

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-他-232
提出年月日	2022年10月14日

防波壁（波返重力擁壁）のうちケーソンの評価方法の  
見直しについて

2022年10月

中国電力株式会社

## 1. 概要

防波壁（波返重力擁壁）のうち、重力擁壁を支持する鉄筋コンクリート造のケーソンは、前壁、後壁、側壁、隔壁及び底版（フーチング含む）で構成される箱型構造であり、内部には格子状に複数の隔壁を配置し、隔壁により囲まれた区画内に、中詰コンクリート又は中詰材（銅水砕スラグ及び砂）を充填している。ケーソンは地震時及び津波時の荷重を前壁又は後壁で負担し、中詰材、隔壁及び側壁を通じて各部材に伝達する構造となっている。

設置変更許可段階では、この複雑な荷重伝達を考慮するために、3次元静的FEM解析を用いて、ケーソンの各部材を評価する方針とし、中詰材の一部を改良することで構造成立性を確認している。なお、詳細な中詰材の改良範囲及び仕様については、詳細設計段階において説明することとしていた。

詳細設計段階においては、前壁又は後壁で受けた地震時及び津波時の荷重をケーソン全体で確実に伝達させることが可能な構造とするため、図1-1に示すとおりすべての中詰材を改良することにより各部材と中詰材の一体化を図り、安全性を向上させることとした。

ここでは、ケーソンの変形状態を確認してケーソンの評価方法を見直すこととし、ケーソンの評価方法及びその妥当性について説明する。

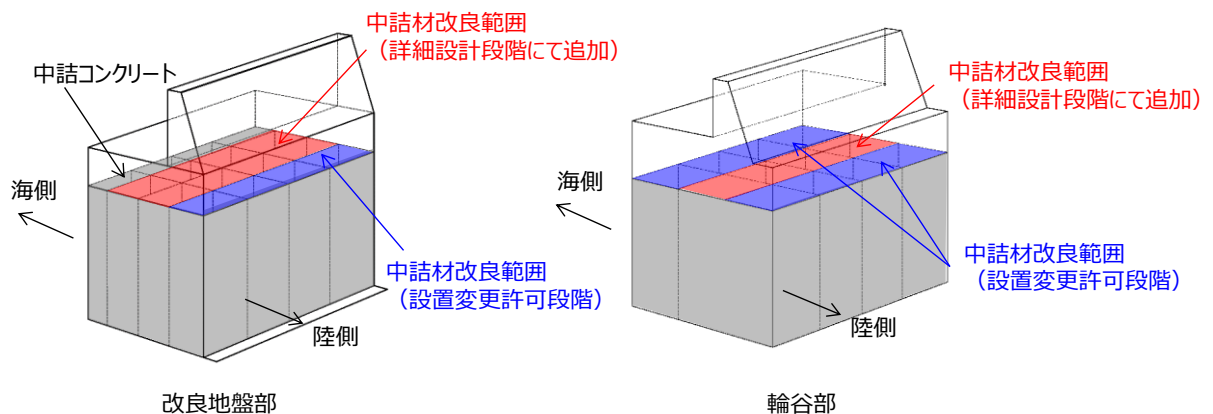


図1-1 中詰材の改良範囲

## 2. 中詰材改良の範囲と仕様

### 2.1 中詰材改良の範囲

#### (1) 設置変更許可段階において考慮した中詰材改良の範囲

設置変更許可段階では，中詰材（銅水砕スラグ及び砂）の剛性を期待せず，法線直交方向の地震時の荷重を対象に構造成立性を検討した結果，中詰材を改良しない場合において，地震時の荷重を直接負担する後壁等で構造が成立しないことを確認した。そのため，図 2-1 に示すとおり，地震時及び津波時の荷重を直接負担する前壁及び後壁の背面の中詰材を改良した場合の検討を実施し，構造成立性を確認している。中詰材を改良しない場合及び中詰材を一部改良した場合における変形図を図 2-2 示す。

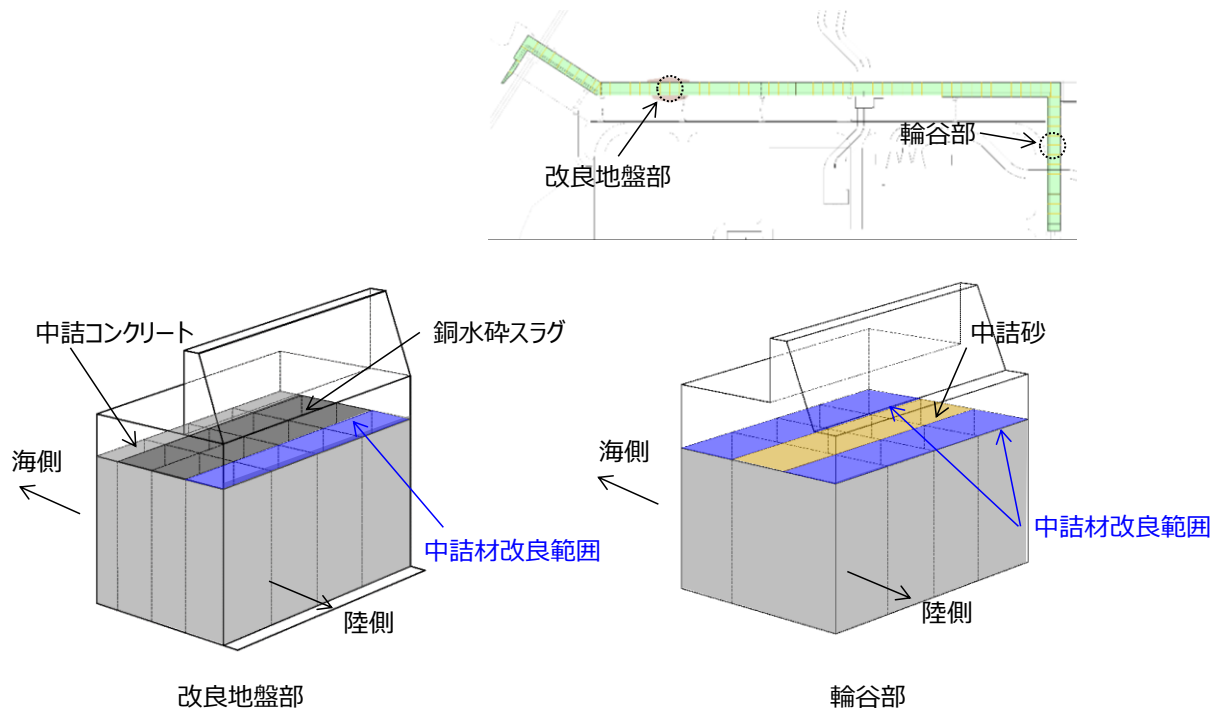
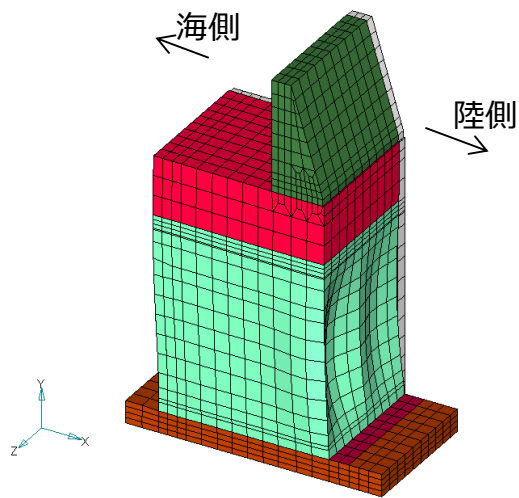
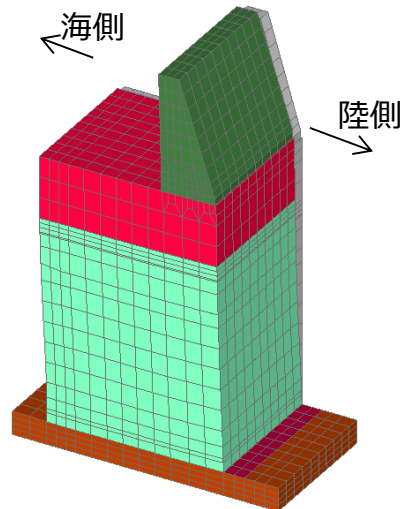


