

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。

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

$$\begin{array}{l}
 Y \text{ 方向 } (W_{FY} \text{ 波}) \text{ 加振時} \\
 \left\{ \begin{array}{l} R_{YX} \\ R_{YY} \\ R_{YZ} \end{array} \right. \begin{array}{l} X \text{ 方向応答波} \\ Y \text{ 方向応答波} \\ Z \text{ 方向応答波} \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 Z \text{ 方向 } (W_{FZ} \text{ 波}) \text{ 加振時} \\
 \left\{ \begin{array}{l} R_{ZX} \\ R_{ZY} \\ R_{ZZ} \end{array} \right. \begin{array}{l} X \text{ 方向応答波} \\ Y \text{ 方向応答波} \\ Z \text{ 方向応答波} \end{array}
 \end{array}$$

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。

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

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

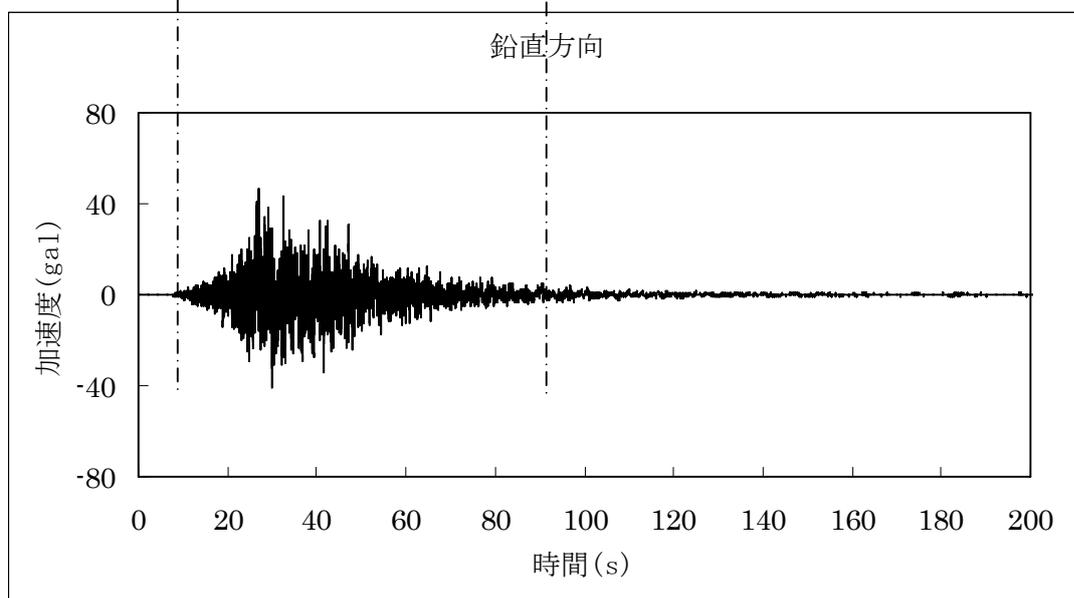
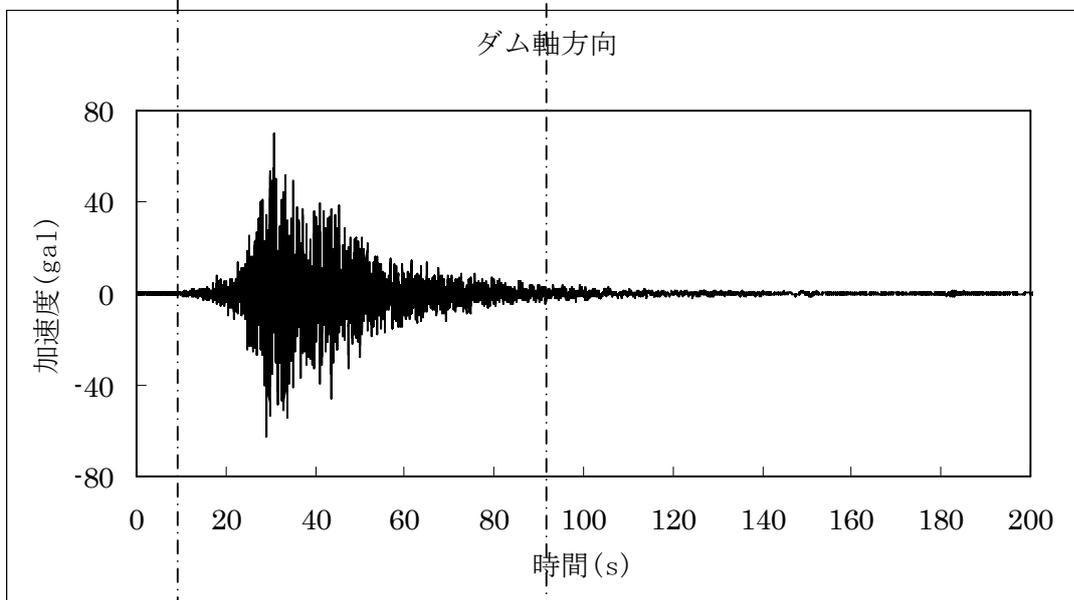
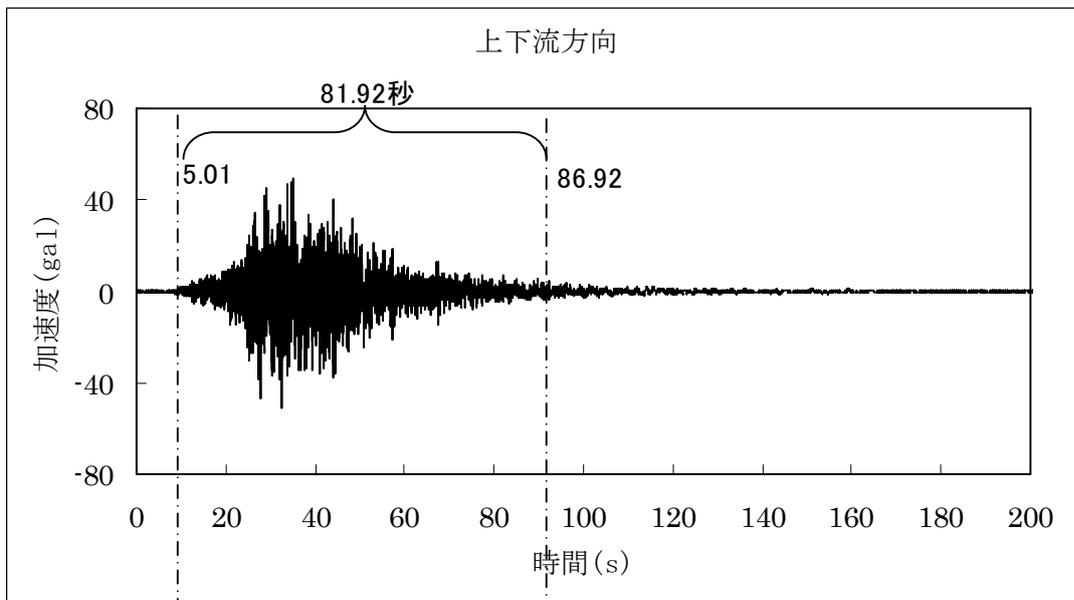


図 7-1 岩盤下部 (F1)で観測された地震動

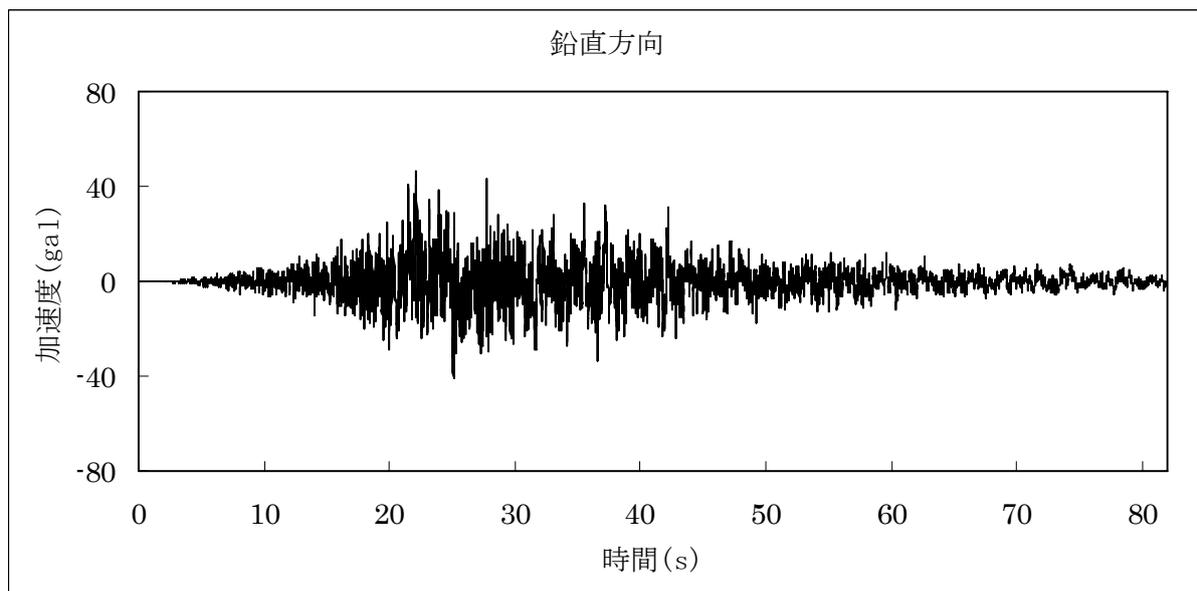
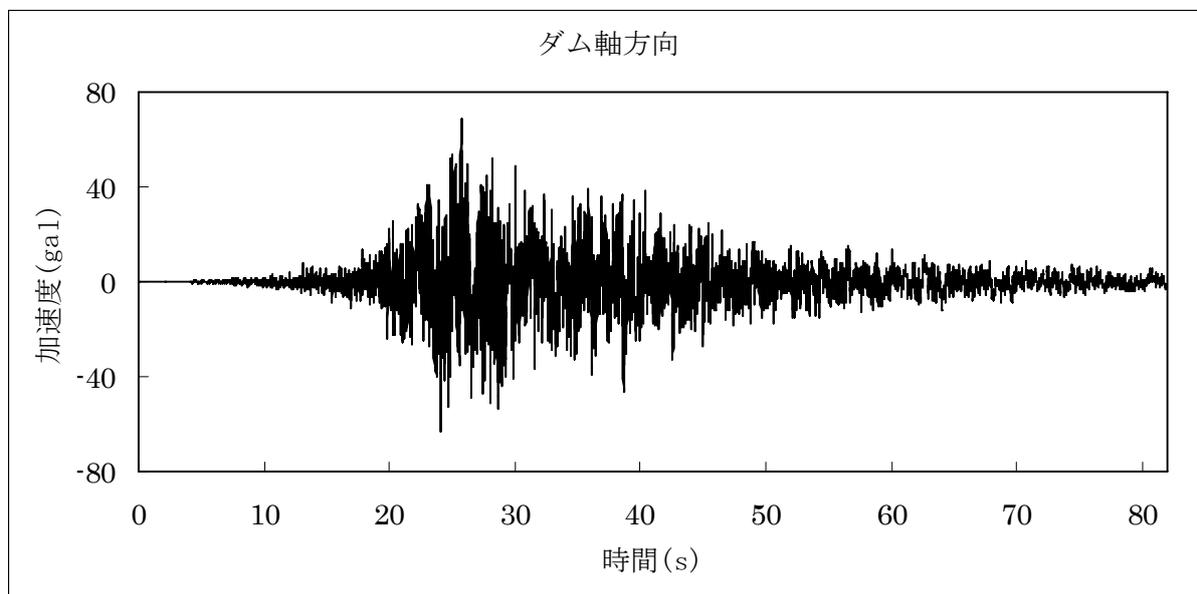
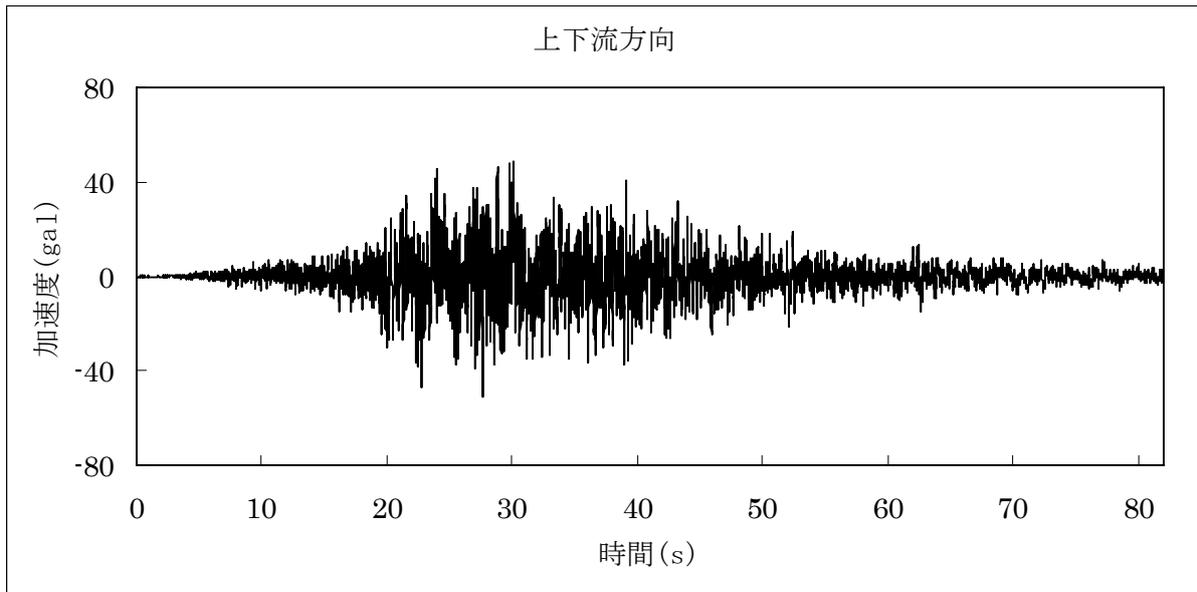


図 7-2 再現解析で用いた岩盤下部の観測地震動

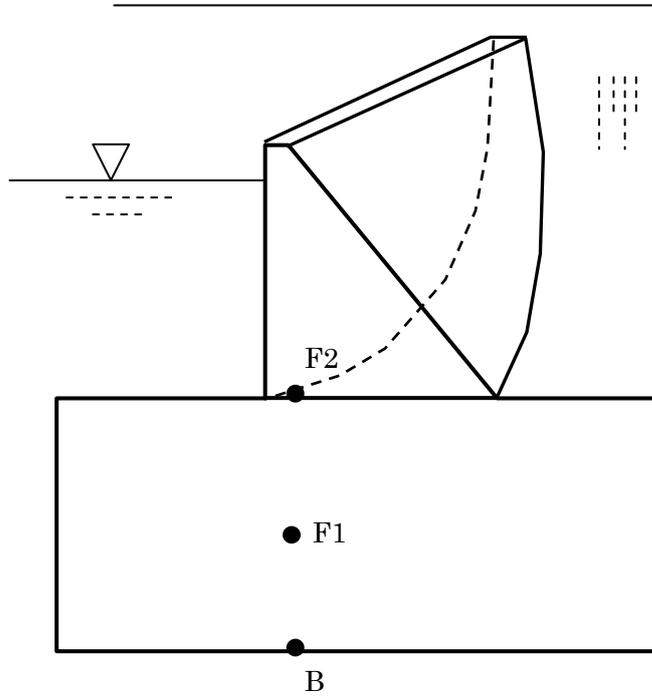


図 7-3 引戻し計算イメージ図

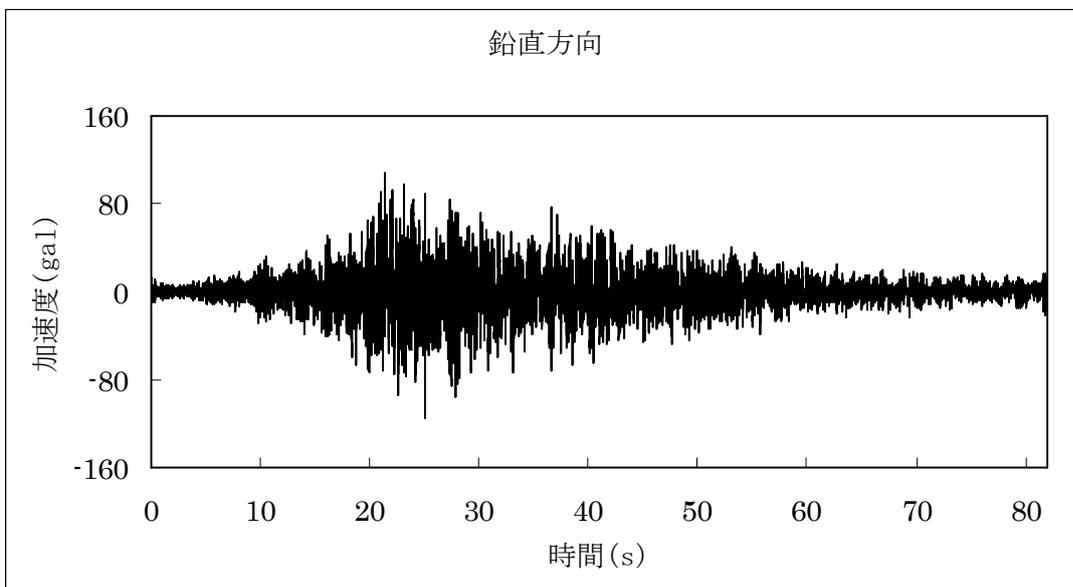
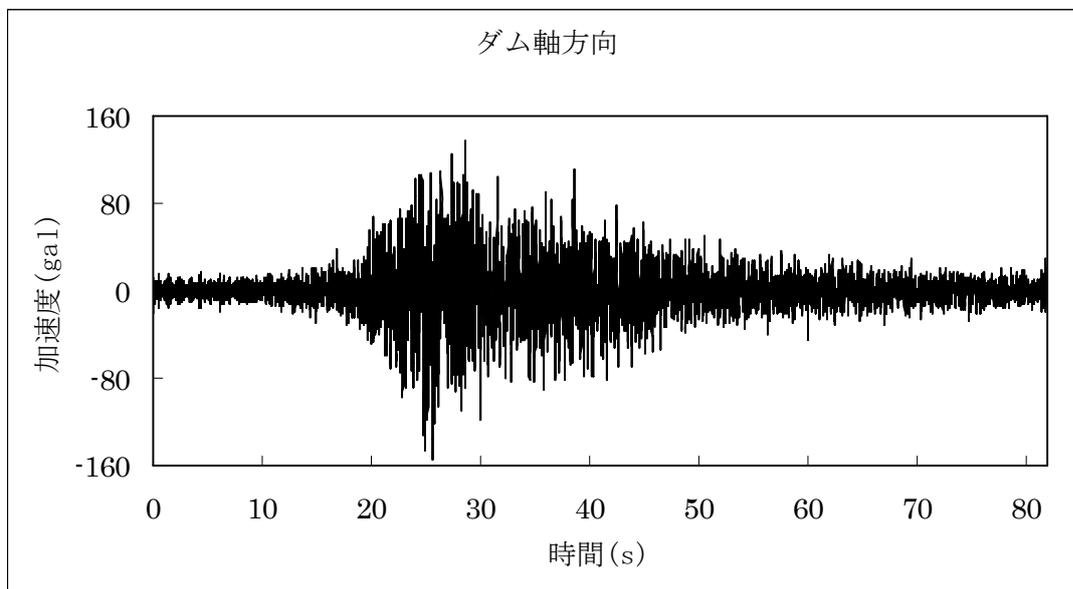
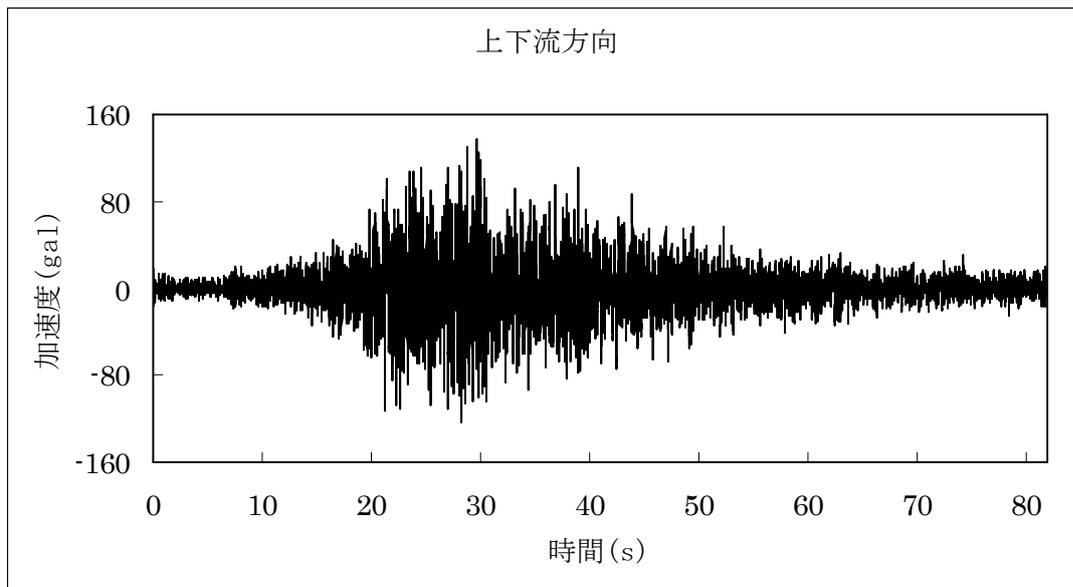


図 7-4 引戻された解析モデル底面の入力地震動

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%

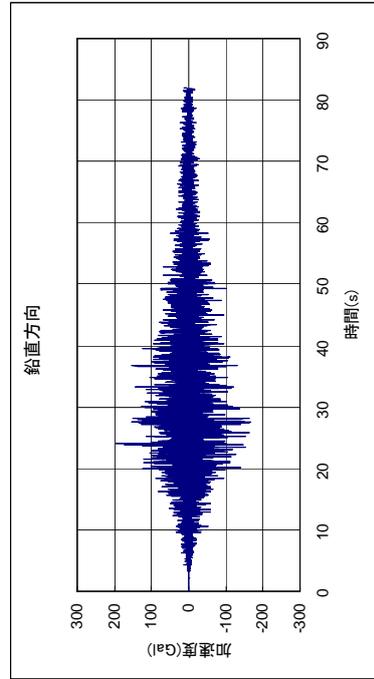
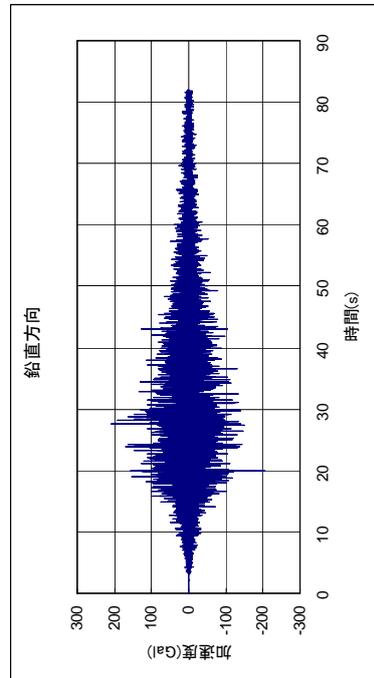
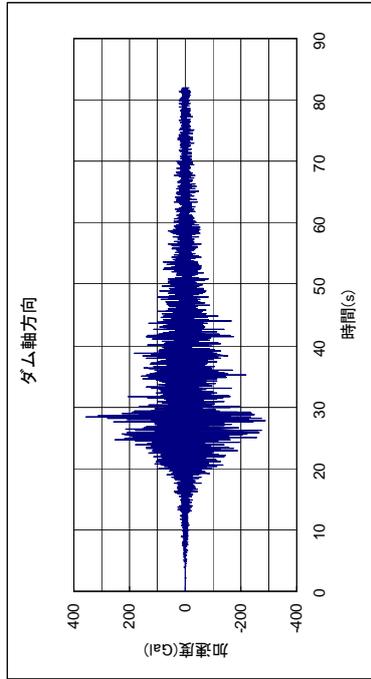
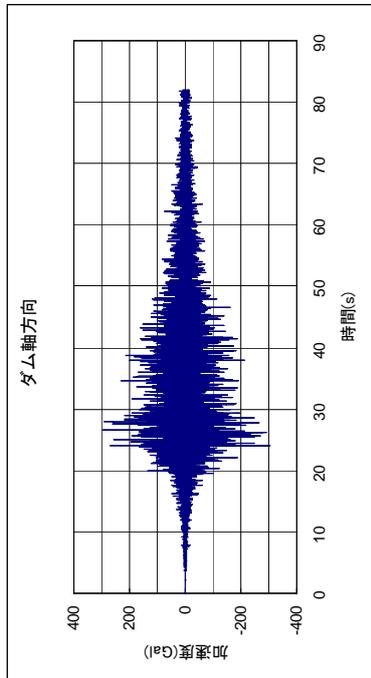
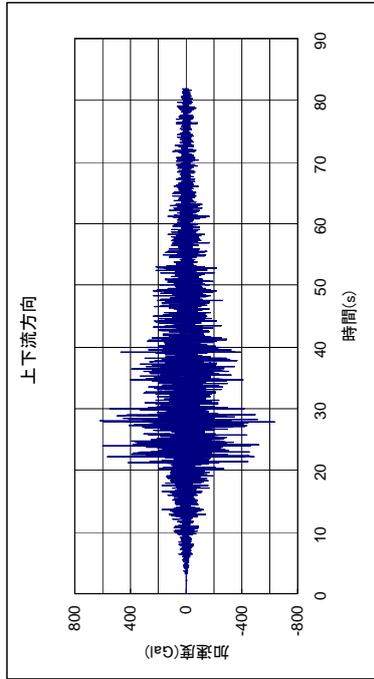
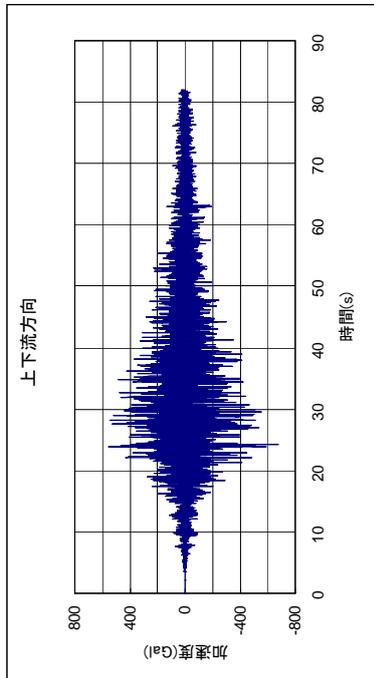
表 7-3 基礎下部 (F1) に対する各観測点の加速度増幅率

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

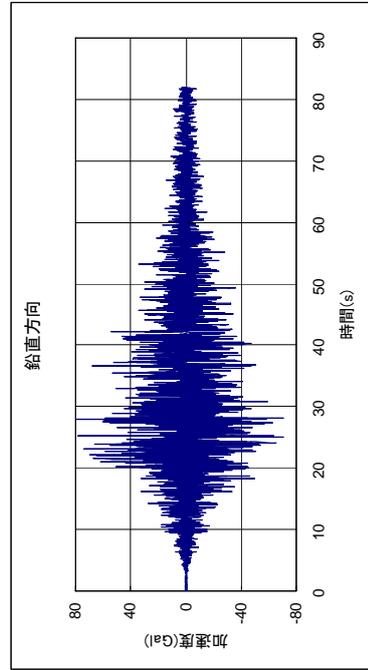
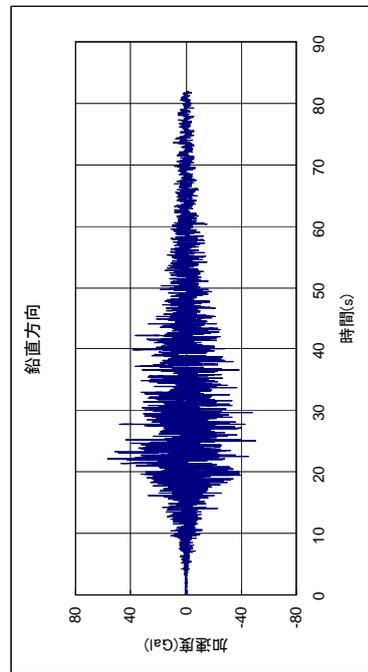
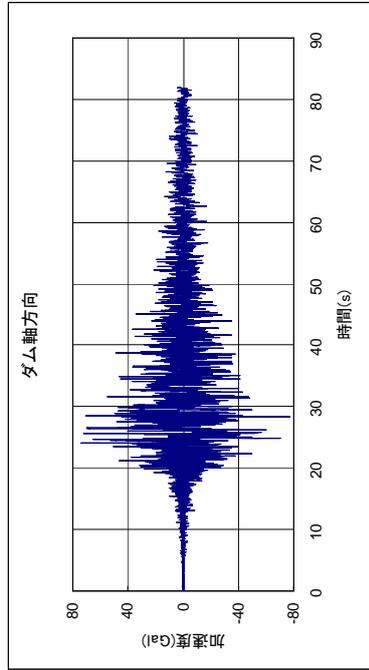
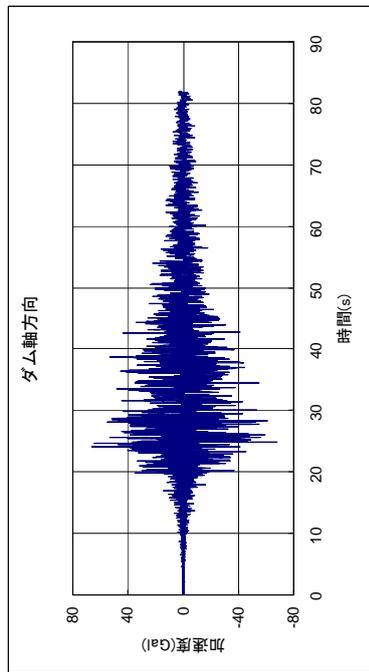
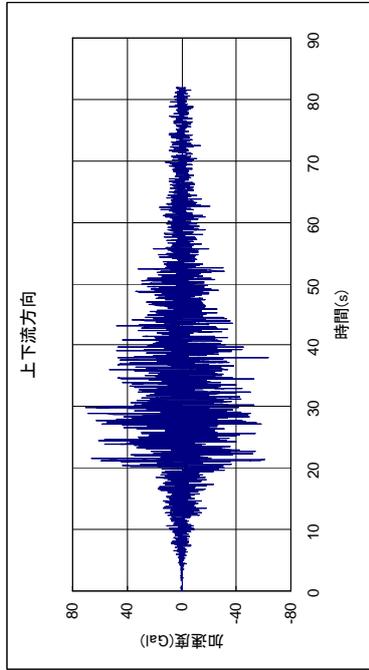
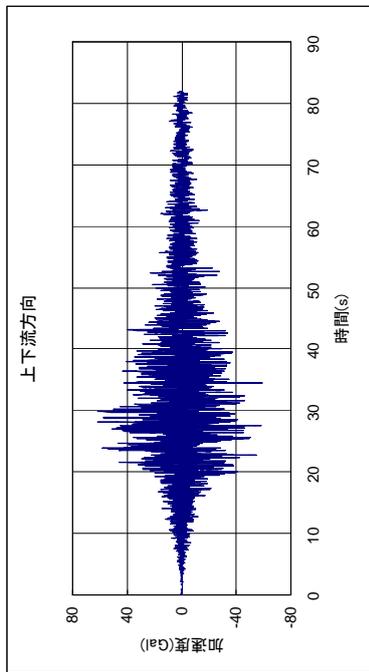
注：相対差 = (解析値 - 観測値) × 100 / 観測値



【観測波】

【解析結果】

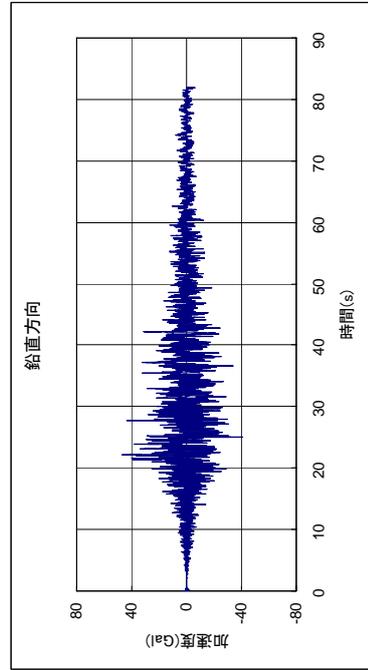
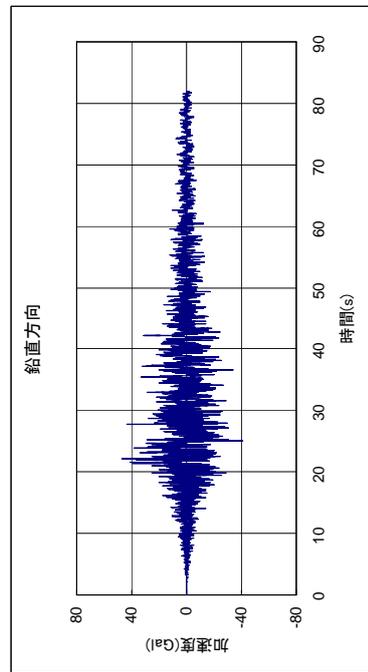
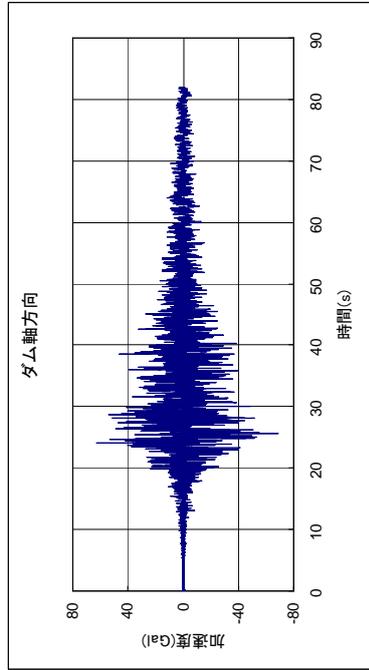
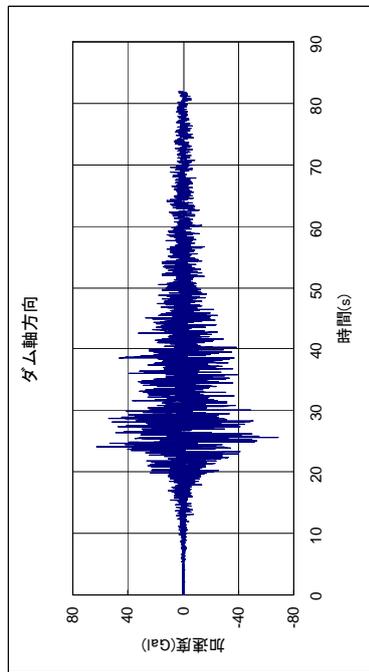
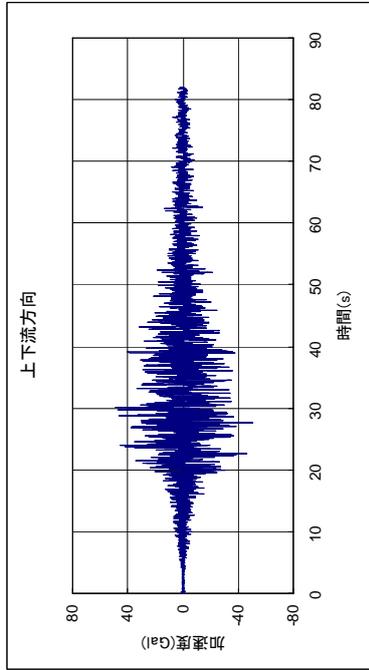
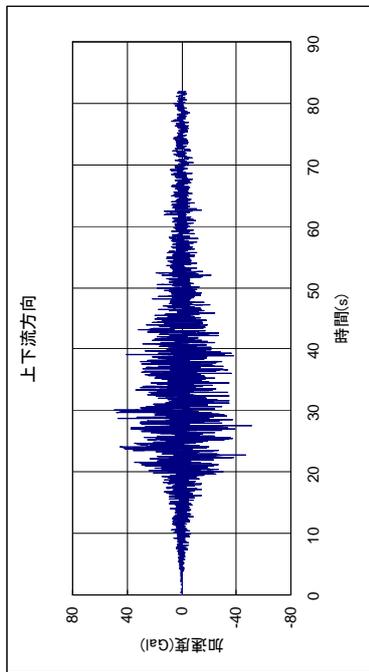
図7-5(a) ダム天端中央 (T2) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

