

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-他-F-24-0020_改0
提出年月日	2021年9月15日

本資料の内容は、「補足 140-1【津波への配慮に関する補足説明資料】」の「6.2 取放水路流路縮小工に関する補足説明参考資料 5 取放水路流路縮小工の耐震評価の妥当性について」として反映予定。

## 取放水路流路縮小工の補足検討資料

## 1. 概要

取放水路流路縮小工（第1号機取水路，第1号機放水路）の耐震設計については，コンクリート躯体である取放水路流路縮小工（充填部，覆工部）を平面ひずみ要素（線形）でモデル化し，二次元動的有限要素法解析（SuperFLUSH）による地震応答解析を行い，発生応力に対して許容限界以内に収まることを確認している。なお，評価方針は，取放水路流路縮小工が，既設の取放水路を充填した直径3m～4m程度のマッシブな無筋コンクリート\*<sup>1</sup>構造であることから，地震荷重に対してコンクリート躯体である覆工部及び充填部が引張破壊又はせん断破壊しないこととして，許容限界は引張破壊に対しては引張強度\*<sup>2</sup>，せん断破壊に対してはせん断強度\*<sup>2</sup>としている。

本資料は，上記に示す取放水路流路縮小工（第1号機取水路，第1号機放水路）の耐震評価手法の妥当性を確認するために，コンクリートのより正確な力学特性を考慮することや，ひび割れ発生状況等を確認することが可能である材料非線形解析（WCOMD）を実施し，基準地震動S<sub>s</sub>時におけるコンクリートの状態や健全性を確認する。

注記\*<sup>1</sup>：覆工部については，鉄筋コンクリート構造であるものの，充填部に対する覆工部の断面厚さ等が小さいことを踏まえ，耐震評価においては，保守的に鉄筋に期待しないこととして，無筋コンクリートとして構造強度を評価する方針としている。

\*<sup>2</sup>：引張強度は「コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年制定）」に基づき，せん断強度については「コンクリート標準示方書（ダムコンクリート編）（土木学会，2013年制定）」に基づき設定する。

## 2. 評価方針

「6.2.1 取放水路流路縮小工(第1号機取水路)の耐震性についての計算書に関する補足説明」及び「6.2.2 取放水路流路縮小工(第1号機放水路)の耐震性についての計算書に関する補足説明」で示した耐震評価結果に対して、コンクリートのより正確な力学特性を考慮することや、ひび割れ発生状況等を確認することが可能である材料非線形解析を用い、二次元動的有限要素法解析(SuperFLUSH)における荷重状態を再現(躯体上端と下端の層間変位を一致させる)し、その状態での発生応力の比較やひび割れ発生状況の確認を行うことで、二次元動的有限要素法解析(SuperFLUSH)による耐震評価結果の妥当性を確認する。

妥当性確認は、取水路と放水路で構造的な違いは無く、周辺地質が岩盤であることは共通であるため、発生応力(照査値)が大きい放水路を代表に行う。

なお、鉄筋コンクリート部材である覆工部については、耐震評価時には保守的に考慮しないこととしており、本検討においても考慮しないことを基本として検討を行うが、鉄筋コンクリート部材として扱う場合についても影響確認を行う。

