

3. 解析モデルの作成

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

3.1 メッシュサイズと時間刻みの設定基準

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

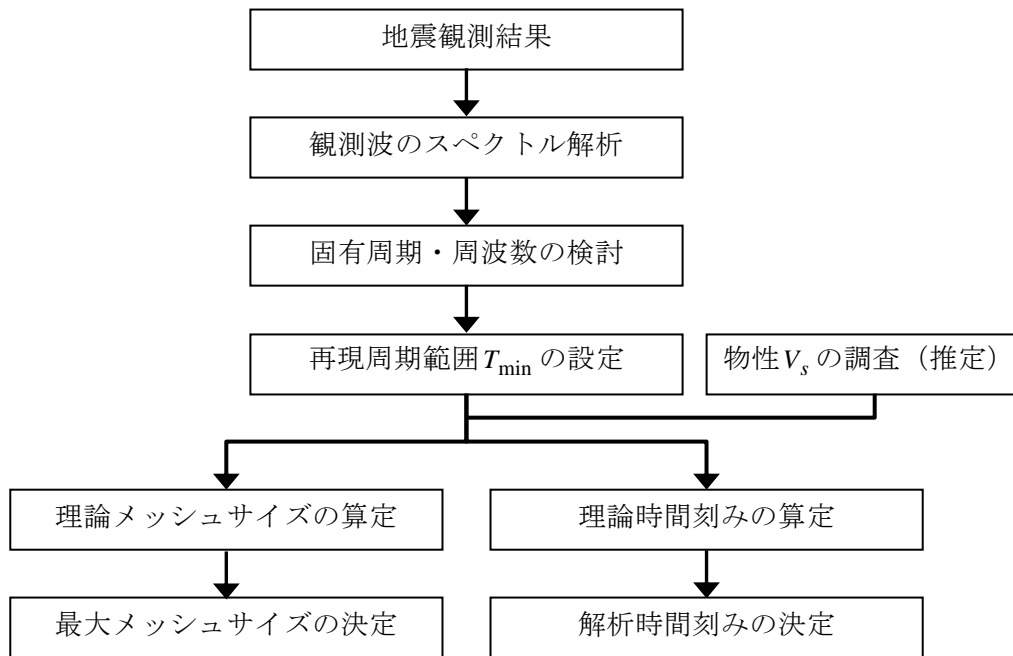


図3-1 メッシュ最大サイズと解析時間刻みの決定手順

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

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

理論時間刻みの算定については、式(3.2)により設定した。

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

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

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

