

3.2 サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化

3.2.1 検討方針

3.2.1.1 検討方針

現在の地震PRAでは、配管サポートが1本でも破損すれば、配管本体が機能喪失するものと仮定されているが、実際に、配管サポートが損傷した場合の配管系の地震時挙動に関する知見は少ない。本研究は、配管サポートの支持機能喪失を想定した配管系の振動台加振試験を実施し、耐震性評価における配管系の地震時損傷に係る検討を行う。

(1) 試験体作成の方針

試験体作成にあたり、基本的な考え方を以下に示す。

- ・試験体は小口配管モデルとする。
- ・内圧なし、流体質量なし。
- ・常温条件とし、熱膨張は考慮しない。
- ・地震慣性力を得るために付加マスを用いる。

以上を踏まえ、小型振動台で加振することを想定して図3.2-1のような配管系試験装置を製作する。

(2) 水平加振試験及び試解析

図3.2-1に示すように水平加振試験では、以下の3つのステップを想定した現象を再現するシナリオとし、そのような状況下での配管の構造健全性を確認する。具体的には、ひずみ計及び加速度計により計測することにより確認するものとする。

ステップ1:地震反力が作用するサポートが、加振中に支持機能を喪失する。

ステップ2:ステップ1により、振動台加振中に配管系の振動モードが変化し、残りのサポートの配管反力が増加する。

ステップ3:加振終了後、ひずみ等の計測値に基づき、サポート条件が変化した状態の配管構造健全性を確認する。

加振方向は1方向(X方向)のみを対象とする。

配管系試験体の試解析では、詳細な寸法などから解析モデルを構築し、固有値解析及び観測地震動等に基づく地震応答解析を実施することで、サポートの損傷前後の状態における固有振動性状及び応答性状を把握する。

一方、配管サポートの損傷を対象とした水平加振試験では、sin波入力による水平加振試験よりサポート損傷前後の状態における固有振動数、固有モードを検討するとともに、観測地震動等の入力による水平加振試験よりサポート損傷前後の状態で得られた加速度等の試験データや全体挙動を精査する。

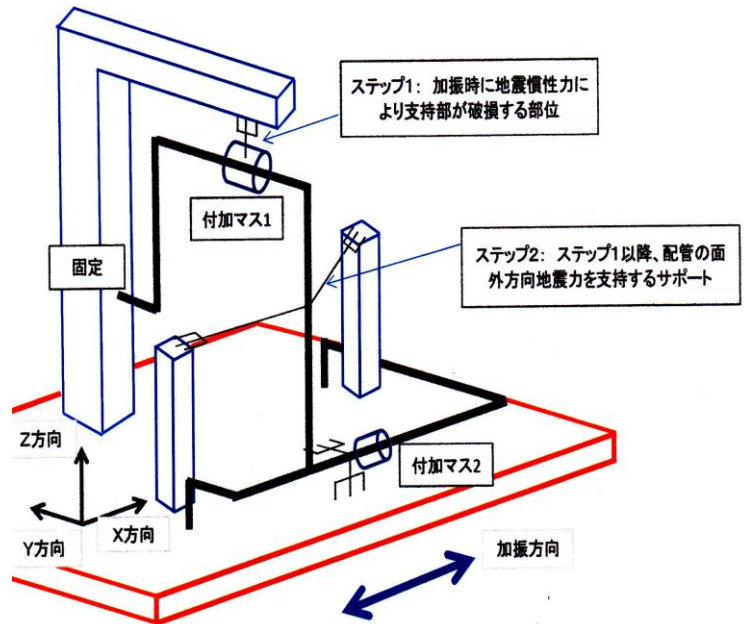


図 3.2-1 配管系試験体のイメージ図

3. 2. 1. 2 振動台の性能

水平振動試験に用いる振動台の外観は図 3.2-2 に示している。3次元永久磁石式地震波振動台であり、加振部に永久磁石を採用している。主な仕様を表 3.2-1 に示す。振動台のテーブルの大きさは 1.5m × 1.5m である。加振周波数範囲は 0.1~100Hz、水平方向の最大加速度は、1tonf 積載時で 10.7m/s^2 、水平方向の最大変位は $400\text{mm}^{\text{P-P}}$ (両振幅)である。

表 3.2-1 振動台の主な仕様

加振方向	3軸
駆動方式	永久磁石式
加振テーブルの大きさ	1.5m × 1.5m
最大可能搭載質量	5ton
加振周波数範囲	0.1~100Hz
最大加速度	14.7m/s^2 (水平方向、無積載時) 10.7m/s^2 (水平方向、1.0tonf積載時)
最大変位	$400\text{mm}^{\text{P-P}}$ (両振幅)

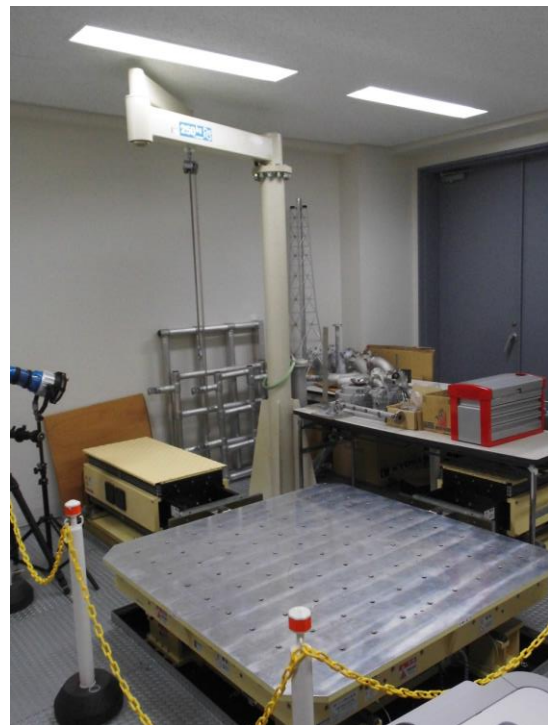


図 3.2-2 小型 3 次元振動台

3.2.2 配管系試験体の製作

3.2.2.1 配管系試験体の製作

(1) 配管及び支持鉄骨

作成した配管系試験体の写真及び鳥瞰図を図 3.2-3(1), (2)に示し、詳細な寸法関係などは図 3.2-4(1)～(3)の製作用図面に示す。

振動台のテーブル(1500×1500mm)上に H-200×200 の土台を設定し、その上に H-150×150 の支柱を立て、上方に配管支持のための H-100×100 の支梁を設置している。支柱及び支梁の支持端には補強用のリブプレートを設置している。さらに、H-100×100 の支梁が個別に振動することを止めることを目的として L-50×50 を用いて組み立てた振れ止め用鉄骨を設置している。

配管は圧力配管用炭素鋼管 1B(sch40)を用いている。上方の部分と下方の部分の2つの部分に分け、直線部分とエルボは溶接により組み立てている。上方の部分と下方の部分を別々に組み立て振動台上に搬入し、接続はフランジを用いてボルトで結合させている(接続位置は図 3.2-3(2)。また、配管の土台及び支柱への支持方法はフランジを用いてボルトで固定させている。

使用した鋼材の種類を以下に示す。

配管:圧力配管用炭素鋼管、1B(sch40、外径 34mm、厚さ 3.4mm)

土台:H200×200(一般構造用鋼材 SS400)

支柱:H150×150(一般構造用鋼材 SS400)

支梁:H100×100(一般構造用鋼材 SS400)

振れ止め鉄骨:L50×50 より組み立て(一般構造用鋼材 SS400)

(2) 配管サポート

図 3.2-3(1)に示すように配管のサポートには、サポート A、B、C の 3 種類を設定する。

上方の横方向配管の中央部分にサポート A を設置する。サポート A は振動時に損傷が生じるように設置する。サポート A の詳細は後述する。

縦方向配管には、サポート B を設置する。市販のロッドレストレイントを用いる。

下方の横方向配管にはサポート C を設置する。これは、自重のみを支持するために設置するもので水平方向にはフリーとしている。

(3) 付加マス

慣性力増大及び固有振動数を調整するために、付加マスを用いる。上方のサポート A 付近には付加マス 1 として 10kg(5.12kg の錘を 2 か所)を、下方のサポート C 付近には付加マス 2 として 20kg(10.56kg の錘を 2 か所)を設置する。

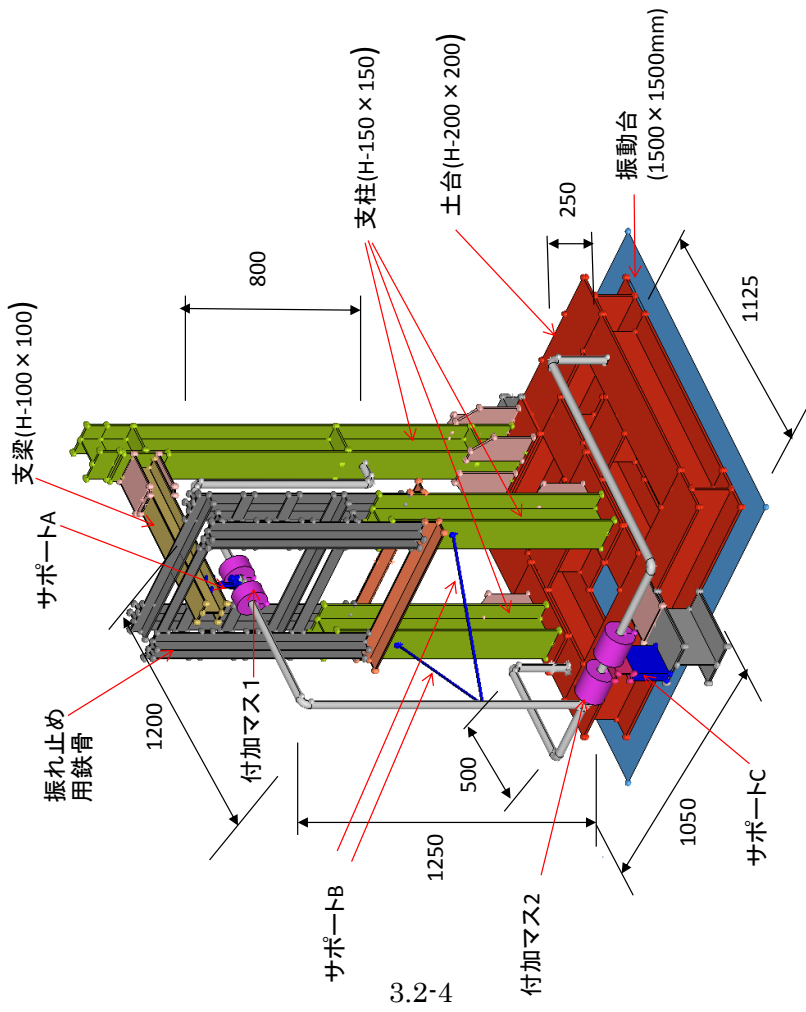


図 3.2-3(1) 試験体概要

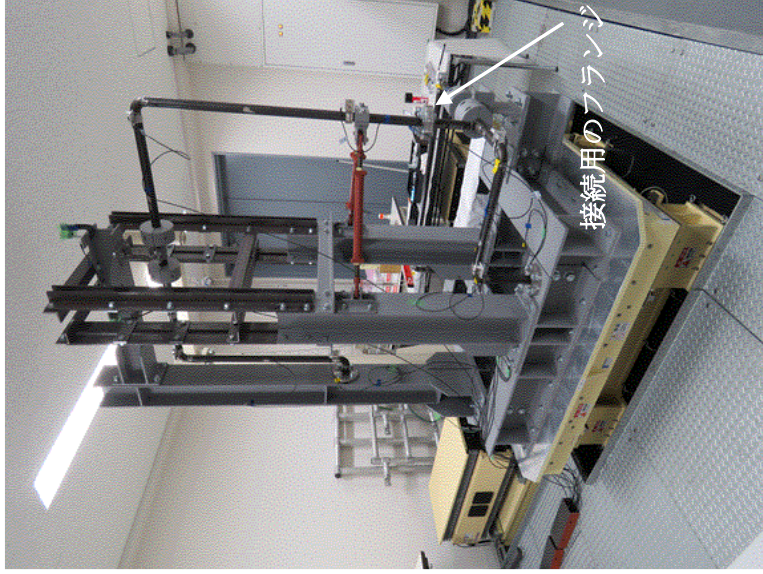


図 3.2-3(2) 試験体設置状況

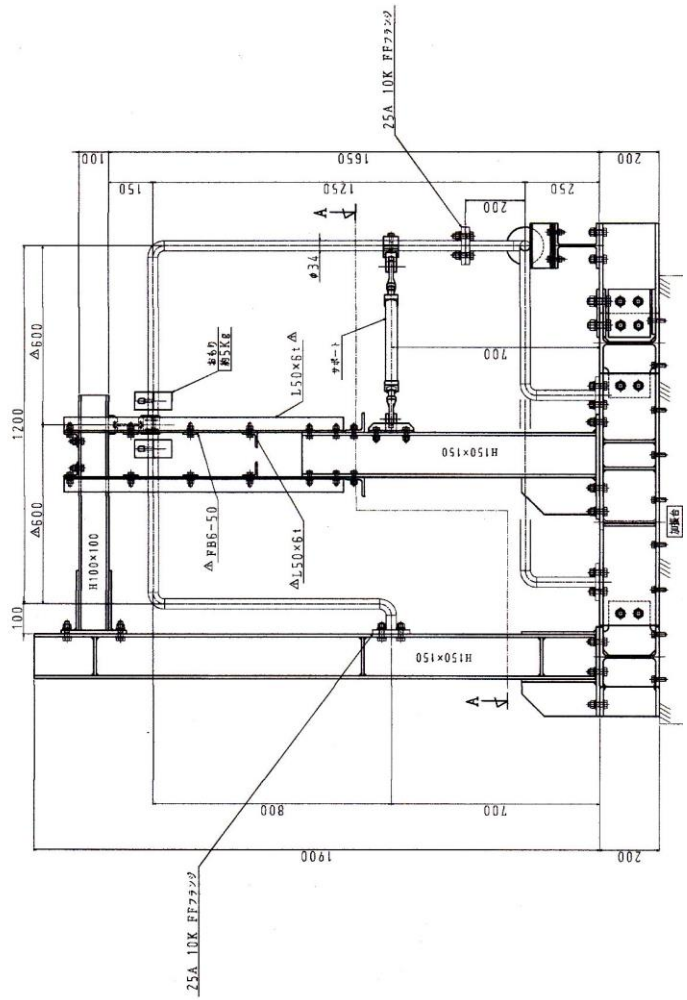
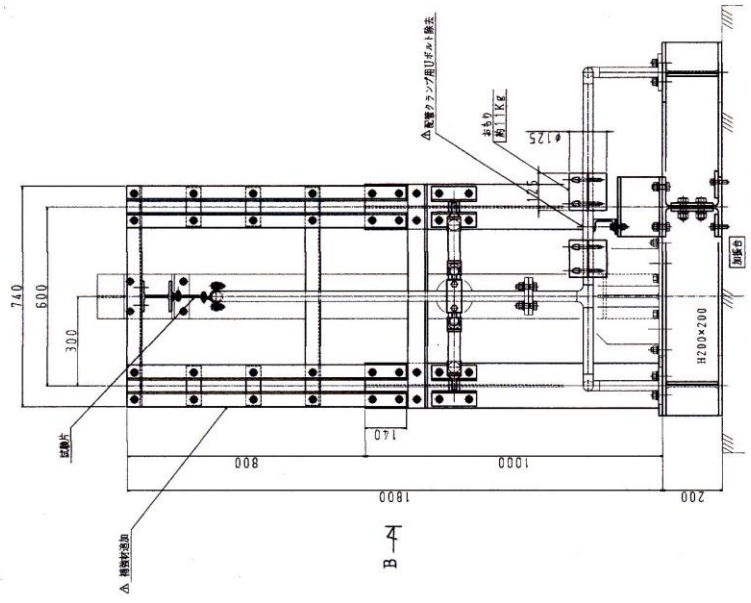
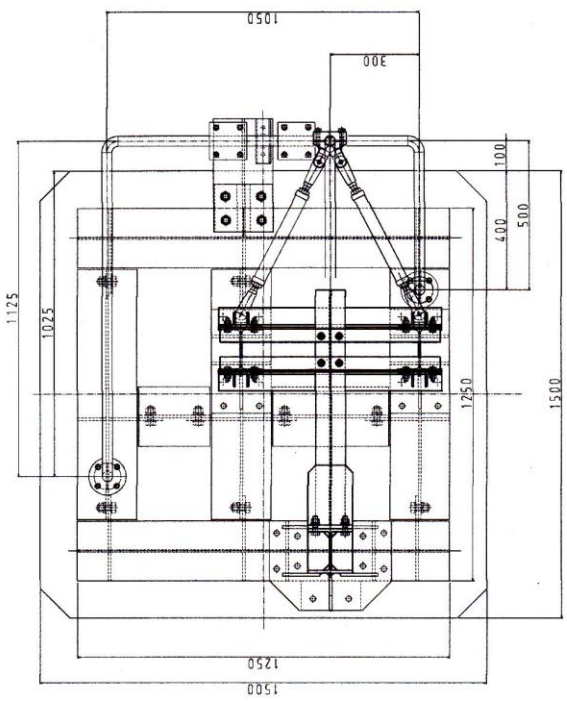


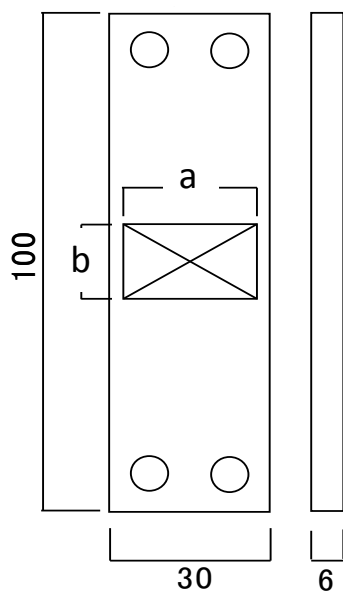
図 3.2-4(1) 試験体の図面(全体図)

3. 2. 2. 2 サポート A の支持機能特性

3. 2. 2. 2.1 サポート A の概要

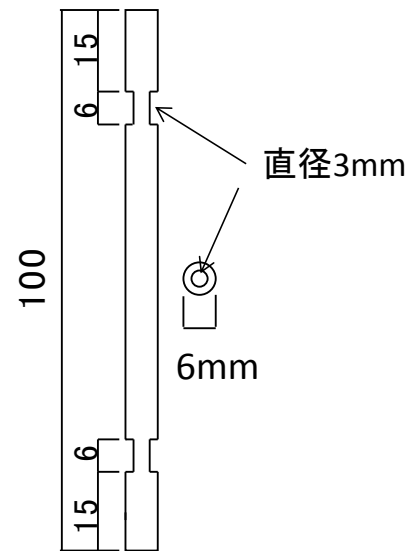
上方横方向配管の中央部に設置するサポート A は振動試験中に損傷を発生させるサポートである。図 3.2-5 に示すように、長さ 100mm としたアクリル板(厚さ 6mm)と鋼棒(直径 6mm)を用いることとする。アクリル板は幅 30mm とし、変形を中央に集中させ破断させることを意図して、中央に大きな開口部を設けることにする。開口の大きさは、破断強度(破断変位)の大きさを定めることを目的として、図中に示すように 25×15mm(以下、AK(25×15))、25×12.5mm(以下、AK(25×12.5))、20×15mm(以下、AK(20×15))、20×12.5mm(以下、AK(20×12.5))の 4 種類とする。鋼棒(直径 6mm の丸鋼、SR235)では、鋼材の曲げ変形を材端に集中するように両端に直径 3mm の部分を幅 6mm で設ける(以下、STφ6)。

サポート A のアクリル板(厚さ 6mm)と鋼棒(直径 6mm)の長さは 100mm であるが、両端部分(各 15mm)は固定するために使用するの、変形する部分の長さは 70mm である。



中央開口の大きさとその記号

記号	a(mm)	b(mm)
AK(25×15)	25	15.0
AK(25×12.5)	25	12.5
AK(20×15)	20	15.0
AK(20×12.5)	20	12.5



鋼棒の形状とその記号

記号	
STφ6	直径6mmの丸鋼 両端は直径3mm(幅6mm)

鋼棒(直径 6mm)

中央に開口を有するアクリル板(厚さ 6mm)

図 3.2-5 サポート A の概要

3. 2. 2. 2 サポート A の支持機能特性調査

サポート A の支持機能特性(荷重-変位関係)を把握するため、静的加力試験を実施する。

静的加力試験の状況を図 3.2-6(1)、(2)に示す。

サポート A の試験片は、振動台試験と同様の変形状態をさせることを目的として、図 3.2-7 のような加力治具を作成した。試験片の下端を固定し、上端が下端と水平方向に平行に移動できるように、上下(回転)方向変位を拘束するフレームと加力点が水平方向に移動できるようなローラー付きレールを設置している。

試験概要を図 3.2-8 に示す。手動油圧ポンプを用いて複動シリンダを操作する。加力点先端にロードセルと変位計を設置し、加力点位置での水平荷重と水平変位を計測する。使用したロードセルと変位計の容量を以下に示す。

ロードセルの容量:10kN

変位計の容量:25mm

計測データはデータロガーに集められ、PC に収録される。

静的加力試験では、最大水平変位 10mm まで載荷し、その後、荷重が 0 になるまで除荷している。変位 0.1mm 間隔でデータを計測する。しかし、10mm 以前で試験片が破断した場合には、その時点で終了する。

3. 2. 2. 3 サポート A の支持機能特性のまとめ

4 種類の開口を有するアクリル板(AK(20×12.5)、AK(20×15)、AK(25×12.5)、AK(25×15))と鋼棒(ST φ 6)について各 2 つの試験片の結果について、表 3.2-2~6 に最大荷重、最大変位、初期剛性等を示す。初期剛性は変位 1mm を目安として評価した値である。

図 3.2.9~13 に各試験片の荷重-変形関係と加力終了時の破断状況、変形状況を示している。

開口を有するアクリル板ではすべて 10mm 以前で破断しているが、鋼棒(ST φ 6)では最大変位 10mm でも破断には至っていない。

開口幅が 20mm のアクリル板の最大変形(破断変位)はほぼ 4mm 以上となっており、特に開口 20×12.5mm(AK(20×12.5))の場合では、6mm 以上である。開口幅が 25mm のアクリル板の場合にはほぼ 4mm 以下で破断している。アクリル板の荷重-変位関係は、初期の部分で剛性が大きくなっているケースも見られるが、ほぼ直線的な関係であることがわかる。全ケース共に変位 4mm で 0.2kN 程度となっており、開口の影響は、破断変位の大きさに特に影響しているものと考えられる。

鋼棒(ST φ 6)の荷重変位関係には、変位 0.5mm 付近と 3.5mm 付近に 2 回、勾配が変化している。曲げ変形等の大きさ、集中部分が変化していることが原因と考えられる。

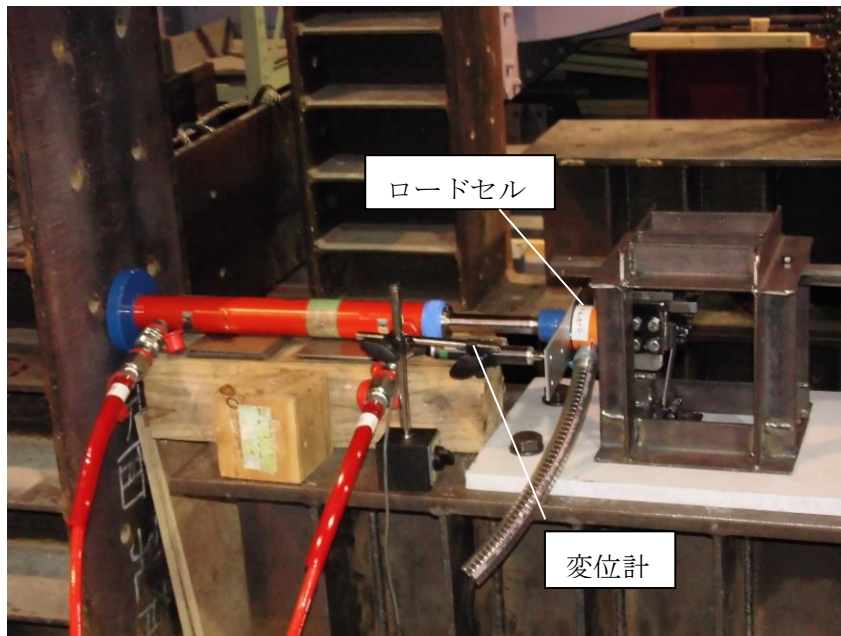


図 3.2-6(1) 静的加力試験の状況



図 3.2-6(2) 静的加力試験の状況(アクリル板の変形状況)

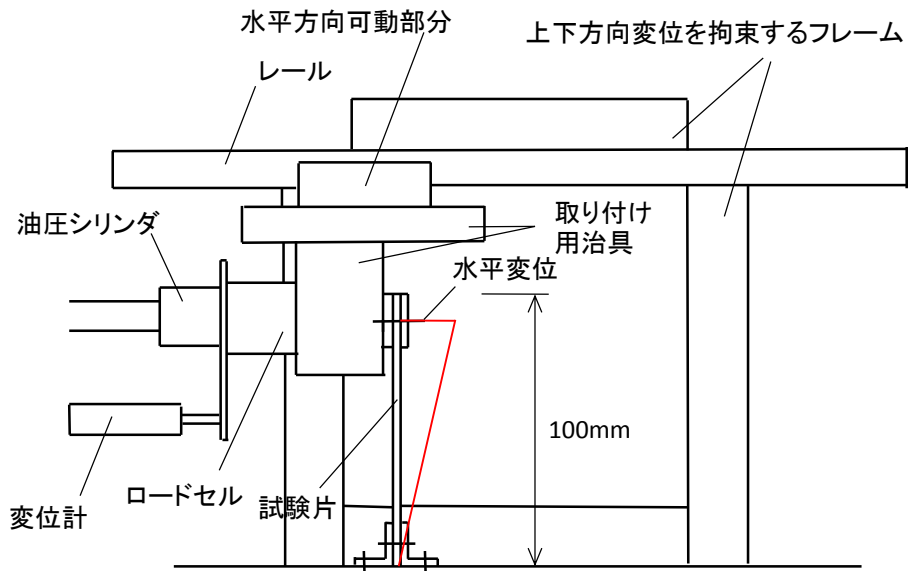


図 3.2-7 加力用治具

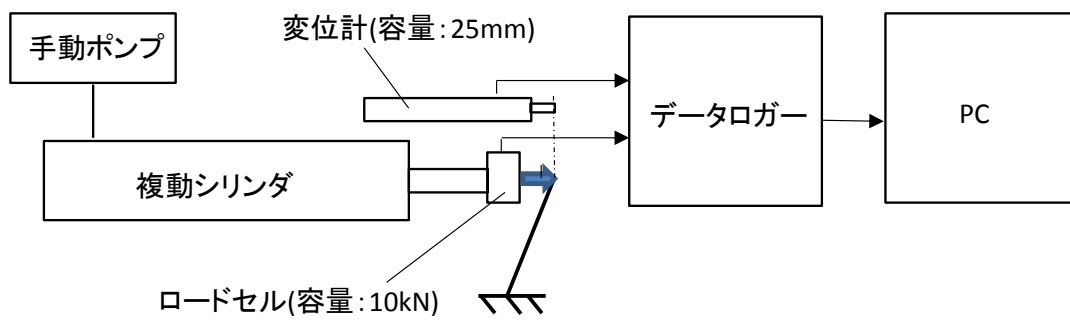
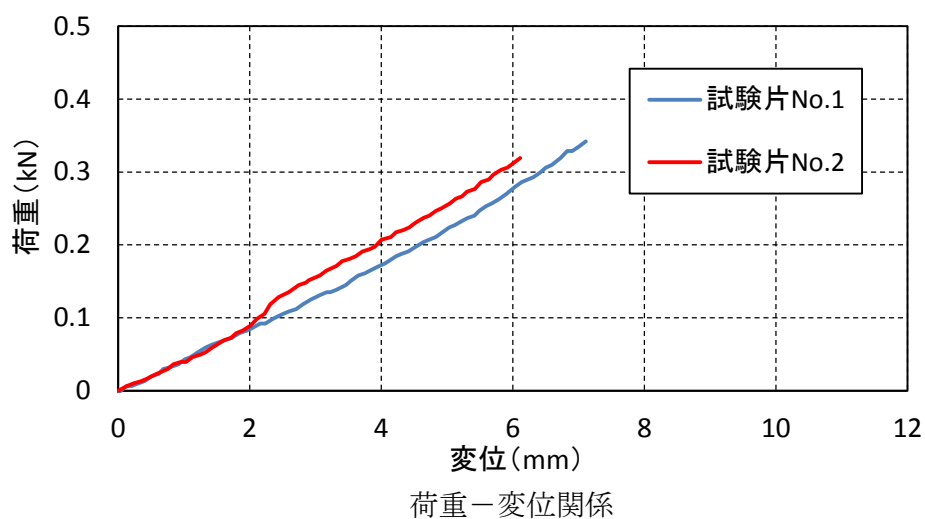


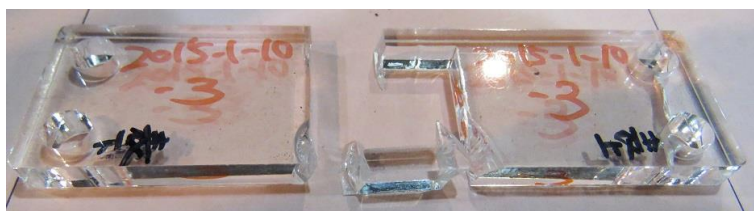
図 3.2-8 加力計測システム

表 3.2-2 AK(20×12.5)の試験結果一覧

試験片番号	初期剛性(kN/mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	破断・亀裂状況
No.1(2015-1-10-1)	0.043	0.342	7.11	左破断(上部) 右破断(上部 下部)
No.2(2015-1-10-3)	0.04	0.319	6.11	左破断(下部) 右破断(上部 下部)



試験片 No.1 の破断状況

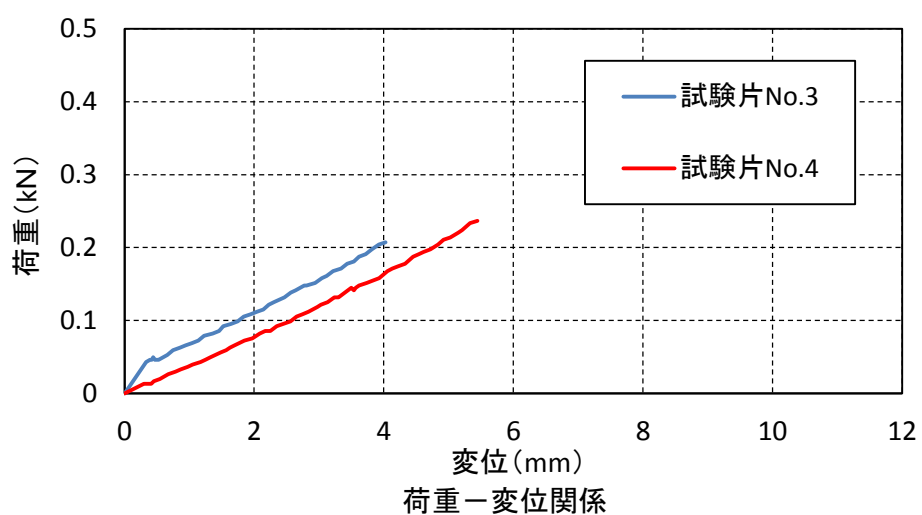


試験片 No.2 の破断状況

図 3.2-9 AK(20×12.5)の荷重-変形関係と破断状況

表 3.2-3 AK(20×15)の試験結果一覧

試験片番号	初期剛性(kN/mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	破断・亀裂状況
No.3(2015-1-7-3)	0.062	0.207	4.03	左破断(上部) 右破断(上部 下部)
No.4(2015-1-7-4)	0.035	0.237	5.45	左破断(上部) 右破断(上部 下部)



