

高速炉配管の耐震裕度に関する研究
(研究報告)

1999年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

高速炉配管の耐震裕度に関する研究 (研究報告)

森下 正樹*

要 旨

現行の配管耐震設計手法には必要以上の安全裕度が含まれていると認識されている。そこで、高速炉の主冷却系配管の設計例を対象とした耐震解析を行い、種々の基準による強度評価を実施するとともに、実際の配管の耐力を評価し、基準が有している裕度の定量化を試みた。また、現行の許容値を緩和した場合の配管設計への影響や合理化効果を検討した。その結果、以下の点が明らかになった。

- a) 非線型時刻歴解析による応答と(設計許容値から安全裕度を除いて求めた)真の強度を比較すると、本検討で取り上げた設計例の配管は、現行の設計手法(床応答解析と高温構造設計方針を使用)で許容される地震力の、数倍から 20 倍程度の地震力を与えて、初めて破損する。
- b) ASME 新基準と非線形時刻歴解析による評価とは比較的对応性が良い。従って、ASME 新基準による許容限界が今後の基準合理化に向けての目安目標となろう。
- c) ASME 新基準相当の合理化基準を適用する場合、許容応力が高いため設計において応力を抑えるための対策(サポート設置や板厚増)を施す必要はほとんど無くなる可能性がある。但し、固有振動数ある程度に確保する必要があり、そのためのサポートは必要である。

* システム技術開発部 構造・材料技術開発室

A QUANTITATIVE EVALUATION OF SEISMIC MARGIN OF TYPICAL SODIUM PIPING

Masaki MORISHITA*

Abstract

It is widely recognized that the current seismic design methods for piping involve a large amount of safety margin. From this viewpoint, a series of seismic analyses and evaluations with various design codes were made on typical LMFBR main sodium piping systems. Actual capability against seismic loads were also estimated on the piping systems. Margins contained in the current codes were quantified based on these results, and potential benefits and impacts to the piping seismic design were assessed on possible mitigation of the current code allowables. From the study, the following points were clarified;

- 1) A combination of inelastic time history analysis and true(without margin)strength capability allows several to twenty times as large seismic load compared with the allowable load with the current methods.
- 2) The new rule of the ASME is relatively compatible with the results of inelastic analysis evaluation. Hence, this new rule might be a goal for the mitigation of seismic design rule.
- 3) With this mitigation, seismic design accommodation such as equipping with a large number of seismic supports may become unnecessary.

* Structure and Material Research Group, O-arai engineering Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	検討条件	2
3.	線形解析による評価	10
3.1	検討方法	10
3.2	FRSの作成	11
3.3	慣性力による応力	11
3.4	ミドルレグ配管取付部の相対変位による応力	12
3.5	モーダル床応答解析による強度評価	13
4.	非線形解析による評価	62
4.1	概要	62
4.2	配管要素の弾塑性大変形解析	62
4.3	非線形時刻歴振動解析モデル及び地震入力条件	66
4.4	ホットレグ配管の非線形時刻歴振動解析	69
4.5	ミドルレグ配管の非線形時刻歴振動解析	70
4.6	強度評価	72
4.7	考察	75
4.8	結論	78
5.	合理化効果の検討	184
6.	まとめ	185
7.	参考文献	186
8.	謝辞	187

表リスト

表 2-1(1)	ASMEの新・旧基準の概要	4
表 2-1(2)	ASMEの新・旧基準の概要	5
表 2-2	各評価基準の比較	6
表 3.2-1	IHX及びポンプの固有値解析結果	15
表 3.3-1	ホットレグ配管の固有値解析結果	22
表 3.3-2	ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%]/水平サポート)	23
表 3.3-3	ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%]/水平サポート)	24
表 3.3-4	ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%]/水平サポート)	25
表 3.3-5	ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%]/水平サポート)	26
表 3.3-6	ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%]/水平サポート)	27
表 3.3-7	ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%]/水平サポート)	28
表 3.3-8	ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%]/水平サポート)	29
表 3.3-9	ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%]/水平サポート)	30
表 3.3-10	ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%]/水平サポート)	31
表 3.3-11	ホットレグ配管に生じる応力 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%]/水平サポート)	32
表 3.3-12	ホットレグ配管に生じる応力 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%]/水平サポート)	33
表 3.3-13	ホットレグ配管に生じる応力 (上下S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%]/水平サポート)	34

表 3.3-14	ホットレグ配管に生じる応力(水平S2+上下S2/慣性力 [FRS:S2h=0.5%]/水平サポート)……………	35
表 3.3-15	ホットレグ配管に生じる応力(水平S2+上下S2/慣性力 [FRS:S2h=1.0%]/水平サポート)……………	36
表 3.3-16	ホットレグ配管に生じる応力(水平S2+上下S2/慣性力 [FRS:S2h=5.0%]/水平サポート)……………	37
表 3.3-17	ミドルレグ配管の固有値解析結果……………	38
表 3.3-18	ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%])……………	39
表 3.3-19	ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%])……………	40
表 3.3-20	ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%])……………	41
表 3.3-21	ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=0.5%])……………	42
表 3.3-22	ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=1.0%])……………	43
表 3.3-23	ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力[FRS:S2h=5.0%])……………	44
表 3.4-1	ミドルレグ配管に生じる荷重(水平S2/強制変位[逆位相])……………	51
表 3.4-2	ミドルレグ配管に生じる荷重(水平S2/強制変位[同位相])……………	52
表 3.4-3	ミドルレグ配管に生じる応力(水平S2/強制変位[逆位相])……………	53
表 3.4-4	ミドルレグ配管に生じる応力(水平S2/強制変位[同位相])……………	54
表 3.5-1	BDSによる評価(水平地震)……………	55
表 3.5-2	BDSによる評価(水平地震+上下地震)[参考用]……………	56
表 3.5-3	DDSによる評価(水平地震)……………	57
表 3.5-4	DDSによる評価(水平地震+上下地震)[参考用]……………	58
表 3.5-5	ASME(旧、新)による評価(水平地震)……………	59
表 3.5-6	ASME(旧、新)による評価(水平地震+上下地震)[参考用]……………	60
表 3.5-7	発生応力とFRS(主として減衰率)の関係……………	61
表 4.2.1-1	荷重点変位—反力—ひずみのデジタル値(HL配管のエルボ)……………	80
表 4.2.2-1	荷重点変位—反力—ひずみのデジタル値(HL配管の直管)……………	87
表 4.2.3-1	荷重点変位—反力—ひずみのデジタル値(ML配管のエルボ)……………	95
表 4.2.4-1	荷重点変位—反力—ひずみのデジタル値(ML配管の直管)……………	102

表 4.6.2-1	HL配管の成立性評価 (最大角変形 = 各時刻の θ max とした場合) ……	164
表 4.6.2-2	HL配管の成立性評価 (最大角変形 = $0.5 \times \Delta \theta_{max}$ とした場合) ……	165
表 4.6.2-3	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 5を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = 各時刻の θ max とした場合) ……	166
表 4.6.2-4	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 7.5を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = 各時刻の θ max とした場合) ……	167
表 4.6.2-5	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 10を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = 各時刻の θ max とした場合) ……	168
表 4.6.2-6	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 5を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = $0.5 \times \Delta \theta_{max}$ とした場合) ……	169
表 4.6.2-7	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 7.5を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = $0.5 \times \Delta \theta_{max}$ とした場合) ……	170
表 4.6.2-8	[BDSで裕度 = 1となる水平地震] × 10を入力した場合のML配管の 成立性評価(最大角変形 = $0.5 \times \Delta \theta_{max}$ とした場合) ……	171

図リスト

図 2-1	検討対象とする配管の構造概念	7
図 2-2	検討対象とする配管の構造形状	8
図 2-3	容器据付部における地震条件(水平:S1)	9
図 2-4	容器据付部における地震条件(上下:S1)	9
図 3.2-1	容器据付部における床応答曲線(水平S2)	16
図 3.2-2	容器据付部における床応答曲線(上下S2)	17
図 3.2-3	ポンプ及びIHXの振動解析モデル	18
図 3.2-4	IHXの振動モード	19
図 3.2-5	ポンプの振動モード	20
図 3.2-6	機器先端の加速度応答(S2)	21
図 3.3-1	ホットレグ配管の線形振動解析モデル	45
図 3.3-2	ホットレグ配管モデルの節点番号	46
図 3.3-3	ホットレグ配管の振動モード	47
図 3.3-4	ミドルレグ配管の線形振動解析モデル	48
図 3.3-5	ミドルレグ配管モデルの節点番号	49
図 3.3-6	ミドルレグ配管の振動モード	50
図 4.2.1-1	ホットレグ配管(エルボ)の弾塑性大変形解析モデル	81
図 4.2.1-2	弾塑性大変形解析用FEMモデル(HL配管のエルボ)	82
図 4.2.1-3	SUS304(530°C)の応力-ひずみ曲線(平均傾向線)	83
図 4.2.1-4	最大荷重点における変形図(HL配管のエルボ)	84
図 4.2.1-5	荷重点変位と反力の関係(HL配管のエルボ)	85
図 4.2.1-6	荷重点変位とひずみの関係(HL配管のエルボ)	86
図 4.2.2-1	ホットレグ配管(直管)の弾塑性大変形解析モデル	88
図 4.2.2-2	弾塑性大変形解析用FEMモデル(HL配管の直管)	89
図 4.2.2-3	SUS304(530°C)の応力-ひずみ曲線(平均傾向線)	90
図 4.2.2-4	最大荷重点における変形図(HL配管の直管)	91
図 4.2.2-5	荷重点変位と反力の関係(HL配管の直管)	92
図 4.2.2-6	荷重点変位とひずみの関係(HL配管の直管)	93
図 4.2.2-7	slenderness limit: α と崩壊モーメントの関係	94
図 4.2.3-1	ミドルレグ配管(エルボ)の弾塑性大変形解析モデル	96
図 4.2.3-2	弾塑性大変形解析用FEMモデル(ML配管のエルボ)	97
図 4.2.3-3	SUS304(380°C)の応力-ひずみ曲線(平均傾向線)	98

図 4.2.3-4	最大荷重点における変形図(ML配管のエルボ)	99
図 4.2.3-5	荷重点変位と反力の関係(ML配管のエルボ)	100
図 4.2.3-6	荷重点変位とひずみの関係(ML配管のエルボ)	101
図 4.2.4-1	ミドルレグ配管(直管)の弾塑性大変形解析モデル	103
図 4.2.4-2	弾塑性大変形解析用FEMモデル(ML配管の直管)	104
図 4.2.4-3	SUS304(380°C)の応力-ひずみ曲線(平均傾向線)	105
図 4.2.4-4	最大荷重点における変形図(ML配管の直管)	106
図 4.2.4-5	荷重点変位と反力の関係(ML配管の直管)	107
図 4.2.4-6	荷重点変位とひずみの関係(ML配管の直管)	108
図 4.3-1	ホットレグ配管の非線形時刻歴振動解析モデル	109
図 4.3-2	ホットレグ配管解析モデルの要素分割	110
図 4.3-3	曲げを受ける直管付け根の非線形バネの定義	111
図 4.3-4	直管基部のモーメント vs 回転変形 vs ひずみの関係(HL配管)	112
図 4.3-5	エルボのモーメント vs 回転変形 vs ひずみの関係(HL配管)	113
図 4.3-6	ML配管の非線形時刻歴振動解析モデル	114
図 4.3-7	ML配管解析モデルの要素分割	115
図 4.3-8	直管基部のモーメント vs 回転変形 vs ひずみの関係(ML配管)	116
図 4.3-9	エルボのモーメント vs 回転変形 vs ひずみの関係(ML配管)	117
図 4.4.1-1	ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-5)	118
図 4.4.1-2	ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-5)	119
図 4.4.1-3	ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の 履歴(ケースHL-H-5)	120
図 4.4.1-4	ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースHL-H-5)	121
図 4.4.1-5	ホットレグエルボ(K3)及び水平管付け根(K2)の非線形バネの ヒステリシス(ケースHL-H-5)	122
図 4.4.2-1	ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-10)	123
図 4.4.2-2	ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-10)	124
図 4.4.2-3	ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の 履歴(ケースHL-H-10)	125

図 4.4.2-4	ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースHL-H-10)	126
図 4.4.2-5	ホットレグエルボ(K3)及び水平管付け根(K2)の非線形バネの ヒステリシス(ケースHL-H-10)	127
図 4.4.3-1	ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-20)	128
図 4.4.3-2	ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-H-20)	129
図 4.4.3-3	ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の 履歴(ケースHL-H-20)	130
図 4.4.3-4	ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースHL-H-20)	131
図 4.4.3-5	ホットレグエルボ(K3)及び水平管付け根(K2)の非線形バネの ヒステリシス(ケースHL-H-20)	132
図 4.4.4-1	ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-HV-5)	133
図 4.4.4-2	ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケースHL-HV-5)	134
図 4.4.4-3	ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の 履歴(ケースHL-HV-5)	135
図 4.4.4-4	ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースHL-HV-5)	136
図 4.4.4-5	ホットレグエルボ(K3)及び水平管付け根(K2)の非線形バネの ヒステリシス(ケースHL-HV-5)	137
図 4.5.1-1	ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケースML-H-5)	138
図 4.5.1-2	ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケースML-H-5)	139
図 4.5.1-3	ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースML-H-5)	140
図 4.5.1-4	ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回転 変形の履歴(ケースML-H-5)	141
図 4.5.1-5	ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び 回転変形の履歴(ケースML-H-5)	142

図 4.5.1-6	ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-5)	143
図 4.5.1-7	ミドルレグエルボ(IHX側:K8, ポンプ側:K6)の非線形バネのヒステリシス(ケースML-H-5)	144
図 4.5.1-8	ミドルレグ鉛直管付け根(IHX側:K7, ポンプ側:K5)の非線形バネのヒステリシス(ケースML-H-5)	145
図 4.5.2-1	ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴(ケースML-H-7.5)	146
図 4.5.2-2	ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴(ケースML-H-7.5)	147
図 4.5.2-3	ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-7.5)	148
図 4.5.2-4	ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-7.5)	149
図 4.5.2-5	ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-7.5)	150
図 4.5.2-6	ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-7.5)	151
図 4.5.2-7	ミドルレグエルボ(IHX側:K8, ポンプ側:K6)の非線形バネのヒステリシス(ケースML-H-7.5)	152
図 4.5.2-8	ミドルレグ鉛直管付け根(IHX側:K7, ポンプ側:K5)の非線形バネのヒステリシス(ケースML-H-7.5)	153
図 4.5.3-1	ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴(ケースML-H-10)	154
図 4.5.3-2	ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴(ケースML-H-10)	155
図 4.5.3-3	ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-10)	156
図 4.5.3-4	ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-10)	157
図 4.5.3-5	ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-10)	158
図 4.5.3-6	ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴(ケースML-H-10)	159

図 4.5.3-7	ミドルレグエルボ(IHX側:K8, ポンプ側:K6)の非線形バネの ヒステリシス(ケースML-H-10)	160
図 4.5.3-8	ミドルレグ鉛直管付け根(IHX側:K7, ポンプ側:K5)の非線形 バネのヒステリシス(ケースML-H-10)	161
図 4.6.1-1	エルボのラチェットひずみと応力の関係	162
図 4.6.1-2	直管のラチェットひずみと回転変形の関係	163
図 4.6.2-1	HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×5)	172
図 4.6.2-2	HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×10)	173
図 4.6.2-3	HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×20)	174
図 4.6.2-4	HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる[水平+上下]地震)×5)	175
図 4.6.2-5	ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×5)	176
図 4.6.2-6	ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×7.5)	177
図 4.6.2-7	ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震)×10)	178
図 4.7-1	ホットレグ配管の鉛直管下端の応答スペクトル	179
図 4.7-2	ミドルレグ配管の水平管中央の応答スペクトル	180
図 4.7-3	入力地震とHL配管エルボ部の最大角変形の関係	181
図 4.7-4	入力地震とHL配管直管部の最大変形の関係	181
図 4.7-5	入力地震とML配管エルボ部の最大角変形の関係	182
図 4.7-6	入力地震とML配管直管部の最大変形の関係	182
図 4.7-7	容器据付部のFRSと応答加速度	183

1. はじめに

現行の配管耐震設計手法には必要以上の安全裕度が含まれていると認識されており、評価手法の合理化を目的とした配管健全性評価に関する研究が国内外で各種実施されている。合理化の定量的目標を設定するには、現行の手法に内在する安全裕度の定量化を行う必要がある。ここでは、上記の観点に基づいて、高速炉の代表的な主冷却系配管を対象とした耐震解析を行い、種々の基準による強度評価を実施するとともに、実際の配管の耐力を評価し、基準が有している裕度の定量化を試みる。また、現行の許容値を緩和した場合の配管設計への影響や合理化効果を検討する。

2. 検討方法

(1) 検討対象

高速炉の主冷却系配管は高温で使用され、構造的には薄肉・大口径という特徴を有している。その典型例として、1992年度に実施された60万kWeプラントの設計研究(ヘッドアクセスプラント)⁽²⁻¹⁾の1次主冷却系配管のうち、ホットレグ(HL)及びミドルレグ(ML)を対象として地震応答解析と強度評価を実施する。1992年度に設定した配管の概念を図2-1に示す。ホットレグ配管は主中間熱交換器の胴部にノズルで支持され、原子炉容器の上部から逆L字型に挿入され、面外レストレイントで耐震支持されている。ミドルレグは、主中間熱交換器と主循環ポンプの下部鏡をU字型につなぐ配管である。図2-1では、耐震性を確保するため、ホットレグ配管の径・板厚の増大やスナッパ・レストレイント・流体制振構造の設置などの設計対応が図られているが、本検討ではこれらの耐震性向上対策をなるべく施さない配管構造に対して解析・評価を行うことにした。検討対象とする配管の構造形状を図2-2に示す。ホットレグ配管の径及び板厚はミドルレグ配管と同一とした。

なお、ホットレグ配管の解析・評価は、主として地震入力が増大に伴って慣性力が大きくなった場合の配管応答に着眼し、ミドルレグ配管の解析・評価は、配管両側の容器の振動による強制変位の影響を主たる着眼点としている。

(2) 地震荷重条件

上述のプラント設計研究において耐震評価に用いられた地震動のうち、S1地震に対する原子炉容器据付部における原子炉建物の応答(加速度時刻歴または床応答曲線)を使用する。地震荷重条件を図2-3に示す。なお、 $S2=1.5 \times S1$ とした。

ホットレグ配管は、水平面内方向の地震を負荷することを基本とするが、参考のために水平面内と上下を重畳させる場合についても検討を行う。ミドルレグ配管は、上下方向の剛性が非常に高いため、水平面内方向のみ地震を与える。

対象とする配管は基本的に単一面内に配置される単純な形状の配管であり、振動モードとしては、面内、面外両方のモードが存在する。面外モードを励起する入力と考えると各方向の荷重や変位が生じるが、それらの精度良い合成方法が特にエルボにおい

て確立されていない。そこで、ここでは不確定性をなるべく排除するため、解析・評価は面内モードについて行うものとした。

(3) 評価クライテリア

評価を行う基準には以下を用いる。

- － 高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針, BDS⁽²⁻²⁾
- － 実証炉構造設計基準, DDS⁽²⁻³⁾
- － ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III (現行)⁽²⁻⁴⁾
- － ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III (改訂)⁽²⁻⁵⁾

BDSとDDSは座屈の評価式に若干の違いはあるがほとんど同じである。ASMEの旧(現行)基準及び新(改訂)基準の概要を表2-1に、また、上記4基準のS1及びS2地震に対する主要な評価規定を表2-2に示す。

(4) 検討の手順

裕度評価の手順は以下によった。

1) 現行の設計手法に基づく評価

応答の評価はスペクトル応答解析により、この結果算定された配管の発生応力を上記の種々のクライテリアと比較することによって裕度を求める。

2) 非線型応答解析に基づく評価

非線型(弾塑性)時刻歴解析によって配管の応答を評価し、この結果算定された配管の発生応力などを、疲労や座屈など防止すべき破損モード毎に、実際に有すると考えられる強度との比較によって裕度を算定する。疲労や座屈などに対する強度は、各種基準の安全率を取り除いたり、あるいは解析や既往のデータなどに基づいて設定する。

表 2-1(1) ASME の新・旧基準の概要

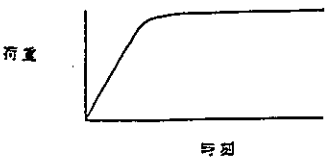
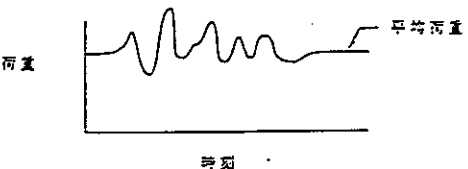
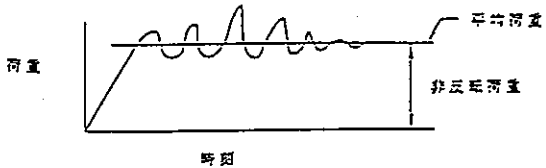
運転状態	現行 ASME Sec. III NB-3600 規定 (Class 1 Piping)	ASME Sec. III NB-3600 改訂案 (TCG レポート)
レベル B 含 OBE	<p>1. 1 次応力の制限:</p> $B_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + B_2 \frac{D_0 (M_1 + M_1'')}{2l} \leq \min(1.8S_m, 1.5S_y)$ <p>2. 1 次及び 2 次応力強さの制限</p> $S_n = C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + C_2 \frac{D_0 (M_1 + M_1'' + M_1''' + M_1'''')_R}{2l} + C_3 E_{a_0} a_a T_a - a_o T_o $ <p>3. 疲労損傷の制限</p> $U = \sum \frac{n_i}{L_i n_{d_i}} \leq 1.0$ <p>(1) 繰り返しピーク応力強さの範囲の計算</p> $S_p = K_1 C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_0 (M_1 + M_1'' + M_1''' + M_1'''')_R}{2l} + \frac{K_3 E_{a_0} \Delta T_1 }{2(1-\nu)} + K_3 C_3 E_{a_0} a_a T_a - a_o T_o + \frac{E_{a_0} \Delta T_2 }{1-\nu}$ <p>(2) 繰り返しピーク応力強さの計算</p> <p>① $S_n \leq 3S_m$ の場合、 $S_l = S_p / 2$</p> <p>② $S_n > 3S_m$ の場合、 $S_l = K_2 S_p / 2$</p> $K_2 = \begin{cases} 1.0 & : S_n \leq 3S_m \\ 1.0 + [(1-a)/n(a-1)](S_n/3S_m - 1) & : 3S_m < S_n < 3aS_m \\ 1/a & : S_n \geq 3aS_m \end{cases}$ <p>付帯制限として、</p> <p>a. 熱膨張応力の範囲の制限:</p> $S_e = C_2 \frac{D_0 (M_1'')_R}{2l} \leq 3S_m$ <p>b. 熱膨張応力を除く応力強さの範囲の制限:</p> $S_n' = C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + C_2 \frac{D_0 (M_1 + M_1'' + M_1''' + M_1'''')_R}{2l} + C_3 E_{a_0} a_a T_a - a_o T_o \leq 3S_m$ <p>c. 熱応力ラチエットの制限:</p> $\Delta T_1 \leq \frac{\gamma S_y}{0.7 E_a} C_3$ <p>$\gamma = 3.33(x=0.3), 2.00(0.5), 1.20(0.7), 0.80(0.8)$ $x = (P D_0 / 2t) (1/S_y)$ $C_3 = 1.1$ (炭素鋼), 1.3 (オーステナイト系ステンレス鋼)</p>	<p>1. 非反転動荷重を含む場合.....</p> <p>同左。現行の ASME Sec. III NB-3600 通り。</p> <p>2. 非反転動荷重を含まない場合.....</p> <p>左記第 2 項 (1 次及び 2 次応力強さの制限) 及び第 3 項 (疲労損傷の制限) を適用。</p> <div style="text-align: center;">  <p>(a) 非反転動荷重</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) 反転動荷重</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(c) 複合型荷重</p> </div> <p style="text-align: center;"><u>反転動荷重及び非反転動荷重の例</u></p>

表 2-1(2) ASME の新・旧基準の概要

運転状態	現行 A S M E Sec. III NB-3600 規定 (Class 1 Piping)	A S M E Sec. III NB-3600 改訂案 (TCG レポート)
レベル D 含 S S E	<p>1. APPENDIX F を適用。</p> <p>2. または以下を適用。</p> <p>(1) 1 次応力の制限</p> $B_1 \frac{P_o D_o}{2t} + B_2 \frac{D_o M_i}{2l} \leq \min(3.0 S_m, 2.0 S_y)$ <p>(2) 内圧制限</p> <p>(レベル D 圧力) $\leq 2 P_a$</p> $P_a = \frac{2 S_m t}{D_o - 2 y t} \quad (y=0.4)$	<p>1. 非反転動荷重を含む場合……………</p> <p>同左。現行の A S M E Sec. III NB-3600 通り。</p> <p>2. 非反転動荷重を含まない場合……………</p> <p>(1) 1 次応力制限</p> <p>a. 内圧制限</p> <p>(レベル D 圧力) \leq (設計圧力 P)</p> <p>b. 自重応力制限</p> $B_2 \frac{D_o}{2l} M_i \leq \min(0.5 S_m, 0.25 S_y)$ <p>c. 1 次応力制限</p> $B_1 \frac{P D_o}{2t} + B_2 \frac{D_o}{2l} (M_i + M_i^2) \leq \min(4.5 S_m, 4.0 S_y)$ <p>(2) 地震等による相対変位に対する応力制限</p> <p>a. モーメント変動制限</p> $C_2 \frac{(M_i^{2+2\epsilon}) R D_o}{2l} \leq \min(6.0 S_m, 4.0 S_y)$ <p>b. 軸力制限</p> $\frac{ F_a^{2+2\epsilon} }{A} \leq \min(1.5 S_m, S_y)$ <p>(3) その他の制限</p> <p>a. 設計用サポート荷重の設定</p> <p>(設計サポート荷重) = 1.2 * (解析反力)</p> <p>b. 配管変位制限</p> <p>(配管変位) \leq (設計仕様要求値)</p>

表2-2 各評価基準の比較

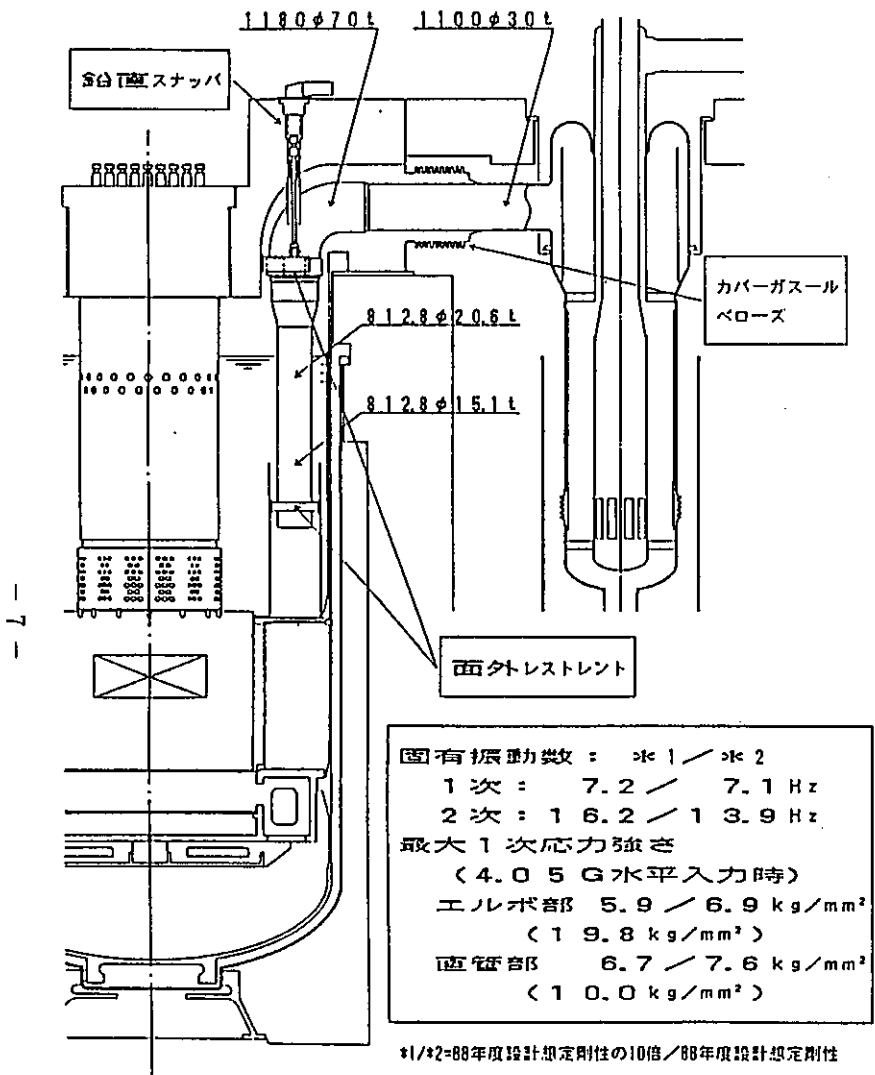
	① BDS	② DDS	③ 旧 ASME	④ 新 ASME
S ₁ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 1.2K_sSm$ (2) ひずみの制限 $C_2(M^* + M^{***})_R + (Fa^*)_R/A \leq 3S_mH$ (3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/2$	(1) 1次応力制限 同 左 (2) ひずみの制限 同 左 (3) 座屈の防止 (直管) $(M^*/Z)/1.27 + Fa^*/A \leq Sy/2.25$	—————	—————
S ₂ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 2K_sSm$ (2) ひずみの制限 $C_2(M^* + M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 2.5 \times 3S_m$ (3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/1.5$ (4) 座屈の防止 (エルボ) $B_2M^*/Z \leq 1.5K_sSm$	(1) 1次応力制限 同 左 (2) ひずみの制限 同 左 (3) 座屈の防止 (直管) $(M^*/Z)/1.27 + Fa^*/A \leq Sy/1.5$ (4) 座屈の防止 (エルボ) 同 左	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [3S_m, 2Sy] = 2Sy$	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [4.5S_m, 4Sy] = 4Sy$ (2) 相対変位による応力の制限 $C_2(M^{***})_R/Z \leq \text{Min} [6S_m, 4Sy] = 4Sy$
適用FRS	h = 0.5% (HL), 1% (ML) 10%幅広げ	同 左	h = 5%又は3%, 15%幅広げ	!! h = 5%, 15%幅広げ
S ₂ = 1.5S ₁ の場合にクリティカルとなる規定	(1) 直管 S ₂ 地震時の(3) (2) エルボ S ₁ 地震時の(2)	(1) 直管 S ₁ 地震時の(3) = S ₂ 地震時の(3) (2) エルボ S ₁ 地震時の(2)	(1) 直管, エルボ S ₂ 地震時の(1)	(1) 直管, エルボ S ₂ 地震時の(1) (慣性力による応力が相対変位による応力による応力より大きい場合)

M* : 慣性力によるモーメント

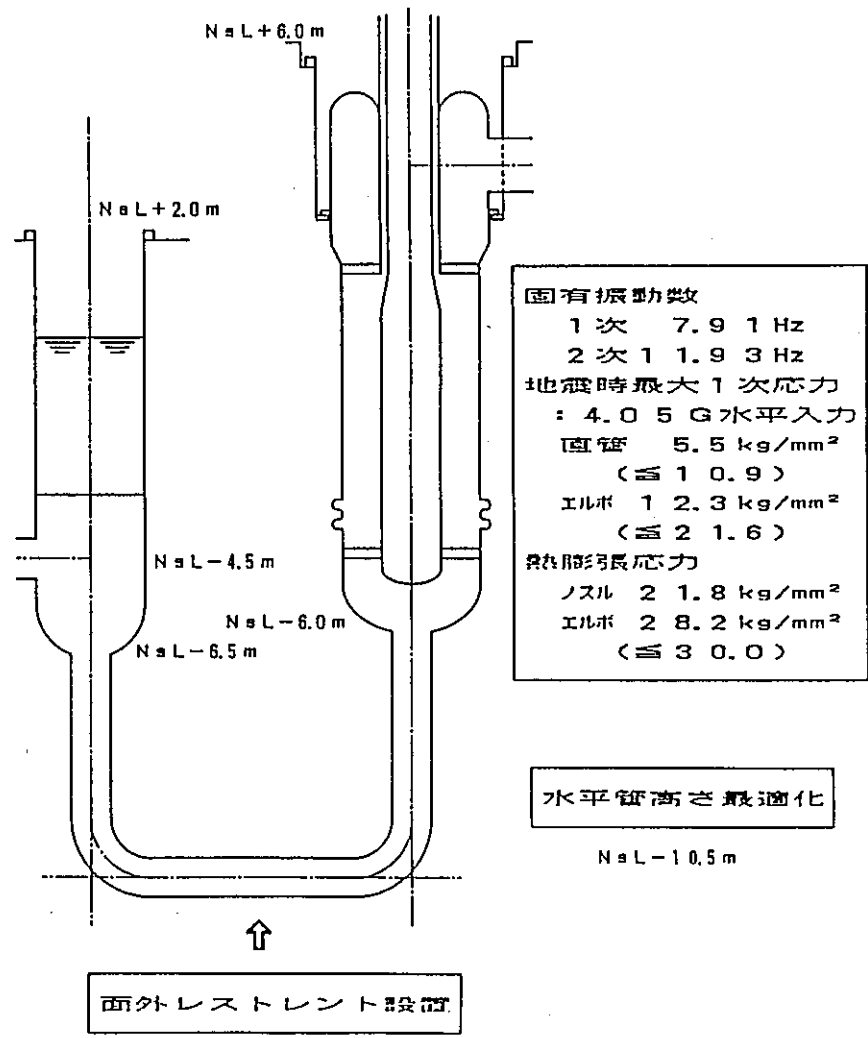
Fa* : 慣性力による軸力

M*** : 相対変位によるモーメント

()_R : 変動範囲エルボの応力係数: 従来は $B_2 = 3/4 C_2$ であったが、新ASMEでは $B_2 = 2/3 C_2$ となった。

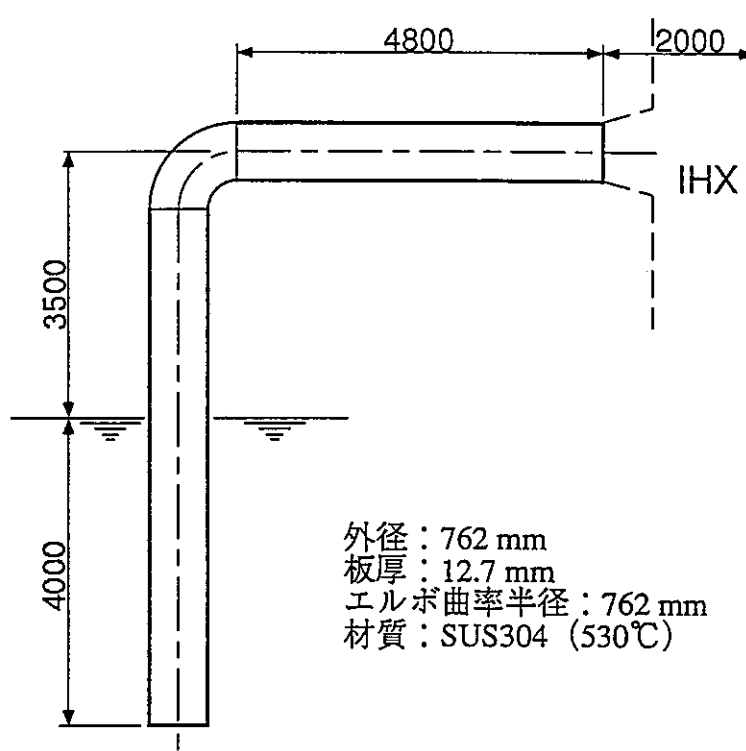


ホットレグ配管

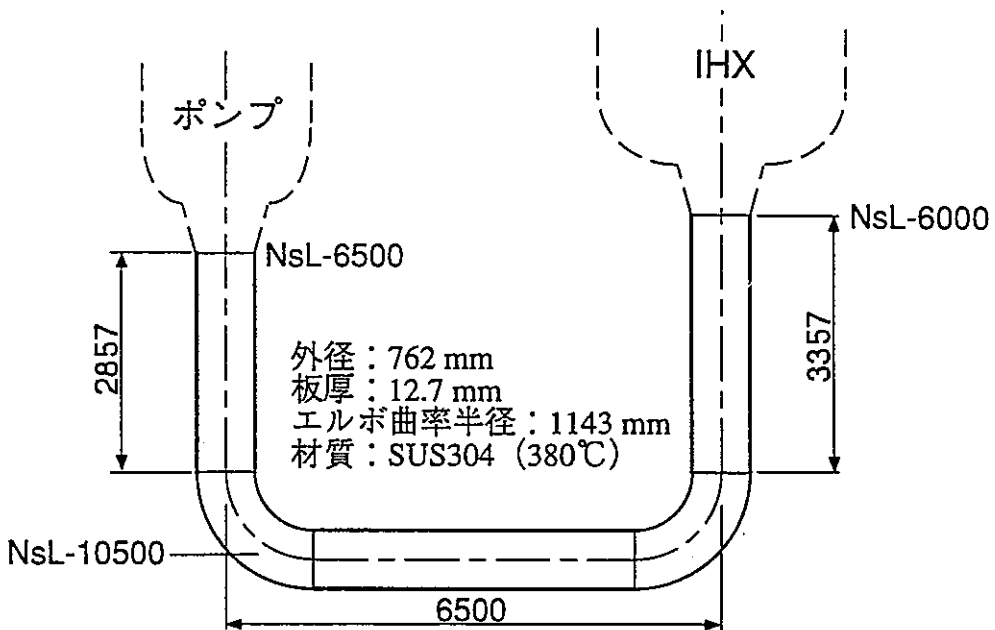


ミドルレグ配管

図 2-1 検討対象とする配管の構造概念



[ホットレグ配管]



[ミドルレグ配管]

図2-2 検討対象とする配管の構造形状

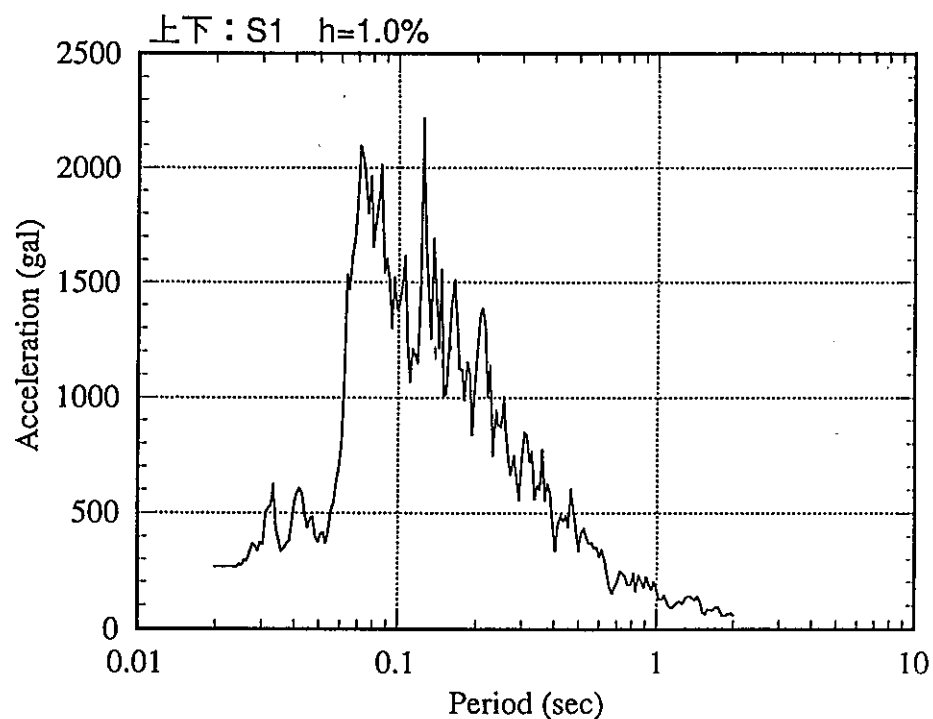
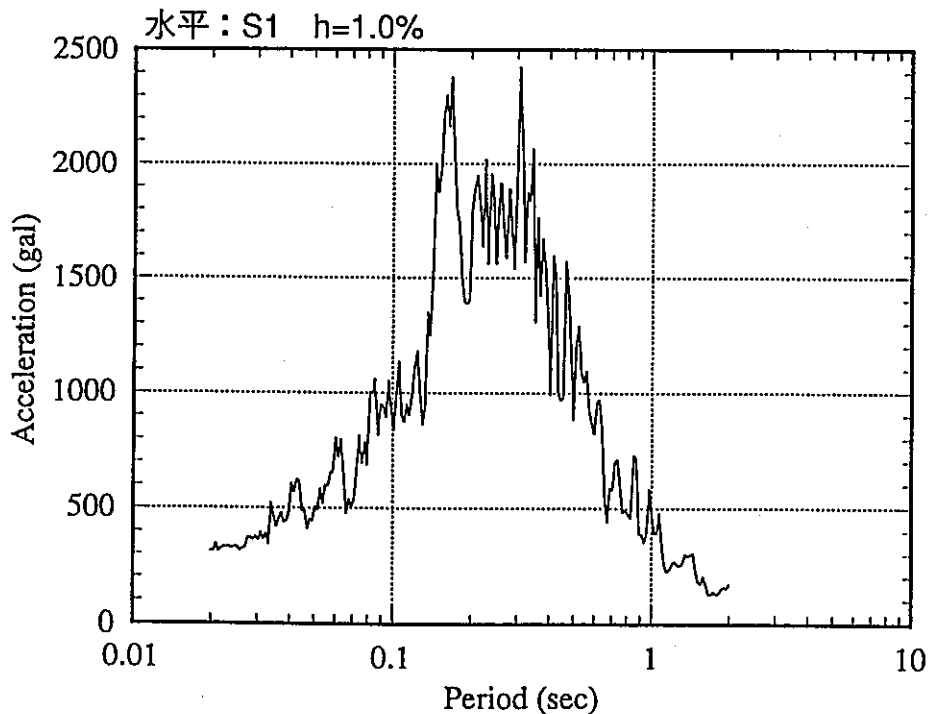
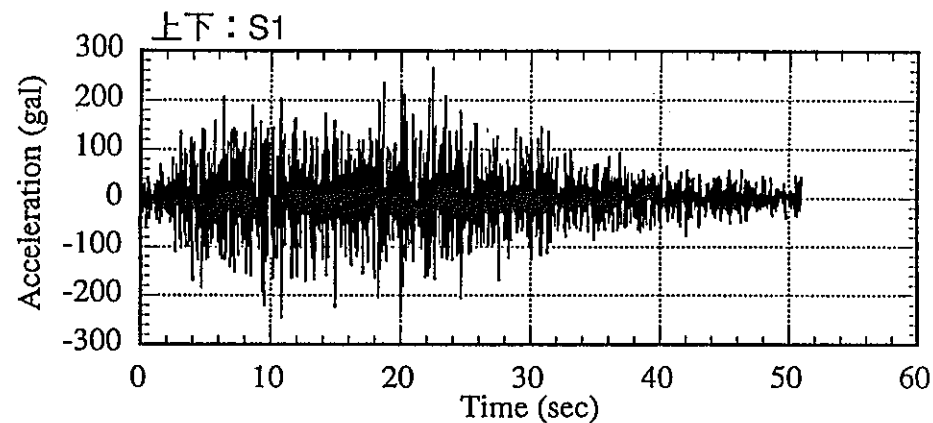
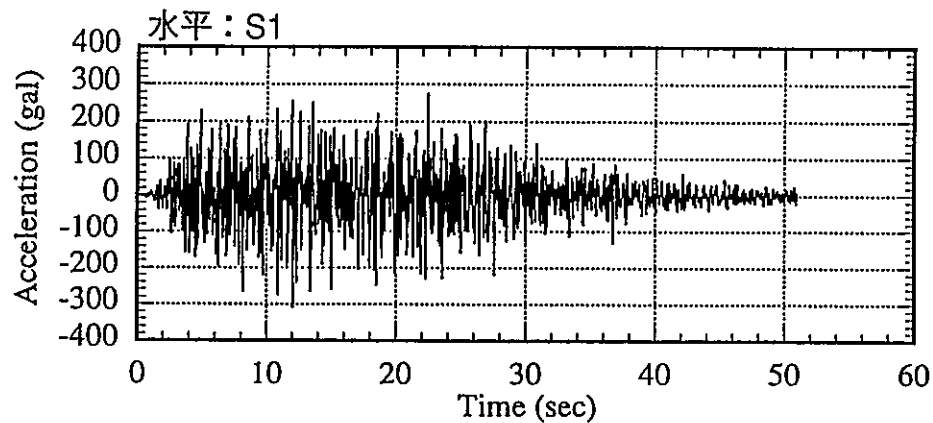


図2-3 容器据付部における地震条件 (水平 : S1)

図2-4 容器据付部における地震条件 (上下 : S1)

3. 線形解析による評価

はりモデルを用いて線形解析(床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析)を行って、配管要素に生じる慣性力及び強制変位による応力を求め、各種の基準(BDS, DDS, ASME(新, 旧))により評価を行い、各基準で許容できる限界を求める。

3.1 検討方法

(1) ホットレグ配管

ホットレグ配管には容器据付部の床応答曲線(FRS)を直接入力してモーダル床応答解析を行いホットレグ配管に生じる応力(慣性力による応力)を求め、各基準により評価する。なお、ホットレグ配管の1次の固有周期がFRSのピークの固有周期より小さくなるように、必要に応じてサポートを設ける。

(大きな入力を受けて配管が塑性すると、減衰の増大と剛性低下(固有周期の増大)が同時に生じる。一般的には配管は剛設計とするため固有周期が増大すると応答加速度が増えるが、一方で減衰の増大効果によって応答加速度は減少する。両者が重畳した結果として地震入力と配管の振動応答との関係(地震入力が増えるほどには配管応答が増えないこと)を求めるのがここでの検討目的である。従って、容器据付部のFRSを用いるかそれともIHX側部ノズル部のFRSを用いるかは、大きな意味を持たない。そのため、ホットレグ配管に対しては容器据付部のFRSを適用するものとした。)

(2) ミドルレグ配管

IHX及びポンプの振動解析モデルを作成し、時刻歴解析を行って先端部のノズル位置(ミドルレグ配管取付部)におけるFRS(両者を包絡したFRS)を作成する。

次にIHX及びポンプのモーダル床応答解析を行ってノズル部における最大変位を求め、これらをミドルレグ配管に入力した場合の応力(相対変位による応力)を求める。更に、ミドルレグ配管に対してノズル位置における包絡FRSを適用したモーダル床応答解析を行いミドルレグ配管に生じる応力(慣性力による応力)を求める。

これらの相対変位による応力と慣性力による応力を用いて、各基準により評価を行う。

3.2 FRS の作成

(1) ホットレグ配管用

容器据付レベルにおける水平及び上下地震の FRS を各々図 3.2-1 及び図 3.2-2 に示す。(先述のように $S_2=1.5 \times S_1$ である。)

(2) ミドルレグ配管用

ミドルレグ配管を解析する際に用いる IHX 及びポンプ先端のノズル部における床応答曲線を、図 3.2-3 のモデルに容器据付部の地震波を入力した時刻歴解析を行って求める。IHX の振動解析モデルは 1992 年度の大型炉設計の検討結果を基に、ポンプの振動解析モデルは先行炉の解析モデル例を参考に設定した。

(大型炉設計においては IHX には振れ止めを設けることになっている。しかし振れ止めがあるとノズル部の変位が非常に小さくなってしまい、今回の検討目的が達成できなくなる。そのため、IHX には振れ止めを設けないことにした。一方、振れ止めを設けないと IHX の固有振動数は約 11Hz となり、ミドルレグ配管と共振し易い領域になる。そのため、IHX の支持フランジ及びスカートの剛性を大きめに設定するものとした。(同時にミドルレグ配管取付部のノズル剛性も小さめにしてミドルレグ配管の固有振動数を下げる処置をとった。)当初はフランジ部のバネ剛性を 6×10^{12} kg-mm/rad, 支持スカート板厚を 50mm としていたが、IHX の固有振動数を 15Hz 程度にするため、図 3.2-3 に示すようにフランジ部のバネ剛性を 3×10^{13} kg-mm/rad, 支持スカート板厚を 100mm とした。)

なお、図 3.2-3 のモデルでは、慣性は水平方向についてのみ考慮している。

IHX 及びポンプの振動モードを図 3.2-4 及び図 3.2-5 に、固有値、刺激係数及び有効質量を表 3.2-1 に、作成した FRS を図 3.2-6 に示す。

3.3 慣性力による応力

(1) ホットレグ配管

図 3.3-1 にホットレグ配管の解析モデルを、図 3.3-2 に節点番号図を示す。図 3.3-1 に示す下端の水平サポートは大型炉設計で採用している流体制振構造を模擬したもので、その剛性は、ホットレグ配管の水平モードの固有振動数が水平地震の FRS のピークよりも剛領域側になるように(約 10Hz 程度になるように)設定したものである。(サポートを設けないと $f_1=1.39$ Hz(水平), $f_2=5.11$ Hz(上下)と特に水平モードの固有振動数が非常に低かった。)慣性は水平及び上下方向について考慮し、回転慣性は無視している。

((2)のミドルレグ配管の場合も同様である。)

ホットレグ配管の振動モードを図 3.3-3 に、固有値解析結果(固有値, 刺激係数, 有効質量)を表 3.3-1 に示す。1次モードは上下モードで $f=4.98\text{Hz}$ となった。2次モードは水平モードで水平振れ止めによって $f=9.79\text{Hz}$ まで増大した。モードは、エルボを回転中心として鉛直管が剛体に近い形で水平に変位するモードである。

図 3.2-1 に示す水平地震の3種類の FRS を入力した場合の各部位に生じる荷重を表 3.3-2～表 3.3-4 に、発生応力を表 3.3-5～表 3.3-7 に示す。

また、参考用として、図 3.2-2 に示す上下地震の3種類の FRS を入力した場合の各部位に生じる荷重を表 3.3-8～表 3.3-10 に、発生応力を表 3.3-11～表 3.3-13 に示す。また、水平と上下の地震による応力を加算した結果を表 3.3-14～表 3.3-16 に示す。

(2) ミドルレグ配管

図 3.3-4 にミドルレグ配管の解析モデルを、図 3.3-5 に節点番号図を示す。(取付部のノズル剛性は、IHX との共振を十分に回避するため、大型炉設計で使用した剛性の約 $2/3$ とした。)

ミドルレグ配管の振動モードを図 3.3-6 に、固有値解析結果(固有値, 刺激係数, 有効質量)を表 3.3-17 に示す。1次モードは水平モードで $f=9.56\text{Hz}$ となった。

図 3.2-4 に示す水平地震の3種類の FRS を入力した場合の各部位の発生荷重を表 3.3-18～表 3.3-20 に、発生応力を表 3.3-21～表 3.3-23 に示す。

3.4 ミドルレグ配管取付部の相対変位による応力

(1) ミドルレグ配管取付部の変位

図 3.2-3 に示す IHX 及びポンプのモデルに、図 3.2-2 に示す容器据付部の FRS ($h=1\%$, 10% 幅広げ)を適用してモーダル床応答解析を行った。

IHX 及びポンプの固有値, 刺激係数, 有効質量は表 3.2-1 に、振動モードは図 3.2-4 及び図 3.2-5 に示した通りである。S2 地震によるミドルレグ配管取付部の変位は以下の値となった。

- ・ IHX 側 → 水平変位: 2.28mm , 回転変位: $2.32 \times 10^{-4}\text{rad}$
- ・ ポンプ側 → 水平変位: 1.51mm , 回転変位: $2.23 \times 10^{-4}\text{rad}$

(2) 相対変位によってミドルレグ配管に生じる応力

上記の取付部変位を逆位相と同位相でミドルレグ配管に負荷した場合の解析を行

った。各節点における荷重を表 3.4-1 及び表 3.4-2 に、発生応力を表 3.4-3 及び表 3.4-4 に示す。相対変位による応力は $1\text{kg}/\text{mm}^2$ 以下と小さい。

3.5 モーダル床応答解析による強度評価

ホットレグ配管及びミドルレグ配管について、BDS、DDS、旧 ASME 及び新 ASME の各基準を用いて強度評価を行った。なお、評価に当たっては以下を条件とした。

- エルボの1次荷重による曲げモーメントに対する応力係数 B_2 は、従来は $B_2=3/4C_2$ であったが、ASME の改訂で $B_2=2/3C_2$ となった。(告示でもそのように改訂された。) ここでは、後者の B_2 を適用して評価を行う。
- BDS 及び DDS で評価する際は、ホットレグ配管の鉛直管には保温材が設けられていないため、保守側に減衰率として $h=0.5\%$ を適用する。ミドルレグ配管には全体に保温材が設けられているため $h=1\%$ とする。(幅広げはいずれも 10%)
- 旧 ASME で評価する場合の減衰率には2種類のルールがあり、いずれも適用が認められている。1つは Regulatory Guide 1.61 によるもので、SSE において 12B 以上の口径の配管に対して $h=3\%$ (上記以下の口径の配管には $h=2\%$) を用いるものである。もう1つは ASME Code Case N-411 によるもので、10Hz 以下の固有振動数の配管には $h=5\%$ を、20Hz 以上の配管には $h=2\%$ を適用するものである。新 ASME では $h=5\%$ を適用する。ここでは、新・旧の ASME 基準の比較を行うには、発生応力を同じにしておく方がよいこと、今回のホットレグ配管及びミドルレグ配管ともに Code Case N-411 の $h=5\%$ を用いる条件を満足していることから、ASME 基準の評価には全て $h=5\%$ を用いるものとする。(幅広げは 15%)

評価結果を表 3.5-1～表 3.5-6 に示す。参考として行った水平+上下地震を負荷したホットレグ配管の BDS 及び DDS による評価を除き、評価を満足した。ASME 基準では水平+上下地震を負荷したホットレグ配管も評価を満足している。これは、許容値の違いもあるが、減衰率の違いによる影響も大きい。 $h=0.5\%$ (10%幅広げ) と $h=5\%$ (15%幅広げ) の場合の応力を比較すると、表 3.5-7 より後者は前者の概ね 1/2～1/3 程度に収まっている。なお、表 3.5-1～表 3.5-6 の下端に今回適用した地震の何倍まで基準の評価を満足するかを求めた。これをまとめて以下に示す。

[基準の評価を満足する限界地震レベル]

	適用基準	BDS	DDS	旧 ASME	新 ASME
HL	水平地震	2.88	2.81	12.9	25.8
	水平+上下地震	0.41	0.40	2.92	5.85
ML	水平地震	1.20	1.17	3.86	7.69

注) 上表の数値をnとすると, $n \times S_2$ ($S_2=1.5 \times S_1$) 地震の地震レベルまで評価を満足することを示す。

表3.2-1 IHX及びポンプの固有値解析結果

[IHX]

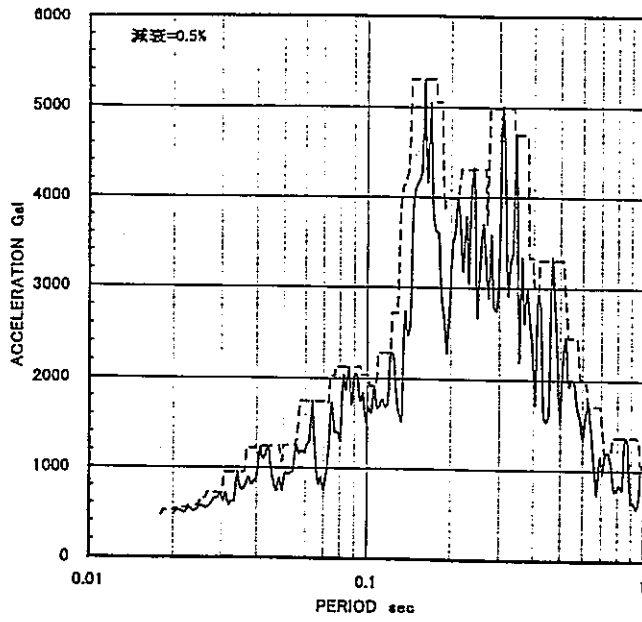
REAL EIGENVALUES							
MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD				
1	9.349749E+03	1.538934E+01	6.498003E-02				
2	8.352857E+04	4.599786E+01	2.174014E-02				
3	1.531983E+05	6.229412E+01	1.605288E-02				

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS							
MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	-3.27552E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.56865E-10
	EFFECTIVE MASS	1.07290E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.59798E-20
	RATIO	6.90193E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.38943E-01
2	PARTICIPATION FACTOR	-2.19076E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.34197E-10
	EFFECTIVE MASS	4.79942E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.48482E-20
	RATIO	3.08745E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.48016E-01
3	PARTICIPATION FACTOR	-1.28526E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-3.99565E-11
	EFFECTIVE MASS	1.65190E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.59652E-21
	RATIO	1.06266E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.30408E-02
TOTAL EFFECTIVE MASS		1.55450E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.22425E-19

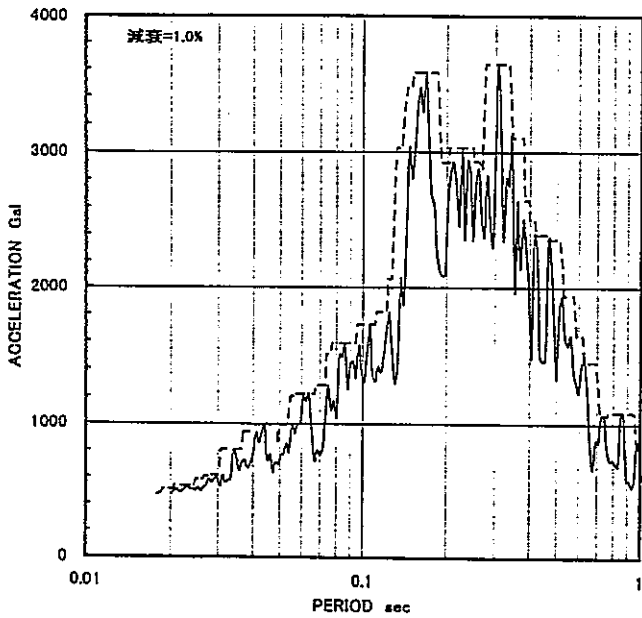
[ポンプ]

REAL EIGENVALUES							
MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD				
1	1.180731E+04	1.729400E+01	5.782351E-02				
2	3.046278E+05	8.784253E+01	1.138401E-02				
3	8.621949E+05	1.477824E+02	6.766704E-03				

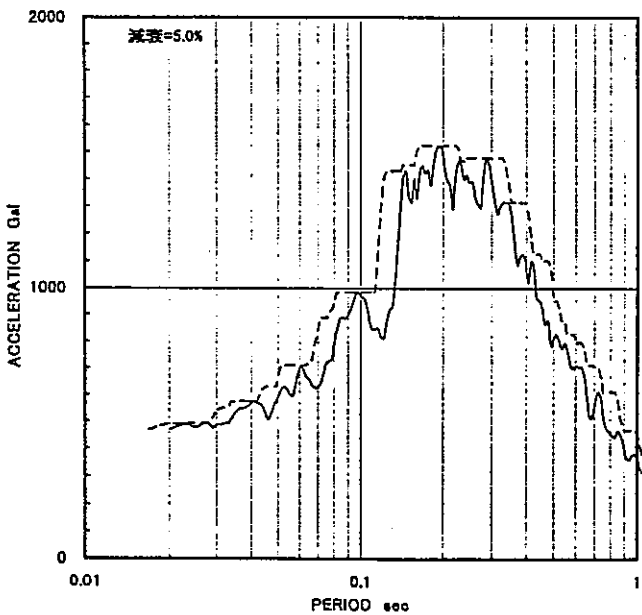
PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS							
MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	-1.44408E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.13755E-11
	EFFECTIVE MASS	2.08536E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.63945E-21
	RATIO	6.38898E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	PARTICIPATION FACTOR	-9.04403E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.09815E-11
	EFFECTIVE MASS	8.17945E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.71874E-21
	RATIO	2.50596E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	PARTICIPATION FACTOR	6.00575E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-3.89065E-11
	EFFECTIVE MASS	3.60690E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.51372E-21
	RATIO	1.10506E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
TOTAL EFFECTIVE MASS		3.26400E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.87190E-21



[h=0.5%, 10%幅広げ]

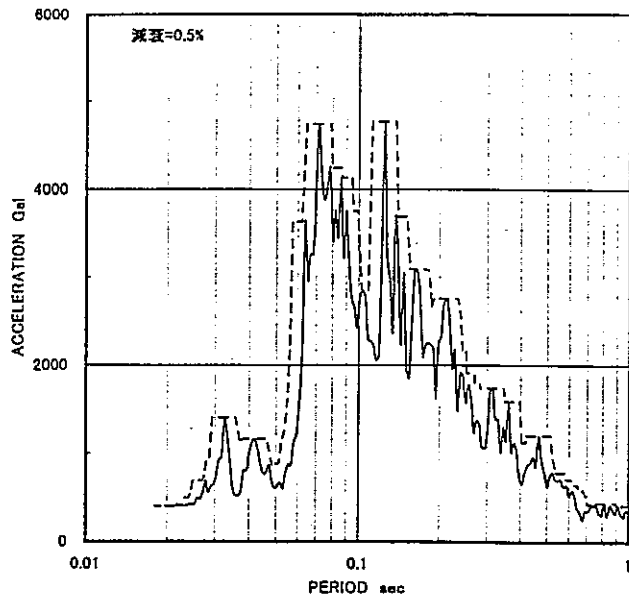


[h=1%, 10%幅広げ]

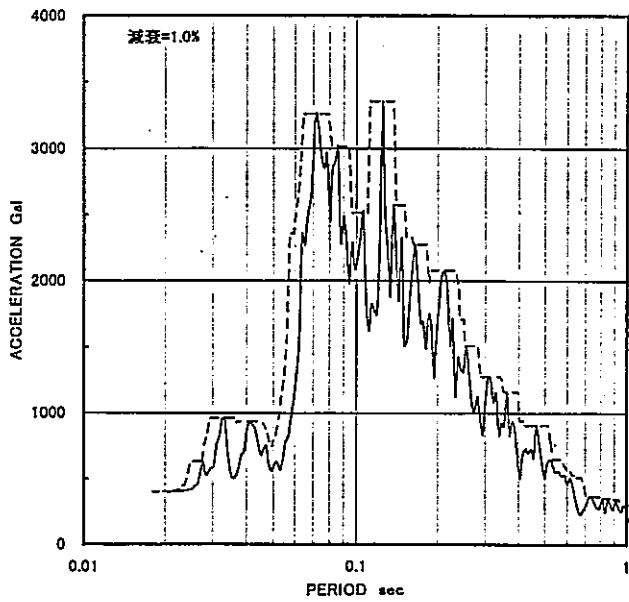


[h=5%, 15%幅広げ]

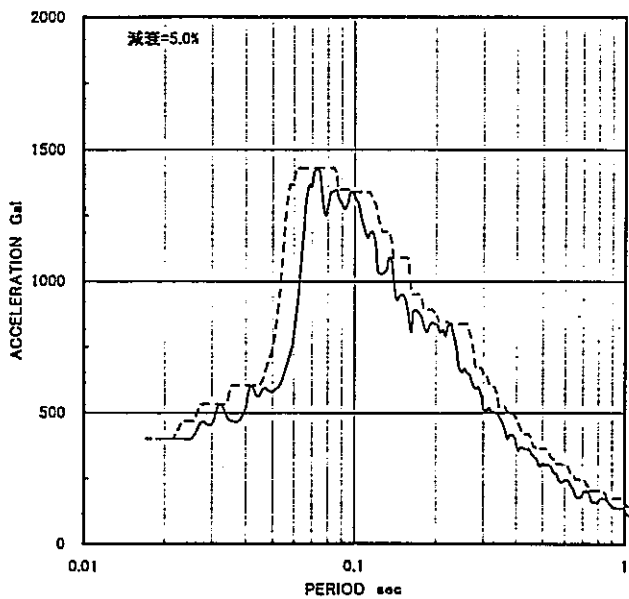
図 3.2-1 容器据付部における床応答曲線 (水平 S2)



$h=0.5\%$, 10%幅広げ]

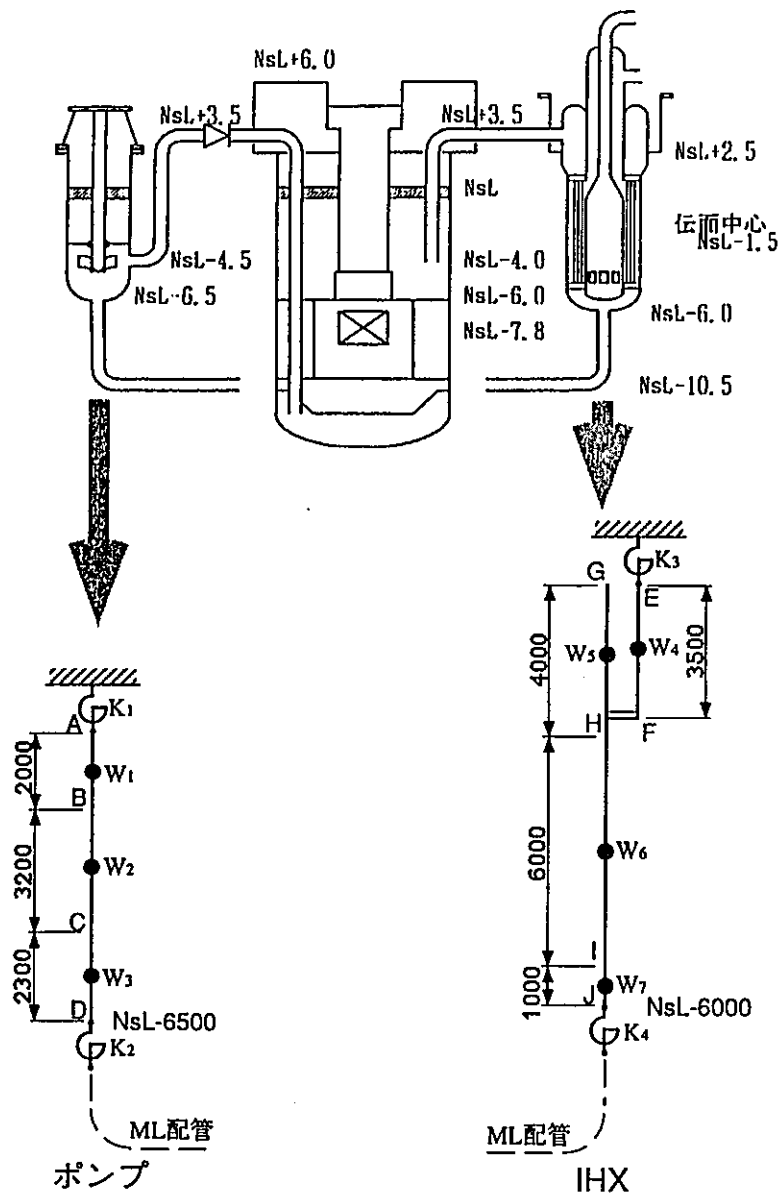


[$h=1\%$, 10%幅広げ]



[$h=5\%$, 15%幅広げ]

図 3.2-2 容器据付部における床応答曲線 (上下 S2)



ポンプ

- W₁ = 12 ton (容器+遮蔽体+シャフト)
- W₂ = 8 ton (容器+Na+シャフト)
- W₃ = 12 ton (容器+Na+インペラ+仕切板+その他)

- K₁ = 3.0 × 10¹² kg·mm/rad (フランジ部の回転剛性：先行炉のパネ剛性を直径比例で補正)
- K₂ = 3.0 × 10¹⁰ kg·mm/rad (ノズル部の回転剛性：大型炉の1992年度報告書の値の7割に設定 (応答加速度を小さくするため))

- A~B } : D = 2230 mm, t = 30 mm, SUS304 (380℃)
- B~C }
- C~D }

IHX

- W₄ = 34 ton (支持スカート)
- W₅ = 47 ton (容器+Na+内部構造物)
- W₆ = 81 ton (容器+Na+内部構造物)
- W₇ = 8 ton (容器+Na+内部構造物)

- K₃ = 3.0 × 10¹³ kg·mm/rad (フランジ部の回転剛性：IHXに触れ止めを設けない条件としたため先行炉よりも固めのパネとした)
- K₄ = 2.0 × 10¹⁰ kg·mm/rad (ノズル部の回転剛性：大型炉の1992年度報告書の値の7割に設定 (応答加速度を小さくするため))

- E~F : D = 3850 mm, t = 100 mm, SUS304 (100℃) (板厚は大型炉の1992年度報告書の2倍)
- G~H : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (530℃ : 1次入口Na温度)
- H~I : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (442.5℃ : 2次入口出口Naの平均温度)
- I~J : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (380℃ : 1次出口Na温度)

図3.2-3 ポンプ及びIHXの振動解析モデル

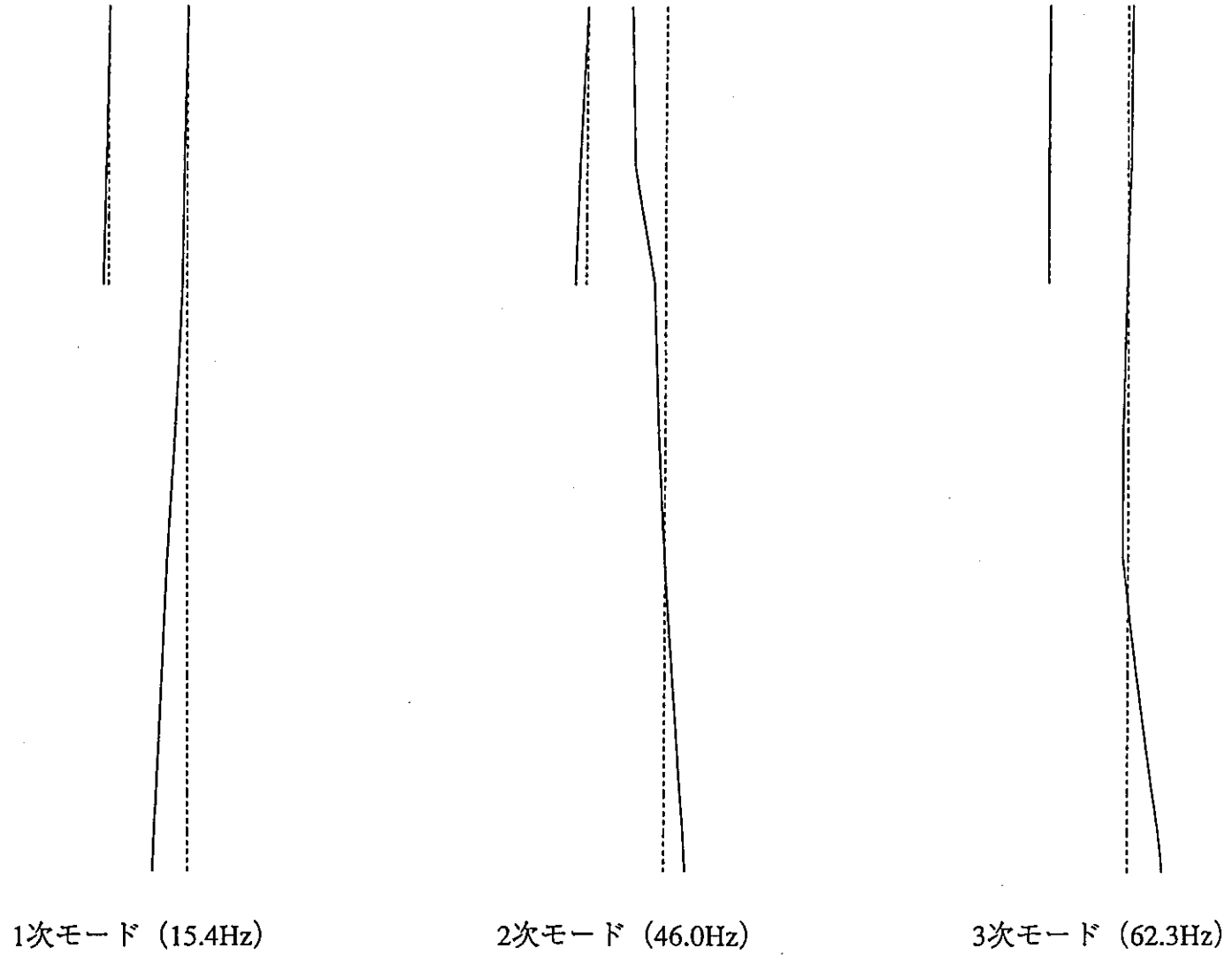


図3.2-4 IHXの振動モード

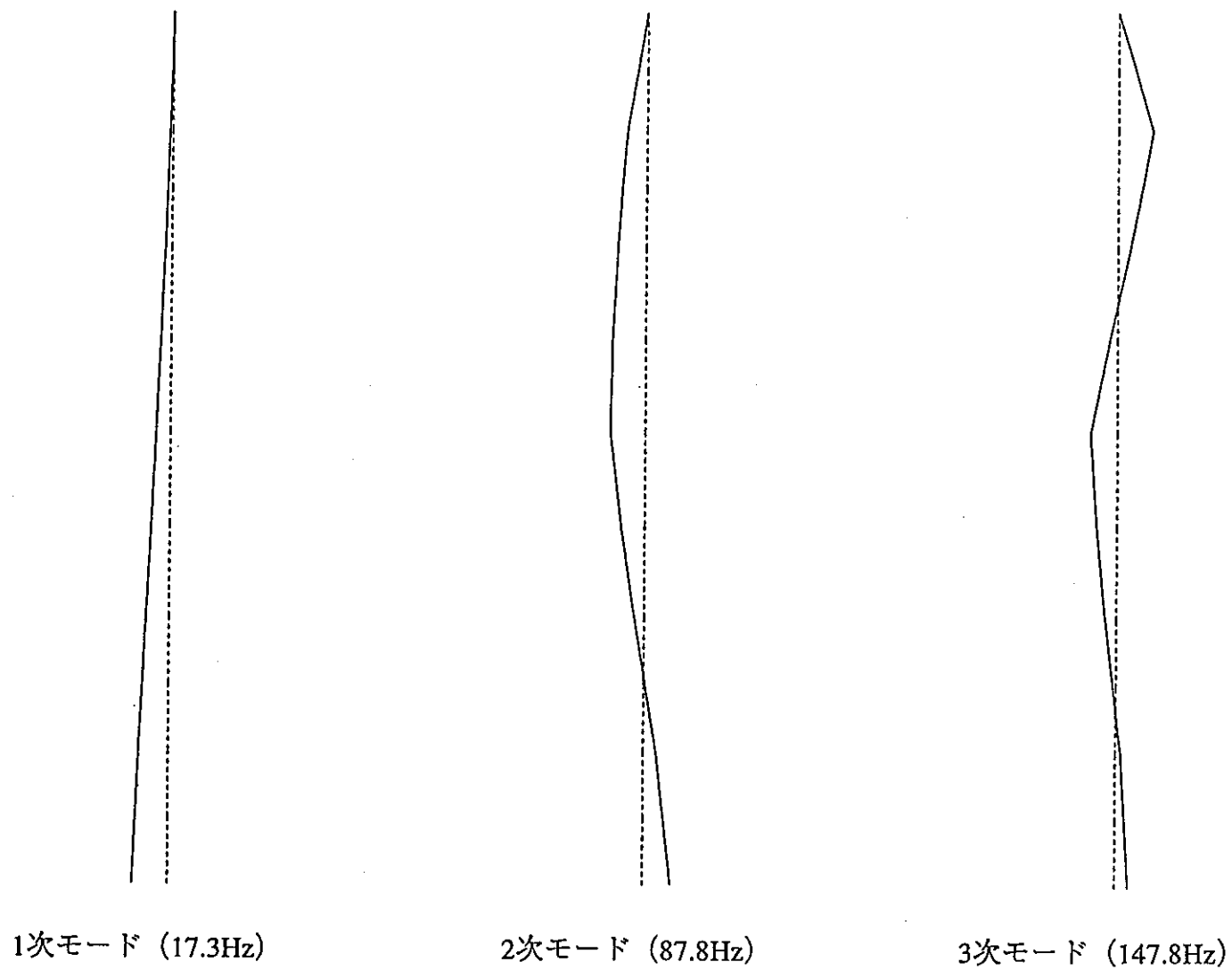


図3.2-5 ポンプの振動モード

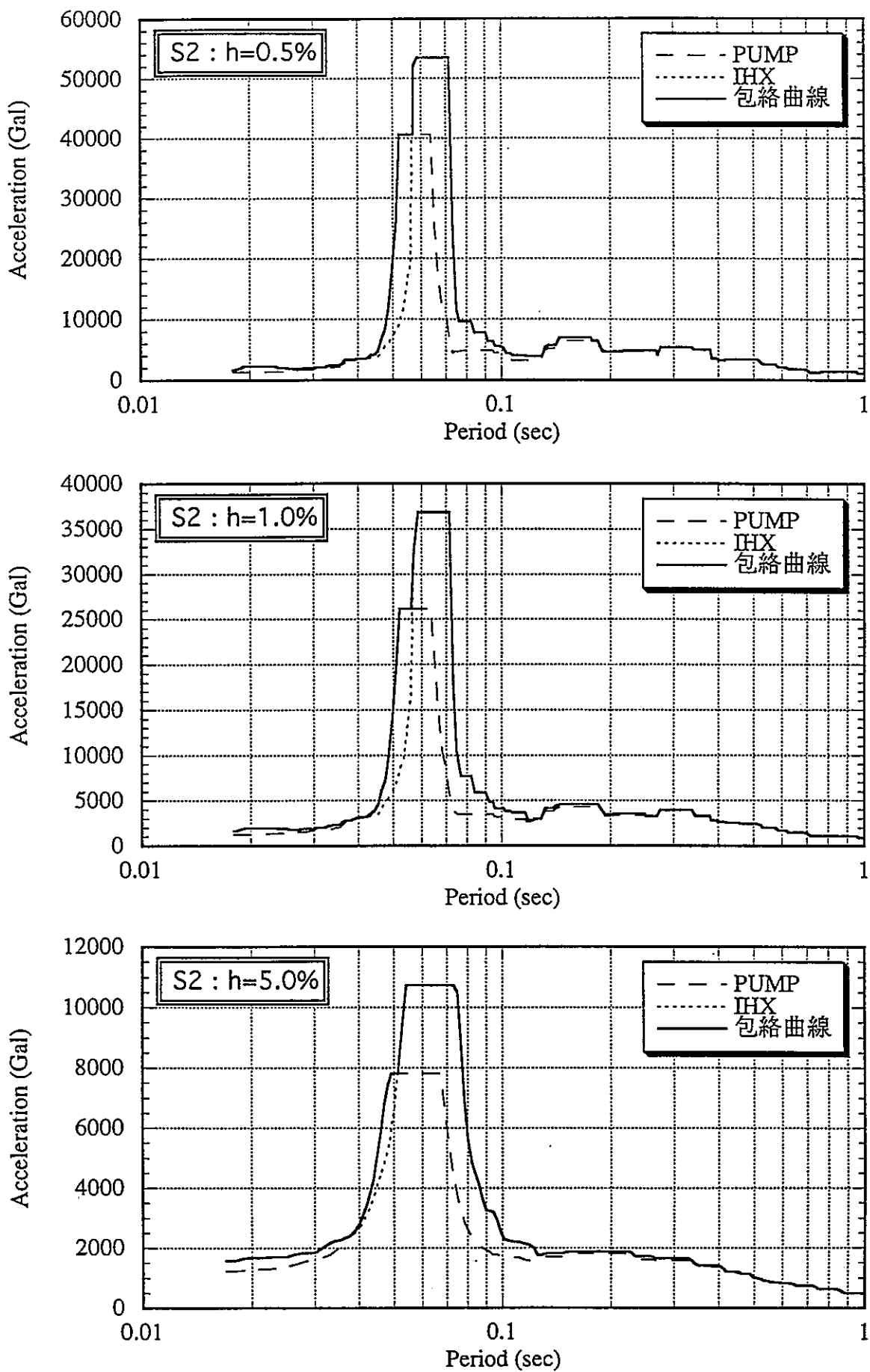


図3.2-6 機器先端の加速度応答 (S2)