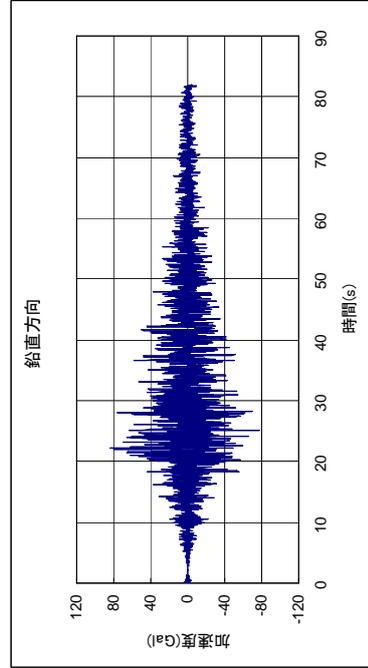
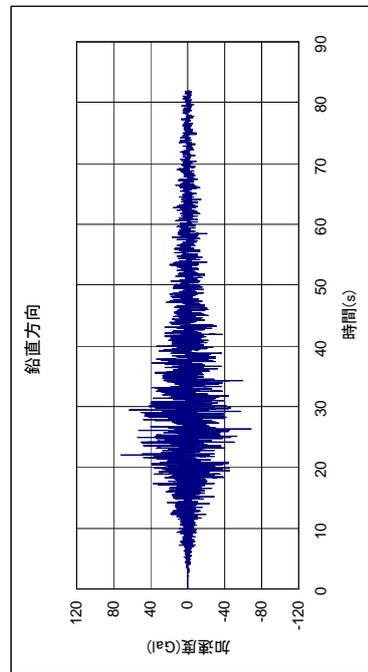
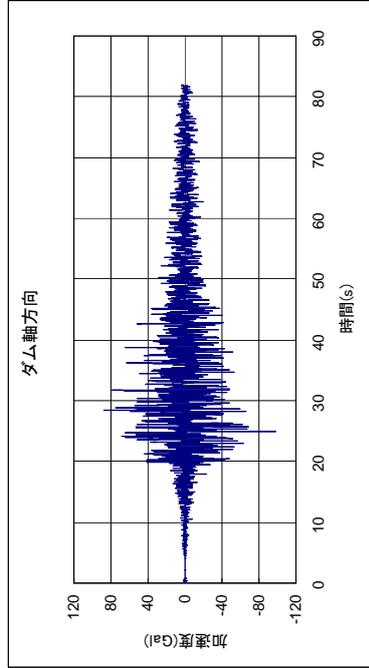
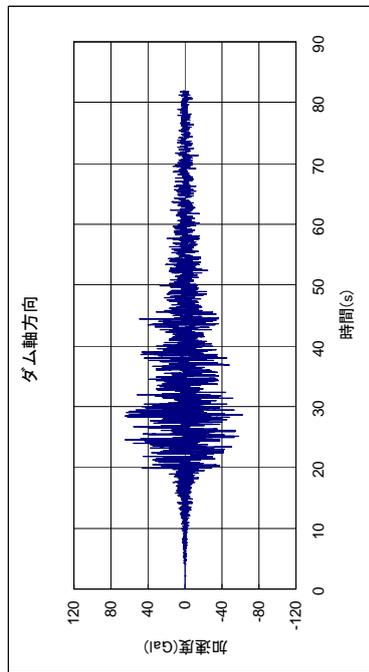
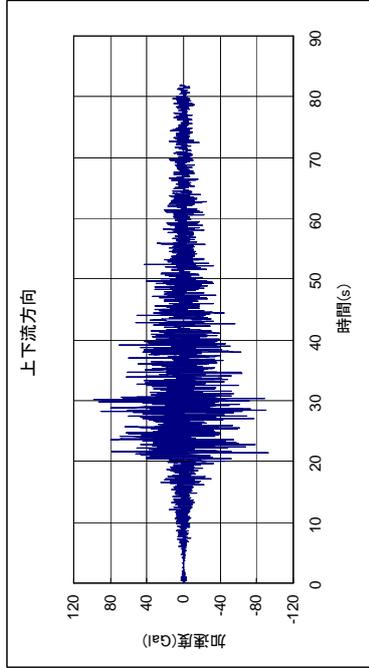
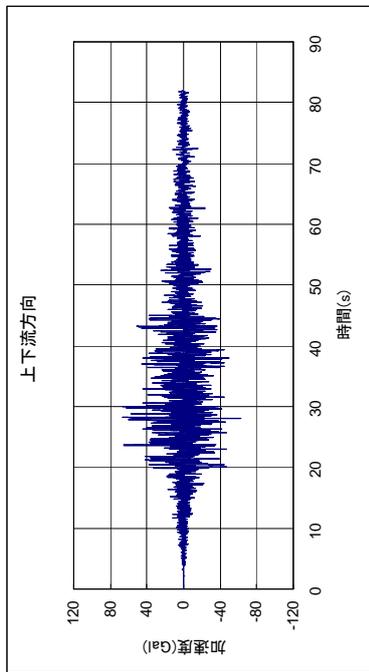
図7-5 (b) 岩盤上部 (F2) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

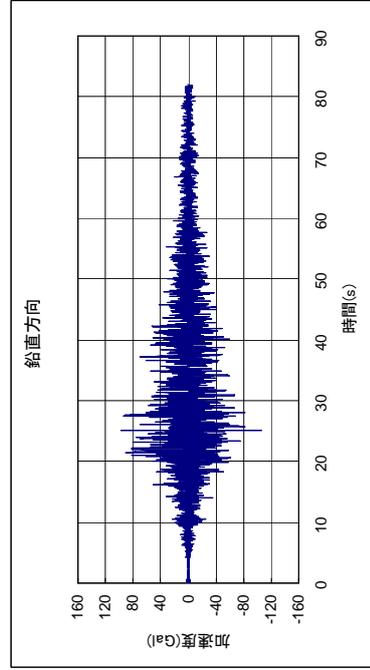
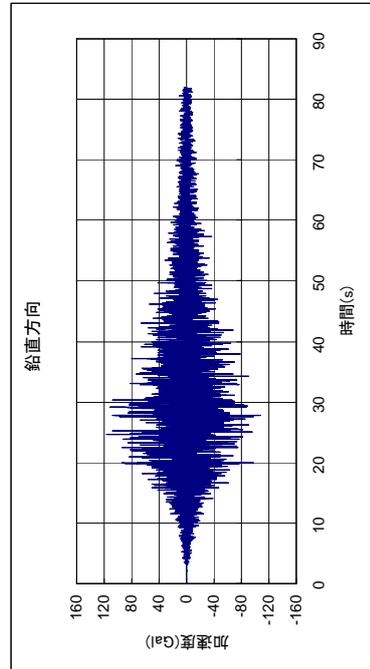
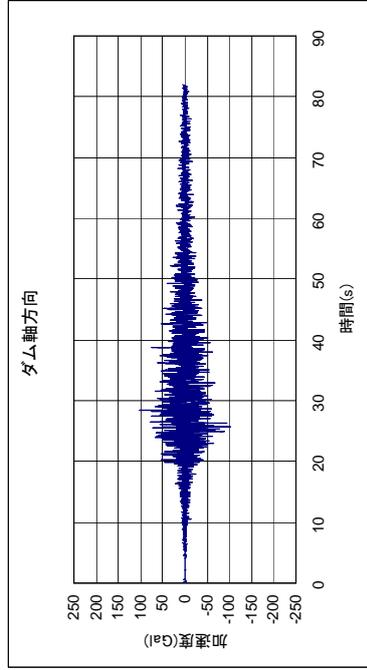
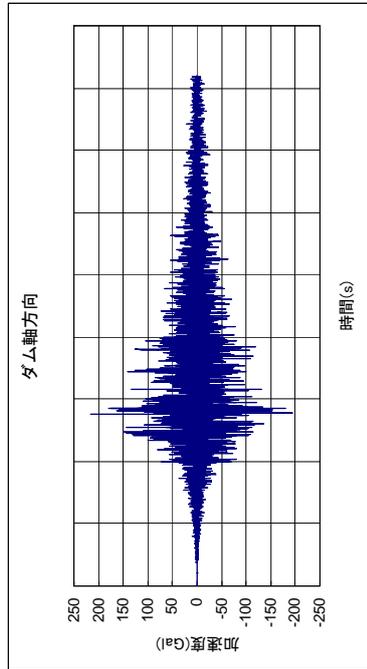
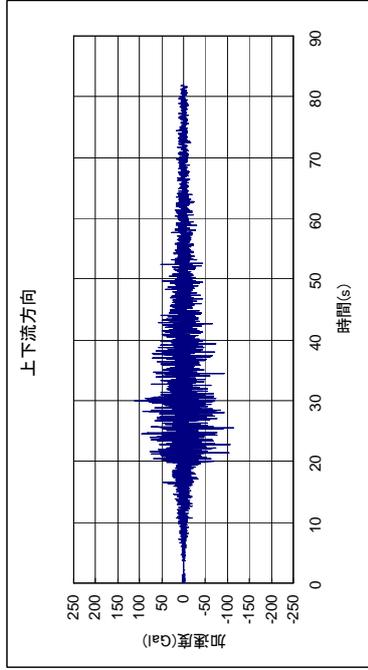
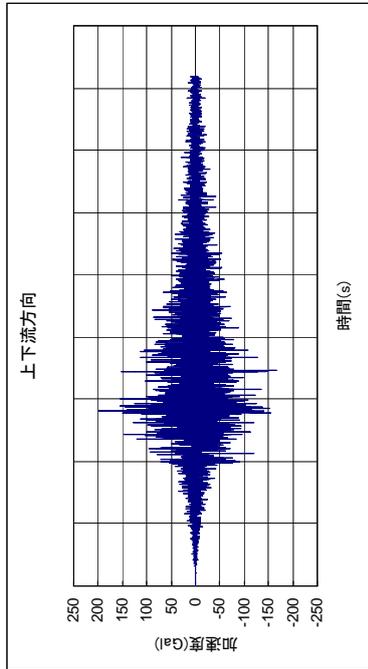
図7-5(c) 岩盤下部 (F1) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

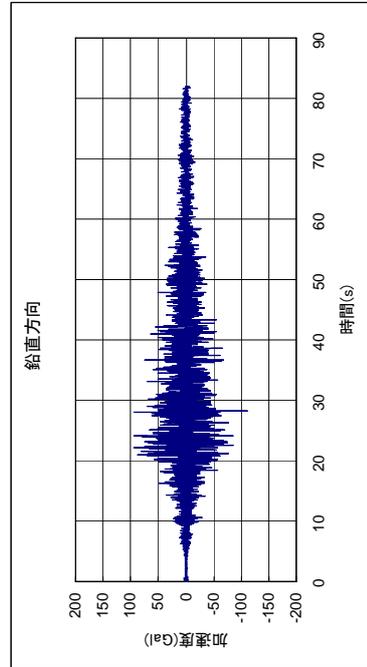
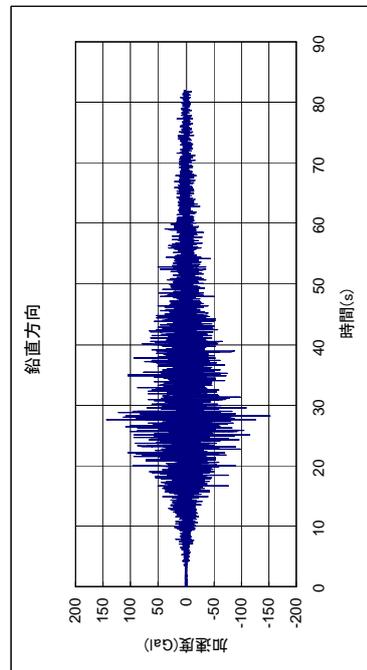
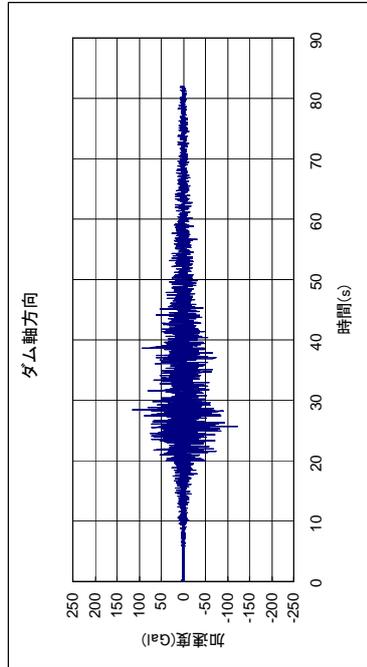
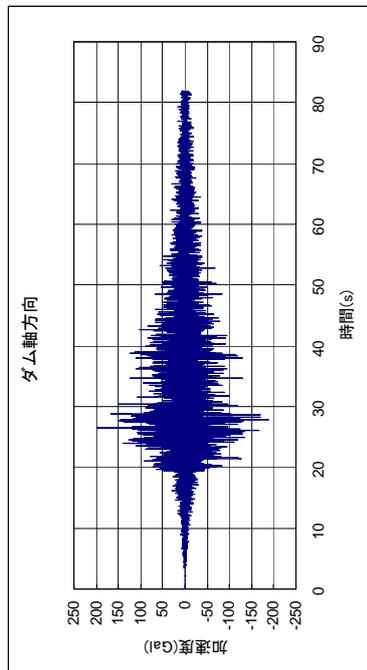
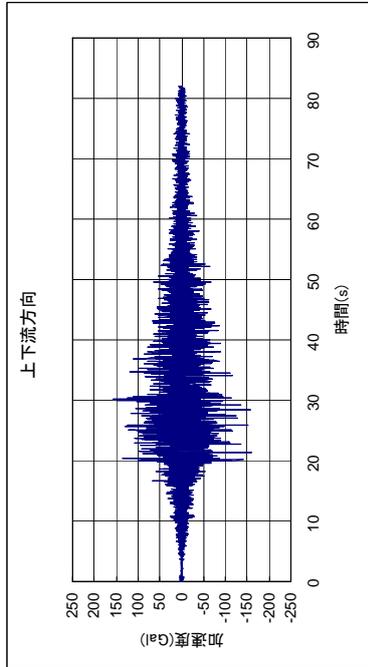
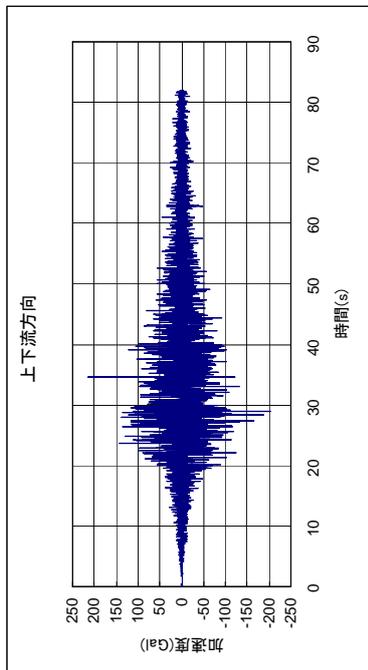
図7-5(d) 左岸リムトネル内 (R1) の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

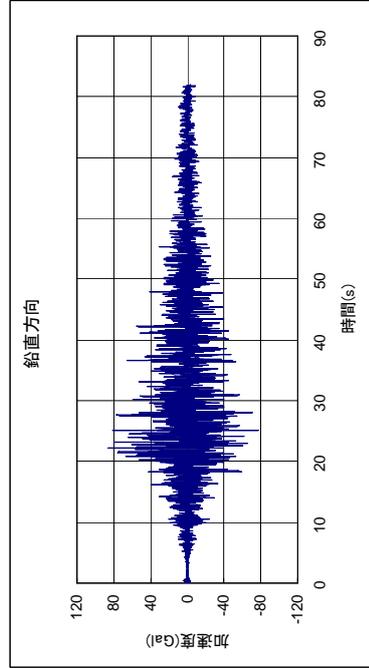
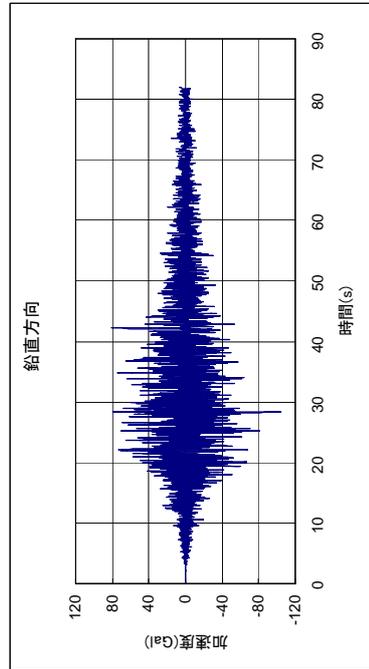
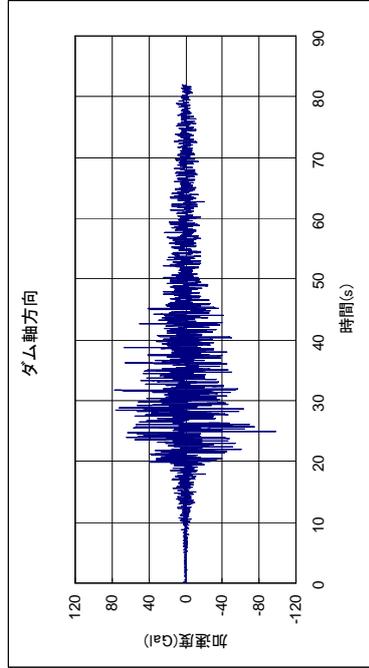
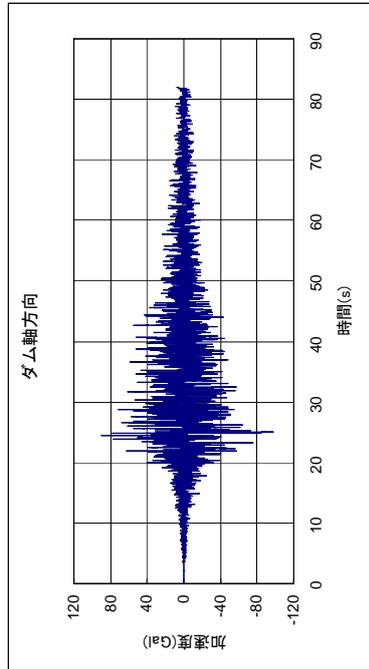
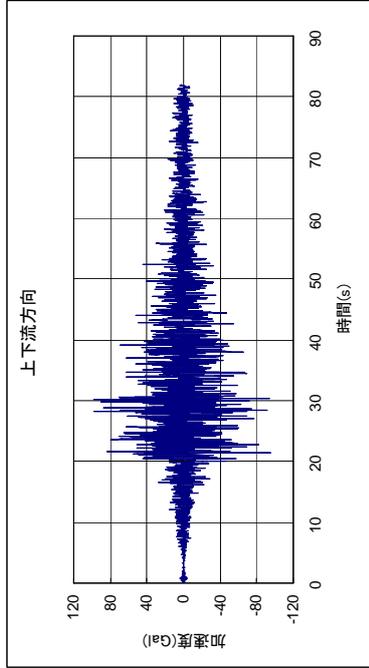
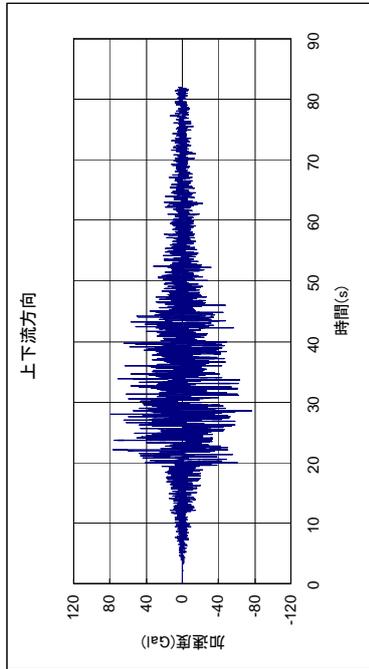
図7-5(e) ダム左肩(T1)の加速度応答時刻歴



【観測波】

【解析結果】

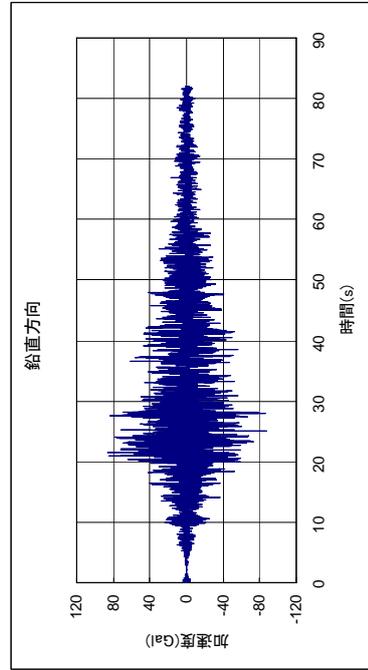
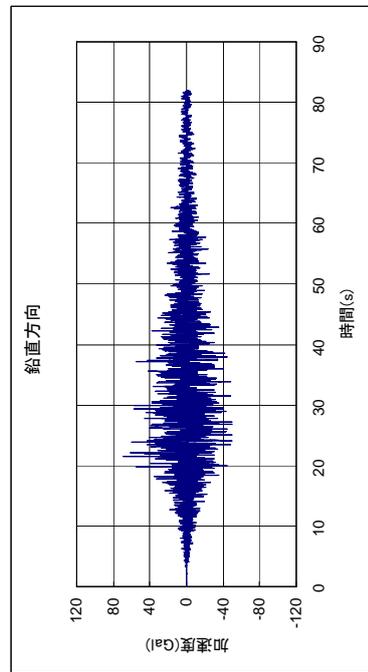
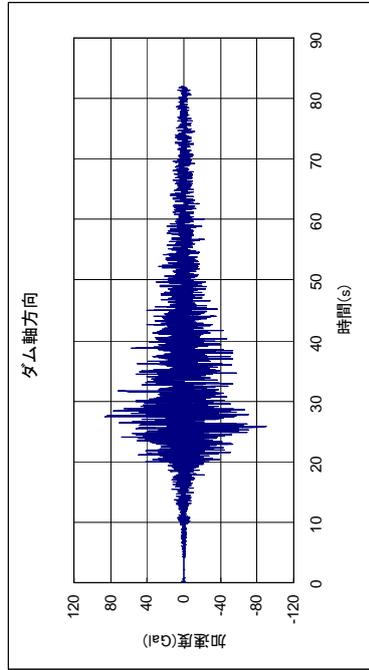
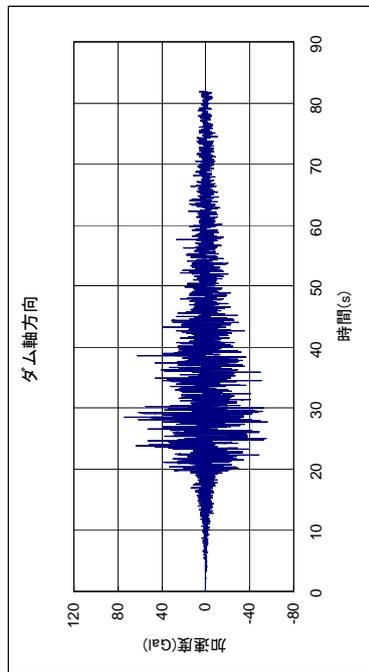
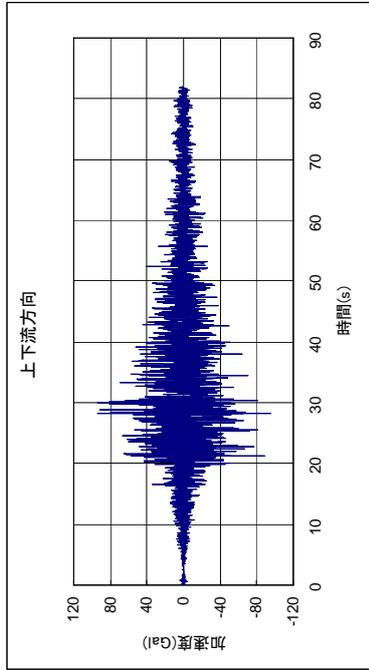
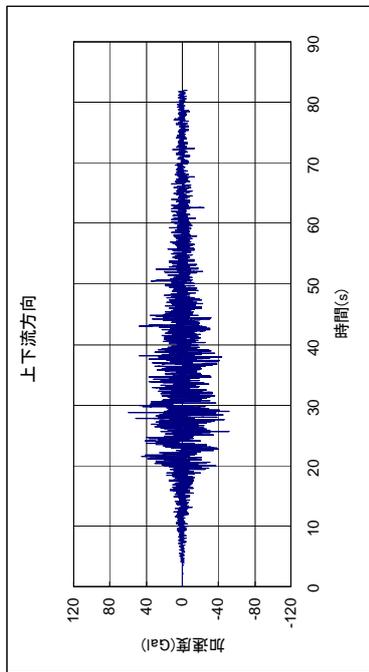
図7-5(f) ダム右肩 (T3) の加速度応答時刻歴



【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

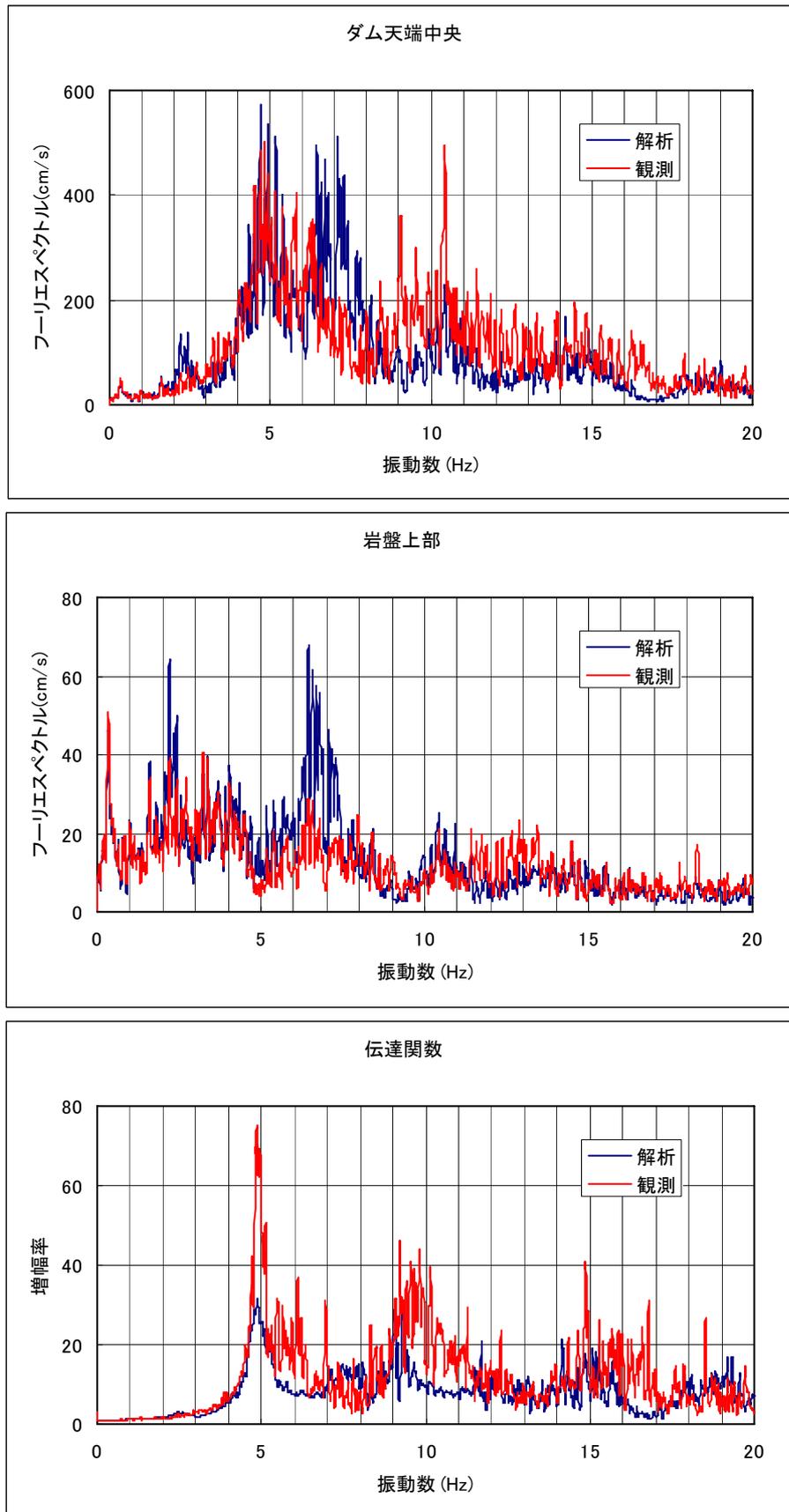


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

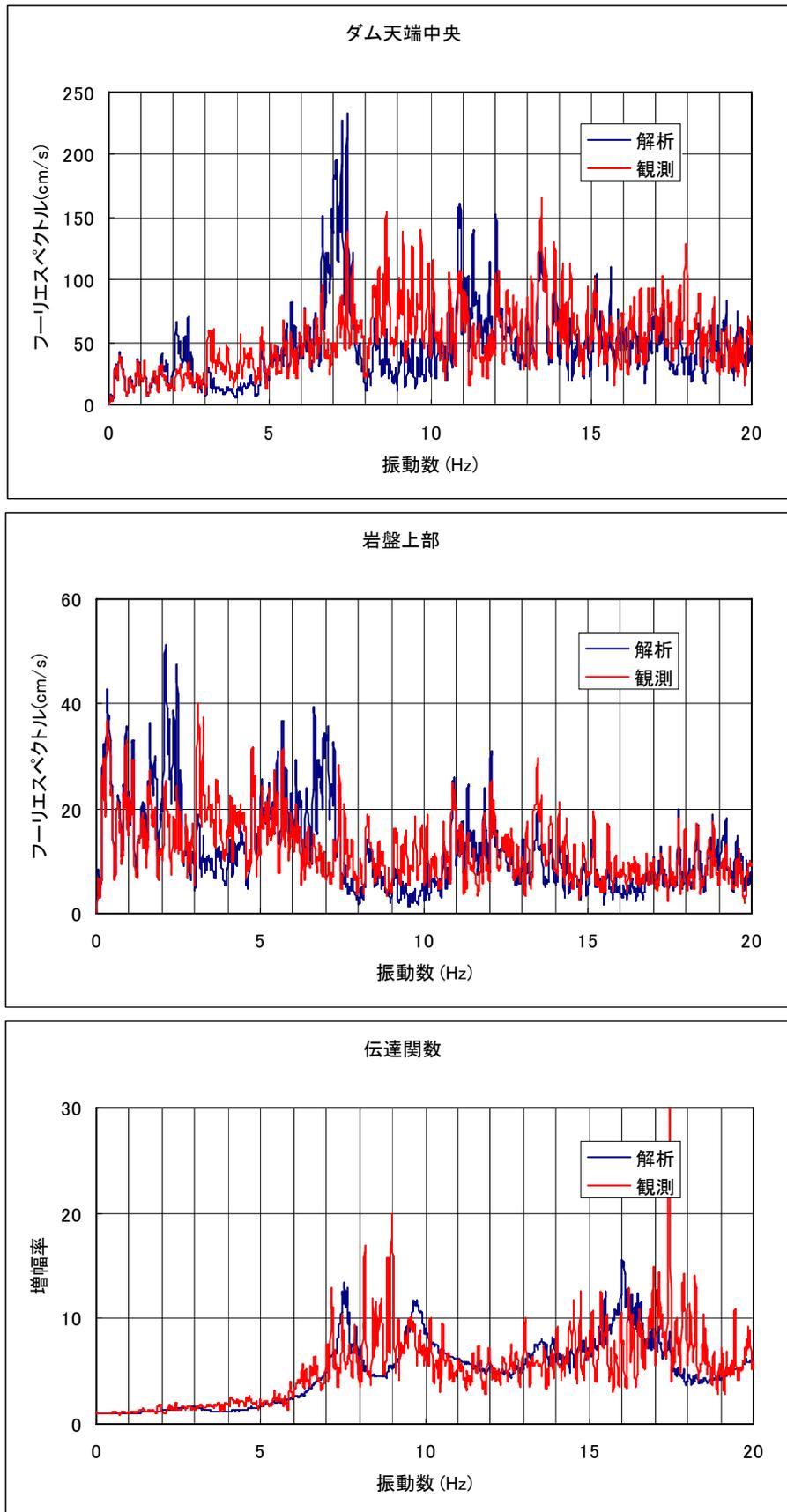


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

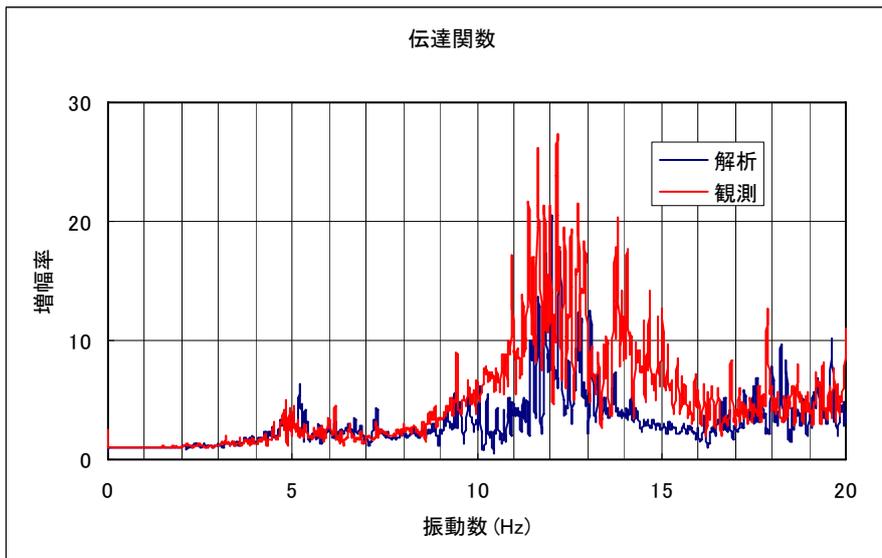
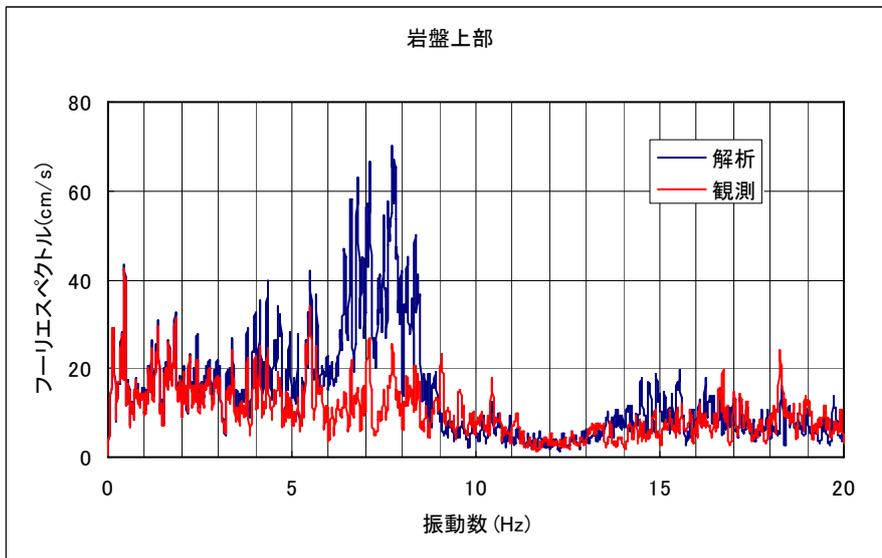
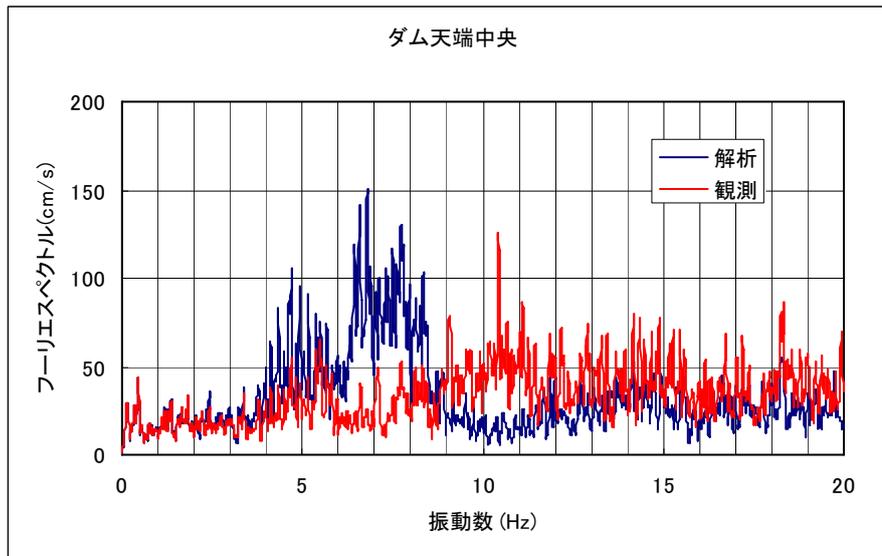


