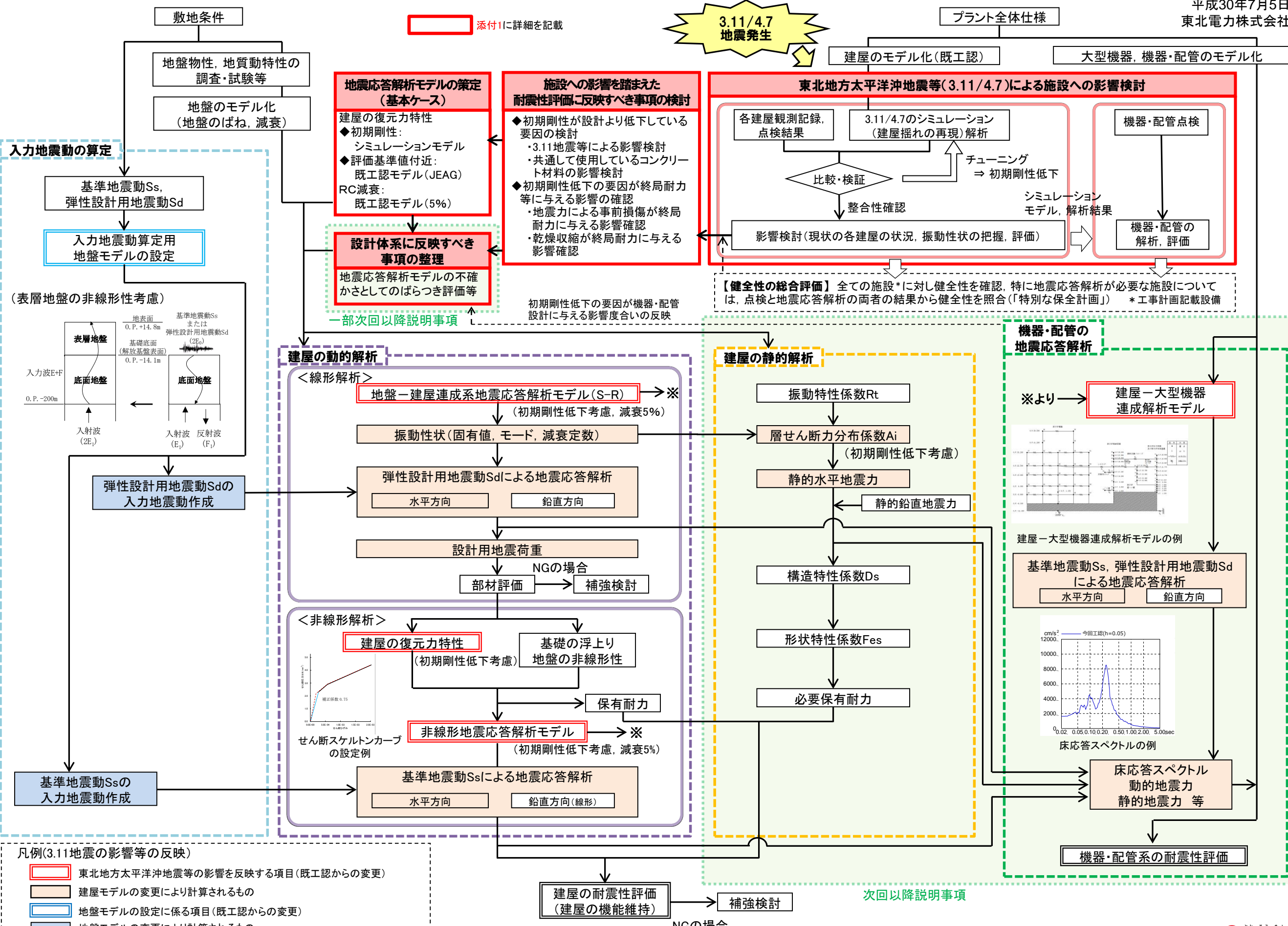


女川2号炉 東北地方太平洋沖地震後の既設設備の耐震設計全体概要



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

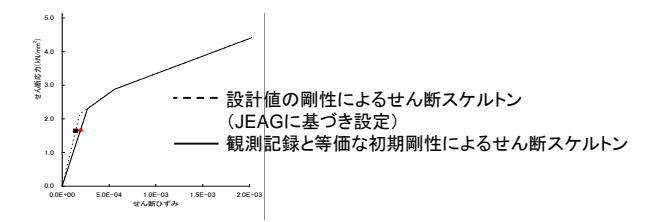
【課題】3.11地震等における建屋の振動特性の変化

➢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2割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割程度の低下となっており、これについても検討が必要である。

