

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-他-067改03
提出年月日	2022年5月20日

# 島根原子力発電所第2号機

## 工事計画認可申請（補正）に係る論点整理について

---

2022年5月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

**Energia**

## ■ 説明内容

- 工事計画認可申請（補正）に係る論点について、第1018回審査会合（2021年12月7日）にて示した主な説明事項を含め、審査の中で論点として整理された項目について説明する。
- また、第1018回審査会合（2021年12月7日）及び第1036回審査会合（2022年3月29日）での主な説明事項No.1-1、No.1-12及びNo.1-13に関する指摘事項に対する回答について説明する。

分類	No. (主な説明事項)	項目	回答頁
[1] 詳細設計申 送り事項	1-1	地震応答解析モデルにおける建物基礎底面の付着力 （【指摘事項に対する回答】を含む）	P.2～24
	1-11	保管・アクセス（抑止杭）	P.25～39
	1-12	ブローアウトパネル閉止装置【指摘事項に対する回答】	P.40～42
	1-13	非常用ガス処理系吸込口の位置変更による影響【指摘事項 に対する回答】	P.43,44
[2] 新たな規制 要求（バックフィッ ト）への対応事項	2-1	安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災 対策	P.45～52

- なお、今後の審査にて論点として抽出されたものについても審査会合にて説明する。

- 指摘事項（第1018回審査会合（2021年12月7日））  
建物の地震応答解析における基礎浮上り評価について、低接地率となる見込みのある複数の建物に対して、複数の手法を使い分けて適用することが島根サイトの特徴であることから、その妥当性について建物基礎底面の付着力の論点と併せて今後説明すること。
- 回答
  - 島根2号機の建物・構築物は「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に示される浮上り非線形地震応答解析により基準地震動  $S_s$  に対して接地率を算定することを基本とし、接地率  $\eta < 65\%$  となる場合の別途検討については、「J E A C 4 6 0 1 - 2008」及び「J E A C 4 6 0 1 - 2015」の評価フローを参考に、地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）の選定フローを整理した。（P.4,5）
  - また、建物の基礎底面と地盤間の付着力は、島根原子力発電所における付着力試験の結果（追加試験結果を含む）に基づき  $0.40\text{N/mm}^2$  に設定した。（P.10～24）
  - さらに、ジョイント要素（付着力考慮）を用いた3次元 F E Mモデルによる接地率の適用範囲（接地率  $\eta \geq 35\%$ ）について、解析的検討等によりその適用性を確認した。（P.6～9）

以上のことから、島根2号機において各建物（重要 S A 施設及び波及的影響に係る施設を含む）の地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）を使い分けて適用することは妥当であることを確認した。

地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）の選定フロー及び論点（建物基礎底面の付着力の設定）について、P.3～24に示す。

## 1. 概要

- 島根 2 号機の建物の地震応答解析には、S R モデル、ジョイント要素を用いた 3 次元 F E M モデル及び基礎固定モデルを用いている。このうち、ジョイント要素を用いた 3 次元 F E M モデル及び S R モデル(浮上り線形地震応答解析)では、建物の基礎底面と地盤間に存在する付着力を考慮する。
- 設置変更許可段階において、地震応答解析モデルにおける建物基礎底面の付着力は、建物直下地盤と同等の岩盤で行った付着力試験結果に基づき、十分な保守性を考慮した値とすることを説明している。
- しかし、試験地盤(3号機エリア)と建物直下地盤(1, 2号機エリア)が離れており、建物直下地盤近傍での直接的な付着力試験データが得られていないため、設計に用いる付着力について、信頼性、保守性及び地盤のばらつきを踏まえた網羅性・代表性に対する説明性を向上させる観点から、1, 2号機建物近傍において追加試験を実施した(図1参照)。
- 追加試験結果を踏まえ、建物基礎底面の付着力として設置変更許可段階で説明した値の保守性・妥当性を確認した。

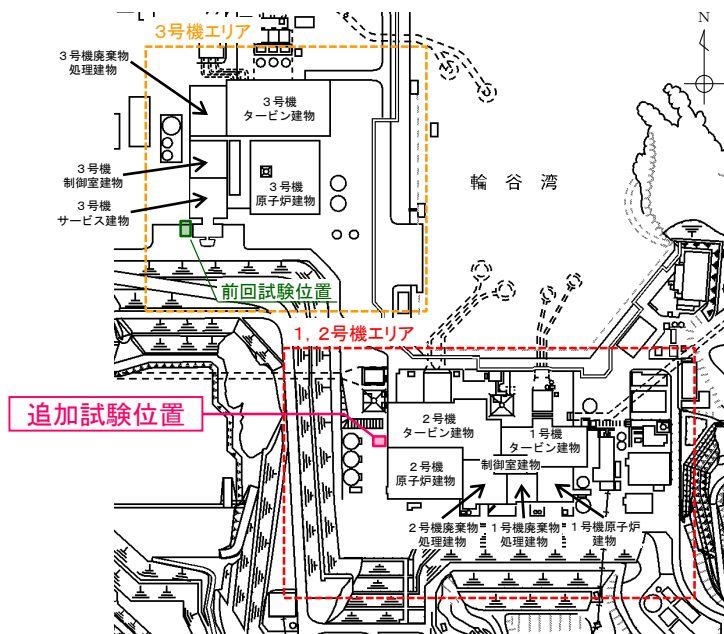


図1 付着力試験位置

## 2. 建物の地震応答解析モデルについて

### 2. 1 検討概要

- 島根原子力発電所の建設時の工事計画認可申請書では、原子炉建物等の地震応答解析における基礎浮上り評価について、線形地震応答解析又は浮上り非線形地震応答解析を実施している。
- 今回の工事計画認可申請(以下「今回工認」という。)では、入力地震動の増大に伴い、基準地震動  $S_s$  による検討においては、一部解析結果で浮上り非線形地震応答解析を適用できる接地率に満たないことから、個別に解析の妥当性を確認し、採用する地震応答解析モデル(基礎浮上り評価法)について検討する。

### 2. 2 地震応答解析モデル(基礎浮上り評価法)について

#### (1) 地震応答解析モデル(基礎浮上り評価法)の選定フローの設定

- 島根2号炉の建物・構築物は「J E A G 4 6 0 1 - 1991追補版」に示される浮上り非線形地震応答解析により基準地震動  $S_s$  に対して接地率を算定することを基本とする。
- 接地率  $\eta < 65\%$  となる場合の別途検討は、「J E A C 4 6 0 1 - 2008」(図2参照)及び「J E A C 4 6 0 1 - 2015」の評価フローを参考とした。
- 上記を踏まえた島根2号機における各建物(重要SA施設及び波及的影響に係る施設を含む)の地震応答解析モデル(基礎浮上り評価法)の選定フローを次頁に示す。

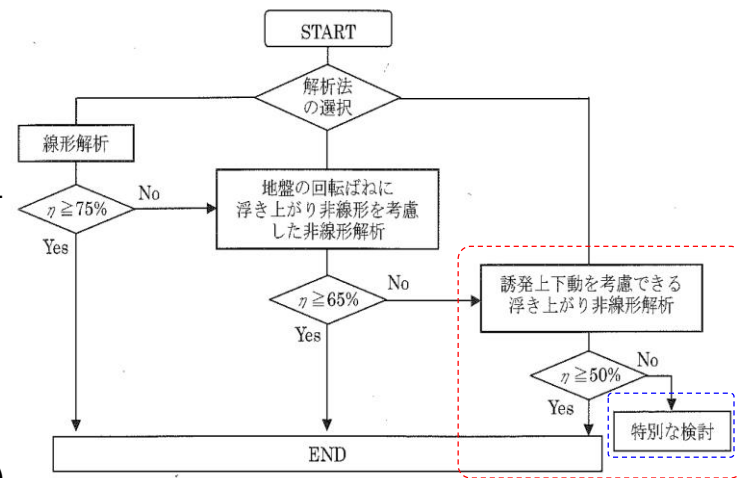
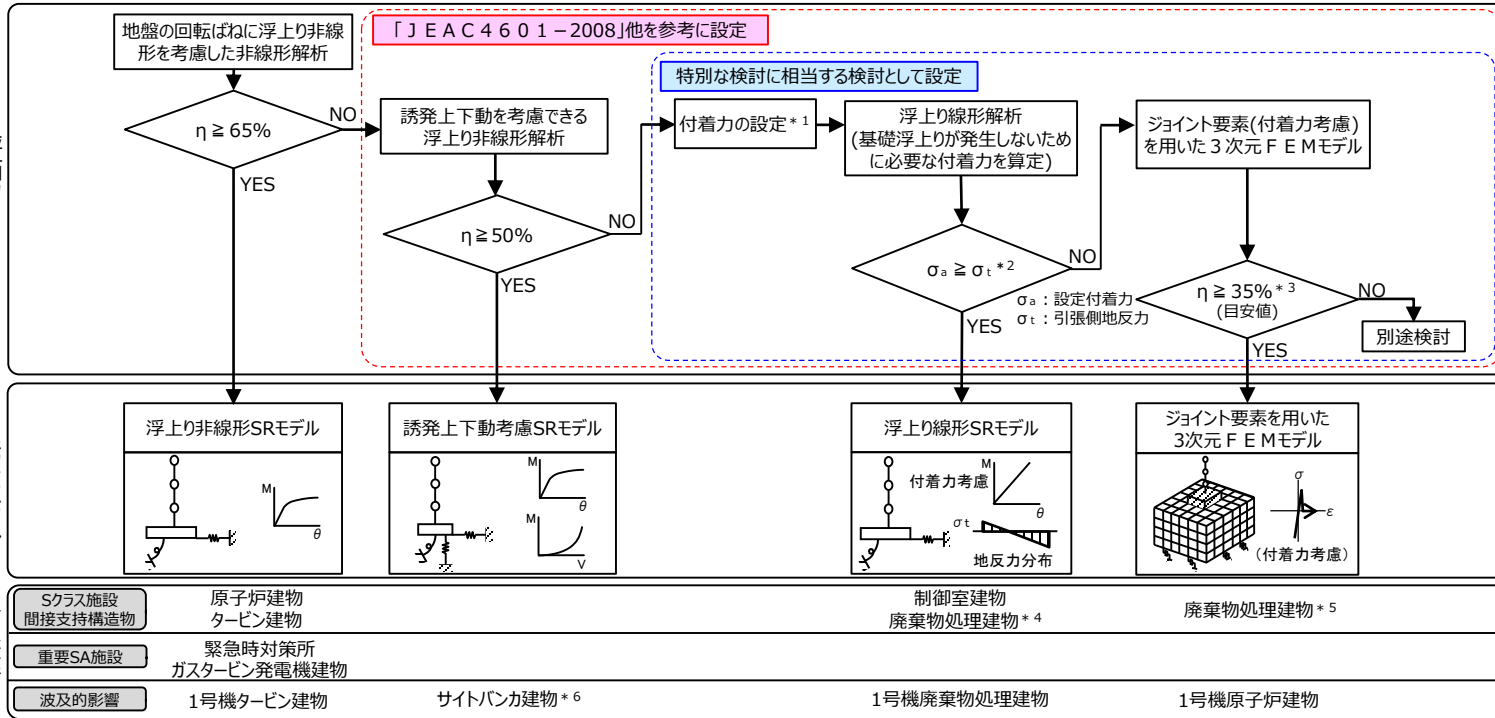


図2 基礎浮上り評価フロー(参考)  
(「J E A C 4 6 0 1 - 2008」より抜粋, 一部加筆)

# 【1-1】地震応答解析モデルにおける建物基礎底面の付着力（4/23）

## 2. 2 地震応答解析モデル（基礎浮上り評価法）について(続き)



(補足1)  
基礎スラブの応力解析において、 $\sigma_a \geq \sigma_t$  の場合は基礎浮上りが発生しないことから、応力解析に設定する地盤ばねは線形ばねとする。  
また、組合せ係数法の適用性について検討する。

(補足2)  
J E A C 4 6 0 1 - 2015 参考資料 3.5「基礎浮き上がりの解析手法について(7)基礎底面の付着力を考慮した基礎浮き上がり解析法」において、ジョイント要素に付着力を考慮した3次元 F E M モデルが提案されており、低接地率の範囲まで適用可能とされていることから、当社が付着力を考慮した場合も適用できると判断し、接地率  $\eta \geq 35\%$  を目安値として設定した (P6~9 参照)。  
なお、島根 2 号機において今回採用する 3 次元 F E M モデルによる接地率は 35% を大きく上回った。

(補足3)  
ジョイント要素に付着力を考慮した 3 次元 F E M モデルは、浮上りに伴う誘発上下動の評価が可能であることを踏まえて、誘発上下動の影響を確認する。

注：上記以外の建物（サイトバンカ建物(増築部)、排気筒モニタ室、燃料移送ポンプエリア竜巻防護対策設備）は基礎固定モデルとする。  
 注記\*1：設定付着力  $\sigma_a = 0.40 \text{ N/mm}^2$  \*2：組合せ係数法により鉛直方向地震力を組み合わせた場合も考慮する。(補足1)  
 \*3：JEAC4601-2008, 2015参考資料3.5「基礎浮き上がりの解析手法について(3)ジョイント要素を用いた3次元 F E M 地盤モデル」(補足2), (補足3)  
 \*4：弾性設計用地震動 S d に対する評価に用いる。  
 \*5：基準地震動 S s に対する評価に用いる。  
 \*6：接地率が65%以上となる場合は浮上り非線形SRモデルとする。

図3 島根2号機における各建物の地震応答解析モデルの選定フロー

➤ 地震応答解析モデルの選定フローのうち、島根2号機の地震応答解析の特徴である「付着力を考慮した3次元 F E M モデルの適用性」及び「付着力の設定」について3. 及び4. で詳細に説明する。

## 3. 付着力を考慮した3次元FEMモデルの適用性について

### 3.1 既往文献の整理

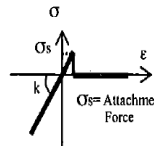
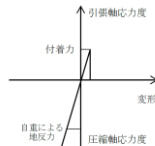
#### (1) ジョイント要素(付着力無視)を用いた3次元FEMモデルの適用範囲及び適用性

- 「J E A C 4 6 0 1 - 2015 参考資料3.5(3)」及び引用している既往論文<sup>(1)</sup>によると、時間領域のグリーン関数法の地震応答解析結果との比較を行い、接地率 $\eta$ が30%程度まで時間領域のグリーン関数法の結果と概ね一致するとされている。この結果を基に、ジョイント要素を用いた3次元FEMモデルの適用範囲として接地率 $\eta \geq 35\%$ を提案している。
- 既往論文の解析条件と、島根2号機において3次元FEMモデルを採用する廃棄物処理建物の解析条件の比較を表1に示す。基礎底面の付着力以外は、実際の建物の大きさや解析モデル規模も含めて、ほぼ同じ解析条件となっている。

#### (2) ジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元FEMモデルの適用性

- 「J E A C 4 6 0 1 - 2015 参考資料3.5(7)」及び引用している既往論文<sup>(1)</sup>では、上記(1)のモデルをベースに更に現実に近い解析条件を設定した検討として、建物基礎底面の付着力を考慮した検討を実施し、最大加速度が900Galの地震波を入力した際に、基礎底面の付着力として0.49N/mm<sup>2</sup>を考慮した時の接地率は約30~50%となっていることが示されている(図4参照)。
- 「J E A C 4 6 0 1 - 2015 参考資料3.5(7)」において、ジョイント要素に付着力を考慮した3次元FEMモデルは、低接地率の範囲まで適用可能とされている。
- これは既往論文においてジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元FEMモデルによる接地率30%程度まで適用された事例であることから、ジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元FEMモデルは接地率30%程度まで適用可能であることを示唆しているといえる。

表1 3次元FEMモデルの既往論文との解析条件の比較

項目	既往論文	評価対象建物	
対象建物	PWR 原子炉建屋	BWR 2号機廃棄物処理建物	
建物モデル (減衰)	多軸多質点系モデル (ひずみエネルギー比例型)	単軸多質点系モデル (ひずみエネルギー比例型)	
地盤のせん断波速度 (m/s)	1000, 2000	約1,660 (標準地盤の等価せん断波速度)	
基礎浮上り	ジョイント要素で考慮 	ジョイント要素で考慮 	
基礎幅 (m)	約60	NS : 53.07 EW : 53.64	
地盤モデル化 範囲	水平	基礎幅の5倍	基礎幅の約5倍
	鉛直	基礎幅の1.5倍	基礎幅の約1.5倍
基礎底面の付着力 (N/mm <sup>2</sup> )	無視*1, 考慮*2(0.49, 0.98)	考慮(0.40)	

注記\*1: 接地率の適用範囲に関する検討(I(1)ジョイント要素(付着力無視)を用いた3次元FEMモデルに対応)  
\*2: 現実に近い解析条件を設定した検討(I(2)ジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元FEMモデルに対応)

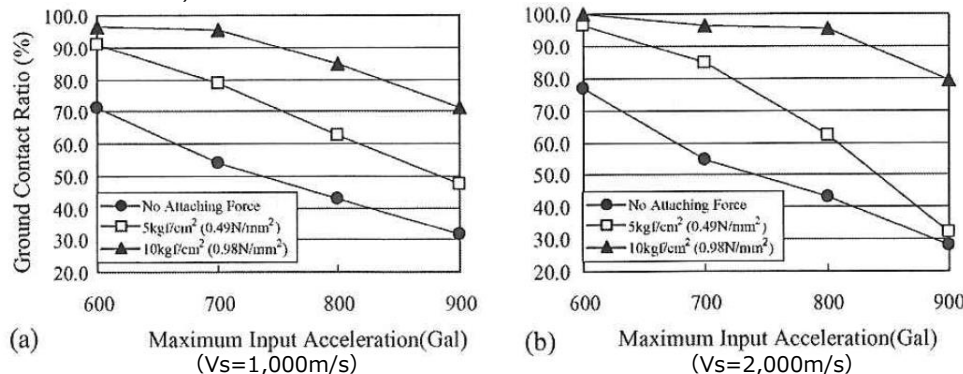


図4 既往論文における3次元FEMモデルの応答解析結果

(1) Nakamura, N. et al. : An estimation method for basemat uplift behavior of nuclear power plant buildings, Nuclear Engineering and Design, Vol.237, 2007.7, pp.1275-1287

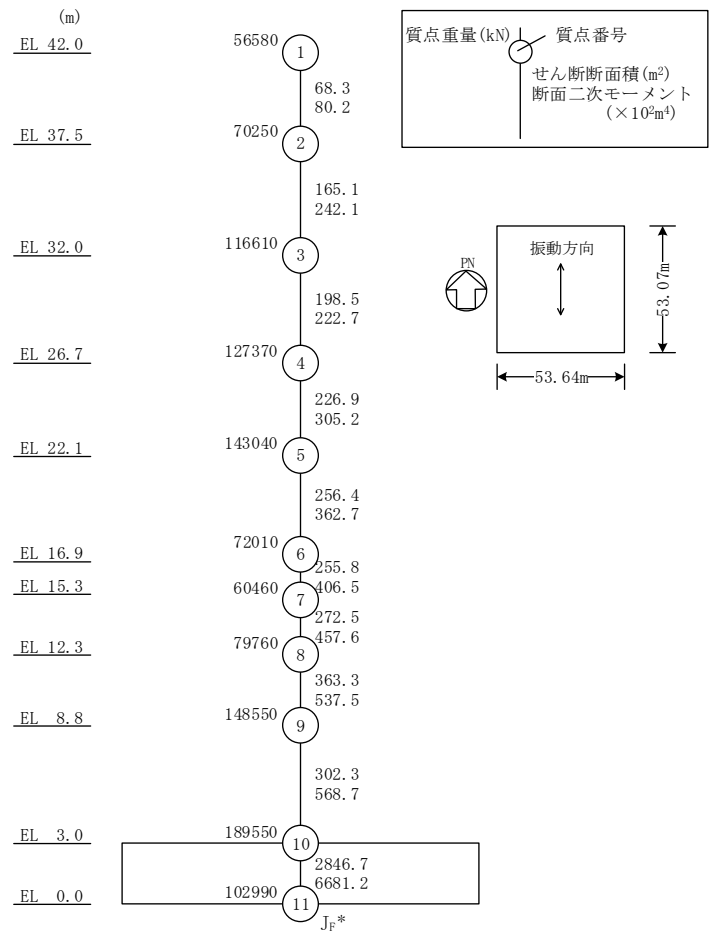
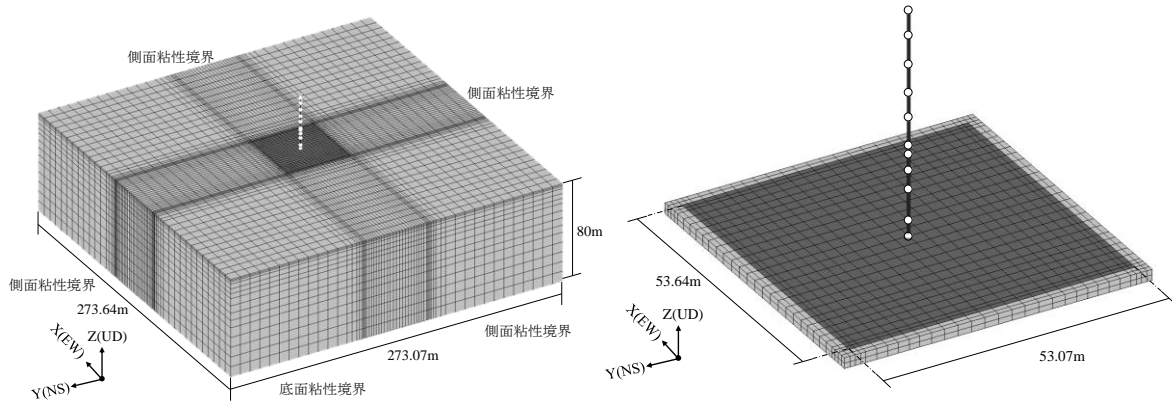
## 3. 2 付着力を考慮した3次元 F E Mモデルの適用性に関する解析的検討

### (1) 検討方針

ジョイント要素(付着力考慮)を用いた3次元 F E Mモデルを用いて入力地震動を係数倍した地震応答解析を行い、最小接地率、入力地震動の倍率、水平応答加速度及び誘発上下動に伴う鉛直応答加速度の関係が既往論文と同様の傾向になることを確認する。なお、検討においては廃棄物処理建物の地震応答解析モデルを用いる。