試験片 No.3 の破断状況

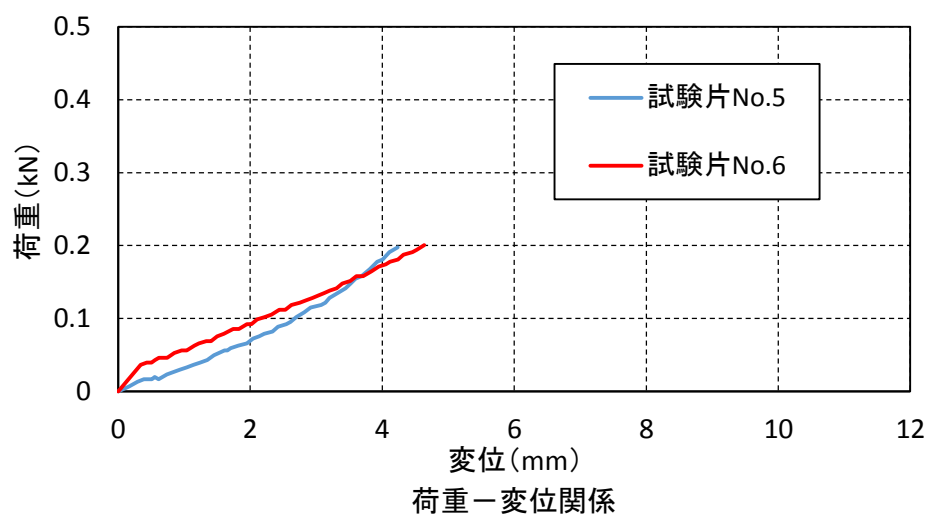


試験片 No.4 の破断状況

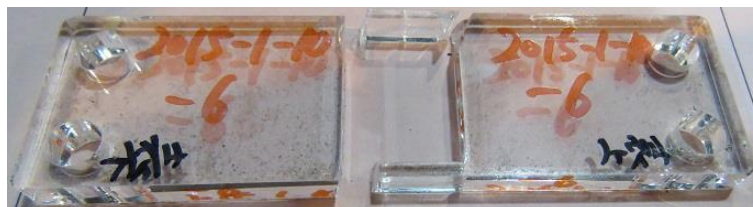
図 3.2-10 AK(20×15)の荷重-変形関係と破断状況

表 3.2-4 AK(25×12.5)の試験結果一覧

試験片番号	初期剛性(kN/mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	破断・亀裂状況
No.5(2015-1-10-5)	0.034	0.204	4.31	左破断(上部 下部) 右破断(上部 下部)
No.6(2015-1-10-6)	0.058	0.201	4.64	左破断(上部 下部) 右破断(下部)



試験片 No.5 の破断状況

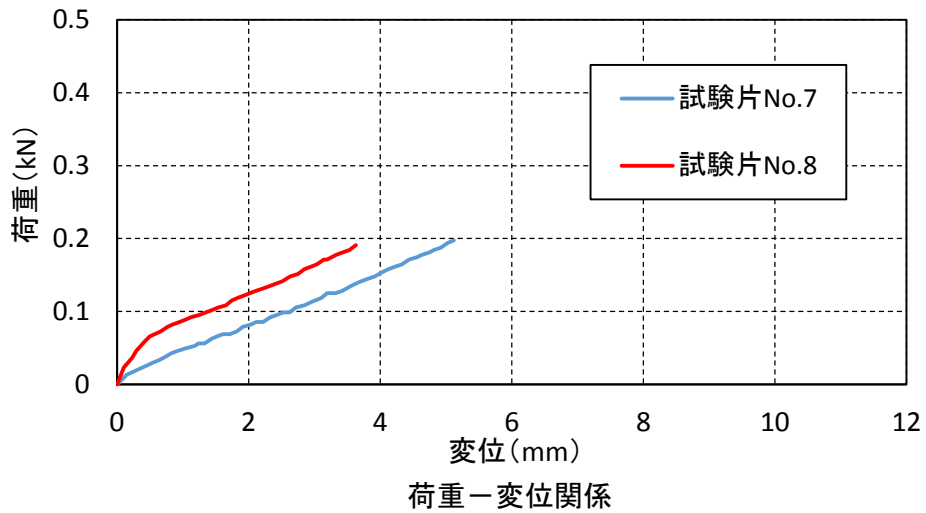


試験片 No.6 の破断状況

図 3.2-11 AK(25×12.5)の荷重-変形関係と破断状況

表 3.2-5 AK(25×15)の試験結果一覧

試験片番号	初期剛性(kN/mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	破断・亀裂状況
No.7(2015-1-10-7)	0.052	0.197	5.12	左破断(上部) 右破断(上部 下部)
No.8(2015-1-10-8)	0.092	0.19	3.63	左破断(上部) 右破断(上部 下部)



試験片 No.7 の破断状況

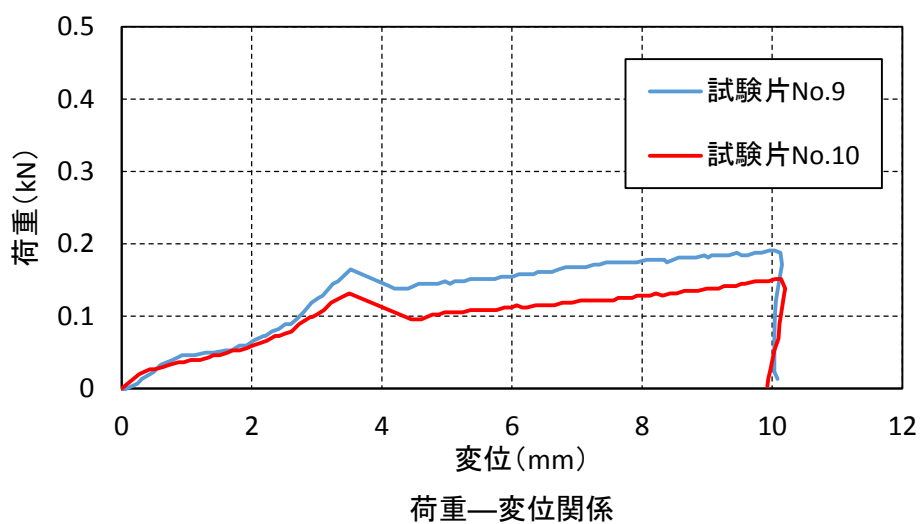


試験片 No.8 の破断状況

図 3.2-12 AK(25×15)の荷重-変形関係と破断状況

表 3.2-6 STφ6 の試験結果一覧

試験片番号	初期剛性(kN/mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	破断・亀裂状況
No.9(2015-1-21-3)	0.046	0.191	10	破断・亀裂なし
No.10(2015-1-21-4)	0.035	0.15	10.1	破断・亀裂なし



試験片 No.9 の最終変形状態



試験片 No.10 の最終変形状態

図 3.2-13 ST(φ6)のの荷重-変形関係と破断状況

3. 2. 3 固有振動数と固有モードの比較

3. 2. 3. 1 解析モデルによる固有振動数と固有モード

(1) 解析モデルの構築

固有値解析と地震応答解析を実施するための解析モデルを構築する。

図 3.2-14 に解析モデルを示す。配管は 3 次元梁要素でモデル化する。エルボ部分は曲率を考慮できないので、直角に接続するものとする。配管を支持する H 型鋼(H-150×150、H-100×100)と振れ止め用鉄骨も 3次元梁要素でモデル化する。土台のH-200×200は無視する。梁要素は、配管応力の評価を行う可能性も考慮して基本的に 100mm 間隔で節点を設けている。

設定した部材の断面性能は表 3.2-7 に、材料特性を表 3.2-8 に示す。サポート B のロッドレストレイントは外径 34mm、厚さ 3.2mm を仮定して、軸断面積を求めトラス要素としてモデル化する。振れ止め用鉄骨は、縦方向の立ち上がり部分は 4 本の L-50×50 の配置を考慮して断面 2 次モーメントと断面積を算出し梁要素でモデル化する。振れ止め用鉄骨の上方の水平材(2 本の L-50×50)も梁要素でモデル化する。

サポート A はバネ要素にモデル化し、設定した剛性を表 3.2-9 に示す。

アクリル板では、4 種類の開口付きアクリル板を対象として実施した静的加力試験の初期剛性の平均値が 52N/mm であったので、中央に開口を有するアクリル板の X 方向の剛性(kx)として、50N/mm を設定する。Y 方向の剛性 ky は、断面 2 次モーメントの相違を考慮して、kx を 25 倍する。鋼棒の X,Y 方向の剛性(kx、ky)は、静的加力試験の初期剛性の平均値が 40.5N/mm であったので、40N/mm を設定する。アクリル板、鋼棒共に Z 方向の剛性kzは、ky を 5 倍した数値を仮定している。

鋼材の単位質量は 7.85t/m³とする。付加マス1、2の質量は表 3.2-10 に示す。

解析モデルの全支点の A,B,C,D,E,F(図 3.2-14)は固定として扱う。

表 3.2-7 部材の断面性能

	A(cm ²)	Ix(cm ⁴)	Iy(cm ⁴)
配管(外径34mm、板厚3.4mm)	3.269	3.873	3.873
H-150×150	39.65	1620.0	563.0
H-100×100	21.59	378.0	134.0
振れ止め用鉄骨の縦方向材	22.58.	79.39	313.6
振れ止め用鉄骨の横方向材	22.58.	79.39	313.6
サポートB(ロッドレストレイント、1本)	3.096	—	—
注) サポートB(ロッドレストレイント)は外径34mm、板厚3.2mmを仮定			
振れ止め鉄骨の縦方向材は4本のL-50×50の配置を考慮して評価			
振れ止め鉄骨の横方向材は2本のL-50×50より算出			

表 3.2-8 鋼部材に設定した材料諸元

単位質量	7.85(t/m ³)
ポアソン比	0.3
ヤング係数	2.05 × 10 ⁵ (N/mm ²)

表 3.2-9 設定したサポート A の初期剛性

	kx(N/mm ²)	ky(N/mm ²)	kz(N/mm ²)
開口付きの亚克力板	50	625	3125
鋼棒(STφ6)	40	40	200

注) kx、ky、kzはX、Y、Z方向の剛性
kxは静的加力試験から得られた剛性の平均的な値

表 3.2-10 付加マスの質量

付加マス1	10.24kg (5.12 × 2)
付加マス2	21.12kg (10.56 × 2)

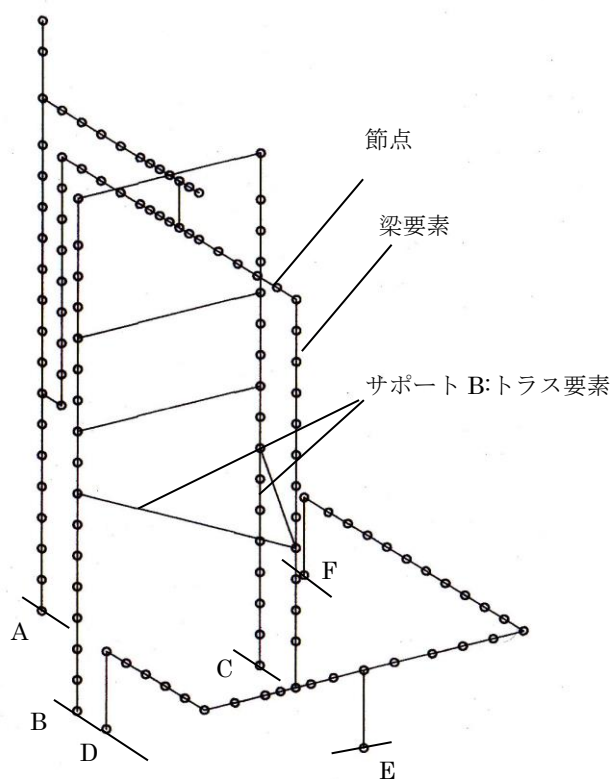


図 3.2-14 解析モデル

(2) 固有振動数と固有モード

固有値解析結果の固有振動数の一覧を表 3.2-11 に示し、対応する固有モードを図 3.2-15(1)~(3)に示す。

サポートAなし、開口付きアクリル板、鋼棒(STφ6)に対応する 1 次振動数は、それぞれ 10.18Hz、13.72Hz、13.10Hz である。サポート A を取り付けることにより振動数が高くなっている。2 次振動数は、それぞれ 17.00Hz、34.09Hz、18.86Hz である。開口付きアクリル板の 2 次振動数が他の 2 つより高いのは、表 3.2-9 に示したように k_y が大きいので配管の動き拘束する効果が大きくなったためと考えられる。

図中には各方向の刺激係数も示している。1 次モードは各ケース共に、主に X 方向に振動する形状である。2 次モードは主に上方の横方向配管が Y 方向に振動する形状(上方の横方向配管は面外方向に逆対称の変形)である。3 次モードは、開口付きアクリル板では X 方向の刺激係数が大きくなっているが、主に下方の横方向配管が Z 方向に振動する形状となっている。

また、参考として、土台からの配管の立ち上がり支点である D、F をピンとした場合の固有振動数と固有モードを表 3.2-11 と図 3.2-16 に示す。1 次振動数は 9.35Hz となっている。また、21.27Hz の 3 次モードは、下方横方向配管の X 方向への振動が大きくなっている。

表 3.2-11 固有振動数の一覧

サポートA	解析 1次	解析 2次	解析 3次
なし	10.18Hz	17.00Hz	31.07Hz
開口付きアクリル板	13.72Hz	34.09Hz	39.22Hz
鋼棒 (STφ6)	13.10Hz	18.86Hz	35.57Hz
なし(支点D,F:ピン)	9.35Hz	16.41Hz	21.27Hz

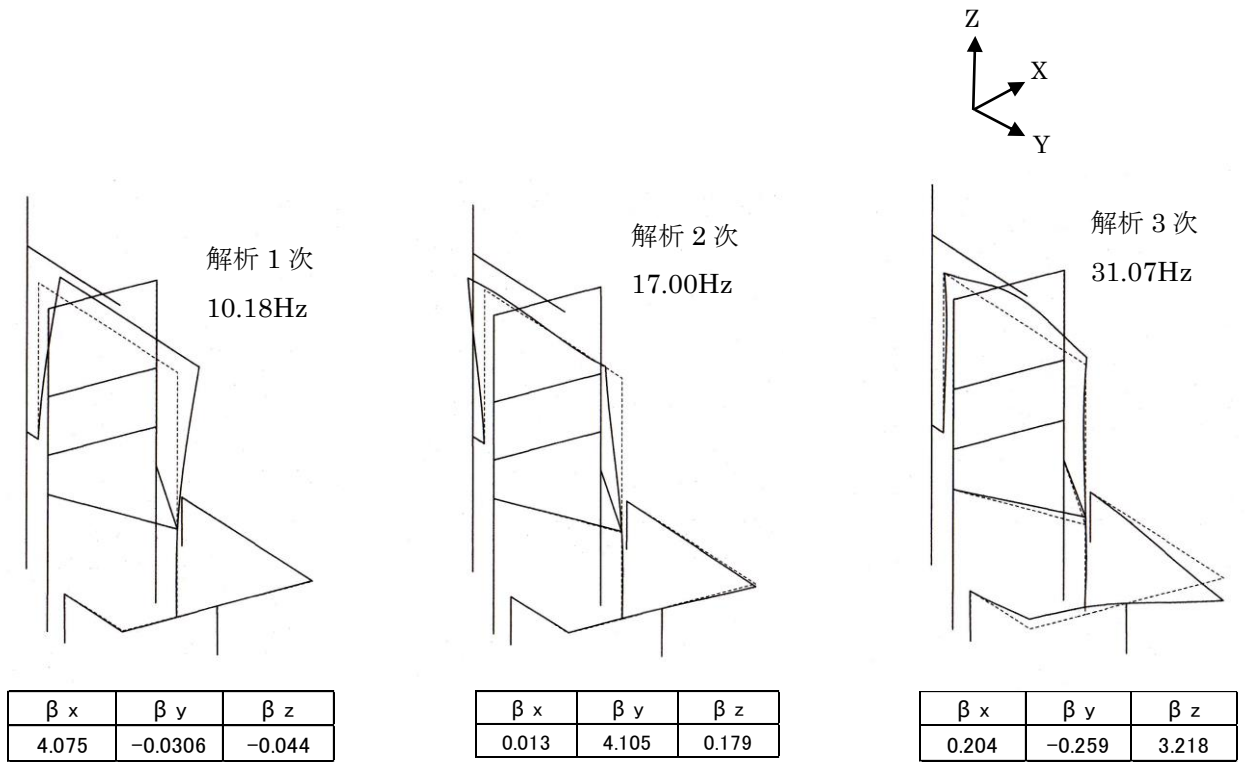


図 3.2-15(1) 固有モード(サポート A:なし)

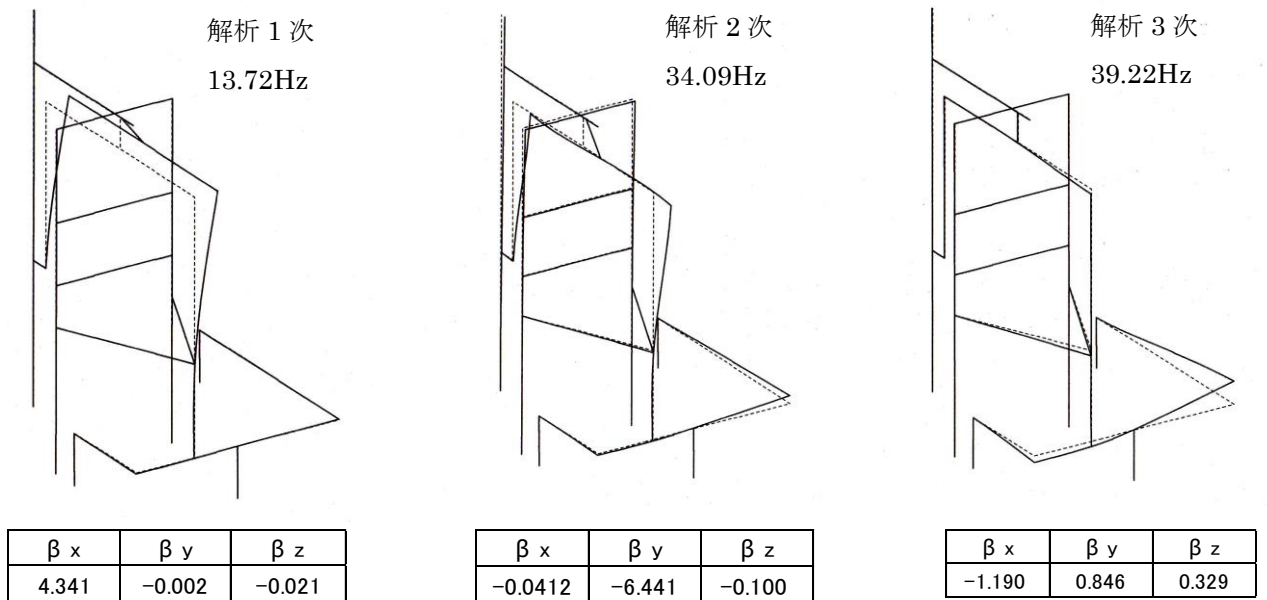


図 3.2-15(2) 固有モード(サポート A:開口付きアクリル板)

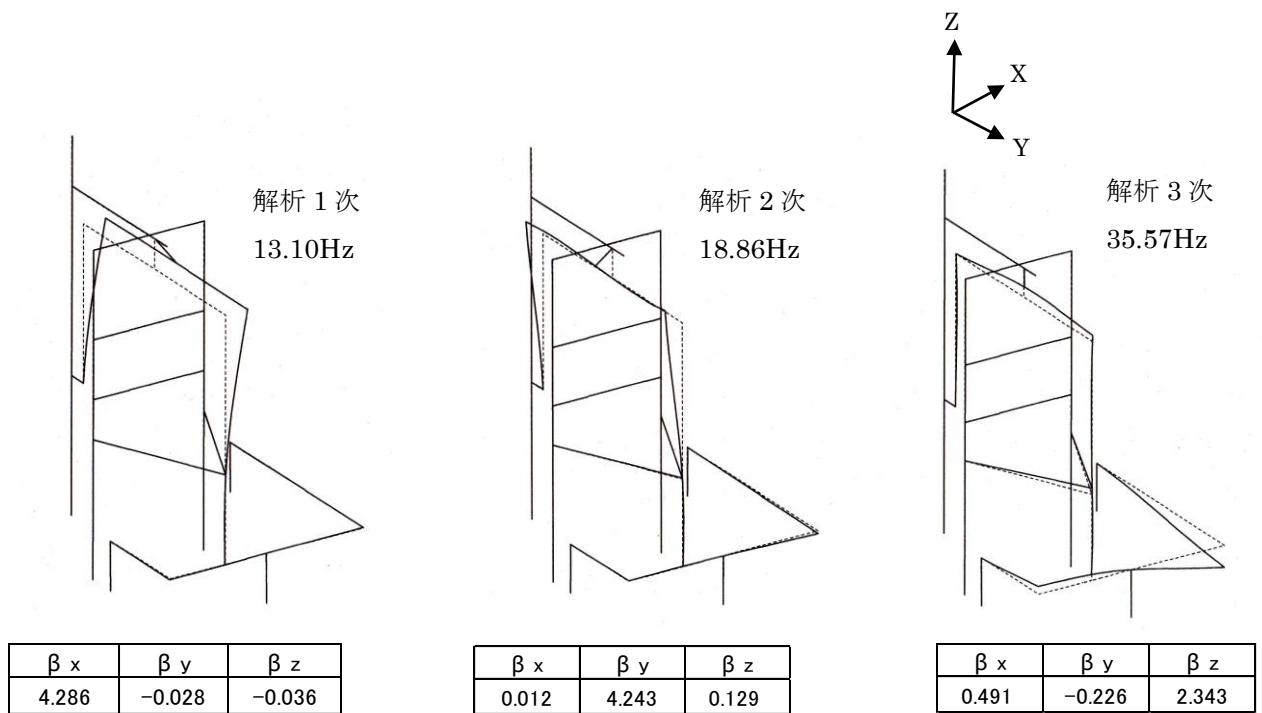


図 3.2-15(3)固有モード(サポート A: 鋼棒(ST φ6))

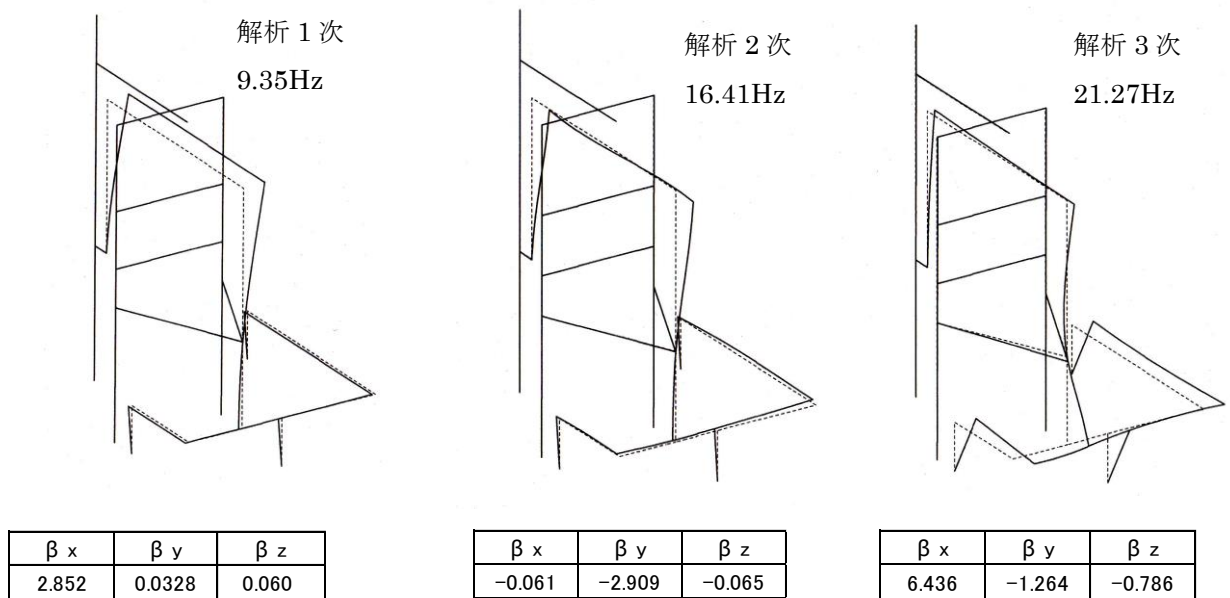


図 3.2-16(参考) 固有モード(サポート A: なし、支点 D、F: ピン)

3. 2. 3. 2 振動台水平加振試験による固有振動数と固有モード

試験体の固有振動数と固有モードを把握するために、比較的小振幅での振動台による水平加振試験を実施する。また、加振方向は X 方向のみである。

(1) 小振幅水平加振試験による固有振動数と固有モード

1) 小振幅水平加振試験の条件

小振幅水平加振試験の種類は表 3.2-12 に示す。サポート A としては、なし、開口 20×15mm のアクリル板(AK(20×15))、鋼棒(ST φ6)の条件で、それぞれ 1 次と 2 次モードを対象として実施している。開口 20×15mm のアクリル板は、静的加力試験による 4 種類の開口付きアクリル板の剛性は開口寸法によって大きな相違はなかったが、その中でも平均的な剛性であったので使用している。

サポート A なしの 1 次モードを対象とした小振幅水平加振試験は、加振振動数と加振の最大加速度を一定とした sin 波入力加振を複数回繰り返し、応答倍率曲線(共振曲線)を作成する。他のケースでは、最大加速度一定で、一定時間内で加振振動数を変化させる sin 波のスweep水平加振試験を実施する。

表 3.2-12 小振幅水平加振試験の加振条件

サポートAの種類		試験番号	振動数範囲	加振時間	最大加速度(m/s ²)
なし	1次	2014-12-27-11~33	一定	30秒間	0.5
	2次	2015-1-31-S25	14~21Hz	1分間	1.1
アクリル板 開口20×15mm AK(20×15)	1次	2015-2-19-S51	5~15Hz	3分間	0.5
	2次	2015-2-19-S41	15~22Hz	1分間	1.0
鋼棒 STφ6	1次	2015-2-19-S61	5~15Hz	3分間	0.5
	2次	2015-2-19-S71	15~22Hz	1分間	1.0

2) 応答倍率曲線(共振曲線)

サポート A なしの 1 次モードを対象とした水平加振試験では、応答倍率曲線(共振曲線)を得ることを目的として、最大加速度を 0.5m/s² とし加振振動数を一定とした試験を複数回実施している。各加振振動数で計測した時刻歴に対して、その振動数帯を対象としたバンドパスフィルターを通して時刻歴波形を作成し、上方の横方向配管と土台上の加速度の振幅の倍率を作成する。関係式は次式とし、計算に用いた加速度計の位置を図 3.2-17 に示す。

$$\text{応答倍率} = \frac{\text{加速度計A1とA3の平均(X方向)}}{\text{加速度計A15(X方向)}}$$

算出した応答倍率曲線(共振曲線)を図 3.2-18 に示す。ピークの振動数は 8.2Hz である。

また、共振曲線に $1/\sqrt{2}$ 法を適用して算出された減衰定数(h)は 0.0136 であった。

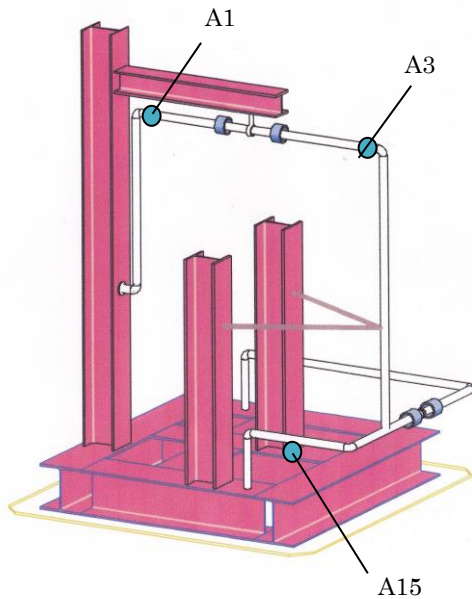


図 3.2-17 共振曲線作成に用いた加速度計の位置

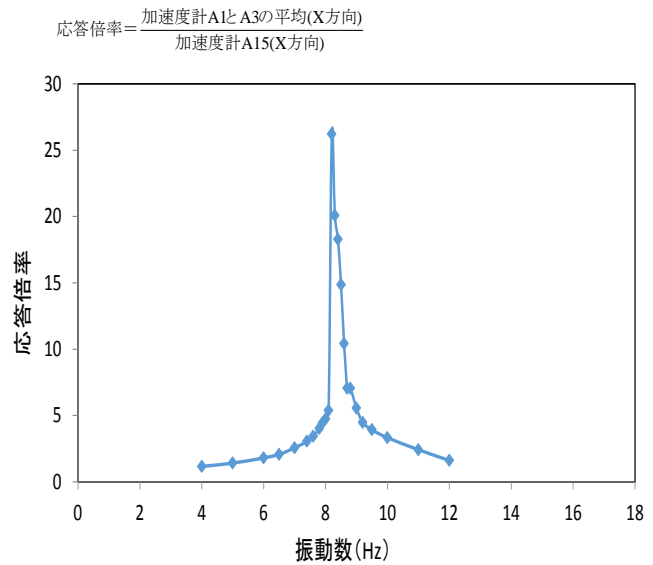


図 3.2-18 応答倍率曲線(共振曲線)

3) 水平振動試験から得られた固有振動数と固有モード

(a) 水平振動試験(X 方向)から得られた固有振動数と固有モード

サポートAなしの1次モード以外は最大加速度を一定としたsin波のスweep加振試験を実施している。固有振動数、固有モードは各加速度計の計測記録から算出するが、加速度計の設置位置は3.2.5.1の計測計画に示している。

固有振動数は、上方の横方向配管の応答加速度計時刻歴の振幅が大きい時間帯のフーリエ振幅スペクトルを求め、そのピークの振動数を固有振動数としている。算出した固有振動数を表3.2-13に示す。各固有振動数に対する固有モードは、各加速度計(X 方向)の時刻歴に対して、固有振動数に該当する振動数を中心として1Hz(±0.5Hz)のバンドパスフィルターを用い、通過後の各計測点の時刻歴波形の振幅のピークと位相差の関係を読み取って作成している。作成した固有モードを図3.2-19(1)~(3)に示す。ここで述べる固有振動数、固有モードはX方向水平加振試験により得られた振動数の低い順からの1、2次振動であり、Y方向、Z方向に卓越するモードは抽出できていないものと考えられる。また、水平加振試験では、23Hz以上は振動台制御の関係で、試験継続が不可能となったため、2次振動より高次は得ることができなかった。

サポートAなしの1次固有振動数は8.2Hzであるが、アクリル板(AK(20×15))では13.33Hz、鋼棒(STφ6)では12.1Hzとなっており、サポートAの有無により相違が解析と同様に見られる。一方、2次振動数は、3ケース共に18Hz付近である。これは、後述する固有モードに見られるように、2次モードが下方の横方向配管の振動が大きい振動形状であるので、サポートAの影響が小さくなっているためと考えられる。

3ケース共通に、1次モードは上方の横方向配管が大きく振動する形状、2次モードは下方の横方向配管が大きく振動し、全体として振れているような形状である。1次、2次モード共に、サポートBのロッドレストレイントでの拘束の影響を大きく受けた形状をしていると考えられる。

表 3.2-13 水平振動台試験(X方向)から求めた固有振動数

サポートA	試験 1次	試験 2次
なし	8.2Hz	17.8Hz
アクリル板(開口20×15mm) AK(20×15)	13.3Hz	18.0Hz
鋼棒 STφ6	12.1Hz	18.2Hz

注) モード図は X 方向の記録のみにより作成

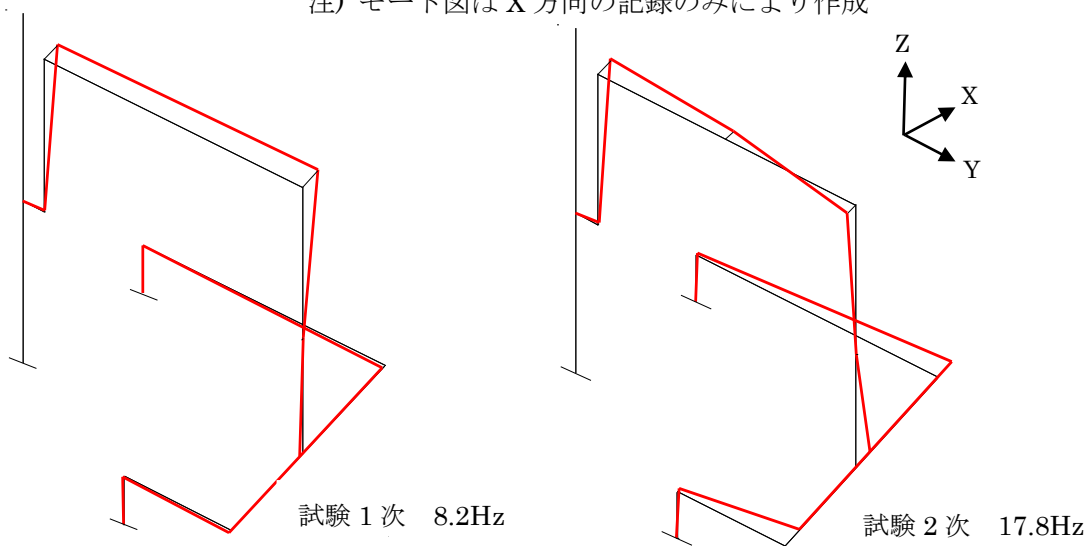


図 3.2-19(1) X 方向水平加振試験から得られた固有モード(サポート A : なし)