表3.3-1 ホットレグ配管の固有値解析結果

[ホットレグ配管]

REAL EIGENVALUES							
MODE		EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD			
1		9.831503E+02	4.990339E+00	2.003872E-01			
2		3.781716E+03	9.787337E+00	1.021728E-01			
3		3.572271E+04	3.008101E+01	3.324357E-02			
4		1.093190E+05	5.262208E+01	1.900343E-02			
5		2.593945E+05	8.105887E+01	1.233671E-02			

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS							
MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	-9.31614E-02	8.88799E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-9.40300E-02
	EFFECTIVE MASS	8.67904E-03	7.89964E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.84165E-03
	RATIO	1.30184E-02	8.86930E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.08491E-03
2	PARTICIPATION FACTOR	7.10062E-01	1.10459E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-9.68229E-01
	EFFECTIVE MASS	5.04188E-01	1.22013E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.37468E-01
	RATIO	7.56276E-01	1.36990E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.15032E-01
3	PARTICIPATION FACTOR	2.03051E-01	9.13039E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.15184E+00
	EFFECTIVE MASS	4.12298E-02	8.33641E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.63042E+00
	RATIO	6.18441E-02	9.35968E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.68174E-01
4	PARTICIPATION FACTOR	2.16972E-02	2.51911E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-9.31373E-01
	EFFECTIVE MASS	4.70768E-04	6.34592E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.67455E-01
	RATIO	7.06145E-04	7.12486E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.06441E-01
5	PARTICIPATION FACTOR	3.34821E-01	-1.29272E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.30594E+00
	EFFECTIVE MASS	1.12105E-01	1.67113E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.70547E+00
	RATIO	1.68156E-01	1.87626E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.09269E-01
	TOTAL EFFECTIVE MASS	6.66673E-01	8.90672E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.14966E+00

表3.3-2 ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [FRS : S2.h=0.5%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	3.587E+03	3.641E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.600E+07	IHX側ノズル部
2 BEGIN	3.586E+03	3.636E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.384E+07	
3 BEGIN	3.585E+03	3.615E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.170E+07	
4 BEGIN	3.582E+03	3.572E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.583E+06	
5 BEGIN	3.579E+03	3.502E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.519E+06	
6 BEGIN	3.574E+03	3.403E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.547E+06	
7 BEGIN	3.569E+03	3.273E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.755E+06	
8 BEGIN	3.563E+03	3.110E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.412E+06	
9 BEGIN	3.542E+03	2.920E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.223E+06	エルボ (上端)
MIDDLE	3.823E+03	2.541E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.406E+06	
10 BEGIN	3.659E+03	2.547E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.381E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	3.262E+03	3.040E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.148E+06	
11 BEGIN	2.546E+03	3.422E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.893E+06	エルボ (下端)
12 BEGIN	2.352E+03	3.154E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.747E+06	
13 BEGIN	2.157E+03	2.750E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.567E+06	
14 BEGIN	1.963E+03	2.224E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.321E+06	
15 BEGIN	1.710E+03	1.412E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.792E+06	
16 BEGIN	1.400E+03	4.396E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.672E+06	
17 BEGIN	1.089E+03	1.179E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.779E+06	
18 BEGIN	7.775E+02	2.522E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.030E+06	
19 BEGIN	4.670E+02	3.961E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.361E+06	
20 BEGIN	1.555E+02	5.459E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.725E+06	
21 END	1.555E+02	5.459E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.658E+04	

表3.3-3 ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [FRS: S2h=1.0%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	3.202E+03	2.779E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.193E+07	IHX側ノズル部
2 BEGIN	3.201E+03	2.774E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.030E+07	
3 BEGIN	3.199E+03	2.756E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.672E+06	
4 BEGIN	3.196E+03	2.720E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.074E+06	
5 BEGIN	3.191E+03	2.663E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.525E+06	
6 BEGIN	3.186E+03	2.584E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.064E+06	
7 BEGIN	3.180E+03	2.480E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.780E+06	
8 BEGIN	3.174E+03	2.350E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.931E+06	
9 BEGIN	3.153E+03	2.199E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.978E+06	エルボ (上端)
MIDDLE	3.357E+03	1.875E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.114E+06	
10 BEGIN	3.116E+03	2.086E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.009E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	2.635E+03	2.667E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.698E+06	
11 BEGIN	1.915E+03	3.045E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.397E+06	エルボ (下端)
12 BEGIN	1.769E+03	2.806E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.273E+06	
13 BEGIN	1.623E+03	2.447E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.974E+06	
14 BEGIN	1.477E+03	1.979E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.569E+06	
15 BEGIN	1.286E+03	1.253E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.897E+06	
16 BEGIN	1.053E+03	3.596E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.693E+06	
17 BEGIN	8.191E+02	1.032E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.798E+06	
18 BEGIN	5.849E+02	2.237E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.138E+06	
19 BEGIN	3.513E+02	3.521E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.656E+06	
20 BEGIN	1.170E+02	4.856E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.313E+06	
21 END	1.170E+02	4.856E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.706E+04	

表3.3-4 ホットレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [FRS : S2 h=5.0%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	1.883E+03	1.493E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.292E+06	IHX側ノズル部
2 BEGIN	1.881E+03	1.489E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.418E+06	
3 BEGIN	1.877E+03	1.476E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.553E+06	
4 BEGIN	1.871E+03	1.452E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.706E+06	
5 BEGIN	1.864E+03	1.419E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.889E+06	
6 BEGIN	1.856E+03	1.377E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.123E+06	
7 BEGIN	1.847E+03	1.322E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.463E+06	
8 BEGIN	1.838E+03	1.251E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.059E+06	
9 BEGIN	1.820E+03	1.168E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.130E+06	エルボ (上端)
MIDDLE	1.925E+03	9.854E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.202E+06	
10 BEGIN	1.759E+03	1.162E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.123E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	1.453E+03	1.528E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.227E+05	
11 BEGIN	1.016E+03	1.744E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.385E+05	エルボ (下端)
12 BEGIN	9.384E+02	1.603E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.278E+06	
13 BEGIN	8.609E+02	1.400E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.264E+06	
14 BEGIN	7.835E+02	1.136E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.178E+06	
15 BEGIN	6.827E+02	7.270E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.938E+06	
16 BEGIN	5.589E+02	2.298E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.393E+06	
17 BEGIN	4.349E+02	5.969E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.453E+06	
18 BEGIN	3.106E+02	1.282E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.074E+06	
19 BEGIN	1.866E+02	2.012E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.227E+06	
20 BEGIN	6.212E+01	2.769E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.889E+06	
21 END	6.212E+01	2.769E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.461E+04	

表3.3-5 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [ERS: S2h=0.5%] /水平サポート)

(単位: kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	2.857	0.120						
エルボ (上端)						1.841	2.762	0.118
エルボ (中央)			3.287	4.931	0.122			
エルボ (下端)						1.568	2.352	0.085

応力係数: B2= 7.73

応力係数: C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数: Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート: K2= 1000 kg/mm

表3.3-6 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [FRS : S2h=1.0%] /水平サポート)

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	2.131	0.107						
エルボ (上端)						1.638	2.457	0.105
エルボ (中央)			2.773	4.159	0.104			
エルボ (下端)						1.157	1.736	0.064

応力係数 : B2= 7.73

応力係数 : C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート : K2= 1000 kg/mm

表3.3-7 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [FRS : S2.h=5.0%] /水平サポート)

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	1.124	0.063						
エルボ (上端)						0.936	1.404	0.061
エルボ (中央)			1.551	2.326	0.059			
エルボ (下端)						0.612	0.918	0.034

応力係数 : B2= 7.73

応力係数 : C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート : K2= 1000 kg/mm

表3.3-8 ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力 [FRS: S2h=0.5%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	1.186E+03	2.180E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.013E+08	IHX側ノズル部
2 BEGIN	1.186E+03	2.178E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.823E+07	
3 BEGIN	1.184E+03	2.168E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.516E+07	
4 BEGIN	1.182E+03	2.147E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.215E+07	
5 BEGIN	1.180E+03	2.113E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.926E+07	
6 BEGIN	1.177E+03	2.063E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.658E+07	
7 BEGIN	1.173E+03	1.996E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.420E+07	
8 BEGIN	1.170E+03	1.910E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.222E+07	
9 BEGIN	1.084E+03	1.807E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.338E+05	エルボ (上端)
MIDDLE	7.516E+03	1.647E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.520E+06	
10 BEGIN	1.248E+04	1.155E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.850E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	1.593E+04	5.946E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.148E+07	
11 BEGIN	1.582E+04	1.232E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.227E+07	エルボ (下端)
12 BEGIN	1.461E+04	1.298E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.168E+07	
13 BEGIN	1.340E+04	1.380E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.101E+07	
14 BEGIN	1.219E+04	1.485E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.025E+07	
15 BEGIN	1.062E+04	1.656E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.394E+06	
16 BEGIN	8.691E+03	1.916E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.390E+06	
17 BEGIN	6.761E+03	2.214E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.170E+06	
18 BEGIN	4.827E+03	2.532E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.725E+06	
19 BEGIN	2.900E+03	2.861E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.051E+06	
20 BEGIN	9.651E+02	3.196E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.149E+06	
21 END	9.651E+02	3.196E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.576E+04	

表3.3-9 ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力 [FRS : S2.h=1.0%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	9.471E+02	1.643E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.634E+07	IHX側ノズル部
2 BEGIN	9.465E+02	1.641E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.648E+07	
3 BEGIN	9.452E+02	1.634E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.664E+07	
4 BEGIN	9.433E+02	1.618E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.683E+07	
5 BEGIN	9.409E+02	1.592E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.712E+07	
6 BEGIN	9.381E+02	1.555E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.757E+07	
7 BEGIN	9.349E+02	1.504E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.824E+07	
8 BEGIN	9.314E+02	1.440E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.210E+06	
9 BEGIN	8.696E+02	1.362E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.310E+05	エルボ (上端)
MIDDLE	5.672E+03	1.241E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.412E+06	
10 BEGIN	9.406E+03	8.707E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.671E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	1.201E+04	4.487E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.655E+06	
11 BEGIN	1.192E+04	9.722E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.242E+06	エルボ (下端)
12 BEGIN	1.101E+04	1.015E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.802E+06	
13 BEGIN	1.010E+04	1.068E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.307E+06	
14 BEGIN	9.187E+03	1.137E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.744E+06	
15 BEGIN	8.003E+03	1.255E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.109E+06	
16 BEGIN	6.549E+03	1.443E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.366E+06	
17 BEGIN	5.095E+03	1.670E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.456E+06	
18 BEGIN	3.638E+03	1.920E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.371E+06	
19 BEGIN	2.186E+03	2.183E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.103E+06	
20 BEGIN	7.273E+02	2.455E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.652E+06	
21 END	7.273E+02	2.455E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.075E+04	

表3.3-10 ホットレグ配管に生じる荷重 (上下S2/慣性力 [FRS: S2.h=5.0%] /水平サポート)

NODE No.	Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
1 BEGIN	4.939E+02	6.898E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.203E+07	IHX側ノズル部
2 BEGIN	4.930E+02	6.890E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.789E+07	
3 BEGIN	4.912E+02	6.857E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.376E+07	
4 BEGIN	4.886E+02	6.790E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.965E+07	
5 BEGIN	4.852E+02	6.681E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.558E+07	
6 BEGIN	4.814E+02	6.523E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.157E+07	
7 BEGIN	4.771E+02	6.313E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.654E+06	
8 BEGIN	4.727E+02	6.042E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.869E+06	
9 BEGIN	4.474E+02	5.717E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.497E+05	エルボ (上端)
MIDDLE	2.395E+03	5.210E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.440E+06	
10 BEGIN	3.955E+03	3.658E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.802E+06	エルボ (中央)
MIDDLE	5.043E+03	1.895E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.632E+06	
11 BEGIN	5.004E+03	4.734E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.878E+06	エルボ (下端)
12 BEGIN	4.622E+03	4.809E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.696E+06	
13 BEGIN	4.239E+03	4.907E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.498E+06	
14 BEGIN	3.857E+03	5.054E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.277E+06	
15 BEGIN	3.360E+03	5.380E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.030E+06	
16 BEGIN	2.750E+03	6.076E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.736E+06	
17 BEGIN	2.139E+03	7.075E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.367E+06	
18 BEGIN	1.528E+03	8.267E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.913E+06	
19 BEGIN	9.177E+02	9.557E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.370E+06	
20 BEGIN	3.054E+02	1.092E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.357E+05	
21 END	3.054E+02	1.092E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.126E+04	

表3.3-11 ホットレグ配管に生じる応力（上下S2／慣性力 [FRS : S2 h=0.5%] /水平サポート）

(単位：kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	18.091	0.040						
エルボ（上端）						0.774	1.160	0.036
エルボ（中央）			12.219	18.328	0.417			
エルボ（下端）						10.160	15.240	0.529

応力係数：B2= 7.73

応力係数：C2= 11.60

断面積：A = 2.99E+04 mm²断面係数：Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート：K2= 1000 kg/mm

表3.3-12 ホットレグ配管に生じる応力（上下S2／慣性力 [FRS : S2.h=1.0%] /水平サポート）

(単位：kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	13.632	0.032						
エルボ（上端）						0.605	0.908	0.029
エルボ（中央）			9.210	13.815	0.315			
エルボ（下端）						7.656	11.484	0.399

応力係数：B2= 7.73

応力係数：C2= 11.60

断面積：A = 2.99E+04 mm²断面係数：Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート：K2= 1000 kg/mm

表3.3-13 ホットレグ配管に生じる応力 (上下S2/慣性力 [FRS : S2 h=5.0%] /水平サポート)

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	5.720	0.017						
エルボ (上端)						0.290	0.435	0.015
エルボ (中央)			3.868	5.803	0.132			
エルボ (下端)						3.213	4.819	0.167

応力係数 : B2= 7.73

応力係数 : C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート : K2= 1000 kg/mm

表3.3-14 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2+上下S2/慣性力 [FRS: S2 h=0.5%] /水平サポート)

(単位: kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	20.947	0.160						
エルボ (上端)						2.615	3.923	0.155
エルボ (中央)			15.506	23.259	0.540			
エルボ (下端)						11.728	17.591	0.614

応力係数: B2= 7.73

応力係数: C2= 11.60

断面積: A = 2.99E+04 mm²断面係数: Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート: K2= 1000 kg/mm

表3.3-15 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2+上下S2/慣性力 [FRS : S2h=1.0%] /水平サポート)

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	15.763	0.139						
エルボ (上端)						2.244	3.366	0.135
エルボ (中央)			11.983	17.975	0.419			
エルボ (下端)						8.813	13.220	0.463

応力係数 : B2= 7.73

応力係数 : C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート : K2= 1000 kg/mm

表3.3-16 ホットレグ配管に生じる応力 (水平S2+上下S2/慣性力 [FRS : S2 h=5.0%] /水平サポート)

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
IHX側ノズル部	6.843	0.079						
エルボ (上端)						1.226	1.839	0.076
エルボ (中央)			5.419	8.129	0.191			
エルボ (下端)						3.824	5.736	0.201

応力係数 : B2= 7.73

応力係数 : C2= 11.60

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

水平サポート : K2= 1000 kg/mm

表3.3-17 ミドルレグ配管の固有値解析結果

[ミドルレグ配管]

REAL EIGENVALUES						
MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD			
1	3.670885E+03	9.642853E+00	1.037038E-01			
2	2.925682E+04	2.722285E+01	3.673384E-02			
3	1.086265E+05	5.245513E+01	1.906391E-02			
4	2.124372E+05	7.335596E+01	1.363216E-02			
5	4.893798E+05	1.113379E+02	8.981666E-03			
6	7.580956E+05	1.385741E+02	7.216355E-03			
7	9.475374E+05	1.549239E+02	6.454783E-03			
8	1.203261E+06	1.745822E+02	5.727960E-03			
9	1.808272E+06	2.140188E+02	4.672487E-03			
10	1.824577E+06	2.149816E+02	4.651561E-03			

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS							
MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	8.69946E-01	2.19440E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.47621E-01
	EFFECTIVE MASS	7.56805E-01	4.81541E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.97986E-01
	RATIO	8.46972E-01	5.75592E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.69764E-02
2	PARTICIPATION FACTOR	-1.80675E-02	5.81912E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.56336E-01
	EFFECTIVE MASS	3.26436E-04	3.38621E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.44410E-02
	RATIO	3.65327E-04	4.04758E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.63946E-03
3	PARTICIPATION FACTOR	-2.32561E-01	5.13099E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-2.17601E+00
	EFFECTIVE MASS	5.40845E-02	2.63270E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.73504E+00
	RATIO	6.05282E-02	3.14690E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.11352E-01
4	PARTICIPATION FACTOR	-7.67541E-03	1.70074E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.73920E-01
	EFFECTIVE MASS	5.89119E-05	2.89253E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.48521E-01
	RATIO	6.59307E-05	3.45747E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.02434E-01
5	PARTICIPATION FACTOR	2.26086E-01	-8.65218E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-1.13106E+00
	EFFECTIVE MASS	5.11151E-02	7.48602E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.27929E+00
	RATIO	5.72050E-02	8.94813E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.38155E-01
6	PARTICIPATION FACTOR	-5.74605E-02	-5.42503E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.15890E-01
	EFFECTIVE MASS	3.30171E-03	2.94309E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.66087E-02
	RATIO	3.69508E-03	3.51792E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.03342E-03
7	PARTICIPATION FACTOR	-5.30643E-02	-2.19240E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-7.10065E-02
	EFFECTIVE MASS	2.81582E-03	4.80664E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.04192E-03
	RATIO	3.15130E-03	5.74543E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.44493E-04
8	PARTICIPATION FACTOR	-6.44158E-02	1.92365E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.37786E-01
	EFFECTIVE MASS	4.14940E-03	3.70042E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.89849E-02
	RATIO	4.64376E-03	4.42316E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.05023E-03
9	PARTICIPATION FACTOR	9.83644E-02	-2.34770E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-7.02628E-01
	EFFECTIVE MASS	9.67555E-03	5.51171E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.93685E-01
	RATIO	1.08283E-02	6.58821E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.33147E-02
10	PARTICIPATION FACTOR	1.05878E-01	1.54783E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-9.00135E-01
	EFFECTIVE MASS	1.12101E-02	2.39577E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.10244E-01
	RATIO	1.25456E-02	2.86370E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.75008E-02
	TOTAL EFFECTIVE MASS	8.93543E-01	8.36601E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.25984E+00

表3.3-18 ミドルレゲ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [FRS : S2.h=0.5%])

NODE No.		Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
2001	BEGIN	2.808E+03	1.920E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.593E+07	ポンプ側ノズル部
2002	BEGIN	2.802E+03	1.889E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.220E+07	
2003	BEGIN	2.790E+03	1.816E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.869E+07	
2004	BEGIN	2.773E+03	1.693E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.571E+07	
2005	BEGIN	2.445E+03	1.491E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.556E+06	ポンプ側エルボ (上端)
	MIDDLE	7.872E+03	1.289E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.802E+06	
2006	BEGIN	1.039E+04	6.821E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.703E+06	ポンプ側エルボ (中央)
	MIDDLE	1.220E+04	2.395E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.778E+06	
2007	BEGIN	9.555E+03	3.269E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.667E+06	ポンプ側エルボ (下端)
2008	BEGIN	7.094E+03	3.592E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.393E+06	
2009	BEGIN	4.632E+03	3.840E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.874E+06	
2010	BEGIN	2.176E+03	3.968E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.181E+06	
2011	BEGIN	4.420E+02	3.953E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.757E+05	
2012	BEGIN	2.798E+03	3.816E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.415E+06	
2013	BEGIN	5.409E+03	3.307E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.153E+06	IHX側エルボ (下端)
	MIDDLE	6.243E+03	1.105E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.101E+06	
2014	BEGIN	8.021E+03	3.665E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.033E+06	IHX側エルボ (中央)
	MIDDLE	6.047E+03	6.418E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.770E+06	
2015	BEGIN	3.558E+03	1.059E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.498E+06	IHX側エルボ (上端)
2016	BEGIN	3.590E+03	1.224E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.552E+06	
2017	BEGIN	3.613E+03	1.326E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.783E+07	
2018	BEGIN	3.626E+03	1.372E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.897E+07	
2019	END	3.626E+03	1.372E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.047E+07	IHX側ノズル部

表3.3-19 ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [ERS : S2.h=1.0%])

NODE No.		Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
2001	BEGIN	2.399E+03	1.670E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.866E+07	ポンプ側ノズル部
2002	BEGIN	2.397E+03	1.644E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.672E+07	
2003	BEGIN	2.392E+03	1.580E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.496E+07	
2004	BEGIN	2.386E+03	1.473E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.366E+07	
2005	BEGIN	2.107E+03	1.297E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.094E+06	ポンプ側エルボ (上端)
	MIDDLE	6.835E+03	1.122E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.439E+06	
2006	BEGIN	9.031E+03	5.936E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.701E+06	ポンプ側エルボ (中央)
	MIDDLE	1.060E+04	2.082E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.507E+06	
2007	BEGIN	8.309E+03	2.836E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.411E+06	ポンプ側エルボ (下端)
2008	BEGIN	6.169E+03	3.126E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.430E+06	
2009	BEGIN	4.027E+03	3.340E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.235E+06	
2010	BEGIN	1.893E+03	3.447E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.892E+06	
2011	BEGIN	3.937E+02	3.436E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.891E+05	
2012	BEGIN	2.436E+03	3.320E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.970E+06	
2013	BEGIN	4.705E+03	2.864E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.353E+06	IHX側エルボ (下端)
	MIDDLE	5.426E+03	9.476E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.179E+06	
2014	BEGIN	6.959E+03	3.192E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.119E+06	IHX側エルボ (中央)
	MIDDLE	5.236E+03	5.586E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.150E+06	
2015	BEGIN	3.042E+03	9.210E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.310E+06	IHX側エルボ (上端)
2016	BEGIN	3.047E+03	1.065E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.565E+06	
2017	BEGIN	3.051E+03	1.154E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.551E+07	
2018	BEGIN	3.053E+03	1.193E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.521E+07	
2019	END	3.053E+03	1.193E+04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.521E+07	IHX側ノズル部

表3.3-20 ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/慣性力 [FRS : S2 h=5.0%])

NODE No.		Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
2001	BEGIN	1.577E+03	9.879E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.875E+07	ポンプ側ノズル部
2002	BEGIN	1.570E+03	9.716E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.169E+07	
2003	BEGIN	1.555E+03	9.335E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.475E+07	
2004	BEGIN	1.535E+03	8.704E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.080E+06	
2005	BEGIN	1.358E+03	7.670E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.849E+06	ポンプ側エルボ (上端)
	MIDDLE	4.079E+03	6.636E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.450E+06	
2006	BEGIN	5.356E+03	3.521E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.960E+06	ポンプ側エルボ (中央)
	MIDDLE	6.278E+03	1.290E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.029E+06	
2007	BEGIN	4.917E+03	1.692E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.980E+06	ポンプ側エルボ (下端)
2008	BEGIN	3.650E+03	1.851E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.824E+06	
2009	BEGIN	2.384E+03	1.992E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.533E+06	
2010	BEGIN	1.128E+03	2.066E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.141E+06	
2011	BEGIN	3.025E+02	2.049E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.812E+05	
2012	BEGIN	1.463E+03	1.964E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.780E+06	
2013	BEGIN	2.800E+03	1.728E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.180E+06	IHX側エルボ (下端)
	MIDDLE	3.223E+03	6.608E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.656E+06	
2014	BEGIN	4.145E+03	1.932E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.616E+06	IHX側エルボ (中央)
	MIDDLE	3.141E+03	3.323E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.457E+06	
2015	BEGIN	1.919E+03	5.452E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.330E+05	IHX側エルボ (上端)
2016	BEGIN	1.959E+03	6.294E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.911E+06	
2017	BEGIN	1.990E+03	6.826E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.177E+06	
2018	BEGIN	2.007E+03	7.070E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.489E+07	
2019	END	2.007E+03	7.070E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.080E+07	IHX側ノズル部

表3.3-21 ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [ERS : S2h=0.5%])

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
ポンプ側ノズル部	9.987	0.094						
IHX側ノズル部	7.226	0.121						
ポンプ側エルボ (上端)						2.248	3.372	0.082
ポンプ側エルボ (中央)			8.115	12.173	0.348			
ポンプ側エルボ (下端)						6.111	9.167	0.320
IHX側エルボ (上端)						3.890	5.835	0.181
IHX側エルボ (中央)			7.410	11.115	0.268			
IHX側エルボ (下端)						0.947	1.421	0.119

応力係数 : B2 = 5.90

応力係数 : C2 = 8.85

断面積 : A = 2.99E+04 mm²断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³

表3.3-22 ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [ERS: S2.h=1.0%])

(単位: kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
ポンプ側ノズル部	8.689	0.080						
IHX側ノズル部	6.287	0.102						
ポンプ側エルボ (上端)						1.956	2.934	0.070
ポンプ側エルボ (中央)			7.060	10.590	0.302			
ポンプ側エルボ (下端)						5.317	7.976	0.278
IHX側エルボ (上端)						3.384	5.076	0.157
IHX側エルボ (中央)			6.446	9.670	0.233			
IHX側エルボ (下端)						0.828	1.242	0.102

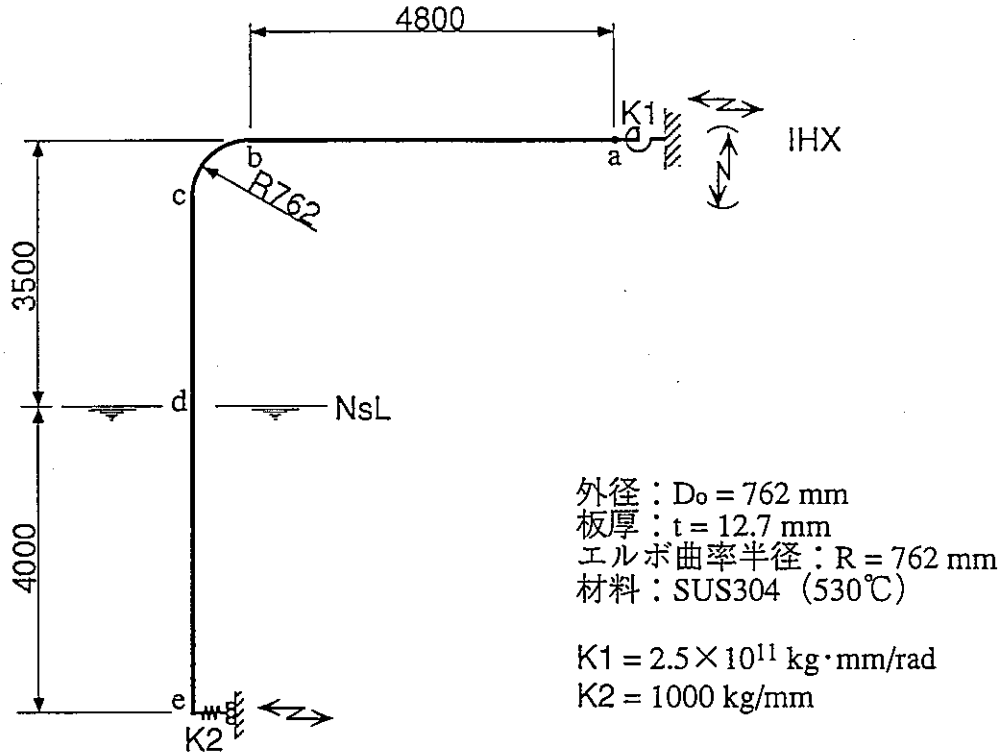
応力係数: B2= 5.90
 応力係数: C2= 8.85
 断面積: A = 2.99E+04 mm²
 断面係数: Z = 5.60E+06 mm³

表3.3-23 ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/慣性力 [FRS : S2 h=5.0%])

(単位 : kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
ポンプ側ノズル部	5.134	0.053						
IHX側ノズル部	3.715	0.067						
ポンプ側エルボ (上端)						1.169	1.753	0.045
ポンプ側エルボ (中央)			4.172	6.258	0.179			
ポンプ側エルボ (下端)						3.148	4.722	0.164
IHX側エルボ (上端)						2.010	3.015	0.094
IHX側エルボ (中央)			3.809	5.714	0.139			
IHX側エルボ (下端)						0.527	0.790	0.064

応力係数 : B2 = 5.90
 応力係数 : C2 = 8.85
 断面積 : A = 2.99E+04 mm²
 断面係数 : Z = 5.60E+06 mm³



- ① 配管鋼材重量 : 240 kg/m
- ② 内部Na重量 : 351 kg/m
- ③ 流体付加マス : 376 kg/m
- ④ 保温材等の重量 : 103 kg/m (保温材厚さはMLの4/3倍)

インプット重量

$$\begin{cases}
 a \sim b & \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{4} \\
 b \sim c & \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{4} \\
 c \sim d & \textcircled{1} + \textcircled{2} \\
 d \sim e & \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3}
 \end{cases}$$

図3.3-1 ホットレグ配管の線形振動解析モデル

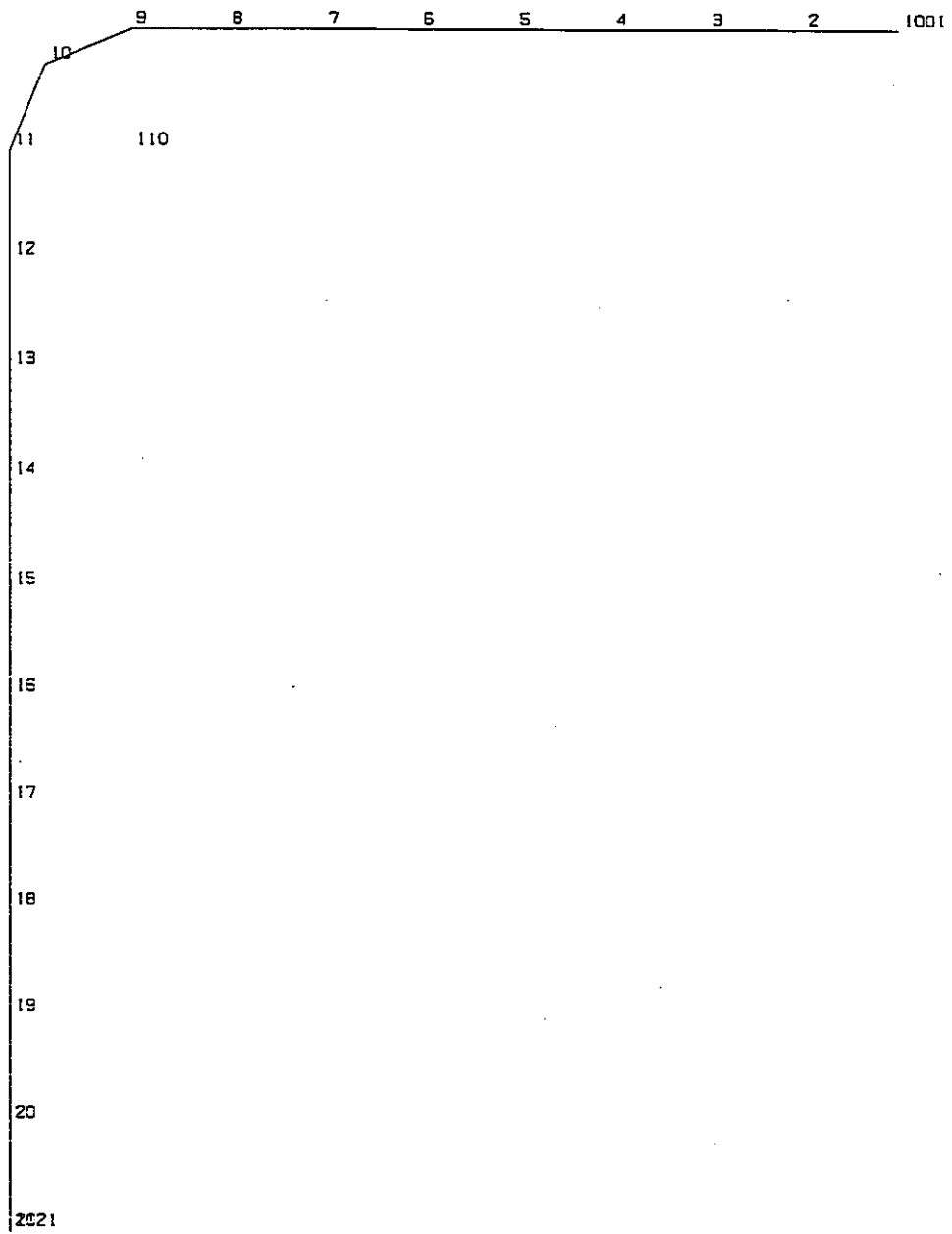
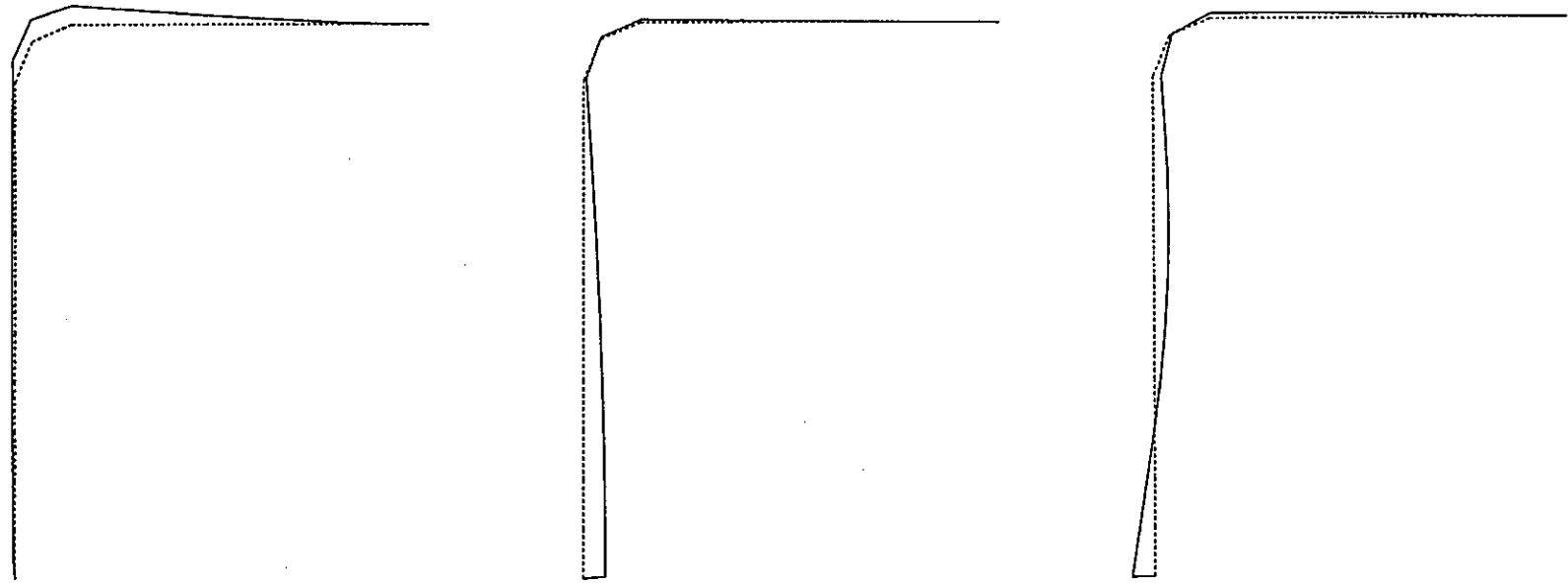


図 3.3-2 ホットレグ配管モデルの節点番号

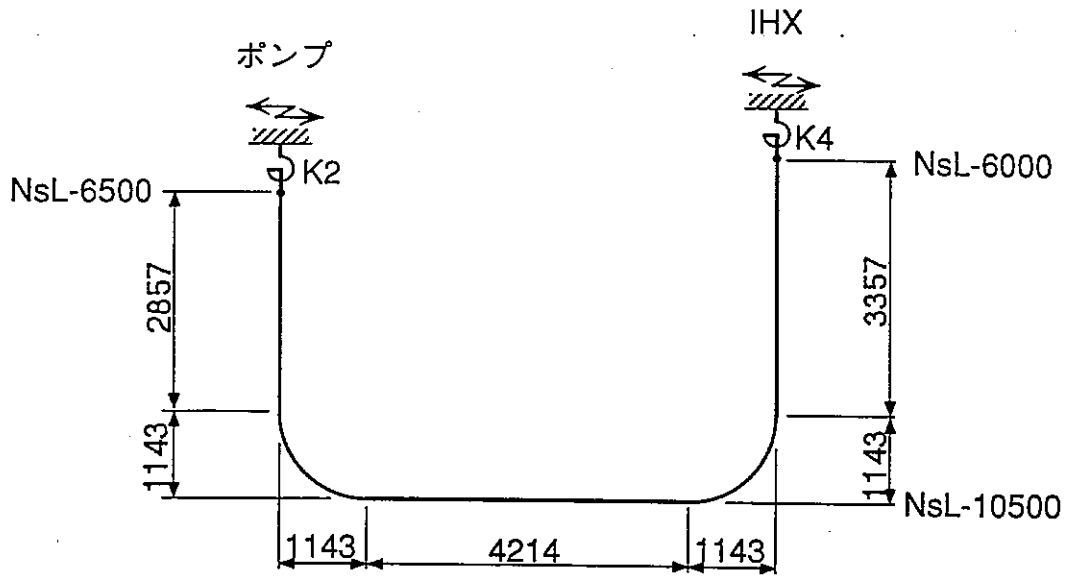


1次モード (5.0Hz)

2次モード (9.8Hz)

3次モード (30.1Hz)

図3.3-3 ホットレグ配管の振動モード



外径 : $D_o = 762$ mm
 板厚 : $t = 12.7$ mm
 エルボ曲率半径 : $R = 1143$ mm
 材料 : SUS304 (380℃)

$K2 = 3.0 \times 10^{10}$ kg·mm/rad
 $K4 = 2.0 \times 10^{10}$ kg·mm/rad

- ① 配管鋼材重量 : 240 kg/m
- ② 内部Na重量 : 374 kg/m
- ③ 保温材等の重量 : 77 kg/m (保温材厚さはMLの4/3倍)

インプット重量 : ①+②+③

図3.3-4 ミドルレグ配管の線形振動解析モデル

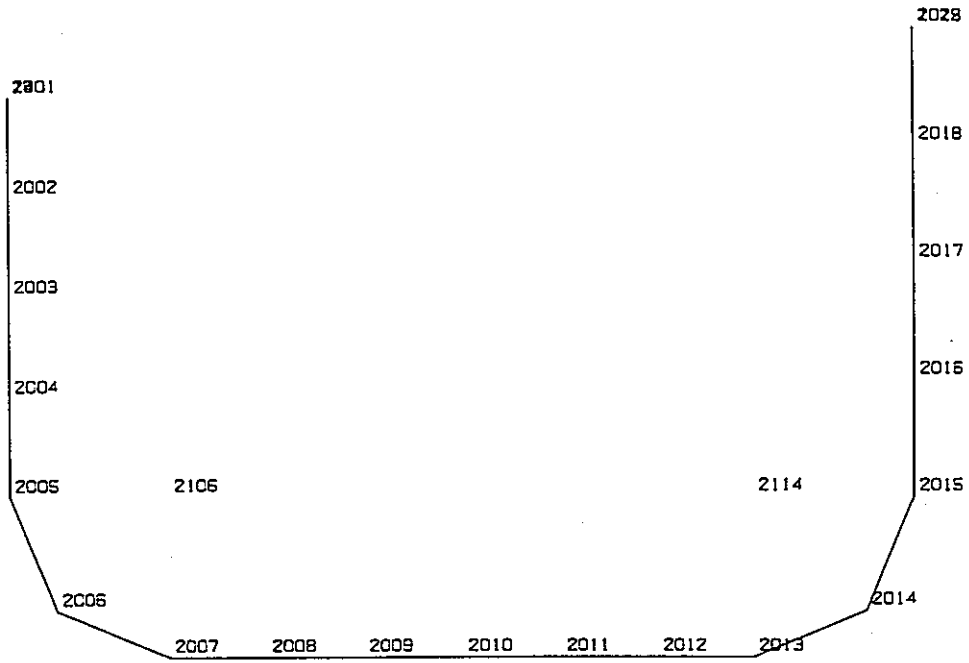
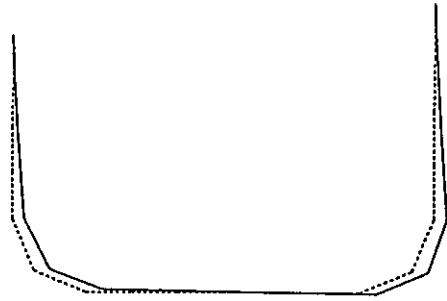
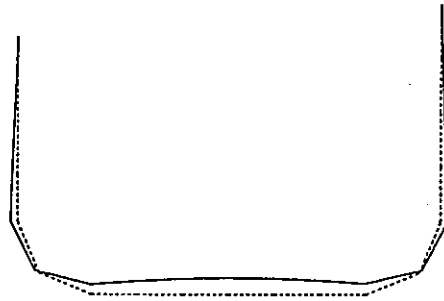


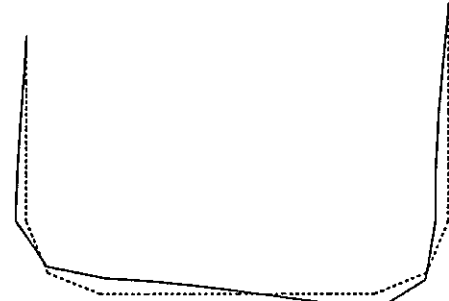
図 3.3-5 ミドルレグ配管モデルの節点番号



1次モード (9.6Hz)



2次モード (27.2Hz)



3次モード (52.5Hz)

図3.3-6 ミドルレグ配管の振動モード

表3.4-1 ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/強制変位 [逆位相])

NODE No.		Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
2001	BEGIN	2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.965E+06	ポンプ側ノズル部
2002	BEGIN	2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.278E+06	
2003	BEGIN	2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.592E+06	
2004	BEGIN	2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-9.057E+05	
2005	BEGIN	2.564E+01	9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.193E+05	ポンプ側エルボ (上端)
	MIDDLE	-3.441E+02	8.976E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.032E+05	
2006	BEGIN	-6.614E+02	6.976E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-5.659E+05	ポンプ側エルボ (中央)
	MIDDLE	-8.780E+02	3.914E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-8.135E+05	
2007	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.084E+05	ポンプ側エルボ (下端)
2008	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.264E+05	
2009	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.444E+05	
2010	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.624E+05	
2011	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.804E+05	
2012	BEGIN	-9.610E+02	-2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.984E+05	
2013	BEGIN	-9.610E+02	2.564E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.016E+06	IHX側エルボ (下端)
	MIDDLE	-8.976E+02	-3.441E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-9.440E+05	
2014	BEGIN	-6.976E+02	-6.614E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-7.154E+05	IHX側エルボ (中央)
	MIDDLE	-3.914E+02	-8.780E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-3.654E+05	
2015	BEGIN	-2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.268E+04	IHX側エルボ (上端)
2016	BEGIN	-2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.592E+05	
2017	BEGIN	-2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.666E+06	
2018	BEGIN	-2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.472E+06	
2019	END	-2.564E+01	-9.610E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.279E+06	IHX側ノズル部

表3.4-2 ミドルレグ配管に生じる荷重 (水平S2/強制変位 [同位相])

NODE No.		Fx (kg)	Fy (kg)	Fz (kg)	Mx (kg-mm)	My (kg-mm)	Mz (kg-mm)	部位
2001	BEGIN	-1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.275E+06	ポンプ側ノズル部
2002	BEGIN	-1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.067E+06	
2003	BEGIN	-1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.595E+05	
2004	BEGIN	-1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.518E+05	
2005	BEGIN	-1.020E+02	-2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-4.440E+05	ポンプ側エルボ (上端)
	MIDDLE	1.703E+01	-3.078E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-3.079E+05	
2006	BEGIN	1.335E+02	-2.778E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.748E+05	ポンプ側エルボ (中央)
	MIDDLE	2.297E+02	-2.056E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-6.491E+04	
2007	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-5.032E+03	ポンプ側エルボ (下端)
2008	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-7.670E+04	
2009	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.484E+05	
2010	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.200E+05	
2011	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.917E+05	
2012	BEGIN	2.908E+02	1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-3.634E+05	
2013	BEGIN	2.908E+02	-1.020E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.350E+05	IHX側エルボ (下端)
	MIDDLE	3.078E+02	1.703E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.543E+05	
2014	BEGIN	2.778E+02	1.335E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.201E+05	IHX側エルボ (中央)
	MIDDLE	2.056E+02	2.297E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.376E+05	
2015	BEGIN	1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.192E+05	IHX側エルボ (上端)
2016	BEGIN	1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.487E+04	
2017	BEGIN	1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.690E+05	
2018	BEGIN	1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-5.131E+05	
2019	END	1.020E+02	2.908E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-7.571E+05	IHX側ノズル部

表3.4-3 ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/強制変位 [逆位相])

(単位: kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
ポンプ側ノズル部	0.529	0.001						
IHX側ノズル部	0.585	0.001						
ポンプ側エルボ (上端)						0.139	0.208	0.001
ポンプ側エルボ (中央)			0.596	0.894	0.022			
ポンプ側エルボ (下端)						0.574	0.861	0.032
IHX側エルボ (上端)						0.643	0.964	0.032
IHX側エルボ (中央)			0.754	1.131	0.023			
IHX側エルボ (下端)						0.033	0.050	0.001

応力係数: B2= 5.90
 応力係数: C2= 8.85
 断面積: A = 2.99E+04 mm²
 断面係数: Z = 5.60E+06 mm³

強制変位
 ポンプ側: $\Delta X=1.51$ mm
 $\theta Z=-2.23E-4$ rad
 IHX側: $\Delta X=-2.28$ mm
 $\theta Z=2.32E-4$ rad

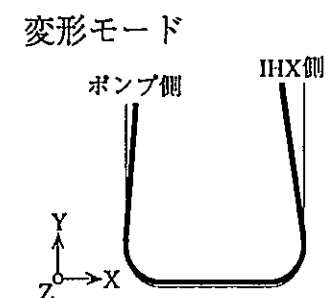


表3.4-4 ミドルレグ配管に生じる応力 (水平S2/強制変位 [同位相])

(単位: kg/mm²)

部位	ノズル部		エルボ中央			エルボ端部		
	M/Z	軸応力	B2・M/Z	C2・M/Z	軸応力	0.6×B2・M/Z	0.6×C2・M/Z	軸応力
ポンプ側ノズル部	0.228	0.003						
IHX側ノズル部	0.135	0.003						
ポンプ側エルボ (上端)						0.281	0.421	0.003
ポンプ側エルボ (中央)			0.184	0.276	0.004			
ポンプ側エルボ (下端)						0.003	0.005	0.010
IHX側エルボ (上端)						0.275	0.413	0.010
IHX側エルボ (中央)			0.443	0.664	0.009			
IHX側エルボ (下端)						0.139	0.208	0.003

応力係数: B2= 5.90
 応力係数: C2= 8.85
 断面積: A = 2.99E+04 mm²
 断面係数: Z = 5.60E+06 mm³

強制変位
 ポンプ側: $\Delta X=1.51$ mm
 $\theta Z=-2.23E-4$ rad
 IHX側: $\Delta X=2.28$ mm
 $\theta Z=-2.32E-4$ rad

変形モード

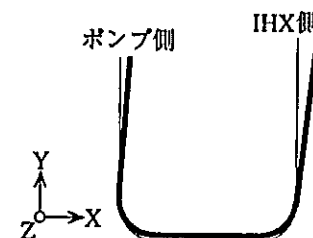


表3.5-1 BDSによる評価 (水平地震)

(単位: kg/mm²)

		ホットレグ配管*			ミドルレグ配管**		
		① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₁ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 1.2KsSm$	(エルボ) 2.27	15.03	6.621	(直管) 5.85	15.35	2.624
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 3S_mH$	6.74	29.58	4.389	14.52	30.21	2.081
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/2$	1.55	5.03	3.245	4.51	6.17	1.368
S ₂ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 2KsSm$	(エルボ) 3.41	25.04	7.343	(直管) 8.77	25.58	2.917
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 2.5 \times 3S_m$	10.11	73.95	7.315	21.78	75.53	3.468
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/1.5$	2.32	6.71	2.892	6.76	8.23	1.217
	(4) 座屈の防止 (エルボ) $B_2M^*/Z \leq 1.5KsSm$	3.29	18.78	5.708	7.06	19.18	2.717

* h = 0.5% (10%幅広げ) のFRS

** h = 1% (10%幅広げ) のFRS

2.89S₂のとき裕度 = 11.22S₂のとき裕度 = 1

表3.5-2 BDSによる評価（水平地震＋上下地震）〔参考用〕

（単位：kg/mm²）

		ホットレグ配管*			ミドルレグ配管		
		① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₁ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 1.2KsSm$	(直管) 14.07	15.03	1.068	—	—	—
	(2) ひずみの制限（エルボ） $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 3S_mH$	31.73	29.58	0.932	—	—	—
	(3) 座屈の防止（直管） $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/2$	10.85	5.03	0.464	—	—	—
S ₂ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 2KsSm$	(直管) 21.11	25.04	1.186	—	—	—
	(2) ひずみの制限（エルボ） $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 2.5 \times 3S_m$	47.60	73.95	1.554	—	—	—
	(3) 座屈の防止（直管） $M^*/1.3Z + Fa^*/A \leq Sy/1.5$	16.27	6.71	0.412	—	—	—
	(4) 座屈の防止（エルボ） $B_2M^*/Z \leq 1.5KsSm$	15.51	18.78	1.211	—	—	—

* h = 0.5%（10%幅広げ）のFRS

↓
0.41S₂のとき裕度 = 1

表3.5-3 DDSによる評価 (水平地震)

(単位: kg/mm²)

		ホットレグ配管*			ミドルレグ配管**		
		① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₁ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 1.2KsSm$	(エルボ) 2.27	15.03	6.621	(直管) 5.85	15.35	2.624
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 3S_{mH}$	6.74	29.58	4.389	14.52	30.21	2.081
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.27Z + Fa^*/A \leq Sy/2.25$	1.58	4.47	2.829	4.61	5.48	1.189
S ₂ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 2KsSm$	(エルボ) 3.41	25.04	7.343	(直管) 8.77	25.58	2.917
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 2.5 \times 3S_m$	10.11	73.95	7.315	21.78	75.53	3.468
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.27Z + Fa^*/A \leq Sy/1.5$	2.37	6.71	2.831	6.92	8.23	1.189
	(4) 座屈の防止 (エルボ) $B_2M^*/Z \leq 1.5KsSm$	3.29	18.78	5.708	7.06	19.18	2.717

* h = 0.5% (10%幅広げ) のFRS

** h = 1% (10%幅広げ) のFRS

↓
2.83S₂のとき裕度 = 1↓
1.19S₂のとき裕度 = 1

表3.5-4 DDSによる評価（水平地震+上下地震） [参考用]

(単位：kg/mm²)

		ホットレグ配管*			ミドルレグ配管		
		① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₁ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 1.2KsSm$	(直管) 14.07	15.03	1.068	—	—	—
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 3S_mH$	31.73	29.58	0.932	—	—	—
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.27Z + Fa^*/A \leq Sy/2.25$	11.10	4.47	0.403	—	—	—
S ₂ 地震	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z + Fa^*/A \leq 2KsSm$	(直管) 21.11	25.04	1.186	—	—	—
	(2) ひずみの制限 (エルボ) $C_2(M^*+M^{***})_R/Z + (Fa^*)_R/A \leq 2.5 \times 3S_m$	47.60	73.95	1.554	—	—	—
	(3) 座屈の防止 (直管) $M^*/1.27Z + Fa^*/A \leq Sy/1.5$	16.65	6.71	0.403	—	—	—
	(4) 座屈の防止 (エルボ) $B_2M^*/Z \leq 1.5KsSm$	15.51	18.78	1.211	—	—	—

* h = 0.5% (10%幅広げ) のFRS

↓
0.40S₂のとき裕度 = 1

表3.5-5 ASME (旧、新) による評価 (水平地震)

(単位: kg/mm²)

			部 位	ホットレグ配管*			ミドルレグ配管*		
				① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₂ 地震 (SSE)	旧 ASME	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [3S_m, 2S_y]$ $=2S_y$	エルボ	1.55	20.12	12.981	4.17	24.68	5.918
			直 管	1.12	20.12	17.964	5.13	24.68	4.811
	新 ASME	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [4.5S_m,$ $4S_y] = 4S_y$	エルボ	1.55	40.24	25.961	4.17	49.36	11.837
			直 管	1.12	40.24	35.929	5.13	49.36	9.622
		(2) 相対変位による応力の制限 $C_2(M^{***})_R/Z \leq \text{Min} [6S_m,$ $4S_y] = 4S_y$	エルボ	—	—	—	2.26	49.36	21.841
			直 管	—	—	—	1.17	49.36	42.188

* h = 5% (15%幅広げ) のFRS

↓
(旧) 13.0S₂のとき裕度 = 1(新) 26.0S₂のとき裕度 = 1↓
(旧) 4.81S₂のとき裕度 = 1(新) 9.62S₂のとき裕度 = 1

表3.5-6 ASME (旧、新) による評価 (水平地震+上下地震) [参考用]

(単位: kg/mm²)

			部 位	ホットレグ配管*			ミドルレグ配管		
				① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)	① 発生応力	② 許容応力	裕度 (②/①)
S ₂ 地震 (SSE)	旧 ASME	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [3S_m, 2S_y]$ $=2S_y$	エルボ	5.42	20.12	3.712	—	—	—
			直 管	6.84	20.12	2.942	—	—	—
	新 ASME	(1) 1次応力制限 $B_2M^*/Z \leq \text{Min} [4.5S_m,$ $4S_y] = 4.5S_m$	エルボ	5.42	40.24	7.424	—	—	—
			直 管	6.84	40.24	5.883	—	—	—
		(2) 相対変位による応力の制限 $C_2(M^{***})_R/Z \leq \text{Min} [6S_m,$ $4S_y] = 4S_y$	エルボ	—	—	—	—	—	—
			直 管	—	—	—	—	—	—

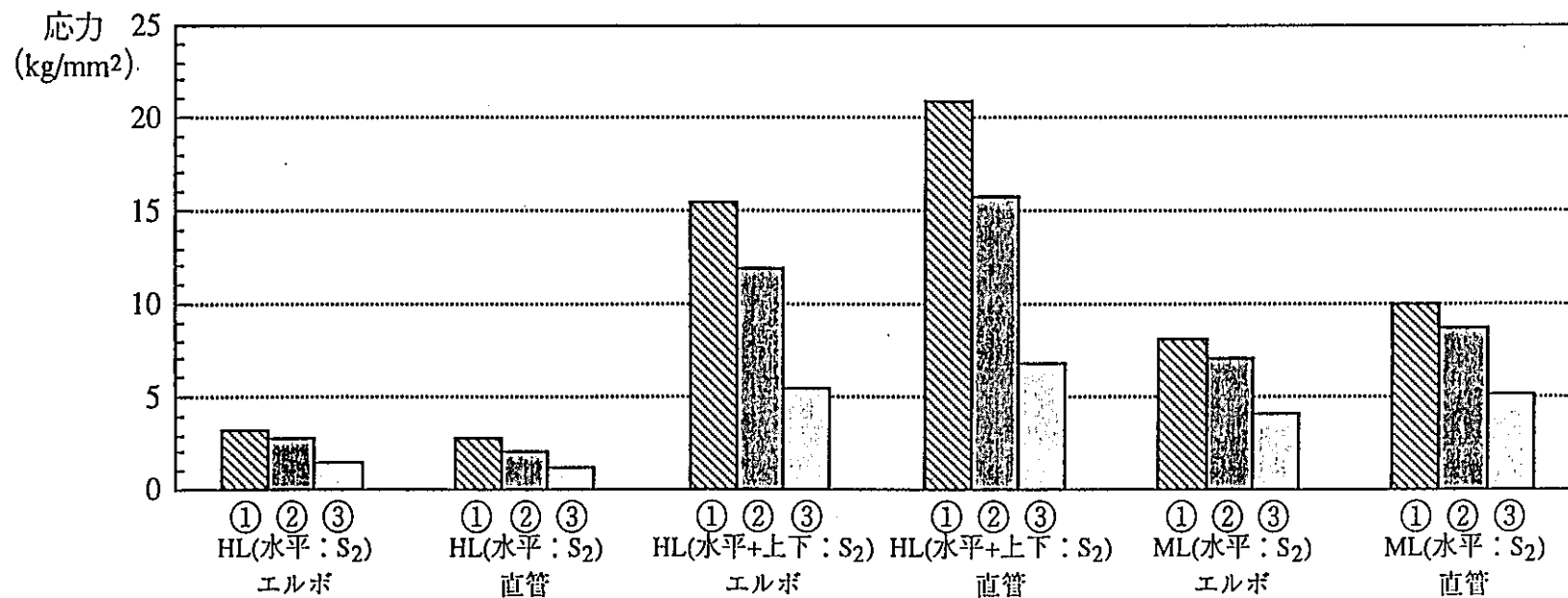
* h = 5% (15%幅広げ) のFRS

(旧) 2.94S₂のとき裕度 = 1(新) 5.88S₂のとき裕度 = 1

表3.5-7 発生応力とFRS (主として減衰率) の関係

(単位: kg/mm²)

FRS		ホットレグ (水平: S ₂)		ホットレグ (水平+上下: S ₂)		ミドルレグ (水平: S ₂)		
	減衰率	幅広げ	エルボ B ₂ ・M/Z	直管 M/Z	エルボ B ₂ ・M/Z	直管 M/Z	エルボ B ₂ ・M/Z	直管 M/Z
①	0.5%	10%	3.29	2.86	15.51	20.95	8.12	9.99
②	1.0%	10%	2.77	2.13	11.98	15.76	7.06	8.69
③	5.0%	15%	1.55	1.12	5.42	6.84	4.17	5.13



4. 非線型解析による評価

4.1 概要

配管の梁モデルを用いた非線形時刻歴振動解析を行って非線形応答を求め、配管が有すると考えられる裕度を評価する。評価項目は、ひずみ評価、疲労評価及び座屈評価である。解析・評価手順を以下に示す。

- 1) 直管(管台との接合部)及びエルボの静的な単調負荷の弾塑性大変形解析(エルボは面内曲げ、直管は曲げ)を行って、荷重-変形-ひずみの関係を作成する。
- 2) 直管及びエルボの変形部の非線形バネを作成する。
- 3) 直管付け根及びエルボ中央に非線形バネを入れた梁モデルを作成する。
- 4) 非線形時刻歴振動解析を行う。
 - HL: 水平面内(水平負荷をレファレンスとし、上下と重畳するケースは参考用として行う。)
 - ML: 水平面内(上下は有意でないので無視する。)
 - ML は配管+IHX+ポンプの連成モデル。IHX 及びポンプは線形挙動とする。
- 5) 非線形バネの変形の時刻歴を求め、それと先に求めた変形-ひずみの関係からひずみの時刻歴を求める。
- 6) 以下の成立性評価を行う。(制限値については後で説明する。)
 - 非線形バネの変形の時刻歴からラチェットひずみを求める。また、変形の最大値から単調負荷によるひずみを求める。両者を加算してひずみ制限値と比較する。
 - ひずみの時刻歴を用いて疲労評価を行う。
 - 変形の最大値から座屈評価を行う。

4.2 配管要素の弾塑性大変形解析

配管要素(エルボ、直管付け根)に曲げ荷重を与えた場合の弾塑性大変形解析を行い、変形部位の荷重-変形-ひずみの関係を求める。

4.2.1 ホットレグ配管(エルボ)

(1) 解析モデル

- モデル形状, 境界条件: 図 4.2.1-1
- FEM モデル: 図 4.2.1-2
- 物性値: 図 4.2.1-3 に示す SUS304 (530°C) における単調負荷の応力-ひずみ関係(平均傾向)を用いる。
- 使用プログラム: ABAQUS

(2) 解析結果

解析は最大荷重発生時の変位の2倍の変位まで負荷した。最大荷重発生時の最大ひずみはエルボ中央断面の真横 ($\theta=90^\circ$ の位置) で発生した。主要な解析結果を以下に示す。

- 最大荷重点における変形図: 図 4.2.1-4
- 荷重点変位と反力の関係: 図 4.2.1-5
- 荷重点変位とひずみの関係: 図 4.2.1-6
- 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値: 表 4.2.1-1

最大荷重(モーメント)は $2.25 \times 10^7 \text{kg}\cdot\text{mm}$ となった。このときの線形計算による応力を求めると次の値になる。

$$B_2 \times M/Z = 31.02 \text{kg}/\text{mm}^2 = 2.18 \sigma_y$$

$$\left(\text{ここで, } B_2 = 1.30 / (tR/r^2)^{2/3} = 7.718, \sigma_y = 1.3S_y = 14.25 \text{ kg}/\text{mm}^2\right)$$

一方, SUS304 製薄肉エルボの曲げ崩壊試験では, 最大荷重による応力は

$$\begin{aligned} B_2 \times M/Z &= 8.07 \times (460 \times 797.1) / 5.797 \times 10^4 \\ &= 51.04 \text{ kg}/\text{mm}^2 = 1.97 \sigma_y \quad (\sigma_y = 25.85 \text{ kg}/\text{mm}^2) \end{aligned}$$

で表される。今回の解析による最大荷重による応力(降伏応力で無次元化した値)と試験結果の差は約1割であり, 解析は(若干高めの感はあるものの)概ね妥当な範囲内にあると考えられる。

4.2.2 ホットレグ配管(直管)

(1) 解析モデル

- モデル形状, 境界条件: 図 4.2.2-1
- FEM モデル: 図 4.2.2-2
- 物性値: 図 4.2.2-3 に示す SUS304 (530°C) における単調負荷

の応力-ひずみ関係(平均傾向)を用いる。

- 使用プログラム: ABAQUS

(2) 解析結果

最大荷重発生時の変位の2倍の変位まで負荷した。最大ひずみは固定端から110mmの位置で発生した。主要な解析結果を以下に示す。

- 最大荷重点における変形図: 図 4.2.2-4
- 荷重点変位と反力の関係 : 図 4.2.2-5
- 荷重点変位とひずみの関係: 図 4.2.2-6
- 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値: 表 4.2.2-1

最大モーメントは $32840 \times 4500 = 1.478 \times 10^8 \text{kg}\cdot\text{mm}$ となった。このときの線形計算による応力は $M/Z = 26.40 \text{kg}/\text{mm}^2 = 1.87 \sigma_y$ であり、崩壊モーメントは $M = 1.87 \sigma_y \times Z$ である。。一方、直管の塑性による曲げ崩壊強度を、Sherman は図 4.2.2-7 に示すように物性と形状の効果を考慮した slenderness limit $\alpha = (E/\sigma_y)/(D/t)$ で整理している。今回の解析の条件では $\alpha = 18.55$ であり、これから図 4.2.2-7 の破線(文献のプロット点から推定した線)を用いて崩壊荷重を求めると、(崩壊モーメント) $= 1.3 \times (1.27 \sigma_y) \times Z = 1.65 \sigma_y \times Z$ となり、今回の解析結果との差は約1割である。従って、(崩壊荷重が若干高めの感はあるものの、)解析は概ね妥当な範囲内にあると考えられる。(なお、SUS304 製薄肉直管の曲げ崩壊試験では、最大荷重による応力は $M/Z = 1.55 \sigma_y$ であり、今回の解析による値はこれより約2割大きい。但し、直管の曲げ崩壊強度は、物性と形状の効果をより汎用性のある形で表した上記の slenderness limit に基づいて評価する方が適切であると考ええる。)

4.2.3 ミドルレグ配管(エルボ)

(1) 解析モデル

- モデル形状, 境界条件: 図 4.2.3-1
- FEM モデル: 図 4.2.3-2
- 物性値: 図 4.2.3-3 に示す SUS304 (380°C) における単調負荷の応力-ひずみ関係(平均傾向)を用いる。
- 使用プログラム: ABAQUS

(2) 解析結果

最大荷重発生時の変位の2倍の変位まで負荷した。最大ひずみはエルボ中央断面

の真横($\theta = 90^\circ$ の位置)で発生した。主要な結果を以下に示す。

- 最大荷重点における変形図: 図 4.2.3-4
- 荷重点変位と反力の関係 : 図 4.2.3-5
- 荷重点変位とひずみの関係: 図 4.2.3-6
- 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値: 表 4.2.3-1

最大荷重(モーメント)は $2.80 \times 10^7 \text{kg}\cdot\text{mm}$ となった。このときの線形計算による応力を求めると次の値になる。

$$B_2 \times M/Z = 5.597 \times M/Z = 29.51 \text{kg}/\text{mm}^2 = 1.88 \sigma_y$$

$$\left(\text{ここで, } B_2 = 1.30 / (tR/r^2)^{2/3}, \sigma_y = 1.27 S_y = 15.67 \text{ kg}/\text{mm}^2 \right)$$

一方, SUS304 製薄肉エルボの曲げ崩壊試験では, 最大荷重による応力は

$$B_2 \times M/Z = 1.97 \sigma_y$$

である。今回の解析による最大荷重による応力(降伏応力で無次元化した値)と試験結果の差は約 5% であり, 解析は概ね妥当な範囲内にあると考えられる。

4.2.4 ミドルレグ配管(直管)

(1) 解析モデル

- モデル形状, 境界条件: 図 4.2.4-1
- FEM モデル: 図 4.2.4-2
- 物性値: 図 4.2.4-3 に示す SUS304 (380°C) における単調負荷の応力-ひずみ関係(平均傾向)を用いる。
- 使用プログラム: ABAQUS

(2) 解析結果

最大荷重発生時の変位の2倍の変位まで負荷した。最大ひずみは固定端から 110mm の位置で発生した。主要な結果を以下に示す。

- 最大荷重点における変形図: 図 4.2.4-4
- 荷重点変位と反力の関係: 図 4.2.4-5
- 荷重点変位とひずみの関係: 図 4.2.4-6
- 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値: 表 4.2.4-1

最大モーメントは $35750 \times 4500 = 1.609 \times 10^8 \text{kg}\cdot\text{mm}$ となった。このときの線形計算による応力は $M/Z = 28.74 \text{kg}/\text{mm}^2 = 1.83 \sigma_y$ であり, 崩壊モーメントは $M = 1.83 \sigma_y \times Z$ である。一方, 4.2.1 で述べた Sherman の slenderness limit $\alpha = (E/\sigma_y)/(D/t)$ は, ミドルレグ

配管の条件では $\alpha=18.78$ である。図 4.2.2-7 の破線(文献のプロット点から推定した線)を用いて崩壊荷重を求めると、(崩壊モーメント) $=1.3 \times (1.27 \sigma_y) \times Z = 1.65 \sigma_y \times Z$ となり、今回の解析結果との差は約 3% でしかない。従って、解析は概ね妥当な範囲内にあると考えられる。

4.3 非線形時刻歴振動解析モデル及び地震入力条件

4.3.1 非線形時刻歴振動解析モデル

(1) ホットレグ配管の解析モデル

(a) モデル概要

ホットレグ配管の非線形時刻歴振動解析モデルを図 4.3-1 に、要素分割を図 4.3-2 に示す。図 4.3-1 のモデルと線形振動解析で用いた図 3.3-1 のモデルとの違いを以下に示す。

- 水平管の付け根に直管の塑性曲げ変形を表す非線形回転バネ K2 を入れた。
- エルボ全体の曲げ変形を表す非線形回転バネ K3 をエルボ中央に入れた。エルボの変形は全てこのバネで表すため、バネ以外のエルボは剛とした。

(b) 非線形バネ特性

曲げを受ける直管付け根の非線形回転バネの定義を図 4.3-3 に示す。4.2.2 で行った 3次元シェルモデルによる弾塑性大変形解析では、負荷位置での変位と荷重(反力)の関係が得られている。これを図 4.3-3 の定義に従い直管付け根のモーメントと塑性による回転変形の関係に変換して入力した。変換したバネ特性を図 4.3-4 に示す。

エルボ全体の変形を表す非線形バネの特性を図 4.3-5 に示す。

また、モーメントと回転変形の関係において、最大荷重を超えた領域(モーメントと回転変形の関係が右下がりになる領域)については、直管及びエルボともに、図 4.3-4 及び図 4.3-5 に示すように傾きが零となるように入力した。このようにしたのは、モーメントと回転変形の関係が負であると解析の収束性が非常に悪く、現実的に解析を進めることができなくなったためである。このような扱いは保守的ではないが、右下がりの程度が比較的小さいこと及び地震による振動挙動は変位制御型に近い性格を持つと言われていることから、非保守的となる程度は比較的小さいと推定する。

(c) 非線形バネのモデル化方法

非線形バネの挙動を表すために、長さ 1mm の極く短いビーム要素を設けて、この要

素にモーメント vs 回転変形の非線形特性を与えた。

(2) ミドルレグ配管の解析モデル

ミドルレグ配管の非線形時刻歴振動解析モデルを図 4.3-6 に、要素分割を図 4.3-7 に示す。モデル化の考え方はホットレグ配管の場合と同様である。直管付け根の非線形回転バネの特性を図 4.3-8 に、また、エルボの非線形回転バネの特性を図 4.3-9 に示す。

4.3.2 地震入力条件

(1) ホットレグ配管

付録-A で幅広げ無し of FRS を用いた床応答解析・評価を行っている。ここでは、この解析・評価結果を基に地震入力条件を設定する。

水平地震のみを与えた場合のホットレグ配管の BDS による評価結果を表 A-22 に示す。S2 地震時の直管の座屈評価がクリティカルであり、 $3.627 \times S2$ の地震入力を与えたときに BDS の裕度が 1.0 となる。

また、水平と上下地震を同時に与えた場合の評価結果を表 A-23 に示す。この場合も S2 地震時の直管の座屈評価がクリティカルであり、 $0.499 \times S2$ の地震入力を与えたときに BDS の裕度が 1.0 となる。

ここでは、以上の解析・評価結果を参考にして、以下の4ケースの非線形時刻歴振動解析を行う。条件設定の考え方を以下に示す。

- ✓ ケース HL-H-20 は、非線形バネの最大変形が荷重-変位特性の最大荷重点の変形量に近い値になるように設定した。
- ✓ ケース HL-H-5 及びケース HL-H-10 は、ケース HL-H-20 と荷重 0 との間を内挿できるように条件を設定した。
- ✓ ケース HL-HV-5 は水平+上下地震を同時に与えた場合であって、ケース HL-H-5 に相当する厳しさの条件として設定した。

ホットレグ配管の解析ケース

解析ケース	加振方向	地震の大きさ
ケース HL-H-5	水平	$5 \times S_H (18.14 \times S_2)$
ケース HL-H-10	水平	$10 \times S_H (36.27 \times S_2)$
ケース HL-H-20	水平	$20 \times S_H (72.54 \times S_2)$
ケース HL-HV-5	水平+上下	$5 \times (S_H + S_V) (2.5 \times S_2)$

S_H : BDS で裕度が 1.0 となる場合の水平地震入力(ホットレグ配管の場合は

$$S_H = 3.627 \times S_2)$$

$S_H + S_V$: BDS で裕度が 1.0 となる場合の(水平+上下)地震入力(ホットレグ配管の

$$\text{場合は } S_H + S_V = 0.499 \times S_2)$$

(2) ミドルレグ配管

ホットレグ配管の場合と同様に、付録-A で幅広げ無しの FRS を用いた床応答解析・評価を行っており、この解析・評価結果を基に地震入力条件を設定する。

水平地震のみを与えた場合のミドルレグ配管の BDS による評価結果を表 A-22 に示す。S2 地震時の直管の座屈評価がクリティカルであり、 $1.974 \times S_2$ の地震入力を与えたときに BDS の裕度が 1.0 となる。

ここでは、以上の解析・評価結果を参考にして、以下の3ケースの非線形時刻歴振動解析を行う。条件設定の考え方は以下の通りである。

- ✓ ケース ML-H-10 は、非線形バネの最大変形が荷重-変位特性の最大荷重点の変形量に近い値になるように設定した。
- ✓ ケース ML-H-5 及びケース ML-H-7.5 は、ケース ML-H-10 と荷重 0 との間を内挿できるように条件を設定した。

ミドルレグ配管の解析ケース

解析ケース	加振方向	地震の大きさ
ケース ML-H-5	水平	$5 \times S_H (9.87 \times S_2)$
ケース ML-H-7.5	水平	$10 \times S_H (14.81 \times S_2)$
ケース ML-H-10	水平	$20 \times S_H (19.74 \times S_2)$

S_H : BDS で裕度が 1.0 となる場合の水平地震入力(ミドルレグ配管の場合は

$$S_H = 1.974 \times S_2)$$

4.4 ホットレグ配管の非線形時刻歴振動解析

4.4.1 ケース HL-H-5 の解析結果

- 鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位: 図 4.4.1-1 (最大変位:95mm)
- 鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位: 図 4.4.1-2 (最大変位:51mm)
- エルボの非線形バネ K3 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.1-3 (最大変形: 2.33×10^{-2} rad)
- 水平管付け根の非線形バネ K2 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.1-4 (最大変形: 3.35×10^{-3} rad)
- 非線形バネ K3 及び K2 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.4.1-5

図 4.4.1-4 の下段に示す直管付け根の回転変形履歴は異様な印象を与えるが、これはここでの非線形バネ特性がモーメント vs 塑性変形の関係を表しているためである。(即ち、弾性での振動挙動はこの図には現れず、塑性変形量の変化があった場合に初めて図に現れるためである。)以下のケースにおける直管付け根の回転変形の時刻歴も同様である。

同図より、量は大きくないが永久変形が生じていることが判る。

4.4.2 ケース HL-H-10 の解析結果

- 鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位: 図 4.4.2-1 (最大変位:183mm)
- 鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位: 図 4.4.2-2 (最大変位:96mm)
- エルボの非線形バネ K3 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.2-3 (最大変形: 4.74×10^{-2} rad)
- 水平管付け根の非線形バネ K2 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.2-4 (最大変形: 9.76×10^{-3} rad)
- 非線形バネ K3 及び K2 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.4.2-5

図 4.4.2-4 より、入力地震が大きくなったため永久変形量も大きくなっている様子が窺える。また、エルボにも永久変形が生じていることが図 4.4.2-3 より読み取れる。

4.4.3 ケース HL-H-20 の解析結果

- 鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位: 図 4.4.3-1 (最大変位:371mm)
- 鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位: 図 4.4.3-2 (最大変位:138mm)