### (2) 解析条件

解析は、付着力を考慮しない場合(0N/mm<sup>2</sup>)と、付着力を考慮した場合(0.40N/mm<sup>2</sup>)の2ケース実施した。入力地震動は位相特性に偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 S s - Dとし、入力倍率を乗じた地震動を入力する。付着力を考慮しない条件で接地率が30%となる時の入力倍率を1.0倍として基準化し、接地率が100%となる0.5倍から、接地率が10%を下回る1.3倍まで0.1倍刻みで漸増させた。



注記\* : 回転慣性重量 (29.35 × 10<sup>7</sup> kN · m<sup>2</sup>)

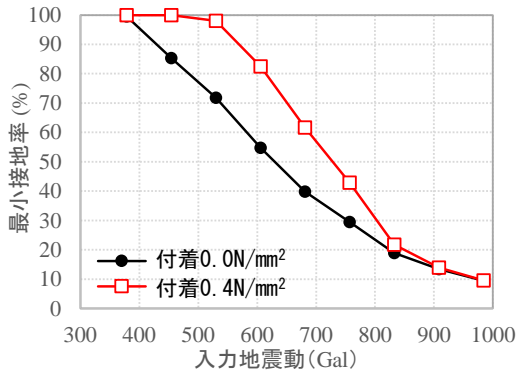
図5 廃棄物処理建物の地震応答解析モデル



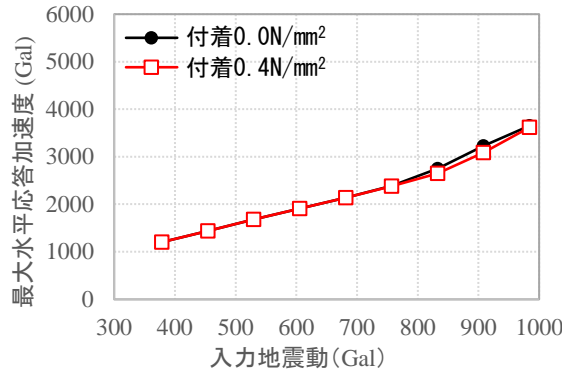
## 3. 2 付着力を考慮した3次元 F E Mモデルの適用性に関する解析的検討(続き)

### (3) 検討結果

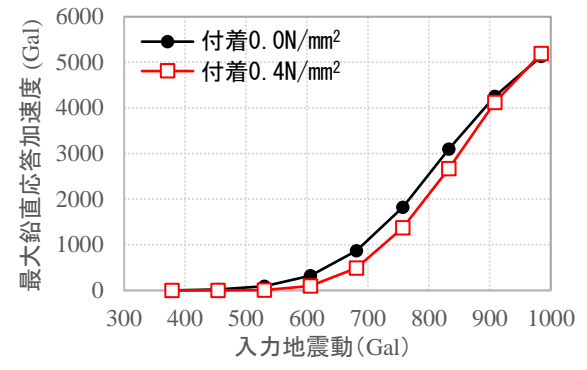
- 付着力と最小接地率の関係において、付着力を考慮しない場合と付着力を考慮する場合のいずれにおいても既往論文と同様の傾向を示しているとともに、接地率は入力地震動の大きさに応じて連続的に変化し、低接地率の領域においても特異な応答を生じていないことが確認できる (a.参照)。
- 最大水平応答加速度は付着力の有無によらずほぼ一致しており、既往論文と同様の傾向を示している。また、最大水平応答加速度は接地率に応じて連続的に変化し、低接地率の領域においても特異な応答を生じていないことが確認できる (b.参照)。
- 付着力の有無と誘発上下動に伴う最大鉛直応答加速度の関係は、既往論文と同様の傾向を示している。また、誘発上下動に伴う最大鉛直応答加速度は接地率に応じて連続的に変化し、低接地率の領域においても特異な応答を生じていないことが確認できる (c.参照)。



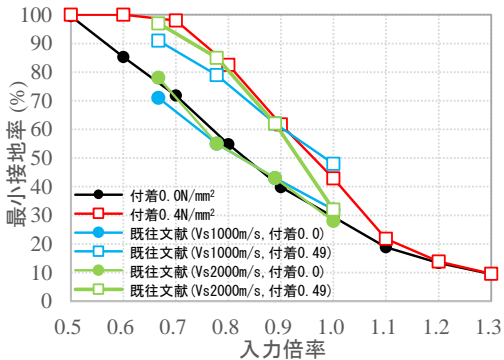
(a) 廃棄物処理建物



(a) 廃棄物処理建物

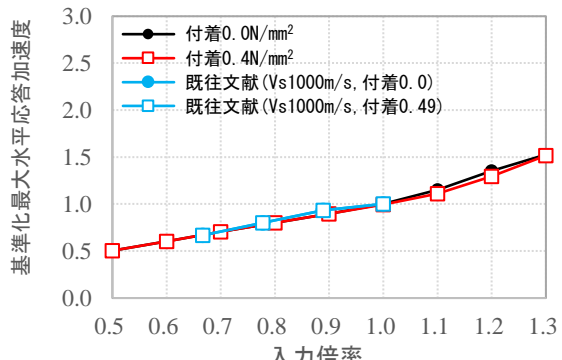


(a) 廃棄物処理建物



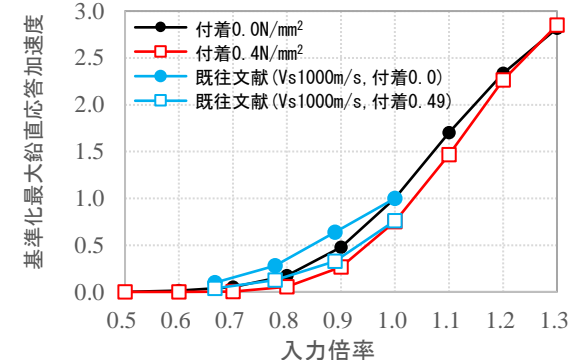
(b) 廃棄物処理建物と既往論文の比較

a. 付着力の有無による接地率の比較



(b) 廃棄物処理建物と既往論文の比較

b. 付着力の有無による最大水平応答加速度の比較



(b) 廃棄物処理建物と既往論文の比較

c. 付着力の有無による誘発上下動に伴う最大鉛直応答加速度の比較

## 3. 3 島根 2 号機における 3 次元 F E Mモデルの適用性について

(まとめ)

- 島根 2 号機において採用した 3 次元 F E Mモデルは、既往論文における接地率の適用範囲に関する検討及び基礎底面に付着力を考慮した検討とほぼ同じ解析条件となっている。
- 「J E A C 4 6 0 1 - 2015」において、ジョイント要素に付着力を考慮した 3 次元 F E Mモデルが提案されており、低接地率の範囲まで適用可能とされていることから、当社が付着力を考慮した場合も適用できると判断し、接地率  $\eta \geq 35\%$  を目安値として設定した。
- 廃棄物処理建物のジョイント要素(付着力考慮)を用いた 3 次元 F E Mモデルの解析結果について既往論文と比較検討した結果、両者は同様の傾向を示していること及び低接地率となる領域においても特異な応答を生じていないことが確認でき、ジョイント要素(付着力考慮)を用いた 3 次元 F E Mモデルが適用可能な接地率を、付着力を考慮しない場合と同様に 35%以上としていることの妥当性を確認した。
- なお、島根 2 号機において今回採用する 3 次元 F E Mモデルによる接地率は 35% を大きく上回る。

## 4. 島根原子力発電所における建物基礎底面の付着力の設定について

### 4. 1 検討概要

- 原子炉施設の建設にあたっては、図6に示すように施工精度確保の観点から岩盤上にコンクリート(レベルコンクリート)を打設し基礎底面を平坦にした後、基礎コンクリートを打設している。
- 島根原子力発電所における建物基礎底面と地盤(岩盤)間の付着力を把握するため、耐震上重要な建物が設置されている岩盤(以下「建物直下地盤」という。)と同等な岩盤を選定し、岩盤-レベルコンクリート間(図6の①)及びレベルコンクリート-基礎コンクリート間(図6の②)を模擬した試験体を用いて付着力試験を行った。
- 地震応答解析に用いる付着力は、これらの試験結果に基づき設定する。
- 次頁以降に試験位置の選定、試験方法、試験結果及び試験結果を踏まえた地震応答解析に用いる付着力の設定について示す。なお、付着力試験については、「(独)原子力安全基盤機構の報告書<sup>(2)</sup>」(以下「JNES報告書」という。)を参考にした。

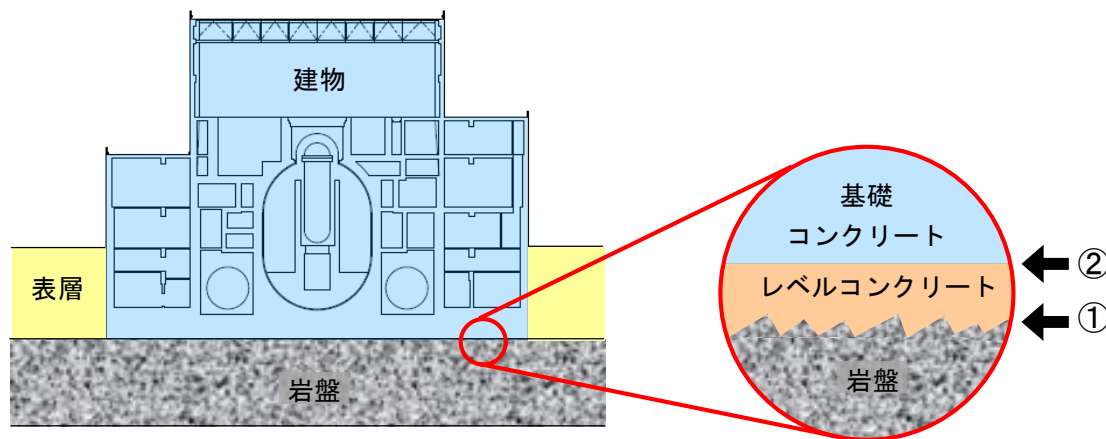


図6 原子炉施設の建物基礎と岩盤

(2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成18年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 原子力施設の非線形地盤・構造物相互作用試験及び基準整備 基礎浮上り評価手法の調査に関する報告書，2007

## 4. 2 試験位置の選定について

### (1) 島根 2 号機における敷地の地質

- 島根 2 号機における地質水平断面図(T.P.-4.1 m\* 1)を図 7 に, 地質鉛直断面図を次頁(図 8)に示す。
- 建物直下地盤は主に黒色頁岩, 凝灰岩及びこれらの互層から構成されている。

注記 \* 1 : T.P.は, 東京湾平均海面を示す。

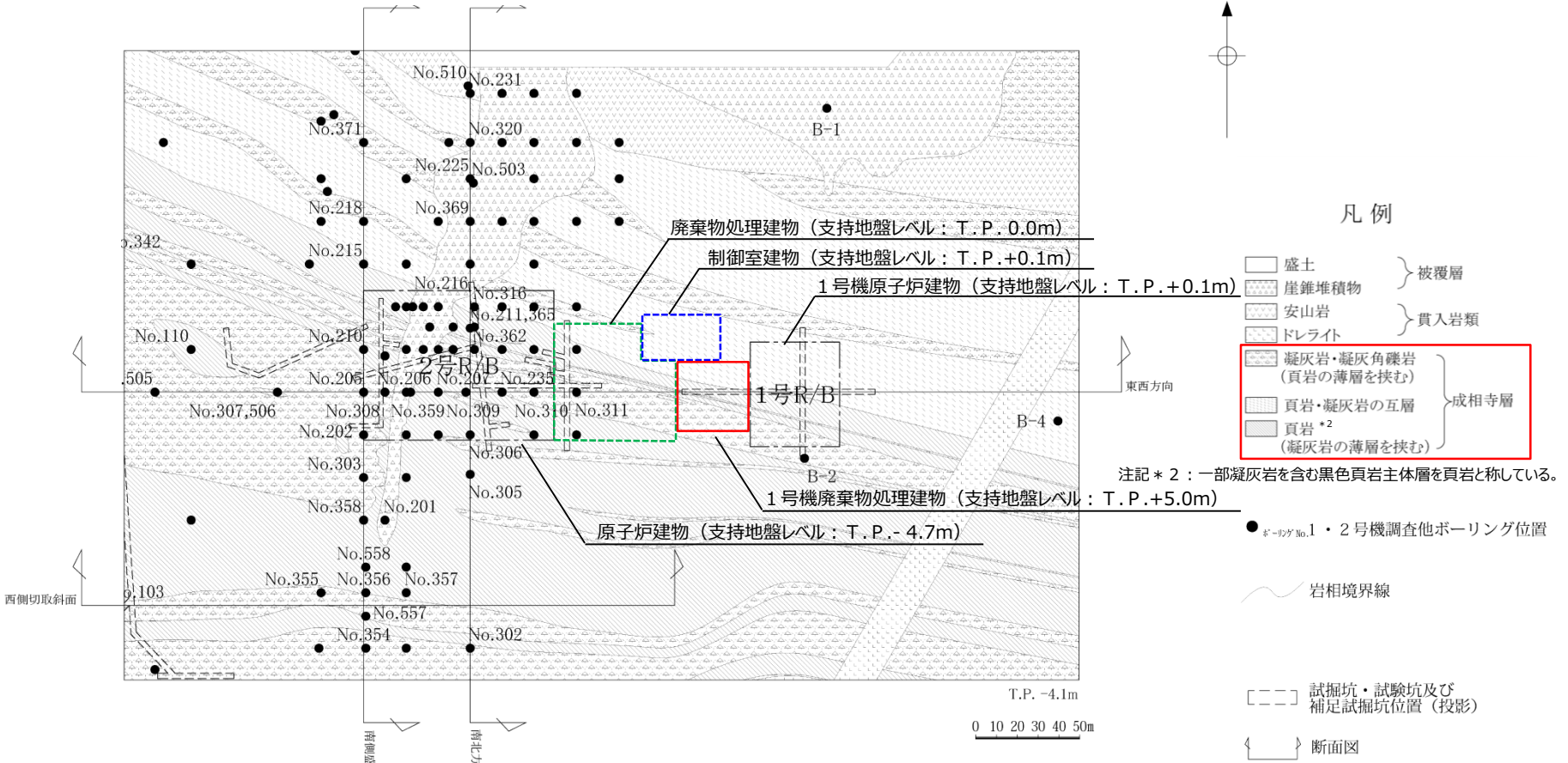


図 7 地質水平断面図 (2 号機) (T.P.-4.1m)

## 4. 2 試験位置の選定について(続き)

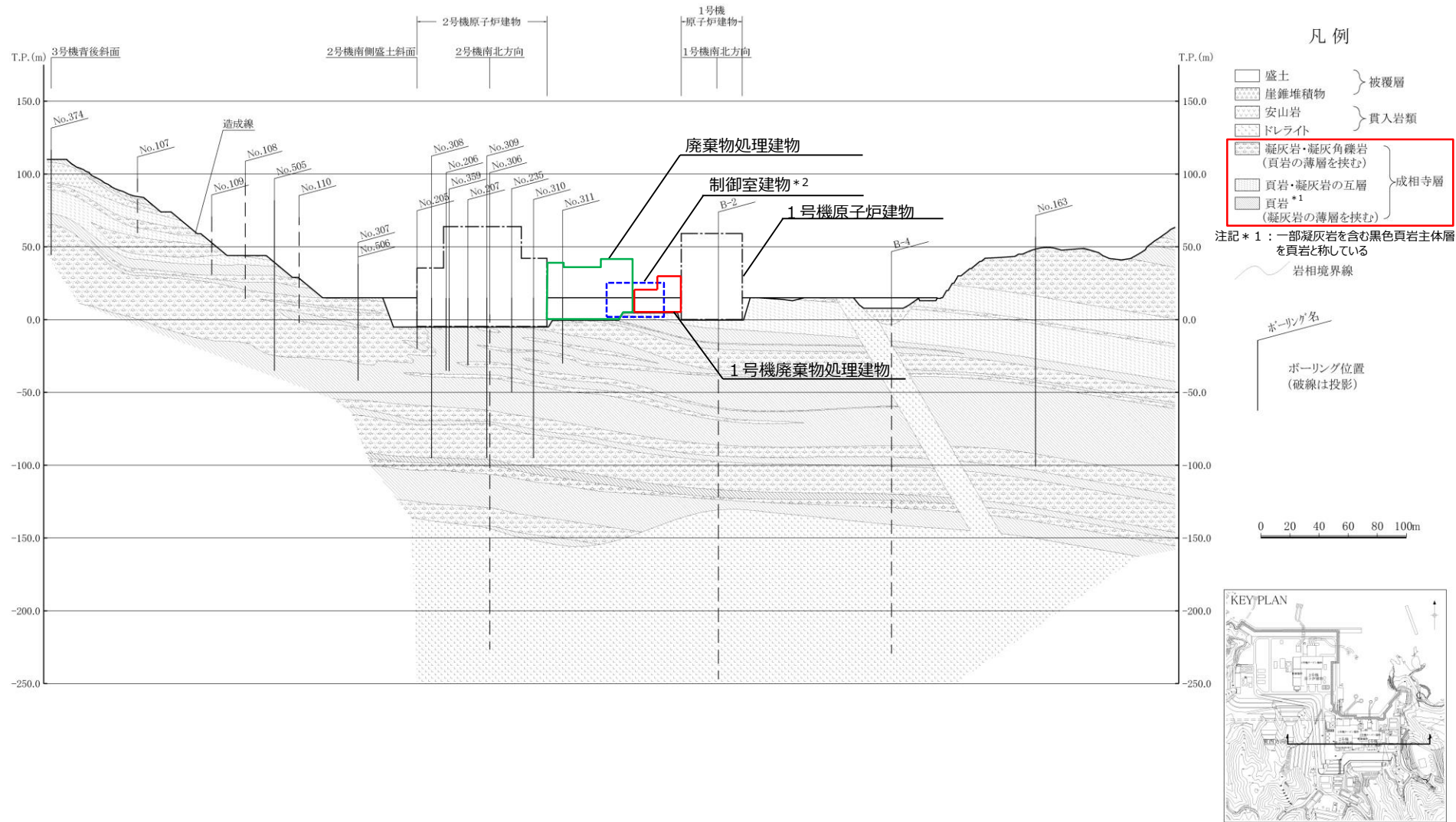


図8 地質鉛直断面図(東西方向)(2号機)

注記\*2: 制御室建物位置を投影

## 4. 2 試験位置の選定について(続き)

### (2) 試験位置

- 建物直下地盤と同等な岩盤(黒色頁岩及び凝灰岩)が現われた箇所(3号機本館南西)を試験位置として選定した。
- 試験位置及び試験面の状況(写真及びスケッチ)を図9及び図10に示す。おおよそ北側半分が凝灰岩, 南側半分が黒色頁岩で構成されている。

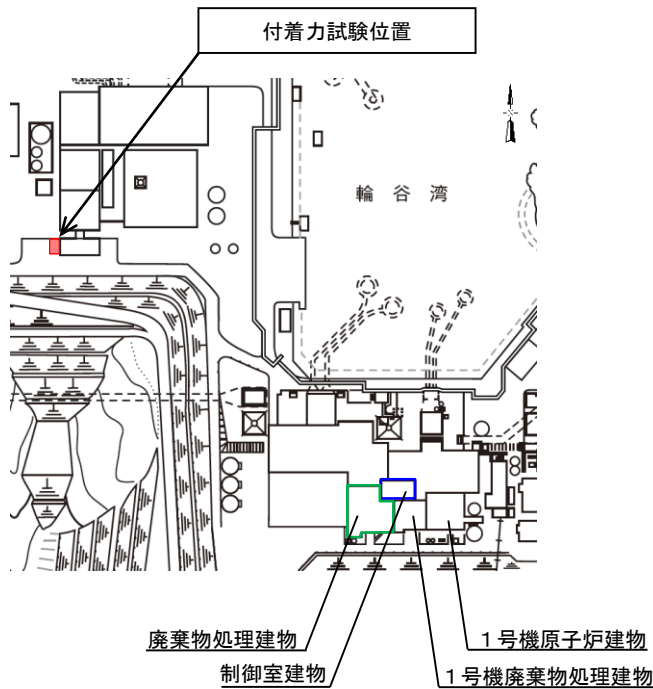


図9 試験位置

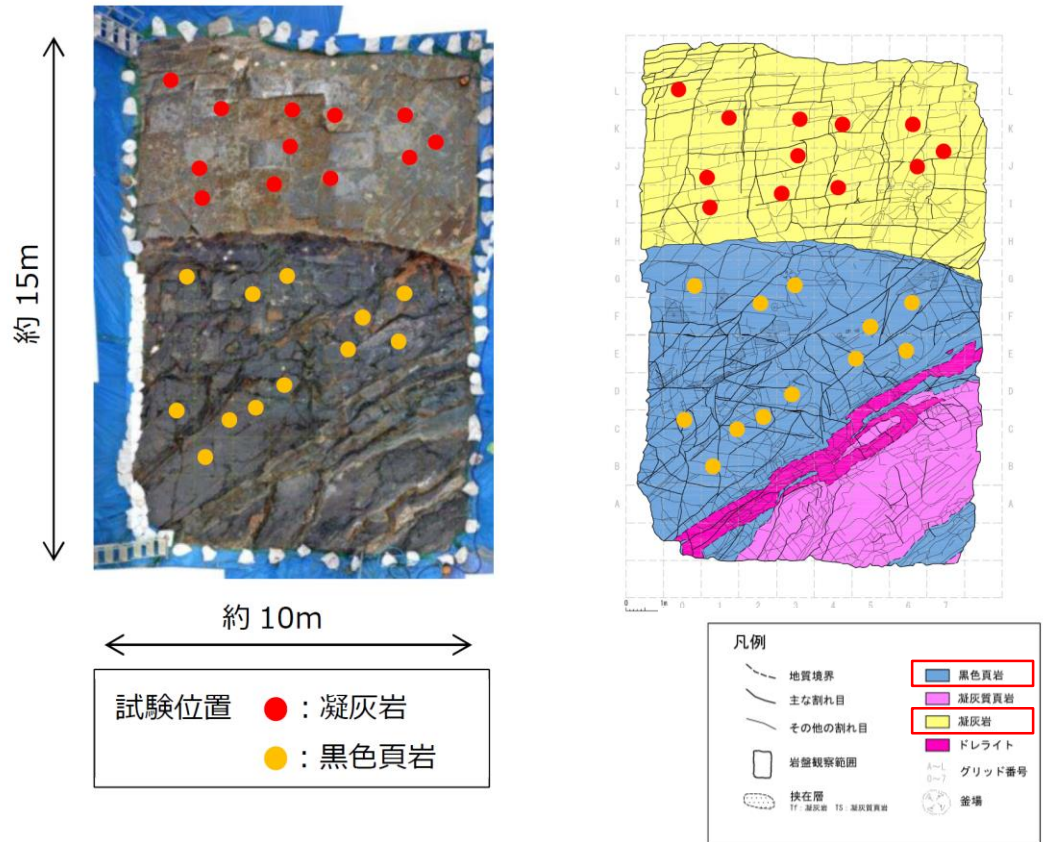


図10 試験面の状況(左側：写真, 右側：スケッチ図)

