

女川2号炉 東北地方太平洋沖地震(3.11地震)等の施設への影響を踏まえた耐震性評価に反映すべき事項の検討

課題の整理と検討概要

【課題】3.11地震等における建屋の振動特性の変化

▶3.11地震や4.7地震に対する2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析(水平方向)では、建屋の振動特性に支配的なオペフロ下部において、発生応力については耐震壁は弾性範囲であったものの、剛性※については設計で考慮している初期剛性に比べて程度低下している結果が得られた。

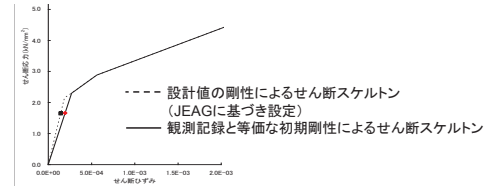
▶また、安全上重要な施設はないものの、オペフロ上部の耐震壁の3.11地震等の応答は、設計で考慮している初期剛性に対して5~7割程度の低下している結果が得られた。

3.11地震等のシミュレーション解析

- ・水平動については、既工認モデルにオペフロ上部の剛性低下率:0.3(NS), 0.5(EV), オペフロ下部の剛性低下率:0.75(NS), 0.8(EV)を考慮することでシミュレーション可能。建屋内部減衰は7%。
- ・鉛直動は設計剛性で3.11地震等のシミュレーション可能。建屋内部減衰は5%。

※剛性:力に対する建物の変形のしやすさを表す指標。同じ力が作用する場合、剛性が小さい方が変形量は大きくなる。また、鉄筋コンクリートの剛性は外力の大きさによって変化する。

→ 初期剛性が設計より低下している要因を特定し、その要因を踏まえて地震応答解析モデルを構築する必要がある。

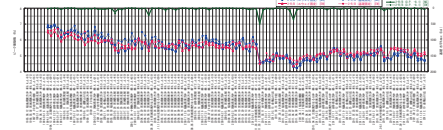


初期剛性が設計より低下している要因の検討

【地震等による構造的影響】

■実機の3.11地震等に対する建屋の振動特性の把握

・観測記録の分析(ARXモデルによる検討)の結果、経年変化に伴う剛性の低下傾向に加え、それまで経験していない大きな地震動(更新地震)による顕著な剛性低下傾向(水平、鉛直共)が認められる。鉛直動の剛性低下は水平動よりは顕著ではない。



原子炉建屋の観測記録(水平動)の傾向(ARXモデルによる分析)

■3.11地震等における構造的損傷の有無

・2号炉原子炉建屋に関する現地調査、解析的検討による3.11地震等による構造的影響評価・3次元的な応答性状やねじれの影響、残留変位について検討し、構造的損傷がないこと、建屋は弾性範囲内であることを確認。

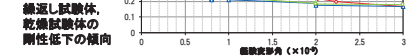
※構造的損傷:耐震壁の損傷(ひび割れ幅1.0mm以上のクラックの発生)、壁と床の交差部の損傷 等

■3D-FEMモデルによるオペフロ上部の剛性低下(大架構)

・3D-FEMモデルを用いた静的加力解析の結果、薄い耐震壁で構成される大架構部では、設計よりも曲げ変形が卓越する影響で初期剛性は低下する傾向を示すものの、せん断変形については、評価基準値付近および終局耐力はJEAG式と整合することを確認。

■繰返し試験体(耐震実験[1])による確認

・小変形時から初期剛性は低下するがその傾向はJEAG式と整合すること、一方繰返し加力による剛性低下は顕著ではないことを確認。



繰返し試験体、乾燥試験体の剛性低下の傾向

【コンクリートの乾燥収縮の影響】

■剛性低下や乾燥収縮の影響等に関する文献レビュー

・乾燥させた耐震壁の初期剛性が低下することを確認した耐震実験等の報告あり。

■乾燥試験体(耐震実験[3])による確認

・乾燥収縮の影響を受けた乾燥試験体(耐震実験[3])は初期の剛性低下量がJEAG式を下回ることを確認。また、この剛性低下量は、女川の過去の主要地震(2005年宮城県沖の地震や3.11地震)時の観測記録による剛性低下量(固有振動数低下)と概ね整合することを確認。