図7-6(a) 天端中央 (T2) と岩盤上部 (F2) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

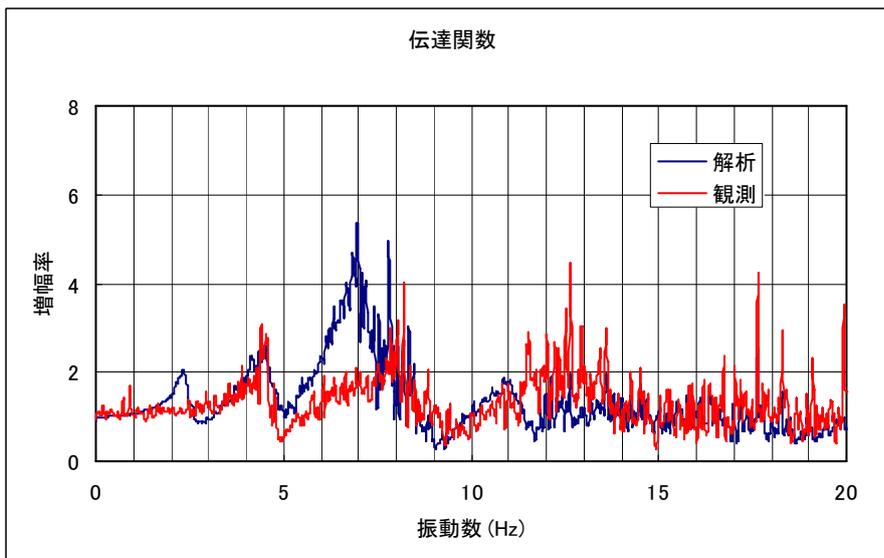
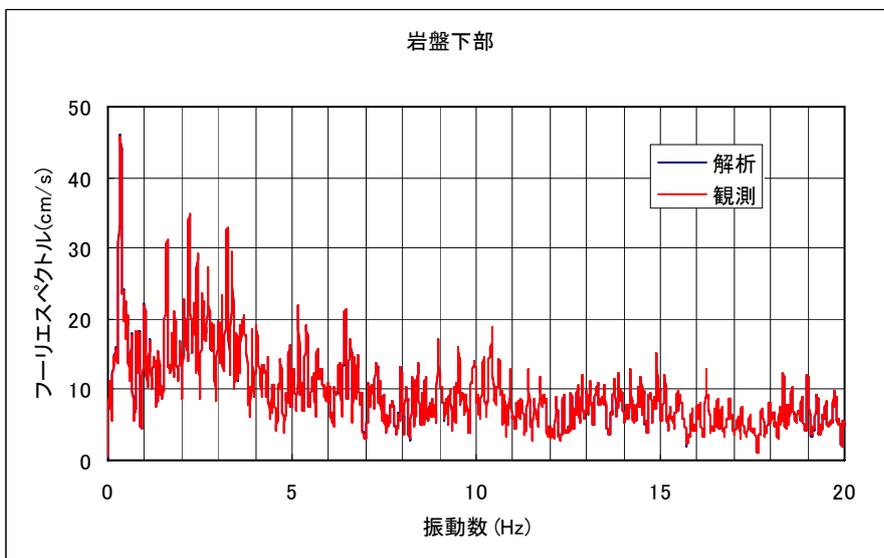
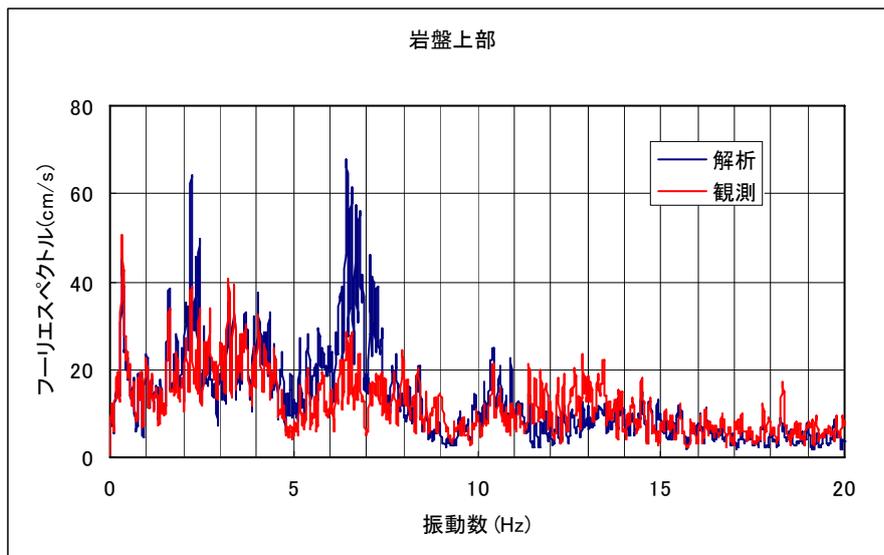


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

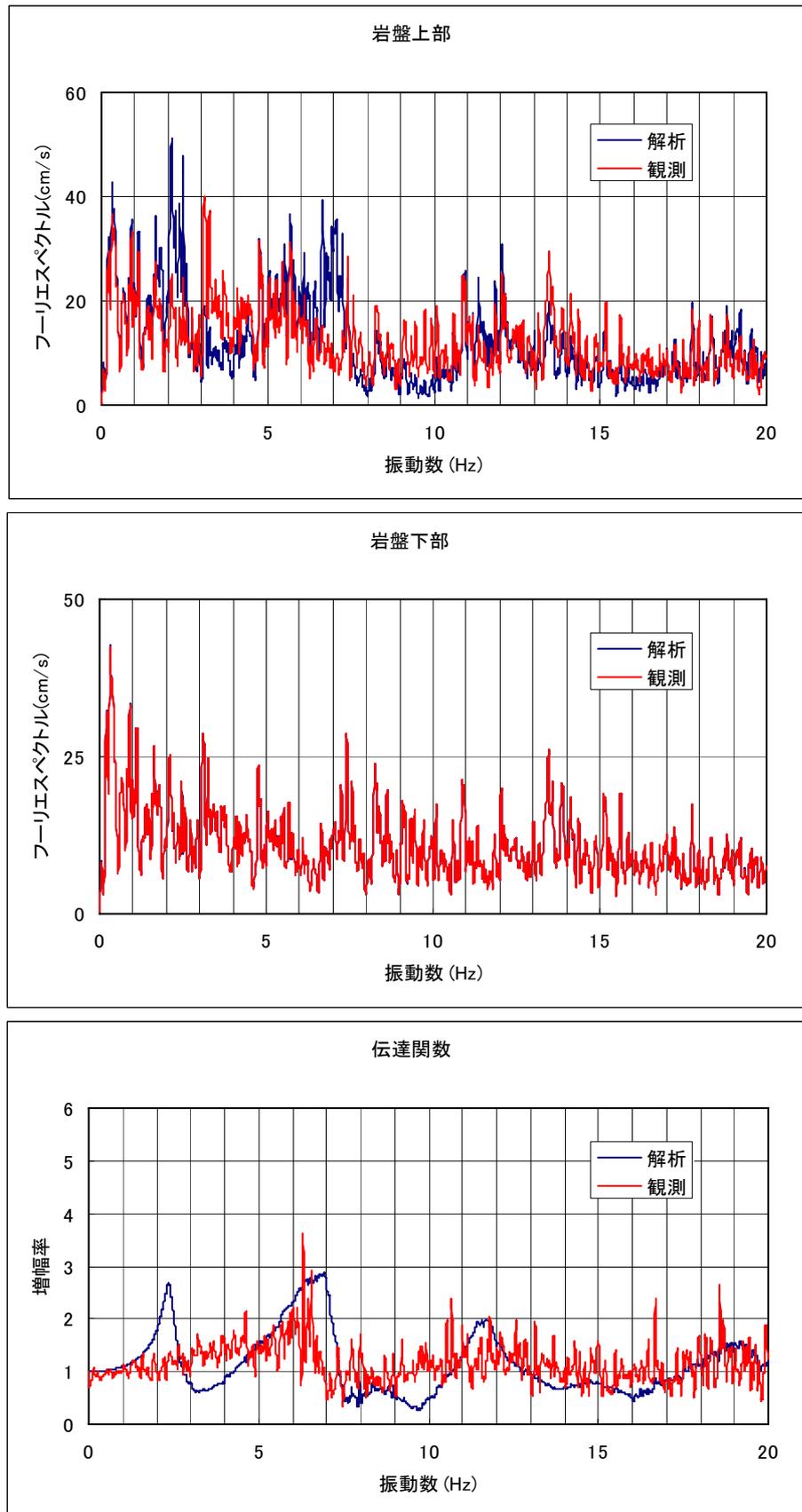


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

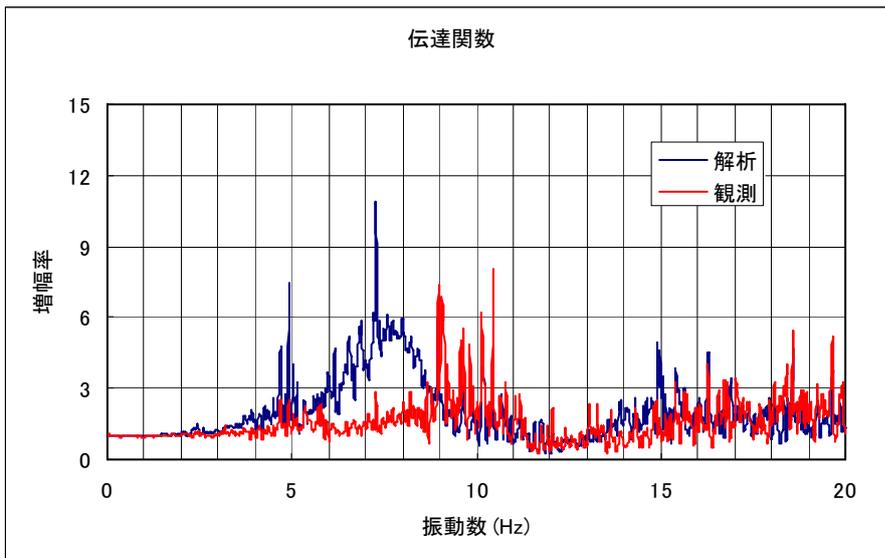
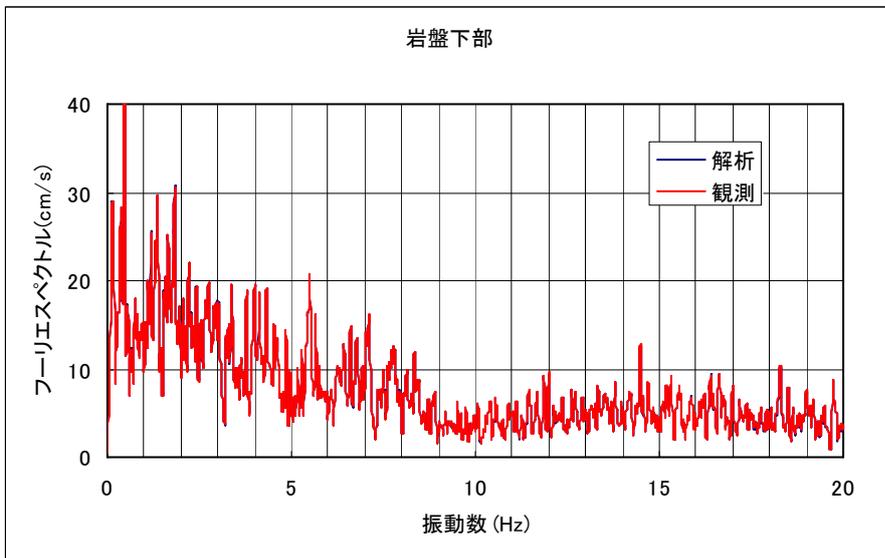
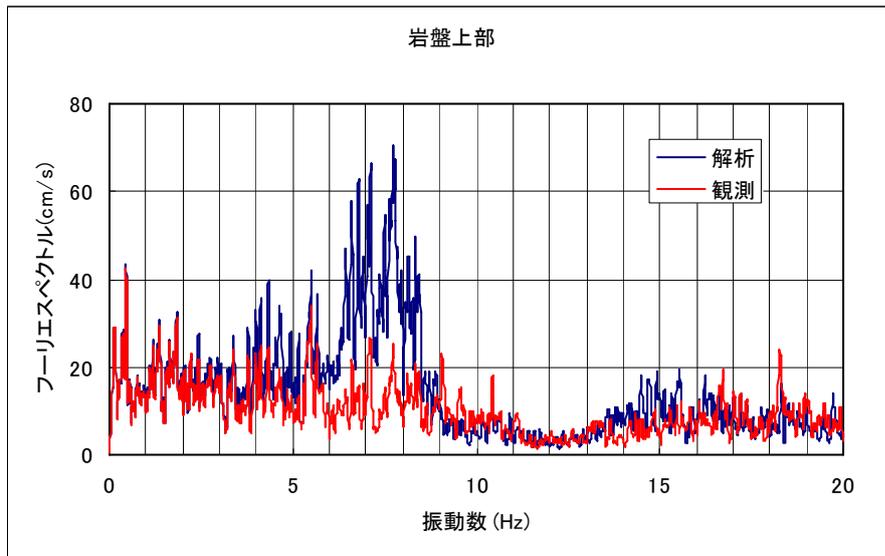


図7-6(b) 岩盤上部 (F2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

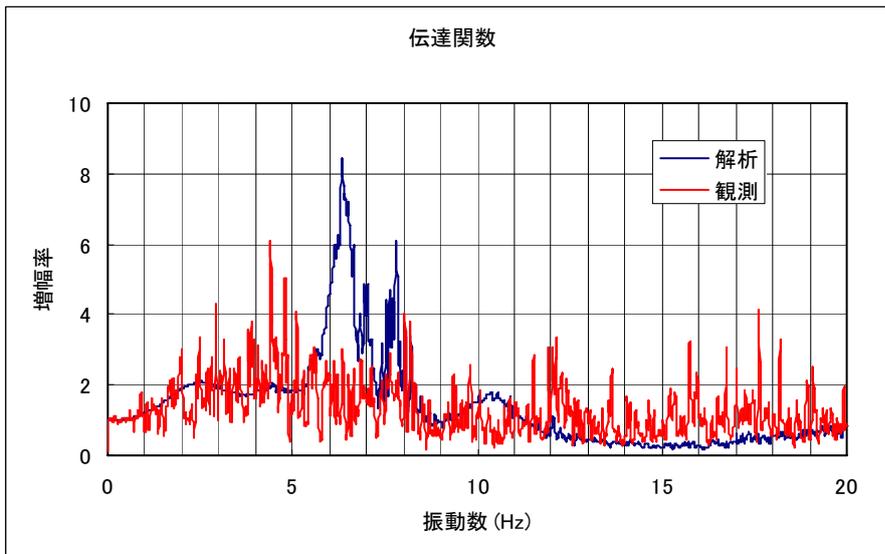
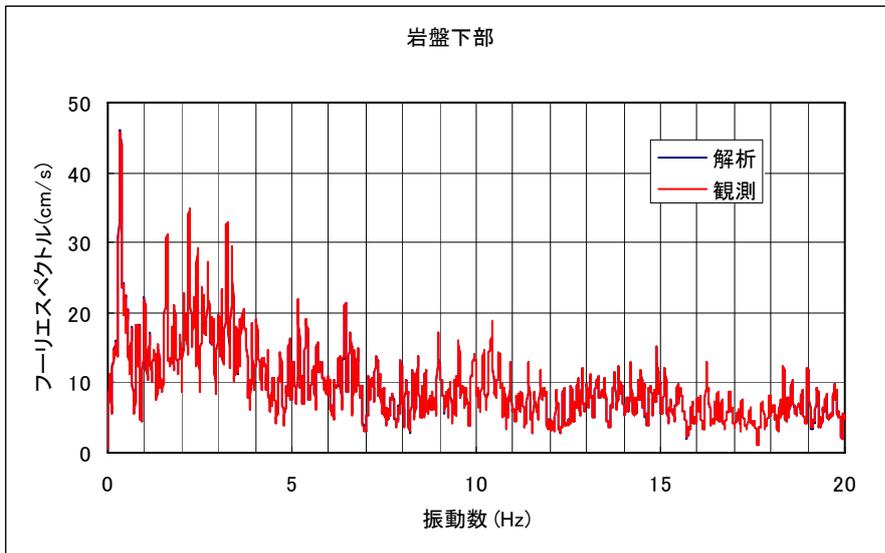
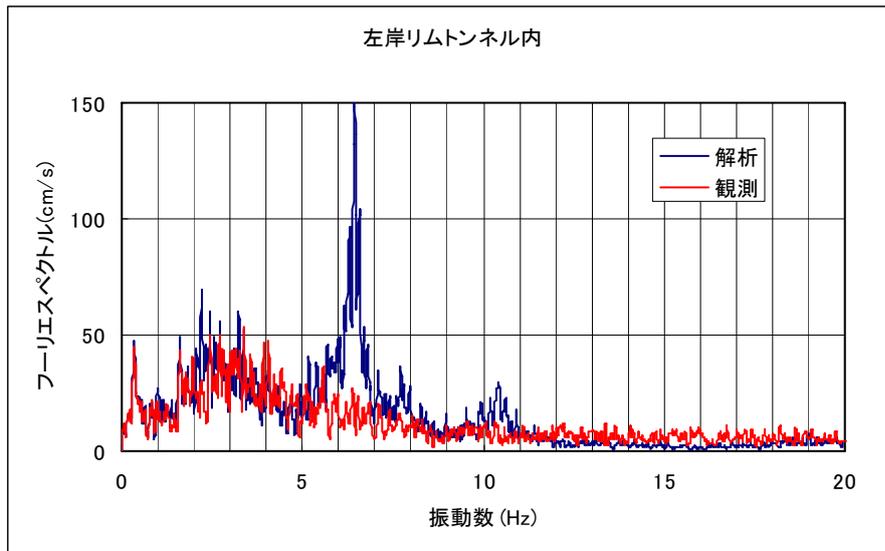


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

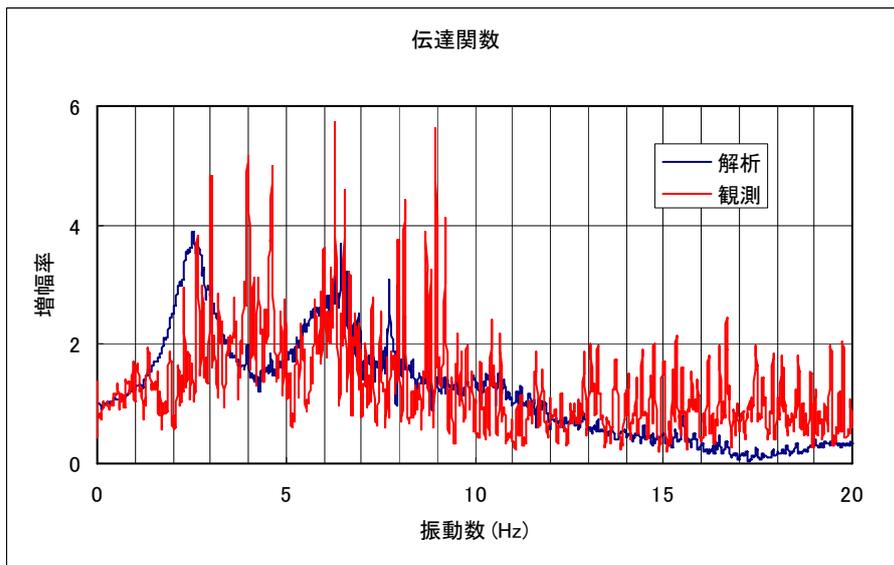
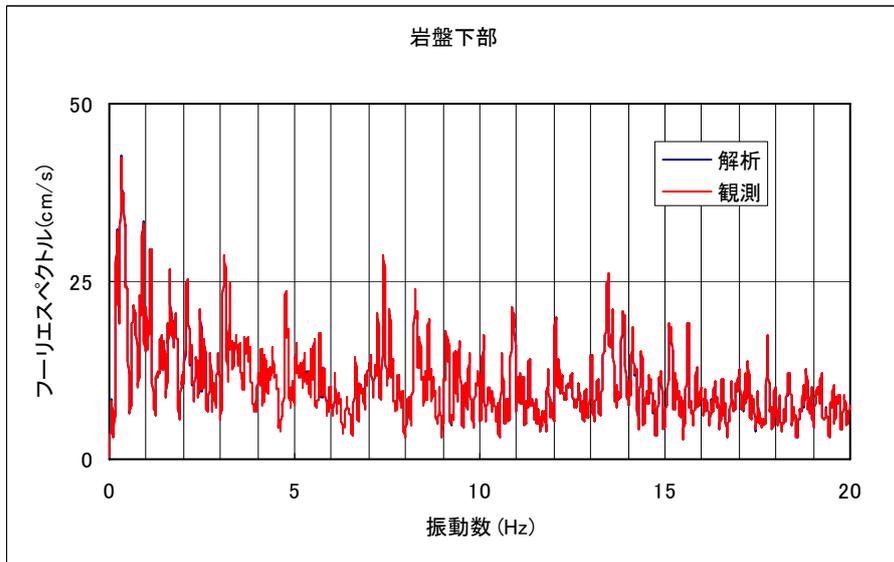
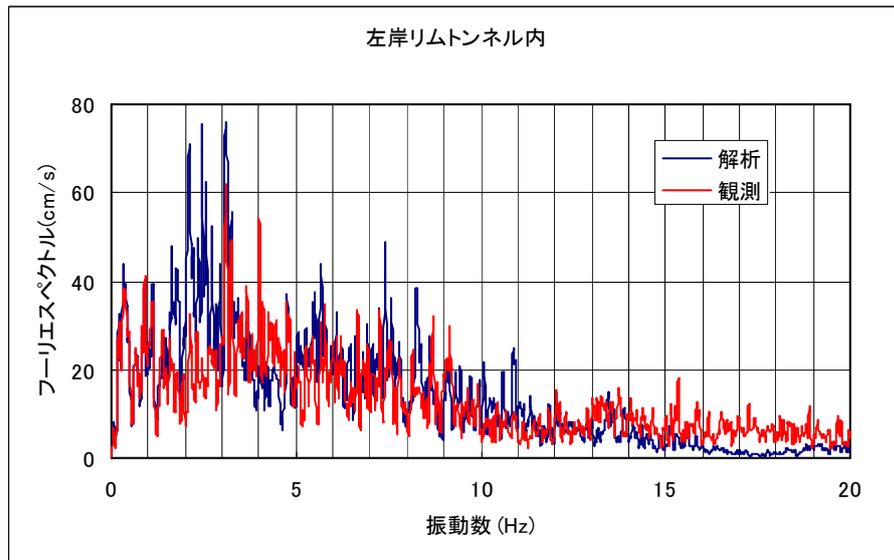


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

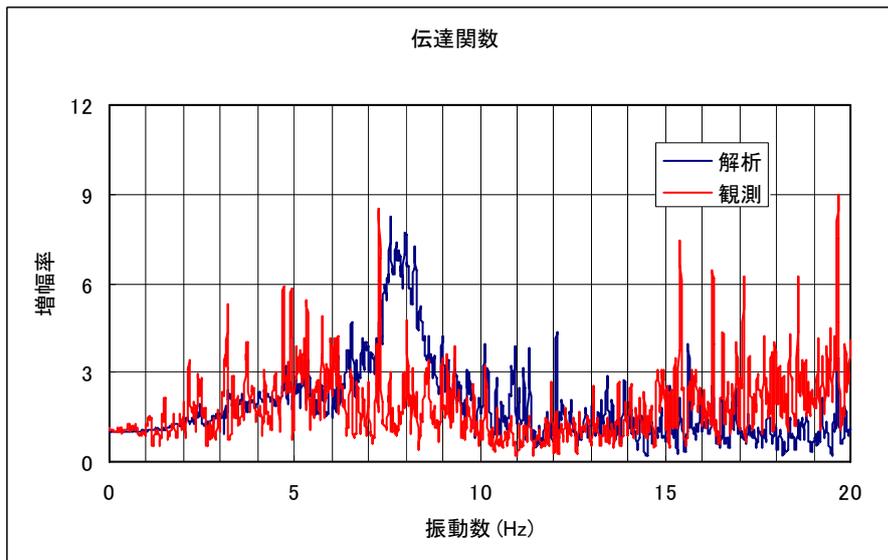
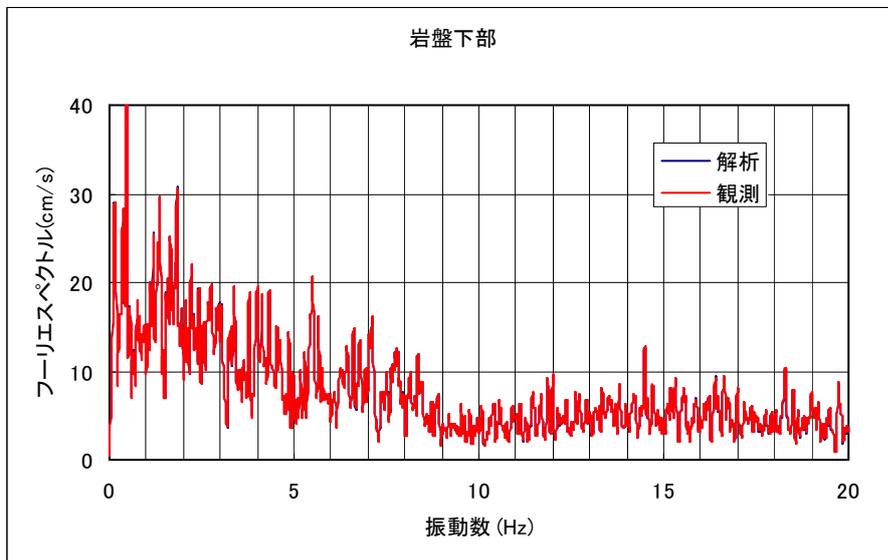
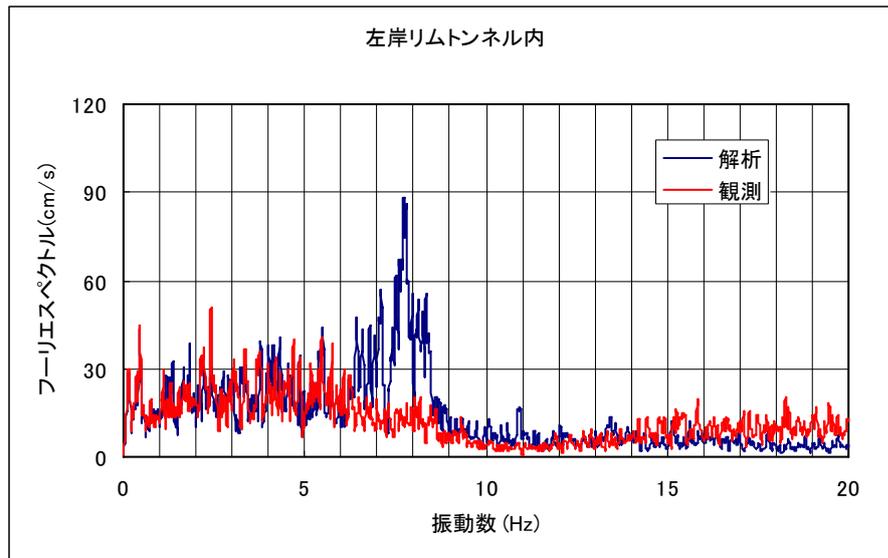


