

安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

外部事象に係る施設・設備の 脆弱性評価手法の高度化に関する研究

Research on improvement of fragility evaluation methods for structures, systems and components subjected to external events

山崎宏晃 日比野憲太 田岡英斗 平松昌子 太田良巳
東喜三郎 高野雅美 森谷寛 鳥山拓也 永井穰 藤原啓太
山川光稀 土屋隆

YAMAZAKI Hiroaki, HIBINO Kenta, TAOKA Hideto,
HIRAMATSU Masako, OTA Yoshimi, AZUMA Kisaburo, TAKANO Masami,
MORITANI Hiroshi, TORIYAMA Takuya, NAGAI Minoru, FUJIWARA Keita,
YAMAKAWA Koki, and TSUCHIYA Takashi

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和 7 年 6 月

June 2025

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

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
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

外部事象に係る施設・設備の脆弱性評価手法の 高度化に関する研究

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 日比野憲太 田岡英斗 平松昌子 太田良巳 東喜三郎 高野雅美
森谷寛 鳥山拓也 永井穰 藤原啓太 山川光稀 土屋隆

要 旨

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）において、設計基準対象施設については「地震による損傷の防止」（第 4 条）及び「津波による損傷の防止」（第 5 条）、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第 6 条）等が、同様に重大事故等対処施設については「重大事故等対処設備」（第 43 条）及び「特定重大事故等対処施設」（第 42 条）等が外部事象（地震、津波、火山等）に対する規制要求事項として規定されている。また、平成 25 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和 32 年法律第 166 号）において発電用原子炉設置者は、発電用原子炉施設における安全性の向上を図るため、当該発電用原子炉施設の安全性について、定期的に自ら評価し届け出なければならない旨が規定されている。

外部事象はその規模及び発生頻度等の不確かさが大きく、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓から低頻度ではあるが影響の大きい事象が発生する可能性が否定できないことが認識されている。したがって、安全性向上評価においては、「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」（平成 25 年原子力規制委員会決定）を踏まえ、外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）の活用が見込まれる。

そのため、これから重要性が増していくリスク評価を見据え、外部事象に対する建屋、設備、防潮堤等の応答及び耐力に基づく損傷の度合い（脆弱性）の評価の精度向上等に係る研究に取り組むことが重要である。

以上を踏まえ、本研究では、外部事象に係る科学的・技術的知見及び規制基準等の整備に活用するための知見の拡充等に資することを目的に、地震、津波及び衝撃の各分野において以下の研究課題に取り組んだ。

(1) 地震に対する脆弱性評価手法の高度化の検討

基準地震動に対して非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性及び礫質土

等の地盤の液状化による施設への影響を確認した。また、大きな地震を経験した設備を模擬した試験体の加振試験等を行い、耐震安全性評価手法の適用性を確認した。さらに、制振装置を適用した設備の耐震安全性を確認するための留意点を取りまとめた。

(2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

海水の条件よりも大きな波力を与え得る黒津波（ヘドロ状の堆積物を含む津波）について、黒津波の発生条件及び防潮堤の波力に与える影響を確認した。

(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

現実的に想定される複雑な設置状態又は形状をした建物・構築物の衝撃評価や、衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価への既往の評価手法の適用性を確認した。

なお、本研究の一部は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人東北大学、学校法人東北工業大学、株式会社篠塚研究所、大成建設株式会社及び鹿島建設株式会社に委託し、また国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、学校法人東京電機大学との共同研究として実施した。

Research on improvement of fragility evaluation methods for structures, systems and components subjected to external events

YAMAZAKI Hiroaki, HIBINO Kenta, TAOKA Hideto,
HIRAMATSU Masako, OTA Yoshimi, AZUMA Kisaburo, TAKANO Masami,
MORITANI Hiroshi, TORIYAMA Takuya, NAGAI Minoru, FUJIWARA Keita,
YAMAKAWA Koki, and TSUCHIYA Takashi
Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The NRA Rules Prescribing Standards for the Location, Structure, and Equipment of Commercial Power Reactors and Their Auxiliary Facilities (NRA Regulation No. 5, 2013) stipulate regulatory requirements for external events, including prevention of damage caused by earthquakes (Article 4), tsunamis (Article 5), and other external impacts (Article 6). These regulations also address structures, systems, and components (SSCs) with safety functions related to beyond design-basis accidents (Article 43) and specialized safety facilities (Article 42). Similarly, the Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors (Act No. 166, 1957), as amended in 2013, mandates the periodic safety assessment for continuous improvement, which licensees are required to perform and submit.

Given the significant uncertainties in the scale and frequency of external events—and lessons learned from the accident at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, which highlighted the possibility of low-frequency, high-consequence events—the importance of probabilistic risk assessments (PRAs) has increased. Consequently, the “Operational Guide for Periodic Safety Assessment of Continuous Improvement of Commercial Power Reactors,” issued by the NRA in 2013, recommends the use of external events PRAs in safety assessments.

To support the increasing importance of PRAs, it is critical to advance research on the uncertainties in fragility assessments, particularly those based on the responses and structural resistance of buildings, equipment, seawalls, and other SSCs to external events.

This study, therefore, focuses on enhancing fragility evaluation methods for SSCs subjected to earthquakes, tsunamis, and external impacts, with the aim of contributing to the scientific and technical knowledge necessary for developing regulatory standards.

(1) Research on improvement of fragility evaluation methods of SSCs subjected to earthquakes

The applicability of seismic safety assessment methods for buildings exhibiting nonlinear behavior to the standard seismic ground motion and the impact on a facility due to liquefaction of gravelly soil ground were assessed. In addition, the shaking table tests were conducted on specimens simulating SSCs that had experienced significant seismic events, and the applicability of seismic safety assessment methods was evaluated based on these tests. Furthermore, the key considerations for confirming the seismic safety of SSCs equipped with vibration control devices were summarized.

(2) Research on improvement of fragility evaluation methods of SSCs subjected to Tsunamis

Investigations were carried out on "black tsunamis"—tsunamis containing sludge sediments—which can exert greater wave forces compared to clear-water tsunamis. The study examined the conditions under which such tsunamis occur and their impact on the wave forces acting on seawalls.

(3) Research on improvement of fragility evaluation methods of SSCs subjected to impact due to collision of flying objects

The study confirmed the applicability of impact evaluation methods for SSCs with complex installation configurations and geometries that are realistic in practice. The applicability of existing evaluation techniques for assessing the responses of equipment, including systems susceptible to rattling, under impact loads was also verified.

Part of this research was conducted by the Japan Atomic Energy Agency, Tohoku University, Tohoku Institute of Technology, Shinozuka Research Institute Co., Ltd., TAISEI CORPORATION, and KAJIMA CORPORATION, under the auspices of the NRA and through collaborative research involving the Japan Atomic Energy Agency, Tokyo Denki University, and the NRA.

目 次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 全体行程	4
2. 本論	8
2.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価	8
2.1.1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討	8
2.1.2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討	15
2.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握	24
2.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討	31
2.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価	39
2.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握	52
2.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握	61
2.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握	67
2.8 黒津波の発生条件等の検討	75
2.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価	85
2.10 衝撃力に対する設備の応答解析手法の検討	93
3. 結論	107
3.1 成果の要点	107
3.2 目的の達成状況	112
3.3 成果の公表等	115
3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表	115
3.3.2 委託先による公表	117
3.4 成果の活用等	120
3.5 今後の課題等	123
参考文献一覧	127
執筆者一覧	138

表 目 次

地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

表 2.1.1	シミュレーション解析で対象とした既往実験に係る文献.....	12
---------	--------------------------------	----

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

表 2.1.2	主な試験条件（シリンダー試験）	18
表 2.1.3	主な実験条件（実大ブロック実験）	19
表 2.1.4	主な実験条件（RC 円筒壁実験）	20

高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

表 2.2.1	地震動の諸元	26
---------	--------------	----

礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

表 2.4.1	解析に用いた主な物性値一覧.....	49
---------	--------------------	----

大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

表 2.5.1	各試験体の固有振動数と減衰比の計測値	54
表 2.5.2	振動試験の加速度レベルと繰り返し回数	56
表 2.5.3	累積疲労損傷係数の解析値	60

制振装置を適用した設備の耐震性の把握

表 2.7.1	試験体の仕様	72
表 2.7.2	試験条件	72

建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

表 2.9.1	簡易評価結果	91
---------	--------------	----

衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

表 2.10.1	試験ケース	96
表 2.10.2	試験体の固有振動数及び減衰比	96
表 2.10.3	解析ケース	99
表 2.10.4	加振試験と再現解析で得られた筐体の一次固有振動数	99
表 2.10.5	GPT の単体衝撃応答解析ケース	103
表 2.10.6	解析ケース	105

目 次

全体行程

図 1.3.1	研究の全体工程.....	5
---------	--------------	---

地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

図 2.1.1	低接地率状態の建屋及び高温状態等にさらされた建屋の概念図	8
図 2.1.2	基礎浮上りに係る地震応答解析の評価手順フローの概要.....	10
図 2.1.3	研究全体イメージ	11

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

図 2.1.4	研究全体イメージ	16
図 2.1.5	材料実験及び構造実験の概要.....	18
図 2.1.6	実大ブロック実験	19
図 2.1.7	RC 円筒壁実験.....	21
図 2.1.8	解析モデルのイメージ	22

高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

図 2.2.1	周辺地盤の加速度計設置位置.....	26
図 2.2.2	建屋の加速度計設置位置.....	26
図 2.2.3	フーリエスペクトル比（地盤）	27
図 2.2.4	最大加速度分布（地盤）	27
図 2.2.5	地盤柱状図.....	27
図 2.2.6	フーリエスペクトル比（建屋）	27
図 2.2.7	加速度モード（建屋）	28
図 2.2.8	建屋の平面図	28
図 2.2.9	ACROSS の概要	29
図 2.2.10	フーリエスペクトル比（屋根）	29
図 2.2.11	3次元有限要素モデル	30
図 2.2.12	建屋の固有モード例.....	30

建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

図 2.3.1	固有周期と減衰定数.....	34
図 2.3.2	試験体.....	35
図 2.3.3	解析モデル.....	36
図 2.3.4	解析結果	36

礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

図 2.4.1	遠心模型実験の模型概要	43
図 2.4.2	礫質土の粒径加積曲線及び液状化強度曲線	43
図 2.4.3	センサー配置図（ペア土圧計の例）	43
図 2.4.4	入力加速度時刻歴（ソイルモルタル表面）	44
図 2.4.5	地盤応答の時刻歴	44
図 2.4.6	ペア土圧計測方法により推定されたせん断応力の時刻歴	44
図 2.4.7	構造物の応答、作用土圧及び周面せん断力	45
図 2.4.8	2次元解析モデルの概要	48
図 2.4.9	解析に用いた G/G_0 - γ , h - γ 曲線	49
図 2.4.10	解析に用いた液状化強度曲線	50
図 2.4.11	地盤応答の実験結果と解析結果の比較	50
図 2.4.12	構造物への作用荷重及び構造物応答の実験結果と解析結果の比較	51

大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

図 2.5.1	(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ試験体の形状	54
図 2.5.2	異径ティ試験体の設置状況	54
図 2.5.3	浸透探傷試験で検出した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ表面の貫通亀裂	56
図 2.5.4	有限要素解析モデルの形状と肉厚：3次元計測した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ並びに(d)公称肉厚の異径ティ	58
図 2.5.5	相当塑性ひずみ分布：3次元計測した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ並びに(d)公称肉厚の異径ティ	59

大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

図 2.6.1	試験体の構造図	62
図 2.6.2	载荷サイクル（①～⑦）と全体変形角の関係	63
図 2.6.3	荷重－変位の関係（正負交番载荷 B）	64
図 2.6.4	荷重－曲げ及びせん断変位の関係（正負交番载荷 B）	64
図 2.6.5	曲げ剛性－経験最大曲げ変位の関係及びせん断剛性－経験最大せん断変位の関係	65

制振装置を適用した設備の耐震性の把握

図 2.7.1	試験の状況	72
図 2.7.2	試験結果	73

黒津波の発生条件等の検討

図 2.8.1	細粒分含有率の予測値及び 80 % ベイズ予測区間（河川距離 700 m）	77
図 2.8.2	水路縦断面図	78
図 2.8.3	入力波形の水位時刻歴（入力波形計測位置）	78
図 2.8.4	流体密度と波形の関係（水理試験）	79
図 2.8.5	流体密度と最大波力の増加率及び通過波最大浸水深の増加率の関係（水理試験）	80
図 2.8.6	波力時刻歴及び通過波浸水深時刻歴	81
図 2.8.7	流体密度と波形の関係（数値解析）	82
図 2.8.8	数値解析で用いる入力波形（入力波形計測位置）	82
図 2.8.9	流体密度と最大波力の増減率の関係（直立護岸）	83

建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

図 2.9.1	実験概要及び実験結果の一例	87
図 2.9.2	貫入量評価結果の比較	87
図 2.9.3	弾頭型の先端形状模式図	88
図 2.9.4	既往実験結果と弾頭型理論貫入評価結果及び数値解析結果の比較	88
図 2.9.5	中型実験の概要及び実験結果の一例	90
図 2.9.6	実験結果と Chang 式による評価結果の関係	91

衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

図 2.10.1	電気盤を模擬した試験体の概要	94
図 2.10.2	ショック波の加速度時刻歴及び正規化応答スペクトル	95
図 2.10.3	ランダム波の加速度時刻歴及び正規化応答スペクトル	95
図 2.10.4	筐体及び内蔵機器の伝達関数（前後方向）	96
図 2.10.5	筐体頂部及び内蔵機器における最大応答加速度（前後方向）	98
図 2.10.6	フーリエ解析結果	98
図 2.10.7	電源装置端部の応答加速度時刻歴 ランダム波試験（60.9Hz-268.8Hz）	98
図 2.10.8	再現解析モデルの概要（扉、側面パネルを非表示）	99
図 2.10.9	筐体の加振試験及び再現解析結果	100
図 2.10.10	ファンの加振試験及び再現解析結果	101
図 2.10.11	GPT の衝撃加振試験実施状況	102
図 2.10.12	GPT の解析モデル	102
図 2.10.13	GPT 衝撃加振試験の単体応答解析結果と試験結果の比較	104

図 2.10.14	組合せ解析結果 加速度時刻歴（左右方向）	105
-----------	----------------------------	-----

略 語 表

地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

JEAG4601 Japan Electric Association Guide 4601 (原子力発電所耐震設計技術指針)

JEAC4601 Japan Electric Association Code 4601 (原子力発電所耐震設計技術規程)

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

CCV Concrete Containment Vessel (コンクリート製格納容器)

RC Reinforced Concrete (鉄筋コンクリート)

RCCV Reinforced Concrete Containment Vessel (鉄筋コンクリート製格納容器)

高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

JAEA Japan Atomic Energy Agency (日本原子力研究開発機構)

HTTR High Temperature engineering Test Reactor (高温工学試験研究炉)

ACROSS Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (精密制御定常信号システム)

建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

BWR Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉)

PWR Pressurized Water Reactor (加圧水型原子炉)

大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

FEM Finite Element Method (有限要素法)

大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

ABWR Advanced Boiling Water Reactor (改良型沸騰水型原子炉)

制振装置を適用した設備の耐震性の把握

JIS Japan Industrial Standards (日本産業規格)

衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

GPT Grounding Potential Transformer (計器用接地形変圧器)

用語の定義

地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

JEAG4601	単に「JEAG4601」とした場合は、(社)日本電気協会の「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 1987」、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984」及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」をいう。
接地率	基礎底面の全面積に対する圧縮応力領域の面積比のこと。地震の揺れにより建屋の基礎浮上りが生じると接地率は100%未満になる。
建屋・地盤間の付着力	建屋基礎底面と支持地盤間の引張強度をいう。
誘発上下動	建屋に水平動が入力された場合、基礎の浮上に伴って建屋の中心軸上で生じる上下動のこと。
建屋と地盤の相互作用	地震時に建屋と地盤が互いに影響を及ぼしあう効果のこと。

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

重大事故等	重大事故に至るおそれがある事故(運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を除く)又は重大事故をいう。
弾塑性解析	材料が弾性限界を超えて塑性変形を生じる状態までを考慮した構造解析手法のこと。
プッシュオーバー解析	地震時の建屋等の変形を評価するための静的非線形解析手法のこと。建屋等に対して段階的に水平荷重を増加させ、荷重－変形関係を求める。

高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

高温工学試験研究炉	1000℃近い高温ガスを取り出して高温の熱利用を可能とする高温ガス炉の試験研究を行うことを目的として、日本原子力研究開発機構大洗研究所に建設された原子炉。「HTTR」と略される。
三次元有限要素モデル	建屋を構成する主要な構造体(屋根トラス、基礎スラブ、耐壁、床スラブ等)及び地盤を立体的にモデル化した解析モデル。有限要素法は「FEM」と略される。
精密制御定常信号システム	送信装置(振動発生機、電力増幅器、冷却装置等)、受信装置(地震計等)等からなり、人工波(微小振動)を送信して微小な応答を高精度に計測することが可能なシステム。 「ACROSS」と略される。

加速度計	物体の加速度（速度の変化率）を測定する装置。
フーリエスペクトル	地震波を様々な周期の振動の集まりと捉え、振動数ごとの地震波の強さに分解して表したもの。
フーリエスペクトル比	ここでは、下階のフーリエスペクトルに対する上階のフーリエスペクトルの比率。
卓越振動数	建物・構築物の振動が増幅しやすい振動数のこと。
加速度モード	卓越振動数における建物・構築物の振動形状のこと。
正弦波加振	特定の周波数の振動を与え続ける加振方法。本研究では、特定の範囲、特定の間隔の振動数の正弦波を重ね合わせた波形を人工的に作成し、加振を行っている。
モバイル型加速度計	加速度計、無線 LAN 通信機能、バッテリー等が一体となった小型で軽量の微動観測装置で、容易に持ち運ぶことができ、位置を変えて複数箇所の計測を実施できる。
局所振動	建物・構築物の比較的小さな特定の部分のみが、周辺に比べて大きい振幅で振動する現象。
固有値解析	建物・構築物の固有振動数及び固有モードを求める解析手法。
地震応答解析	地震動を受けた建物・構築物や地盤等がどのように振動するかシミュレーションする解析方法。

建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

初期減衰	建築物自体で発生する減衰。固体内摩擦、固体間摩擦、内部粘性抵抗に起因する。
逸散減衰	ここでは、構造物系の振動エネルギーが系の外部へ逸散してゆき、構造物系に戻ってこないために生ずる振動の減衰。
内部粘性減衰	粘性減衰は、空気抵抗や構造内部の摩擦抵抗などによって生じる減衰力で速度に比例する。
履歴減衰	塑性化することにより、振動によるせん断力と変形の軌跡が線形から、膨らみを持つループの描くようになり、このループの膨らみの面積が履歴減衰である。

礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

液状化	地下水で飽和した土（主に砂地盤）が地震動のような繰り返し作用する水平方向の力を受けて土の粒子構造が崩れ、土の粒子が地下水（間隙水）に浮いた状態となり地盤全体が砂の混ざった液体のような状態となる現象。
屋外重要土木構造物	原子力発電所の海水ポンプや海水管など耐震安全上重要な機器・

	配管等を支える構造物、非常時において海水を通水する構造物等をいう。
礫質土	ここでは、土粒子の粒径が 2.0mm 以上の礫分を含む土をいう。
遠心模型実験	実物の 1/N の縮小模型に重力の N 倍の遠心力を作用させ、実物と等しい自重応力を作用させて、その変形や破壊の挙動を調べる実験。
周面せん断力	地震時の地盤の変形（せん断変形）により地中構造物の周面に沿って作用する力。
飽和地盤	土は土粒子と間隙からなるが、間隙が完全に水で満たされ飽和した状態にある地盤のことを指す。完全に水で満たされない場合を不飽和地盤という。
ダイレイタンシー特性	粒状体である土粒子からなる土は、せん断を受ける場合、それに伴って体積を変えようとする特性がある。これをダイレイタンシー (dilatancy) といい、一般にせん断を受けて膨張する場合を正、収縮する場合を負とする。
中空ねじり試験	中空円筒状の供試体を鉛直方向に載荷しながら、供試体の上面もしくは下面に水平方向に繰返しのねじり載荷を行うものであり、地盤材料の強度及び変形特性の把握に使用する。
繰返し変形特性	10^{-6} から 10^{-2} 程度までのせん断ひずみレベルにおける土の動的な変形特性を示す。繰返し変形特性はせん断弾性係数 (G) とせん断ひずみ (γ) の関係及び減衰定数 (h) とせん断ひずみの関係を繰返しせん断試験によって求める。通常、微小ひずみ時のせん断弾性係数 (G_0) に対する比 (G/G_0) とせん断ひずみの関係として試験結果を整理する。
液状化強度曲線	液状化強度は、中空ねじり試験等の繰返しせん断試験により求められ、地震時における繰返しせん断応力と初期鉛直有効応力の応力比で表す。液状化強度曲線はその繰返し応力比と繰返し回数との関係を示したものである。
マルチスプリング要素	液状化地盤をモデル化するための FLIP（有限要素法に基づく平面ひずみ状態を対象とする 2 次元動的有効応力解析プログラム）の地盤要素の一つである。マルチスプリング要素には、応力履歴による土の異方性を自然に考慮可能な多重せん断ばねモデルと液状化過程を表現するための有効応力経路を適切に制御する方法に基づく過剰間隙水圧モデルが組み込まれていて、非排水の条件下での動的有効応力解析が可能である。
H-D モデル	土質試験結果のせん断剛性比（せん断弾性係数と初期せん断弾性

係数の比)と減衰定数のひずみ依存性を近似する非線形モデルとして使用される双曲線モデル (Hardin-Drnevich モデル)。

残留変位量 弾性限界以上の荷重が作用した後、元の位置から移動した変位量。

大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

低サイクル疲労 材料の降伏点を超えるような大きい繰り返し荷重によって起こる損傷形態で、疲労亀裂の発生及び貫通までのサイクル数が少ないもの。本研究では 10^4 回以下のサイクル数における疲労損傷を低サイクル疲労とみなす。

設計応力強さ 設計降伏応力又は設計引張強さ等の材料の機械的性質に基づき、適切な安全率を考慮して規格等で規定される応力で、機器・配管系の設計を行う際の指標となるもの。

塑性崩壊 地震時の慣性力等で発生する過大な応力によって部材の全断面が降伏し、崩壊に至る損傷形態。

大きな地震を経験した鋼コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

基準地震動 最新の科学的・技術的知見を踏まえ、敷地及び敷地周辺の地質・地質構造、地盤構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から想定することが適切なものとして策定する地震動。原子力施設の耐震設計に用いられる。

復元力特性 構造物の地震応答を弾塑性域にわたって解析するため、部材の力と変形の関係及びそこに現れる特性を数値モデル化したもの。

スタッド方式の鋼板コンクリート構造 スタッドにより鋼板とコンクリートが一体に挙動し、共に外力に抵抗することを前提とした鋼板コンクリート構造。

隔壁方式の鋼板コンクリート構造 縦隔壁及び横隔壁により鋼板とコンクリートが一体に挙動し、共に外力に抵抗することを前提とした鋼板コンクリート構造。

制振装置を適用した設備の耐震性の把握

減衰力 物体の運動方向と反対向きに働き、運動を抑制するように働く力のこと。

制振性能 制振装置が制振対象の振動を制御する能力。これに関する定量的指標。

制振材料 制振装置で振動エネルギー吸収を目的に使用されている材料。

等価粘性減衰係数 減衰力が振動の 1 周期になす仕事と等しい仕事を与える粘性減衰を表す係数。

黒津波の発生条件等の検討

黒津波 ここでは、細粒子を多く含む津波。

ヘドロ ここでは、有機物質が吸着し含水比の高い状態で海底に堆積したシルト及び粘土。

細粒子 シルト（粒径 5 μm から 74 μm ）及び粘土（粒径 5 μm 未満）の細粒分の土粒子。

閉鎖度指標 水域の形状から規定される、海水交換の効率を意味する指標。湾口部の断面積に対する湾内断面積の比で求められ、値が大きいほど閉鎖度が高いことを示す。例えば、東京湾の閉鎖度指標の値は 1.78 となる。

建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

マンメイドロック 基礎岩盤の弱層部の置換や、軟岩を基礎とする構造物の埋戻しなどのためのセメント系固形材料。原子力分野では、人工岩盤とも呼ばれている。

モルタル 砂（細骨材）とセメントと水を練り混ぜた建築材料。コンクリートと違い、砂利（粗骨材）が入らない。

来待石 島根県宍道湖の南岸（松山市宍道町の来待地区）に分布する大森一來待層で採掘される凝灰質砂岩。

裏面剥離 被衝突体の衝突面と反対側の面において、コンクリートが剥離する現象。裏面剥離限界速度は、想定する板厚で裏面剥離が発生すると評価された速度のこと。

衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

ガタ系 複数の要素から構成される系のうち、要素間に間隙（ガタ）を有するもの。

計器用接地形変圧器 母線の高電圧を計器やリレー等に必要な扱いやすい電圧に変換する機器。英語名称の Grounding Potential Transformer から、GPT と略される。

応答スペクトル ある振動に対する複数の固有振動数の 1 質点系の応答の最大値を直線でつなぎ描いた線図で、入力とした振動の振動数特性を示す。応答スペクトルを入力の最大加速度で除して正規化したものが正規化応答スペクトル。

フーリエ解析	フーリエ変換を用いて時刻歴に含まれるの振動数成分を解析する手法。時刻歴を振動数ごとの強さに分解して表現することができる。
ローパスフィルタ	カットオフ振動数を上回る信号を除去するフィルタ。

1. 序論

1.1 背景

外部事象（地震、津波、火山等）に対する規制要求事項として、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成25年原子力規制委員会規則第5号）（以下「設置許可基準規則」という。）において、設計基準対象施設については「地震による損傷の防止」（第4条）、「津波による損傷の防止」（第5条）、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第6条）等が、同様に重大事故等対処施設については「重大事故等対処設備」（第43条）及び「特定重大事故等対処施設」（第42条）等が規定されている。また、平成25年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和32年法律第166号）において発電用原子炉設置者は、発電用原子炉施設における安全性の向上を図るため、当該発電用原子炉施設の安全性について、定期的に自ら評価し届け出なければならない旨が規定されている。

外部事象はその規模及び発生頻度等の不確かさが大きく、福島第一原子力発電所事故の教訓から低頻度ではあるが影響の大きい事象が発生する可能性が否定できないことが認識されている。したがって、安全性向上評価においては、「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」（平成25年原子力規制委員会決定）を踏まえ、外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）の活用が見込まれる。

そのため、これから重要性が増していくリスク評価を見据え、外部事象に対する建屋、設備、防潮堤等の応答及び耐力に基づく損傷の度合い（フラジリティ）に関する評価の精度向上等に係る研究に取り組むことが重要である。

以上を踏まえ、本研究では、これまで、外部事象に係る科学的・技術的知見及び規制基準等の整備に活用するための知見の拡充等に資することを目的に、地震・津波・衝撃の各分野において以下の研究課題に取り組んできた。

(1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

前安全研究プロジェクト「地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究（平成29年度～令和2年度）」（以下「前プロジェクト」という。）において、建物・構築物の三次元挙動に係る耐震評価手法の整備のために、原子炉建屋及び周辺地盤の地震応答解析を行い、建屋と地盤間の接触・剥離現象や鉄筋コンクリート（以下「RC」という。）材料の非線形挙動等に係るモデル化が建屋の応答特性に及ぼす影響の程度を把握する等、建屋応答の評価手法に係る知見を拡充した^{1.1.1,1.1.2}。また、礫質土等の埋め立て地盤の液状化については、遠心模型実験、シミュレーション解析等により密に締め固めた礫質土地盤と砂質土地盤とでは過剰間隙水圧の蓄積傾向が異なるとともに、礫質土の残留変形は限定的である等の液状化時の応答挙動に係る知見を拡充した^{1.1.3}。さらに、配管設備の地震時亀裂進展に係る評価手法を提案するとともに、耐震重要設備の耐震余裕を整理した^{1.1.4}。今後、耐震評価に関する適合性審査やリスク評価等の妥当性確認に資する

ためには、新規制基準の制定以降に建設時の設計に用いていた地震動よりも増大した基準地震動に対して非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法及び礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価に係る知見の拡充^{1.1.5}が必要である。また、東北地方太平洋沖地震等の大きな地震を経験した既設プラントの再稼働を勘案すると、大きな地震を経験した設備の耐震性に係る知見の拡充^{1.1.5}が必要である。さらに、既設プラントの耐震性を向上させるために導入されつつある制振装置について、それを適用した設備の耐震性に係る知見の拡充^{1.1.5}も必要である。

(2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

前プロジェクトでは、防潮堤を対象に、設計条件を超える津波までを模擬した水理試験及びシミュレーション解析を実施し、防潮堤への作用荷重等を評価した。防潮堤の耐津波設計手法については、持続波に対する既往の設計手法の適用範囲を明らかにするとともに、適用範囲を超える場合の評価手法及び段波が防潮堤の構造健全性に与える影響について研究を実施した^{1.1.6}。東北地方太平洋沖地震に伴い発生したシルト等の細粒分の土粒子（以下「細粒子」という。）を多く含む津波（以下「黒津波」という。）は、前プロジェクトで実施した淡水を対象として示した従来の評価方法で得られる津波波力よりも大きな波力が生じる可能性があり、耐津波評価に関する適合性審査やリスク評価等の妥当性確認に資するため、黒津波の発生可能性や波力評価に係る知見の拡充^{1.1.5}が必要である。

(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

地震・津波以外の外部事象に対する構造健全性評価として、飛翔体等の衝突に対する構造物の衝撃評価手法の整備を目的に、前プロジェクトでは、飛翔体等の衝突に対する建物・構築物の局部損傷及び全体損傷に対する試験及びシミュレーション解析を行い、衝撃力に対する既往の応答評価手法の適用性を確認した^{1.1.7}。また、設備の衝撃振動試験を行い、衝撃力に対する耐力評価を行った^{1.1.8}。さらに、衝撃研究の一環として、輸送貯蔵兼用キャスクのスラップダウン落下に係る試験及びシミュレーション解析を行い、スラップダウン落下の影響を把握するとともに従来評価手法についての適用性を確認した^{1.1.9}。今後、耐衝撃評価に関する適合性審査やリスク評価等の妥当性確認に資するためには、より現実的な建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価手法及び前プロジェクトで実施した設備を構成する要素の衝撃耐力に係る知見に加えて衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価手法に係る知見の拡充^{1.1.5}が必要である。

1.2 目的

本研究では、外部事象に対する建物・構築物、設備、防潮堤等のリスク評価における応答及び耐力に基づく損傷度合い（フラジリティ）等に関する評価手法の高度化に係る技術的知見を拡充することを目的に、地震・津波・衝撃の各分野において以下の研究課題に取

り組んだ。

(1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

基準地震動に対して非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性及び礫質土等の地盤の液状化による施設への影響を確認した。また、大きな地震を経験した設備を模擬した試験体の加振試験等を行い、耐震安全性評価手法の適用性を確認した。さらに、制振装置及び制振装置を適用した設備の新規制基準適合性に係る審査において耐震安全性を確認するための留意点を取りまとめた。

a. 建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

a-1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

a-1-1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

a-2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

a-3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

c. 大きな地震を経験した既設プラントの設備の耐震性の把握

c-1 大きな地震を経験した設備の耐震性の把握

c-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

c-1-2 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

c-2 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

(2) 津波に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討

ヘドロ状の堆積物の影響により従来の評価で得られる津波波力よりも大きな波力が生じる可能性について、その発生条件及び防潮堤等への影響を確認した。

a. 黒津波の発生条件等の検討

(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

現実的に想定される複雑な設置状態・形状をした建物・構築物の衝撃評価や、衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価への既往の評価手法の適用性を確認した。

a. 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

b. 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

1.3 全体行程

本研究プロジェクトは、図 1.3.1 に示した計画のとおり、令和 3 年度から令和 6 年度にかけて実験、解析等を実施したものである。図 1.3.1 には、各研究テーマの実施体制（委託研究、共同研究等）も記しており、委託研究先及び共同研究相手先機関は以下のとおりである。

【委託研究先】

(1) a-1-1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）

(1) a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

鹿島建設株式会社（以下「鹿島建設」という。）

(1) a-3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

株式会社篠塚研究所（以下「篠塚研究所」という。）（令和 5 年度）、大成建設株式会社（以下「大成建設」という。）（令和 6 年度）

(1) b 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

国立大学法人東北大学（以下「東北大学」という。）（令和 3 年度）

学校法人東北工業大学（以下「東北工業大学」という。）（令和 4 年度から令和 6 年度まで）

(2) a 黒津波の発生条件等の検討

大成建設株式会社

(3) a 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価（形状特性を考慮した衝撃評価）

鹿島建設株式会社

【共同研究先】

(1) a-2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

・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（令和元年度～令和 3 年度）

・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 年度～令和 6 年度）

(1) c-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

学校法人東京電機大学（以下「東京電機大学」という。）

・機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究（令和 2 年度～令和 4 年度）

・機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究（その 2）（令和 5 年度～令和 7 年度）

(3) b 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

学校法人東京電機大学

・機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究（令和 2 年度～令和 4 年度）

学校法人東京電機大学、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

・機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究（その 2）（令和 5 年度～令和 7 年度）

実施内容	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
(1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討				
a. 建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価				
a-1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価				
a-1-1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討	- 文献調査 - シミュレーション解析 - 研究計画策定 - 取りまとめ			
a-1-2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討	- 文献調査 - 実験計画立案 - 研究計画策定	- 材料実験 - 実大ブロック実験準備 - 構造実験事前シミュレーション解析 - 建屋解析モデル作成	- 材料実験 - 実大ブロック実験 - 構造実験準備 - 建屋解析モデル改良	- 材料実験 - 構造実験 - 構造実験シミュレーション解析 - 建屋解析 - 構造実験シミュレーション解析 - 建屋解析 - 取りまとめ
a-2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握	NRA - 地震観測記録の取得 - ACROSS 計測記録の取得 JAEA - 三次元解析モデルの構築	NRA - 観測記録等に基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析 JAEA - 固有値解析の実施	NRA - 観測記録等に基づく建屋及び周辺地盤の振動特性の分析 JAEA - 周波数応答解析の実施	NRA - 建屋及び周辺地盤の三次元挙動の把握 - 取りまとめ JAEA - 観測記録と解析結果の比較 - 三次元解析モデルの妥当性確認
a-3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討		- 事前調査 - データ分析	- 文献調査・整理 - システム同定 - 文献調査	- 文献調査・整理・分析 - シミュレーション解析 - 文献調査 - データ分析 - 取りまとめ

委託 内作・請負 共同研究

図 1.3.1 研究の全体行程 (1/3)

Figure 1.3.1 Overall schedule of the research project (1/3)

実施内容	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
(1) 地震に対するフラジリティ評価手法の高度化の検討				
b. 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価				
	・文献調査 ・予備実験	・遠心模型実験 (地盤の応答挙動の把握)	・遠心模型実験 (施設への影響把握)	・遠心模型実験 (施設への影響把握)
	・解析計画検討	・試解析	・実験の再現解析、感度解析	・実験の再現解析、感度解析 ・取りまとめ
c. 大きな地震を経験した既設プラントの設備の耐震性の把握				
c-1 大きな地震を経験した設備の耐震性の把握				
c-1-1 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握				
	NRA ・試験計画の立案 ・材料試験	NRA ・事前解析の実施 ・配管要素試験体の設計・製作	東京電機大学 ・配管要素試験体の振動試験及び試験データの取得 ・事後解析の実施	NRA 東京電機大学 ・大きな地震を経験した配管系の疲労評価における裕度等に係る知見の取りまとめ
	東京電機大学 ・試験計画に対する技術的助言	東京電機大学 ・事前解析結果及び試験体の設計に対する技術的助言	東京電機大学 ・試験結果及び事後解析結果に対する技術的助言	東京電機大学 ・研究成果の取りまとめに対する技術的助言
c-1-2 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握				
	・既往知見の調査 ・載荷試験計画の立案 ・試験体の設計	・試験体の製作	・試験体の載荷試験、試験データの取得	・取得したデータの分析・整理 ・大きな地震を経験した原子炉本体基礎の復元力特性に係る知見の取りまとめ
c-2 制振装置を適用した設備の耐震性の把握				
	・制振装置の型式の選定 ・既往研究の調査	・制振装置の調査 ・制振装置の振動試験の計画立案	・調査結果の分析 ・制振装置の振動試験 ・既往研究の調査	・制振装置の審査における留意点及び事例集の取りまとめ

委託  内作・請負  共同研究 

図 1.3.1 研究の全体行程 (2/3)

Figure 1.3.1 Overall schedule of the research project (2/3)

実施内容	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和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				
a. 黒津波の発生条件等の検討				
	・黒津波の発生条件等を検討するための課題の抽出	・水理試験の実施	・水理試験の実施 ・実験の再現解析、感度解析 ・堆積物調査のデータ整理	・水理試験の実施 ・実験の再現解析、感度解析 ・取りまとめ
(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				
a. 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価				
建物・構築物の設置状況を考慮した衝撃評価	・コンクリート高速貫入解析	・理論的貫入評価式の検討	・来待石・モルタル貫入実験等	・来待石・モルタル貫入実験等 ・取りまとめ
	・超低強度貫入実験等	・超低強度貫入実験等		
建物・構築物の形状特性を考慮した衝撃評価	・小型平板・アーチ衝突実験（球飛翔体）・解析	・小型平板・アーチ衝突実験（球飛翔体・曲率影響確認）・解析 ・中型平板・アーチ衝突実験（裏面剥離）・解析	・小型平板・アーチ衝突実験（平坦飛翔体）・解析 ・中型平板・アーチ衝突実験（貫通）・解析	・小型平板・アーチ衝突実験（鉄筋影響・板厚影響確認）・解析
b. 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討				
	NRA ・研究計画の立案、電気盤を模擬した試験体の製作	NRA ・電気盤を模擬した試験体の衝撃振動試験及び衝撃応答解析 ・ガタ系を有する設備の衝撃応答解析	NRA ・電気盤を模擬した試験体にガタ系を有する設備を組み合わせた衝撃応答解析	NRA ・試験データ及び解析結果の整理・比較・分析 ・応答解析手法の適用性の確認
	東京電機大学 ・研究計画及び試験体の設計に対する技術的助言	東京電機大学 ・衝撃振動試験結果及び解析結果に対する技術的助言	東京電機大学 JAEA ・解析結果に対する技術的助言	東京電機大学 JAEA ・研究成果の取りまとめに対する技術的助言

委託  内作・請負  共同研究 

図 1.3.1 研究の全体行程 (3/3)

Figure 1.3.1 Overall schedule of the research project (3/3)

2. 本論

2.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

建屋の耐震安全性評価手法の適用性について、令和2年度までは原子炉建屋を対象とした三次元有限要素モデルを用いた地震応答解析により、応答挙動に影響を及ぼす因子を分析整理し、建屋の三次元地震時挙動の精緻化に資する知見を蓄積してきた^{1.1.1,2.1.1,2.1.2}。ここでは、これまでの三次元解析に関する知見を踏まえ、地震力を受け低接地率状態となる建屋及び高温状態等にさらされた建屋のように非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性に係る検討を実施した（図2.1.1）。

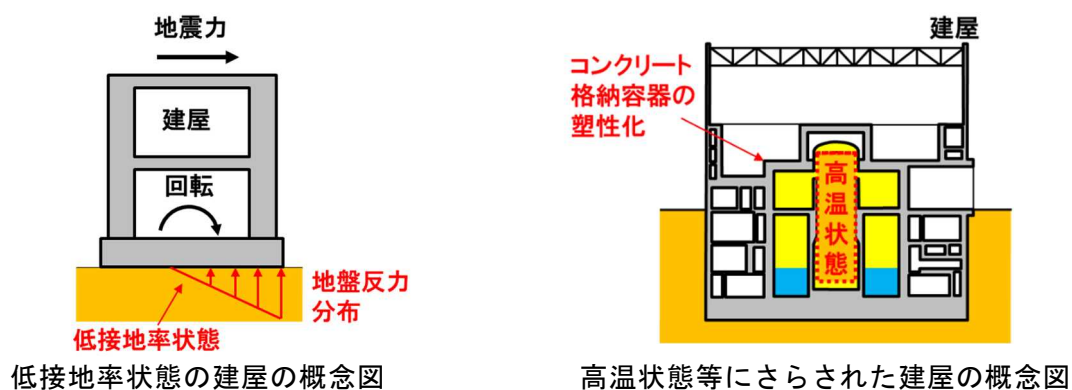


図 2.1.1 低接地率状態の建屋及び高温状態等にさらされた建屋の概念図

Figure 2.1.1 Schematics of a building with a low ground contact ratio and that exposed to high temperature

2.1.1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

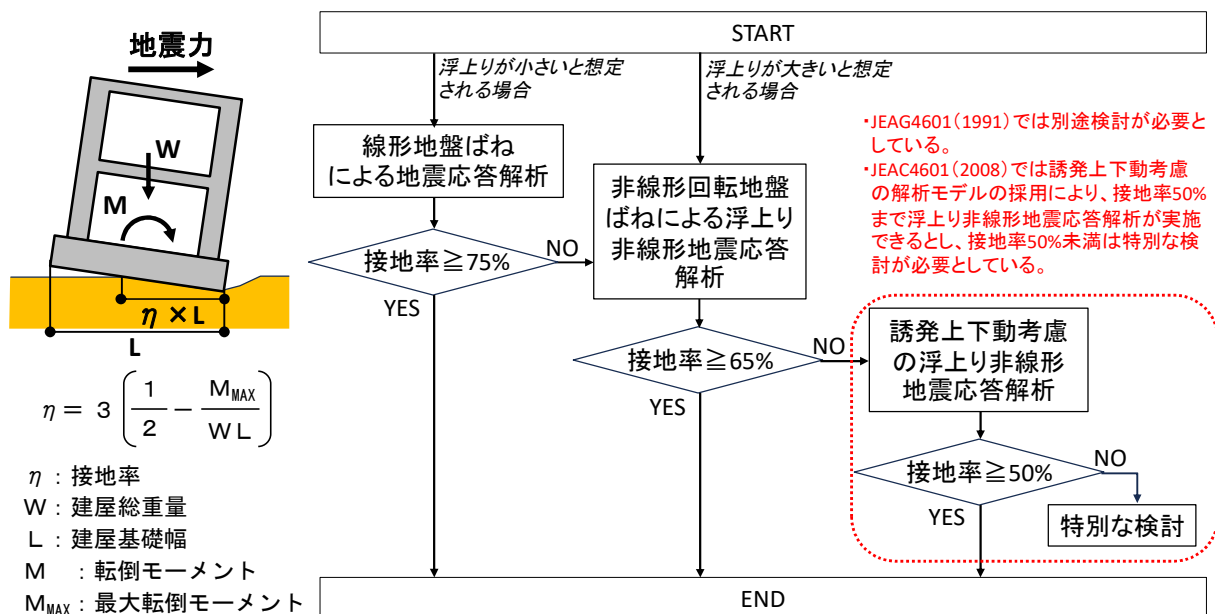
(1) はじめに

本項の(2)から(4)は、令和3年度に実施した JAEA への委託事業^{2.1.3}による成果をまとめたものである。また、本項の(5)は、委託事業の成果を踏まえ、原子力規制庁（以下「規制庁」と言う。）が審査に資する知見としてまとめた成果である。

耐震設計の厳格な妥当性確認に活用することを目的として策定した「耐震設計に係る設工認審査ガイド」^{2.1.4}では、建物・構築物と地盤との相互作用は JEAG4601^{2.1.5-2.1.7}の規定等を参考に適切に設定していることを確認するとしている。また、建物・構築物の地盤への埋め込み状況や配置の実状を考慮した建物・構築物と地盤との相互作用効果への影響について検討していることを確認するとしており、あわせて、建物・構築物の埋め込み形状や埋め戻し部の仕様、隣接建屋、建物・構築物と地盤間の接触・剥離、基礎底面での支持地盤との付着効果等が相互作用の算定及び建物・構築物の応答結果に及ぼす影響等に留意するとしている。

新規制基準適合性に係る審査では、基礎浮上りが予想される建屋の地震応答解析において、JEAG4601（1991）^{2.1.7}の規定及び既往の研究等を参考に、建屋の各階に分布している質量を床位置に集中させた一次元の質点系モデルに基礎浮上りを考慮した地盤ばねをモデ

ル化した地震応答解析を事業者が行うことが、以下に示すとおり基本となっている。図 2.1.2 に、文献 2.1.7, 2.1.8 のフロー図を参考に作成した基礎浮上りに係る地震応答解析の評価手順フローの概要を示す。同評価手順フローに示すとおり、建物・構築物の総重量、基礎幅、地震応答解析結果の最大転倒モーメント等から求めた接地率が 75% 以上の場合は、基礎浮上りによる建屋・地盤間の接触面の滑動・剥離などの影響を線形の力学特性で近似した線形地盤ばねによりモデル化した地震応答解析が採用できる。また、接地率が 75% 未満で 65% 以上の場合は、建屋・地盤間の影響を非線形の力学特性で近似した非線形地盤ばねによりモデル化した浮上り非線形地震応答解析が採用できる。なお、JEAG4601 (1991) 2.1.7 では、接地率が 65% 未満の場合は別途検討が必要となっているが、現在の審査では、接地率が 65% 未満の場合、事業者は審査当時の規格及び基準類等である JEAC4601 (2008) 2.1.8 等の規程に準拠した誘発上下動考慮の浮上り非線形地震応答解析を採用している。また、JEAC4601 (2008) 2.1.8 では、接地率が 50% 未満になる場合、三次元有限要素法に基づく解析等の特別な検討が必要であるが、事業者が、現実的な判断により付着力を設定した地震応答解析を実施して接地率を改善し、特別な検討ではなく既往の地震応答解析を採用する事例 2.1.9 がある。審査では、事業者が付着力を設定した地震応答解析を実施して接地率を改善する場合、付着力の有無が建屋の加速度応答に与える影響等を確認することになるが、接地率が 50% 未満になる場合の検討事例はほとんどない。地震力の増大により接地率が減少する場合もあることを考慮し、建屋・地盤間の付着力の影響を含めた低接地率状態での地震応答解析について審査に資する知見を拡充する必要がある。これらを踏まえ、委託先により、解析的検討等を行い、基礎浮上りに係る非線形地震応答解析手法の適用性に関する技術的知見を収集した。また、規制庁は委託事業により得られた知見を踏まえ、審査に資する知見を確認事項として取りまとめた。



出典) 日本電気協会 (1991、2008) 2.1.7,2.1.8 の図を参考に作成

図 2.1.2 基礎浮上りに係る地震応答解析の評価手順フローの概要

Figure 2.1.2 Overview of the evaluation flow for earthquake response analysis related to foundation uplift

(2) 実施概要

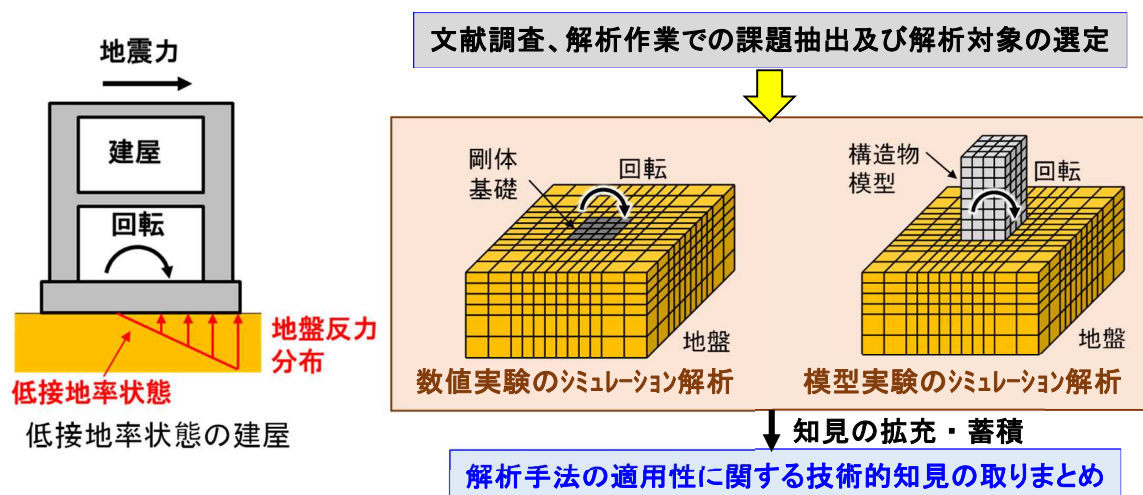
本項では、委託先で実施した検討の概要を示す。原子力発電所の建屋の中には、構造形状や重量配分及び地盤条件等により、過去の審査では地震時の接地率が問題とならなかった建屋でも、基準地震動の増大に伴い地震時の接地率が低くなることで、審査において論点となる場合がある。低接地率の建屋では上下応答を適切に評価する必要があり、採用する評価手法の適用性について確認することが重要である。しかし、このような低接地率状態となる建屋について、低接地率の挙動や鉛直地震動の影響に着目した研究事例は僅かである。したがって、低接地率状態となる建屋の応答評価手法に関する知見を蓄積する必要がある。低接地率状態の建屋の地震時応答挙動について、審査に資する知見を拡充するため、既往知見の収集、解析手法の調査、解析による応答挙動の把握等を行い、解析手法の適用性に係る技術的知見を取りまとめた (図 2.1.3)。

具体的には、まず、建屋基礎底面と支持地盤との間の接地率が小さくなる場合の建屋の地震時挙動に関する文献調査を行い、低接地率状態の建屋の地震応答解析手法に関する課題を抽出した。そして、既往文献に示されている理論解及び実験結果を対象に、審査では接地率が 50%未満になる場合に三次元有限要素法に基づく解析手法が採用されることを踏まえ、三次元有限要素法によるシミュレーション解析を行い、文献だけからでは把握できない詳細な内容について確認するとともに、モデル化や解析コードの違い等について考察した。さらに、解析結果への影響が大きいと判断されたモデル化手法については、感度解析により解析結果への影響を具体的に確認し、基礎浮上りに係る非線形地震応答解析の適

用性に関する知見を収集した。

ここでは下記に示す 2 項目の実施内容について以降に示す。なお、研究成果については、委託先の JAEA が国内の学会や国際会議のプロシーディングスで公表済み^{2.1.10-2.1.15}である。

- ・ 文献調査、解析作業での課題抽出及び解析対象の選定
- ・ 既往実験を対象としたシミュレーション解析



出典) JAEA (2022) ^{2.1.3} の記述を参考に作成

図 2.1.3 研究全体イメージ

Figure 2.1.3 Overall image of the research

(3) 文献調査・解析作業での課題抽出及び解析対象の選定

委託先の JAEA は、低接地率状態に関連した文献を収集・分析し技術的論点を明らかにするため、建屋の基礎浮上りに係わる解析の現状について、国内外の文献を調査し、得られた知見を整理した。審査において、事業者が低接地率状態となる場合に付着力を想定することで基礎浮上りが生じない既往の解析手法を用いる場合があるが、文献調査の結果、このような付着力を考慮した三次元有限要素法に基づく解析手法の使用実績が少ないことが分かった。このため、低接地率に係る規制上の主要な技術的論点は、付着力設定方法の妥当性及び付着力が有るか低接地率となる場合における解析法の妥当性の 2 点であり、これが低接地率状態の解析作業における現状の課題と考えた。これを踏まえ、実際に付着力を考慮した解析作業における現状の課題及び本検討でシミュレーション解析を実施可能な詳細情報まで読み取れる文献整理結果から、低接地率状態及び付着の影響を把握するために必要な文献として表 2.1.1 の 3 つを選択した。

文献①^{2.1.16} では、基礎浮上りを考慮した解析コードの機能の検証のために適した理論解の解析事例が示されており、解析コードの性能確認に適切と考えた。文献②^{2.1.17} の実験は、弾性のシリコンゴムにより地盤を模擬した実験であることから、地盤材料の非線形性の影

響を除外した基本的な解析的検討を行うために適切と考えた。文献③^{2.1.18}の実験は、粘土地盤を用いて付着力を模擬したケースのほかに、一度付着が切れた後で再度加振実験を行い、付着力が無い状態で浮上りが顕著に生じる実験も実施しており、付着力の有無の両方でシミュレーション解析が実施できると考えた。

表 2.1.1 シミュレーション解析で対象とした既往実験に係る文献

Table 2.1.1 Literature related to previous experiments that were subjected to simulation analyses

文献①	原子力安全基盤機構：平成 16～18 年度 原子力施設の非線形地盤・構造物相互作用試験及び基準整備に関する報告書, 2005～2007.
文献②	矢野ら：非線形連結要素 FEM モデルによる基礎浮き上がり動的解析:振動台実験のシミュレーションによる精度検討, 日本建築学会構造系論文集, No.427, pp. 87-98, 1991.
文献③	今村ら：砂地盤及び粘土地盤に支持された直接基礎構造物の浮き上がり挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No.692, pp. 1759-1768, 2013.

