

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。

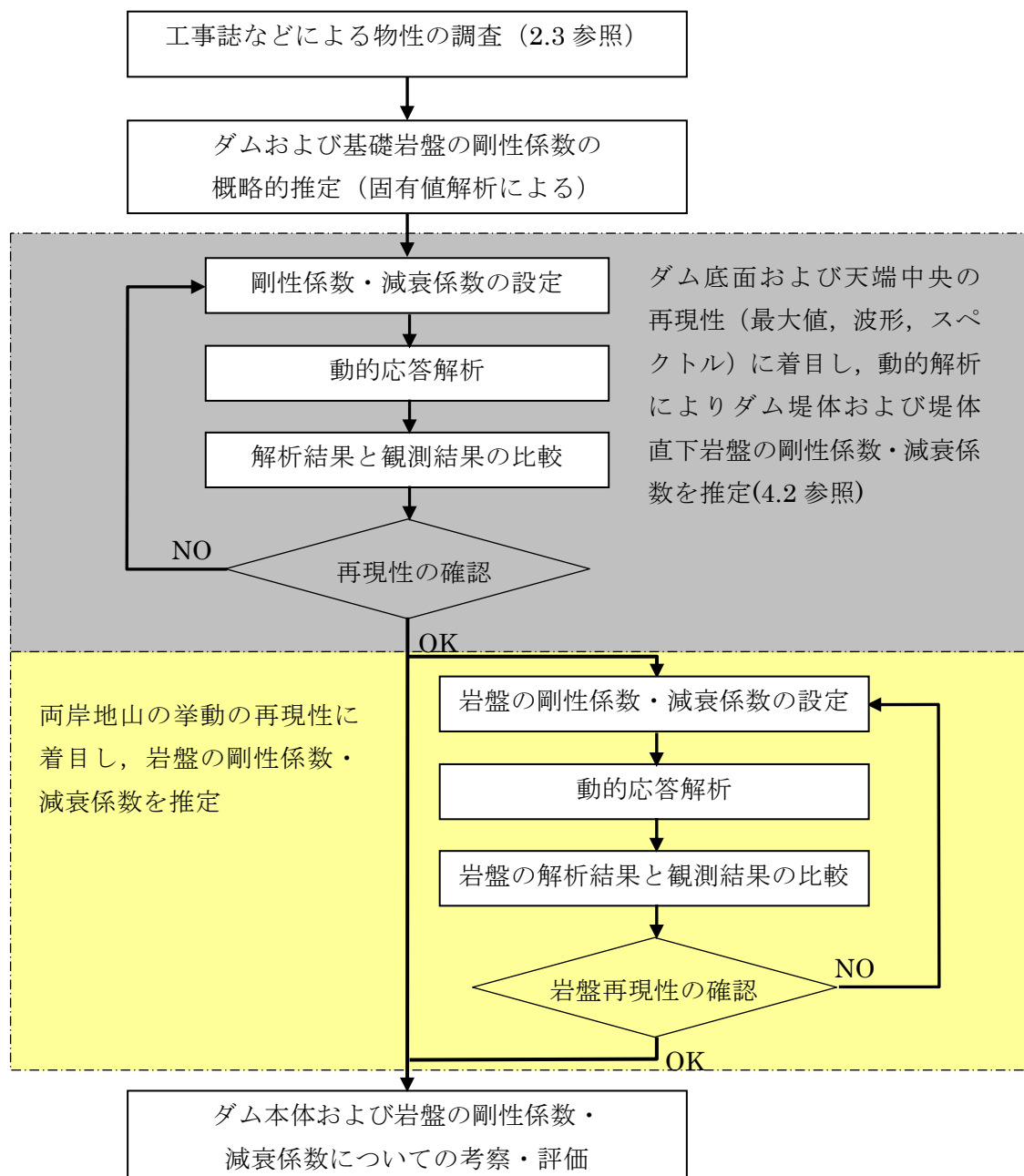


図 5-1 ダム本体および基礎岩盤物性の同定手順

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

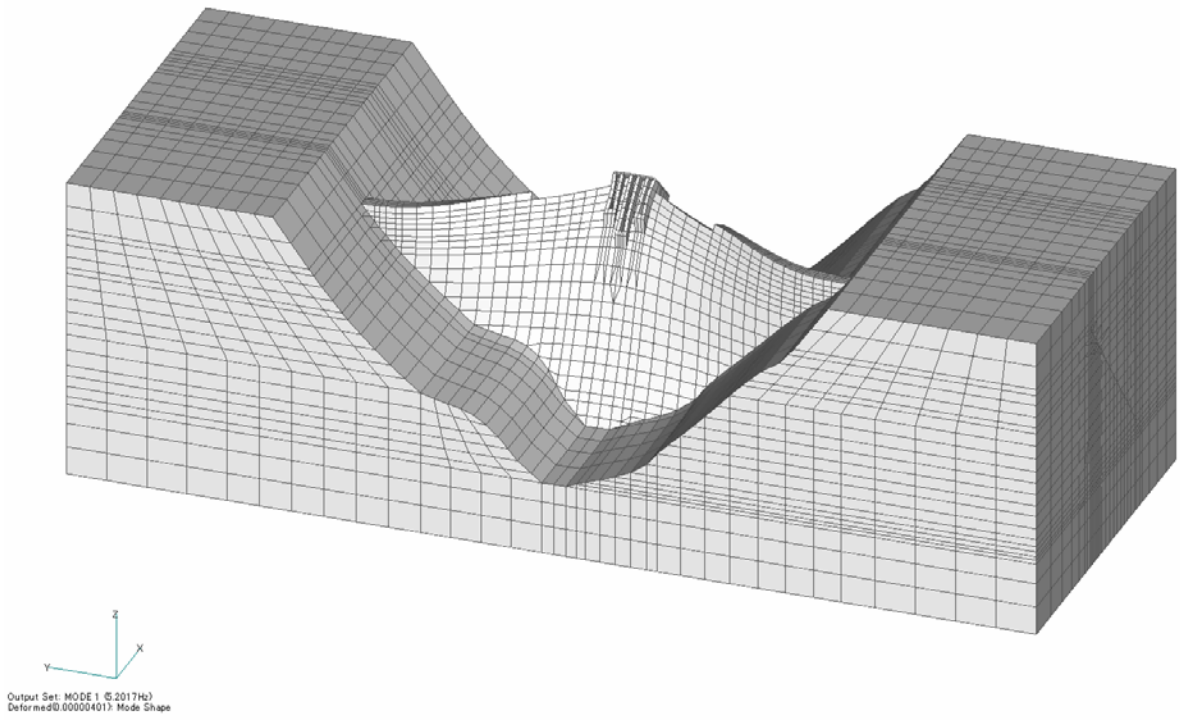


図 5-2 (a) 1 次固有振動モード (5.202Hz)

v1

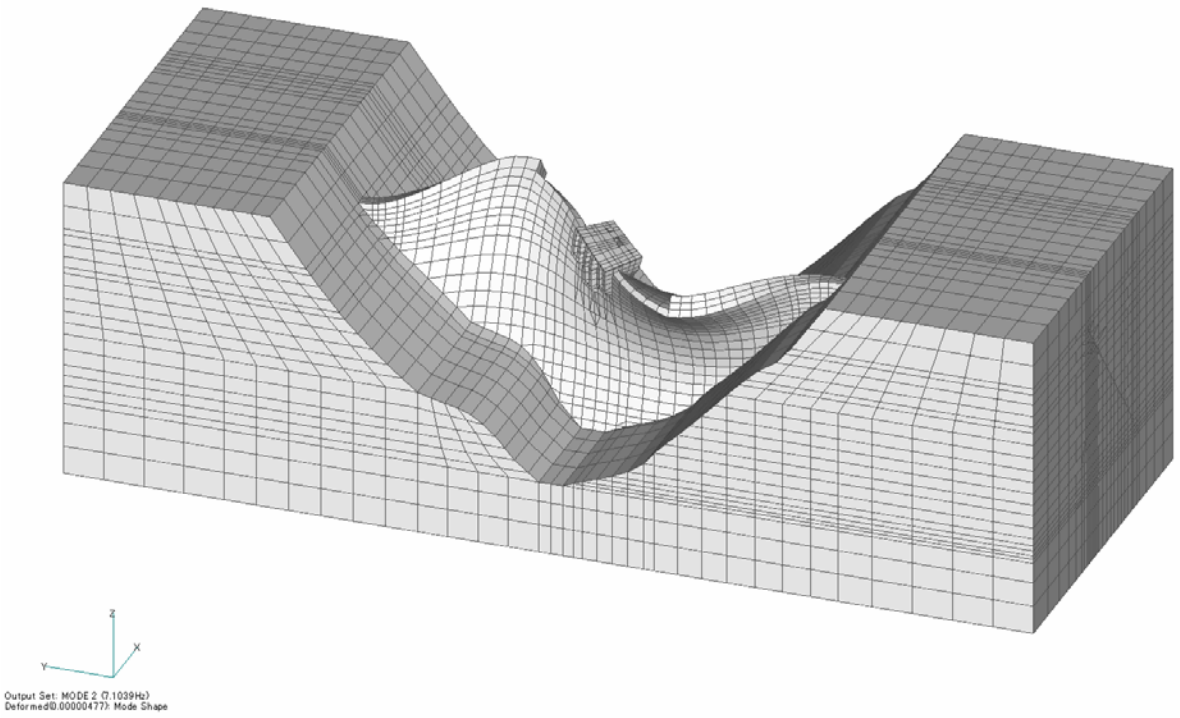


図 5-2 (b) 2 次固有振動モード (7.104Hz)

v1

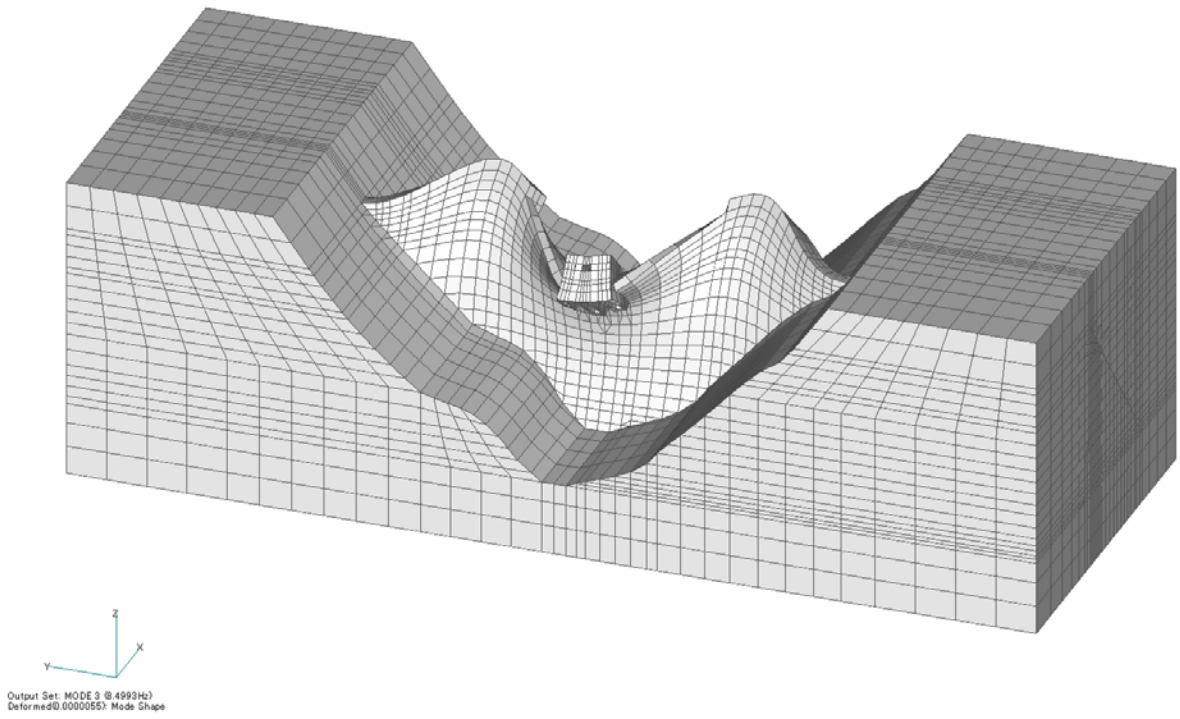


図 5-2(c) 3次固有振動モード(8.499Hz)

v1

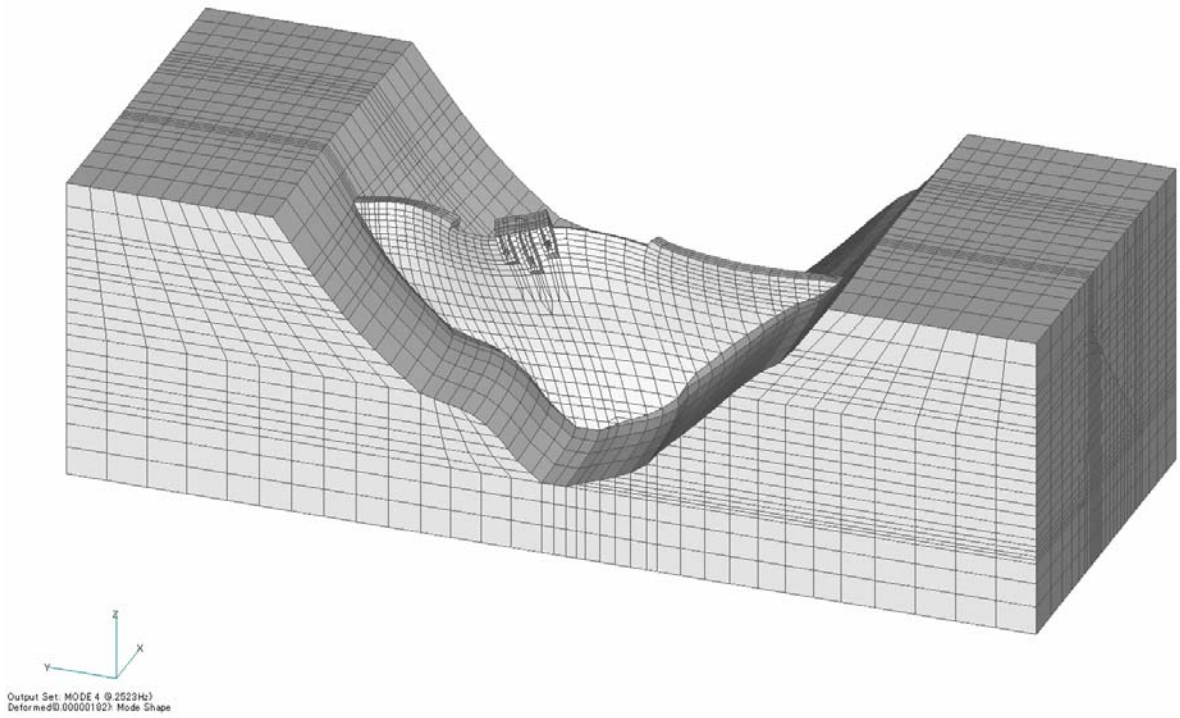


図 5-2(d) 4次固有振動モード(9.252Hz)

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。

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

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

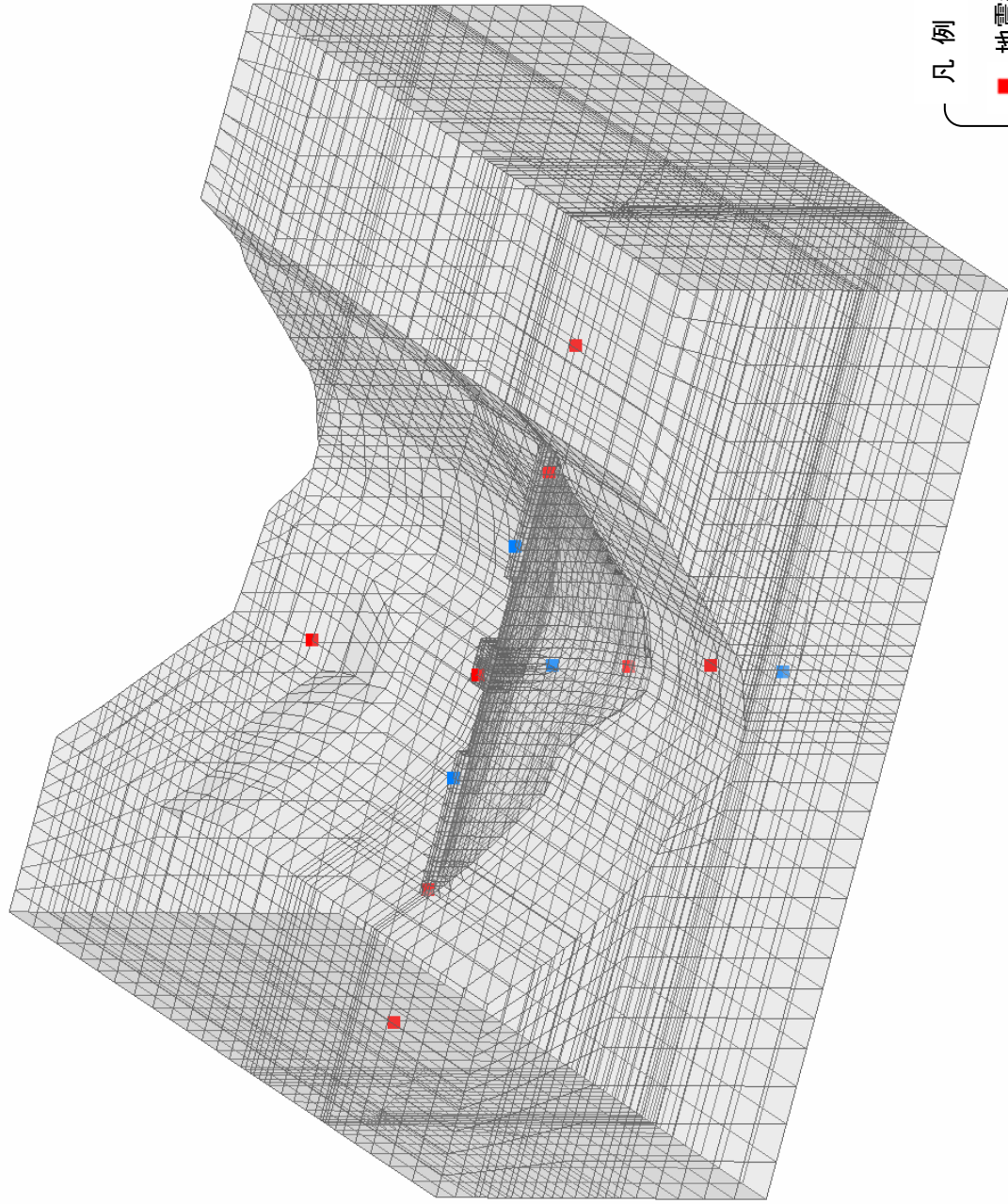
$$W_{FZ} \text{ と } R_Z \rightarrow T_{ZZ}$$

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)

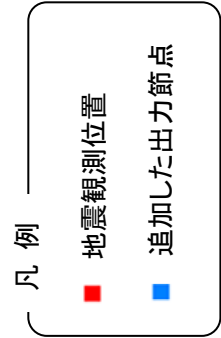
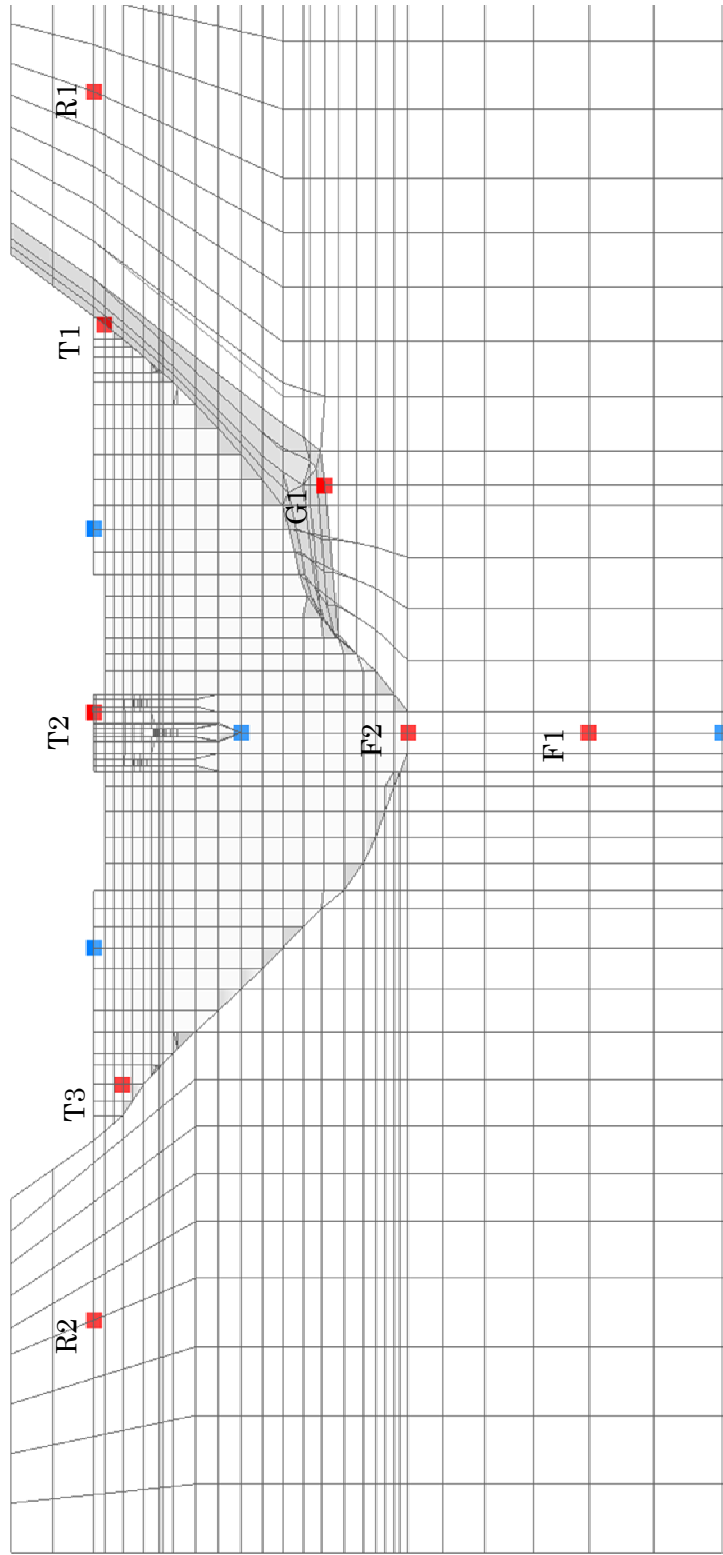