図7-6(c) 左岸リムトンネル内 (R1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

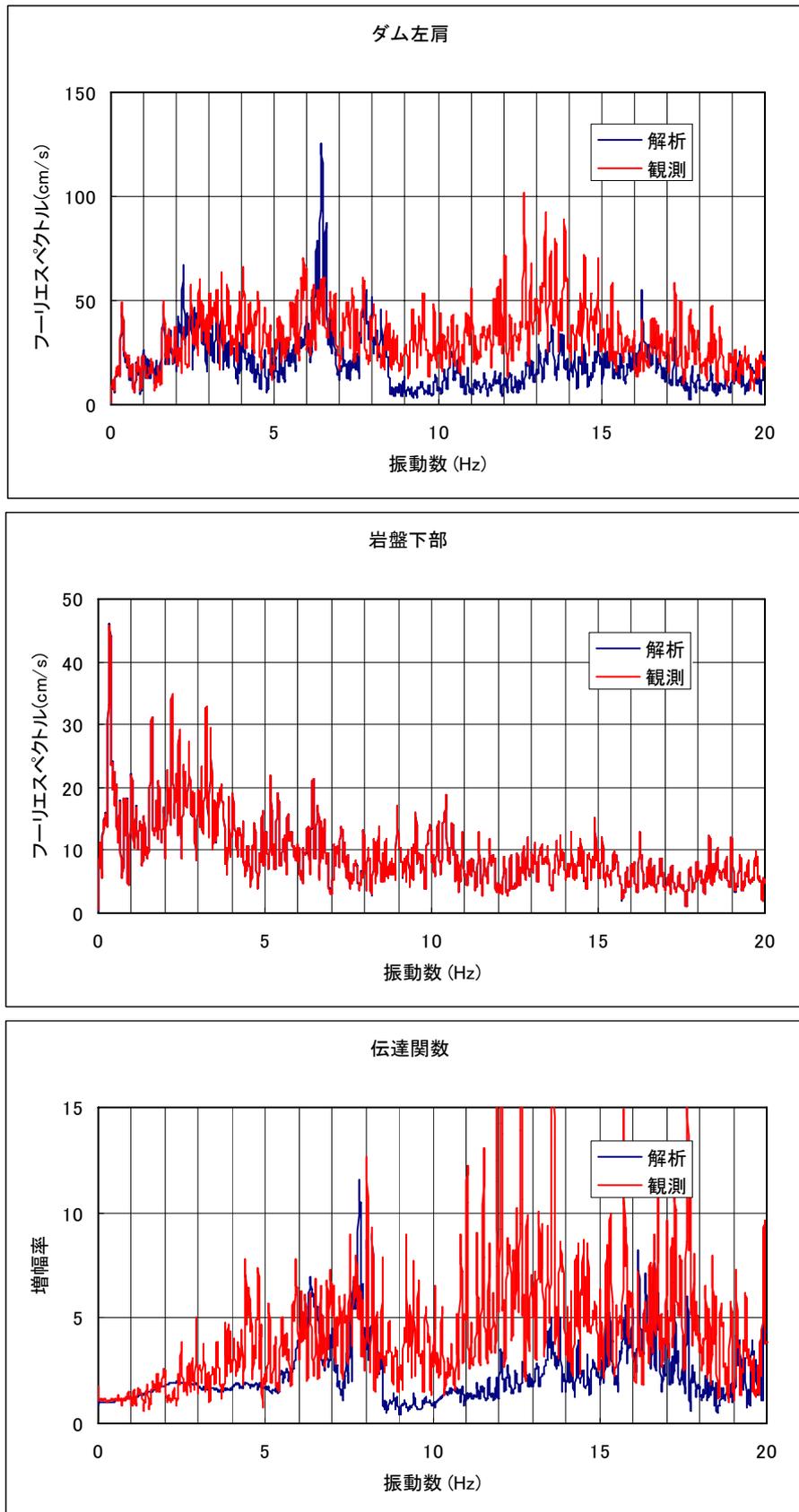


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

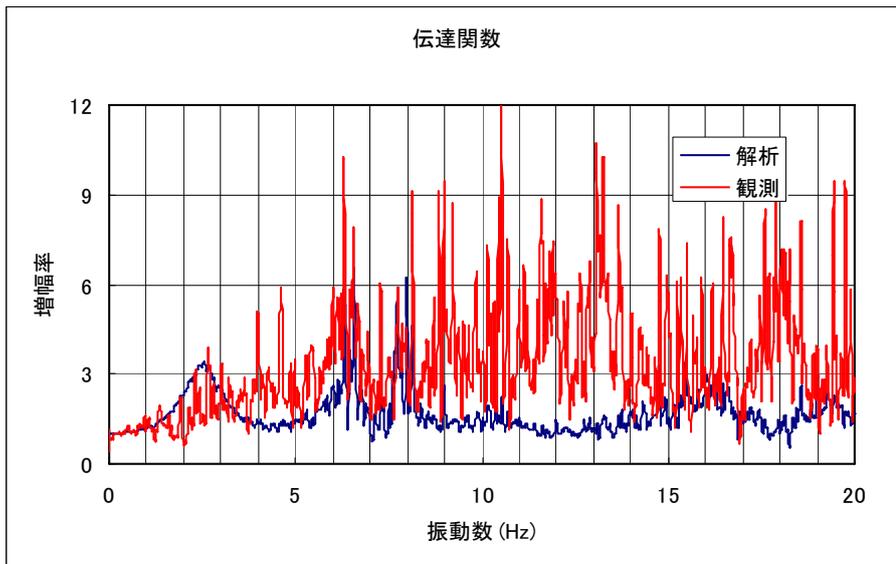
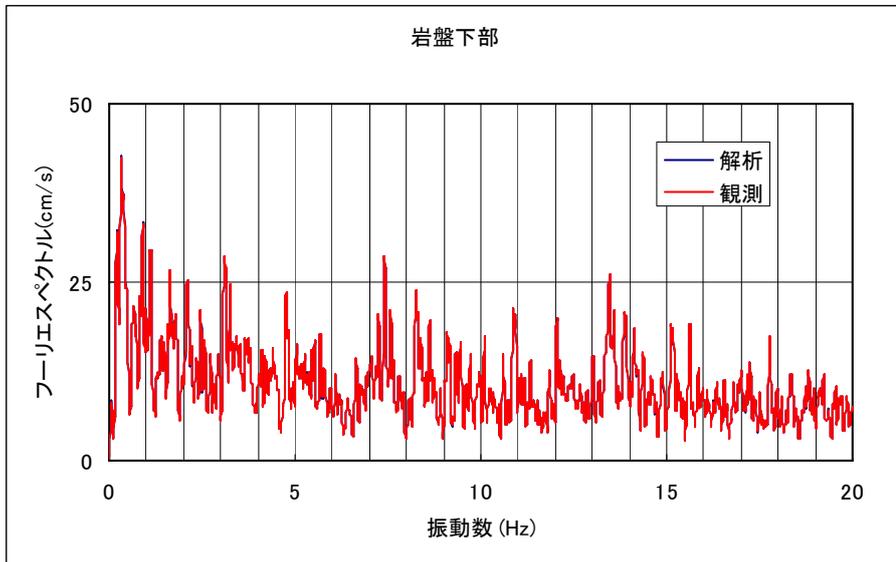
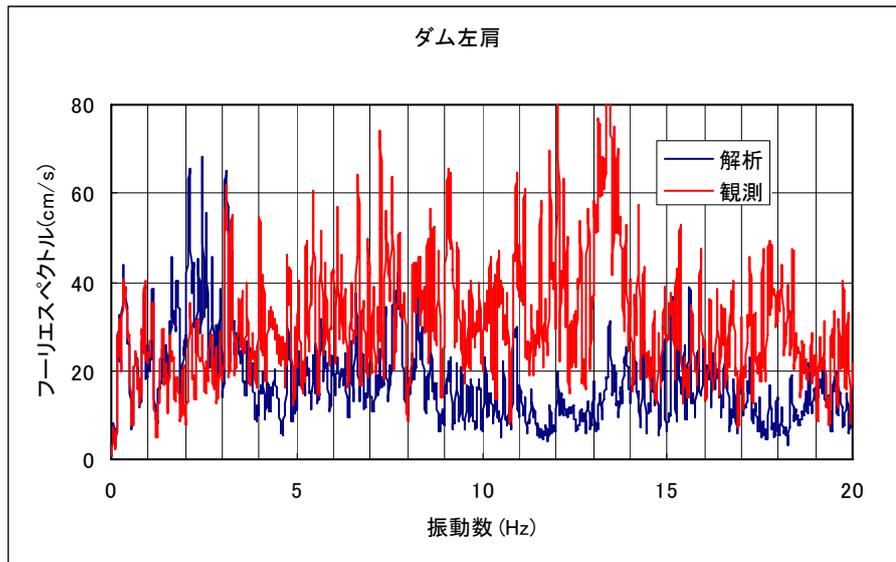


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

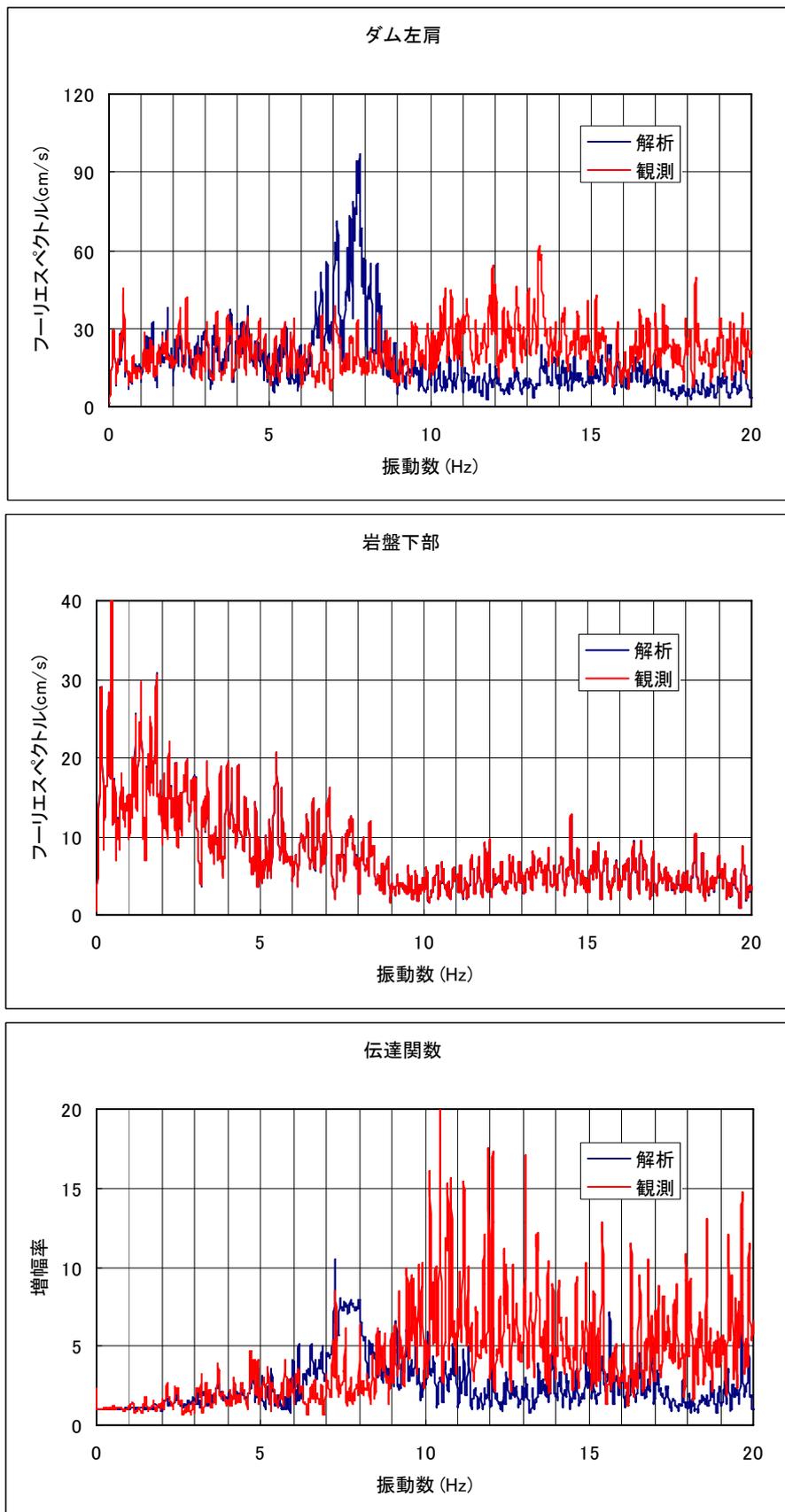


図7-6(d) ダム左肩 (T1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

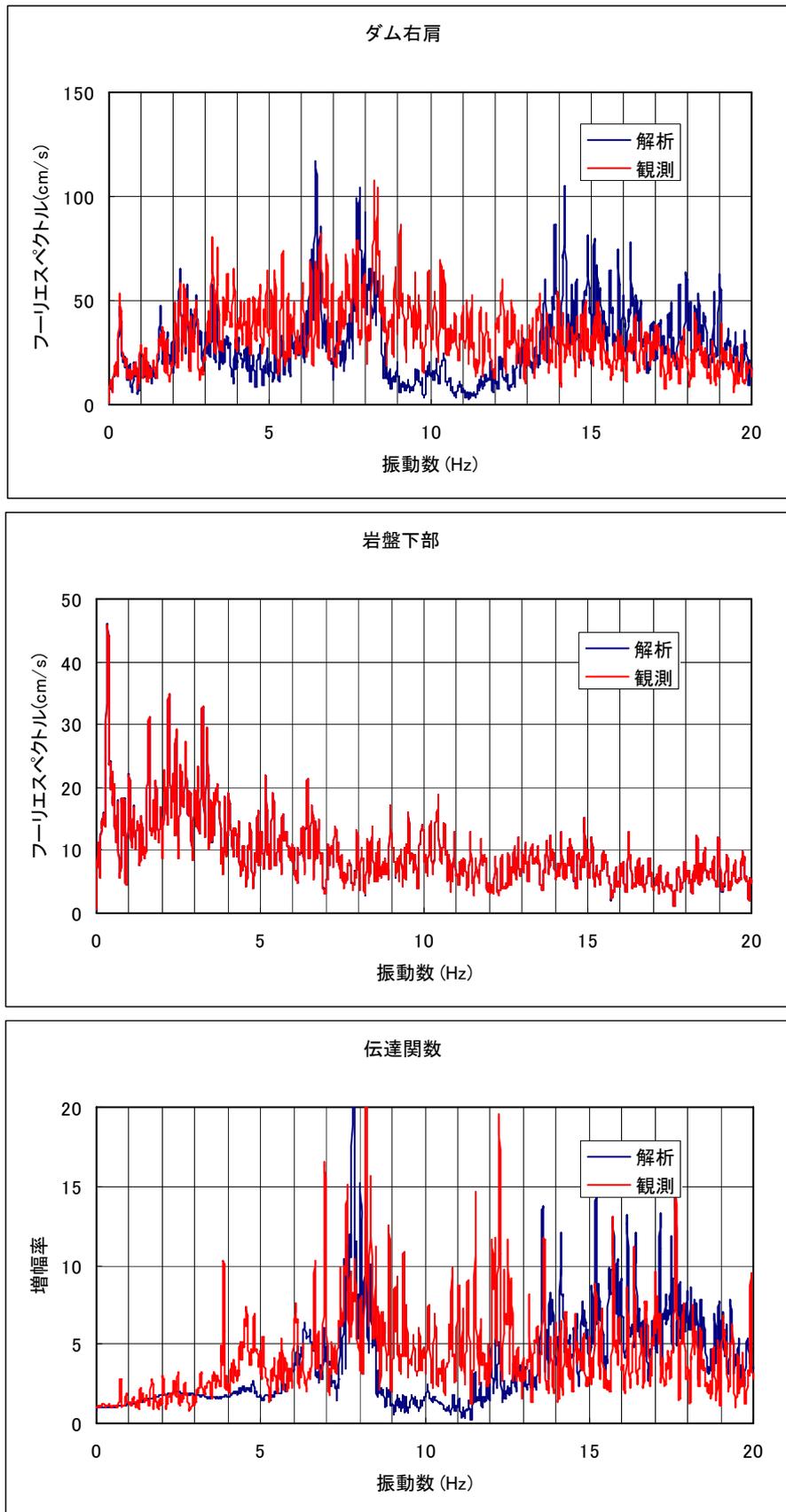


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

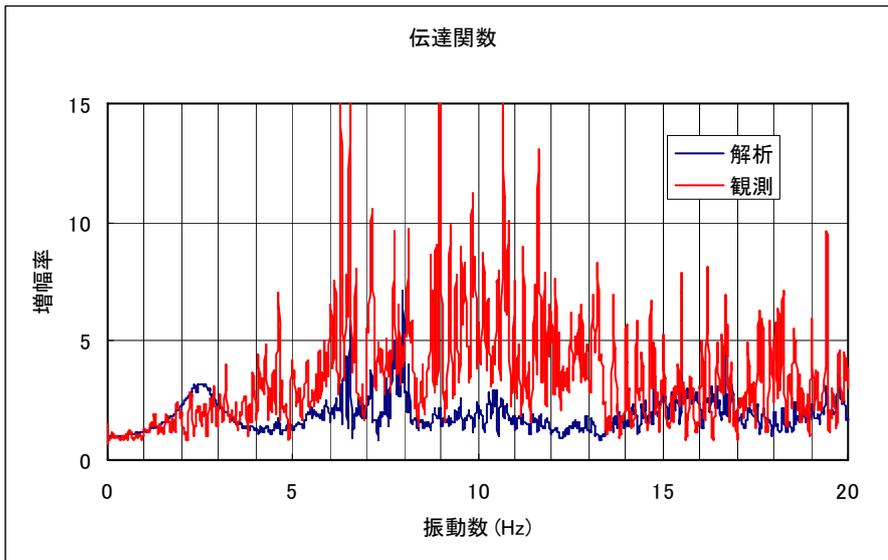
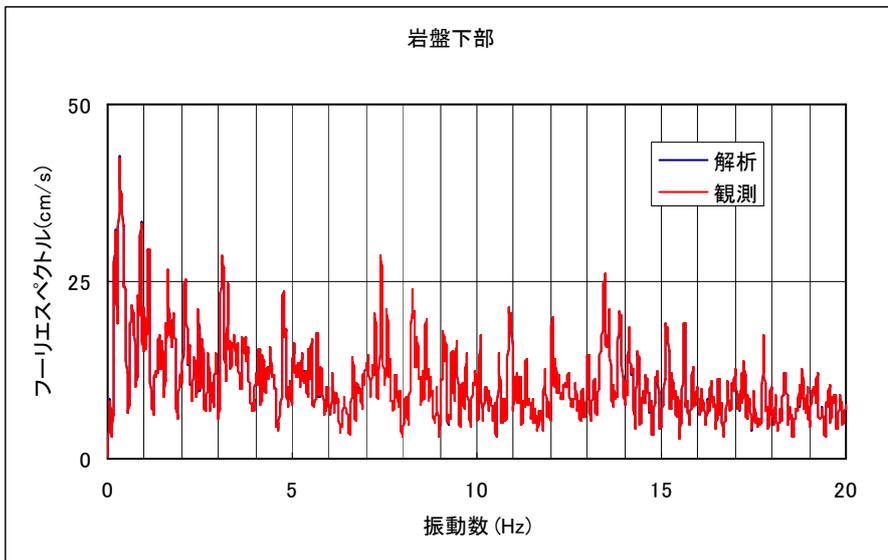
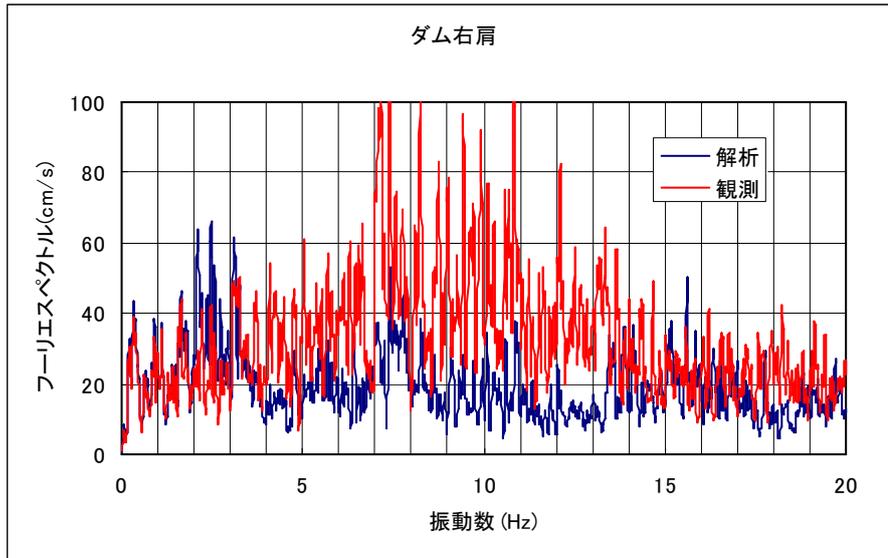


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

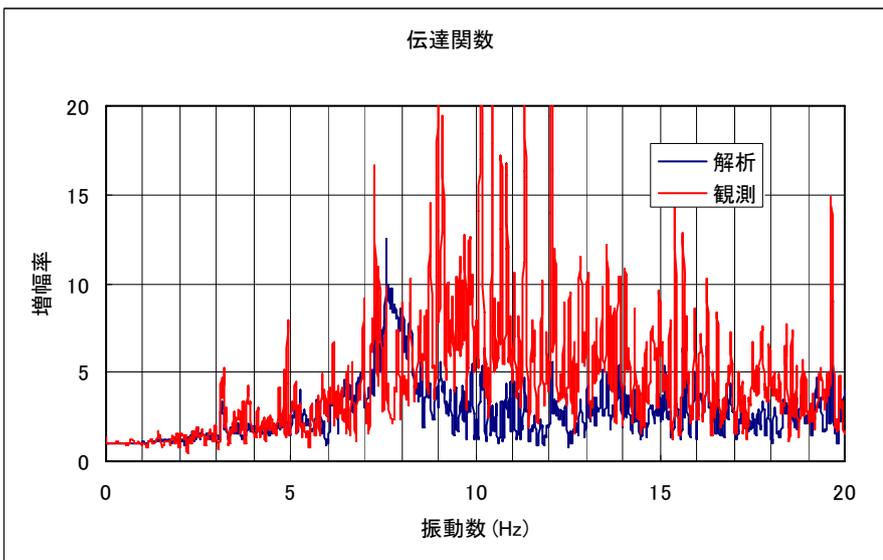
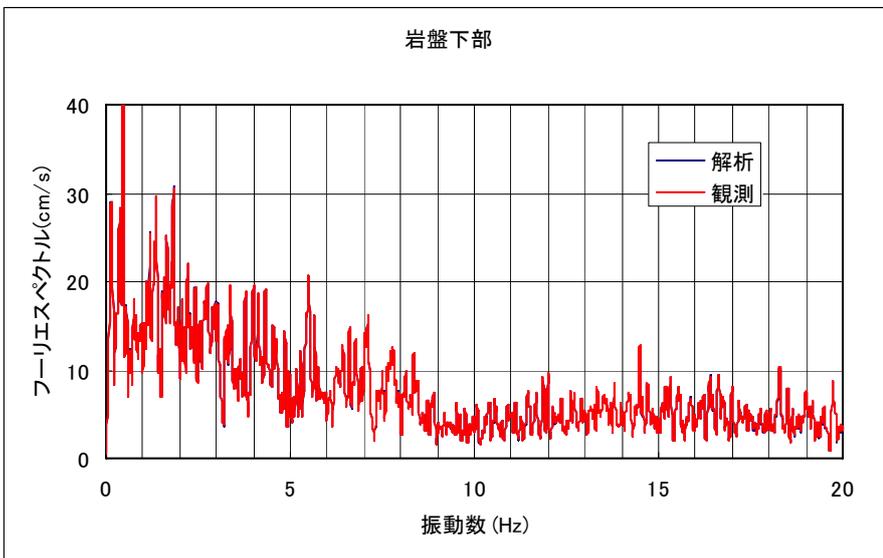
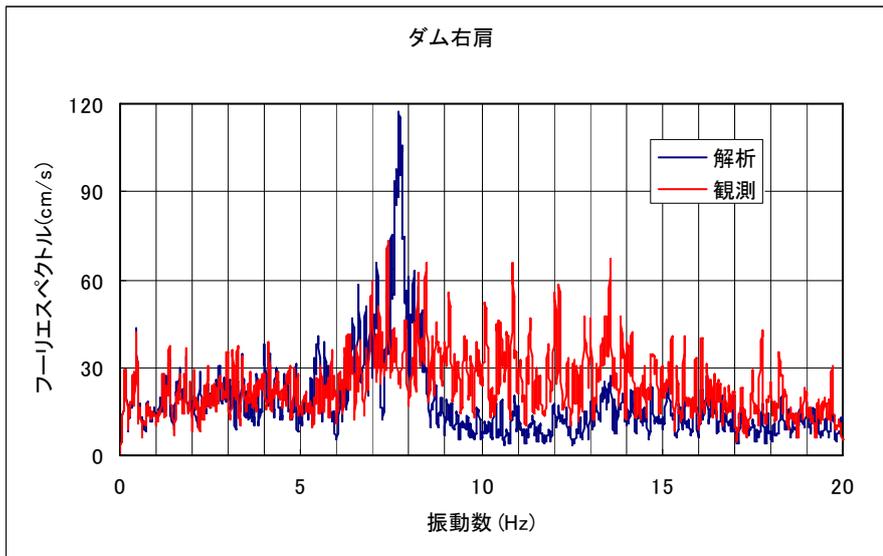


図7-6(e) ダム右肩 (T3) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

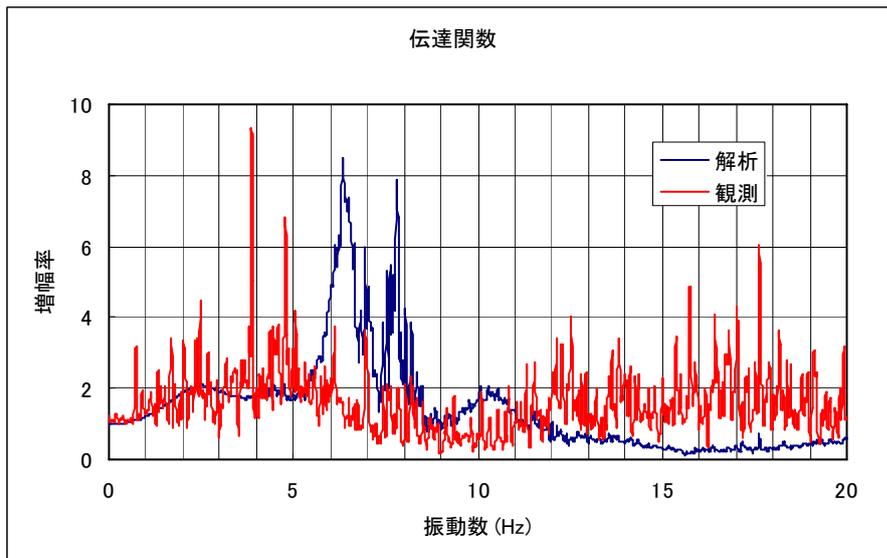
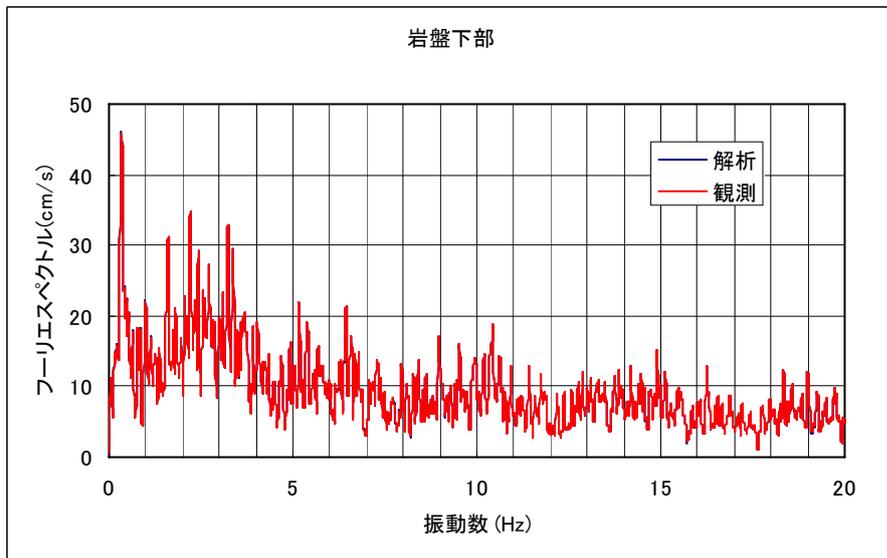
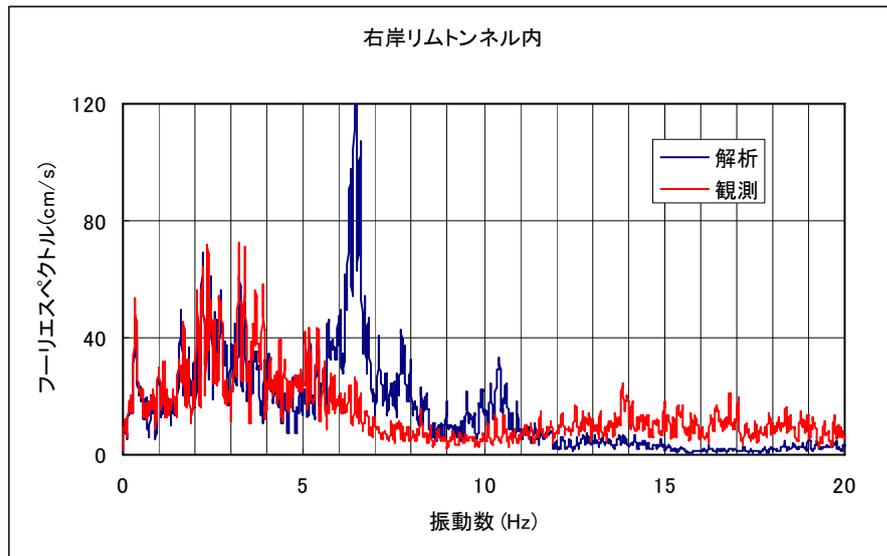


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

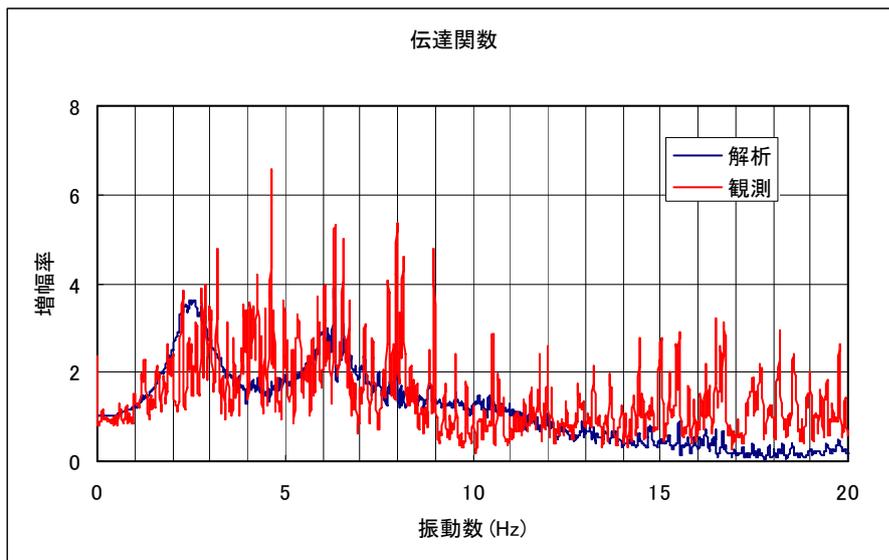
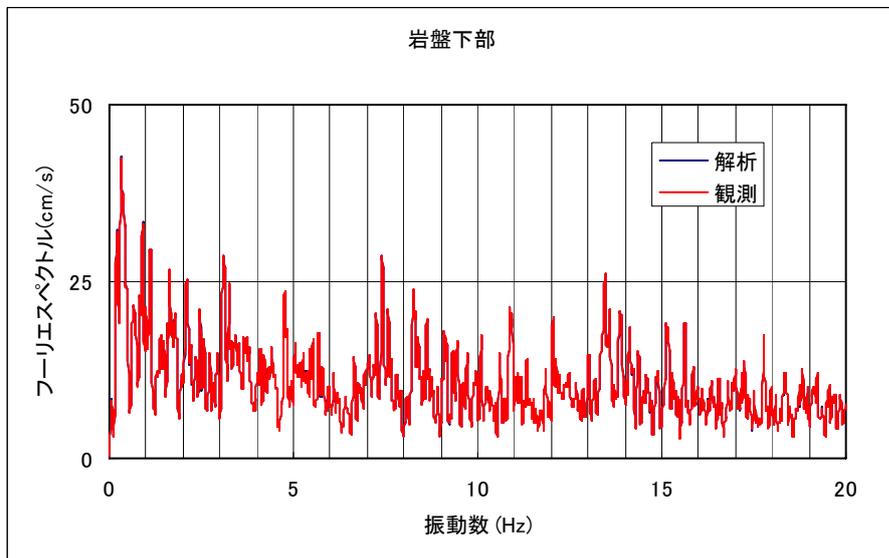
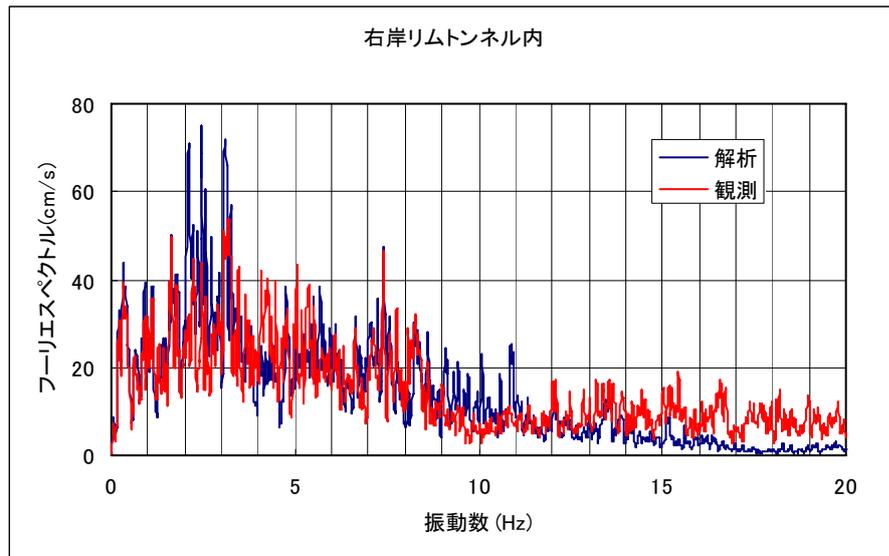


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

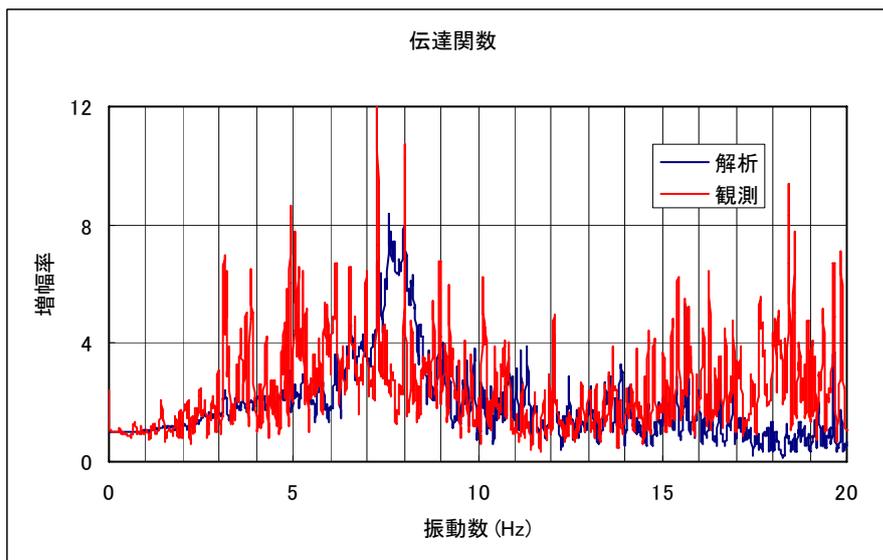
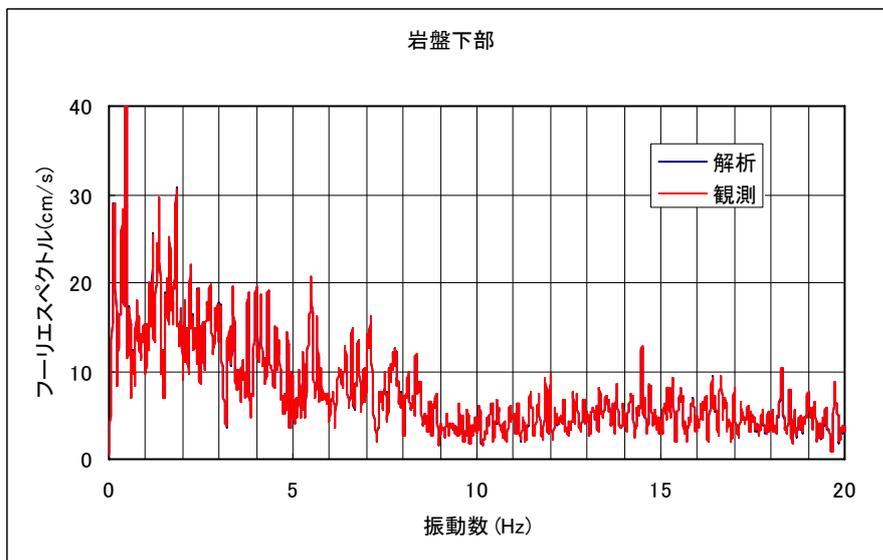
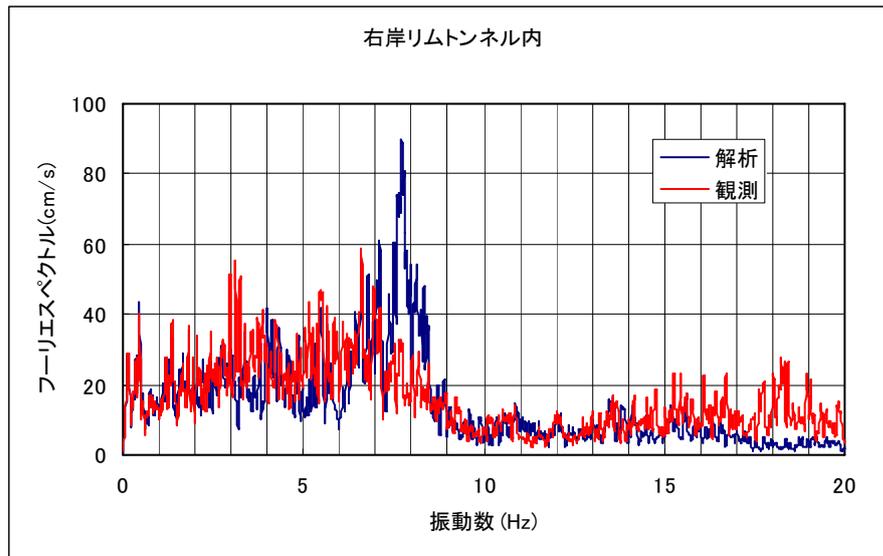