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

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

表 3-1 メッシュ分割および時刻歴の時間刻み

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

3.2 ダム本体

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

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

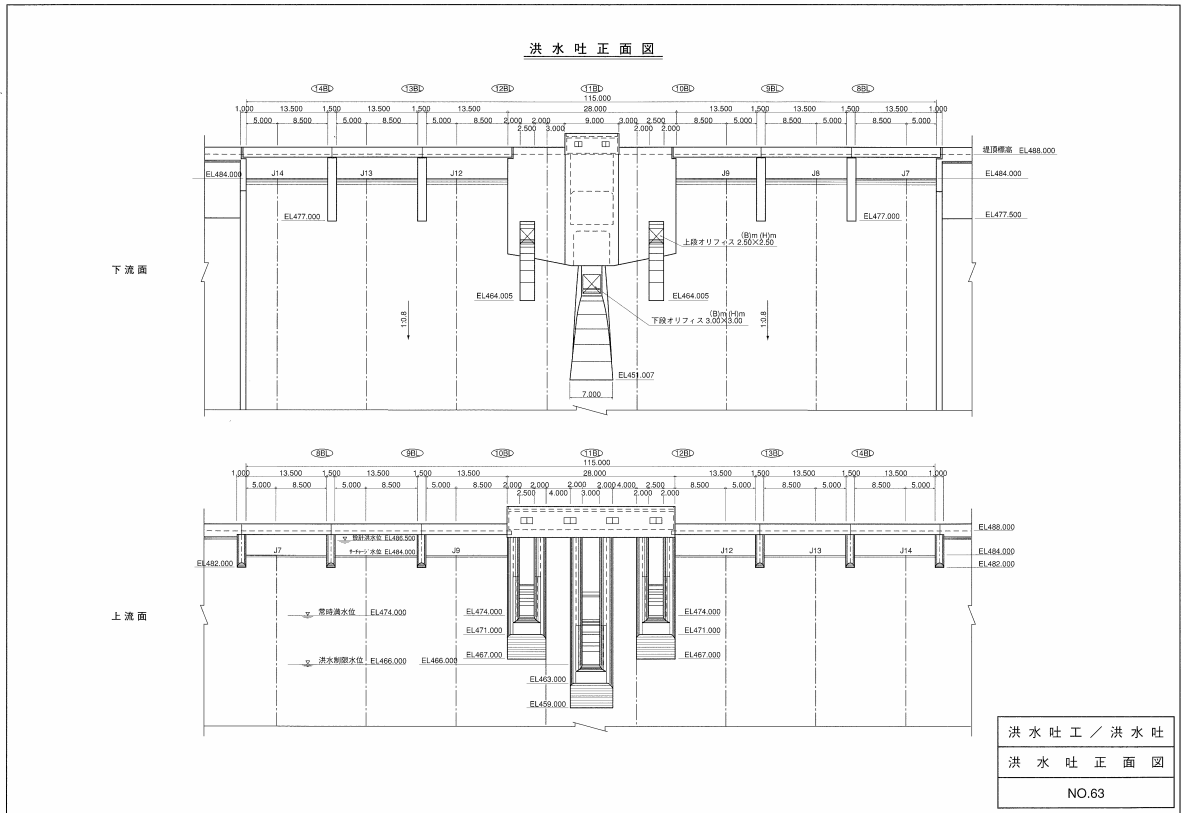


図 3-2 洪水吐の正面図

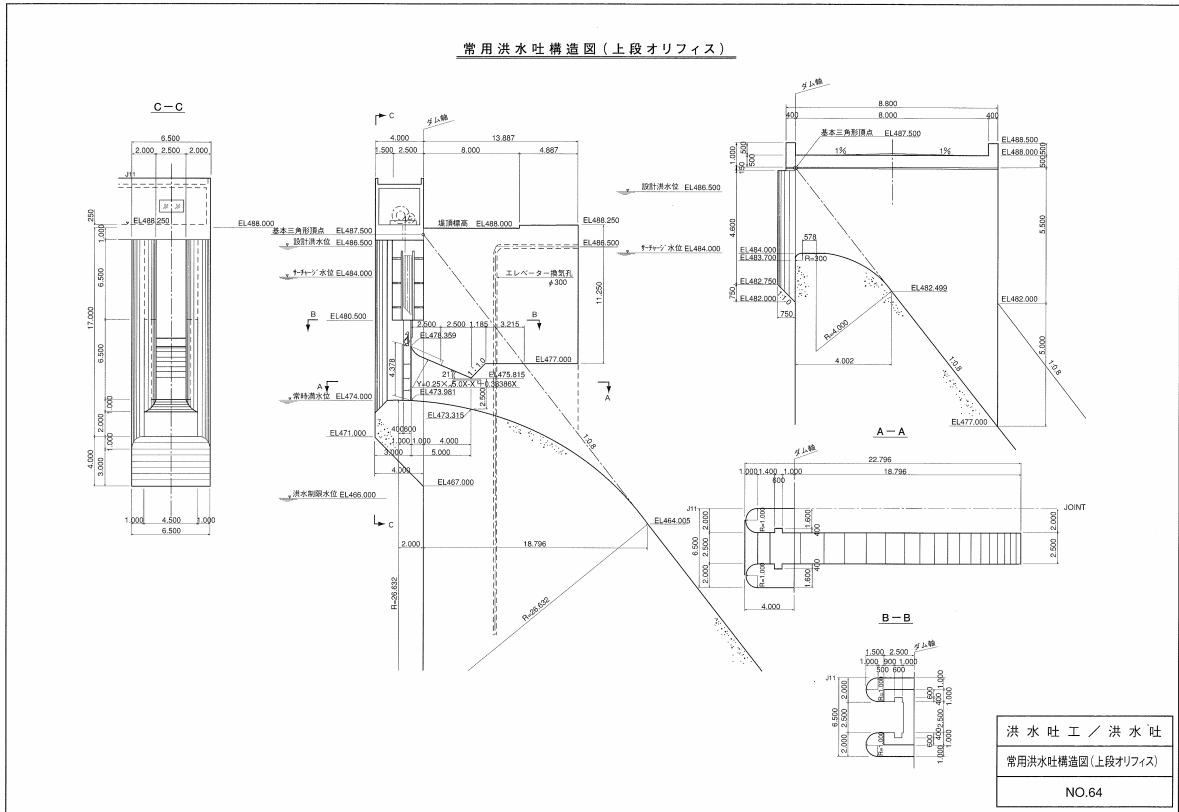


図 3-3 常用洪水吐構造図（上段オリフィス）

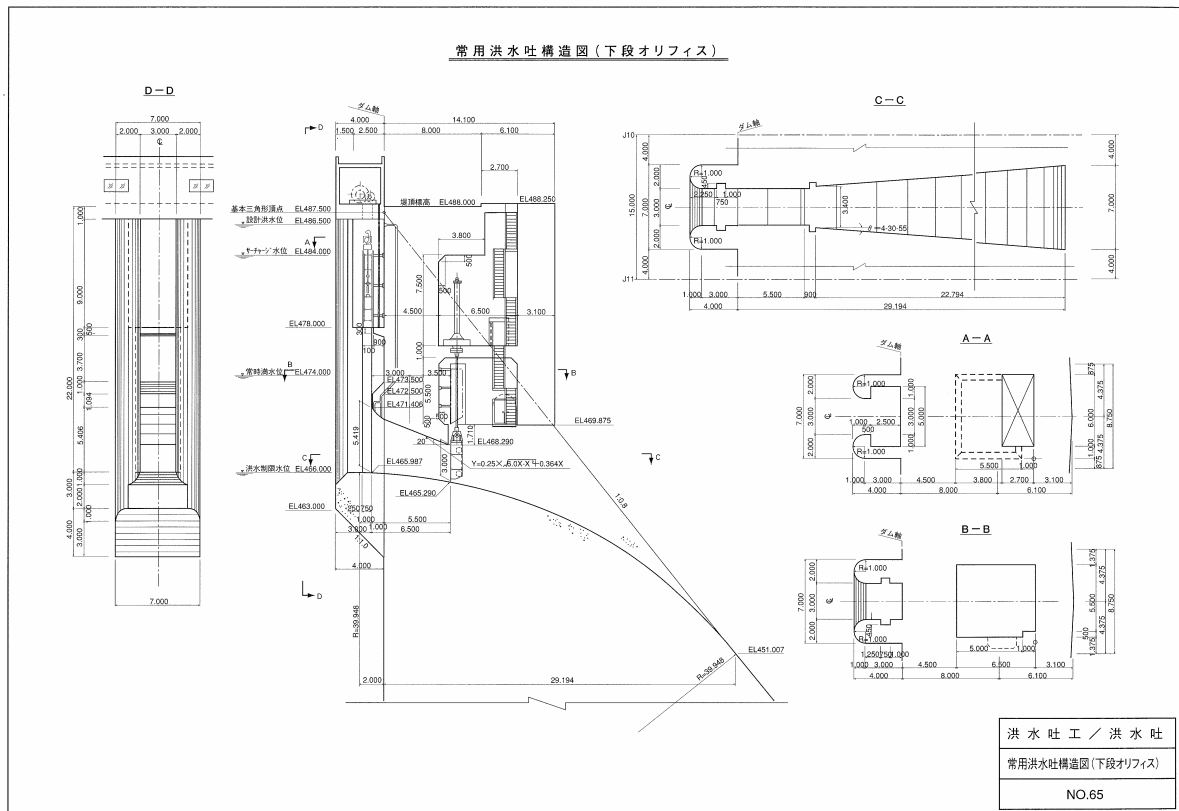


図 3-4 常用洪水吐構造図（下段オリフィス）

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