図 2-1 設置変更許可段階におけるケーソン中詰材改良範囲



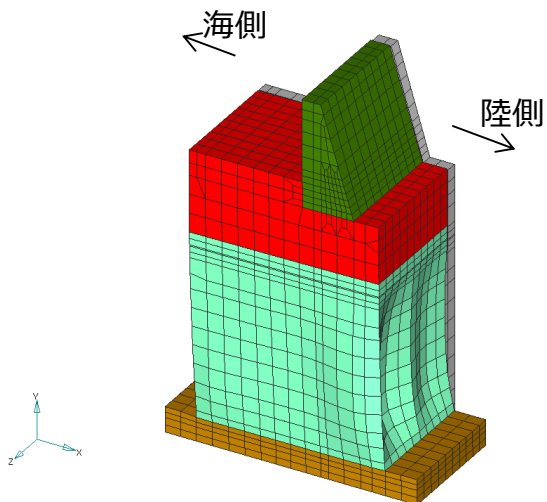
中詰材改良なし



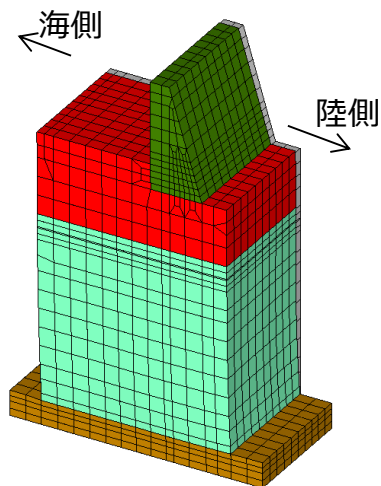
注：実際の変形量の500倍にスケールアップ

中詰材一部改良

(改良地盤部)



中詰材改良なし



注：実際の変形量の500倍にスケールアップ

中詰材一部改良

(輪谷部)

図 2-2 ケーソン変形図

(2) 詳細設計段階において考慮する中詰材改良の範囲

詳細設計段階では，図 2-3 に示すとおり，ケーソン内のすべての区画の中詰材を改良することにより各部材と中詰材の一体化を図り，ケーソンの前壁又は後壁で受けた地震時及び津波時の荷重をケーソン全体で確実に伝達させることが可能な構造とする

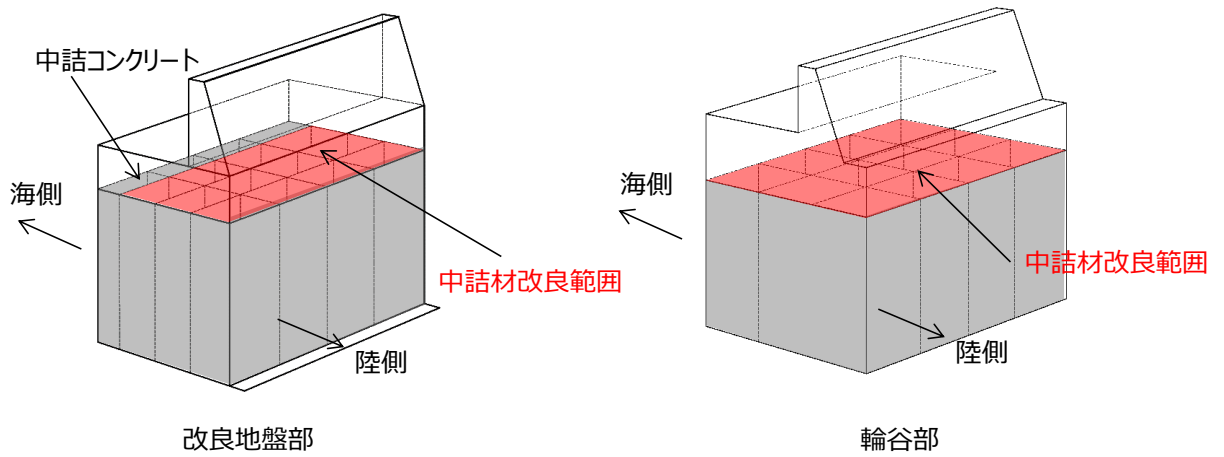


図 2-3 詳細設計段階におけるケーソン中詰材改良範囲

## 2.2 中詰材改良の仕様

ケーソンの中詰材（銅水砕スラグ及び砂）は、セメント系固化材を噴射しながら混合・攪拌する改良工法である高圧噴射攪拌工法により改良する。高圧噴射攪拌工法の施工イメージを図2-4に、施工状況を図2-5に示す。

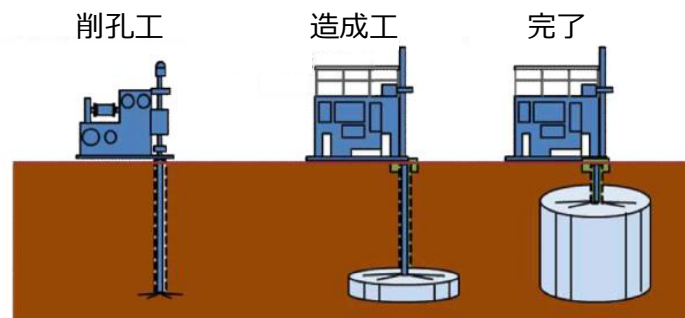


図2-4 高圧噴射攪拌工法の施工イメージ



図2-5 ケーソン中詰材改良の施工状況

施工済みの改良された中詰材（以下「中詰材改良体」という。）の原位置試験及び試料採取位置図を図 2-6 に、P S 検層結果及び三軸圧縮試験結果を表 2-1 及び図 2-7 に、採取した中詰材改良体のコア写真を図 2-8 に示す。

なお、ケーソンの解析用物性値の設定方針については、今後「NS-補-027-08 浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料」に示す。

