

5.3 洪水吐ゲート

5.3.1 レベル2地震動に対する照査基準

レベル2地震動に対する洪水吐ゲートの要求性能に対応する照査基準を表5.3.1-1に示す。なお、各対象部位の要求性能において、複数の照査基準が示されている場合、全ての項目について評価を行った上で、各対象部位の評価結果を踏まえ、設備全体の耐震性について総合的な評価を行う。

表 5.3.1-1 洪水吐ゲートのレベル2地震動に対する限界状態及び照査基準

(a) ゲート

対象設備	要求性能(限界状態)	照査基準
ゲート (耐震性能①に相当)	主要構造部材が座屈しない状態 (横倒れ座屈、局部座屈、曲げせん断座屈)	・ 主要構造部材の応力 ≤ 座屈に対する許容応力度
	補助構造部材が座屈しない又は座屈してもその影響により主要構造部材が座屈しない状態(局部座屈)	・ 補助構造部材の応力 ≤ 座屈に対する許容応力度
	主要構造部材のひずみが弾性域内に留まる状態	・ 主要構造部材のひずみ ≤ 降伏ひずみの2~3倍程度
	補助構造部材のひずみが限定的な塑性化に留まる状態	・ 補助構造部材のひずみ ≤ 降伏ひずみの10倍程度
ゲート (耐震性能②に相当)	主要構造部材及び補助構造部材のひずみがほぼ弾性域内に留まる状態(洪水吐)	・ 主要/補助構造部材のひずみ ≤ 降伏ひずみの2~3倍程度
	主要構造部材及び補助構造部材のひずみが弾性域内に留まる状態(放流管)	・ 主要/補助構造部材のひずみ ≤ 降伏ひずみ
	ゲートと戸当り金物の水密性が確保される状態	・ ゲートのたわみ ≤ 許容変位

(b) ピア

対象設備	要求性能(限界状態)	照査基準
ピア (耐震性能①に相当)	ピアの損傷によりゲートが脱落しない状態	(曲げ破壊に対する照査) ・ 作用曲げモーメント ≤ 許容曲げ耐力
		(せん断破壊に対する照査) ・ 作用せん断力 ≤ 許容せん断耐力
ピア (耐震性能②に相当)	ピアの変形によりゲートが崩壊(損傷)しない状態	・ ゲート位置におけるピアの最大応答変位 ≤ ゲートの可動範囲
	ピアの損傷によりゲートが脱落しない状態	(曲げ破壊に対する照査) ・ 作用曲げモーメント ≤ 許容曲げ耐力
		(せん断破壊に対する照査) ・ 作用せん断力 ≤ 許容せん断耐力
	損傷の修復を容易に行える状態	・ ピアの残留変位 ≤ ピアの高さの1/100
ゲートが常時満水位以上まで開閉可能な状態	・ ピアの残留変形角 ≤ 許容残留変形角	
	・ ピアの残留変位 ≤ ゲートの可動範囲	

(c) 天端橋梁・操作架台・開閉装置・昇降装置

対象設備	要求性能(限界状態)	照査基準
操作架台 ゲート開閉装置 (耐震性能①に相当)	アンカ部の損傷により脱落し、ゲートの崩壊(損傷)させない状態	・アンカボルトの発生応力 ≤許容応力度
操作架台 ゲート開閉装置 (耐震性能②に相当)	損傷の修復を容易にでき、取水が可能となる状態	・アンカボルトの発生応力 ≤許容応力度 ・装置に損傷が発生しない
天端橋梁	落橋しゲートを崩壊(損傷)させない状態 必要な電力が供給可能な状態	・取水塔と橋台間の最大相対変位 ≤桁かかり長

洪水吐ゲートは、常時満水位がゲート敷高より高い場合、地震によって扉体の架構部又は支承部に大変形が生じたり、戸当り及び固定部や門柱部が損傷して扉体の脱落が生じたりすれば、制御できない貯水の流出が生じるおそれがある。このため、そのような損傷が生じないことを地震応答解析より確認する必要がある。

ゲート構造物の特徴は、鋼材を用いることで強度の高い構造物を軽量に作製できることである。その結果、ゲートに作用する地震荷重の一つである慣性力に対しては耐震上有利に働く。一方、大規模地震時の地震荷重で大きな割合を占める動水圧に対しては、部材が薄肉構造であるために座屈や発生応力に特に留意が必要であり、ゲートの耐震性を評価する場合には動水圧を精度良く求めることが重要となる。

なお、照査にあたって考慮する開閉状態として、全閉の状態(=洪水処理を行っていない状態)を基本とする。

また、各ゲート型式において設定される照査項目を表5.3.1-2に示す。ここで示す「照査項目」とは、「照査実施部位とその要求性能の組み合わせ」である。

表5.3.1-2 各ゲート型式において設定される照査項目

型式 部位	ラジアルゲート	ローラゲート
扉体	<ul style="list-style-type: none"> ・架構部の主要構造部材(脚柱、主桁、水平桁)及び支承部(トラニオンボス、トラニオンピン、ペDESTAL): 座屈を生じず部材の力学特性がほぼ弾性域内に留まること。 ・架構部の補助構造部材(トラス材): 座屈を生じても主要構造部材に関して上記条件を満足すること。 ・受圧部(補助桁、スキンプレート): 座屈を生じず、限定的な塑性化に留まること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・架構部の主要構造部材(主桁、端桁)及び支承部(主ローラ、ロッカービーム): 座屈を生じず、部材の力学特性がほぼ弾性域内に留まること。 ・架構部の補助構造部材(トラス材、ブレイジング): 座屈を生じても、主要構造部材に関して上記条件を満足すること。 ・受圧部(補助桁、スキンプレート): 座屈を生じず、限定的な塑性化に留まること。

型式 部位	ラジアルゲート	ローラゲート
戸当り ・ 固定部 ・ 門柱部	<ul style="list-style-type: none"> ・水密部及びサイドローラ： 限定的な部分の破壊に留まること。 ・トラニオンガーダ及びアンカ： 座屈を生じず、部材の力学特性がほぼ 弾性域内に留まること。 ・門柱（ピア）部： 限定的な部分の損傷に留まること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・水密部、フロントローラ及びサイドローラ： 限定的な部分の破壊に留まること。 ・ローラレール、ローラ踏面板（戸当り（重構造））： 座屈を生じず、部材の力学特性がほぼ 弾性域内に留まること。 ・門構（主要部材）： 座屈を生じず、弾性域内に留まること。 ・門構（補助部材）及び戸当り（軽構造部）： 限定的な部分の破壊に留まること。 ・門柱（橋脚）： 限定的な部分の損傷に留まること。
開閉装置 等	<ul style="list-style-type: none"> ・機械式又は油圧式開閉装置： 移動、転倒、破損等が生じないこと。 ・機側操作盤： 移動、転倒、破損等が生じないこと。 ・操作橋（操作室床として使用されているもの）： 落橋しないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ・機械式開閉装置： 移動、転倒、破損等が生じないこと。 ・機側操作盤： 移動、転倒、破損等が生じないこと。 ・操作橋（門柱間に設置され、開閉装置架台として使用されているもの） 落橋しないこと。

5.3.1.1 扉体

ゲート全体構造の安定性を確保する上で必要な主要部材（以下、「主要構造部材」という。）の「座屈を生じるおそれがなく」、かつ各部材の力学的状態が「ほぼ弾性域内にあること」が確認できれば、耐震性能照査上問題となるような損傷は生じない。

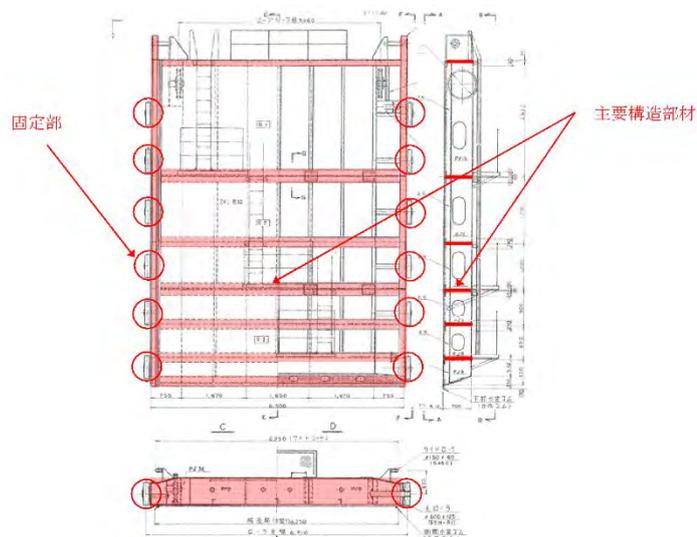
なお、主要構造部材以外の構造部材（補助構造部材）の一部において「座屈を生じるおそれがある」場合には、当該補助構造部材の座屈の影響を考慮した動的解析を行って「ゲート全体構造の安定性が確保される」ことを確認する必要がある。

次に、主要構造部材の「座屈が生じるおそれはない」ものの、「一部部材の力学的状態がほぼ弾性域にとどまることが確認できない」場合には、当該部材の降伏（塑性化）の影響を非線形解析等により照査する。その結果、主要構造部材が「ほぼ弾性域内にとどまる」とともに補助構造部材が「限定的な塑性化」にとどまり、塑性変形量が「ゲート操作に支障をきたす」ものとならないことを確認する。

5.3.1.2 戸当り及び固定部

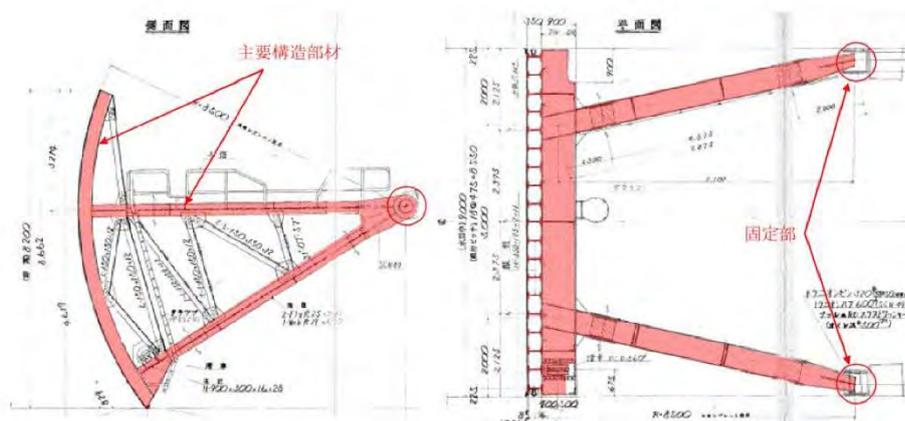
扉体の動的解析等においてモデル化していない部材（境界条件として考慮）については、動的解析等の結果を踏まえた構造計算等による評価を行い、許容値を満足し、破損等が生じないことを確認する。