■実機の乾燥収縮状態等の把握

・女川と東通の乾燥収縮ひび割れ調査を実施し、女川が多い傾向にあることを確認。
・建設後の経過年数から女川2号炉の乾燥収縮はほぼ定常状態にあるものと判断。

■実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較

・コア強度は設計基準強度を上回ること、また、3.11地震前後におけるコア強度について有意な劣化は認められないことを確認。

【その他の要因影響】

■支持地盤の剛性低下の有無

・建屋直下の岩盤中の地震観測記録等から、3.11地震等による支持地盤の剛性低下の傾向は認められないことを確認。

- ◆ 建屋全体として構造的損傷には至っていないこと、初期剛性の低下の要因として、支持地盤等の剛性低下、側面地盤の振動特性の影響はないことを確認した。
- ◆ 実機の乾燥収縮状態や耐震実験の結果から、設計よりも初期剛性が低下した要因として、3.11地震等の地震力の影響と乾燥収縮の影響との重量と考えられる。

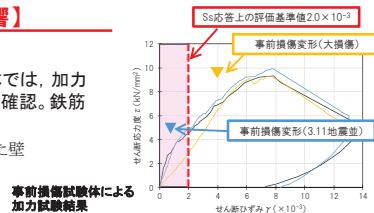
初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響の確認

【地震による事前損傷が終局耐力等に与える影響】

■事前損傷試験体(耐震実験[2])による確認

・原子力発電所の耐震壁並みの鉄筋量を入れた試験体では、加力による事前損傷が終局耐力に与える影響は小さいことを確認。鉄筋量を半分程度に低減した試験体でも同様の傾向を確認。

※事前損傷:3.11地震より更に多数のひび割れを発生させた壁



事前損傷試験体による加力試験結果

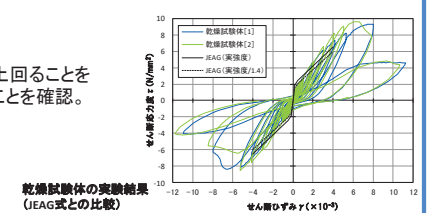
【乾燥収縮が終局耐力等に与える影響】

■乾燥試験体(耐震実験[3])による確認

・乾燥試験体は初期剛性はJEAG式を下回るものの評価基準値付近および終局耐力はJEAG式を上回ることを確認。また、乾燥期間の違い(乾燥期間3ヵ月⇔8ヵ月)が荷重-変形特性に与える影響は小さいことを確認。
・乾燥試験体においても事前加力がその後の履歴特性に与える影響は小さいことを確認。

■乾燥収縮の影響等に関する文献レビュー

・乾燥させた耐震壁(鉄筋量は一般建物相当)の初期剛性が低下する一方、終局耐力の低下はなく、既往の評価式を上回る傾向を確認した耐震実験の報告あり。

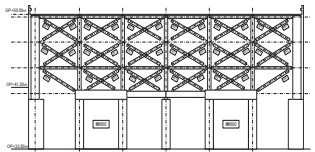


乾燥試験体の実験結果(JEAG式との比較)

◆ 地震による事前損傷や乾燥収縮の影響が、原子力施設建屋の基準地震動Ssに対する評価基準値(せん断ひずみ:2.0×10⁻³)付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。

オペフロ上部耐震補強工事

- ・オペフロ上部のオペフロ~クレーン階部分に追加耐震壁を、クレーン階より上部に追加ブレースを設置。
- ・地震観測記録などから耐震補強工事の有効性を確認。
- ・耐震補強による地震応答特性への影響を検討し、ねじれ応答等の影響は小さく、設計上適切に考慮されていることを確認。



