

## 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 <sup>3</sup> )	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<sup>6)</sup>。

\*2: 2.3 物性値についての調査参照

##### (2) 境界条件

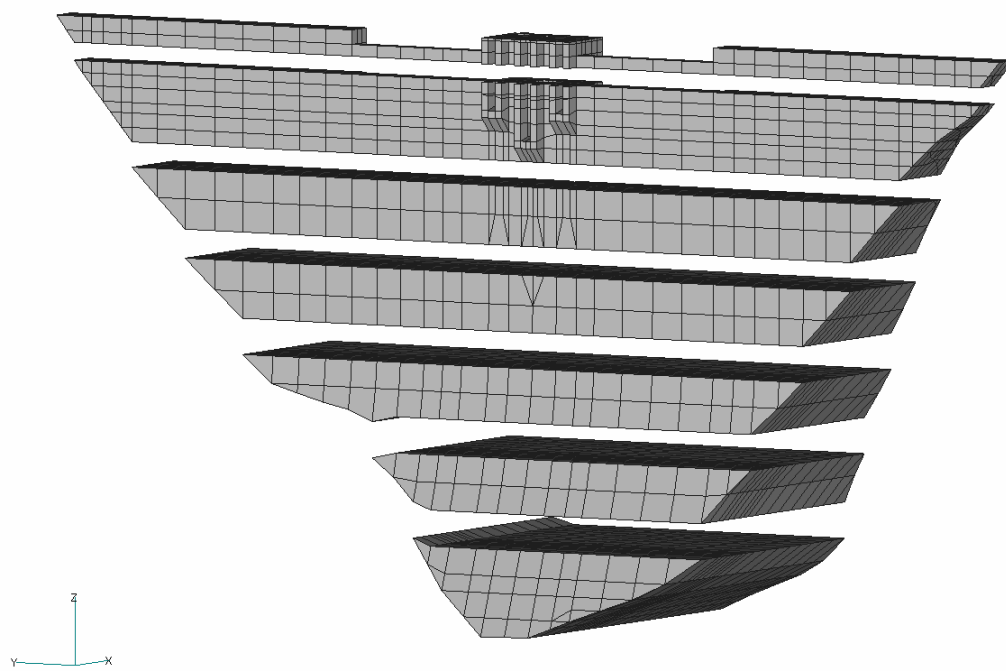
モデルの境界条件としては、基礎岩盤の底面では固定条件、側方境界では鉛直ローラー条件とした。

##### (3) 荷重条件

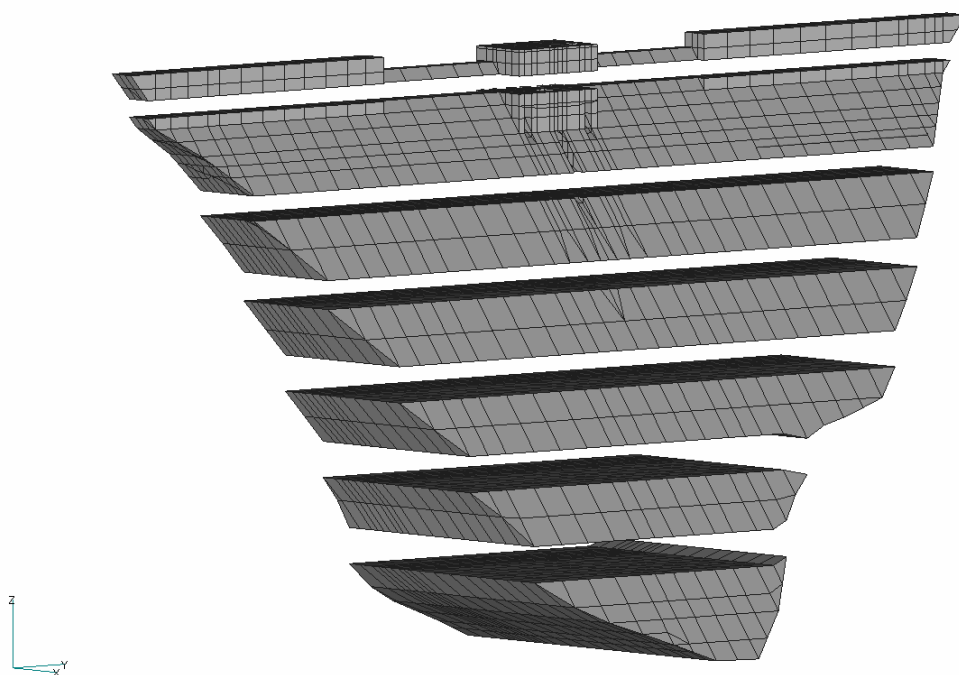
静的荷重は、ダムおよび基礎岩盤の自重、湛水時の静水圧である。

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。

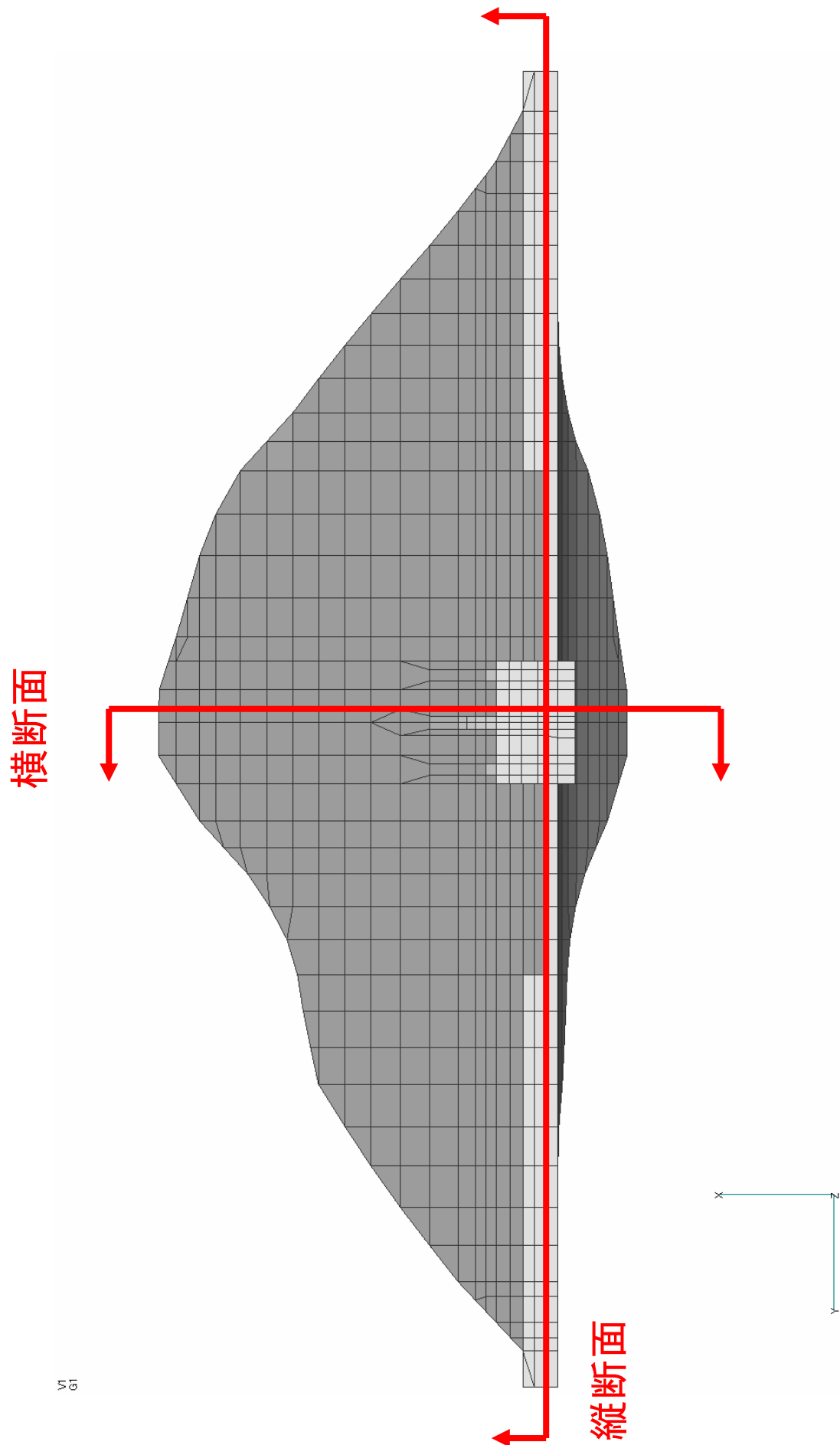


图 6-2 断面位置图

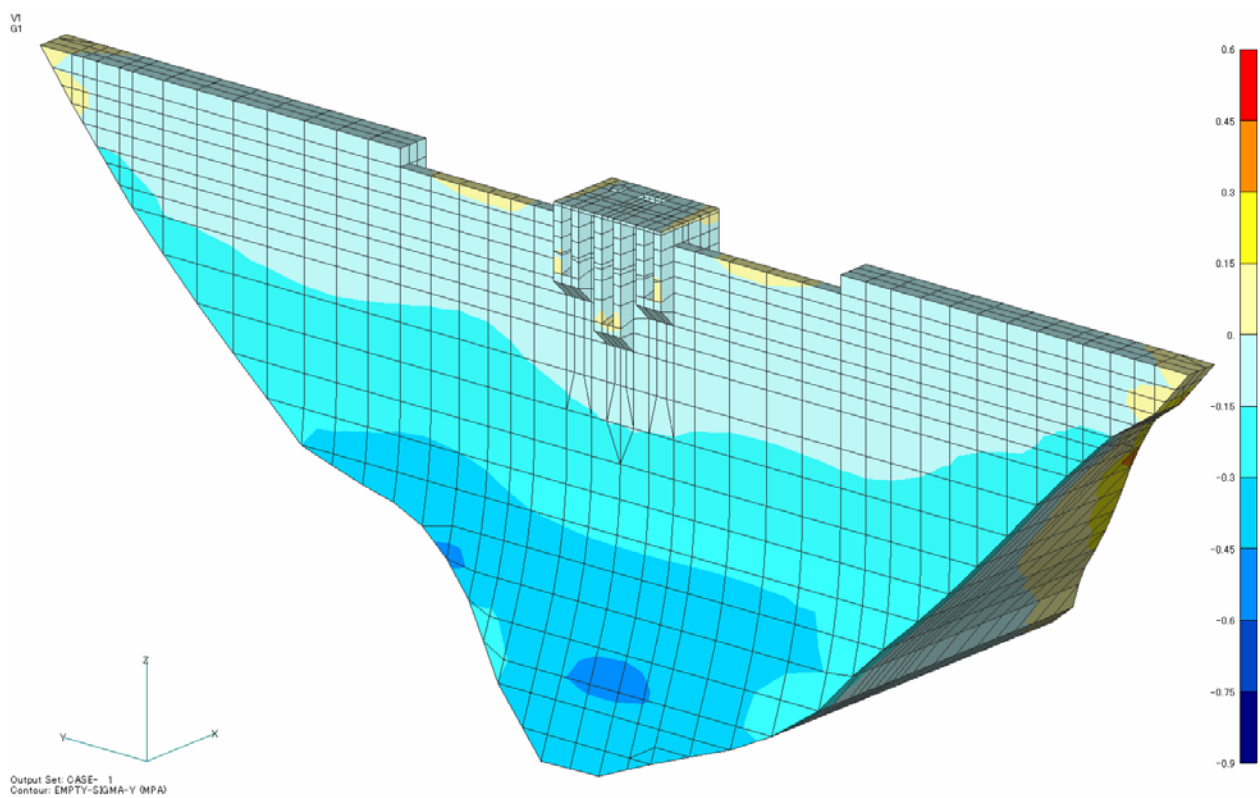


図 6-3 (a) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(鳥瞰図)

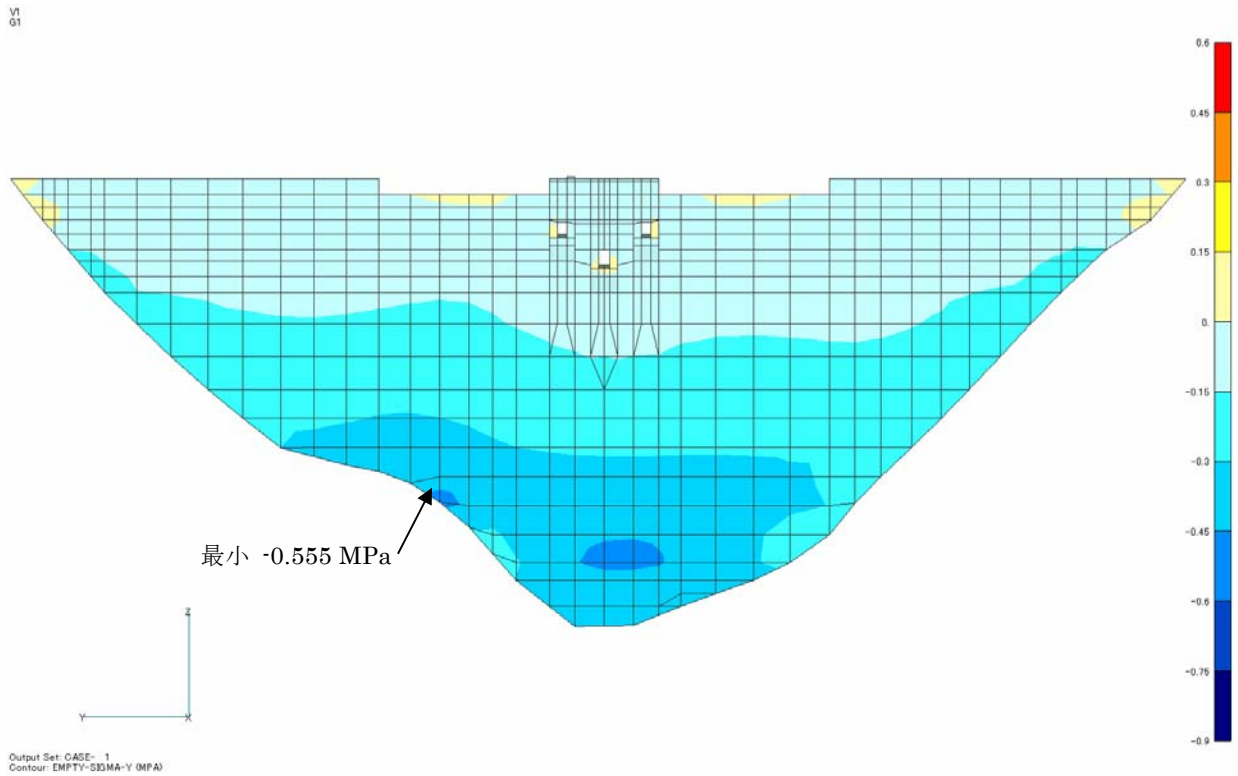


図 6-3 (b) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(上流面)

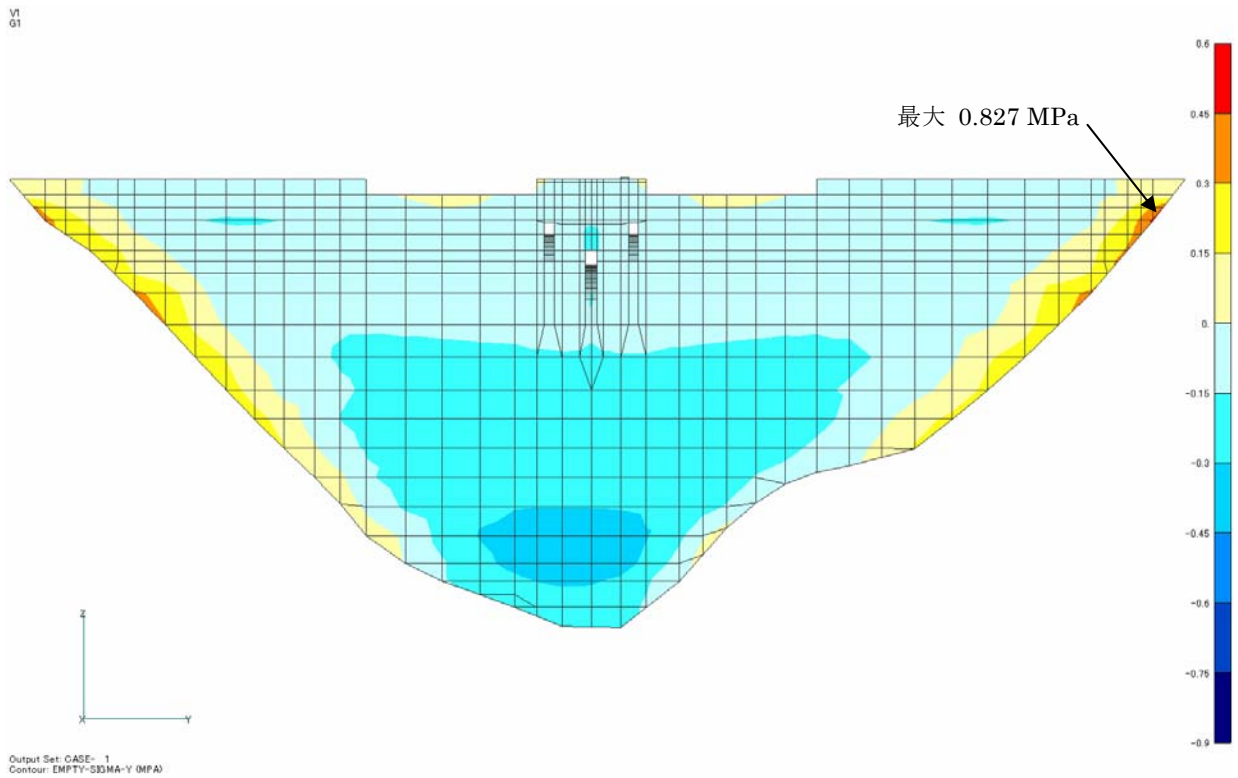


図 6-3 (c) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(下流面)

V1  
02

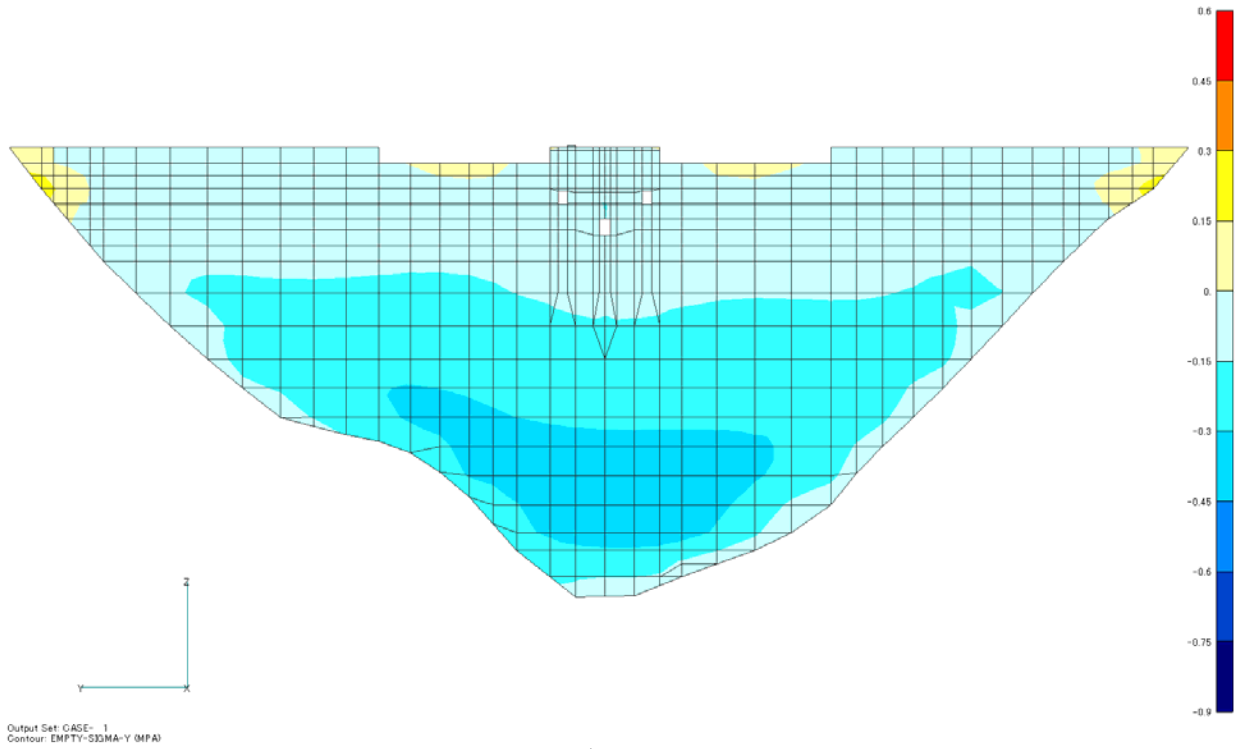


図 6-3 (d) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(縦断面)