図 5-3(b) 地震計位置および追加した出力節点（下流側正面図）

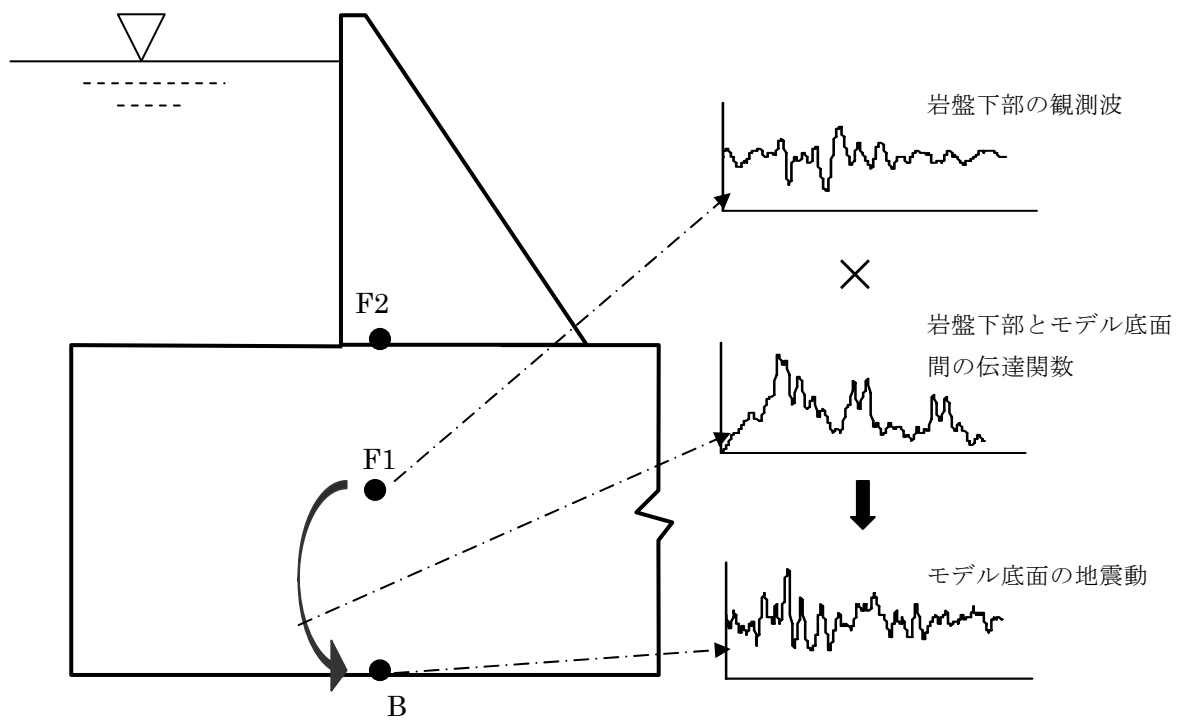


図 5-4 三方向同時加振の動的解析による引戻し計算イメージ図

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

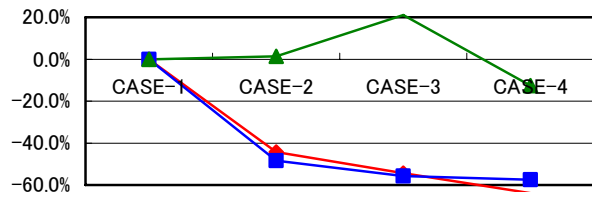
CASE 番号		弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰係数 (%)	物性調整理由
CASE-1	ダム本体	33000.0	2.44	0.20	2	予備解析（固有値解析）により概略的に推定された物性値を動的再現解析の初期物性値として用いる
	岩盤	30000.0	2.74	0.30	2	
CASE-2	ダム本体	33000.0	2.44	0.20	1	CASE-1 では、ダム本体の上下流方向の加速度増幅率が表 5-6 より 9.5（観測値 11.0）であり、堤体の伝達関数のピーク振動数もほぼ観測結果と一致している。よって、ダム本体の剛性係数をキープしながら、堤体の増幅率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	

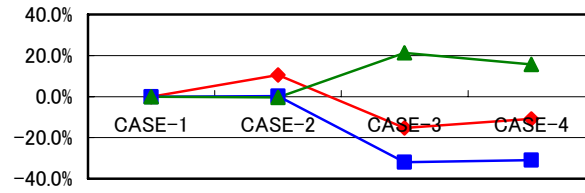
表 5-6 物性同定解析における加速度応答の最大値と観測値の比較

	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	

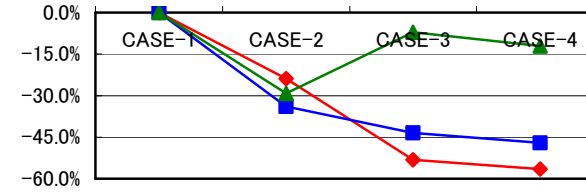


CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
-	-44.2%	-54.3%	-63.8%
-	-48.4%	-55.7%	-57.4%
-	1.4%	21.0%	-12.5%

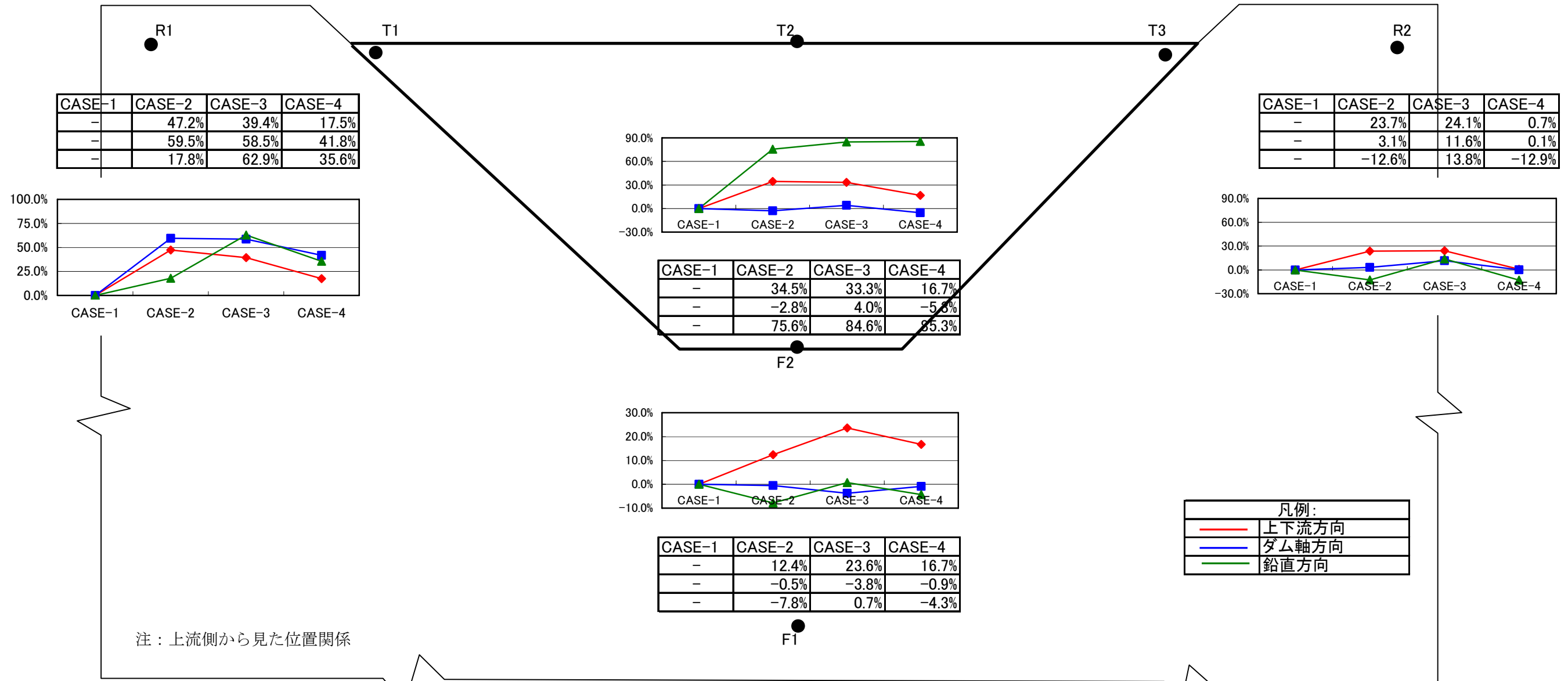
上下流
ダム軸
鉛直



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%



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

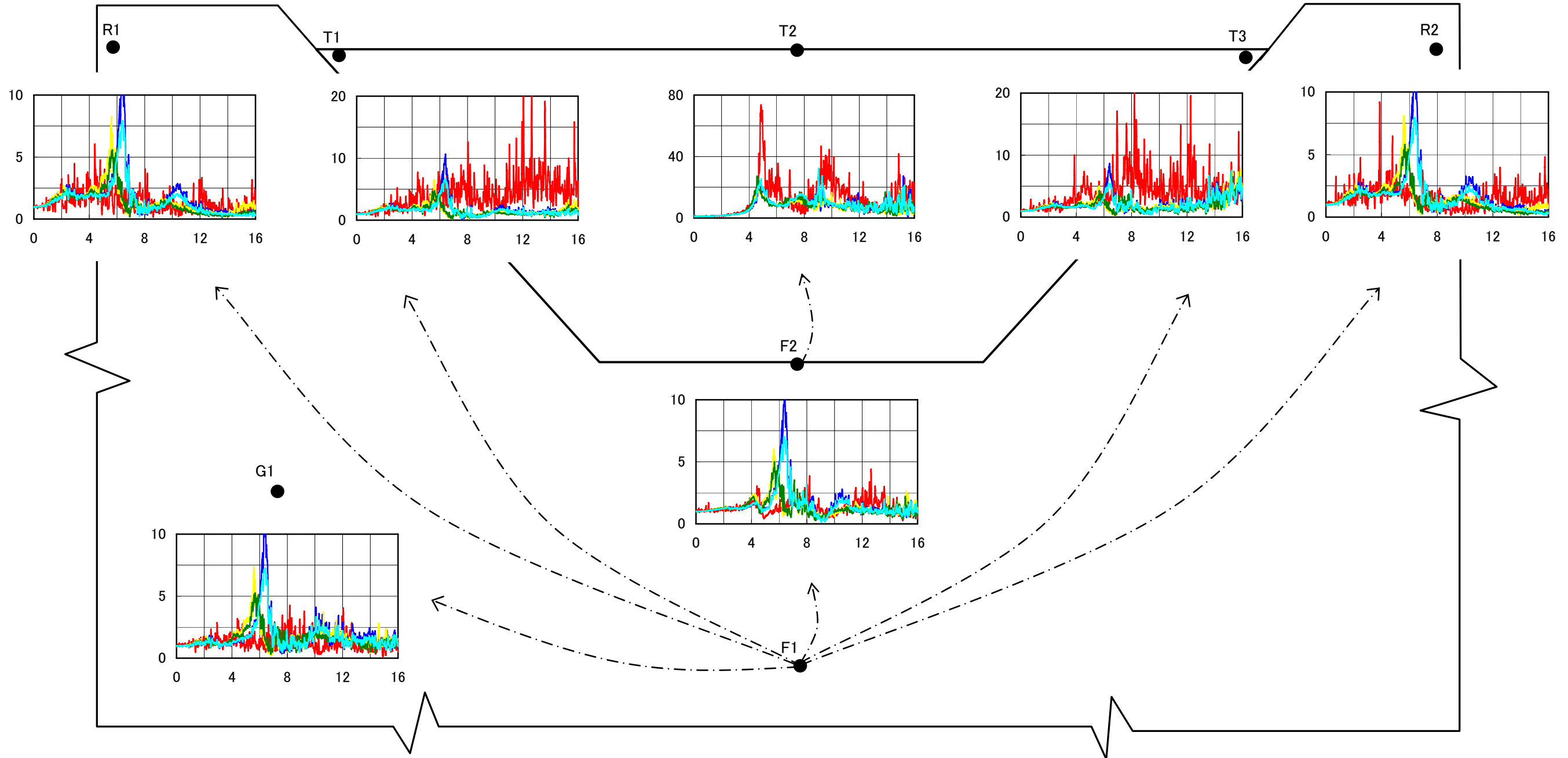


図5-6(a) 上下流方向の伝達関数の比較図(上流側より)

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

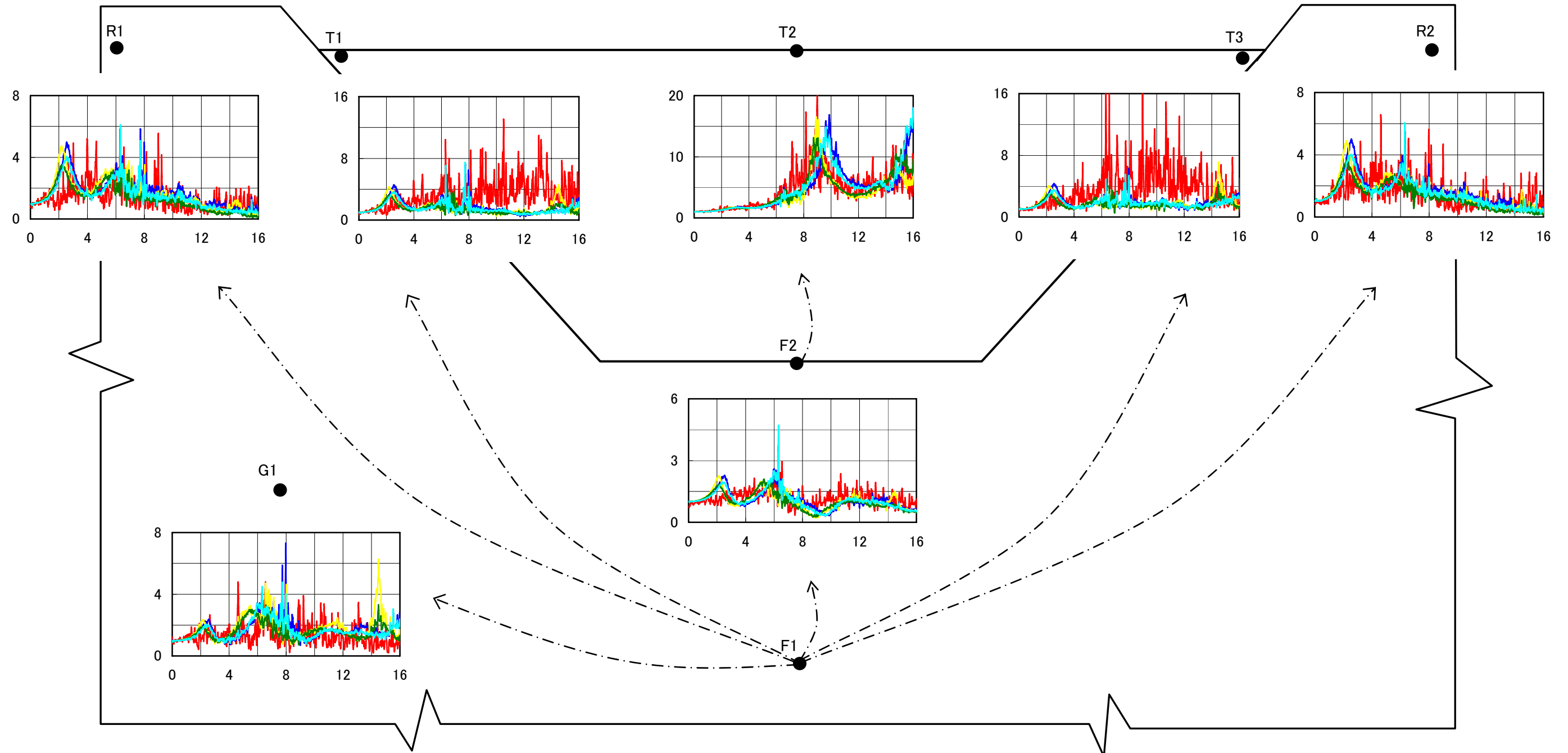


図5-6(b) ダム軸方向の伝達関数の比較図(上流側より)

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				

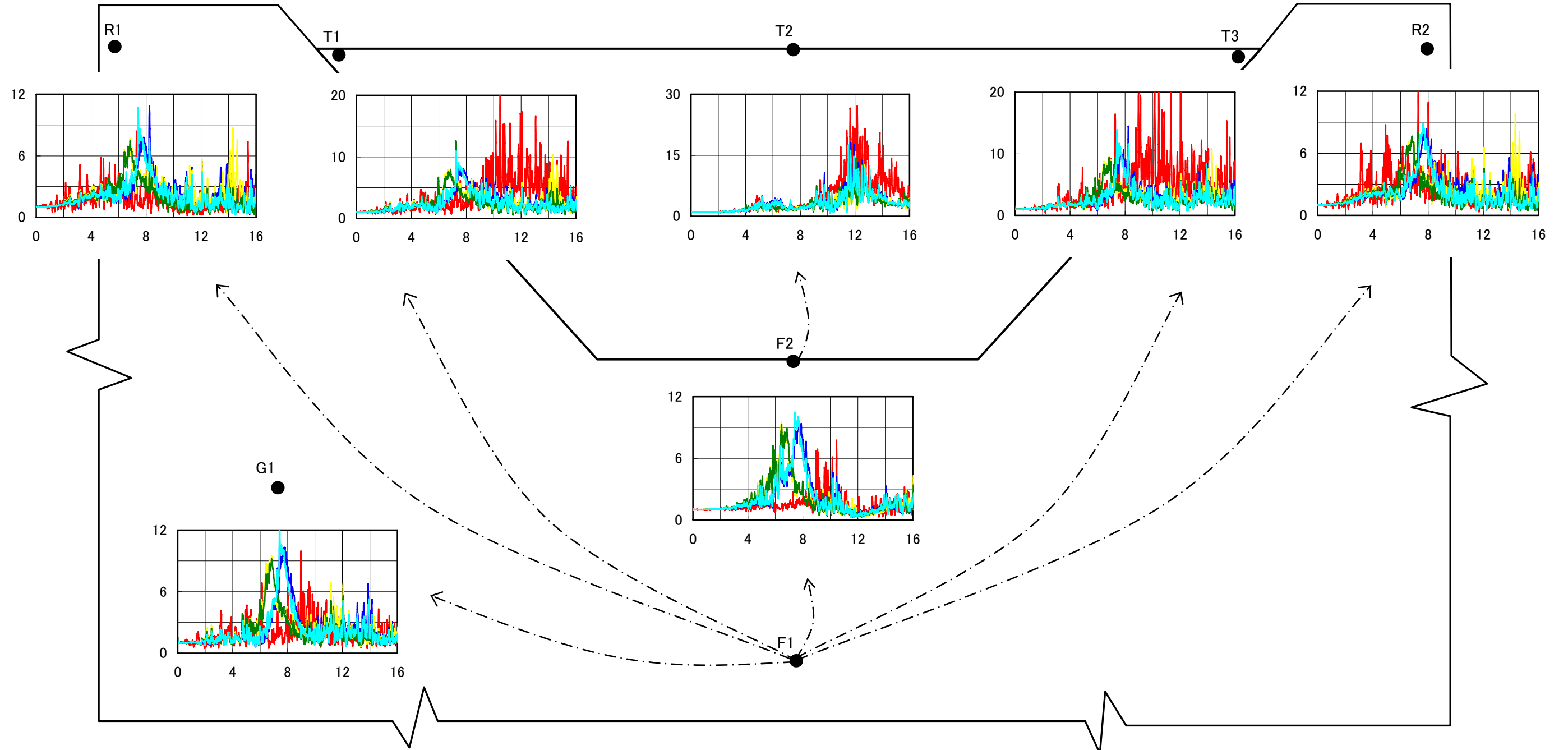


図5-6(c) 鉛直方向の伝達関数の比較図(上流側より)

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。

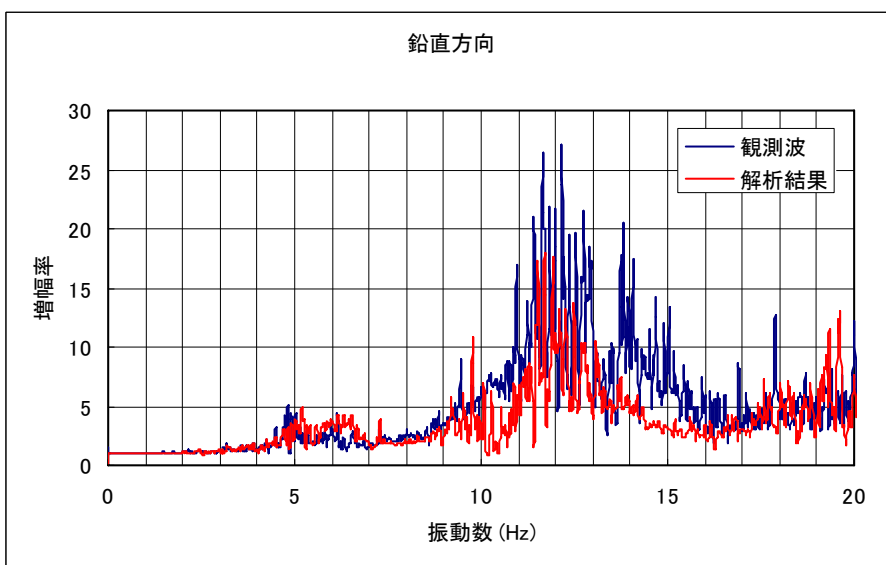
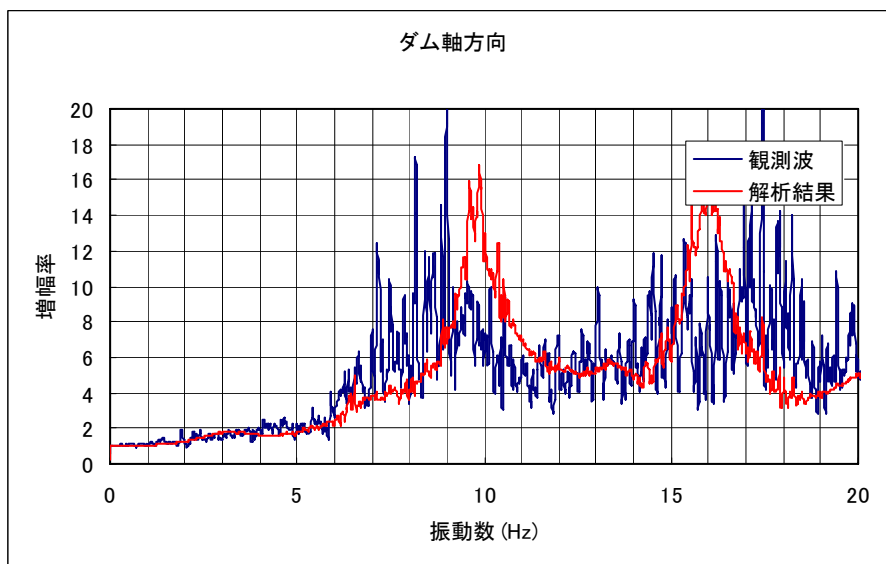
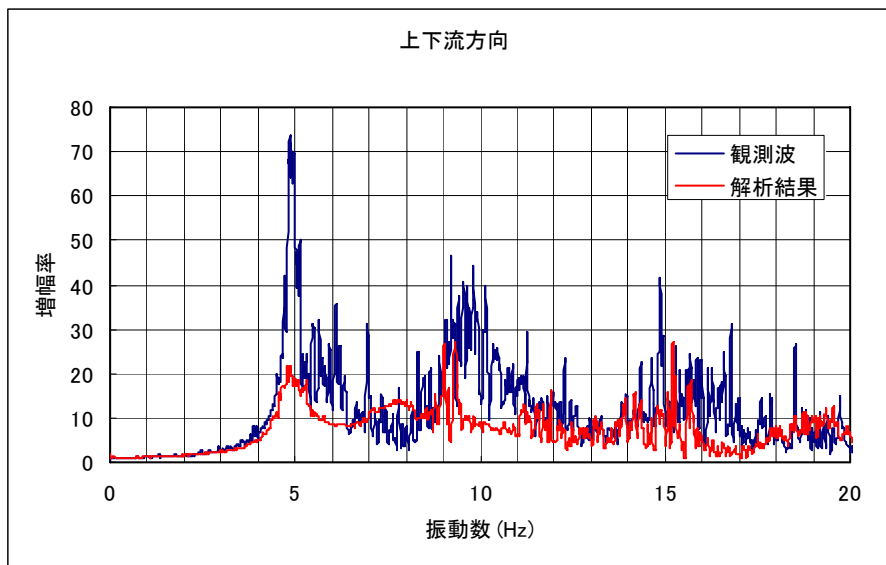


