

令和3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

原子力規制庁地震・津波研究部門の研究概要及び 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

令和3年11月2日

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

山川 光稀

本研究は、日本原子力研究開発機構との共同研究の成果である。
また、本研究の成果は、NRAの見解を示したものではない。



1. 原子力規制庁 地震・津波研究部門の研究概要

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震後の津波により福島第一原子力発電所が重大な事故に至った。

このような外部事象（地震・地震動、津波、火山等）の発生及びそれによる原子力発電所のリスクの存在を認識し、外部事象に対して安全性を確保することが必要である。

地震・津波研究部門では、原子力施設の耐震・耐津波等に係わる評価手法及び関連基準類の整備などに資するため、外部事象に関する評価（ハザード分野）とその影響を受ける地盤・建屋・機器等の構造健全性評価（フラジリティ分野）に関する調査及び研究を行っている。

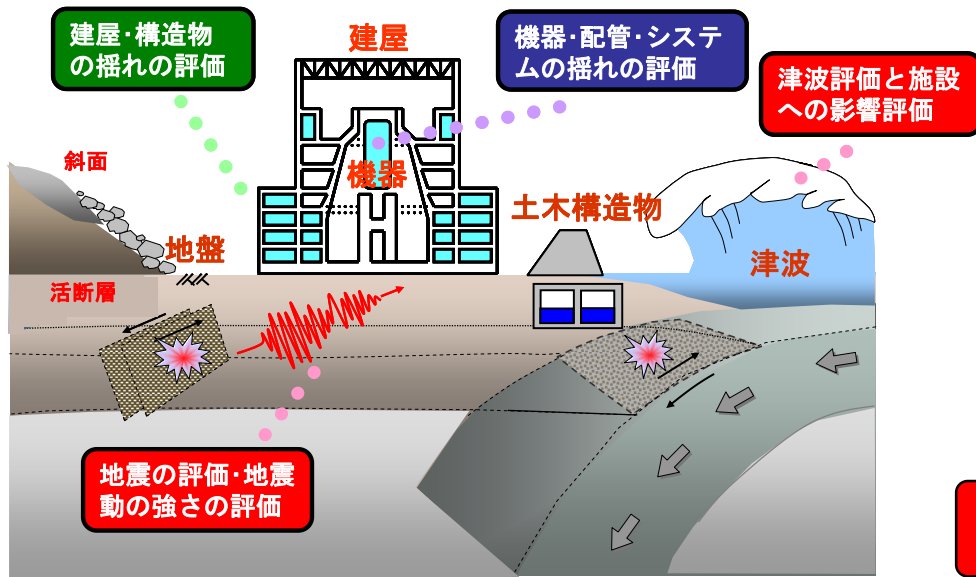


図1 地震・津波研究部門の所掌範囲

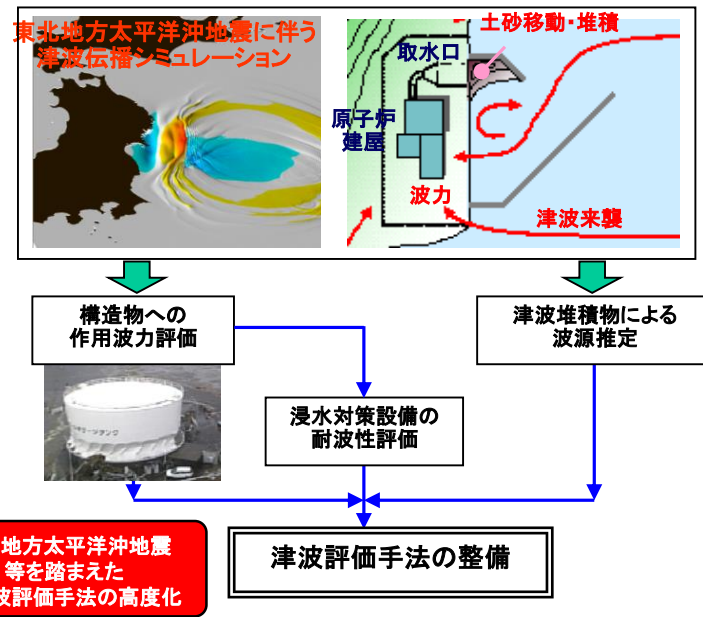


図2 津波評価手法の整備



研究実施項目、研究成果の主な活用先

地震・津波研究部門の研究実施項目

○ハザード分野

- (1) 震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究(令和2年度～5年度)
- (2) 津波評価手法及び既往津波の波源推定に関する研究(令和3年度～6年度)
- (3) 断層の活動性評価に関する研究(令和2年度～5年度)
- (4) 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究(令和元年度～5年度)

