

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉
建屋および原子炉の地震応答解析モデルの
高度化について（妥当性説明）

平成28年6月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

1. はじめに
2. 高度化項目の妥当性確認
 - (1) 原子炉本体基礎の復元力特性
 - (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性
 - (3) 補助壁の考慮
3. まとめ

1. はじめに

前のご説明内容

- 柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の工事計画認可申請書（以下、「今回工認」という）では、耐震設計に用いる建屋および原子炉の地震応答解析モデル（以下、「動解モデル」という）の高度化を予定している。
- 動解モデル高度化の考え方及び目的について説明した。

動解モデルの高度化項目

項目	既工認の動解モデル	今回工認の動解モデル
原子炉本体基礎のモデル化	線形仮定とした弾性解析モデル	弾塑性挙動を考慮した復元力特性を設定
コンクリート剛性	設計基準強度を使用	コンクリート強度データに基づく剛性を使用
耐震要素（建屋壁）のモデル化	外壁などの主要な壁のみモデル化	左記に加え、考慮可能な壁（補助壁）を追加でモデル化
建屋側面地盤の摩擦による拘束効果（側面地盤回転ばね）	考慮せず	考慮する

2. 高度化項目の妥当性確認

今回ご説明内容

- 動解モデルの各高度化項目について、設定の妥当性を以降で説明する。

今回工認の動解モデル	高度化の目的	論点
原子炉本体基礎に弾塑性挙動を考慮した復元力特性を設定	入力の大きさに応じて、民間規格等に基づき弾塑性挙動を考慮した復元力特性を設定	<u>民間規格の適用性</u>
コンクリートの実剛性を使用	新規建設時の設計段階では実測値がなく、設計値を使用せざるを得ないが、実機では実測したコンクリート強度に基づく剛性の設定により建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化	<u>実測値に基づく、剛性設定の妥当性</u>
補助壁をモデル化	実際に存在する壁をモデルに組み込むことにより建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化	—
側面回転ばね追加	側面回転ばねそのものは新しい評価技術ではなく、要素試験等により技術的妥当性を確認した上で動解モデルへ取り込むことにより、接地率を改善するとともに、建屋の振動性状をより実状に近い応答に適正化	<u>要素試験や解析に基づく、ばね剛性設定の妥当性</u>

 : 今回ご説明範囲

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

■ 技術的妥当性確認方針

I. 原子炉本体基礎の構造の特徴に応じた追加検討事項の抽出

II. 復元力特性への反映方法を検討

III. 検討事項の妥当性確認

IV. 実機原子炉本体基礎の復元力特性の設定

- 「鋼板コンクリート構造耐震設計技術規程（JEAC4618-2009）」（以下、「SC規程」）を準用するにあたり、実機原子炉本体基礎の構造（隔壁方式）の特徴を抽出し、SC規程の前提となっている構造（スタッド方式）との違いに対して追加検討の要否を判断。
- 追加検討が必要と判断した事項に対して、既往研究等に基づき、復元力特性（スケルトンカーブ）評価式への反映方法を検討。
- 既往の加力試験の結果を活用し、上記で設定した復元力特性の評価式の妥当性を確認。
- 上記で妥当性が確認された手法を用いて、実機原子炉本体基礎の復元力特性を設定。

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

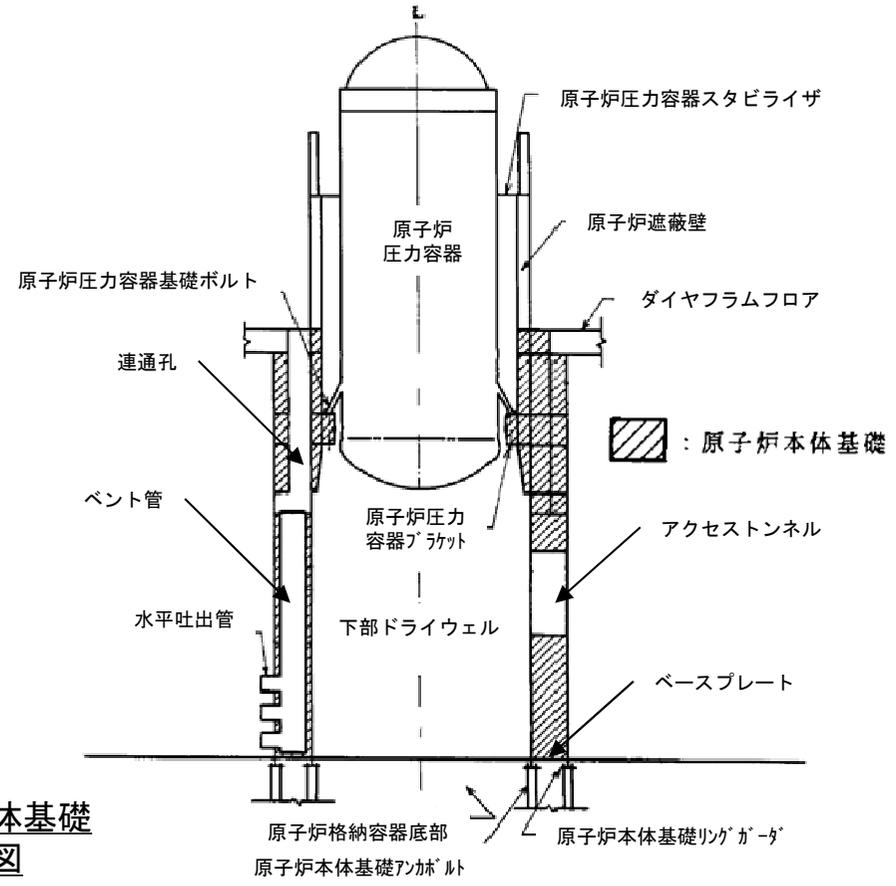
※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