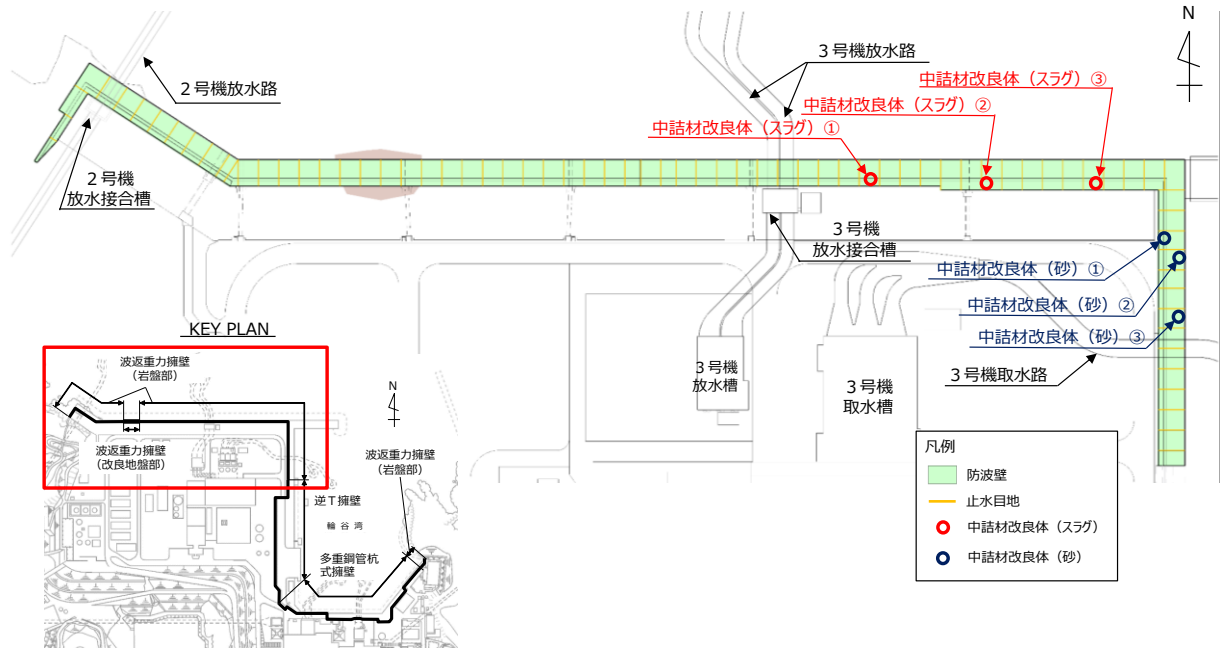


図 2-6 中詰材改良体の原位置試験及び試料採取位置図

表 2-1 中詰材改良体の P S 検層結果

試験実施位置	中詰材改良体（銅水砕スラグ）		試験実施位置	中詰材改良体（砂）	
	試料数*	S 波速度 (m/s)		試料数*	S 波速度 (m/s)
中詰材改良体 (スラグ) ①	2	1440	中詰材改良体 (砂) ①	4	1320
	2	1620		4	1680
				1	1920
中詰材改良体 (スラグ) ②	4	1250	中詰材改良体 (砂) ②	4	1050
	4	1400		4	1420
	1	1390		1	1700
中詰材改良体 (スラグ) ③	4	1290	中詰材改良体 (砂) ③	2	1070
	4	1540		2	1090
	1	1660		2	1190
加重平均		1413	加重平均		1342

注記\*：P S 検層の測定区間長 1m を一つの試験数とみなす。

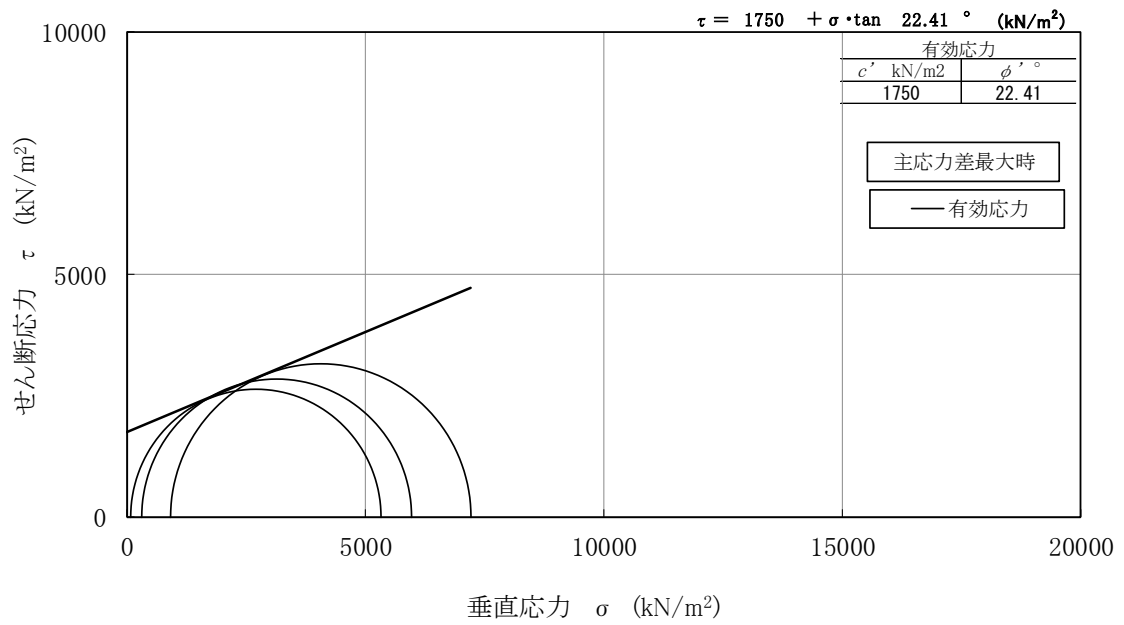


図 2-7 中詰材改良体 (砂) の三軸圧縮試験結果





図 2-8 中詰材改良体（砂）のコア写真

### 3. ケーソンの役割と評価方法

#### 3.1 ケーソンの役割

設置変更許可段階において、ケーソンは重力擁壁の支持及び遮水性を保持する役割を有することから「施設」として整理した。

詳細設計段階においても、ケーソンは「施設」として整理する。

#### 3.2 設置変更許可段階におけるケーソンの評価方法

ケーソンは箱型構造であり、内部には格子状に複数の隔壁を配置し、隔壁により囲まれた区画内に中詰コンクリート又は中詰材を充填している。ケーソンは地震時及び津波時の荷重を前壁又は後壁で負担し、隔壁及び側壁を通じて各部材に伝達する。この複雑な荷重伝達を考慮するために、3次元静的FEM解析を用いて、ケーソンの各部材を評価する方針とした。ケーソンの3次元解析モデルを図3-1に示す。3次元解析モデルの詳細については参考資料1に示す。

設置変更許可申請段階では、法線直交方向の地震時の荷重を対象とし、前壁及び後壁の背面の中詰材を改良することで構造成立性を確認した。また、照査項目及び許容限界については、構造部材の健全性及び有意な漏えいを生じないことを確認するため表3-1に示すとおり設定した。

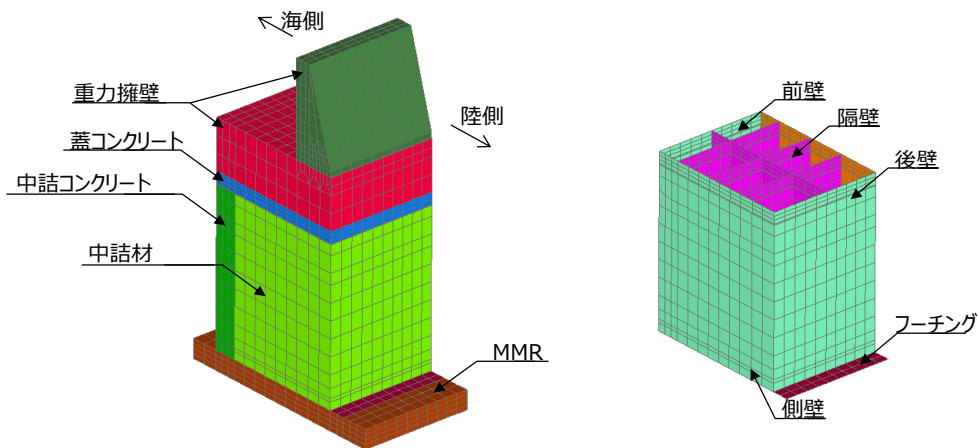


図3-1 ケーソンの3次元モデル（例：改良地盤部）

表3-1 設置変更許可段階におけるケーソンの照査項目及び許容限界

評価部位	照査項目	許容限界	適用基準
ケーソン	曲げ・せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書[構造的 性能照査編]（2002年制定）

### 3.3 詳細設計段階におけるケーソンの評価方法

中詰材（銅水砕スラグ及び砂）をすべて改良することに伴い、中詰材の改良の有無及び改良範囲の違いによるケーソンの変形状態を設置変更許可段階と同じ条件での3次元静的FEM解析により確認した。3次元静的FEM解析の結果について、設置変更許可段階で実施した中詰材を改良しない場合の解析結果、中詰材を一部改良した場合の解析結果及び中詰材をすべて改良した場合の解析結果として、ケーソンの変形コンター図を図3-2に示す。解析の詳細については、参考資料1に示す。

解析結果から、中詰材をすべて改良することで、ケーソン全体の変形が抑制されることに加え、中詰材改良体及び各部材が荷重を一様として伝達する構造となり、ケーソン全体が一体的に挙動している。

以上を踏まえ、詳細設計段階ではケーソンの評価については、前壁、後壁、側壁、隔壁及び中詰材からなる各構造部材の挙動を個別に評価可能な3次元静的FEM解析に代えて、一体的に挙動する構造体の地震時の健全性を詳細に把握できる2次元動的FEM解析により評価することとした。

