体の弾性係数は約33000MPaであるとした。

v1

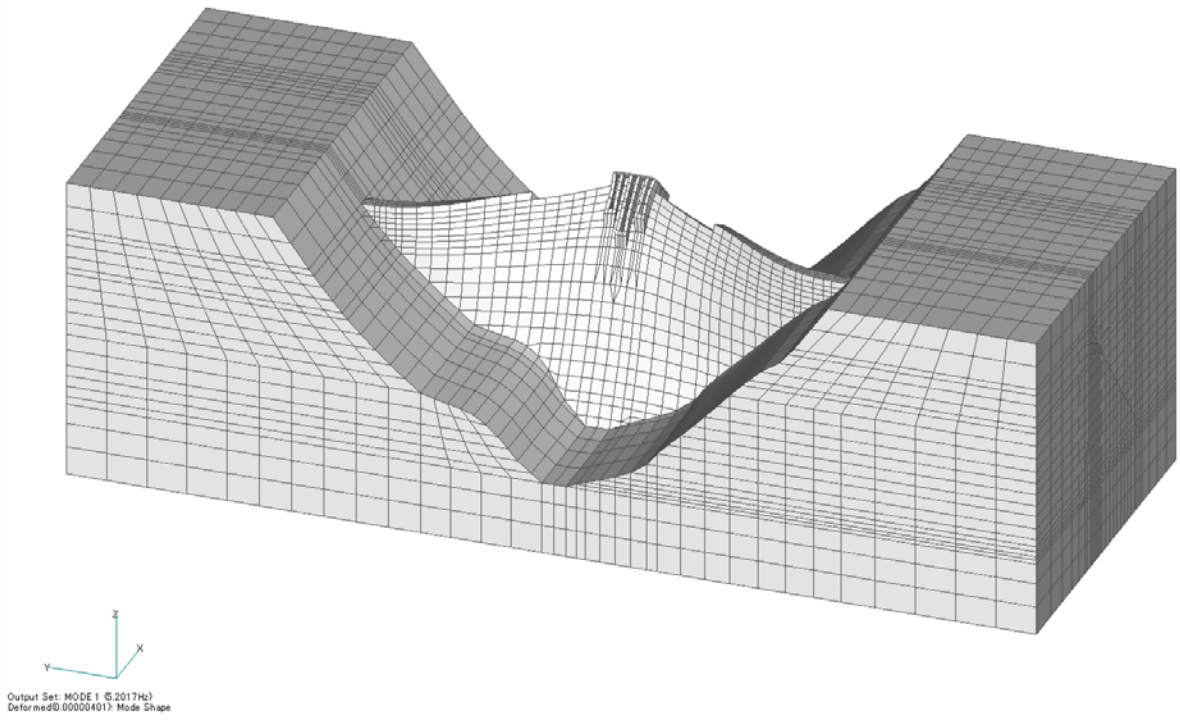


図 5-2 (a) 1 次固有振動モード (5.202Hz)

v1

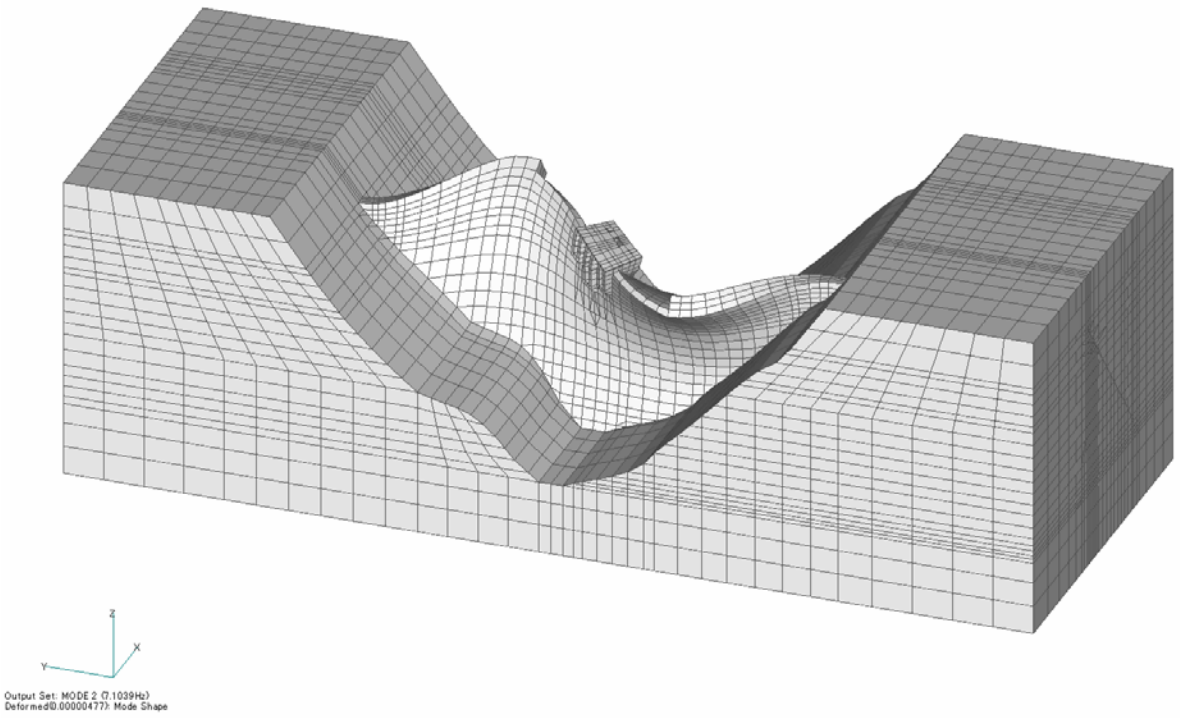


図 5-2 (b) 2 次固有振動モード (7.104Hz)

v1

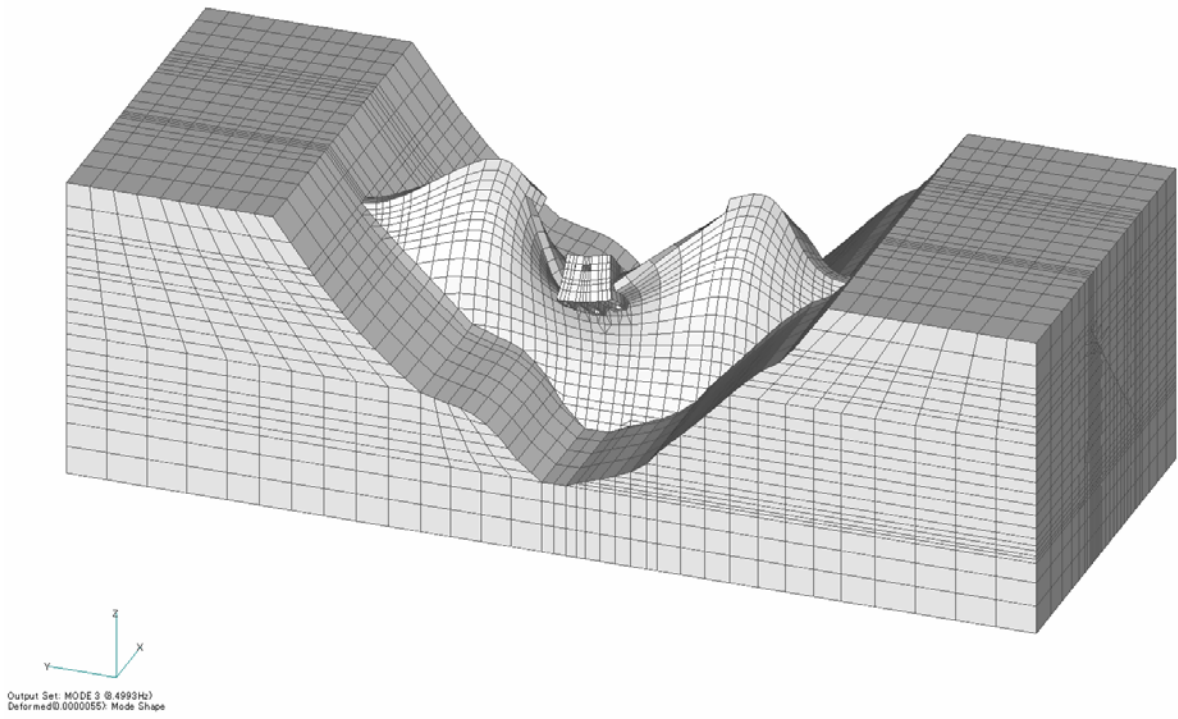


図 5-2(c) 3次固有振動モード(8.499Hz)

v1

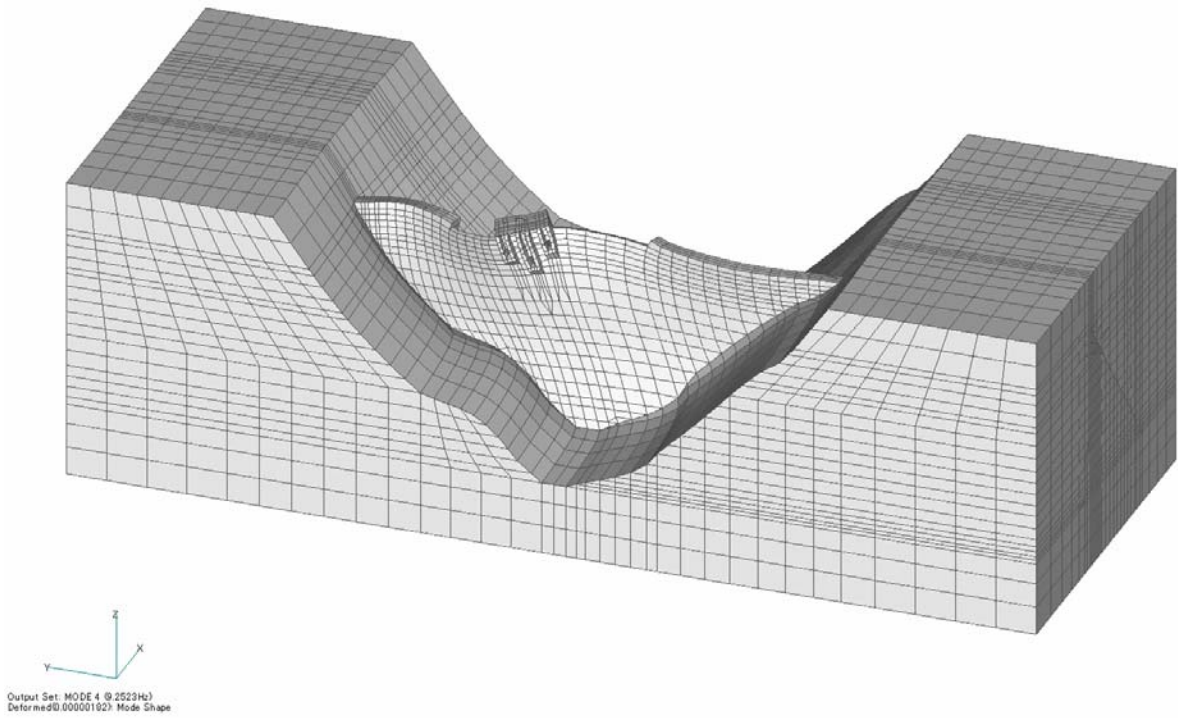


図 5-2(d) 4次固有振動モード(9.252Hz)

5.3 物性の同定

5.3.1 解析条件

3章で作成した解析モデルを用い、三次元ダム－貯水池－基礎岩盤連成系解析プログラムUNIVERSE(Ver.5.1)を用いて、動的解析を実施した。UNIVERSEは、時間領域の直接積分法を用いている。

(1) 物性条件

固有値解析により概略的に同定したダム・基礎岩盤の物性（表5-2参照）および地震観測結果に基づきハーフパワー法で推定した減衰係数（表2-6参照）を物性同定プロセスの初期値とする。表5-4に初期物性値を示す。また、材料の減衰については、レーリー型減衰として、式(5.1)により算出している。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5.1)$$

ここに、 $[C]$ 、 $[M]$ 、 $[K]$ は順に減衰、質量、剛性マトリックスである。 α 、 β は式(5.2)で定義するパラメータである。

$$\begin{cases} \alpha = 1.4 \cdot h \cdot \omega_1 \\ \beta = 0.6 \frac{h}{\omega_1} \end{cases} \quad (5.2)$$

ここに、 h は表5-4に示す減衰係数であり、 ω_1 はダムの1次固有円振動数である。

表 5-4 物性値を同定するための初期値

	弾性係数(MPa)	密度(g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数(%)
ダム本体	33000.0	2.44	0.20	2
基礎岩盤	30000.0	2.74	0.24	2

表5-4に示す物性値を初期値として、動的解析を行い、解析結果と観測結果との比較により再現性を確認する。再現性が確認できない場合、物性を修正して、図5-1に示す解析検討を行い、よい再現性が得られるまで解析・検討を繰り返す。修正した物性およびその修正理由などについては、後述する5.3.3物性の同定を参照されたい。

(2) 境界条件

① 基礎岩盤の境界条件

境界条件について、基礎岩盤の側方境界およびモデル底面では、4.2節で述べた粘性境界を用い、側方粘性境界の外側に自由地盤を設けて、自由地盤との連成解析とした。

② 貯水池の境界条件

貯水池の底面および両側の斜面では部分吸収条件（底面 $\beta_b = 1.5$ ，斜面 $\beta_b = 2.0$ ），上流端では完全吸収条件，自由表面では表面波条件を用いた（4.1.3参照）。

(3) 再現性についての検討項目

以下の項目に着目して、解析結果と観測結果を比較する。また、解析モデルにおける観測点の位置は図 5-3 に示す。

- ① 最大加速度応答値，ダム本体の加速度増幅率
- ② 加速度伝達関数
- ③ 加速度応答の時刻歴波形

5.3.2 入力地震動

十勝沖地震時，基礎岩盤で観測された地震動を次に述べる三次元引戻し計算手法により解析モデル底面（底面粘性境界下）に引戻した。

物性同定解析では，ダム本体の物性のみでなく，基礎岩盤の物性も同定することを想定しているから，基礎岩盤における地震動の伝播特性を考察することが必要となっている。具体的には，岩盤下部観測点(F1)から岩盤上部観測点(F2)，左岸観測点(R1)および右岸観測点(R2)の間の伝播特性を考察する必要がある。このため，岩盤下部観測点(F1)で観測された地震動を，水平上下流方向，水平ダム軸方向，鉛直方向の3方向同時入力として，解析モデルの底面まで引戻した。作成されたモデル底面の波を物性同定解析の入力地震動とした。

地震動の引戻し計算手法の概要は以下の通りである（図 5-4 参照）。

(1) B点とF1点間の伝達関数を求める。

F1点の地震動(W_{FX} , W_{FY} , W_{FZ})を三方向同時にモデル底面(B点)により入力加振し，三次元ダム-貯水池-基礎岩盤連成系の解析を行う。これによりF1点で三方向の応答波(R_X , R_Y , R_Z)が得られる。

入力波(W_{FX} , W_{FY} , W_{FZ})とF1点の応答波(R_X , R_Y , R_Z)のフーリエスペクトルを求め，方向毎にB点とF1点間の伝達関数を求める。

$$W_{FX} \text{ と } R_X \rightarrow T_{XX}$$

$$W_{FY} \text{ と } R_Y \rightarrow T_{YY}$$

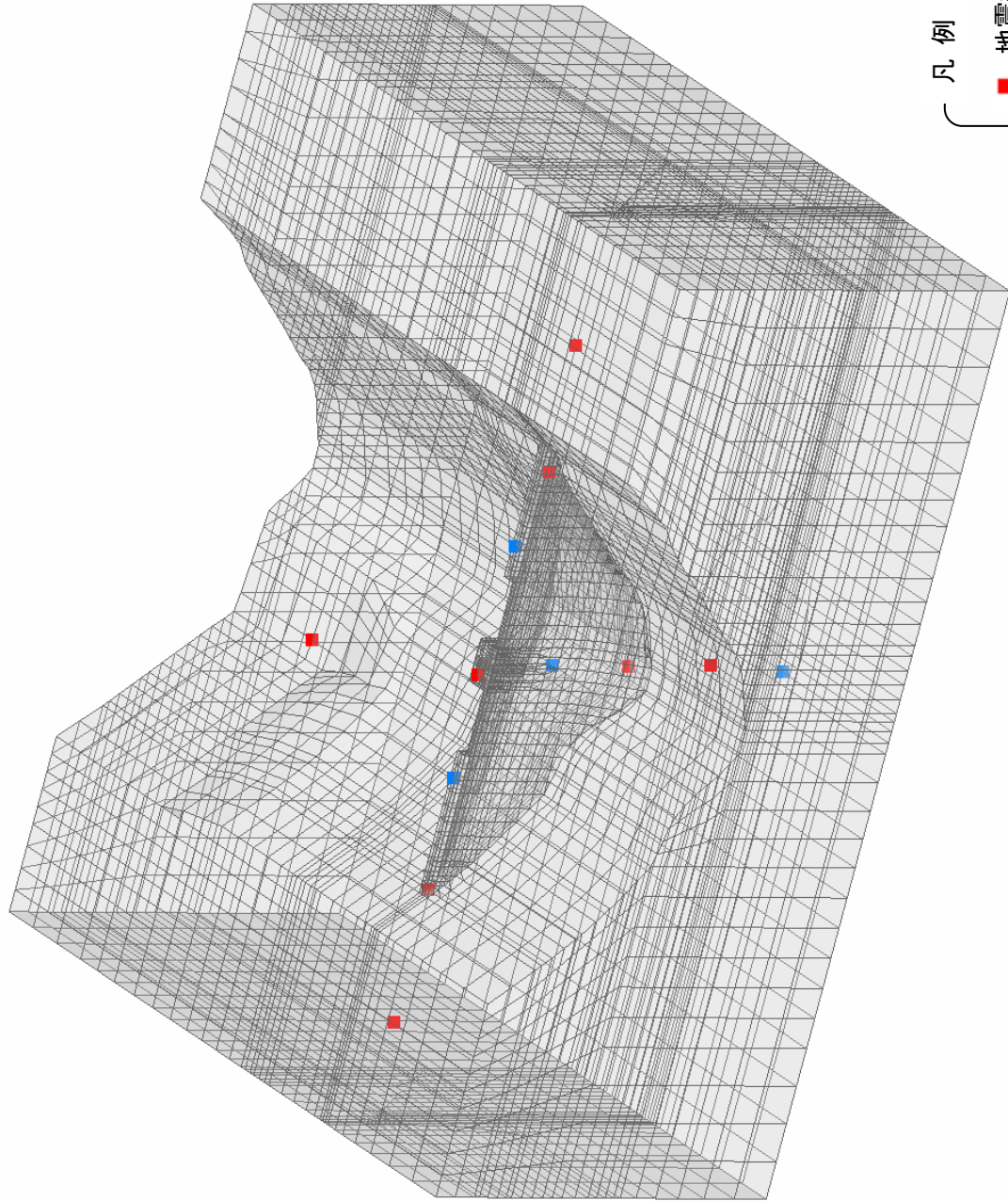
$$W_{FZ} \text{ と } R_Z \rightarrow T_{ZZ}$$

が得られる。

(2) B点のフーリエスペクトルおよび時刻歴を求める。

F1点の地震動を再現するために，B点で入力すべき3方向の地震動(W_{BX} , W_{BY} , W_{BZ})のフーリエスペクトル(F_{BX} , F_{BY} , F_{BZ})は，式(5.3)の関係に満たさなければならない。

$$\begin{Bmatrix} F_{FX} \\ F_{FY} \\ F_{FZ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & T_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & T_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_{BZ} \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$



凡例

- 地震観測位置
- 追加した出力節点

図 5-3(a) 地震計位置および追加した出力節点 (鳥瞰図)

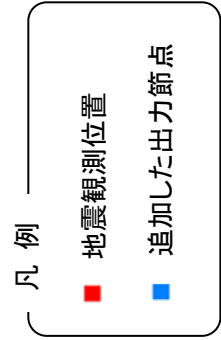
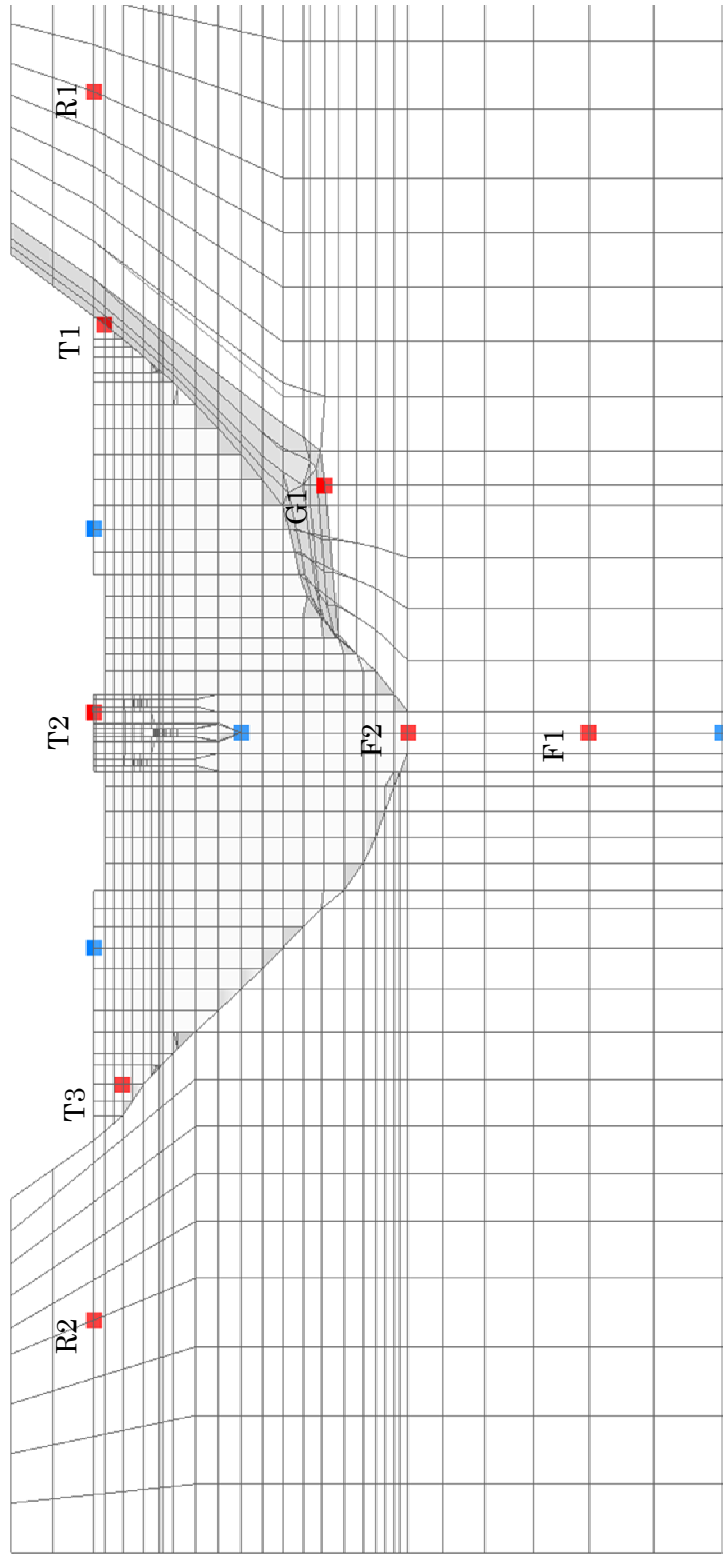


図 5-3(b) 地震計位置および追加した出力節点（下流側正面図）

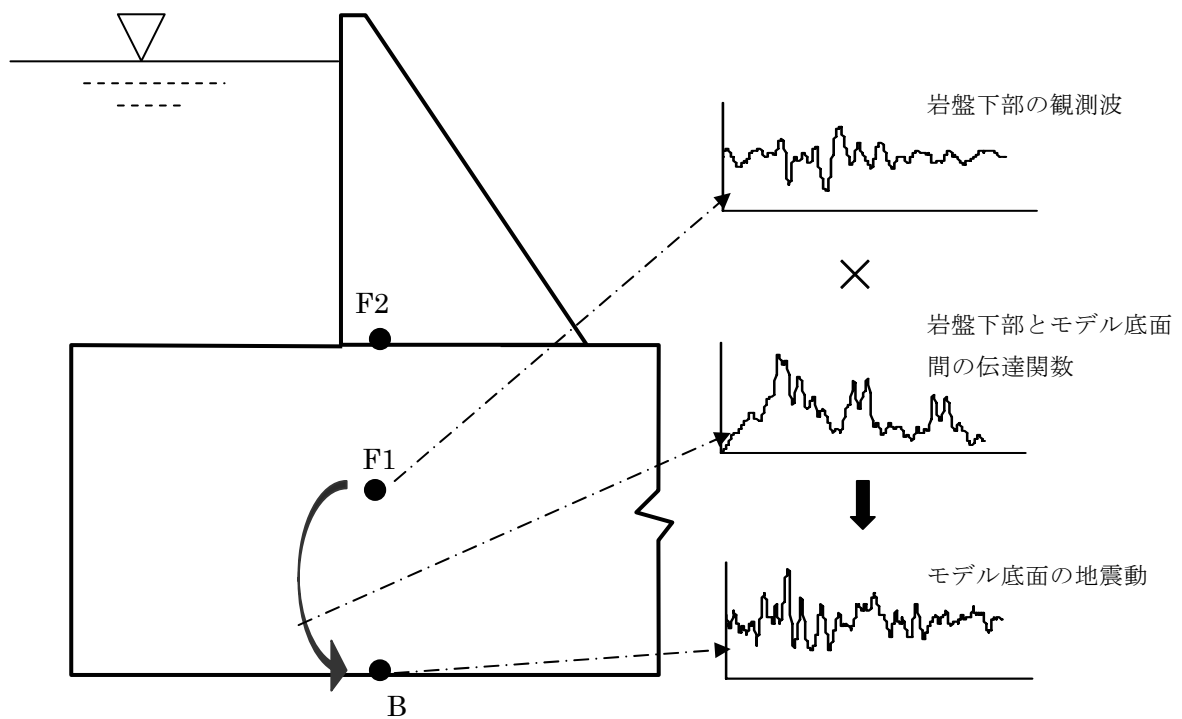


図 5-4 三方向同時加振の動的解析による引戻し計算イメージ図

フーリエスペクトルの振動数毎に、式(5.3)により B 点のフーリエスペクトル (F_{BX} , F_{BY} , F_{BZ}) を求め、さらに逆フーリエ変換により B 点で入力すべき 3 方向の地震動時刻歴 (W_{BX} , W_{BY} , W_{BZ}) が求められる。

この手法の特徴は、F1 点の応答波を求めるための解析では 3 方向同時加振をして、F1 点の応答波が得られた後、伝達関数を方向ごとに求める。一方、各方向成分間の相互影響が考慮されないの
で、振幅の小さい成分の計算誤差は比較的大きい。

5.3.3 動的解析による物性の同定

5.2 節で概略的に同定したダム本体の剛性係数等の物性値を用いて、動的応答解析を行い、以下の項目に着目して、解析結果と観測結果を比較した。

- ① ダム天端中央(T2)および岩盤上部(F2)の加速度応答の時刻歴波形並びに最大加速度値
- ① ダム本体の加速度増幅率 (T2/F2) およびダム直下基礎岩盤の加速度増幅率 (F2/F1)
- ② ダム本体の加速度伝達関数 (T2/F2) およびダム直下基礎岩盤の加速度伝達関数 (F2/F1)

解析結果と観測結果が一致しない場合、ダム本体および基礎岩盤の剛性係数・減衰係数を調整して再度解析し、観測結果のよい再現性が得られるまで解析を繰り返した。

このように、まず、ダム天端中央および岩盤上部観測点の地震時挙動を再現することにより、ダム本体およびダム直下基礎岩盤の物性を同定した。

そして、ダム本体の再現性をできるだけ維持しながら、両岸地山 (R1 と R2) の地震時挙動も再現するために、基礎岩盤の物性を調整して解析を試みた。しかし、両岸地山の地震時挙動がほぼ再現した時にダム本体の再現性が悪くなった。

以上の解析・検討により、現状の解析モデルでは、ダム本体と両岸地山の地震時挙動の同時再現が困難であることがわかった。ダム本体の再現性を優先に考慮するため、本解析業務では両岸地山における解析結果と観測結果の差を容認せざるを得ないこととなった。

表 5-5 には物性を同定するために行った 4 回の解析で用いた物性値をまとめる。

表 5-6 には、各ケースの解析で得られた各観測点の加速度応答の最大値をまとめる。また、観測結果は同表に記しており、解析結果と観測結果との相対差も示されている。この相対差を図 5-5 にまとめて、ケース間の比較もできる。

図 5-6(a)～図 5-6(c)には、ダム天端中央対ダム底面のフーリエスペクトル比および岩盤下部観測点と他の観測点におけるフーリエスペクトル比の比較を示す。

表 5-5 動的応答解析で用いた物性値およびその調整

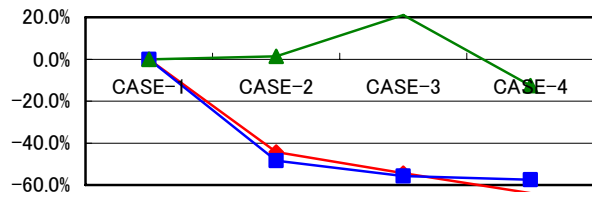
CASE 番号		弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数 (%)	物性調整理由
CASE-1	ダム本体	33000.0	2.44	0.20	2	予備解析（固有値解析）により概略的に推定された物性値を動的再現解析の初期物性値として用いる
	岩盤	30000.0	2.74	0.30	2	
CASE-2	ダム本体	33000.0	2.44	0.20	1	CASE-1 では、ダム本体の上下流方向の加速度増幅率が表 5-6 より 9.5（観測値 11.0）であり、堤体の伝達関数のピーク振動数もほぼ観測結果と一致している。よって、ダム本体の剛性係数をキープしながら、堤体の増幅率をより上げるために減衰係数を 2%から 1%に小さくした。一方、岩盤の増幅率が大きかったので、岩盤の減衰係数を 2%から 4%に増大させた。 （注：CASE-1 と CASE-2 はともにせん断剛性係数を 11500MPa としていたが、両ケースのポアソン比が違うので、弾性係数は異なっている）
	岩盤	28520.0	2.74	0.24	4	
CASE-3	ダム本体	35000.0	2.44	0.20	2	CASE-1 と CASE-2 では、ダム本体（図-3(a)の中央 T2 点）の上下流方向の加速度伝達関数のピーク振動数について、解析結果と観測結果とが概ね一致しているが、両岸地山（R1 点と R2 点）およびダム肩（T1 点と T3 点）では、解析結果が観測結果より高くなっており、解析で設定した両岸地山の剛性が実際より高いと推定できる。また、ダム軸方向の伝達関数（図-3(b)の T2 点）にも 1 次ピークの振動数が観測されたものより高くなっており、両岸地山による拘束が実際より大きくなっていると判断できる。よって、両岸地山の剛性を下げる必要があると考える。
	岩盤	22820.0	2.74	0.24	2	
CASE-4	ダム本体	33000.0	2.44	0.20	1	岩盤（F2 点）および地山（R1 点と R2 点）の増幅率などの地震時挙動の再現性に着目すると、CASE-3 より基礎岩盤の減衰係数を増やす必要があると判断できる。一方、ダム本体の増幅率を上げるために堤体の減衰係数を小さくすべきである。 解析結果として、両岸地山の地震時挙動の再現性がよくなったが、ダム直下の基礎岩盤の伝達関数のピーク振動数が実測結果より低くなっており、ここで設定した岩盤の剛性係数はダム直下の岩盤に対しては低いと推測することができる。
	岩盤	22820.0	2.74	0.24	5	

2003/09/26 十勝沖地震時、札内川ダムの挙動の再現解析で以下の物性を用いる。

	弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数 (%)	選定理由および残る課題
ダム本体	33000.0	2.44	0.20	1	CASE-1～CASE-4 の解析結果を踏まえ、ダム本体および堤体直下岩盤の地震時挙動の再現性（堤体の増幅率・固有振動数・波形）に着目して、左記物性を選定した（堤体の再現性の比較的良好な CASE-2 の剛性を用い、基礎岩盤の減衰係数を 4%から 5%に変更した）。 課題：本解析では、基礎岩盤の物性を一様としているため、ダム直下岩盤と両岸地山の挙動を同時に再現することが困難であることがわかった（ダム直下岩盤の再現性に着目する場合は、基礎岩盤の剛性を高く、両岸地山の再現性に着目する場合は基礎岩盤の剛性を低く設定すべき）。一方、ダムサイトの岩級区分図（添付資料 4-2 参照）からは、ダム本体下方岩盤は B 級、両岸地山は CH 級、または CM 級であることが見受けられる。よって、基礎岩盤の地震時挙動をよりよく再現するためには、解析モデルに地山の地質構造を反映する等の方法があると考えられる。
岩盤	28520.0	2.74	0.24	5	

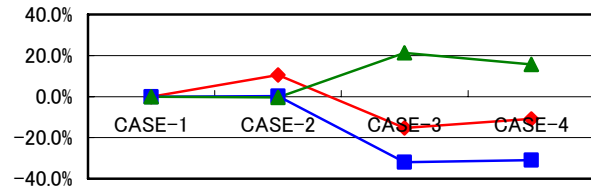
表 5-6 物性同定解析における加速度応答の最大値と観測値の比較

	方向	観測値	CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4	
			解析値	相対差(%)	解析値	相対差(%)	解析値	相対差(%)	解析値	相対差(%)
F1 岩盤下部	上下流	51.03	53.09	4.0%	57.36	12.4%	63.06	23.6%	59.57	16.7%
	ダム軸	69.00	67.93	-1.6%	68.73	-0.4%	66.41	-3.8%	68.36	-0.9%
	鉛直	46.66	44.95	-3.7%	43.01	-7.8%	46.99	0.7%	44.65	-4.3%
F2 岩盤上部	上下流	61.50	96.17	56.4%	82.72	34.5%	81.95	33.3%	71.76	16.7%
	ダム軸	67.03	67.46	0.6%	65.16	-2.8%	69.68	4.0%	63.51	-5.3%
	鉛直	56.25	101.75	80.9%	98.80	75.6%	103.81	84.6%	104.25	85.3%
G1 堤体下流開放基盤	上下流	59.13	103.55	75.1%	88.71	50.0%	101.28	71.3%	81.10	37.1%
	ダム軸	74.75	99.56	33.2%	91.39	22.3%	102.49	37.1%	86.60	15.9%
	鉛直	69.00	97.39	41.1%	97.18	40.8%	125.56	82.0%	112.57	63.1%
R1 左岸リムトンネル内	上下流	66.16	125.74	90.1%	97.39	47.2%	92.23	39.4%	77.77	17.5%
	ダム軸	64.63	118.27	83.0%	103.08	59.5%	102.41	58.5%	91.64	41.8%
	鉛直	72.16	90.81	25.8%	84.98	17.8%	117.56	62.9%	97.87	35.6%
R2 右岸リムトンネル内	上下流	79.13	127.28	60.8%	97.86	23.7%	98.23	24.1%	79.66	0.7%
	ダム軸	98.19	113.39	15.5%	101.19	3.1%	109.54	11.6%	98.25	0.1%
	鉛直	103.25	92.78	-10.1%	90.25	-12.6%	117.49	13.8%	89.90	-12.9%
T1 堤体左岸部	上下流	199.38	101.49	-49.1%	111.29	-44.2%	91.18	-54.3%	72.27	-63.8%
	ダム軸	216.16	107.72	-50.2%	111.47	-48.4%	95.86	-55.7%	91.99	-57.4%
	鉛直	116.97	104.62	-10.6%	118.60	1.4%	141.57	21.0%	102.38	-12.5%
T2 堤体天端部	上下流	676.69	914.06	35.1%	748.14	10.6%	573.66	-15.2%	603.09	-10.9%
	ダム軸	303.53	334.34	10.2%	304.26	0.2%	206.45	-32.0%	209.63	-30.9%
	鉛直	206.81	201.09	-2.8%	205.95	-0.4%	250.79	21.3%	239.30	15.7%
T3 堤体右岸部	上下流	214.19	119.08	-44.4%	163.03	-23.9%	100.53	-53.1%	93.25	-56.5%
	ダム軸	195.56	137.87	-29.5%	129.24	-33.9%	110.44	-43.5%	103.50	-47.1%
	鉛直	151.47	106.09	-30.0%	107.17	-29.2%	140.75	-7.1%	133.22	-12.0%
基礎上部に対する天 端中央の増幅率	上下流	11.0	9.5		9.0		7.0		8.4	
	ダム軸	4.5	5.0		4.7		3.0		3.3	
	鉛直	3.7	2.0		2.1		2.4		2.3	
基礎下部に対する基 礎上部の増幅率	上下流	1.2	1.8		1.4		1.3		1.2	
	ダム軸	1.0	1.0		0.9		1.0		0.9	
	鉛直	1.2	2.3		2.3		2.2		2.3	

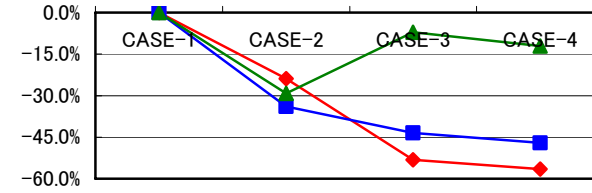


CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	-44.2%	-54.3%	-63.8%
-	-48.4%	-55.7%	-57.4%
-	1.4%	21.0%	-12.5%

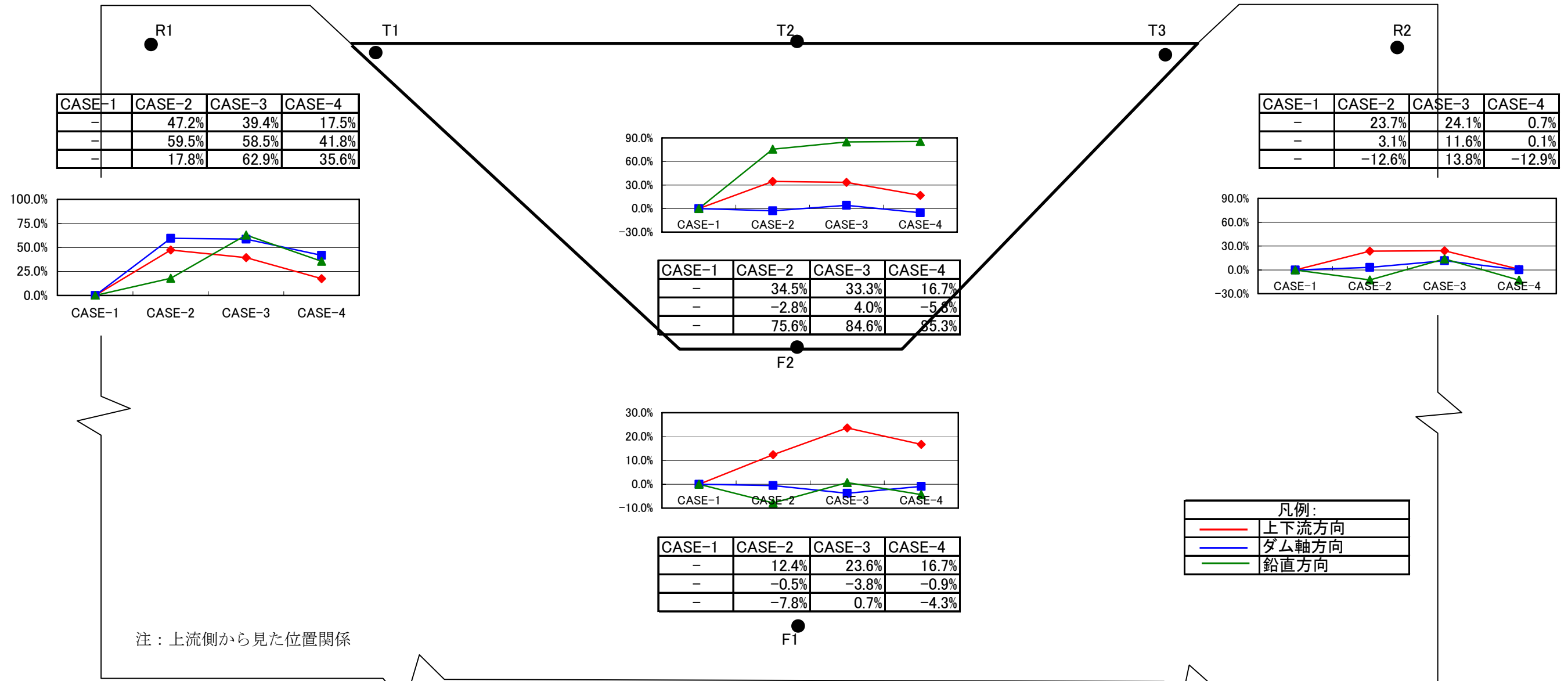
上下流
ダム軸
鉛直



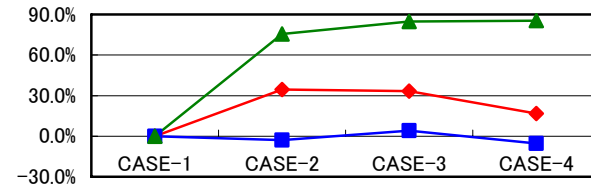
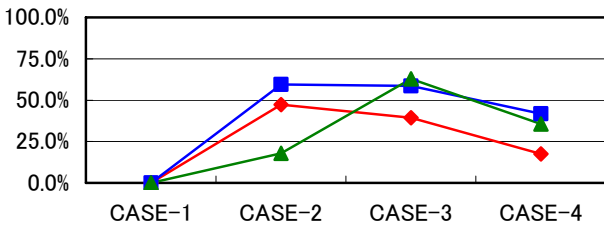
CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	10.6%	-15.2%	-10.9%
-	0.2%	-32.0%	-30.9%
-	-0.4%	21.3%	15.7%



CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	-23.9%	-53.1%	-56.5%
-	-33.9%	-43.5%	-47.1%
-	-29.2%	-7.1%	-12.0%

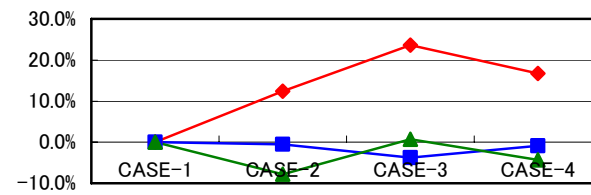
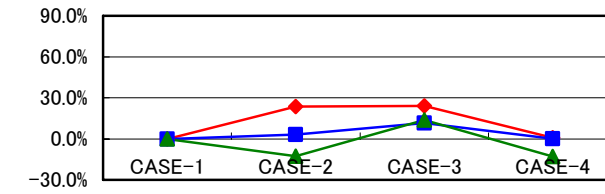


CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	47.2%	39.4%	17.5%
-	59.5%	58.5%	41.8%
-	17.8%	62.9%	35.6%



CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	34.5%	33.3%	16.7%
-	-2.8%	4.0%	-5.6%
-	75.6%	84.6%	85.3%

CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	23.7%	24.1%	0.7%
-	3.1%	11.6%	0.1%
-	-12.6%	13.8%	-12.9%



CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	12.4%	23.6%	16.7%
-	-0.5%	-3.8%	-0.9%
-	-7.8%	0.7%	-4.3%

凡例:	
— (red)	上下流方向
— (blue)	ダム軸方向
— (green)	鉛直方向

注：上流側から見た位置関係

図5-5 加速度応答の最大値の相対差
相対差 = (解析値 - 観測値) / 観測値

凡例	ケース名		E(MPa)	ρ (g/cm ³)	ν	h(%)
—	CASE-1	ダム	33000	2.44	0.2	2
		岩盤	30000	2.74	0.3	2
—	CASE-2	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	28520	2.74	0.24	4
—	CASE-3	ダム	35000	2.44	0.2	2
		岩盤	22020	2.74	0.24	2
—	CASE-4	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	22820	2.74	0.24	5

— 観測

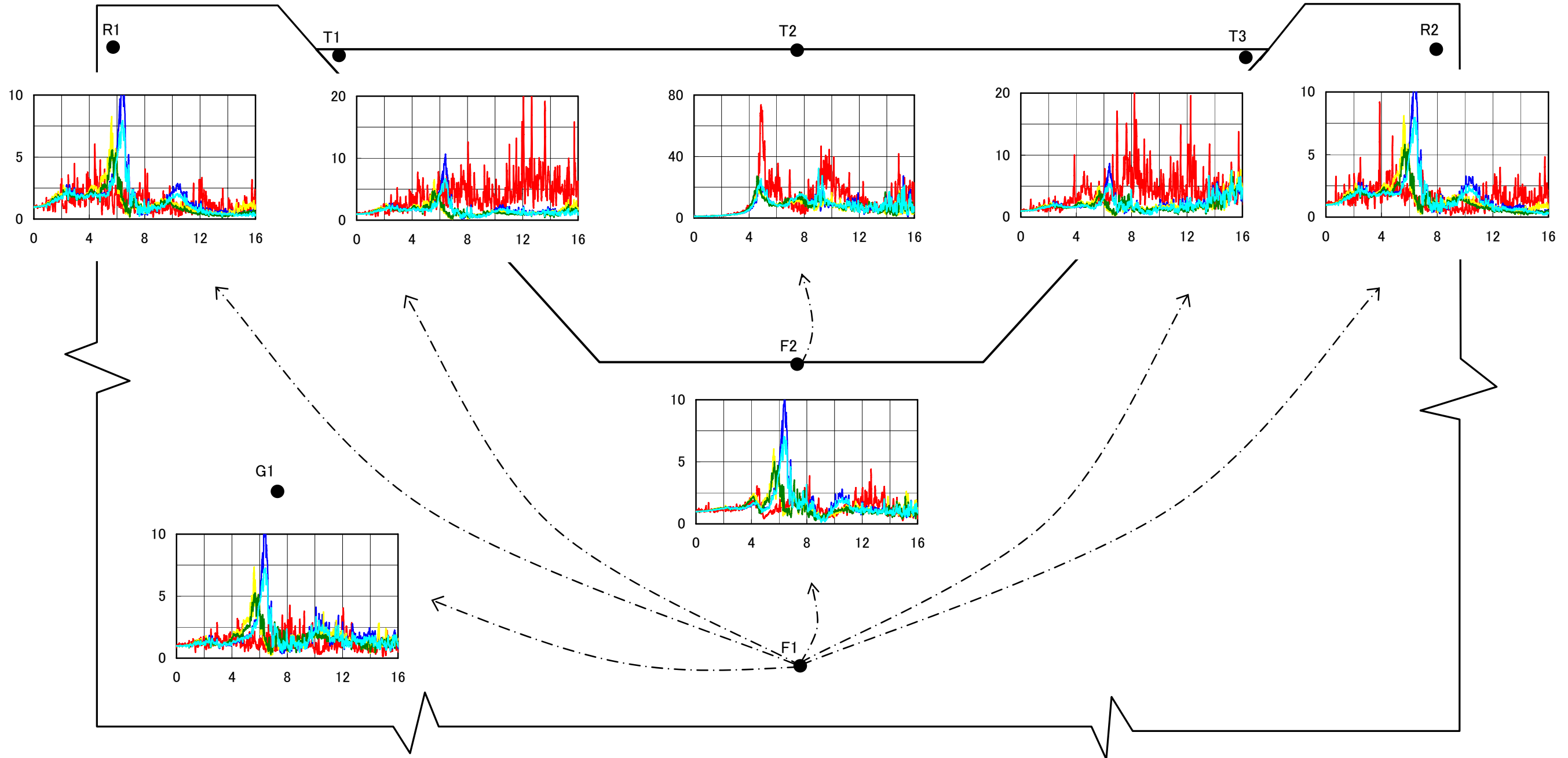


図5-6(a) 上下流方向の伝達関数の比較図(上流側より)

凡例	ケース名		E(MPa)	ρ (g/cm ³)	ν	h(%)
—	CASE-1	ダム	33000	2.44	0.2	2
		岩盤	30000	2.74	0.3	2
—	CASE-2	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	28520	2.74	0.24	4
—	CASE-3	ダム	35000	2.44	0.2	2
		岩盤	22020	2.74	0.24	2
—	CASE-4	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	22820	2.74	0.24	5
— 観測						

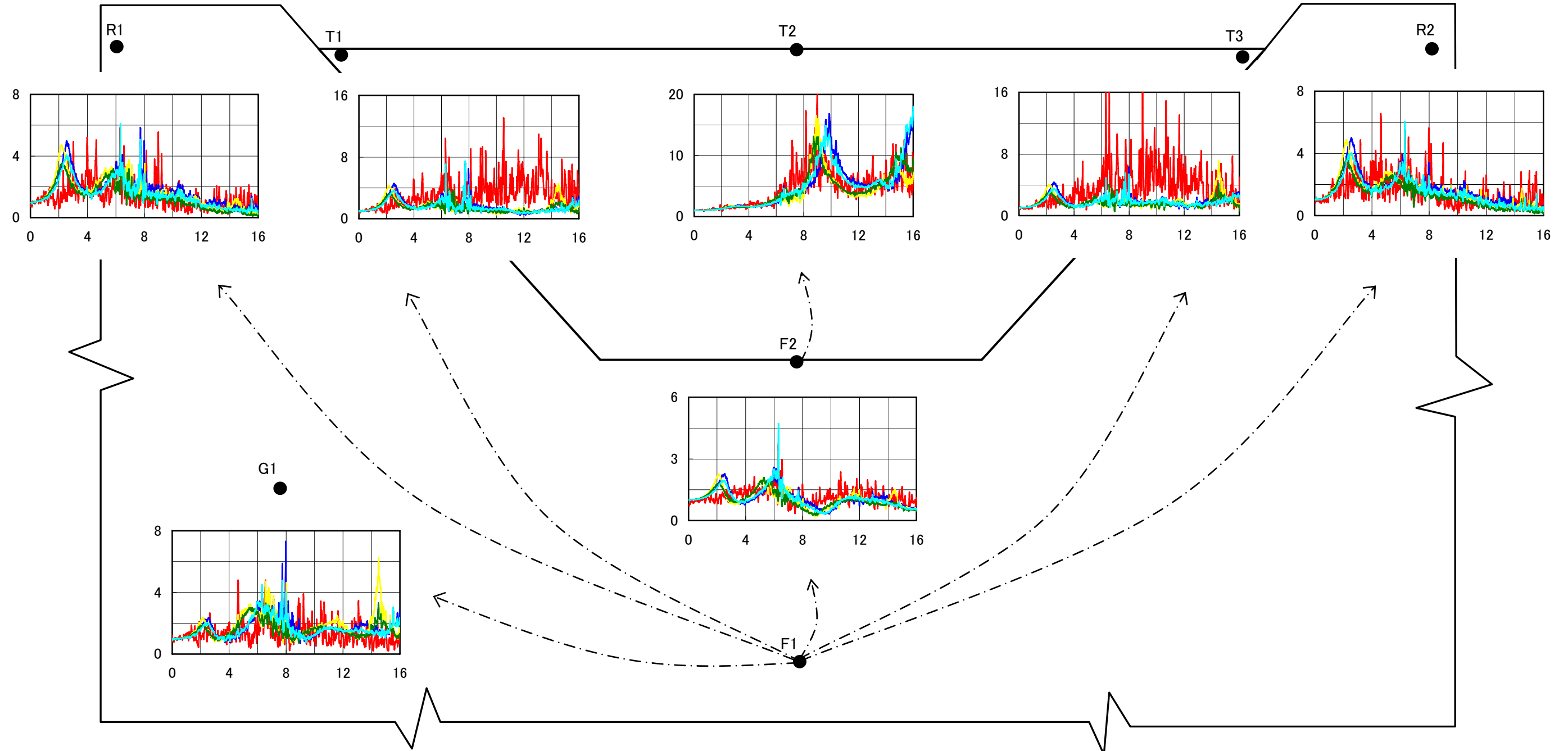


図5-6(b) ダム軸方向の伝達関数の比較図(上流側より)

凡例	ケース名		E(MPa)	ρ (g/cm ³)	ν	h(%)
—	CASE-1	ダム	33000	2.44	0.2	2
		岩盤	30000	2.74	0.3	2
—	CASE-2	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	28520	2.74	0.24	4
—	CASE-3	ダム	35000	2.44	0.2	2
		岩盤	22020	2.74	0.24	2
—	CASE-4	ダム	33000	2.44	0.2	1
		岩盤	22820	2.74	0.24	5
—	観測					

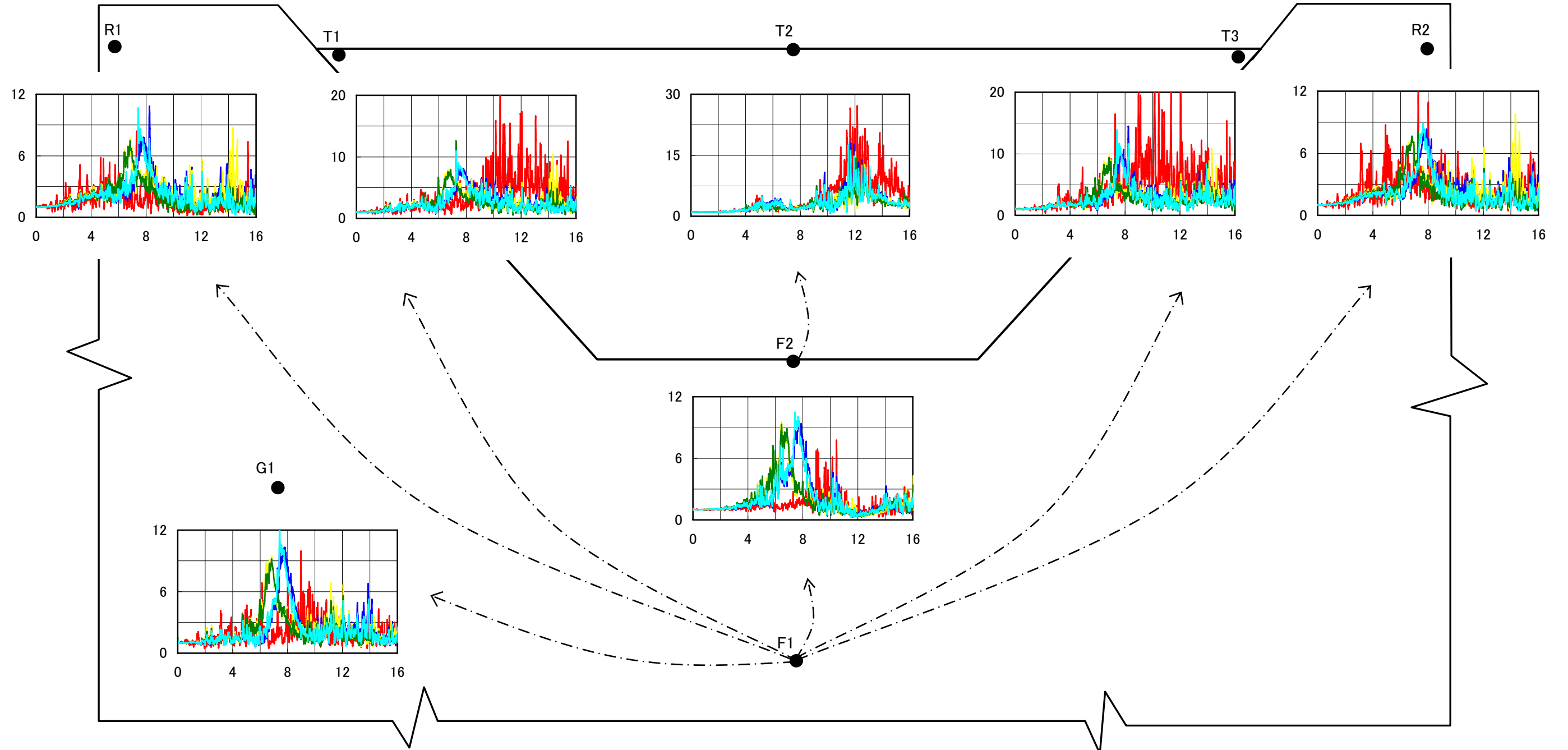


図5-6(c) 鉛直方向の伝達関数の比較図(上流側より)

以下に各ケースの解析およびその物性調整の理由を述べる。

(1) CASE-1 の解析

CASE-1 では、固有値解析により概略的に推定された物性値を用いた。

ダム本体の応答について、ダム本体の上下流方向の加速度増幅率が表 5-6 のように 9.5 (観測値 11.0) であり、ダム本体の伝達関数のピーク振動数も観測結果とほぼ一致している。よって、堤体の剛性係数が真の値に相当すると考えられる。図 5-6 の伝達関数の形状を考察すると、解析により得られた 1 次ピークは観測結果よりかなり低いことがわかる。よって、ダム本体の減衰係数を小さくする必要があると考える (2%から 1%へ)。一方、岩盤の増幅率が大きかったため、岩盤の減衰係数を大きくすべきと考える (2%から 4%へ)。

(注：CASE-1 と CASE-2 はともにせん断剛性係数を 11500MPa としていたが、両ケースのポアソン比が違うので、弾性係数は異なる。CASE-1 で岩盤のポアソン比は一般的な値 0.3 としたが、工事誌などの文献調査により札内川ダムサイトの岩盤のポアソン比 (0.24) を、CASE-2 以降の解析に用いた)。

図 5-7 には解析および観測により得られたダム本体ならびに岩盤の伝達関数の詳細な比較を示す。

(2) CASE-2 の解析

CASE-1 の物性をベースとして、減衰係数を調整し、CASE-2 の解析を行った。

ダム天端中央の加速度応答の最大値は 748gal で、観測された結果との相対差は約 10.6%である。ダム底面に対する天端中央の上下流方向の増幅率は約 9.0 であり、CASE-1 より小さくなっているが、これは主に基礎岩盤の減衰係数の増大による兩岸地山の加速度応答が小さくなり、兩岸からの寄与が小さくなったことに起因すると考える。天端中央のダム軸方向および鉛直方向の最大加速度応答値にも観測結果との差がほとんどない。また、ダム肩および基礎岩盤のほかの観測点においても、CASE-2 の結果は CASE-1 の結果より再現性がよいと考えられる。

図 5-8 に、CASE-2 で得られた伝達関数の詳細な比較を示す。

(3) CASE-3 の解析

CASE-2 において、ダム天端中央 (T2) の上下流方向の加速度伝達関数のピーク振動数について、解析結果と観測結果が概ね一致しているが、兩岸地山 (R1 点と R2 点) およびダム肩 (T1 点と T3 点) では、解析結果が観測結果より高くなっており、このケースで設定した兩岸地山の剛性が実際より高いと推定できる。また、ダム軸方向の伝達関数 (F2 に対する T2 点) にも 1 次ピークの振動数が観測されたものより高くなっており、兩岸地山による拘束が実際より大きくなっていると判断できる。よって、兩岸地山の再現性に着目し、基礎岩盤の剛性係数を調整して CASE-3 の解析を行った (減衰係数は CASE-1 と同じ)。

CASE-1 と比較すると、岩盤の剛性を低下した場合、ダムの左肩・右肩以外の観測点では実測値と近い加速度応答が得られた。ダム本体の軸方向の伝達関数 (図 5-6(b)の天端中央点) のピーク振動数も実測値とほぼ一致になった。

図 5-9 には、CASE-3 で得られた伝達関数の詳細な比較を示す。

しかし、CASE-3 では地震動の引戻し元である、岩盤下部の応答にも 20%以上の差がある。これ

は引戻し計算手法の精度によるものと考える。

(4) CASE-4 の解析

CASE-3 では、CASE-1 と比べ、両岸地山の加速度応答値は実測値と近づいた。両岸地山の剛性が低下したため、ダム本体の軸方向における伝達関数のピーク振動数が実測結果とほぼ一致するようになった。しかし、ダム本体の加速度の増幅率は 7.0 で、観測値よりかなり低い値となっている。よって、CASE-3 の物性をベースとして、ダム本体の減衰係数を 2% から 1% に、基礎岩盤の減衰係数を 2% から 4% に調整して、CASE-4 の解析を行った。

CASE-4 では、岩盤の剛性が低下したため、両岸地山、特に右側の地山では解析結果が観測結果とがほぼ一致となった。しかし、岩盤下部に対する岩盤上部の伝達関数から、ピーク振動数が観測結果より低くなる傾向にあり、設定したダム直下の岩盤の剛性が実際より低いと判断できる。

図 5-10 には、CASE-4 で得られた伝達関数の詳細な比較を示す。

5.4 まとめ

以上の解析から、ダム本体および基礎岩盤の物性値を同定することができた。

剛性係数については、ダム本体の弾性係数が約 33000 MPa であることを推定した。基礎岩盤の剛性係数については、ダム直下岩盤と両岸地山の剛性が異なり、ダム直下岩盤の弾性係数は約 30000 MPa 以上で、両岸地山は約 22800 MPa であることも推定した。今回の解析で岩盤の物性を一様としているため、ダム直下岩盤と両岸地山の挙動を同時に再現することは困難であった。

減衰係数については、地震動レベルによって、減衰係数が変化することが考えられるが、2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震の際には、ダム本体の減衰係数が約 1%、基礎岩盤の平均減衰係数は約 5% と推定した。

今後の課題として、基礎岩盤の地震時挙動の再現ならびに物性値を同定するためには、基礎岩盤の地質構造を忠実にモデル化する等の方法が考える。

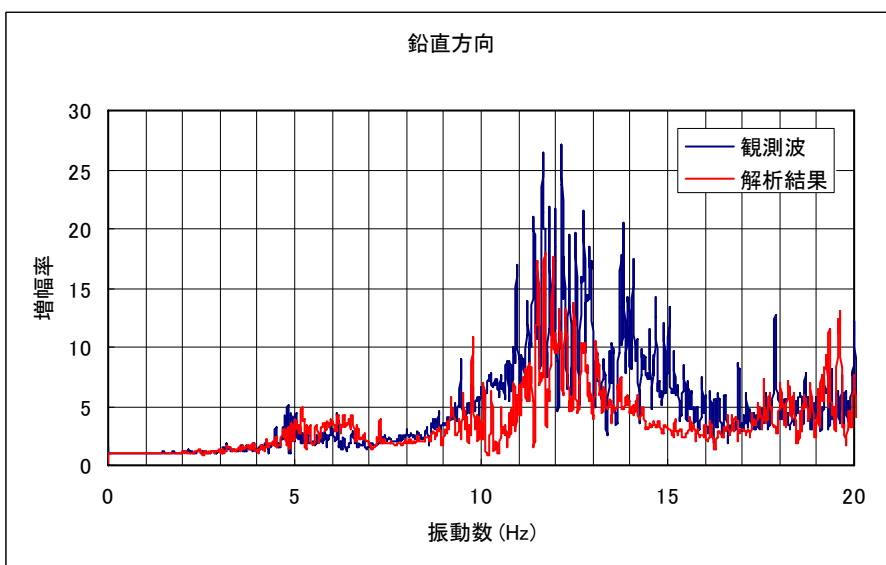
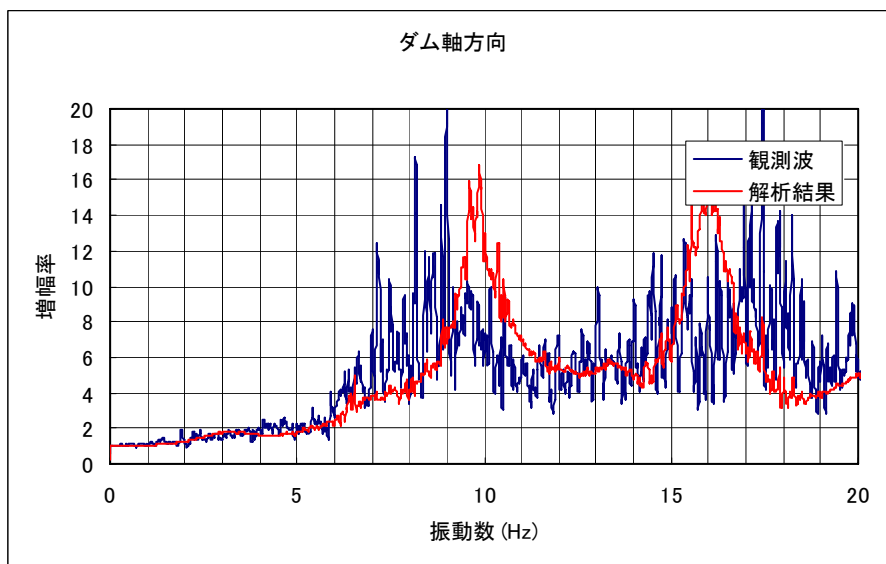
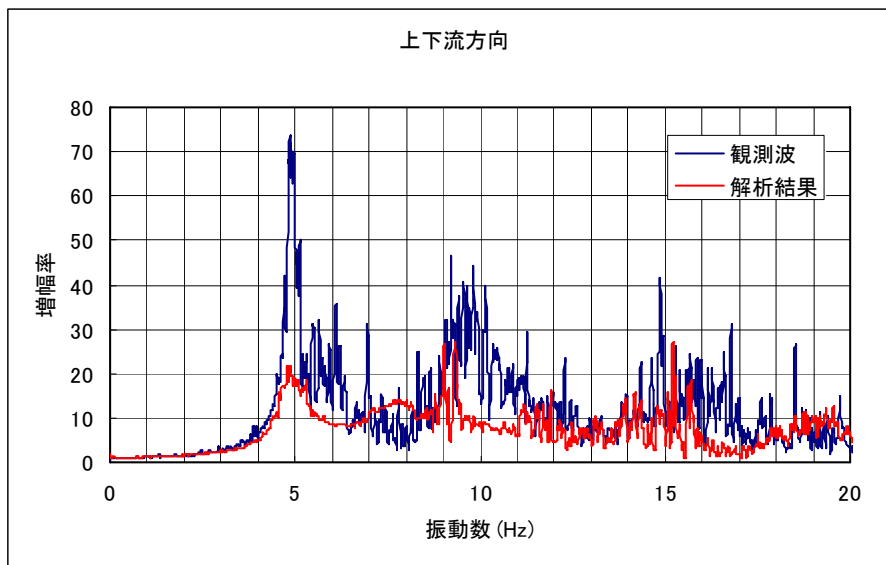


図5-7(a) 岩盤上部(F2)に対するダム天端中央(T2)の伝達関数

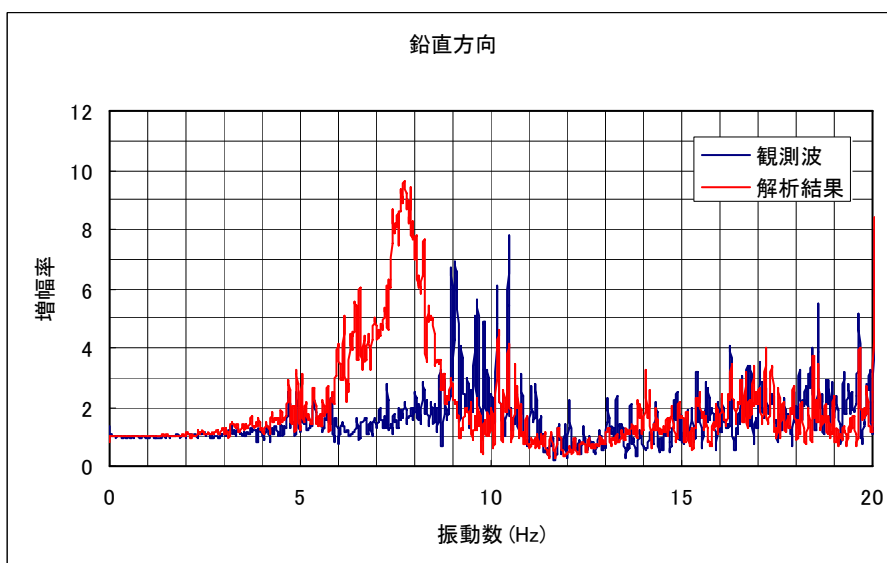
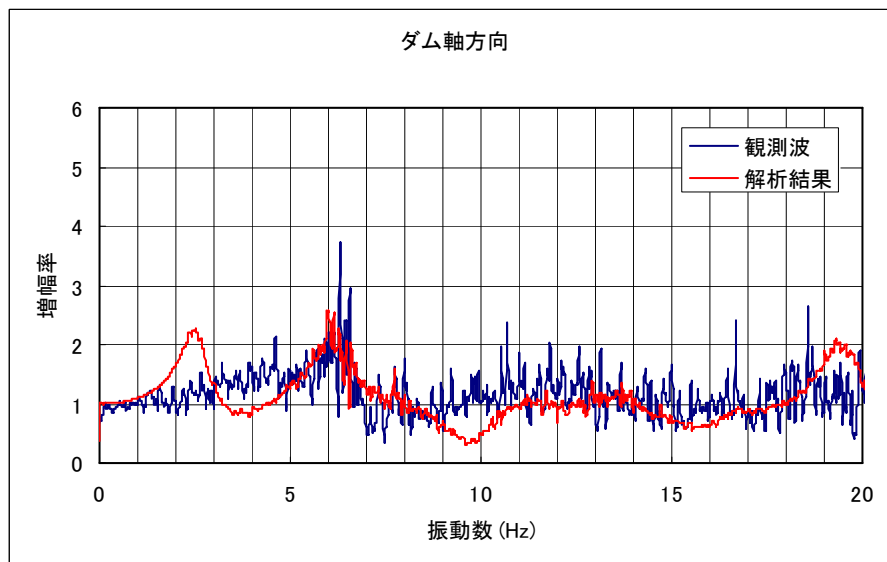
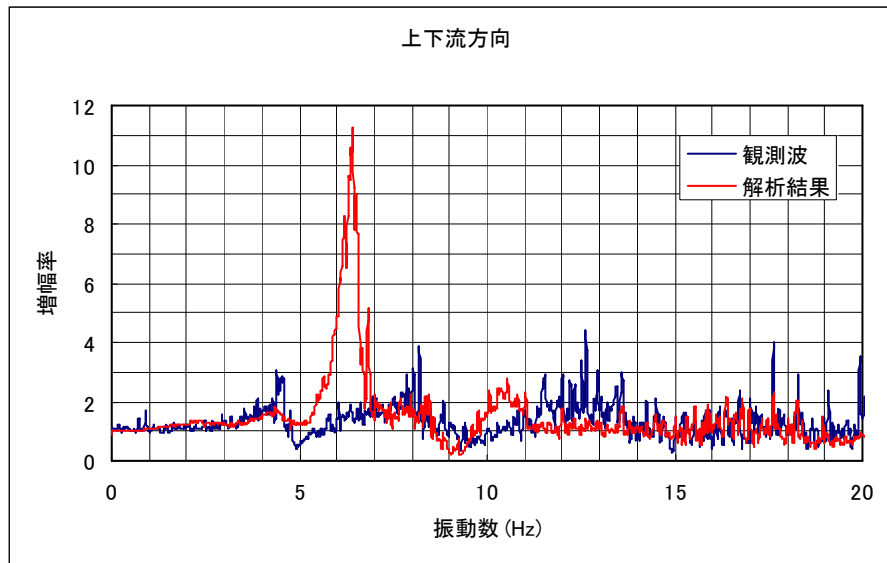


図5-7(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

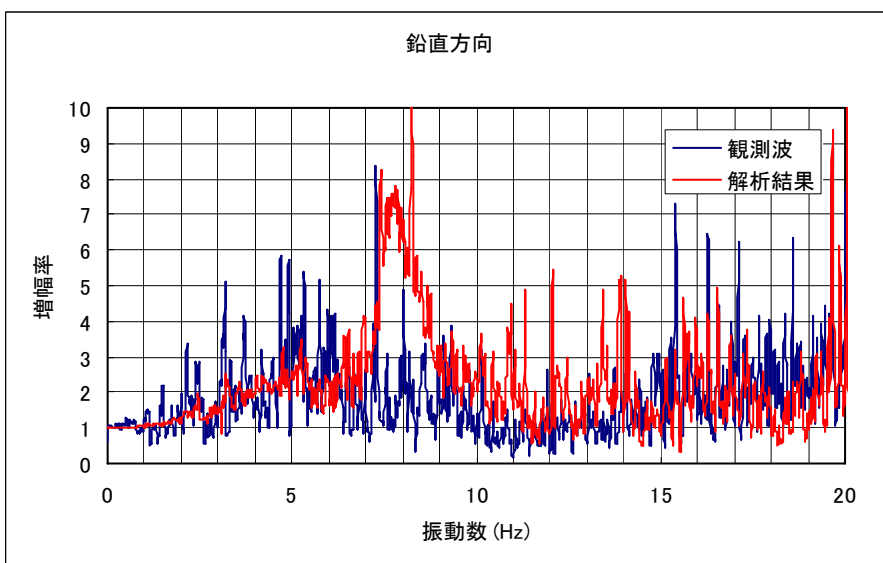
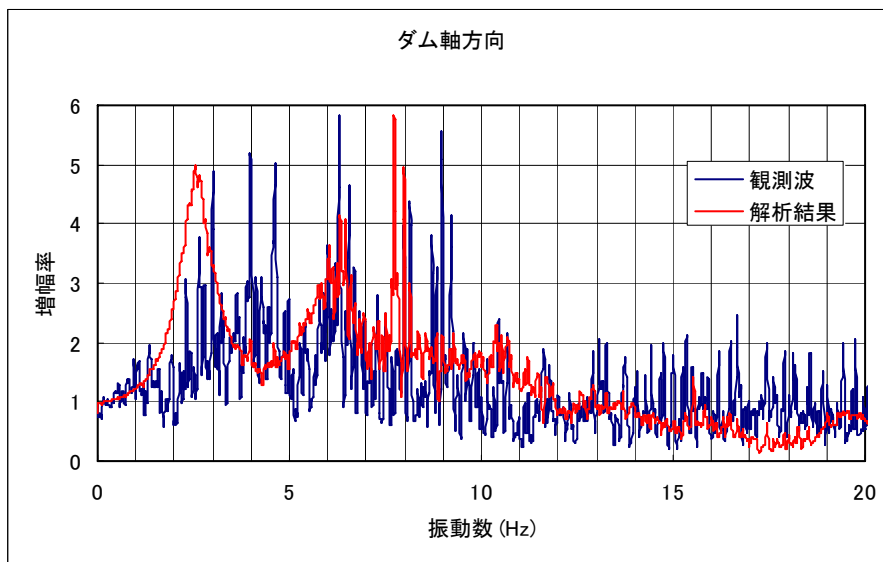
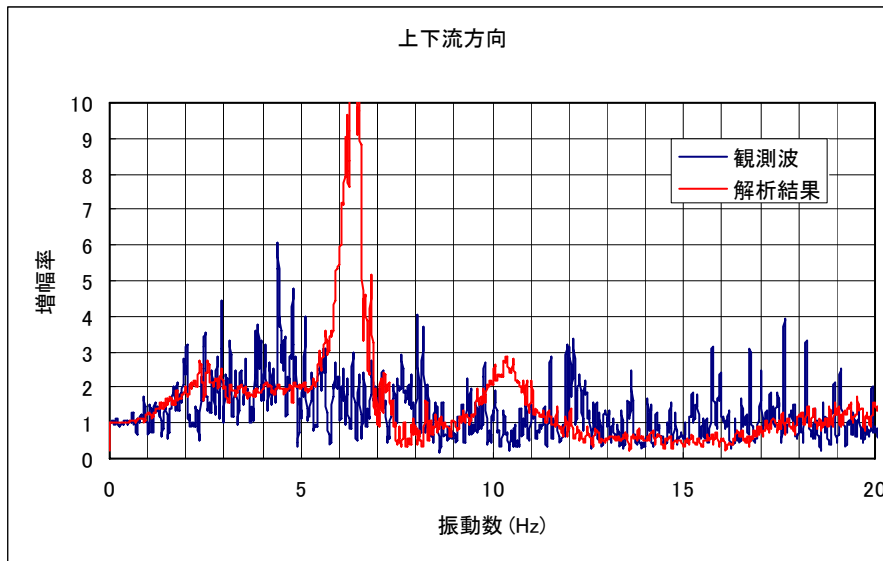


図5-7(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

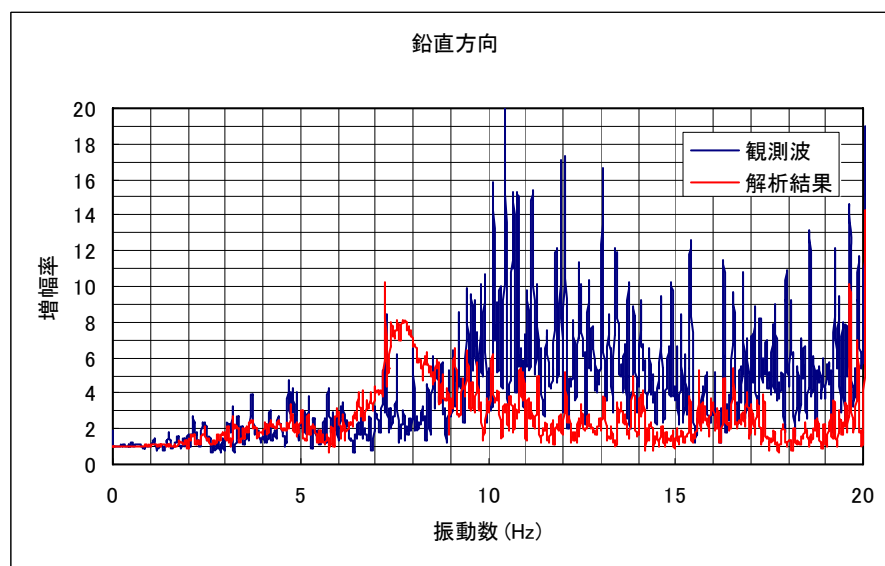
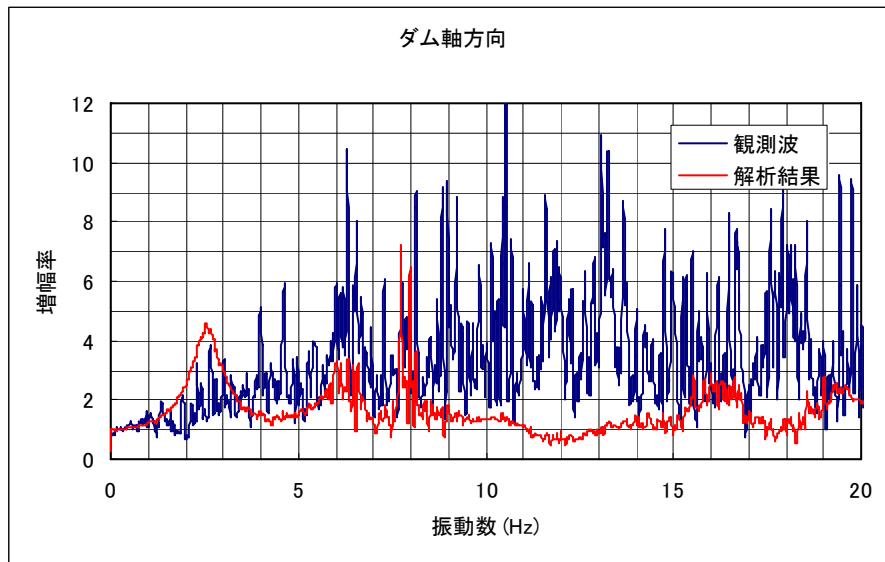
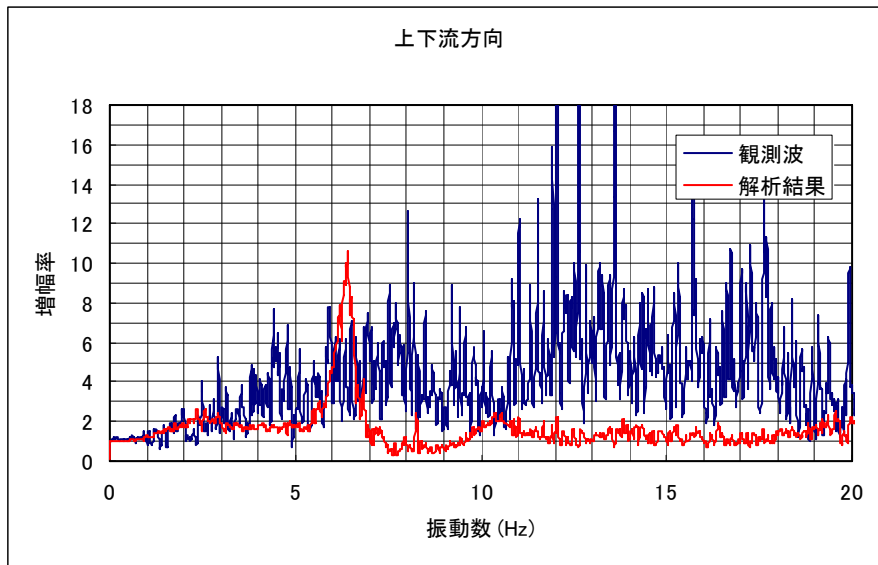


図5-7(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

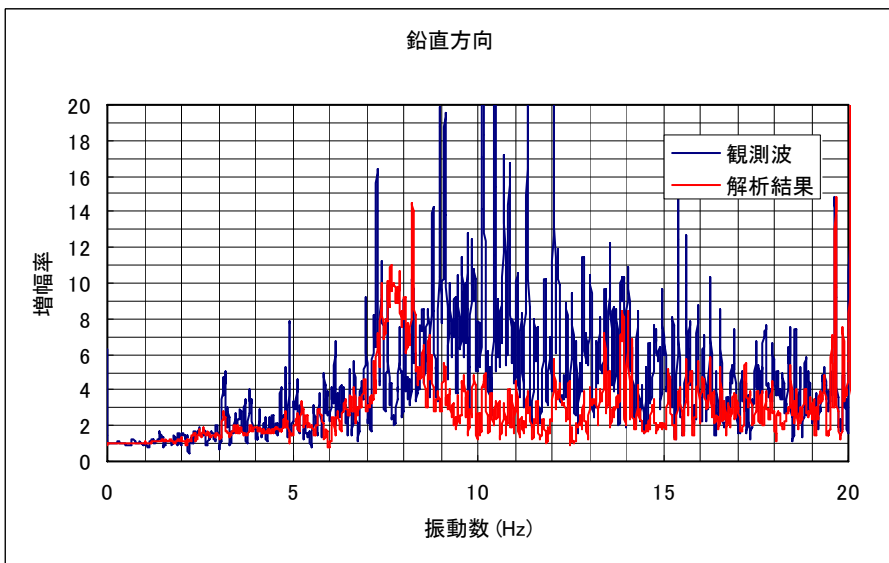
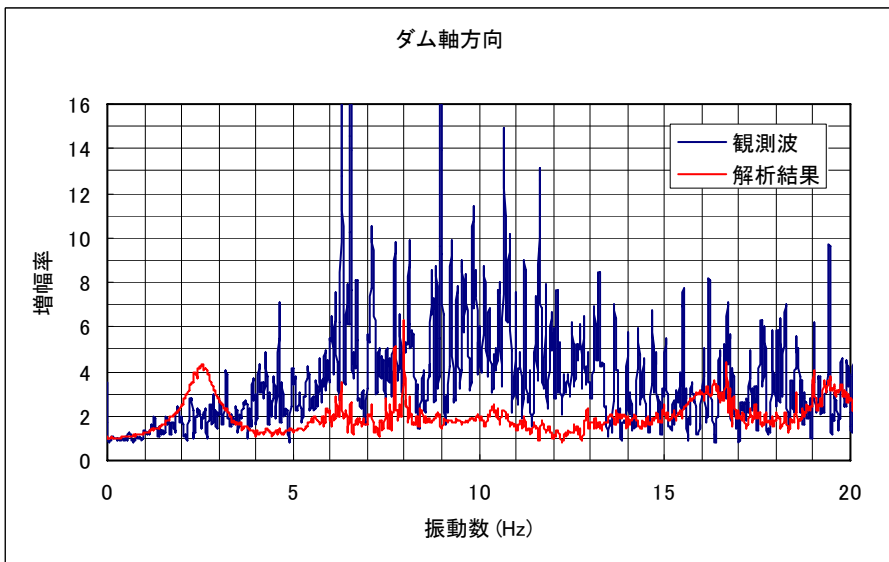
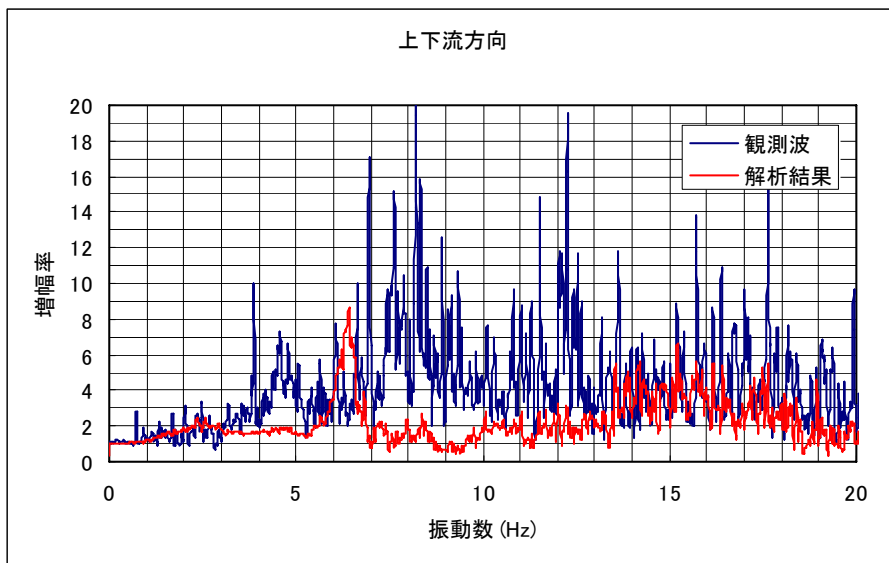