材料非線形解析においては、解析コード「WCOMD Studio」を使用する。

図2-1に材料非線形解析(WCOMD)の耐震評価フローにおける解析モデル及び解析手法の概要(選定フロー)を示す。

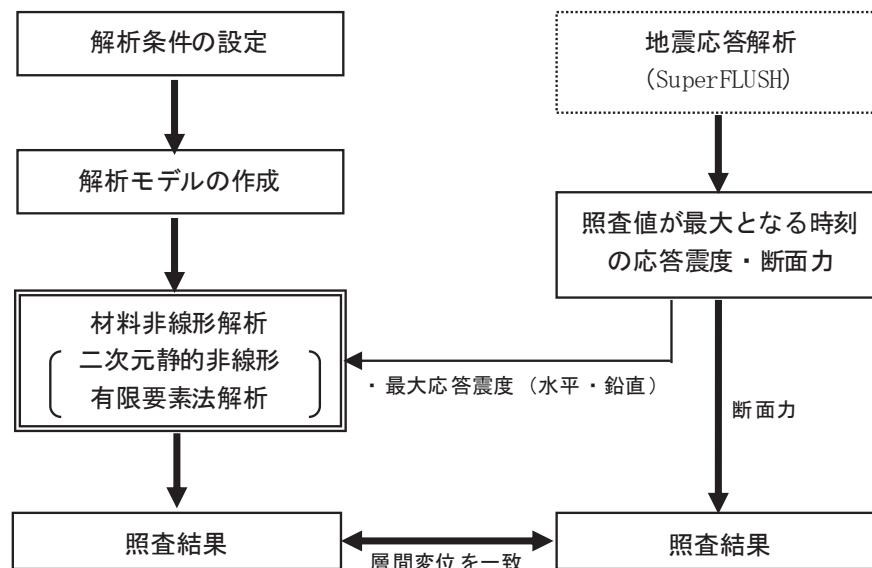


図2-1 材料非線形解析(WCOMD)評価フロー

### 3. 評価条件（材料非線形解析（WCOMD））

#### 3.1 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2017 等に基づき実施する。

#### 3.2 材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 コンクリートの材料定数

項目	設定値		諸元
	覆工部	充填部	
単位体積重量	24.0 kN/m <sup>3</sup>	23.0 kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	15.8 N/mm <sup>2</sup>	38.5 N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度（覆工部：設計図書20.5N/mm <sup>2</sup> 、充填部：設計図書50.0N/mm <sup>2</sup> ）／材料係数*
引張強度	1.33 N/mm <sup>2</sup>	2.40 N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数*
圧縮ピークひずみ	0.2%	0.3%	コンクリート標準示方書2017
ひび割れ－せん断伝達係数	1.0	1.0	コンクリート標準示方書2017
破壊エネルギー	0.0681 N/mm	0.0917 N/mm	コンクリート標準示方書2017

注記\*：材料係数を 1.3 として算出

表 3-2 鉄筋の材料定数

項目	設定値	諸元
ヤング係数	200 kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2017
降伏強度	345 N/mm <sup>2</sup>	設計図書（SD345）

### 3.3 解析モデル

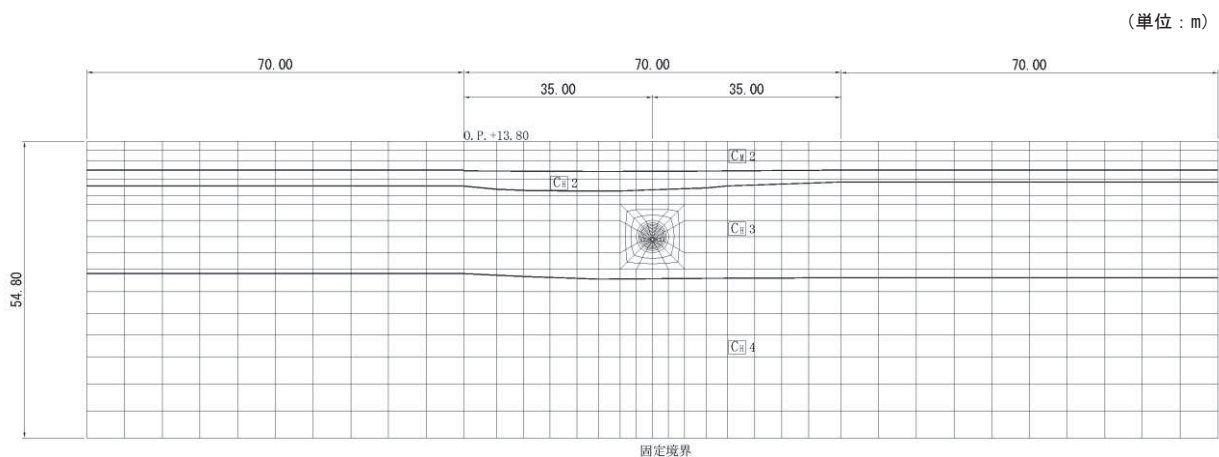
#### a. 解析モデル

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。

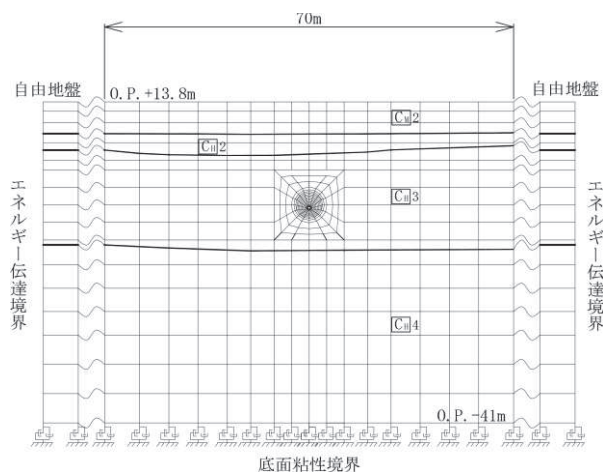
モデル幅は、側方の変形影響が取放水路流路縮小工近傍に発生しないよう、二次元動的有限要素法解析（SuperFLUSH）をベースに十分な幅に設定する。

鉄筋コンクリート部材である覆工部についても、前述のとおり覆工部は無筋コンクリート要素としてモデル化する。ただし、鉄筋コンクリート部材として扱った場合の影響確認を行う検討では、鉄筋コンクリート要素としてモデル化する。

要素分割図を図3-1に示す。



(材料非線形解析 (WCOMD) )



(参考：二次元動的有限要素法解析 (SuperFLUSH))

注)  $C_H 5$  は  $C_H$  級岩盤の第5速度層を示す。

図3-1 要素分割図

b. コンクリートの非線形特性

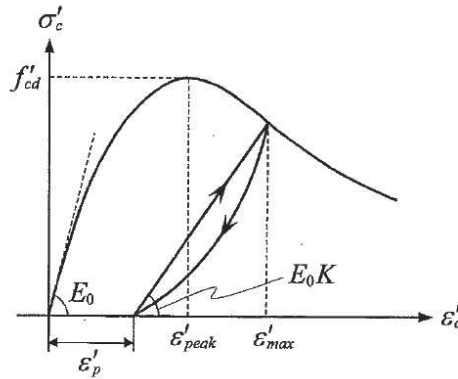
耐震評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 3-2 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 3-3 に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



