

調査・分析・実験結果の要点

【建屋関係】

中小地震を含めた観測記録の分析(ARXモデルによる検討) 添付1

- ・経年的に剛性が低下する傾向(水平, 鉛直共)。
- ・それまで経験していない大きな地震動(更新地震)を受けると剛性が低下する傾向(水平, 鉛直共)。
- ・鉛直動の剛性低下は水平動よりは顕著ではない。

建屋シミュレーション解析(水平動) 添付2

- ・設計に対する剛性低下率
オペフロ上部:0.3(NS), 0.5(EW)
オペフロ下部:0.75(NS), 0.8(EW)
- ・シミュレーションは剛性を低下させた等価線形解析を採用, 第一折点を超えるオペフロ上部に対しても記録と整合する結果を得ている。
- ・建屋内部減衰は7%で記録と整合。

建屋シミュレーション解析(鉛直動) 添付2

- ・シミュレーション解析では, 設計で採用した剛性で評価し, 記録と整合していることを確認。但し, 感度は鈍い。
- ・建屋内部減衰も設計と同様5%。

オペフロ上部の剛性低下(大架構) 添付3

- ・3D-FEMモデルを用いた静的加力解析の結果, 曲げ変形の影響で初期の剛性は低下するものの, 評価基準値付近及び終局耐力はJEAG式と同程度であること, また, 基本モデル採用の剛性低下補正係数の保守性を確認。

初期剛性の違いが基準地震動Ssの応答に与える影響 添付4

- ・基準地震動Ssによる応答は第一, 第二折点を超えるレベルとなるため, 初期剛性に既工認モデルの値を用いたモデルと3.11地震の剛性低下を考慮したモデルによる地震応答解析結果に大きな違いは生じない。

耐震実験 添付5

- ①繰り返し加力
繰り返し加力による剛性低下は顕著ではない。
- ②事前損傷
加力による事前損傷が終局耐力に与える影響は小さい。
- ③乾燥収縮
 - ・乾燥試験体(3か月)は初期剛性はJEAG式を下回るが評価基準値付近及び終局耐力はJEAG式を上回る。
 - ・さらに乾燥させた試験体(8か月)による加力実験結果は, 乾燥試験体(3か月)とほぼ同程度の結果となった。
 - ・乾燥試験体においても初期変形状態における事前加力がその後の履歴特性に与える影響は小さい。

建屋の状況 添付6

- ・地震による有害なひび割れの発生は認められない。
- ・乾燥収縮ひび割れは東通と比較して多い。
- ・建設後の経過年数から乾燥収縮はほぼ定常状態。
- ・コア強度は設計基準強度を上回る。また, 特に経年による優位な劣化は認められない(一部追而)。

【地盤物性】

底面地盤(地盤ばね算定用地盤モデル) 添付7

- ・建屋の支持地盤より以深の岩盤については, 2号炉原子炉建屋近傍においてPS検層を9箇所実施している。

表層地盤(入力地震動算定用地盤モデル) 添付7

- ・表層地盤については, 埋戻し土が支配的な上部と, 岩盤が支配的な下部に分割。それぞれ地盤の調査結果に基づき地盤物性を与えているが, 3.11地震によるシミュレーション解析も実施し, 適用性について確認している。
- ・特に表層地盤上部については, ひずみレベルに応じて地盤物性値を評価する手法を採用しているが, 基準地震動Ssに対しては初期物性とひずみ依存特性を更に低下させた値を採用しても解析結果に与える感度は小さいことを確認。
- ・下部については各種パラスタ結果も踏まえ, Vs900m/sを採用。

