

減肉配管の3次元加振実験と耐震設計評価の比較
3-D SHAKING TABLE TEST AND THE SEISMIC DESIGN CRITERIA
FOR THINNED WALL PIPING

大谷章仁¹⁾、佐藤祐二²⁾、中村いずみ³⁾、高橋宏治⁴⁾、高田一⁵⁾

Akihito OTANI¹, Yuji SATO², Izumi NAKAMURA³, Koji TAKAHASHI⁴, Hajime TAKADA⁵

1) 株式会社 I H I 原子カプラント技術部、主幹 工博

¹ Member, General Manager, Nuclear Plant Engineering, IHI Corporation, Dr. Eng.
e-mail : akihito_ootani@ihi.co.jp

2) 株式会社 I H I 基盤技術研究所 構造研究部、主任研究員

² Senior Engineer, Structural Strength Dept., Research Laboratory, IHI Corporation
e-mail : yuji_satou@ihi.co.jp

3) 独立行政法人 防災科学技術研究所、工博

³ Member, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.
e-mail : izumi@bosai.go.jp

4) 横浜国立大学、准教授 工博

⁴ Associate Professor, Yokohama National University, Dr. Eng.
e-mail : takada@ynu.ac.jp

5) 横浜国立大学、教授 工博

⁵ Member, Professor, Yokohama National University, Dr. Eng.
e-mail : takada@ynu.ac.jp

ABSTRACT: Tri-axial shake table tests on the piping system with wall thinning were conducted to obtain the effect of wall thinning on vibration characteristics and failure modes of piping system. The excitation test reached the fatigue failure of the elbow applied in the piping system but the failure could not cause under the excitation level beyond the limit of the piping design criteria. The test results suggest that the seismic design criterion for piping system has too much margin.

キーワード: 配管、3次元振動台、耐震設計、裕度、弾塑性応答、メカニカルラチェット、疲労破壊

1. 緒言

原子力発電施設で広く使用されている炭素鋼配管は、高経年化の腐食・壊食により減肉することが知られている。本研究では、減肉を有する配管系の振動応答と損傷挙動を明らかにすることを目的とし、配管系の中でエルボ及びティを減肉させた減肉試験体と、比較として健全試験体の2体に対して破損までの加振実験を行った。健全試験体では面内曲げを受けるエルボ、減肉試験体では面外曲げを受けるエルボにおいて疲労き裂の貫通を生じた。この損傷に至るまでには、健全試験体、減肉試験体共に、設計で許容され得るレベルをはるかに超えた加振を、多数回繰返す必要があった。

実プラント配管系の耐震設計では、多質点系のモデルが用いられ、地震応答解析が行われる。その結果を基に、一次応力評価、疲労評価が行われている¹⁾。この設計評価と実験結果を比較することにより、現行の配管系の耐震設計における余裕度を明らかにすることを試みた。

2. 配管系試験体

減肉した配管系の地震応答及び損傷挙動を把握するために、図1に示す配管系試験体を用いて加振実験を行った。この試験体には、6個のエルボと1個の同径ティが組み込まれており、795 kgの重錘が2個取り付けられている。配管支持具は2箇所設置されている。一つはUプレートを用いた支持具、もう一つは重錘(図中Weight1)下部に設置されたボールベアリングを用いた支持具である。配管内部には水が封入され、3 MPaに加圧されている。振動台への設置状況を図2に示す。

上記全体構造で、エルボ5箇所とティ1箇所を減肉させた減肉試験体と、比較のための健全試験体の2体を製作した。両試験体の配管部分の仕様を表1に示す。また、健全試験体の振動モードを図3に示す。なお、減肉試験体の場合も、固有振動数は異なるが、同様の振動モードとなる。試験体の固有振動数及び減衰比を表2及び表3に示す。