図5-7(a) 岩盤上部(F2)に対するダム天端中央(T2)の伝達関数

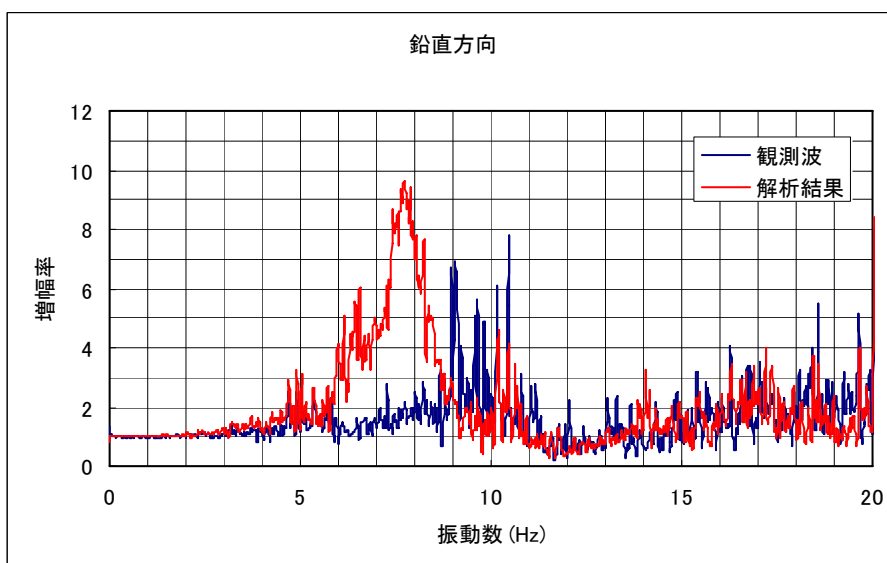
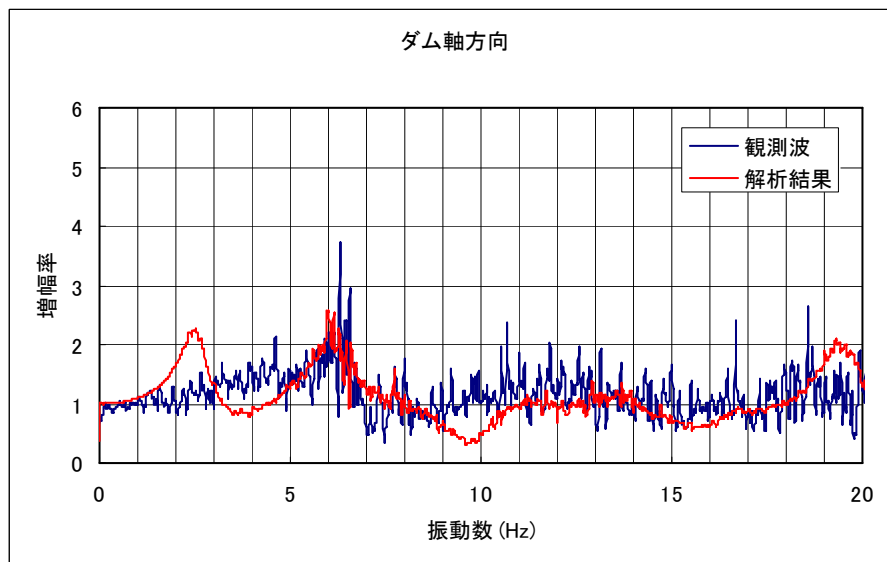
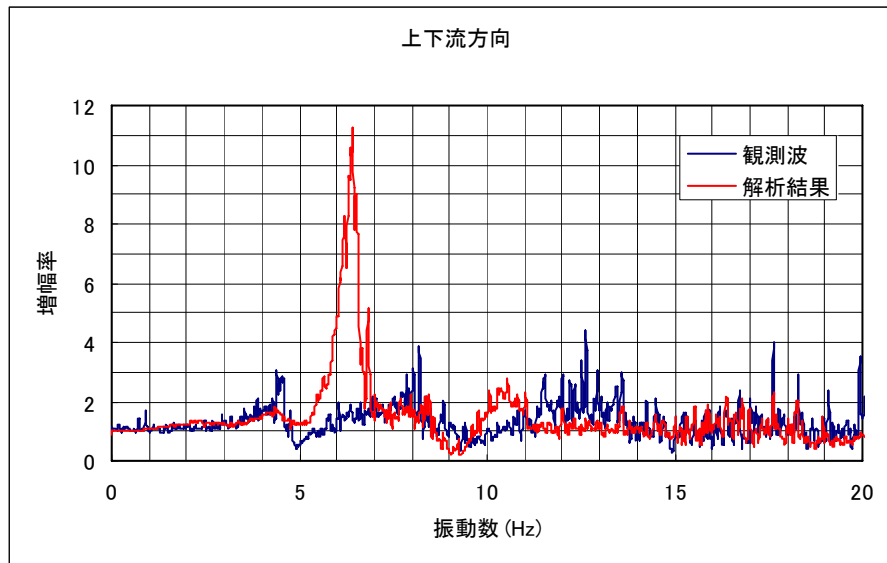


図5-7(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

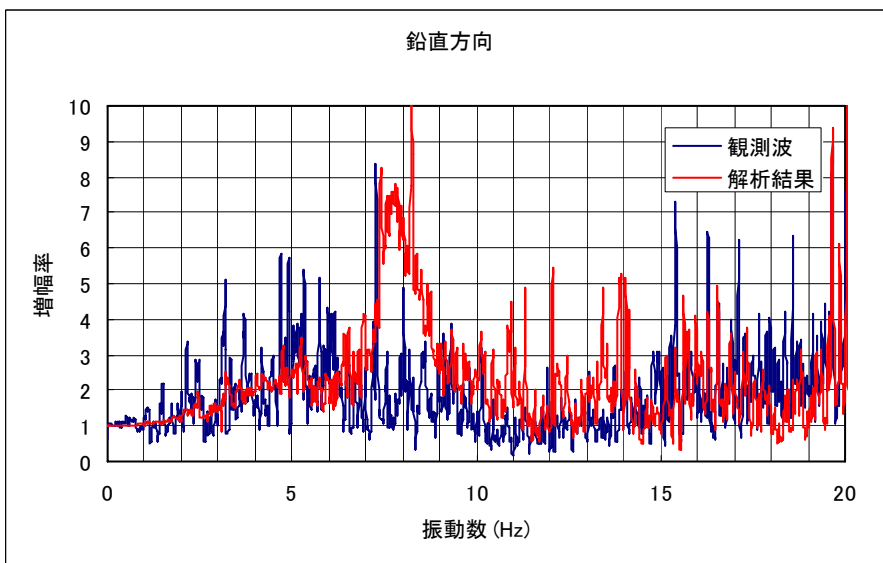
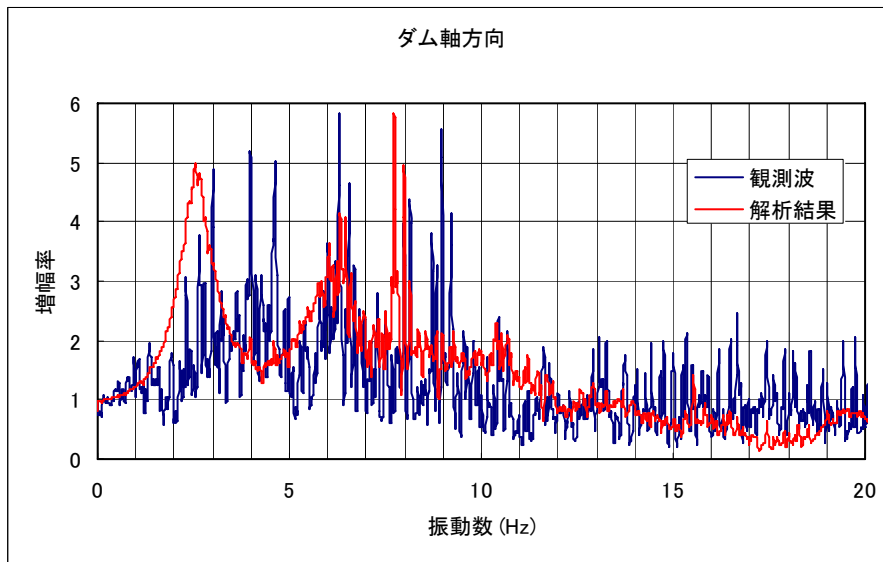
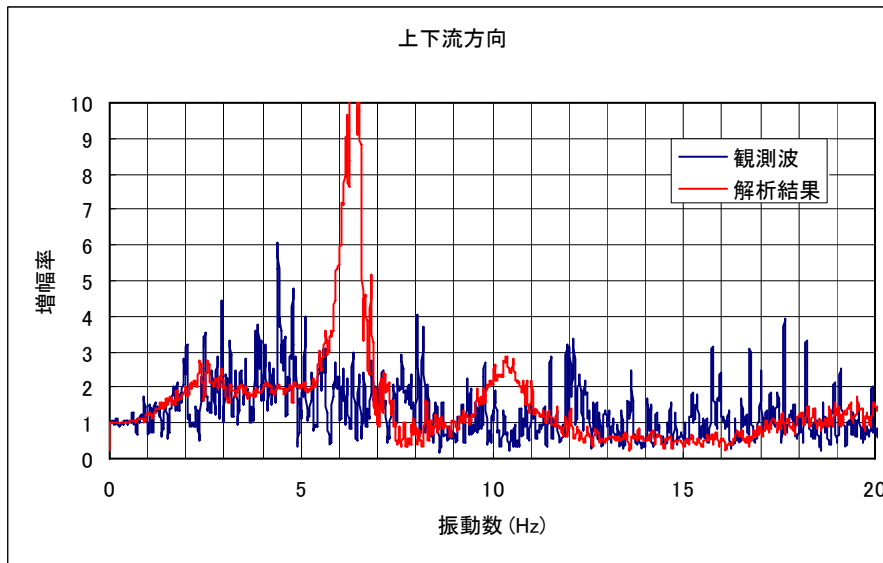


図5-7(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

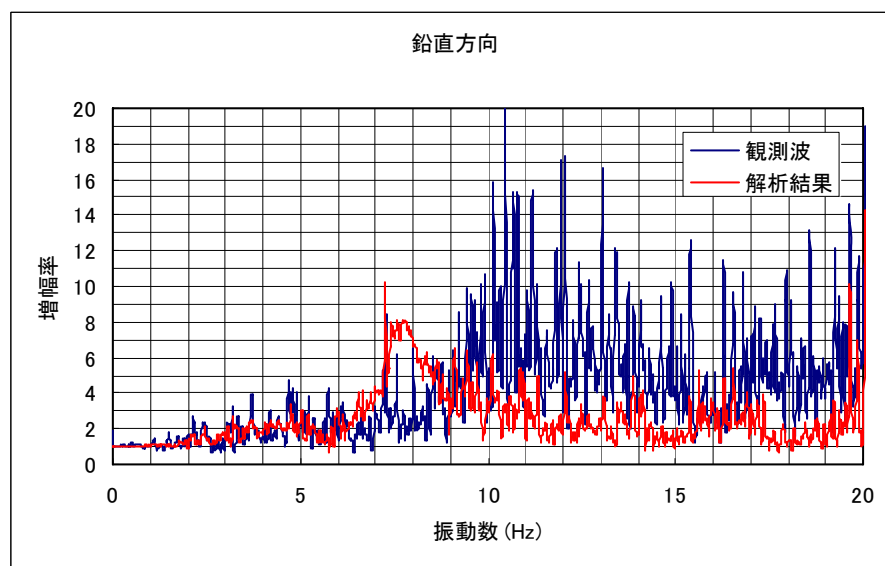
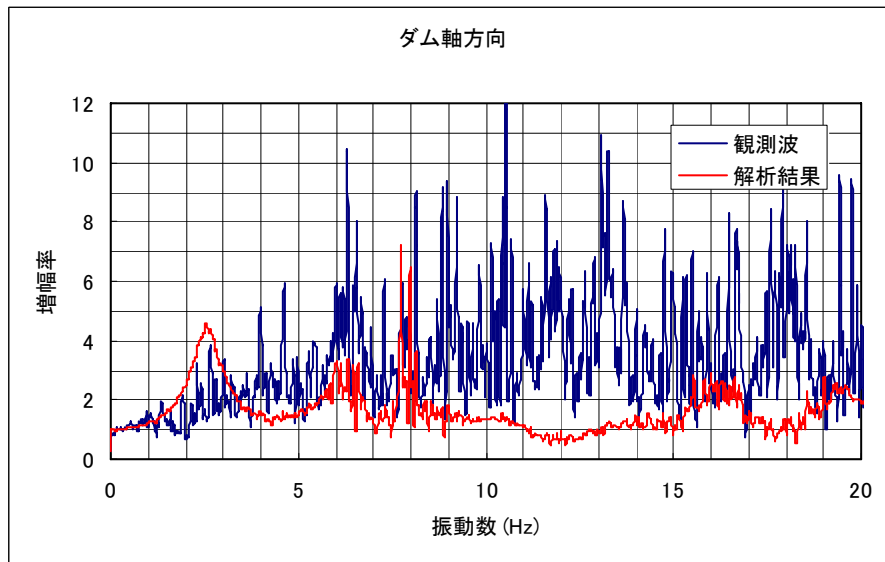
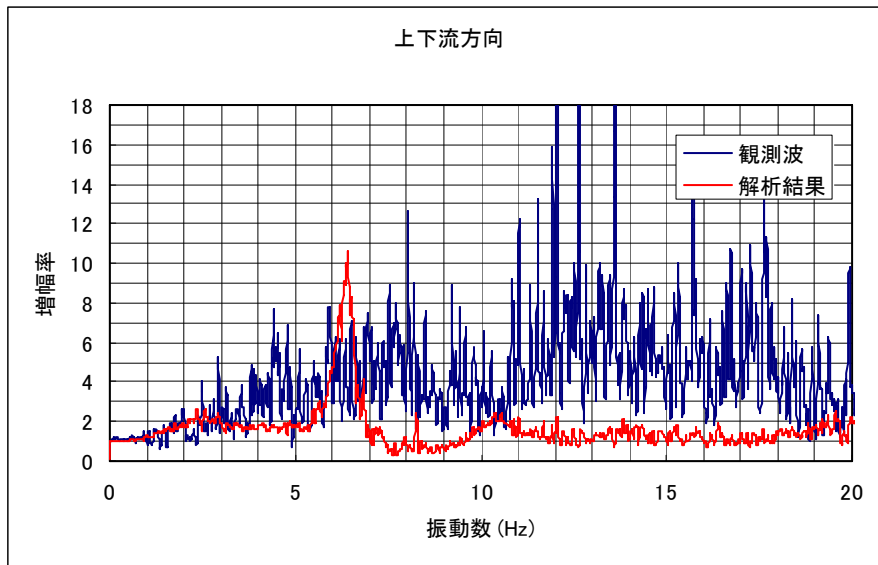


図5-7(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

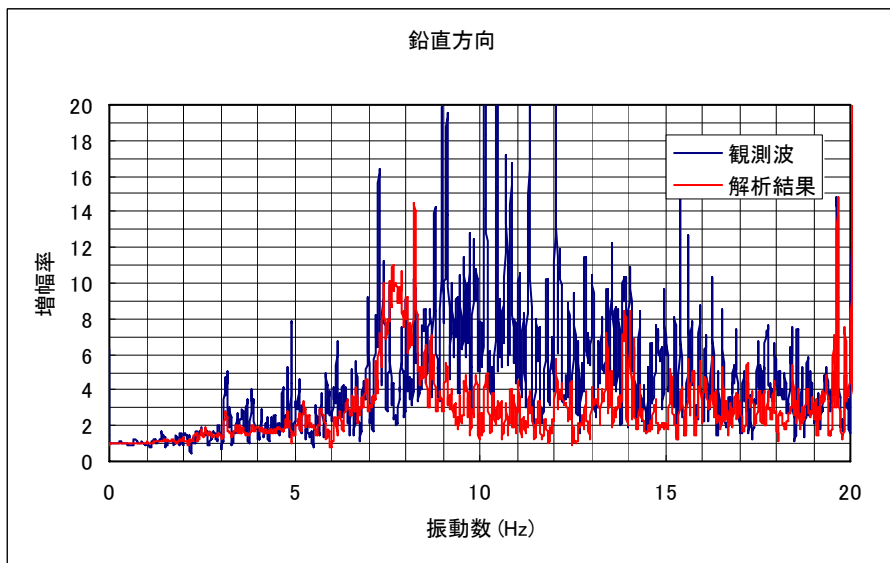
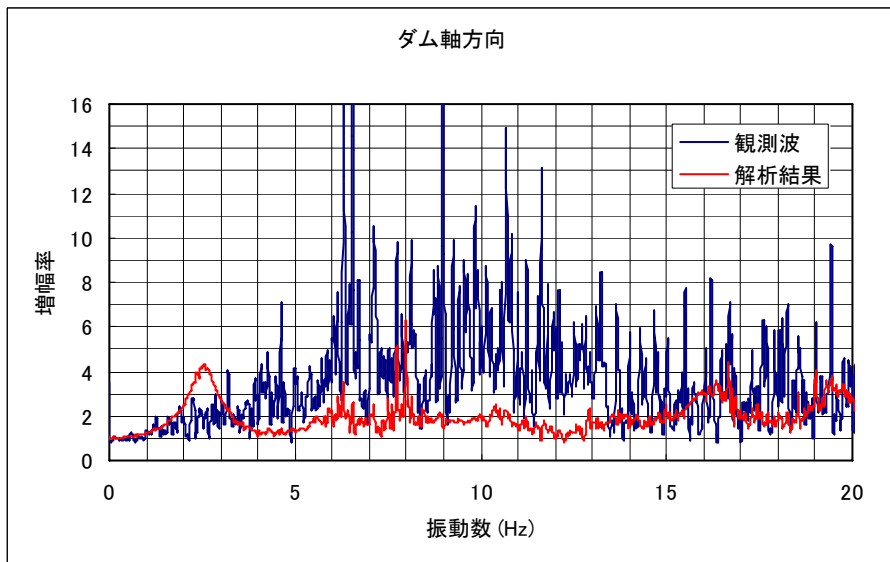
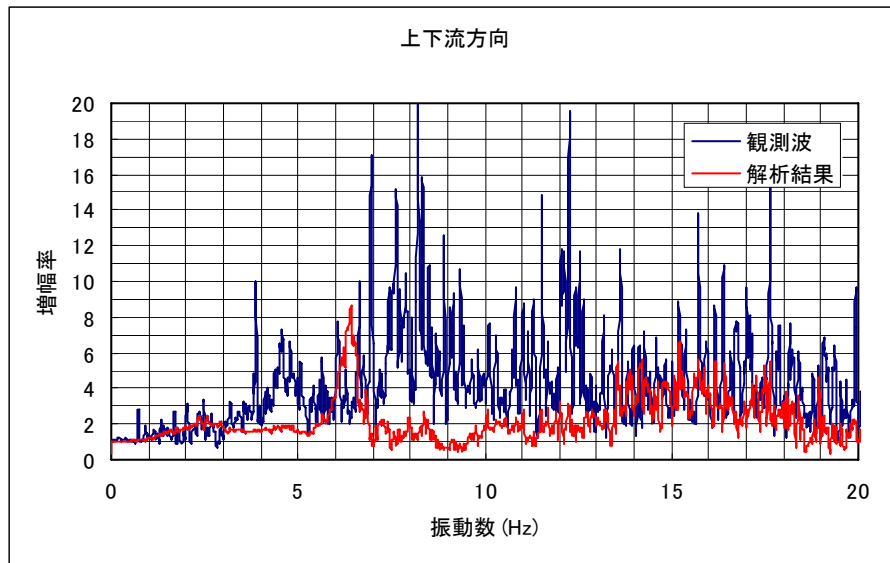