I. 原子炉本体基礎の構造の特徴に応じた追加検討事項の抽出

原子炉本体基礎の構造

【P.6~7】

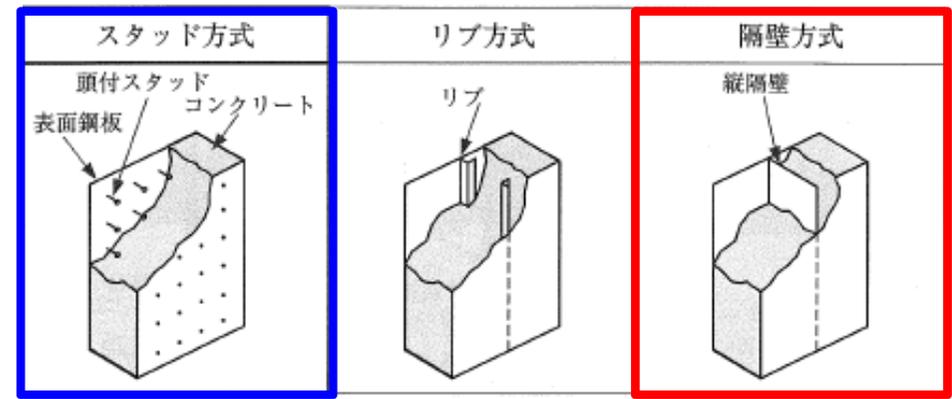
- 原子炉本体基礎は、円筒型・隔壁方式のSC構造であり、SC規程の前提となる構造（スタッド方式）とは異なる。
- ベント管やアクセストンネルなどの開口部を有し、また、ベースプレート等の鋼板によりコンクリートが局所的に分断されている。



原子炉本体基礎断面図

SC規程の前提

原子炉本体基礎



SC構造の各種構造形式（SC規程より）

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

■ I. 原子炉本体基礎の構造の特徴に応じた追加検討事項の抽出

- 原子炉本体基礎の構造の特徴を抽出し、それぞれに対して追加検討の要否を判断【P.10～11】

表 原子炉本体基礎の構造の特徴と追加検討の要否（1/2）

原子炉本体基礎の 構造の特徴		構造の特徴に応じた追加検討の要否	
		追加検討要否	理由
共通	隔壁方式	要	SC規程（スタッド方式）とはコンクリートと鋼板の一体化方式が異なるため
	円筒型	要	円筒型はSC規程の対象範囲だが、根拠となるデータは矩形形状によるものであることから、念のため検討をおこなう
下部 ペデスタル	ベント管	要	コンクリート内に大口径管を埋め込んだ特殊な構造であるため
	水平吐出管	否	SC規程の開口の取り扱いに関する規定に準じることが可能であるため※
	ベースプレート	要	原子炉建屋基礎版と原子炉本体基礎の接続部でコンクリートが分断されているため
	アクセストンネル	否	※と同じ

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

表 原子炉本体基礎の構造の特徴に対するSC規程の適用性 (2/2)

原子炉本体基礎の 構造の特徴		構造の特徴に応じた追加検討の要否	
		追加検討要否	理由
上部 ペDESTAL	連通孔	否	SC規程の開口の取り扱いに関する規定に準じることが可能であるため※
	ベント取入孔	否	※と同じ
	中間鋼板	要	隔壁方式と同じ扱い（SC規程（スタッド方式）とはコンクリートと鋼板の一体化方式が異なるため）
	水平鋼板	要	同上
	コンクリート 打設孔	要	打設孔部分のコンクリートの取り扱いについては、SC規程に特に規定されていないため
	アクセス 開口	否	※と同じ

これらの特殊構造を、復元力特性（スケルトンカーブ）の評価式へ反映する方法を検討する

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

■ II. 復元力特性への反映方法を検討

- 追加検討が必要と判断した事項に対して、既往研究等に基づき、復元力特性（スケルトンカーブ）評価式への反映方法を検討【P.12～41】。

表 追加検討事項に対するスケルトンカーブ評価式への反映方法

追加検討事項	検討内容（スケルトンカーブ評価式への反映方法）
隔壁方式	・ 隔壁方式の場合のコンクリートのひび割れ後における有効せん断剛性をひび割れ角度を仮定することで評価【P.35, P.40】
円筒型	・ 全断面の1/2がせん断抵抗すると評価【P.35, P.40】
ベント管	・ ベント管による大開口を考慮し、コンクリートせん断ひび割れ強度を低減【P.32】 ・ ベント管の開口面積を除いたコンクリートの有効断面を算出【P.32】
ベースプレート	・ 原子炉建屋基礎版と原子炉本体基礎の接続部でコンクリートが分断されていることを考慮し、当該部ではコンクリートの引張強度を無視【P.22】
コンクリート打設孔	・ コンクリート断面積の減少を考慮し、コンクリートの引張強度を減じる【P.26～27】

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

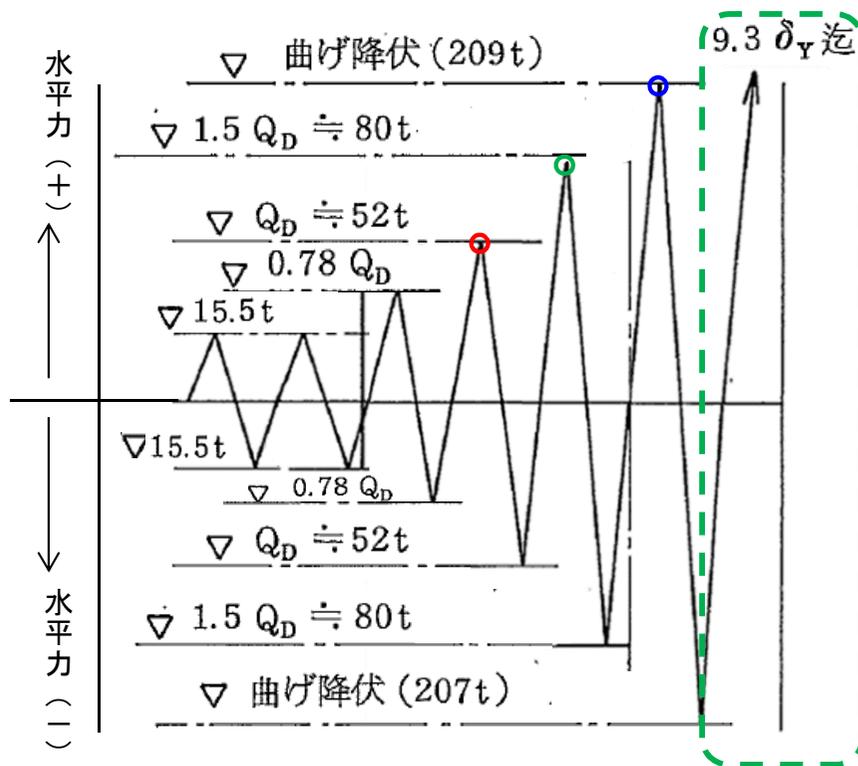
※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

