

ダム水門柱の耐震性能照査を目的とした地震応答解析手法の検討

清水建設(株) 正会員 ○田中 栄次, 玉井 誠司, 小松 太, 新美 勝之
中部電力(株) 正会員 亀谷 泰久, 森下 和輝
(株)シーテック 正会員 伊藤 真佑

1. はじめに

ダム水門柱は、洪水吐ゲートを開閉するための支持構造物であり、地震時でも洪水処理機能を維持可能な耐震性能が求められる。水門柱の耐震性能を照査する上では、水門柱を含むダム全体及び周辺地盤、貯水を精緻にモデル化し、構造物－地盤－流体の相互作用を考慮した三次元有限要素法（FEM）解析により、その地震時挙動を把握することが理想である。しかしながら、解析モデル作成や解析に伴う計算コストの観点から、前述の複雑なモデル化による耐震性能照査は実用上困難である。よって、水門柱及び近傍の堤体のみを部分的にモデル化（以下部分モデルと称す）した地震応答解析を行うことで、水門柱の耐震性能照査の合理化が期待できる。そこで本報では、水門柱の耐震性能照査に適した地震応答解析手法の構築を目指し、水門柱の FEM 解析モデル化に対する検討を実施した。検討内容は 3 項目に大別される。第一に、水門柱に作用する動水圧を評価する手法を検討した。次に、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏からなる水門柱の損傷を考慮する手法について検討した。第三に、部分モデル化における境界条件の設定手法を検討した。以降で各検討の詳細を述べる。

2. 水門柱に作用する動水圧評価手法の検討

ダムに作用する動水圧の評価手法としては、次式の Westergaard 近似式^[1]が一般に知られている。

$$p = \frac{7}{8} \rho \alpha \sqrt{Hz} \quad (1)$$

ここで、 p ：任意の水深 z における動水圧、 ρ ：水の単位体積重量、 α ：地震の水平震度、 H ：水深である。同式は、無限に広がる一定水深の貯水に面した、剛な堤体が正弦振動する場合の定常解を近似したものである。ダムの地震応答解析においては、同式の水平震度に比例する性質等を利用し、次式で求められる付加質量をダム堤体に与える手法が用いられる。

$$w = \frac{7}{8} \rho \sqrt{Hz} \quad (2)$$

ここで、 w ：任意の水深 z における単位面積当りの付加質量である。このように、貯水を流体ではなく付加質量として扱うことで、貯水－ダムの流体－構造連成解析を行うことなく、簡便に動水圧の影響を考慮できる。加えて、付加質量は、部分モデル化の際にも有効である。貯水の挙動を流体解析により評価する場合、水門柱近傍の貯水のみを部分モデル化し、その境界に適切な境界条件を定めることは難しい。一方、付加質量は、部分モデルにおいても煩雑な処理を伴わずに適用できるため、実用上の利点が多い。

しかし、図-1 に示すように、水門柱はダム堤体表面から突出していることが多いため、Westergaard 近似式が想定する上下流方向動水圧だけでなく、左右岸方向動水圧が水門柱の突出部分に作用する。そこで本報では、種々のパラメトリックスタディを行い、水門柱側面（左右岸方向に垂直な面）に作用する動水圧の傾向を検証することで、その影響を付加質量として近似することを試みた。

(1) 水門柱基部以深を変化させた検討

水門柱側面に作用する左右岸方向動水圧を付加質量で模擬するに当たり、まず、動水圧に影響する要因を検討した。水門柱側面に作用する左右岸方向動水圧は、専ら水門柱基部以浅の貯水の動きに依存し、水門柱基部

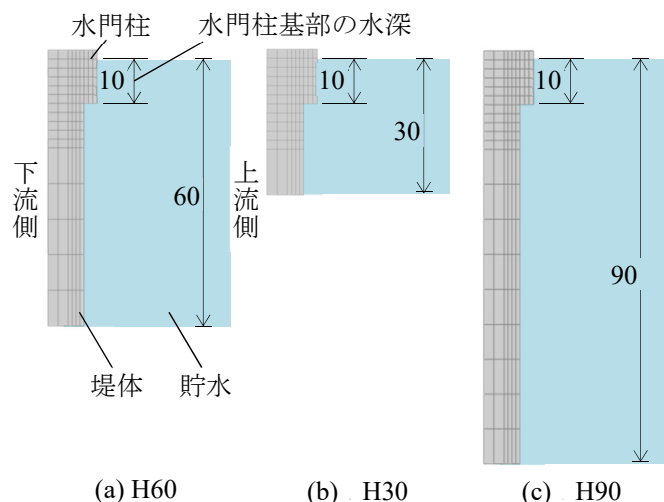
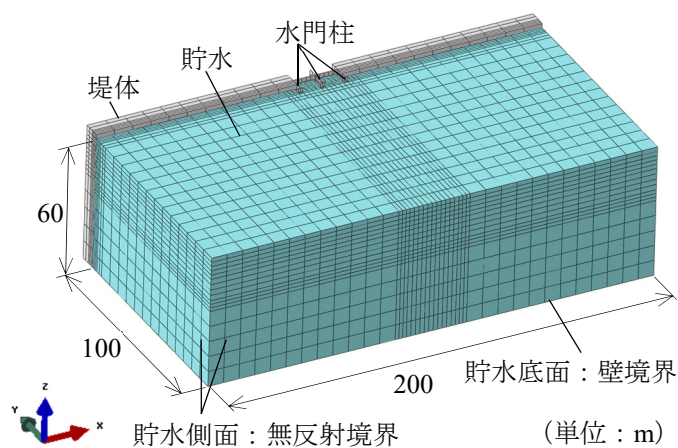