- エルボの非線形バネ K3 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.3-3 (最大変形: 8.54×10^{-2} rad)
- 水平管付け根の非線形バネ K2 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.3-4 (最大変形: 1.93×10^{-2} rad)
- 非線形バネ K3 及び K2 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.4.3-5

4.4.4 ケース HL-HV-5 の解析結果

- 鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位: 図 4.4.4-1 (最大変位: 20mm)
- 鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位: 図 4.4.4-2 (最大変位: 49mm)
- エルボの非線形バネ K3 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.4-3 (最大変形: 1.14×10^{-2} rad)
- 水平管付け根の非線形バネ K2 のモーメント及び回転変形: 図 4.4.4-4 (最大変形: 3.08×10^{-3} rad)
- 非線形バネ K3 及び K2 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.4.4-5

加振方向は異なるが、水平管付け根の荷重レベルがケース HL-H-5 と同等であるため、ここでの変形量も概ね等しくなっている。

4.5 ミドルレグ配管の非線形時刻歴振動解析

4.5.1 ケース ML-H-5 の解析結果

- 水平管中央の水平方向の加速度及び変位: 図 4.5.1-1 (最大変位: 147mm)
- 水平管中央の上下方向の加速度及び変位: 図 4.5.1-2 (最大変位: 2.5mm)
- IHX 側エルボの非線形バネ K8 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.1-3 (最大変形: 3.86×10^{-2} rad)
- ポンプ側エルボの非線形バネ K6 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.1-4 (最大変形: 4.07×10^{-2} rad)
- IHX 側鉛直管付け根の非線形バネ K7 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.1-5 (最大変形: 1.89×10^{-2} rad)
- ポンプ側鉛直管付け根の非線形バネ K5 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.1-6 (最大変形: 2.25×10^{-2} rad)

- 非線形バネ K8 及び K6 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.1-7
- 非線形バネ K7 及び K5 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.1-8

直管付け根の発生応力をホットレグ配管のケース HL-H-5 と概ね同等としているにも拘わらず、ミドルレグ配管を対象とした本ケースの変形量はホットレグ配管の場合の 6 倍程度と大きい。

ケース HL-H-5 → 直管付け根の最大変形量: 3.35×10^{-3} rad

ケース ML-H-5 → 直管付け根の最大変形量: 2.25×10^{-2} rad

ホットレグ配管よりもミドルレグ配管の方が、振動の中心位置の移動量が相当に大きい。これも最大変形量を大きくしている一因である。以降のケースを見ると、振動の中心位置の移動量は、地震入力レベルが大きくなるにつれて大きくなっている。

4.5.2 ケース ML-H-5 の解析結果

- 水平管中央の水平方向の加速度及び変位: 図 4.5.2-1 (最大変位: 213mm)
- 水平管中央の上下方向の加速度及び変位: 図 4.5.2-2 (最大変位: 3.8mm)
- IHX 側エルボの非線形バネ K8 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.2-3 (最大変形: 5.60×10^{-2} rad)
- ポンプ側エルボの非線形バネ K6 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.2-4 (最大変形: 6.11×10^{-2} rad)
- IHX 側鉛直管付け根の非線形バネ K7 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.2-5 (最大変形: 3.31×10^{-2} rad)
- ポンプ側鉛直管付け根の非線形バネ K5 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.2-6 (最大変形: 3.94×10^{-2} rad)
- 非線形バネ K8 及び K6 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.2-7
- 非線形バネ K7 及び K5 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.2-8

4.5.3 ケース ML-H-5 の解析結果

- 水平管中央の水平方向の加速度及び変位: 図 4.5.3-1 (最大変位: 432mm)
- 水平管中央の上下方向の加速度及び変位: 図 4.5.3-2 (最大変位: 4.8mm)
- IHX 側エルボの非線形バネ K8 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.3-3 (最大変形: 1.19×10^{-2} rad)
- ポンプ側エルボの非線形バネ K6 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.3-4 (最大

- 変形: $1.29 \times 10^{-2} \text{rad}$)
- IHX 側鉛直管付け根の非線形バネ K7 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.3-5
(最大変形: $8.74 \times 10^{-2} \text{rad}$)
 - ポンプ側鉛直管付け根の非線形バネ K5 のモーメント及び回転変形: 図 4.5.3-6
(最大変形: $9.89 \times 10^{-2} \text{rad}$)
 - 非線形バネ K8 及び K6 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.3-7
 - 非線形バネ K7 及び K5 のモーメント vs 回転変形のヒステリシス: 図 4.5.3-8

4.6 強度評価

4.6.1 評価の方法

(1) ひずみ評価

発生ひずみはラチェットひずみと単調負荷によるひずみの和として定める。ラチェットひずみは、今回の解析で得られた非線形バネの回転変形の時刻歴を回転変形レンジの時刻歴に変換し、それを図 4.6.1-1 及び図 4.6.1-2 のラチェット線図に適用して算出する。これらのラチェット線図は試験結果に基づいて設定したものである。一方、単調負荷によるひずみは、非線形バネの回転変形の最大値を回転変形 vs ひずみの関係に適用して算出する。

$$\text{トータルひずみ: } \varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{R}} + \varepsilon_{\text{mono}}$$

$$\text{ラチェットひずみ: } \varepsilon_{\text{R}} = \sum |\varepsilon_{\text{Ri}}|$$

ε_{Ri} : 回転変形レンジの時刻歴において各回転変形レンジを θ_i とする。各 θ_i 対してラチェット線図から求める1回の負荷サイクルによるラチェットひずみを ε_{Ri} とする。

$$\text{単調負荷によるひずみ: } \varepsilon_{\text{mono}}$$

非線形バネの最大回転変形を回転変形 vs ひずみの関係に適用して求めるひずみ

なお、ラチェットひずみ及び単調負荷によるひずみともに、上記のラチェット線図や 4.3 で求めた回転変形 vs ひずみの関係は(膜+曲げ)ひずみを対象に定義している。一方、ひずみ評価のためには膜ひずみを求める必要がある。そのため、既存のラチェット解析結果及び 4.3 で行った非弾性解析結果から次のように膜ひずみを求めることにした。

- エルボ: 膜ひずみ = (膜 + 曲げ) ひずみ × 0.1
- 直管: 膜ひずみ = (膜 + 曲げ) ひずみ × 0.8

ひずみ制限値については、破断を防止するとの観点から、膜ひずみを15%以下に抑えるものとした。膜ひずみを対象にしたのは、SUS材が曲げで破断することは考えられず(例えば、SUS板を180°折り曲げても破断はしない。)、破断するとすれば膜ひずみが過大になった場合と考えられるためである。15%は、一様伸びの概ね1/2として暫定した。係数1/2は、材質の経年変化や多軸効果を考慮して暫定的に定めたものである。

(2) 疲労評価

各非線形バネの回転変形の時刻歴を回転変形 vs ひずみの関係からひずみの時刻歴に変換し、それをひずみレンジヒストリーに置き換え、疲労曲線に適用して疲労損傷を求める。疲労曲線は、BDS材料強度基準解説にある平均疲労曲線をレファレンスとするが、参考として設計疲労曲線を用いた場合についても評価を行う。

(3) 座屈評価

非線形バネの最大回転変形がモーメント vs 回転変形曲線の最大荷重点における変形以下であれば評価を満足するとして座屈評価を行う。また、参考用として、回転変形の時刻歴中の最大レンジの1/2を発生変形量とした場合についても評価を行う。(後者は、振動の原点が移動する効果を見逃した場合の最大変形量に相当する。)

4.6.2 強度評価

(1) ホットレグ配管

(a) 最大回転変形を時刻歴中の変形量の最大値とする場合の評価

最大回転(角)変形量を時刻歴中の変形量のうちの最大値とした場合の評価結果の一覧を表4.6.2-1に示す。いずれのケースも評価を満足した。また、各ケースについて最大変形量を荷重-変位曲線上にプロットして図4.6.2-1～図4.6.2-4に示す。

水平加振の場合に比較的クリティカルであったのはエルボの座屈評価であり、 $5 \times S_H$ (S_H : BDSで裕度が1.0となる水平地震)の場合に制限値(最大荷重点における角変形量)の22%、 $10 \times S_H$ の場合に制限値の49%、 $20 \times S_H$ の場合に制限値の82%の変形量が発生した。水平管付け根の座屈評価はエルボの2倍前後の裕度がある。一方、(水平+上下)加振($5 \times (S_H + S_V)$)の場合はエルボと水平管付け根の座屈評価が概ね同程度の

裕度(制限値の10%前後)となった。

膜ひずみは3%以下であり、ひずみ評価はいずれのケースも十分に満足している。

疲労評価は、平均疲労曲線(裕度=1.0)を用いた場合には $Df < 1.0$ となった。($20 \times S_H$ の場合でエルボにおいて $Df=0.601$)しかし、設計疲労曲線を用いた場合には、 $5 \times S_H$ の場合で $Df=0.473$, $10 \times S_H$ の場合で $Df=3.63$, $20 \times S_H$ の場合で $Df=11.9$ となった。

(b) 最大回転変形量を最大回転変形レンジの1/2とする場合の評価

この場合の評価結果の一覧を表4.6.2-2に示す。ひずみ評価は表4.6.2-1と大差は無く、疲労評価は同一である。座屈評価は、振動の中心位置の移動を無視しているため、表4.6.2-1の場合よりも発生変形量が約20~30%減少している。従って、表4.6.2-1よりも大きな裕度で評価を満足している。

(2) ミドルレグ配管

(a) 最大回転変形を時刻歴中の変形量の最大値とする場合の評価

評価結果の一覧を表4.6.2-3~表4.6.2-5に示す。入力地震が $5 \times S_H$ (S_H :BDSで裕度が1.0となる水平地震)及び $7.5 \times S_H$ の場合は評価を満足したが、 $10 \times S_H$ の場合はひずみ評価及び座屈評価を満足しなかった。各ケースについて最大変形量を荷重-変位曲線上にプロットして図4.6.2-5~図4.6.2-7に示すが、 $10 \times S_H$ の場合は最大荷重点を超えている。この領域では直管付け根のひずみが急増するため、これらについてはひずみ評価も満足しなくなったものである。

なお、ホットレグ配管の場合はエルボの方が評価が厳しかったが、ミドルレグ配管では直管の方が厳しい評価となった。この理由を以下に示す。

- ミドルレグ配管はU字型配管であり、U字型配管の特色として配管全体の剛性を支配するのは直管の剛性である。エルボには直管が変形した分に相当する変形しか生じない。(例えば、崩壊を生じる場合でも、直管が崩壊してそれが大きく変形しない限りエルボは崩壊しない。エルボだけが大きく変形することはあり得ない。)
- エルボは直管よりも大きな変形吸収能力がある。
- 従って、エルボよりも直管の方が評価が厳しくなる。
- 疲労損傷係数は $10 \times S_H$ の場合でも $Df=0.605$ (直管付け根)である。但し、設計疲労曲線を用いると $7.5 \times S_H$ の場合で $Df=1.13$, $10 \times S_H$ の場合で $Df=6.05$ (いずれも直管付け根)となった。

(b) 最大回転変形量を最大回転変形レンジの 1/2 とする場合の評価

この場合の評価結果の一覧を表 4.6.2-6～表 4.6.2-8 に示す。振動の中心位置の移動を無視しているため、(a)の場合と比べて最大回転変形量が大幅に小さくなっている。(変形が最大となるポンプ側直管付け根について見ると、(a)の場合の 1/5～1/7 に減少している。)その結果、全てのケースにおいて評価を満足した。

4.7 考 察

(1) 塑性による固有振動数の変化

ホットレグ配管の鉛直管下端部及びミドルレグ配管の水平管中央部の水平方向加速度履歴から応答加速度スペクトルを作成した。これを図 4.7-1 及び図 4.7-2 に示す。線形状態における各配管の支配モードの固有周期は、HL:0.102 秒, ML:0.118 秒である。図 4.7-1 及び図 4.7-2 のスペクトルのピークの周期はこれらとほとんど差が無い。塑性が顕著に生じると固有振動数の低下が生じるはずであるが、ピークの周期がほとんど変化していないのは意外であった。但し、ピークより長周期側で幾分応答加速度が大きくなる傾向は見えている。塑性による固有振動数の変化については、解析・試験データの蓄積及び整理方法の検討を行って、今後も知見を深めていく必要がある。

(2) 入力地震の大きさと応答の関係

入力地震とエルボ及び直管付け根の応答変形の間関係を図 4.7-3～図 4.7-6 に示す。ミドルレグ配管のエルボ及び直管は変形の大きいポンプ側を選んだ。エルボの回転変形はエルボ両端の相対角変位である。直管の変形は、最大塑性変形 θ を生じた時のモーメントを M とすると、 $F=M/L=M/4.5\text{m}$ として長さ $L=4.5\text{m}$ の片持ち梁に生じる剪断力 F を求め、この F による片持ち梁の自由端の変位を図 4.3-3 の方法で計算したものである。なお、 $L=4.5\text{m}$ は非線形バネを求める際の静的な弾塑性大変形解析のモデルに合わせた。また、線形計算による変形は付録 A の幅広げ無しの床応答曲線を用いたモーダル床応答解析結果(応答荷重)から梁モデルにより線形的に変形を計算したものである。

図 4.7-3 及び図 4.7-4 のホットレグ配管の場合は、ある入力地震による応答変形が線形計算による変形を下回っており、入力地震が大きく塑性挙動が顕著になるほどその傾向が著しい。これは、塑性のエネルギー吸収によって減衰の効果が顕著に現れるためで

ある。最大荷重点を大きく超えるまで入力地震を大きくしていくと今度は変形が急増する傾向が生じるはずである。

一方、図 4.7-5 及び図 4.7-6 のミドルレグ配管の場合は、変形を時刻歴中の最大変形として定義した白丸は線形計算による値を上回っており、従来と異なる傾向を見せている。この原因を次の(3)で考察する。

(3) ミドルレグ配管で応答が大きくなった原因の推定

(a) 推定(その1)

まず考えられるのは、ホットレグ配管とミドルレグ配管の固有周期の違いによって、床応答曲線との関係で、線形状態(低減衰状態)から塑性状態(高減衰状態)に移った際の応答加速度の変化の仕方が異なるのではないかということである。

これを考察するため、線形状態と高減衰状態(ここでは5%減衰と仮定)における各配管の応答加速度を幅広げ無しの床応答曲線から求めた。これを図 4.7-7 に示す。ホットレグ配管は $h=0.5\%$ から $h=5\%$ となることで応答加速度は約 6 割になる。一方、ミドルレグ配管は $h=1\%$ から $h=5\%$ となることで応答加速度は約 6 割になる。両者の応答加速度の変化は同程度である。

従って、応答加速度の変化の仕方がミドルレグ配管の応答を大きくした原因ではない。

(b) 推定(その2)

次に考えられるのは、配管の形状の違いである。ホットレグ配管は基本的に1質点モデルに近い挙動をする。ミドルレグ配管も全体としては水平管部に質点を有する1質点モデルに近いと言えるが、ポンプ側と IHX 側で鉛直管の長さが異なる。

ミドルレグ配管が水平方向に振れる場合、水平管部の変位を両方の鉛直管の変形で各々吸収することになる。ポンプ側の鉛直管の長さが2857mm, IHX 側は3357mmであり、発生モーメントは長さの2乗に逆比例するため、モーメントに約 1.4 倍 $((3357/2857)^2=1.38)$ の開きが生じる。従って、その分ポンプ側の鉛直管に大きな変形が生じることになる。

但し、この考察はポンプ側の変形が IHX 側の変形より大きくなることを説明しているが、ミドルレグ配管の応答が大きくなることの説明にはならない。

(c) 推定(その3)

最後に考えられるのは、ミドルレグ配管が剛性の高い容器の先端に付いているという

点である。

ポンプ及び IHX の固有周期は 0.058 秒及び 0.065 秒であり、ミドルレグ配管単体の固有周期は 0.104 秒である。ミドルレグ配管の取付部が IHX 及びポンプの先端と考えると、ミドルレグ配管はこれらの容器の応答スペクトルよりも長周期側にある。一方、ホットレグ配管の固有周期は 0.102 秒であり容器据付部の応答スペクトルよりも短周期側にある。この違いが両配管の応答の差を生んだ可能性があると考えられる。(現時点ではこれ以外に原因が考えられない。)

因みに、従来動的応答低減効果を検討してきた機器の固有周期は入力スペクトルよりも短周期側(ホットレグ配管と同じ)であった。しかし、今回のミドルレグ配管のような場合についての非線形応答については、あまり検討が行われていないようである。ASME 基準の改訂を目指した米国の R&D の中で固有振動数の低い配管要素の試験が数体行われている。この試験では、高い固有振動数を有する場合の試験と比べて応答が大きくなり、また高い固有振動数の場合には見られなかった崩壊が発生した。(但し、その原因が固有振動数なのかどうかははっきりしていない。)現時点では単なる推定の域を出ないが、固有周期が入力スペクトルよりも長周期側となる場合は応答が大きくなる可能性があり、注意が必要である。

(4) 各配管の耐震成立性

(a) ホットレグ配管

ホットレグ配管を水平加振する場合は今回のケース HL-H-20(入力地震: $20 \times S_H$)が実力的にも概ね限界である。上下地震との重ね合せを考えると $20 \times (S_H + S_V)$ が限界と考えてよい。一方、 $2.5 \times S_2$ が $5 \times (S_H + S_V)$ に相当するので、限界を S_2 の倍数で表すと(水平+上下)で約 $10 \times S_2$ となる。

なお、ミドルレグ配管の場合にも該当するが、最大応答が荷重-変位曲線の最大荷重点近傍となる状態が、概ね実力的な限界状態である。

(b) ミドルレグ配管

ミドルレグ配管を水平加振する場合は今回のケース ML-H-7.5(入力地震: $7.5 \times S_H$)が実力的にも概ね限界である。これを S_2 の倍数で表すと約 $15 \times S_2$ に相当する。

(5) ASME 新基準と非線形解析結果との比較

幅広げ無しの床応答曲線($h=5\%$)を用いて応答値を求め ASME 新基準で評価した

場合と、非線形時刻歴解析結果との比較を行う。

(a) ホットレグ配管

付録 A の表 A-26 より、水平地震を受ける場合 ASME 新基準では $26.5 \times S_2$ の場合に裕度が 1.0 となる。一方、非線形時刻歴解析に基づく評価で、ひずみが 5% 以下 (ASME ではひずみを 5% 以下に抑えようとしているようである。), 設計疲労曲線で $D_f < 1.0$, 座屈評価で裕度が 1.5 以上となる場合を設計ベースで評価を満足する場合と考える。これを満足するのは、表 4.6.2-1 より、入力地震が $5 \times S_H$ を多少超える程度 ($20 \times S_2$ 程度) である。(疲労評価がクリティカルである。)これと比べて ASME 新基準は若干評価が甘いとも言えるが、ここでは ASME で規定している床応答曲線の 15% 幅広げを無視しており、これを考慮すると ASME 新基準は概ね非線形時刻歴解析ベースの評価に対応していると言える。

(水平+上下)地震を受ける場合は、付録 A の表 A-27 より、線形解析ベースでは $3.06 \times S_2$ の時に ASME 新基準で裕度が 1.0 となる。一方、 $5 \times (S_H + S_V)$ ($2.5 \times S_2$ に相当) の場合の非線形時刻歴解析に基づく評価では上記の制限値を十分に満足している。これから $3.06 \times S_2$ の時には非線形時刻歴解析を行えば評価は満足できると考えられる。従って、この場合は ASME 新基準は幾分保守的な評価になっていると言える。

(b) ミドルレグ配管

付録 A の表 A-26 より、水平地震を受ける場合 ASME 新基準では $16.1 \times S_2$ の場合に裕度が 1.0 となる。一方、非線形時刻歴解析に基づく評価で、上記の制限値を満足するのは、表 4.6.2-1 より、入力地震が $5 \times S_H$ を多少超える程度 ($10 \times S_2$ 程度) である。(ひずみ評価がクリティカルである。)これと比べて ASME 新基準は若干評価が甘いとも言えるが、床応答曲線の 15% 幅広げの効果を考慮すると ASME 新基準は概ね非線形時刻歴解析ベースの評価に対応していると言える。

4.8 結論

ホットレグ配管及びミドルレグ配管を模擬したモデルを用いて非線形時刻歴振動解析を行い、以下の結論を得た。

- a) ホットレグ配管の実力としての耐震限界は、水平地震を受ける場合は $20 \times S_H$ ($70 \times S_2$ 程度), (水平+上下)地震を受ける場合は $20 \times (S_H + S_V)$ ($10 \times S_2$ 程度) である。
- b) ミドルレグ配管の実力としての耐震限界は $7.5 \times S_H$ ($15 \times S_2$ 程度) である。

- c) ホットレグ配管と比べてミドルレグ配管の方が応答が大きくなる傾向がある。その原因はミドルレグ配管の固有周期が据え付け部であるポンプや IHX の固有周期よりも長いと推定されるが、明確ではない。
- d) ASME 新基準と非線形時刻歴解析ベースの評価とは比較的对応性が良い。

表 4.2.1-1 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値 (HL 配管のエルボ)

HL エルボの荷重と変位、ひずみの関係

回転角 (°)	モーメント (Kg・mm)	相当ひずみ (Mises)(mm/mm)	
		内面	外面
0.120	2.3356E+06	2.6378E-04	2.0388E-04
0.240	4.6391E+06	5.2857E-04	4.0907E-04
0.420	7.9648E+06	1.0177E-03	7.6336E-04
0.690	1.1963E+07	2.2606E-03	1.6384E-03
1.095	1.5547E+07	4.9325E-03	3.5463E-03
1.703	1.8451E+07	9.3914E-03	6.6491E-03
2.614	2.0740E+07	1.6223E-02	1.1513E-02
2.955	2.1256E+07	1.8793E-02	1.3342E-02
3.468	2.1815E+07	2.2668E-02	1.6104E-02
4.237	2.2301E+07	2.8445E-02	2.0276E-02
5.390	2.2524E+07	3.7395E-02	2.6695E-02
5.679	2.2521E+07	3.9577E-02	2.8247E-02
5.967	2.2501E+07	4.1778E-02	2.9805E-02
6.399	2.2444E+07	4.5141E-02	3.2191E-02
7.048	2.2311E+07	5.0188E-02	3.5773E-02
8.021	2.2033E+07	5.7688E-02	4.1055E-02
8.386	2.1914E+07	6.0419E-02	4.2954E-02
8.933	2.1725E+07	6.4482E-02	4.5756E-02
9.755	2.1424E+07	7.0517E-02	4.9861E-02
10.990	2.0950E+07	7.9284E-02	5.5661E-02
12.000	2.0559E+07	8.5985E-02	5.9944E-02

HL エルボのひずみ成分 (最大ひずみ発生点)

回転角 (°)	モーメント (Kg・mm)	内面 (mm/mm)		外面 (mm/mm)	
		軸方向ひずみ	周方向ひずみ	軸方向ひずみ	周方向ひずみ
0.120	2.3356E+06	2.0300E-05	-2.7046E-04	4.0194E-05	2.0137E-04
0.240	4.6391E+06	4.0619E-05	-5.4196E-04	8.0382E-05	4.0409E-04
0.420	7.9648E+06	7.2170E-05	-1.0241E-03	1.4523E-04	7.3808E-04
0.690	1.1963E+07	1.2815E-04	-2.1716E-03	2.6949E-04	1.4756E-03
1.095	1.5547E+07	2.6783E-04	-4.5848E-03	5.1719E-04	3.0250E-03
1.703	1.8451E+07	5.3543E-04	-8.5946E-03	9.3045E-04	5.5093E-03
2.614	2.0740E+07	9.4352E-04	-1.4725E-02	1.5407E-03	9.4080E-03
2.955	2.1256E+07	1.0989E-03	-1.7030E-02	1.7620E-03	1.0876E-02
3.468	2.1815E+07	1.3308E-03	-2.0505E-02	2.0885E-03	1.3096E-02
4.237	2.2301E+07	1.6660E-03	-2.5677E-02	2.5595E-03	1.6464E-02
5.390	2.2524E+07	2.1623E-03	-3.3678E-02	3.2179E-03	2.1677E-02
5.679	2.2521E+07	2.2813E-03	-3.5628E-02	3.3700E-03	2.2941E-02
5.967	2.2501E+07	2.3979E-03	-3.7593E-02	3.5170E-03	2.4214E-02
6.399	2.2444E+07	2.5674E-03	-4.0590E-02	3.7288E-03	2.6170E-02
7.048	2.2311E+07	2.8053E-03	-4.5082E-02	4.0183E-03	2.9122E-02
8.021	2.2033E+07	3.1266E-03	-5.1741E-02	4.3912E-03	3.3505E-02
8.386	2.1914E+07	3.2355E-03	-5.4161E-02	4.5120E-03	3.5087E-02
8.933	2.1725E+07	3.3816E-03	-5.7756E-02	4.6683E-03	3.7433E-02
9.755	2.1424E+07	3.5641E-03	-6.3078E-02	4.8478E-03	4.0898E-02
10.990	2.0950E+07	3.7531E-03	-7.0774E-02	4.9838E-03	4.5853E-02
12.000	2.0559E+07	3.8393E-03	-7.6628E-02	4.9817E-03	4.9562E-02

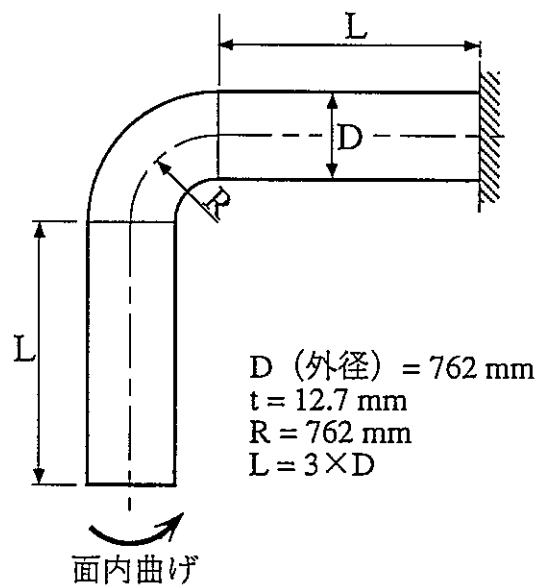
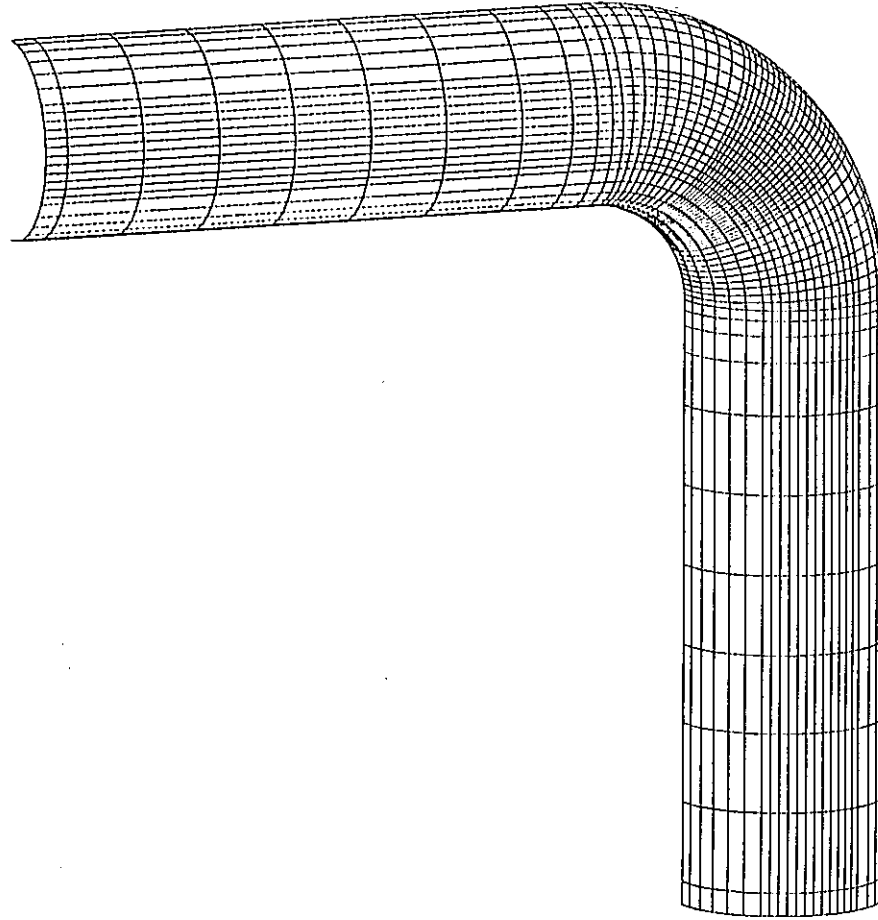
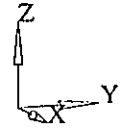


図4.2.1-1 ホットレグ配管（エルボ）の弾塑性大変形解析モデル

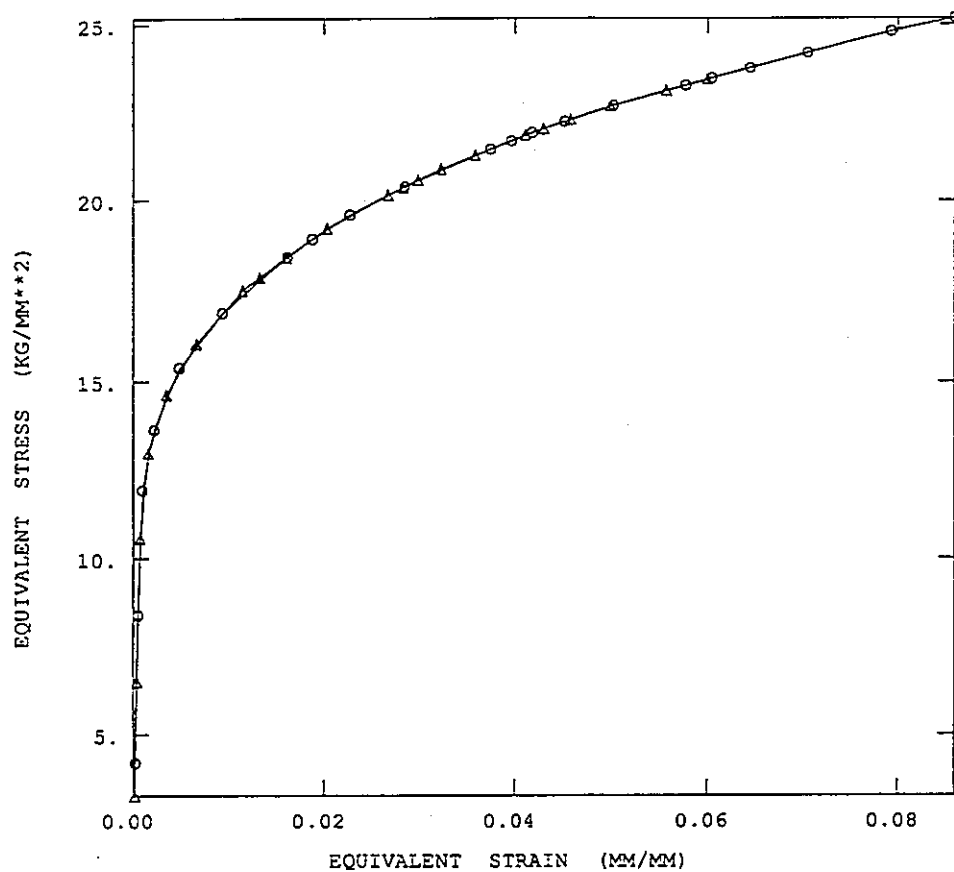
AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 10.000
T = 20.000



$\times 10^3$

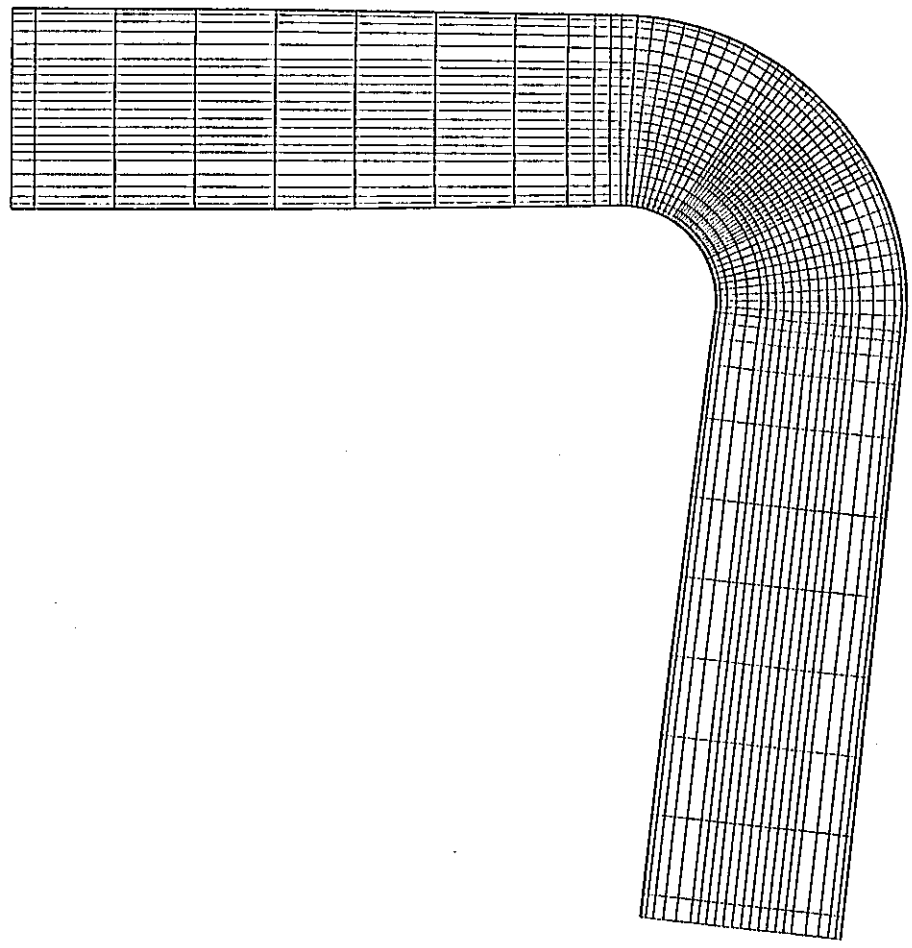
0.2861
GEOM. SCALE []

図 4.2.1-2 弾塑性大変形解析用 FEM モデル (HL 配管のエルボ)

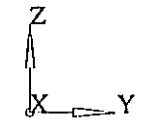


SUS304 STRESS-STRAIN RERATION AT 530 DEG (HL)

図 4.2.1-3 SUS304(530 °C)の応力-ひずみ曲線 (平均傾向線)



AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 0.0
T = 0.0



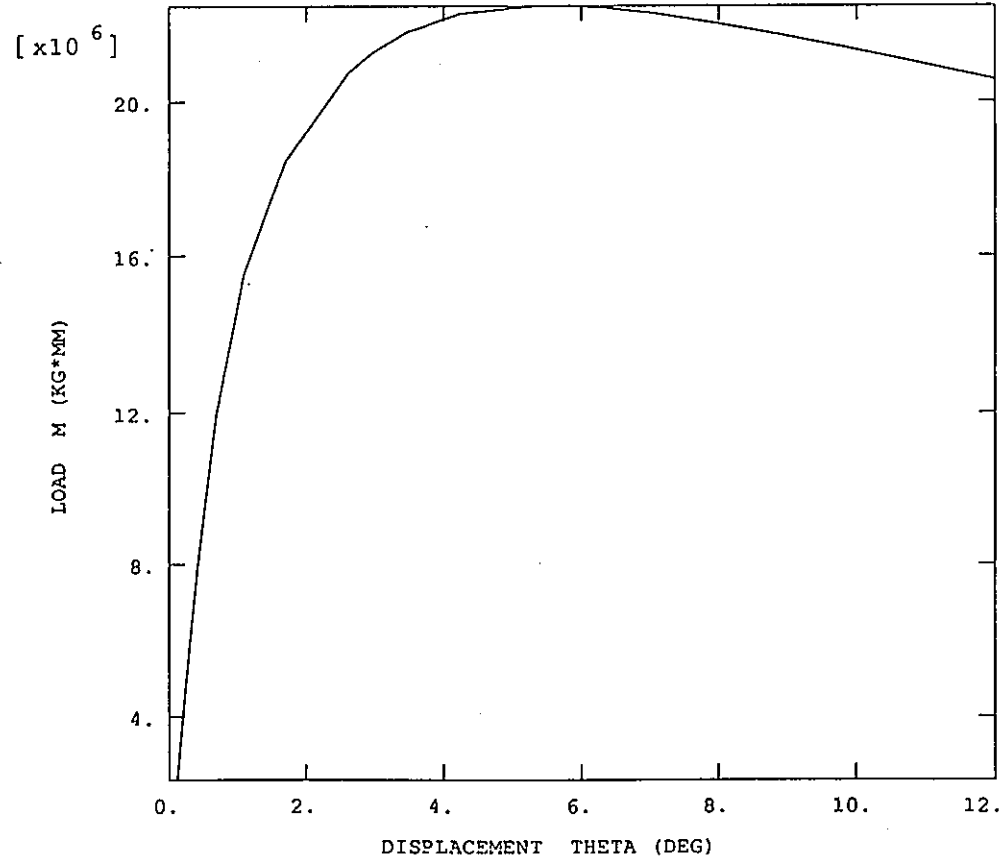
_____ $\times 10^3$
0.2879
DISP. SCALE [_____] $\times 10^3$
0.2886
GEOM. SCALE [_____]

図 4.2.1-4 最大荷重点における変形図 (HL 配管のエルボ)

ABAQUS

— LOAD

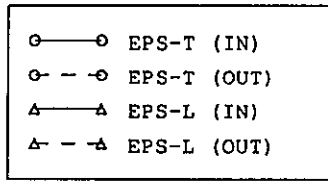
XMIN 1.200E-01
XMAX 1.200E+01
YMIN 2.336E+06
YMAX 2.252E+07



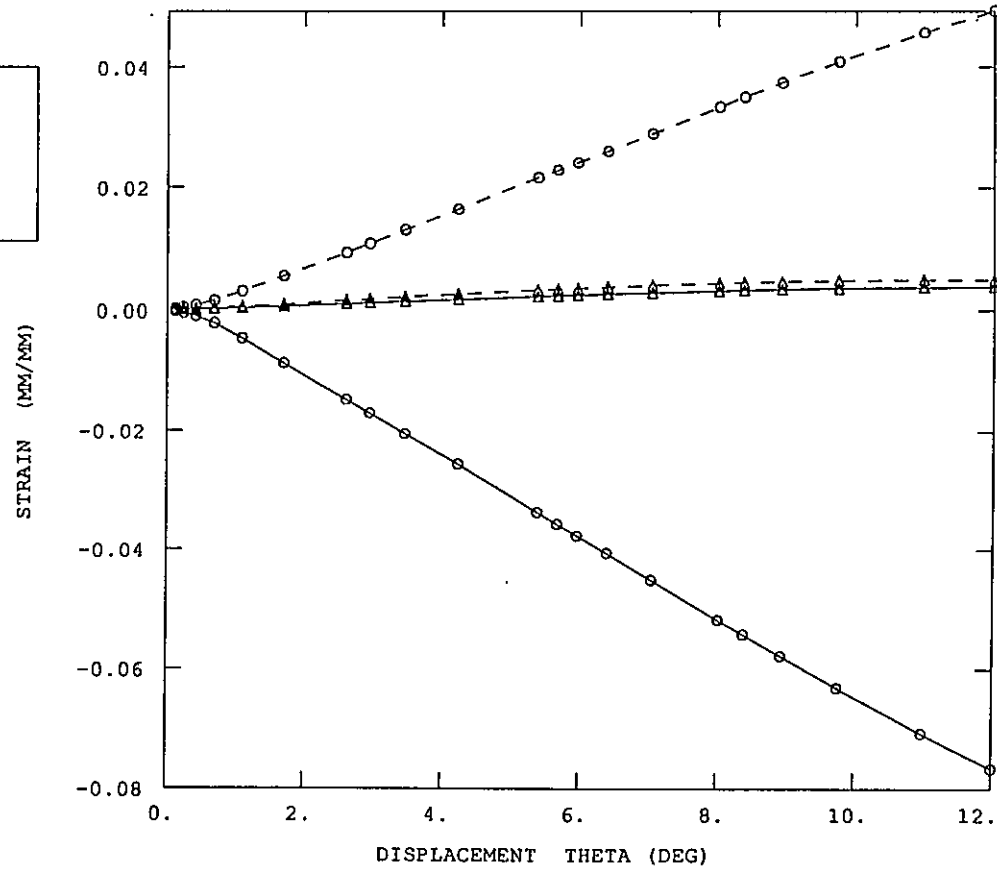
HL ELBOW LOAD:+2M LOAD VS DISP.

図 4.2.1-5 荷重点変位と反力の関係 (HL 配管のエルボ)

ABAQUS



XMIN 1.200E-01
XMAX 1.200E+01
YMIN -7.663E-02
YMAX 4.956E-02



HL ELBOW LOAD:+2M STRAIN VS DISP.

図 4.2.1-6 荷重点変位とひずみの関係 (HL 配管のエルボ)

表 4.2.2-1 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値 (HL 配管の直管)

HL 直管の荷重と変位、ひずみの関係

変位 (mm)	荷重 (Kg)	相当ひずみ (Mises)(mm/mm)	
		内面	外面
4.00	0.4408E+04	2.1885E-04	1.9057E-04
8.00	0.8815E+04	4.3728E-04	3.8031E-04
14.00	1.5173E+04	8.4509E-04	7.1171E-04
23.00	2.0764E+04	2.0126E-03	1.5485E-03
36.50	2.4071E+04	4.3688E-03	3.0915E-03
50.00	2.5931E+04	7.1525E-03	4.7510E-03
63.50	2.7286E+04	1.0430E-02	6.5320E-03
83.75	2.8862E+04	1.6150E-02	9.1813E-03
114.10	3.0673E+04	2.9057E-02	1.3878E-02
125.50	3.1228E+04	3.5332E-02	1.6011E-02
142.60	3.1939E+04	4.8073E-02	2.0104E-02
168.20	3.2611E+04	7.8563E-02	3.0261E-02
193.90	3.2839E+04	0.1125	4.3174E-02
219.50	3.2822E+04	0.1467	5.7876E-02
245.10	3.2591E+04	0.1810	7.4386E-02
270.70	3.2227E+04	0.2136	9.1567E-02
296.40	3.1876E+04	0.2439	0.1087
322.00	3.1559E+04	0.2724	0.1258
347.60	3.1252E+04	0.2995	0.1428
373.30	3.0908E+04	0.3259	0.1600
398.90	3.0566E+04	0.3510	0.1769
400.00	3.0550E+04	0.3520	0.1777

HL 直管のひずみ成分 (最大ひずみ発生点)

変位 (mm)	荷重 (Kg)	内面 (mm/mm)		外面 (mm/mm)	
		軸方向ひずみ	周方向ひずみ	軸方向ひずみ	周方向ひずみ
4.00	0.4408E+04	-2.2070E-04	5.7720E-05	-1.9016E-04	5.9692E-05
8.00	0.8815E+04	-4.4095E-04	1.1547E-04	-3.7944E-04	1.1936E-04
14.00	1.5173E+04	-8.5170E-04	2.4653E-04	-7.0527E-04	2.5739E-04
23.00	2.0764E+04	-2.0216E-03	7.0396E-04	-1.5269E-03	7.3547E-04
36.50	2.4071E+04	-4.3719E-03	1.6520E-03	-3.0370E-03	1.7113E-03
50.00	2.5931E+04	-7.1428E-03	2.7446E-03	-4.6412E-03	2.8445E-03
63.50	2.7286E+04	-1.0399E-02	4.0013E-03	-6.3286E-03	4.1569E-03
83.75	2.8862E+04	-1.6067E-02	6.0934E-03	-8.7052E-03	6.3545E-03
114.10	3.0673E+04	-2.8786E-02	1.0451E-02	-1.2111E-02	1.0954E-02
125.50	3.1228E+04	-3.4954E-02	1.2494E-02	-1.3428E-02	1.3109E-02
142.60	3.1939E+04	-4.7441E-02	1.6489E-02	-1.5176E-02	1.7293E-02
168.20	3.2611E+04	-7.7188E-02	2.5478E-02	-1.5769E-02	2.6604E-02
193.90	3.2839E+04	-0.1103	3.5143E-02	-1.3368E-02	3.6528E-02
219.50	3.2822E+04	-0.1434	4.4587E-02	-8.5130E-03	4.6191E-02
245.10	3.2591E+04	-0.1767	5.3971E-02	-1.5549E-03	5.5724E-02
270.70	3.2227E+04	-0.2083	6.2859E-02	6.6652E-03	6.4712E-02
296.40	3.1876E+04	-0.2377	7.1011E-02	1.5644E-02	7.2923E-02
322.00	3.1559E+04	-0.2652	7.8537E-02	2.5064E-02	8.0500E-02
347.60	3.1252E+04	-0.2915	8.5660E-02	3.4846E-02	8.7669E-02
373.30	3.0908E+04	-0.3170	9.2594E-02	4.5009E-02	9.4676E-02
398.90	3.0566E+04	-0.3412	9.9165E-02	5.5192E-02	0.1013
400.00	3.0550E+04	-0.3422	9.9439E-02	5.5622E-02	0.1016

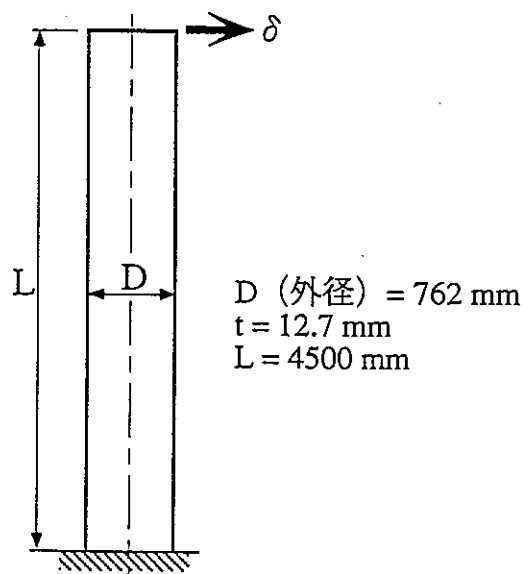


図4.2.2-1 ホットレグ配管（直管）の弾塑性大変形解析モデル

AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 10.000
T = 20.000

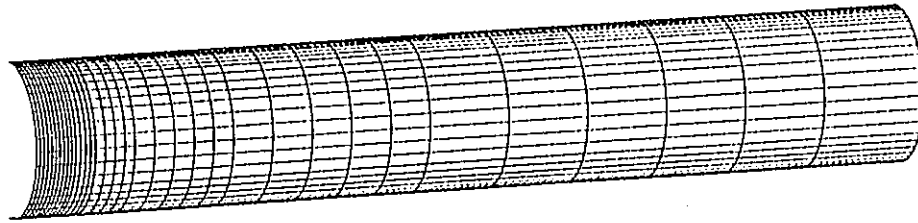
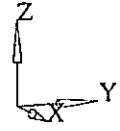
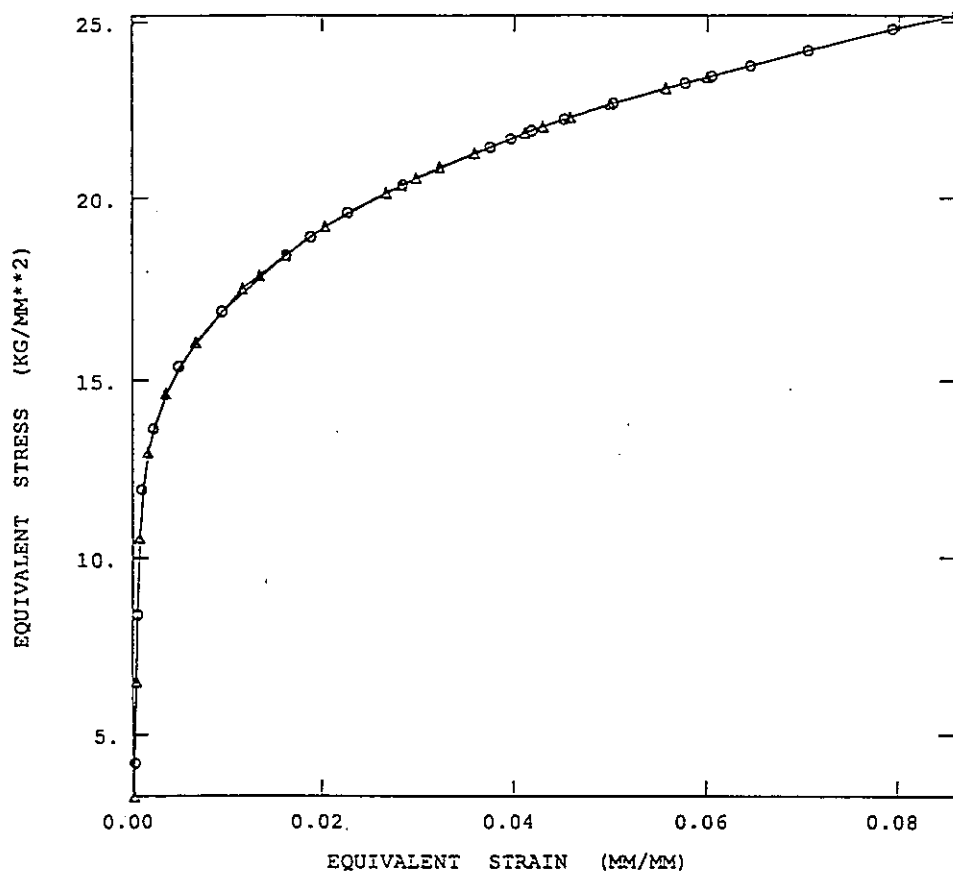


図 4.2.2-2 弾塑性大変形解析用 FEM モデル (HL 配管の直管)

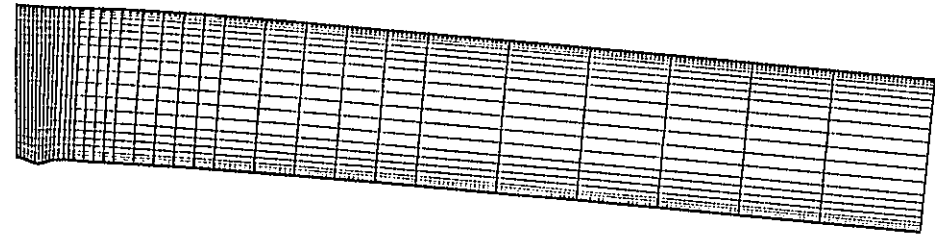
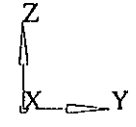
x 10³
0.3668
GEOM. SCALE []



SUS304 STRESS-STRAIN RERATION AT 530 DEG (HL)

図 4.2.2-3 SUS304(530℃)の応力-ひずみ曲線 (平均傾向線)

AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 0.0
T = 0.0



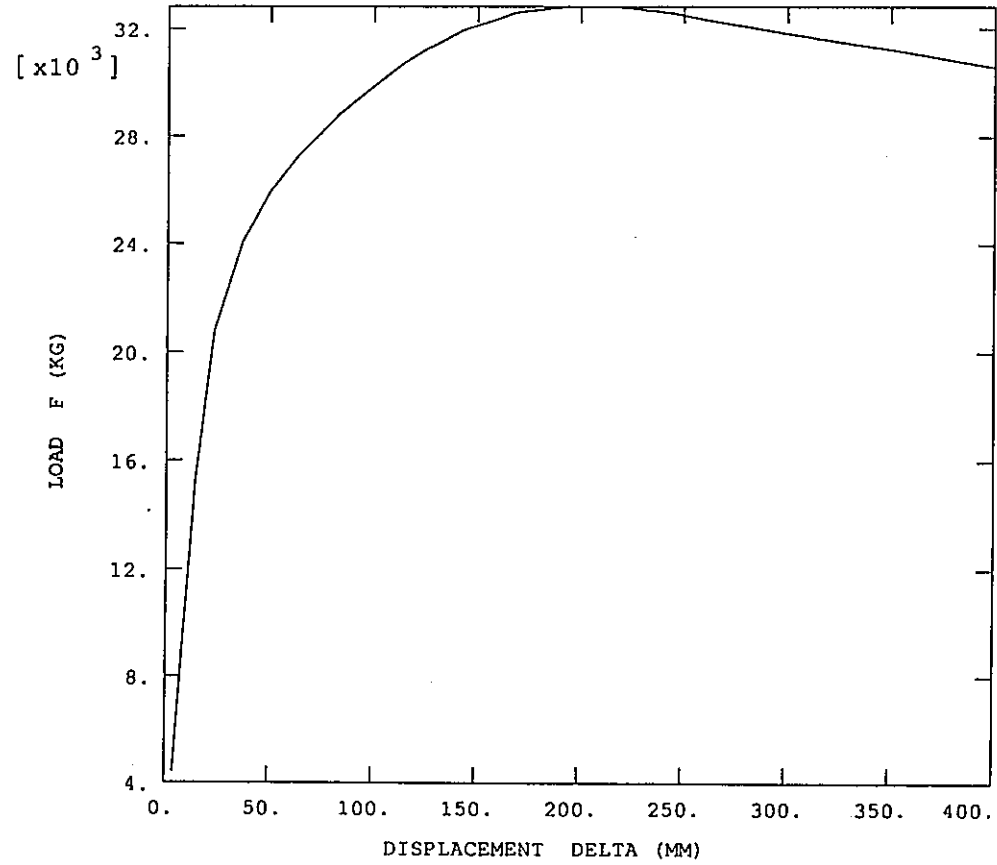
_____ x 10³
0.1713
DISP. SCALE [_____]
x 10³
_____ 0.3787
GEOM. SCALE [_____]

図 4.2.2-4 最大荷重点における変形図 (HL 配管の直管)

ABAQUS

— LOAD

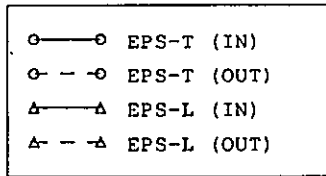
XMIN 4.000E+00
XMAX 4.000E+02
YMIN 4.408E+03
YMAX 3.284E+04



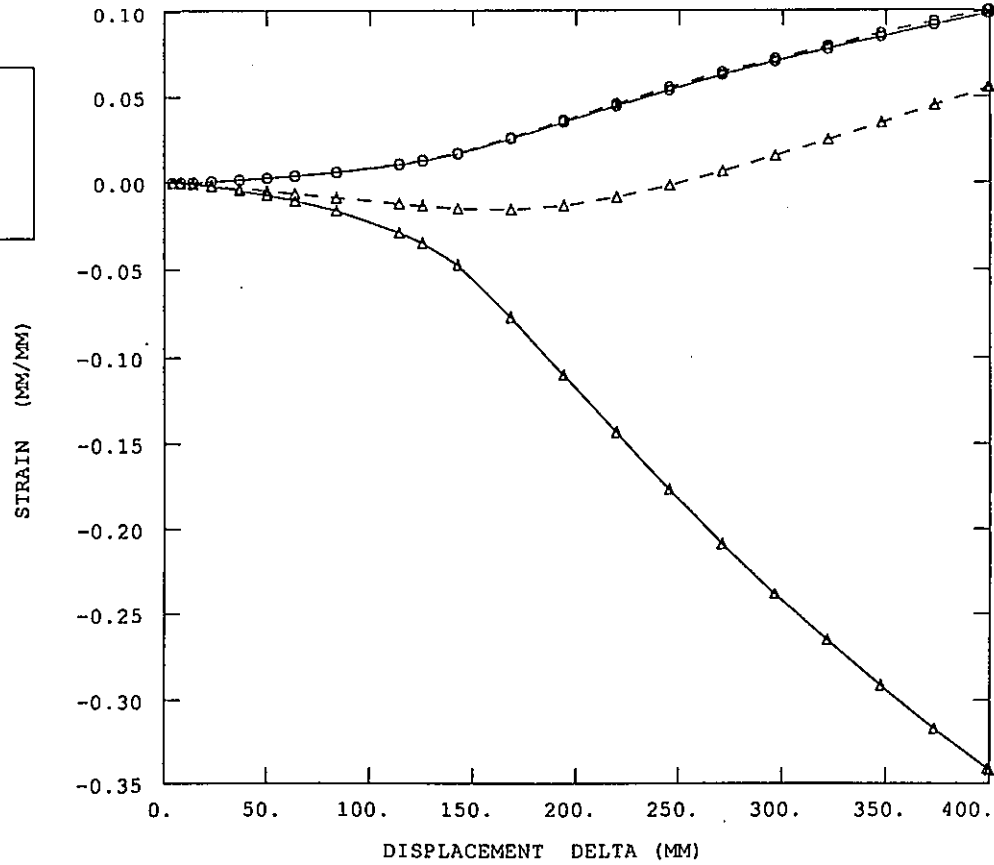
HL STRAIGHT PIPE LOAD:+2H LOAD VS DISP.

図 4.2.2-5 荷重点変位と反力の関係 (HL 配管の直管)

ABAQUS



XMIN 4.000E+00
XMAX 4.000E+02
YMIN -3.422E-01
YMAX 1.016E-01



HL STRAIGHT PIPE LOAD:+2H STRAIN VS DISP.

図 4.2.2-6 荷重点変位とひずみの関係 (HL 配管の直管)

出典 : D.R.Sherman, "Inelastic Flexural Buckling of Cylinders"

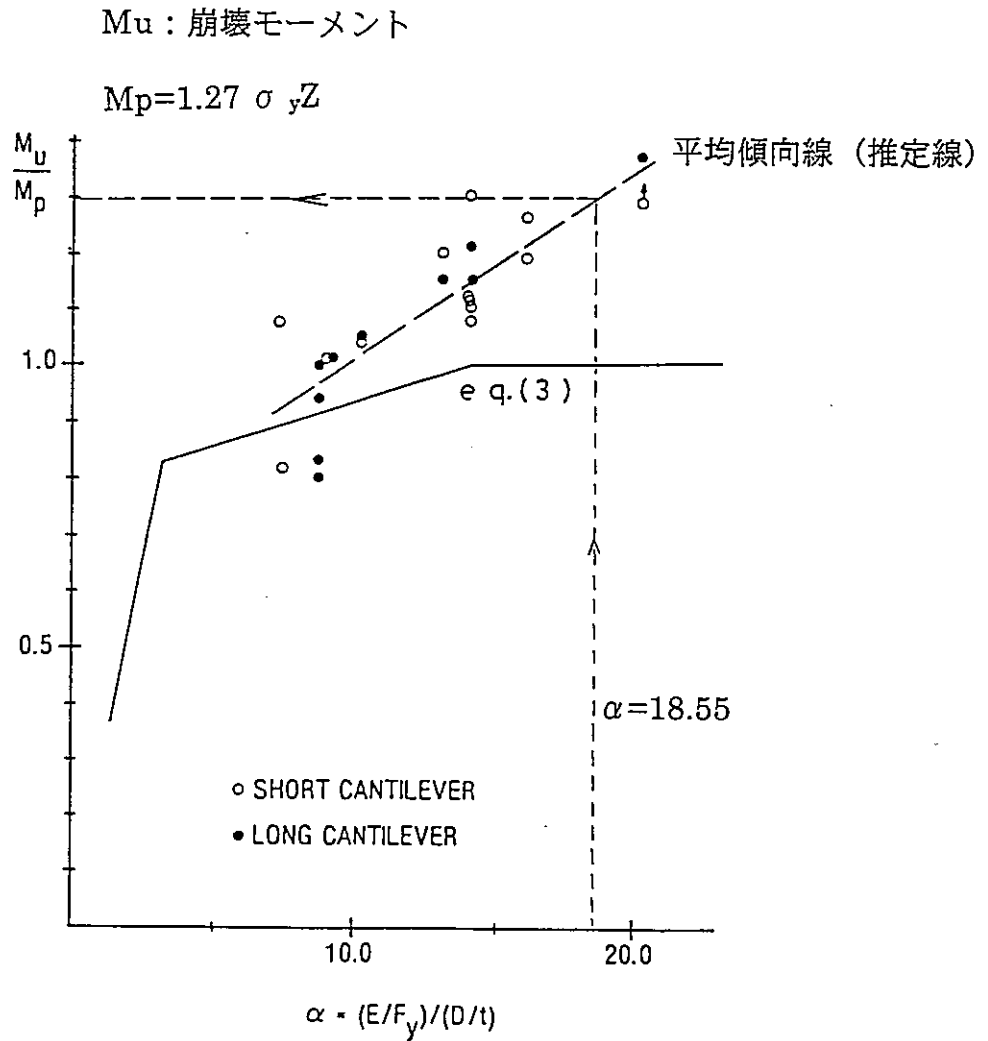


FIG. 7. Ultimate moments in cantilever tests of fabricated pipe.

図 4.2.2-7 slenderness limit : α と崩壊モーメントの関係

表 4.2.3-1 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値 (ML 配管のエルボ)

ML エルボの荷重と変位、ひずみの関係

回転角 (°)	モーメント (Kg・mm)	相当ひずみ (Mises)(mm/mm)	
		内面	外面
0.120	2.5307E+06	2.0578E-04	1.6788E-04
0.240	5.0315E+06	4.1221E-04	3.3658E-04
0.420	8.7135E+06	7.4205E-04	5.9999E-04
0.690	1.3596E+07	1.5042E-03	1.1816E-03
1.095	1.8511E+07	3.2919E-03	2.5484E-03
1.703	2.2548E+07	6.4906E-03	4.8750E-03
2.614	2.5538E+07	1.1508E-02	8.5146E-03
2.955	2.6205E+07	1.3351E-02	9.9065E-03
3.468	2.6931E+07	1.6143E-02	1.2020E-02
4.237	2.7581E+07	2.0303E-02	1.5170E-02
5.390	2.7936E+07	2.6433E-02	1.9921E-02
5.679	2.7950E+07	2.7885E-02	2.1044E-02
5.967	2.7943E+07	2.9345E-02	2.2182E-02
6.399	2.7900E+07	3.1513E-02	2.3880E-02
7.048	2.7770E+07	3.4762E-02	2.6403E-02
8.021	2.7477E+07	3.9522E-02	3.0144E-02
8.386	2.7345E+07	4.1301E-02	3.1553E-02
8.933	2.7128E+07	4.3965E-02	3.3665E-02
9.755	2.6772E+07	4.7849E-02	3.6784E-02
10.990	2.6190E+07	5.3430E-02	4.1321E-02
12.000	2.5691E+07	5.7897E-02	4.4998E-02

ML エルボのひずみ成分 (最大ひずみ発生点)

回転角 (°)	モーメント (Kg・mm)	内面 (mm/mm)		外面 (mm/mm)	
		軸方向ひずみ	周方向ひずみ	軸方向ひずみ	周方向ひずみ
0.120	2.5307E+06	1.2839E-05	-2.1157E-04	2.1997E-05	1.6976E-04
0.240	5.0315E+06	2.5666E-05	-4.2382E-04	4.3946E-05	3.4037E-04
0.420	8.7135E+06	4.5092E-05	-7.5658E-04	7.7481E-05	6.0406E-04
0.690	1.3596E+07	7.6544E-05	-1.4793E-03	1.3568E-04	1.1303E-03
1.095	1.8511E+07	1.5248E-04	-3.1036E-03	2.5134E-04	2.2913E-03
1.703	2.2548E+07	3.3203E-04	-5.9844E-03	4.6675E-04	4.2221E-03
2.614	2.5538E+07	6.1561E-04	-1.0486E-02	7.8237E-04	7.2280E-03
2.955	2.6205E+07	7.2056E-04	-1.2137E-02	8.9584E-04	8.3799E-03
3.468	2.6931E+07	8.7554E-04	-1.4637E-02	1.0625E-03	1.0130E-02
4.237	2.7581E+07	1.0987E-03	-1.8357E-02	1.2989E-03	1.2742E-02
5.390	2.7936E+07	1.4187E-03	-2.3832E-02	1.6310E-03	1.6694E-02
5.679	2.7950E+07	1.4934E-03	-2.5127E-02	1.7082E-03	1.7629E-02
5.967	2.7943E+07	1.5676E-03	-2.6430E-02	1.7843E-03	1.8577E-02
6.399	2.7900E+07	1.6774E-03	-2.8365E-02	1.8952E-03	1.9993E-02
7.048	2.7770E+07	1.8353E-03	-3.1258E-02	2.0542E-03	2.2099E-02
8.021	2.7477E+07	2.0563E-03	-3.5494E-02	2.2771E-03	2.5229E-02
8.386	2.7345E+07	2.1357E-03	-3.7076E-02	2.3571E-03	2.6410E-02
8.933	2.7128E+07	2.2493E-03	-3.9442E-02	2.4717E-03	2.8182E-02
9.755	2.6772E+07	2.4100E-03	-4.2889E-02	2.6332E-03	3.0803E-02
10.990	2.6190E+07	2.6281E-03	-4.7835E-02	2.8548E-03	3.4624E-02
12.000	2.5691E+07	2.7880E-03	-5.1786E-02	3.0206E-03	3.7726E-02

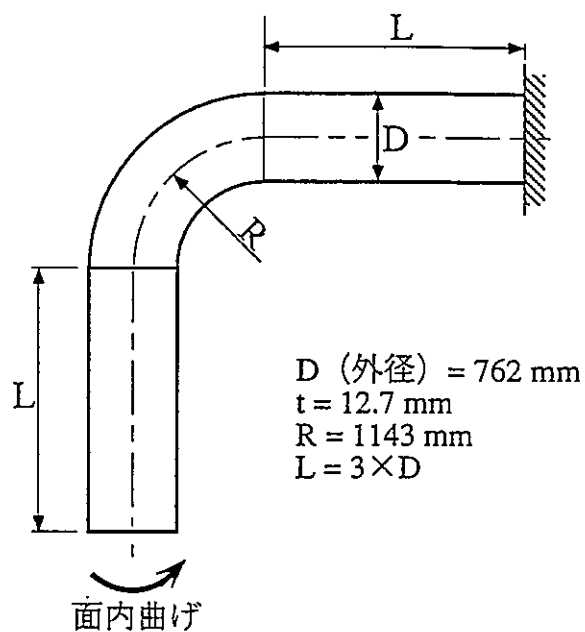


図4.2.3-1 ミドルレグ配管 (エルボ) の弾塑性大変形解析モデル

AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 10.000
T = 20.000

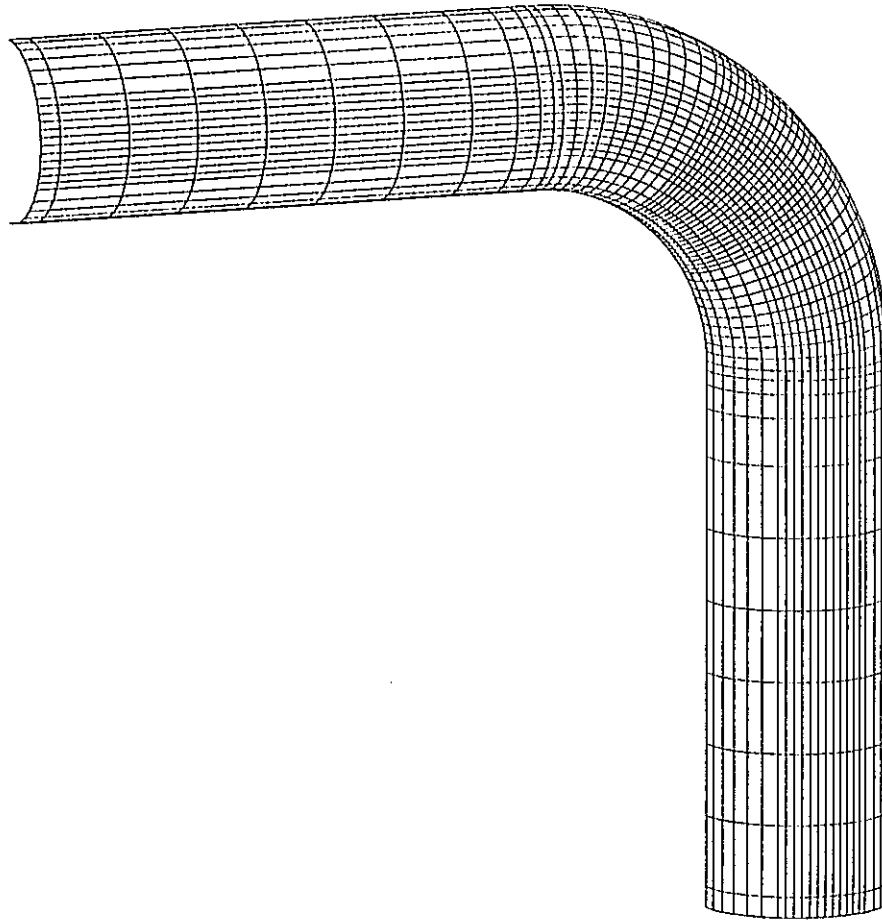
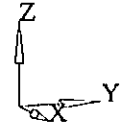
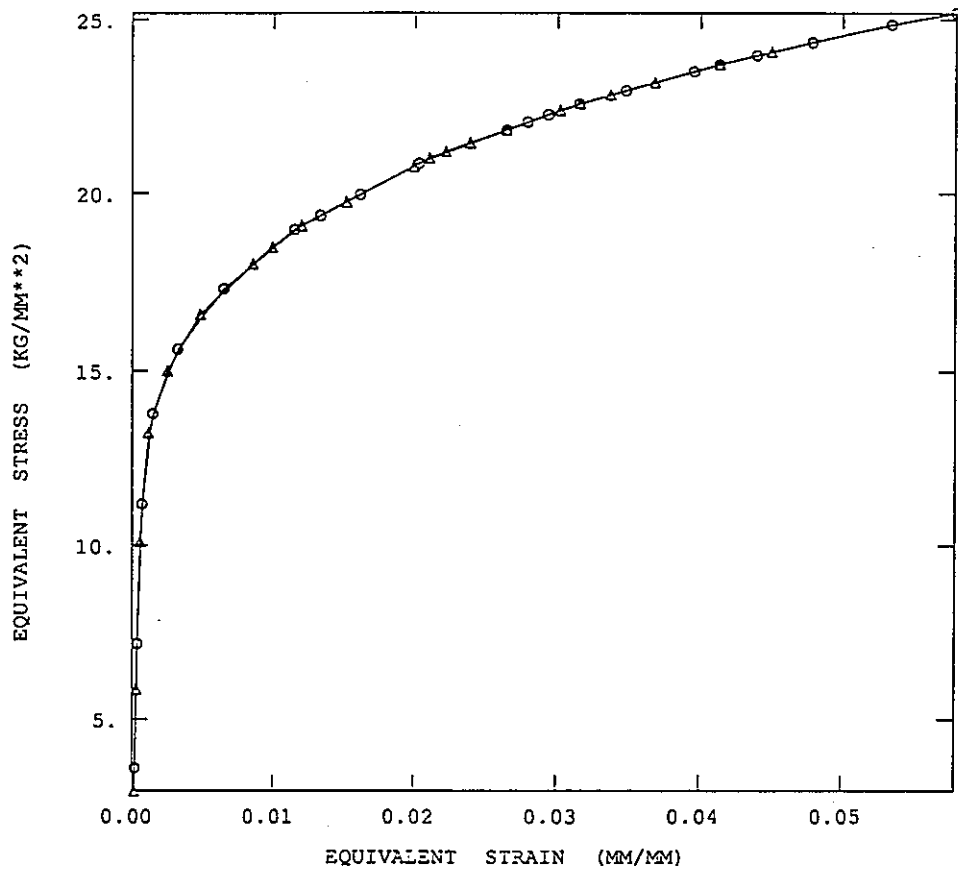


図 4.2.3-2 弾塑性大変形解析用 FEM モデル (ML 配管のエルボ)

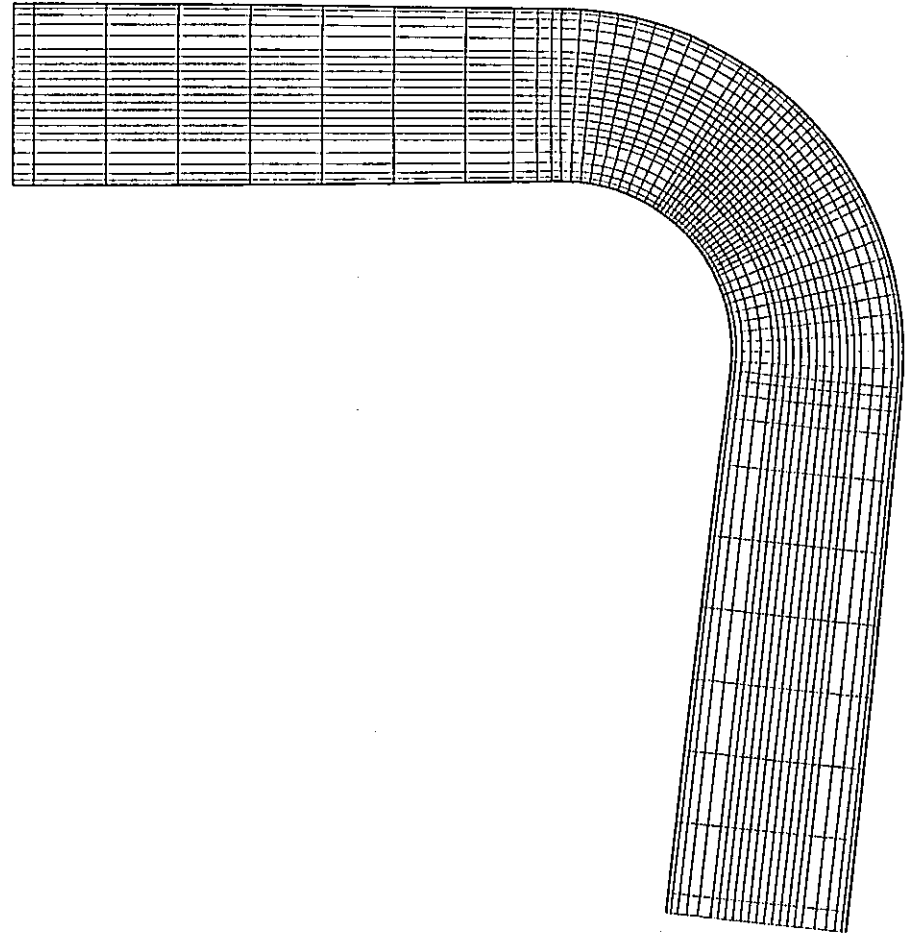
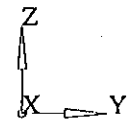
0.3158 x 10³
GEOM. SCALE []



SUS304 STRESS-STRAIN RERATION AT 380 DEG (ML)

図 4.2.3-3 SUS304(380℃)の応力-ひずみ曲線 (平均傾向線)

AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 0.0
T = 0.0



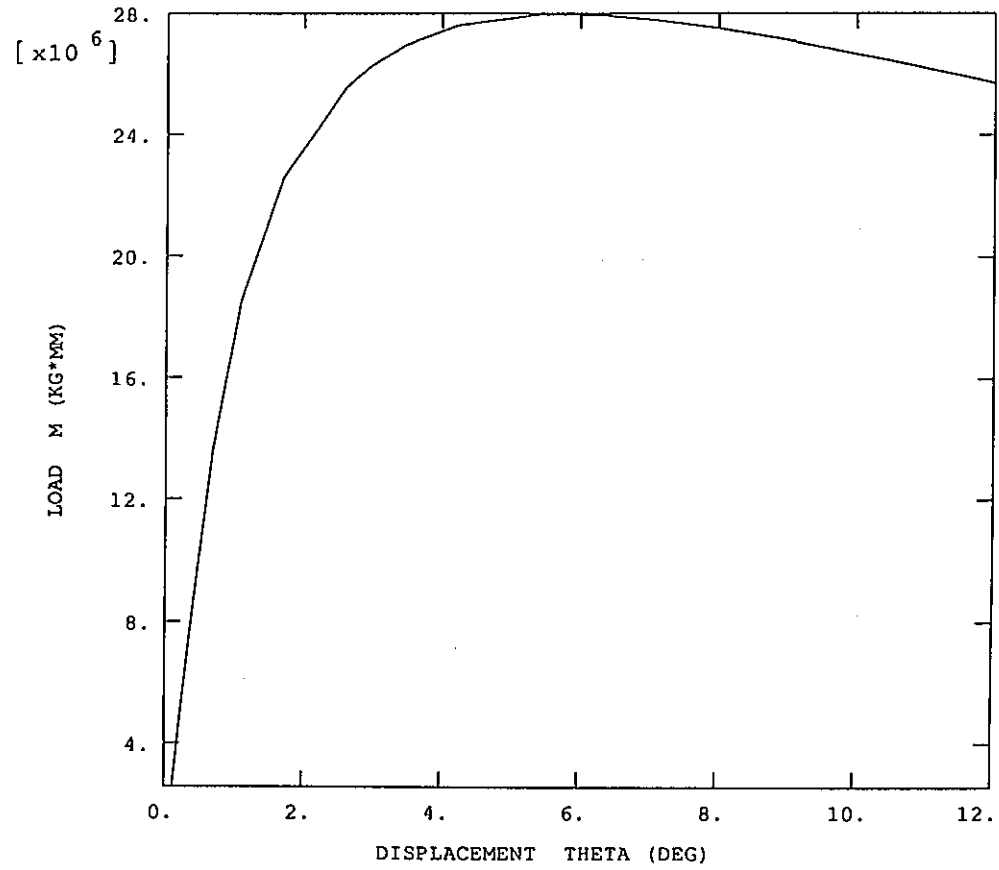
$\times 10^3$
0.3440
DISP. SCALE [$\times 10^3$]
0.3206
GEOM. SCALE []

図 4.2.3-4 最大荷重点における変形図 (ML 配管のエルボ)

ABAQUS

— LOAD

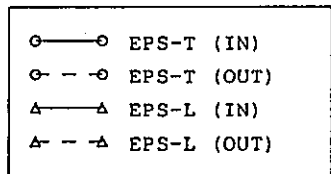
XMIN 1.200E-01
XMAX 1.200E+01
YMIN 2.531E+06
YMAX 2.795E+07



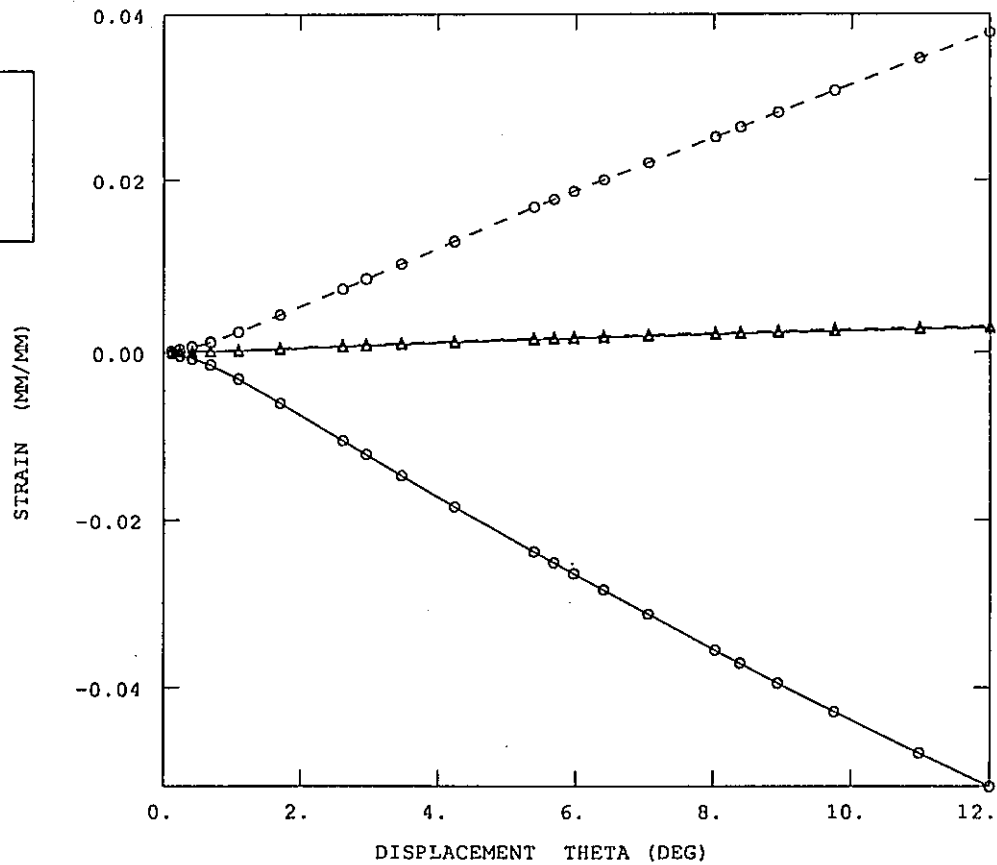
ML ELBOW LOAD:+2M LOAD VS DISP.