3.3 基礎岩盤

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

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

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

3.4 貯水池

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

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

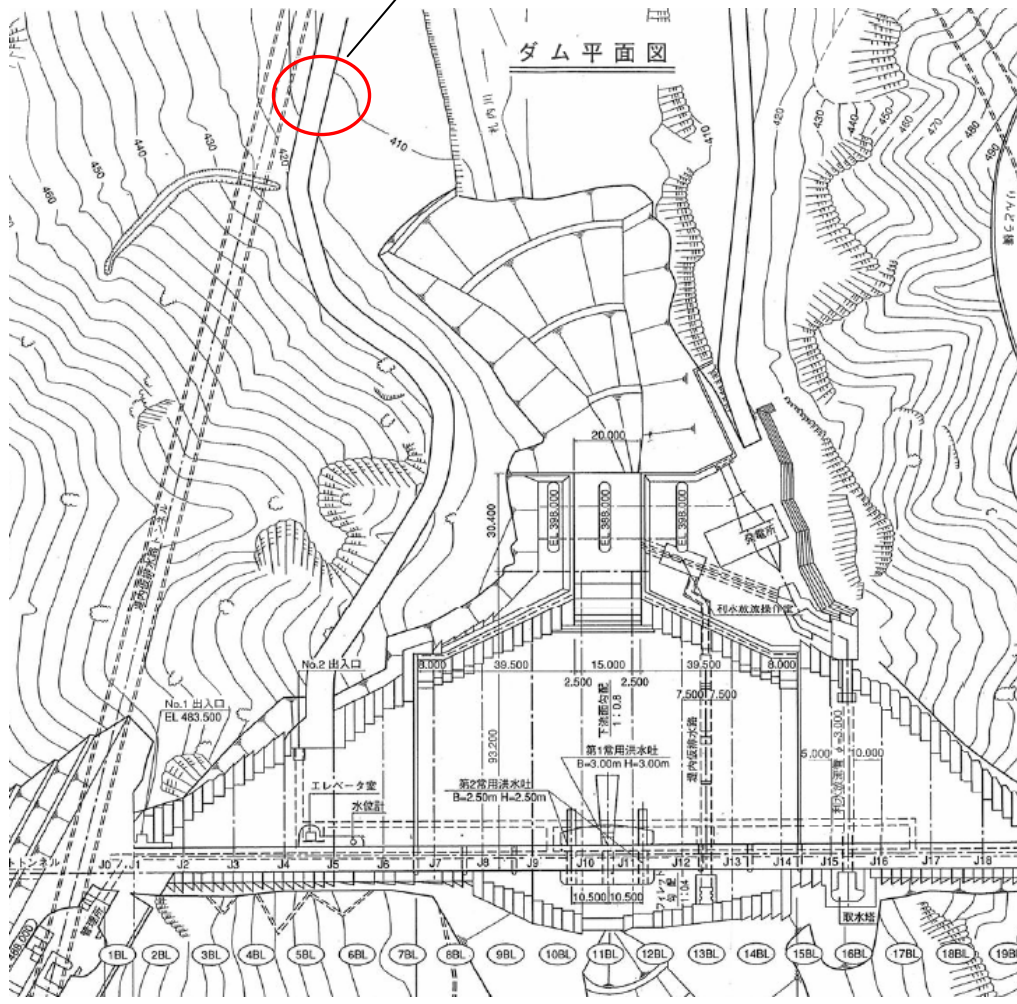


図 3-5 下流側の地形および開放基盤面にある地震計の位置

3.5 境界条件

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

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

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