V1  
03

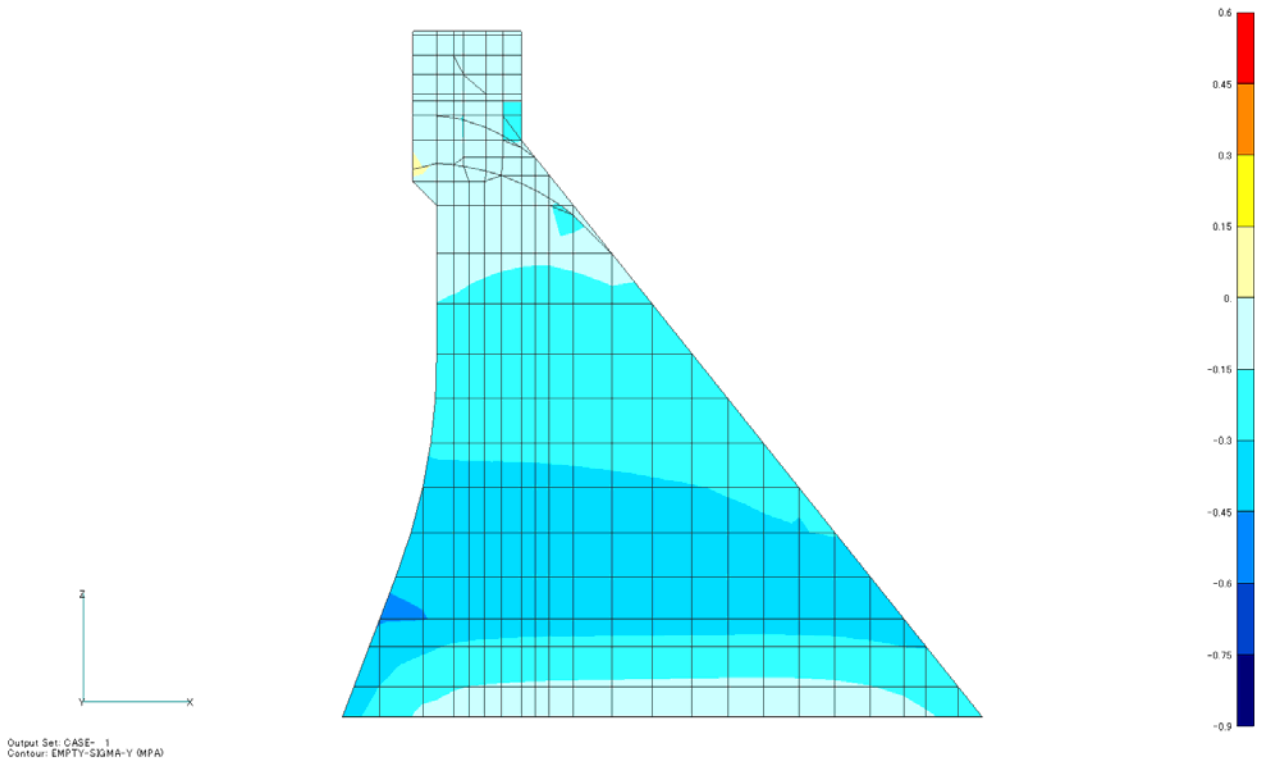


図 6-3 (e) 空虚時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(横断面)

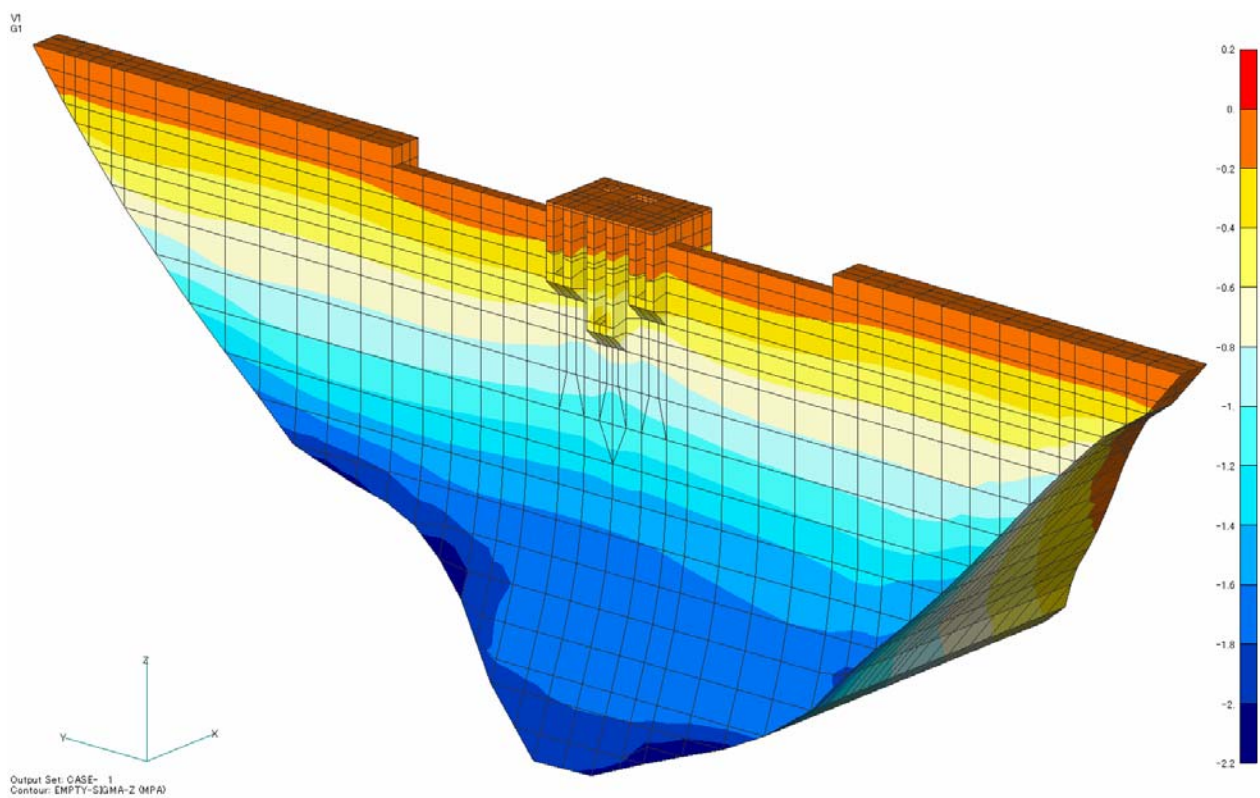


图 6-4 (a) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(鳥瞰図)



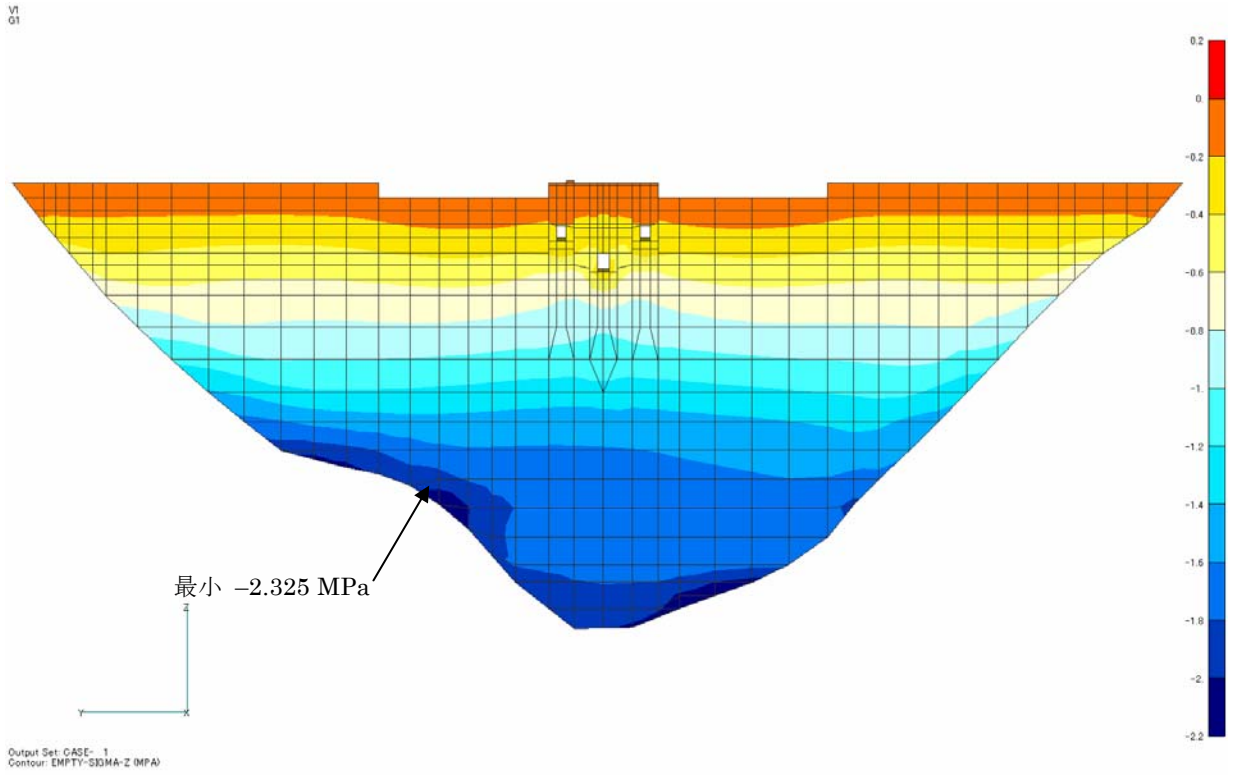


图 6-4 (b) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(上流面)

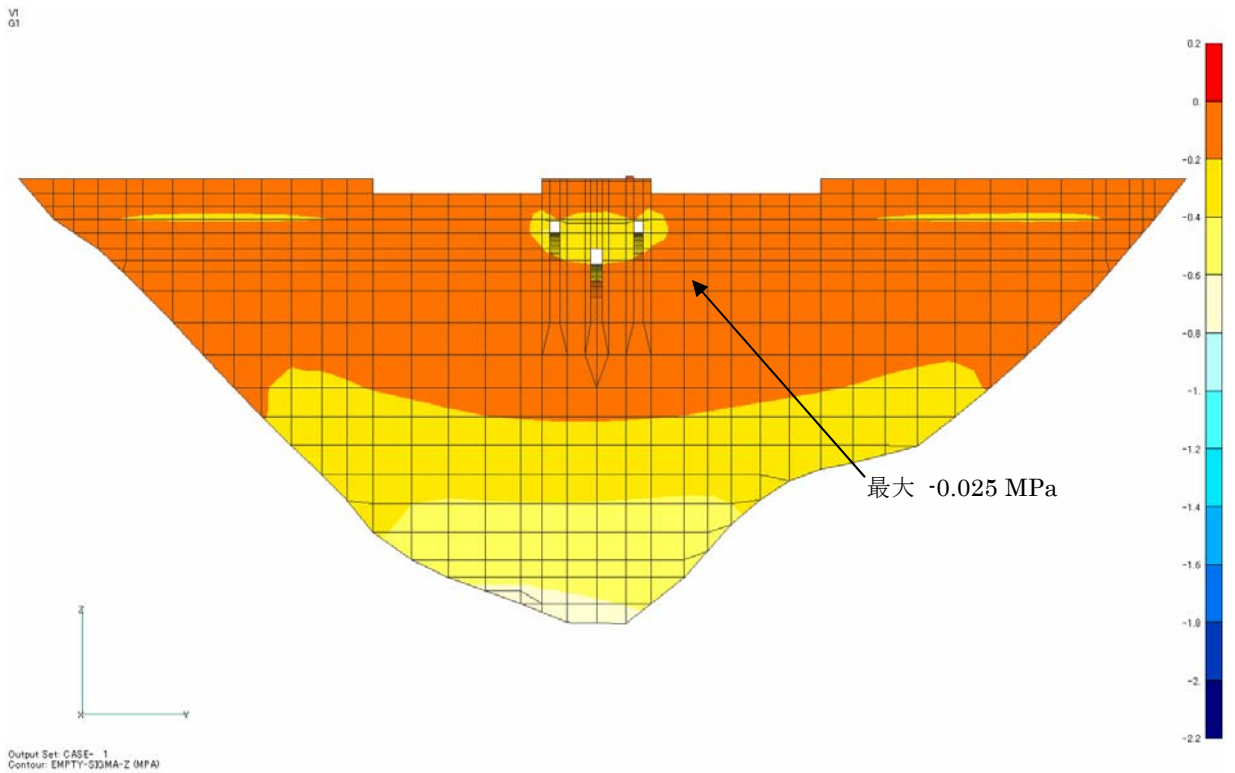


图 6-4 (c) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(下流面)

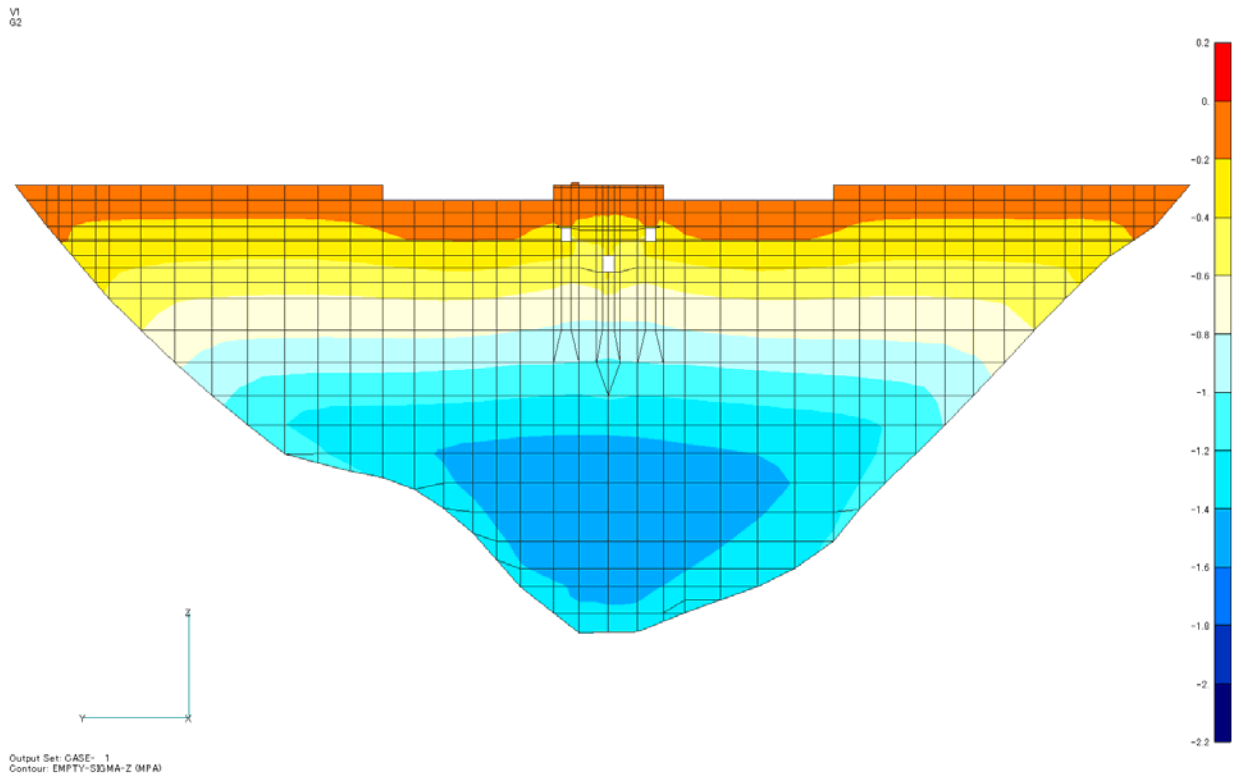


图 6-4 (d) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(縦断面)

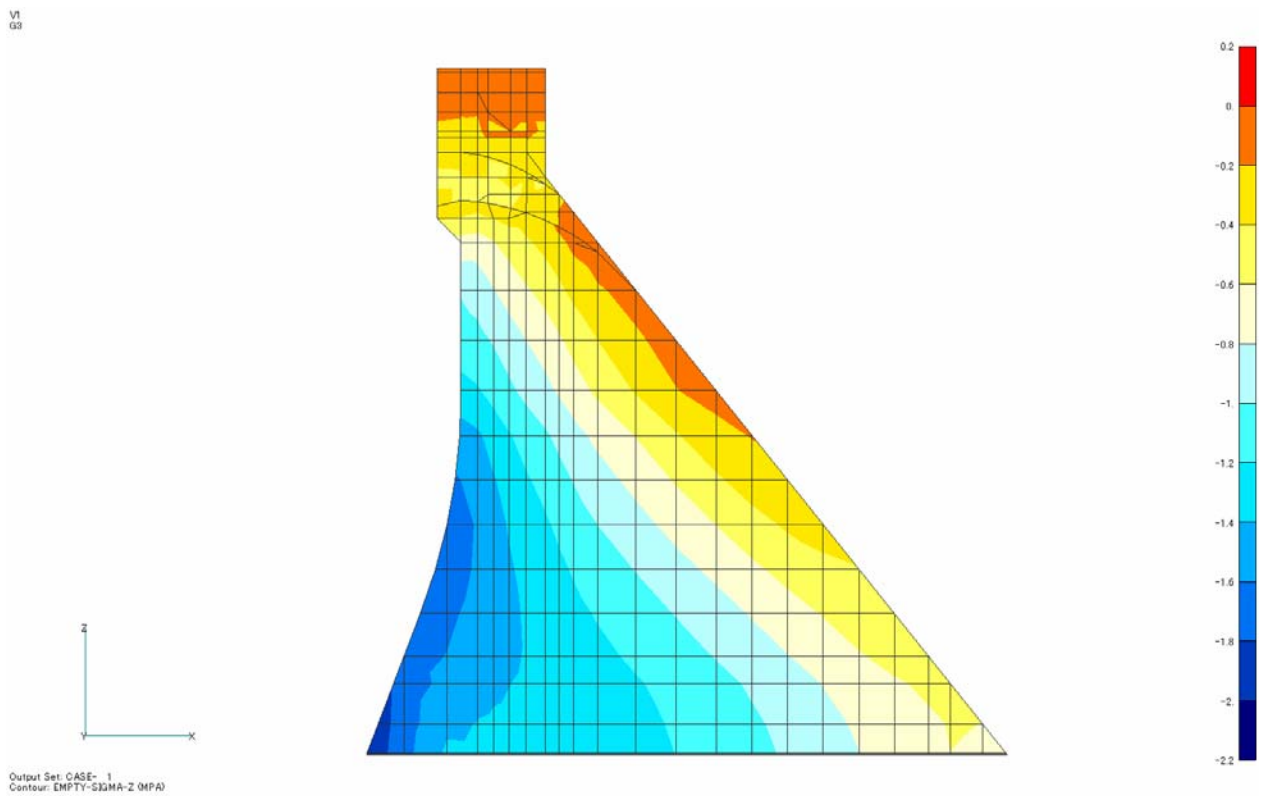


图 6-4 (e) 空虛時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(横断面)