図5-7(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

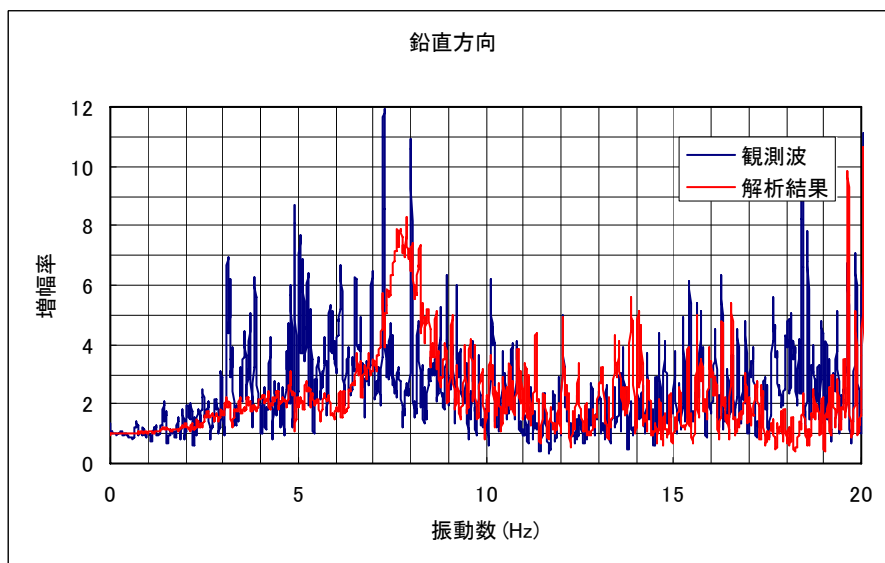
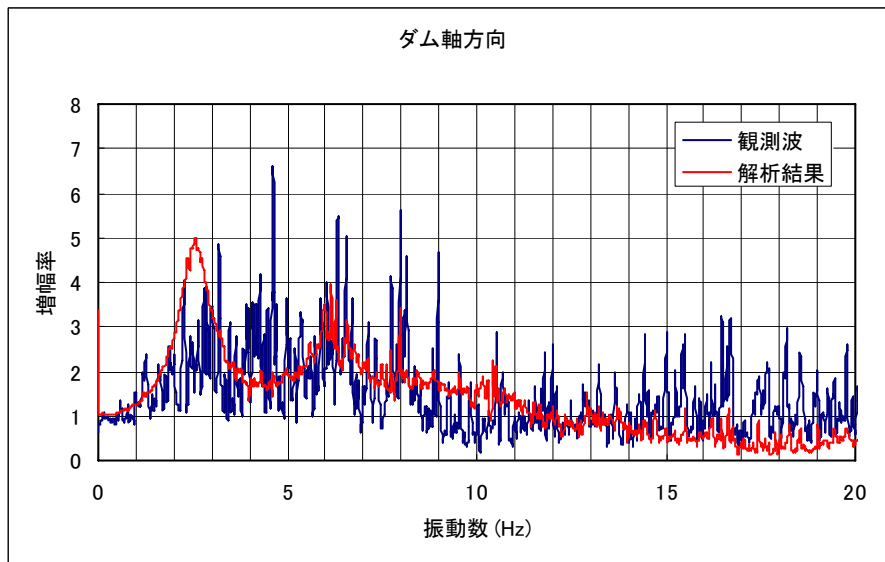
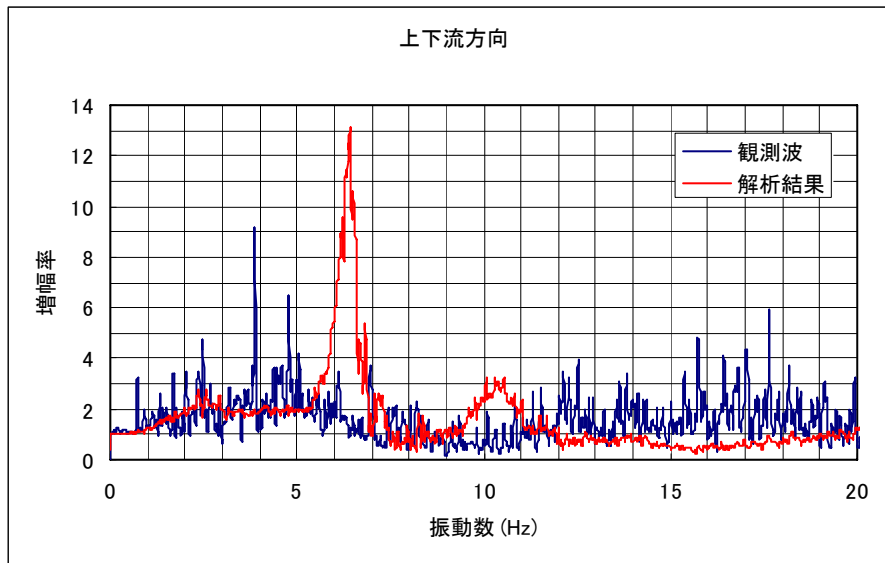


図5-7(f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2)の伝達関数

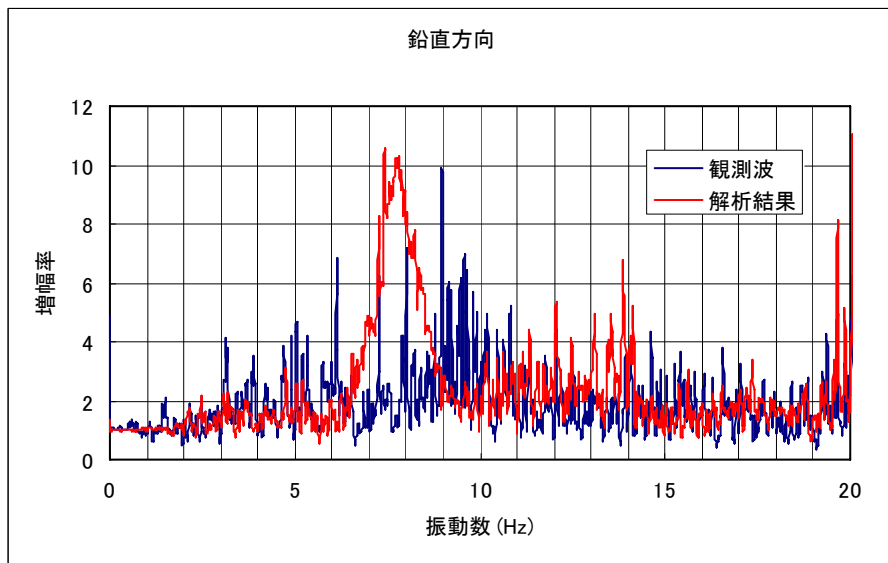
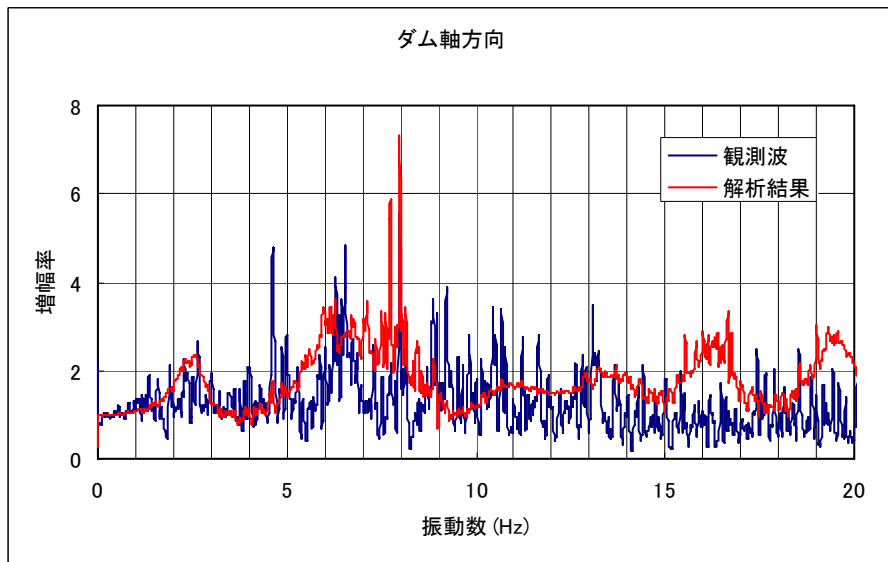
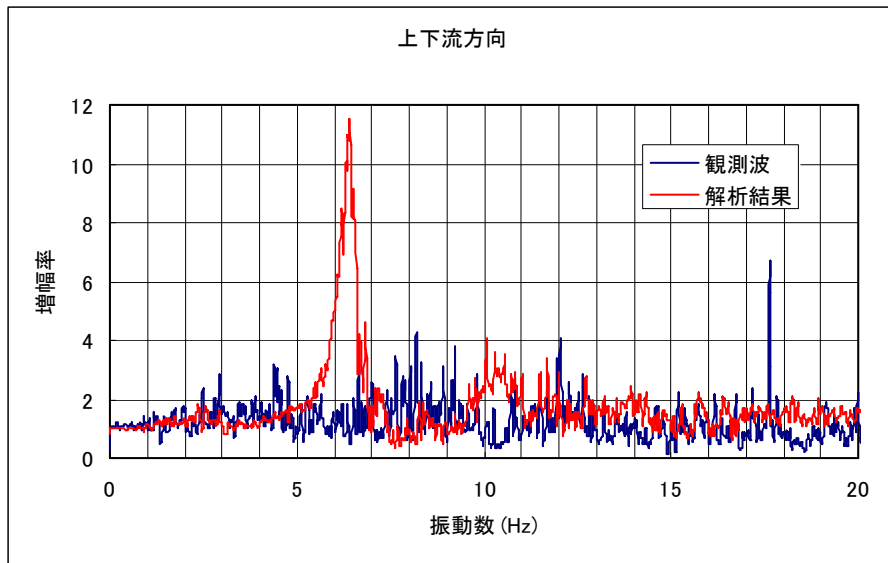


図5-7(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

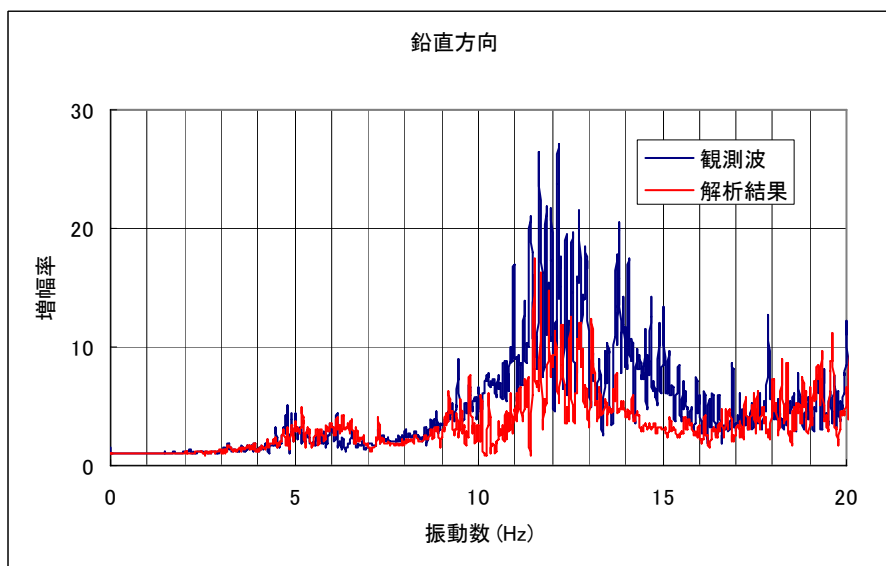
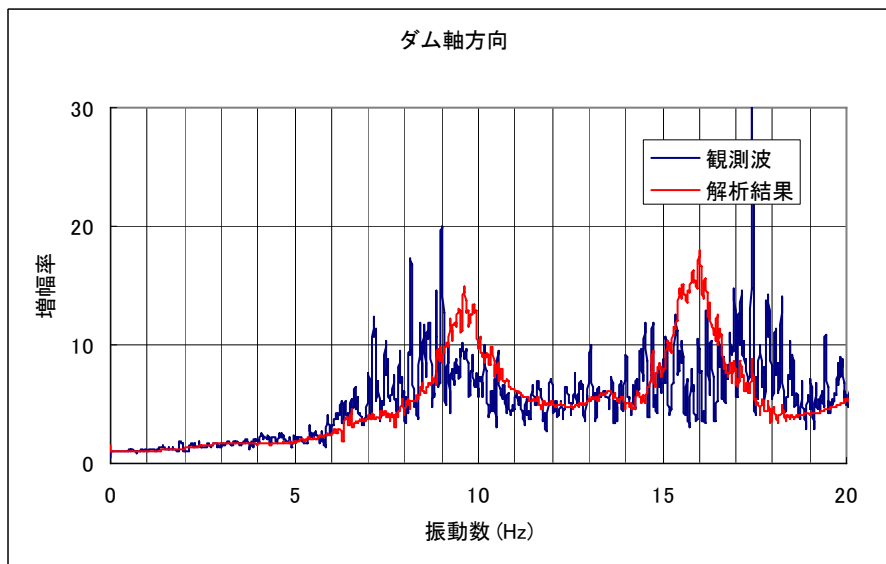
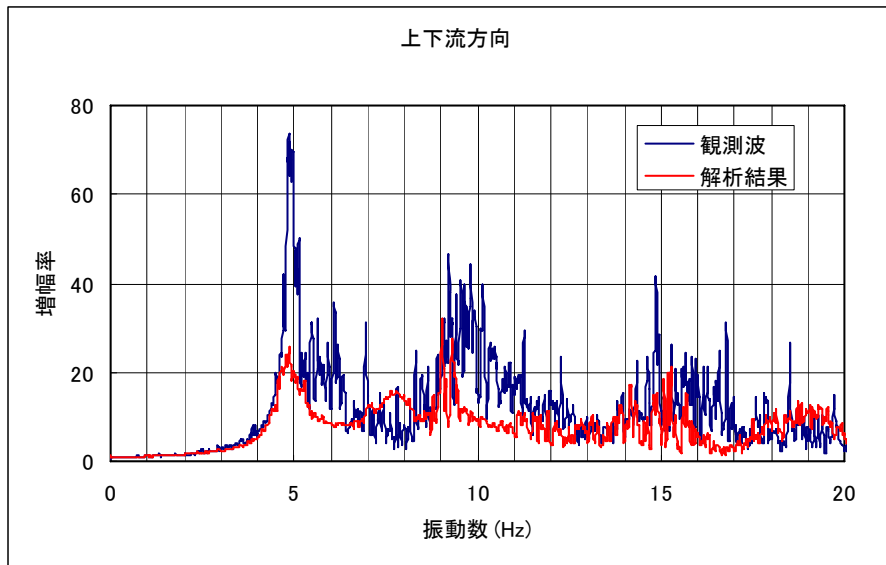


図5-8(a) 岩盤上部(F2)に対するダム天端中央(T2)の伝達関数

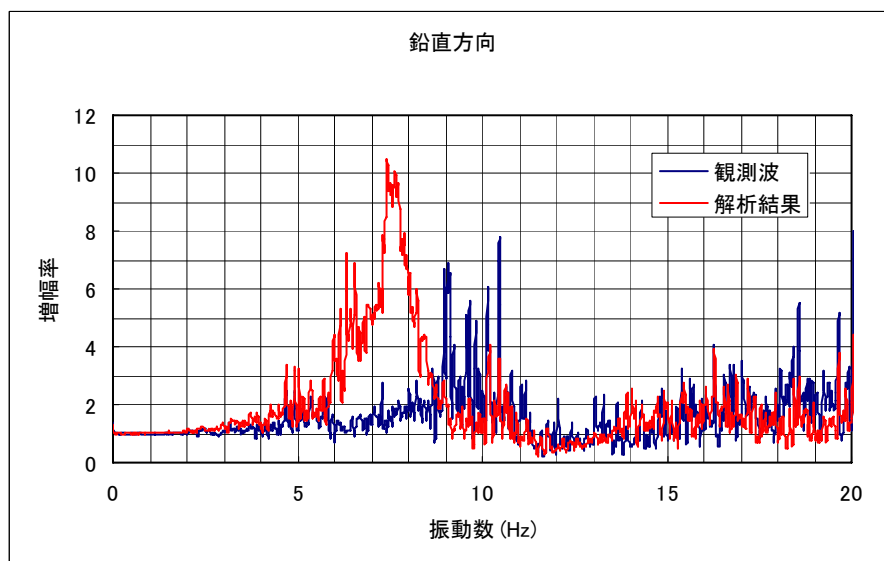
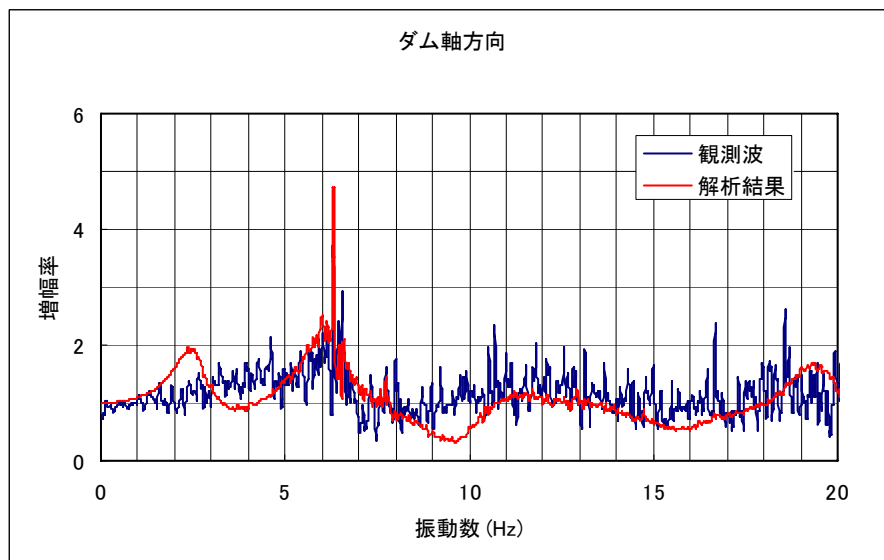
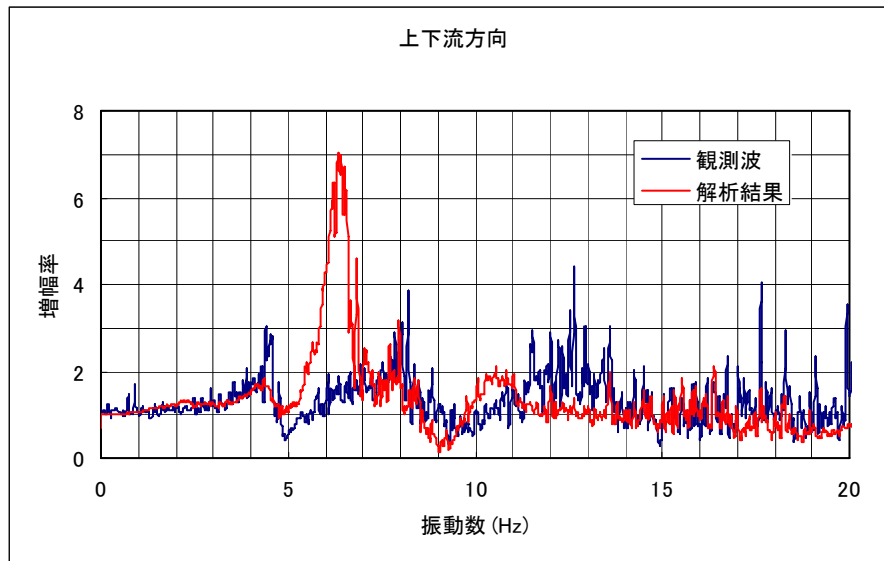


図5-8(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

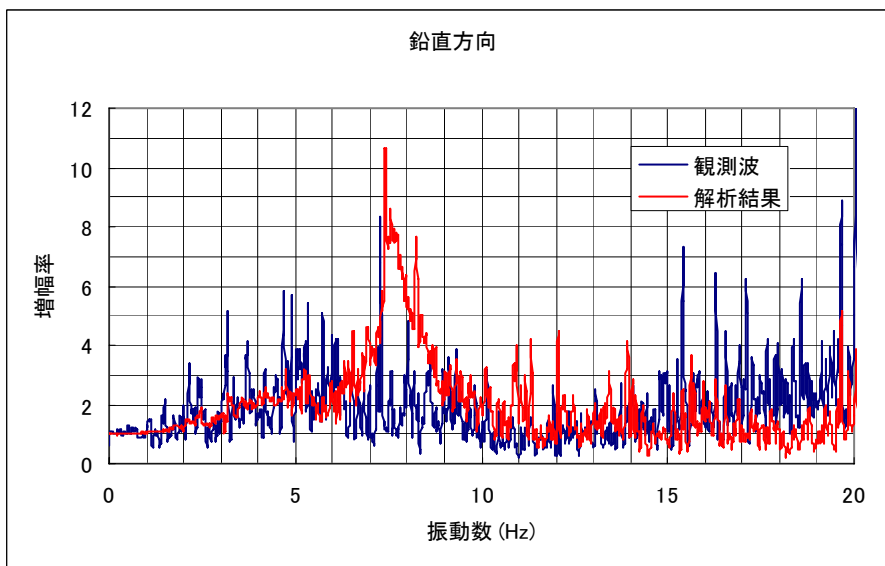
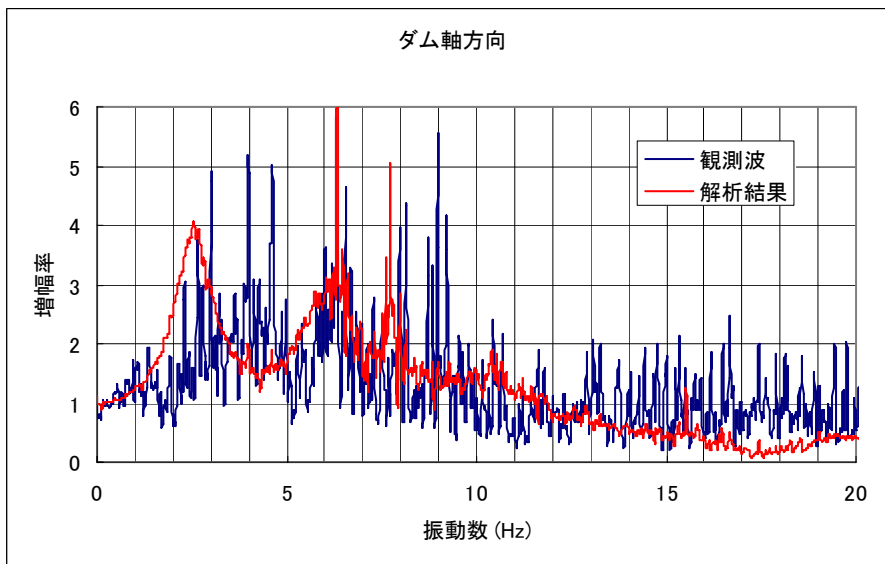
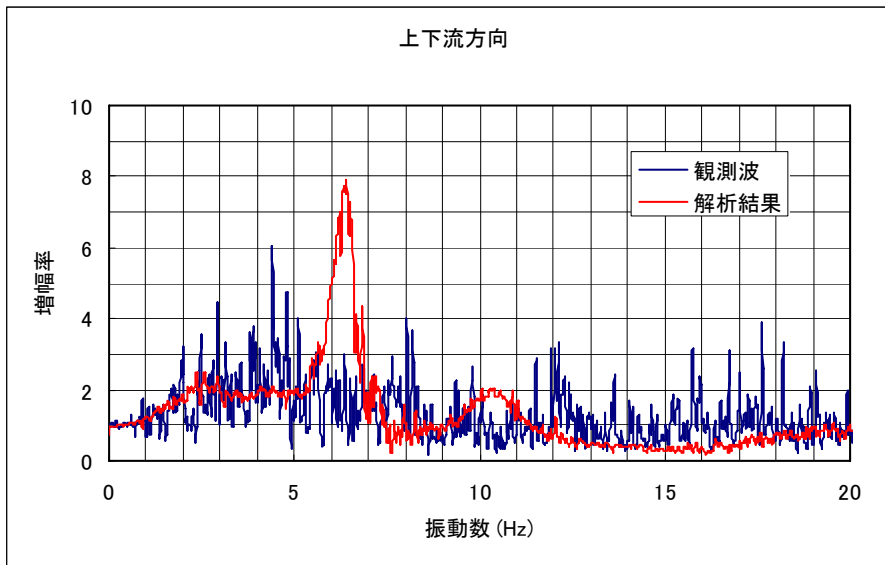