3.6 モデル化結果

図 3-6～図 3-9 に，ダム本体と基礎岩盤の有限要素メッシュ図を示す。

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

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

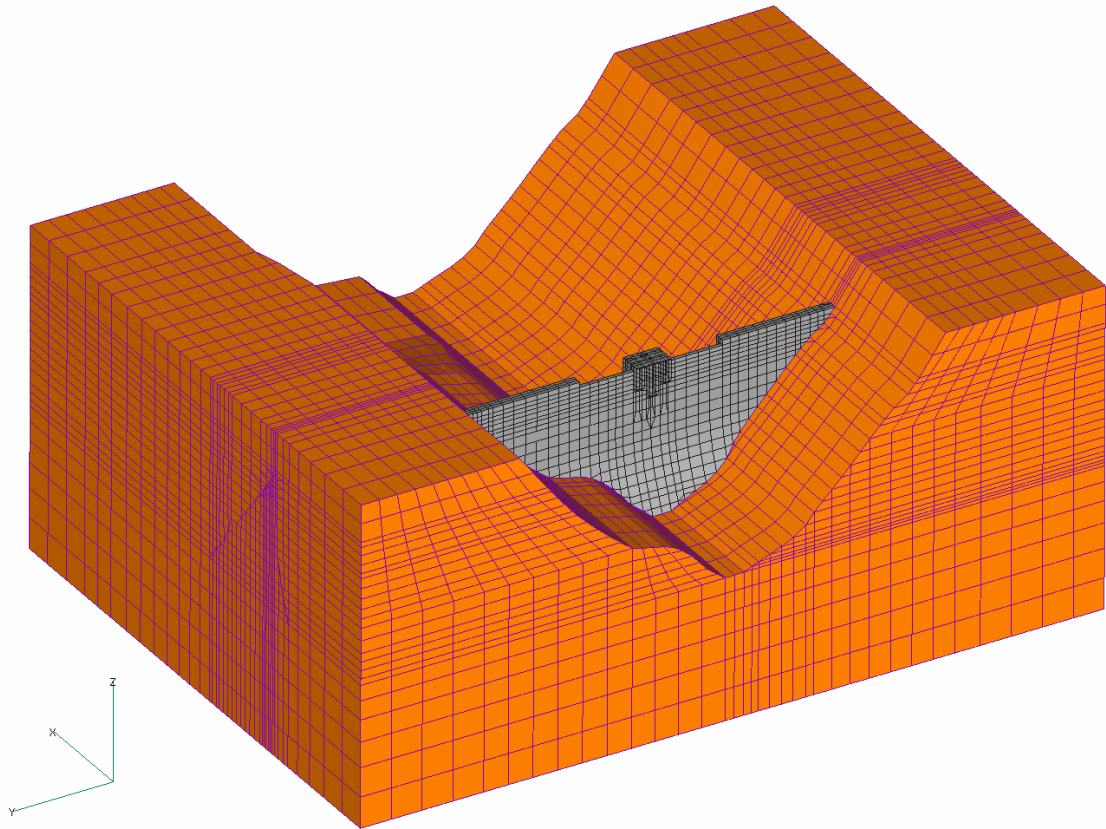


図 3-6(a) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(上流側鳥瞰図)

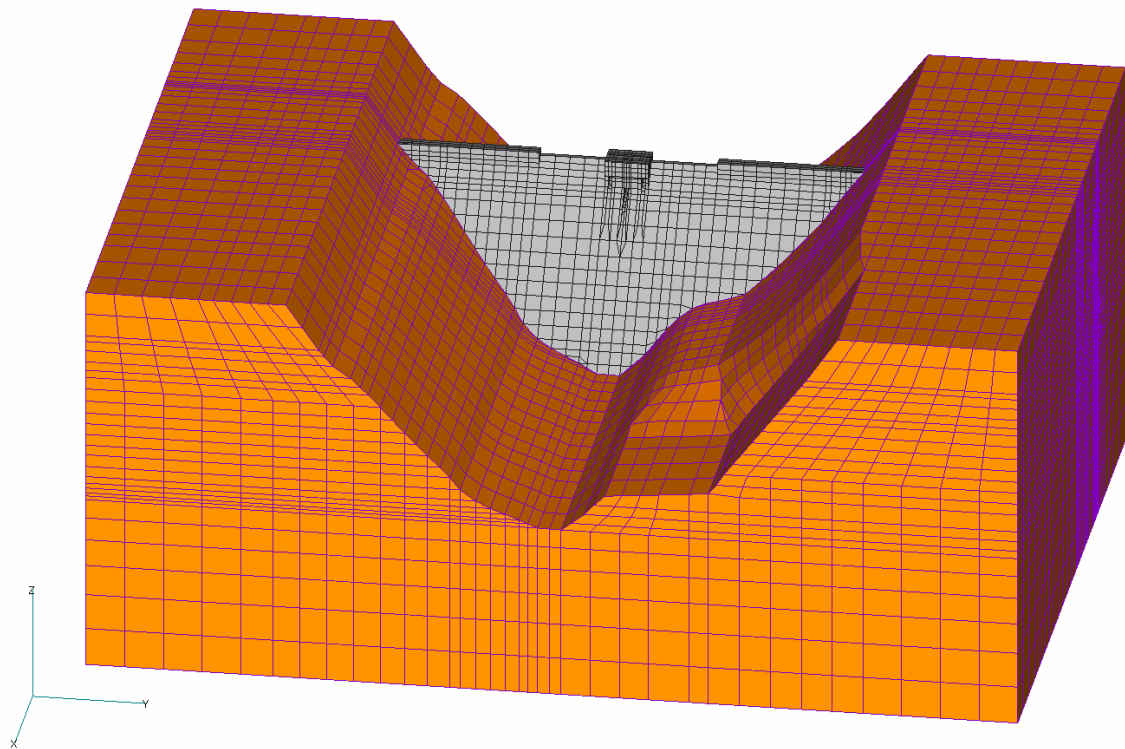


図 3-6(b) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(下流側鳥瞰図)

5

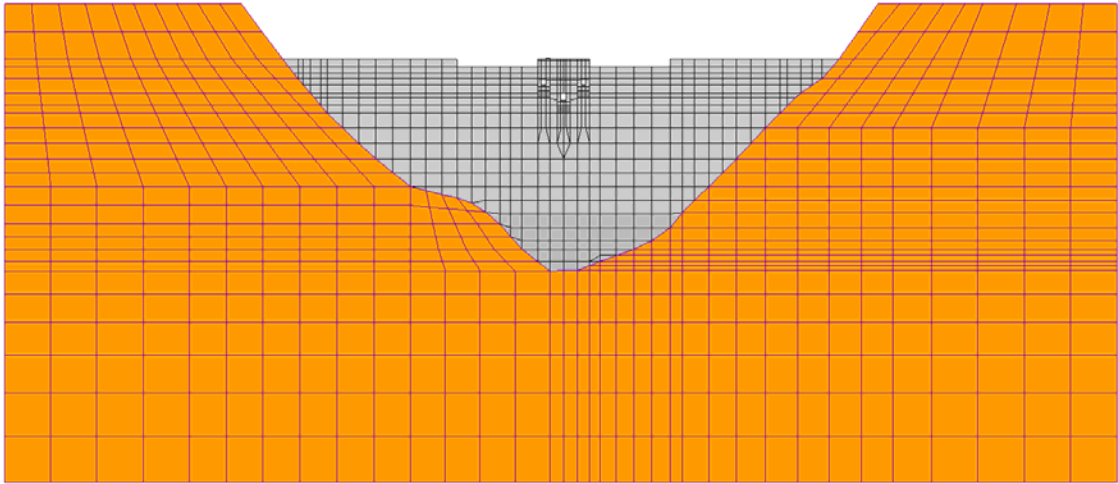


図 3-6(c) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(上流側正面図)