なお、許容値については、設計で用いられる許容荷重に対し見込まれている安全率（2程度）を見込まない値として設定する。



※ 固定部は、ローラー部、戸当たり金物部を含む。

(a) ローラーゲート



※ 固定部は、トラニオン部、アンカレッジ部を含む。

(b) ラジアルゲート

図 5.3.1-1 クレストゲートの主要構造部材 1)P.1-75

5.3.1.3 門柱部、天端橋梁及び操作室

ゲートを支持する門柱（天端橋梁の橋脚と一体構造のものを含む）は、構造的にはダム本体の一部であるが、重大な損傷により「ゲートの脱落等が生じないこと」を確認する必要がある。また、門柱部の変形により「ゲートが損傷しない」ことを確認する。なお、ダム本体の場合と異なり、ダム軸方向の地震動の影響が大きくなることに留意する必要がある。

また、門柱の損傷により主ゲートが操作不能になるなどして貯水機能及び放流機能が維持できない状況にならないこと（「ゲートが常時満水位まで開閉可能な状態」）を確認する必要がある。

併せて、門柱部の変形により操作室へのアクセス路となる天端橋梁が「落橋しゲート操作に影響を及ぼさない」こと、操作室に設置された開閉装置等が「移動・転倒等により損傷しないこと」を確認する必要がある。

5.3.2 考慮すべき荷重とそのモデル化

耐震性能照査における荷重の設定

洪水吐ゲートの解析では、レベル2地震動作用時の実際の荷重を想定し、以下の条件を考慮する。

- ① 自重
- ② 静水圧
- ③ 地震時加速度（慣性力）
- ④ 地震時動水圧（貯水による動水圧）

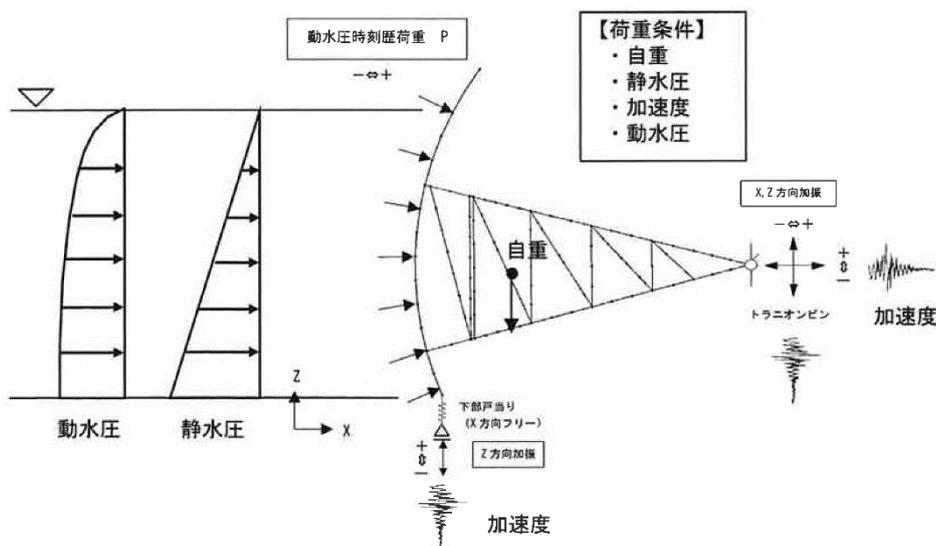


図 5.3.2-1 作用荷重例の模式図 9)P1-32

5.3.2.1 自重

扉体全体の重量を考慮する。なお、ゲート部材すべてを解析モデル化することは実用的でないため、モデルの重量は実ゲートの重量より小さくなる。このため、解析モデルとしてモデル化していない部材については、集中荷重により設定する又はモデルの重量が実ゲートの重量に等しくなるようにモデルの単位体積重量を調整することで対応する。

5.3.2.2 静水圧

設定した水位条件に基づく静水圧を対象節点に作用させる。作用方向は作用面に直角とする。ゲートの耐震照査で考慮する水位条件は、通常時ダムに想定される水位の中で地震が発生した場合にゲートに対する影響が最も大きくなる常時満水位を基本とする。洪水時に一時的に生じる水位については、そのような水位が生じる洪水と大規模地震が同時に発生する可能性は極めて小さいと考えられることから考慮しない。

なお、照査にあたって考慮するゲートの開閉状態として、全閉状態は小開度時よりもゲートに作用する水圧が大きく、外力が厳しい条件となることから、全閉状態を基本とする。

5.3.2.3 地震時加速度（慣性力）

扉体及び門柱部の慣性力は、動的応答解析により考慮する。ダム本体の堤体上に設置されているゲート（コンクリートダムの非常用洪水吐ゲートなど）の場合は、ダム本体の地震応答解析の結果から得られるゲート設置位置での応答加速度時刻歴波形を用いることができる。また、基礎岩盤上に直接設置されているゲート（フィルダム洪水吐ゲート）などのように、ゲートを支える構造物があまり応答しないと考えられる場合には、ダム基礎岩盤での地震動（堤体基礎地盤面での応答加速度）を直接用いることが考えられる。

以下に、動的応答解析に用いる入力地震動の設定方法を示す。ゲートの照査は、原則として、ゲートと直交方向の入力動を考慮することとする。なお、ゲートを支持する門柱部は、ダム本体の場合と異なり、ダム軸方向の地震動の影響が大きくなる可能性があることに留意し、上下流方向及びダム軸方向の地震動の影響を考慮する。

(1) ゲート

1) 堤体の地震応答解析（2次元解析）の結果から得られるゲート設置位置での応答加速度時刻歴波形（上下流方向又は上下流+鉛直方向）

ダム本体の地震応答解析（2次元解析）の結果から得られるゲート設置位置における応答加速度（上下流方向成分）の時刻歴波形を、戸当り、トラニオンピン、主ローラ等、境界条件と設定した箇所に入力する。ゲートの地震応答解析において考慮する入力地震動の成分としては水平動（上下流方向成分とダム軸方向成分）及び上下動（鉛直方向成分）が考えられる。

既往の検討事例では、ゲートの地震応答解析は、一般に水平動の上下流方向成分の影響が支配的となることが多い。

2) 堤体、岩盤ならびに貯水の連成を考慮した3次元動的解析の結果から得られるゲート設置位置での応答加速度時刻歴波形（上下流+鉛直方向又は水平方向2成分+鉛直方向）

堤体、岩盤及び貯水の連成を考慮した3次元動的解析の結果より、戸当り、トラニオンピン、主ローラ等を介しダム本体から伝達される加速度をゲートに作用する入力地震動として、境界条件設定箇所（戸当り部、トラニオンピン部、主ローラ部等）に入力する。

堤体、岩盤及び貯水の連成解析モデルは、堤体の地震応答と貯水の相互作用を適正に評価するため、堤体、ゲート（簡易モデル）、貯水、基礎岩盤を連成させた3次元FEM解析モデルとし、ゲートに作用する地震荷重はこの連成解析モデルを用いた動的解析により評価する。なお、ダム本体の解析モデルは、ピア、越流部、トップアーチ（管理橋）の形状までを詳細に作成する。

ゲートの解析モデルは、ダム本体と連成させて作成することから、ゲート単独の解析モデルのように詳細に要素分割することは困難であること、ここで作成した解析モデルを用いて部材の応力照査を行うものではないことから、スキンプレートや桁の形状を簡略化した“簡易モデル”を用いてよい。

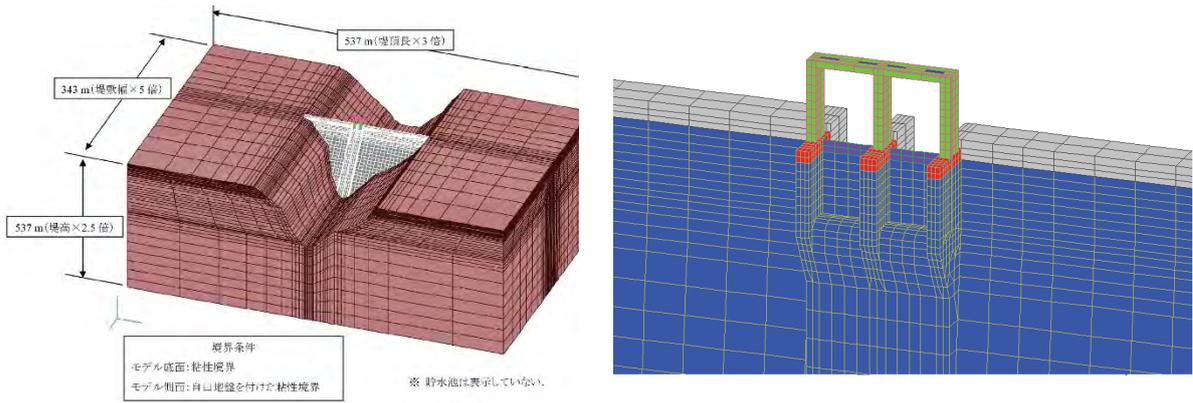


図 5.3.2-2 ダム、ゲート(簡易モデル)、岩盤ならびに貯水の連成解析モデル
: 重力式コンクリートダム (貯水是非表示) 1)P. 3-132~133

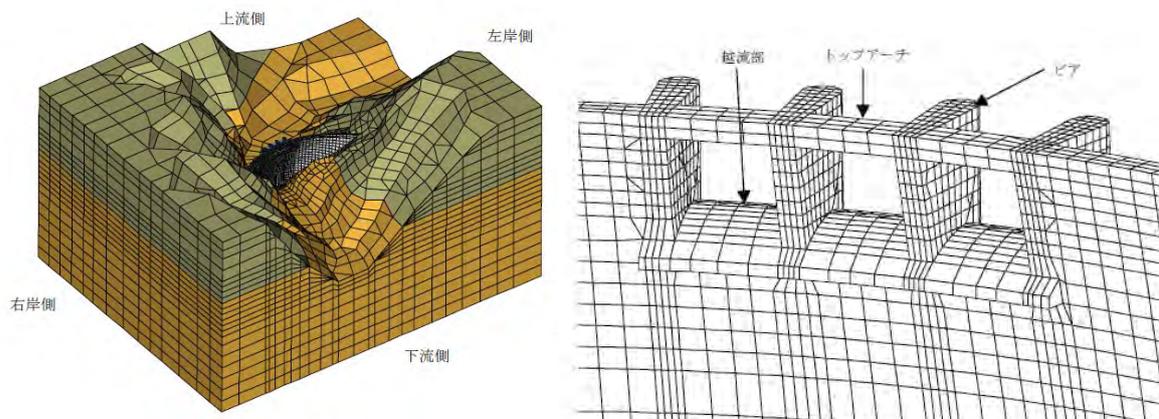


図 5.3.2-3 ダム、ゲート(簡易モデル)、岩盤ならびに貯水の連成解析モデル
: アーチダム (貯水是非表示)