图 4.2.3-5 荷重点変位と反力の関係 (ML 配管のエルボ)

ABAQUS



XMIN 1.200E-01
XMAX 1.200E+01
YMIN -5.179E-02
YMAX 3.773E-02



ML ELBOW LOAD:+2M STRAIN VS DISP.

図 4.2.3-6 荷重点変位とひずみの関係 (ML 配管のエルボ)

表 4.2.4-1 荷重点変位-反力-ひずみのデジタル値 (ML 配管の直管)

ML 直管の荷重と変位、ひずみの関係

変位 (mm)	荷重 (Kg)	相当ひずみ (Mises)(mm/mm)	
		内面	外面
4.00	0.4824E+04	2.1835E-04	1.9127E-04
8.00	0.9648E+04	4.3626E-04	3.8170E-04
14.00	1.6469E+04	8.5103E-04	7.1987E-04
23.00	2.2375E+04	2.0140E-03	1.5541E-03
36.50	2.5956E+04	4.3270E-03	3.0762E-03
50.00	2.7994E+04	7.0486E-03	4.7110E-03
63.50	2.9482E+04	1.0264E-02	6.4685E-03
77.00	3.0682E+04	1.3729E-02	8.2032E-03
97.25	3.2177E+04	2.0327E-02	1.0967E-02
127.60	3.3921E+04	3.6062E-02	1.6280E-02
139.00	3.4454E+04	4.3909E-02	1.8829E-02
156.10	3.5095E+04	6.0248E-02	2.4045E-02
173.20	3.5499E+04	8.1293E-02	3.1128E-02
190.30	3.5693E+04	0.1036	3.9283E-02
207.40	3.5753E+04	0.1260	4.8233E-02
224.40	3.5717E+04	0.1485	5.7953E-02
241.50	3.5580E+04	0.1712	6.8524E-02
258.60	3.5339E+04	0.1935	7.9651E-02
275.70	3.5076E+04	0.2149	9.0932E-02
292.80	3.4820E+04	0.2354	0.1022
309.90	3.4579E+04	0.2549	0.1135
327.00	3.4354E+04	0.2737	0.1247
344.00	3.4136E+04	0.2919	0.1359
361.10	3.3901E+04	0.3098	0.1473
378.20	3.3647E+04	0.3273	0.1588
395.30	3.3394E+04	0.3443	0.1701
400.00	3.3328E+04	0.3488	0.1731

ML 直管のひずみ成分 (最大ひずみ発生点)

変位 (mm)	荷重 (Kg)	内面 (mm/mm)		外面 (mm/mm)	
		軸方向ひずみ	周方向ひずみ	軸方向ひずみ	周方向ひずみ
4.00	0.4824E+04	-2.2019E-04	5.5662E-05	-1.9089E-04	5.7566E-05
8.00	0.9648E+04	-4.3992E-04	1.1136E-04	-3.8090E-04	1.1511E-04
14.00	1.6469E+04	-8.5773E-04	2.4473E-04	-7.1343E-04	2.5614E-04
23.00	2.2375E+04	-2.0235E-03	6.9966E-04	-1.5321E-03	7.3131E-04
36.50	2.5956E+04	-4.3312E-03	1.6305E-03	-3.0217E-03	1.6902E-03
50.00	2.7994E+04	-7.0410E-03	2.7012E-03	-4.6030E-03	2.8009E-03
63.50	2.9482E+04	-1.0236E-02	3.9355E-03	-6.2700E-03	4.0895E-03
77.00	3.0682E+04	-1.3674E-02	5.2386E-03	-7.8700E-03	5.4555E-03
97.25	3.2177E+04	-2.0199E-02	7.5724E-03	-1.0213E-02	7.9090E-03
127.60	3.3921E+04	-3.5667E-02	1.2695E-02	-1.3475E-02	1.3322E-02
139.00	3.4454E+04	-4.3364E-02	1.5180E-02	-1.4719E-02	1.5931E-02
156.10	3.5095E+04	-5.9340E-02	2.0145E-02	-1.6077E-02	2.1101E-02
173.20	3.5499E+04	-7.9863E-02	2.6310E-02	-1.6306E-02	2.7474E-02
190.30	3.5693E+04	-0.1015	3.2667E-02	-1.5203E-02	3.4007E-02
207.40	3.5753E+04	-0.1233	3.8948E-02	-1.2956E-02	4.0442E-02
224.40	3.5717E+04	-0.1452	4.5139E-02	-9.6885E-03	4.6775E-02
241.50	3.5580E+04	-0.1672	5.1325E-02	-5.4480E-03	5.3071E-02
258.60	3.5339E+04	-0.1889	5.7408E-02	-4.7542E-04	5.9230E-02
275.70	3.5076E+04	-0.2096	6.3209E-02	4.9602E-03	6.5092E-02
292.80	3.4820E+04	-0.2294	6.8685E-02	1.0759E-02	7.0613E-02
309.90	3.4579E+04	-0.2483	7.3873E-02	1.6828E-02	7.5838E-02
327.00	3.4354E+04	-0.2665	7.8799E-02	2.3072E-02	8.0792E-02
344.00	3.4136E+04	-0.2840	8.3535E-02	2.9475E-02	8.5556E-02
361.10	3.3901E+04	-0.3014	8.8212E-02	3.6111E-02	9.0271E-02
378.20	3.3647E+04	-0.3183	9.2784E-02	4.2881E-02	9.4892E-02
395.30	3.3394E+04	-0.3347	9.7197E-02	4.9669E-02	9.9353E-02
400.00	3.3328E+04	-0.3391	9.8373E-02	5.1507E-02	0.1005

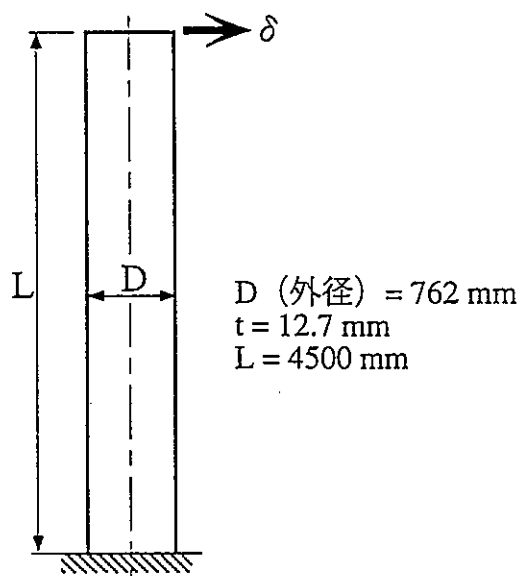
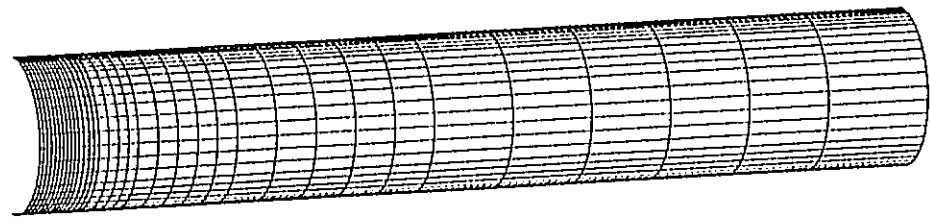


図4.2.4-1 ミドルレグ配管（直管）の弾塑性大変形解析モデル



AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 10.000
T = 20.000

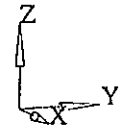
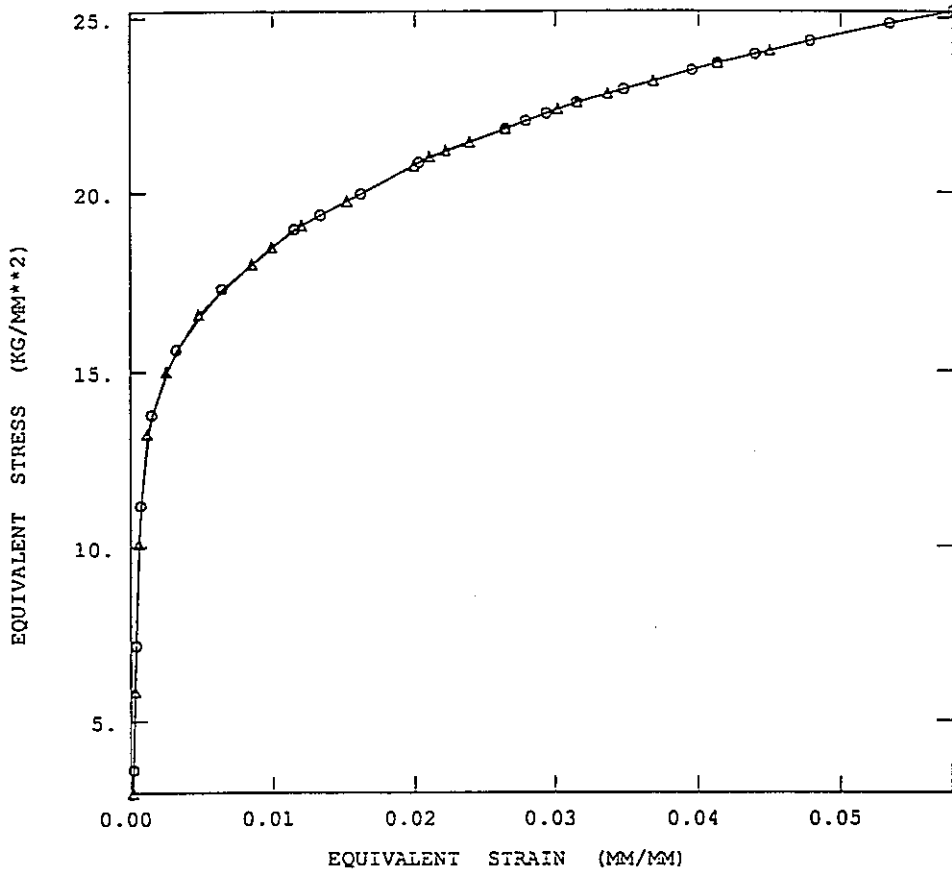


図 4.2.4-2 弾塑性大変形解析用 FEM モデル (ML 配管の直管)

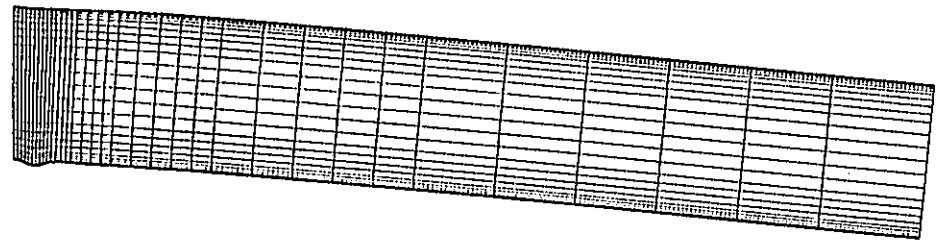
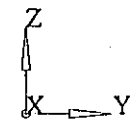
— 0.3668 x 10³ —
GEOM. SCALE []



SUS304 STRESS-STRAIN RERATION AT 380 DEG (ML)

図 4.2.4-3 SUS304(380 °C)の応力-ひずみ曲線 (平均傾向線)

AXIS: X Y Z
R = 0.0
S = 0.0
T = 0.0



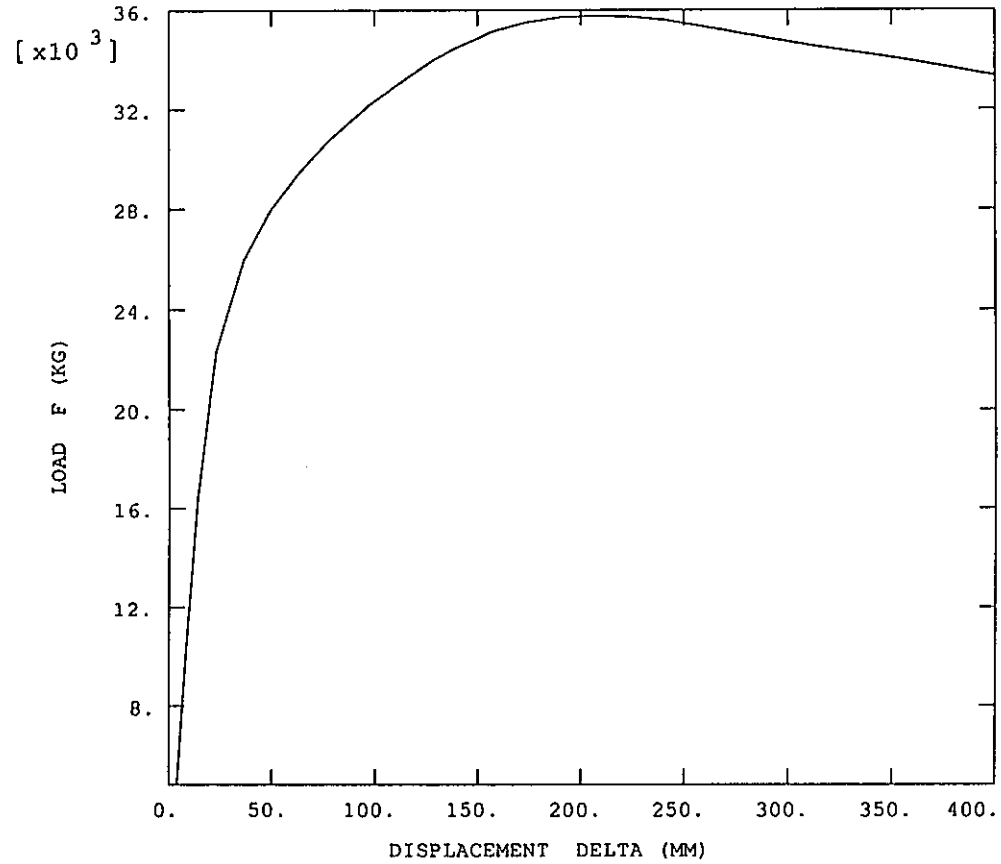
x 10³
0.1713
DISP. SCALE [x 10³]
0.3787
GEOM. SCALE []

図 4.2.4-4 最大荷重点における変形図 (ML 配管の直管)

ABAQUS

— LOAD

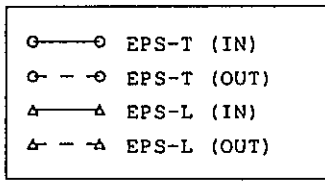
XMIN 4.000E+00
XMAX 4.000E+02
YMIN 4.824E+03
YMAX 3.575E+04



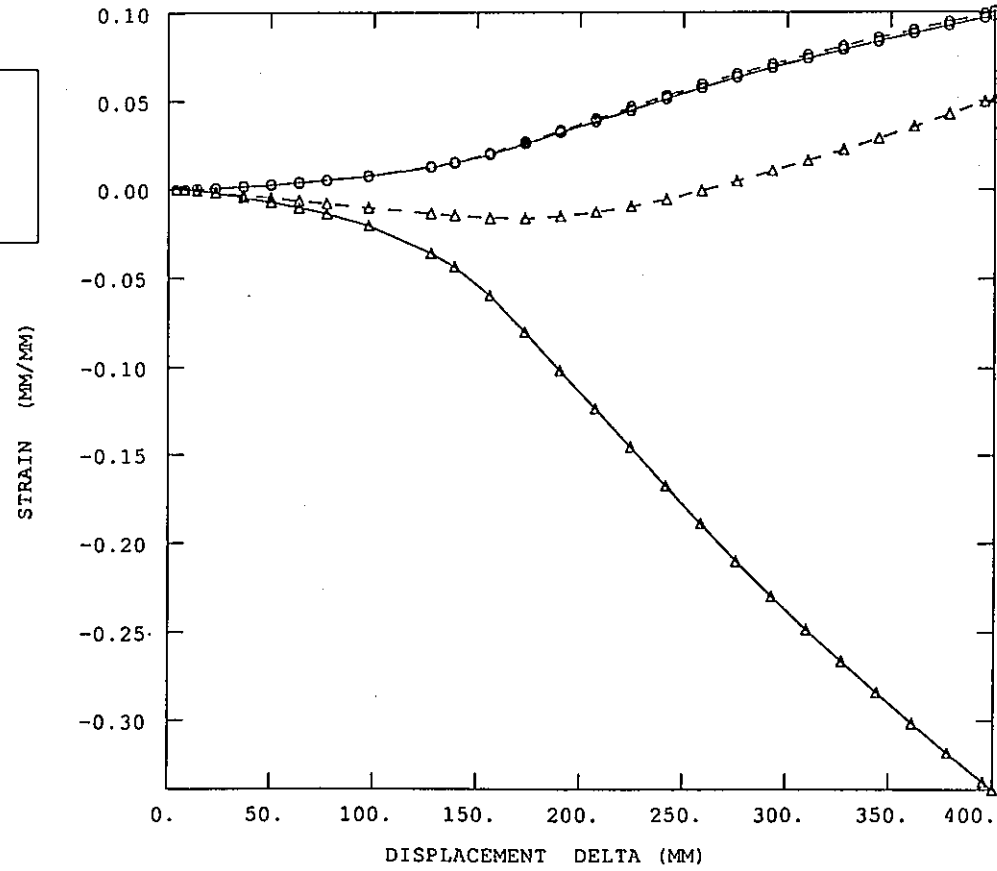
ML STRAIGHT PIPE LOAD:+2H LOAD VS DISP.

図 4.2.4-5 荷重点変位と反力の関係 (ML 配管の直管)

ABAQUS

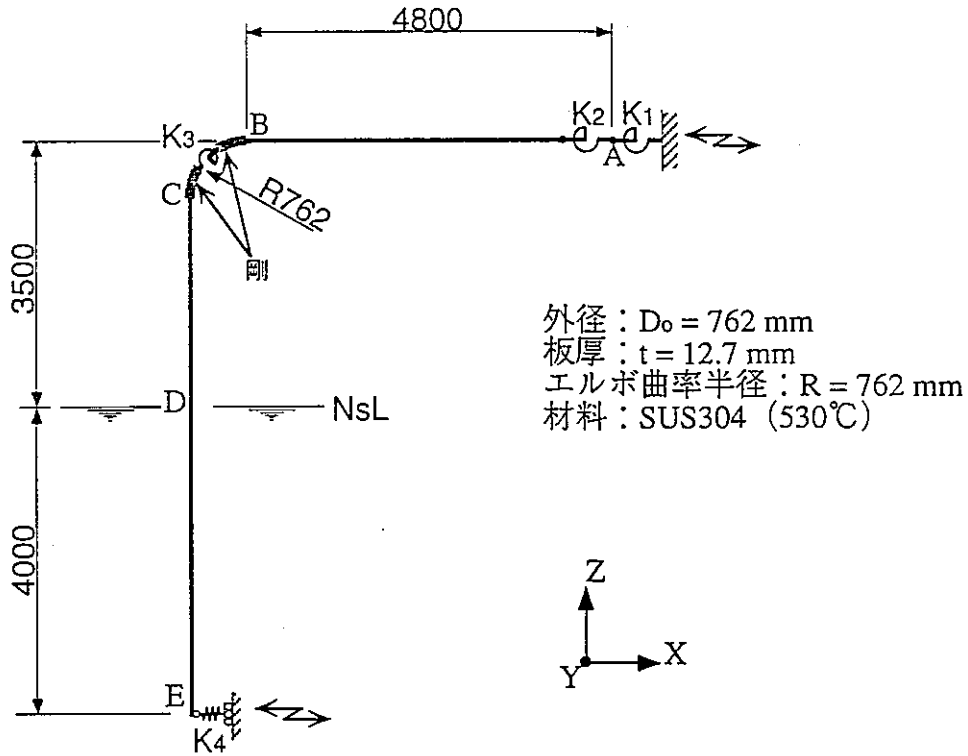


XMIN 4.000E+00
XMAX 4.000E+02
YMIN -3.391E-01
YMAX 1.005E-01



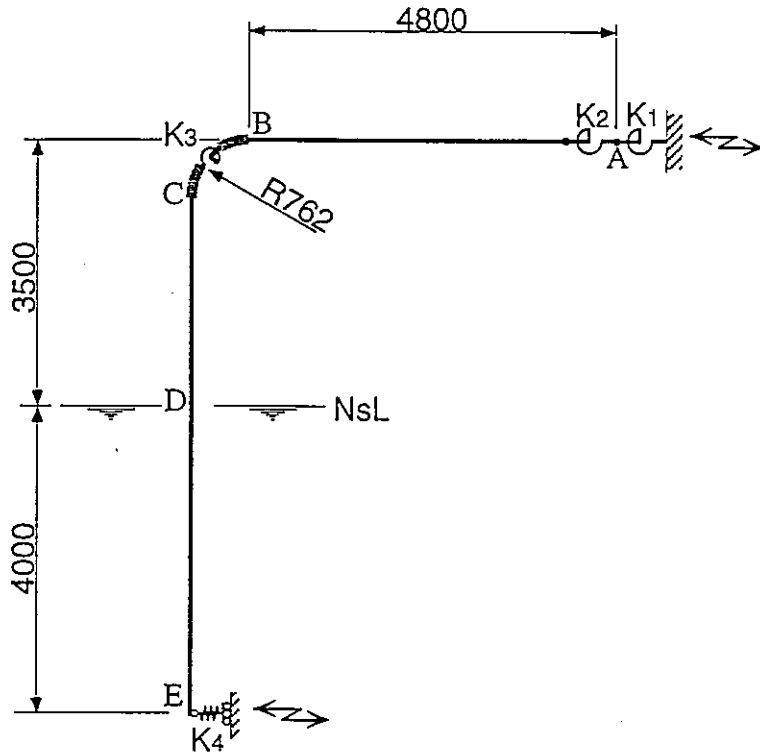
ML STRAIGHT PIPE LOAD:+2H STRAIN VS DISP.

図 4.2.4-6 荷重点変位とひずみの関係 (ML 配管の直管)



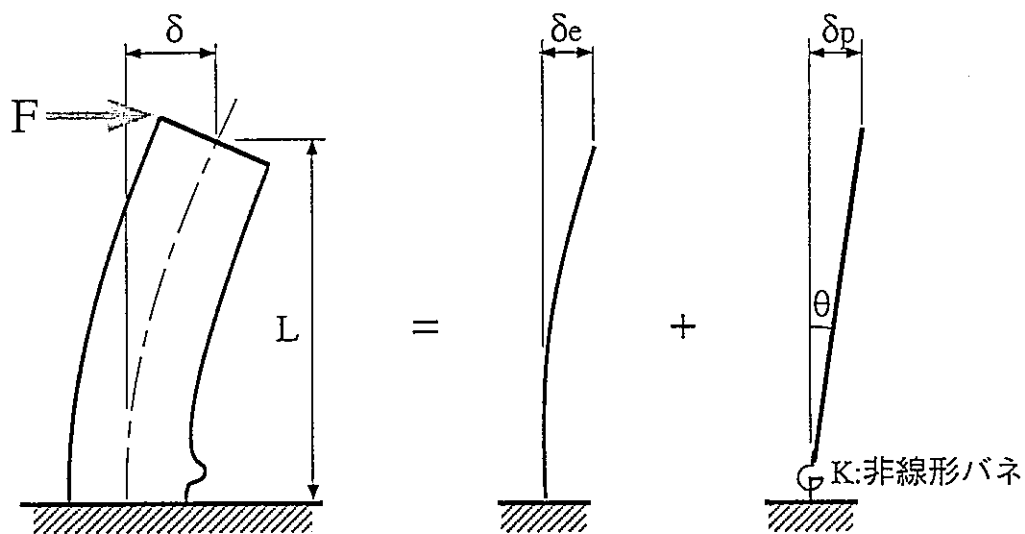
- ・バネ
 - K1：ノズル剛性を表す線形回転バネ
 $K_1 = 2.5 \times 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{mm}/\text{rad}$
 - K2：曲げを受ける直管の非線形解析結果から作成した非線形回転バネ
 - K3：曲げを受けるエルボの非線形解析結果から作成したエルボ全体の曲げ剛性を表す非線形回転バネ
 - K4：水平方向の線形バネ（回転は拘束しない）
 $K_4 = 1000 \text{ kg}/\text{mm}$
- ・重量（配管1m当たりの重さ）
 - A～C：694 kg/m
 - C～D：591 kg/m
 - D～E：967 kg/m
- ・弾性状態での減衰率
0.5%
- ・加振方向
水平加振
- ・その他
X方向，Z方向，Y軸回りの慣性を考慮

図4.3-1 ホットレグ配管の非線形時刻歴振動解析モデル



	要素分割数
A~B	5
B~K3	1
K3~C	1
C~D	3
D~E	4

図4.3-2 ホットレグ配管解析モデルの要素分割



静的弾塑性大変形解析
による荷重点変位

弾性変形

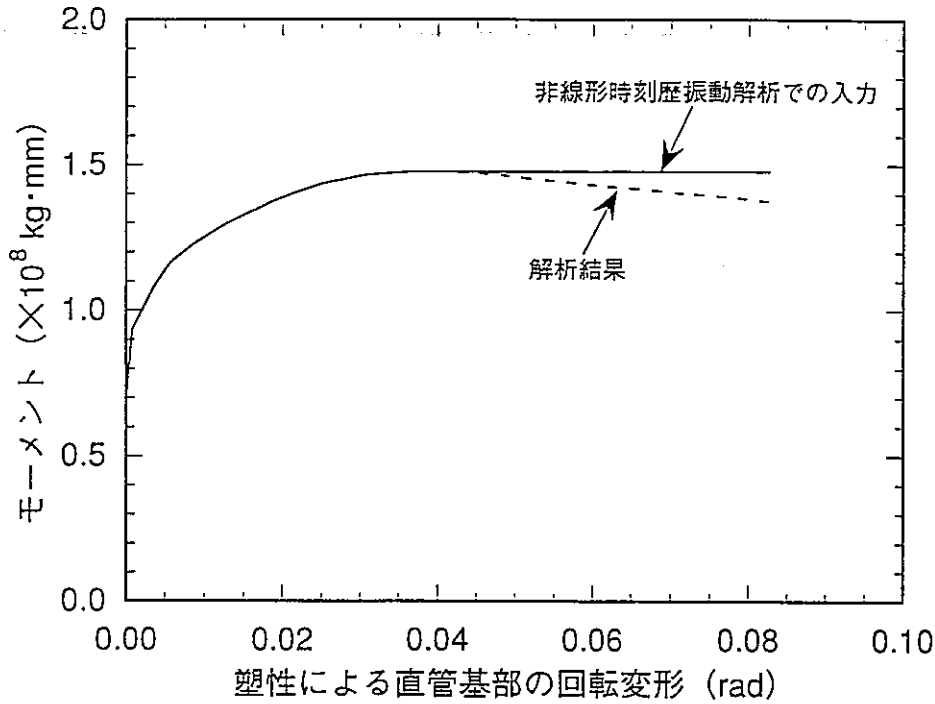
塑性変形

$$\delta = \delta_e + \delta_p = \frac{FL^3}{3EI} + \theta L$$

$$\theta = \frac{1}{L} \left(\delta - \frac{FL^3}{3EI} \right)$$

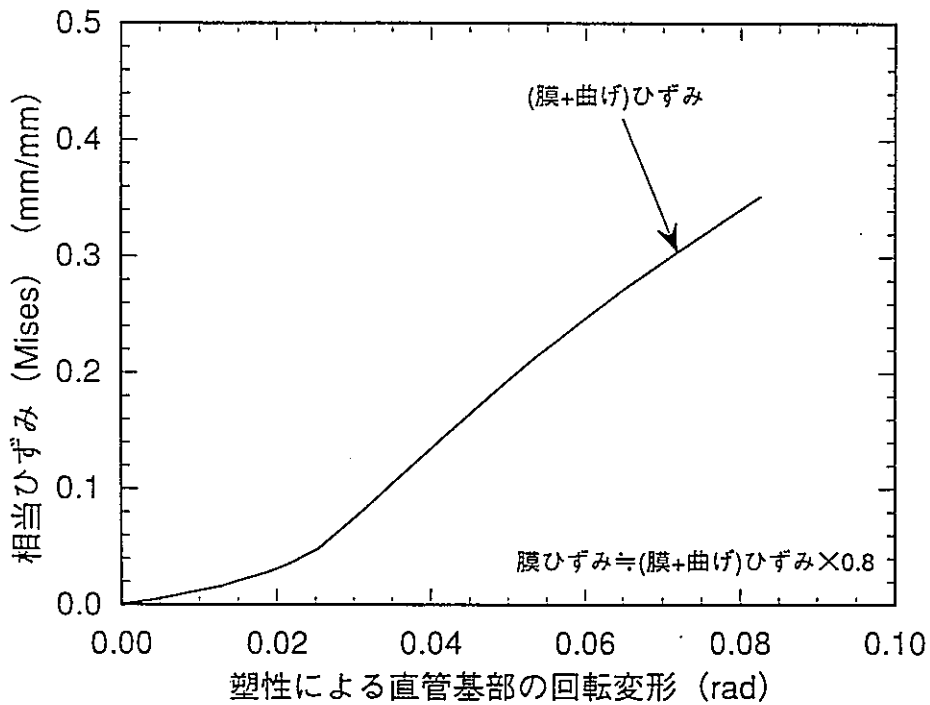
非線形バネ K: モーメント $M=FL$ と回転変形 θ との関係として定義

図4.3-3 曲げを受ける直管付け根の非線形バネの定義



回転変形 (rad)	モーメント (×10 ⁸ kg·mm)
0.000E+00	0.000
0.000E+00	0.198
0.000E+00	0.397
3.313E-05	0.683
8.989E-04	0.934
3.650E-03	1.083
5.851E-03	1.167
8.576E-03	1.228
1.276E-02	1.299
1.913E-02	1.380
2.155E-02	1.405
2.521E-02	1.437
3.076E-02	1.468
3.643E-02	1.478
4.212E-02	1.477 (1.478)
4.786E-02	1.467 (1.478)
5.362E-02	1.450 (1.478)
5.940E-02	1.434 (1.478)
6.515E-02	1.420 (1.478)
7.091E-02	1.406 (1.478)
7.669E-02	1.391 (1.478)
8.244E-02	1.376 (1.478)
8.269E-02	1.375 (1.478)

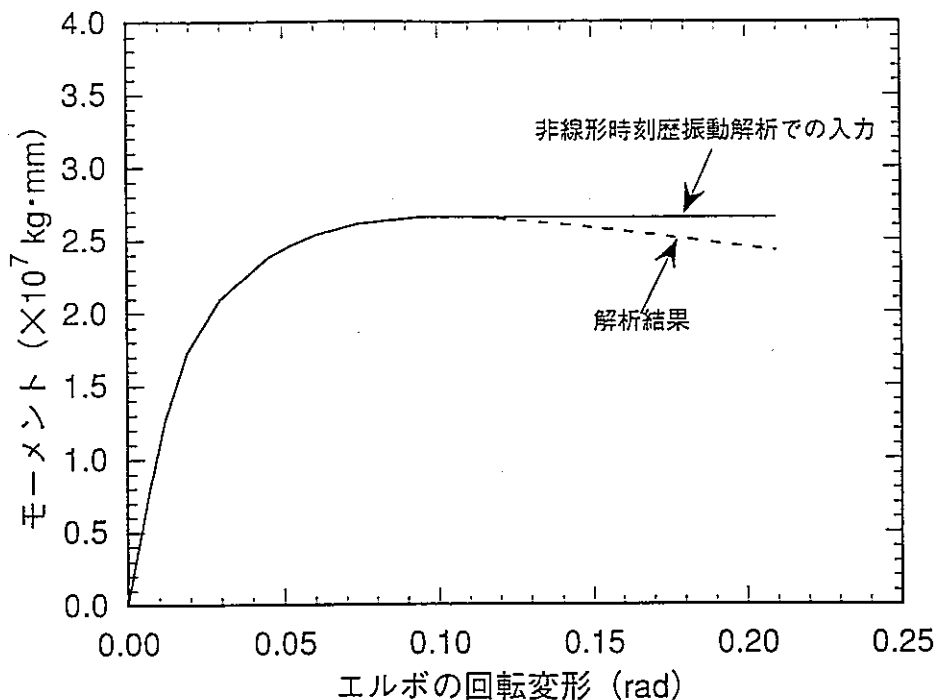
[直管基部の回転変形とモーメントの関係]



回転変形 (rad)	相当ひずみ (mm/mm)
0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	2.189E-04
0.000E+00	4.373E-04
3.313E-05	8.451E-04
8.989E-04	2.013E-03
3.650E-03	4.369E-03
5.851E-03	7.153E-03
8.576E-03	1.043E-02
1.276E-02	1.615E-02
1.913E-02	2.906E-02
2.155E-02	3.533E-02
2.521E-02	4.807E-02
3.076E-02	7.856E-02
3.643E-02	1.125E-01
4.212E-02	1.467E-01
4.786E-02	1.810E-01
5.362E-02	2.136E-01
5.940E-02	2.439E-01
6.515E-02	2.724E-01
7.091E-02	2.995E-01
7.669E-02	3.259E-01
8.244E-02	3.510E-01
8.269E-02	3.520E-01

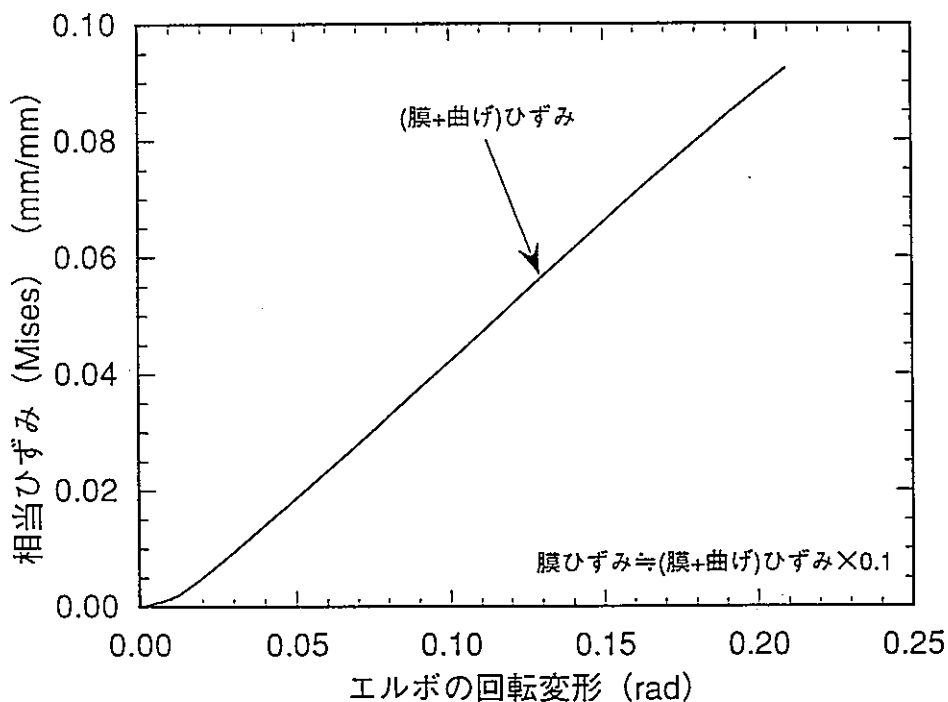
[直管基部の回転変形とひずみの関係]

図4.3-4 直管基部のモーメントvs回転変形vsひずみの関係 (HL配管)



回転変形 (rad)	モーメント ($\times 10^7$ kg·mm)
0.000E+00	0.000
2.094E-03	0.237
4.189E-03	0.470
7.330E-03	0.813
1.204E-02	1.269
1.911E-02	1.724
2.972E-02	2.090
4.562E-02	2.381
5.157E-02	2.452
6.053E-02	2.530
7.395E-02	2.604
9.407E-02	2.648
9.912E-02	2.651
1.041E-01	2.651
1.117E-01	2.647 (2.651)
1.230E-01	2.634 (2.651)
1.400E-01	2.603 (2.651)
1.464E-01	2.589 (2.651)
1.559E-01	2.566 (2.651)
1.703E-01	2.529 (2.651)
1.918E-01	2.470 (2.651)
2.094E-01	2.421 (2.651)

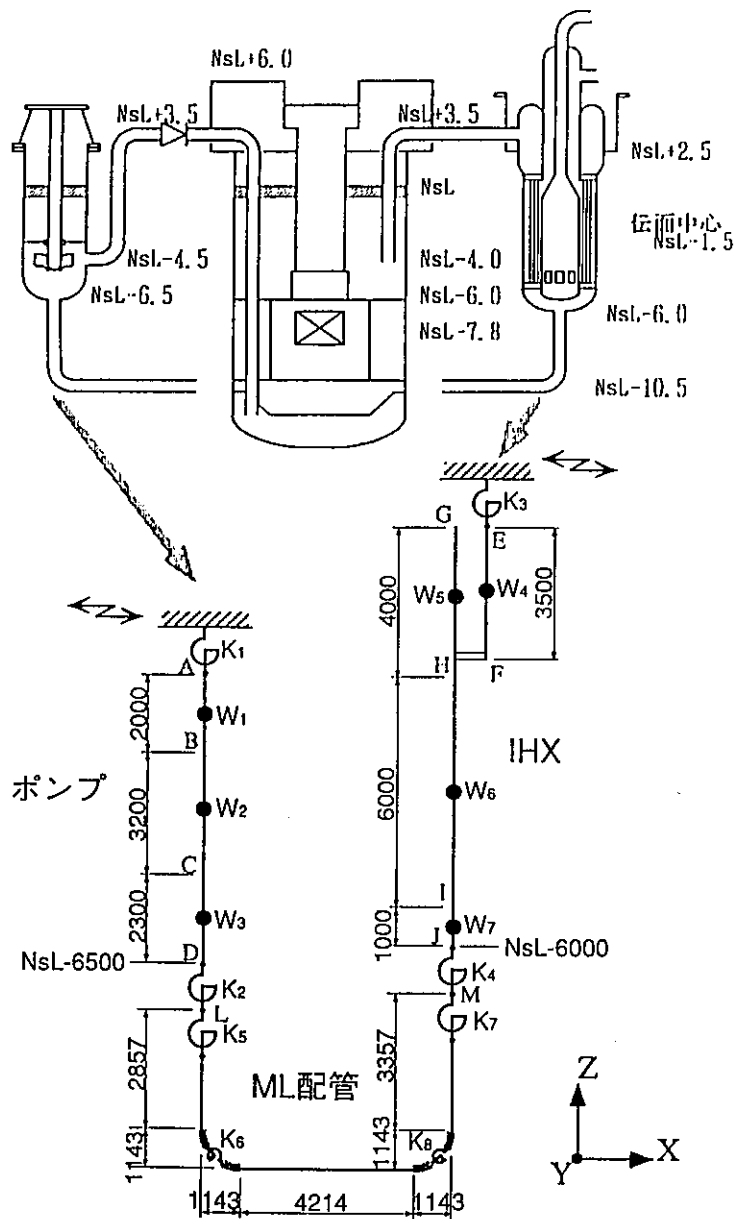
[エルボの回転変形とモーメントの関係]



回転変形 (rad)	相当ひずみ (mm/mm)
0.000E+00	0.000E+00
2.094E-03	2.638E-04
4.189E-03	5.287E-04
7.330E-03	9.467E-04
1.204E-02	1.962E-03
1.911E-02	4.545E-03
2.972E-02	9.267E-03
4.562E-02	1.661E-02
5.157E-02	1.936E-02
6.053E-02	2.350E-02
7.395E-02	2.972E-02
9.407E-02	3.932E-02
9.912E-02	4.169E-02
1.041E-01	4.409E-02
1.117E-01	4.773E-02
1.230E-01	5.317E-02
1.400E-01	6.136E-02
1.464E-01	6.434E-02
1.559E-01	6.879E-02
1.703E-01	7.538E-02
1.918E-01	8.491E-02
2.094E-01	9.227E-02

[エルボの回転変形とひずみの関係]

図4.3-5 エルボのモーメントvs回転変形vsひずみの関係 (HL配管)



ポンプ

- W₁ = 12 ton (容器+遮蔽体+シャフト)
- W₂ = 8 ton (容器+Na+シャフト)
- W₃ = 12 ton (容器+Na+インペラ+仕切板+その他)

K₁ = 3.0 × 10¹² kg·mm/rad (フランジ部の回転剛性：先行炉のバネ剛性を直径比例で補正)
 K₂ = 3.0 × 10¹⁰ kg·mm/rad (ノズル部の回転剛性：大型炉の1992年度報告書の値の7割に設定 (応答加速度を小さくするため))

A~B } : D = 2230 mm, t = 30 mm, SUS304 (380℃)
 B~C }
 C~D }

IHX

- W₄ = 34 ton (支持スカート)
- W₅ = 47 ton (容器+Na+内部構造物)
- W₆ = 81 ton (容器+Na+内部構造物)
- W₇ = 8 ton (容器+Na+内部構造物)

K₃ = 3.0 × 10¹³ kg·mm/rad (フランジ部の回転剛性：IHXに触れ止めを設けない条件としたため先行炉よりも固めのバネとした)

K₄ = 2.0 × 10¹⁰ kg·mm/rad (ノズル部の回転剛性：大型炉の1992年度報告書の値の7割に設定 (応答加速度を小さくするため))

E~F : D = 3850 mm, t = 100 mm, SUS304 (100℃) (板厚は大型炉の1992年度報告書の2倍)

G~H : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (530℃：1次入口Na温度)

H~I : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (442.5℃：2次入口出口Naの平均温度)

I~J : D = 3210 mm, t = 30 mm, SUS304 (380℃：1次出口Na温度)

ML配管

K₅, K₇ : 直管の非線形解析から定める非線形回転バネ

K₆, K₈ : エルボの非線形解析から定める非線形回転バネ

L~M : D = 762 mm, t = 12.7 mm, エルボ曲率半径：R = 1143 mm, SUS304 (380℃)

配管重量：691 kg/m

エルボ部はバネを除いて剛として扱う

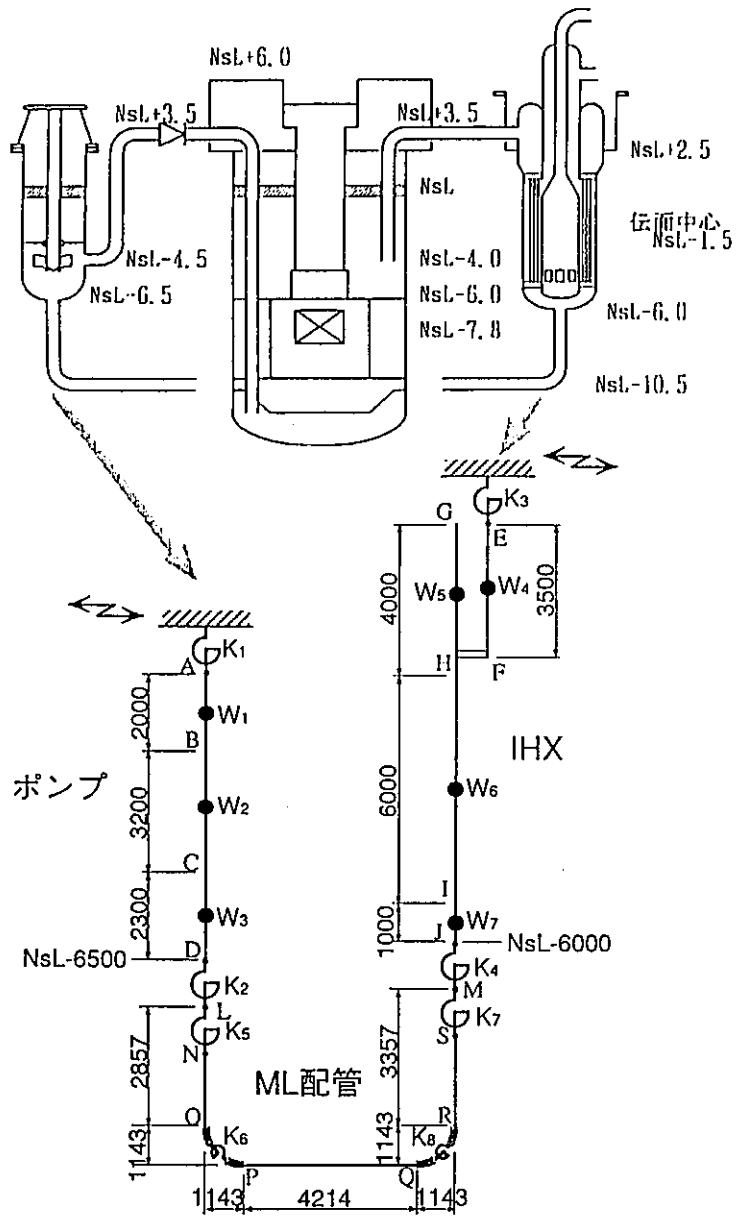
共通

弾性状態での減衰率：1%

加振方向：水平加振

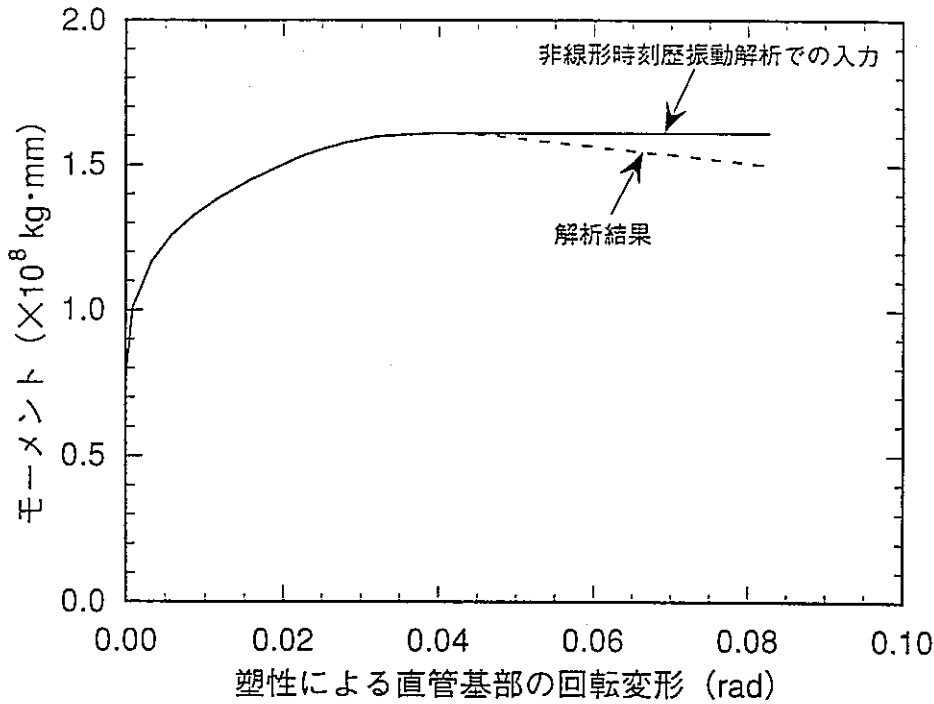
X方向, Z方向, Y軸回りの慣性を考慮

図4.3-6 ML配管の非線形時刻歴振動解析モデル



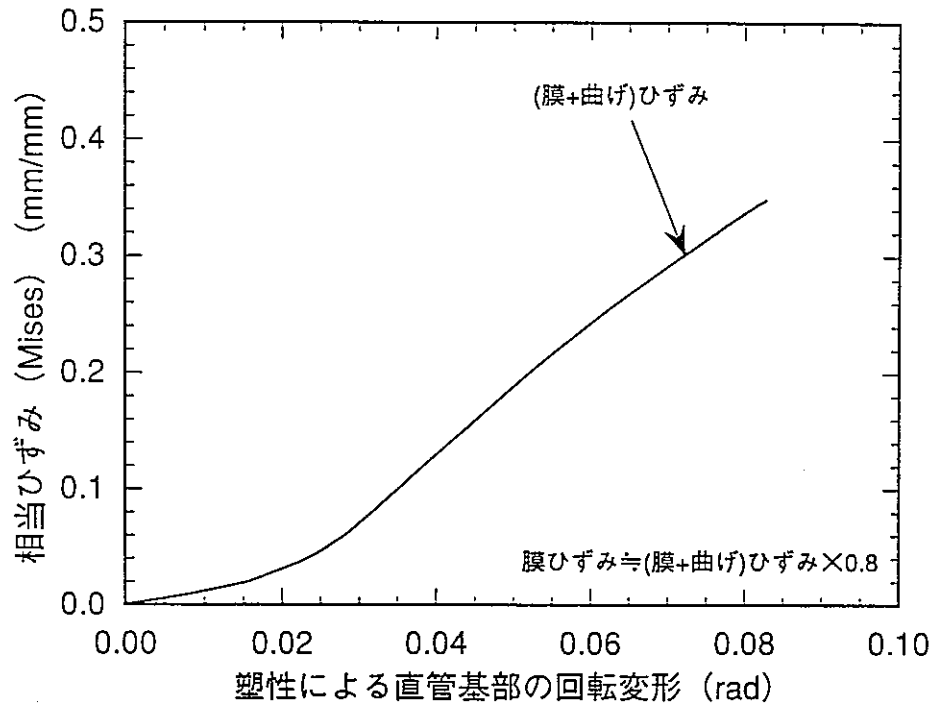
		要素分割数
ポンプ	A~B	2
	B~C	4
	C~D	2
IHX	E~F	4
	G~H	5
	H~I	6
	I~J	2
ML配管	N~O	3
	O~K6	1
	K6~P	1
	P~Q	4
	Q~K8	1
	K8~R	1
	R~S	3

図4.3-7 ML配管解析モデルの要素分割



[直管基部の回転変形とモーメントの関係]

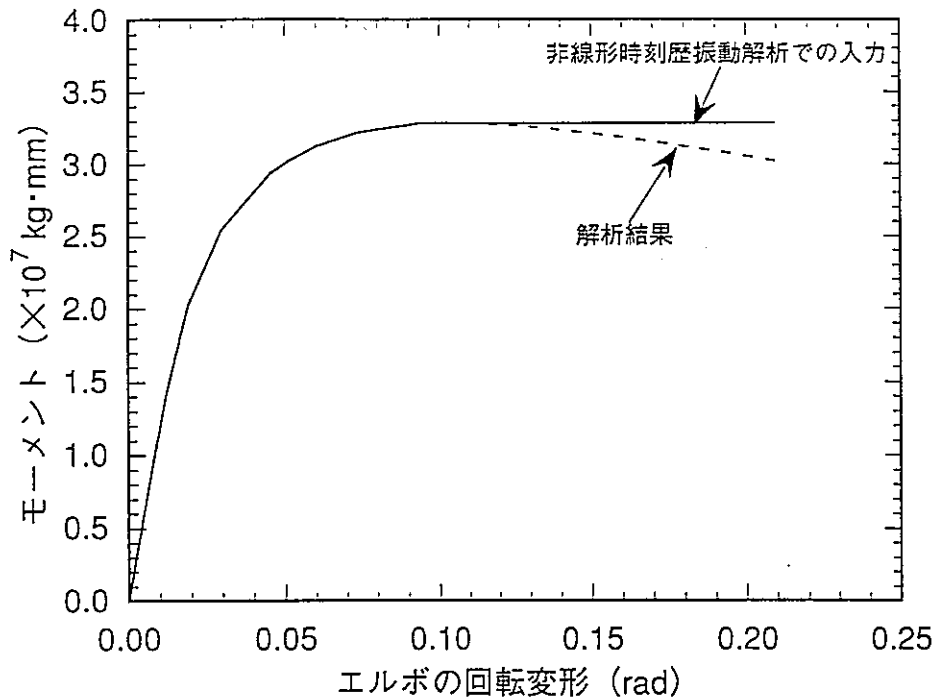
回転変形 (rad)	モーメント ($\times 10^8$ kg·mm)
0.000E+00	0.000
0.000E+00	0.217
0.000E+00	0.434
5.889E-05	0.741
9.643E-04	1.007
3.301E-03	1.168
5.923E-03	1.260
8.647E-03	1.327
1.143E-02	1.381
1.565E-02	1.448
2.207E-02	1.526
2.450E-02	1.550
2.819E-02	1.579
3.191E-02	1.598
3.567E-02	1.606
3.946E-02	1.609
4.325E-02	1.607 (1.609)
4.707E-02	1.601 (1.609)
5.092E-02	1.590 (1.609)
5.477E-02	1.578 (1.609)
5.861E-02	1.567 (1.609)
6.246E-02	1.556 (1.609)
6.630E-02	1.546 (1.609)
7.012E-02	1.536 (1.609)
7.396E-02	1.526 (1.609)
7.781E-02	1.514 (1.609)
8.166E-02	1.503 (1.609)
8.271E-02	1.500 (1.609)



[直管基部の回転変形とひずみの関係]

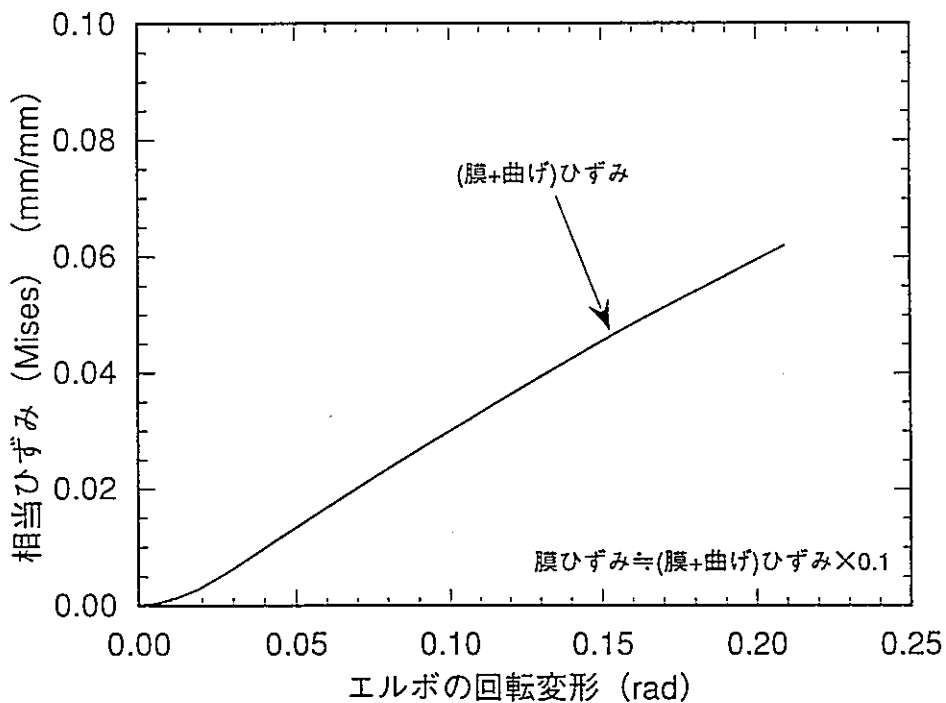
回転変形 (rad)	相当ひずみ (mm/mm)
0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	2.184E-04
0.000E+00	4.363E-04
5.889E-05	8.510E-04
9.643E-04	2.014E-03
3.301E-03	4.327E-03
5.923E-03	7.049E-03
8.647E-03	1.026E-02
1.143E-02	1.373E-02
1.565E-02	2.033E-02
2.207E-02	3.606E-02
2.450E-02	4.391E-02
2.819E-02	6.025E-02
3.191E-02	8.129E-02
3.567E-02	1.036E-01
3.946E-02	1.260E-01
4.325E-02	1.485E-01
4.707E-02	1.712E-01
5.092E-02	1.935E-01
5.477E-02	2.149E-01
5.861E-02	2.354E-01
6.246E-02	2.549E-01
6.630E-02	2.737E-01
7.012E-02	2.919E-01
7.396E-02	3.098E-01
7.781E-02	3.273E-01
8.166E-02	3.443E-01
8.271E-02	3.488E-01

図4.3-8 直管基部のモーメントvs回転変形vsひずみの関係 (ML配管)



回転変形 (rad)	モーメント ($\times 10^7$ kg·mm)
0.000E+00	0.000
2.094E-03	0.256
4.189E-03	0.508
7.330E-03	0.882
1.204E-02	1.412
1.911E-02	2.023
2.972E-02	2.546
4.562E-02	2.939
5.157E-02	3.029
6.053E-02	3.127
7.395E-02	3.220
9.407E-02	3.281
1.142E-01	3.281
1.343E-01	3.250 (3.281)
1.545E-01	3.199 (3.281)
1.745E-01	3.138 (3.281)
1.948E-01	3.071 (3.281)
2.094E-01	3.019 (3.281)

[エルボの回転変形とモーメントの関係]



回転変形 (rad)	相当ひずみ (mm/mm)
0.000E+00	0.000E+00
2.094E-03	2.061E-04
4.189E-03	4.129E-04
7.330E-03	7.243E-04
1.204E-02	1.331E-03
1.911E-02	2.955E-03
2.972E-02	6.279E-03
4.562E-02	1.183E-02
5.157E-02	1.385E-02
6.053E-02	1.693E-02
7.395E-02	2.146E-02
9.407E-02	2.812E-02
1.142E-01	3.452E-02
1.343E-01	4.067E-02
1.545E-01	4.681E-02
1.745E-01	5.253E-02
1.948E-01	5.805E-02
2.094E-01	6.196E-02

[エルボの回転変形とひずみの関係]

図4.3-9 エルボのモーメントvs回転変形vsひずみの関係 (ML配管)

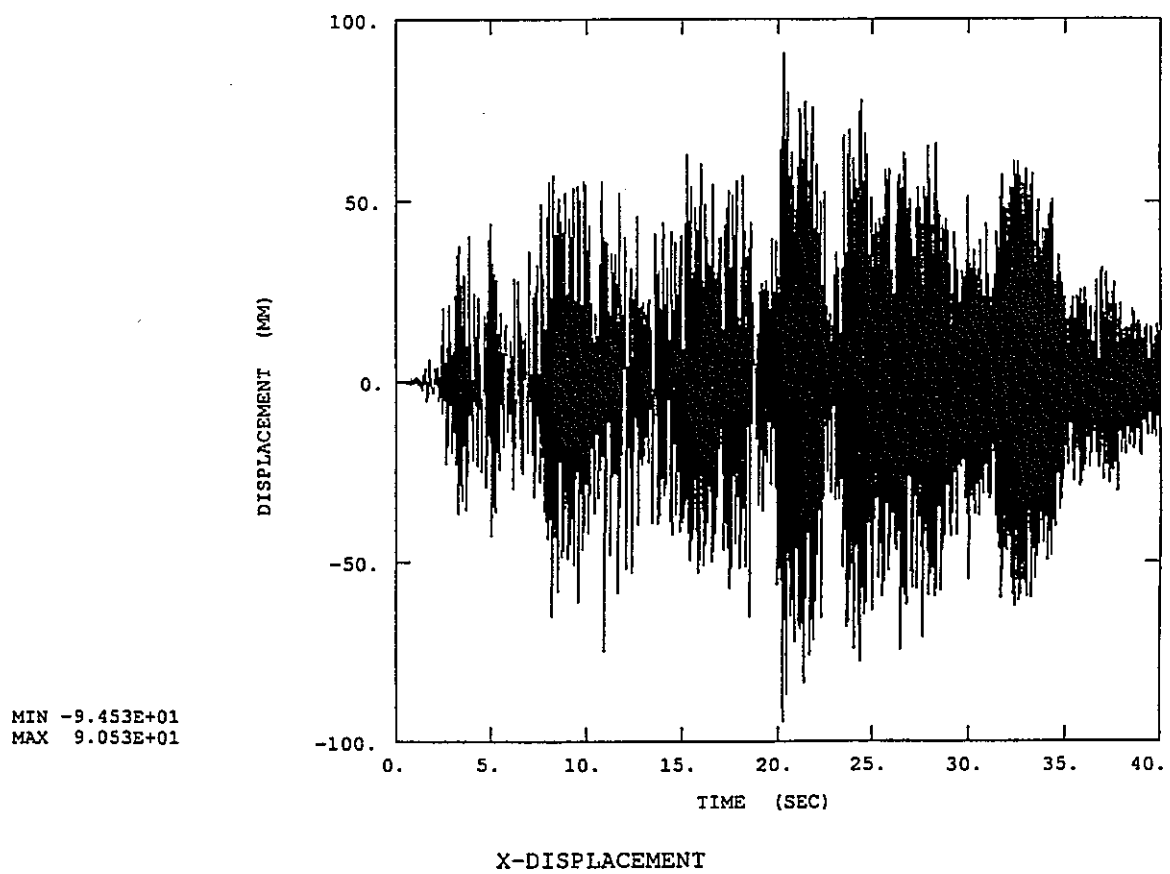
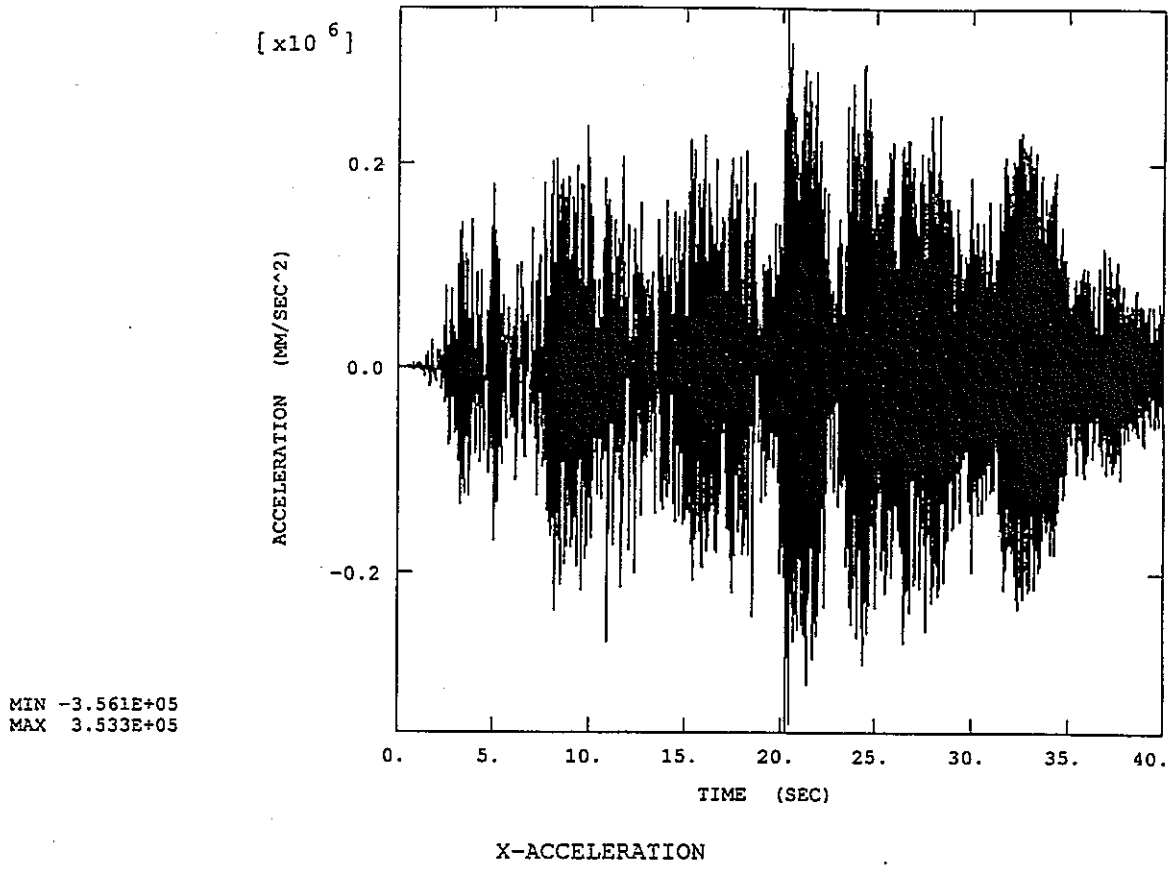
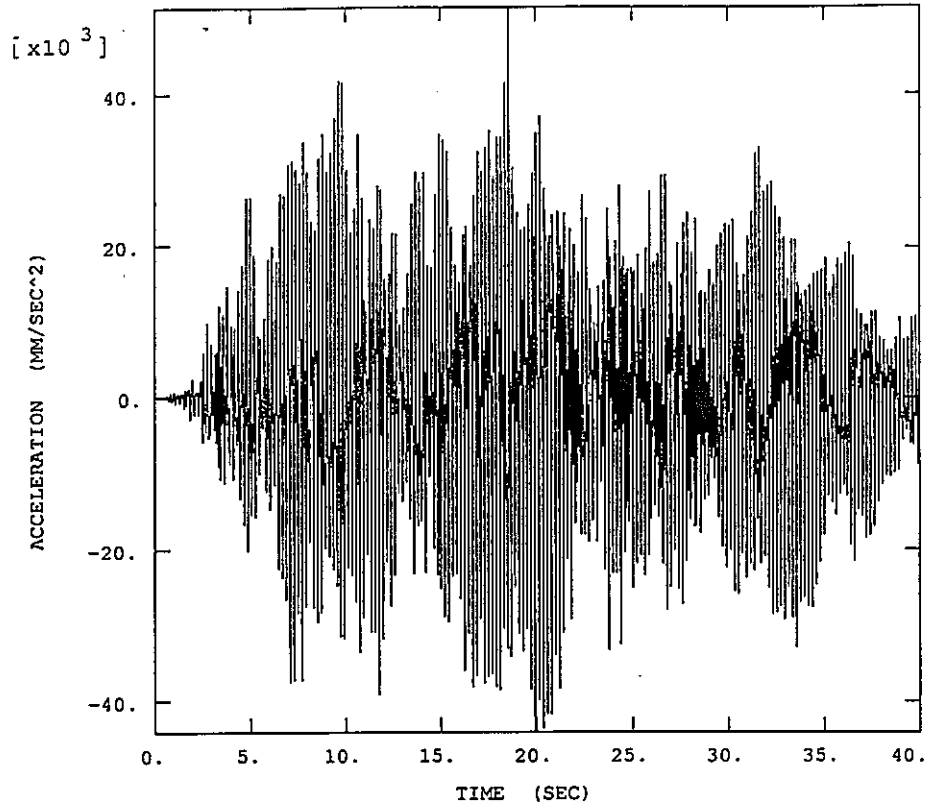
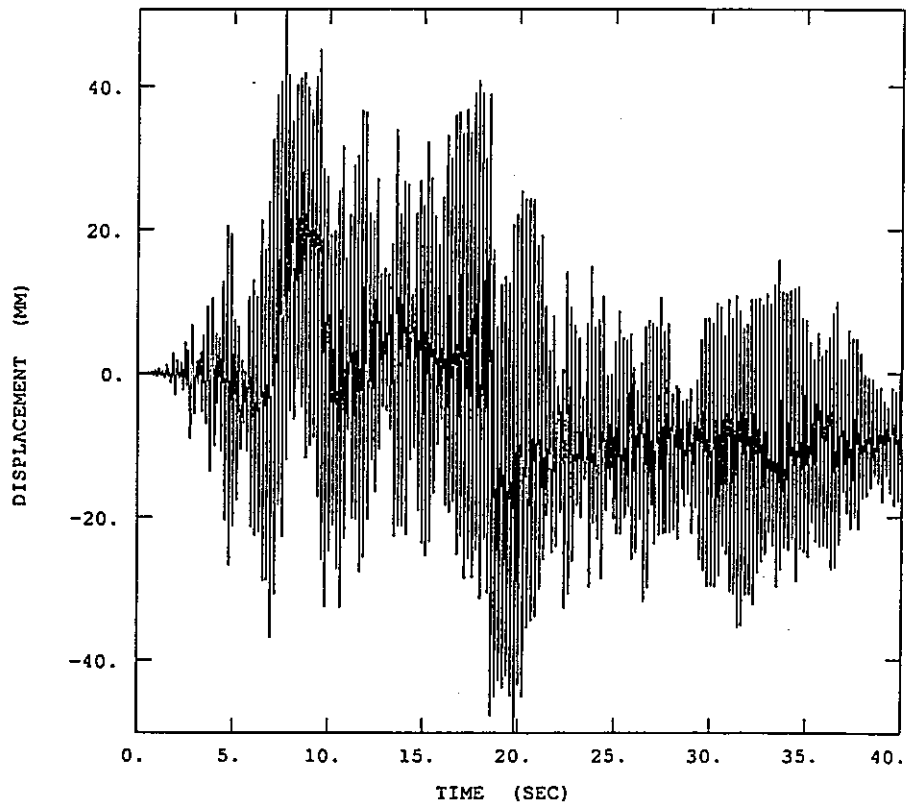


図4.4.1-1 ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-5)

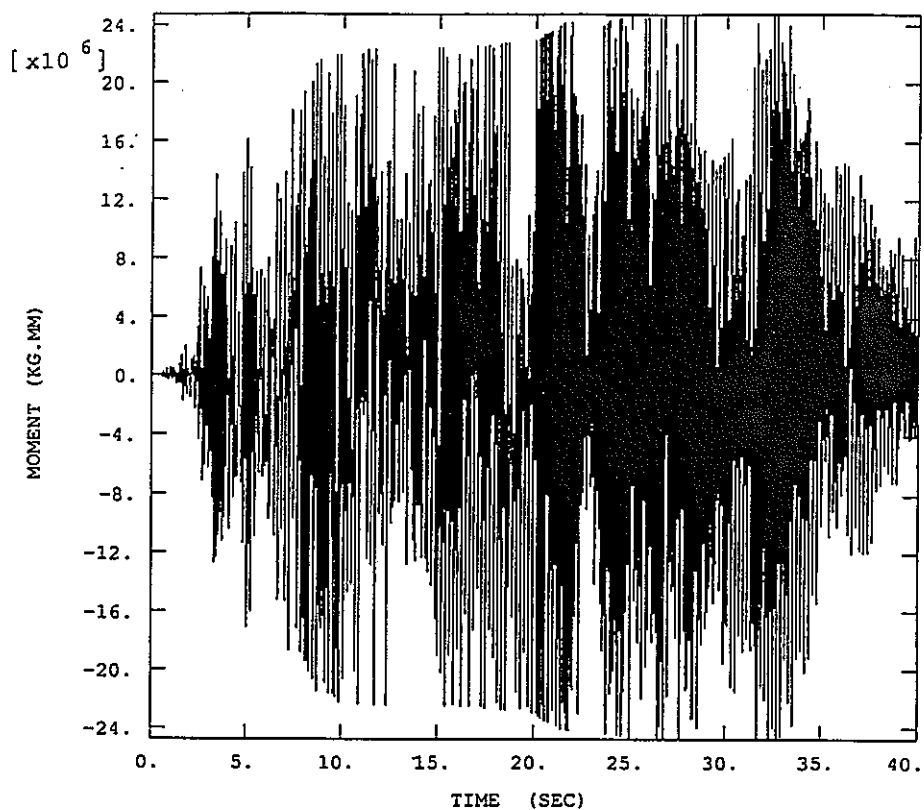


Y-ACCELERATION

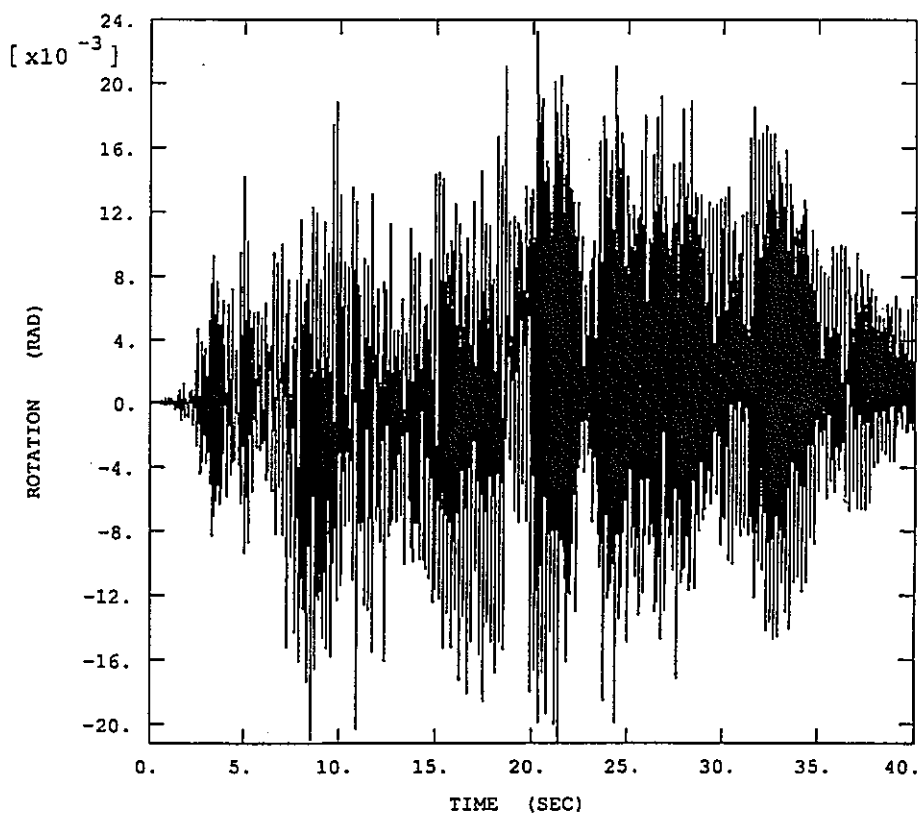


Y-DISPLACEMENT

図4.4.1-2 ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-5)