5

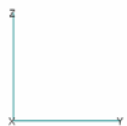
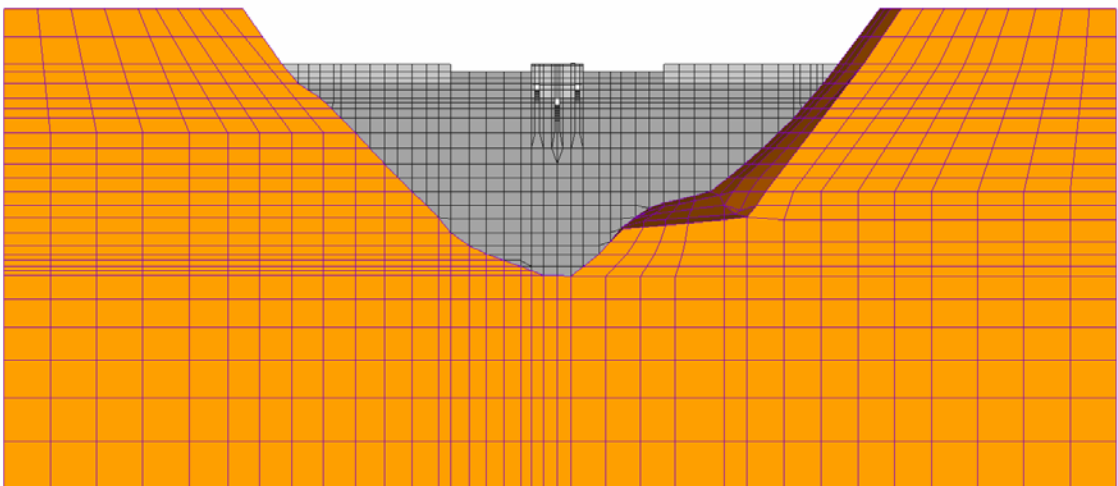


図 3-6(d) 堤体—基礎岩盤の有限要素メッシュ図
(下流側正面図)

v

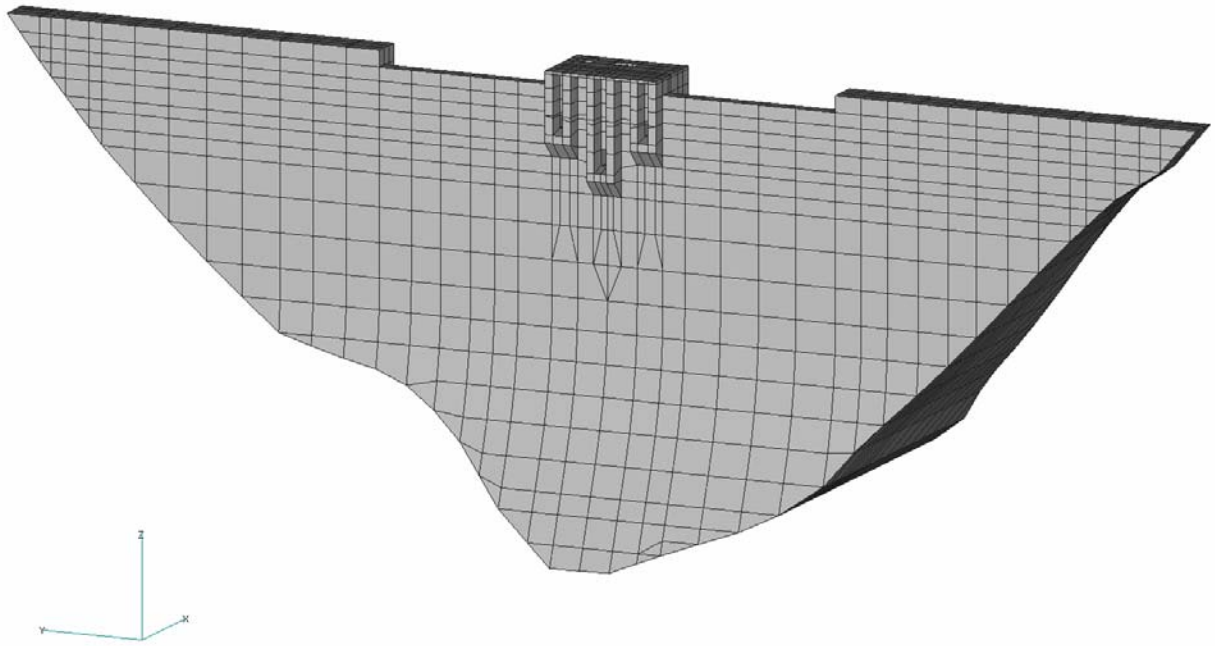


図 3-7(a) 堤体の有限要素メッシュ図
(上流側鳥瞰図)

