

振動台実験による高経年配管系の耐震裕度評価
ESTIMATION OF SEISMIC SAFETY MARGIN OF AGED PIPING
SYSTEMS BY SHAKE TABLE TESTS

中村いずみ¹⁾、大谷章仁²⁾、佐藤祐二³⁾、高田一⁴⁾

Izumi Nakamura¹, Akihito OTANI², Yuji SATO³, Hajime TAKADA⁴

1) 独立行政法人 防災科学技術研究所、主任研究員 博士 (工学)

¹ Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.
e-mail : izumi@bosai.go.jp

2) I H I 原子カプラント技術部、主幹 博士 (工学)

² General Manager, Nuclear Plant Engineering Dept., IHI Corporation, Dr. Eng.

3) I H I 基盤技術研究所、主任研究員

³ Senior Engineer, Structural Strength Dept., Research Laboratory, IHI Corporation

4) 横浜国立大学、教授 工博

⁴ Professor, Yokohama National University, Dr. Eng

ABSTRACT: In order to investigate the influence of wall thinning on the dynamic behavior and failure modes of piping systems, shake table tests using 3-D piping system models were conducted. About 50% full circumferential wall thinning at elbows was considered in the test. The failure mode of the piping models was a low-cycle fatigue failure at the weakest elbow. Comparing the applied load in the excitation tests with the stress limitation of the seismic design, the piping system model still contains a considerable seismic margin though the model has 50% wall thinning.

キーワード： 配管系、減肉、振動台実験、応力制限、耐震裕度

1. はじめに

配管系は発電施設等における重要な構成要素のひとつであり、高経年化に伴い通常の熱疲労だけでなく、応力腐食割れや流れ加速型腐食 (FAC) による減肉などの劣化の発生が知られている。日本は地震国であるため、プラントの耐震安全性は劣化を想定した場合にも十分確保されなければならない、プラントの長寿命化を実現するためには、劣化の存在が配管系の動的挙動や耐震裕度に与える影響を明らかにし、地震動を受ける経年劣化配管の安全性を合理的に評価する手法が必要である。

本稿では、これまでに著者らが実施した配管系試験体に対する振動台実験のうち、一次元加振に供した立体配管系試験の面内曲げモデル試験体の試験結果をもとに、減肉部を有する配管系の地震応答の特徴について述べる。また、設計で規定される応力制限との比較により、配管系の耐震裕度の評価を試みた結果について報告する。

2. 配管系に対する振動台実験¹⁾

面内曲げモデル試験体を用いた立体配管系試験は、図1に示すような、比較的単純な形状の、立体Z型

の配管系に対する一次元の振動台実験である。試験体に用いた配管は、主に高温配管用炭素鋼管 STPT370、100Asch80 (外径: 114.3mm、肉厚: 8.6mm) としたが、減肉エルボは炭素鋼管 FSGP エルボで代用した。FSGP エルボの公称肉厚は 4.5mm であり、約 50% の全周減肉を模擬した。試験体は、減肉を導入しない健全試験体 (以下 3D_A01)、エルボ1およびエルボ2を減肉させた試験体 (以下 3D_C01)、エルボ1を減肉させた試験体 (以下 3D_C02)、エルボ2を減肉させた試験体 (以下 3D_C03) の4種類を使用した。固有値解析で得られた 3D_A01 の一次固有振動数は 2.74Hz、一次固有振動モードで支配的な変形は、エルボ1およびエルボ2の面内変形であった。実験では、これらの試験体に対し、一次元大型振動台を用いて加振を実施した。加振方向は、図1に記載した一方向であり、加振波は、試験体の一次固有振動モードを励起し、かつ、減肉の存在や弾塑性応答により試験体の卓越振動数が変化しても大きく応答が変動しないよう、1.5Hz~3.0Hzの狭帯域ランダム波を作成して使用した。図2に実験で使用した狭帯域ランダム波の加速度時刻歴波形と応答スペクトルを示す。実験は、狭帯域ランダム波に倍率を乗じ、入力レベルを 20Gal から振動台の限界性能である 1850Gal まで増幅させて各入力レベルでの応答性状を得るとともに、最大レベルで試験体が破損するまで加振を繰り返した。試験体は内部に常温の水を満し、水圧により 10MPa の内圧を負荷した。内圧により発生する周方向応力は、健全肉厚の部分で約 67MPa、減肉部分で約 128MPa となる。本研究では、試験体の破損を配管本体における損傷に伴う内部水の漏洩と内圧の低下で定義した。

