

共同研究成果報告書

地震荷重を受ける原子力設備の破壊力学的 評価手法の検討

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和5年6月

1. 研究目的

有限要素解析及び亀裂進展試験によって、地震時に想定される引張・圧縮を含むサイクル荷重（交番荷重）や曲げ荷重が亀裂を有する機器・配管等に及ぼす影響を検討し、原子力機器の健全性評価に係る知見を拡充する。

2. 研究内容

2.1 地震荷重を受ける配管の亀裂進展評価手法の検討

経年事象による亀裂を有する配管を対象として、地震荷重で想定される交番荷重が亀裂進展に及ぼす影響を明らかにするため、亀裂閉口挙動等の影響を調査する。

2.2 複数亀裂を有する配管の地震時の破壊評価手法の検討

複数の亀裂が近接することによる破壊挙動への影響を明らかにするため、複雑形状の複数亀裂が発生した配管の破壊曲げモーメントを評価する手法を検討する。

3. 実施方法

3.1 地震荷重を受ける配管の亀裂進展評価手法の検討

本研究では、過去の亀裂進展試験のデータを、国内外の発表論文、及び報告書等を中心に収集する。材料は国内の原子力施設の機器・設備等で用いられるフェライト鋼（低合金鋼）とする。特に、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格や、米国機械学会（American Society for Mechanical Engineers、以下「ASME」という）が制定するボイラ・圧力容器規格 Section XI¹（Boiler and Pressure Vessel Code Section XI、以下単に「Section XI」という）の技術根拠を中心に調査する。これらの既往試験のデータから、交番荷重と亀裂閉口挙動の関係を考察し、既往の ASME Section XI の亀裂進展則を適用する上で留意すべき事項を整理する。

3.2 複数亀裂を有する配管の地震時の破壊評価手法の検討

応力腐食割れでは周方向に複数の亀裂が発生する可能性が有ることから、本研究では、2つの亀裂が発生した円筒を対象に、配管の破壊曲げモーメントを評価する手法を検討する。

はじめに従来の極限荷重評価式を、2つの表面亀裂のパラメータを取り入れた式に改良する。複数亀裂モデルのパラメータとして、亀裂長さ、亀裂深さ、及び亀裂間距離を考慮する。続いて一様引張荷重と地震で想定される曲げ荷重を与え、破壊曲げモーメントを算出する。最後に考案した算定式と既往の破壊曲げ試験の結果との比較を行う。

しかし、金属材料の亀裂閉口挙動は負荷応力にも依存する傾向があることが報告されている。実際に原子力規制庁が行った中央切り欠き平板試験片による亀裂進展試験³では、高い負荷応力において ASME Section XI の参照疲労亀裂進展則から予想される値よりも高い亀裂進展速度が観測され、亀裂閉口挙動の変化が影響したと予想される。ただし、この試験は中央切り欠き平板試験片を用いており、ASME Section XI で想定する実機の機器・設備とは亀裂周辺の拘束状態が異なるため、本試験結果を単純に一般化することはできない。

以上により、今後、高負荷応力において亀裂進展則の適用性を検証するためには、負荷応力のみならず亀裂先端の拘束状態の影響にも留意した上で、疲労亀裂進展データを拡充する必要があると考えられる。

7.2 複数亀裂を有する配管の地震時の破壊評価手法の検討

原子力発電所の配管において、ステンレス鋼又はニッケル合金異材溶接部等では応力腐食割れによる亀裂等が確認されている。一般的に、これらの材料は高靱性材料であるため、その破壊曲げモーメントは、正味断面応力概念により求められる。正味断面応力による評価は、周方向亀裂を有する配管の極限荷重評価法として ASME Section XI に採用されている。現状の規格では、周方向亀裂を有する配管の破壊曲げモーメントは、深さが一定の単一亀裂にのみ適用できる。しかし、実際に確認された応力腐食割れによる亀裂の多くは複数亀裂であり、その形状は深さが一定でない複雑な形状を有するものである。

これまでに、李らは配管の同一平面上の周方向複数表面亀裂を有する配管の破壊曲げモーメントを評価する手法を考案した⁴。本手法の概念は複雑形状の複数亀裂を有する配管にも適用できるものである。そこで本研究では、複数亀裂を一つの大きな亀裂とみなす簡易評価手法、及び上記の提案手法に基づき、複雑形状の複数亀裂を有する配管の破壊曲げモーメントを評価する詳細手法を考案するとともに、評価結果との比較のため、2つの周方向亀裂を有するステンレス鋼管（直径 8 インチ、スケジュール番号 80）の破壊試験を行った。

試験結果との比較により、複数亀裂を単一亀裂に置き換えて評価する簡易評価手法は保守的であることを確認した。また、詳細評価手法は配管の破壊曲げモーメントを十分に高い精度で予測することができることを確認した。

8. 公表成果一覧

- 1 Li, Y., Azuma, K., Hasegawa, K., “Failure bending moment of pipes containing multiple circumferential flaws with complex shape,” International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 171, pp. 305–310, 2019.

9. 参考文献一覧

- 1 ASME, ASME B&PV Code Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2017.
- 2 Eason, E. D., Gilman, J. D., Jones, D. P., and Andrew, S. P., “Technical Basis for a Revised Fatigue Crack Growth Rate Reference Curve for Ferritic Steels in Air,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 114, No. 1, pp. 80–86, 1992.
- 3 Azuma, K., Hidaka, S., Yamazaki, Y., “Effects of crack closure on the fatigue crack growth rates of ferritic steels subjected to severe reversing loads,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 142, No. 6, 061503, 2020.
- 4 Li, Y., Hasegawa, K., Onizawa, K., Sugino, H., “Limit Load Estimation Method for Pipe with an Arbitrary Shaped Circumferential Surface Flaw,” *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 75, No. 752, pp. 469–475, 2009.