○フラジリティ分野

- (1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討(令和3年度～6年度)
- (2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討(令和3年度～6年度)
- (3) 飛翔体等の衝突に対する衝撃評価手法の高度化の検討(令和3年度～6年度)

研究成果の主な活用先

①規制基準、審査ガイド等への反映

②NRA技術報告の公開

③学会論文等による情報発信

④海外への情報発信

○「設置(変更)許可申請」及び「設計及び工事の計画の認可申請」に係る審査における基礎データ及び判断根拠等として活用

○耐震/耐津波設計・評価分野における日本の技術的優位性を維持・拡大

○原子カプルの耐震・耐津波等に係る審査にあたって、国際的に遜色がない審査レベルの維持・発展



研究成果の紹介

原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討(令和3年3月)

- 原子炉建屋の三次元FEMモデルに関する各種モデル化因子が地震応答解析結果に与える影響について文献調査等を行い、着目すべきモデル化因子を同定した。
- さらに、原子炉建屋の三次元FEMモデルを作成し、同定したモデル化因子に対して基準地震動Ssに相当する検討用の地震動を入力とした感度解析を行い、建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。
- そして、モデル作成の対象とした原子炉建屋で観測された地震記録を用いて再現解析を行い、モデル化手法の妥当性を確認するとともに、建屋地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見を取得した。

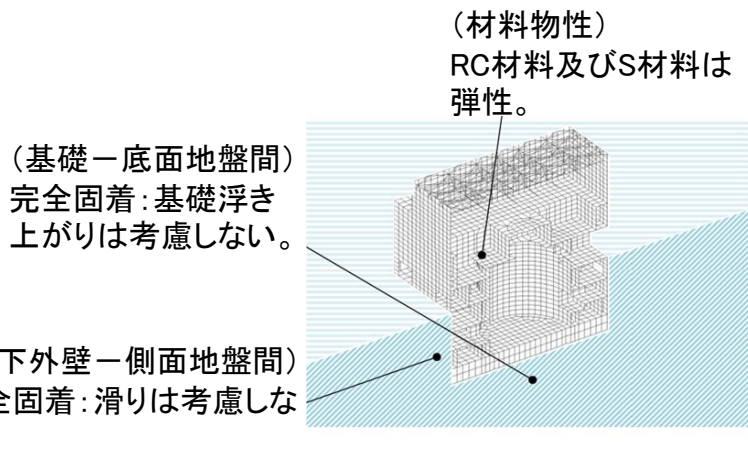


図3 原子炉建屋の三次元FEMモデルの例¹⁾

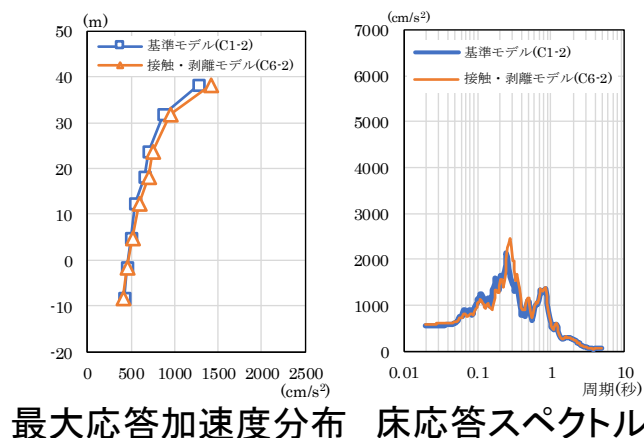


図4 解析結果の例¹⁾



図5 NRA技術報告表紙

※ 本検討の一部は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構に委託して実施した。



2. 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

背景

- ・新規規制基準において、地震等の外部事象評価が厳格化され、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されている。
- ・リスク評価においては、現実的応答及び耐力評価が重要であり、重要機器への入力動を評価できる建屋の三次元耐震解析手法の活用が期待されている。
- ・三次元耐震解析手法の活用に向けては、実測データによる三次元耐震評価モデルのモデル化手法の妥当性確認が重要であり、柏崎刈羽原子力発電所をモデルにベンチマーク解析を行う「Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment (KARISMAベンチマーク解析、図6)」等、今までに数多くの検討が実施されている。

課題

- ・上下応答を含む三次元応答という観点では、観測記録と解析結果にずれが見られる。
- ・公開情報によるモデル化ではプラントの詳細情報が不足しており、三次元耐震評価モデルによる観測記録の再現性を向上させるには限界がある。
- ・通常のプラントでは加速度計の数が少なく、三次元耐震評価モデルのモデル化手法の妥当性確認に必要な床及び壁の詳細な観測記録が不足している。