図-1 水門柱基部以深を変化させた検討ケース

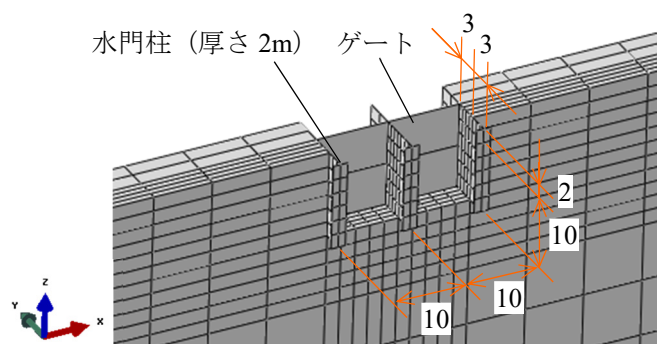
以深にある貯水の流れの寄与は小さいと推測される。そこで、水門柱基部以深における貯水部分の水深を変化させたパラメトリックスタディを行い、その影響を調査した。具体的には、水門柱の形状は同一で、水深の異なる三次元流体-構造連成解析を実施し、水門柱側面に作用する動水圧の変化を検証した。検討する水深は、図-1 に示す 3 ケースを設定した。

解析モデルを図-2 に示す。尚、数値解析は汎用 FEM 解析ソフト Abaqus を用いて行った。堤体及び水門柱は剛体とし、貯水は非粘性の流体要素（Abaqus の音響媒体）でモデル化した。また、貯水の単位体積重量を 1000kg/m^3 、体積弾性率を 2200N/mm^2 と定めた。境界条件としては、貯水側面に無反射境界、貯水底面に壁境界を設け、一定水深の貯水が無限に広がっている状態を想定した。以上の条件のもとで、堤体に図-3 に示す左右岸方向（X 方向）入力地震動を与える流体-構造連成解析を実施した。

解析結果より、水門柱近傍の各位置における動水圧絶対値の時刻歴最大値の鉛直分布を図-4 に示す。同図より、各ケース共に、水門柱側面に作用する動水圧はほぼ等しいことが確認できる。したがって、水門柱基部と貯水底面が近接する場合を除き、水門柱以深の貯水部分が、動水圧へ与える影響は小さいと考えられる。換言すれば、左右岸方向動水圧は、水門柱基部の水深をはじめとする突出部分の形状に依存すると思われる。また、動水圧分布の傾向を見ると、水面に近い場合は水深に応じて増大するが、水門柱基部位置に近い水深では、逆に低減傾向に転じることが分かる。これは、水門柱基部の下を通り



(a) モデル全体



(b) 水門柱部分

図-2 水門柱基部以深を変化させた解析モデル（H60）

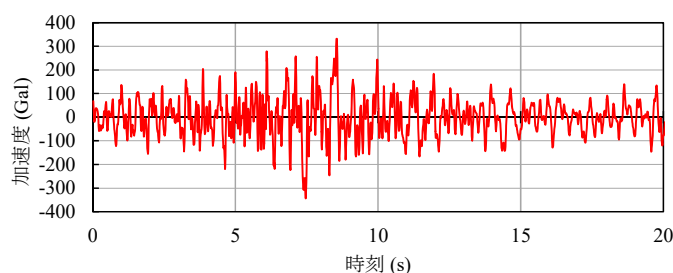


図-3 水門柱基部以深を変化させた解析 入力地震動

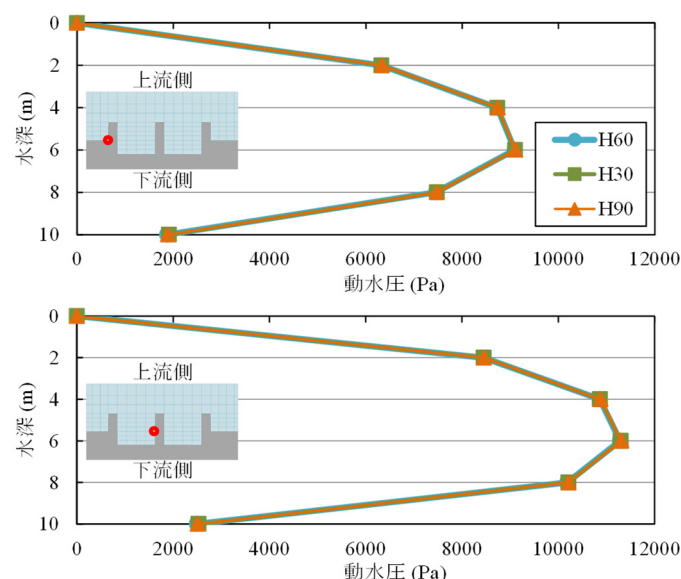


図-4 水門柱側面の動水圧最大値分布

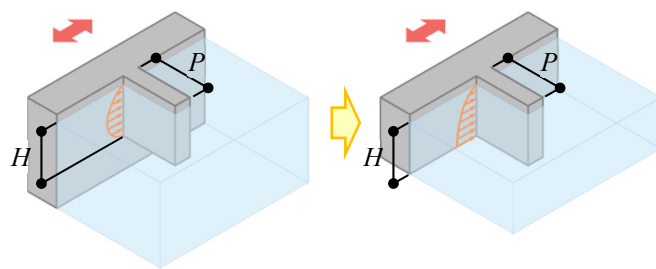
抜ける貯水の流れが発生するためと考えられる。

(2) 水門柱形状を変化させた検討

次に、前述の検討結果を踏まえ、水門柱側面に作用する左右岸方向動水圧を、付加質量としてモデル化する手法を検討した。図-4 より、水門柱基部近傍では動水圧が低減する。よって、動水圧を安全側に評価した上で問題を単純化するために、図-5 に示すように、水門柱基部の水深 H より深い貯水が無視した。そして、この問題について、水門柱突出部分の形状に対する動水圧の依存性を検証した。具体的には、水深 H 及び張り出し長さ P を変化させたパラメトリックスタディを行い、その影響を調査した上で、付加質量による近似手法との比較を行った。