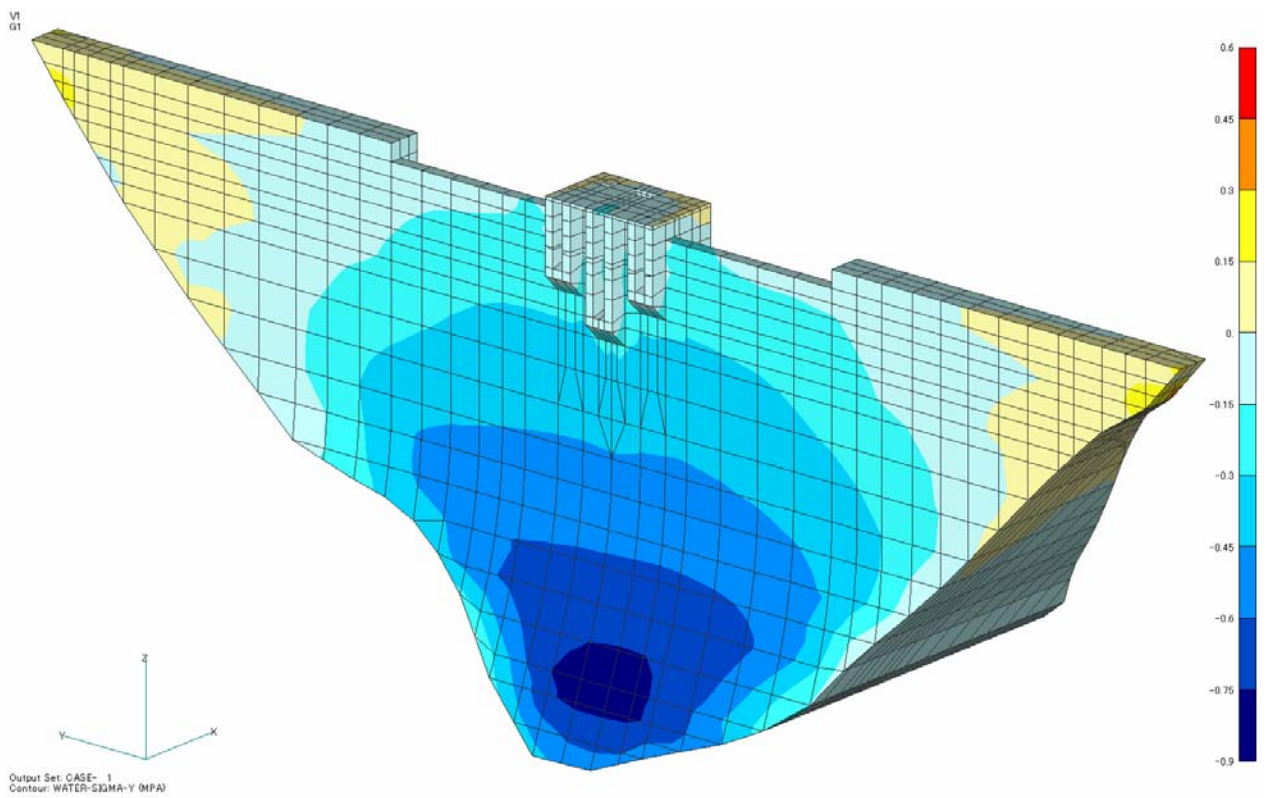


図 6-5(a) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(鳥瞰図)

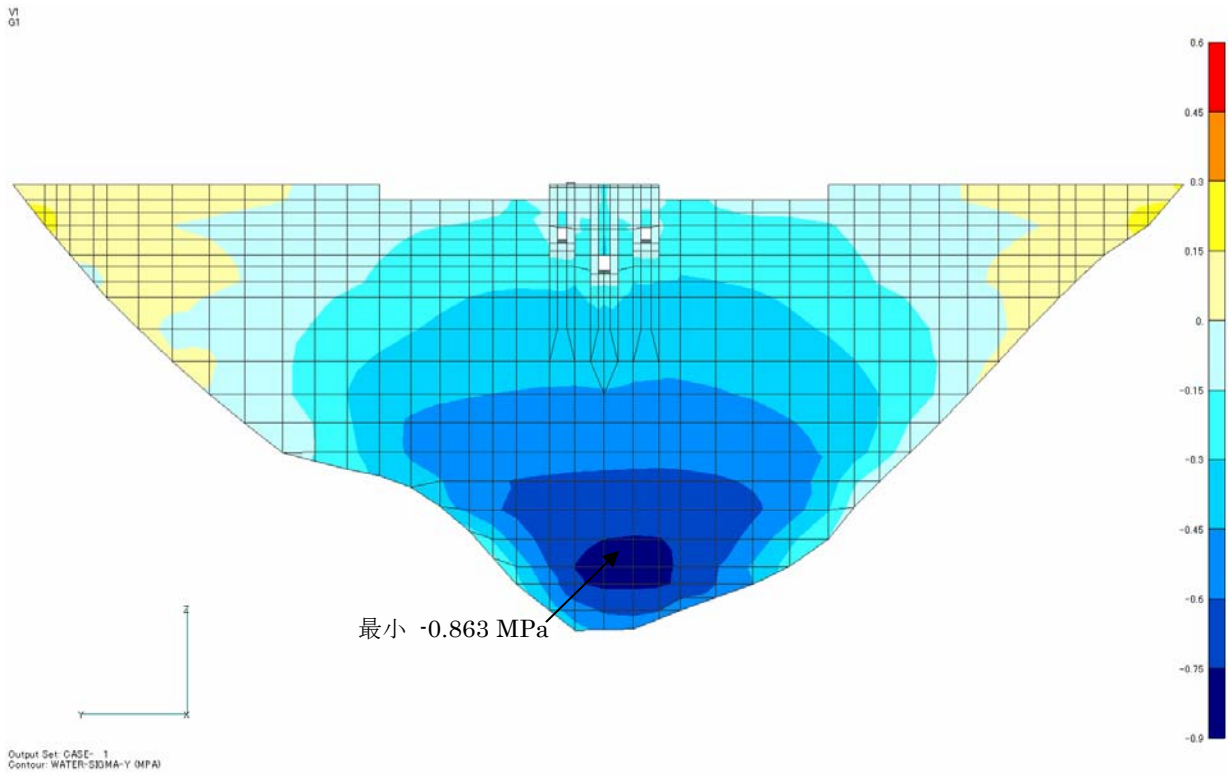


図 6-5 (b) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(上流面)

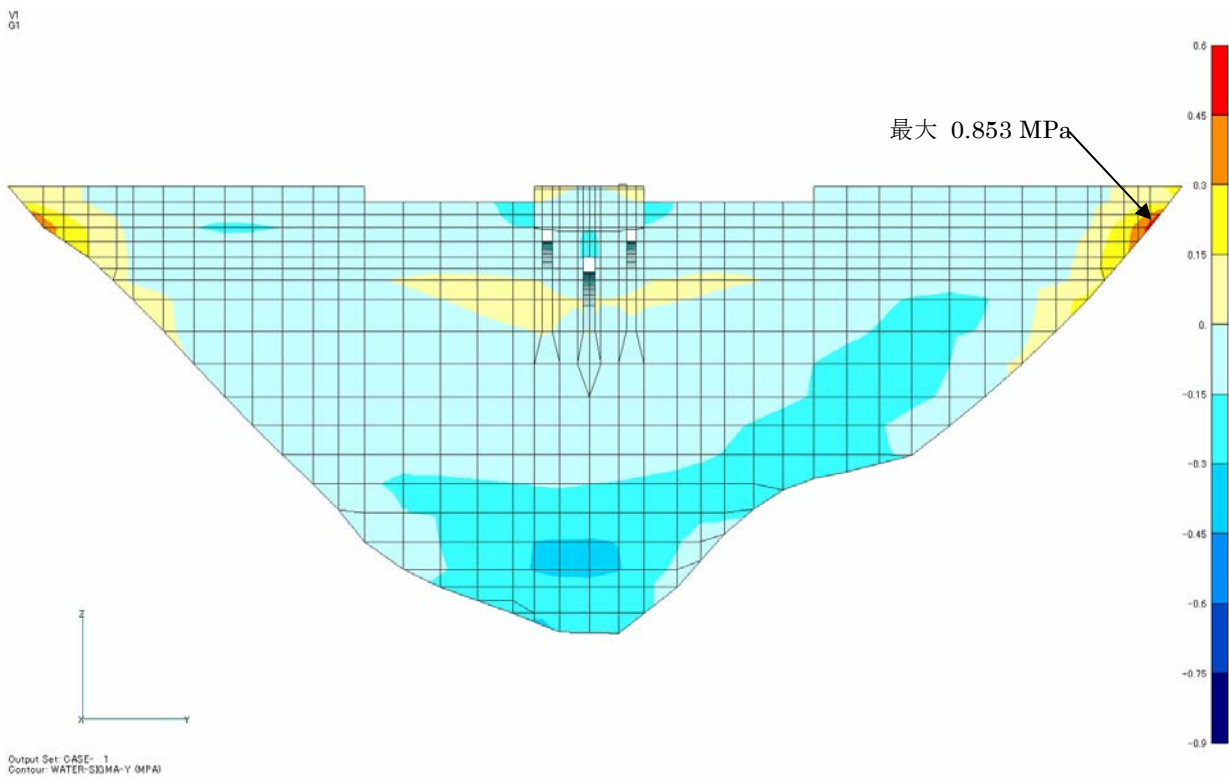


図 6-5 (c) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(下流面)

V1

02

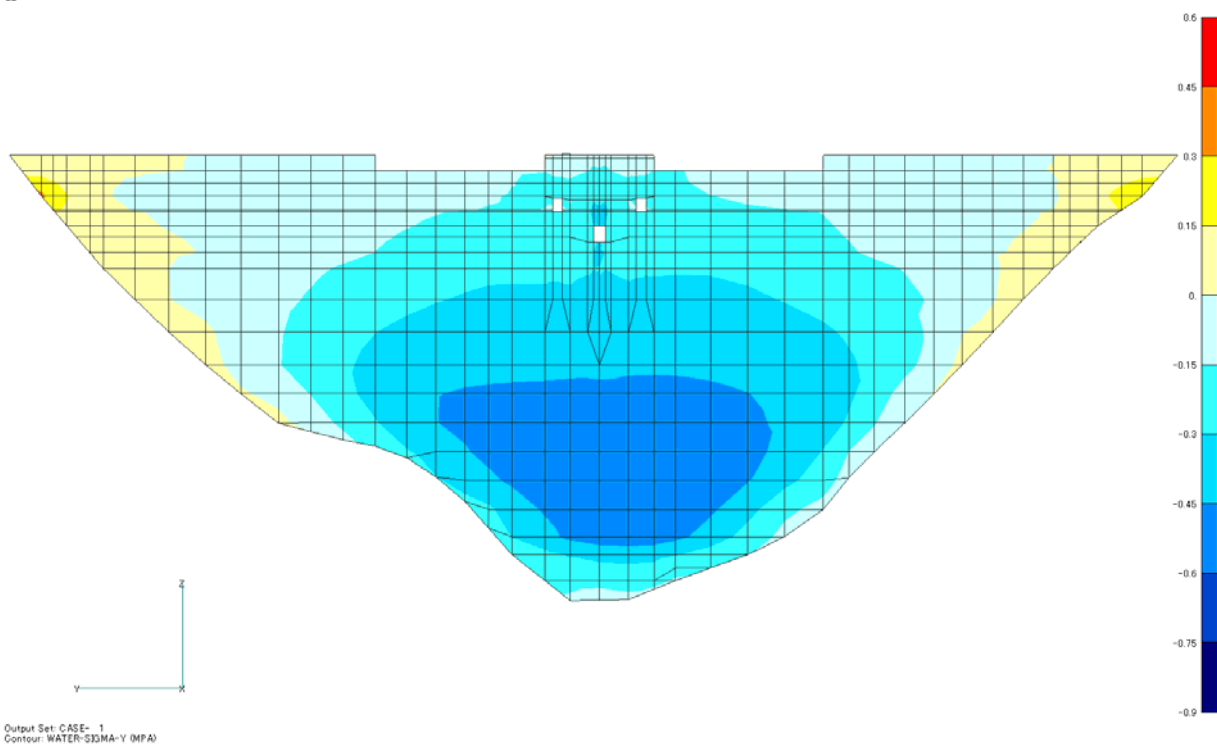


図 6-5 (d) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(縦断面)

V1

03

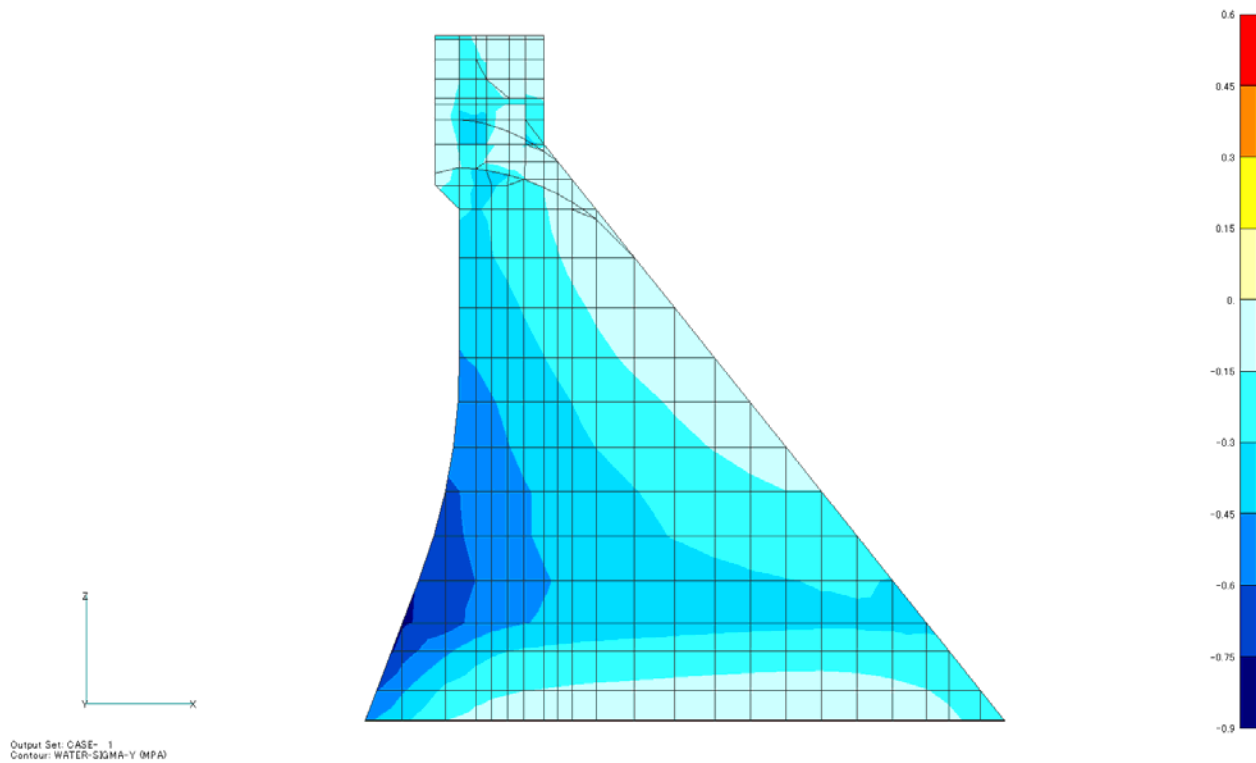


図 6-5 (e) 湛水時ダム軸方向応力分布 (MPa)  
(横断面)

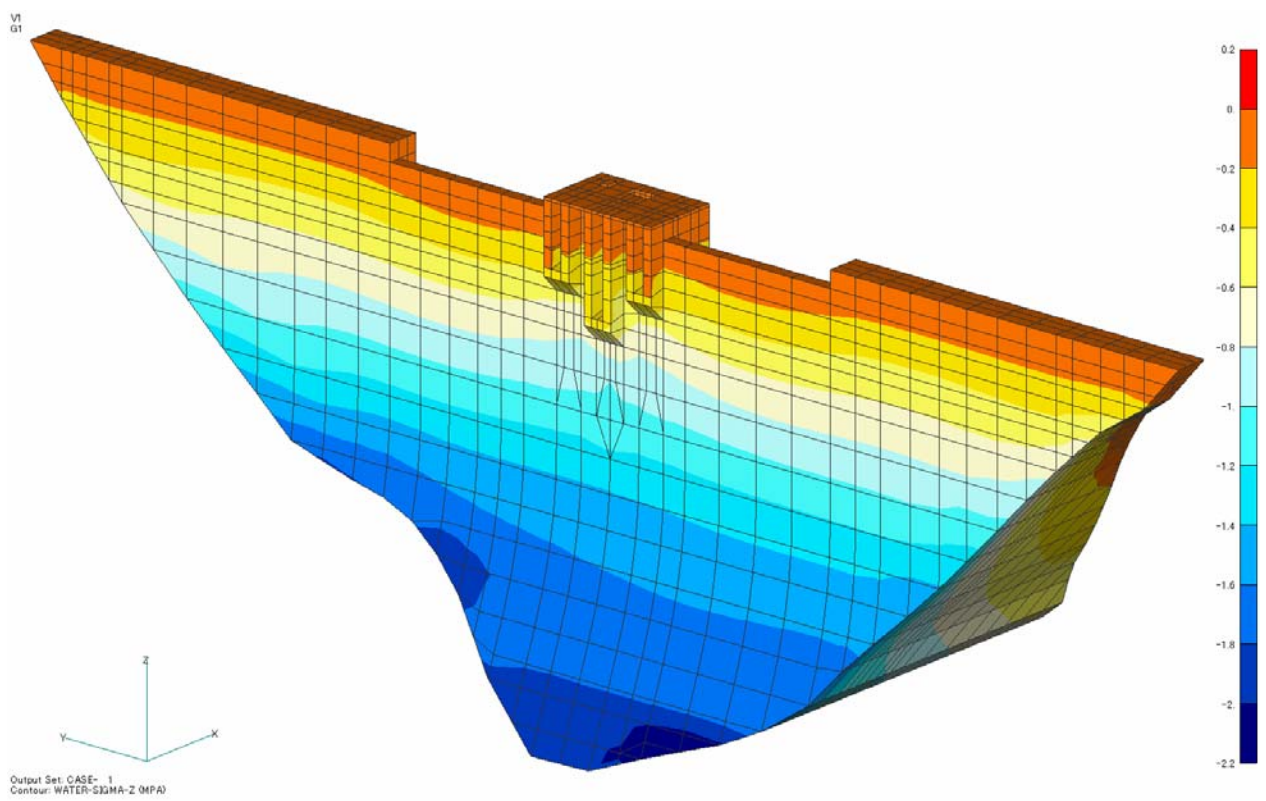


图 6-6 (a) 湛水時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(鳥瞰図)