図5-8(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

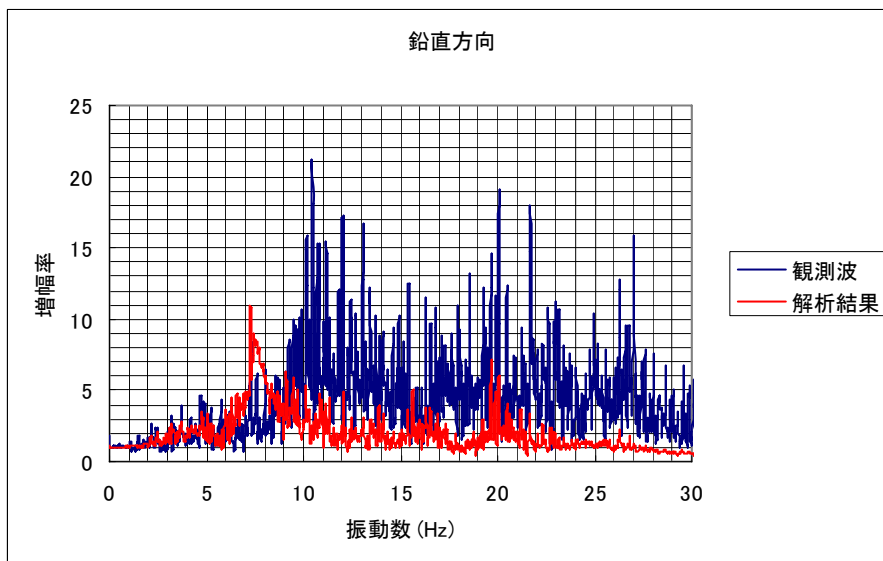
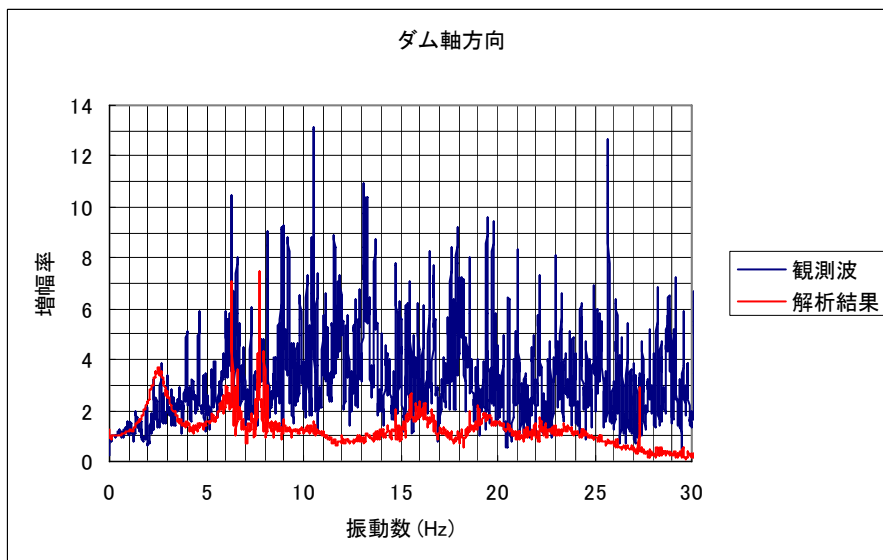
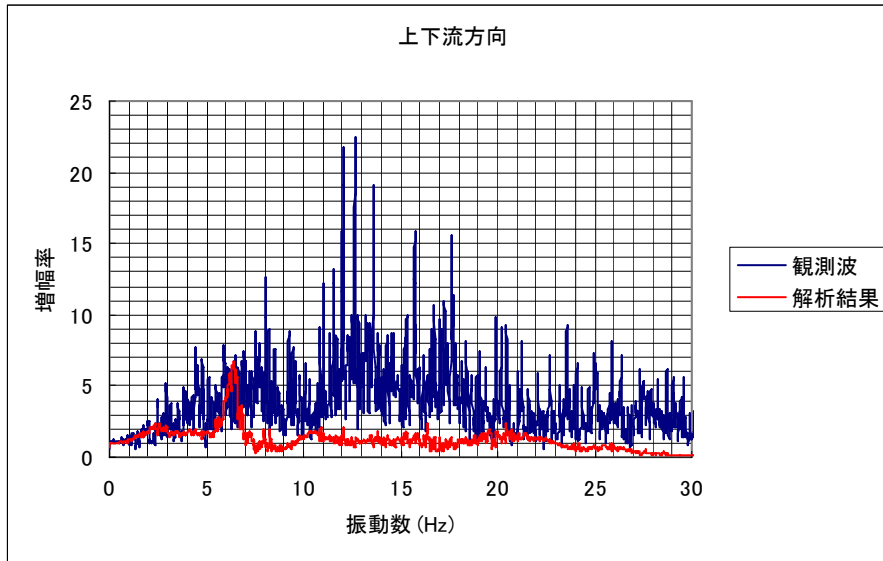


図5-8(d) T1のF1に対する伝達関数 (堤体左岸部)

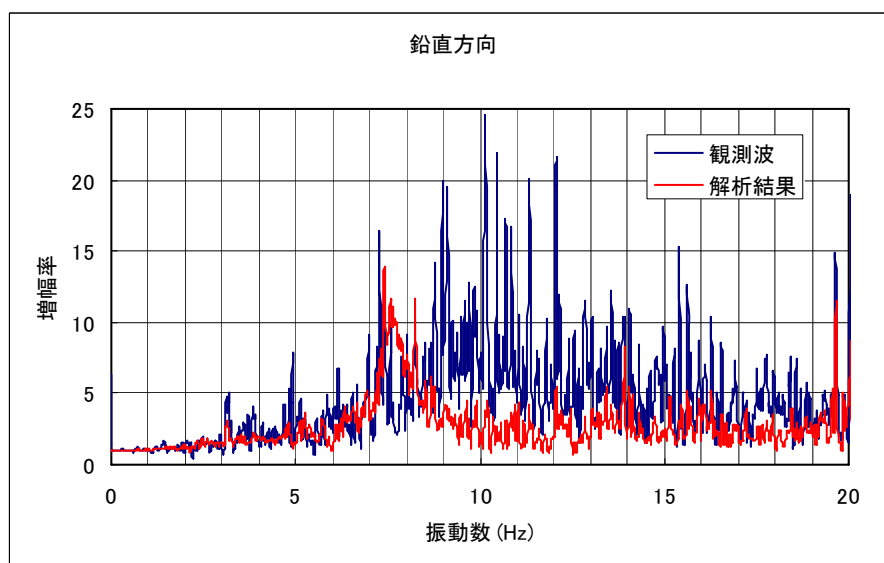
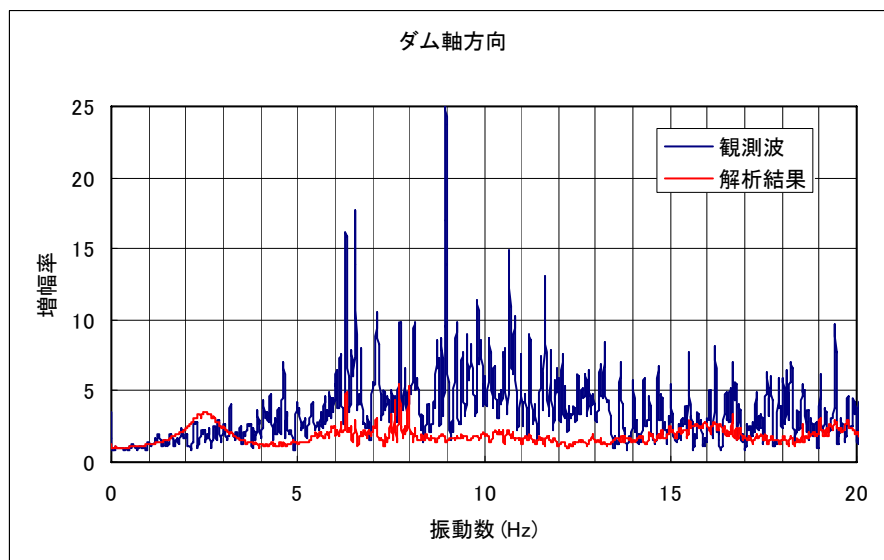
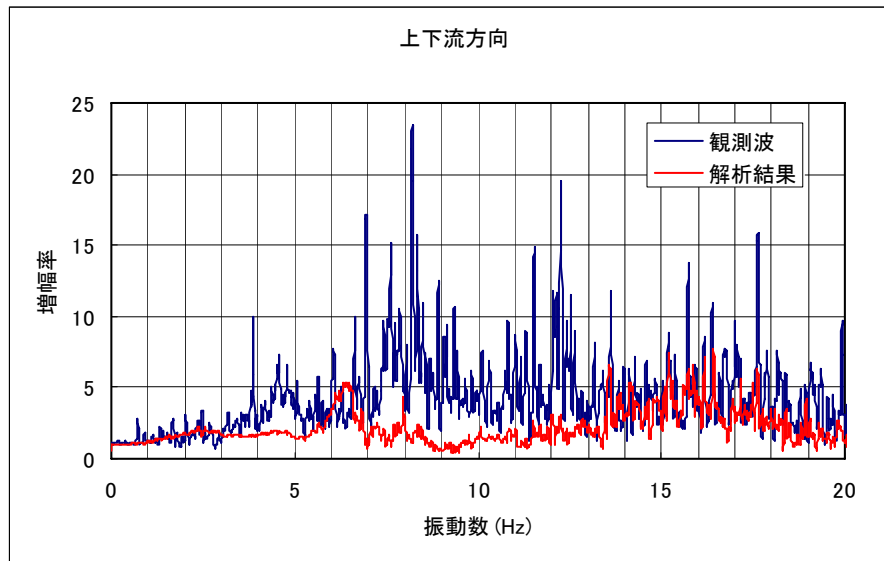


図5-8(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

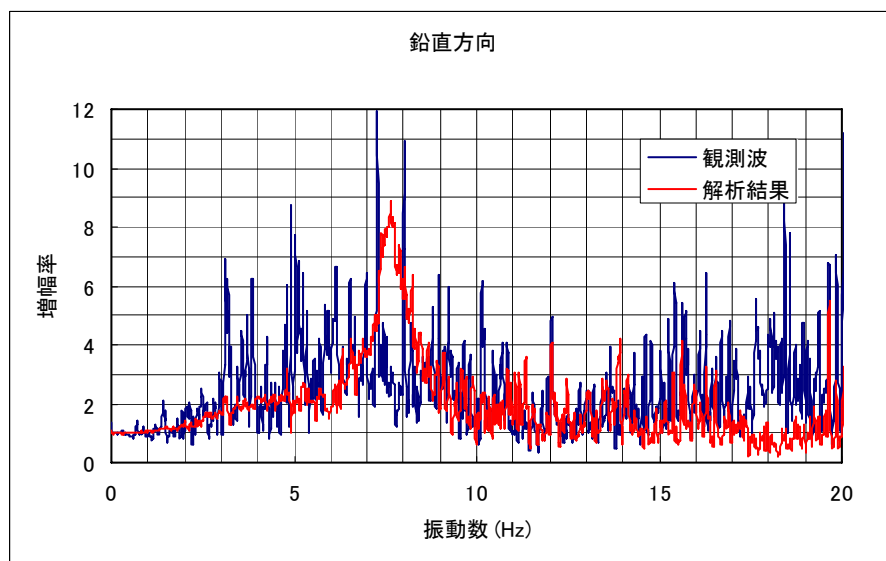
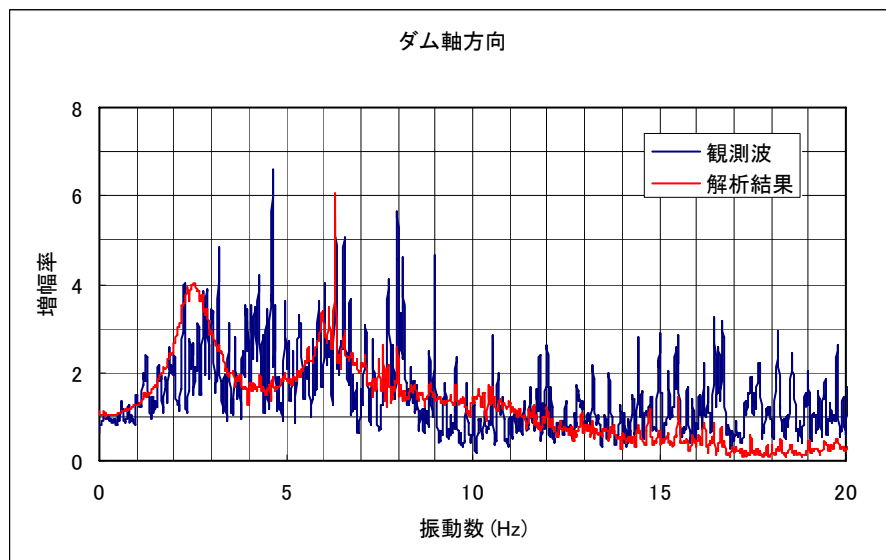
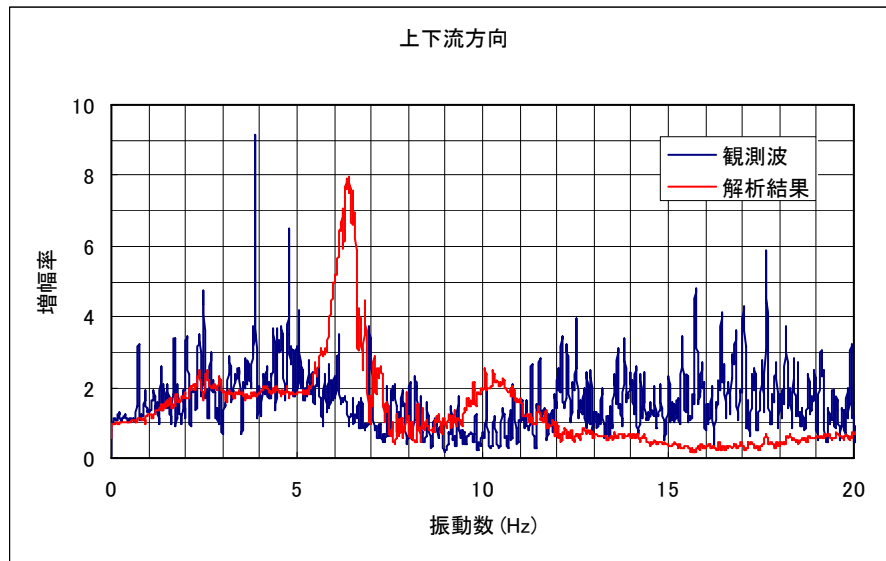


図5-8(f) 岩盤下部 (F1) に対する右岸リムトンネル内 (R2) の伝達関数

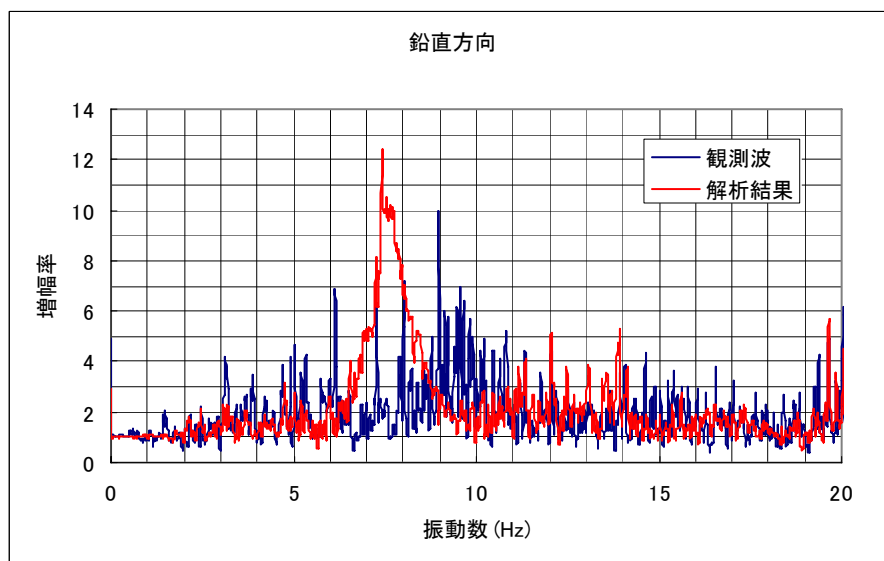
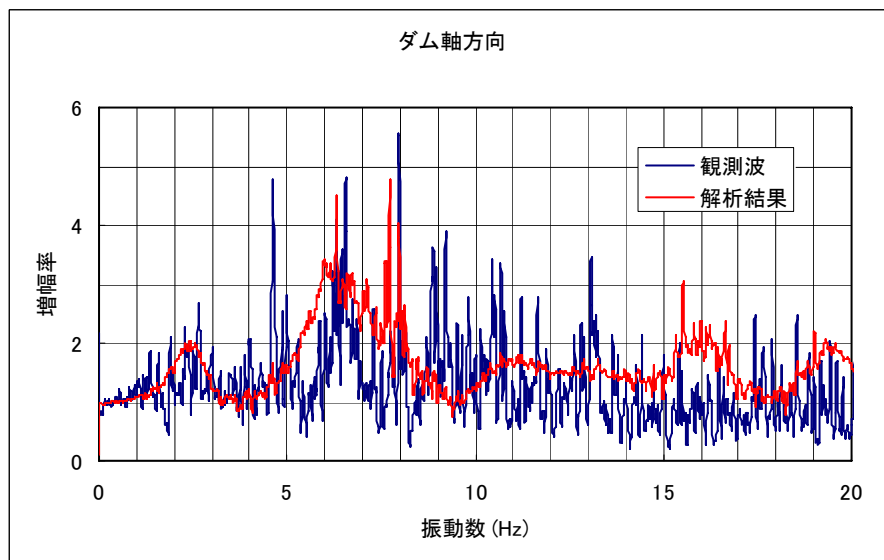
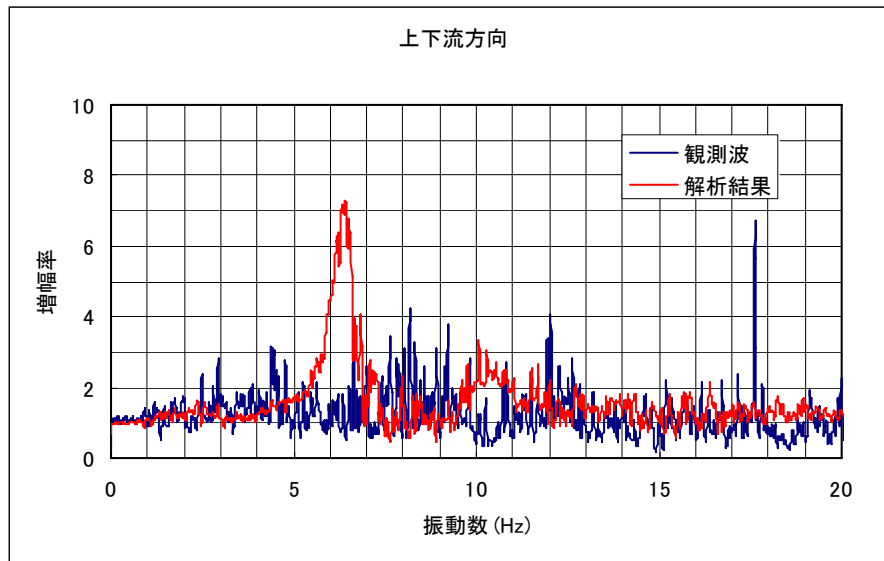