※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、鉄筋コンクリート造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。



【初期剛性低下の特徴と初期剛性が設計より低下している要因】

- ①3.11地震や4.7地震では、耐震クラスに係らず、多くの建屋で、設計と乖離する初期剛性の低下傾向が認められる。また、地震による微細なクラックも各建屋で認められている。
⇒3.11地震等の影響を受け、初期剛性が低下している。
- ②一方、各建屋では3.11地震等による顕著な被害は認められていない。
⇒初期剛性が設計より低下している要因として、共通して使用しているコンクリート材料の影響が重なっていると考えられる。

【初期剛性が設計より低下している要因分析の具体的検討項目】

- ①3.11地震等による影響検討
 - ・大きな地震動による影響に関し、3.11地震における構造的損傷、支持地盤の変化の有無を確認する。
 - ・女川は3.11地震前にも比較的大きな地震を受けており、繰返し地震による影響についても確認する。
 - ・オペフロ上部については、構造的特徴(大空間)およびその応答性状による影響について検討する。
- ②共通して使用しているコンクリート材料の影響検討
 - ・コンクリート材料の影響に関しコンクリートの圧縮強度の低下の有無を確認する。
 - ・コンクリートの乾燥収縮は初期剛性低下に影響を与えるとの指摘があること、女川の建屋の共通特徴として乾燥収縮ひび割れが比較的多い傾向があることから、乾燥収縮の影響について検討する。

【初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認】

- ①各建屋は、3.11地震によって微細なクラックが発生している。事前損傷の程度差(3.11地震より更に多数のクラックを発生させた耐震壁など)が終局耐力に与える影響を確認する。
- ②乾燥収縮がコンクリート構造物の終局耐力に与える影響について確認する。
⇒ 初期剛性の低下要因が終局耐力に与える影響等を含め、設計に反映すべき事項をとりまとめる。

初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

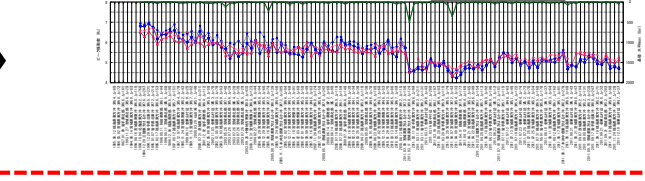
【3.11地震等による影響検討】

■実機の3.11地震等に対する建屋の振動特性の把握

建屋剛性の経年変化について観測記録の分析(ARXモデルによる検討)
 ・経年変化に伴い剛性は低下する傾向が認められる。特にそれまで経験していない大きな地震動(更新地震)を受けると剛性が大きく低下する傾向(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。

3.11地震等のシミュレーション解析

・既工認モデルにオペフロ上部の剛性低下率:0.3(NS), 0.5(EW), オペフロ下部の剛性低下率:0.75(NS), 0.8(EW)を考慮すること、鉛直方向は設計剛性で3.11地震等のシミュレーション可能。
 ・建屋内部減衰は水平7%、鉛直5%で観測記録と整合。



【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

■乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)

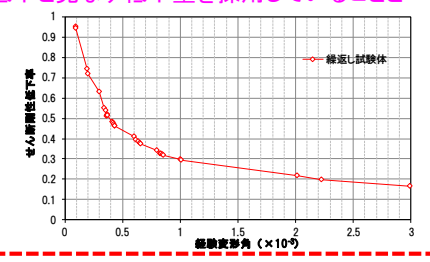
・耐震壁の実験結果に基づき初期剛性と終局耐力について検討している文献2編を分析。
 (a. 耐震実験論文をベースに分析した例, b. 乾燥前後の耐震壁の加力試験)
 ・両文献とも、乾燥収縮が原因とされる初期剛性の低下が認められる一方で、終局耐力の低下はなく、既往の評価式を上回る傾向を示している。