図5-7(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

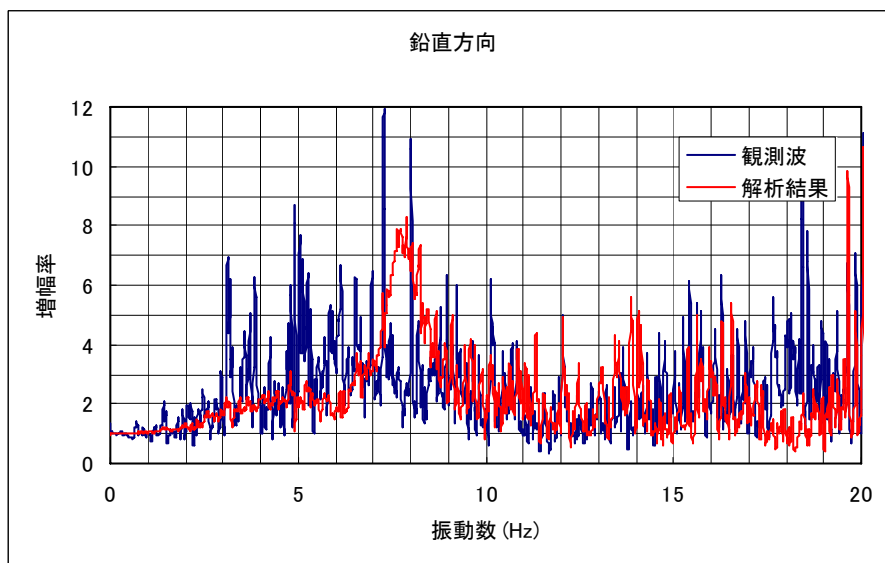
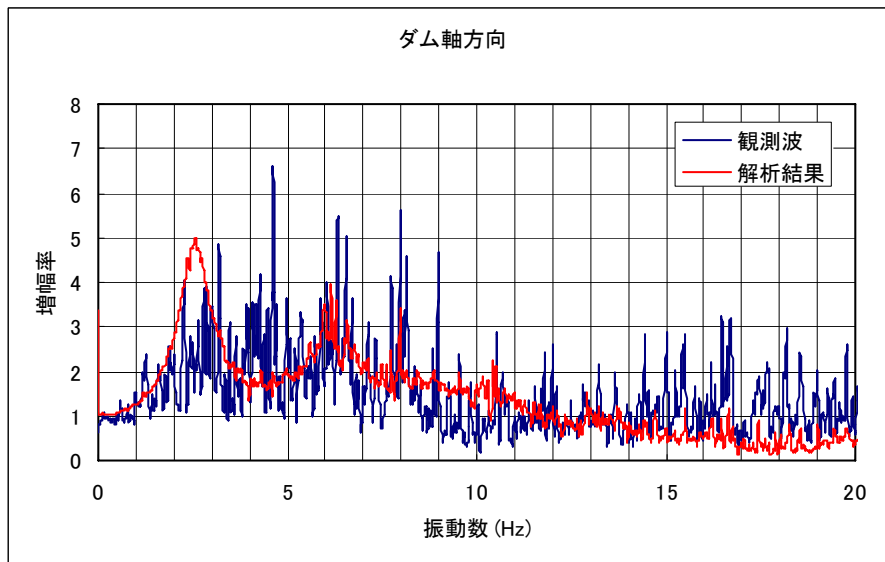
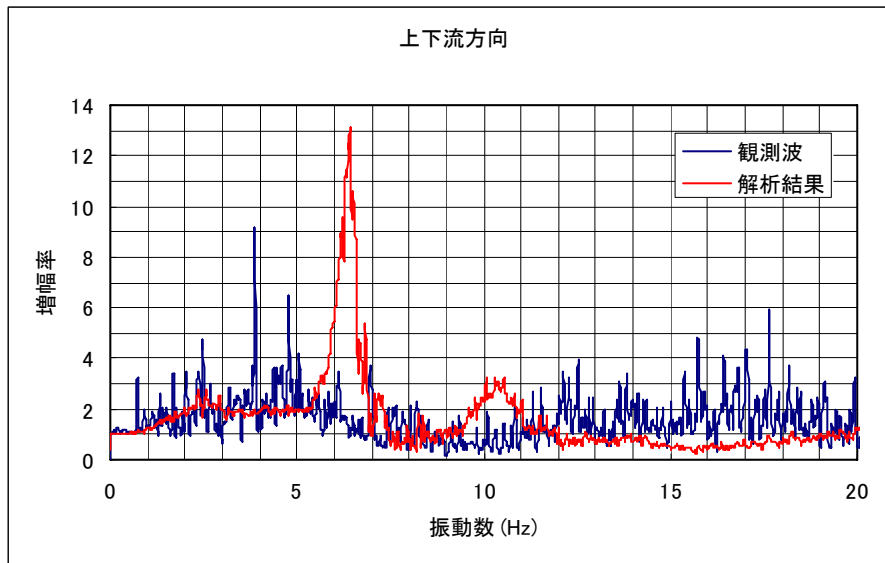


図5-7(f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2)の伝達関数

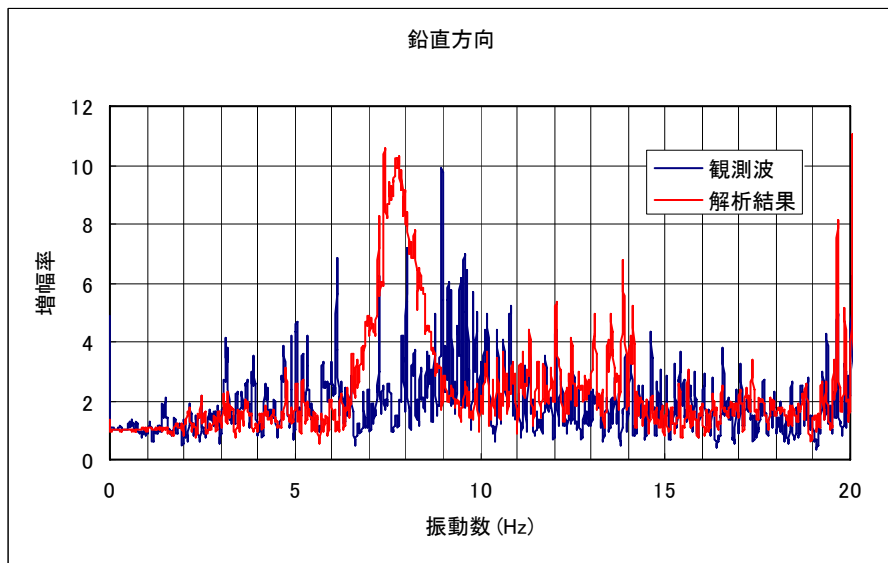
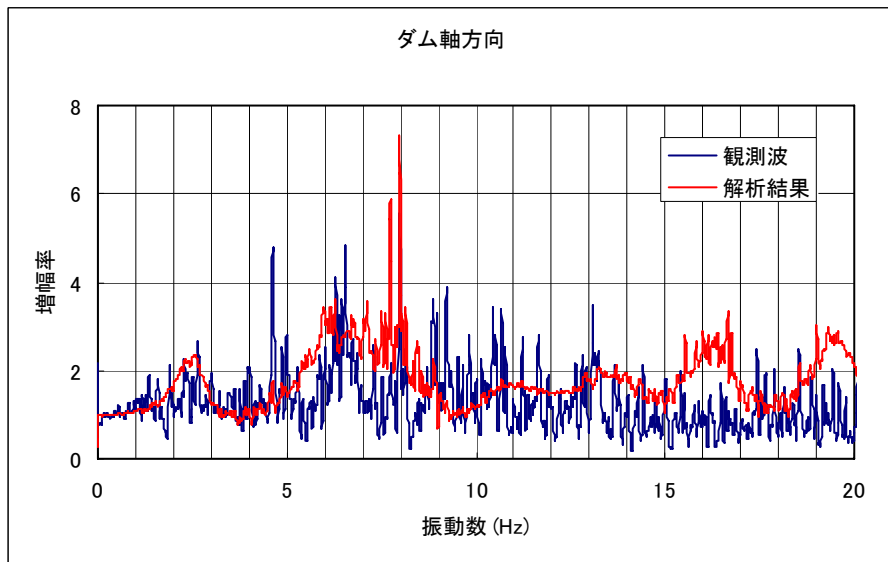
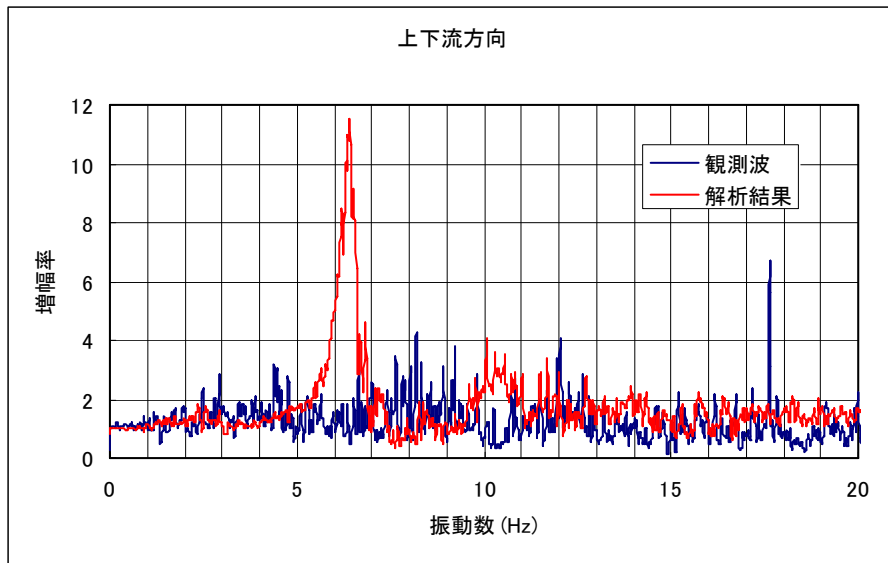


図5-7(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

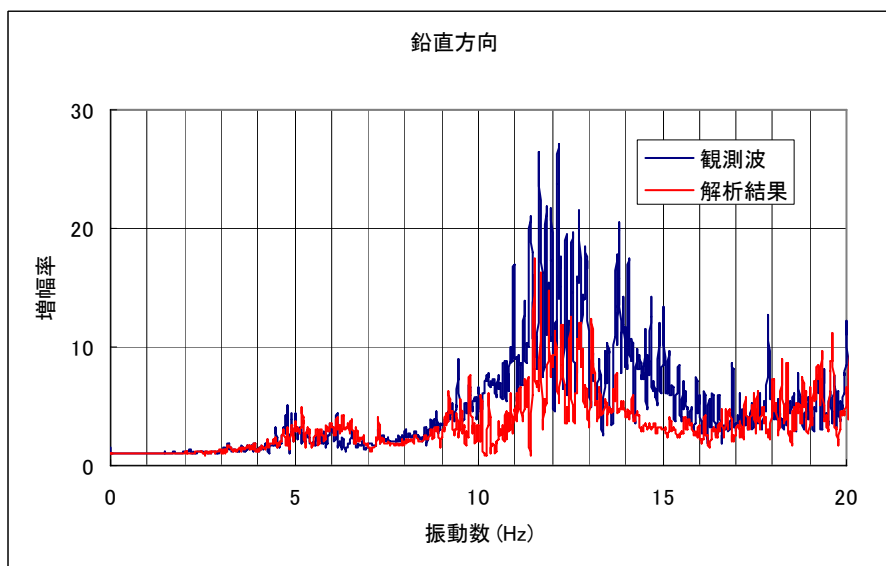
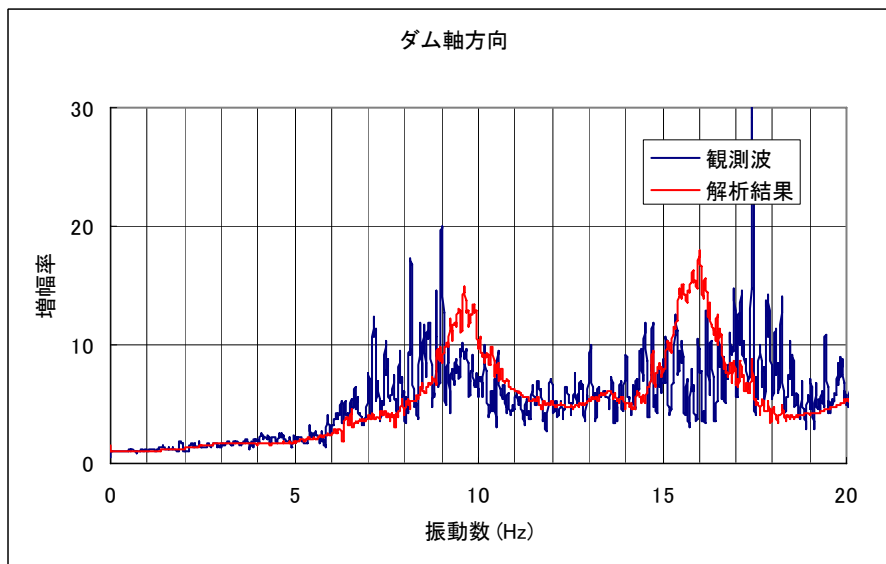
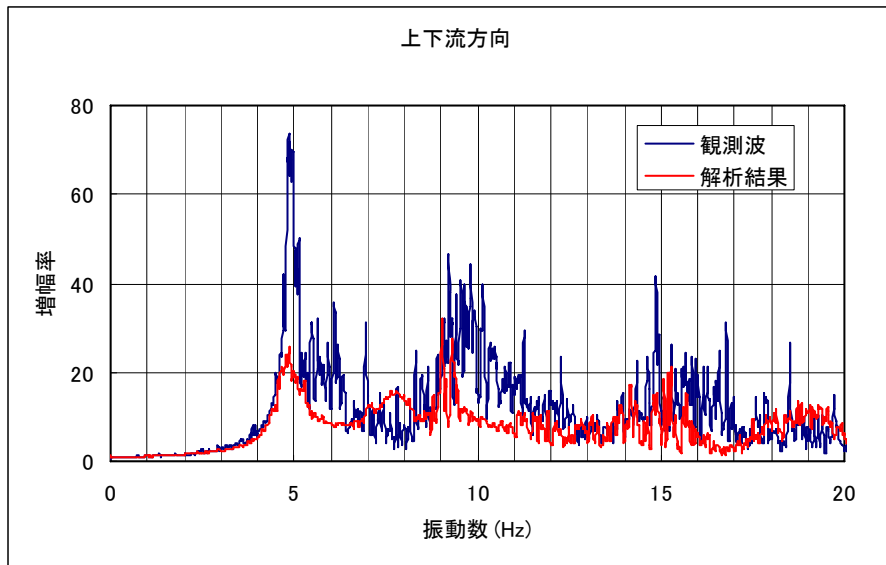


図5-8(a) 岩盤上部(F2)に対するダム天端中央(T2)の伝達関数

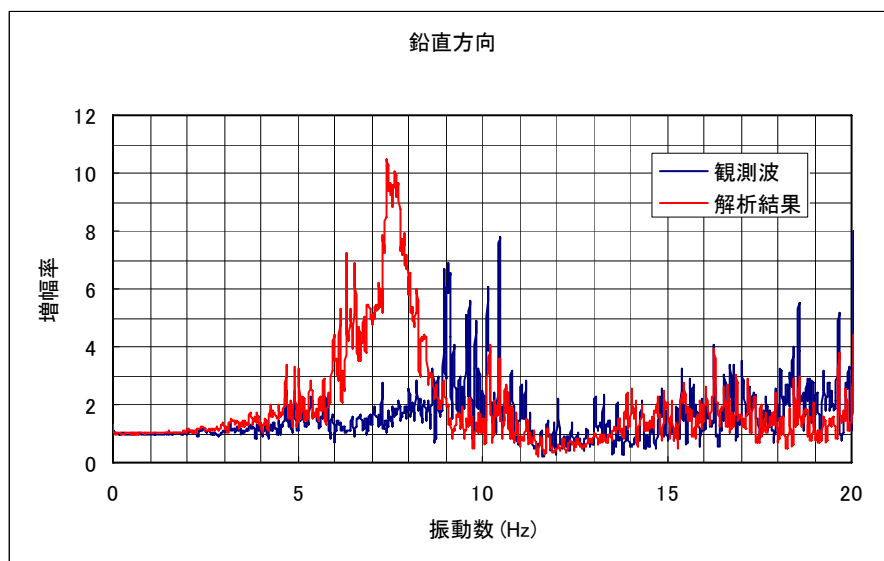
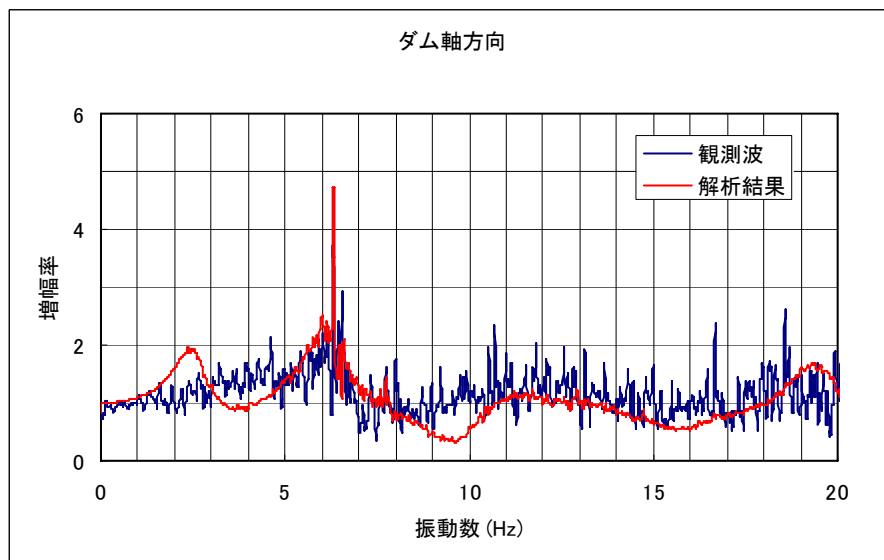
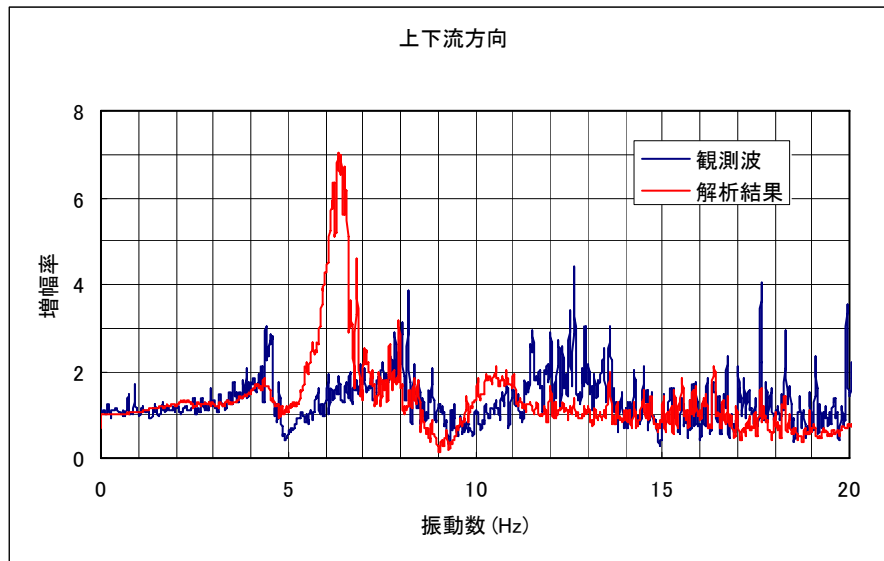


図5-8(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

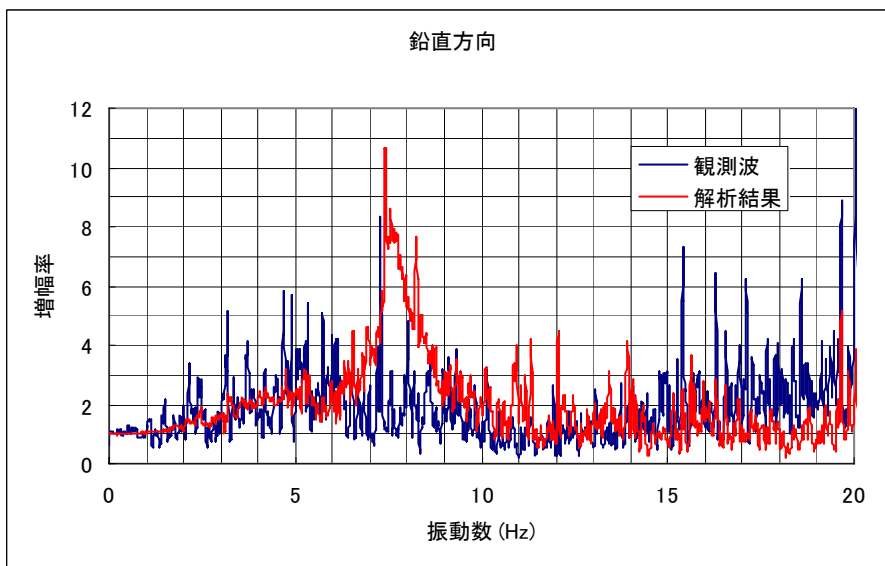
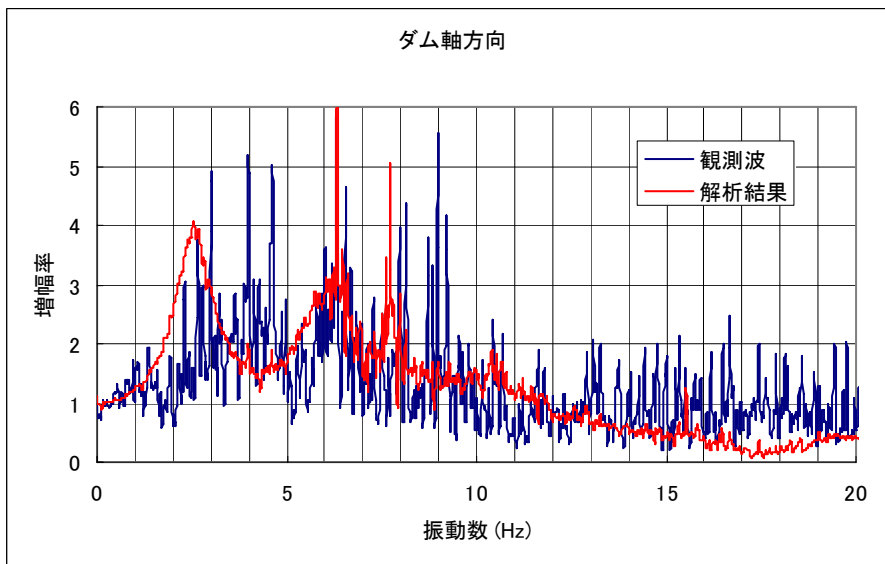
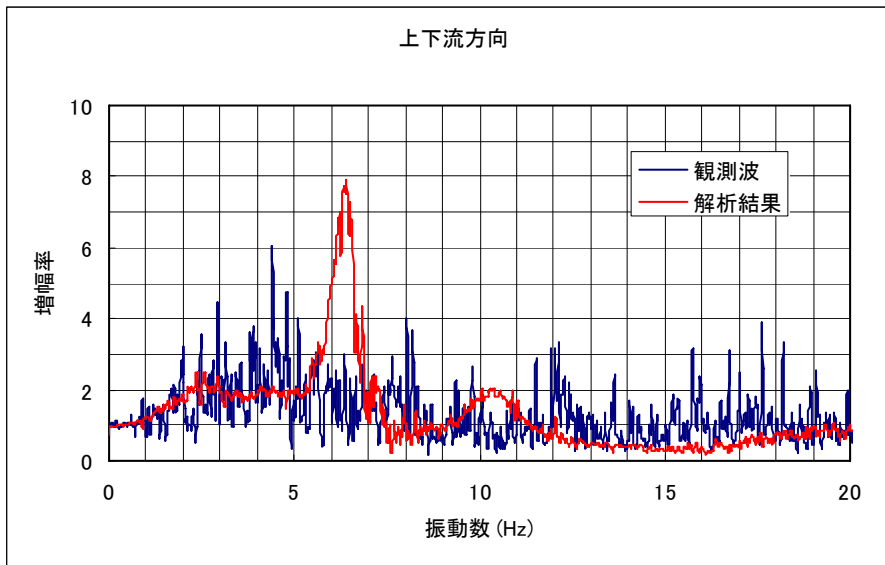


図5-8(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

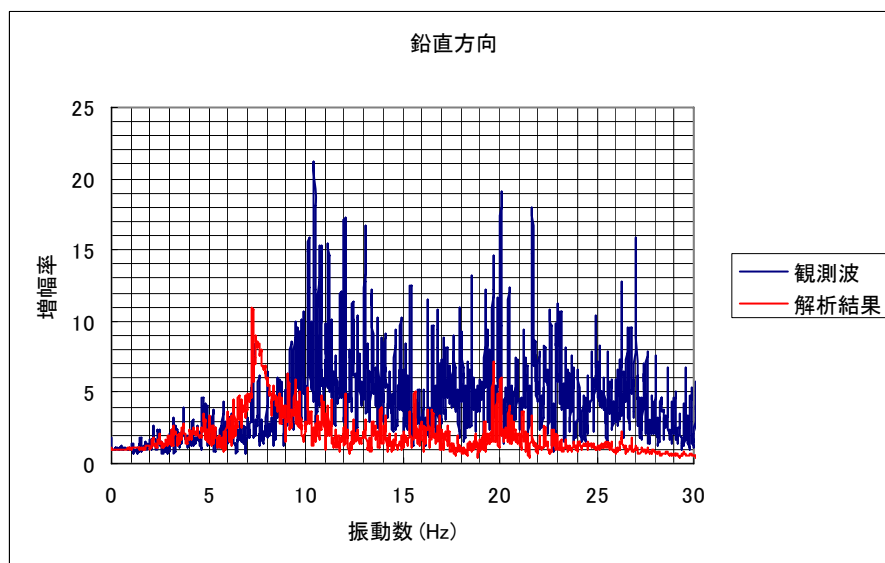
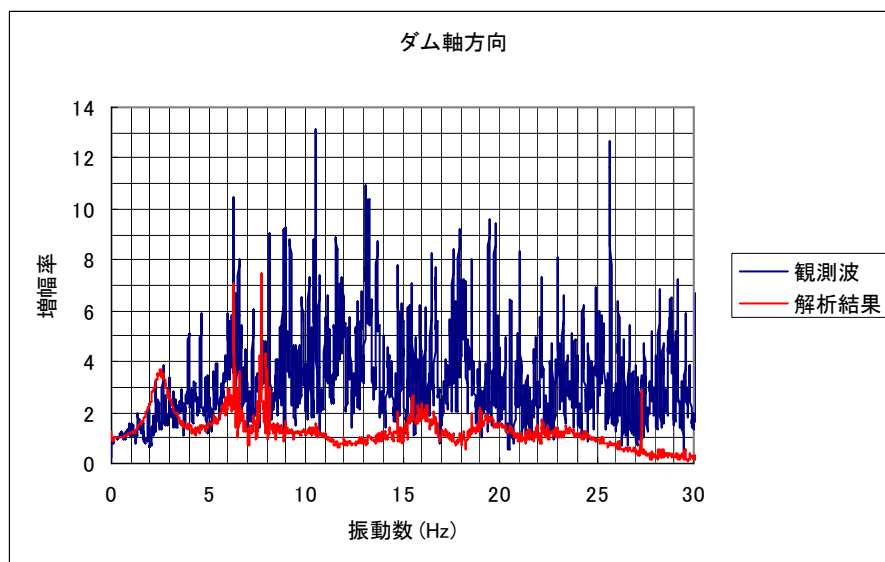
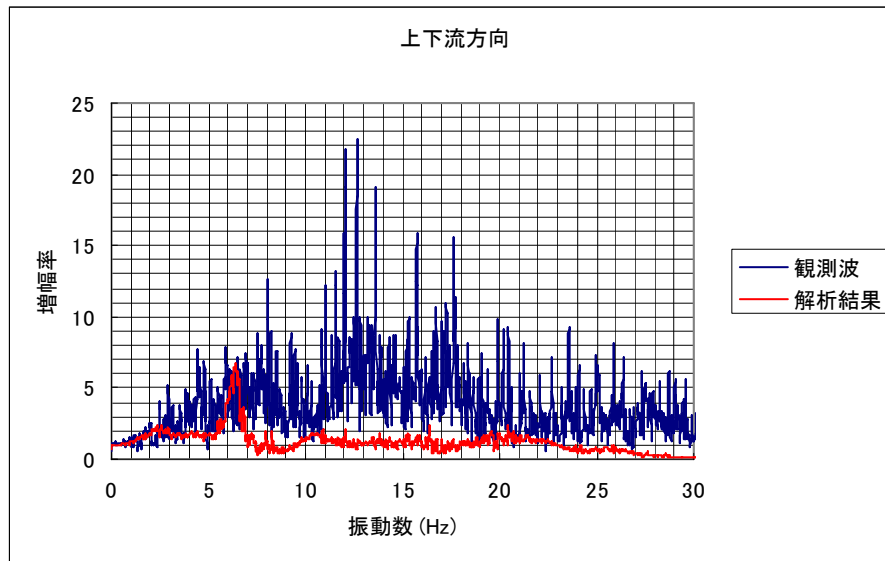


図5-8(d) T1のF1に対する伝達関数 (堤体左岸部)

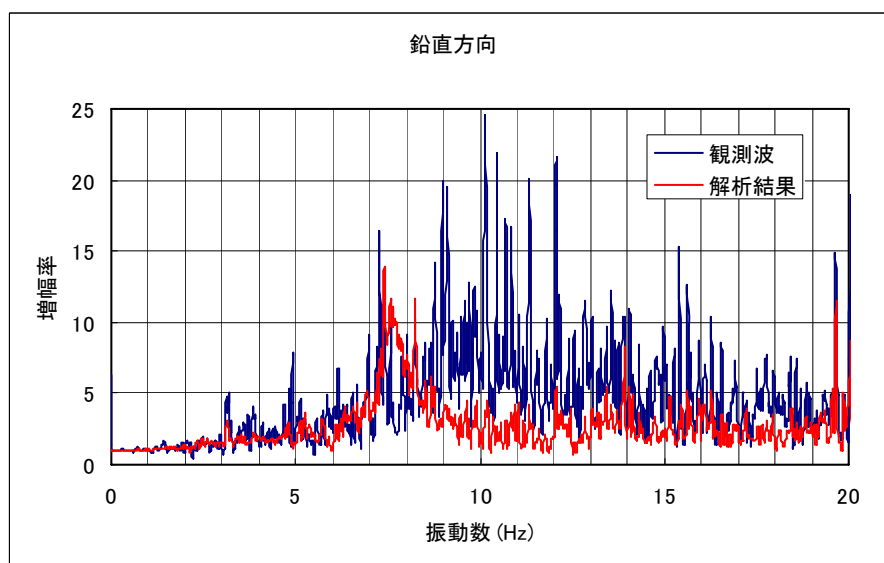
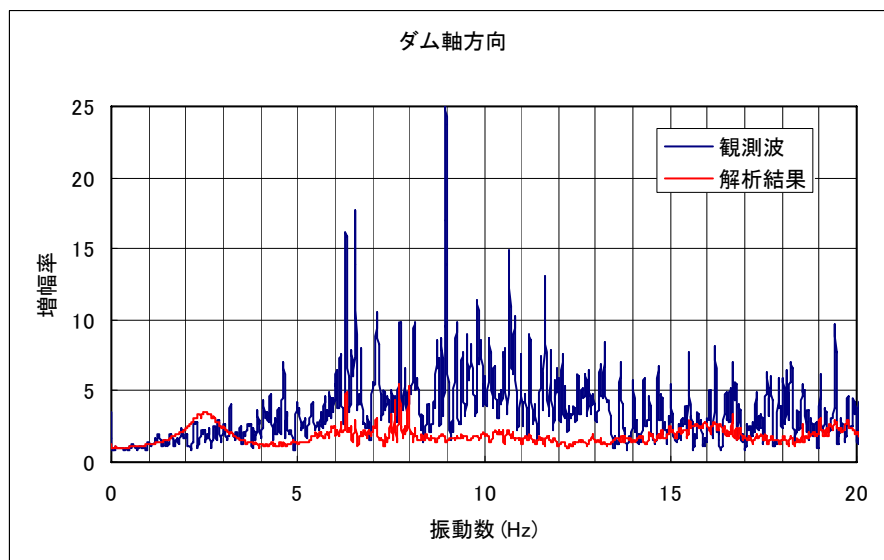
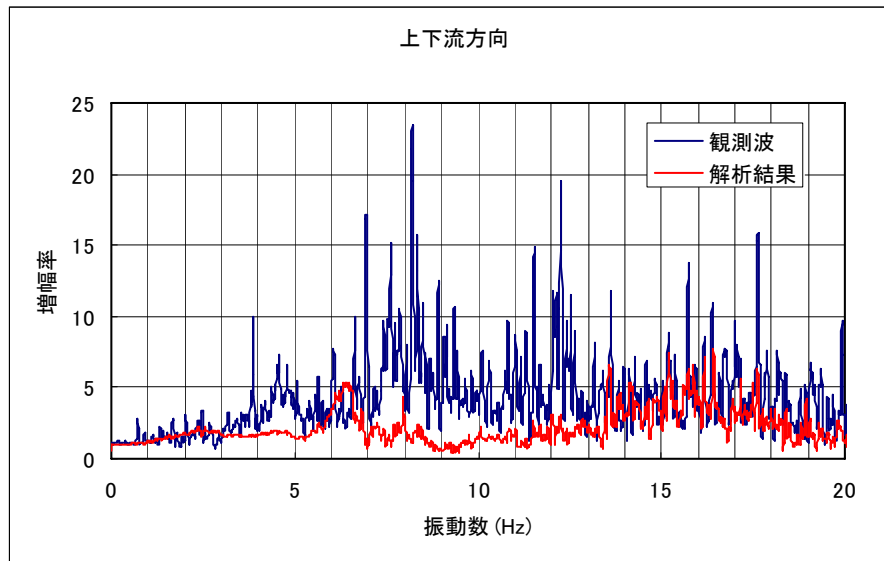


図5-8(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

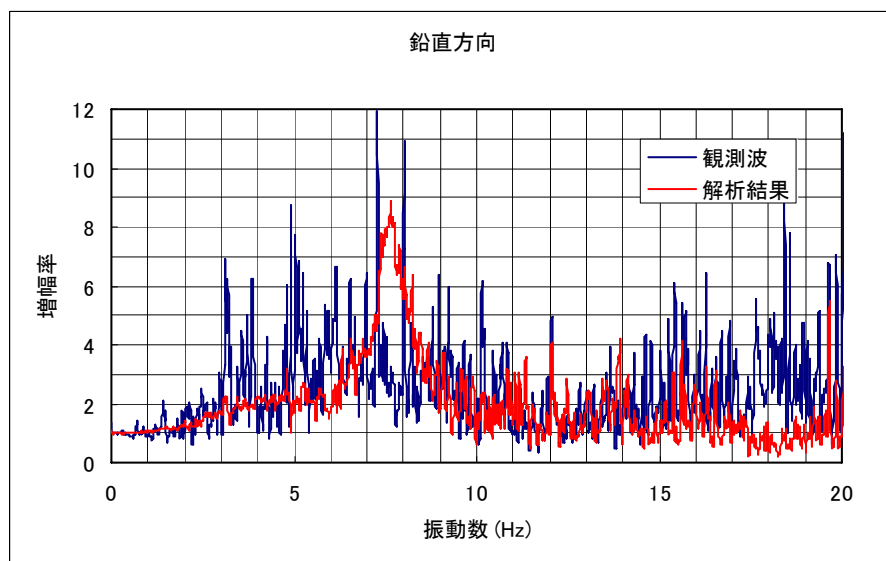
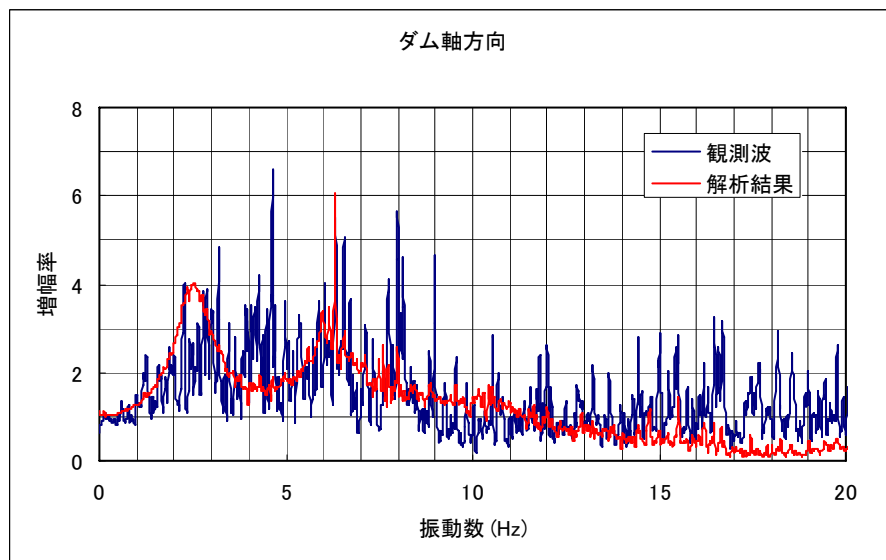
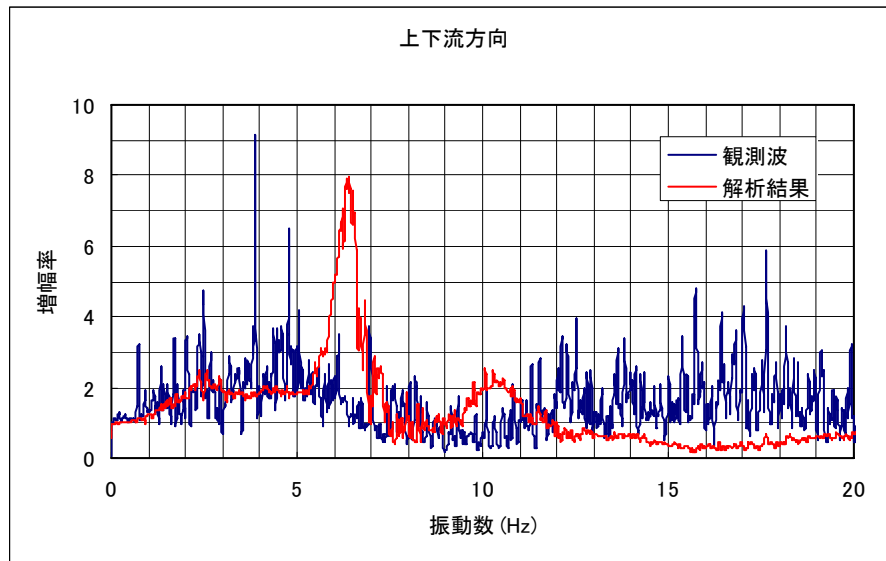


図5-8(f) 岩盤下部 (F1) に対する右岸リムトンネル内 (R2) の伝達関数

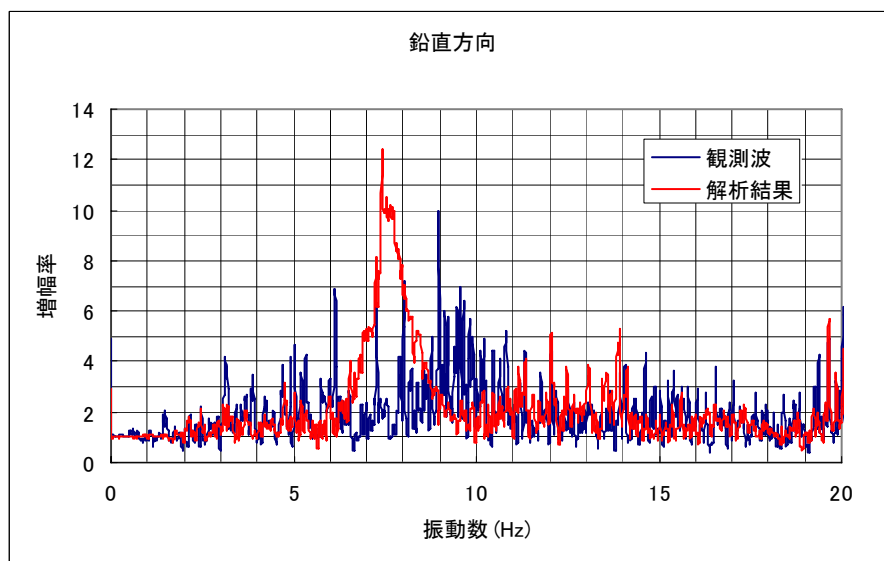
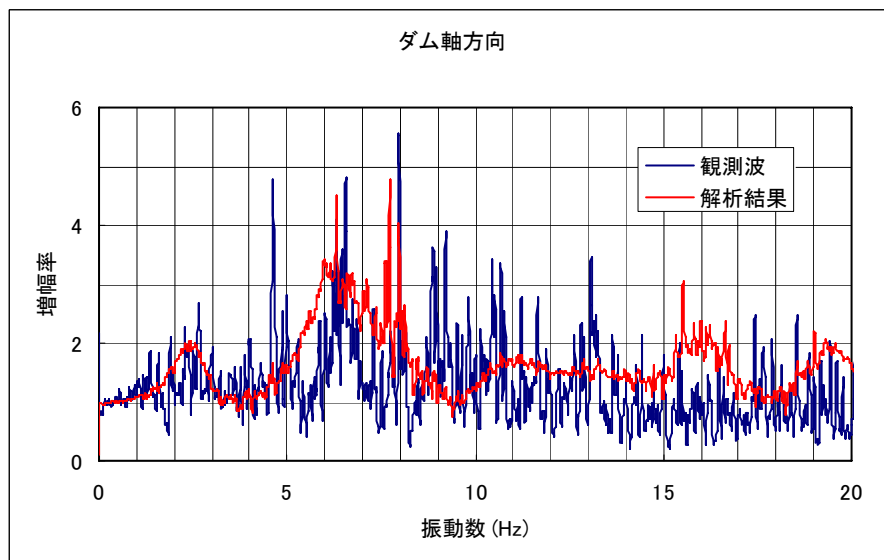
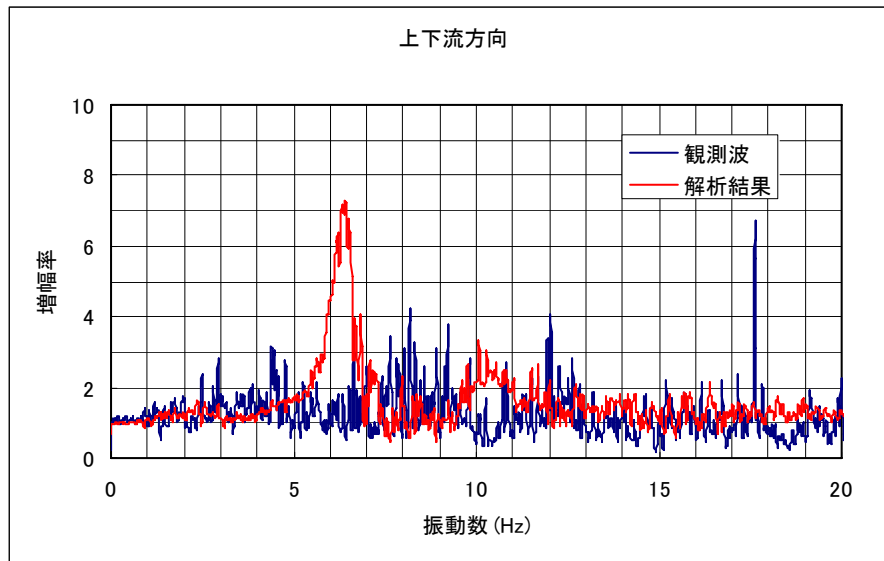


図5-8(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

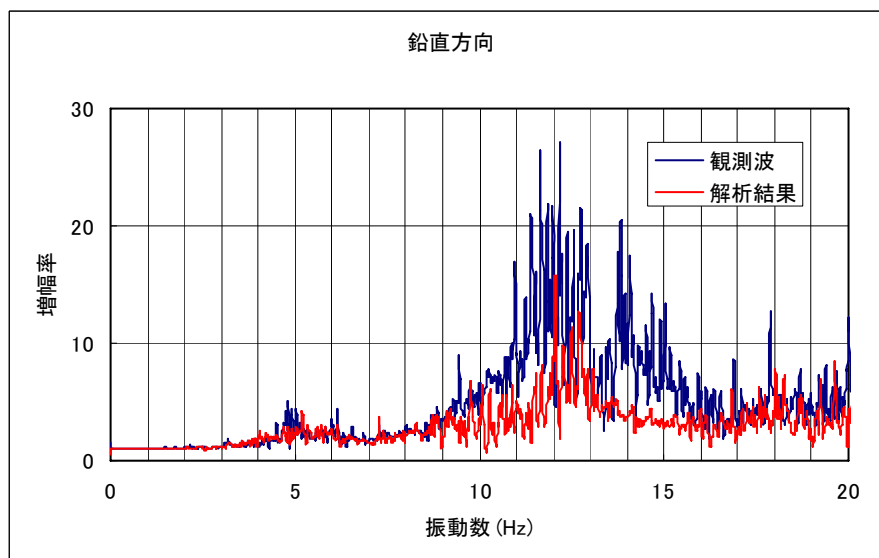
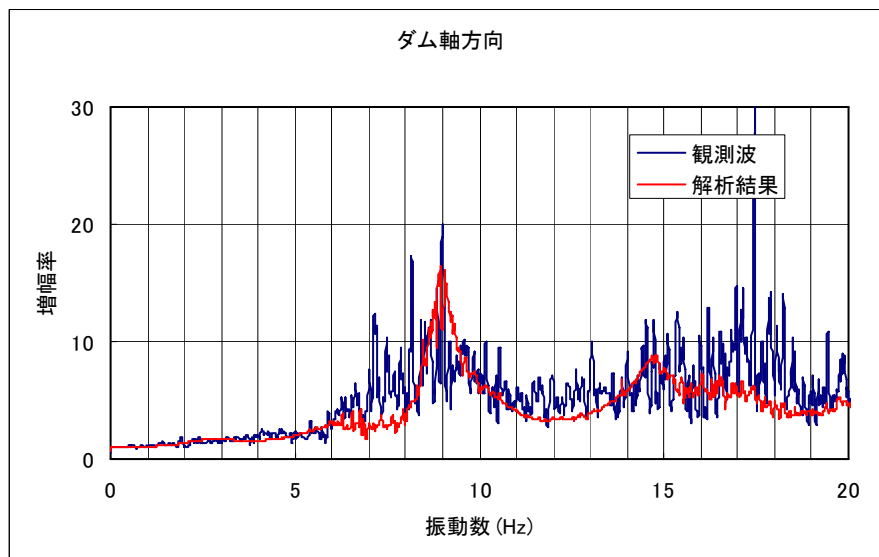
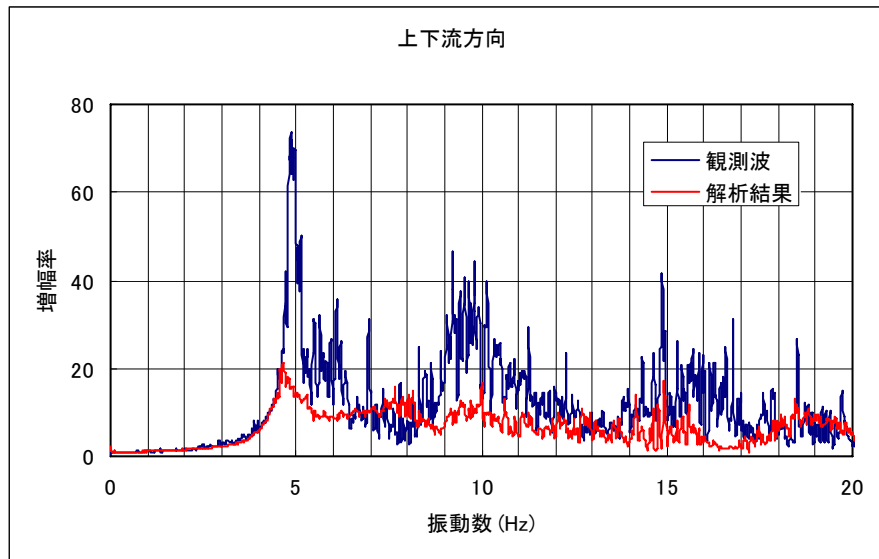


図5-9(a) ダム底面(F2)に対する天端中央(T2)の伝達関数

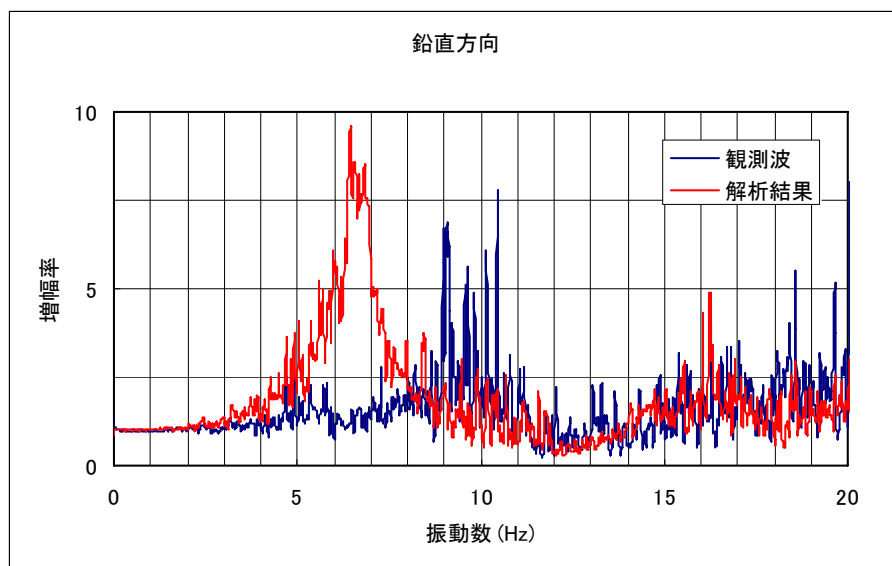
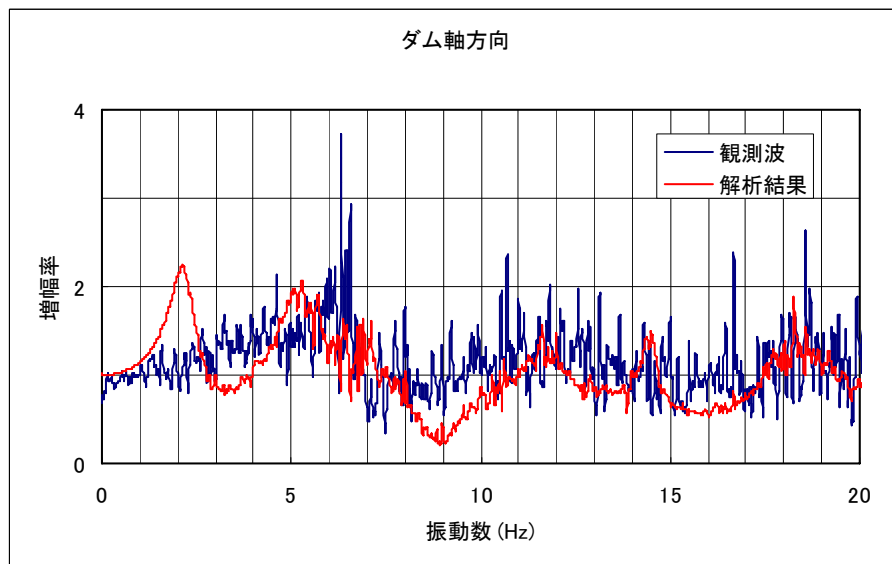
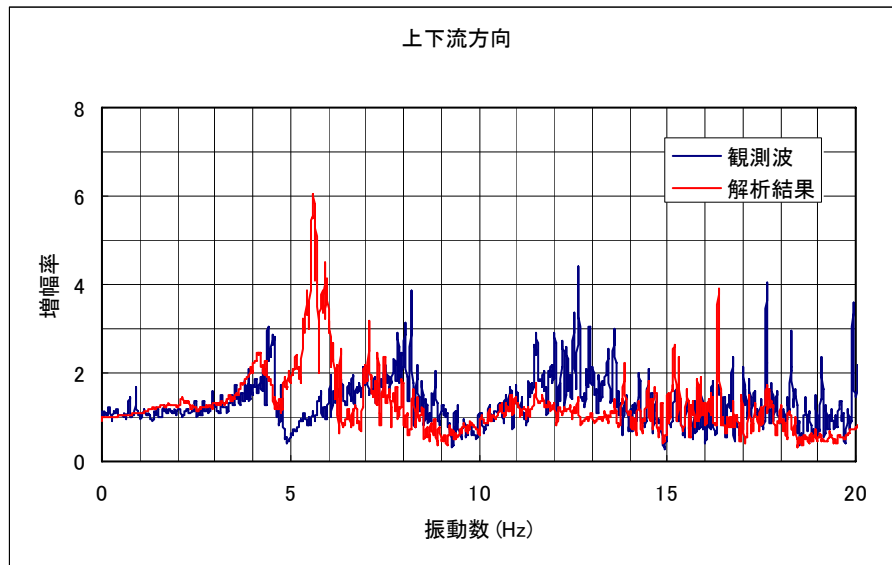


図5-9 (b) 岩盤下部 (F1) に対する岩盤上部 (F2) の伝達関数

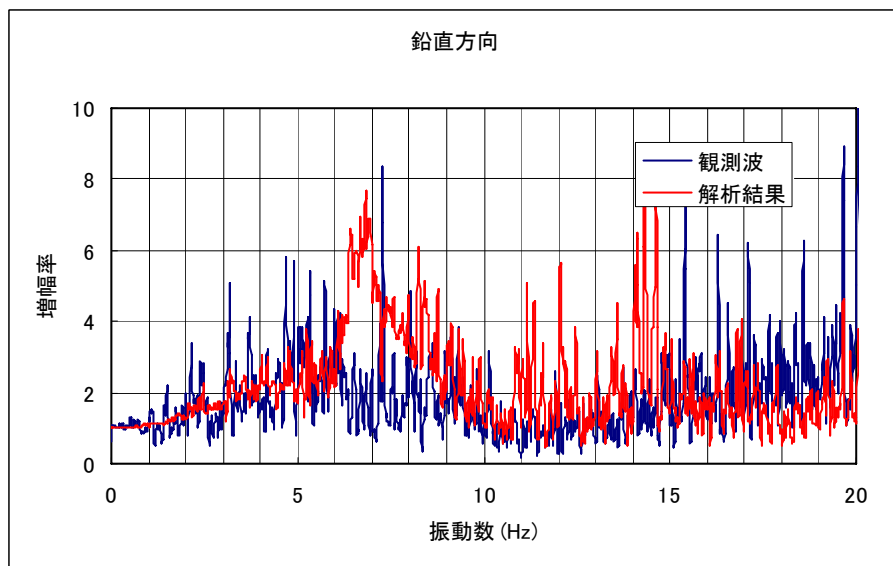
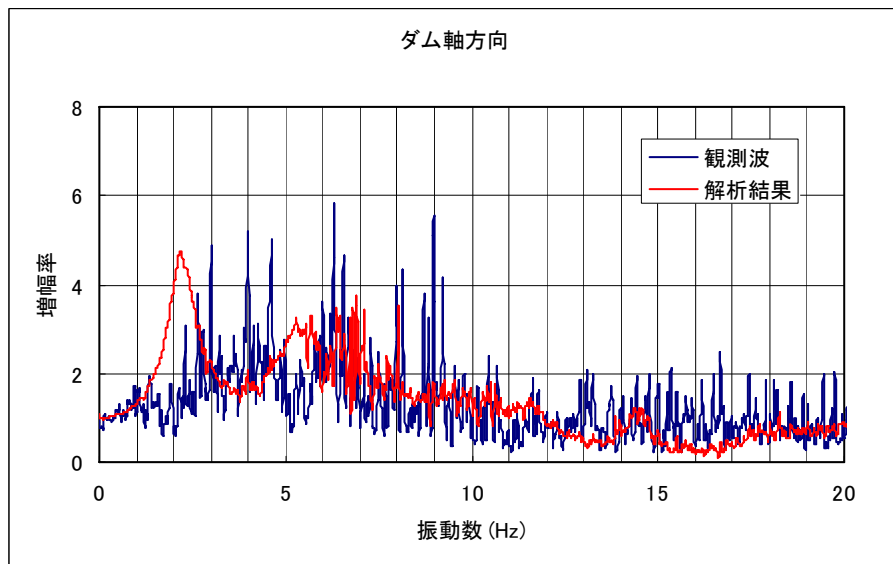
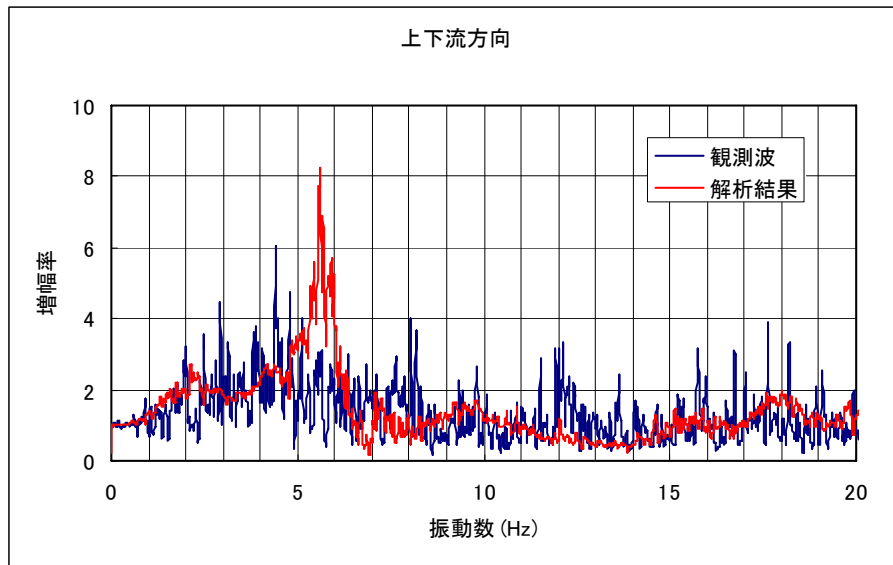


図5-9(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

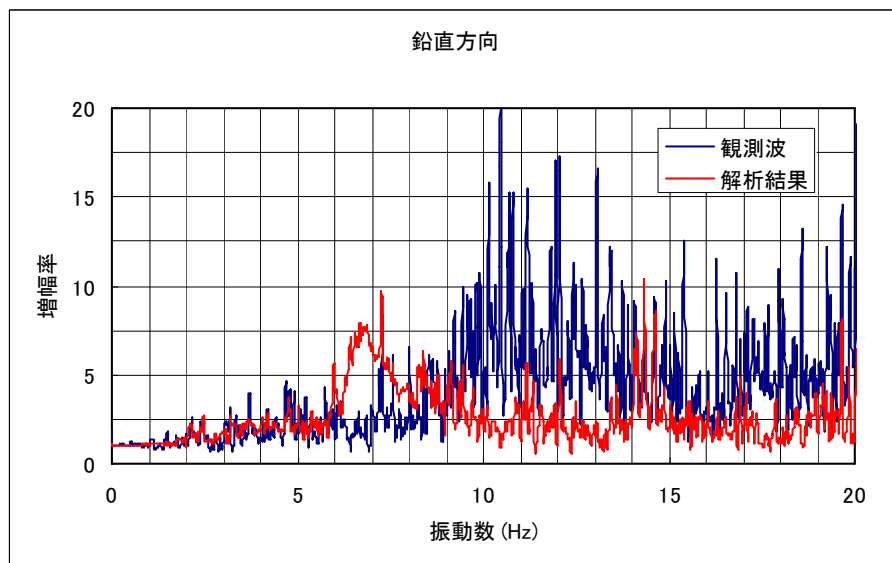
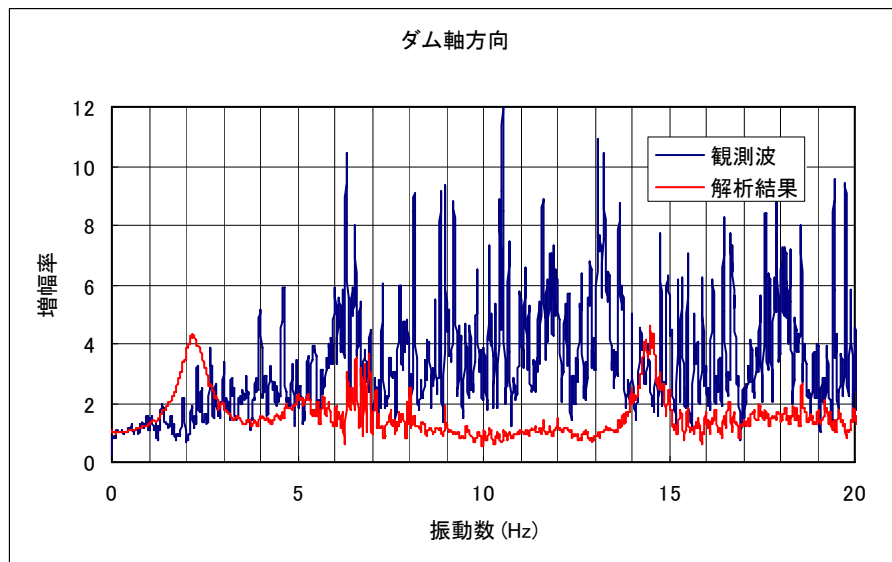
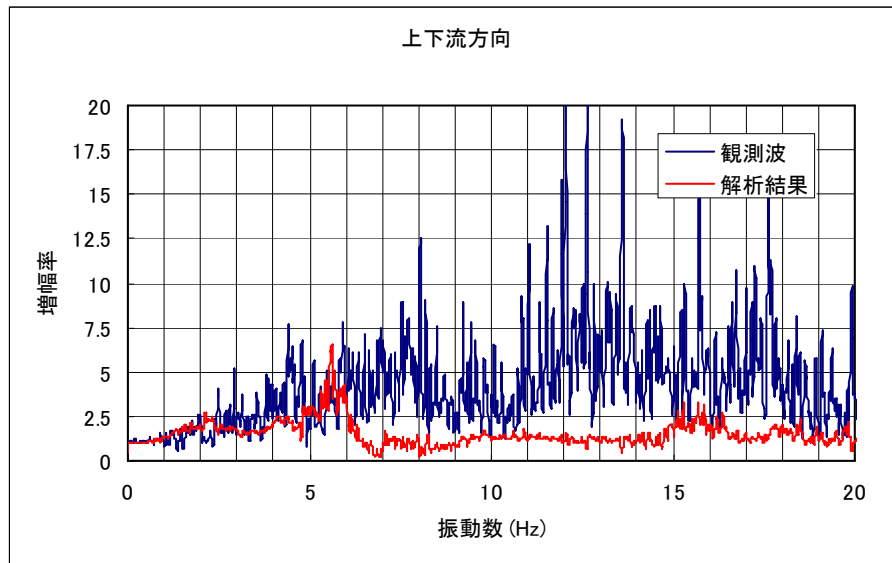


図5-9(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

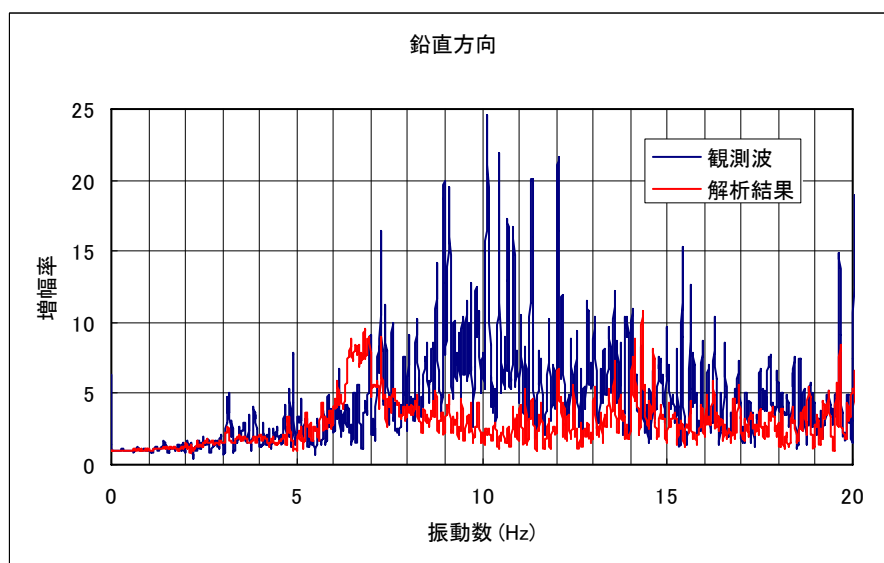
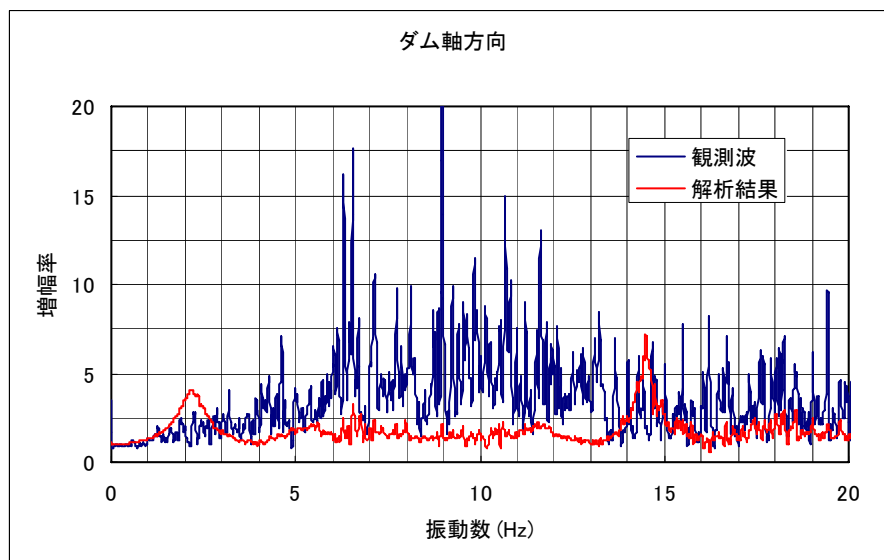
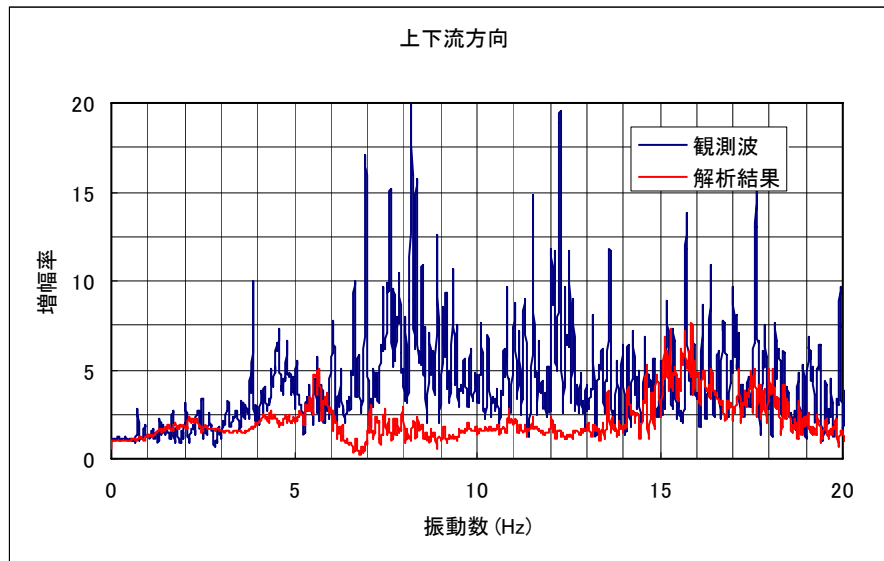


図5-9(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩の伝達関数

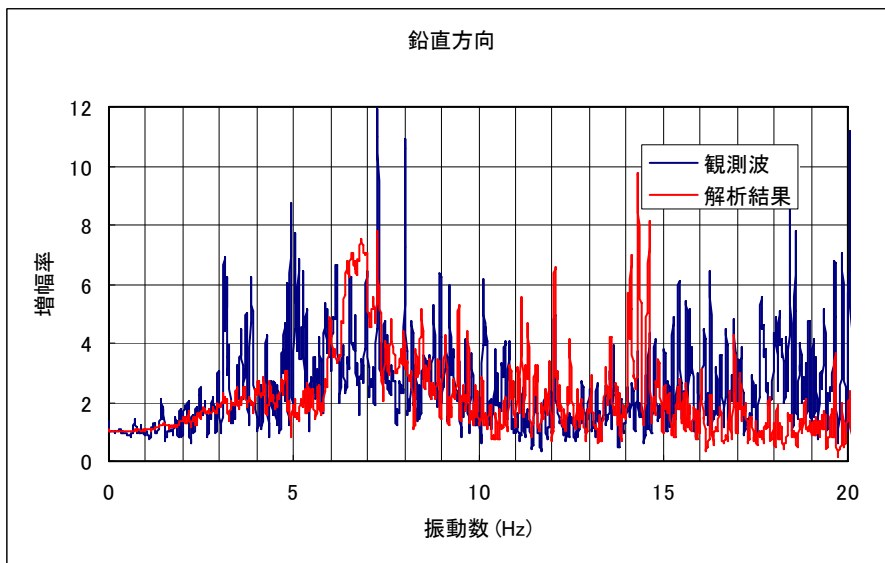
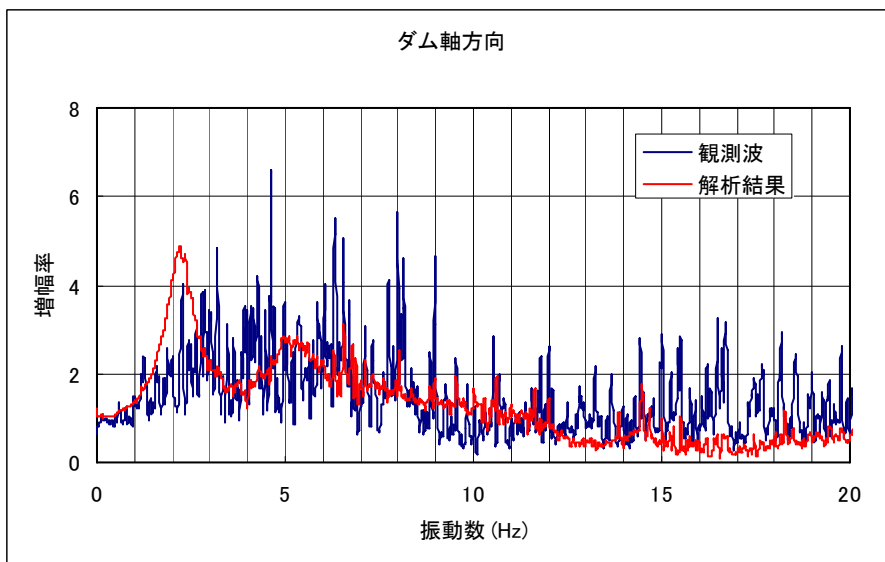
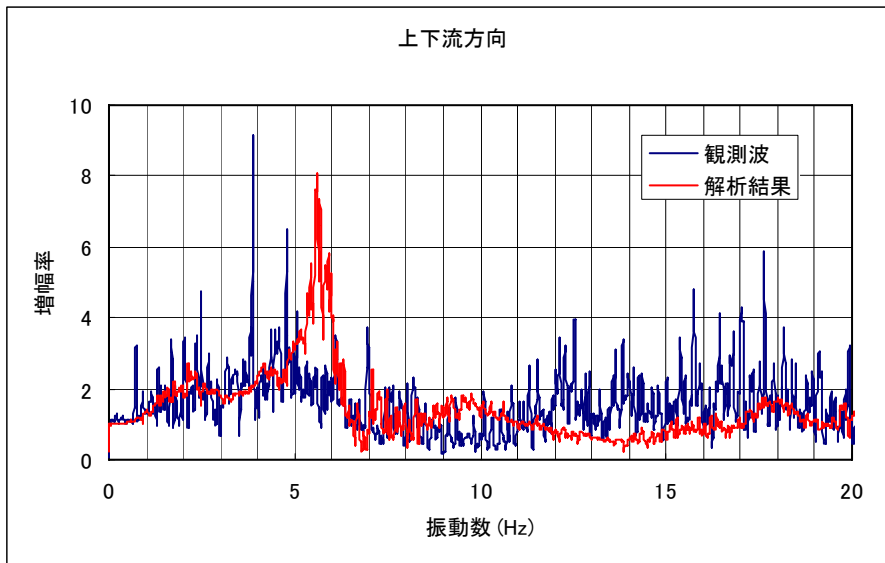


図5-9 (f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2)_nの伝達関数

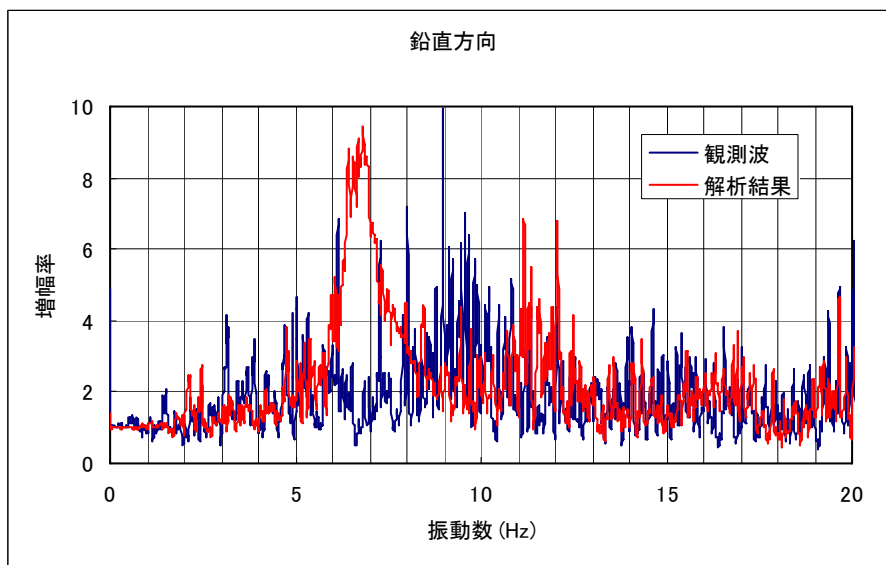
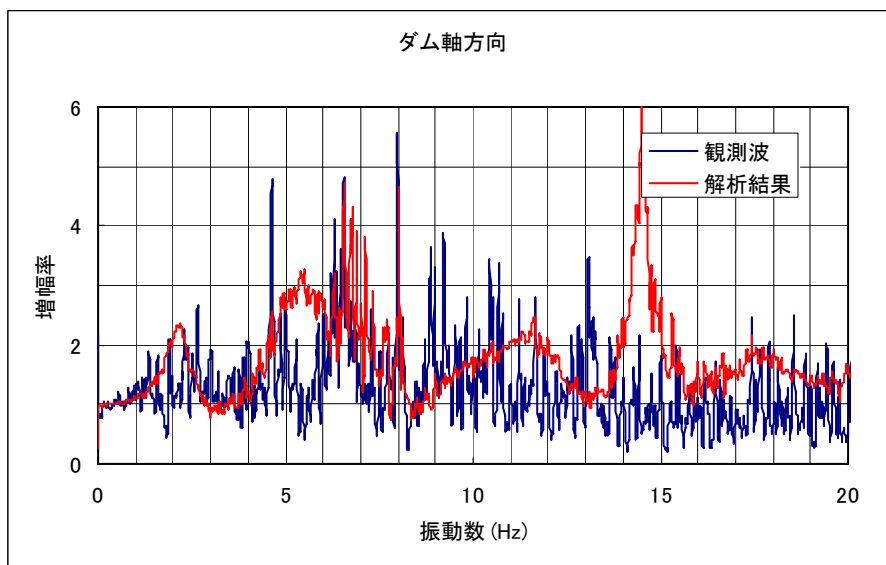
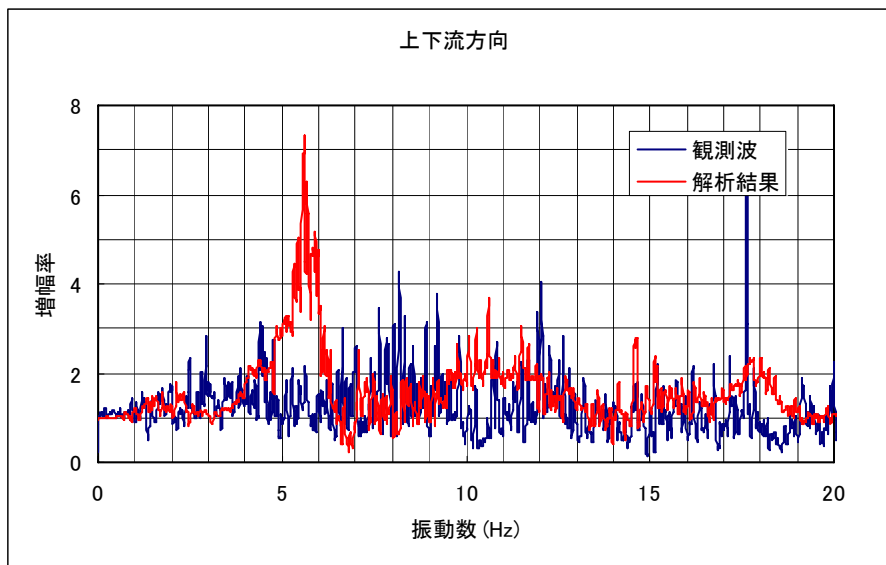


図5-9(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

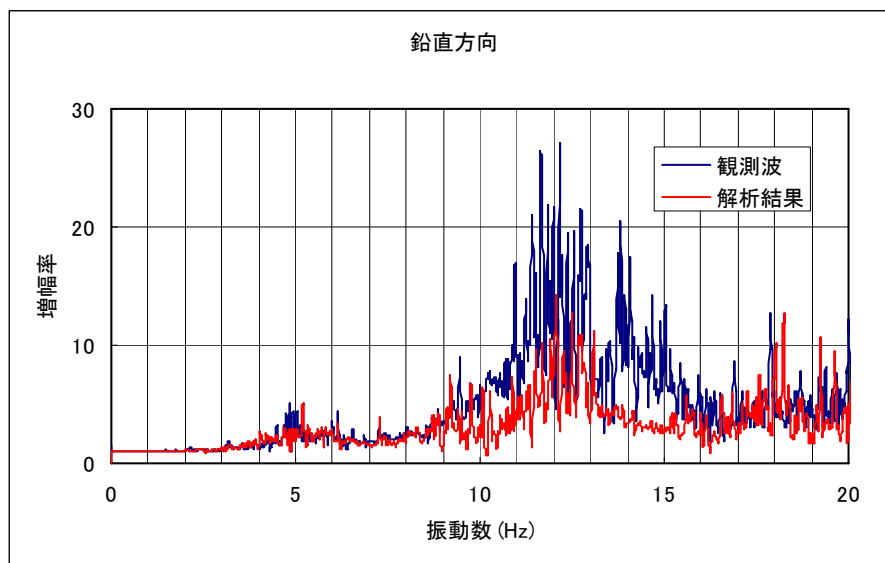
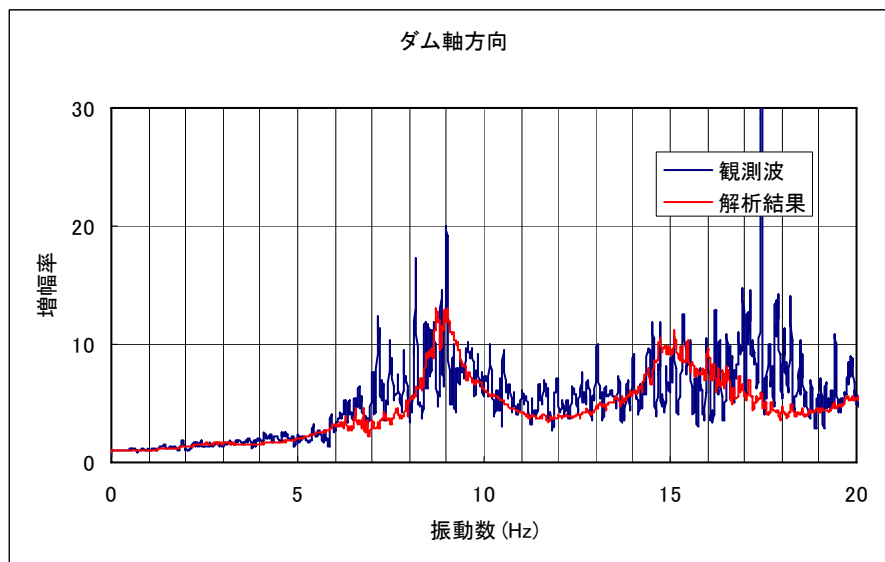
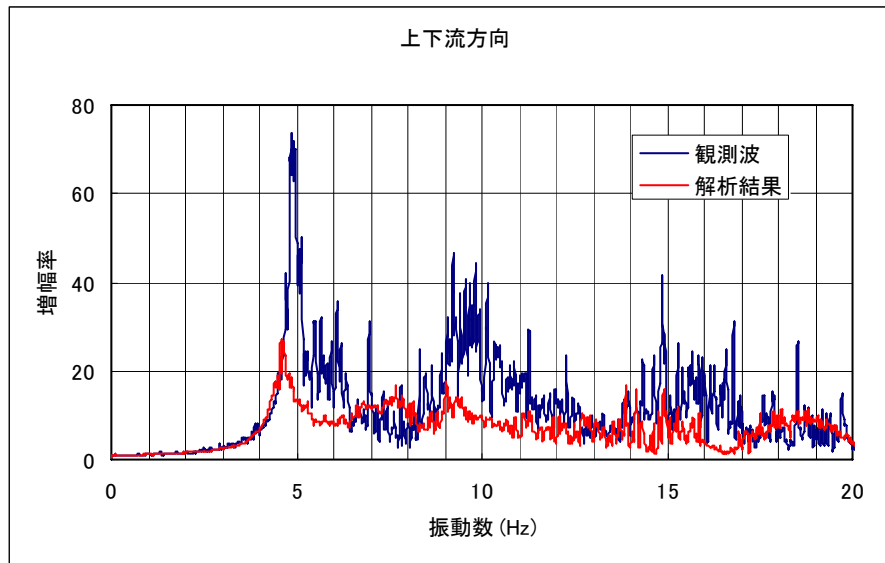