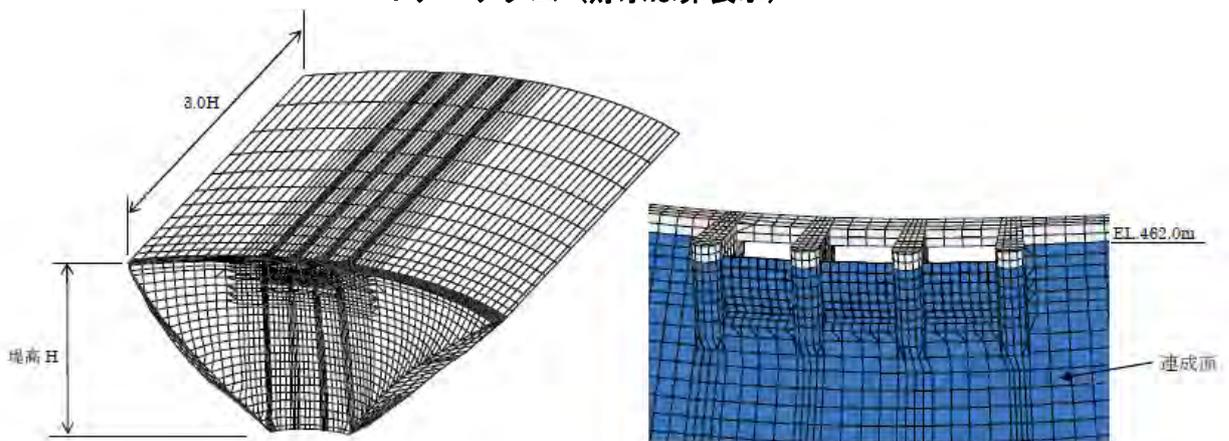


図 5.3.2-4 貯水の解析モデル

3) ダム基盤部で想定される地震動 (上下流方向、上下流+鉛直方向又は水平方向2成分+鉛直方向)

地山に岩着した洪水吐に設置されたゲート、堰及び頭首工と類似した堤高が低いダムの洪水吐に設置されたゲートで、ゲートを支持するピア及び堤体の応答が小さいと想定される場合、ダム基盤部で想定される地震動を入力地震動とする。

(2) ピア

1) ダム、岩盤ならびに貯水の連成を考慮した3次元動的解析により計算されるピア基部での応答加速度時刻歴波形（水平方向2成分+鉛直方向）

ダム天端に設置されるピアに作用する地震荷重は、ダムの地震応答と貯水の相互作用の影響を受ける。この影響を考慮するため、堤体、貯水及び基礎岩盤を連成させた3次元動的解析により得られるピア基部等での応答加速度時刻歴波形を入力地震動に用いる。なお、入力地震動は、ピア照査用の解析モデル（2次元又は3次元）の境界条件設定部に入力する。

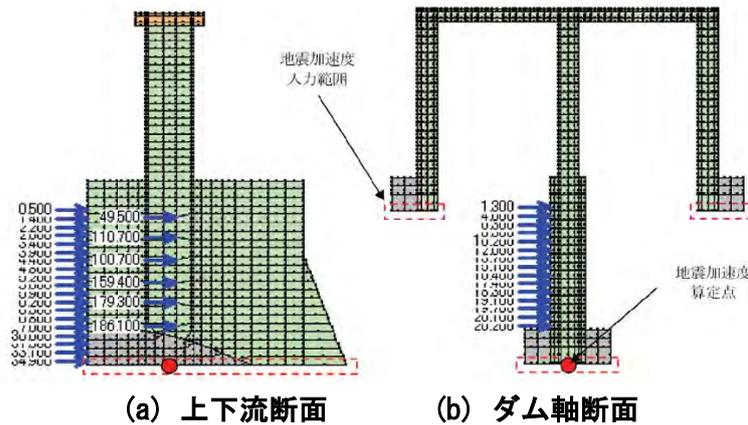


図 5.3.2-5 ピア解析モデル(2次元平面モデル)への地震荷重の与え方の概念図 1)P. 2-127

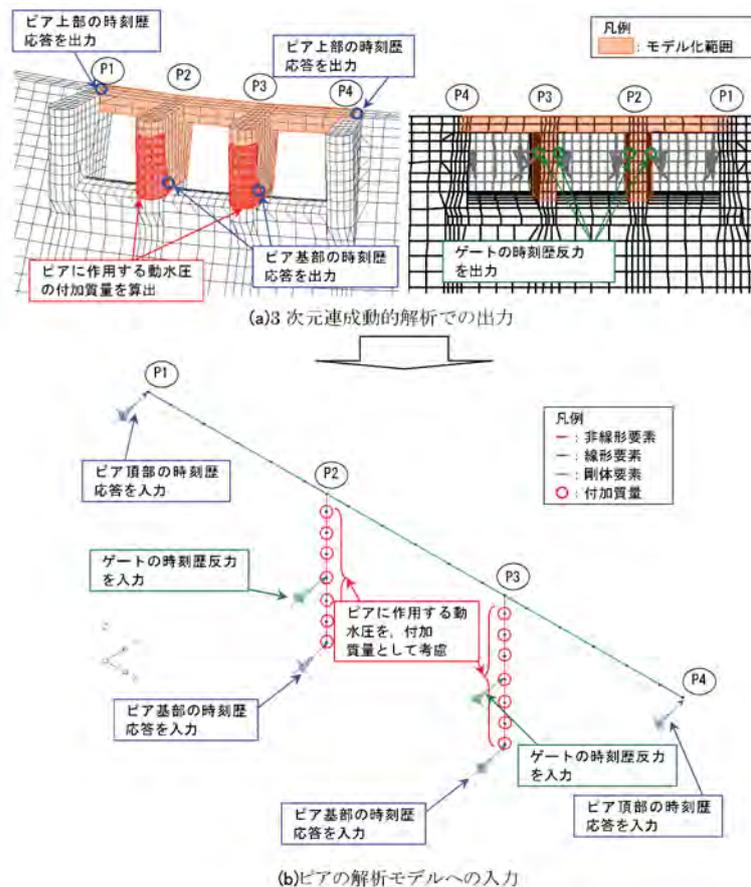


図 5.3.2-6 ピア解析モデル(3次元フレームモデル)での地震荷重の与え方の概念図 1)P. 2-184

2) 堤体地震応答解析（2次元解析）により計算されるピア基部での応答加速度時刻歴波形（上下流方向又は上下流+鉛直方向）

* ダム軸方向については、上下流方向の最大応答加速度に基づいた静的地震力を想定し、静的解析を実施。

ダム本体の地震応答解析（2次元解析）の結果から、門柱部基礎標高位置での応答加速度（上下流方向又は上下流+鉛直方向）の時刻歴波形をピア照査用の解析モデル（2次元又は3次元）の境界条件設定部（解析モデル基部）に入力する。ダム軸方向については、ダム本体の解析が2次元解析であるため、門柱部解析に用いるべき加速度応答（時刻歴波形）は直接設定できない。このため、上下流方向の最大応答とダム軸方向の最大応答の関係（門柱の固有振動周期）についての既往の研究成果等を参考に、上下流方向の最大応答加速度に基づいたいくつかのレベルの静的地震力を想定し、静的解析を実施する。

【参考】堤頂長の違いによる堤体の加速度応答の検討（上下流方向/ダム軸方向）

堤高 100m で堤頂長が異なる 3 種類（堤頂長 300m、500m、800m）の重力ダムを想定した簡易な 3 次元モデルを用い、レベル 2 地震動（照査下限加速度応答スペクトル相当）を堤体基礎において、上下流方向、ダム軸方向に同時に作用させたときの堤頂部における最大応答（上下流方向・ダム軸方向）を比較。

このような検討結果を参照し、門柱部の固有値解析により求まる固有周期に対応する応答スペクトル比を推定することにより、上下流方向に対してダム軸方向の照査において考慮すべき地震力の相対的な大きさを設定する方法を提案している。

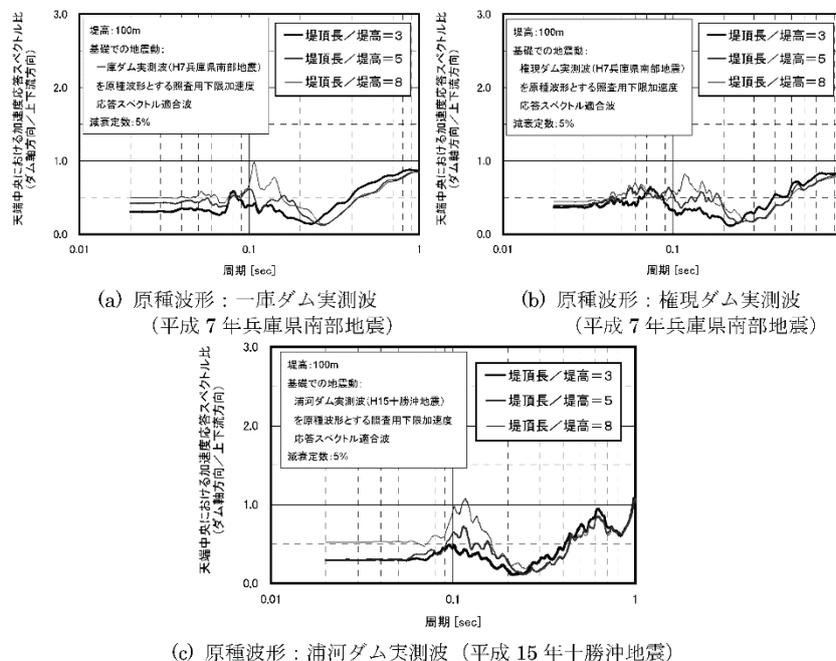


図 5.3.2-参 1 堤頂部における上下流方向応答に対するダム軸方向応答の応答スペクトル比の試算例 2) P. 91

3) 堤体地震応答解析（2次元解析）により計算されるピア基部での応答加速度時刻歴波形（上下流方向又は上下流+鉛直方向）と当該ダムでの既往の観測記録から推定される応答加速度時刻歴波形（ダム軸方向）

ダム本体の地震応答解析（2次元解析）の結果から、門柱部基礎標高位置での応答加速度（上下流方向又は上下流+鉛直方向）の時刻歴波形とする。ダム軸方向については、当該ダムの基礎及び堤頂部において強震時の地震動記録が得られていれば、その記録を基に当該ダムの動的応答特性を勘案し、ダム軸方向の入力地震動を設定することも考えられる。ただし、既往の地震動の活用にあたっては、その妥当性について地震動の特性を詳細に検討すること。