v

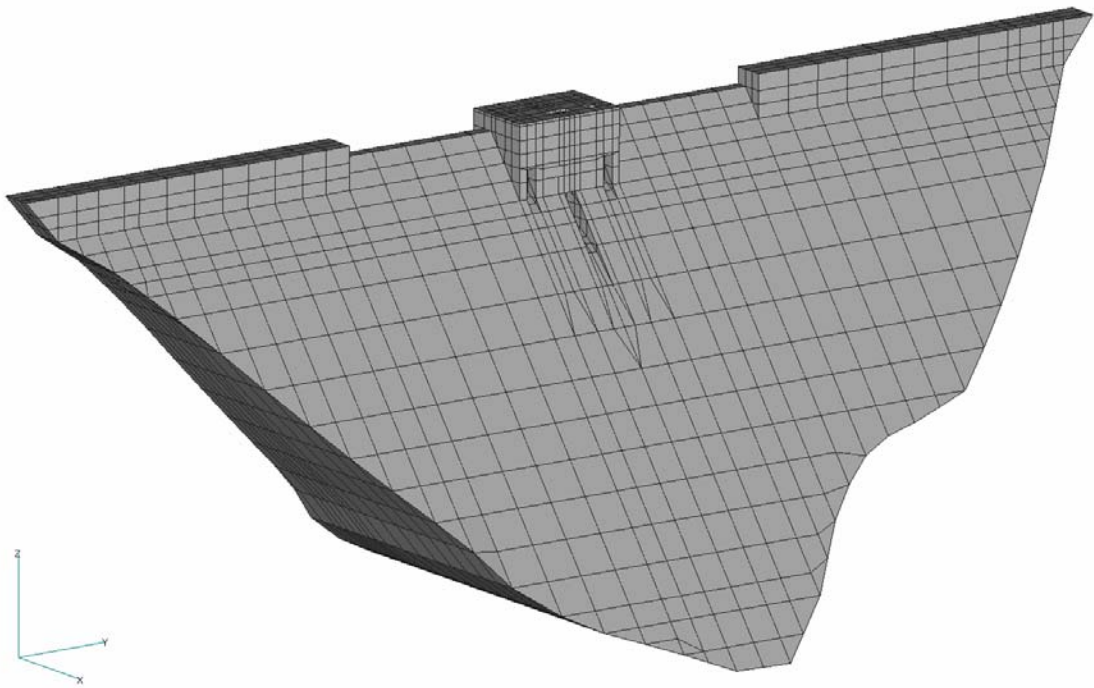


図 3-7(b) 堤体の有限要素メッシュ図
(下流側鳥瞰図)

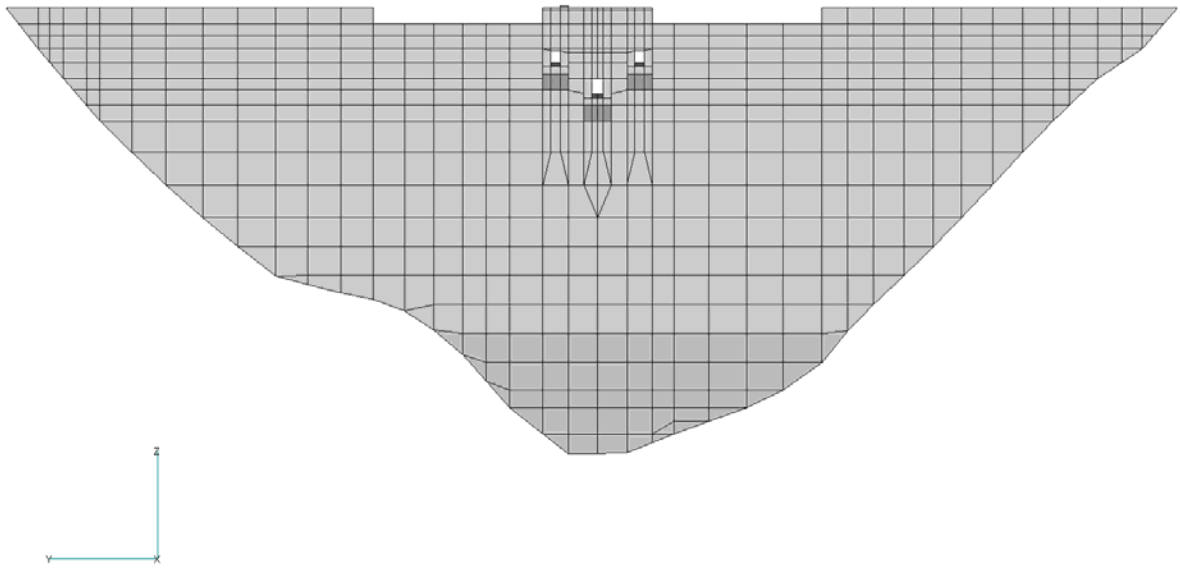


図 3-7(c) 堤体の有限要素メッシュ図
(上流側正面図)

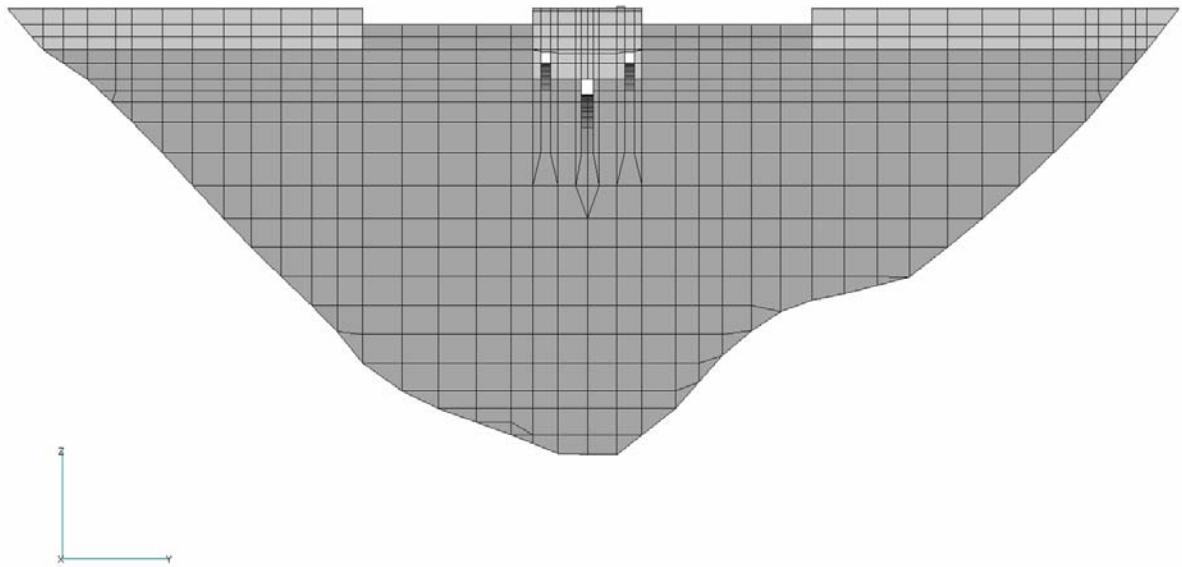


図 3-7(d) 堤体の有限要素メッシュ図
(下流側正面図)