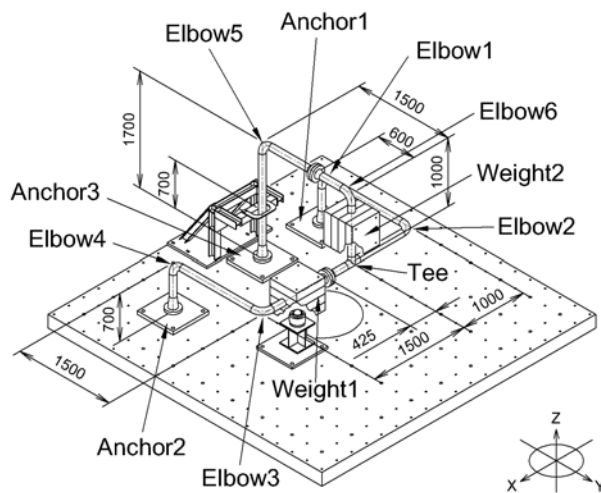


図1 配管系試験体構造

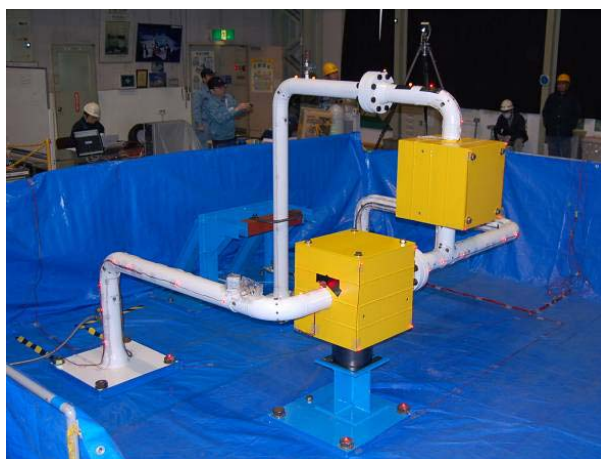


図2 試験体設置状況

表1 試験体仕様

名称	部位	材質 (JIS)	公称寸法 (mm)	
			外径	肉厚
AP3 -A31	Pipe	STPT370	114.3	8.6
	Elbow1	PT370		
	Elbow2			
	Elbow3			
	Elbow4			
	Elbow5			
	Elbow6			
Tee				
AP3 -C31	Pipe	STPT370	114.3	8.6 *
	Elbow1	FSGP		4.5
	Elbow2			
	Elbow3			
	Elbow4			
	Elbow5			
	Elbow6	PT370		8.6
Tee	FSGP	4.5		

* 健全部ー減肉部の接続部の形状

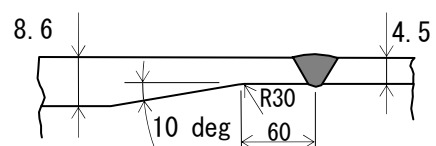
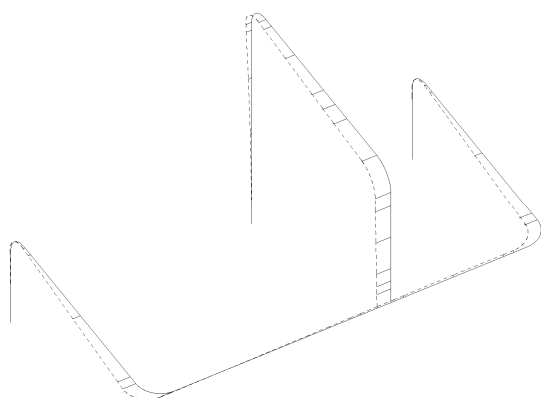


表2 試験体固有振動数 単位：Hz

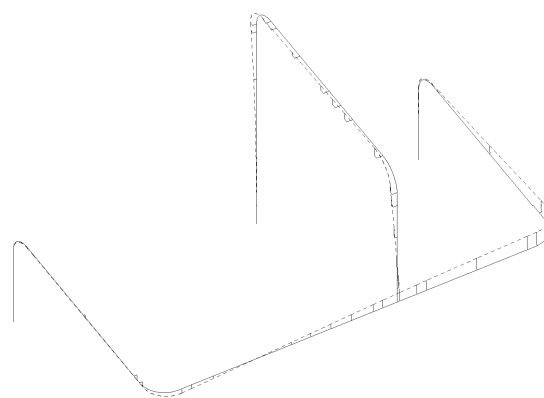
名称	モード	試験結果			FEM
		ランダム波加振レベル			
		0.5 m/s ²	1.0 m/s ²	1.5 m/s ²	
AP3-A31	1次	6.2	5.7	5.3	4.6
	2次	9.0	—	7.9	7.5
	3次	11.5	—	11.6	12.1
	4次	17.9	—	17.7	19.3
AP3-C31	1次	4.5	4.2	4.0	3.5
	2次	6.7	6.4	—	5.7
	3次	9.9	9.7	—	10.3
	4次	13.0	12.8	—	16.4

