



Japan Atomic Energy Agency

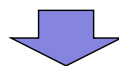
# 原子炉建屋の耐震評価のための三次元 モデル化手法の標準化への取り組み

JAEA 西田明美  
崔炳賢  
塩見忠彦  
李銀生

# 背景・目的

## ● 背景

- 東北地方太平洋沖地震以降、原子力施設に対する地震や津波等の外部事象による影響評価の強化が求められている。地震に対しては特に、想定を超える地震の発生が懸念されており、設計基準を超える条件で現実的応答や現実的耐力を評価可能なモデル化手法の整備が急務。
- 一方、計算工学及び計算機技術等の発展により、近年は構造解析等において実形状に基づく三次元モデルが作成され、応力解析や応答解析等に活用されている。
- 原子炉建屋においても、三次元詳細モデルは耐震評価等に活用されつつある。しかしながら、三次元詳細モデルの精度にはばらつきがあり、原子炉建屋のように実大実験が困難な規模の構造に対しては、解析結果の妥当性確認が課題となっている。



## ● 目的

- 地震応答解析のための原子炉建屋三次元詳細モデルの構築手法に係る標準（以下、標準）を整備し、原子炉建屋の科学的かつ合理的な耐震評価に資する。

## 標準作成の基本方針(案)

地震応答解析のための原子炉建屋三次元詳細モデル構築手法の標準（以下、標準という）作成の基本方針（案）を以下に示す。

- ✓ 本標準は、原子炉建屋の地震応答解析の妥当性を確保するための三次元詳細モデルの作成方法及び計算方法を示す。これは、妥当性が確保されていることを確認するためのガイドを示すことでもある。
- ✓ 標準の構成は、本文（モデルを構築するための基本事項）、解説（基本事項の技術根拠等）、解析事例とする。
- ✓ 標準の対象は、国内の原子炉建屋を想定し、その適用事例として、公開データをもとに解析事例を作成する。

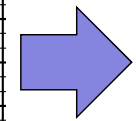
# 標準の項目

- 解析法の妥当性を示すプロセスとして一般に用いられている Verification と Validation※を考慮した解析プロセスに基づき、解析結果に影響の大きいモデル化因子リスト案を作成。

※ Verification : 解析に用いる数理モデル（三次元有限要素法による振動方程式、構成式など）の正しさの確認行為  
 Validation : その解析による結果が実際を表しているかの確認行為