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

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

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

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

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$

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

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 3-2 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

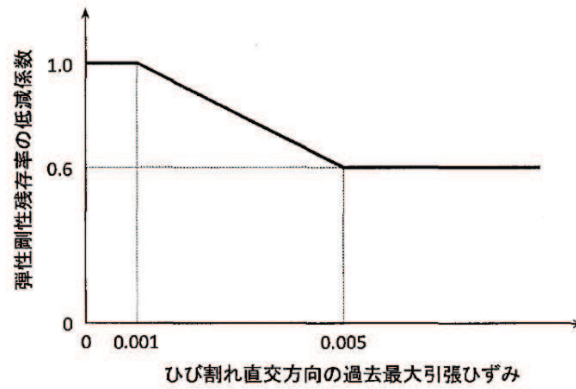
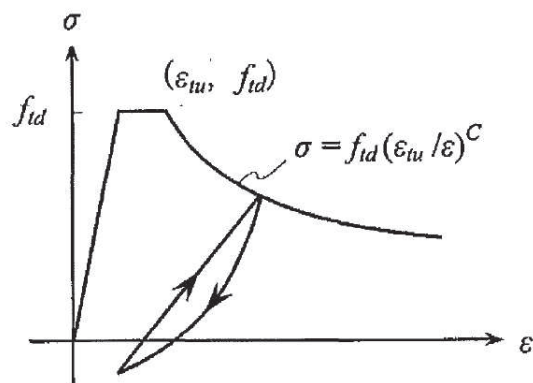


図 3-3 弾性剛性残存率の低減係数  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

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、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 3-4 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー ( $G_f$ ) によって定義する。引張軟化挙動の考慮にあたっては、図 3-5 に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f / L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。



- $f_t$  : 設計引張強度
- $\epsilon_{tu}$  : 引張軟化開始ひずみ
- $c$  : 引張軟化特性を表す係数

図 3-4 引張対応力下における鉄筋とコンクリートの  
付着効果を考慮した応力-ひずみ関係  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

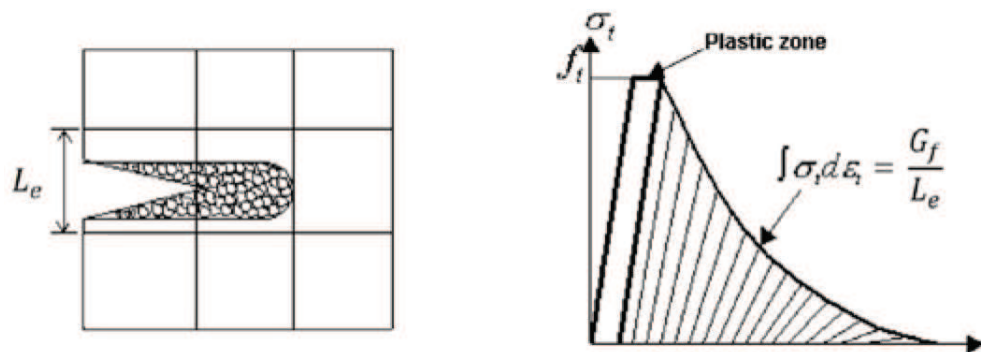
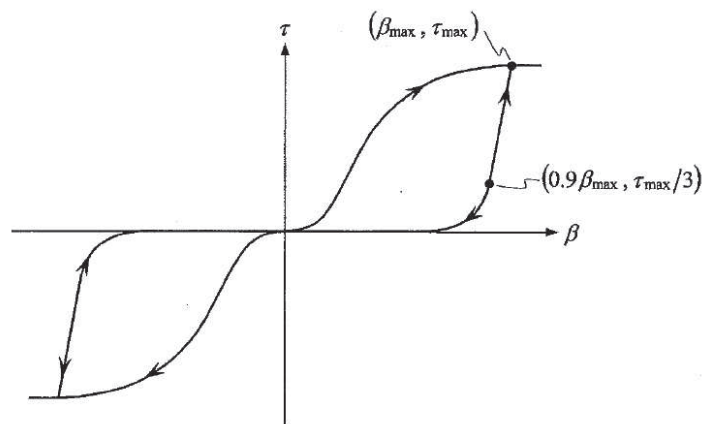


図 3-5 応力—ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 3-6 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



ここに、 $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比  
( $\gamma / \varepsilon$ )