出典) JAEA (2022) ^{2.1.3} の記述に基づき作成

(4) 既往実験を対象としたシミュレーション解析

委託先の JAEA は、既往実験 ^{2.1.16-2.1.18} を対象としたシミュレーション解析を行い、解析上の留意点等を整理した。シミュレーション解析結果については、低接地率状態となる建屋基礎底面の付着力の有無に関する応答の違い、解析手法の精度等について考察した。また、解析結果への影響が大きいと判断されたモデル化手法については、感度解析により解析結果への影響を具体的に確認した。

解析作業では、解析手法の妥当性確認のため、3 つの解析コードを用いた。使用する解析コードは、建屋の浮上り挙動を表現するために建屋と地盤との境界部に非線形特性が考慮できるかを考慮して、三次元非線形時刻歴応答解析プログラム TDAPIII (使用バージョン: Ver.3.13) ^{2.1.19}、大規模三次元並列非線形耐震解析コード E-FrontISTR (使用バージョン: Ver.20211215) ^{2.1.20} 及び大規模非線形構造解析システム FINAS/STAR (使用バージョン: v2019r190925) ^{2.1.21} を用いた。これらの解析コードを用いて三次元有限要素法に基づく解析モデルを作成し、シミュレーション解析を実施した。解析モデルでは、地盤を弾性体とし、建屋基礎底面と地盤との節点間に接触・剥離の特性を考慮したジョイント要素を用いた。シミュレーション解析により得られた成果 ^{2.1.10-2.1.13} を以下に示す。

- ・ 低接地率基礎浮上り解析における適切な解析条件の確認及び複数解析コードの解析機能を検証するため、3 つの解析コードを用いた地盤インピーダンス、静的解析、動的解析を実施し、理論解と比較して 3 つの解析コードともにおおむね同等な解析結果が得

られ、低接地率に至る挙動を再現できることを確認した。

- ・ 支持地盤（シリコンゴム）上に、構造物を模擬した模型を載せスweep波を入力した既往の実験のシミュレーション解析を実施し、実験結果を精度よく再現するような結果が得られた。鉛直応答については、解析が実験よりも大きく評価される傾向が確認された。
- ・ 粘土地盤に関する既往の遠心振動実験のシミュレーション解析を実施し、付着力無し
の条件では、解析結果が実験結果を精度よく再現するような結果が得られた。付着力有
りの条件では、解析結果は実験結果より誘発上下動が大きくなり、解析条件での付着強
度を上げることで実験結果を再現できた。
- ・ 実施したシミュレーション解析結果を接地率 65%以下の領域の誘発上下動に注目して
分析し、静的単調載荷、正弦波加振問題及び振動台試験における付着力の影響につい
て、付着力が模擬されている場合は誘発上下変位が小さくなる一方で水平応答加速度
は大きくなる等を確認した。

なお、3つの解析コードの結果はいずれの計算でもおおむね整合したものの、基礎浮上
り後に再接地する瞬間の鉛直加速度の大きさに違いが見られたことから、解析コードを使
用する際は再接地する瞬間の影響を踏まえて、解析手法、パラメータ等を決める必要があ
る。

(5) 規制の観点での取りまとめ

委託先の JAEA が実施した文献調査、既往実験のシミュレーション解析結果等から得ら
れた、低接地率状態となる建屋応答評価における解析手法の適用性に係る技術的知見を、
規制庁が、審査に資する知見として、確認事項の形式でまとめた。確認事項を下記に示す。

- ・ 接地率の改善を目的に建屋・地盤間の付着力を考慮した地震応答解析を実施する場合、
付着力の有無が建屋の水平応答加速度、鉛直応答加速度等の建屋の地震応答に与える
影響の大きさを確認すること。通常、建屋の水平応答加速度へ与える影響は小さい。
- ・ 地震応答解析における鉛直応答加速度は、付着力の影響を受けるため、実際の発電所サ
イトの岩盤等の状況を調査して付着力試験を実施する等、設定した付着力の妥当性を
確認すること。
- ・ 解析コードの機能及び特徴により、使用する解析コードによって地震応答解析に違い
が生じる可能性があるため、付着力を考慮した地震応答解析では、入力地震動レベルを
変えた地震応答解析を行い、入力地震動レベルごとの最小接地率、水平応答加速度及び
誘発上下動を含めた鉛直応答加速度の関係を既往論文等と比較し、解析手法の適用範
囲、設定した解析パラメータの妥当性等を確認すること。
- ・ 接地率が 65%以下になると誘発上下動の影響が大きくなり、建屋の鉛直応答加速度波

形に、物理的な意味が無く数値計算上生じる非常に鋭いスパイク状のノイズのような応答が生じやすくなる。スパイク状の波形を除去する場合、有意な誘発上下動を除去しないよう、速度波形等を確認しながら、その除去の妥当性を確認すること。

(6) まとめ

低接地率状態となる建屋の応答評価に関する知見を蓄積して、低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目した評価手法の適用性を確認することを目的に、JAEA への委託事業により、建屋基礎底面と支持地盤との間の接地率が小さくなる場合の建屋の地震時挙動に関する文献調査を行い、低接地率状態の建屋の地震応答解析手法に関する課題を抽出した^{2.1.3}。そして、既往文献に示されている理論解及び実験結果を対象に、審査等で採用される既往の解析手法を用いたシミュレーション解析を行い、文献だけからでは把握できない詳細な内容について確認するとともに、モデル化や解析コードの違い等について考察した^{2.1.3,2.1.10-2.1.15}。さらに、解析結果への影響が大きいと判断されたモデル化手法については、感度解析により解析結果への影響を具体的に確認し、解析コードを使用する際は再接地する瞬間の影響を踏まえて、解析手法、パラメータ等を決める必要がある等、基礎浮上りに係る非線形地震応答解析の適用性に関する技術的知見を収集した^{2.1.3}。最後に、それら委託事業による知見を踏まえ、規制庁は審査に資する知見を取りまとめた。

2.1.2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

(1) はじめに

本項の(2)から(5)は、令和3年度から令和6年度に実施した鹿島建設への委託事業による成果をまとめたものである。また、本項の(6)は、委託事業の成果^{2.1.22}を踏まえ、規制庁が審査に資する知見としてまとめた成果である。

「耐震設計に係る設工認審査ガイド」^{2.1.4}では、建物・構築物の耐震設計における荷重及び荷重の組合せについて、施設に作用する地震力と地震力以外の荷重を適切に組み合わせていることを確認するとしている。そして、施設に作用する地震力以外の荷重については、耐震設計に係る設工認審査で適用実績のある規格及び基準等として、JEAG4601^{2.1.5-2.1.7}、原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2005)^{2.1.23}、コンクリート製原子炉格納容器規格^{2.1.24}等を示し、それらを踏まえ、規制基準の要求事項に留意し考慮していることを確認するとしている。

これまで、建物・構築物の耐震設計におけるコンクリート部材の応力解析では、上記の規格及び基準等を用いて部材の弾性剛性に基づいた弾性解析が用いられていた。しかしながら、新規制基準を踏まえ、新たに重大事故等の温度・圧力が負荷された状態も含めた各荷重状態での原子炉建屋の耐震性評価が重要となり、弾性解析だけではなく、RC部材に生じるひび割れ等の影響を材料の非線形特性として考慮した弾塑性解析に基づく評価が重要となっている。一方で、耐震設計に係る設工認審査で用いられている上記の規格及び基準等には弾塑性解析における温度荷重に関する記載はない。中でも、原子力施設特有の温度荷重を受けるコンクリート製原子炉格納容器(以下「CCV」という。)において、重大事故等のような過酷な環境での剛性や耐力を評価するためには、高温状態での材料物性の変化及びRC部材の応答挙動に関する知見が必要であるが、重大事故時のような高温時に関する既往の研究事例は少なく、それらについて審査に資する知見を拡充する必要がある。これらを踏まえ、委託先により実験的検討、解析的検討等を行い、RC部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を拡充した。また、規制庁は委託事業により得られた知見を踏まえ、審査に資する知見を確認事項として取りまとめた。

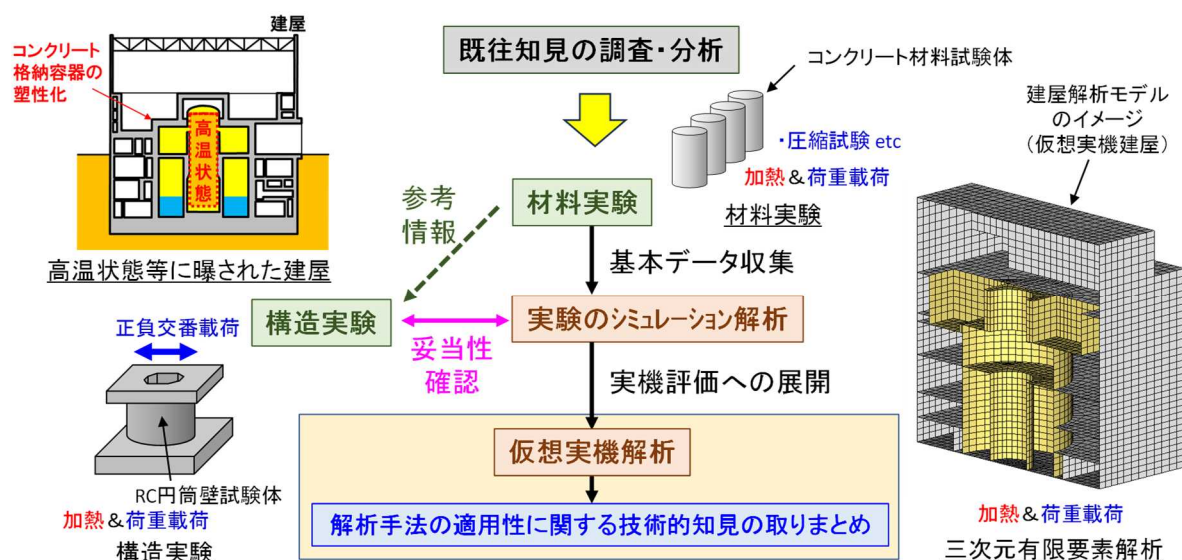
(2) 実施概要

本項では、委託先で実施した検討の概要を示す。原子炉建屋において、これまでは設計基準事象のうち通常時の状態を対象とした検討を実施し知見を蓄積してきたが、事故時の状態を対象とした高温状態等の影響を受けた建屋の地震時応力解析に関する知見は少ないことから、高温状態等の影響を受けた建屋の地震時応力解析手法の適用性を確認するとともに応答特性への影響に関する知見を蓄積する必要がある。高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について、審査に資する知見を拡充するため、既往知見の収集、材料・構造実験の実施、仮想実機建屋を対象とした弾塑性解析等により応答挙動の把握等を行い、解析手法の適用性に係る技術的知見を取りまとめた(図2.1.4)。

具体的には、まず、既往知見の収集、材料・構造実験の調査、解析手法の調査等を行い、実験・解析による応答挙動の把握のための計画を作成した。そして、調査・収集した情報に基づき、既往知見で不足又は拡充すべき高温影響を受けたコンクリートの材料物性を評価する材料実験及び RC 部材の構造実験を行い、高温の影響を受けたコンクリート材料及びコンクリート部材に関する基本データを収集した。また、構造実験を対象に、三次元有限要素法に基づく弾塑性解析を実施し、文献調査等で収集した既往の解析手法の妥当性を確認したうえで、それらの解析手法を用いて仮想実機建屋を対象とした解析的検討を行い、高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する技術的知見を収集した。

ここでは下記に示す 3 項目の各実施内容について以降に示す。なお、研究成果については、その一部を委託先の鹿島建設が国内の学会や国際会議のプロシーディングスで公表済み^{2.1.25,2.1.26}である。今後、論文等として公表する計画である。

- ・ 既往規格・基準類、設計事例及び既往研究の調査
- ・ 材料及び構造実験
- ・ 実験のシミュレーション解析及び仮想実機解析



出典) 鹿島建設 (2022)^{2.1.22} の記述及び図を参考に作成

図 2.1.4 研究全体イメージ

Figure 2.1.4 Overall image of the research

(3) 既往規格・基準類、設計事例及び既往研究の調査

委託先の鹿島建設は、国内外の温度影響を考慮した CCV の耐震設計・評価に関する規格基準について、温度レベルに応じた温度荷重の考え方、地震応答を評価する際の温度荷重の扱い及びコンクリートの材料物性（圧縮強度、引張強度、弾性係数等）を調査した。また、調査した規格・基準類で参考又は引用している論文等での温度荷重の扱い及び温度によるコンクリートの材料物性に関する知見を整理し、加熱以前の荷重履歴の影響及び加熱による損傷の観点から、国内外の CCV の耐震設計・評価事例を調査した。その結果、加熱

履歴・加熱時間の違いが材料物性に与える影響、コンクリート中のセメント種類の違いが加熱された材料物性に与える影響等に関する知見が得られた。

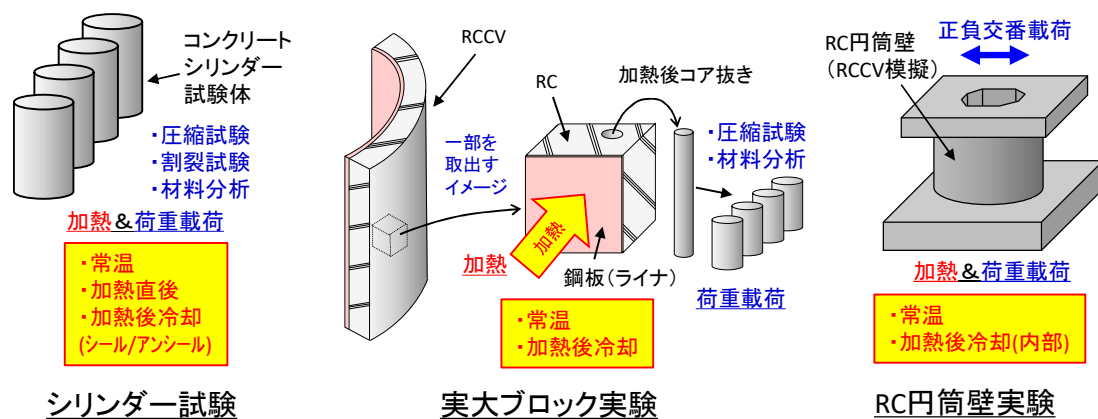
そして、既往研究として、加熱中又は加熱後のコンクリートについて調査した事例を対象として、加熱の影響を受けたコンクリートの材料物性（圧縮強度、引張強度、弾性係数等）に関する国内外の材料実験例、加熱の影響を受けた RC 部材の変形特性や耐力等に関する構造実験例を調査し知見を整理した。その結果、300℃までの加熱温度では、材料実験強度に与える影響よりも RC 部材の終局強度に与える影響が小さくなる実験結果が多いことが分かった^{2.1.22}。

(4) 材料及び構造実験

委託先の鹿島建設は、(3)の調査結果を踏まえ、高温影響を受けたコンクリートの材料物性を評価する材料実験及び RC 部材の構造実験を行った（図 2.1.5）。材料実験としてシリンダー試験及び実大ブロック実験を実施した。シリンダー試験は原則として日本産業規格（以下「JIS」という。）等に基づき実施する材料試験（圧縮試験及び割裂試験）である。高温時の試験方法に関する規定は無いため、文献調査等を参考に高温影響が確認できるよう留意し最大 300℃までの加熱を行うシリンダー試験を実施し、高温影響を受けたコンクリートの材料物性に関するデータを取得した。また、実大ブロック実験は、CCV のうち RC 製格納容器（以下「RCCV」という。）を対象に、RCCV 実機から一部を取り出すイメージで製作した実大ブロックを用いて加熱を行う実験である。実大ブロック実験では実機同様にライナ部材を模擬し、そのライナ面側から最大 300℃の加熱を行った。加熱中の実大ブロックの温度分布から実機 RCCV 内部の温度分布に関するデータを取得した。また、加熱実験終了後に常温となった実大ブロックから採取したコア供試体を用いた圧縮試験から、実機内部で高温影響を受けたコンクリートの材料物性に関するデータを取得した。

材料実験を実施後、その結果を参考にしながら構造実験として RC 円筒壁実験を実施した。RC 円筒壁実験では、RCCV を模擬した RC 円筒壁を用い、円筒壁内部から 300℃で加熱後、静的な正負交番載荷等を行った。RC 円筒壁実験により、高温影響を受けた RC 円筒壁部材の地震時応答及び部材耐力に関するデータを取得した。

実験条件、結果概要等について以降に示す。本検討は、事業者が、重大事故等対策の有効性評価の審査資料において、原子炉格納容器の限界温度・圧力を 200℃・2Pd（Pd：最高使用圧力）としていることから、それを包含する条件として各種条件を設定した。



出典) 鹿島建設 (2022) ^{2.1.22} の記述及び図を参考に作成

図 2.1.5 材料実験及び構造実験の概要

Figure 2.1.5 Overview of material and structural experiments

① 材料実験 (シリンダー試験)

委託先の鹿島建設は、高温影響を受けたコンクリート材料の力学特性に係るデータを取得することを目的に、コンクリートのシリンダー試験体を用いた材料実験を行った。主な試験条件は表 2.1.2 とし、強度発現確認用も含めて 210 体の試験体を製作した。なお、水分条件におけるシール条件とは試験体を密封して水分逸散させない条件、アンシール条件とは密封せずに水分逸散させる条件のことである。シリンダー試験体をシール条件又はアンシール条件で、100℃、175℃、200℃又は 300℃の加熱を行い、加熱直後又は加熱後自然冷却後に試験等を実施し、圧縮強度等のデータを取得した。なお、常温のケースでは、加熱を行わず試験を行っている。

シリンダー試験の結果から、アンシール条件では加熱温度が高いほどコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数が低下する傾向であること、シール条件ではアンシール条件と比較して加熱によるコンクリートの静弾性係数の低下が小さい傾向にあること等、調合条件、加熱条件及び加熱温度の違いによるコンクリートの力学特性の違いを把握することができた ^{2.1.26}。

表 2.1.2 主な試験条件 (シリンダー試験)

Table 2.1.2 Test overview (cylinder test)

温度条件	常温／100／175／200／300℃
加熱条件	加熱直後／加熱後自然冷却
水分条件	アンシール条件／シール条件
セメント種類	普通ポルトランドセメント／フライアッシュセメント
測定項目	圧縮強度、引張強度、静弾性係数、温度等

出典) 鹿島建設 (2022) ^{2.1.22} の記述に基づき作成

② 材料実験（実大ブロック実験）

実機 RCCV の高温時の熱伝導特性及び実機 RCCV のコンクリート材料の力学特性に係るデータを取得することを目的に、実大ブロックを用いた材料実験を行った（図 2.1.6）。主な実験条件は表 2.1.3 とし、3 体の実大ブロックを製作した。実大ブロックは実機 RCCV の壁厚が 2m 程度であることを踏まえ 1 辺が 2m の RC 製の立方体とし、ライナ部材も模擬している。実大ブロックの配筋は実機相当の鉄筋比とした。実大ブロックのライナ面及びその反対面以外の 4 面を断熱材で保温したうえで、ライナ面側から 200℃又は 300℃で加熱し、200℃加熱、300℃加熱におけるデータを取得した。200℃又は 300℃加熱中は実大ブロック内部の温度を計測し、加熱終了後に常温となつてからコア供試体を採取して、そのコア供試体を用いた圧縮試験等を行った。なお、常温のケースは、加熱を行わずコア供試体を採取して試験を行っている。実大ブロック実験の結果から、加熱条件及び加熱温度の違いによるコンクリートの熱伝導特性及び力学的特性に係るデータを取得した。

表 2.1.3 主な実験条件（実大ブロック実験）

Table 2.1.3 Experimental overview (full-scale block experiment)

温度条件	常温／200／300℃
加熱条件	ライナ面から実大ブロックを加熱する方法
セメント種類	普通ポルトランドセメント
測定項目	加熱中：温度、加熱後：圧縮強度（採取したコア供試体使用）等

出典）鹿島建設（2022）^{2.1.22} の記述に基づき作成



※ 写真は規制庁が実験立会い時に撮影

出典）左図は鹿島建設（2022）^{2.1.22} の図を参考に作成

図 2.1.6 実大ブロック実験

Figure 2.1.6 Full-scale block experiment

③ 構造実験（RC 円筒壁実験）

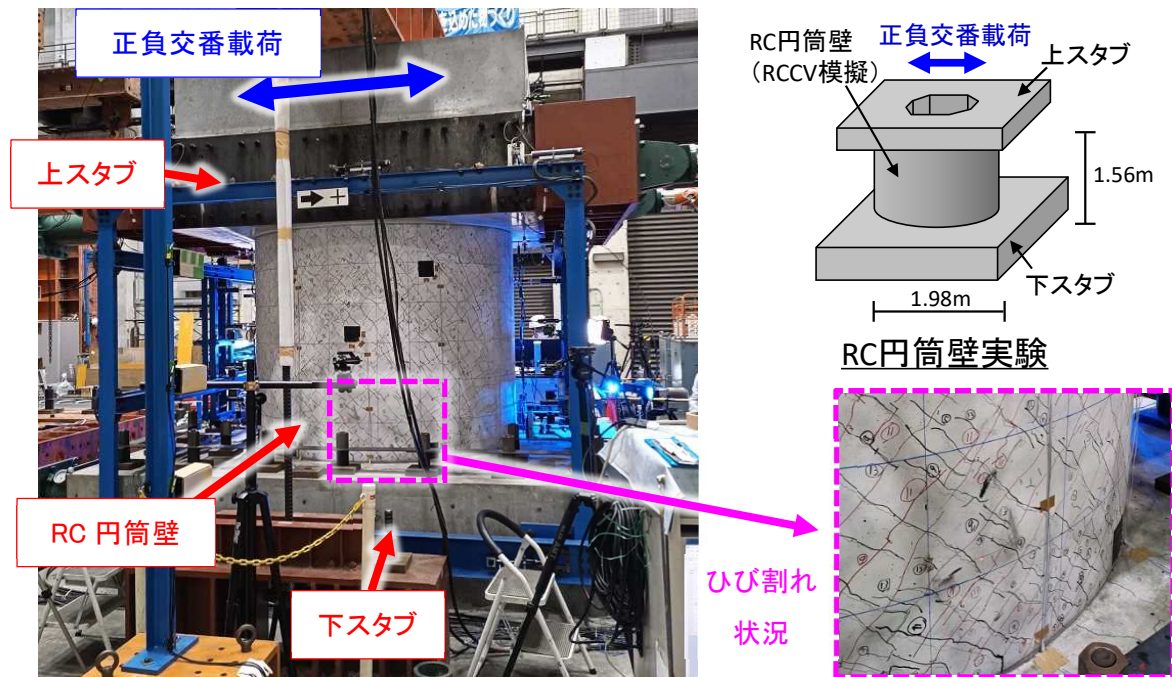
高温影響を受けた RCCV の地震時応答及び部材耐力を評価するためのデータ取得を目的に、RC 円筒壁を用いた構造実験を行った（図 2.1.7）。主な実験条件は表 2.1.4 とし、2 体の RC 円筒壁を製作した。RC 円筒壁は実機 RCCV の 1/17 スケールに相当し、円筒壁部の外径が 1.98m、高さ 1.56m、壁厚 0.12m で、壁内の配筋は実機相当の鉄筋比とした。実験では、まず、下スタブを固定し、上スタブを介して RC 円筒壁に鉛直荷重を作用させたうえで、円筒壁内面から 300℃加熱した。そして、自然冷却後にジャッキを用いて上スタブを水平方向に加力することで水平繰返し载荷を行い、RC 円筒壁の破壊までの実験を行った。なお、事前損傷ありのケースでは、加熱前にせん断ひずみ 2000 μ までの水平繰返し载荷・除荷を与えている。構造実験の結果から、高温影響を受けた RCCV の地震時応答及び部材耐力の評価に係るデータを取得した。

表 2.1.4 主な実験条件（RC 円筒壁実験）

Table 2.1.4 Experimental overview (RC cylindrical wall experiment)

温度条件	300℃
加熱条件	円筒壁内面をほぼ均等に加熱後自然冷却
セメント種類	普通ポルトランドセメント
加力	水平方向の正負交番繰返し载荷
事前損傷の有無	なし／あり
測定項目	荷重、変位、温度、ひずみ等

出典）鹿島建設（2022）^{2.1.22} の記述に基づき作成



※ 写真は規制庁が実験立会い時に撮影

出典) 右上図は鹿島建設 (2022) ^{2.1.22} の図を参考に作成

図 2.1.7 RC 円筒壁実験

Figure 2.1.7 RC cylindrical wall experiment

(5) 実験のシミュレーション解析及び仮想実機解析

高温の影響を受けた原子炉建屋の地震時応答挙動を把握することを目的に、RC 円筒壁実験及び仮想実機建屋を対象とした三次元有限要素法に基づく弾塑性解析を行った。材料の温度依存特性及び弾塑性特性を考慮した三次元有限要素法に基づく解析モデル等を作成すると共に、作成した有限要素モデルを用いて、実験のシミュレーション解析及び仮想実機の原子炉建屋を対象とした弾塑性解析を実施した。

具体的には、まず、解析手法の妥当性及び適用性を確認するため、RC 円筒壁実験を対象とした三次元有限要素法に基づいた解析モデルを作成し、実験での荷重条件を考慮したシミュレーション解析を実施した。解析には、汎用有限要素ソルバーAbaqus/Standard^{2.1.27}を用い、鉄筋の材料モデルには弾塑性モデルを、コンクリートの材料モデルには塑性理論をベースとした Abaqus のコンクリート塑性損傷モデル^{2.1.27}を用いた。材料モデルは、前述の材料実験結果、ユーロコード^{2.1.28}等に基づきパラメータを設定した。そして、実験のシミュレーション解析から得られた知見を踏まえ、RCCV 内部の温度が最大 300℃となる仮想の原子炉建屋を対象とした仮想実機解析を行った。仮想の原子炉建屋の解析モデルは、文献^{2.1.29-2.1.31}を参考に作成した。仮想実機解析では、解析モデルのモデル化範囲の影響を確認するため、基礎版から屋根までを積層シェル要素等でモデル化した建屋一体モデル及び RCCV 近傍のみを積層シェル要素等でモデル化した RCCV 設計用モデルの 2 種類の解

析モデルを用いた（図 2.1.8）。RCCV 設計用モデルは、RCCV の設計時に応力解析モデルとして採用される解析モデルを想定したものである。通常、設計時の応力解析モデルでは、地震時、温度荷重時等の荷重条件ごとに、応力等の評価結果が保守的になるように形状をモデル化していない外壁等の影響が境界条件として適切に考慮されている。これらの解析モデルを用い、高温影響を受けた原子炉建屋の最大耐力を評価するためプッシュオーバー解析を実施した。なお、実験のシミュレーション解析により、RC 円筒壁の正負交番荷重による最大耐力を評価可能であることを確認している。解析の結果、高温影響によるコンクリート材料の弾性係数の低下により建屋の剛性も低下する一方で、圧縮強度の低下が建屋の耐力へ与える影響は小さいこと等を確認した。解析により、高温影響を受けた RC 部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析において留意すべき解析条件、高温影響によるコンクリート部材の剛性低下及び圧縮強度低下が建屋の地震時応答挙動に与える影響、地震荷重と温度荷重の荷重順序の影響等、RC 部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を得た。

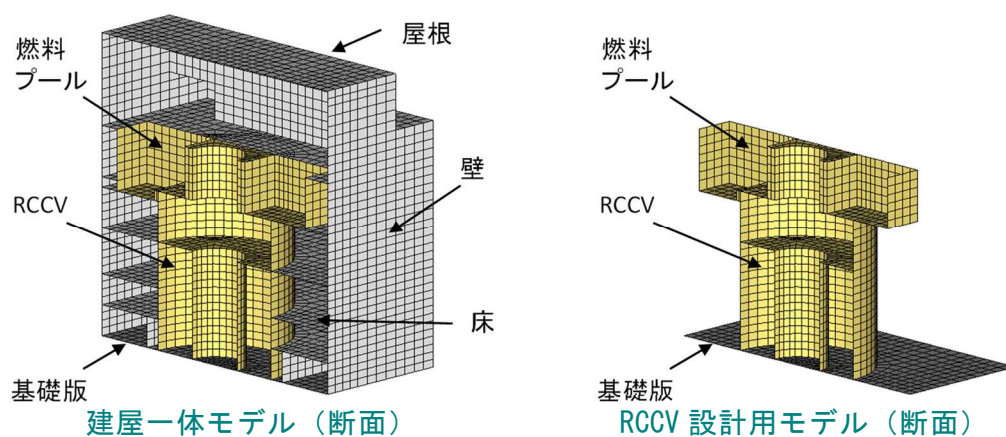


図 2.1.8 解析モデルのイメージ

Figure 2.1.8 Analysis model image

(6) 規制の観点での取りまとめ

委託先の鹿島建設が実施した文献調査、実験、仮想実機建屋の解析結果等から得られた、高温影響を受けた建屋での弾塑性解析の適用性に関する温度荷重における確認事項を、規制庁が、審査に資する知見として、確認事項の形式でまとめた。確認事項を下記に示す。

- ・ RC 部材の材料非線形特性を考慮した弾塑性解析で重要となるコンクリートの材料モデルについては、使用する解析コードを用いて既往の実験結果のシミュレーション解析を行う等により、部材の剛性、耐力及び荷重－変位関係における履歴特性等の設定の妥当性を確認すること。
- ・ 実機建屋を対象とした解析では、地震荷重、温度荷重等の荷重条件ごとに応力解析結果

が保守的となる境界条件が異なる場合があるため、常時・運転時、地震時、温度荷重時等の各荷重条件における境界条件の妥当性を確認すること。

- ・ 弾塑性解析は、弾性解析と異なり各荷重条件の応力解析結果の重ね合わせが出来ない非線形解析であるため、荷重組合せの応力解析結果においては荷重載荷順序の妥当性を確認すること。

1 点目の確認事項は、実験結果のシミュレーション解析における試行錯誤等から、材料モデルの妥当性に関する確認事項として挙げた。2 点目の確認事項は、審査で各荷重条件での境界条件を確認している一方で、本検討では、床スラブの材料特性を変えた建屋一体モデルによる感度解析により、入力荷重が大きい場合は RCCV に取り付く床スラブが塑性化するため、RCCV 部の負担荷重に影響を与えることを確認した。特に、RCCV 設計用モデルでは、RCCV 部に接続する床スラブ等の周辺部材の影響を境界条件として設定するため、それら境界条件の妥当性に関する確認事項として挙げた。3 点目の確認事項は、2 点目のとおり、入力荷重が大きくなると各荷重載荷で部材に塑性化が生じるため、各部材が塑性化する順序が着目部材の評価に影響を与える可能性があることから、荷重組合せに係る確認事項として挙げた。

(7) まとめ

高温状態等の影響が建屋の応答特性へ与える影響に関する知見を蓄積して、事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法の適用性を確認することを目的に、鹿島建設への委託事業により、高温状態にさらされた建屋の地震時応力解析の適用性に係る調査を行った^{2.1.22}。また、高温状態にさらされた建屋の地震時応答挙動を把握するためのコンクリートの材料試験データを取得するとともに、実機の RC 部材の材料特性を把握するため、これを模擬した材料試験体等を製作し、材料試験データを取得した^{2.1.22,2.1.25,2.1.26}。さらに、構造試験体を製作し、構造試験、シミュレーション解析等を行うとともに、仮想実機建屋を対象とした感度解析等を実施した。その結果、高温影響によるコンクリート材料の弾性係数の低下により建屋の剛性も低下する一方で、圧縮強度の低下が建屋の耐力へ与える影響は小さいこと等、RC 部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を拡充した^{2.1.22}。最後に、それら委託事業による知見を踏まえ、規制庁は審査に資する知見を取りまとめた。

2.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

2.2.1 はじめに

日本の原子炉建屋の耐震解析は長らく質点系モデルを用いた地震応答解析が主流であり、三次元有限要素モデルによる検討事例は少なかった。しかし、設置許可基準規則において、「地震による損傷の防止」（第四条）が大幅に強化され、水平2方向及び鉛直方向の応答評価が求められるようになった。そのため、質点系モデルによる検討は行われつつも、より現実的な応答評価が可能な三次元有限要素モデルを用いた耐震重要施設の健全性評価が検討されるようになった。

そこで、本研究では、JAEA 大洗研究所の高温工学試験研究炉（以下「HTTR」という。）で構築した大規模観測システム^{2.2.1}を用いて地震観測記録等の実測データを取得し、建屋及び周辺地盤の振動特性を分析して建屋の三次元挙動を把握した。また、三次元有限要素モデルを用いた解析結果と地震観測記録等の分析結果とを比較し、モデルの妥当性を確認することにより、三次元耐震解析による実測データの再現性向上のための知見を拡充した。また、本研究は JAEA との共同研究「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」として、「地震観測記録による建屋及び周辺地盤の振動特性の分析」及び「実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化」の2つを実施したものである。JAEA の成果を含む共同研究の成果については、共同研究成果報告書^{2.2.2,2.2.3}に示すこととする。本章では、規制庁の主な成果として、地震観測記録による建屋及び周辺地盤の振動特性の分析について 2.2.2(1)に示す。また、JAEA の主な成果として、人工波送信装置（ACROSS：精密制御定常信号システム^{2.2.4}）を用いた計測記録（以下「ACROSS 計測記録」という。）による局所振動の分析について 2.2.2(2)に、三次元耐震解析モデルを用いた再現解析の実施について 2.2.3 に示す。

2.2.2 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

大規模観測システムによって得られた地震観測記録及び ACROSS 計測記録を用いて分析を行い、HTTR 建屋の構造的特徴を踏まえて振動特性を把握した。

(1) 地震観測記録による建屋及び周辺地盤の振動特性の分析

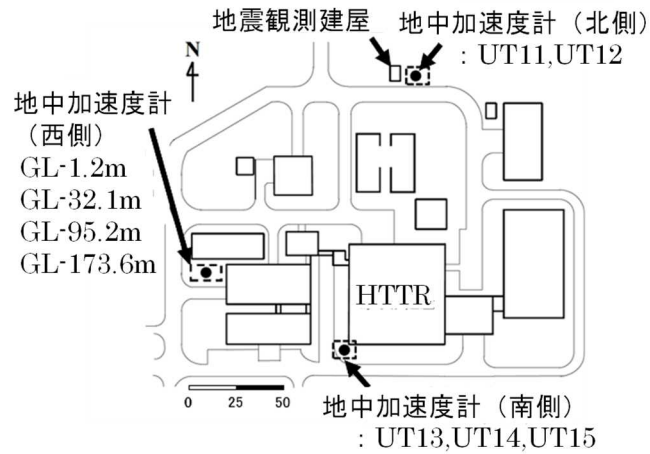
地震観測記録による建屋及び周辺地盤の振動特性の分析を実施した。HTTR 建屋及び周辺地盤の加速度計の設置位置を図 2.2.1^{2.2.5} 及び図 2.2.2^{2.2.6} に示す。HTTR では、これまでに 100 地震以上の観測記録が得られている。ここでは、研究内容の一例として 2020 年 4 月 12 日の地震を用いて地盤の振動特性を、2022 年 3 月 16 日の地震を用いて建屋の振動特性を分析した結果を報告する。それぞれの地震動の諸元を表 2.2.1 に示す。なお、表 2.2.1 中の計測震度は、気象庁が定める方法^{2.2.7}により求めた。

地中加速度計の観測記録を用いて、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。西側地盤のフーリエスペクトル比を図 2.2.3^{2.2.5} に示す。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る。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。地盤の最大加速度分布（図 2.2.4^{2.2.5}）は、GL-32.1m より浅い表層部分にて顕著に増加している。これは、HTTR 建屋周辺の地盤柱状図（図 2.2.5^{2.2.5}）より、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、建屋南壁付近の基礎版に対する各階床のフーリエスペクトル比を図 2.2.6^{2.2.6} に示す。スペクトル比がピークとなる 4.63Hz、6.99Hz 及び 9.05Hz を卓越振動数とした。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。ここでは、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を横軸、加速度計の設置高さを縦軸として、加速度モードを図示した。NS 方向の加速度モードを図 2.2.7^{2.2.6} に示す。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ている。地盤の分析結果も踏まえ、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、地表面より上層階で加速度が増大しており、上部構造の 1 次モードと考えられる。9.05Hz では、建屋自体の変形が大きく、南北壁の屋上階と 3 階以下の加速度が逆方向に生じている。これは、3 階以下は RC 造、屋上階が鉄骨造となっており、3 階と屋上の間で構造種別が変わっていることが要因と考えられる。また、南壁と北壁で加速度モードが異なっているが、両者の振動に位相差が生じていた。特に 2 階及び 3 階で加速度の差が大きい。これは、図 2.2.8^{2.2.1} に示すように 2 階及び 3 階には大きな吹抜けがあり、フロア全体が一体となって振動していないことが影響していると考えられる。なお、東西壁の加速度モードは、4.63Hz 及び 6.99Hz では南北壁とおおむね一致していたが、9.05Hz では異なる傾向を示した。HTTR 建屋上部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。

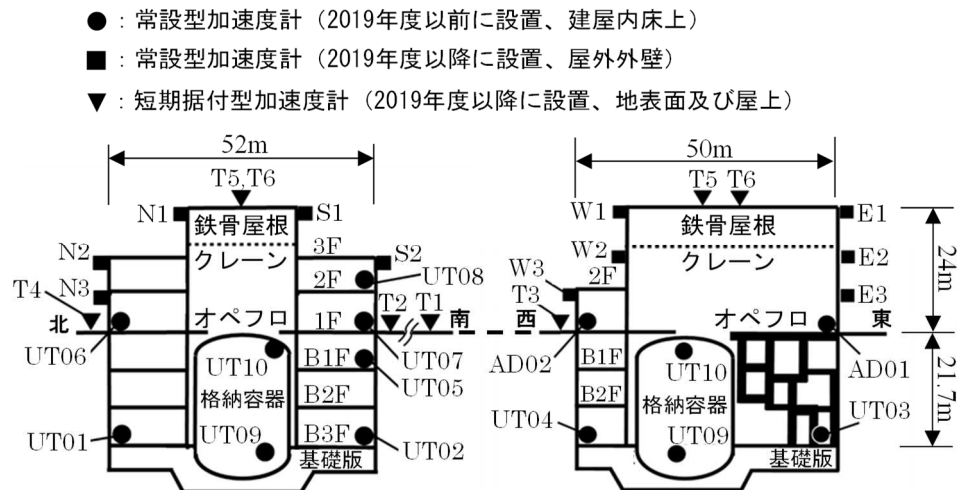
以上より、地震観測記録から HTTR 建屋及び周辺地盤の振動特性を分析し、地震時の三次元挙動を把握した。HTTR 建屋の上部構造は形状や構造種別が複雑であり、建屋の構造的特徴と地震時に生じる三次元挙動の関係をより詳細に把握するためには、詳細な分析が必要と考えられる。



出典) 土屋ほか (2023) 2.2.5

図 2.2.1 周辺地盤の加速度計設置位置

Figure 2.2.1 Location of accelerometers in the ground



出典) 山川ほか (2023) 2.2.6 に加筆

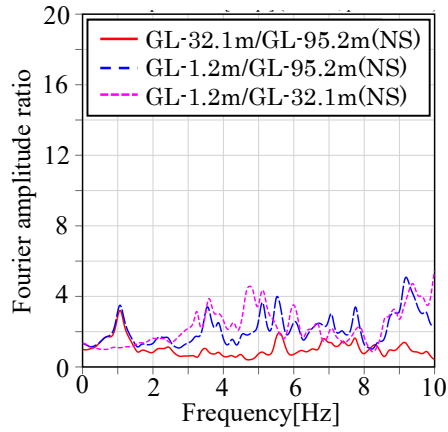
図 2.2.2 建屋の加速度計設置位置

Figure 2.2.2 Location of accelerometers in the building

表 2.2.1 地震動の諸元

Table 2.2.1 Seismic characteristics

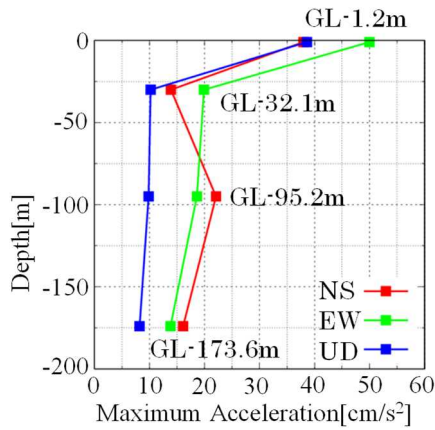
発生日	震央地名	震源深さ	マグニ チュード	最大震度	計測震度 (UT15)
2020年4月12日	茨城県南部	58km	5	震度4	3.4
2022年3月16日	福島県沖	57km	7.4	震度6強	4.1



出典) 土屋ほか (2023) 2.2.5

図 2.2.3 フーリエスペクトル比 (地盤)

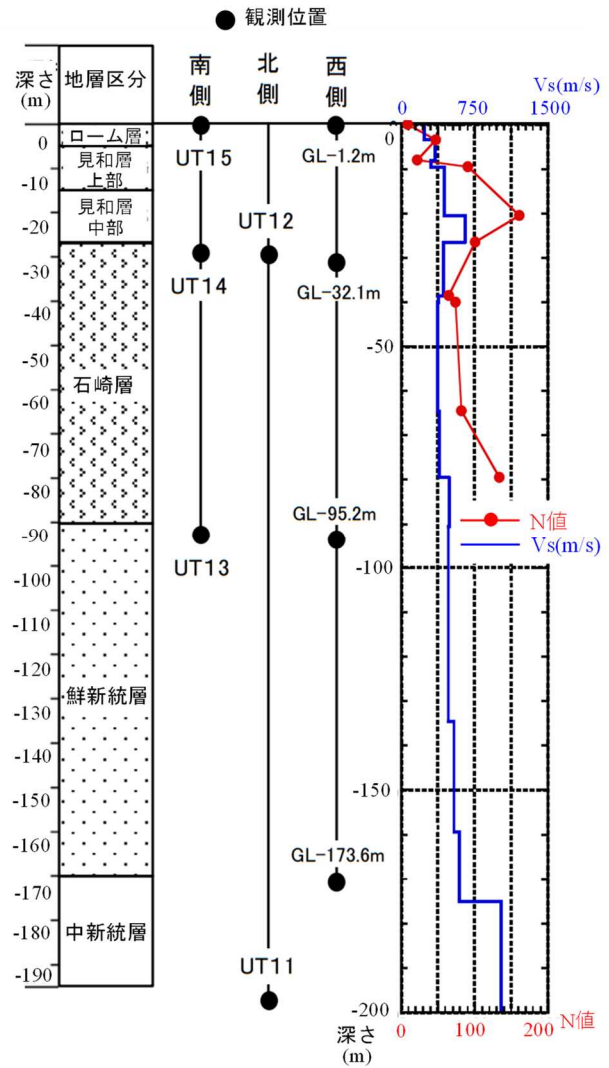
Figure 2.2.3 Fourier spectrum ratio (Ground)



出典) 土屋ほか (2023) 2.2.5

図 2.2.4 最大加速度分布 (地盤)

Figure 2.2.4 Maximum acceleration (Ground)

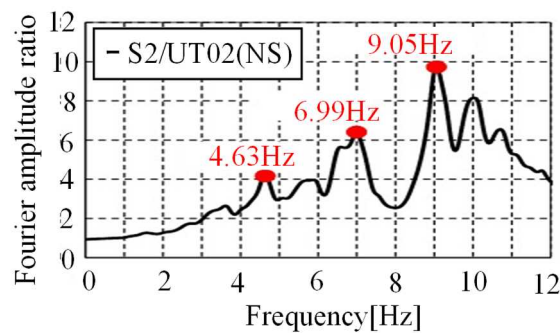


(a) 柱状図 (b) 地震計深さ (c) Vs 値と N 値

出典) 土屋ほか (2023) 2.2.5 に加筆

図 2.2.5 地盤柱状図

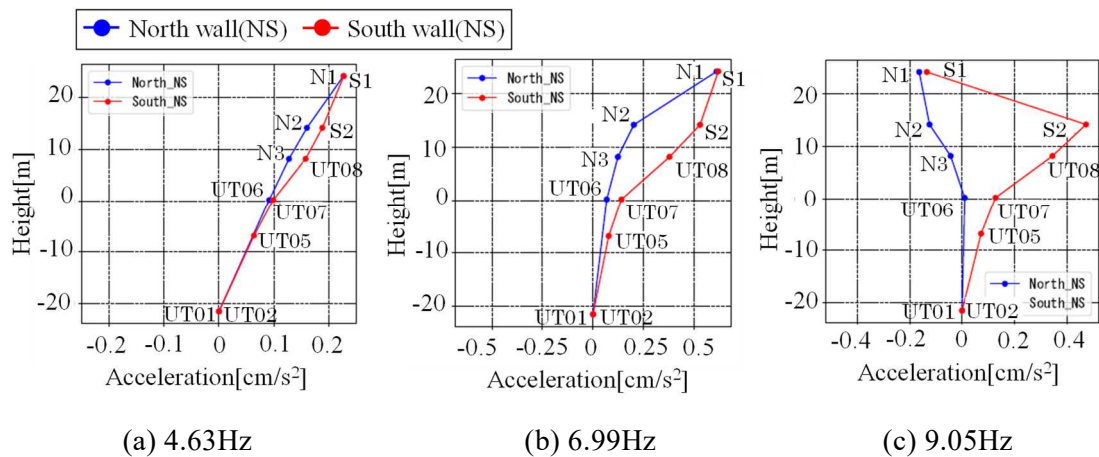
Figure 2.2.5 Geotechnical columnar map



出典) 山川ほか (2023) 2.2.6

図 2.2.6 フーリエスペクトル比 (建屋)

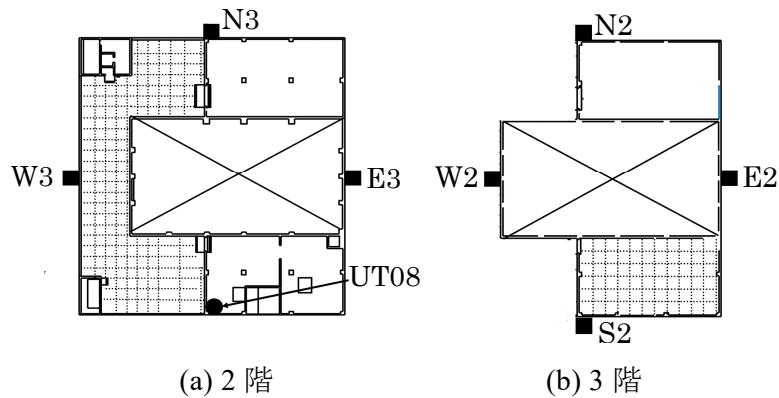
Figure 2.2.6 Fourier spectrum ratio (Building)



出典) 山川ほか (2023)^{2.2.6} に加筆

図 2.2.7 加速度モード (建屋)

Figure 2.2.7 Acceleration mode (Building)



出典) Nishida et al. (2023)^{2.2.1} に加筆

図 2.2.8 建屋の平面図

Figure 2.2.8 Plan of the building

(2) ACROSS 計測記録による局所的な振動特性の分析

図 2.2.9^{2.2.8}に ACROSS の概要を示す。JAEA は、HTTR 建屋の南側 35m の地点に設置した ACROSS を稼働させることで、地盤を介して HTTR 建屋に振動を与え、モバイル型加速度計を任意の位置に設置することで、床の局所振動を計測した。モバイル型加速度計の設置位置の一例を M1～M4 で示す。ACROSS とは、正弦波加振方式を採用した振動試験装置であり、小さな振動を長時間加振することによってノイズを抑えた計測記録を取得できるという特徴を有する。ここで、モバイル型加速度計を屋上に設置し、屋根北側端部 (N1) に対する中央部 (M2～M4) のフーリエスペクトル比から鉄骨屋根の面外方向の卓越振動数と振動モードを分析した例を図 2.2.10^{2.2.8}に示す。屋根中央部は面外方向に対して 6Hz 及び 12Hz で応答が増幅しており、JAEA はこれらの振動数を屋根の卓越振動数と考えた。また、それぞれの振動数での屋根の振動モードを確認すると、6Hz では中央部よりやや東側

(E1 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ることを明らかにした。このような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。

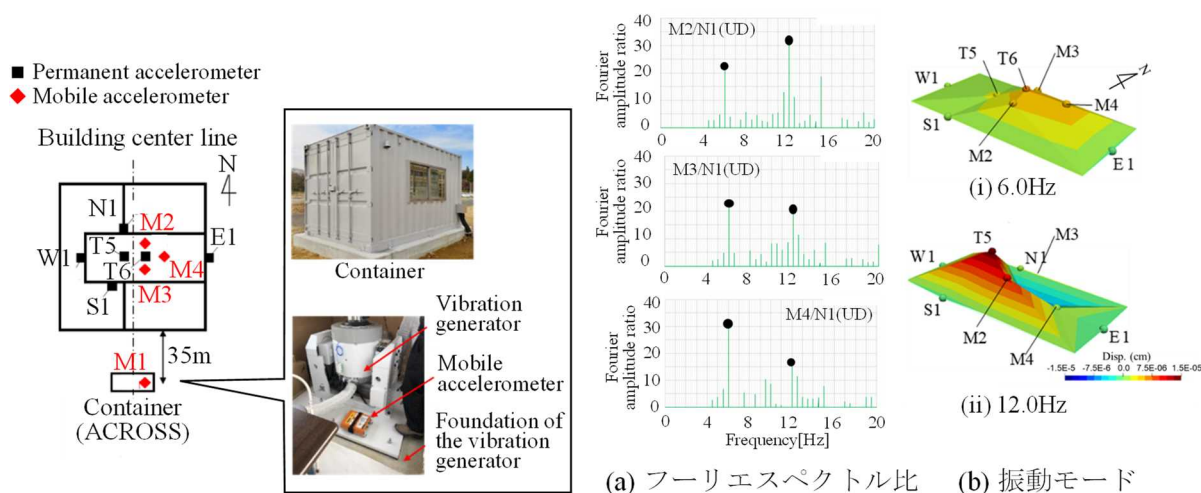


Figure and photos courtesy of IASMiRT.

