

高経年配管系に対する耐震裕度の定量評価に関する研究

(受託者)独立行政法人防災科学技術研究所

(研究代表者)中村いずみ 減災実験研究領域 兵庫耐震工学研究センター

(再委託先)国立大学法人横浜国立大学、株式会社 I H I

(研究開発期間)平成20年度～22年度

1. 研究開発の背景とねらい

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所で設計の想定を超える地震動を記録した。地震後、炉内を含む施設の点検が実施されたが、耐震重要度の高い機器・構造物等に対する損傷は報告されていない。これは、現行の耐震基準に従い設計された機器・構造物等は設計基準を超えた入力を受けても実際に機能喪失に至るような損傷を生じるまでにはある程度の裕度を有していることを示している。しかし、設計上の想定を超えた入力を受けた機器類の弾塑性応答挙動や限界強度、内包する耐震裕度は必ずしも明確になってはいない。

また、日本では2010年12月末時点において54基の商業用原子炉が運転中であるが、これらのうち全体の半数以上にあたる32基は稼働開始から20年以上を、また、18基が30年以上を経過しており、高経年化対策は昨今重要な課題となっている。一般に、プラントにおける主要構成要素のひとつである配管系では、高経年化に伴い減肉の発生が想定されているが、減肉の生じた配管系の耐震性能については、実験的検討、解析的検討ともに数少なく、減肉部の耐震裕度への影響は明らかではない。

これらの背景に基づき、本事業では健全な配管系について、設計時の想定を超えた地震動を受けた場合の配管系の耐震裕度を明らかにすること、および、そのような配管系の耐震裕度に対し、減肉が存在した場合の影響を把握し、配管系の耐震性に対する減肉部の影響を明らかにすることを目的として実施した。

2. 研究開発成果

本事業は、平成20年度～平成22年度の3ヶ年で実施した。実施内容は大きく分けて以下の3項目である。

- ・振動台を用いた減肉配管系の耐震信頼性実証試験
- ・数値解析による減肉配管系の耐震信頼性評価の検討
- ・耐震裕度評価手法の構築と検証

以下では、これらの成果の概略について報告する。

平成20年度と平成22年度に、配管系に対する振動台実験を実施した。平成20年度に実施した実験は、中規模振動台実験と称し、比較的単純・小規模な配管系試験体を用い、三次元加振下での応答挙動の把握、試験手法や計測手法の妥当性等の調査を目的とした。また、平成22年度に実施した実験は、防災科学技術研究所が兵庫県三木市に有する世界最大の振動実験施設である実大三次元震動破壊実験施設（以下E-ディフェンス）を用いた実証実験（以下E-ディフェンス実験）であり、実際の原子力発電施設で多用される口径の配管を用い、減肉を有する配管系の耐震信頼性を検証することを目的とした。以下では、平成22年度に実施したE-ディフェンス実験の概要について述べる。

E-ディフェンス実験では、健全試験体（以下 AP3_EA01）および減肉試験体（以下 AP3_EC01）の 2 種類の配管系試験体を使用し、E-ディフェンス上に併置して加振実験を実施した。図 1 に試験体の外観形状を示す。図 1 には震動台の加振方向もあわせて示した。2 種類の試験体は、外観形状は同一であり、AP3_EC01 では図 1 に示すティ 2 およびエルボ 3～6 に減肉を模擬した。試験体に使用している配管種別は、減肉部以外には高温配管用炭素鋼管 STPT370、150Asch80（外径：165.2mm、肉厚：11.0mm、いずれも公称値）を使用した。減肉を模擬した継手のうち、ティ 2 には一般配管用炭素鋼管 SGP、150A のティを使用し継手部分の全周減肉を模擬した。エルボ 3～6 は STPT370、150A のエルボの内面側の肉厚を機械加工で低減することで全周一様減肉を模擬した。減肉部の公称肉厚は 5mm であり、約 50%の減肉を模擬していることになる。実験では実地震波の位相を用い、1.5Hz～5.5Hz の振動数帯域の波形を作成して使用した。以下、これを模擬地震波と称する。図 3 に模擬地震波の加速度時刻歴波形を示す。以下では図 3 に示した波形レベルの模擬地震波を原波と称する。事前に実施した応答スペクトル解析によると最大応力の発生位置はティ 2 と予想され、原波で加振した場合に AP3_EA01 のティ 2 に発生する一次応力が設計（旧指針）¹⁾における制限値である $3S_m$ （ S_m ：設計応力強さ）にほぼ相当した。従って、実験では、原波による加振を設計限界レベルと考える。実験では試験体に損傷が生じるまで加振を継続することとし、