■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、曲げ変形の影響で初期の剛性は低下するものの、評価基準値付近および終局耐力はJEAG式と同程度であることを確認。
 ・また、基本モデルは曲げ変形による剛性低下をせん断変形による剛性低下と見なす低用量を採用していることと等価であり、保守的評価となっている。



■繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1])

・小変形時の繰返し加力による剛性低下は顕著ではないことを確認。

■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、支持地盤の剛性低下の傾向は認められないことを確認。

■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を確認。
 ・今後、3.11地震前後におけるコア強度について、優位な劣化は認められないことを確認。

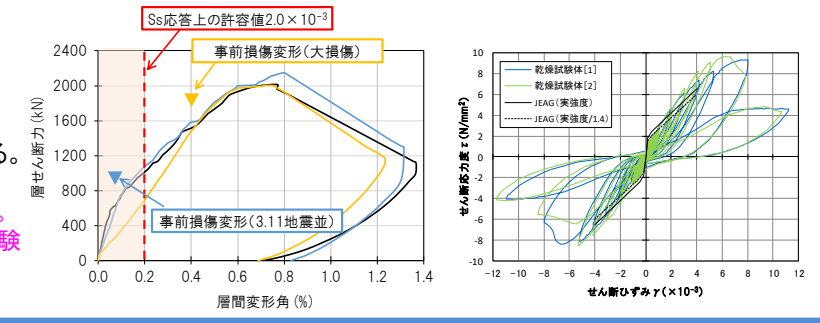
初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認

■地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震実験[2])

・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、また、鉄筋量の小さい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クラックを発生させた壁

■乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震実験[3])

・乾燥試験体(3か月)では、初期剛性はJEAG式を下回るが評価基準値付近および終局耐力は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では、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とその後の履歴特性に与える影響は小さいことを確認。
 大変形時は乾燥試験体と通常試験体の加力によるひび割れの傾向は同等となるため、乾燥試験体でも耐震実験[2]が適用可能と判断。
 ・耐震実験で使用した骨材と女川の骨材について比較し、耐震実験結果の実機への適用性について確認。

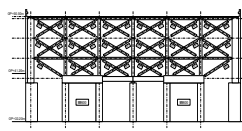


地震応答解析モデルの策定(基本ケース)

・上記検討結果を基準地震動Ss等の地震応答解析モデルに反映。
 ・既工認モデルとの応答比較を実施。
 ・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ことを確認。

オペフロ上部耐震補強工事

・オペフロ上部の耐震補強工事の概要や効果についての定量的データを説明。
 ・今後、オペフロ上部補強工事による悪影響の有無、今後起こり得る剛性低下の影響の有無について検討する。



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ばらつき評価等)

原子炉建屋の代表性
 ・原子炉建屋と他の建屋の状況比較を実施し、原子炉建屋オペフロ上部の代表性を説明する。

原子炉建屋の耐震設計
 ・地震応答解析モデルの不確かさケースの設定(基準地震動Ssおよび弾性設計用地震動Sd)
 ・静的地震力評価用Ai分布(3Ci用、保有水平耐力)※
 ・基礎版等の二次元FEMモデルの初期剛性の設定
 ・断面算定時のコンクリートの許容応力度の確認

建屋の要求機能に対する設計上の取り扱い
 ・初期剛性の低下により地震によるひび割れが入りやすい状態になっており、特に気密性能を有する壁等に対する影響や設計上の対応について検討する。

既設設備評価への反映事項の有無
 ・建屋の剛性低下により既設設備の健全性にどの程度影響があるのかについて確認し、重点化が必要な課題の有無について検討する。

※既工認モデルと今回工認モデル(初期剛性低下を考慮したモデル)によるAi分布の差異が、静的地震力や保有水平耐力の算定結果に与える影響を比較し、設計体系への反映について検討する。また、静的地震力が建屋設計上どの程度の重みを持つかについて、基準地震動Ss等の応答結果と比較する。