2次元動的FEM解析（有効応力解析）によるケーソンの健全性の評価は、すべり安全率の確認により実施する。なお、ケーソンを一体構造物として評価するに当たり、ケーソンは鉄筋コンクリート部材と中詰材改良体で構成されるが、安全側に中詰材改良体の物性を用いる。ケーソンの評価に用いる許容限界については、ケーソンを通るすべり線のすべり安全率が1.2以上であることを確認する。照査項目及び許容限界について表3-2に示す。

上記を踏まえ、防波壁（波返重力擁壁）の耐震・耐津波評価フローを図3-3のとおり見直す。

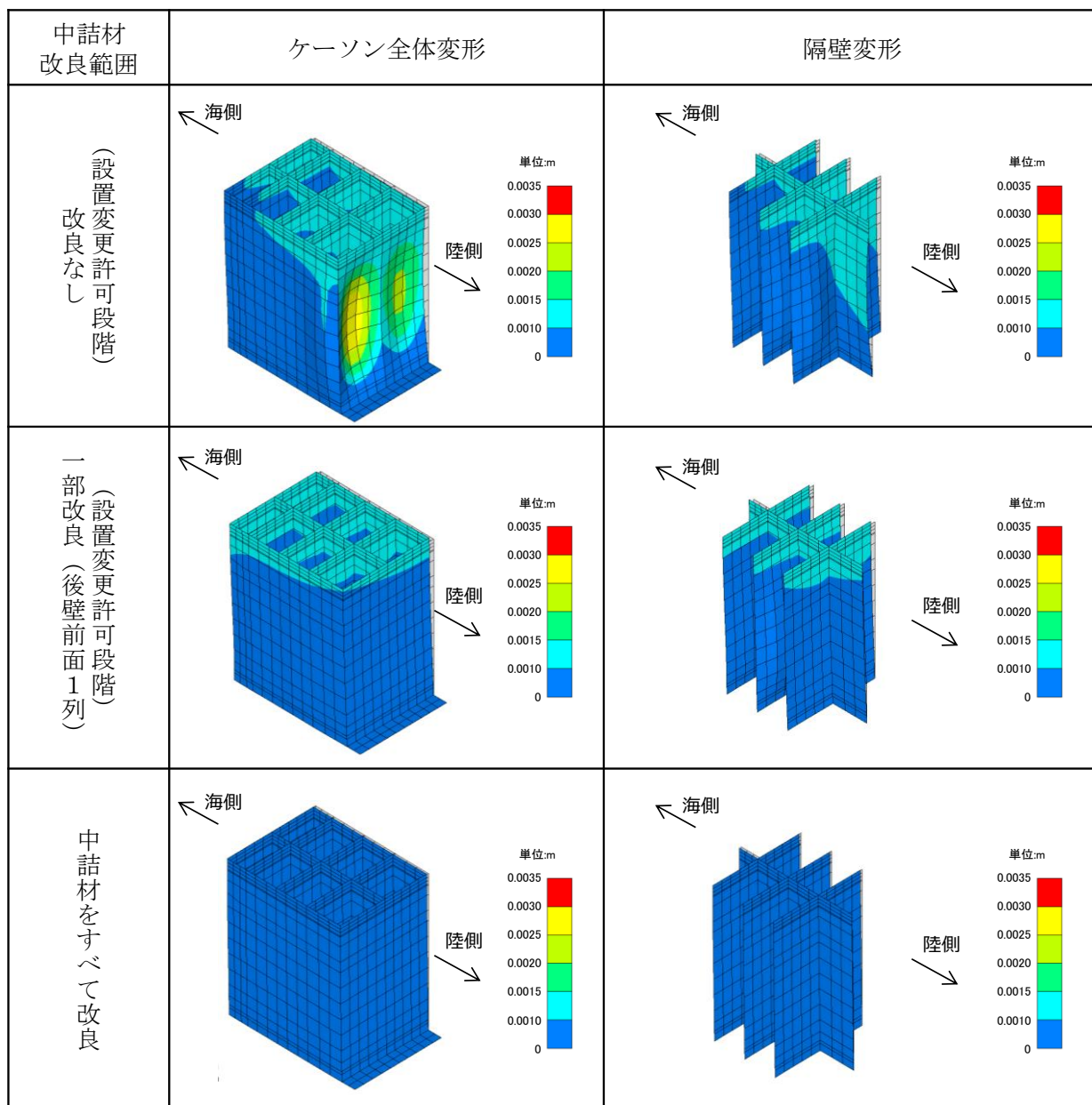


図 3-2(1) 改良地盤部のケーソン変形コンター図

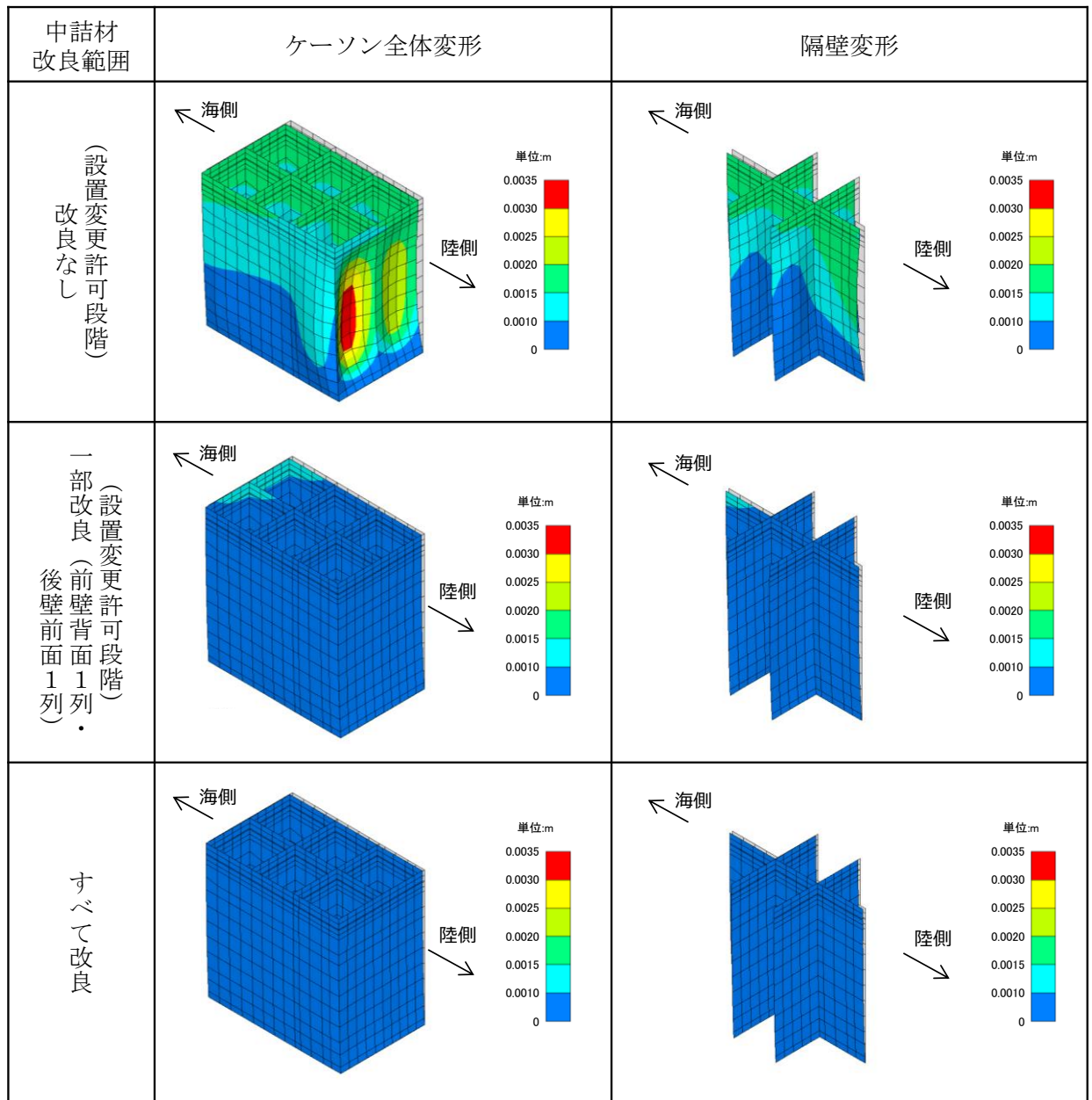
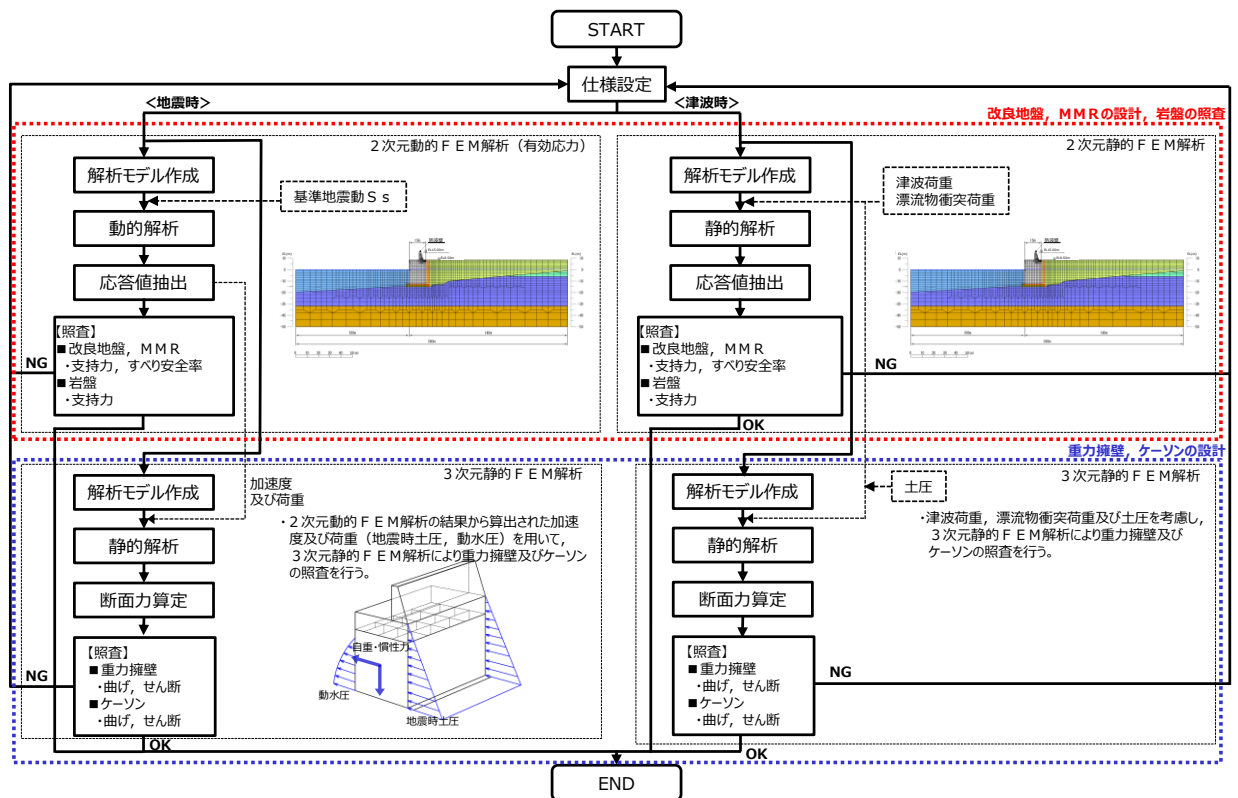