## 4. 3 試験方法について

### (1) 岩盤-レベルコンクリート間の付着力試験方法

- 試験は、岩盤上(黒色頁岩及び凝灰岩)にφ100mm, 高さ約100mmのコンクリート( $F_c=18\text{N/mm}^2$ )を直接打設し(1岩種あたり12個), コンクリート上面に取付けた引張治具をロードセルに接続し, 岩盤とコンクリート境界面が剥離破壊する際の最大荷重を測定した。
- 試験体の概要及び付着力試験装置の概要を図11及び図12に示す。なお, 付着力  $F_t$  は下式により算定した。

$$F_t = \frac{P}{A}$$

ここで,  $F_t$ : 付着力 (N/mm<sup>2</sup>)  
 P: 最大荷重 (N)  
 A: 断面積 (mm<sup>2</sup>)

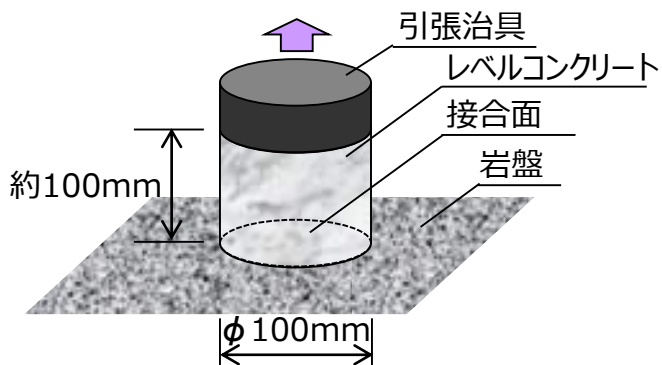


図11 試験体の概要(岩盤-レベルコンクリート)

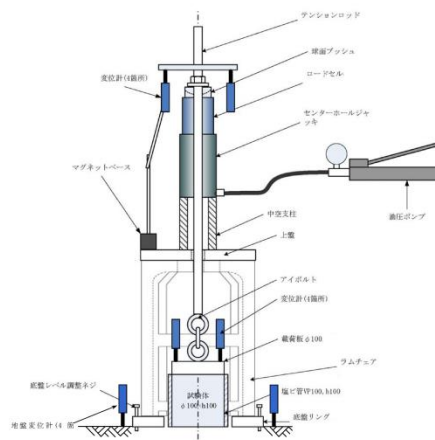
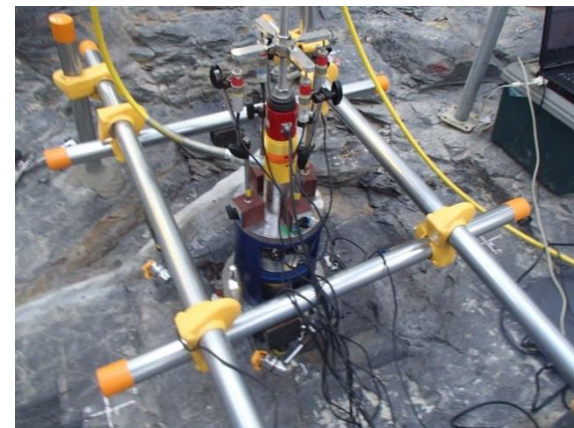


図12 付着力試験装置の概要(岩盤-レベルコンクリート)



## 4. 3 試験方法について(続き)

### (2) レベルコンクリートー基礎コンクリート間の付着力試験方法

- 試験体は、高さ約100mmに打設したレベルコンクリート( $F_c = 18\text{N/mm}^2$ )を7日間養生した後、その上に高さ約100mmの基礎コンクリート( $F_c = 21\text{N/mm}^2$ )を打設し、 $\phi 100\text{mm} \times$ 高さ200mmの試験体を作製し(12個)、さらに7日間養生した後、室内にて試験を実施した。
- 付着力は、岩盤ーレベルコンクリート間の付着試験と同様に、コンクリート相互の境界面が剥離破壊する際の最大荷重を測定し算出した。
- 試験体及び付着力試験装置の概要を図13及び図14に示す。

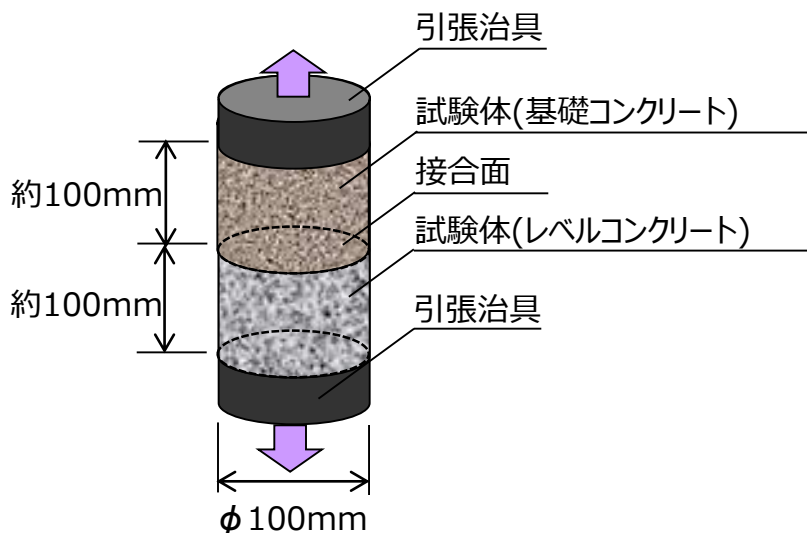


図13 試験体の概要  
(レベルコンクリートー基礎コンクリート)



図14 付着力試験装置の概要  
(レベルコンクリートー基礎コンクリート)



## 4. 4 試験結果について

### (1) 岩盤-レベルコンクリート間の付着力試験結果

- 岩盤-レベルコンクリート間の付着力試験の結果を以下に示す。
- 建物直下地盤は主に黑色頁岩と凝灰岩から構成されていることを踏まえ、岩盤全体として評価した付着力(平均値)は、 $0.98\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.30\text{N/mm}^2$ )であった。
- なお、個々の岩盤における付着力の平均値は、黑色頁岩 $0.81\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.26\text{N/mm}^2$ )、凝灰岩 $1.15\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.24\text{N/mm}^2$ )であった。

表2 付着力試験の結果(岩盤-レベルコンクリート)

試験体の種類	平均値(N/mm <sup>2</sup> )	
岩盤-レベルコンクリート	0.98	
黑色頁岩-レベルコンクリート		0.81
凝灰岩-レベルコンクリート		1.15



図15 試験後の破断面の状況の例 (黑色頁岩-レベルコンクリート)

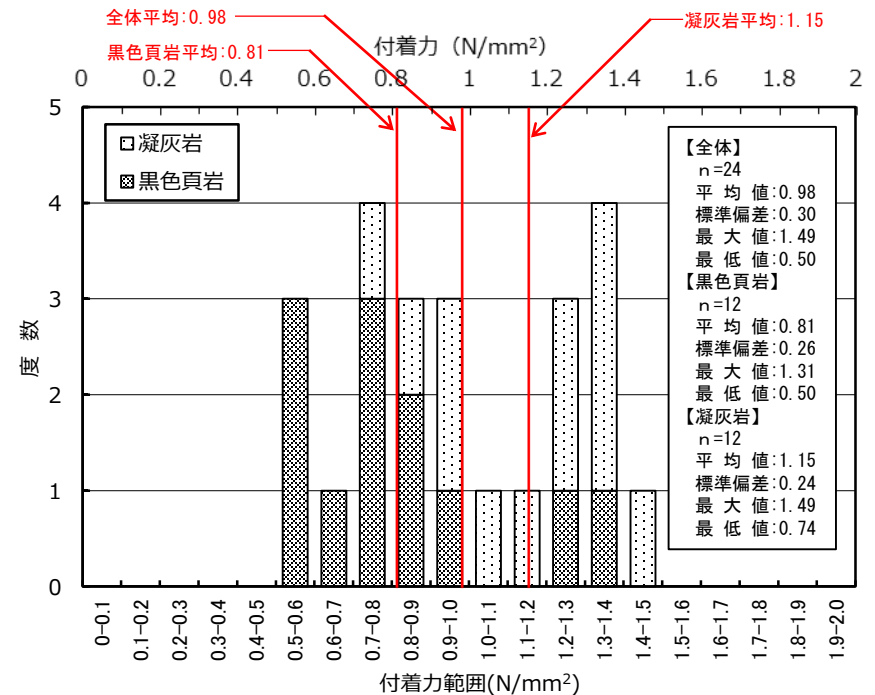


図16 付着力試験の結果(岩盤-レベルコンクリート)

## 4. 4 試験結果について(続き)

### (2) レベルコンクリート-基礎コンクリート間の付着力試験結果

- レベルコンクリート-基礎コンクリート間の付着力試験の結果を以下に示す。
- 付着力の平均値は $1.61\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.12\text{N/mm}^2$ )であった。

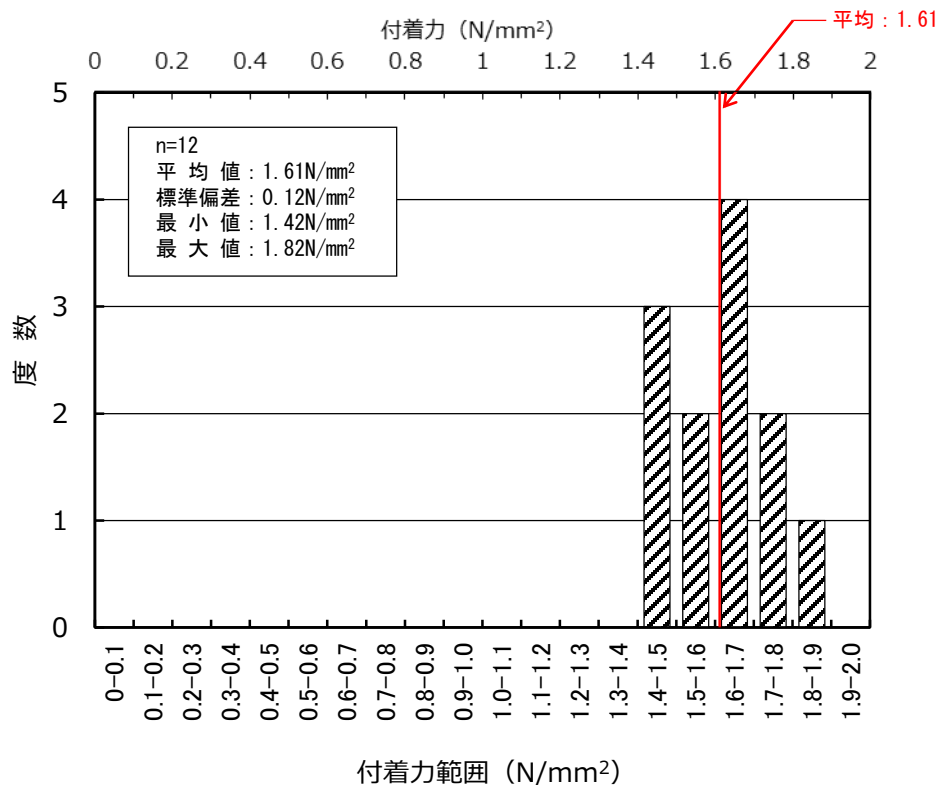


図18 試験後の破断面の状況の例 (レベルコンクリート-基礎コンクリート)

図17 付着力試験の結果(レベルコンクリート-基礎コンクリート)

## 4. 5 地震応答解析に用いる付着力の設定について

- 「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」及び「レベルコンクリート－基礎コンクリート間の付着力試験」の試験結果及び設定付着力を表3に示す。
- 「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」の付着力の方が小さいことから、「岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験」の試験結果に基づき地震応答解析に用いる付着力を設定することとし、2種の岩種のうち平均値の小さい黒色頁岩の平均値0.81N/mm<sup>2</sup>に対して2倍の安全率を考慮した0.40N/mm<sup>2</sup>を採用することとした。
- なお、設定した付着力は、試験結果の最低値(0.50N/mm<sup>2</sup>)を下回る値となっている。

付着力として設定した0.40N/mm<sup>2</sup>という値の保守性について、次頁に示す。

表3 付着力試験の結果及び設定付着力

試験	試験体の種類		平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	設定付着力 (N/mm <sup>2</sup> )
原位置試験*1	岩盤－レベルコンクリート	黒色頁岩	0.81	0.40*2
		凝灰岩	1.15	
室内試験	レベルコンクリート－基礎コンクリート		1.61	

注記\*1：直接引張試験

\*2：各試験の平均値のうち、最も小さい「黒色頁岩－レベルコンクリート」の平均値に対して2倍の安全率を考慮

## 4. 6 建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性について

### (1) 付着力として設定した値の保守性について

- 岩盤物性を用いる解析では一般に数個の試料によって試験を実施し、得られた試験結果の平均値を用いているが、今回実施した付着力試験は試験方法が標準化されていない\*<sup>1</sup>ことから、物性値のばらつき、原位置試験の不確実性を踏まえて、平均値をそのまま用いるのではなく、保守性を考慮し、平均値に対して2倍の安全率を考慮した。
- また、建物直下地盤は主に黒色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層から構成されているが、実際の建物直下地盤における黒色頁岩と凝灰岩の構成割合を定量的に確認できないこと、建物毎でその構成割合が異なることを踏まえ、付着力の設定には、岩盤全体の平均値ではなく、保守的に値の小さい黒色頁岩のみが建物直下地盤を構成するものと見なして黒色頁岩の平均値( $0.81\text{N/mm}^2$ )を用いて設定した ( $0.81/2 = 0.40\text{N/mm}^2$ )。
- なお、設定した付着力は、試験結果の最低値( $0.50\text{N/mm}^2$ )を下回る値となっている。
- 既工認実績における設定付着力との比較を参考1 (P.24)に示す。

注記\* 1：地盤工学会において、「岩盤の原位置一軸引張り試験方法(JGS 3551-2020)」が定められ、その適用範囲に「岩盤とコンクリートの付着強さを求める場合にも適用できる。」とされている。今回実施した付着力試験は、本基準に示されているものと同等の試験方法となっていることを確認した。

### (2) 標本数の妥当性について

- 標本数は、土木学会指針<sup>(3)</sup>に規定されている原位置における岩盤試験では3ないしは4個以上\*<sup>2</sup>、地盤工学会の「岩盤の原位置一軸引張り試験方法(JGS 3551-2020)」では3個以上とされているが、試験結果を用いる施設の重要度及び圧縮試験と比較して結果のばらつきが大きいことを踏まえて、「JNES報告書」を参考に1岩種当たり12個とし十分な標本数を確保した。

注記\* 2：土木学会指針に規定された試験の標本数

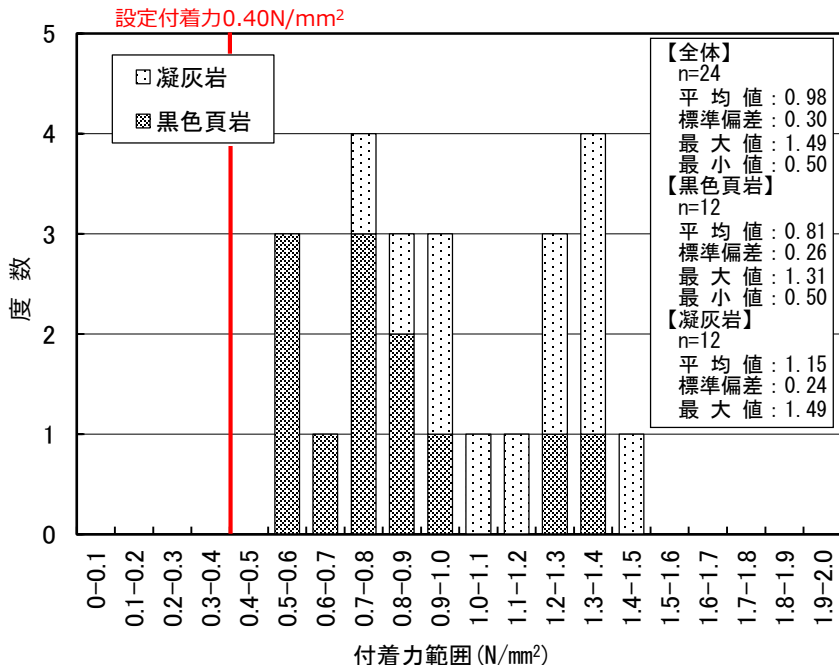
- ・原位置岩盤の平板載荷試験：3個以上
- ・原位置岩盤のせん断試験：4個以上
- ・岩盤の孔内載荷試験：3点以上

(3) 土木学会：原位置岩盤試験法の指針，2000

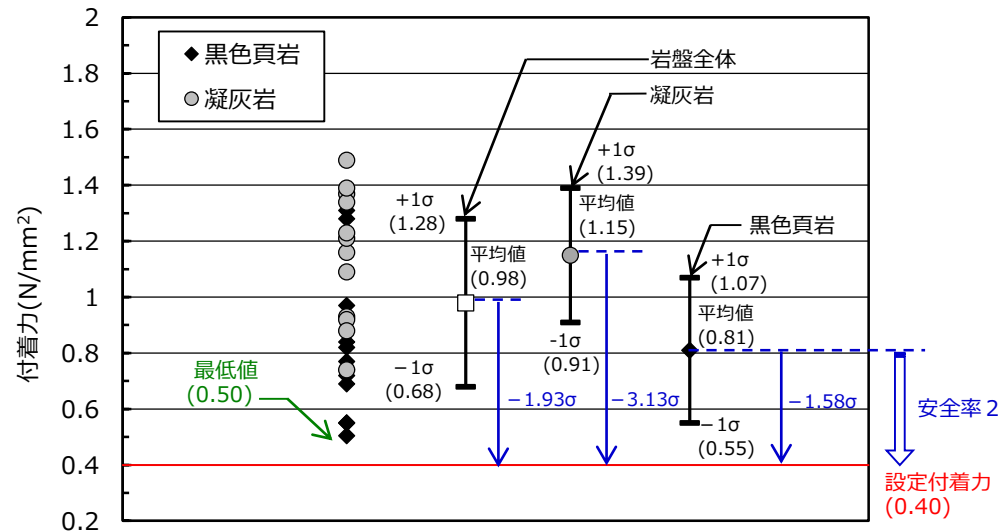
## 4. 6 建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性について(続き)

### (3) 設定付着力の統計的な観点も含めた考察について

- 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験の結果と設定付着力の関係を図19に示す。
- 設定付着力(0.40N/mm<sup>2</sup>)は、平均値の小さい黒色頁岩の試験結果の平均値(0.81N/mm<sup>2</sup>)に対して-1.58σに相当する。
- 参考として、設定付着力は凝灰岩の平均値(1.15N/mm<sup>2</sup>)に対して-3.13σ，黒色頁岩と凝灰岩を合わせた全体の平均値(0.98N/mm<sup>2</sup>)に対して-1.93σとなる。



【付着力試験の結果（ヒストグラム）】



【岩盤全体、凝灰岩及び黒色頁岩の比較】

図19 岩盤－レベルコンクリート間の付着力試験の結果と設定付着力の関係

## 4. 7 追加試験結果を踏まえた建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性について

### (1) 設計用付着力としての信頼性，保守性及び地盤のばらつきを踏まえた網羅性・代表性について

- ▶ 建物基礎底面の付着力として設置変更許可段階で説明した値に十分な保守性・妥当性があると判断しているが，試験地盤と建物直下地盤が離れており，建物直下地盤近傍での直接的な付着力試験データが得られていないため，設計に用いる付着力について，信頼性，保守性及び地盤のばらつきを踏まえた網羅性・代表性に対する説明性を向上させる観点から，1，2号機建物近傍において追加試験を実施した。

### (2) 追加付着力試験概要

- ▶ 試験場所の選定  
 1，2号機エリアを対象に，耐震上重要な建物が設置されている岩盤と同様な岩盤とした。また，追加試験の目的，3号機エリアで実施した試験（以下「前回試験」という。）条件を踏まえ，以下の岩相，岩級が確認される場所を選定した。追加試験位置及び追加試験面の状況（写真及びスケッチ図）を図20及び図21に示す。

岩相：黒色頁岩  
 岩級：CH級

- ▶ 試験方法  
 前回試験と同様の試験方法（原位置試験（直接引張試験））とする。

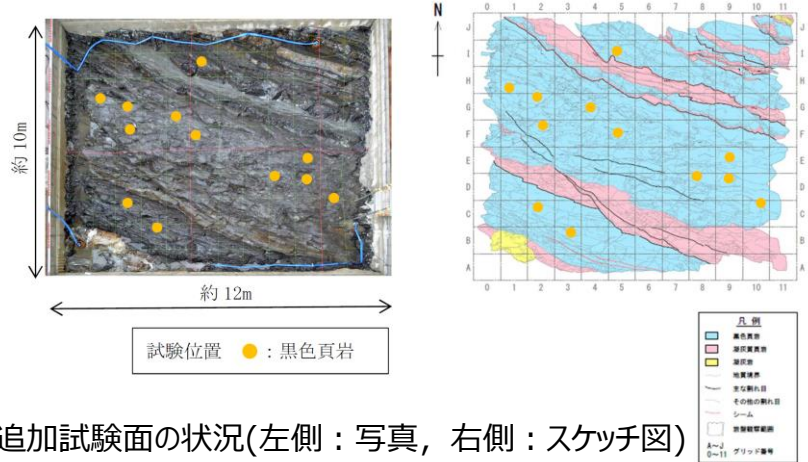


図20 追加試験面の状況（左側：写真，右側：スケッチ図）

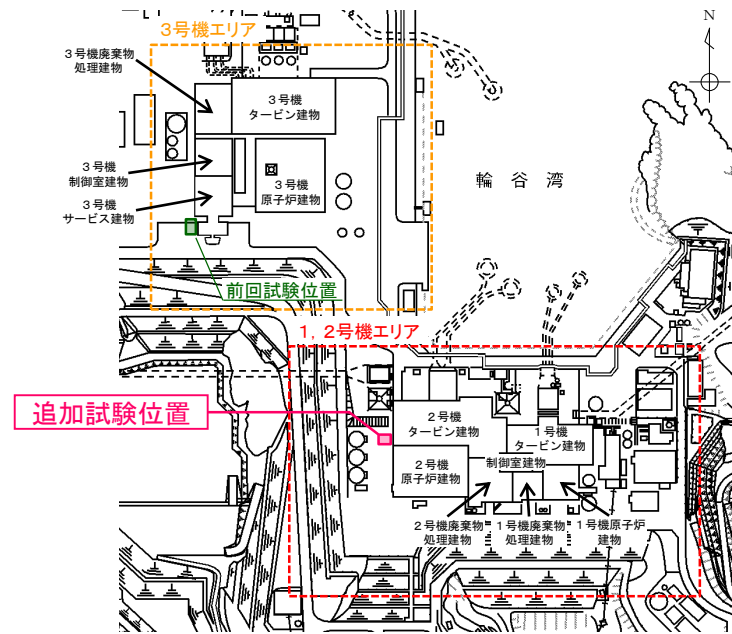


図21 追加試験位置

## 4. 7 追加試験結果を踏まえた建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性について(続き)

### (3) 追加試験結果

- 追加付着力試験の結果を図22に示す。
- 付着力の平均値は、黒色頁岩0.97N/mm<sup>2</sup>(標準偏差0.23N/mm<sup>2</sup>)であった。