$\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力

$\tau_{\max}$  : 除荷開始時せん断応力

$\beta_{\max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

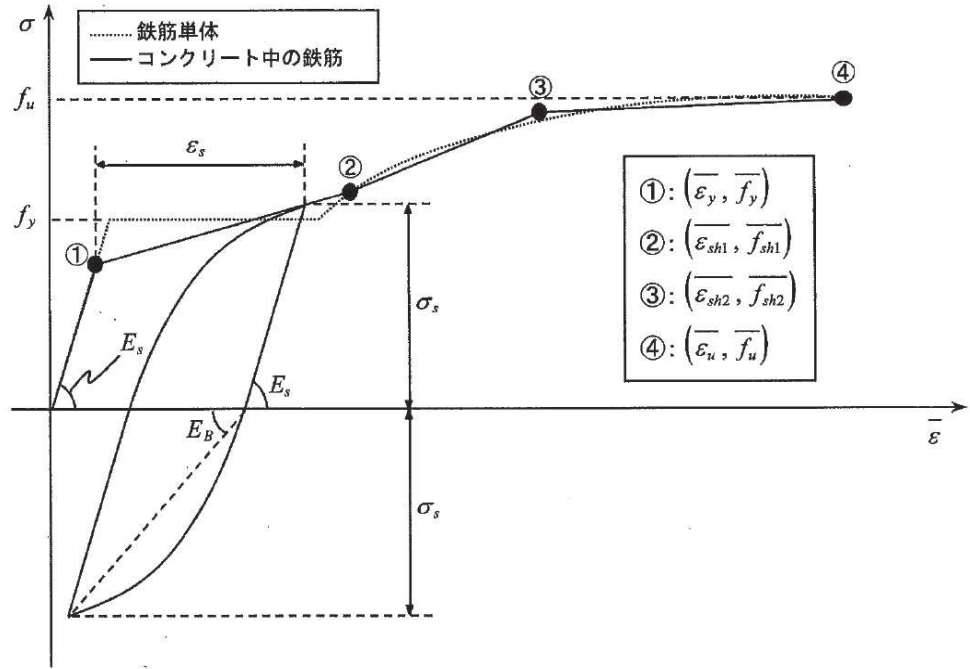
図 3-6 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

(コンクリート標準示方書 2017 より引用)



c. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図3-7に示すひずみ硬化特性を考慮する。



- $f_y$  : 鉄筋単体の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_u$  : 鉄筋単体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鉄筋単体のヤング率 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon_y$  : 鉄筋単体の降伏ひずみ
- $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみ
- $p$  : 鉄筋比
- $f_1$  : コンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図3-7 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  
(コンクリート標準示方書 2017 より引用)

d. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果（引張特性が硬化する現象）として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\overline{\sigma}_{RC} = \frac{A_S}{A_{RC}} \overline{\sigma}_S + \frac{A_C}{A_{RC}} \overline{\sigma}_C$$

ここに、 $\overline{\sigma}_S$ ,  $\overline{\sigma}_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_S$ ,  $A_C$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積,  $A_{RC} = A_S + A_C$

e. 荷重の載荷方法

材料非線形解析にて考慮する荷重は、常時荷重と地震応答解析 (SuperFLUSH) から得られる地震時荷重を考慮する。地震時荷重は、地震応答解析 (SuperFLUSH) において照査結果が最も厳しくなる地震波 (解析ケース①, 地震動 S s - F 1 (++) ) の、躯体全要素の最大応答加速度を抽出し、その最大応答加速度に基づく最大応答震度を目標に、全要素に慣性力荷重を漸増載荷する (地震時荷重載荷①)。その上で、地震応答解析で得られた層間変位最大時刻 (=照査値最大時刻) の層間変位を再現できるまで水平地震力を漸増載荷する (地震時荷重載荷②)。さらにピーク強度に達するまで水平地震力を漸増載荷する (地震時荷重載荷③)。

荷重の作用手順を図 3-8 に、二次元時刻歴応答解析 (SuperFLUSH) における最大応答震度を表 3-3 に、地震時荷重の載荷方法を図 3-9 に、層間変位の算定結果を図 3-10 に示す。