4) ダム基盤部で想定される地震動（上下流+ダム軸方向又は水平方向2成分+鉛直方向）

地山に岩着した洪水吐に設置されたピア、堰及び頭首工と類似した堤高が低いダムのピアで、ピア及び堤体の応答が小さいと想定される場合には、ダム基盤部で想定される地震動を入力地震動とすることができる。

5.3.2.4 地震時動水圧（貯水による動水圧）

ゲートに作用する動水圧は、ゲートと堤体の応答を考慮して求めることが必要であるが、既往の研究によれば、特にゲートの固有振動周期が堤体の固有振動周期に対し十分に短いような場合、堤体応答のみを考慮して求める方法で近似ができるとされている。照査対象のゲートがこのような条件下にあると考えられる場合、ゲートに作用する動水圧については、ゲートの固有振動そのものは考慮せず、貯水を含めた堤体全体のモデルによる解析などにより堤体上流面に作用する動水圧を算出し、その結果から得られるゲート位置における動水圧をゲートに作用する動水圧とすれば良い。

なお、堤体上流面に作用する動水圧をゲートに作用する動水圧とする場合、堤頂に近いクレストゲートは大きな堤体応答を受ける結果となるが、実際のクレストゲートは堤体上流面よりも少し下流側に設置されており、このセットバックの影響によりゲートに作用する動水圧が軽減することが既往の研究で指摘されている。照査にあたっては、安全側の評価となることを基本とするが、必要に応じその影響を考慮してもよい。

以下に、動的応答解析に用いる地震時動水圧の設定方法を示す。

(1) ゲート

1) 堤体の2次元動的解析（貯水を非圧縮性流体と仮定）により求められたゲート標高における堤体上流面の動水圧時刻歴波形

堤体の2次元動的解析（貯水を非圧縮性流体と仮定）によって求められた堤体上流面の動水圧の時刻歴を算出し、それをゲートのスキンプレート面の各節点において、スキンプレート面垂直方向に入力する。

2) 堤体の2次元動的解析（貯水を非圧縮性流体と仮定）により求められたゲート標高における堤体上流面の応答加速度と貯水池の動水圧マトリクスから算出される堤体上流面の動水圧時刻歴波形

堤体の2次元動的解析（貯水を非圧縮性流体と仮定）によって求められた堤体上流面の応答加速度と貯水池の動水圧マトリクスを用いて動水圧の時刻歴を算出し、それをゲートのスキンプレート面の各節点において、スキンプレート面垂直方向に入力する。

【参考】堤体上流面の動水圧の設定方法（非圧縮性流体モデル）

堤体上流面の動水圧を設定する場合の事例として、FEMによる動水圧マトリクスを用いた動水圧計算方法について下記に述べる。

(1) 非圧縮流体解析による動水圧の算定式

非圧縮性流体モデルによる動水圧解析では、堤体上流面の動水圧を算定するために、あらかじめ堤体上流面の各節点に動水圧マトリクスを作成する。そして(1-3)式に示すように動的解析で算出される堤体上流面の加速度を乗じて堤体上流面の動水圧を求める。

$$\{p\} = [P_w] \cdot \{a_{FEM}(t)\} \quad \dots \quad (1-3)$$

ここに、 $\{p\}$ ：堤体上流面の動水圧（各節点）

$[P_w]$ ：動水圧マトリクス

$\{a_{FEM}(t)\}$ ：堤体上流面の加速度（任意節点）

(2) 動水圧マトリクス係数の算出方法

堤体上流面の各節点に単位加振し、Laplace の式によって、単位加振に対する堤体上流面に発生する動水圧分布を求める。

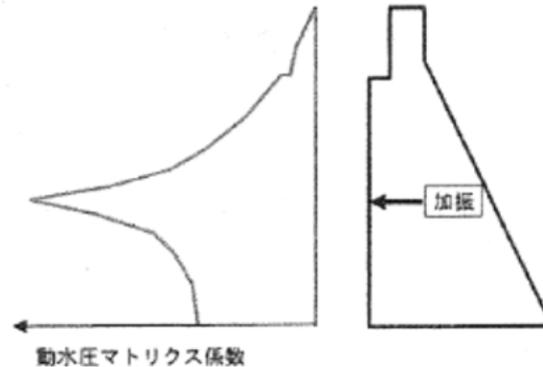


図 5.3.2-参 2 動水圧マトリクス係数のイメージ 9)P.1-40

3) ダム本体、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた 3次元 FEM 解析モデルによる動的解析により求められるゲート設置標高における堤体上流面の動水圧時刻歴波形

ダム本体、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた 3次元動的解析によって求められたゲート設置位置における堤体上流面の動水圧の時刻歴波形を、ゲートのスキンプレート面の各節点に対し、スキンプレート面直角方向に入力する。

4) 堤体、ゲート（簡易モデル）、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた 3次元動的解析により求められるゲート（簡易モデル）に作用する動水圧の時刻歴波形

堤体、岩盤及び貯水の連成解析モデルは、堤体の地震応答と貯水の相互作用を適正に評価するため、堤体、ゲート（簡易モデル）、貯水、基礎岩盤を連成させた 3次元 FEM 解析モデルとし、ゲートに作用する地震荷重はこの連成解析モデルを用いた動的解析により評価する。ダム本体の解析モデルは、ピア、越流部、トップアーチ（管理橋）の形状までを詳細に作成するが、ゲートの解析モデルは、ダム本体と連成させて作成することから、ゲート単独の解析モデルのように詳細に要素分割することは困難であること、ここで作成した解析モデルを用いて部材の応力照査を行うものではないことから、スキンプレートや桁の形状を簡略化した“簡易モデル”を用いてよい。

なお、ゲートの照査に用いるモデル（詳細モデル）に作用させる動水圧は、簡易モデルの節点で得られた動水圧の時刻歴波形を代表値とし詳細モデルの節点に与える。

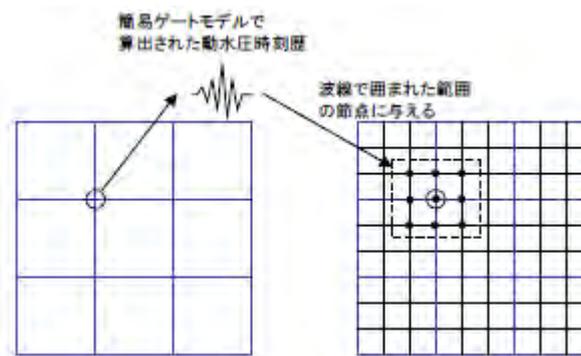


図 5.3.2-7 動水圧の時刻歴荷重の設定 1)P.2-171

5) 貯水（管内水）の質量に相当する付加質量（管内ゲートの場合）

堤体内にある常用洪水吐ゲートなど、放流管下流側に位置するゲートについては、動水圧として堤体上流面に作用する動水圧の他に、扉体上流側の放流管内の水による動水圧（管内動水圧）を考慮する必要がある。しかし、管内動水圧を正確に求めることは、現時点で非常に難しい問題であり、一般的には、管内水の体積分の慣性力が扉体前面に均等に作用するものとして、スキンプレート面各節点の支配面積分の動水圧荷重を算出し、これを各節点に対して時刻歴入力する簡便法がとられる。入力方向はスキンプレート面直角方向とする。

6) 動水圧の簡易算定式から算定される付加質量

地山に岩着した洪水吐に設置されたゲート及び堰並びに頭首工と類似した堤高が低いダムの洪水吐に設置されたゲートで、ゲートを支持するピア及び堤体の応答が小さいと想定される場合、動水圧の簡易算定式（Westergaard の簡易式や Zanger の実験式等）を参考に付加質量を算定し、ゲートのスキンプレート面の各節点に対し設定することが考えられる。

【Westergaard の簡易式】

$$Pd = 0.875 \cdot W_0 \cdot k \cdot \sqrt{H \cdot h}$$

ここに、 Pd : 動水圧 (kN/m^2)

W_0 : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

k : 地震加速度（設計震度）

H : 貯水池水面から基礎地盤までの水深 (m)

h : 貯水池水面から動水圧の作用する点までの水深 (m)

【Zanger の実験式】

$$Pd = C \cdot W_0 \cdot k \cdot H$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right) + \sqrt{\frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right)} \right]$$

ここに、 Pd : 動水圧 (kN/m^2)

W_0 : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

k : 地震加速度（設計震度）

H : 貯水池水面から基礎地盤までの水深 (m)

h : 貯水池水面から動水圧の作用する点までの水深 (m)

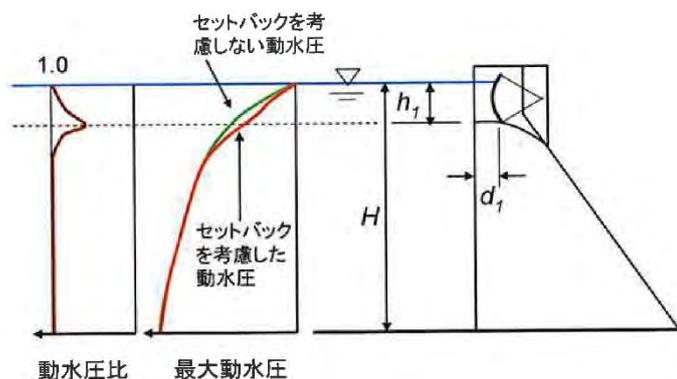
C_m : 与えられたダム上流面勾配より求める定数

【参考】セットバックによる動水圧の低減効果

地震時のクレストゲートの照査では、堤頂に近い構造物ほど堤体応答の影響を受ける形になり、地震慣性力だけでなく動水圧が主要な外力となる。

従来の耐震性能照査では、クレストゲートに作用させる動水圧は、ゲート位置における堤体上流面に作用する動水圧を設定していた。しかし、一般にクレストゲートは堤体

上流面よりも少し下流側に設置されており、このセットバックによる効果により、ゲートに作用する動水圧が低減することが指摘されている。



H : 貯水池水深、 h_1 : ゲート水深、 d_1 : セットバック量 (堤体とゲート下端の水平距離)

図 5.3.2-参3 ゲートのセットバックの定義 9)P.1-36

中山ら¹⁴⁾P. 959-969は、この動水圧について、以下のような低減効果を評価している。

$$p_g(h) = p(h) \cdot C(h)$$

ここに、 $p_g(h)$: ゲートに作用する動水圧、 $p(h)$: 堤体上流面の動水圧

$C(h)$: 動水圧比で下式による

$$C(h) = (1 - \sqrt{\alpha}) \exp\left(\frac{-1.4\beta h}{h_1}\right) + \sqrt{\alpha}$$

ここに、 α : ゲート水深比 (=ゲート水深 h_1 /貯水深 H)