■ Ⅲ. 検討事項の妥当性確認

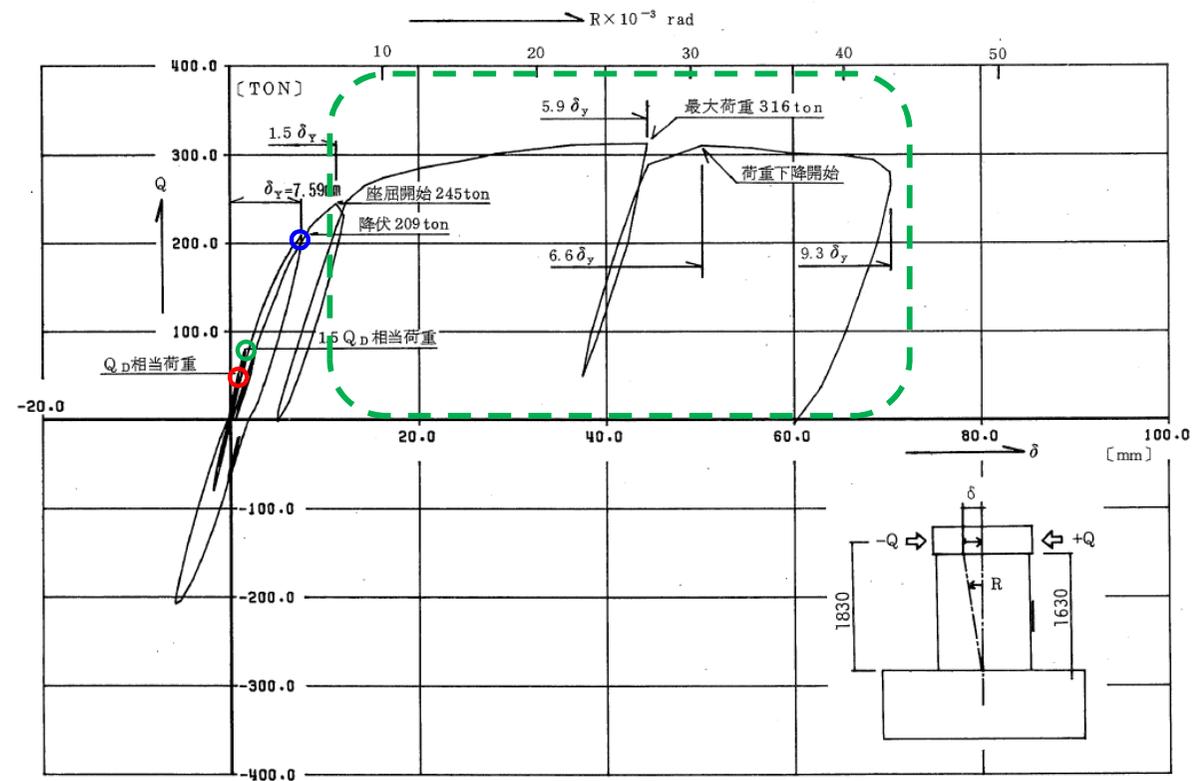
既往の加力試験

【添付資料-5】

- 複数のサイクルを経たのち、荷重降下に至るレベルまで加力した。



水平力の载荷サイクル



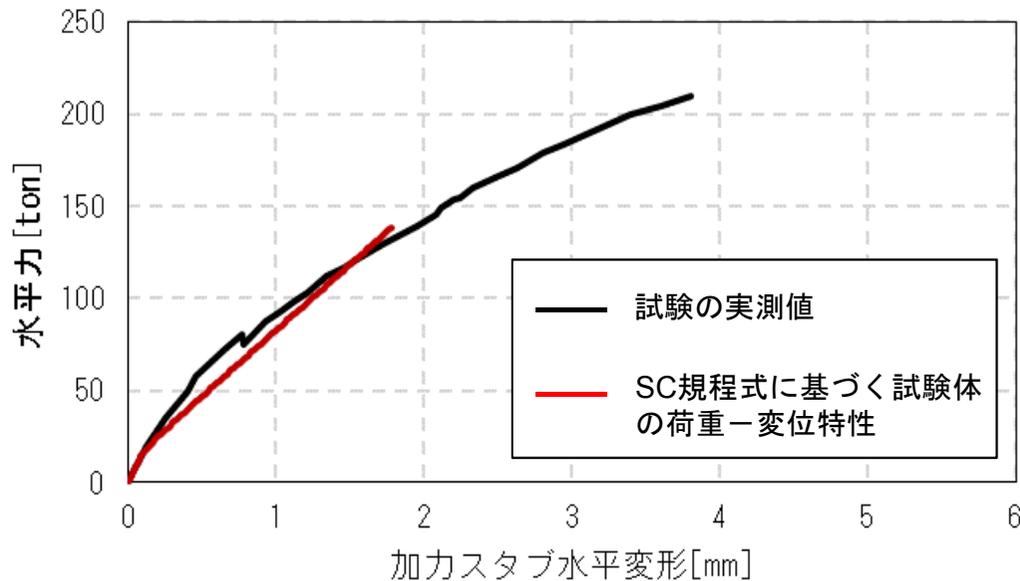
水平力—水平変位特性

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

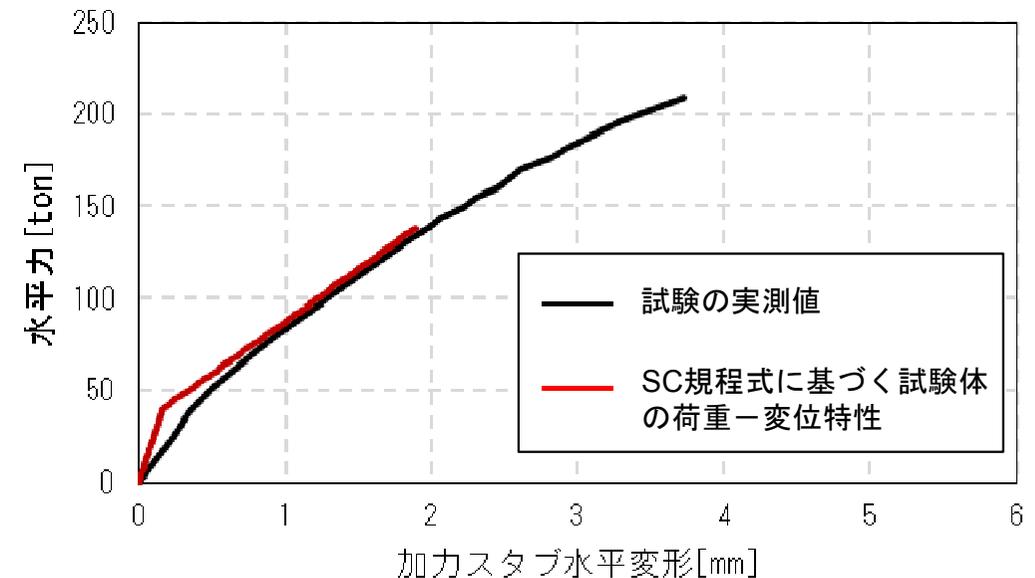