図5-10(a) 岩盤上部 (F2) に対する天端中央(T2) の伝達関数

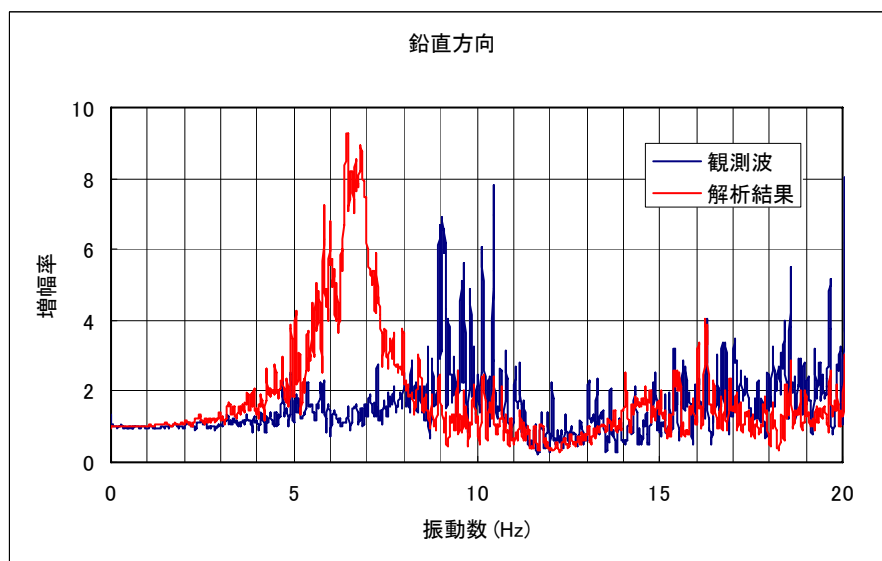
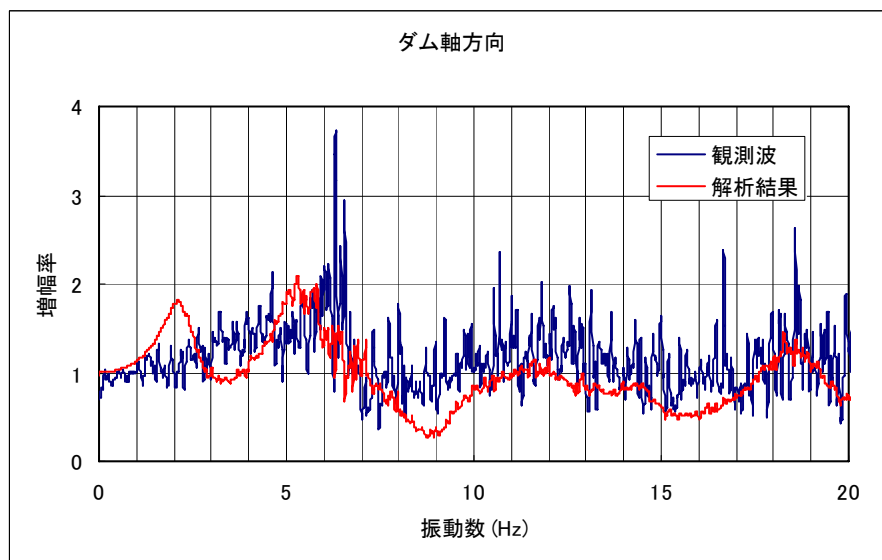
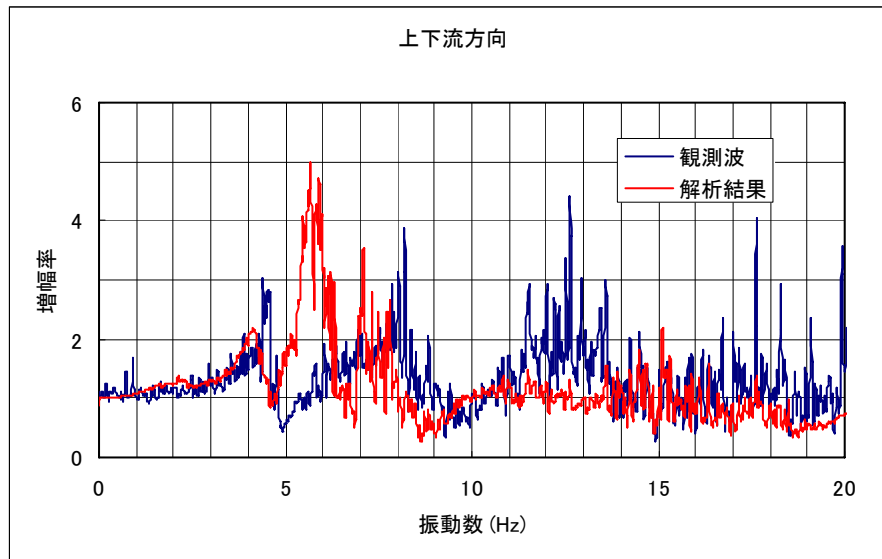


図5-10(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

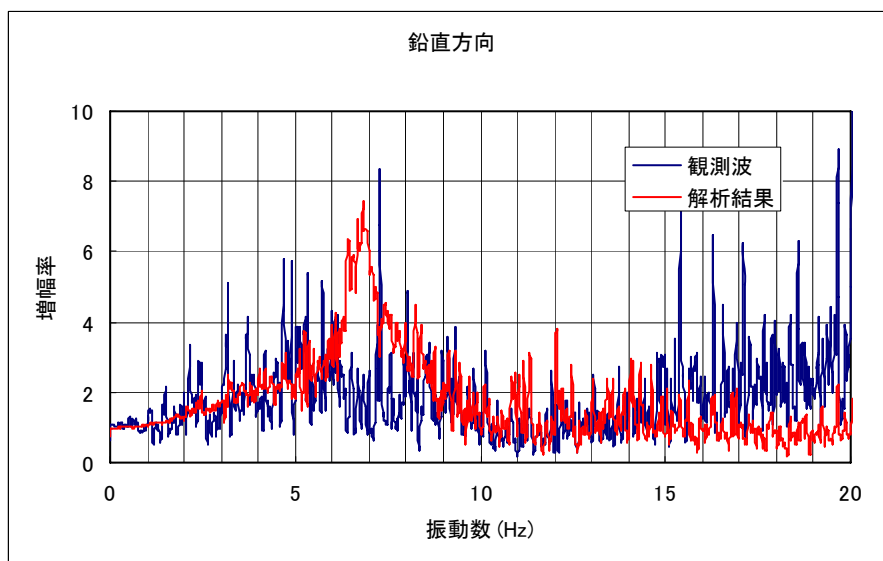
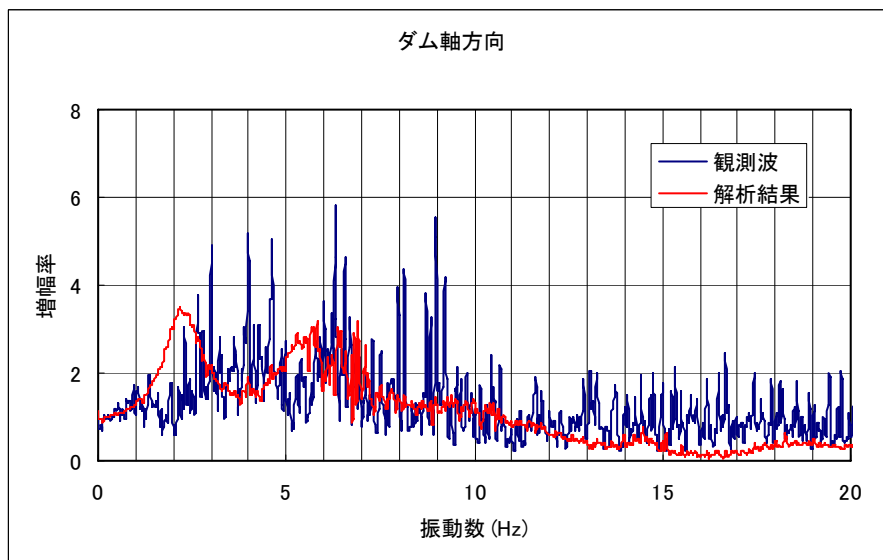
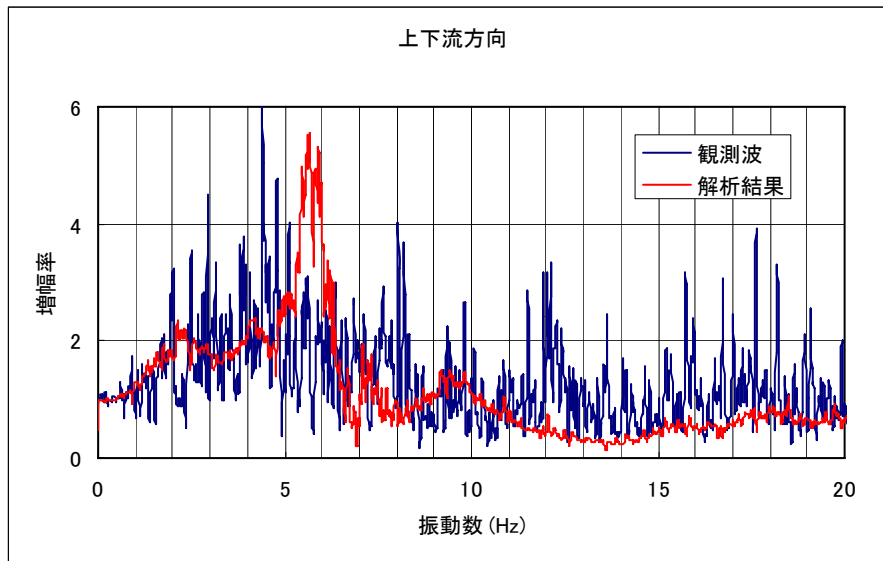


図5-10(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1) の伝達関数

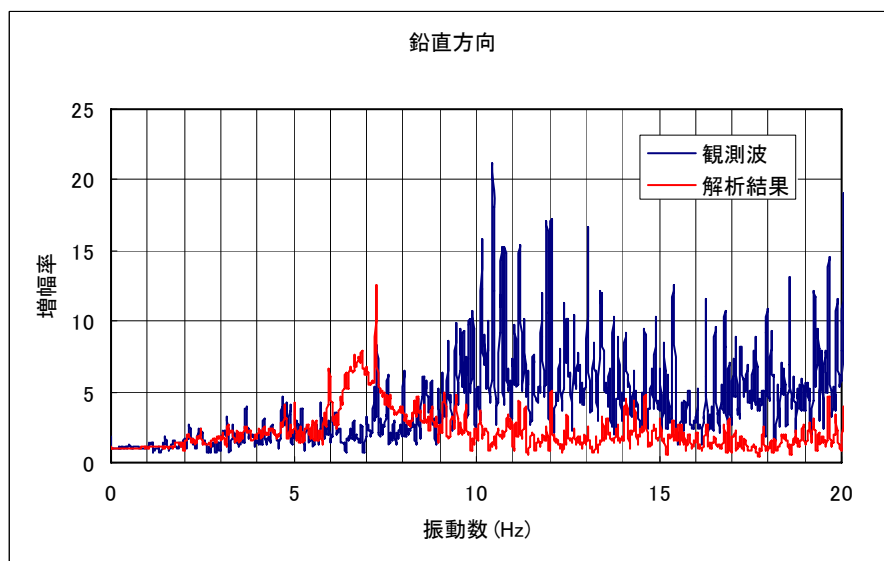
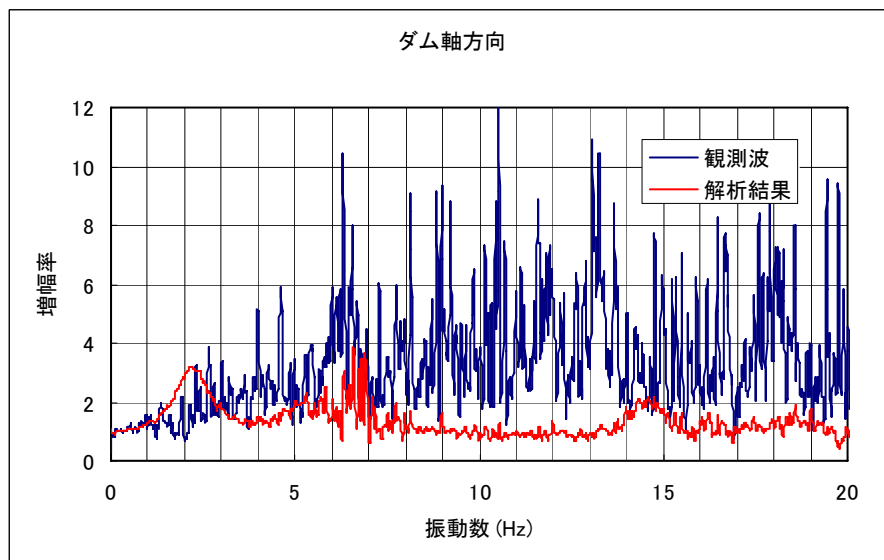
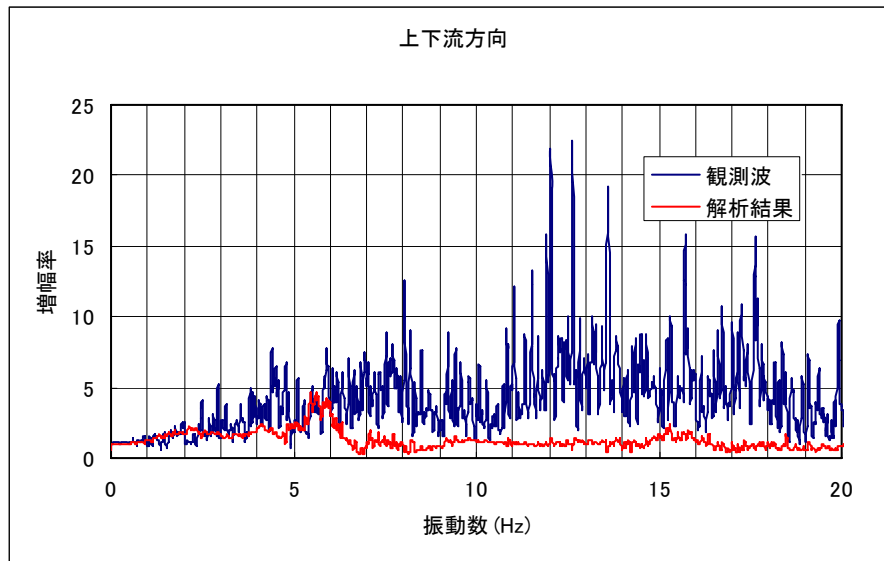


図5-10(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

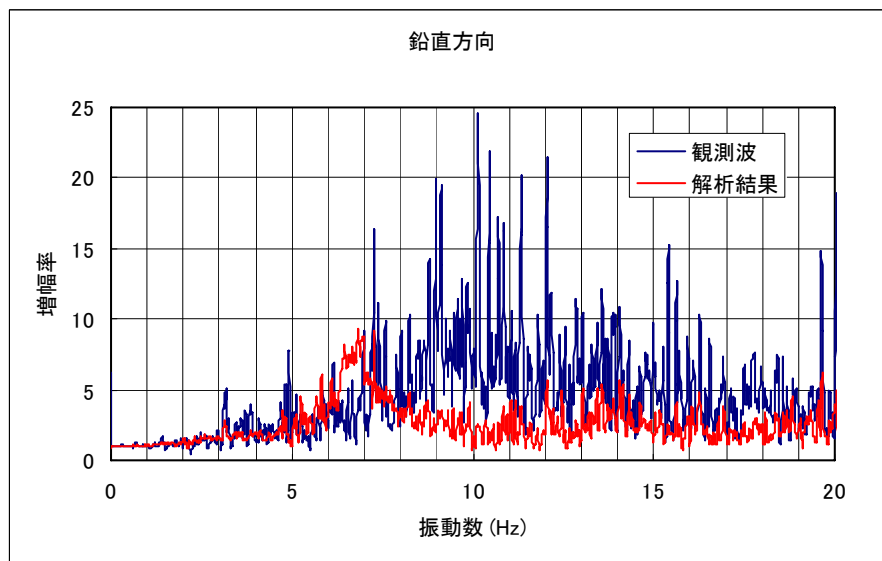
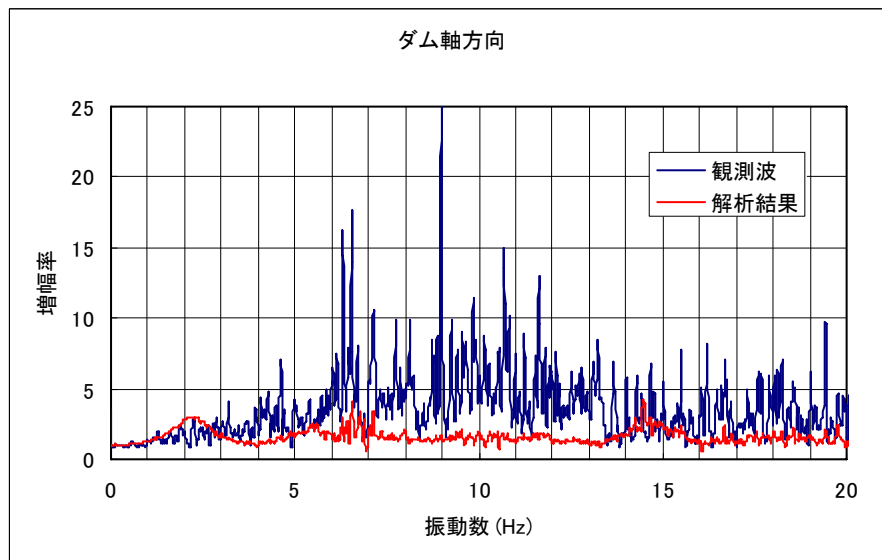
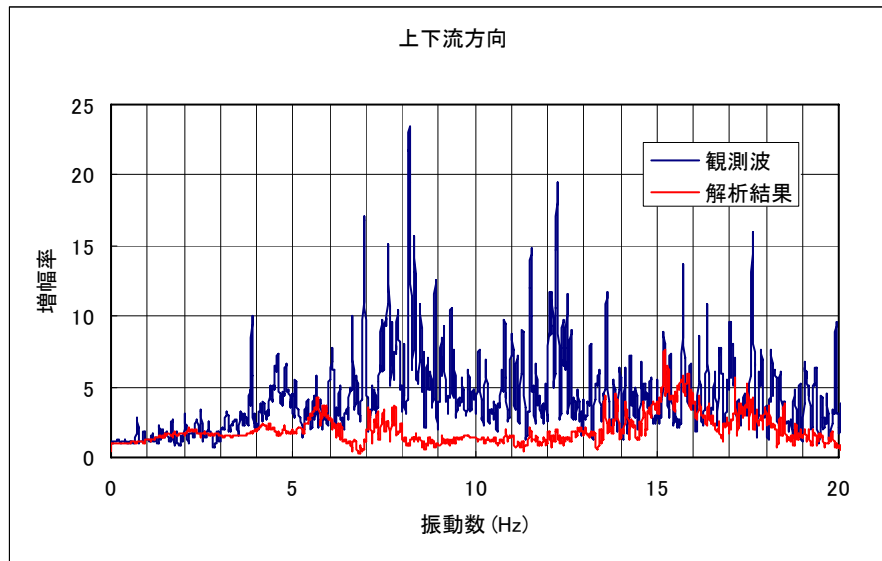


図5-10(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

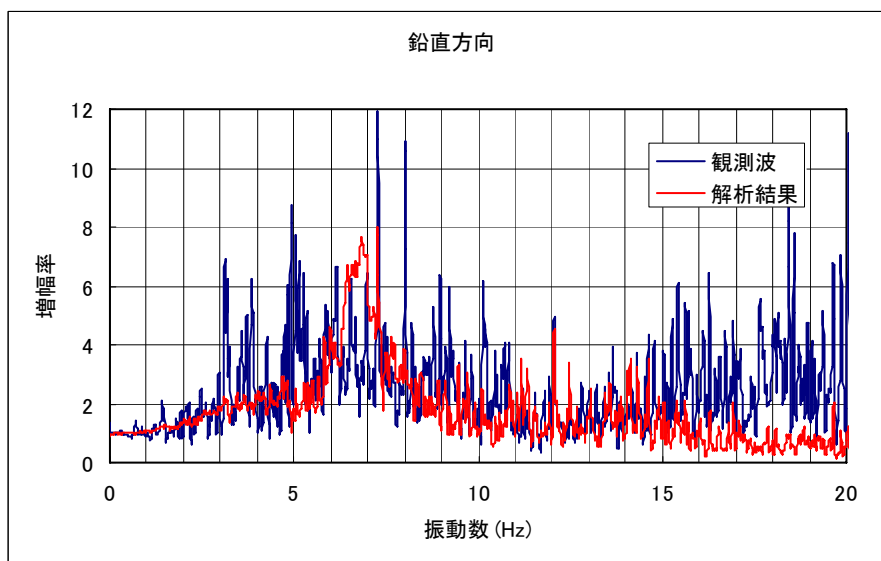
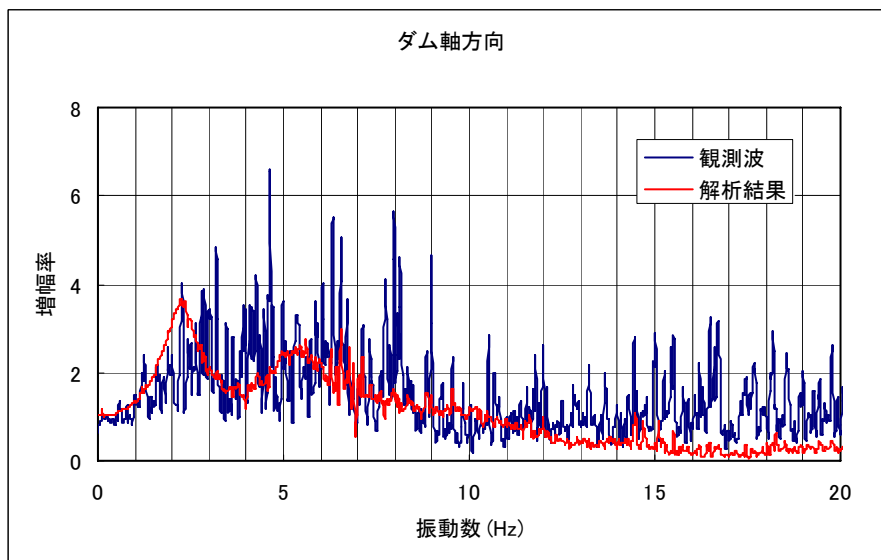
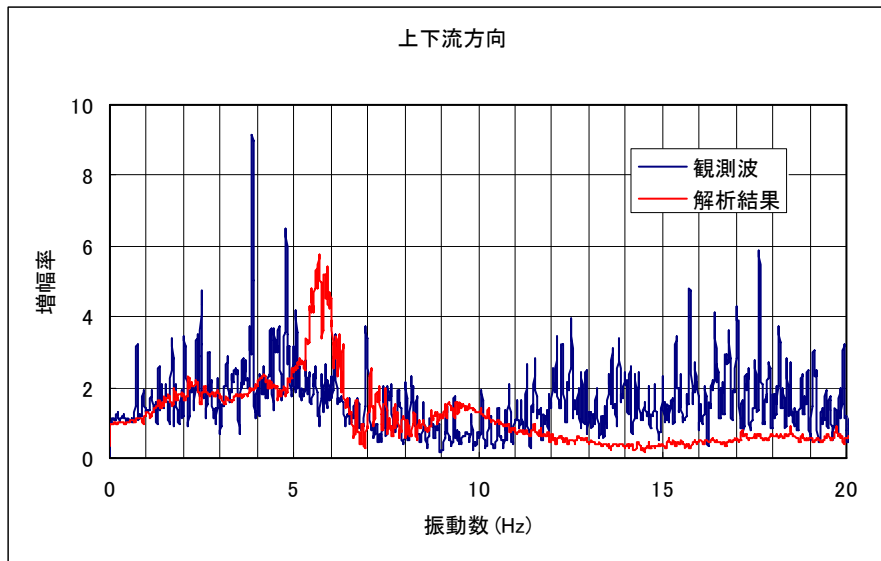


図5-10(f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2) の伝達関数

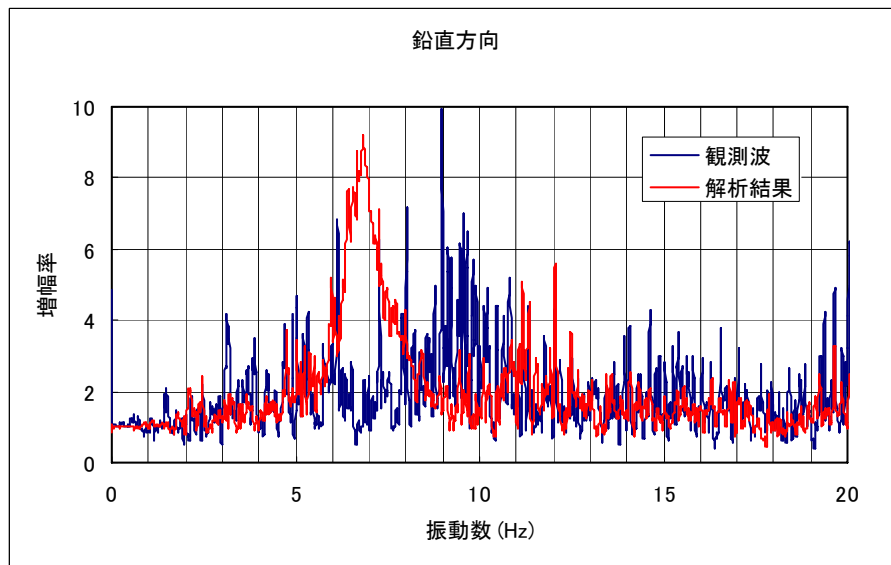
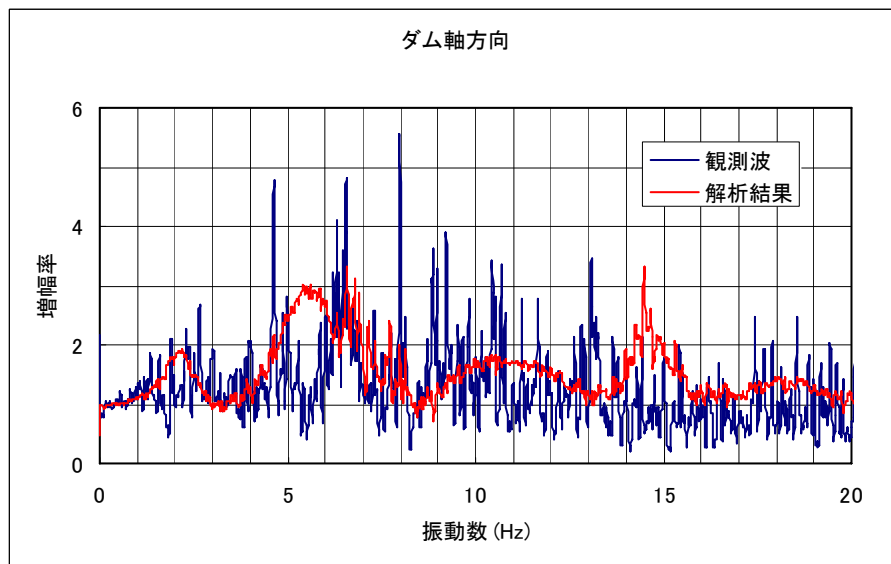
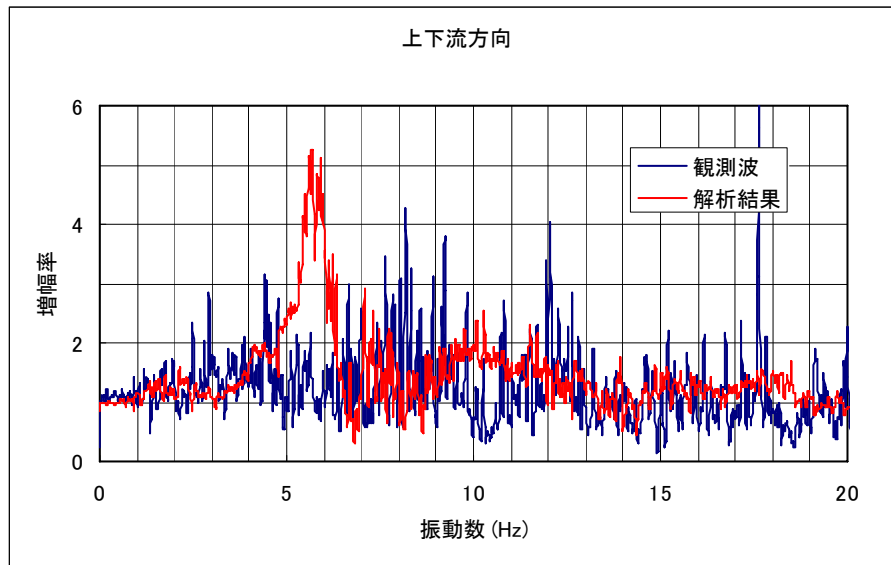


図5-10(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

6. 初期応力解析と固有値解析

作成された三次元ダムー基礎岩盤モデルを用い、2003年9月26日十勝沖地震時の水位状態におけるダム・基礎岩盤の静的応力解析を行った。

6.1 初期応力解析

6.1.1 解析条件

(1) 物性条件

ダムおよび基礎岩盤を線形弾性材料として、表 6-1 に示す物性値を用いた。

表 6-1 初期応力解析に用いたダムおよび基礎岩盤の物性値

モデル	弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比
ダム堤体	33000.0*1	2.44	0.20
基礎岩盤	17000.0*2	2.74	0.24

注：

*1: ダムコンクリートの静的弾性係数は動的弾性係数とほぼ同じ、または1割程度小さくなっているため、ここでは動的弾性係数より約6%と小さい値を用いた⁶⁾。

*2: 2.3 物性値についての調査参照

(2) 境界条件

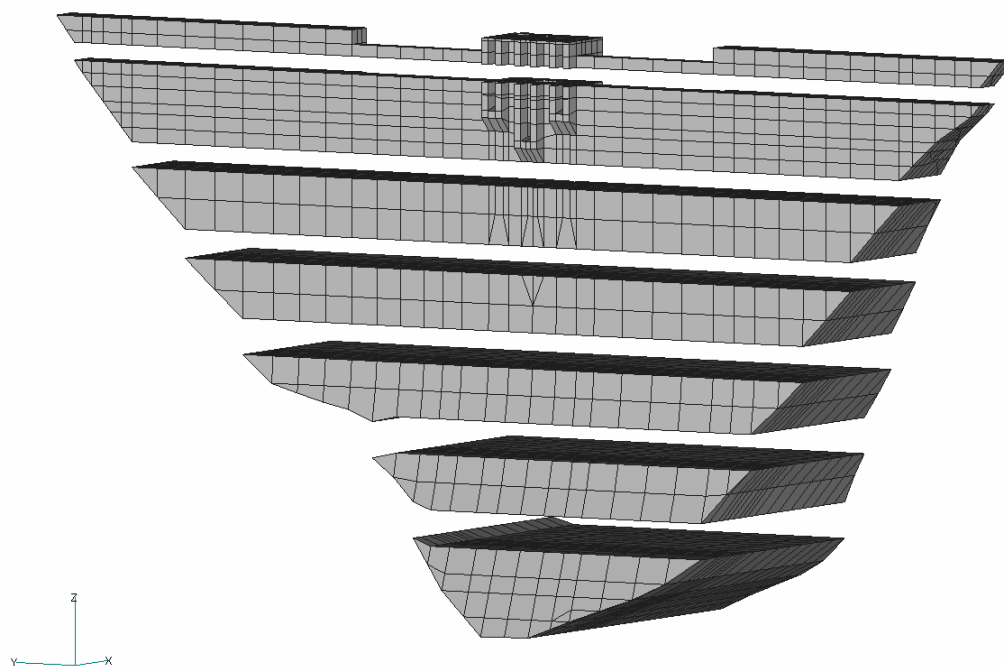
モデルの境界条件としては、基礎岩盤の底面では固定条件、側方境界では鉛直ローラー条件とした。

(3) 荷重条件

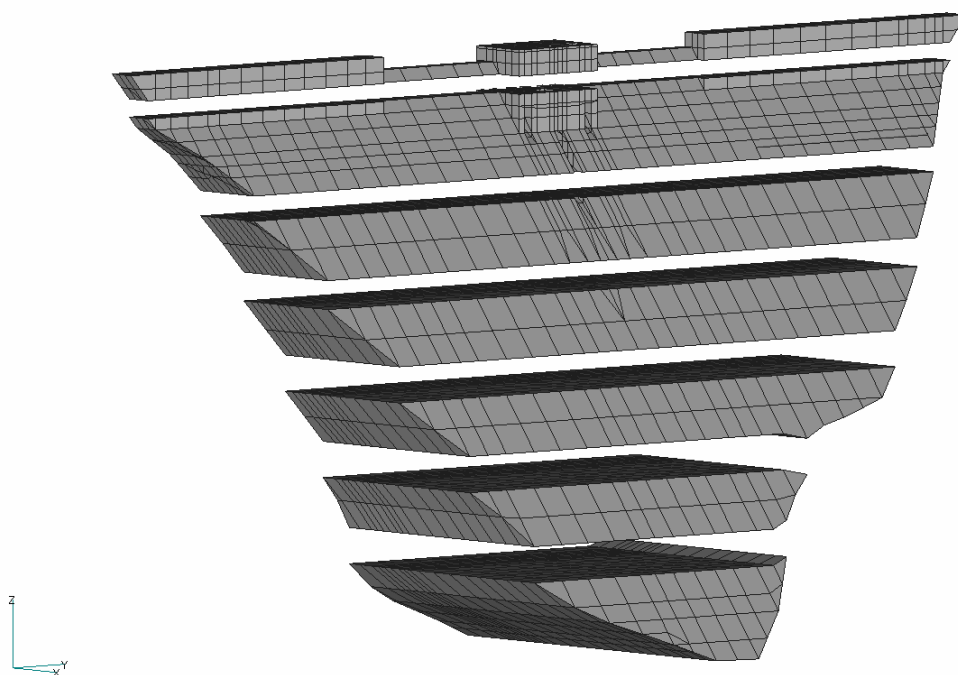
静的荷重は、ダムおよび基礎岩盤の自重、湛水時の静水圧である。

ダムの静的応力解析において、従来の一轄して、堤体全体に重量を作用させる解析手法（フィルダムの築堤解析のイメージになる。）によりダム天端のアバットメント付近で生じた不合理な引張応力をなるべく抑制するために、堤体本体を7ステップ（基礎岩盤と合わせて8ステップ）に分けて、逐次コンクリート打設過程のシミュレーションを実施した。図 6-1 に堤体の築堤ステップの分割を示す。

なお、貯水池の地震時水位（水深 87.82m）の水圧荷重を与え、湛水状態の解析も行った。



(a) 上流側鳥瞰図



(b) 下流側鳥瞰図

図 6-1 堤体の築造ステップ分けイメージ図

6.1.2 初期応力解析結果

表 6-2 に堤体の解析結果を示す。応力は、上流面、下流面および図 6-2 に示す断面に着目している。ダム軸方向応力、鉛直方向応力および湛水による変形について、解析結果を考察する。

空虚時の応力分布のコンター図を図 6-3～図 6-4 に、湛水時の結果を図 6-5～図 6-6 に示す。なお、湛水時、静水圧によるダムの変形を図 6-7 に示す。

(1) 応力結果について

ダム軸方向の最大引張応力は、空虚時および満水時においてそれぞれ 0.483Mpa と 0.513Mpa である。水位が低いため、湛水による軸方向の引張応力の変化は小さかった。鉛直方向の応力については、空虚時の完全圧縮状態からわずかながら 0.018MPa に変化した。一方、ダム軸方向の最大圧縮応力は空虚時の 0.493MPa から湛水時の 0.799MPa に増大しており、湛水による鉛直方向の圧縮応力の変化はほとんどなかった。なお、これらの応力は滑らかな分布をしている。

また、湛水時でも、堤体の最大引張応力が約 0.513Mpa であったが、ダムコンクリートの引張強度には十分な余裕があると言える。

表 6-2 初期応力解析結果一覧

	方向	空虚	湛水
最大引張応力 (MPa)	ダム軸	0.483	0.513
	鉛直	----	0.0177
最大圧縮応力 (MPa)	ダム軸	-0.493	-0.799
	鉛直	-2.184	-2.122
最大引張ひずみ ($\times 10^{-4}$)	ダム軸	0.154	0.162
	鉛直	0.00413	0.0087
最大圧縮ひずみ ($\times 10^{-4}$)	ダム軸	-0.0802	-0.110
	鉛直	-0.580	-0.554
最大変位 (cm)	上下流	----	0.232

(2) 変形結果について

貯水による堤体の上下流方向の最大変位は 0.232cm であり、大きな変形はなかった。

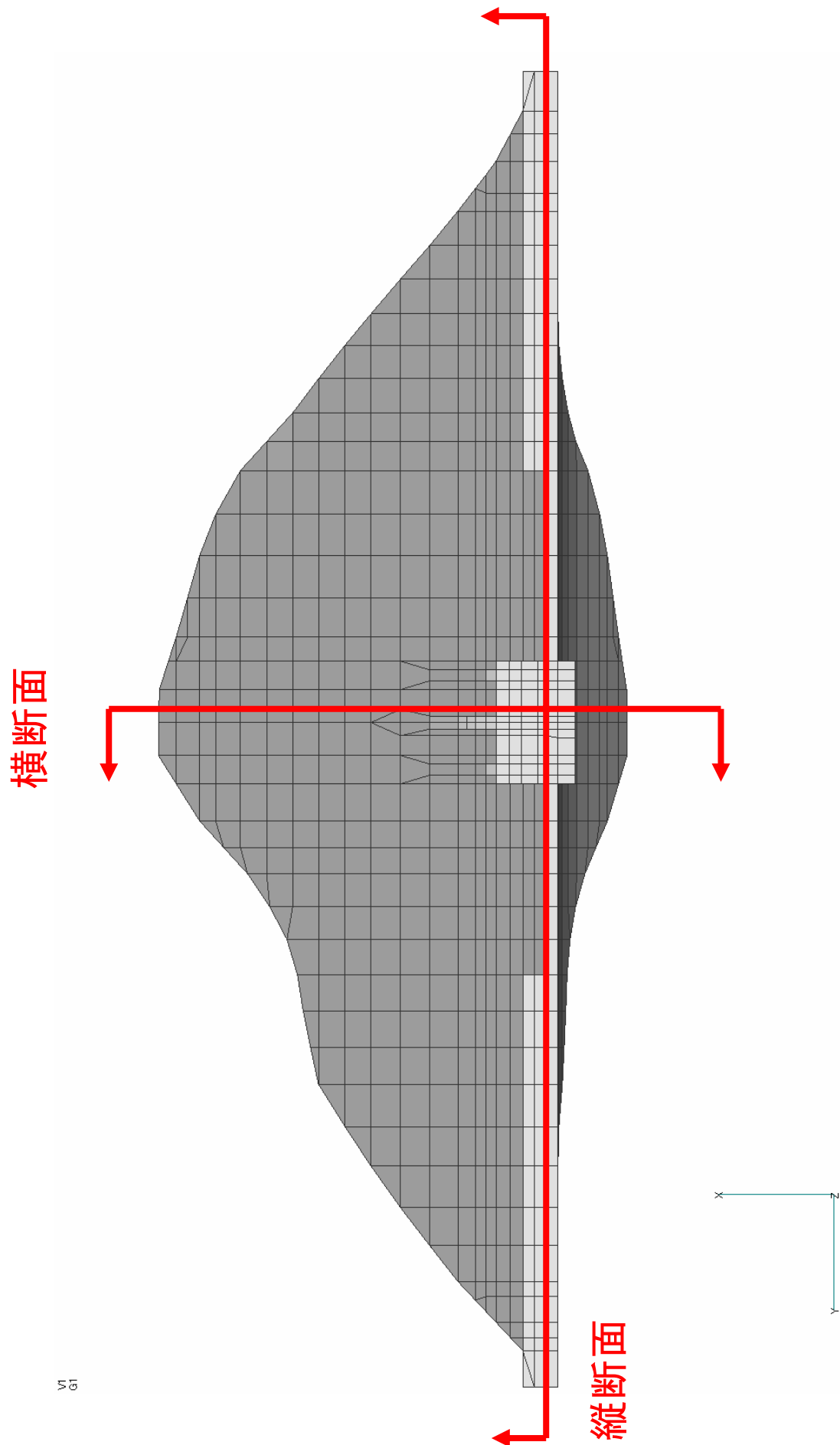


图 6-2 断面位置图

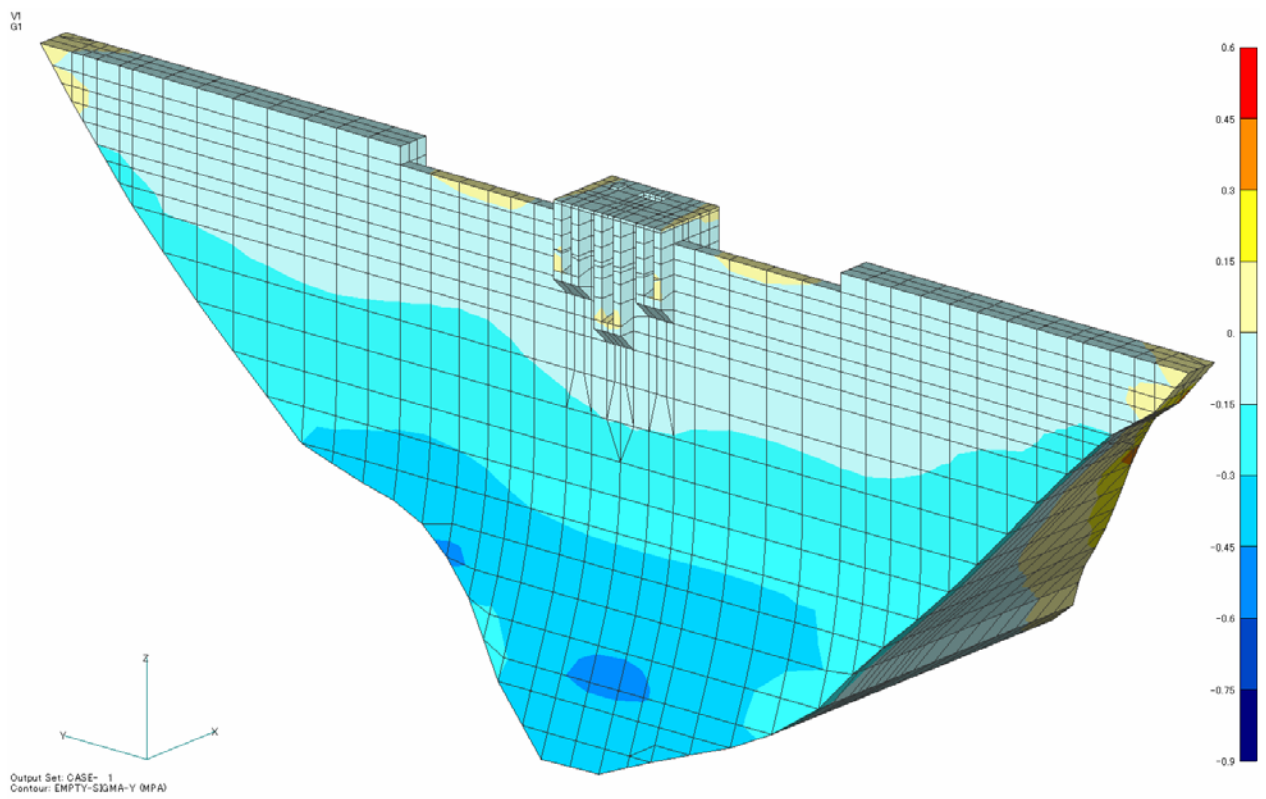


図 6-3 (a) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(鳥瞰図)

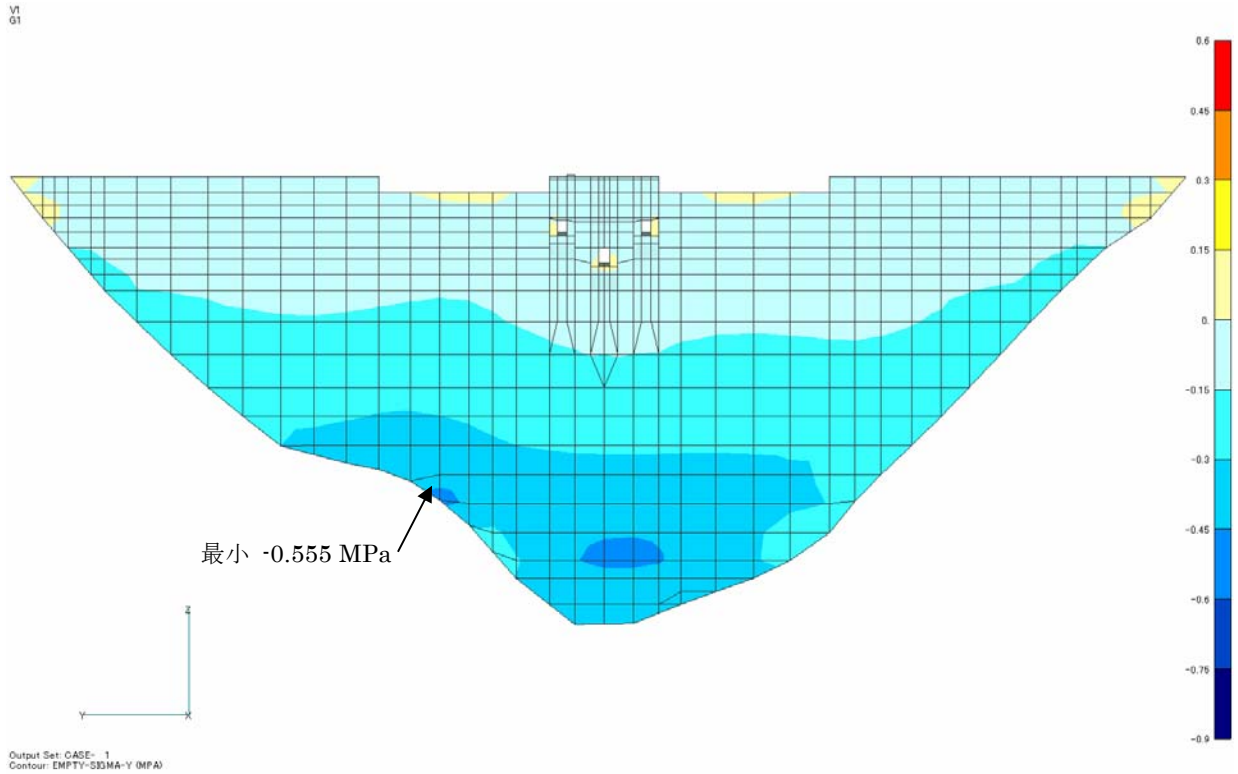


図 6-3 (b) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(上流面)

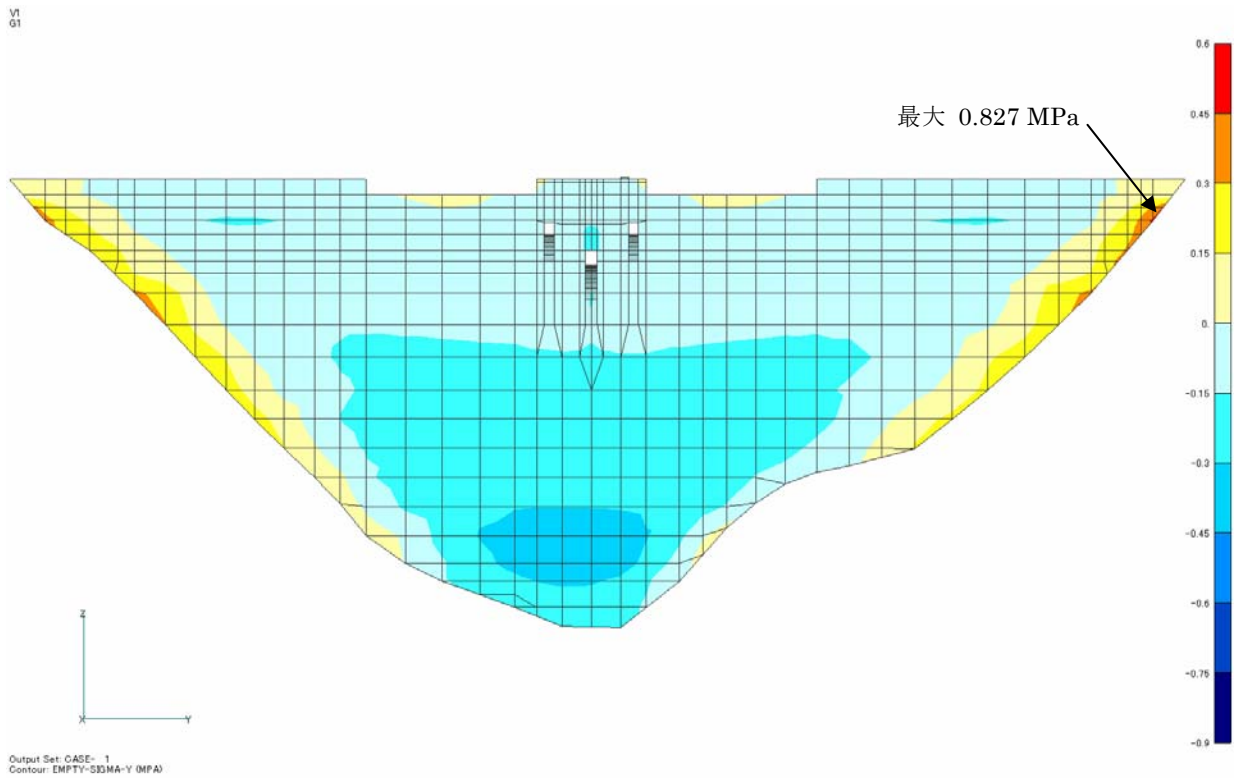


図 6-3 (c) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(下流面)

V1
02

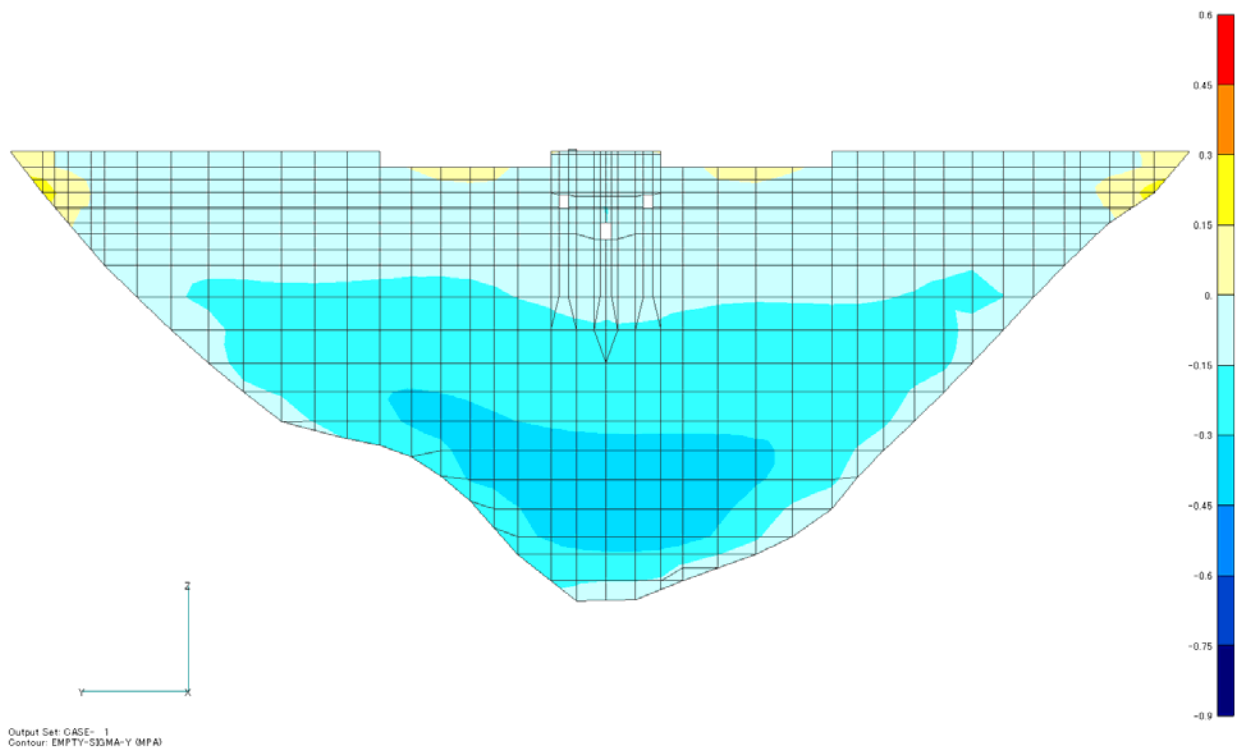


図 6-3 (d) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(縦断面)

V1
03

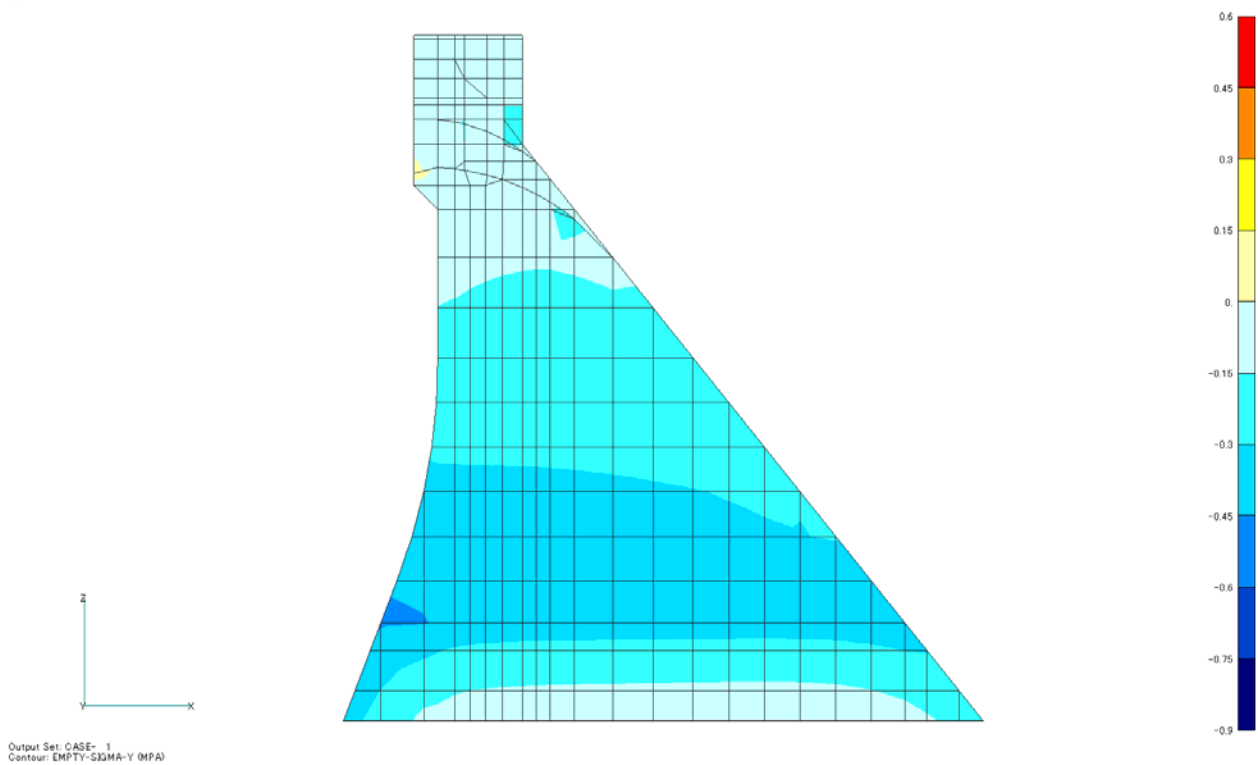


図 6-3 (e) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(横断面)

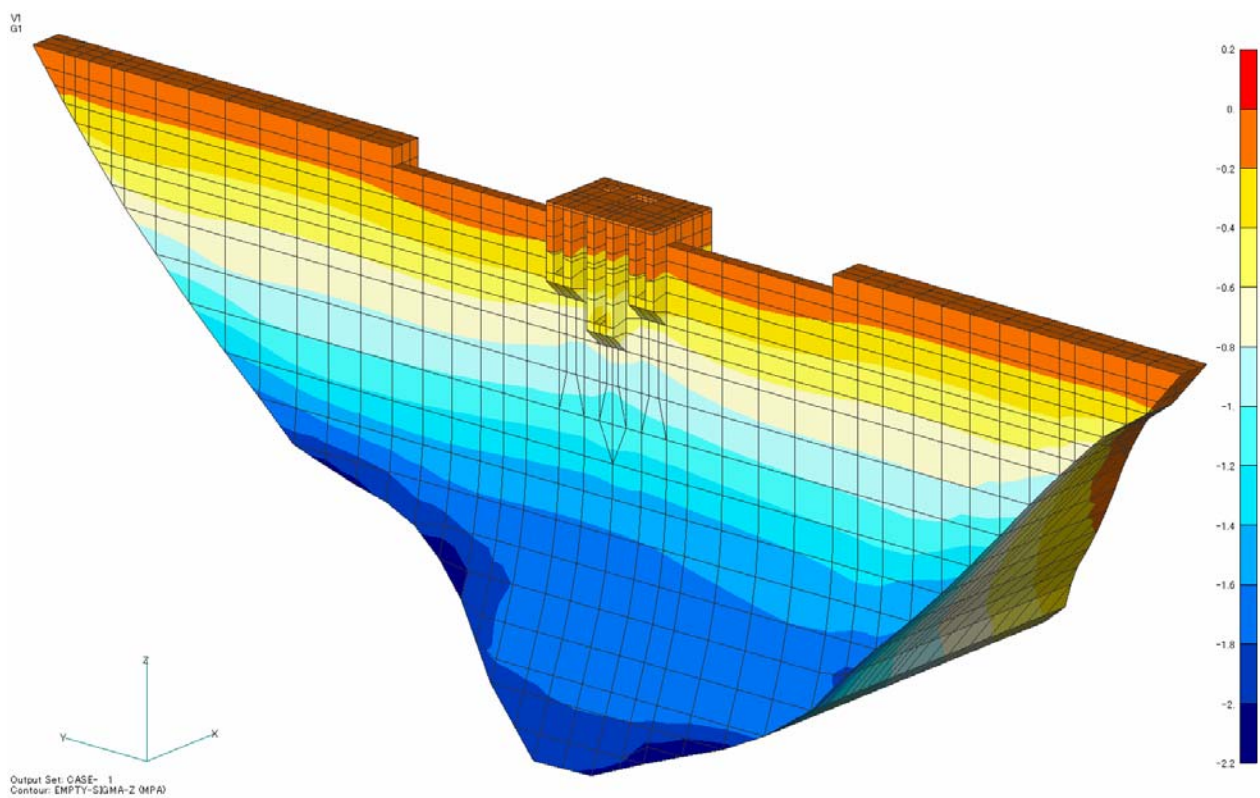


图 6-4 (a) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)
(鳥瞰図)

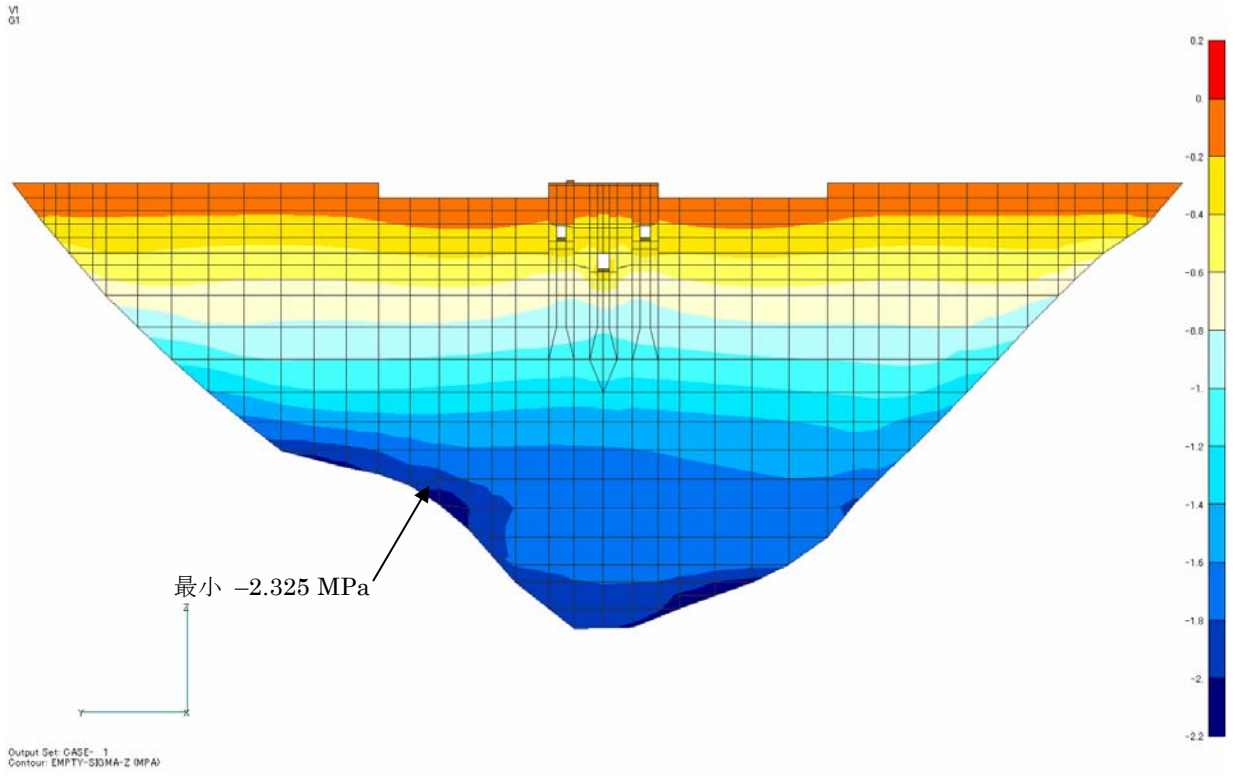


图 6-4 (b) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)
(上流面)

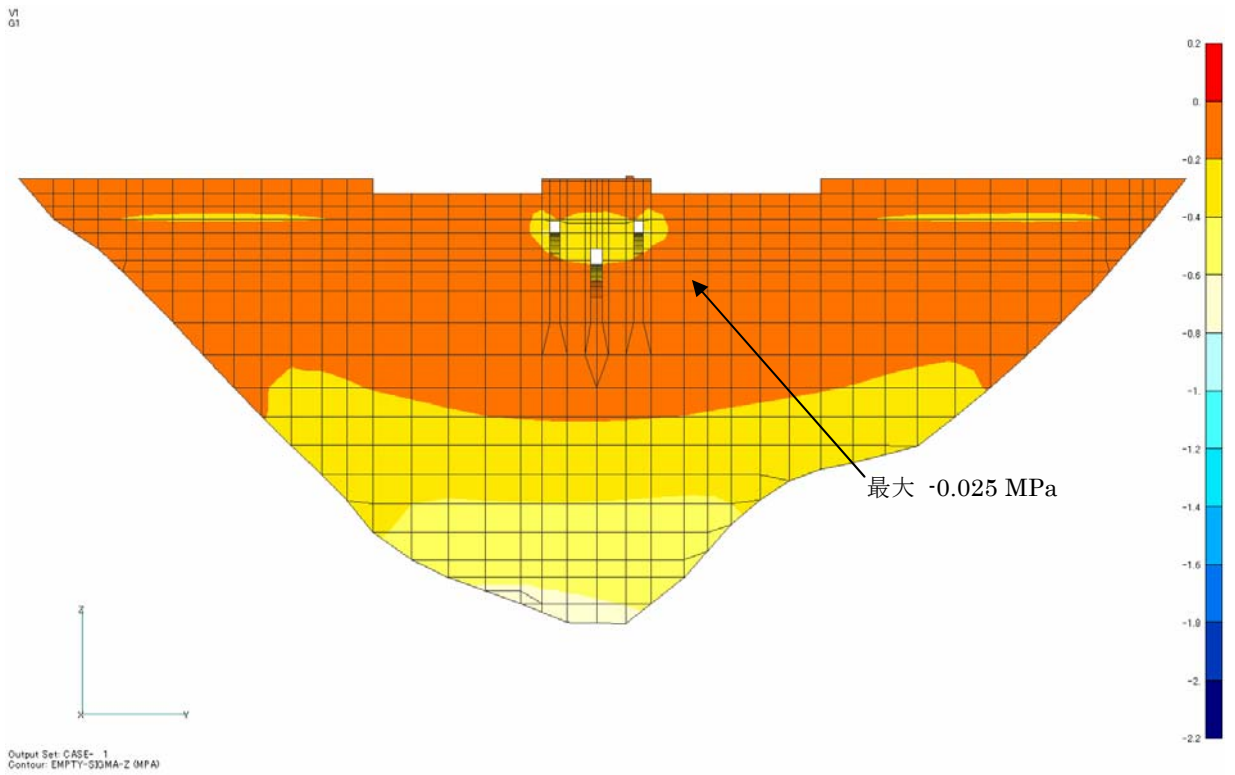


图 6-4 (c) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)
(下流面)

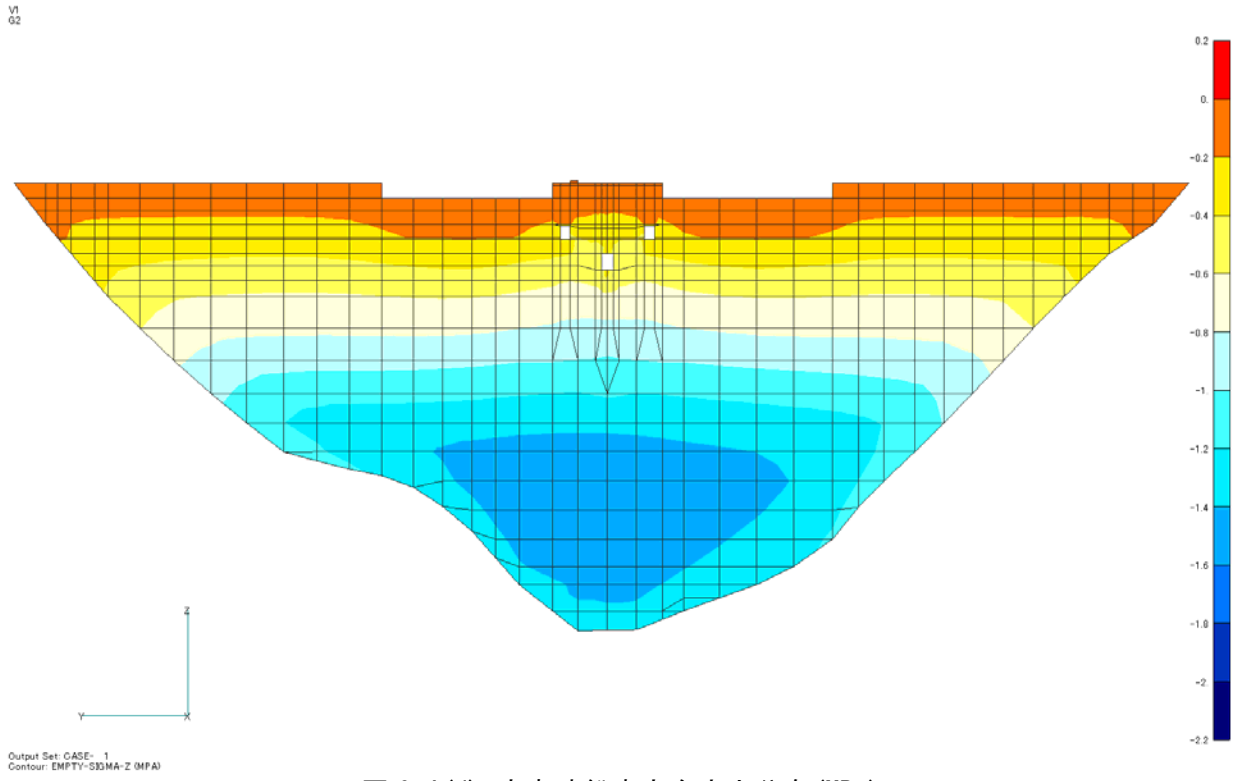


图 6-4 (d) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)
(縦断面)

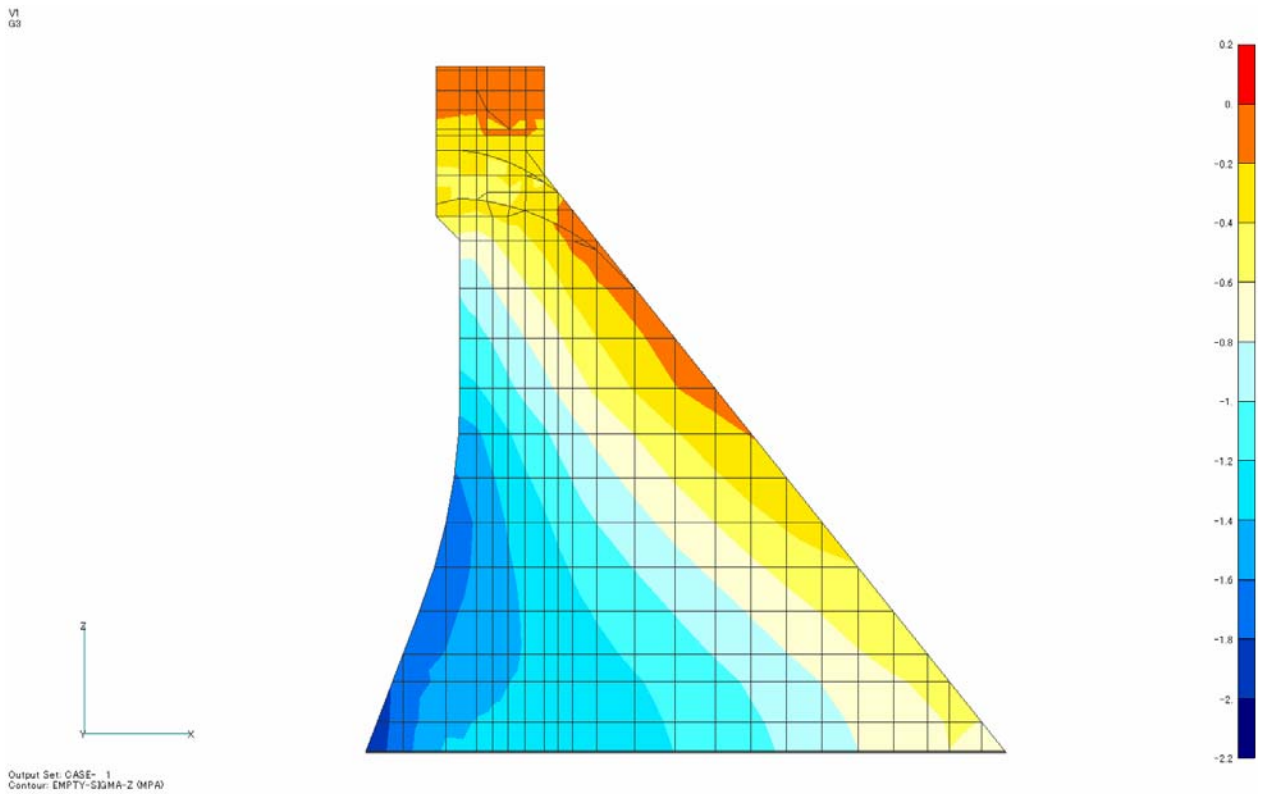


图 6-4 (e) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)
(横断面)

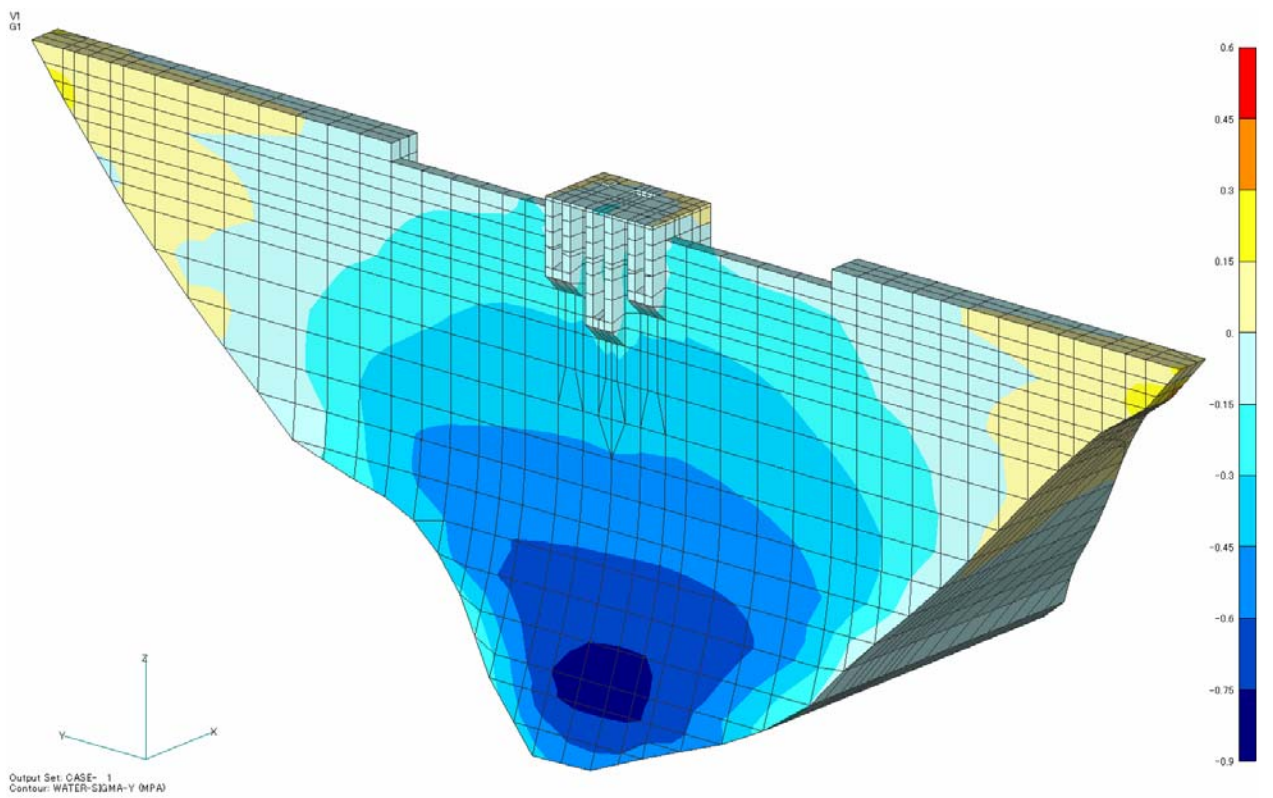


図 6-5(a) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(鳥瞰図)

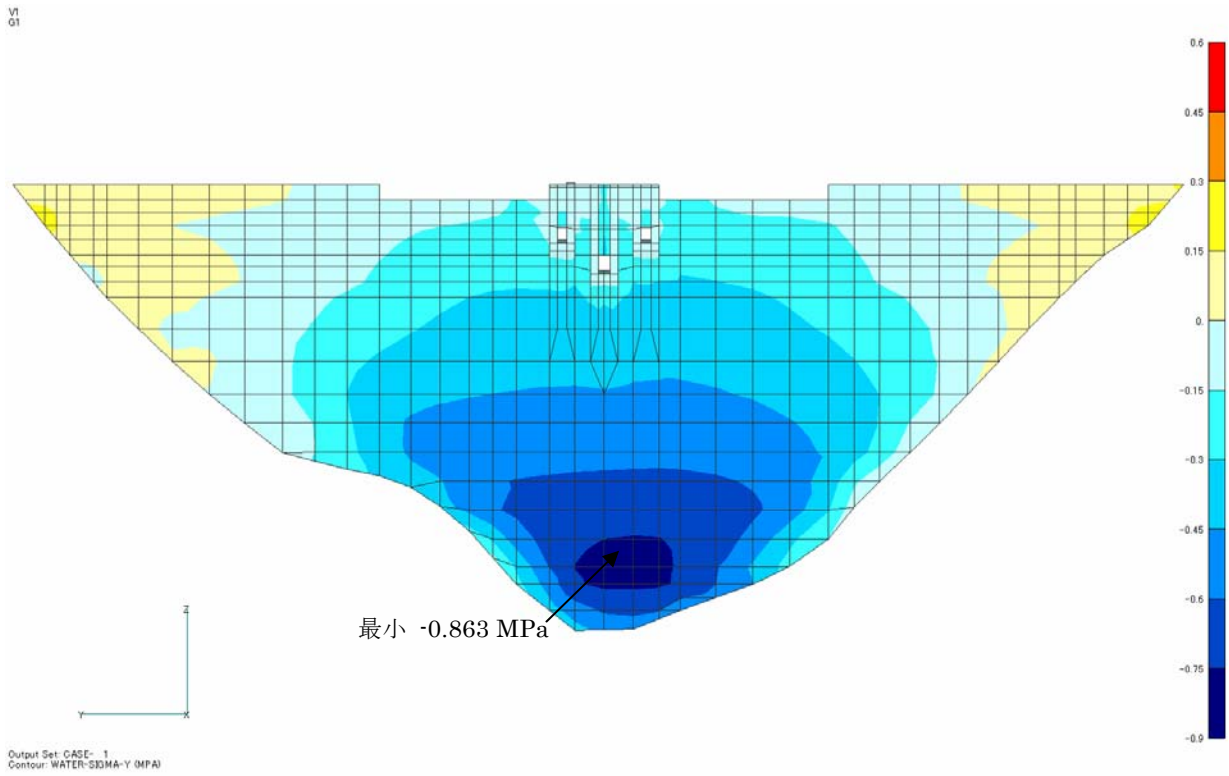


図 6-5 (b) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(上流面)

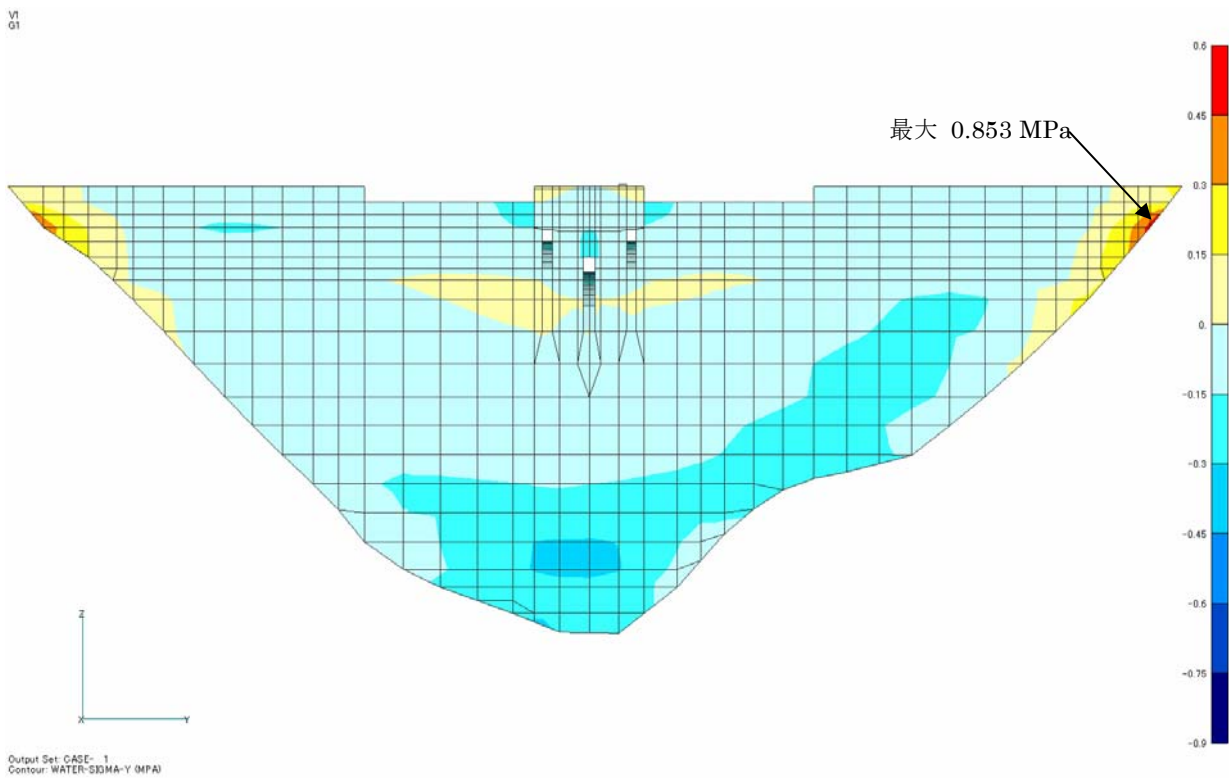


図 6-5 (c) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(下流面)

V1
02

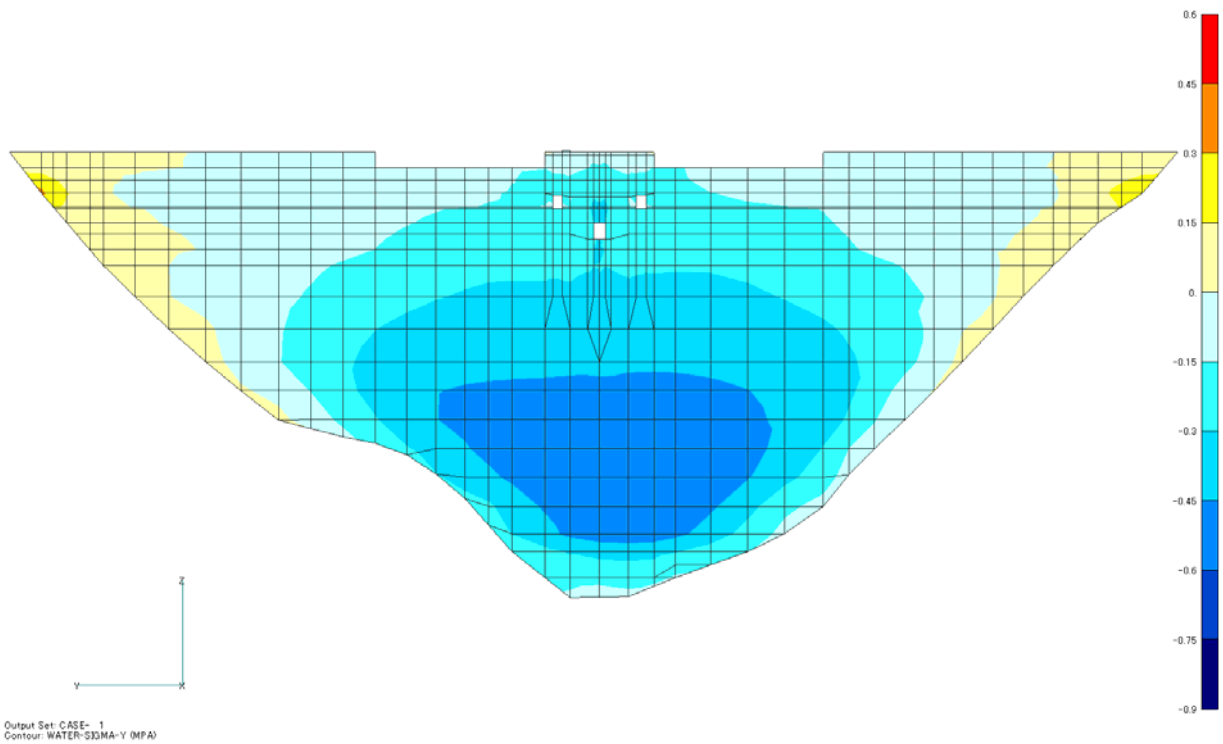


図 6-5 (d) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(縦断面)