表1に、試験結果をまとめて示す。表1に示したとおり、実験から得られた弾性域における健全試験体の一次固有振動数は 2.78Hz であった。一方、減肉がある試験体の一次固有振動数は、2ヶ所のエルボが減肉している 3D_C01 では 2.42Hz、1ヶ所のエルボが減肉している 3D_C02 および 3D_C03 では、それぞれ 2.55Hz と 2.62Hz となり、減肉の程度による固有振動数の低下が認められた。図3に、入力加速度とエルボ3位置における応答加速度との関係を示す。入力加速度 400Gal 以上の加振では、試験体の一部に塑性変形が生じることによるエネルギー吸収のため、応答加速度が低下する傾向が確認された。同一の入力加速度に対する応答加速度のレベルを試験体間で比較すると、減肉のある試験体では健全試験体と比較して低い応答加速度となるが、これは、減肉部では健全な場合と比較して同一入力により大きな塑性変形が生じ、エネルギー吸収が大きくなることによると考えられる。立体配管系試験の最終的な損傷形態は、すべての試験体においてエルボ部における疲労損傷であった。損傷の生じた部分では、健全配管で 3% 程度、減肉配管で 10~12% 程度の外径増加が生じ、ラチェット現象を伴っていることが確認されたが、加振に伴い配管系の変形が不安定に進行するような塑性崩壊は確認されなかった。写真1に損傷状況を示す。

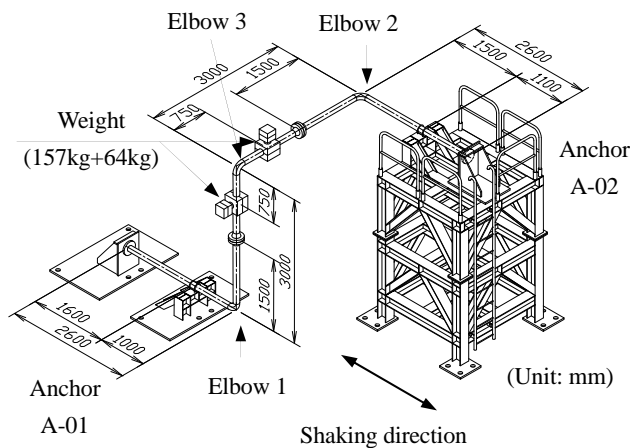
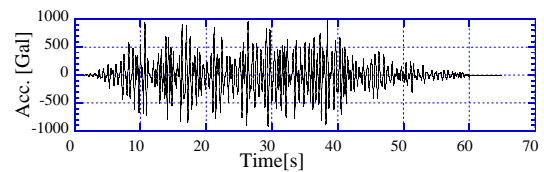
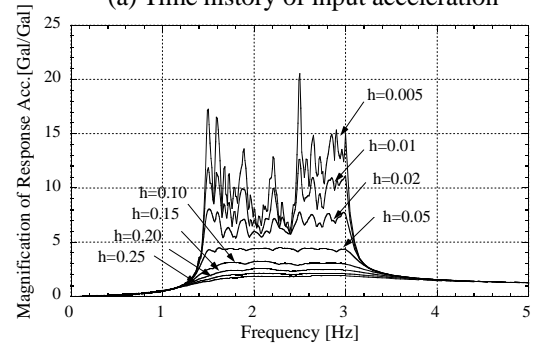