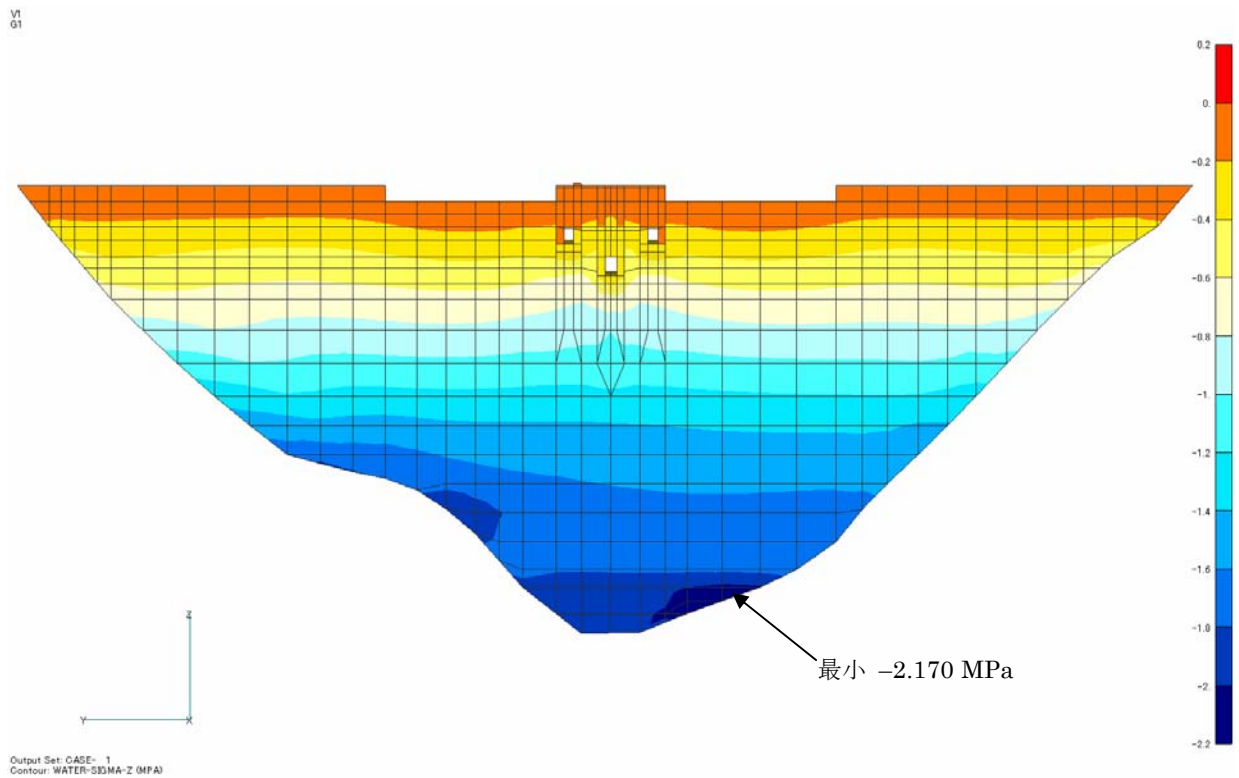


图 6-6 (b) 湛水時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(上流面)

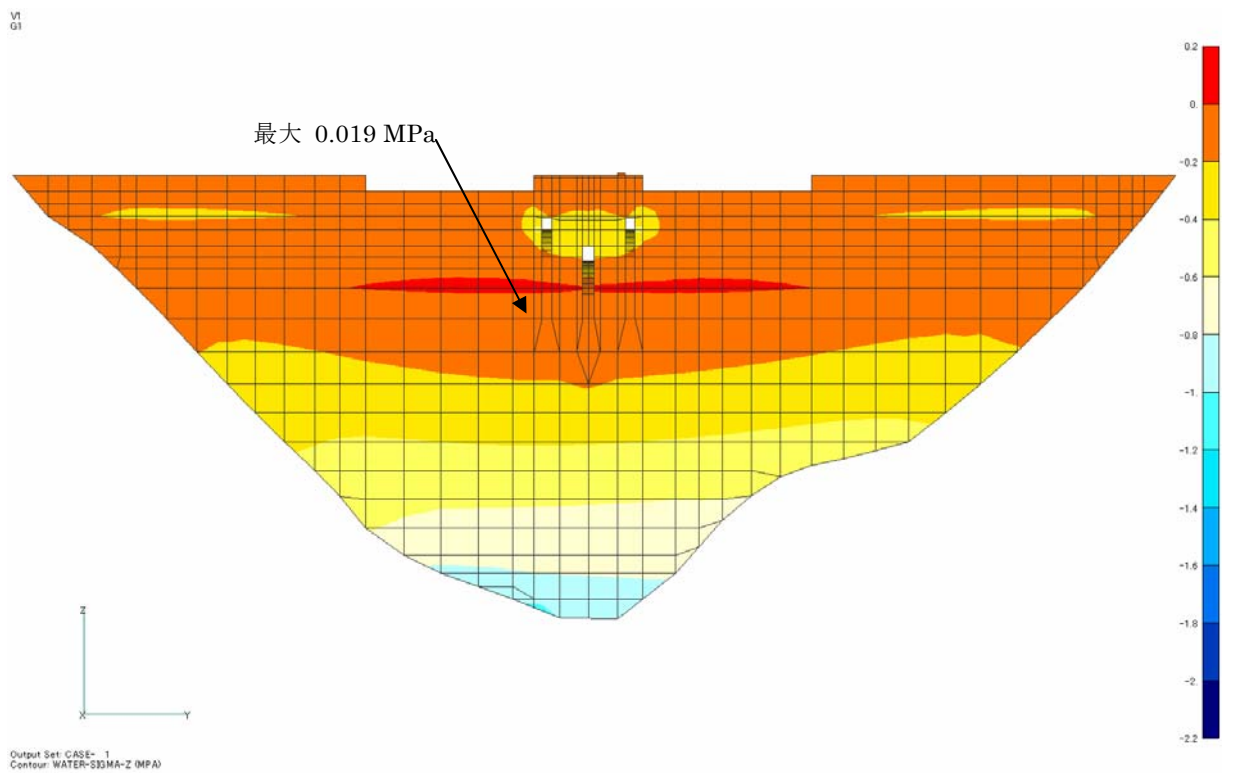


图 6-6 (c) 湛水時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(下流面)

V1  
02

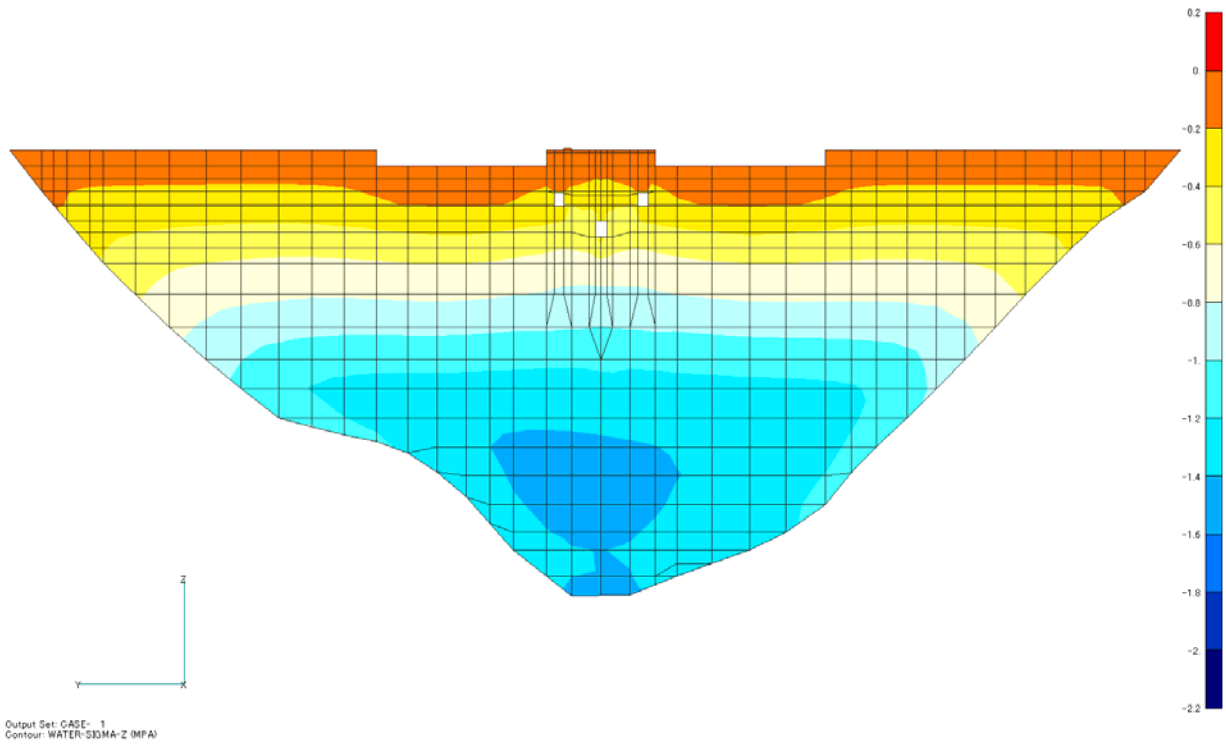


图 6-6 (d) 潜水時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(縦断面)

V1  
03

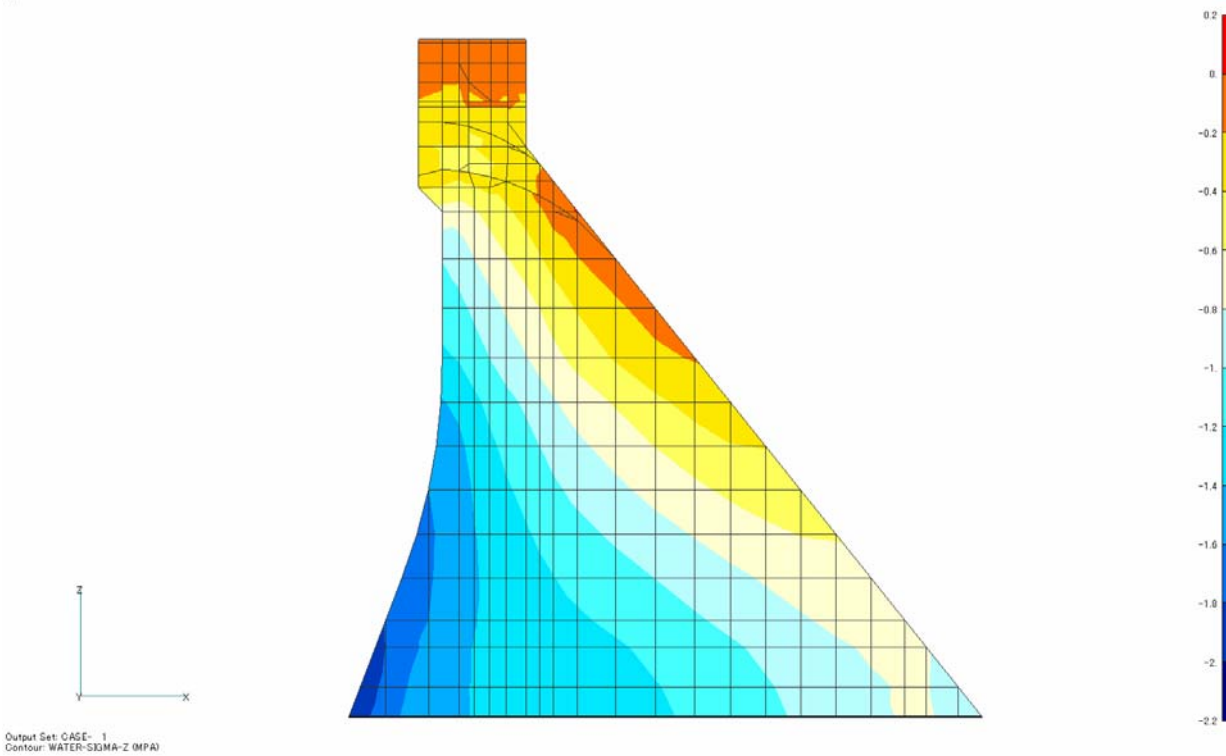


图 6-6 (e) 潜水時鉛直方向応力分布 (MPa)  
(横断面)



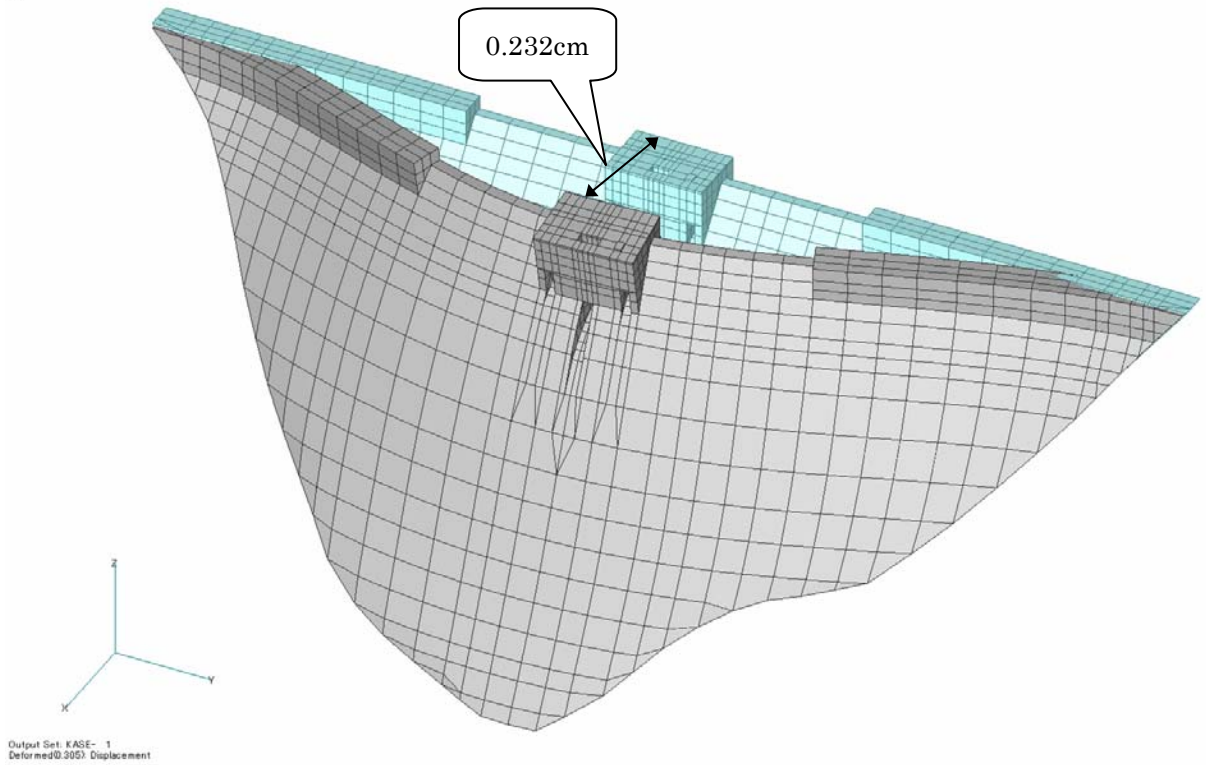


图 6-7(a) 湛水時變形圖  
(下流側鳥瞰圖)

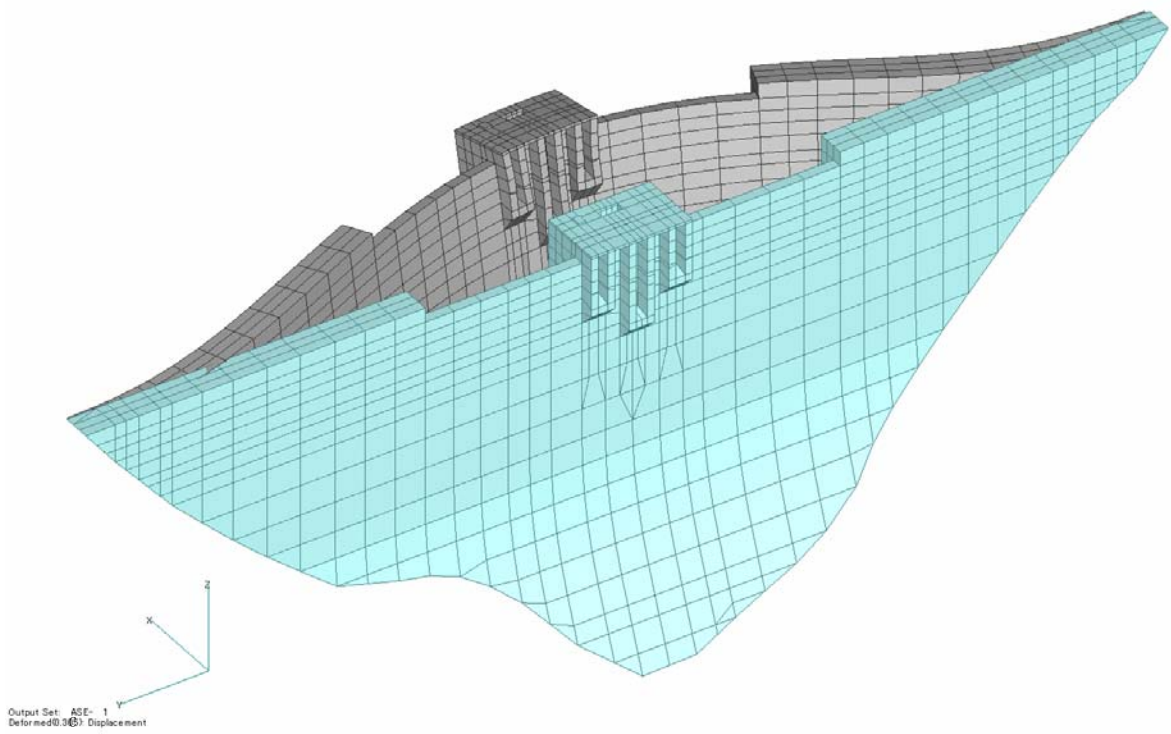
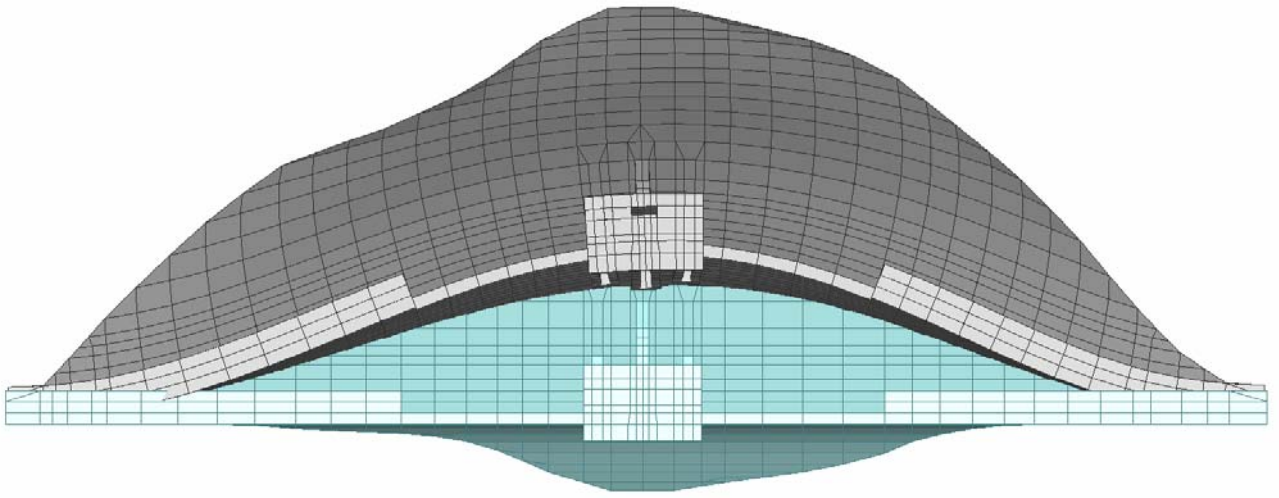


图 6-7(b) 湛水時變形圖  
(上流側鳥瞰圖)



Output Set: ASE\_1  
Deformed(S63): 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 <sup>3</sup> )	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