V1
03

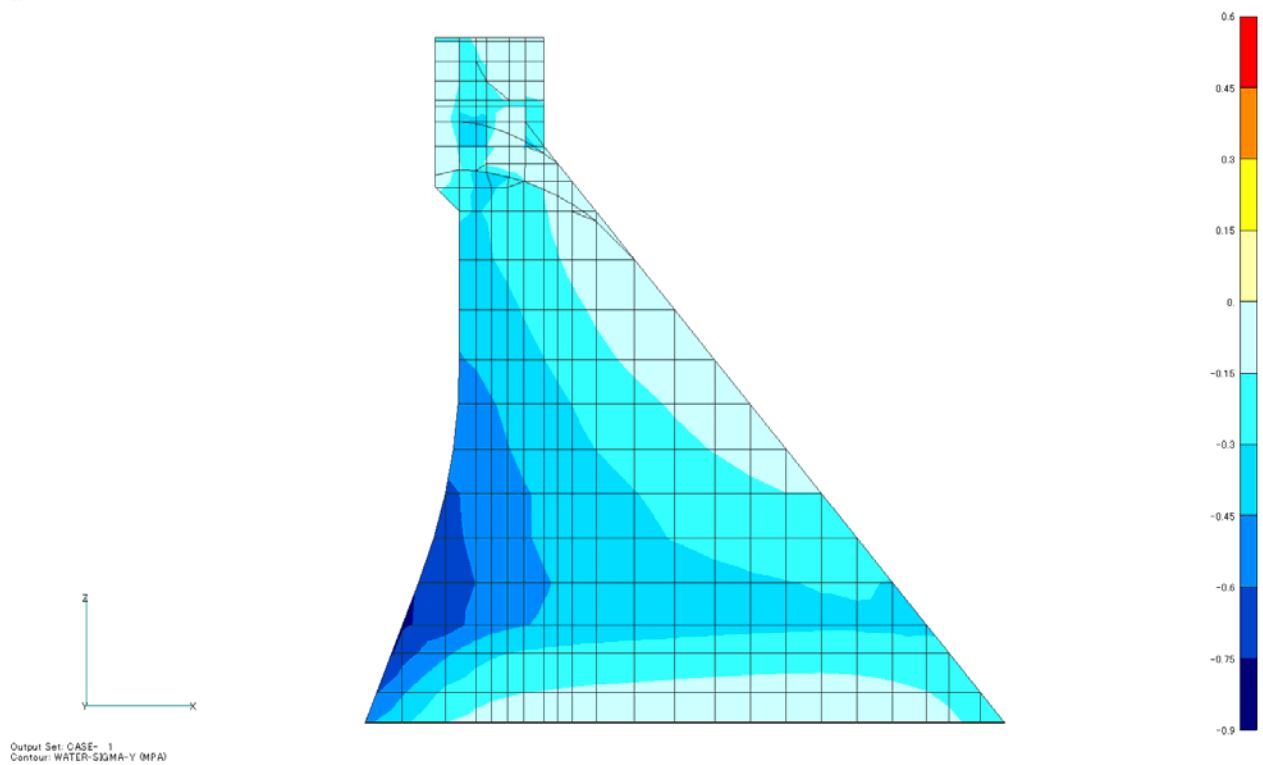


図 6-5 (e) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)
(横断面)

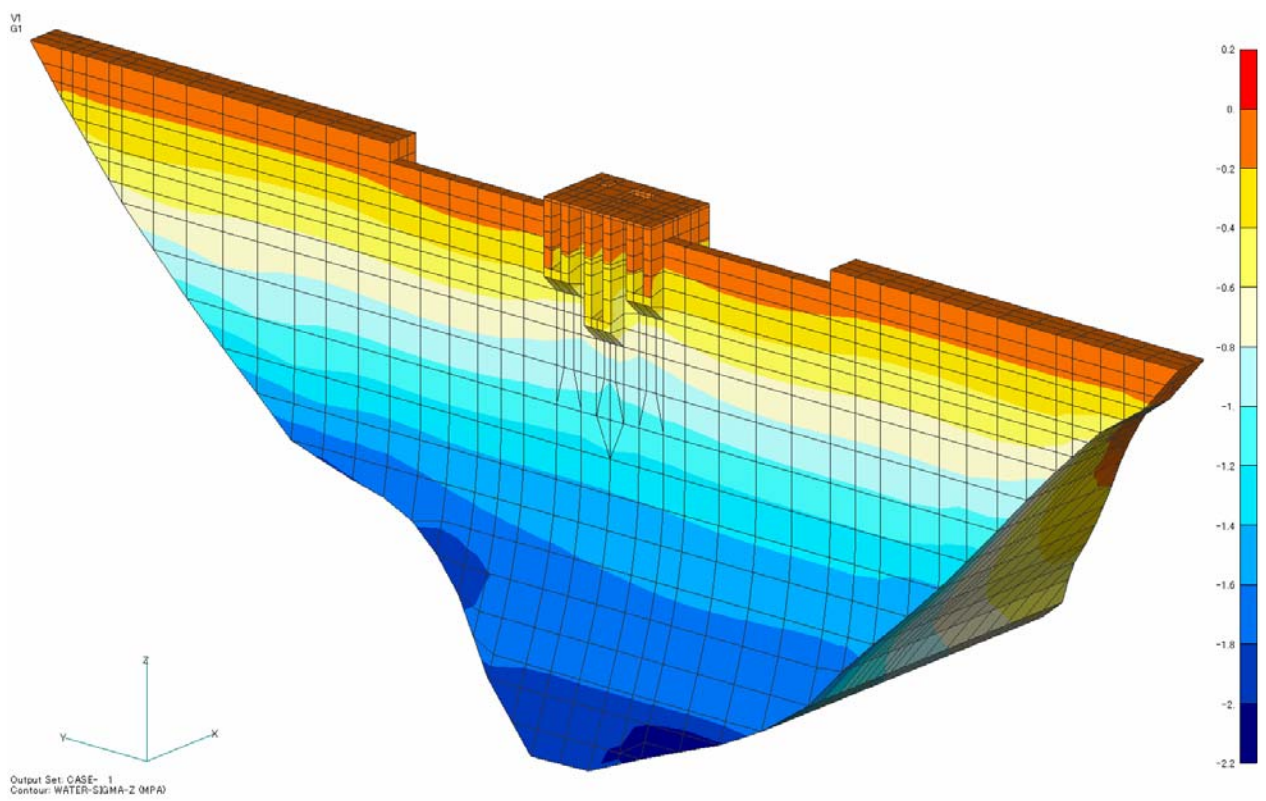


图 6-6 (a) 潜水時鉛直方向応力分布 (MPa)
(鳥瞰図)

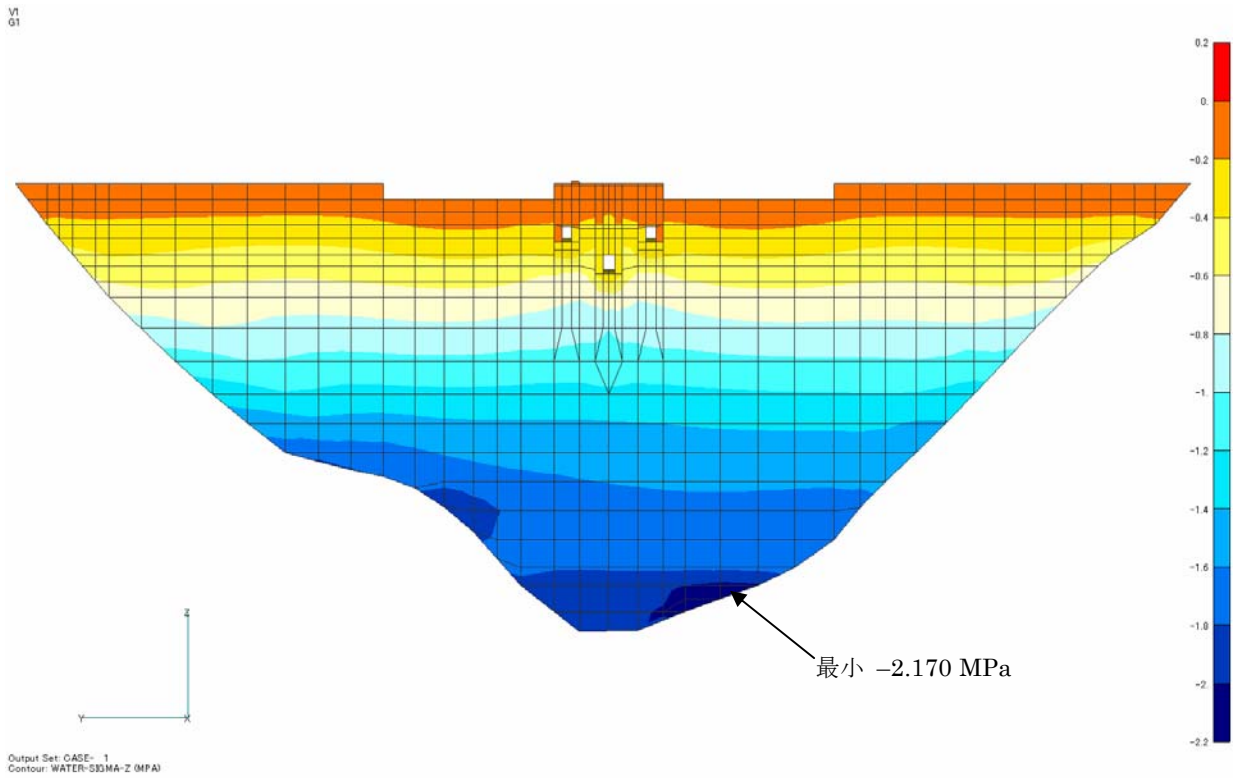


图 6-6 (b) 湛水時鉛直方向応力分布 (MPa)
(上流面)

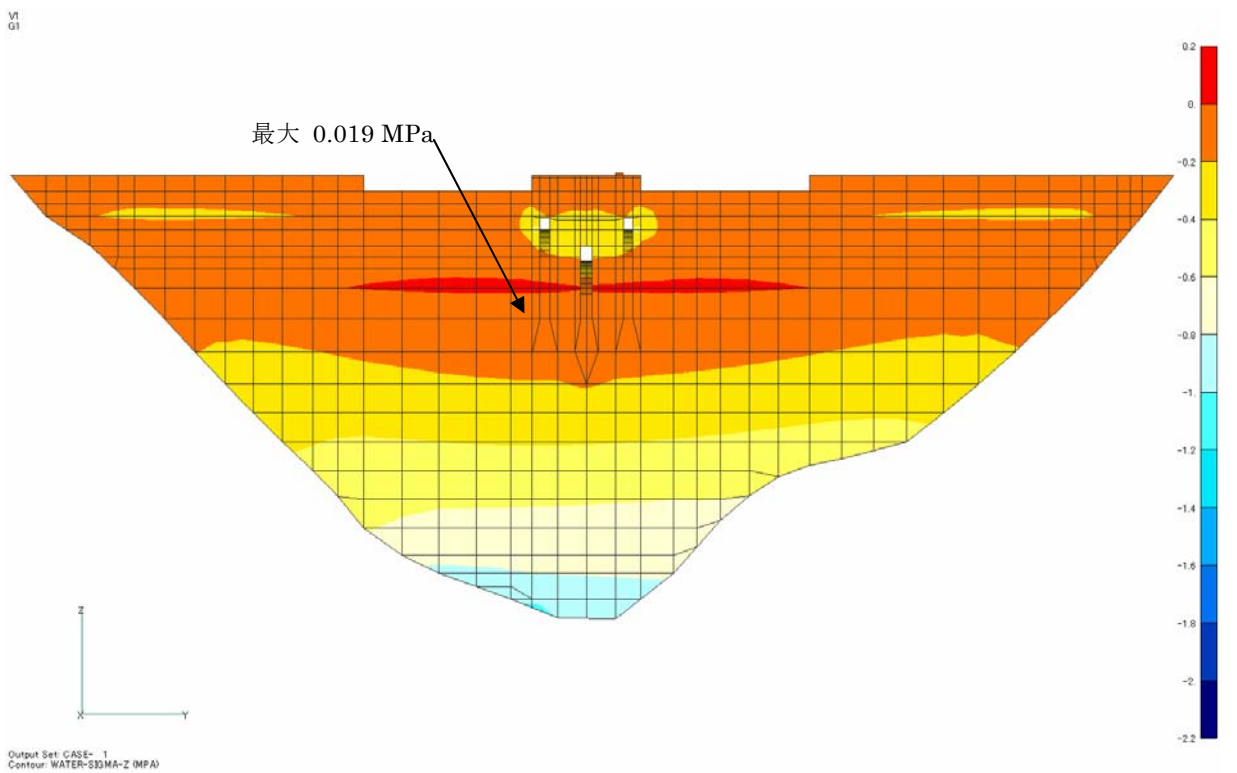


图 6-6 (c) 湛水時鉛直方向応力分布 (MPa)
(下流面)

V1
02

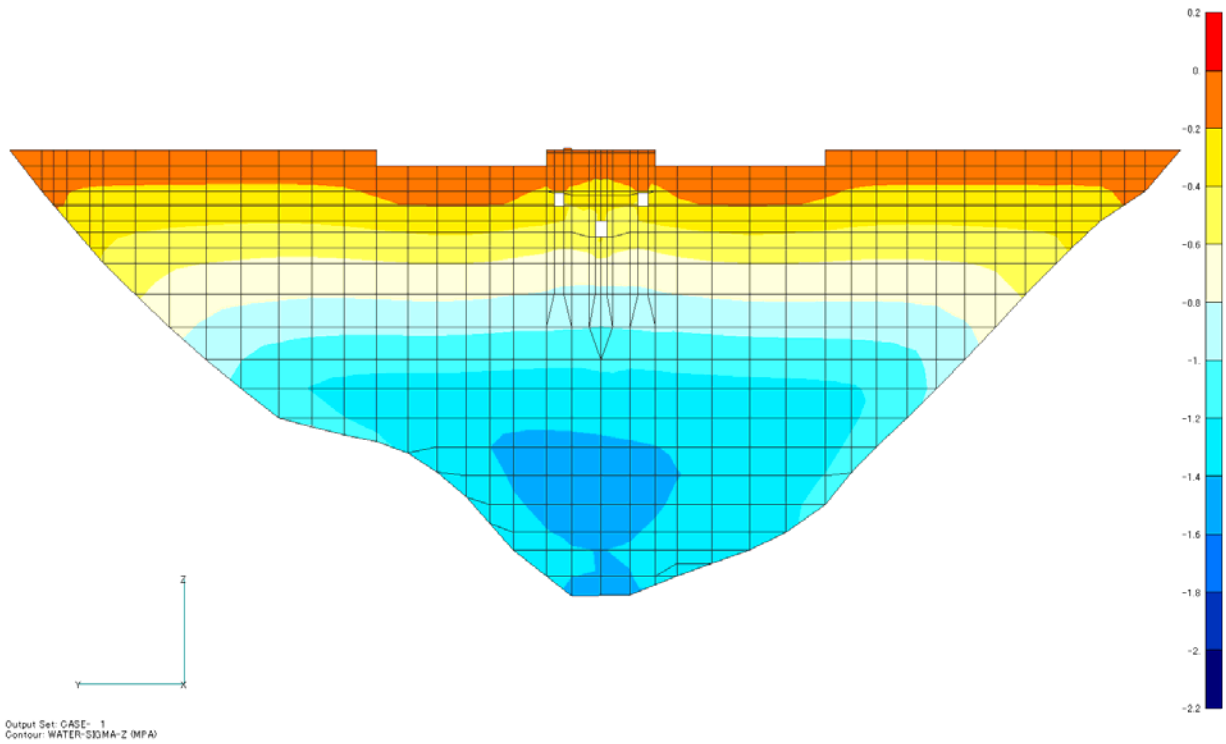


图 6-6 (d) 潜水時鉛直方向応力分布 (MPa)
(縦断面)

V1
03

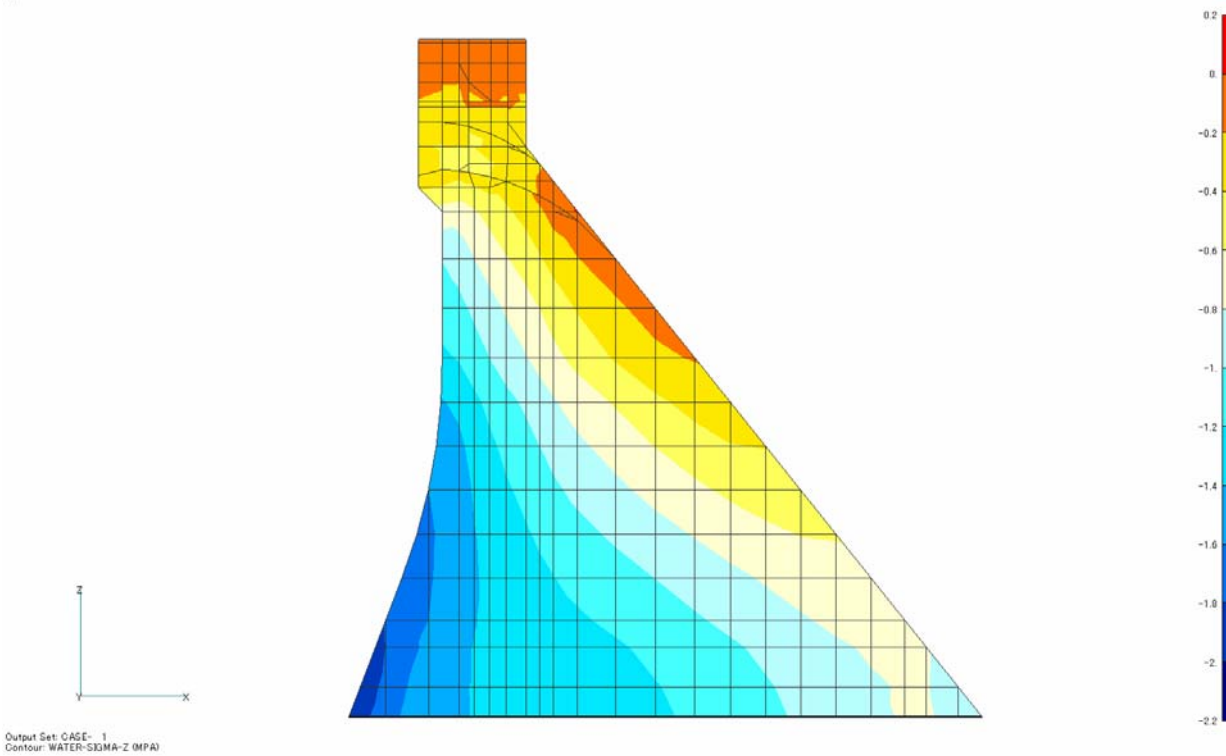


图 6-6 (e) 潜水時鉛直方向応力分布 (MPa)
(横断面)

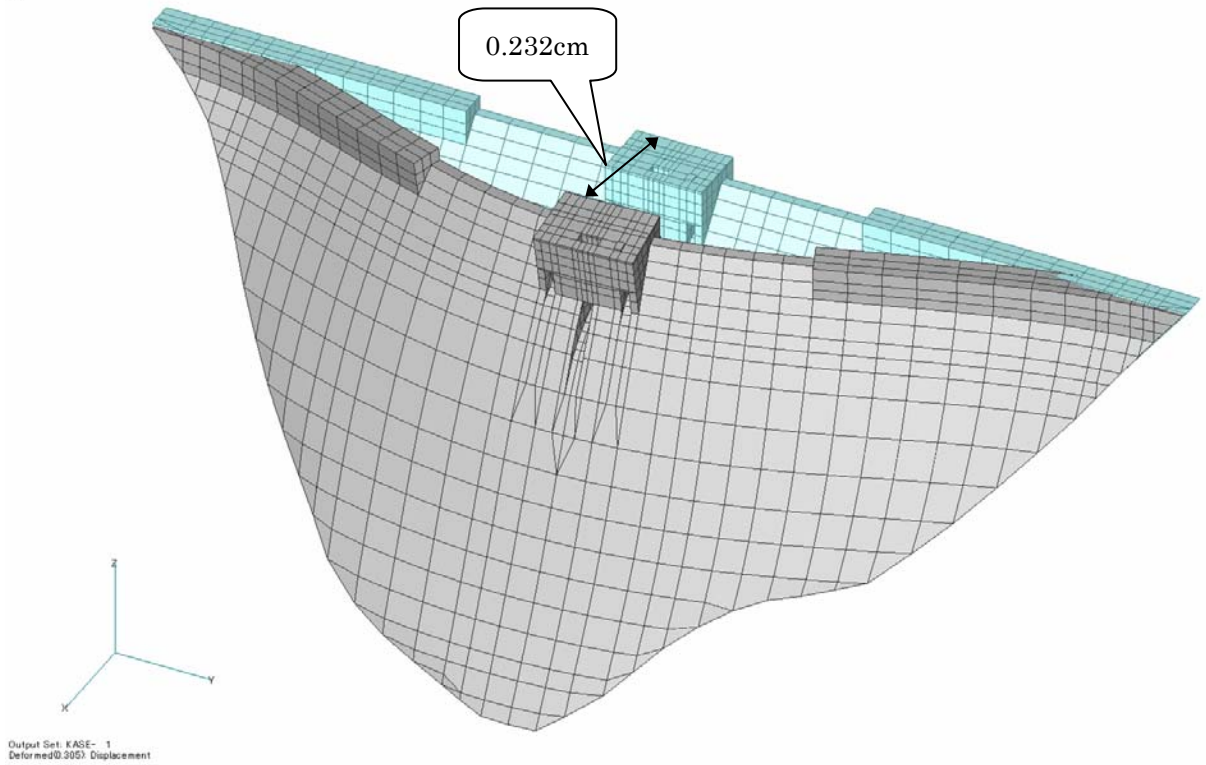


图 6-7(a) 湛水時變形圖
(下流側鳥瞰圖)

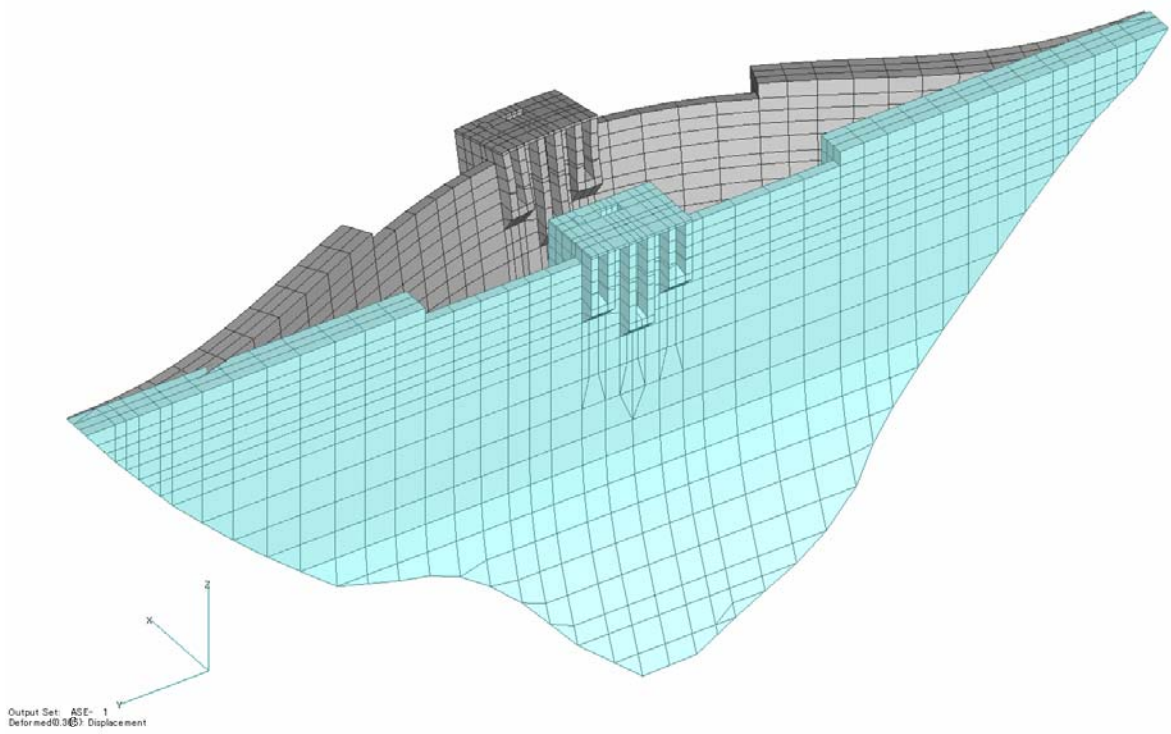
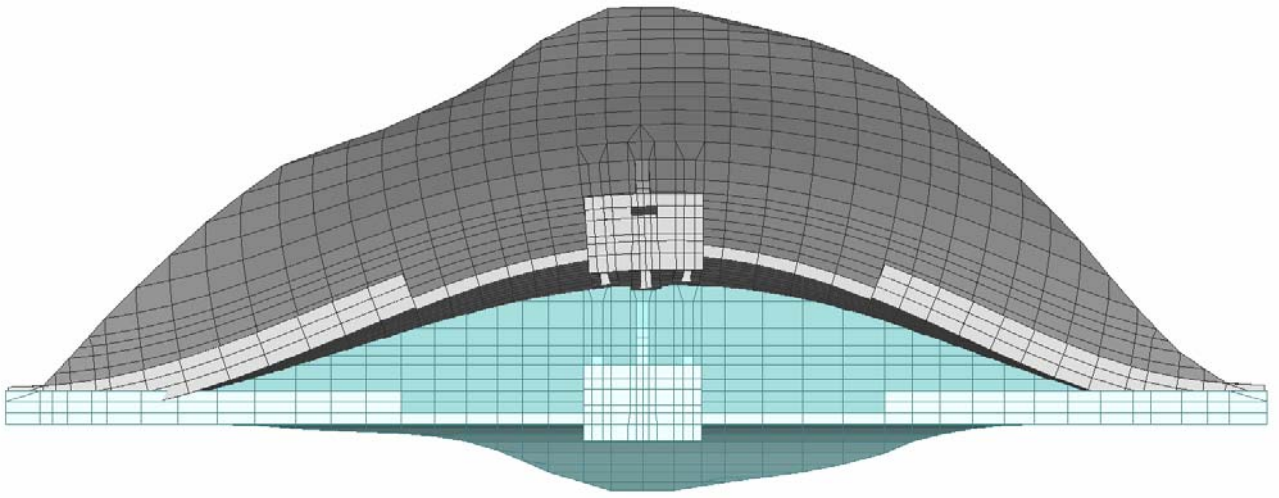


图 6-7(b) 湛水時變形圖
(上流側鳥瞰圖)



Output Set: ASE_1
Deformed(SDS): Displacement

図 6-7(c) 湛水時変形図
(上方から)

6.2 固有値解析

札内川ダム の 振動特性を調べるために、同定された物性を用いて、固有値解析を実施した。

6.2.1 解析条件

表 6-3 には固有値解析に用いた物性値を示す。ダム堤体の固有値に着目しているため、基礎岩盤のモードの影響を除くために、基礎岩盤の密度を 0 とした。

表 6-3 固有値解析に用いた物性値

	弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比
ダム堤体	33000.00	2.44	0.20
基礎岩盤	28520.00	0.00	0.24

6.2.2 固有値解析結果

表 6-4 には固有値解析により得られたダム堤体の 1 次～10 次の固有振動数および各モードの特徴を示す。表 6-5 と表 6-6 には、それぞれ各モードの刺激係数および有効質量をまとめる。各次のモード図は図 6-8～図 6-17 に示す。

表 6-4 札内川ダム固有振動数と固有振動モード一覧

モード次数	振動数 (Hz)	モード特徴
1	5.1395	上下流方向 1 次 対称
2	7.0468	上下流方向 2 次 逆対称
3	8.4549	上下流方向 3 次 対称
4	9.1134	ダム軸方向 1 次
5	9.6109	洪水吐ゲート操作室のダム軸周りの回転
6	10.2309	鉛直方向 1 次？
7	10.6326	上下流方向 4 次 逆対称
8	12.5763	鉛直方向 2 次 逆対称
9	12.6128	上下流方向 5 次 対称
10	13.4724	ダム軸方向と上下流方向の混合モード

固有値解析により、札内川ダムの固有振動特性を明らかにした。堤体の幾何的な非対称性の影響を受け、固有振動モード、特に高次モードの形は不規則になっているが、基本的には最大横断面（洪水吐操作室位置）を対称軸として、対称モード、または逆対称モードが表れている。

洪水吐操作室および付近の構造がダム軸周りの回転モードをしており、札内川ダムの一つの特徴であると考えられる。また、ダム全体のいずれのモードに伴って、オリフィスおよびゲート操作室の局所的なモードが現れており、場合によって、その付近のモード形の変化が大きく見受けられる。このような特徴から、オリフィスおよびゲート操作室が地震時激しく挙動することが推測できる。

表 6-5 固有振動モードの振動数と刺激係数

モード 次数	振動数 (Hz)	刺激係数					
		上下流方向	ダム軸方向	鉛直方向	X 軸回転	Y 軸回転	Z 軸回転
1	5.1395	3.440	0.014	0.832	0.008	1.939	-0.055
2	7.0468	0.040	0.129	0.016	0.532	0.172	-2.260
3	8.4549	1.550	-0.047	0.432	-0.090	1.023	0.374
4	9.1134	-0.038	2.159	0.126	-0.809	0.021	-0.652
5	9.6109	2.818	0.228	-2.235	0.019	-1.993	0.157
6	10.2309	0.197	-0.253	3.947	-0.084	-0.371	0.138
7	10.6326	0.091	-0.412	0.232	-0.346	-0.171	0.985
8	12.5763	-0.285	-0.755	-0.256	-2.173	0.199	-1.227
9	12.6128	-1.967	0.631	-0.783	1.536	0.648	1.312
10	13.4724	-0.258	0.454	-0.002	2.493	0.686	-2.512

表 6-6 固有振動モード有効質量

モード 次数	振動数 (Hz)	有効質量 (ton)					
		上下流方向	ダム軸方向	鉛直方向	X 軸回転	Y 軸回転	Z 軸回転
1	5.1395	859,890	13	50,303	6	351,920	279
2	7.0468	56	582	9	20,987	2,182	378,260
3	8.4549	65,772	60	5,099	385	50,296	6,723
4	9.1134	468	1,475,200	5,014	123,120	85	79,788
5	9.6109	435,470	2,851	273,810	17	184,050	1,138
6	10.2309	2,717	4,489	1,090,300	331	6,431	886
7	10.6326	167	3,416	1,082	4,393	1,068	35,589
8	12.5763	8,749	61,223	7,021	751,120	6,286	239,570
9	12.6128	75,795	7,800	12,020	76,339	13,603	55,728
10	13.4724	1,290	3,985	0	212,250	16,077	215,420

注) X 軸 — 上下流方向

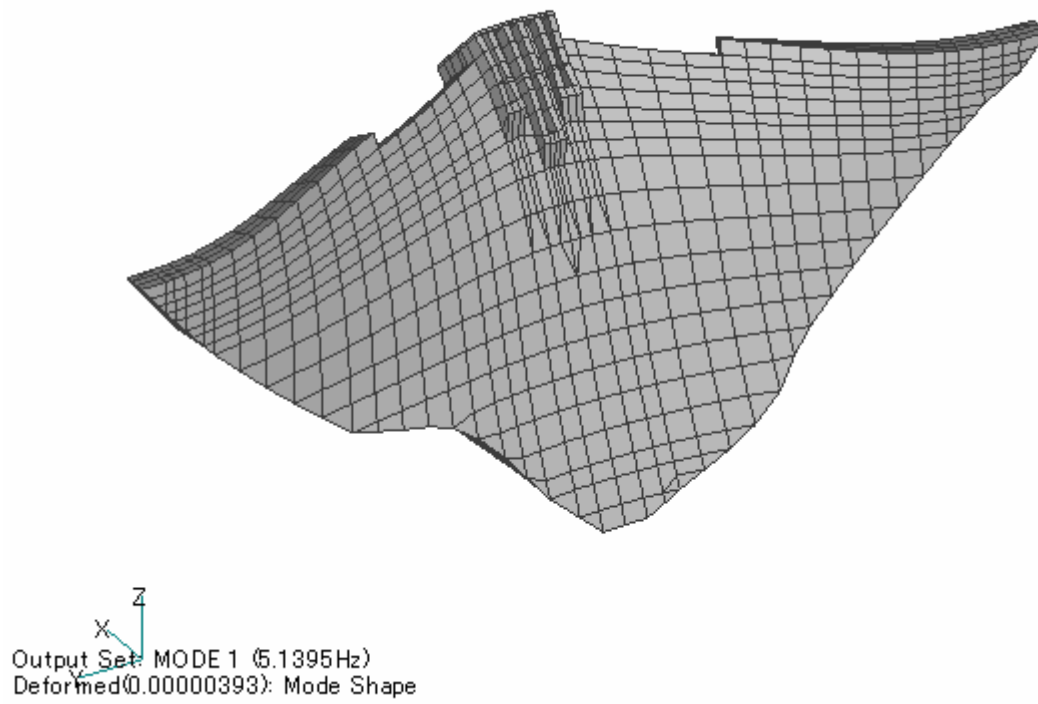
Y 軸 — ダム軸方向

Z 軸 — 鉛直方向

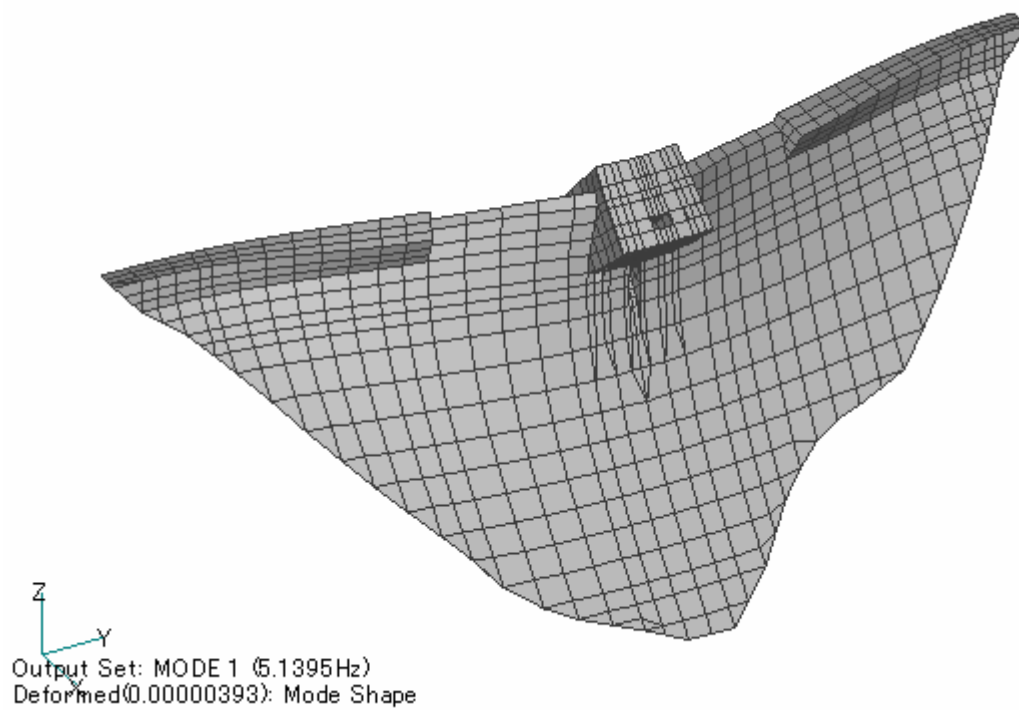
6.3 まとめ

地震時貯水位におけるダム堤体の静的応力解析を行い、地震発生時のダムの初期応力状態を把握することができた。初期状態では、ダムの応力レベルも変形レベルも低いものであり、弾性段階にある。これにより、地震時のダムの応力状態を検討するにあたり、地震発生直前の応力状態を明らかにした。

固有値解析により、札内川ダムの固有振動数および振動モードなどの固有振動特性を調べた。札内川ダムの全体的な振動特性を明らかにした上、洪水吐およびゲート操作室などの局部的なモードも明確になった。ダム堤体の各次モードにおいて、ゲート操作室付近ではモード形の変化が大きく、洪水吐付近は地震時は激しく挙動することが推測できる。

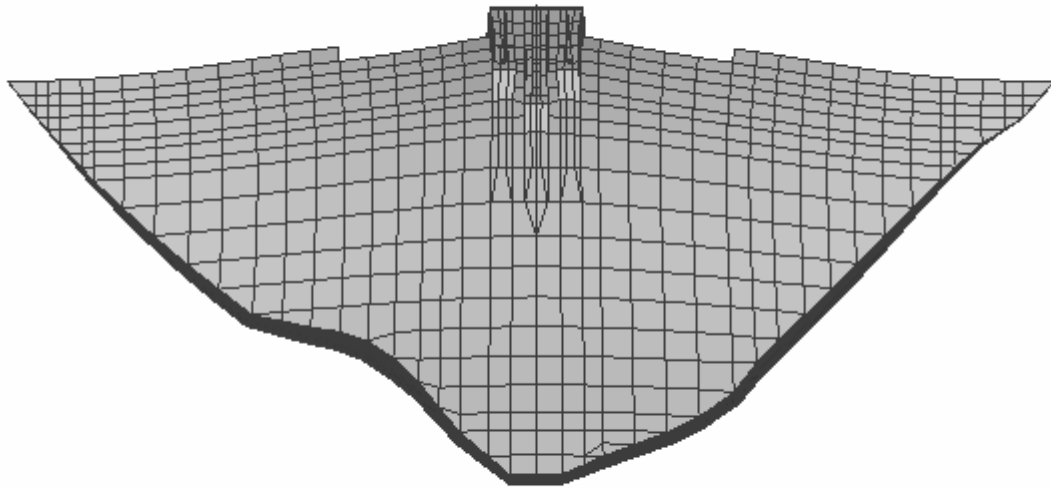


上流側鳥瞰図



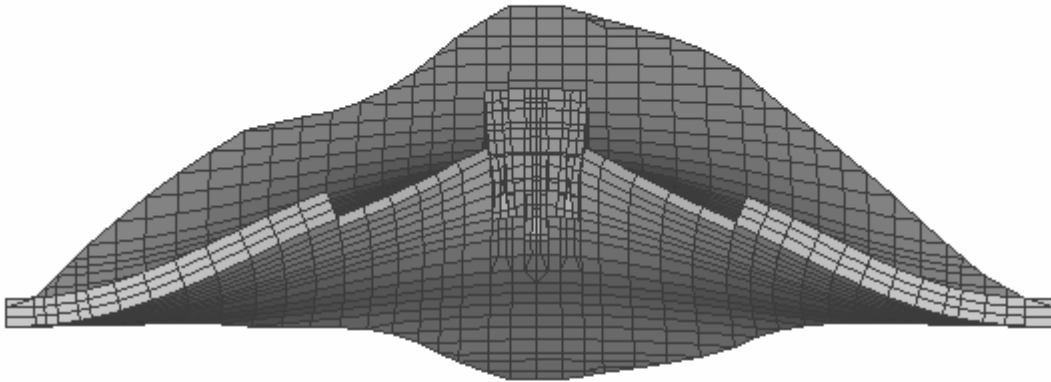
下流側鳥瞰図

図 6-8(a) 札内川ダムの 1 次固有振動モード (5.1395Hz)



Output Set: MODE 1 (5.1395Hz)
 Deformed(0.00000393): Mode Shape

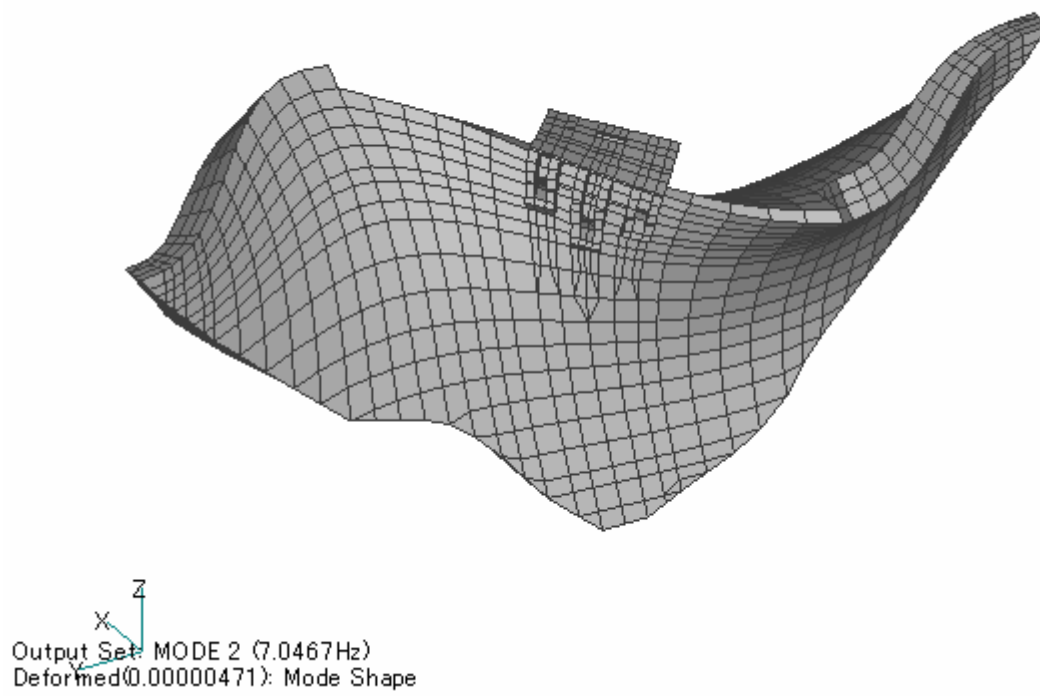
上流側正面より



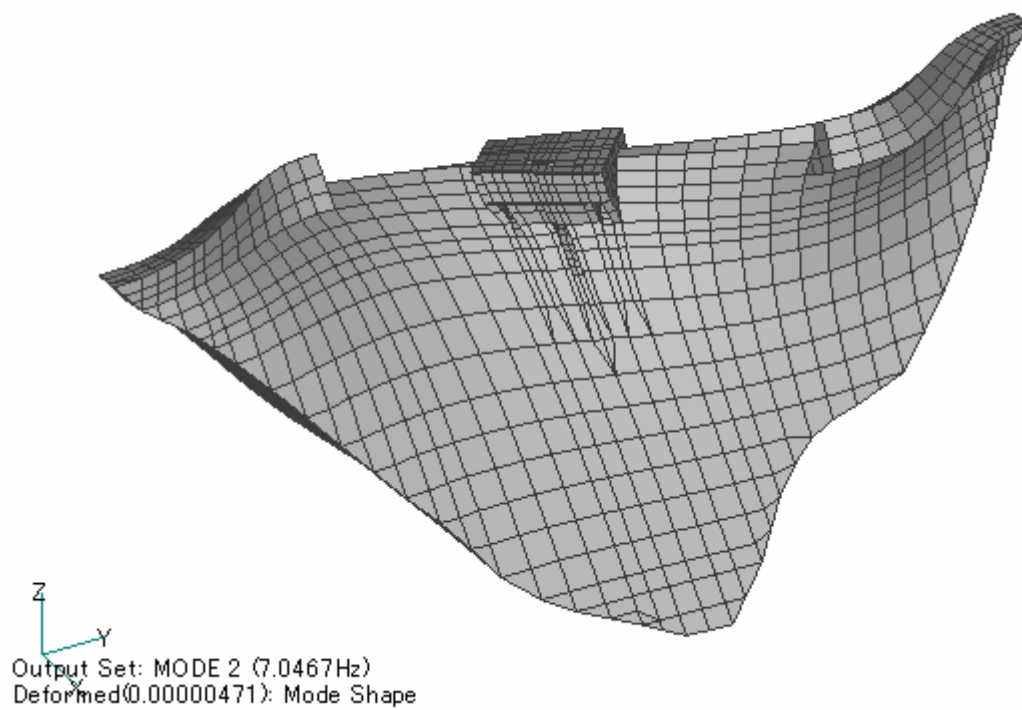
Output Set: MODE 1 (5.1395Hz)
 Deformed(0.00000393): Mode Shape

上方より

図 6-8 (b) 札内川ダムの 1 次固有振動モード (5.1395Hz)

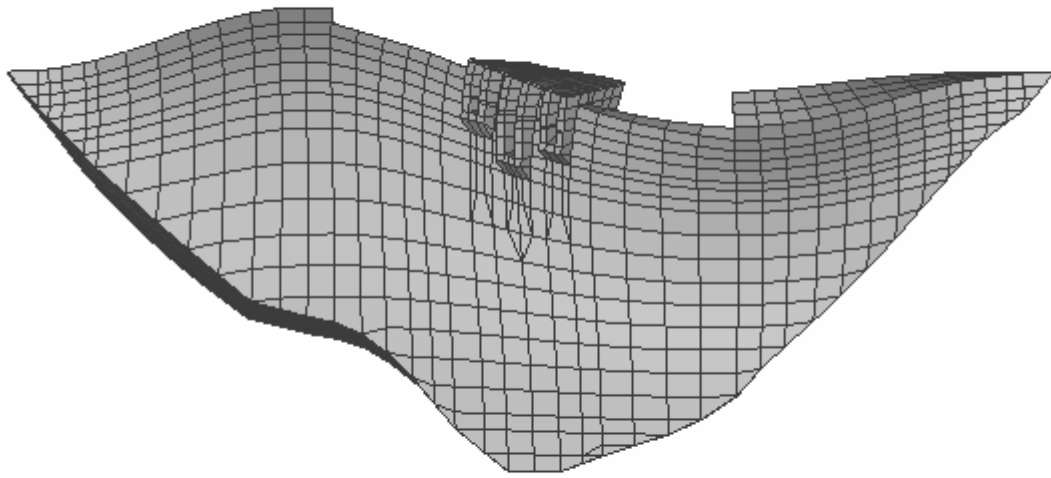


上流側鳥瞰図



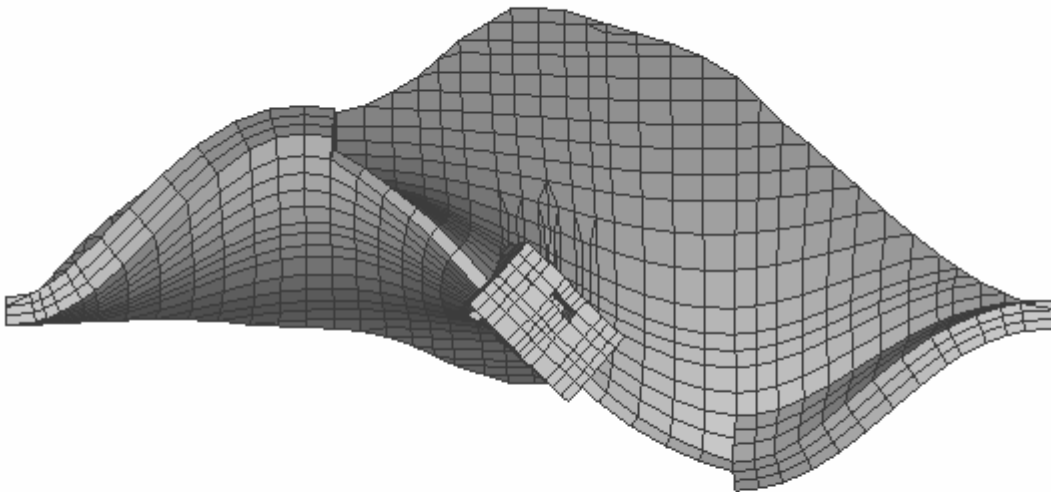
下流側鳥瞰図

図 6-9 (a) 札内川ダムの 2 次固有振動モード (7.0467Hz)



Output Set: MODE 2 (7.0467Hz)
 Deformed(0.00000471): Mode Shape

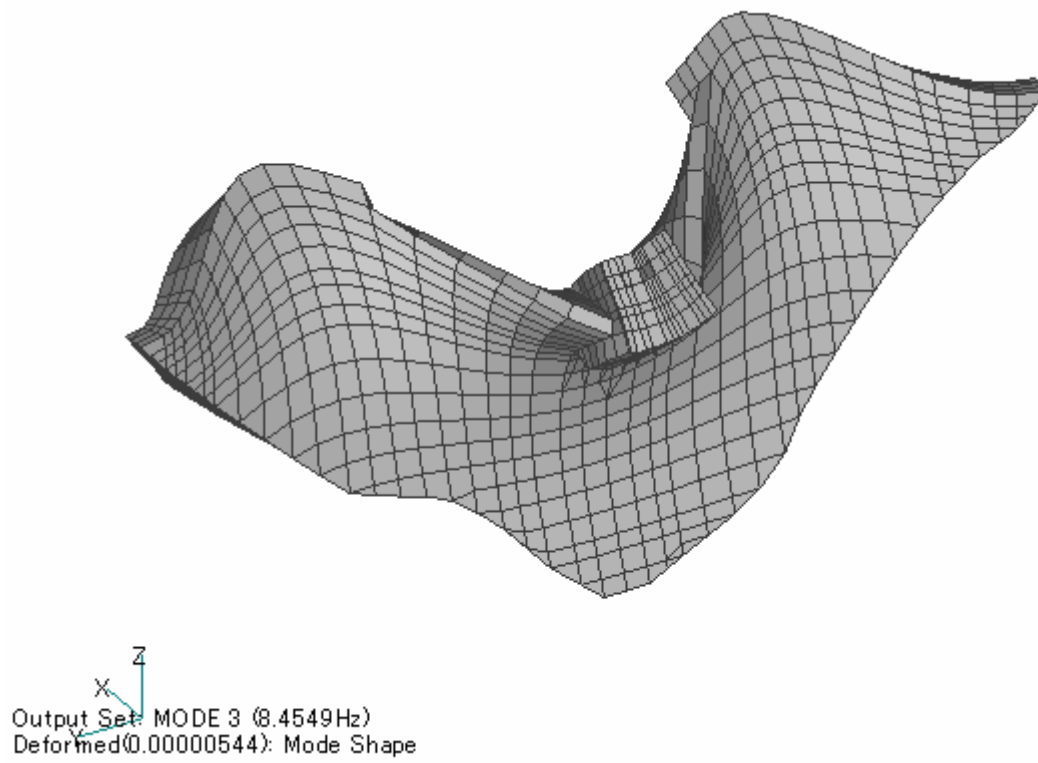
上流側正面より



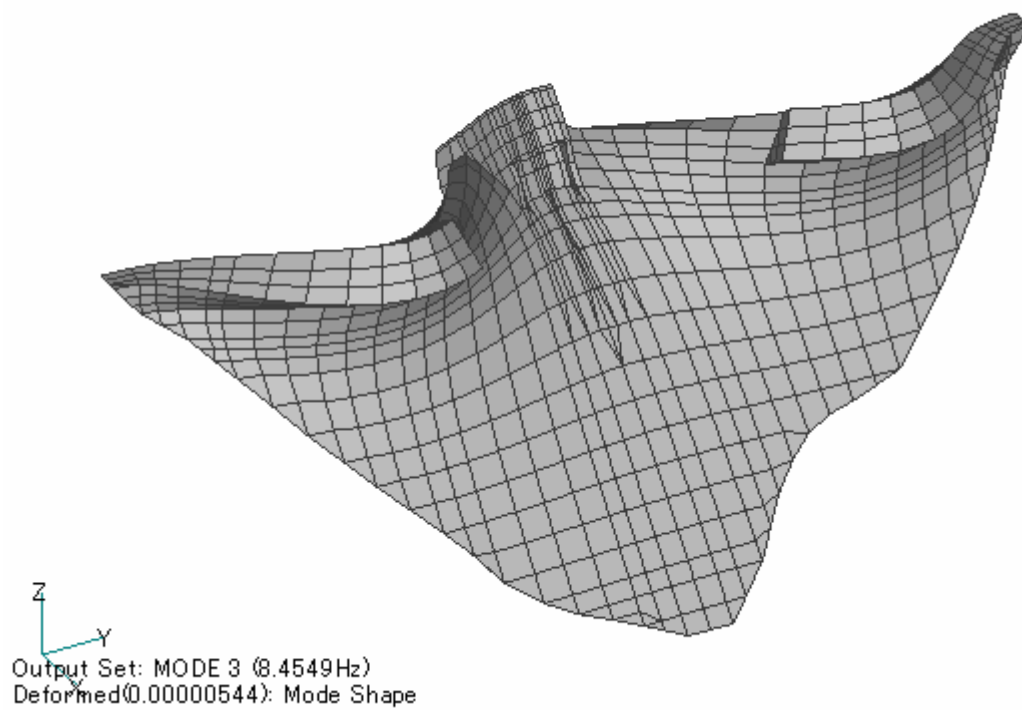
Output Set: MODE 2 (7.0467Hz)
 Deformed(0.00000471): Mode Shape

上方より

図 6-9 (b) 札内川ダムの 2 次固有振動モード (7.0467Hz)

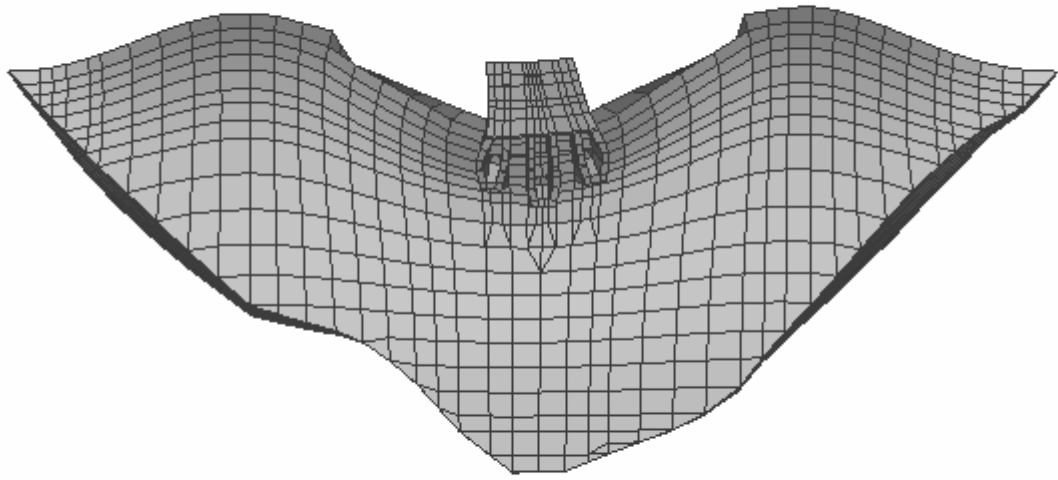



上流側鳥瞰図



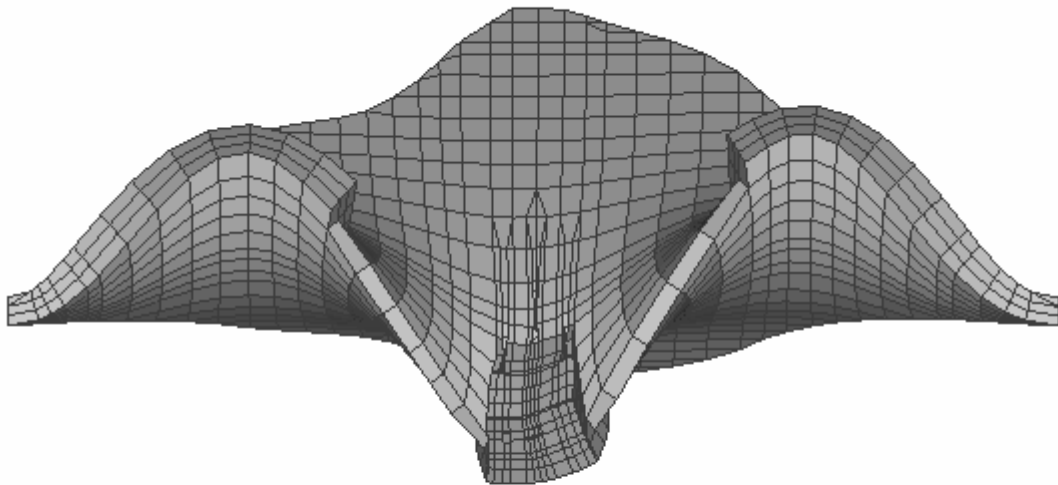
下流側鳥瞰図


図 6-10(a) 札内川ダムの3次固有振動モード(8.4549Hz)



 Z
 Output Set: MODE 3 (8.4549Hz)
 Deformed(0.00000544): Mode Shape

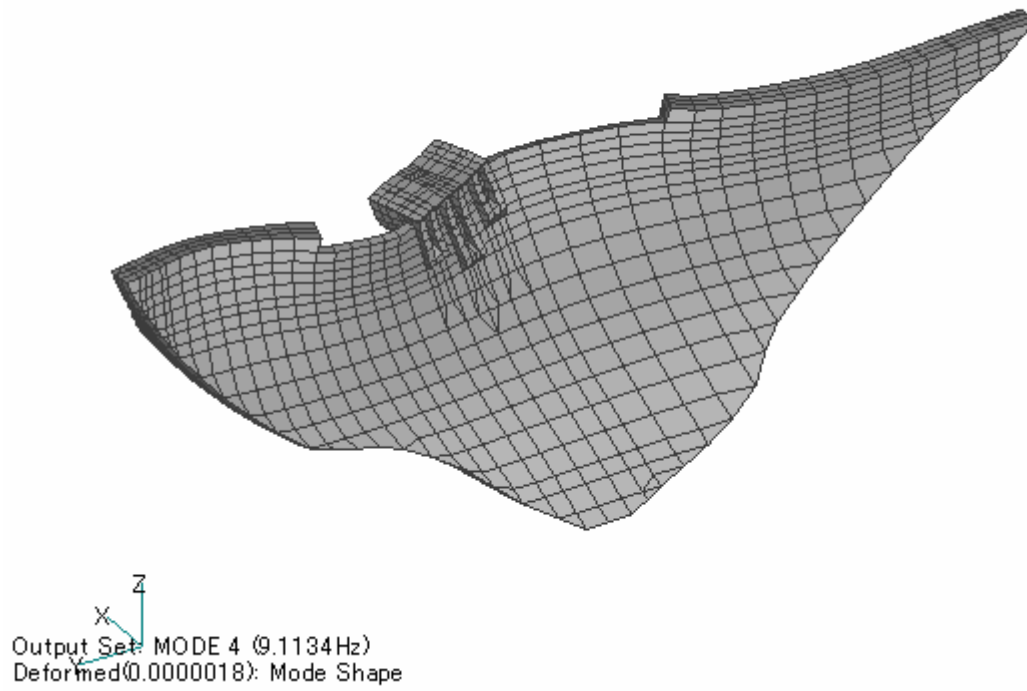
上流側正面より



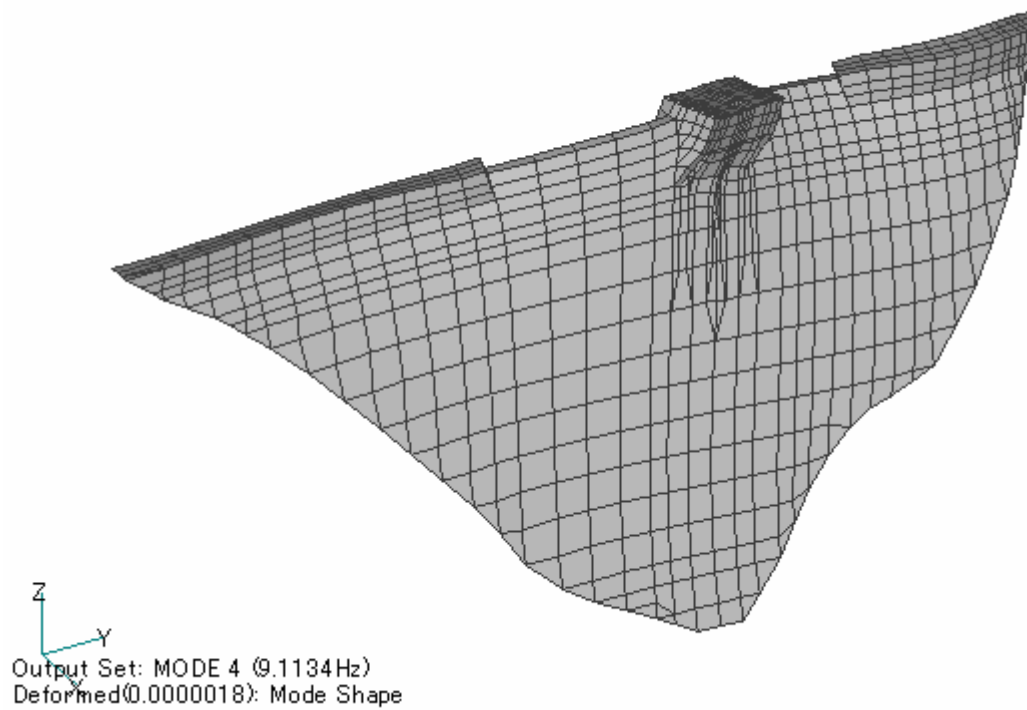
 X
 Output Set: MODE 3 (8.4549Hz)
 Deformed(0.00000544): Mode Shape

上方より

図 6-10(b) 札内川ダムの3次固有振動モード (8.4549Hz)

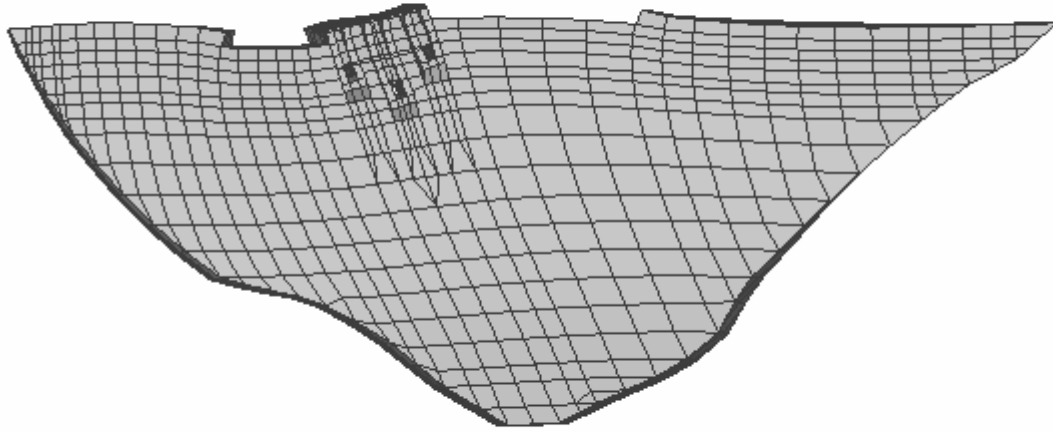


上流側鳥瞰図



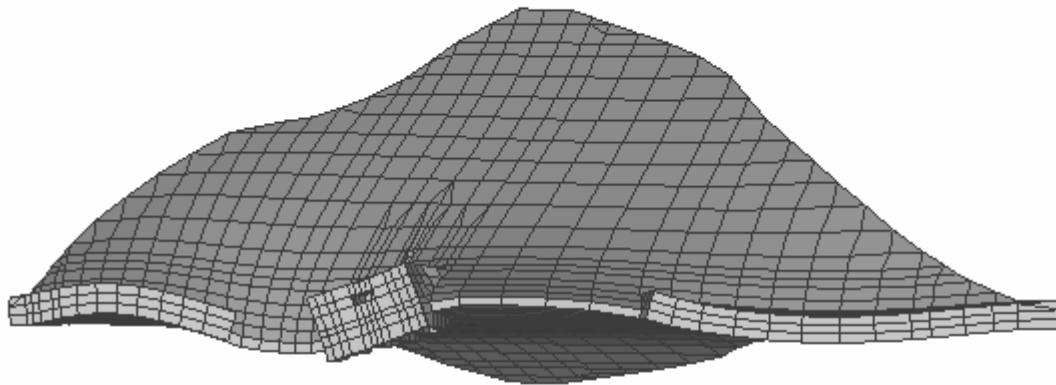
下流側鳥瞰図

図 6-11 (a) 札内川ダムの 4 次固有振動モード (9.1134Hz)



Output Set: MODE 4 (9.1134Hz)
Deformed(0.0000018): Mode Shape

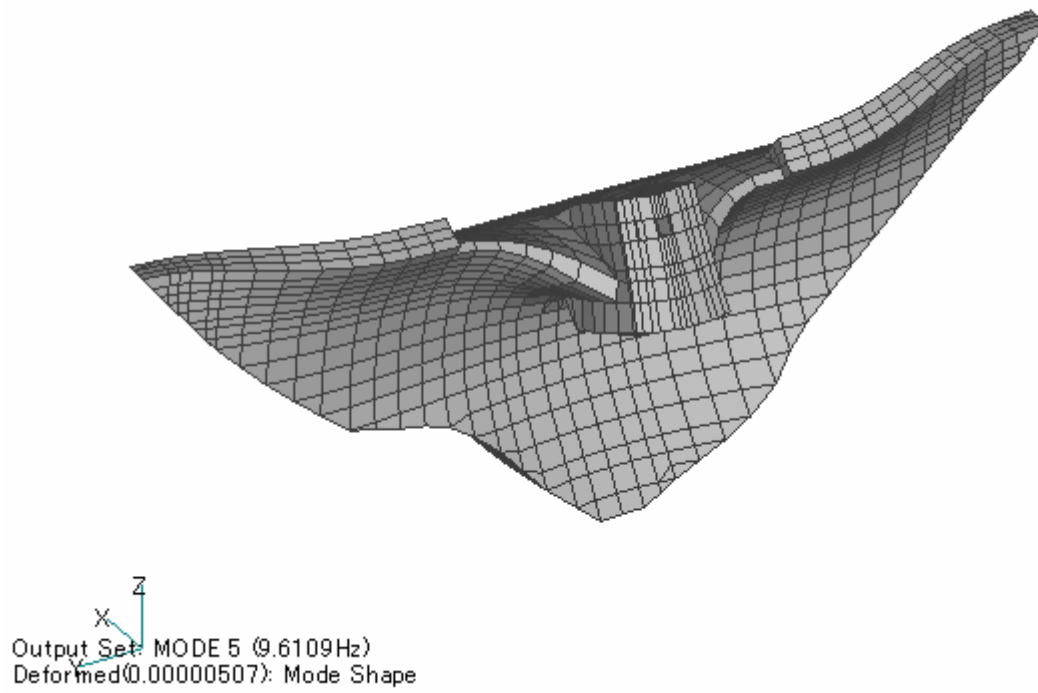
上流側正面より



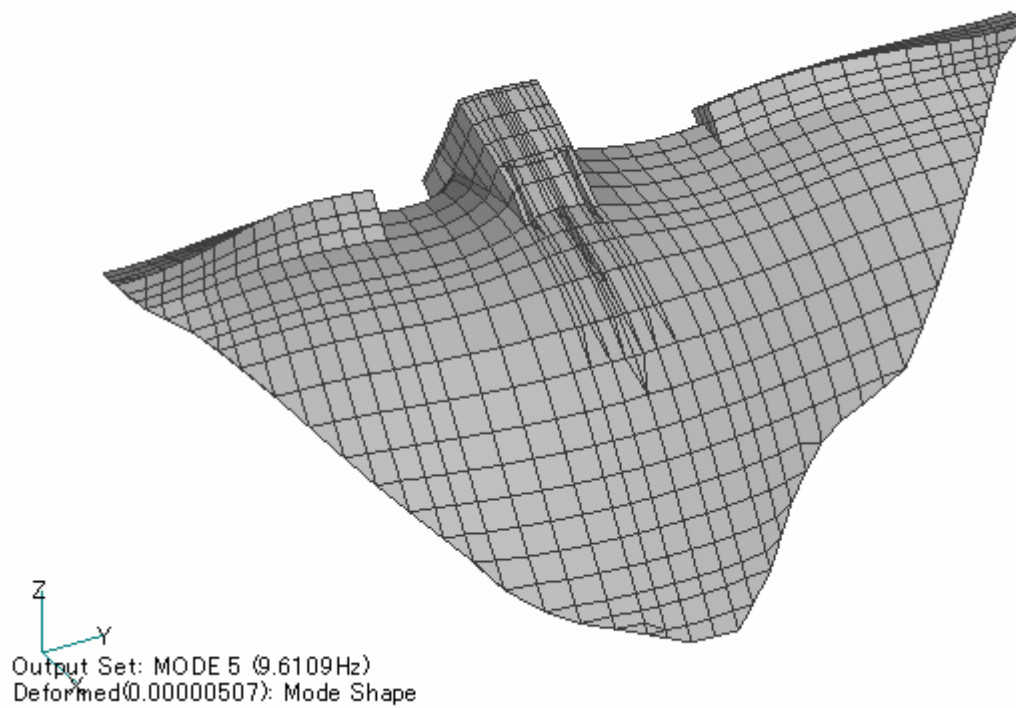
Output Set: MODE 4 (9.1134Hz)
Deformed(0.0000018): Mode Shape

上方より

図 6-11 (b) 札内川ダムの 4 次固有振動モード (9.1134Hz)

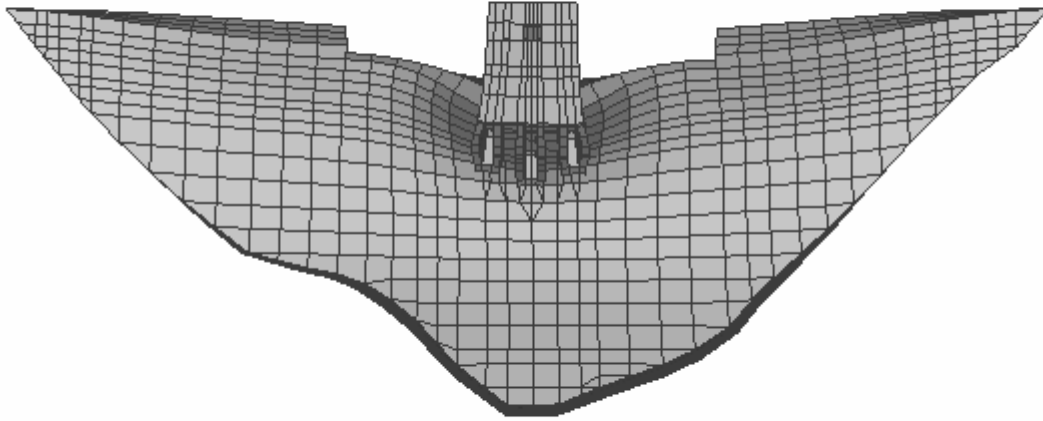



上流側鳥瞰図



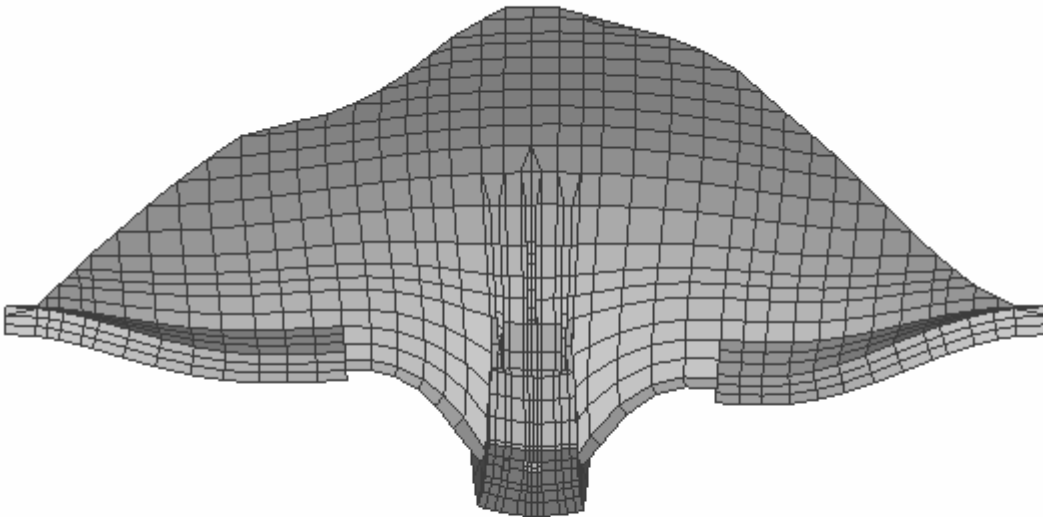
下流側鳥瞰図


図 6-12(a) 札内川ダムの 5 次固有振動モード (9.6109Hz)



 Z
 Output Set: MODE 5 (9.6109Hz)
 Deformed(0.00000507): Mode Shape

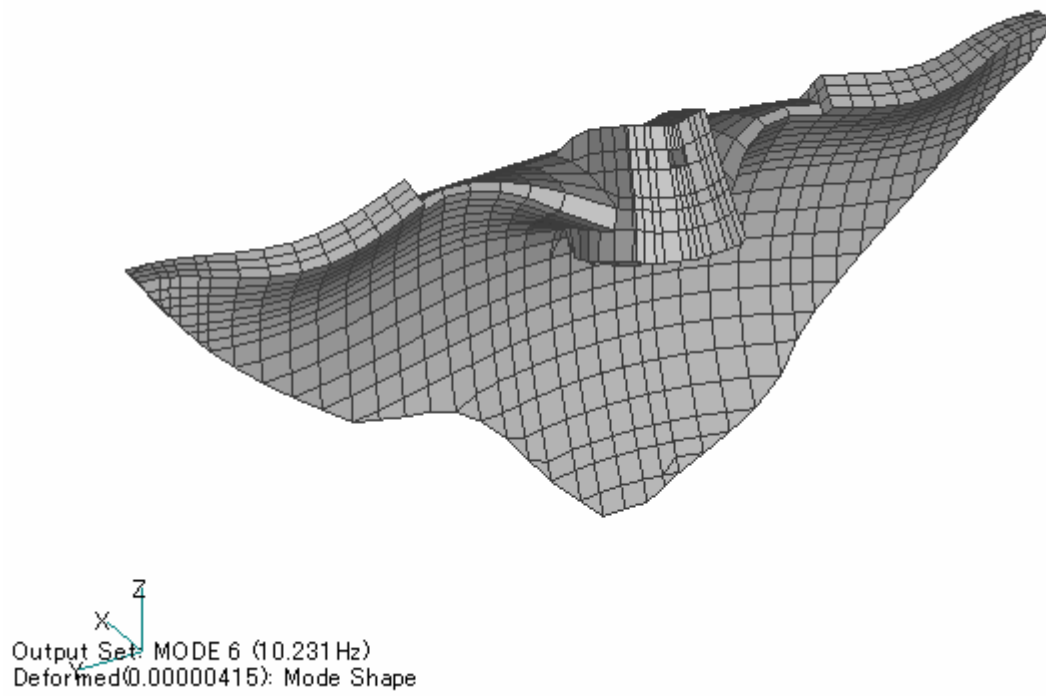
上流側正面より



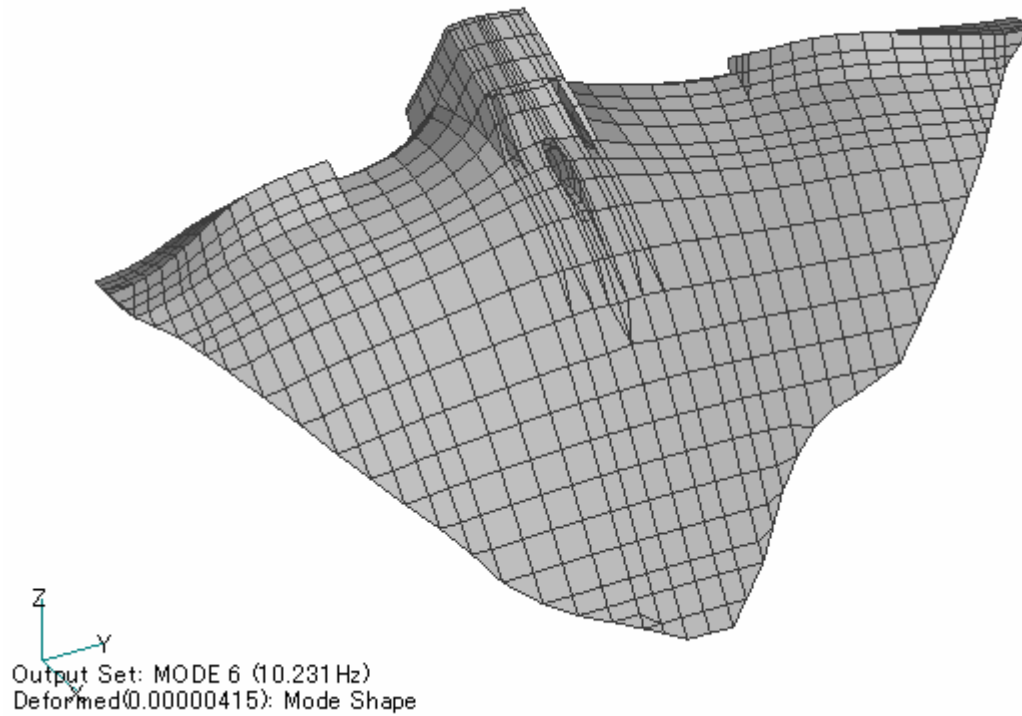
 X
 Output Set: MODE 5 (9.6109Hz)
 Deformed(0.00000507): Mode Shape

上方より

図 6-12 (b) 札内川ダムの 5 次固有振動モード (9.6109Hz)

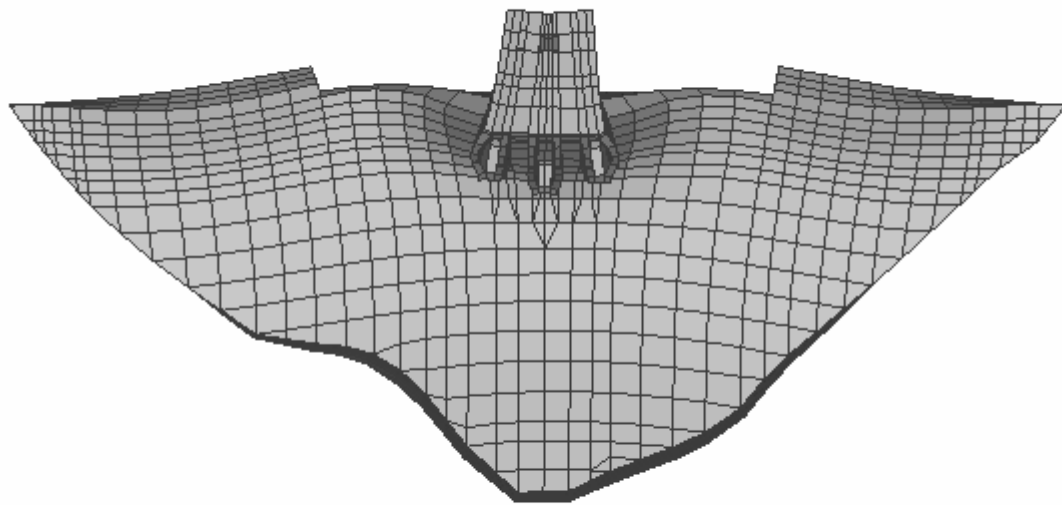



上流側鳥瞰図



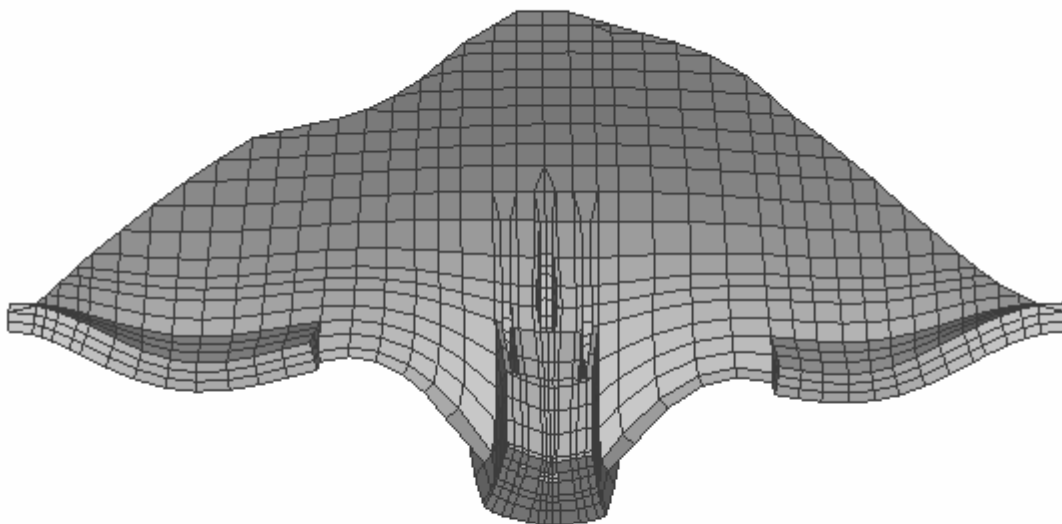
下流側鳥瞰図


図 6-13(a) 札内川ダムの 6 次固有振動モード (10.231Hz)