## モデル化因子リスト案

大項目	中項目	項目	部位/手法	内容		
解析モデルの設定・定義	解析対象の設定・定義	複数、単独建物、	建物	隣接効果(単独、複数)		
		入力動	地盤	モデル化範囲(解放基礎の位置など)		
			入力動の種類	入力動の種類	入力動の速い(断層波、横断波など)	
			水平2方向+鉛直	水平2方向+鉛直	最大加速度方向	
			長大構造物	長大構造物	位相差	
	解析モデル(空間因子)	モデルの詳細度合	建物の部分の選択範囲	深層地盤	地盤構造、入射角	
				建物	—	解放境界の設定方法
				建物	モデル化範囲(貯蔵庫、補助壁、開口など)	
				地盤(相互作用)	地盤のモデル化(解序、不整形性、データ整理など)	
				外部荷重	表面地盤の影響(埋込など)	
	解析モデルの設定・定義	部材	鉄骨トラス	材料	剛性、強度、履歴、減衰、非線形	
			免震装置	損傷メカニズム	座屈(接合部の影響)	
			機器(重量機器、重要機器)	原子炉ペDESTAL	特性	
		材料(物理因子)	鉄筋コンクリート	強度	圧力容器	モデル化 ON/OFF (建物との干渉)
				剛性	強度	モデル化 ON/OFF (建物との干渉)
質量				圧縮強度、引張強度	モデル化 ON/OFF (建物との干渉)	
鉄骨			減衰	ヤング率、ポアソン比	ヤング率、ポアソン比	
			復元力特性	減衰	減衰	
			初期状態	ひび割れ	ひび割れの履歴	
地盤		強度	ひび割れ	ひび割れ		
		剛性	ひび割れ	ひび割れ		
		質量	ひび割れ	ひび割れ		
境界(空間因子)		半無限境界のモデル化	側面、底面	側面、底面	水平、回転ばね、FEM	
				側面、底面	水平、回転ばね、FEM	
				側面、底面	水平、回転ばね、FEM	
	接合部	基礎浮上り	基礎浮上り	基礎浮上り		
		RCと鉄骨	RCと鉄骨	RCと鉄骨		
		鉄骨と鉄骨	鉄骨と鉄骨	鉄骨と鉄骨		
	境界の荷重	温度	温度	温度		
		変位	変位	変位		
		土圧	土圧	土圧		
	計算モデルの検証	初期状態	初期応力、ひび割れ	初期応力、ひび割れ	初期応力、ひび割れ	
				初期応力、ひび割れ	初期応力、ひび割れ	
				初期応力、ひび割れ	初期応力、ひび割れ	
		解析法	有限要素の精度	要素タイプ	要素タイプ	要素タイプ
			メッシュと応答の精度	OFFSET	OFFSET	OFFSET
			時間積分法の精度	解の収束	解の収束	解の収束
周波数応答法の精度			方法と刻み時間	方法と刻み時間	方法と刻み時間	
周波数応答法-逐次解析			振動数範囲	振動数範囲	振動数範囲	
初期応力の算定方法			手法の違い	手法の違い	手法の違い	
応力計算方法			Tailing Zero	Tailing Zero	Tailing Zero	
非線形解析法			非線形モデル	非線形モデル	非線形モデル	
材料モデル			アルゴリズム/プログラム	アルゴリズム/プログラム	アルゴリズム/プログラム	
結果整理			計算点の値、出力点	減衰モデル	減衰モデル	減衰モデル
		時刻歴の最大値				
		可視化	内挿、外挿	内挿、外挿	内挿、外挿	
	プログラム	スムージング	スムージング	スムージング		
		要素・手法の組合せ	要素・手法の組合せ	要素・手法の組合せ		
解析結果の妥当性(観測記録、実験)	弾性範囲	地震観測記録による解析手法の妥当性確認	建物	モデル化の詳細さ(開口、機器重量など)		
			地盤	材料特性(弾強度、変位性など)		
			建物	質量、荷重分布		
	塑性	ひび割れ観測記録	建物	ひび割れ分布	ひび割れ分布	
		振動台試験	部材	ひび割れ分布構成則の違い	ひび割れ分布構成則の違い	



## 標準の目次例

- 概要
- 一般事項
- 適用範囲
- 用語
- 解析内容の概要
- 解析の目的
- 解析対象の設定
- 解析モデル(空間因子)
- 使用する単位、モデル化方法、解析モデルの形状と寸法
- 部材のモデル化
- RC部材、SRC部材、鉄骨部材、鉄骨トラス、使用済み燃料プール、機器、配管及び取付部、免震装置
- 材料物性
- 鉄筋コンクリート、鉄骨、地盤
- 接合条件
- 埋め込まれた建屋と地盤のモデル化
- 柱と梁の剛域のモデル化
- 柱と壁、梁と床の接合状態のモデル化
- 建屋と機器の接合部のモデル化
- 境界条件
- 半無限境界、内圧、温度境界
- 初期状態
- 熱応力、土圧
- 質量
- 荷重(入力動)
- 荷重(入力動以外)
- 解析プログラム
- 有限要素の精度
- メッシュの精度
- 解析パラメータ
- 時間積分法の精度
- 周波数応答の精度
- 初期応力の算定法の精度
- 応力計算法の精度
- 非線形計算法の精度
- 材料モデル
- 構成モデルによる違い、減衰モデルの違い
- 解析結果
- 図化・計算結果、計算エラー、非線形計算の収束
- 解析モデルの妥当性確認

## モデル化因子の選定手順

- 原子炉建屋の三次元詳細モデルの構築におけるモデル化因子のパラメータ設定が建屋応答（FRSや建屋損傷等）の違いに影響する度合い（影響度）が大きい因子を文献調査により選定し、感度解析等により建屋応答への詳細な影響評価を行う