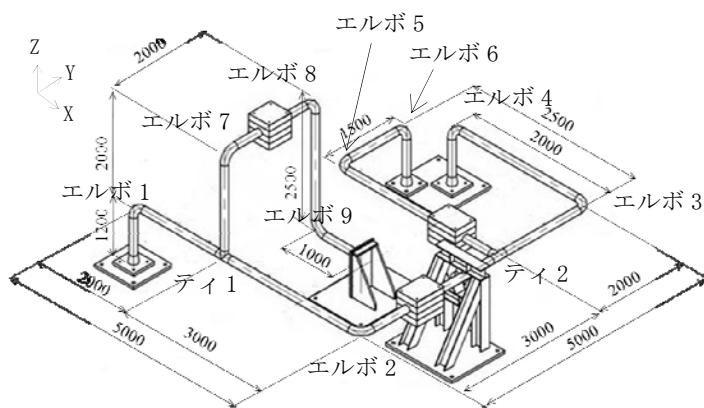
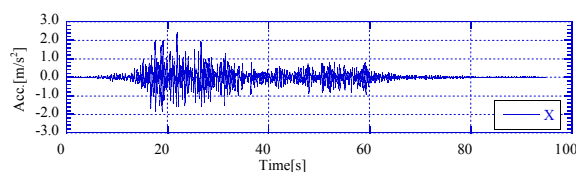
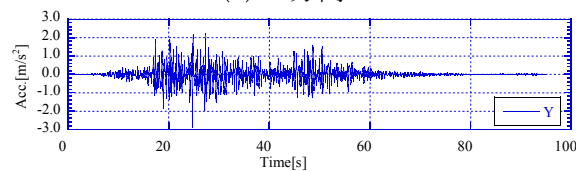


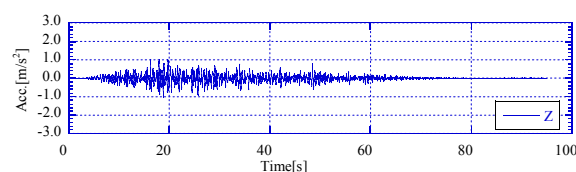
図 1 E-ディフェンス実験試験体形状



(a) X 方向



(b) Y 方向



(c) Z 方向

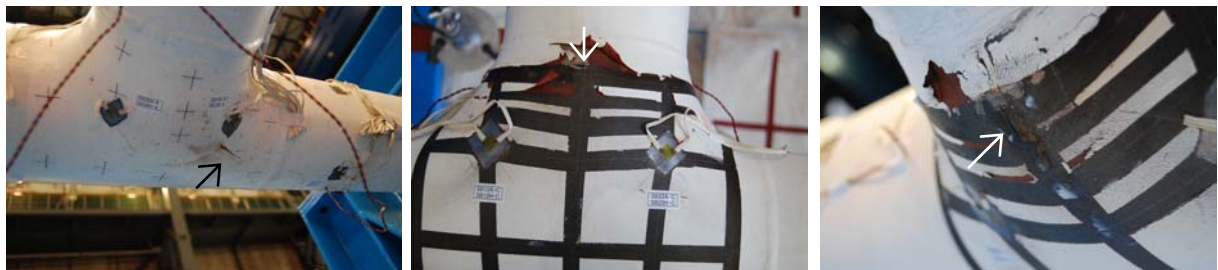
図 2 実験で使用した模擬地震波の加速度時刻歴波形

設計限界レベル以下から三軸同時加振における震動台の加振限界まで段階的に原波に掛ける倍率を増幅させた。三軸同時加振における震動台の加振限界に達しても試験体に損傷が生じない場合、Y 方向の単軸加振に切り替え、さらに加速度のレベルを増加させた。Y 軸単軸加振によっても試験体に損傷が生じない場合は Y 方向の正弦波加振を実施し、試験体を損傷させた。試験体には内部に水を満たし、10MPa の内圧を負荷している。試験体の損傷は、き裂貫通等による内部水の漏洩で判断した。