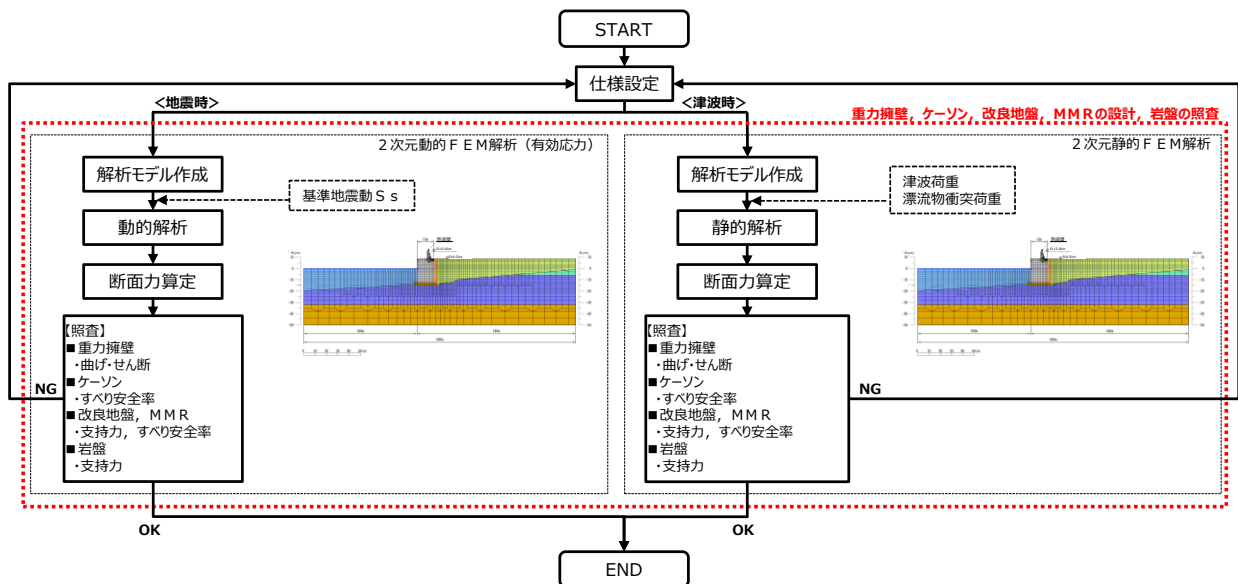
図 3-2 (2) 輪谷部のケーソン変形コンター図

表 3-2 詳細設計段階におけるケーソンの照査項目及び許容限界

評価部位	照査項目	許容限界	適用基準
ケーソン (中詰材改良体)	すべり安全率	すべり安全率 1.2 以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド



(設置変更許可段階における耐震・耐津波評価フロー)



(詳細設計段階における耐震・耐津波評価フロー)

図 3-3 防波壁 (波返重力擁壁) における耐震・耐津波評価フロー

中詰材改良範囲の見直しに伴うケーソンの挙動

1. 概要

設置変更許可段階では、前壁、後壁、側壁、隔壁、底版（フーチング含む）及び中詰材から構成されるケーソンの複雑な荷重伝達を考慮するため、3次元静的FEM解析を用いてケーソンの各部材を評価する方針とした。中詰材（銅水砕スラグ及び砂）の剛性を期待せず、法線直交方向の地震時の荷重を対象に構造成立性を検討した結果、中詰材を改良しない場合において、地震時の荷重を直接負担する後壁等で構造成立しないことを確認したため、中詰材を一部改良した場合の検討を実施し、構造成立性を確認している。

詳細設計段階においては、安全性向上の観点から、図 1-1 に示すとおりすべての中詰材を改良することにより各部材と中詰材の一体化を図り、前壁又は後壁で受けた地震時及び津波時の荷重をケーソン全体で確実に伝播させる構造とした。

本資料では、中詰材をすべて改良した場合における3次元静的FEM解析の結果と設置変更許可段階で示した3次元静的FEM解析の結果を比較して、中詰材の改良範囲の見直しに伴うケーソンの挙動を確認する。