検討ケースを表-1 に、解析モデルを図-6 に、解析諸元を表-2 に各々示す。同図中の堤体を、振動数 5Hz、加速度振幅 1m/s^2 の左右岸方向 (X 方向) 正弦波で加振した。尚、加振振動数は、既存ダム of 左右岸方向固有振動数を参考に定めた。検討ケースでは、同一の P と H に対し、2 種類の貯水モデル化手法を考えた。貯水を流体要素でモデル化したケースでは、貯水側面に無反射境界、貯水底面に壁境界を設けた流体-構造連成解析を行った。付加質量のケースは、貯水を直接的にモデル化せず、Westergaard 近似式に補正係数を乗じて求めた付加質量を、水門柱側面に与えた。補正係数は、中央水門柱に近い側面を内側として、端部水門柱外側を 0.7、それ以外を矩形水槽の評価式^[2]に基づく値とした。同評価式によると、水門柱間隔内法寸法と水深の比から表-3 に示す補正係数が得られる。

解析結果より、水門柱近傍の各位置における動水圧の鉛直分布を図-7 に示す。ここで、付加質量と加速度より求めた動水圧分布も同図に合わせて示す。同図より、全ケースに共通する傾向として、中央水門柱より端部水門柱に作用する動水圧がより大きいことが分かる。まず、水深 20m で張り出し長さの異なる P3H20, P8H20, P20H10 を比較すると、張り出し長さが大きい程動水圧も増大することが確認できる。一方、付加質量は張り出し長さの影響を考慮していないため、動水圧分布は変化しない。そのため、張り出し長さが小さい場合、付加質量は流体要素のケースを過大評価するが、張り出し長さが大きいと、逆に過小評価となっている。次に、同じ張り出し長さで水深が異なる P20H20, P20H10, P20H100 を比較すると、水深

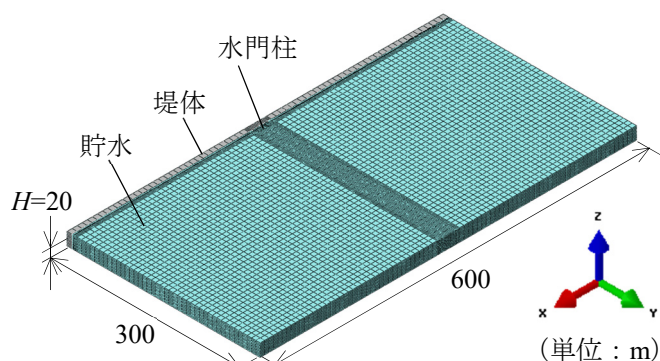


(a) H より深い部分を考慮 (b) H より深い部分を無視

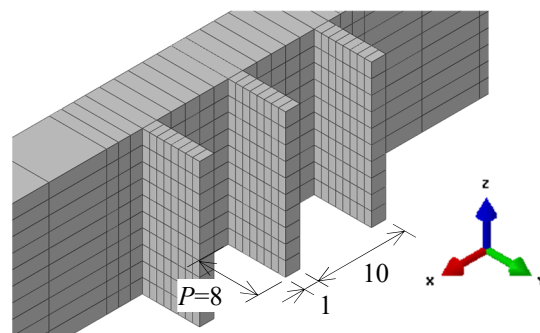
図-5 水門柱形状を変化させた検討の概要

表-1 水門柱形状を変化させた検討ケース

ケース	貯水モデル化	張り出し長さ $P(\text{m})$	水深 $H(\text{m})$
P3H20	流体要素	3	20
P8H20		8	20
P20H20		20	20
P20H10		20	10
P20H100		20	100



(a) モデル全体



(b) 水門柱部分

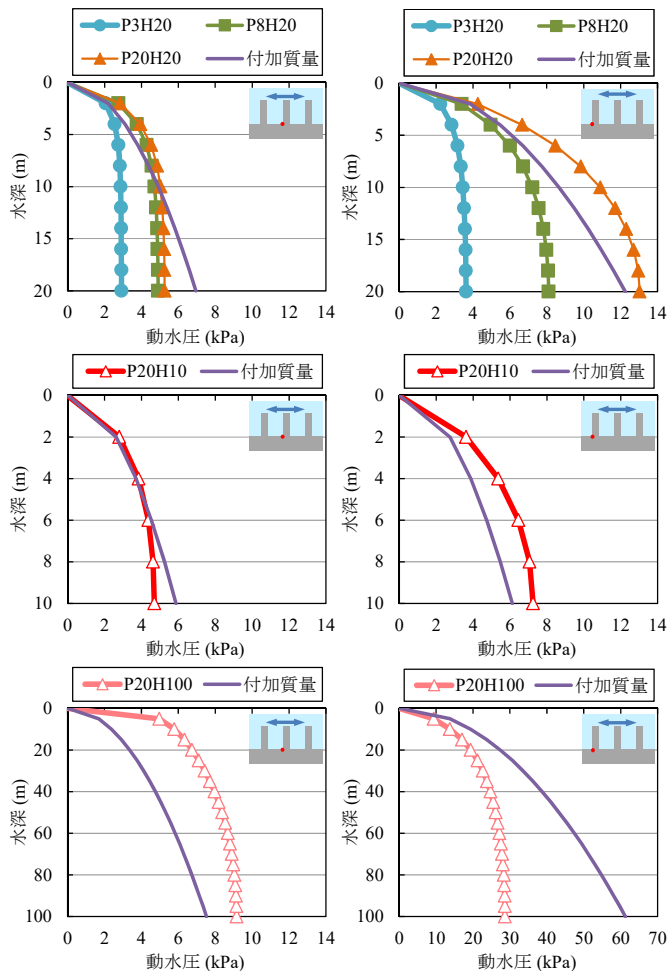
図-6 水門柱形状を変化させた解析モデル (P8H20)