設計限界レベルの加振（三軸同時加振、Y 軸最大加速度 2.70m/s^2 ）では、AP3_EA01、AP3_EC01 ともに損傷には至らなかった。AP3_EA01 では、試験体内で最も大きいひずみの発生するティ 2 部のひずみはおおむね $1,500\mu$ 以下程度であった。また、この加振の終了後に試験体の外観を調査したところ、特に変化は認められ

なかった。一方、AP3_EC01 では、損傷は発生していなかったものの、ティ 2 部においてラチェット現象による、目視でわかる程度の外径増加が発生していた。設計限界レベルにおける試験体挙動を確認したあと、加振レベルを段階的に増加させた加振を継続した。その結果、震動台の三軸同時加振による加振限界となるレベルの加振 (Y 軸最大加速度 13.76m/s^2) を 2 回実施したが、どちらの試験体も損傷しなかったため、Y 軸単軸加振の震動台限界レベルの加振 (Y 軸最大加速度 17.18m/s^2) を実施したところ、その加振の途中で AP3_EC01 が損傷した。AP3_EA01 はその加振でも損傷しなかったため、Y 軸単軸加振の地震波加振を 5 回繰り返した後、正弦波加振により損傷させた。図 3 に各試験体の損傷箇所の写真を示す。損傷した継手は、両試験体ともティ 2 であり、AP3_EA01 の損傷形態は疲労き裂の発生、貫通と判断された。一方、AP3_EC01 については、ティ 2 の上下面に図 3 に示すようなき裂が発生した。実験後の調査や解析結果から判断すると、これはラチェット現象により配管外径が増加しティ部の肉厚が薄くなることに伴い内圧バーストのような損傷形態が発生したものと考えられる。実験後に実施した浸透探傷試験では、AP3_EA01、AP3_EC01 ともに、損傷の生じたティ 2 以外ではき裂の発生は確認されなかった。

本事業では振動台実験と並行し、数値解析による配管系の耐震信頼性評価を実施した。数値解析の目的は、実験結果を精度良く再現できる解析モデルを構築し、解析に基づき減肉配管の損傷寿命評価を行えるようにすること、また、実験と対照して精度を検証した解析モデルを用い、実験では実施しきれないさまざまな条件の解析を行い、配管系の地震応答による損傷に対する減肉の影響を明らかにすることを目的としている。平成 20 年度および平成 21 年度には、平成 20 年度に実施した中規模振動台実験の試験体形状を対象として、配管系の全体的な応答を評価する非線



(a) AP3_EA01 ティ 2 下面 (b)-i AP3_EC01 ティ 2 上面 (b)-ii AP3_EC01 ティ 2 下面

図 3 E-ディフェンス実験で得られた損傷状況

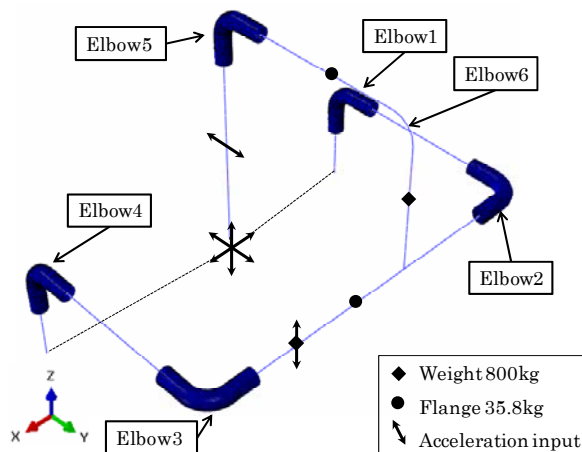


図 4 解析モデル (パイプ+シェル要素)