※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

■ Ⅲ. 検討事項の妥当性確認

- 既往の加力試験の結果を活用し，設定した復元力特性の評価式の妥当性を確認。
- 試験体の荷重－変位特性を作成し，実測された荷重－変位特性との整合性を確認することにより，その妥当性を確認【P.42～47】。



曲げ変形の比較



せん断変形の比較

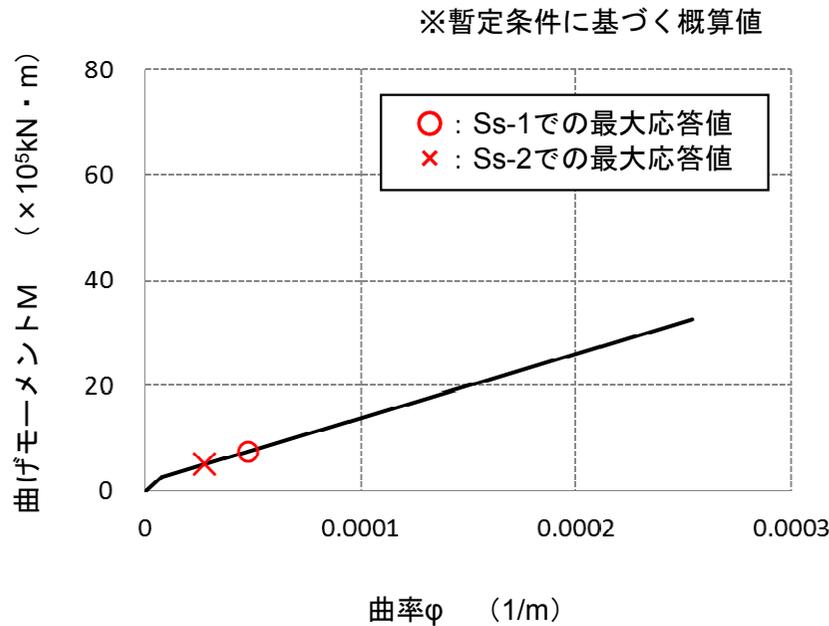
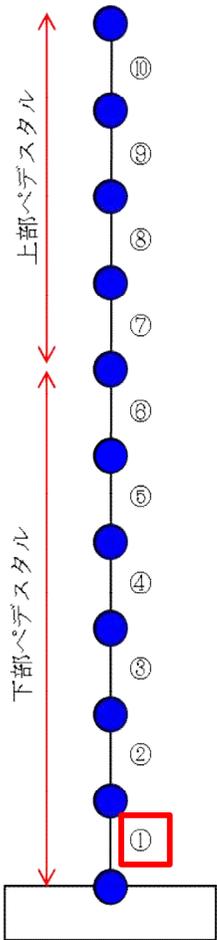
試験結果とよく一致していることから，追加検討事項の妥当性を確認