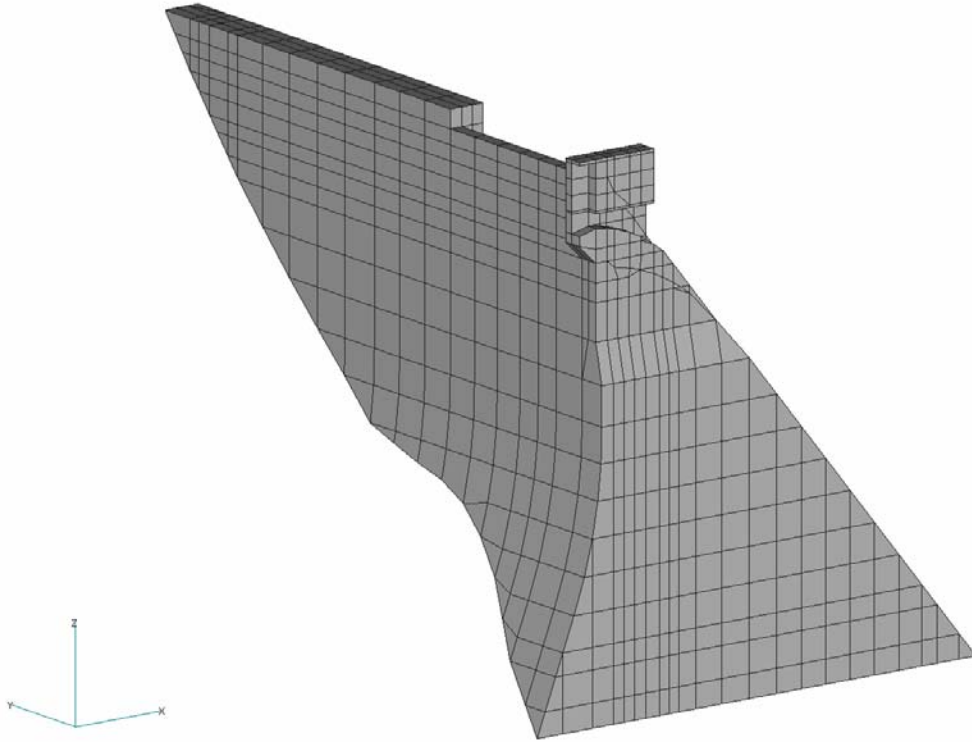


図 3-8(a) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図①)

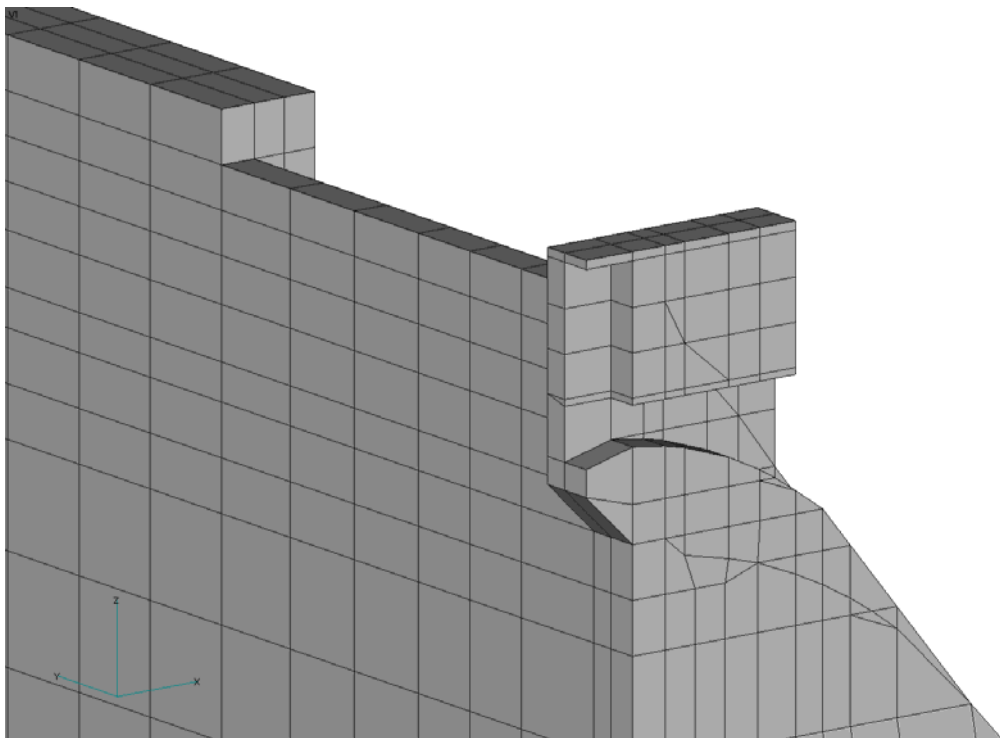


図 3-8(b) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図②)