Figures courtesy of IASMiRT.

出典) Nishida et al. (2024)^{2.2.8}

出典) Nishida et al. (2024)^{2.2.8}

図 2.2.9 ACROSS の概要

図 2.2.10 ACROSS による分析結果 (屋根)

Figure 2.2.9 Overview of ACROSS

Figure 2.2.10 Analysis results by ACROSS (Roof)

2.2.3 実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化

JAEA は、更に HTTR 建屋及び周辺地盤を対象とした三次元有限要素モデルを用いて、固有値解析及び地震応答解析を行った。三次元有限要素モデルを図 2.2.11^{2.2.9} に示す。建屋の設計図面の確認や現地調査等を踏まえ、実際の建屋を極力再現した三次元有限要素モデルを作成した。特に建屋の固有振動数に影響を及ぼすことが予想される、設備類の重量及びブレース等の剛性に着目し、空気冷却器、冷却器支持部のブレース、クレーン、クレーン階の水平ブレース等を表現した。この三次元有限要素モデルを用いて解析を行い、実測データの再現性について効果を確認した。三次元有限要素モデルによる固有値解析結果の例を図 2.2.12^{2.2.9} に示す。地震観測記録の分析により得られた卓越振動数 (4Hz 及び 7Hz 近傍) とおおむね等しい固有振動数が得られ、固有モードも分析結果で明らかになった傾向 (4Hz 近傍: 建屋基礎から屋上まで加速度がおおむね直線状に増幅、7Hz 近傍: 上層階で加速度が増大する上部構造の 1 次モード) が現れている。

以上より、実際の建屋の振動特性を把握するために上記の三次元有限要素モデルが妥当であることを明らかにした。

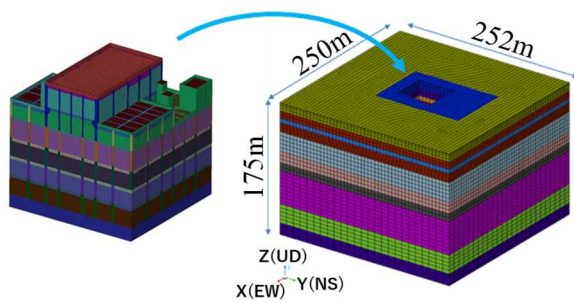
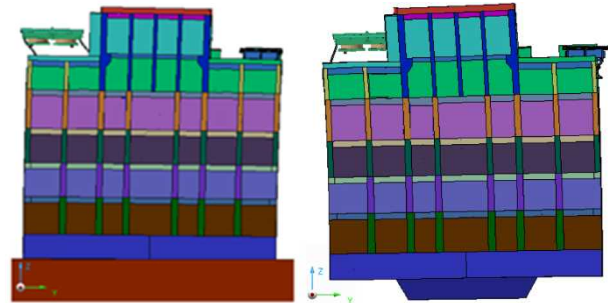


Figure and photos courtesy of IASMiRT.

出典) Choi et al. (2024)^{2.2.9}
 図 2.2.11 3次元有限要素モデル
 Figure 2.2.11 3D-FEM model



(a) 4.07Hz (NS dir.)

(b) 6.81Hz (NS dir.)

Figures courtesy of IASMiRT.

出典) Choi et al. (2024)^{2.2.9}
 図 2.2.12 建屋の固有モード例

Figure 2.2.12 Examples of building eigenmode

2.2.4 まとめ

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では、地震観測記録から建屋及び周辺地盤の卓越振動数、加速度モードを求め、建屋の構造的特徴を踏まえて振動特性を分析した^{2.2.5,2.2.6}。4Hz 近傍では地盤との連成によるロッキング振動が生じ、6Hz 近傍では上部構造の1次モード、9Hz 近傍では建屋自体の振動が大きく、外壁ごとの位相ずれが発生していた。4Hz 近傍では全ての外壁の振幅と位相がおおむね一致し、建屋全体がほぼ一体となって振動していたが、9Hz 近傍では外壁ごとにモード形状の違い、位相のずれが見られ、それぞれの外壁が独立して振動していたと推測される。また、モバイル型加速度計を床中央等に設置して ACROSS 計測記録を取得することで、鉄骨屋根等における局所振動の卓越振動数及びモード形状を分析した^{2.2.8}。

実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化では、HTTR 建屋及び周辺地盤を対象とした三次元有限要素モデルを作成して固有値解析及び地震応答解析を行った^{2.2.9}。実測データから得られた振動特性と比較することによって、実挙動で確認された同一階での応答の違いを概ね再現でき、三次元耐震解析での実測データの再現性向上に係る知見を拡充した。

2.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

2.3.1 はじめに

本研究は株式会社篠塚研究所（令和 5 年度）及び大成建設株式会社（令和 6 年度）に委託し実施したものである。また、規制庁は、これらの委託成果を基に要因分析及び取りまとめを行った。

地震応答解析における建物・構築物の減衰定数は、これまで実用発電用原子炉施設（2.3 では、以下「原子炉施設」という。）等の耐震設計・評価において適用実績のある JEAG4601-1987^{2.3.1}に基づいて設定され、不確かさを考慮した感度解析等によりその影響が評価されてきた^{2.3.2}。この適用実績のある減衰定数は、主に原子炉建屋のような比較的複雑な建物・構築物を対象に、既設プラントの地震観測記録から妥当性を確認した値に基づくものである。しかし、近年、原子炉施設においても箱形断面の通路のような比較的単純な構造の建物・構築物が追設されており、当該建物・構築物への既往の減衰定数の適用性に関する知見を蓄積することが重要である。

そこで、建物・構築物の耐震設計・評価において一般的に用いられている質点系モデルによる地震応答解析の減衰定数の設定に関する知見の拡充を目的に、原子炉施設や一般建築物における地震観測、模型実験から求められた減衰定数と、数値解析等で用いる耐震設計・評価で適用実績のある減衰定数に関する既往知見の整理、分析を行うとともに、比較的単純な構造モデルによる既往実験の再現解析を行った。これらの結果を踏まえ、減衰に与える影響要因を分析し、減衰定数の設定に関する知見として、建物・構築物のもつ「構造の複雑さ」、地震応答解析におけるひずみ依存性の影響があることについて取りまとめを行った。

2.3.2 検討概要

本項では、委託先で実施した委託事業全体^{2.3.3,2.3.4}の概要を示す。

比較的単純な建物・構築物の減衰の設定に関する既往知見を取りまとめ、地震応答解析における質点系モデルの減衰定数の設定に関する考え方を整理する観点で以下の検討を行った。

2.3.3 では、まず、原子炉施設における質点系モデルの減衰定数の設定に関する知見を再整理し、現状把握を行った。次に、一般建築物における減衰の設定に係る現状の知見を収集し、様々な構造形式の中から比較的単純な構造の建物・構築物を対象とした減衰の設定に関する知見の整理を行った。これらの知見収集・整理の結果、箱形断面の通路のような比較的単純な構造の原子炉施設に類似した建物・構築物の情報が少ない事が分かった。そこで、2.3.4 では、比較的単純な構造の建物・構築物の減衰の設定に係る知見を補完する目的で、比較的単純な構造の模型実験結果^{2.3.5}を用いてシミュレーション解析を実施し、質点系モデルの減衰定数を検討した。これらの文献調査・解析の結果を踏まえて、建物・構築物の用途に応じて配置される大型機器・設備配管・設備機器等と、耐震壁に直交して配

置される床・壁による「構造の複雑さ」の影響や、地震応答解析の応答レベルに応じたひずみ依存性の影響等があり、これらの影響を考慮して減衰定数を設定するという点で技術的知見を整理し、取りまとめた。

2.3.3 建物・構築物の減衰定数に関する文献調査

本項では、委託先で実施した文献調査^{2.3.3,2.3.4}の概要を示す。

近年追設されている比較的単純な構造を含む原子炉施設は固有周期が1秒以下の壁構造又は耐震壁付きラーメン構造であり、1次モードが支配的な剛構造である。一方、2000年以降の観測記録が充実している一般建築物^{2.3.6}は、高さが60mを超え、固有周期が1秒以上であり、柱梁から成る純ラーメン構造を主体とし、2次以上の高次モードの影響も無視できない柔構造である。

このように、原子炉施設と一般建築物は、振動性状が大きく異なる。そこで、本研究では、原子炉施設と一般建築物とで構造的に共通する剛構造の壁式構造と耐震壁付きラーメン構造に関する減衰定数に着目し、地震観測記録や振動実験から得られた建物・構築物の減衰定数に関する文献の調査分析^{2.3.3,2.3.4}を行い、これらの観測記録から得られた減衰定数は弾性領域において初期減衰は1～2%となっており、履歴面積の考慮の有無等の復元力特性の特徴に応じて適切に履歴減衰の影響を考慮し減衰定数の設定に関する考え方^{2.3.3,2.3.4}を整理した。

ここでは、以下に示す①～③の文献を対象に、約90件の文献を調査した。

- ① 「新規制基準適合性に係る審査」における地震応答解析における質点系モデルの減衰定数に関する文献
- ② 一般建築物を対象とした地震応答解析における質点系モデルの減衰定数に関する国内外の文献
- ③ 鉄筋コンクリート造（RC造）の建物・構築物などを用いた振動台実験のうち、実験に関するデータが公開されている文献

①については、(1)原子炉施設の減衰定数に関する文献調査・分析において、原子炉施設の既往の地震観測記録と振動台実験に着目して整理・分析を行った。②については、(2)一般建築物の減衰定数に関する文献調査・分析において、一般建築物と原子炉施設とで共通の事項となる知見の整理・分析を行った。③については、(3)一般建築物を対象とした公開データを用いた減衰定数に関する分析において、日本建築学会「建築物の減衰機構とその性能評価小委員会」が収集した公開データを用いて分析を行った。

(1) 原子炉施設の減衰定数に関する文献調査・分析

国内の新規制基準適合性に係る審査会合資料等^{2.3.2,2.3.7}から、原子炉施設の減衰定数の設定に関する説明資料として原子炉施設における既往の地震観測記録と振動台実験に関する文献を整理・分析した結果、以下に示す知見が得られた。

まず、観測記録から得られた減衰定数に関する知見を以下に示す。

- ・観測記録の分析結果より、埋め込みの深い BWR 原子炉建屋の減衰定数は、埋め込みの浅い PWR 原子炉建屋の減衰定数に比べて大きな値をとる。これは底面と側面地盤の逸散減衰の影響によることが分かった。
- ・建物・構築物の 1 次モードに対して逸散減衰の影響の小さい PWR 原子炉建屋の観測記録から得られた減衰定数は、比較的単純な構造の外部しゃへい壁より内部コンクリートなどの複雑な構造の方が大きくなることが分かった。
- ・2000 年以降、固有周期が 1.0 秒以下の一般建築物^{2,3,6}や最近追設された箱形断面の通路のような単純な構造の施設を含む原子炉施設の常時微動観測記録や強震観測記録はほとんど無い。

次に、解析に用いる減衰定数に関する知見を以下に示す。

- ・地震応答解析に用いる質点系モデルの減衰定数は初期減衰と履歴減衰の和として評価される。また、質点系モデルの履歴減衰の評価方法は、履歴ループに面積を持たせて評価する方法と、履歴ループに面積を持たせず等価粘性減衰として粘性減衰に履歴減衰を加える方法があり、履歴ループの設定に合わせて履歴減衰の評価方法を適切に設定する必要がある。変位応答が大きくなるにつれて履歴ループが大きくなり、その結果、履歴減衰が大きくなるため、応答ひずみレベルに応じた適切な値を設定する必要がある。
- ・RC 造の模型実験から得られた減衰定数と比べて、原子炉施設の地震観測記録から得られる減衰定数が大きくなる要因として「構造の複雑さによる減衰効果が存在することが考えられる」としている。しかし、その具体的なメカニズムと寄与率等は明確になっていない。

(2) 一般建築物の減衰定数に関する文献調査・分析

日本建築学会の「建築物の減衰と振動（2021 年版）」^{2,3,6}等の文献調査の結果、原子炉施設と共通の知見を以下に示す。

まず、観測記録から得られた減衰定数に関する知見を以下に示す。

- ・実建物・実構築物を対象とした加振実験、微動観測及び強震観測記録は、地盤の逸散減衰を含む。とくに、固有周期が 1 秒以下の RC 造建物の場合、地盤への逸散減衰の影響が大きく、その結果、観測記録から得られた減衰定数は、ばらつきが大きくなると考えられる。
- ・実験データが公開されている既往の文献から、構造の複雑さを考慮できるような医療施設を模擬した実験を抽出しデータの分析を行った。その結果、得られた減衰定数は文献^{2,3,6}の推奨値より大きな値となった。このことから、医療機器などの積載物や非

構造部材による付加的な減衰効果の可能性があることが示唆された。

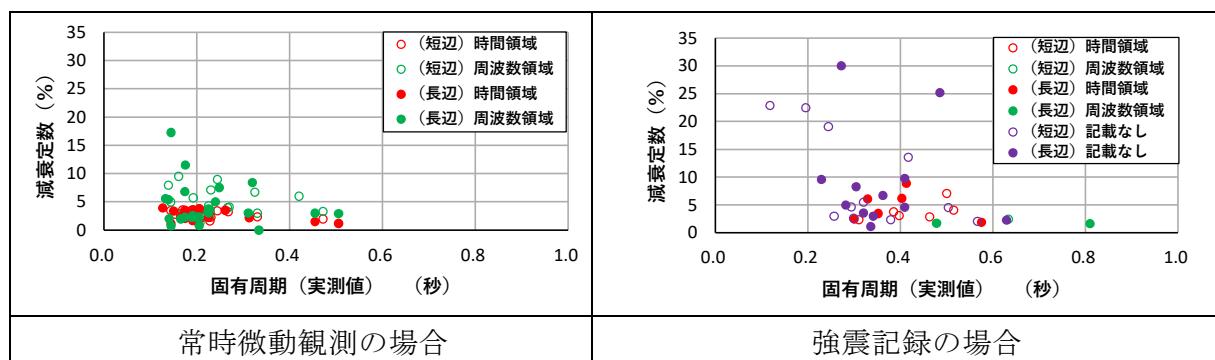
次に、解析に用いる減衰定数に関する知見を以下に示す。

- ・減衰定数はひずみ依存性と振動数依存性があり、また、経年劣化の影響を受けている。
- ・履歴減衰の影響を考慮し減衰定数を設定する場合は、応答ひずみレベルに応じた適切な値を設定する必要がある。
- ・地震応答解析に用いる減衰定数は、評価に用いる解析モデルや、減衰評価手法に応じて調整・設定する必要がある。

(3) 一般建築物を対象とした公開データを用いた減衰定数に関する分析

日本建築学会「建築物の減衰機構とその性能評価小委員会」が収集した公開データ^{2.3.8}を基に作成した固有周期が1秒未満の中低層のRC造建物の固有周期と減衰定数の関係を規制庁で作成した図2.3.1に示す。なお、当データベースに分析手法の記載がない場合は「記載なし（紫○●）」と記す。常時微動観測の場合、減衰の同定手法がハーフパワー法等の周波数領域（緑○●）では、部分空間法等の時間領域（赤○●）に比べ、ばらつきが大きいことが分かる。また、強震記録の場合は、常時微動観測に比べ、ばらつきの範囲がより大きく、両者の違いには、常時微動に比べて、強震記録から得られた減衰には、初期減衰に加え、履歴減衰や設備機器の取り付け部の影響などの構造の複雑さによる影響があり、それらにはひずみ依存性の影響があることが分かる。原子炉施設の設計用地震動は、一般建築物で観測された強震記録より更に大きいため、その結果、ひずみが大きくなり、それに従い、履歴減衰等の影響もあり減衰定数も大きくなるため、ひずみ依存性を考慮すると更に大きな減衰定数となることも考えられる。

なお、当データベースから同じ地震観測記録波形を用いて、時間領域と振動数領域での分析を行った所、減衰定数の値は異なる結果となったことから、減衰の同定手法にも留意する必要があると考える。



出典) 日本建築学会 荷重運営委員会 (2020) ^{2.3.8} より作図

図 2.3.1 固有周期と減衰定数

Figure 2.3.1 Natural period and damping ratio

2.3.4 既往実験を対象としたシミュレーション解析と分析

比較的単純な構造の建物・構築物に関して、既往の知見を補完することを目的に、既往実験のシミュレーション解析を行った^{2,3,4}。このシミュレーション解析に採用した既往の実験は、2枚の耐震壁のみの単純な構造の試験体を用い、逸散減衰や構造の複雑さといった減衰の影響要因が少ない振動台実験を対象とした。解析は、主に質点系モデルで実施したが、比較対象として3次元有限要素モデルでも実施し、実験結果の再現性が高い減衰定数を探求した。

(1) 解析概要

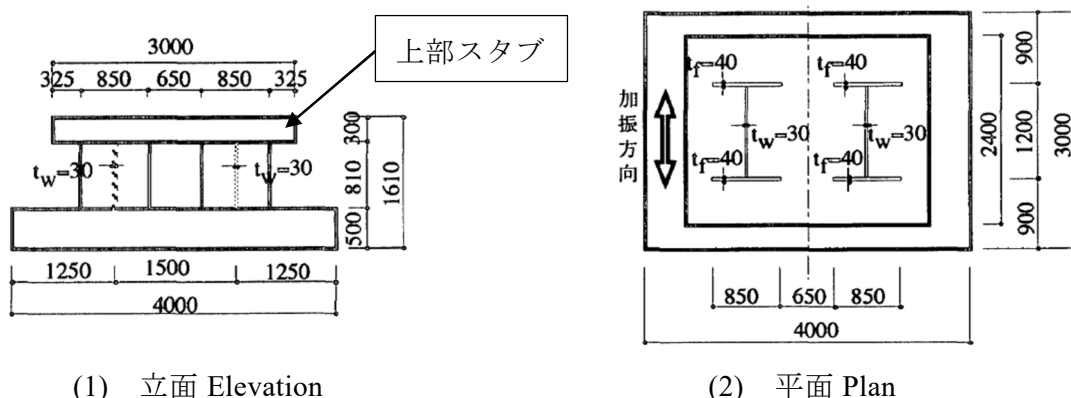
図 2.3.2 の試験体を図 2.3.3 に示す質点系モデルと 3 次元有限要素モデルにモデル化し、参考文献^{2,3,5}に基づき解析モデルの諸元を設定した。質点系モデルによる時刻歴応答解析は、3次元非線形時刻歴応答解析プログラム TDAPⅢ (ver.3.15)^{2,3,4}を用いた。また、3次元有限要素モデルによる解析は、同コードと有限要素解析コード E-FrontISTR (2024.7.11 版)^{2,3,4}の2種類の解析プログラムを用いて行った。

(2) 解析結果

解析結果の一例として微小変形ケース (Run-1) の上部スタブでの加速度応答時刻歴を図 2.3.4(a)に、応答スペクトルを図 2.3.4(b)に示す。また、解析結果の概要としては、微小変形の弾性範囲において質点系モデルの粘性減衰定数を初期減衰（既往の加振実験から得られた微小変形時の減衰定数=1.2%^{2,3,5}）とした場合、解析結果が試験結果とよく整合した。また、3次元有限要素解析では、減衰定数として初期減衰（減衰定数=1.2%^{2,3,5}）を設定することにより弾性範囲で試験値をほぼ再現可能であることがわかった。

以上のことから、図 2.3.2 に示す試験体を用いた試験の再現解析を行った結果、微小変形の弾性範囲で質点系モデルの減衰定数は初期減衰と同等であることが分かった。

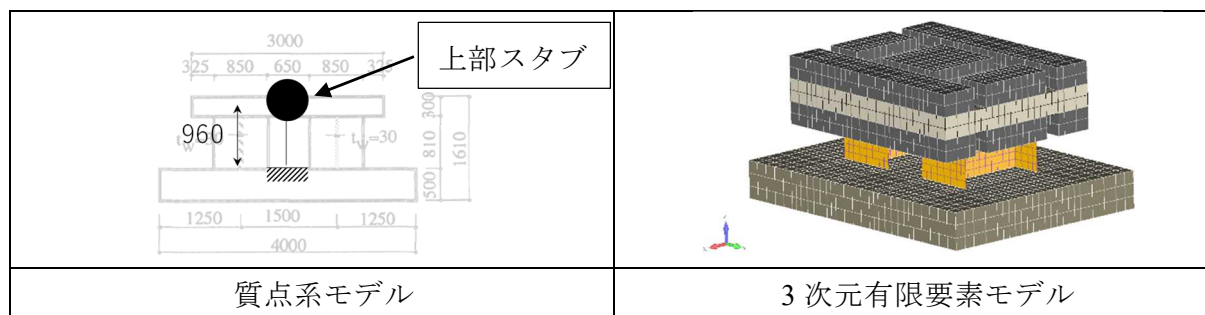
なお、上記2種類の解析プログラムの解析結果と既往実験結果が整合していることにより、3次元有限要素解析モデルが適用できることを確認した。



出典) (財)原子力工学試験センター (1988)^{2,3,5} の図に一部追記

図 2.3.2 試験体

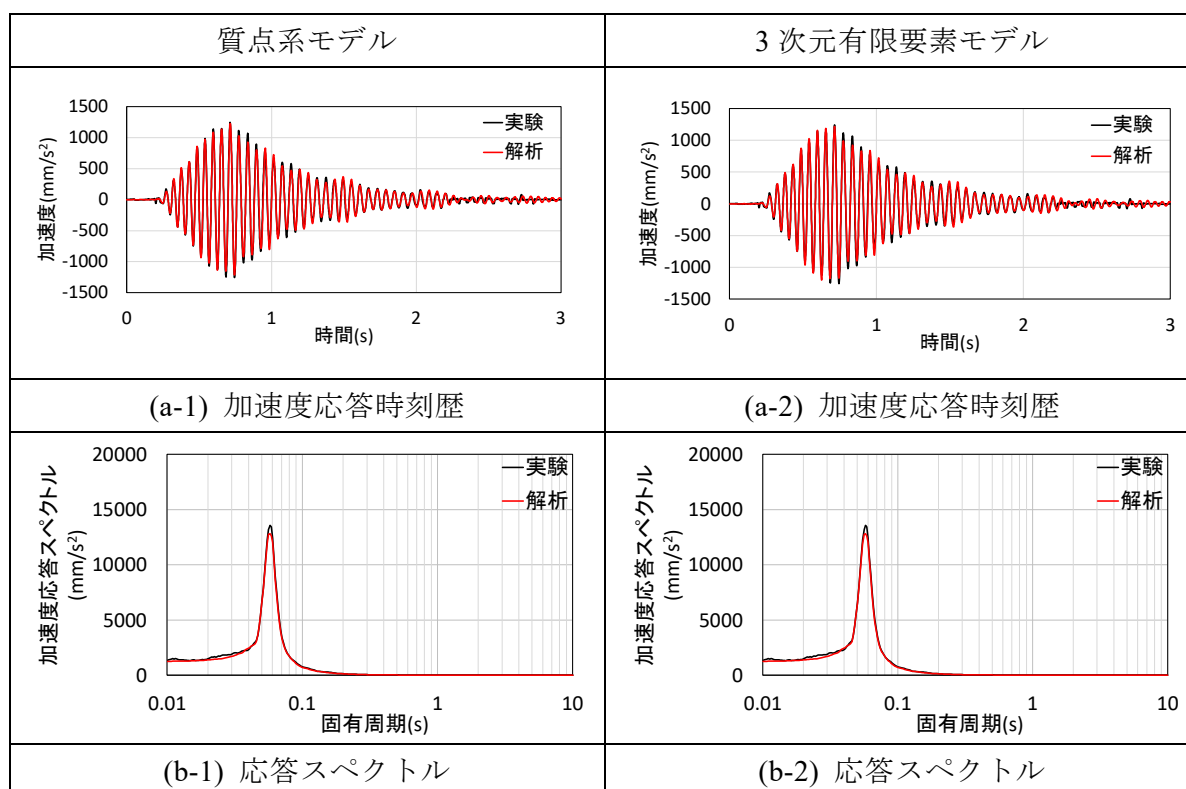
Figure 2.3.2 Test structure



出典) 大成建設 (2025) ^{2.3.4} の図を引用

図 2.3.3 解析モデル

Fig. 2.3.3 Analysis model



出典) 大成建設 (2025) ^{2.3.4} の図を一部編集

図 2.3.4 解析結果

Figure 2.3.4 Analysis results

2.3.5 まとめ

原子炉施設のうち比較的単純な構造の RC 造の建物・構築物の地震応答解析の減衰定数について、文献調査やシミュレーション解析等に基づき知見を整理、分析する目的で、株式会社篠塚研究所（令和 5 年度）及び大成建設株式会社（令和 6 年度）が文献調査・分析とシミュレーション解析を実施し得られた結果、地震応答解析で用いる質点系モデルの減衰定数の設定に関する考え方を以下に示す。2.3.3 の文献調査では、①比較的単純な構造と

複雑な構造の減衰に関する共通の知見と②複雑な構造の減衰に関する共通の知見が得られた。2.3.4 では比較的単純な構造の建物・構築物に関して、既往の知見から補完するために、耐震部材である耐震壁のみを対象とした数値解析を行った。

(1) 2.3.3 の文献調査より、観測記録から得られた減衰定数に関する知見を以下に示す。

① 比較的単純な構造と複雑な構造の減衰に関する共通の知見

比較的単純な構造と複雑な構造の減衰のうち、ここでは、地盤の逸散減衰とひずみ依存性について示す。

a. 地盤の逸散減衰

- ・原子炉建屋の埋め込みの深い場合の減衰定数は、埋め込みの浅い場合に比べて大きな値をとる。これは底面と側面地盤の逸散減衰の影響によることが分かった。
- ・日本建築学会「建築物の減衰機構とその性能評価小委員会」が収集した公開データ^{2.3.8}を分析した結果、固有周期が1秒以下のRC造の建物・構築物の場合、地盤の逸散減衰の影響が大きいため、観測記録から得られた減衰定数は、ばらつきが大きいと考えられる。なお、固有周期が1秒以下の箱形通路のような比較的単純な構造のRC造の建物・構築物に関する常時微動観測記録や強震観測記録の追加事例は少ない。

b. ひずみ依存性

- ・強震記録から求めた減衰定数の方が常時微動観測記録より大きな値となる傾向がある。これは、ひずみ依存性の影響があると考えられる。

② 「構造の複雑さ」に着目した知見

- ・実際の原子炉施設の観測記録から得られた減衰定数と模型実験から得られた初期減衰には差があることがわかった。この要因として「構造の複雑さによる減衰効果が存在する」と考えられる。そのため、弾性領域での減衰定数は初期減衰に加え、対象となる建物・構築物に対応する「構造の複雑さ」等を考慮して設定する必要がある。しかし、その具体的なメカニズムと寄与率は明確になっていない。
- ・一般建築物のような比較的単純な構造のRC造の建物・構築物と、国内の原子炉施設では、構造の複雑さが異なる。弾性領域での減衰定数は初期減衰に加え、対象となる建物・構築物に対応する構造の複雑さ等を考慮して設定する必要がある。

(2) 2.3.3 の文献調査より、地震応答解析に用いる質点系モデルの減衰定数に関する知見を以下に示す。

① 単純な構造と複雑な構造の減衰に関する共通の知見

a. 履歴減衰

- ・地震応答解析に用いる質点系モデルの履歴減衰の評価方法は、履歴ループに面積を持たせて評価する方法と、履歴ループに面積を持たせず粘性減衰に等価粘性減衰を加える方法があり、履歴ループを考慮しない場合は、応答ひずみレベルに応じて等価粘性

減衰を適切に設定する必要がある。

b. 減衰の評価法

- ・地震応答解析に用いる減衰定数は、評価に用いるモデル、減衰評価手法に応じて設定する必要がある。

(3) 2.3.4 では、比較的単純な構造の建物・構築物に関して、既往の知見を補完するために、RC 耐震壁のみの単純な試験体を用いた既往実験に対するシミュレーション解析を行った。その結果、解析結果が実験結果と合うように定めた弾性領域における粘性減衰定数が、初期減衰のみの値と同等であることがわかった。一方、渡り廊下のような比較的単純な建物・構築物であっても、構造部材が有する初期減衰に加えて、直交する床・壁や重量のある設備機器等からの影響によって、減衰が大きくなっているものと考えられ、実際の実用発電用原子炉施設の観測記録から得られた減衰定数は、微小変形での構造部材のもつ初期減衰のみの値と異なる。その理由としては「構造の複雑さによる減衰効果が存在することが考えられる」^{2.3.3,2.3.4}。しかし、比較的単純な構造の建物・構築物を含む実用発電用原子炉施設については、その具体的な要因と寄与率等は明確になっていない。

なお、本研究では、限られた文献調査結果と、既往実験のシミュレーション解析の一例という限られた条件での調査分析であることから、一般化にあたっては、今後、更なる評価事例等の蓄積が必要である。また、今後の課題としては、「構造の複雑さ」が減衰定数に及ぼす影響、メカニズム等、様々なことが明確ではないことが挙げられる。構造の複雑さがある程度表現可能な 3 次元有限要素解析モデルを耐震解析に用いる場合、使用するモデルの粗細に応じた減衰定数の設定に関する知見も十分ではない。そのため、3 次元有限要素解析の適用にあたり、減衰のメカニズム及び構造の複雑さに関する定量的評価や非線形性を考慮した解析モデルの減衰の設定に係る技術的知見を拡充する必要があると考える。建物・構築物には要求機能上、必要な設備配管・大型機器があり、それらの機器を 3 次元有限要素解析モデルに反映させる際のモデル化の粗さ・細かさによって、「構造の複雑さ」として減衰定数の設定値が異なる。このように減衰に関するメカニズムと構造の複雑さの濃淡によって減衰定数の設定に関する考え方をより具体的に把握することが今後の課題である。

2.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

2.4.1 はじめに

本項の 2.4.2 の実験は東北大学（令和 3 年度）、東北工業大学（令和 4 年度から令和 6 年度まで）への委託事業^{2.4.1-2.4.4}による成果をまとめたものである。また、委託先とは異なる解析コードを用いて規制庁による内作及び請負により 2.4.3 の解析を実施し、実験結果も含め考察を行ったものである。

実用発電用原子炉施設のうち、防潮堤や屋外重要土木構造物等（以下「土木構造物等」という。）の施設は、地盤を掘削し基礎や構造物を建設したのち、礫質土等の地盤材料を密に締固めて埋め戻されている。一方、密な礫質土地盤は、通常、液状化し難い地盤と考えられているが、基準地震動レベルの地震動が作用した場合、液状化による地盤の変状が懸念される。耐震設計に係る設工認審査ガイド^{2.4.5}では、土木構造物等の耐震評価に用いる地震応答解析手法において、構造物や周辺地盤の非線形挙動を踏まえ適切に解析手法を選定していることを確認することとしている。砂質土に比べて礫質土地盤の液状化に関する過去の事例は多くはないが、一例として、1993 年北海道南西沖地震の液状化被害があり、比較的ゆるい地盤での被害であることが報告されている^{2.4.6}。このため、規制庁では、礫質土地盤等の液状化時の挙動及び土木構造物等への影響に関する知見を拡充するため、実験及び解析により、礫質土地盤においても過剰間隙水圧が上昇して液状化が発生することは確認してきたが^{2.4.7}、土木構造物等への影響の把握までは至っていない。また、液状化による構造物への影響を対象にした既往の知見として、大友らによる実験的検討^{2.4.8}があるが、砂質土を用いた実験であり、礫質土地盤の液状化による施設への影響に関して実験等により評価した事例は少なく審査に資する知見を蓄積することが重要である。

そこで、本研究では、礫質土地盤の液状化による施設への影響評価に係る技術的知見の拡充を目的に、土木構造物等の周辺地盤を対象に、原子力発電所特有の条件として地震動、礫質土等の地盤材料、地形等の特性を踏まえた液状化実験やシミュレーション解析等を実施し、液状化による施設への作用荷重や施設の応答特性等を確認した。

2.4.2 礫質土地盤を用いた遠心模型実験

本項では、委託事業^{2.4.4}において実施した実験概要及び実験結果について示すとともに、実験結果に対する規制庁の考察を示す。

(1) 実験概要

委託先の東北工業大学により、実大規模の応力状態を模擬した上で、液状化時に施設へ作用する地盤の変形挙動や応力状態の適切な把握を目的に遠心模型実験を行った。礫質土地盤内に設置された土木構造物等を対象に実機の 1/50 スケールの模型を作成し、遠心模型実験装置による遠心加速度 50G 場（ここで、重力加速度 $G=9.80665 \text{ m/s}^2$ ）での加振実験を実施した。一般的に、地盤内の過剰間隙水圧が上昇することで地盤のせん断剛性は低下し

減衰は大きくなる。過剰間隙水圧が大きくなり液状化状態に達すると地盤内に作用しているせん断応力や応答加速度は低減することが知られている。

本実験の模型概要を図 2.4.1 に示す。本実験では、地中構造物を念頭に地盤からの作用荷重及び構造物の変形挙動を把握することを目的とした構造物模型（部材端部をピン結合したジュラルミン製）をせん断土槽内に設置した。模型地盤には、比較的密に締固めた礫質土（福島県伊達産の礫材料（最大粒径 26.5mm、平均粒径 $D_{50}=1.0\text{ mm}$ ））と、比較用として砂質土（珪砂 7 号（平均粒径 $D_{50}=0.15\text{ mm}$ ））を用いた。

礫質土地盤は、図 2.4.2 に示す繰返しせん断応力比を目標に締固め度 $D_c=90\%$ で作製し、相似則を踏まえ、水の 50 倍の粘性を持つメトロース溶液により透水性を調整した。入力加速度波形には、前プロジェクトを踏襲して模型地盤の卓越振動数及び加振装置の特性を踏まえた正弦波（1.6Hz、1.0Hz）、国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震観測網（NIED K-NET、KiK-net）により近年観測された強震動波形のうち、大振幅の波形として 2016 年 4 月 16 日の熊本地震の観測記録（菊池、KMMH03）、比較的振幅が大きく継続時間の長い波形として 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の観測記録（田老、IWITH14）等を選定した（図 2.4.4 に正弦波 1.6Hz の入力加速度時刻歴を示す）。これら一連の加振は同一模型で段階的に実施した。

また、計測センサーは、図 2.4.3 に示すように盛土や構造物の配置による複雑な地盤内応力や加速度応答を把握するため広範囲に配置した。なお、本研究では、委託先の新たな試みとして、地盤のせん断応力を把握するため複数の土圧計を組み合わせ計測し、地盤内のせん断応力を推定する方法（以下「ペア土圧計測方法」という。）を考案^{2.4.9}し、その適用性を確認した。せん断応力の推定については、これまで水平方向土圧の計測とともに、加速度を計測し、土圧計上部の土塊の慣性力と水平土圧から、せん断応力を推定^{例えば 2.4.10}してきたが、土塊の慣性力は計測した加速度で代表していることから、求めた慣性力は平均的なものであり、あくまでも概略値であることに加え、計測センサーの配置に制限があった。一方、ペア土圧計測方法は、2 つの土圧計を 90° に固定し、これらの測定値と同位置での鉛直方向の土圧計の測定値からせん断応力を理論的に算定するものであり、これまでの土圧計測方法に比べ、多数の位置での計測が可能である。そのため、盛土や構造物の影響による複雑な地盤内のせん断応力を精緻に把握することが可能となる。これにより、地表面変位や加速度、過剰間隙水圧に加え、複雑な地盤内応力も含めて精緻に数値解析の妥当性確認を行うことが可能になると考える。

(2) 実験結果

本報告では、委託先の研究内容の一例として委託報告書^{2.4.4}から抜粋した、礫質土の模型地盤（飽和地盤及び不飽和地盤）の加振履歴の影響が小さい正弦波（1.6Hz、最大加速度 5.0 m/s^2 、21 波程度（ソイルモルタル表面での計測値））の結果を示す。その他の結果については、委託報告書^{2.4.4}を参照されたい。以降の結果は、模型地盤の相似則を適用した実

スケール換算で示す。

① 地盤応答

図 2.4.5 に応答加速度、地表面変位、過剰間隙水圧の時刻歴を示す。また、図 2.4.6 に地盤内応力の時刻歴を示す。これより、応答加速度、地表面変位とも全体的に不飽和地盤の方が大きめの傾向が見られる。加振開始後の 2 波目付近までは、飽和・不飽和地盤ともに同様の変位量となっているが、飽和地盤は過剰間隙水圧が上昇することで、3 波目付近で応答加速度が低減し、地表面変位は加振中が最大で、残留変位はそれ程大きくない結果となっている。一方、不飽和地盤は盛土から遠ざかる水平方向（S 側）への残留変位が飽和地盤よりも大きくなっており、委託先では間隙水圧の影響が無いことから応答加速度が減衰せず伝播したためと考えている。

② 構造物への作用土圧等の性状と構造物への影響

図 2.4.7 に構造物の応答加速度、構造物の頂版-底版間の相対変位（以下「相対変位」という。）、構造物へ作用する土圧及び周面せん断力の時刻歴を示す。

これより、構造物内の応答加速度については、2 波目あたりまでは飽和・不飽和地盤で同程度であるが、飽和地盤は過剰間隙水圧の上昇により 3 波目程度から振幅が小さくなっており、周辺地盤の応答加速度と同様の傾向が見られる。一方、構造物の相対変位は、飽和地盤で過剰間隙水圧の上昇後、若干、位相遅れが見られるが、飽和・不飽和の影響は小さく、振幅はほとんど差異が無い。

構造物への作用土圧は、盛土荷重の影響度に応じて構造物の S 側壁よりも盛土法尻下に位置する N 側壁が大きく、S 側も含め、側壁に作用する土圧は飽和地盤の方が大きい結果となっている。一方、構造物頂版への周面せん断力は、盛土荷重による初期せん断応力分だけ N 側（盛土側）が大きい傾向が見られるが、不飽和地盤よりも飽和地盤の方が小さくなる。委託先では、過剰間隙水圧の上昇により構造物との摩擦抵抗が低減し周面せん断力は小さくなったものと考えている。また、構造物側部の土圧よりも構造物頂版に作用する周面せん断力の増分が大きい傾向もあり、頂版の周面せん断力は構造物の変形挙動への寄与度が大きいものと考えており、既往の知見とも同様の傾向が見られた。

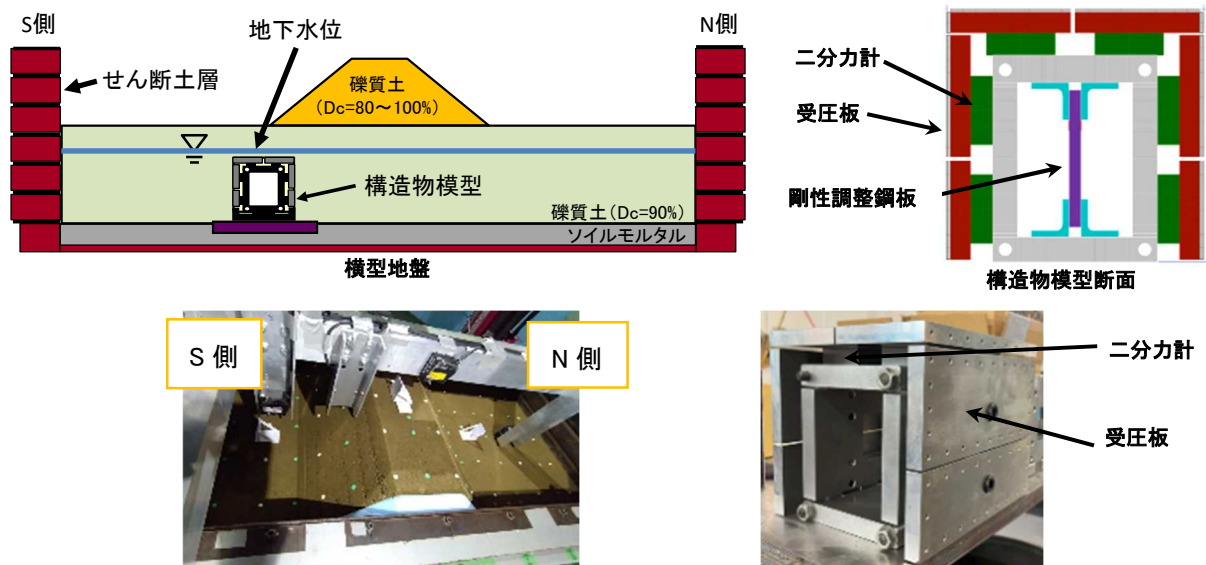
(3) 実験結果に対する規制庁の考察

本報告で示したケースでは、加振から数波で過剰間隙水圧が上昇したものの、残留変位量がそれ程小さくなく、比較的密な地盤特有の応答挙動が見られた。また、新たに試みたペア土圧計測方法により、地盤内の複雑な応力状態を把握することができ、盛土による初期せん断応力の影響も確認することができた。

構造物への影響については、構造物の相対変位、作用土圧は応答加速度よりも位相遅れが見られ、作用土圧はケースによって位相が同調、反転する傾向が見られた。また、作用土圧は飽和地盤の方が全体的に大きめの値となるものの、せん断力は不飽和地盤の方が大きくなった。

飽和地盤、不飽和地盤の比較において、それぞれの特徴に応じて、応答加速度、応答変位の相違が見られた。比較的密な礫質土地盤での実験であったため、過剰間隙水圧の上昇が限定的であるものの、必ずしも、飽和・不飽和のどちらかの地盤で応答が大きくなるということではなく、構造物への影響の観点からは、地盤条件に応じて適切な評価が必要であることが示唆された。

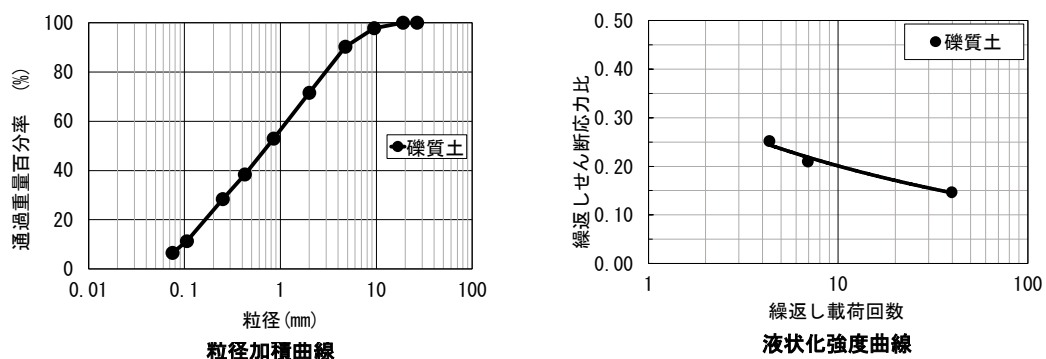
なお、本報告では一例を示したが、他のケースについてもおおむね同様の傾向を示すものの、ケースによっては盛土部の残留変位が大きくなる等の異なる傾向も示しており、地盤の応答挙動の確認においては、複数のケースの結果を踏まえて、実験結果を評価する必要があると考える。



※ 写真は規制庁が実験立会い時に撮影
出典) 東北工業大学 (2025) 2.4.4 の図面を一部編集

図 2.4.1 遠心模型実験の模型概要

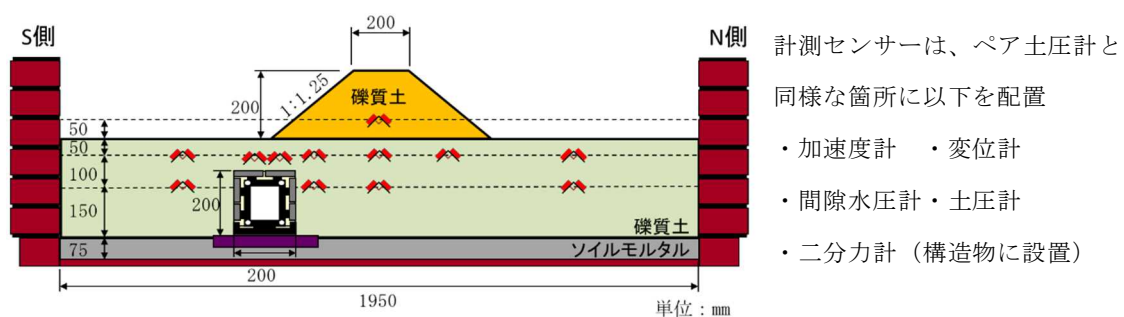
Figure 2.4.1 Overview of centrifuge test model



出典) 東北工業大学 (2025) 2.4.4 の図面を一部編集

図 2.4.2 礫質土の粒径加積曲線及び液状化強度曲線

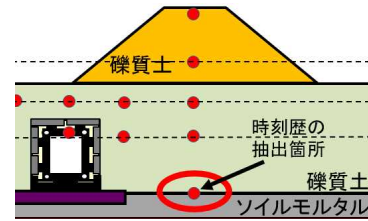
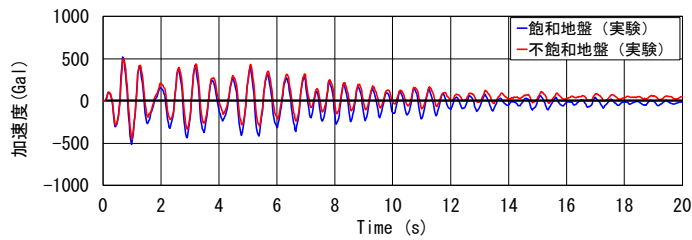
Figure 2.4.2 Grain size accumulation curve and liquefaction strength curve of gravelly soil material



出典) 東北工業大学 (2025) 2.4.4 の図面を一部編集

図2.4.3 センサー配置図 (ペア土圧計の例)

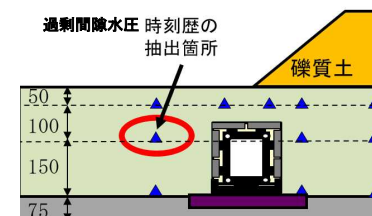
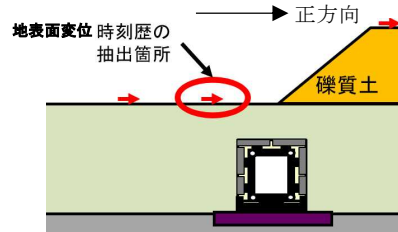
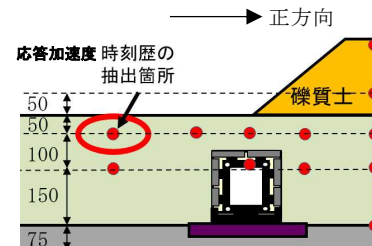
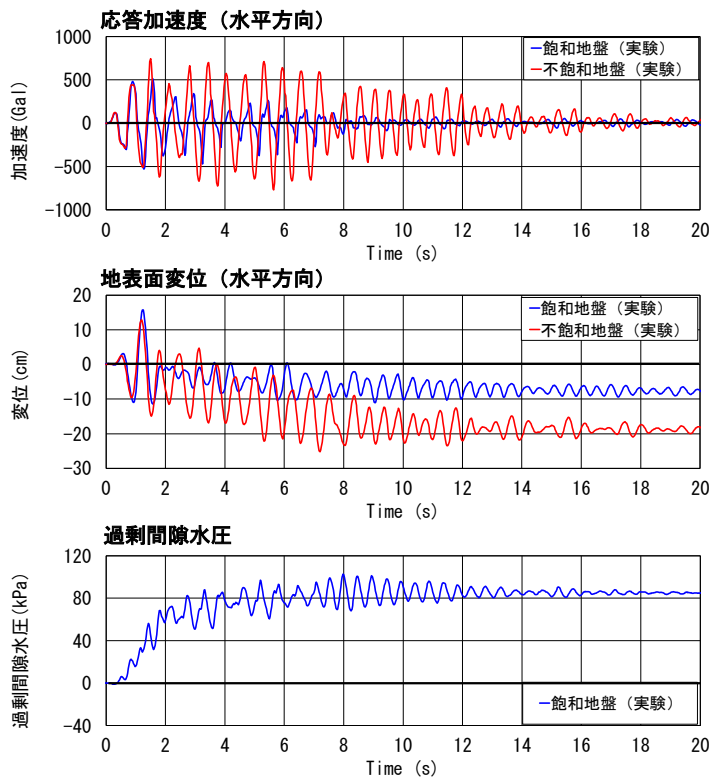
Figure 2.4.3 Sensor arrangement (Example of pair earth pressure meters)



出典) 東北工業大学 (2025) ^{2.4.4} の図面を一部編集

図 2.4.4 入力加速度時刻歴 (ソイルモルタル表面)

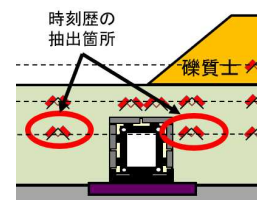
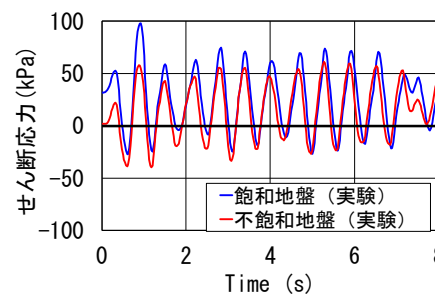
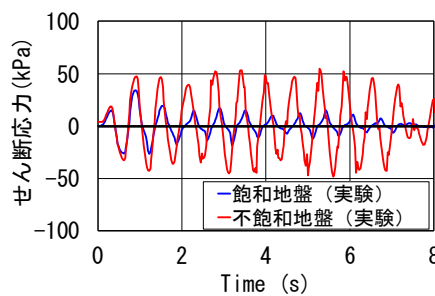
Figure 2.4.4 Input acceleration time history (on the soil mortar surface)