図5-8(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

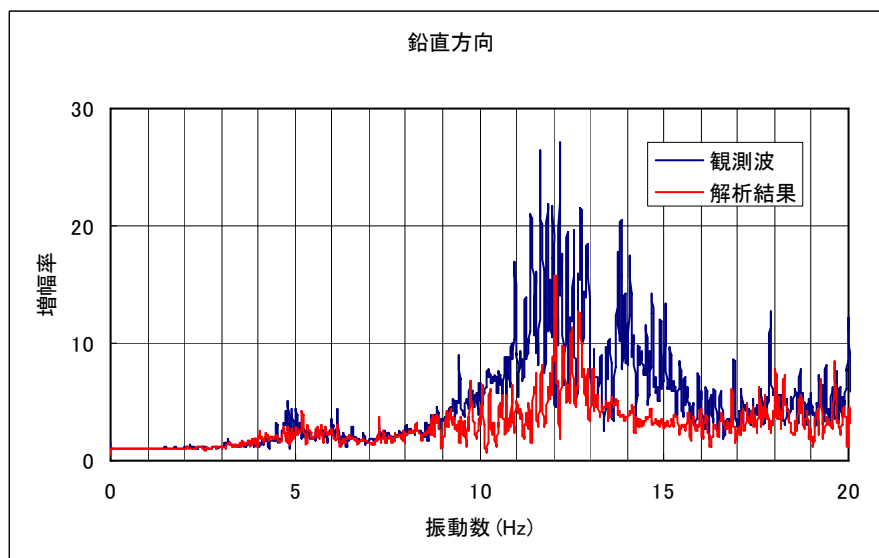
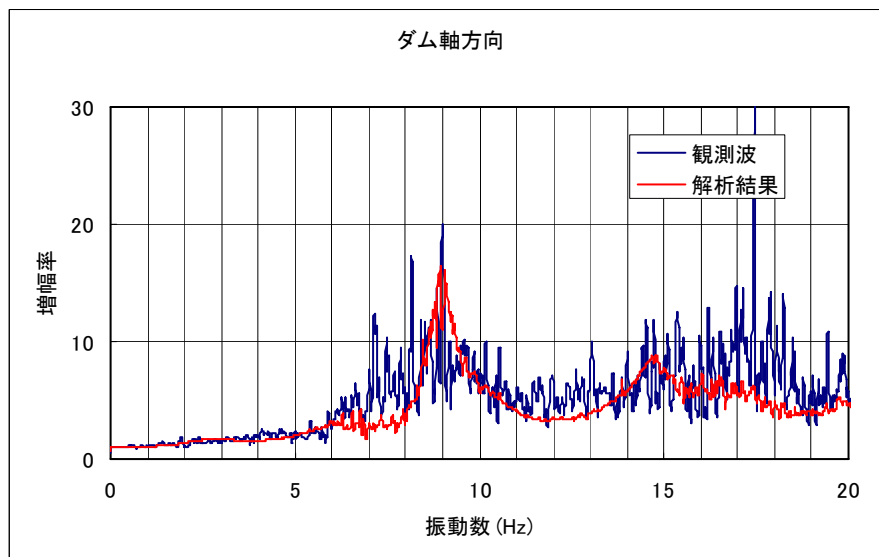
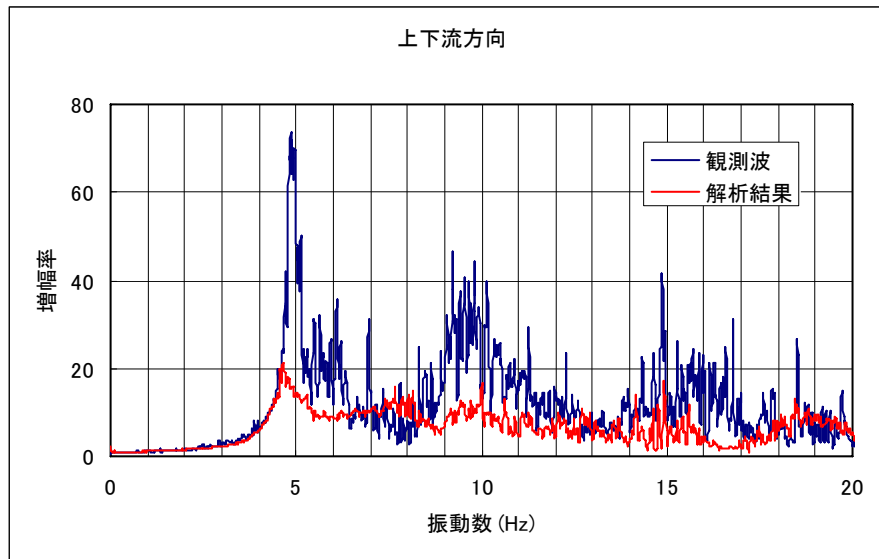


図5-9(a) ダム底面(F2)に対する天端中央 (T2) の伝達関数

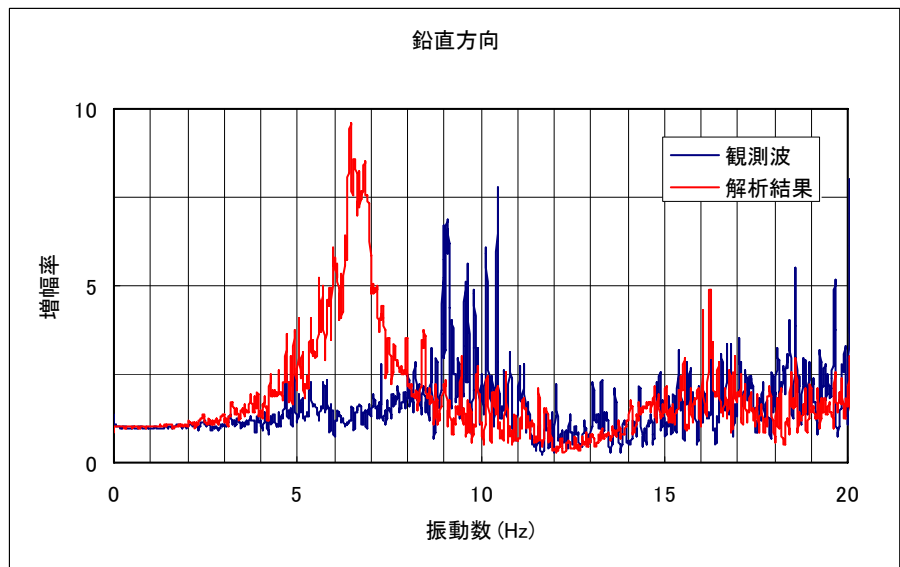
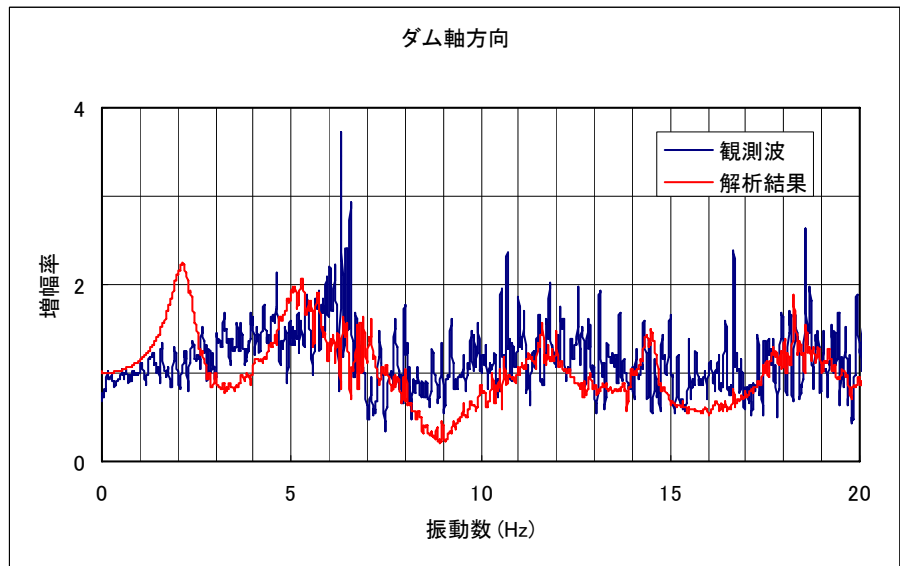
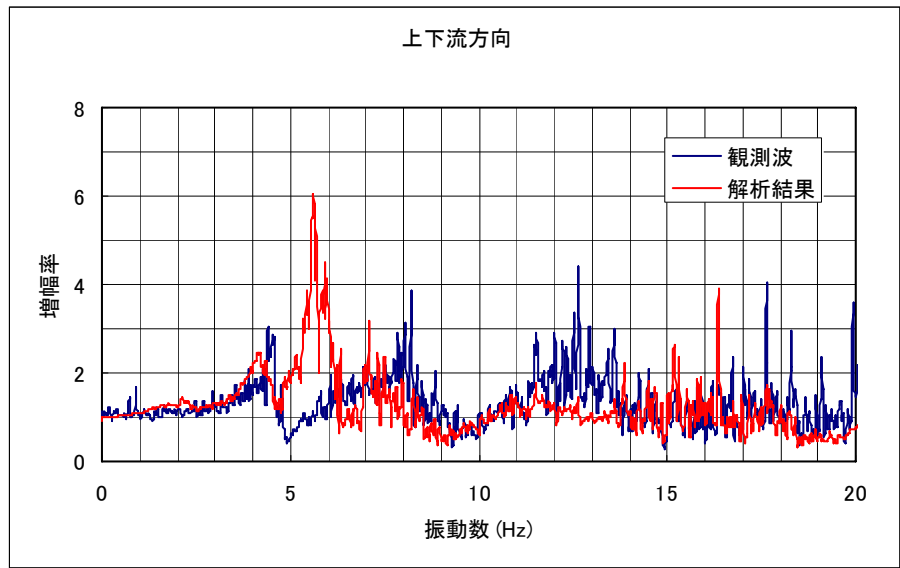


図5-9 (b) 岩盤下部 (F1) に対する岩盤上部 (F2) の伝達関数

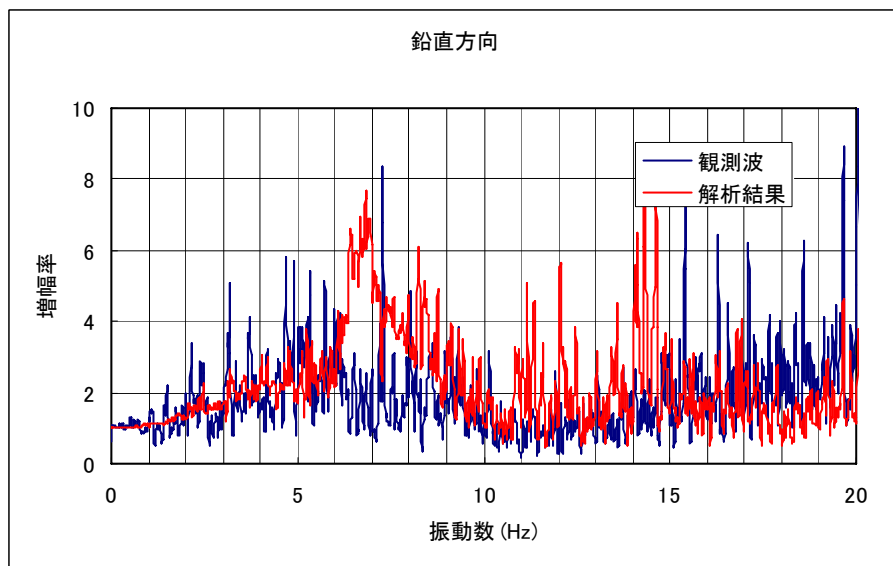
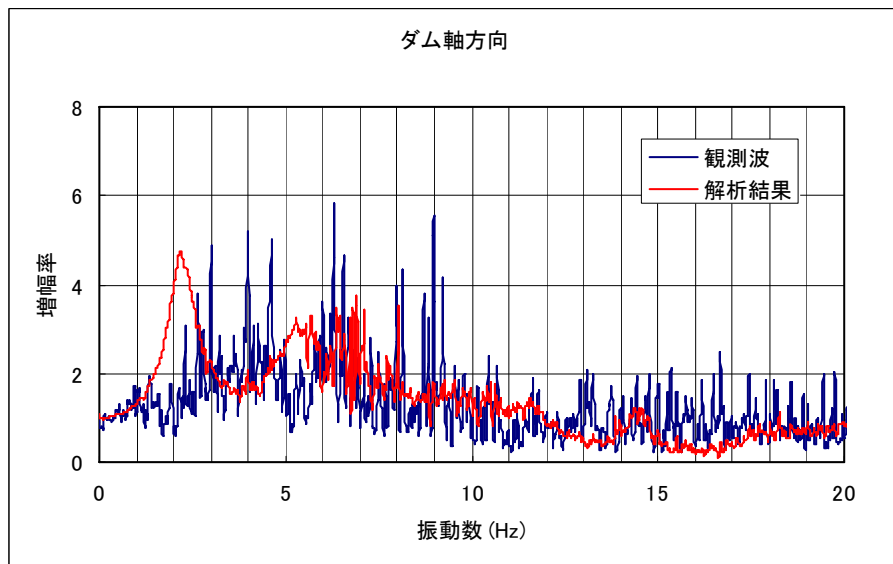
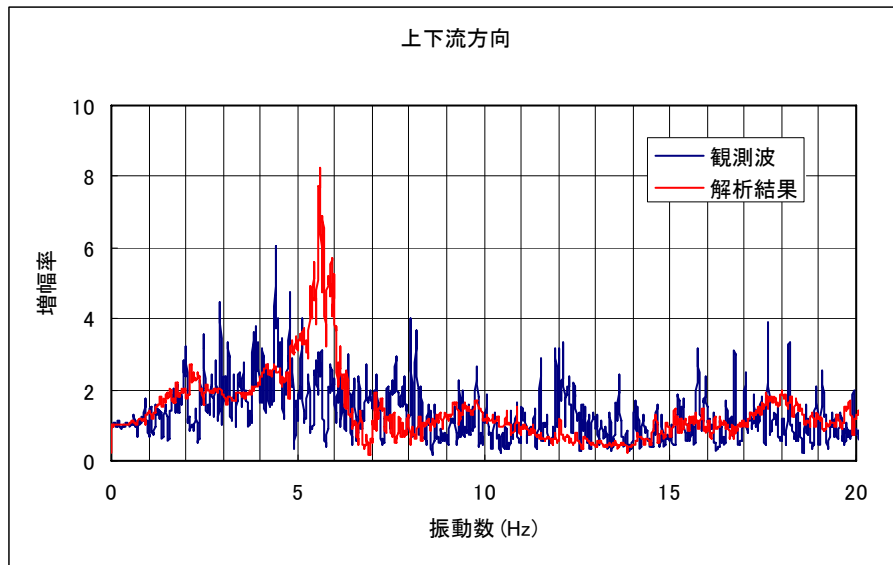


図5-9(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1)の伝達関数

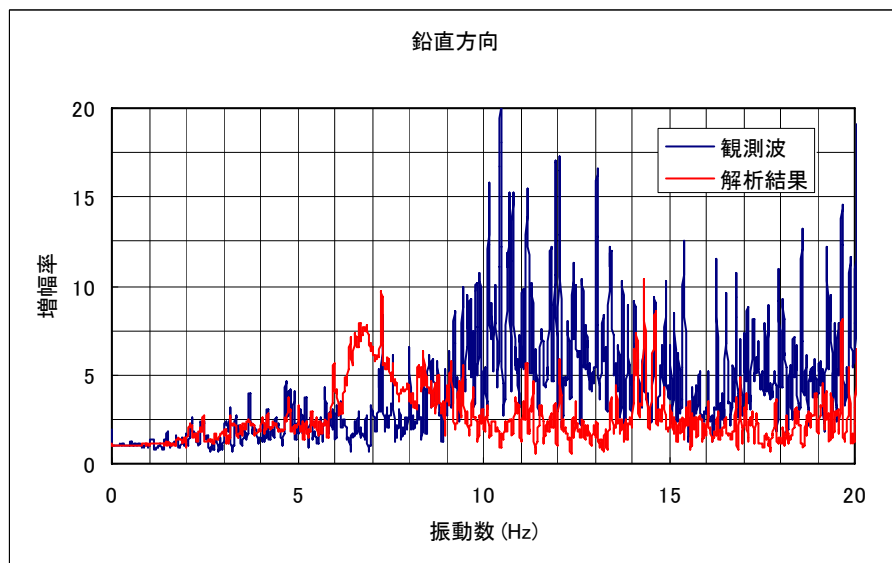
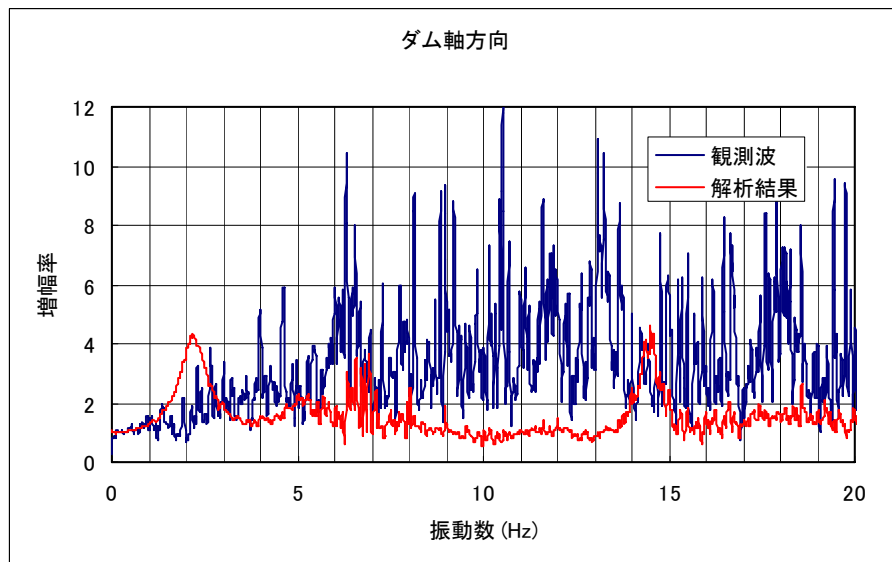
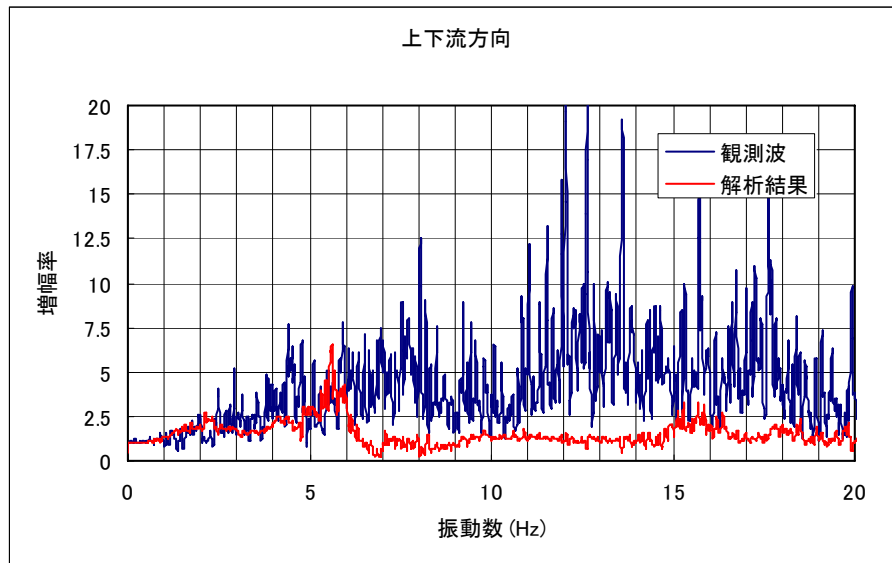


図5-9(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

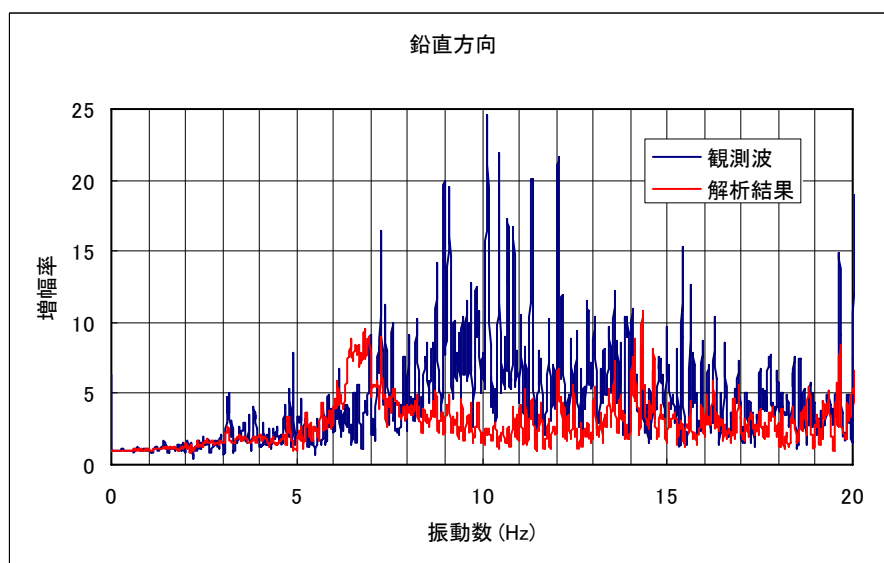
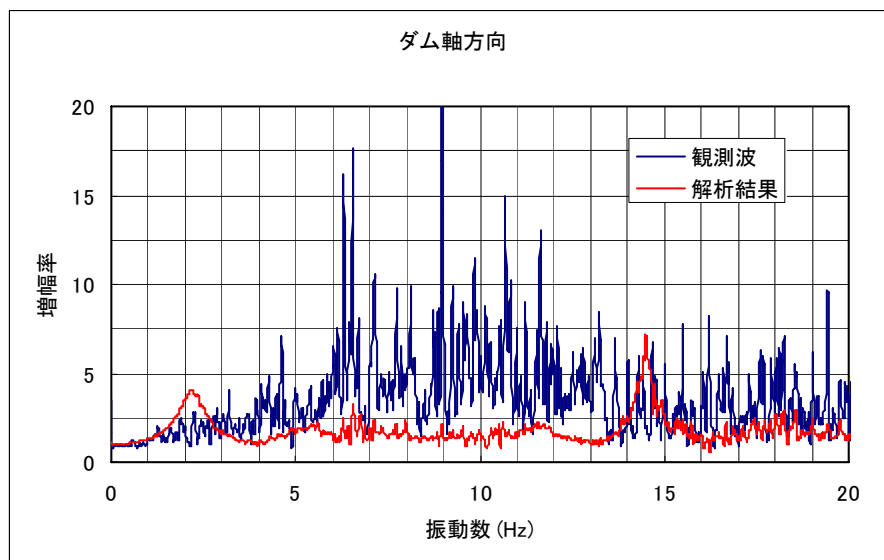
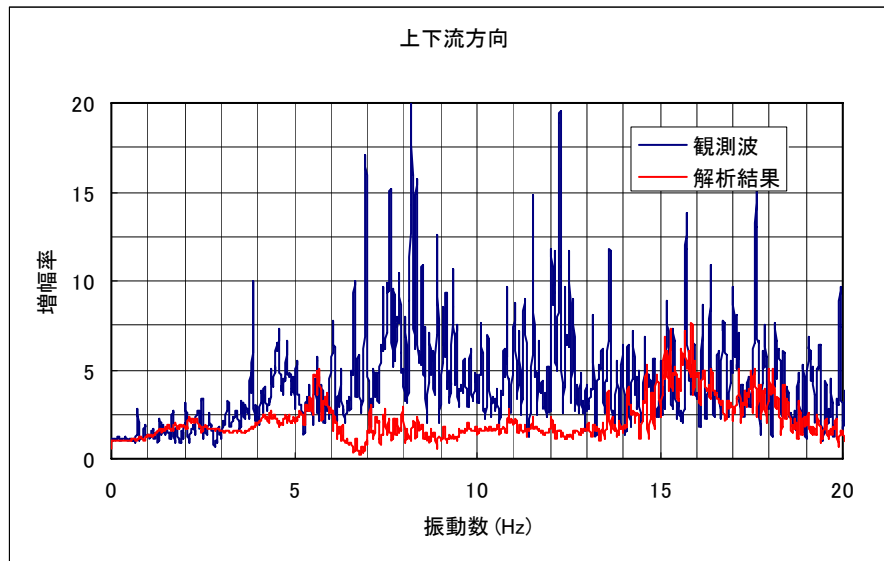