表-2 水門柱形状を変化させた解析諸元

	密度(kg/m^3)	体積弾性率(N/mm^2)
堤体	2,460	剛体
水門柱	2,460	剛体
貯水	1,000	2,200

表-3 水門柱形状を変化させた解析 補正係数

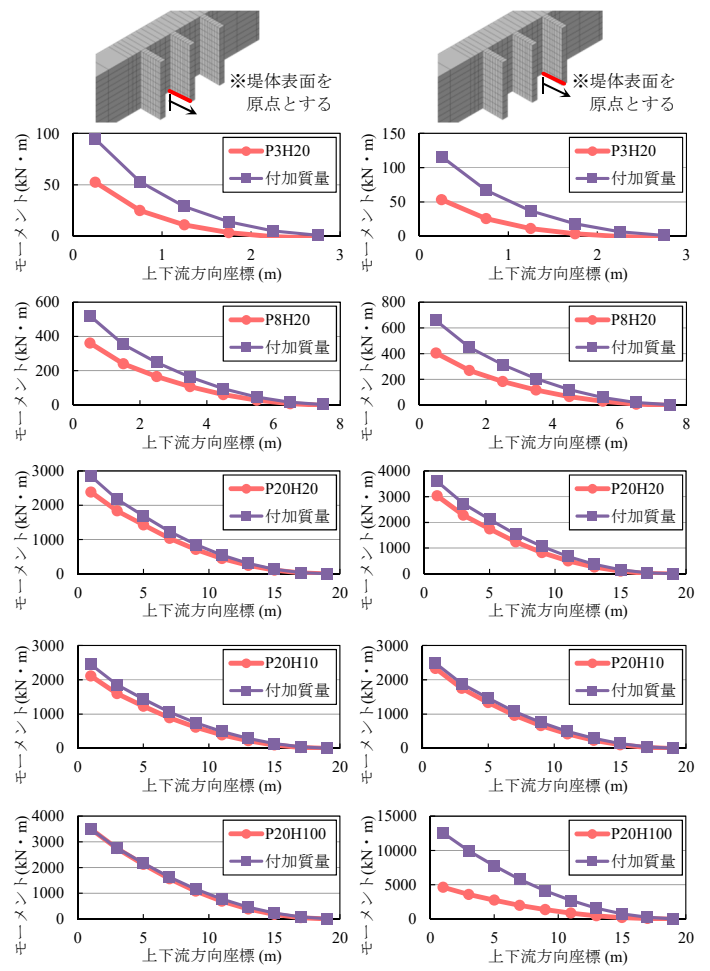
水深 $H(\text{m})$	Westergaard式の補正係数	
	端部水門柱外側	端部水門柱内側・中央水門柱両側
10	0.7	0.670
20	0.7	0.397
100	0.7	0.086



(a) 中央水門柱

(b) 端部水門柱

図-7 加速度最大時の動水圧分布



(a) 中央水門柱基部

(b) 端部水門柱基部

図-8 加速度最大時の曲げモーメント分布

に応じて動水圧が増大することが分かる。一方、付加質量は、水深の大きいケースで動水圧が増大する傾向を捉えているものの、流体要素のケースとの大小関係は一貫していない。また、水深が極端に大きい P20H100 では、水門柱基部に近い部分で動水圧が一定値に近づいているが、付加質量はその傾向を模擬できておらず、動水圧分布の相違が顕著である。以上より、動水圧は水門柱の張り出し長さと水深に応じて変化するが、本手法の付加質量では、その傾向を必ずしも安全側に評価しないといえる。

そこで、貯水モデル化手法が水門柱の曲げ変形に与える影響を、水門柱に生じる曲げモーメントに着目して比較した。解析結果より、水門柱基部の要素における鉛直軸（Z 軸）回り曲げモーメント分布を図-8 に示す。ここで、表-1 の各ケースに対し、流体要素に代わり付加質量を用いた解析結果を同図中に合わせて示す。同図より、同一水門柱形状について、流体要素を用いたケースと付加質量とを比較すると、付加質量の曲げモーメントの方が概ね大きい。したがって、動水圧によって水門柱に生じる変形や応力を検討する場合、本手法の付加質量は概ね安全側の評価を与えることが期待できる。また、水門柱形状による曲げモーメントの変化を俯瞰すると、水深が浅いほど、また張り出し長さが大きいほど、流体要素を用いたケースと付加質量との相違は小さくなっている。つまり、流体要素の解析結果を正と見做せば、付加質量の精度は、水門柱の張り出し長さや水深に依存すると考えられる。

3. 水門柱の損傷を考慮した解析手法の検討

水門柱は鉄筋比の低い構造が多く、地震時にコンクリートのひび割れが発生する可能性がある。この場合、水門柱が大変形を生じ崩壊に至らないこと、損傷が水門柱の機能維持に支障を及ぼさないことを確認する必要がある。本章では、この問題への対処として、水門柱のコンクリートのひび割れ及び鉄筋の降伏を考慮した材

料非線形解析の実施を考えた。具体的には、水門柱と近傍の堤体を部分モデル化した三次元地震応答解析を実施し、水門柱の破壊性状を検証した。それが地震時挙動に与える影響と水門柱の破壊性状を検証した。さらに、材料線形を仮定した解析結果と比較することで、水門柱の損傷がその地震時挙動に与える影響を検討した。

解析モデル（以下水門柱モデルと称す）を図-9に、解析諸元を表-4に各々示す。尚、数値解析は汎用FEM解析ソフトDIANAを用いて実施した。コンクリートのひび割れを精緻に表現するために、3次元ソリッド要素で水門柱コンクリートをモデル化し、固定ひび割れモデルによる材料非線形性を導入した。コンクリートの引張特性に2直線型引張軟化モデル^[3]、圧縮特性に線形弾性、ひび割れ面のせん断伝達特性にAl-Mahaidiモデル^[4]を各々採用した。ただし、コンクリートが圧壊しないことを別途検討により確認している。また、堤体部分のコンクリートは線形弾性を仮定した。鉄筋については、線材の埋め込み鉄筋要素でモデル化し、バイリニア弾塑性によって鉄筋の降伏を考慮した。加えて、前章で検討した手法により、動水圧を模擬した付加質量を与えた。管理橋等の上載構造物は、直接的にモデル化せず、付加質量として慣性力の作用を考慮した。ただし、ゲートのピンから受ける水平方向反力のみ、後述するダムー地盤モデルの解析結果時刻歴を取得し、水門柱モデルの当該位置に入力した。解析は、自重、静水压及び堆砂圧を与える初期応力解析を実施した後、地震応答解析を行った。地震応答解析時の減衰は、文献^[5]より瞬間剛性比例型減衰を用い、一次固有振動数4.4Hzに対し5%とした。境界条件は、堤体側面に周期境界を設け、堤体底面に図-10に示す地震動を入力した。