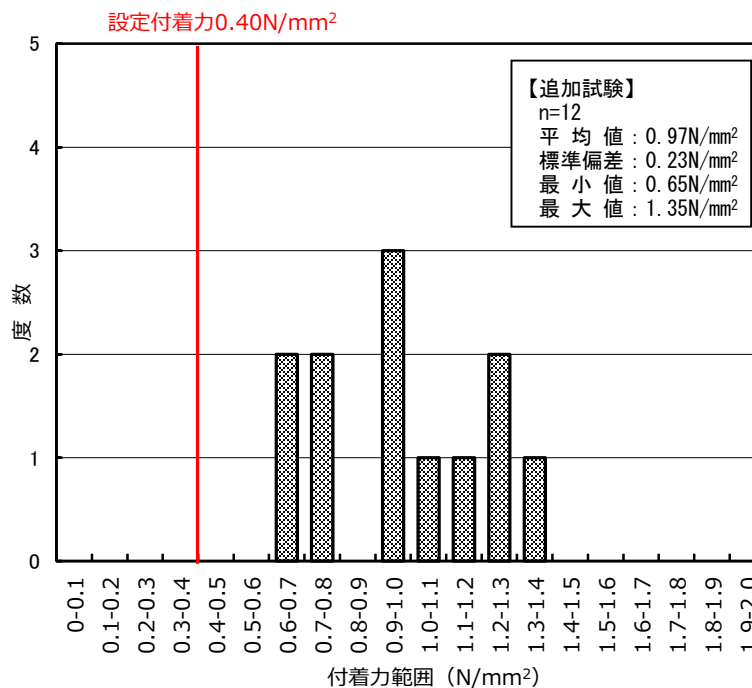


図22 追加付着力試験の結果（黒色頁岩 - レベルコンクリート）

## 4. 7 追加試験結果を踏まえた建物基礎底面の付着力として設定した値の保守性・妥当性について(続き)

### (4) 追加試験結果を踏まえた設計用付着力の妥当性について

- ▶ 黒色頁岩の追加試験結果と前回試験結果を合わせたヒストグラム及び追加試験結果と前回試験結果の比較を示す。
- ▶ 平均値は、追加試験結果(0.97N/mm<sup>2</sup>)が前回試験結果(0.81N/mm<sup>2</sup>)を上回り、最低値も追加試験結果(0.65N/mm<sup>2</sup>)が前回試験結果(0.50N/mm<sup>2</sup>)を上回った。一方最大値は、追加試験結果(1.35N/mm<sup>2</sup>)と前回試験結果(1.31N/mm<sup>2</sup>)は同程度であった。また、追加試験結果と前回試験結果を合わせた全体の平均値は0.89N/mm<sup>2</sup>(標準偏差：0.26N/mm<sup>2</sup>)であった。
- ▶ 比較の結果、追加試験結果は前回試験結果と同等以上の値であったことから、設計用付着力として設定した値(0.40N/mm<sup>2</sup>)は、追加試験結果を踏まえても十分な保守性を有しており妥当であると判断した。
- ▶ なお、両者の標準偏差を比較すると、前回試験は0.26N/mm<sup>2</sup>、今回試験は0.23N/mm<sup>2</sup>であり、ばらつきは同程度であった。また、設計用付着力(0.40N/mm<sup>2</sup>)は、追加試験結果の平均値(0.97N/mm<sup>2</sup>)に対して-2.48σ、追加試験結果と前回試験結果を合わせた全体の平均値(0.89N/mm<sup>2</sup>)に対して-1.88σに相当する。

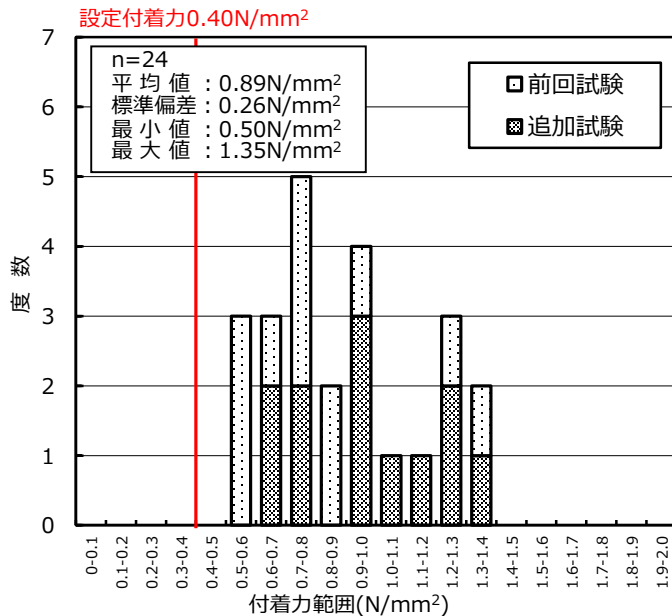


図23 付着力試験の結果（ヒストグラム）

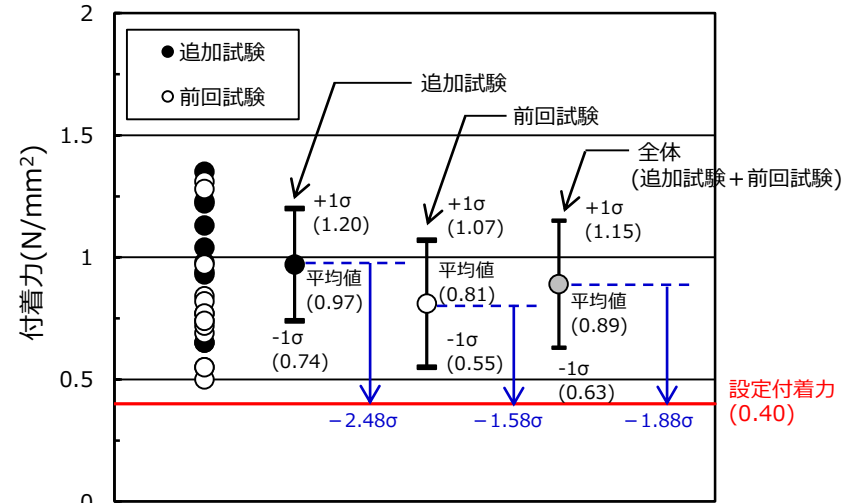


図24 追加試験結果と前回試験結果の比較



（参考1）島根サイトと既工認実績における設定付着力の比較

- 島根サイトと既工認実績における設定付着力の比較を表4に示す。
- 島根サイトの建物直下地盤は主に黒色頁岩、凝灰岩及びこれらの互層から構成されており、実際の建物直下地盤における黒色頁岩と凝灰岩の構成割合を定量的に確認できないこと、建物毎でその構成割合が異なることから、付着力の設定には、岩盤全体の平均値(0.98N/mm<sup>2</sup>)ではなく、保守的に値の小さい黒色頁岩の平均値(0.81N/mm<sup>2</sup>)に基づき設定した。また、物性値のばらつき、原位置試験の不確実性を踏まえて、平均値をそのまま用いるのではなく、保守性を考慮し、平均値に2倍の安全率を考慮し、かつ試験結果の最低値を下回るよう設定した。
- よって、島根サイトの設定付着力は、岩盤全体の平均値(0.98N/mm<sup>2</sup>)に対して2.5倍程度、岩種毎に見れば2.0~2.9倍の余裕があることから、既工認実績と比較しても、試験結果に対して十分な保守性を考慮した値である。
- なお、安全率については、一般的な地盤に関する安全率として、基礎地盤の許容支持力度の例を挙げると、短期許容支持力度は極限支持力度に対して1.5倍の安全率を考慮している。一方で、建物基礎底面と地盤の付着力を考慮した設計においては、適用例も少ないことからデータの信頼性を鑑みて、十分な保守性を確保している。

表4 島根サイトと既工認実績における設定付着力の比較

サイト	建物	採用する地震応答解析モデル (基礎浮上り評価法)	付着力の設定					
			試験の平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	試験の最小値 (N/mm <sup>2</sup> )	設定付着力 (N/mm <sup>2</sup> )	安全率	保守性の考え方等	
島根	廃棄物処理建物	ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル*1	0.98(全体)	0.50	0.40	2.5(全体) 2.9(凝灰岩) 2.0(黒色頁岩)	2種の岩種のうち平均値の小さい黒色頁岩の平均値 に対して2倍の安全率を考慮するとともに最小値0.50 を下回るよう設定	
	制御室建物	S Rモデル*2 (浮上り線形地震応答解析)	1.15(凝灰岩) 0.81(黒色頁岩)					
既工認実績	高浜	中間建屋	ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル*1	0.92	0.55	0.3	3.1	平均値に対して十分な余裕を考慮するとともに最小値 0.55を下回るよう設定
	大飯	制御建屋	ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル*1	0.71	0.44	0.3	2.4	平均値に対して十分な余裕を考慮するとともに最小値 0.44を下回るよう設定
	美浜	原子炉建屋	ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル*1	0.91	0.57	—	—	補足説明資料において工認ケースとの比較ケース(側面 回転ばね非考慮モデル)に平均値(0.91N/mm <sup>2</sup> )を設定*3
	川内	ディーゼル建屋, 主蒸気管室建屋	基礎固定モデル*2	0.63	0.50	0.18 (必要付着力)	—	「JNES報告書」のレベルコンクリートと基礎コンクリート 間の試験結果の平均値(0.6N/mm <sup>2</sup> )と比較

注記\*1：ジョイント要素に付着力を考慮。 \*2：基礎浮上りが発生しないために必要な付着力が設定付着力を超えないことを確認。 \*3：工認ケースにおいては、付着力を考慮していない。  
注：他サイトの情報に係る記載内容については、公開資料を基に当社の責任において記載したものです。

## 1. 概要

- 第3保管エリア近傍斜面の抑止杭の評価にあたっては、抑止杭を5本追加配置したレイアウトに基づき斜面の安定性評価を実施し、更に余裕を持った設計となっていることを確認した。
- 平面配置の妥当性については、「抑止杭の効果を期待しない範囲」において、2次元 F E M 解析を実施し、当該範囲におけるすべり安定性が確保されていることを確認した。
- 杭下流側のシームすべり（杭前面の肌分かれ）については、杭間の岩盤の中抜けが起こらないことを確認したうえで、2次元 F E M 解析により杭下流側のシームすべりが起こらないことを確認した。
- 地中構造物のモデル化については、重量の観点から保守的となるよう埋戻土によりモデル化した。また、埋戻部前面での肌分かれを想定した場合においても、すべり安定性が確保されていることを確認した。
- 杭根入れ部の健全性については、原位置引張試験により岩盤の引張強度を設定したうえで、2次元 F E M 解析により、杭根入れ部が水平支持力を有していることを確認した。
- 杭間の岩盤の中抜けについては、文献調査により中抜け現象の発生に係る判定基準を設定し、3次元 F E M 解析により判定基準を満足していることから、中抜けが起こらないことを確認した。

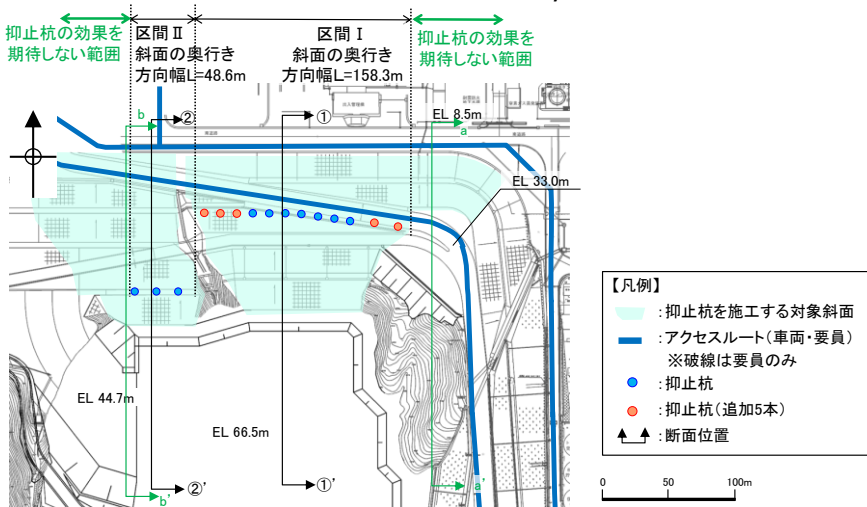


図1 抑止杭配置平面図

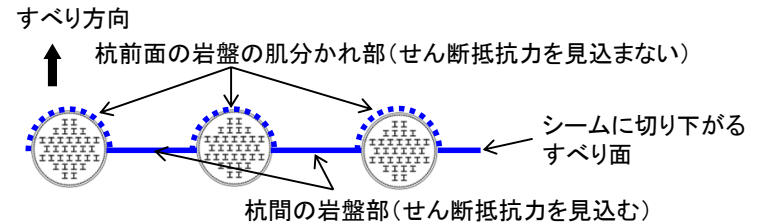


図2 ①-①'断面の杭間隔等(イメージ図)

## 2. 抑止杭を設置した斜面の安定性評価結果

➤ 抑止杭を5本追加配置したレイアウトに基づき斜面の安定性評価を実施した結果、抑止杭追加前と比較し、すべり安全率が向上し、更に余裕を持った設計となっていることを確認した。

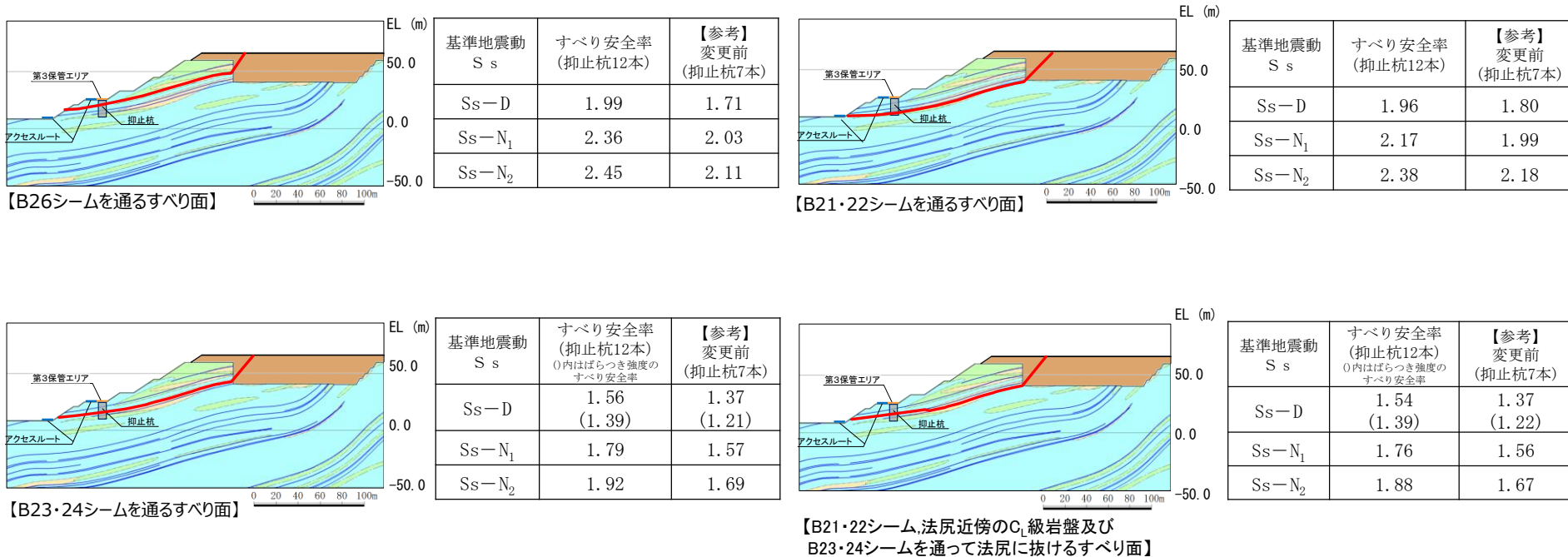
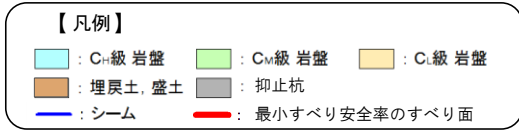


図3 ①-①'断面の評価結果



## 3. 抑止杭の効果を期待しない範囲の安定性確認

- 「抑止杭の効果を期待しない範囲」の安定性を確認するため、区間Ⅰより東側において、風化帯が最も厚くなる尾根部を通り、シーム及び切取斜面の最急勾配となるすべり方向に a - a'断面を、区間Ⅱより西側において、斜面高さが高くなり、シーム及び切取斜面の最急勾配となるすべり方向に b - b'断面を設定した。
- a - a'断面及び b - b'断面において、2次元動的 F E M解析を実施した結果、すべり安全率は評価基準値 1.0に対し余裕を有することから、当該範囲に抑止杭は不要とした。

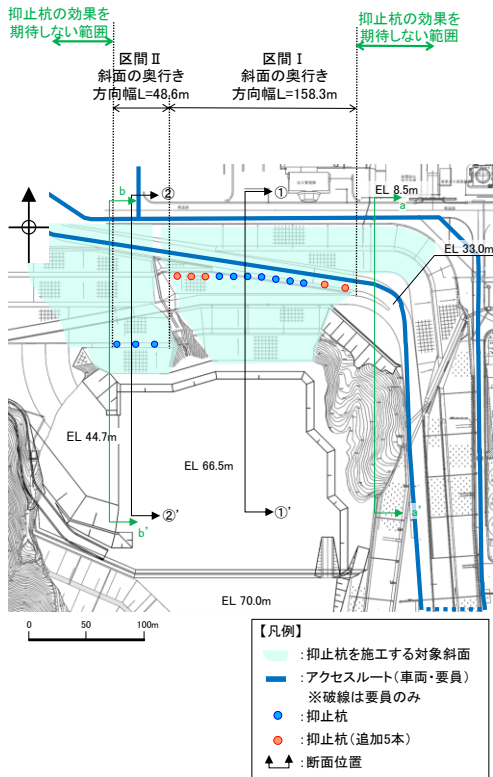


図4 抑止杭配置平面図

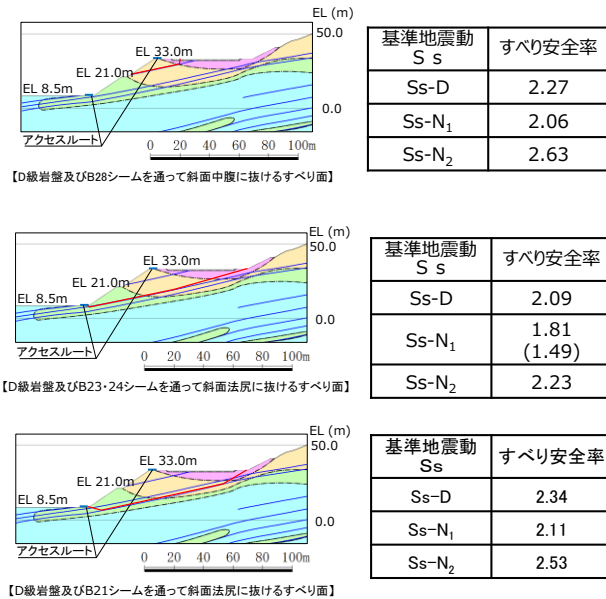


図5 評価結果（a - a'断面）

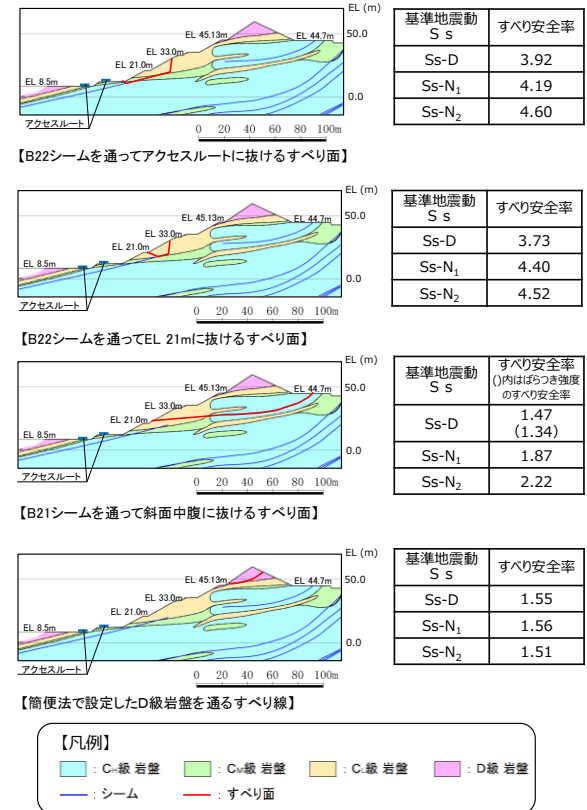


図6 評価結果（b - b'断面）

## 4. 杭前面における岩盤の肌分かれを想定したすべりの検討

- ①-①'断面及び②-②'断面において、杭前面における岩盤の肌分かれを想定したすべり安定性評価を実施した。
- 「7. 対策工（抑止杭）を設置した斜面の抑止杭間の岩盤の健全性」に記載のとおり、杭間の岩盤の中抜け現象が起こらないことを踏まえ、杭前面の岩盤の肌分かれ部のせん断抵抗力を見込まずにすべり安全率を算定した結果、評価基準値1.0に対し余裕を有していることを確認した。

