

共同研究成果報告書

原子力施設の三次元耐震解析手法の高度化 に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和7年9月

1. 研究目的

東北地方太平洋沖地震・津波を踏まえて制定された実用発電用原子炉に係る規制基準において、地震・津波等の外部事象に対する種々の影響評価の強化が求められた。その中の一つである原子力施設の地震時の複雑な挙動の把握に対して、今後その実用が期待されている三次元耐震解析手法の妥当性を確認することが重要である。また、当該手法の妥当性を確認する上では、実際の原子力施設で得られた地震観測記録等の実測データを活用することが有効である。このような中、原子力規制庁及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）は、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（平成31年4月～令和4年3月末）」（以下「前共同研究」という。）を実施した。前共同研究において、実測データから原子力施設の地震時挙動を把握するため、原子力機構内施設を対象に多数の加速度計及び人工波送信装置（ACROSS：精密制御定常信号システム¹）を設置し、大規模観測システム²を構築した。なお、ACROSSとは振動発生機を用いて人工的に作成した微小振動を送信し、微小な応答を高精度に計測可能なシステムを指す。

本共同研究「原子力施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（令和4年4月～令和7年3月末）」（以下「本共同研究」という。）では、多点で得られた地震観測記録等の実測データから建屋の三次元挙動を明らかにすること及び原子力施設を対象とした三次元耐震解析手法の高度化を図ることを目的として、大規模観測システムを用いて実測データ（地震観測記録及びACROSSを用いた計測記録（以下「ACROSS計測記録」という。））を取得するとともに、得られた実測データから建屋の三次元挙動を分析する。また、当該施設を対象として三次元耐震解析モデルを作成し、実測データとの再現性を確認することで、原子力施設の三次元耐震解析手法の高度化を図る。

なお、原子力機構内施設としては、建屋の三次元耐震解析モデルの基礎データ（建屋形状データ、メッシュデータ等）を有する³高温工学試験研究炉（HTTR）を対象とする。

2. 研究内容

（1）実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析

前共同研究では、建屋を中心として、地震観測記録等の実測データを用いて振動特性を分析した。一方、建屋応答に与える地盤応答の分析や、複数の地震に共通する建屋の振動特性の抽出等については、課題であった。このため、本共同研究では、大規模観測システムを維持・改善するとともに、特に地盤応答に着目して地震観測記録を取得し、地盤や小規模地震の記録も含めた多様なデータの分析を進めた。

ACROSSについては、前共同研究において建屋2階の床中央等の局所的な応答を計測し、これらから床中央部と端部の振動特性の違い等、局所的な振動特性を

分析できることを確認した。本共同研究では、建屋の他の階において ACROSS 計測記録を取得し、床の局所応答を中心に分析を進め、建屋の振動特性を詳細に説明した。

(2) 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化

前共同研究では、三次元耐震解析モデルを作成し、実測データとの比較検討により、三次元耐震解析手法の高度化を進めた。その過程で、地盤と建屋の相互作用等の課題も抽出した。本共同研究では、抽出した課題をもとに三次元耐震解析モデルの改良を進め、実測データの再現性に及ぼす影響を検討するとともに、三次元耐震解析手法の高度化に係る課題の明確化を進めた。

3. 実施方法

(1) 実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析

前共同研究で整備した大規模観測システムを用いて継続して実測データを取得するため以下の a を実施した。また、地震観測記録及び ACROSS 計測記録を取得し、建屋及び周辺地盤の振動特性を分析するため以下の b、c 及び d を実施した。

a. 大規模観測システムの維持、改良

加速度計の追加、不具合が見られる加速度計の置き換え等を行った。

b. 地震観測記録による建屋の全体的な振動特性の分析

小規模地震の記録を含め、建屋及び周辺地盤で得られた多数の地震観測記録を用いて、フーリエスペクトルや伝達関数の算出、減衰定数の同定等を行った。これらの分析結果から、地盤と建屋の相互作用による影響を含め、建屋全体の振動特性を把握した。

c. ACROSS 計測記録による局所的な振動特性の分析

前共同研究で計測を実施していない箇所等において ACROSS を用いた計測を行い、床の局所的な振動特性等を分析した。

d. 分析システムの高度化

実測データから HTRR 建屋及び周辺地盤の三次元挙動を効率的に分析し、可視化するためのソフトウェアの開発及び改良を行った。

(2) 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化

図面確認、現地確認及び振動計測等によって実建屋の形状や物性値等を極力再現した三次元耐震解析モデルを作成した。また、当該三次元耐震解析モデルを用いて固有値解析や地震応答解析等を行い、実測データの再現性を確認するとともに、三次元耐震解析手法の高度化に係る課題を示した。

