602 原子力施設の免震技術の開発（その2） 渡り配管要素試験

Development of Seismic Isolation Technology for Nuclear Power Plant (Part 2) Component Test of Main Steam Crossover Piping

○水野 琴世（三菱重工）
神保 雅一（東芝）

岡本 拓（三菱重工）
小杉 慎司（日立 GE）

松岡 真二（三菱重工）
尾西 重信（中部電力）

Kotoyo MIZUNO, Hiromu OKAMOTO, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Takasago R&D Center, 2-1-1 Shinhamma, Arai, Takasago, Hyogo, 676-8686 Japan
Shinji MATSUOKA, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
Masakazu JINBO, Toshiba Corporation
Shinji KOSUGI, Hitachi-GE Nuclear Energy Co, Inc.
Shigenobu ONISHI, Chubu Electric Power Co, Inc.

The Japanese government accepted utilizing seismic isolation technology for nuclear power plants with the 2006 revision to the Nuclear Power Plant Seismic Design Review Guidance. The public-private sectors formed a team in 2010 to begin development of a seismically isolated nuclear power plant using the existing lead rubber bearing.

This paper focuses on the main steam crossover piping. A low cycle ratcheting fatigue test based on the relative displacement and inertia load by earthquake between the buildings was performed to confirm the failure modes and ultimate strength (i.e. fatigue life) of pipe elbow. As a result, the ultimate strength under combined loads was sufficiently higher than the design criteria and it was confirmed the structural integrity of the main steam crossover piping.

Key Words: Nuclear Power Plant, Seismic Isolation, Crossover Piping System, Ratcheting Deformation, Low Cycle Fatigue

1. 緒言

免震建屋と非免震建屋との渡り配管には、仕様の異なる配管が多数あり、その一つに大口径で高温・高圧の主蒸気配管がある（図1参照）。主蒸気配管は、建屋間の相対変位と地震時に作用する慣性力に加え、運転時の内圧により、損傷モードは、ラチェット変形を考慮した低サイクル疲労が想定される。

そこで本研究では、実機の主蒸気配管を対象とした曲げ管の縮尺試験体にて、配管の面内および面外方向に繰返し強制変位を加えて損傷モードと終局耐力を確認した。

2. 要素試験

2.1. 試験計画

配管要素のラチェット疲労試験事例⁽¹⁾では、主蒸気配管のような曲げ半径が大きな厚肉配管に対する試験事例はほとんどない。また、単一荷重下での評価検証のみであり、大地震を想定した複合荷重下での検証例は少ないことから、曲げ半径が大きな厚肉配管を対象に低サイクルラチェット疲労による複合荷重下での繰返し試験を実施した。

図2に荷重パターン、表1に試験条件を示す。複合荷重下では、渡り配管の地震時の耐震解析結果を参考に、面内方向と面外方向荷重（配管の軸方向に荷重する面内方向荷重と軸直角方向に荷重する面外方向荷重）を1:1、1:4、4:1と設定した。また、荷重量については、過去の研究事例⁽¹⁾を参考に目標ひずみ範囲を3~4%となるように設定した。

2.2. 試験方法

図3に複合荷重試験装置の概要を示す。試験体は、大口径かつ曲げ半径が大きく肉厚の主蒸気配管を検討対象とし、地震時において設計上クリティカルとなる曲げ管部を想定した縮尺試験体を用いた。設計内圧（約8MPa）を付与した状態で地震時の複合荷重を作用させた要素試験を実施した。

Fig.1 Main Steam Crossover Piping

Fig.2 Loading Pattern

Table1 Test Conditions

Case	Cycles		Loading	
	In-Plane	Out-of-Plane	In-Plane	Out-of-Plane
Case1	1	1	±116.5mm	±0.1rad
Case2	1	1	±116.5mm	±0.1rad
Case3	1	1	±93mm	±0.08rad
Case4	1	4	±93mm	±0.08rad
Case5	4	1	±93mm	±0.08rad

2.3. 試験結果

図4、図5に試験結果を示す。

- いずれの試験ケースにおいても、き裂の貫通部位はエルボ側面部付近であり、軸方向にき裂が発生した。(き裂は内面から発生) また、き裂貫通サイクルはケース1で28回、ケース2で30回であった。
- ケース3では、ケース1、2に比べ載荷量を8割程度に低減した結果、き裂貫通サイクルは88回であり、疲労寿命は延びた。
- ケース4及び5では、ケース3と同じ載荷量ではあるものの、1サイクルの中で面外もしくは面内方向を4回付与した影響もあり、き裂貫通サイクルはそれぞれ39回、36回とケース3に比べ疲労寿命は低下した。

Fig.3 Test Machine

(a) Case1 (1:1)

(c) Case5 (4:1)

Fig.4 Test Results (Typical Cases)

Fig.5 Crack Position (Case1)

3. 再現解析

FEM (汎用コード *ABAQUS*^{*1} 適用) を用いて、内面ひずみを求めた。解析の材料物性については材料試験データを用い、多直線移動硬化則を使用した弾塑性解析を実施した。表2に試験結果及び解析結果をまとめ、図6に解析より得られた内面ひずみ範囲を用いた疲労線図を示す。なお、ケース4、5については線形疲労損傷則に基づき、載荷比を1:1となるように等価な回数に補正した。

表2に示すように、外面ひずみ範囲は、要素試験結果と概ね等しい結果を得た。また、図6に示すように、複合荷重下での終局耐力は設計疲労寿命よりも十分大きく、渡り配管の構造健全性を確認できた。

なお、今回実施した複合荷重下におけるひずみの算定については、多軸応力場の影響を考慮した算定手法を継続検討中であり後報にて報告予定である。

4. 結言

免震型プラントに適用する主蒸気配管を模擬した要素試験により以下の結果を得た。

- いずれの試験ケースにおいても、周方向ひずみが卓越する低サイクルラチェット疲労損傷がみられた。
- 既往の試験事例では、面内方向のみの単一荷重下における評価を行っていたが、面内、面外方向の複合荷重下においても、き裂貫通部位はエルボ側面部付近であり、損傷モードは同じであることを確認することができた。
- 複合荷重下での終局耐力は設計疲労寿命よりも十分大きく、渡り配管の構造健全性を確認できた。

本開発は、経済産業省の補助事業「発電用原子炉等安全対策高度化技術開発」の一環、及び電力共通研究「免震システムの評価手法開発」として遂行している。

*1: 本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

参考文献

- (1) K. Suzuki, et al., Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Test Results on Piping Component and Simplified Piping System), ASME PVP, Vol.445-1, pp.99-106, (2002).
- (2) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版) <第I編 軽水炉規格> I-4-243.4

Table2 Summary of the Results

Test Conditions	Test Results ^{*3}	Analytical Results ^{*3}		Crack Cycles
	Outer Strain Range	Outer Strain Range	Inner Strain Range	
Case1	3.5%	3.1%	4.1%	N=28
Case2	3.9%	3.2%	3.7%	N=30
Case3	2.6%	2.6%	3.5%	N=88
Case4	2.9%	2.2%	4.1%	N=81 ^{*2}
Case5	3.3%	2.3%	3.6%	N=75 ^{*2}

*2: Cycles are corrected by the fatigue damage rules.

*3: The strain range is picked up at the 5th cycle.

Fig.6 Fatigue Curve