

令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

# 外部事象を考慮した原子力施設の 健全性評価手法の高度化

令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
耐震・構造健全性評価研究グループ

本成果の一部は、原子力規制庁からの受託事業「原子力施設等防災対策等委託費(高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化)事業」及び原子力規制庁との共同研究「原子力施設耐震評価用モデルの妥当性確認に関する研究」の成果である。

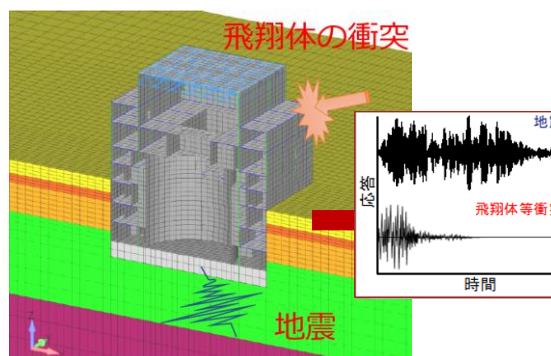
# 全体像(外部事象)

## 【最新の動向】

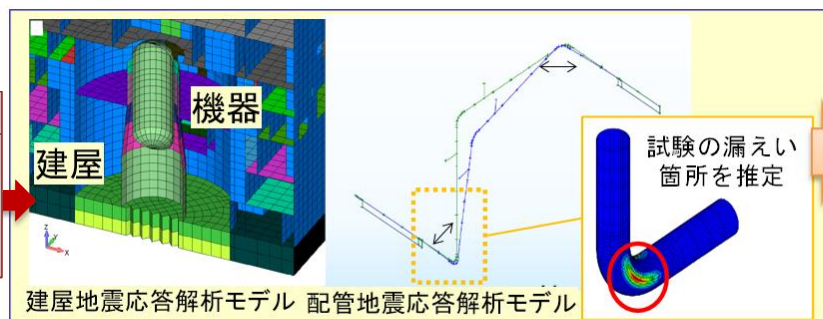
- 新規基準では、地震等の外部事象評価の厳格化、リスク評価を含めた安全性向上評価に関する運用ガイドが施行。また、飛翔体（竜巻飛来物や飛行機等）衝突に係る規制が新設。

## 【実施内容の概要】

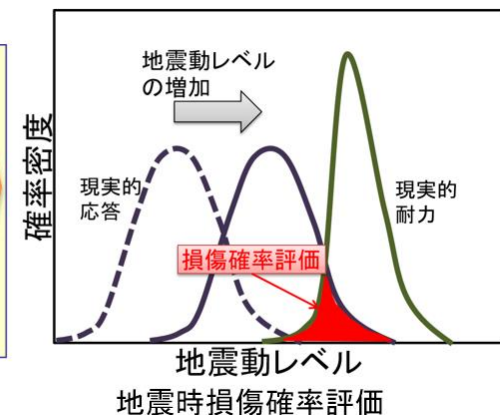
- 地震時**の原子炉建屋及び機器・配管の健全性評価
  - 地震動による現実的応答に係る3次元・非線形詳細解析手法の整備、評価モデルの標準化
  - 現実的応答・耐力評価を通じた健全性評価手法・フラジリティ評価手法の整備
  - 現実的耐力に係る強度試験データの活用、機構施設を活用した地震観測記録の取得
- 飛翔体衝突**に係る原子炉建屋及び内包機器等の健全性評価
  - 建屋を対象とした飛翔体衝突による損傷評価手法の整備
  - 建屋内包機器設備を対象とした応力波による応答に係る評価手法、健全性評価手法の整備
  - 建屋外壁や内包機器を含めた構造体を対象とした飛翔体衝突試験の実施、試験データの活用



原子炉建屋・機器等の解析モデルの詳細化



建屋・機器・配管の地震応答評価や耐力評価



地震動レベル  
地震時損傷確率評価

## 【ねらい】

安全上重要な建屋・配管等を対象に、地震を起因とした確率論的リスク評価(地震PRA)に資するフラジリティ評価のための3次元詳細解析モデルを用いた現実的応答解析手法の高度化及び標準化を図る。

## 【アプローチ及び成果】

- ✓ 地震時のゆれに対して影響が大きい重要因子を抽出し、各重要因子の影響度を明らかにするため、地震観測記録と解析結果の比較等を通して、建屋3次元詳細解析モデルを整備(図1)。
- ✓ 特に影響度が大きい鉄筋コンクリート(RC)材料非線形、建屋側面と地盤間の剥離・滑りや建屋基礎の浮上り等の重要因子に着目した応答解析を実施し、**フラジリティ評価のための地震応答解析手法の高度化**に資する技術的知見を取得(図2、図3)。
- ✓ 以上の考察等を踏まえ、原子炉建屋を対象とした地震応答解析に用いられる**3次元詳細モデルの作成及び解析で必要となる手法や考え方、技術根拠等をまとめた標準的解析要領を充実化させ、JAEA-Researchとして公開**。
- ✓ 配管の地震応答解析手法の高度化のため、支持構造物を含めた配管系の3次元弾塑性詳細解析モデルを整備し、解析モデルによる解析結果と既往試験との比較により、解析手法の妥当性確認を進めた。