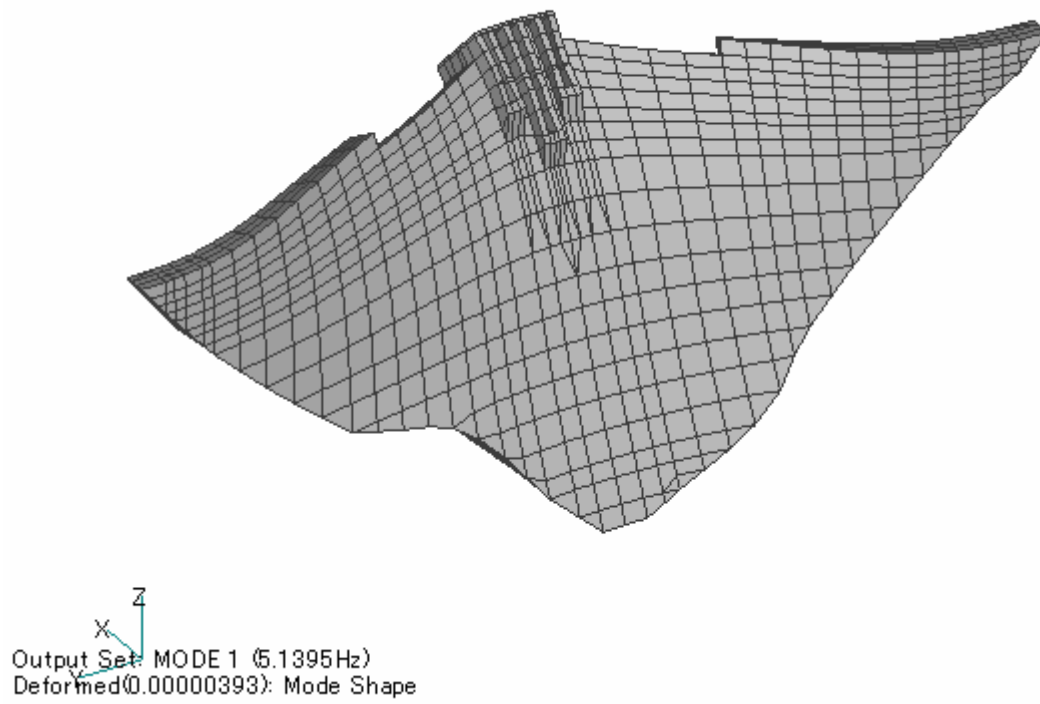
Y 軸 — ダム軸方向

Z 軸 — 鉛直方向

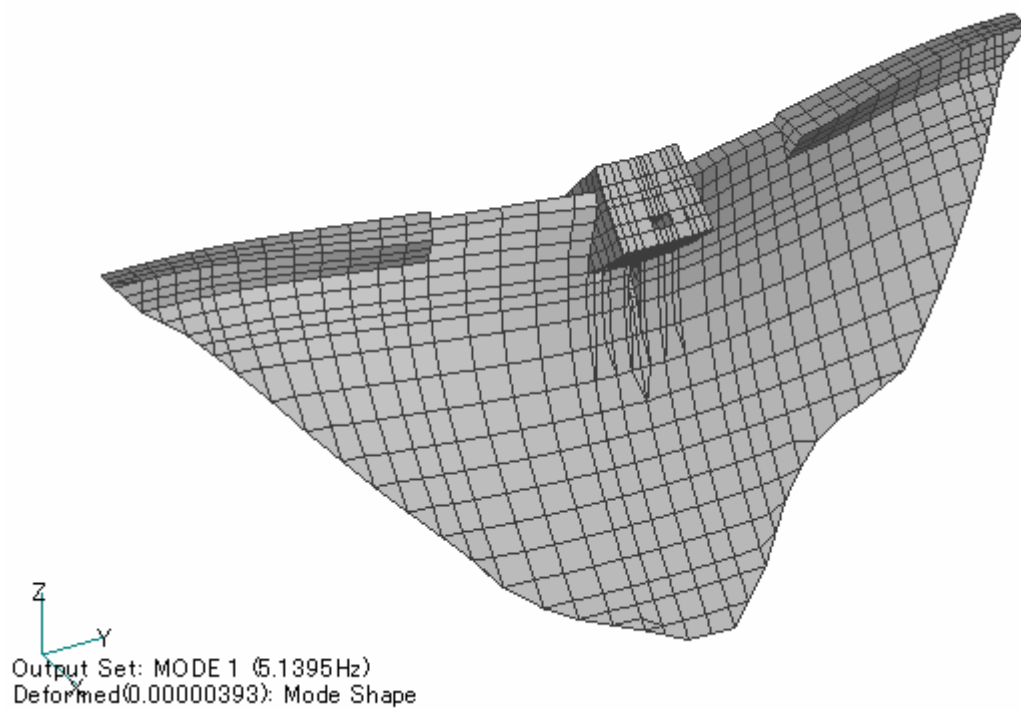
### 6.3 まとめ

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。

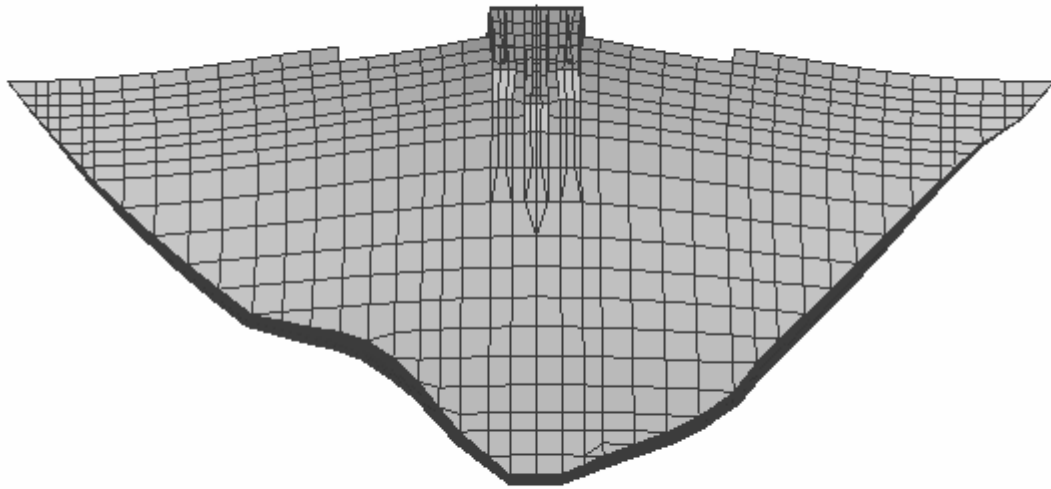



上流側鳥瞰図



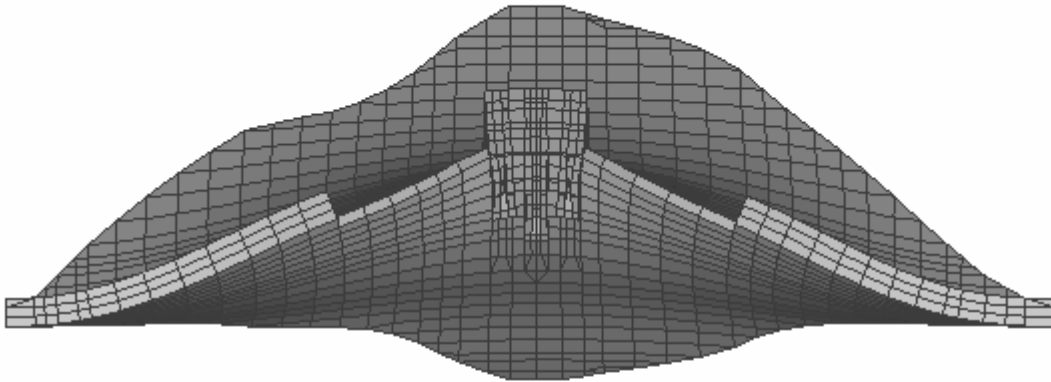
下流側鳥瞰図


図 6-8(a) 札内川ダムの 1 次固有振動モード (5.1395Hz)



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

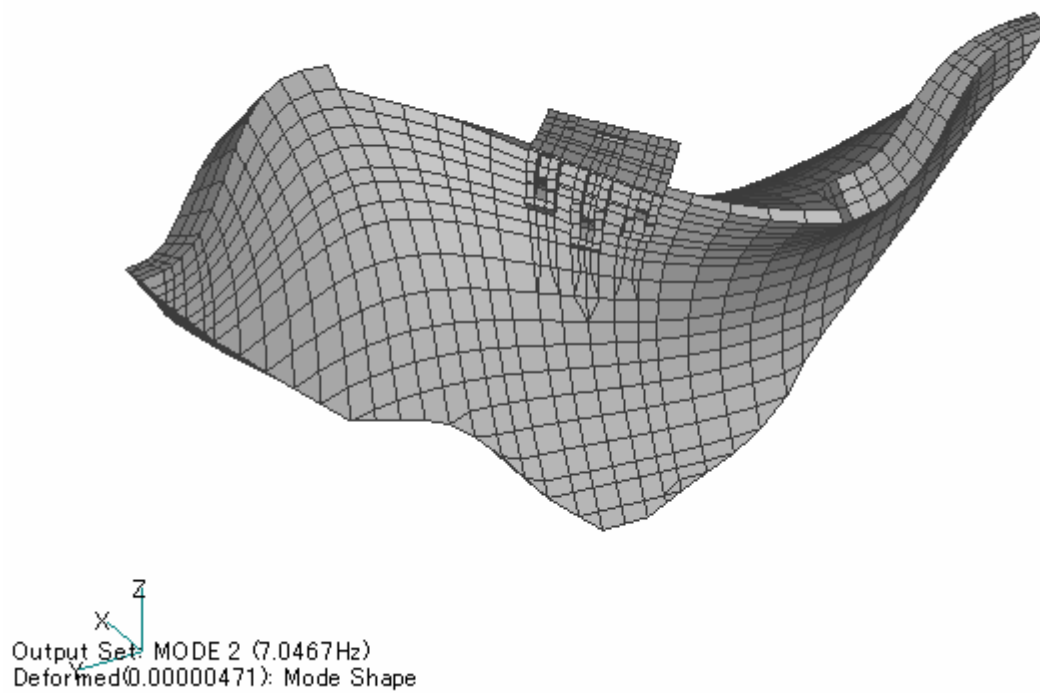
上流側正面より



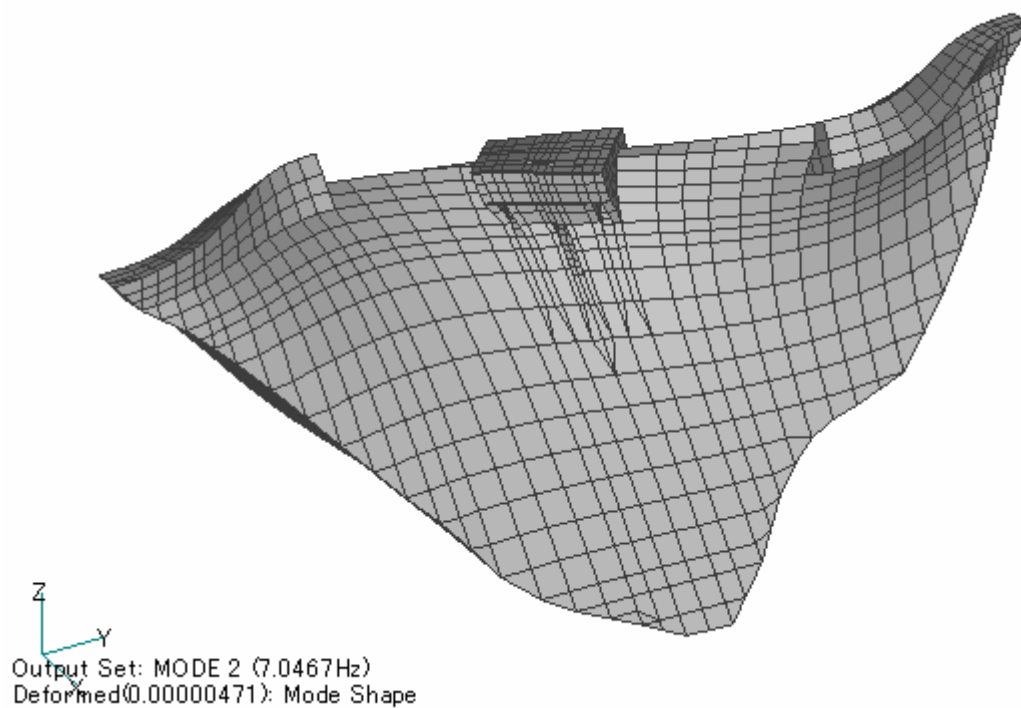
 X  
 Output Set: MODE 1 (5.1395Hz)  
 Deformed(0.00000393): Mode Shape

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)



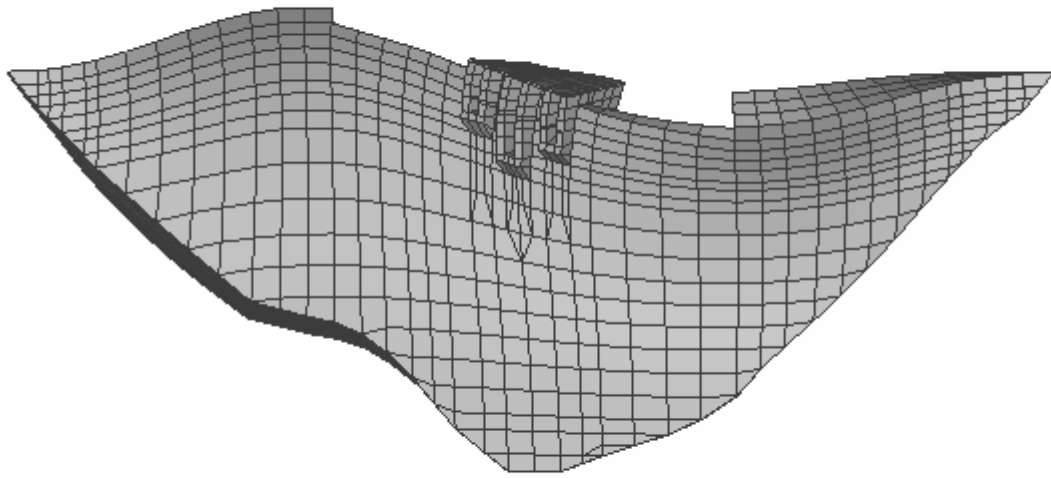
上流側鳥瞰図



下流側鳥瞰図

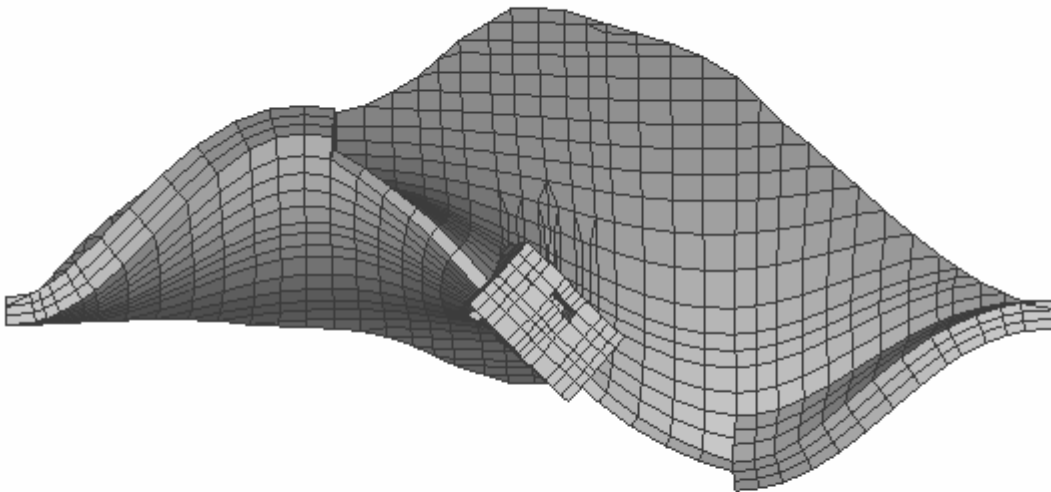
図 6-9 (a) 札内川ダムの 2 次固有振動モード (7.0467Hz)





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

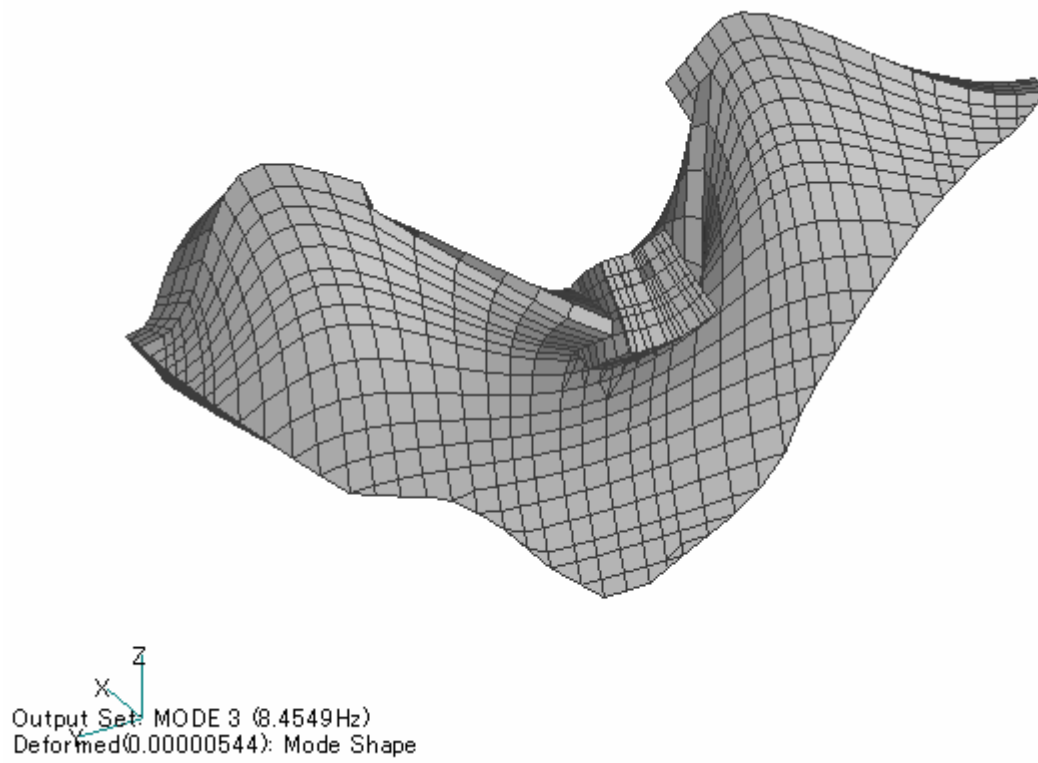
上流側正面より



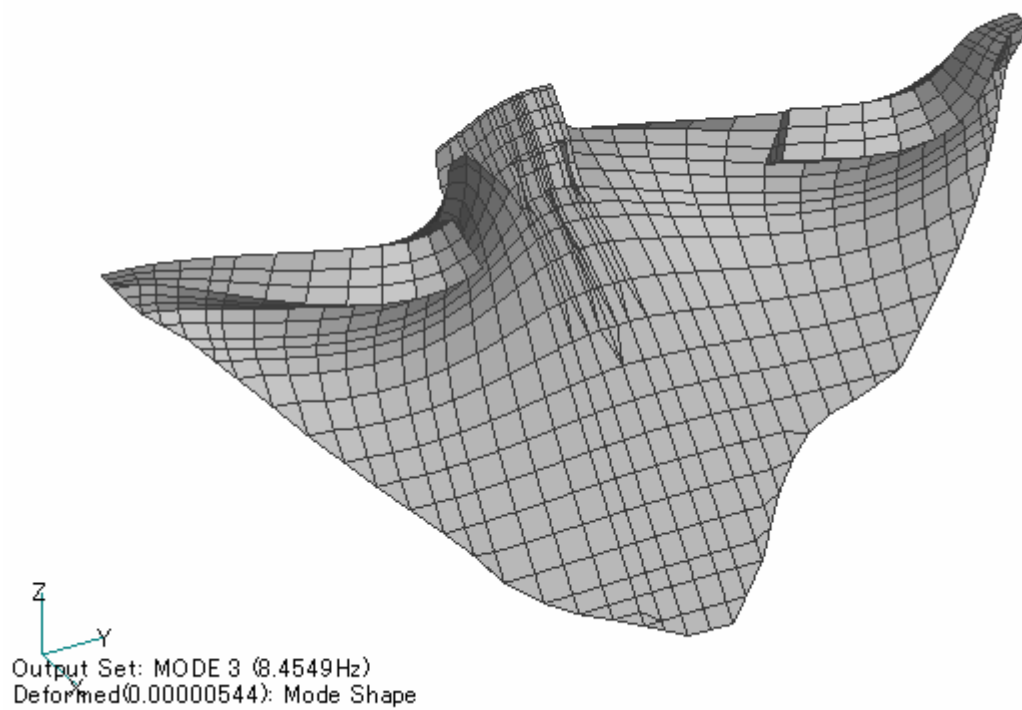
Output Set: MODE 2 (7.0467Hz)  
Deformed(0.00000471): Mode Shape