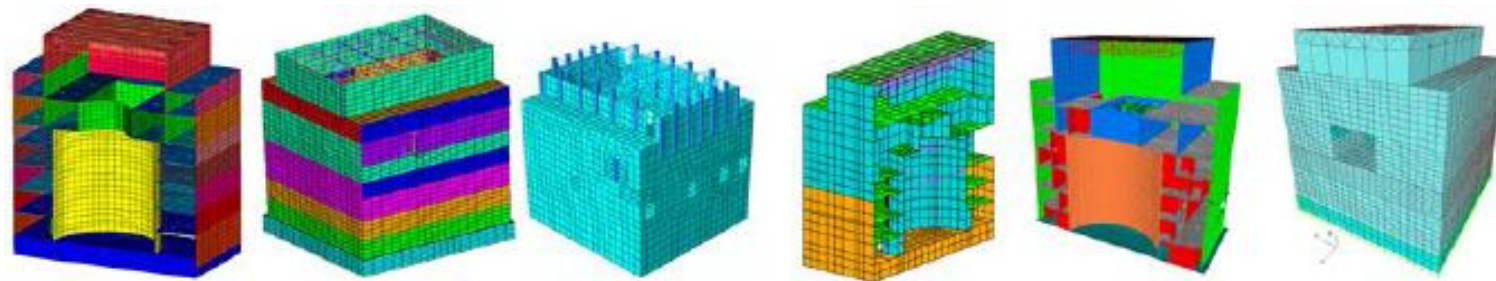


図6 KARISMAベンチマーク解析で作成された三次元FEMモデルの例²⁾



2. 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

目的

- ・ JAEAとの共同研究として、高温工学試験研究炉 (HTTR) (図7)を対象に地震等計測システムを整備拡充(図8)し、建屋全体の応答挙動に加え、床及び壁の局所的な応答を確認する。
 - 常設型及び可搬型の加速度計を増設することで、従来の研究より多くの点で計測を行い、建屋の地震時応答特性を詳細に把握する。
 - また、人工波送信装置を導入することで、従来の研究ではあまり検討していなかった床及び壁の局所的な応答を計測し、建屋の精緻な挙動を解明する。
- ・ 得られた地震観測記録等の実測データに基づき、三次元耐震評価モデルのモデル化手法の妥当性を確認する。
 - 図面の確認や現地調査によって、細部まで再現した三次元耐震評価モデルを作成することで、従来の研究ではモデルに十分反映されていない雑壁や小梁等が解析結果に及ぼす影響を検討する。

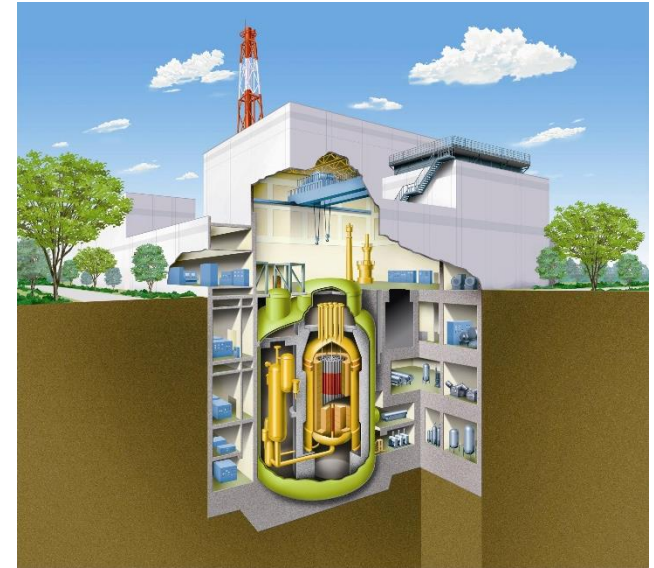


図7 高温工学試験研究炉 (HTTR)³⁾

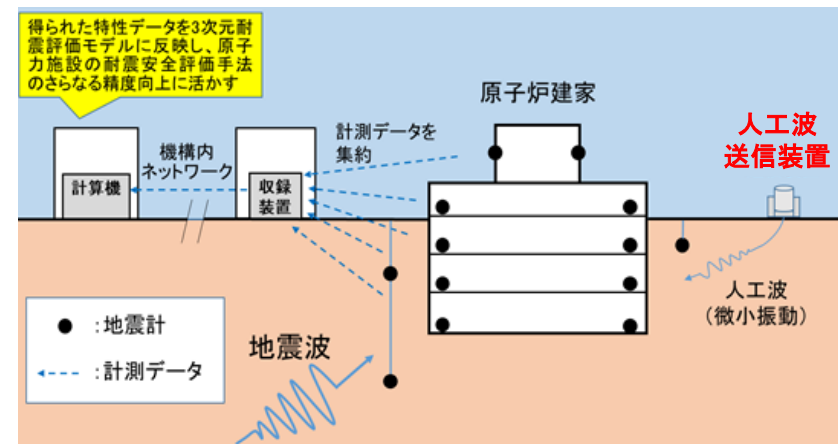


図8 計測システムの概要⁴⁾



研究内容、研究目標及び成果の活用先

(1) 計測システムの整備

新たに加速度計を追加して自然地震を観測するとともに、任意の周波数帯で人工波を送信できる人工波送信装置を設置し、能動的な計測が可能なシステム(ACROSS^{※1})を整備する。