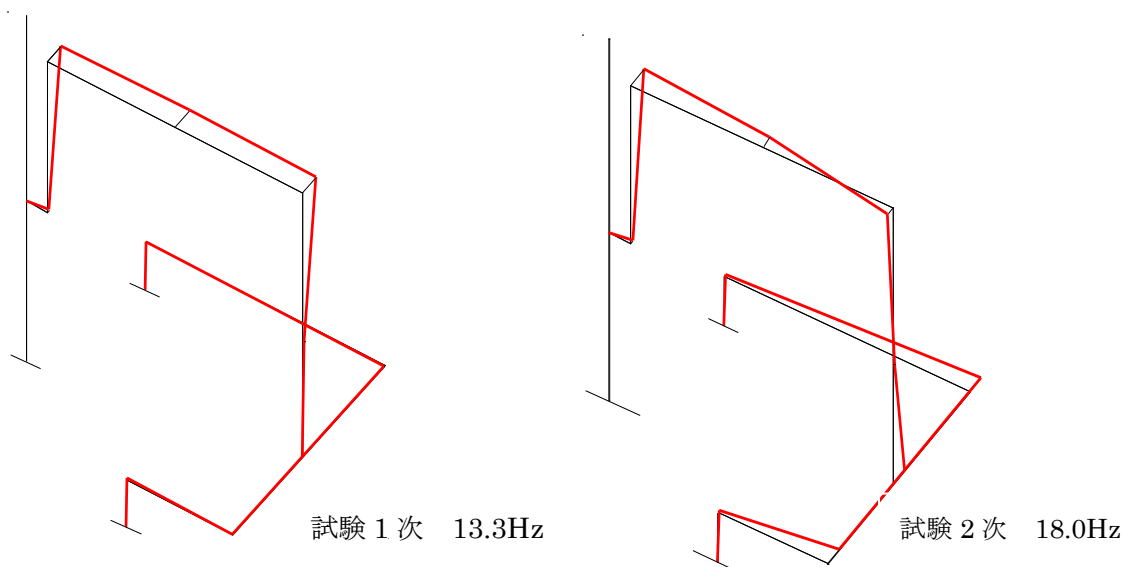


図 3.2-19(2) X 方向水平加振試験から得られた固有モード(サポート A : AK(20×15))

注) モード図は X 方向の記録のみにより作成

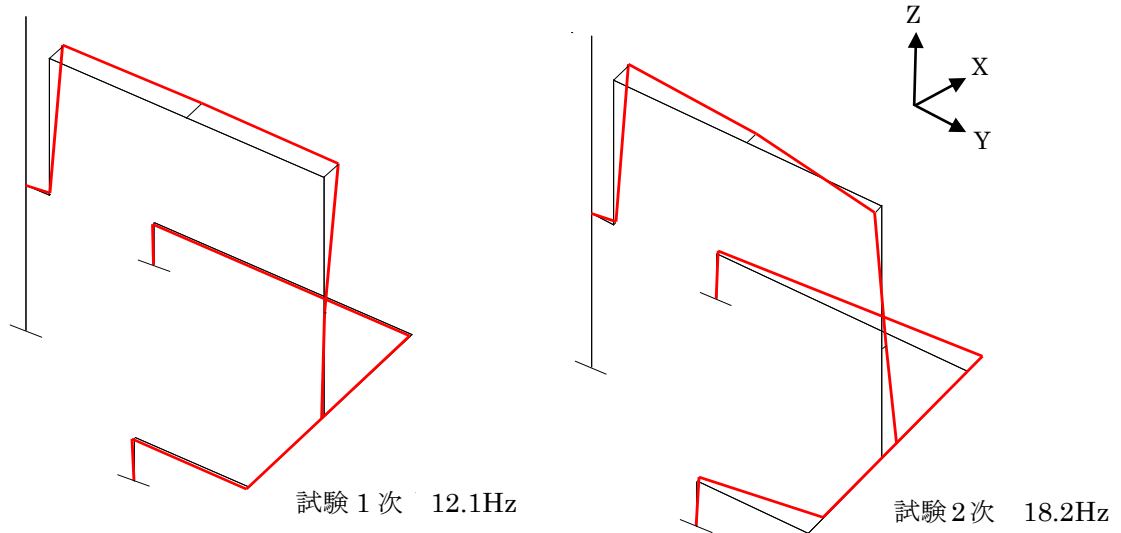


図 3.2-19(3) X 方向水平加振試験から得られた固有モード((サポート A: ST ϕ 6))

3. 2. 3. 3 固有振動数と固有モードの比較

水平加振試験(から得られた固有振動数、固有モードと解析モデルを用いた固有値解析結果とを比較する。サポート A なし、開口付きアクリル板、鋼棒(ST ϕ 6)の条件で加振方向(X 方向)の 1 次モードは両者同様の振動形を得ることができたが、1 次振動数は解析の方が1~2Hz 程度高くなっている。X 方向への水平加振試験から得られた 2 次振動数は 18Hz 付近で、下方の横方向配管が大きく振動する固有モードを得ることができた。解析モデルの結果では、下方の横方向配管が主に上下方向(Z 方向)に大きく振動するモードが 30Hz 以上に現れている。この原因としては、

- 1)解析モデルでは、配管を梁要素として扱っており、コーナー部分では直角に接続していること。
- 2)参考として実施した配管の土台からの立ち上がる支点をピンとした解析モデルでは、21Hz で下方の横方向配管が X 方向に大きく振動するモードを得られたことを参考とすると、支持条件をすべて固定として扱ったことも影響していると考えられる。

3. 2. 4 解析モデルを用いた試解析

3.2.3で構築した振動解析モデルを用いて地震応答解析を行う。サポートAの有無による地震応答解析を実施し、サポートAの損傷に関する検討を行う。

3. 2. 4. 1 入力地震動

入力地震動は 2 つの模擬地震動(mwave-01、mwave-02)と2つの新潟工科大での観測地震動(n05-ns1000 , n05-ew1000)を用いる。観測地震動の地震番号はn05 であり、地表面観測記録のNS成分とEW成分である。地震番号 n05 の震央位置等は図 3.2-20 に示す。地震番号 n05 は観測地震動の中で代表的なものであり、最大加速度が大きく、比較的短周期成分に優勢な成分を持つ地震動である。NS 成分、EW 成分の最大加速度はそれぞれ 5.58cm/s^2 、 7.56cm/s^2 であるが、本水平振動試験に用いるには小さいので、最大加速度を 1000cm/s^2 に規準化したものを n05-ns1000 , n05-ew1000 とする。

2 つの模擬地震動(mwave-01、mwave-02)と2つの観測地震動(n05-ns1000 , ns05-ew1000)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図 3.2-21～24 に示す。

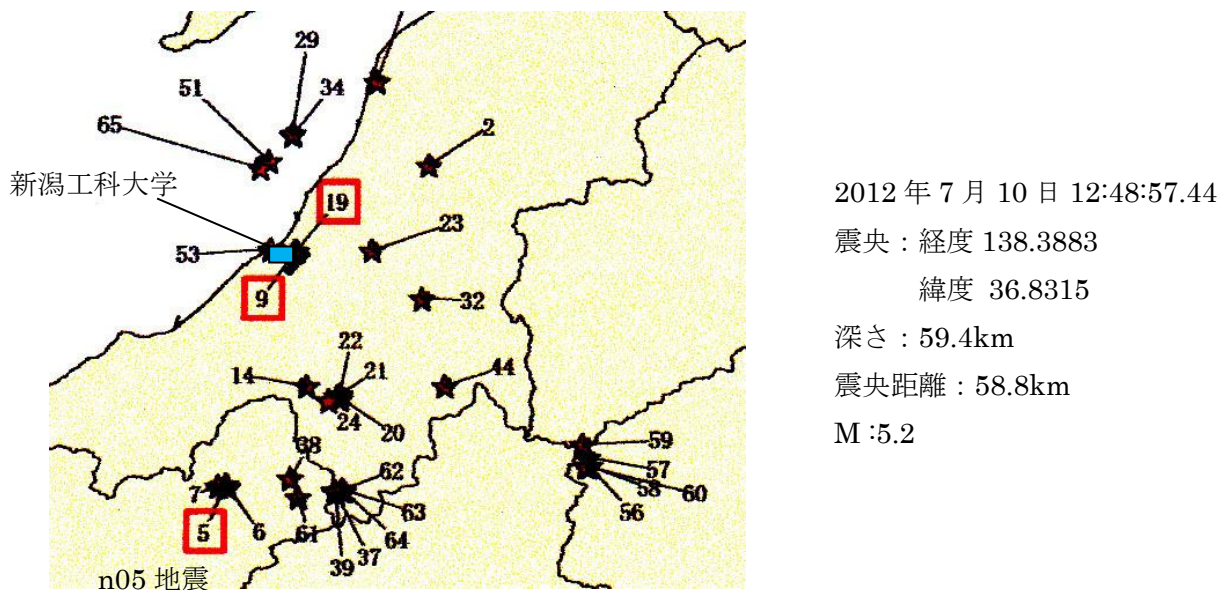


図 3.2-20 n05 地震の震央位置等

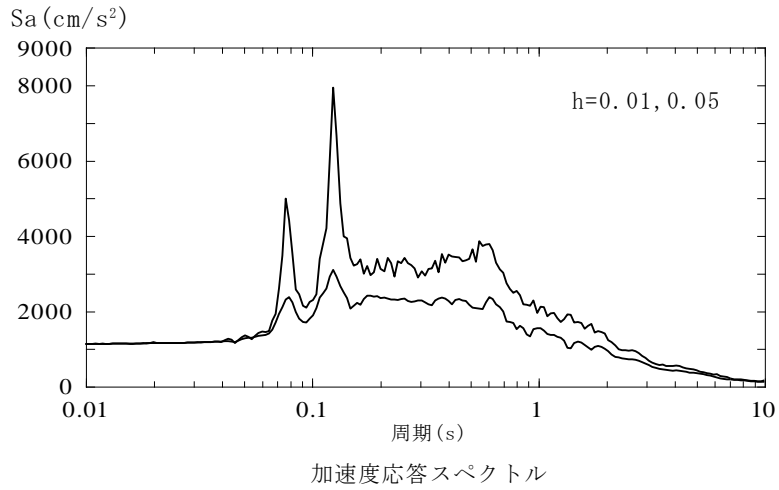
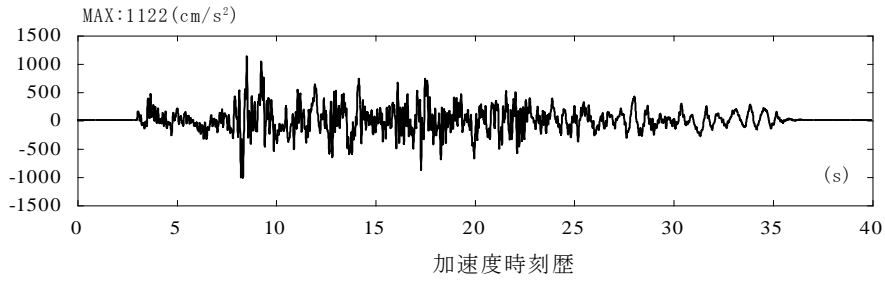


図 3.2-21 mwave-01 の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル

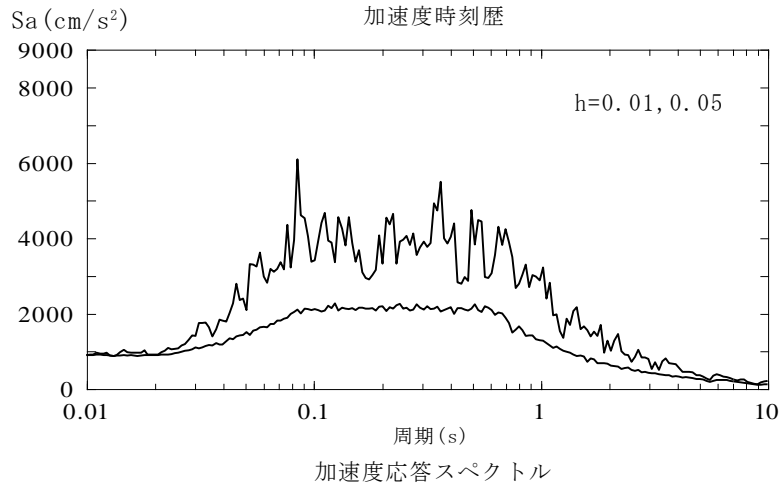
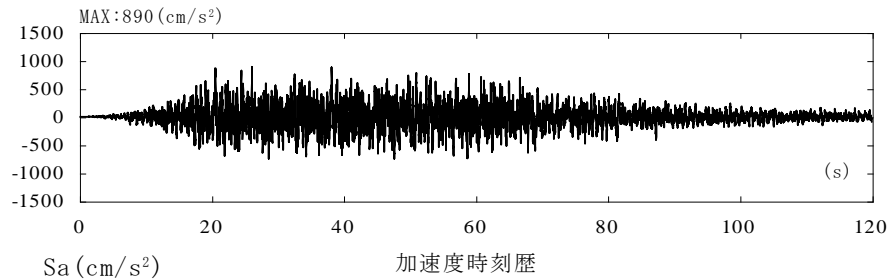


図 3.2-22 mwave-02 の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル

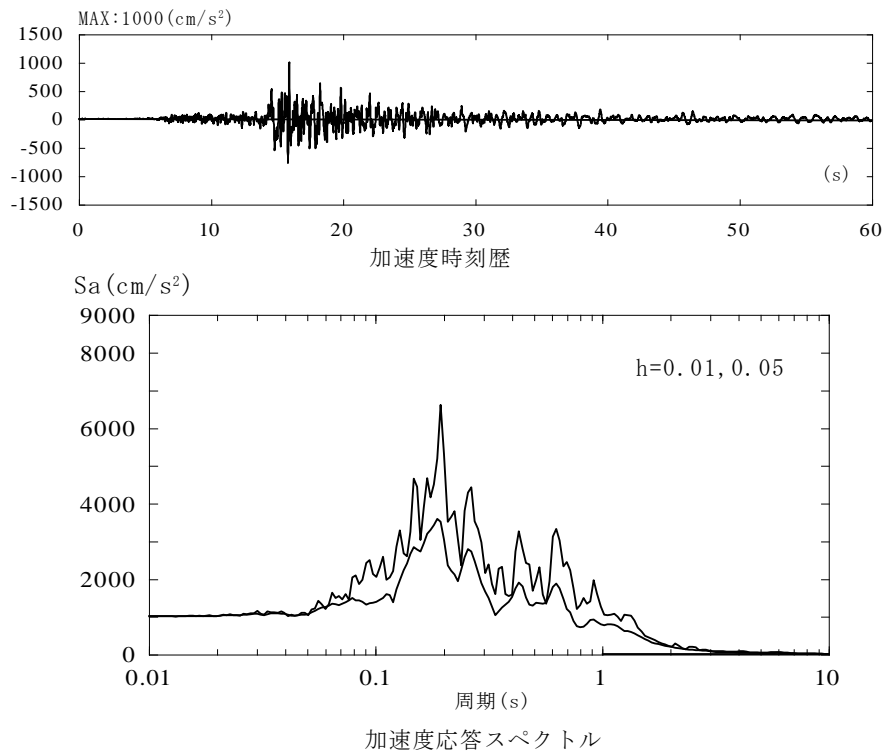


図 3.2-23 n05-ns1000 の加加速度時刻歴と加加速度応答スペクトル

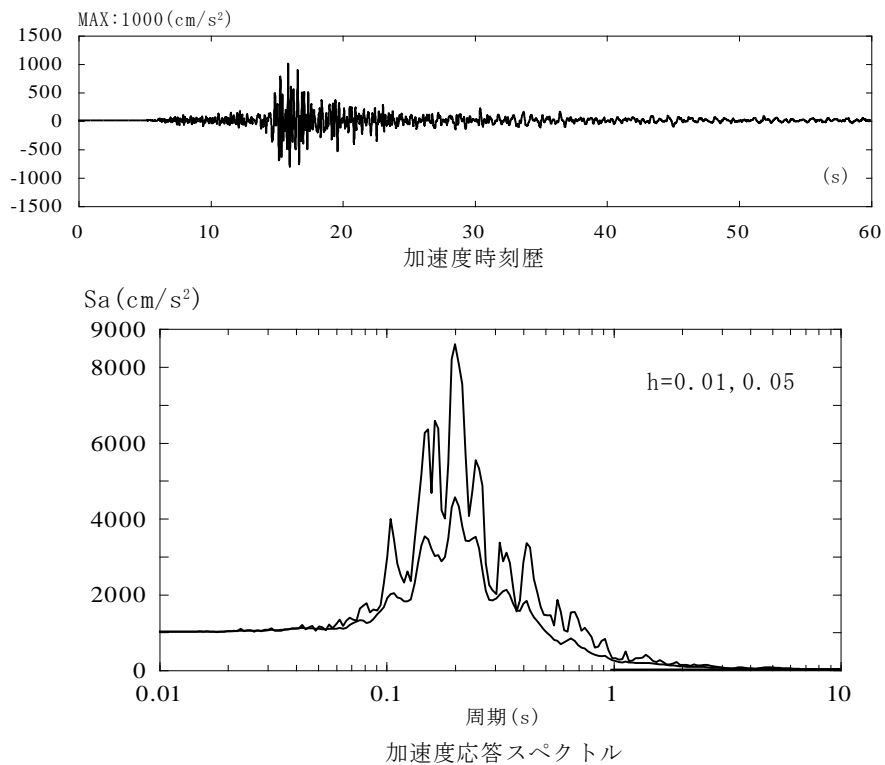


図 3.2-24 n05-ew1000 の加加速度時刻歴と加加速度応答スペクトル

3.2.4.2 地震応答解析

地震応答解析は、3.2.3 の固有値解析と同様に、サポートAとして、なし、開口付きアクリル板、鋼棒(ST φ 6)の3種類の解析モデルについて実施する。

(1) 地震応答解析手法

解析モデルについて、配管、サポート B 及び支柱・支梁・振れ止め鉄骨は弾性体として扱うが、鋼棒(ST φ 6)のサポートAに関しては支持機能特性(荷重-変形関係)の結果を参考として図 3.2-25 に示す骨格曲線を設定し、Bilinear 型の履歴ルールを適用することで非線形特性を考慮する。

粘性減衰は、配管には3.2.3 の共振曲線から得られた $h=0.0136$ を、支柱等の H 型鋼等には $h=0.015$ を 1 次振動数に対して適用し、初期剛性比例型として設定する。

(2) 地震応答解析結果

地震応答解析では、サポート A 部分に生じる相対変位に着目して検討する。

サポートAを取り付ける配管部分(図 3.2-26 の b 点)の最大応答加速度と、サポート A の変形に相当する図 3.2-26 の a,b 点の最大相対変位を表 3.2-14(1)、(2)に示す。b 点の加速度と a-b 間の相対変位の時刻歴を、4 つの入力地震動に対して図 3.2-27~30 に示す。

a-b 間の相対変位は、mwave-01 で多少異なるが、サポート A を有する解析モデルで小さくなっている。アクリル板のサポート A を付いた状態の a-b 間の相対変位は、mwave-01、mwave-02 で 4mm を超えている。静的加力試験から 4mm 程度で破断が見られたので、振動台試験でも破断の可能性があるが、n05-ns1000、n05-ew1000 では 4mm より小さく、破断の可能性は小さいことが予測される。鋼棒(ST φ 6)のサポート A を付いた状態の a-b 間の相対変位は、mwave-01、mwave-02 で 5mm を超えており、鋼材には塑性化としての損傷が生じることが予測される。

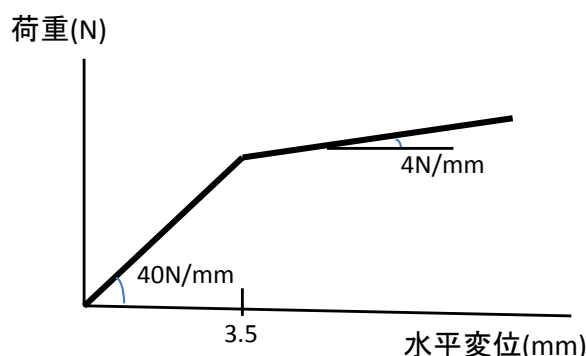


図 3.2-25 鋼棒のサポート A(ST φ6)に設定した支持機能特性

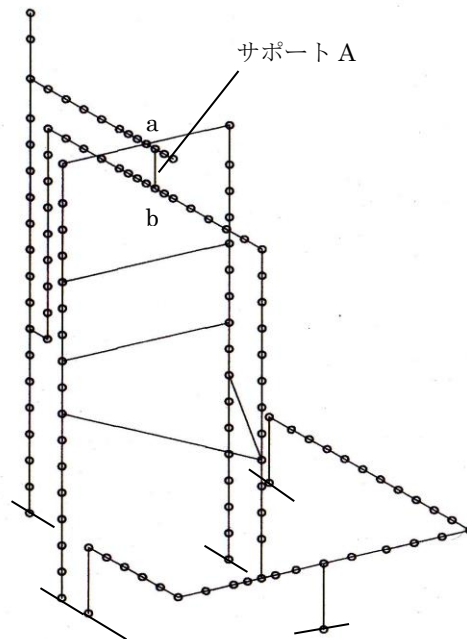


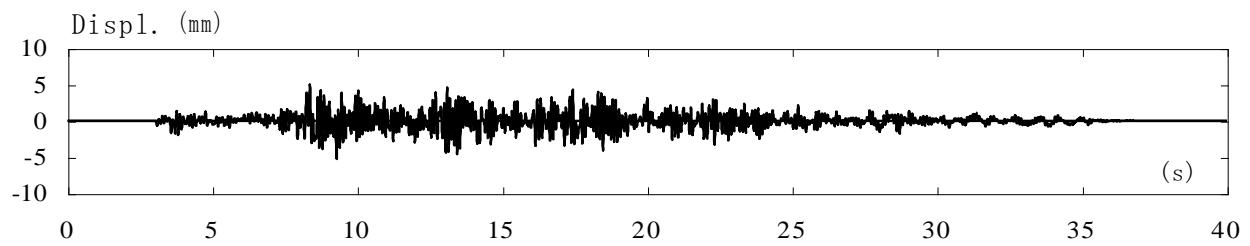
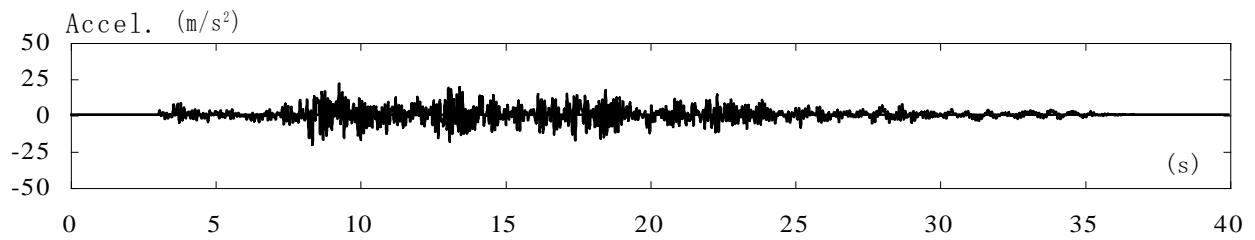
図 3.2-26 対象とした a-b 間の相対変位

表 3.2-14(1) b 点(配管のサポート A 位置)の最大応答加速度

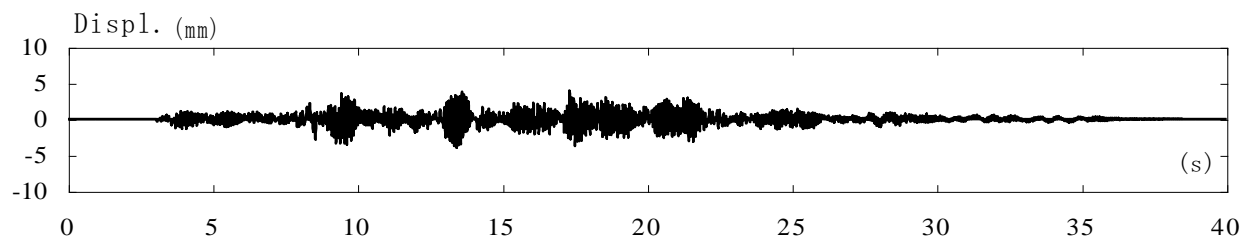
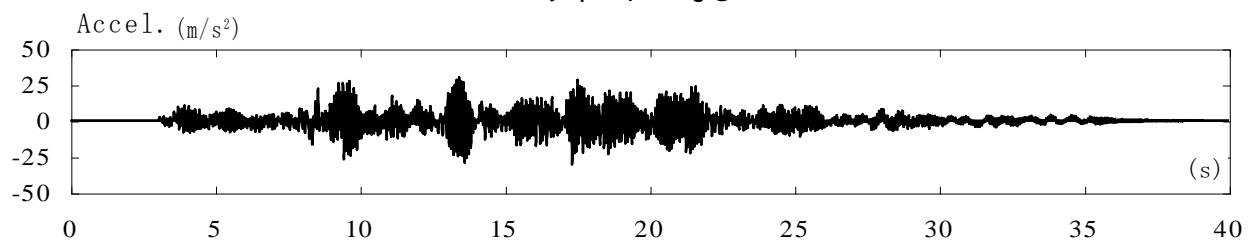
サポートA	単位: m/s ²			
	mwave-01	mwave-02	n05-ns1000	n05-ew1000
なし	21.64	33.09	21.04	23.66
開口付きアクリル板	30.45	44.99	18.14	13.82
鋼棒 (STφ 6)	34.54	33.21	15.64	16.68

表 3.2-14(2) a-b 間の最大相対変位

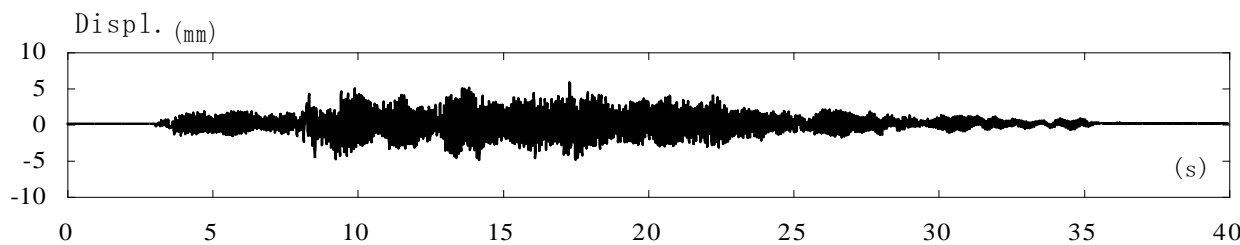
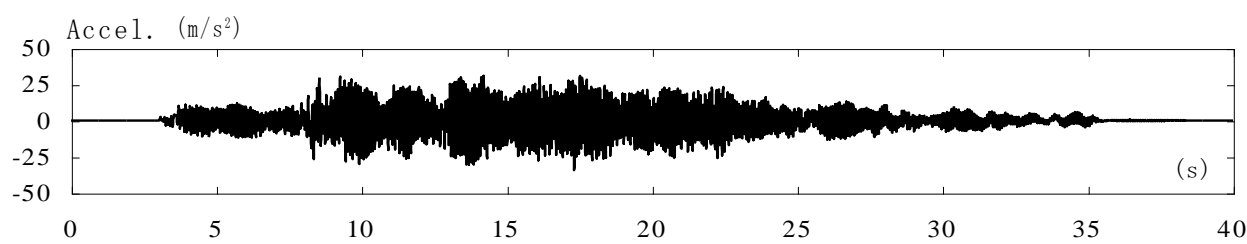
サポートA	単位: mm			
	mwave-01	mwave-02	n05-ns1000	n05-ew1000
なし	5.2	8.0	5.1	5.7
開口付きアクリル板	4.0	5.9	2.4	1.8
鋼棒 (STφ 6)	5.7	5.5	2.3	2.4



サポート A: なし

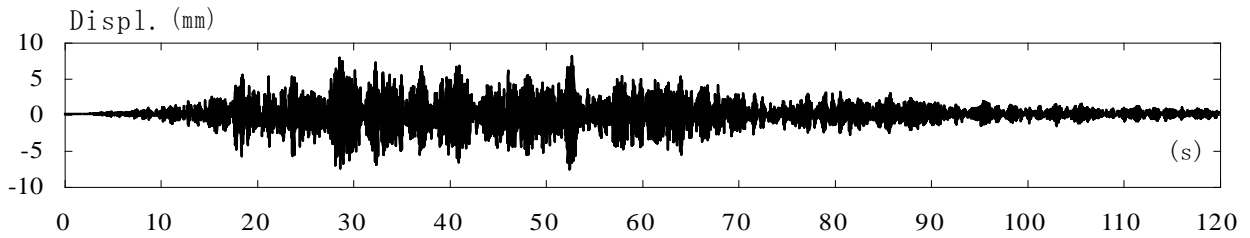
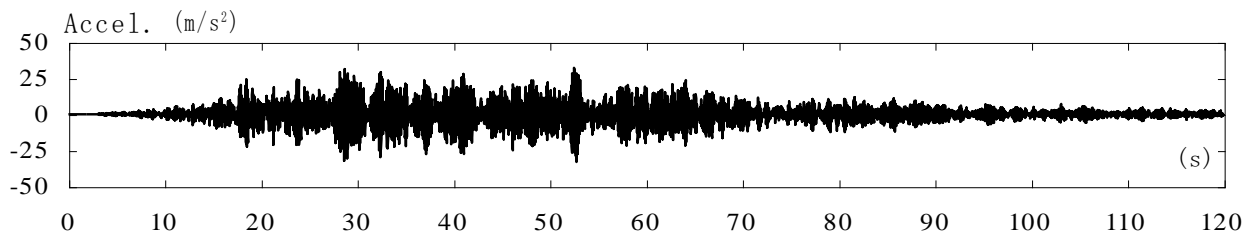


サポート A: 中央開口付きアクリル板

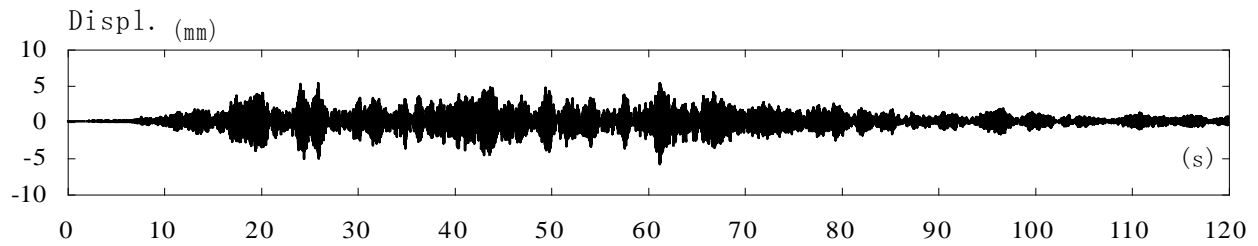
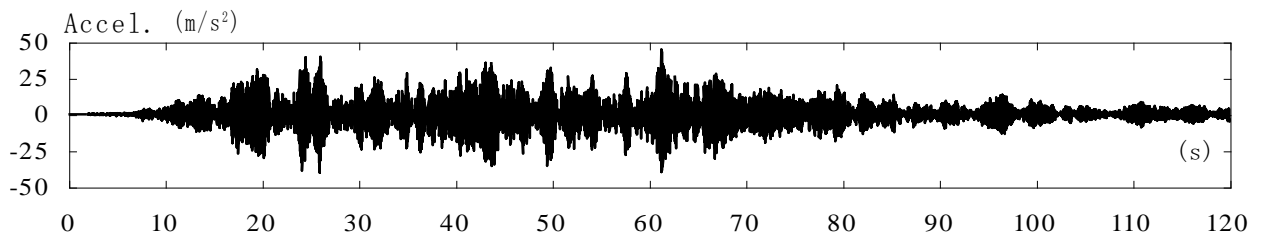