設計体系に反映すべき事項の整理(地震応答解析モデルの策定、ばらつき評価等)

原子炉建屋の代表性

・原子炉建屋オペフロ上部は、①地震によるひび割れが多くみられる、②初期剛性低下が最も大きい、③剛性低下に耐震壁の薄い影響が現れている、ことから他の建屋もオペフロ上部と同様に3.11地震等に対する性状把握や今後の設計モデルの構築が可能。

原子炉建屋の耐震設計

【初期剛性低下を踏まえた地震応答解析モデルの基本ケースと不確かさケースの設定】
・基本ケースには3.11地震等による初期剛性低下を考慮、評価基準値付近はJEAG式を採用。
・不確かさケースには更なる初期剛性低下を考慮。建屋内部減衰は保守的に5%を採用。
【静的地震力評価用Ai分布(3Ci用、必要保有水平耐力用)】
・地震応答解析モデルの基本ケース(3.11地震等による初期剛性低下考慮)によるAi分布を採用。なお、初期剛性低下を考慮しないモデルによるAi分布に対する確認も実施。

【基礎版(FEMモデル)の評価】

・初期剛性の低下を考慮したモデル・考慮しないモデル両方に対し検討を実施。

建屋の要求機能に対する設計上の取り扱い

・3.11地震によるひび割れの発生等の影響を踏まえ、保守的に基準地震動Ssに対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース(3.11地震よりも更なる初期剛性低下を考慮したモデル)に対し、支持性能、気密性能、遮蔽性能、止水性能等について検討する。

設備への影響評価

・不確かさの検討ケースに対して、機器・配管系の設計用地震力に及ぼす影響を検討する。

モニタリングの充実化

・乾燥収縮ひび割れ等のひび割れ分布について、点検、記録方法の詳細化を図る。
・新設建屋に対して地震観測装置を設置する。既設に対して必要に応じ充実を図る。

鉄筋コンクリート部材

【構造・設計上の特徴】

- ・地震力(水平力)は全て耐震壁で負担(弾性設計用の地震力に対する応力は基本的には全て鉄筋で負担)。
- ・フレーム(柱・梁)については、耐震壁の変形に対する変形追従部材として設計(耐震要素としては無視)。
- ・床、小梁については、機器荷重などの長期荷重に対して設計(長期荷重が支配的)。
- ・基礎版については、長期荷重に加え、上部構造物からの地震荷重を組み合わせた評価を実施。

地震力の大きさの目安

【ベースシャー】

3.11地震, 4.7地震ともベースシャーは設計(基準地震動S1による地震応答解析結果)と同程度。

屋根トラス

【構造・設計上の特徴】

- ・主トラスは水平地震力や鉛直地震力を負担。
- ・サブトラスは地震力を負担していない。
- ・その他仮設材(水平ブレース)が取り付けられている。

【代表性・網羅性を考慮した点検・解析評価】

【点検】

【耐震壁の点検評価】

○建屋の構造的影響評価のための点検は、基本的には水平地震力を負担する全ての耐震壁を対象に実施した。

【耐震壁の開口部周り等に関する点検】

○3次元FEM解析※2の結果、壁上部の開口部周り等で裕度が少ない箇所については、念のために追加で点検を行った。

【耐震壁以外の部材の点検評価】

○3次元FEM解析※2の結果、フレーム、床等で裕度が少ない箇所については、念のために点検を実施した。また、床について、面外方向の応答の大きい箇所についても念のために点検を実施した。

○3次元FEM解析※2等から健全と評価された場合であっても、設計において地震力の影響を考慮している部材については、3次元FEM解析※2結果の妥当性確認の観点も含め、サンプル的に点検を実施した。

(例)フレーム部材(地震時変形追従部材)
基礎版(地震力を考慮した設計を実施)

【解析】

【耐震壁の解析的评价】

○構造的影響評価のための解析は、基本的には水平地震力を負担する耐震壁を対象に実施した。合わせて接地圧も確認した。

○解析モデルは、設計で用いている手法(質点系モデル)をベースとしたシミュレーションモデルとする。評価の結果、裕度が少ない箇所に対しては詳細モデル※1等を用いた検討を行った。