※1: ACROSSは、送信装置(人工波送信装置、電力増幅器等)及び受信装置(加速度計、収録装置等)から構成される計測システム全体を指す。

(2) 実測データの取得及び分析

整備した計測システムを活用し、実測データの取得及び分析に基づいた振動特性の同定を行う。

(3) 実測データを活用した耐震評価モデルの高度化

HTTRの三次元耐震評価モデルを構築し、(2)で同定した振動特性を反映してモデルを改善し、地震観測記録との比較により三次元耐震評価モデルのモデル化手法の妥当性を確認する(図9参照)。

上記の検討をもとに三次元耐震評価モデルのモデル化手法に係る知見を蓄積し、三次元耐震解析手法での観測記録の再現性向上を目標とする。

本研究の成果は、審査において三次元耐震評価モデルの妥当性を確認する際の判断材料としての活用が期待される。

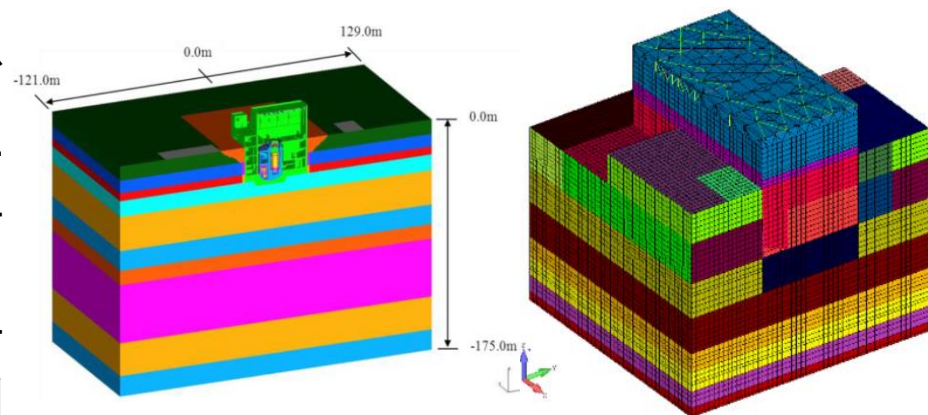


図9 三次元耐震評価モデルの例⁵⁾



全体工程

表1 共同研究全体工程表

実施項目	R1	R2	R3
(1) 計測システムの整備	<ul style="list-style-type: none"> ・据付型加速度計の設置 ・モバイル型加速度計の導入 ・人工波送信装置の設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・据付型加速度計の追加 ・モバイル型加速度計の追加 	
(2) 実測データの取得及び分析	<ul style="list-style-type: none"> ・地震観測記録の取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・新設加速度計を含めた地震観測記録の取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・ACROSSを用いた計測
(3) 実測データを活用した三次元耐震評価モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・既往観測記録の分析 →建屋の全体的な振動特性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・解析モデルの構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震観測記録、計測記録の分析 →建屋全体の応答及び床・壁の局所応答の把握 ・解析モデルの改良 ・観測記録と解析結果の比較 →耐震評価モデルの妥当性確認
まとめ			<ul style="list-style-type: none"> ・成果報告書作成

公表済み=今回の発表範囲



(1) 計測システムの整備

解析対象とするHTTRには、既存の加速度計として、建屋(地下を中心)に12箇所、地中に9箇所の計21箇所設置されていた。

本研究では、建屋の地震時応答特性をより詳細に把握するため、**加速度計の追加**(計38箇所に増設)や**ACROSSの設置**により、大規模な計測システムを整備した。

- 地上階及び屋上に常設加速度計を設置し、建屋全体の応答特性の把握を可能とした。また、建屋周辺の地盤の応答を計測するため、地表面にも常設加速度計を設置した(図10)。
- 可搬型のモバイル型加速度計(図11)を導入した。上記の常設加速度計と組み合わせ、任意の位置での計測を可能とした。
- 人工波送信装置(図12)を導入し、任意の周波数(または振動数)、振幅における振動計測を可能とした。人工波送信装置とモバイル型加速度計を組み合わせることで、床中央等で生じる局所的な応答を計測できる。