図1 立体配管系 (面内曲げモデル) の形状



(a) Time history of input acceleration



(b) Response spectrum (h: damping ratio)

図2 振動台実験の入力波

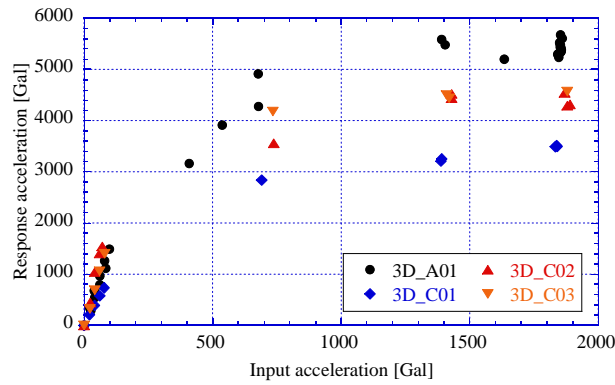


図3 入力加速度とエルボ3位置における応答加速度関係

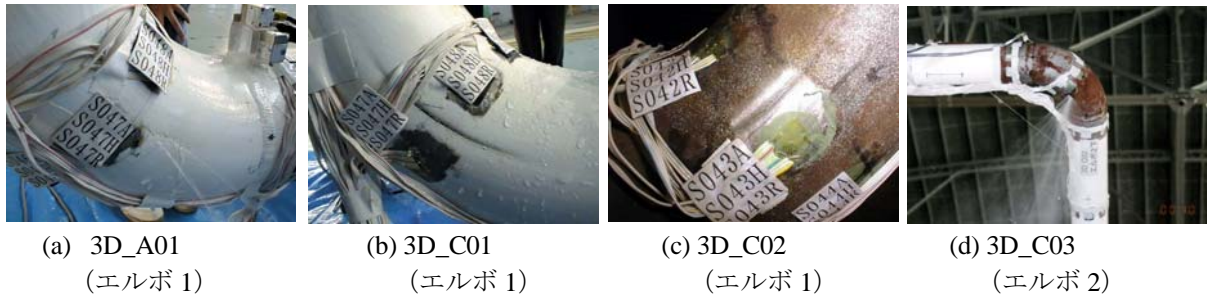


写真1 立体配管系試験（面内曲げモデル）の損傷形態

表1 立体配管系試験（面内曲げモデル）の試験結果

Name	Condition of defect		Natural frequency (f) and damping ratio (h) at 1st mode*2	Contents of the excitation test by narrow band random wave		Test results
	Type	Depth*1		Max. input acc. [Gal]	Number of input times	
3D_A01	No defect	-	$f=2.78$ [Hz] $h=0.0106$	20-100 (Elastic level)	10	* Penetration of fatigue cracks in longitudinal direction at Elbow 1. * A number of small cracks were observed on the inner surface of Elbow 2.
				400-700	4	
				1400	2	
				1850	14	
3D_C01	Wall thinning at Elbow 1 and Elbow 2	0.48 t	$f=2.42$ [Hz] $h=0.0121$	20-80 (Elastic level)	4	* Penetration of a fatigue crack in longitudinal direction at Elbow 1. * No crack was observed at Elbow 2. * The residual deformation was clearly observed after the test.
				700	1	
				1400	2	
				1850	3	
3D_C02	Wall thinning at Elbow 1	0.48 t	$f=2.55$ [Hz] $h=0.0131$	20-80 (Elastic level)	4	* Penetration of fatigue cracks in longitudinal direction at Elbow 1. * No crack was observed at Elbow 2.
				700	1	
				1400	2	
				1850	3	
3D_C03	Wall thinning at Elbow 2	0.48 t	$f=2.62$ [Hz] $h=0.0109$	20-80 (Elastic level)	4	* Penetration of a fatigue crack in longitudinal direction at Elbow 2. * No crack was observed at Elbow 1.
				700	1	
				1400	2	
				1850	1	