2. (1) 原子炉本体基礎の復元力特性

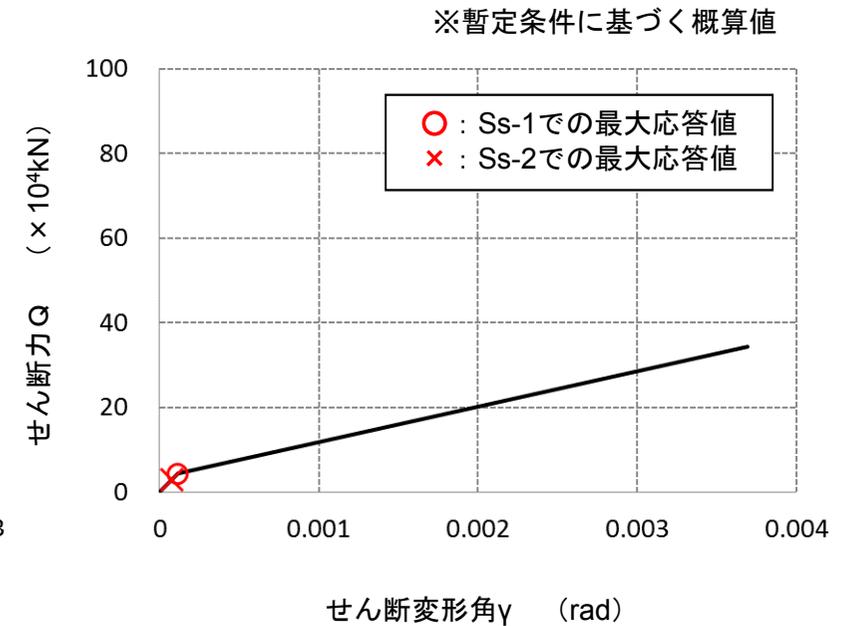
※【 】は資料1-2 別紙4の頁を示す。

■ IV. 実機原子炉本体基礎の復元力特性の設定

- 妥当性が確認された手法を用いて、実機原子炉本体基礎の復元力特性を設定【P.48～68】。



曲げモーメントー曲率関係

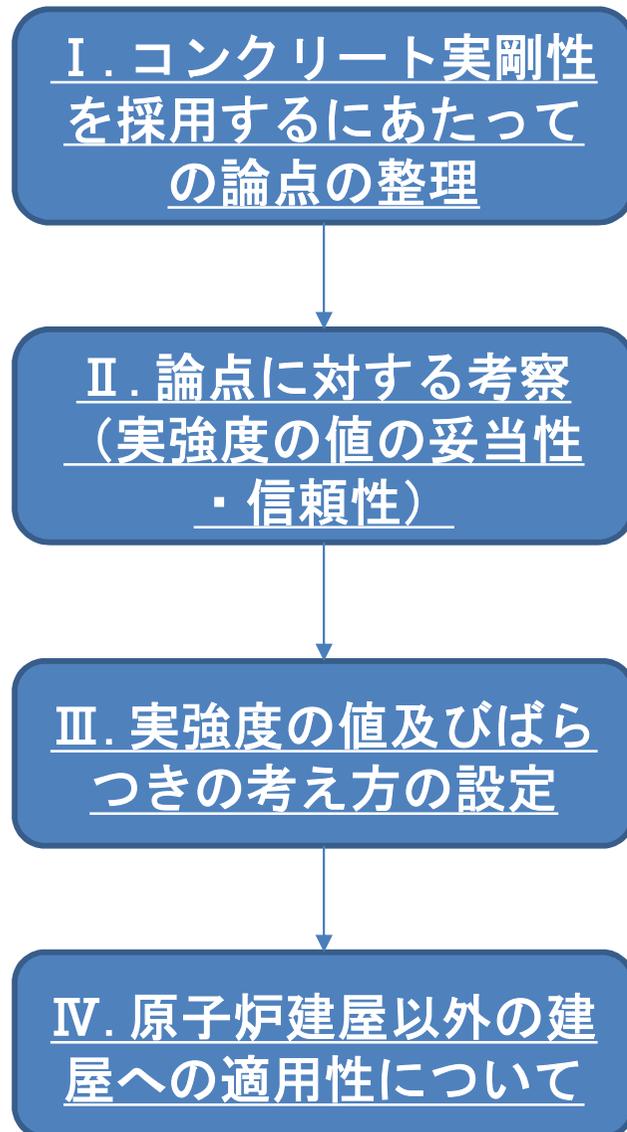


せん断力ーせん断変形角関係

実機スケルトンカーブの例

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ 技術的妥当性確認方針



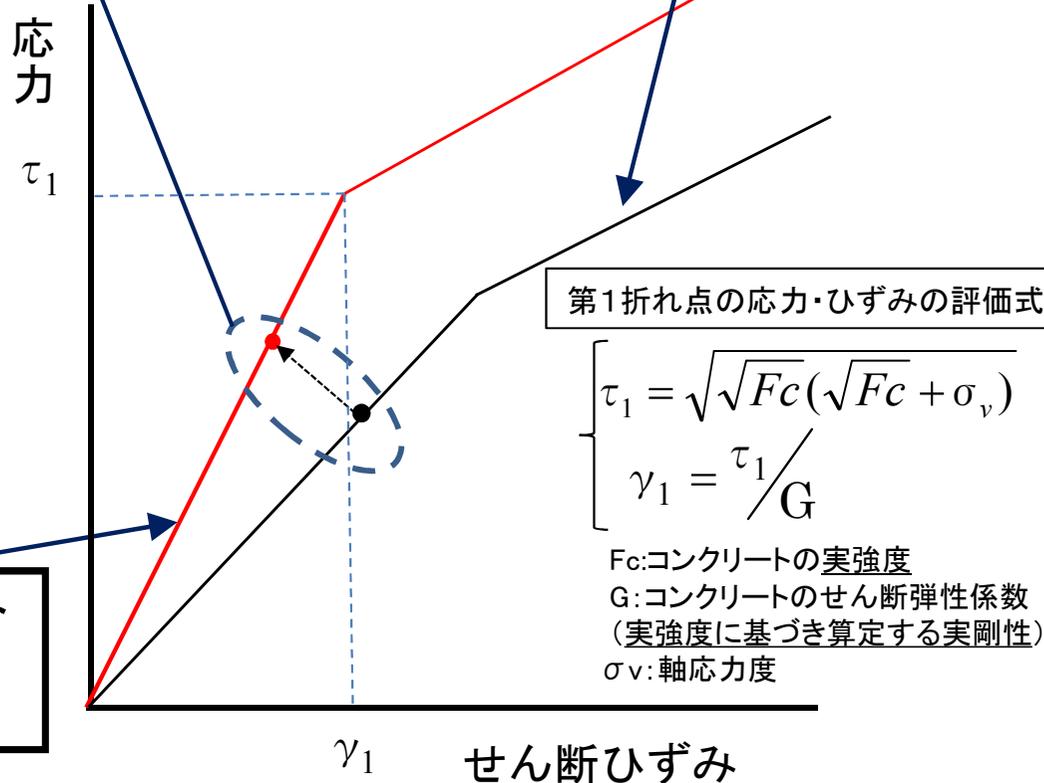
- 地震応答解析において、コンクリート実強度を考慮した建屋剛性（実剛性）を採用する際の論点について整理する。
- 妥当性・信頼性のある実強度を設定するにあたって、①サンプル数が豊富な建設時コンクリートの材齢91日における圧縮強度（91日強度）を用いて平均値とばらつきを評価したのち、②既往の知見を参考に経年による強度増進を考慮して推定した実強度の値と、実機から採取したコア強度との比較を行い、推定した実強度の値について考察する。
- 上記の考察を踏まえ、実際に実強度を設定する際の考え方を整理し、妥当性・信頼性のある実強度値を設定。さらに、材料物性のばらつきについて、設計上の考え方について設定。
- 設定した実強度について、原子炉建屋以外の建屋（タービン建屋、コントロール建屋、廃棄物処理建屋）への適用性を考察する。