出典) 東北工業大学 (2025) ^{2.4.4} の図面を一部編集

図 2.4.5 地盤応答の時刻歴

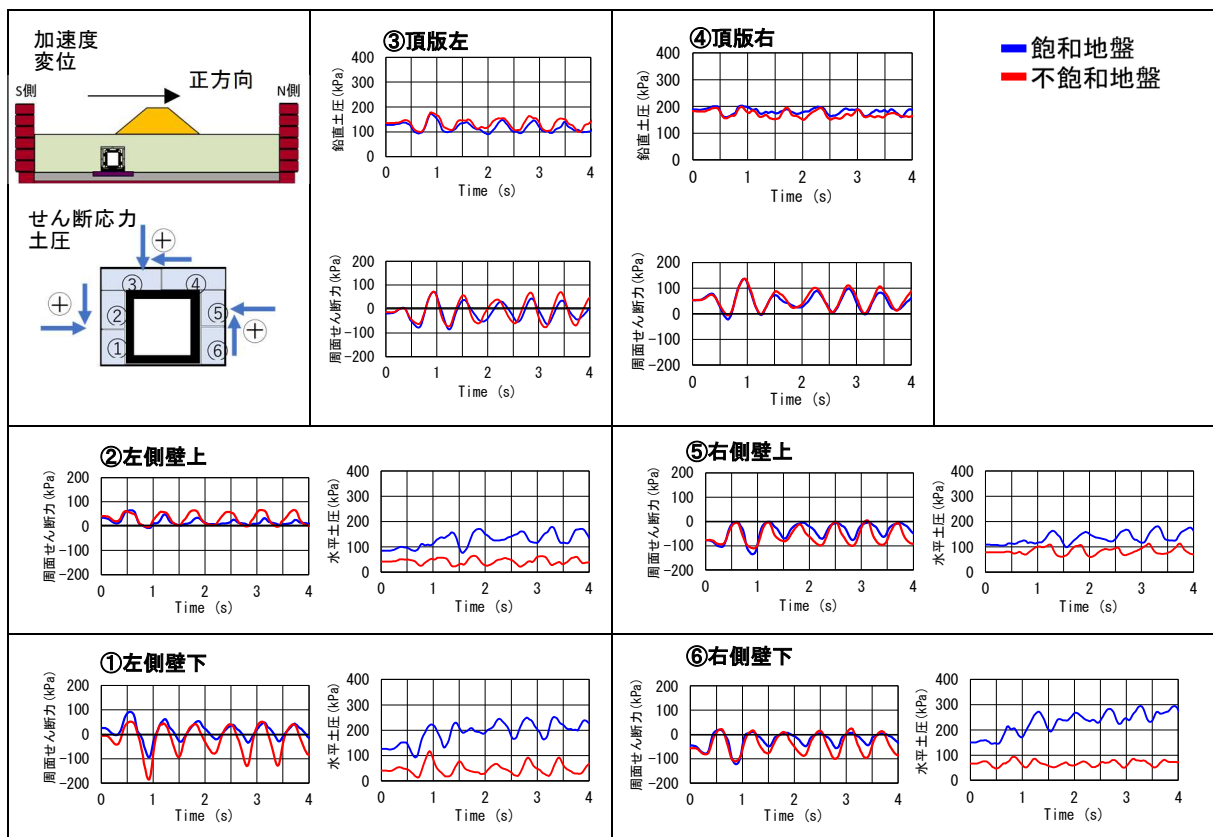
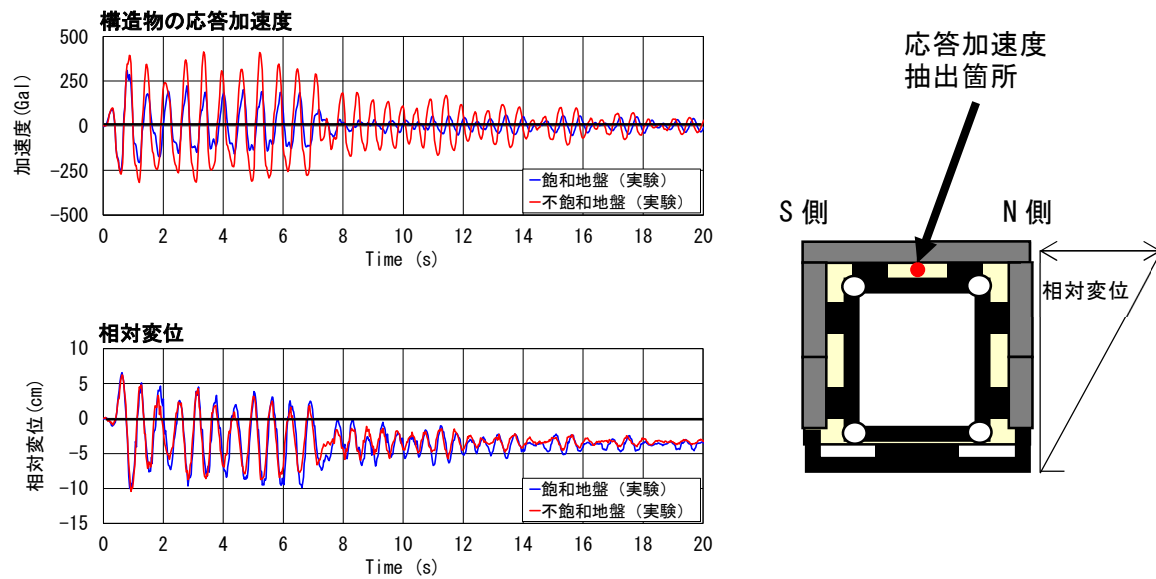
Figure 2.4.5 Time histories of seismic responses



出典) 東北工業大学 (2025) ^{2.4.4} の図面を一部編集

図 2.4.6 ペア土圧計測方法により推定されたせん断応力の時刻歴

Figure 2.4.6 Time history of shear stress estimated by pair earth pressure meters method



出典) 東北工業大学 (2025) 2.4.4 の図面を一部編集

図 2.4.7 構造物の応答、作用土圧及び周面せん断力

Figure 2.4.7 Response of structure, earth pressure and surface shear force acting on the structure

2.4.3 遠心模型実験のシミュレーション解析

本報告では、委託事業において実施した実験を踏まえ規制庁が実施したシミュレーション解析の結果を示す。本解析は、2.4.2 で示した礫質土地盤を用いた飽和地盤、不飽和地盤の遠心模型実験（正弦波 1.6Hz 加振）を対象に行った。解析コードは、一般社団法人 FLIP コンソーシアムで開発された大変形理論に基づく有効応力解析コード「FLIP TULIP ver.6」を用いた。

(1) 解析概要

2次元解析モデルの概要を図 2.4.8 に示す。解析モデルの要素寸法は、模型地盤の寸法に相似則を適用した実大地盤スケール（遠心模型地盤モデルの 50 倍）とした。解析モデルの境界は、遠心模型実験にせん断土槽を使用したことから、側部を水平成分のみ等変位境界、底部を固定境界とした。地盤要素はマルチスプリング要素を用い、構造物は頂底板及び側壁に剛な梁要素を用いて梁端部をピン結合した。また、構造物のせん断剛性は構造物模型中央のプレートを模擬した線形梁要素を用いた。この線形梁要素は、別途実施している構造物の載荷試験により得られた荷重－変位関係を満たすよう等価な剛性を設定した。

解析条件として、礫質土の地盤物性を表 2.4.1 に、中空ねじり試験結果に対し H-D モデルでフィッティングした繰返し変形特性を図 2.4.9 に示す。また、中空ねじり試験結果の要素シミュレーションによって算出した液状化強度曲線を図 2.4.10 に示す。なお、礫質土下部のソイルモルタルは岩盤相当の剛な基盤層としてモデル化した。

(2) 解析結果

① 実験結果の再現性

図 2.4.11 に過剰間隙水圧、応答加速度、地表面変位及びせん断応力の実験と解析の比較結果を示す。解析結果の出力位置は、構造物の左側壁横の地盤である。飽和地盤については、過剰間隙水圧が、実験結果よりも早い段階で上昇しており、開始 2 秒付近では既に液状化状態（過剰間隙水圧が定常状態となる）に達していることが分かる。また、この過剰間隙水圧の相違により、応答加速度、地表面変位は、加振の 1 波目では実験結果とおおむね一致しているものの、2 波目以降の加速度の低減が大きく、地表面変位は方向、大きさとも整合性がよくない結果となっている。せん断応力についても、実験及び解析ともに出力位置と盛土の間に構造物があるため盛土による初期せん断応力の影響が小さく、加振 1 波目程度までは同程度の振幅となっている。しかし、せん断応力は、過剰間隙水圧の上昇の違いにより、1 波目以降は解析の方が小さくなり、液状化に至った後は、おおむねゼロ値となっている。不飽和地盤については、盛土の影響が小さい地点で地表面変位は比較的实验との整合が見られるものの、盛土による初期せん断応力の影響が想定される付近では、残留変位の傾向を表現できず、最大変位は解析の方が小さい結果となっている。一方、変位以外では、応答加速度、せん断応力ともに実験結果の再現性がよい結果となっている。

特に、せん断応力については、1 秒付近まで解析がやや大きいものの、2 秒付近以降はほぼ一致しており本研究で新たに試みた土圧計測方法の有用性が確認された。

② 構造物への作用土圧等の性状と構造物への影響

図 2.4.12 に構造物の応答加速度、相対変位、構造物へ作用する水平土圧及び周面せん断力の実験と解析の比較結果を示す。飽和地盤については、解析の過剰間隙水圧の上昇が早く、構造物周辺の地盤が液状化したことから、周面せん断力が加振 2 波目程度から、ほぼゼロ値となっている。水平土圧は、解析結果に位相の相違が見られるとともに、液状化により泥水化し、土と水が一体となって構造物に作用したことから加振中の振幅が実験よりも大きめの結果となっている。一方で、鉛直土圧については位相の相違が見られ、加振中の振幅は実験結果と同レベルであるものの、解析結果の方が小さい結果となった。不飽和地盤については、構造物側部の初期土圧（加振前の土圧）に差異が見られ、その差異を保持したまま振動しており全体的に実験よりも大きい結果となっている。水平土圧の相違により S 側への相対変位は解析が小さい傾向を示すが、全体的に実験結果の再現性が良く、特に、頂版、側壁の周面せん断力が実験と解析でおおむね一致していることから構造物の応答も良い整合が見られたものと考えられる。一方、飽和地盤については、土圧、周面せん断力ともに大まかな傾向が同様であるものの位相を含め、振幅には大小のばらつきが見られ、構造物の応答も同様に整合しない結果となっている。

(3) 解析結果のまとめ

遠心模型実験のシミュレーション解析の結果、飽和・不飽和地盤ともに、解析は実験の全体的な傾向を再現できていると考えられ、過剰間隙水圧の上昇による相違、初期せん断応力の影響等を表現できていた。ただし、飽和地盤の過剰間隙水圧は、実験結果よりも早い段階で上昇し、開始 2 秒付近では既に液状化状態に達したことから、地盤の応答や構造物へ作用する土圧等については、過剰間隙水圧の上昇の影響で実験値と異なる傾向が見られた。また、地表面変位については、飽和・不飽和地盤とも、特に残留変位の傾向を表現できず解析の方が小さい結果となった。一方、不飽和地盤では、地表面変位の相違の影響が限定的であり全体的には比較的よい再現性が見られ、地盤内応力や構造物に作用する周面せん断力は、比較的良い一致を示していた。

2.4.4 まとめ

委託先の東北工業大学は、土木構造物等の周辺地盤として、主に礫質土地盤（飽和・不飽和地盤）を用い構造物模型を設置した遠心模型実験を実施した。また規制庁は、当該実験のシミュレーション解析を実施した。遠心模型実験の結果、飽和・不飽和地盤の応答特性、盛土や構造物の設置による複雑な応力状態、構造物への作用土圧等の特徴を確認した。特に、構造物への作用土圧は飽和地盤の方が大きく、周面せん断力は不飽和地盤の方が大きい傾向が見られたものの、構造物への影響の大小は、必ずしも飽和/不飽和のどちらかに

限られることは無く、地盤条件に応じて適切に評価する必要があることが示唆された。また、シミュレーション解析の結果、地盤の応答加速度やせん断応力等の性状、構造物の変形挙動、構造物へ作用する周面せん断力等の性状について、全体的な傾向を再現でき、盛土の影響による過剰間隙水圧の相違、初期せん断応力の影響等の再現性を確認した。一方、実験と解析の過剰間隙水圧の上昇過程の差異、これに伴う加速度や応力の差異等が見られ、構造物の耐震性評価にあたっては、引き続き、これらの応答挙動の再現性を向上する必要があることを確認した。

なお、今回の実験及び解析のケースにおいては、飽和地盤における過剰間隙水圧の上昇・蓄積過程の精度が結果に大きく影響し、構造物への作用荷重にばらつきが見られ過小評価する可能性も示唆された。また、今回の実験では加振ケースによって地盤の応答挙動に差異が見られ、本報告で示した加振ケースよりも大きな残留変位となったケースもあり、残留変位による影響については引き続き検討していく必要があると考える。

実機においては、地盤条件や地下水の状況などを調査・試験等で確認した上で設計条件を設定し、耐震性評価を実施することになる。一方、地下水の変動が大きい場合、非常に密に締固められた地盤等、液状化の発生が定かでは無い場合、条件の不確かさを考慮して、有効応力解析に加え全応力解析も実施し保守的な評価が行われることもある。これに関し、本研究で実施した実験及び解析の範囲では、飽和地盤と不飽和地盤における構造物の変形挙動等の大小関係は一概には言えず、液状化による施設への影響を評価するには、液状化（過剰間隙水圧の上昇）に伴う地盤状態の変化、構造物へ作用する土圧の変化等に対して保守的な評価の観点で有効応力解析と全応力解析の両解析方法を用いて耐震評価を行うことが妥当であることを確認した。

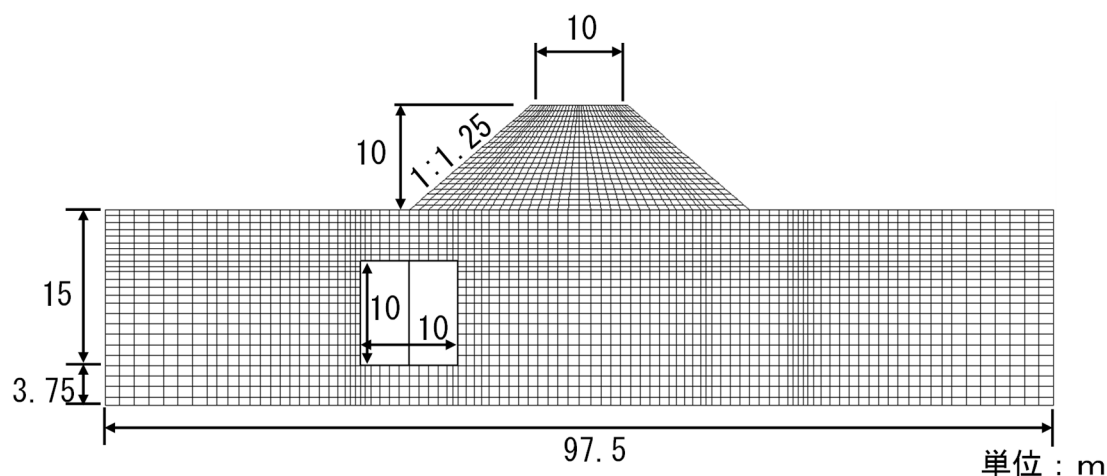


図 2.4.8 2次元解析モデルの概要

Figure 2.4.8 Overview of 2D analytical model

表 2.4.1 解析に用いた主な物性値一覧
Table.2.4.1 Physical properties for the analysis

分類	主なパラメータ		値	単位
物理特性 動的特性	ρ_t	飽和密度	2.12	g/cm ²
	ϕ_f	内部摩擦角	43.9	度(°)
	C	粘着力	0	kN/m ²
	n	間隙率	0.392	—
	ν	ポアソン比	0.33	—
	σ'_{ma}	G_{ma} 、 K_{ma} に対応する平均有効応力 (基準拘束圧)	98	kN/m ²
	G_{ma}	基準せん断剛性 (σ'_{ma} の状態での G_0)	42624	kN/m ²
	K_{ma}	基準体積弾性係数	111157	kN/m ²
	m_G	初期せん断剛性 G_0 の有効拘束圧依存性	0.5	—
	m_K	体積弾性係数 K_0 の有効拘束圧依存性	0.5	—
	h_{max}	履歴減衰定数の上限値	21.7	%

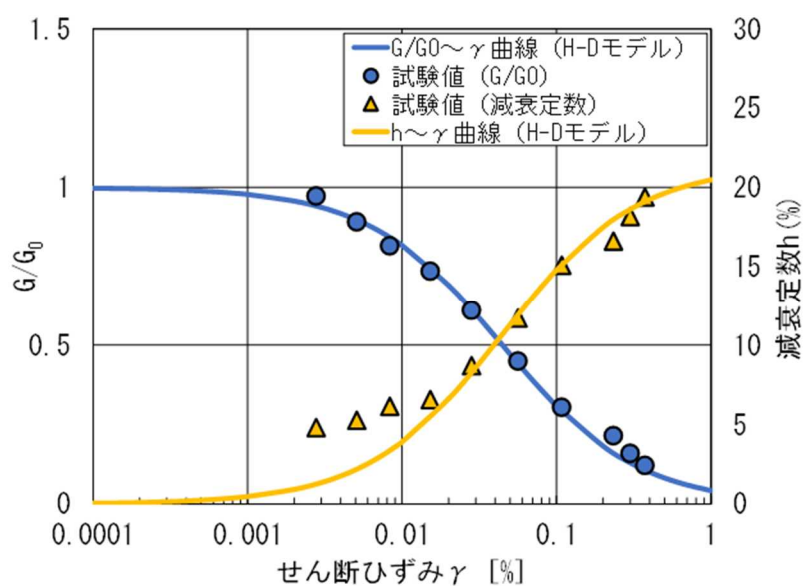


図 2.4.9 解析に用いた G/G_0 - γ , h - γ 曲線
Figure 2.4.9 G/G_0 - γ , h - γ Curves for the analysis

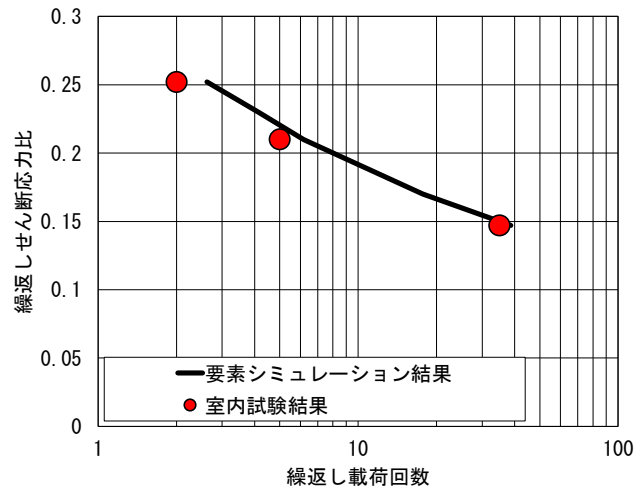
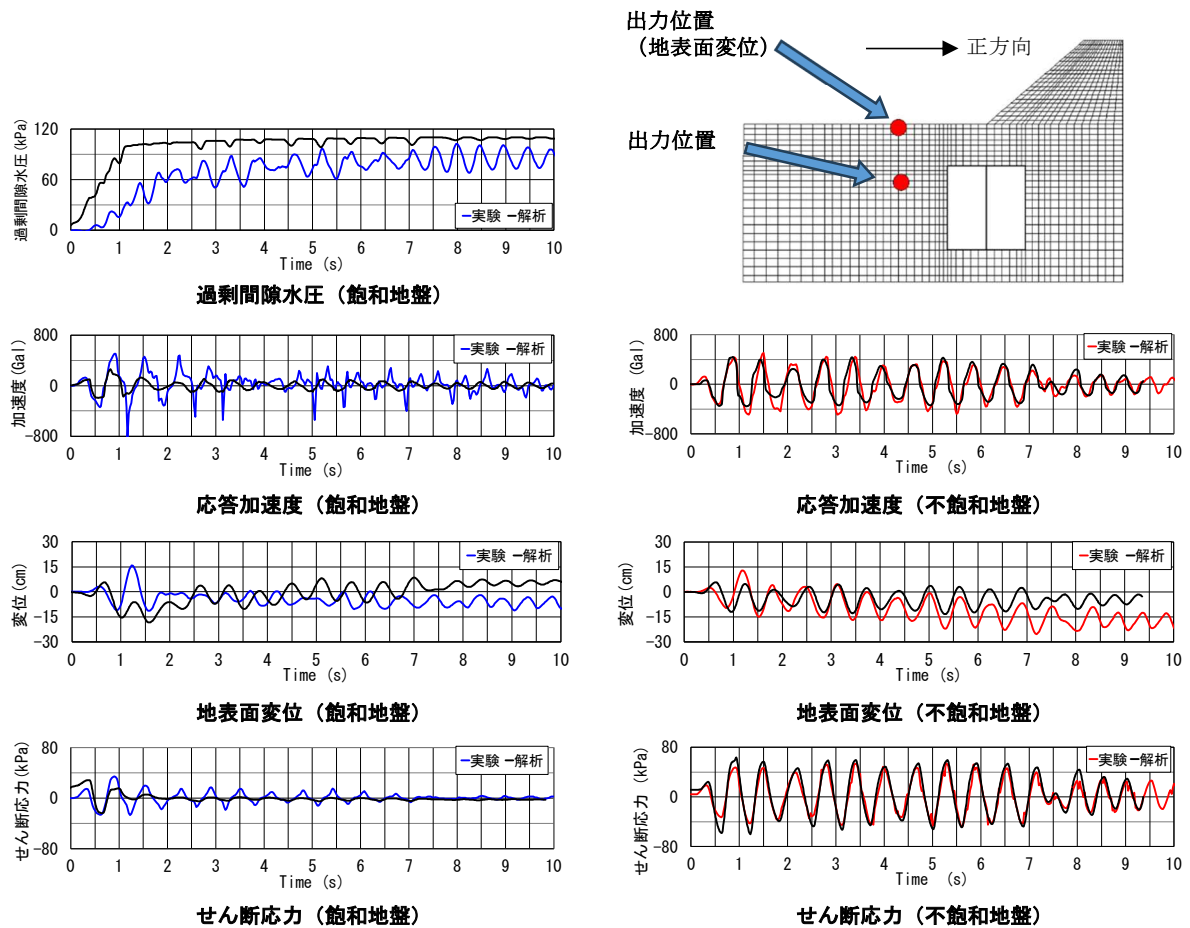


図 2.4.10 解析に用いた液状化強度曲線

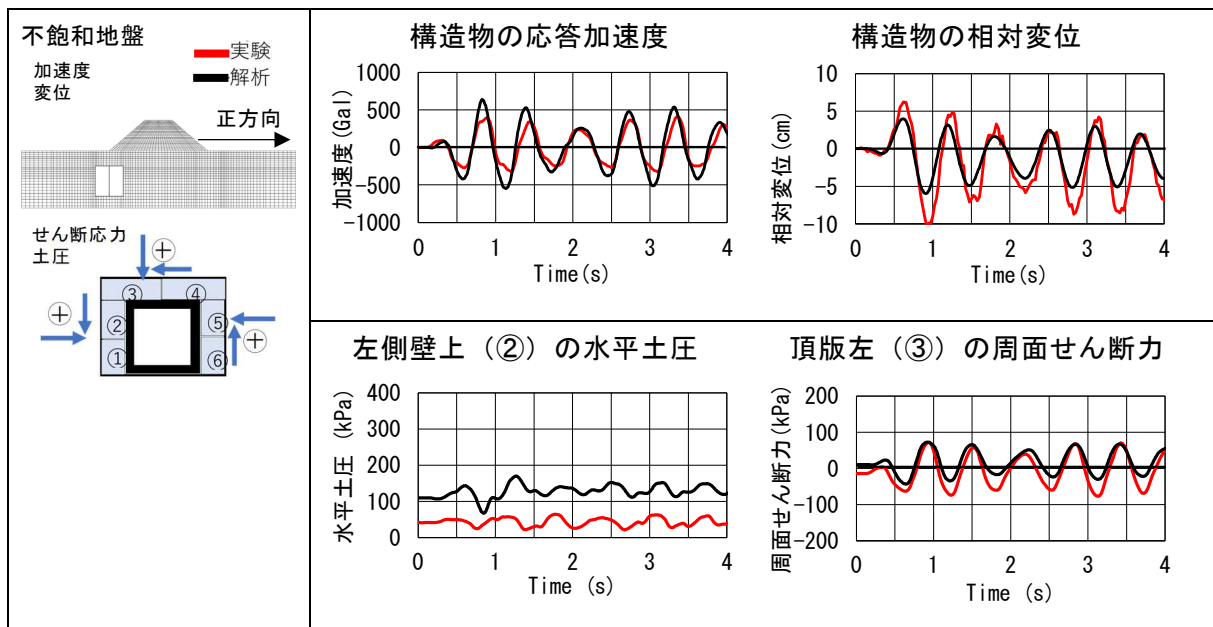
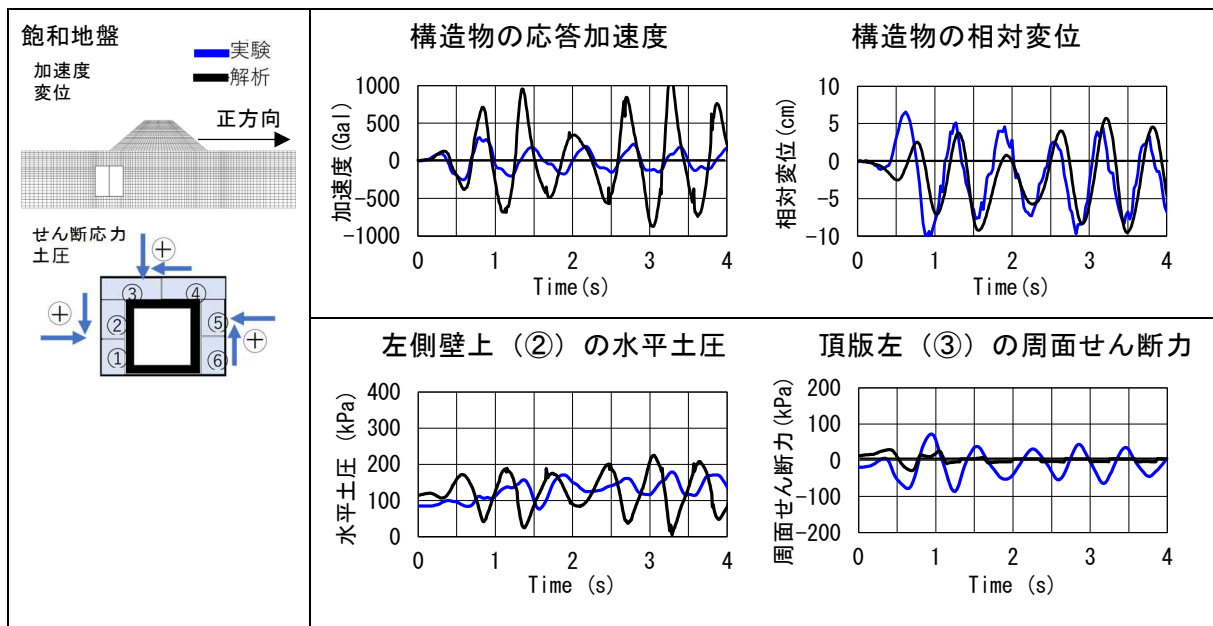
Figure 2.4.10 Liquefaction strength curve for the analysis



出典) 東北工業大学 (2025) 2.4.4の実験データに規制庁の解析結果を重ねて作図

図 2.4.11 地盤応答の実験結果と解析結果の比較

Figure 2.4.11 Comparison of seismic responses of the ground between the test results and the analytical results



出典) 東北工業大学 (2025) ^{2.4.4} の実験データに規制庁の解析結果を重ねて作図

図 2.4.12 構造物への作用荷重及び構造物応答の実験結果と解析結果の比較

Figure 2.4.12 Comparison of seismic responses of and acting loads on the structure between the test results and analytical results

2.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

本項では、3 種類の配管要素の振動試験及び有限要素解析を実施し、その耐震性を確認した結果を報告する。本項のうち、振動試験に係る内容は、学校法人東京電機大学との共同研究「機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究」（令和 2 年度から令和 4 年度まで）として実施したものである。

2.5.1 はじめに

新規制基準適合性審査では、設置許可基準規則の第 4 条（地震による損傷の防止）に従い、基準地震動による地震力に対して耐震重要施設の安全機能が損なわれるおそれがないことを確認する。そのため、耐震重要施設が設計上、十分な耐震性を持つことを確認するためには、基準地震動を超える領域までの機能限界を明らかにすることが重要である。特に既設の原子力施設の場合には、長期間の運転や過去に経験した地震動による荷重履歴が、その耐震性に累積的に影響する可能性があるため、繰り返し荷重に対して十分な耐震性を有する必要がある。

過去に経験した地震の影響を受けることが想定される代表的な耐震重要施設として、配管系が挙げられる。地震荷重による配管の損傷を防止するため、配管の耐震設計では、JEAC4601-1987 等の規格^{2.5.1-2.5.3}に基づき、想定される荷重を分類し、各荷重に対応する損傷モードを防止するための制限が課される。配管系は直管に継手と呼ばれる配管要素を組み合わせて構成されるが、特に地震荷重を受ける配管系では、曲がり部（エルボ）や分岐部（ティ）等の配管要素で最大応力が発生する傾向があるため、各配管要素の発生応力が規格で規定される許容応力制限を満たすことを確認しなければならない。

これまでに既往試験によって、エルボ等の代表的な配管要素の許容応力制限に対する裕度（試験で確認された損傷限界と、許容応力制限又は許容繰り返し回数との比）の確認が行われてきた。例えば、財団法人原子力発電技術機構が実施した試験によれば、振動試験で確認される配管要素の損傷モードは主に低サイクル疲労（比較的少ない繰り返し回数で亀裂が発生・貫通する疲労損傷）であり、代表的な配管要素の許容繰り返し回数は、実際の疲労損傷までに十分な裕度があることが確認された^{2.5.4}。ただし、同じ材料の材料試験片の疲労データから予想される繰り返し回数（ベストフィット曲線）と比較すると、配管要素試験体の方が、亀裂が貫通するまでの繰り返し回数が低下する傾向も見られており、より詳細に疲労損傷のメカニズムを分析する必要がある。

配管要素の疲労損傷のメカニズムを分析する手法として、従来から弾塑性有限要素法（以下「FEM」という。）による試験データの分析が進められている。近年では、例えば一般社団法人日本機械学会が配管系の弾塑性応答解析に係る事例規格^{2.5.5}を発刊しており、配管系の疲労損傷を解析するための標準的な手法が整備されつつある。既往研究によれば、弾塑性 FEM は、振動試験で観測されたエルボの応答加速度を精度良く再現できることが報告されている^{2.5.6}。一方で、ティのような比較的複雑な形状を持つ配管要素の場合には、

最大ひずみ位置を正確に予測することができないケース^{2.5.7}も報告されており、現在も弾塑性 FEM に基づく評価の適用性の検証が進められている^{2.5.8}。特に異径ティ（母管と分岐管でサイズが異なる分岐部）のような配管要素に対しては、既往の試験事例が少なく、弾塑性 FEM の適用性の検証は十分に進められていない。

このような背景を踏まえ、本研究では既往試験での報告例が少ない異径ティを含む 3 種類の配管要素の振動試験を実施し、その耐震性を確認した。具体的には、設計上の許容応力に相当するレベルの正弦波によって試験体を加振し、試験体に損傷が確認されるまで加振を繰り返すことで、現行の耐震設計が有する裕度を分析した。続いて、弾塑性 FEM による再現解析を実施し、設計を超えるレベルでの裕度についても分析を試みた。

本項では、共同研究として実施した振動試験を含め、規制庁が実施し、国際会議等で既に公表した内容の一部^{2.5.9, 2.5.10}を抜粋して説明する。

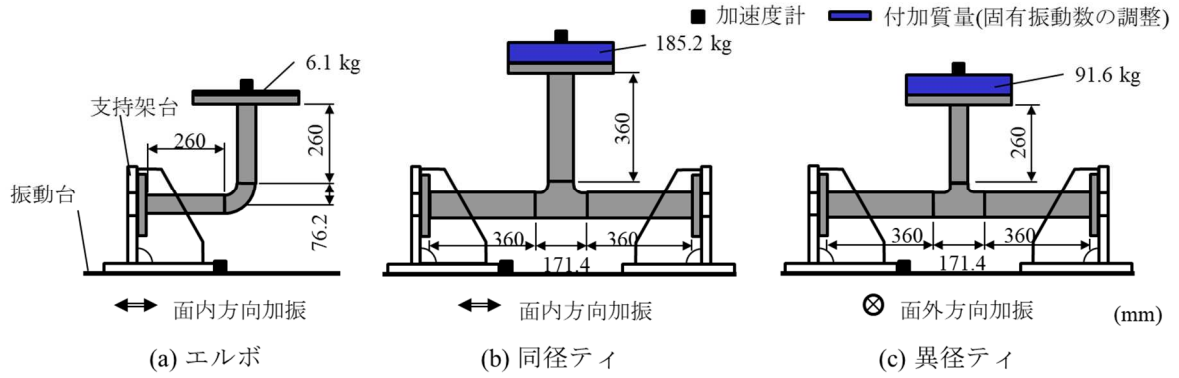
2.5.2 振動試験

(1) 研究対象及び手法

本研究では、炭素鋼（JIS G3456 STPT370）のエルボ、同径ティ（母管と分岐管でサイズが等しい分岐部）及び異径ティを対象に、電磁式の振動台（IMV K350^{注1}）による振動試験を実施した。

振動試験における各試験体の概略図を図 2.5.1 に、また、試験体の設置状況として異径ティの場合を図 2.5.2 に例示する。各試験体は配管要素に溶接で直管部を取り付けた構造をしており、直管の端部を十分な剛性を持つ支持架台に固定した。試験体の管径と肉厚は、BWR の給水系配管のサイズを参考にして、約 1/5.6 に縮尺している。試験体の固有振動数を調整するため、試験体の頂部には付加質量を取り付けた。正弦波掃引試験で確認した試験体の固有振動数と減衰比を表 2.5.1 に示す。各試験体の加振方向は、はりモデルを用いた事前解析の結果、加振時の発生応力が大きいと予想される方向に設定した。各試験体には 0.5 MPa の内圧を負荷し、加振後の内圧の低下をもって、試験体の損傷を判定した。

注1 正弦波の場合、最大 350 kN で加振が可能な 1 軸の電磁式振動試験装置



出典) Azuma et al. (2024)^{2.5.9} の図に加筆

図 2.5.1 (a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ試験体の形状

Figure 2.5.1 Outline drawing for (a) the elbow specimen, (b) the equal tee specimen, and (c) the reducing tee specimen.

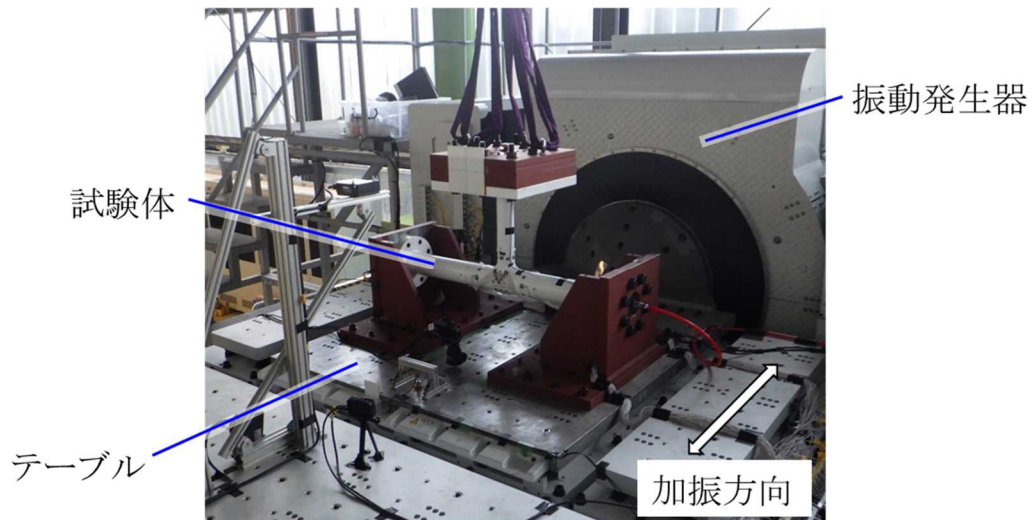


図 2.5.2 異径ティ試験体の設置状況

Figure 2.5.2 Test setup for the reducing tee specimen.

表 2.5.1 各試験体の固有振動数と減衰比の計測値

Table 2.5.1 Observed natural frequencies and damping ratios of test specimens

	エルボ	同径ティ	異径ティ
加振方向	面内方向	面内方向	面外方向
付加質量 [kg]	6.1	185.2	91.6
固有振動数 [Hz]	19.7	18.6	17.4
減衰比	0.0041	0.0037	0.0025

各試験ケースでは、1 方向の正弦波の加速度入力によって振動台を加振した。弾塑性応答時に共振を起こすように、正弦波の振動数は各試験体の固有振動数よりもやや低い値（16.6 Hz）に設定した。

正弦波の加速度振幅には、設計レベル、中レベル及び大レベルの 3 種類を設定した。設計レベルは、はりモデルを用いて評価した一次応力が現行の耐震設計で規定される許容応力 $3S_m$ （ S_m は材料規格^{2.5.11}で規定される設計応力強さ）と同程度となるように設定した加速度 a_d に相当する。設計レベルの加振を 1000 サイクル繰り返し、損傷が確認されない場合は、既往試験^{2.5.4}の入力加速度レベルを参照し、加振レベルを約 3.3 倍に増加させた波形（中レベル、 $3.3a_d$ ）を入力した。さらに 1000 サイクルの中レベルの正弦波加振後も損傷が確認されない場合は、設計レベルの約 6.7 倍の加速度（大レベル、 $6.7a_d$ ）で正弦波を入力した。加振を継続し、試験体の内圧の低下が確認された時点で試験を終了した。

(2) 結果と考察

振動試験の加速度レベルと繰り返し回数の一覧を表 2.5.2 に示す。設計レベルの加速度 a_d では、1000 サイクルの加振を行っても、全ての試験体で損傷は確認されなかった。続いて加速度を中レベル $3.3a_d$ に増加させたところ、エルボ試験体のみ 700 サイクルの加振で内圧の低下が確認された。中レベルを 1000 サイクル加振後、さらに大レベル $6.7a_d$ まで加速度を増加させたところ、同径ティで 200 サイクル、異径ティで 100 サイクル時点で内圧の低下を確認したため、加振を終了した。

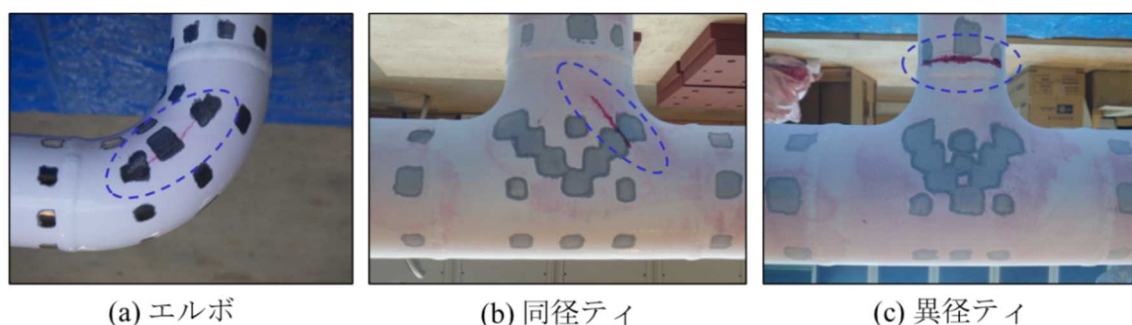
加振終了後、表面亀裂の位置を検出するために浸透探傷試験を実施した結果を図 2.5.3 に示す。図 2.5.3 から、表面亀裂から赤い浸透液が表出していることが確認できる（図中の青点線で囲まれた範囲）。また、試験体の内表面を観察し、これらの表面亀裂が貫通していることを確認した。エルボ及び同径ティでは、母材部で貫通亀裂が生じており、亀裂発生位置が既往試験結果^{2.5.4}と一致した。一方で異径ティは、同径ティとは異なり、接続配管溶接部近傍に貫通亀裂が発生していることを確認した。いずれの試験体においても、疲労亀裂が貫通することで内圧が低下したものと判断できることから、いずれも損傷モードは疲労損傷であると判断した。

表 2.5.2 振動試験の加速度レベルと繰り返し回数

Table 2.5.2 Acceleration level and number of cycles applied to the shaking-table tests

試験ケース	加速度レベル	繰り返し回数	エルボ	同径ティ	異径ティ
D1	設計レベル a_d	1000	N	N	N
I1	中レベル $3.3 a_d$	100	N	N	N
I2		200	N	N	N
I3		300	N	N	N
I4		400	N	N	N
I5		500	N	N	N
I6		600	N	N	N
I7		700	L	N	N
I8		800	-	N	N
I9		900	-	N	N
I10		1000	-	N	N
H1	大レベル $6.7 a_d$	100	-	N	L
H2		200	-	L	-

L: 疲労亀裂からの漏洩 N: 漏洩無し



出典) Azuma et al. (2024)^{2.5.9}

図 2.5.3 浸透探傷試験で検出した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ表面の貫通亀裂

Figure 2.5.3 Throughwall cracks detected by the liquid penetrant method on the surface of (a) elbow, (b) equal tee, and (c) reducing tee.

表 2.5.2 に示す振動試験結果に基づき、各配管要素試験体の耐震性を分析する。エルボ試験体で設計許容レベルの 3.3 倍、同径ティ及び異径ティ試験体で 6.7 倍の加速度を入力したが、塑性崩壊は発生しなかった。本試験結果から、塑性崩壊に対して、少なくともエルボ試験体で 3.3 倍以上、同径ティ及び異径ティ試験体で 6.7 倍以上の裕度があると考えられる。したがって、今回対象とした配管要素の場合、設計上の許容応力制限は、塑性崩壊が発生する加速度に十分な裕度をもって設定されていると言える。

また、設計レベル a_d では疲労亀裂の貫通は確認されておらず、続けて実施した中レベル 3.3 a_d でも、ただちに損傷には至らなかったことから、実際に疲労亀裂が貫通するには十分な裕度があることが見込まれる。したがって、設計疲労線図から算出される許容繰返し回数も、十分な裕度をもって設定されていることを確認した。

2.5.3 弾塑性有限要素解析

(1) 研究対象及び手法

本研究では上記の振動試験の試験体を模擬した FEM モデルを作成し、正弦波加振を再現することで、試験体の弾塑性挙動を分析した。なお、弾塑性 FEM ではモデル化の方法によって、評価結果が大きく変わる可能性があるため、各パラメータを注意深く設定する必要があることが知られているが^{2.5.5}、本文では、形状モデルの影響、特に配管肉厚分布の影響を分析した結果を報告する。その他のパラメータ（材料物性等）は事例規格^{2.5.5}を参考にして設定した。配管肉厚分布以外のパラメータの影響を評価した結果については、Azuma et al. (2023)^{2.5.10}を参照されたい。

まず、振動試験の試験体設置状況を再現するため、試験体頂部には質点としてモデル化した質量を付加し、その他の直管の端部は加速度の入力方向を除き並進・回転運動を拘束した。炭素鋼の降伏応力は 258 MPa、縦弾性係数 E は 203 GPa とした。降伏応力を超えた領域の応力—ひずみ関係には、縦弾性係数 E_2 ($= 2.03$ GPa) で表現するバイリニアモデルを採用した。ただし、疲労評価を行う際には、降伏応力のみ、試験体の製造時の実績値（エルボ：280 MPa、同径ティ：384 MPa、異径ティ：294 MPa）を用いた。

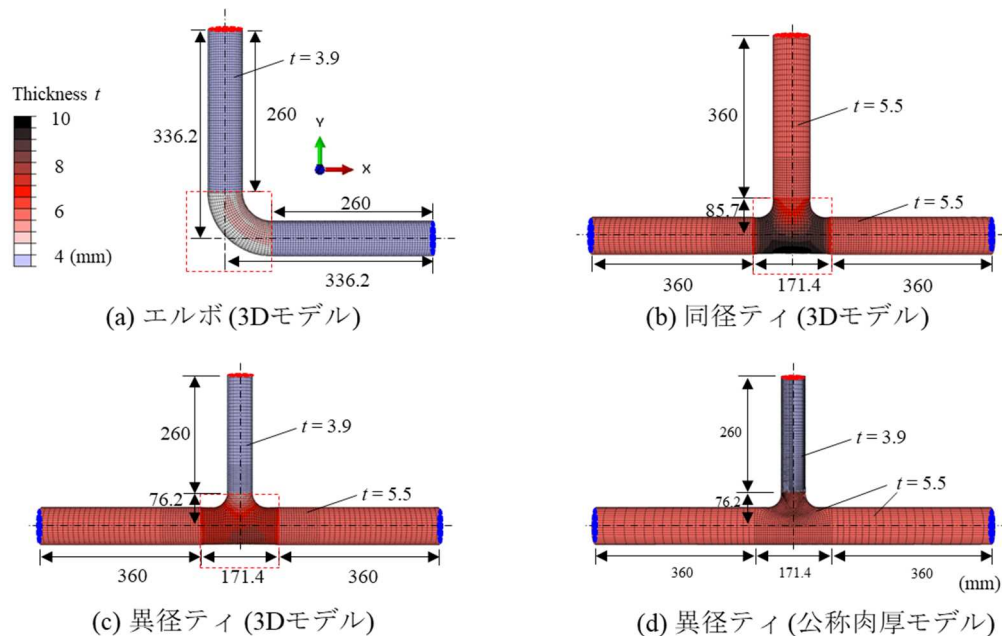
続いて、実際にレーザースキャナーで試験体の外面及び内面の 3 次元形状を計測し、シェル要素モデルの形状及び肉厚分布に測定結果を反映したモデル（3D 計測モデル）を作成した。作成した FEM モデルを図 2.5.4 に示す。異径ティは構造が複雑で、実際の 3 次元の肉厚分布と、公称の肉厚分布との差が大きくなることが予想されたため、異径ティには、均一な公称肉厚でモデル化したモデル（公称肉厚モデル）も作成し、配管肉厚分布の影響を比較した。

設計レベルを超える加振条件（中レベル及び大レベル）では、設計・建設規格^{2.5.12}の設計疲労線図で想定する応力レベルを大きく超えてしまうため、設計レベルと同様の方法では裕度を評価することができない。そこで事例規格^{2.5.5}に基づき、弾塑性 FEM による局所的なひずみをベースとした疲労評価を行い、疲労損傷係数の値から裕度の分析を試みた。解析では、上記 2.5.2(1)の試験条件を模擬し、正弦波加振の時刻歴解析を行った。累積疲労損傷係数の評価式は以下のとおりである。

$$U_{F,cal} = \sum_{i=1}^3 \frac{N_c(i)}{N_a(i)} \cdots \cdots \cdots (2.5.1)$$

ここで N_c は当該荷重レベルにおける繰返し回数、 N_a は当該荷重レベルで発生する相当

ひずみ範囲において設計上許容される繰り返し回数^{2.5.5, 2.5.12}、 i ($i = 1 \sim 3$)はそれぞれ設計レベル、中レベル及び大レベルのケースに対応する。なお、設計評価では累積疲労損傷係数 U_F が許容値である 1.0 を超えることは認められないが、本評価では裕度を計算するため、1.0 を超える値であっても $U_{F,cal}$ の計算値を累積させた。



出典) Azuma et al. (2023)^{2.5.10}

図 2.5.4 有限要素解析モデルの形状と肉厚：

3次元計測した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ並びに(d)公称肉厚の異径ティ

Figure 2.5.4 Geometry and thickness t of the pipe fitting finite element models:

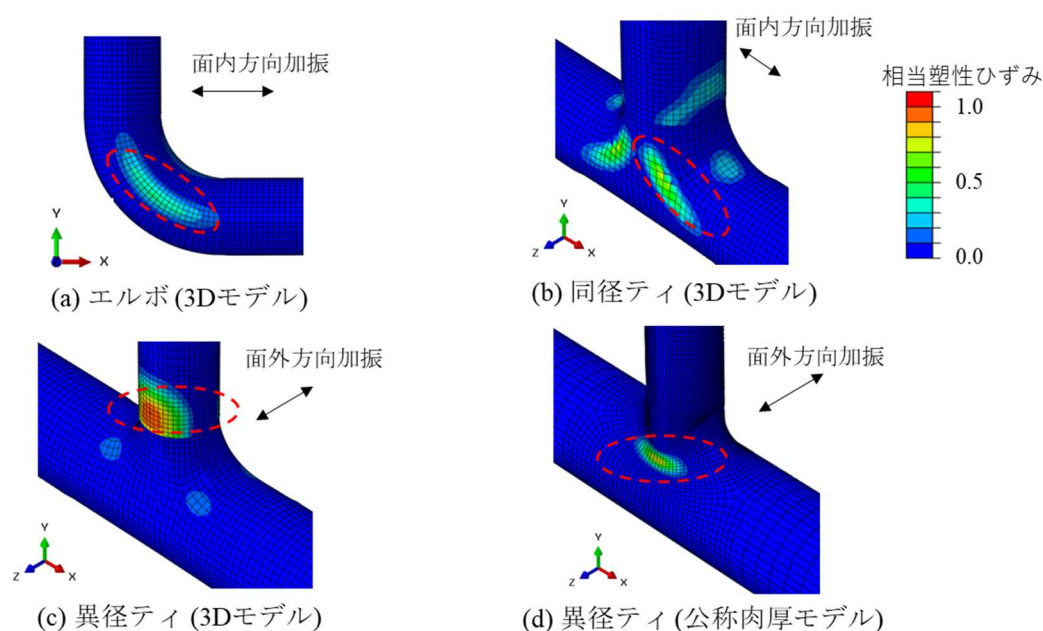
(a) elbow, (b) equal tee, (c) reducing tee based on the 3D shape measurement, and (d) reducing tee modeled with nominal size.

(2) 結果と考察

本節では、事例規格^{2.5.5}の方法に基づいて弾塑性 FEM による疲労評価を実施し、設計を超えるレベルの裕度の分析を試みる。はじめに弾塑性 FEM でのモデル化方針が解析結果に及ぼす影響を分析するため、肉厚分布の影響を確認した結果を示す。

各配管要素表面の塑性変形の度合いを示すため、相当塑性ひずみ分布を計算した結果を図 2.5.5 に示す。図 2.5.5 中の赤点線は、相当塑性ひずみが最大の部位を示す。3D 計測モデル (図 2.5.5(a)-(c)) の最大ひずみ発生位置は、配管要素の形状及び加振方向によって違いがあるものの、いずれも試験で確認された亀裂発生位置 (図 2.5.3(a)-(c)) と良く一致している。一方で、異径ティの公称肉厚モデル (図 2.5.5(d)) では、最大ひずみ発生位置が母管側に寄っており、試験で確認された亀裂発生位置 (図 2.5.3(c)) を再現できていない。また相当塑性ひずみにも、形状モデルによって差異が現れている。したがって、異径ティのよ

うに形状が複雑な配管要素では、肉厚分布のモデル化方針が解析結果に大きく影響することが示唆される。



出典) Azuma et al. (2023)^{2.5.10}

図 2.5.5 相当塑性ひずみ分布：

3次元計測した(a)エルボ、(b)同径ティ、及び(c)異径ティ並びに(d)公称肉厚の異径ティ
 Figure 2.5.5 Distribution of the equivalent plastic strain: (a) elbow, (b) equal tee, (c) reducing tee based on the 3D shape measurement, and (d) reducing tee modeled with nominal size.