○また、耐震壁の面外方向の揺れの影響について3次元FEM解析※2から評価した。更に、観測記録からねじれの影響度合い、残留変形の大きさについて確認を行った。

【点検が困難な耐震壁に関する評価】

○点検が困難な箇所の壁の構造的影響評価については、質点系モデルによる検討の他に、3次元FEM解析※2結果からも評価した。

【耐震壁以外の部材の解析的评价】

○耐震壁の点検結果並びに3次元FEM解析※2結果から、耐震壁以外の部材の構造的影響について評価した。

○床の面外方向の揺れの影響についても3次元FEM解析※2から評価した。

【点検・解析評価】

【点検】

【屋根トラスの点検】

○主トラス、サブトラスなど全ての部材について目視点検等を実施した。

【解析】

【屋根トラスの解析】

○主トラス、サブトラスなど全ての部材をモデルに取り入れた、3次元立体架構モデル※3による屋根トラスのシミュレーション解析より構造的影響について評価した。

【総合評価】

○屋根トラスの点検・解析評価結果から部材が健全であるかどうかを確認した。

○なお、地震力を負担しない部材で損傷が認められる場合は、補修する等の対策を施した。

【総合評価】

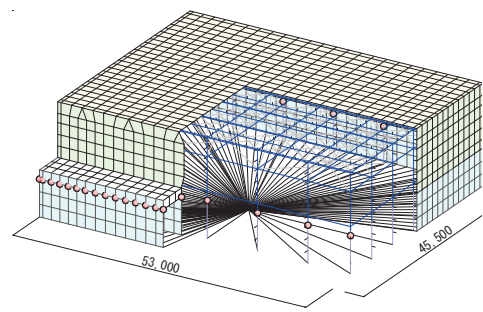
○点検・解析評価結果から建屋が弾性設計用の地震動(基準地震動S1)に対する設計(許容応力度設計)範囲内であったことを確認した。

【調査結果と解析結果の整合性確認】

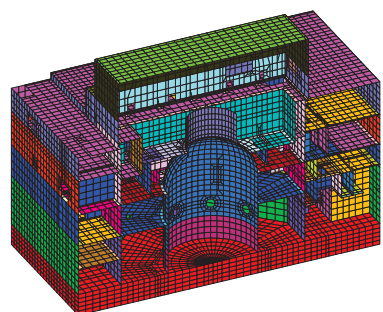
○予め、耐震壁のひび割れ分布と3次元FEM解析※2のせん断ひずみ分布の傾向が整合していることを確認した。

当該部分の調査を「基本評価」と呼称

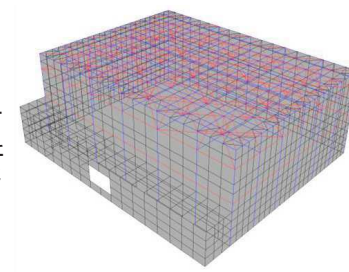
当該部分の調査を「追加評価」と呼称



※1 詳細モデル (オペフロ上部、非線形)
オペフロ上部の鉄筋コンクリート部、鉄骨部を考慮した非線形の3次元FEMによるシミュレーションモデル。変位計測システムによる記録との整合性検討も実施。



※2 3次元FEMモデル (建屋全体、等価線形)
耐震壁以外の部材も考慮可能な、建屋全体を対象とした3次元FEM(等価線形)によるシミュレーションモデル。



※3 3次元立体架構モデル(オペフロ上部)
オペフロ上部の鉄骨(主トラス・サブトラス・母屋・水平ブレース(上下弦面))・柱・梁・耐震壁・屋根スラブをモデル化したシミュレーションモデル。