サポート A: 鋼棒(ST φ6)

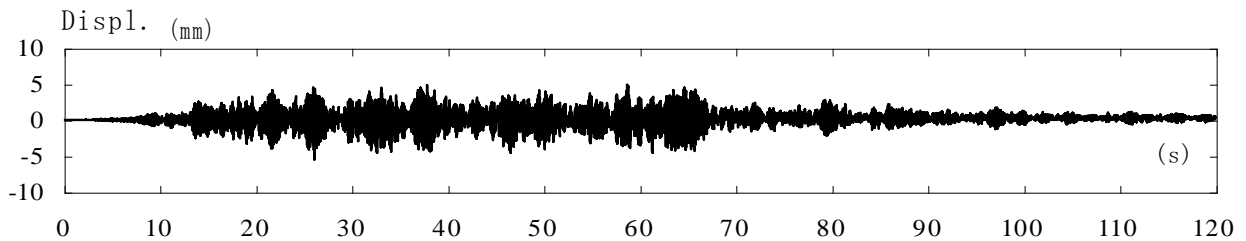
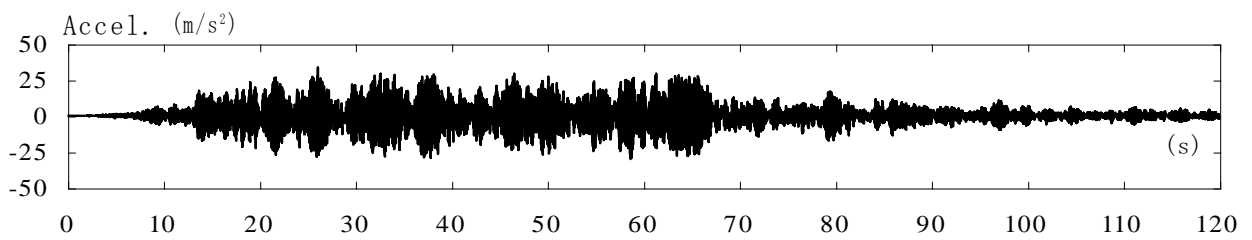
図 3.2-27 mwave-01 による時刻歴(上段:b 点の加速度,下段:a-b 間の相対変位)



サポート A:なし

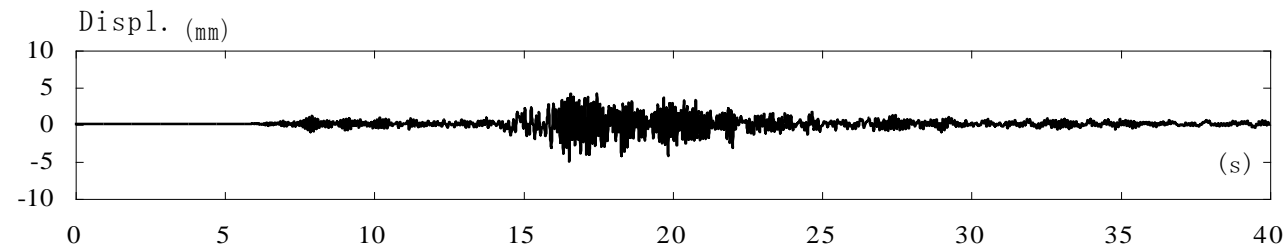
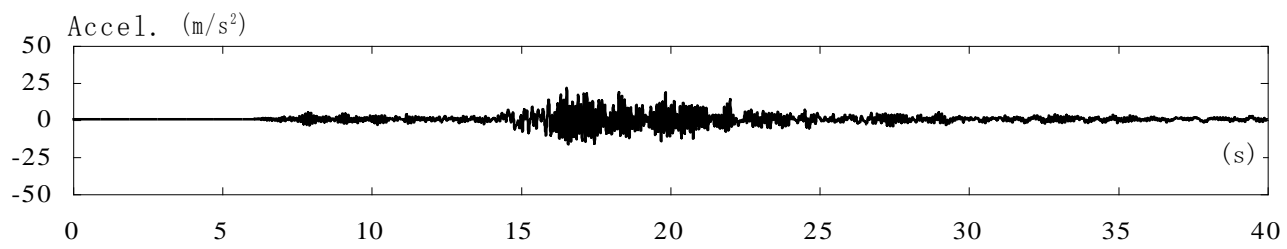


サポート A:中央開口付きアクリル板

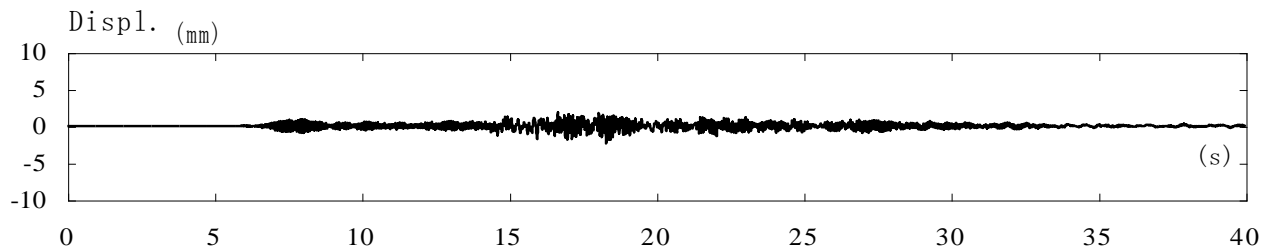
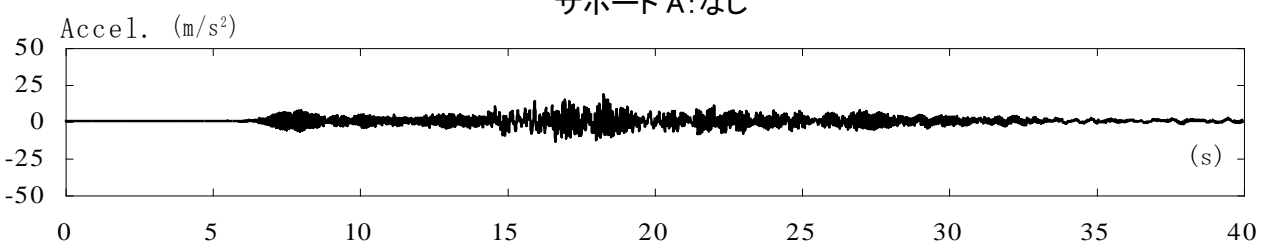


サポート A:鋼棒(ST $\phi 6$)

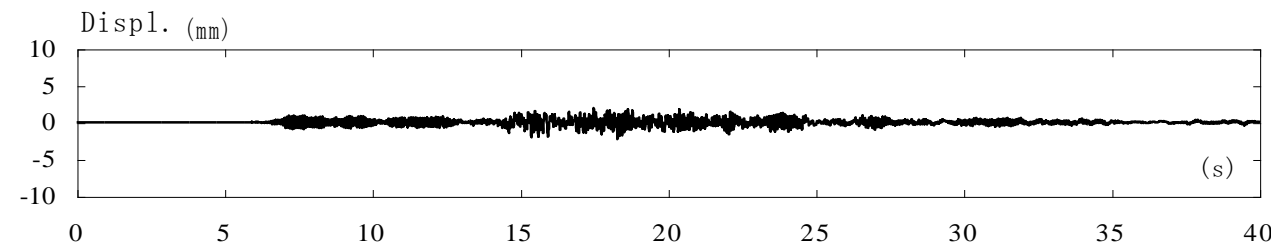
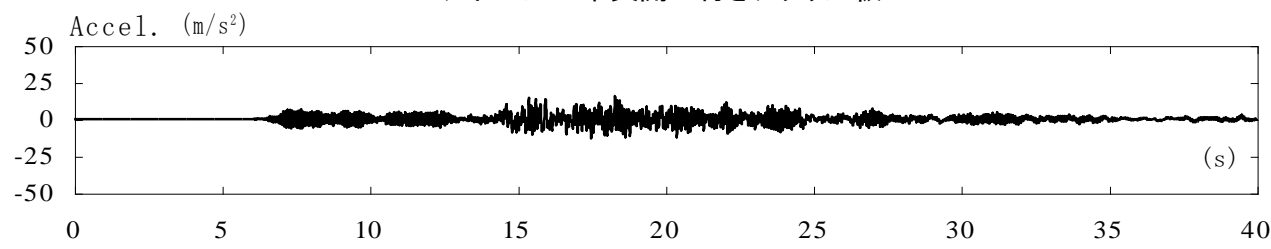
図 3.2-28 mwave-02 による時刻歴(上段:b 点の加速度,下段:a-b 間の相対変位)



サポート A: なし

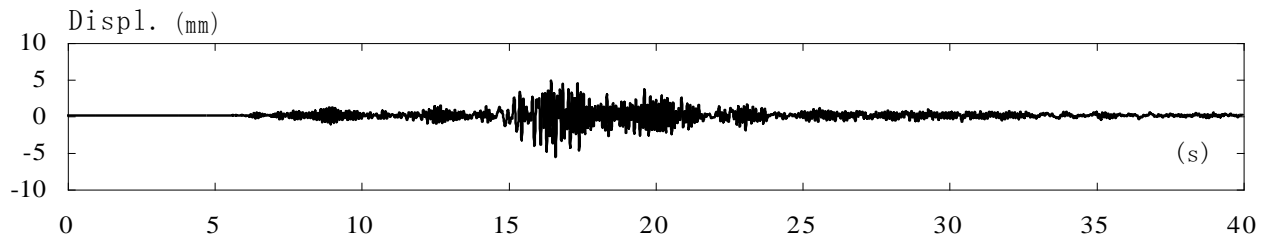
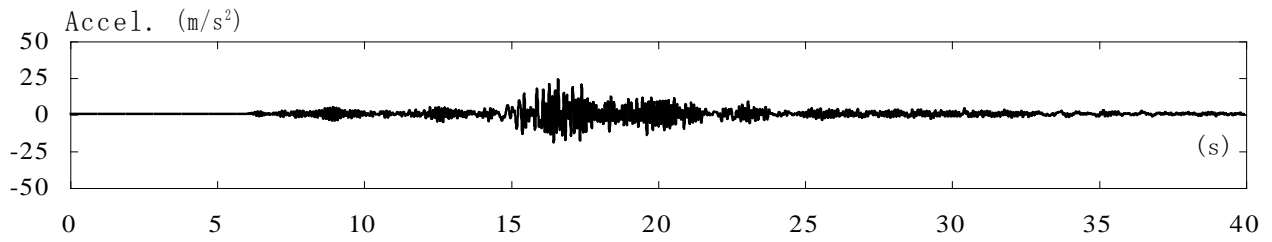


サポート A: 中央開口付きアクリル板

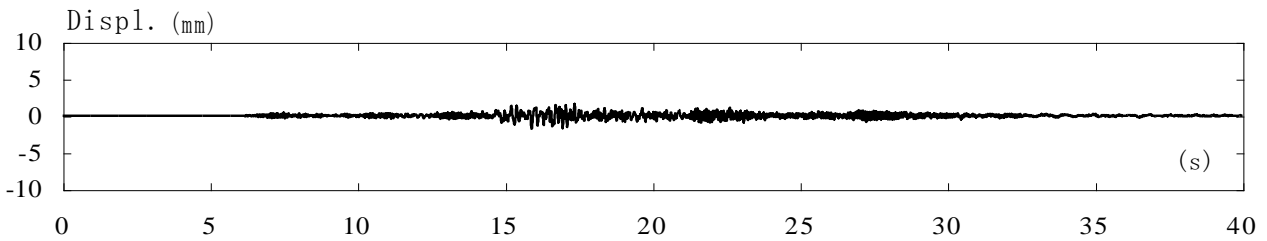
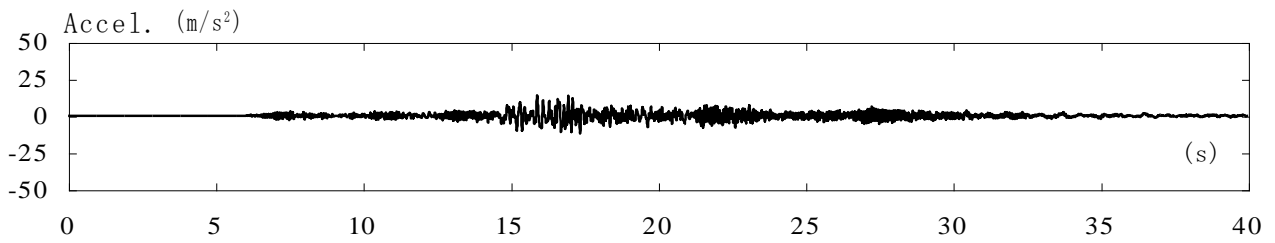


サポート A: 鋼棒(ST φ6)

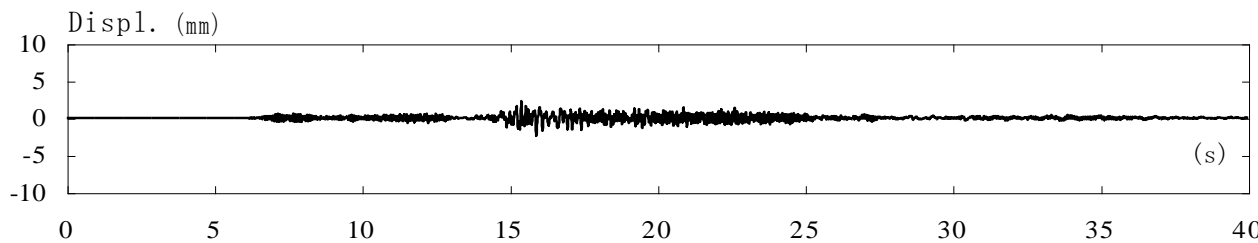
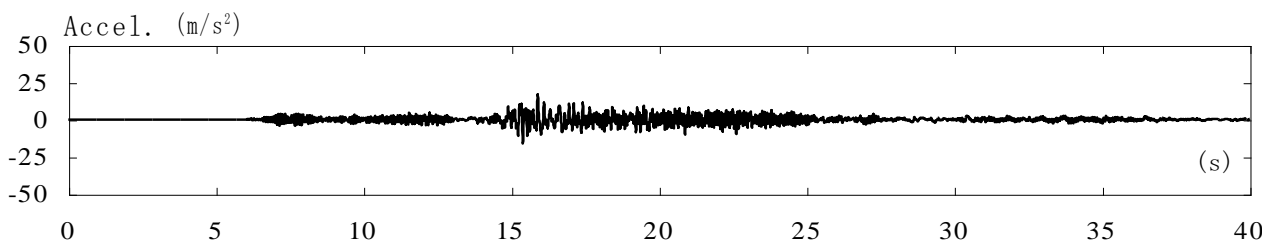
図 3.2-29 n05-ns1000 による時刻歴(上段:b 点の加速度,下段:a-b 間の相対変位)



サポート A: なし



サポート A: 中央開口付きアクリル板



サポート A: 鋼棒(ST φ6)

図 3.2-30. n05-ew1000 による時刻歴(上段: b 点の加速度, 下段: a-b 間の相対変位)

3.2.5 振動台水平加振試験

3.2.5.1 計測計画

計測は配管各部の加速度とひずみを中心に行う。図 3.2-31 に加振、計測システムのイメージを示す。

加速度計、歪ゲージ各 16ch を設置し、合計 32ch のデータを 200Hz の間隔で収録する。

加速度計の記号と設置位置を図 3.2-32(1)に示す。X 方向加振なので X 方向を中心に、応答が大きくなると予想される位置に設置している。図中には加速度の設置方向も示している。X 方向としては、A1,A2,A3 を上方横方向配管に、A6,A7 を支持点付近に、A8,A9,A10,A11 を下方横方向配管に設置している。Y 方向は A4,A5 を縦方向配管の頂部付近に設置している。また、A12,A13,A14 は支柱、支梁 H 鋼の X 方向振動を計測するために設置したが、A12,A14 は、測定点の数の関係でほとんど計測していない。A13 は支梁 H-100×100 の先端に取り付けた加速度計である。また、A15 は土台(H-200×200)の上面に、A16 は土台の下面に設置し、振動台の挙動を計測するために設置した X 方向の加速度計である。A17,A18 は配管の Z 方向の振動を計測するため設置した加速度計である。A17,A18 は、1 次、2 次振動を対象とした sin 波入力 of 水平加振試験では Z 方向への応答は小さいことから計測せず、Z 方向の応答に影響が考えられる観測地震動等の入力による水平加振試験では計測した。加速度計の設置状況の例を図 3.2-33(1)、(2)に示す。配管に対して結束金具と主に L 字型のアルミアングルを用いて 1 軸加速度計を設置している。容量 10G、20G、50G の加速度計を応答加速度の大きさに応じて振り分けて設置する。

ひずみゲージ設置位置を図 3.2-32(2)に示す。図中には計測しようとしている方向も示している。H3,H5,H6,H8,H10,H13,H15,H16 は配管の X 方向の挙動を計測しようとして、曲げモーメントが大きくなると考えられる位置に貼っている。位置は加速度計を設置する関係でエルボ等の溶接部から 60mm 程度離している。H1,H7,H9,H11 は、サポート A が破断する際の上下方向(Z 方向)のひずみを計測用として貼ったものである。Y 方向では、H4,H14 を縦方向配管の支持点付近に貼っている。H2 は縦方向配管の X 方向振動による支持点付近の捩れの影響を測定しようとしたものである。

また、配管へのひずみゲージの貼り方は、計測のチャンネル数の関係で計測方向の片側の一面のみとしている。

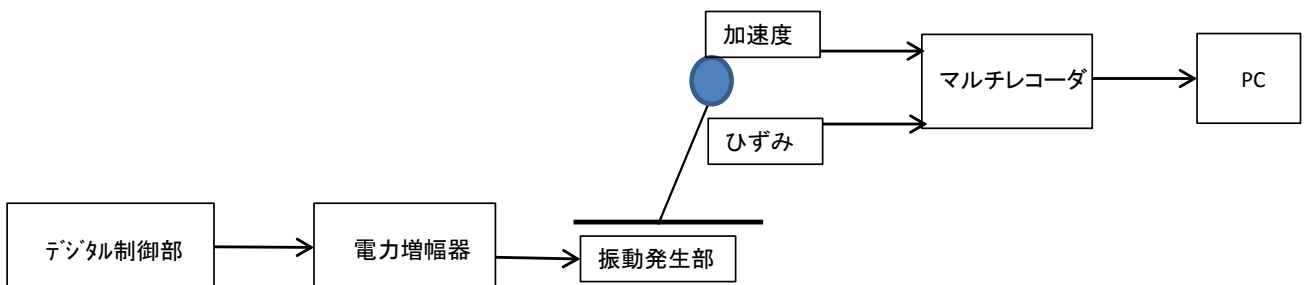
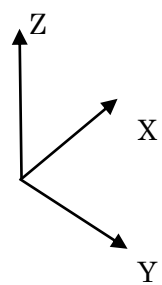
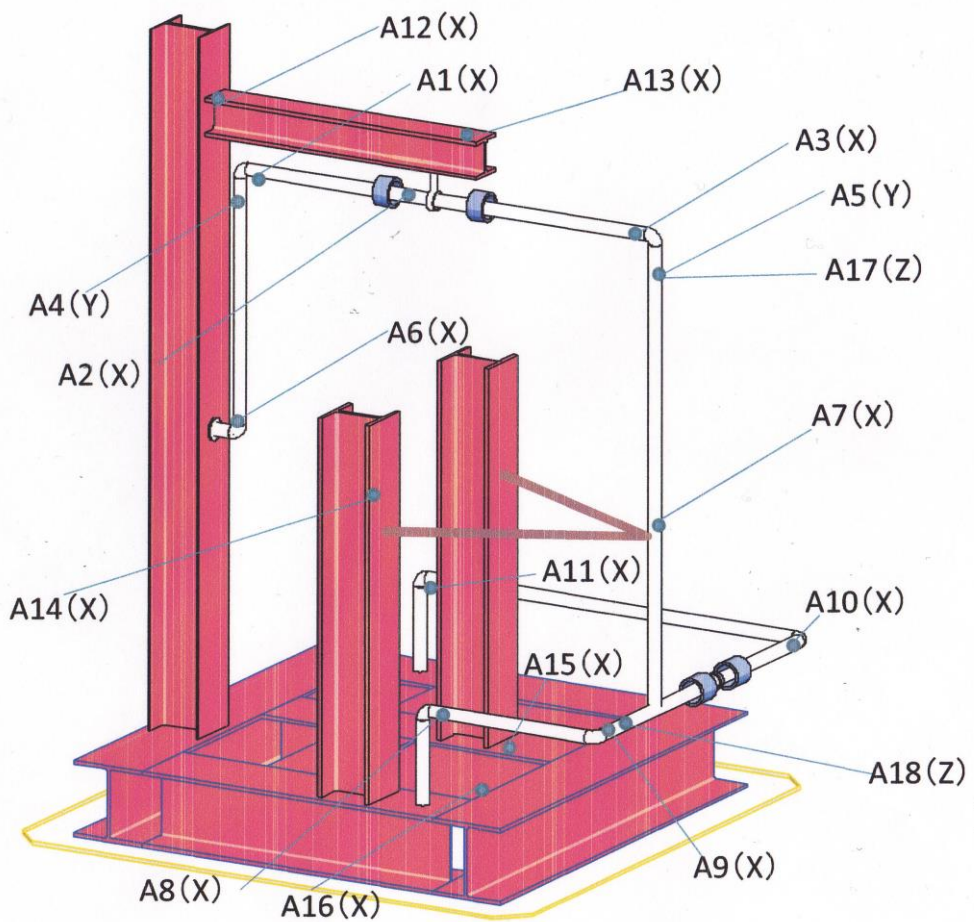
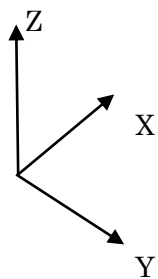
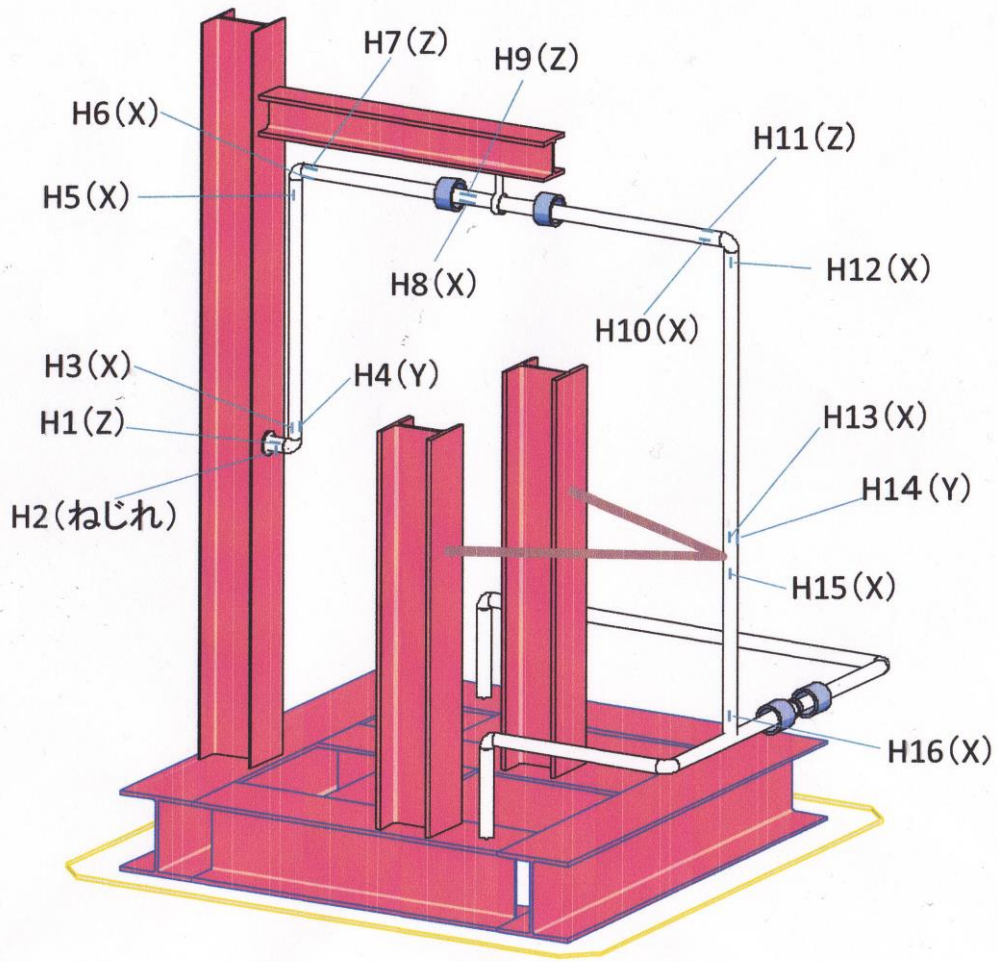


図 3.2-31 振動台水平加振試験の加振、計測システムのイメージ図



注：()内は加速度計及びひずみゲージで測定しようとしている方向を示す。

図 3.2-32(1) 加速度計の記号とその設置位置と計測方向



注：()内は加速度計及びひずみゲージで測定しようとしている方向を示す。

図 3.2-32(2) ひずみゲージの記号とその設置位置と計測方向



図 3.2-33(1) 加速度計とひずみゲージの設置状況(サポート A 近傍)

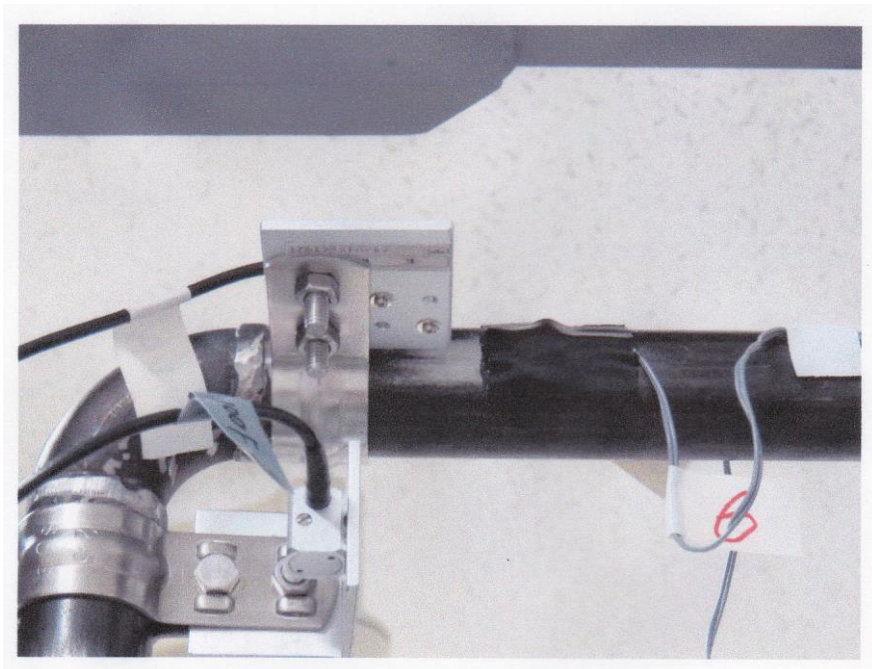


図 3.2-33(2) 加速度計とひずみゲージの設置状況

3.2.5.2 sin 波入力による水平加振試験

3.2.5.2.1 水平加振試験及び結果の概要

(1) 水平加振試験概要

サポート A の損傷発生を対象とした sin 波のスweep 水平加振試験を実施する。

sin 波のスweep 水平加振試験は、最大加速度を一定として、設定した振動数間隔を設定した時間内に加振する試験である。

基本的に、3.2.3.2 の水平加振試験で得られた 1,2 次の固有振動数を対象とした振動数間隔を設定し、それぞれの共振を利用してサポート A を破断させ、破断による配管系の振動性状の変化を検討する。

本試験では、振動台の振動数を昇順と降順の 2 種類に変化させ、破断後の配管挙動に振動数の変化が及ぼす影響を考慮する。1 次振動を対象とする場合は 15Hz 以下の振動数間隔、2 次振動を対象とする場合は 15Hz 以上の振動数間隔を対象として試験を行う。

水平加振のための sin 波は、振動数範囲、加振時間、最大加速度を入力することにより振動台デジタル制御部で自動的に作成され、加振される。

(2) 水平加振結果の一覧

サポート A として 4 種類のアクリル板と鋼棒を対象とする。

サポート A が破断するまで、最大加速度を 0.5m/s^2 又は 1.0m/s^2 間隔で増大させる。サポート A の破断・亀裂に関する試験結果の一覧を表 3.2-15(1)、(2)に示す。図中において赤線で囲った条件が、サポート A に破断・亀裂が生じた加振条件である。2 次振動数を対象とした 15Hz 以上の加振では、アクリル板の開口幅が 20mm のもの及び鋼棒で、サポート A が破断・亀裂する以前に加速度計の容量を超える可能性が生じたためサポート A が破断・亀裂に至る試験を行うことは出来なかった。

1 次振動数を対象とした 15Hz 以下の場合、開口幅が 25mm のアクリル板は、最大加速度が 1.5m/s^2 、開口幅が 20mm のアクリル板は 2.0m/s^2 で亀裂・破断が発生しており、3.2.3 で見らえた破断強度(破断変位)の相違の影響が見られる。鋼棒は最大加速度が 4.0m/s^2 で破断・亀裂が発生している。

(3) 本報告に掲載するアクリル板のサポート A

アクリル板のサポート A では 4 種類について実施したが、本報告では、破断に至った条件の最も多い開口 $25 \times 15\text{mm}$ (AK(25×15))の結果のみを示し、全アクリル板及び鋼棒のサポート A の試験結果は添付資料(DVD に収録)に掲載する。

表 3.2-15(1) sin 波のスweep加振でのサポート A の破断・亀裂状況

サポートA		加振の種類			
		15Hz以下UP	15Hz以下DoWN	15Hz以上UP	15Hz以上DoWN
アクリル板 (厚さ6mm)	開口: 25 × 12.5 AK(25 × 12.5)	試験番号: 2015-1-14-S-7 加振条件: 3→17Hz, 3分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-14-S-8 加振条件: 17→3Hz, 3分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-17-S-3 加振条件: 15→22Hz, 1分間, 最大加速度0.9m/s ² *1	試験番号: 2015-1-17-S-5 加振条件: 22→15Hz, 1分間, 最大加速度0.9m/s ² *1
	開口: 25 × 15 AK(25 × 15)	試験番号: 2015-1-14-S-3 加振条件: 3→17Hz, 3分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-21-S-1 加振条件: 15→9Hz, 2分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-17-S-7 加振条件: 15→22Hz, 1分間, 最大加速度1.0m/s ²	試験番号: 2015-1-17-S-8 加振条件: 22→15Hz, 1分間, 最大加速度1.0m/s ²
	開口: 20 × 12.5 AK(20 × 12.5)	試験番号: 2015-1-16-S-4 加振条件: 5→15Hz, 3分間, 最大加速度2.0m/s ²	試験番号: 2015-1-16-S-5 加振条件: 15→9Hz, 2分間, 最大加速度2.0m/s ²	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)
	開口: 20 × 15 AK(20 × 15)	試験番号: 2015-1-15-S-5 加振条件: 5→15Hz, 3分間, 最大加速度2.0m/s ²	試験番号: 2015-1-15-S-6 加振条件: 15→5Hz, 3分間,(途中停止*2), 最大加速度2.0m/s ²	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)
鋼棒 (直径6mm)	両端で直径3mm STφ 6	試験番号: 2015-1-24-S-5 加振条件: 7→15Hz, 1.5分間(途中停止*2), 最大加速度4.0m/s ²	試験番号: 2015-1-31-S-6 加振条件: 14→7Hz, 1.5分間(途中停止*2), 最大加速度4.0m/s ²	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)	— (加速度計のレンジ内 で破断せず)
注) *1: 最大加速度1.0m/s ² で行って加速度計の容量を超える可能性があったので、0.9m/s ² で実施したもの *2: サポートA破断後に共振が発生し、加速度計の容量を超える可能性が生じたため停止したケース					