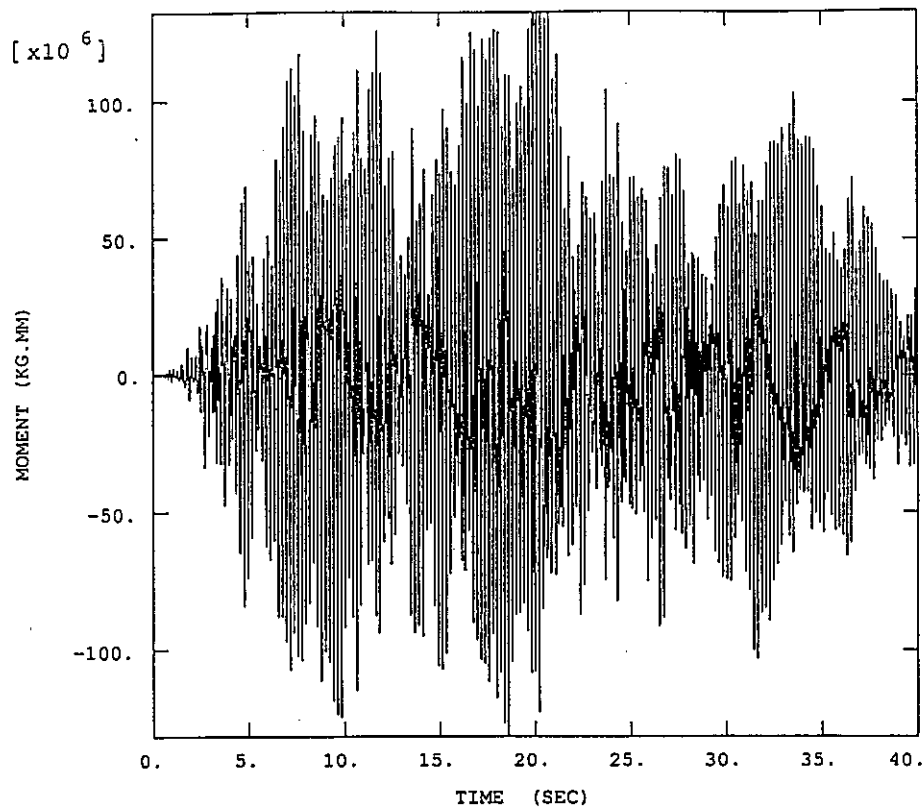


K3 MOMENT

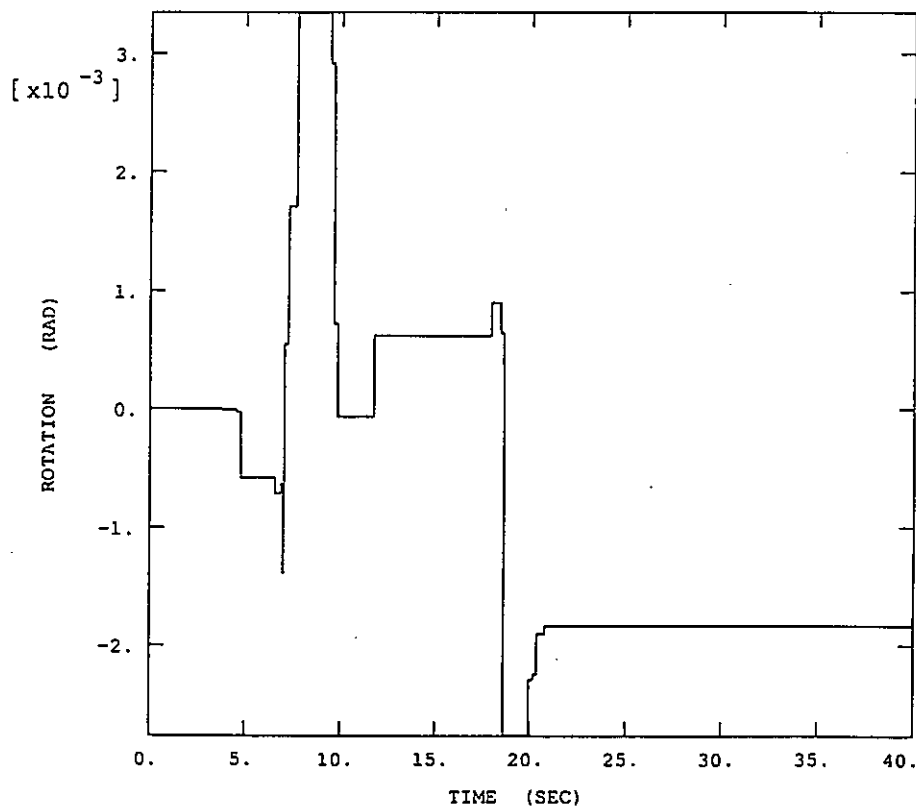


K3 ROTATION

図4.4.1-3 ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-5)

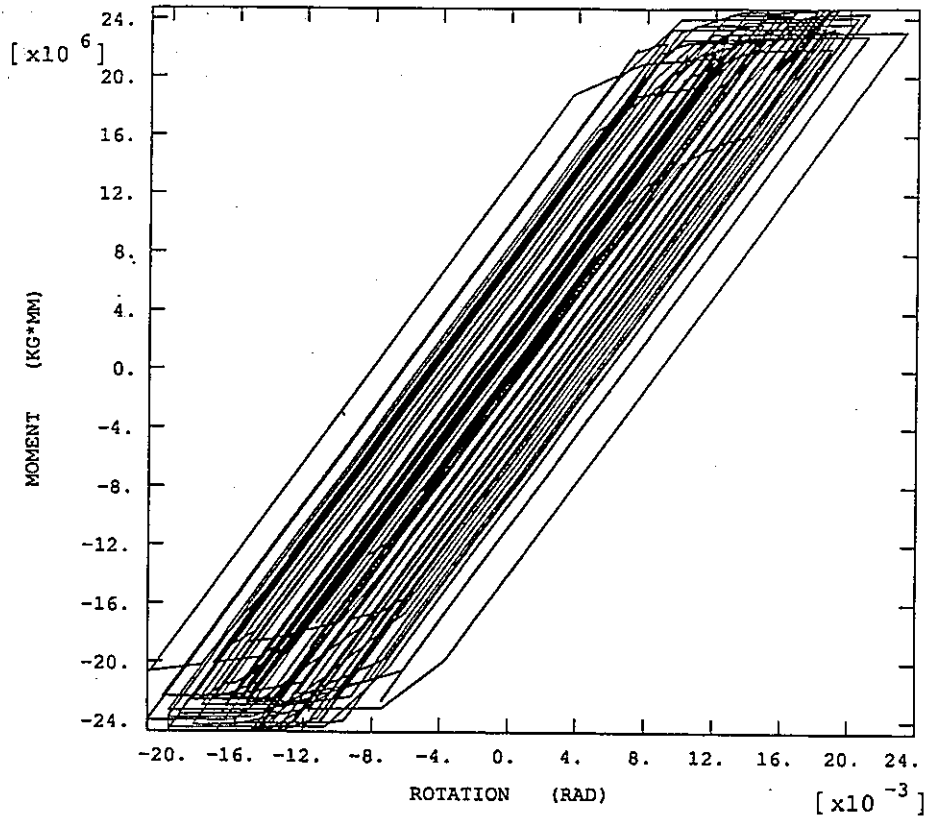


K2 MOMENT



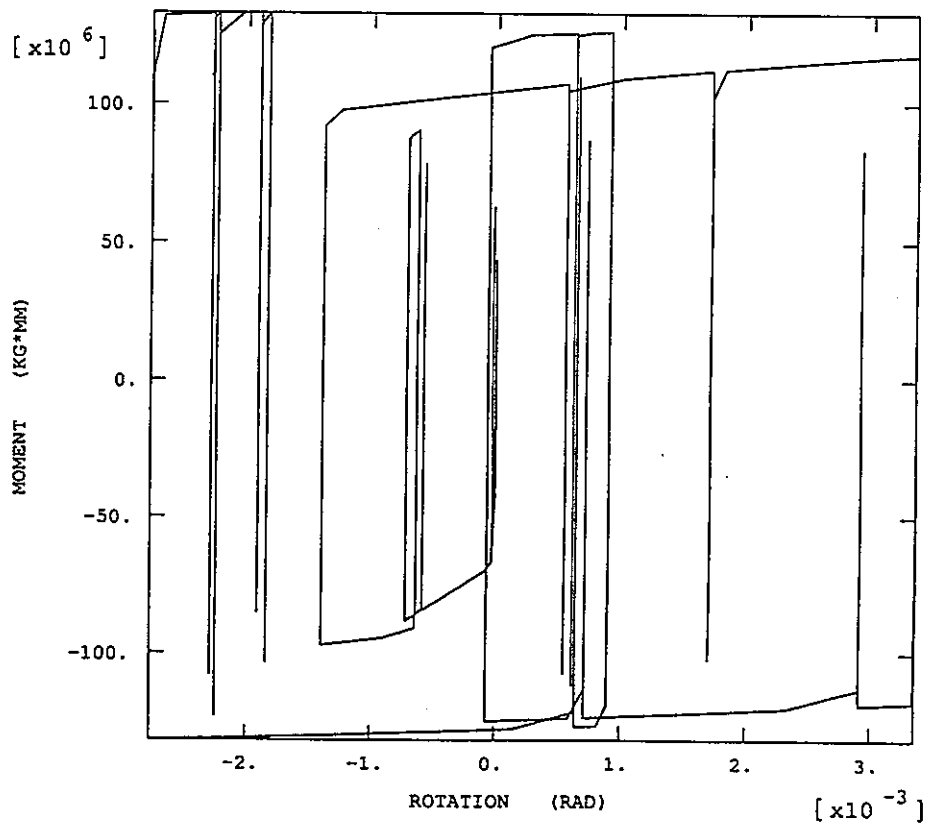
K2 ROTATION

図4.4.1-4 ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-5)



XMIN -2.124E-02
 XMAX 2.327E-02
 YMIN -2.480E+07
 YMAX 2.479E+07

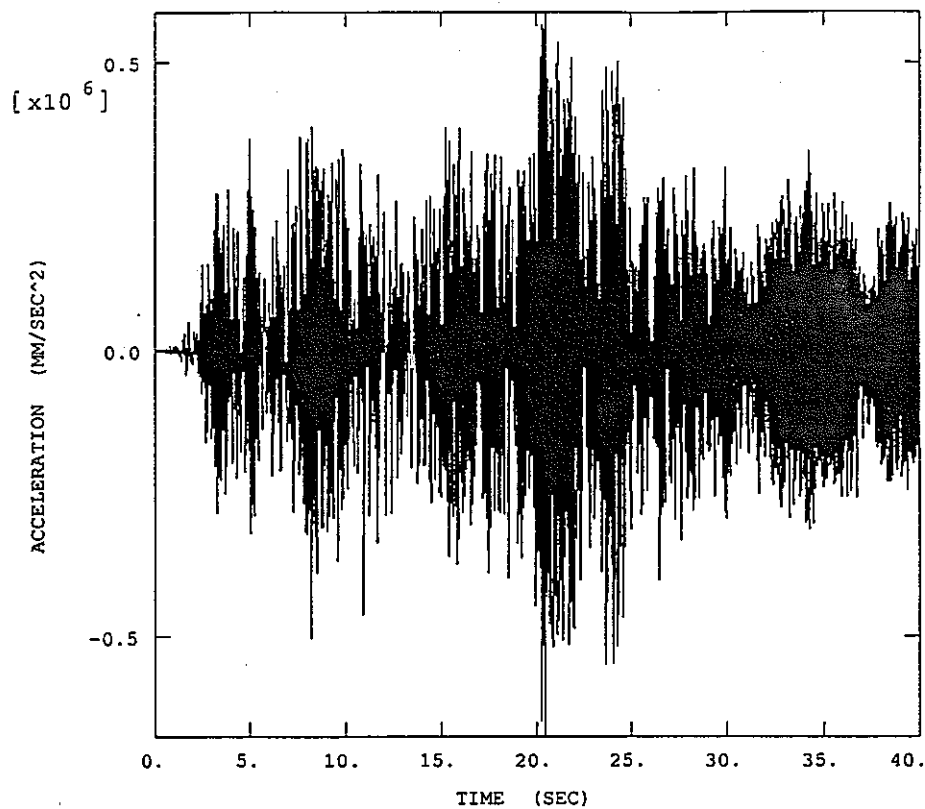
K3 MOMENT VS. ROTATION



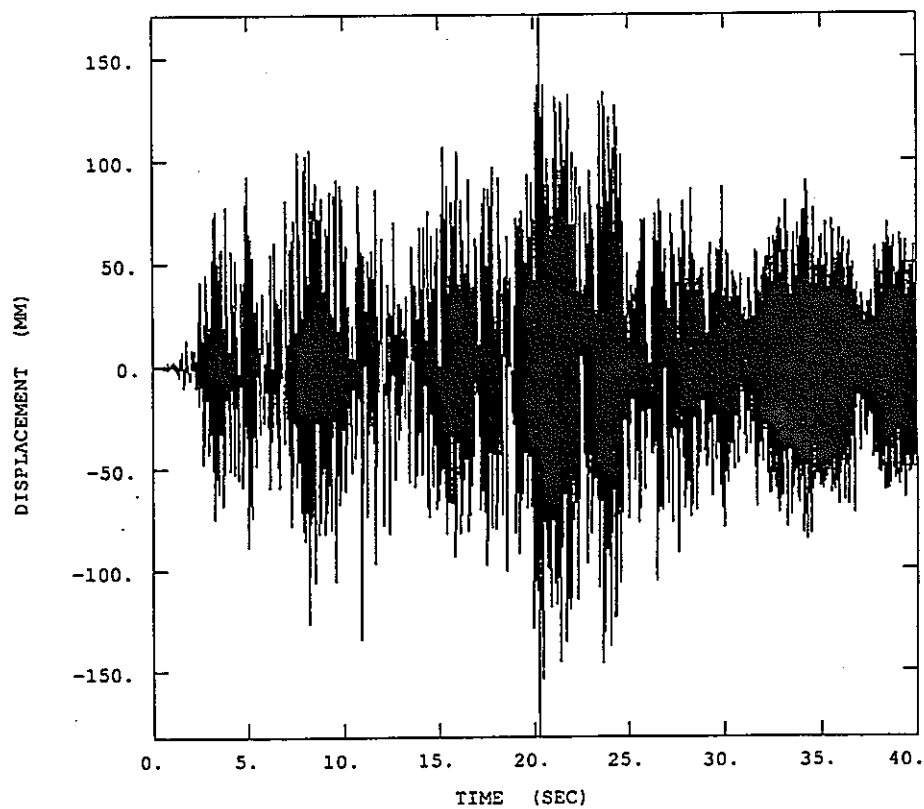
XMIN -2.775E-03
 XMAX 3.352E-03
 YMIN -1.319E+08
 YMAX 1.331E+08

K2 MOMENT VS. ROTATION

図4.4.1-5 ホットレグエルボ (K3) 及び水平管付け根 (K2) の非線形バネのヒステリシス (ケース HL-H-5)



X-ACCELERATION



X-DISPLACEMENT

図4.4.2-1 ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-10)

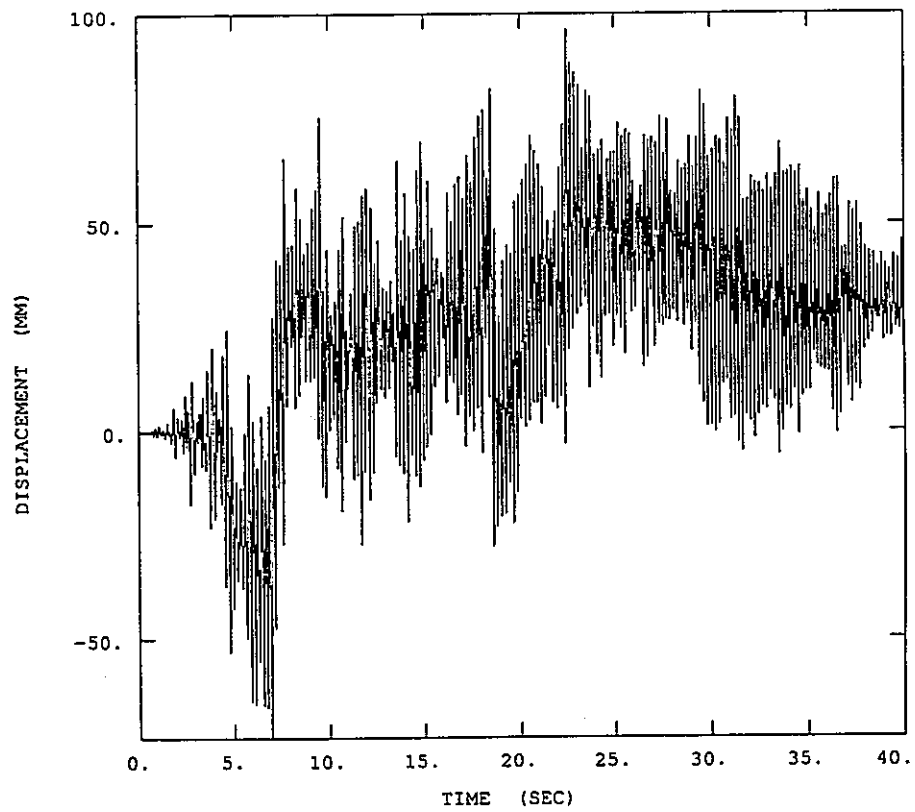
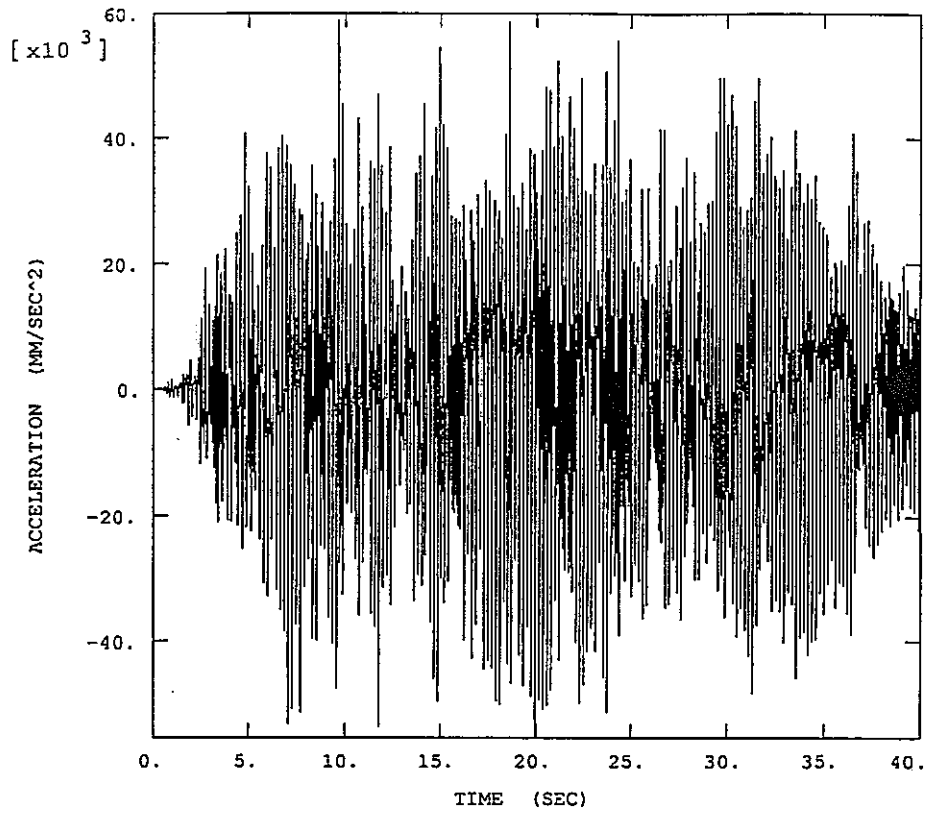
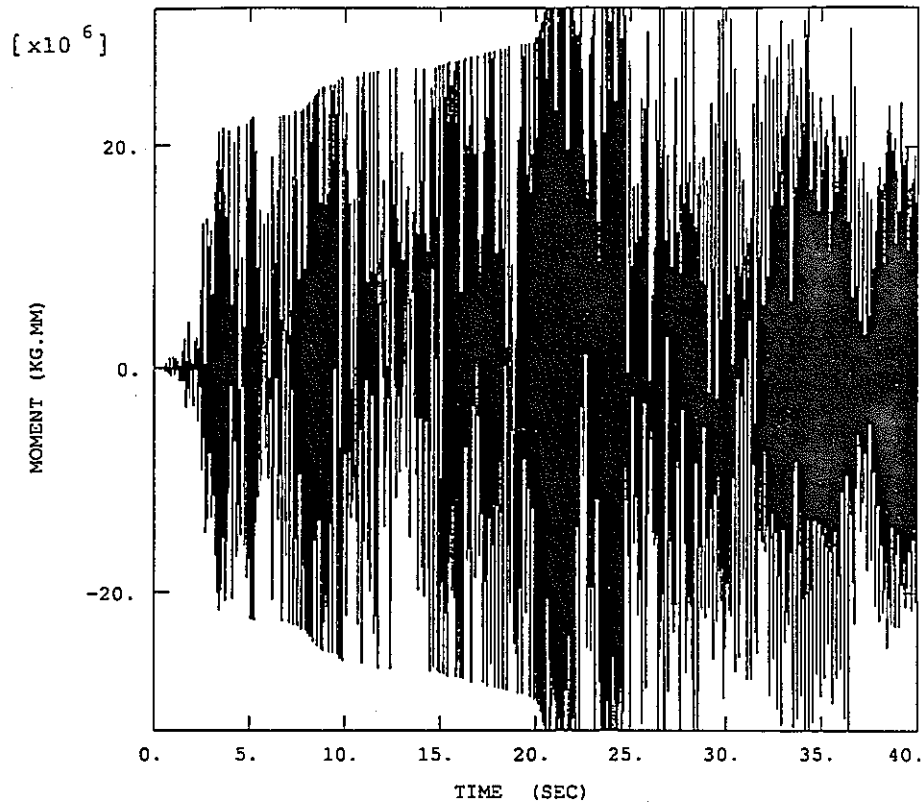
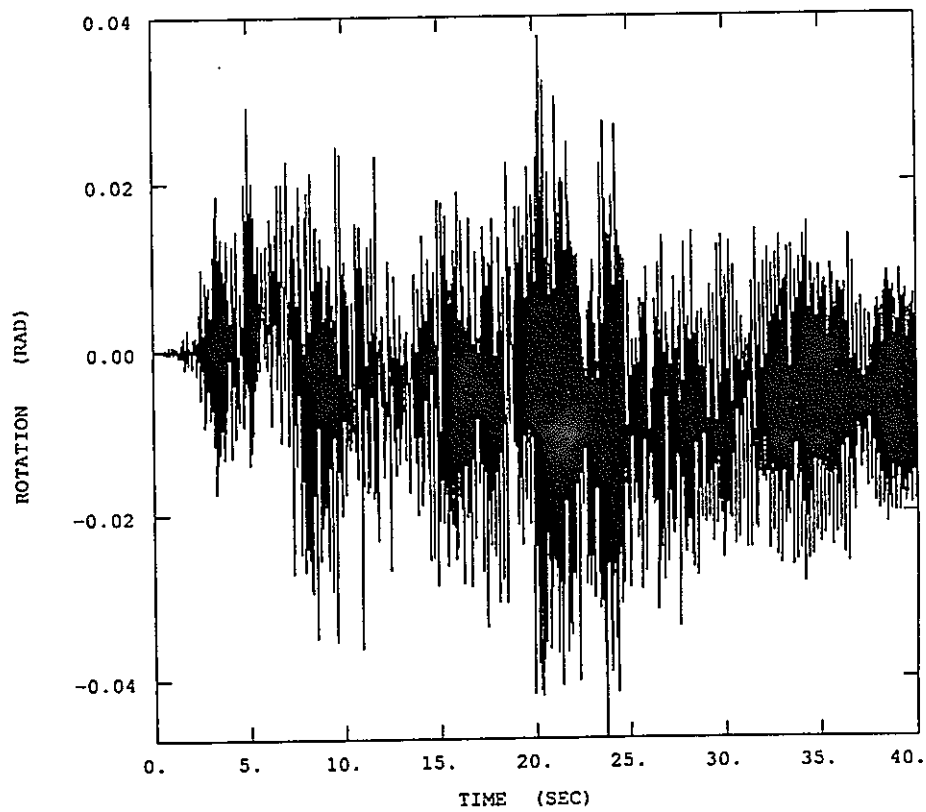


図4.4.2-2 ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-10)



MIN -3.252E+07
MAX 3.252E+07

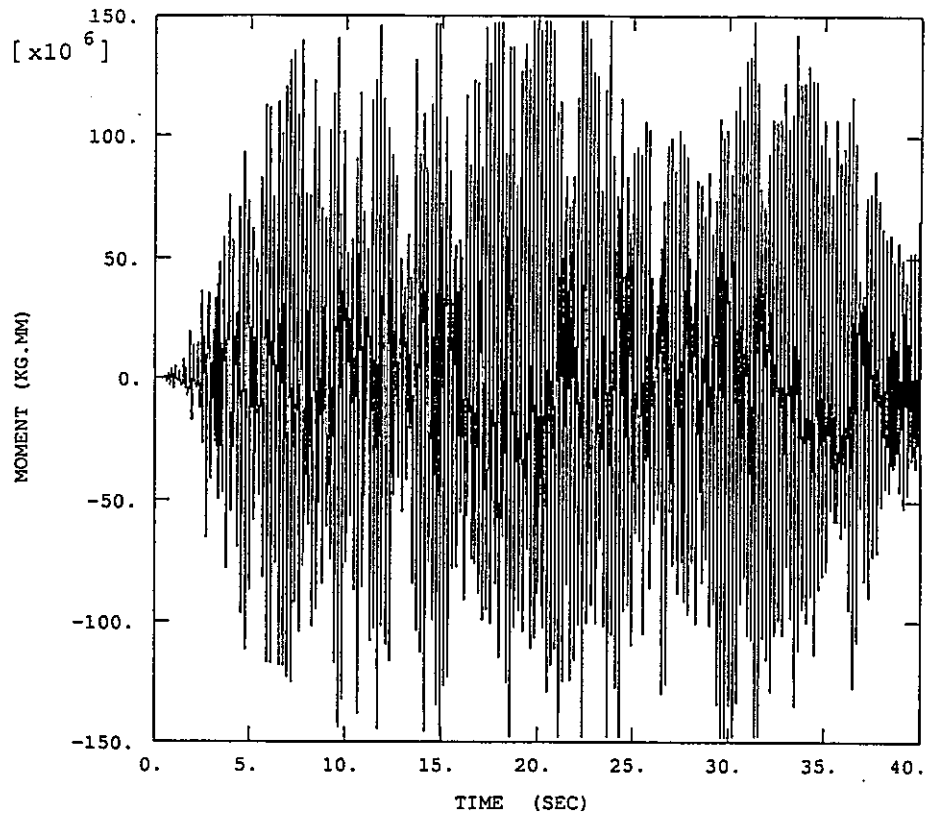
K3 MOMENT



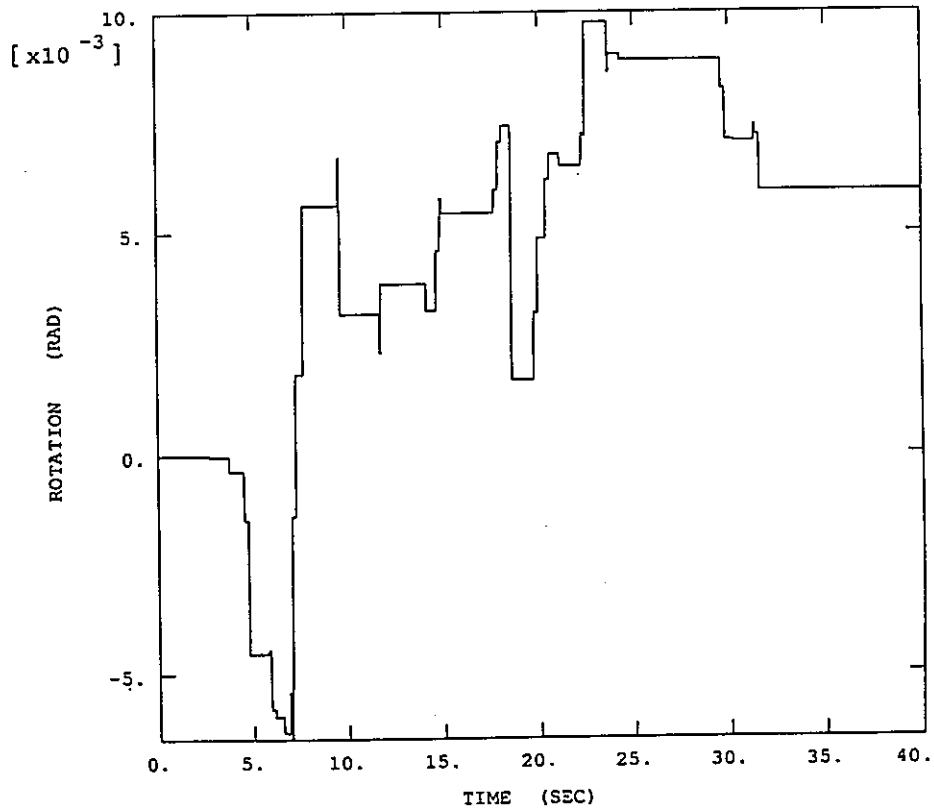
MIN -4.739E-02
MAX 3.760E-02

K3 ROTATION

図4.4.2-3 ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-10)

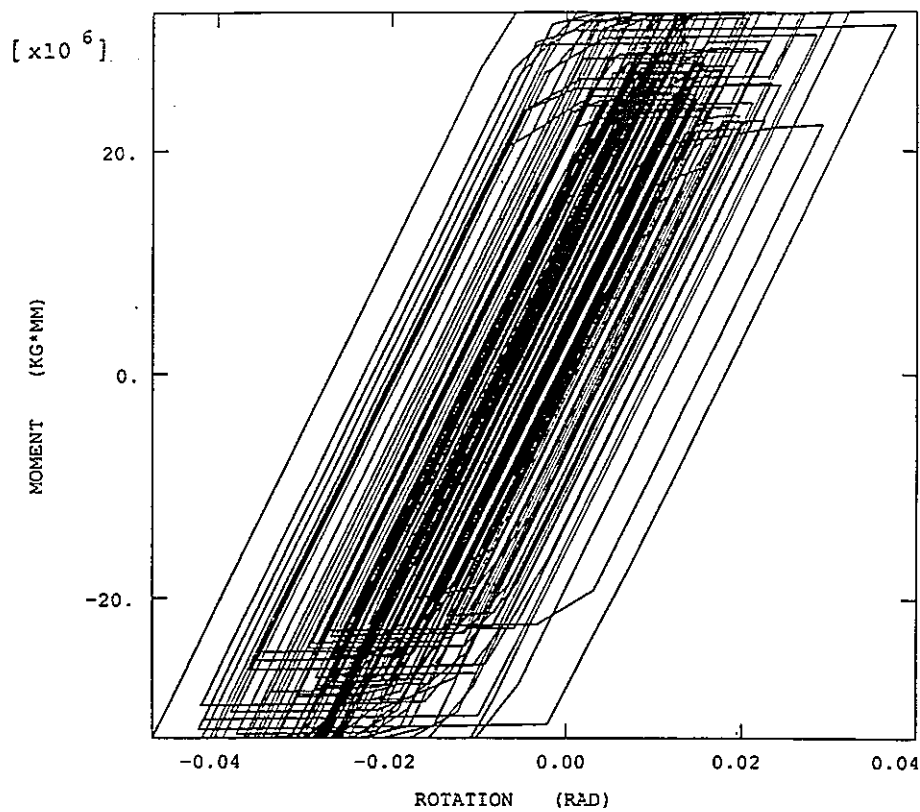


K2 MOMENT



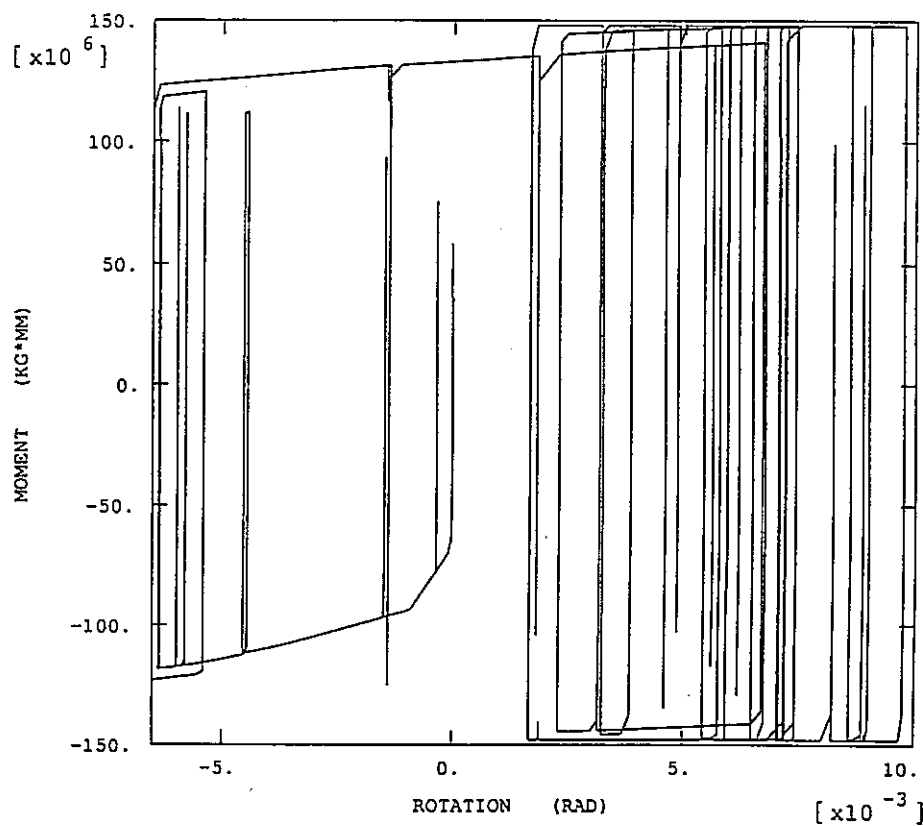
K2 ROTATION

図4.4.2-4 ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-10)



XMIN -4.739E-02
 XMAX 3.760E-02
 YMIN -3.252E+07
 YMAX 3.252E+07

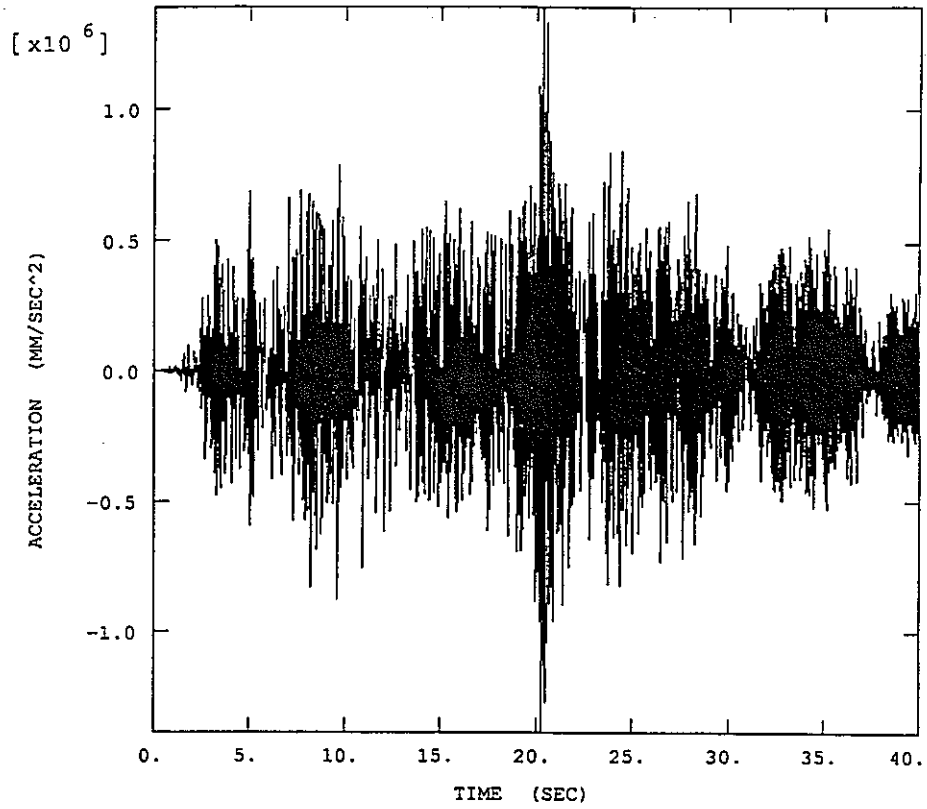
K3 MOMENT VS. ROTATION



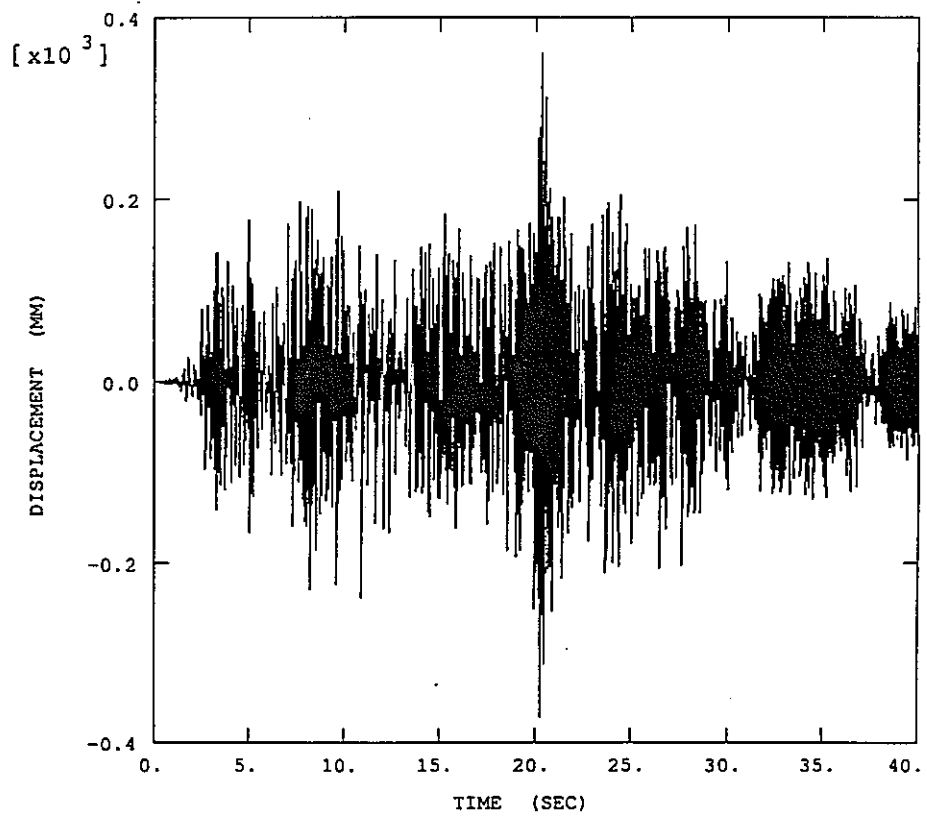
XMIN -6.513E-03
 XMAX 9.759E-03
 YMIN -1.478E+08
 YMAX 1.478E+08

K2 MOMENT VS. ROTATION

図4.4.2-5 ホットレグエルボ (K3) 及び水平管付け根 (K2) の非線形バネのヒステリシス (ケース HL-H-10)

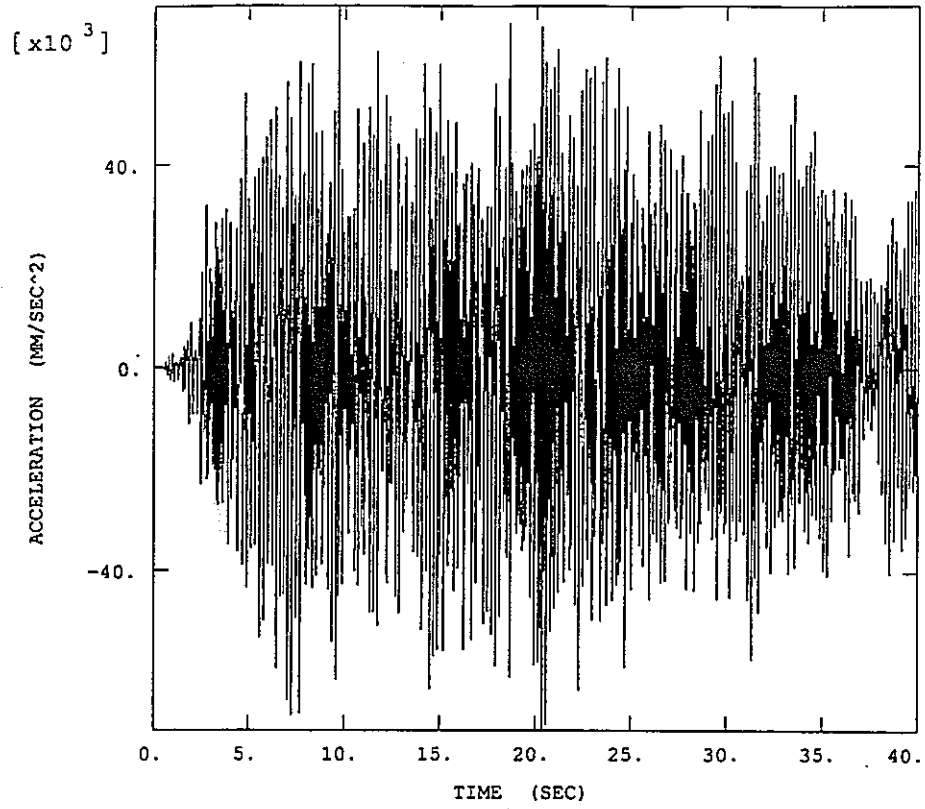


X-ACCELERATION

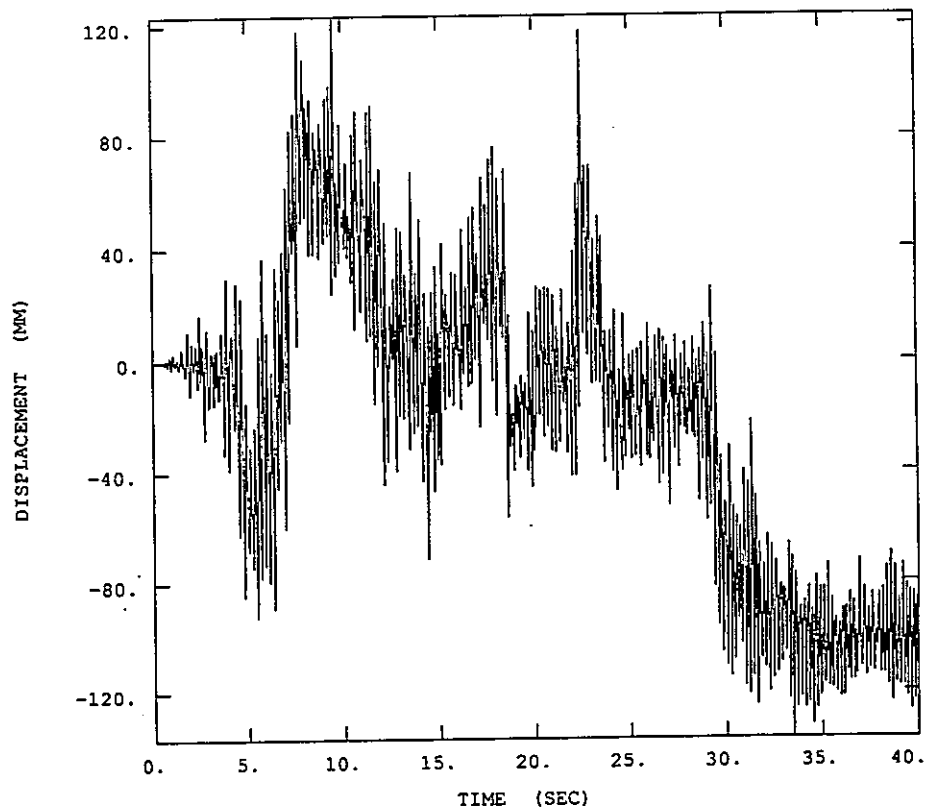


X-DISPLACEMENT

図4.4.3-1 ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-20)

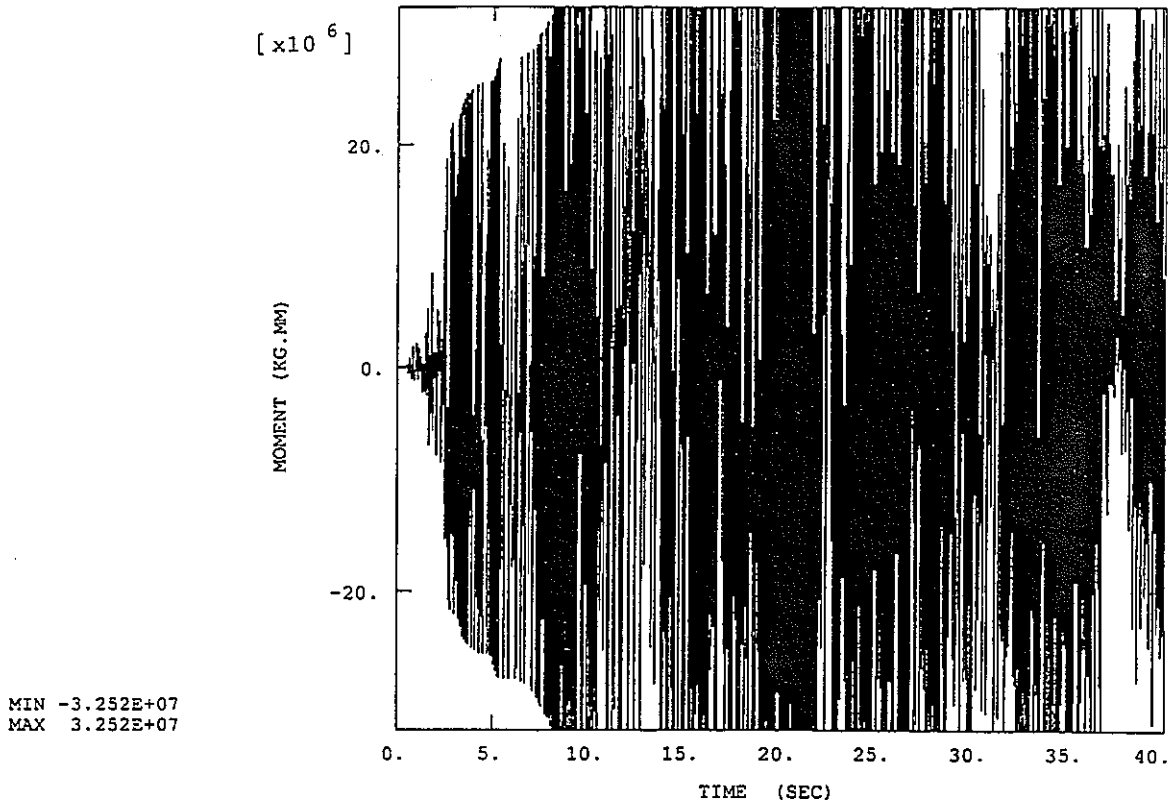


Y-ACCELERATION

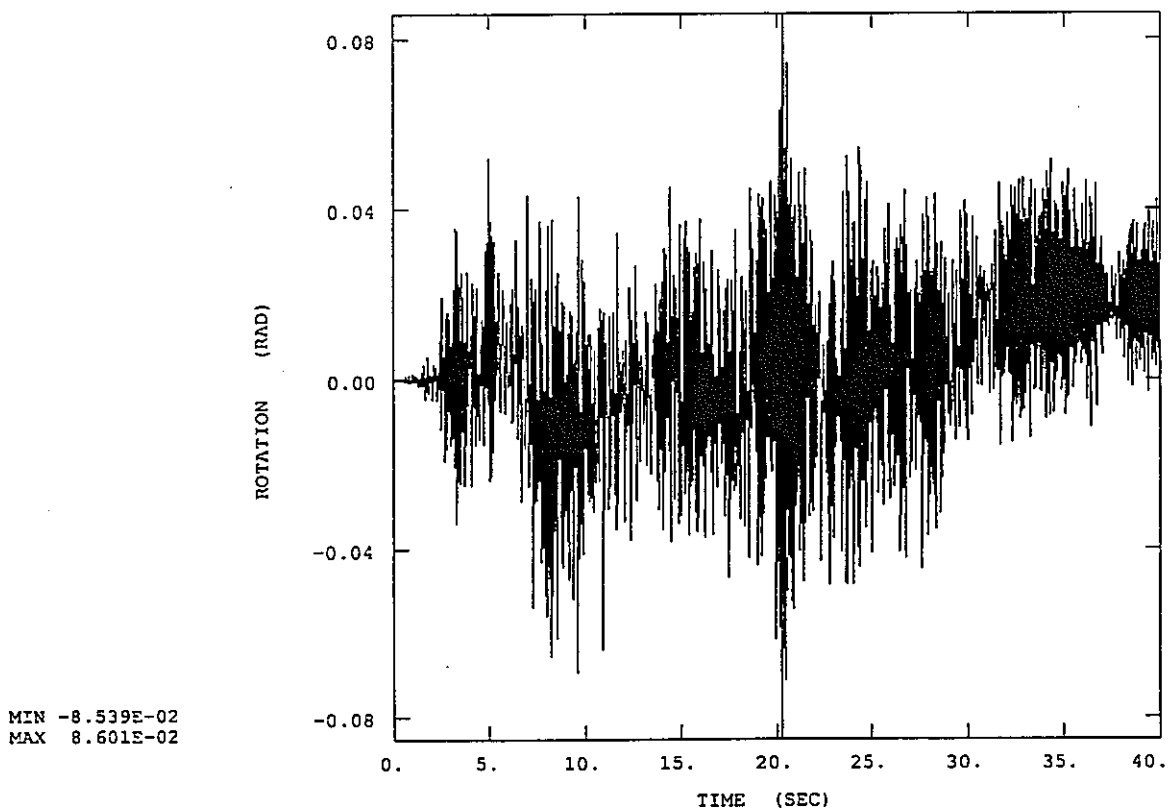


Y-DISPLACEMENT

図4.4.3-2 ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-H-20)

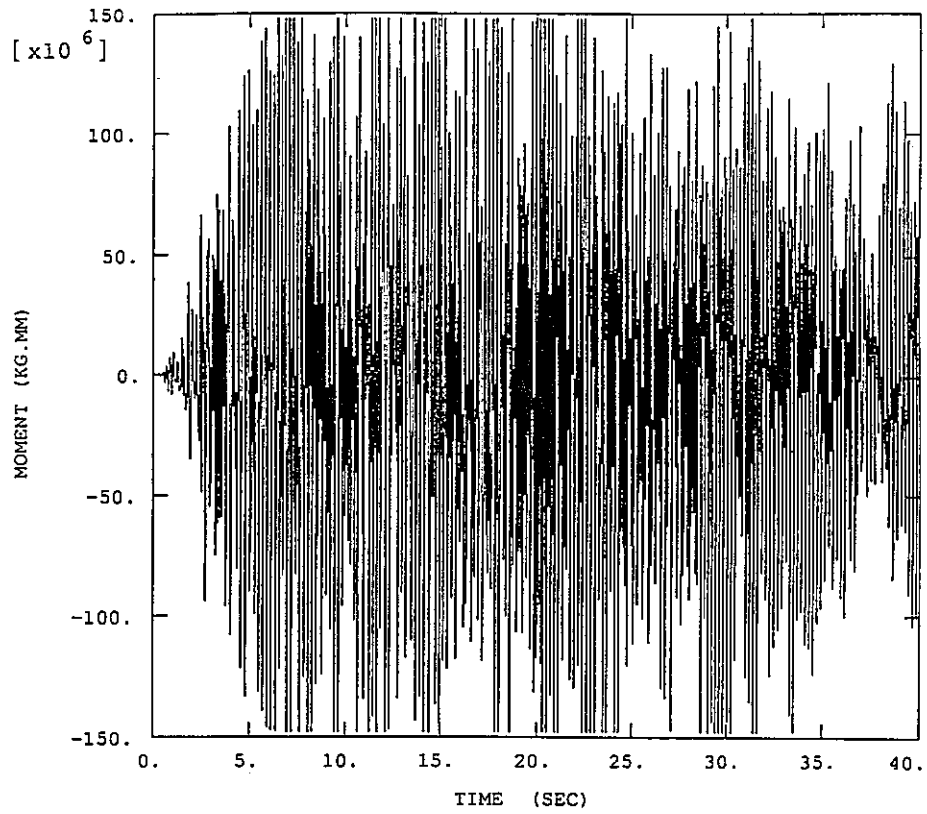


K3 MOMENT

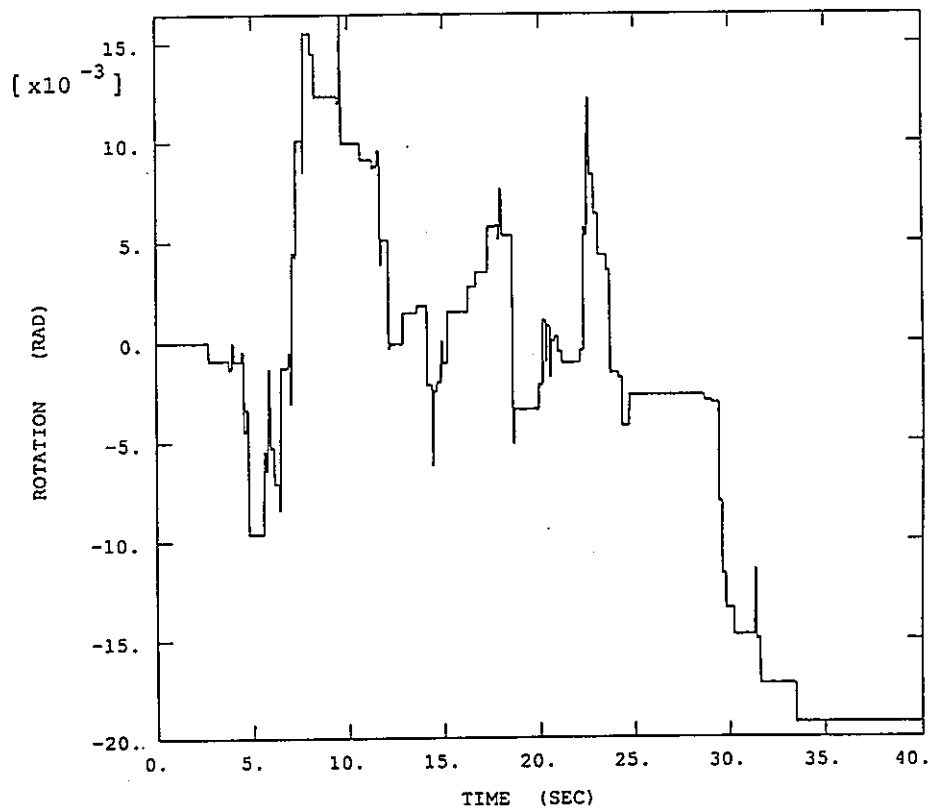


K3 ROTATION

図4.4.3-3 ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-20)

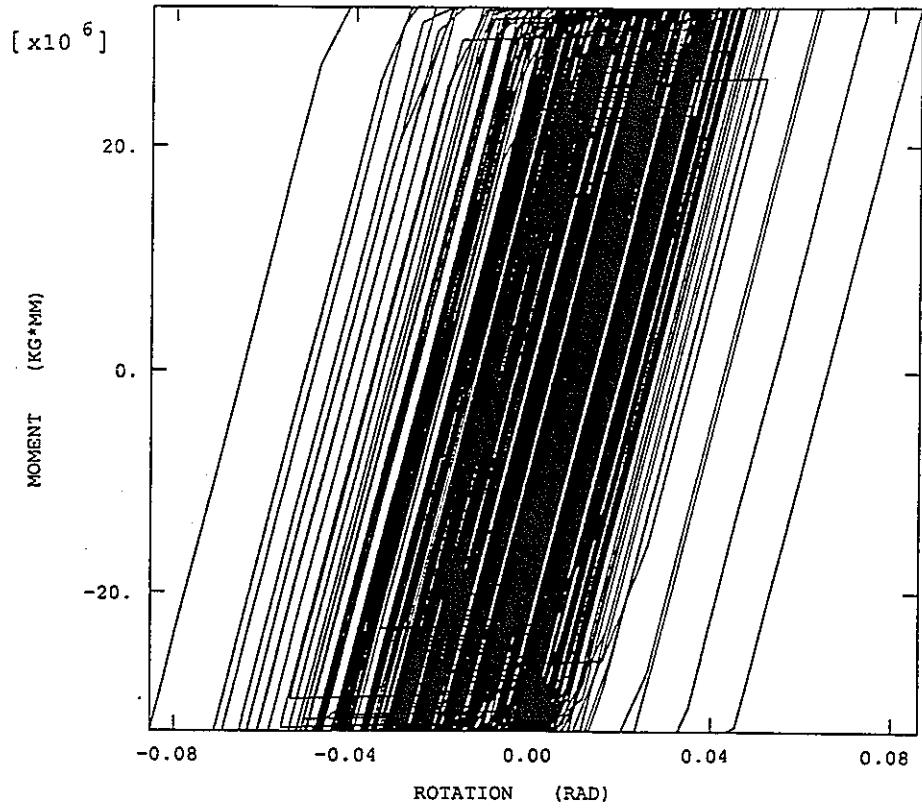


K2 MOMENT

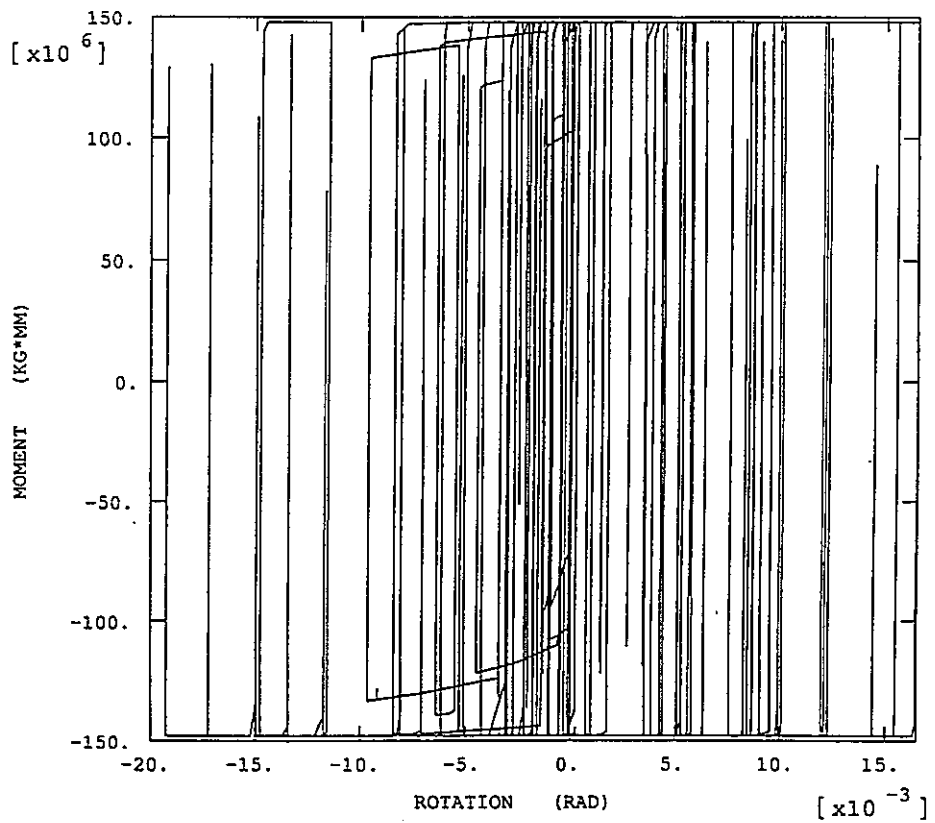


K2 ROTATION

図4.4.3-4 ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-H-20)

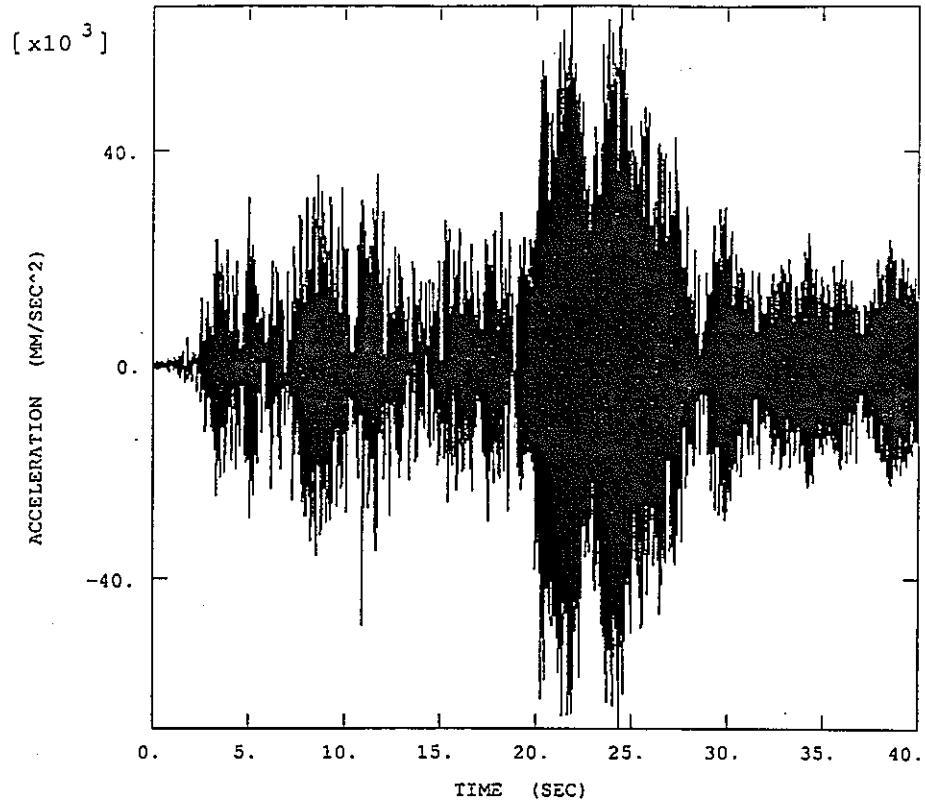


K3 MOMENT VS. ROTATION



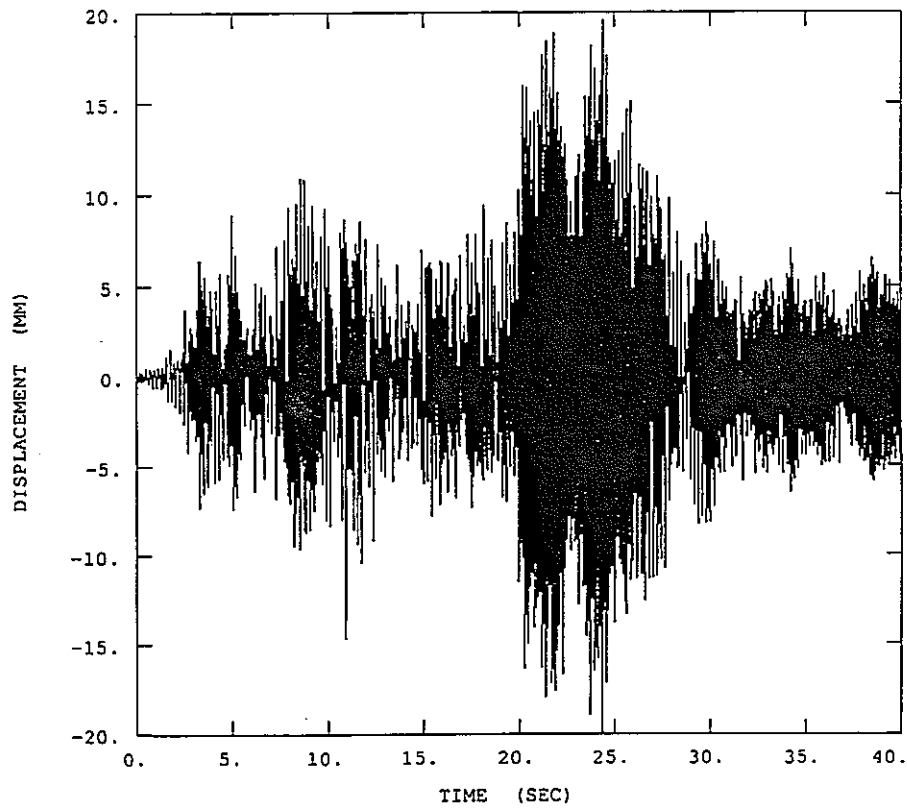
K2 MOMENT VS. ROTATION

図4.4.3-5 ホットレグエルボ (K3) 及び水平管付け根 (K2) の非線形バネのヒステリシス (ケース HL-H-20)



MIN -6.811E+04
MAX 6.728E+04

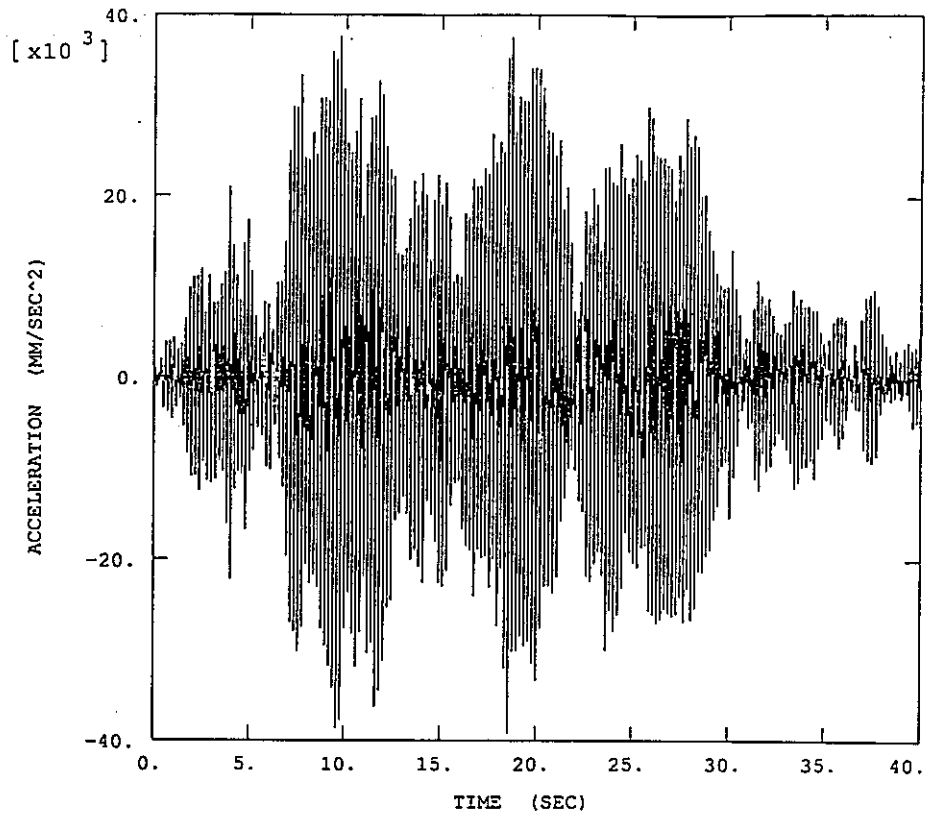
X-ACCELERATION



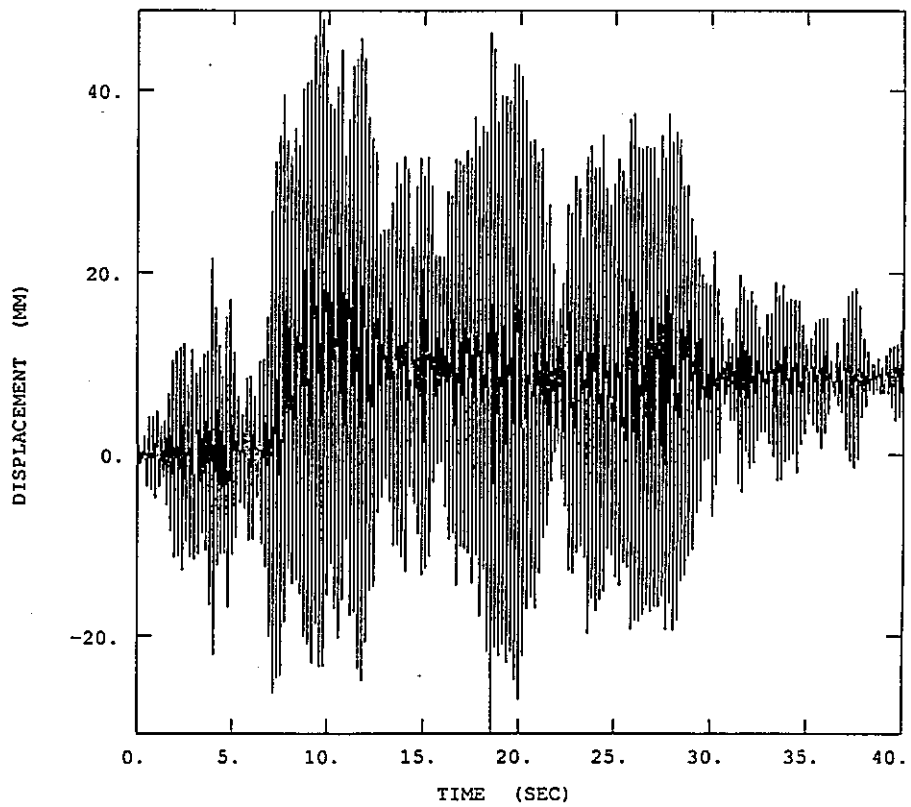
MIN -2.006E+01
MAX 1.959E+01

X-DISPLACEMENT

図4.4.4-1 ホットレグ鉛直管下端の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-HV-5)

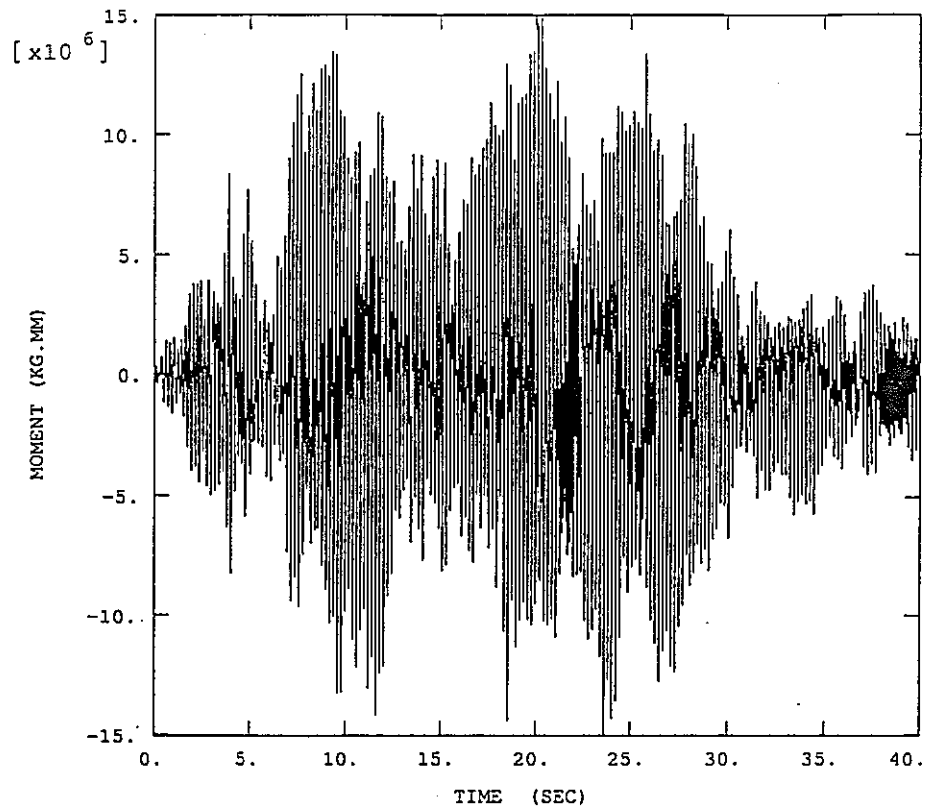


Y-ACCELERATION

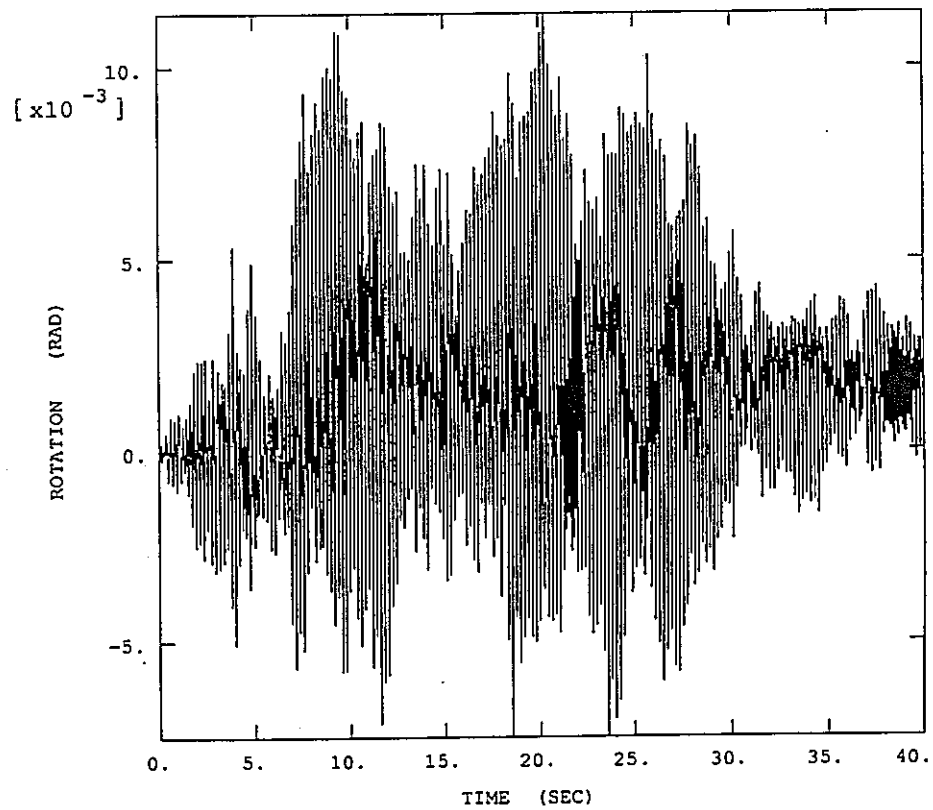


Y-DISPLACEMENT

図4.4.4-2 ホットレグ鉛直管下端の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース HL-HV-5)

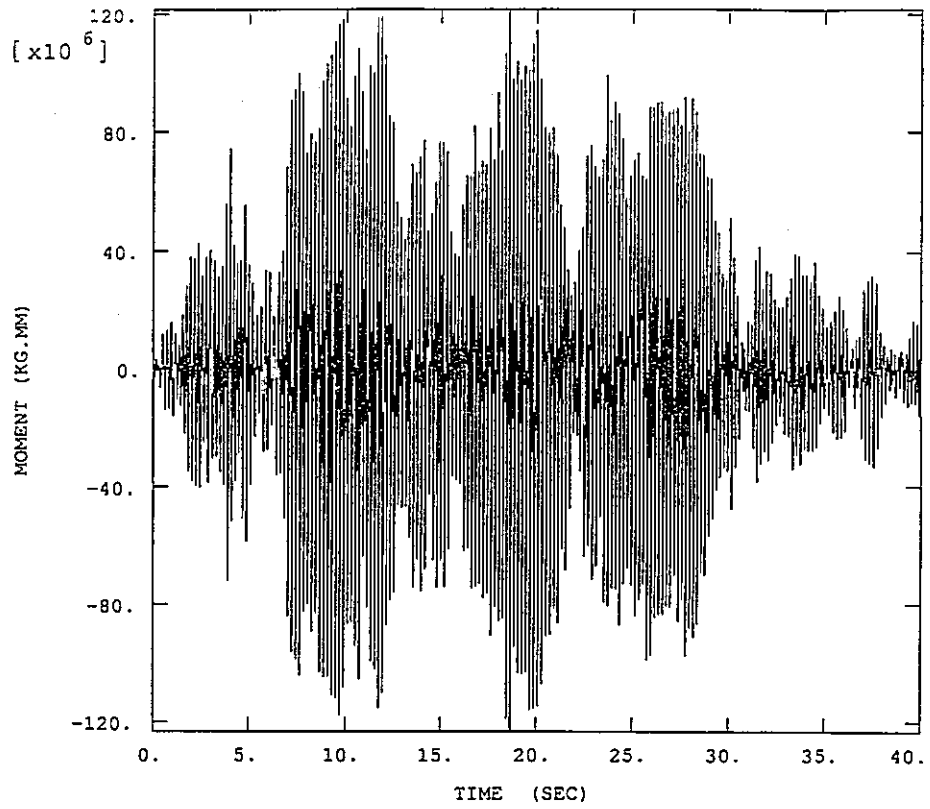


K3 MOMENT

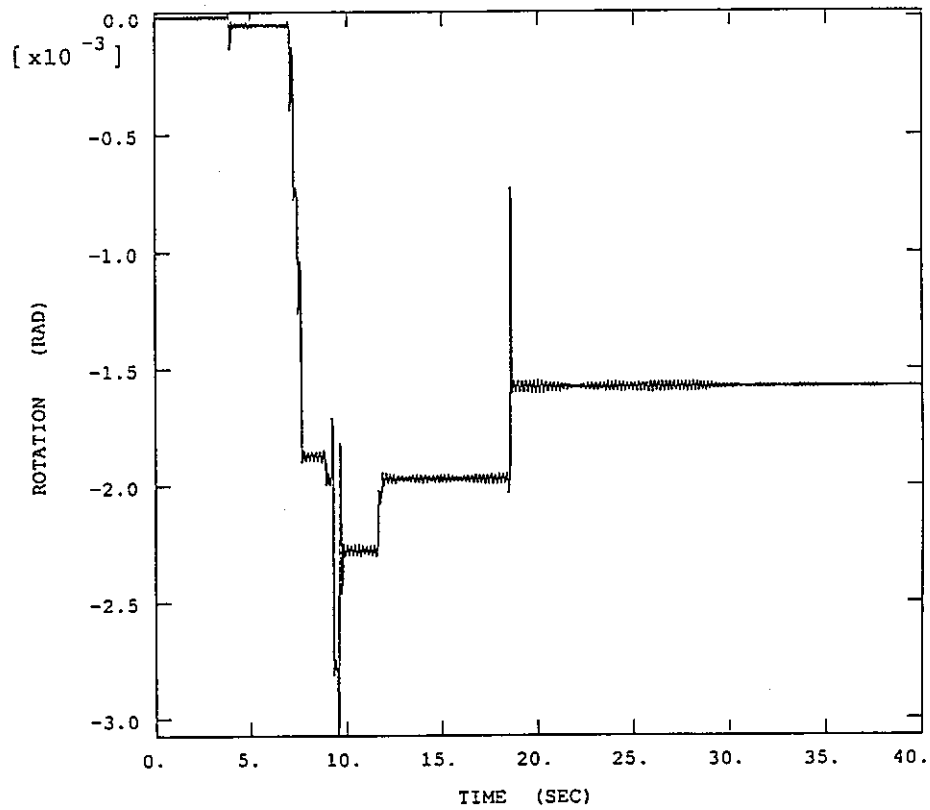


K3 ROTATION

図4.4.4-3 ホットレグエルボの非線形バネK3のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-HV-5)