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ I. コンクリート実剛性を採用するにあたっての論点の整理

応答値の精度は、復元力特性（スケルトンカーブ）の精度に大きく依存する。

設計時モデル：設計基準強度に基づく剛性



コンクリート
実剛性
考慮モデル

コンクリート実強度の値が応答値の精度に直接影響を及ぼすことから、その設定の妥当性・信頼性については十分に確認する必要がある。



「コンクリート実強度の値」を論点として位置付ける。

概念図 コンクリート実剛性の採用

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ II. 論点に対する考察（実強度の値の妥当性・信頼性）

・実強度の値の設定方針

①建設時コンクリートの91日強度データの整理

- コンクリート強度の一般的な性状（材齢90日程度で強度はほぼ安定し、1年以上の長期においては緩やかに増進する傾向）を考慮し、豊富なサンプル数がある建設時コンクリートの91日強度をデータベースとして使用する。

②推定実強度値と実機から採取したコア強度との比較

- 既往文献を調査し、長期的な強度増進効果について考慮した上で実強度を推定（推定実強度値を設定）し、実機から採取して得たコア強度と比較する。

上記の内容を踏まえ、総合的に実強度の値を設定する。

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ II. 論点に対する考察（実強度の値の妥当性・信頼性）

① 91日強度データの整理について（6号炉及び7号炉原子炉建屋の分）

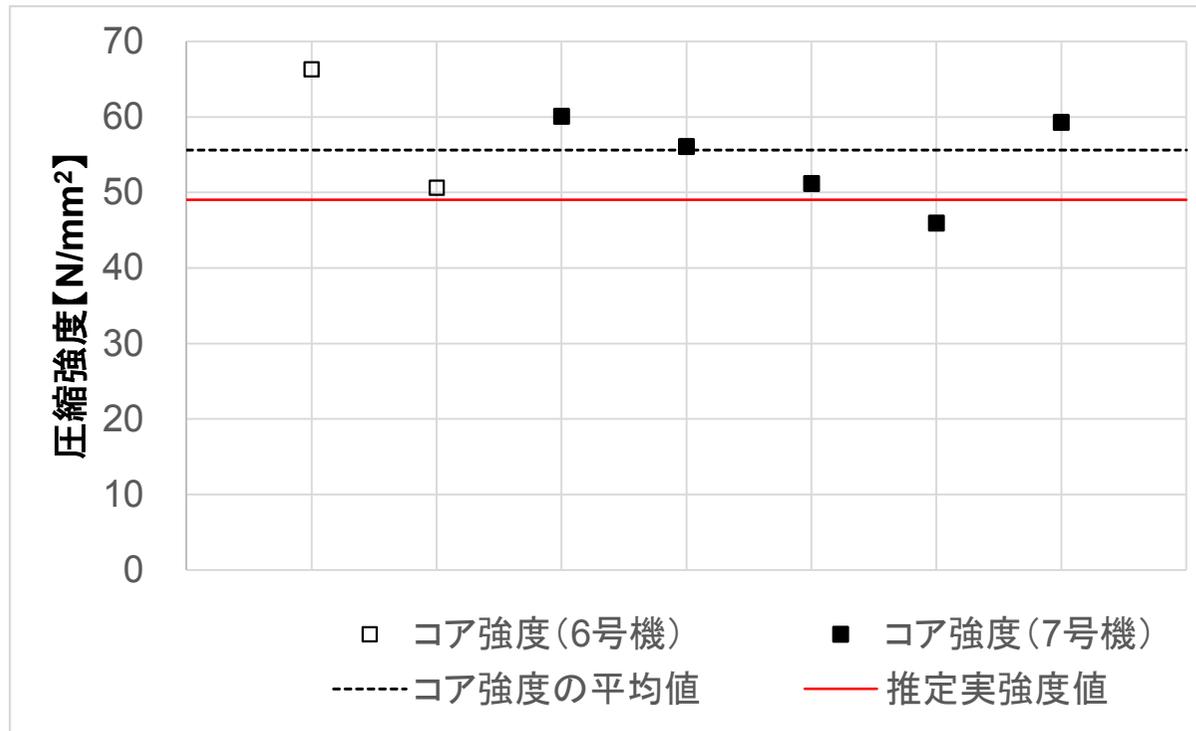
打設箇所	平均値 【kg/cm ² 】	標準偏差 【kg/cm ² 】	最大値 【kg/cm ² 】	最小値 【kg/cm ² 】	中央値 【kg/cm ² 】	データ数 【個】
B3F,MB3F	459	28.1	510	403	466	92
B2F	441	30.6	496	344	439	120
B1F,MB1F	429	27.5	518	376	425	131
1F	464	18.7	493	403	470	126
2F	457	25.4	493	366	458	93
3F	432	21.5	477	358	434	119
4F,M4F,RF	440	34.8	547	365	446	179
全体	445	30.3	547	344	446	860

6号炉及び7号炉原子炉建屋の打設後91日のコンクリート強度は平均で445kg/cm²であり、その標準偏差は30.3kg/cm²となっている。

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ II. 論点に対する考察（実強度の値の妥当性・信頼性）

② 経年による強度増進効果を考慮した推定実強度値とコア強度の比較



既往の文献を調査し経年による強度増進効果を考慮した推定実強度の値は、経年後（約10年）の実機から採取したコア強度の平均値と概ね同等であることが確認できる。

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ III. 実強度の値及びばらつきの考え方の設定

コンクリート実強度の値の設定にあたって、経年によるコンクリート強度の増進効果については文献内で詳細な考察がなされていないこと、また、実機から採取したコア強度についてはサンプル数が少ないことから、妥当性・信頼性に欠けると判断し、6号炉及び7号炉原子炉建屋の91日強度の平均値(445kg/cm²)を保守的に評価して有効数字3桁を切り下げ、440kg/cm²(43.1N/mm²)という値を用いることとした。また、ばらつきについては、標準偏差の平均値を参考に $\sigma = 30\text{kg/cm}^2(2.94\text{N/mm}^2)$ とした。