 : 破断・破断の生じた加振条件

表 3.2-15(2) 本報告書に掲載する加振条件

サポートA		加振の種類			
		15Hz以下UP	15Hz以下DoWN	15Hz以上UP	15Hz以上DoWN
アクリル板 (厚さ6mm)	開口: 25 × 15 AK(25 × 15)	試験番号: 2015-1-14-S-3 加振条件: 3→17Hz, 3分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-21-S-1 加振条件: 15→9Hz, 2分間, 最大加速度1.5m/s ²	試験番号: 2015-1-17-S-7 加振条件: 15→22Hz, 1分間, 最大加速度1.0m/s ²	試験番号: 2015-1-17-S-8 加振条件: 22→15Hz, 1分間, 最大加速度1.0m/s ²
鋼棒 (直径6mm)	両端で直径3mm STφ 6	試験番号: 2015-1-24-S-5 加振条件: 7→15Hz, 1.5分間(途中停止),	試験番号: 2015-1-31-S-6 加振条件: 14→7Hz, 1.5分間(途中停止),	/	/

3.2.5.2.2 AK(25×15)の15Hz以下での水平加振試験結果

破断・亀裂が発生した加振条件について表 3.2-16 に示している。振動数昇順(UP)及び降順(DOWN)の加振試験において破断・亀裂は最大加速度 1.5m/s^2 で発生している。表中の破断・亀裂発生時刻は、時刻歴波形の変化と試験状況を撮影した動画を参考として設定している。また、破断・亀裂状況等は図 3.2-34 に示している。開口左右の側片で破断が発生している。

破断・亀裂の発生時刻を中心とした 10 秒間について検討する。

(1) 振動数昇順(UP)での水平加振試験

表 3.2-17(1)、(2)には振動数昇順(UP)での 10 秒間の最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。応答倍率は土台(H-200×200)上の A15 を基準とした場合と振動台上の A16 を基準とした場合の 2 種類を示している。また、この応答倍率及び最大ひずみは、アクリル板のサポート A において、破断時にパルス的な波形が発生すること等の影響を考慮して破断・亀裂に影響された部分を時刻歴から判断し、その間隔を除いて破断前と破断後に分けた場合も示している。

図 3.2-35(1)～(4)は、計測した 32ch の 10 秒間の加速度とひずみの時刻歴である。図 3.2-36(1)、(2)は、上方の横方向配管の A1,A2,A3 と振動台上 A16 について、破断時の不安定となる部分を除いた破断前後それぞれ 5 秒間の加速度記録によるフーリエ振幅スペクトルである。図 3.2-37 は、A13(支梁 H-100×100 の先端)と A2(上方の横方向配管の中央)の 2 つの加速度計の記録をバンドパスフィルター通して積分した変位時刻歴と両者の差として求めた相対変位時刻歴を示している。この相対変位はサポート A 部分が受ける変位に相当するものとみなしている。

破断・亀裂前の A1,A2,A3 等の時刻歴及びフーリエスペクトルをみると、アクリル板をサポート A とした 1 次固有振動数の 12～13Hz で振動していることがわかる。時刻歴波形からサポート A の破断・亀裂時に、特に加速度波形において衝撃によるパルス的な波形が発生している。破断後は、配管の固有振動数が変化するので、応答は急激に小さくなっていることがわかる。このパルス的な波形は、支柱への支持端付近の加速度計 A6,A7,A8,A11 で大きくなる傾向が見られる。特に支柱(H-150×150)への支点付近に設置した A6 では 95m/s^2 と大きくなっている。

上方横方向配管の H7～H11 のひずみ時刻歴において、サポート A が負担していた Z 方向の応力を解放する影響と考えられるが、破断に伴い時刻歴の中心軸が、わずかではあるがシフトしている。

表 3.2-17(2)の最大ひずみの一覧には、破断前後について、縦方向配管の H3 の頂部付近 H5 に対する比率 $H3/H5$ ともう一方の縦方向配管の H13,H15,H16 の頂部付近 H12 に対する比率 $H13/H12,H15/H12,H16/H12$ を()内に示している。同表には比率 $H13/H12,H15/H12,H16/H12$ について分布状況を図として示している。この比率は、定常的に振動している区間では、最大値がほぼ同時刻に発生するとみなして、表中の最大値を用いて作成しているが、H12 に 1.0 のひずみが発生した時のひずみ分布と考えられる。分布形状は、破断前ではロッドレストレイントの影響を大きく受ける分布形状である。また、破断後のひずみは小さくなっているが、これは、破断後にほとんど振動していないためと考えられる。

破断の影響によるパルス的な波形はひずみ時刻歴にも見られるが、その増大率は H5 で最大で、影響を含まない振幅に比べて 2 倍 程度になっている。また、最も大きいひずみ度は、H15 の 106μ (表 3.2-17(2))

である。

図 3.2-37 の相対変位時刻歴を見ると、支梁の振動は破断時に若干見られるが、主に配管部分 A2 が大きく振動していることが分かる。また、時刻歴中に示したサポート A 部分の最大相対変位は 3.3mm 程度である。

(2) 振動数降順(DOWN)での水平加振試験

同様の表、図を示す。表 3.2-18(1)、(2)は振動数降順(DOWN)での、最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。図 3.2-38(1)～(4)は、加速度、ひずみの時刻歴であり、図 3.2-39(1)、(2)はフーリエスペクトルである。図 3.2-40 は、サポート A 部分の相対変位に相当する時刻歴を示している。

振動数降順(DOWN)の破断・亀裂発生前後の応答性状は、振動数昇順(UP)と同様の傾向が見られる。

A1 又は A3 のフーリエスペクトルから 2 倍、3 倍の振動数の影響を見ることができる。

上方の横方向配管の H7～H11 のひずみ時刻歴において、振動数昇順(UP)と同様の傾向が見られるが、特に中心位置 Z 方向のひずみ H9 ではっきり表れている。縦方向配管のひずみ度分布では、振動数昇順(UP)ほどはっきりはしていないが、同様の傾向が見られる。最も大きいひずみ度は、H3 の 78μ である。

サポート A 部分の最大相対変位は 3.0mm 程度であるが、これは破断時に生じたものであり、破断前の最大相対変位は 1.5～2mm 程度と考えられる。

表 3.2-16 AK(25×15)の 15Hz 以下水平加振結果の概要

	最大加速度 m/s^2	加振条件	試験番号	破断・亀裂状況
U	0.5	3→22Hz, 3分間	2015-1-14-S-1	破断・亀裂なし
	1.0	3→22Hz, 3分間	2015-1-14-S-2	破断・亀裂なし
	1.5	3→17Hz, 3分間	○2015-1-14-S-3	172.7s付近: 右破断(上部 下部) 左破断(下部)
D	1.5	15→9Hz, 2分間	○2015-1-21-S-1	55.8s付近: 亀裂 57.78s付近: 亀裂 64.5s付近: 右破断(上部 下部) 左破断(下部) 亀裂(上部) 129.09s付近: 左破断(上部)

※U: UP D: DOWN ※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号: 2015-1-14-S-3



試験番号: 2015-1-21-S-1

図 3.2-34 サポート A の破壊状況(AK(25×15),15Hz 以下)

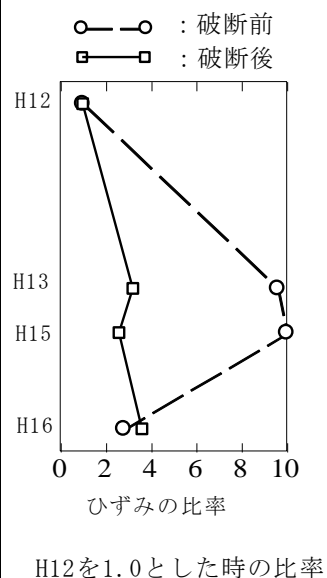
表 3.2-17(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 3→17Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 168~178s	破断前 168~172s	破断後 174~178s	全区間 168~178s	破断前 168~172s	破断後 174~178s	全区間 168~178s	破断前 168~172s	破断後 174~178s
A1	22.30	15.08	5.46	5.85	8.57	3.17	10.88	9.25	3.08
A2	21.39	16.40	3.21	5.61	9.32	1.87	10.43	10.06	1.81
A3	30.53	17.15	6.35	8.01	9.74	3.69	14.89	10.52	3.59
A4	6.44	1.72	0.64	—	—	—	—	—	—
A5	7.57	0.90	0.63	—	—	—	—	—	—
A6	95.21	6.47	3.23	24.99	3.68	1.88	46.44	3.97	1.82
A7	23.15	5.16	3.03	6.08	2.93	1.76	11.29	3.17	1.71
A8	43.07	4.99	6.57	11.30	2.84	3.82	21.01	3.06	3.71
A9	8.21	1.68	4.85	2.15	0.95	2.82	4.00	1.03	2.74
A10	6.52	1.98	4.44	1.71	1.13	2.58	3.18	1.21	2.51
A11	29.37	6.04	7.90	7.71	3.43	4.59	14.33	3.71	4.46
A12	61.16	5.36	4.83	16.05	3.05	2.81	29.83	3.29	2.73
A13	70.98	5.36	4.91	18.63	3.05	2.85	34.62	3.29	2.77
A14	17.08	3.50	3.50	4.48	1.99	2.03	8.33	2.15	1.98
A15	3.81	1.76	1.72	1.00	1.00	1.00	1.86	1.08	0.97
A16	2.05	1.63	1.77	0.54	0.93	1.03	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-17(2) 最大ひずみの一覧(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 168~178s	破断前 168~172s	破断後 174~178s
H1	10	10	6
H2	20	16	8
H3	104	98(9.8)	30(3.0)
H4	16	12	10
H5	28	10(1.0)	10(1.0)
H6	14	12	14
H7	18	8	10
H8	56	34	20
H9	42	10	8
H10	14	10	8
H11	16	6	6
H12	14	10(1.0)	10(1.0)
H13	98	96(9.6)	32(3.2)
H14	14	10	6
H15	106	100(10.0)	26(2.6)
H16	90	28(2.8)	36(3.6)



※()内はH5又は、H12に対する比率である。

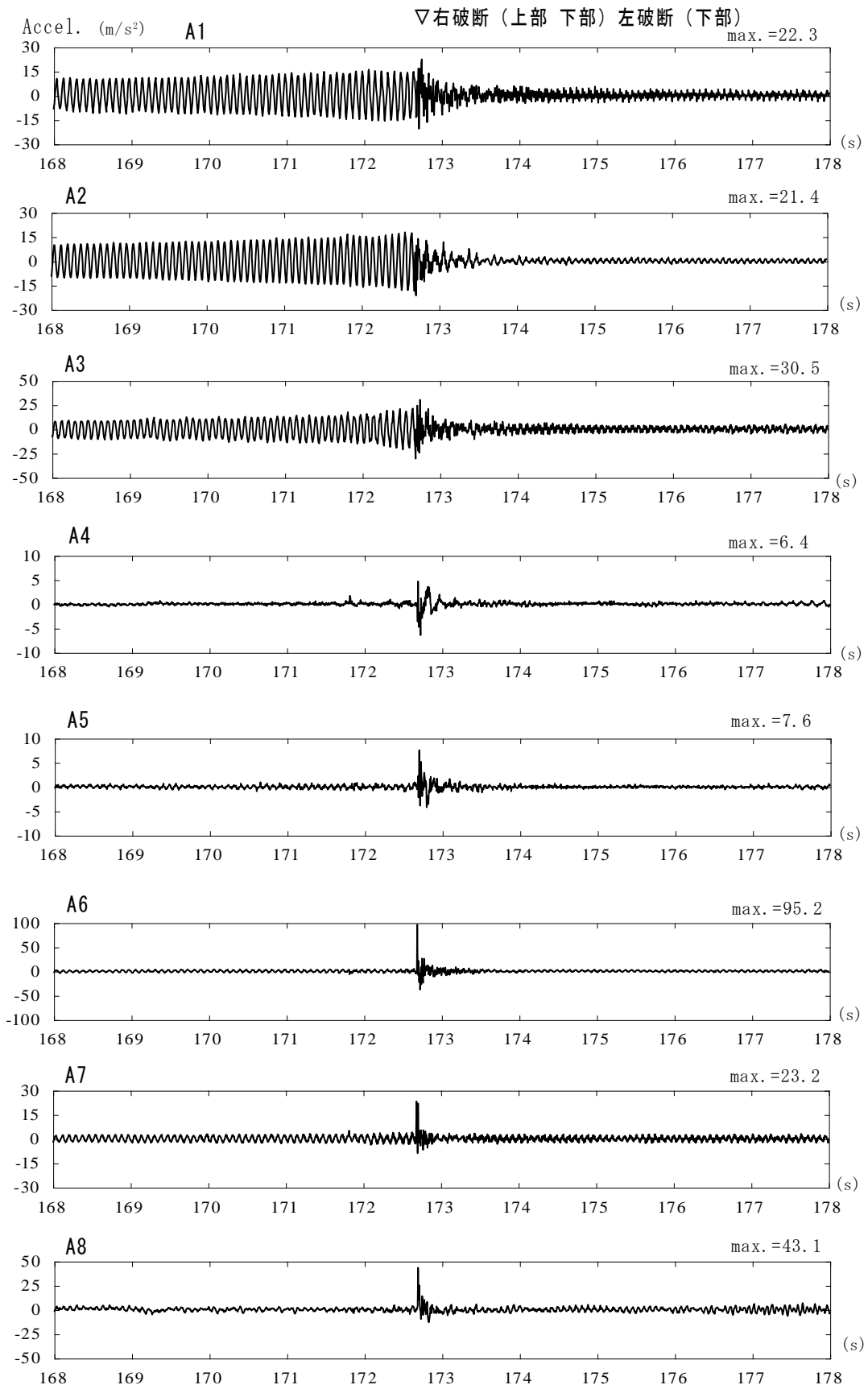


图 3.2-35(1) 加速度時刻歴、A1~A8(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

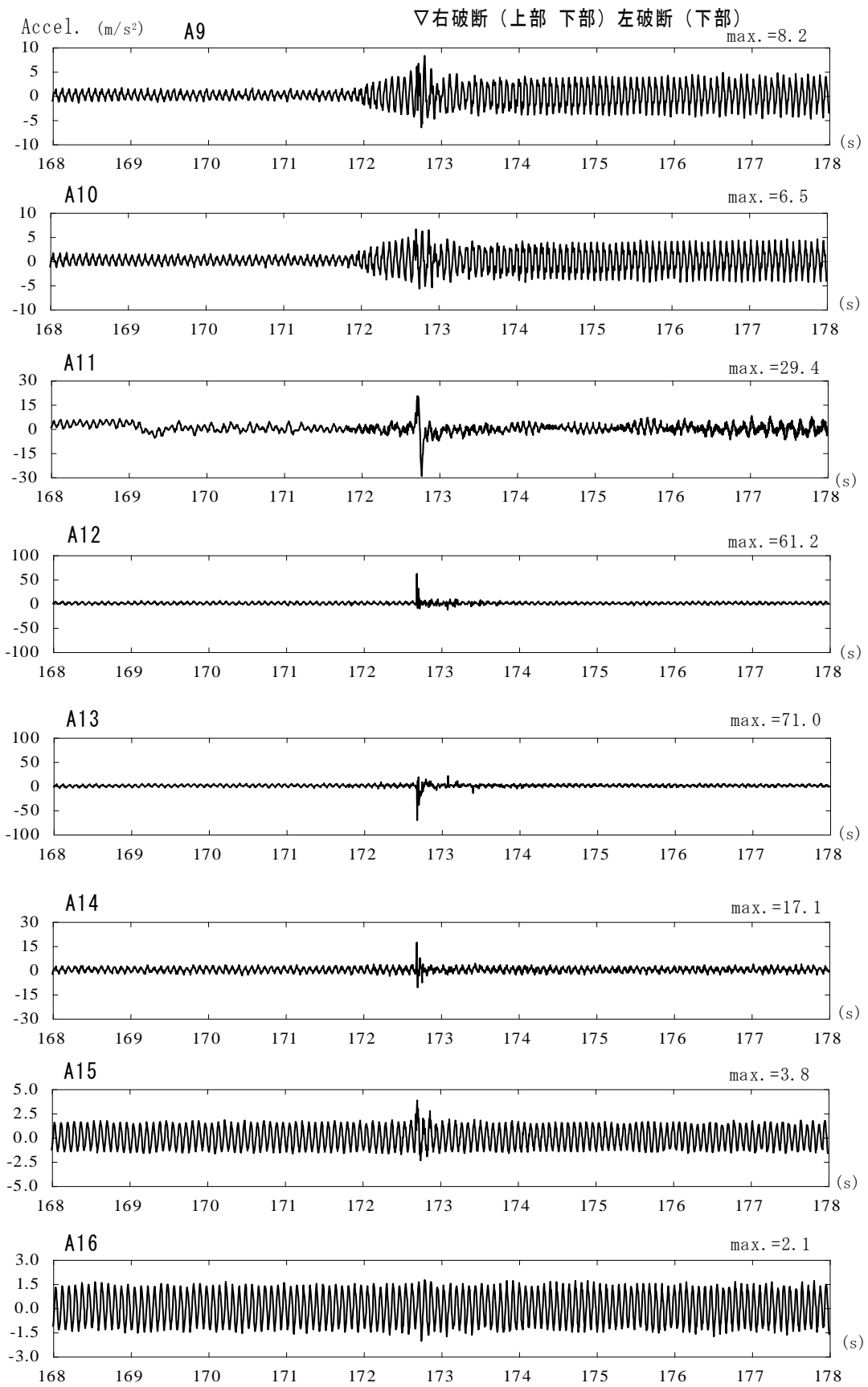


图 3.2-35(2) 加速度時刻歴、A9~A16(AK(25×15),15Hz 以下.振動数昇順(UP))

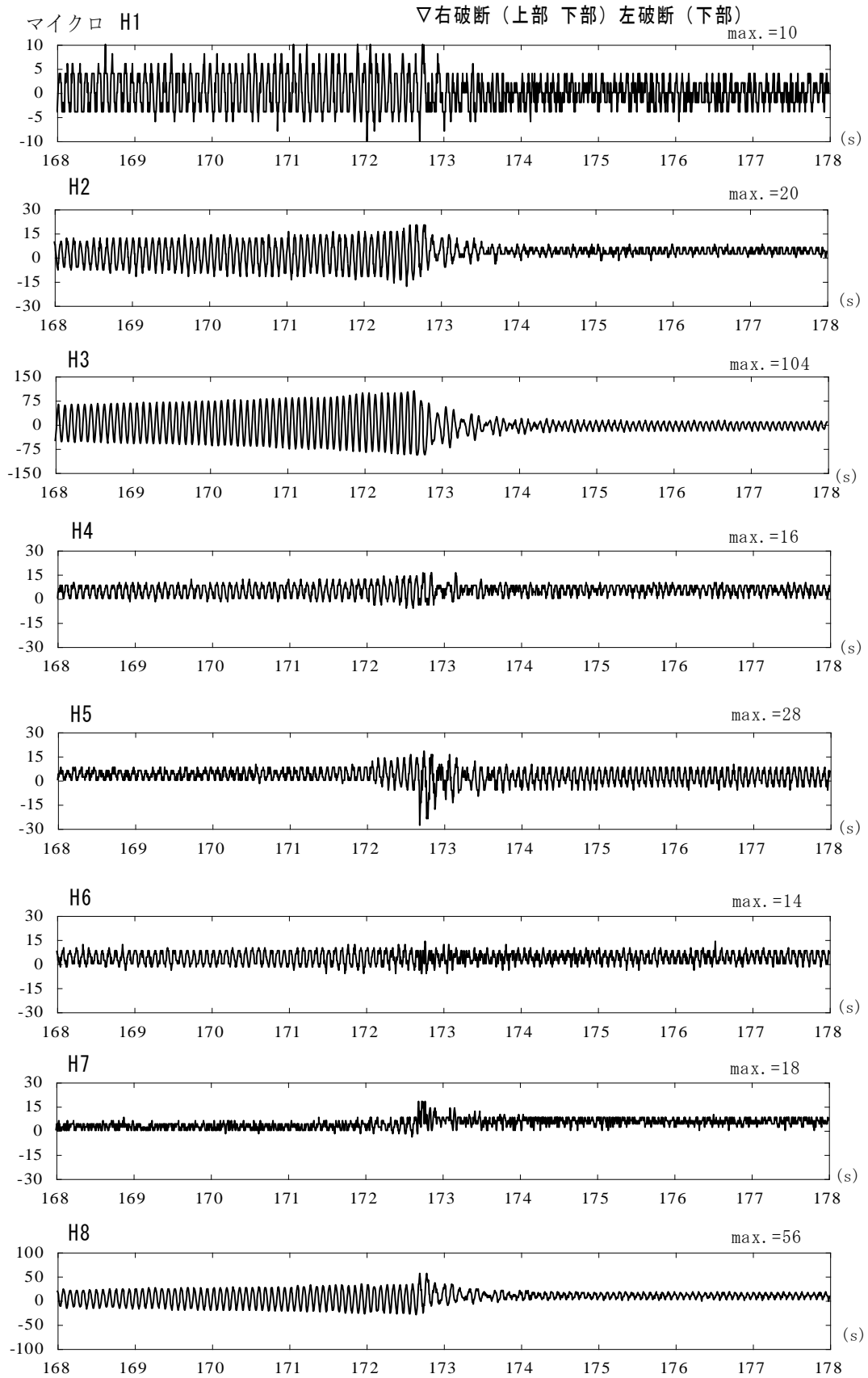


図 3.2-35(3) 配管のひずみ時刻歴、H1~H8(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

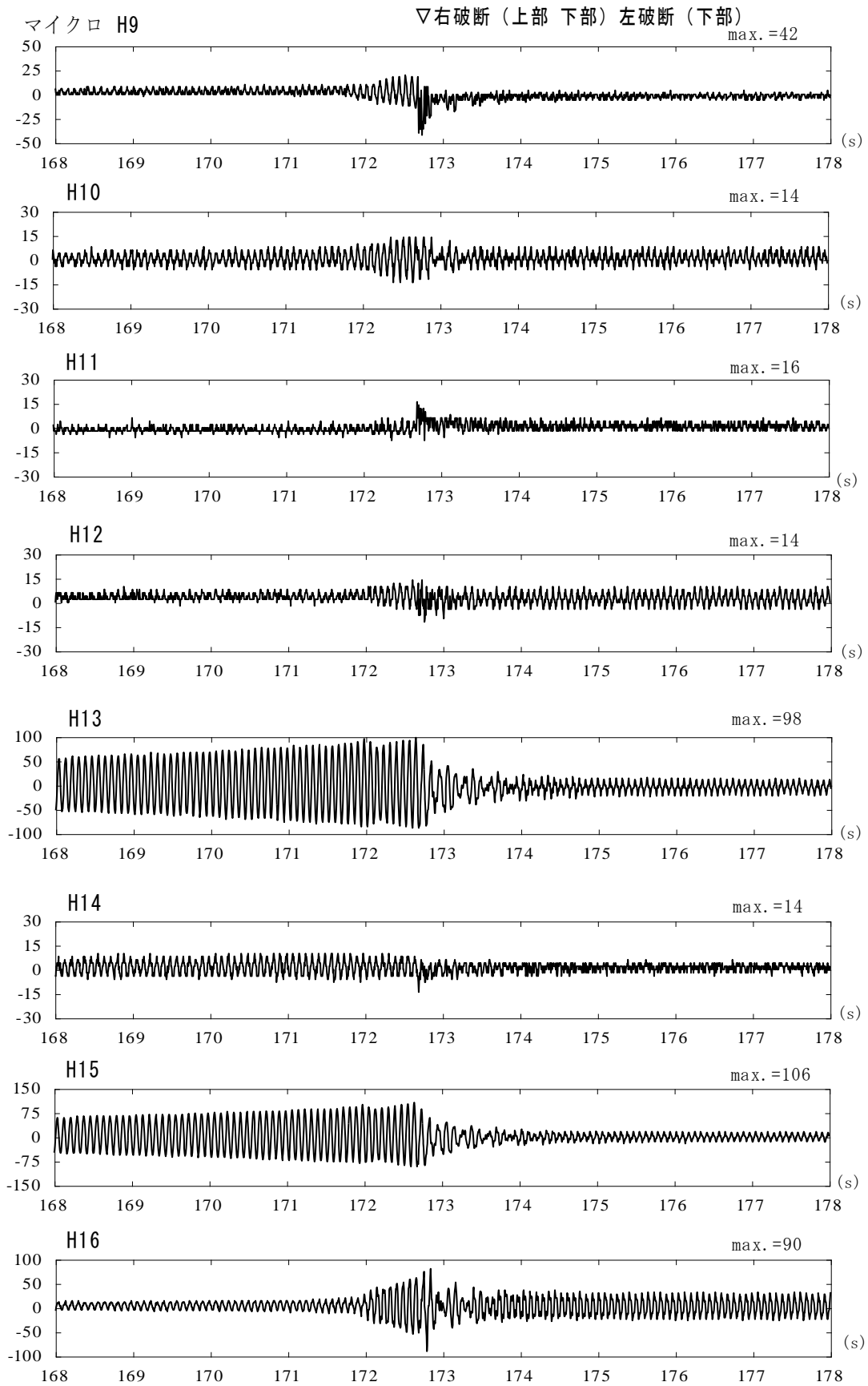


図 3.2-35(4) 配管のひずみ時刻歴、H9~H16(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

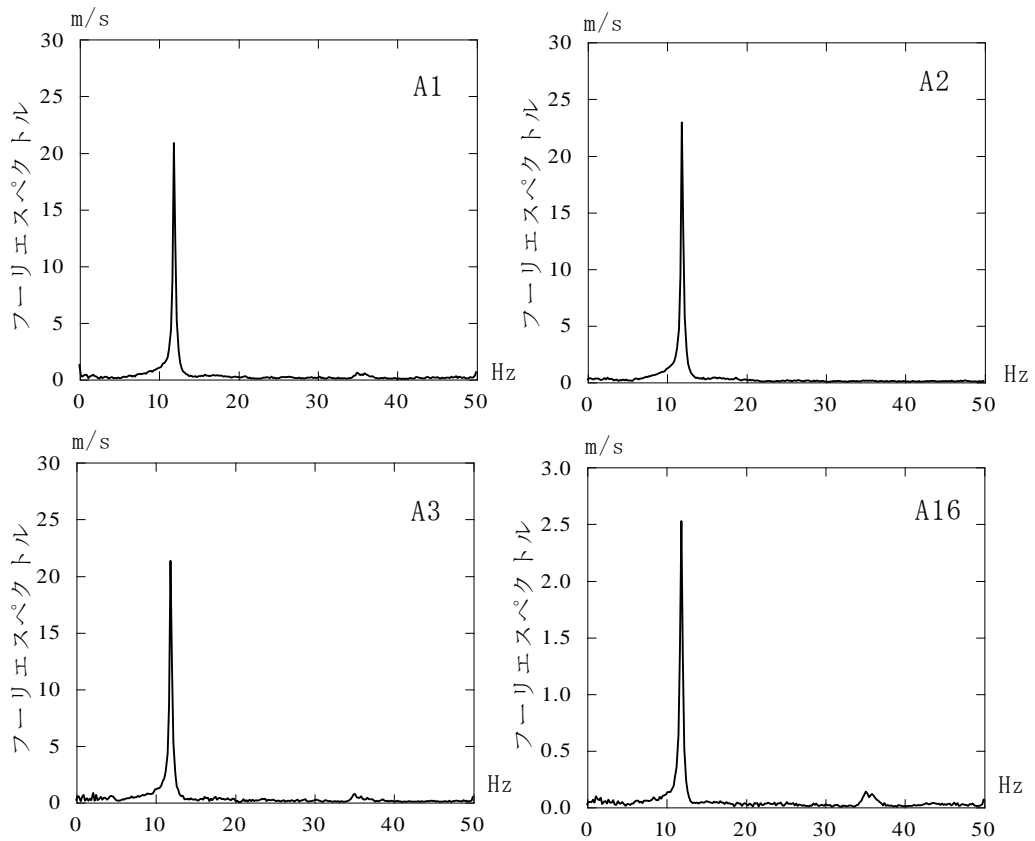


図 3.2-36(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(167~172s 間隔)

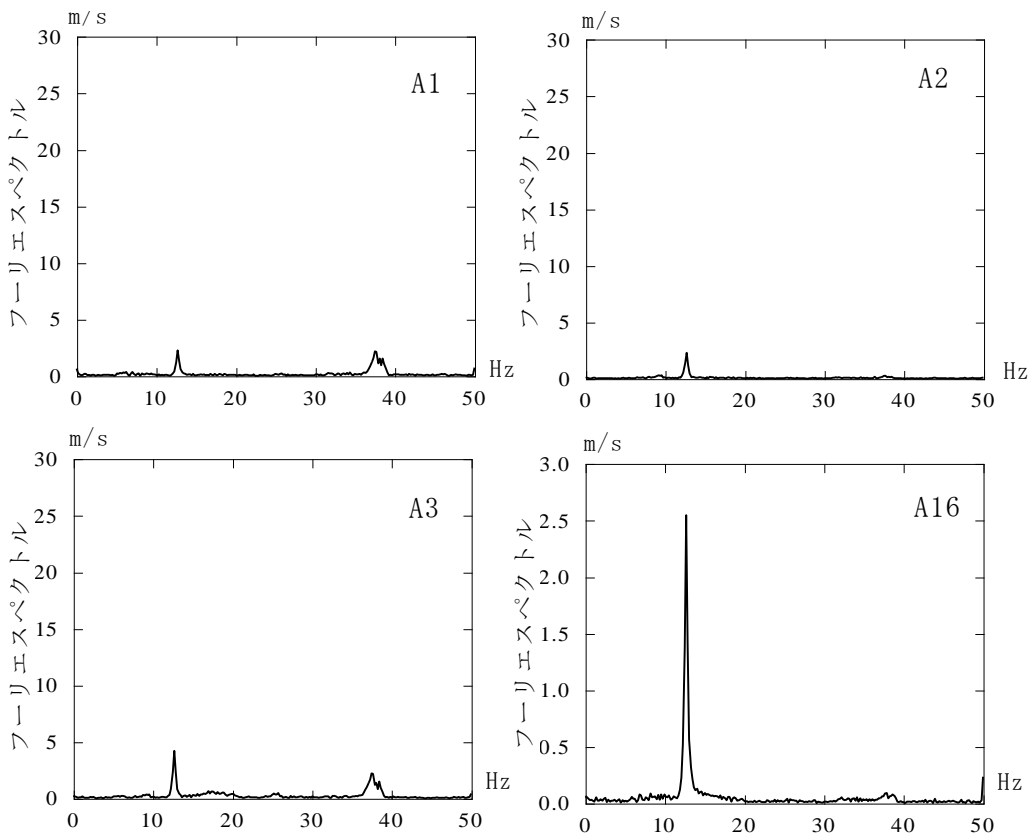


図 3.2-36(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(174~179s 間隔)

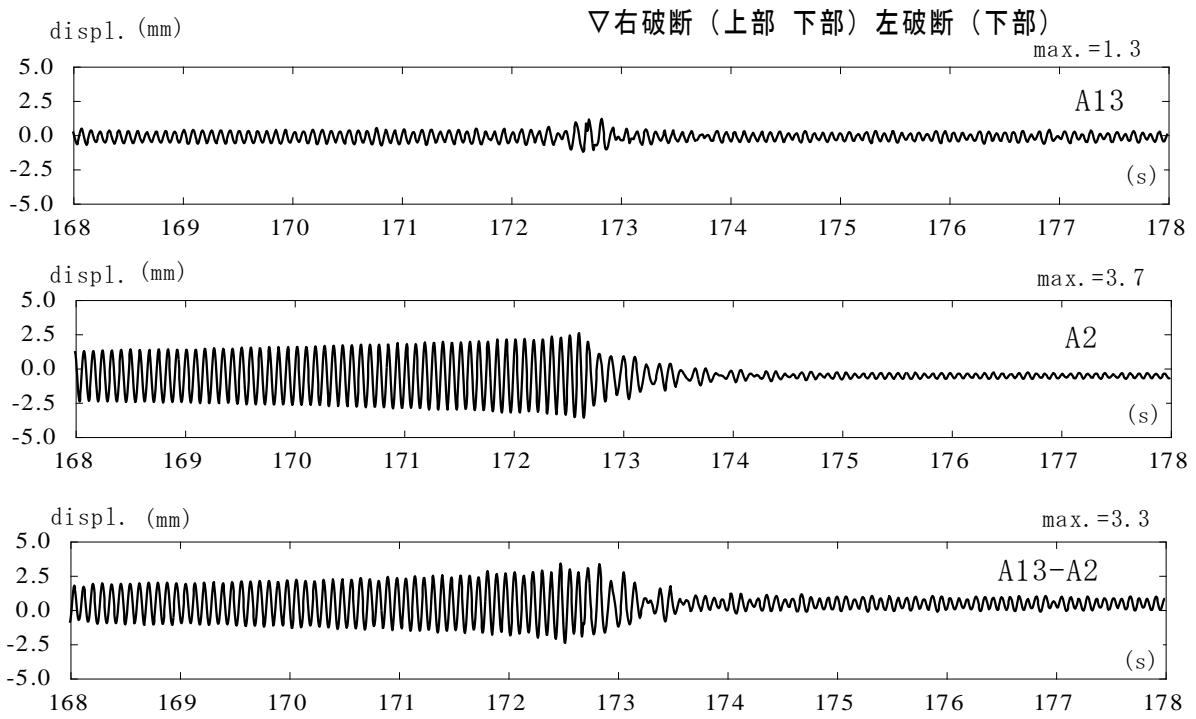


図 3.2-37 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),15Hz 以下,振動数昇順(UP))