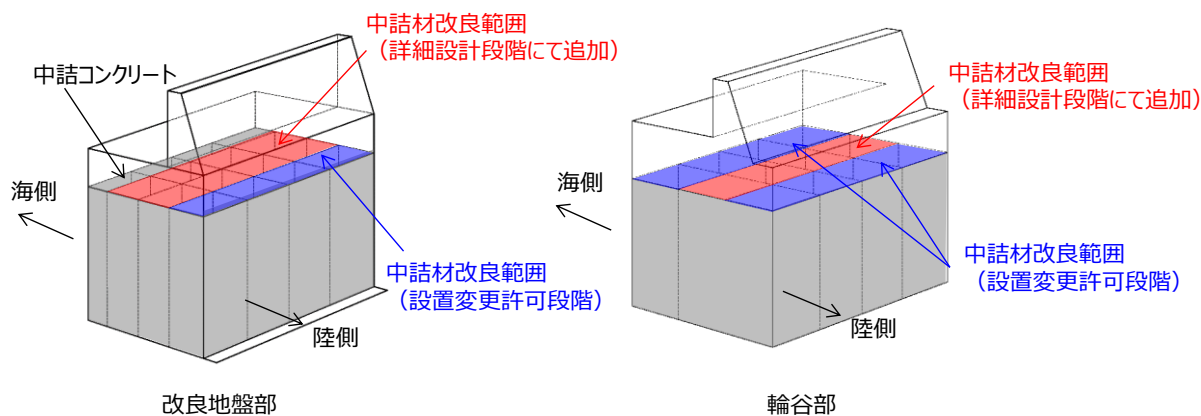


図 1-1 中詰材の改良範囲



## 2. 中詰材改良範囲の見直しに伴う比較方法

設置変更許可段階では、中詰材の一部を改良することで、構造成立性を確認しており、詳細設計段階では、中詰材を全て改良していた。本資料では、3次元静的FEM解析を実施し、変形量を確認し、改良範囲の違いによるケーソンの挙動を比較する。3次元静的FEM解析の解析条件は、設置変更許可段階で実施した解析条件を基に、評価対象断面は改良地盤部及び輪谷部とする。

3次元静的FEM解析には、解析コード「MSC Nastran」を使用する。

### 2.1 解析モデル

ケーソンの壁部材、底版及びフーチングはシェル要素でモデル化し、重力擁壁、蓋コンクリート、中詰コンクリート、中詰材（銅水砕スラグ及び砂）及びMMRについては、ソリッド要素でモデル化する。また、設置変更許可段階と同様にケーソンは左右対称構造であることから、ケーソン奥行方向の半分をモデル化範囲とした。ケーソンの解析モデルを図2-1に示す。

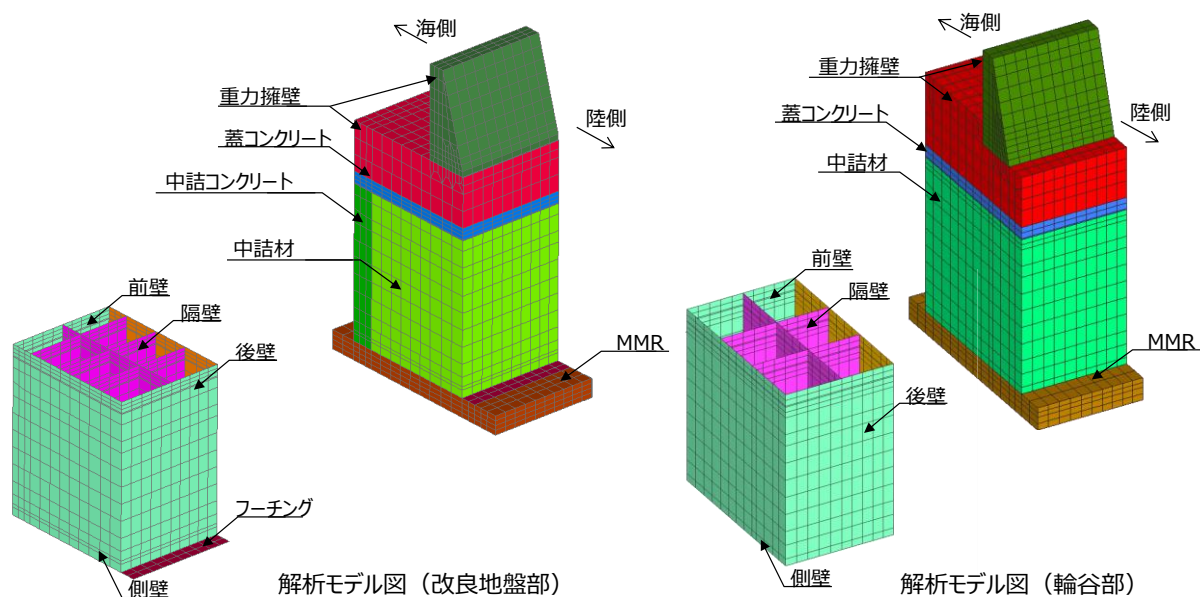


図 2-1 ケーソンの解析モデル

## 2.2 荷重条件

2次元動的FEM解析（有効応力解析）によるケーソン頂底板間の相対変位が最大となる時刻の地震時荷重（地震時土圧及び動水圧）及び加速度を抽出し，3次元モデルに載荷する。なお，地震時荷重及び加速度を抽出する2次元動的FEM解析（有効応力解析）は，設置変更許可段階で構造成立性を示した解析結果を基に設定する。

2次元動的FEM解析（有効応力解析）から3次元モデルへの荷重の載荷イメージを図2-2に示す。

3次元モデルにおける地震時荷重の載荷方法は，2次元モデルにおける抽出要素の中心高さに応じた3次元モデルの要素に載荷する。加速度においては，2次元モデルにおける抽出要素の節点高さに応じた3次元モデルの節点に設定する。なお，3次元モデルにおいてメッシュを細分化した要素には，上下の要素の平均値を設定する。