v1

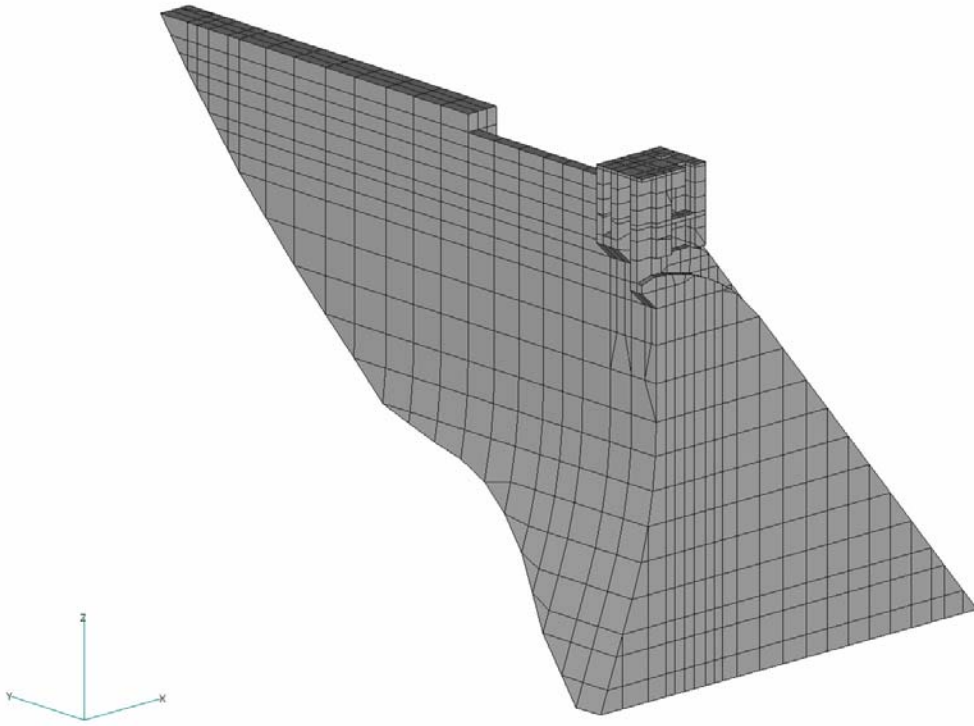


図 3-8(c) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図③)

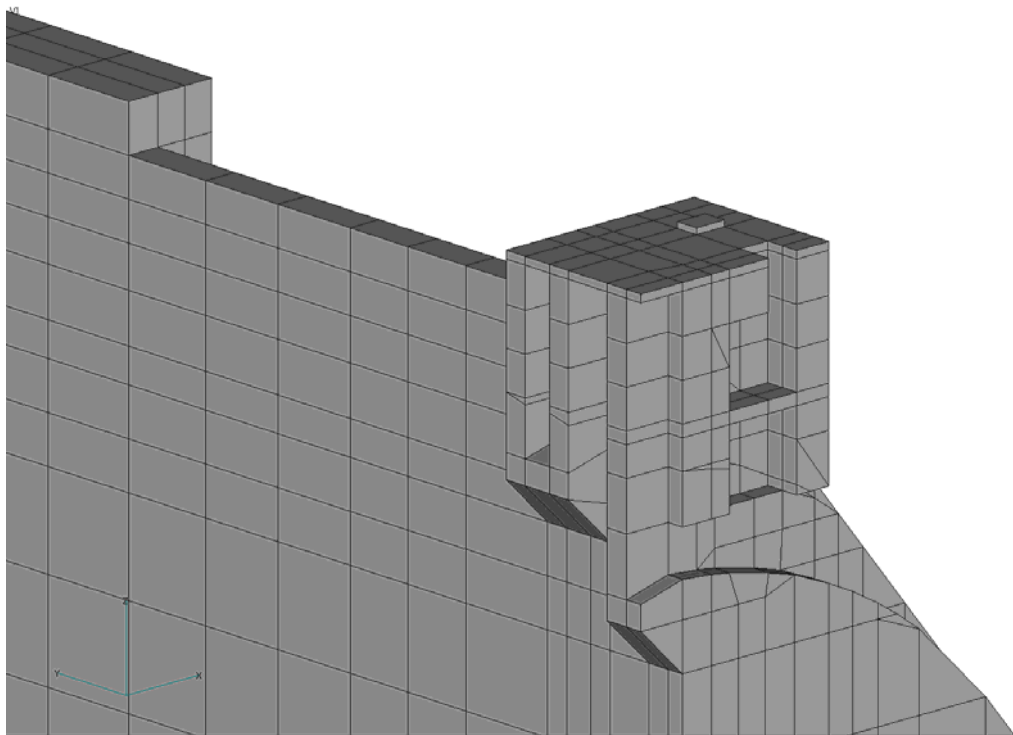


図 3-8(d) 堤体の有限要素メッシュ図
(詳細図④)

v

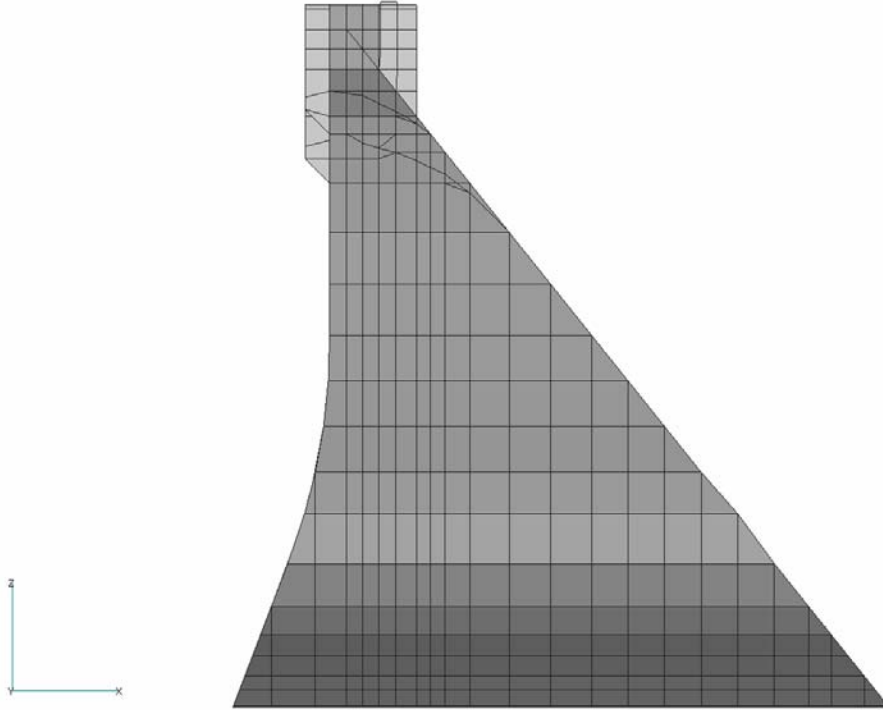


図 3-9 堤体の有限要素メッシュ図
(横断面図)