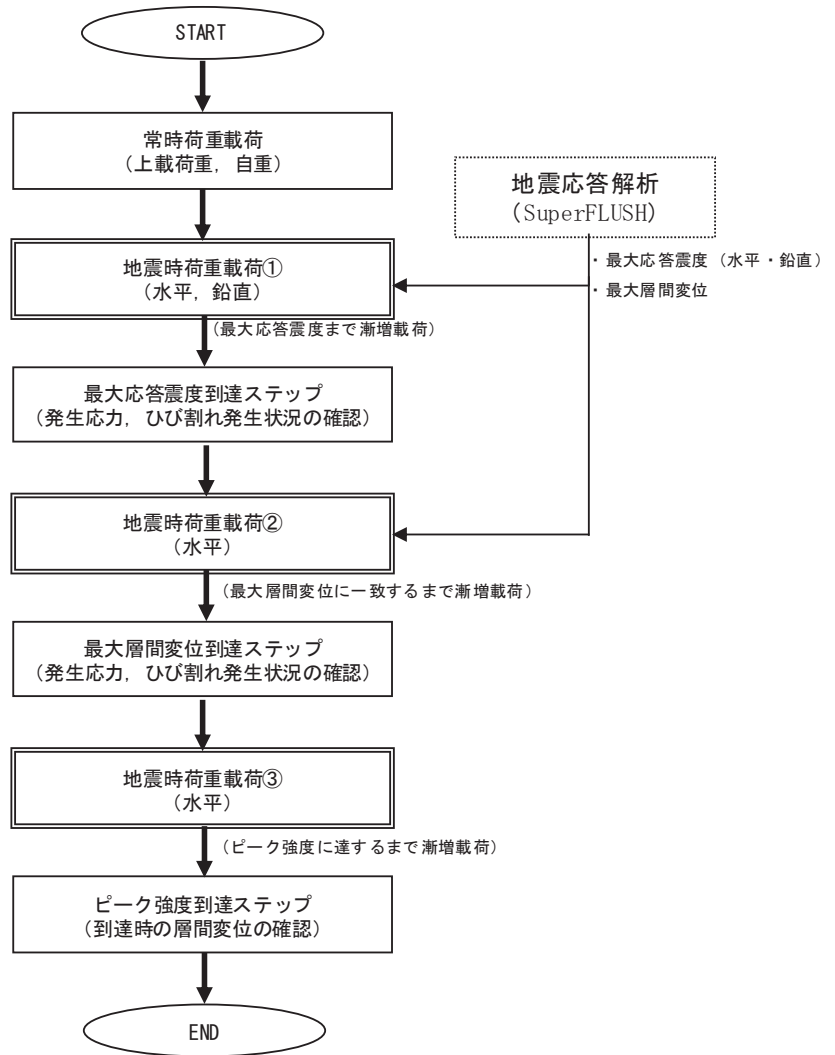
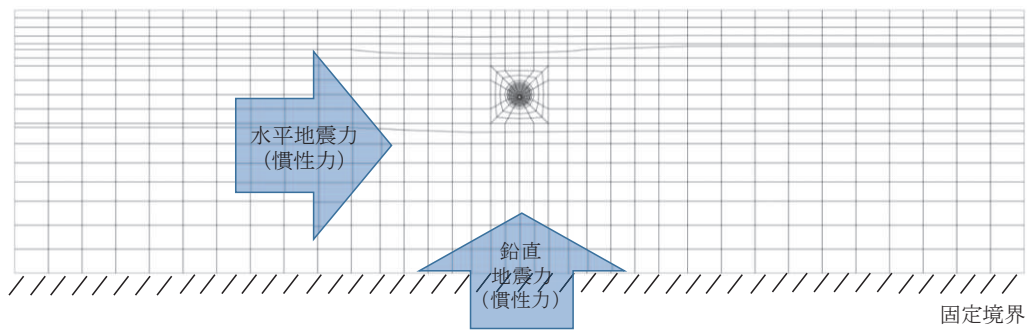
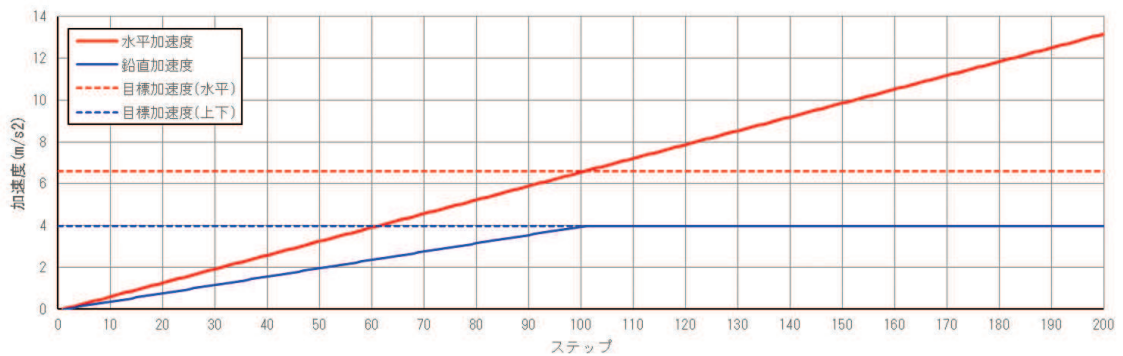


図 3-8 荷重の載荷フロー



(荷重作用概念図)

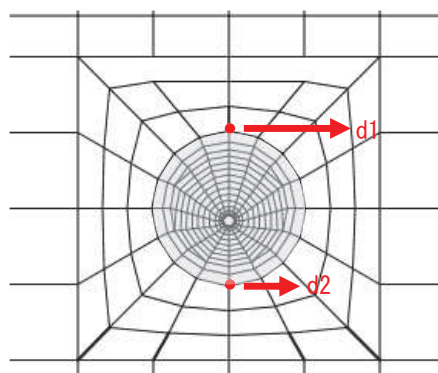


(載荷ステップ)

図 3-9 地震時荷重の載荷方法

表 3-3 二次元時刻歴応答解析 (SuperFLUSH) における最大応答震度

地震波	解析ケース	震度	
		水平	鉛直
S s - F 1 (++)	①	0.68	0.41



$ d1-d2 $ (m)	時刻 (sec)
$2.865 \times 10^{-4}$	27.64*

注記\* : 照査値最大時刻と同時刻

図 3-10 二次元時刻歴応答解析 (SuperFLUSH) における最大層間変位  
(地震動 S s - F 1 (++) , 解析ケース①)