β : セットバック比 (=セットバック量 d_1 /ゲート水深 h_1)

h_1 : ゲート水深

h : 任意の水深

(2) ピア

1) 堤体、ゲート（簡易モデル）、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた3次元動的解析により求まるピア基部での動水圧時刻歴の最大値から設定した静的荷重

ダム本体、ゲート（簡易モデル）、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた3次元動的解析により求まるピア基部での動水圧時刻歴の最大値を静的荷重として、ピアモデルに作用させる。

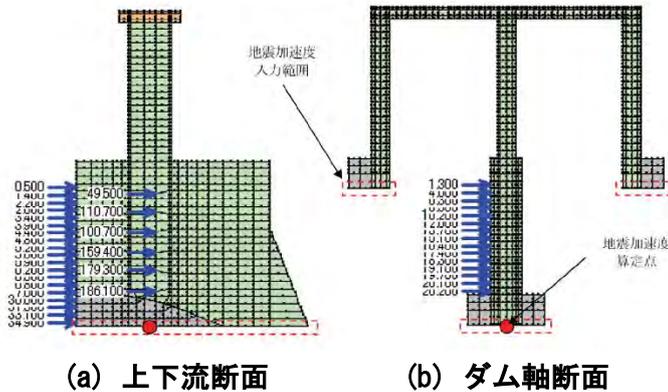
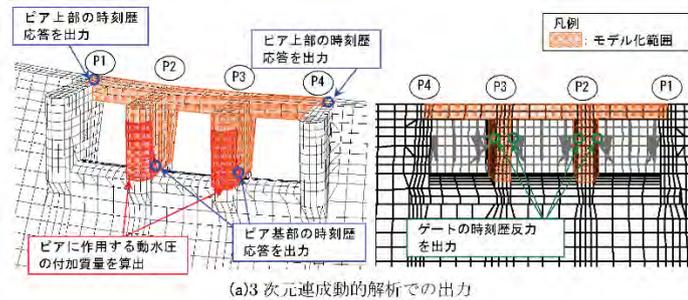


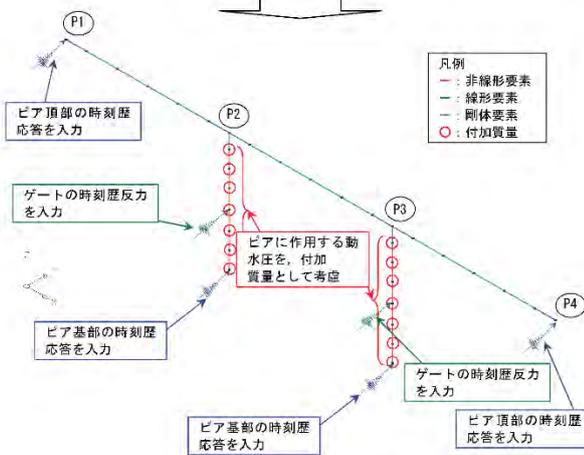
図 5.3.2-8 ピアモデル（2次元）に対する動水圧（静的荷重）の入力範囲 1)P.2-127

2) 貯水を非圧縮性流体と仮定し算出した付加質量マトリクス

ピアの前面及び側面に作用する動水圧を、堤体、ゲート（簡易モデル）、貯水（非圧縮性）、基礎岩盤を連成させた3次元連成解析モデルの結果より算出される付加質量で考慮し、該当箇所に設定する。



(a)3次元連成動的解析での出力



(b)ピアの解析モデルへの入力

図 5.3.2-9 ピアの解析モデル（3次元フレームモデル）への地震荷重の与え方の概念図 1)P.2-184

3) 動水圧の簡易算定式から算定される付加質量

地山に岩着した洪水吐に設置されたピア、堰及び頭首工と類似した堤高が低いダム
の洪水吐に設置されたピアで、ゲートを支持するピア及び堤体の応答が小さいと
想定される場合、動水圧の簡易算定式（Westergaard の簡易式や Zanger の
実験式等）を参考に付加質量を算定しピア前面及び側面の各節点に対し設定
することも考えられる。

5.3.3 解析モデル

レベル2地震動に対するクレストゲートの耐震性能照査では、クレストゲートの地震時挙動を適切に表現するため、荷重モデル、解析モデルを適切に組み合わせた3次元動的解析を実施する。

5.3.3.1 有限要素モデル

(1) ゲート

レベル2地震動に対するクレストゲートの照査では、ゲートを構成する架構部の主要構造部材（ローラゲート：主桁、端桁、ラジアルゲート：横桁、縦桁、脚柱）、補助構造部材（ローラゲート：縦補助桁、ブレーシング材、ラジアルゲート：縦補助桁、ブレーシング材）及び受圧部（スキンプレート）をモデル化し、3次元動的解析により発生応力や変形を計算する。このとき、ゲートの荷重伝達機構に直接影響しないような部材（歩廊等）をモデル化する必要は無いが、応力伝達や桁の剛性向上に影響する部材（主桁のウェブに設けられている垂直補剛材・水平補剛材、ラジアルゲートの主桁と脚柱との接続部に設けられた補剛板等）については、適切にモデル化する必要がある。

ローラ（主ローラ、フロントローラ、サイドローラ）や固定部（トラニオン、アンカレッジ）、戸当り部、水密部については直接モデル化せず境界条件として考慮し、照査は動的解析により得られる最大反力を用いた構造解析により行う。なお、モデル化しない部材（ローラ、トラニオンピン等）については、モデルの総重量がゲートの実重量になるよう考慮する必要がある。

解析モデルは、ゲート形式等の構造特性に応じた動的応答が適切に評価できるように留意し作成することが必要である。また、解析結果が照査上危険側の結果とならないこと、解析結果の評価に必要な精度を確保できること、いたずらに計算量が大きくならないこと等にも留意が必要である。

1) フレームモデル

部材を梁（ビーム要素）でモデル化した3次元有限要素モデルで、クレストゲートのモデル化に用いられる。簡便なモデル化が可能であり、解析時間の短縮を図れる反面、部材の複雑な応力状態の評価等、詳細な検討には向かない。照査の初期の段階において用いるモデルとして位置付けられる。

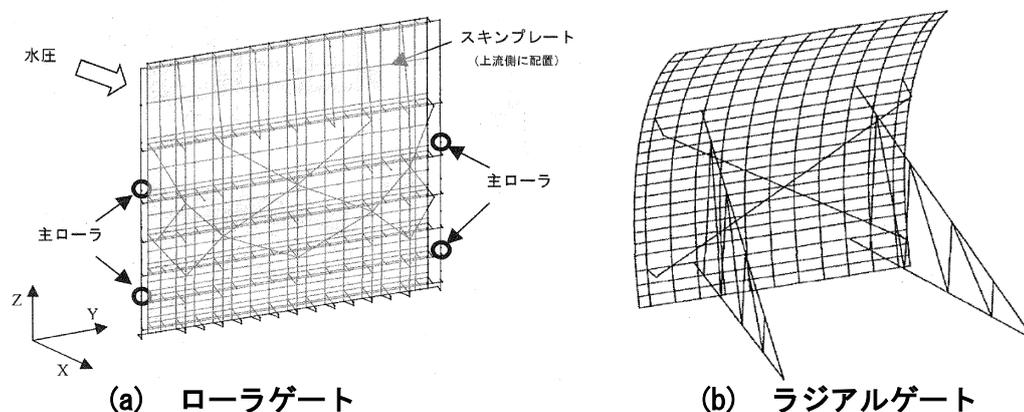


図 5.3.3-1 フレームモデル 2)P.155,166

2) シェルモデル

クレストゲートの照査に用いるモデルは、部材の塑性化等を評価するため、各部材の複雑な応力状態を解析上考慮可能なものとする必要がある。このため、構成する部材を出来る限り詳細に再現する目的で、局所的な応力状態を解析可能なシェル要素（板要素）が用いられることが多い。

なお、ゲートを構成する各桁は鋼板の組み合わせでできているため、シェル要素（板要素）を用いるとゲートの解析モデルを実際のものと同様に再現することができる。

ただし、シェル要素による解析モデルは、梁（ビーム）要素と比較して要素数が多くなることから、解析に要する時間が多大になる場合がある。このため、ゲートの左右対称性に着目し、計算時間の短縮を目的に半断面モデルを用いる等の工夫が必要である。（ただし、ダム軸方向成分の波形も考慮する場合にはこの限りではない。）

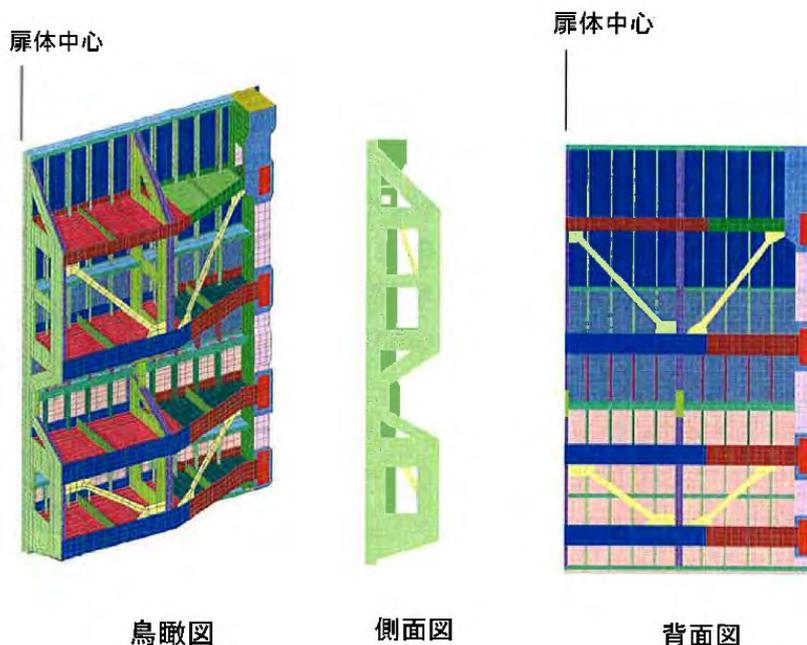


図 5.3.3-2 シェルモデル（ローラゲート） 9)P.1-21

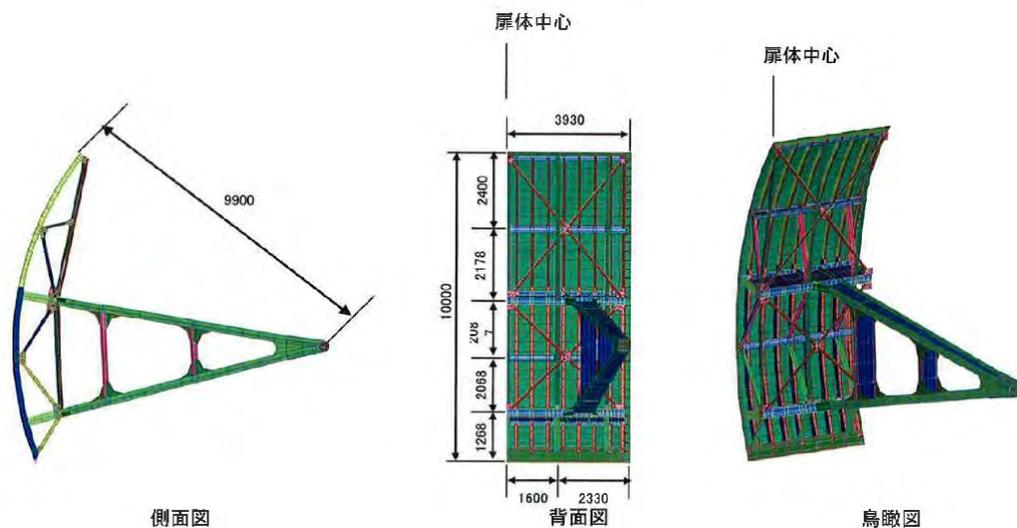


図 5.3.3-3 シェルモデル（ラジアルゲート） 9)P.1-17

(2) 門柱部（ピア）

地震応答解析により門柱部の照査を行うには、門柱部を含む堤体全体について3次元有限要素解析を行うことも考えられる。しかし、この方法では解析モデルが複雑で大規模なものとなることから、ダム本体とは切り離して門柱部のみをモデル化し、その基部においてはダム本体の地震応答解析により得られる加速度応答を考慮することが多い。