入力地震動の設定に際し、図-11に示すダム全体と周辺地盤をモデル化した地震応答解析をあらかじめ実施した。このダムー地盤モデルでは、水門柱をシェル要素で簡易にモデル化し、水門柱と堤体のコンクリートを線形弾性と仮定している。ダムー地盤モデルの解析結果より得られた水門柱モデル底面位置における応答加速度を、水門柱モデルの入力地震動として用いた。ある程度大規模なダムにおいて、水門柱の損傷が堤体や周辺地盤の応答に与える影響は小さいと推測されるため、本手法のように、広範囲を簡易にモデル化した解析と検討対象部分のみを精緻にモデル化した解析を適切に使い分けることで、効率的な検討が可能と考えられる。

解析結果より、各時刻におけるコンクリートのひび割れひずみ分布を図-12に示す。同図より、水門柱の破壊挙動を検討すると、水門柱基部で最初のひび割れが発生し、水門柱と堤体との接合部に沿って進展していることが分かる。その後、越流面天端に近い標高で水平方向にひび割れが進展するなど、広範囲に損傷が進行し、水門柱基部で鉄筋の降伏も確認されている。このようにひび割れが水門柱基部に集中して発生する原因は、上下流軸（Y軸）回りの曲げモーメントによる引張応力が、水門柱基部のコンクリートに生じるためと考えられ

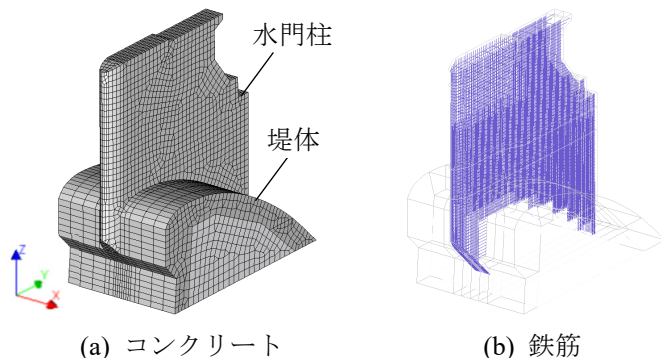


図-9 水門柱モデル

表-4 水門柱モデル 解析諸元

(a) コンクリート

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)
52.3	5.2	31000	0.2	2400

(b) 鉄筋

降伏強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
235	200000	0.3

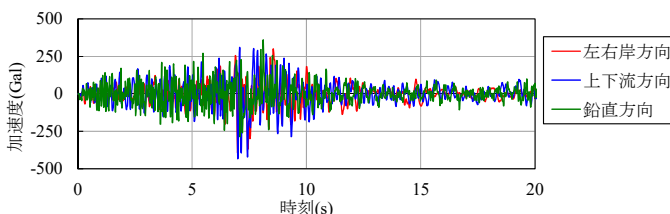


図-10 水門柱モデル 入力地震動

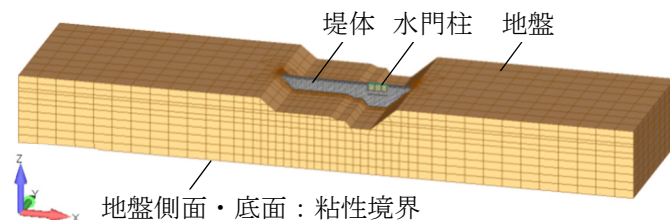


図-11 ダムー地盤モデル

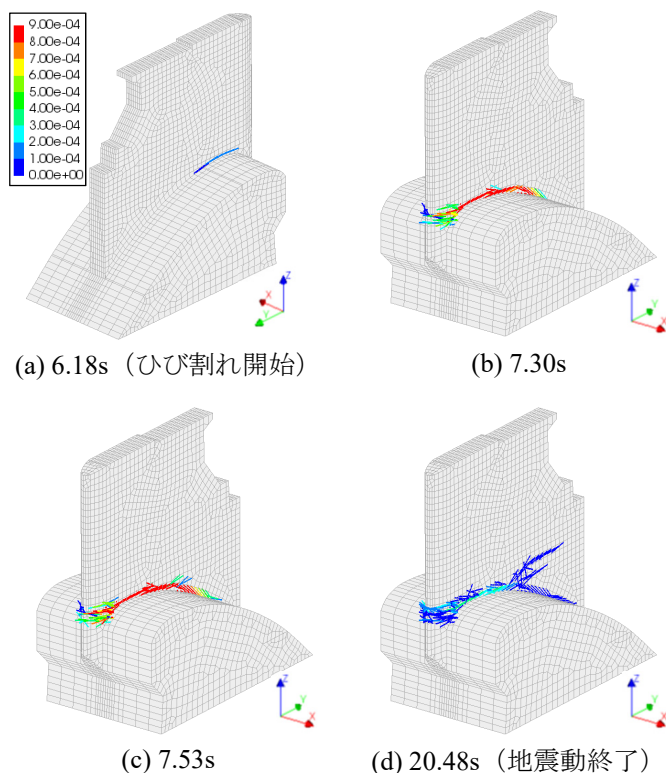


図-12 水門柱モデルのひび割れひずみ分布

る。また、水門柱と堤体との接合部に沿ってひび割れが進展する現象を捉えるためには、ビーム要素等からなる単純な解析モデルでは困難であり、水門柱の破壊挙動を検証する上では、本報のような解析が有効と思われる。

