

共同研究成果報告書

機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

学校法人東京電機大学

令和5年7月

1. 研究目的

旧原子力発電技術機構及び原子力安全基盤機構は、機器配管系、電気品等の設備の耐震性の把握を目的として、その振動試験を継続的に行ってきた。これらの振動試験は、新設プラントの許認可等の審査に資することを目的としたものであり、新品の耐震Sクラスの設備を対象として、基準地震動レベルまでの耐震性を確認するとともに、一部の設備については限界耐力までを把握してきた。

しかしながら、近年は平成23年の東北地方太平洋沖地震等で大きな地震を経験した原子力発電所をはじめとした、既設の原子力発電所の再稼働に係る安全性確認のための審査が実施されている。また、原子炉等規制法は、事業者の自主的な安全性向上の取組みを促進するために安全性向上評価の届出を要求するとともに、その運用ガイドは、確率論的リスク評価を用いた原子力施設の脆弱性の把握及び安全性向上のために講じた措置の効果の確認方法を示している。これより本研究では、大きな地震を経験した設備の耐震性、特にその基準地震動レベルを超える領域での耐震性を把握し、既設の原子力発電所の確率論的地震リスク評価に資する知見を拡充する。

さらに、規制基準では外的事象として航空機や竜巻飛来物等の飛翔体衝突に対する設備の健全性を要求している。飛翔体衝突時の設備の健全性を評価するには、耐震設計において対象とする領域よりも短周期成分を有する衝撃振動に対する設備の応答特性に係る知見の把握が重要となる。そのため、衝撃振動による設備応答への解析評価手法の適用性を確認し、飛翔体衝突に対する設備の健全性評価に資する知見を拡充する。

2. 研究内容

2.1 耐震研究

大きな地震を経験したことによる影響が大きいと考えられる設備とその損傷モードとして配管系の疲労損傷が挙げられる。そこで、配管系の基準地震動レベル及び基準地震動を超えるレベルの地震荷重に対する疲労評価における裕度等を把握するため、試験片を用いた材料試験及び配管要素試験体を用いた振動試験を行う。

2.2 耐衝撃研究

衝撃振動の影響を受ける可能性のある設備の振動試験及び応答解析を行い、その衝撃応答特性を把握する。また、振動試験及び応答解析結果を分析・整理することで、応答解析手法の適用性を確認する。

3. 実施方法

3.1 耐震研究

大きな地震を経験した設備、特にその基準地震動を超えるレベルを対象に、下記の検討

を行う。

A) 設備の地震破損挙動の分析

大きな地震を経験した設備の耐震性への影響を調べるため、設備の機能・構造損傷の原因となる可能性のある部位を分析・整理する。

B) 配管要素の振動試験及び数値解析

A)の結果に基づき、設備の機能・構造損傷の原因となる可能性のある配管要素の振動試験及び数値解析を行う。

C) 設計評価手法の保守性の検証

A)とB)の結果に基づき、配管要素の疲労損傷に係る設計評価手法の保守性を検証する。

3.2 耐衝撃研究

A) 対象設備の選定及び衝撃応答解析手法の検討

衝撃振動の影響を受ける可能性のある設備を分析・整理し、対象設備を選定する。また、対象設備の衝撃応答評価に用いる解析手法を選定する。

B) 対象設備の振動試験及び応答解析

A)の結果に基づき、衝撃振動を受ける設備の振動試験及び応答解析を行い、対象設備の衝撃応答を評価・整理する。

C) 衝撃応答解析手法の適用性の検討

A)とB)の結果に基づき、対象設備の衝撃応答に対する応答解析手法の適用性を確認する。

4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	東京電機大学
(1) 耐震研究	◎	○
(2) 耐衝撃研究	◎	◎

(◎：主担当、○：副担当)

5. 共同研究参加者

区分	氏名	所属部局・職名	本研究における役割
原子力 規制庁	大橋 守人 日比野 憲太 東 喜三郎 藤原 啓太 永井 穰	原子力規制庁 技術基盤グループ 地震・津波研究部門	研究統括 項目(1)(2) 項目(1) 項目(1) 項目(2)

	高松 直丘 石田 暢生		研究指導 研究指導
東京電機大学	藤田 聡	東京電機大学 工学部 機械工学科 特別専任教授 耐震安全研究センター センター長	研究統括
	古屋 治	東京電機大学 理工学部 理工学科 機械工学系 教授 耐震安全研究センター 副センター長	項目 (1) (2)