なお、門柱部は一般に鉄筋コンクリート構造(RC 構造)となっていることから、コンクリートと鉄筋の双方をモデル化する方法が適しているが、まず鉄筋を考慮しないモデルにより検討し、コンクリートのひび割れ等が予想される場合には、必要に応じ解析結果の評価の中で鉄筋の効果を考慮してもよい。

1) フレームモデル

部材を梁（ビーム）要素でモデル化した3次元有限要素モデルで、簡便なモデル化が可能である。ピア部のモデル化にあたっては、堤体との連続性を考慮し、適切な範囲を設定するとともに、適切な境界条件を設定する必要がある。

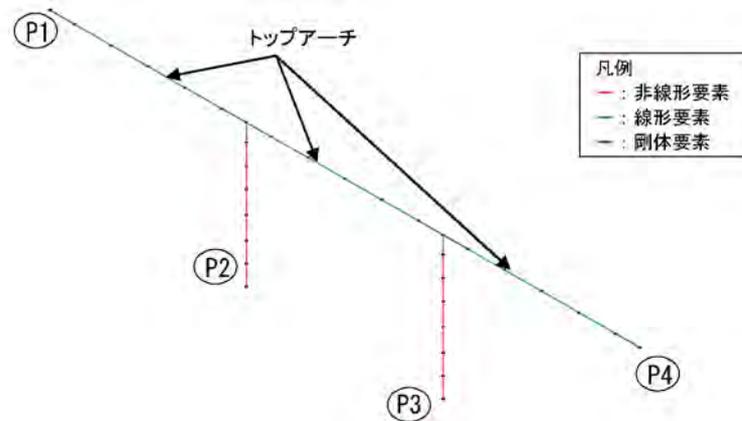


図 5.3.3-4 フレームモデル（ピア+天端橋梁） 1)P.2-160

2) 平面モデル・ソリッドモデル

部材を平面又はソリッド要素でモデル化した有限要素モデルで、平面要素では2次元断面形状、ソリッド要素では3次元形状をモデル化できる。2次元でモデル化する場合には、上下流断面、ダム軸断面についてモデル化を行う必要がある。鉄筋コンクリートをモデル化する場合、コンクリート部を平面又はソリッド要素、鉄筋部をリバー要素(補強材)でモデル化することもできる。

なお、ピア部のモデル化にあたっては、堤体との連続性を考慮し、適切な範囲を設定するとともに、適切な境界条件を設定する必要がある。ピア部単体の解析において、上部構造の拘束による門柱部での応答に対する抑制効果が期待できるものの、解析モデルを簡易に表現していること、また、安全側として上部構造はその質量のみ考慮し、境界条件等において拘束の効果を考慮していない事例もあることから、照査の目的やその段階等に応じ、適切なモデルを設定することに留意が必要である。

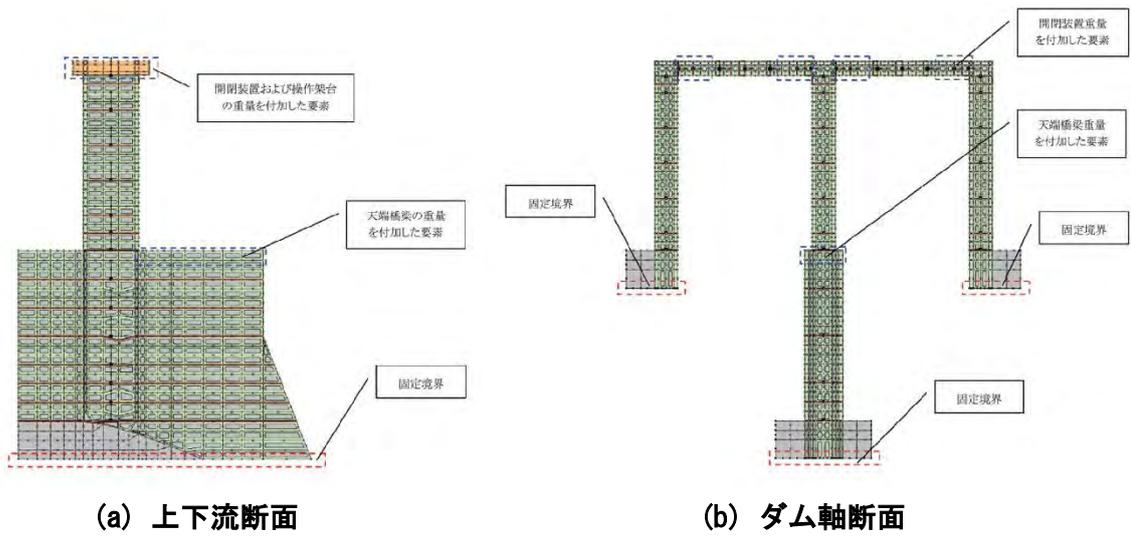


図 5.3.3-5 2次元平面モデル (ピア) 1)P. 2-122

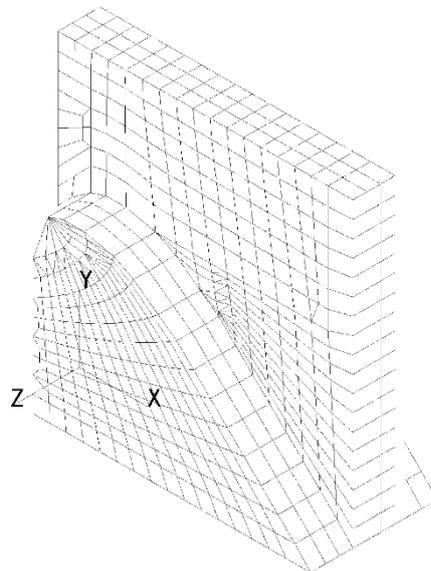


図 5.3.3-6 3次元ソリッドモデル (ピア単体) 2)P. 181

5.3.3.2 材料物性及び構成モデル

(1) 線形モデル

1) 鋼材

非線形解析を実施する前に、部材の強度が弾性域を超えない状態に留まるか、また、部材が降伏後にほぼ弾性域内とみなせる状態（降伏ひずみの2倍程度）に留まるかを確認する場合に用いる。また、エネルギー一定測による算定において、降伏ひずみの2倍以上のひずみの発生が想定される場合は、非線形モデルを用いた非線形解析による照査が必要となる。

ゲートの線形解析では、扉体を構成する鋼材について、①単位体積重量、②ヤング係数（縦弾性係数）、③ポアソン比が必要になる。ゲートに使用される主要部材は、原則として JIS 規格で定められた材料又はこれと同等以上の特性を有する材料を使用することとされており、扉体の主要部材に用いられる鋼材の各物性は JIS 規格に基づいた一定の性質を有している。このことから、解析に用いる物性値は、基本的には JIS 規格に準拠して設定する。なお、単位体積重量の設定にあたっては、ゲートにはモデル化を省略している部材もあるため、解析モデルの合計重量が扉体全体重量となるように単位体積重量を付加して解析を実施する場合がある。

一般的なゲートの構造部材として用いられる鋼材の材料物性値を以下に示す。

i. 単位体積重量

普通鋼（SS、SM 等） : 77.0 kN/m³

ステンレス鋼（SUS304） : 77.8 kN/m³

ii. ヤング係数（縦弾性係数）

普通鋼（SS、SM 等） : 2.05×10^5 N/mm²

ステンレス鋼（SUS304） : 1.93×10^5 N/mm²

iii. ポアソン比

普通鋼（SS、SM 等） : 0.3

ステンレス鋼（SUS304） : 0.3

また、ゲートの解析事例で用いられた材料物性値の設定例を表 5.3.3-1 に示す。

表 5.3.3-1 ゲート構造部材の材料物性値の設定例 ^{1)P. 2-122}

単位体積重量 ^{注1)} [kN/m ³]	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	降伏応力度 ^{注2)} [N/mm ²]
135	2.06×10^5	0.3	235

注1) モデル化しない部材があることにより合計重量が実際より小さくなるため、合計重量が実際の値に等しくなるよう調整した。

注2) 鋼材の降伏応力度は、『ダム・堰施設技術基準(案)』に記載されている設計基本強度（安全率を考慮して設計にも用いる許容応力度を定める際に基準とされた強度）と同じ値とした。

表 5.3.3-2 ゲート構成部材の材料物性値の設定例 2)P.169

部位	材質	単位体積重量 ^{注1)} [kN/m ³]	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	降伏応力度 ^{注2)} [N/mm ²]
架構部 (構造部材)	SM400 SS400	77.0	2.06×10^5	0.3	235
受圧部 (スキンプレート)	SM490	77.0	2.06×10^5	0.3	315

注1) モデル化しない部材があることにより合計重量が実際より小さくなるため、合計重量が実際の値に等しくなるよう調整した。

注2) 鋼材の降伏応力度は、『ダム・堰施設技術基準(案)』に記載されている設計基本強度（安全率を考慮して設計にも用いる許容応力度を定める際に基準とされた強度）と同じ値とした。

2) コンクリート

非線形解析を実施する前に、部材の挙動が弾性域を超えない状態にとどまるかを確認する場合に用いられる。また、断面寸法が大きく動的解析により弾性領域にとどまることがあらかじめ想定される部材に対し用いることで解析効率を向上させることができる。