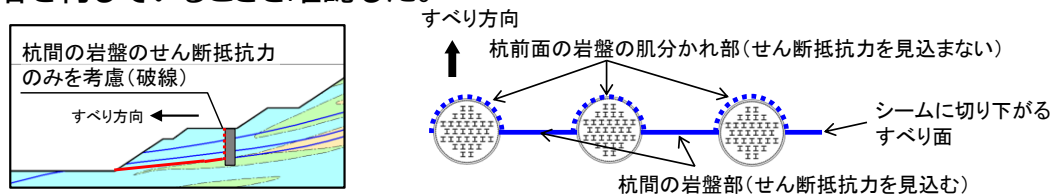
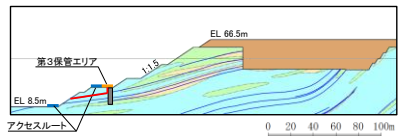
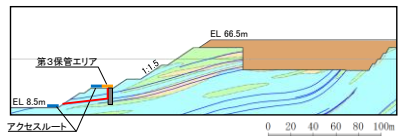


図7 ①-①'断面の杭間隔等（イメージ図）



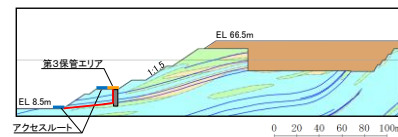
基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	3.37
Ss-N <sub>1</sub>	3.71
Ss-N <sub>2</sub>	3.77

【B26シームを通る杭の肌分かれを想定したすべり面】



基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	3.10
Ss-N <sub>1</sub>	3.12
Ss-N <sub>2</sub>	3.53

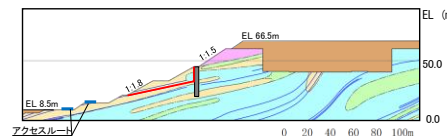
【B23+24シームを通る杭の肌分かれを想定したすべり面】



基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	7.09
Ss-N <sub>1</sub>	8.58
Ss-N <sub>2</sub>	7.97

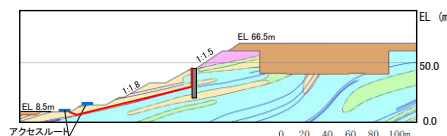
【B21シームを通過して法尻に抜ける杭の肌分かれを想定したすべり面】

①-①'断面



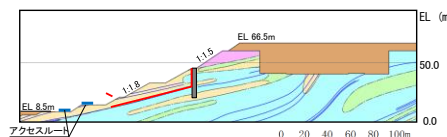
基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	2.64
Ss-N <sub>1</sub>	3.18
Ss-N <sub>2</sub>	3.84

【B23・24シームを通る杭の肌分かれを想定したすべり面】



基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	2.32
Ss-N <sub>1</sub>	2.78
Ss-N <sub>2</sub>	3.06

【B21・22シームを通り法尻に抜ける杭の肌分かれを想定したすべり面】



基準地震動 S s	すべり安全率
Ss-D	2.44
Ss-N <sub>1</sub>	2.86
Ss-N <sub>2</sub>	3.21

【B21・22シームを通り法尻に抜ける杭の肌分かれを想定したすべり面】

②-②'断面

【凡例】

- C<sub>1</sub>級岩盤 (Blue)
- C<sub>2</sub>級岩盤 (Green)
- C<sub>3</sub>級岩盤 (Yellow)
- 埋戻土、盛土 (Brown)
- 抑止杭 (Grey)
- D級岩盤 (Pink)
- シーム (Blue line)
- 最小すべり安全率のすべり面 (Red line)

図8 杭の断面配置の妥当性確認結果  
(杭前面における岩盤の肌分かれを想定したすべりの検討)

## 5. 埋戻部前面での肌分かれを想定したケースにおける評価結果

- すべり安全率が厳しくなったケースに対して，埋戻部前面での肌分かれを想定したケースとして，すべり安全率算定時に埋戻土のすべり面を考慮しない評価を実施した。
- その結果，すべり安全率は評価基準値1.0に対し余裕を有しており，安定性を有することを確認した。

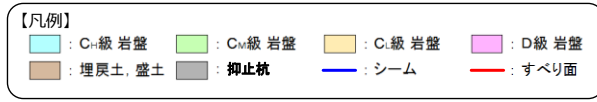
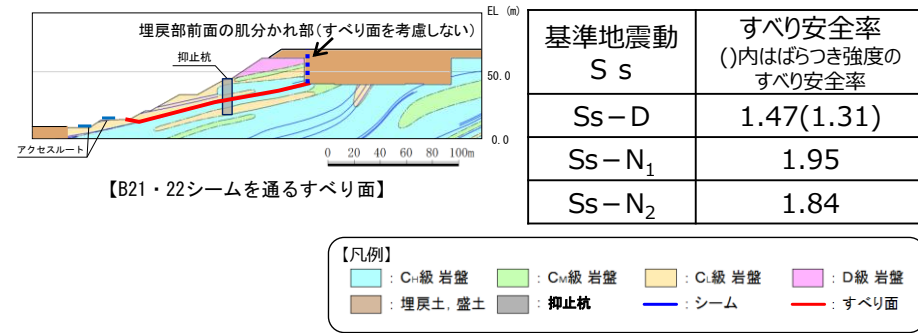
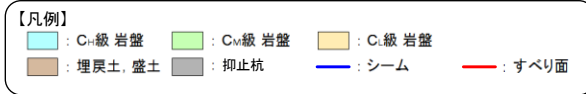
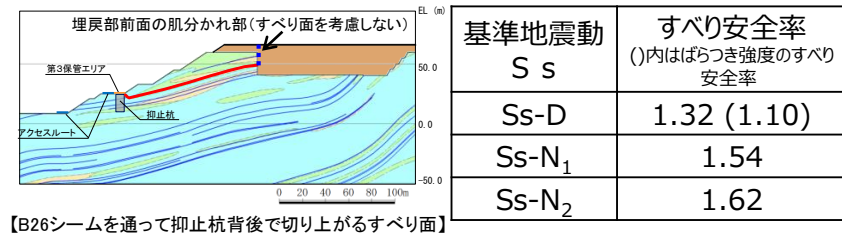
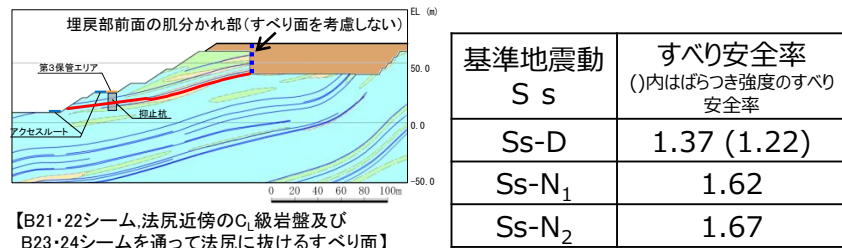
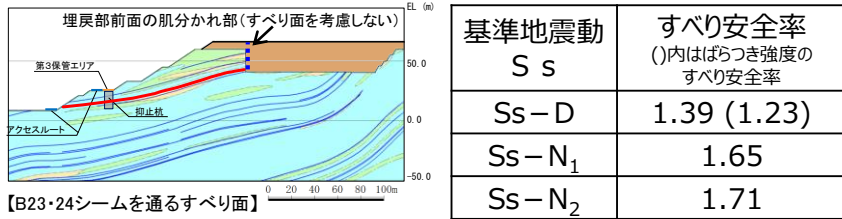


図10 ②-②'断面の評価結果  
(埋戻部前面での肌分かれを想定したケース)

図9 ①-①'断面の評価結果  
(埋戻部前面での肌分かれを想定したケース)

## 6. 抑止杭周辺地盤の健全性照査

### 〔岩盤の引張強度の設定〕

- 地盤工学会基準「JGS3551:2020 岩盤の原位置一軸引張り試験方法」と同じ方法を用い、図11に示す試験装置及び図12に示す位置において、 $C_M$ 級及び $C_H$ 級の黑色頁岩を対象に、原位置引張試験を実施した。
- 原位置引張試験により得られた引張強度 $0.13\text{N/mm}^2$ を区間Ⅰ及び区間Ⅱの斜面の岩盤の引張強度に設定する。
- なお、以下の理由により、当該試験結果は区間Ⅰ及びⅡに適用できると考えられる。
  - ・ 区間Ⅰ及び区間Ⅱの動的解析の結果、引張応力が発生する範囲は、概ね $C_H$ 級の凝灰岩及び頁岩と凝灰岩の互層であり、試験対象と同等の岩級かつ同一層準である。(図13参照)
  - ・ 試験対象の黑色頁岩は、葉理・層理が発達する層状岩盤であり、層理面に平行に薄く剥げやすい性質（へき開性）を有するため、引張応力が発生した凝灰岩及び頁岩と凝灰岩の互層に比べ、引張強度が低いと考えられる。

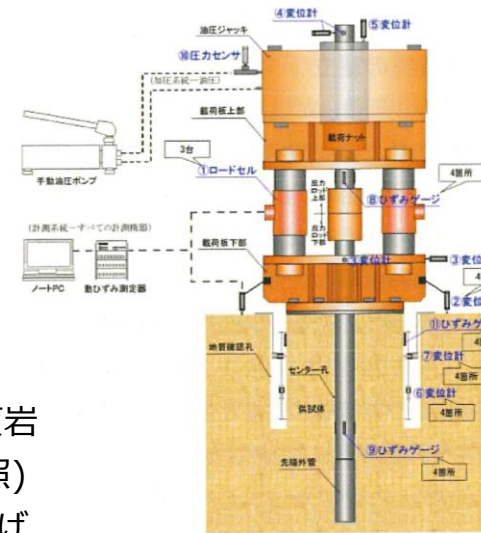


図11 試験装置の概要

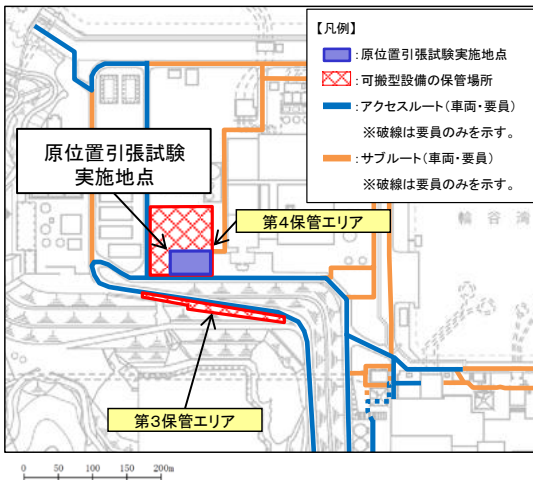


図12 原位置引張試験位置図

表1 引張試験結果

供試体名	引張強度 $\text{N/mm}^2$
MT-2	0.08
MT-3	0.14
MT-4	0.15
MT-5	0.15
平均値	0.13

注：MT-1は、供試体全体に連続する割れ目が分布しており、引張強度の測定不可となったため、未掲載。

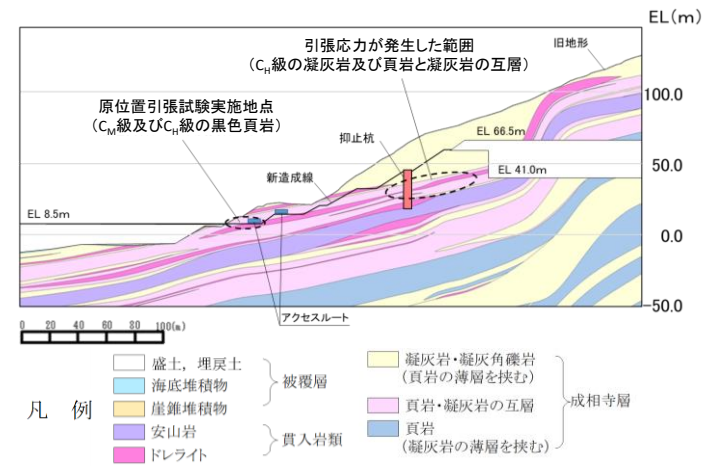


図13 試験位置周辺の地質断面図 (②-②'断面)

## 〔抑止杭周辺地盤の健全性照査結果〕

- ①－①'断面及び②－②'断面において、抑止杭周辺の地盤の局所安全係数分布図を以下に示す。
- ①－①'断面の杭根入れ部周辺には、せん断強度に達した要素及び引張応力が発生した要素が認められず、健全性を確保している。
- ②－②'断面の杭根入れ部周辺において、引張強度に達した要素は局所的かつ散在的である。また、杭根入れ部周辺の引張強度に達した要素を通るすべりの安全率を算定した結果、2.52であり、十分な余裕があることを確認した。よって、杭根入れ部は水平支持力を有していると評価した。

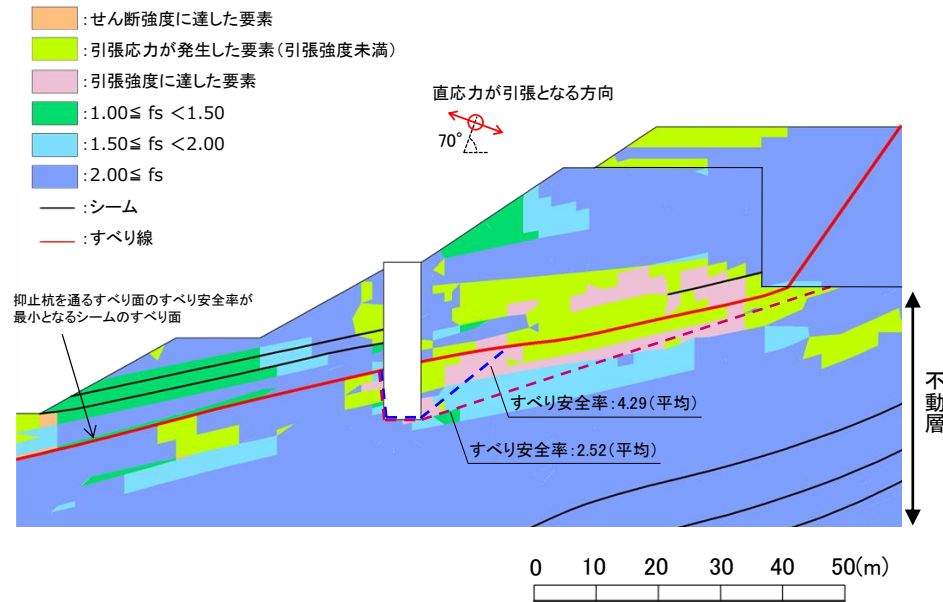
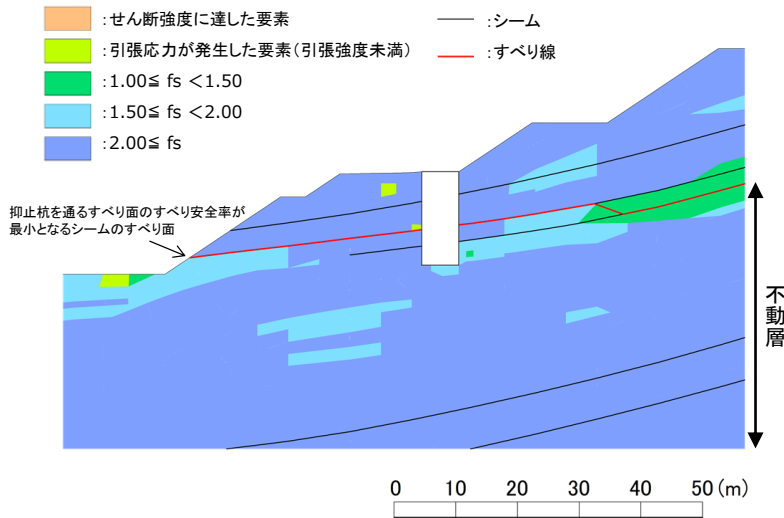


図14 抑止杭周辺地盤の健全性照査結果（①－①'断面）  
（ $S_s - D \cdot 8.96$ 秒、抑止杭を通るすべり面のすべり安全率が最小となる地震動及び時刻）

図15 抑止杭周辺地盤の健全性照査結果（②－②'断面）  
（ $S_s - D \cdot 8.58$ 秒、抑止杭を通るすべり面のすべり安全率が最小となる地震動及び時刻）



## 7. 対策工（抑止杭）を設置した斜面の抑止杭間の岩盤の健全性

〔杭間隔の考え方〕

- 杭の間隔については、表 2 に整理した文献調査を踏まえ、必要抑止力を満足するよう杭直径の2倍程度に設定した。
- 当該抑止杭は大口径（ $\phi 6m$ ）の深礎杭であるため、杭間隔が12m～17.5m（図16参照）と大きく、杭間の岩盤が中抜けするおそれがあることから、区間 I, II をモデル化した3次元静的 F E M解析により、杭間及び杭周辺の岩盤の評価を行う。

表 2 杭間隔の考え方に係る文献調査結果

文献	記載内容
斜面上の深礎基礎設計施工便覧（公益社団法人日本道路協会、2012年）	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭間隔が基礎径の2倍程度未満となると、支持地盤が掘削時の影響により隣接基礎の周面を緩め、地盤抵抗の減少や斜面の不安定化のおそれがあるため、最小中心間隔は基礎径の2倍程度とするのがよいとしている。</li> </ul>
最新斜面・土留め技術総覧（最新斜面・土留め技術総覧編集委員会、1991年）	<ul style="list-style-type: none"> <li>標準杭間隔として、移動層の厚さ20m以上では杭の間隔は4m以下を目安とする。</li> <li>上記の数値の他に杭の直径の8倍以内を杭間隔の一応の目安とすることができる。</li> </ul>
斜面崩壊抑止杭に関する模型実験（技術研究所報 No.19, 佐藤工業（株）、1993年）	<ul style="list-style-type: none"> <li>風化まさ土地帯の抑止杭を対象とし、大型一面せん断機による模型実験により、杭間隔と中抜け現象及び杭の負担荷重の相関性について考察した。</li> <li>杭間隔を変えて実験を行った結果、8D以上になると中抜けしやすくなることが分かったため、適切な杭間隔として8D以下が一つの目安になることが分かった。</li> <li>中抜け現象は、移動層と不動層の層境の移動層底部の土塊が杭間をトコロテン状にすべり抜け、地表面付近の土塊も一体にすべり抜けようとし、手前にせり出す際の亀裂の発生により、崩壊している現象と考えられる。</li> </ul>
室内模型実験による地すべり抑止杭の抑止機構に関する考察（足立ほか、1988年）	<ul style="list-style-type: none"> <li>砂質地盤の斜面に設置された抑止杭を対象とした模型実験により、地盤の移動状態、アーチ効果と杭配置との関係を検討している。</li> <li>一般に、並列杭前面にはアーチ効果が期待でき、上流側からの作用応力が杭体に集中し、杭間における作用応力が小さくなる。</li> <li>引張領域に配置された抑止杭でも、杭間隔が8D未満であれば、中抜け現象に対する抑止になることが分かった。</li> </ul>

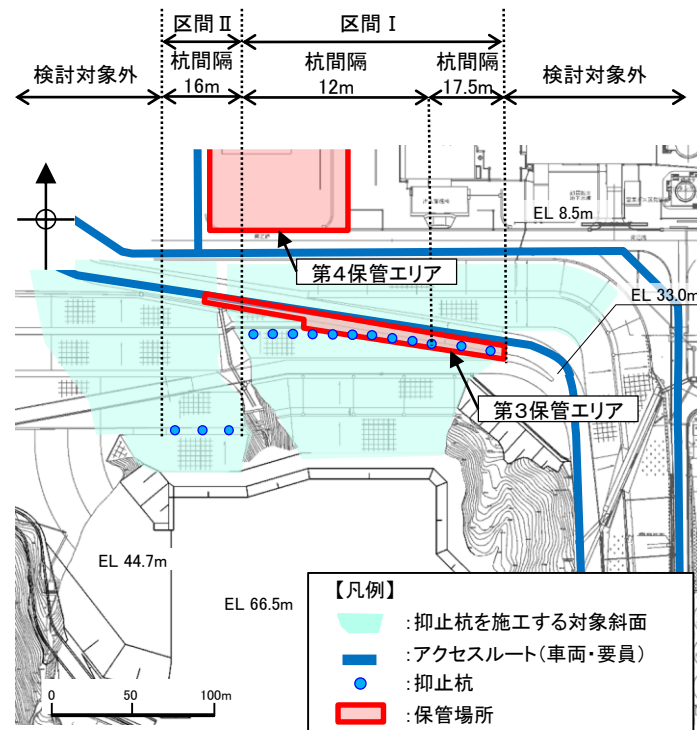


図16 抑止杭配置平面図

〔中抜け現象の発生に係る判定基準の設定〕

- 中抜け現象の発生に係る判定基準について、表3のとおり「室内模型実験による地すべり抑止杭の抑止機構に関する考察（足立ほか、1998年）」を踏まえて整理した。

表3 文献を踏まえた中抜け現象の発生に係る判定基準

文献の内容	判定基準
・8D以上ではアーチ効果は見られず、中抜け現象が発生する。	①杭間隔が8D未満であることを確認する。
・アーチ効果の有無は降下床の降下量により変化する。ある程度の降下量まではアーチ効果を発現するが、それ以上ではアーチは徐々に切れ始め、中抜け現象が発生する。	②岩盤を線形弾性体でモデル化したFEM解析により、アーチ効果が認められ、中抜け現象に移行していないことを確認する。
・アーチ効果の支持部が不安定な場合、アーチ効果は発揮されにくい。	③図18に示す杭間部、アーチ部及び支持部付近の岩盤が健全であることを確認する。局所安全係数分布図により、当該範囲の岩盤に引張強度及びせん断強度に達した要素が発生していないことを確認する。
・杭周辺の流動領域（図17の領域①）の変形を止めれば、抑止効果は大きくなる。	