以上の分析を踏まえ、以下の疲労損傷係数については、3D 計測モデルを用いて算出する。表 2.5.2 に示す各配管要素の一連の試験条件を再現し、解析的に疲労損傷時点での累積疲労損傷係数を算出した結果を表 2.5.3 に示す。いずれの試験体も設計レベルで 1000 サイクル加振した時点での疲労損傷係数は 0.1 未満であり、事例規格^{2.5.5}で規定する許容値($U_{F,cal}=1.0$)を大きく下回っている。1000 サイクルは一般的に基準地震動で想定するサイクル数(等価繰り返し回数)をはるかに上回ることから、設計レベルの加振条件では、局所的な塑性ひずみによる疲労損傷は発生せず、現行の耐震設計に十分な裕度があることを示唆している。

試験終了時点の累積疲労損傷係数は、エルボ、同径ティ及び異径ティ試験体のそれぞれ 20.98、6.80 及び 14.15 であり、許容値である 1.0 を大きく超える値となった。したがって、事例規格^{2.5.5}で定める累積疲労損傷係数の許容値は、設計を超えるレベルの荷重に対しても十分に保守的に設定されていると言える。この傾向は異径ティにもあてはまることから、形状の複雑さによらず、設計を超えるレベルの荷重に対して各配管要素が十分な耐震性を持っていることが示された。

表 2.5.3 累積疲労損傷係数の解析値

Table 2.5.3 Calculated fatigue usage factors

試験体	目標加速度レベル	実測平均加速度 [m/s ²]	繰り返し回数 N_c	疲労損傷係数 $U_{F,cal}$	累積疲労損傷係数 $\sum U_{F,cal}$
エルボ	設計レベル a_d	15.20	1000	0.01	0.01
	中レベル $3.3a_d$	48.77	700	20.97	20.98
同径ティ	設計レベル a_d	6.25	1000	0.01	0.01
	中レベル $3.3a_d$	19.33	1000	2.19	2.20
	大レベル $6.7a_d$	50.93	200	4.60	6.80
異径ティ	設計レベル a_d	5.72	1000	0.06	0.06
	中レベル $3.3a_d$	17.74	1000	11.20	11.26
	大レベル $6.7a_d$	39.11	100	2.89	14.15

2.5.4 まとめ

これまで比較的単純な構造を持つ配管要素であるエルボについては、多くの試験が実施され、十分な耐震裕度があることが確認されるとともに、その弾塑性挙動も FEM によって精度良く再現できることが報告されている^{2.5.5}。しかし、異径ティのような比較的複雑な構造の配管要素については、試験事例が極めて少なく、FEM の適用性の検証が十分に行われていない。

本研究で異径ティを含む 3 種類の配管要素の振動試験を行った結果、いずれの試験体も損傷モードは疲労損傷であり、設計レベルの荷重及び繰り返し回数に対して、十分な裕度を持つことが示された。これは既往試験において、代表的な配管要素の耐震性を確認した結果^{2.5.4}と良く整合するものである。また、設計を超えるレベルの荷重における疲労損傷に対しても、弾塑性 FEM に基づく疲労評価の結果、配管要素には十分な裕度が有ることが確認された。

また、異径ティ特有の損傷挙動と評価上の留意点を明らかにした点も、本研究の主要な成果である。既往試験^{2.5.4}では、主に同径ティを代表させてティの損傷形態の分析を行っているが、厳密には異径ティの場合、既往の同径ティを対象とした試験では確認されていない位置で、亀裂が貫通する可能性があることが明らかになった。溶接部近傍は一般的に応力腐食割れ等も生じる部位であることから、異径ティの耐震性の評価では、他の劣化モードとの重畳の可能性も十分に留意して行う必要がある。また、異径ティでは、FEM の形状モデルが大きな誤差要因となることを明らかにした。このような形状モデルが影響する可能性は、既往の同径ティに関する解析^{2.5.7}でも報告されているが、特に異径ティではその影響が大きく、特有の損傷挙動と評価上の留意点があることを明らかにしたことは、複雑な形状の配管要素の耐震裕度を分析する上で重要であり、今後の安全研究に反映すべき知見である。

2.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

2.6.1 はじめに

既設の原子力施設の地震リスクを評価するには、過去に経験した地震の影響、すなわち、繰り返し入力される地震力の影響にも着目し、施設を構成する各種設備の基準地震動を超える領域までの耐震性を明らかにすることが重要である。

上述の重要性を踏まえ、新たに取り替えの困難な設備に着目すると、その1つにはBWR型プラントの原子炉本体を支持する原子炉本体基礎が挙げられる。鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎（以下「原子炉本体基礎」という。）は、二重の円筒鋼板と縦リブ鋼板から構成される鋼構造部の内部にコンクリートを充填した合成構造物であり、その地震応答解析モデルには、鋼構造部と充填コンクリート部の剛性が考慮されている。建設当時の基準地震動のレベルにおいては、原子炉本体基礎の地震応答はおおむね線形領域に収まっていたことから、剛性一定の線形モデルとして扱われてきた。しかしながら、近年の基準地震動の増大に伴い、原子炉本体基礎の地震応答が線形領域を超えるようになったことから、非線形領域での地震応答を評価するために定式化された原子炉本体基礎の復元力特性評価法が菊地ら^{2.6.1, 2.6.2}によって提案され、原子炉本体等の重要設備の地震応答の評価に用いられている。また、今後は地震リスク評価に用いるそれらの精緻なフラジリティ評価のため、その復元力特性評価法は、基準地震動のレベルを超える大地震入力時の地震応答の評価にも用いられると考えられる。

一般社団法人日本電気協会の鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針^{2.6.3}で定められた復元力特性評価法は、スタッド方式の鋼板コンクリート構造への適用を前提としている。しかしながら、原子炉本体基礎は隔壁方式に近い鋼板コンクリート構造物として分類されるため、その評価法をそのまま適用することはできない。そこで、菊地らは、原子炉本体基礎の外筒鋼板が引張降伏するまでを対象として、鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針に基づき原子炉本体基礎の特徴に応じた検討を行い、曲げモーメントー曲率関係とせん断力ーせん断ひずみ関係に基づく復元力特性（以下「既往の復元力特性評価法」という。）を提案した。また、既往のABWR型の原子炉本体基礎の縮小試験の結果から得られた荷重ー変位関係等は、提案した評価法に基づく算定結果と良好に対応していることを確認している。しかしながら、その評価法の履歴特性は、原子炉本体基礎の地震応答に対して消費エネルギーが小さく、最大値が大きくなる様に設定されたものであり、繰り返し入力される地震力の影響を考慮した試験結果に基づく十分な検証はなされていない。

そこで本研究は、大きな地震を経験した原子炉本体基礎の耐震性に着目し、繰り返し入力される地震力がその復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、原子炉本体基礎の構造的特徴を模擬したBWR Mark-II型の1/10スケールの縮小試験体を製作し、加力回数をパラメータとした正負交番载荷試験を実施したものである。

2.6.2 試験方法と試験結果

(1) 試験体

試験体の設計では、原子炉本体基礎の構造形式に近い隔壁方式の鋼板コンクリート製の円筒型基礎構造物の基本的な力学的挙動を把握することに着目した。また、三次元有限要素法解析を用いた事前解析を行い、試験に必要な載荷設備の規模を評価するとともに、鋼板と充填コンクリート間の付着特性がその部材剛性や破壊モード等の力学的挙動に大きな影響を及ぼすことを把握した^{2.6.4}。

上述を踏まえて製作した試験体の構造図を図 2.6.1 に示す。試験体の寸法は、外径 1000 mm、内径 600 mm、壁厚 200 mm とした。試験体に用いる鋼材は SS400 とし、二重円筒鋼板及び縦リブの板厚は 3.2 mm とした。また、充填コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm^2 として配合設計を行った。試験体には、固定用の下部スタブと加力用の上部スタブを取り付けた。また、試験結果の考察を容易にするため、試験体の脚部には下部スタブと取合うための板厚 50 mm のベースプレートを取り付け、脚部の完全固定条件を模擬した。

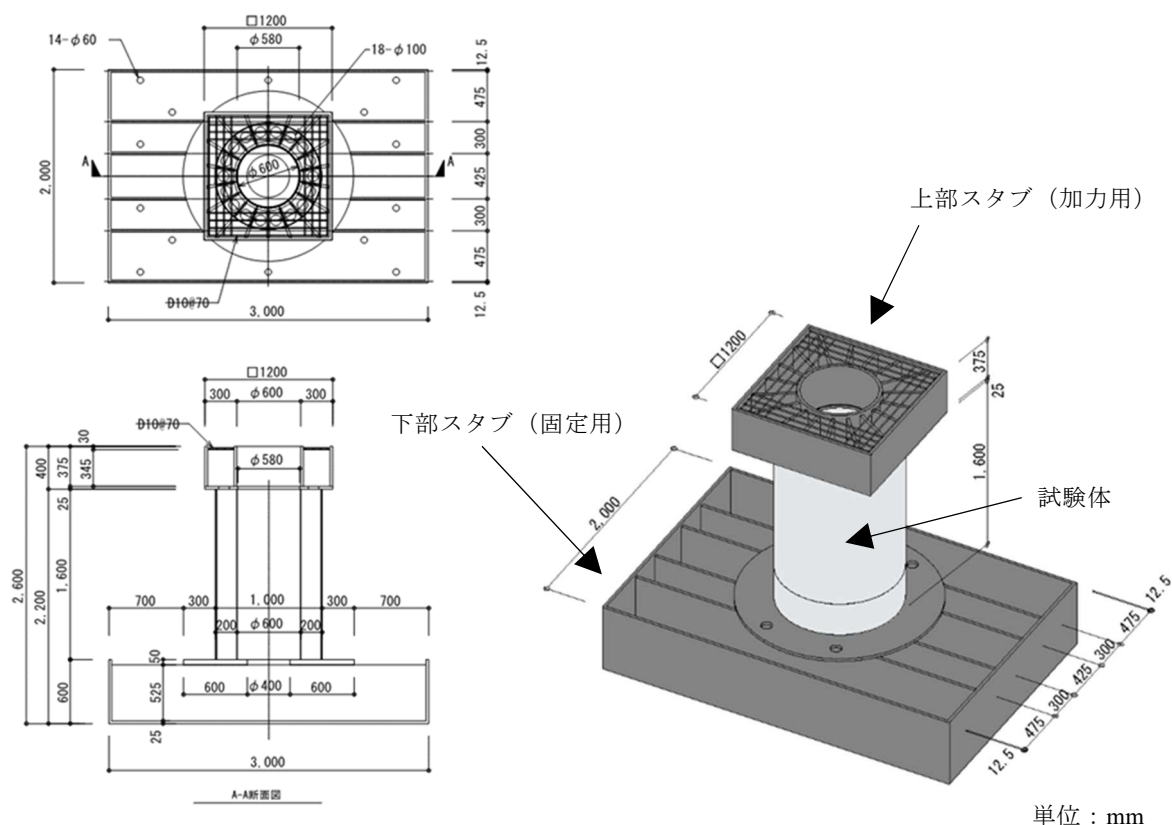


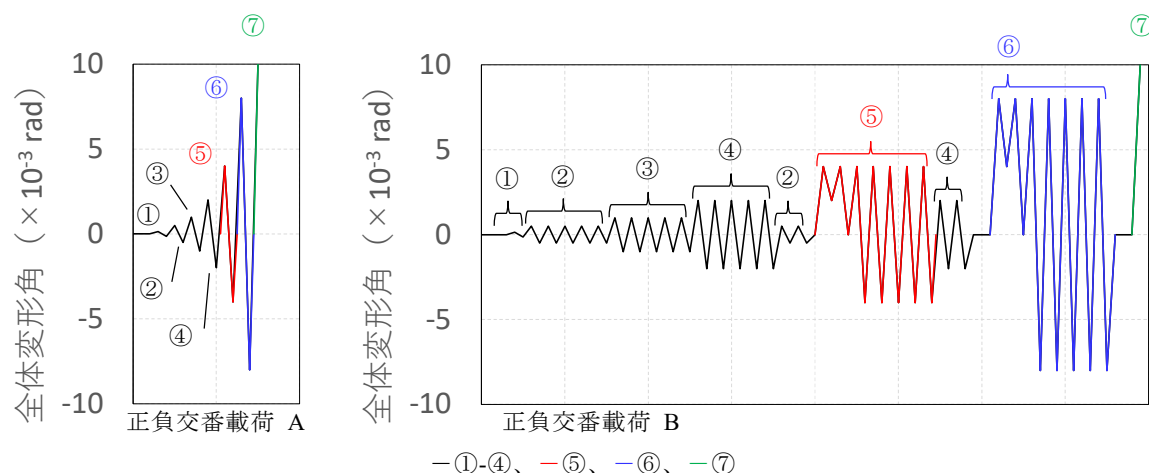
図 2.6.1 試験体の構造図

Figure 2.6.1 Structural drawing of the test structure

(2) 試験ケース

試験ケースとして、正負交番載荷 A 及び B を設定した。これらの載荷サイクル (①～

⑦) と全体変形角の関係を図 2.6.2 に示す。正負交番载荷 A は、基本的な復元力特性（骨格曲線及び履歴特性）を把握することを目的とした。一方、正負交番载荷 B は、载荷サイクルごとに 5 回の正負交番繰り返し载荷（载荷サイクル⑤と⑥については、2 回の半振幅载荷を含む）を行い、繰り返し载荷の回数が復元力特性に及ぼす影響を把握することを目的とした。



③は既往の復元力特性評価法に基づき評価した骨格曲線のせん断の第一折れ点の近傍、④は曲げの第二折れ点の近傍に対応する。また、全体変形角は加力点変位/試験体の脚部から加力点までの高さで計算される。

図 2.6.2 载荷サイクル（①～⑦）と全体変形角の関係

Figure 2.6.2 Relationship between loading cycles(①～⑦)
and overall displacement angle

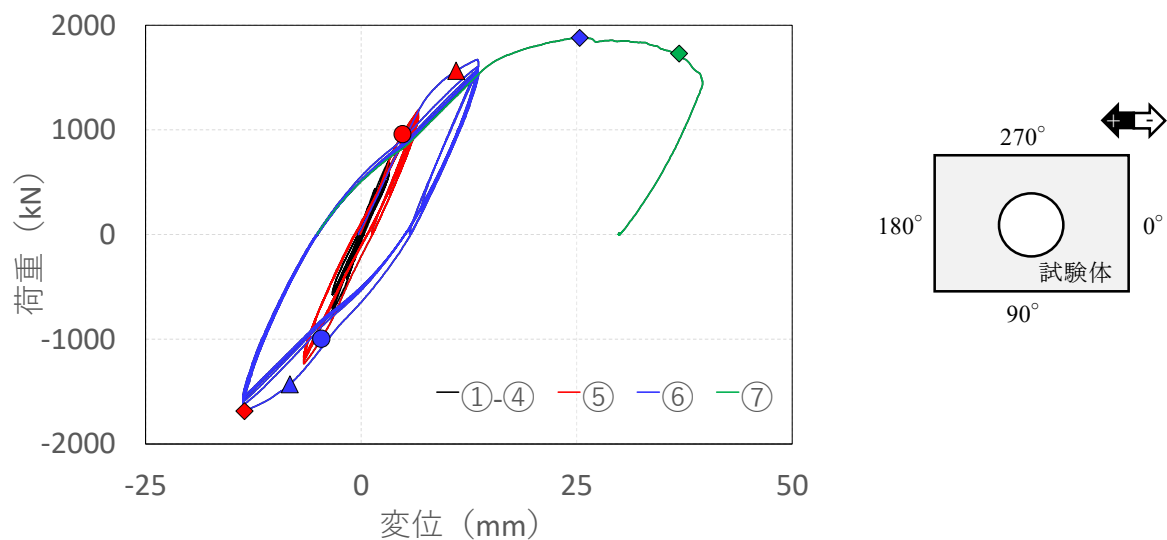
(3) 試験結果

正負交番载荷 B の荷重－変位の関係を図 2.6.3、変位を曲げ及びせん断変位に分離し、荷重－曲げ及びせん断変位の関係として整理したものを図 2.6.4 に示す。なお、これらの図には、载荷試験中に確認した曲げ及びせん断挙動に関する各イベントの発生状況も併せて示している。また、载荷サイクル⑥以降は外筒鋼板の塑性変形が大きく、曲げ変位とせん断変位を分離することができなかった。

载荷サイクル⑤の 1 回目で、外筒鋼板の加力軸（0° -180°）の脚部が降伏した。また、载荷サイクル⑥の 1 回目で、内筒鋼板の加力軸（0° -180°）の脚部が降伏するとともに、曲げ圧縮側（0°）の外筒鋼板の脚部に座屈を確認した。さらに、载荷サイクル⑦で、最大荷重を記録した後に徐々に荷重低下が始まり、最終的に曲げ引張側（0°）の内外筒鋼板の脚部が破断し、荷重が急激に低下して载荷を終了した。

試験終了後に外筒鋼板を剥ぎ取り、充填コンクリート部の損傷状況を確認したところ、载荷サイクル⑦での曲げ引張側（0°）の脚部に、水平方向に貫通した曲げひび割れを確認した。また、曲げ圧縮側（180°）の脚部の充填コンクリート表面に、圧縮力によるコンクリートの剥落を確認した。しかしながら、充填コンクリートの 90° 及び 270° 部の中央部には、せん断ひび割れは確認できなかった。

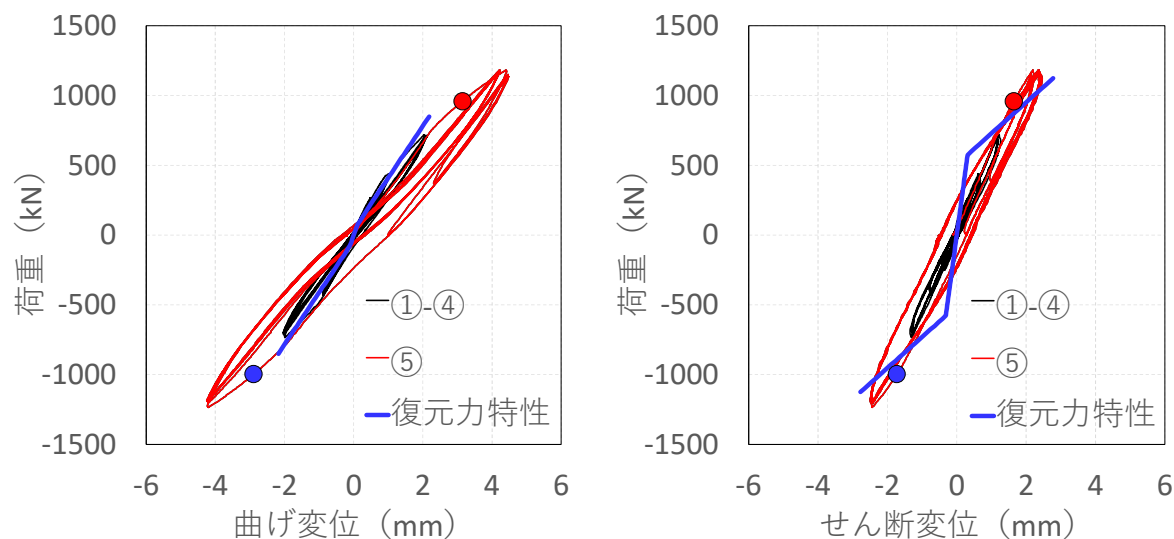
正負交番载荷 A 及び B の各载荷サイクルの 1 回目において、荷重－変位の関係はほぼ同様であった。また、内外筒鋼板の降伏や座屈のタイミングについても、ほぼ同様であった。さらに、正負交番载荷 A 及び B とともに、正負交番载荷時の荷重－曲げ及びせん断変位の関係は、それまでの载荷サイクルで経験した最大変位の履歴を辿る結果となった。



● 外筒降伏 (0°)、● 外筒降伏 (180°)、▲ 内筒降伏 (0°)、▲ 内筒降伏 (180°)、
 ◆ 外筒座屈 (0°)、◆ 最大荷重、◆ 鋼板破断 (0°)

図 2.6.3 荷重－変位の関係（正負交番载荷 B）

Figure 2.6.3 Load-displacement relationship
(positive-negative cyclic loading B)



● 外筒降伏 (0°)、● 外筒降伏 (180°)

図 2.6.4 荷重－曲げ及びせん断変位の関係（正負交番载荷 B）

Figure 2.6.4 Load-flexural and shear displacement relationship
(positive-negative cyclic loading B)

2.6.3 繰り返し入力される地震力が復元力特性に及ぼす影響

繰り返し入力される地震力が復元力特性に及ぼす影響として、正負交番载荷 A 及び B の曲げ剛性－経験最大曲げ変位の関係及びせん断剛性－経験最大せん断変位の関係を図 2.6.5 に示す。なお、曲げ及びせん断剛性は、各载荷サイクルの各回目の正負最大荷重とその際の曲げ及びせん断変位から算出した割線剛性とした。

正負交番载荷 A 及び B は、正側と負側で若干異なる剛性を示すものの、経験最大変位の増加にともない曲げ及びせん断剛性ともにおおむね低下する傾向を示した。また、正負交番载荷 B の各载荷サイクルでの 5 回の正負交番繰り返し载荷（载荷サイクル⑤については、2 回の半振幅载荷を含む）による剛性低下は、曲げ剛性については 4%程度（最大 7.7%、平均 4.4%）、せん断剛性については 3%程度（最大 9.9%、平均 3.4%）となり、5 回程度の繰り返し载荷による顕著な剛性低下は確認できなかった。

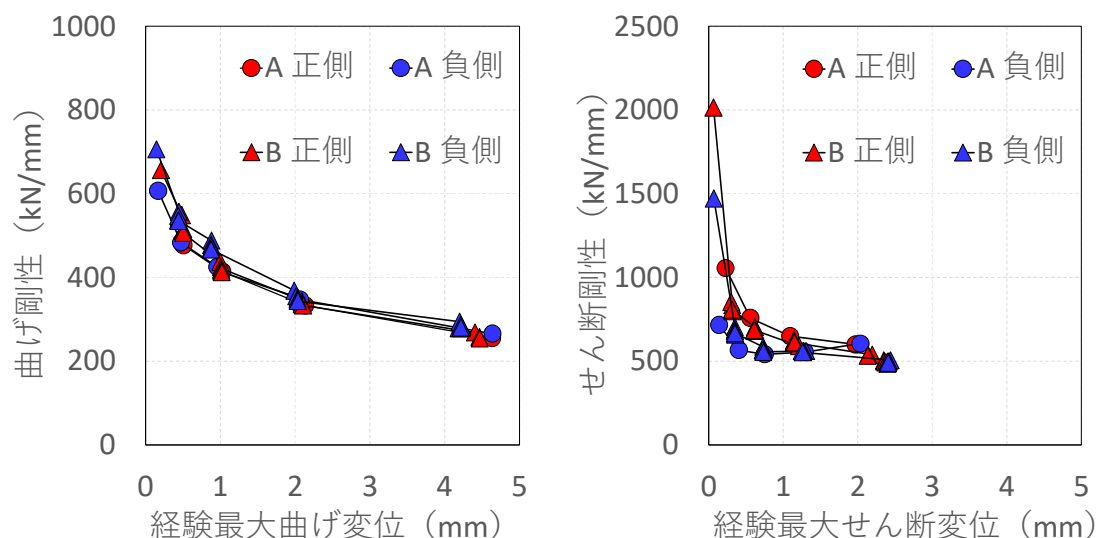


図 2.6.5 曲げ剛性－経験最大曲げ変位の関係及びせん断剛性－経験最大せん断変位の関係

Figure 2.6.5 Flexural stiffness-experienced maximum flexural displacement relationship and shear stiffness-experienced maximum shear displacement relationship

2.6.4 既往の評価法による復元力特性との比較

(1) 骨格曲線との比較

試験結果と既往の評価法^{2.6.1,2.6.2}に基づく骨格曲線との比較として、正負交番载荷 B の条件に対して荷重－曲げ及びせん断変位の関係を求め、試験結果と比較したものを図 2.6.4 に併せて示す。なお、材料強度には設計値を用いている。

荷重－曲げ変位の関係については、既往の評価法により求めた関係と試験結果はおおむね対応する結果となった。一方、荷重－せん断変位の関係については、既往の評価法により求めた関係の初期剛性が試験結果と比較して大きくなる結果となった。これは既往の評

価法の第一折れ点の算定は、鋼板と充填コンクリートの完全付着を仮定し、それらの合成せん断剛性を用いているのに対して、実際は鋼板と充填コンクリート間の付着は小さく、それらのせん断剛性の完全な合成が成り立たないことが原因であると考えられる。このことは、前述した事前解析の傾向とも整合するとともに、試験結果において、充填コンクリートの 90° 及び 270° 部の中央部にせん断ひび割れが確認できなかったこととも整合する。

(2) 履歴特性との比較

履歴特性については、上述の試験結果で述べた通り、正負交番載荷 A 及び B とともに、荷重－曲げ及びせん断変位の関係は、それまでの載荷サイクルで経験した最大変位の履歴を辿る結果となった。既往の評価法は、その曲げ及びせん断の履歴特性に最大点指向型を採用しており、その特性は試験結果と整合している。

2.6.5 まとめ

本研究では、繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、その構造的特徴を模擬した 1/10 スケールの試験体を製作し、加力回数をパラメータとした正負交番載荷試験を実施した。

繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響として、正負交番載荷 B の曲げ剛性－経験最大曲げ変位の関係及びせん断剛性－経験最大せん断変位の関係を整理した結果、各載荷サイクルでの 5 回の正負交番繰り返し載荷（載荷サイクル⑤については、2 回の半振幅載荷を含む）による割線剛性の低下は、曲げ剛性については 4%程度、せん断剛性については 3%程度となり、5 回程度の繰り返し載荷による顕著な剛性低下は無いことが分かった。この知見は安全性向上評価やリスク情報を活用した原子力規制検査において、既設の原子力発電所の原子炉本体等の重要設備のフラジリティ評価結果の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待される。

また、既往の評価法による復元力特性との比較として、正負交番載荷 B の荷重－曲げ及びせん断変位の関係を比較した結果、両者の荷重－曲げ変位の関係については、おおむね対応する結果となったものの、荷重－せん断変位の関係については、既往の評価法により求めた初期剛性が試験結果よりも大きくなる結果となった。このことから、既往の評価法は原子炉本体基礎のせん断剛性を大きめに評価する可能性があり、原子炉本体基礎に作用するせん断力の影響が大きい場合には注意が必要である。この知見は原子力施設の耐震安全性に係る適合性審査において、既設の原子力発電所の原子炉本体等の重要設備の地震応答解析結果の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待される。

2.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

2.7.1 はじめに

既設の実用発電用原子炉施設の耐震性を向上させるために新たに導入された設備である制振装置は、現状では適用実績はまだ少なく、適用設備も B クラスであるが、今後適用実績の増加、適用範囲の拡大（S クラス設備への適用）が予想される。

制振装置は、主として一般の土木構造物、建築物（以下「一般の施設」という。）への適用を想定して開発されており、実用発電用原子炉施設への適用実績が少ないことから、今後の S クラス設備への適用も想定して、制振装置の審査における留意点を整理しておくことが望ましい。

このため、実用発電用原子炉施設以外の一般の施設に適用される代表的な型式の制振装置について、実用発電用原子炉施設設備の審査の観点を踏まえて、制振性能の特徴を調査した（2.7.2 項、2.7.3 項）。また、調査結果から、制振装置の一般の施設への適用時の留意点を分析した（2.7.4 項）。さらに、分析結果を基に実用発電用原子炉施設設備に制振装置を適用する観点から留意点を整理した（2.7.5 項）。

以上の調査、分析及び整理の結果を基に、制振装置の実用発電用原子炉施設設備への適用に係る審査を行う上で参考となる情報を、「実用発電用原子炉施設への制振装置適用に係る留意点」（以下「審査における留意点」という。）に整理した（2.7.6 項）。あわせて、「審査における留意点」の内容の理解に資するため、参考資料として制振装置に関する試験や解析の実施例等をまとめた事例集を作成した。一例として制振装置の振動試験を示す（2.7.7 項）。

上記の調査、分析等の内容は、NRA 技術報告に取りまとめ、その一部として「審査における留意点」を作成する計画である。

2.7.2 調査対象及び調査手法

多種多様な制振装置の型式の中から、実用発電用原子炉施設への適用実績、実用発電用原子炉施設への適用を想定した制振装置の研究事例^{2.7.1-2.7.6}、原子力発電所耐震設計技術規定（JEAC4601-2021）^{2.7.7}を参考に、以下の代表的な制振装置の型式を選定した。

- ・弾塑性ダンパー
- ・鉛ダンパー
- ・摩擦ダンパー
- ・オイルダンパー
- ・粘性ダンパー

制振装置の実用発電用原子炉施設への適用事例が少ないことから、選定した型式の制振装置の一般製品を対象に、各制振装置の特徴、適用を想定している対象設備、制振装置使用に際しての留意点等について、製品のカタログ情報の収集、制振装置メーカーへのアン

ケート及び聞き取り調査を実施した。

調査に当たり、あらかじめ実用発電用原子炉施設設備の審査の観点を踏まえて、収集する調査項目を設定した。設定した調査項目は、各制振装置の基本性能・特性、制振装置の設計・製造に当たっての前提、設計に使用される地震応答解析手法と解析モデル、長期間の運用に関する見解等とした。

2.7.3 制振装置の特徴の例

制振装置メーカーへのアンケート及び聞き取り調査の結果、今回の調査の範囲では、鉛ダンパーを除く 4 型式（10 機種）について回答が得られた。

以下の項目について、制振装置の調査結果から、制振装置の特徴を抽出、整理した。2.7.4 項以降の調査結果を踏まえた分析等についても、以下の項目の観点で実施した。

- ・ 使用材料及び材料定数
- ・ 荷重及び荷重の組合せ
- ・ 許容限界
- ・ 地震応答解析
- ・ 制振装置の設計
- ・ 制振される設備の設計
- ・ 制振装置の品質管理・維持管理の方針

ここでは、制振装置の特徴の例として、許容限界について以下に示す。

（例）許容限界

制振装置が機能を喪失する要因とそれに関連する部位を抽出し、抽出した部位の中から最弱の部位を選定して許容限界を設定する。制振装置が機能を維持しない要因は、構造の健全性に関するものと、要求性能の保持に関するものに分けられる。

構造の健全性に関するものの例に、取付け部の損傷がある。要求性能の保持に関するものの例に、制振材料の劣化による性能変化、可動域限界超過がある。このように許容限界の設定の観点は構造の健全性と要求性能の保持に分けて整理でき、各々の観点に対応して構造の健全性に関する許容限界、要求性能の保持に関する許容限界が設定されている。

ここでは、機能を喪失する要因と許容限界の例として、粘性ダンパーについて制振装置メーカーの見解の例を示す。

機能を喪失する要因の抽出：

- ・ 構造の損傷：取付け部の損傷
- ・ 要求性能の喪失：ピストンロッドの可動域限界到達

許容限界：

- ・ 構造の健全性に関するもの：構造部材の設計耐力は定格減衰力を基に、余裕を考慮して設定
- ・ 要求性能の保持に関するもの：ピストンの可動長は限界ストローク（ピストンロッドの可動域の限界）に対して余裕を考慮して設定

2.7.4 調査に基づく留意点の分析

調査から得られた制振装置の特徴を踏まえて、制振装置の一般の施設への適用時の留意点を分析した。例として、2.7.3 項に示した調査結果を整理する観点の 7 項目のうち許容限界について以下に示す。

（例）許容限界

制振装置に想定される機能を喪失する要因は、構造の健全性に関するものと、要求性能の保持に関するものに分けられるが、どちらがより支配的かは制振装置によって異なる。そこで許容限界は、制振装置の構造の健全性、要求性能の保持の両方の観点から設定する必要がある。調査結果から考えられる許容限界に関する留意点の例を示す。

機能を喪失する要因の抽出：

許容限界の設定のため、対象とする制振装置が機能を喪失する要因を抽出する。

- ・ 制振装置が機能を喪失する異常要因の分析が行われている必要がある。
- ・ 異常要因の分析は、制振装置の構造の健全性、要求性能の保持の各々に対する影響の観点から分析する必要がある。

許容限界：

- ・ 構造の健全性に関するもの：

制振装置の構造の健全性に関する許容限界は、制振装置の使用材料の材料強度から定まる。制振装置に使用されている構造部材の使用材料と材料定数の根拠は、製品ごとに異なっている。

- 構造の健全性に関する許容限界は、使用材料及び材料定数の設定に使用している JIS 規格等の公的に認められている根拠に基づき設定している必要がある。使用する根拠が自社規格のような独自のものの場合は、その妥当性が示されている必要がある。
- 上記に関して、同一製品でも部材ごとに使用材料及び材料定数の設定の根拠が異なる場合があることに留意する必要がある。

- ・ 要求性能の保持に関するもの：

要求性能の保持に関する許容限界は、制振性能が保持される条件、エネルギー吸

収機構の構造から定まる。

- 要求性能の保持に関する許容限界は、制振装置の使用材料の材料物性のばらつき、取付け、供用期間中の制振性能の変化を踏まえ、要求性能の保持が実証されている値に対し余裕を考慮して設定している必要がある。
- 要求性能の保持に関する許容限界が制振装置の構造から定まる場合がある。この例として、オイルダンパー、粘性ダンパーのピストンロッドの可動域の限界が挙げられる。制振装置のピストンロッドが可動域限界に達すると制振装置は一時的な機能の喪失又は機能の低下が生じる。この場合の許容限界は、制振性能のばらつきに留意して可動域限界長に対し余裕を考慮して設定する必要がある。

2.7.5 実用発電用原子炉施設設備への適用における留意点の整理

上記の分析を踏まえて、実用発電用原子炉施設設備への制振装置の適用の観点から留意点を整理した。例として、2.7.3 項に示した調査結果を整理する観点の7項目のうち許容限界について以下に示す。

(例) 許容限界

実用発電用原子炉施設に制振装置を適用する際の許容限界に関する留意点をまとめると、以下が考えられる。

- ・ 制振装置の異常要因分析を行い、制振装置が機能を喪失する要因が抽出されていること。
- ・ 制振装置の許容限界は、構造健全性に関するものと、要求性能保持に関するものについて設定されていること。
- ・ 構造の健全性に関する許容限界は、安全上適切と認められる規格・基準等により設定されていること。安全上適切と認められる規格・基準等によらないで設定されている場合は、その妥当性が示されていること。
- ・ 要求性能の保持に関する許容限界は、原則として実機制振装置の試験により機能維持が確認された値をもとに十分な余裕を考慮して設定されていること。ここで、余裕には、制振性能のばらつき、経年変化の影響を含むこと。

2.7.6 「審査における留意点」の整理

上記の調査、分析及び整理の結果を基に、制振装置の実用発電用原子炉施設設備への適用に係る審査を行う上で参考となる情報を、「審査における留意点(案)」として整理した。

ここでは「審査における留意点」の目次を以下に示す。

審査における留意点

目次

- 1. 総則
 - 1.1 目的
 - 1.2 適用範囲
 - 1.3 本書の適用に当たっての留意事項
 - 1.4 用語の定義
- 2. 基本事項
 - 2.1 制振装置設計の基本方針
 - 2.2 設計用地震力の算定
- 3. 制振構造物の設計に係る事項
 - 3.1 使用材料及び材料定数
 - 3.2 荷重及び荷重の組合せ
 - 3.3 制振装置の許容限界
 - 3.4 地震応答解析
 - 3.5 制振装置の設計
 - 3.6 制振される機器・配管系の設計
- 4. 制振装置の品質管理・維持管理の方針
- 参考資料
- 参考文献

2.7.7 制振装置の試験例

制振装置を実用発電用原子炉施設設備に適用する場合、適用する実機の制振性能を確認する必要がある。そこで制振装置の性能確認に係る試験の方法の例を示すことを目的に、制振装置の振動試験を実施し、「審査における留意点」の参考資料として、その内容をまとめた。

以下に試験の概要を示す。

(1) 試験内容

実用発電用原子炉施設設備への適用を想定した制振装置の振動試験を実施した。試験体は、調査対象とした制振装置の型式から、JEAG4601-2021 に記載のないオイルダンパーを対象とした。試験体の仕様を表 2.7.1 に示す。当該のオイルダンパーの用途は一般建築用である。

試験は、振動試験機に試験体を設置し、試験体を正弦波で加振し、減衰力を計測した。試験の状況を図 2.7.1 に示す。加振波形は、定常波 10 サイクルのその前後に漸増、漸減の各 1 サイクルを加えた波形とした。加振中に、レーザー変位計により試験体の変位、振動試験機に設置されたロードセルにより試験体の減衰力を測定した。

試験条件は、試験体の使用条件に加えて、一般の施設より固有振動数が高振動数領域にある実用発電用原子炉施設設備の振動特性を考慮した。試験条件を表 2.7.2 に示す。表 2.7.2 の条件 1 は、振動数一定で変位を変化させた。条件 2 は、変位一定で振動数を変化させた。ここで、変位とは試験体可動部の伸縮量（ストローク長）であり、変位の基準は試験体のストローク位置中央である。

表 2.7.1 試験体の仕様

Table 2.7.1 Specification of specimen

型式	オイルダンパー
ストローク(mm)	160 (±80)
減衰係数(kN・s/cm)	12.5
最大速度(cm/s)	20
最大減衰力(kN)	250
作動油	シリコーンオイル
製品質量(kg)	100

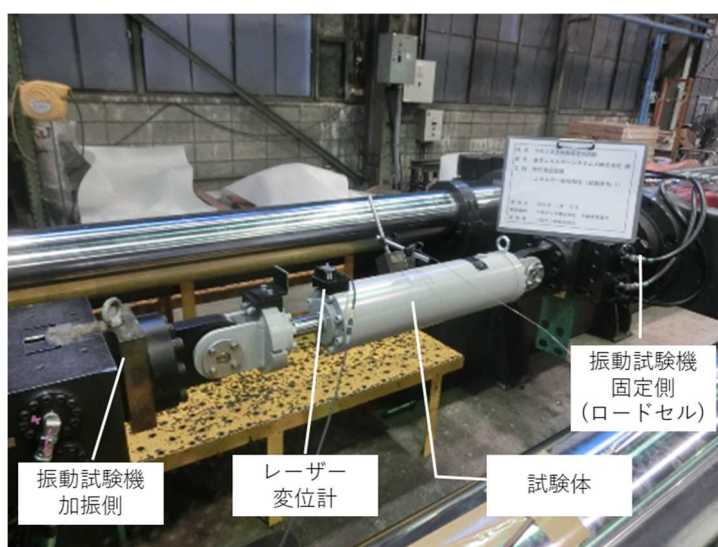


図 2.7.1 試験の状況

Figure 2.7.1 Test apparatus

表 2.7.2 試験条件

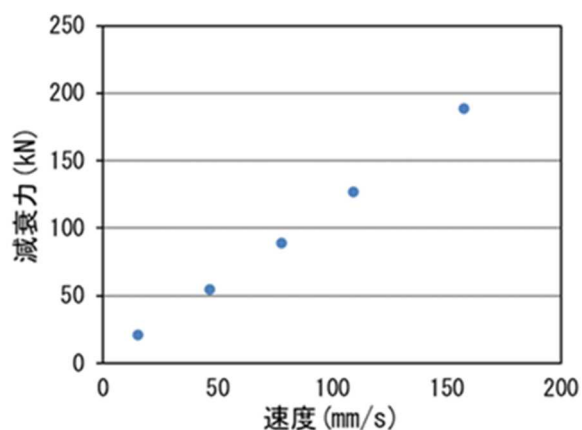
Table 2.7.2 Test conditions

条件 1 振動数一定	振動数(Hz)	変位(±mm)					
	2.5	1	3	5	7	10	
条件 2 変位一定	変位(±mm)	振動数(Hz)					
	1	1	2.5	5	7.5	10	20

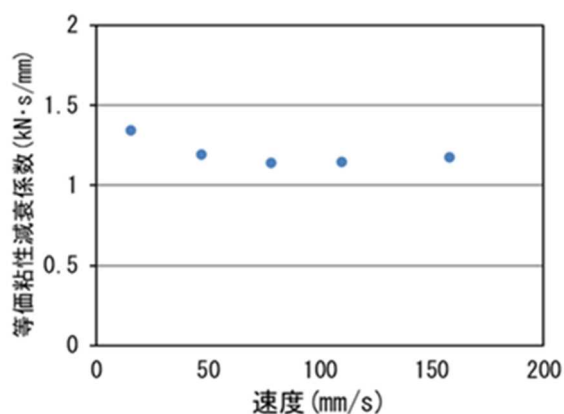
(2) 試験結果

試験結果として、測定された試験体の減衰力、試験結果から求めた等価粘性減衰係数を図 2.7.2 に示す。図の減衰力、等価粘性減衰係数は、定常波 5 サイクル目のデータに基づき整理したものである。

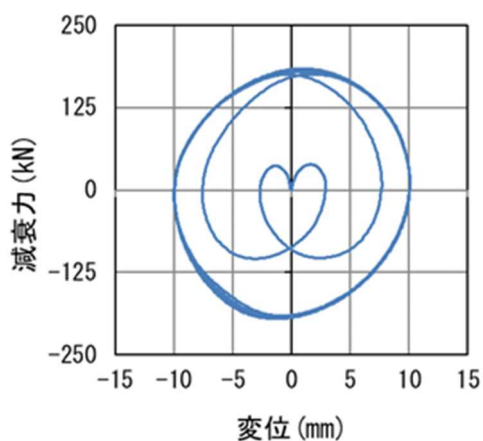
条件 1 の試験結果において、減衰力は速度に比例し増加している（図 2.7.2(a)）。等価粘性減衰係数は低速領域では大きくなっている（図 2.7.2(b)）。これはシリンダーとピストンの摺動抵抗による影響と考えられる。変位－減衰力関係の履歴形状はほぼ円形であり、制振材料であるシリコンオイルの粘性による抵抗の効果が現れている（図 2.7.2(c)）。条件 2 の試験結果において、振動数が大きくなるに従い等価粘性減衰係数は減少している（図 2.7.2(d)）。



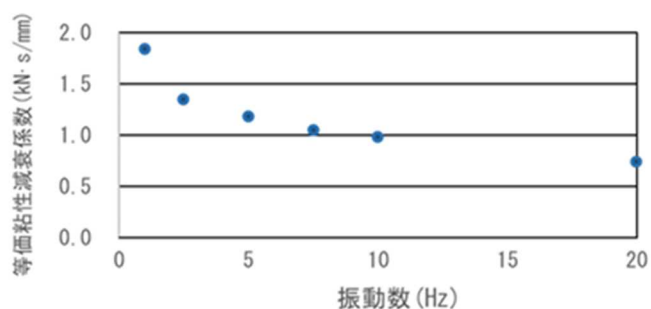
(a) 速度－減衰力関係（条件 1）



(b) 速度－等価粘性減衰係数関係（条件 1）



(c) 変位－減衰力関係(変位 ± 10 mm)
(条件 1)



(d) 振動数－等価粘性減衰係数関係
(条件 2)

図 2.7.2 試験結果

Figure 2.7.2 Test results

2.7.8 まとめ

制振装置メーカーから制振装置の特徴、使用上の留意点について回答が得られた 4 型式（弾塑性ダンパー、摩擦ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー）の調査結果から、一般の施設に制振装置を適用する場合の留意点を分析し、実用発電用原子炉施設設備に制振装置を適用する場合の留意点を整理した。

以上の結果を基に、制振装置の実用発電用原子炉施設設備への適用に係る審査を行う上で参考となる情報を「審査における留意点」として整理したことにより、制振装置に係る審査における留意点を網羅的に示すことが出来た。今後、「審査における留意点」は、制振装置に係る審査を行う上での参考情報として活用されることが期待される。

上記の調査、分析等の内容、及び「審査における留意点」は、NRA 技術報告に取りまとめる計画である。

2.8 黒津波の発生条件等の検討

2.8.1 はじめに

本項の 2.8.3(1)は、大成建設株式会社に委託した委託事業の成果を踏まえ、規制庁が防潮堤に対する津波波力評価に関する審査に資する知見としてまとめた成果である。

東北地方太平洋沖地震に伴う津波では、シルト等の細粒子を多く含んだ津波が発生した^{2.8.1, 2.8.2}。海底面にヘドロ（有機物質が吸着し含水比の高い状態のシルト及び粘土）等の堆積物が存在する沿岸海域に津波が来襲した際、黒津波が発生する可能性がある。木瀬ら(2020)^{2.8.2}は、シルトを含む波の特性として、密度が大きくなると衝突時の先端波面の角度がばらつき、大きな衝撃段波波圧を生じさせる可能性があることを示した。近年様々な機関が、黒津波を対象とした津波波力評価に関する研究を実施しているが、統一的な見解は得られていない。また、黒津波が発生する条件についても、海底のヘドロ等の堆積状況や海岸形状等の複数の要因に影響される複雑な事象であり、十分に明らかにされていない。

本研究では、黒津波が発生する可能性を簡易に評価する手法を提案する（以下「黒津波の発生可能性評価」という。）とともに、黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響を定量評価する（以下「黒津波の影響評価」という。）ことを目的とする。

本研究では、主な結果・考察を示すとともに、研究結果の意義について、重点的に示すものとした。詳細な実施方法及び結果・考察は、別の文書^{2.8.3-2.8.9}を参照されたい。

2.8.2 黒津波の発生可能性評価

本項では、黒津波が発生する可能性を簡易に評価する方法の構築を目指し、東日本大震災後に行われた、一般社団法人廃棄物資源循環学会「災害廃棄物対策・復興タスクチーム」による津波堆積物の調査結果^{2.8.10}を基に、津波堆積物中の細粒分含有率と採取地域の特性を表す指標の関係について定量化を試みた。

黒津波のサンプルとして宮城県気仙沼市で採取された黒い水は、シルト（粒径 5 μm から 74 μm の粒子）を多く含み、その密度は 1.1 g/cm^3 であった^{2.8.1, 2.8.2}。有機物が吸着し、富栄養化が進んだ細粒子（シルト及び粘土（粒径 5 μm 未満の粒子））は含水比が高くなり、津波による移動量が大きくなる^{2.8.8}。結果として、有機物質が吸着し含水比の高い状態で海底に堆積した細粒子は、津波により海底から陸上にその多くが移動・堆積したと考えられる。黒津波が発生した地域では、採取された試料における細粒子の質量割合を表す細粒分含有率が高くなり得ると仮定した。この仮定の下、黒津波が発生する可能性を簡易に評価することは、細粒分含有率が高くなる地域を簡易に評価することを意味する。

岩手県及び宮城県において採取された津波堆積物試料^{2.8.10}に含まれる細粒分含有率を用いて、細粒分含有率と採取地域の特性を表す指標の関係について定量評価を実施した。ここで、津波堆積物調査で計測される細粒分含有率は、細粒子が全土粒子の質量に占める割合を表す。海域におけるシルト域の細粒分含有率^{2.8.11, 2.8.12}よりも全体的に小さい値となるものの、陸域で計測された細粒分含有率が高いほど、細粒子を多く含む黒津波が発生する

可能性が高いと仮定した。

採取地域の特性を表す指標として、人口密度、閉鎖度指標及び河川距離を選定した。細粒分含有率として計測される細粒子は、高含水比と低含水比の各寄与分及びこれらのばらつきで構成されると考えた。ヘドロは、細粒子に有機物質が付着することで、静穏な海域に高含水比の状態で沈殿し、堆積すると考えられる。そのため、海底にヘドロが多く含まれる地域として、細粒子及び有機物質が多く流入する地域並びに細粒子及び有機物質が流出せず蓄積及び沈殿しやすい地域が考えられる。前者に関連する指標として、流入する有機物量と関係すると考えられる人口密度を選定し、後者に関連する指標として、海域の海水交換能力を数値化した指標である閉鎖度指標を選定した。また、ヘドロと異なり低含水比の細粒子は海域においては移動しにくいため、流入場所である河口と採取地点の距離に応じて堆積量が変化すると考えられる。そのため、低含水比の細粒子の堆積量に関連する指標として河川距離を選定した。人口密度 a 、閉鎖度指標 b 及び河川距離 c で細粒分含有率 P_μ を説明するモデルとして、式2.8.1を仮定した。

$$P_\mu = \alpha \log(ab) + \beta \log c + \gamma + \varepsilon_0 \quad \cdots \cdots \cdots (2.8.1)$$

右辺第一項は高含水比の細粒子の寄与分を表し、右辺第二項は低含水比の細粒子の寄与分を表す。ばらつき ε_0 は、平均 0 で標準偏差 σ の正規分布を仮定した。係数 α β 、切片 γ 及び標準偏差 σ の予測値と信頼値を、ベイズ推定に基づく回帰分析により評価した。得られた係数は確率分布を持ち、ある幅の確率値は真値がその幅に含まれる信頼値を意味する。係数が正の値である確率値は、説明変数と細粒分含有率が単調増加関係にある信頼値と一致する。この確率値を **Bayesian p-value** と呼び、対象とする係数が正である確率又は負である確率^{2.8.13} で表される。回帰分析の結果、係数 α の **Bayesian p-value** は 91.7% であり、人口密度及び閉鎖度指標を乗じた説明変数と細粒分含有率に、因果関係があることが示された。一方で、係数 β の **Bayesian p-value** は 74.2% であり、河川距離と細粒分含有率の因果関係は人口密度及び閉鎖度指標を乗じた説明変数よりも低いものであった。河川距離を 700 m と与えた場合の予測値と、80% ベイズ予測区間を図2.8.1に示す。ベイズ予測区間は、式2.8.1による予測値の信頼区間を意味する。対象となる地域の各指標から、細粒含有率の確率幅を推定することが可能である。以上より、細粒分含有率が高い地域では黒津波が発生した可能性が高いという仮定の下、人口密度及び閉鎖度指標は黒津波が発生する可能性を定量的に示す指標となりうると言える。ただし、太平洋側の限られた地域における採取結果に基づく評価であり、他地域への適用性は未確認であることに留意する。

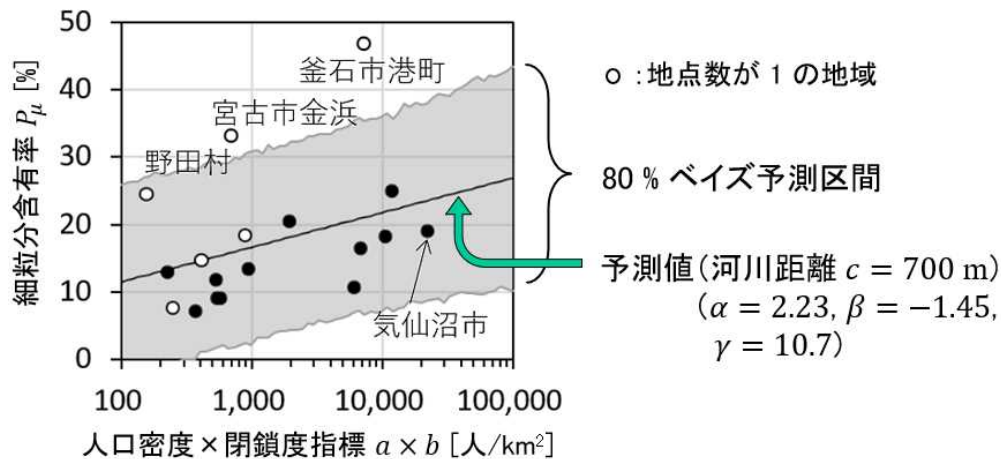


図 2.8.1 細粒分含有率の予測値及び 80 % ベイズ予測区間 (河川距離 700 m)

Figure 2.8.1 Predicted content ratio of silty sediment and 80 % Bayesian prediction interval (river distance 700 m)