 Z
 Output Set: MODE 6 (10.231 Hz)
 Deformed(0.00000415): Mode Shape

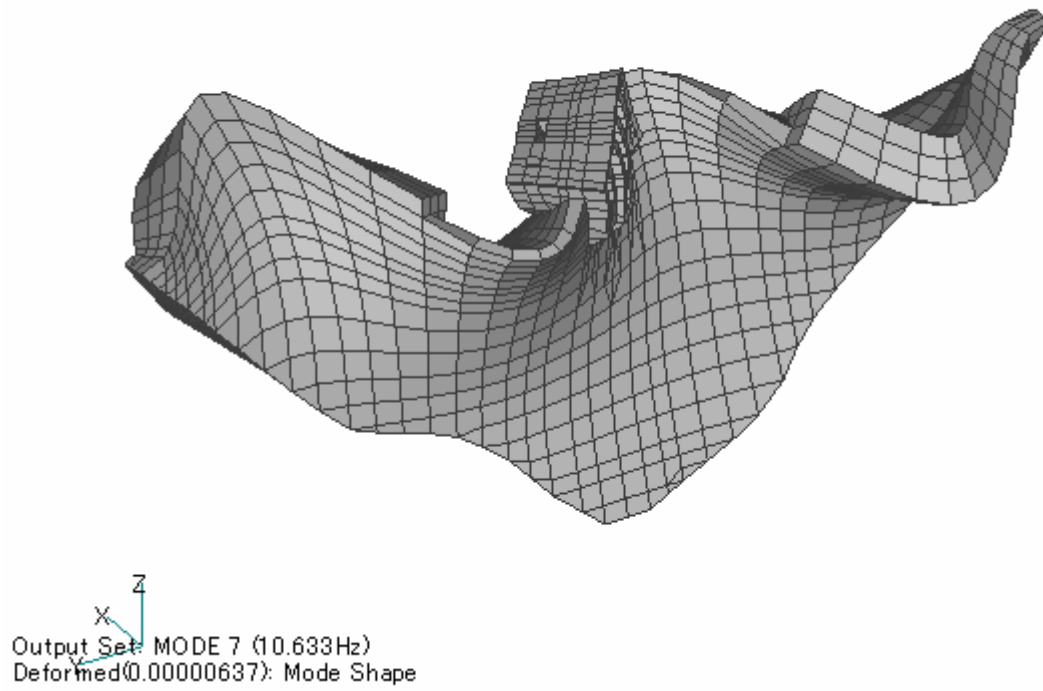
上流側正面より



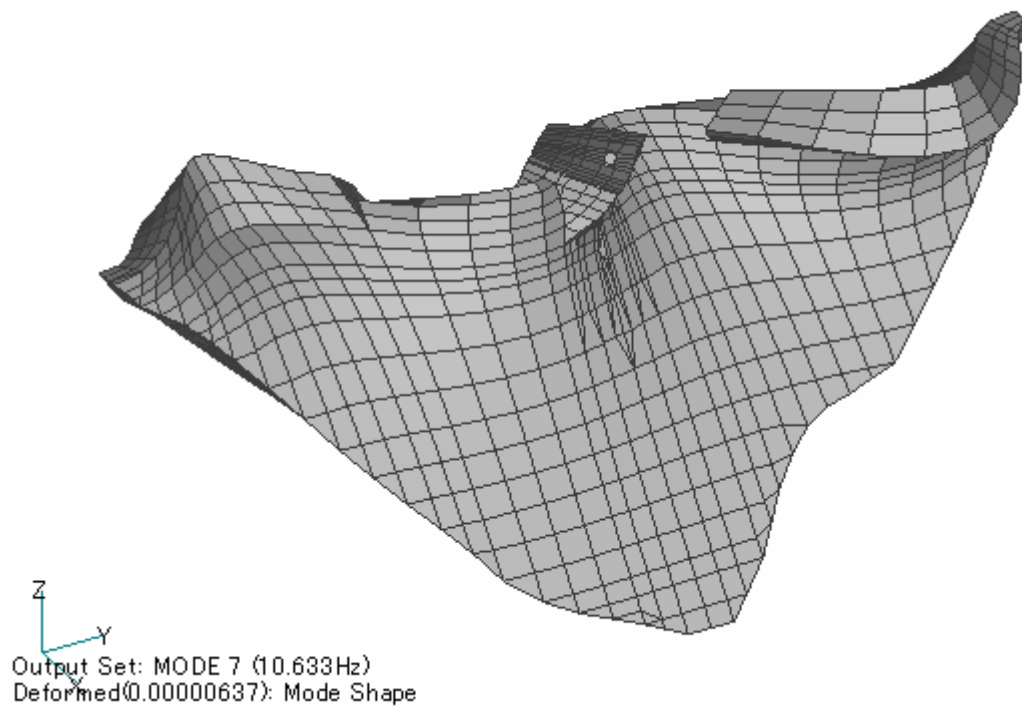
 X
 Output Set: MODE 6 (10.231 Hz)
 Deformed(0.00000415): Mode Shape

上方より

図 6-13 (b) 札内川ダムの 6 次固有振動モード (10.231Hz)

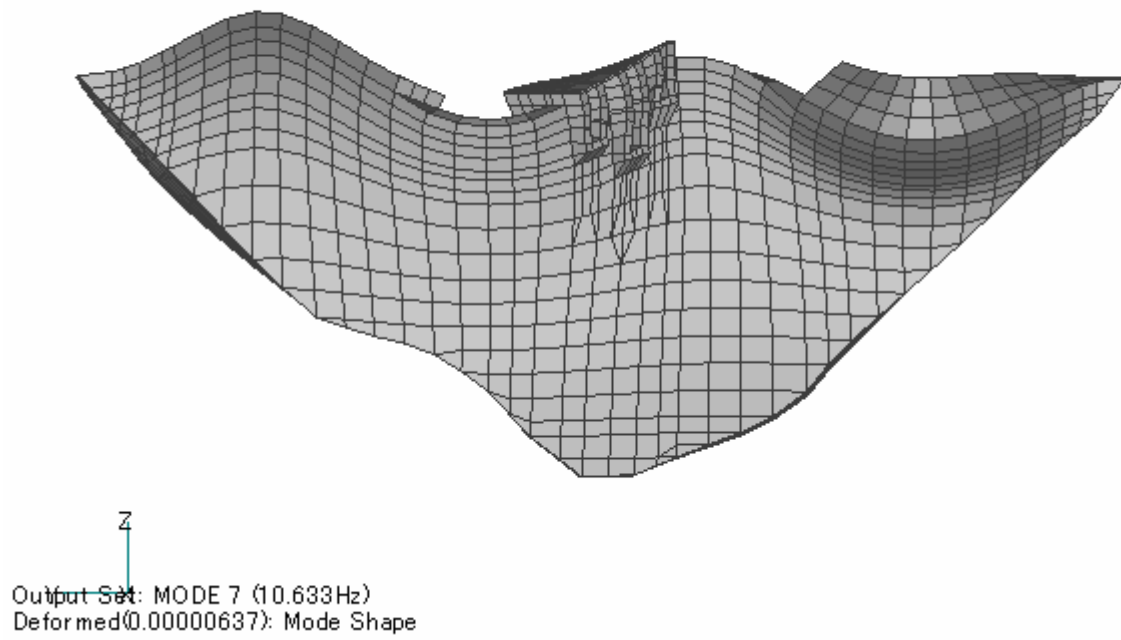


上流側鳥瞰図

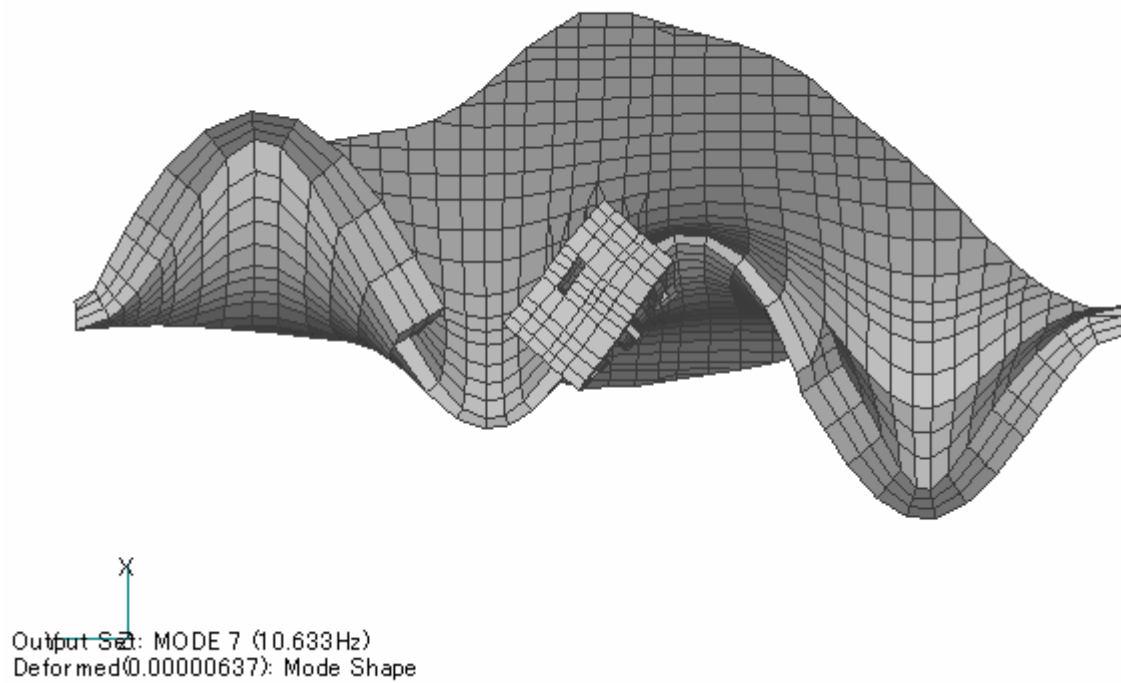


下流側鳥瞰図

図 6-14(a) 札内川ダムの7次固有振動モード (10.633Hz)

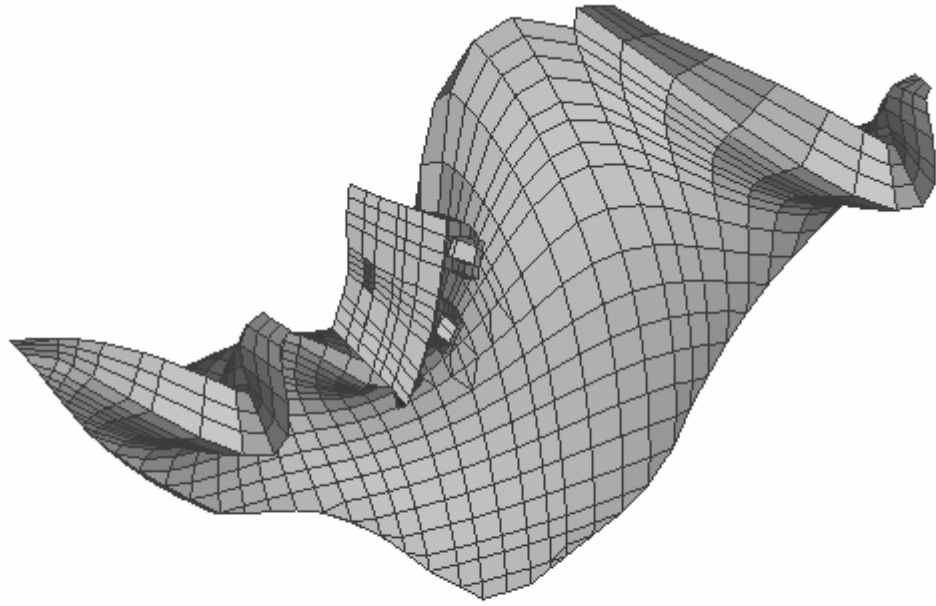


正面より



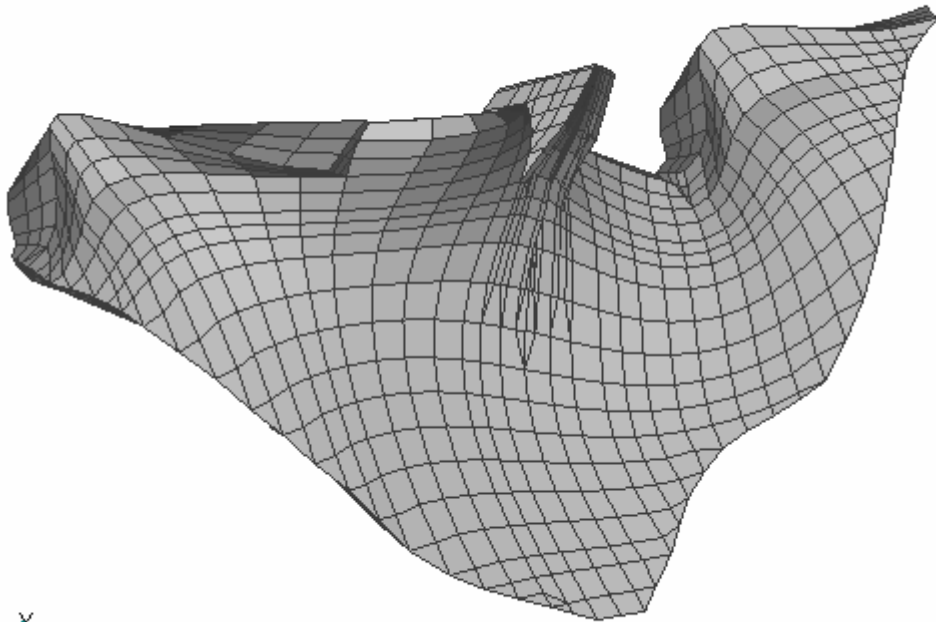
上方より

図 6-14 (b) 札内川ダムの 7 次固有振動モード (10.633Hz)



Output Set: MODE 8 (12.576Hz)
Deformed(0.00000289): Mode Shape

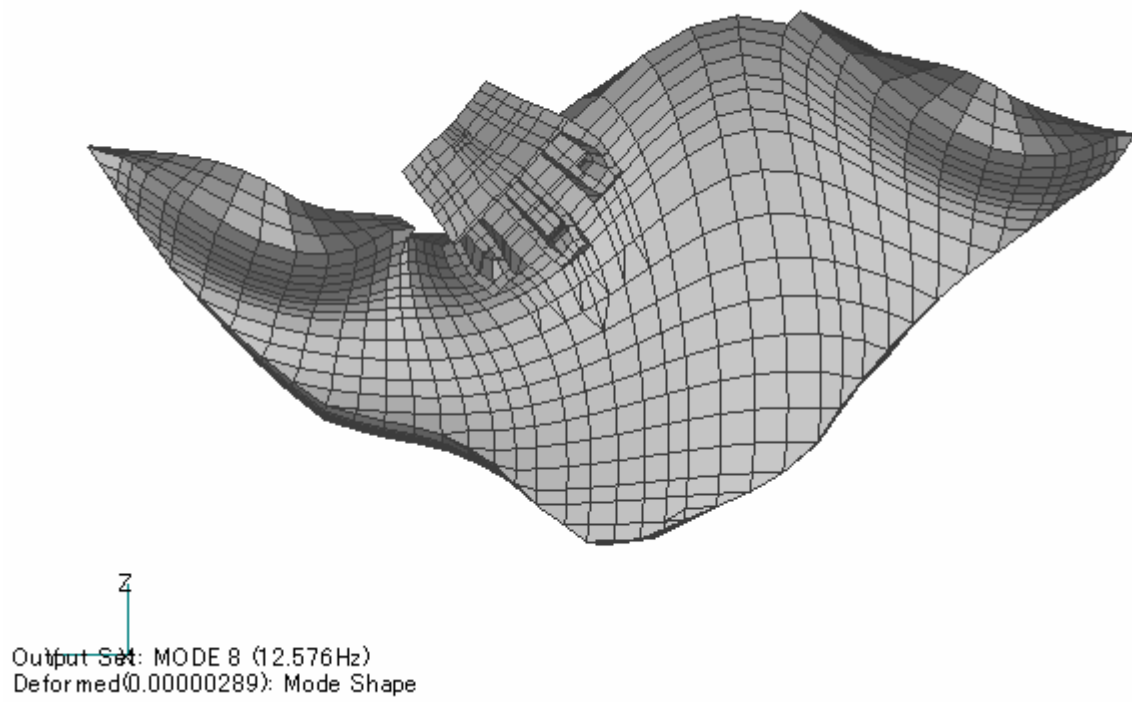
上流側鳥瞰図



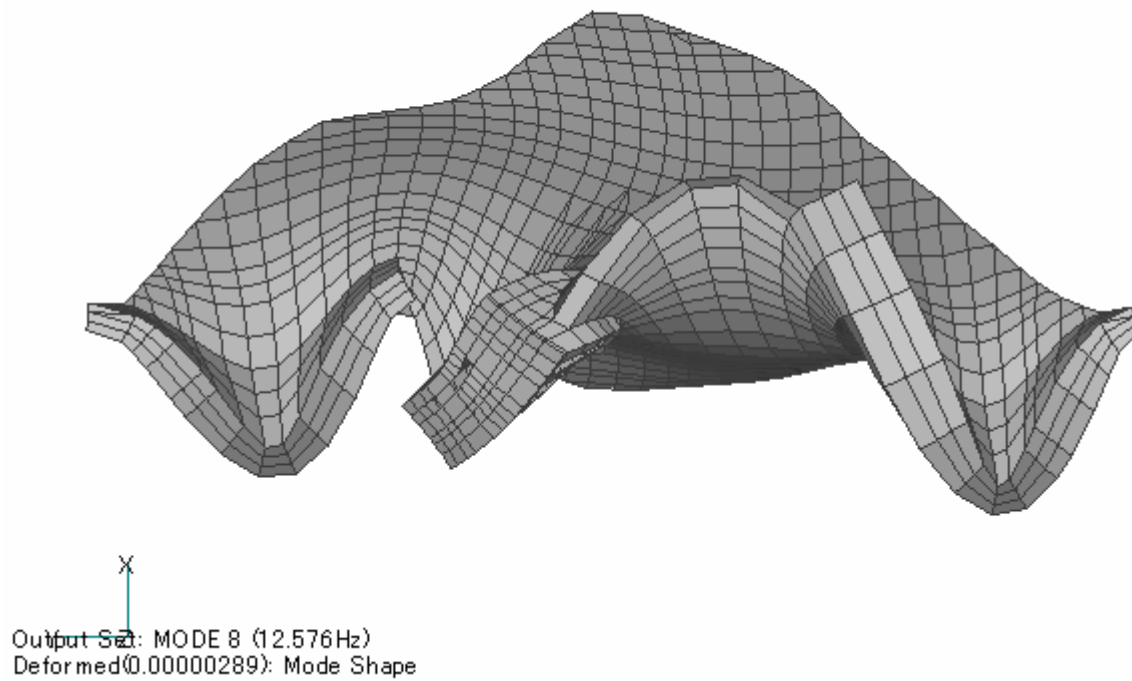
Output Set: MODE 8 (12.576Hz)
Deformed(0.00000289): Mode Shape

下流側鳥瞰図

図 6-15(a) 札内川ダムの 8 次固有振動モード (12.576Hz)

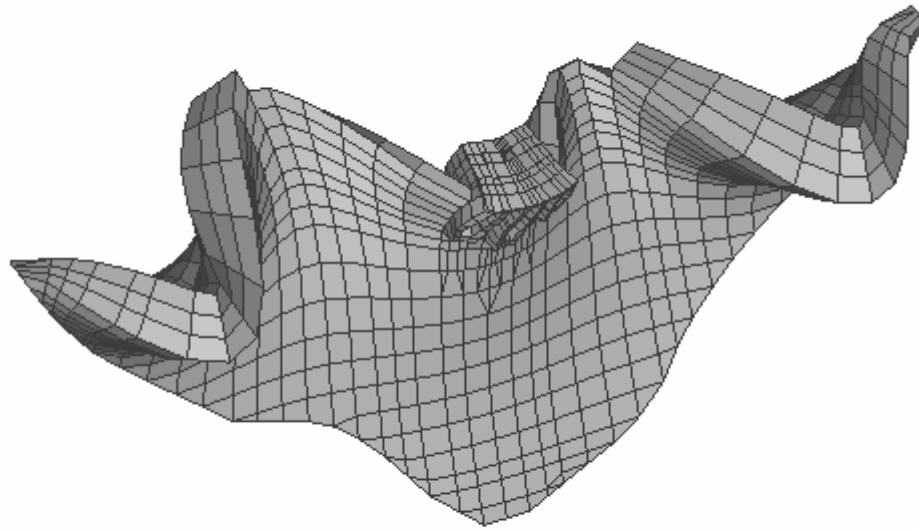


上流側正面より



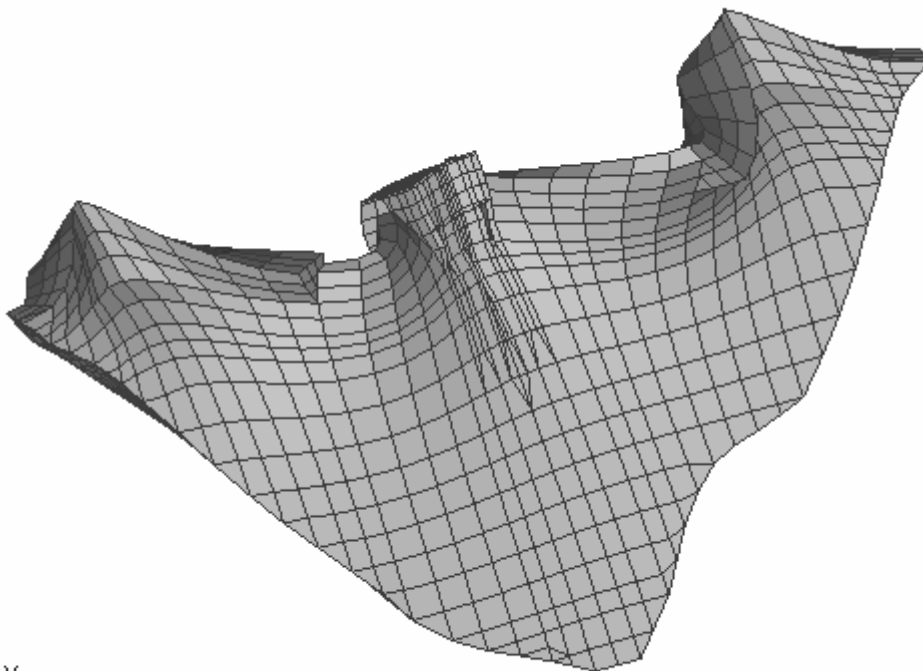
上方より

図 6-15 (b) 札内川ダムの 8 次固有振動モード (12.576Hz)



Output Set: MODE 9 (12.613Hz)
Deformed(0.0000067): Mode Shape

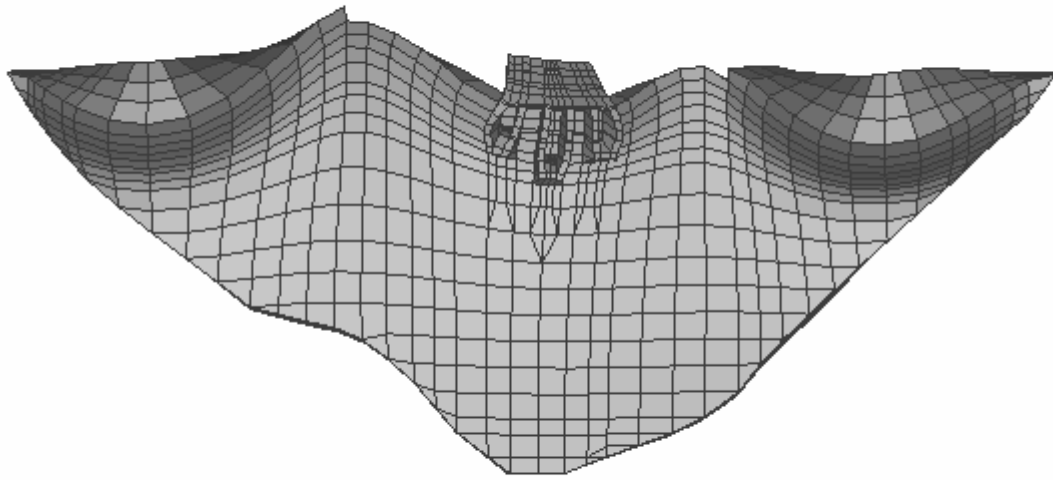
上流側鳥瞰図




Output Set: MODE 9 (12.613Hz)
Deformed(0.0000067): Mode Shape

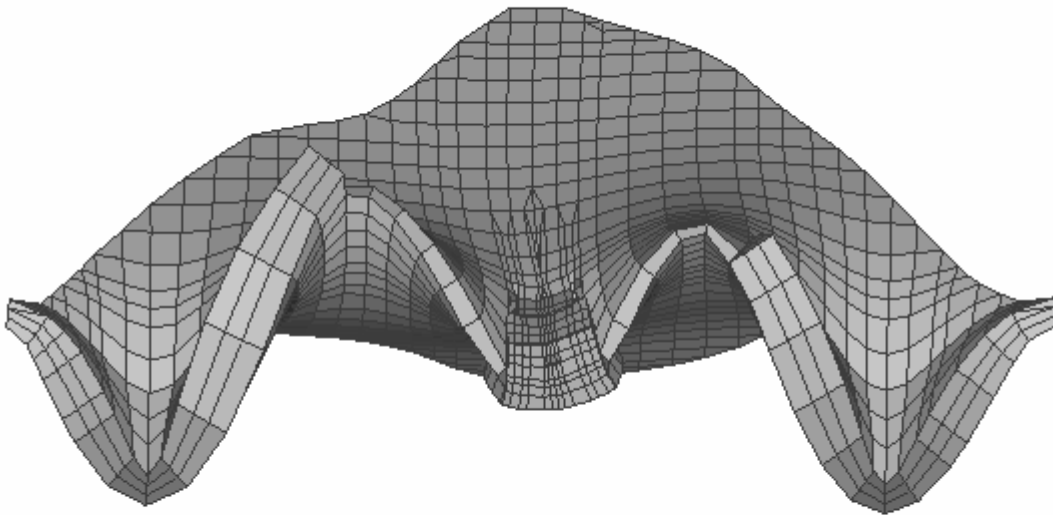
下流側鳥瞰図


図 6-16(a) 札内川ダムの9次固有振動モード (12.613Hz)



 Z
 Output Set: MODE 9 (12.613Hz)
 Deformed(0.0000067): Mode Shape

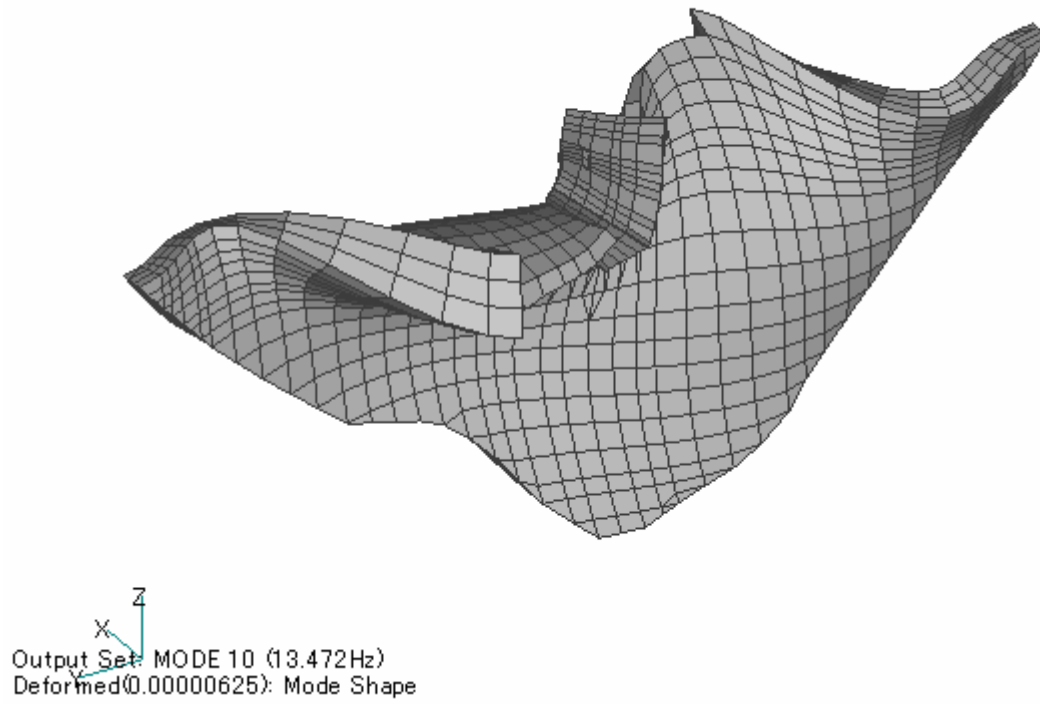
上流側正面より



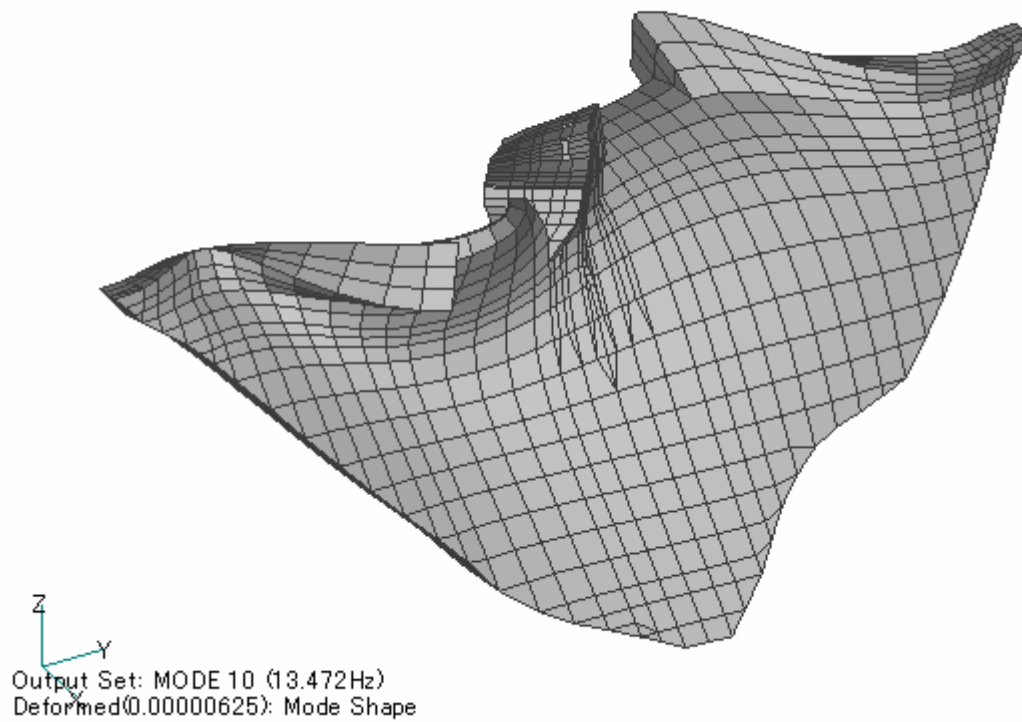
 X
 Output Set: MODE 9 (12.613Hz)
 Deformed(0.0000067): Mode Shape

上方より

図 6-16 (b) 札内川ダムの 9 次固有振動モード (12.613Hz)

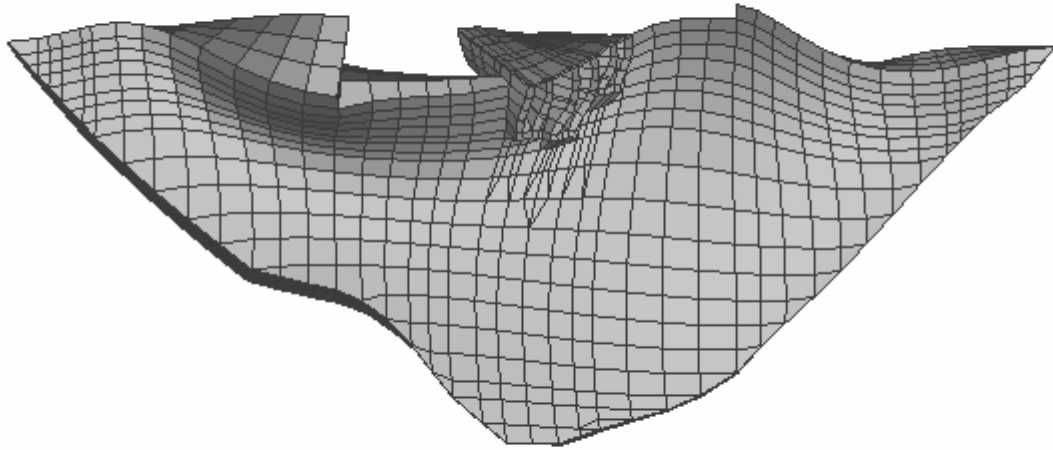



上流側鳥瞰図



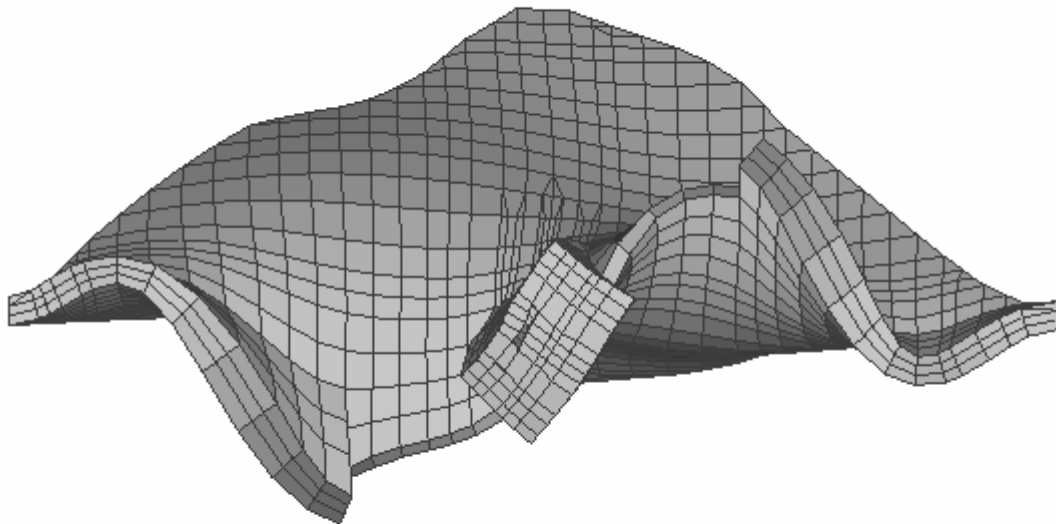
下流側鳥瞰図


図 6-17(a) 札内川ダムの 10 次固有振動モード (13.472Hz)



 Z
 Output Set: MODE 10 (13.472Hz)
 Deformed(0.00000625): Mode Shape

上流側正面より



 X
 Output Set: MODE 10 (13.472Hz)
 Deformed(0.00000625): Mode Shape

上方より

図 6-17(b) 札内川ダムの 10 次固有振動モード (13.472Hz)

7. 十勝沖地震時のダムの挙動再現解析

5章で同定された物性を用い、4章で説明した3次元ダム-貯水池-基礎岩盤連成解析手法により、2003年9月26日の十勝沖地震時におけるダムの挙動を再現解析した。

7.1 解析条件

7.1.1 物性条件

再現解析に用いた物性値を表7-1に示す。

表 7-1 再現解析に用いた物性値

	弾性係数(MPa)	密度(g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数(%)
ダム堤体	33000.0	2.44	0.20	1
基礎岩盤	28520.0	2.74	0.24	5
自由地盤	28520.0	2.74	0.24	5

7.1.2 境界条件

基礎岩盤の側方境界および底面境界では、4.2で述べた三浦の粘性境界(改良版)を用いた。

貯水池の底面および両側の斜面では部分吸収条件(底面 $\beta_b = 1.5$, 斜面 $\beta_b = 2.0$)、上流端では完全吸収条件、自由表面では表面波条件を用いた。

7.1.3 入力地震動

十勝沖地震時、岩盤下部(F1)で観測された地震動を次に述べる三次元引戻し計算手法により解析モデル底面(底面粘性境界下)に引戻した。図7-1には岩盤下部で観測されたオリジナルの波形を示し、図7-2には本解析で用いた時刻歴を示す。

地震動の引戻し計算については、ダム-貯水池-基礎岩盤の相互作用の影響ならび不整形地表構造の影響を考慮できる三次元引戻し計算手法を用いた。この手法の概要を以下に述べる(図7-3参照)。

F1点で観測された3方向の地震動の時刻歴を(W_{FX} , W_{FY} , W_{FZ})と記す。これを解析モデルの底面B点に引戻すために、以下の解析・計算を行った。

(1) B点とF1点間の伝達関数を求める。

F1点の地震動を一方向ずつモデル底面(B点)により入力加振し、三次元ダム-貯水池-基礎岩盤連成系の解析を行う。これによりF1点で以下の応答波が得られる。

$$X \text{ 方向 } (W_{FX} \text{ 波}) \text{ 加振時 } \begin{cases} R_{XX} & X \text{ 方向応答波} \\ R_{XY} & Y \text{ 方向応答波} \\ R_{XZ} & Z \text{ 方向応答波} \end{cases}$$

$$Y \text{ 方向 } (W_{FY} \text{ 波}) \text{ 加振時 } \begin{cases} R_{YX} & X \text{ 方向応答波} \\ R_{YY} & Y \text{ 方向応答波} \\ R_{YZ} & Z \text{ 方向応答波} \end{cases}$$

$$Z \text{ 方向 } (W_{FZ} \text{ 波}) \text{ 加振時 } \begin{cases} R_{ZX} & X \text{ 方向応答波} \\ R_{ZY} & Y \text{ 方向応答波} \\ R_{ZZ} & Z \text{ 方向応答波} \end{cases}$$

F1点における入力波 (W_{FX} , W_{FY} , W_{FZ}) のフーリエスペクトル (F_{FX} , F_{FY} , F_{FZ}) を求め (この時は B 点のものを見なす), 上記 F1 の点での応答波 (計 9 成分) のフーリエスペクトルおよび加振波に対するスペクトル比 (B 点と F1 点間の伝達関数) を求める。[W_{FX} 波に対する (T_{XX}, T_{XY}, T_{XZ}), W_{FY} 波に対する (T_{YX}, T_{YY}, T_{YZ}), W_{FZ} 波に対する (T_{ZX}, T_{ZY}, T_{ZZ})] が得られる。

(2) B 点のフーリエスペクトルおよび時刻歴を求める。

F1 点の地震動を再現するために, B 点で入力すべき 3 方向の地震動 (W_{BX} , W_{BY} , W_{BZ}) のフーリエスペクトル (F_{BX} , F_{BY} , F_{BZ}) は, 式 (7.1) の関係に満たさなければならない。

$$\begin{cases} F_{FX} \\ F_{FY} \\ F_{FZ} \end{cases} = \begin{bmatrix} T_{XX} & T_{YX} & T_{ZX} \\ T_{XY} & T_{YY} & T_{ZY} \\ T_{XZ} & T_{YZ} & T_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{cases} F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_{BZ} \end{cases} \quad (7.1)$$

フーリエスペクトルの振動数毎に, 式 (5.3) により B 点のフーリエスペクトル (F_{BX} , F_{BY} , F_{BZ}) を求め, さらに逆フーリエ変換により B 点で入力すべき 3 方向の地震動時刻歴 (W_{BX} , W_{BY} , W_{BZ}) が求められる。

この引戻し計算手法を用い, 岩盤下部の地震動を解析モデルの底面 (粘性境界下) に引戻した。引戻された解析モデル底面の入力地震動を図 7-4 に示す。図 7-4 に示す入力地震動は, 長さ 81.92 秒, 時間刻み 0.01 秒として, 入力加振した。

7.1.4 出力項目

再現解析において, 以下の項目を出力する。

- ① 地震観測点の加速度応答時刻歴 (出力点位置は図 5-3 参照)
- ② 地震観測点の加速度時刻歴のフーリエスペクトル
- ③ 岩盤上部観測点に対するダム天端中央観測点の加速度時刻歴のフーリエスペクトルおよび伝達関数。
- ④ 岩盤下部観測点に対する岩盤上部観測点, 左岸および右岸リムトンネル内観測点, ダムの左肩および右肩観測点, 下流側開放基盤面の観測点のフーリエスペクトル・伝達関数
- ⑤ 最大加速度分布
- ⑥ 地震時の最大・最小応力分布
- ⑦ 横断面と縦断面の交差位置 (図 6-1 参照) における最大加速度分布

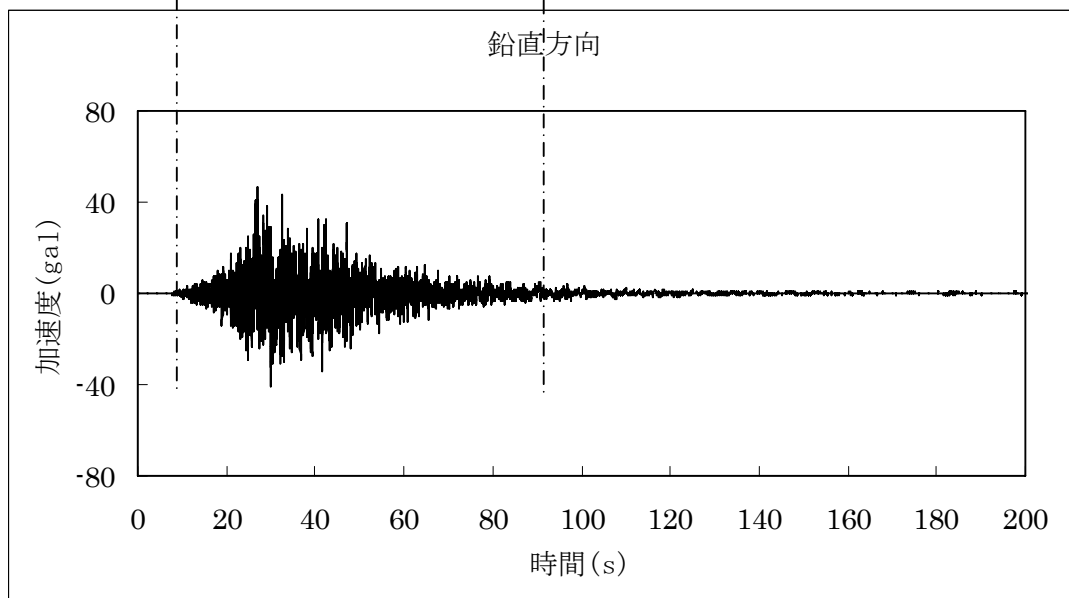
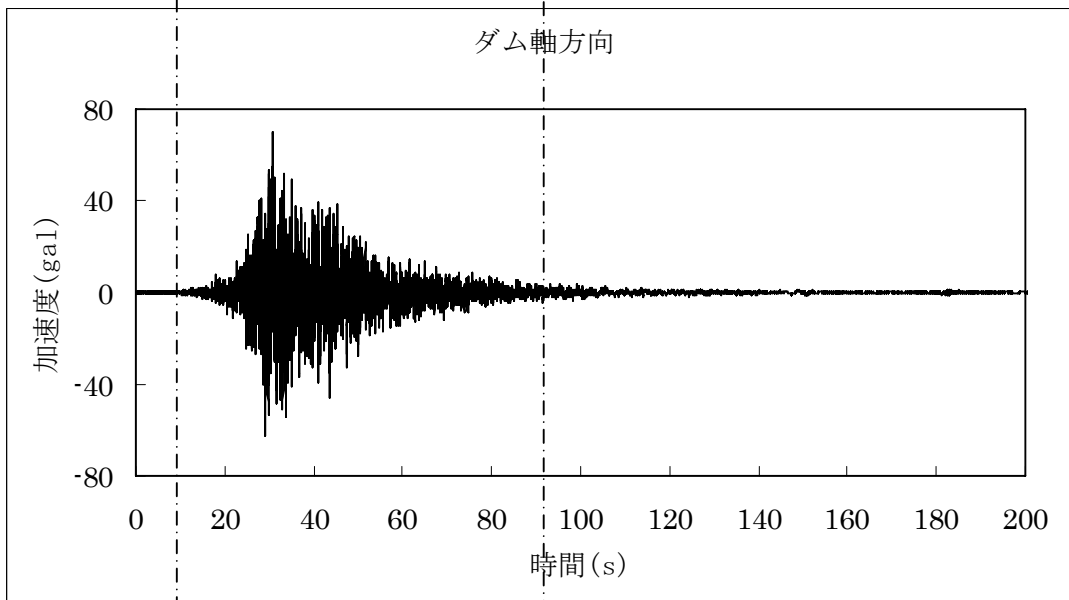
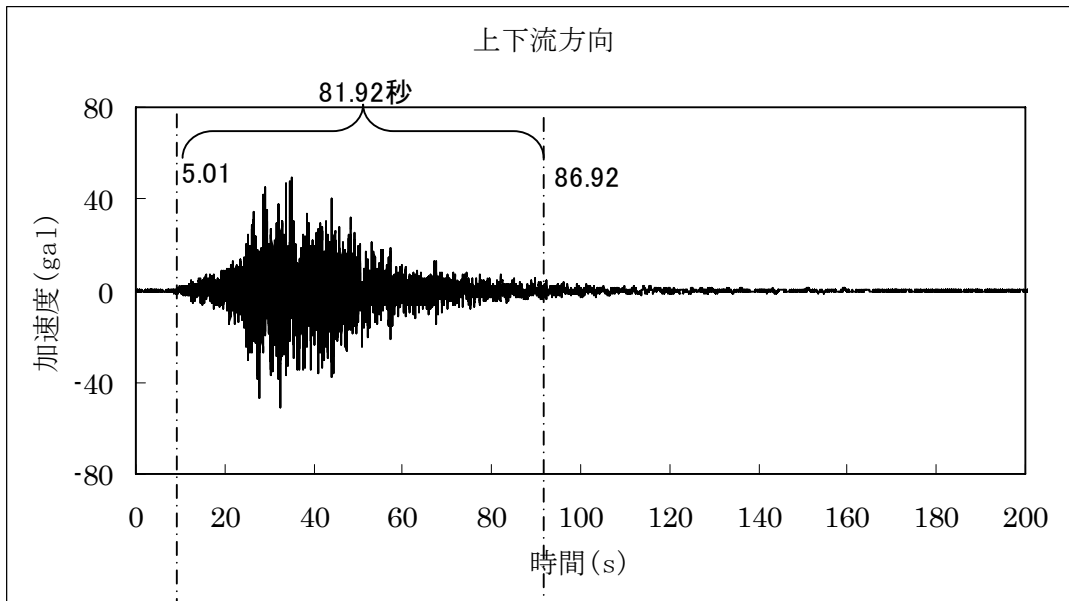


図 7-1 岩盤下部 (F1)で観測された地震動

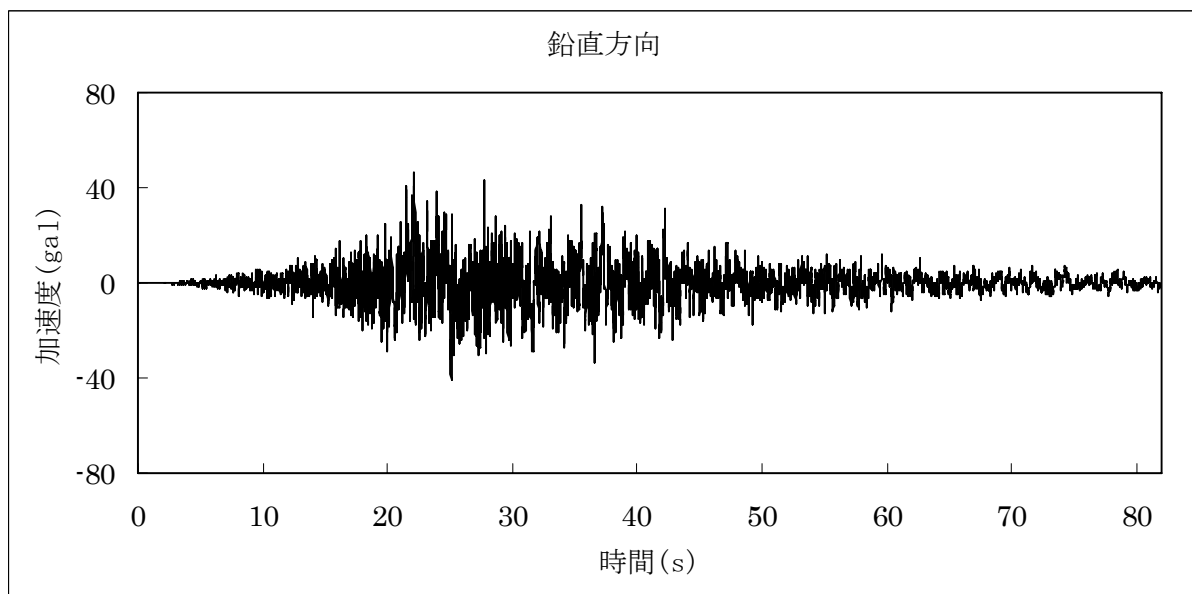
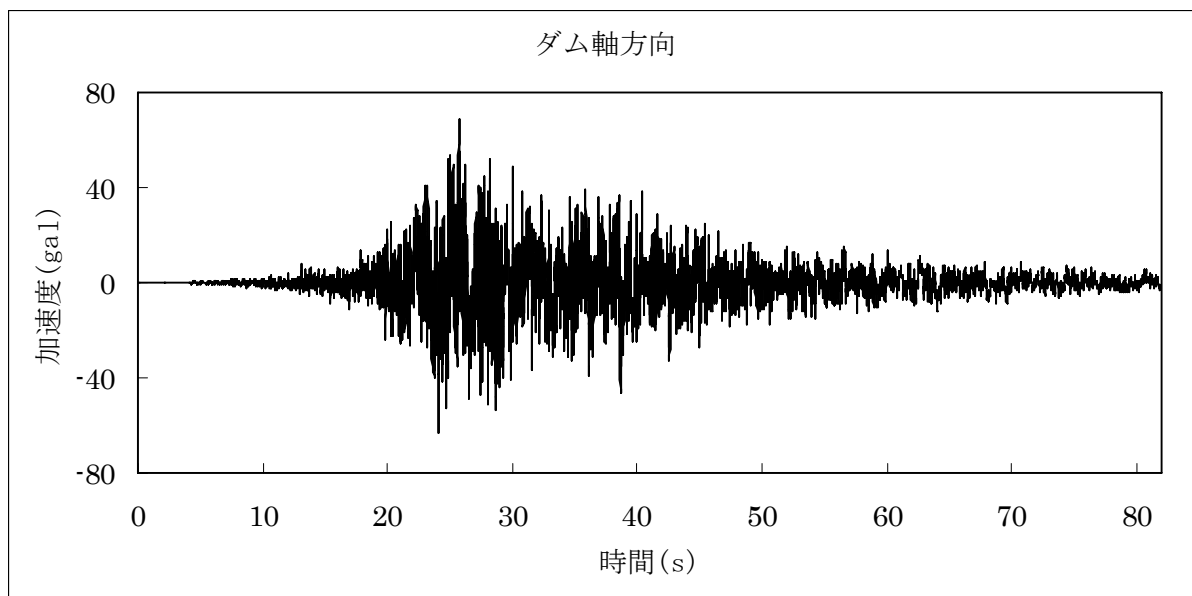
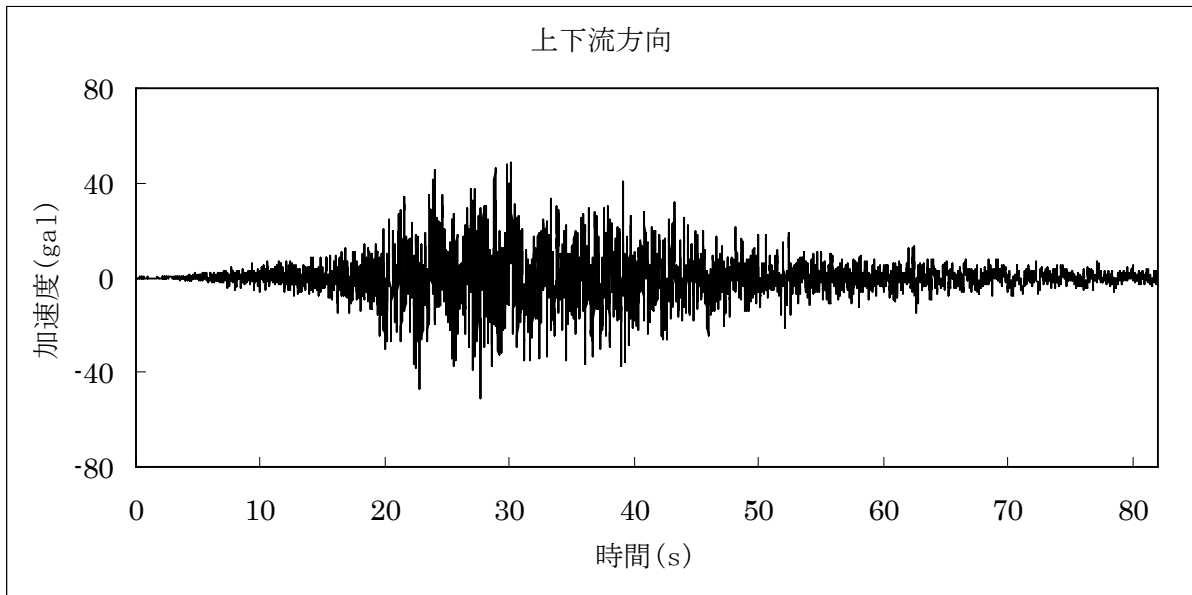


図 7-2 再現解析で用いた岩盤下部の観測地震動

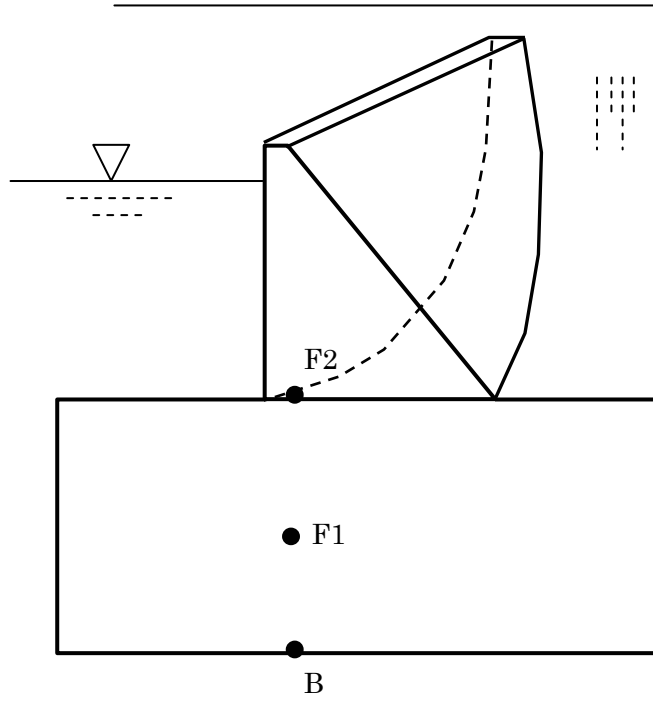


図 7-3 引戻し計算イメージ図

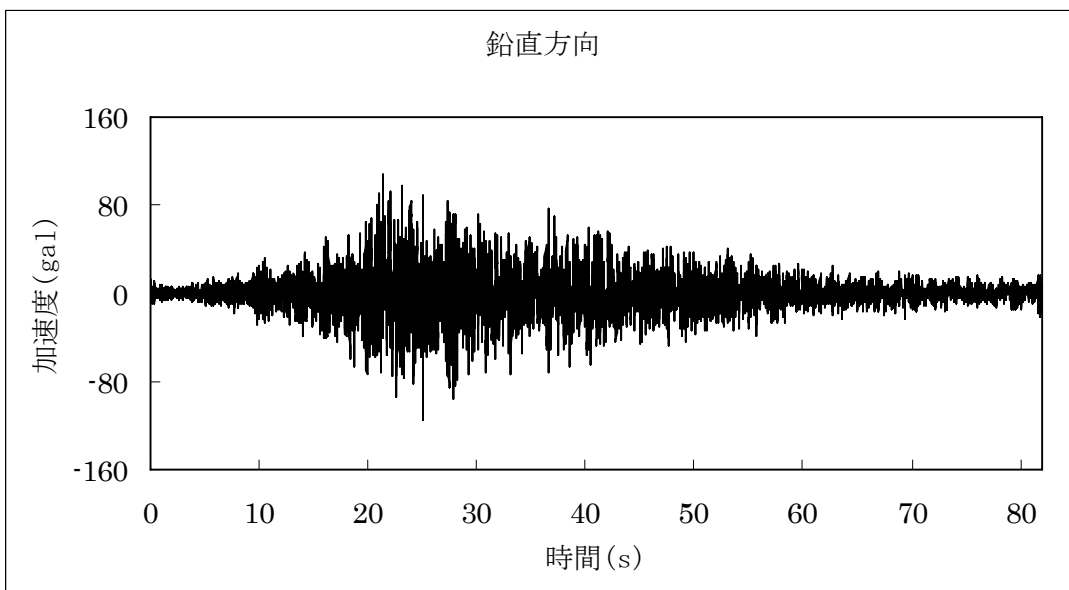
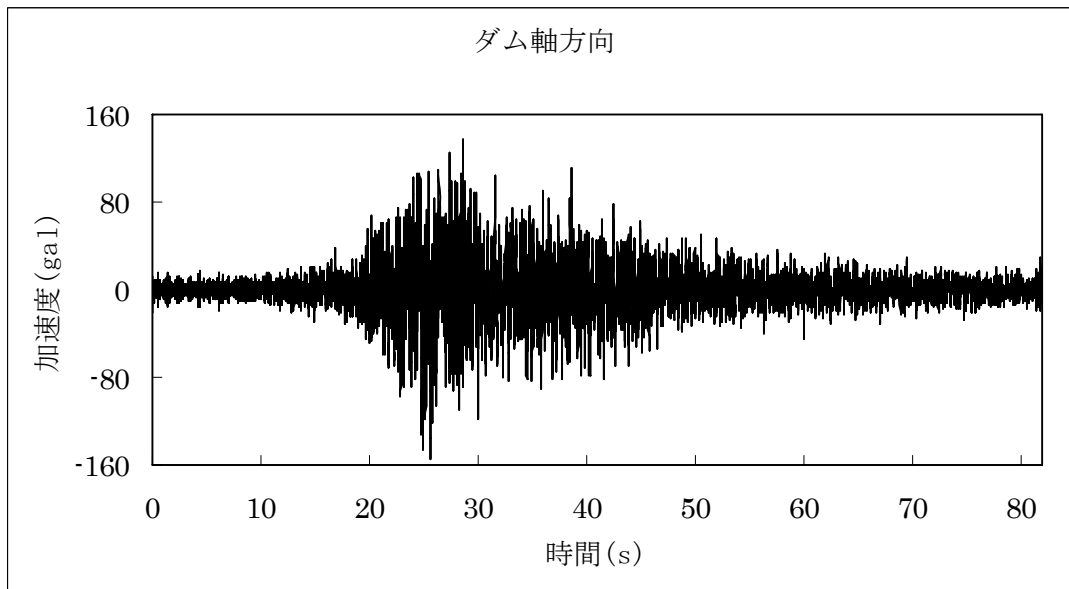
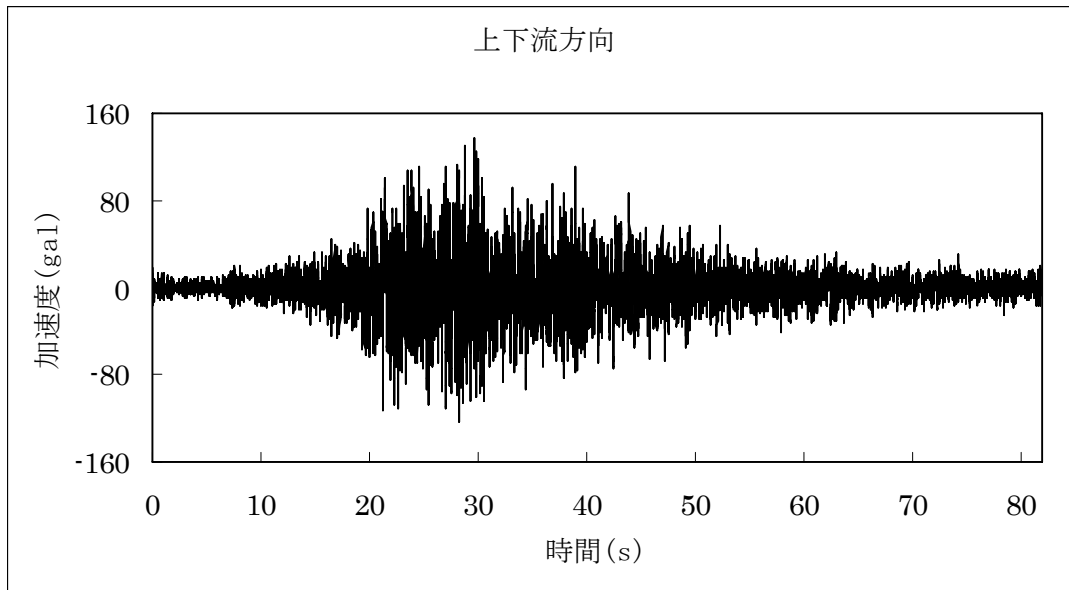


図 7-4 引戻された解析モデル底面の入力地震動

7.2 解析結果

解析により得られた各観測点の加速度時刻歴を図 7-5 に、フーリエスペクトルおよび着目点間の伝達関数を図 7-6 に示す。各観測点の最大加速度値を表 7-2 にまとめる。比較するために、観測値も同じ表に併記する。また、岩盤下部 (F1) に対する他の観測点の加速度増幅率を表 7-3 にまとめる。

各観測点における解析の最大加速度値と観測の最大加速度値の相対差を図 7-7 に示す。堤体およびダム直下岩盤における加速度応答の増幅率を表 7-4 にまとめる。

図 7-8～図 7-10 には堤体の最大加速度の分布を示す。図 7-11 には、横断面と縦断面の交差位置 (図 6-1 参照) における最大加速度応答の分布を示す。

表 7-2 解析による最大加速度値および観測値との比較

	方向	観測値 (gal)	解析値 (gal)	相対差 (%)
F1 岩盤下部	上下流	51.03	51.02	0.0%
	ダム軸	69	68.61	-0.6%
	鉛直	46.66	46.61	-0.1%
F2 岩盤上部	上下流	61.5	68.37	11.2%
	ダム軸	67.03	77.1	15.0%
	鉛直	56.25	88.22	56.8%
G1 下流側開放基盤	上下流	59.13	94.66	60.1%
	ダム軸	74.75	90.58	21.2%
	鉛直	69	86.91	26.0%
R1 左岸リムトンネル内	上下流	66.16	97.61	47.5%
	ダム軸	64.63	98.61	52.6%
	鉛直	72.16	84.42	17.0%
R2 右岸リムトンネル内	上下流	79.13	97.71	23.5%
	ダム軸	98.19	97.76	-0.4%
	鉛直	103.25	85.87	-16.8%
T1 ダム堤体左肩	上下流	199.38	114.07	-42.8%
	ダム軸	216.16	101.75	-52.9%
	鉛直	116.97	106.91	-8.6%
T2 ダム天端中央	上下流	676.69	637.63	-5.8%
	ダム軸	303.53	357.57	17.8%
	鉛直	206.81	196.77	-4.9%
T3 ダム堤体右肩	上下流	214.19	160.93	-24.9%
	ダム軸	195.56	122.60	-37.3%
	鉛直	151.47	110.46	-27.1%

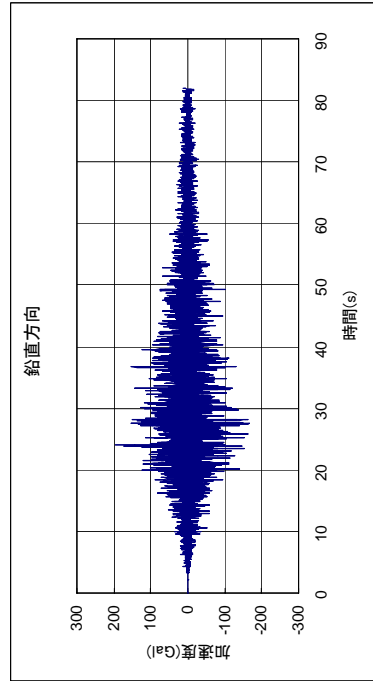
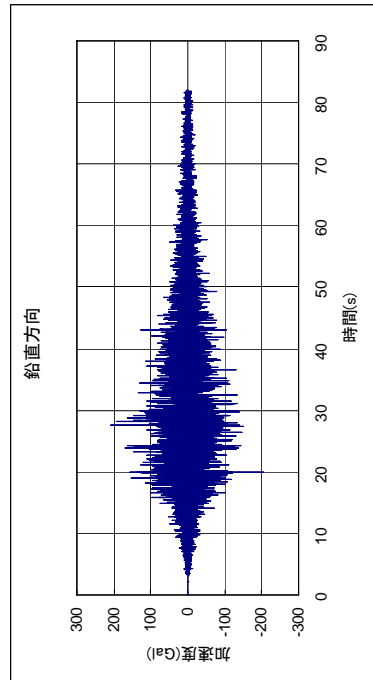
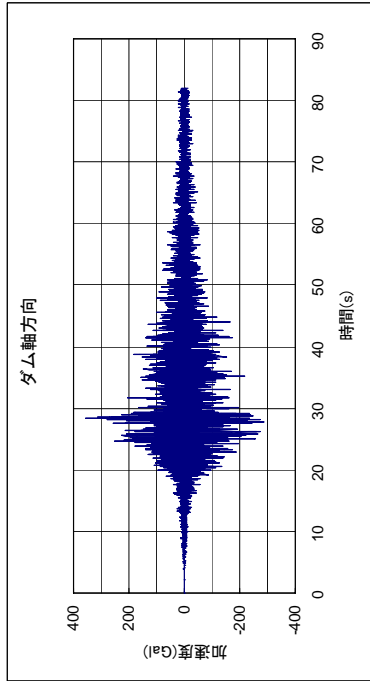
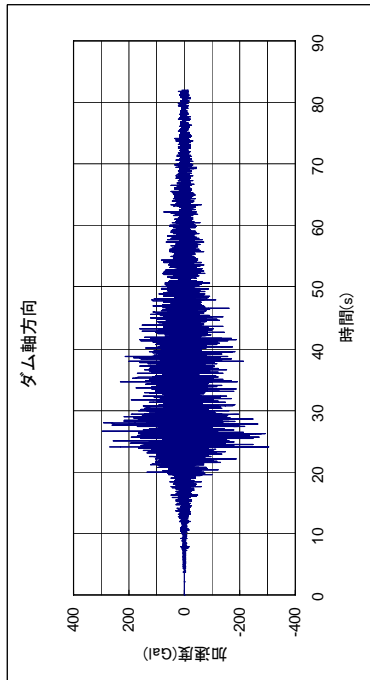
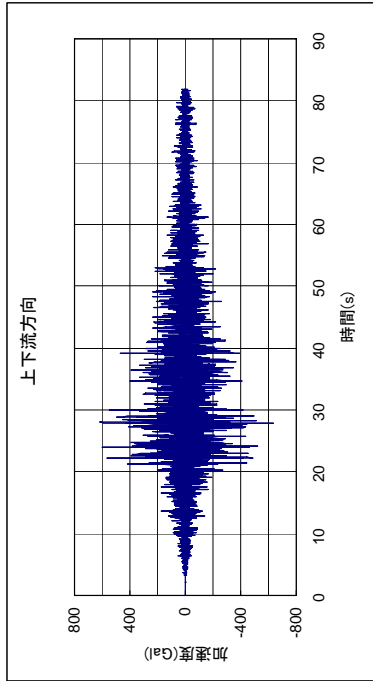
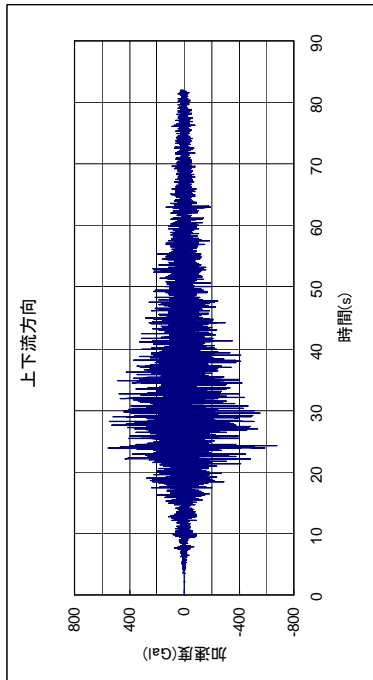
表 7-3 基礎下部 (F1) に対する各観測点の加速度増幅率

観測点	方向	観測値 (gal)	解析値 (gal)	相対差 (%)
F2 岩盤上部	上下流	1.21	1.34	11.2%
	ダム軸	0.97	1.12	15.7%
	鉛直	1.21	1.89	57.0%
G1 下流側開放基盤	上下流	1.16	1.86	60.1%
	ダム軸	1.08	1.32	21.9%
	鉛直	1.48	1.86	26.1%
R1 左岸リムトンネル内	上下流	1.30	1.91	47.6%
	ダム軸	0.94	1.44	53.4%
	鉛直	1.55	1.81	17.1%
R2 右岸リムトンネル内	上下流	1.55	1.92	23.5%
	ダム軸	1.42	1.42	0.1%
	鉛直	2.21	1.84	-16.7%
T1 ダム堤体左肩	上下流	3.91	2.24	-42.8%
	ダム軸	3.13	1.48	-52.7%
	鉛直	2.51	2.29	-8.5%
T2 ダム天端中央	上下流	13.26	12.50	-5.8%
	ダム軸	4.40	5.21	18.5%
	鉛直	4.43	4.22	-4.8%
T3 ダム堤体右肩	上下流	4.20	3.15	-24.9%
	ダム軸	2.83	1.79	-37.0%
	鉛直	3.25	2.37	-27.0%

表 7-4 ダムおよび直下岩盤の加速度増幅率

	方向	観測値	解析値	相対差 (%)
堤体 (T2/F2)	上下流	11.0	9.3	-15.4
	ダム軸	4.5	4.6	2.2
	鉛直	3.7	2.2	-40.5
ダム直下岩盤 (F2/F1)	上下流	1.2	1.3	8.3
	ダム軸	1.0	1.1	10.0
	鉛直	1.2	1.9	58.3

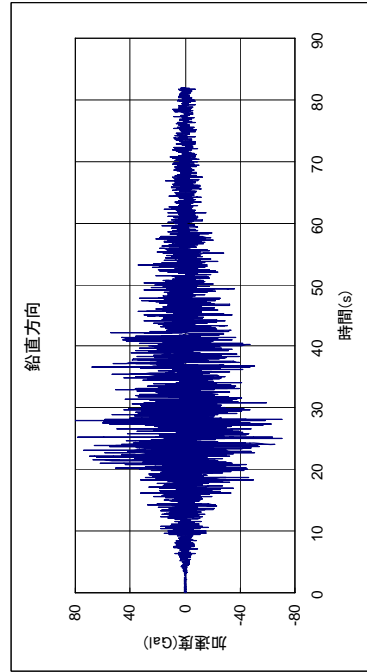
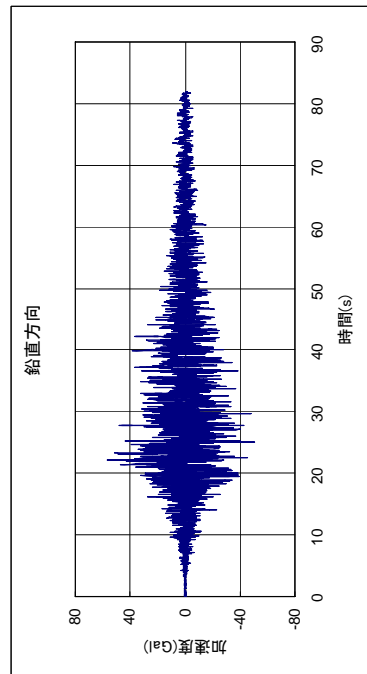
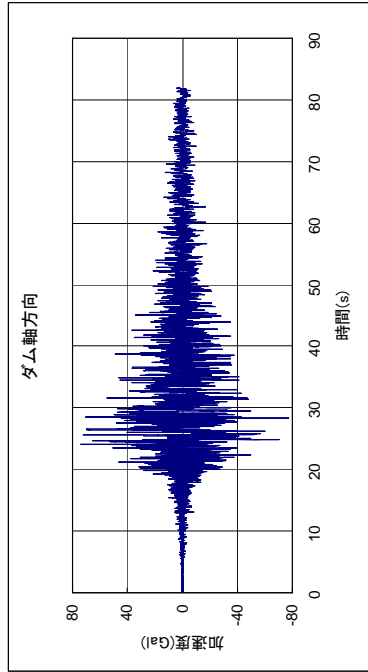
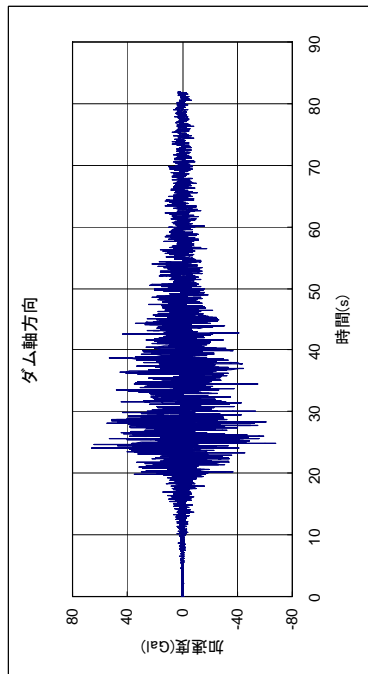
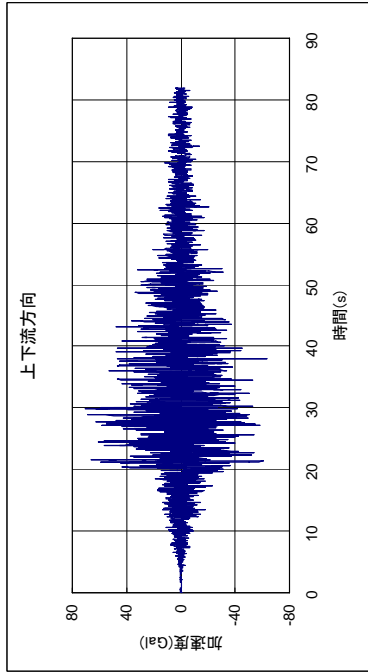
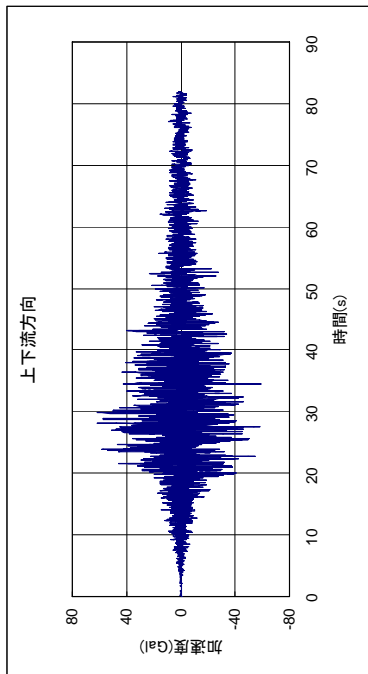
注：相対差 = (解析値 - 観測値) × 100 / 観測値



【観測波】

【解析結果】

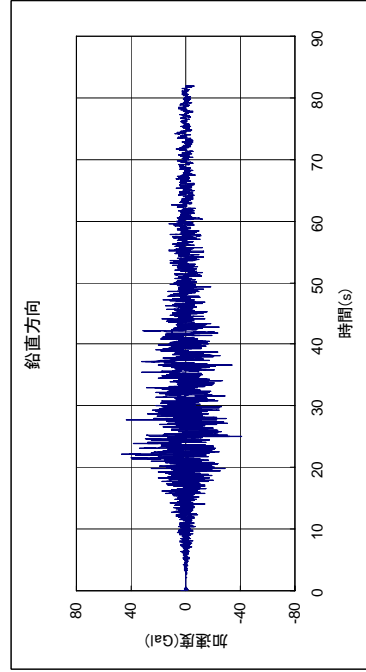
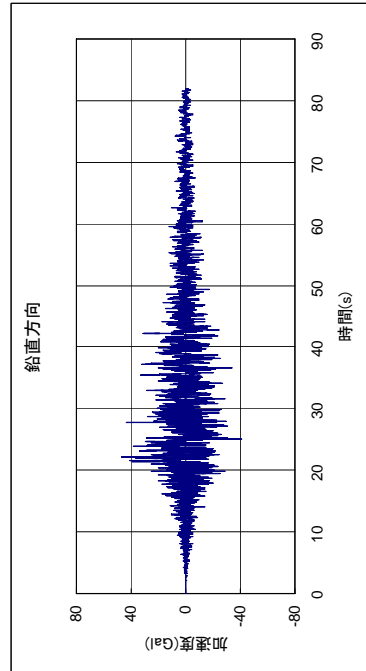
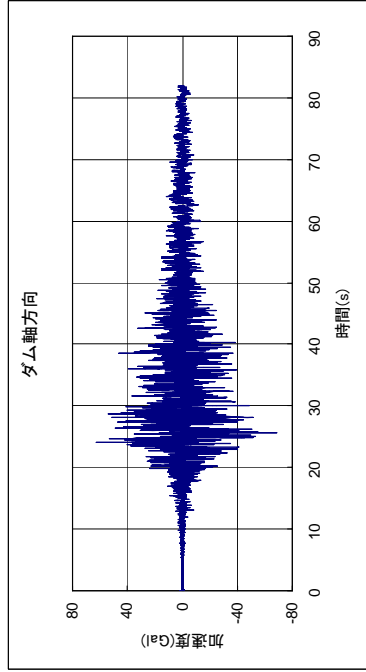
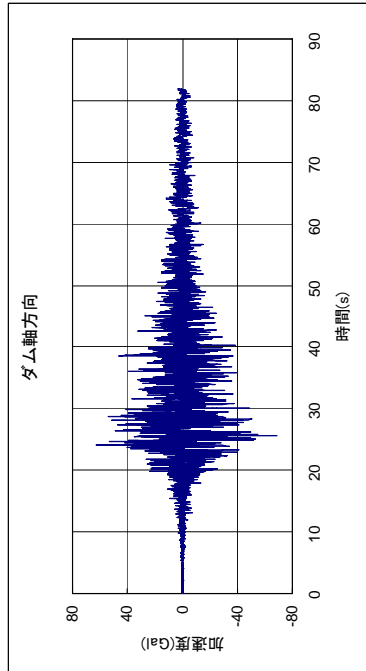
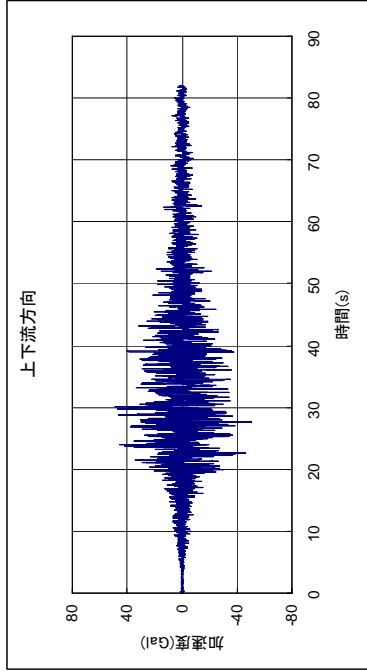
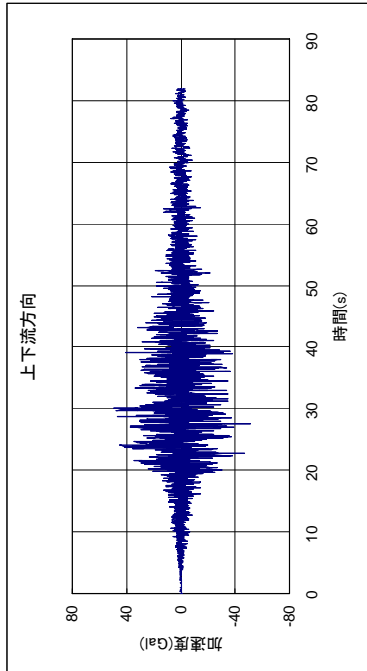
図7-5(a) ダム天端中央 (T2) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

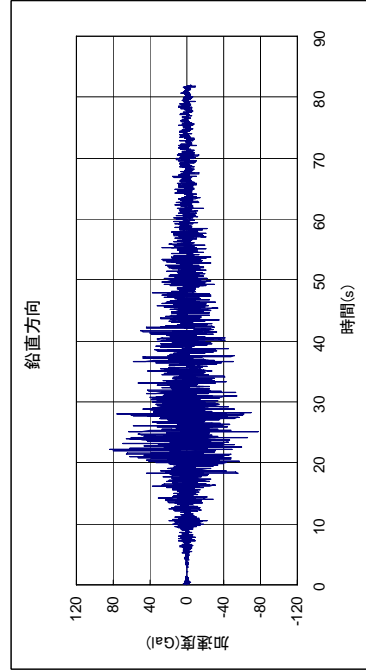
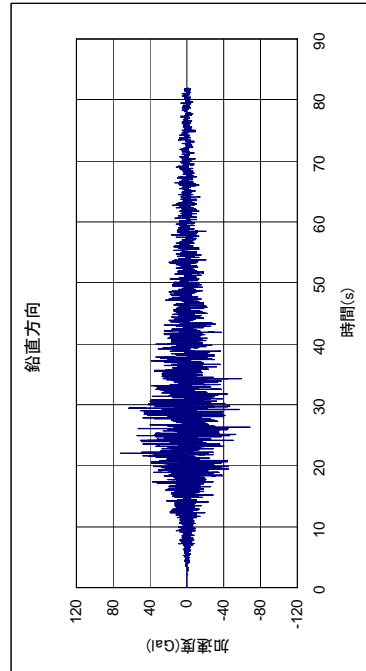
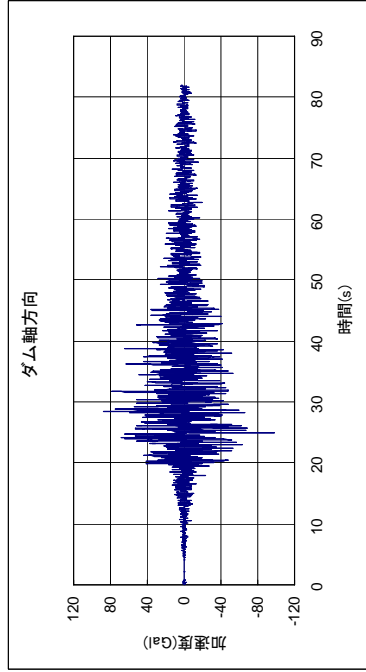
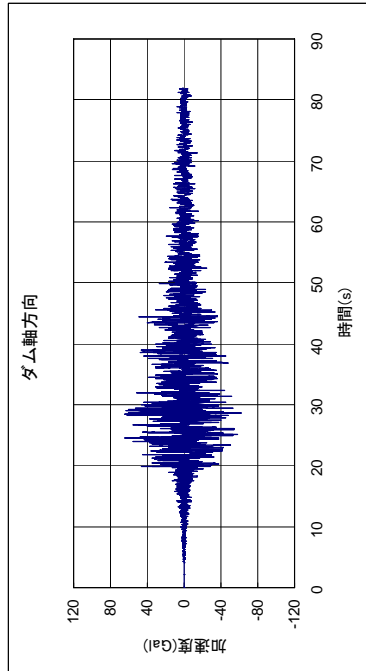
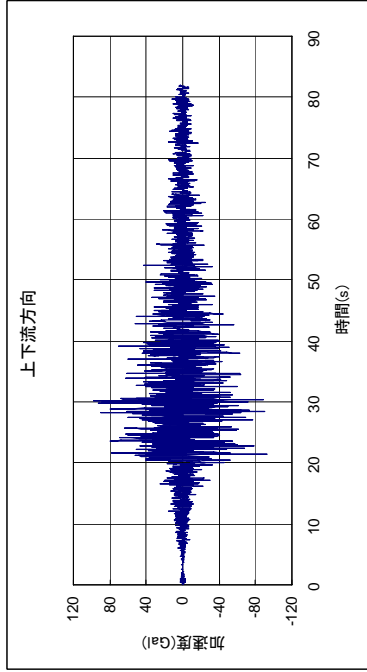
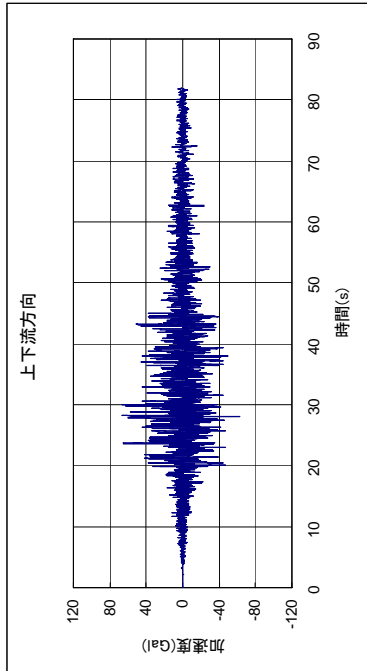
図7-5 (b) 岩盤上部 (F2) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