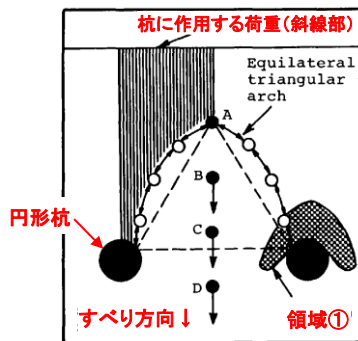


図17 アーチ効果のメカニズム

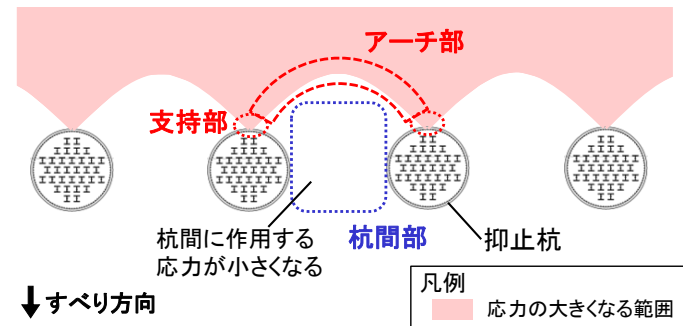


図18 岩盤の局所安全係数分布図において確認する範囲

## 〔3次元 F E M解析の解析条件〕

- 中抜け現象の判定基準を確認するため3次元静的 F E M解析を実施する。
- 解析条件
  - 図19及び図20のとおり、各区間を F E Mでモデル化した3次元静的 F E M解析を実施する。
  - 2次元動的 F E M解析と同様、岩相、岩級、シーム及び速度層をモデル化する。
  - 区間 I については斜面高さが相対的に高く、すべり土塊量が大きくなる範囲をモデル化する。
  - 常時応力：2次元常時応力解析から得られる常時応力を2次元場から3次元場に展開。
  - 地震時応力：2次元動的 F E M解析における最小すべり安全率時刻の加速度を抽出し、静的震度として入力。

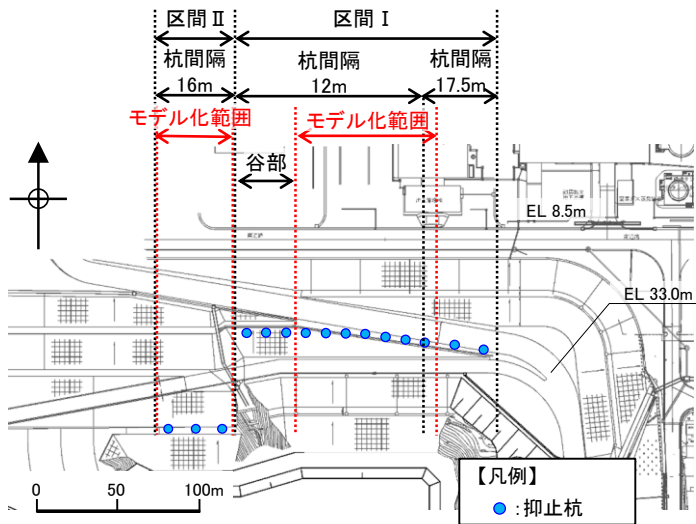


図19 モデル化範囲

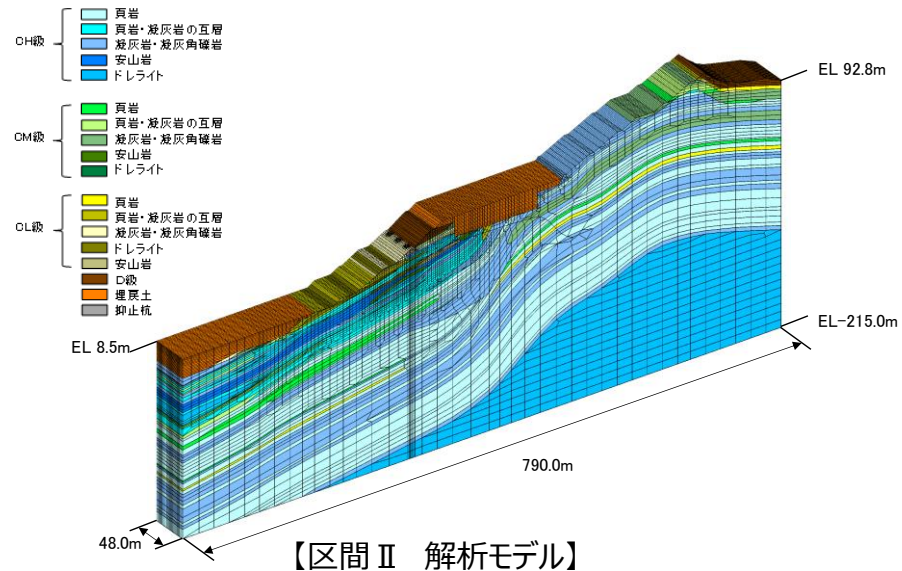
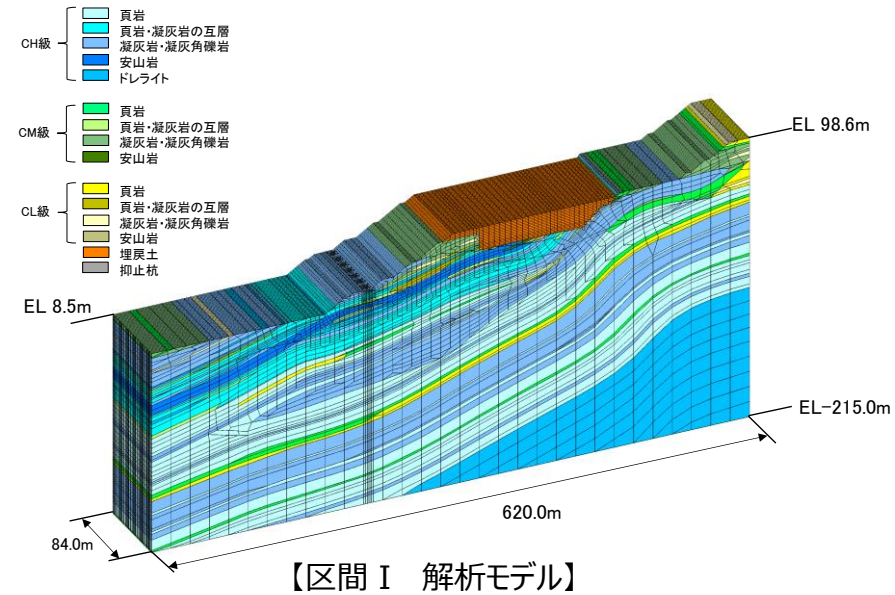


図20 3次元解析モデル

〔3次元静的 F E M解析の結果（区間 I）（1/2）〕

➤ アーチ効果の有無

- 図22, 図23に区間 I の抑止杭周辺の最大せん断応力図及び最大圧縮応力図を示す。杭上流側では、アーチ状に応力が大きくなるアーチ効果が認められることから、杭間の岩盤は中抜け現象に移行していないと評価する。

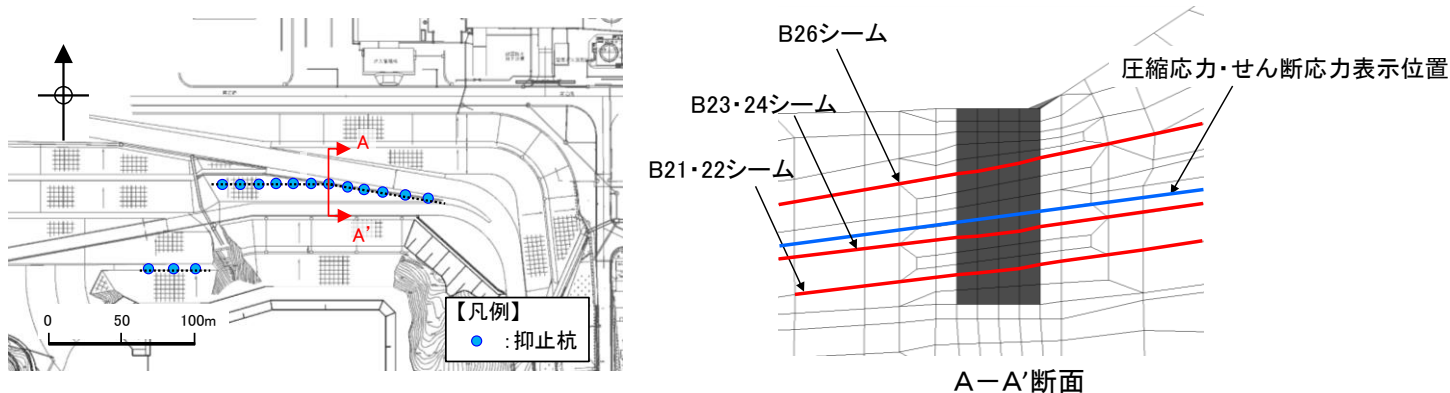


図21 抑止杭周辺の応力表示位置（区間 I）

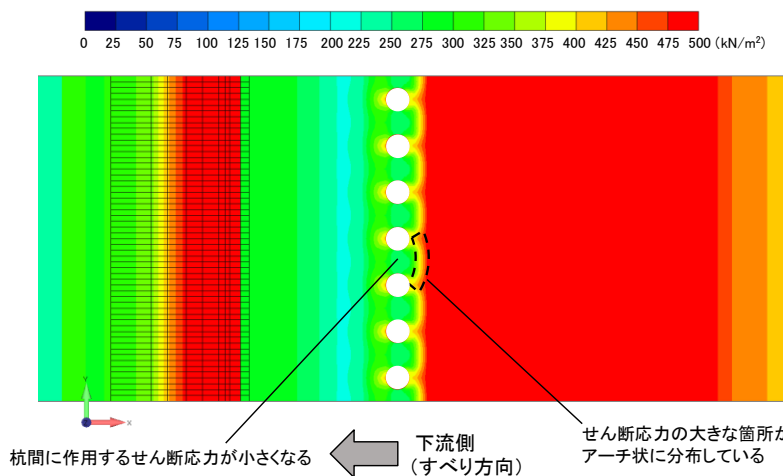


図22 最大せん断応力図（区間 I）

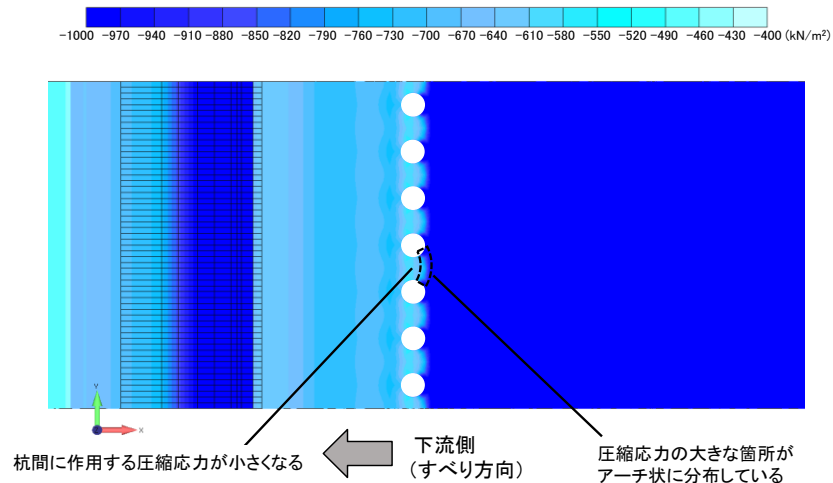


図23 最大圧縮応力図（区間 I）

# 【1-11】保管・アクセス（抑止杭）（12/15）

〔3次元静的 F E M解析の結果（区間 I）（2/2）〕

- 杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤の健全性
  - 引張応力が発生した要素が抑止杭周辺の岩盤に認められるため，「6. 抑止杭周辺地盤の健全性照査〔抑止杭周辺地盤の健全性照査結果〕」で設定した引張強度 $0.13\text{N/mm}^2$ を用い，岩盤の健全性の評価を行う。
  - 杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤には，引張強度及びせん断強度に達した要素は発生していないことから，これらの岩盤は健全であることを確認した。

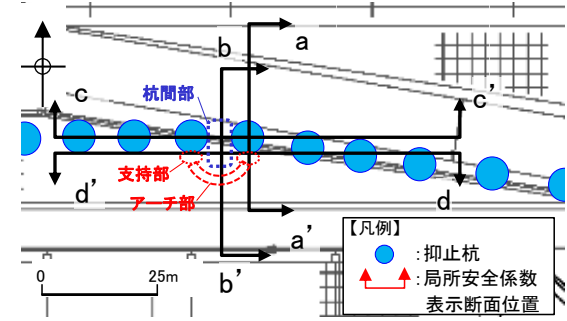


図24 局所安全係数表示位置（区間 I）

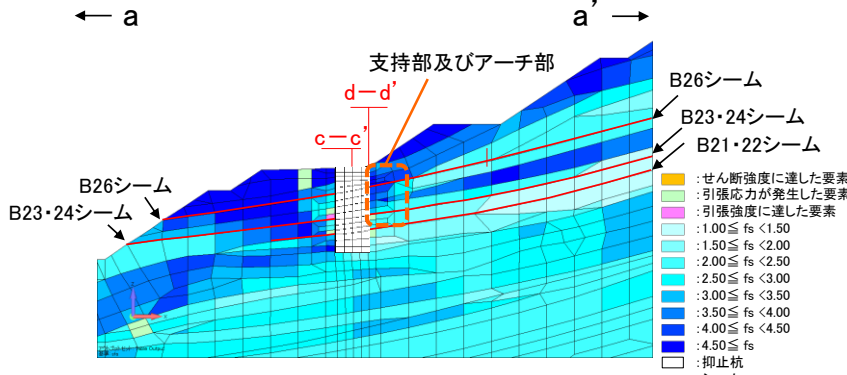


図25 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（a-a'断面）

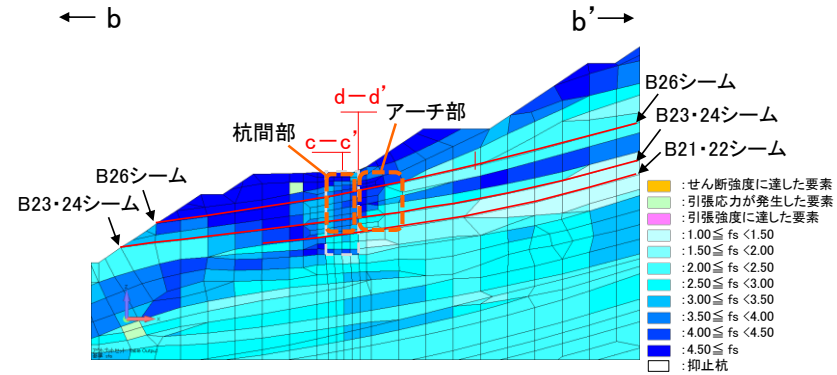


図26 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（b-b'断面）

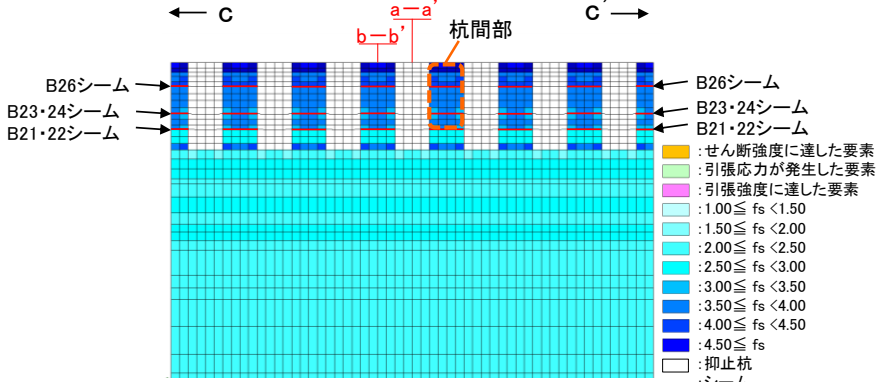


図27 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（c-c'断面）

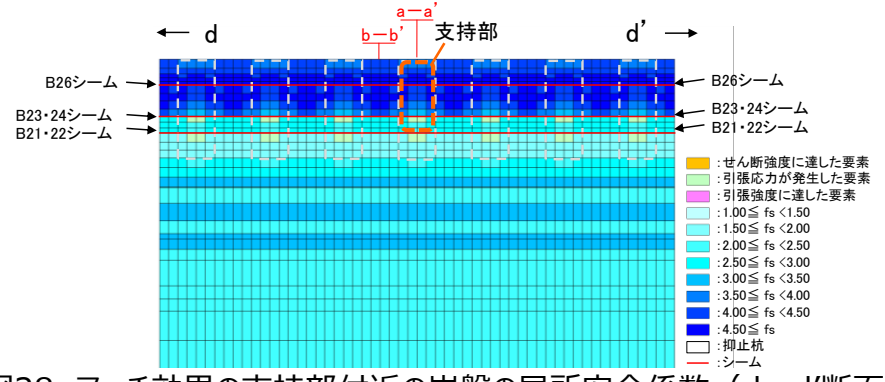


図28 アーチ効果の支持部付近の岩盤の局所安全係数（d-d'断面）

## 〔3次元静的 F E M解析の結果（区間Ⅱ）（1/2）〕

### ➤ アーチ効果の有無

- 図30, 図31に区間Ⅱの抑止杭周辺の最大せん断応力図及び最大圧縮応力図を示す。杭上流側では、アーチ状に応力が大きくなるアーチ効果が認められることから、杭間の岩盤は中抜け現象に移行していないと評価する。

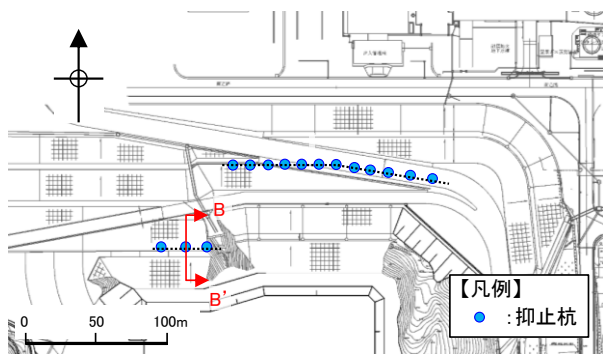
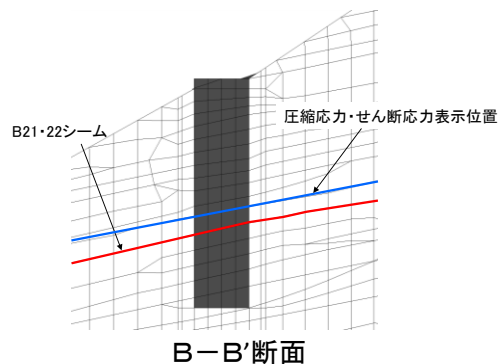


図29 抑止杭周辺の応力表示位置（区間Ⅱ）



B-B'断面

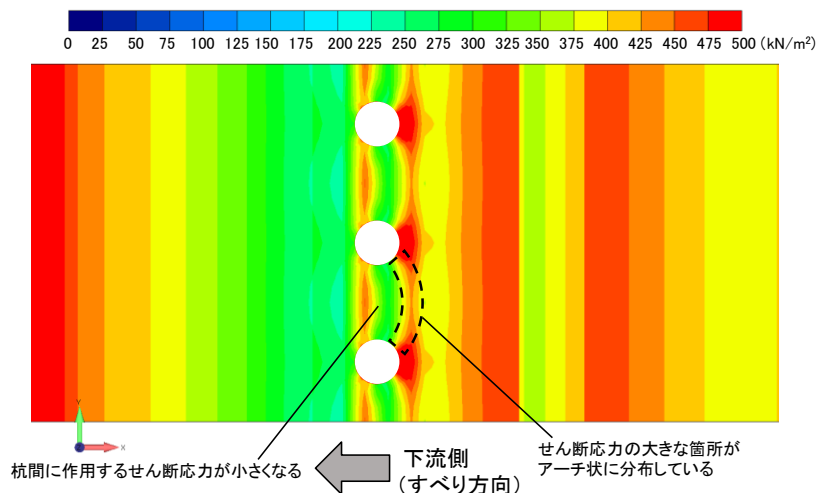


図30 最大せん断応力図（区間Ⅱ）

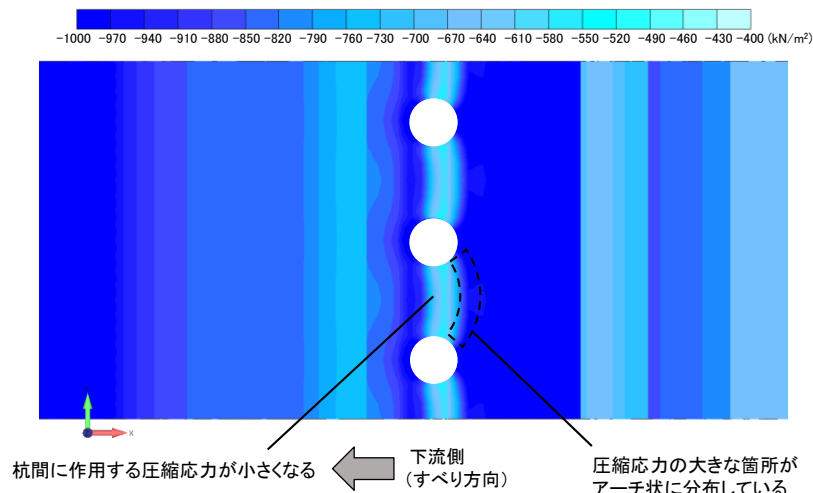


図31 最大圧縮応力図（区間Ⅱ）

# 【1-11】保管・アクセス（抑止杭）（14/15）

〔3次元静的 F E M解析の結果（区間Ⅱ）（2/2）〕

- 杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤の健全性
  - 引張応力が発生した要素が杭間の下部及び抑止杭より上流側の岩盤に認められるため，区間Ⅰと同様に，引張強度 $0.13\text{N/mm}^2$ を用い，岩盤の健全性の評価を行う。
  - 杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤には，引張強度及びせん断強度に達した要素は発生していないことから，これらの岩盤は健全であることを確認した。