表3 試験体減衰比 単位：%

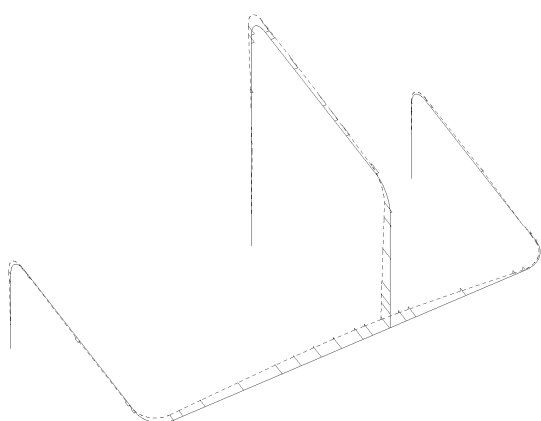
名称	モード	試験結果			設計基準
		ランダム波加振レベル			
		0.5 m/s ²	0.5 m/s ²	0.5 m/s ²	
AP3-A31	1次	1.8	1.7	1.2	0.5
	2次	13.2	—	2.7	
	3次	1.5	—	0.8	
	4次	0.9	—	0.5	
AP3-C31	1次	1.8	0.9	2.2	
	2次	4.4	1.8	—	
	3次	2.0	1.6	—	
	4次	0.7	0.7	—	



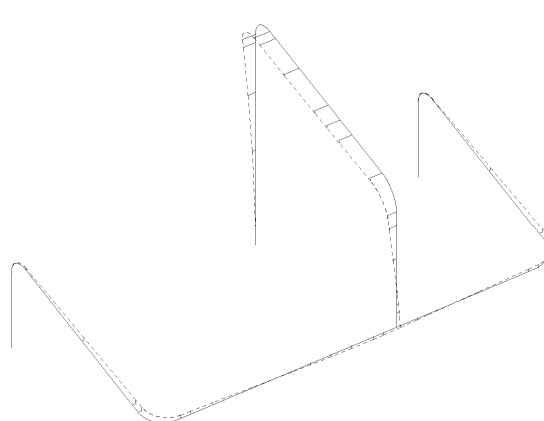
(a) 1次モード



(b) 2次モード



(c) 3次モード



(d) 4次モード

図3 振動モード (健全試験体 AP3-A31)

3. 加振実験

加振実験では、弾性域の振動特性を把握するためのランダム波及び地震波加振、塑性域の振動応答と損傷挙動を把握するための地震波加振及び正弦波加振を行った。

加振実験に用いた地震波を図4に示す。また、この地震波から計算した応答スペクトルを図5に示す。この地震波は、1993年の北海道南西沖地震でのJMA寿都における観測波である。卓越振動数領域が試験体の1次固有振動数に近いこと、地震継続時間及び主要動の時間が比較的長く、試験体に損傷を与え易いと考え選定した。なお、振動台性能を考慮して1.5Hzのハイパスフィルタを施した。

加振実験は表4に示す条件で実施した。表中の設計評価の欄の応力レベル及び疲労損傷係数は、現行の評価法に基づき求めたものであり、その計算詳細は次項に示す。地震波加振では、加振レベル250%までは3軸同時加振、これ以上の750%までのレベルではX方向の単軸加振とした。これらは、振動台の性能に基づき設定したものである。最大レベルの地震波加振を継続しても損傷に至らないと判断したため、正弦波加振を行った。その結果、健全試験体AP3-A31ではエルボ3の側部において管軸方向の疲労き裂を生じ（図6参照）、減肉試験体AP3-C31ではエルボ1の側部に周方向き裂を生じた（図7参照）。エルボ3は主に面内曲げを受け、エルボ1は主に面外曲げを受けるエルボである。