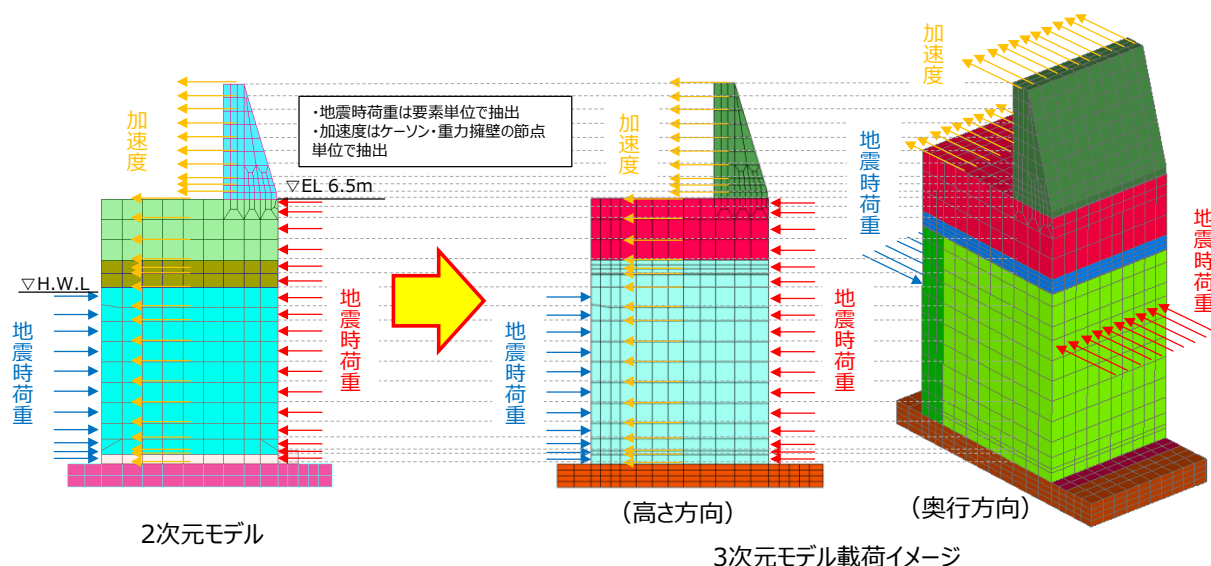
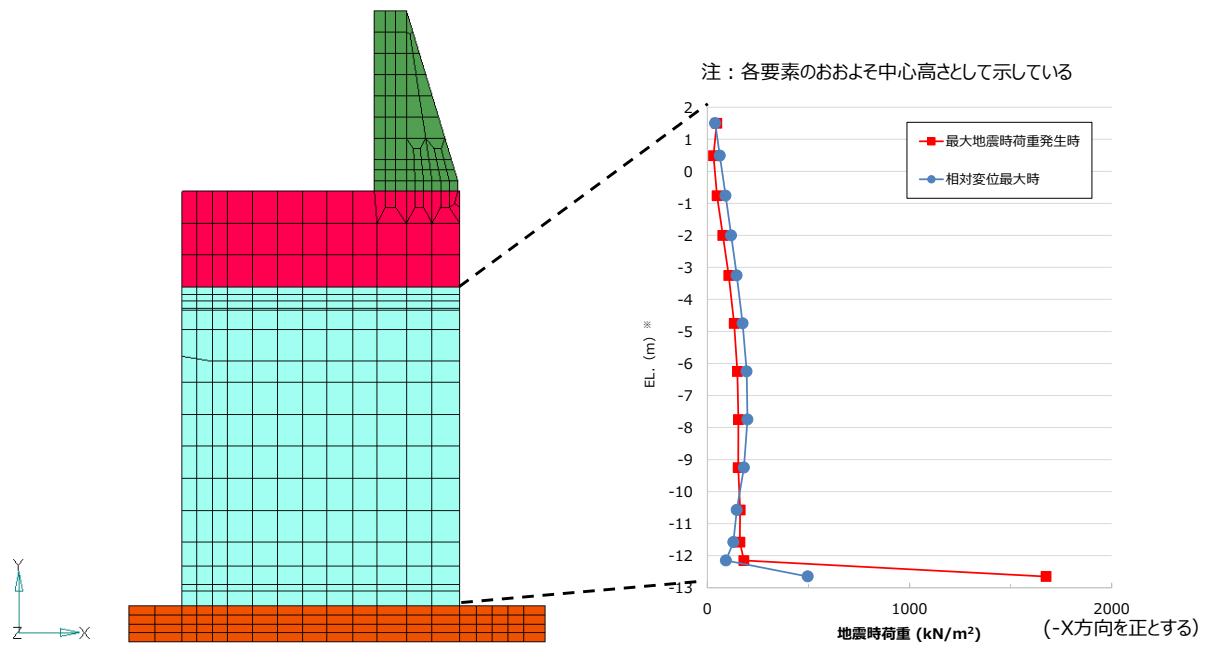
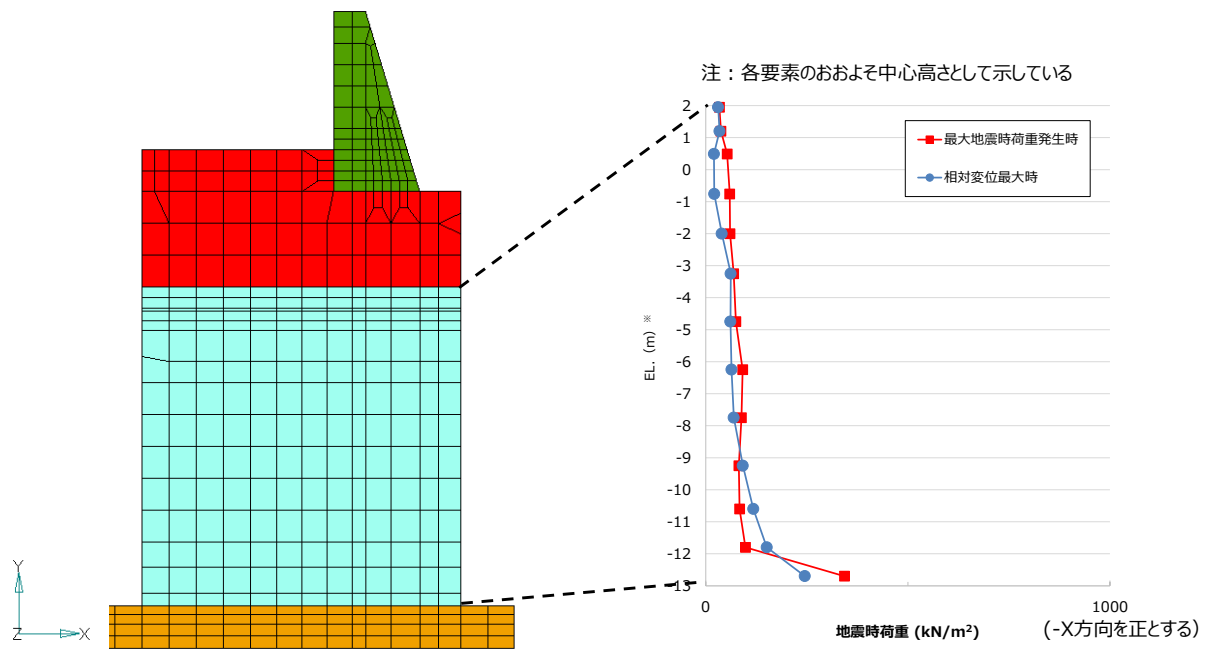


図2-2 3次元モデルの荷重の載荷イメージ

3次元静的FEM解析においてケーソンに載荷する荷重として，ケーソンの頂底板間の相対変形量が最大となる時刻の地震時荷重（地震時土圧，動水圧）を図2-3に示す。頂底板間の相対変位が最大となる時刻の地震時荷重は，ケーソンに載荷する地震時荷重の最大値が発生する時刻における地震時荷重分布と同程度であることを確認している。



(改良地盤部)



(輪谷部)

図 2-3 ケーソンに載荷する地震時荷重分布

### 2.3 解析ケース

中詰材改良範囲の見直しに伴うケーソン挙動の比較ケースを表 2-1 に示す。各ケースにおける実施目的を以下に示す。なお、ケース 1 及び 2 は、設置変更許可段階で実施したケースであり、ケース 2 にて構造成立性を確認している。

ケース 1：中詰材をすべて改良しない場合におけるケーソン挙動の確認

ケース 2：中詰材を一部改良した場合におけるケーソン挙動の確認

ケース 3：中詰材をすべて高圧噴射攪拌工法により改良した場合におけるケーソン挙動の確認

表 2-1 解析ケース

ケース	中詰材改良範囲	備考
1	改良なし	設置変更許可段階で実施
2	一部改良	設置変更許可段階で実施 改良地盤部では後壁前面 1 列を改良 輪谷部では前壁背面 1 列，後壁前面 1 列を改良
3	すべて改良	

### 2.4 中詰材の解析用物性値及び境界条件

設置変更許可段階で示した中詰材の解析用物性値を表 2-2 に示す。また、境界条件を表 2-3 に示す。

表 2-2 中詰材の解析用物性値

材料名	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング率 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比	備考
中詰コンクリート	22.6	$2.2 \times 10^7$	0.20	
中詰材 (銅水砕スラグ)	22.6	1.0	0.20	剛性を期待しない
中詰材 (砂)	20.0	1.0	0.30	剛性を期待しない
中詰材改良体 (銅水砕スラグ)	22.6	$9.7 \times 10^6$	0.33	設置変更許可段階で 設定
中詰材改良体 (砂)	20.0	$4.0 \times 10^6$	0.33	設置変更許可段階で 設定

表 2-3 境界条件

部位	境界条件	備考
前壁	拘束なし	地震時荷重を載荷
側壁	拘束なし	—
隔壁 (ケーソン中央)	対称条件	ケーソン奥行方向を半分と しているため
後壁	拘束なし	地震時荷重を載荷
底版	拘束なし	MMR と接点共有
MMR	固定条件	—
中詰材	—	各部材と節点共有

### 3. 中詰材改良範囲の見直しに伴うケーソン変形状態の比較結果

「2.3 解析ケース」における3次元静的FEM解析結果として、改良地盤部のケーソンの変形コンター図を図3-1に、輪谷部のケーソン変形コンター図を図3-2に示す。

中詰材を改良しないケース1は、ケーソン全体が変形しており、荷重を直接負担する後壁が他の部材と比較して変形量大きい。また、法線直交方向の隔壁及び側壁の変形量も大きいことから、後壁で負担した荷重は、法線直交方向の隔壁及び側壁を通じて個別に各部材に荷重を伝達していると考えられる。

中詰材を一部改良したケース2は、ケース1と比較して、後壁、法線直交方向の隔壁及び側壁の変形量が大幅に抑制されたが、ケーソン上部の一部において全体の変形量と異なる変形量が確認される。