#### 4. 評価結果

荷重（震度）－変位曲線を図 4-1 に示す。最大層間変位時（118 ステップ）における変形図を図 4-2 に、初期ひび割れ発生時（157 ステップ）及び最大応答震度の 2 倍時（200 ステップ）におけるひび割れ図を図 4-3 に示す。

荷重（震度）－変位曲線において、最大応答震度に達した 100 ステップ、最大層間変位を再現した 118 ステップ、さらに漸増载荷し、最大応答震度の 2 倍に達した 200 ステップにおいても、概ね荷重（震度）－変位曲線は一定の勾配を維持している。さらに漸増を続け、242 ステップ以降で水平変位の急増が認められた。なお、初期ひび割れが発生したのは、最大層間変位時（118 ステップ）よりも層間変位が約 1.3 倍程度となる 157 ステップで、層間変位が約 1.7 倍となる最大応答震度の 2 倍時（200 ステップ）においても有意なひび割れは生じていない。なお、覆工部の鉄筋考慮・非考慮の差は極めて小さい結果となっている。

以上の結果から、基準地震動  $S_s$  時におけるコンクリートの挙動は線形状態に留まっていると考えられ、ピーク強度に達するまでに十分な安全余裕を有している。

また、最大層間変位時（118 ステップ）における二次元動的有限要素法解析（SuperFLUSH）との発生応力の比較を表 4-1 に示す。二次元動的有限要素法解析（SuperFLUSH）と材料非線形解析で最大層間変位時（118 ステップ）における発生応力を比較した最大引張応力は概ね一致、最大せん断応力は僅かに材料非線形解析の方が小さくなっていることから、線形材料でモデル化した二次元動的有限要素法解析（SuperFLUSH）においても妥当な評価結果になっていると判断される。