図7-6(f) 右岸リムトンネル内 (R2) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

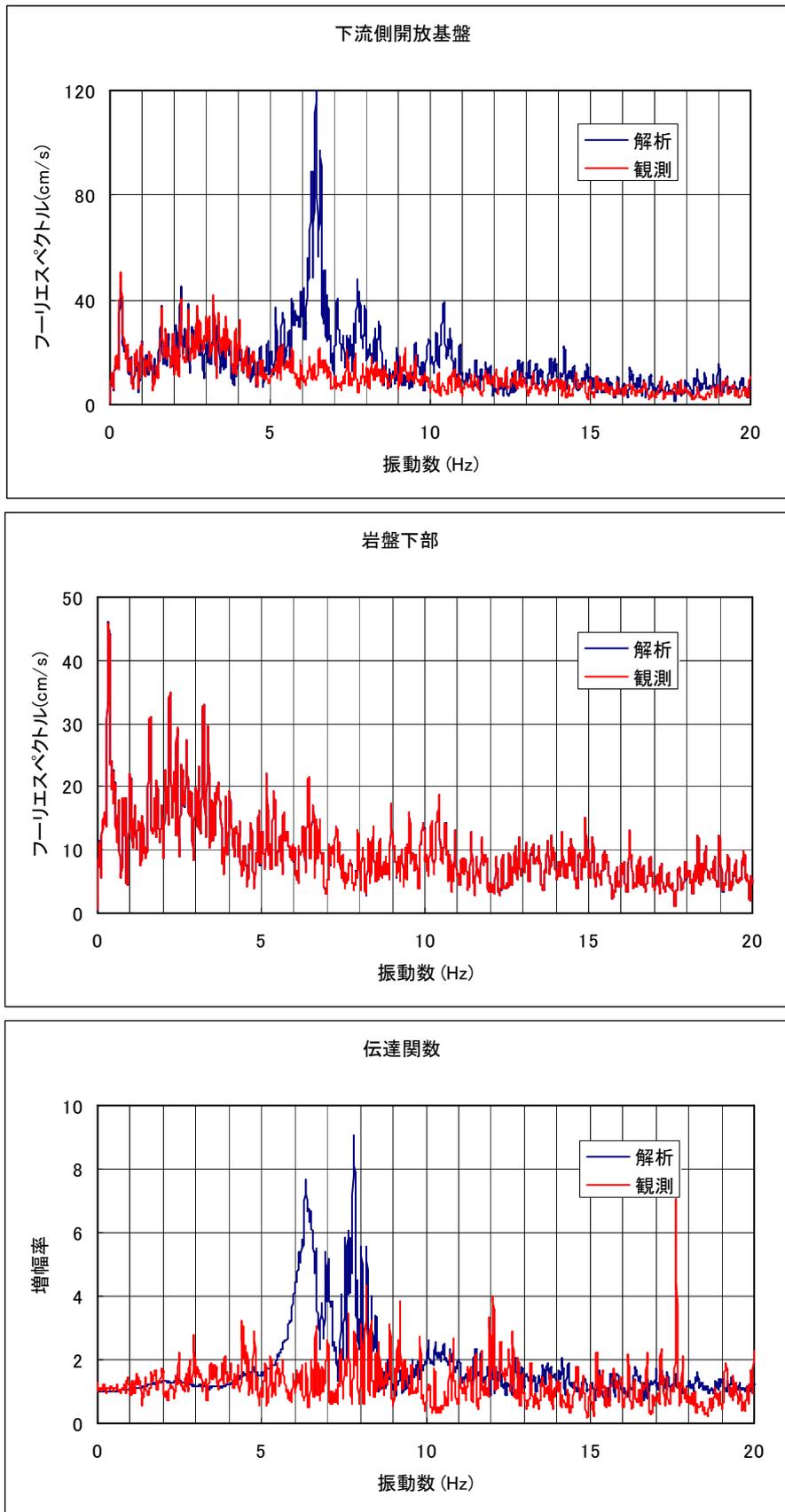


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (上下流方向)

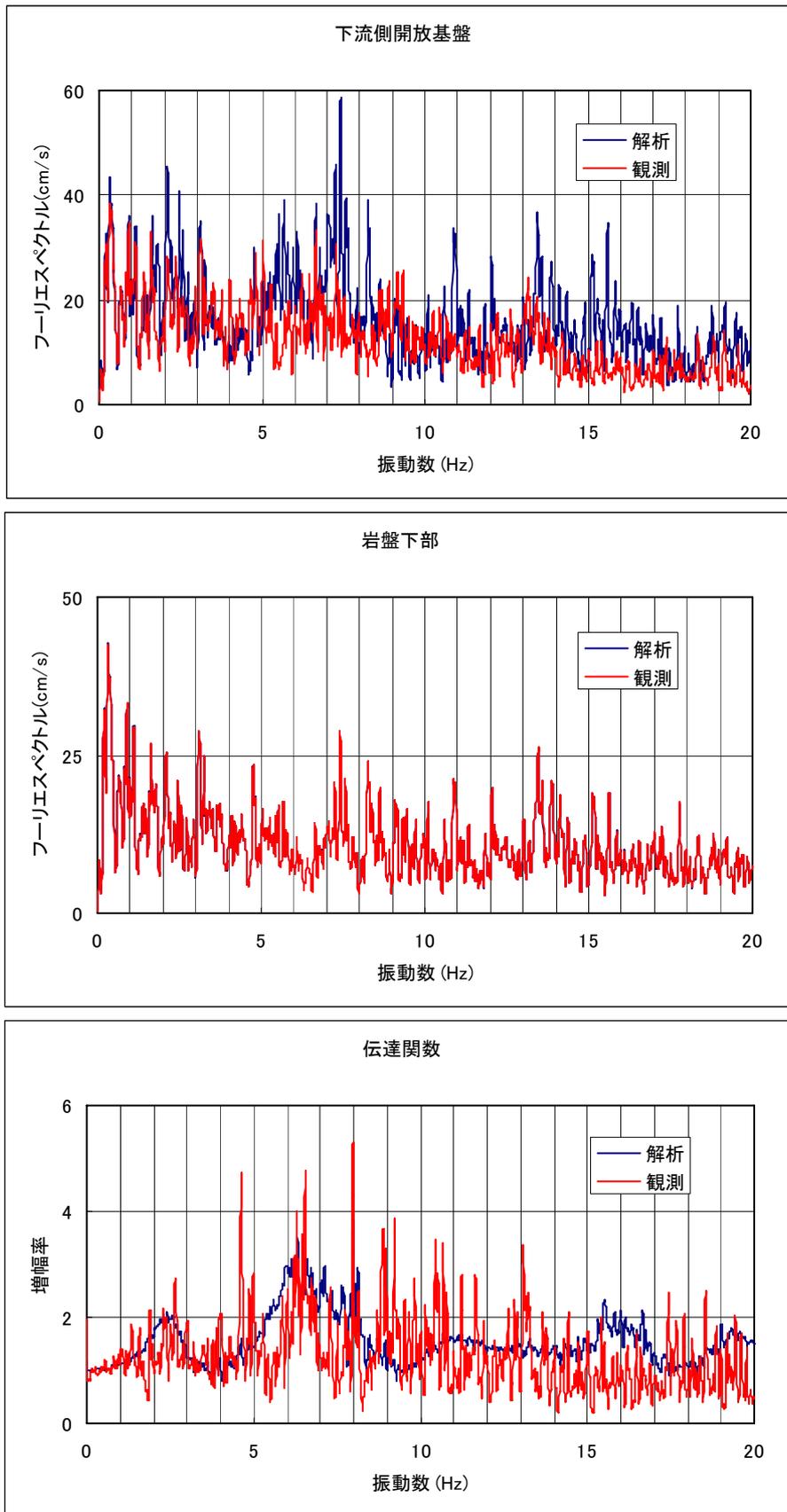


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (ダム軸方向)

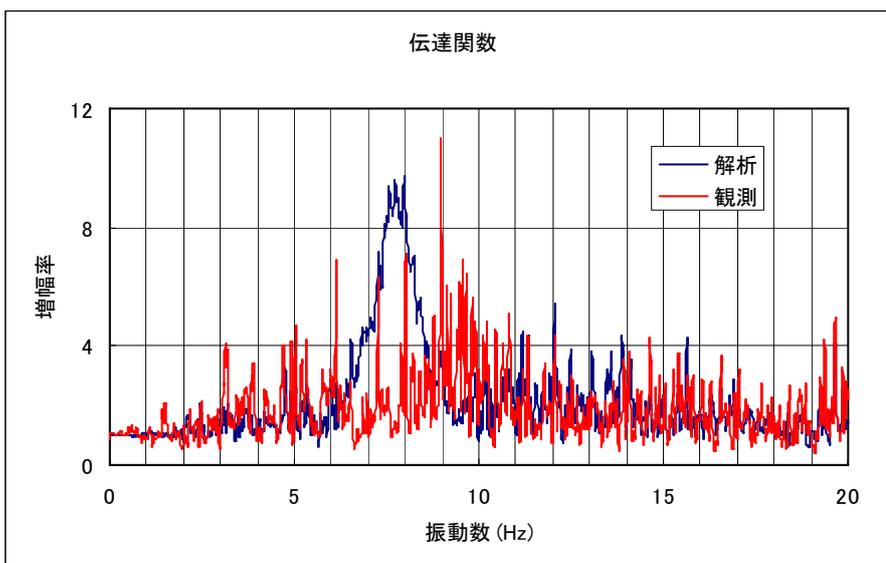
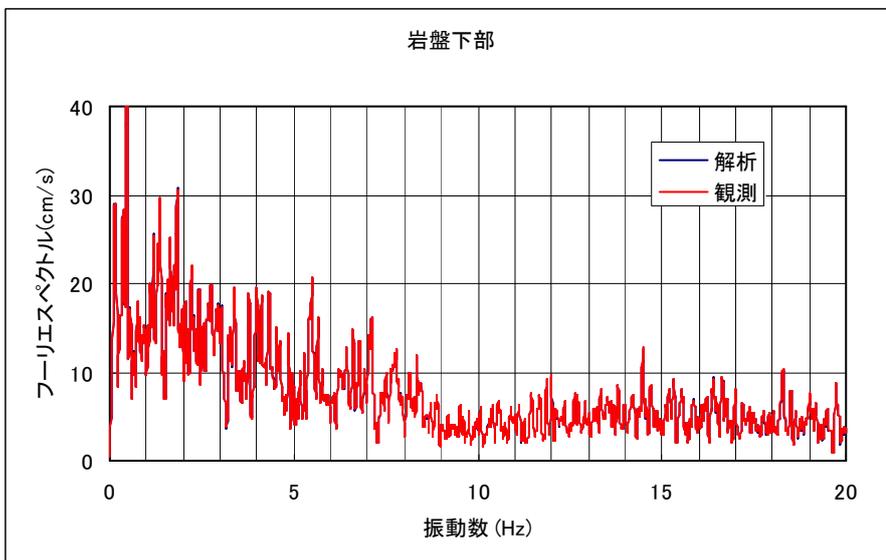
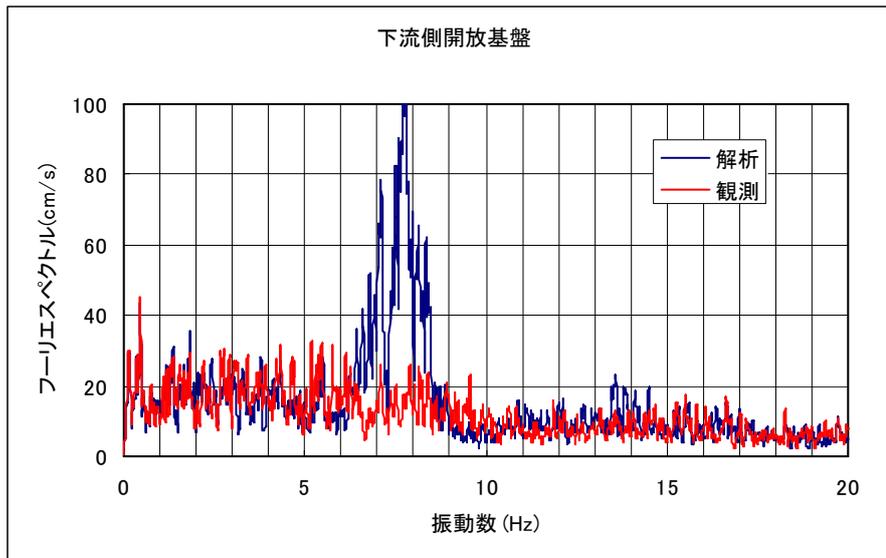


図7-6(g) 下流側開放基盤 (G1) と岩盤下部 (F1) のフーリエスペクトルおよび伝達関数 (鉛直方向)

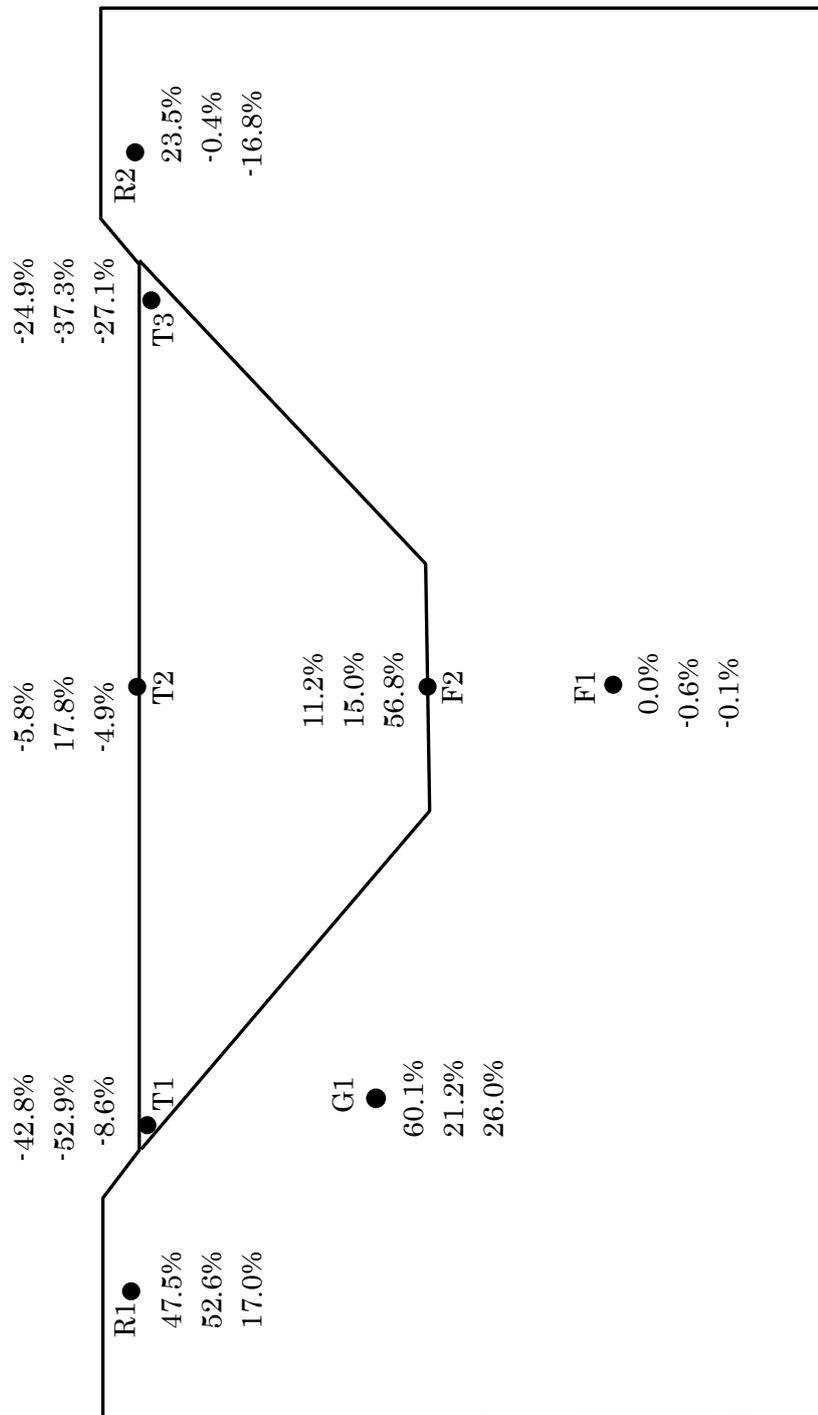


図 7-7 各観測点の計算結果と観測結果の相対差
 (相対差=(計算値-観測値)/観測値)

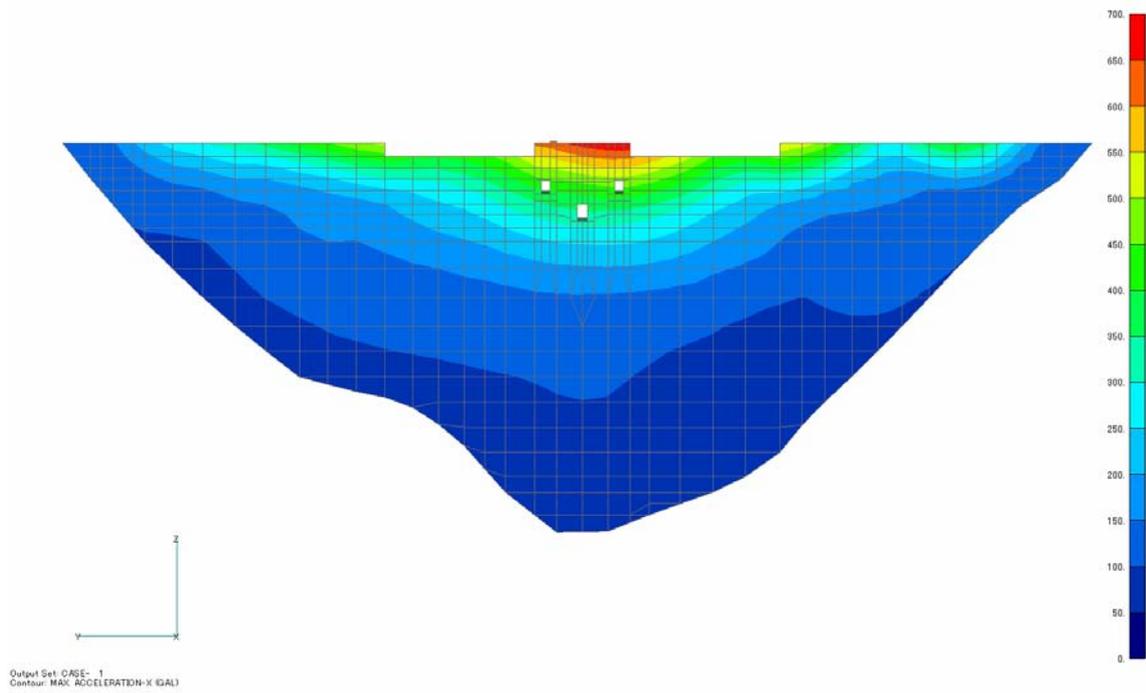


図 7-8(a) 上下流方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

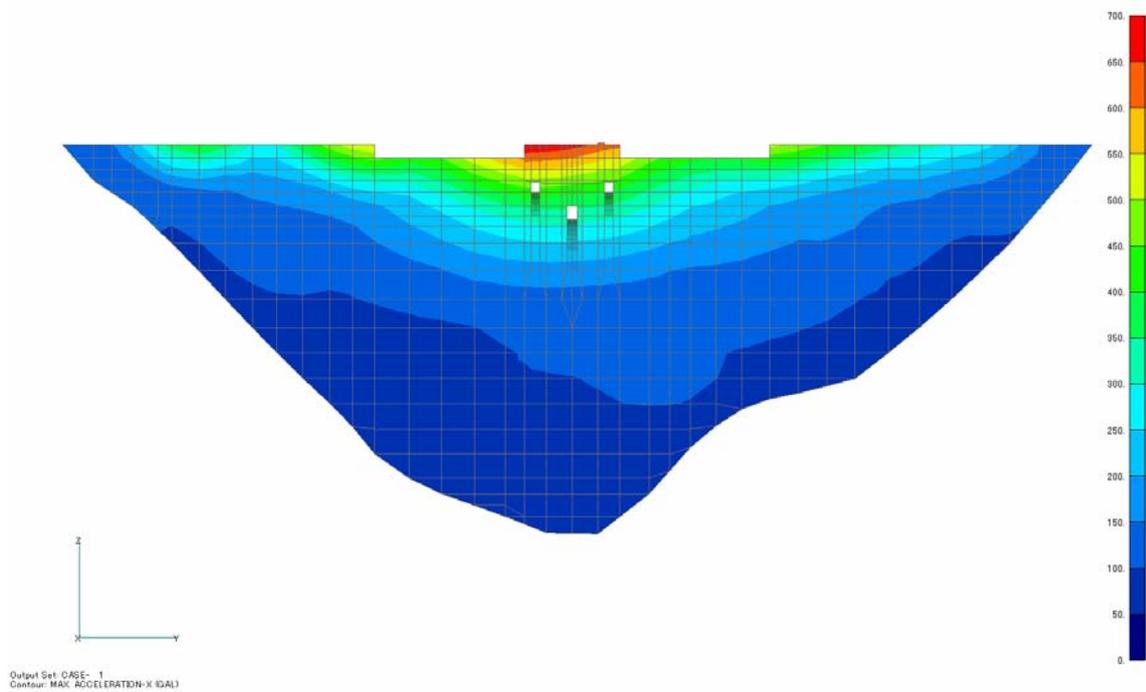


図 7-8(b) 上下流方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

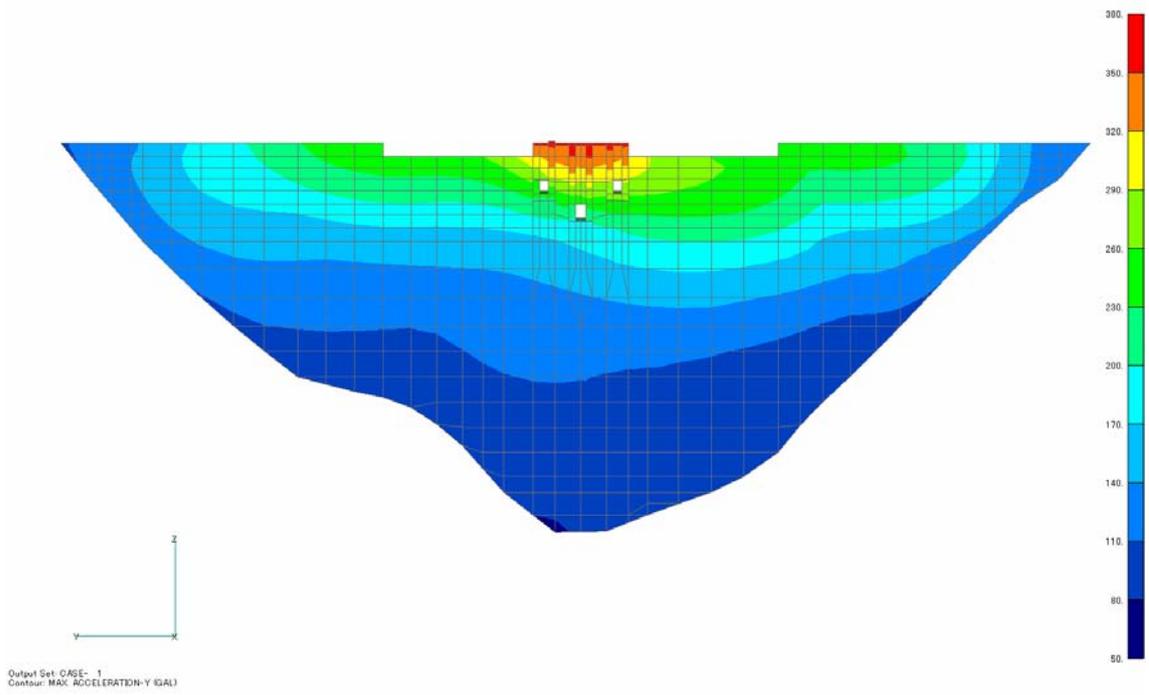


図 7-9(a) ダム軸方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

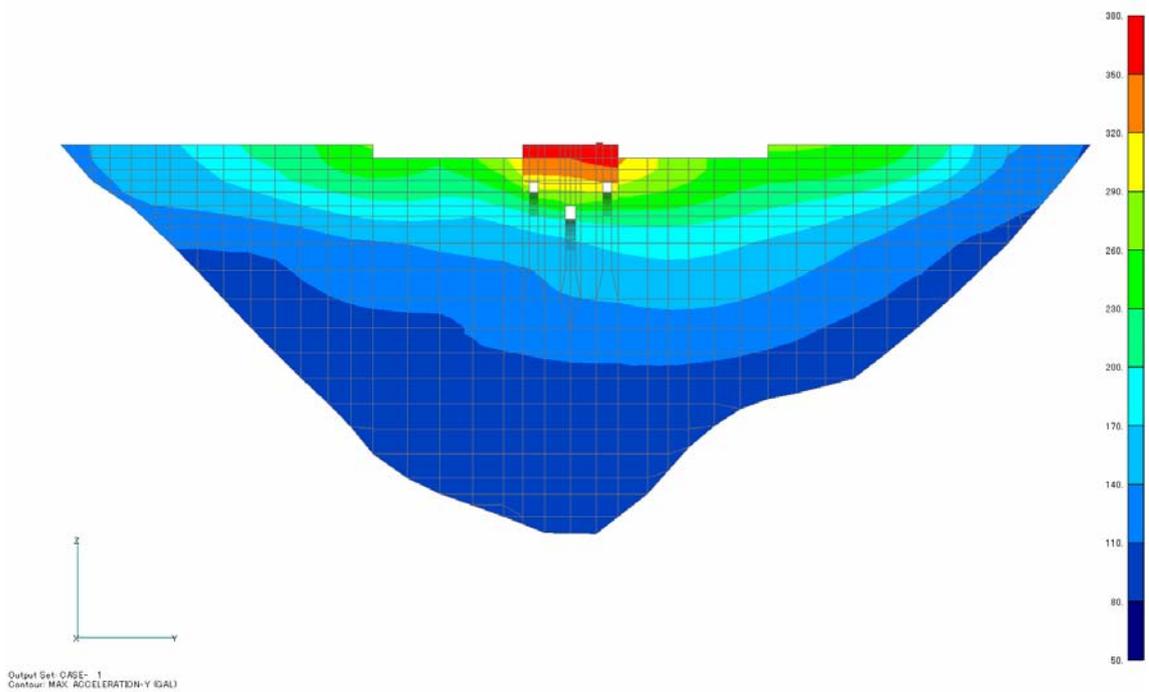


図 7-9(b) ダム軸方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

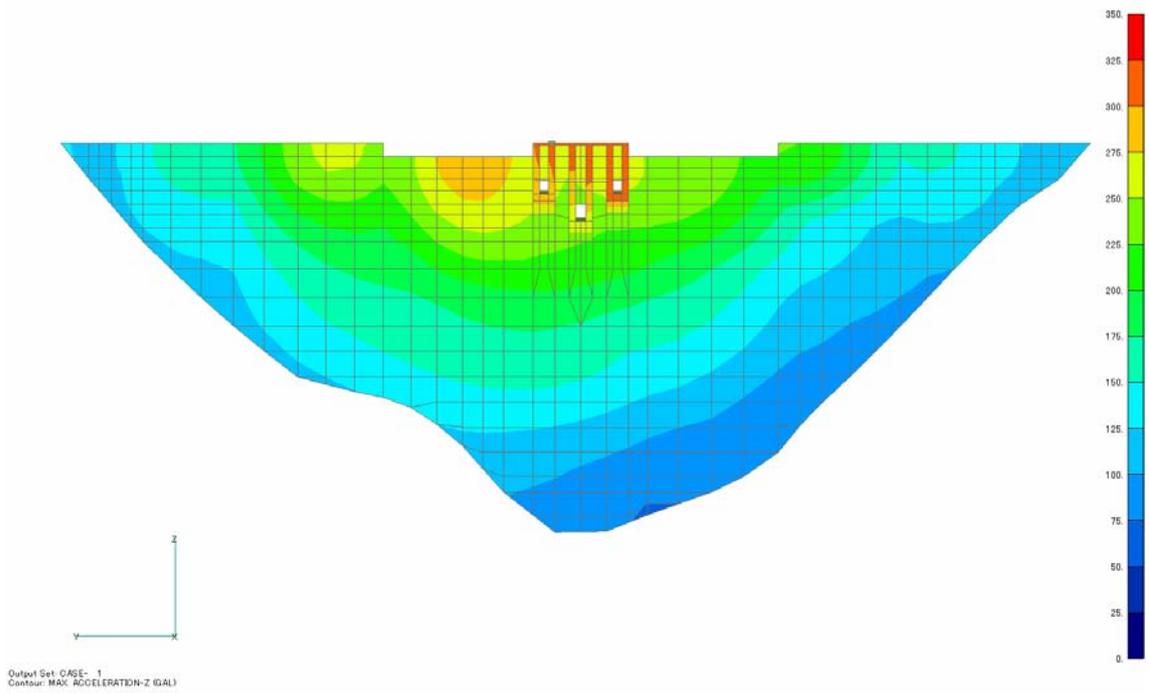


図 7-10(a) 鉛直方向の最大加速度応答分布(gal)
(上流面)

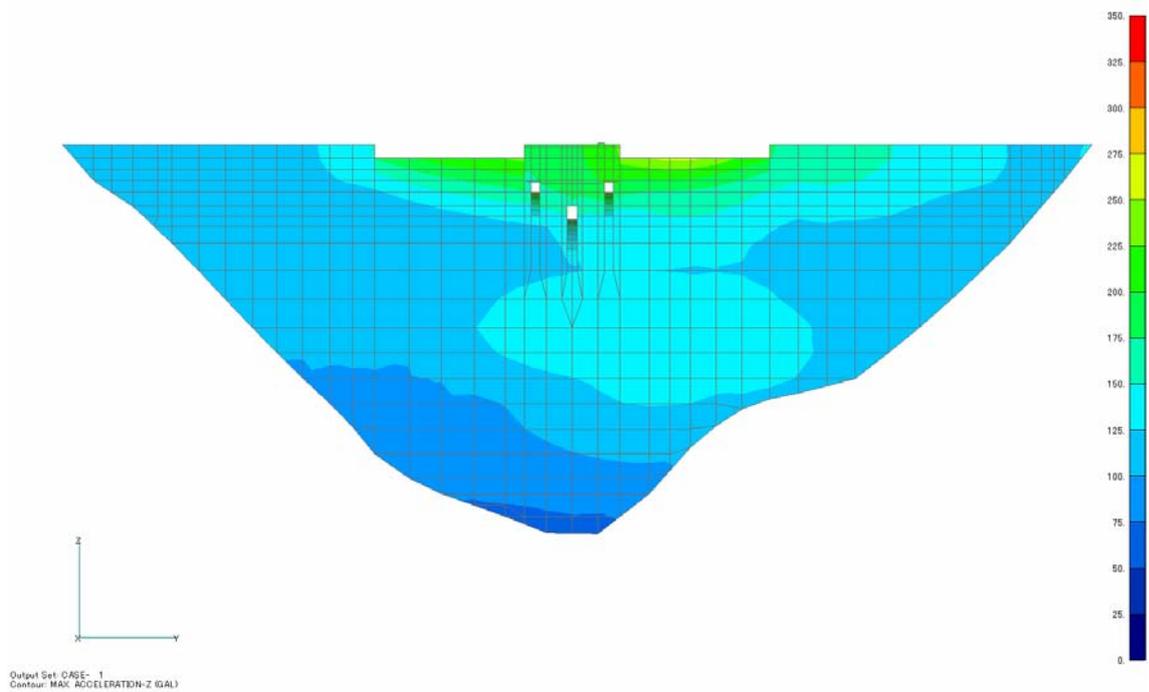


図 7-10(b) 鉛直方向の最大加速度応答分布(gal)
(下流面)