中詰材をすべて改良したケース3は、ケース2と比較して、後壁、法線直交方向の隔壁及び側壁の変形量が全体の変形量と一様となったことから、ケーソン全体で荷重を伝達していると考えられる。

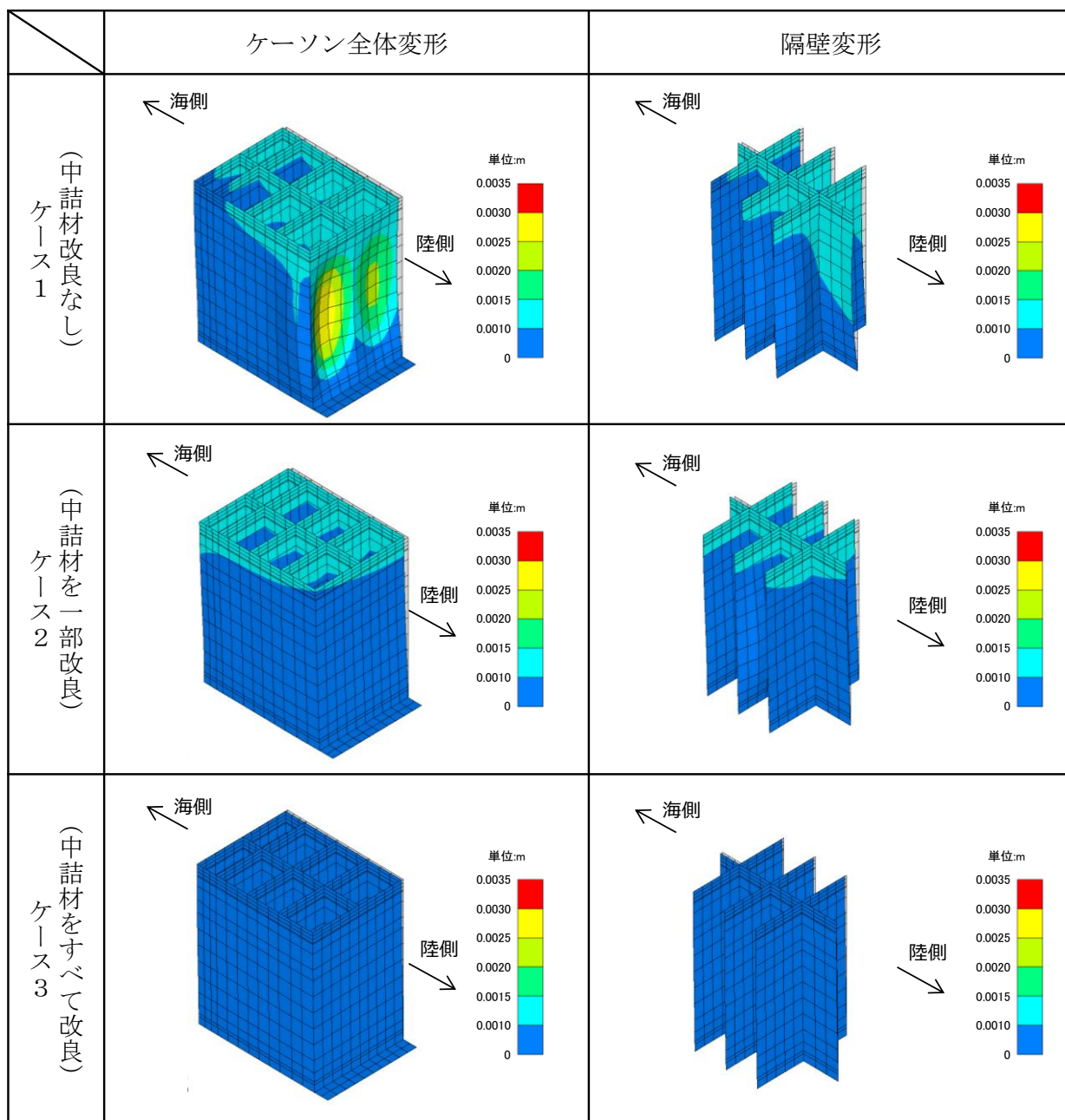


図 3-1 改良地盤部のケーソン変形コンター図

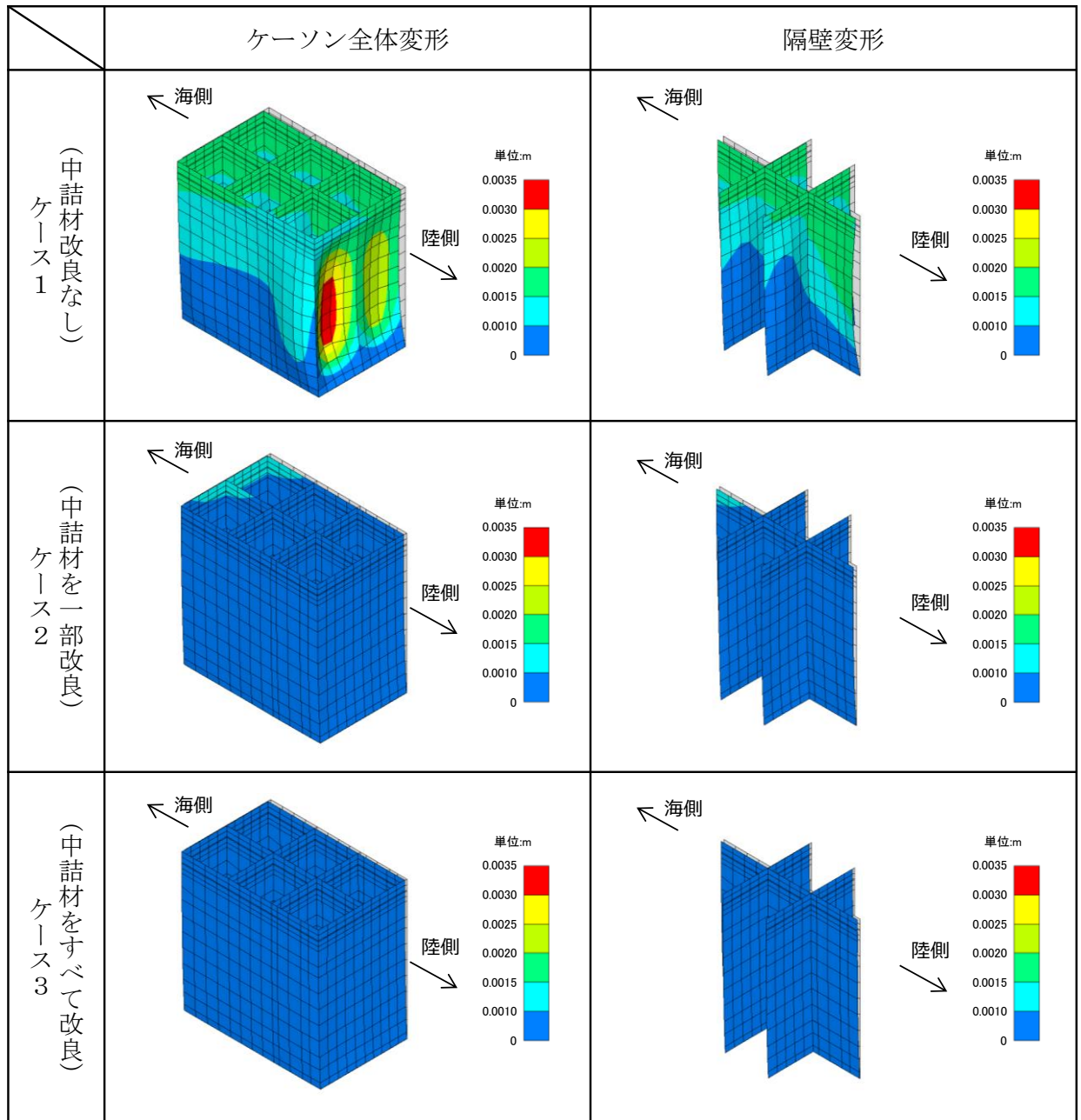


図 3-2 輪谷部のケーソン変形コンター図