表 5.3.3-3 門柱部(ピア)の材料物性値の設定例 1)P.2-161(一部)

材料	項目	単位	値
コンクリート	単位体積重量 ρ	kN/m ³	23.05
	圧縮強度	kN/m ²	40,000
	ポアソン比		0.2
	弾性係数	MPa	40,000

(2) 非線形モデル

1) 鋼材

線形動的解析の結果を踏まえ、部材の降伏（塑性化）の影響を考慮するために用いられる。部材の応力-ひずみ関係として、降伏後（降伏応力到達以降）は剛性が初期剛性の1/100に低下するモデル等が用いられる。ゲートの解析事例で用いられた材料物性値及び応力-ひずみ関係の設定例を表5.3.3-4に示す。また、ゲートに用いられる代表的な鋼種についての降伏応力を表5.3.3-5に示す。

表 5.3.3-4 ゲート構造部材の材料物性値の設定例 1)P.2-161

項目	単位	値	備考
ヤング係数	N/mm ²	2.06×10^5	
単位体積重量	kN/m ³	78	実ゲート重量からの補正值
ポアソン比		0.3	
降伏基準		VonMises	
降伏応力	N/mm ²	235	
2次勾配		0.01E	国交省資料より

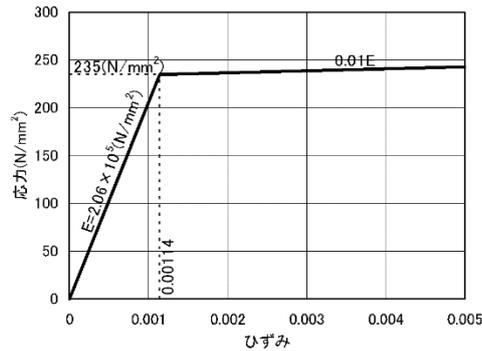


図 5.3.3-7 鋼材の応力—ひずみ関係の設定例（非線形） 1)P. 2-161

表 5.3.3-5 代表的な鋼種の降伏応力度 9)P. 1-25

鋼種	σ_y (N/mm ²) 降伏点又は 0.2%耐力	τ_y (N/mm ²) ミゼスの降伏条件
SS400、SM400	235	135
SM490	315	181
SUS304	205	118

*SS、SMについては鋼種の厚さにより σ_y 、 τ_y の値は異なる。

2) コンクリート

①部材非線形モデル (M-φ モデル)

コンクリートの曲げひび割れならびに鉄筋降伏を考慮した照査を行うために用いられる。

解析物性値及び非線形性を考慮するための材料強度の設定例を、それぞれ表 5.3.3-6 及び表 5.3.3-7 に示す。

表 5.3.3-6 解析物性値の設定例 1)P. 3-151(一部・追記)

部位等	特性	物性値	
コンクリート	非線形	質量密度 ρ_c	2.5 g/cm ³
		弾性係数 E_c ※1	27.5 kN/mm ²
		ポアソン比 ν_c	0.2
鉄筋、鉄骨	非線形	質量密度	0.0 g/cm ³
		弾性係数	200 kN/mm ²
		ポアソン比	0.3

※1 コンクリートの弾性係数は、圧縮強度をもとにコンクリート標準示方書を参照して設定

表 5.3.3-7 材料強度の設定例 1)P. 3-151

項目	種別	強度 (単位:N/mm ²)	備考
コンクリート	圧縮強度	29.0	材料強度試験値
	引張強度	2.171	コンクリート標準示方書による
	せん断強度	0.614	コンクリート標準示方書による
鉄筋(SD295)	降伏強度	325	
鉄骨(SS400)	降伏強度	195	

設定した材料物性及び材料強度より、土地改良事業設計指針「耐震設計」等を参考に、曲げ耐力、せん断耐力を算定し、曲げ耐力の非線形特性を曲げモーメント M ~ 曲率 ϕ 関係で定義するトリリニアモデルで評価する。

なお、レベル2地震動を対象とする照査では材料降伏後の損傷の程度を評価することとなるため、コンクリート及び鉄筋の材料特性は、より実物の強度特性（現時点での材料強度特性）に近く設定することに留意が必要である。

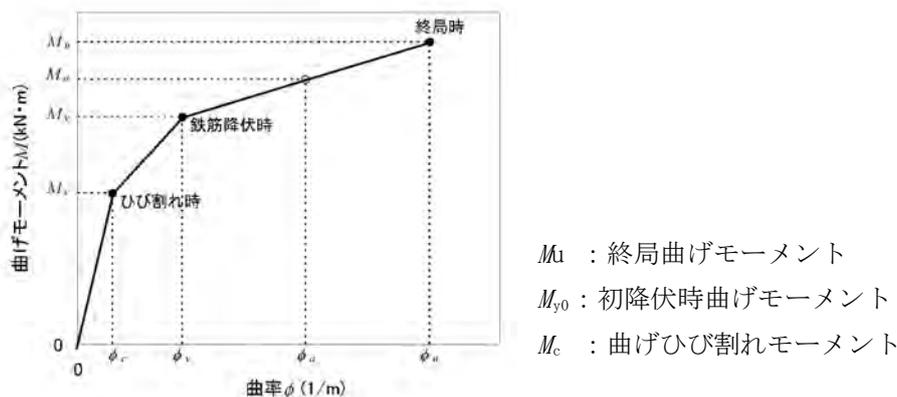


図 5.3.3-8 M ~ ϕ モデル 1)P.2-162

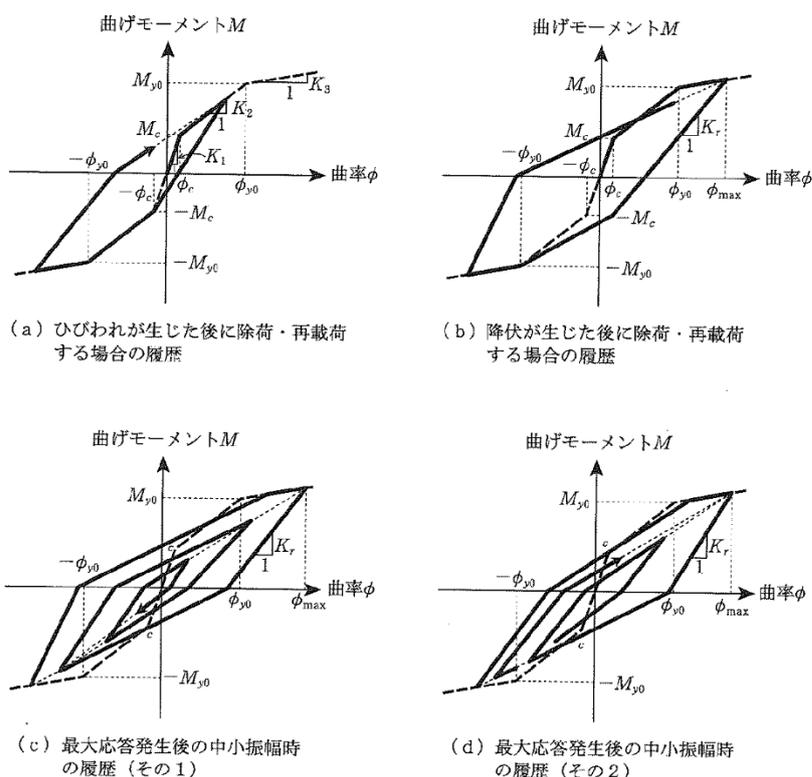


図 5.3.3-9 Takeda モデル 7)P.334

非線形材料の履歴特性は、繰り返し載荷時の部材の剛性劣化を表現できるモデルとして、鉄筋コンクリート部材の復元力特性を良く表現できるとされている Takeda モデル等、適切なモデルを用いる。

② 材料非線形モデル

コンクリート単体の非線形特性は、圧縮側では応力の増加とともにひずみが增大する非線形の応力-ひずみ関係を示し、ひび割れが発生した後は、ひび割れ直角方向の剛性が低下する。一方、引張側では発生応力が引張強度に達するまでは線形の応力-ひずみ関係を示し、ひび割れが発生し始めると引張軟化挙動を示して、完全にひび割れが入る（この状態を限界ひずみという）と応力を負担しなくなる（図 5.3.3-10）。

鉄筋単体の非線形特性は、圧縮・引張側ともに発生応力が降伏強度に達するまでは線形の応力-ひずみ関係を示し、降伏後の剛性はほぼ 0 となる（図 5.3.3-11）。

RC 構造では、これらの単体材料の非線形挙動に加え、ひび割れ発生とともにコンクリートと鉄筋が相互に影響を与え、単体とは異なる非線形挙動を示す。

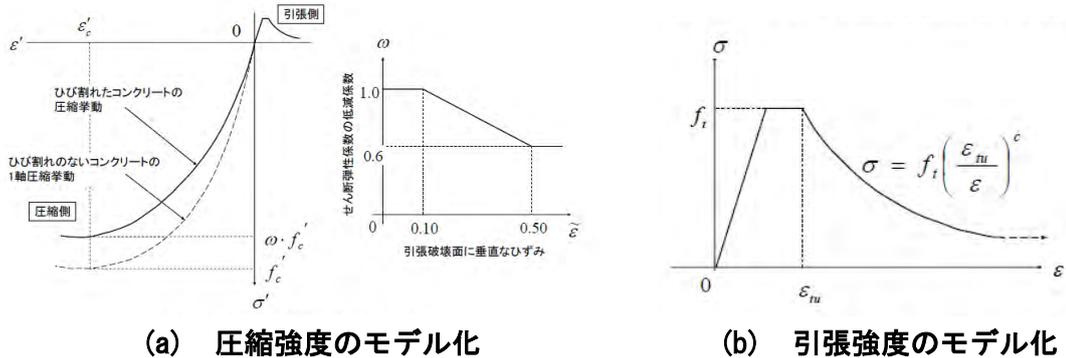


図 5.3.3-10 コンクリートの非線形特性のモデル化

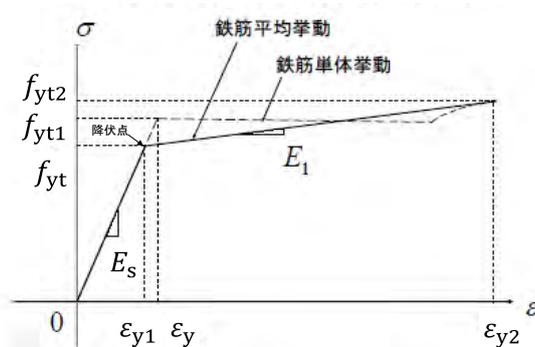


図 5.3.3-11 鉄筋引張挙動のモデル化

i. コンクリート

コンクリートの非線形特性については、コンクリート標準示方書に準じ設定を行う。

(a) 圧縮側

一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係の例を図 5.3.3-12 に示す。このモデルでは、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を超えた軟化域で表される曲線が用いられ、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を示すことが可能となっている。

