1219 繰り返し荷重を受ける減肉配管の破損挙動

Failure behavior of thinned wall pipes under cyclic loading

○正 中村 いずみ (防災科研)
学 宇田川 誠 (横浜国大)

正 大谷 章仁 (石播重工)
正 白鳥 正樹 (横浜国大)

Izumi NAKAMURA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

3-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Akihito OTANI

Ishikawajima-Harima Heavy Industries

Makoto UDAGAWA

Yokohama National University

Masaki SHIRATORI

Yokohama National University

Key Words: Elbow, Wall thinning, In-plane bending, Out-of-plane bending, Failure mode

1. 緒言

発電施設で広く使用されている炭素鋼配管では高経年化に伴い腐食・壊食による減肉の発生が予想されるが、地震のような繰り返し荷重を受ける減肉配管の破損挙動に関する試験研究は数少なく¹⁾²⁾、減肉のある配管系の耐震安全性には不明な点が多い。そこで、防災科学技術研究所では横浜国立大学、石川島播磨重工業との三者共同で、平成13年度から平成17年度までの5ヶ年計画として地震を想定した繰り返し荷重を受ける減肉配管の破損挙動を実験と解析により明らかにすることを目的とした試験研究を実施している。本研究では、機械加工により減肉を模擬した曲管に対し静的繰り返し曲げを行う配管要素試験、減肉を模擬した配管系に対し振動台による加振実験を行う配管系試験、および有限要素法を用いた詳細解析を実施している。

本稿では、これらの内容のうち、平成13年度および平成14年度に実施した配管要素試験の結果と今後の予定について述べる。これまでに実施したいくつかの解析結果については別途報告している³⁾。

2. 実験方法

配管要素試験では減肉配管の荷重変形特性および破損形態を明らかにすることを目的として、機械加工により内面に減肉を導入した曲管に対する静的な繰り返し曲げ試験を行った。試験体には200A, sch80 (外径: 216.3mm, 肉厚:

12.7mm)、高圧配管用炭素鋼配管 STS410 の曲管を使用した。試験体に導入した減肉は全周減肉または部分減肉とした。図1および図2に曲管部分に導入した減肉の形状を示す。

健全配管の場合、曲管では面内曲げ方向の荷重が応力的に最も厳しい荷重条件となるが、本研究では減肉配管が面外方向の曲げ荷重を受ける場合の破損挙動を確認するため、面内方向の曲げ荷重に加え、面外方向の曲げ荷重、および面内と面外が混在する曲げ荷重 (以下面内+面外曲げ) の3種類の荷重条件について試験を行った。

載荷は防災科学技術研究所が所有する一次元大型振動台を利用し、振動台と基礎との相対変位を試験体に入力する載荷装置を製作して使用した。載荷装置は面内曲げ試験用の両端ピン支持型載荷装置と、面内、面外、および面内+面外曲げ試験用の一端固定型載荷装置の2種類を製作した。図3および図4に載荷装置を示す。試験はすべて変位制御で行い、0.2Hzの正弦波5波または20波を1ブロックとした載荷波形を使用した。試験では、最初に健全配管の荷重変形特性から二倍勾配法により崩壊荷重となる入力変位を求めた。使用する載荷装置および荷重の方向が同じ試験体については減肉の有無にかかわらずこの方法で求めた健全配管の崩壊荷重に対応する入力変位振幅で破損までの繰り返し載荷を行った。面内+面外曲げを負荷する試験体については面内曲げ試験体の崩壊荷重に対応する変位を入力変位振幅とした。実験は常温で行い、試験体には水圧により9.8MPaの

Fig.1 Cross section in longitudinal direction

Fig.2 Cross section in circumferential direction

Fig.3 Test equipment for In-plane bending
(Support condition : Pin - Pin)

Fig.4 Test equipment for In-plane and Out-of-plane bending
(Support condition : Pin - Fixed support)