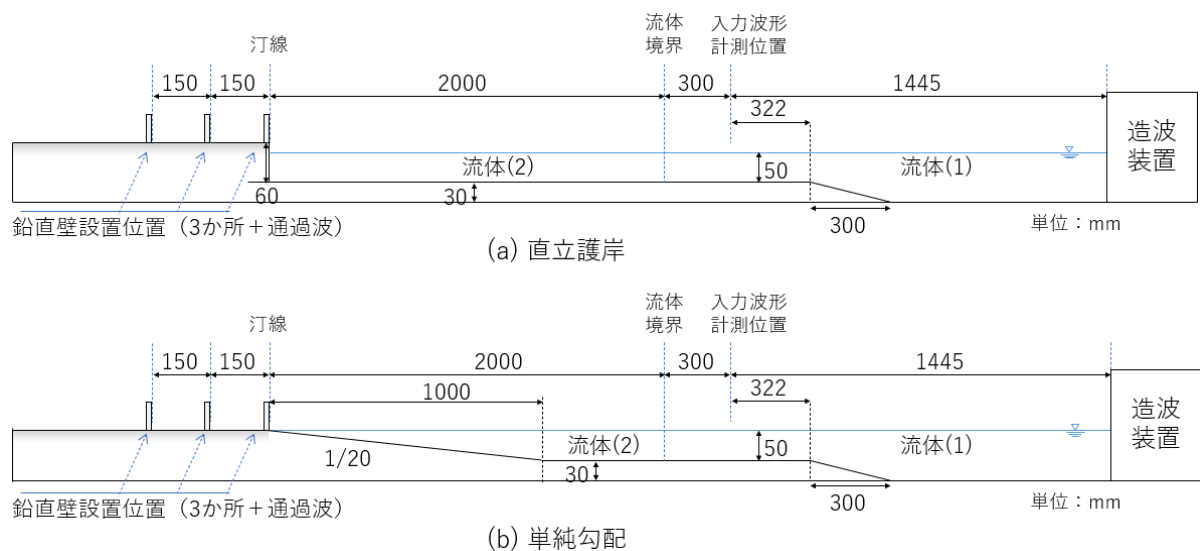
2.8.3 黒津波の影響評価

(1) 水理試験

本項は、大成建設株式会社に委託した水理試験の結果^{2.8.5, 2.8.6}である。規制庁が、防潮堤に対する津波波力評価に関する審査に資する知見として、鉛直壁前面で最大浸水深が発生した時刻以降における波力の最大値を整理した。

細粒子を含む流体密度の変化が、防潮堤を模した鉛直壁に作用する波力等に与える影響を評価した。また、粘性係数はフルード則に基づく縮尺モデルで適切に模擬できないため、実スケールのモデルを用いた数値解析を実施した。

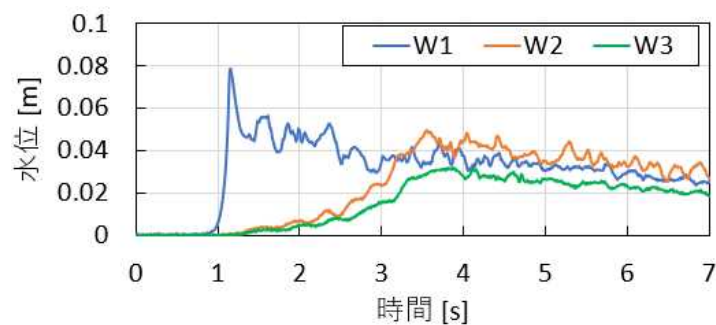
水理試験では、同じ入射津波を流体密度の異なる水に与え、鉛直壁に波を衝突させた。これにより、入力エネルギーを同一とした場合に、鉛直壁に作用する波圧等の影響を観測できる。以下、この試験を「入力エネルギーが同一の試験」という。この試験装置の概要を図 2.8.2 に示す。試験条件として、直立護岸及び単純勾配の二種類の海底地形を用いた。フルード相似則を適用した場合の想定縮尺を 1/100 とした。鉛直壁は、汀線位置、汀線から 0.15 m 陸側の位置又は汀線から 0.3 m 陸側の位置に設置した。流体(1) は淡水とし、流体(2) の流体密度を変化させた。流体境界は仕切り板があり、造波と同時に取り除く。流体(2) の流体条件は、淡水 ($\rho = 1.0$)、粘土 ($\rho = 1.05$, $\rho = 1.1$) 及び食塩 ($\rho = 1.05$, $\rho = 1.1$) の 5 種類とした。水に粘土を混ぜた泥水に含まれる細粒子は、粘土に分類されるシリカフェームを用いた。泥水と塩水は、同じ流体密度でも粘性係数が異なる。入力波形の水位時刻歴は、図 2.8.3 に示す 3 種類の波形 W1 (沖側で碎波後に崩れながら伝播)、W2 (護岸近傍で碎波)、W3 (碎波を伴わない波) を設定した。



出典) 大成建設 (2024) ^{2.8.5} の記述に基づき作成

図 2.8.2 水路縦断面図

Figure 2.8.2 Schematic of test flume

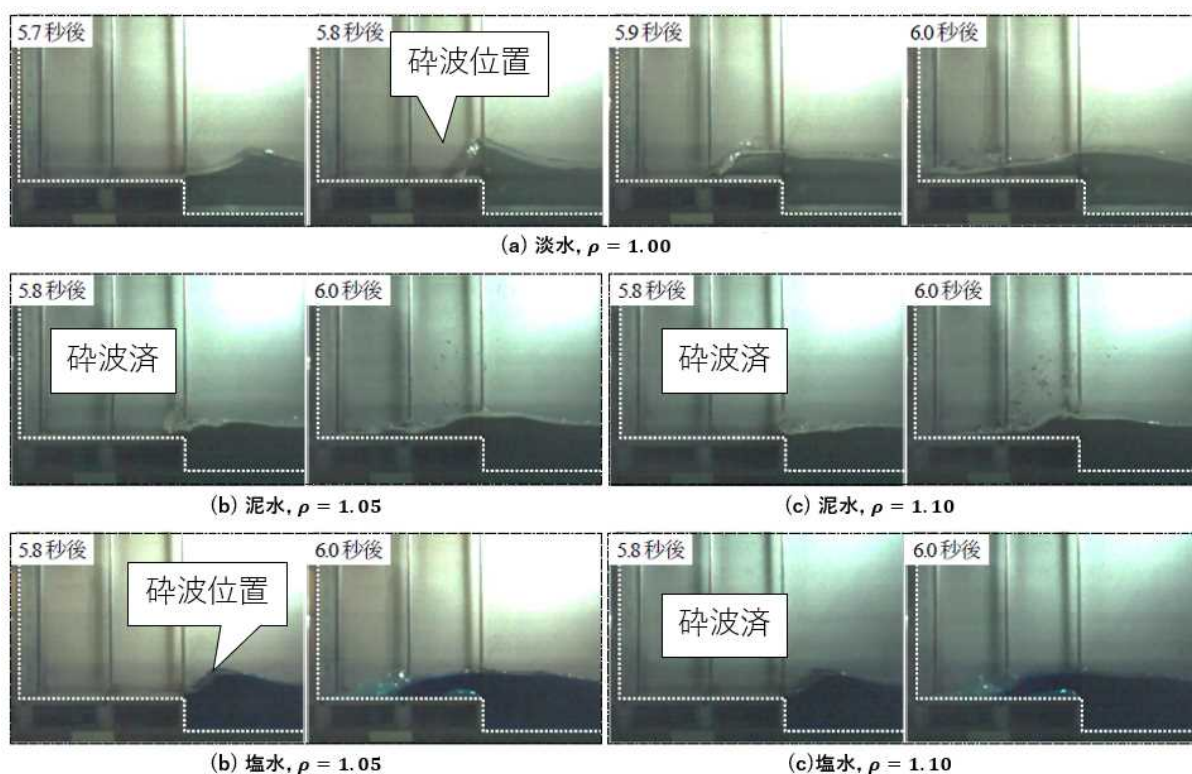


出典) 大成建設 (2024) ^{2.8.5} の記述に基づき作成

図 2.8.3 入力波形の水位時刻歴 (入力波形計測位置)

Figure 2.8.3 Water height time history of input wave (at wave input location)

流体密度と波形の関係の一例として、直立護岸の汀線から 0.3 m 離れた位置に鉛直壁を設置した条件で波 W2 を用いた場合の結果を図 2.8.4 に示す。図から、泥水及び塩水では、淡水と異なる位置で碎波が生じると共に、同時刻の先端波形についても、淡水と異なる形状となったことが分かる ^{2.8.9}。これにより、波の伝播の途中で流体密度及び粘性係数が変化することにより、碎波位置及び先端波形の変化が生じることが分かる。



出典) 橋本ら (2024) ^{2.8.9} の図を修正

図 2.8.4 流体密度と波形の関係 (水理試験)

Figure 2.8.4 Relationship between fluid density and waveform (hydraulic flume tests)

流体密度の増加に伴う影響を定量化する指標として、最大波力の増減率 r_F を式 2.8.2 のとおり算出した。ここで、 F_{ave} は鉛直壁前面で最大浸水深が発生した時刻以降における波力の最大値を 5 回の繰り返し試験で平均化した値である。以降は、これを最大波力と呼ぶ。同一条件における淡水 ($\rho = 1.0$) の最大波力 $F_{ave, \rho=1.0}$ に対する増減率を意味する。同様に、通過波最大浸水深の増減率 r_η を式 2.8.3 のとおり算出した。 η_{ave} は、3 回の繰り返し試験で得られた通過波浸水深の最大値 η (防潮堤設置位置) の平均値である。以降は、これを通過波最大浸水深と呼ぶ。

$$r_F = \frac{F_{ave}}{F_{ave, \rho=1.0}} \dots\dots\dots (2.8.2)$$

$$r_\eta = \frac{\eta_{ave}}{\eta_{ave, \rho=1.0}} \dots\dots\dots (2.8.3)$$

流体密度、最大波力及び通過波最大浸水深の増減率の関係の一例として、直立護岸の汀線から 0.3 m 離れた位置に鉛直壁を設置した条件の結果を図2.8.5に示す。橋本ら^{2.8.9}が示したとおり、最大波力の増加は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まった。単純勾配や他の鉛直壁設置位置での場合も、同様に最大波力の増加は流体密度の増分の範囲内に収

まった。この要因として、流体密度の増加に伴い浸水深が低減したことが示されている。図2.8.5に示すとおり、通過波最大浸水深は全てのケースにおいて1を下回り、淡水のそれよりも低下した。静水圧仮定において、波力は密度と浸水深の二乗の積で表されるため、浸水深の低減は最大波力の低減の要因となる。ただし、砕波しない W3 を用いたケースでは、塩水 ($\rho = 1.05$) のケースで、最大波力の増減率が約 1.1 となり、流体密度の増分 (1.05) 以上の波力増加が生じた。直立護岸の汀線から 0.3 m 離れた位置に鉛直壁を設置し、砕波しない W3 を用いた条件について、淡水 ($\rho = 1.0$)、塩水 ($\rho = 1.05$)、塩水 ($\rho = 1.1$) の条件における波力時刻歴及び通過波浸水深時刻歴を図2.8.6に示す。平均波力を表す赤線は、同時刻での平均値であることに留意する。最大波力は全てのケースで、着水時に生じる荷重を表す第二ピークで生じ、流体密度が小さいほど最大波力のばらつきが大きくなった。流体密度の増分以上の波力増加が生じた要因として、着水に伴い発生する波力に含まれる不確かさの影響が考えられる。また、流体密度の増加に伴う粘性係数の増加により、水塊が砕けず着水することで、最大波力が増加した可能性も考えられる。加えて、塩水でW3 を用いた条件では砕波位置は変化しなかったが、流体密度の増加は砕波位置及び先端波形の変化も引き起こすため、これらも最大波力に影響を与えうる。条件によっては、流体密度の増分以上に最大波力が増加しうることに留意する。なお、粘性係数が塩水と比べて大きい泥水では、底面摩擦が大きくなることでエネルギーが減少し最大波力が塩水より減少したと考えられる。ただし、粘性係数はフルード則に基づく縮尺モデルで適切に模擬できず、実規模のスケールに近づくほど粘性係数の差の影響は小さくなることに留意する。

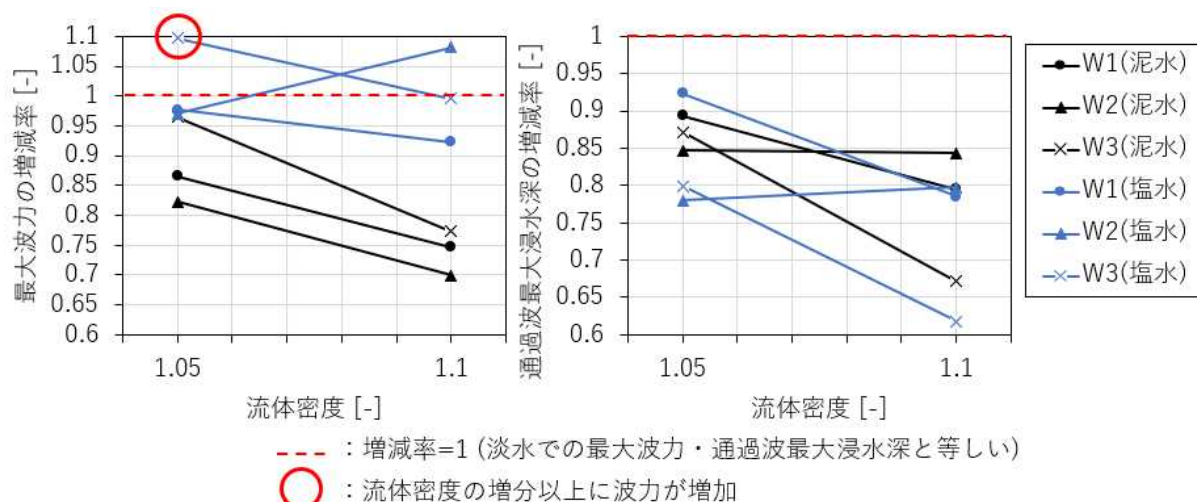


図 2.8.5 流体密度と最大波力の増加率及び通過波最大浸水深の増加率の関係 (水理試験)

Figure 2.8.5 Relationship among fluid density and increase rates of maximum wave force and maximum run-up inundation depth (hydraulic flume tests)

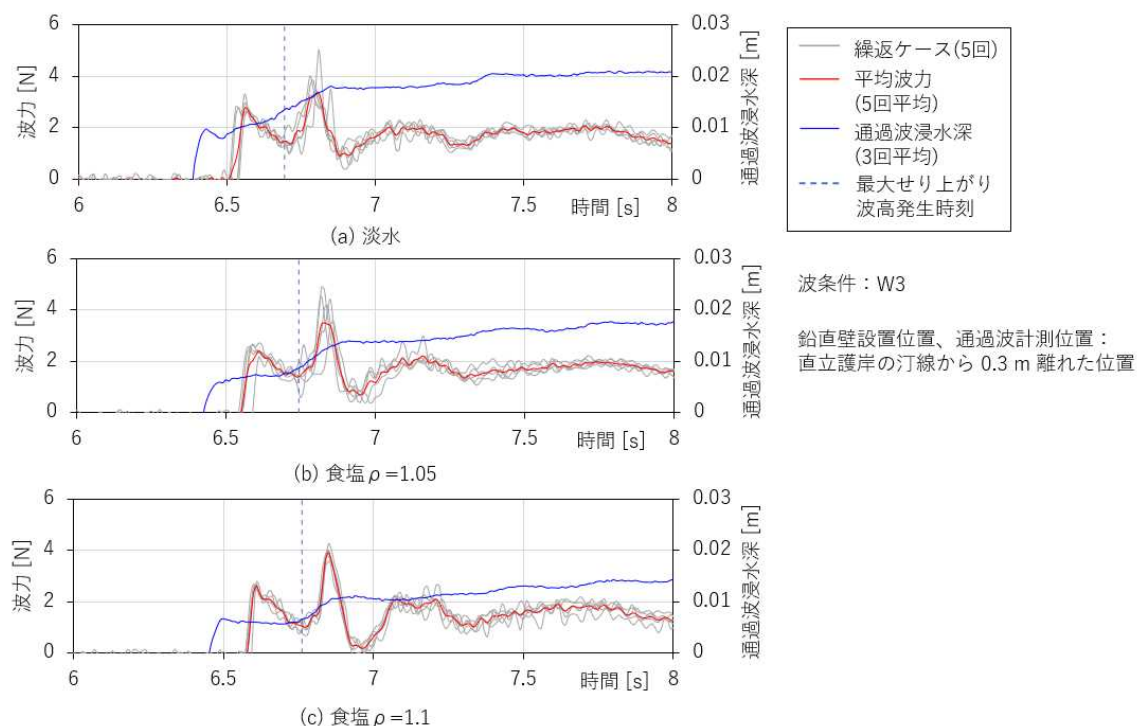


図 2.8.6 波力時刻歴及び通過波浸水深時刻歴

Figure 2.8.6 Wave force time history and run-up inundation depth time history

(2) 数値解析

次に、数値解析の概要を示す。現実的な流体密度と粘性係数の関係を用いた評価を行うため、流体解析コード **OpenFOAM** を用いた数値解析に基づき、実スケールで流体密度と最大波力の関係性を評価した。実スケールでの数値解析に先立ち、水理試験で得られた最大波力や通過波最大浸水深を当該コードでおおむね再現可能であることを確認した。しかしながら、図2.8.7に示すとおり、流体密度が変化しても、先端波形の形状や砕波の有無は変化しなかった。数値解析では、流体密度及び粘性係数の変化に伴う、砕波位置及び先端波形の変化を適切に模擬できない可能性が考えられる。

実スケールでの数値解析において、流体密度は最大で 1.2 g/cm^3 までを想定した。最大密度は、土砂を対象とした氾濫水密度が最大で 1.2 g/cm^3 に達するという知見^{2.8.14} を参考に設定した。加えて、高濃度のサスペンション粒子を含む泥質流体である **Fluid mud** については、浮遊物質濃度が最高で 300 g/L 程度であり^{2.8.15, 2.8.16}、密度 2.27 g/cm^3 のシリカフュームでは最大密度が 1.2 g/cm^3 程度となることも考慮した。粘性係数については、シリカフュームの粘性試験及び川崎港京浜運河での計測結果^{2.8.4, 2.8.5}を用いた。図2.8.2の縮尺モデルを 100 倍した計算領域を用いて、試験と同様に、同じ入射津波を伝播途中で流体密度の異なる水に与える条件で数値計算を行った。数値解析で用いる入力津波は図2.8.8のとおり、水理試験と異なり単純な孤立波状の形状で、砕波の有無が異なるものとした。W20 は汀線から 10 m 沖合で砕波し、W10 は砕波しない。解析条件として、堤体位置及び海底

形状を変化させた。鉛直壁は汀線位置又は汀線位置から 30 m 離れた位置に設置した。数値解析の最小メッシュサイズは 0.5 m とした。

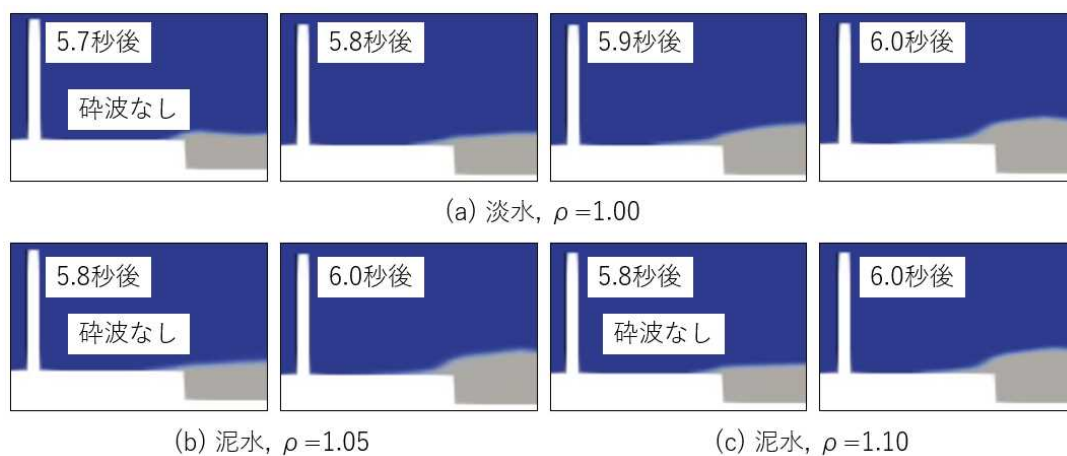


図 2.8.7 流体密度と波形の関係（数値解析）

Figure 2.8.7 Relationship between fluid density and waveform (numerical analysis)

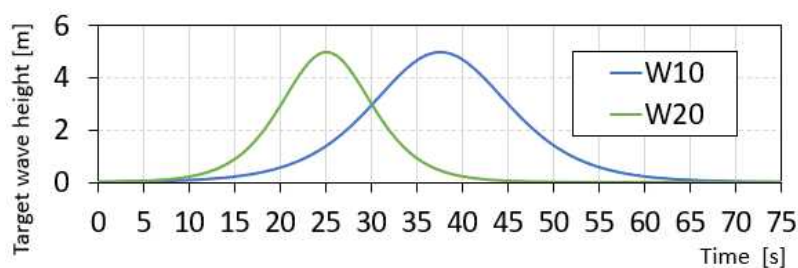


図 2.8.8 数値解析で用いる入力波形（入力波形計測位置）

Figure 2.8.8 Input waves used in numerical analysis (at wave input location)

解析結果の例として、直立護岸における、流体密度と最大波力の増減率の関係を図 2.8.9 に示す。図には塩水による試験結果も併記した。水理試験の結果と同様に、最大波力の増減率は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まった。また、水理試験と同様に、図中の赤丸を付けたケースのように、流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合もあった。

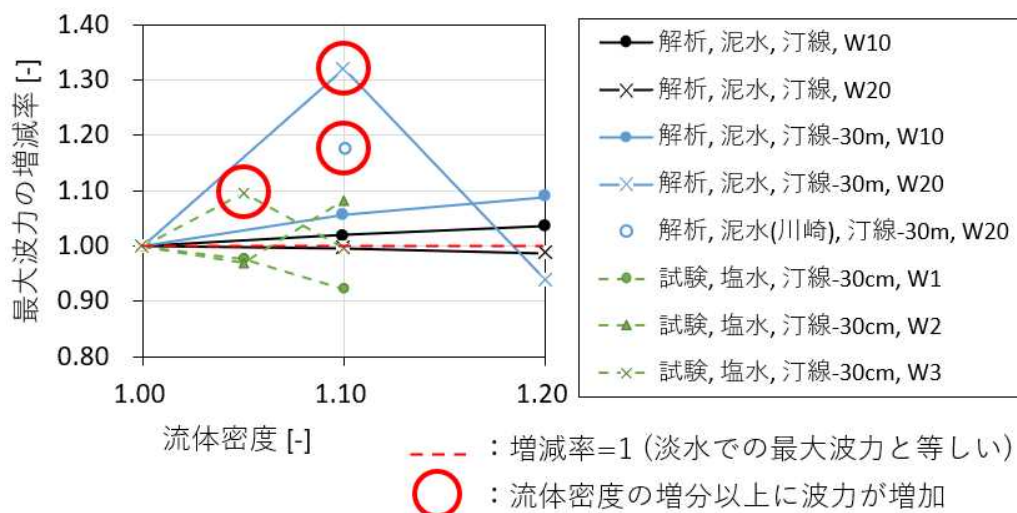


図 2.8.9 流体密度と最大波力の増減率の関係（直立護岸）

Figure 2.8.9 Relationship between fluid density and increase rate of wave force (zero slope)

以上より、入力エネルギーが同一の試験及び数値解析では、最大波力の増加の傾向は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まった。なお、条件によっては流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合があったが、その要因を明らかにするには至らなかった。今後その要因を明らかにし、黒津波を対象とした最大波力の評価手法を構築することを目指す。

例えば、本研究で実施した水理試験及び数値解析は、黒津波特有の津波が沿岸域に伝播する過程で海底の細粒子を含有し、流体密度が増加する現象を模したものであった。本研究の結果から、鉛直壁前面で最大浸水深が発生した時刻以降における波力を対象とする場合については、黒津波の発生を考慮しない最大波力 F_{sea} に対し流体密度の増分 ρ_{black}/ρ_{sea} を乗じることで、黒津波の発生を考慮した最大波力 F_{black} をおおむね保守的に評価できる可能性が示唆された（式 2.8.4）。 ρ_{black} は黒津波で想定される流体密度で、 ρ_{sea} は海水の流体密度を表す。

$$F_{black} \geq \frac{\rho_{black}}{\rho_{sea}} \cdot F_{sea} \quad \dots\dots\dots (2.8.4)$$

2.8.4 まとめ

黒津波の発生可能性評価に係る知見として、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標と因果関係があり、黒津波の発生を簡易に推定するに当たり有用な指標となり得ることを示した。人口密度及び閉鎖度指標は、公開情報から容易に評価可能な指標である。今回示した細粒分含有率の推定手法及び評価式は、黒津波の発生可能性の判断に重要な役割を果たすことが期待される。

黒津波の影響評価に係る知見として、入力エネルギーが同一の条件の範囲内では、最大波力の増加は流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。ただし、水理試験

及び数値解析ともに、条件によっては流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合があります、今後その要因を明らかにする必要がある。今回得られた知見は、黒津波を対象とした最大波力の評価手法を構築するにあたり、重要な役割を果たすことが期待される。

2.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

2.9.1 はじめに

本研究では、令和3年度から令和6年度にかけて、設置状況を考慮した衝撃評価に係る研究の一部及び形状特性を考慮した衝撃評価に係る研究を鹿島建設に委託して実験及び再現解析を実施した^{2.9.1-2.9.4}。

設置許可基準規則^{2.9.5}では、第6条において様々な事象に対する衝撃評価が求められている。また、ガイド等^{2.9.6-2.9.8}では、衝撃評価に関係する確認事項が示されている。

物体衝突に係る既往研究の多くは、地上の建物・構築物を想定した平板構造や簡略化した構造物を対象にしたものがほとんどである。一方、原子力施設には多くの地中設置の構造物が存在し、岩盤内又は上載部を土やマンメイドロック等で埋め戻された地盤に設置されている。また、原子力施設にある実際の構造物は様々な形状を有しているものもあり、現実的な形状を考慮した衝撃評価も必要となる。

そこで、本研究では、設置状況・形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価に係る知見の拡充のため、関連する既往知見を調査するとともに、設置状況・形状特性を考慮した衝突実験を実施し損傷状況を確認した。また、衝突実験の再現解析を実施し耐衝撃評価手法の妥当性を確認した。具体的な内容については以下のとおりである。

2.9.2 設置状況を考慮した衝撃評価として、岩盤及びマンメイドロックを模した試験体に対して半球型剛飛翔体（球状飛翔体及び半球型の先端を有する円柱飛翔体）の衝突実験を実施し、試験体の損傷状況を把握するとともに、実験結果を用いて既往貫入評価式、理論的評価手法及び数値解析手法の適用性を確認した。

2.9.3 形状特性を考慮した衝撃評価として、建物・構築物の外壁を模した鉄筋コンクリート製（以下「RC製」という。）で同じ板厚の平板試験体及びアーチ試験体への剛飛翔体の衝突実験を実施し、平板とアーチ構造の損傷状況を比較し、形状の差異による影響を把握するとともに、実験結果を用いて既往の局部損傷評価式及び数値解析手法の適用性を確認した。

以降に、各研究の成果概要を示す。

2.9.2 設置状況を考慮した衝撃評価

設置状況を考慮した衝撃評価として、岩盤等試験体への高速貫入実験を実施し、損傷状況を把握するとともに、実験結果を用いて提案されている既往貫入評価式、理論的評価手法及び数値解析手法の適用性を確認した。本研究については、一部を鹿島建設に委託^{2.9.1,2.9.2}して実施するとともに、規制庁による内作及び請負事業で実施したものである。

本研究の実施内容の一例を以下に示す。2.9.2(1)及び2.9.2(2)に示す内容は、規制庁による内作及び請負事業で実施した成果である。ここに示す以外に、委託研究として、貫入実験の特殊ケースとして、超低強度供試体に対する貫入実験及び斜め貫入実験を実施しており、詳細は委託報告書^{2.9.1,2.9.2}を参照されたい。

(1) 岩盤及びモルタルに対する半球型剛飛翔体の貫入事象に関する実験的研究

本研究では、物体衝突に伴う岩盤等の損傷メカニズムを明確にするため、岩盤及びマンメイドロックを想定して、来待石及び強度調整モルタル試験体等を用いて衝突速度 50～160m/s における半球型剛飛翔体の衝突実験を実施した。来待石は入手が容易で品質が比較的均一であることから採用した。また、強度調整モルタルは想定一軸圧縮強さ $1.5 \cdot 20\text{MPa}$ とし、様々な圧縮強さに対する衝突実験を実施した。衝突実験から得られた貫入量と既往貫入評価式による評価結果を比較し、当該評価式の適用性について検討した。ここでは、研究内容の一例として、規制庁で実施した来待石に対する半球型剛飛翔体の衝突実験結果^{2.9.9}を示す。図 2.9.1 に実験概要及び実験結果の一例として、a)実験装置、b)来待石試験体、c)半球型剛飛翔体及び d)衝突速度 150m/s における損傷状況をそれぞれ示す。衝突実験は、ガス蓄圧・急速開放式の発射装置を用いて実施した。試験体として来待石（凝灰質砂岩、一軸圧縮強さ約 30MPa）を用いた。来待石は 500mm 角で、衝突により来待石試験体の崩壊を防止する観点から衝突面及びその裏面を除いた上下面及び側面の 4 面に炭素繊維シートを接着補強した。飛翔体は、先端形状を半球型とし衝突で飛翔体自体が変形しない剛構造とし、炭素工具鋼鋼材 JIS G 4401 SK4 を切削加工して製作した。飛翔体直径は 25mm、質量は 508g である。実験の結果、衝突速度 150m/s では、半径約 70mm のクレーターが形成された（図 2.9.1 d）。図 2.9.2 に実験結果と既往評価式の比較を示す。既往の貫入評価式として、Bernard and Creighton 式^{2.9.10}、TM5-855-1 式^{2.9.11}及び Young 式^{2.9.12}による評価結果を示している。Bernard and Creighton 式は、実験結果に対して良い対応を示し、既往の貫入評価式を用いた評価の適用性が確認された。

(2) 弾頭型剛飛翔体の理論的貫入評価手法の提案

物体衝突に対する貫入評価については、力学モデルに基づき、衝突過程を単純なモデルに置き換えて評価する理論的貫入評価手法も提案されている。既往の理論的貫入評価手法においては、衝突物の先端形状が半球型、円錐型及び平坦型について提案されている^{2.9.13}が、既往の衝突実験例の多い弾頭型（尖頭型）については提案されていない。本研究では、弾頭型の貫入事象を簡易評価する事を目的に、弾頭型の幾何学的形状関数を提案するとともに、既往の実験結果を用いてその適用性を確認した^{2.9.9, 2.9.14-2.9.16}。

力学モデルに基づく理論的貫入評価式として、一般社団法人防衛施設学会より発刊されている「衝突を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—」に示されている手法（以下「防衛施設学会の手法」という。）^{2.9.13}を用いる。

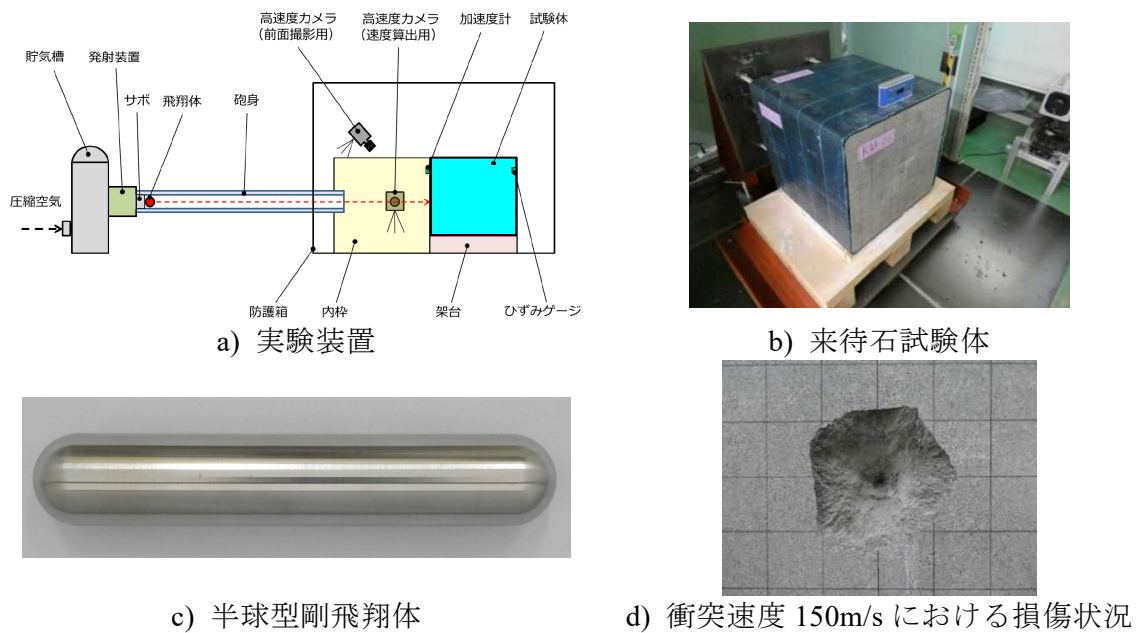
提案する弾頭型の先端形状模式図を図 2.9.3 に示す。 L_1 は弾頭先端長さ、 L_2 は飛翔体中心から曲率半径中心までの距離を示し、式(2.9.1)及び式(2.9.2)で計算される。先端の形状として曲率半径 R を有する弾頭型先端形状の形状関数を式(2.9.3)で定義する。

$$L_1 = \sqrt{(\psi D)^2 - \left(\psi D - \frac{D}{2}\right)^2} = D \sqrt{\psi - \frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots (2.9.1)$$

$$L_2 = \psi D - \frac{D}{2} = D \left(\psi - \frac{1}{2} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (2.9.2)$$

$$y(x) = \sqrt{(\psi D)^2 - (L_1 - x)^2} - L_2 \quad \cdots \cdots \cdots (2.9.3)$$

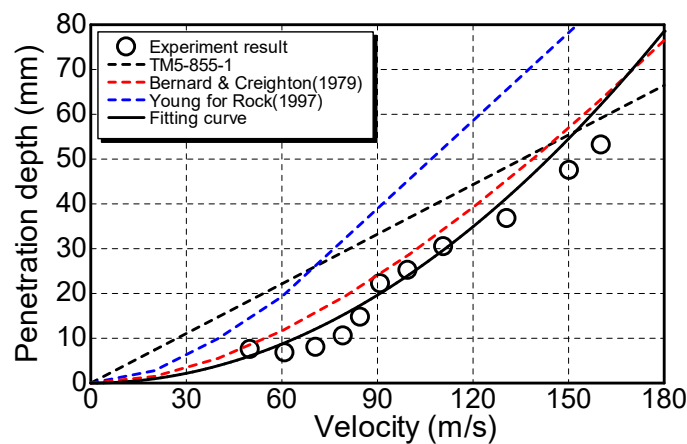
ここで、 D ：衝突物半径、 x ：貫入量、曲率半径 $R=\psi D$ とする。式(2.9.3)の形状関数を防衛施設学会の手法に組み込み、弾頭型剛飛翔体の理論的貫入評価式による評価を実施した。図 2.9.4 に既往実験結果^{2.9.17}と提案する弾頭型の理論的貫入式による評価結果及び衝撃解析ソフト LS-DYNA(v971 R7.1.2 倍精度版)を用いた数値解析結果の比較を示す。最終貫入量に着目すると、理論的評価式及び数値解析を用いた貫入評価結果は実験結果 0.79m とほぼ一致した。このことより、本研究で提案する弾頭型形状関数を用いた理論的貫入評価式の適用性が確認された。



出典) 太田ら (2025)^{2.9.9}

図 2.9.1 実験概要及び実験結果の一例

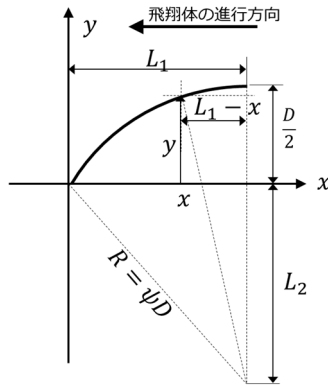
Figure 2.9.1 Experimental summary and example of experimental results



出典) 太田ら (2025)^{2.9.9}

図 2.9.2 貫入量評価結果の比較

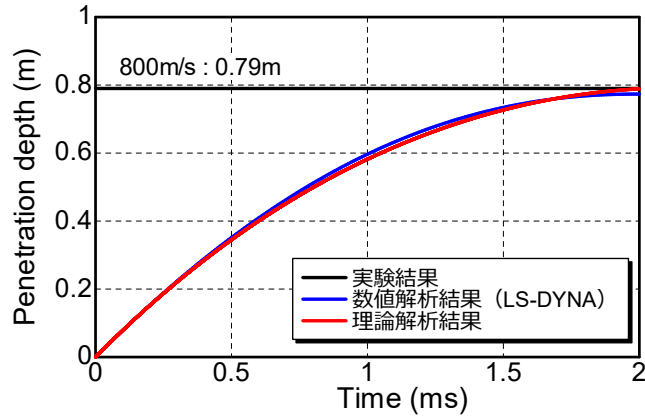
Figure 2.9.2 Comparison of penetration evaluation results



出典) 太田ら (2025) 2.9.16

図 2.9.3 弾頭型の先端形状
模式図

Figure 2.9.3 Ogive-nose model



出典) 太田ら (2025) 2.9.16

図 2.9.4 既往実験結果と弾頭型理論貫入評価結果及び
数値解析結果の比較

Figure 2.9.4 Comparison of experimental results with
warhead type theoretical penetration evaluation results and
numerical analysis results

2.9.3 形状特性を考慮した衝撃評価

形状特性を考慮した衝撃評価手法の確認のため、建物・構築物の外壁を模した平板試験体及びアーチ試験体への衝突実験を実施し、形状の違いによる損傷状況の差異を整理し、既往実験式及び数値解析手法の適用性を確認した。実験は、RC 製の板厚 55mm・高さ 1,000mm 程度の小型平板試験体及びアーチ試験体並びに板厚 200mm・高さ 2,000mm 程度の中型平板試験体及びアーチ試験体への衝突実験を実施し、貫通事象及び裏面剥離事象を把握した。また、小型試験体については、曲率・鉄筋比の影響についても確認した。

本研究については、令和 3 年度から令和 6 年度にかけて鹿島建設に委託して実験及び再現解析を実施した^{2.9.1-2.9.4}。また、規制庁は平板構造及びアーチ構造に対する簡易評価式を提案するとともに当該実験結果を用いて、その適用性を確認した^{2.9.18, 2.9.19}。

ここでは、研究内容の一例として、中型の平板試験体及びアーチ試験体に対する裏面剥離事象に係る実験的検討結果を示す^{2.9.18, 2.9.19}。

(1) 中型実験概要

図 2.9.5 に中型実験の概要及び実験結果の一例として、a) 中型平板試験体外観及び衝突速度 80.7m/s における裏面剥離状況、b) 中型 1/4 アーチ試験体外観及び衝突速度 81.6m/s における裏面剥離状況、c) 剛飛翔体をそれぞれ示す。剛飛翔体は、衝突に伴い変形しない剛構造とした。先端形状は直径 150mm の平坦型で、質量は 11kg とした。平板試験体及びアーチ試験体の板厚は 200mm、高さ 2,094mm とした。アーチ試験体は、アーチ半径 2000mm の円筒から中心角 90°の 1/4 を切り出したモデルとし、板厚/半径比は 0.1 とした。RC 製試験体の固定条件は底部のみボルトにて固定し、上面及び側面は自由端とした。衝突位置は試験体の中心とした。実験ケースは、平板試験体及び 1/4 アーチ試験体ともに、裏面剥離限

界速度を算出する既往実験式である Chang 式^{2.9.20}を用いた板厚 200mm に対する評価結果である裏面剥離限界速度 65m/s を中心に 5 水準の衝突速度とした。

(2) 簡易評価式の提案

平板構造に対しては、多くの局部損傷評価式が提案されている。しかし、アーチ構造等の平板構造以外の形状については評価式がない。そこで、平板及びアーチ構造に対する簡易評価を目的に、動的たわみに着目した定式化を行い、損傷状況の評価値に日本建築学会「建築物の耐衝撃設計の考え方」^{2.9.21}の許容値を取り入れた評価手法を新たに検討した。ここでは、試験体の衝突位置の断面を単純な梁及びアーチとし、その中央に外力が作用すると仮定する。また、衝撃作用時のたわみ曲線を静的たわみ曲線と同じ線形と仮定すると、動的たわみが生じるのに必要な外力 F は次式で与えられる。

$$F = ku \quad \dots\dots\dots (2.9.4)$$

ここで、 k ：部材のばね定数、 u ：最大たわみである。

部材に生じる全ひずみエネルギー U_i と、衝突エネルギー U_k がほぼ等しい ($U_i = U_k$) と仮定すると、最大たわみは次式で与えられる。

$$u = \sqrt{\frac{mv^2}{k}} \quad \dots\dots\dots (2.9.5)$$

ここで、 m ：衝突物の質量、 v ：衝突速度である。

この時、はり及びアーチのばね定数は次式で与えられる。

$$\text{はり} \quad k = \frac{48EI}{L^3} \quad \dots\dots\dots (2.9.6)$$

$$\text{アーチ} \quad k = 384EI/l^3 \left(\frac{3}{16} + 75 \frac{l}{l^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.9.7)$$

ここで、 E ：コンクリートのヤング率、 I ：部材の断面二次モーメント、 L ：部材長さ、 l ：弦の長さである。

一般社団法人日本建築学会「建築物の耐衝撃設計の考え方」^{2.9.21}において RC 部材の曲げ破壊の場合の応答限界値として、小損傷限界に対して材端回転角 $\theta=1/100$ 、中損傷限界に対して材端回転角 $\theta=1/60$ としている。簡易評価では、この値を参照し、小損傷限界速度及び中損傷限界速度を評価した結果を表 2.9.1 に示す。ただし、アーチについては、奥行き方向の材端回転角を算出している。

(3) 実験結果とまとめ

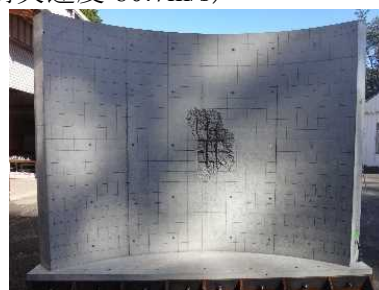
中型実験結果と平板を対象にした Chang 式による裏面剥離限界速度の評価結果との比較を図 2.9.6 に示す。板厚 2,000mm に対する Chang 式の評価結果である裏面剥離限界速度 65m/s 近傍に着目すると、平板試験体及び 1/4 アーチ試験体ともに裏面剥離には至っていない。図 2.9.6 に示す衝突速度 80m/s 程度の実験結果では、両構造とも裏面剥離となってお

り、今回の実験条件においては、**Chang** 式が適用できることが確認された。また、平板構造及びアーチ構造における形状特性の差異による裏面剥離限界速度への影響は確認されなかった。これらの傾向は、小型試験体についても同様であった。

提案する簡易評価式と比較すると、平板については、実験結果では衝突速度 67.1～80.7m/s の間に裏面剥離限界速度があることから、71m/s と評価した簡易評価における中損傷限界速度は、裏面剥離限界速度とおおむね対応した。アーチ構造については、日本建築学会の許容値と整合がとれず、今後更なる検討が必要である。



a) 中型平板試験体実験前外観
及び裏面剥離状況（衝突速度 80.7m/s）



b) 中型アーチ試験体実験前外観
及び裏面剥離状況（衝突速度 81.6m/s）



c) 剛飛翔体

出典) 鹿島建設 (2023) ^{2.9.2}

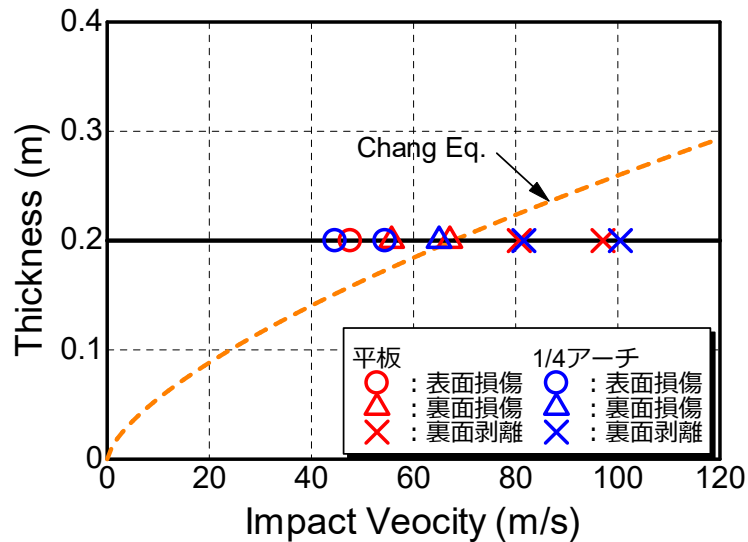
図 2.9.5 中型実験の概要及び実験結果の一例

Figure 2.9.5 Overview of the medium scale experiment and an example of the experimental results

表 2.9.1 簡易評価結果

Table 2.9.1 Simplified evaluation results

	想定損傷状況	
	小損傷限界速度	中損傷限界速度
平板	42m/s	71m/s
1/4 アーチ	35m/s	58m/s



出典) 鹿島建設 (2023) ^{2.9.2} のデータを基に再整理し作図

図 2.9.6 実験結果と Chang 式による評価結果の関係

Figure 2.9.6 Relationship between experimental results and evaluation results using Chang equation

2.9.4 まとめ

設置状況を考慮した衝撃評価に関する研究では、来待石、モルタル等試験体への衝突速度 50~160m/s における先端形状が半球型の剛飛翔体貫入実験を実施し、試験体の損傷状況に係る知見を蓄積するとともに、実験結果を用いて貫入量に係る既往実験式の適用性を確認した。さらに、既往の力学モデルに基づく理論的貫入評価式において示されていない先端形状弾頭型について形状関数を提案した。既往の弾頭型の飛翔体貫入実験結果に対して提案する形状関数を用いた理論的貫入評価を実施し、貫入量評価に適用できることを確認した。

形状特性を考慮した衝撃評価に関する研究では、建物・構築物の外壁を模した小型及び中型の平板・アーチ構造試験体への衝突実験を実施し、構造の差異による裏面剥離特性等について検討した。その結果、本研究の実験条件においては、裏面剥離特性について平板構造とアーチ構造に大きな差異はないことを確認した。また、平板構造及びアーチ構造に

ついて動的たわみに着目した定式化から新たに簡易評価手法を提案し、適用性を確認した。損傷状況の評価値には一般社団法人日本建築学会「建築物の耐衝撃設計の考え方」^{2,9,21}の許容値を取り入れた。平板については、実験結果と比較して簡易評価手法による中損傷限界速度は、裏面剥離限界速度とおおむね対応した。アーチ構造については、日本建築学会の許容値と整合がとれず、今後更なる検討が必要である。

設置状況を考慮した建物・構築物の衝撃評価については、先端形状の影響を確認するため先端形状円錐型及び平坦型の貫入事象に係る知見を拡充する必要がある。形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価については、衝撃作用時間の長くなる柔飛翔体衝突に対する平板・アーチの耐衝撃性に係る知見を拡充する必要がある。

2.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

本項では、電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験、再現解析及び計器用接地形変圧器の単体衝撃応答解析を実施し、衝撃振動に対する応答解析手法の適用性を確認した結果を報告する。本項のうち、電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験及び再現解析に係る内容は、学校法人東京電機大学との共同研究「機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究」

（令和2年度から令和4年度まで）及び学校法人東京電機大学並びに国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との共同研究「機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究（その2）」（令和5年度から令和7年度まで）として実施したものである。全ての項目について、主として規制庁が研究計画の立案、試験、解析及び結果の分析等を実施し、それぞれの段階で共同研究相手方から技術的助言を受けながら研究を行った。本項では、規制庁が実施した内容を説明する。

2.10.1 はじめに

設置許可基準規則第42条（特定重大事故等対処施設）では、特定重大事故等対処施設において、原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムに対してその重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないことを求めている。原子力施設へ大型航空機が衝突する場合を想定すると、衝撃荷重が建屋を伝播し、これによって建屋内の設備が衝撃振動を受けると考えられる。この衝撃振動によって建屋内の設備が損傷するおそれがあることから、「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド（原規技発第1409178号（平成26年9月17日原子力規制委員会決定）」^{2.10.1}では、評価対象設備に対して、衝撃荷重による振動により必要な機能を喪失しないかどうかを評価すると記載している。

しかしながら、航空機の衝突に対する建屋内設備の安全性評価手法に関する既往知見^{2.10.2}は、主として設備の衝撃耐力に着目したものに限られるとともに、建屋内設備の衝撃応答評価手法に係る知見もほとんど存在しない。設備の衝撃応答評価にあたっては、衝撃振動と同様の振動現象の応答解析手法である地震応答解析の手法を適用することが考えられるが、衝撃振動では地震動と異なる高振動数成分の影響や数百 m/s^2 程度の大きな衝撃加速度の影響等の差異を考慮する必要がある、これを踏まえて地震応答解析手法の衝撃応答解析への適用性を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、電気盤を模擬した試験体を用い、衝撃加振試験及び地震応答解析手法による再現解析を実施し、地震応答解析手法の衝撃応答解析への適用性を確認した。また、既往の衝撃加振試験^{2.10.3}により、ガタ系を有する設備である計器用接地形変圧器では、レールと台車間の衝突等の衝撃振動特有の挙動が生じることが明らかになっている。このようなガタ系を有する設備の衝撃振動特有の挙動を考慮した衝撃応答解析を実施し、試験結果と比較することで衝撃応答解析手法の適用性を確認した。

本項の構成は、以下の通りである。はじめに、電気盤を模擬した試験体を用いた衝撃加

振試験とその再現解析の結果を比較することで、地震応答解析手法の衝撃応答解析への適用性について論じた。続けて、ガタ系を有する設備単体の衝撃応答解析を実施し、衝撃加振試験とその再現解析の結果を比較することで、ガタ系を考慮した衝撃応答解析手法の適用性を論じた。さらに、非線形応答が生じる内蔵機器やガタ系を有する内蔵機器のような衝撃応答解析を適用することが難しい設備を有する電気盤等の耐衝撃性を評価するため、設備単体に対する衝撃加振試験と電気盤の衝撃応答解析の組み合わせによる耐衝撃性の評価体系について論じた。

2.10.2 電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験及び再現解析

(1) 衝撃加振試験

① 試験体の製作

電気盤を模擬した試験体を製作し試験に供した。試験体の概要を図 2.10.1 に示す。試験体は、試験場の制約から実機電気盤筐体を高さ方向のみ約 1m に縮小したものとし、試験体の内部にファン、電源装置、指示計等の実機及びサーバ計算機を模擬したダミーウェイトを収納した。ファン、電源装置、指示計は試験体の筐体にボルトで固定した。また、ダミーウェイトはスライドレール上に設置する構造であり、スライドレールは筐体にボルトで固定した。