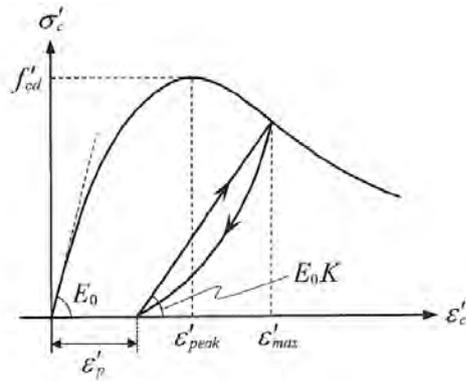


図 5.3.3-12 コンクリートの簡略化した一軸圧縮応力-ひずみ関係 8)P.487

$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

f'_{cd} : 設計圧縮強度

f'_{ck} : 設計基準強度

γ_c : 安全係数 (材料係数 : コンクリート)

ε'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

ε'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ε'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

(b) 引張側

一軸引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性としてもよく、ひびわれ強度以降は軟化曲線を用いてモデル化するものとする。鉄筋コンクリートでは、コンクリートと鋼材間の相互作用が無視できないので、その影響をコンクリート及び鋼材の応力-ひずみ関係に適切に考慮するものとした。一般には、図 5.3.3-13 に示すような、十分に配筋された鉄筋コンクリートの引張領域に適用する平均応力-ひずみ関係を用いるのがよい。

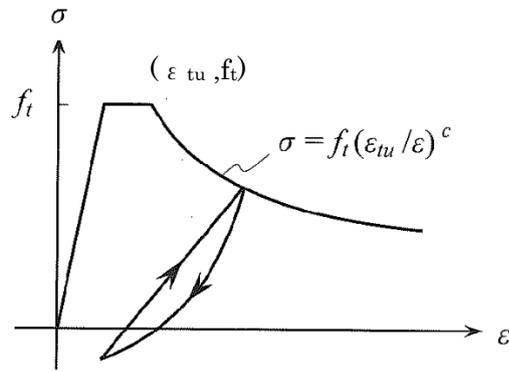


図 5.3.3-13 鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した引張応力-ひずみ関係 8) P. 484

$$\sigma_c = f_t(\varepsilon_{tu}/\varepsilon_c)^c$$

ここに、 f_t : 引張強度(= $\alpha_t f_{td}$)

f_{td} : 圧縮強度の特性値

α_t : 引張強度の低減係数 (≤ 1.0)

ε_{tu} : 引張軟化開始ひずみ (一般に、0.0002 としてもよい)

c : 引張軟化特性を表す係数で、異形鉄筋が十分に配置されている場合には 0.4 とする。

ii. 鉄筋・鉄骨

鉄筋・鉄骨の非線形特性については、コンクリート標準示方書に準じ設

コンクリート中の鉄筋・鉄骨の応力-ひずみ関係は、ひび割れを複数含む領域における鉄筋降伏後の挙動を適切にモデル化するため、鉄筋単体の応力-ひずみ関係ではなく、ひび割れやコンクリートとの付着効果を考慮した平均応力-平均ひずみ関係を設定する。

(a) コンクリート中の補強材（鉄筋・鉄骨）の平均応力-平均ひずみ関係

コンクリート中の鉄筋のひずみ硬化特性を考慮した平均応力-平均ひずみ関係は、一般に図 5.3.3-14 及び下式に示す応力-ひずみ関係を用いる (図、式中の上線付き記号表記が平均応力、平均ひずみを示す)。下式の骨格曲線及び除荷・再載荷履歴曲線は、 $(\varepsilon_s, \sigma_s)$ を応力反転位置とするバウジナー効果を考慮した除荷・再載荷のループを、原点を通る曲線として表したものである。

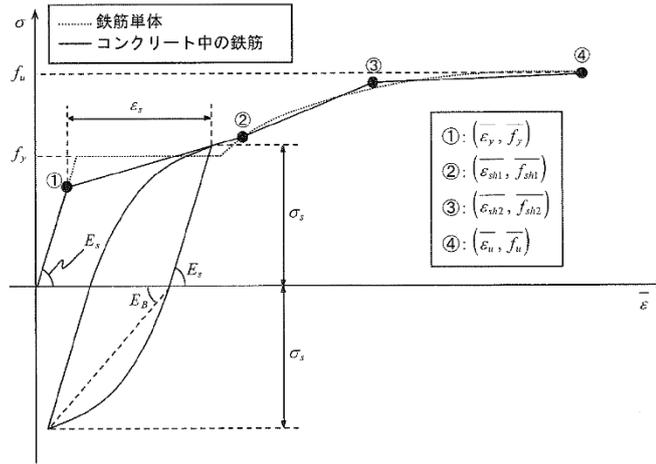


図 5.3.3-14 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係 8)P.493

骨格曲線

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_s &= E_s \bar{\varepsilon}_s & (\bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_y) \\ &= \bar{f}_y + \left(\frac{f_{sh1} - \bar{f}_y}{\bar{\varepsilon}_{sh1} - \bar{\varepsilon}_y} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_y) & (\bar{\varepsilon}_y < \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_{sh1}) \\ &= \bar{f}_{sh1} + \left(\frac{f_{sh2} - f_{sh1}}{\bar{\varepsilon}_{sh2} - \bar{\varepsilon}_{sh1}} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_{sh1}) & (\bar{\varepsilon}_{sh1} < \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_{sh2}) \\ &= \bar{f}_{sh2} + \left(\frac{f_u - f_{sh2}}{\bar{\varepsilon}_u - \bar{\varepsilon}_{sh2}} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_{sh2}) & (\bar{\varepsilon}_{sh2} < \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_u)\end{aligned}$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \bar{f}_y / E_s$$

$$\bar{f}_y = (1.0 - 0.5k_1)f_y$$

$$\bar{\varepsilon}_{sh1} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \varepsilon_y$$

$$\bar{f}_{sh1} = \bar{f}_y + (f_y - \bar{f}_y)\alpha_4$$

$$\bar{f}_{sh2} = 1.02 \left[\bar{f}_{sh1} + \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\bar{\varepsilon}_{sh1} - \bar{\varepsilon}_{sh2}}{k_5} \right) \right\} \cdot (1.01f_u - \bar{f}_{sh1}) \right]$$

$$\bar{\varepsilon}_u = \bar{\varepsilon}_{sh1} - k_5 \cdot \ln\left(1 - \frac{\bar{f}_u - \bar{f}_{sh1}}{1.01f_u - \bar{f}_{sh1}} \right)$$

$$\bar{f}_u = (0.993 - 0.22k_1^2 k_4^{-3})f_u$$

ここに、 $\alpha_1 = (2.7 - k_2) + (0.42 + 0.18k_2)k_3$

$$\alpha_2 = (0.045 + 0.055k_3) + (1.0 - 0.1k_3)k_1$$

$$\alpha_3 = a - b \cdot k_4 \geq 1.0$$

$$\alpha_4 = c + (1 - c)[1 - \exp\{-d(k_4 - 1.09)\}]$$

$$a = 3.25 - 0.25k_3 \geq 2.08$$

$$b = 1.5 - k_3/6 \geq 0.72$$

$$c = 0.4k_3^{0.25} + (1 - 0.4k_3^{0.25})[1 - \exp\{-0.5k_3^{0.4}(k_1^{-1} - 1.0)\}]$$

$$d = 7.5 - (k_1^{-1} - 1.0)(e - 7.5)/0.75 \geq e$$

$$e = 10 - 1.2k_3$$

$$k_1 = p_{cr}/p \quad k_2 = \bar{f}_y/350 \quad k_3 = \varepsilon_{sh}/\varepsilon_y \quad k_4 = \bar{f}_u/\bar{f}_y$$

$$p_{cr} = \bar{f}_t/\bar{f}_y$$

$$k_5 = 0.035(400/\bar{f}_y)^{1/3}$$

f_y : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm²)

- f_u : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm²)
- E_s : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm²)
- ε_y : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- ε_{sh} : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- p : 鉄筋比
- f_t : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

除荷・再載荷履歴曲線

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_s} - r\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} + r - 1\right) - r(1 - r) = 0$$

$$r = \frac{E_s}{E_s - E_B}$$

$$E_B = -\frac{E_s}{6} \cdot \log_{10}(10\varepsilon_s)$$

ここに、 ε_s : 骨格曲線部の経験ひずみの総和

σ_s : 除荷開始時の応力

なお、ひずみ硬化の影響が顕著な大ひずみ領域までを解析の対象としない場合には、図 5.3.3-14 の①～②転換の勾配を二次勾配とするバイリニア型の骨格曲線を用いてよい。

(b) 鉄筋単体の応力ひずみ関係

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (0 \leq \varepsilon < f_{yd}/E_s; \text{弾性域})$$

$$= f_{yd} \quad (f_{yd}/E_s \leq \varepsilon < \varepsilon_{sh}; \text{降伏棚})$$

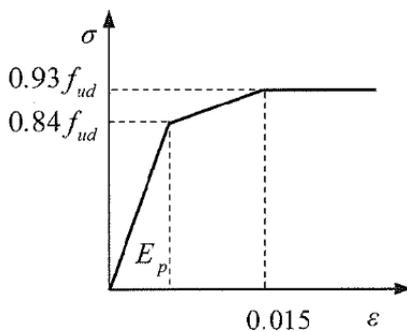
$$= f_{yd} + \left(1 - \exp((\varepsilon_{sh} - \varepsilon)/\kappa)\right) (1.01f_{ud} - f_{yd}) \quad (\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon < f_u/E_s; \text{ひずみ硬化域})$$

$$\kappa = 0.032(400/f_{yd})^{1/3}$$

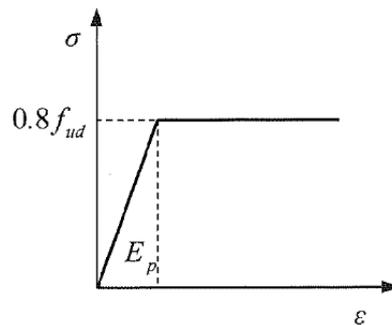
ここに、 σ : 鉄筋応力 ε : 鉄筋ひずみ E_s : 鉄筋ヤング率 (N/mm²)

f_{yd} : 設計降伏強度 (N/mm²) f_{ud} : 設計引張強度 (N/mm²)

ε_{sh} : ひずみ硬化開始ひずみ



(a) PC鋼線、PCより線および
PC鋼棒1号の応力-ひずみ関係



(b) PC鋼棒2号の応力-ひずみ関係

図 5.3.3-15 PC鋼材のモデル化された応力-ひずみ関係 8)P.491