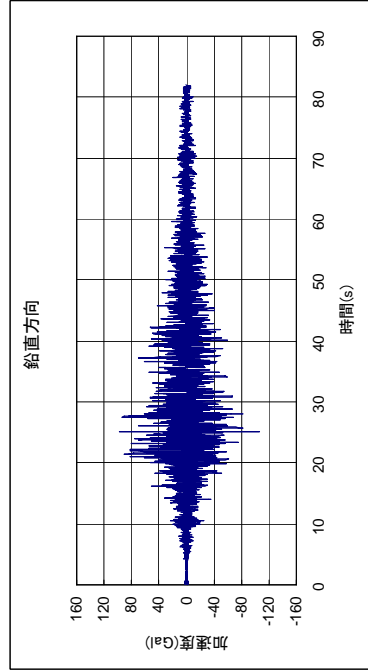
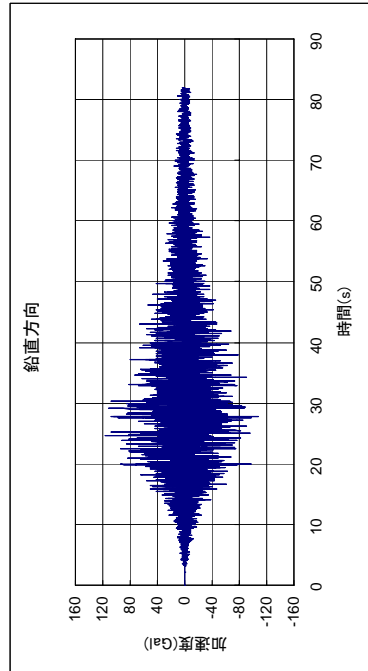
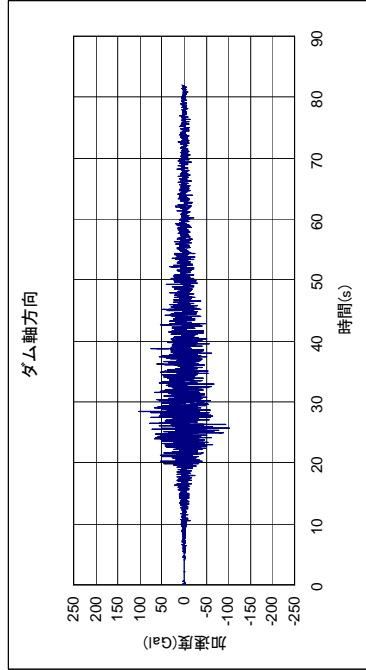
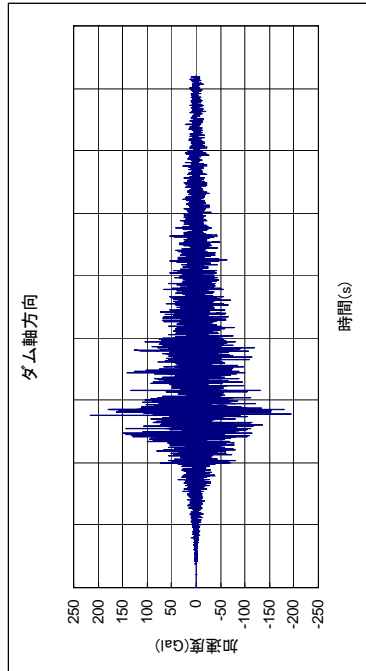
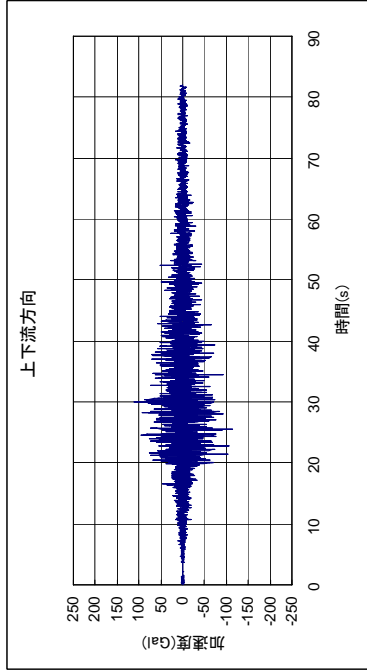
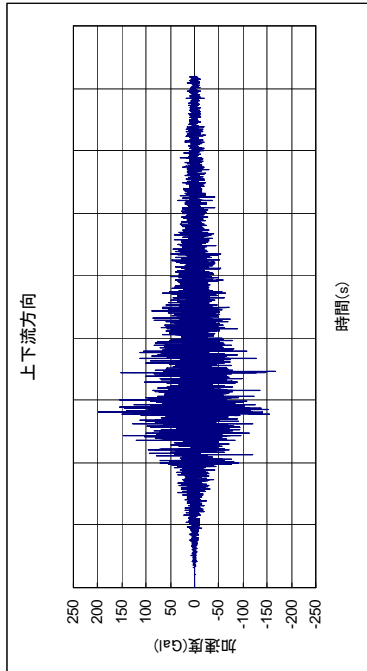
図7-5(c) 岩盤下部 (F1) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

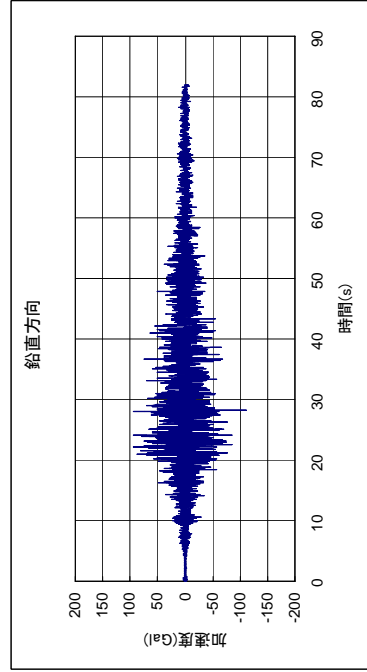
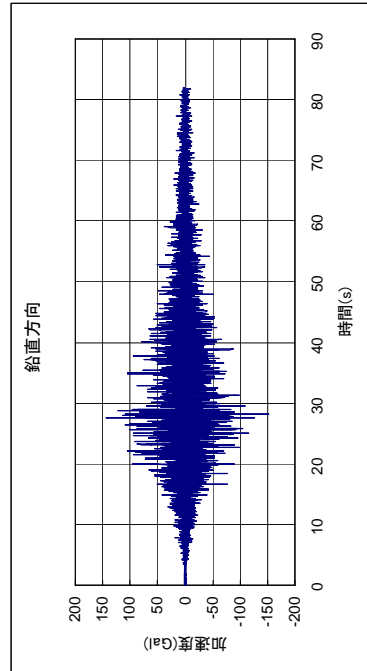
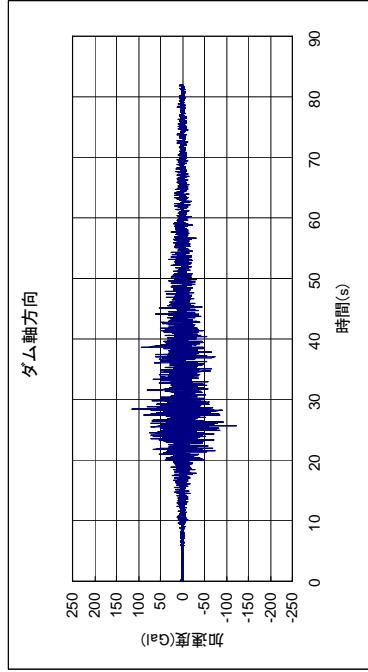
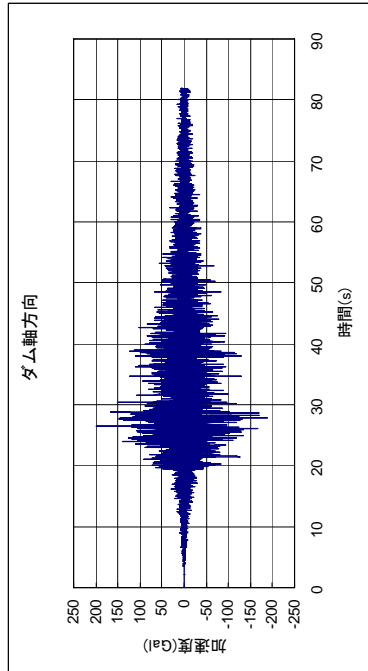
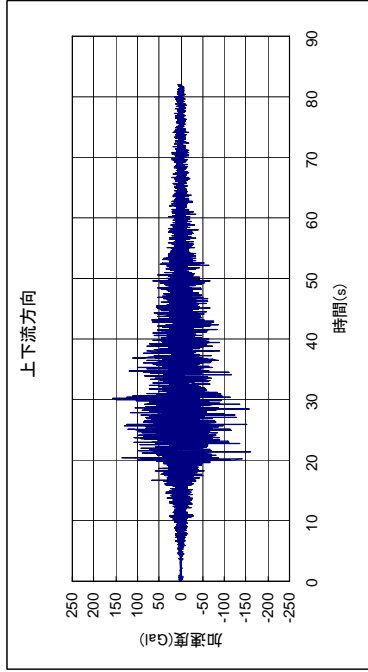
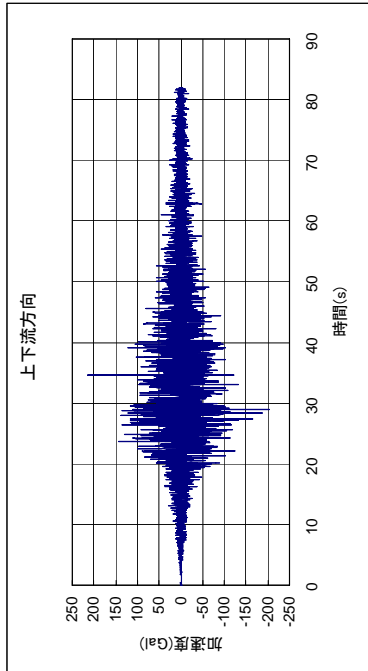
図7-5(d) 左岸リムトネル内 (R1) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

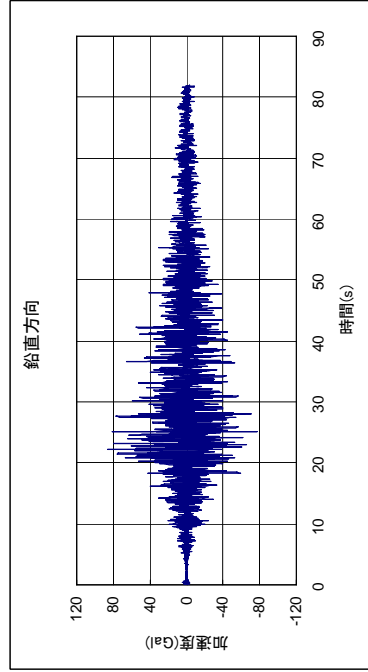
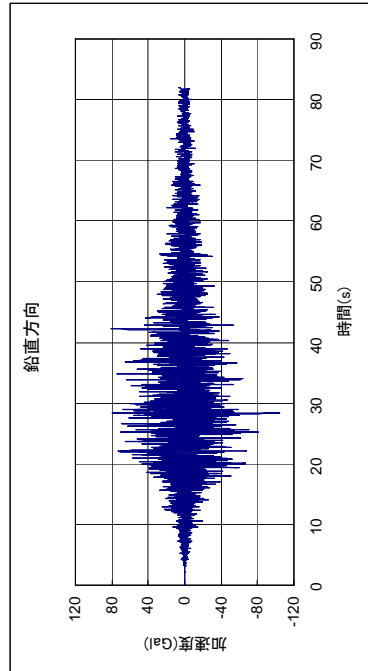
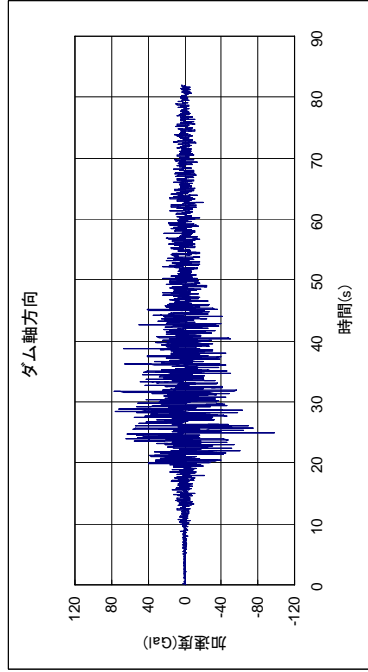
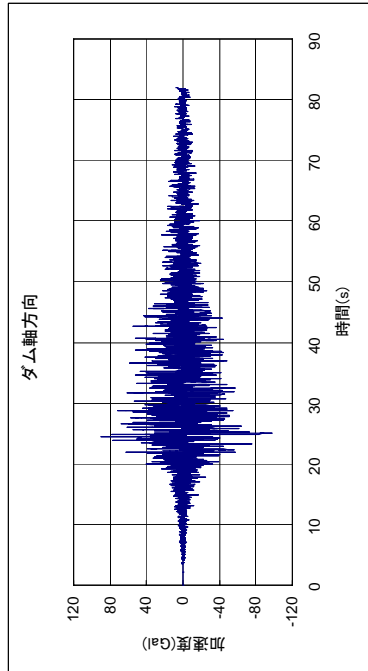
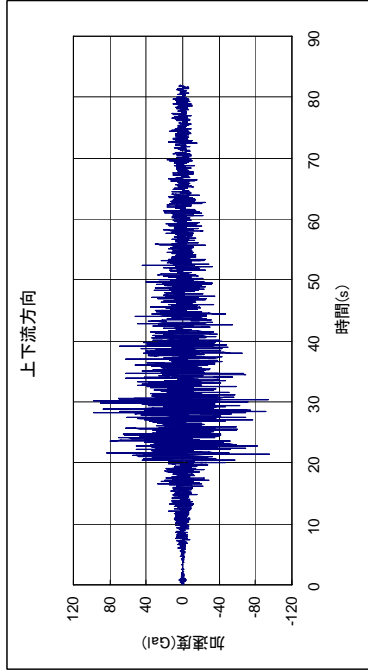
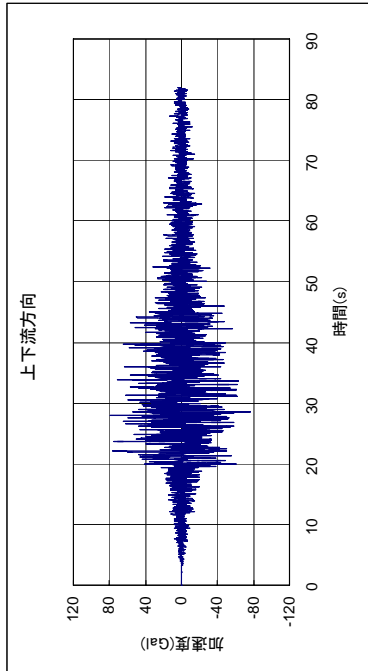
図7-5(e) ダム左肩 (T1) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

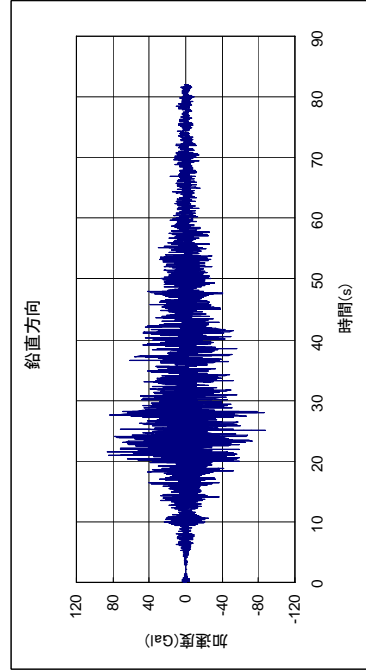
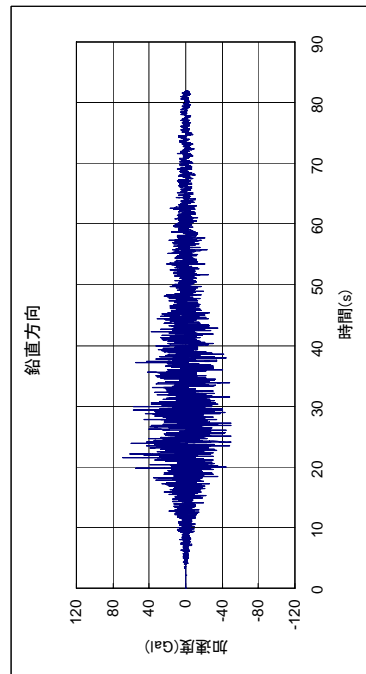
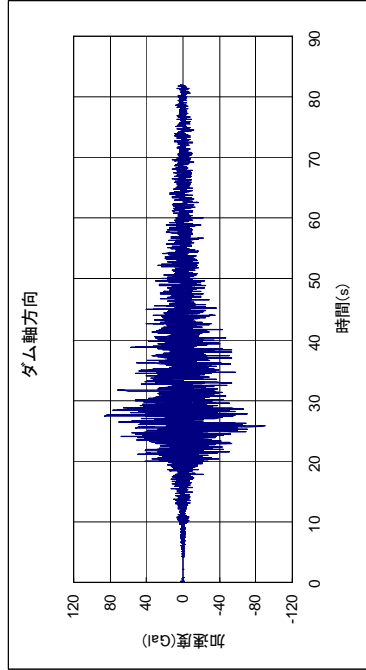
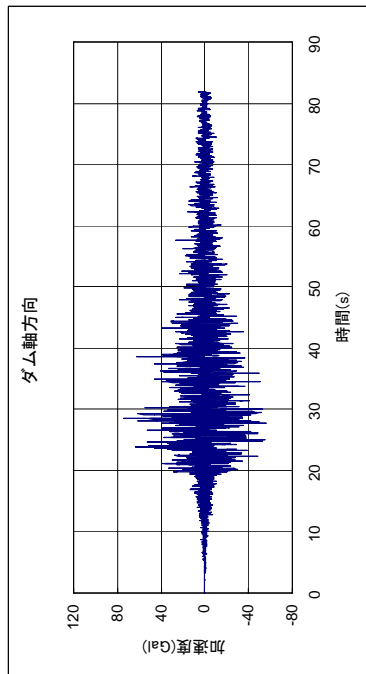
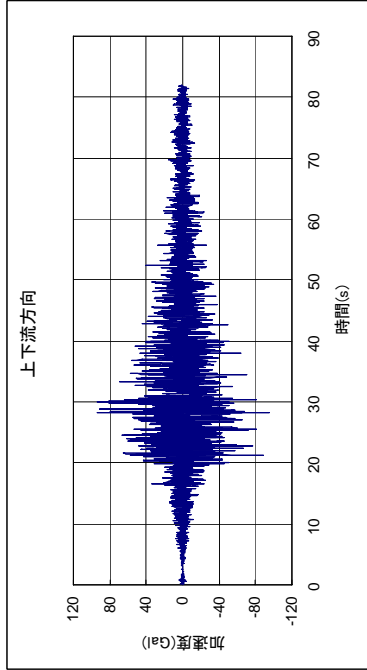
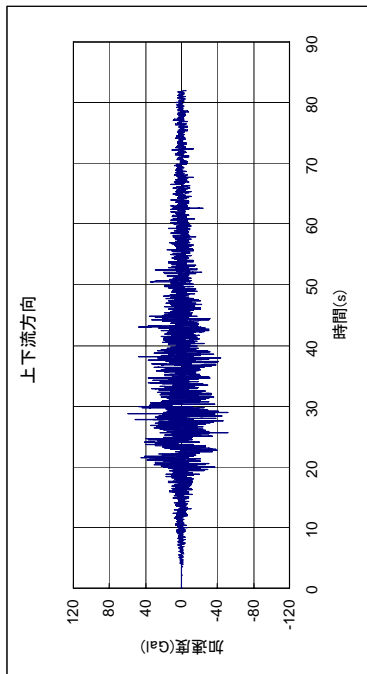
図7-5(f) ダム右肩 (T3) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

図7-5(g) 右岸リムトンネル内 (R2) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

図7-5(h) 下流側開放基盤 (G1) の加速度応答時刻歴

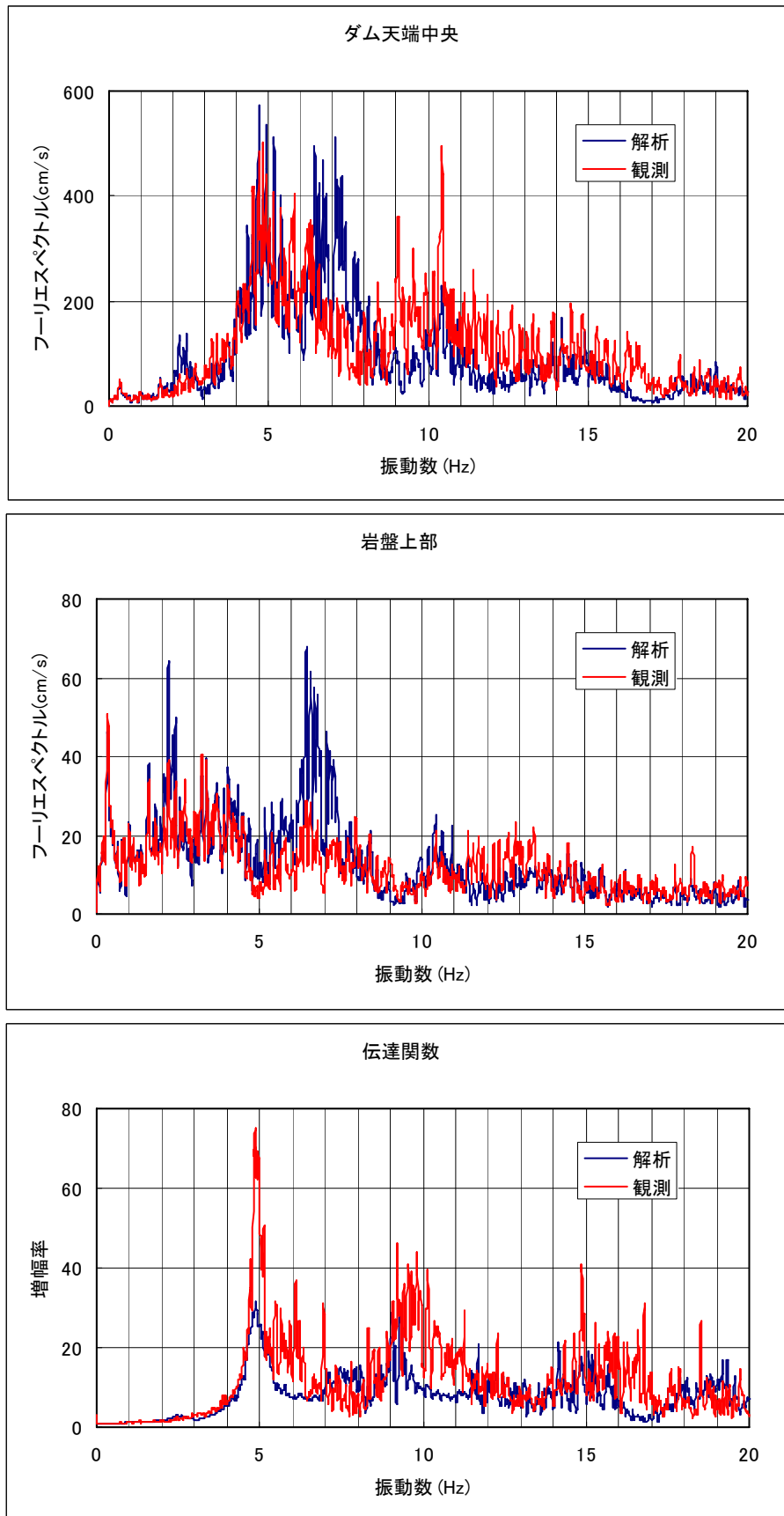


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

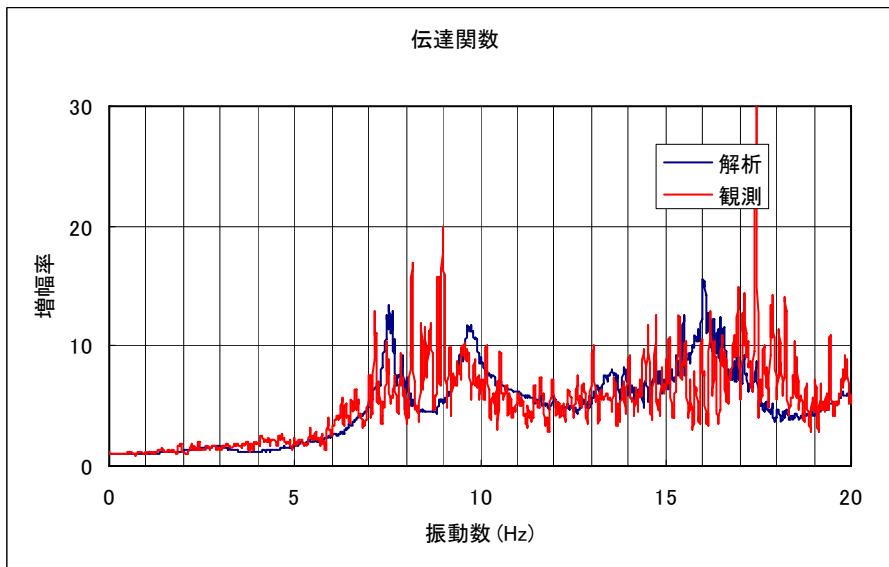
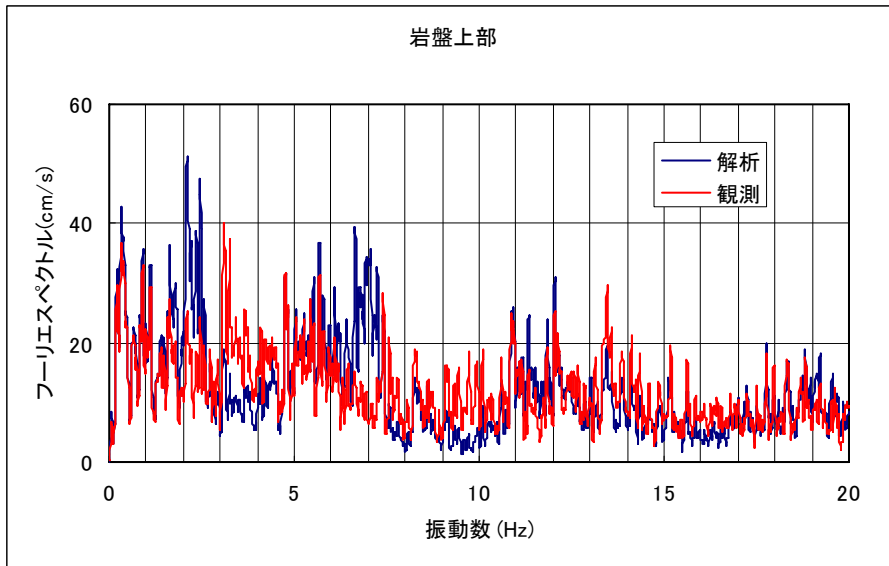
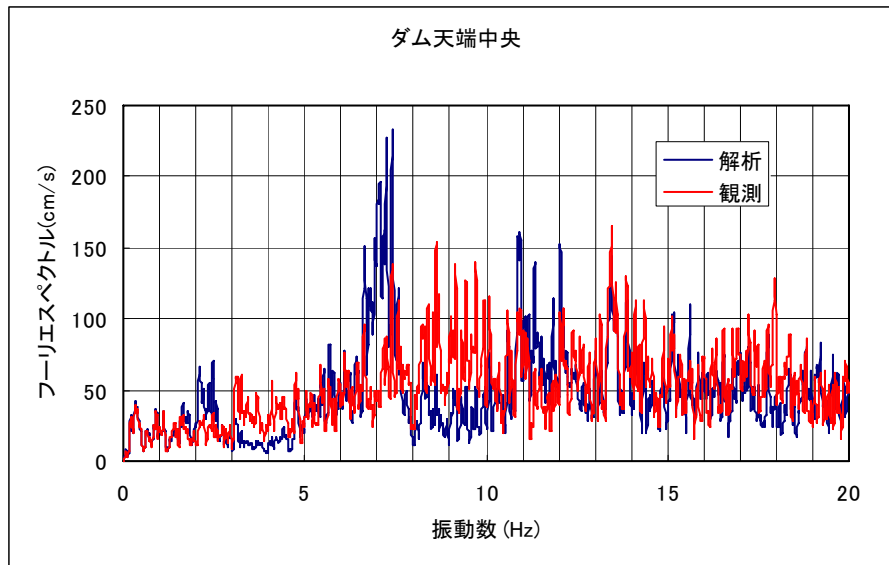


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

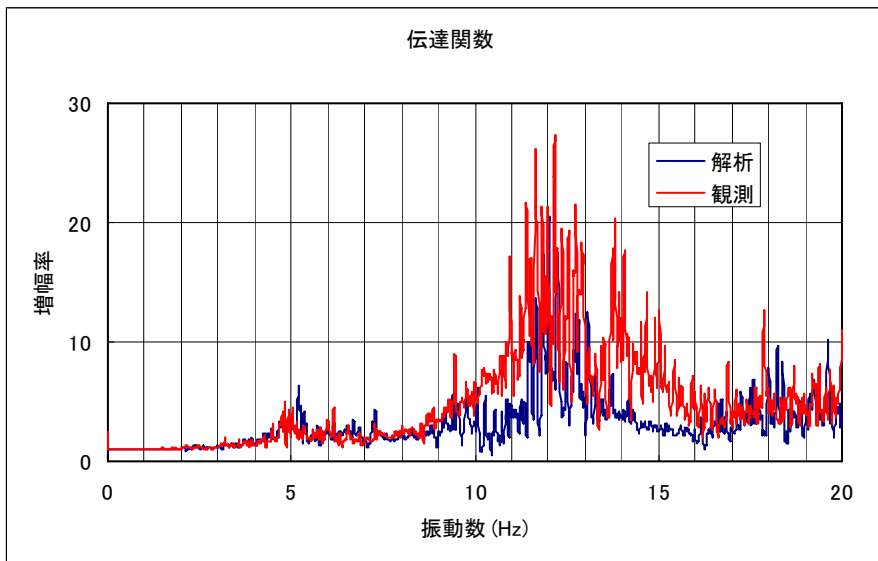
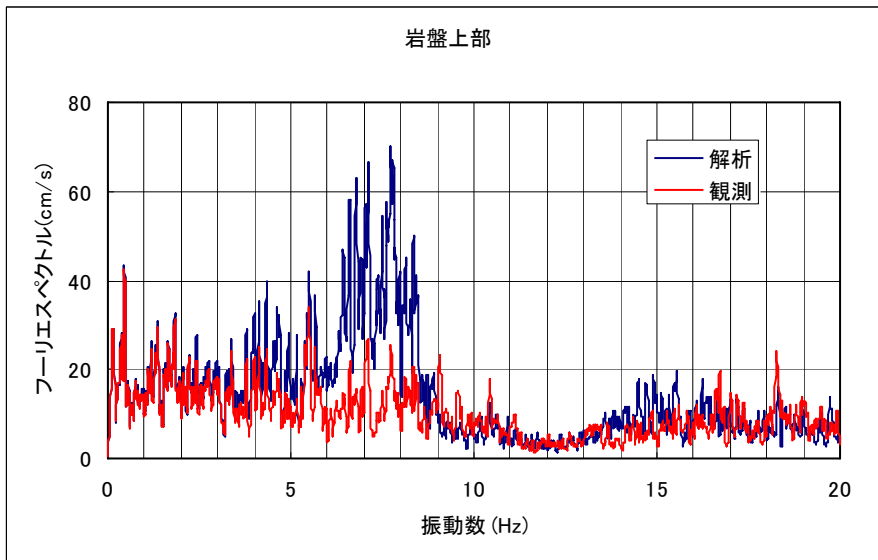
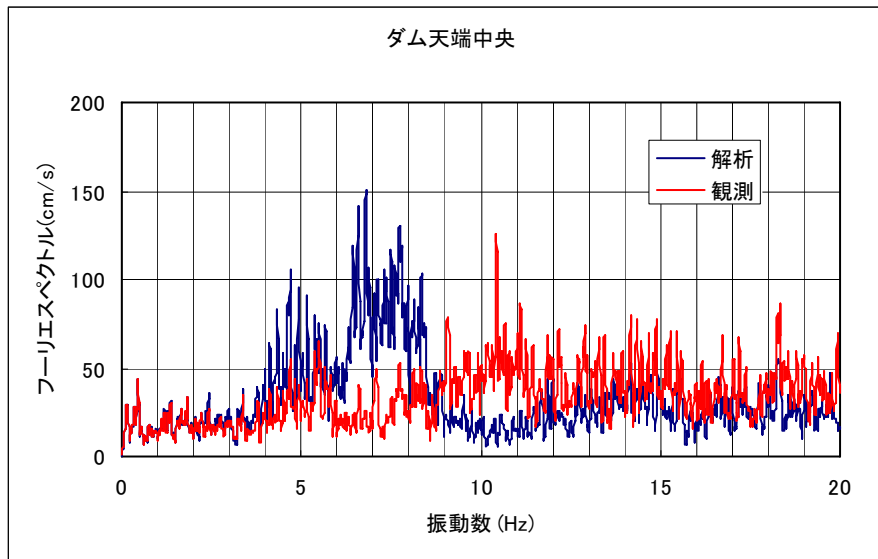


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

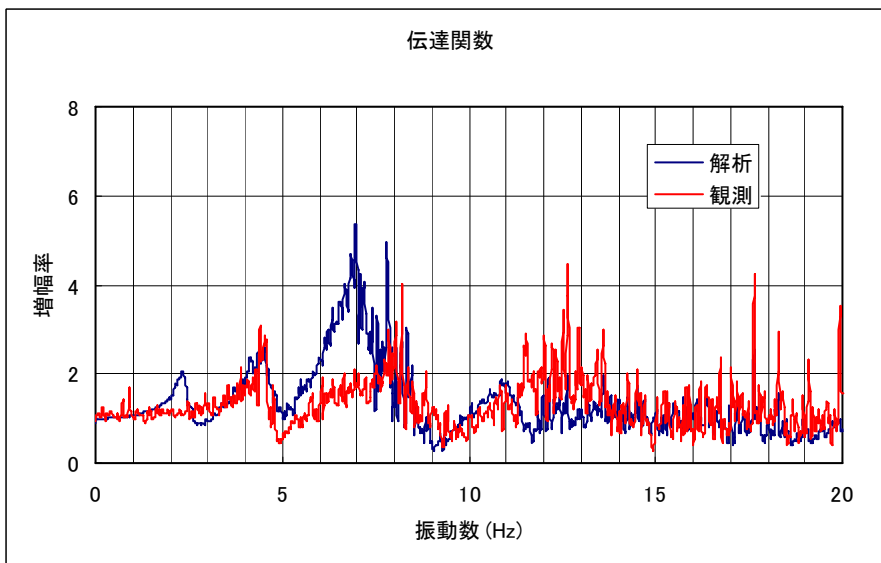
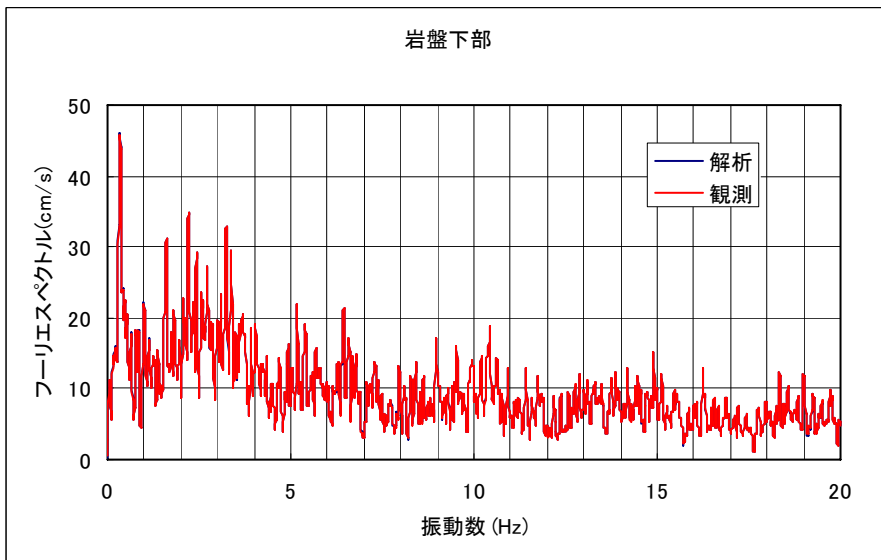
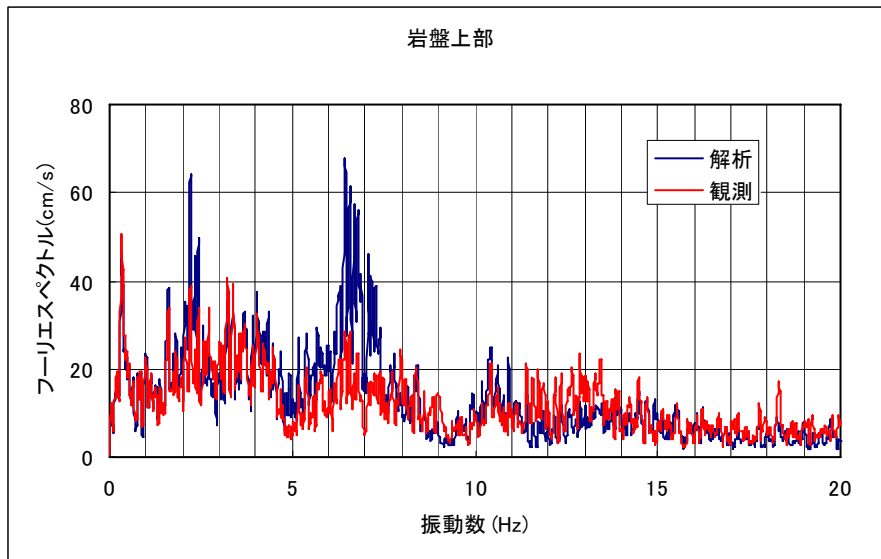


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

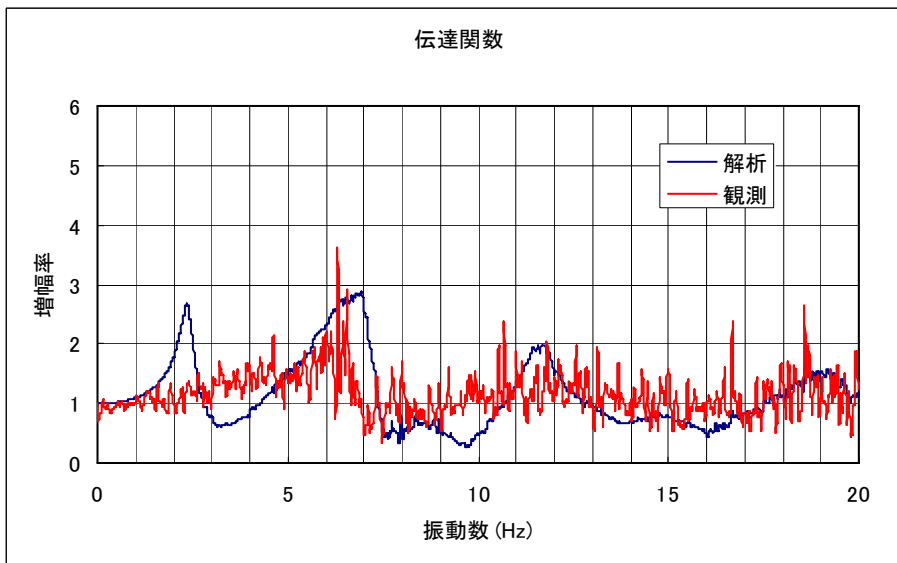
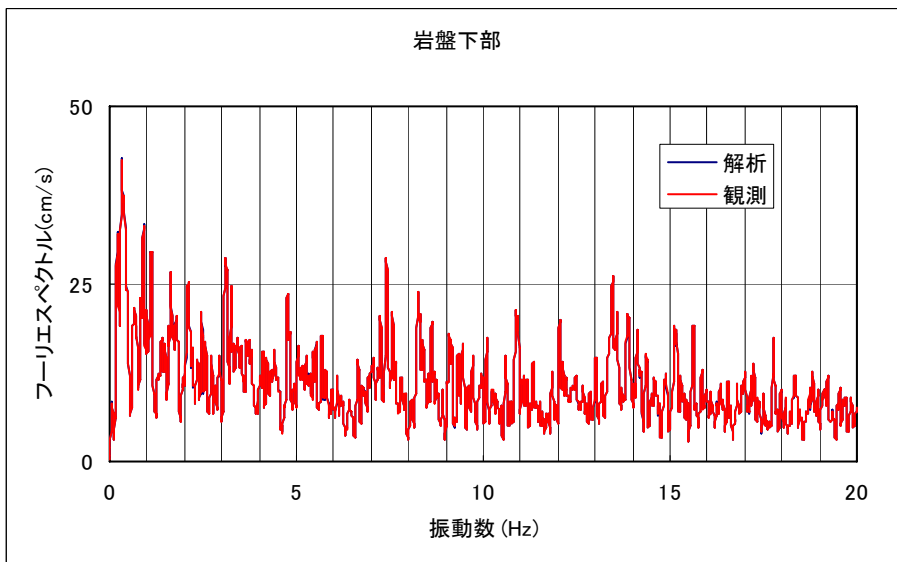
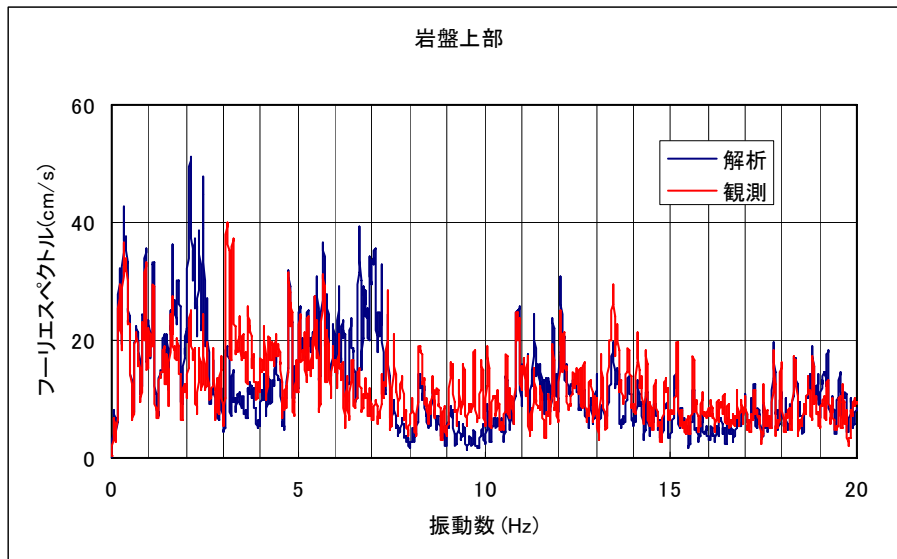


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

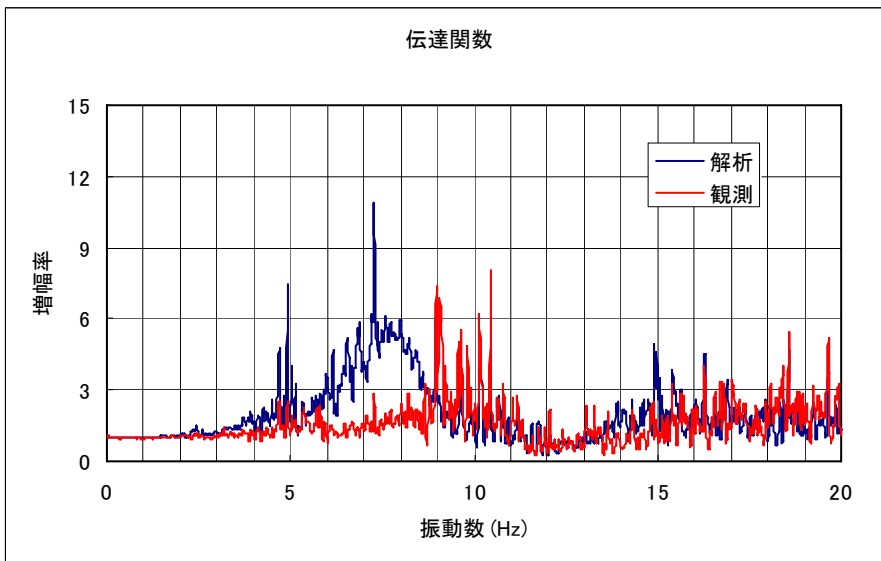
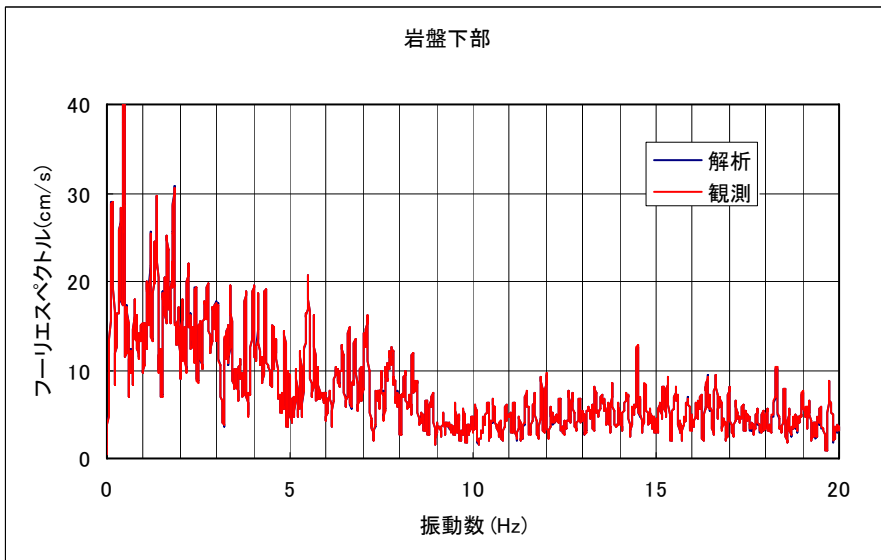
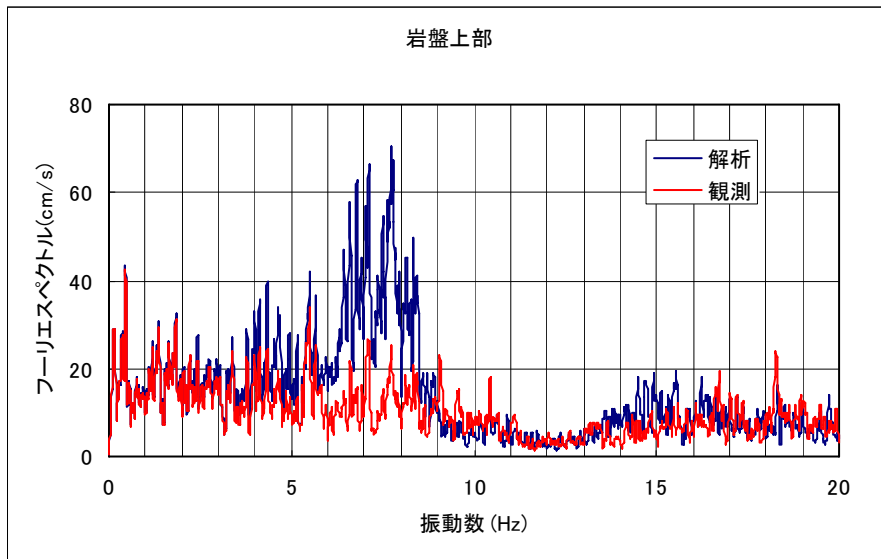


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

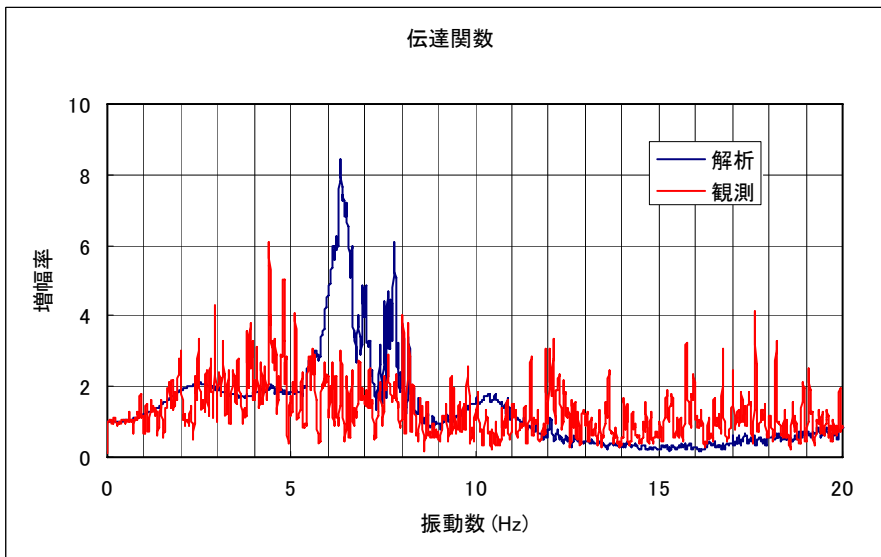
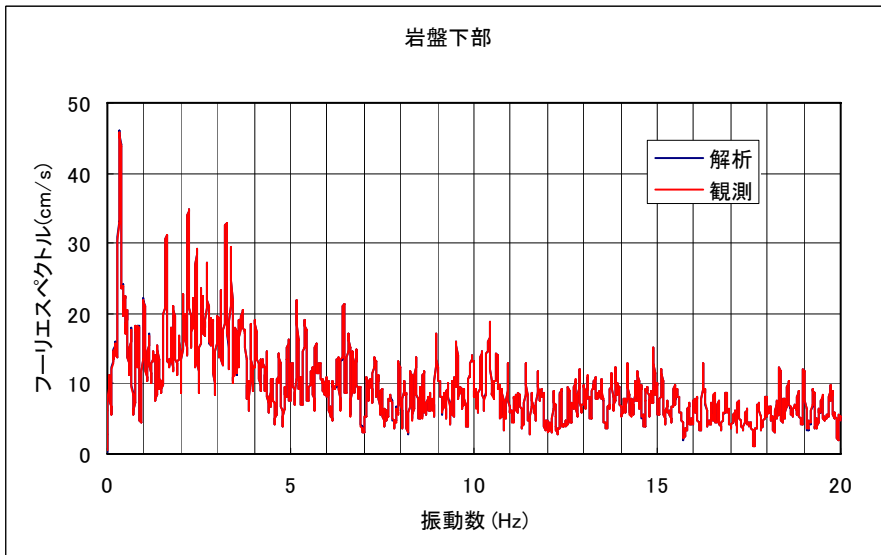
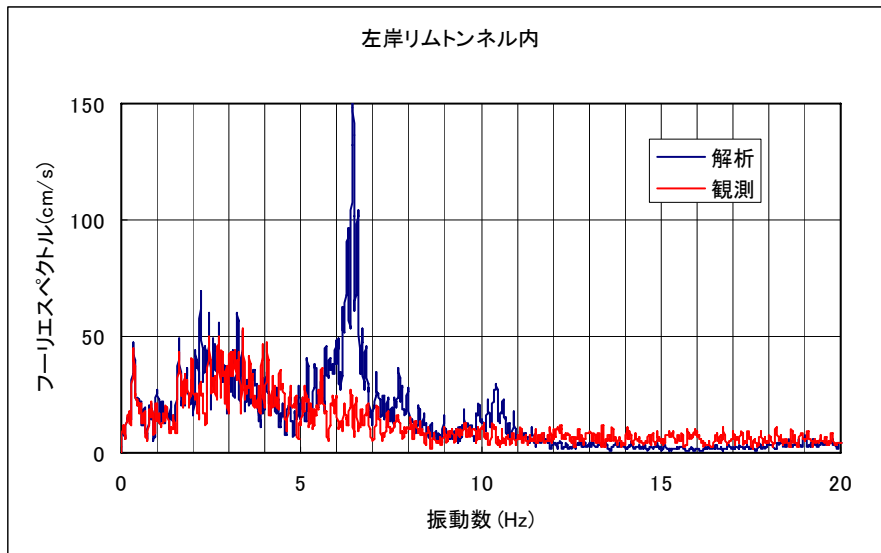


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

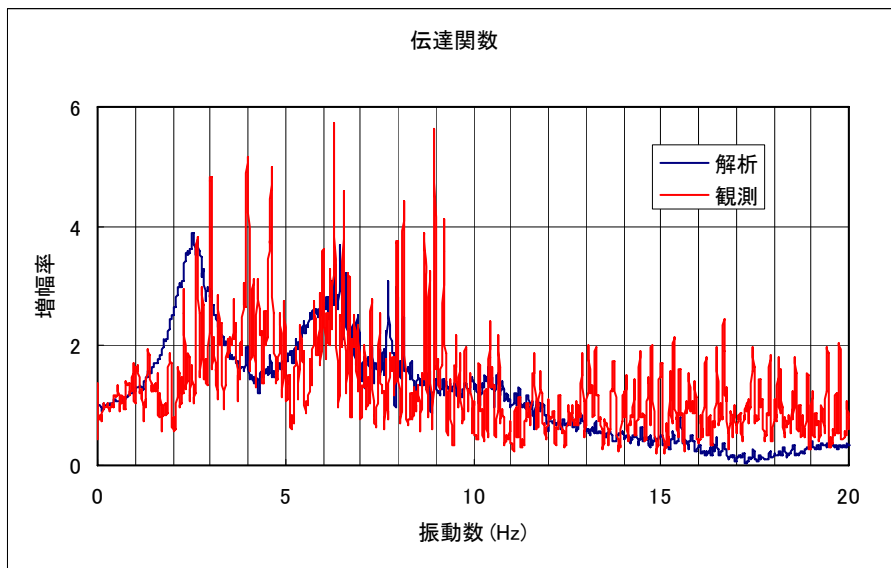
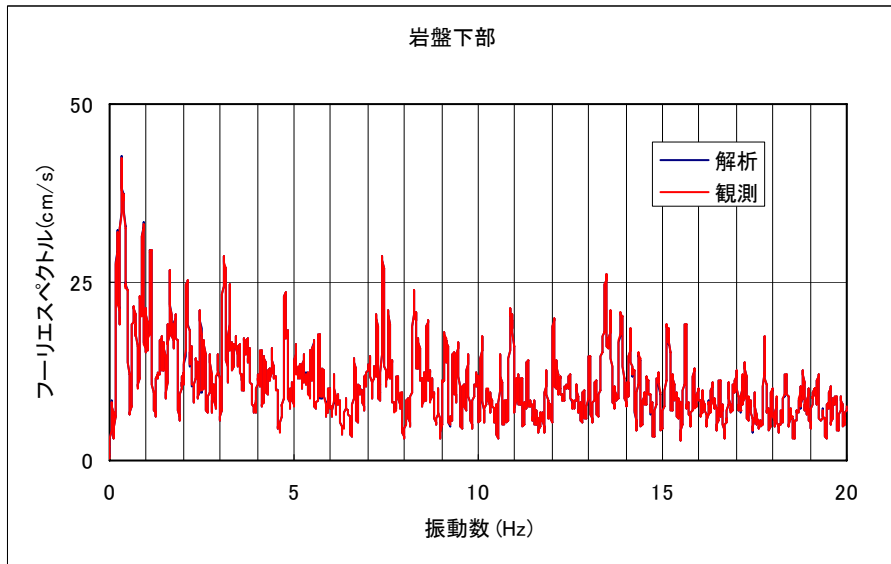
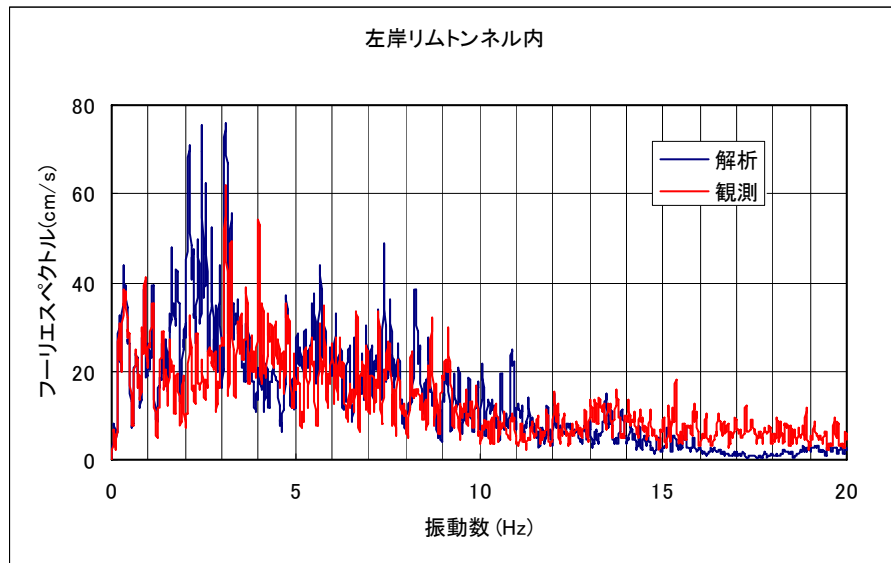


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

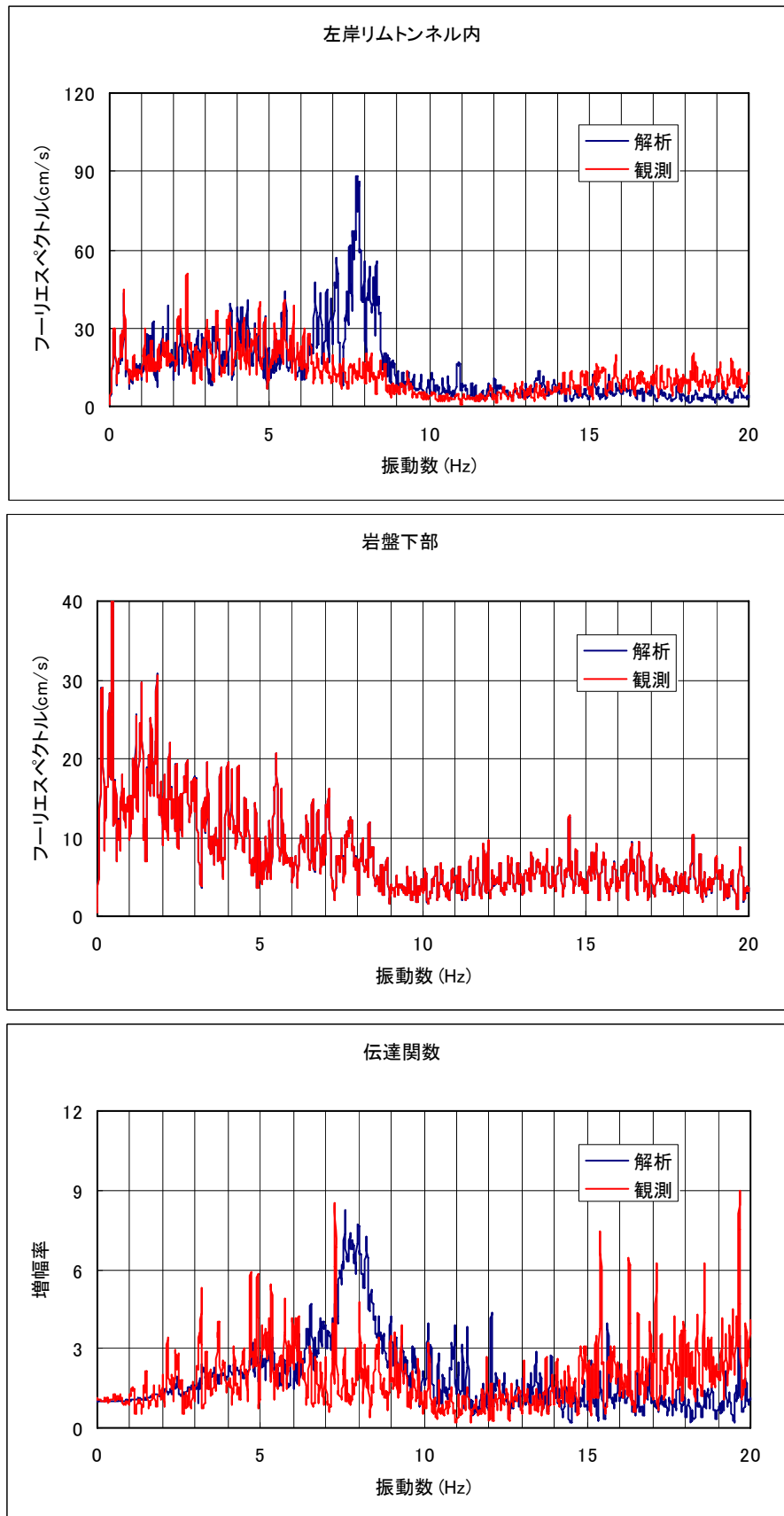


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

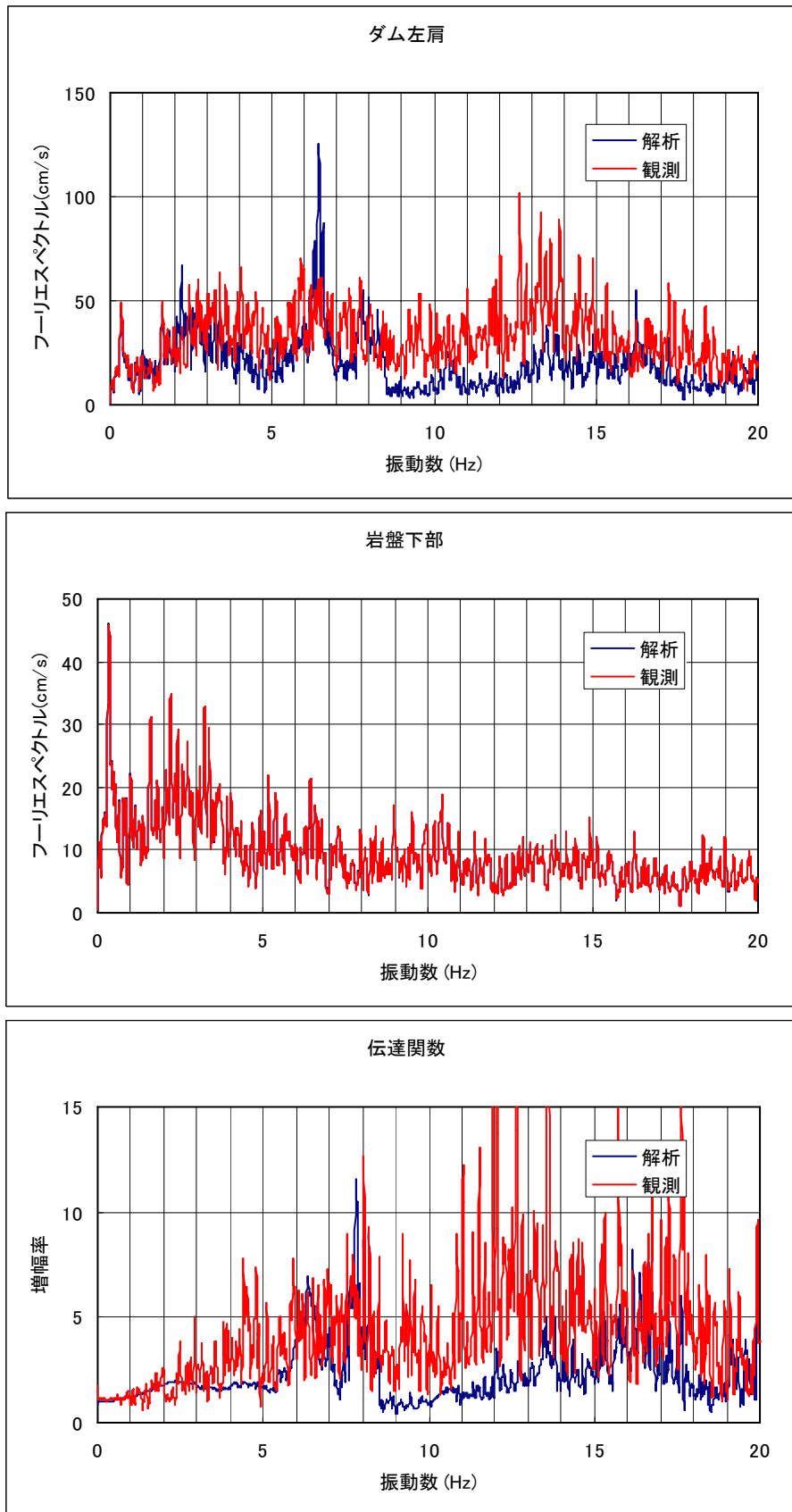


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

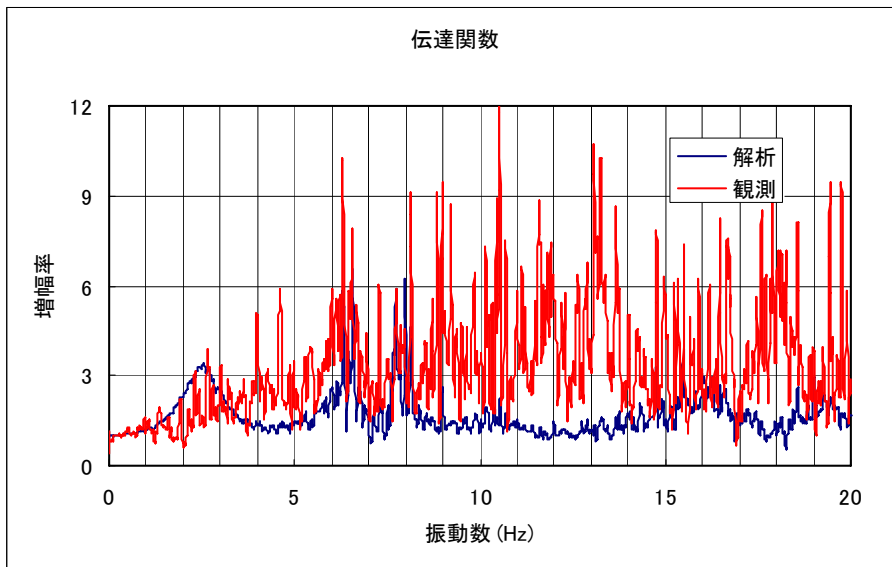
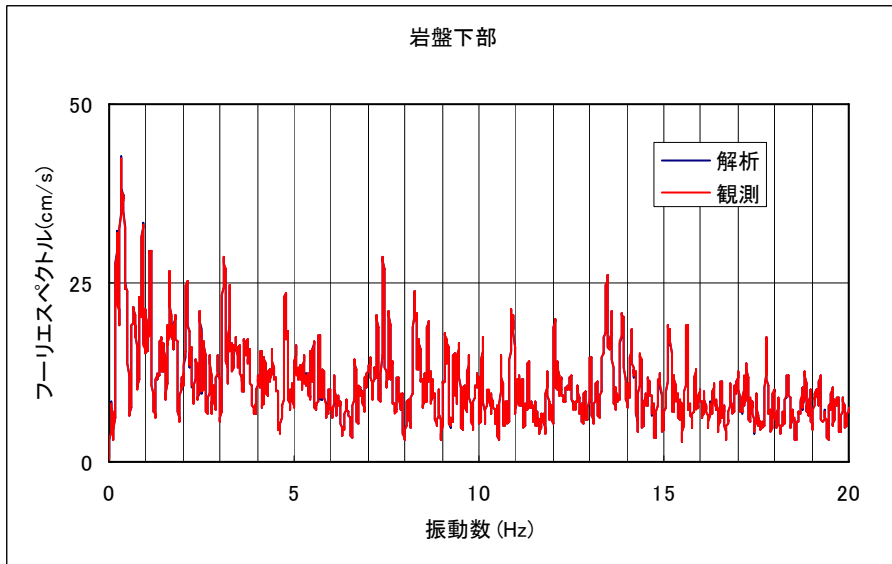
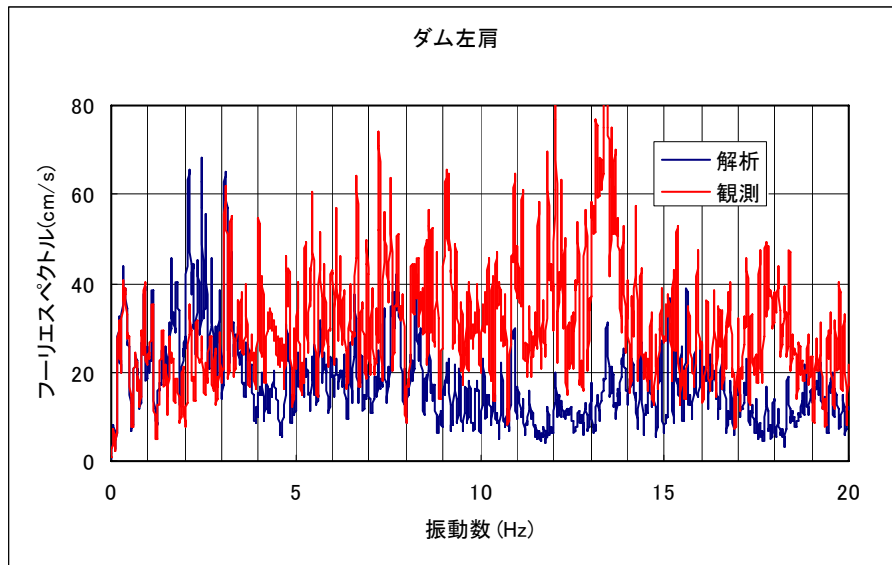


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

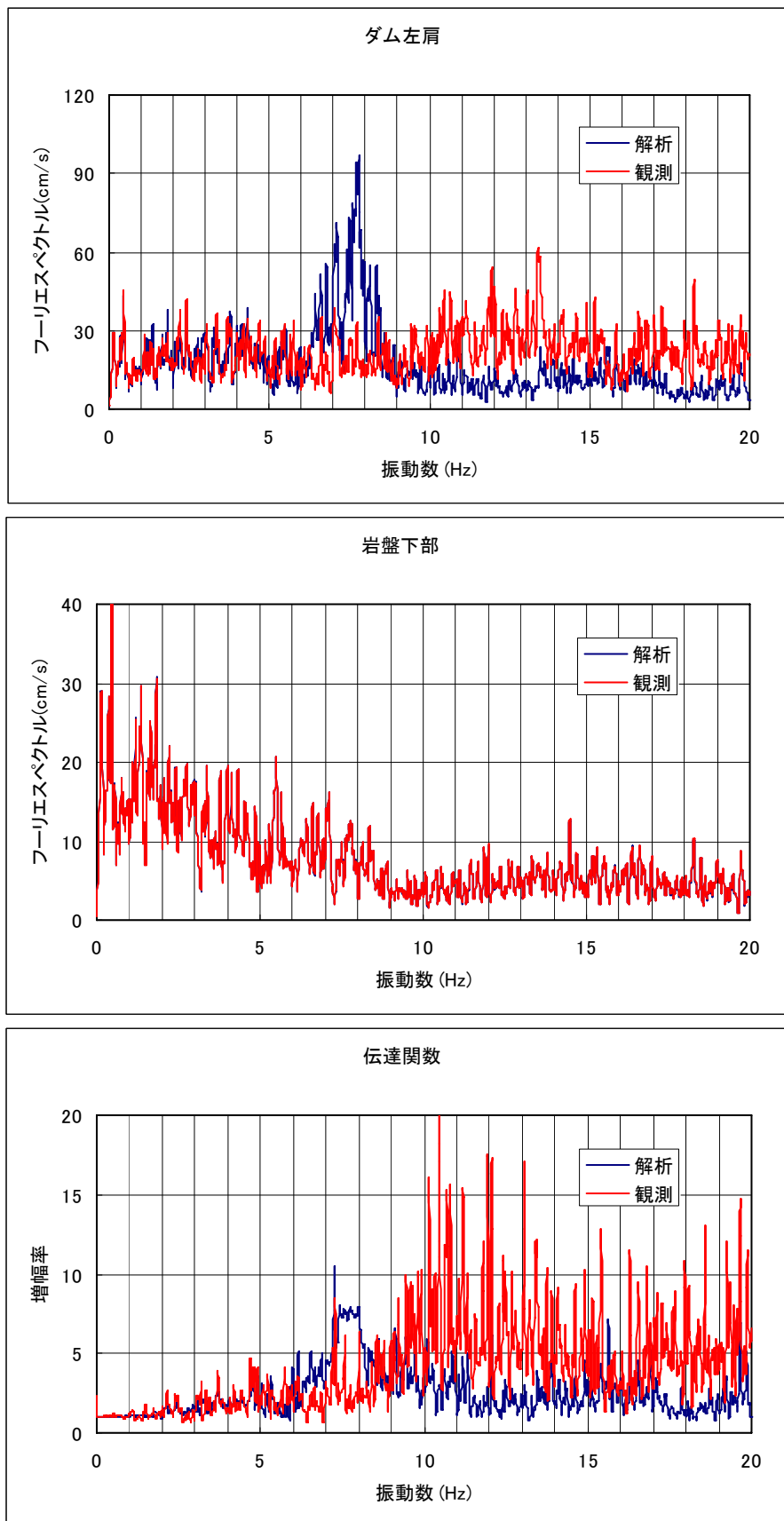


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

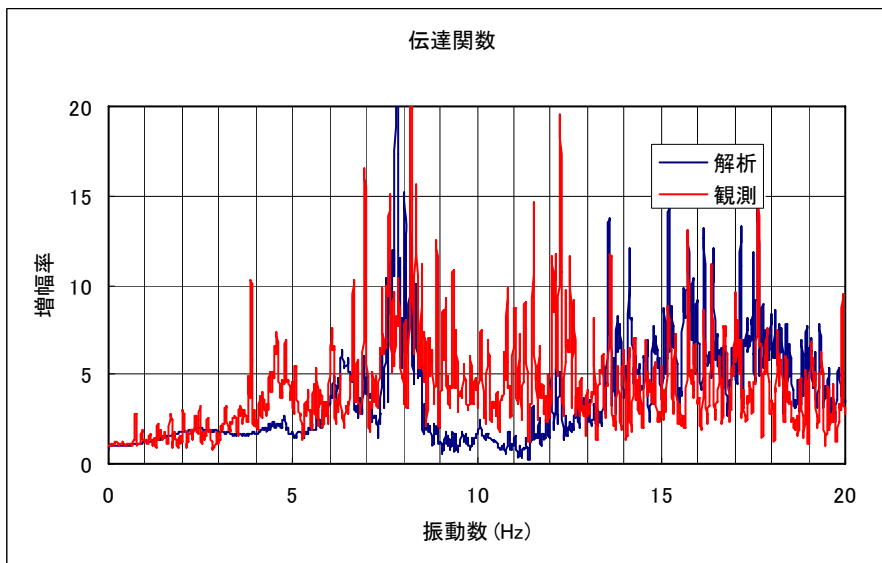
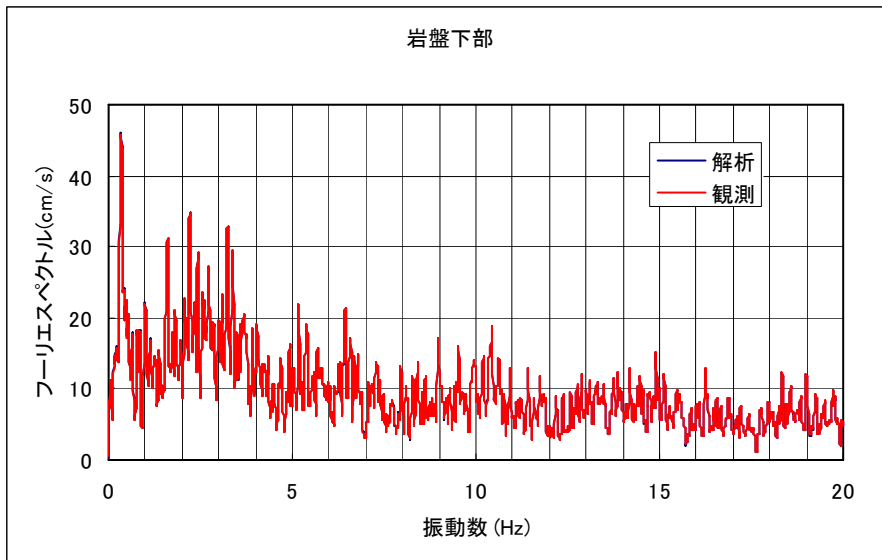
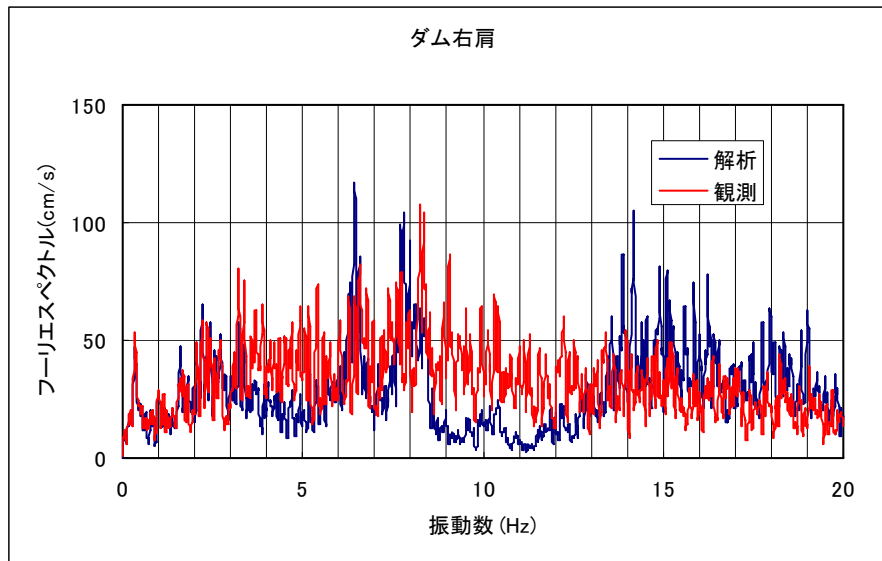


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

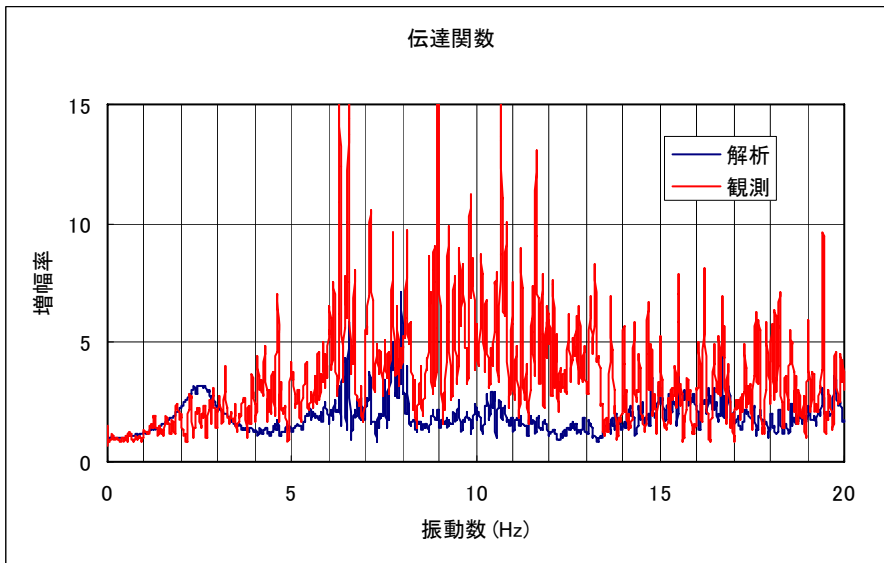
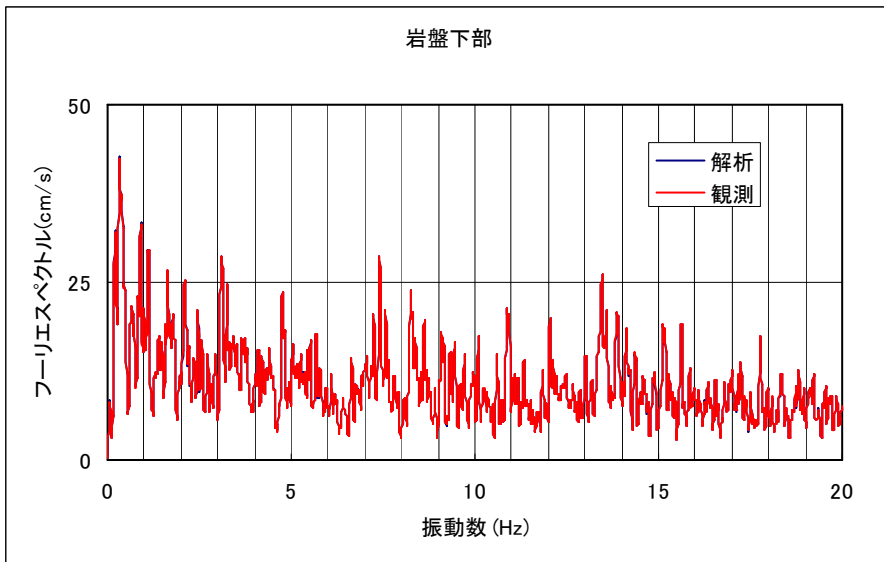
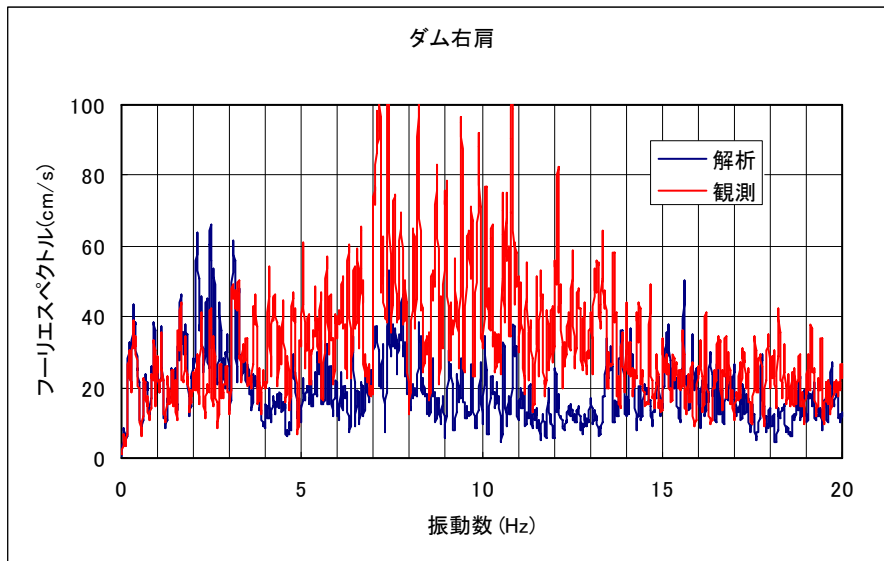