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)

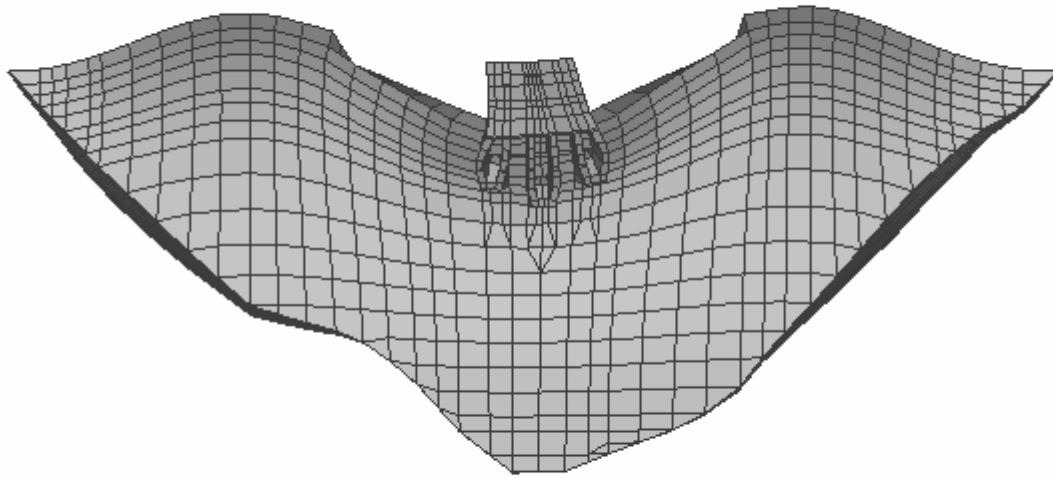



上流側鳥瞰図



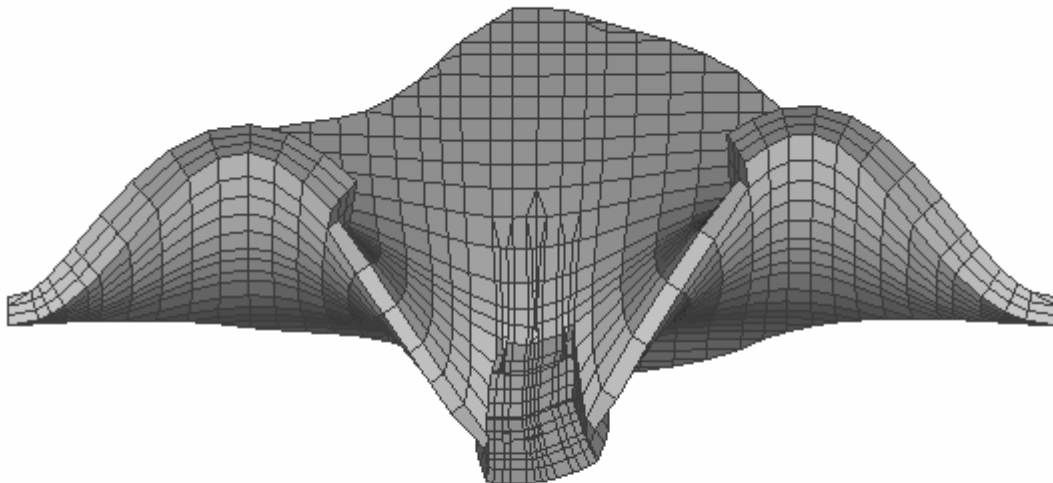
下流側鳥瞰図


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

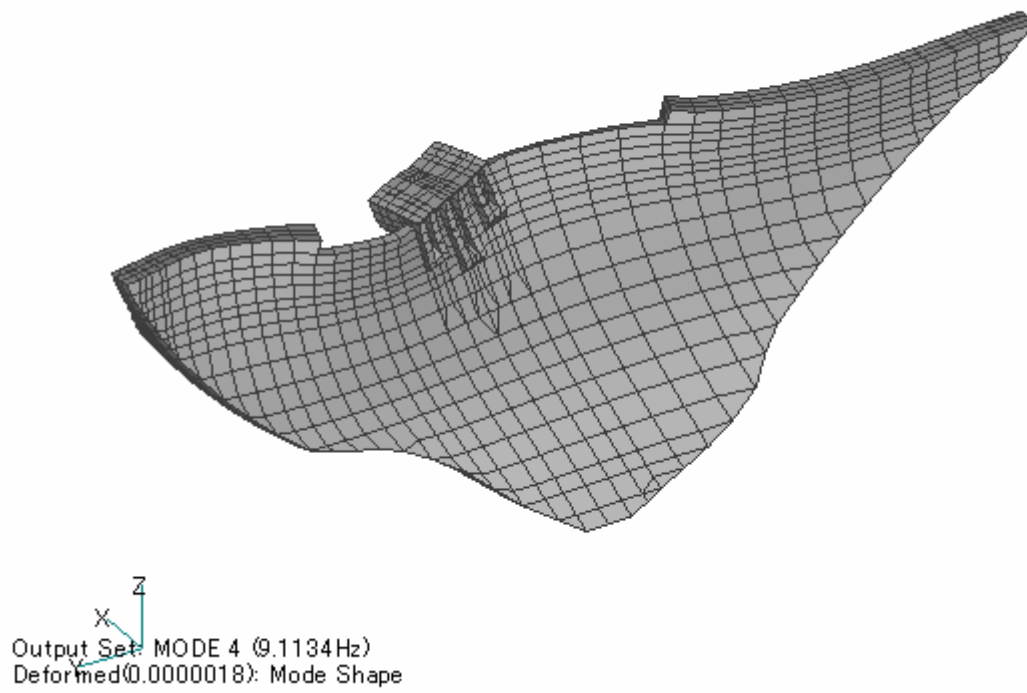
上流側正面より



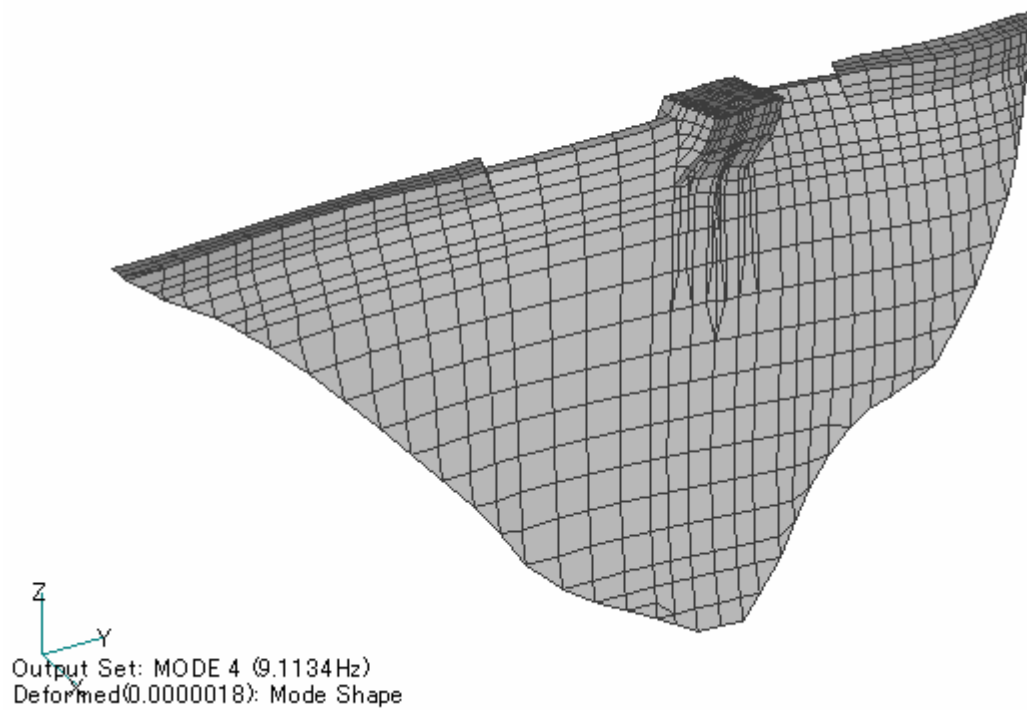
 X  
 Output Set: MODE 3 (8.4549Hz)  
 Deformed(0.00000544): Mode Shape

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)

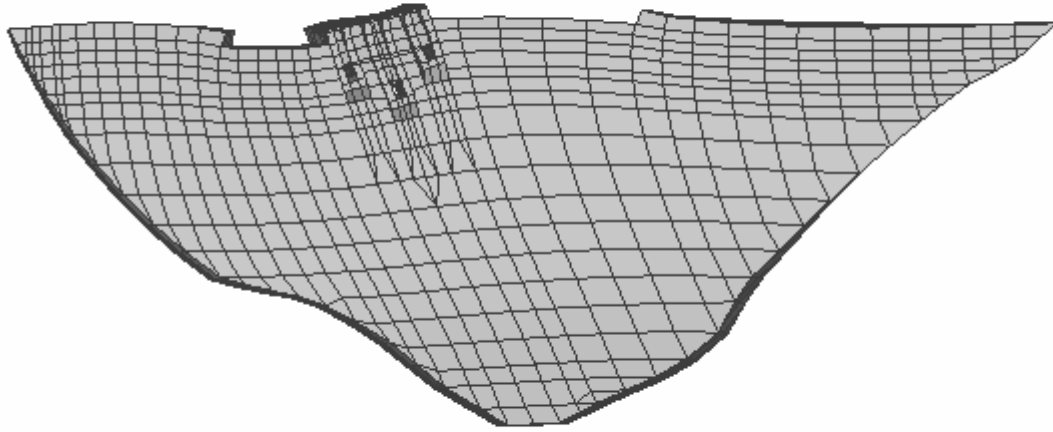


上流側鳥瞰図



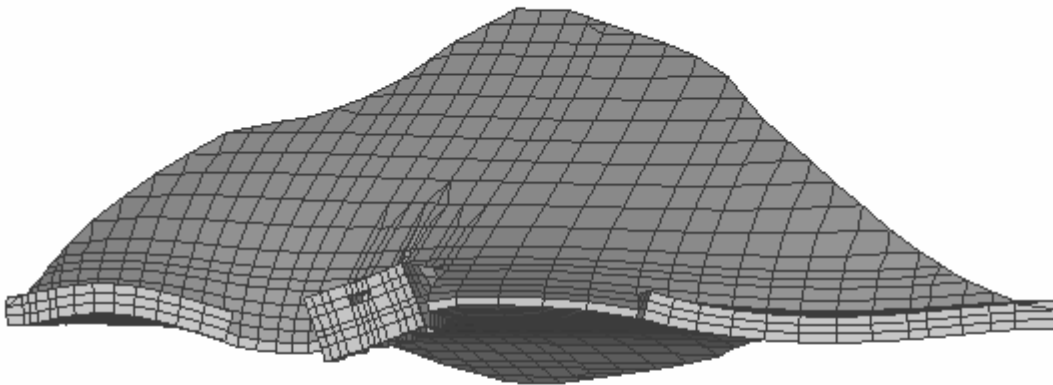
下流側鳥瞰図

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



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

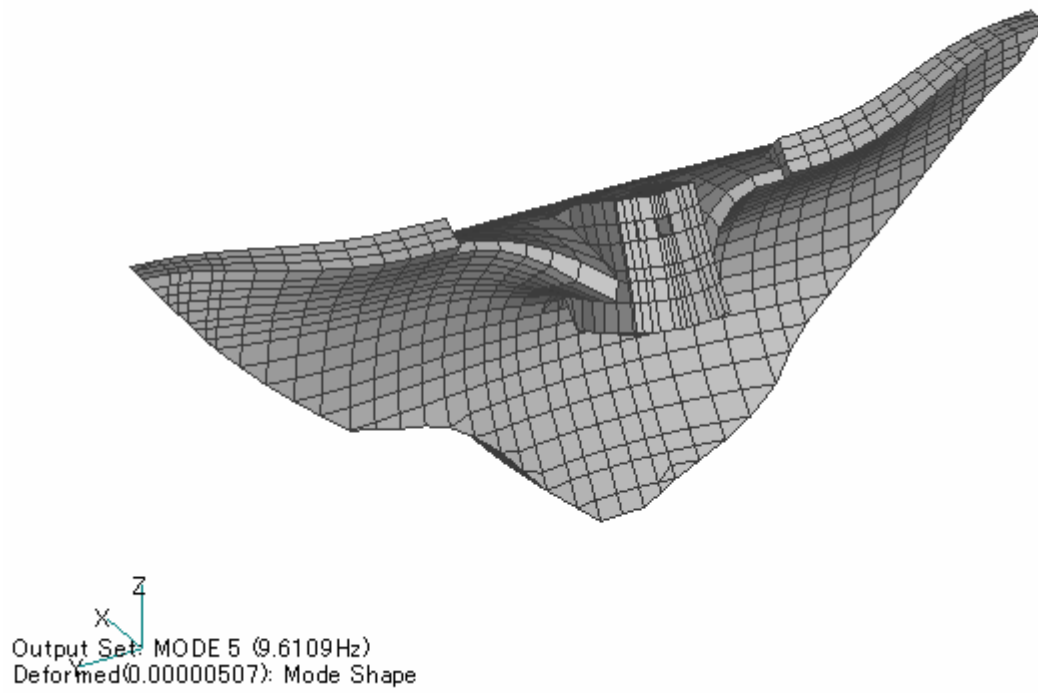
上流側正面より



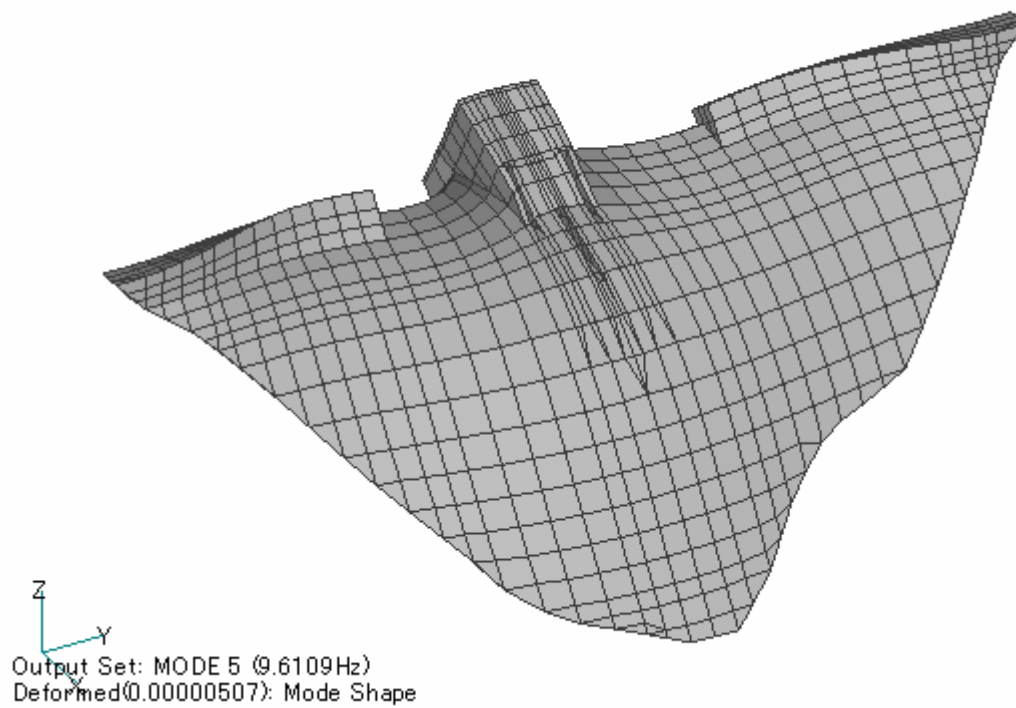
X  
 Output Set: MODE 4 (9.1134Hz)  
 Deformed(0.0000018): Mode Shape

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)