4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	原子力機構
(1) 実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析	◎	○
(2) 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化	○	◎

(◎：主担当、○：副担当)

5. 共同研究参加者

所属部局・職名	氏名	本研究における役割
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	山崎 宏晃 ^{*1}	研究統括
	山川 光稀 ^{*1}	研究計画の立案、実測データの分析、モデルの改善、取りまとめ
	平松 昌子 ^{*2}	研究計画の立案、実測データの分析
	森谷 寛 ^{*1}	モデルの改善、解析手法の高度化
	猿田 正明 ^{*3}	実測データの分析、振動特性の同定
	飯場 正紀 ^{*1}	実測データの分析
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 安全研究センター 耐震・構造健全性評価研究グループ	土屋 隆 ^{*2}	実測データの分析
	西田 明美 ^{*1}	研究統括、研究計画の立案、取りまとめ
	塩見 忠彦 ^{*4}	研究計画の立案及び取りまとめの補佐、モデルの改善、解析手法の高度化
	奥田 幸彦 ^{*1}	振動特性の同定
	川田 学 ^{*1}	実測データの分析、振動特性の同定、
	康 作夷 ^{*4}	実測データの分析、振動特性の同定
	崔 炳賢 ^{*1}	モデルの改善、解析手法の高度化
	石塚 悦男 ^{*5}	データの測定取りまとめ
	飯垣 和彦 ^{*1}	データの測定
	近藤 誠 ^{*1}	データの測定
國友 孝洋 ^{*1}	送信試験実施、実測データの分析	

(実施期間：令和4年4月～令和7年3月)

※1：令和4年4月から令和7年3月まで

※2：令和5年1月から令和7年3月まで

※3：令和4年4月から令和6年3月まで

※4：令和6年4月から令和7年3月まで

※5：令和4年4月から令和6年12月まで

6. 研究実施工程

項目	年 度											
	令和4年度				令和5年度				令和6年度			
(1) 実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析	a. 大規模観測システムの維持、改良											
	b. 地震観測記録による建屋の全体的な振動特性の分析										(1) まとめ	
	c. ACROSS計測記録による局所的な振動特性の分析											
	d. 分析システムの高度化											
(2) 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化	実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化										(2) まとめ	

7. 成果概要

(1) 実測データに基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析

a. 大規模観測システムの維持、改良

本研究に必要な実測データを継続して取得するため、加速度計の追加や不具合が見られる加速度計の置き換え等を行った。本共同研究期間中において、HTTRが立地する茨城県大洗町での計測震度が1以上の地震観測記録を59件、ACROSS計測記録を51件取得した。

b. 地震観測記録による建屋の全体的な振動特性の分析

地中加速度計の観測記録(2020年4月12日の地震)を用いて、フーリエスペクトル比から地盤の卓越振動数を求めた。ここでは、地盤と建屋の相互作用の影響を確認するため、1Hzから5Hz前後までの振動数に着目した。地盤の増幅特性は、

GL-95.2m を基準にしたフーリエスペクトル比より、GL-32.1m 以深では 1Hz 付近にスペクトル比のピークが確認できた。一方、表層の増幅特性 (GL-1.2m/GL-32.1m) については、1Hz にピークは見られず、3～5Hz 近傍での増幅率が大きい。特に、GL-32.1m より浅い表層部分にて増幅率が顕著に増加していた。これは、GL-10m より浅いローム層及び見和層上部が軟らかい地盤であることが要因と考えられる。また、HTTR 建屋の埋込部が GL-32.1m から地表面にあるため、地盤の振動が建屋の挙動に影響を及ぼすことが考えられる。

