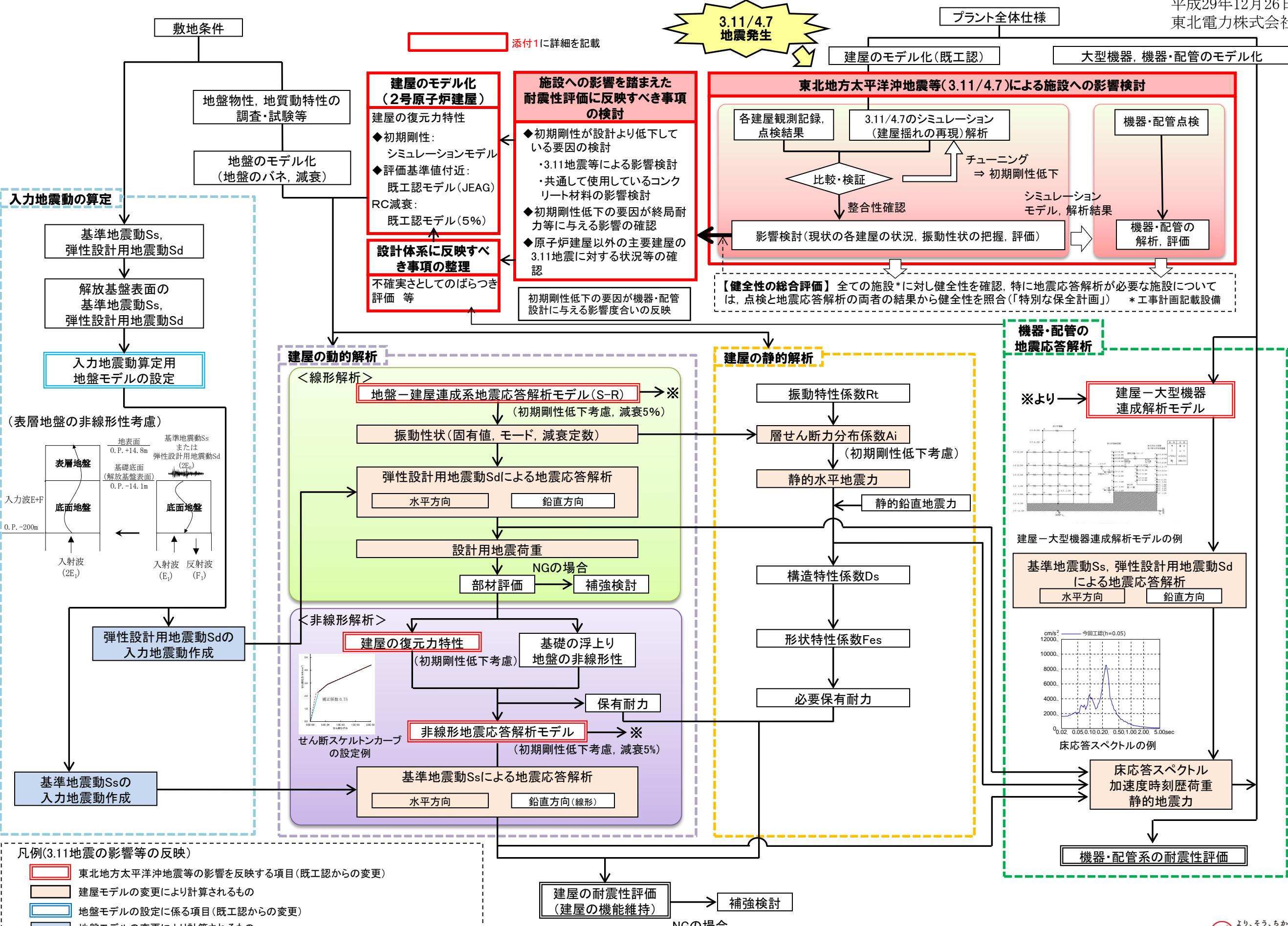


女川2号炉 東北地方太平洋沖地震後の既設設備の耐震設計全体概要



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

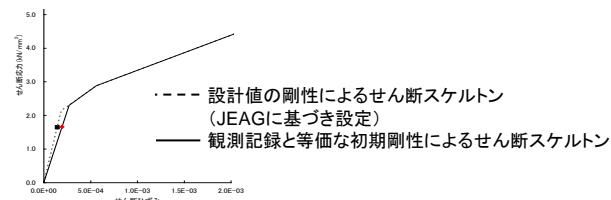
【課題】3.11地震等における建屋の振動特性の変化

➤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畳し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)及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】