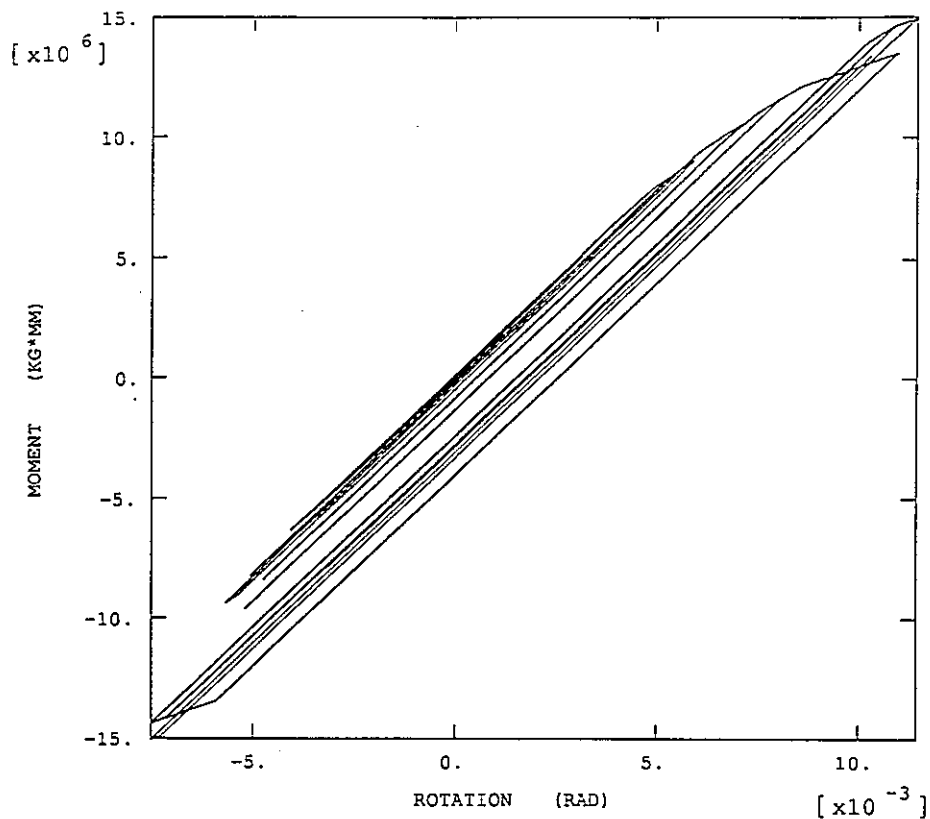


K2 MOMENT

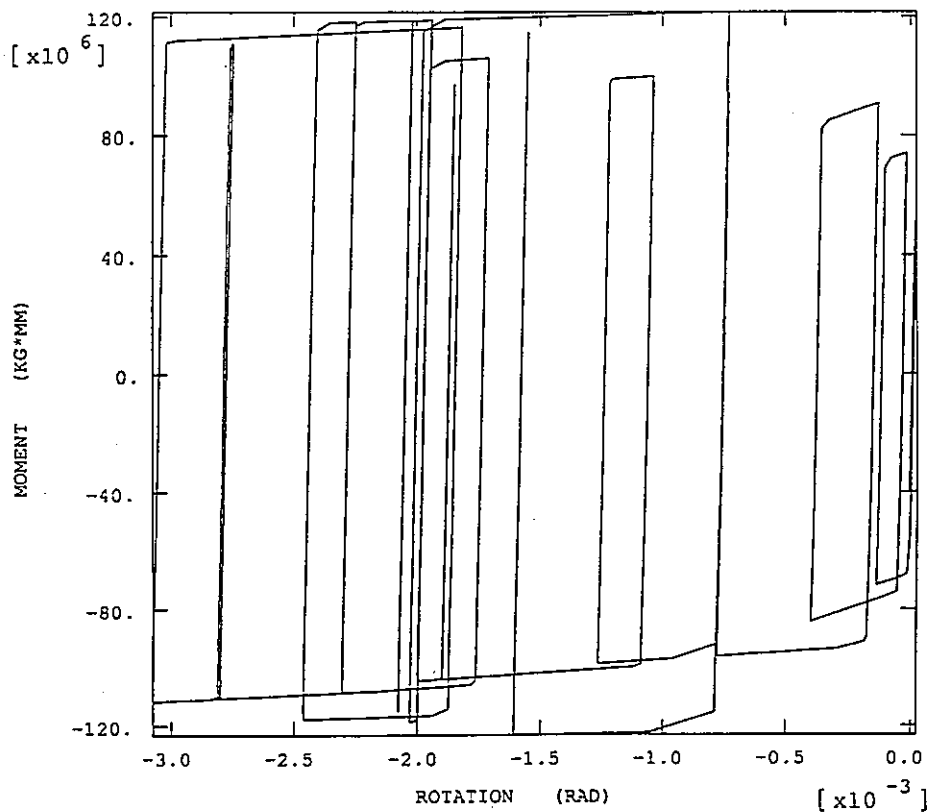


K2 ROTATION

図4.4.4-4 ホットレグ水平管付け根の非線形バネK2のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース HL-HV-5)



K3 MOMENT VS. ROTATION



K2 MOMENT VS. ROTATION

図4.4.4-5 ホットレグエルボ (K3) 及び水平管付け根 (K2) の非線形バネのヒステリシス
 (ケース HL-HV-5)

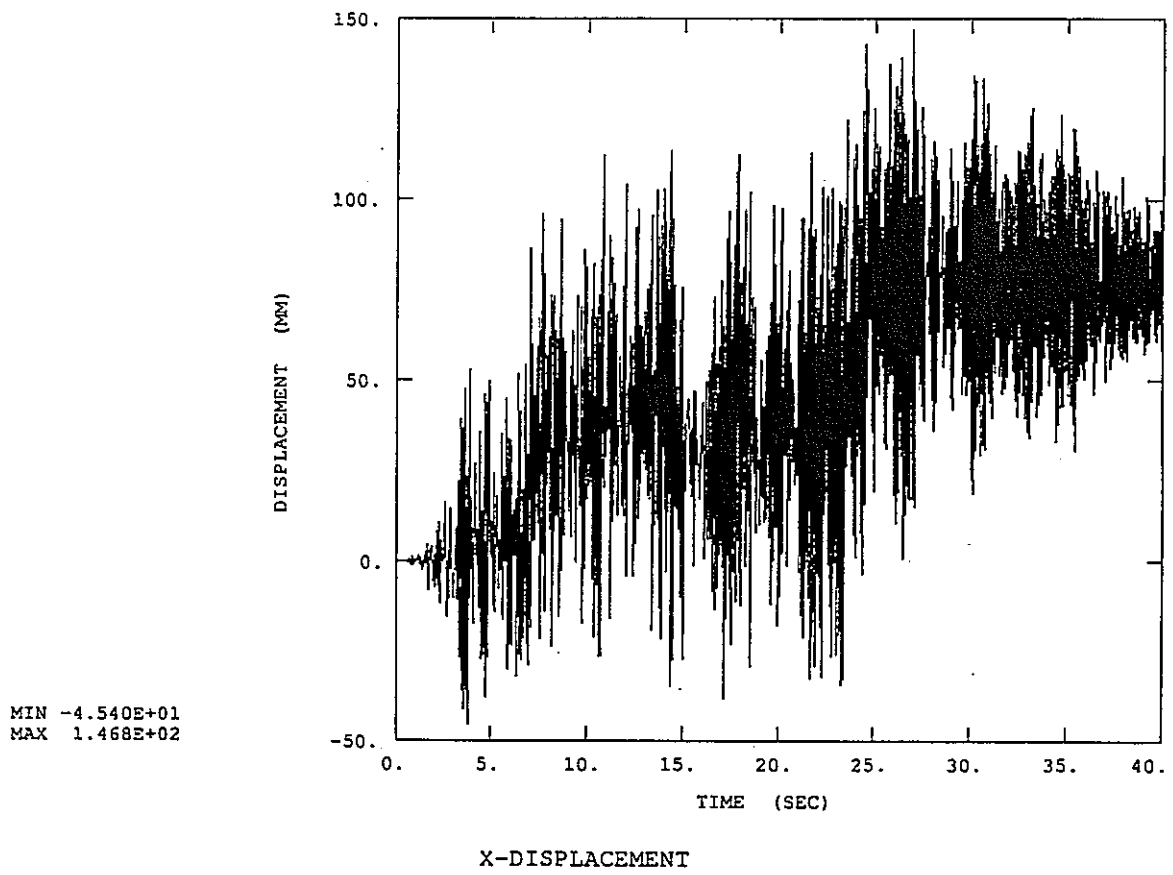
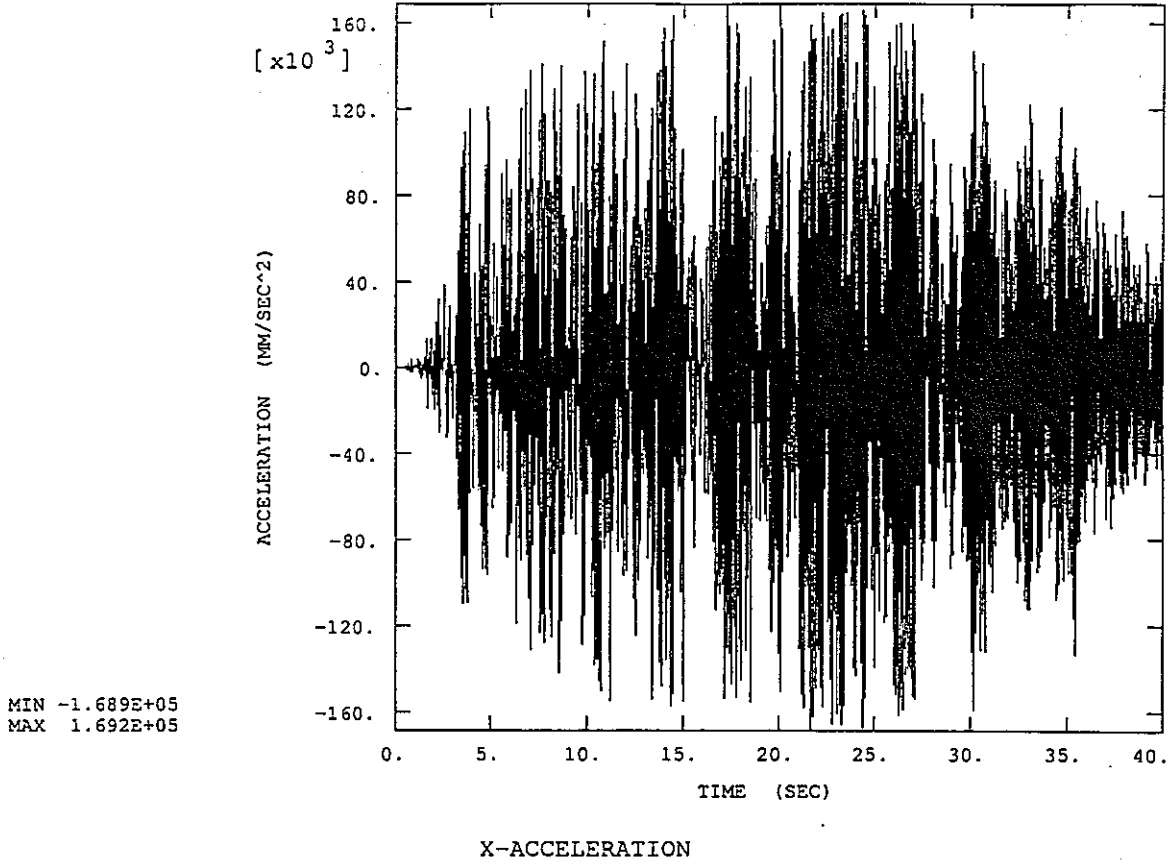
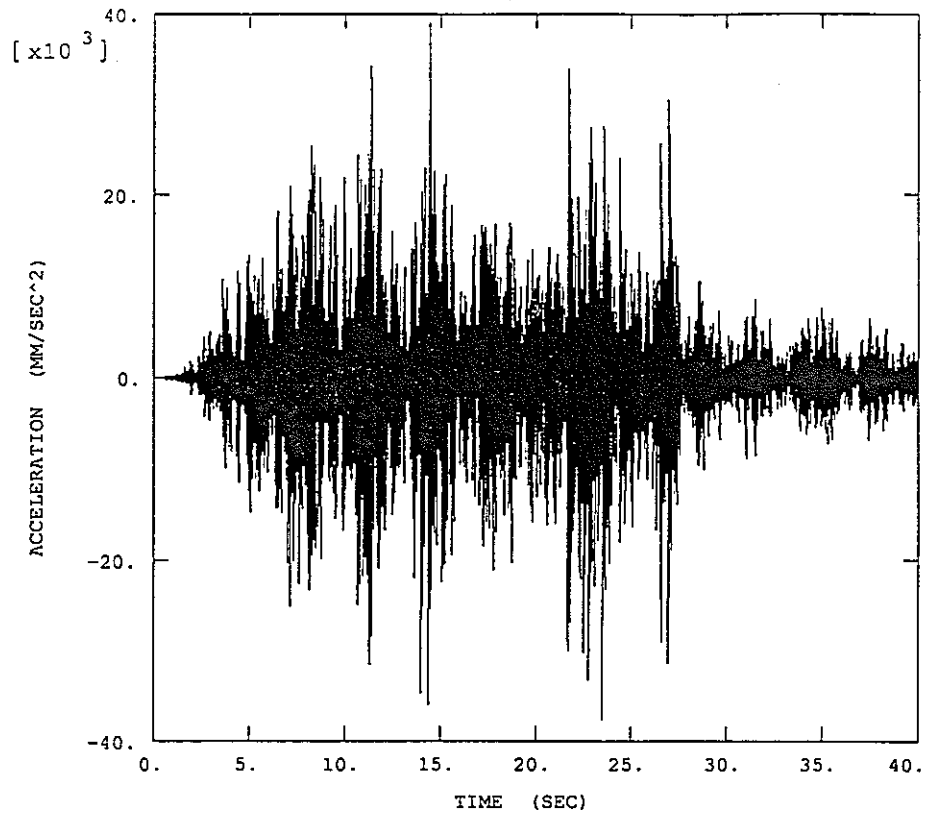
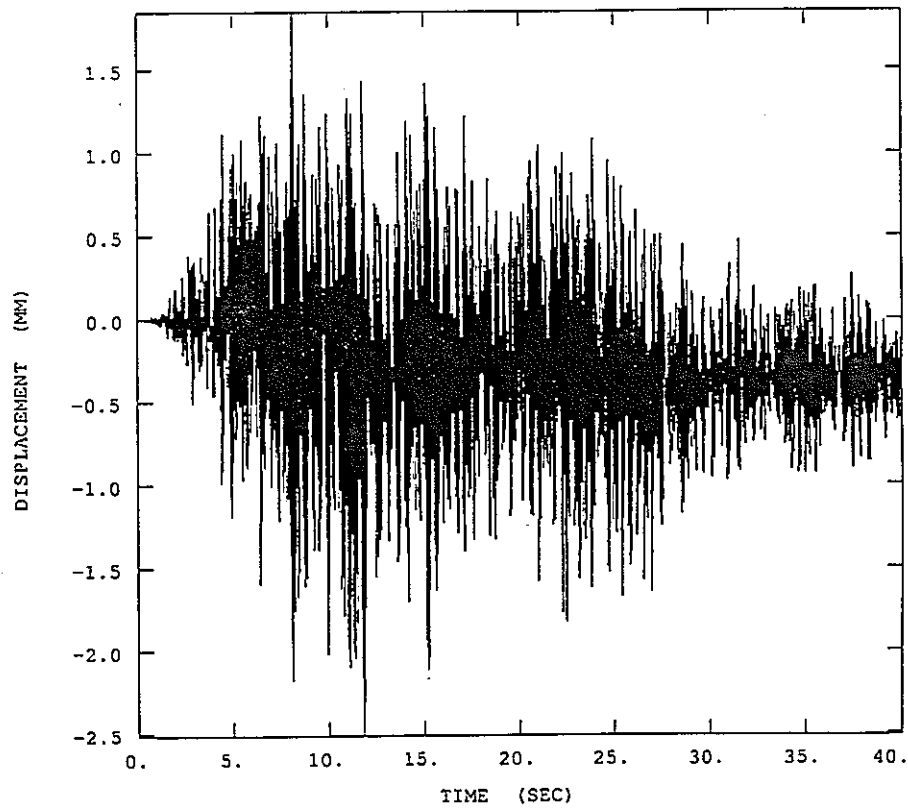


図4.5.1-1 ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-5)

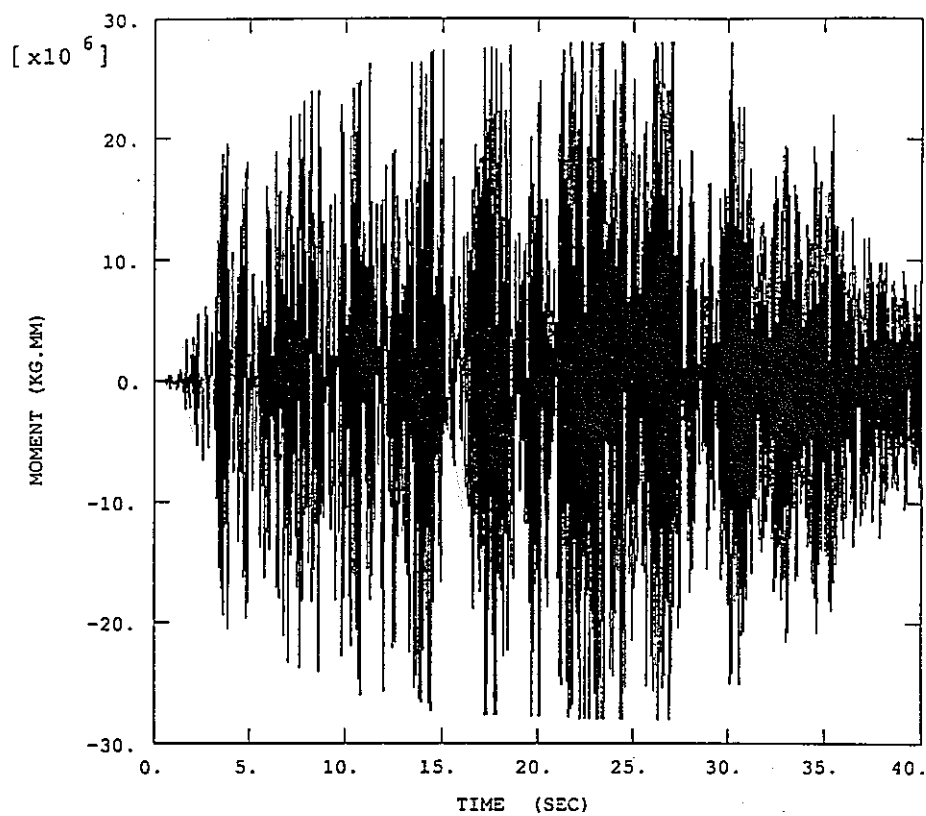


Y-ACCELERATION

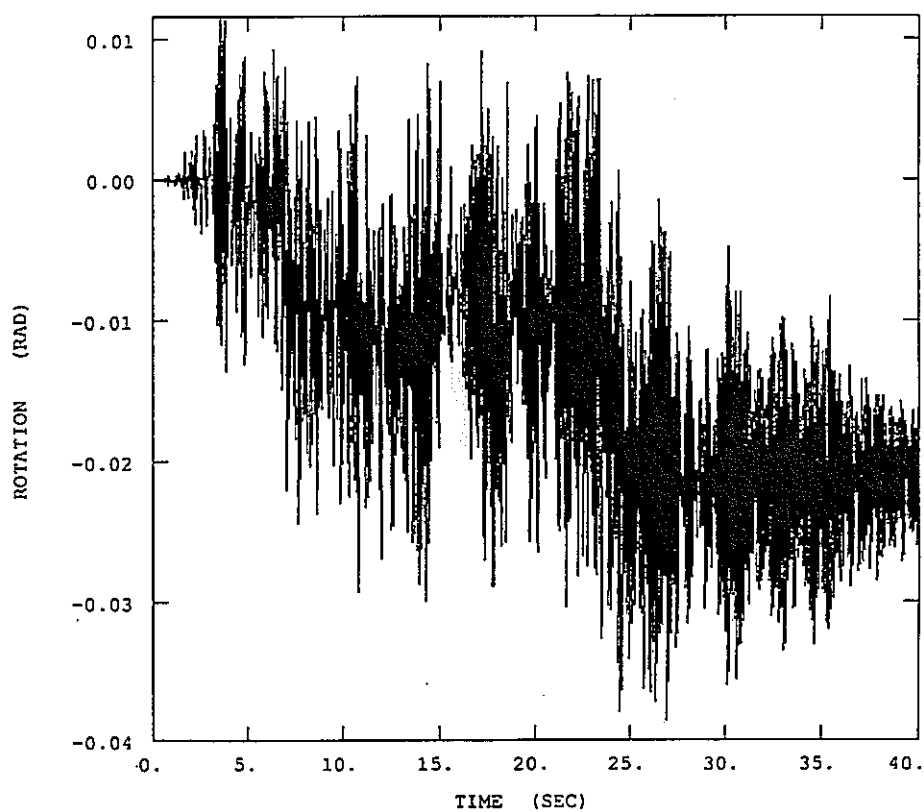


Y-DISPLACEMENT

図4.5.1-2 ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-5)

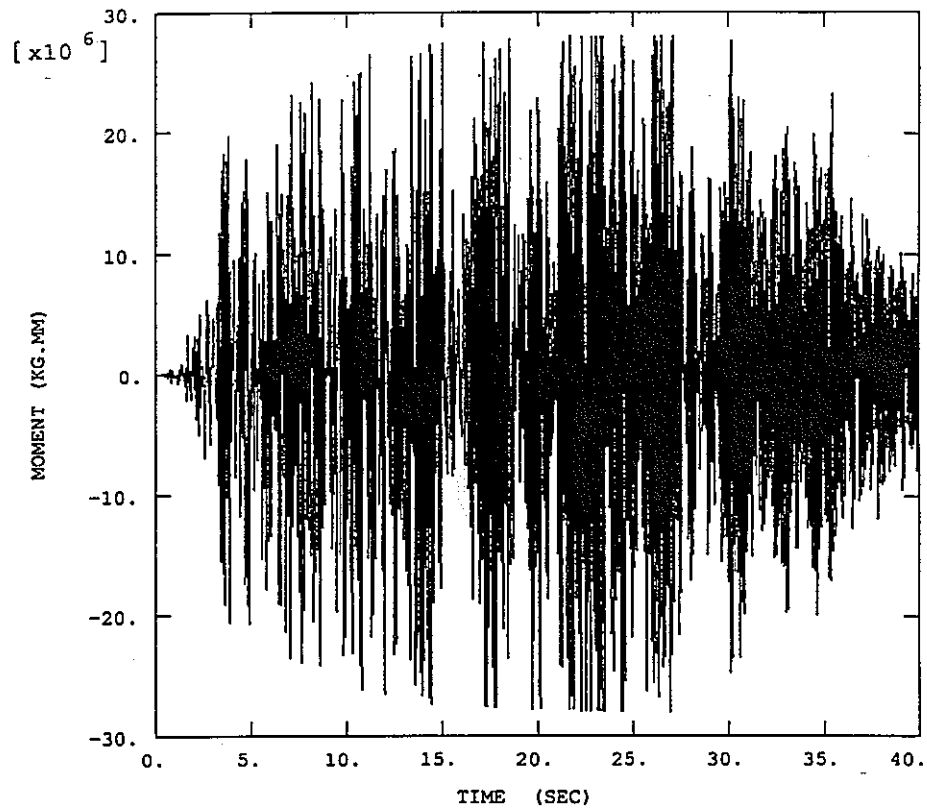


K8 MOMENT



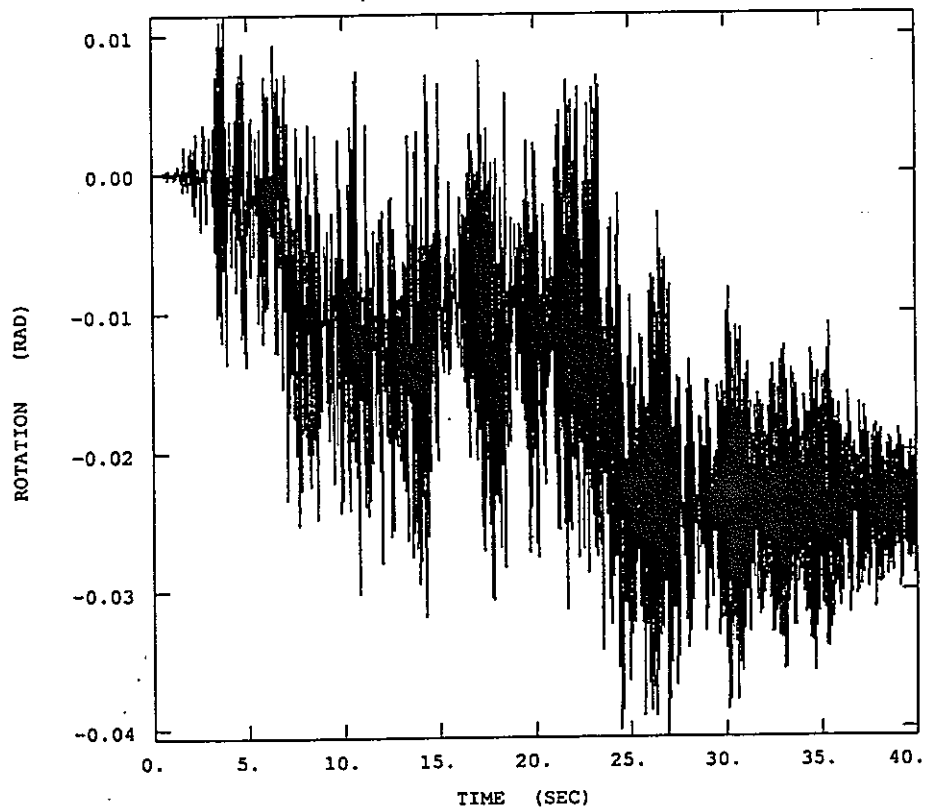
K8 ROTATION

図4.5.1-3 ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-5)



MIN -2.802E+07
MAX 2.802E+07

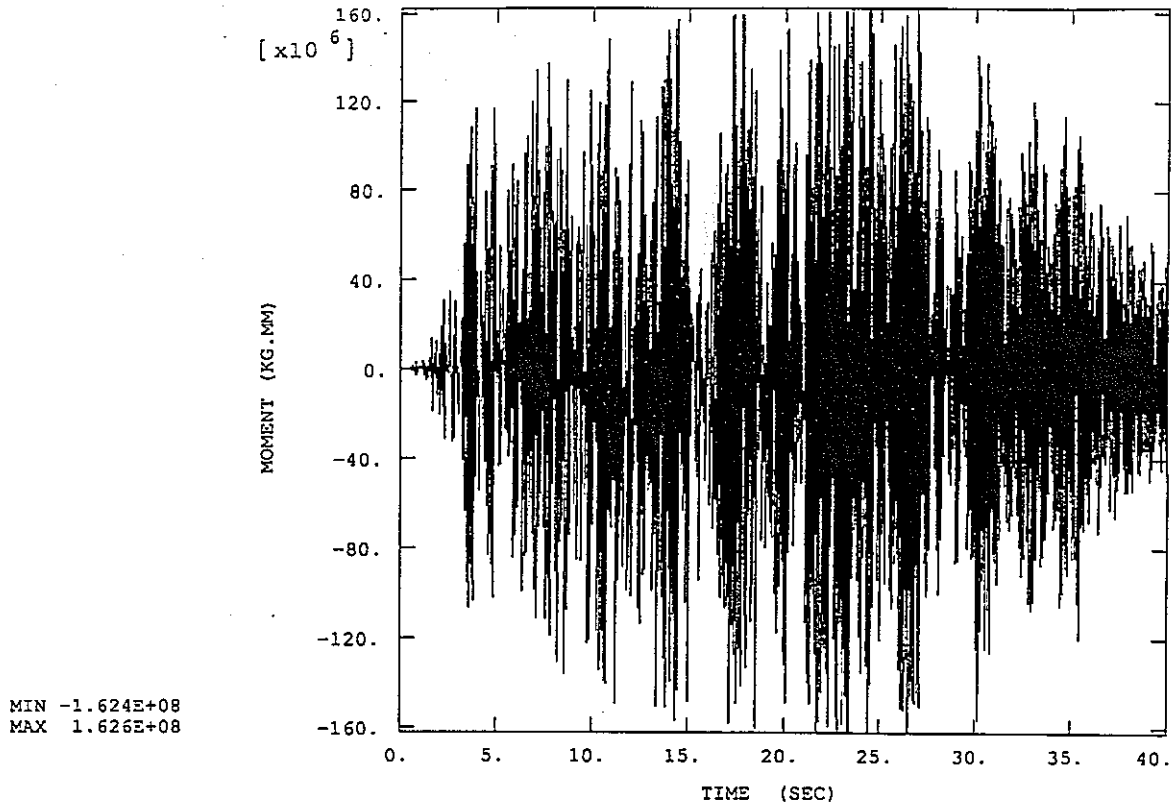
K6 MOMENT



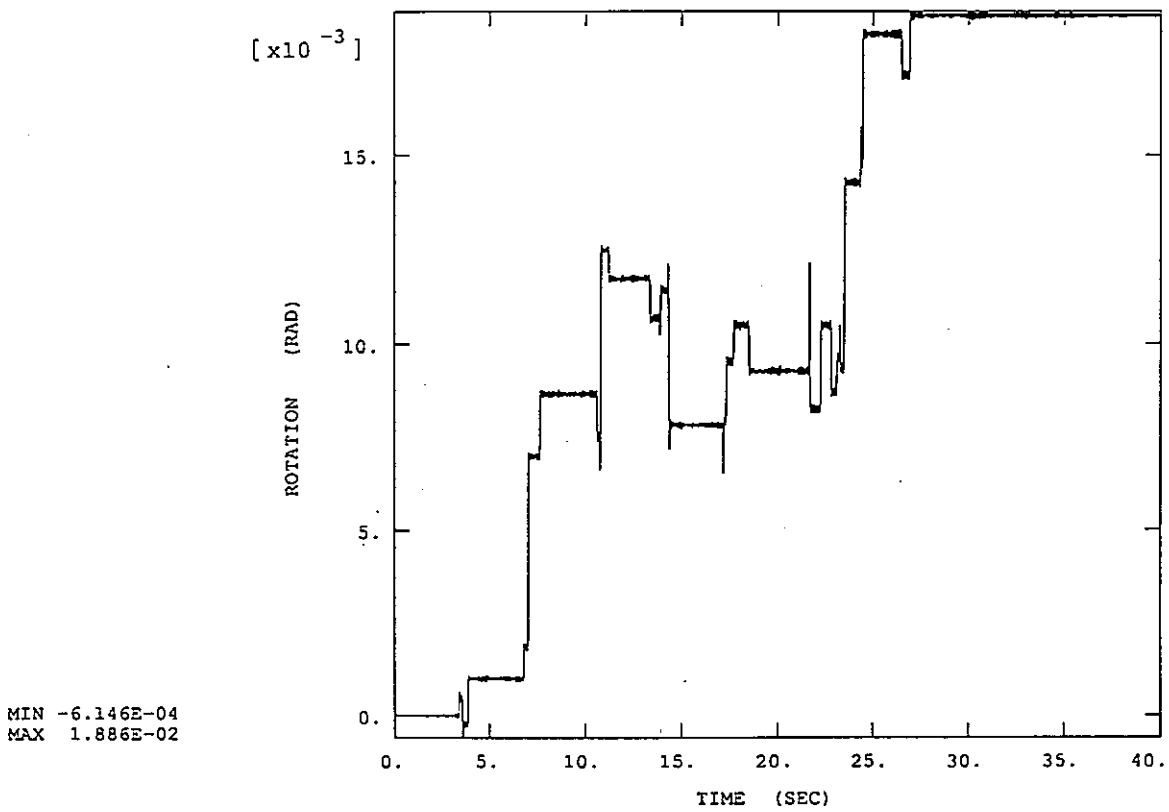
MIN -4.068E-02
MAX 1.145E-02

K6 ROTATION

図4.5.1-4 ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-5)

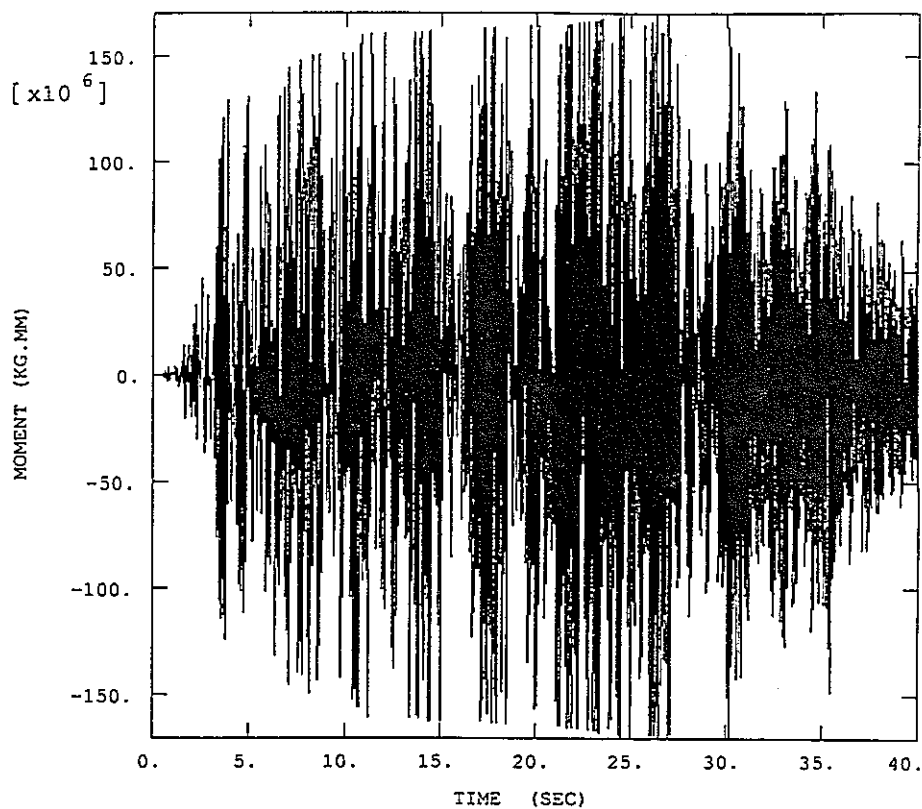


K7 MOMENT

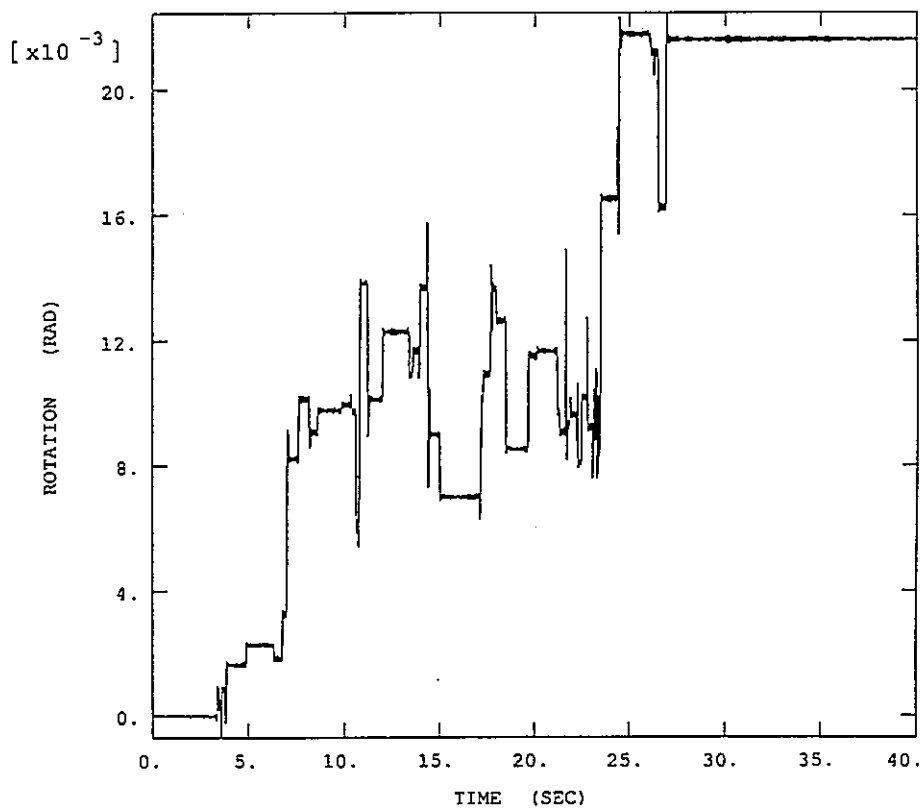


K7 ROTATION

図4.5.1-5 ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び回転変形の履歴
(ケース ML-H-5)

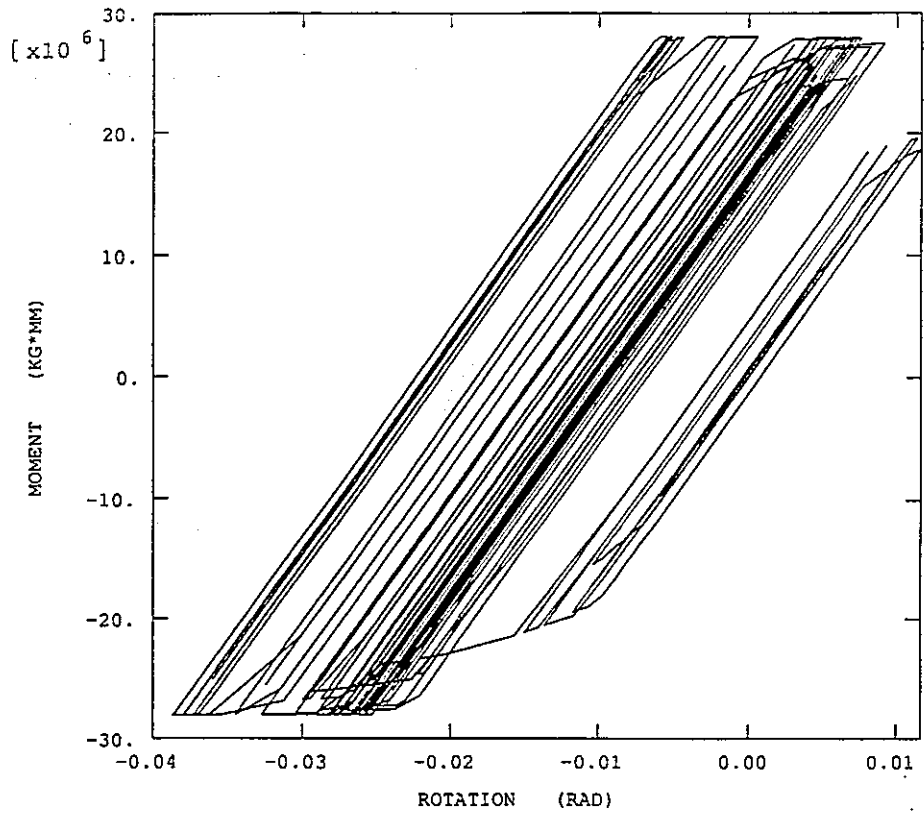


K5 MOMENT



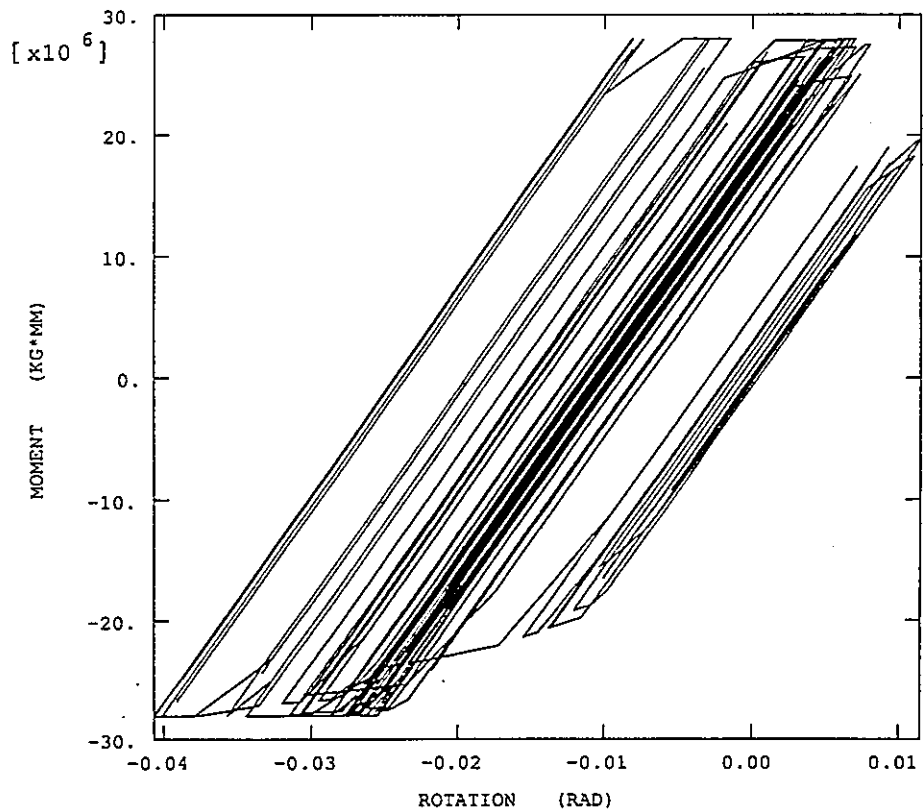
K5 ROTATION

図4.5.1-6 ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴
(ケース ML-H-5)



XMIN -3.863E-02
 XMAX 1.165E-02
 YMIN -2.802E+07
 YMAX 2.803E+07

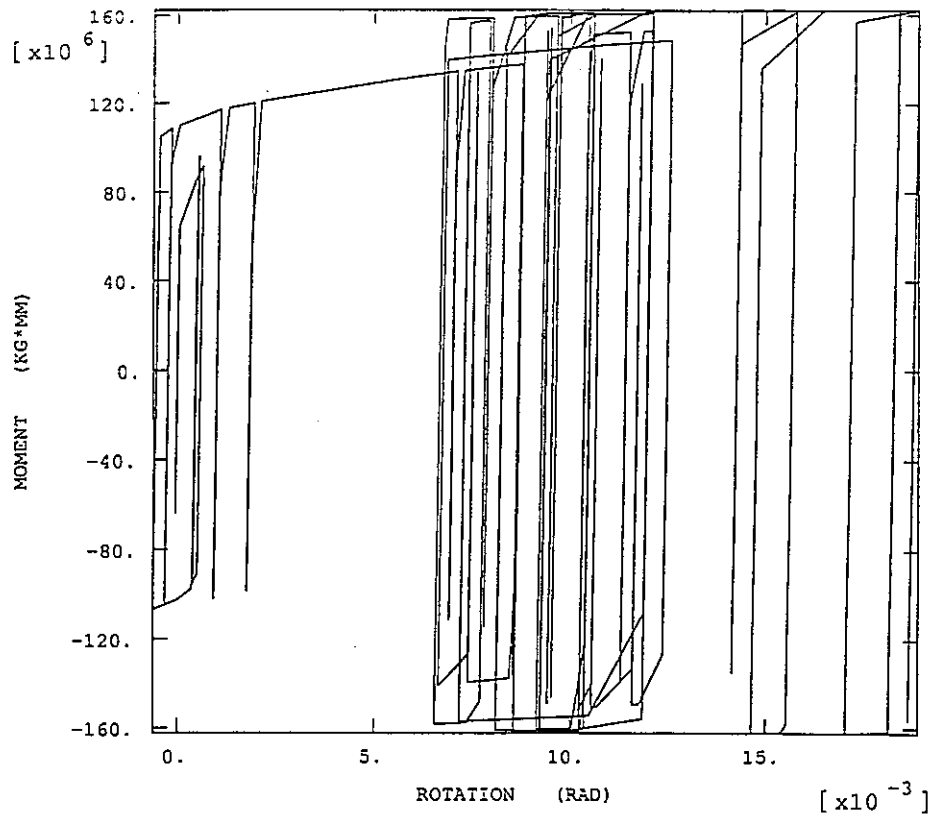
K8 MOMENT VS. ROTATION



XMIN -4.068E-02
 XMAX 1.145E-02
 YMIN -2.802E+07
 YMAX 2.802E+07

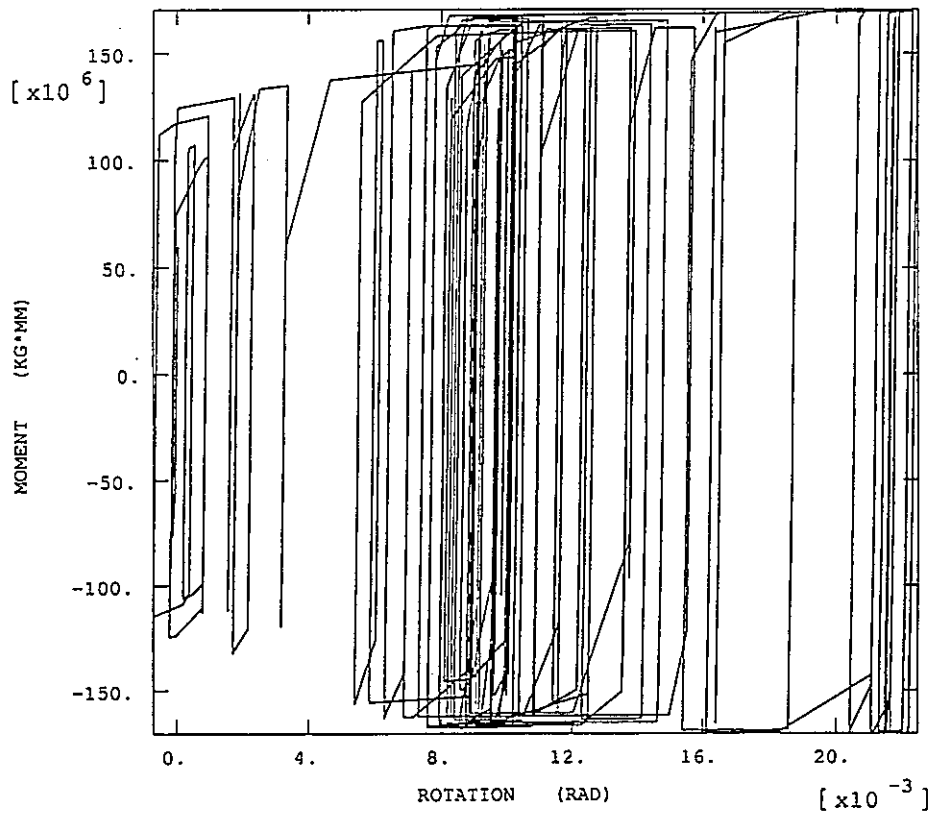
K6 MOMENT VS. ROTATION

図4.5.1-7 ミドルレグエルボ (IHX側:K8, ポンプ側:K6) の非線形バネのヒステリシス
 (ケース ML-H-5)



XMIN -6.146E-04
 XMAX 1.886E-02
 YMIN -1.624E+08
 YMAX 1.626E+08

K7 MOMENT VS. ROTATION

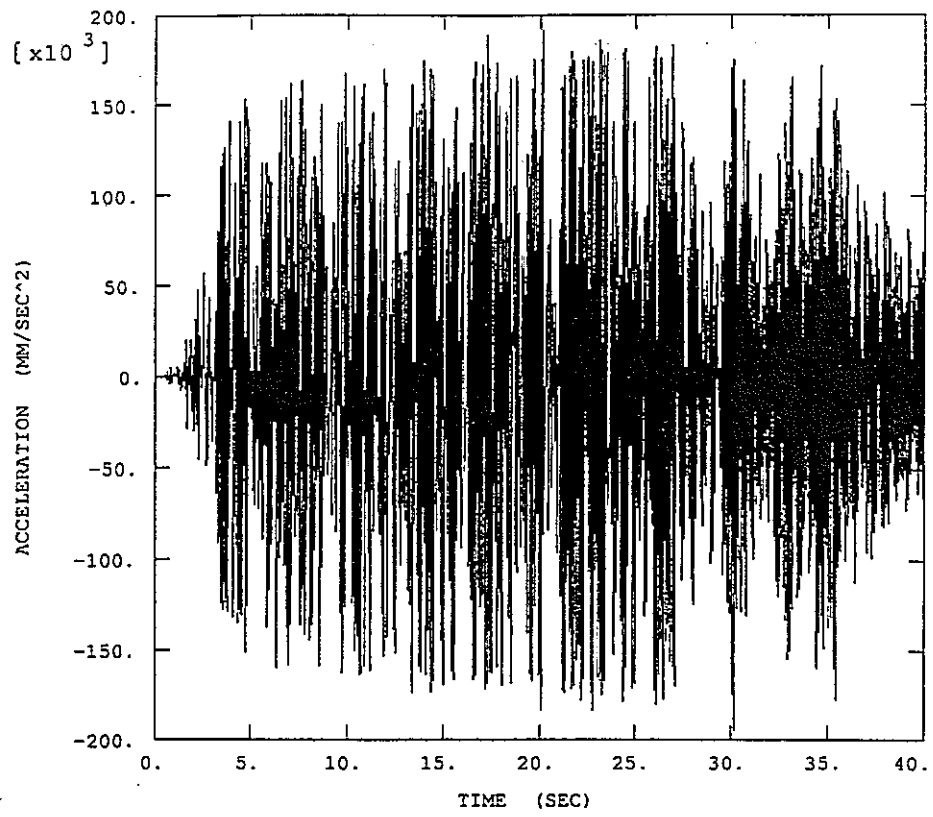


XMIN -7.045E-04
 XMAX 2.246E-02
 YMIN -1.707E+08
 YMAX 1.707E+08

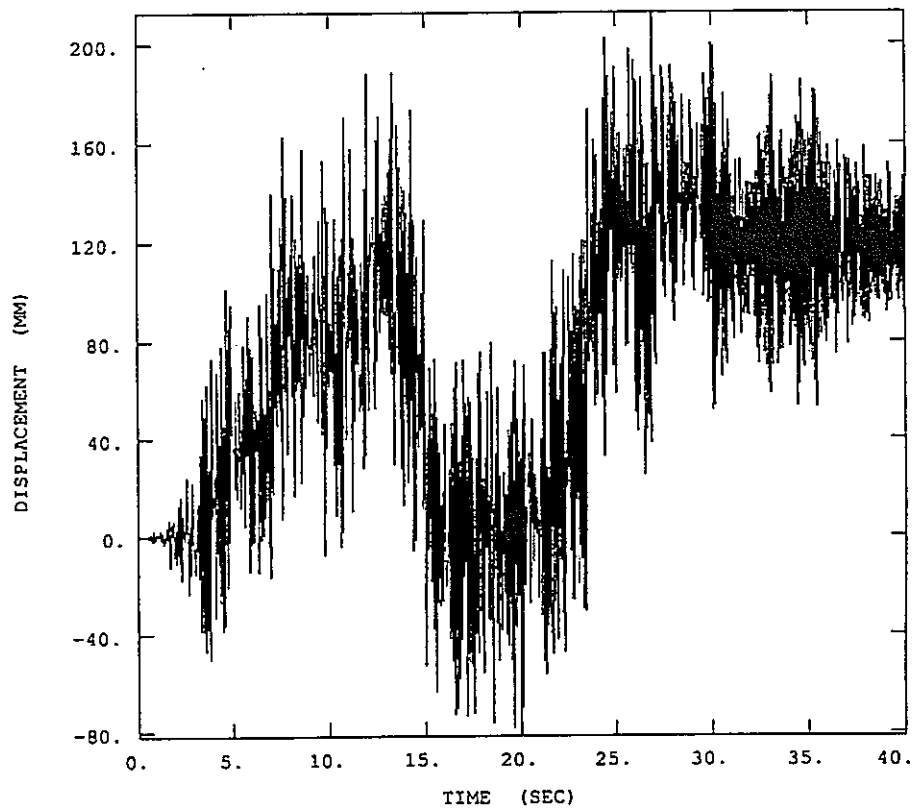
K5 MOMENT VS. ROTATION

図4.5.1-8 ミドルレグ鉛直管付け根 (IHX側:K7, ポンプ側:K5) の非線形バネのヒステリシス

(ケース ML-H-5)

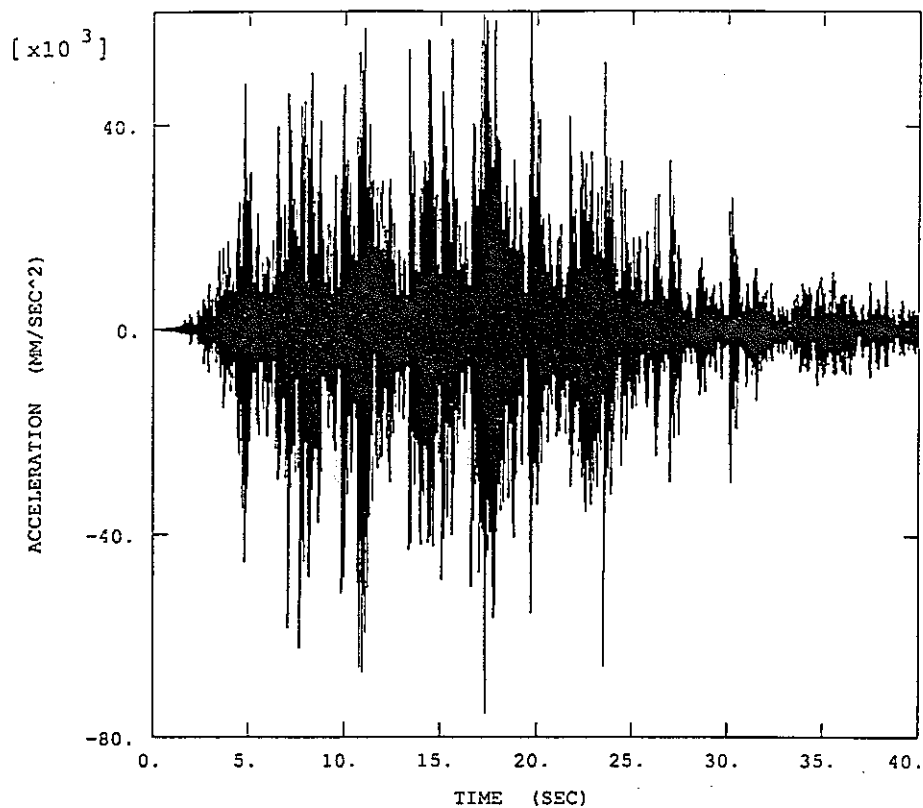


X-ACCELERATION

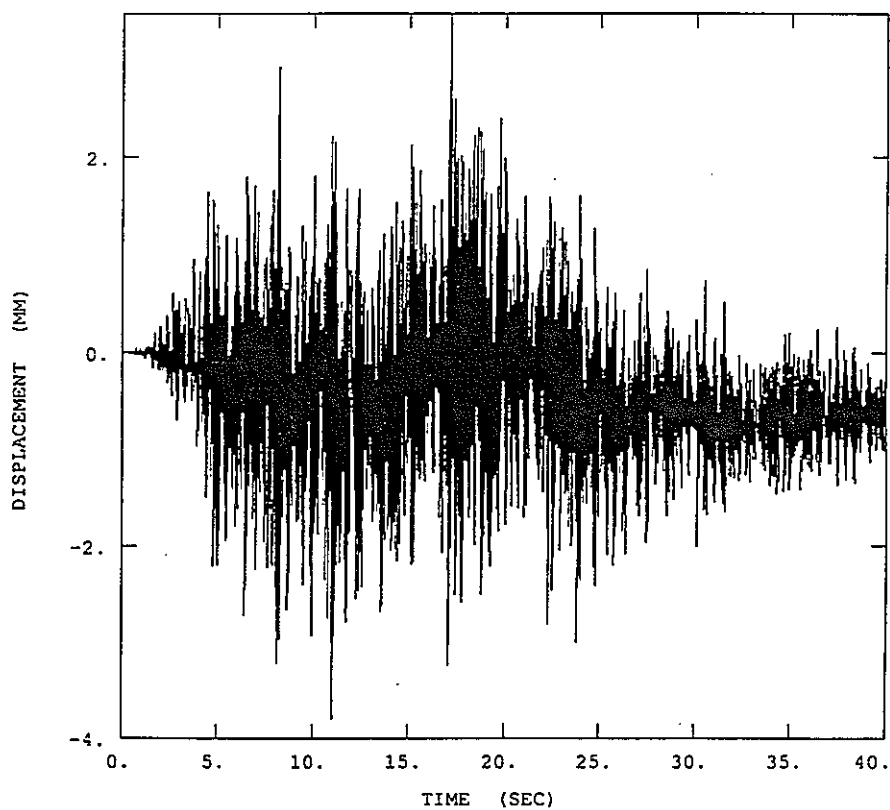


X-DISPLACEMENT

図4.5.2-1 ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-7.5)

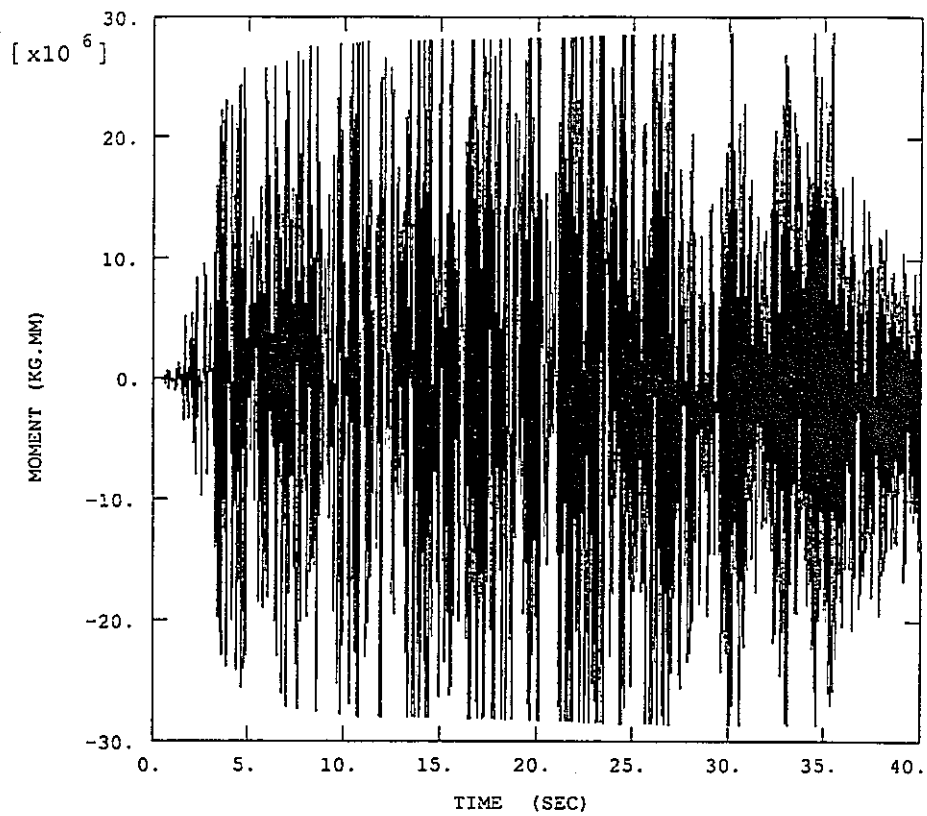


Y-ACCELERATION

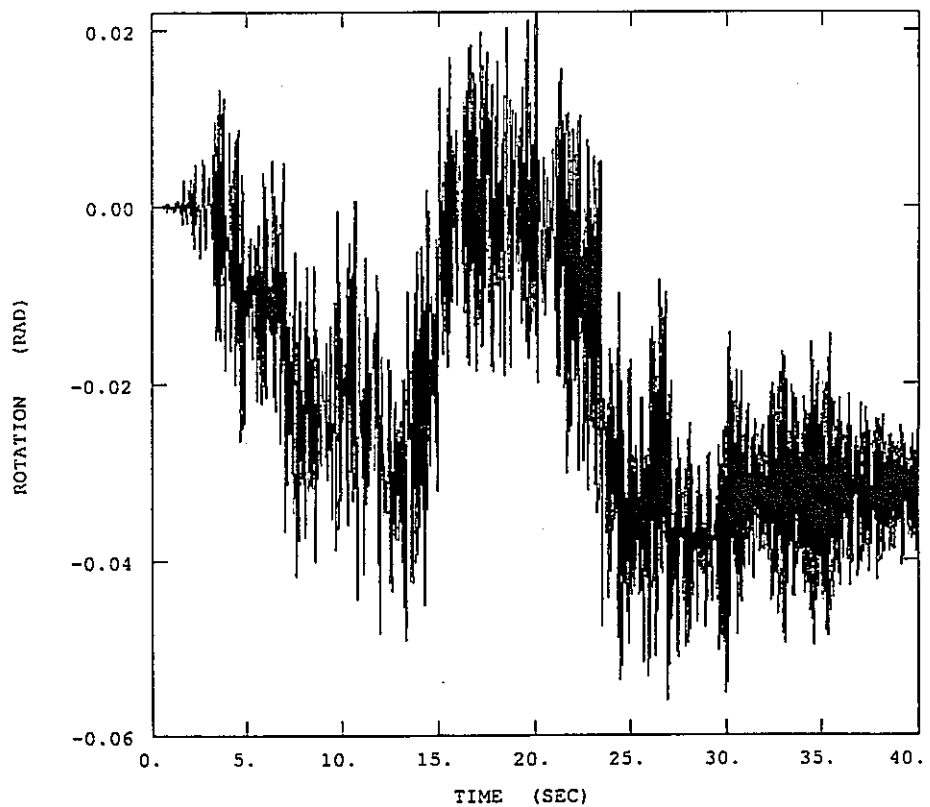


Y-DISPLACEMENT

図4.5.2-2 ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-7.5)

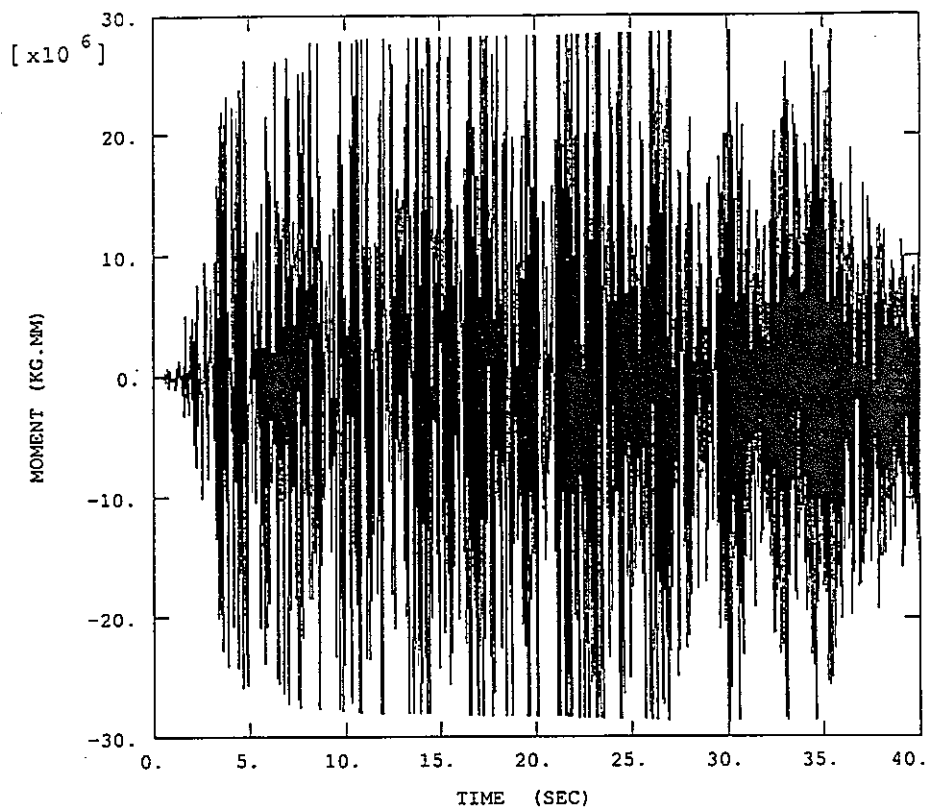


K8 MOMENT

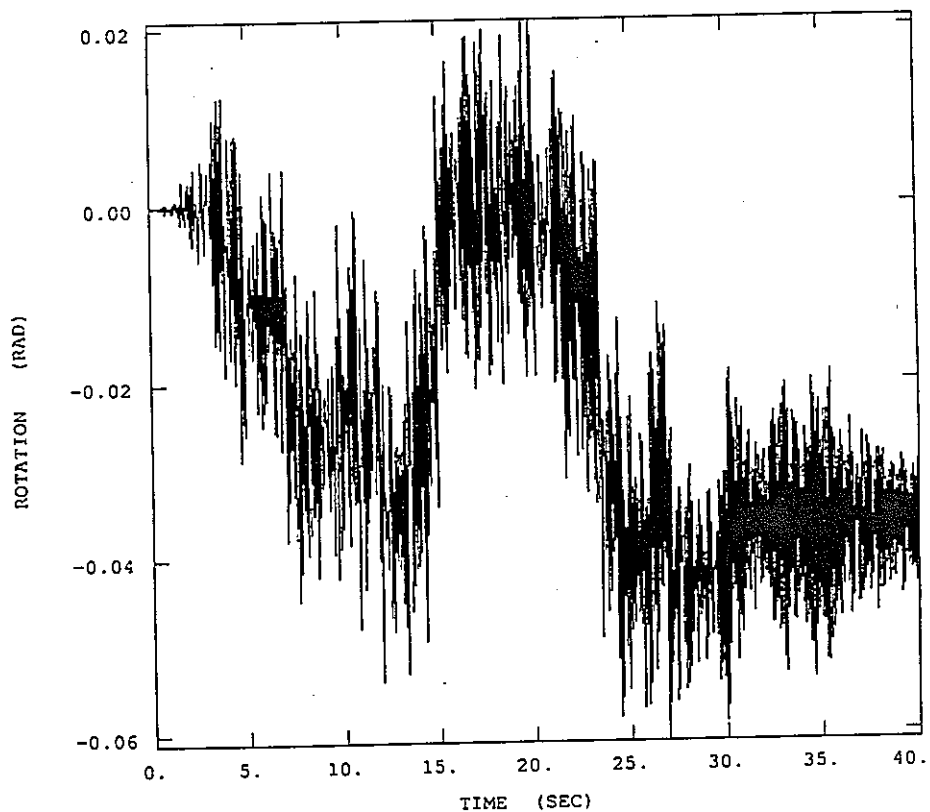


K8 ROTATION

図4.5.2-3 ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-7.5)

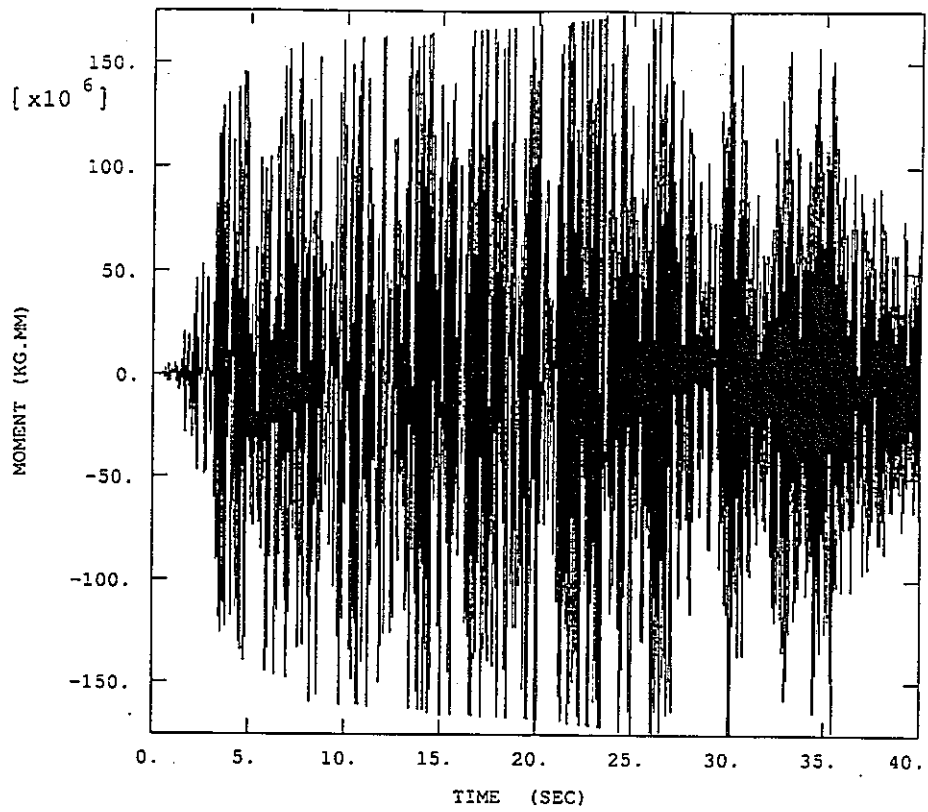


K6 MOMENT

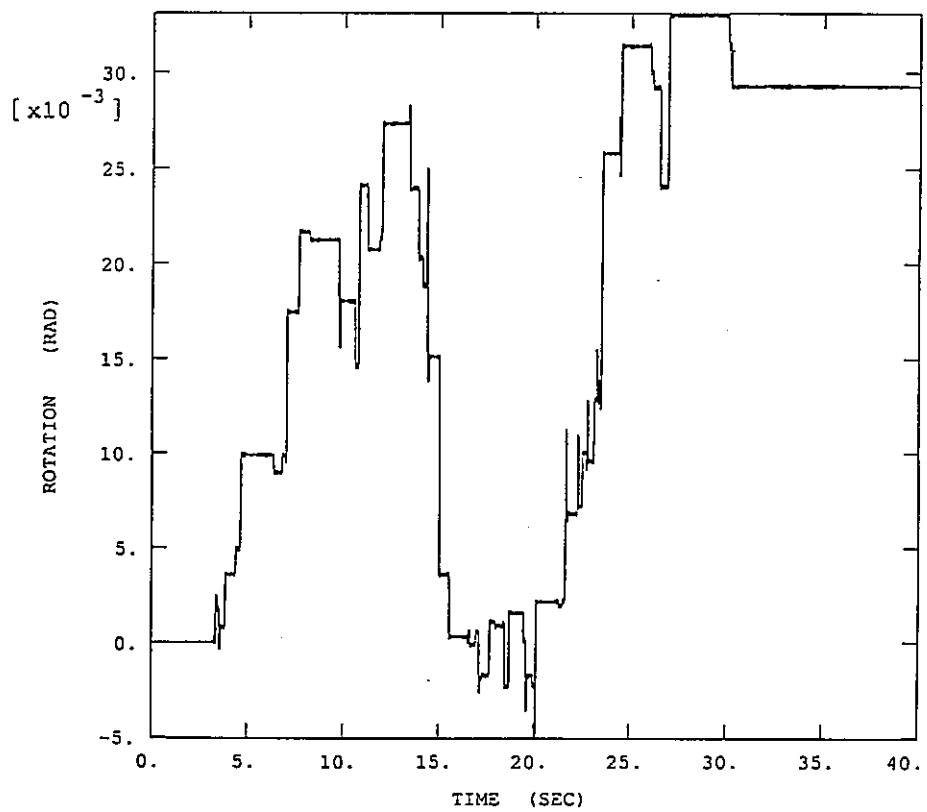


K6 ROTATION

図4.5.2-4 ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-7.5)

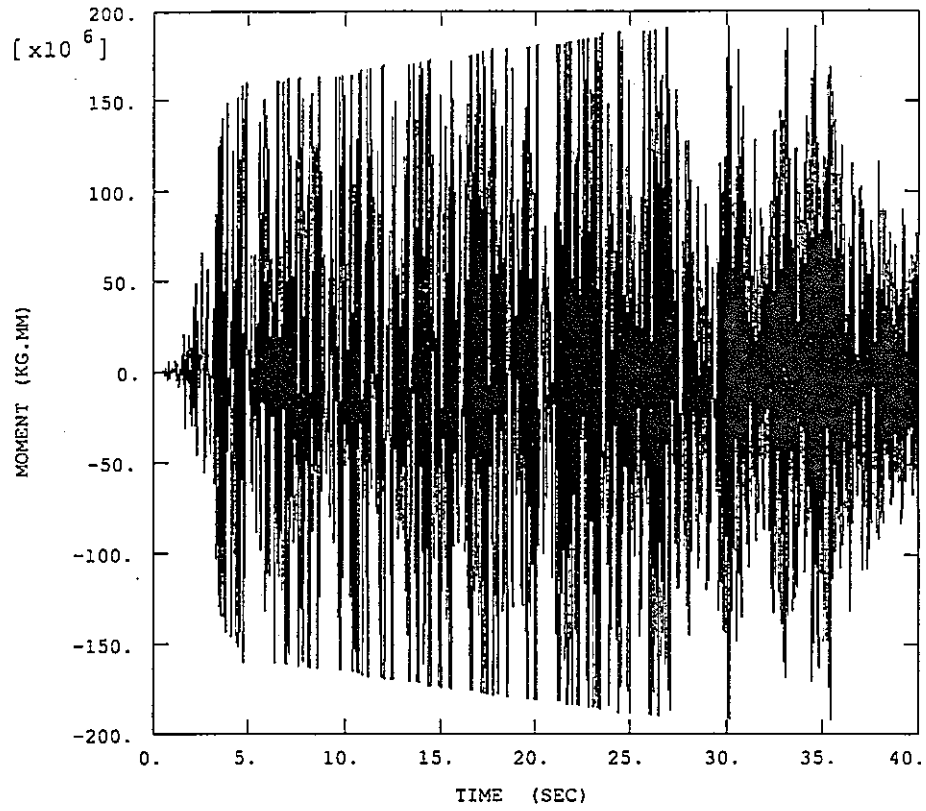


K7 MOMENT

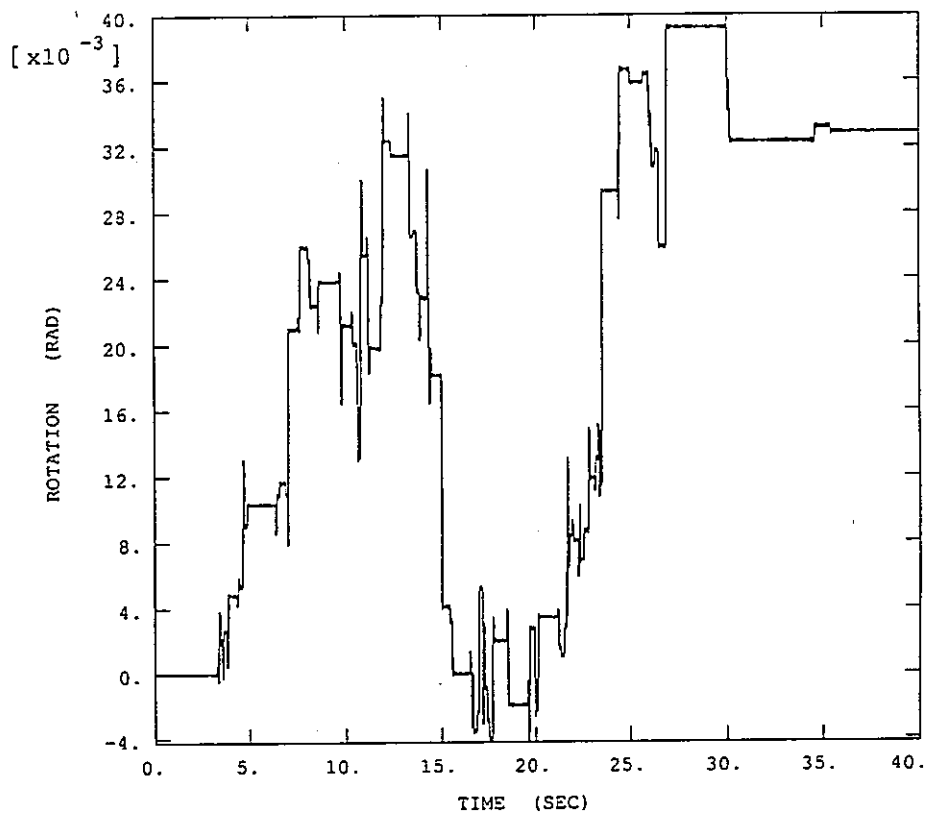


K7 ROTATION

図4.5.2-5 ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び回転変形の履歴
(ケース ML-H-7.5)