。

選定指標は以下の通り。

- ✓ モデル化による応答の違いがあるか
- ✓ 質点系モデルの解析にはなかった三次元解析固有の振動性状が評価できるか
- ✓ 非線形解析が適切にできるか

# 代表的なモデル化因子

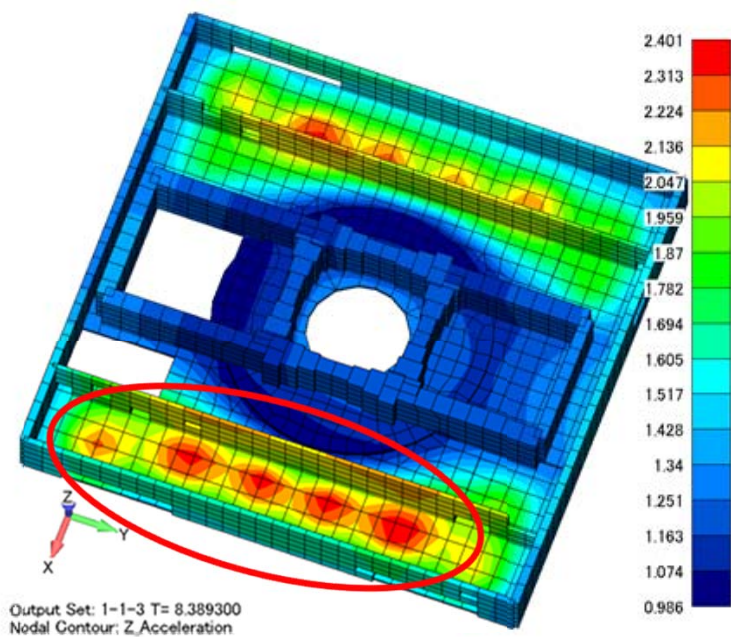
- ① モデル化範囲（建屋内部）
- ② モデル化範囲（建屋周辺・地盤）
- ③ 水平2方向＋鉛直入力
- ④ 有限要素タイプ（板要素、ソリッド要素）
- ⑤ 芯ずれ
- ⑥ 鉄骨トラス非線形特性のモデル化
- ⑦ 鉄筋コンクリート材料のモデル化
- ⑧ 半無限境界のモデル化
- ⑨ 建屋と地盤の接合部のモデル化
- ⑩ 初期応力のモデル化
- ⑪ 有限要素の精度
- ⑫ 有限要素メッシュの粗密
- ⑬ 時間積分法／周波数応答解析の影響
- ⑭ 減衰のモデル化