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配的になる。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、荷重-変形特性は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低下量を反映するカーブを採用する。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。

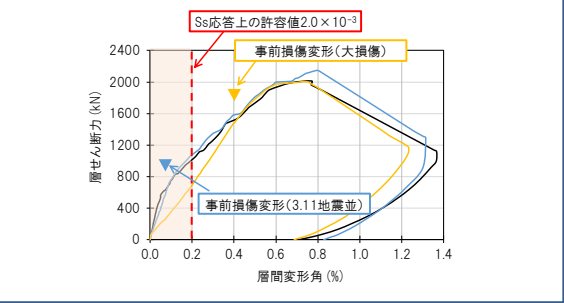
・不確かさモデルについては、女川における地震環境も踏まえ、初期剛性の更なる低下を不確かさケースとして考慮する。具体的には基本モデルに基準地震動Ssを入力し、JEAG式に従い低下する建屋の剛性低下量を建屋の初期剛性低下量とみなして適用したモデルを不確かさモデルとし、再度基準地震動Ssを入力する地震応答解析結果を設計に考慮する。不確かさモデルにおいても、建屋の内部減衰は5%を採用する。

3.11,4.7地震のシミュレーション解析

- ・初期剛性の低下量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)(建設時からは約5割)
- ・建屋の内部減衰は7%

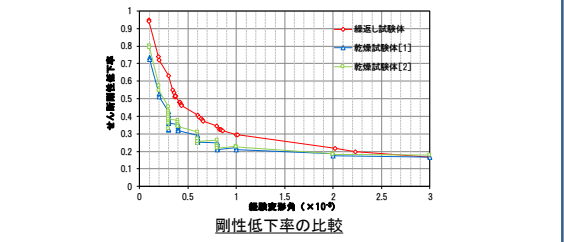
耐震実験(事前損傷)

- ・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。

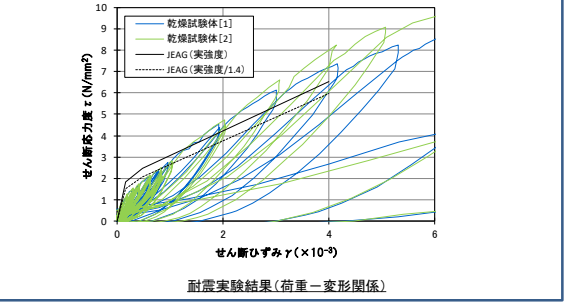


耐震実験(乾燥試験体)

- ・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。

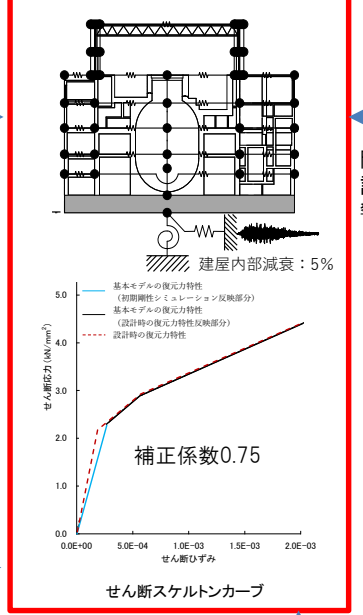


- ・乾燥試験体[1](3か月養生)は、初期剛性はJEAG式を下回るが評価基準値および終局耐力はJEAG式を上回る。
- ・更に乾燥させた試験体[2](8か月養生)による加力実験結果は、乾燥試験体[1](3か月養生)とほぼ同程度の結果となった。