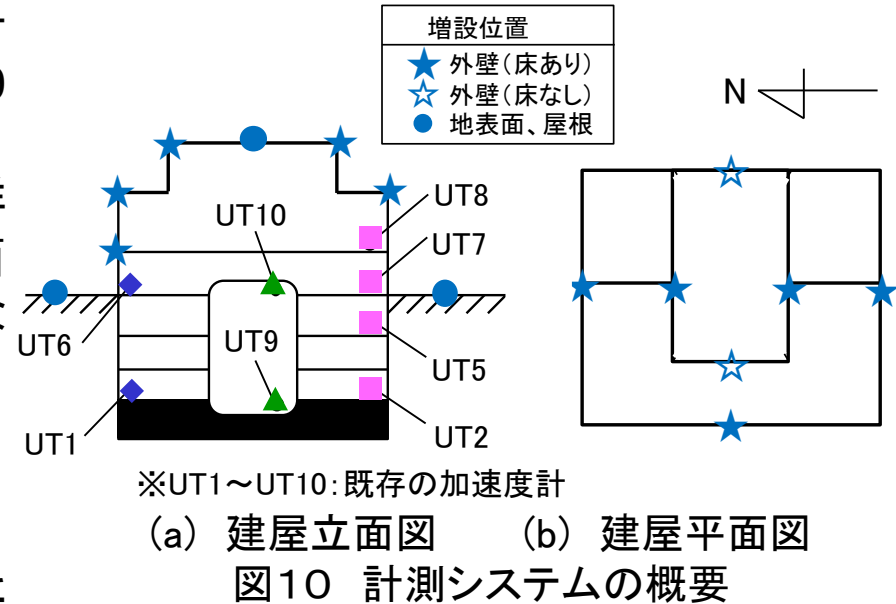


図11 モバイル型加速度計



図12 人工波送信装置の振動発生機⁴⁾



(2) 実測データの取得及び分析(1/3)

本研究で整備した計測システムを用いて、計72データ(地震観測記録39回、人工波33回(R3年7月時点))取得している。

まずは、東北地方太平洋沖地震本震(以降「3.11本震」という。)を含む代表的な既存観測記録9波を選定し、**基礎に対するフーリエ振幅比**や**振動モード**といった**建屋の基本的な振動特性**を分析した。

- 基礎に対するフーリエ振幅比のピーク値から建屋の固有振動数を求めた(図13)。図中の●は、フーリエ振幅比から求めた固有振動数を表す。
 - 4Hz、7Hz及び10Hz近傍をフーリエ振幅比のピークに選定し、建屋の固有振動数とした。
- 固有振動数と地震の入力加速度の大きさとの関係を整理した(図14及び図15)。
 - 4Hz近傍では、地震の入力加速度が大きくなるほど固有振動数が低下した。
 - 7Hz及び10Hz近傍では、地震の入力加速度の大きさによらず固有振動数はほぼ一定であった。

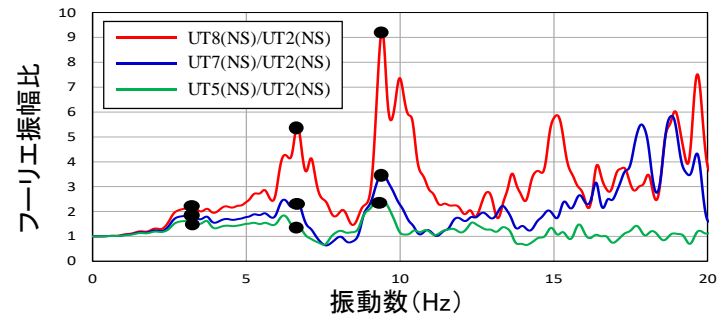


図13 基礎に対するフーリエ振幅比(3.11本震、NS方向)^(6),7,8)

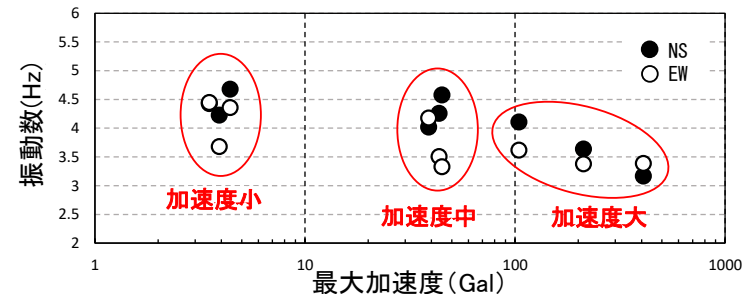


図14 入力加速度と振動数の関係(4Hz近傍)^(6),7,8)