次に、解析結果より、水門柱モデルの応答変位時刻歴及び応答加速度時刻歴を図-13 及び図-14 に各々示す。ここで、水門柱モデルの材料特性を線形弾性に変更した解析モデルを水門柱線形モデルと称し、その解析結果も合わせて示す。同図より、約 7s 以降から両モデルの挙動が大きく異なることが分かる。水門柱線形モデルと比較して、水門柱モデルの左右岸方向（X 方向）最大相対変位は大きく、一方で応答加速度が低減している。これは、コンクリートのひび割れ及び鉄筋の降伏が生じることで、水門柱モデルの剛性が低下し、長周期化するためと考えられる。したがって、水門柱の地震時挙動を正確に評価するためには、本検討のように、水門柱の損傷を材料非線形性等で考慮する必要があると考えられる。

4. 部分モデル化に伴う境界条件の検討

前章では、水門柱モデルの境界条件として、ダムー地盤モデルの応答を用いた。この際、水門柱モデ

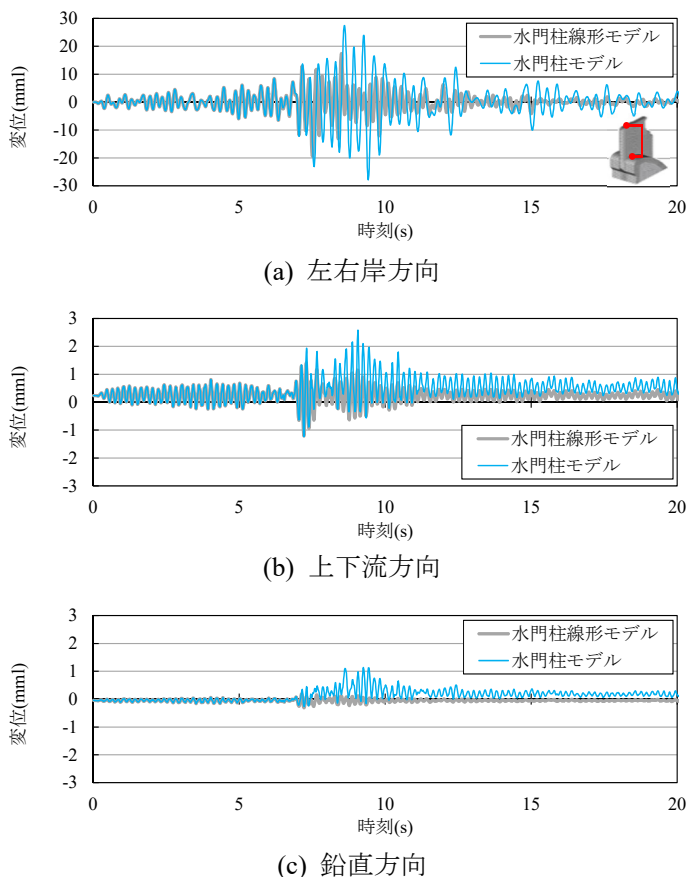


図-13 水門柱天端－水門柱基部の相対変位時刻歴（水門柱モデル、水門柱線形モデル）

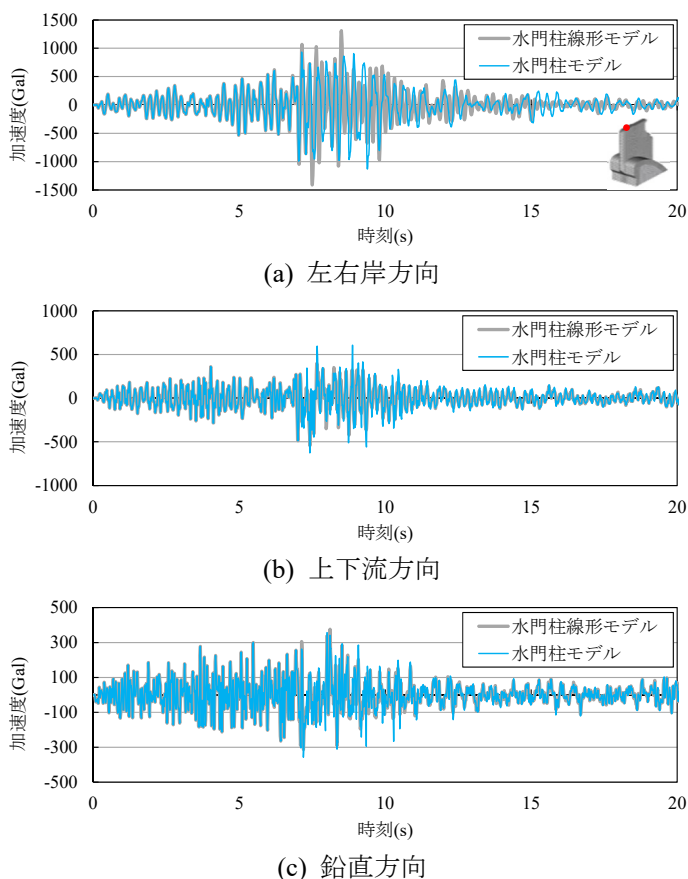


図-14 水門柱天端の絶対加速度時刻歴（水門柱モデル、水門柱線形モデル）

ルの境界全ての節点に、ダムー地盤モデルの対応する位置における応答を採用することが本来望ましい。しかしながら、両者のメッシュ分割が異なる、煩雑な処理が要求される等の理由から、両者を厳密に整合させることが困難な場合も多い。そこで本章では、部分モデルの境界条件について、適切な設定手法を検討した。具体的には、前章の水門柱モデルを対象として、異なる境界条件の解析結果を比較し、その影響を調査した。