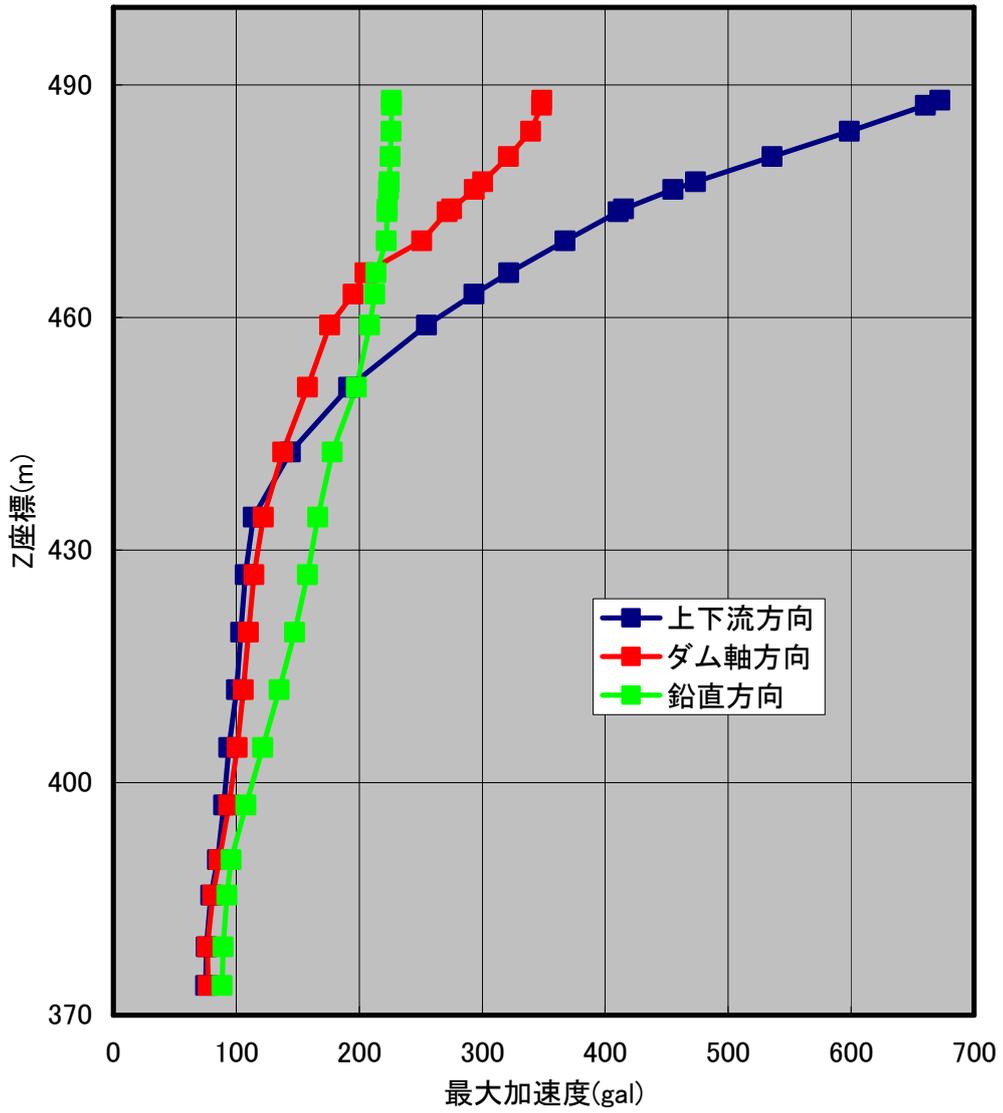


図7-11(a) 横断面と縦断面の交差位置における最大加速度応答の分布 (全時刻歴中の最大値)

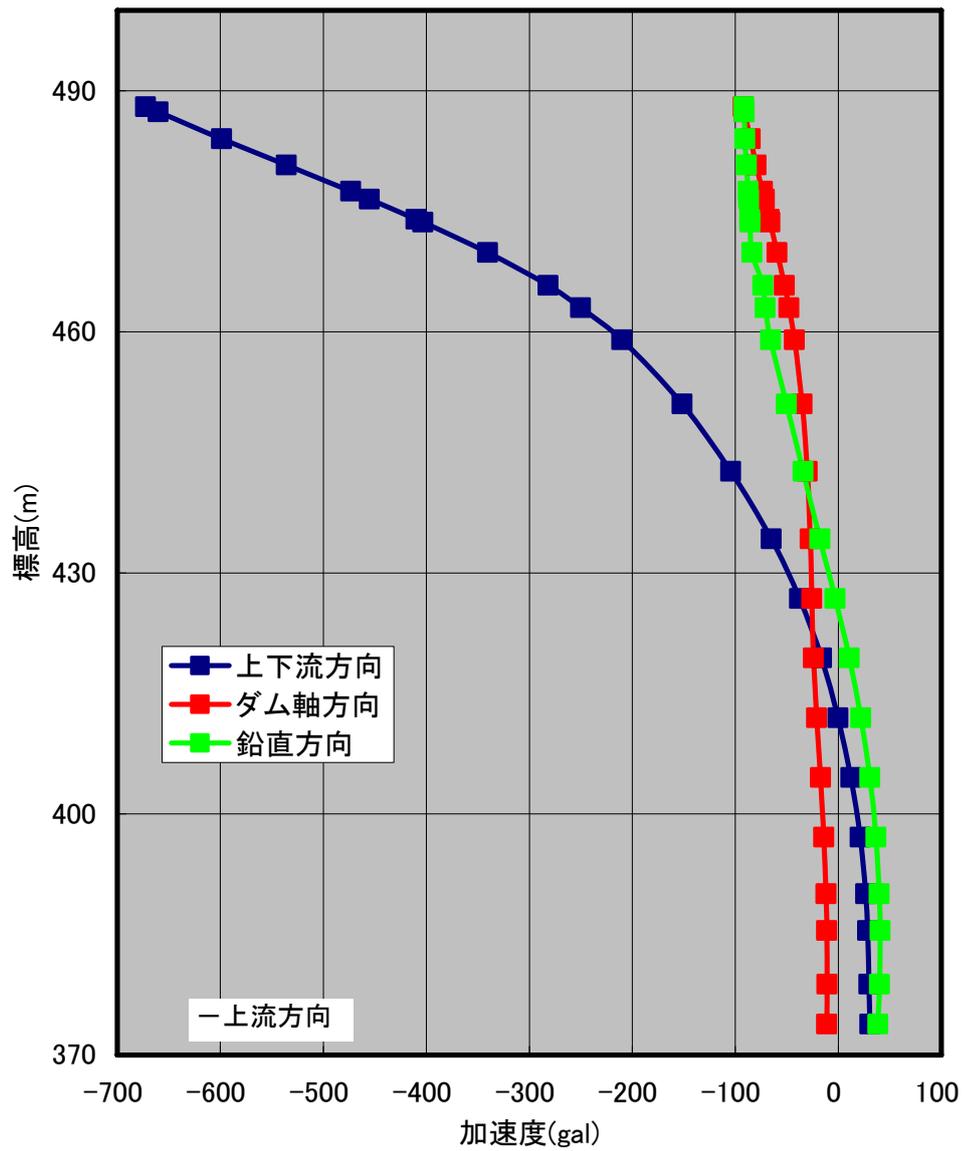


図7-11(b) 横断面と縦断面の交差位置における加速度応答の分布
(上下流方向の最大値発生瞬間の分布)

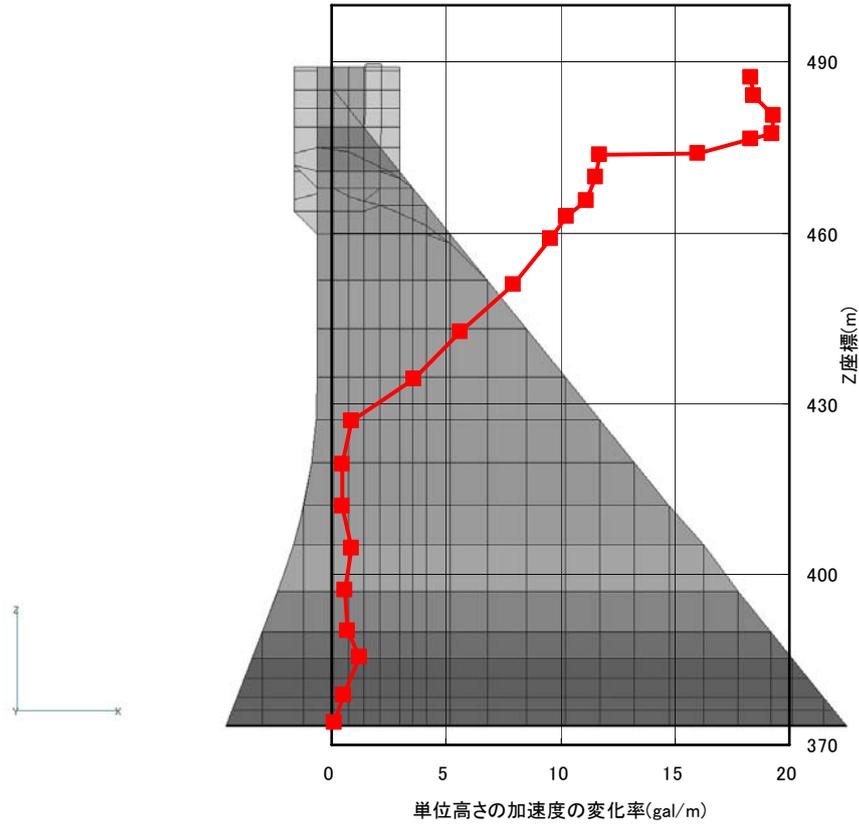


図 7-11(c) 高さ方向の加速度応答の変化率
(上下流方向)

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られる。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られる。

(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。兩岸地山の 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。

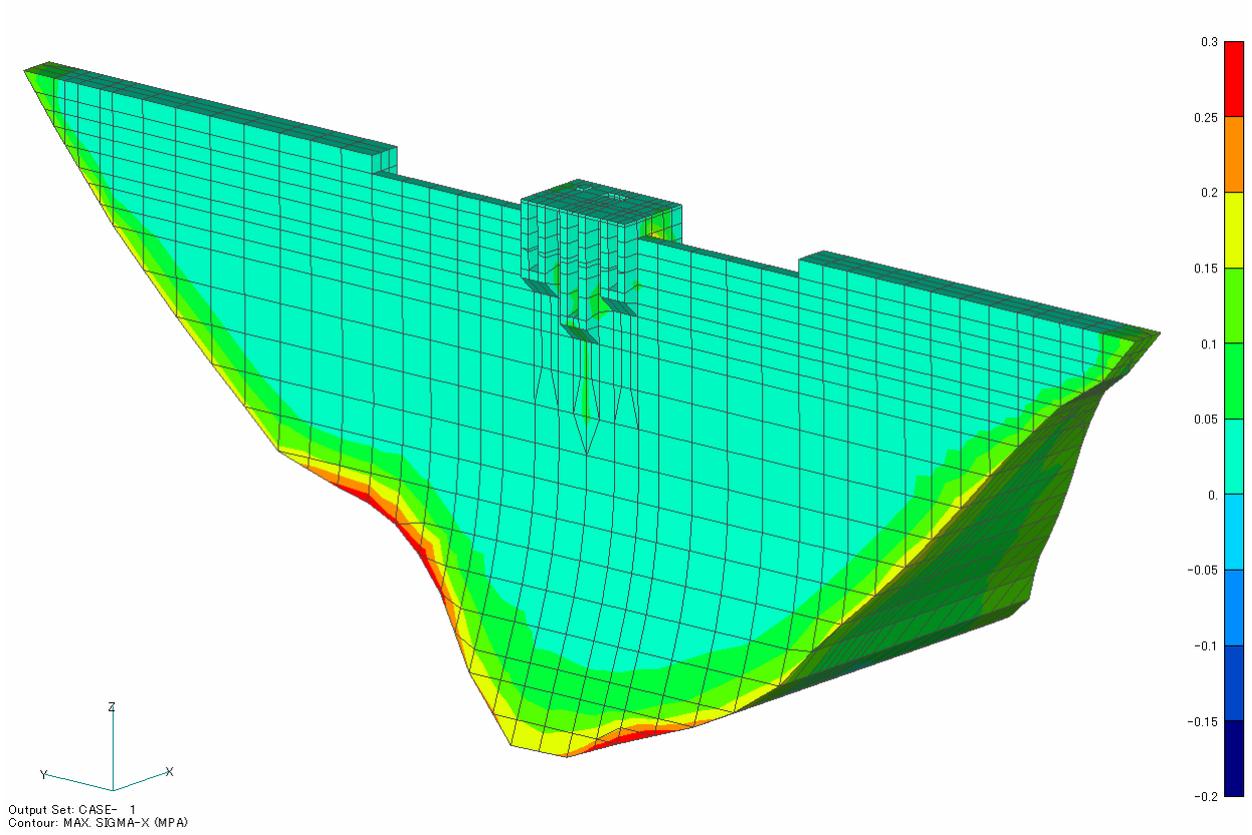


図 7-12(a) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)

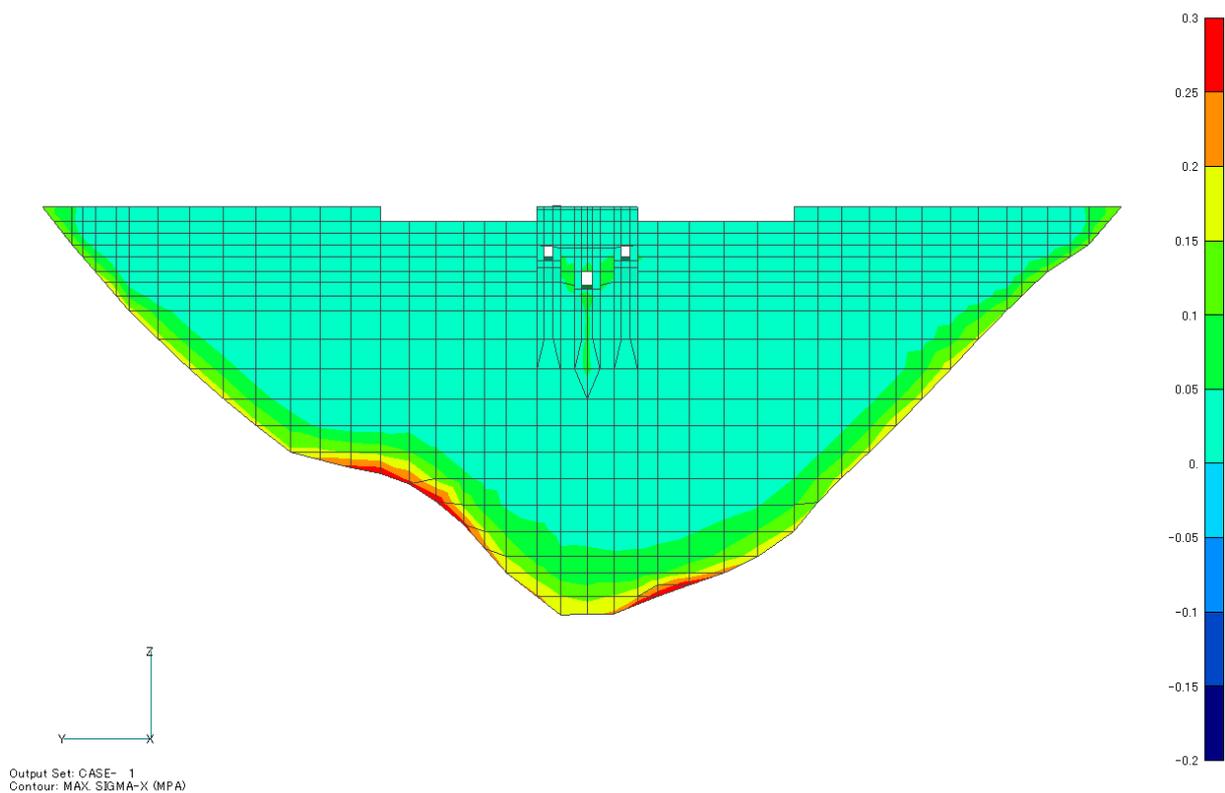


図 7-12(b) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(上流面)

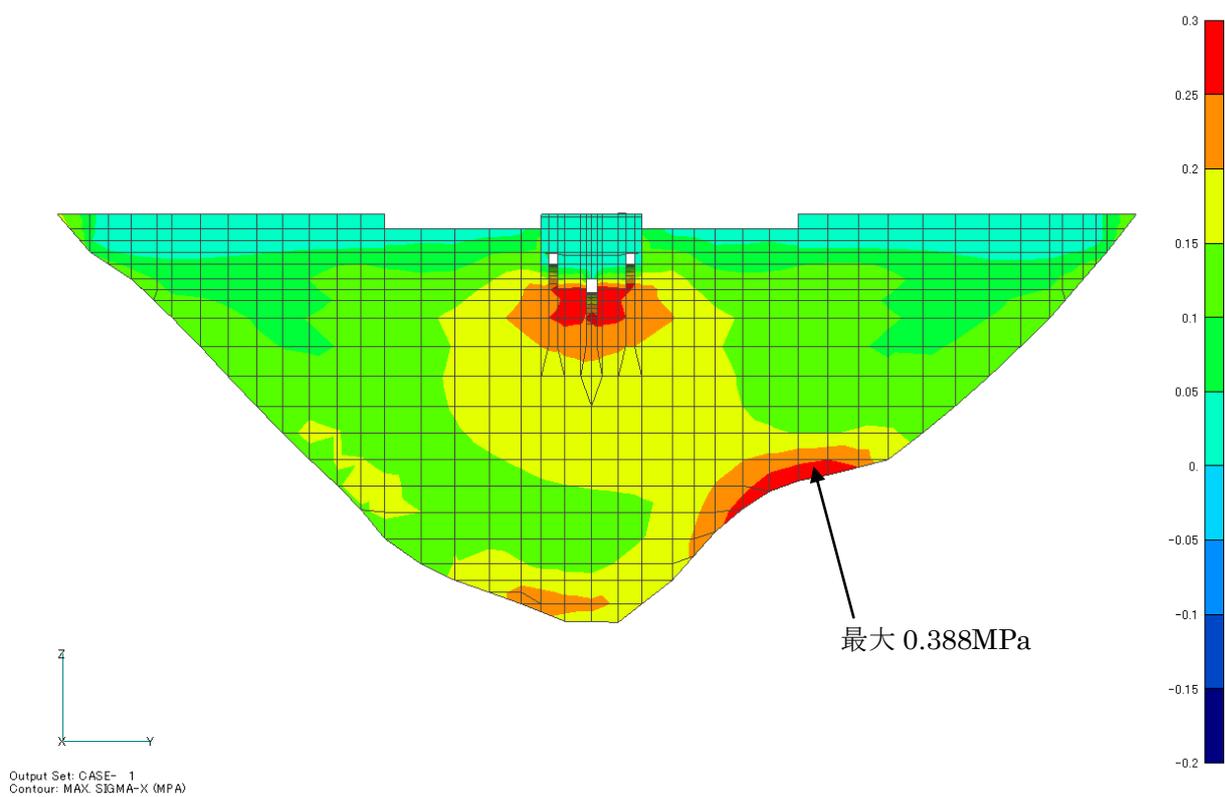


図 7-12(c) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(下流面)

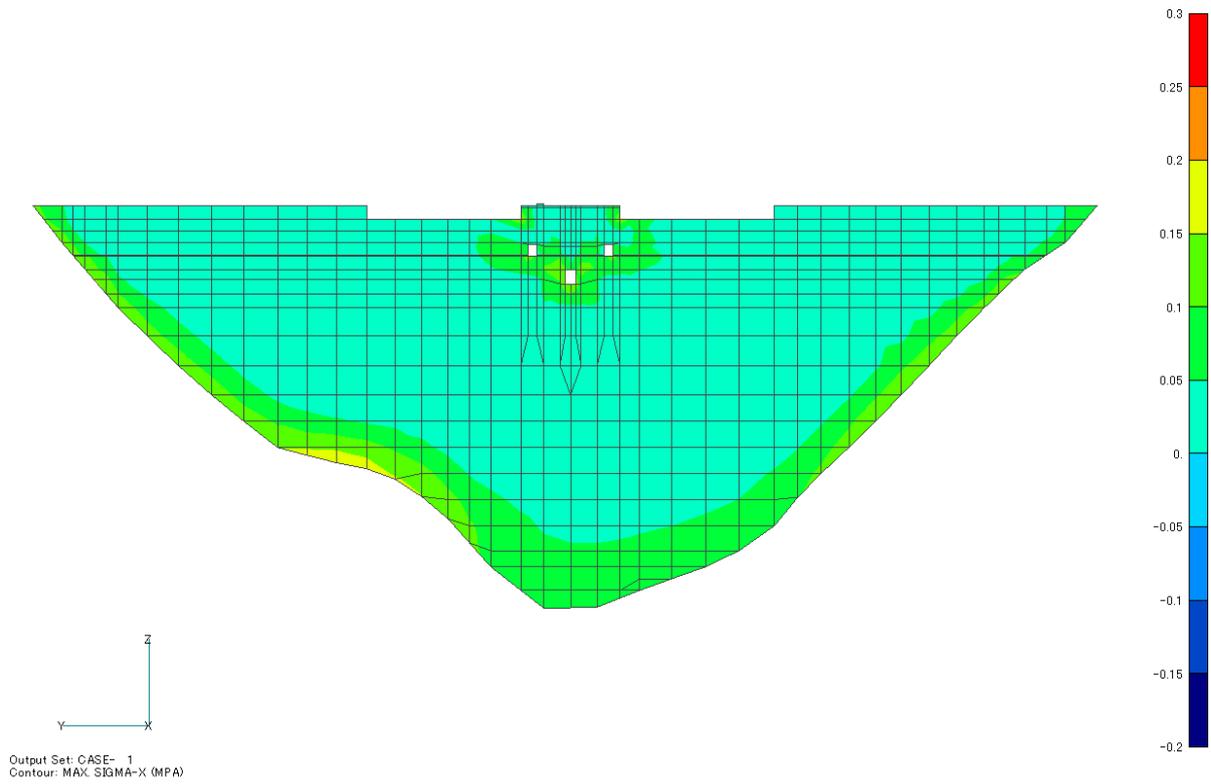


図 7-12(d) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(縦断面)

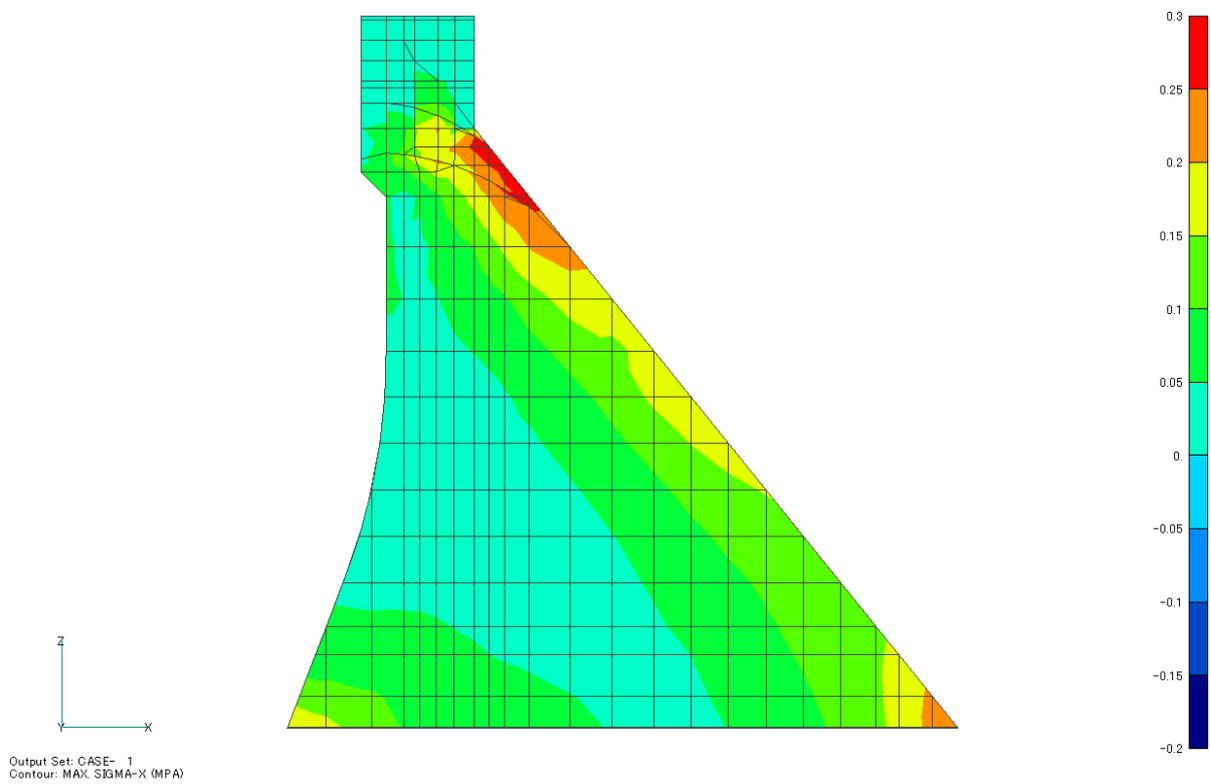


図 7-12(e) 再現解析 上下流方向の最大応力分布 (MPa)
(横断面)

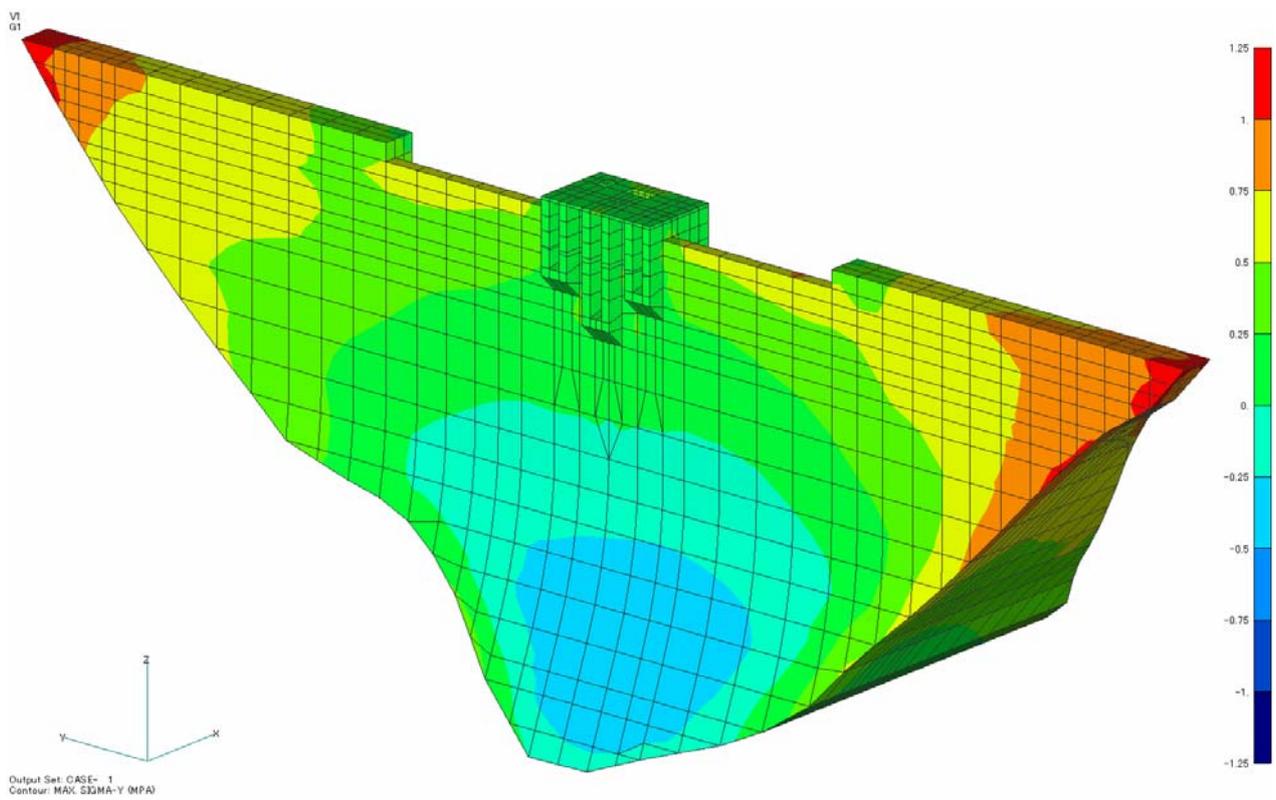


図 7-13(a) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

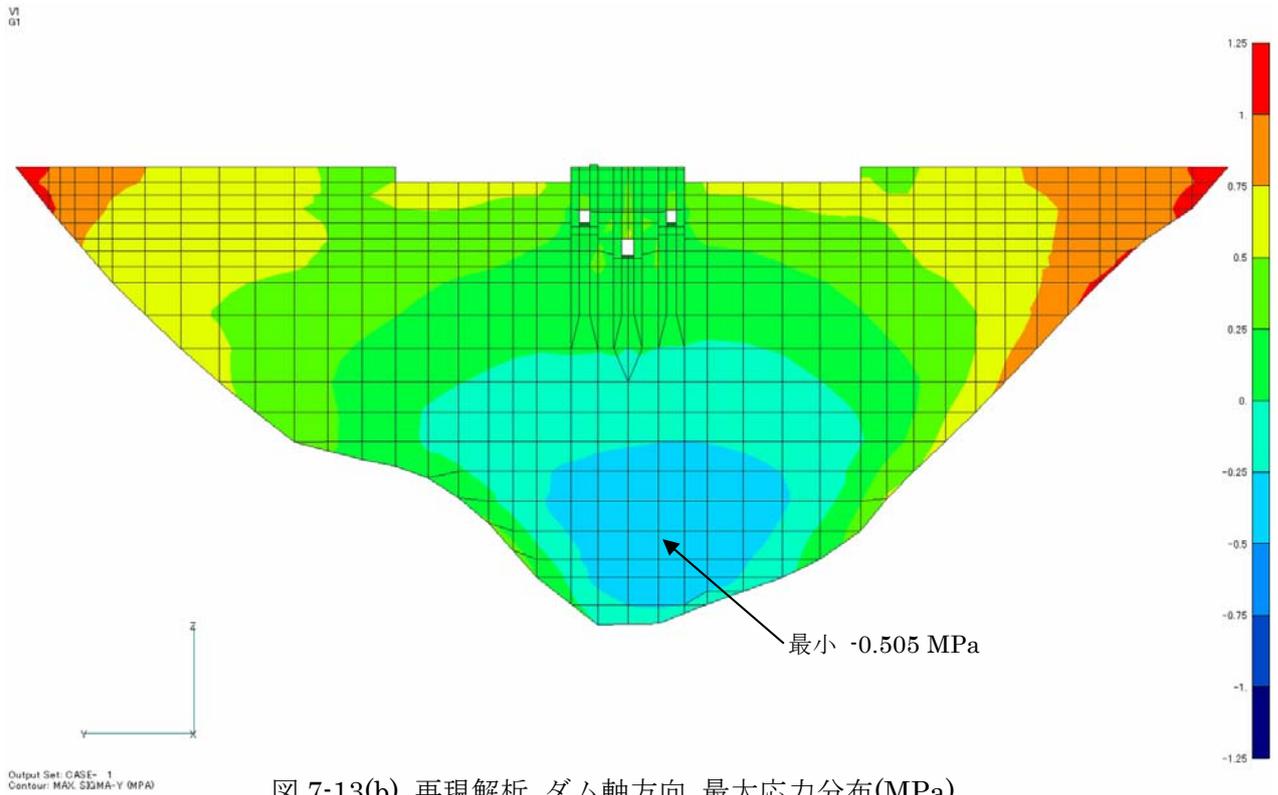


図 7-13(b) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(上流面)

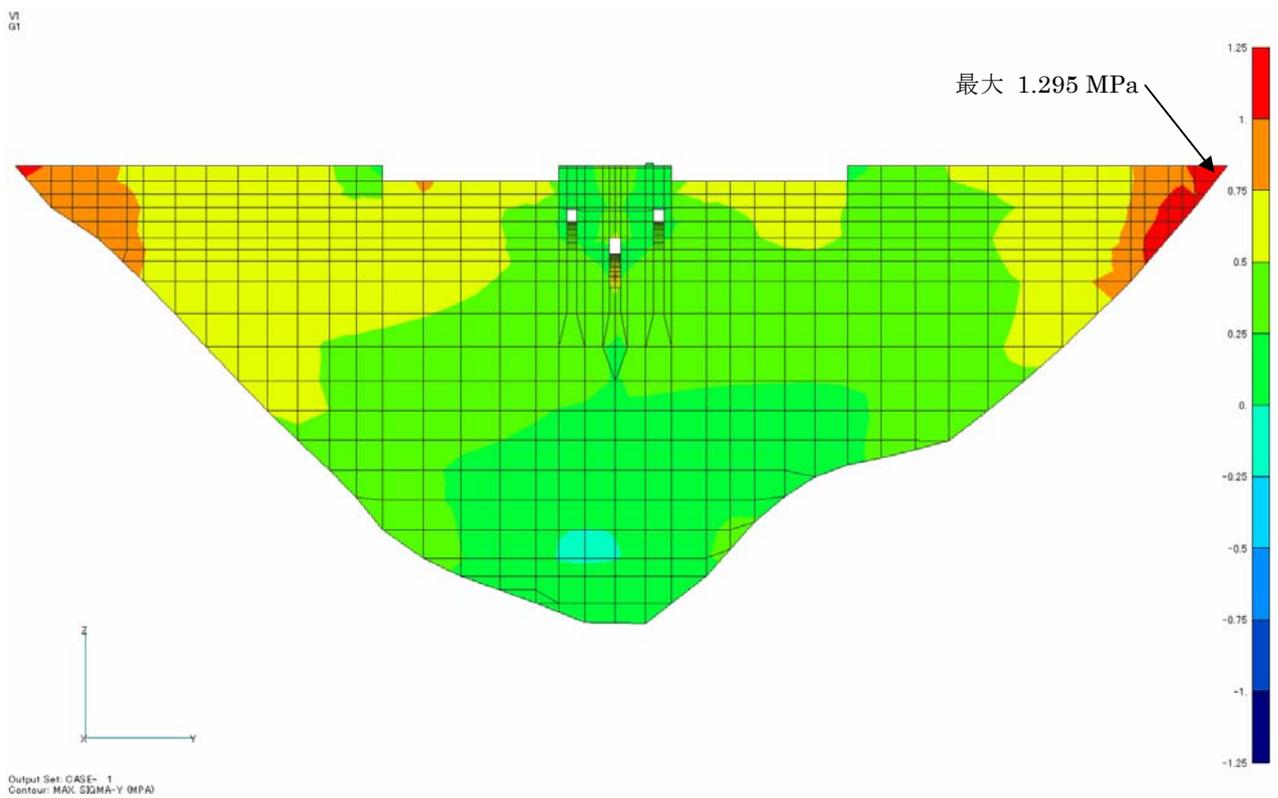


図 7-13(c) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(下流面)