4. 耐震設計上の応力レベル

既往の耐震設計評価法¹⁾によると、試験体の耐震設計用減衰定数（減衰比）は0.5%となる。図5に示した応答スペクトルを用いて解析した。なお、実際の設計では、地盤-建屋モデルの不確かさを考慮し拡張した応答スペクトルを用いるが、ここでは拡張無しの場合の応答スペクトルを用いた。加振実験でき裂貫通を生じたエルボ（AP3-A31ではエルボ3、AP3-C31ではエルボ1）の一次応力及び各加振における疲労係数を計算した。一次応力の計算式を次式²⁾に示す。

$$S = B_1 \cdot \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot t} + B_2 \cdot \frac{M}{Z}, \quad M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}, \quad B_1 = 0.5, \quad B_2 = \frac{1.3}{h^{\frac{2}{3}}}, \quad h = \frac{t \cdot R}{r^2}, \quad r = \frac{D_o - t}{2} \quad (1)$$

P ：内圧(MPa), D_o ：外径(mm), t ：肉厚(mm), M_i ：エルボ端部に生じるモーメント成分,
 Z ：断面係数, R ：エルボ曲げ半径

また、疲労損傷係数は、地震荷重の等価繰返し回数と、下式で求めたピーク応力²⁾（炭素鋼のエルボの場合）及び設計疲労曲線²⁾より求められる許容繰返し回数の比率として計算される。

$$S_e = \frac{K_e \cdot S_p}{2}, \quad S_p = \frac{K_2 \cdot C_2 \cdot 2 \cdot M}{Z}, \quad S_n = \frac{C_2 \cdot 2 \cdot M}{Z} \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_e = 1 + (q-1) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot S_m}{S_n}\right) & (S_n \geq 3 \cdot S_m) \\ K_e = 1 & (S_n < 3 \cdot S_m) \end{cases}, \quad K_2 = 1.0, \quad C_2 = \frac{1.95}{h^{\frac{2}{3}}}, \quad q = 3.1$$

なお、上式における S_p 及び S_n は応力の変動範囲であり解析で求めたモーメントを2倍して計算した。

表4に示す一次応力及び疲労損傷係数は、以上の設計式を用いて計算したものである。また、設計式及び表中の応力レベルの基準値である S_m の値としては、設計基準²⁾に規定された125 MPaを用いた。設計評価では、疲労損傷係数を求める際の地震荷重の等価繰返し回数として、沸騰水型軽水炉での代表的な回数である60サイクルを用いた。なお、正弦波加振の応力値は計算により算定することが困難であったため、地震波加振での計算応力に加振実験での重錘2における応答変位の比率を乗じて求めた。

表4に示す一次応力及び各加振における疲労損傷係数は、設計上の許容値である $3 S_m$ （AP3-C31での面外曲げを受けるエルボ1では、曲げ+ねじりに対する許容値 $2.4 S_m$ ）と、累積疲労損傷係数の許容値1.0とは、比べものにならない程に大きな値となった。この結果は、裕度が大きいと言うよりも、現実離れた結果と言わざるを得ない。

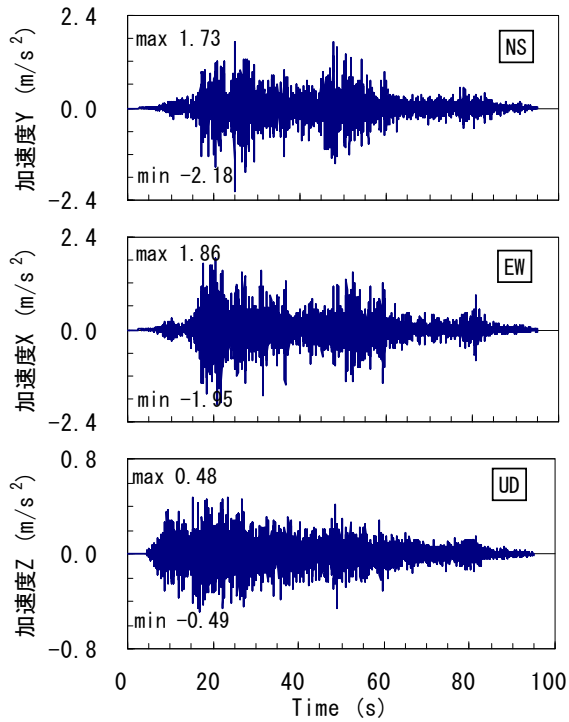


図4 加振試験に用いた地震波
(JMA 寿都, 1993, 1.5Hz ハイパスフィルタ処理)