また、HTTR 建屋内加速度計の観測記録 (2022 年 3 月 16 日の地震) を用いて、フーリエスペクトル比から HTTR 建屋の卓越振動数を求め、加速度モードを分析した。HTTR 建屋の増幅特性は、基礎を基準にしたフーリエスペクトル比より、スペクトル比がピークとなる 4.63Hz、6.99Hz 及び 9.05Hz が HTTR 建屋の卓越振動数と考えられる。また、それぞれの卓越振動数とその振動数での振幅、位相をもとに、フーリエ逆変換によって 1 つの振動数、振幅をもつ加速度時刻歴波形を求めた。この方法に基づき、建屋南側 3 階の加速度計 S2 の加速度が最大になる時刻での地下 3 階に対する各加速度計の相対加速度と、加速度計の設置高さの関係から加速度モードを確認した。4.63Hz では、建屋基礎から屋上まで加速度がおおむね直線状に増幅した。地盤の分析結果も踏まえ、これは地盤との連成によるロッキング振動と考えられる。6.99Hz では、地上階で加速度が増大し、上部構造の 1 次モードとなった。9.05Hz では、建屋自体の変形が大きく、南北壁の南北方向振動では屋上階と 3 階以下で加速度が逆方向に生じた。このような挙動は、南側と北側の 2 階から 3 階で大型機器の設置位置が異なっていること、3 階以下に比べて 3 階から屋上の剛性が小さくなっていることが原因で発生したものと考えられる。また、南壁と北壁の加速度モード間には位相差が生じており、特に 2 階及び 3 階で加速度の差が大きい。これは、HTTR 建屋の 2 階及び 3 階には大きな吹抜けがあり、床が一体化していないことから高振動数では各外壁が独立して振動している可能性がある。

c. ACROSS 計測記録による局所的な振動特性の分析

ACROSS を稼働させ、床の任意の位置にモバイル型加速度計を設置することで、床の局所振動を計測し、フーリエスペクトル比から床面外方向の卓越振動数及び振動モードを分析した。鉄骨トラスで支持された屋根スラブ上で計測した場合には、屋根中央部が面外方向に対して 6Hz 及び 12Hz で応答増幅し、これらを屋根の卓越振動数とした。また、6Hz では中央部よりやや東側が大きく振動する 1 次モード、12Hz では南西側と北東側が逆位相で振動するモードとなった。同様の分析を屋根以外でも実施することで、床及び壁の面外方向の局所振動を捉えた。

d. 分析システムの高度化

地震観測記録及び ACROSS 計測記録を効率的に分析するため、データ分析シス

テムとして ATOM (2次元可視化用ソフトウェア) の改良及び HTTR3DViewer (3次元可視化用ソフトウェア) の開発・改良を行い、効率的な分析を可能とした。

以上より、地震観測記録及び ACROSS 計測記録から HTTR 建屋及び周辺地盤の振動特性を分析し、地震時の三次元挙動を把握することができた。

(2) 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化

原子力施設の床や柱、梁などの各部材の有無や剛性、質量等の違いが建屋応答に与える影響を分析可能とするために、新たに部材単位で分解可能な三次元耐震解析モデルを整備した。この三次元耐震解析モデルは、HTTR 建屋及び建屋周辺地盤(地盤寸法：幅と奥行きはそれぞれ建屋幅の約 5 倍、深さは解放基盤面である-175m から上の地表まで)を含む建屋・地盤連成モデルである。前共同研究の検討結果を踏まえ、建屋 1 階の床構造や地下階の構造を図面に基づき詳細にモデル化するとともに、屋内の大型設備である圧力容器等に加え、建屋上部の応答(約 7Hz, 9Hz)に影響を与えると予想されるクレーン及びクレーンの走行レール支持梁や水平トラス等、屋外(屋上)に設置されている大型設備である空気冷却器等をモデルとして追加し、三次元耐震解析モデルの改良を進めた。また、地震時の建屋の局部振動モード(約 10Hz 以上)に対しては、建屋と地盤の相互作用効果が大きく影響することから、HTTR 建屋周辺地盤(特に埋込地盤)の物性値の同定が重要となる。そこで、HTTR 建屋周辺の表層地盤を対象に地盤構造を推定するための直線アレイ計測を実施し、埋込地盤の物性値を同定し、三次元耐震解析モデルに反映した。