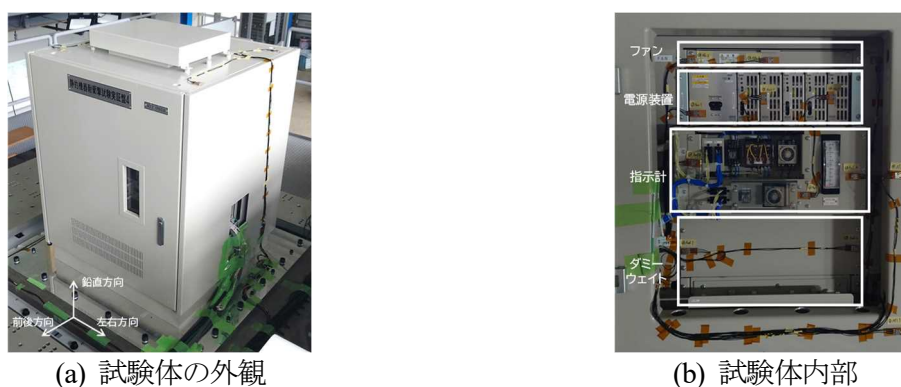


図 2.10.1 電気盤を模擬した試験体の概要

Figure 2.10.1 Schematic diagram of the test specimen modeled an electrical cabinet

② 試験方法

上記の試験体を用いて、正弦波掃引試験、ショック波試験及びランダム波試験を実施した。正弦波掃引試験では、5Hz から 500Hz までの帯域で正弦波掃引を実施することで、試験体の振動特性を明らかにした。ショック波試験は、6ms 及び 12ms の 2 通りの加振継続時間（パルス幅）の台形波を振動台により入力することで実施し、パルスの衝撃振動に対する試験体の応答や、パルス幅の差異による応答の変化を把握した。また、ランダム波試験は、15.2～67.2Hz 及び 60.9～268.8Hz の 2 通りの振動数範囲が卓越するランダム波を

振動台により入力することで実施し、衝撃の振動数範囲における試験体の応答や、入力振動数範囲の差異による応答の変化を把握した。ショック波試験及びランダム波試験では入力波の最大加速度を 20m/s^2 とした。

ショック波、ランダム波の入力時刻歴及び正規化応答スペクトルを図 2.10.2 及び 2.10.3 に、試験ケースを表 2.10.1 に示す。試験装置については参考文献^{2.10.4}に詳細な情報を記載している。

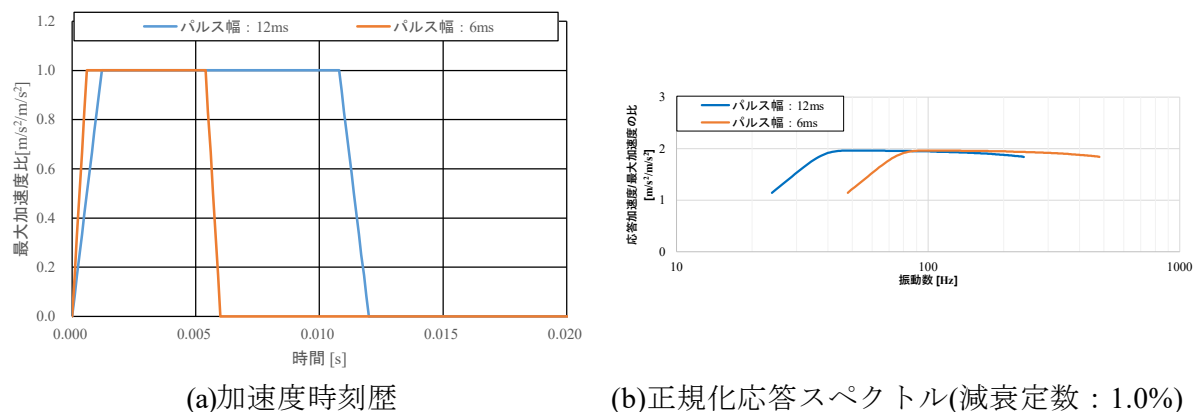


図 2.10.2 ショック波の加速度時刻歴及び正規化応答スペクトル

Figure 2.10.2 Acceleration time histories and normalized response spectra of the shock wave test

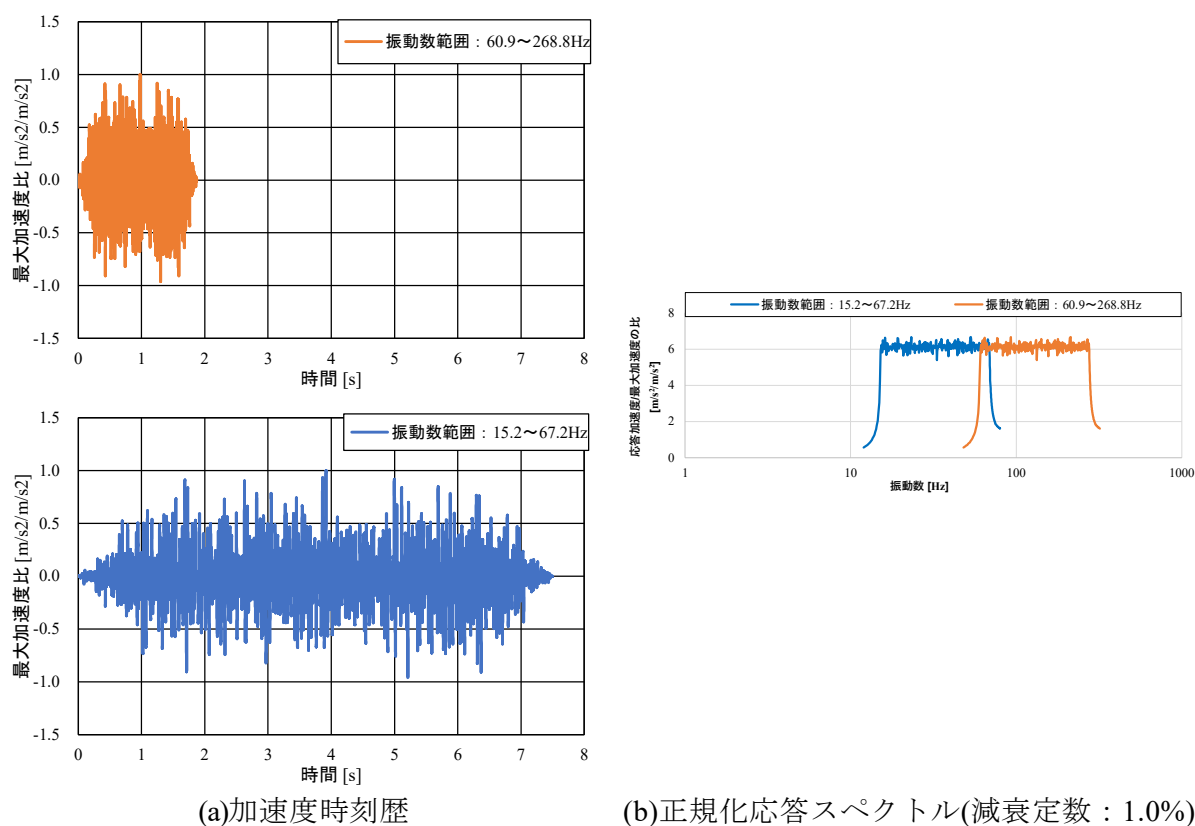


図 2.10.3 ランダム波の加速度時刻歴及び正規化応答スペクトル

Figure 2.10.3 Acceleration time histories and normalized response spectra of the random wave test

表 2.10.1 試験ケース

Table 2.10.1 Test cases

入力波	正弦波掃引試験、ショック波、ランダム波
加振方向	水平 2 方向（左右・前後） ※ショック波は各加振方向に対し一方向に実施
パルス幅・振動数範囲	ショック波：6ms、12 ms ランダム波：15.2Hz-67.2Hz、60.9Hz-268.8Hz 正弦波掃引試験：5-500Hz
入力加速度	20 m/s ²

③ 正弦波掃引試験結果

試験体の筐体では明確に一次固有振動数のピークが生じた。また、内蔵機器では、明確に一次固有振動数のピークが生じるとともに、入力加速度が大きい場合には、高い振動数にもピークが生じることが示された。正弦波掃引試験の代表的な結果を図 2.10.4 に、固有振動数及びハーフパワー法で求めた減衰比を表 2.10.2 に示す。

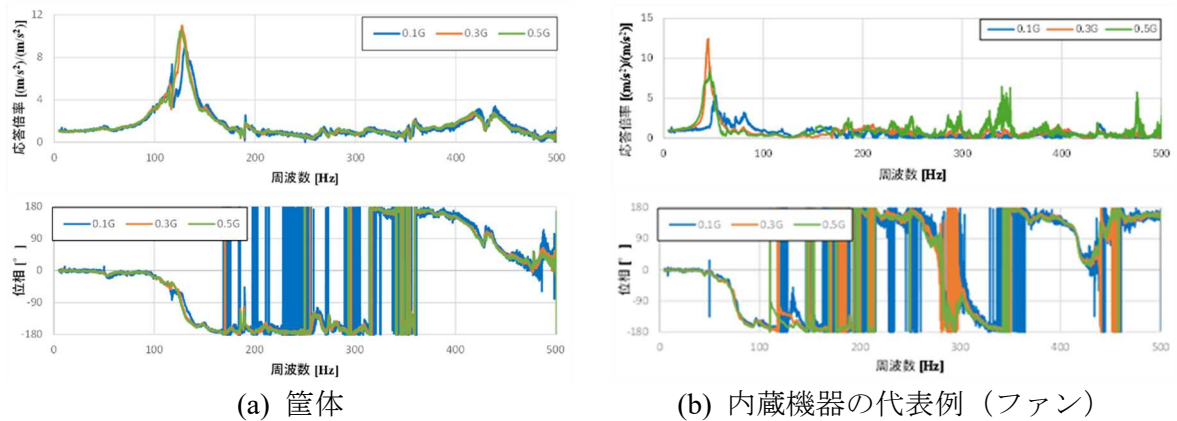


図 2.10.4 筐体及び内蔵機器の伝達関数（前後方向）

Figure 2.10.4 Transfer function of the cabinet and built-in equipment in the front-rear direction

表 2.10.2 試験体の固有振動数及び減衰比

Table 2.10.2 Eigenfrequencies and damping ratios

		筐体	ファン	電源装置	指示計	ダミーウェイト
前後方向	固有振動数	128 Hz	45 Hz	55 Hz	60 Hz	53 Hz
	減衰比	4.0 %	4.5 %	5.1 %	3.0 %	2.9 %
左右方向	固有振動数	76 Hz	46 Hz	62 Hz	45 Hz	55 Hz
	減衰比	2.2 %	4.6 %	5.7 %	2.3 %	3.0 %

④ ショック波試験及びランダム波試験結果と考察

図 2.10.5 は試験体の筐体頂部及び内蔵機器における前後方向の最大応答加速度である。図に示すとおり、ショック波試験では、パルス幅により最大応答加速度に多少の差異はあるがおおむね同程度である。これは、図 2.10.2(b)に示すとおり、パルス幅 6ms のショック波は 50Hz 以上、パルス幅 12ms のショック波は 40~150Hz 以上と幅広い振動数成分を有しており、いずれのパルス幅のショック波においても筐体、電源装置、指示計、ダミーウェイトの一次固有振動数が含まれたため、応答が増大したと考えられる。ファンは前後方向の固有振動数が 45Hz であり、この振動数成分を含むパルス幅 12ms のショック波に対して最大応答加速度が大きくなっている。ランダム波試験では、筐体及び指示計は、60.9Hz-268.8Hz のランダム波において応答加速度が最大となり、ファン、電源装置、ダミーウェイトは 15.2Hz-67.2Hz のランダム波において応答加速度が最大となった。これは、筐体及び内蔵機器の一次固有振動数を含むランダム波において特に応答が増大したことを示している。これらのショック波試験及びランダム波試験結果から、筐体及び内蔵機器は一次固有振動数を含む振動数範囲の入力によって最大応答加速度が大きくなる傾向があると言える。この傾向は、一般に知られている振動論から導かれる傾向と一致していることから、衝撃振動の振動数範囲であっても、地震応答解析のような既知の振動論に基づいた手法を適用することができると考えられる。

また、ランダム波試験の応答加速度時刻歴を対象にフーリエ解析を実施し、入力振動数範囲と応答の振動数範囲の関係の観点で分析したところ、内蔵機器においては入力振動数に対して高振動数の応答が生じていることが示唆された。結果を図 2.10.6 に示す。図 2.10.6(a)に示した筐体頂部の解析結果では、主に一次固有振動数である 76Hz の前後に主要な応答成分を有しており、入力振動数を上回る 268.8Hz 以上の振動数範囲の応答はほとんど発生していない。これに対して図 2.10.6(b)に示した電源装置の解析結果では、固有振動数である 60Hz 前後の振動数範囲以外にも 125Hz 前後及び 195Hz 前後に応答が生じているほか、268.8Hz 以上の振動数範囲においても応答が生じている。加速度時刻歴でも、図 2.10.7 に示すように、電源装置端部近傍において高振動数の応答が継続的に重畳したことがわかる。ランダム波の入力により電源装置の応答が増幅し、電源装置と支持部材との間で摩擦滑りや分離・衝突といった非線形挙動を生じたことが、この高振動数の応答の原因として推定される。

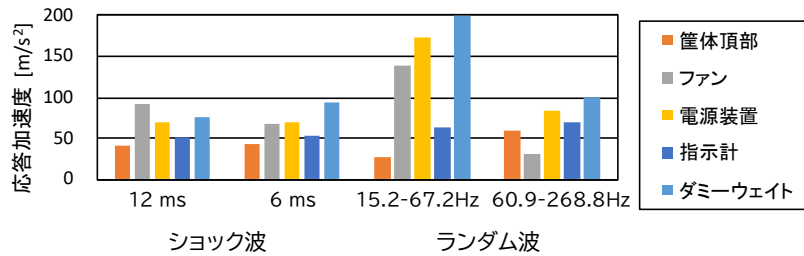


図 2.10.5 筐体頂部及び内蔵機器における最大応答加速度（前後方向）

Figure 2.10.5 Maximum response accelerations of the cabinet and built-in equipment in the front-rear direction

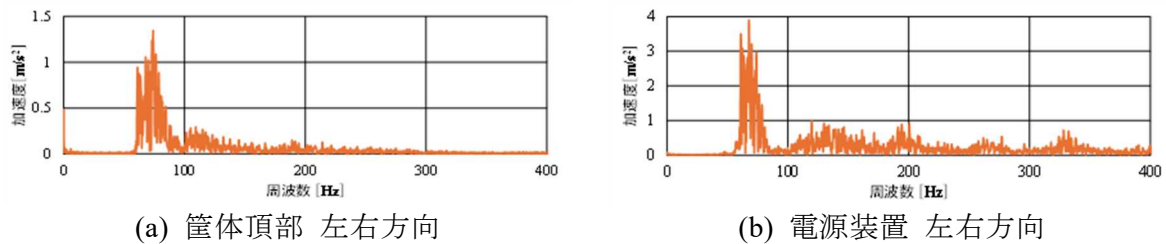


図 2.10.6 フーリエ解析結果

Figure 2.10.6 Results of the frequency analysis

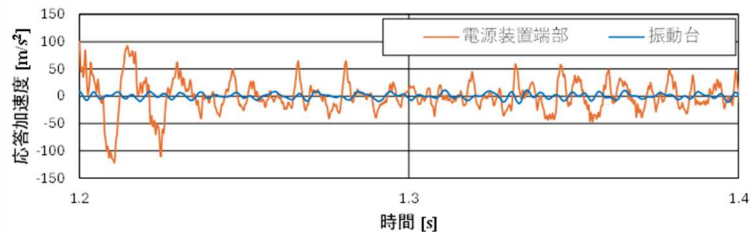


図 2.10.7 電源装置端部の応答加速度時刻歴 ランダム波試験（60.9Hz-268.8Hz）

Figure 2.10.7 Acceleration time histories of end of the power supply unit in the random wave test (60.9Hz-268.8Hz)

(2) 衝撃加振試験の再現解析

① 解析方法

既往の地震応答解析手法に基づいて衝撃加振試験の再現解析を実施し、試験結果と比較することで、既往の地震応答解析手法の衝撃振動への適用性を確認した。再現解析モデルの概要を図 2.10.8 に示す。再現解析モデルは、内蔵機器、筐体の内部構造、柱、側板及び扉等を含めて詳細に試験体の構造を再現した。解析には有限要素解析コード NASTRAN を用いた。また、上述の正弦波掃引試験で得られた内蔵機器の固有振動数を適切に再現できるように再現解析モデルを作製し、筐体及び内蔵機器の加振方向ごとの異なる要素別減衰を設定して再現解析を実施した。再現解析は加振試験と同一の入力波を用いて実施した。解析ケースを表 2.10.3 に示す。

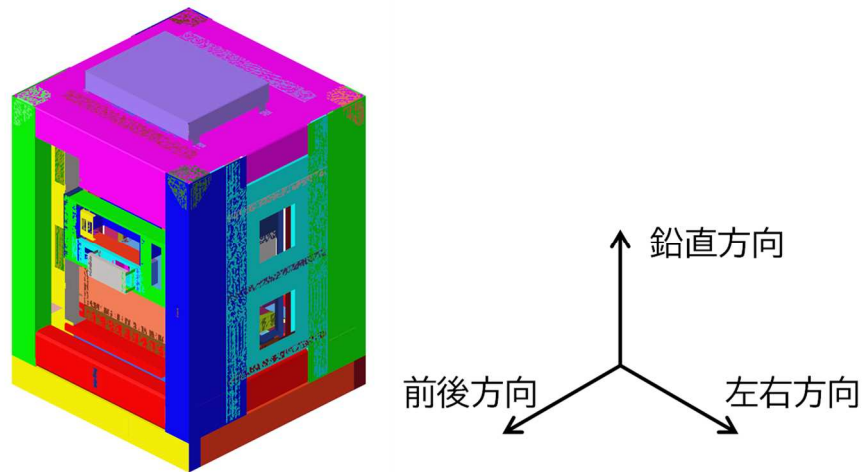


図 2.10.8 再現解析モデルの概要（扉、側面パネルを非表示）

Figure 2.10.8 Schematic of the reproduction analysis model

表 2.10.3 解析ケース

Table 2.10.3 Cases of the reproduction analysis

入力波	ショック波、ランダム波
加振方向	水平 2 方向（左右・前後） ※ショック波は各加振方向に対し一方向に実施
パルス幅・振動数範囲	ショック波：6ms、12 ms ランダム波：15.2Hz-67.2Hz、60.9Hz-268.8Hz
入力加速度	20 m/s ²

② 固有値解析結果

解析と試験における筐体の一次固有振動数は表 2.10.4 に示したとおりである。前後、左右方向ともに一次固有振動数の差異は小さく、加振試験で得られた一次固有振動数をおおむね再現できた。

表 2.10.4 加振試験と再現解析で得られた筐体の一次固有振動数

Table 2.10.4 First order eigenfrequencies of the cabinet in vibration tests and reproduction analysis

	加振試験	再現解析
前後方向	128 Hz	124 Hz
左右方向	76 Hz	68 Hz

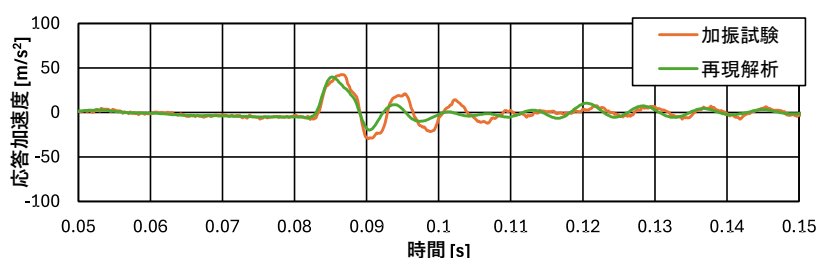
③ ショック波及びランダム波の再現解析及び考察

筐体頂部における応答加速度時刻歴について、試験結果と再現解析結果との比較を行った。代表例として、パルス幅 6ms、前後方向加振のショック波試験結果と再現解析の比較を図 2.10.9 に示す。加振試験結果と再現解析結果はおおむね一致しており、ショック波に対する応答を解析によって再現出来た。また、加振方向に関わらず、異なるパルス幅のシ

ショック波及びランダム波に対しても同様に筐体頂部の応答を解析によって再現出来た。

内蔵機器についても、試験結果と再現解析結果との比較を行った。それぞれの内蔵機器に対しては、指示計の左右方向を除いて、試験で得られた主要な応答を再現することができた。このような内蔵機器の代表例として、ファンの応答加速度時刻歴についてパルス幅 12ms、前後方向加振のショック波試験結果と再現解析結果との比較を図 2.10.10 に示す。加振試験結果と再現解析結果はおおむね一致しているが、図中のオレンジ線で示した試験結果では 0.08 秒以降に、ファンの一次固有振動数よりも高い振動数の応答が発生しており、これを解析では再現出来なかった。そこで、試験結果に対して入力振動数を上回る 300Hz をカットオフ振動数としたローパスフィルタを適用したものと、再現解析結果の比較を併せて行った。ローパスフィルタを適用した試験結果が図中の水色線であり、これと再現解析結果を比較するとおおむね一致しており、これらの差異は衝撃加振試験において内蔵機器で発生した 300Hz を超える高振動数の応答によって生じたと考えられる。この高振動数の応答は、2.10.2(1)④に示したとおり内蔵機器と支持部材との間で摩擦滑りや分離・衝突といった非線形挙動が発生原因として推定される。

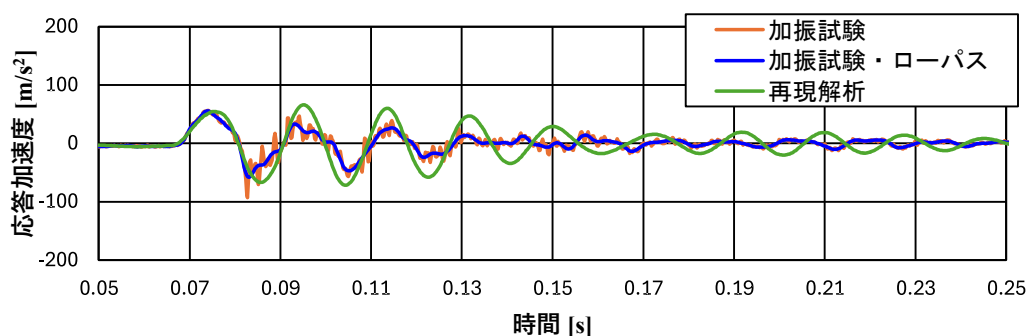
また、指示計の左右方向に対しては、一次の固有振動数の応答を解析で再現出来なかった。これは、指示計がボルト締結ではなく、パネルの後方からボルトで押さえつけるよう支持する独自の固定方法のため、衝撃加振試験において指示計の固定部に滑りが発生したことが原因と推定される。



ショック波（パルス幅 6ms、前後方向）

図 2.10.9 筐体の加振試験及び再現解析結果

Figure 2.10.9 Acceleration time histories of the cabinet in the vibration test and the reproduction analysis



ショック波（パルス幅 12ms）：前後方向）

図 2.10.10 ファンの加振試験及び再現解析結果

Figure 2.10.10 Acceleration time histories of the fan in the vibration test and the reproduction analysis

(3) 地震応答解析手法の適用性について

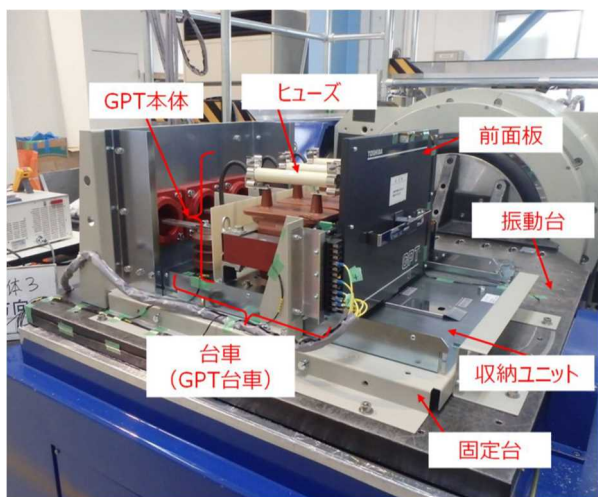
地震応答解析手法を適用した解析モデルを構築することで、試験体の筐体は、衝撃加振試験で得られた衝撃振動に対する応答を再現できることを確認した。また、内蔵機器については、同様の手法で解析モデルを構築することで、固定部に滑りが発生したと推定される指示計の左右方向を除いて、衝撃振動に対する主要な応答を再現できることを確認した。

しかしながら、衝撃加振試験では、指示計以外の内蔵機器においても内蔵機器と支持部材との間で発生した非線形挙動によると推定される高振動数の応答が生じた。このような非線形挙動には取り付け状況等の各内蔵機器固有の状況が大きく影響し、これを正確に解析モデルに反映することは困難であるため、このような高振動数の応答は、解析で再現することは難しいと考えられる。

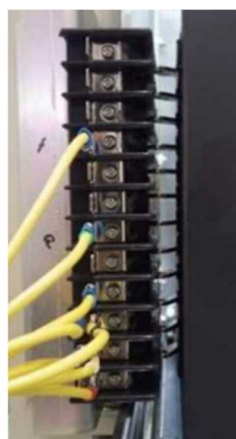
2.10.3 計器用接地形変圧器の単体衝撃応答解析

令和 2 年度までに実施した計器用接地形変圧器（以下「GPT」という。）の衝撃加振試験では、GPT が損傷する事例を確認した^{2.10.3}。GPT は、収納ユニットに設置されたレール上に、GPT 台車が乗った構造をしており、レールと台車の車輪の間に存在するガタ構造によって衝撃応答が増幅し、損傷したと考えられる。図 2.10.11 に衝撃加振試験の実施状況を示す。

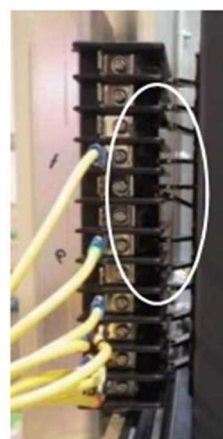
本項では、ガタ系を有する設備の衝撃応答評価への既往知見に基づく応答評価手法の適用性を確認するため、ギャップ要素を有する解析モデルを用いて、GPT のようなガタ系を有する設備に係る衝撃応答解析を実施した。



(a) 衝撃振試験実施状況



試験前



試験後

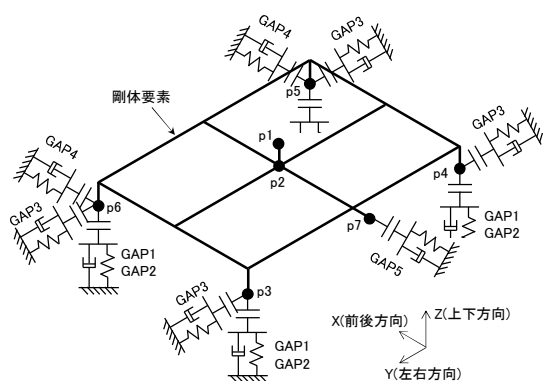
(b) GPT の損傷箇所

図 2.10.11 GPT の衝撃加振試験実施状況

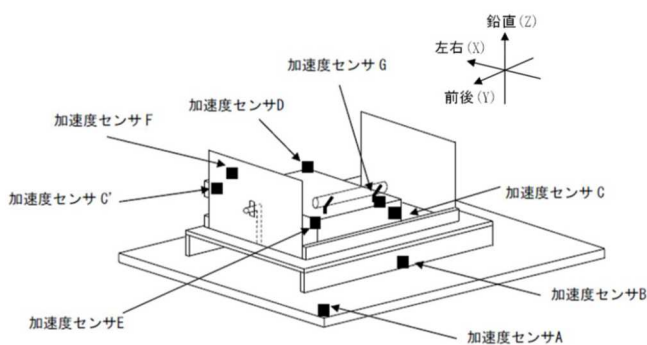
Figure 2.10.11 The impact vibration test of the GPT

(1) 計器用接地形変圧器の解析モデル

GPT の衝撃応答解析に使用する解析モデルの構成について示す。GPT 本体と GPT 台車は剛体でモデル化し、収納ユニットは固定点として扱い、GPT 台車と収納ユニット間の衝突はギャップ要素及び非線型ばね要素でモデル化した。モデルの自由度は剛体 6 自由度である。解析モデルの概要を図 2.10.12 に、解析ケースを表 2.10.5 に示す。



(a) GPT 解析モデルの概要



(b) GPT の加速度計の設置位置

図 2.10.12 GPT の解析モデル

Figure 2.10.12 Analysis model of the GPT

表 2.10.5 GPTの単体衝撃応答解析ケース

Table 2.10.5 Cases of the reproduction analysis for the impact vibration tests of GPT

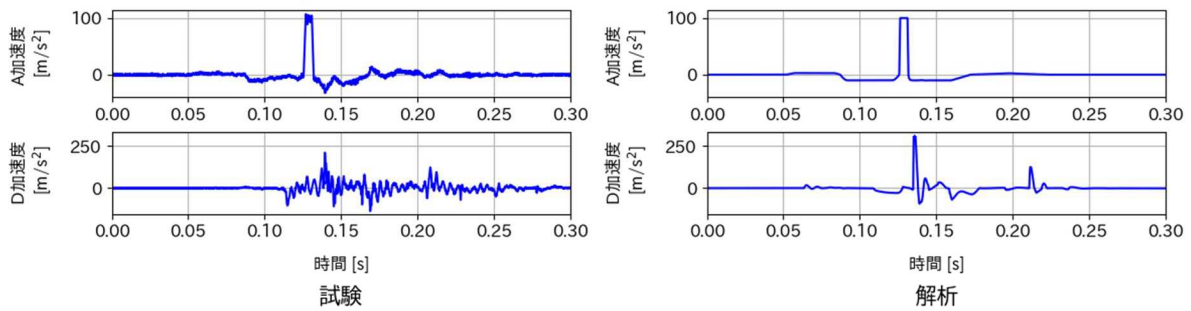
入力波	ショック波、ランダム波
加振方向	水平2 方向（左右・前後） ※ショック波は各加振方向に対し一方向に実施
パルス幅・振動数範囲	ショック波：6ms、18 ms ランダム波：15Hz-55Hz、55Hz-200Hz
入力加速度	3 レベル（50、100、150 m/s ² ）

(2) 計器用接地形変圧器の単体衝撃応答解析結果の考察

上述した解析モデルを用いて、衝撃加振試験に係る再現解析を実施し、モデルの妥当性及び衝撃応答解析手法の適用性を確認した。振動台上に設置した加速度センサ A（図 2.10.12(b)に示す。）と GPT 台車上に直接設置した加速度センサ D（図 2.10.12(b)に示す。）の加速度時刻歴を比較した。ショック波試験結果と再現解析結果の比較を図 2.10.13 に示す。ここでは、GPT の正面に向かって、左方向に生じる加速度を正、右方向に生じる加速度を負と定義した。

図 2.10.13 に示すように、いずれの試験結果、再現解析結果においても入力に若干遅れて衝突による加速度が入力方向に発生し、その後、逆方向に発生した。試験では高振動数の応答も重畳しているが、GPT 台車の剛体的挙動に着目すると、入力発生後に正側と負側の加速度が交互に発生しており、解析においても同様の傾向を示している。また定量的に見ても、最大応答加速度は試験と解析でおおむね近い値となった。

しかしながら、同じ解析モデルを用いて実施したランダム波試験の再現解析では、衝突加速度は試験結果とほぼ同様であったものの、時刻歴でみると最大応答加速度が発生する時刻が大きくずれるなど、十分に再現できたとは言い難い結果が得られた。これは、ランダム波試験では、ガタ部において滑り挙動と衝突が連続的に繰り返し発生したが、再現解析ではこのような繰り返しの衝突を全て再現することができなかったため、最大応答加速度が発生する時刻のズレ等が生じたと推定される。



ショック波 100m/s² 6ms 左右方向

図 2.10.13 GPT 衝撃加振試験の単体応答解析結果と試験結果の比較

Figure 2.10.13 Results of the reproduction analysis for the impact vibration tests of GPT

2.10.4 衝撃を受ける設備の評価体系

2.10.2 で示したとおり、衝撃振動を受ける内蔵機器は高振動数の応答が発生するが、これを解析で再現することは難しい。また、2.10.3 で示したとおり、ガタ系を有する設備のランダム波に対する衝撃応答を解析のみで評価することは難しい。このような設備を内蔵する電気盤では、電気盤筐体の解析と内蔵機器単体での衝撃試験を分離して実施し、結果を組み合わせ耐衝撃性の評価を行う必要があると考えられる。そこで、本項では、このような評価手法の適用性を確認する。

(1) 電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法

原子力発電所耐震設計技術指針 JAEG4601-1987 には、電気計装機器の地震時機能維持評価法として、電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法が示されている。具体的には、電気盤筐体の地震応答解析を行って内蔵機器の設置点の応答を把握し、この応答と内蔵機器単体の検定スペクトル（内蔵機器単体の加振試験で機能上問題無いことを確認した振動数範囲ごとの入力加速度レベル分布）とを比較することで健全性を評価できるとしている。この手法を参考に、衝撃振動に対しても同様の手法を適用することを考える。衝撃振動に対しても電気盤筐体の応答を解析によって評価できることは 2.10.2 で示しており、電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法を耐衝撃性評価に適用するためには、内蔵機器の応答が筐体やその他の内蔵機器に伝播して影響を及ぼさないことを確認する必要がある。

そこで、衝撃振動により応答が増幅し、筐体やその他の内蔵機器に応答が伝播しやすいと考えられるガタ系を有する内蔵機器を、電気盤を模擬した試験体の筐体に組み合わせた解析モデル（以下「組み合わせ解析モデル」という）を作成し、これを用いた応答解析により、ガタ系を有する内蔵機器の有無による筐体及びその他内蔵機器の応答の差異を明らかにすることで、電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価できるかを確認した。

(2) 応答解析結果及び評価手法の適用性

組み合わせ解析モデルを用いてショック波加振試験の再現解析を実施し、その結果を 2.10.2 で実施した電気盤を模擬した試験体（ガタ系を有する内蔵機器を含まない）の再現解析と比較することで、電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法の適用性を確認した。解析には表 2.10.6 に示すショック波を入力し、その応答加速度を評価した。結果を図 2.10.14 に示す。図の青線は組み合わせ解析、赤線は 2.10.2 で実施した解析の結果である。

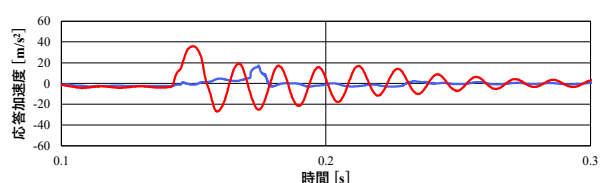
組み合わせ解析では、2.10.3 で実施した単体解析と同様に、ガタ系を有する内蔵機器において応答加速度の立ち上がりの遅れや衝突による衝撃加速度の発生がみられており、ガタ系による応答増幅が再現されている。しかしながら、ガタ系を有する内蔵機器以外の、筐体及びその他の内蔵機器における応答は、2.10.2 で実施した解析結果とほぼ同様であり、ガタ系を有する内蔵機器の応答が筐体及びその他の内蔵機器の応答に及ぼす影響は小さいことが示された。

以上の結果から、耐衝撃性評価を電気盤筐体と内蔵機器に分離して実施できると考えられる。

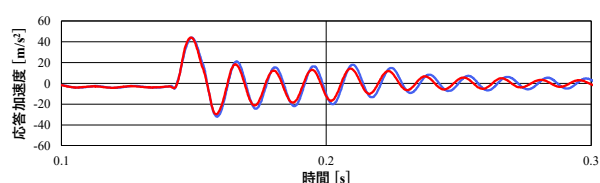
表 2.10.6 解析ケース

Table 2.10.6 Cases of combined analysis

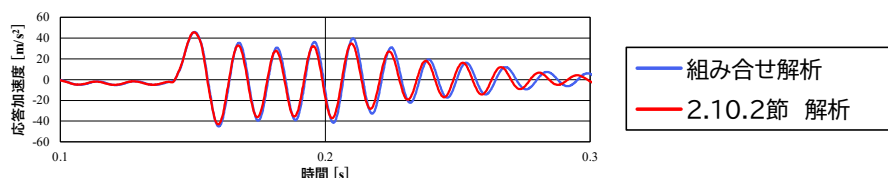
入力波	ショック波
加振方向	水平 2 方向（左右・前後）
パルス幅	ショック波：12 ms
入力加速度	1 レベル（20 m/s ² ）



(a) ガタ系を有する内蔵機器とダミーウェイト



(b) 筐体頂部



(c) 電源装置

図 2.10.14 組合せ解析結果 加速度時刻歴（左右方向）

Figure 2.10.14 Acceleration time histories of the combined analysis in left-right direction

2.10.5 まとめ

本研究では、電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験結果及び地震応答解析手法を用いたその再現解析結果を比較し、試験体の筐体は、衝撃加振試験で得られた衝撃振動に対する応答を再現できることを確認した。また、内蔵機器については、固定部に滑りが発生したと推定される指示計の左右方向を除いて、衝撃振動に対する主要な応答を再現できることを確認した。しかしながら、衝撃加振試験では、指示計以外の内蔵機器においても内蔵機器と支持部材との間で発生した非線形挙動によると推定される高振動数の応答が生じた。このような非線形挙動には取り付け状況等の各内蔵機器固有の状況が大きく影響し、これを正確に解析モデルに反映することは困難であるため、このような高振動数の応答は解析で再現することは難しいと考えられる。

続いて、ガタ系を有する設備である GPT の衝撃応答解析を実施し、衝撃加振試験とその再現解析の結果を比較することで、ガタ系を考慮した衝撃応答解析手法の適用性を確認した。その結果、ショック波試験のような比較的単純な入力に対しては、GPT 台車の剛体的挙動や最大応答加速度を再現できたが、ランダム波試験のような複雑な入力に対しては、GPT 台車の最大応答加速度は再現できたものの、ガタ部における繰り返しの衝突を再現することはできなかった。

さらに、高振動数の応答が生じる内蔵機器やガタ系を有する設備のような衝撃応答解析を適用することが難しい設備を有する電気盤等の耐衝撃性評価手法として、耐震性評価のために JEAG4601-1987 に規定されている電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法の耐衝撃性評価への適用性を確認した。この手法を適用するためには、内蔵機器やガタ系を有する設備の非線形応答が筐体や他の内蔵機器の応答に影響を及ぼさないことが条件となる。上述において適用性を確認した衝撃応答解析手法を用いて、ガタ系を有する設備を電気盤筐体に組み合わせた解析を実施し、ガタ系を有する内蔵機器の応答が供試体全体の応答及びその他の内蔵機器に及ぼす影響は小さいことを示し、耐衝撃性評価においても耐震性評価と同様に電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法が適用できることを確認した。

このように地震応答解析手法の衝撃振動に対する適用性及び留意事項を確認したことは、解析による設備の衝撃安全性評価等の手法及び結果の妥当性確認を実施する上で重要である。

3. 結論

3.1 成果の要点

本研究では、外部事象に係る科学的・技術的知見及び規制基準等の整備に活用するための知見の拡充等に資することを目的に、地震・津波・衝撃の各分野における研究を実施した。各研究項目の成果を以下に示す。3.1.1(1)の一部は JAEA への委託、3.1.1(2)の一部は鹿島建設への委託、3.1.3 の一部は篠塚研究所（令和 5 年度）、大成建設（令和 6 年度）への委託、3.1.4 の一部は東北大学（令和 3 年度）、東北工業大学（令和 4 年度から令和 6 年度まで）への委託、3.1.8 の一部は大成建設への委託、3.1.9 の一部は鹿島建設への委託により実施したものである。また、3.1.2 は JAEA（令和元年度から令和 6 年度）、3.1.5 は東京電機大学（令和 2 年度から令和 4 年度）、3.1.10 は東京電機大学（令和 2 年度から令和 4 年度）、東京電機大学及び JAEA（令和 5 年度から令和 7 年度）との共同研究にて実施したものである。

3.1.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

(1) 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

低接地率状態となる建屋の応答評価に関する知見を蓄積して、低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目した評価手法の適用性を確認することを目的に、JAEA への委託事業により、建屋基礎底面と支持地盤との間の接地率が小さくなる場合の建屋の地震時挙動に関する文献調査を行い、低接地率状態の建屋の地震応答解析手法に関する課題を抽出した^{2.1.3}。そして、既往文献に示されている理論解及び実験結果を対象に、審査等で採用される既往の解析手法を用いたシミュレーション解析を行い、文献だけからは把握できない詳細な内容について確認するとともに、モデル化や解析コードの違い等について考察した^{2.1.3,2.1.10-2.1.15}。さらに、解析結果への影響が大きいと判断されたモデル化手法については、感度解析により解析結果への影響を具体的に確認し、解析コードを使用する際は再接地する瞬間の影響を踏まえて、解析手法、パラメータ等を決める必要がある等、基礎浮上りに係る非線形地震応答解析の適用性に関する技術的知見を収集した^{2.1.3}。最後に、それら委託事業による知見を踏まえ、規制庁は審査に資する技術的知見を取りまとめた。

(2) 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

高温状態等の影響が建屋の応答特性へ与える影響に関する知見を蓄積して、重大事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法の適用性を確認することを目的に、鹿島建設への委託事業により、高温状態にさらされた建屋の地震時応力解析の適用性に係る調査を行った^{2.1.22}。また、高温状態にさらされた建屋の地震時応答挙動を把握するためのコンクリートの材料試験データを取得するとともに、実機の RC 部材の材料特性を把握するため、これを模擬した材料試験体等を製作し、材料試験データを取得した^{2.1.22,2.1.25,2.1.26}。さらに、構造試験体を製作し、構造試験、シミュレーション解析等を行うとともに、仮想実機

建屋を対象とした感度解析等を実施することで、高温影響によるコンクリート材料の弾性係数の低下により建屋の剛性も低下する一方で、圧縮強度の低下が建屋の耐力へ与える影響は小さいこと等、RC 部材の材料非線形性を考慮した弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を拡充した^{2.1.22}。最後に、それら委託事業による知見を踏まえ、規制庁は審査に資する知見を取りまとめた。

3.1.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

大規模観測システムを用いて建屋及び周辺地盤の詳細な振動特性を分析し、三次元有限要素モデルを用いた再現解析をとおして、三次元耐震解析手法を高度化するための研究を実施した。本研究は JAEA 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^{2.2.2}」及び「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^{2.2.3}」として実施した。

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では、地震観測記録から建屋及び周辺地盤の卓越振動数、加速度モード等を求め、建屋の構造的特徴を踏まえて振動特性を把握した^{2.2.5,2.2.6}。また、モバイル型加速度計を床中央等に設置して ACROSS 計測記録を取得することで、床の局所的な振動特性を分析した^{2.2.8}。

実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化では、HTTR 建屋及び周辺地盤を対象とした三次元有限要素モデルを作成して固有値解析及び地震応答解析を行い、実測データから得られた振動特性と比較した^{2.2.9}。これらによって三次元有限要素モデルの改良点を抽出し、三次元耐震解析の再現性向上に係る知見を拡充した。

3.1.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

原子力発電所施設における構造形式の複雑さが減衰性能に与える影響に焦点をあてて RC 造建物を対象に、一部は篠塚研究所（令和 5 年度）、大成建設（令和 6 年度）への委託事業により、文献調査結果等に基づき知見を整理・分析及び、文献調査結果と試解析を実施した。これらの結果^{2.3.3,2.3.4}から、耐震壁のみの単純な構造の試験体については、弾性範囲では初期減衰のみの値となり、ひび割れ発生後では初期減衰に加えて履歴減衰による影響があることがわかった^{2.3.4}。また、実際の建物・構築物の形状が通路のような比較的単純な構造であっても、原子力発電所施設のような複雑な構造と同様な建物・構築物の持つ「構造の複雑さ」が減衰に影響を及ぼすことを確認した^{2.3.4}。その結果、地震応答解析における減衰の設定に関する考え方として、これらの条件等に応じて適切に設定する必要があることを確認した^{2.3.4}。委託事業による知見を基に規制庁は当庁の審査に資する知見を取りまとめた。なお、本研究では、限られた文献調査結果と、既往実験のシミュレーションの一例という限られた条件での調査分析であることから、一般化にあたっては、今後、更なる精緻化が必要である。

3.1.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

東北大学、東北工業大学への委託事業として、土木構造物等の周辺地盤を対象に、原子力発電所特有の条件として地震動、礫質土等の地盤材料、地形等の特性を踏まえ、主に礫質土地盤（飽和・不飽和地盤）内に構造物模型を設置し、遠心模型実験を実施するとともに、当該実験のシミュレーション解析等を実施した^{2.4.1-2.4.4}。遠心模型実験の結果、飽和・不飽和地盤の応答特性、盛土や構造物の設置による複雑な応力状態、構造物への作用土圧等の特徴を確認した^{2.4.4}。ただし、比較的密な礫質土地盤での実験であったため、過剰間隙水圧の上昇が限定的であるものの、必ずしも、飽和・不飽和のどちらかの地盤で応答が大きくなるということはなく、構造物への影響の観点からは、地盤条件に応じて適切な評価が必要であることが示唆された。また、委託事業において実施した実験を踏まえ規制庁で実施したシミュレーション解析の結果、地盤の応答加速度やせん断応力等の性状、構造物の変形挙動、構造物へ作用する周面せん断力等の性状について、全体的な傾向を再現でき、盛土の影響による過剰間隙水圧の相違、初期せん断応力の影響等の再現性を確認した。一方、実験と解析の過剰間隙水圧の上昇過程の差異、これに伴う加速度や応力の差異等が見られ、構造物の耐震性評価にあたっては、引き続き、これらの応答挙動の再現性を向上する必要があることを確認した。

3.1.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

本研究では、既往の試験事例が少ない異径ティを含む3種類の配管要素の振動試験及び弾塑性有限要素解析を実施し、耐震性の評価を行った。試験の結果、いずれの試験体も、設計レベルの荷重に対して十分な耐震性があり、現行の耐震設計手法の持つ保守性が確認された。また、試験及び解析の結果、設計レベルを超える荷重に対しても、既往の評価手法により保守的な疲労評価が可能であることが確認された^{2.5.9}。

異径ティを含む複雑な形状の配管要素では、FEMの形状モデルが大きな誤差要因となること^{2.5.10}、そして接続配管溶接部近傍で疲労亀裂が発生する可能性があることが明らかになった^{2.5.9}。このような溶接部近傍に疲労亀裂が発生するケースでは、低サイクル疲労以外の劣化モードが重畳する可能性に留意して評価する必要があることが示唆された。

3.1.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

本研究では、繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、その構造的特徴を模擬した1/10スケールの試験体を製作し、加力回数をパラメータとした正負交番载荷試験を実施した。

繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響として、各载荷サイクルでの5回の正負交番繰り返し载荷による割線剛性の低下は、曲げ剛性については4%程度、せん断剛性については3%程度となり、5回程度の繰り返し载荷による顕著な剛性低下は無いことが分かった。

また、既往の評価法による復元力特性との比較では、両者の荷重－曲げ変位の関係については、おおむね対応する結果となったものの、荷重－せん断変位の関係については、既往の評価法より求めた初期剛性が試験結果よりも大きくなる結果となった。このことから、既往の評価法は原子炉本体基礎のせん断剛性を大きめに評価する可能性があり、原子炉本体基礎に作用するせん断力の影響が大きい場合には注意が必要である。

3.1.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

一般の施設に適用される制振装置（弾塑性ダンパー、摩擦ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー）の製品を対象にした制振装置メーカーへのアンケート、聞き取り調査の結果を基に、実用発電用原子炉施設設備に制振装置を適用する場合の留意点を整理した。留意点の例として、許容限界の設定の観点には構造の健全性と要求性能の保持に分けて整理出来ることを示した。これらの内容は、制振装置の発電用原子炉施設設備への適用に係る審査を行う上で参考となるため、「審査における留意点」として整理した。

上記の調査、分析等の内容、及び「審査における留意点」は、NRA技術報告に取りまとめる計画である。

3.1.8 黒津波の発生条件等の検討

本研究では、ヘドロ等の細粒子を多く含む津波が発生する可能性を評価する手法を構築すると共に、そのような津波が防潮堤の作用荷重に与える影響を定量評価することを目的とした。黒津波の発生可能性評価に係る知見として、東北地方太平洋沖地震後の津波堆積物調査の結果を整理し、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標（港湾の海水交換の効率を意味する指標）と因果関係があることを示した^{2.8.3}。また、黒津波の影響評価に係る知見として、細粒子を含む泥水を用いた水理試験^{2.8.4-2.8.6,2.8.8,2.8.9}及び数値解析を実施し、淡水と比べて密度の大きい泥水の最大波力は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。ただし、その理由は不明であるものの、条件によっては流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合があった。

3.1.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価に関する研究を実施した。

設置状況を考慮した衝撃評価に関する研究では、来待石、モルタル等試験体への衝突速度 50～160m/s における先端形状が半球型の剛飛翔体貫入実験を実施し、試験体の損傷状況に係る知見を蓄積するとともに、実験結果に対して貫入量に係る既往実験式が適用出来ることを確認した^{2.9.9}。さらに、既往の力学モデルに基づく理論的貫入評価式において示されていない先端形状弾頭型について形状関数を提案した。既往の弾頭型の飛翔体貫入実験結果に対して提案する形状関数を用いた理論的貫入評価を実施し、実験結果に対して適用

出来ることを確認した^{2.9.14-2.9.16}。

形状特性を考慮した衝撃評価に関する研究では、鹿島建設への委託事業として、小型及び中型の平板・アーチ構造試験体への衝突実験を実施し、構造の差異による裏面剥離特性等について確認した。その結果、本研究の実験条件においては、裏面剥離特性について平板構造とアーチ構造に大きな差異はないことを確認した^{2.9.1-2.9.4}。また、規制庁において平板構造及びアーチ構造について動的たわみに着目した定式化から新たに簡易評価手法を提案し、損傷状況の評価値に日本建築学会「建築物の耐衝撃設計の考え方」の許容値を取り入れた。提案した簡易評価手法を当該実験結果に適用し、平板に対しては、実験結果と比較して簡易評価手法による中損傷限界速度は、裏面剥離限界速度とおおむね対応することを確認した。アーチ構造については、日本建築学会の許容値と整合がとれず、今後更なる検討が必要である^{2.9.18, 2.9.19}。

3.1.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

本研究では、まず、電気盤を模擬した試験体を用いた衝撃加振試験結果^{2.10.4}と地震応答解析手法を用いたその再現解析結果を比較することで、地震応答解析手法の衝撃応答解析への適用性を確認した。その結果、試験体の筐体については、衝撃加振試験で得られた衝撃振動に対する応答が再現できた。また、内蔵機器については、固定部に滑りが発生したと推定される指示計の左右方向を除いて、衝撃振動に対する主要な応答を再現できることを確認した。しかしながら、衝撃加振試験では、指示計以外の内蔵機器においても内蔵機器と支持部材との間で発生した非線形挙動によると推定される高振動数の応答が生じた。このような非線形挙動には各内蔵機器固有の取り付け状況等が大きく影響し、これを正確に解析モデルに反映することは困難であるため、このような高振動数の応答は解析で再現することが難しいと考えられる。

続いて、ガタ系を有する設備である GPT の衝撃応答解析を実施し、衝撃加振試験とその再現解析の結果を比較することで、ガタ系を考慮した衝撃応答解析手法の適用性を確認した。その結果、ショック波試験のような比較的単純な入力に対しては、GPT 台車の剛体的挙動や最大応答加速度を再現できたが、ランダム波試験のような複雑な入力に対しては、GPT 台車の最大応答加速度は再現できたものの、ガタ部における繰り返しの衝突を再現することはできなかった。