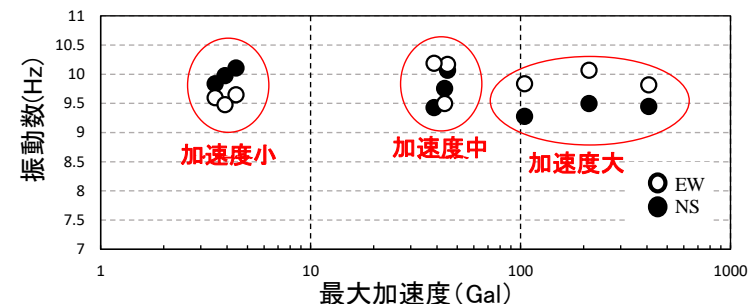


図15 入力加速度と振動数の関係(10Hz近傍)^(6),7,8)



(2) 実測データの取得及び分析(2/3)

建屋の振動モードの分析にあたって、水平方向変位を以下の3つの変位成分に分解した(図16及び図17)。

- ① 水平動による基礎変位(水平変位): 基礎上に設置された加速度計(UT1, UT2, UT9)の水平方向変位を、水平変位とする。
- ② 剛体回転による変位(回転変位): 基礎上の2つの加速度計(NS方向の場合はUT1及びUT2、EW方向の場合はUT3及びUT4(図18参照))の鉛直方向変位の差から求めた回転角 θ と、各加速度計の高さ h_i をかけて回転変位を求める($= \theta \times h_i$)。
- ③ 建屋自体の変形による変位: 水平方向変位から①水平変位と②回転変位を引き、建屋自体の変形による変位を求める。