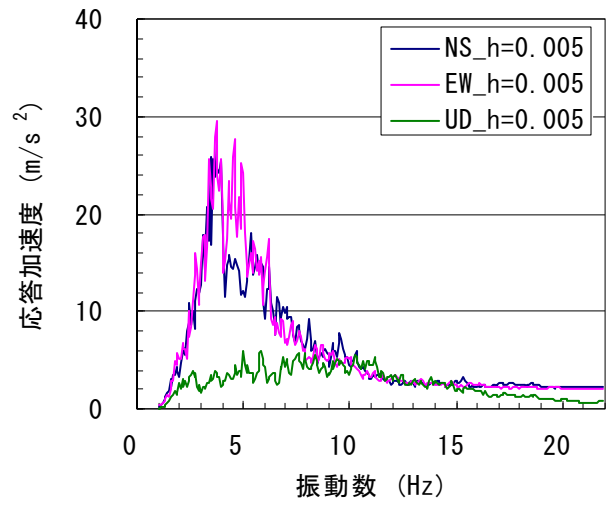
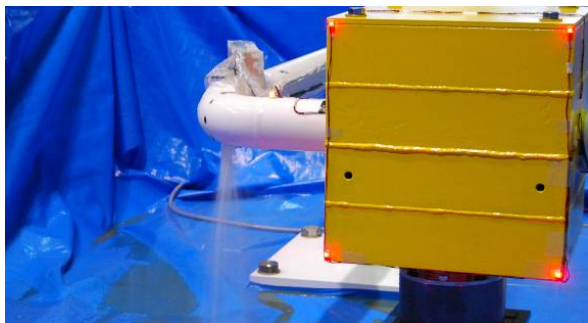
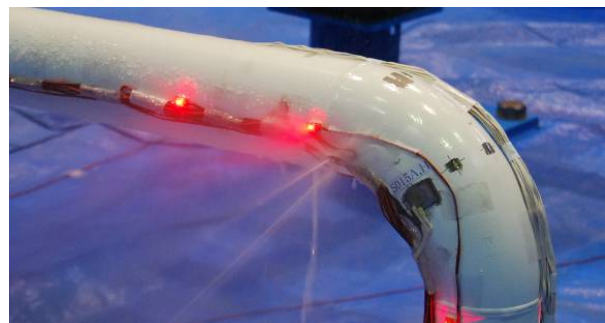


図5 応答スペクトル (減衰比 0.5%)