検討する境界条件は、水門柱モデルで採用したものを含め、表-5 に示す 2 ケースを考えた。水門柱モデルでは、ダムー地盤モデルの 1 節点の応答を、水門柱モデル底面全体に一様に入力した。しかし、この手法では、図-15 に示すように、堤体全体がロッキング変形する影響を無視しているという問題がある。そこで、水門柱 R モデルでは、図-16 に示すように、水門柱モデル底面が剛体として並進・回転すると仮定した境界条件を設定する。水門柱モデル底面隅角位置に近いダムー地盤モデルの節点から応答加速度を抽出し、回転中心における並進加速度を水平面（XY 平面）上の線形補間により求める。左右岸方向軸回りの回転角加速度は、ダムー地盤モデルの上記節点における鉛直方向応答加速度を用いて、次式より算出する。

$$\ddot{\theta}_x = \frac{a_{1z} + a_{2z} - a_{3z} - a_{4z}}{2L} \quad (3)$$

ここで、 a_{iz} ：図-16 中の節点 i における鉛直方向応答加速度、 L ：節点 1・2 と節点 3・4 間の上下流方向距離である。回転角加速度については、ロッキングの主要な成分である左右岸方向軸回りのみを考慮し、3 方向並進及び 1 軸回り回転の同時入力とする。

水門柱 R モデルの解析結果より、各時刻におけるコンクリートのひび割れひずみ分布を図-17 に示す。同図を水門柱モデルのひび割れひずみ分布と比較すると、ひび割れの範囲はやや広がっているものの、同様の傾向を示すことが分かる。また、水門柱モデルと水門柱 R モデルにおける鉄筋ひずみの時刻歴最大値分布を図-18 に示す。同図より、両モデルの応力分布形状や最大発生応力に大きな変化は見られない。したがって、堤体のロッキング変形が水門柱の破壊挙動に与える影響は小さいと推測される。

次に、解析結果より、水門柱モデルの応答変位時刻歴及び応答加速度時刻歴を図-19 及び図-20 に各々示す。ここで、水門柱モデルの解析結果も比較のために

表-5 境界条件の検討ケース

ケース	堤体底面境界条件
水門柱モデル	並進加速度入力
水門柱Rモデル	並進加速度及び回転角加速度入力

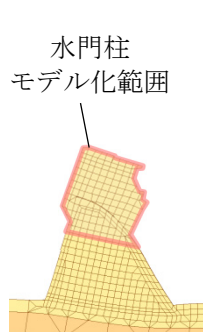


図-15 堤体のロッキング変形

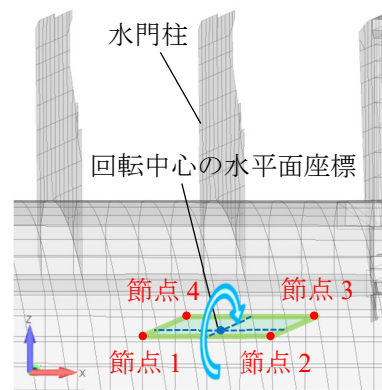


図-16 回転角加速度の算出方法

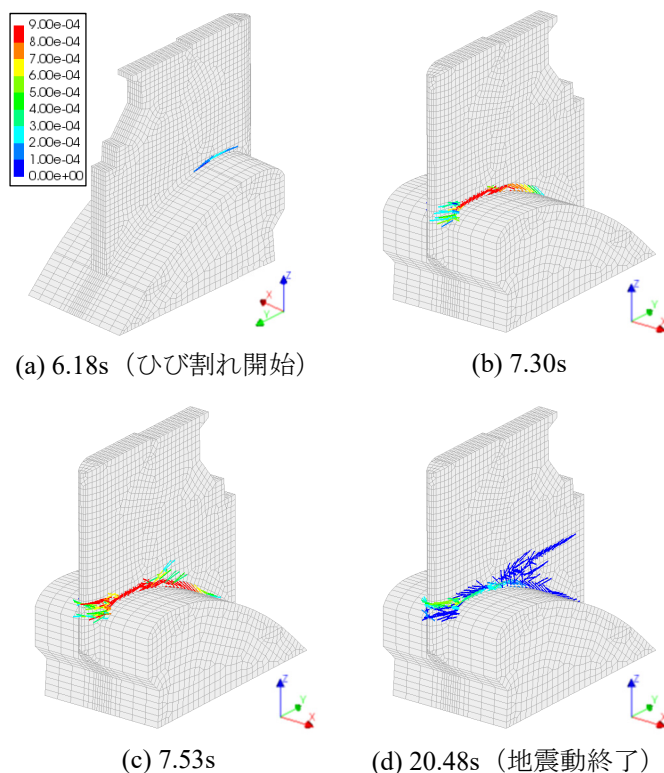


図-17 水門柱 R モデルのひび割れひずみ分布

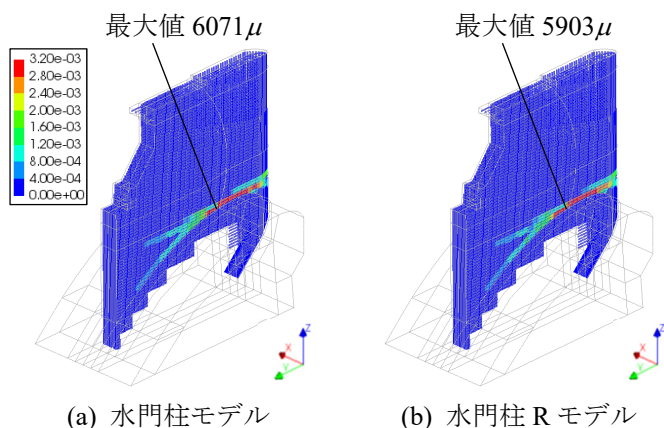


図-18 鉄筋の鉛直方向ひずみ分布

合わせて示す。同図より、両モデルを比較すると、上下周方向の応答変位、応答加速度は水門柱 R モデルの方が大きく、左右岸軸回りの回転入力による影響が顕著に表れている。一方、左右岸方向の応答は概ね同程度となっているが、これは、水門柱モデルの損傷が主に左右岸方向の曲げ変形に起因するためと考えられる。つまり、上下流方向の応答増大は水門柱 R モデルの損傷進展にあまり寄与しないため、両モデルの損傷状態や発生ひずみ、左右岸方向に大きな相違がないと思われる。したがって、本検討では、境界条件の変化が、水門柱の破壊挙動や耐震性能照査に与える影響は小さいと推測される。