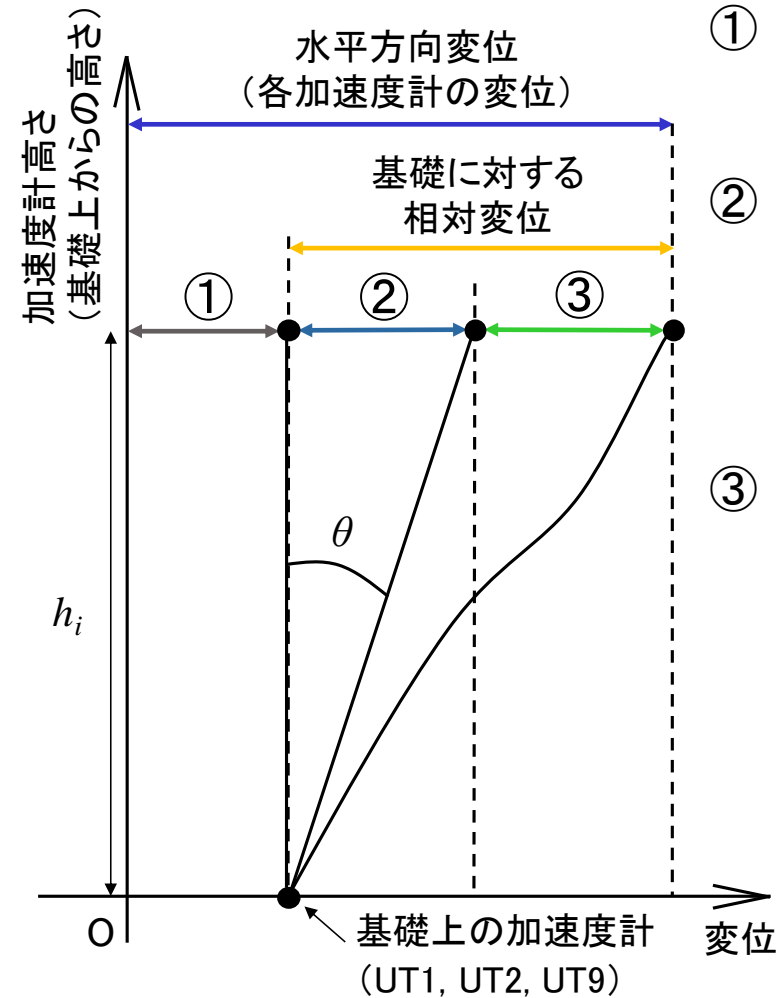


図16 水平方向変位の成分分解

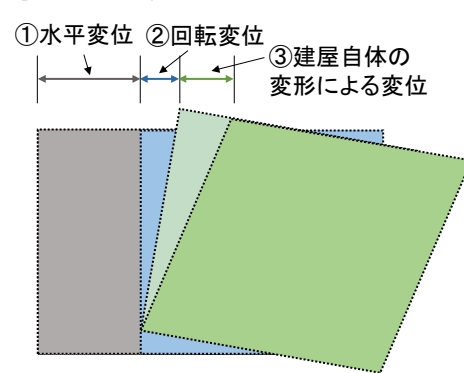


図17 成分分解の概略図

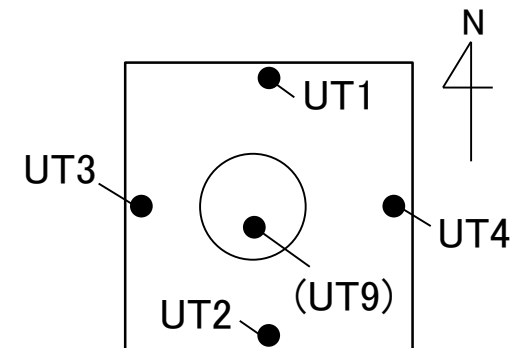


図18 基礎上の
加速度計位置



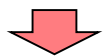
(2) 実測データの取得及び分析(3/3)

- それぞれの固有振動数における基礎に対する相対変位、②回轉變位及び③建屋自体の変形による変位の変形モード図を作成した(図19)。

- 4Hz近傍では、②回轉變位と③建屋自体の変形による変位がほぼ1:1となった。
- 10Hz近傍では、②回轉變位はほとんどなく、③建屋自体の変形による変位が支配的となった。