改良した三次元耐震解析モデルの妥当性を確認するため、まずは固有値解析を実施し、得られた解析結果が実測データより得られた HTTR 建屋全体の主要な卓越振動数(地盤連成振動は 3.2~4.5Hz、建屋振動は約 7Hz)及び各振動モードと対応することを確認した。次に、実測データの再現解析として、ACROSS 加振シミュレーションを行い、実測データとの比較を行った。ACROSS 加振試験と同様に、建屋南外壁から 35m の加振機の設置位置での垂直加振を想定し、三次元耐震解析モデルを用いた周波数応答解析(地震応答解析手法のひとつで、周波数領域で周波数ごとに入力を与えて応答を求める方法)を実施した。また、加振機の基礎上に設置されたモバイル加速度計(M1)で計測された加速度を入力とみなし、M1 に対する伝達関数を求めて解析結果と実測データの比較を行った。三次元耐震解析モデルを用いた ACROSS 加振シミュレーション結果は、実測データから得られた HTTR 建屋の周波数応答と定性的特性が比較的整合していることを確認した。さらに、三次元耐震解析モデルを用いた地震応答解析(周波数応答解析及び時刻歴応答解析)を実施し、地震観測記録との比較を行った。得られた結果より、改良した三次元耐震解析モデルの解析結果は改良前よりも地震観測記録の再現性が向上していることを確認した。なお、周波数応答解析及び時刻歴応答解析のどちらも、解析結果と観測記録の卓越振動数は比較的よく整合して

いるが、振幅に違いが見られた。その大きな原因は地盤（ここでは解放基盤から上の地盤）の減衰のモデル化による影響と考えられ、三次元耐震解析モデルの建屋周辺を含む地盤構成とその物性の見直しは、今後の課題である。

8. 公表成果一覧

■国際会議のプロシーディングス

- 1) Nishida, A., Kawata, M., Choi, B., Iigaki, K., Shiomi, T., Li, Y., “Construction of Large-Scale Observation System for Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method for Nuclear Building”, Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP) 2023, 2023.
- 2) Yamakawa, K., Moritani, H., Saruta, M., Iiba, M., Nishida, A., Kawata, M., Iigaki, K., “A Study on Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using A Large-Scale Observation System (Part1: Analysis of Entire Response of The Reactor Building Based on Seismic Observation Records)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- 3) Nishida, A., Kawata, M., Choi, B., Shiomi, T., Iigaki, K., Yamakawa, K., “A Study on Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using A Large-Scale Observation System (Part2: Analysis of Local Response of The Reactor Building Based on Artificial Waves)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- 4) Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Iigaki, K., Yamakawa, K., “A Study on Improvement of Three-Dimensional Seismic Analysis Method of Nuclear Building Using A Large-Scale Observation System (Part3: Improvement and Validation of Three-Dimensional Seismic Analysis Method)”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.

■その他

- 1) 土屋隆、山川光稀、猿田正明、飯場正紀、平松昌子、西田明美、飯垣和彦、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その5：観測記録に基づく地盤振動特性の分析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1009-1010、令和5年
- 2) 山川光稀、土屋隆、平松昌子、森谷寛、猿田正明、飯場正紀、西田明美、川田学、飯垣和彦、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その6：位相差を考慮した振動モードの分析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1011-1012、令和5年
- 3) 塩見忠彦、西田明美、崔炳賢、川田学、飯垣和彦、山川光稀、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その7：建屋の振動特性と三次元有限要素モデルの構築）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1013-1014、令和5年
- 4) 山川光稀、土屋隆、平松昌子、森谷寛、猿田正明、飯場正紀、西田明美、川田学、

飯垣和彦、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その 8：同時刻での変位モードの分析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 961-962、令和 6 年

- 5) 西田明美、塩見忠彦、國友孝洋、川田学、飯垣和彦、山川光稀、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（その 9：ACROSS に関する研究の背景と観測結果）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 963-964、令和 6 年
- 6) 塩見忠彦、西田明美、崔炳賢、康作夷、飯垣和彦、山川光稀、「原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究（令和 6 年能登半島地震による振動特性分析）」、日本地震工学会・年会-2024、令和 6 年

9. 参考文献

- 1 Kumazawa, M., Kunitomo, T., Nakajima, T., Tsuruga, K., Hasada, Y., Nagao, H., Matsumoto, H., Kasahara, J., Fujii, N., Shigeta, N., “Development of ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated, Signal System) to Realize Constant Monitoring the Invisible Earth’s Interiors by Means of Stationary Coherence Elastic and Electromagnetic Waves”, JAEA-Research 2007-033, 2007.
- 2 国立研究開発法人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-」、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構プレス発表ウェブページ、令和 2 年
<https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p20032401/>（2025 年 2 月 7 日確認）
- 3 西田明美、「原子力施設の大規模 3 次元地震応答解析と地震観測記録との比較」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1047-1048、平成 20 年