## 【成果とその活用】

建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法の高度化・標準化に係る成果は、原子炉建屋のフラジリティ評価に資する重要な技術的知見として活用可能である。**標準的解析要領を公開するとともにプレス発表を実施(令和4年3月)**。

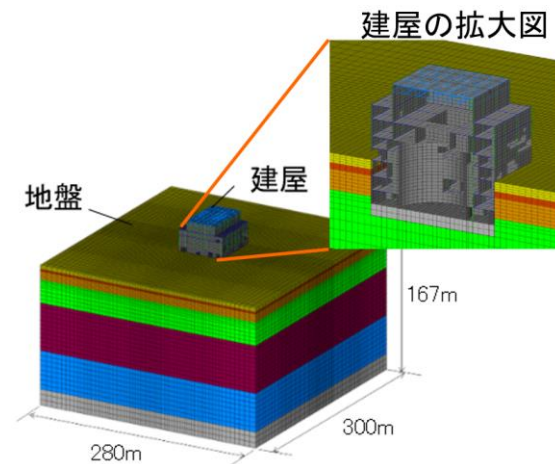


図1 軽水炉建屋の3次元詳細解析モデル

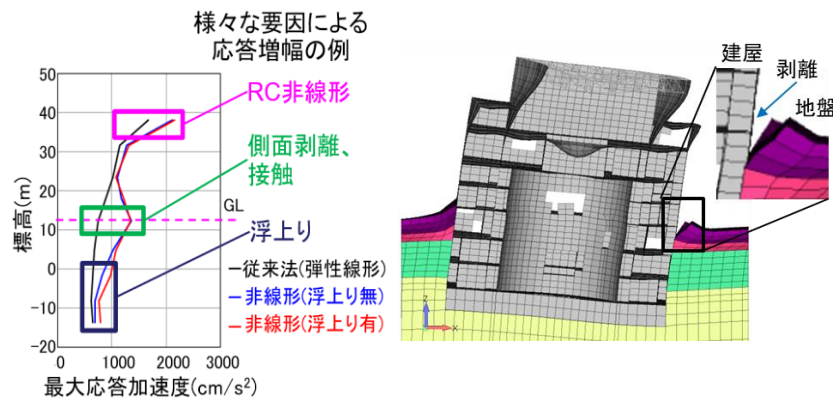


図2 非線形地震応答解析事例

図3 地盤と建屋の境界部における接触・剥離の計算例

## 【ねらい】

建屋3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析手法の妥当性を確認する。

## 【アプローチ及び成果】

機構施設を活用した大規模観測システムを整備し、実測データの分析により得られた振動特性を3次元詳細解析モデルに反映し、3次元耐震評価解析手法の精緻化を図る。

✓原子力規制庁との共同研究の一環として、機構施設である高温工学試験研究炉(HTR)を活用し、自然地震に加えて人工波に対する多点同時観測が可能な**大規模観測システムを整備**した(図1)。

✓整備した大規模観測システムにより自然地震及び人工波の観測記録の取得を継続した。また、得られた観測記録に基づき建屋全体及び局所の振動特性の分析を進め、分析結果をもとに解析モデルを精緻化した。さらに、**地震観測記録を活用し、建屋3次元地震応答解析手法の妥当性確認を実施中**(図2)。

## 【成果とその活用】

大規模観測システムを活用した建屋3次元地震応答解析手法の妥当性確認に係る成果は、建屋のフラジリティ評価に資する技術的知見として活用可能。本研究で整備した自然地震と人工波による同時多点観測を可能とする大規模観測システムは世界初であることから、**プレス発表を実施**(令和2年3月)。