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

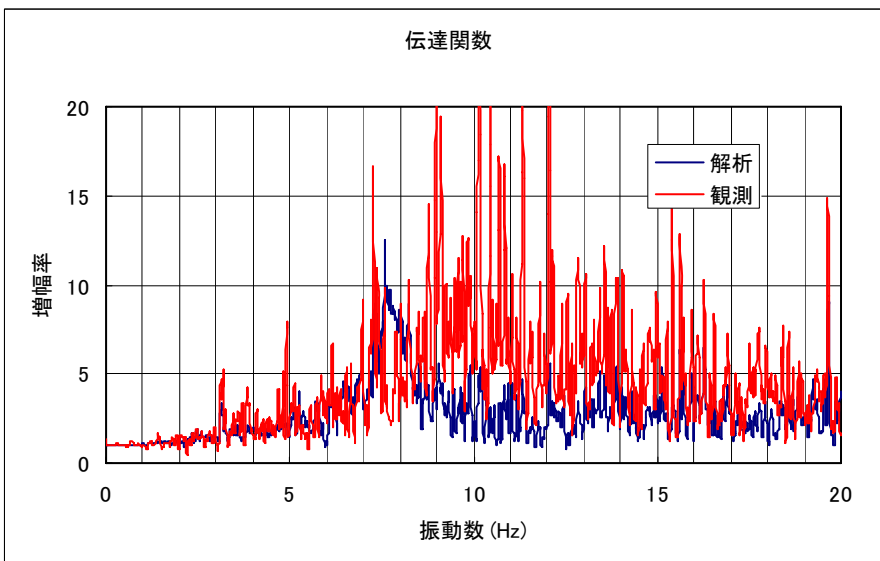
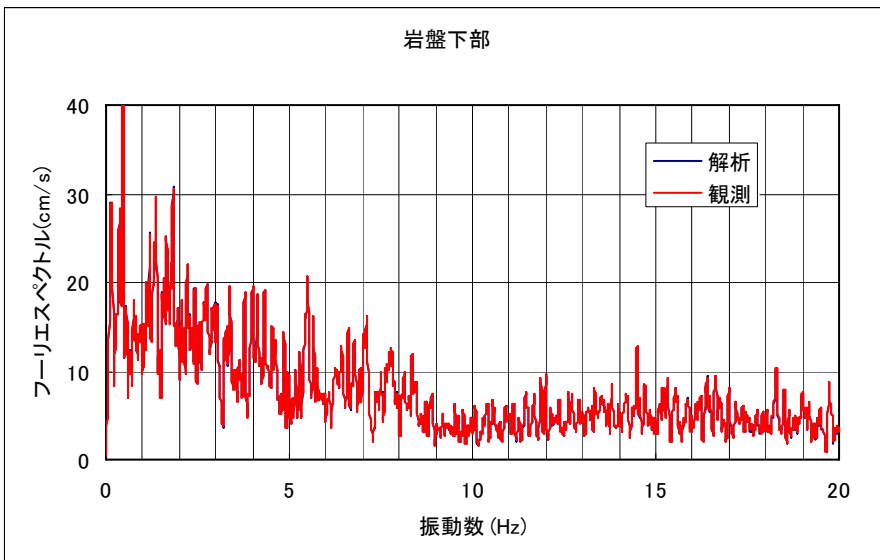
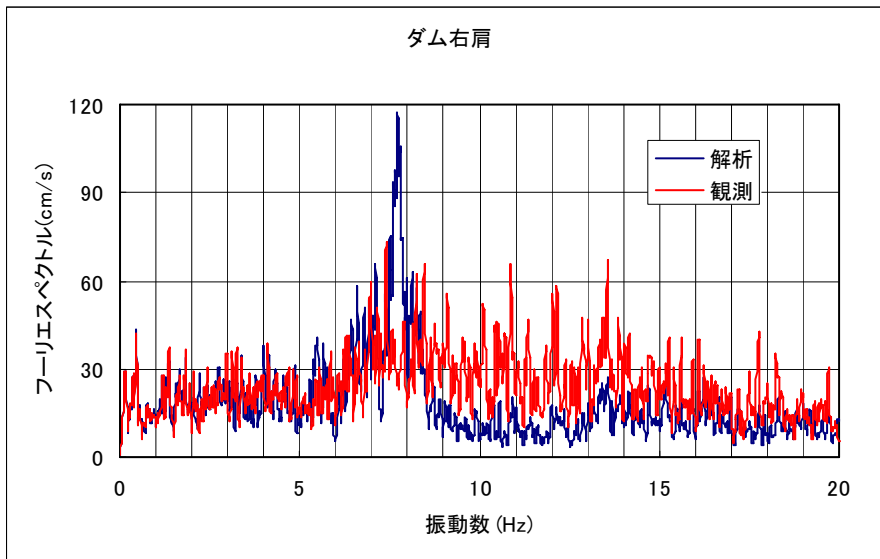


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

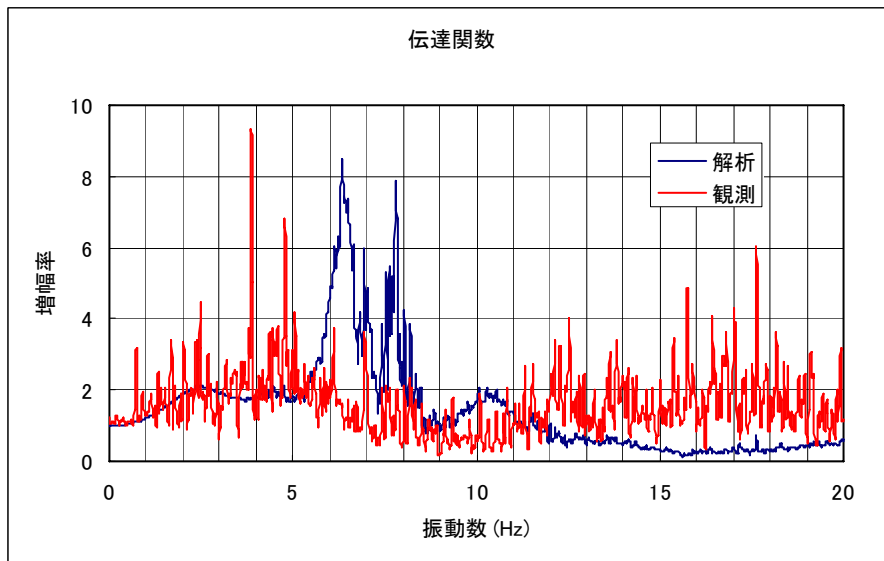
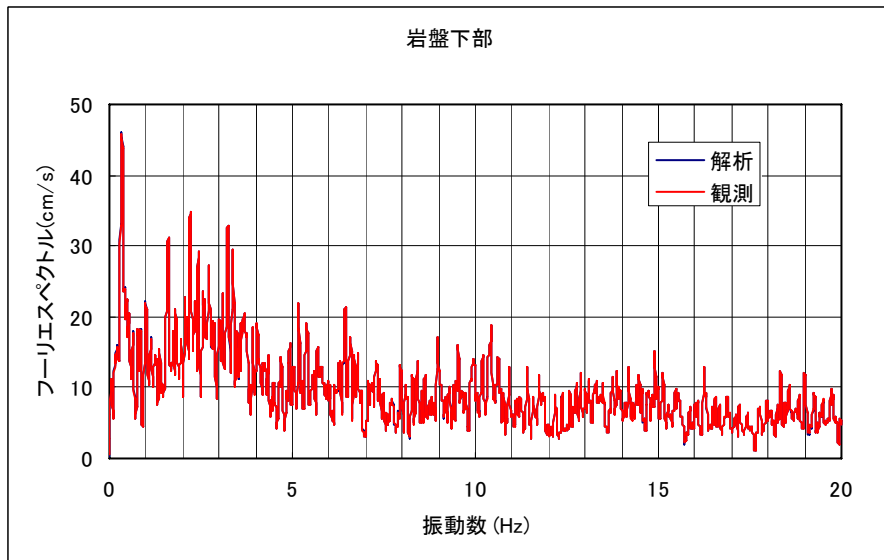
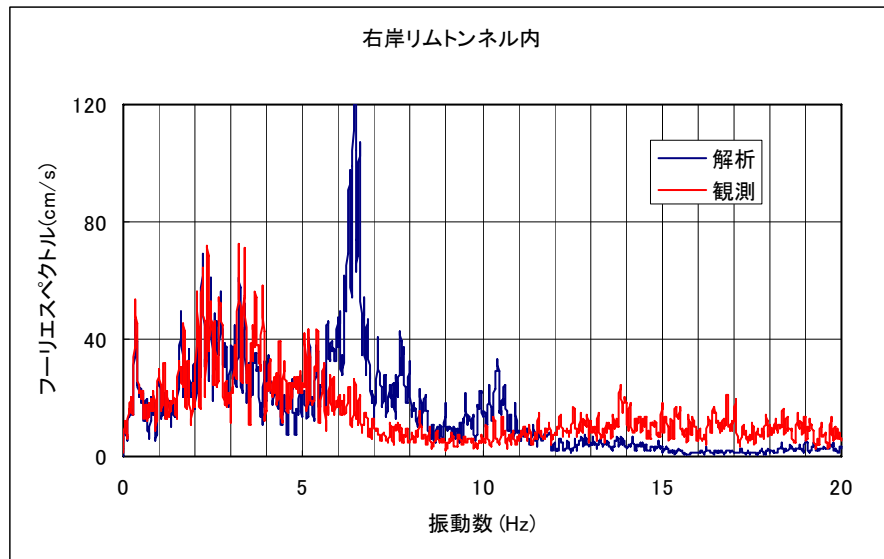


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

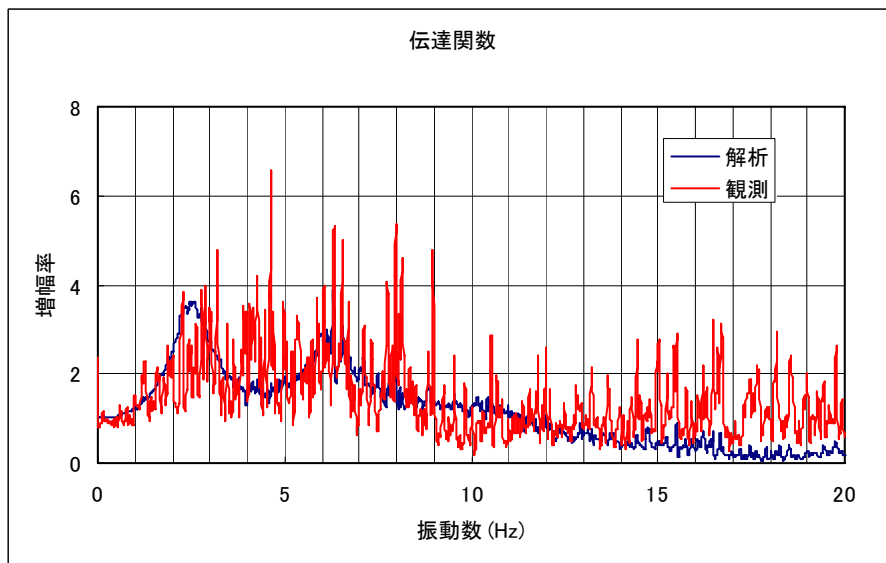
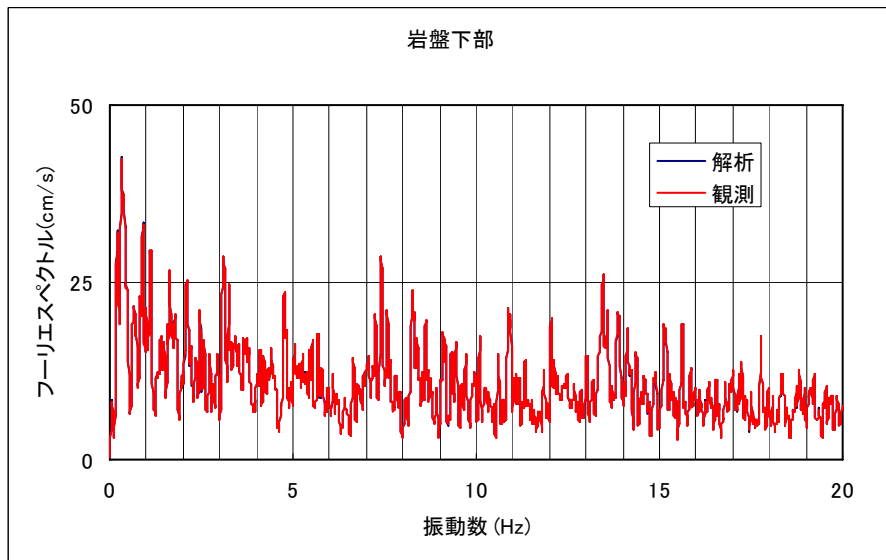
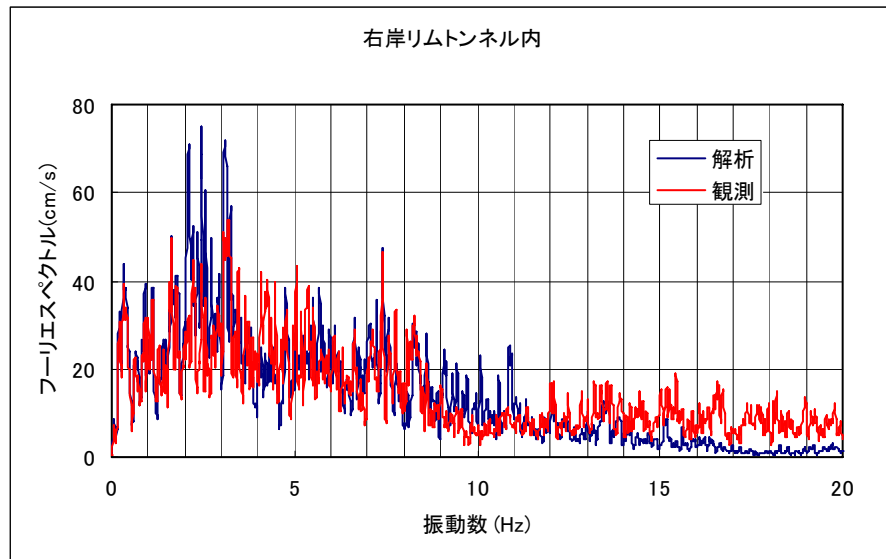


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

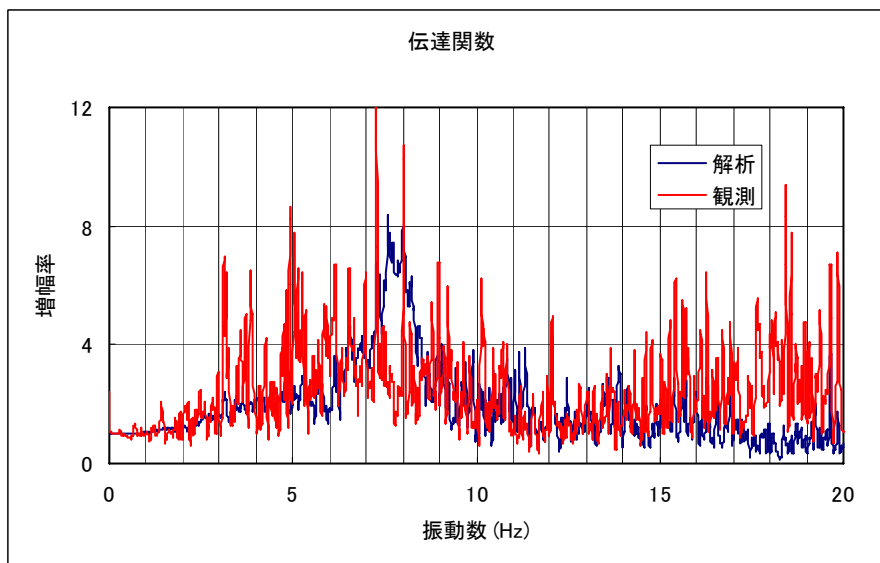
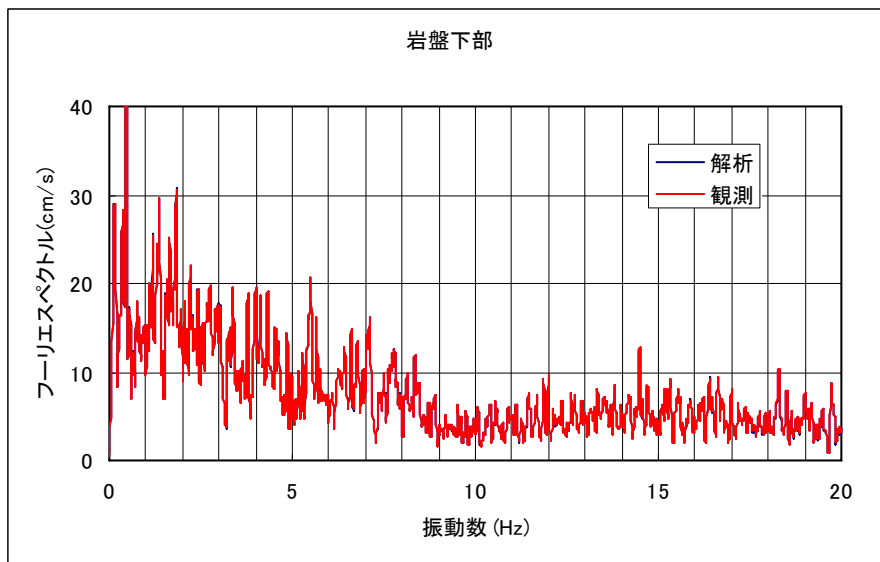
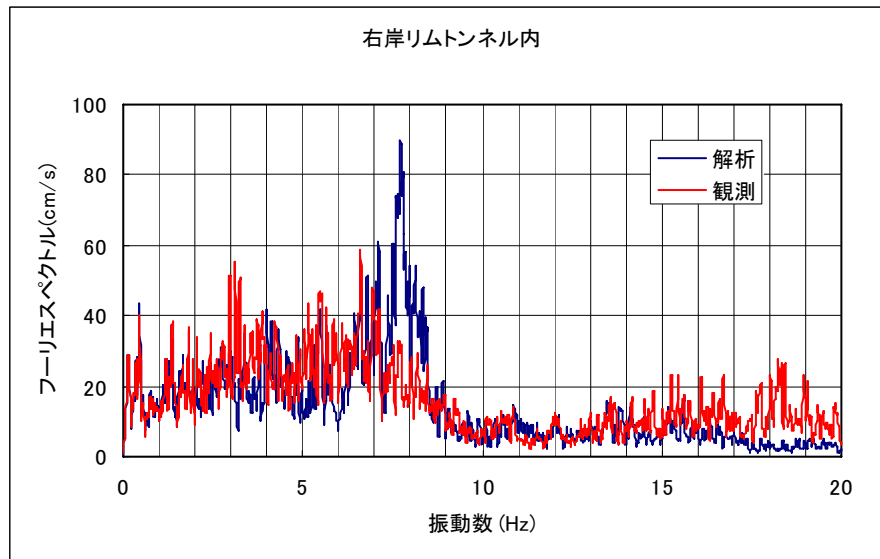


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

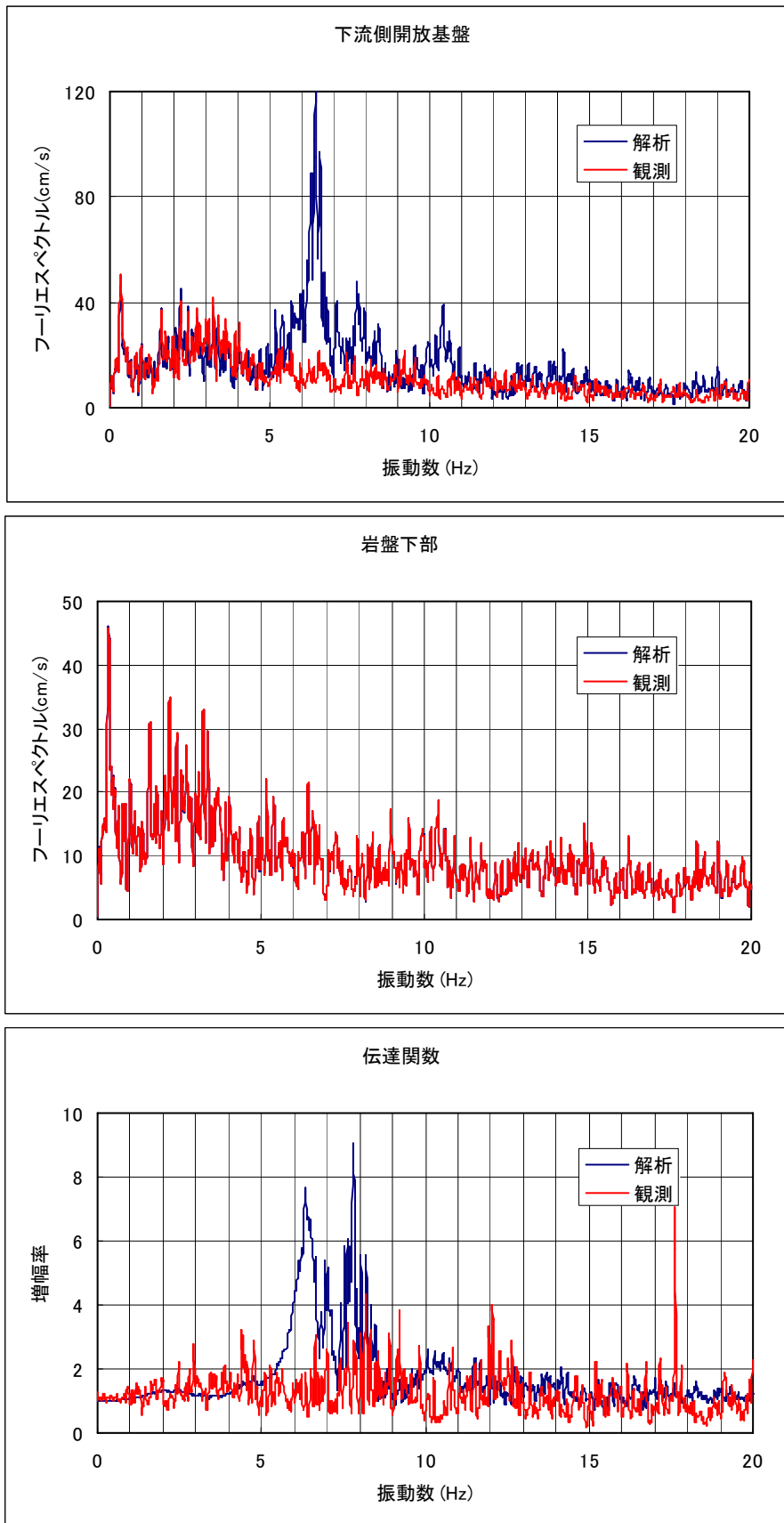


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

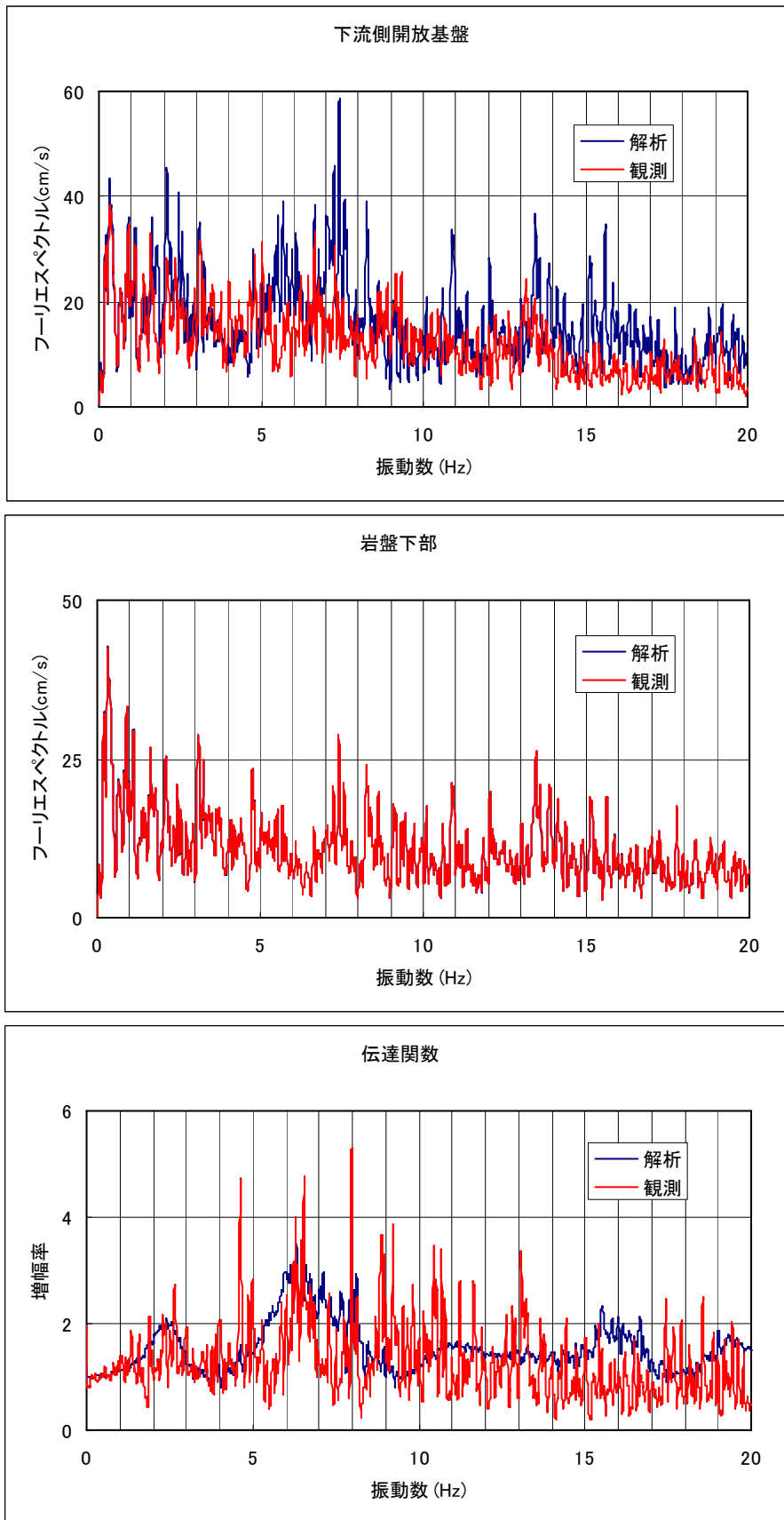


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

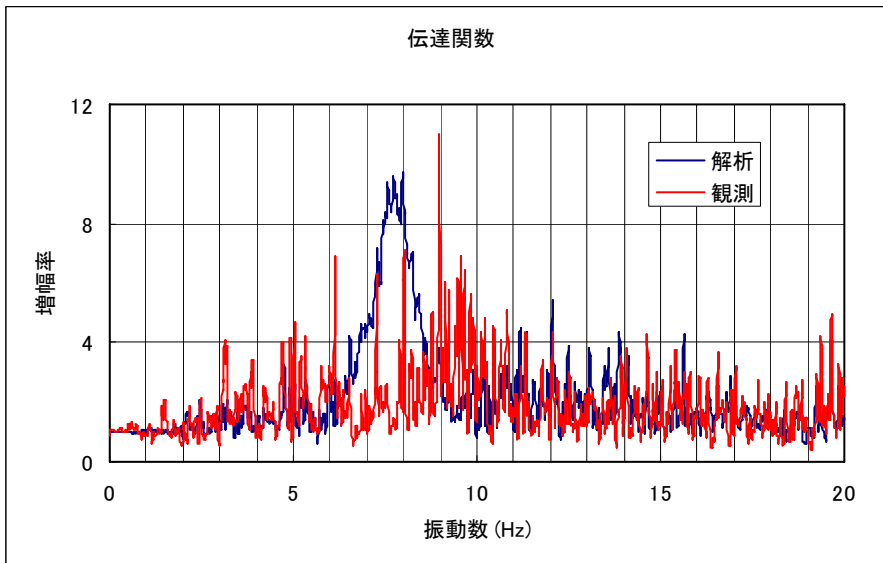
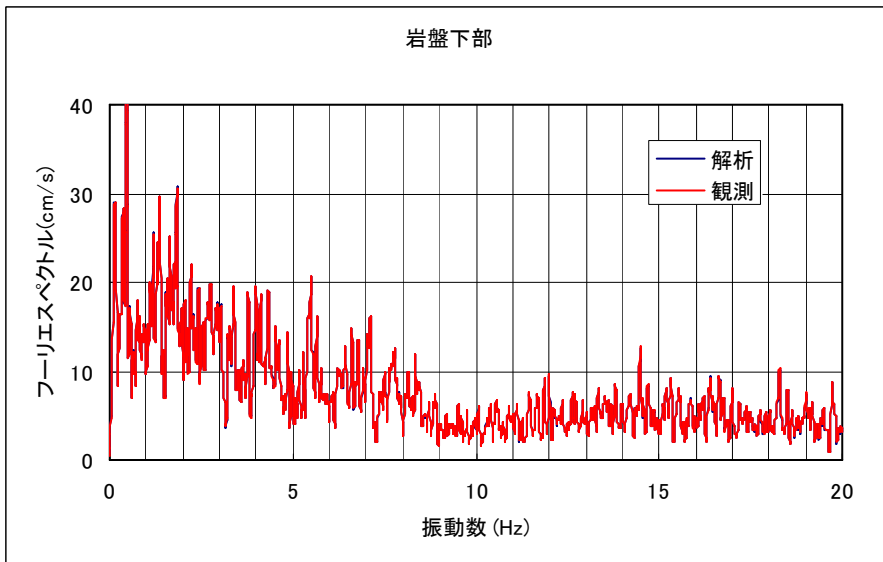
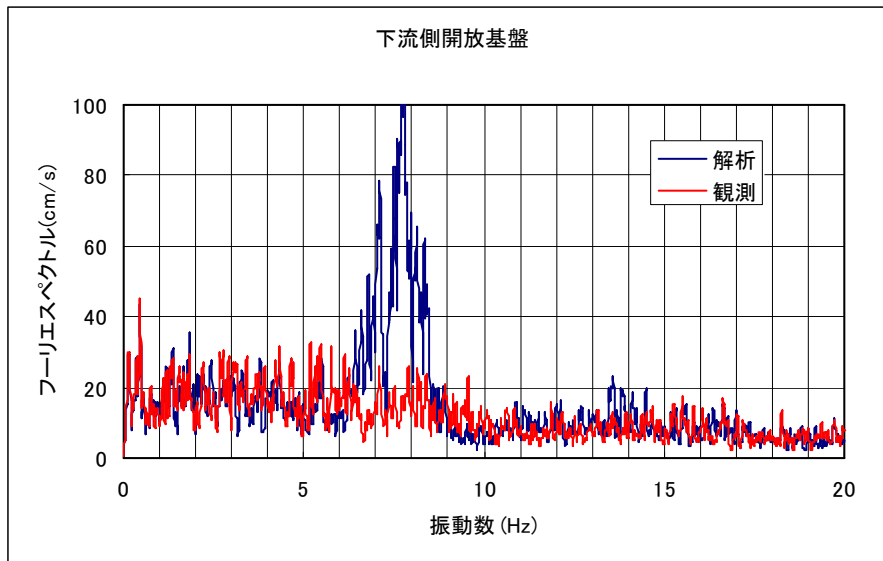


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

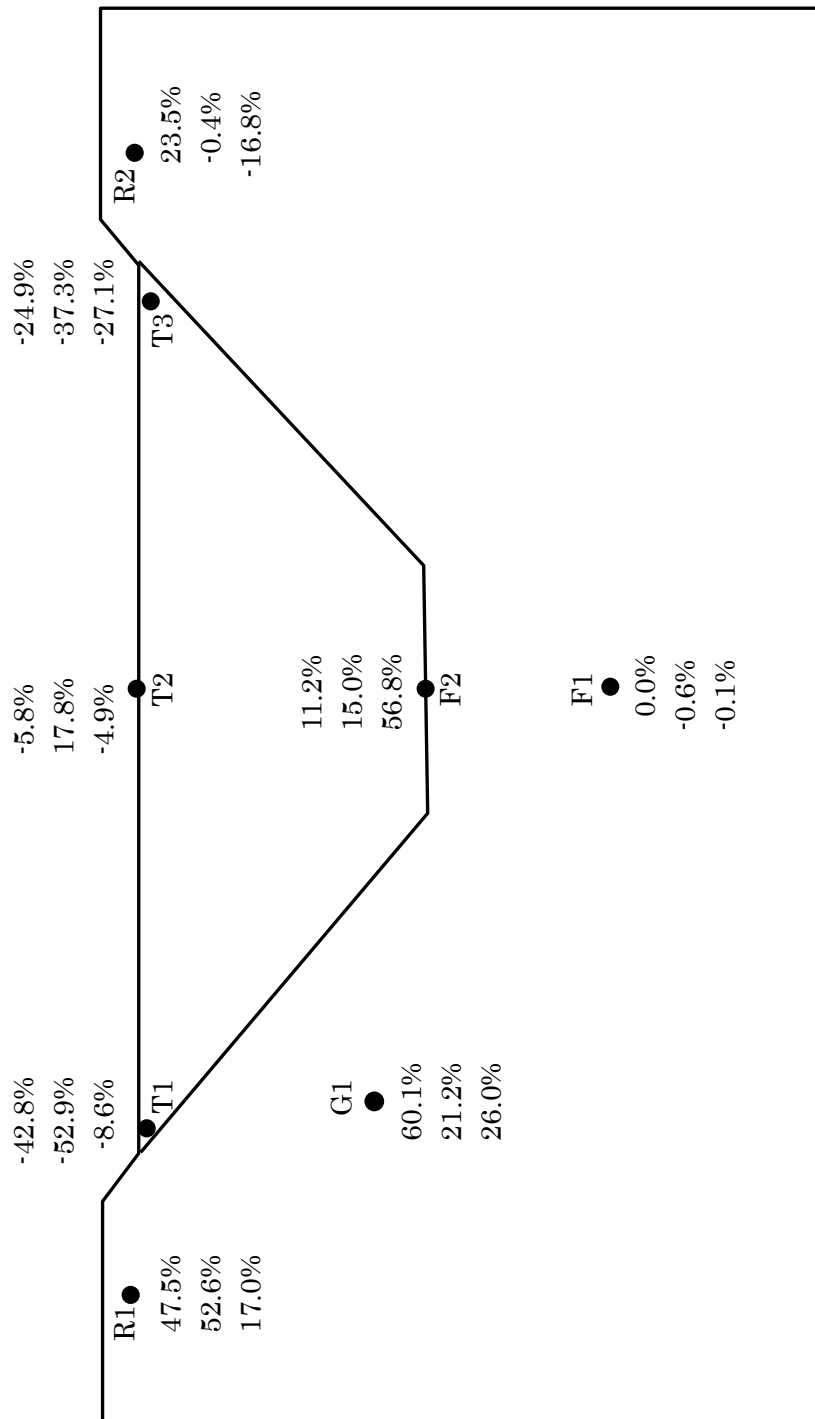


図 7-7 各観測点の計算結果と観測結果の相対差
 (相対差=(計算値-観測値)/観測値)

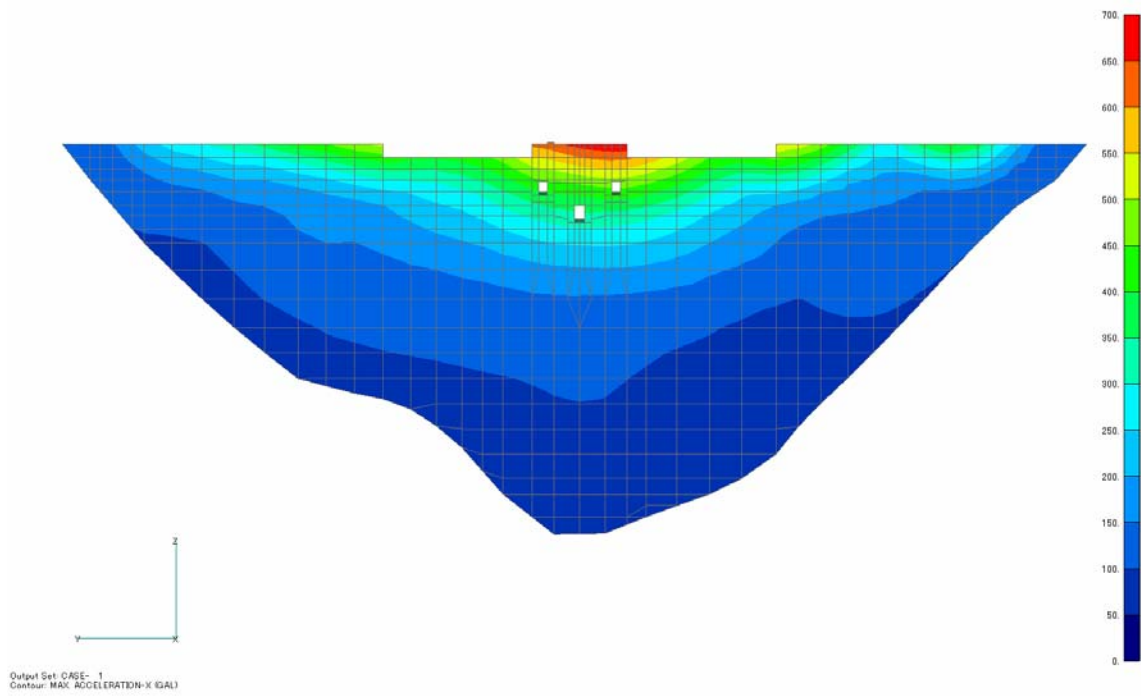


図 7-8(a) 上下流方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

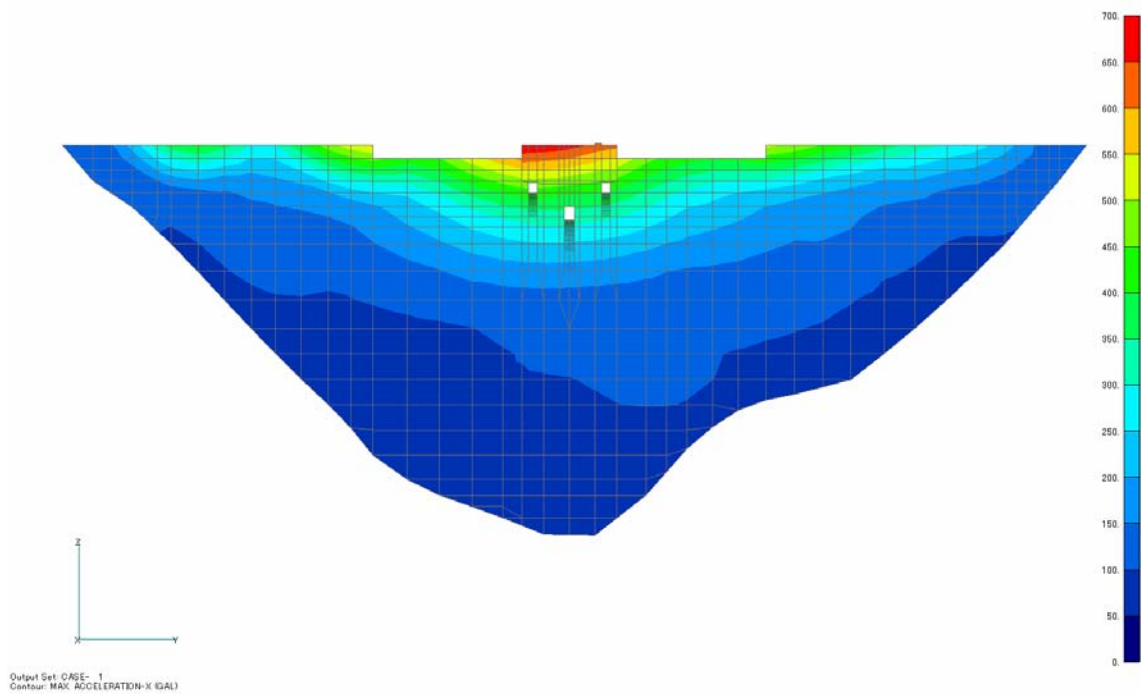


図 7-8(b) 上下流方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

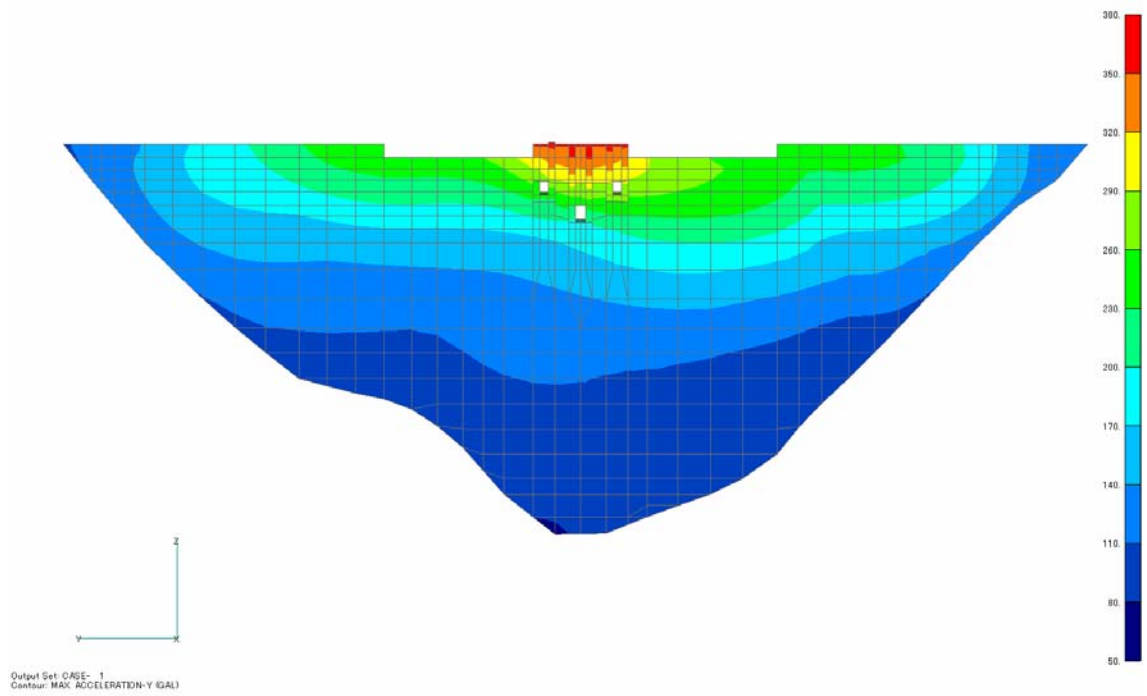


図 7-9(a) ダム軸方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

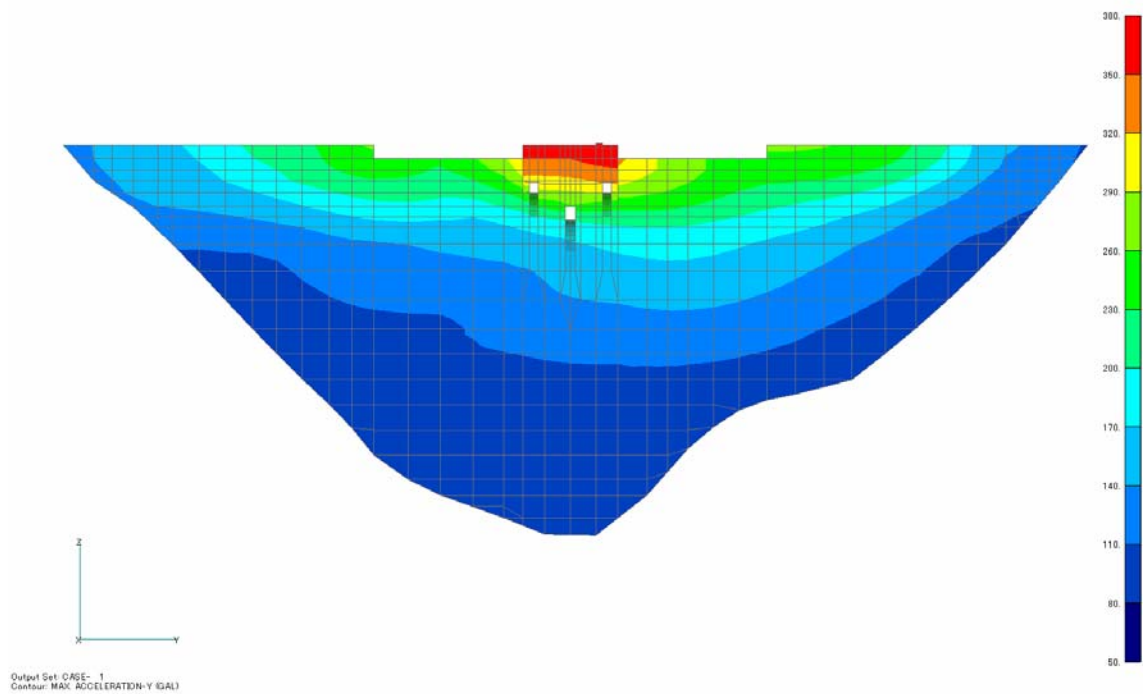


図 7-9(b) ダム軸方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

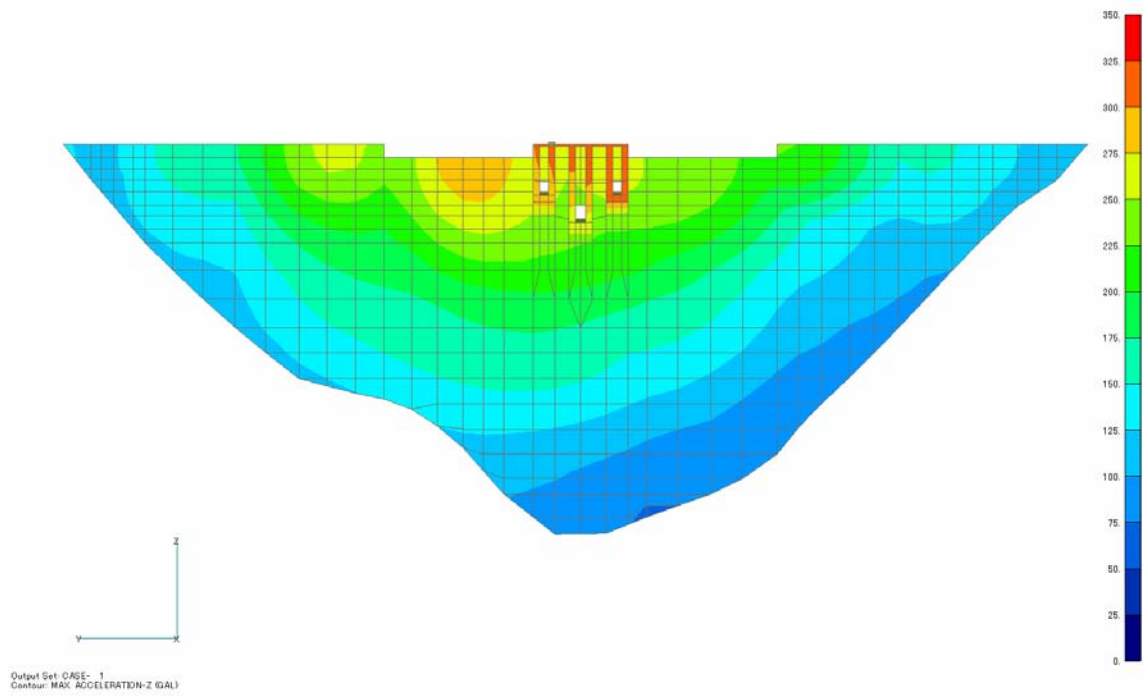


図 7-10(a) 鉛直方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

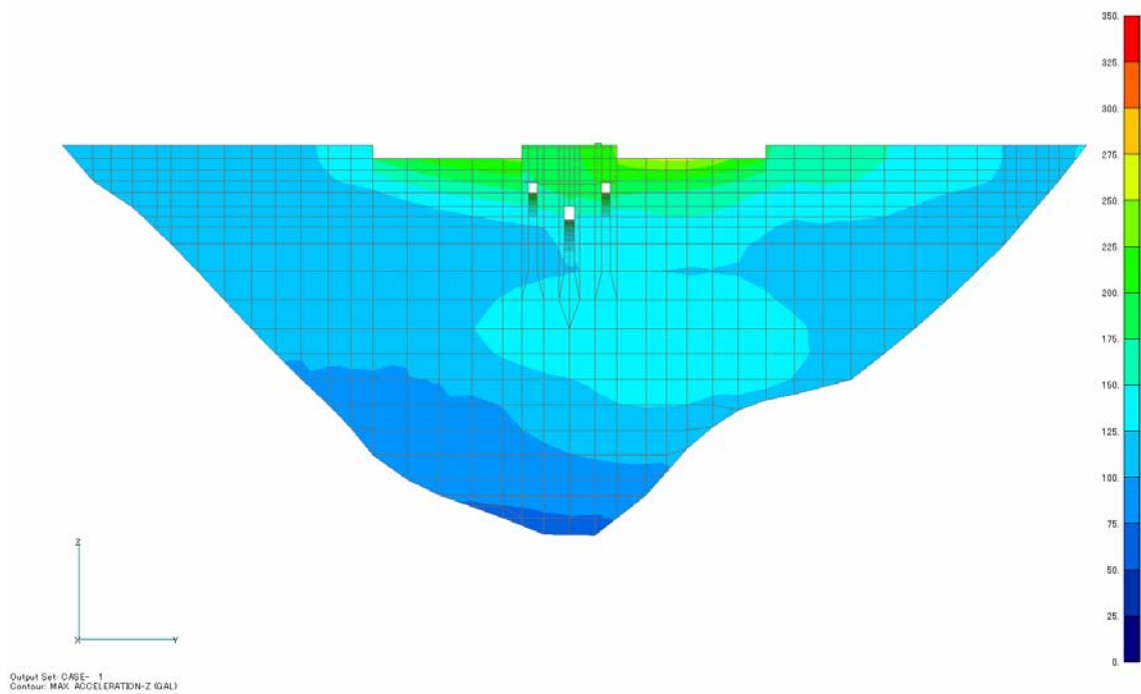


図 7-10(b) 鉛直方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

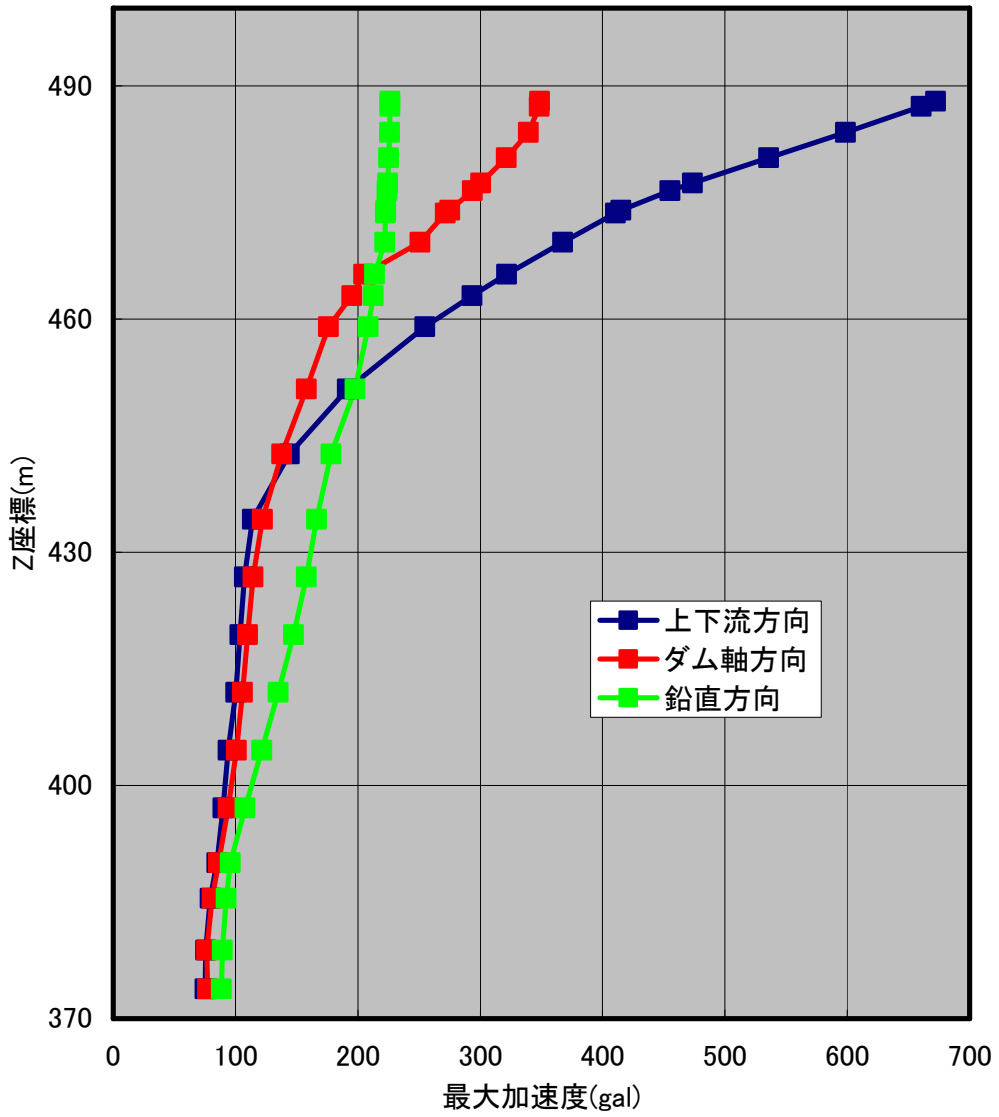


図7-11(a) 横断面と縦断面の交差位置における最大加速度応答の分布 (全時刻歴中の最大値)

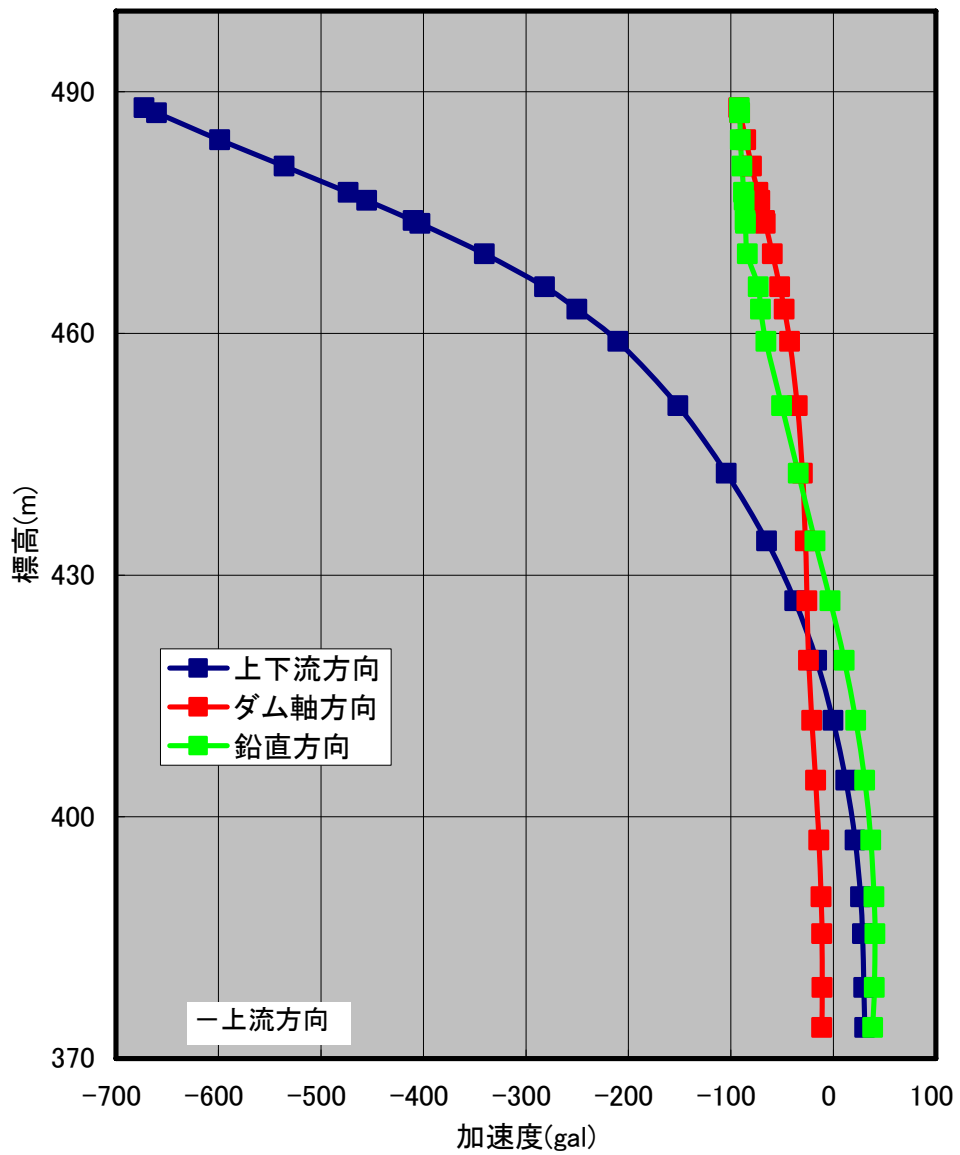


図7-11(b) 横断面と縦断面の交差位置における加速度応答の分布
(上下流方向の最大値発生瞬間の分布)

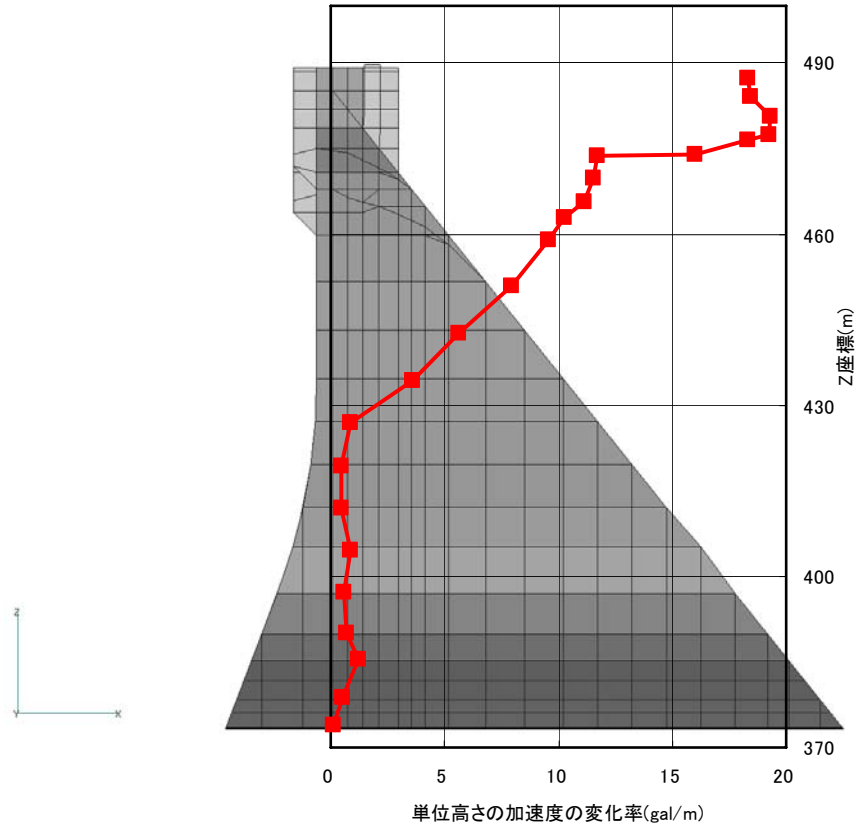


図 7-11(c) 高さ方向の加速度応答の変化率
(上下流方向)

7.3 再現性についての考察・評価

7.3.1 再現解析について

(1) 岩盤下部 (F1)

今回の再現解析で用いた入力波は岩盤下部 (F1) の観測波を解析モデル底面に引戻したものであるから、岩盤下部の地震動を再現できるのは当然である。この点では、上下流方向、ダム軸方向および鉛直方向に、解析と観測の最大加速度の差がわずか 0.6% であり、加速度波形もほぼ完全に一致している。

(2) 岩盤上部 (F2)

岩盤上部 (F2) では、上下流方向およびダム軸方向には解析による最大加速度と観測結果の差がそれぞれ 11.2% と 15.0% で、加速度波形はよく相似していると思われる。岩盤上部の加速度応答のフーリエスペクトル (図 7-6(b) の上段) では、上下流方向およびダム軸方向に解析と観測がほぼ同じ卓越振動数を示しており、スペクトル積分 (スペクトルと振動数軸で囲まれた面積) も大きな差がないと考える。しかし、2.3Hz、特に 6.7Hz 付近ではスペクトル振幅が大きく異なって、解析モデルの固有振動特性が強調されているのではないかと推測している。6.7Hz がダム堤体の 2 次固有振動数と近いが、ダム天端中央点は 2 次モードの節点位置に当たるので、ダム底面でこの振動数成分の差が大きくても、ダム天端中央点の再現性に対して大きな影響はないと考えられる。

岩盤下部に対する加速度応答の増幅率 (表 7-4) について、上下流方向とダム軸方向においては、解析値と観測値の最大差が 10% 以内であり、再現性がよい。しかし、鉛直方向においては、解析値は観測値より約 58% 大きくなっている。図 7-6(b) (鉛直方向) に示す岩盤下部に対する岩盤上部の伝達関数から、鉛直方向に関して、解析モデルの岩盤と実際の岩盤の固有振動数が異なっていることがわかる。観測結果におけるピーク振動数が 9~11Hz にあるが、この振動数範囲はちょうど加振波 (F1 点) のスペクトルの谷に当たる。一方、解析モデルの鉛直方向の固有振動数が実際 (観測) より低くなっており、地震動 (F1 点) のスペクトルのピーク振動数と近づいている。岩盤上部 (F2 点) の鉛直方向の応答が観測結果より大きくなったのはこれに起因していると考え、ダム直下の岩盤の剛性係数が今の設定値よりある程度高いと推測する。

(3) 天端中央 (T2)

ダム天端中央の最大加速度応答値と観測値の相対差は、上下流方向と鉛直方向には 6% 未満 (解析値が小さい) であり、よい再現性が現れているが、ダム軸方向には 17.8% (解析値が大きい) で、やや大きな差がある。図 7-5(a) に示すダム天端中央の加速度波形について、最大値の発生時刻は解析結果と観測結果は異なるものの、全時刻歴波形を見ると、時間に沿った振幅の変化傾向は概ね一致していると考え。天端中央のフーリエスペクトル (図 7-6(a) の上段) および岩盤上部に対する伝達関数 (図 7-6(a) 下段) では、卓越振動数については解析と観測が良好な一致を示している。

ダム堤体の上下流方向およびダム軸方向の加速度の増幅率はそれぞれ 9.3 と 4.6 であり、いずれも、通常の高さ 114m の重力式コンクリートダムとしては高いものであり、観測結果とよい一致性を示しているため、解析モデルが札内川ダムの特徴を反映していると考え。

(4) 左岸および右岸リムトンネル内 (R1 と R2)

左岸および右岸のリムトンネル内の観測点においては、解析結果と観測結果の差が比較的大きい。特に左岸側 (R1) において、ダム軸方向の応答に約 53%の差がある (表 7-3 と表 7-4 参照)。岩盤下部に対するこれらの観測点のフーリエスペクトル比 (伝達関数) (図 7-6(c) と (f))には、観測結果は (図示振動数範囲 0.01~20Hz) 明瞭な卓越ピークはないが、解析結果には 2.3Hz および 6.0~8.0Hz 付近で比較的大きなピークが現れている。両岸地山の 1 次固有振動数が $(=V_s/(4H))$ 、 H :岩盤深さ、 V_s :約 2030 m/s) 約 2.2Hz であるから、これらの観測点の応答には岩盤の固有振動特性が現れていると考える。実観測結果に明瞭なピークがないのは、地山の地震時挙動の一体性が劣っていることを示していると考えられる。実岩盤には異なる岩質が分布しており、節理・破砕帯・風化層もあるから、地山において各振動数成分の減衰は大きいと考えられる。

また、解析においては、左岸と右岸の結果はほぼ対称的になっているが、観測結果は右岸側が左岸よりいずれの方向にも大きくなっている。これは現地における左右岸の地質の差異および左右岸の地山形状の非対称性による現象であると考えられる。

(5) 堤体の左肩および右肩 (T1 と T3)

堤体の左肩および右肩の観測点において、解析結果と観測結果の比較について、左右岸地山の応答と同じ傾向が示されている。右岸側 (T3) では、解析により得られた加速度応答の最大値 (表 7-2) または F1 点に対する増幅率 (表 7-3) は観測結果と比べ、約 25~37%小さくなっている。これに対して、左岸側 (T1) では、最大約 53%の差がある。また、図 7-6(d)に示す左肩のスペクトル図 (上段) から、加速度応答の差が主に高周波成分 (5Hz 以上) の寄与によるものと見受けられる。

(6) 下流側開放基盤 (G1)

下流側開放基盤の観測点 (G1) において、解析により得られた最大加速度応答値は観測値より大きくなっている。特に、上下流方向には約 60%の差がある。図 7-6(g) (上下流方向) のフーリエスペクトル図 (上段) に示すように、5Hz までは観測結果と解析結果がよく一致しているが、約 6.4Hz に解析結果にピークが現れている。本解析に用いた解析モデルでは、3.3 節で述べたように下流開放基盤面の観測点の位置をできるだけモデル化しているが、観測点近傍の地質、地形および設置状況を反映し切れないところがあると考えられる。再現性を向上するためには、これらの情報を把握することが必要である。

(7) 加速度応答の分布について

図 7-8~図 7-10 に示すように、上下流方向およびダム軸方向の加速度応答には、天端中央観測点付近で加速度の急激な増幅が見受けられる。これは常用洪水吐の複雑な構造による現象ではないかと考える。また、鉛直方向の応答には、洪水吐の呑水部 (上流凸部) で大きな鉛直動が現れている。常用洪水吐およびその近傍の以外に、ダム堤体の全体として滑らかな加速度分布が示されている。

横断面と縦断面の交差位置 (図 6-1 参照) における最大加速度応答の分布 (図 7-11) から加速度応答の高さ方向の増幅状況がより判りやすい。単位高さにおける上下流方向の加速度応答の変化 (ここで、加速度の変化率と呼ぶ) は式 (7.2) により求め、その結果を図 7-11(c)に示す。

$$\mu = \frac{A_u - A_d}{Z_u - Z_d} \quad (7.2)$$

ここに、 μ は加速度の変化率、 A_u と A_d は上節点と下節点の加速度値、 Z_u と Z_d は上節点と下節点の高さ方向の座標値である。

図 7-11(c)において、加速度の変化率をおよそ 3 段階に記述することができる。標高約 430m 以下、つまり上流面フィレットの上端までは加速度の変化率はほとんど変わらなく、フィレットの上端より標高 474m (上段オリフィス) までの間では位置が高いほど加速度の変化率が大きくなっている。さらに、上段オリフィス位置では加速度の変化率が急変して天端中央観測位置の加速度増幅率に大きく寄与していることがわかる。このことから、札内川ダムの天端中央の加速度増幅率が非常に大きいことが理解できる。

(8) ダムの地震応答に対する貯水の影響

図 7-6(a)に示すダム堤体の伝達関数の一次ピーク振動数が 4.96Hz であり、貯水池の空虚条件で行った固有値解析による得られた一次モードの固有振動数 (5.14Hz) より約 3.5%小さい。地震時の水位 (水深 87.82m) は比較的良かったため、ダム堤体の固有振動数に対する貯水の影響は小さかったと考えられる。貯水によるダム堤体の加速度などの地震応答に対する影響については、今回の解析条件 (1 水位条件) では考察できないが、満水状態のダム堤体の地震応答特性を解析による検討すべきであると考えられる。

7.3.2 地震計の設置について

観測された地震動のスペクトル分析から、ほぼすべての観測結果に通常のダムサイトの地震動として理解できないほどの高い振動数成分がなく、加速度波形にも特に異常なものがないので、地震計の設置はよい状態ではないかと考えられる。

地震計の設置位置については、ダム天端中央および両肩、ダム底面の他に、両岩盤の深い位置および両岸地山内部の地震動を観測しているため、ダムサイトの地震動をより全面的に把握することに対して、合理的なものであると考えられる。

しかし、ダム堤体において、岩着部の以外に天端中央の一点のみでは、ダム堤体の全体的な挙動を観測することは困難である。例えば、ダム堤体の 2 次モード (図 6-9 参照) が逆対称であるため、2 次モードの頂点 (天端の左肩および右肩からそれぞれ 1/4 堤長所) にも地震計の設置することが望ましいと考えられる。

7.4 地震時ダムの応力状態

地震時のダムの応力状態を把握するために、堤体の最大引張応力および最大圧縮応力（図には最小応力と記している）を出力した。表 7-5 にはダム堤体の最大応力値をまとめる。図 7-12～図 7-17 には、ダムの上流面、下流面、縦断面および横断面（断面位置は図 6-1 参照）の応力分布を示す。

表 7-5 地震時のダム堤体の最大引張・最大圧縮応力

	方向	最大値 (MPa)	発生箇所
最大引張応力	上下流	0.388	下流面左岸側
	ダム軸	1.295	天端左肩
	鉛直	0.976	下段オリフィスの下流端の側面
最大圧縮応力	上下流	-0.390	下流面左岸側
	ダム軸	-1.457	下段オリフィスの下流端、空洞上縁
	鉛直	-2.330	左岸側岩着部の斜面勾配の急変所

地震時、洪水吐付近を除けば、上下流方向応力、ダム軸方向応力も、鉛直方向応力も滑らかな分布をしている。左肩ではダム軸方向に最大約 1.3MPa の引張応力が生じていたが、クラックの発生は考えられない程度である。一方、洪水吐、特に吞水口と出水口付近では応力集中が発生しており、今後、強い地震後、これらの箇所も点検すべきではないかと考える。

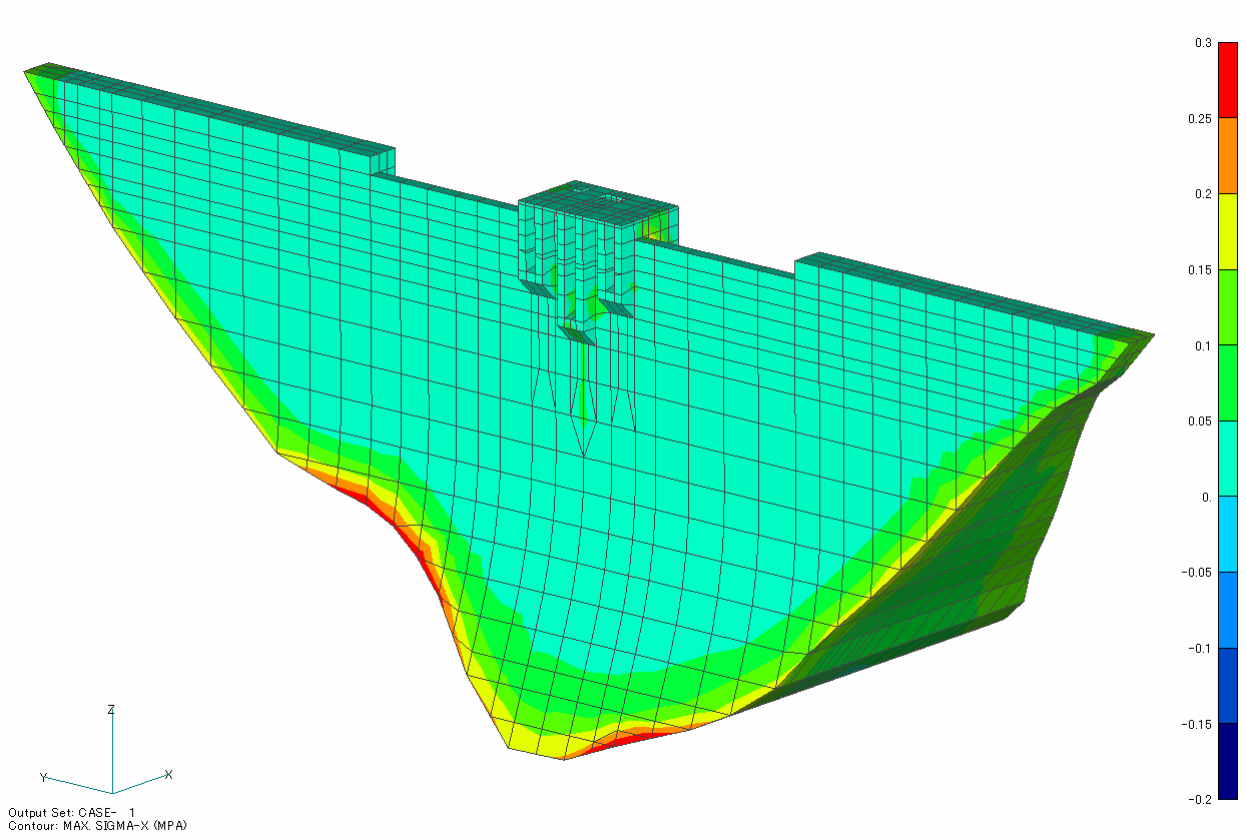


図 7-12(a) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)

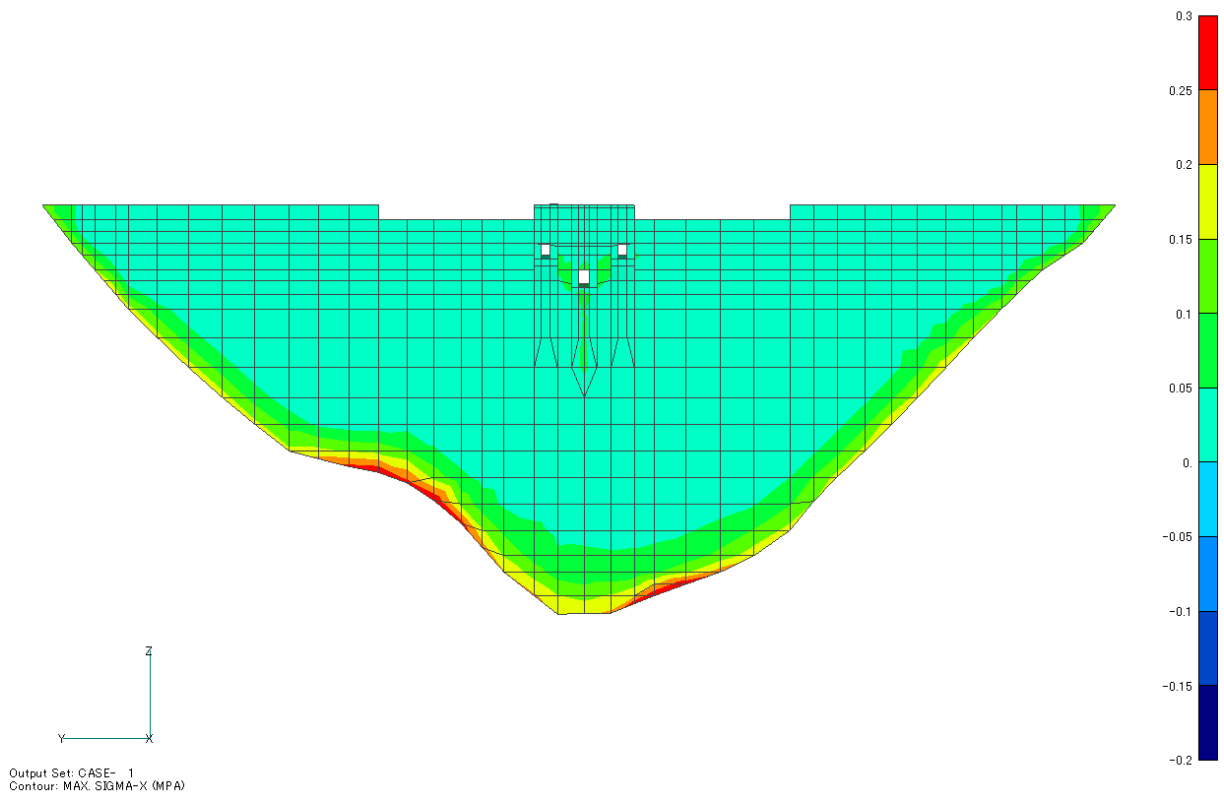


図 7-12(b) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(上流面)

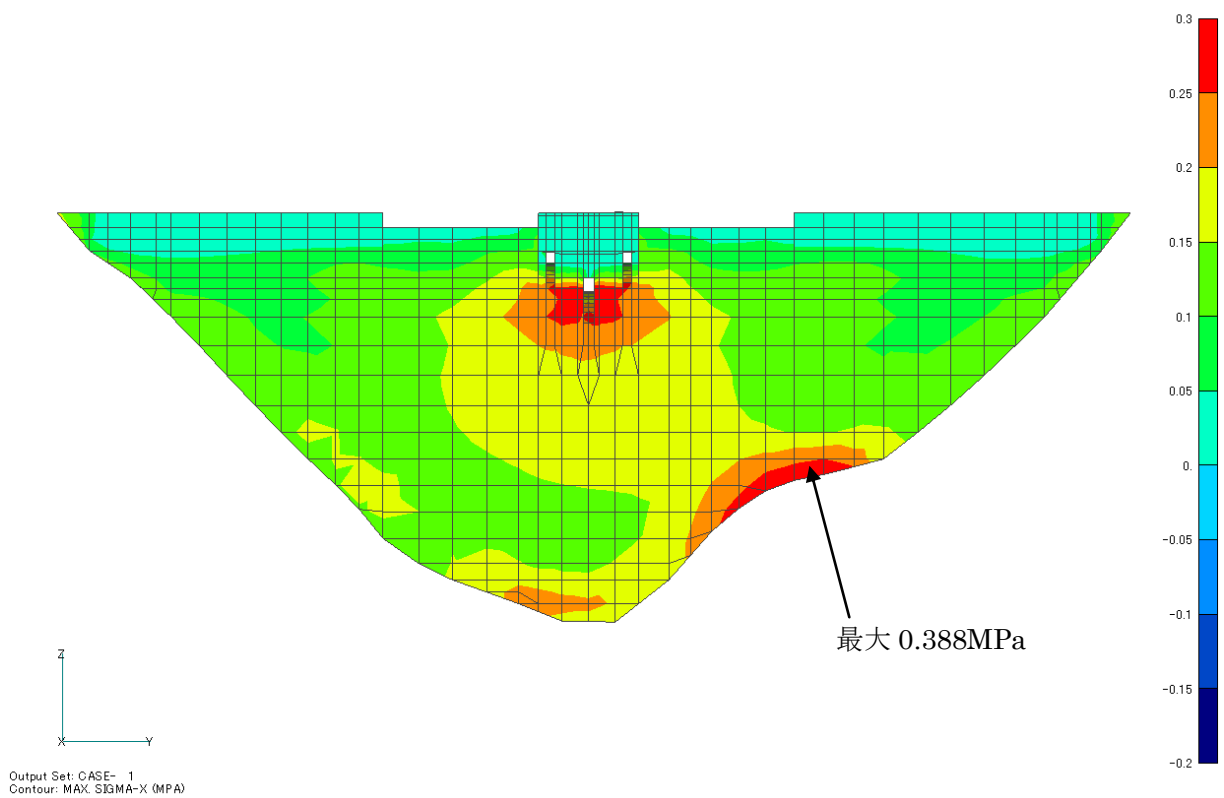


図 7-12(c) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(下流面)

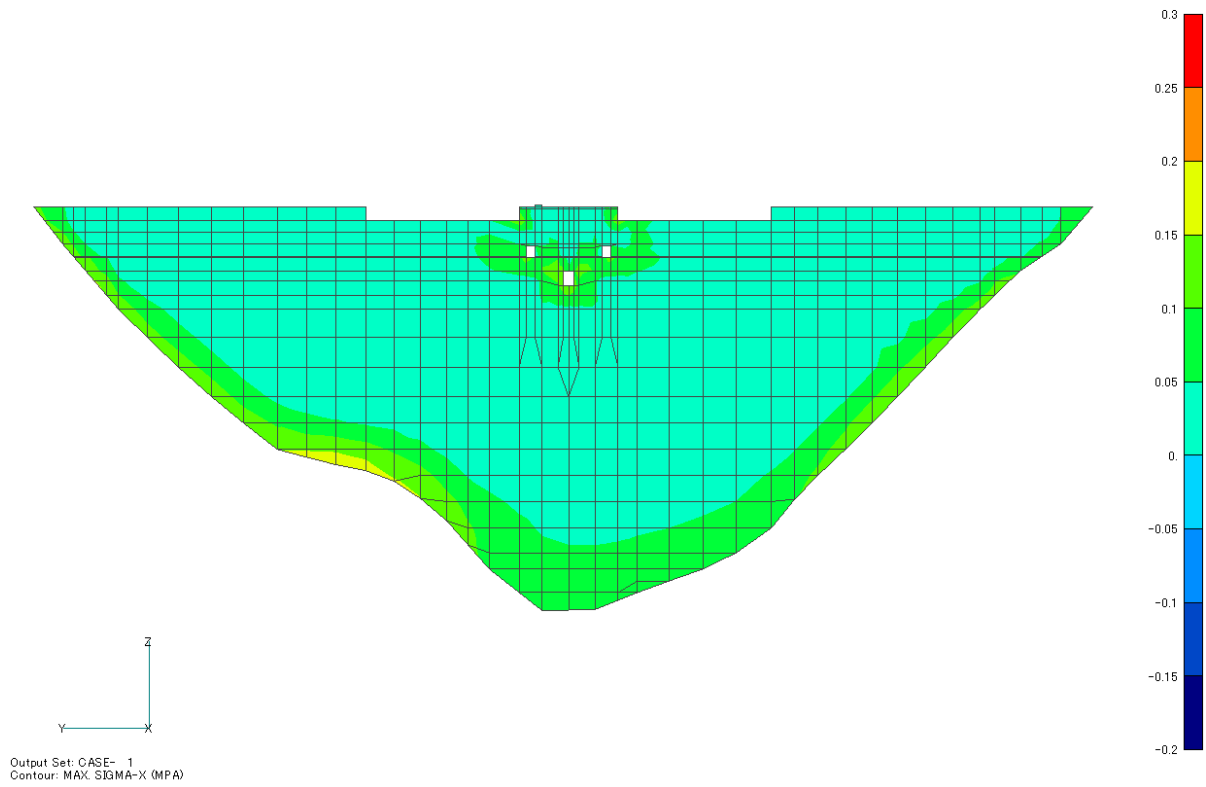


図 7-12(d) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(縦断面)

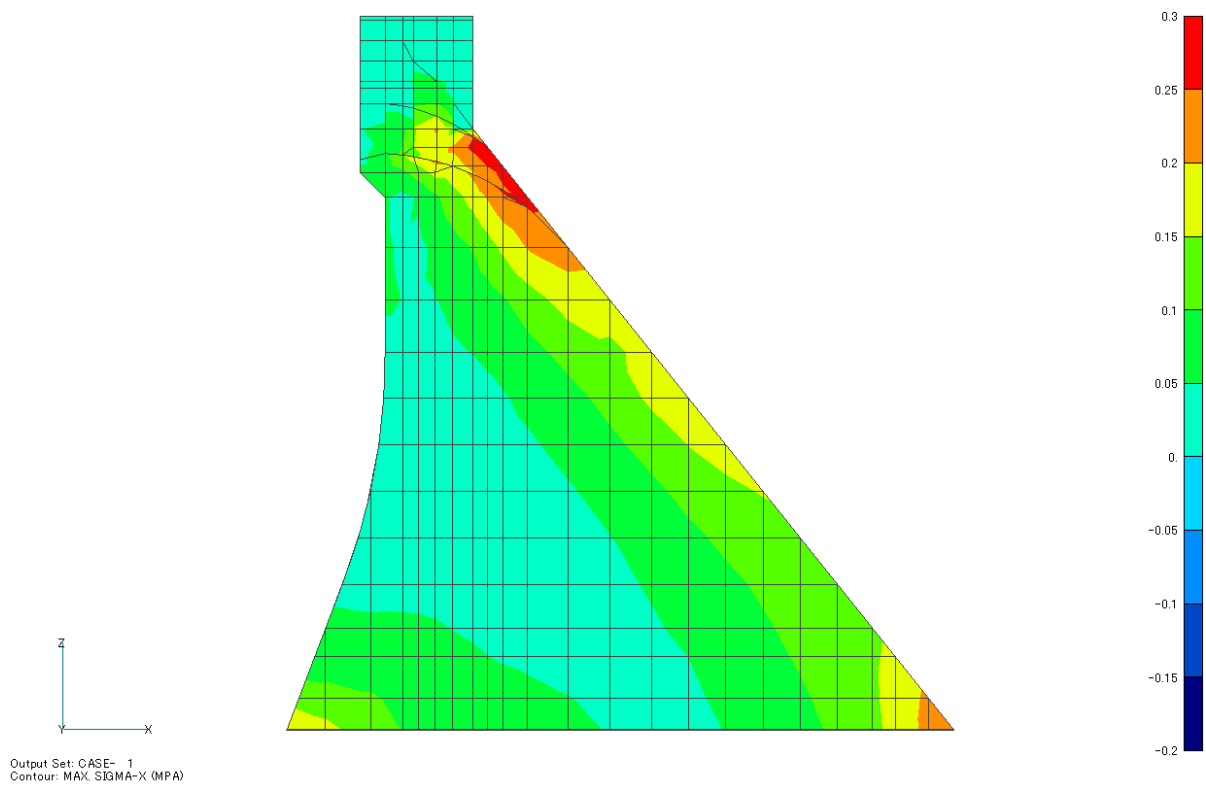


図 7-12(e) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(横断面)