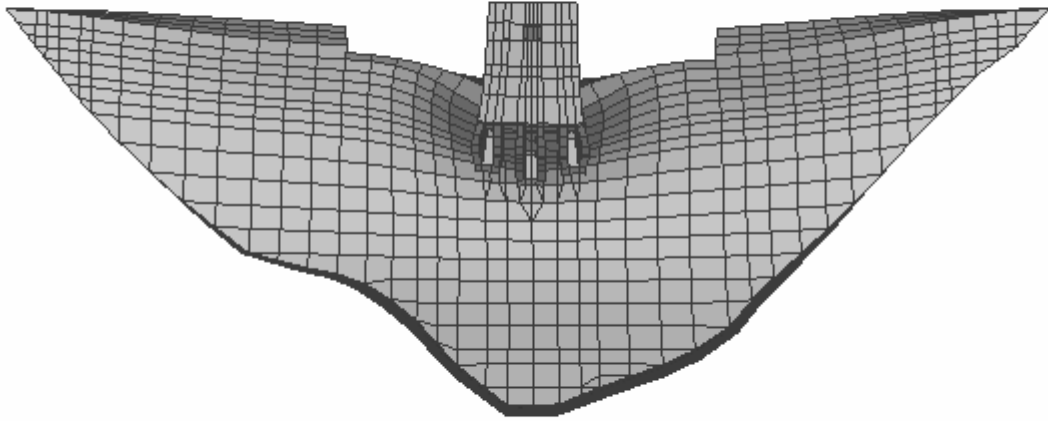



上流側鳥瞰図



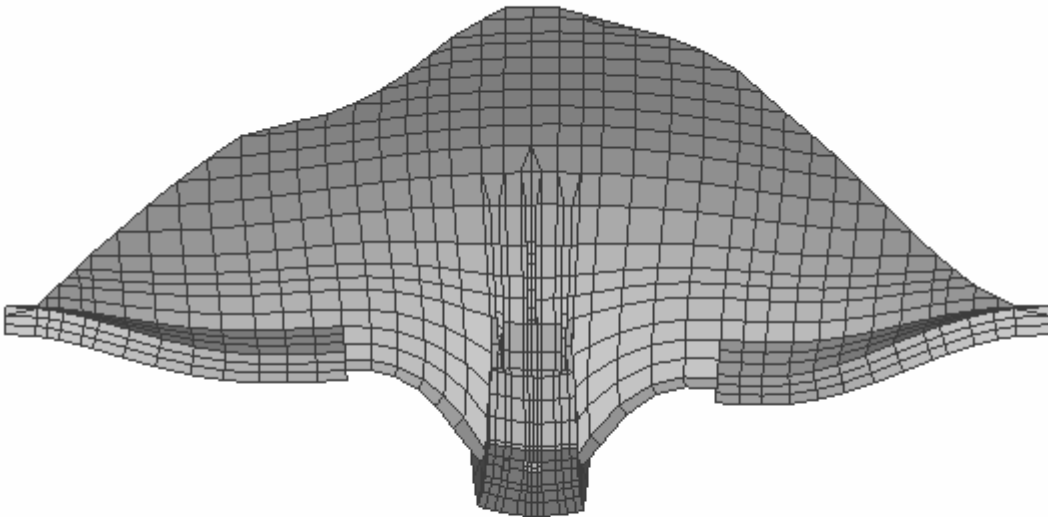
下流側鳥瞰図


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

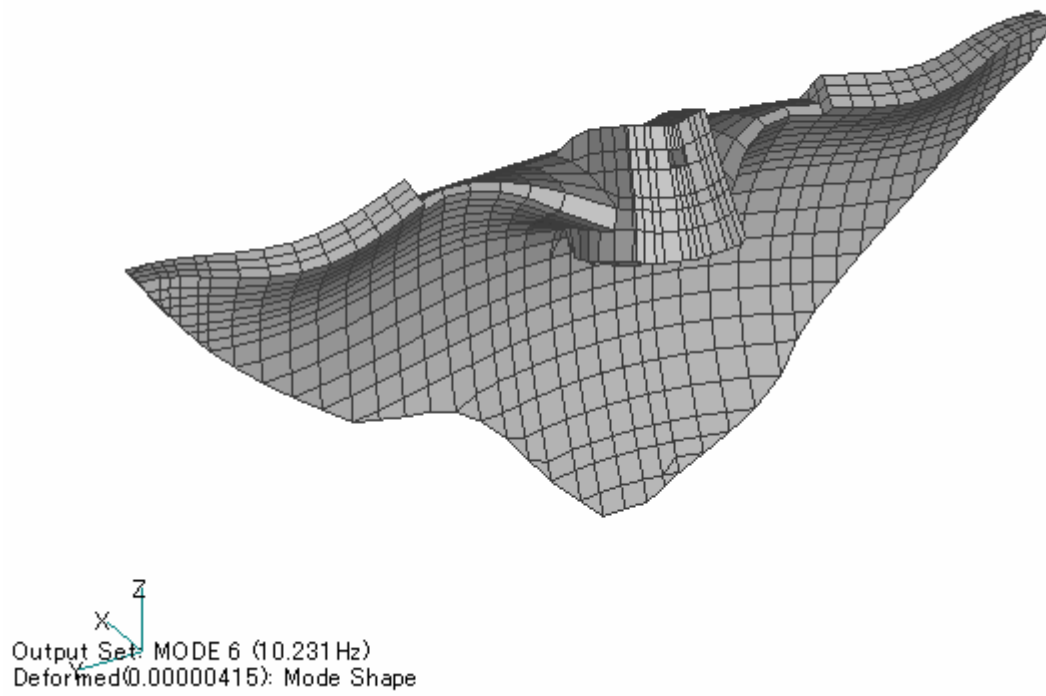
上流側正面より



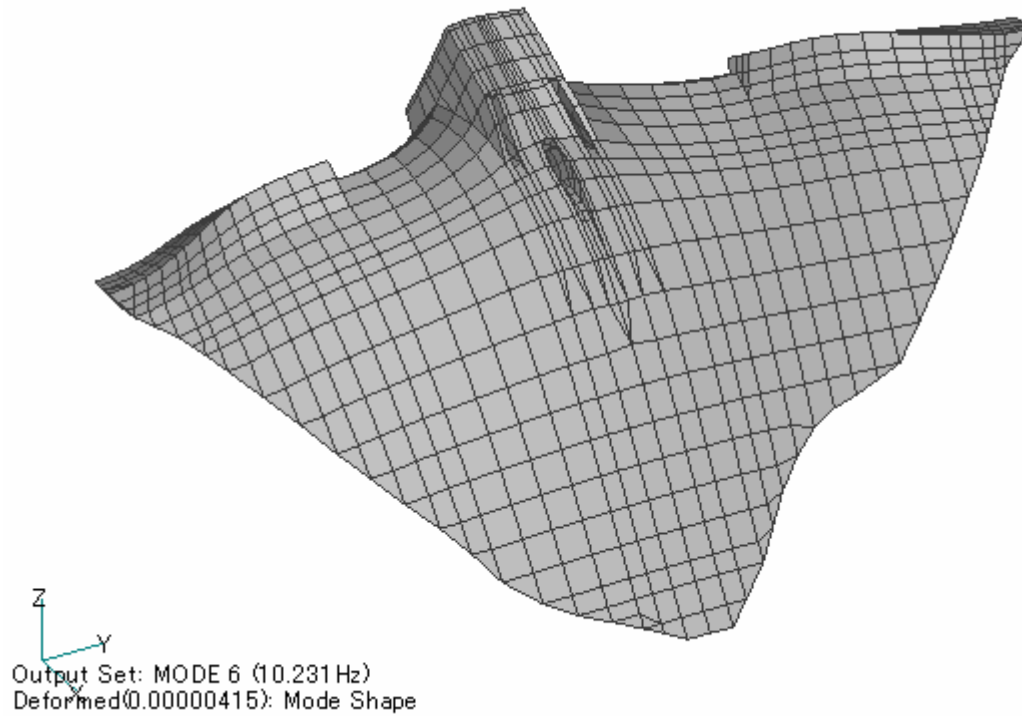
 X  
 Output Set: MODE 5 (9.6109Hz)  
 Deformed(0.00000507): Mode Shape

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)



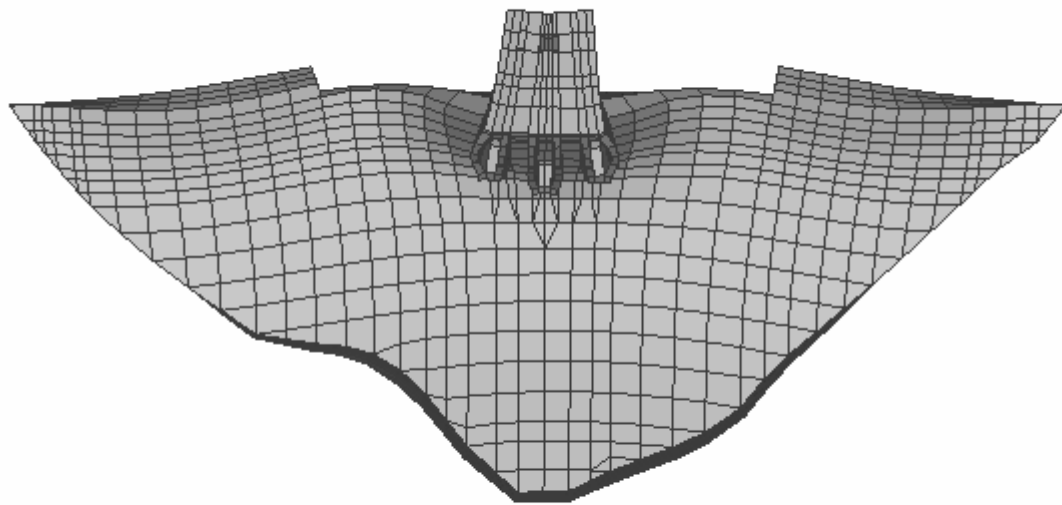
上流側鳥瞰図




下流側鳥瞰図

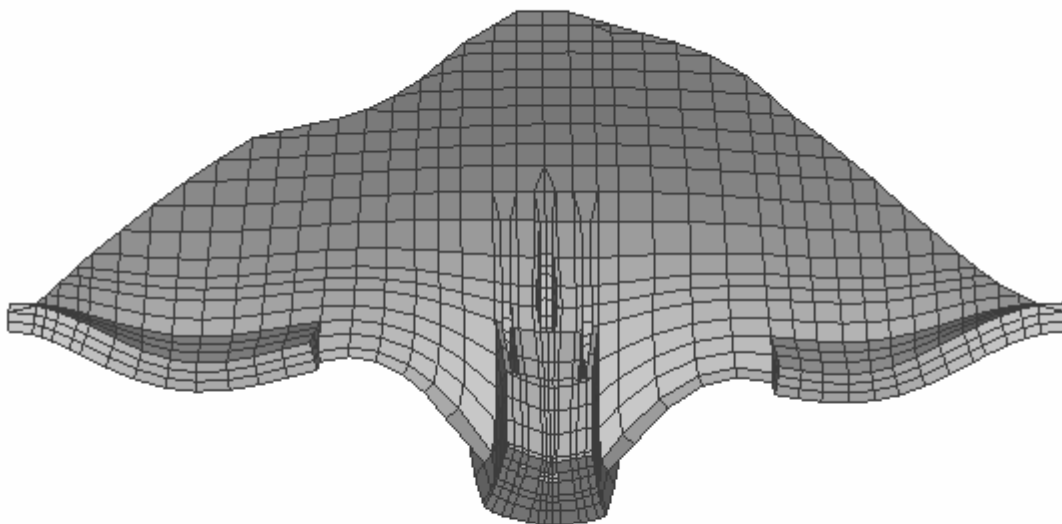
図 6-13(a) 札内川ダムの 6 次固有振動モード (10.231Hz)






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

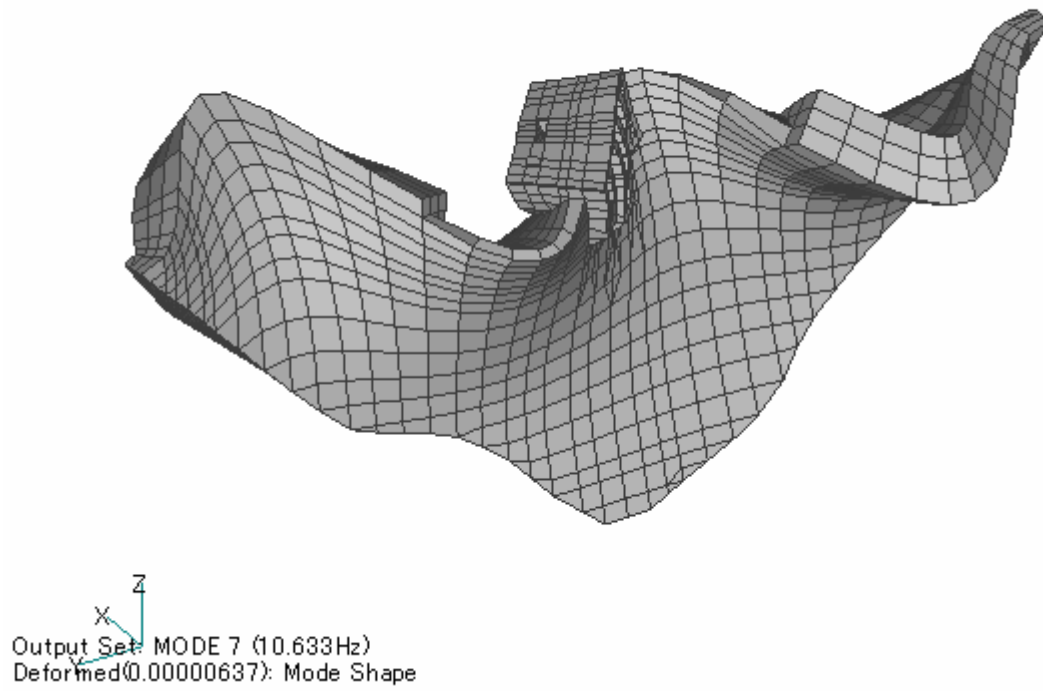
上流側正面より



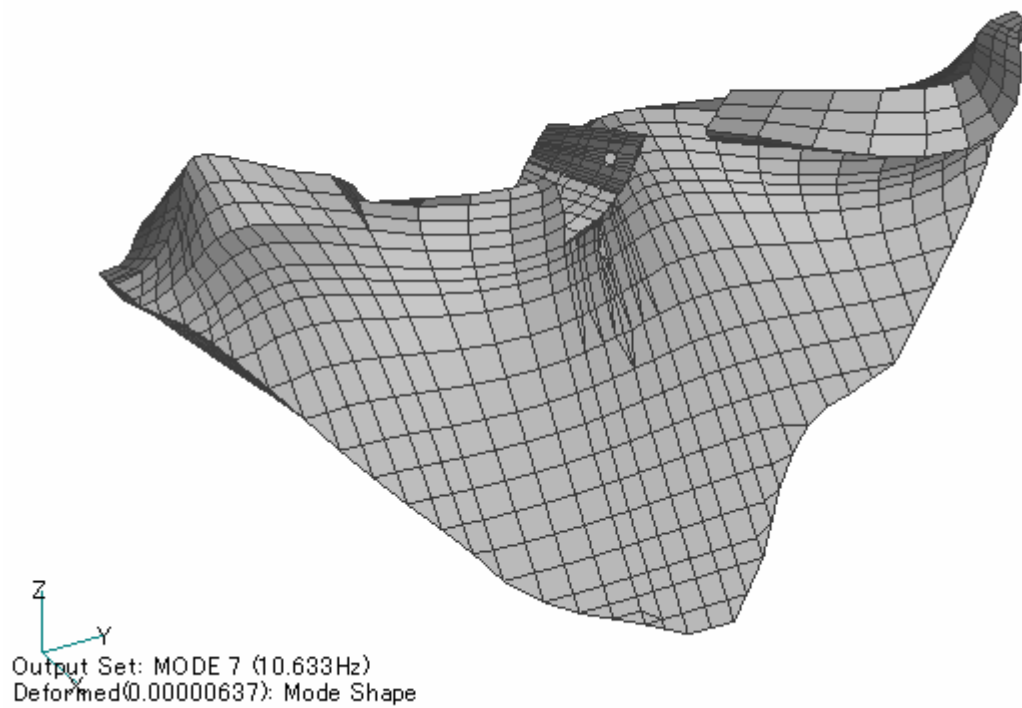
 X  
 Output Set: MODE 6 (10.231 Hz)  
 Deformed(0.00000415): Mode Shape

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)

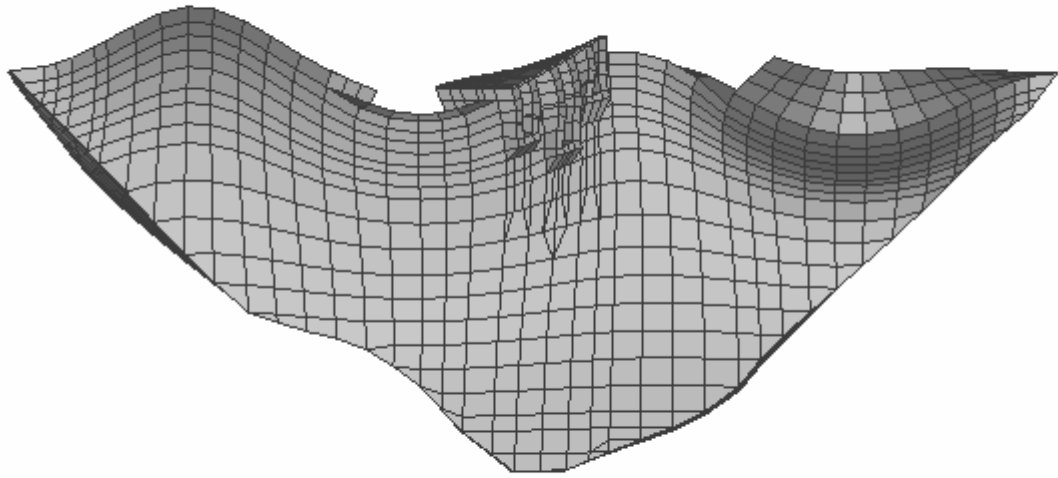


上流側鳥瞰図



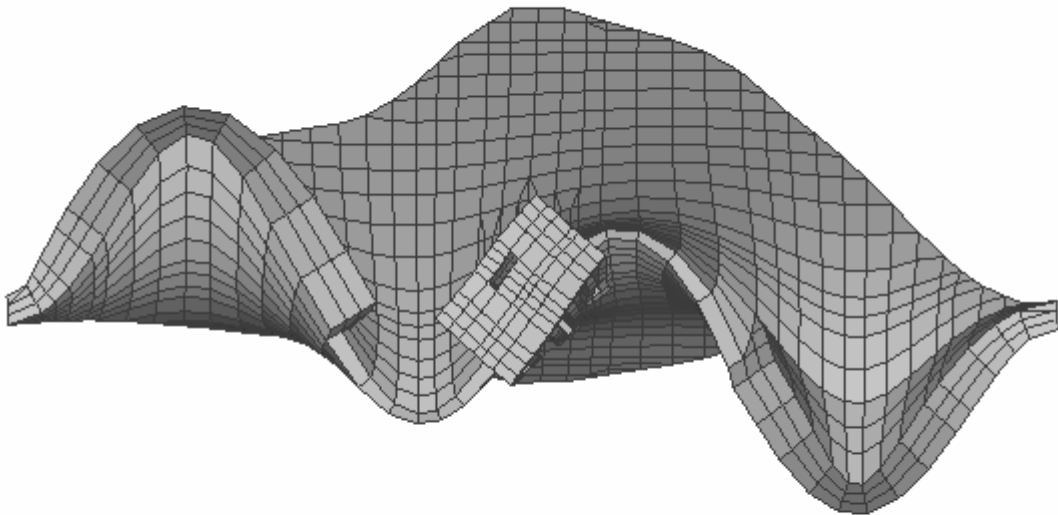
下流側鳥瞰図

図 6-14(a) 札内川ダムの7次固有振動モード (10.633Hz)