(a) エルボ 3 からの水の噴出

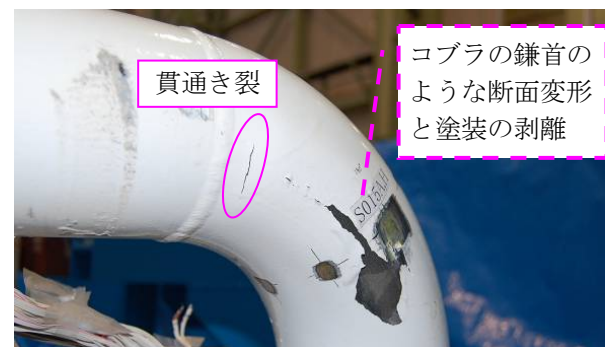


(a) エルボ 1 からの水の噴出



(b) エルボ 3 側部の軸方向の貫通き裂

図6 AP3-A31 における疲労き裂貫通



(b) エルボ 1 側部の周方向の貫通き裂

図7 AP3-C31 における疲労き裂貫通

表 4 加振試験における応力レベル、疲労損傷係数

試験体名称	加振条件			一次応力レベル ($\times S_m$) *				疲労損傷 **			
				設計評価			実態評価	設計評価	実態評価		
	種類	方向	レベル	SP	SW	SD	SD	設計疲労曲線による評価	設計疲労曲線による評価	最適疲労曲線による評価	
健全試験体 AP3-A31	ランダム波	X	0.5~	0.08	0.43	0.03 ~ 0.96	0.03 ~ 0.96	0.00	0.00	0.00	
		Y	2.0								
		Z	m/s ²								
	地震波 オリジナル	XYZ	40%			1.11	1.11	0.01	0.00	0.00	
	地震波	XYZ	40%			1.11	1.11	0.01	0.00	0.00	
			60%			1.66	1.66	0.06	0.03	0.00	
			80%			2.22	2.10	0.21	0.07	0.00	
			100%			2.77	2.74	0.44	0.17	0.01	
		X	100%			2.76	2.96	0.43	0.22	0.01	
			150%			4.16	3.41	1.47	0.34	0.02	
		フィルタ処理	XYZ			200%	5.54	4.25	3.15	0.63	0.03
						250%	6.93	4.67	5.20	0.81	0.04
			X			300%	8.28	4.26	7.68	0.63	0.03
						500%	13.8	4.95	22.9	0.94	0.05
	X	750%	20.7			6.06	53.2	1.54	0.08		
		750%	53.2			1.54	0.08				
		750%	53.2			1.54	0.08				
正弦波 4.5Hz	X	9.8 m/s ²	20	5.79	148	10.42	0.52				
累積疲労損傷係数 (設計許容値 1.0)								296	17.3	0.87	
減肉試験体 AP3-A31	ランダム波	X	0.5~	0.15	1.16	0.11 ~ 1.65	0.11 ~ 1.65	0.06	0.07	0.00	
		Y	1.5								
		Z	m/s ²								
	地震波	XYZ	20%			1.49	1.49	0.04	0.01	0.00	
			40%			2.98	1.94	0.56	0.03	0.00	
			60%			4.47	3.39	1.80	0.18	0.01	
			80%			5.96	5.49	3.72	0.67	0.03	
			100%			7.46	5.30	6.11	0.61	0.03	
			250%			18.6	8.36	42.9	1.70	0.09	
		フィルタ処理	XYZ			250%	42.9	1.48	0.07		
						750%	401	4.79	0.24		
			X			750%	401	4.79	0.24		
						750%	401	4.79	0.24		
	X	750%	55.7			13.6	401	4.79	0.24		
		750%	401			4.30	0.21				
		750%	401			4.37	0.22				
	正弦波 3.2Hz	X	9.8 m/s ²			42	10.1	487	25.27	1.26	
累積疲労損傷係数 (設計許容値 1.0)								2590	53.1	2.64	

* SP, SW 及び SD は、それぞれ内圧、自重及び地震動による応力を示す ($S_m=125 \text{ MPa}^2$)。AP3-A31 ではエルボ 3、AP3-C31 はエルボ 1 における応力を示す。これらの応力は、減衰比 0.5% の応答スペクトルで解析し、3次元加振の場合 SRSS で組合せ、式 (1) により求めた。実態評価での SD は、図 10 に示す応答低減率を考慮した。

** 実態評価では図 10 に示す応答低減率を考慮し、式 (2) によりピーク応力を計算し疲労評価を行った。地震応答波の等価繰返し数は、設計評価では 60 サイクル、実態評価では AP3-A31 で 24 サイクル (図 12 参照)、AP3-C31 で 13 サイクルを用いた。

5. 裕度評価

設計裕度というものは、本来意図的に安全性が配慮されたもので、その設定根拠、必要性は明示されなければならないと思われる。表4に示した設計評価結果は、設計裕度が含まれていて安全な評価と捉えることもできるが、不明確で十分考慮されていない要因が含まれている。これを明らかにするために、一次応力及び疲労損傷係数を、加振実験結果を説明できる程度までに近づけることを試みた。

加振実験で得られた最大応答加速度及び最大応答変位を図8及び図9に示す。図に示すとおり、加振レベルと線形関係ではなく、加振レベルの増加に伴い最大応答値が相対的に低下する傾向にある。これは、配管系の塑性変形で生じるエネルギー逸散（履歴減衰）により、振動応答が低下したものである。なお、最大応答加速度の低下では、塑性変形に伴う剛性低下、振動数低下の影響も少なからず寄与している。

減衰比0.5%応答スペクトルでの解析に対する低下率として表すと、図10に示す応答低減率が得られる。最大応答変位が増加すると共に、塑性変形が進み、その応答は抑制される。減肉試験体のAP3-C31の最大応答レベルでは、約23%まで減少している。この応答低減効果は、設計では考慮されておらず、意図的に考慮された裕度ではない。塑性変形による振動応答の変化を考慮していないために入り込んだ、安全側ではあるが、応答計算の誤差（安全側の誤差）に類するもの捉えることもできる。