表 3.2-18(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

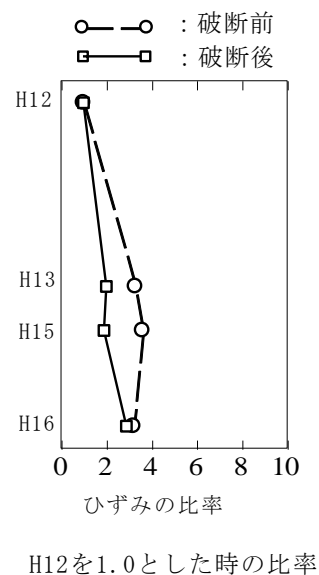
振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 15→9Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 60~70s	破断前 60~64s	破断後 66~70s	全区間 60~70s	破断前 60~64s	破断後 66~70s	全区間 60~70s	破断前 60~64s	破断後 66~70s
A1	13.55	10.27	6.34	4.79	5.67	3.41	7.66	5.80	4.12
A2	18.18	11.76	3.39	6.42	6.50	1.82	10.27	6.64	2.20
A3	25.21	15.44	8.58	8.91	8.53	4.61	14.24	8.72	5.57
A4	2.45	1.00	0.91	—	—	—	—	—	—
A5	2.88	1.17	0.99	—	—	—	—	—	—
A6	82.08	4.83	7.51	29.00	2.67	4.04	46.37	2.73	4.88
A7	9.62	3.56	3.21	3.40	1.97	1.73	5.44	2.01	2.08
A8	24.96	7.88	5.25	8.82	4.35	2.82	14.10	4.45	3.41
A9	5.83	5.83	3.83	2.06	3.22	2.06	3.29	3.29	2.49
A10	5.84	5.84	3.84	2.06	3.23	2.06	3.30	3.30	2.49
A11	17.33	8.67	5.72	6.12	4.79	3.08	9.79	4.90	3.71
A12	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A13	17.86	5.36	11.16	6.31	2.96	6.00	10.09	3.03	7.25
A14	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A15	2.83	1.81	1.86	1.00	1.00	1.00	1.60	1.02	1.21
A16	1.77	1.77	1.54	0.63	0.98	0.83	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-18(2) 最大ひずみの一覧(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 60~70s	破断前 60~64s	破断後 66~70s
H1	10	10	8
H2	20	20	12
H3	78	76(4.2)	32(2.3)
H4	20	18	14
H5	26	18(1.0)	14(1.0)
H6	14	14	12
H7	16	8	14
H8	28	26	16
H9	20	16	12
H10	18	18	12
H11	12	6	8
H12	20	20(1.0)	14(1.0)
H13	66	66(3.3)	28(2.0)
H14	16	16	14
H15	72	72(3.6)	26(1.9)
H16	64	64(3.2)	40(2.9)

※()内はH5又は、H12に対する比率である。



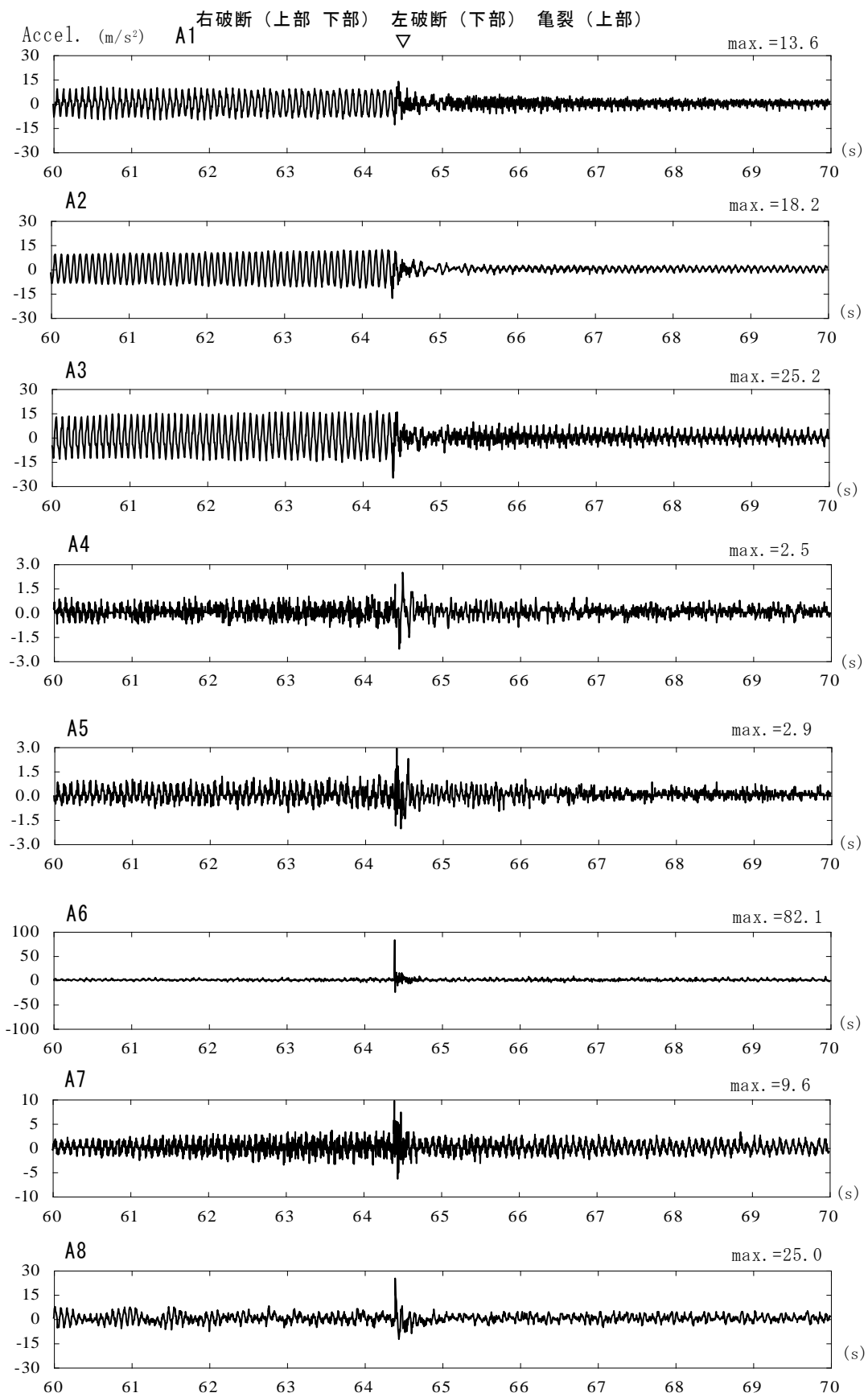


図 3.2-38(1) 加速度時刻歴、A1~A8(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

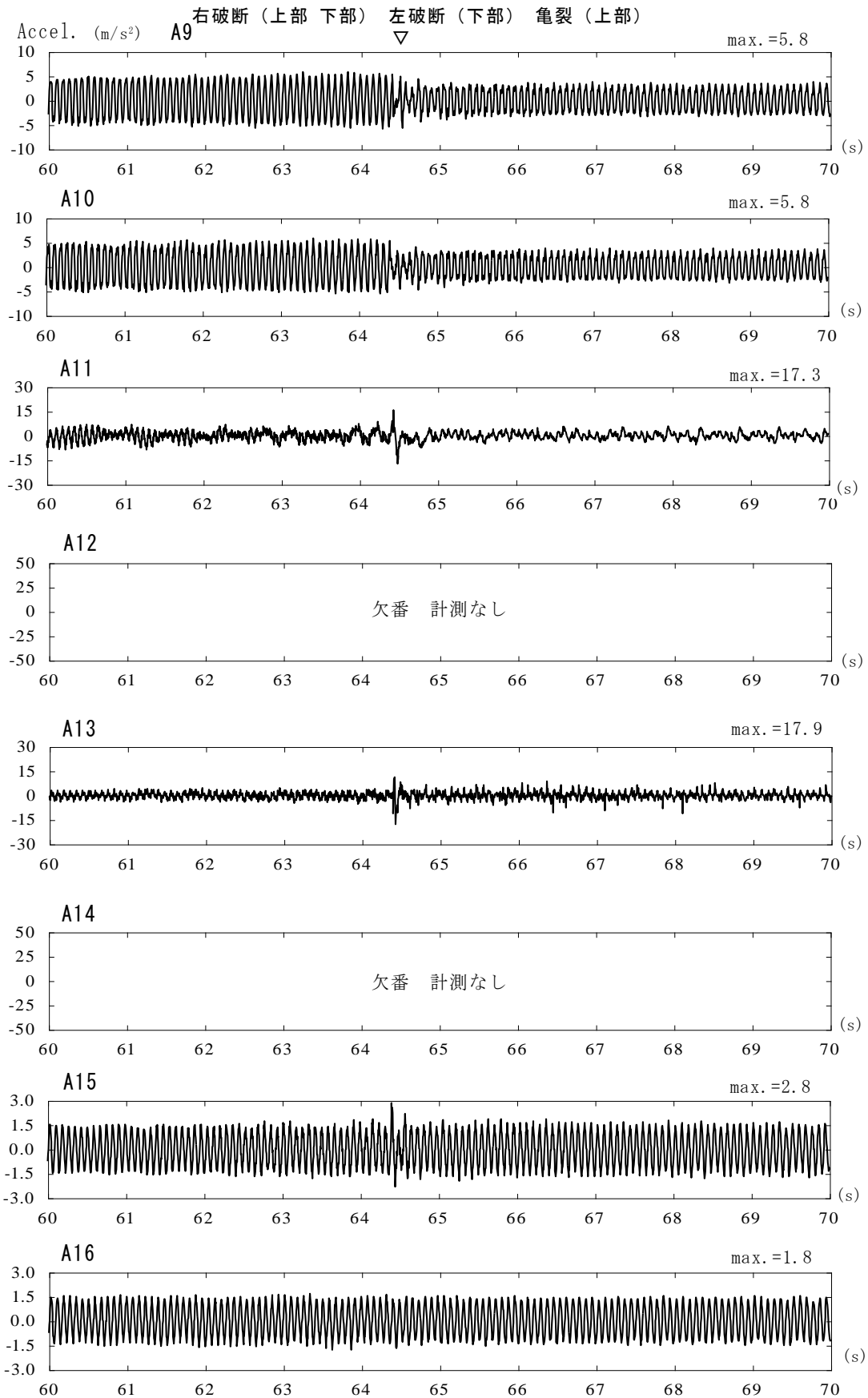


図 3.2-38(2) 加速度時刻歴、A9~A16(AK(25×15), 15Hz 以下, 振動数降順(DOWN))

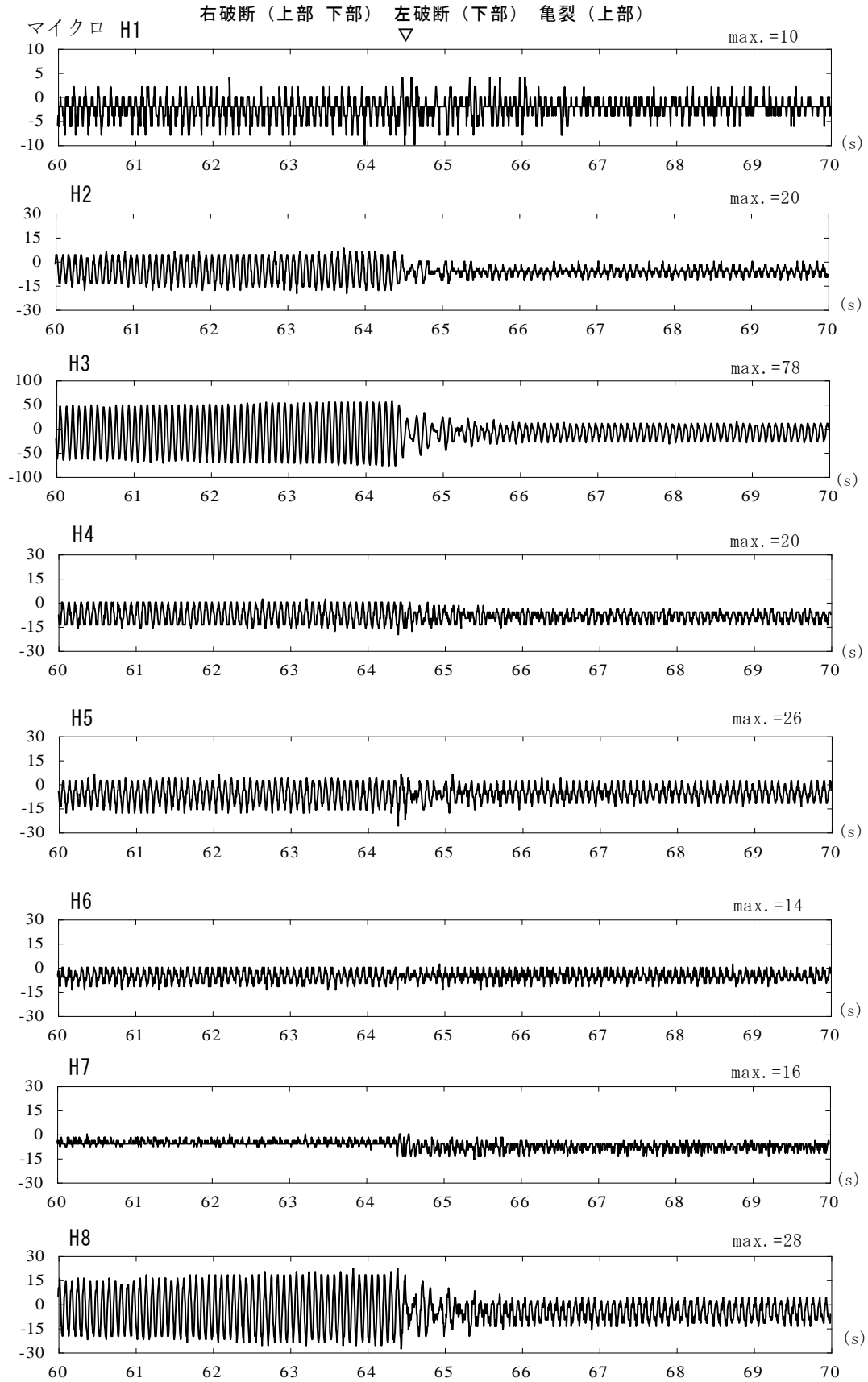


図 3.2-38(3) 配管のひずみ時刻歴、H1～H8(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

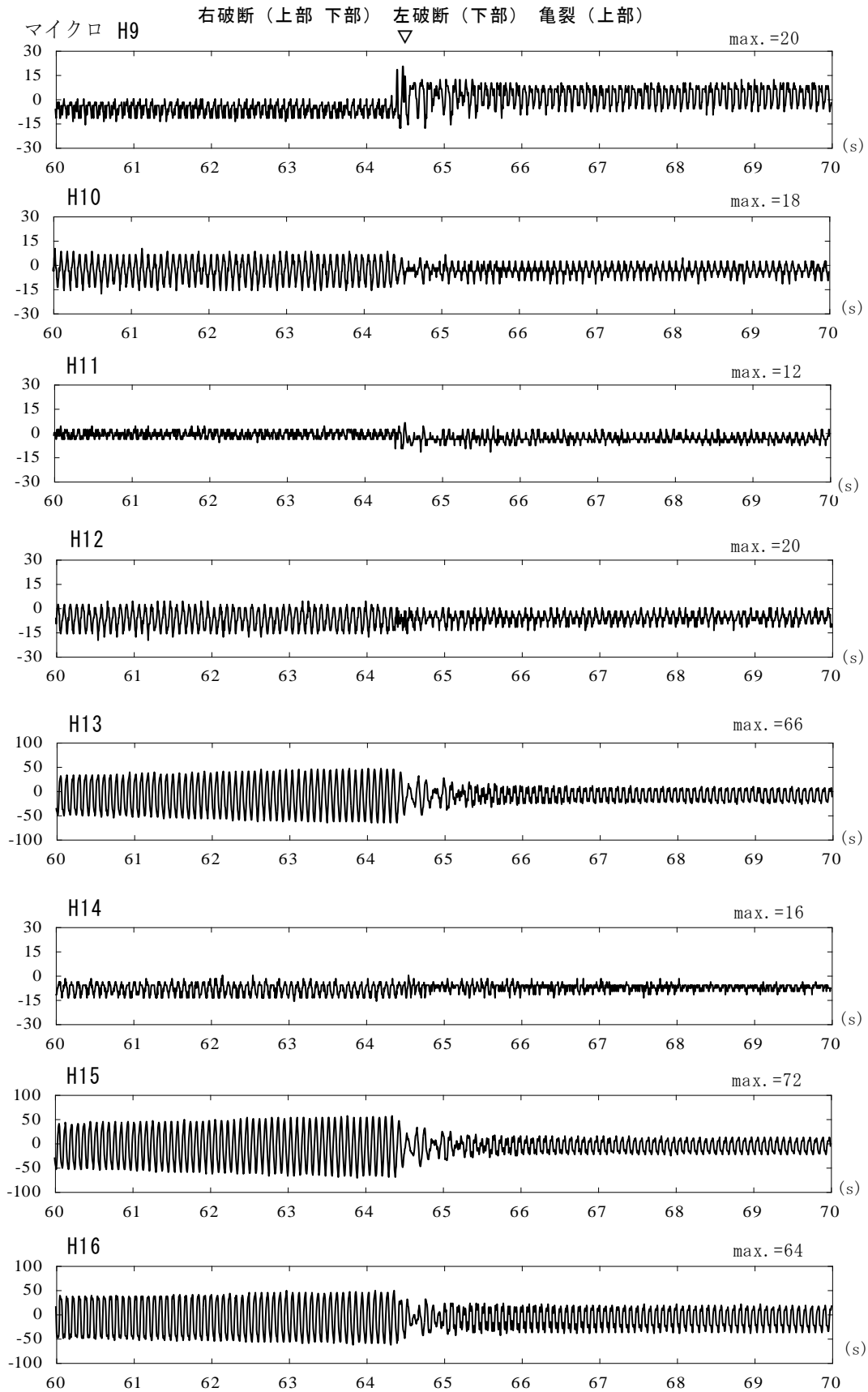


図 3.2-38(4) 配管のひずみ時刻歴、H9~H16(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

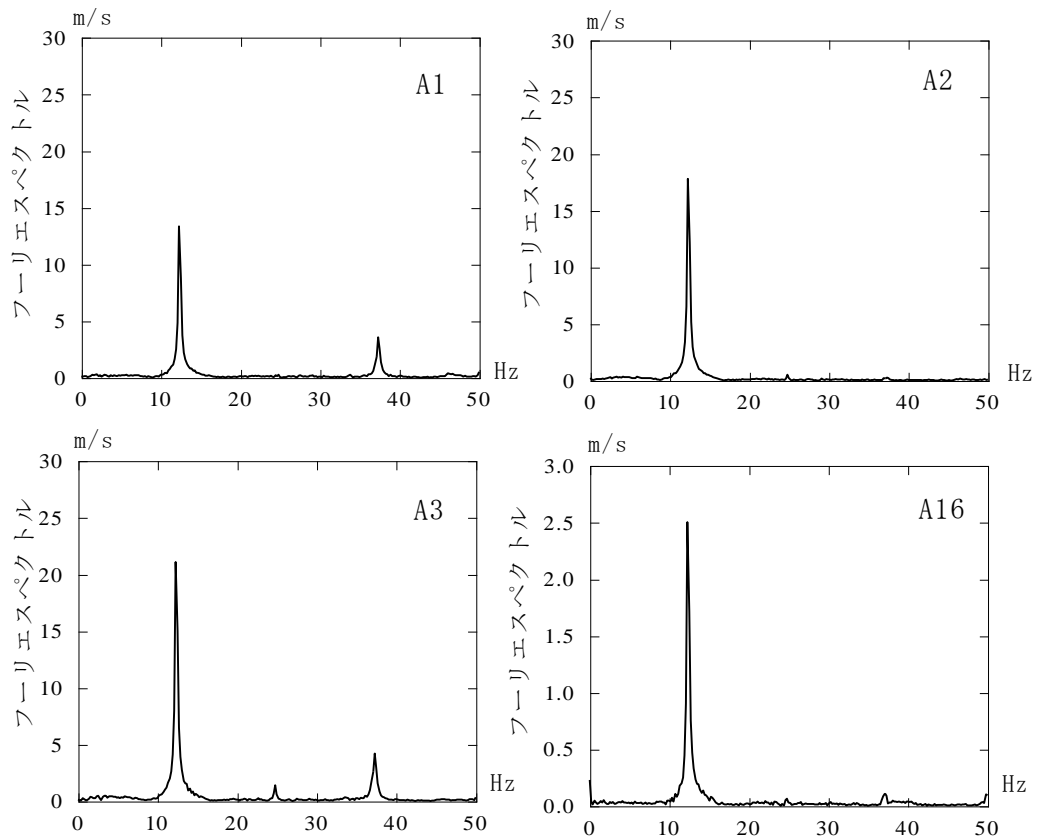


図 3.2-39(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(59~64s 間隔)

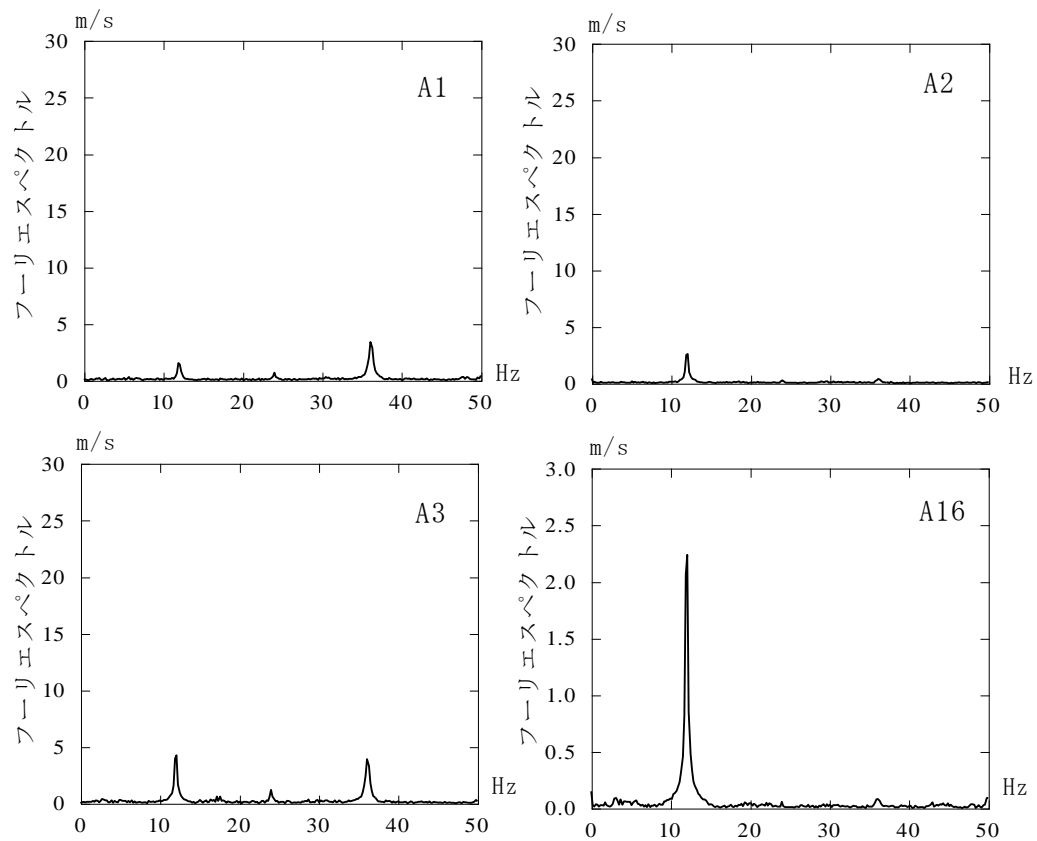


図 3.2-39(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(66~71s 間隔)

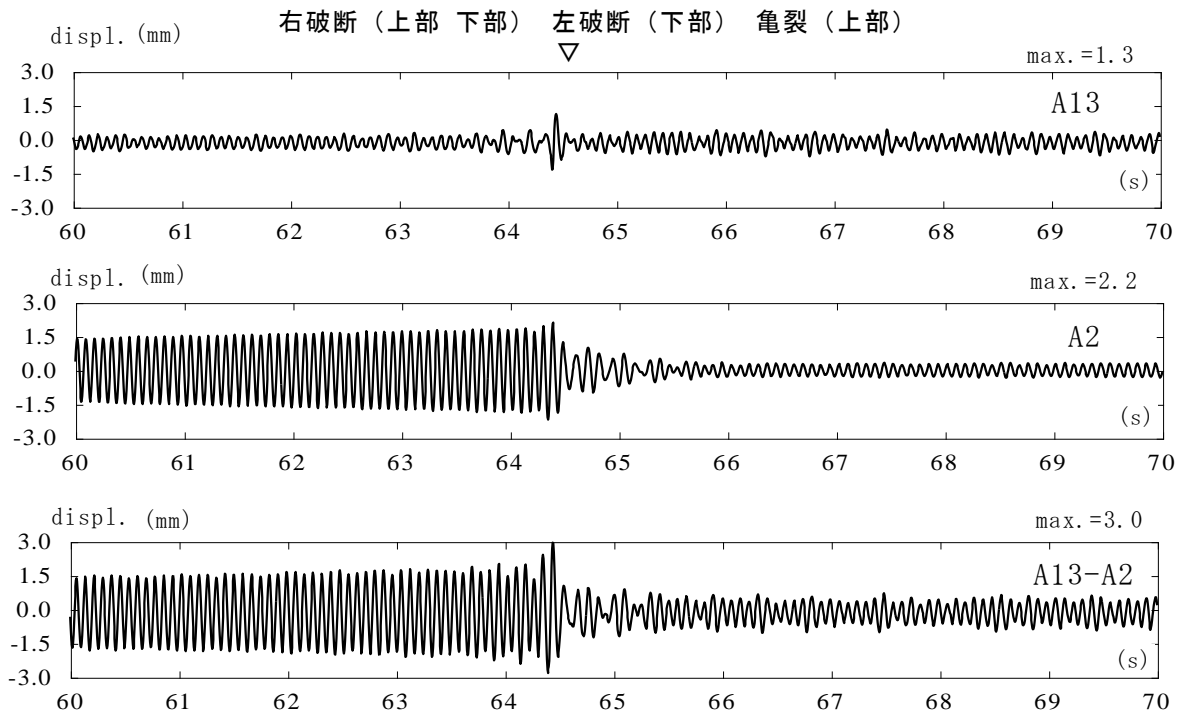


図 3.2-40 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

3.2.5.2.3 STφ6の15Hz以下の水平加振試験結果

破断・亀裂が発生した加振条件について表 3.2-19 に示している。振動数昇順(UP)及び降順(DOWN)の加振試験において破断・亀裂は最大加速度 4.0m/s^2 で発生しており、アクリル板のサポート A の 2 倍以上である。破断・亀裂状況等は図 3.2-41 に示している。破断は、昇順(UP)及び降順(DOWN)共に下側の直径 3mm の部分で生じており、上側では直径 3mm の部分で大きなクラックが複数入った状態である。

破断・亀裂の発生時刻を中心とした 10 秒間について検討する。

(1) 振動数昇順(UP)での水平加振試験

同様の表、図を示す。表 3.2-20(1)、(2)は最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。図 3.2-42(1)～(4)は加速度、ひずみの時刻歴であり、図 3.2-43(1)、(2)はフーリエスペクトルである。図 3.2-44 は、サポート A 部分の相対変位に相当する時刻歴を示している。

本試験は 7Hz から加振を開始し、30 秒付近で破断が生じ、38 秒付近で鋼棒が分離し上下で別々に振動している。この際、振動台の加振振動数がサポート A なしの 1 次固有振動数(8.2Hz)に近かったため共振が発生し、配管の振幅が非常に大きくなったため、40 秒付近で強制的に停止している。

時刻歴より、38 秒付近の破断(分離)以降、応答が非常に大きくなっていることがわかる。また、鋼棒ではアクリル板とは異なり破断時にパルス的な波形は発生していない。

縦方向配管のひずみ分布(表 3.2-20(2))では、破断前後で分布形状に大きな変化は見られない。両者ともに 1 次モードで振動しており、破断前後の 1 次モードの形状に大きな相違がないためと考えられる。しかし、破断前後の比率は、破断後がより大きくなっている。これは、H12 に 1.0 のひずみ(曲げモーメント)が生じた場合の他点のひずみ(曲げモーメント)と考えられるので、破断後の方がより大きな力が頂部に作用していたと考えられる。これは、サポート A が負担していた X 方向の応力分と考えられ、荷重(応力)再配分の影響と考えられる。最も大きいひずみ度は、共振の影響を受けているが H3 の 704μ である。

サポート A 部分の最大相対変位は共振の影響を受けて 23.3mm 程度であるが、破断前の最大相対変位は 10mm 程度であったと推察される。

(2) 振動数降順(DOWN)での水平加振試験

同様の表、図を示す。表 3.2-21(1)、(2)は最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。図 3.2-45(1)～(4)は加速度、ひずみの時刻歴であり、図 3.2-46(1)、(2)はフーリエスペクトルである。図 3.2-47 は、サポート A 部分の相対変位に相当する時刻歴を示している。

降順(DOWN)の場合、フーリエスペクトルから分かるように、破断前は 9～10Hz 付近で振動しており、小振幅試験での STφ6 をサポート A とした場合の 1 次振動数 12Hz 付近より小さくなっている。これは、鋼材のサポート A の変形に伴う塑性化の影響と考えられる。破断後は 8Hz 付近で振動している。破断前後で、振動数が近いと考えられるが、上方の横配管には、破断前後で大きな振幅の変化は見られない。

上方の横方向配管の H7～H11 のひずみ時刻歴において、破断に伴い時刻歴の中心軸が、がシフト傾向ははっきりとみられる。縦方向配管のひずみ度分布(表 3.2-21(2))は、振動数昇順(UP)と同様に、破断後の比率が大きく、負担する水平力が多くなっていることがわかる。最も大きいひずみ度は、H3 の 304μ であ

る。

サポートA部分の最大相対変位は11mm程度であるが、破断前の最大相対変位は8～9mm程度であると推察される。

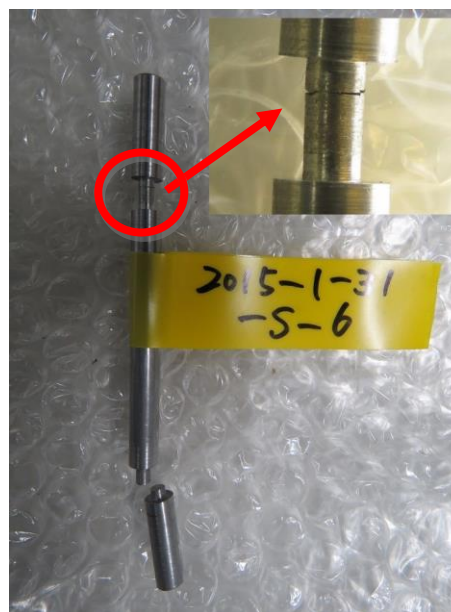
表 3.2-19 ST φ6 の 15Hz 以下水平加振結果の概要

	最大加速度 m/s^2	加振条件	試験番号	破断・亀裂状況
U	1.0	5→22Hz, 3分間	2015-1-24-S-2	破断・亀裂なし
	2.0	7→15Hz, 3分間	2015-1-24-S-3	破断・亀裂なし
	3.0	7→15Hz, 1分30秒間	2015-1-24-S-4	破断・亀裂なし
	4.0	7→15Hz, 1分30秒間	○2015-1-24-S-5	30.72s付近:破断(下部) 38.28s付近:破断部完全分離
D	4.0	14→7Hz, 1分30秒間	○2015-1-31-S-6	75.8s付近:破断(下部)