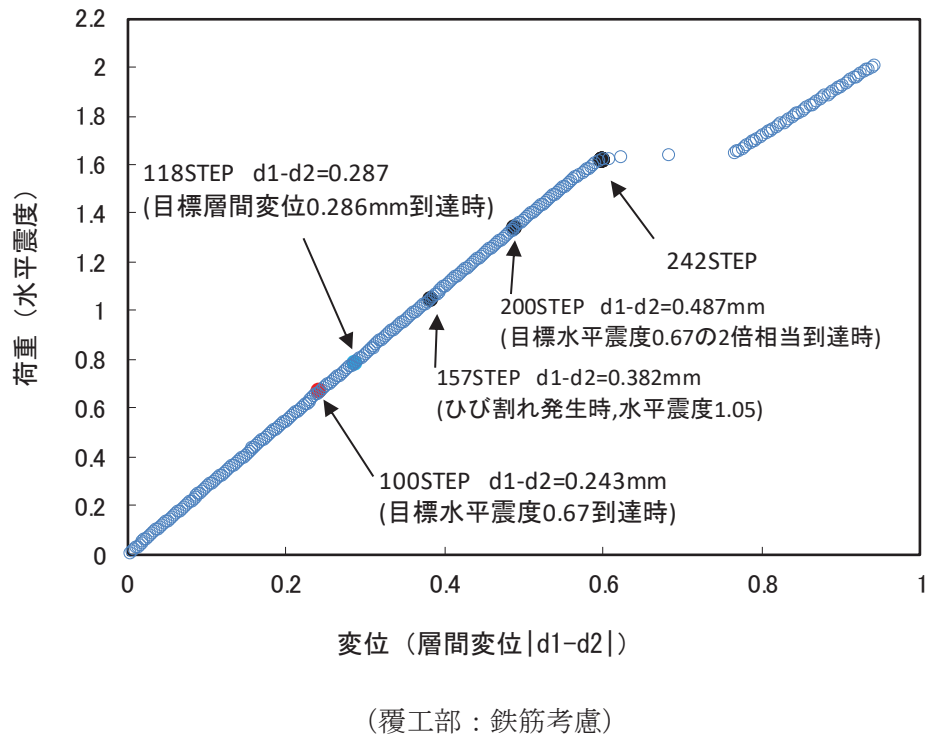
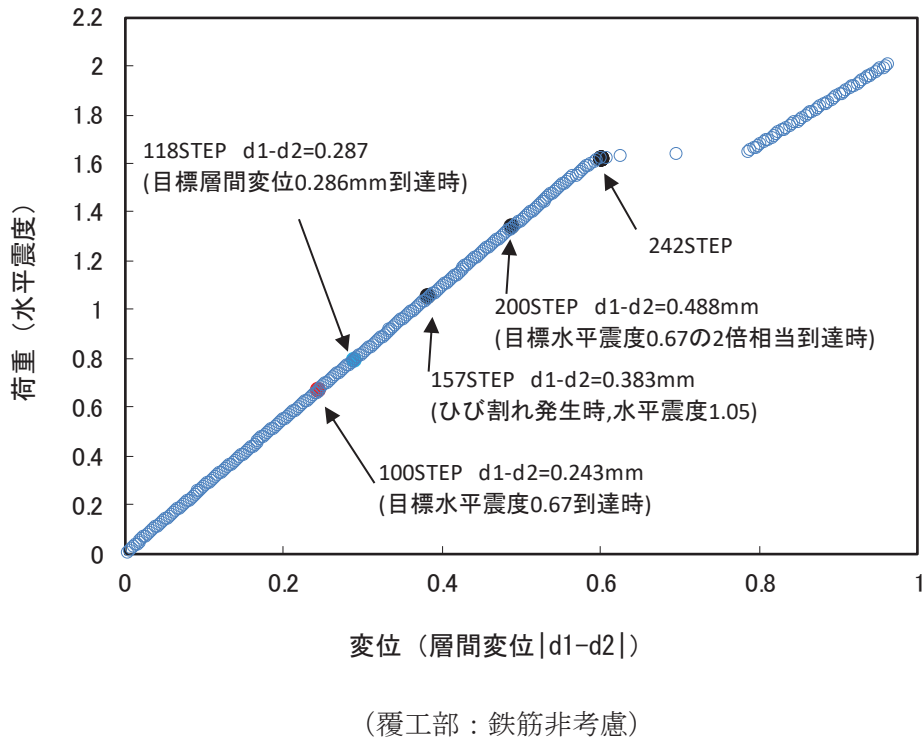
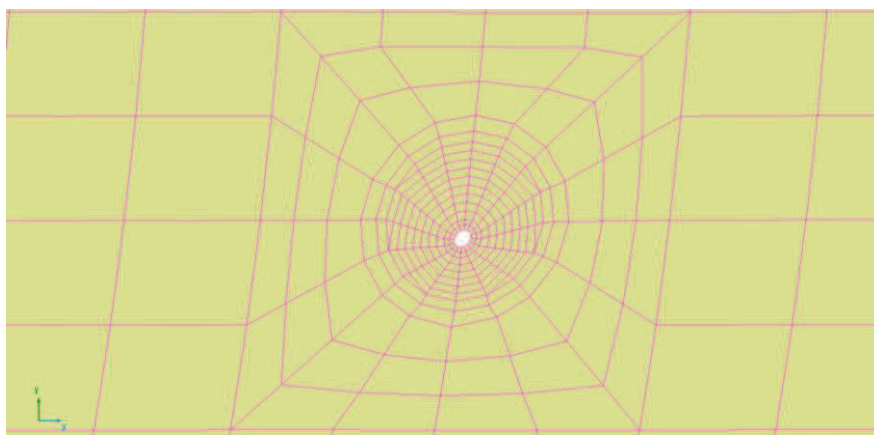
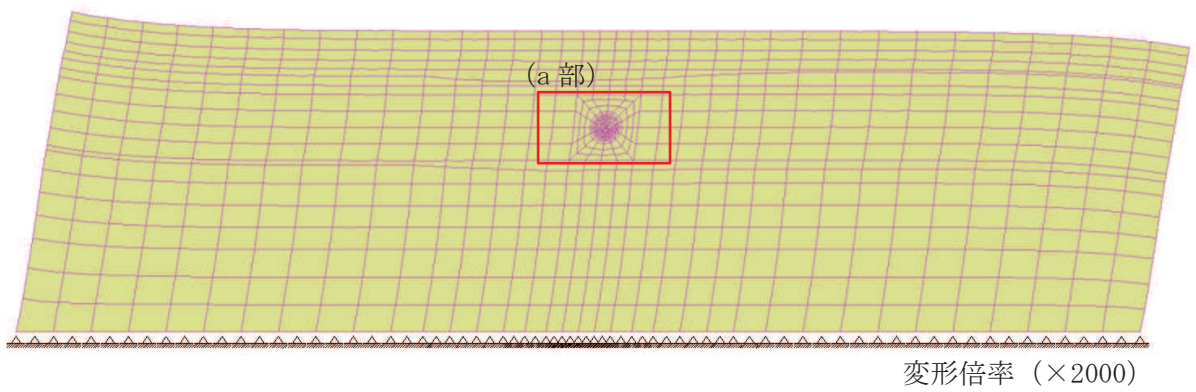
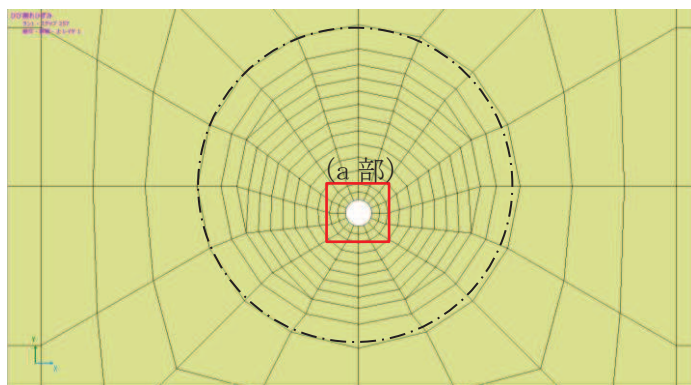