内圧を負荷した。載荷は試験体の破損により内部水が漏洩するまで繰り返した。表1に配管要素試験の試験条件と結果を示す。

3. 実験結果

表1に示したように、配管要素試験では大きく分けて2種類の破損形態が確認された。一つは曲管脇部の軸方向疲労き裂の発生、貫通であり、面内曲げを受ける健全配管および50%部分減肉配管で確認された。もう一つは曲管腹部近傍における座屈を伴う疲労破壊であり、全ての荷重方向の全周50%減肉試験体で確認された。図5にこれらの破損形態を示した試験体の例を示す。座屈を伴う疲労破壊が発生した要因として、一つは肉厚が薄くなっているために曲げ変形を受けたときに座屈が発生しやすくなっていることが挙げられる。また、表1に示したように、これらの試験体では健全配管と比較して配管外径の変化が大きい。これは減肉部分でラチェット変形が顕著に発生したためであり、これらの試験体では外力による配管の変形にラチェット変形が重なることで腹部に変形が集中し、座屈に至ったものと考えられる。

本研究で載荷を行った試験体のうち、面外曲げを負荷した健全配管では300サイクル以上の繰り返し載荷を行ってもほとんど損傷は発生せず、破損に対して十分な裕度を有

(a) Fatigue at a flank of the elbow (ELB01)

(b) Fatigue accompanied with buckling (ELBM_01)

Fig.5 Failure mode of elbows under cyclic loading

Fig.6 Hoop strain time histories of elbows under out-of-plane bending

していることが確認されたが、全周50%減肉が存在する面外曲げ試験体、および面内+面外曲げ試験体では極めて短寿命で破損に至った。図6に、面外曲げを負荷した健全試験体 (ELBO_01) と全周50%減肉試験体 (ELBO_02) について、入力変位195mm 1回目の載荷における曲管脇部周方向ひずみの履歴を示す。図6から、ELBO_02ではELBO_01と比較してひずみ振幅が大きく、また、顕著なラチェットが発生していることがわかる。これらの結果から、健全な肉厚を持つ配管では面外曲げは厳しい荷重条件ではないが、配管に減肉が存在する場合、減肉の条件によっては面外曲げ荷重においても短寿命で破損に至る可能性があると考えられ、今後さらに検討する必要がある。

4. 結言

平成14年度までに減肉のある曲管に対する変位制御の繰り返し曲げ試験を実施した。平成15年度以降は、平成14年度までに得られた試験結果をふまえ、基本的な構造の立体配管系の一部に減肉を導入した試験体を使用した加振実験を行う予定である。この配管系試験を通じて、減肉の存在により配管系の振動応答挙動が受ける影響や減肉のある配管系の損傷挙動を実験的に把握する。また、これらの実験と平行して有限要素法による詳細解析を実施し、減肉配管の破損に影響を与える要因の抽出と評価を行う予定である。

<謝辞>

本研究は原子力安全委員会の策定した原子力安全研究年次計画 (平成13年度～平成17年度) に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施された。また、研究の実施にあたっては実験実施研究会 (略称：NAP研究会、主査：白鳥正樹横浜国立大学教授) を組織し、研究内容の検討を行っている。関係者各位に深く感謝します。

<参考文献>

- (財) 原子力発電技術機構、「平成14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 減肉配管」、(2003)
- Katsumasa Miyazaki et al, "Fracture strength and behavior of carbon steel pipes with local wall thinning subjected to cyclic bending load", Nuclear Engineering and Design, **214** (2002), 127-136
- 青島誠他、「構造的劣化部を有する配管系の耐震安全裕度に関する解析的研究 (第2報：エルボ要素試験)」、第15回計算力学講演会講演論文集 (2002)、651-652

Table 1 Test condition and results of pipe element tests

Specimen	Configuration of wall thinning	Bending direction	Support condition	Internal pressure [MPa]	Input disp. [mm]	Test Result		
						Num. of input cycles	Ratio of diameter deformation [%]	Failure mode
ELB01	No defect	I	Pin - Pin	9.8	70	179	2.7	Fatigue at a flank of the elbow
ELB02	50% full circumferential			7		319	9.2	Fatigue + Buckling
ELB03	50% partial			9.8		231	7.2	Fatigue at a flank of the elbow
ELB04	70% partial					177	6.4	Fatigue at ratchet deformation
ELB05	50% partial					264	13.7	Fatigue + Buckling
ELBI_01	No defect	I	Pin - Fixed support	9.8	185	110	4.5	Fatigue at a flank of the elbow
ELBO_01	No defect	O			195	>300	2.5	No failure
ELBO_02	50% full circumferential					40	12.9	Fatigue + Buckling
ELBM_01	50% full circumferential	I + O			185	34	9.7	Fatigue + Buckling

* I: In-plane, O: Out-of-plane