# モデル化因子の影響評価例(1)

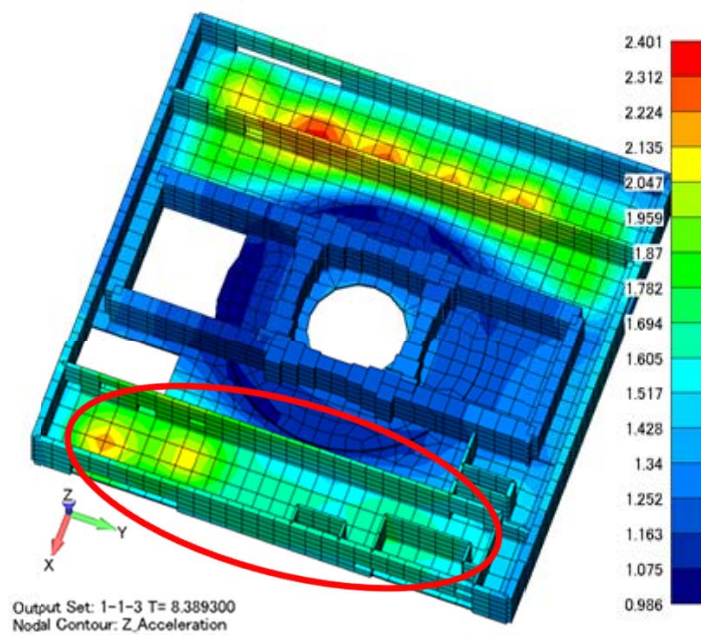
## 「モデル化範囲（建屋内部）」

原子炉建屋の3次元詳細モデルの作成においては、非耐震壁、壁・床開口部、階段など、建屋部材のモデル化範囲が建屋応答に及ぼす影響の度合いを確認する必要がある。

下図は補助壁を一部追加した場合の追加前後における床の上下方向加速度応答を示す。補助壁追加後は床の加速度応答が抑制されることが確認できる。



補助壁追加前



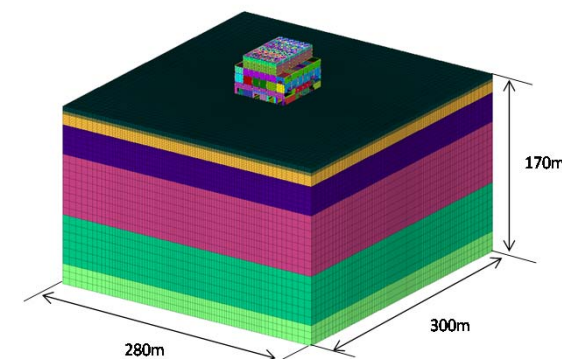
補助壁追加後

補助壁の影響確認(3F)

# モデル化因子の影響評価例(2)

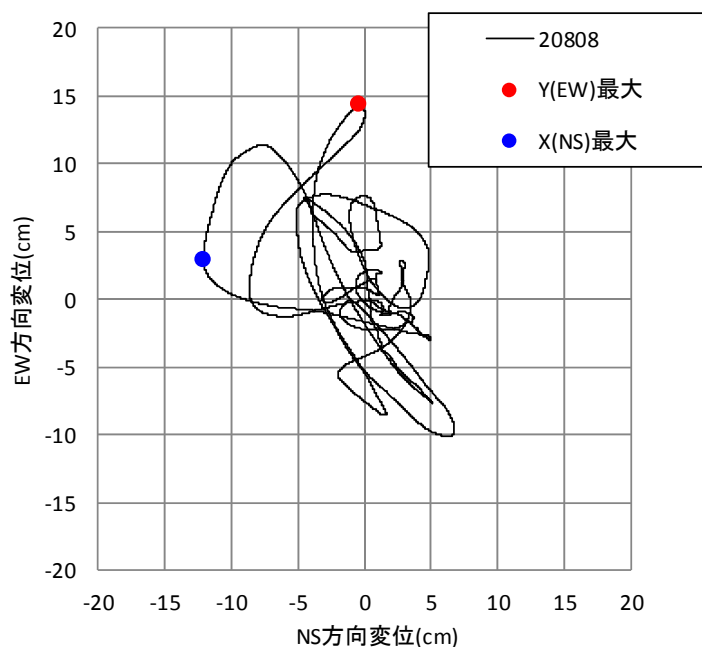
## 「水平2方向+鉛直入力」

解析モデル（右図）を用いて、原子炉建屋と地盤間の三次元挙動を分析するために、線形地震応答解析を実施。以下に示すようなオービットや地盤と建屋地下外壁との相対変位などの結果を基に入力地震動の入力方向の組み合わせによる応答の違いを分析し、影響評価を実施。