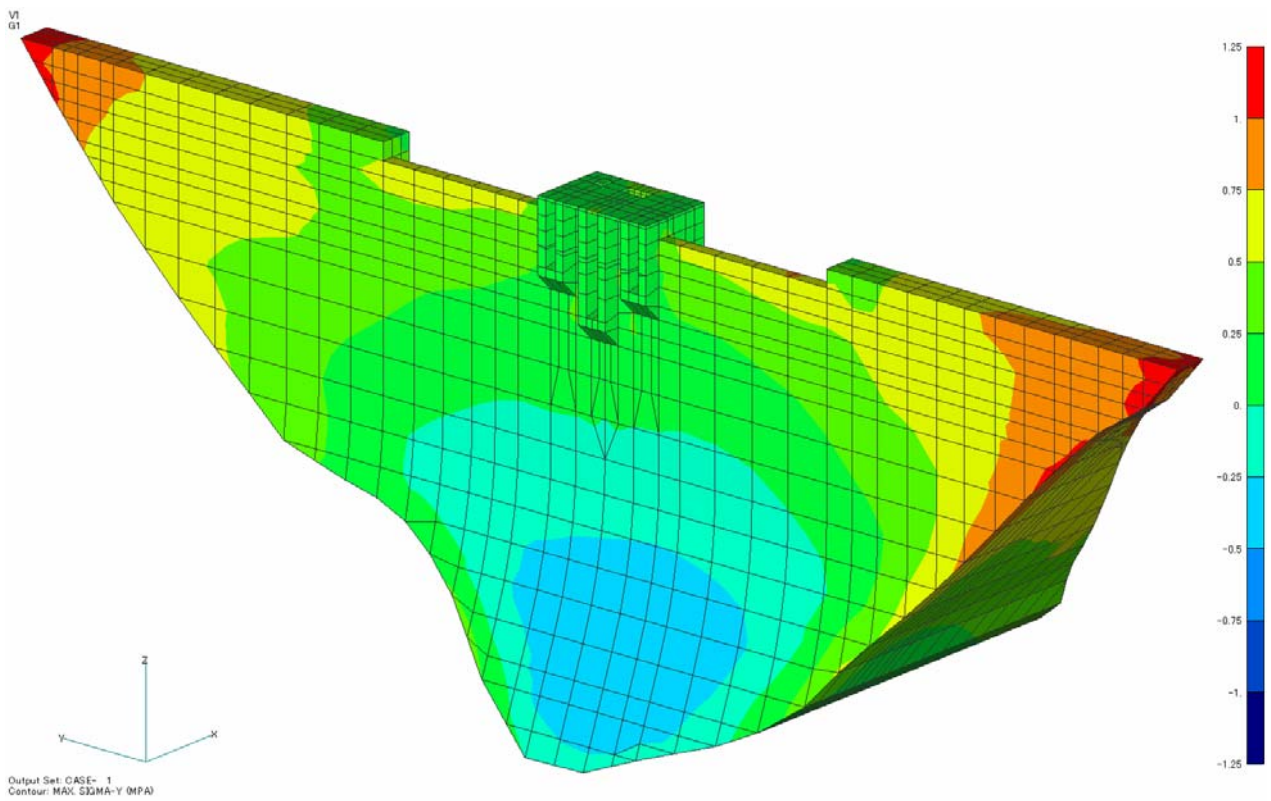


図 7-13(a) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

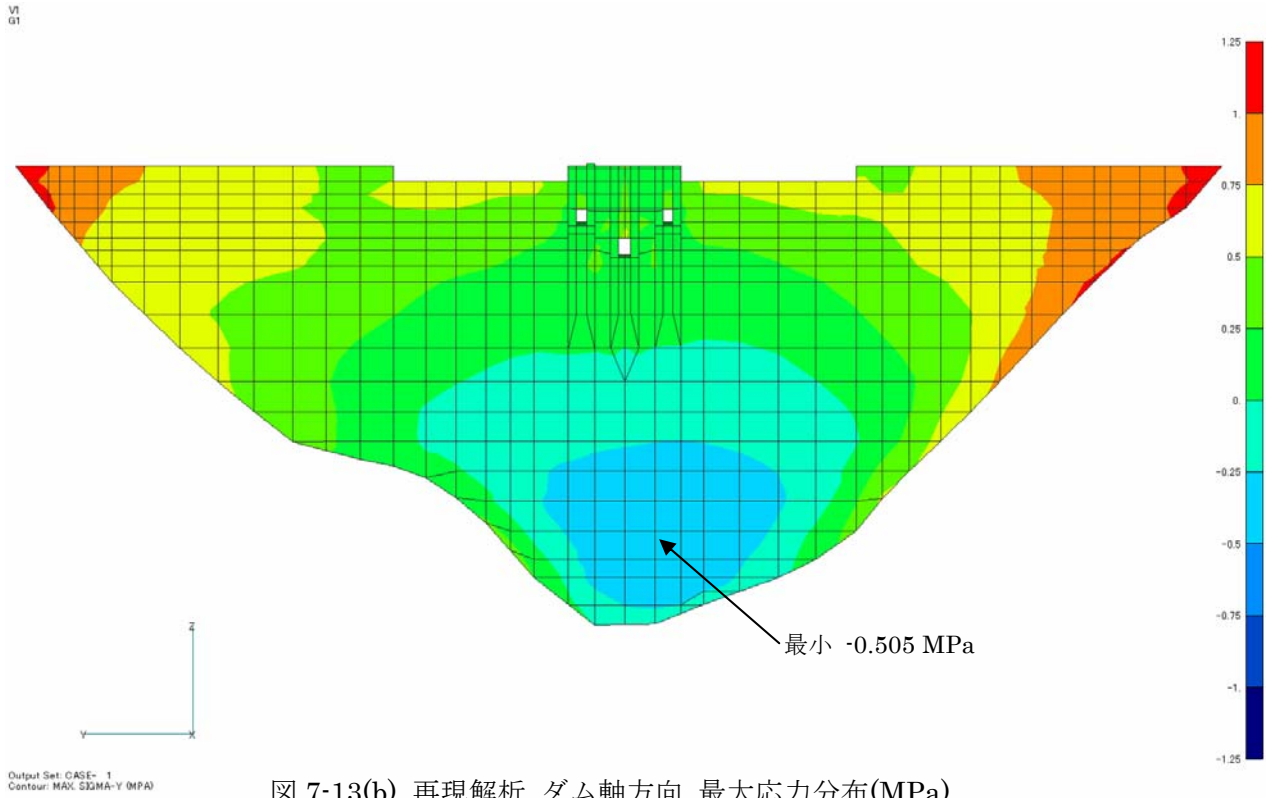


図 7-13(b) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(上流面)

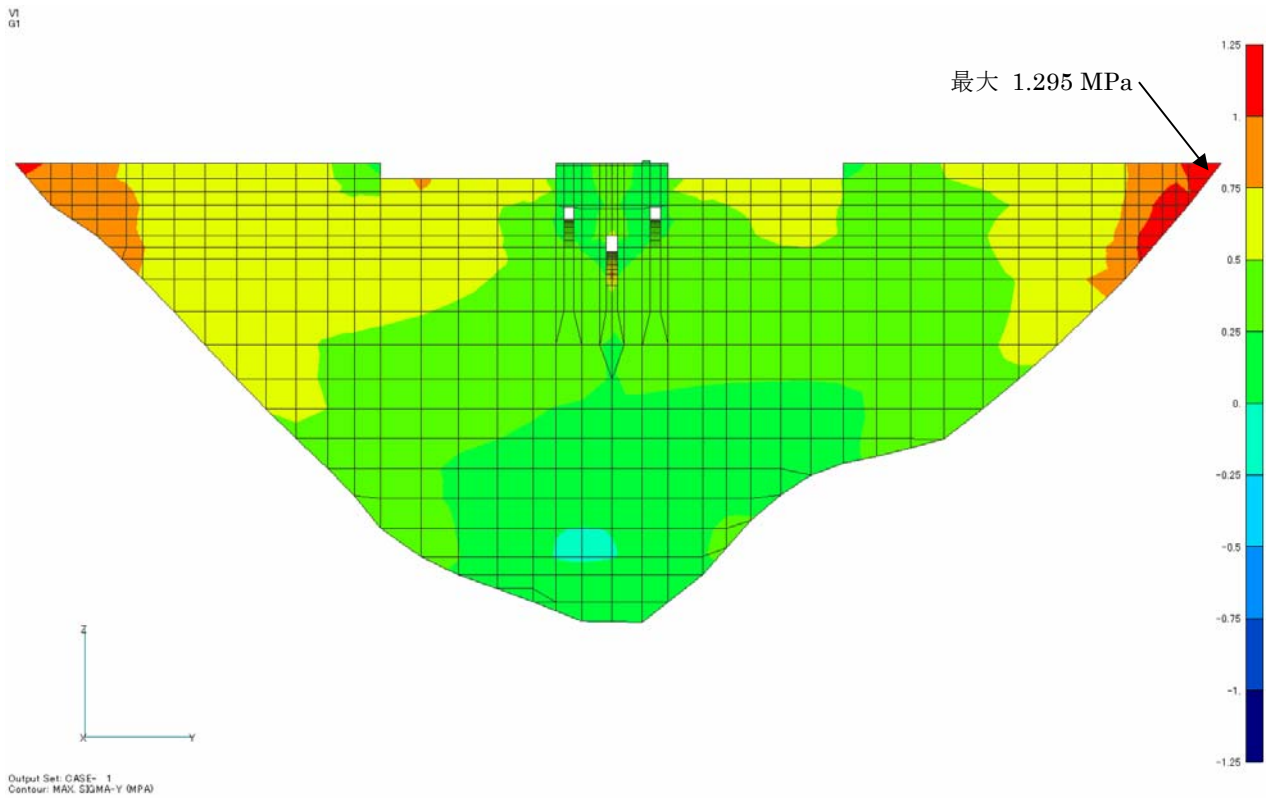


図 7-13(c) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(下流面)

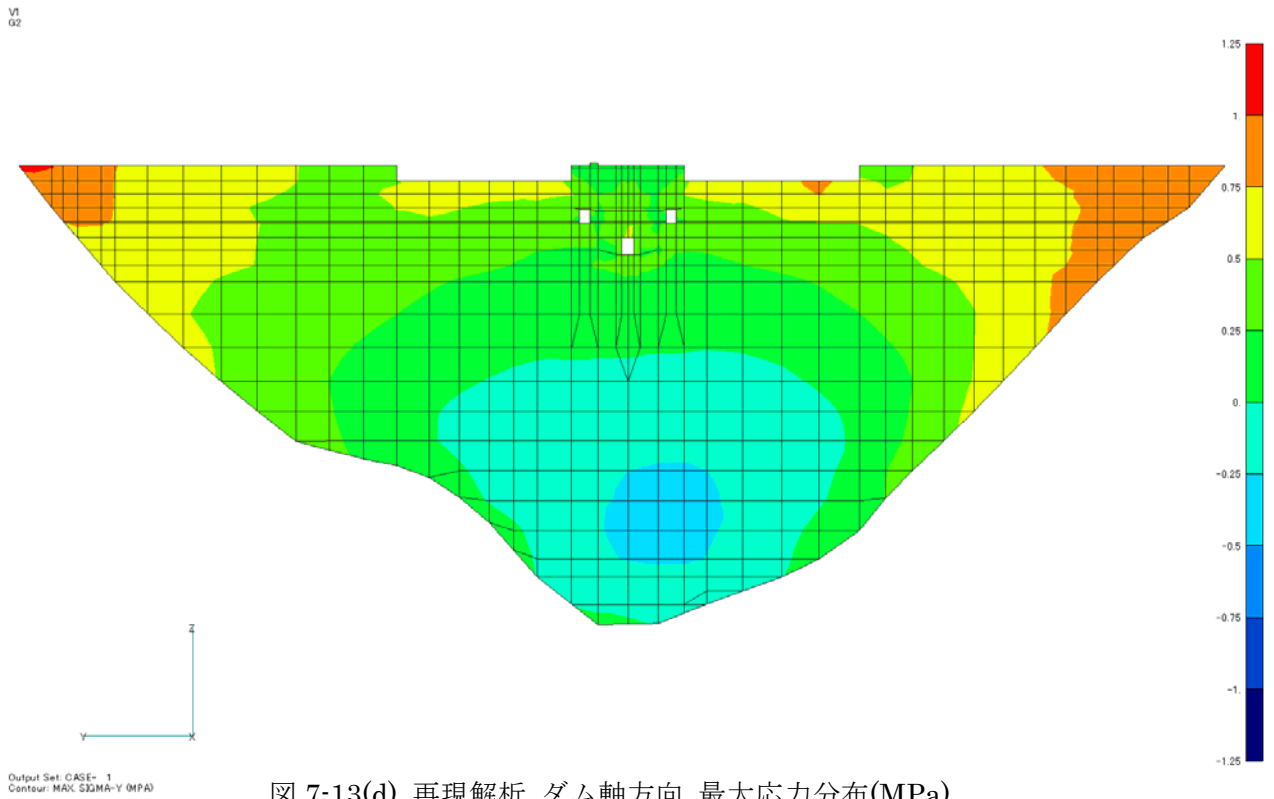


図 7-13(d) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(縦断面)

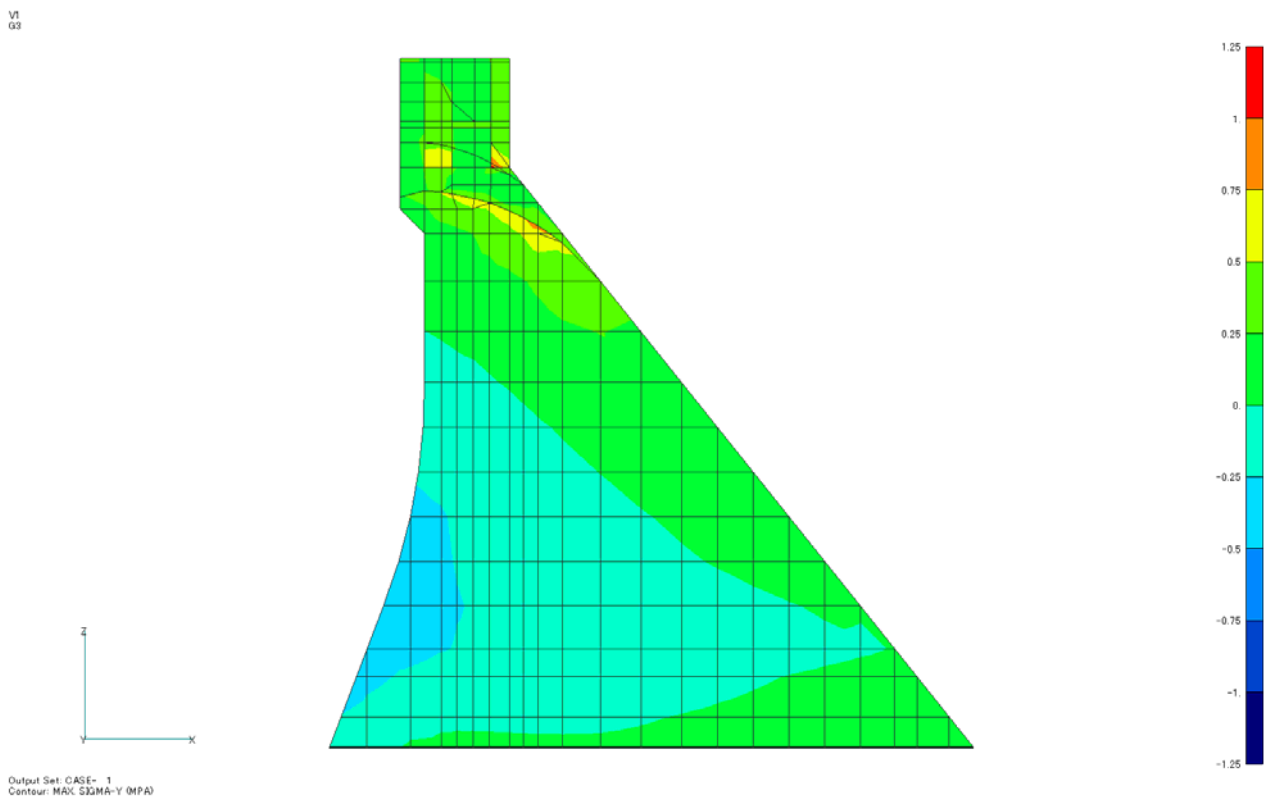


図 7-13(e) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(横断面)

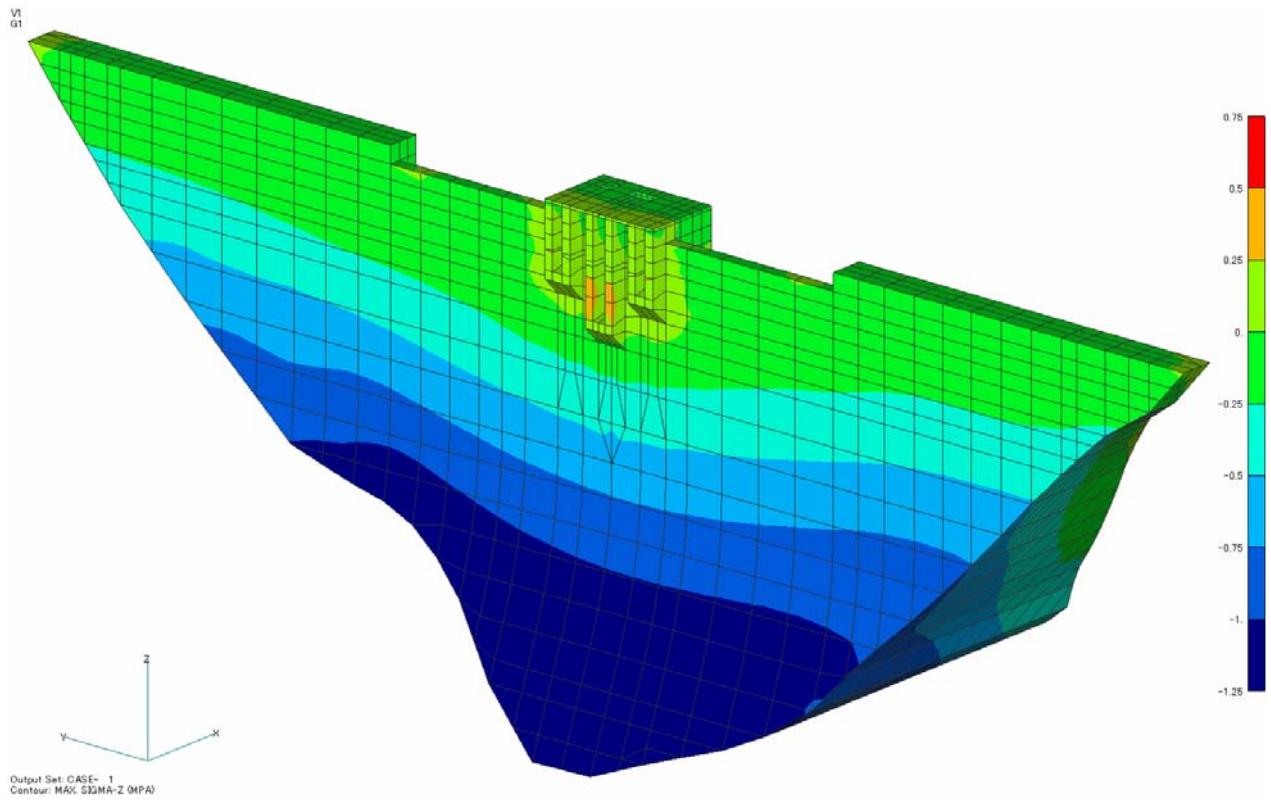
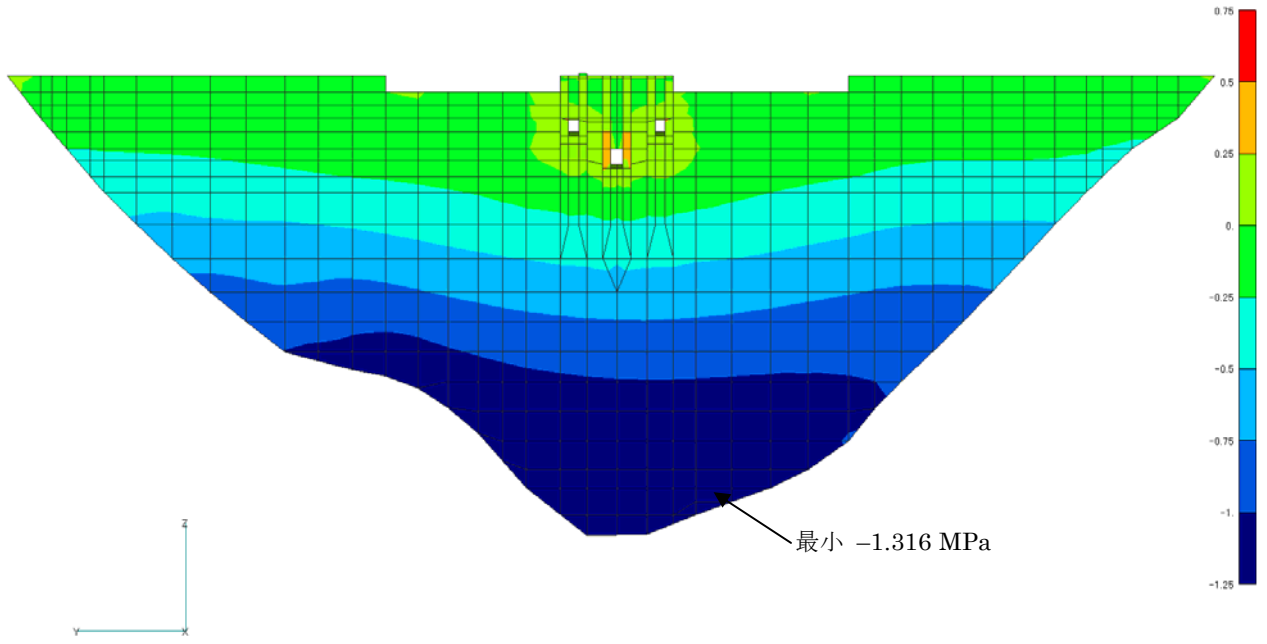


图 7-14(a) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

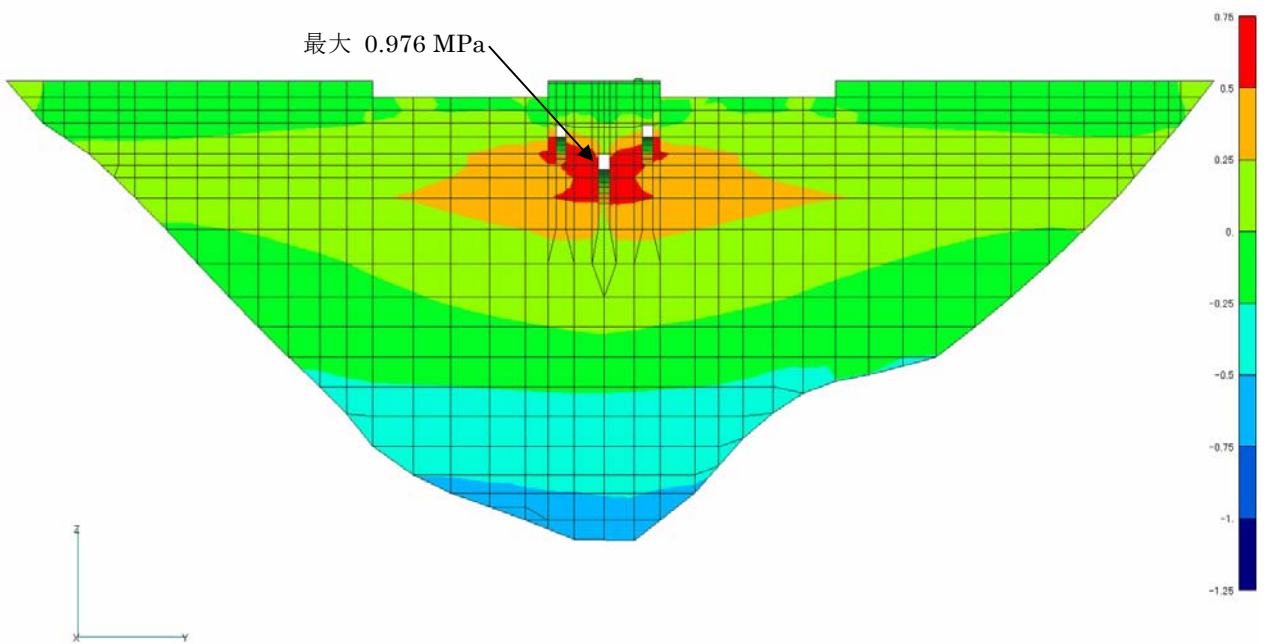
V1
G1



Output Set: CASE- 1
Contour: MAX, S33(MA)-Z (MPa)

图 7-14(b) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(上流面)

V1
G1



Output Set: CASE- 1
Contour: MAX, S33(MA)-Z (MPa)

图 7-14(c) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(下流面)

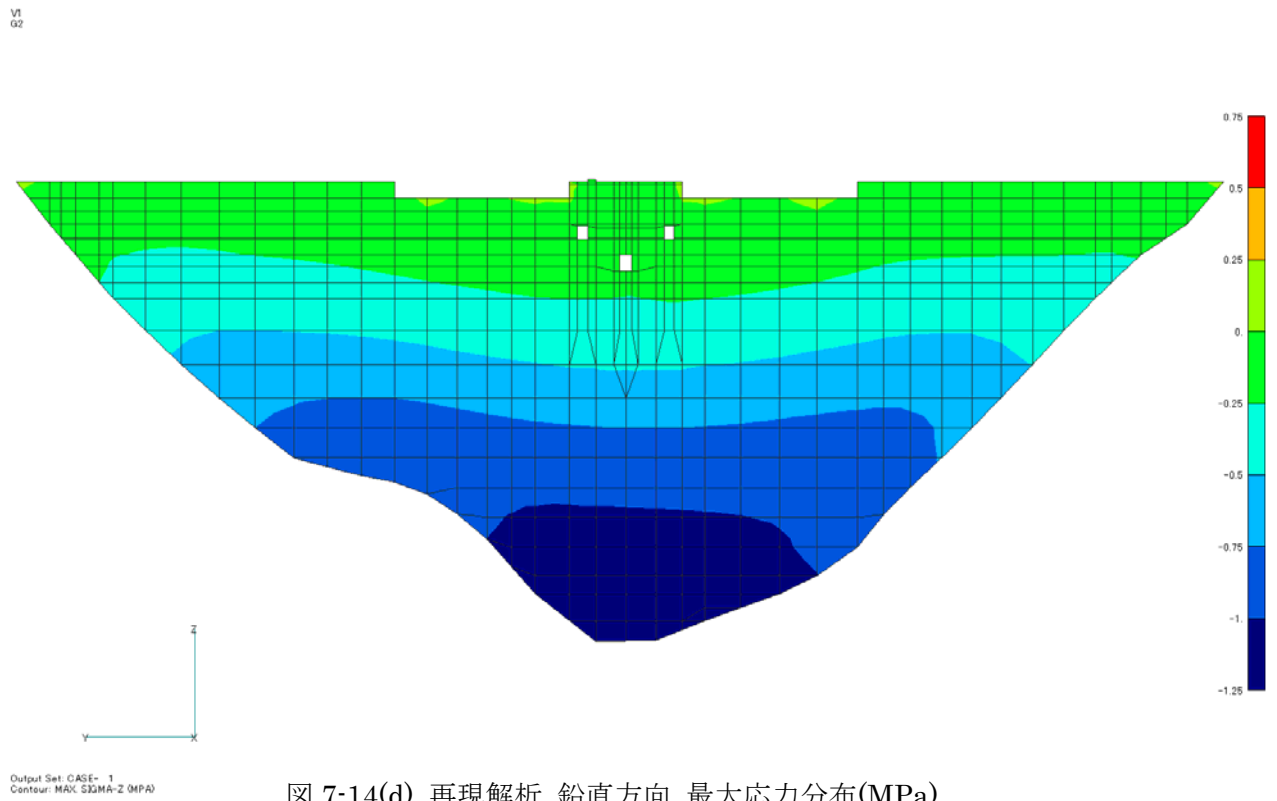


図 7-14(d) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(縦断面)

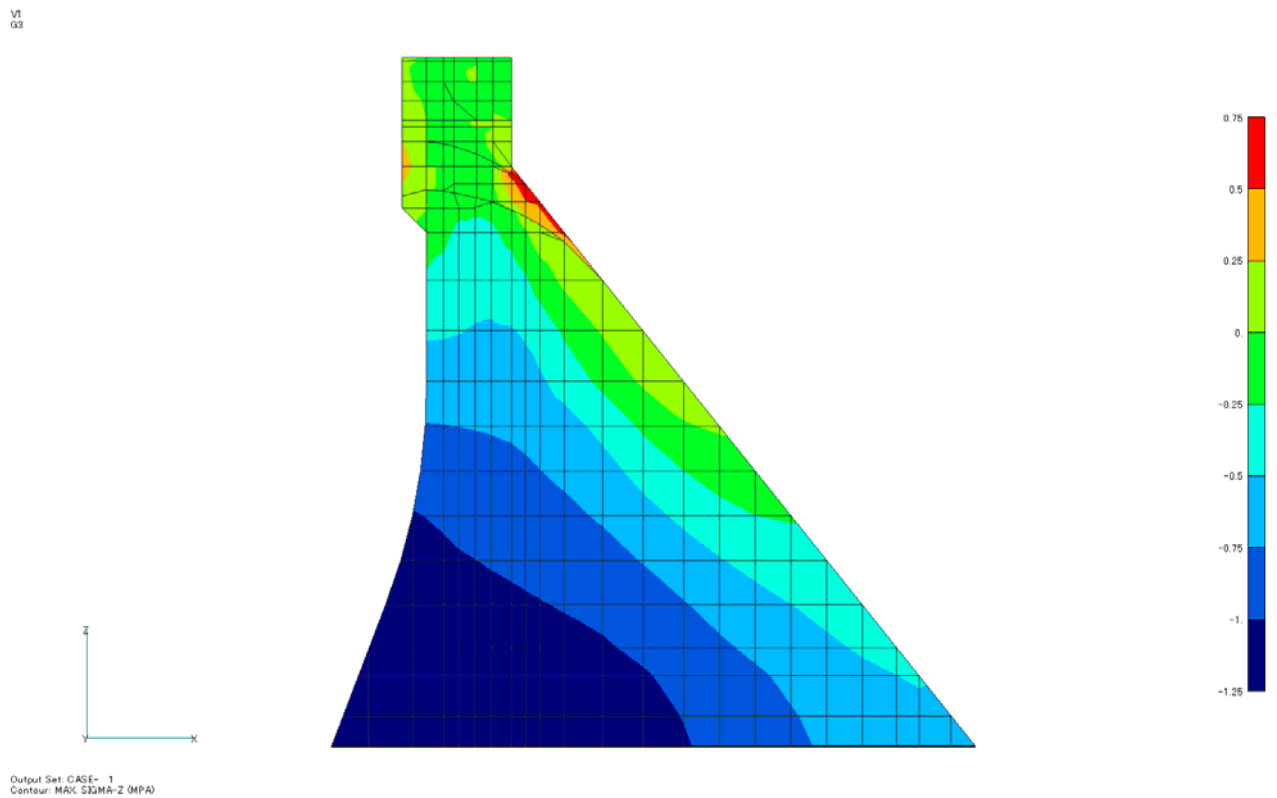


図 7-14(e) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(横断面)

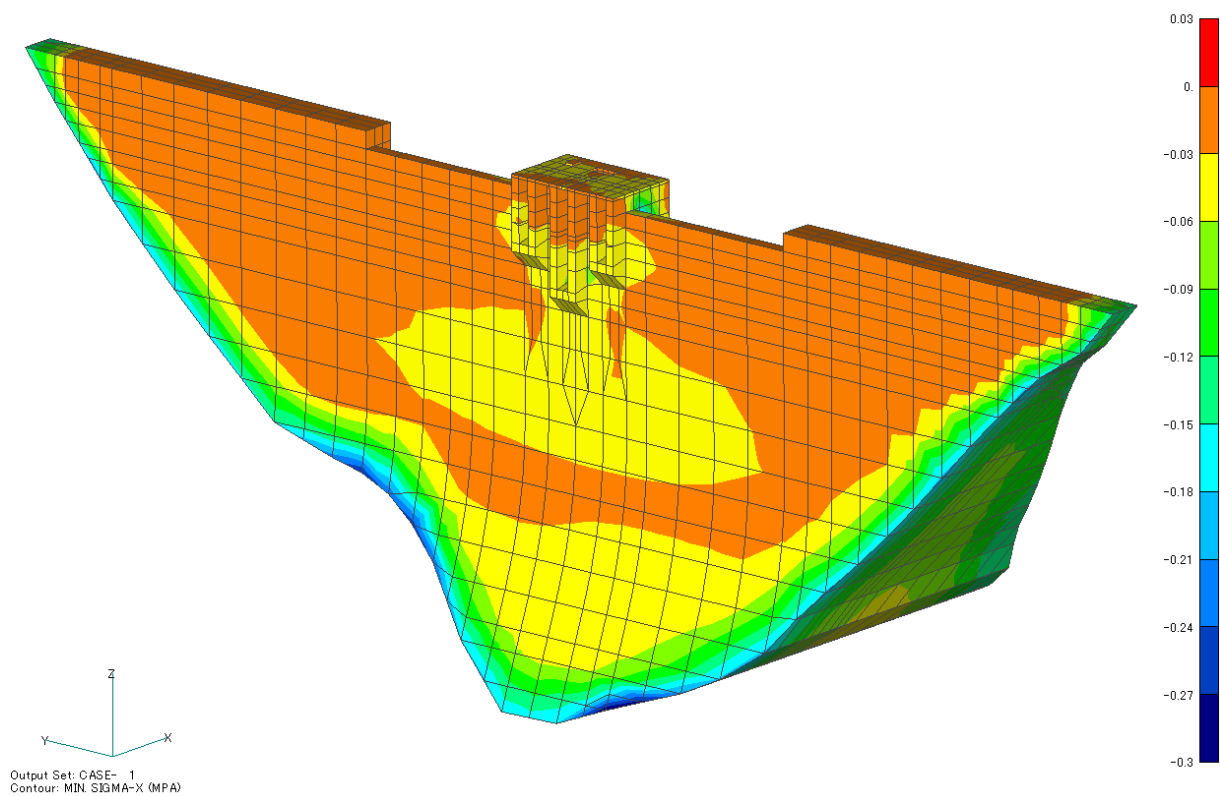


図 7-15(a) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)

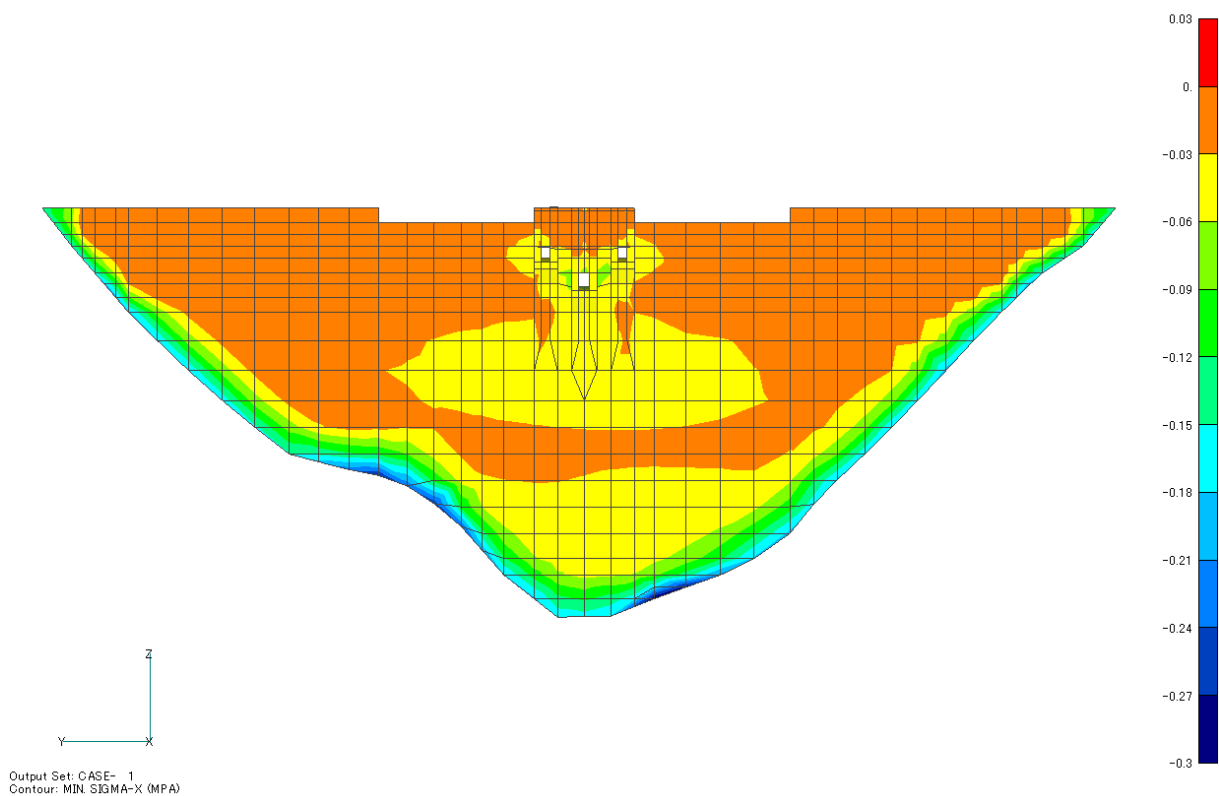


図 7-15(b) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(上流面)

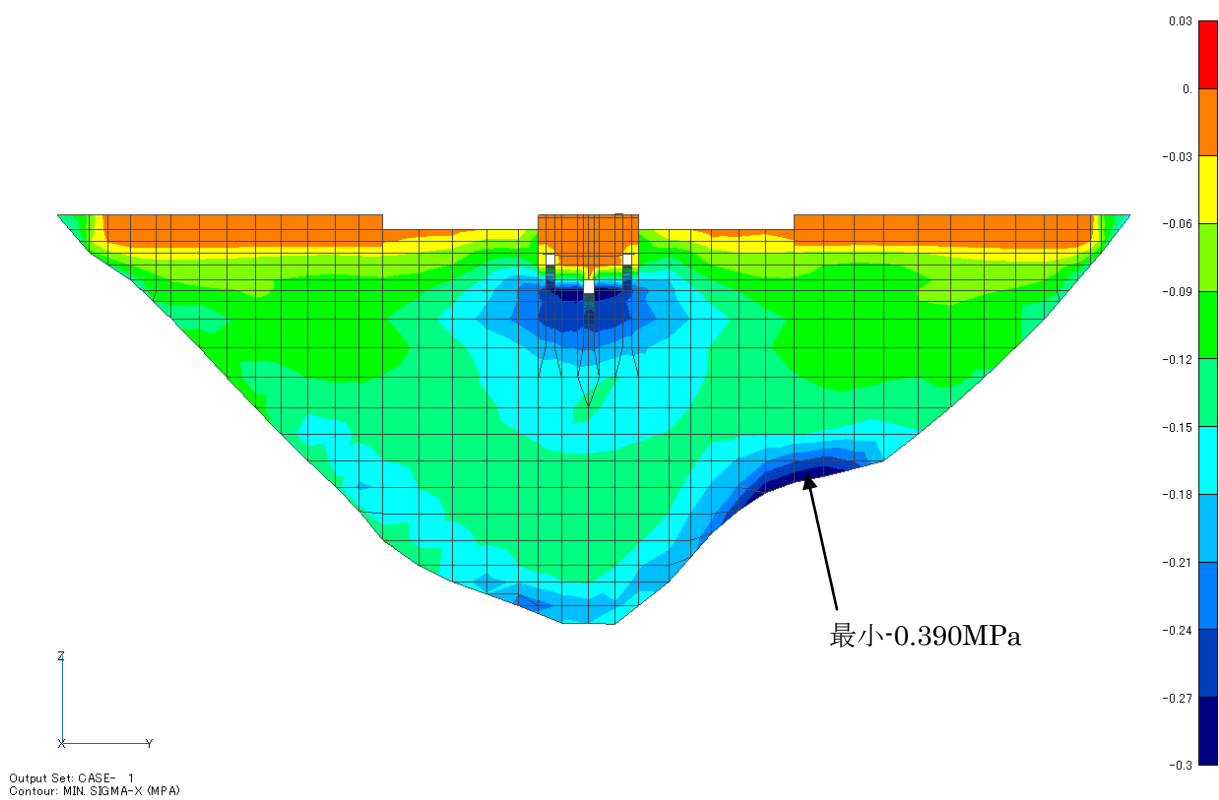


図 7-15(c) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(下流面)

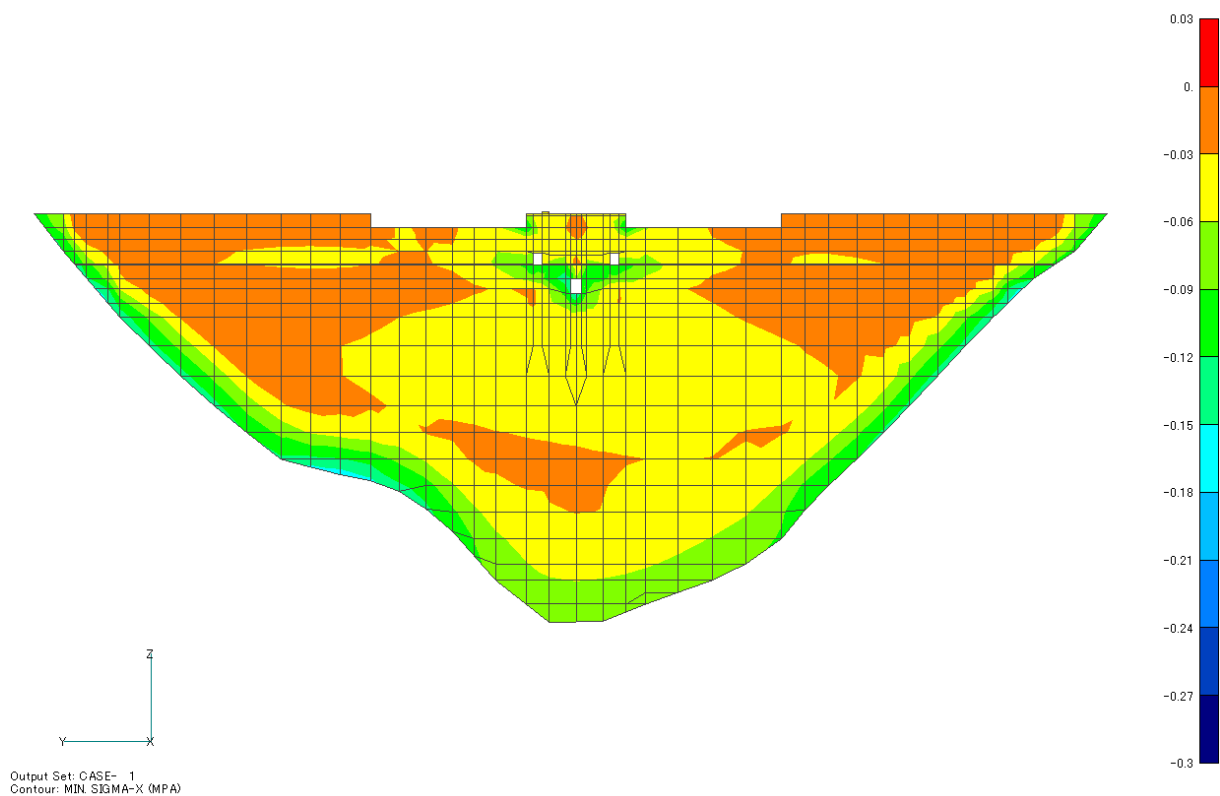


図 7-15(d) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(縦断面)

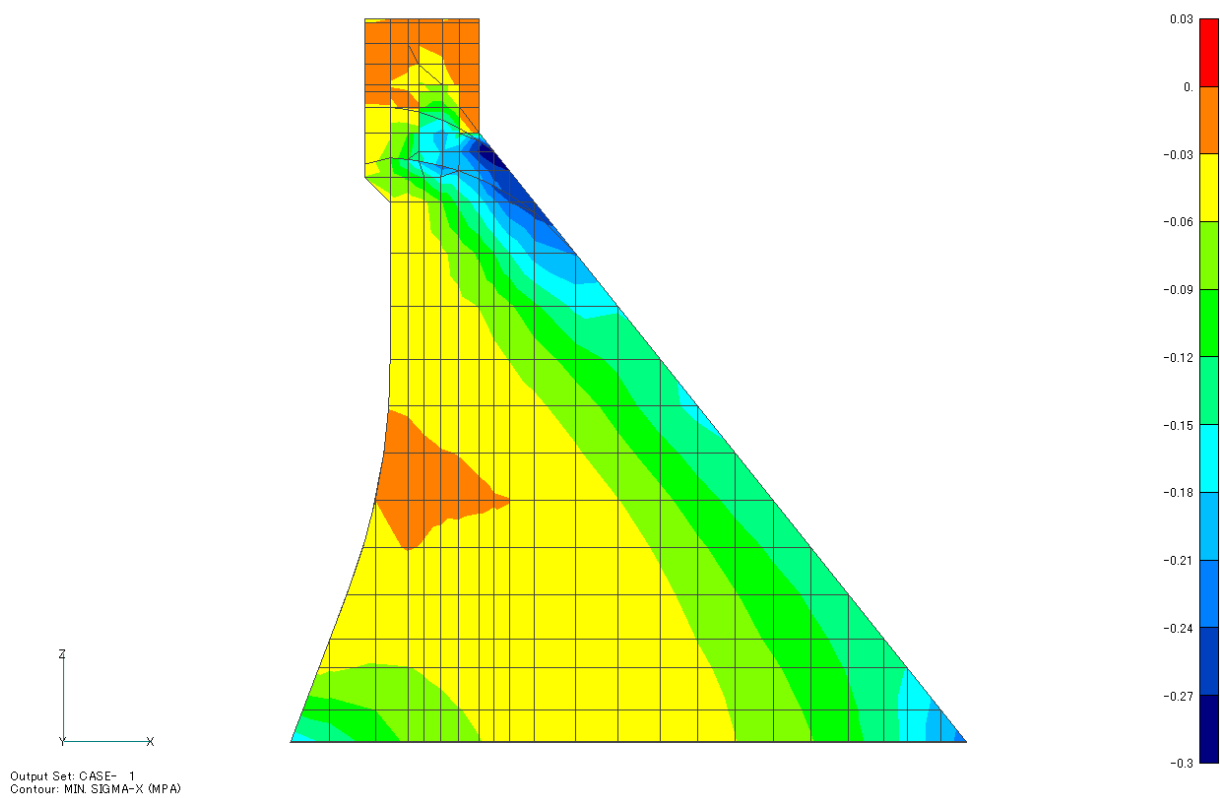


図 7-15(e) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(横断面)

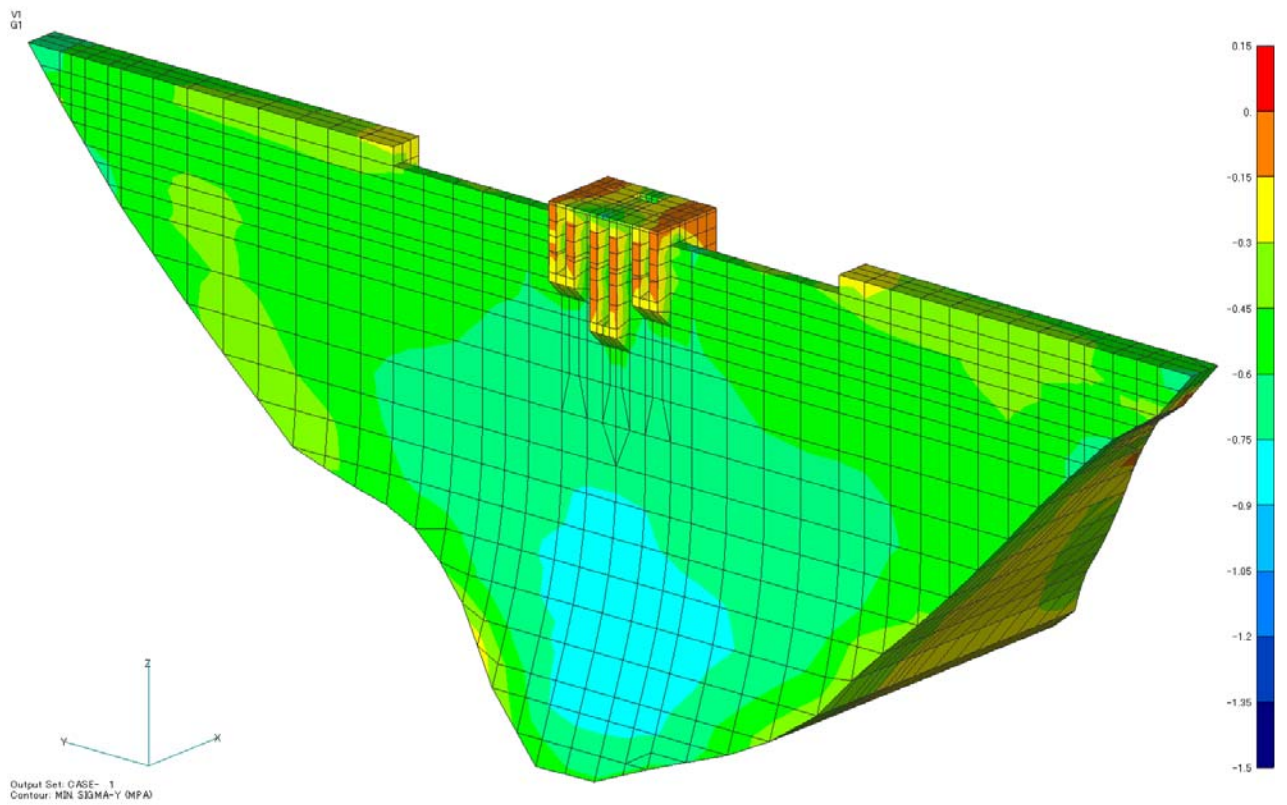


図 7-16(a) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

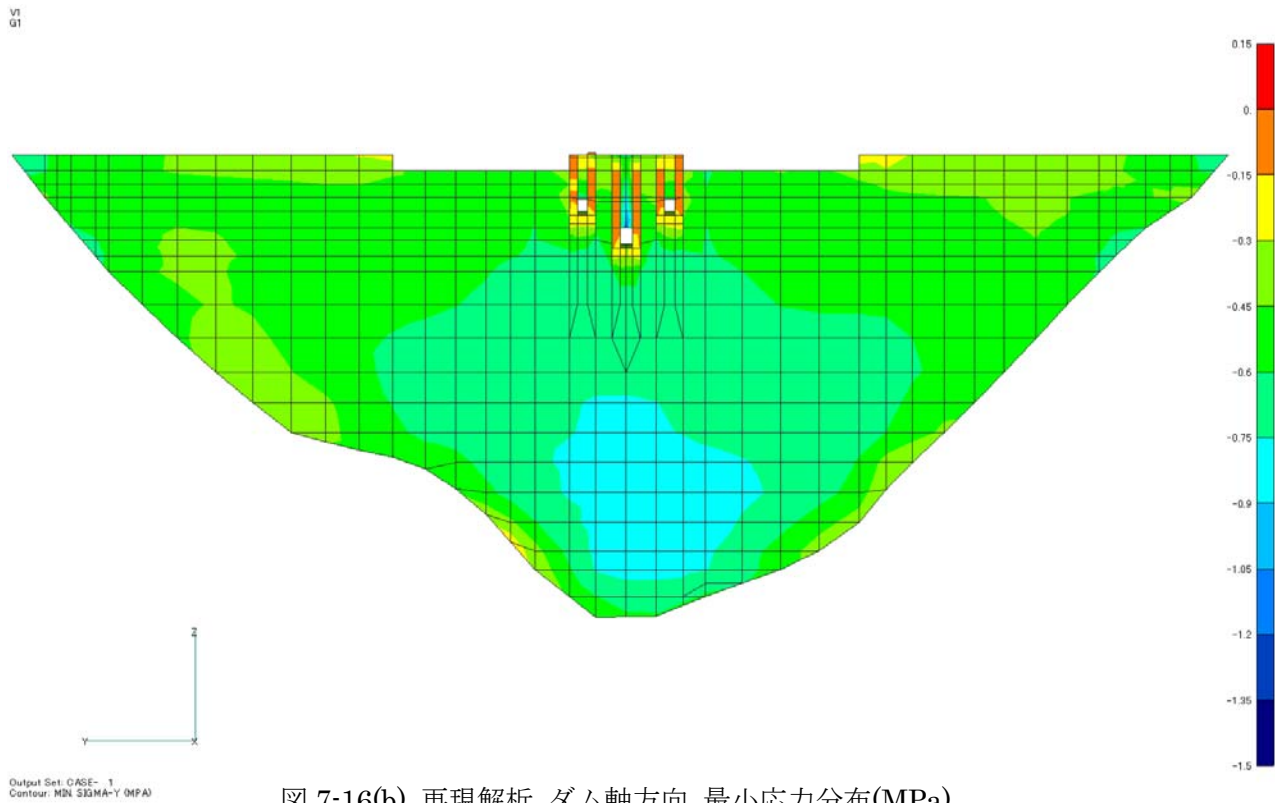


図 7-16(b) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(上流面)

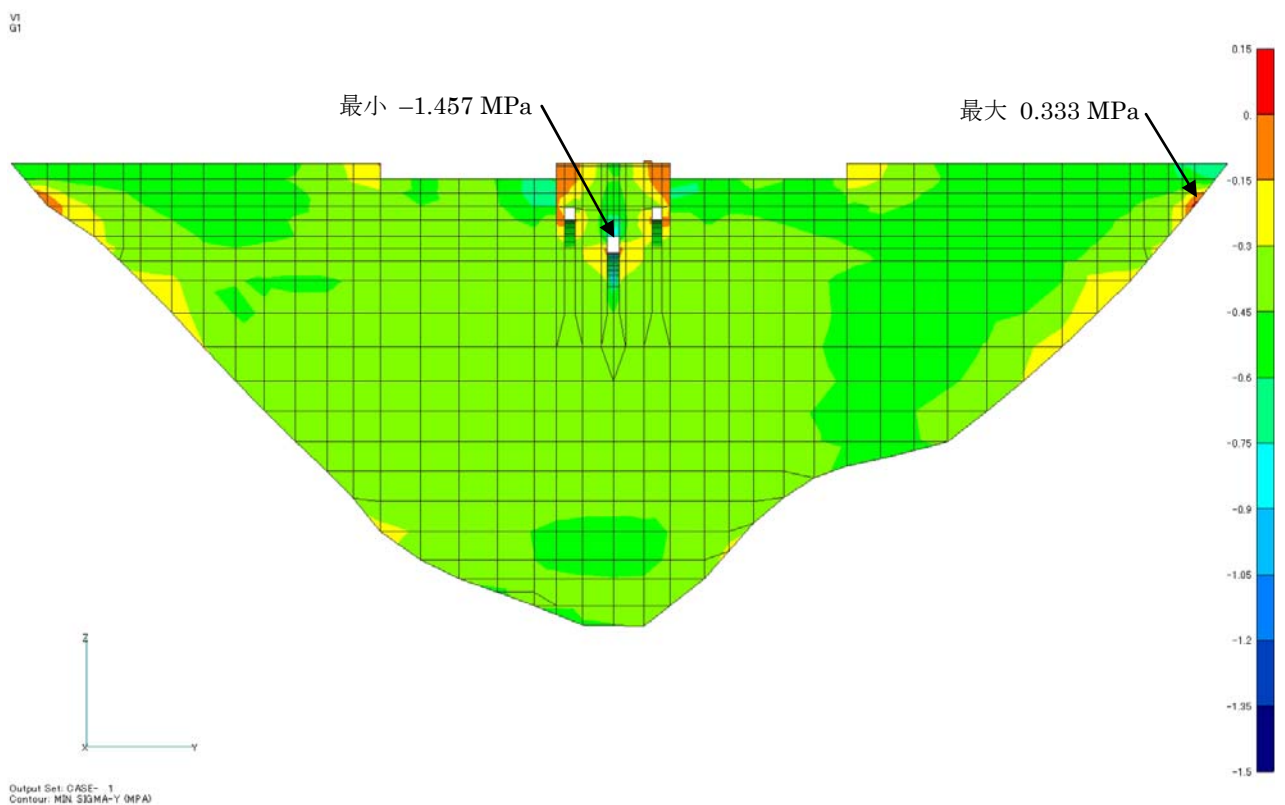


図 7-16(c) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(下流面)

V1
G2

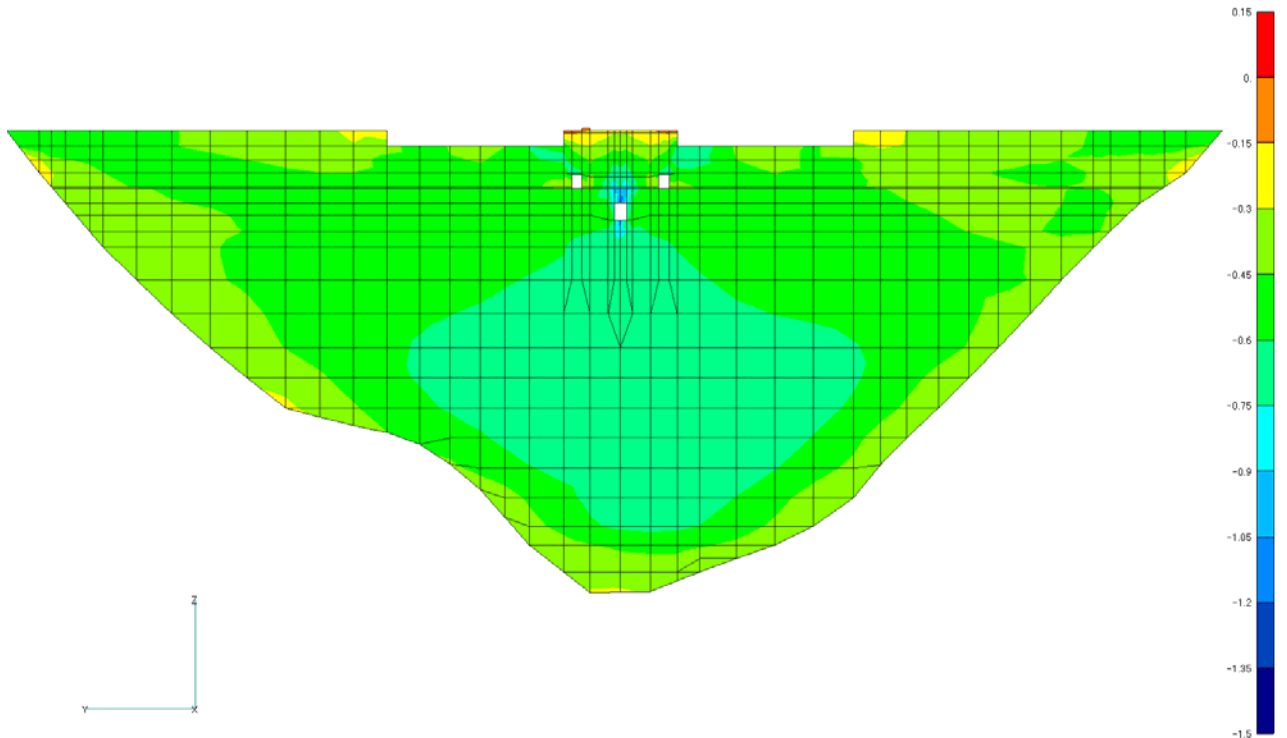


図 7-16(d) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(縦断面)

V1
G3

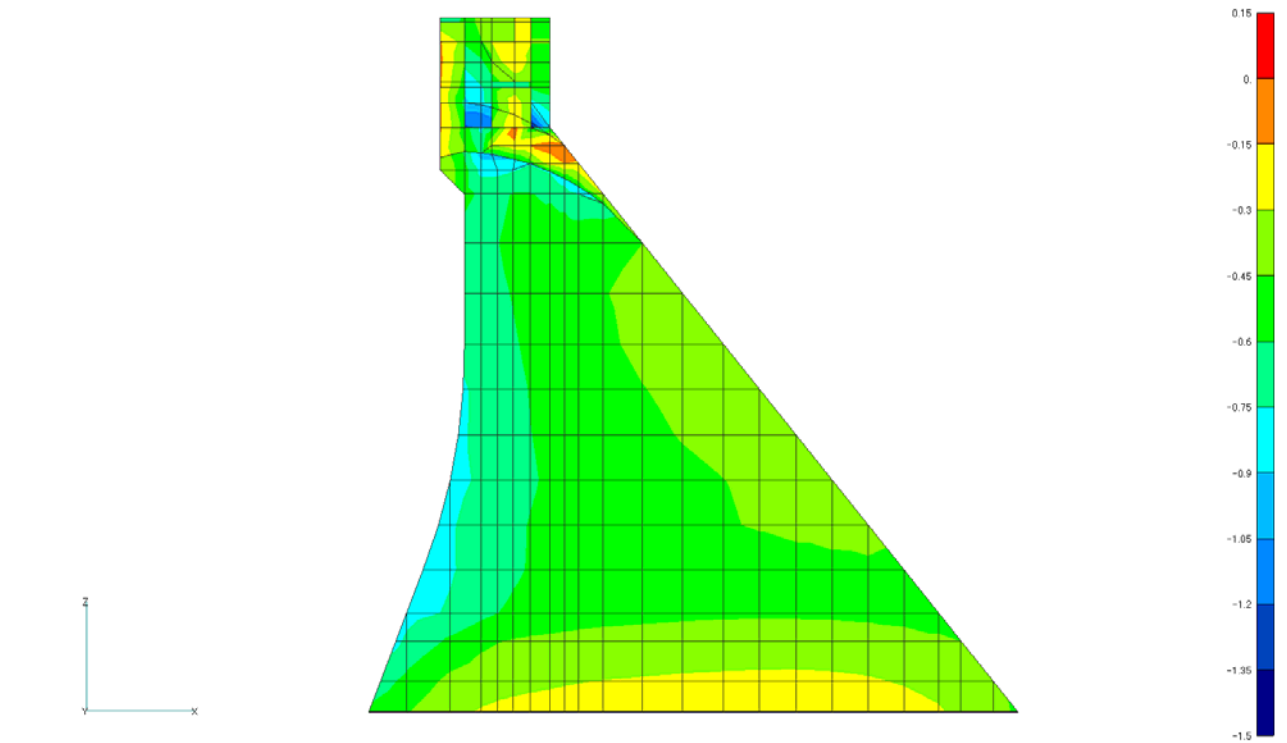


図 7-16(e) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(横断面)

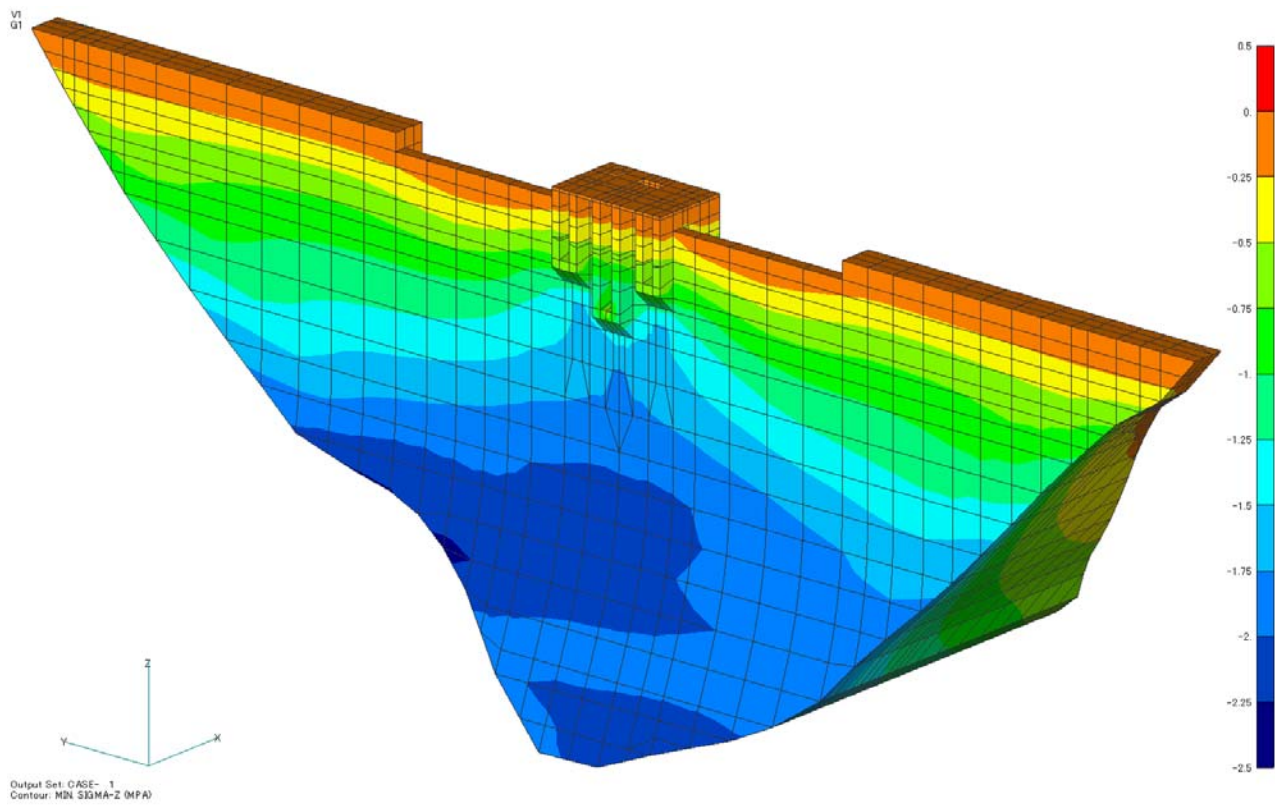


図 7-17(a) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

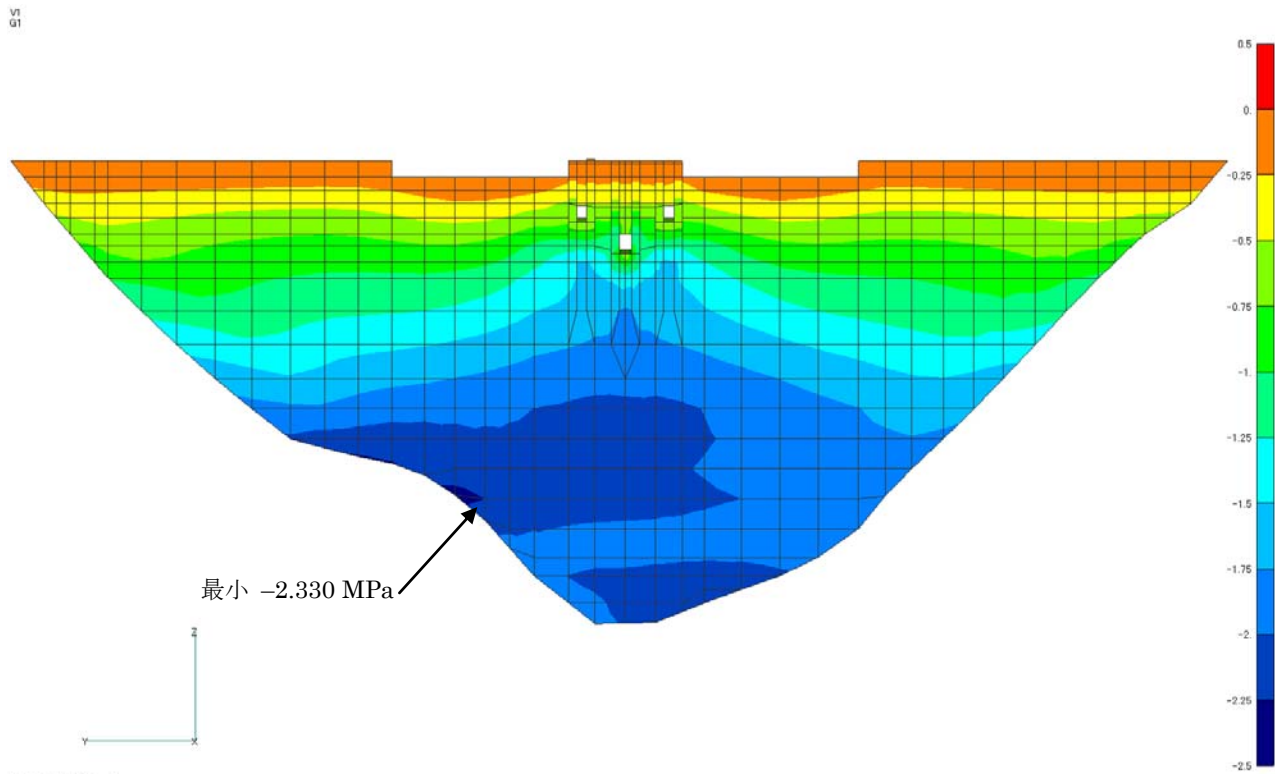


图 7-17(b) 再现解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(上流面)

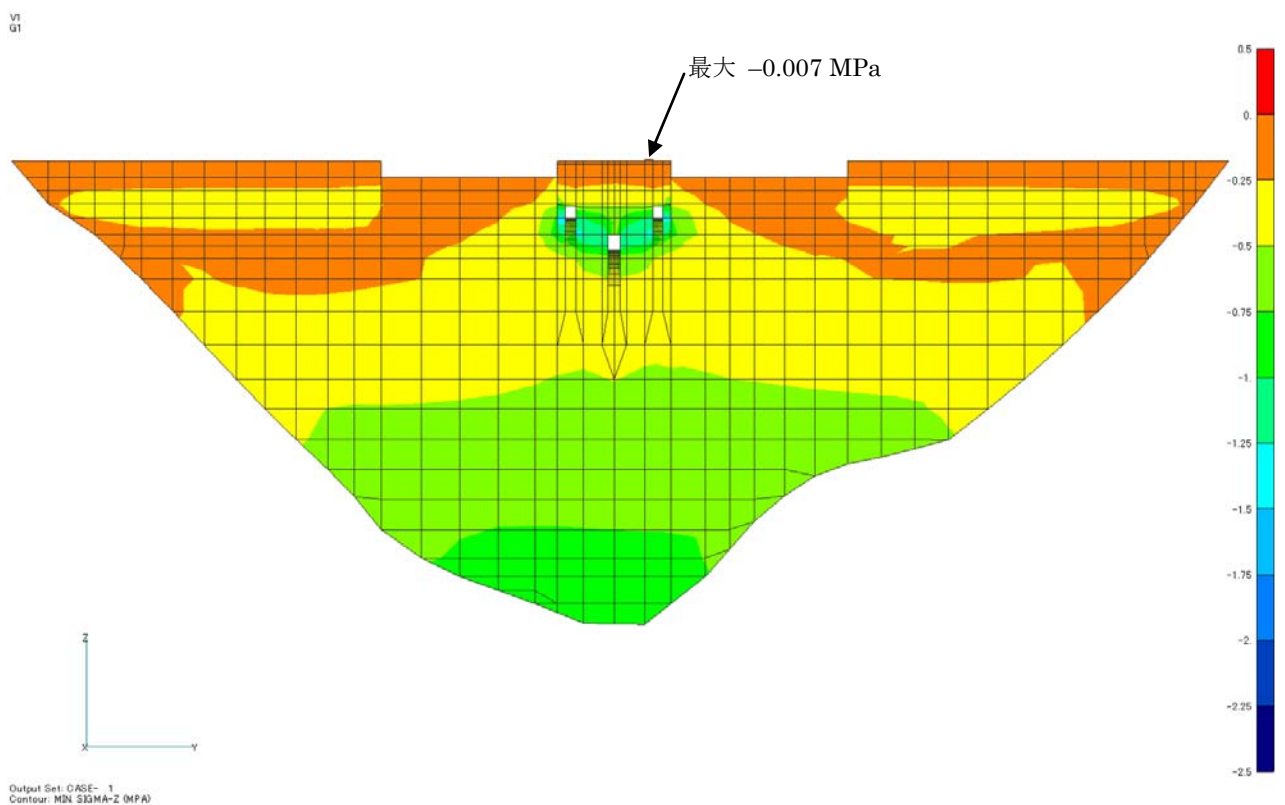
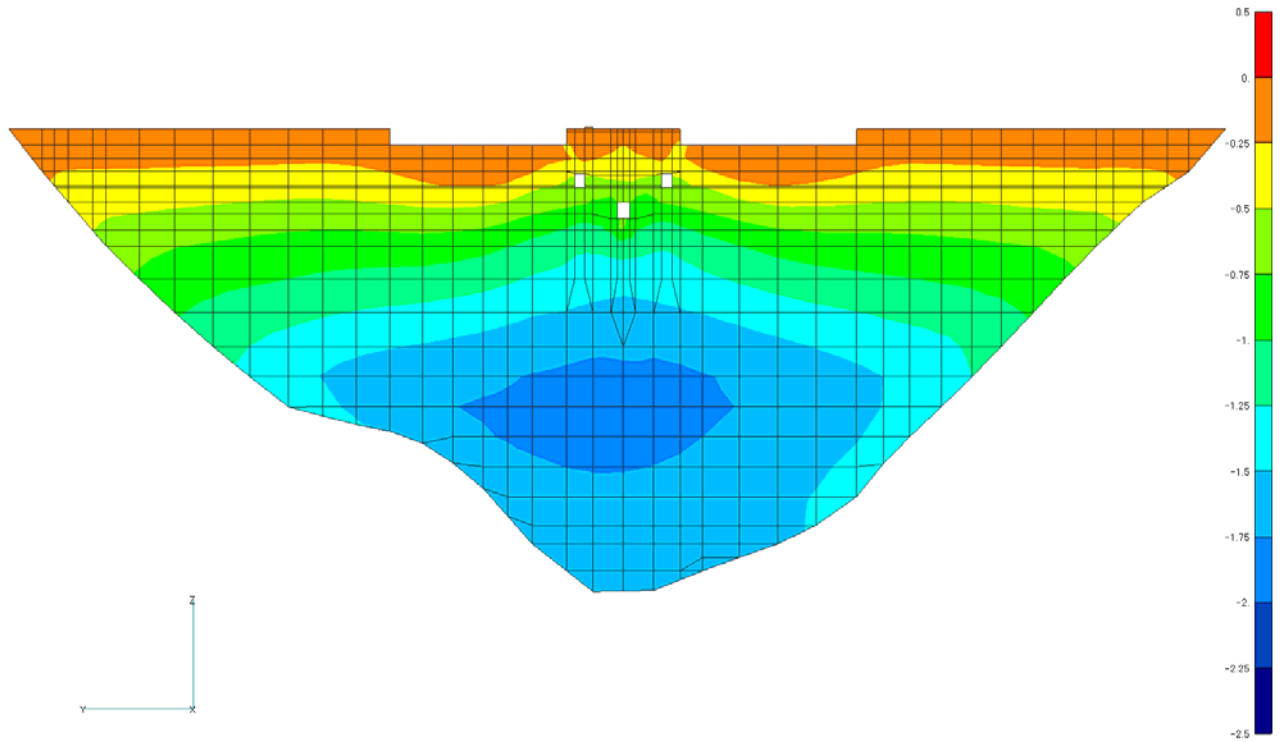


图 7-17(c) 再现解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(下流面)

V1

G2

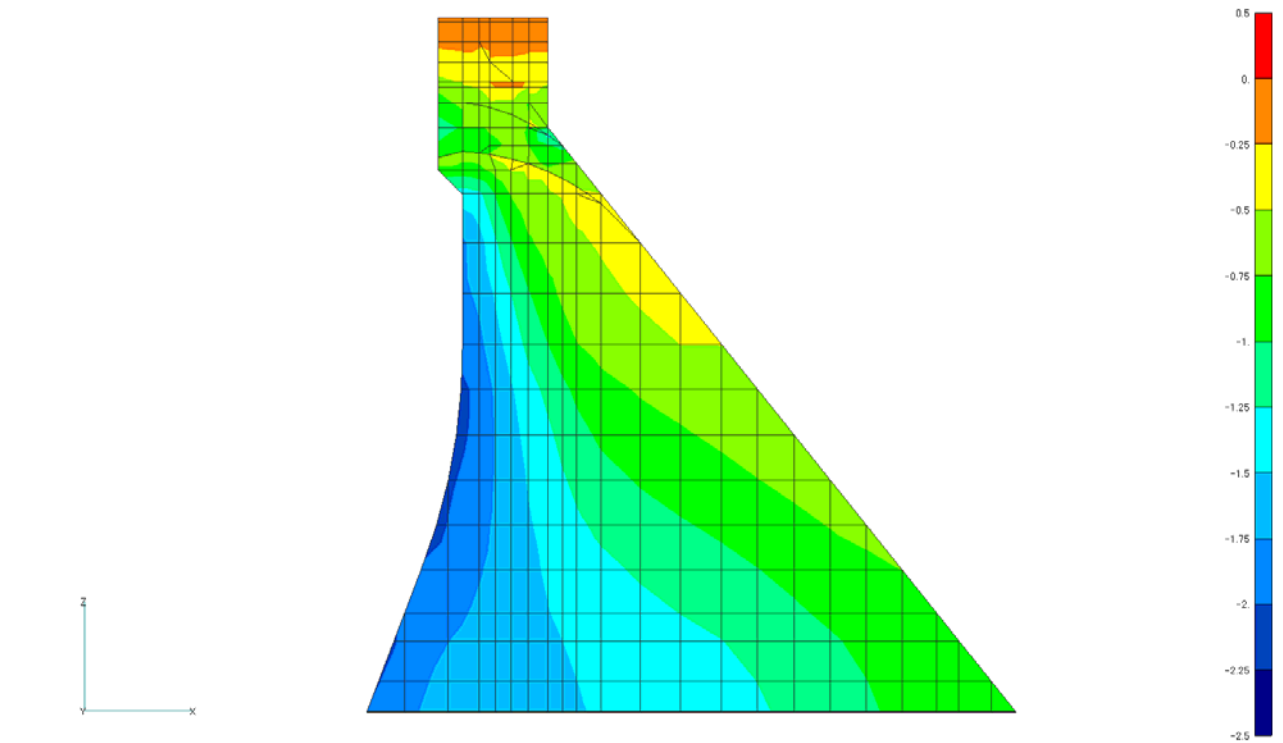


Output Set: CASE- 1
Contour: MIN SIGMA-Z (MPa)

図 7-17(d) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(縦断面)

V1

G3



Output Set: CASE- 1
Contour: MIN SIGMA-Z (MPa)

図 7-17(e) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(横断面)

7.5 まとめ

1) 三次元動的解析により、2003年9月26日の十勝沖地震時における札内川ダムの挙動を次のように再現された。

表 7-6 2003年9月26日十勝沖地震時札内川ダムの動的挙動の再現状況

項目	方向	観測結果	解析結果
ダムの加速度増幅率	上下流	11.0	9.3
	ダム軸	4.5	4.6
	鉛直	3.7	2.2
岩盤の加速度増幅率	上下流	1.2	1.3
	ダム軸	1.0	1.1
	鉛直	1.2	1.9
ダムの1次固有振動数(Hz)		4.96	4.96

また、再現解析結果により、

- ① 堤体の物性値を推定することができた。
- ② ダムの左右の両肩、上段オリフィスおよび下段オリフィスの上流端と下流端では引張応力が発生し、強い地震後の点検時、これらの箇所について留意する必要があると考える。
- ③ 観測された天端中央および岩盤上部の地震時挙動が再現されているから、これらの地震計の良好な設置状態も確認された。また、地震計の設置位置について、上下流方向の逆モードの挙動も観測できるために1/4堤長所に地震計の設置が望ましいと考える。
- ④ 今回の解析では、堤体の地震時挙動の再現性に注目しているため、一様とした基礎岩盤の物性の同定はこれに準拠した。従って、ダム天端中央およびダム底面の地震時挙動の再現性が高くなっているが、兩岸リムトンネルなどの観測点の再現性が犠牲になっている。今後、左右岸地山とダム直下岩盤の地質構造を考慮し、さらに地震計の詳細な設置状況を十分に把握した上で、基礎岩盤のモデルを精緻化すれば、基礎岩盤の再現性も十分な精度に達する可能性がある。その際に、本解析の成果を生かして、以下の検討手順を提案する。
 - ・ まず、本解析で用いた堤体モデル（同定されたダムの物性を含む）を維持する。
 - ・ 地震計の詳細設置状況を調査し、できるだけ解析モデルに反映する。
 - ・ 地質構造を導入した基礎岩盤モデルの物性を同定する。その際に、左岸・右岸のリムトンネルの観測点および下流側開放基盤の観測点の再現性に注目して、詳細に区分された岩盤物性を同定する。
 - ・ そして、基礎岩盤の詳細物性を同定した上で、今回の解析で用いたダム堤体モデルをチェックして、ダム堤体の再現性をさらに向上する。
- ⑤ 本解析では、入力地震動として、岩盤下部（F1）の観測記録を用いて三次元引戻し計算手法により解析モデル底面の地震動を求めたが、岩盤モデルが妥当なものであれば、岩盤上部（F2）、または下流側開放基盤（G1）の地震動を用いても、同程度の再現性が得られると考えら得る。この点を考慮して、今後、基礎岩盤モデルの妥当性の検討に他の観測点の地震動を用いた解析もすべきではないかと考える。
- ⑥ 用いた三次元ダム－貯水池－基礎岩盤連成系の動的解析手法および粘性境界の解析手法が実用的、妥当な解析モデルおよび解析手順を用いれば、有力な手法である。

また、再現できたモデルを用い、レベル2相当の強い地震を受ける場合のダムの耐震安全性を解析・評価することも非常に重要であると思われる。この場合、継目の非線形挙動の影響を考慮した解析手法を用いるべきものと思われる。

参考文献：

- 1) 三浦 房紀・沖中 宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法, *土木学会論文集*, 第 404 号/I-11, 395-404, 1989
- 2) 解析コードUNIVERSE http://www.jpbs.co.jp/it/02_03.html
- 3) 土木学会論文集No.759 P.53～ 「強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダム of 3次元動的解析に関する研究」
- 4) 土木学会編「動的解析と耐震設計, 第 3 卷, エネルギー施設」, “動的変形特性”, 技報堂出版, p.74
- 5) Watanabe H., Cao Z.: Investigation of the Modelling Method of the Dam-Foundation – Reservoir System. *12th World Conference of Earthquake Engineering*, No.0512 , Auckland, 2000.1
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁・社団法人電力土木技術協会: 「ダム耐震設計高度化調査報告書」, 平成 13 年 3 月, p.32, 参照

.....
国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

N o . 4 2 9 December 2007

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....
本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675