女川2号炉原子炉建屋 地震による初期剛性低下を反映した基準地震動Ssに対する地震応答解析モデル

・女川2号炉原子炉建屋や機器・配管類の耐震設計では基準地震動Ss(水平動)による地震応答解析結果の影響が支的になる。また、建屋の地震応答解析の不確かさケースの設定にあたっては、建屋の初期剛性低下の不確かさ設定の影響が大きい。

・初期剛性低下に関し、基本モデルについては、耐震実験等から初期剛性低下要因がJEAG式の評価基準値(せん断変形角: 2.0×10^{-3})付近での耐力低下につながることを確認したこと等から、復元力特性モデルはJEAG式をベースに、初期剛性は3.11地震のシミュレーション解析で得られた剛性低下を反映するスケルトンカーブを採用する。なお、建屋の内部減衰は保守的に5%(シミュレーション解析では7%)を採用する。

・不確かさモデルについては、初期剛性の更なる低下を不確かさケースとして考慮する。具体的には基本モデルに基準地震動Ssを入力し、JEAG式に従い低下した建屋剛性を建屋の初期剛性低下とみなして適用したモデルを不確かさモデルとする。不確かさモデルにおいても、建屋の内部減衰は5%を採用する。

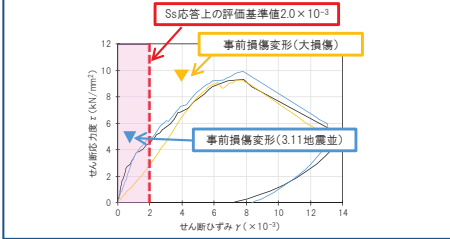
3.11.4.7地震のシミュレーション解析

・初期剛性の低下率は建屋の振動特性に支配的なオペフロ下部で、設計剛性に対し0.75倍(NS) (建設時から約5割)

・建屋の内部減衰は7%

耐震実験(事前損傷)

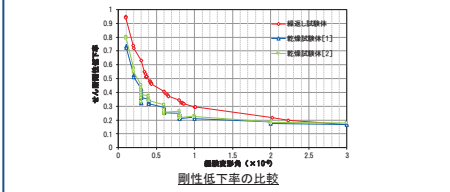
・加力による事前損傷が終局耐力に与える影響は小さいことを確認。



地震による剛性低下は終局耐力に影響を与えない。

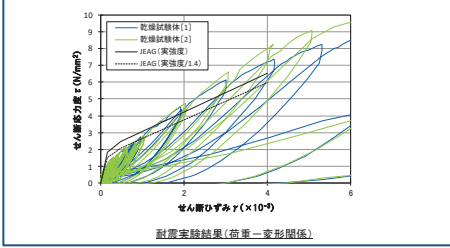
耐震実験(乾燥試験体)

・乾燥試験体の方が、乾燥させていない試験体に比べ、特に初期剛性の低下が大きい。



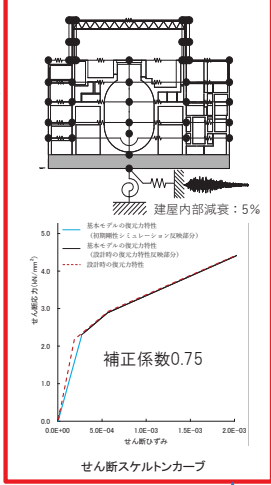
・乾燥試験体[1](3か月養生)は、初期剛性はJEAG式を下回るが評価基準値および終局耐力はJEAG式を上回る。