*1. t is the normal wall thickness of the pipe *2. Results of the sinusoidal sweep excitation

3. 実験結果と設計で規定される応力制限との比較

実験で使用した配管系試験体の耐震裕度を検討するために、実験結果と設計で規定される応力制限との比較を試みた。実験結果からの応力値の計算に必要な、エルボ1、エルボ2まわりの作用モーメントは、エルボ1、エルボ2まわりに貼付したひずみゲージの計測値から以下の手順で算出した。

- (1) 20Gal～80Galまでの、弾性域加振の応答を使用し、エルボ1、エルボ2まわりのひずみ計測点より、二軸の曲げモーメント (M_x 、 M_y) およびねじりモーメント (M_z) を求める。また、それらのモーメントから、合成モーメント M を求める。
日本機械学会の定める発電用原子力設備規格設計・建設規格（以下JSME建設規格）²⁾の規定に基づくと、合成モーメント M は以下の式(1)で与えられる。

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (1)$$

- (2) 弾性域加振での入力加速度と対象とするエルボ位置での合成モーメントの関係について、線形近似式を求める。
(3) 大レベルの入力における作用モーメントは、(2)で求めた近似式から算出される仮想弾性モーメントを M_f とし、 M_f から設計で規定される手順に基づき作用応力を計算する。実際の配管応答は、実験結果で述べたように、弾塑性応答領域では線形弾性を仮定した場合よりも、配管の塑性変形に伴うエネルギー吸収のため低減されるが、設計基準との比較においては、仮想的に弾性とした場合の応力で比較するため、大レベル入力でも弾性域加振の結果から比例倍して求める。

算出された応力は、2008年に改訂された原子力発電施設耐震設計技術規程（以下JEAC4601-2008）³⁾での応力制限と比較する。クラス1配管の場合、エルボ部の一次応力（曲げ+ねじりによるもの）は、JEAC4601-2008に従い、以下の式(2)で与えられる。

$$S_{prm} = \frac{B_2 M_{ip}}{Z_i} \quad (2)$$

ここで、 P ：内圧[MPa]、 D_0 ：配管外径[mm]、 t ：配管肉厚[mm]、 M_{ip} ：管の機械的荷重（地震による慣性力を含む）によるモーメント[N-mm]、 Z_i ：管の断面係数[mm³]、 B_2 ：応力係数。

B_2 は、エルボの場合、

$$B_2 = \frac{1.3}{h^{\frac{2}{3}}}, h = \frac{t \cdot R}{r^2} \quad (3)$$

で与えられる²⁾。ここで、 R はエルボの回転半径、 r はエルボの平均半径である。健全肉厚の場合、 $D_0=114.3\text{mm}$ 、 $t=8.6\text{mm}$ 、 $R=152.4\text{mm}$ から、 $B_2=2.15$ となる。

同様に、一次+二次応力範囲 S_n [MPa]は式(4)で、ピーク応力 S_p [MPa]は式(5)で、繰り返しピーク応力強さ S_l [MPa]は式(6)で与えられる。

$$S_n = \frac{C_2 M_{is}}{Z_i} \quad (4)$$

$$S_p = \frac{K_2 C_2 M_{is}}{Z_i} \quad (5)$$

$$S_l = \frac{K_e S_p}{2} \quad (6)$$

ここで、 M_{is} ：地震動のみによる慣性力と相対変位により生じるモーメントの全振幅[N-mm]。 C_2 、 K_2 ：応力係数、エルボの場合、 $K_2=1.0$ で、 C_2 は以下の式で与えられる。