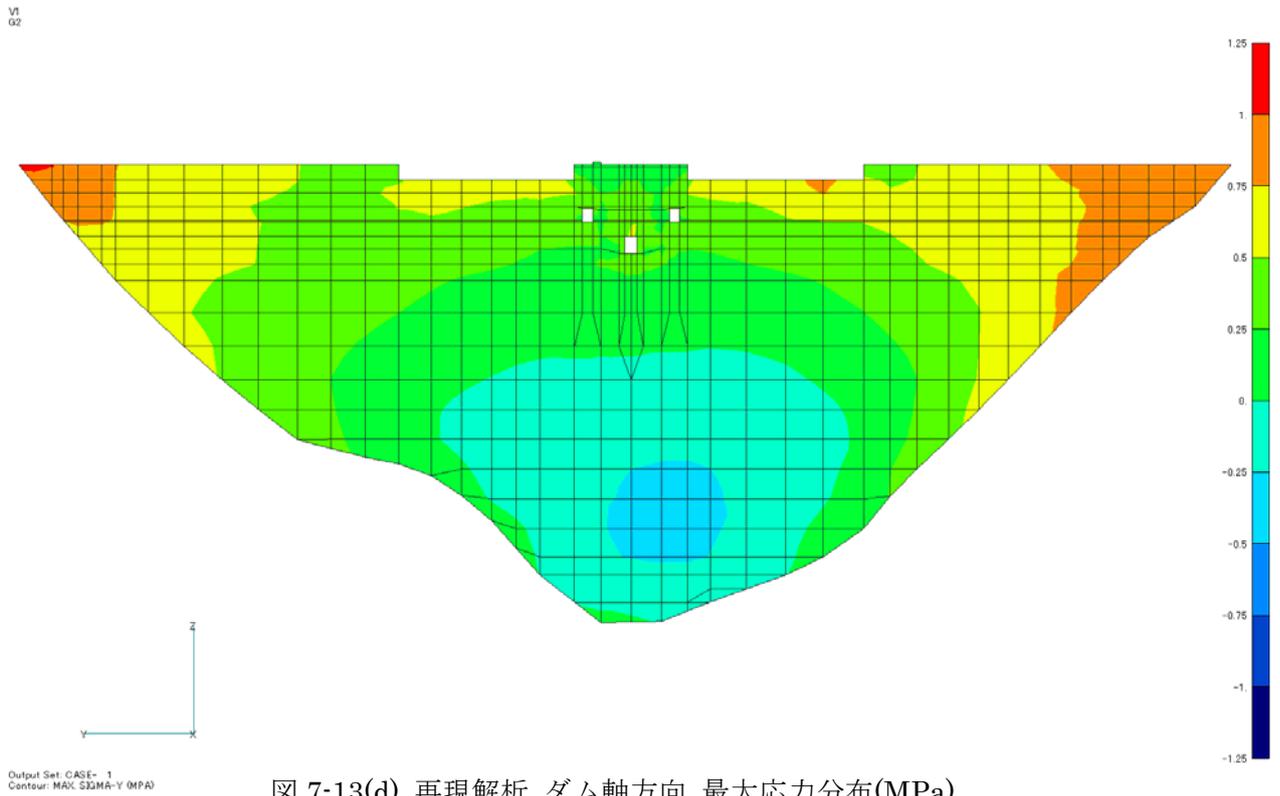


図 7-13(d) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(縦断面)

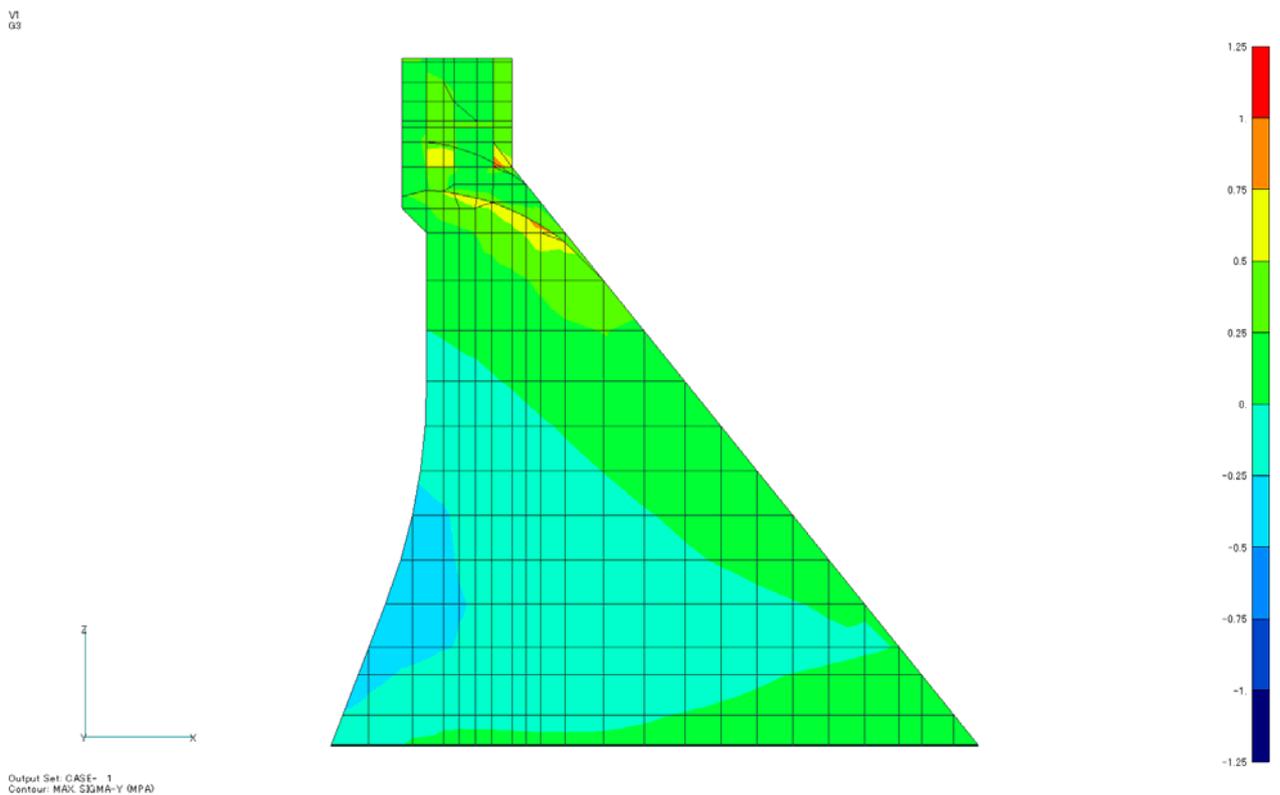


図 7-13(e) 再現解析 ダム軸方向 最大応力分布(MPa)
(横断面)

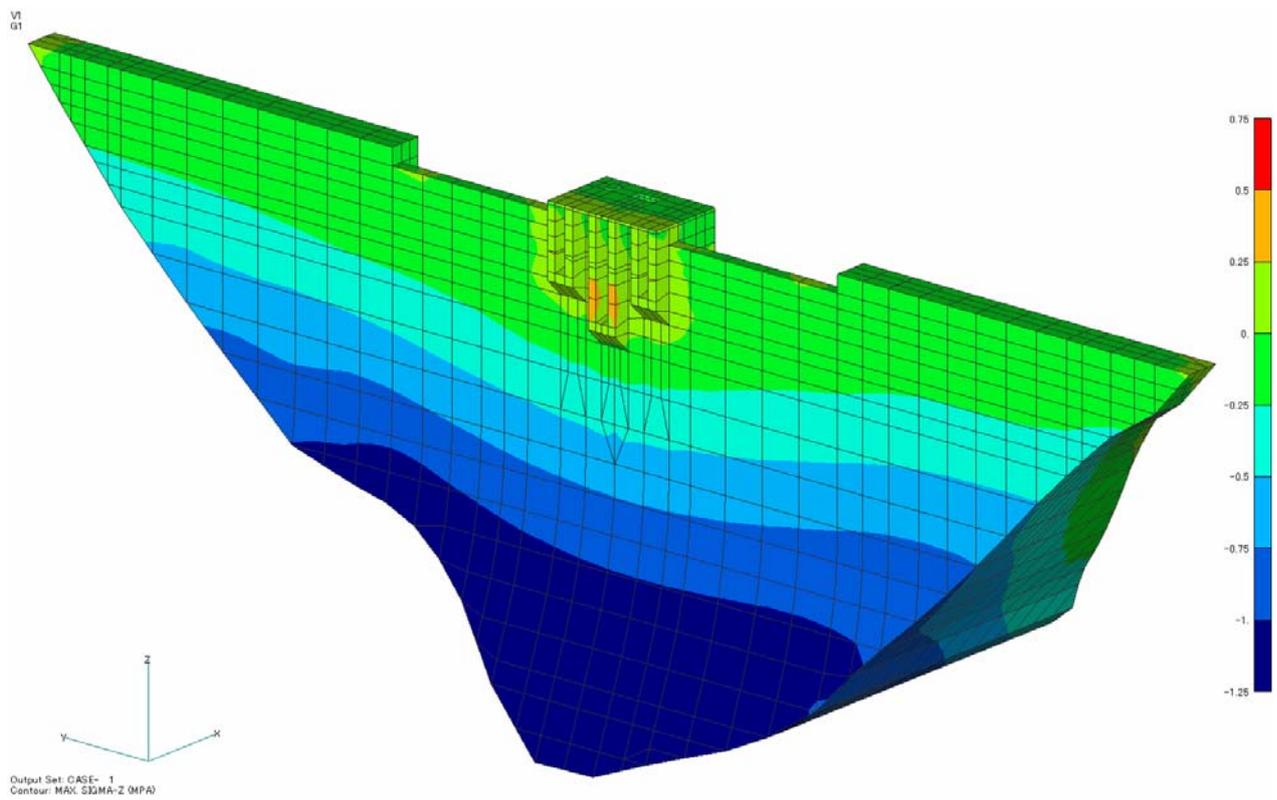
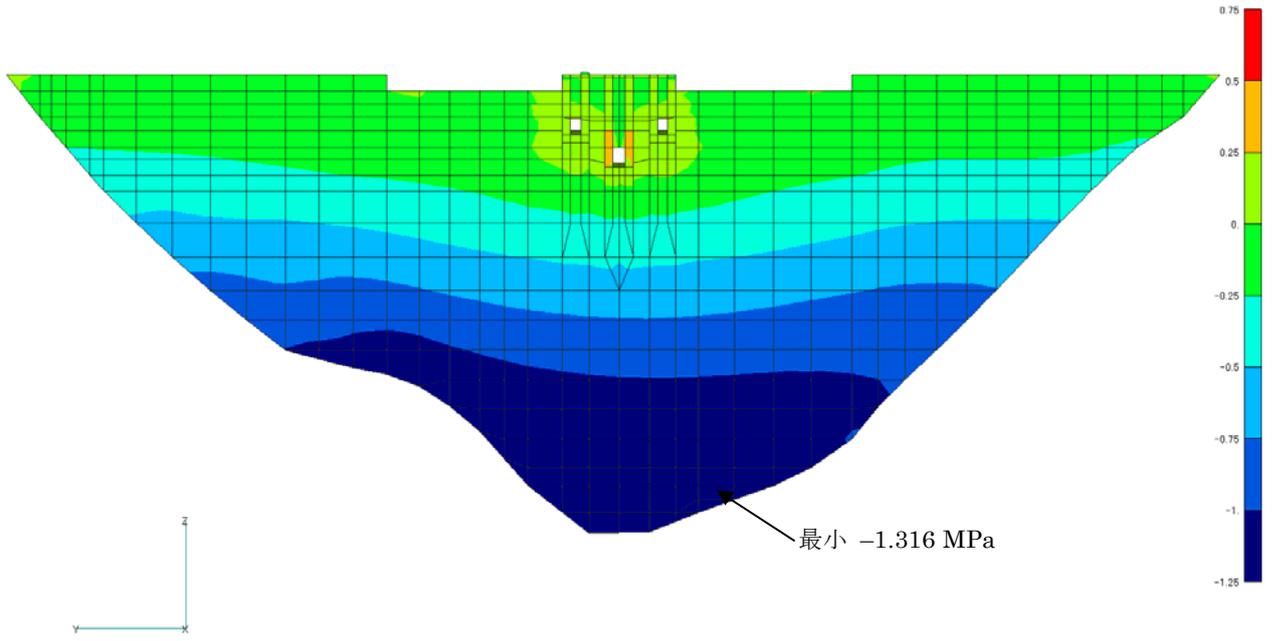


图 7-14(a) 再现解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

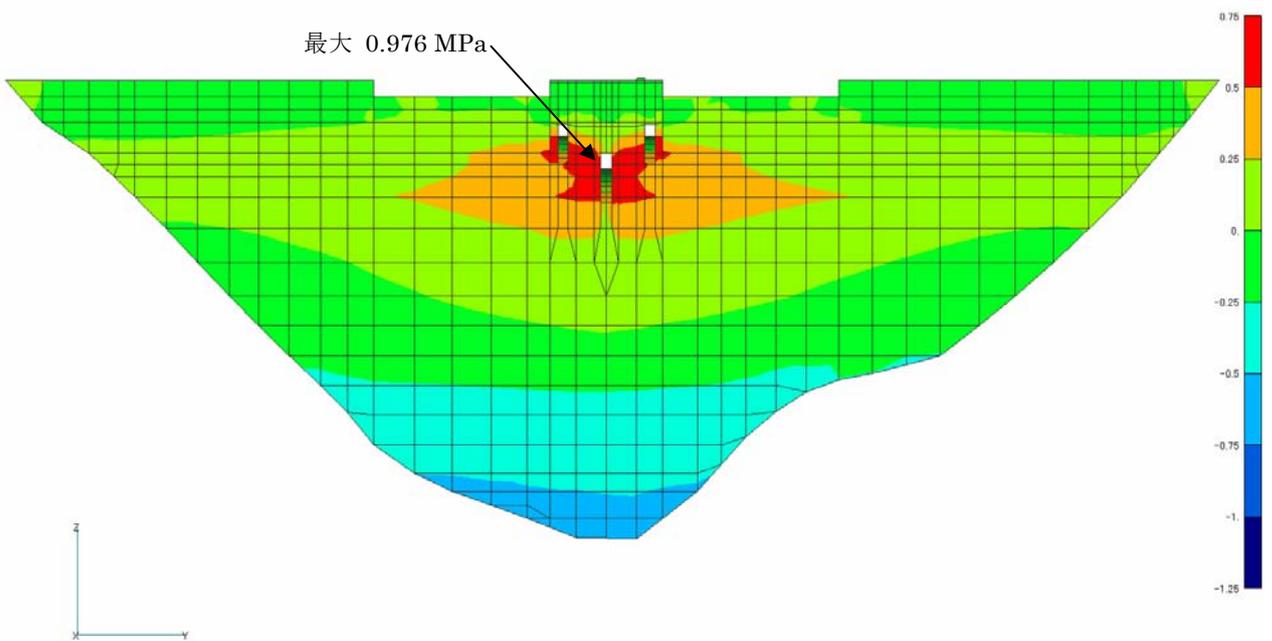
V1
G1



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

图 7-14(c) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(下流面)

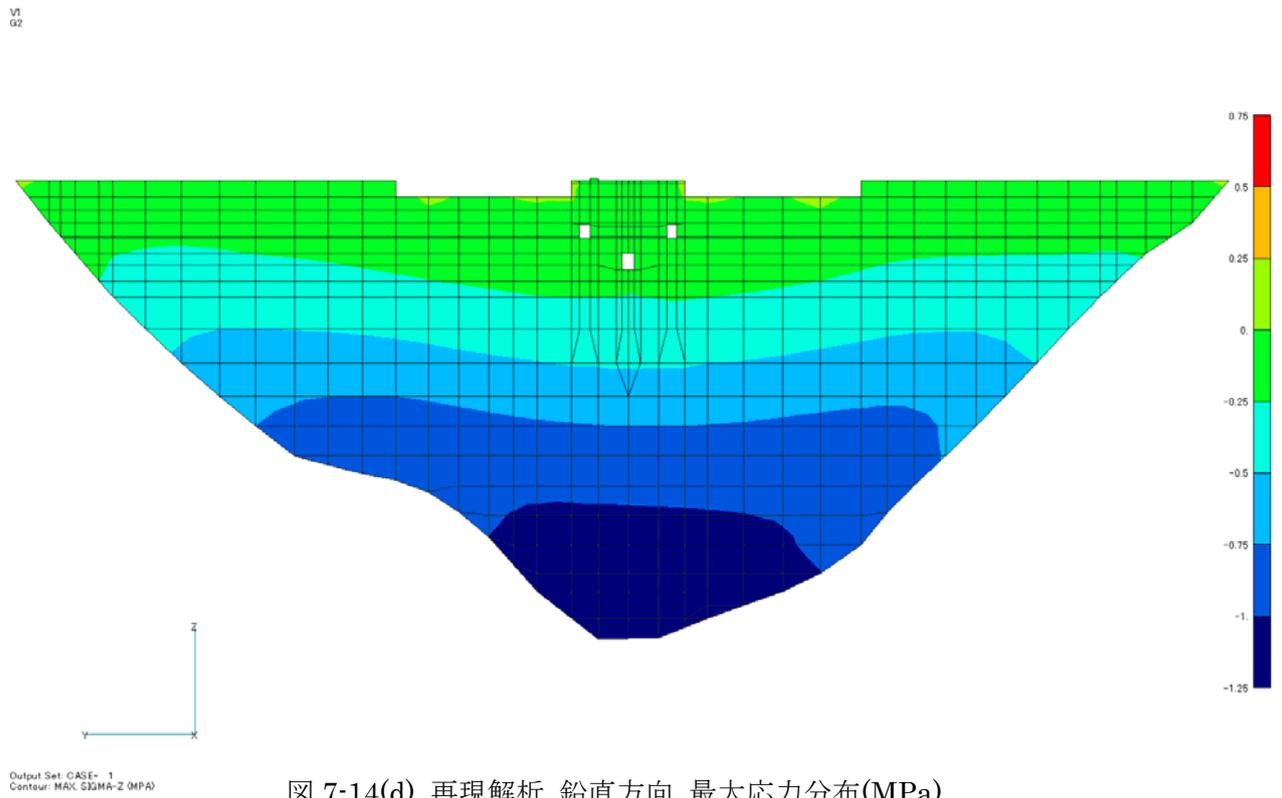


図 7-14(d) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(縦断面)

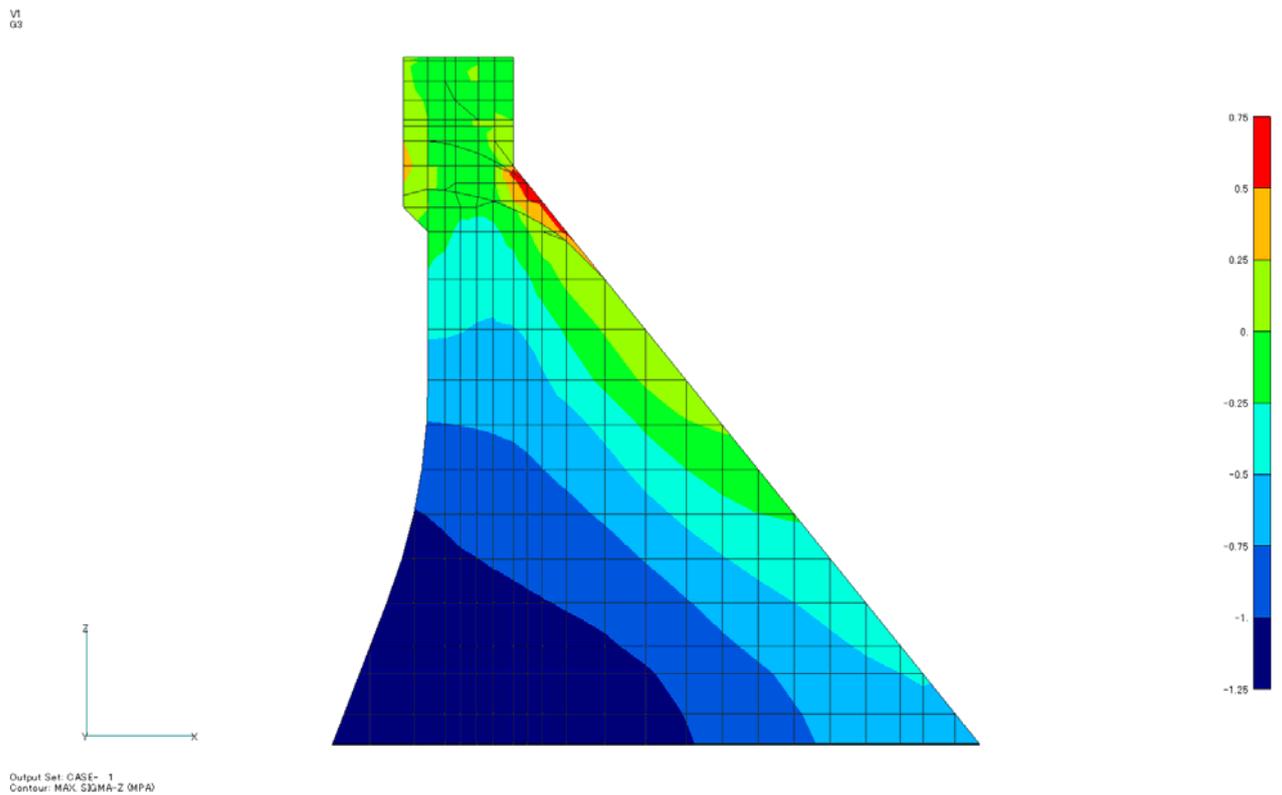


図 7-14(e) 再現解析 鉛直方向 最大応力分布(MPa)
(横断面)

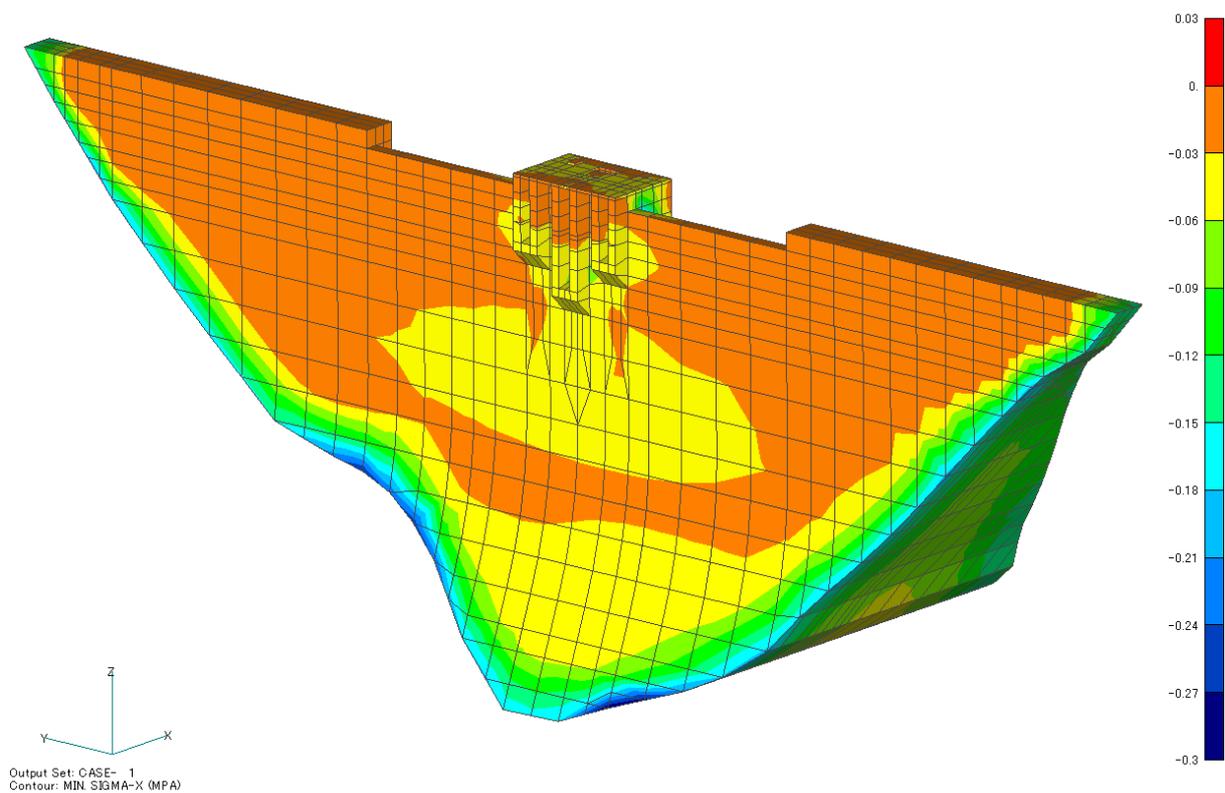


図 7-15(a) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)

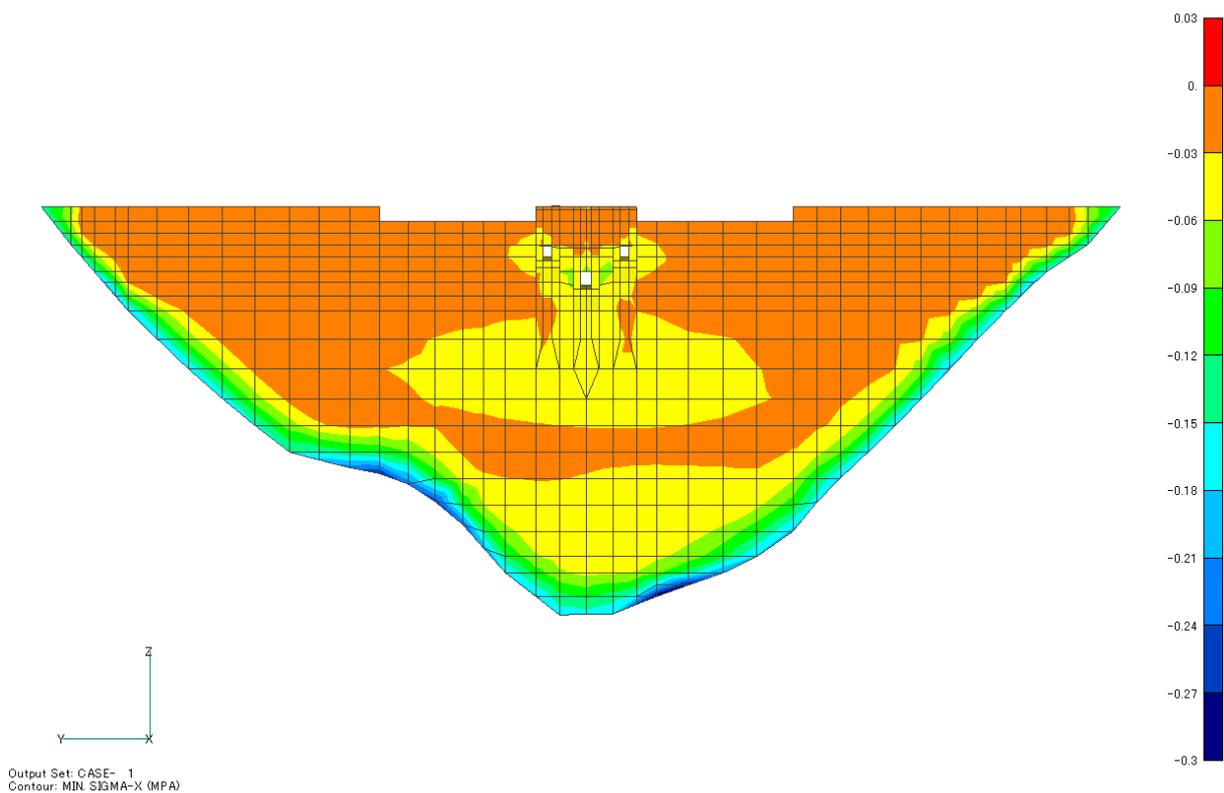


図 7-15(b) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(上流面)

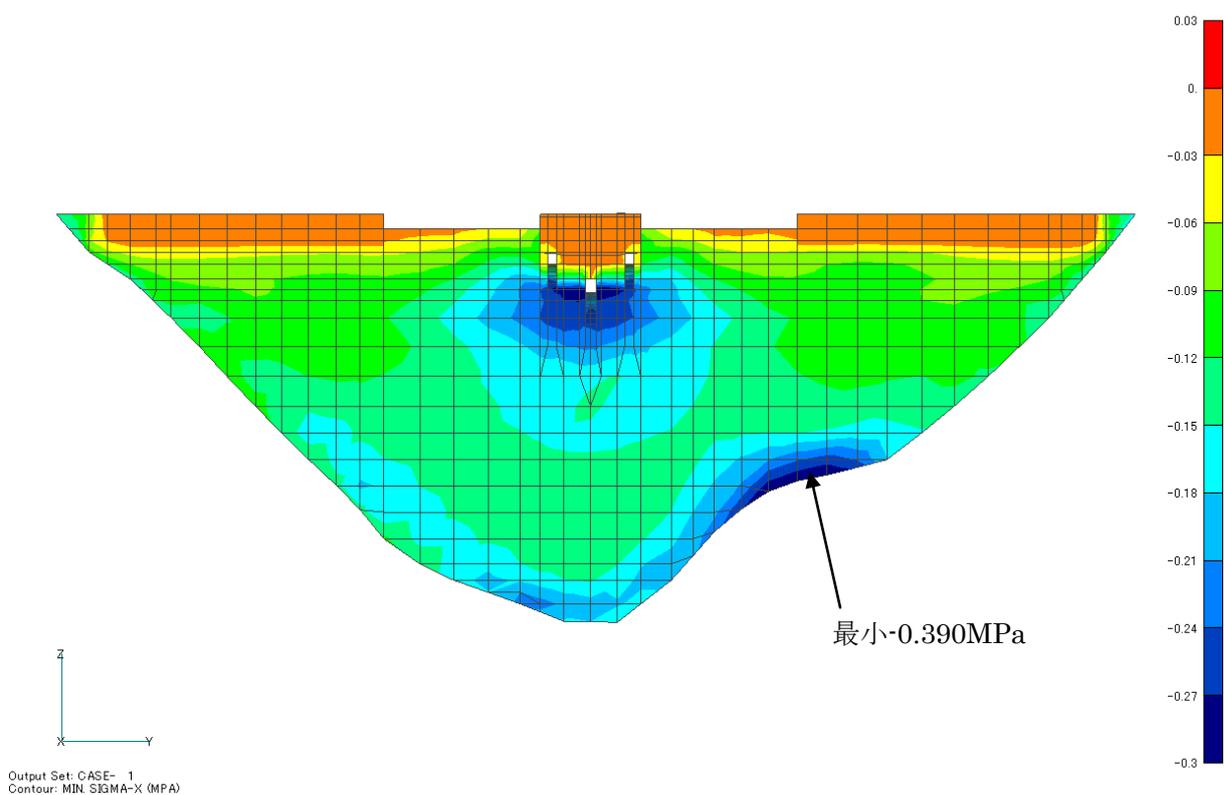


図 7-15(c) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(下流面)

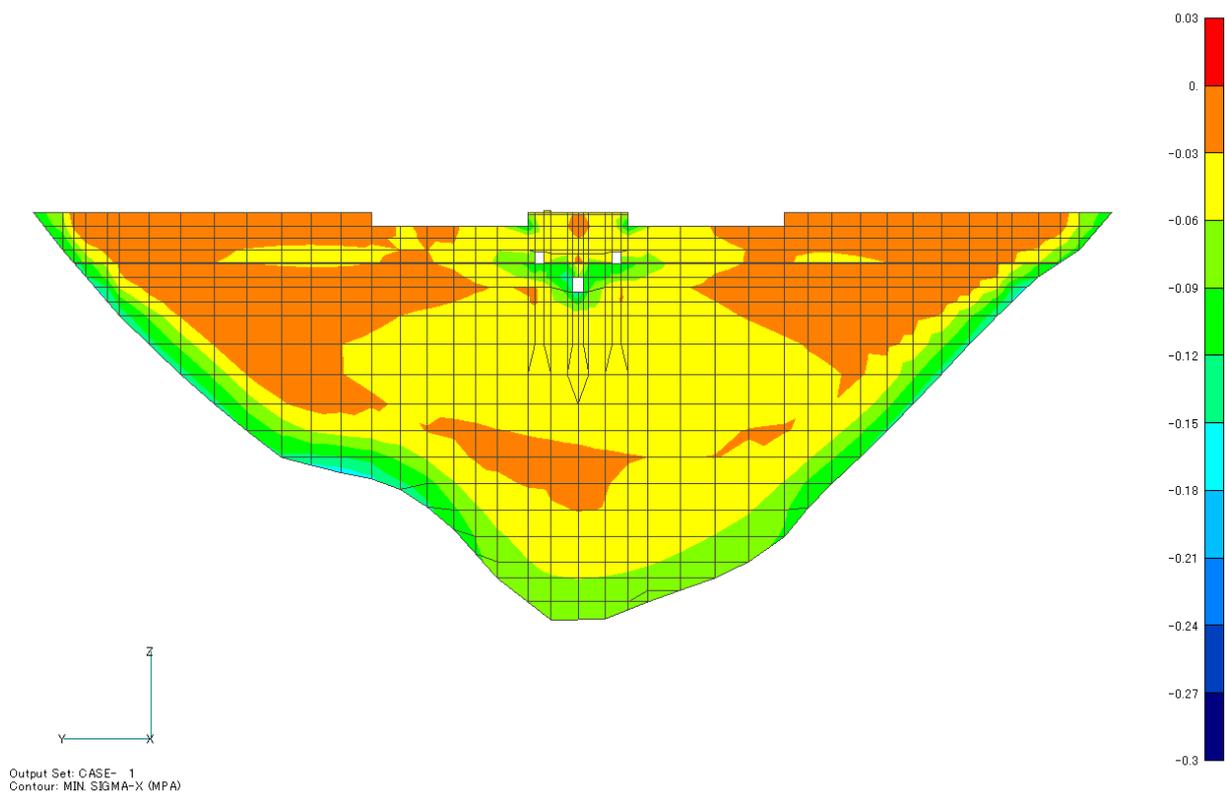


図 7-15(d) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(縦断面)