さらに、衝撃応答解析を適用することが難しい設備を有する電気盤について、耐震性評価で用いられる電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法の耐衝撃性評価への適用性を確認した。ガタ系を有する設備を電気盤筐体に組み合わせた解析を実施し、ガタ系を有する設備の非線形応答は筐体や他の内蔵機器の応答に及ぼす影響が小さいことを示し、耐衝撃性評価においても耐震性評価と同様に、電気盤筐体と内蔵機器を分離して評価する手法が適用できることを確認した。

3.2 目的の達成状況

本研究は、下記 10 項目について、令和 3 年度から令和 6 年度までの 4 年間の実施計画で設けた全ての目的を達成した。

3.2.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

(1) 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

既往知見の収集、解析手法の調査、解析による応答挙動の把握等を行い、低接地率状態となる建屋の応答評価に関する知見を蓄積し低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目した評価手法が適用できることを確認した^{2.1.3}。また、それらより得られた知見を踏まえ、審査に資する知見を確認事項として取りまとめた。

(2) 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

既往知見の収集、材料・構造実験の実施、仮想実機建屋を対象とした弾塑性解析等を行い、高温状態等の影響が建屋の応答特性へ与える影響に関する知見を蓄積し事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法が適用できることを確認した^{2.1.22}。また、それらより得られた知見を踏まえ、審査に資する知見を確認事項として取りまとめた。

3.2.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

三次元耐震解析による実測データの再現性向上を目的として、地震観測記録及び ACROSS 計測記録から HTTR 建屋の全体振動特性、局所振動特性等の三次元的な応答挙動を詳細に把握した^{2.2.5,2.2.6,2.2.8}。また、図面情報等を元に実建屋を再現した三次元有限要素モデルを作成し、解析結果と地震観測記録等で得られた振動特性を比較することで、三次元耐震解析手法の再現性向上に必要なモデル化すべき部材等の情報を蓄積した^{2.2.9}。

3.2.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

本研究では、建物・構築物の耐震設計・評価において一般的に用いられている質点系モデルによる地震応答解析の減衰定数の設定に関する知見の拡充を目的に、原子力発電所施設のうち近年追設されている比較的単純な構造形式の建物・構築物を対象に、その構造や応答性状等を踏まえて既往の建物・構築物における観測記録や振動試験の結果等に基づく知見を整理、分析した結果、原子力発電所施設の地震応答解析における減衰定数は、建物・構築物のもつ「構造の複雑さ」と地震動レベルに応じたひずみ依存性を考慮して適切に設定する^{2.3.3,2.3.4}という技術的知見を蓄積し、減衰定数の設定に関する知見を拡充した。

3.2.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

礫質土地盤の液状化による施設への影響評価に係る技術的知見を拡充するため、屋外重要土木構造物等の周辺地盤を対象に液状化実験を実施し、地盤の応力性状や構造物へ作用

する土圧等の特徴を確認した^{2.4.4}。また、当該実験のシミュレーション解析を実施し、構造物の変形挙動、構造物へ作用する周面せん断力等の全体的な応答傾向を再現できることを確認した。

3.2.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

本研究では、基準地震動レベルの入力波が繰返し入力された場合の配管系の疲労損傷裕度を確認することを目的として、既往の試験事例が少ない異径ティを含む3種類の配管要素の振動試験を実施し、いずれの試験体も、設計レベルの荷重に対して十分な裕度を持つことを確認した。また、弾塑性有限要素解析に基づく疲労評価手法の適用性を検証することを目的として、上述の配管要素の振動試験結果とその疲労評価結果を比較し、当該手法を用いることで、設計を超えるレベルに対しても、保守性を持って累積疲労損傷係数の評価が可能であることを確認した。

3.2.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

本研究では、繰返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、その構造的特徴を模擬した1/10スケールの試験体を製作し、加力回数をパラメータとした正負交番载荷試験を実施した。その結果、各载荷サイクルでの5回の正負交番繰返し载荷による割線剛性の低下は、曲げ剛性については4%程度、せん断剛性については3%程度となり、5回程度の繰返し载荷による顕著な剛性低下は無いことが分かった。

3.2.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

本研究では、設備の地震応答低減のために既設プラントに新たに導入された制振装置を対象として、審査における留意点の整理とその参考となる事例集の作成を目的に、制振装置の調査、制振装置適用に当たっての留意点の分析、制振装置の振動試験等を実施した。その結果を、制振装置に係る耐震安全性を確認するための「審査における留意点」として整理した。また、「審査における留意点」の内容の理解に資する制振装置の振動試験、解析を題材とした事例集に整理した。

3.2.8 黒津波の発生条件等の検討

本研究では、へドロ状の堆積物の影響により従来の評価で得られる津波波力よりも大きな波力が生じる可能性がある場合の、その発生条件及び防潮堤等への影響を確認することを目的に、黒津波が発生する可能性を簡易に評価する手法を提案するとともに、黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響を定量評価した。その結果、黒津波の発生可能性評価に係る知見として、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標（港湾の海水交換の効率を意味する指標）と因果関係があるこ

とを示し、黒津波の発生を簡易に推定する手法に係る有用な知見を拡充した^{2.8.3}。また、黒津波の影響評価に係る知見として、細粒子を含む泥水を用いた水理試験^{2.8.4-2.8.6, 2.8.8, 2.8.9}及び数値解析を実施し、淡水と比べて密度の大きい泥水の最大波力は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。ただし、その理由は不明であるものの、条件によっては流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合があった。

3.2.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

設置状況・形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価に係る知見の拡充のため、関連する既往知見を調査するとともに、設置状況・形状特性を考慮した衝突実験を実施し損傷状況を確認した。また、衝突実験の再現解析を実施し耐衝撃評価手法の妥当性を確認した。

3.2.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

本研究では、衝撃力に対するガタ系等を含む設備の応答評価への既往知見に基づく応答解析手法の適用性を確認することを目的に、電気盤を模擬した試験体の衝撃加振試験及びその再現解析、並びにガタ系を有する設備である GPT の衝撃応答解析を実施した。その結果、地震応答解析のような既知の振動論に基づいた応答解析手法によって、電気盤を模擬した試験体の筐体については、衝撃振動に対する応答が再現できることを確認した。また、内蔵機器については、一部を除いて、衝撃振動に対する主要な応答を再現できることを確認した。しかしながら、内蔵機器と支持部材との間で発生した非線形挙動によると推定される高振動数の応答は解析によって再現できなかった。また、GPT の衝撃加振試験とその再現解析の結果を比較し、ショック波試験のような比較的単純な入力に対しては、GPT 台車の剛体的挙動や最大応答加速度を再現できたが、ランダム波試験のような複雑な入力に対しては、GPT 台車の最大応答加速度は再現できたものの、ガタ部における繰り返しの衝突を再現することはできないことを確認した。

3.3 成果の公表等

3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

(1) NRA 技術報告

- ① 原子力規制委員会、NRA 技術報告、「実用発電用原子炉施設への制振装置適用に係る調査・分析及び留意点の整理（案）」、令和 7 年（令和 7 年 10 月頃公表予定）

(2) 論文（査読付）

- ① 日比野憲太、橋本紀彦、藤原啓太、高松直丘、「水平加力を受ける隔壁方式の鋼板コンクリート構造製の基礎構造物の三次元非線形有限要素法解析」、コンクリート工学年次論文集、44 巻、2 号、pp.655-660、令和 4 年
- ② 鳥山拓也、山下啓、石田暢生、「シルト性堆積物の含有割合と採取地域の関係分析の試み」、土木学会論文集特集号（海岸工学）、80 巻、17 号、令和 6 年
doi:10.2208/jscej.24-17229
- ③ 太田良巳、松澤遼、「弾頭型剛飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会構造工学論文集、71A 巻、pp.825-861、令和 7 年
doi:10.11532/structcivil.71A.852

(3) 学術会議のプロシーディングス（査読付）

- ① 太田良巳、松澤遼、「岩盤材料に対する尖頭型飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.74-79、令和 6 年
- ② 太田良巳、二階堂雄司、阿部大希、山崎宏晃、「来待石に対する半球型剛飛翔体の貫入事象に関する実験的研究」、岩の力学連合会第 16 回岩の力学国内シンポジウム、pp.316-321、令和 7 年

(4) 国際会議のプロシーディングス（査読付）

- ① 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.
- ② 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.
- ③ 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.

- ④ Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Uncertain factors in elastic-plastic finite element analysis for elbows and tees” , Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2023, PVP2023-106166, 2023.
- ⑤ Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Design Margins of Fatigue Life of Carbon Steel Elbows and Tees Subjected to Reversing Dynamic Loads” , Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2024, PVP2024-123304, 2024.
- ⑥ Hibino, K., Hashimoto, N., Fujiwara, K., Takamatsu, N., “FEM Analysis of Partition-Type Steel Plate Concrete Foundation Focusing on Bond Characteristics between Steel Plate and Concrete”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- ⑦ Nagai, M., Minakawa, Y., Hibino, K., Takamatsu, N., Ishida, N., Yoshimura, E., Maruyama, N., Furuya, O., “Shaking Table Test of Electrical Cabinet Considering Shock Vibration”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.

(5) その他

- ① 森谷寛、山川光稀、猿田正明、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 1：大規模観測システムの整備）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 943-944、令和 4 年
- ② 山川光稀、猿田正明、森谷寛、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 2：地震観測記録に基づく建屋の全体応答の分析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 945-946、令和 4 年
- ③ 川田学、西田明美、崔炳賢、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 3：人工波に基づく建屋の局所応答の分析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 947-948、令和 4 年
- ④ 西田明美、川田学、崔炳賢、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 4：三次元有限要素モデルを用いた解析）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 949-950、令和 4 年
- ⑤ 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
- ⑥ 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
- ⑦ 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
- ⑧ 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
 - ⑨ 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
 - ⑩ 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
 - ⑪ 藤原啓太、東喜三郎、甲斐聡流、大谷章仁、古屋治、「繰り返し地震荷重を受ける配管要素試験体の疲労損傷裕度に係る検討」、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023、令和 5 年
 - ⑫ 日比野憲太、橋本紀彦、藤原啓太、高松直丘、「鋼板とコンクリートの付着特性が隔壁方式の鋼板コンクリート構造物の力学的挙動に与える影響」、日本原子力学会 2022 年春の年会、1F03、令和 3 年
 - ⑬ 太田良巳、松澤遼、「尖頭型飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会、I-17、令和 5 年
 - ⑭ 太田良巳、二階堂雄司、藪内耕一、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その 1：実験概要及び簡易評価）」、土木学会令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-394、令和 6 年
 - ⑮ 二階堂雄司、太田良巳、川上綾太、相馬和貴、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その 2：実験結果及び考察）」、土木学会令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-395、令和 6 年

3.3.2 委託先による公表

(1) 論文（査読付）

- ① Kawai, T., “Prospective method to estimate shear stress in the ground using two earth pressure cells”, Soils and Foundations, Vol. 64, Issue 6, 2024.
doi:10.1016/j.sandf.2024.101504
- ② 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「底泥を対象とした底質の移動に関する実験的研究」、土木学会論文集 B2(海岸工学)、78 巻、2 号、pp. I_187-I_192、令和 4 年、
doi:10.2208/kaigan.78.2_I_187
- ③ 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「圧力勾配を考慮した底泥移動と津波波力に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号（海岸工学）、79 巻、17 号、令和 5 年、
doi:10.2208/jscej.23-17026

- ④ 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「泥水密度の違いによる津波波形および波力の変化特性に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号 (海岸工学)、80 巻、17 号、令和 6 年、doi:10.2208/jscej.24-17061

(2) 国際会議のプロシーディングス (査読付)

- ① Ito, S., Ota, A., Sonobe, H., Ino, S., Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., “Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- ② Katayama, Y., Kontani, O., Mihara, Y., Yasukochi, J., Inaba, Y., Kambayashi, D., “Physical Material Properties of Normal Concrete Subjected to High Temperature”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- ③ Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Li, Y., “Analytical study for low ground contact ratio of buildings due to the basemat uplift using a three-dimensional finite element model”, Proceedings of the 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICON29), ICONE29-93870, 2022.
- ④ Hashimoto, T., Honda, T., Oda, Y., “ Experimental Study on Tsunami Wave Forces Considering Density Change of Turbid Water Containing Sediment” , The Proceedings of the 34th (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2024.
- ⑤ Hashimoto, T., Honda, T., Oda, Y., “Study on the Effect of Density Change due to Suspended Fine Sediment on Tsunami Force” , The Proceedings of the 33rd (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2022.

(3) その他

- ① 崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、太田成、園田秀明、猪野晋、「3 次元 FE 解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討(その 1) 検討概要と基礎浮上り解析の機能検証」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.951-952、令和 4 年
- ② 太田成、園田秀明、猪野晋、崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、「3 次元 FE 解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討(その 2) 実験の再現解析(1)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.953-954、令和 4 年
- ③ 園田秀明、太田成、猪野晋、崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、「3 次元 FE 解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討(その 3) 実験の再現解析(2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.955-956、令和 4 年
- ④ 塩見忠彦、崔炳賢、西田明美、川田学、太田成、園田秀明、猪野晋、「3 次元 FE 解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討(その 4) 低接地率の誘発上下動」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.957-958、令和 4 年
- ⑤ 片山雄貴、紺谷修、安河内淳一、稲葉侑亮、神林大輔、「300℃までのシール条件及びア

ンシール条件におけるコンクリートの力学特性の変化」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.997-998、令和 6 年

3.4 成果の活用等

3.4.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

(1) 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

本研究では、基準地震動に対する建物・構築物の耐震設計に係る適合性審査における妥当性判断に資するため、地震力の増大等により建屋が低接地率状態になる場合の地震応答解析の適用性に関する技術的知見を取りまとめた^{2.1.3}。当該知見は委託先により学会発表等で公表^{2.1.10-2.1.15}され、事業者を含めて広く周知されている。本研究で得られた知見は、耐震設計に係る適合性審査だけでなく、安全性向上評価において事業者が採用する地震応答解析手法を確認するときの技術基盤としても活用されることが期待される。

(2) 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

本研究では、重大事故時のような高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について審査する際の知見を拡充する RC 部材の材料非線形を考慮した地震時応答挙動及び耐力評価方法に基づいた弾塑性解析手法の適用性に関する技術的知見を取りまとめた^{2.1.22}。当該知見の一部は委託先により学会発表等で公表済みであり^{2.1.25,2.1.26}、残りの知見も論文等で公表する計画である。本研究で得られた知見は、論文等として公表後、耐震設計に係る適合性審査だけでなく、安全性向上評価において事業者が採用する弾塑性解析手法の適用性を確認するときの技術基盤としても活用されることが期待される。

3.4.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

本研究で得られた HTTR 建屋及び周辺地盤の振動特性の分析並びに三次元有限要素モデルによる解析に係る知見は、規制庁及び共同研究先により学会発表、論文等で公表しており^{2.2.5}等、事業者を含め広く周知されている。また、本研究の成果は適合性審査や将来的な地震リスク評価における建屋の三次元耐震解析手法の妥当性を確認する際の判断材料として活用されることが見込まれる。

3.4.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

本研究では、地震応答解析に用いるモデルに応じた減衰定数・減衰評価手法を設定するため、減衰効果の要因に関する分析・知見の蓄積を実施した^{2.3.3,2.3.4}。本研究で得られた知見は、質点系モデルの減衰定数の妥当性について、建物の構造の複雑さや単純さなど構造的特徴を考慮した上での審査時の判断の一助として活用されることが期待される。

3.4.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価に係る研究で得られた知見の一部は論文等で公表^{2.4.1-2.4.4}しており、今後、実験及び解析による成果を取りまとめ論文等を公表予定である。また、本研究で得られた成果は、論文等として公表後、屋外重要土木構造物

等の耐震性評価に関する審査において、礫質土地盤等の液状化による構造物への影響を考慮した解析手法、モデル化、解析結果等の妥当性を確認する際の技術的根拠として活用されることが期待される。

3.4.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

代表的な配管要素について、設計レベル及び設計レベルを超える繰り返し荷重に対する耐震性に関する知見を拡充した。これらの知見は、現行の規制要求に基づいて設計された配管系が、基準地震動による地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないことを確認したものである。本知見は、論文等として公表した後、基準地震動に対する、機器・配管等の耐震設計に係る適合性審査における妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待される。また基準地震動を超える領域での分析を行い、設計に用いる許容限界の裕度について確認した結果は、確率論的リスク評価や安全裕度評価において配管系の耐震性を確認する上で基礎的な知見を与えるものである。

3.4.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

既設の原子力施設の地震リスクを評価するには、過去に経験した地震の影響、すなわち、繰り返し入力される地震力の影響にも着目し、施設を構成する各種設備の基準地震動を超える領域までの耐震性を明らかにすることが重要である。本研究では、繰り返し入力される地震力が原子炉本体基礎の復元力特性に及ぼす影響に係る知見を拡充した。本研究で得られた知見は、論文等として公表した後、安全性向上評価やリスク情報を活用した原子力規制検査において、既設の原子力発電所の原子炉本体等の重要設備のフラジリティ評価結果の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待される。

また、本研究では、既往の復元力特性評価法が原子炉本体基礎のせん断剛性を過大評価する可能性を示唆した。この知見は原子力施設の耐震安全性に係る適合性審査において、既設の原子力発電所の原子炉本体等の重要設備の地震応答解析結果の妥当性判断に資する技術的知見として活用されることが期待される。

3.4.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

既設の実用発電用原子炉施設に新たに導入された設備である制振装置は、現状では適用実績はまだ少なく、審査の対象となった制振装置の適用設備も B クラスであるが、今後適用実績の増加、適用範囲の拡大（S クラス設備への適用）が予想される。制振装置の審査における留意点を整理した「審査における留意点」は、NRA 技術報告等として公表することにより、制振装置の審査、JEAC4601-2021 の機器・配管系支持構造物のエネルギー吸収を利用した耐震設計の技術評価に関する参考情報として活用することが可能である。

3.4.8 黒津波の発生条件等の検討

本研究では、黒津波の発生可能性の評価に係る知見として、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率は、人口密度及び港湾形状等に基づく閉鎖度指標（港湾の海水交換の効率を意味する指標）と因果関係があることを示した^{2.8.3}。黒津波の影響評価に係る知見として、細粒子を含む泥水を用いた委託事業による水理試験^{2.8.4-2.8.6, 2.8.8, 2.8.9}及び数値解析を実施し、淡水と比べて密度の大きい泥水の最大波力は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。ただし、その理由は不明であるものの、条件によっては流体密度の増分以上に最大波力が増加する場合があった。

これらの知見は、耐津波設計に係る設工認審査ガイドの荷重評価に関する記載について、津波荷重の算定に対し、黒津波を考慮に入れる場合の条件とその時の評価方法に関する技術的知見として活用されることが期待される。

3.4.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

本研究で得られた設置状況及び形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価に係る知見は、規制庁及び委託先により学会発表^{2.9.13, 2.9.18, 2.9.19}、論文^{2.9.9, 2.9.14, 2.9.15}等で公表しており、事業者を含め広く周知されている。新規制基準適合性審査において衝撃荷重が作用する建物・構築物を評価するための技術的知見として活用することが期待される。また、本研究の設置状況を考慮した衝撃評価に係る研究成果^{2.9.9, 2.9.14, 2.9.15}は、一般社団法人防衛施設学会のガイドラインに活用される見込みである。

3.4.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

本研究では、衝撃振動に対する設備の応答評価にあたって、既往の地震応答解析手法を適用して解析を実施する際の適用性を確認した。これらの知見の一部は規制庁及び共同研究先により学会にて公表済み^{2.10.4}であり、残りの知見を論文等として公表した後、航空機衝突影響評価に関する適合性審査等において、事業者の申請・報告内容の妥当性を確認する際の技術的知見として活用されることが期待される。

3.5 今後の課題等

各研究実施項目における成果を踏まえて、今後の課題を以下のとおりまとめた。

3.5.1 非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性評価

(1) 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

文献調査、既往実験のシミュレーション解析結果等から、低接地率状態となる建屋の応答評価に関する知見を蓄積し低接地率の挙動や動的な鉛直地震動の影響に着目した評価手法の適用性を確認できた。しかしながら、実際の建屋は、建屋が地盤に埋め込まれている、隣接建屋が存在している等、シミュレーション解析の対象とした模型実験等と比べ、建屋・地盤間の条件が複雑となっている場合があることから、今後も、より複雑な建屋・地盤間の条件での知見の蓄積は重要と考える。

(2) 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

高温状態等の影響が建屋の応答特性へ与える影響に関する知見を蓄積し、事故後の状態を対象とした建屋の地震時応力解析手法の適用性を確認できた。しかしながら、本検討で対象とした RCCV 以外にも、PCCV 等の構造形式が異なる施設も存在することから、今後も、そのような他の構造形式を対象とした知見の蓄積が重要と考える。また、RC 部材の材料非線形特性を考慮した弾塑性解析で重要となるコンクリートの材料モデルは、近年になり実務設計でも活用されるようになっているが、その材料モデルを用いた弾塑性解析は、コンクリート材料特有の破壊現象の複雑さもあり、高温時における地震時挙動を想定した原子炉建屋の設計に適用できる標準的な解析手法にはなっていないと考える。このため、今後も、RC 部材の材料非線形特性を考慮した弾塑性解析の事例を増やし、知見を蓄積することは重要と考える。

3.5.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

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では、建屋及び周辺地盤の三次元挙動を把握した。ただし、HTTR 建屋の構造的特徴（形状の非対称性、構造種別の違い等）が地震時挙動に及ぼす影響を明らかにするためには、より詳細な分析が重要と考えられる。

実測データを活用した三次元耐震解析手法の高度化では、建屋の積載重量等を実建屋に合わせて作成し、各要素が応答結果の再現性にどの程度影響を与えるか確認した。ただし、三次元解析の精度を更に向上させるためには、地盤のモデル化や地盤と建屋の相互作用の考慮方法等の改良が重要と考えられる。

3.5.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

減衰定数の設定に係る検討では、質点系モデルの減衰に関する知見を明確にできたが、文献調査と試解析例という限られた条件での調査分析であることから、今後、更なる精緻化が必要であり、3次元有限要素解析における減衰定数に寄与する要因ごとの明確な分析が必要と考える。特に、建物・構築物の減衰要因の一つである構造の複雑さについては、既往の研究事例がほとんどなく、そのメカニズムが明確になっていない。そのため、部材レベルの単純な構造物模型を用いた振動実験により建物自体が有する減衰特性を把握するとともに、上述の構造物模型に構造部材又は重量を付加した模型を用いた振動実験により付加した構造部材等が減衰に与える影響を分析し、構造の複雑さ等の減衰要因に関する技術的知見を拡充する必要がある。

3.5.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

遠心模型実験では、盛土や構造物の設置による複雑な地盤内応力、応力性状における構造物への作用荷重、構造物の応答加速度、変形挙動の特徴を把握するとともに、シミュレーション解析による地盤内応力や過剰間隙水圧等の傾向から実験の再現性を把握した。不飽和地盤については比較的良い再現性が見られたが、飽和地盤については再現性が低かった。これについては、飽和地盤における過剰間隙水圧の上昇・消散過程が実験と相違していることが一因として考えられ、これを改善させる必要がある。また、構造物へ作用する土圧等の特徴と、これに伴う構造物の変形、加速度応答は把握できたものの、構造物に発生する応力や周辺地盤の地盤種別や地形条件による構造物への影響については確認できておらず、これらの知見を拡充する必要がある。

3.5.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

本研究により、異径ティのような複雑な形状の配管要素では、接続配管溶接部近傍で疲労亀裂が発生するケースがあり、低サイクル疲労以外の劣化モード（例えば、応力腐食割れ等）と重畳する可能性が示唆された。既往研究においても、地震荷重とその他の劣化モードの重畳の可能性については分析されているが、異径ティを含む複雑な形状の配管要素の損傷に関する知見は少ないため、その影響を改めて調査する必要がある。具体的には、複数の劣化モードの重畳が発生する際の荷重条件・配管要素形状の特性等进行分析し、その健全性の評価において留意すべき事項を整理することが課題として挙げられる。

3.5.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

本研究から、既往の復元力特性評価法は、原子炉本体基礎のせん断剛性を過大評価する可能性が示唆された。これは、鋼板と充填コンクリート間の付着は小さく、それらのせん断剛性の完全な合成が成り立たないことが原因であると考えられる。そのため、鋼板と充填コンクリート間の付着特性をパラメータとした三次元有限要素法解析を用いて試験結果

の再現を試み、その結果に基づき試験結果の詳細分析を進め、原子炉本体基礎のせん断剛性に係る技術的知見を拡充する必要がある。

3.5.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

代表的な型式の一般の制振装置の調査から得られた制振装置を審査する上で参考となる情報を「審査における留意点」として整理した。調査の対象としなかった制振装置の型式及び制振装置メーカーの見解の収集に至らなかった鉛ダンパーについて、実用発電用原子炉施設設備への適用における留意点の抽出の必要性が生じた場合は、改めて調査、分析等が必要である。また、審査の経験等を踏まえて、知見を拡充する必要がある。以上により得られた知見については、必要に応じて「審査における留意点」に反映する。

3.5.8 黒津波の発生条件等の検討

黒津波の発生可能性評価に係る知見として、粒径の細かい土砂の含有率を意味する細粒分含有率と因果関係がある地域条件を示した。黒津波の発生可能性のある地域を簡易評価するための知見を示したものの、選定された地域に対する詳細な絞り込み方法の策定が課題である。

黒津波の影響評価に係る知見として、細粒子を含む泥水を用いた水理試験及び数値解析を実施し、淡水と比べて密度の大きい泥水の最大波力は、流体密度の増分の範囲内におおむね収まることを示した。ただし、条件によっては流体密度以上に最大波力が増加する場合があります、要因の特定が課題である。要因を特定した上で、密度変化を踏まえた波力・波圧について具体的な評価手法を構築する必要がある。

3.5.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

設置状況を考慮した建物・構築物の衝撃評価については、令和6年度までは、半球型の先端形状を有する剛飛翔体を用いた衝突実験を実施してきた。今後の課題として、先端形状の影響を確認した知見が少ないことから、先端形状円錐型及び平坦型の貫入事象に係る知見を拡充する。

形状特性を考慮した建物・構築物の衝撃評価については、令和6年度までは剛飛翔体衝突に対する平板及びアーチ構造に関する衝突実験を実施してきた。今後の課題として、衝撃作用時間の長くなる柔飛翔体衝突に対する平板及びアーチ構造の耐衝撃性に係る知見を拡充する。

3.5.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

本研究では、人工的に設定したショック波及びランダム波を入力として試験及び解析を実施してきた。実際に大型航空機等が建屋に衝突した際に生じる衝撃振動と、本研究で用いたショック波及びランダム波の差異を踏まえた設備の応答解析について知見を拡充する

必要がある。また、令和2年度までに実施した衝撃加振試験では、設備を対象とした既往の耐震試験の知見から想定された損傷モードとは異なる、衝撃振動による損傷モードが発生することが確認されているが、このような損傷モードの発生原因は明らかになっていない。そのため、衝撃振動による損傷モードの発生原因等に係る知見を拡充し、大型航空機の衝突に対する設備安全性評価にあたって留意すべき事項を明確にすることが課題として挙げられる。

参考文献一覧

1.1 背景

- 1.1.1 原子力規制委員会、NRA技術報告、「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」、NTEC-2021-4002、令和3年
<https://www.nra.go.jp/data/000345676.pdf>（2025年1月31日確認）
- 1.1.2 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、令和2年
- 1.1.3 河井正、百間幸晴、山田正太郎、山崎宏晃、森和成、野田利弘、「密な礫質土地盤の動的遠心模型実験に対する数値シミュレーション」、第65 回理論応用力学講演会、令和元年
[doi:10.11345/japannctam.65.0_79](https://doi.org/10.11345/japannctam.65.0_79)（2025年1月31日確認）
- 1.1.4 Kisaburo AZUMA, Yoshihito YAMAGUCHI, Yinsheng LI, “PILOT STUDY ON SEISMIC FRAGILITY EVALUATION FOR DEGRADED AUSTENITIC STAINLESS STEEL PIPING USING PROBABILISTIC FRACTURE MECHANICS CODE PASCAL-SP”, Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2021) , 2021.
- 1.1.5 原子力規制委員会、「「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針」について」、令和2年
<https://www.nra.go.jp/data/000315571.pdf>（2025年1月31日確認）
- 1.1.6 Takuya TORIYAMA, Nobuo ISHIDA, “A METHOD FOR EVALUATING TSUNAMI LOADING ON SEAWALLS DURING OVERFLOW”, Virtual International Conference on Coastal Engineering (VICCE) , 2020.
- 1.1.7 太田良巳、澤田祥平、紺谷修、二階堂雄司、岡安隆史、金子貴司、日向大樹、石木健士朗、相馬和貴、山田和彦、安本宏、「衝撃作用を受ける構造物の衝撃挙動評価に関する取り組み、シンポジウム「耐衝撃設計の合理化に向けて－現状と新しい流れ、今後の課題」」、日本建築学会、土木学会共催、令和元年
- 1.1.8 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、「設地型計器用変圧器にガタが有る場合の衝撃耐力に係る試験結果について（案）」、第43 回技術情報検討会、令和2年
- 1.1.9 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、「キャスクのスラップダウン落下試験から得られた最新知見について（案）」、第38 回技術情報検討会、令和元年

2.1.1 地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動に関する検討

- 2.1.1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成31年度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」、令和2年（公開準備中）
- 2.1.2 崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、李銀生、「原子炉建屋の3次元有限要素モデルを用いた地震応答解析手法に関わる標準的解析要領」、JAEA-Research 2021-017、令和4年
doi:10.11484/jaea-research-2021-017（2025年1月31日確認）
- 2.1.3 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（地震時に低接地率状態となる建屋の応答挙動）事業」、令和4年（公開準備中）
- 2.1.4 原子力規制委員会、「耐震設計に係る設工認審査ガイド」、原管地発第 1306195 号、平成 25 年
<https://www.nra.go.jp/data/000209867.pdf>（2025 年 1 月 31 日確認）
- 2.1.5 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針：重要度分類・許容応力編、JEAG4601・補-1984」、昭和 59 年
- 2.1.6 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」、昭和 62 年
- 2.1.7 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」、平成 3 年
- 2.1.8 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008」、平成 20 年
- 2.1.9 中国電力株式会社、「島根原子力発電所 2 号機、工事計画認可申請（補正）に係る論点整理について」、第 1054 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料 1-3、pp.2-14、令和 4 年
<https://www2.nra.go.jp/data/000393448.pdf>（2025 年 1 月 31 日確認）
- 2.1.10 崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、太田成、園田秀明、猪野晋、「3次元FE解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討（その1）検討概要と基礎浮上り解析の機能検証」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.951-952、令和4年
- 2.1.11 太田成、園田秀明、猪野晋、崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、「3次元FE解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討（その2）実験の再現解析（1）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.953-954、令和4年
- 2.1.12 園田秀明、太田成、猪野晋、崔炳賢、西田明美、川田学、塩見忠彦、「3次元FE解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討（その3）実験の再現解析（2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.955-956、令和4年

- 2.1.13 塩見忠彦、崔炳賢、西田明美、川田学、太田成、園田秀明、猪野晋、「3次元FE解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討（その4）低接地率の誘発上下動」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.957-958、令和4年
- 2.1.14 Ito, S., Ota, A., Sonobe, H., Ino, S., Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., “Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- 2.1.15 Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Li, Y., “Analytical study for low ground contact ratio of buildings due to the basemat uplift using a three-dimensional finite element model”, Proceedings of the 2022, Proceedings of the 29th International Conference on Nuclear Engineering (ICON29), ICON29-93870, August 8-12, 2022.
- 2.1.16 独立行政法人原子力安全基盤機構、「平成16～18年度 原子力施設の非線形地盤・構造物相互作用試験及び基準整備に関する報告書」、平成17年～平成19年
- 2.1.17 矢野明義、内藤幸雄、堀越清視、「非線形連結要素 FEM モデルによる基礎浮き上がり動的解析:振動台実験のシミュレーションによる精度検討」、日本建築学会構造系論文集、427号、pp. 87-98、平成3年
doi:10.3130/aijsx.427.0_87（2025年1月31日確認）
- 2.1.18 今村晃、橋本尚之、鈴木康嗣、安達直人、酒向裕司、「砂地盤及び粘土地盤に支持された直接基礎構造物の浮き上がり挙動」、日本建築学会構造系論文集、78巻、692号、pp. 1759-1768、平成25年
doi:10.3130/aijs.78.1759（2025年1月31日確認）
- 2.1.19 株式会社アーク情報システム「TDAPIII 3次元非線形時刻歴応答解析プログラム」ホームページ
<https://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/tdap3/>（2024年11月28日確認）
- 2.1.20 Hotta et.al, “A numerical study on interaction between structure and foundation rock during earthquake using 3D FEM”, 2f-0021, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE), 2021.
- 2.1.21 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、「FINAS/STAR 規模非線形構造解析システム」
https://www.engineering-eye.com/FINAS_STAR/index.html（2024年11月28日確認）
- 2.1.2 高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討**
- 2.1.22 鹿島建設株式会社、「令和3～6年度原子力施設等防災対策等委託費（高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討）事業成果報告書」、令和4年～令和7年（公開準備中）
- 2.1.23 一般社団法人日本建築学会、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、平成17年

- 2.1.24 一般社団法人日本機械学会、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」、JSME S NE1-2003、平成 15 年
- 2.1.25 Katayama, Y., Kontani, O., Mihara, Y., Yasukochi, J., Inaba, Y., Kambayashi, D., “Physical Material Properties of Normal Concrete Subjected to High Temperature”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.
- 2.1.26 片山雄貴、紺谷修、安河内淳一、稲葉侑亮、神林大輔、「300℃までのシール条件及びアンシール条件におけるコンクリートの力学特性の変化」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.997-998、令和 6 年
- 2.1.27 ダッソー・システムズ株式会社「ABAQUS UNIFIED FEA - SIMULIA」ホームページ
<https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/abaqus/> (2024 年 11 月 28 日確認)
- 2.1.28 European Committee for Standardization, “Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-2: General rules – Structural fire design”, EN 1992-1-2:2004, 2004.
- 2.1.29 International Atomic Energy Agency, “Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise”, IAEA TECDOC No. 1722, 2013.
- 2.1.30 一般社団法人日本機械学会、「発電用原子力設備規格シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR 鉄筋コンクリート製格納容器編)」、JSME S NX5-2018、平成 30 年
- 2.1.31 財団法人原子力発電技術機構、「重要構造物安全性評価 (原子炉格納容器信頼性実証事業) に関する総括報告書」、平成 15 年

2.2 高密度に配置した地震計による建屋の精緻な三次元挙動の把握

- 2.2.1 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.
- 2.2.2 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、「共同研究成果報告書：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 5 年
<https://www.nra.go.jp/data/000437955.pdf> (2025 年 1 月 24 日確認)
- 2.2.3 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、「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」、令和 7 年公表予定 (公開準備中)
- 2.2.4 Kumazawa, M., Kunitomo, T., Nakajima, T., Tsuruga, K., Hasada, Y., Nagao, H., Matsumoto, H., Kasahara, J., Fujii, N. and 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.

- 2.2.5 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 6 年
- 2.2.6 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 6 年
- 2.2.7 気象庁、計測震度の算出方法、
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html（2024 年 12 月 24 日確認）
- 2.2.8 Nishida, A., Kawata, M., Choi, B., Shiomi, T., Iigaki, K. and 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.
- 2.2.9 Choi, B., Nishida, A., Shiomi, T., Kawata, M., Iigaki, K. and 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.

2.3 建物・構築物の地震応答解析における減衰定数の設定に係る検討

- 2.3.1 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術規定（JEAG4601-1987）」、昭和62年
- 2.3.2 東京電力ホールディングス株式会社、「別紙4 地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート造部の減衰定数に関する検討」
<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s7/d1>（2025 年 1 月 15 日確認）
- 2.3.3. 株式会社篠塚研究所、「令和5年度原子力施設等防災対策等委託費（建物・構築物の地震応答解析における減衰の設定に関する調査・分析）事業成果報告書」、令和6年
<https://www.nra.go.jp/data/000473718.pdf>（2025年6月11日確認）
<https://www.nra.go.jp/data/000473719.pdf>（2025年6月11日確認）
- 2.3.4 大成建設株式会社、「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（建物・構築物の地震応答解析における減衰の設定に関する調査・分析）事業成果報告書」、令和7年（公開準備中）
- 2.3.5 （財）原子力工学試験センター「原子炉建屋の弾塑性試験動的復元力に係わる試験

報告書昭和62年度」、昭和63年3月

- 2.3.6 一般社団法人日本建築学会、「建築物の減衰と振動」、令和2年
- 2.3.7 一般社団法人日本建築学会構造委員会、「「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書」、平成13年
- 2.3.8 一般社団法人日本建築学会 荷重運営委員会 建築物の減衰機構とその性能評価小委員会、「各種建築物の実測データベース」、令和2年
<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s7/d1> (2025年1月15日確認)
- 2.3.9 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術規定(JEAG4601-1991) 追補版」、平成3年

2.4 礫質土等の地盤の液状化による施設への影響評価

- 2.4.1 国立大学法人東北大学、「令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(礫質土地盤等の液状化による防潮堤等の施設への影響評価に関する検討) 事業委託成果報告書」、令和4年
<https://www.nra.go.jp/data/000404681.pdf> (2025年6月11日確認)
- 2.4.2 学校法人東北工業大学、「令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(礫質土地盤等の液状化による施設への影響評価に関する遠心模型実験及び数値解析による検討) 事業委託成果報告書」、令和5年(公開準備中)
- 2.4.3 学校法人東北工業大学、「令和5年度原子力施設等防災対策等委託費(礫質土地盤等の液状化による施設への影響評価に関する遠心模型実験及び数値解析による検討) 事業委託成果報告書」、令和6年(公開準備中)
- 2.4.4 学校法人東北工業大学、「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費(礫質土地盤等の液状化による施設への影響評価に関する遠心模型実験及び数値解析による検討) 事業委託成果報告書」、令和7年(公開準備中)
- 2.4.5 原子力規制委員会、「耐震設計に係る設工認審査ガイド」、原管地発第1306195号 原子力規制委員会決定、平成25年
- 2.4.6 一般財団法人電力中央研究所、「1993年北海道南西沖地震における礫地盤液状化の原因解明(その1)―地盤調査・試験と液状化判定―」、電力中央研究報告、研究報告:U94007、平成6年
- 2.4.7 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、「地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究」、RREP-2021-4001、令和3年
- 2.4.8 大友敬三、末広俊夫、河井正、金谷賢生、「強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究」、土木学会論文集、2003 巻、724 号、pp.157-175、平成5年、doi:10.2208/jscej.2003.724_157
- 2.4.9 Kawai, T., “Prospective method to estimate shear stress in the ground using two earth

pressure cells”, Soils and Foundations, Vol. 64, Issue 6, 2024.

doi:10.1016/j.sandf.2024.101504

- 2.4.10 国立大学法人東北大学、「令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費（防潮堤等の基礎地盤の液状化の影響評価に関する実験的検討及び解析的検討）事業委託成果報告書」、令和 3 年

<https://www.nra.go.jp/data/000360179.pdf>（2025 年 6 月 11 日確認）

2.5 大きな地震を経験した配管系の耐震性の把握

- 2.5.1 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針：重要度分類・許容応力編，JEAG4601・補-1984」、昭和 59 年
- 2.5.2 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」、昭和 62 年
- 2.5.3 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」、平成 3 年
- 2.5.4 財団法人原子力発電技術機構、「平成 13 年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書その 2 配管終局強度」、平成 14 年
- 2.5.5 一般社団法人日本機械学会、「発電用原子力設備規格 事例規格 弾塑性応答解析に基づく耐震 S クラス配管の耐震設計に関する代替規定」、令和元年
- 2.5.6 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program,” NUREG/CR-6983, Washington, DC, 2008.
- 2.5.7 Watakabe, T., Nakamura, I., Otani, A., Morishita, M., Shibutani, T., and Shiratori, M., “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis: Part 4 - Second Round Benchmark Analyses with Stainless Steel Piping Component Test,” Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2017-65324, ASME, 2017.
- 2.5.8 Nakamura, I., Shibutani, T., Kuriyama, Y., Kasai, N., "Shaking Table Test on a Piping System Model for Developing High-Quality Simulation Model." Proceedings of the ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2023-106081, ASME, 2023.
- 2.5.9 Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., "Design Margins of Fatigue Life of Carbon Steel Elbows and Tees Subjected to Reversing Dynamic Loads", Proceedings of the ASME 2024 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2024-123304, ASME, 2024.
- 2.5.10 Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., "Uncertain factors in elastic-plastic finite element analysis for elbows and tees", Proceedings of the ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2023-106166, ASME, 2023.
- 2.5.11 一般社団法人日本機械学会、「発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版）」、平

成 24 年

- 2.5.12 一般社団法人日本機械学会、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012 年版)」、平成 25 年

2.6 大きな地震を経験した鋼板コンクリート製の原子炉本体基礎の耐震性の把握

- 2.6.1 菊地利喜朗、村野兼司、肱岡康雄、美原義徳、「21555 原子炉本体基礎の弾塑性モデル化手法に関する研究、その 1 復元力特性評価法の妥当性検討」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1109-1110、平成 22 年
- 2.6.2 肱岡康雄、菊地利喜朗、佐藤仁、美原義徳、「21556 原子炉本体基礎の弾塑性モデル化手法に関する研究、その 2 復元力特性評価法の適用性検討」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1111-1112、平成 22 年
- 2.6.3 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会、「電気技術指針原子力編 鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針 建物・構築物編 JEAG4618-2005」、社団法人日本電気協会、平成 17 年
- 2.6.4 日比野憲太、橋本紀彦、藤原啓太、高松直丘、「水平加力を受ける隔壁方式の鋼板コンクリート構造製の基礎構造物の三次元非線形有限要素法解析」、コンクリート工学年次論文集、44 巻、2 号、pp.655-660、令和 4 年

2.7 制振装置を適用した設備の耐震性の把握

- 2.7.1 財団法人原子力発電技術機構、「原子力発電施設耐震信頼性実証試験 主蒸気系等耐震実証試験」、平成 11 年
- 2.7.2 浪田芳郎、川畑淳一、市橋一郎、福田俊彦、「弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発(第 1 報弾塑性ダンパの単体設計手法の開発)」、日本機械学会論文集 C 編、60 巻 579 号、pp.3794-3799、平成 6 年、doi:10.1299/kikaic.60.3794
- 2.7.3 浪田芳郎、川畑淳一、市橋一郎、福田俊彦、「弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発(第 2 報、一次元配管モデル試験とその応答解析)」、日本機械学会論文集 C 編、61 巻 590 号、pp.3874-3880、平成 7 年、doi:10.1299/kikaic.61.3874
- 2.7.4 浪田芳郎、川畑淳一、市橋一郎、福田俊彦、「弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発(第 3 報、三次元配管モデル試験とその応答解析)」、日本機械学会論文集 C 編、61 巻 590 号、pp. 3881-3888、平成 7 年、doi:10.1299/kikaic.61.3881
- 2.7.5 浪田芳郎、川畑淳一、市橋一郎、福田俊彦、「弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発(第 4 報、時刻歴解析で用いるダンパの荷重-変位モデルの検討)」、日本機械学会論文集 C 編、62 巻 594 号、pp.494-501、平成 8 年、doi:10.1299/kikaic.62.494
- 2.7.6 一般財団法人発電設備技術検査協会、「三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験 報告書」、平成 28 年

- 2.7.7 一般社団法人日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2021」、令和 5 年

2.8 黒津波の発生条件等の検討

- 2.8.1 NHK、「NHK スペシャル連動企画“黒い津波”～知られざる実像～」
<https://www3.nhk.or.jp/news/special/shinsai-portal/8/kuroinami/>（2025 年 1 月 7 日確認）
- 2.8.2 木瀬晃周、有川太郎、「土砂・シルトを含んだ津波の波力に関する実験的研究」、土木学会論文集 B2(海岸工学)、76 巻、2 号、pp. I_385-I_390、令和 2 年、doi:10.2208/kaigan.76.2_I_385
- 2.8.3 鳥山拓也、山下啓、石田暢生、「シルト性堆積物の含有割合と採取地域の関係分析の試み」、土木学会論文集特集号（海岸工学）、Vol. 80、No. 17、令和 6 年、doi:10.2208/jscej.24-17229
- 2.8.4 大成建設株式会社、「令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験(黒津波影響))事業 成果報告書」、令和 5 年
<https://www.nra.go.jp/data/000447909.pdf>（2024 年 9 月 27 日確認）
- 2.8.5 大成建設株式会社、「令和 5 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験(黒津波影響))事業 成果報告書」、令和 6 年
<https://www.nra.go.jp/data/000473720.pdf>（2024 年 9 月 27 日確認）
- 2.8.6 大成建設株式会社、「令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験(黒津波影響))事業 成果報告書」、令和 7 年（公開準備中）
- 2.8.7 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、「令和 5 年度耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る黒津波影響解析 成果報告書」、令和 6 年（公開準備中）
- 2.8.8 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「圧力勾配を考慮した底泥移動と津波波力に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号（海岸工学）、79 巻、17 号、令和 5 年、doi:10.2208/jscej.23-17026
- 2.8.9 橋本貴之、本田隆英、織田幸伸、「泥水密度の違いによる津波波形および波力の変化特性に関する実験的研究」、土木学会論文集特集号（海岸工学）、80 巻、17 号、令和 6 年、doi:10.2208/jscej.24-17061
- 2.8.10 一般社団法人 廃棄物循環資源学会、「東日本大震災における堆積汚泥の化学性状について」、平成 23 年
- 2.8.11 菅野尚、「仙台湾の底質とアカガイ漁場について」、東北区水産研究所研究報告、26 号、pp. 55-75、平成 8 年
- 2.8.12 田邊徹、鈴木矩晃、山崎千登勢、「東日本大震災後の仙台湾南部海域における底質

- の変化」、宮城水産研究報告、22 号、令和 4 年
- 2.8.13 松浦健太郎、「Stan と R でベイズ統計モデリング」、p.60、共立出版、平成 28 年
- 2.8.14 松富英夫、川島峻、「津波氾濫流の密度に関する基礎実験」、土木学会論文集 B2(海岸工学)、71 巻、2 号、平成 27 年、doi:0.2208/kaigan.71.i_355
- 2.8.15 Whim van Leussen, Job Dronkers, "Physical processes in estuaries: An introduction", Springer, 1988, ISBN-13: 978-3642736933
- 2.8.16 西田尚央、伊藤慎、「Fluid mud の特徴とその地層解析における役割」、地質学雑誌、115 巻、4 号、pp.149-167、平成 21 年

2.9 建物・構築物の設置状況及び形状特性を考慮した衝撃評価

- 2.9.1 鹿島建設株式会社、「令和 3 年度原子力施設等防災対策等委託費（衝撃作用を受ける構造物の設置状況及び形状特性を考慮した安全性評価）事業委託成果報告書」、令和 4 年（公開準備中）
- 2.9.2 鹿島建設株式会社、「令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費（衝撃作用を受ける構造物の設置状況及び形状特性を考慮した安全性評価）事業委託成果報告書」、令和 5 年（公開準備中）
- 2.9.3 鹿島建設株式会社、「令和 5 年度原子力施設等防災対策等委託費（衝撃作用を受ける構造物の形状特性を考慮した安全性評価）事業委託成果報告書」、令和 6 年（公開準備中）
- 2.9.4 鹿島建設株式会社、「令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費（衝撃作用を受ける構造物の形状特性を考慮した安全性評価）事業委託成果報告書」、令和 7 年（公開準備中）
- 2.9.5 原子力規制委員会、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」、原規技発第 1306193 号制定、平成 25 年
- 2.9.6 原子炉安全専門審査会、「タービンミサイル評価について」、昭和 52 年
- 2.9.7 原子力規制委員会、「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド」、原規技発第 1409178 号制定、平成 26 年
- 2.9.8 原子力規制委員会、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」、原規技発 13061611 号制定、平成 25 年
- 2.9.9 太田良巳、二階堂雄司、阿部大希、山崎宏晃、「来待石に対する半球型剛飛翔体の貫入事象に関する実験的研究」、岩の力学連合会第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集、pp.316-321、令和 7 年
- 2.9.10 Bernard, R.S. and Creighton, D.C. "Projectile penetration in soil and rock: Analysis for non-nomal impact", Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report SL-79-15, December 1979.
- 2.9.11 Department of the army : Fundamentals of protective design for conventional weapons,

- Technical Manual, TM5-855-1, Chapter 4, 1985.
- 2.9.12 Young, C.W. “Penetration Equations, Sandia National Laboratories”, CONTRACTOR REPORT, SAND97-2426, p.24, 1997.
- 2.9.13 一般社団法人防衛施設学会、「衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—」、pp.84-95、平成 30 年
- 2.9.14 太田良巳、松澤遼、「尖頭型飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会、I-17、令和 5 年
- 2.9.15 太田良巳、松澤遼、「岩盤材料に対する尖頭型飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.74-79、令和 6 年
- 2.9.16 太田良巳、松澤遼、「弾頭型剛飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察」、土木学会構造工学論文集、71A 巻、pp.825-861、令和 7 年
doi:10.11532/structcivil.71A.852
- 2.9.17 Frew, D.J., Forrestal, M.J., Hanchak, S.J. “Penetration experiments with limestone targets with ogive-nose steel projectiles”, J. of Applied Mechanics, 67(4), pp. 841-845, 2000.
- 2.9.18 太田良巳、二階堂雄司、藪内耕一、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その 1：実験概要及び簡易評価）」、土木学会令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-394、令和 6 年
- 2.9.19 二階堂雄司、太田良巳、川上綾太、相馬和貴、山田和彦、「衝撃作用を受けるアーチ構造の裏面剥離特性に関する実験的研究（その 2：実験結果及び考察）」、土木学会令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、I-395、令和 6 年
- 2.9.20 Chang, W. S., “Impact of solid missiles on concrete barriers”, Journal of the Structural Division, ASCE, 107, pp.257-271, 1981.
- 2.9.21 一般社団法人日本建築学会、「建築物の耐衝撃設計の考え方」、pp.101-115、平成 27 年

2.10 衝撃力に対する設備の応答評価手法の検討

- 2.10.1 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド”、原規技発第 1409178 号制定、平成 26 年
- 2.10.2 Nuclear Energy Institute, “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs”, NEI 07-13 [Revision 8P], 2011.
- 2.10.3 原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、安全研究成果報告、「地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究」、RREP-2021-4001、令和 3 年
- 2.10.4 Nagai, N., Minakawa, Y., Hibino, K., Takamatsu, N., Ishida, N., Yoshimura, E., Maruyama, N., Furuya, O., “Shaking Table Test of Electrical Cabinet Considering Shock Vibration”, Transactions of the SMiRT 27, 2024.

執筆者一覧

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 上席技術研究調査官 (1、3)
日比野 憲太 総括技術研究調査官 (1、2.6、3)
田岡 英斗 主任技術研究調査官 (2.7)
平松 昌子 主任技術研究調査官 (2.3)
太田 良巳 主任技術研究調査官 (2.9)
東 喜三郎 主任技術研究調査官 (2.5)
高野 雅美 技術計画専門職 (2.4)
森谷 寛 副主任技術研究調査官 (2.1)
鳥山 拓也 副主任技術研究調査官 (2.8)
永井 穰 副主任技術研究調査官 (2.10)
藤原 啓太 技術研究調査官 (2.5)
山川 光稀 技術研究調査官 (2.2)
土屋 隆 技術研究調査官 (2.4)

括弧内は、主に執筆した章を示す。