コンクリート剛性の不確かさの検討にあたっては、91日強度の分布を考慮し、平均値に対して $\pm 1\sigma$ を考慮することとした。さらに保守的な評価として、マイナス側は平均値 -2σ を、プラス側は実機のコア強度の平均値(568kg/cm²)を、設計上考慮することとした。

地震応答解析モデル	先行電力	今回工認
基本ケース	設計基準強度	実強度 440kg/cm ² (43.1N/mm ²)
不確かさケース	実強度	ばらつき: $\pm 1\sigma$ 470kg/cm ² , 410kg/cm ² (46.1N/mm ² , 40.2N/mm ²) 保守性 プラス側: 568kg/cm ² (55.7N/mm ²) マイナス側: 380kg/cm ² (37.3N/mm ²)

2. (2) コンクリート実強度を考慮した建屋剛性

■ IV. 原子炉建屋以外の建屋への適用性について

他の建屋においても91日強度データについて整理した結果、その平均値は原子炉建屋で設定した実強度の値(440kg/cm²)と概ね同程度であることを確認。各建屋のコンクリートの調合や経年環境は6号炉及び7号炉原子炉建屋と概ね同等であることを踏まえ、原子炉建屋で設定した実強度の値を他の建屋においても用いることは妥当であると考えられる。

建屋	使用材料		水セメント比 【%】	水結合材比 【%】	平均値 【kg/cm ² 】	標準偏差 【kg/cm ² 】	データ数 【個】
	セメント	混和材					
6号炉タービン建屋	普通ポルト ランドセメン ト	フライアッ シュ	50~60	40~50	455	28.6	531
7号炉タービン建屋					449	30.5	453
コントロール建屋					442	32.0	123
廃棄物処理建屋					450	31.0	245
(参考)6号炉原子炉建屋					446	29.0	446
(参考)7号炉原子炉建屋					443	31.7	414

2. (3) 補助壁の考慮

■ 技術的妥当性確認方針

I. 規格基準における記載を踏まえた選定方針の設定及び選定

II. 地震応答解析モデルへの反映方針の設定

III. 設計手法としての妥当性を判断

- 先行審査を含めた既工認で適用実績のある規準である日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（RC-N規準）における耐震壁の規定を参考に、補助壁の選定方針を設定し、選定方針に適合する壁を補助壁として選定する。
- 地震応答解析モデルへの反映にあたっては、補助壁の構造上の特徴を踏まえた適切な方針を設定する。
- 「補助壁の選定方針」及び「地震応答解析モデルへの反映方針」が設計上の妥当性・保守性を有していることを確認することをもって設計手法として妥当であると判断する。

2. (3) 補助壁の考慮

I. 規格基準における記載を踏まえた選定方針の設定及び選定（選定方針）

- 既工認で適用実績のある規格である日本建築学会「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（RC-N規準）における耐震壁の規定（算定外の規定）の記載を踏まえ、補助壁の選定条件を以下の通り設定。

項目	RC-N規準 (算定外の規定)	補助壁の選定条件	【参考】耐震壁の選定条件 (既工認)
壁厚・内法高さ	・壁の厚さは200mm以上、かつ壁の内法高さの1/30以上	・壁の厚さは300mm以上、かつ壁の内法高さの1/30以上	同左
せん断補強筋比	・壁のせん断補強筋比は、直交する各方向に関し、それぞれ0.25%以上	同左	・壁のせん断補強筋比は、直交する各方向に関し、それぞれ0.6%以上
壁筋	・複筋配置 ・D13以上の異形鉄筋を用い、壁の見付面に関する間隔は300mm以下	同左	同左
その他条件	—	・下階まで壁が連続している、もしくは床スラブを介して壁に生じるせん断力を下階の耐震壁に伝達できる壁 ・フレーム構面外でも上記を満たす壁	・基礎スラブから連続して立ち上がっている壁 ・フレーム構面内（柱、梁間）の壁

2. (3) 補助壁の考慮

I. 規格基準における記載を踏まえた選定方針の設定及び選定（選定結果）

- 設定した方針に基づく、補助壁の選定結果(耐震壁と補助壁の断面積の比較)を下表に示す。
- (耐震壁+補助壁)/耐震壁の面積比率は約1.1~1.7程度。下図に、代表的な部位の選定結果(面積比率が大きくなっているフロア, それ以外の一般的なフロア)を示す。下図以外の部分の選定範囲については、机上資料別紙2の添付資料-1,2を参照。

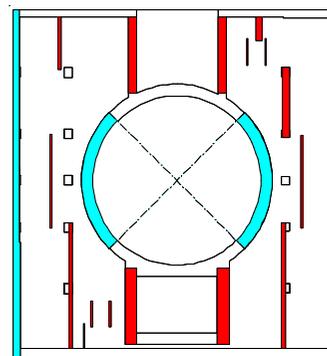
6号炉原子炉建屋

T.M.S.L (m)	階	耐震壁 (既工認)		補助壁		耐震壁+補助壁 (今回工認)		比率 (今回工認/既工認)	
		NS方向	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向	EW方向
		m ²	m ²						
49.7	屋上階	41.0	54.7	0.0	0.0	41.0	54.7	1.00	1.00
38.2	クレーン階	82.4	122.6	0.0	0.0	82.4	122.6	1.00	1.00
31.7	4階	231.3	273.2	70.7	137.3	302.0	410.5	1.31	1.50
23.5	3階	213.6	209.4	22.1	146.4	235.7	355.8	1.10	1.70
18.1	2階	220.3	231.7	86.2	85.0	306.5	316.7	1.39	1.37
12.3	1階	260.8	274.7	52.4	40.9	313.2	315.6	1.20	1.15
4.8	地下1階	280.8	288.2	40.5	106.6	321.3	394.8	1.14	1.37
-1.7	地下2階	336.3	340.1	64.9	78.7	401.2	418.8	1.19	1.23
-8.2	地下3階								