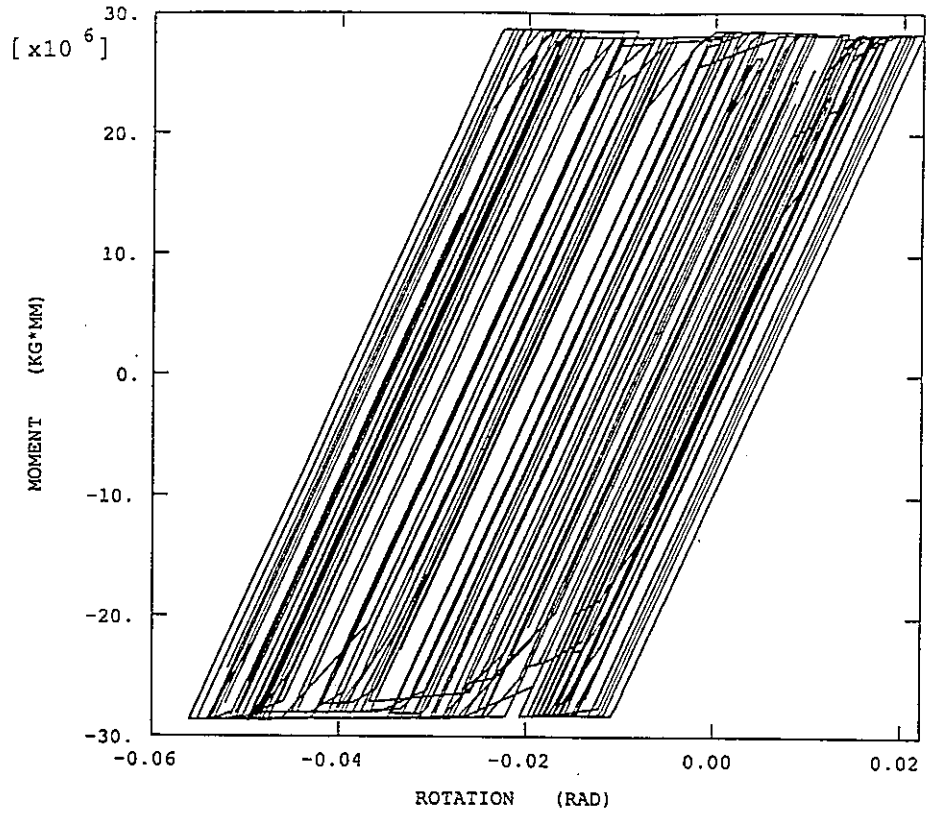


K5 MOMENT



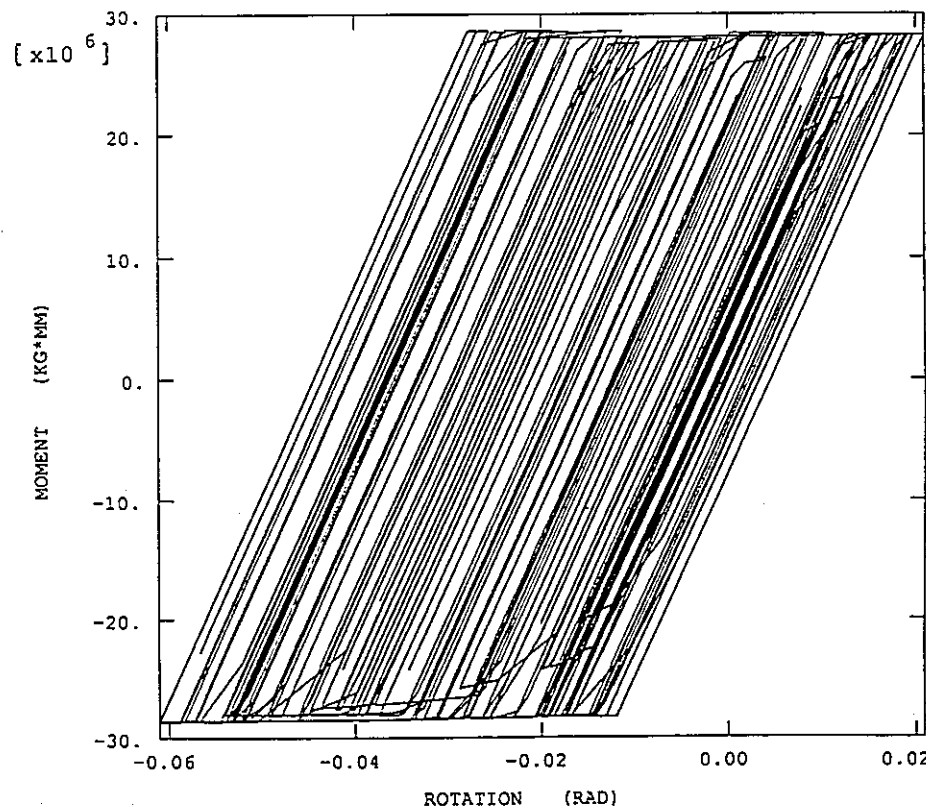
K5 ROTATION

図4.5.2-6 ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴
(ケース ML-H-7.5)



XMIN -5.601E-02
 XMAX 2.208E-02
 YMIN -2.868E+07
 YMAX 2.868E+07

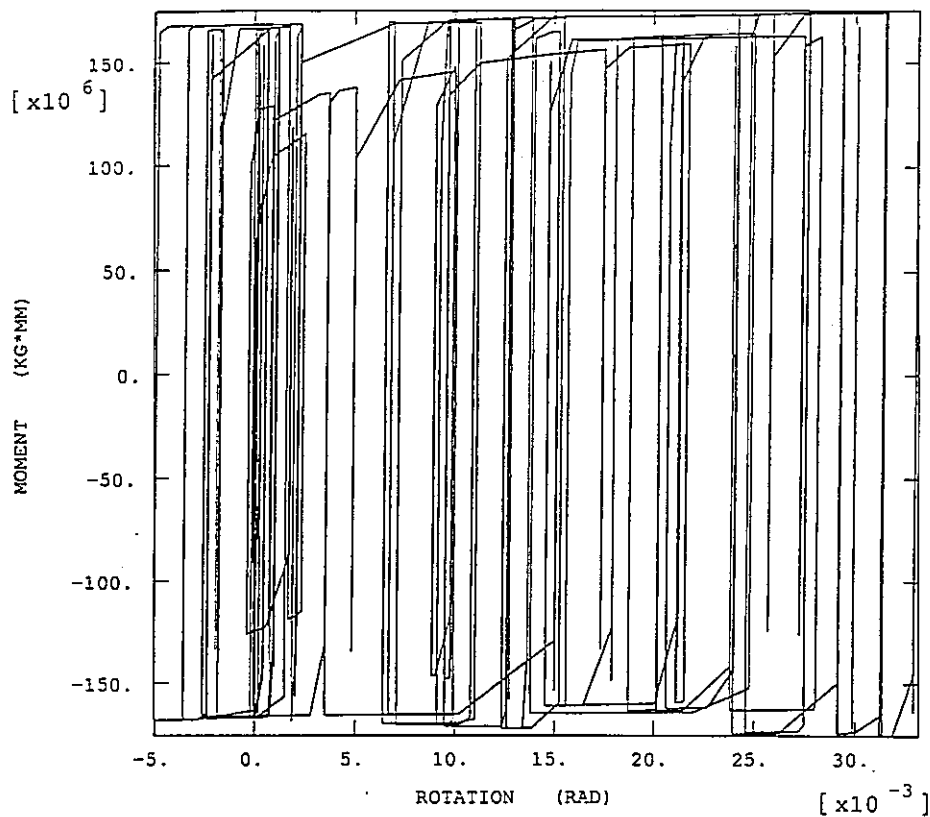
K8 MOMENT VS. ROTATION



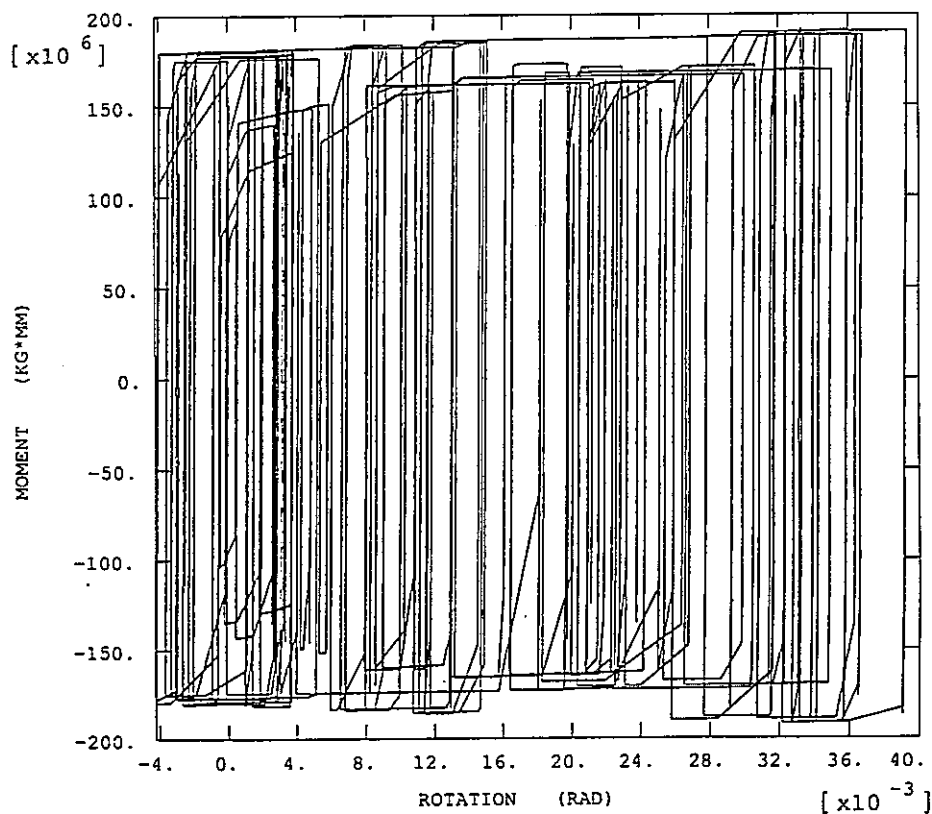
XMIN -6.108E-02
 XMAX 2.095E-02
 YMIN -2.867E+07
 YMAX 2.867E+07

K6 MOMENT VS. ROTATION

図4.5.2-7 ミドルレグエルボ (IHX側:K8, ポンプ側:K6) の非線形バネのヒステリシス (ケース ML-H-7.5)

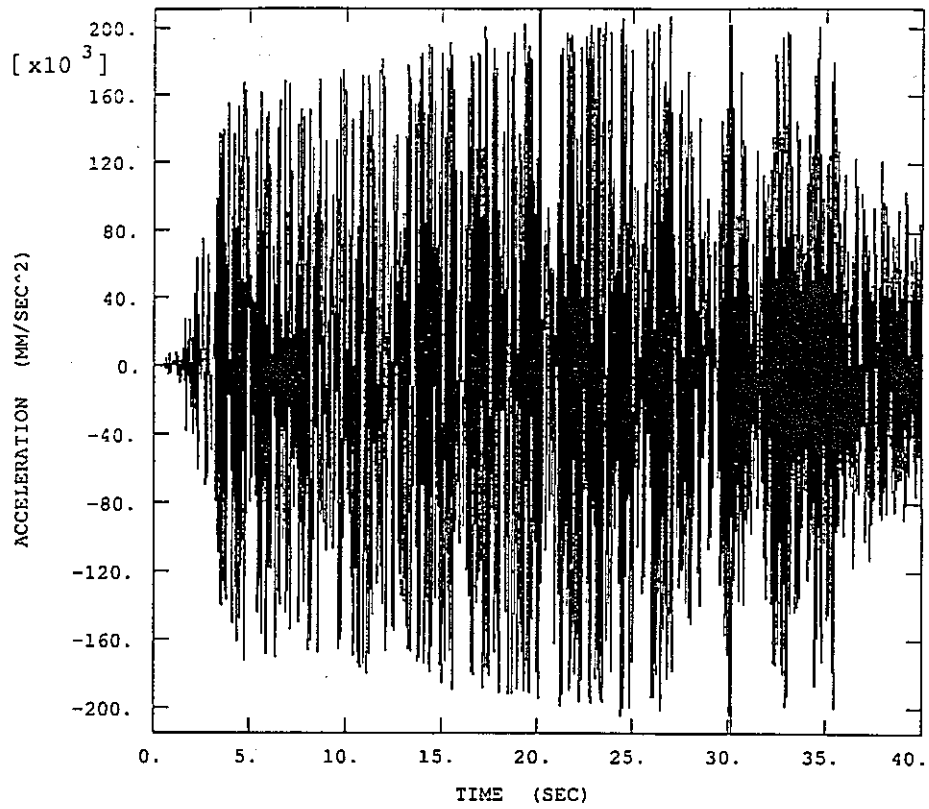


K7 MOMENT VS. ROTATION

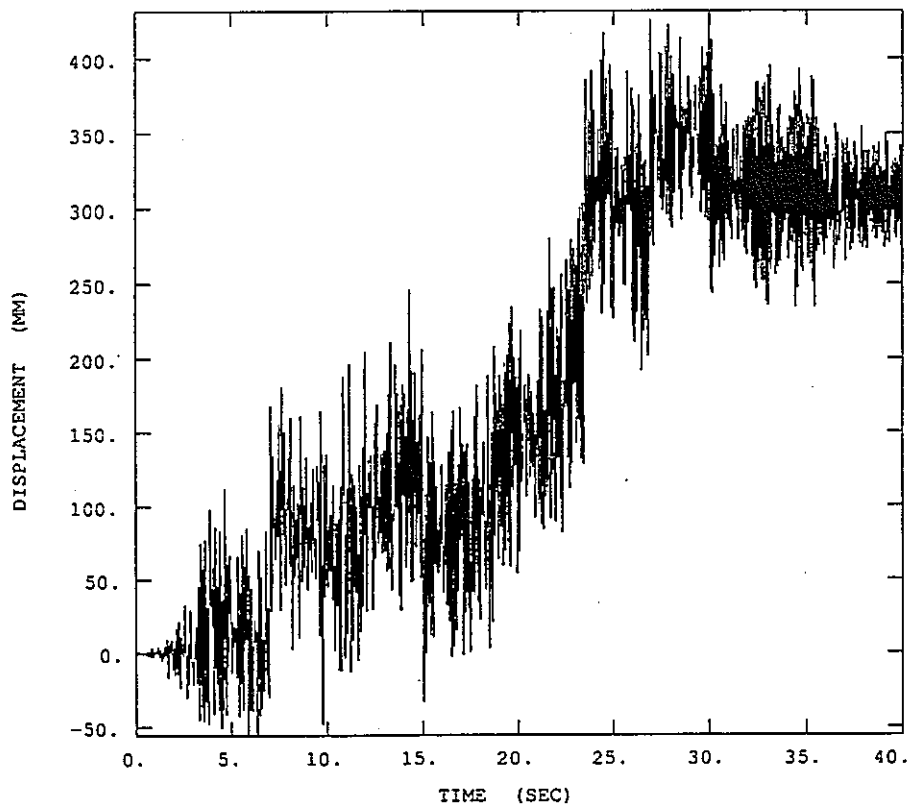


K5 MOMENT VS. ROTATION

図4.5.2-8 ミドルレグ鉛直管付け根 (IHX側:K7, ポンプ側:K5) の非線形バネのヒステリシス (ケース ML-H-7.5)

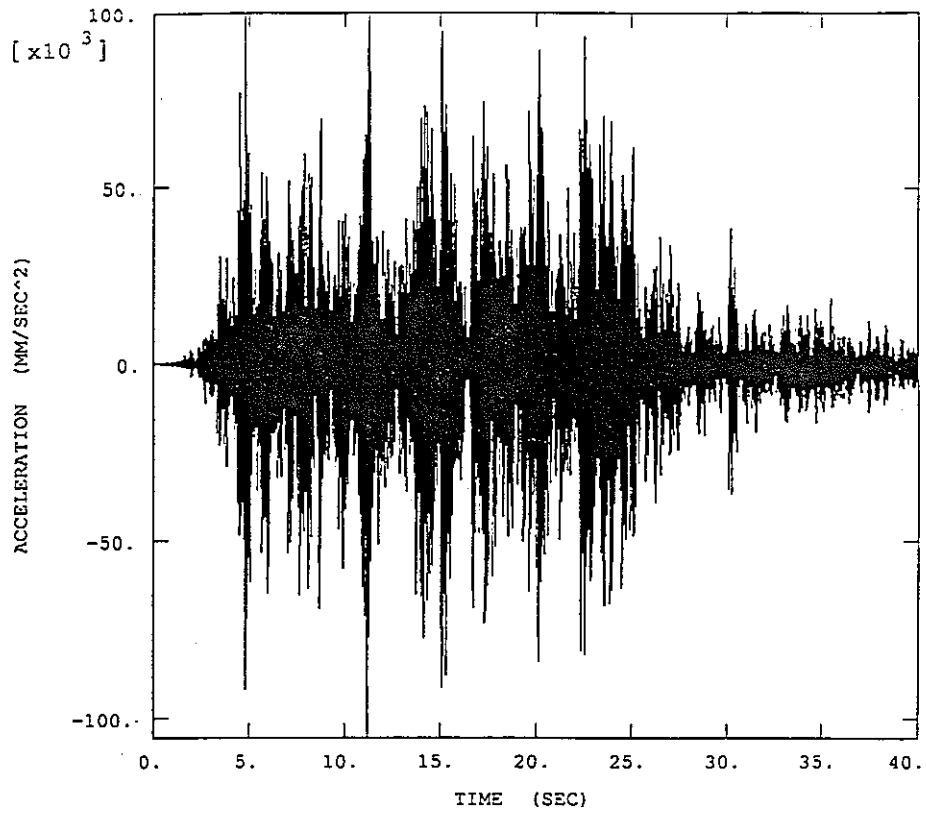


X-ACCELERATION



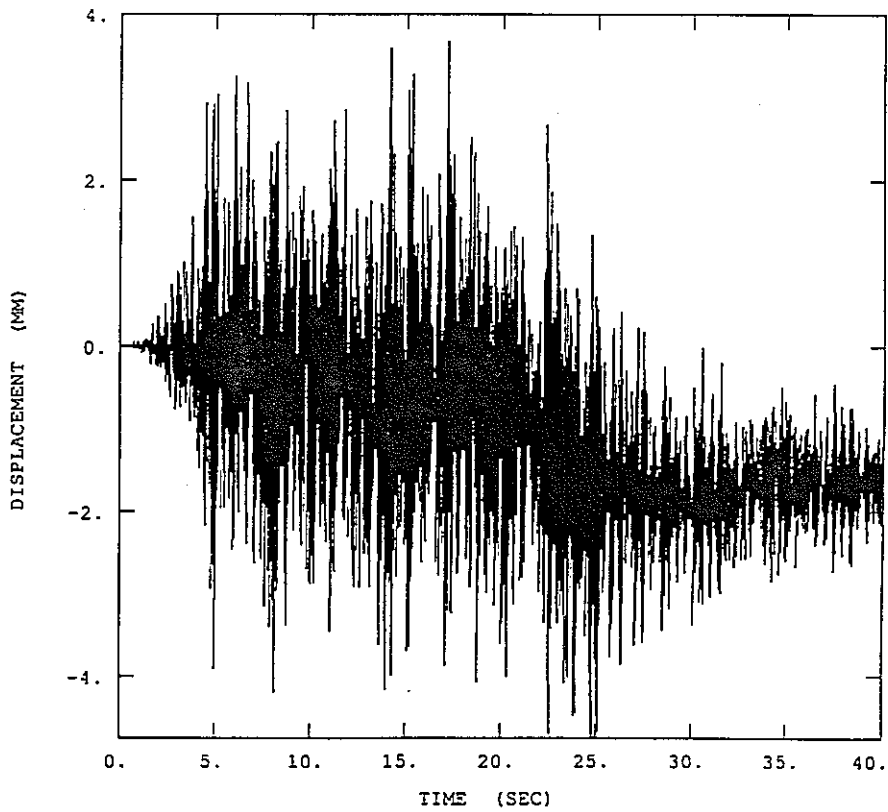
X-DISPLACEMENT

図4.5.3-1 ミドルレグ水平管中央の水平方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-10)



Y-ACCELERATION

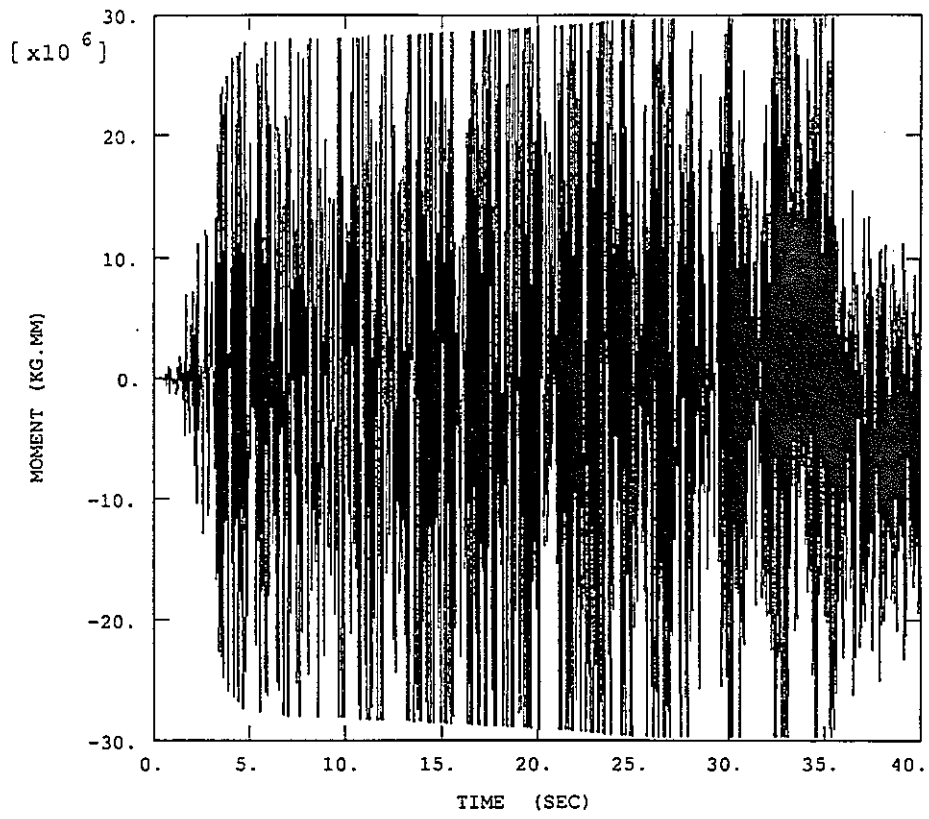
— Y_DISP



MID LEG 19.74 S2 Y-DISPLACEMENT

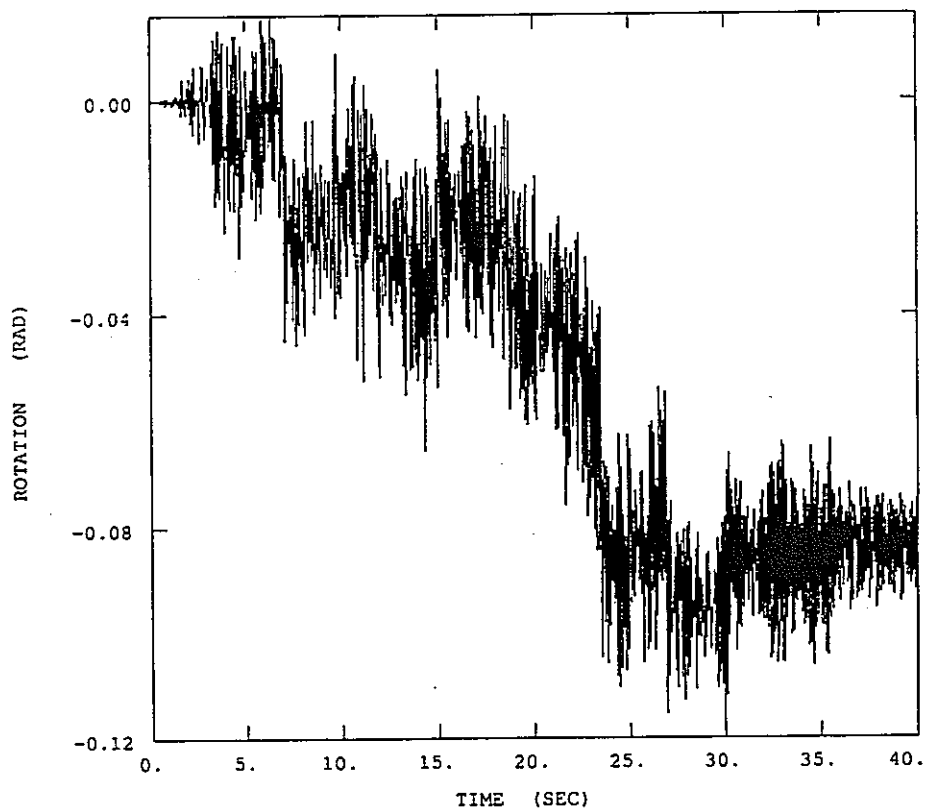
図4.5.3-2 ミドルレグ水平管中央の上下方向の加速度及び変位の履歴 (ケース ML-H-10)

MIN -2.975E+07
MAX 2.975E+07



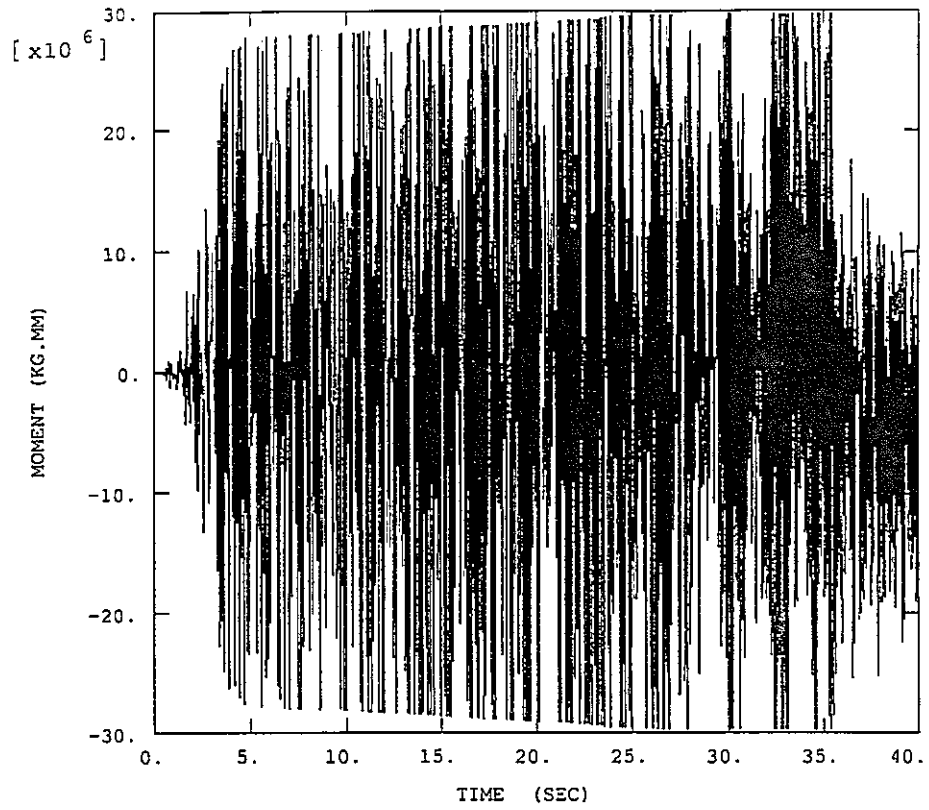
K8 MOMENT

MIN -1.186E-01
MAX 1.609E-02



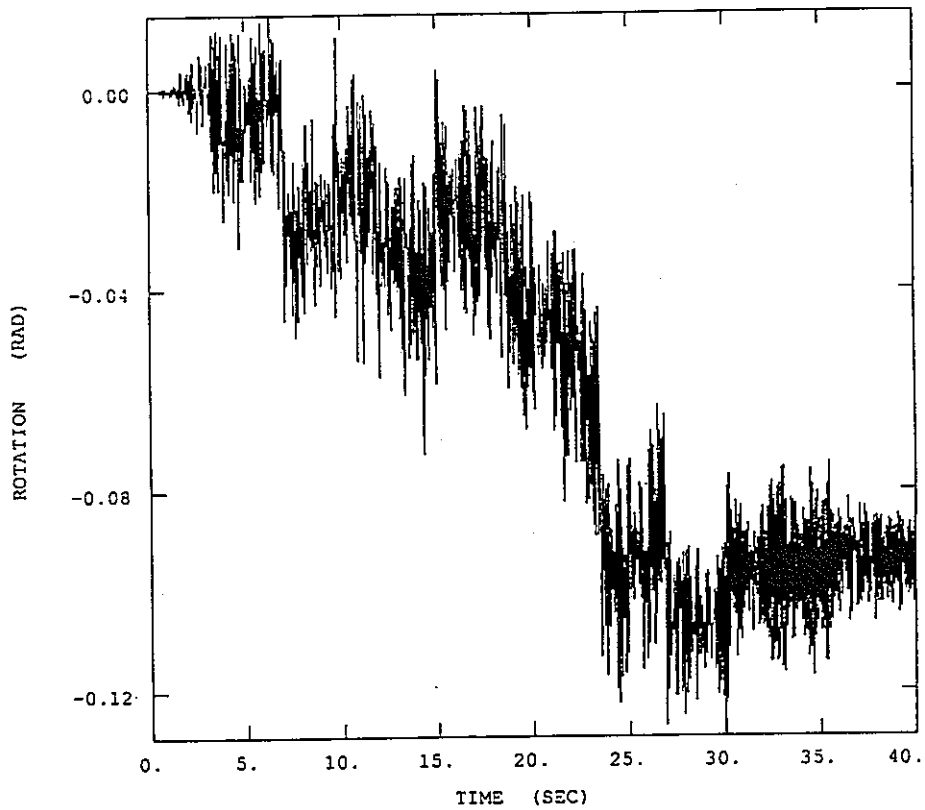
K8 ROTATION

図4.5.3-3 ミドルレグIHX側エルボの非線形バネK8のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-10)



MIN -2.975E+07
MAX 2.975E+07

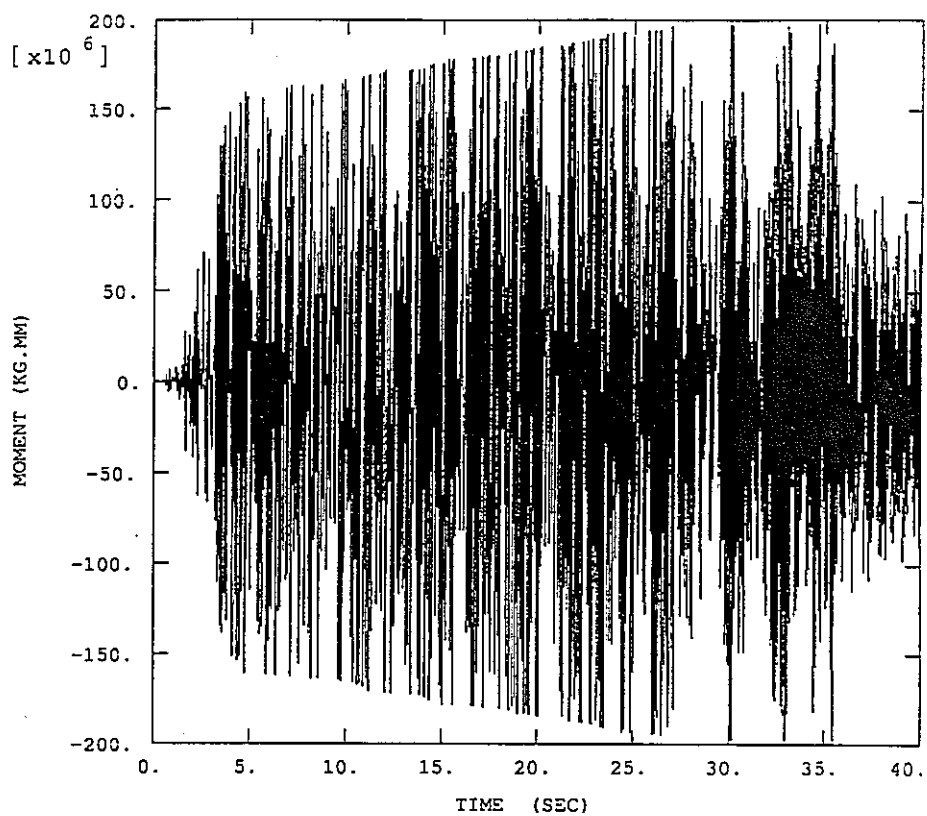
K6 MOMENT



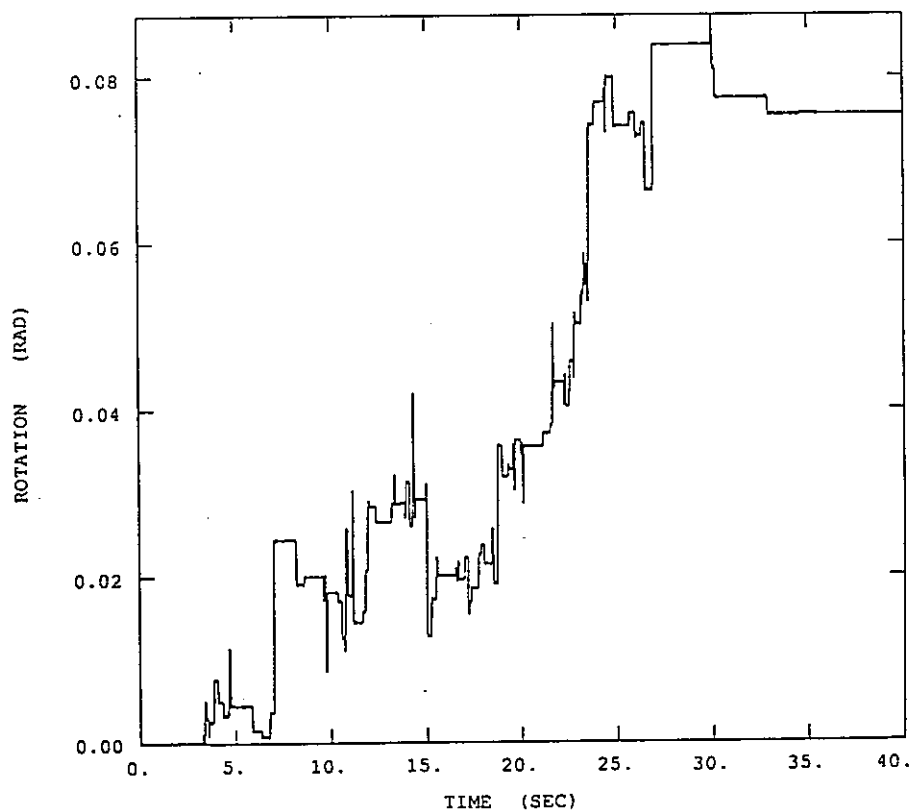
MIN -1.293E-01
MAX 1.519E-02

K6 ROTATION

図4.5.3-4 ミドルレグポンプ側エルボの非線形バネK6のモーメント及び回轉變形の履歴 (ケース ML-H-10)

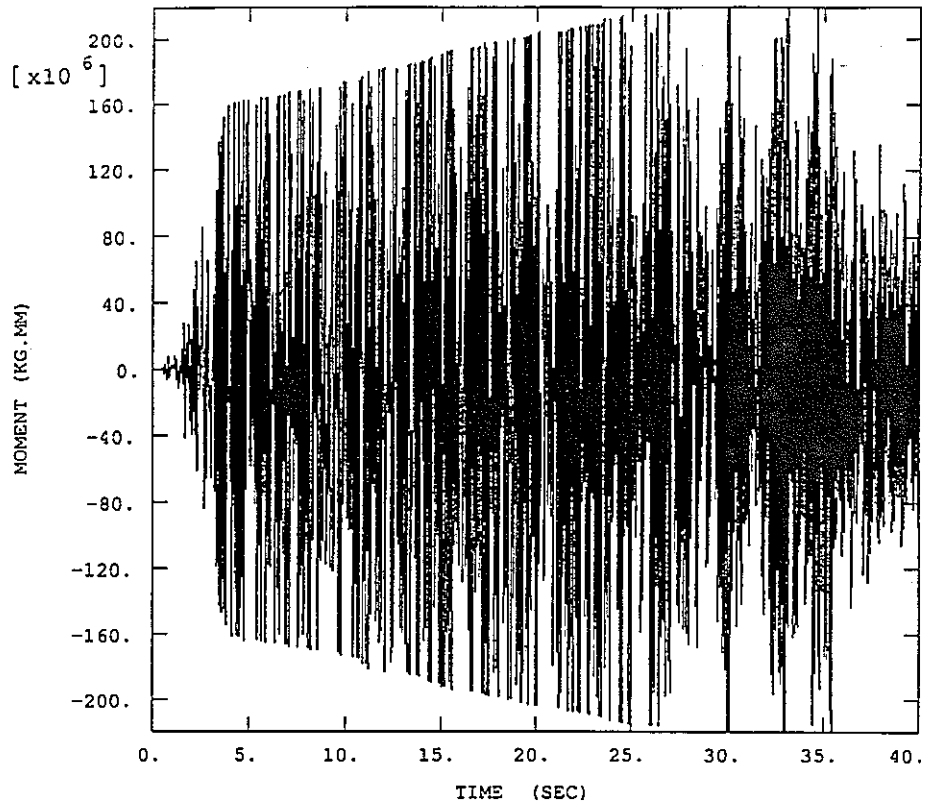


K7 MOMENT

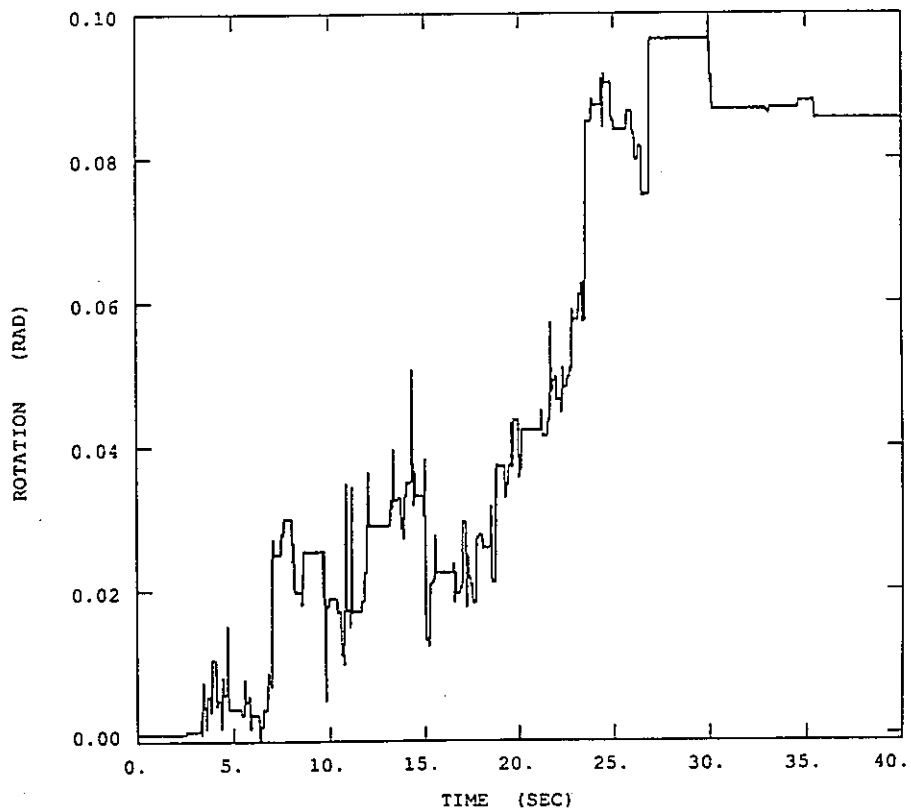


K7 ROTATION

図4.5.3-5 ミドルレグIHX側鉛直管付け根の非線形バネK7のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-10)



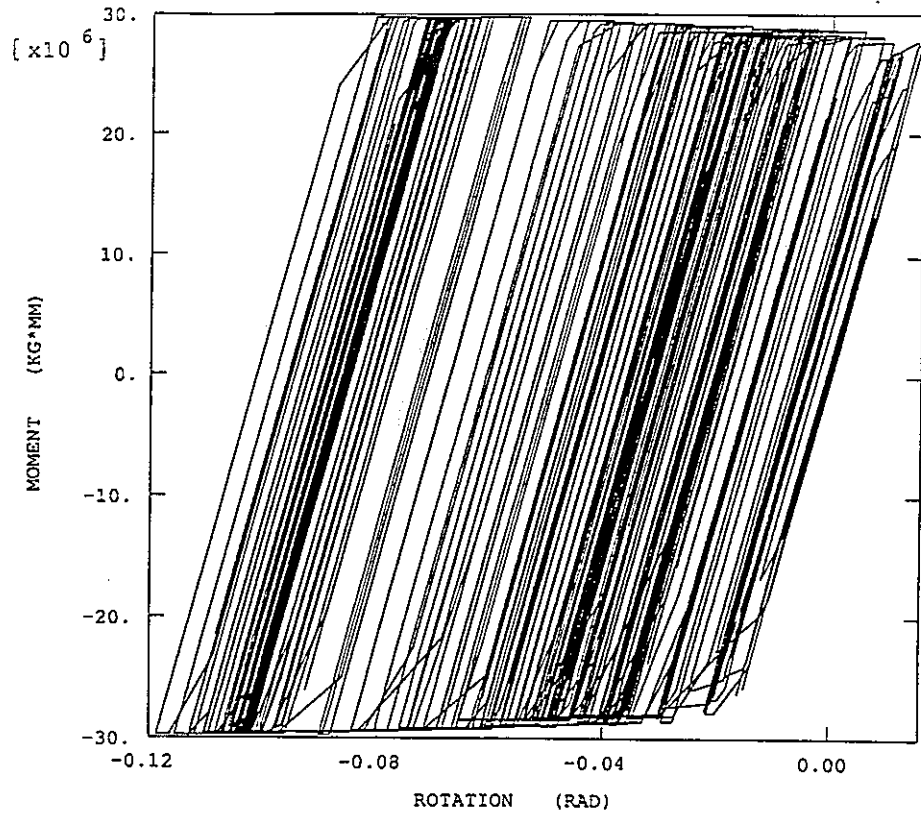
K5 MOMENT



K5 ROTATION

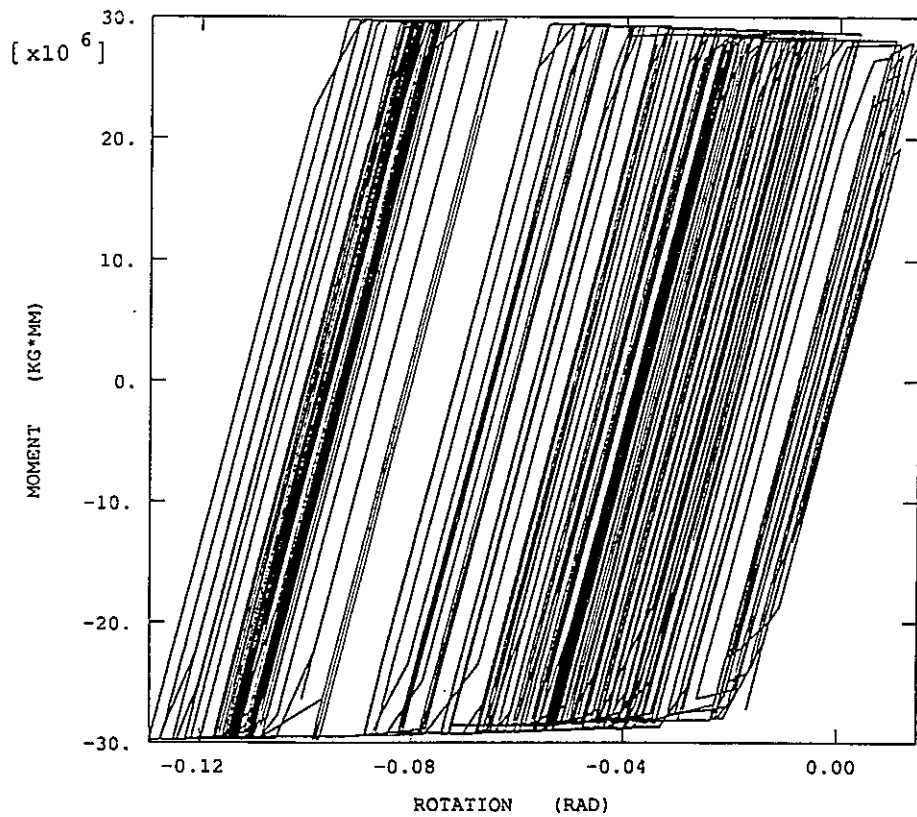
図4.5.3-6 ミドルレグポンプ側鉛直管付け根の非線形バネK5のモーメント及び回転変形の履歴 (ケース ML-H-10)

XMIN -1.186E-01
 XMAX 1.609E-02
 YMIN -2.975E+07
 YMAX 2.975E+07



K8 MOMENT VS. ROTATION

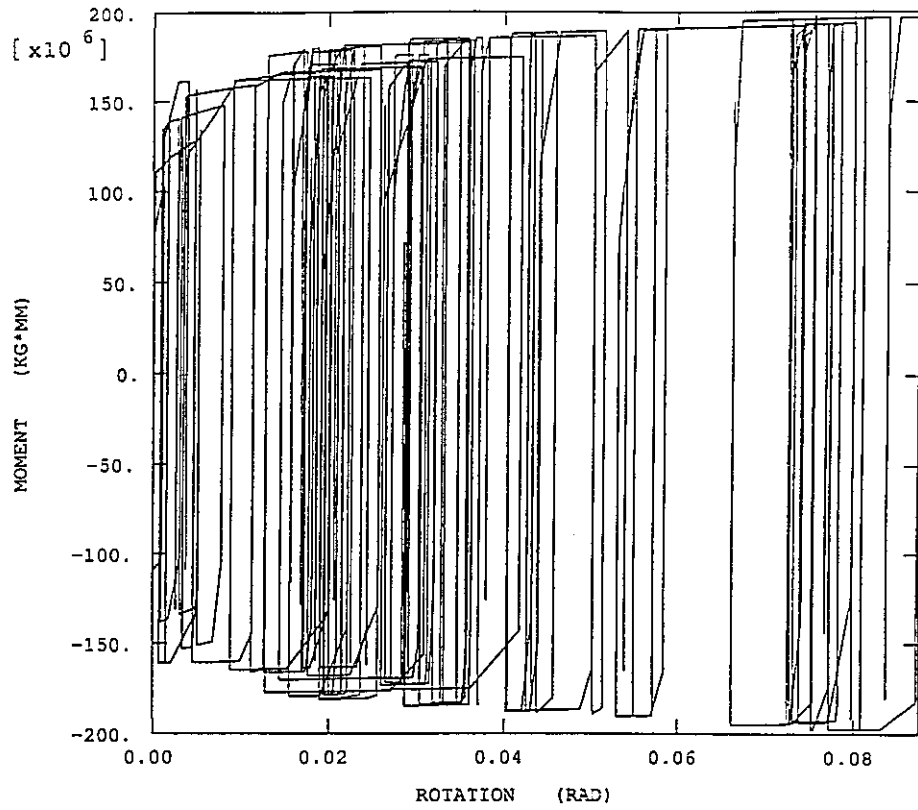
XMIN -1.293E-01
 XMAX 1.519E-02
 YMIN -2.975E+07
 YMAX 2.975E+07



K6 MOMENT VS. ROTATION

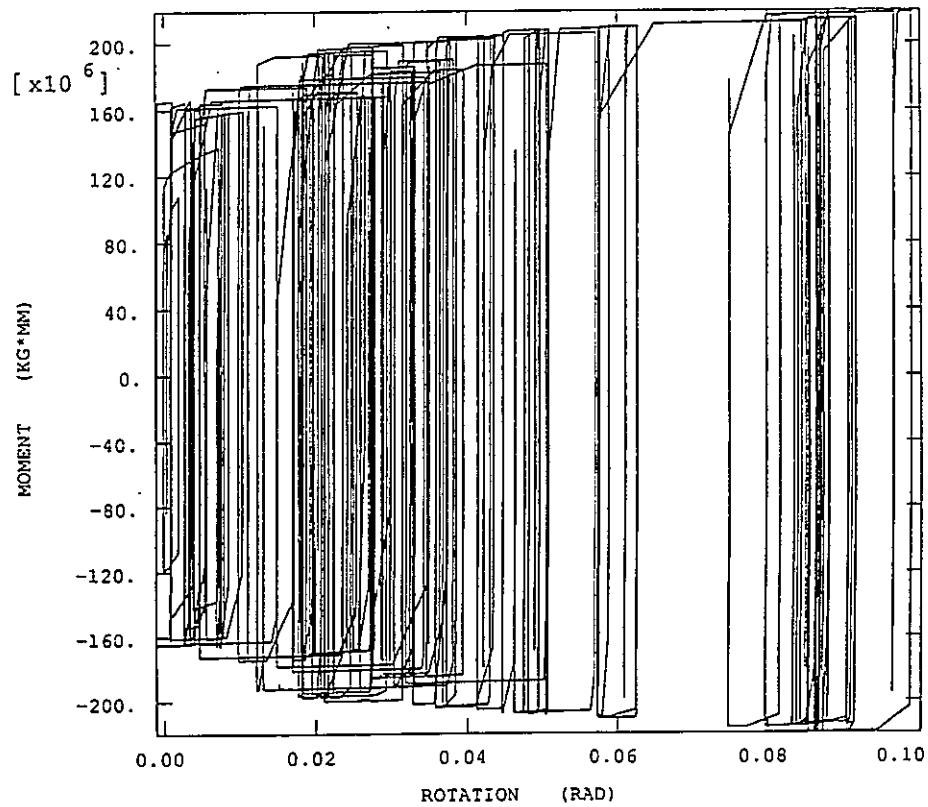
図4.5.1-7 ミドルレグエルボ (IHX側:K8, ポンプ側:K6) の非線形バネのヒステリシス

(ケース ML-H-10)



XMIN -1.392E-04
 XMAX 8.740E-02
 YMIN -1.975E+08
 YMAX 1.975E+08

K7 MOMENT VS. ROTATION



XMIN -1.042E-03
 XMAX 9.889E-02
 YMIN -2.197E+08
 YMAX 2.196E+08

K5 MOMENT VS. ROTATION

図4.5.1-8 ミドルレグ鉛直管付け根 (IHX側:K7, ポンプ側:K5) の非線形バネのヒステリシス (ケース ML-H-10)

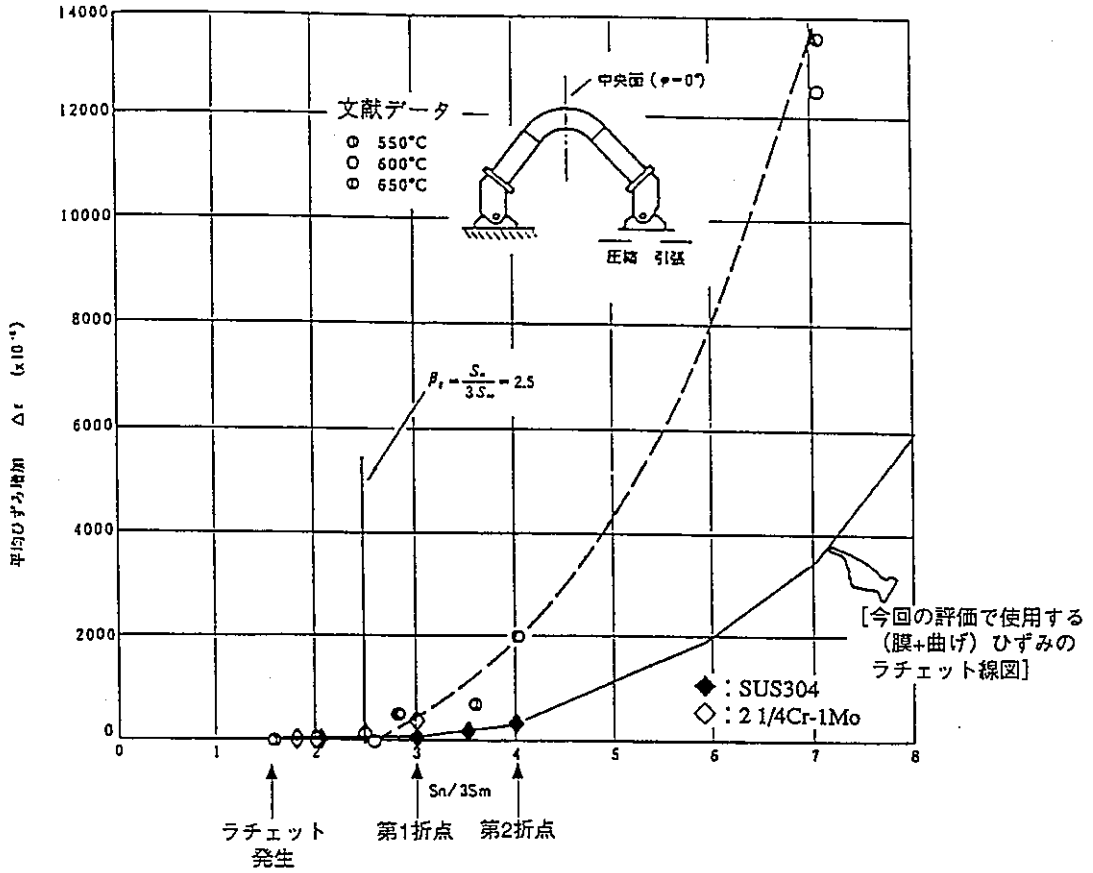


図3 繰り返し面内曲げ荷重をうけるエルボにおけるひずみの増大 (BDS解説 PNC SN241 84-14より引用)

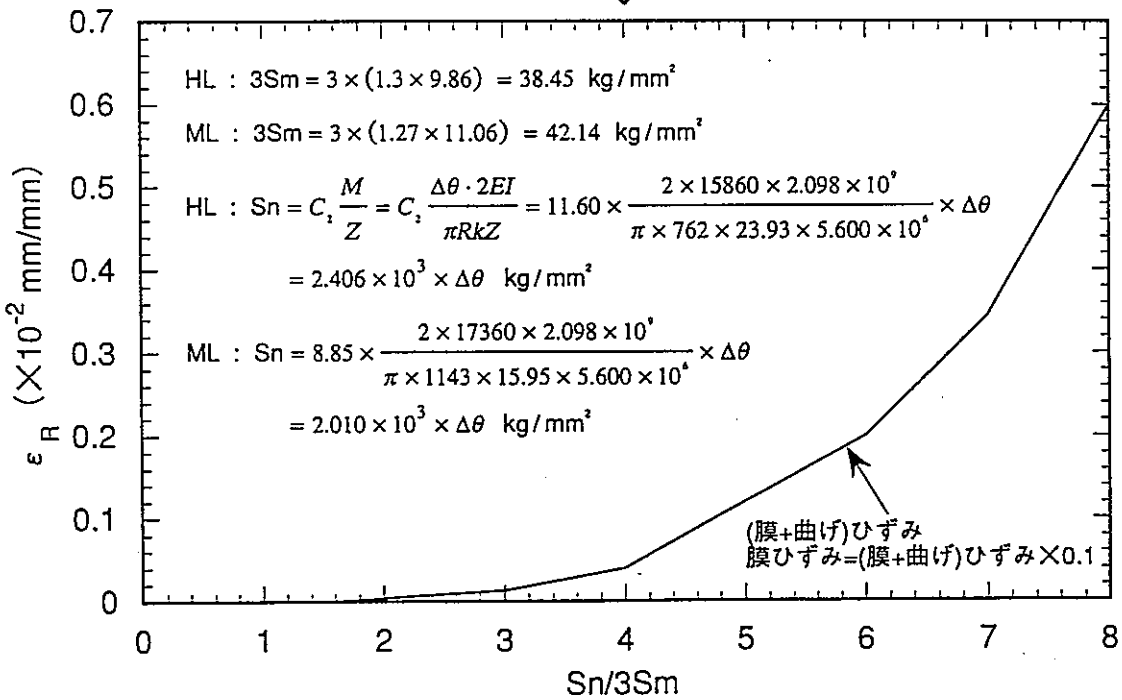


図4.6.1-1 エルボのラチェットひずみと応力の関係

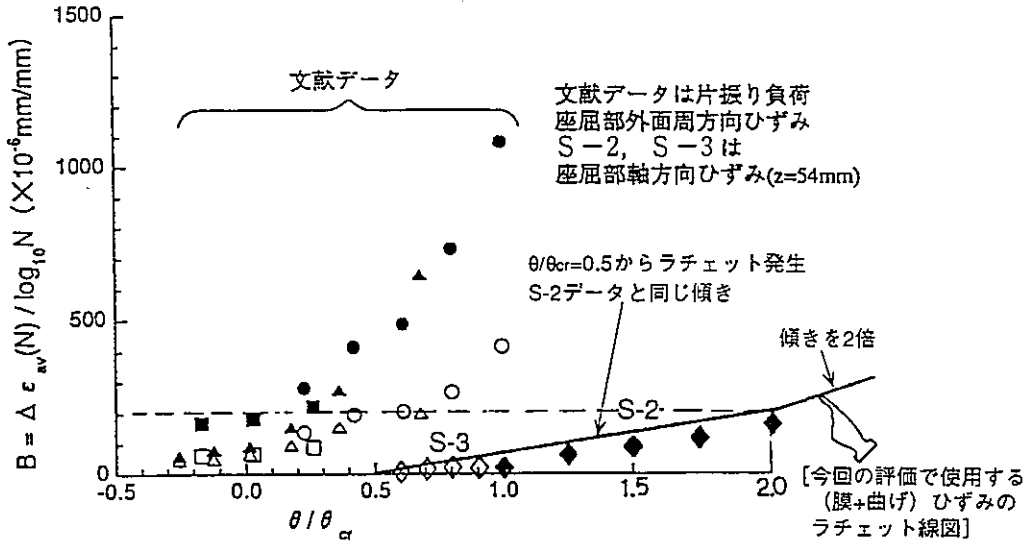


図1 直管ラチェットひずみの発生状況

(「配管耐震健全性評価試験用の試験体の制作」
(H8年9月, MHI)より引用)

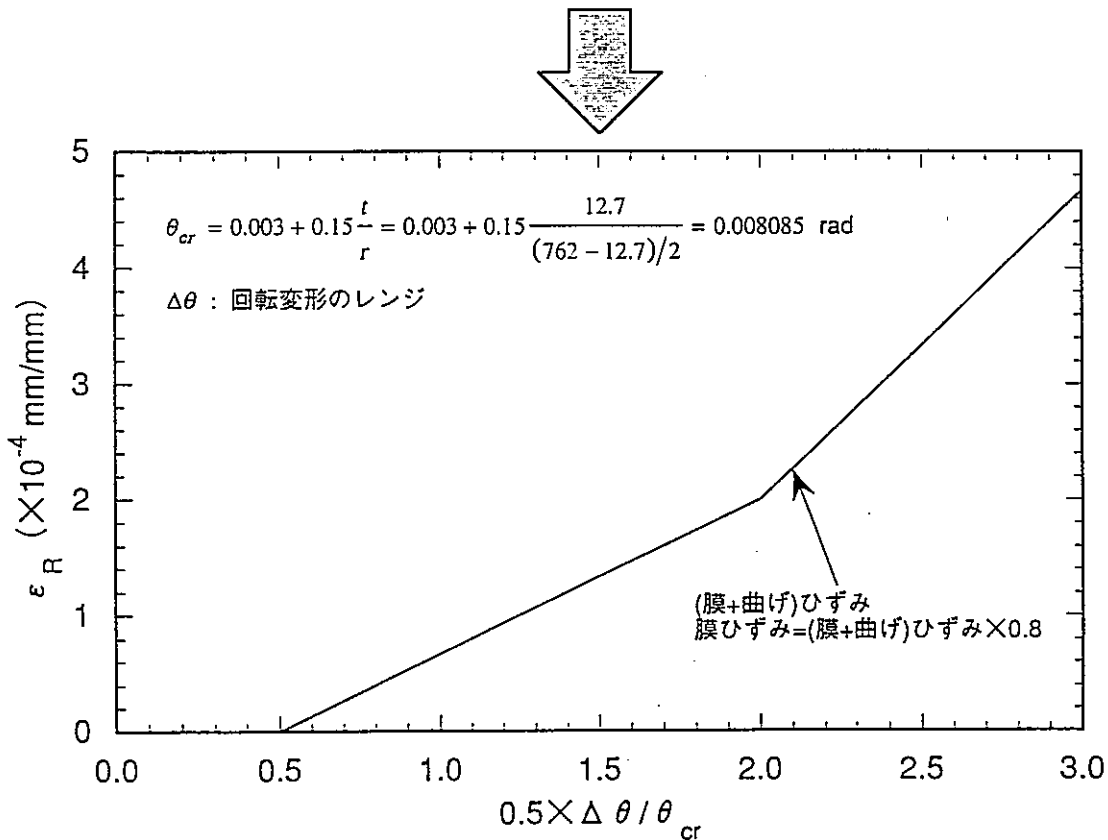


図4.6.1-2 直管のラチェットひずみと回転変形の関係

表4.6.2-1 HL配管の成立性評価 (最大角変形=|各時刻の θ |_{max}とした場合)

入力地震	部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
		①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	DR(平均N-ε)	制限値	評価	DR(設計N-ε)	最大角変形	制限値	評価
		(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
5S _H ¹⁾	エルボ	0.04	0.39	0.06	0.64	0.10	15.00	○	1.03	2.34E-02	1.00E+00	○	4.73E-01	2.33E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.33	0.41	0.33	15.00	○	0.41	8.57E-05	1.00E+00	○	1.81E-03	3.35E-03	3.64E-02	○
10S _H ¹⁾	エルボ	0.30	2.98	0.17	1.74	0.47	15.00	○	4.72	1.82E-01	1.00E+00	○	3.63E+00	4.74E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.96	1.20	0.96	15.00	○	1.20	3.00E-04	1.00E+00	○	6.07E-03	9.76E-03	3.64E-02	○
20S _H ¹⁾	エルボ	1.07	10.69	0.35	3.52	1.42	15.00	○	14.21	6.01E-01	1.00E+00	○	1.19E+01	8.54E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	2.36	2.95	2.36	15.00	○	2.95	3.20E-03	1.00E+00	○	6.42E-02	1.93E-02	3.64E-02	○
5(S _H +S _V) ²⁾	エルボ	0.00	0.00	0.02	0.18	0.02	15.00	○	0.18	1.65E-05	1.00E+00	○	2.55E-03	1.14E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.31	0.39	0.31	15.00	○	0.39	2.62E-09	1.00E+00	○	1.32E-05	3.08E-03	3.64E-02	○

1) S_H : BDSで裕度=1となる水平地震 (3.63S₂に相当)2) S_H+S_V : BDSで裕度=1となる水平+上下地震 (0.5S₂に相当)

表4.6.2-2 HL配管の成立性評価 (最大角変形 $=0.5 \times \Delta \theta_{max}$ とした場合)

入力地震	部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価			座屈評価			
		①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	DR(平均N-ε)	制限値	評価	DR(設計N-ε)	最大角変形	制限値	評価
		(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
5S _H ¹⁾	エルボ	0.04	0.39	0.05	0.53	0.09	15.00	○	0.92	2.34E-02	1.00E+00	○	4.73E-01	2.09E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.22	0.27	0.22	15.00	○	0.27	8.57E-05	1.00E+00	○	1.81E-03	1.71E-03	3.64E-02	○
10S _H ¹⁾	エルボ	0.30	2.98	0.14	1.39	0.44	15.00	○	4.37	1.82E-01	1.00E+00	○	3.63E+00	3.98E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.29	0.36	0.29	15.00	○	0.36	3.00E-04	1.00E+00	○	6.07E-03	2.74E-03	3.64E-02	○
20S _H ¹⁾	エルボ	1.07	10.69	0.00	2.15	1.07	15.00	○	10.69	6.01E-01	1.00E+00	○	1.19E+01	5.61E-02	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00	15.00	○	0.00	3.20E-03	1.00E+00	○	6.42E-02	5.23E-03	3.64E-02	○
5(S _H +S _V) ²⁾	エルボ	0.00	0.00	0.01	0.12	0.01	15.00	○	0.12	1.65E-05	1.00E+00	○	2.55E-03	8.68E-03	1.04E-01	○
	水平管付根	0.00	0.00	0.11	0.14	0.11	15.00	○	0.14	2.62E-09	1.00E+00	○	1.32E-05	6.28E-04	3.64E-02	○

- 1) S_H : BDSで裕度=1となる水平地震 (3.63S₂に相当)
 2) S_H+S_V : BDSで裕度=1となる水平+上下地震 (0.5S₂に相当)

表4.6.2-3 [BDSで裕度=1となる水平地震]×5を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=|各時刻の θ |_{max}とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				歪屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	DR(平均N- ϵ)	制限値	評価	DR(設計N- ϵ)	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.00	0.04	0.09	0.94	0.10	15.00	○	0.98	1.59E-02	1.00E+00	○	7.70E-02	3.86E-02	1.14E-01	○
ポンプ側エルボ	0.00	0.03	0.10	1.01	0.10	15.00	○	1.04	1.76E-02	1.00E+00	○	8.60E-02	4.07E-02	1.14E-01	○
IHX側鉛直管付根	0.00	0.00	2.26	2.83	2.26	15.00	○	2.83	6.33E-04	1.00E+00	○	3.11E-03	1.89E-02	3.95E-02	○
ポンプ側鉛直管付根	0.00	0.00	3.00	3.74	3.00	15.00	○	3.74	4.68E-03	1.00E+00	○	2.90E-02	2.25E-02	3.95E-02	○

表4.6.2-4 [BDSで裕度=1となる水平地震]×7.5を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=|各時刻の θ |_{max}とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	DR(平均N- ϵ)	制限値	評価	DR(設計N- ϵ)	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.02	0.17	0.15	1.54	0.17	15.00	○	1.71	4.54E-02	1.00E+00	○	2.35E-01	5.60E-02	1.14E-01	○
ポンプ側エルボ	0.02	0.17	0.17	1.71	0.19	15.00	○	1.88	4.71E-02	1.00E+00	○	2.46E-01	6.11E-02	1.14E-01	○
IHX側鉛直管付根	0.01	0.01	7.07	8.84	7.08	15.00	○	8.85	3.34E-02	1.00E+00	○	2.62E-01	3.31E-02	3.95E-02	○
ポンプ側鉛直管付根	0.03	0.04	10.01	12.51	10.04	15.00	○	12.55	1.29E-01	1.00E+00	○	1.13E+00	3.93E-02	3.95E-02	○

表4.6.2-5 [BDSで裕度=1となる水平地震]×10を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=|各時刻の θ |_{max}とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	Dr(平均N-ε)	制限値	評価	Dr(設計N-ε)	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.05	0.48	0.36	3.60	0.41	15.00	○	4.08	9.92E-02	1.00E+00	○	5.63E-01	1.19E-01	1.14E-01	×
ポンプ側エルボ	0.05	0.48	0.39	3.90	0.44	15.00	○	4.38	9.81E-02	1.00E+00	○	5.58E-01	1.29E-01	1.14E-01	×
IHX側鉛直管付根	0.06	0.08	29.51	36.89	29.58	15.00	×	36.97	3.17E-01	1.00E+00	○	3.02E+00	8.74E-02	3.95E-02	×
ポンプ側鉛直管付根	0.11	0.14	33.46	41.82	33.57	15.00	×	41.96	6.05E-01	1.00E+00	○	6.05E+00	9.89E-02	3.95E-02	×

表4.6.2-6 [BDSで裕度=1となる水平地震]×5を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=0.5× $\Delta \theta_{max}$ とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	DR(平均N- ϵ)	制限値	評価	DR(設計N- ϵ)	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.00	0.04	0.03	0.32	0.04	15.00	○	0.36	1.59E-02	1.00E+00	○	7.70E-02	1.99E-02	1.14E-01	○
ポンプ側エルボ	0.00	0.03	0.03	0.33	0.04	15.00	○	0.36	1.76E-02	1.00E+00	○	8.60E-02	2.03E-02	1.14E-01	○
IHX側鉛直管付根	0.00	0.00	0.32	0.40	0.32	15.00	○	0.40	6.33E-04	1.00E+00	○	3.11E-03	2.96E-03	3.95E-02	○
ポンプ側鉛直管付根	0.00	0.00	0.43	0.53	0.43	15.00	○	0.53	4.68E-03	1.00E+00	○	2.90E-02	4.28E-03	3.95E-02	○

表4.6.2-7 [BDSで裕度=1となる水平地震]×7.5を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=0.5×Δθ_{max}とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	D((平均N-ε))	制限値	評価	D((設計N-ε))	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.02	0.17	0.00	0.52	0.02	15.00	○	0.17	4.54E-02	1.00E+00	○	2.35E-01	2.64E-02	1.14E-01	○
ポンプ側エルボ	0.02	0.17	0.00	0.54	0.02	15.00	○	0.17	4.71E-02	1.00E+00	○	2.46E-01	2.70E-02	1.14E-01	○
IHX側鉛直管付根	0.01	0.01	0.00	0.81	0.01	15.00	○	0.01	3.34E-02	1.00E+00	○	2.62E-01	6.79E-03	3.95E-02	○
ポンプ側鉛直管付根	0.03	0.04	0.00	1.06	0.03	15.00	○	0.04	1.29E-01	1.00E+00	○	1.13E+00	8.93E-03	3.95E-02	○

表4.6.2-8 [BDSで裕度=1となる水平地震]×10を入力した場合のML配管の成立性評価 (最大角変形=0.5× $\Delta \theta_{max}$ とした場合)

部位	ラチェットひずみ		単調負荷によるひずみ		ひずみ評価				疲労評価				座屈評価		
	①膜ひずみ	②(膜+曲げ)ひずみ	③膜ひずみ	④(膜+曲げ)ひずみ	膜ひずみ	膜ひずみに対する制限値	評価	(膜+曲げ)ひずみ[参考]	Df(平均N- ϵ)	制限値	評価	Df(設計N- ϵ)	最大角変形	制限値	評価
	(%)	(%)	(%)	(%)	①+③ (%)	(%)		②+④ (%)				[参考]	(rad)	(rad)	
IHX側エルボ	0.05	0.48	0.07	0.74	0.12	15.00	○	1.22	9.92E-02	1.00E+00	○	5.63E-01	3.30E-02	1.14E-01	○
ポンプ側エルボ	0.05	0.48	0.08	0.81	0.13	15.00	○	1.29	9.81E-02	1.00E+00	○	5.58E-01	3.49E-02	1.14E-01	○
IHX側鉛直管付根	0.06	0.08	1.02	1.28	1.09	15.00	○	1.36	3.17E-01	1.00E+00	○	3.02E+00	1.07E-02	3.95E-02	○
ポンプ側鉛直管付根	0.11	0.14	1.41	1.76	1.52	15.00	○	1.90	6.05E-01	1.00E+00	○	6.05E+00	1.39E-02	3.95E-02	○

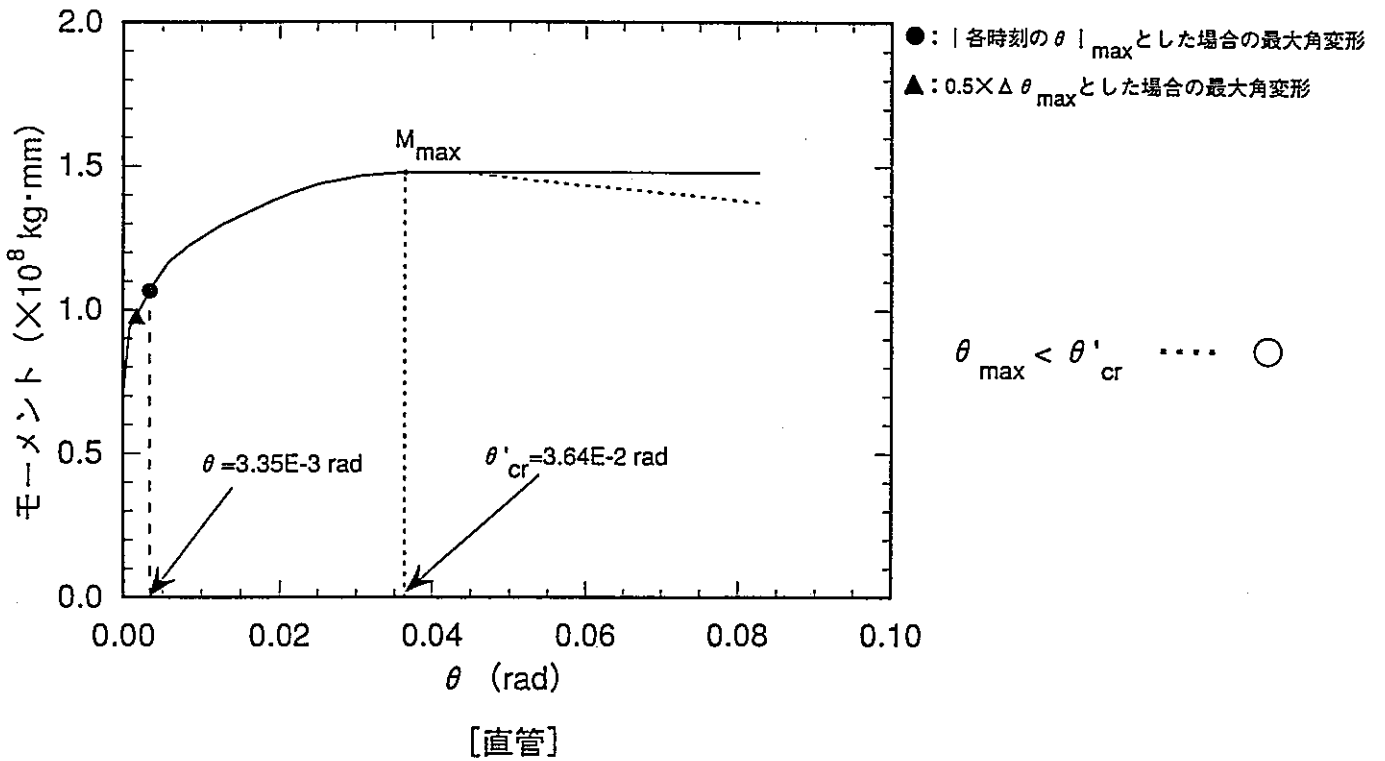
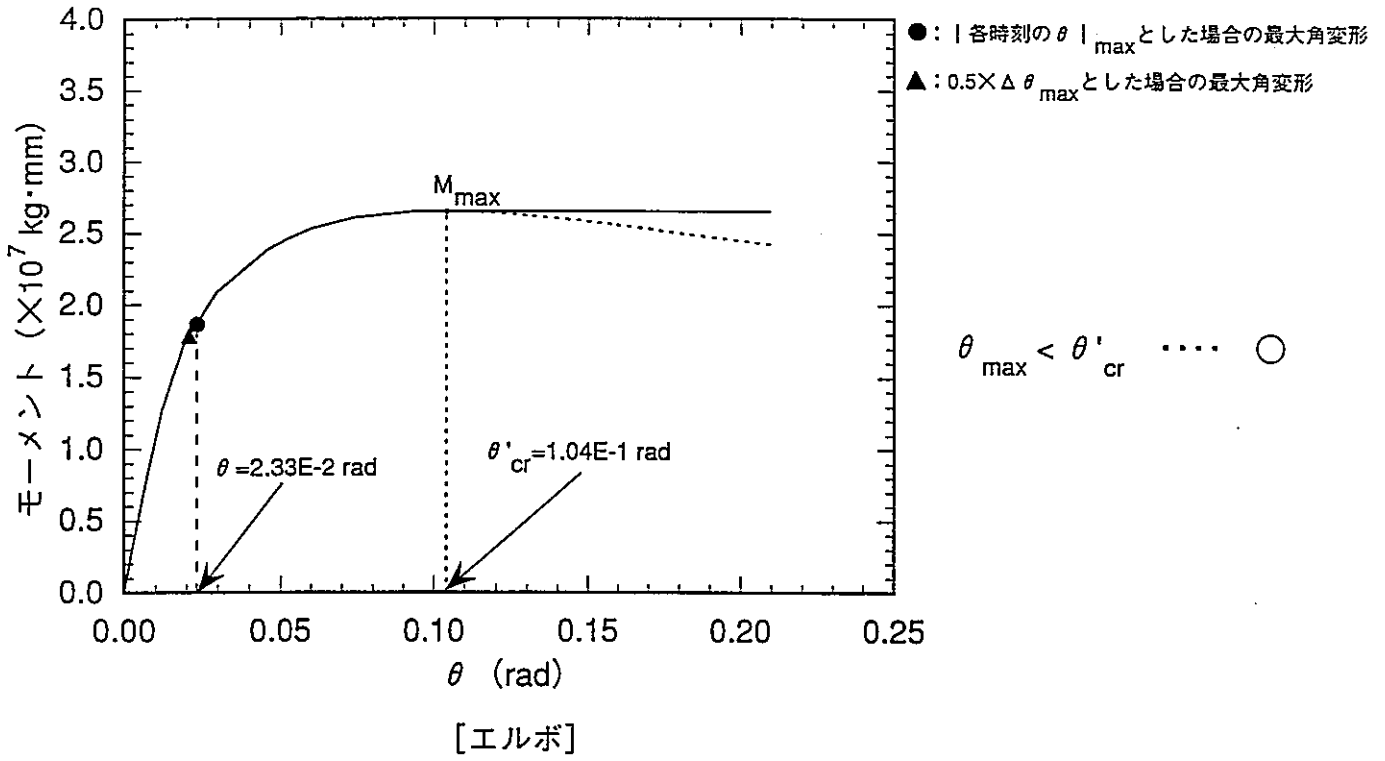