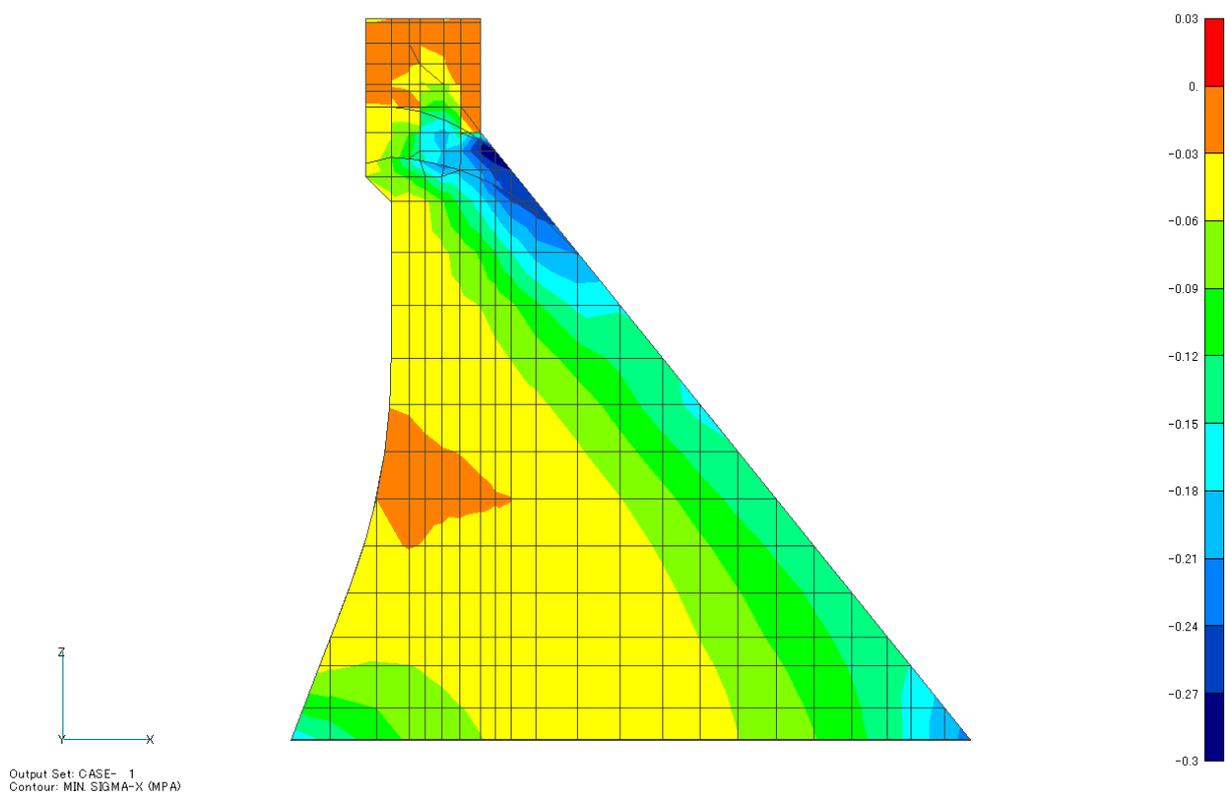


図 7-15(e) 再現解析 上下流方向の最小応力分布 (MPa)
(横断面)

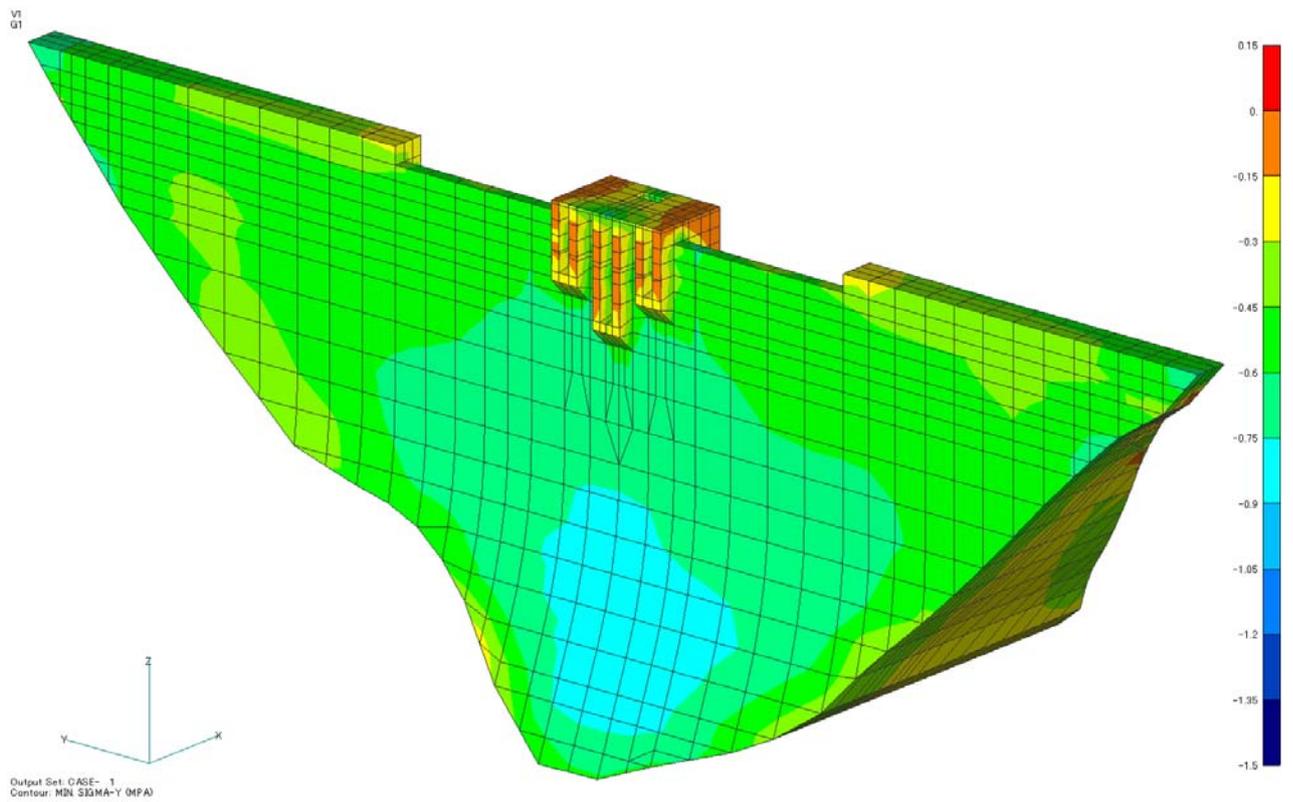


図 7-16(a) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

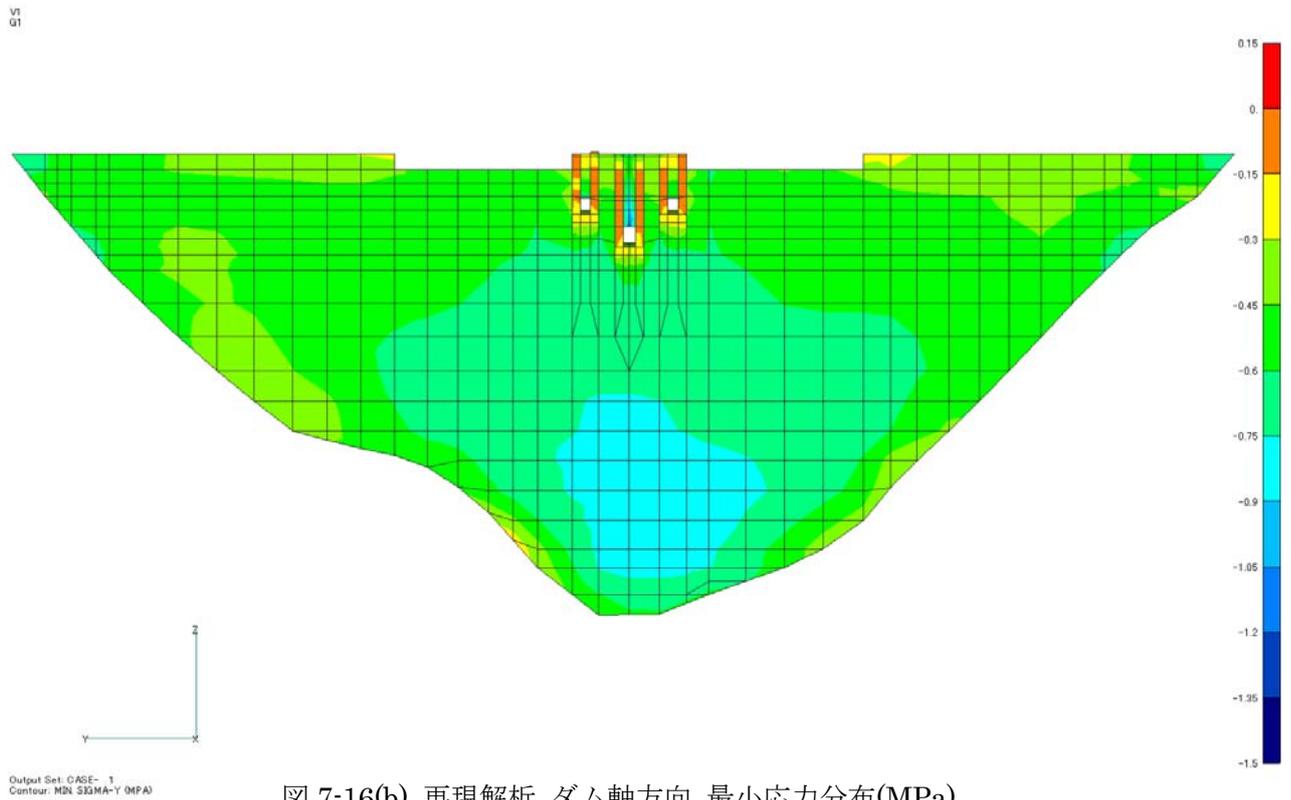


図 7-16(b) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(上流面)

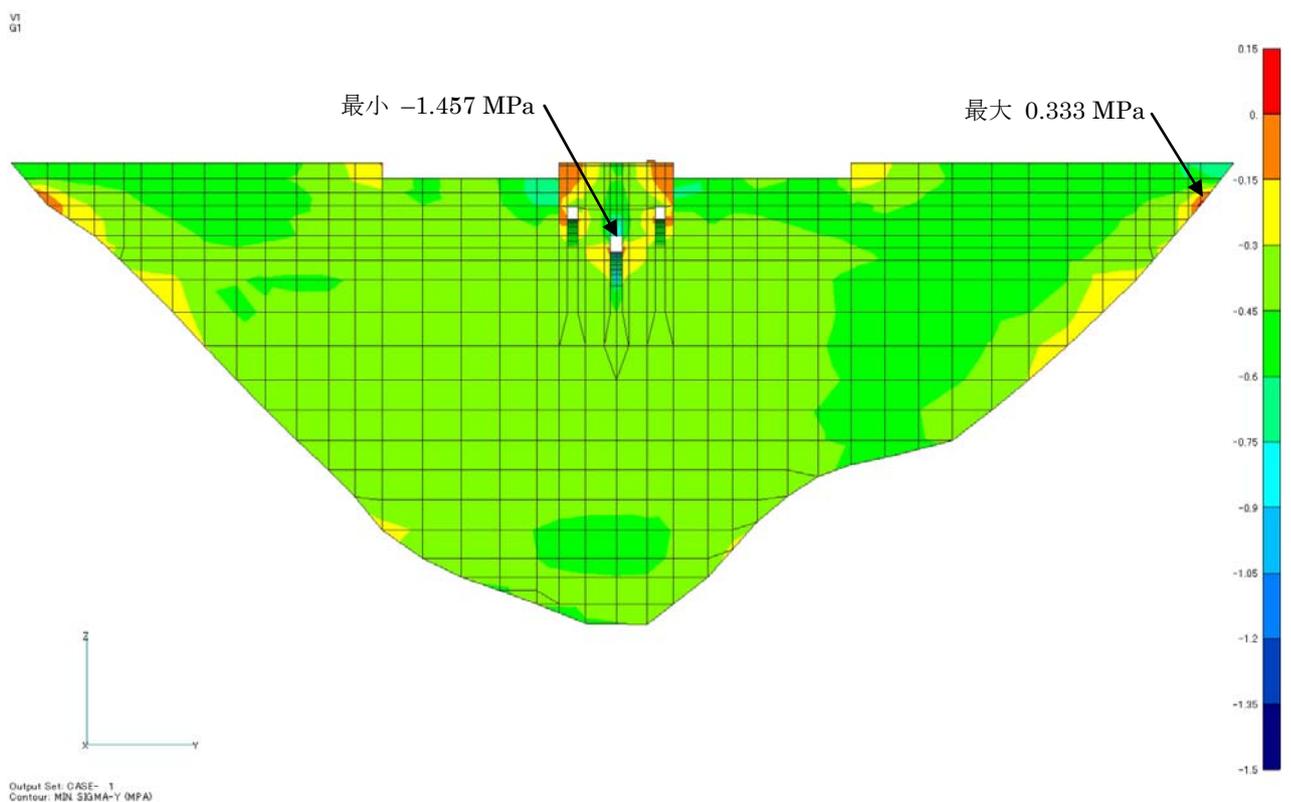


図 7-16(c) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(下流面)

V1
G2

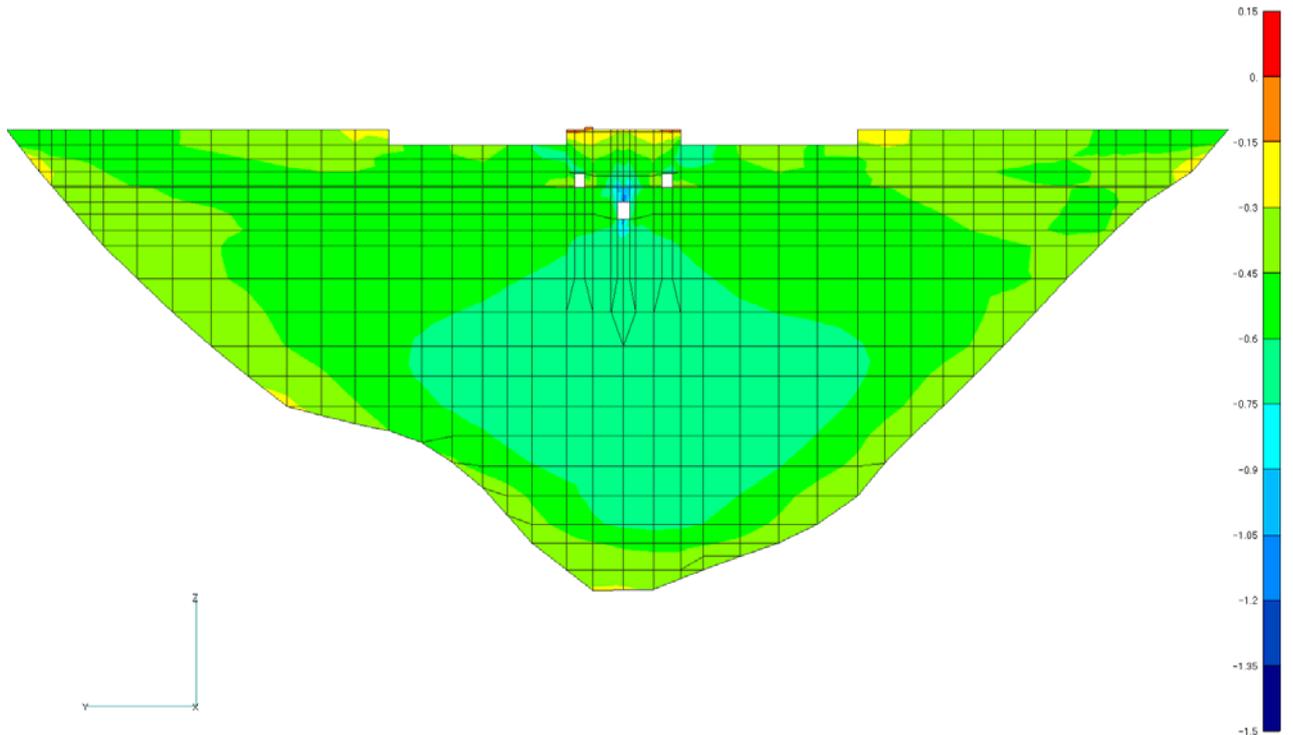


図 7-16(d) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(縦断面)

V1
G3

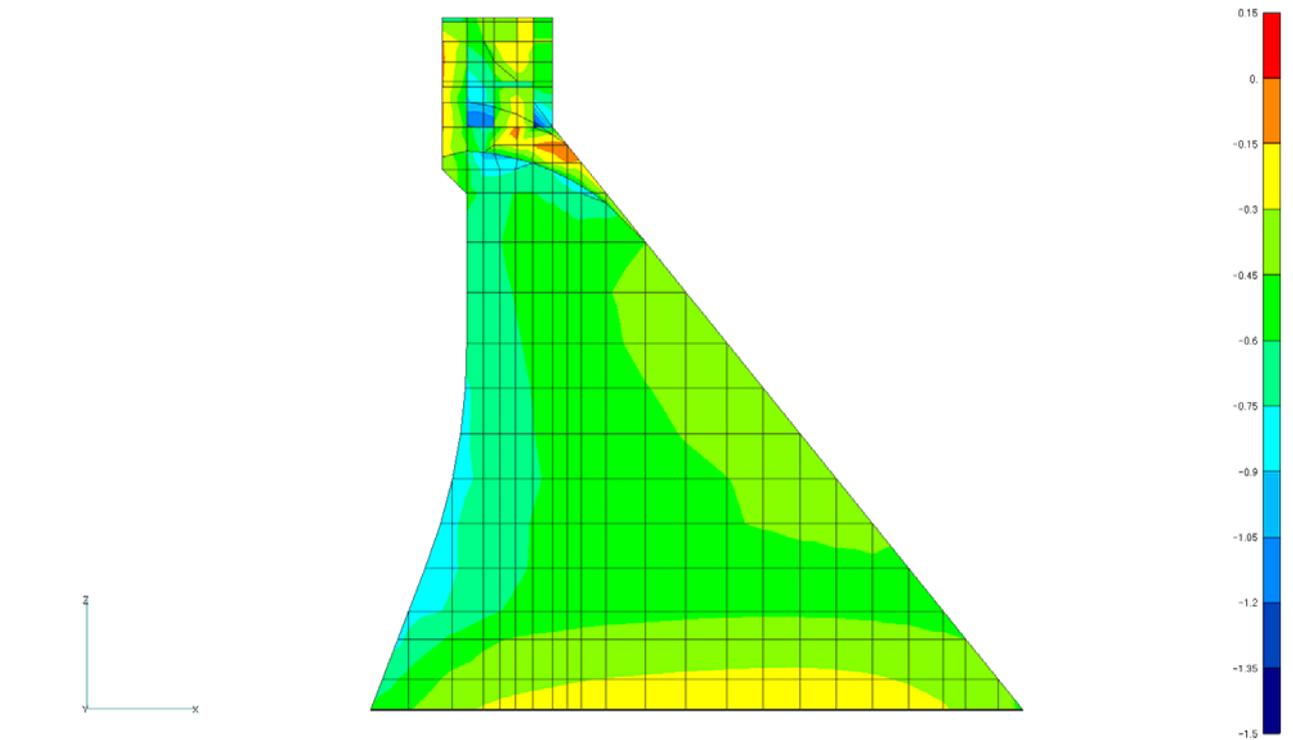


図 7-16(e) 再現解析 ダム軸方向 最小応力分布(MPa)
(横断面)

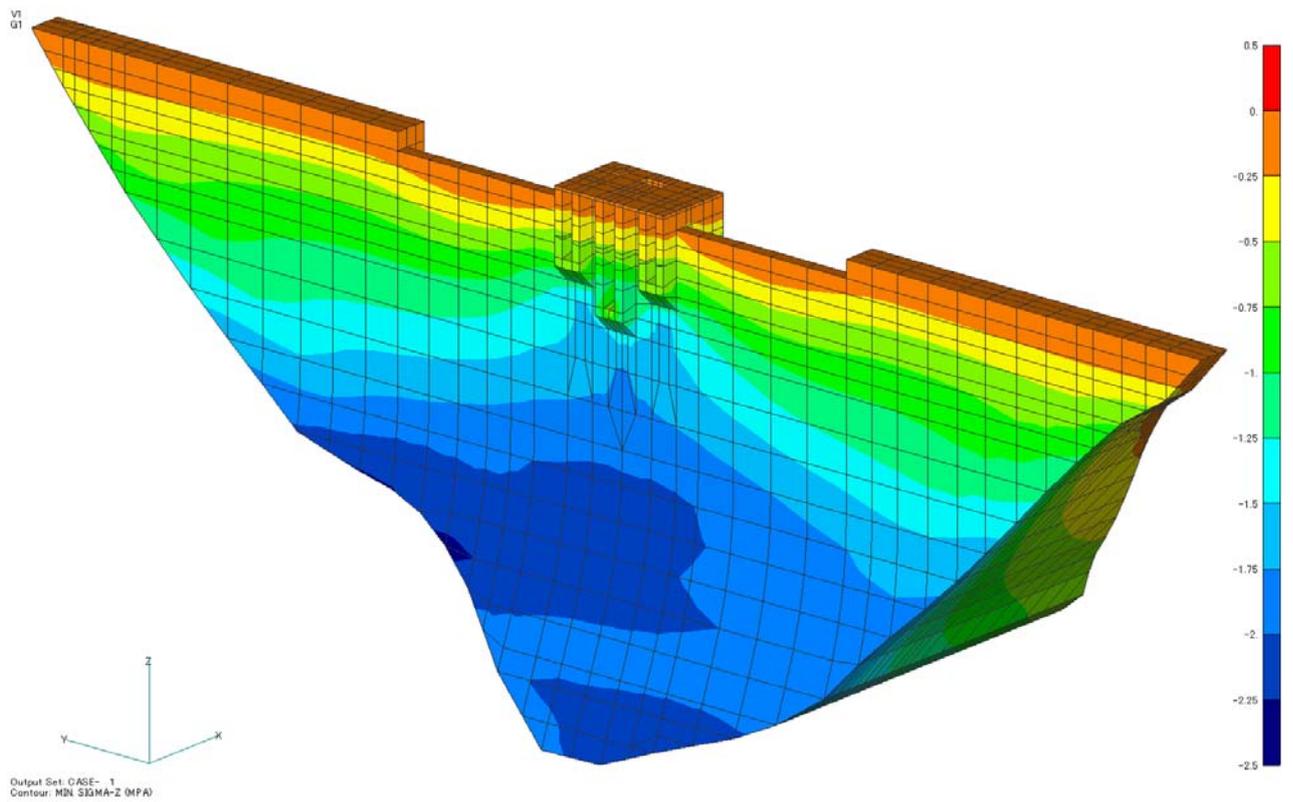


図 7-17(a) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(鳥瞰図)

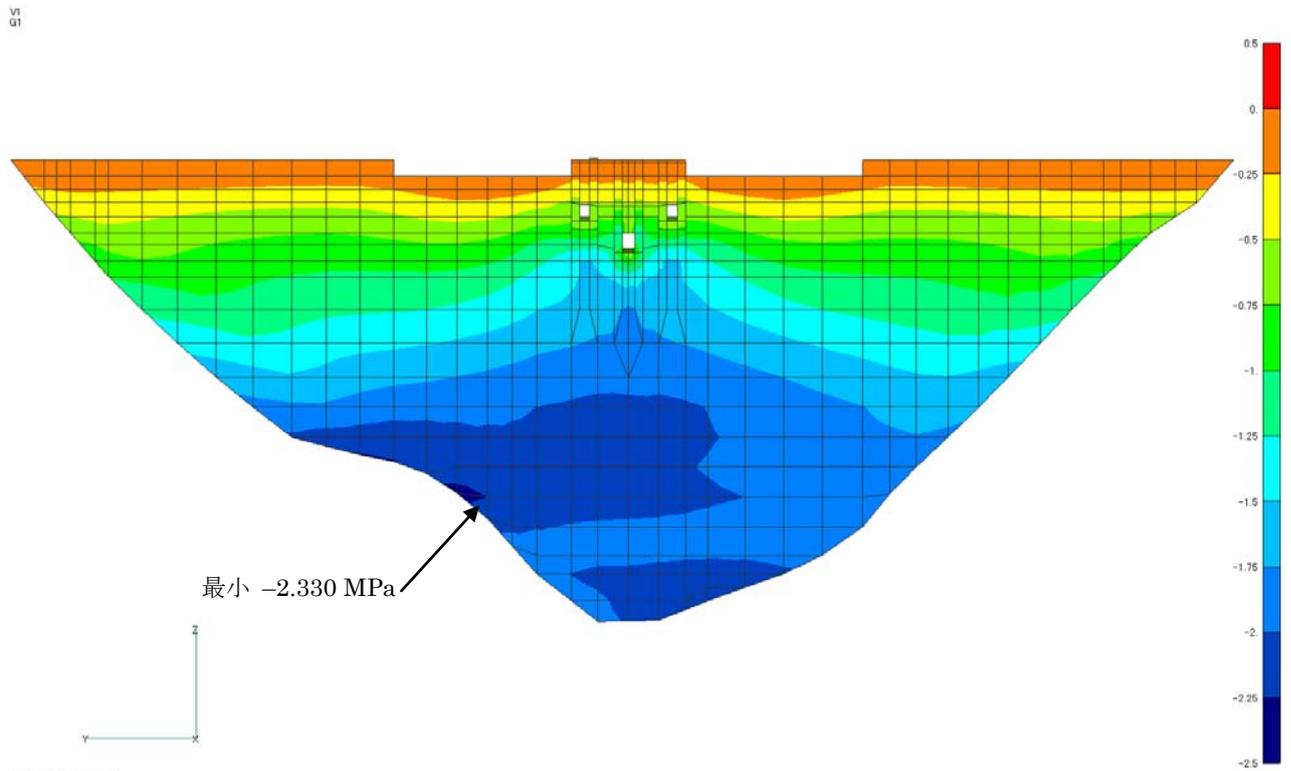


图 7-17(b) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(上流面)

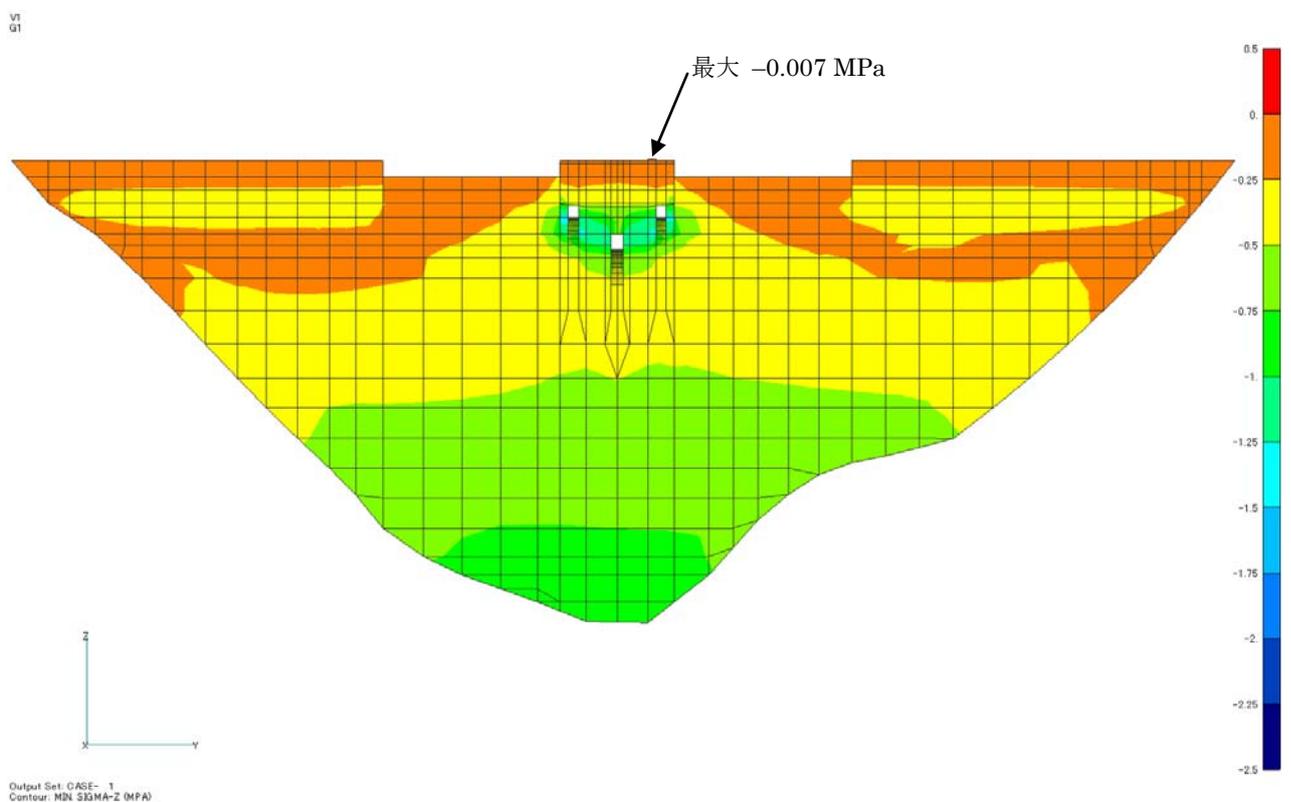
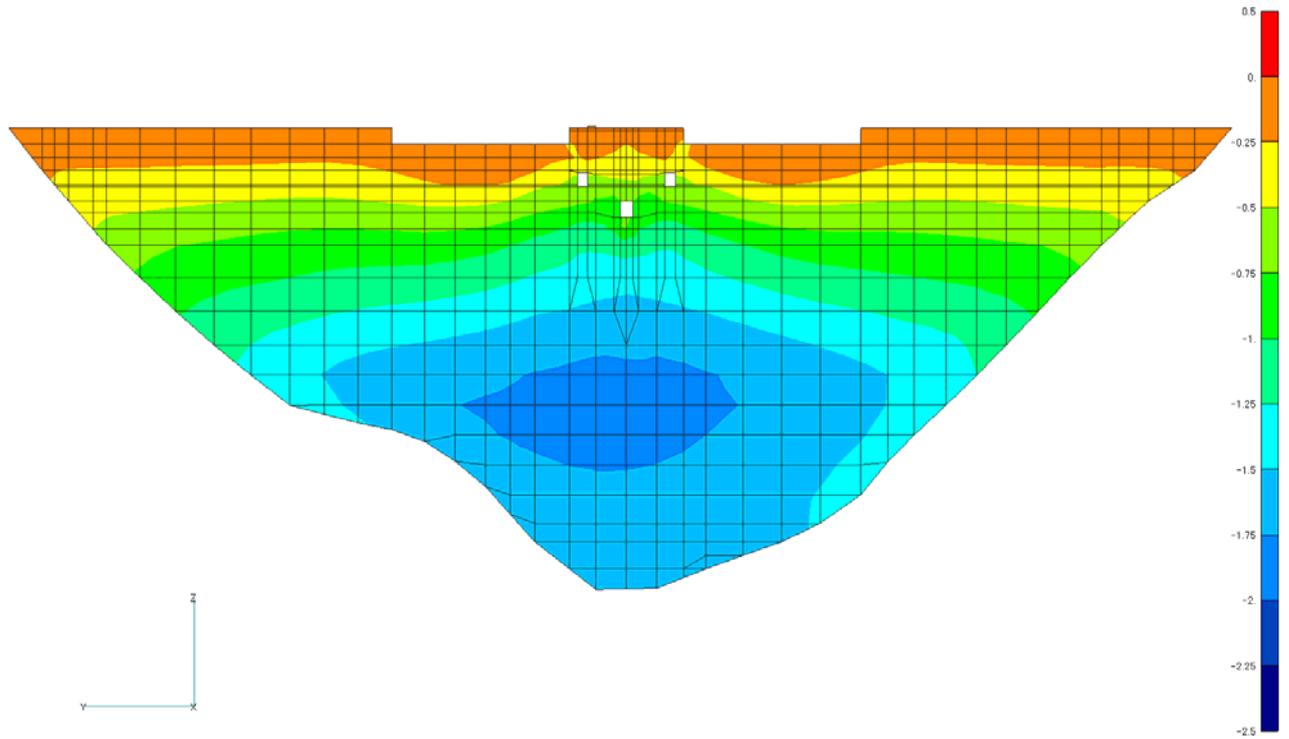


图 7-17(c) 再現解析 鉛直方向 最小応力分布(MPa)
(下流面)

V1

G2

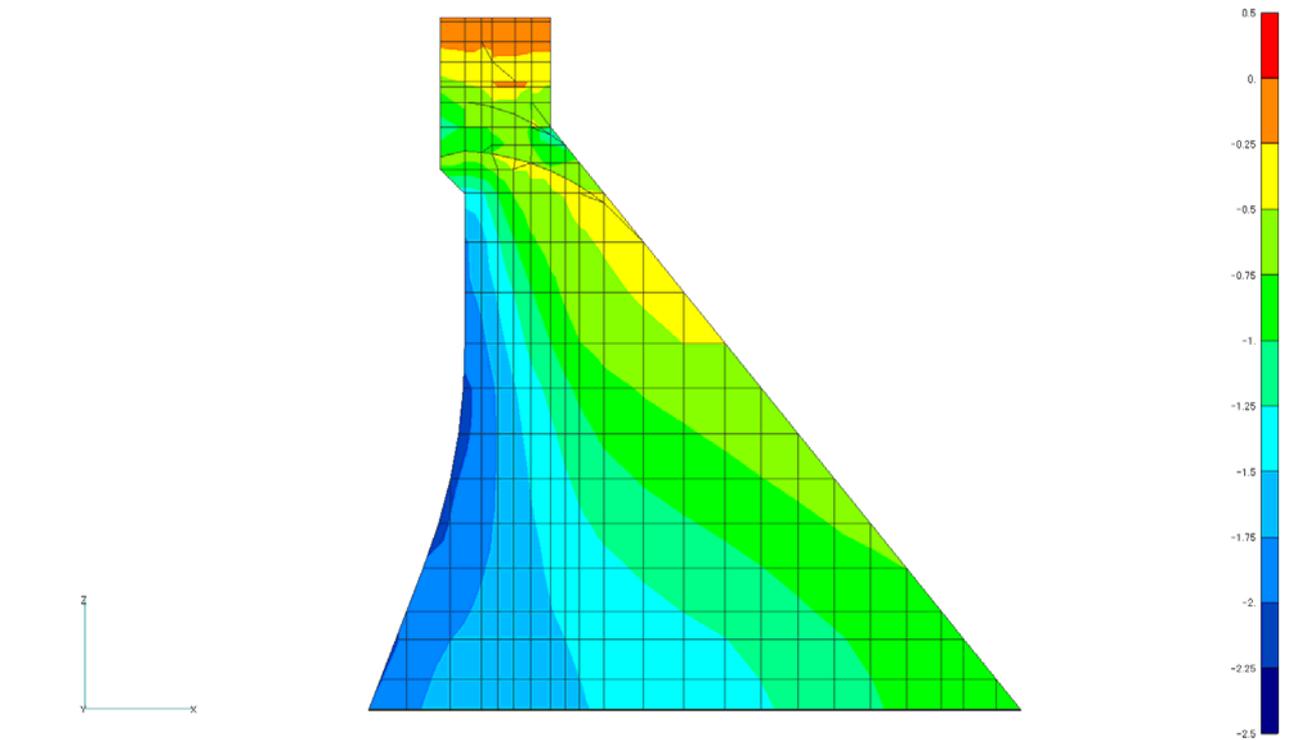


Output Set: CASE- 1
Contour: MIN SIGMA-Z (MPa)

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 巻, 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