5. まとめ

ダム水門柱の耐震性能照査に適した地震応答解析手法を把握するために、水門柱部分モデル化手法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) Westergaard 近似式に補正を加えた付加質量を用いて、水門柱側面に作用する動水圧がもたらす応力を概ね安全側に評価できた。
- 2) コンクリートのひび割れと鉄筋の降伏を考慮した三次元非線形解析によって、水門柱の損傷、及びそれによる応答の変化が推定できた。
- 3) 水門柱の破壊挙動が左右岸方向応答に依存する場合、堤体のロッキング変形を考慮した境界条件が水門柱の損傷に与える影響は小さかった。

参考文献

- [1] Westergaard, H. M. : Water pressure on dams during earthquakes, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, pp.418-433, 1933
- [2] 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 1, 社団法人日本水道協会, 2009
- [3] 土木学会 コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2012
- [4] Al-Mahaidi, R. S. H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979
- [5] 木全宏之, 藤田豊, 堀井秀之：動的クラック進展解析による重力式コンクリートダムの耐震安全性評価, 土木学会論文集, No. 787, pp.137-145, 2005

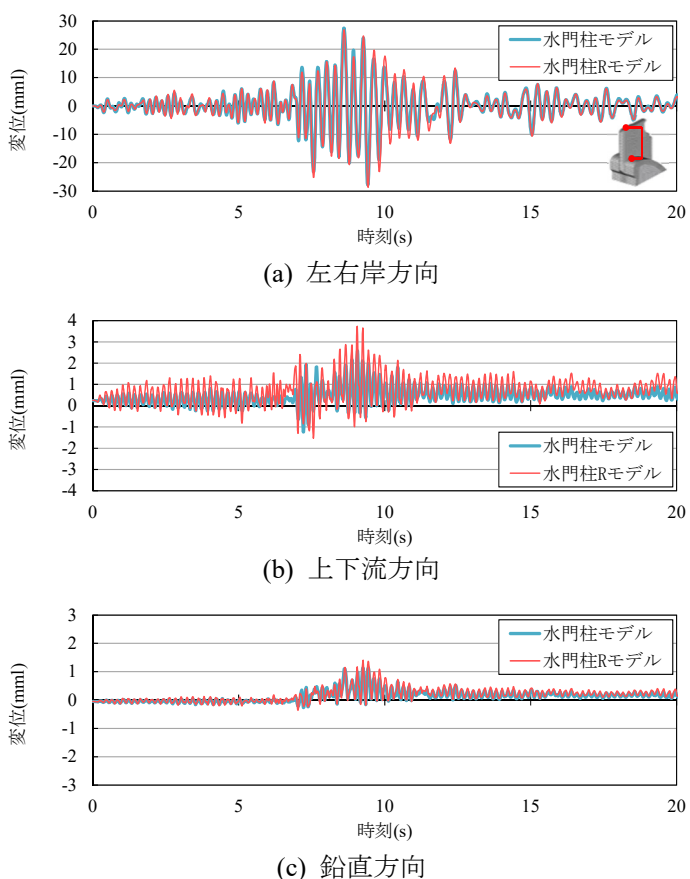


図-19 水門柱天端－水門柱基部の相対変位時刻歴
(水門柱モデル, 水門柱 R モデル)

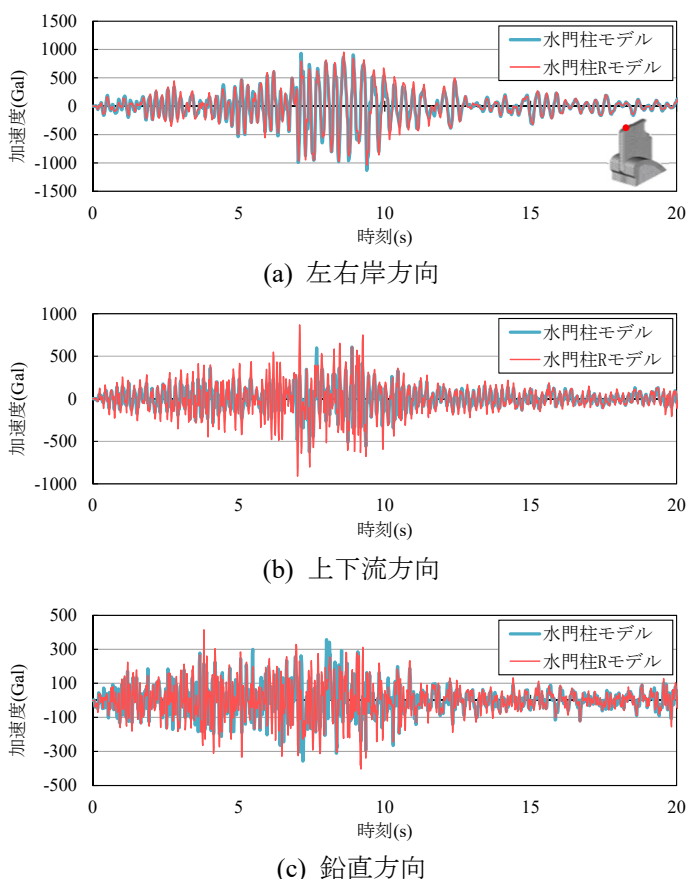


図-20 水門柱天端の絶対加速度時刻歴
(水門柱モデル, 水門柱 R モデル)