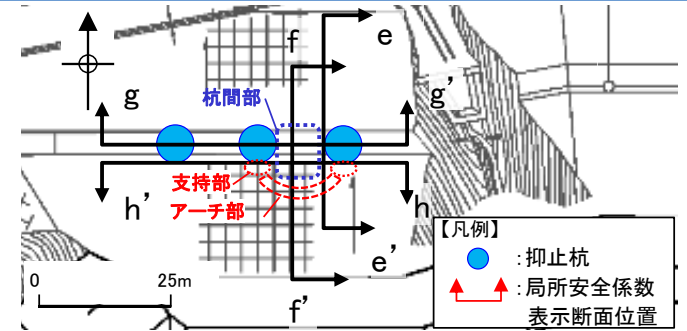


図32 局所安全係数表示位置（区間Ⅱ）

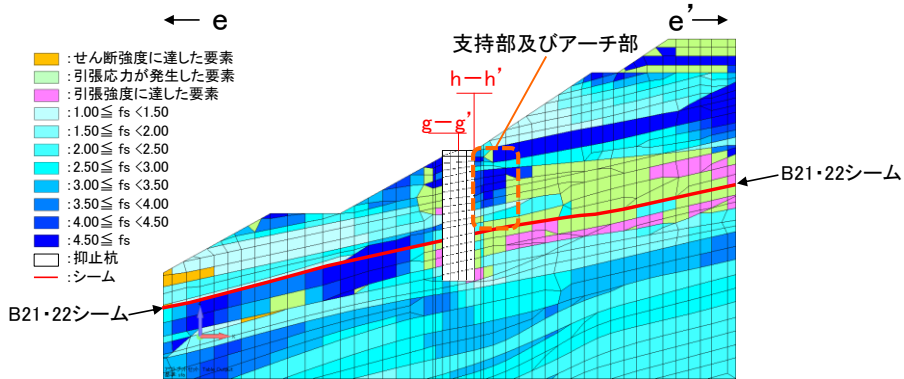


図33 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（e-e'南北断面）

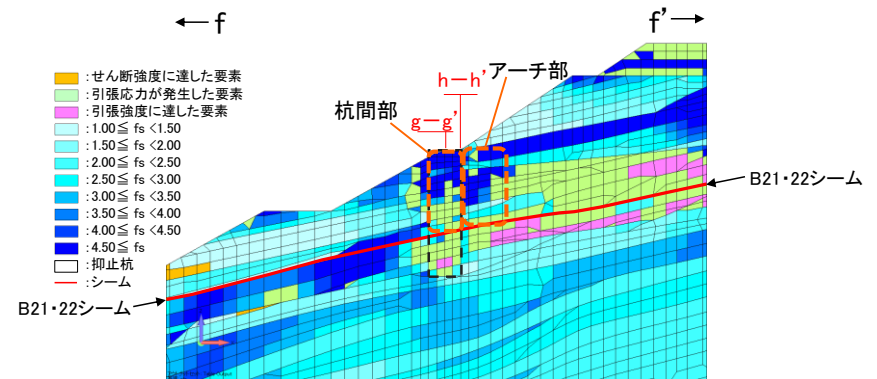


図34 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（f-f'断面）

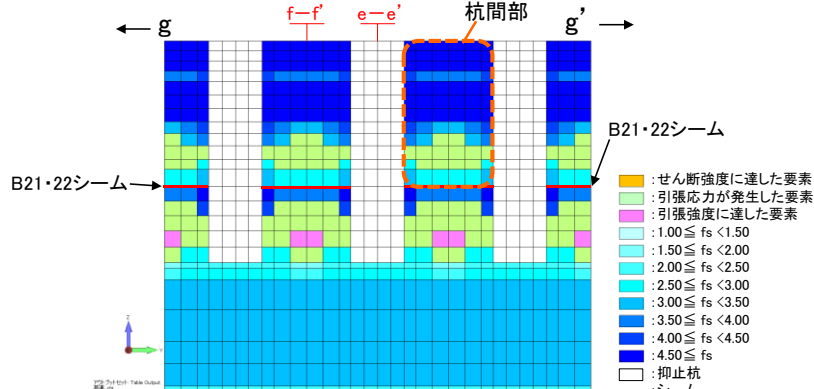


図35 抑止杭周辺の岩盤の局所安全係数（g-g'断面）

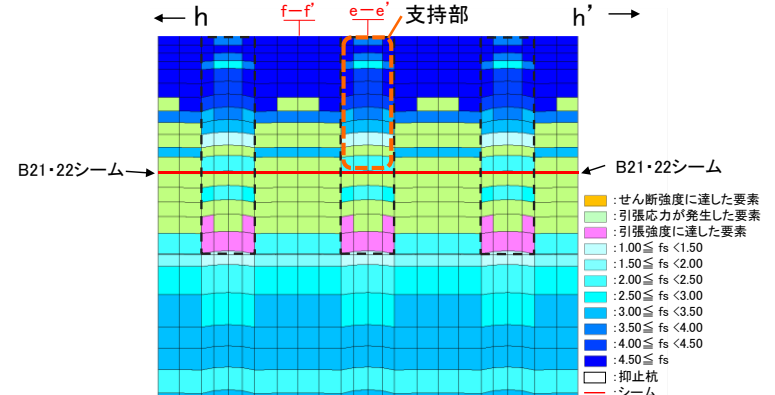


図36 アーチ効果の支持部付近の岩盤の局所安全係数（h-h'断面）

〔対策工（抑止杭）を設置した斜面の抑止杭間の岩盤の健全性〕

- 3次元静的 F E M解析の結果，表4のとおり，区間Ⅰ及び区間Ⅱにおける岩盤の応力状態からアーチ効果が認められ，杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤は健全であることから中抜け現象の発生に係る判定基準を満たすことを確認した。
- 以上のことから区間Ⅰ，区間Ⅱともに抑止杭の杭間を中抜けするおそれはないと評価する。

表4 中抜け現象の発生に係る判定基準及び判定結果

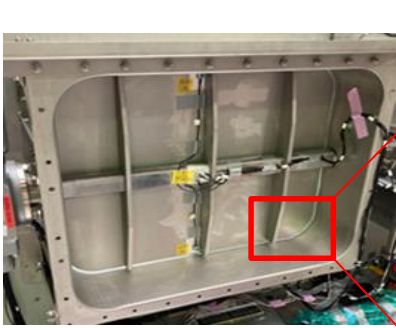
判定基準	判定結果
①杭間隔が8D未満であることを確認する。	①区間Ⅰの杭間隔は12m（2D），もしくは17.5m（約2.9D）であり，区間Ⅱの杭間隔は16m（約2.7D）であることから杭間隔が8D未満であることを確認した。
②岩盤を線形弾性体でモデル化した F E M解析により，アーチ効果が認められ，中抜け現象に移行していないことを確認する。	②杭周辺の応力状態から，杭に応力が集中し，杭間の応力が小さくなるアーチ効果が認められ，杭間の岩盤は中抜けに移行していないことを確認した。
③杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤が健全であることを確認する。局所安全係数分布図により，当該範囲の岩盤に引張強度及びせん断強度に達した要素が発生していないことを確認する。	③岩盤の局所安全係数分布図により杭間部，アーチ部及び支持部付近の岩盤には，引張強度及びせん断強度に達した要素は認められず，健全であることを確認した。



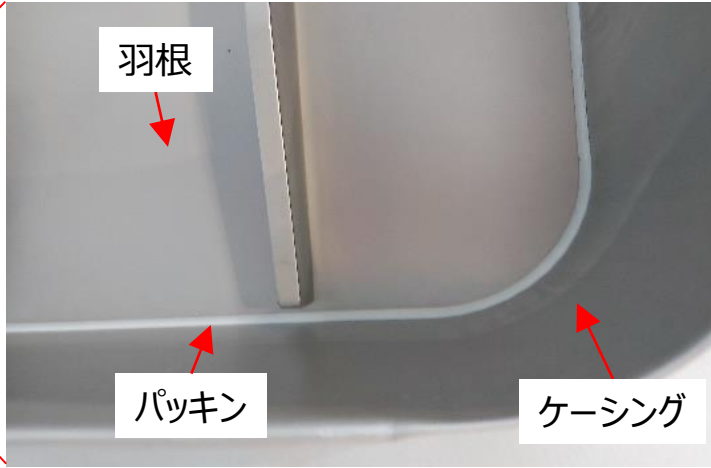
## 【1-12】ブローアウトパネル閉止装置（1/3）

- 指摘事項（第1036回審査会合（2022年3月29日））

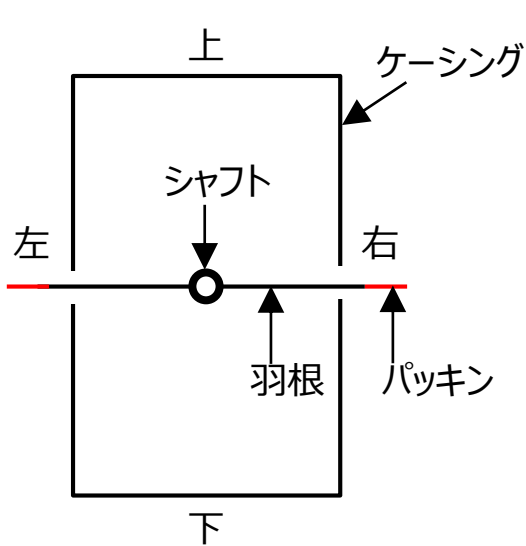
BOP 閉止装置の気密性能試験について漏えい量としては小さく問題はないが、羽根開→羽根閉状態の気密試験で、2連ダンパでは増加傾向、3連ダンパでは下降傾向となっており、2連ダンパと3連ダンパで気密性能が異なるように見えるため、今回の試験データの評価について、データのばらつきを踏まえた上で、その妥当性を説明すること。
- 回答
  - BOP閉止装置のシール方法の概要について図1に示す。BOP閉止装置は、羽根を閉めることで羽根の淵に取り付けられた柔軟性を有したパッキン（シリコンタイプ）がケーシングに押し付けられることでシールする構造となっている。なお、ケーシングの開口は全面開口の構造であり、上下どちらかのみには圧力が加わることはなく、ダンパの加圧側の全面に均一に圧力が加わる構造となっている。
  - 表1に示すとおり、加振後の漏えい量は加振前の漏えい量と比較して増加あるいは減少しているもの（例：ダンパ2Bでは、加振倍率1.0倍及び羽根開状態で加振した場合の漏えい量が増加していたが、加振倍率 $\alpha$ 倍及び羽根開状態で加振した場合の漏えい量は減少していた。）が混在しており、一定の傾向は確認できない。
  - このため、漏えい量のばらつきは加振に起因するものではなく、加振前又は気密性能試験前に行う開閉動作によって、柔軟性を有したパッキンとケーシングの圧着状態が変わるために発生したものと考える。



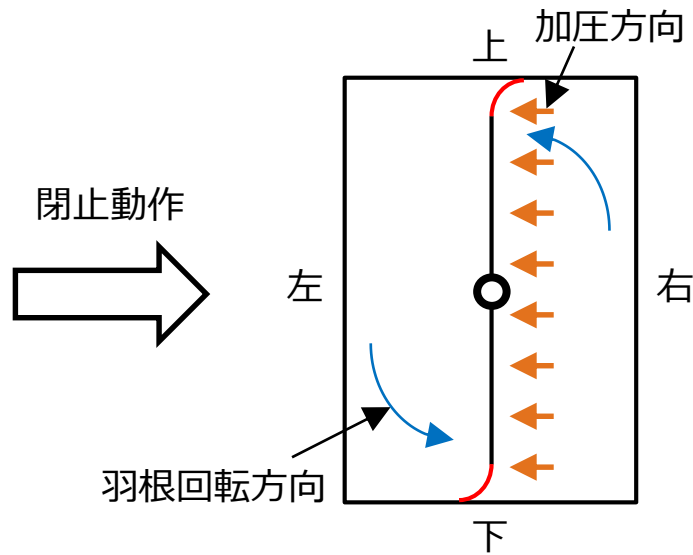
(ダンパ閉止時断面概要の「左」からみた写真)



- 羽根の淵に取り付けられたパッキン（シリコンタイプ）が、羽根を閉めることでケーシングに押し付けられる構造。
- パッキンは柔軟性があり、閉止の都度、同じようにはケーシングに圧着されず、漏えい量にばらつきはあるものの、許容漏れ量に比べれば非常に小さく問題はない。



ダンパ開放時断面概要



ダンパ閉止時断面概要

左：建物屋内側  
右：建物屋外側（加圧側）

- 羽根の回転により閉止してシールするため、上下のパッキンでケーシングへの押し付けられ方が対称関係となるが、左右は全面開口の構造であり、上下どちらかのみには圧力が加わることはなく、ダンパの加圧側の全面に均一に圧力が加わるため、気密性に影響はない。

図1 シール方法の概要

## 【1-12】ブローアウトパネル閉止装置（3/3）

表 1 加振後の気密性能試験

試験対象	加振倍率	加振時の羽根開閉状態	ダンパ*2	通気量@63Pa (m <sup>3</sup> /h・m <sup>2</sup> )	加振による通気量の増減	備考
2連ダンパ 事前確認	-	-	2A		-	加振前に羽根を閉止して試験
			2B		-	
2連ダンパ	1.0倍	開	2A		変化なし	加振後に羽根を閉止し試験
			2B		通気量増加	
	閉	2A	変化なし		羽根閉止状態での加振後に試験	
		2B	通気量増加			
	α倍*1	開	2A		通気量増加	加振後に羽根を閉止し試験
			2B		通気量減少	
閉	2A	変化なし	羽根閉止状態での加振後に試験			
	2B	通気量増加				
3連ダンパ 事前確認	-	-	3A		-	加振前に羽根を閉止して試験
			3B		-	
			3C	-		
3連ダンパ	1.0倍	開	3A	変化なし	加振後に羽根を閉止し試験	
			3B	通気量増加		
			3C	通気量増加		
		閉	3A	変化なし	羽根閉止状態での加振後に試験	
			3B	通気量減少		
			3C	通気量増加		
	α倍*1	開	3A	変化なし	加振後に羽根を閉止し試験	
			3B	変化なし		
			3C	通気量増加		
		閉	3A	変化なし	羽根閉止状態での加振後に試験	
			3B	通気量減少		
			3C	通気量増加		

注記\*1：入力倍率(α)については、模擬地震波の入力レベル1.0倍の振動台応答の実績から、X(NS)=1.15倍、Y(EW)=1.20倍、Z(UD)=1.25倍

\*2：ダンパ1台毎に漏えい量を確認しているため、表中は2連ダンパは2A/2B、3連ダンパは3A/3B/3Cとダンパ1台毎の表記とする。

\*3：流量計の検出限界未満の漏えい量

■ 指摘事項（第1036回審査会合（2022年3月29日））  
トーラス室については，吸込口の位置変更後の吸込箇所が「トーラス室上部ハッチ（開口部）」だけとなり，位置変更前のトーラス室内に吸込口があったときよりもトーラス室の合計の開口面積が小さくなることから，吸込口の位置変更前/後におけるトーラス室の負圧達成への影響について説明すること。

- 回答
- 非常用ガス処理系起動による規定負圧到達時間については，図 1 に示すとおり，吸込口の位置変更によらず約5分であり，開口総面積減少による規定負圧達成時間への影響はない。
  - また，規定負圧達成後の負圧維持についても，吸込口位置変更前後で規定負圧到達後の圧力挙動には大きな差がなく，開口総面積減少による負圧維持への影響はない。
  - なお，図 1 に示す圧力挙動は，原子炉棟 4 階の差圧計による指示値を示しているが，原子炉棟内で生じた圧力変動は大物搬入口等を介し遅滞なく均圧されるため，検出位置によらず，トーラス室を含む原子炉棟全体と外気との差圧を確認可能である。

吸込口位置変更前	吸込口位置変更後

図 1 非常用ガス処理系の吸込口変更前後の圧力挙動比較

■ 指摘事項（第1036回審査会合（2022年3月29日））  
非常用ガス処理系吸込口の位置変更後の吸込空気の温度評価について、吸込口の位置変更が設置変更許可からの変更点であることを踏まえ、健全性に関する説明書の中で位置変更後の吸込空気の温度が非常用ガス処理系の設計温度を超えないことを詳細に説明すること。

## ■ 回答

- 原子炉建物原子炉棟内の環境条件設定では、原子炉棟地上階について、図2に示す温度評価結果を包絡する条件として一律66℃と設定しており、原子炉棟地上階（2階）へ吸込口位置を変更することとしている非常用ガス処理系について、設計温度（66℃）を超える空気を吸引することはない。
- なお、温度評価では、非常用ガス処理系が起動していない無換気状態の条件で温度評価しているが、非常用ガス処理系を起動した場合、非常用ガス処理系により原子炉建物原子炉棟内から排出された空気に相当する量の外気が原子炉建物原子炉棟内にインリークし、この外気により冷却され、環境温度は低下傾向となることから、非常用ガス処理系起動に伴う環境条件への影響はない。

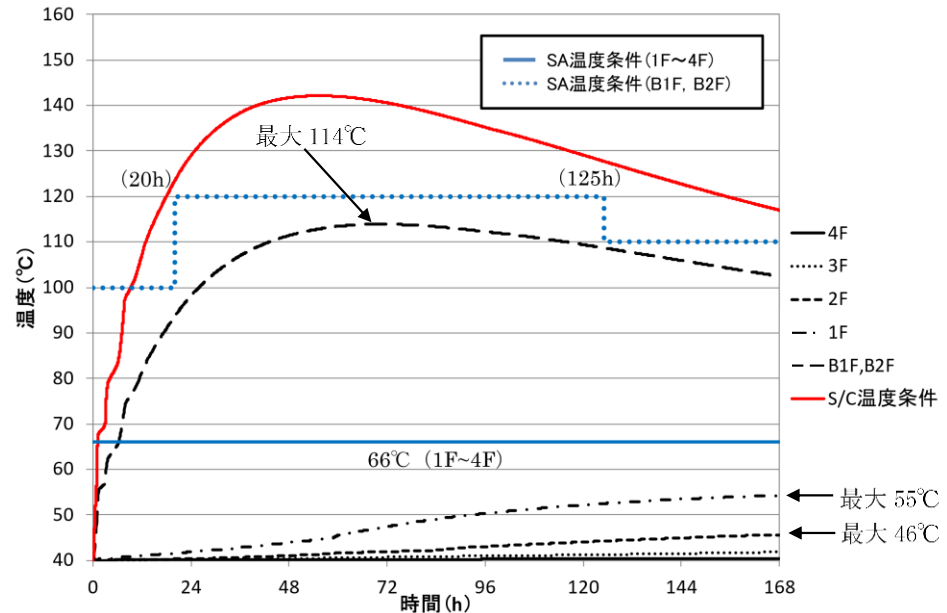


図2 温度評価結果

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (1/8)

## 1. アーク火災発生メカニズム

- 電気盤において、短絡によりアーク放電が発生すると、高温ガスが発生し、急激な圧力・温度上昇に伴うエネルギーの放出が発生する（HEAFの発生）。
- 高温ガスはアーク放電の発生箇所に滞留し、高温ガスから可燃物にエネルギーが伝搬する。
- 可燃物に、あるしきい値以上のエネルギーが印加されるとアーク火災が発生する。
- アーク火災の発生を防止するため、アーク放電によるエネルギーが、火災発生のしきい値を超えないように、アーク放電の遮断時間を適切に設計することによりHEAF火災対策（以下、「HEAF対策」という）を実施する。

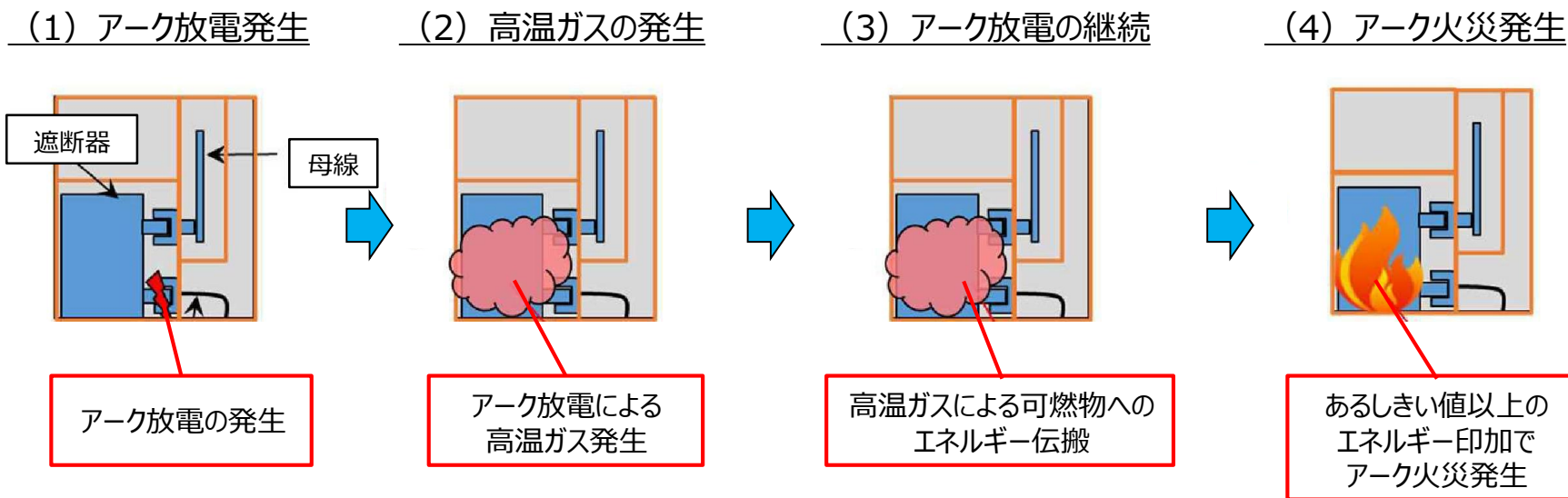
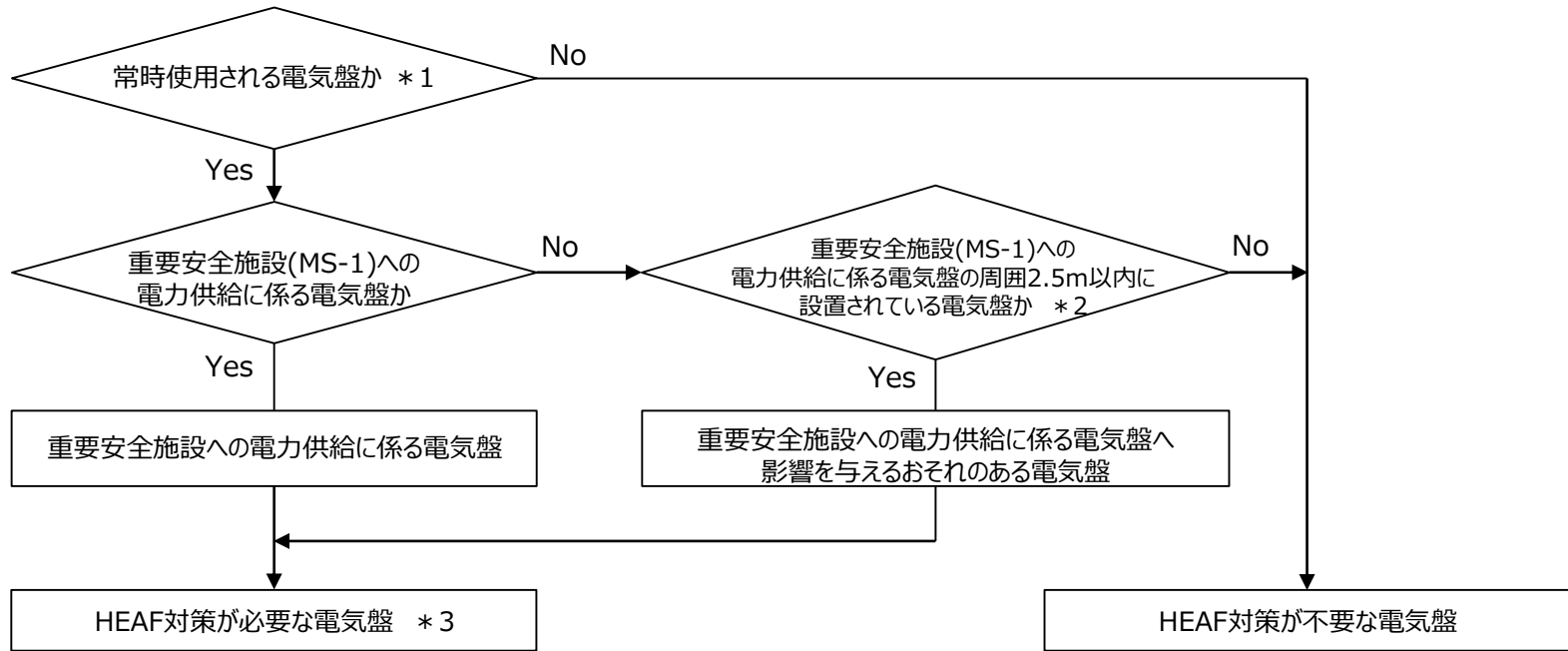