図4.6.2-1 HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 5$)

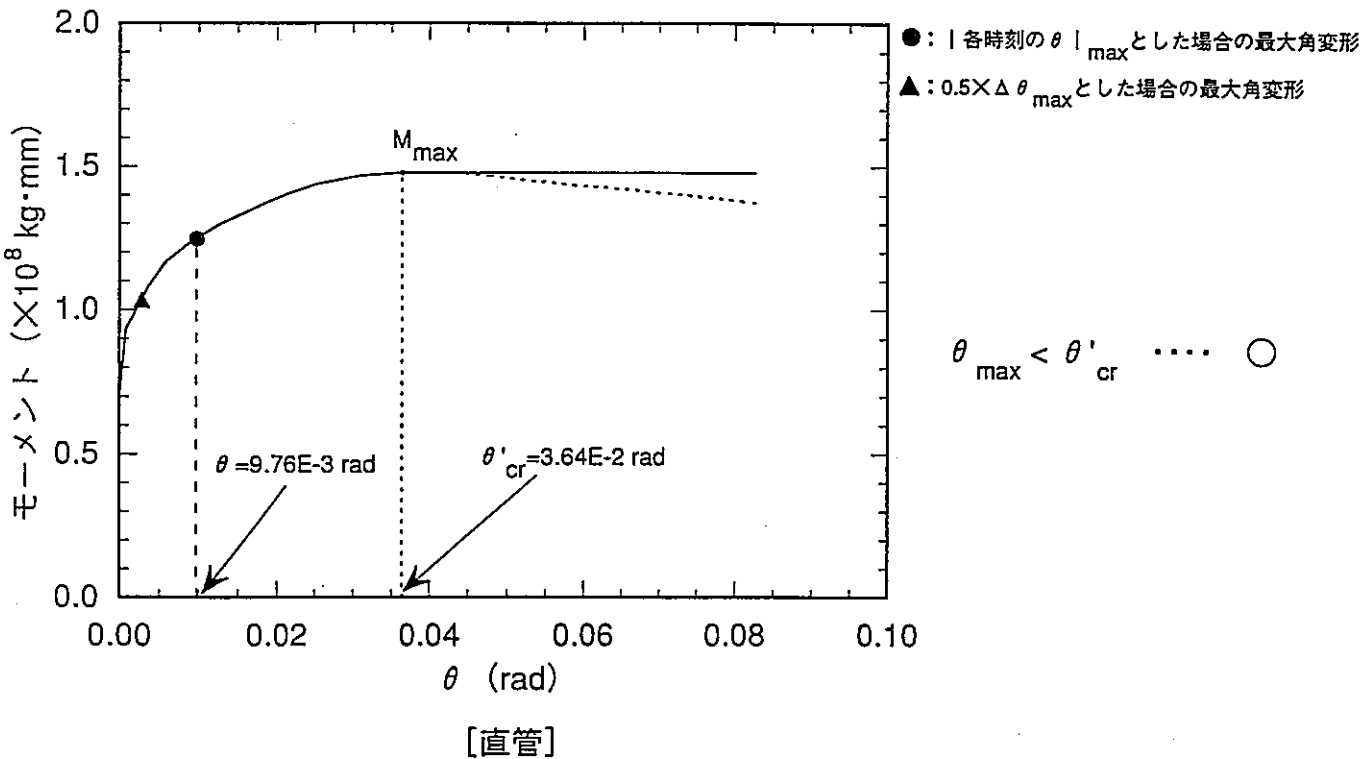
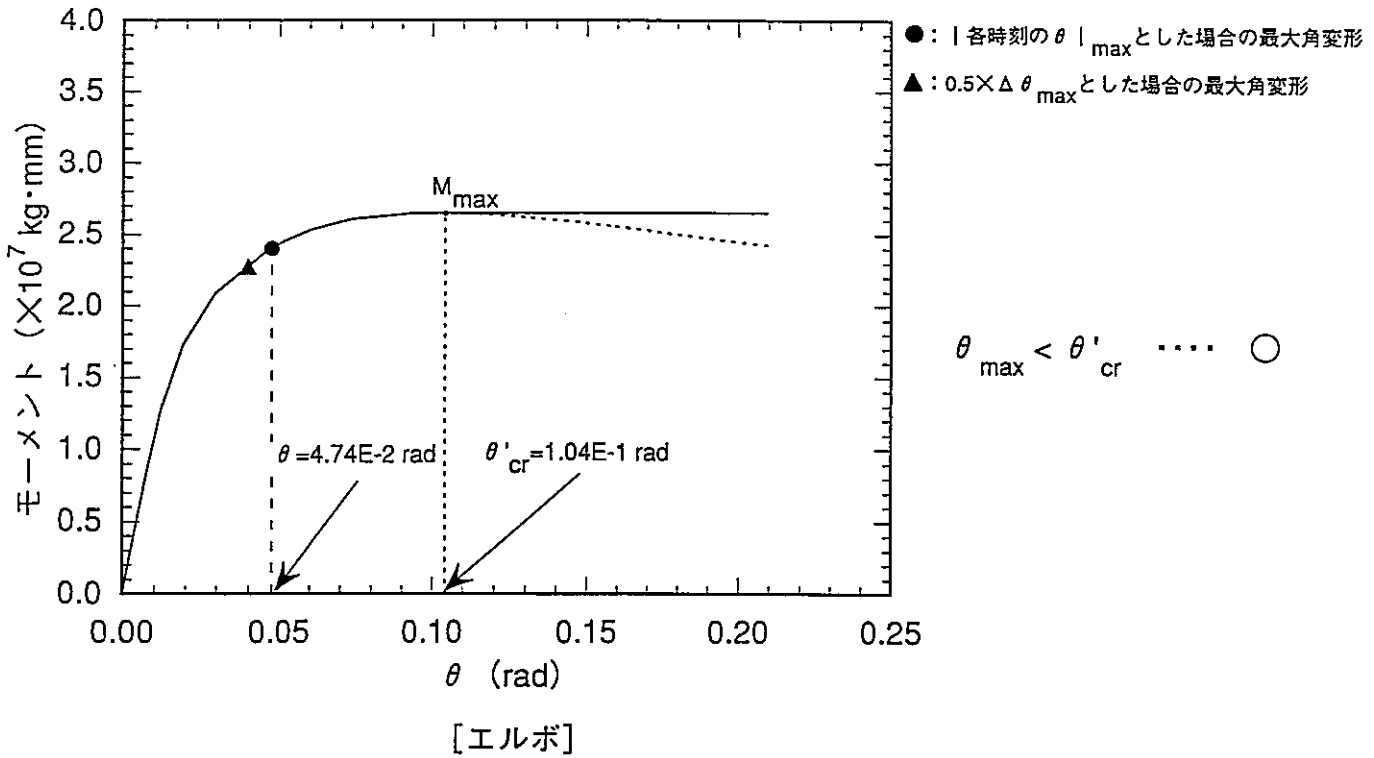


図4.6.2-2 HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 10$)

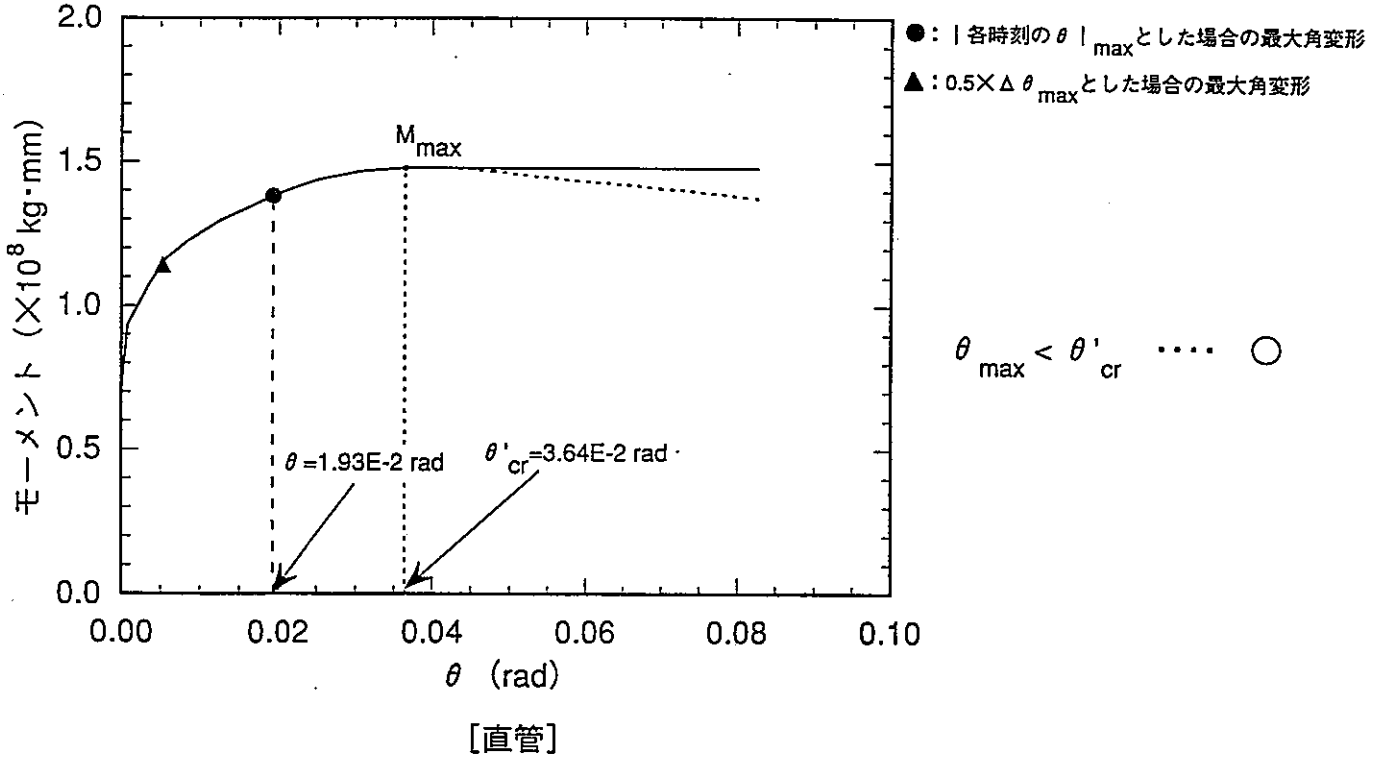
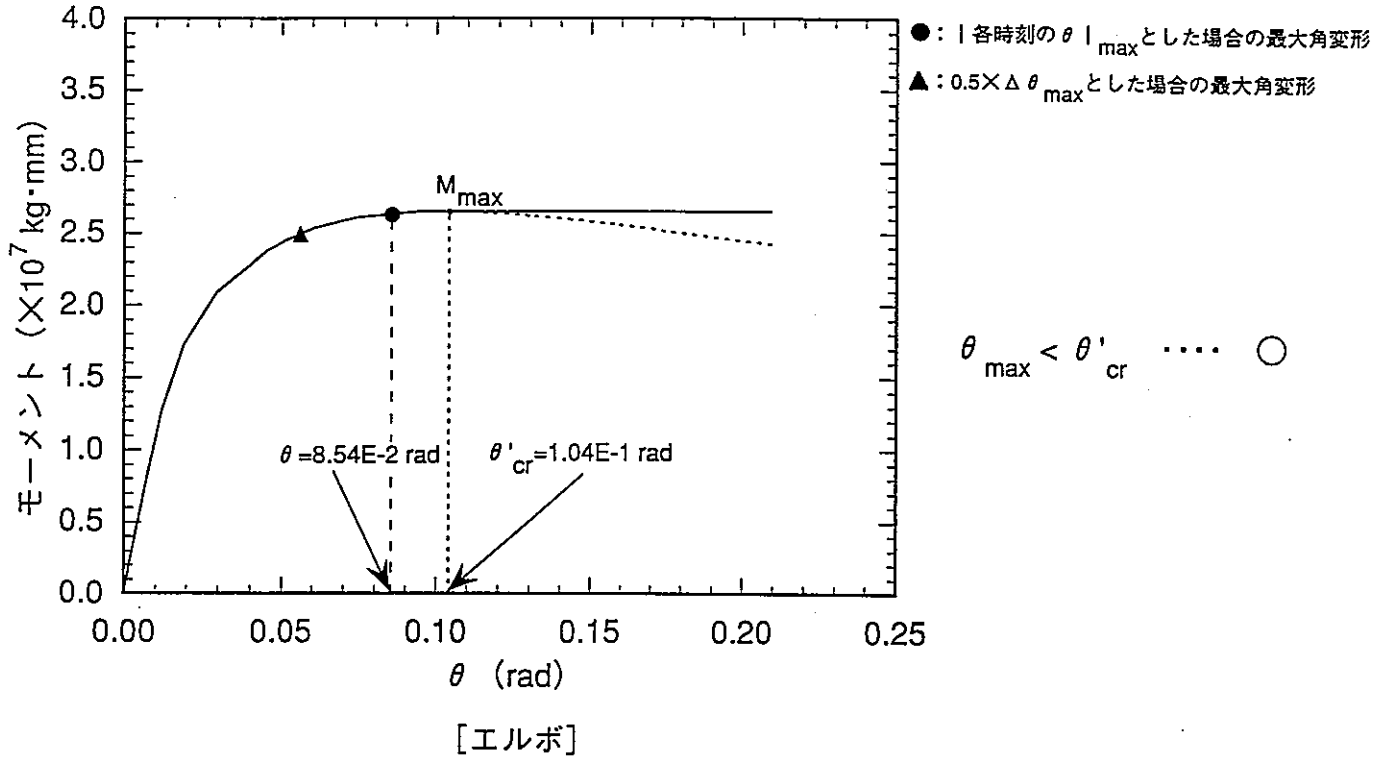


図4.6.2-3 HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 20$)

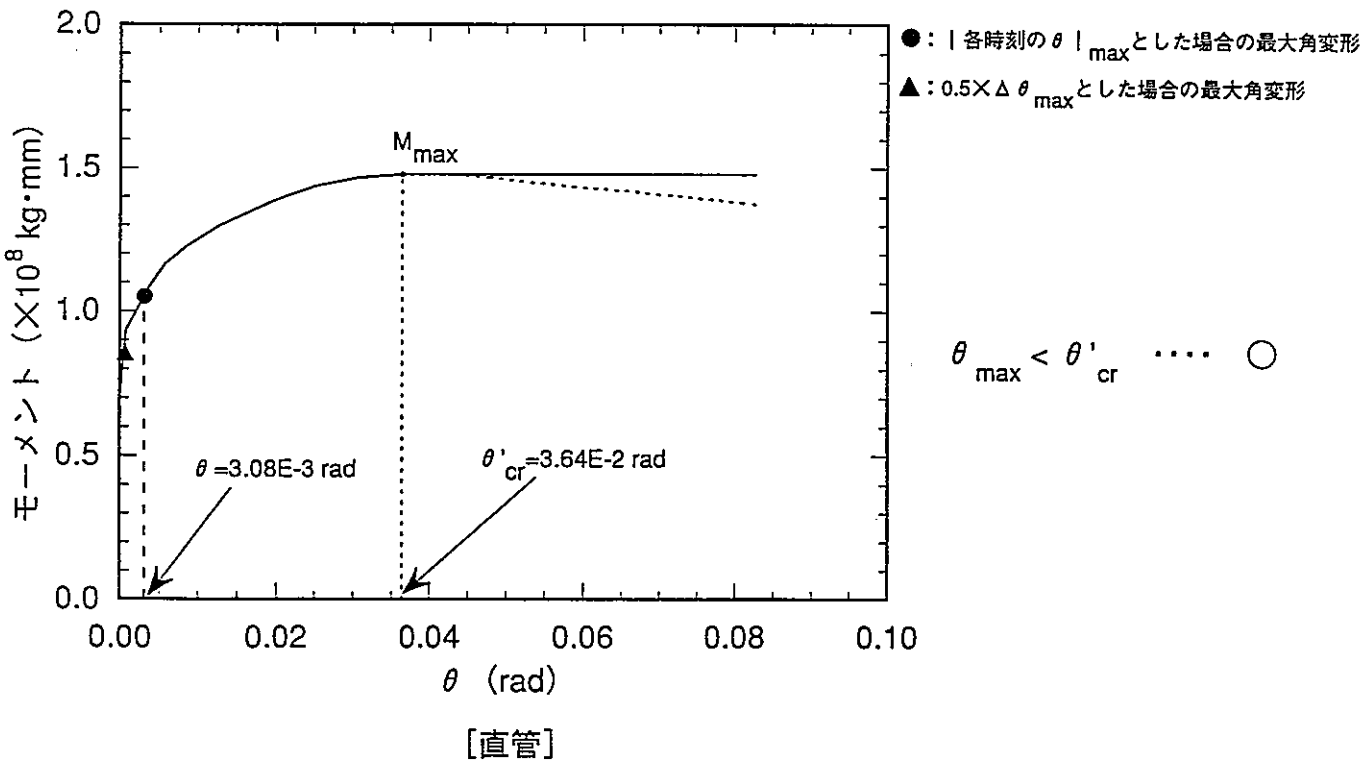
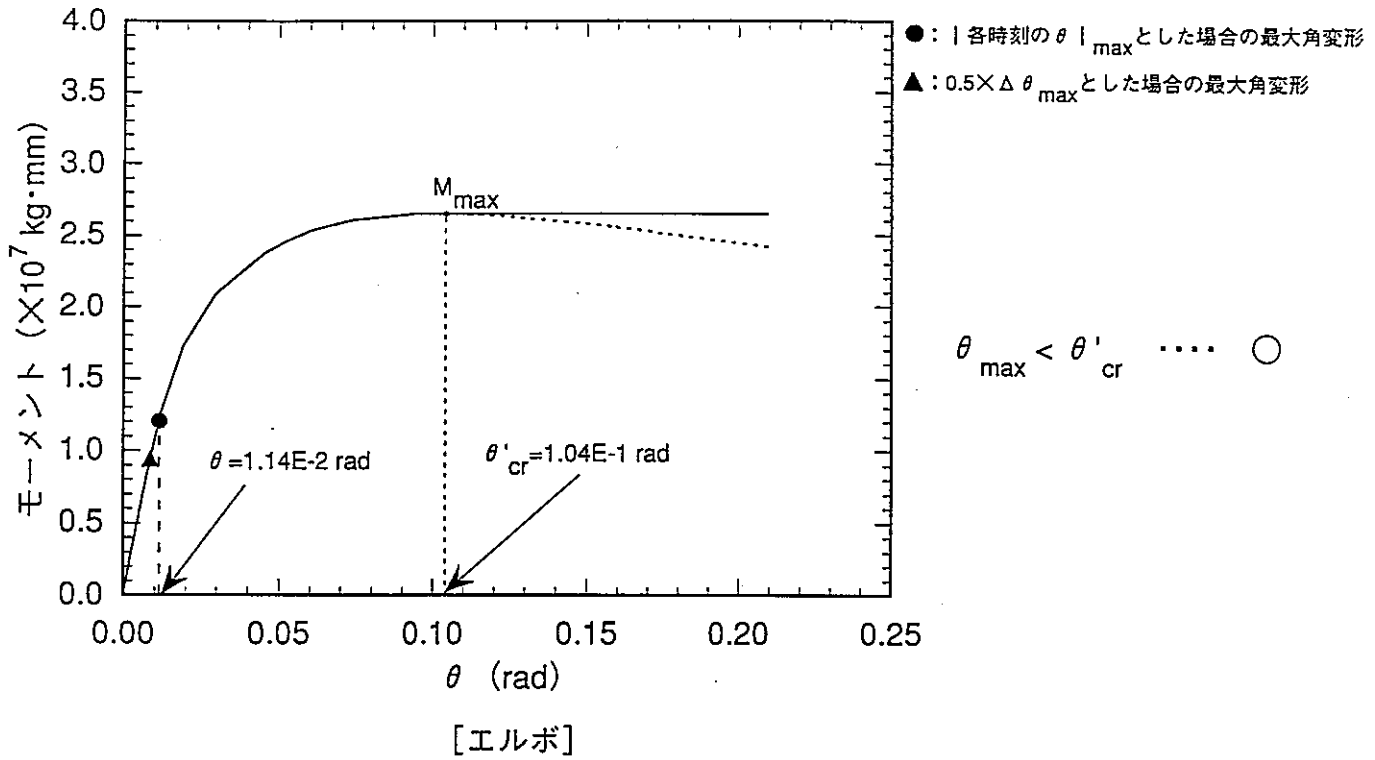


図4.6.2-4 HL配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる[水平+上下]地震) $\times 5$)

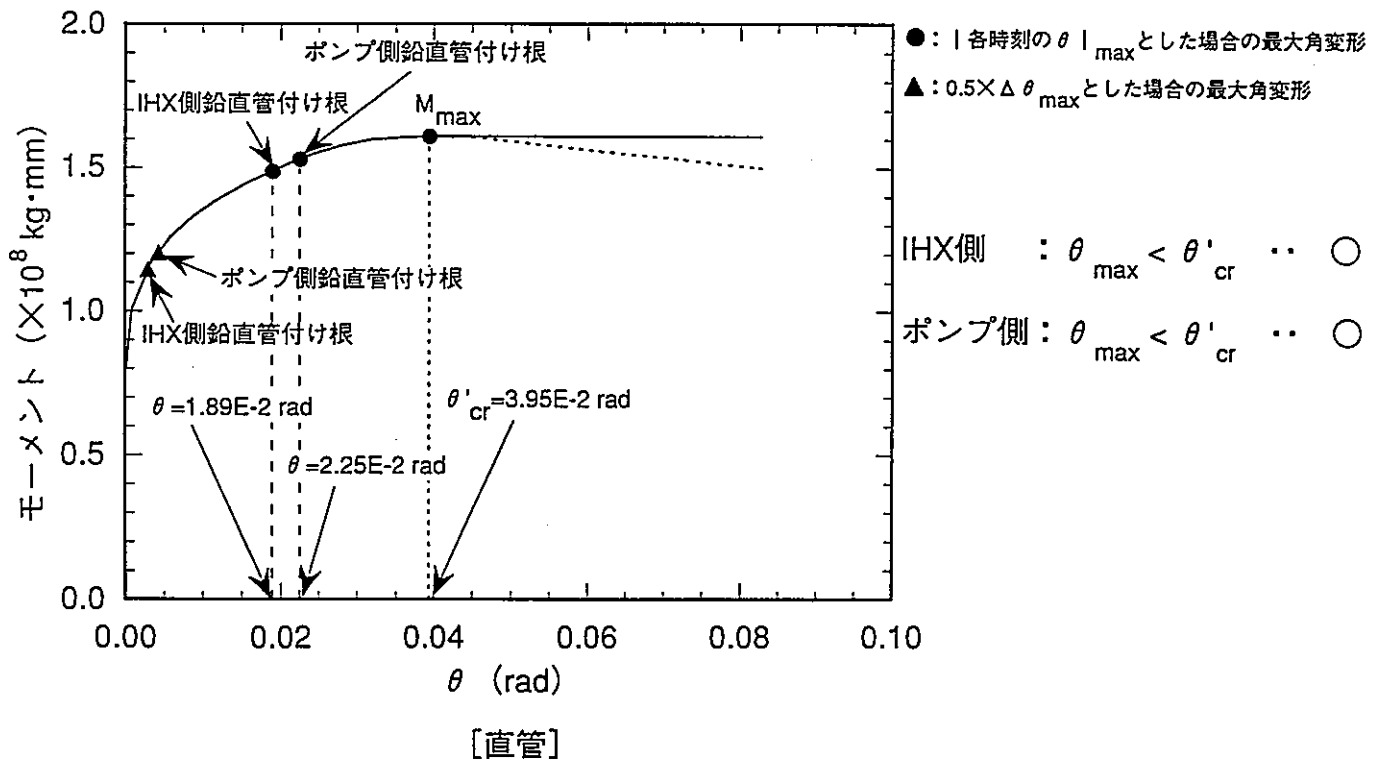
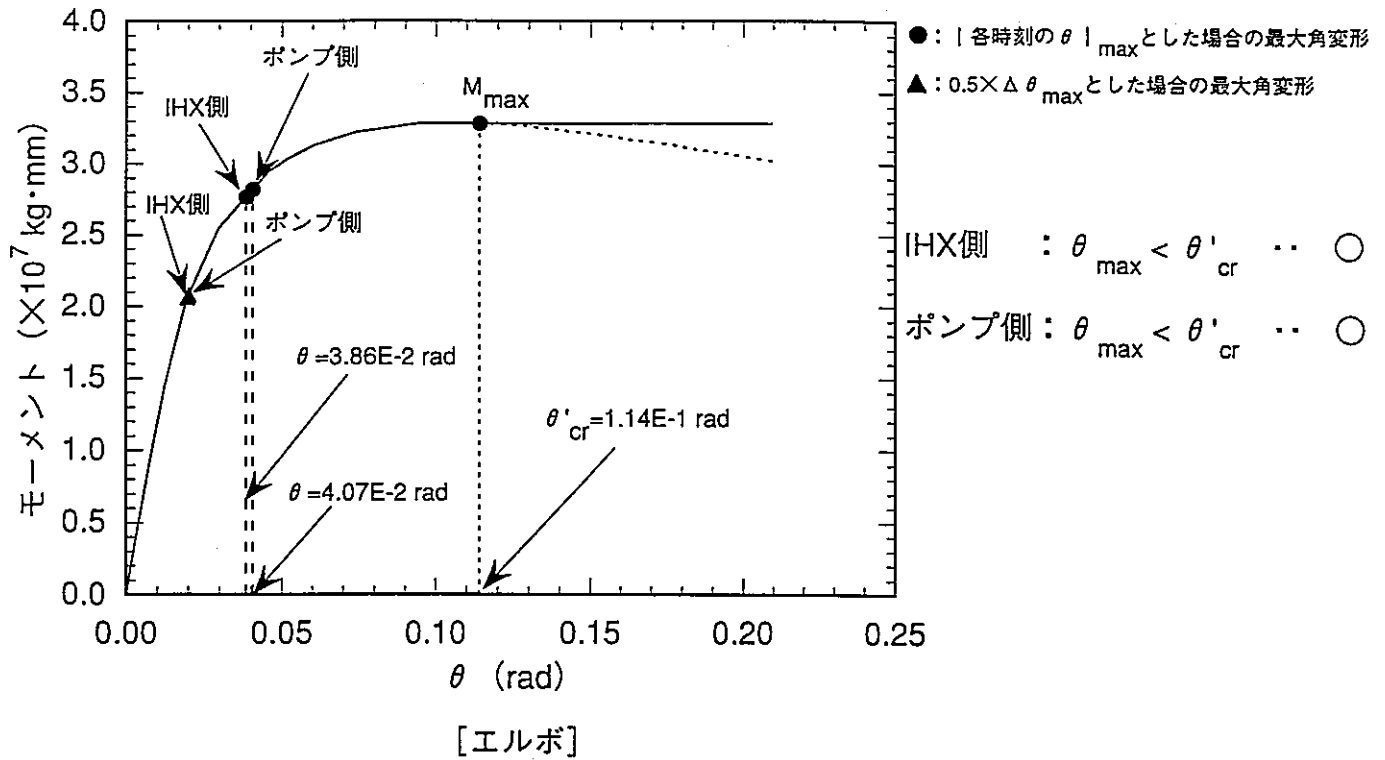


図4.6.2-5 ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 5$)

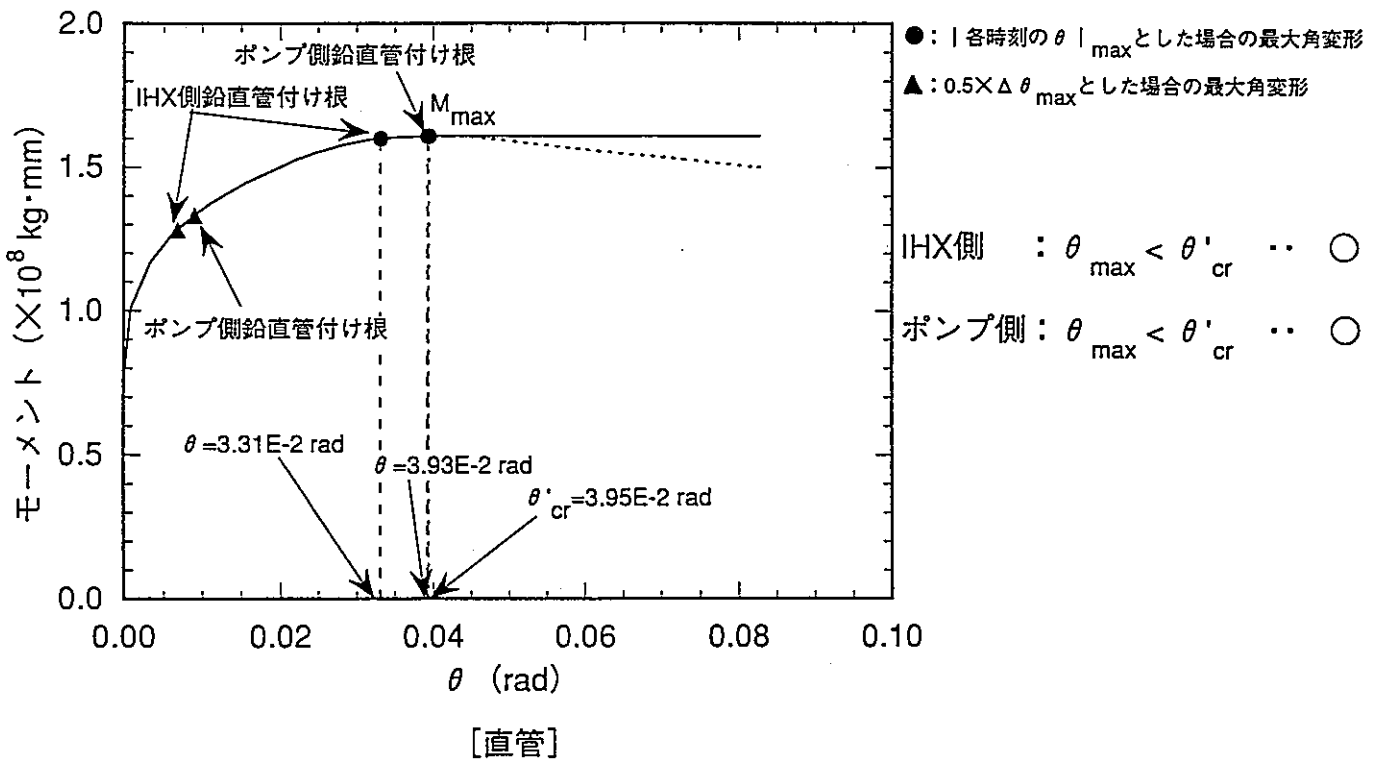
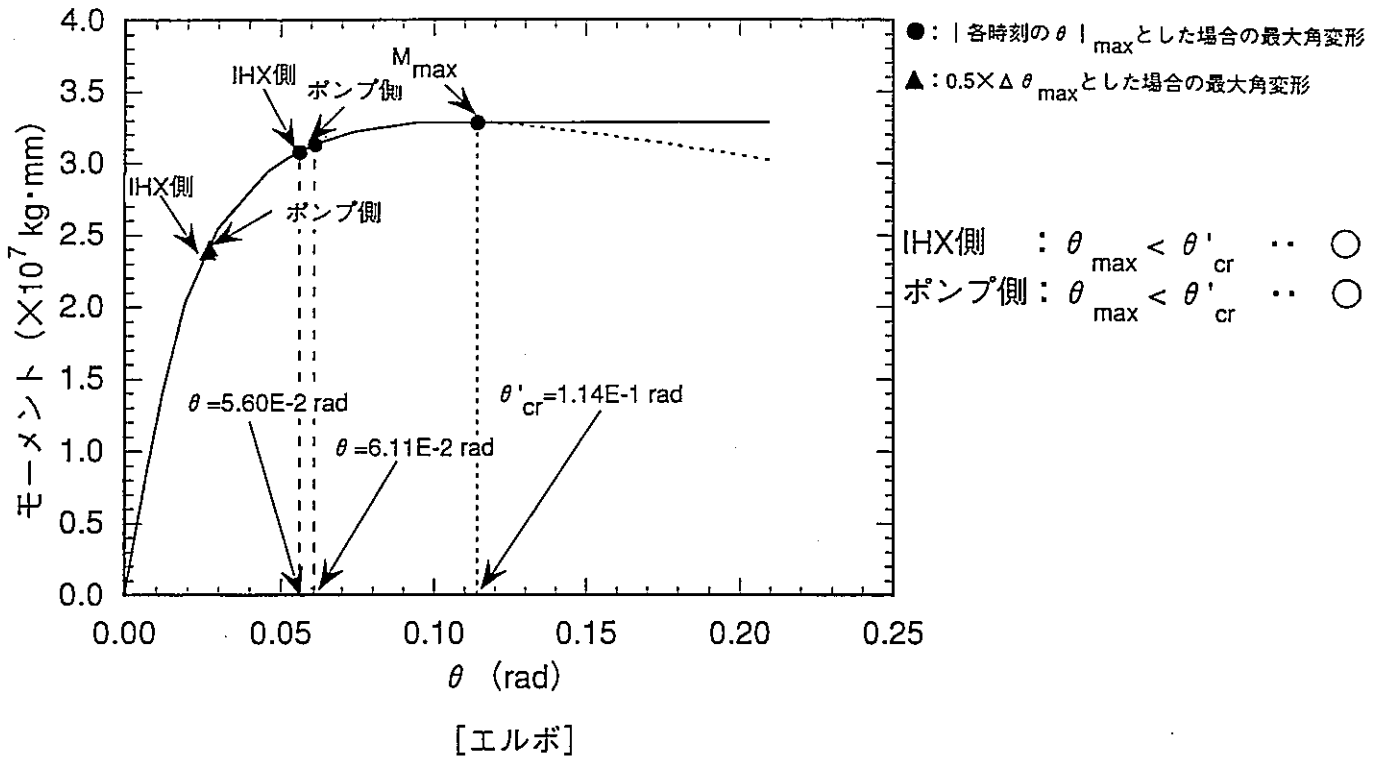


図4.6.2-6 ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 7.5$)

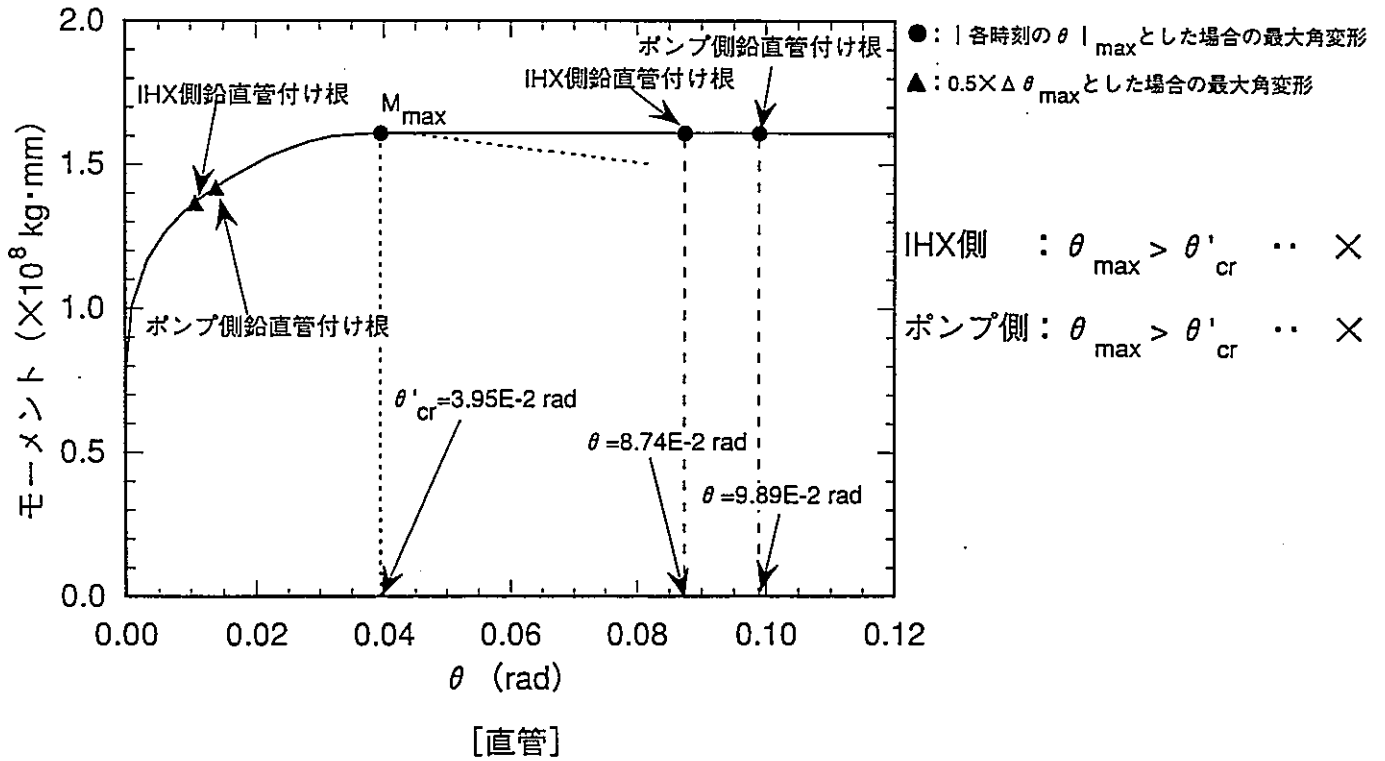
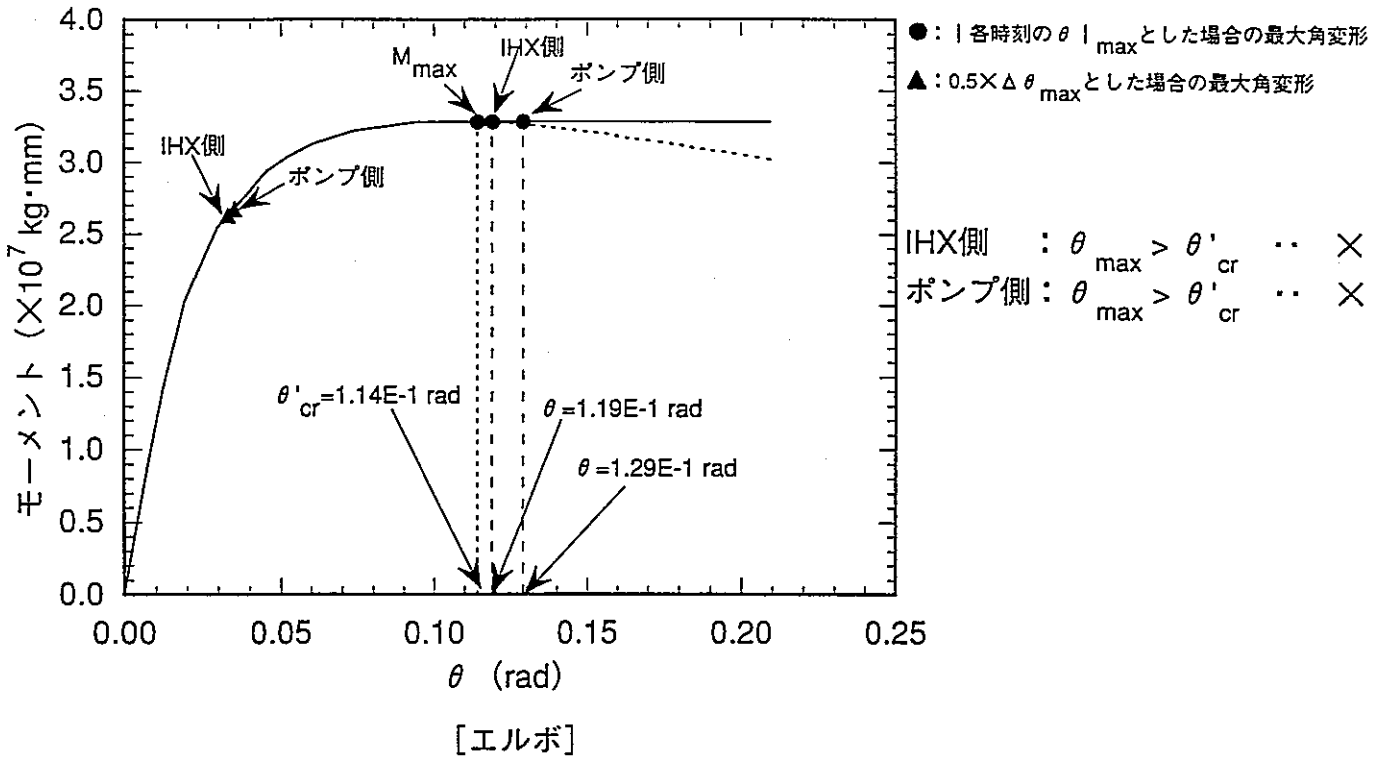


図4.6.2-7 ML配管の座屈評価 (入力地震:(BDSで裕度=1となる水平地震) $\times 10$)

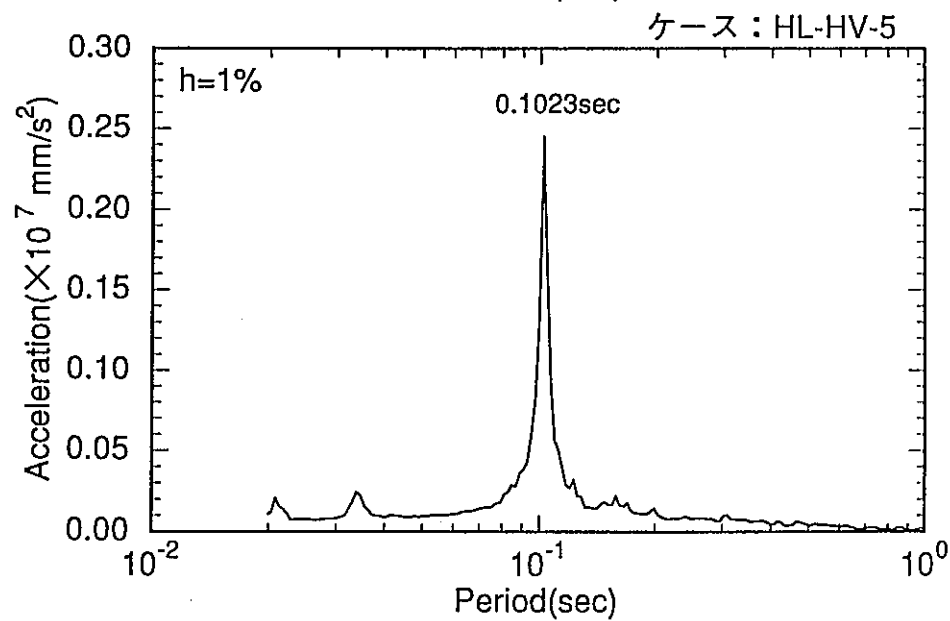
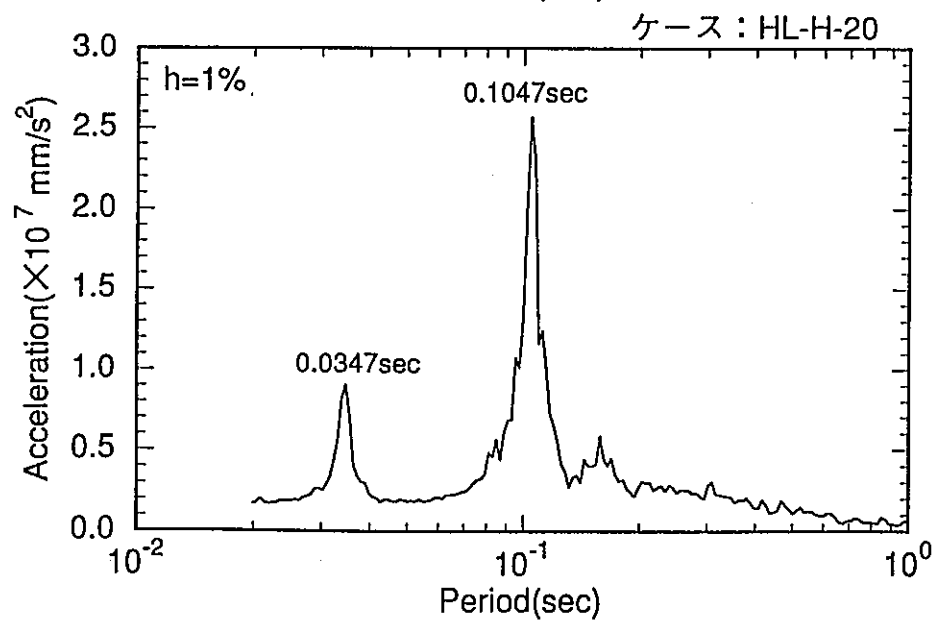
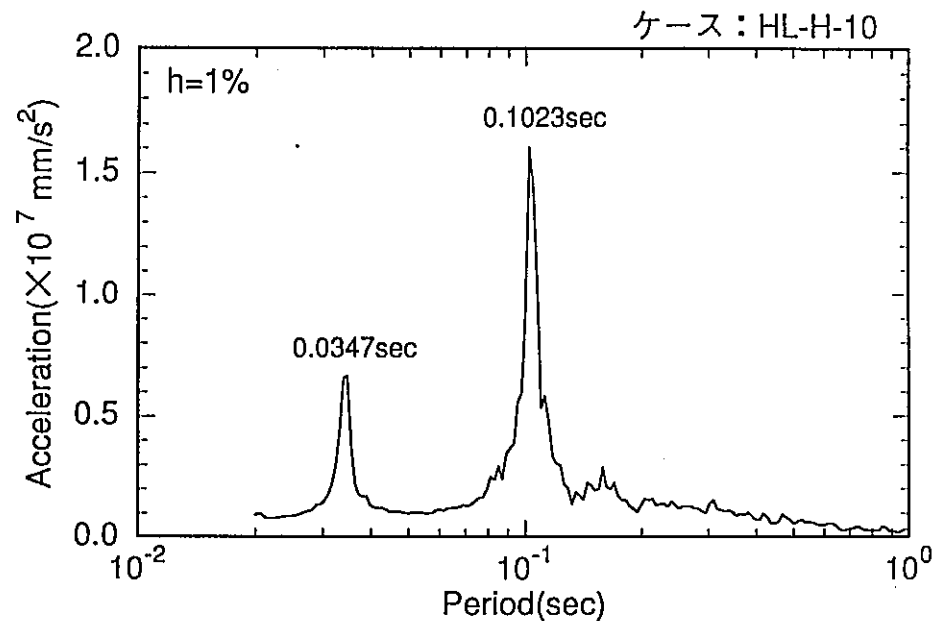
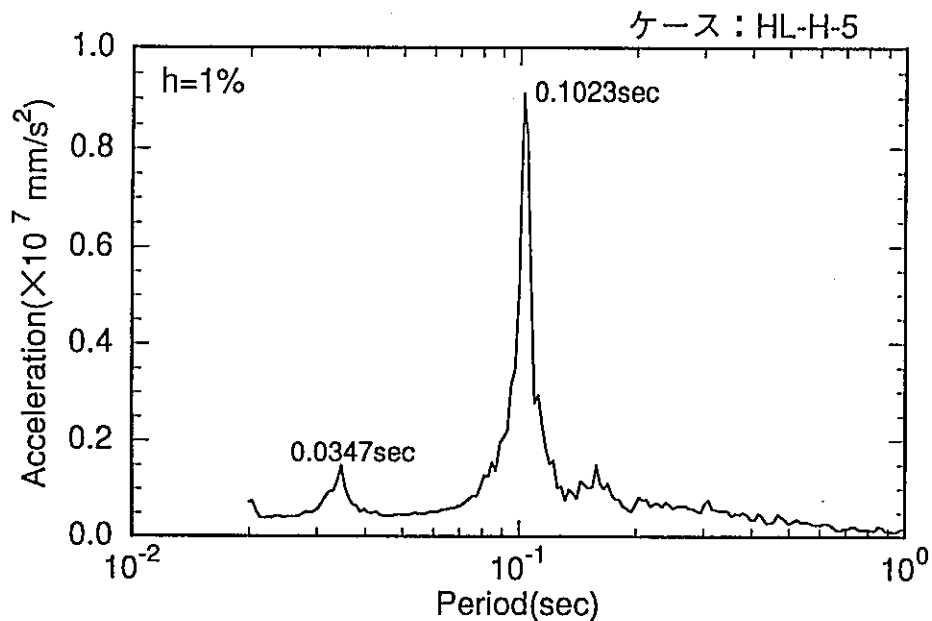


図4.7-1 ホットレグ配管の鉛直管下端の応答スペクトル

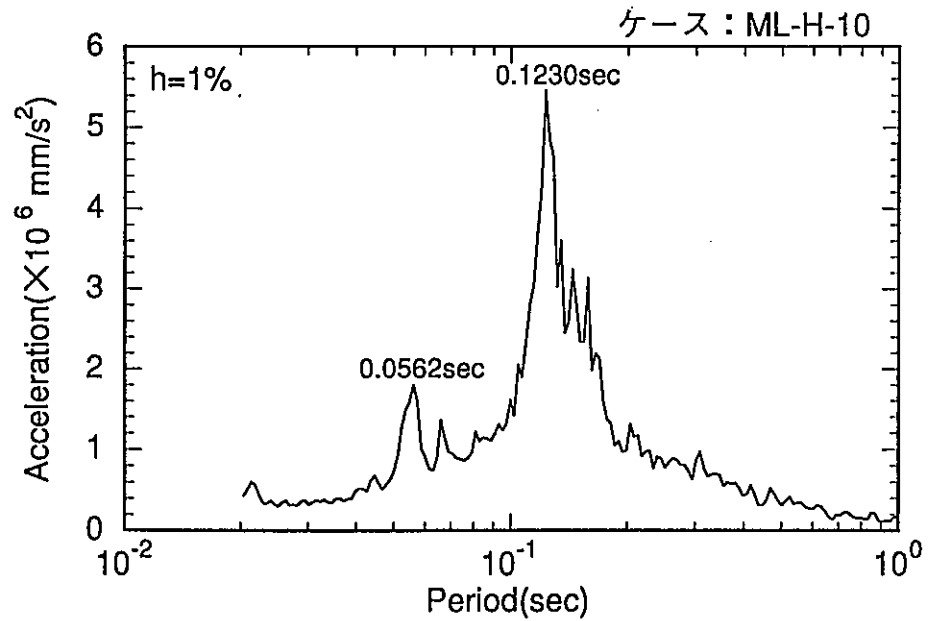
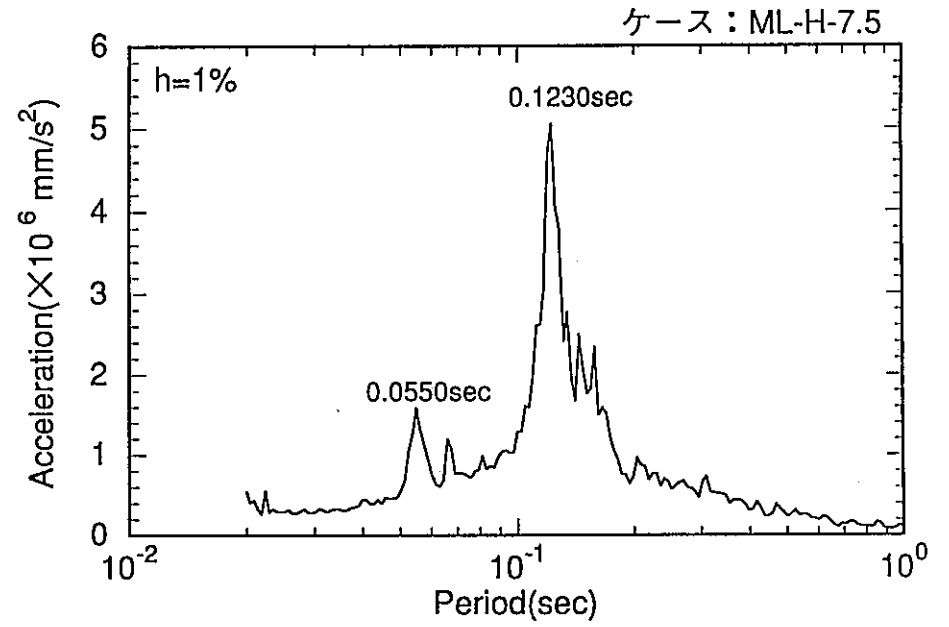
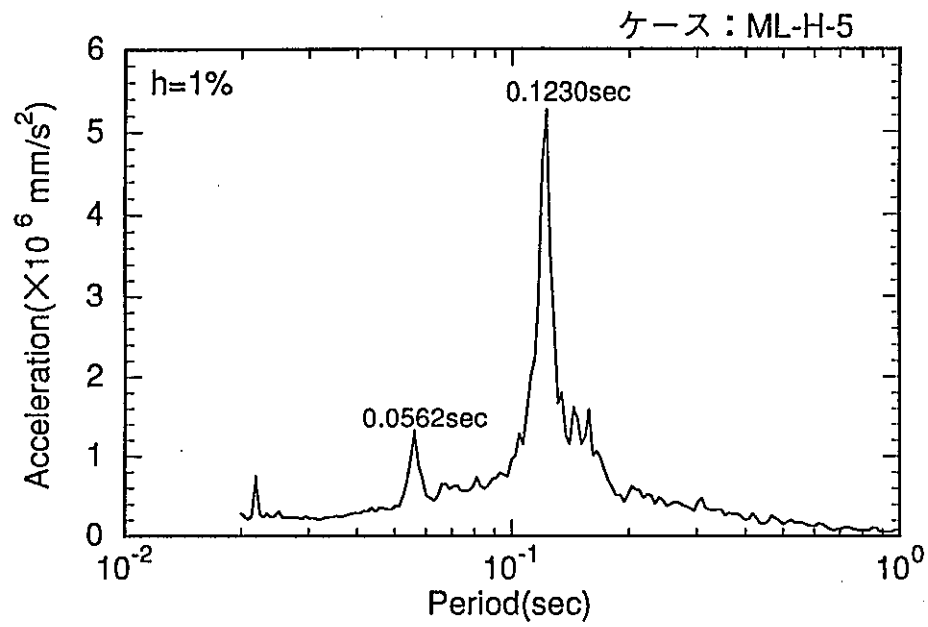


図4.7-2 ミドルレグ配管の水平管中央の応答スペクトル

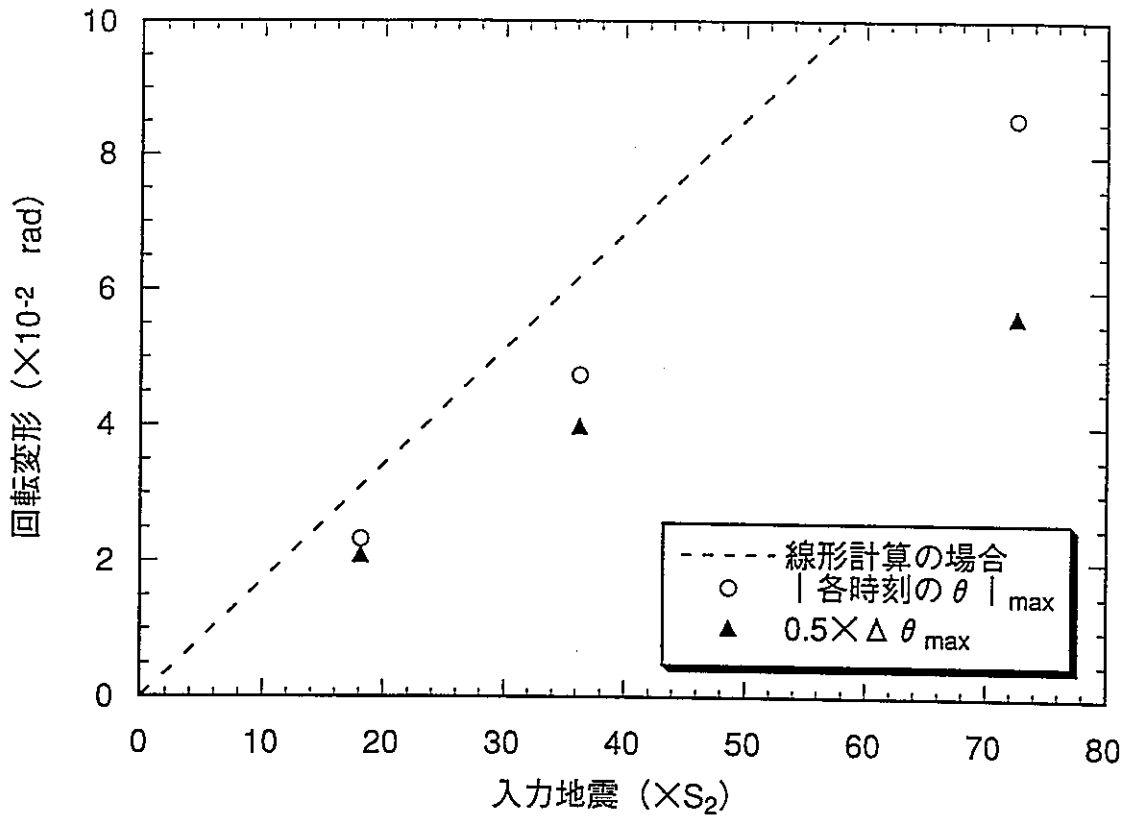


図4.7-3 入力地震とHL配管エルボ部の最大角変形の関係

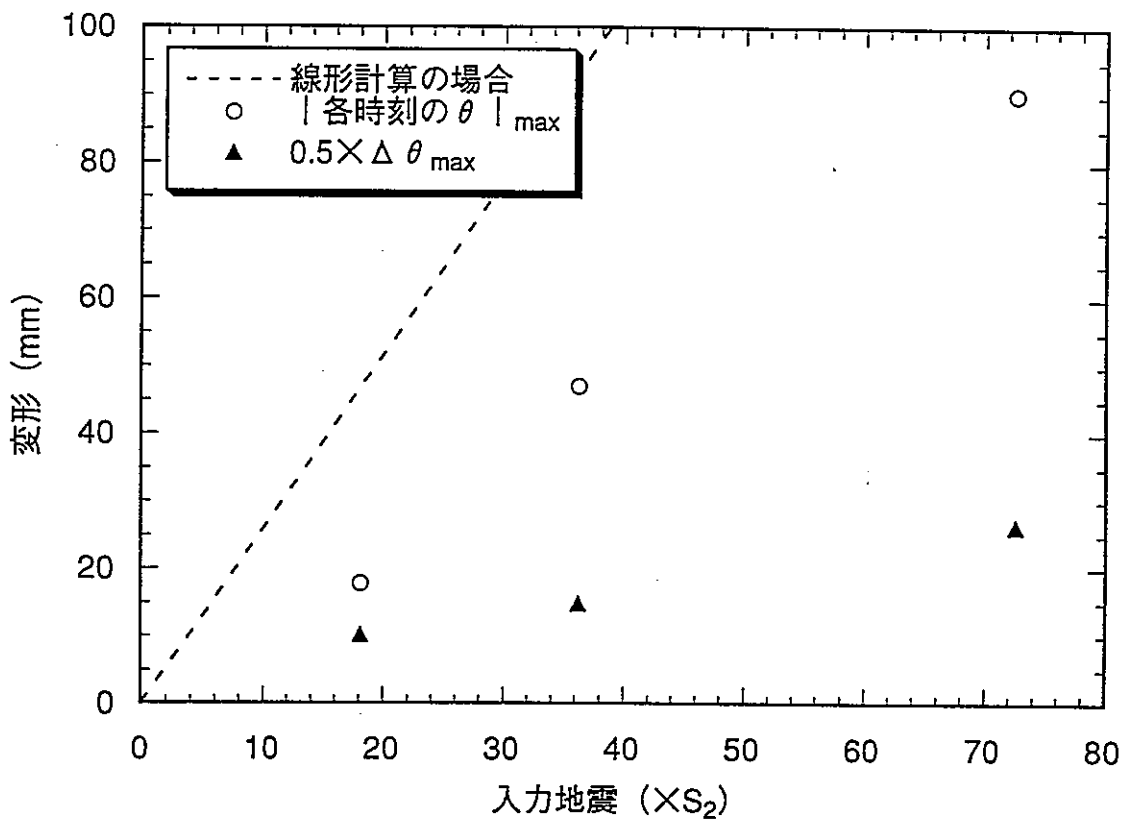


図4.7-4 入力地震とHL配管直管部の最大変形の関係

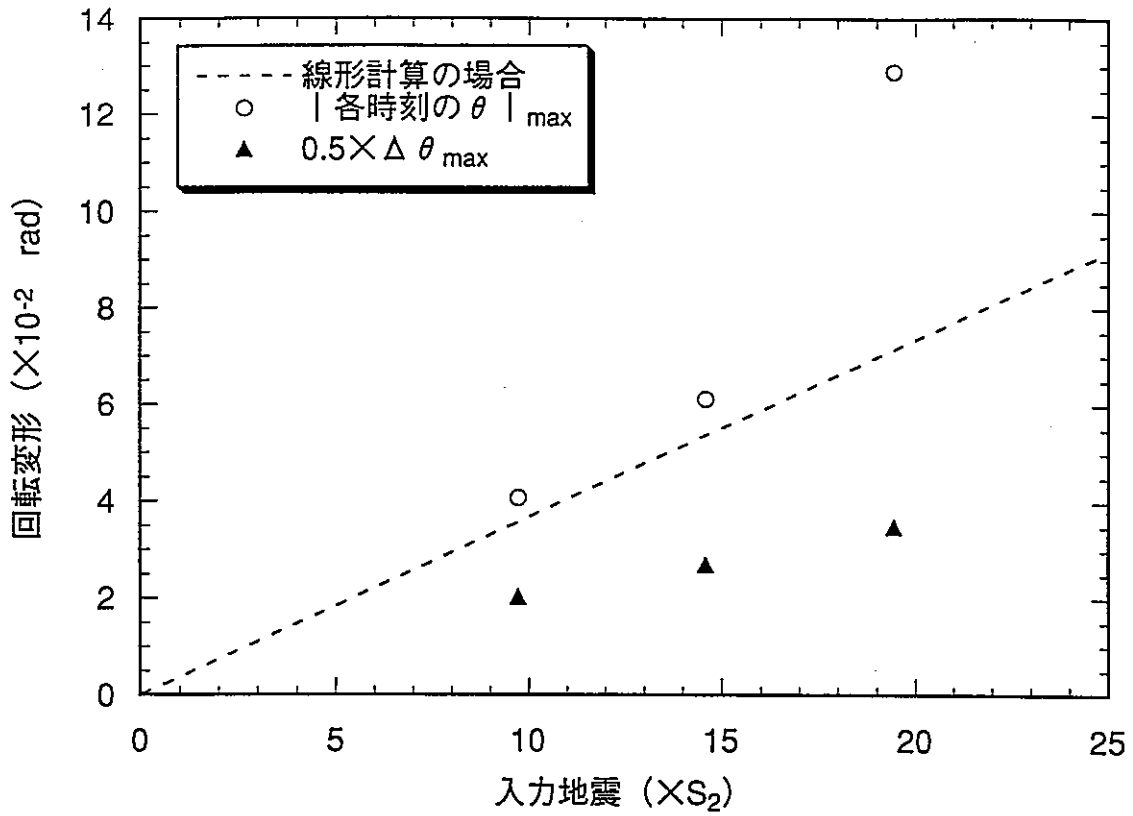


図4.7-5 入力地震とML配管エルボ部の最大角変形の関係

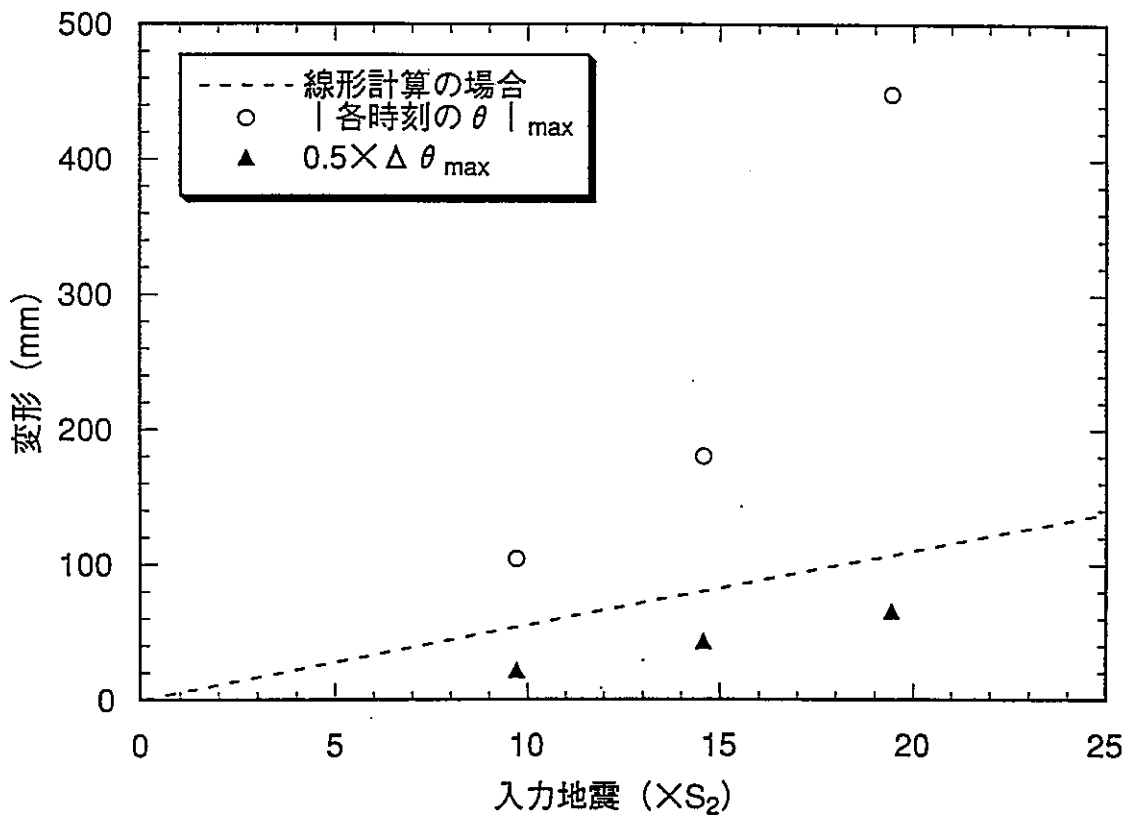


図4.7-6 入力地震とML配管直管部の最大変形の関係

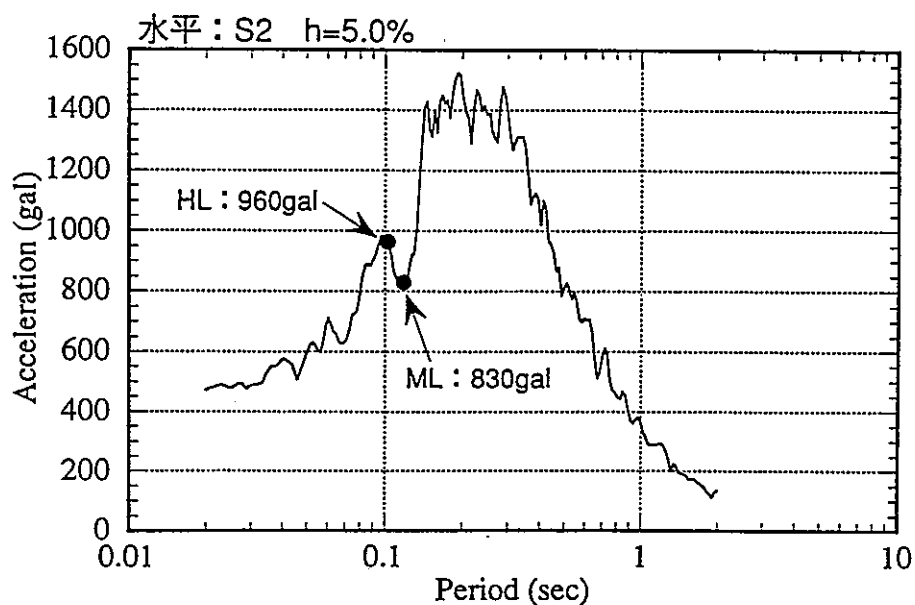
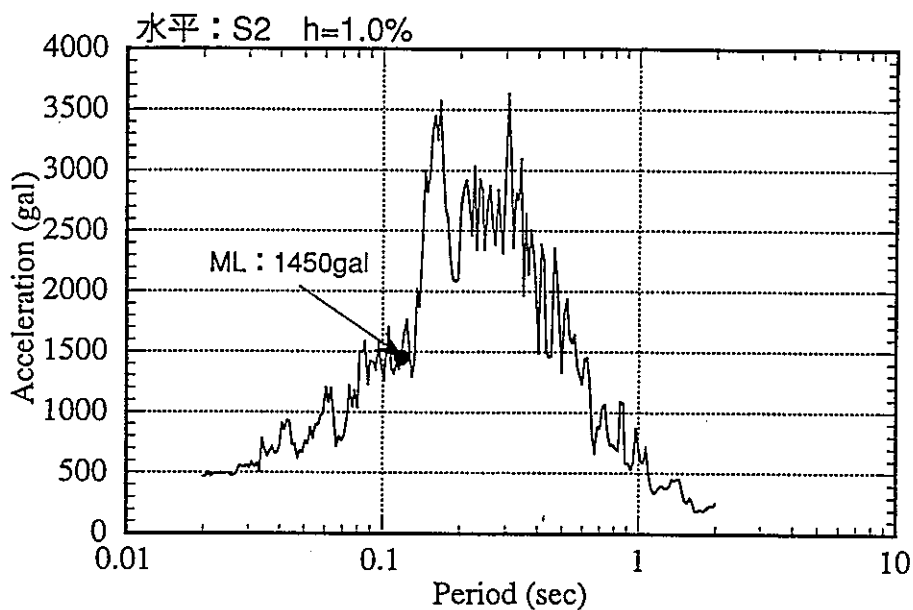
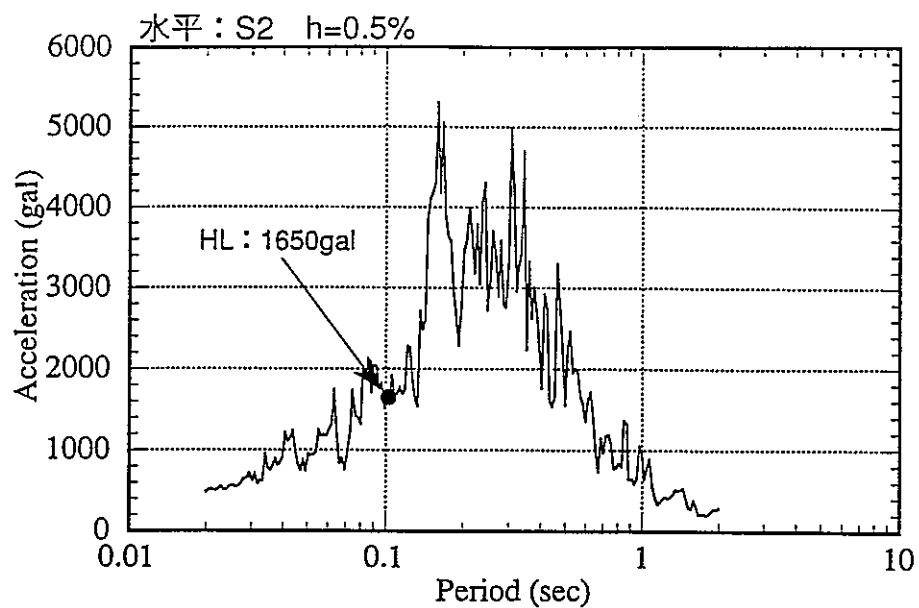


図4.7-7 容器据付部のFRSと応答加速度

5. 合理化効果の検討

(1) 概要

現行の許容値を向上させた場合に、配管設計にどのようなインパクトがあり合理化が達成できるかを検討する。

(2) 許容値向上の目安

今回実施した非線形時刻歴振動解析結果に基づく評価と ASME 新基準による評価とは、結果的には比較的良い対応関係を見せている。従って、ASME 新基準が今後の許容値向上に向けての目安になると考える。

今回検討した範囲では、ASME 新基準で評価を行えば BDS よりも 5 倍程度大きい地震入力を許容できる可能性がある。(S2 の倍数として表せば $10 \times S2$ 以上の地震に耐える可能性がある。)

(3) 合理化効果

今回検討した配管は耐震サポート類を全く設けないことを想定したものである。(但し、ホットレグ配管の鉛直管下端には、固有振動数を確保するため流体制振を念頭に置いた水平バネを設けている。)この場合でも S2 を大きく上回る地震入力に対して成立する。

従って、今回のような単純な短い配管であれば、サポートを設ける必要がほとんど無いと考えられる。

但し、固有振動数が低すぎる場合には応答が大きくなったり座屈崩壊の発生が見られるようであり、ある程度の剛性を確保する必要がある。そのため、固有振動数を確保するためのサポートは必要である。その場合であっても、許容応力が相当に高いため、従来のように発生応力に神経を使うことはあまりなくなるであろう。従って、従来しばしば用いられた応力低減のためのサポートや配管の厚肉化は必要なくなると考える。

なお、多数のエルボを有する長い配管の場合でも、サポートを大幅に削除できると考えられる。但し、サポートが全く無いと塑性変形が特定の箇所に集中して生じる可能性がある。この場合も全体としてある程度の剛性を確保するためのサポートは必要がある。

6. ま と め

大型炉の1次系ホットレグ配管及びミドルレグ配管を模擬した配管モデルを用いて、非線形時刻歴振動解析を含む耐震解析及び評価を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- a) ホットレグ配管の実力としての耐震限界は、水平地震を受ける場合は $20 \times S_H$ ($70 \times S_2$ 程度)、(水平+上下)地震を受ける場合は $20 \times (S_H + S_V)$ ($10 \times S_2$ 程度)である。ここで、 S_H は BDS で裕度が 1.0 となる場合の水平地震であり、 $(S_H + S_V)$ は同じく BDS で裕度が 1.0 となる場合の(水平+上下)地震である。
- b) ミドルレグ配管の実力としての耐震限界は $7.5 \times S_H$ ($15 \times S_2$ 程度)である。
- c) ASME 新基準と非線形時刻歴解析ベースの評価とは比較的对応性が良い。従って、ASME 新基準による許容限界が今後の基準合理化に向けての目安目標となろう。
- d) ASME 新基準相当の合理化基準を適用する場合、許容応力が高いため設計において応力を抑えるための対策(サポート設置や板厚増)を施す必要はほとんど無くなる可能性がある。但し、固有振動数のある程度に確保する必要があり、そのためのサポートは必要である。

7. 参考文献

- (2-1) PNC TN9410 92-137, 大型高速炉設計研究精化報告書 -60 万 KWe 級プラントの設計研究-, 1992年 5 月
- (2-2) PNC SN241 84-14 解説 高速原型炉第1種機器の構造構造設計方針, 昭和 57 年 5 月
- (2-3) 高速実証炉高温構造設計方針(案), 平成 11 年 3 月, 日本原子力発電(株)
- (2-4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec III, NB3600, 1991
- (2-5) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec III, NB3600, 1995

8. 謝 辞

本検討における配管系の地震応答解析と強度評価は、新型炉技術開発・神島吉朗氏に実施して頂いたものである。ここに記して感謝の意を表わす。