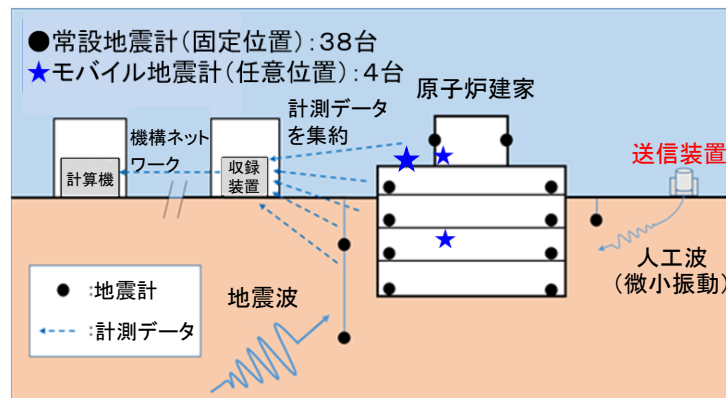
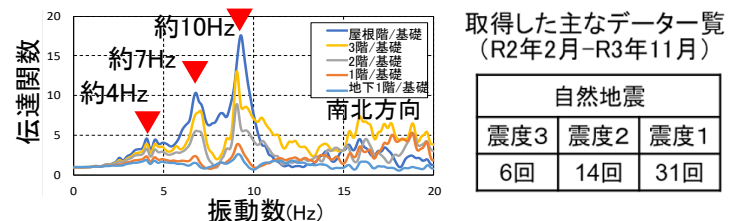
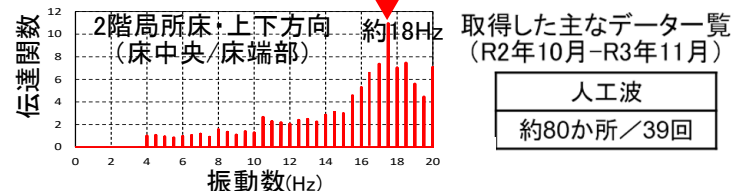


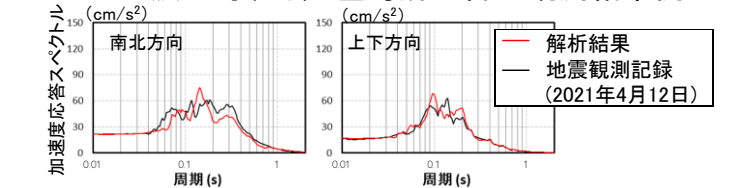
図1 大規模観測システムによる地震観測



自然地震に対する建屋全体応答の観測結果例



人工波に対する建屋局所応答の観測結果例



自然地震の観測記録と解析結果(改良後)の比較例(1階南)

図2 観測記録と解析結果の比較例



# 飛翔体衝突に伴う原子力施設の健全性評価手法の高度化 (1/2)

**【ねらい】** 飛翔体衝突に伴う建屋外壁の構造健全性評価に資する手法の高度化を図る。

**【アプローチ】** 飛翔体衝突による建屋外壁の局部損傷評価に係る試験データを取得するとともに、解析手法の妥当性を確認する。

✓ 建屋外壁の局部損傷については、より現実的な衝突条件(柔飛翔体、斜め衝突)を考慮し、飛翔体の柔性(剛飛翔体及び柔飛翔体)、衝突角度(垂直及び斜め衝突)及び先端形状(平坦型及び半球型)による飛翔体衝突試験を実施し、建屋外壁を模擬した鉄筋コンクリート(RC)板の損傷状況に係る試験データを取得した(図1)。

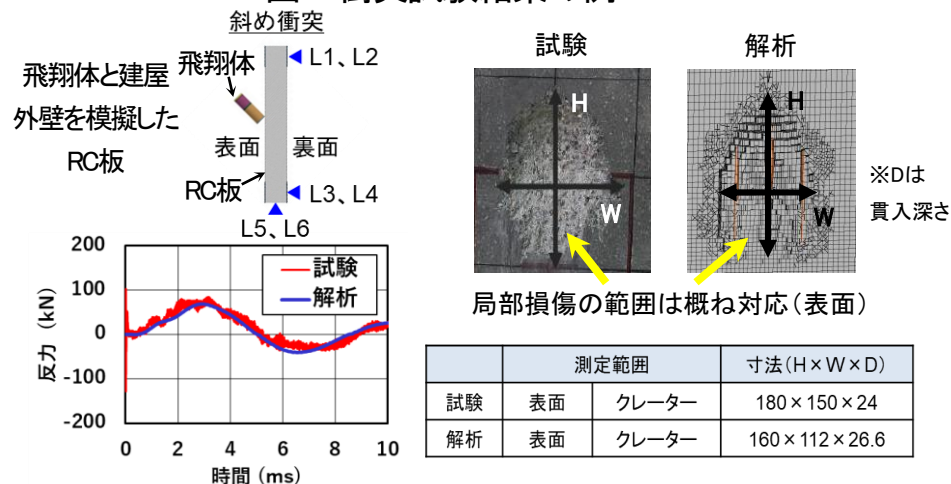
✓ 飛翔体衝突試験の再現解析を実施し、飛翔体や鉄筋コンクリート構造の非線形材料特性、ひび割れ等の閾値及びすべり条件等に係る適切な設定方法等をもとに、局部的損傷に係る影響評価解析手法を整備した(図2)。