図1 アーク火災発生メカニズム

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (2/8)

## 2. HEAF対策が必要な電気盤

➤ 技術基準規則の解釈に基づき、以下のフローを設定し、HEAF対策が必要な電気盤を抽出した。



- \*1 電線路、主発電機又は非常用電源設備から電気が供給されている電気盤をいう。
- \*2 高エネルギーアーク損傷（HEAF）に係る電気盤の設計に関する審査ガイド（以下「審査ガイド」という）による。
- \*3 短絡等が発生した場合、非常に短時間（0.1秒以下）で電気盤への電力供給を止めることができる場合、適切に遮断されていると判断し、HEAF対策が出来ているものとする（審査ガイドによる）。

図2 HEAF対策が必要な電気盤フロー図

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (3/8)

➤ 抽出フローに従い、HEAF対策が必要な電気盤を選定した結果を下図に示す。

- 【凡例】  
 M/C : メタルクラッド開閉装置  
 L/C : ロードセンタ  
 C/C : コントロールセンタ  
 D/G : 非常用ディーゼル発電機又は  
 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機  
 青色 : 起動変圧器からの給電ライン  
 橙色 : 所内変圧器からの給電ライン  
 緑色 : 予備変圧器からの給電ライン  
 紫色 : D/Gからの給電ライン

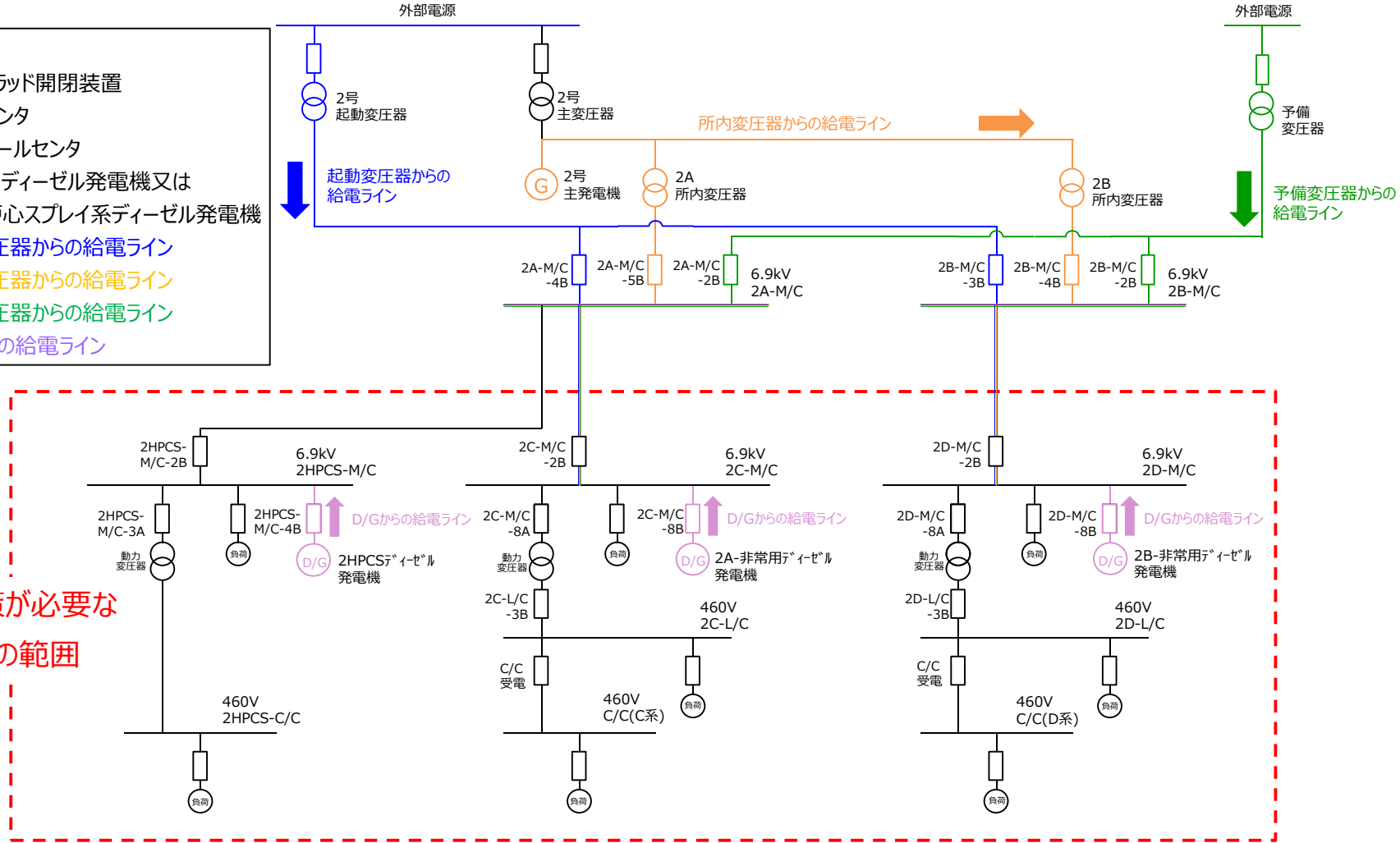


図3 島根2号機 所内電気系統 (概要図)



# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (4/8)

## 3. HEAF試験の実施・評価

- 審査ガイドを踏まえて、表1のとおり、HEAF試験を実施した。

表1 審査ガイドへの対応内容

審査ガイド	対応内容
1. 総則	「目的、適用範囲、用語の定義」のため省略
2. アーク放電を発生させる試験 2.1 電気盤の選定	実際に発電所内で使用されているものと同等の電気盤を選定した。
2.2 短絡電流の目標値	試験時の短絡電流値、印加電圧は、実機プラントで使用している電気盤の三相短絡電流値、定格電圧値を踏まえて設定した。
2.3 HEAF試験に用いる電気回路	HEAF試験は、審査ガイドの付録Aの電気回路と同等の試験回路で実施した。
2.4 測定項目	HEAF試験時に電圧電流波形、熱流束等を測定した。
2.5 アーク放電の発生方法	アーク放電を発生するための導電性針金のワイヤリングを、適切な規格に基づき電気盤の遮断器の受電側及び配電側に施し試験を実施した。
2.6 アーク放電の継続時間	アーク放電の継続時間は、アークエネルギーのしきい値を得るために段階的に設定した。
2.7 HEAF試験の実施	2.1～2.6の対応を行い試験を実施した。
2.8 アークエネルギーの計算	アークエネルギーは試験で測定した電流・電圧から求めたアークパワーをアーク放電の継続時間で積分した値とした。

## 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (5/8)

- 審査ガイドを踏まえて、表2のとおり、アークエネルギーしきい値の評価を実施した。

表2 審査ガイドへの対応内容

審査ガイド	対応内容
3. アーク火災発生の評価 3.1 アーク火災発生の評価の概要	電気盤の目視又は測定した電気盤周囲の熱流束から火災発生を確認している。
3.2 評価に用いる試験データ	試験を実施した一般財団法人電力中央研究所は、公益財団法人日本適合性認定協会から「試験所認定」を取得していることから、評価に用いたデータは、信頼性のある試験に基づくものである。
3.3 アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値に係る評価	アーク火災が発生しないアークエネルギーのしきい値は、HEAF試験において、アーク火災が発生しなかった場合の最大のアークエネルギー値に保守性を考慮して設定した。このアークエネルギー値は、アーク火災が発生したアークエネルギー値を下回っている。
3.4 しきい値に係る解析による評価	しきい値は試験結果から求めており、解析による評価は用いていない。

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (6/8)

## 4. HEAF対策

- 保護継電器等の動作時間を適切に設定し、発生個所の上流で短絡電流を遮断する。

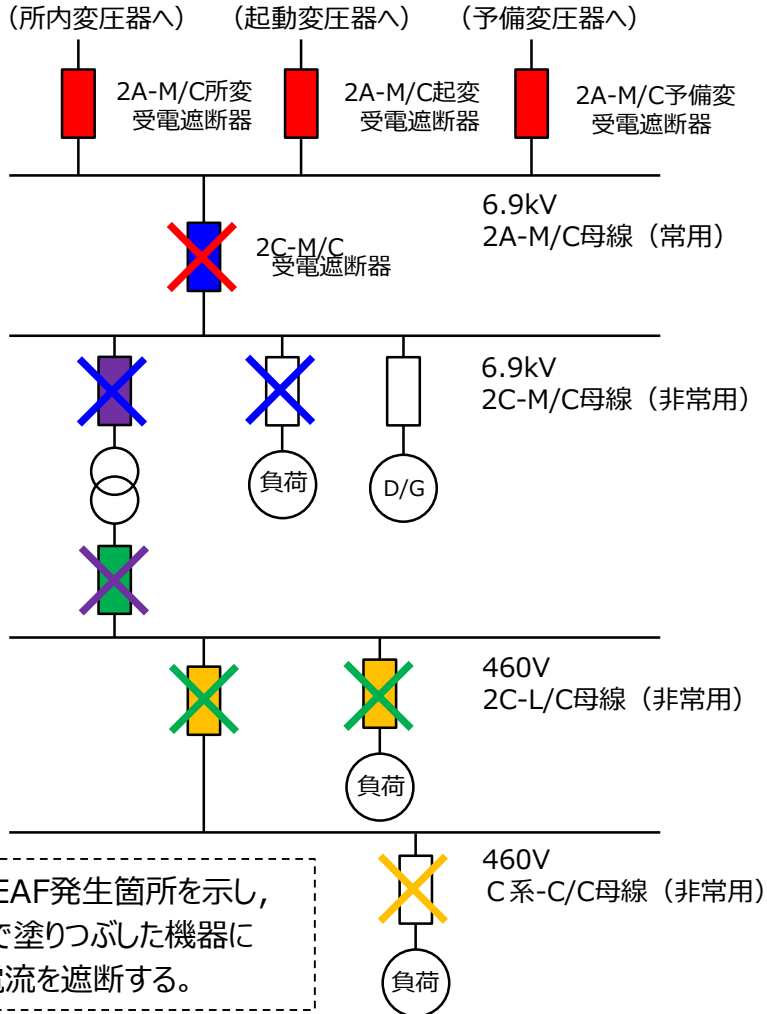


図4 系統給電

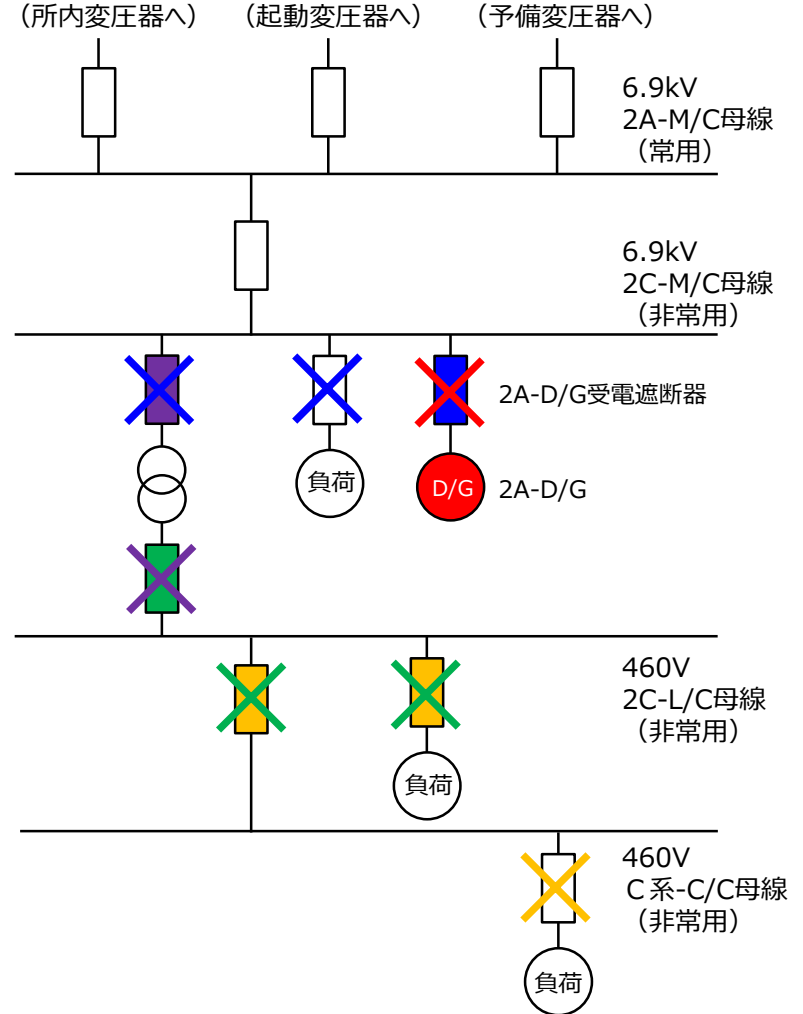


図5 D/G給電

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (7/8)

- D/G受電遮断器でHEAFが発生した場合、速やかに短絡電流を減衰させるため「過電流継電器(51)」に界磁開閉器(消磁コンタクト)\*投入のインターロックを追加する。

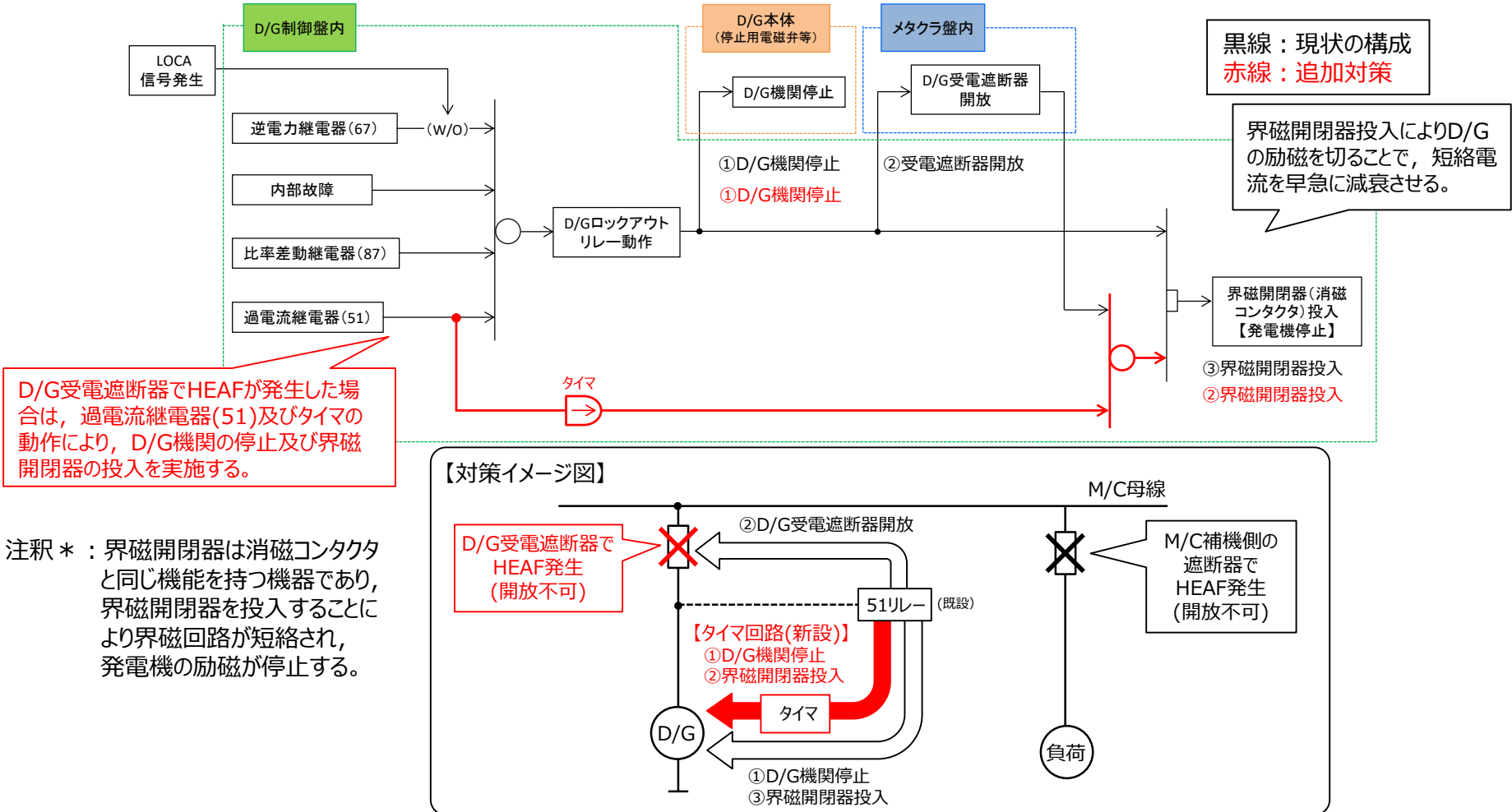


図6 D/Gインターロック概要

# 【2-1】安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策 (8/8)

## 5. 先行審査プラントとの比較

➤ 島根2号機は、先行審査プラント（BWR）と同様、既存の設計思想を変更しない対策とした。

表3 先行審査プラント（BWR,PWR）のHEAF対策（D/Gからの給電時）

先行審査プラント		
<p><b>【BWR】</b></p> <p>黒線：現状の構成 赤線：追加対策</p>	<p>D/G受電遮断器でHEAF発生(開放不可)</p> <p>①D/G受電遮断器開放</p> <p>【タイマ回路（新設）】 ①D/G機関停止 ②(タイマ設定時間経過後) 消磁コンタクト投入</p> <p>51リレー</p> <p>タイマ</p> <p>M/C母線</p> <p>M/C補機側の遮断器でHEAF発生(開放不可)</p> <p>負荷</p>	<p>・既設の過電流継電器（51）にタイマを追加し、タイマが一定時間動作継続した場合には、D/G停止及び消磁コンタクト（界磁開閉器）投入のインターロックを動作させることで、HEAF火災への進展を防止する。</p> <p>・既設の過電流継電器（51）を流用することで、設計思想*1を変更せずに対策。</p> <p>*1：過電流継電器（51）が動作した場合、LOCA発生の有無に関わらずD/G受電遮断器のみ「開」とするプラントや、LOCA発生の有無によりD/G機関を停止するプラントがある。</p>
<p><b>【PWR】</b></p> <p>黒線：現状の構成 赤線：追加対策</p>	<p>D/G受電遮断器でHEAF発生(開放不可)</p> <p>①D/G機関停止、D/G受電遮断器開放</p> <p>【50リレー（新設）】 ①D/G機関停止、消磁コンタクト投入</p> <p>50リレー/51リレー</p> <p>M/C母線</p> <p>M/C補機側の遮断器でHEAF発生(開放不可)</p> <p>負荷</p>	<p>・過電流継電器（50）を追加し、過電流継電器（50）動作した場合には、D/G停止及び消磁コンタクト（界磁開閉器）投入のインターロックを動作させることで、HEAF火災への進展を防止する。</p> <p>・既設の過電流継電器（51）を使用するためには、設計思想*2を変更する必要がある。</p> <p>*2：過電流継電器（51）が動作した場合、SI信号挿入状態においては、D/Gが停止せず、D/G受電遮断器が「開」とならない</p>

# <参考> 第1018回及び第1036回審査会合にて説明した主な説明事項

分類	No.	主な説明事項
[ 1 ] 詳細設計申送り事項	1-1	地震応答解析モデルにおける建物基礎底面の付着力
	1-2	建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価
	1-3	横置円筒形容器の応力解析への F E Mモデル適用方針の変更
	1-4	サブプレッションチェンバの耐震評価
	1-5	漂流物衝突荷重の設定
	1-6	機器・配管系への制震装置の適用
	1-7	浸水防止設備のうち機器・配管系の基準地震動 S s に対する許容限界
	1-8	設計地下水水位の設定
	1-9	防波壁
	1-10	土石流影響評価
	1-11	保管・アクセス（抑止杭）
	1-12	ブローアウトパネル閉止装置
	1-13	非常用ガス処理系吸込口の位置変更による影響
	1-14	原子炉ウェル排気ラインの閉止及び原子炉ウェル水張りラインにおけるドレン弁の閉運用による影響
[ 2 ] 新たな規制要求（バックフィット）への対応事項	2-1	安全系電源盤に対する高エネルギーアーク（HEAF）火災対策
	2-2	火災感知器の配置
[ 3 ] 設置変更許可審査時からの設計変更内容	3-1	ドライウェル水位計（原子炉格納容器床面 + 1.0m）設置高さの変更
	3-2	格納容器酸素濃度（B系）及び格納容器水素濃度（B系）計測範囲の変更
	3-3	第4保管エリアの形状変更
	3-4	放射性物質吸着材の設置箇所の変更
[ 4 ] その他の詳細設計に係る説明事項	4-1	配管系に用いる支持装置の許容荷重の設定
	4-2	原子炉本体の基礎の応力評価に用いる解析モデルの変更
	4-3	復水器水室出入口弁への地震時復水器の影響
	4-4	制御棒・破損燃料貯蔵ラック等における排除水体積質量減算の適用