応答低減効果が現れるのは塑性変形が生じた場合であるが、一次応力を制限する目的である塑性崩壊を防止する観点から実験結果を分析する。図11は最大応答変位と最大応答加速度の関係を示したものである。これは静的な問題での荷重-変位関係に相当する。動的な実験結果において、図8もしくは図9の傾向を見て降伏現象と誤解されることがある。図8及び図9は、あくまで前述の応答低減効果が現れたものである。図11の関係が、静的問題での降伏現象を表す荷重変位関係に相当する。この図に示すとおり、小さな応答レベルの結果を線形近似した直線（図中の一点鎖線）からは、塑性変形の発生に伴い外れてくるものの、それぞれの直線の1/2勾配の直線を想像すると、実験結果はその1/2勾配線よりも上方に位置し、2 tan θ 法（塑性崩壊判定の簡便法の一つ）での崩壊荷重には至っていないことがわかる。

もう一つの評価項目である疲労評価では、地震荷重の繰返し数と、ピーク応力より求められる許容繰返し数が評価を左右する。地震荷重の繰返し数として設計評価では60サイクルを用いていた。ここでは、加振実験での応答変位波形を用いてピーク法¹⁾により等価繰返し数を求めることとした。計算された等価繰返し数は、応力レベルにより多少異なる結果となった。ここでは10～5000サイクル領域での応力レベル、設計疲労曲線を基に等価繰返し数を計算し、この領域での平均値を求めることとした。問題は、応答レベルにより波形の傾向が変化し、計算される等価繰返し数も変化することである。図12にこの変化の例を示す。大レベル加振の応答波形では塑性変形による減衰の大きな応答波形の様相となる。実態評価の疲労損傷係数の計算では、疲労損傷への影響の大きい大レベル加振の応答波形より等価繰返し回数（AP3-A31で24サイクル、AP3-C31で13サイクル）を計算し疲労評価を行った。

以上に示した応答低減率、等価繰返し数を考慮した評価結果を表4の実態評価の欄に示す。更に、図13に示す最適疲労曲線（設計疲労曲線を繰返し数で20倍した曲線）を用いた場合の評価結果も同表に示す。最適疲労曲線を用いた結果では、加振実験での破損を予測できる程度に近づいたと考えられる。以上の評価において、意図的な設けられている裕度としては、設計疲労曲線が持つ裕度のみである。

6. 結言

健全及び減肉の両配管系試験体に対して、3次元振動台による加振実験を行い、設計解析及び評価との比較を行うことで設計裕度を検討した。応答低減効果、詳細な等価繰返し数、最適疲労曲線を用いることで、実験結果に近い評価結果を得ることができた。

設計裕度とは明確に意図的に設定されるべきである。設計疲労曲線を除く、応答低減効果、等価繰返し数の違いは漠然とした安全側の誤差であり、より明確な配慮、耐震設計への取り込みが必要である。

謝辞

本研究は、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブにより実施された「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」の平成20年度成果に基づくものです。実験で用いた1993年北海道南西沖JMA寿都記録波は気象庁提供によるものです。原データから25秒～120秒の範囲を切り出して使用しました。加振実験の計画では、AP3研究会の委員の方々に御助言を頂きました。

参考文献

- 1) 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術規定、JEAC4601-2008
- 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>、JSME S NC1-2005