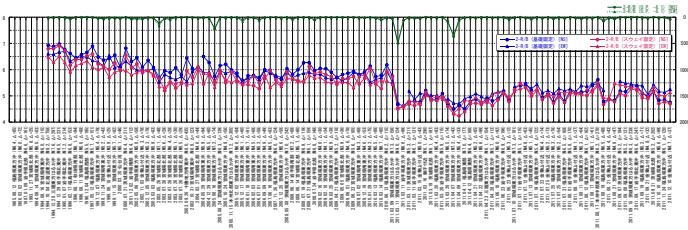
- ①各建屋は、3.11地震によって微細なクラックが発生している。事前損傷の程度差(3.11地震より更に多数のクラックを発生させた耐震壁など)が終局耐力に与える影響を確認する。
- ②乾燥収縮がコンクリート構造物の終局耐力に与える影響について確認する。
⇒ 初期剛性の低下要因が終局耐力に与える影響等を含め、設計に反映すべき事項をとりまとめる。

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】

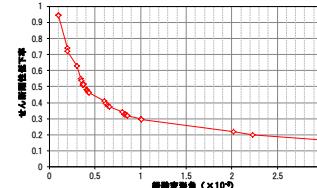
■実機の3.11地震等に対する振動特性の把握

- ・女川の主要な建屋の水平動に対する剛性低下の傾向確認(本震シミュレーション解析, その他の地震を含めた観測記録の分析)
- ・女川の主要な建屋の鉛直動に対する剛性低下の傾向確認(シミュレーション解析, 観測記録の分析)
- ・小振幅地震時の剛性低下の経時的变化の確認(観測記録の分析, 東通との比較)



■3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価)(添付2参照)

- ・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, 残留変位についての検討
 - ・床等のせん断以外の応力又はひずみについての確認
 - ・オペフロ下部の初期剛性低下の共通要因に加え、オペフロ上部について、構造的特徴(大空間)及びその応答性状による影響について検討
- ※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



■支持地盤の剛性低下の有無

- ・2号炉原子炉建屋シミュレーション解析による支持地盤の支持力確認
- ・自由地盤と建屋直下の地震観測記録の傾向比較(3.11地震前後の比較)
- ・側面地盤の影響確認(地震応答解析に与える影響の確認)

■繰返し地震力の影響の有無(耐震壁実験[1]による確認)

- ・中小振幅の地震力を繰返し与えた耐震壁実験による剛性低下の傾向確認

【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

■実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較

- ・2号炉原子炉建屋オペフロ階耐震壁からのコア抜き試験
- ・他号機のコア抜き試験

■乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)

- ・乾燥収縮が初期剛性に与える影響(過去の耐震壁の実験結果の傾向分析, 乾燥前の耐震壁と乾燥させた耐震壁の静的加力試験)
- ・乾燥収縮に対する従来の設計体系における扱い etc

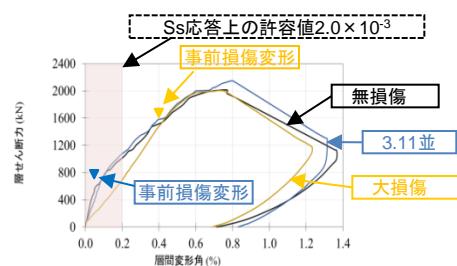
■実機の乾燥収縮状態等の把握

- ・使用コンクリートの乾燥収縮に関する材料特性の把握(女川, 東通のコンクリート試験の比較)
- ・女川の乾燥収縮ひび割れ状況の把握(女川, 東通の建設時期の近い類似の建屋における乾燥収縮ひび割れの点検比較, 2号炉原子炉建屋各階の乾燥収縮ひび割れ調査結果によるひび割れ多寡の評価)