※U: UP D: DOWN ※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号: 2015-1-24-S-5



試験番号: 2015-1-31-S-6

図 3.2-41 サポート A の破壊状況(ST φ6, 15Hz 以下)

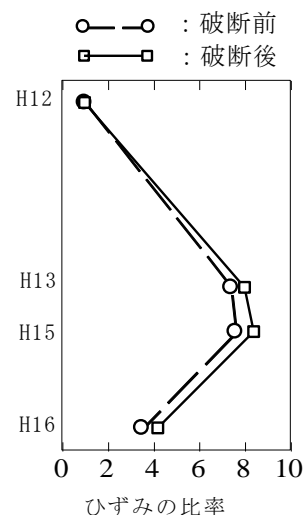
表 3.2-20(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(ST φ6,15Hz 以下,振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 4.0m/s ² , 振動数範囲: 7→15Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 30~42s	破断前 30~38s	破断後 39~40s	全区間 30~42s	破断前 30~38s	破断後 39~40s	全区間 30~42s	破断前 30~38s	破断後 39~40s
A1	71.69	34.54	70.16	8.83	6.20	9.16	14.34	8.30	14.03
A2	86.63	30.66	68.63	10.67	5.50	8.96	17.33	7.37	13.73
A3	95.37	64.49	87.48	11.75	11.58	11.42	19.07	15.50	17.50
A4	14.16	9.44	14.16	—	—	—	—	—	—
A5	36.49	11.26	36.49	—	—	—	—	—	—
A6	130.37	48.82	93.35	16.06	8.76	12.19	26.07	11.74	18.67
A7	89.94	36.15	79.61	11.08	6.49	10.39	17.99	8.69	15.92
A8	134.41	51.66	99.39	16.55	9.27	12.98	26.88	12.42	19.88
A9	37.92	23.15	37.92	4.67	4.16	4.95	7.58	5.56	7.58
A10	23.01	10.23	23.01	2.83	1.84	3.00	4.60	2.46	4.60
A11	48.87	26.86	48.87	6.02	4.82	6.38	9.77	6.46	9.77
A12	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A13	43.30	19.64	33.48	5.33	3.53	4.37	8.66	4.72	6.70
A14	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A15	8.12	5.57	7.66	1.00	1.00	1.00	1.62	1.34	1.53
A16	5.00	4.16	5.00	0.62	0.75	0.65	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-20(2) 最大ひずみの一覧(ST φ6,15Hz 以下,振動数昇順(UP))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 30~42s	破断前 30~38s	破断後 39~40s
H1	58	40	58
H2	118	46	118
H3	704	264(5.3)	684(6.1)
H4	68	40	68
H5	116	50(1.0)	112(1.0)
H6	28	16	28
H7	38	26	38
H8	302	118	300
H9	92	28	92
H10	56	32	56
H11	52	32	52
H12	76	34(1.0)	74(1.0)
H13	604	250(7.4)	590(8.0)
H14	76	40	76
H15	640	260(7.6)	620(8.4)
H16	328	120(3.5)	314(4.2)



H12を1.0とした時の比率

※()内はH5又は、H12に対する比率である。

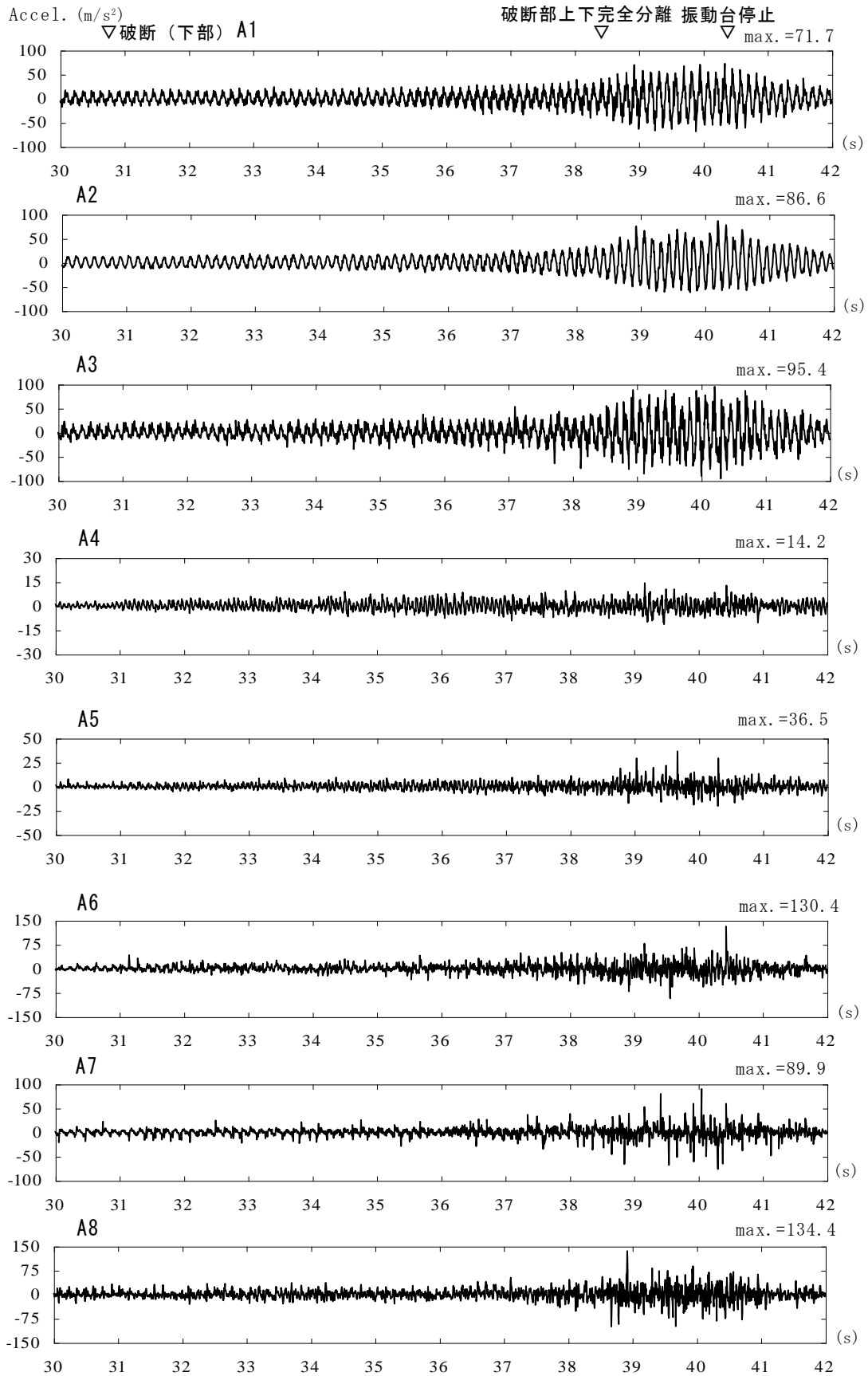


図 3.2-42(1) 加速度時刻歴、A1~A8(ST ϕ 6,15Hz 以下,振動数昇順(UP))

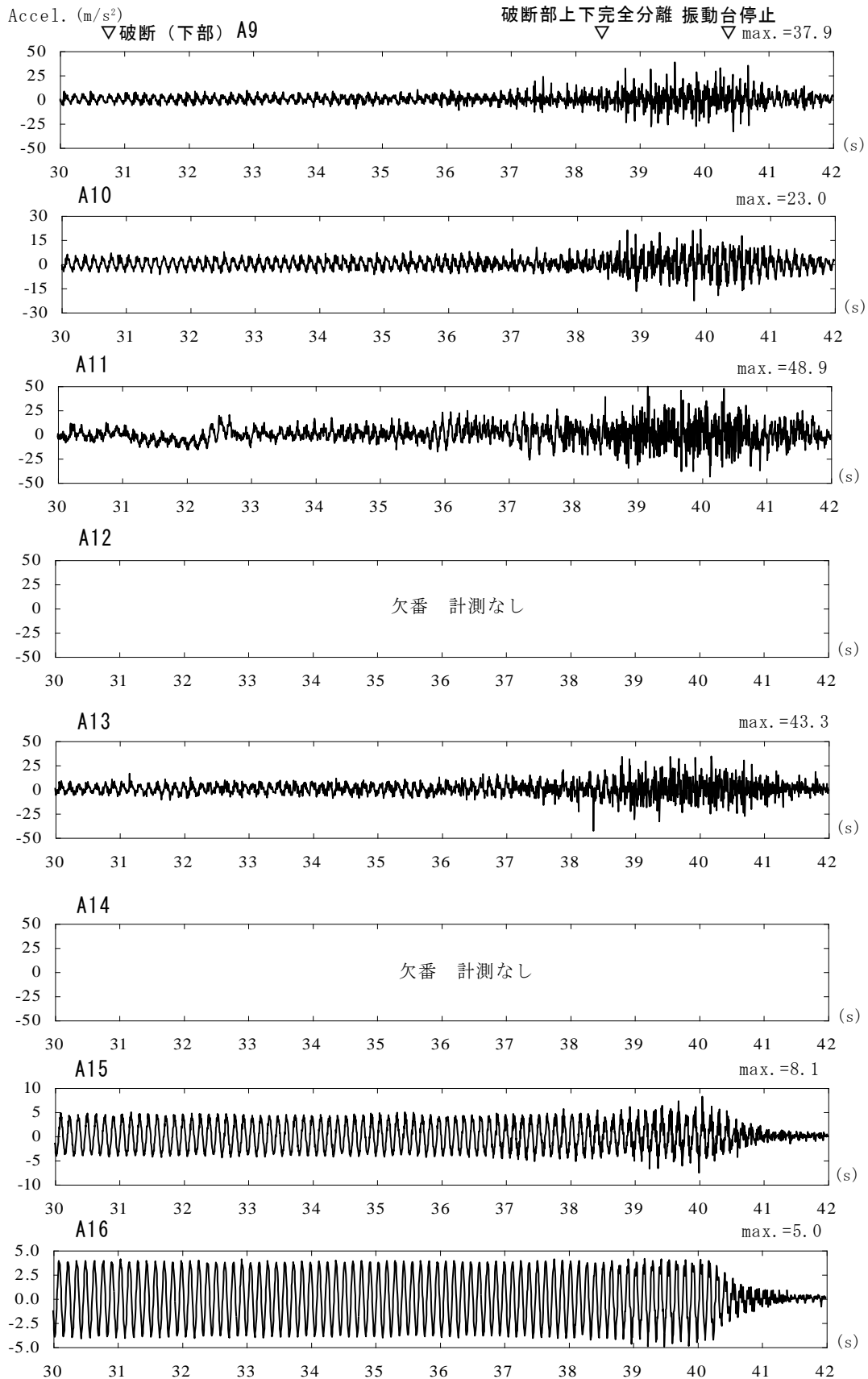


図 3.2-42(2) 加速度時刻歴、A9~A16(ST $\phi 6$,15Hz 以下.振動数昇順(UP))

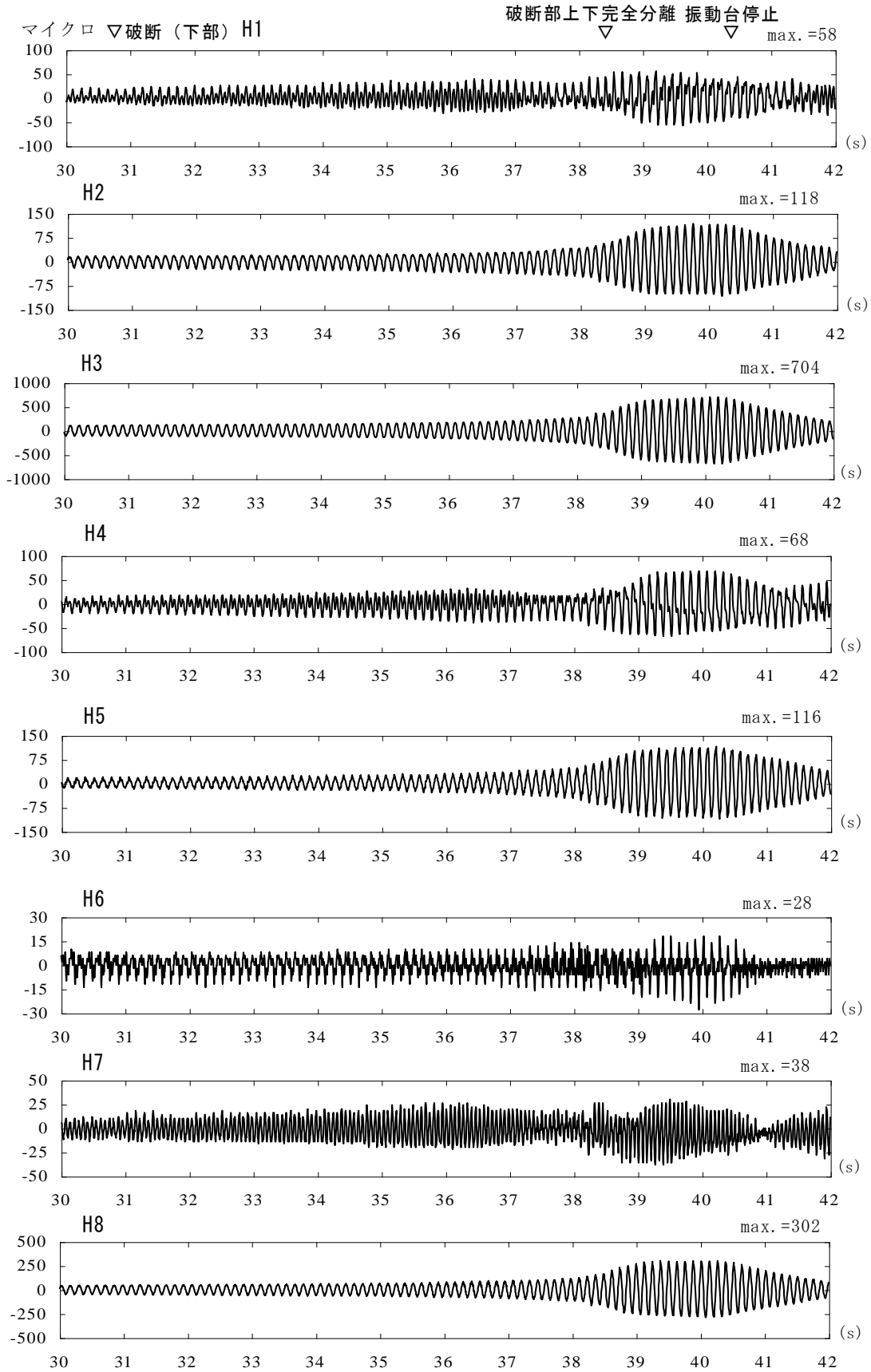


図 3.2-42(3) 配管のひずみ時刻歴、H1~H8(ST $\phi 6$, 15Hz 以下, 振動数昇順(UP))

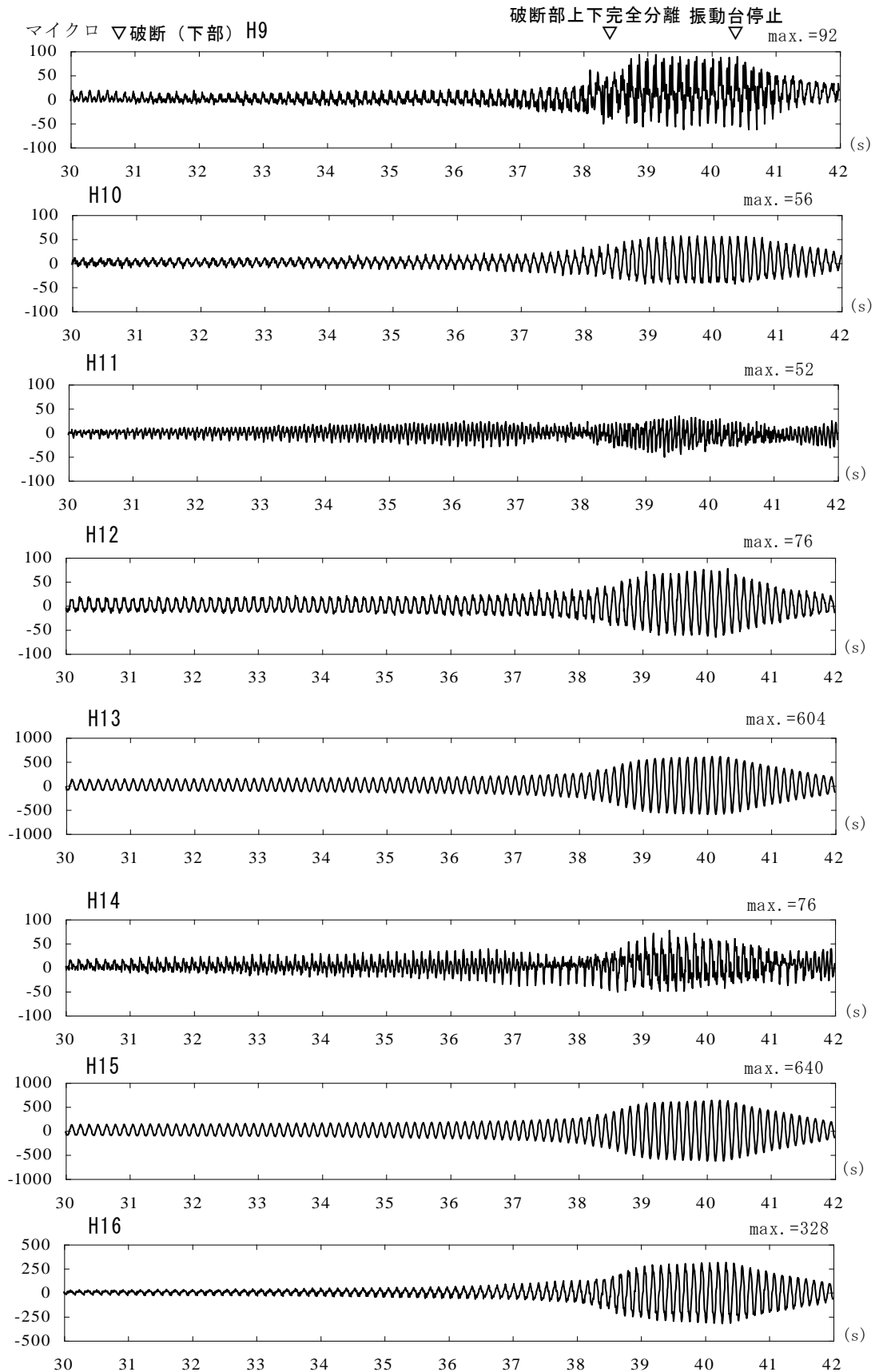


図 3.2-42(4) 配管のひずみ時刻歴、H9～H16(ST ϕ 6,15Hz 以下,振動数昇順(UP))

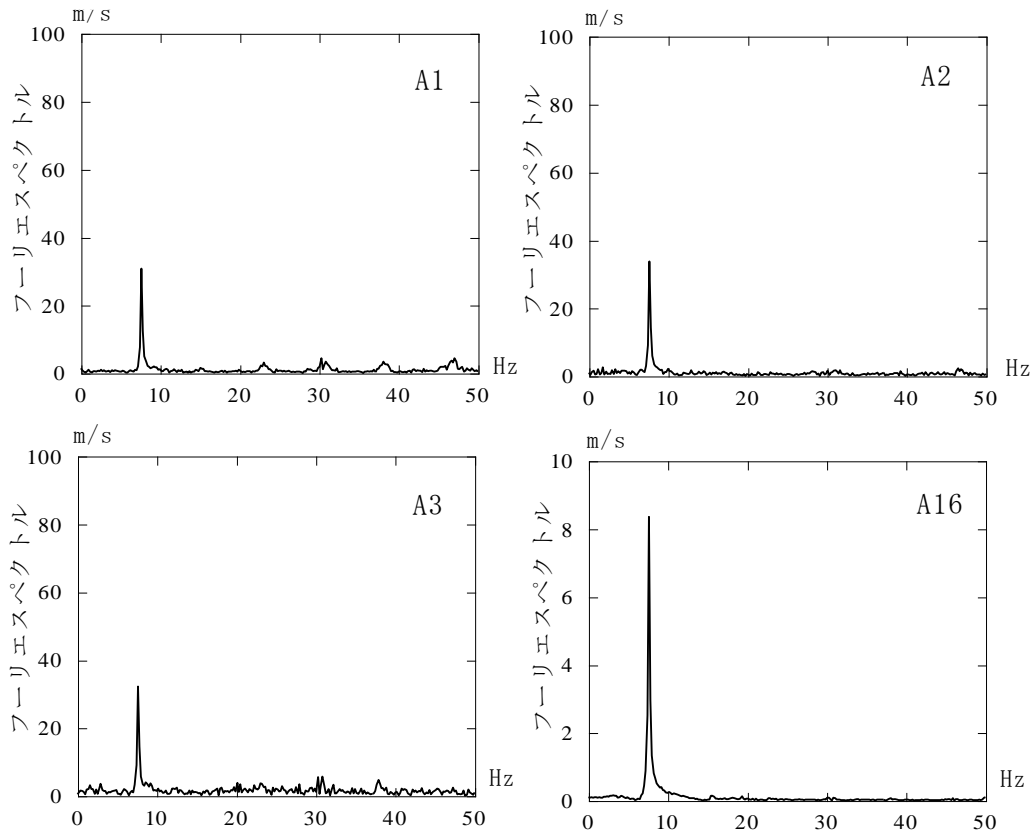


図 3.2-43(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(33~38s 間隔)

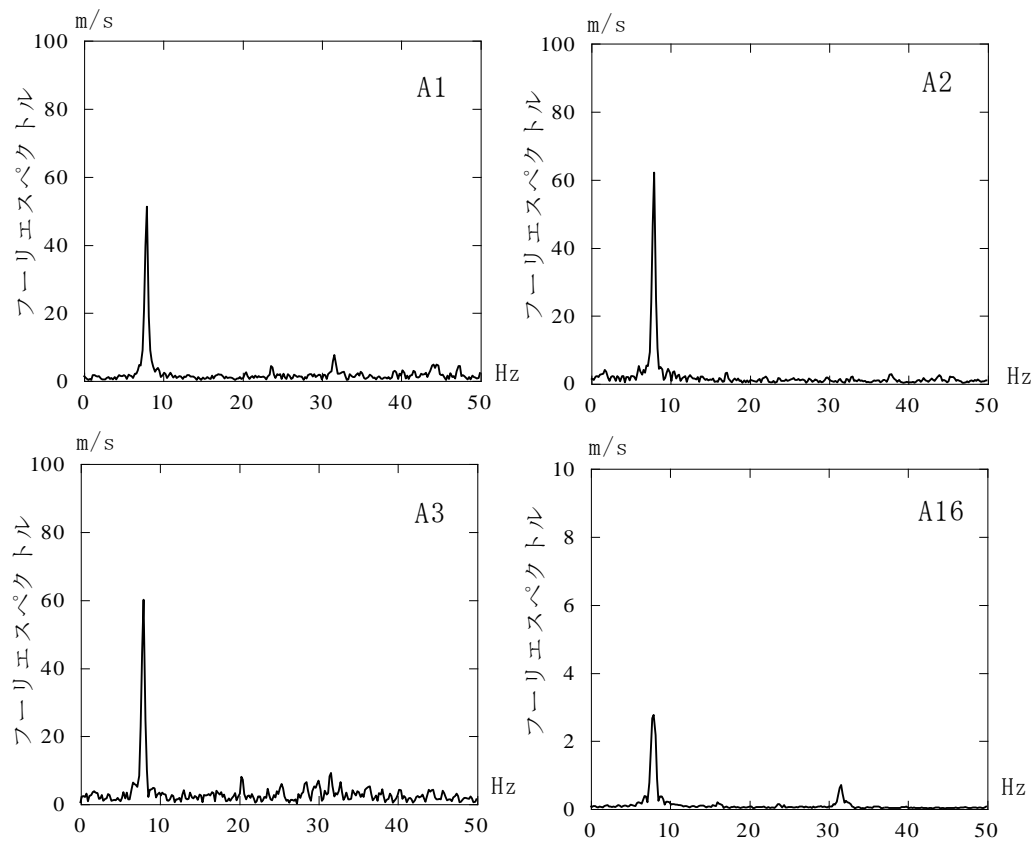


図 3.2-43(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(39~44s 間隔)

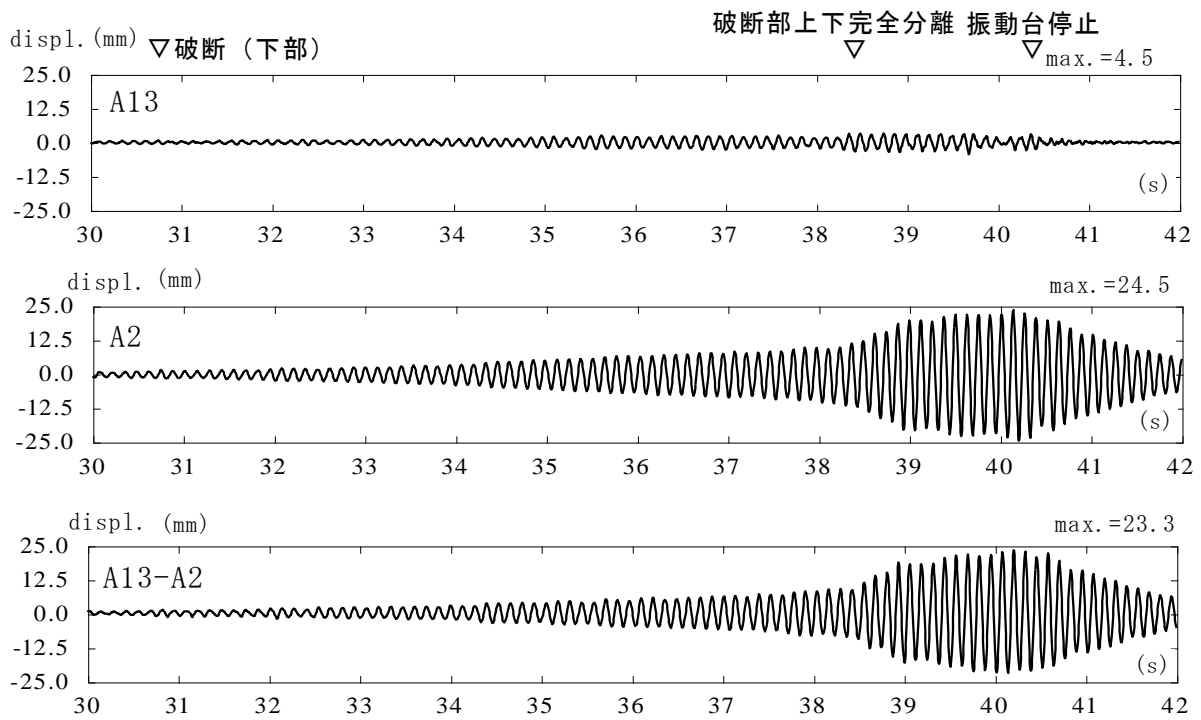


図 3.2-44 サポート A 位置の相対変位時刻歴(ST $\phi 6$, 15Hz 以下, 振動数昇順(UP))

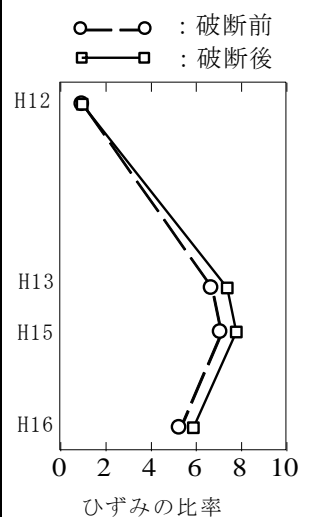
表 3.2-21(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(ST $\phi 6$, 15Hz 以下, 振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 4.0m/s ² , 振動数範囲: 14→7Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 71~81s	破断前 71~75.5s	破断後 77.5~81s	全区間 71~81s	破断前 71~75.5s	破断後 77.5~81s	全区間 71~81s	破断前 71~75.5s	破断後 77.5~81s
A1	37.38	29.07	35.63	2.83	4.46	2.69	1.67	2.55	1.59
A2	33.16	25.13	28.16	2.51	3.85	2.13	1.48	2.21	1.26
A3	62.95	35.51	62.95	4.76	5.45	4.76	2.81	3.12	2.81
A4	9.80	4.08	9.80	—	—	—	—	—	—
A5	12.97	8.38	9.91	—	—	—	—	—	—
A6	46.14	20.92	28.97	3.49	3.21	2.19	2.06	1.84	1.29
A7	37.40	35.98	30.10	2.83	5.52	2.28	1.67	3.16	1.34
A8	61.73	34.59	41.59	4.67	5.31	3.14	2.76	3.04	1.86
A9	16.77	16.23	16.77	1.27	2.49	1.27	0.75	1.43	0.75
A10	15.16	14.25	15.16	1.15	2.19	1.15	0.68	1.25	0.68
A11	34.14	17.50	29.98	2.58	2.68	2.27	1.52	1.54	1.34
A12	27.23	12.05	21.88	2.06	1.85	1.65	1.22	1.06	0.98
A13	6.17	4.69	5.80	0.47	0.72	0.44	0.28	0.41	0.26
A14	4.72	4.67	4.20	0.36	0.72	0.32	0.21	0.41	0.19
A15	13.23	6.52	13.23	1.00	1.00	1.00	0.59	0.57	0.59
A16	22.39	11.38	22.39	1.69	1.75	1.69	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-21(2) 最大ひずみの一覧(ST $\phi 6$, 15Hz 以下, 振動数降順(DOWN))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 71~81s	破断前 71~75.5s	破断後 77.5~81s
H1	24	24	22
H2	54	40	54
H3	300	238(4.4)	300(4.3)
H4	42	36	40
H5	70	54(1.0)	70(1.0)
H6	22	20	20
H7	28	26	28
H8	132	102	132
H9	72	68	68
H10	34	34	34
H11	26	18	26
H12	34	30(1.0)	34(1.0)
H13	250	200(6.7)	250(7.4)
H14	30	22	30
H15	266	214(7.1)	266(7.8)
H16	206	158(5.3)	200(5.9)



H12を1.0とした時に比率

※()内はH5又は、H12に対する比率である。

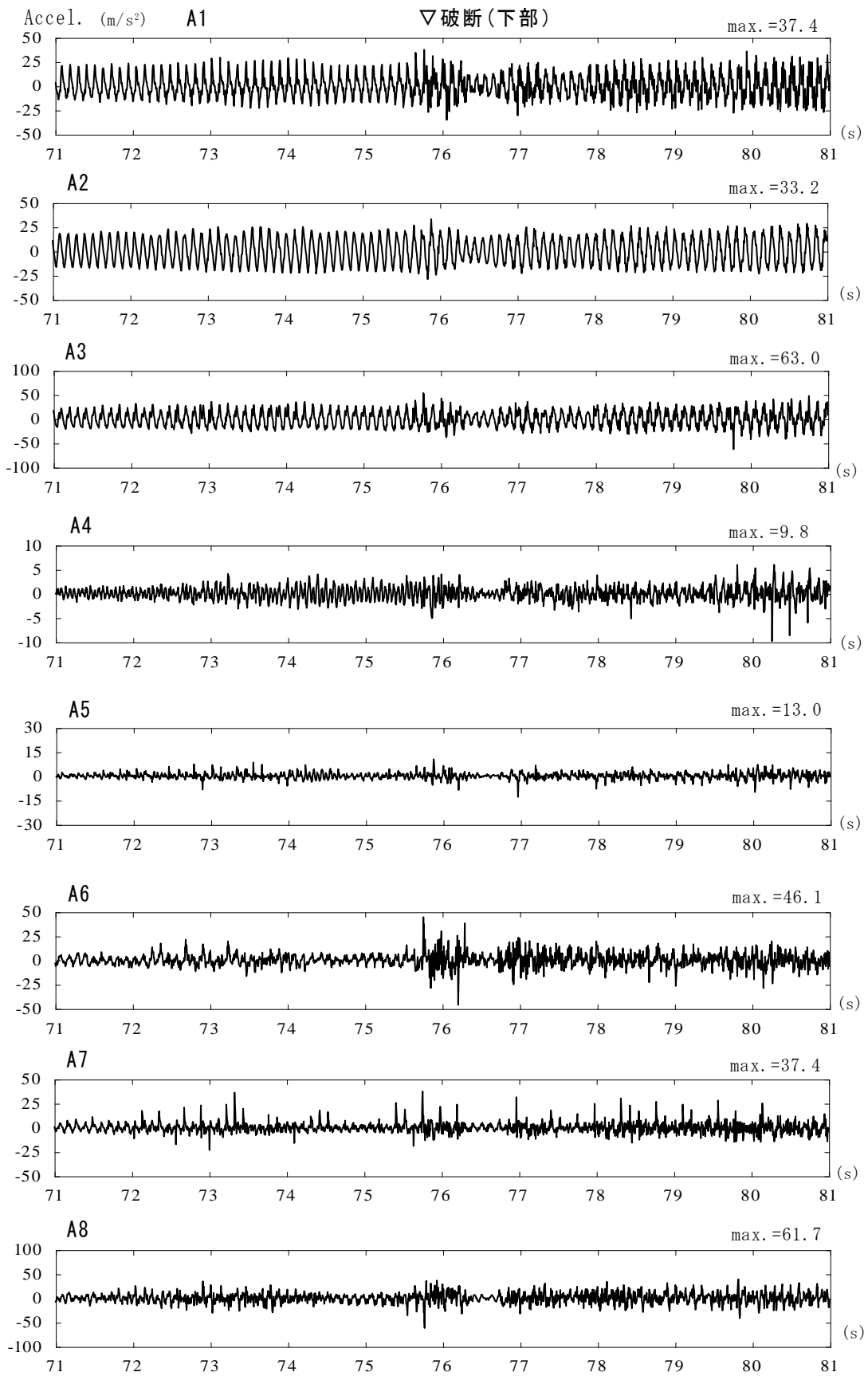


图 3.2-45(1) 加速度時刻歴、A1~A8(ST ϕ 6,15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