図5-9(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩の伝達関数

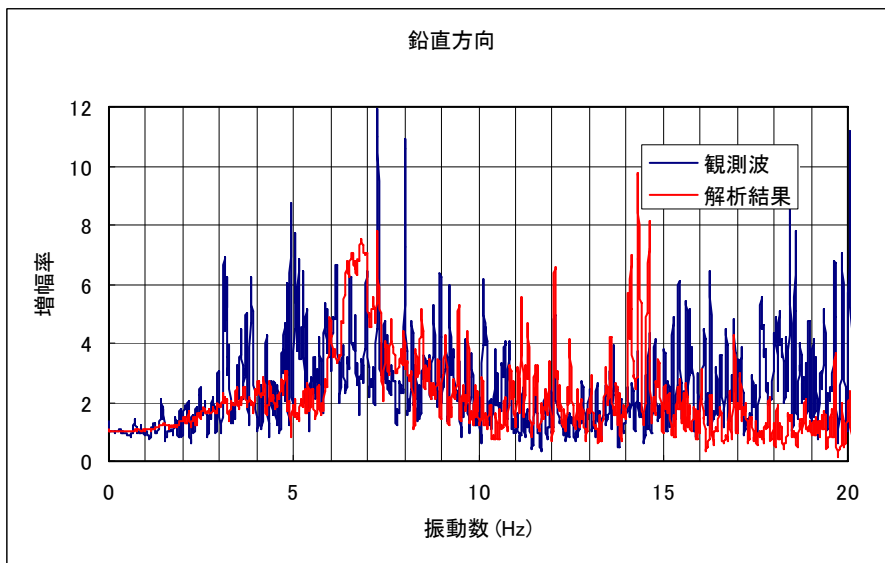
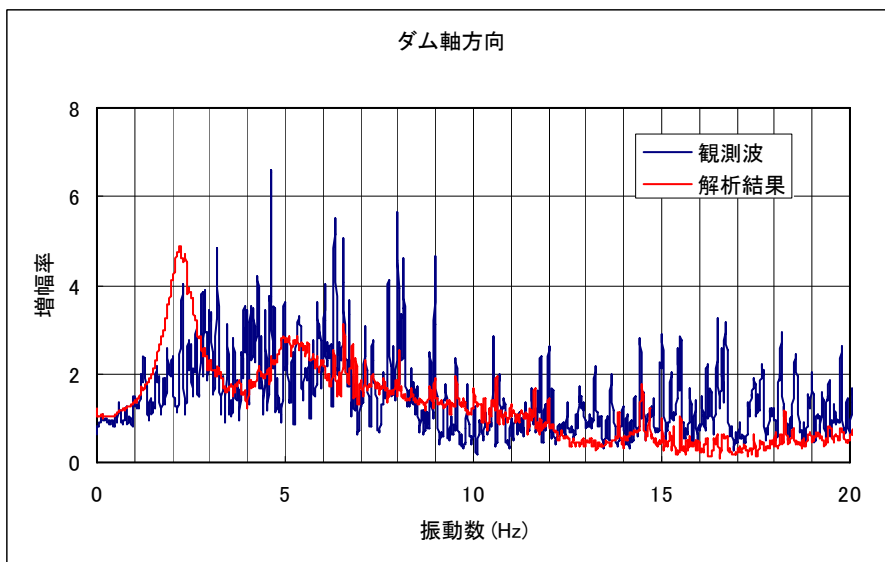
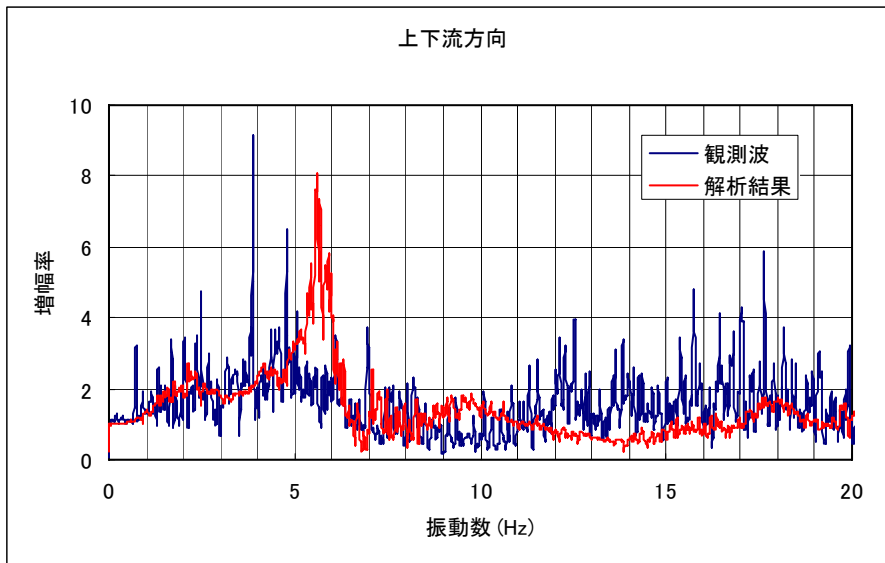


図5-9 (f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2)_nの伝達関数

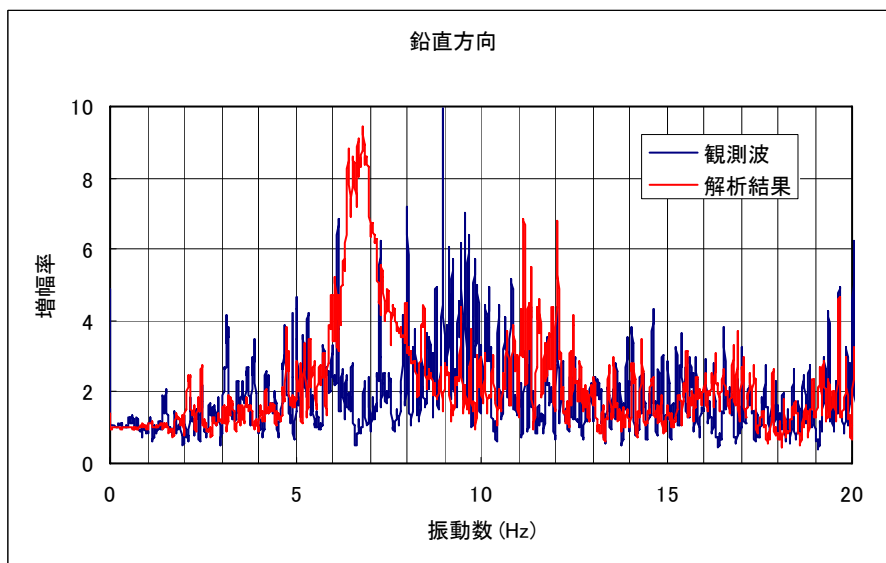
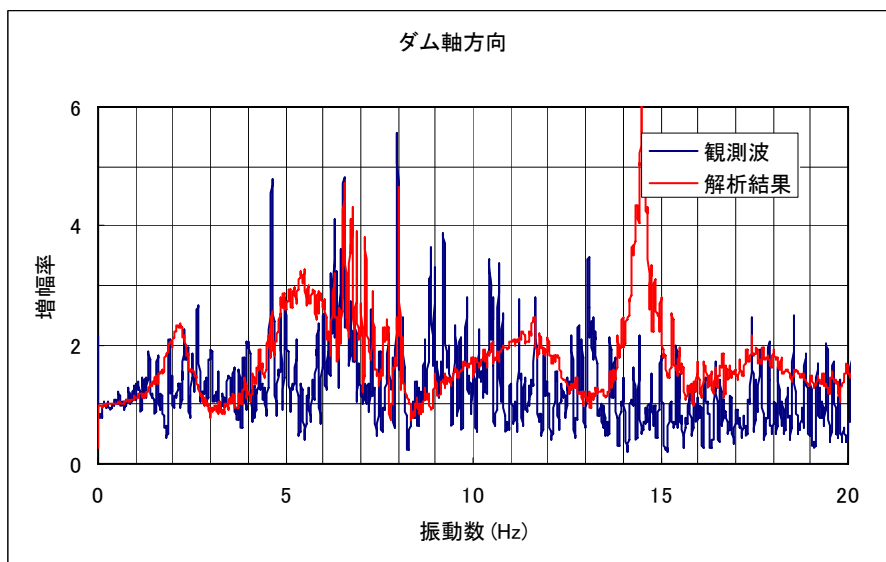
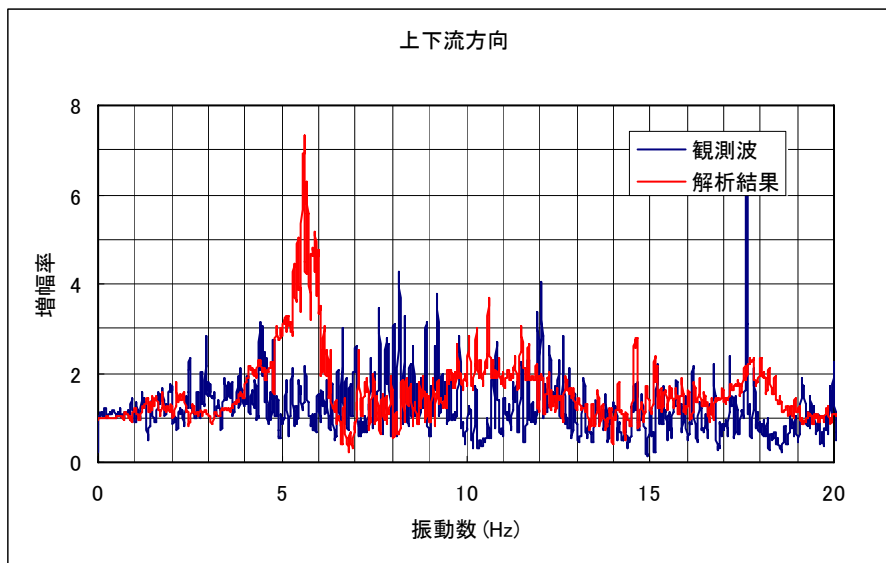


図5-9(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数

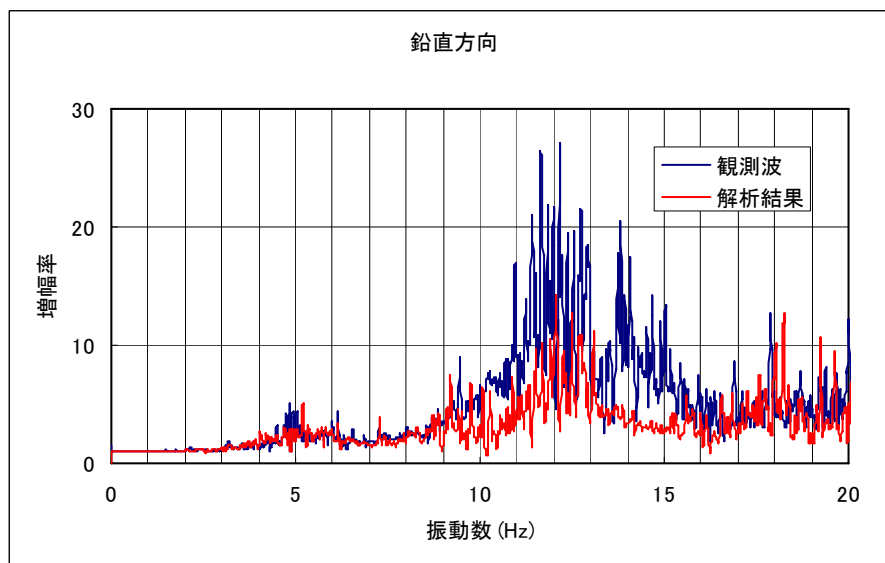
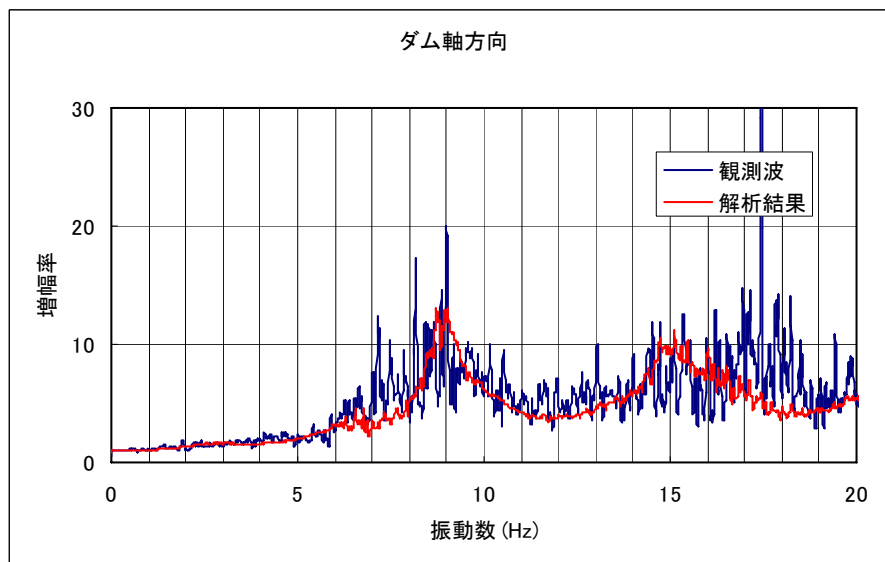
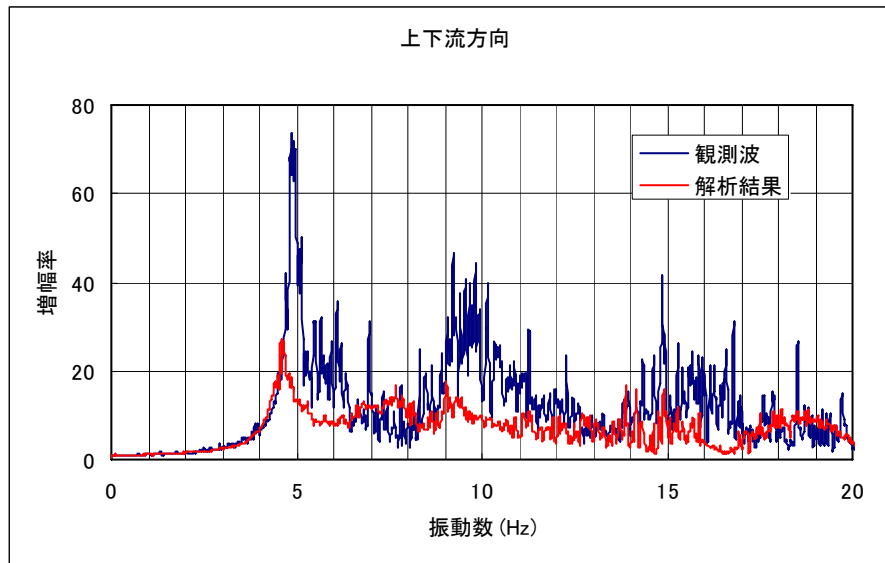


図5-10(a) 岩盤上部 (F2) に対する天端中央(T2) の伝達関数

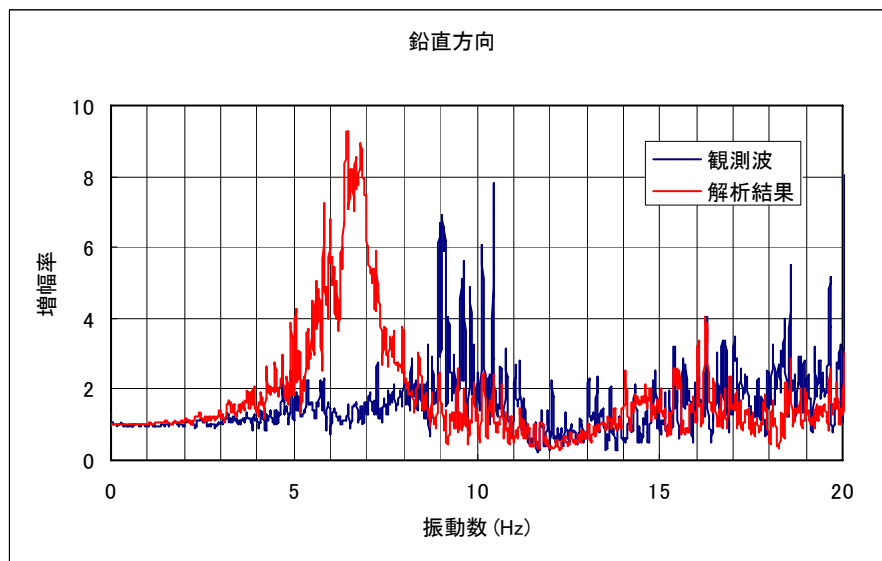
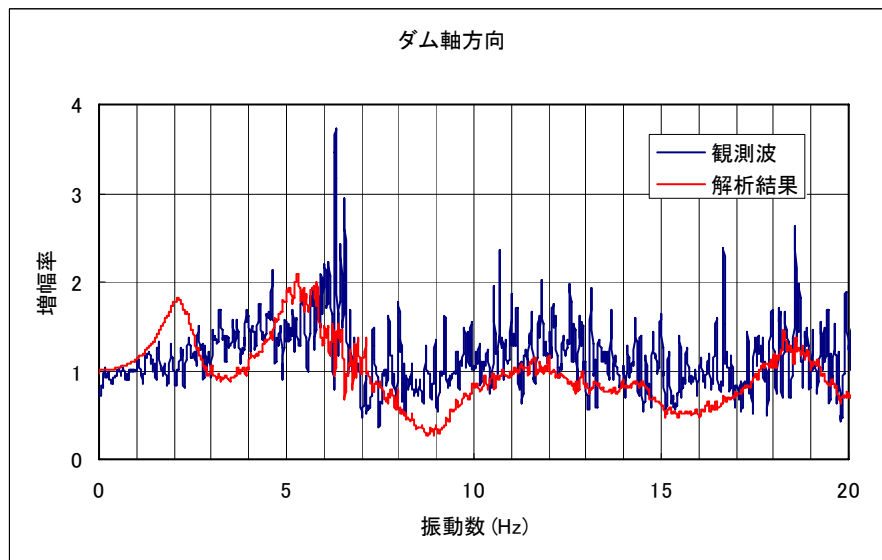
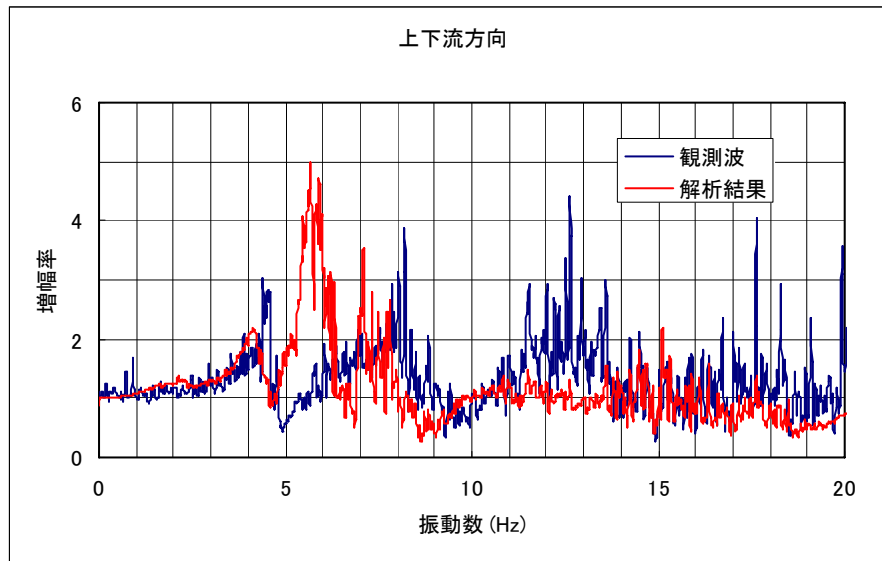