表 1 解析による部分減肉条件の寿命評価結果

減肉条件	エルボ 1	エルボ 3
減肉なし	1.29	3.88
全周減肉	6.99	13.7
背部減肉	1.65	4.29
腹部減肉	7.36	3.28
脇部減肉	9.52	9.08

($\times 10^{-2}$)

* 中規模振動台実験の地震波 250%を入力した結果。

形時刻歴応答解析と、配管要素の局所の損傷を評価する静的な弾塑性解析とを順次実施し、実験で得られた損傷位置の予測と寿命評価を実施した。平成 22 年度には、E-ディフェンス実験に即した解析モデルを作成し、E-ディフェンス実験の事前・事後解析を実施した。さらに、数値解析モデルの高度化を目指し、配管系の解析モデルに配管要素の解析モデルを組み入れた、弾塑性時刻歴応答解析から損傷評価までを統一して実施できる解析モデルを構築し、減肉条件を変更させたパラメトリック解析を効率的に実施できる手法を整えた。図 4 に、中規模振動台実験で使用した試験体形状を基本とし、配管系解析と配管要素解析を統合した解析モデルを示す。また、この解析モデルにおいて、エルボ部を部分減肉とし、中規模振動台実験での入力波を 1 回入力した解析結果を表 1 に示す。減肉率は全て 50%とした。表 1 には、評価を実施したエルボのうち、主に面内曲げ変形となるエルボであるエルボ 3 と、面外曲げ変形となるエルボ 1 の 2 つの損傷評価結果を記載している。ここで、表 1 に示した値は、本研究で疲労損傷の程度を示す指標として使用した F 値という値であり、F=1 で損傷と判断している。表 1 に示した解析結果のうち、減肉なし、および全周減肉が実験条件と同じ条件の解析結果、背部減肉、腹部減肉、脇部減肉が部分減肉の影響を解析上で検討した結果である。表 1 の結果から、部分減肉の影響としては、減肉率 50%の背部減肉では健全な条件と比較して疲労寿命の低下はほとんどないが、腹部減肉の場合は面外曲げを受けるエルボ、全周減肉と脇部減肉では面外曲げを受けるエルボと面内曲げを受けるエルボで疲労寿命が低下する傾向のあることがわかる。

本事業では、健全・弾性状態で算出される配管系の一次応力が、設計における一次応力制限となる状態を設計での許容状態の基準とし、そのレベルに到達する振動台の加速度入力を設計限界とする。この設計限界と実験において実際に試験体が損傷するまでの加速度レベルを比較し、それを設計限界に対する損傷までの裕度と考えた。振動台実験の結果を参照すると、配管系内の複数の継手に 50%程度の全周減肉がある場合でも設計限界レベルの入力を受けた場合に内部の水が漏洩するような損傷は生じなかった。また、損傷までの加振レベルを考慮すると、設計限界に対し 5~7 倍程度の裕度が存在すると考えられることがわかった。実験からは、配管系内の継手に減肉がない場合の裕度はそれよりもさらに大きいことが確認された。

3. 今後の展望

本事業のまとめの時期に入っていた平成 23 年（2011 年）3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震が発生した。東京電力福島第一原子力発電所では地震と津波により全電源喪失に至り、大量の放射性物質の漏洩を伴う原子力事故に発展した。一方、東京電力福島第二発電所および東北電力女川原子力発電所では、東北地方太平洋沖地震の地震動に対して安全に停止しており、十分な耐震性を示したと考えられる。これらの発電所は、現在さまざまな検査を実施し地震の影響を評価している。地震で停止したこれらの施設の再稼働には社会的な困難も伴うと考えられるが、本事業の実施によって得られた、設計許容値を超過した後、損傷までの配管挙動についての知見や数値解析による弾塑性応答評価と寿命評価法に対する知見は、今後必要となる地震を受けた施設の再稼働の議論に対し、客観的なデータとして利用しうると考えられる。

4. 参考文献

- 1) 日本電気協会、1987、「原子力発電所耐震設計技術指針」、JEAG4601-1987