6. 研究実施工程

項目		年度			
		令和2年度	令和3年度	令和4年度	
1. 耐震研究	A) 設備の地震破損挙動の分析	■			
	B) 配管要素の振動試験及び数値解析		■	■	
	C) 設計評価手法の保守性の検証				■
2. 耐衝撃研究	A) 対象設備の選定及び衝撃応答解析手法の検討	■			
	B) 対象設備の振動試験及び応答解析		■	■	
	C) 衝撃応答解析手法の適用性の検討				■

7. 成果概要

7.1 耐震研究

大きな地震を経験した既設の原子力発電所の設備は、繰り返し地震による耐震性への影響を確認しておくことが望ましいと考えられる。繰り返し地震が影響する設備とその破壊モードとして、配管の疲労損傷が挙げられる。そこで本研究では振動試験によって基準地震動レベル及び基準地震動を超えるレベルの入力波が繰り返し入力された場合の配管系の疲労損傷裕度を確認した。

振動試験には実機を縮尺した配管要素（エルボ、同径ティ及び異径ティ）の試験体を用いた。試験体は、現実的な繰り返し回数の正弦波で、設計上の累積疲労限度に達するように製作した。入力する正弦波は、基準地震動レベルの模擬地震波の周波数及び加速度を参考に設定した。この正弦波入力を繰り返すことで、配管系の低サイクル疲労に対する裕度を評価した。振動試験の結果、累積疲労損傷係数が設計上の許容限界を超える回数の正弦

波を入力しても試験体は損傷せず、従来設計評価は、累積疲労損傷係数を非常に保守的に評価していることを確認した。また、基準地震動を超えるレベルの加速度の正弦波を入力した場合にも、疲労損傷に至るには繰り返し加振する必要があり、配管系には十分な疲労損傷裕度があることを確認した。

7.2 耐衝撃研究

本研究では衝撃振動の影響を受ける可能性のある設備として、安全上の重要性が高く、衝撃振動の影響を受ける可能性のある機器を内蔵する電気盤を対象設備とした。電気盤は、筐体に電源装置、ファン、指示計等の内蔵機器を設置する構造であり、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手法を適用した衝撃応答解析によって耐衝撃性を評価できると考えられている。しかし、地震動と衝撃振動では、周波数帯、最大加速度、継続時間等に差異があることから、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、適用範囲等を明らかにする必要がある。そのため、本研究では、電気盤を模擬した試験体を対象に衝撃振動試験及びその再現解析を実施した。

衝撃振動試験は、試験体に動電式加振器を用いて衝撃振動を入力することで実施した。その結果、試験体の一次の固有振動数に近い入力で大きな応答増幅が生じた。このことから、衝撃振動においてもその応答増幅については、地震応答解析で用いられている振動論が適用できると考えられる。また、地震応答解析手法を用いた衝撃振動試験の再現解析を実施し、試験体の筐体、電源装置及び指示計等の衝撃振動に対する一次振動モードを再現できることを確認した。しかしながら、衝撃振動試験では電源装置及び指示計等の内蔵機器において、高次の衝撃応答が発生するとともに、再現解析ではこれらの衝撃応答を再現できなかった。今後、これらの衝撃応答の原因分析及び再現解析の精緻化を実施する予定である。

さらに、従来までの地震応答解析の知見では評価が困難なガタ・摩擦要素を有する機器について、要素試験体等を用いた衝撃振動試験及び再現解析を実施し、その応答をある程度再現できる解析モデルを構築した。今後、筐体に設置されたガタ・摩擦要素を有する内蔵機器の応答評価手法の適用性を確認するため、筐体とガタ・摩擦要素を有する内蔵機器を組み合わせた解析を実施する予定である。

8. 公表成果一覧

- 1 井上恭輔、古屋治、深沢剛司、藤田聡、日本機械学会、「計装盤等機械構造物の衝撃応答に関する研究」、No.22-9 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022、217、令和4年
- 2 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.

9. 参考文献一覧

- 1 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） 第I編軽水炉規格」、JSME SNC1-2012、平成25年
- 2 日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術指針」、JEAG4601-1987、昭和61年
- 3 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、「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」、安全研究成果報告、RREP-2021-4001、令和3年