## 【成果の活用】

建屋外壁の局部損傷評価に関する成果は、飛翔体衝突による原子力施設の構造健全性評価に資する技術的知見として活用可能である。

		局部損傷評価対象: 損傷モード	
		裏面: 裏面剥離	表面: 貫入
衝突条件	垂直衝突 	 剛飛翔体の例 表面剥離 損傷大	 貫入深さD(mm) 剛飛翔体 25.0 柔飛翔体 5.5
	斜め衝突 	 剛飛翔体の例 裏面剥離限界 損傷小	 貫入深さD(mm) 剛飛翔体 37.0 柔飛翔体 24.0

図1 衝突試験結果の例



支持点L1における反力の比較 局部損傷(貫入)の試験と解析の比較

図2 局部的損傷に係る影響評価解析手法の例 5

# 飛翔体衝突に伴う原子力施設の健全性評価手法の高度化 (2/2)

**【ねらい】** 飛翔体衝突に伴う応力波の伝播及び建屋内包機器への影響評価に資する手法の高度化を図る。

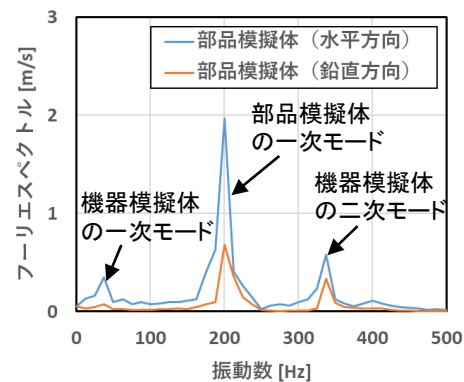
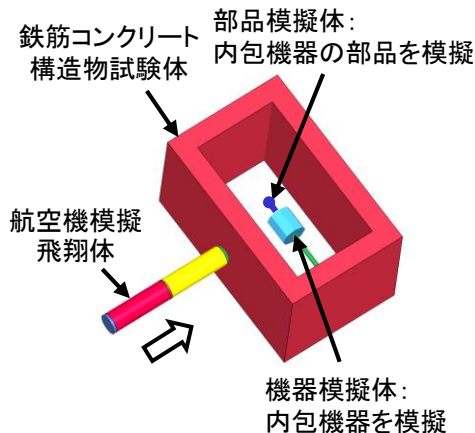
**【アプローチ】** 飛翔体衝突による応力波の伝播及び建屋内包機器への影響評価に係る試験データを取得するとともに、解析手法の妥当性を確認する。

✓ 飛翔体衝突による影響を受けやすい機器及び部品を模擬した箱型試験体を用いて衝突試験を実施し、飛翔体衝突時の建屋における応力波伝播や建屋内包機器への影響等に係る試験データを取得した(図1)。

✓ 内包機器への影響評価に係る解析手法の妥当性確認のため、箱型試験体の衝突試験結果の再現解析を実施。建屋を模擬した鉄筋コンクリート壁における応力波の伝播や内包機器の衝撃応答に係る解析手法を整備し、試験結果との比較により解析手法の妥当性確認を進めている。(図2)。

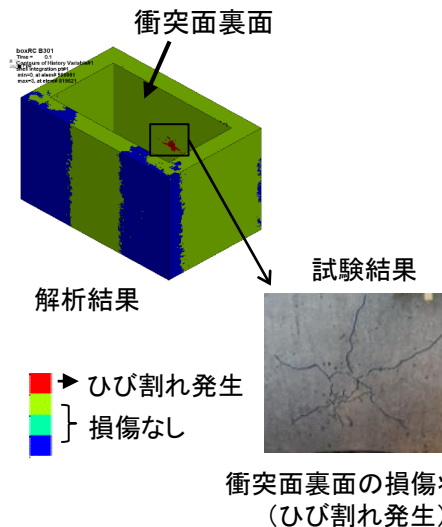
## 【成果の活用】

建屋における応力波の伝播及び建屋内包機器への影響評価に関する成果は、飛翔体衝突による原子力施設の構造健全性評価に資する技術的知見として活用可能である。

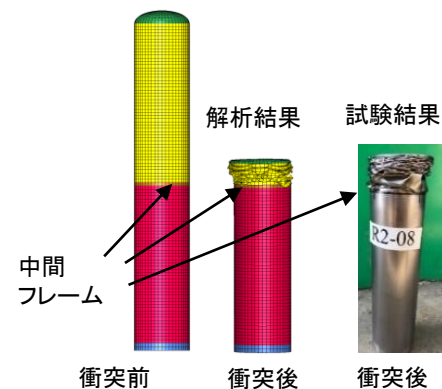


部品模擬体における加速度応答 (フーリエスペクトル)

図1 飛翔体衝突試験で計測した試験データの例



(a)箱型試験体の衝突面裏面の損傷の例



(b) 飛翔体の損傷の例

図2 試験結果と解析結果の比較