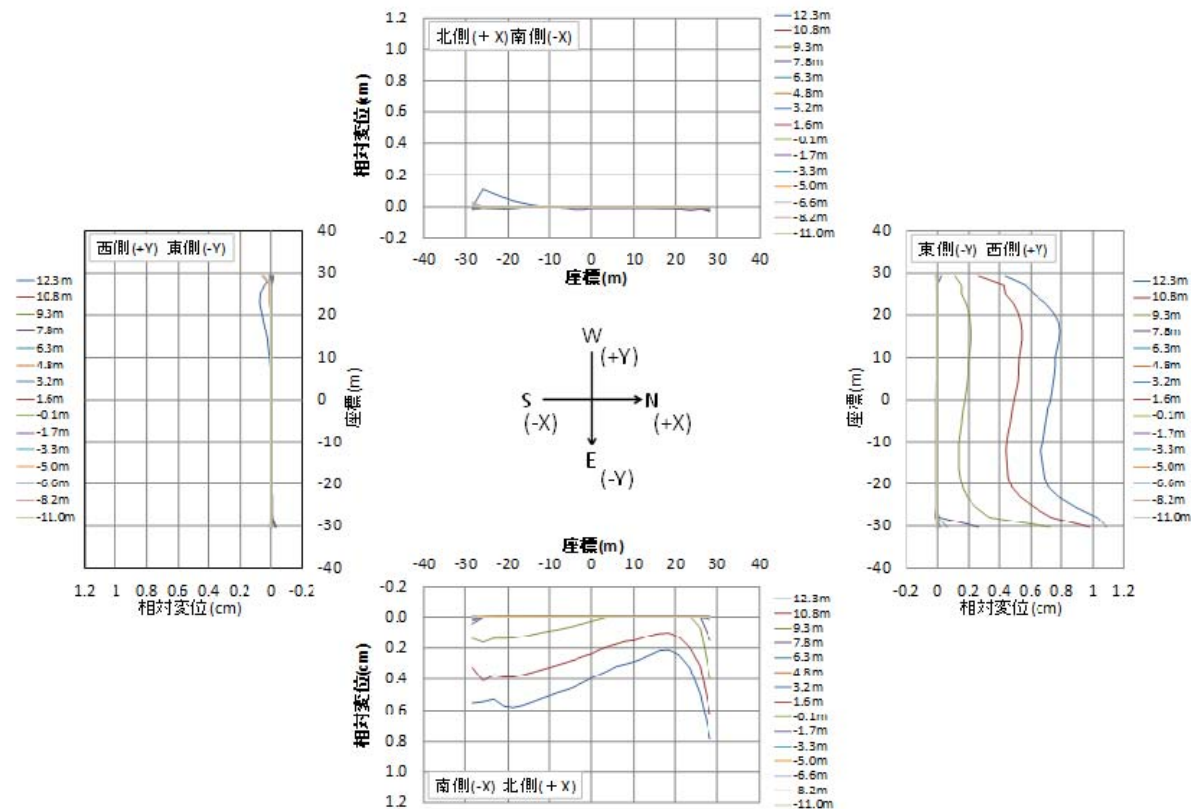


モデルプラント建屋

	Disp(cm)		Time(s)
	EW	NS	
Y(EW)最大	14.4	-0.4	9.53
X(NS)最大	2.9	-12.0	3.39



建屋基礎中心の平面変位オービットの例



建屋地下外壁に対する地盤の変位（平面分布）の例



地震応答解析のための原子炉建屋三次元詳細モデルの構築手法に係る標準を整備することを目的とし、基本方針（案）を示すとともに、現在の取り組み状況について概説。

1. 原子炉建屋の三次元詳細モデルの構築において必要となるモデル化因子をまとめてリスト化（モデル化因子リスト）。
2. 原子炉建屋の三次元詳細モデルの構築におけるモデル化因子のパラメータ設定が建屋応答（FRSや建屋損傷）の違いに影響する度合い（影響度）が大きいモデル化因子に対し、感度解析により建屋応答への影響評価を実施。
3. 2.の評価結果は標準の解説における技術根拠となる。

今後は感度解析等による各モデル化因子の影響評価を継続するとともに、標準の作成に着手予定

# 課題と展望

## 原子炉建屋の三次元詳細モデルの活用にかかわる

### 課題

- サイトごとの3次元地盤構造や地盤-建屋相互作用 ( SSI ) 特性等のデータ取得とモデルへの反映
- 想定を超える入力地震動に対する建屋非線形特性やSSI特性等のモデル化
- その他、実大実験等が不可能な事象にかかる妥当性確認等が課題

### 最近の動向と展望

- 応力解析等では三次元詳細モデルがすでに活用されている。
- 米国では設計やフラジリティ評価に原子炉建屋の三次元詳細モデルが使用されている ( U.S.NRC, NUREG/CR-7230, 2017等 ) 。
- 本標準により、我が国においても原子炉建屋の三次元詳細モデルを用いた地震応答解析に係る知見が共有され、耐震安全の向上に資することが期待される。