$$C_2 = \frac{1.95}{h^3} \quad (7)$$

従って、健全肉厚の場合、 $C_2=3.23$ 。

K_e の値は、 S_n が $3S_m$ 以下の場合には1であり、 $3S_m$ 以上の場合にはJSME建設規格の規定に従って算出される。 K_e は $K=S_p/S_n$ の大きさにより算出方法が異なるが、今回の試験体の場合、 $K=K_2=1.0$ であること、また、使用している配管が炭素鋼であることから、以下の式(8)、(9)で算出される。

$$(a) \quad \frac{S_n}{3S_m} < \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4A_0(q-1)}}{2A_0} \quad \text{のとき}$$

$$K_e = 1 + A_0 \left(\frac{S_n}{3S_m} - \frac{1}{K} \right) \quad (8)$$

$$(b) \quad \frac{S_n}{3S_m} \geq \frac{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right) - \sqrt{\left(q + \frac{A_0}{K} - 1\right)^2 - 4A_0(q-1)}}{2A_0} \quad \text{のとき}$$

$$K_e = 1 + (q-1) \left(1 - \frac{3S_m}{S_n} \right) \quad (9)$$

ここで、 q 、 A_0 はJSME建設規格で定められる値で、炭素鋼の場合、 $q=3.1$ 、 $A_0=0.66$ 。

表2に、3D_A01のエルボ1について、実験結果から算出された一次応力 S_{pm} （曲げ+ねじり）、一次+二次応力範囲 S_n 、繰り返しピーク応力強さ S_1 および S_1 に対応する許容繰り返し数 N_f を実験での入力加速度に対応させて示す。ここで、表2の値を算出するにあたり、式(2)の M_p には実験結果から得られた M_f を、式(4)、(5)で使用される M_{is} は、モーメントの全振幅とすることから $2 \times M_f$ を用いた。また、表中、一次応力、一次+二次応力範囲については、算出された応力の設計応力強さ S_m に対する比を併記した。 N_f は、JSME建設規格で規定されている手順に基づき算出しており、20Gal以下および700Gal以上では、規格上、算出された S_1 に対応する N_f が規定されていないため表には記載していない。

JEAC4601-2008では、供用状態Dsにおいて、曲げのみによる一次応力制限は撤廃されており、ねじりにより生じる応力が $0.73S_m$ 以上の場合には曲げ+ねじりの一次応力が $2.4S_m$ 以下に制限されている。実験結果から算出した一次応力では、事前の設計解析での検討時よりもねじりによる成分がやや大きく、一次応力制限としては $2.4S_m$ 以下が適用されることとなり、このときの入力加速度を算出すると約170Galであった。表2に示すように、健全・弾性を仮定した場合、3D_A01では、実験での最大入力加速度である1850Galで一次応力は約 $26S_m$ 程度と算出された。これは、一次応力制限に対し約10倍程度の入力となるが、2章で述べたとおり、実験では1850Galの入力に対しても塑性崩壊は生じなかった。

一次+二次応力範囲については、JEAG4601-2008で定められているクラス1配管の供用状態Cs、Dsにおける許容応力である $3S_m$ が設計上での許容値となるが、この許容値に到達する加振レベルは約70Galとなる。実験でこの入力加速度に最も近い加振は、入力加速度80Galの加振となるが、この時点では必ずみ計

測値は弾性範囲にとどまっておらず、外観観察、外径計測でも異状は認められていなかった。繰り返しピーク応力強さの算定値については、入力加速度700Gal以上で規格での規定無し（許容繰り返し数が10回以下）となり、地震応答の等価繰り返し数にかかわらず、入力は700Gal以下に制限されることになる。また、1回の地震入力による等価繰り返し数は、BWRの場合、通常60サイクルとされるが、本実験においてこの繰り返し数を用いると、3D_A01においては、実験における弾塑性域加振で最も低い入力レベルである400Galの加振1回で疲労累積係数は1を超過し、疲労累積係数を評価した場合には400Galの加振で損傷するという評価になるが、実験では1850Galの加振14回の繰り返しで損傷に至っており、設計での疲労制限に対し、実際の配管は大きな裕度があるといえる。これらの結果から、実際の配管系で生じた損傷と、設計の手順に準じ、健全・弾性を仮定して算出される応力とを比較すると、健全な場合では設計で規定される一次応力制限、一次＋二次応力範囲の制限、疲労制限のいずれに対しても、実際の配管系で損傷が生じ配管系としての機能を喪失するまでには大きな裕度を有していることがわかる。