・更に乾燥させた試験体[2](8か月養生)による加力実験結果は、乾燥試験体[1](3か月養生)とほぼ同程度の結果となった。



基本モデル

JEAG式をベースに3.11地震による剛性低下を初期剛性に反映



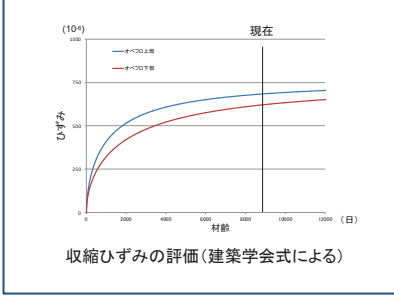
・建屋の初期剛性の低下には乾燥収縮も影響している。

・乾燥収縮による剛性低下は終局耐力に影響を与えない。

・女川2号炉では、乾燥収縮の更なる進展が初期剛性の更なる低下にはつながらない。

実機の乾燥状態

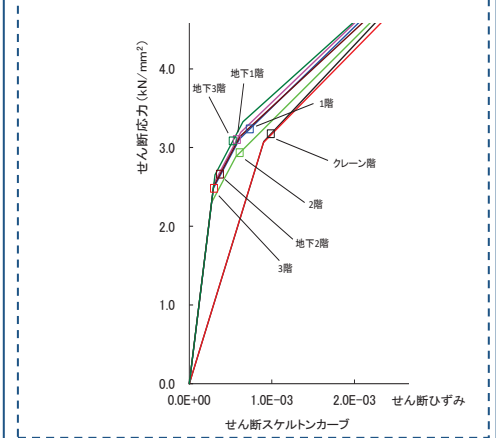
・建設後の経過年数から乾燥収縮はほぼ定常状態となっている。



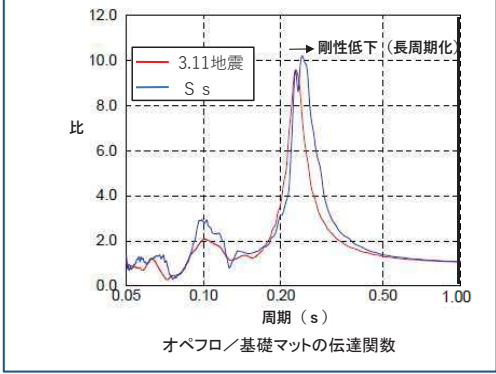
更なる初期剛性の低下を考慮 (保守的に基準地震動Ssによる剛性低下を初期剛性の低下とみなし反映)

基準地震動Ssによる応答

基本モデルを用いた基準地震動Ssによる応答結果は、多くのフロアで第一、二折点を超え非線形化が進む。そのため初期剛性の多少の違いが応答結果に及ぼす影響は小さい。



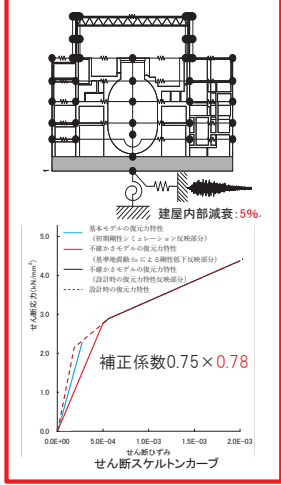
基準地震動Ss7波を基本モデルに入力することによって長周期化した一次周期の最大変化量(原子炉建屋の場合、剛性で0.78倍)を、初期剛性の低下とみなして不確かさモデルに反映する。



基準地震動Ss 入力

不確かさモデル

基準地震動Ssによる剛性低下を初期剛性低下とみなして*モデルに反映



*不確かさモデルでは、基本モデルの基準地震動Ssによる剛性低下を初期剛性の低下とみなし、**応答が小さい部位も含め全ての部位の初期剛性を一律低下させる**。そのため、基本モデルに基準地震動Ssを繰り返し入力する応答よりも、不確かさモデルに基準地震動Ssを入力した応答の方が更に非線形化が進む保守的評価となる。

応答結果 (設計反映)

女川の地震環境との関係

宮城県沖ではプレート間巨大地震(3.11地震)の約一か月後にプレート内地震(4.7地震)が発生している。

不確かさモデルでは、基本モデルの基準地震動Ssによる剛性低下を初期剛性の低下とみなし、応答が小さい部位も含め全ての部位の初期剛性を一律低下させることにより保守性を確保している。従ってこの解析は大きな地震の一定期間後に基準地震動Ssの揺れに見舞われる事象に対する保守的評価にも該当する。