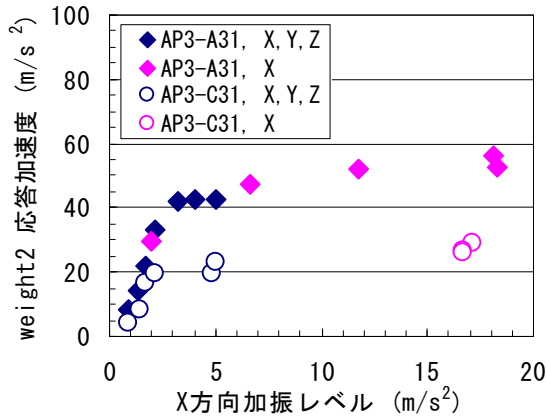


図8 最大応答加速度

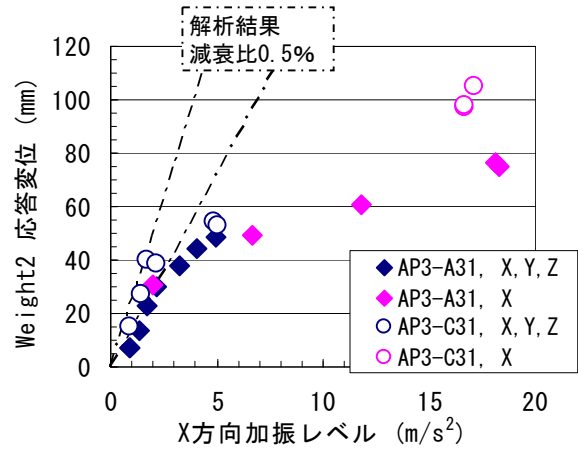


図9 最大応答変位

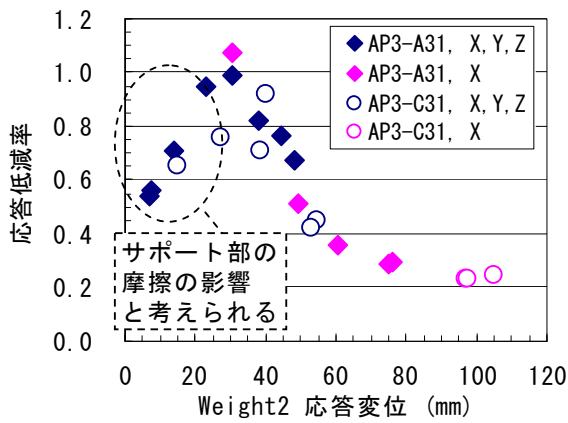


図10 応答低減率

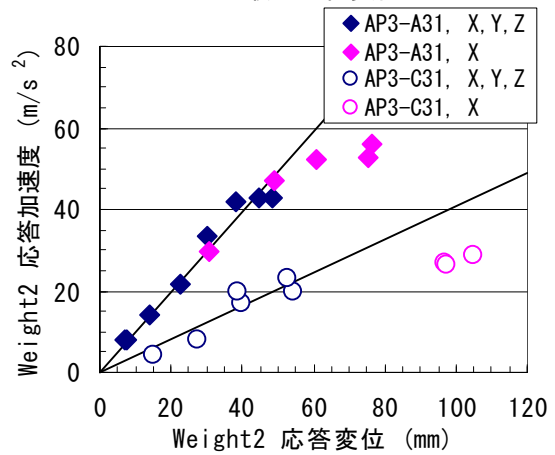


図11 荷重—変位関係に相当する関係

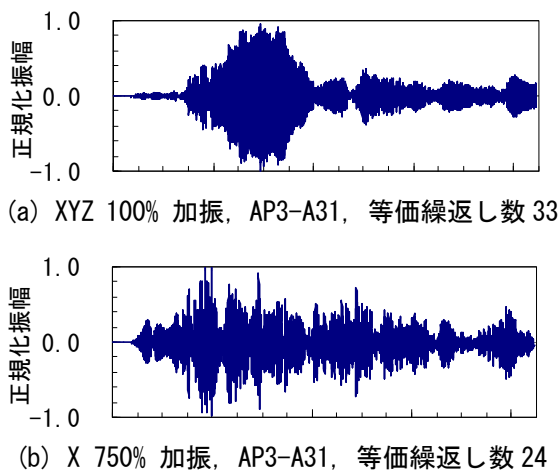


図12 レベルによる応答波形の変化

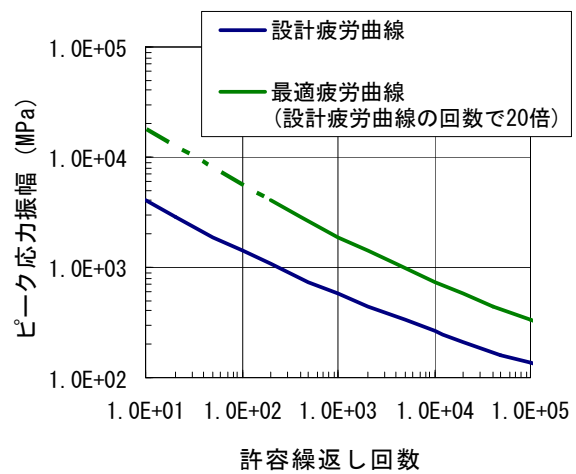


図13 評価に用いた疲労曲線