配管系に減肉を有する場合、表1の実験結果に示すように、実際の配管系試験体では健全試験体と比較して少ない加振回数で破損に至っている。しかし、入力加速度レベルを基準とし、健全・弾性を仮定して算出した設計上の応力制限と比較すると、一次応力制限、一次＋二次応力範囲の制限、疲労制限とも、応力制限に対応する入力加速度レベルに対しては減肉試験体においてもその制限を超過する複数回の加振に対して破損は生じなかった。従って、健全配管と比較すると相対的に寿命は低下するものの、設計上の健全配管に対する応力制限と比較すると、50%程度の減肉のある配管系においても、配管系としての機能を喪失するような損傷までにはある程度の裕度を有すると考えられる。

4. まとめ

減肉部を有する配管系の地震時挙動を明らかにするため、比較的単純な形状の立体配管系試験体を用

表2 3D_A01、エルボ1の一次応力、一次＋二次応力範囲、繰り返しピーク応力強さおよび許容繰り返し回数

Input acc. [Gal]	S_{pm} (bending and torsion) [N/mm ²]	S_n [N/mm ²]	S_l [N/mm ²]	N_f
20	34.9	105	53.3	
	$0.28S_m$	$0.84S_m$		
40	69.8	209	106.7	269512
	$0.56S_m$	$1.67S_m$		
60	104.6	314	160.0	49011
	$0.84S_m$	$2.51S_m$		
80	139.5	419	260.0	10263
	$1.12S_m$	$3.35S_m$		
100	174.4	523	425.3	2245
	$1.40S_m$	$4.19S_m$		
400	697.5	2093	2906	19
	$5.58S_m$	$16.7S_m$		
500	871.9	2616	3733	12
	$6.98S_m$	$20.9S_m$		
700	1221	3662	6213	
	$9.77S_m$	$29.3S_m$		
1400	2441	7324	11174	
	$19.5S_m$	$58.6S_m$		
1850	3226	9678	14895	
	$25.8S_m$	$77.4S_m$		

いた振動台実験を実施した。実験の結果、減肉を有する配管系では減肉の程度に応じた卓越振動数の低下が認められた。また、配管系の損傷形態はエルボ部における疲労損傷であり、50%程度の減肉がある場合でも、配管の変形が不安定に進行するような損傷は確認されなかった。実験結果に対し、設計で規定される応力制限との比較により、配管系の耐震裕度の評価を試みた。その結果、配管に減肉がある場合は、健全配管と比較すると相対的に寿命は低下するものの、設計で規定される応力制限と比較すると、50%程度の減肉のある配管系においても、配管系としての機能を喪失するような損傷までにはある程度の裕度を有すると考えられる。

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している「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」の一環としての検討である。また、本研究で引用した実験は、科学技術庁国立機関原子力試験研究費により実施されたものである（平成8年度～平成12年度、課題名：機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究、実施機関：防災科学技術研究所）。当該研究の実施にあたっては、実験実施委員会（略称：AP委員会、委員長：白鳥正樹横浜国立大学教授）を組織し研究内容について議論を行った。関係各位に記して感謝します。

参考文献

- 1) 中村いずみ、大谷章仁、白鳥正樹、機器・配管系の経年変化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究報告書、防災科学研究資料第220号、2001
- 2) 日本機械学会、「発電用原子力設備規格設計・建設規格 <第I編 軽水炉規格>」、JSME S NC1-2005、2005
- 3) 日本電気協会、「原子力発電所耐震設計技術規程」、JEAC4601-2008、2009