女川2号炉原子炉建屋 不確かさケースの設定概要

地震動	項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
基準地震動Ss	終局耐力	<ul style="list-style-type: none"> ・地震による事前損傷は, JEAG式の評価基準値付近の耐力低下要因とはならない。 ・乾燥収縮は初期剛性低下に寄与するものの, JEAG式の評価基準値付近での耐力はJEAG式を上回る。乾燥度合が進行したとしても, 更なる剛性低下に寄与しない。 ・建設後の経過年数から女川2号炉建屋の乾燥状態はほぼ定常状態にある。 ・オペフロ上部の大架構は, 設計の評価法に比べ実際の初期剛性は小さいがJEAG式の評価基準値付近では評価式と同程度。 → 以上を踏まえ, 評価基準値付近のスケルトンカーブについては, 既工認と同様, JEAG式を基本ケースに適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実機のコンクリート強度は設計基準強度より高い傾向にあり, 終局耐力はその分高い方に上振れすることが考えられるが, 終局耐力の増加は建屋の変形を抑制する方向の評価となることから, これを考慮しない。
	建屋初期剛性	<ul style="list-style-type: none"> 【建屋の初期剛性(水平動)】 ・初期剛性を低下させた等価線形解析によるシミュレーション解析では, オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できること, また, 基準地震動Ssに対しては第一, 第二折点を超えた応答となるため, 初期剛性の多少の違いが応答結果に与える影響は小さいことも踏まえ, 初期剛性は3.11地震等によって低下した状態を採用する。 【建屋の初期剛性(鉛直動)】 ・水平動に比べ剛性の低下率は小さく, これまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと, 建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたことから, 既工認モデルの剛性を採用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 【建屋の初期剛性(水平)】 添付8 ・過去の中小地震も含めた記録の傾向では, 時間経過に伴い剛性が低下する傾向に加え, 更新地震によっても剛性が低下する傾向がある。一方, 実機の乾燥程度はほぼ定常状態にあること, 乾燥試験体における実験から乾燥程度の違いが剛性や耐力に与える影響は小さい結果が得られたことから, 更なる地震動の増加に対し従来と同様の剛性低下傾向を示すかどうかは不明である。しかし, 不確かさとして, 基準地震動Ssに対して更なる初期剛性の低下を考慮する。 ・具体的には, 基本モデルを用いた基準地震動Ssの応答結果として得られる剛性低下量(原子炉建屋の場合0.78倍)を基本モデルの初期剛性低下量とみなして適用したモデルを不確かさケースとして考慮する。なお, この剛性低下量が, 観測記録から類推される基準地震動Ss-D2時の剛性低下量よりも小さいことを確認する。 【建屋の初期剛性(鉛直)】 ・水平動に比べ剛性の低下率は小さくこれまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと, 建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたこと, また, 剛性の変化が建屋応答に与える感度が小さいことから, 鉛直動に対しては初期剛性の不確かさは考慮しない。
	建屋内部減衰	<ul style="list-style-type: none"> 【水平動】 ・3.11地震における建屋内部減衰は7%と評価されており, これは初期剛性の低下の影響(履歴的な減衰効果)も含まれたものと考えられる。基本ケースにおいては, この効果を安全側に無視し, 既工認と同様の減衰5%を採用する。 【鉛直動】 ・3.11地震のシミュレーション解析では既工認と同様の減衰(5%)を採用し観測記録を再現できたことから, 5%を採用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 【水平動】 ・基本的には, 基本ケースに採用した建屋内部減衰の値を適用する。 ・基本モデルを用いた基準地震動Ssの応答値が多くの部位で第二折点を越えるような場合は, 剛性低下量を初期剛性に反映した不確かさモデルでは履歴減衰が考慮されないため, 建屋内部減衰として基本ケースよりも大きい値が採用可能か検討した上でその値を採用する。 【鉛直動】 ・鉛直動シミュレーションでは減衰5%を採用しており, 不確かさケースでもこれを用いる。
地盤物性	<ul style="list-style-type: none"> ・底面地盤については実測した地盤のせん断波速度の平均値を採用。 ・入力地震動の算定に用いる表層地盤上部, 下部とも3.11地震等のシミュレーション解析結果を踏まえた値・手法を採用。 	<ul style="list-style-type: none"> ・底面地盤については, 実測値のばらつきを考慮。 ・表層地盤のばらつきが建屋応答に与える影響は小さいが, 表層地盤下部については非線形性を考慮せず一定値を採用しているため, 底面地盤と同程度のばらつきとして, せん断波速度±100m/sを考慮する。 	
弾性設計用地震動Sd	建屋剛性, 内部減衰	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性設計用地震動Sdの建屋応答は3.11地震による応答と同程度あることから, 3.11建屋シミュレーション解析の剛性を採用する。 ・内部減衰は3.11地震における建屋の内部減衰は7%と評価されたが, 保守的に5%を採用する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・先行プラントでは構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくい単純な構造の建物にRC減衰3%を適用しているが, 女川の原子炉建屋では弾性設計用地震動Sdと同等レベルの3.11地震において内部減衰7%の評価結果が得られており, 減衰3%の不確かさは考慮しない。他の建屋については, 3.11地震の傾向や建屋の特徴も踏まえて必要に応じ考慮する。

地震応答解析モデルへの反映に際しての考え方

検討ケース一覧

対象地震動	ケース名	スケルトンカーブ		建屋内部減衰	地盤物性	
		初期剛性	終局耐力		入力地震動	底面地盤ばね
基準地震動Ss (水平動)	ケース1 (基本ケース)	3.11地震 シミュレーション	設計基準強度を用い JEAG式で評価(=既工認)	5% (=既工認)	表層上部非線形, 表層下部Vs ^{**2} 900m/s	標準地盤 ^{*1} (=既工認)
	ケース2	同上	同上	同上	表層上部非線形, 表層下部Vs900+100m/s	標準地盤 +σ
	ケース3	同上	同上	同上	表層上部非線形, 表層下部Vs900-100m/s	標準地盤 -σ
	ケース4	基本ケースの0.78倍 (原子炉建屋の場合)	同上	5% (原子炉建屋の場合)	表層上部非線形, 表層下部Vs900m/s	標準地盤(=既工認)
	ケース5				表層上部非線形, 表層下部Vs900+100m/s	標準地盤 +σ
	ケース6				表層上部非線形, 表層下部Vs900-100m/s	標準地盤 -σ
基準地震動Ss (鉛直動)	ケース1 (基本ケース)	3.11地震 シミュレーション (=既工認)	—	5% (3.11地震シミュレーション) (=既工認)	直接入力(=既工認)	標準地盤(=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	同上	標準地盤 +σ
	ケース3	同上	—	同上	同上	標準地盤 -σ
弾性設計用地震動Sd (水平, 鉛直)	ケース1 (基本ケース)	3.11地震 シミュレーション	—	5%(水平, 鉛直とも) (=既工認)	(水平)表層上部非線形, 表層下部Vs900m/s (鉛直) 直接入力	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	表層上部非線形, 表層下部Vs900+100m/s	標準地盤 +σ
	ケース3	同上	—	同上	表層上部非線形, 表層下部Vs900-100m/s	標準地盤 -σ

※1 底面地盤ばねを算定する際の標準地盤は, 入力地震動を算定する地盤モデルの底面地盤の物性値

※2 Vs:せん断波速度(m/s)