初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認

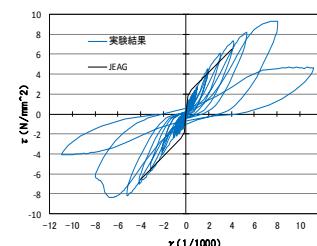
■地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[2]による影響確認)

- ・耐震壁の事前損傷の程度差(ひび割れの多寡)が最終耐力に与える影響の確認
- ※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



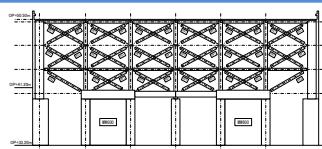
■乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[3]による影響確認)

- ・乾燥させた耐震壁試験体の初期剛性の低下傾向, 終局耐力の大きさ, JEAG式との差異などについて確認



オペフロ上部耐震補強工事

- ・耐震補強工事の目的や取扱の説明
- ・耐震補強工事の有効性の確認(耐震実験や地震観測記録等から補強工事の有効性を確認)



地震応答解析モデルの策定

- ・上記検討結果を基準地震動 S_s 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
- ・地震応答解析モデル策定に当たっては、実機の乾燥状態の度合いを考慮

原子炉建屋以外の主要建屋の3.11地震に対する状況等の確認

- ・原子炉建屋以外の建屋の剛性低下の状況, 被害調査の結果の概要, 構造的特徴の差異等の取り纏め

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)

- ・設計体系に反映すべき事項として、①地震応答解析モデルの不確かさとしてのばらつき評価, ② S_s 評価モデル以外の耐震評価に係る必要反映事項, について検討する。

【地震応答解析モデルの不確かさとしてのばらつき評価】

策定した地震応答解析モデルに対し、乾燥収縮の更なる進行が構造特性に与える影響等について検討を加え、必要に応じばらつきとして考慮していく。ばらつき評価に当たっては、他の建屋の振動の特徴や、剛性低下が設備設計に与える影響についても検討する。

【 S_s 評価モデル以外の耐震評価に係る必要反映事項】

弾性設計用地震動や静的地震力算定に適用するモデルの検討, 建屋の部位への要求機能, 役割を踏まえた影響評価内容, 部材の断面算定に対して、必要反映事項等について検討する。

女川2号炉原子炉建屋 東北地方太平洋沖地震等による構造的影響評価結果

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(添付1-1)。

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(添付1-3-1)。

【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(添付1-3-2)。

【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(添付1-3-2)。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(添付1-3-8)。

○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(添付1-3-2)。

(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】

【耐震壁の解析的評価】

○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(添付1-3-1)。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(添付1-3-4)。

○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(添付1-3-8)。更に、観測記録からねじれの影響度合い(添付1-3-6)、残留変形の大きさ(添付1-3-7)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(添付1-3-3)。

【耐震壁以外の部材の解析的評価】

○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(添付1-3-3)。
○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(添付1-3-8)。

【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(添付1-3-1)。

【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(添付1-3-5)。

【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地震動に対する設計(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(添付1-3-3)。

当該部分の調査を「基本評価」と呼称

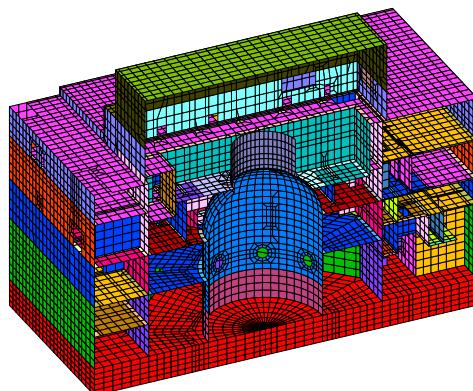
当該部分の調査を「追加評価」と呼称

緑字部分: 今回の審査会合において新たに説明する事項

※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(添付1-3-7)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。