図 4-1 荷重-変位曲線

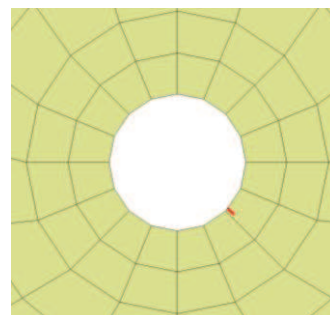


(a 部拡大)

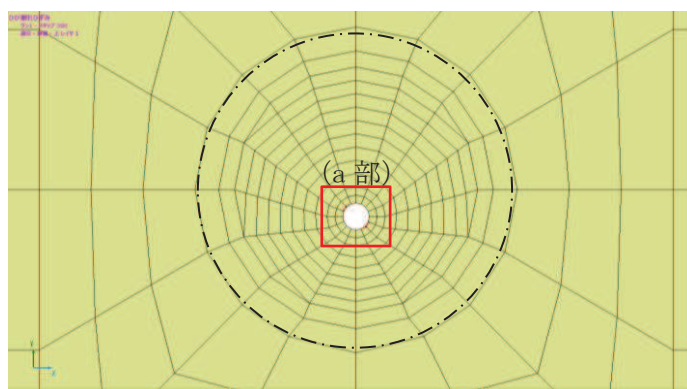
図 4-2 最大層間変位時 (118 ステップ) における変形図  
(覆工部：鉄筋非考慮)



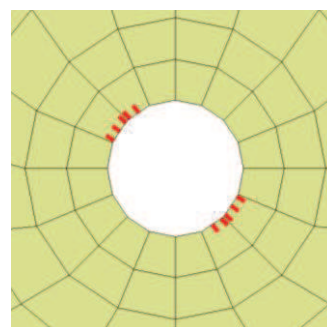
(初期ひび割れ発生時 (157 ステップ))



(a 部拡大)



(最大応答震度の 2 倍時 (200 ステップ))



(a 部拡大)

図 4-3 ひび割れ分布図

(覆工部：鉄筋非考慮)



表 4-1(1) 最大層間変位時 (118 ステップ) における発生応力度 (引張) の比較

部位	発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )		
	耐震計算結果 (SuperFLUSH)	材料非線形解析 (WCOMD)	
		覆工部：鉄筋非考慮	覆工部：鉄筋考慮
覆工部	0.627 (0.62) *	0.615 (0.61) *	0.614 (0.61) *
充填部	1.238 (0.68) *	1.239 (0.67) *	1.239 (0.68) *

注記：照査値 (発生応力/許容限界) を示す。

表 4-1(2) 最大層間変位時 (118 ステップ) における発生応力度 (せん断) の比較

部位	発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )		
	耐震計算結果 (SuperFLUSH)	材料非線形解析 (WCOMD)	
		覆工部：鉄筋非考慮	覆工部：鉄筋考慮
覆工部	0.573 (0.14) *	0.484 (0.12) *	0.485 (0.12) *
充填部	0.695 (0.07) *	0.601 (0.06) *	0.601 (0.06) *

注記：照査値 (発生応力/許容限界) を示す。

ここで、せん断に対する許容限界については、既設の取放水路を充填した直径 3m~4m 程度のマッシュな無筋コンクリート構造であることを踏まえ、「コンクリート標準示方書 (ダムコンクリート編) (土木学会, 2013 年制定)」を参照し、 $\tau_0 = f'_{ck}/5$  のみ見込み、コンクリート中における骨材の噛み合わせによる  $\phi$  成分も期待できるものの、 $\sigma \tan \phi$  は考慮しないこととしている。これについては、「補足 600-1【地盤の支持性能について】参考資料 23 MMR のせん断強度について」に示すとおり、一面せん断試験の結果及び既往文献から保守性を確認している。なお、この設定については防潮堤 (置換コンクリート及び背面補強工) や屋外重要土木構造物等の MMR も同様の設定である。

上記せん断試験は、要素試験を示しているものであり、適用範囲としてはダムコンクリートに限定されず、コンクリート全般に適用可能と判断され、許容限界の設定は妥当なものと考えられる。なお、図 4-1 に示す荷重 (震度) -変位図のとおり、相対変位が急増する直前の点 (242 ステップ) を材料非線形解析から求まる部材のせん断耐力とすると、最大層間変位時 (118 ステップ) の層間変位量の 2 倍相当の層間変位量となっており、部材の健全性に対して十分な安全裕度を有していることが確認される。

以上のことから、許容限界の設定の観点においても、耐震評価手法が妥当であることを確認できる。

## 5. まとめ

取放水路流路縮小工(第1号機取水路, 第1号機放水路)の評価手法の妥当性を確認するために, コンクリートのより正確な力学特性を考慮することや, ひび割れ発生状況等を確認することが可能である材料非線形解析(WCOMD)を実施した。

確認の結果, 材料非線形解析における荷重(震度)-変位曲線やひび割れ発生状況等を踏まえても, 基準地震動 $S_s$ 時におけるコンクリートの挙動は線形状態に留まっていると考えられ, ピーク強度に達するまでに十分な安全余裕を有しており, 基準地震動 $S_s$ 時において健全性を有する事を確認した。