図5-10(b) 岩盤下部(F1)に対する岩盤上部(F2)の伝達関数

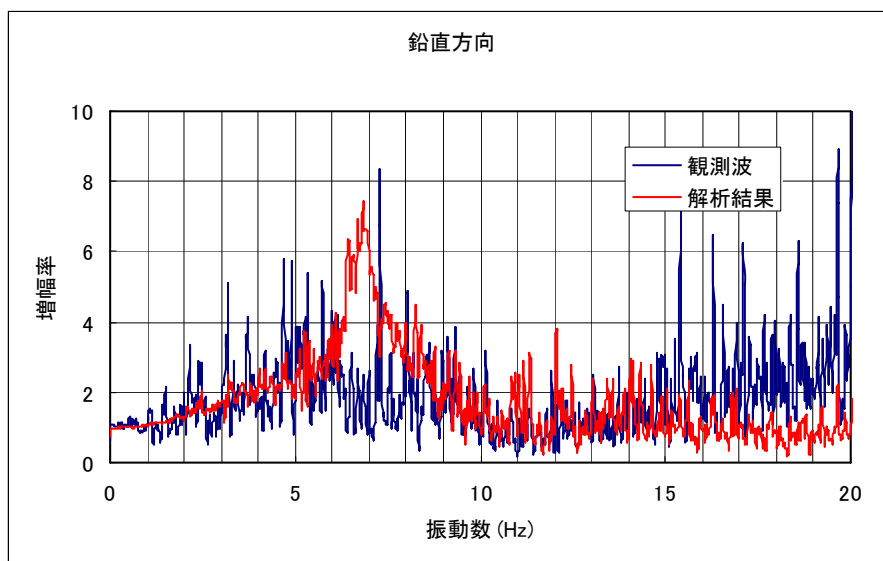
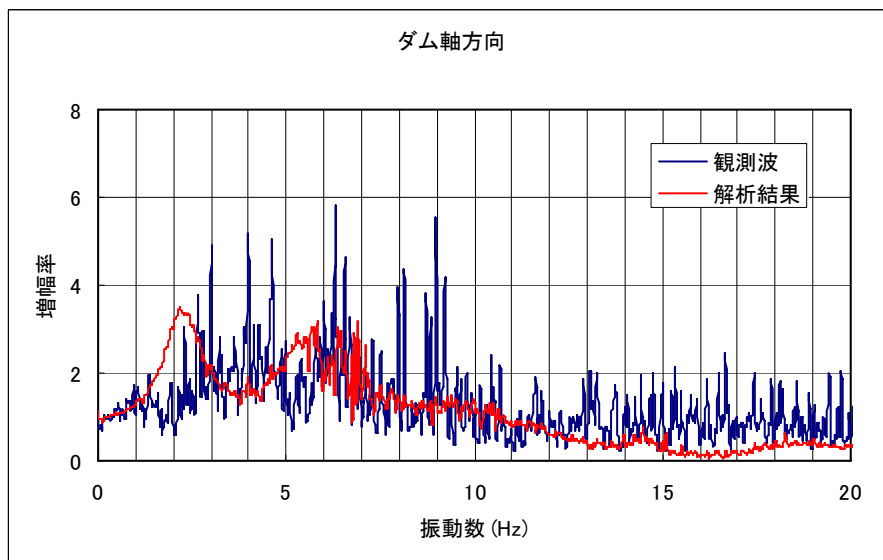
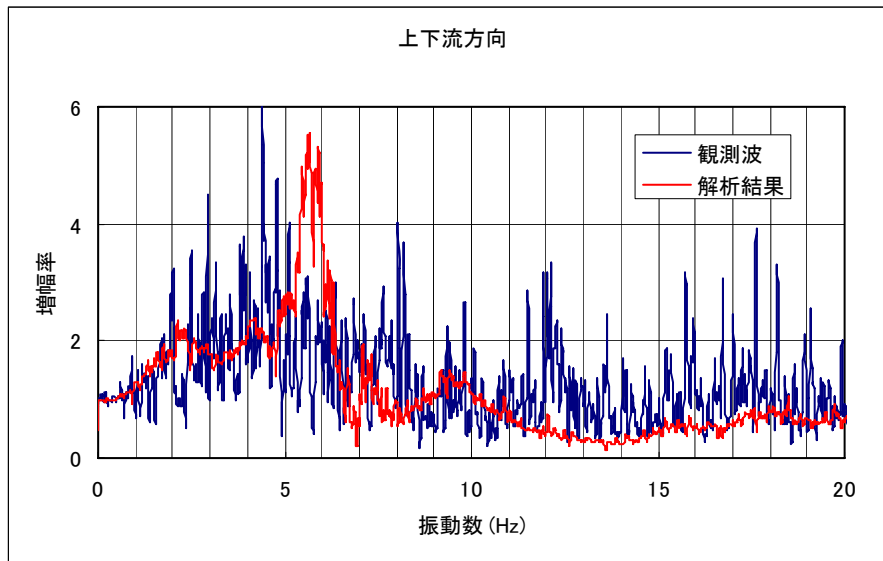


図5-10(c) 岩盤下部(F1)に対する左岸リムトンネル内(R1) の伝達関数

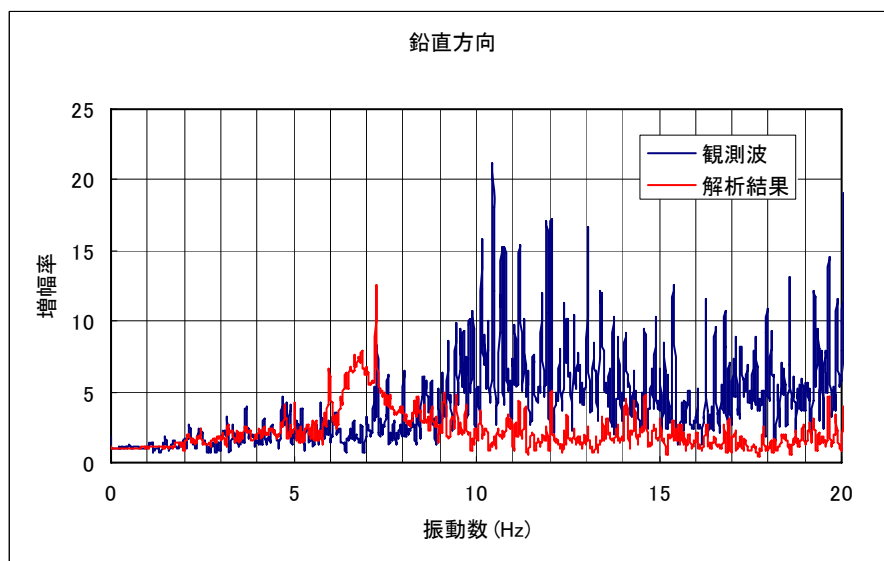
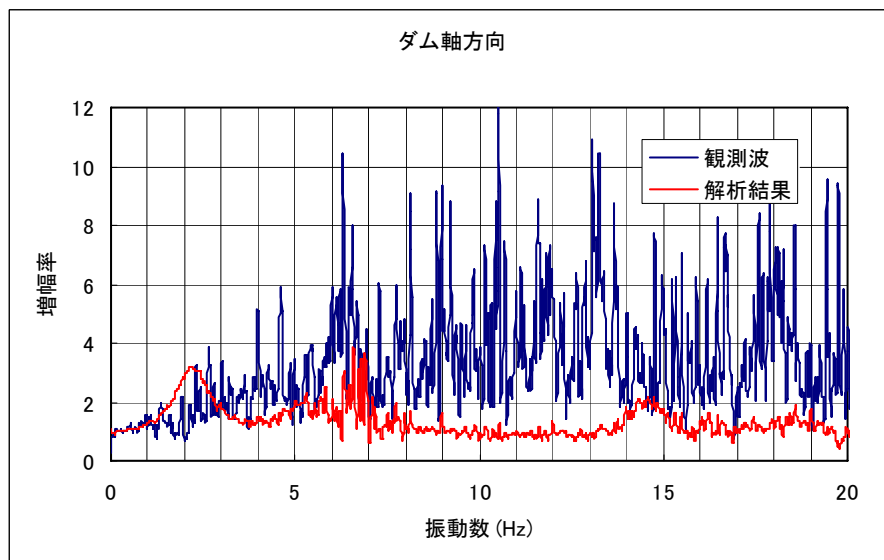
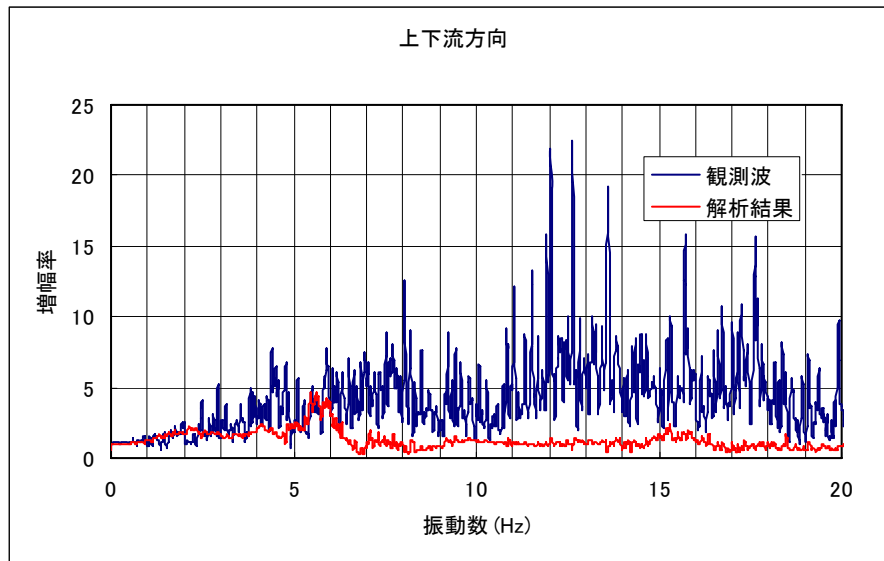


図5-10(d) 岩盤下部(F1)に対するダム左肩(T1)の伝達関数

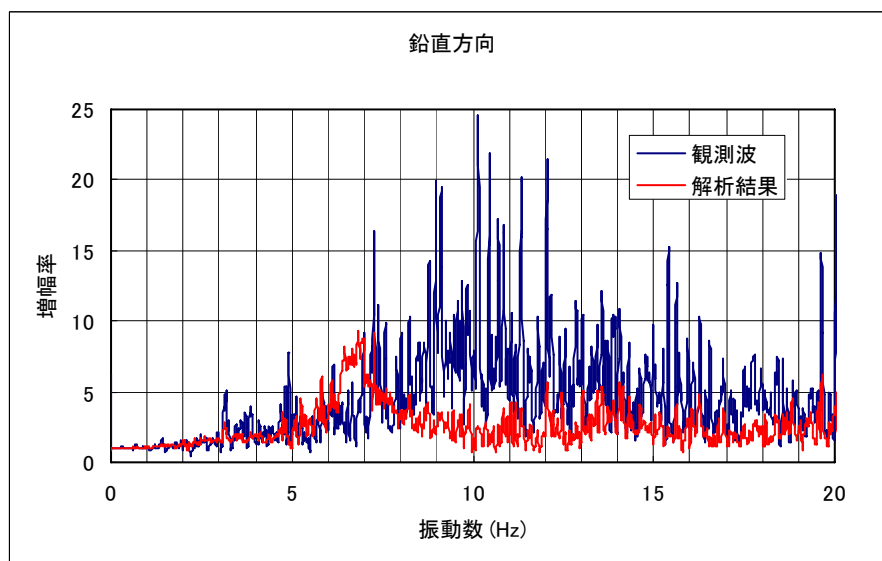
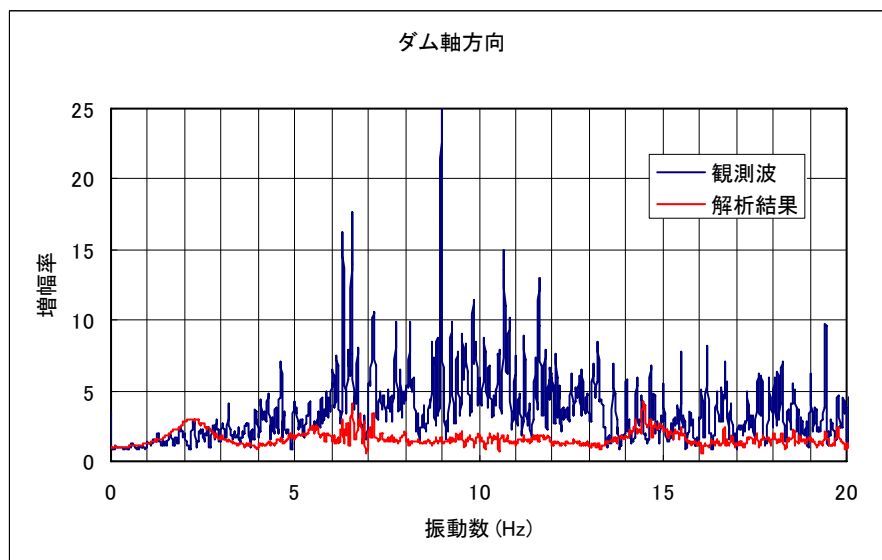
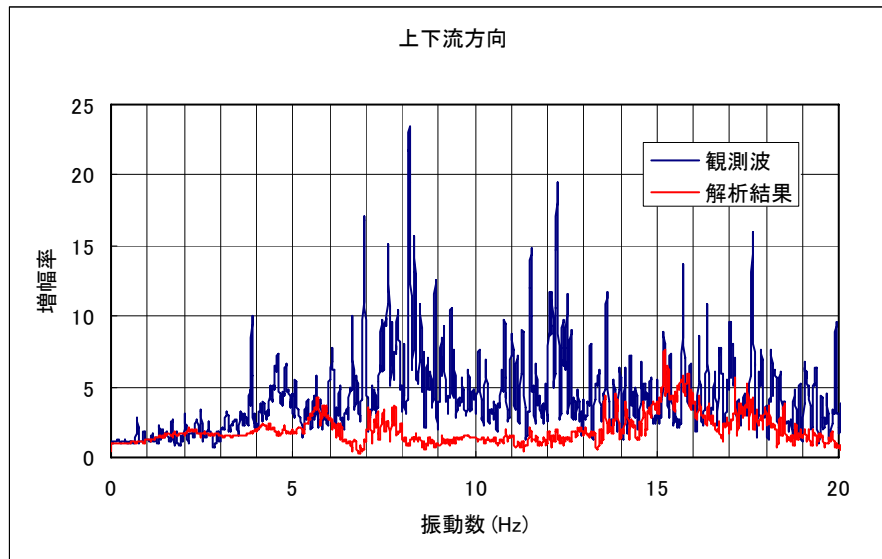


図5-10(e) 岩盤下部(F1)に対するダム右肩(T3)の伝達関数

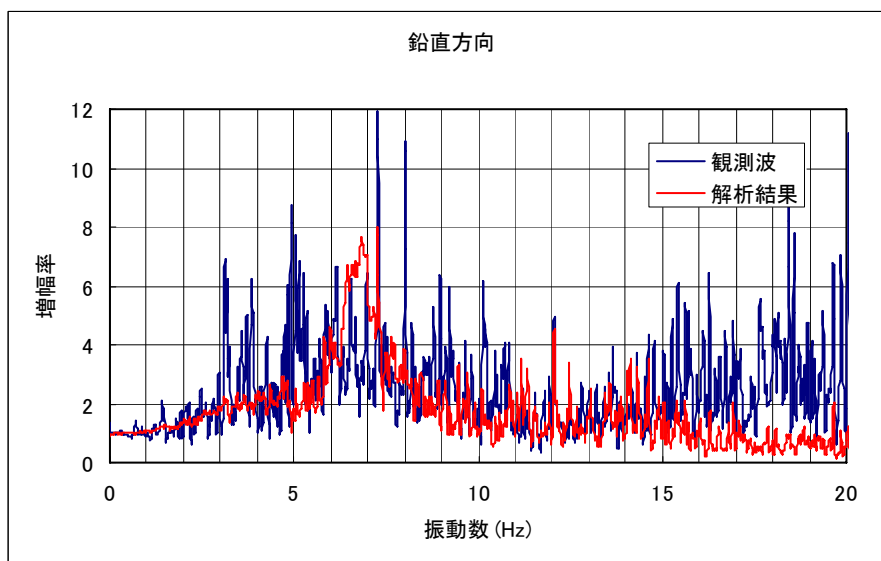
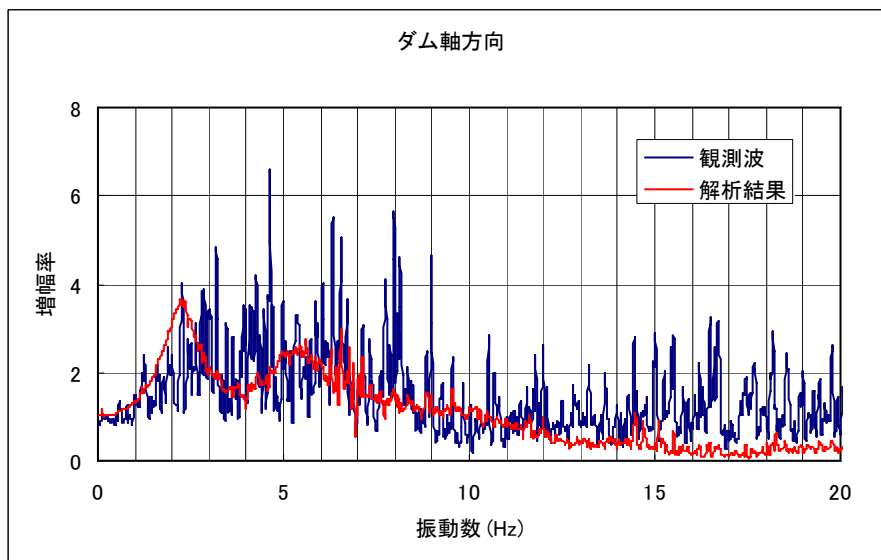
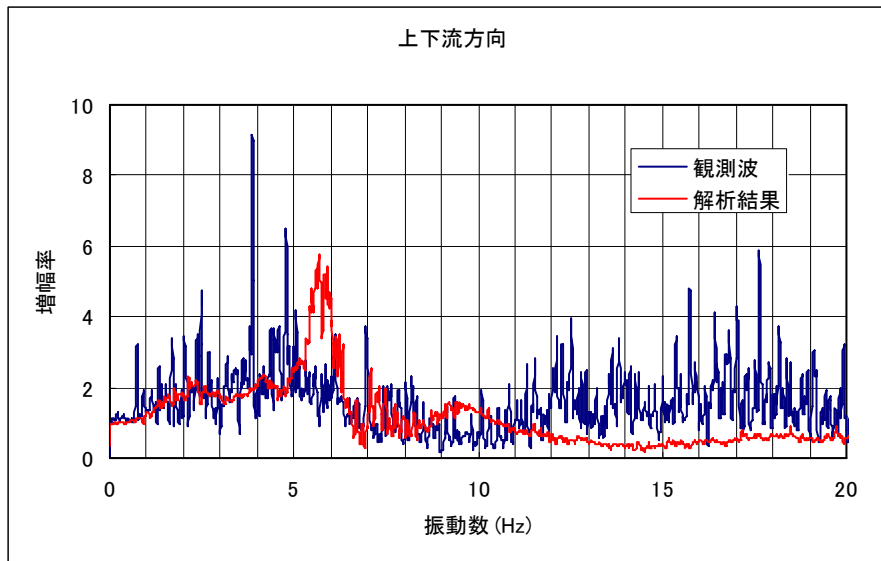


図5-10(f) 岩盤下部(F1)に対する右岸リムトンネル内(R2) の伝達関数

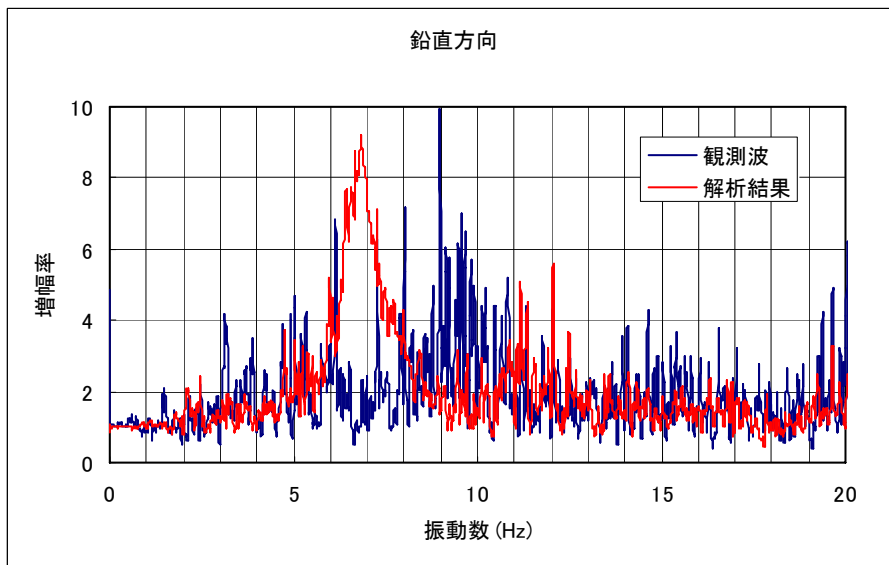
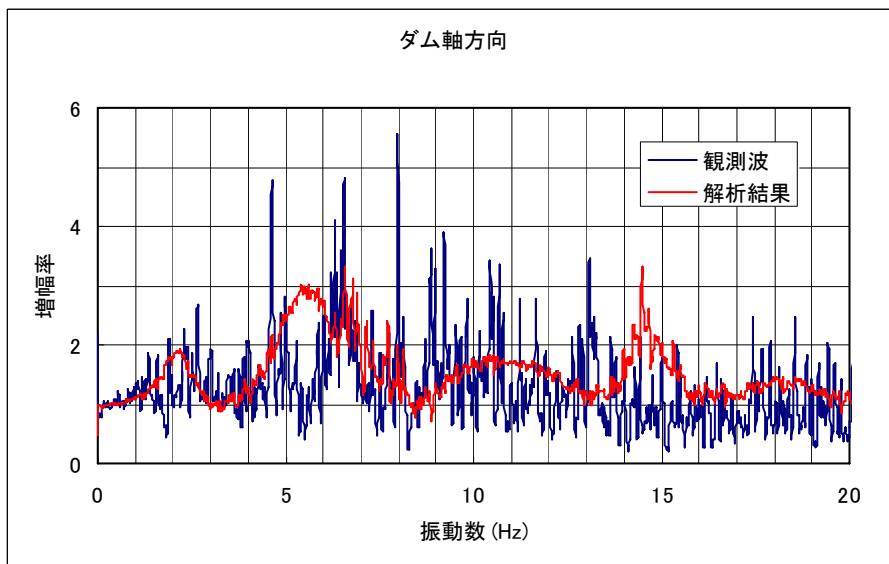
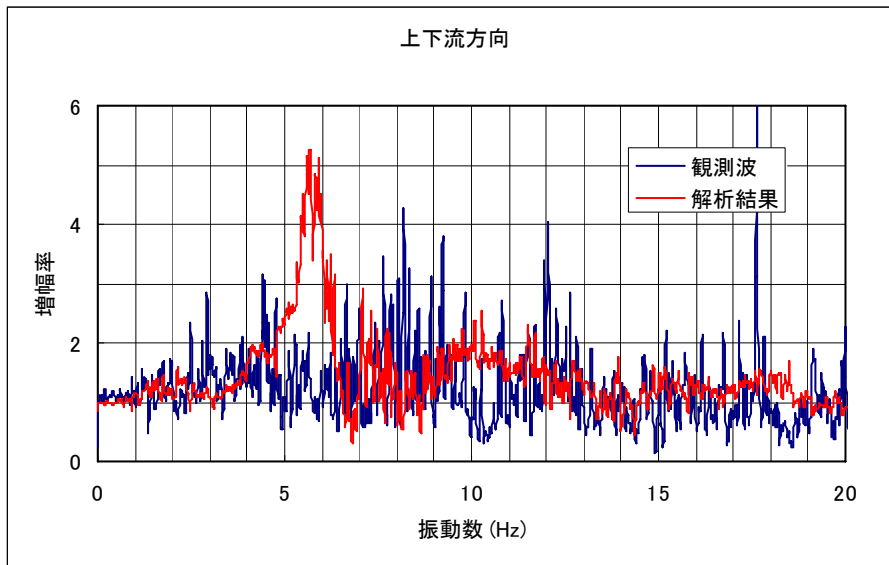


図5-10(g) 岩盤下部(F1)に対する下流側開放基盤(G1)の伝達関数