Output Set: MODE 7 (10.633Hz)  
 Deformed(0.00000637): Mode Shape

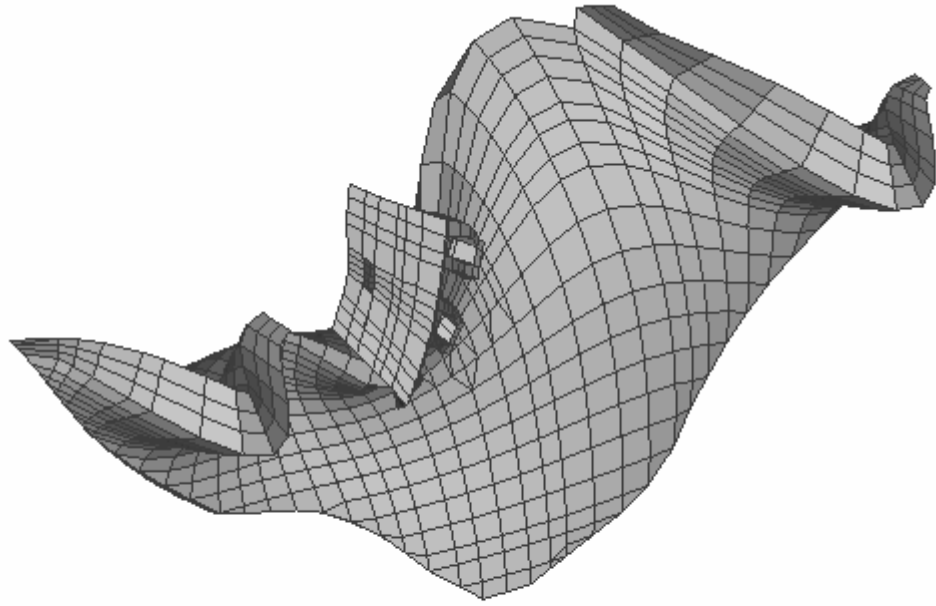
正面より



Output Set: MODE 7 (10.633Hz)  
 Deformed(0.00000637): Mode Shape

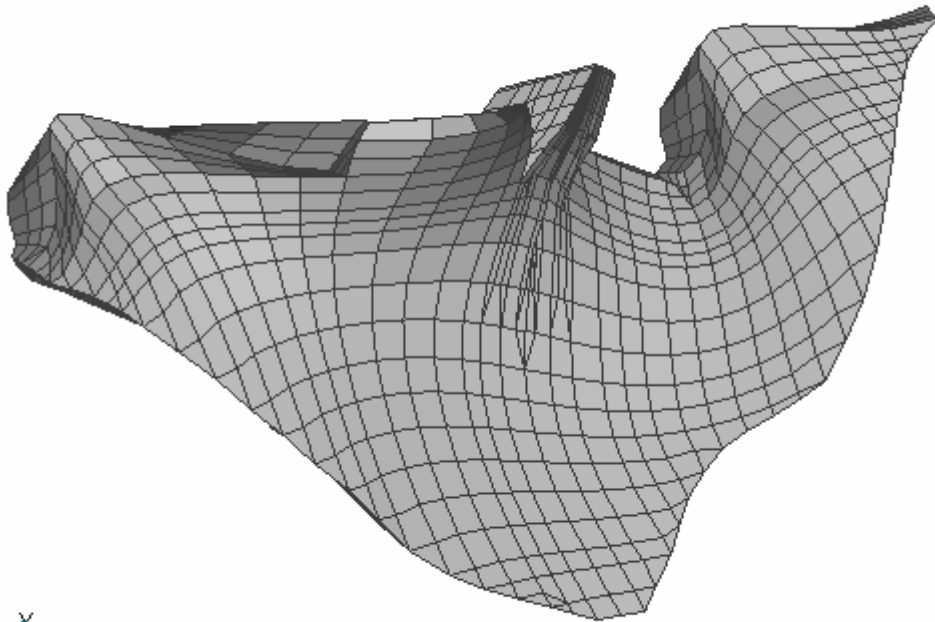
上方より

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

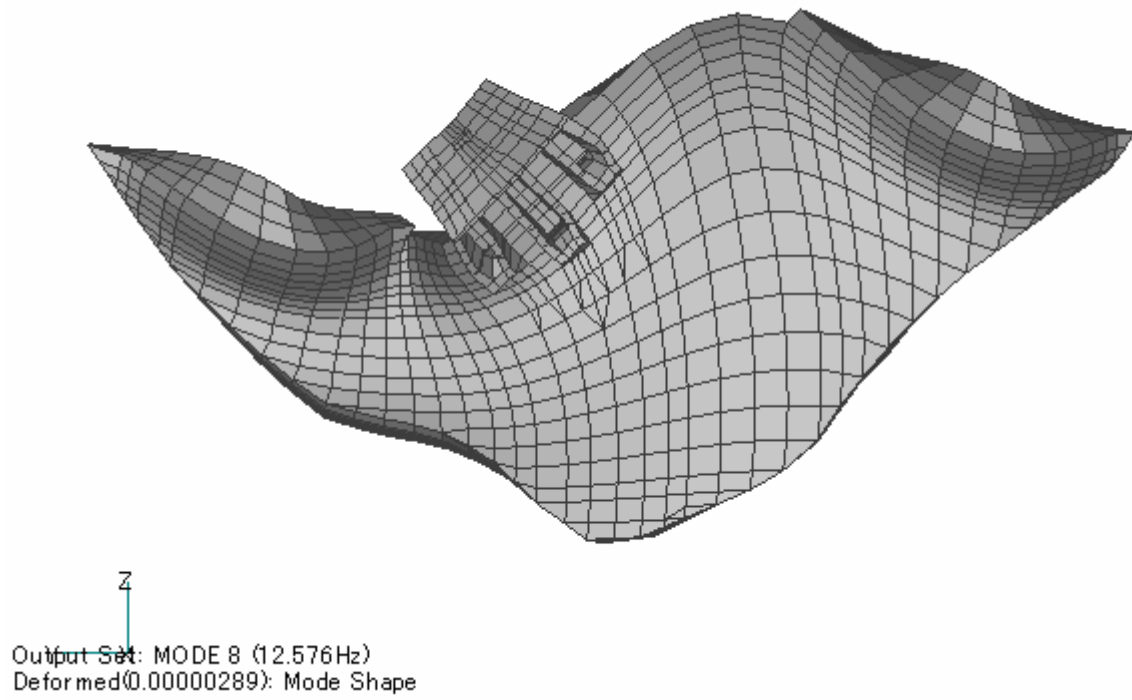
上流側鳥瞰図



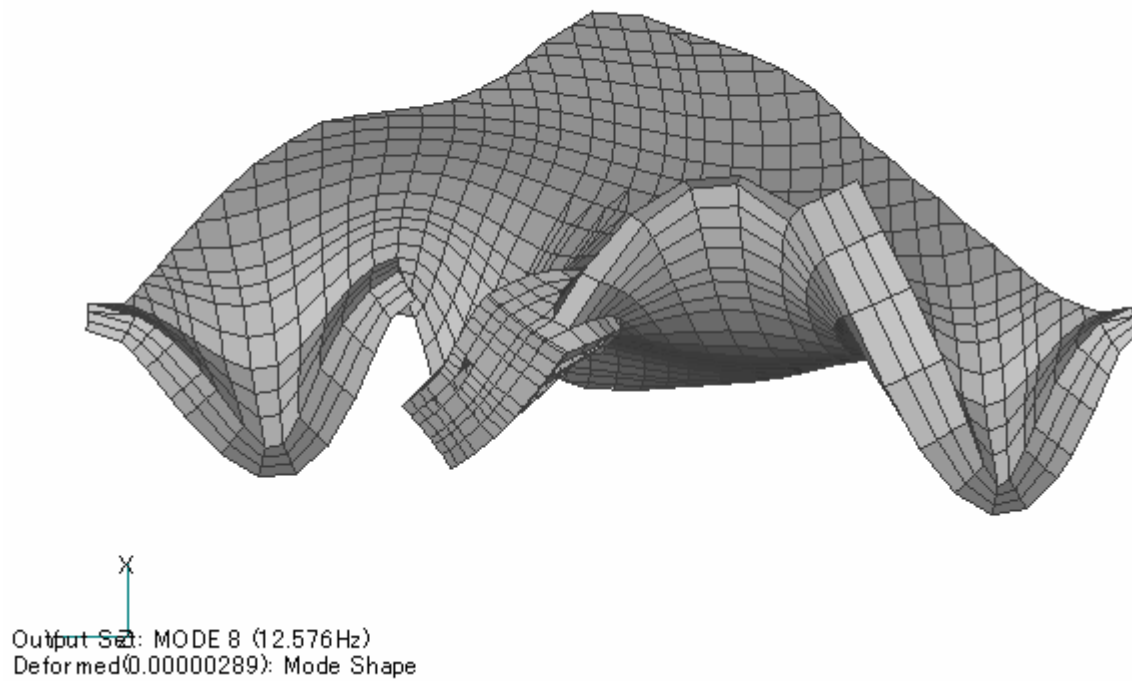
Output Set: MODE 8 (12.576Hz)  
 Deformed(0.00000289): Mode Shape

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)

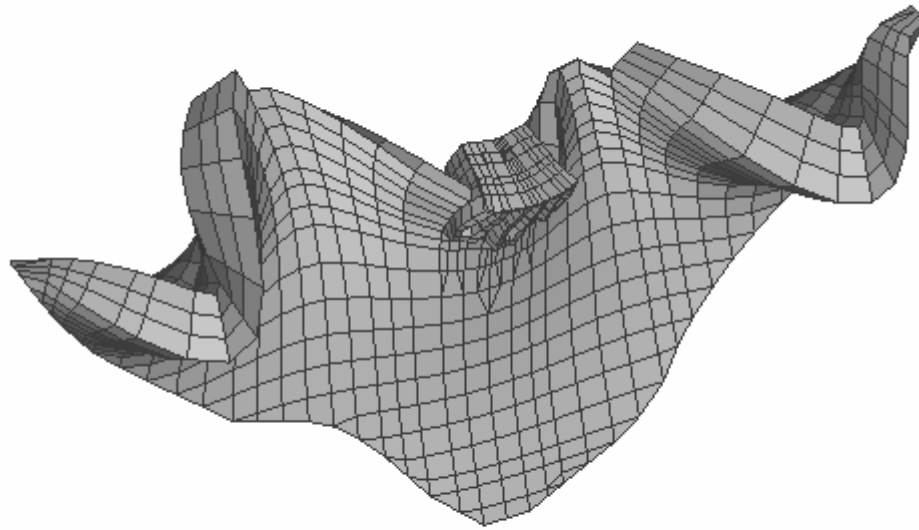


上流側正面より



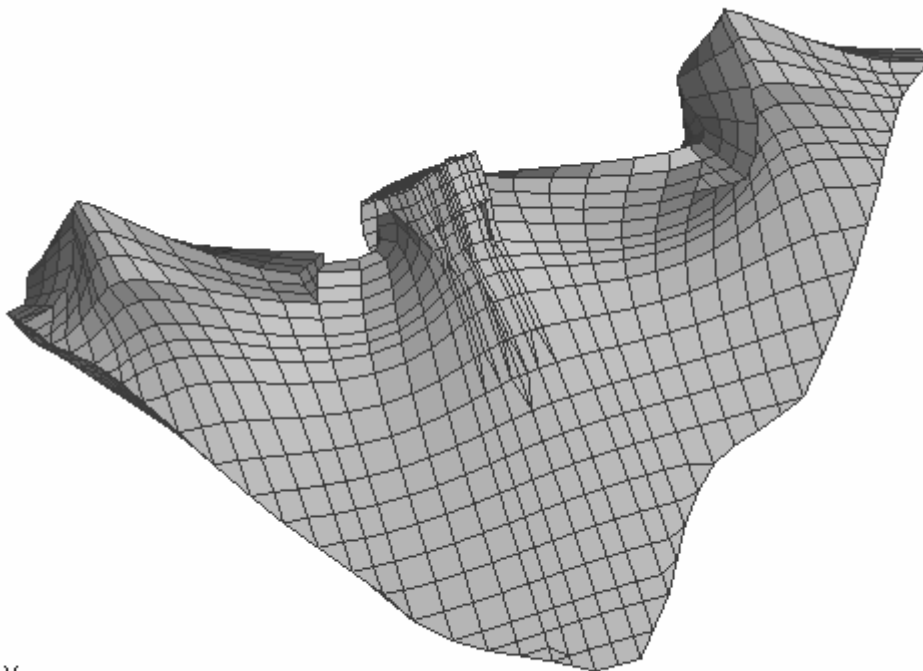
上方より

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

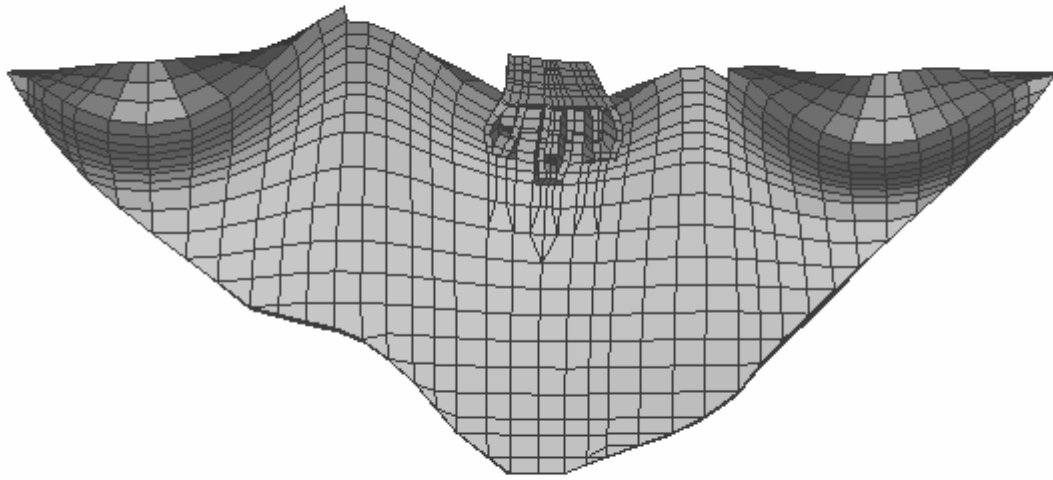
上流側鳥瞰図




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

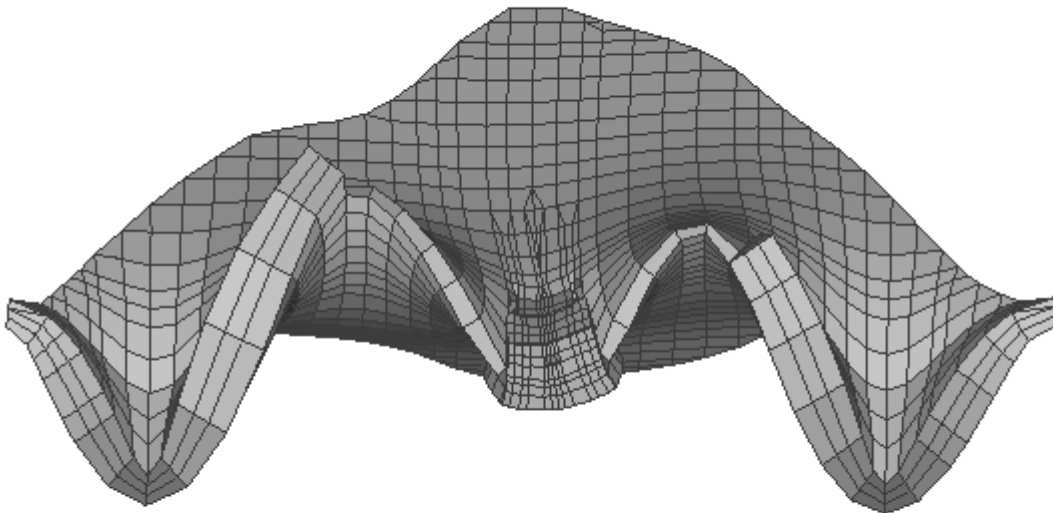
下流側鳥瞰図


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

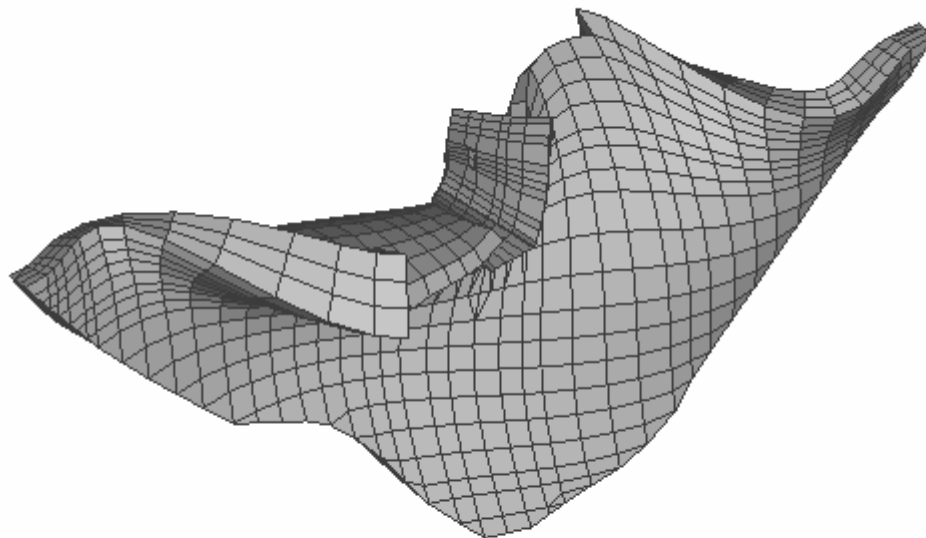
上流側正面より



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

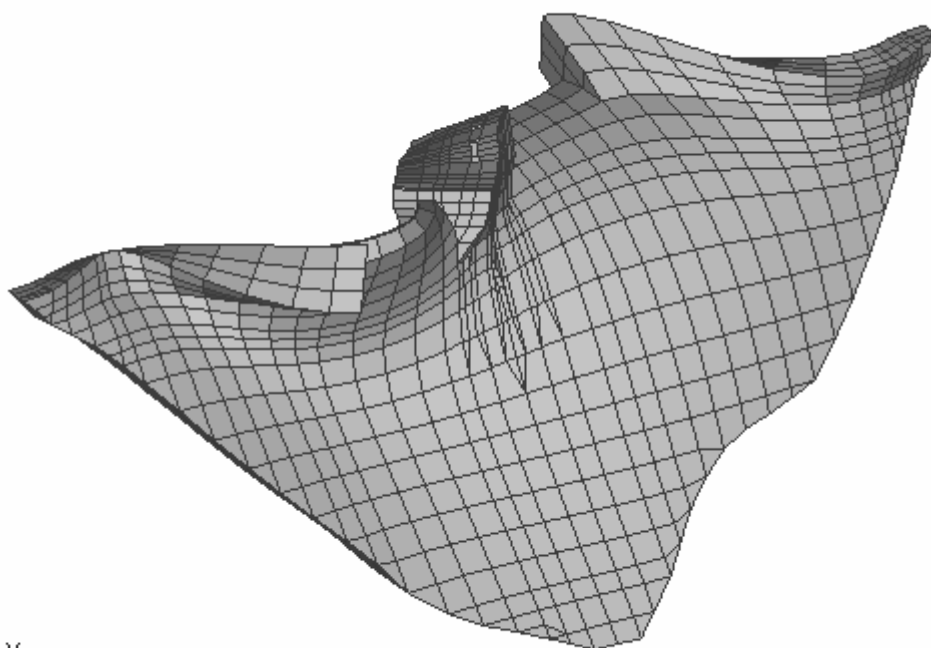
上方より

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



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

上流側鳥瞰図

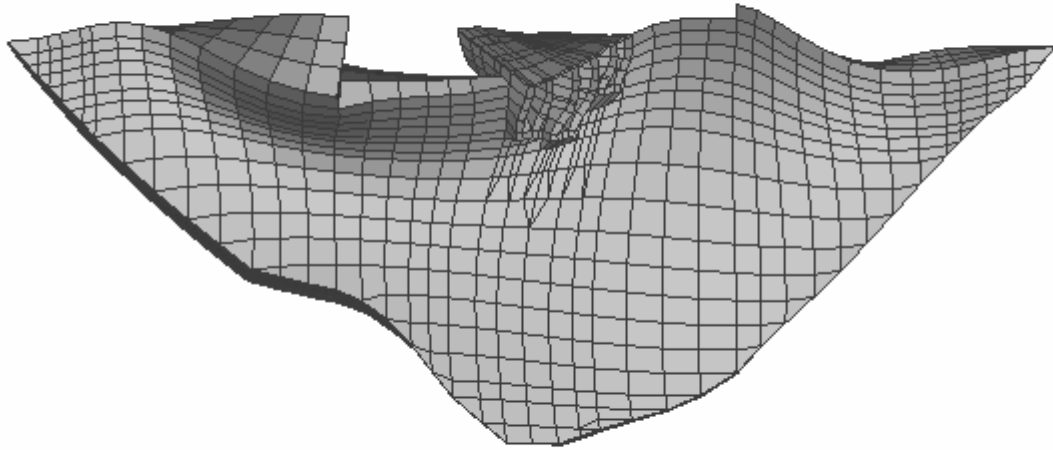



Output Set: MODE 10 (13.472Hz)  
Deformed(0.00000625): Mode Shape

下流側鳥瞰図

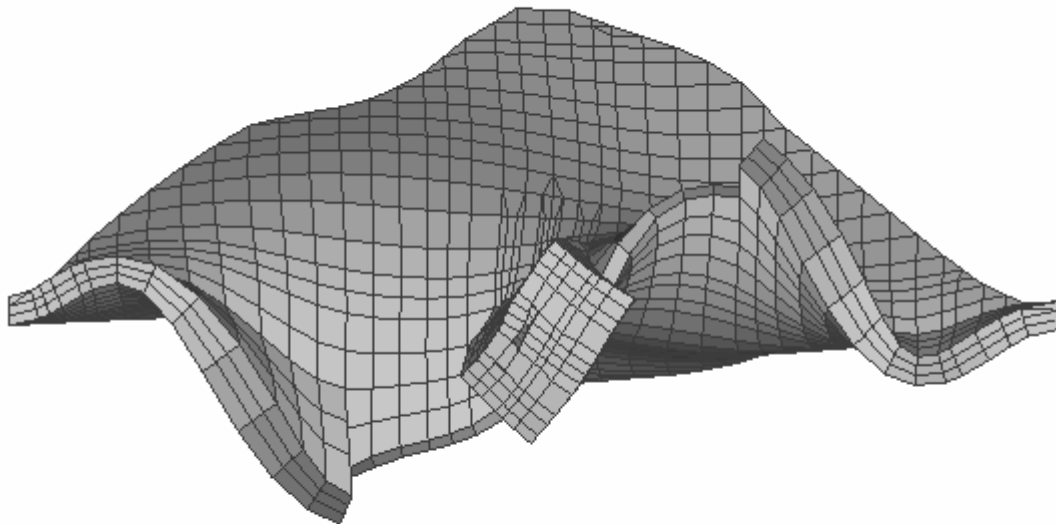
図 6-17(a) 札内川ダムの 10 次固有振動モード (13.472Hz)






 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)