- 地中の加速度計(図20)を用いて地盤記録のフーリエ振幅比及び振動モードを分析し、建屋の応答特性に及ぼす影響を検討した。

- 4Hz近傍において、建屋の基礎位置である-30mより浅い表層で大きな変位が生じた(図21)。



- これらの振動特性をモデルに反映し、モデルの改善を図る予定である。

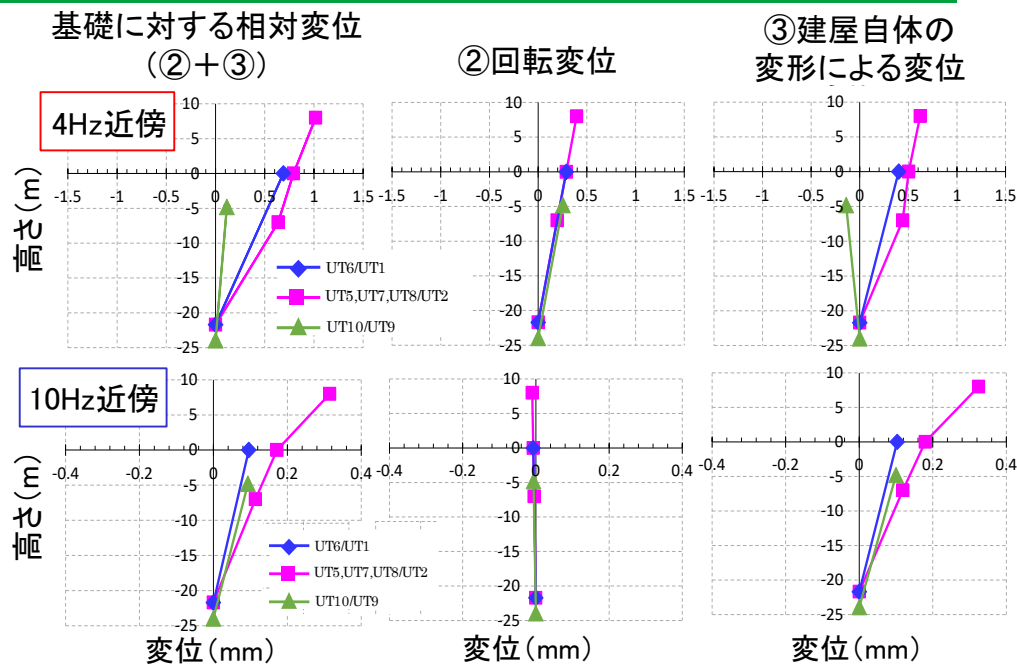


図19 建屋の変形モード図(3.11本震、NS方向)^{6),7),8)}

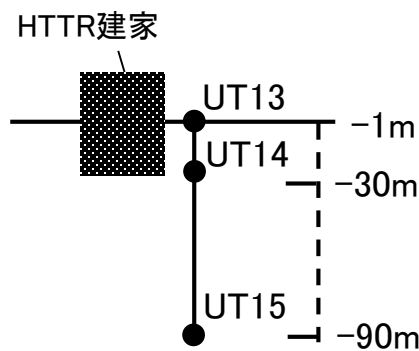


図20 地中の加速度計位置

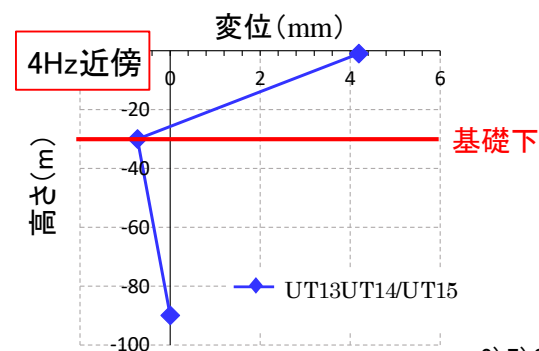


図21 地盤の変形モード図(3.11本震、NS方向)^{6),7),8)}



まとめ

(1) 計測システムの整備

建屋の地震時応答特性をより詳細に把握するため、大規模な計測システムを整備した。

- 常設加速度計やモバイル型加速度計を追加した。
- 人工波送信装置を導入し、自然地震に加え、能動的に人工波を計測できるシステムを整備した。
- 今後、地盤と建屋の相互作用の把握に向けた計測システムの整備・拡充を進める。

(2) 実測データの取得及び分析

地震時における建屋の振動特性を把握するため、取得された地震観測記録をもとに固有振動数や振動モードといった地震時応答を分析した。

- 4Hz近傍の振動数は入力が大きいほど小さくなり、回転変位による変形の割合が大きい一方、10Hz近傍の振動数は入力によらずほぼ一定で、建屋自体の変形が支配的である、といった地震時における建屋の応答特性を解明した。
- 現在、整備した計測システムによって取得された地震観測記録及び人工波送信装置による計測記録をもとに建屋の振動特性の分析を進めている。

(3) 実測データを活用した耐震評価モデルの高度化

- 対象であるHTTR建家の三次元耐震評価モデルの構築を進めている。今後、(2)で得られた振動特性を反映してモデルを改良し、地震観測記録の再現解析を行い、解析結果と観測記録を比較することで、三次元耐震評価モデルのモデル化手法の妥当性を確認する。これらの検討結果を踏まえて、三次元耐震評価モデルの精緻化に係る知見を整理する。



参考文献

1. 市原義孝, 森谷寛, 小林恒一, 山崎宏晃, 大橋守人, “原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討”, NRA技術報告 NTEC-2021-4002, 2021
2. International Atomic Energy Agency (IAEA), “Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on Benchmark Exercise”, IAEA TECDOC No. 1722, 2013
3. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター高温工学試験研究炉ウェブサイト, 閲覧日2021-09-03, <https://htrr.jaea.go.jp/index.html>
4. 日本原子力研究開発機構, “原子力施設の「ゆれ」をとらえる -より高精度な耐震安全性評価のための大規模観測システムを構築-”, 2020年
5. Nishida, A., Nakajima, N., Kawakami, Y., Iigaki, K., Sawa, K., “Seismic response simulation of High-Temperature engineering Test Reactor building against 2011 Tohoku Earthquake”, ICONE23, 2015
6. 西田明美, 川田学, 飯垣和彦, 山川光稀, 猿田正明, 森谷寛, 山崎宏晃, “地震観測記録による原子力施設の振動特性の推定(その1:分析方法)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020年
7. 山川光稀, 猿田正明, 森谷寛, 山崎宏晃, 西田明美, 川田学, 飯垣和彦, “地震観測記録による原子力施設の振動特性の推定(その2:分析結果)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020年
8. Yamakawa, K., Saruta, M., Moritani, H., Yamazaki, H., Nishida, A., Kawata, M., Iigaki, K., “Estimation of Vibration Characteristics of Nuclear Facilities Based on Seismic Observation Records”, ICONE28, 2021



共同研究実施体制

本研究は、原子力施設の耐震安全性をより高い精度で評価するための三次元耐震評価モデルのモデル化手法について検討し、三次元耐震解析手法による観測記録の再現性を向上させることを目標に、原子力規制委員会原子力規制庁と国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が共同で実施している。
本共同研究の参加者は表2のとおりである。

表2 共同研究参加者

	氏名	所属部局	本研究における役割
原子力規制庁	山崎 宏晃	技術基盤グループ 地震・津波研究部門	研究統括
	猿田 正明		研究計画の立案、計測及び送信装置の整備
	森谷 寛		振動特性の同定
	山川 光稀		実測データの分析 モデルの作成、評価手法の妥当性確認
日本原子力 研究開発機構	李 銀生	安全研究センター	研究統括
	西田 明美	材料・構造安全研究ディビジョン	研究計画の立案
	奥田 幸彦	安全研究センター 構造健全性評価研究グループ	振動特性の同定
	川田 学		振動特性の同定
	崔 炳賢		評価手法の妥当性確認
	石塚 悦男		データの測定取りまとめ
	飯垣 和彦		データの測定、実測データの分析
	近藤 誠		データの測定
	國友 孝洋		送信試験の実施、実測データの分析