基本モデル

JEAG式をベースに3.11地震による剛性低下量を初期剛性に反映

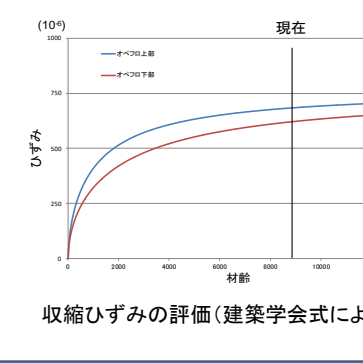


地震による剛性低下は終局耐力に影響を与えない。

- ・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

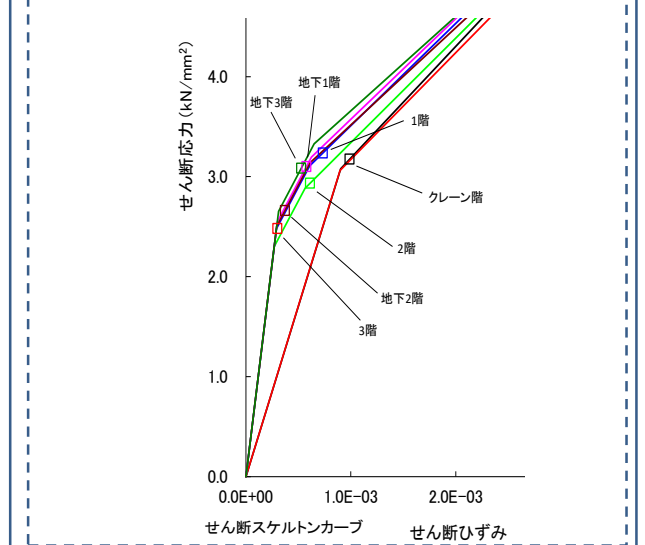
- ・建設後の経過年数から乾燥収縮はほぼ定常状態となっている。



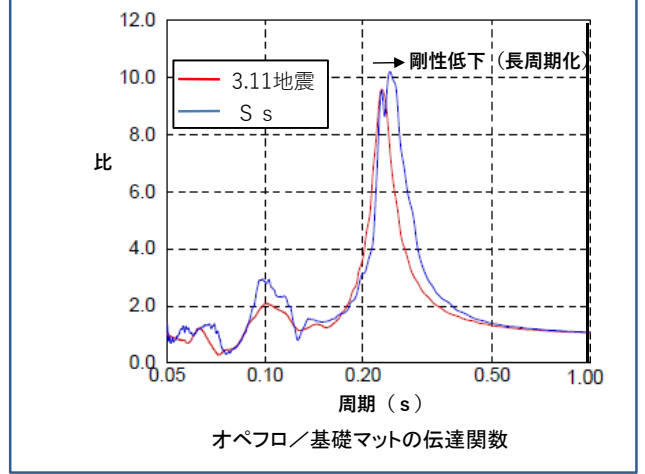
基準地震動Ssによる剛性低下量を初期剛性の低下とみなして反映

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、二折点を越え非線形化が進む。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。



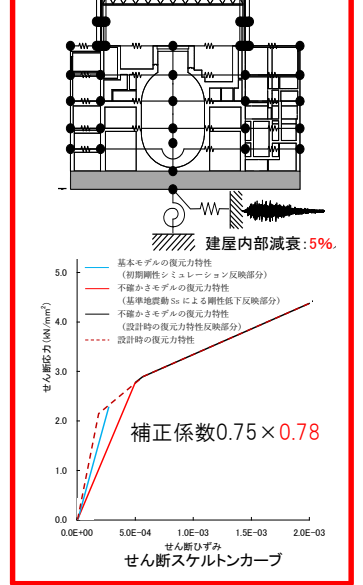
基準地震動Ssを基本モデルに入力することによって長周期化した一次周期の変化量(原子炉建屋の場合、最大0.78倍)を、初期剛性の低下とみなして不確かさモデルに反映する。



基準地震動Ss再入力

不確かさモデル

基準地震動Ssによる剛性低下量を初期剛性低下量とみなして*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による剛性低下量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の評価となる。

応答結果(設計反映)

女川の地震環境

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。プレート内地震は短周期成分が強く、プレート内地震から策定した基準地震動Ss-D2の最大加速度は1000ガルであり、基準地震動7波の中で短周期施設に与える影響は最も大きい。