7号炉原子炉建屋

T.M.S.L (m)	階	耐震壁 (既工認)		補助壁		耐震壁+補助壁 (今回工認)		比率 (今回工認/既工認)	
		NS方向	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向	EW方向
		m ²	m ²						
49.7	屋上階	41.0	54.7	0	0	41.0	54.7	1.00	1.00
38.2	クレーン階	83.0	122.9	0	0	83.0	122.9	1.00	1.00
31.7	4階	231.8	267.7	75.7	124.0	307.5	391.7	1.33	1.46
23.5	3階	214.5	207.3	31.0	147.3	245.5	354.6	1.14	1.71
18.1	2階	215.8	228.9	71.2	145.2	287.0	374.1	1.33	1.63
12.3	1階	261.9	275.8	57.7	55.7	319.6	331.5	1.22	1.20
4.8	地下1階	281.9	288.2	34.1	103.3	315.7	391.5	1.12	1.36
-1.7	地下2階	337.2	343.6	72.7	80.3	409.9	423.9	1.22	1.23
-8.2	地下3階								

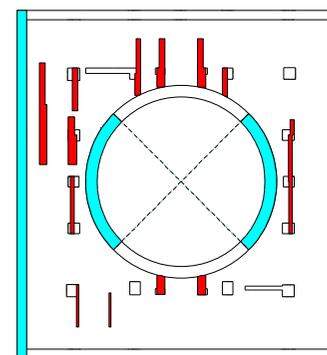
■ : 耐震壁として剛性を評価する範囲
(既工認と同じ)
■ : 補助壁として剛性を評価する範囲



6号炉原子炉建屋 2階 EW方向

面積比率が大きいフロア

・燃料プールや蒸気乾燥器・気水分離器ピット(D/Sピット)の壁を追加で考慮したことによる影響が大きい



7号炉原子炉建屋 地下2階 EW方向

上記以外の一般的なフロア

・その他の補助壁は独立した短スパンの壁が大半を占めている



2. (3) 補助壁の考慮

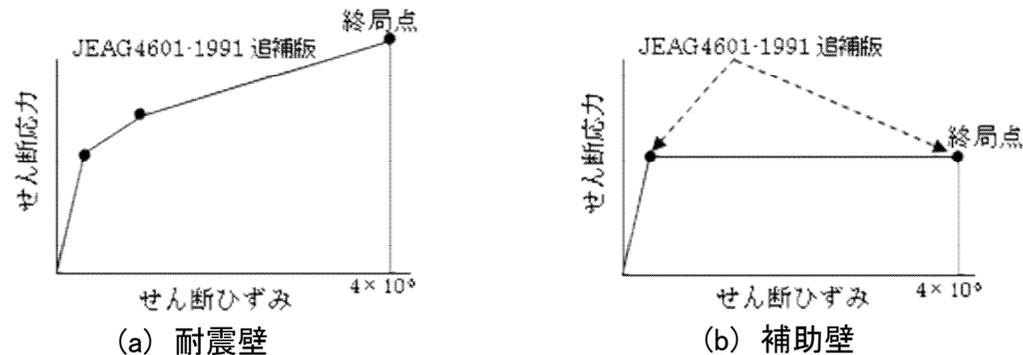
II. 地震応答解析モデルへの反映方針の設定

- 耐震壁と補助壁の構造の特徴の違いを踏まえ、補助壁の地震応答解析モデル(せん断スケルトンカーブ)への反映方針は以下の通りの設定とする。

項目	耐震壁 (既工認で考慮済み)	補助壁
構造上の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・直交する壁の効果を検討できるボックス壁, I型壁, 円筒壁等 ・長スパンの厚い壁が多い ・鉄筋量が多い 	<p>【燃料プール、D/Sピット以外の壁の特徴】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・直交壁が存在しない場合が多い ・独立した短スパンの壁が多い ・鉄筋量が少ない(既工認で考慮した耐震壁と比較した場合)
せん断スケルトンカーブ	JEAG4601-1991 追補版の評価法	JEAG4601-1991 追補版の評価法に基づく第1折点で降伏する完全弾塑性型のスケルトンカーブとして評価 ^{※1}
曲げスケルトンカーブ	JEAG4601-1991 追補版の評価法	考慮しない ^{※2}

※1: JEAG4601-1991 追補版の評価式が、原子炉建屋耐震壁を想定した試験体による試験結果を踏まえて設定されたことを踏まえ、耐震壁と比較して鉄筋比が小さく、直交壁が存在しない場合が多い補助壁については、コンクリート分の効果のみを考慮することとした。

※2: 曲げ剛性への影響が大きいと考えられる、燃料プール・D/Sピットの壁の曲げ剛性については建屋質点間を繋ぐ回転ばねとして既工認時より考慮済み。その他の補助壁については、独立した短スパンの壁が多く、曲げ剛性への寄与が小さいことから、その効果を無視。

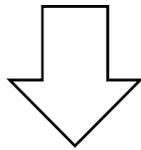


せん断スケルトンカーブの概念図

2. (3) 補助壁の考慮

Ⅲ. 設計手法としての妥当性を判断

- 補助壁は、既工認で適用実績のある規準の記載を踏まえて設定した選定条件に基づき選定していることから、地震応答解析モデルで考慮する耐震要素として、適用可能であると考えられる。
- 地震応答解析モデルへの反映方針としては、耐震壁と補助壁の違い(鉄筋比, 直交壁の有無等)を考慮した保守的な設定としており、地震応答解析モデルへの反映方針として妥当であると考えられる。



補助壁の選定方法及び地震応答解析モデルへの
反映方法が設計手法として妥当であると判断

3. まとめ

- 原子炉本体基礎の復元力特性について、SC規程とその根拠となった既往研究に基づいて、原子炉本体基礎固有の構造特性を反映したスケルトンカーブを設定し、実機を模擬した既往試験結果を用いてその妥当性を確認した。
- コンクリート実強度の設定の考え方や用いたデータベースについて整理し、既往の知見やデータと比較した結果、設定した実強度の値が妥当性・信頼性を有していることを確認した。
- 新たに耐震要素として取り入れる補助壁について、選定の考え方と選定結果を整理し、設計手法として妥当であることを確認した。