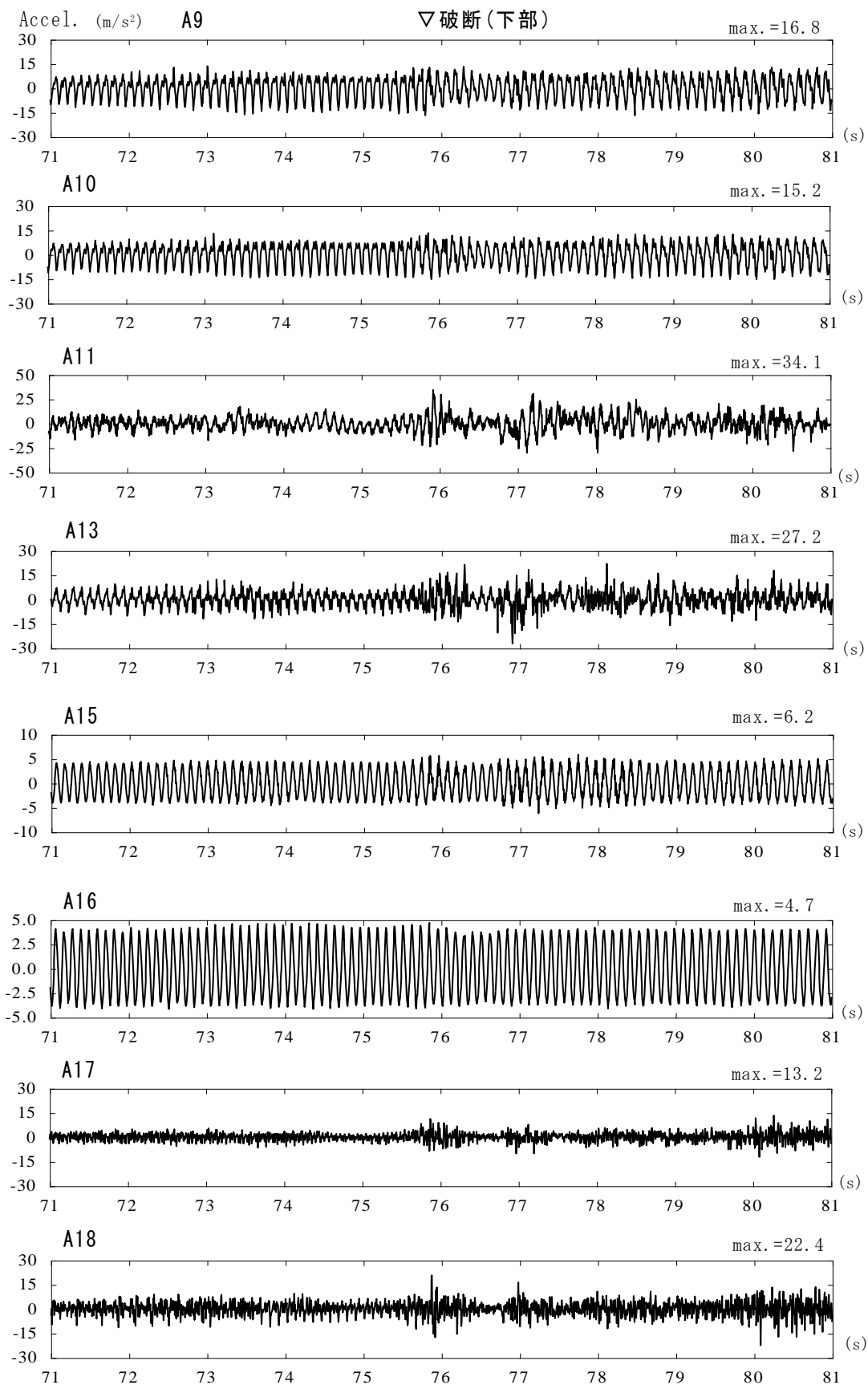


図 3.2-45(2) 加速度時刻歴、A9~A18(ST ϕ 6, 15Hz 以下, 振動数降順(DOWN))

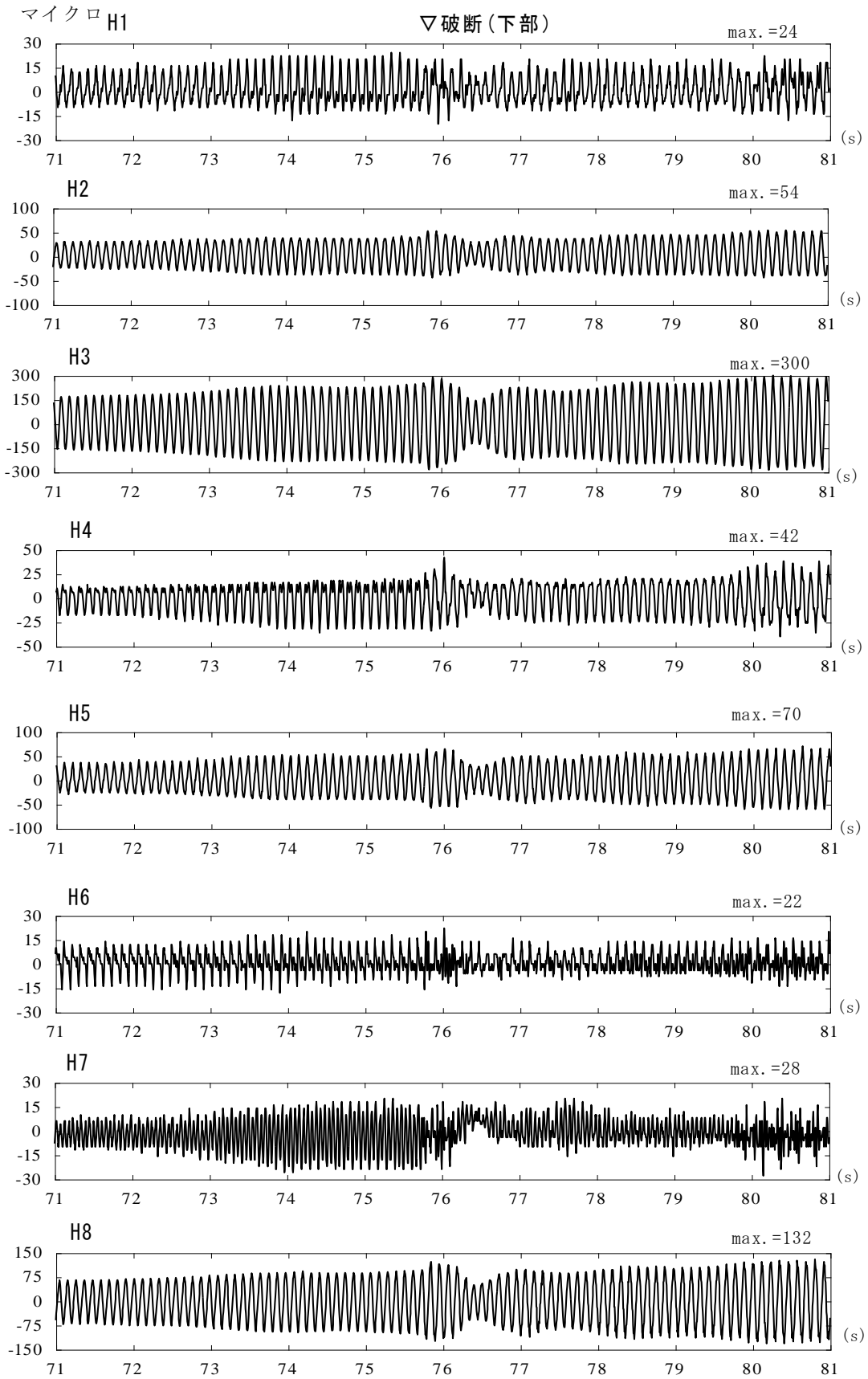


図 3.2-45(3) 配管のひずみ時刻歴、H1～H8(ST ϕ 6, 15Hz 以下, 振動数降順(DOWN))

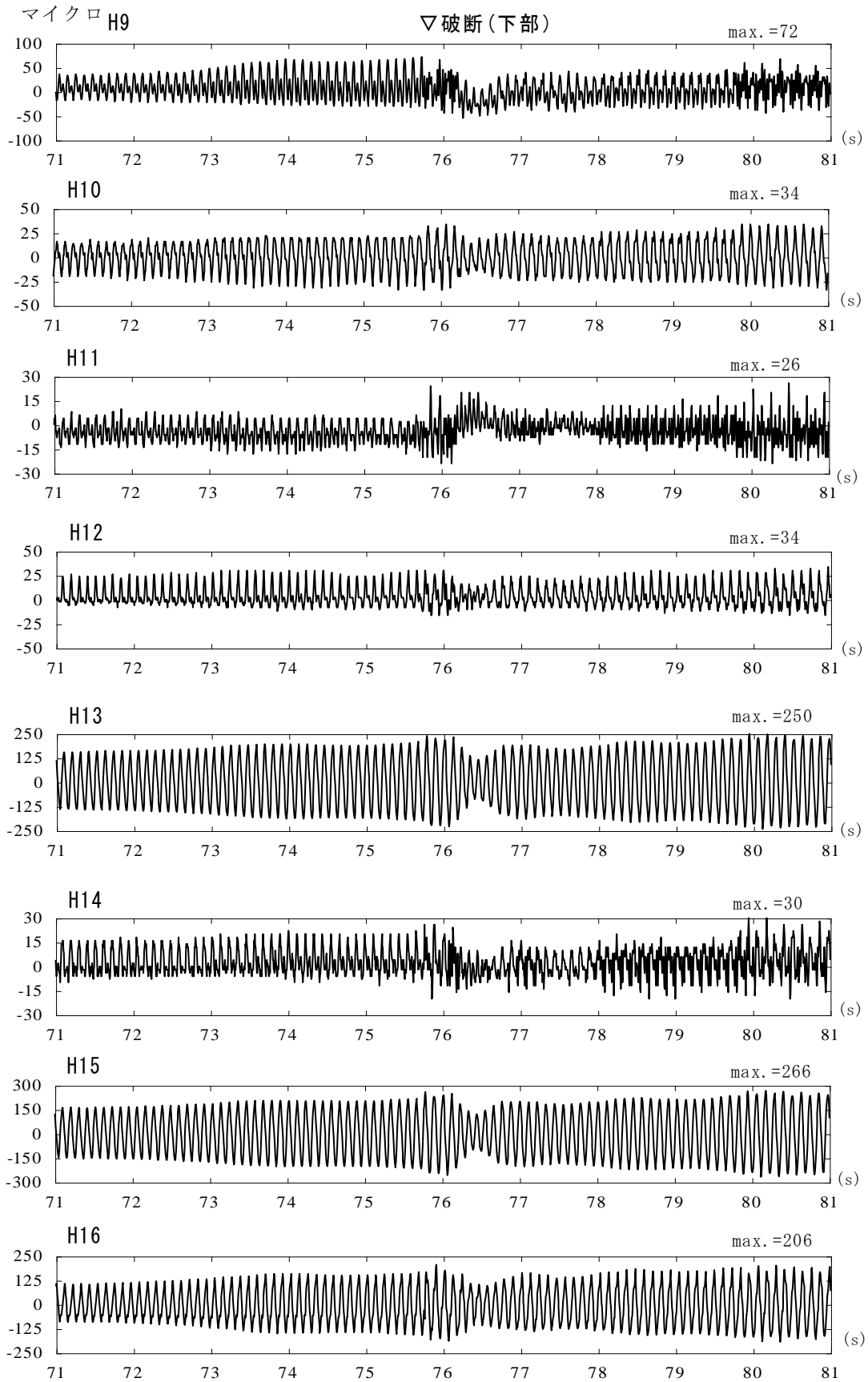


図 3.2-45(4) 配管のひずみ時刻歴、H9~H16(ST φ6,15Hz 以下,振動数降順(DOWN))

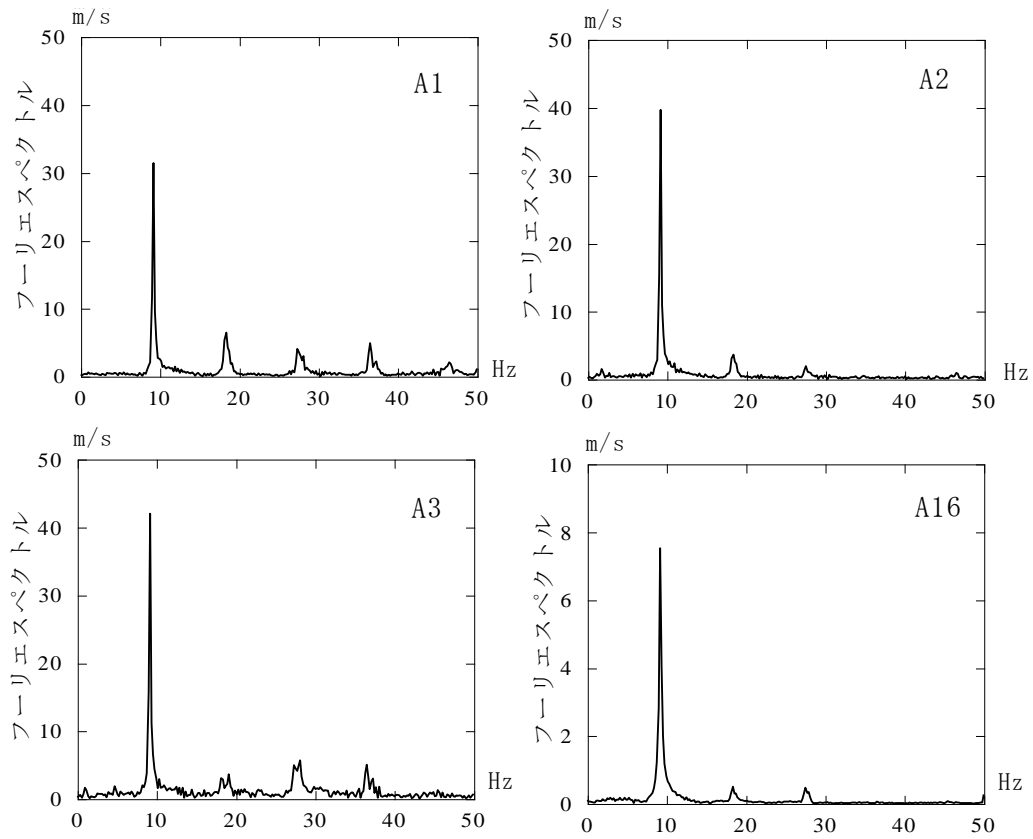


図 3.2-46(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(70.5~75.5s 間隔)

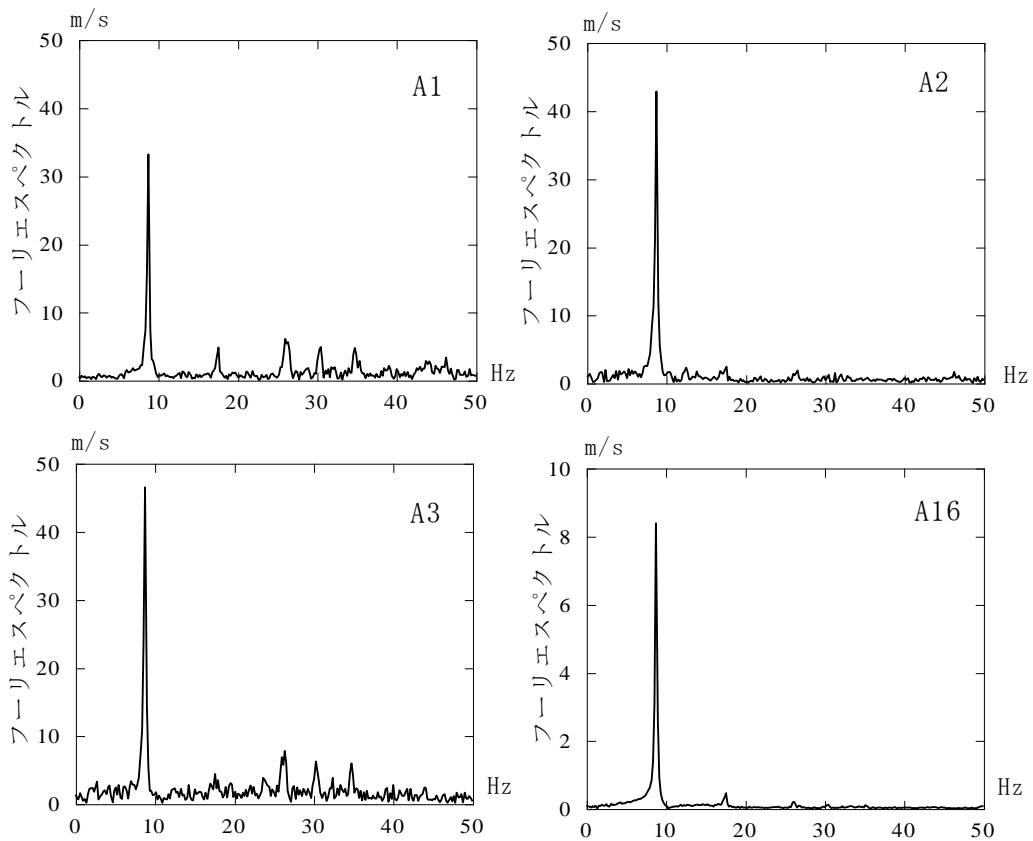


図 3.2-46(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(77.5~82.5s 間隔)

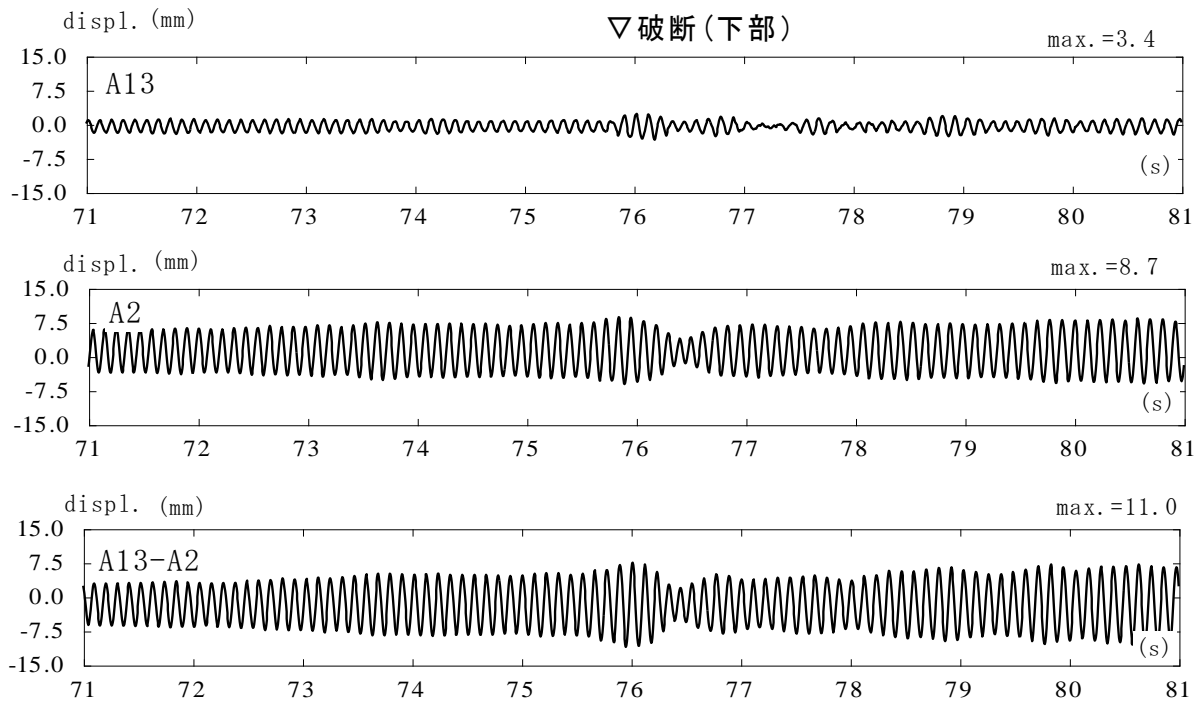


図 3.2-47 サポート A 位置の相対変位時刻歴(ST ϕ 6,15Hz 以下,振動数昇順(DOWN))

3.2.5.2.4 AK(25×15)の15Hz以上での水平加振試験結果

サポートAの破断・亀裂が発生した加振条件について表 3.2-22 に示している。振動数昇順(UP)及び降順(DOWN)の加振試験において破断・亀裂は最大加速度 1.0m/s^2 で発生している。破断・亀裂状況等は図 3.2-48 に示している。破壊状態を見ると、開口の左右の側片が、上方、下方と別々の箇所破断する傾向をみることができる。これは、2次モードでは上方の横方向配管は、両端で逆位相となっているので、その影響を受けている可能性がある。破断・亀裂の発生時刻を中心とした10秒間について検討する。

(1) 振動数昇順(UP)での水平加振試験

同様の表、図を示す。表 3.2-23(1)、(2)は最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。図 3.2-49(1)～(4)は加速度、ひずみの時刻歴であり、図 3.2-50(1)、(2)はフーリエスペクトルである。図 3.2-51は、サポートA部分の相対変位に相当する時刻歴を示している。

2次振動数はサポートAの有無にかかわらず18Hz付近であったので、サポートAの破断前後で、18Hz付近で振動していることがフーリエスペクトルから分かる。時刻歴に破断時のパルス的な波形はほとんど見られず、上述したサポートAの破断形式が1次モードの場合と異なることが一因していると考えられる。フーリエスペクトルから2倍の振動数の影響などを受けていることもわかり、ひずみ時刻歴において、片側に偏る傾向に影響していると可能性がある。

縦方向配管のひずみ度分布(表 3.2-23(2))での、ひずみの比率の分布は破断前後でほとんど同じである。これは、形状が似ているのは、破断前後の2次モード形状に大きな相違がないためと考えられるが、1次モードを対象とした15Hz以下の場合と異なり最も低い位置のH16のひずみ度がH15より大きくなっている。これは、2次モードが下方の横方向配管が大きく振動するので、ロッドレストレイントからの力の向きが変化したためと考えられる。縦方向配管のひずみの比率の大きさも破断前後でほぼ同一である。これは2次モードで上方の横方向配管の振動が1次モードほど大きくないことによると考えられる。最も大きいひずみ度は、下方横方向配管に近いH16の 192μ である。サポートA部分の最大相対変位は2.8mm程度であるが、破断前の最大相対変位は1.0～1.5mm程度であったことが推察される。

(2) 振動数降順(DOWN)での水平加振試験

同様の表、図を示す。表 3.2-24(1)、(2)は最大加速度とその応答倍率及び最大ひずみを示している。図 3.2-52(1)～(4)は加速度、ひずみの時刻歴であり、図 3.2-53(1)、(2)はフーリエスペクトルである。図 3.2-54は、サポートA部分の相対変位に相当する時刻歴を示している。

振動数昇順(UP)と同様に、フーリエスペクトルから18Hz付近で振動していること、特にサポートAの破断・亀裂の発生後に2倍の振動数の成分の影響を受けているなどが分かる。

上方の横方向配管Z方向のひずみ時刻歴における破断に伴い時刻歴の中心軸がシフト傾向は、H9にわずかではあるが、みることができる。縦方向配管のひずみ度分布(表 3.2-24(2))の傾向は、振動数昇順(UP)と同様の傾向である。最も大きいひずみ度は、下方横方向配管に近いH16の 198μ である。

サポートA部分の最大相対変位は2.2mm程度であるが、42秒付近の大規模な破断前の最大相対変位は2.0mm程度であったことが推察される。

表 3.2-22 AK(25×15)の 15Hz 以上加振の結果概要(アクリル板(6 mm,開口 25×15 mm))

	最大加速度 m/s^2	加振条件	試験番号	破断・亀裂状況
U	0.5	15→22Hz, 1分間	2015-1-17-S-6	破断・亀裂なし
	1.0	15→22Hz, 1分間	○2015-1-17-S-7	40.5s付近: 右破断(上部 下部) 左破断(下部)
D	1.0	22→15Hz, 1分間	○2015-1-17-S-8	38.5s付近: 亀裂 42s付近: 右破断(下部) 左破断(上部)

※U: UP D: DOWN ※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号: 2015-1-17-S-7



試験番号: 2015-1-17-S-8

図 3.2-48 サポート A の破壊状況(AK(25×15),15Hz 以上)

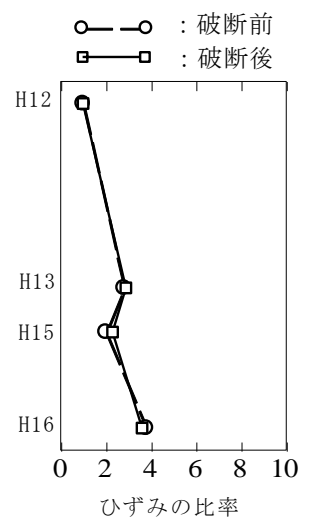
表 3.2-23(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(AK(25×15),15Hz 以上,振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度:1.0m/s ² , 振動数範囲:15→22Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 36~46s	破断前 36~40s	破断後 42~46s	全区間 36~46s	破断前 36~40s	破断後 42~46s	全区間 36~46s	破断前 36~40s	破断後 42~46s
A1	78.69	78.69	63.39	16.78	26.95	14.37	42.08	52.81	33.90
A2	41.00	37.97	41.00	8.74	13.00	9.30	21.93	25.48	21.93
A3	101.54	76.33	96.91	21.65	26.14	21.98	54.30	51.23	51.82
A4	17.70	15.43	12.61	—	—	—	—	—	—
A5	31.62	26.13	31.62	—	—	—	—	—	—
A6	134.66	85.30	109.44	28.71	29.21	24.82	72.01	57.25	58.52
A7	118.97	118.97	105.43	25.37	40.74	23.91	63.62	79.85	56.38
A8	143.17	98.51	135.29	30.53	33.74	30.68	76.56	66.11	72.35
A9	53.97	40.66	48.13	11.51	13.92	10.91	28.86	27.29	25.74
A10	43.11	37.63	43.11	9.19	12.89	9.78	23.05	25.26	23.05
A11	51.30	34.66	50.95	10.94	11.87	11.55	27.43	23.26	27.25
A12	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A13	40.63	29.91	40.63	8.66	10.24	9.21	21.73	20.07	21.73
A14	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A15	4.69	2.92	4.41	1.00	1.00	1.00	2.51	1.96	2.36
A16	1.87	1.49	1.87	0.40	0.51	0.42	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-23(2) 最大ひずみの一覧(AK(25×15),15Hz 以上,振動数昇順(UP))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 36~46s	破断前 36~40s	破断後 42~46s
H1	62	48	22
H2	20	20	10
H3	96	74(3.7)	96(3.7)
H4	70	38	32
H5	26	20(1.0)	26(1.0)
H6	42	30	42
H7	64	36	30
H8	72	64	72
H9	44	40	44
H10	42	26	42
H11	74	32	52
H12	54	40(1.0)	54(1.0)
H13	156	110(2.8)	156(2.9)
H14	80	36	48
H15	122	80(2.0)	122(2.3)
H16	192	152(3.8)	192(3.6)



H12を1.0とした時の比率

※()内はH5又は、H12に対する比率である。

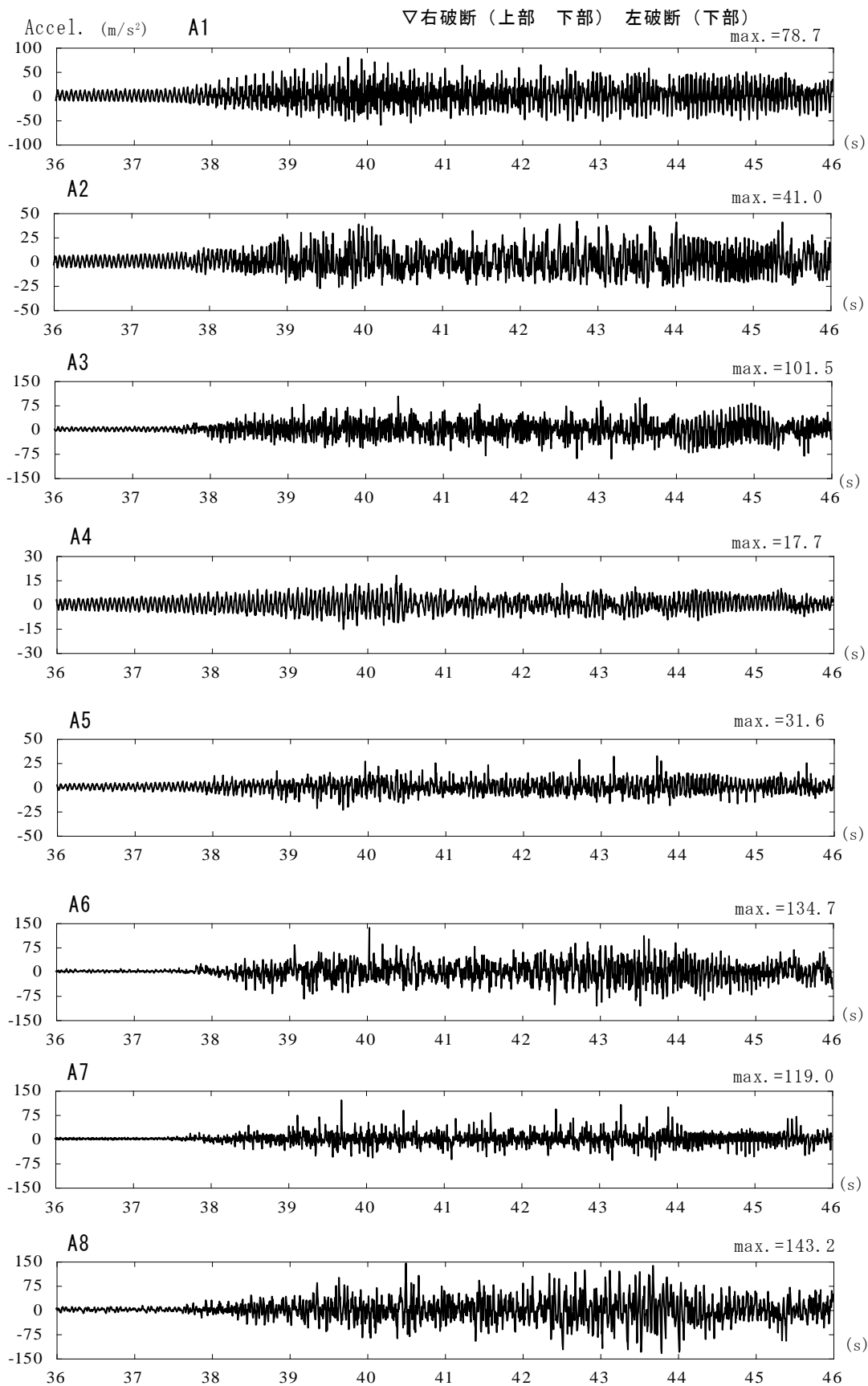


图 3.2-49(1) 加速度時刻歴、A1~A8(AK(25×15),15Hz 以上,振動数昇順(UP))

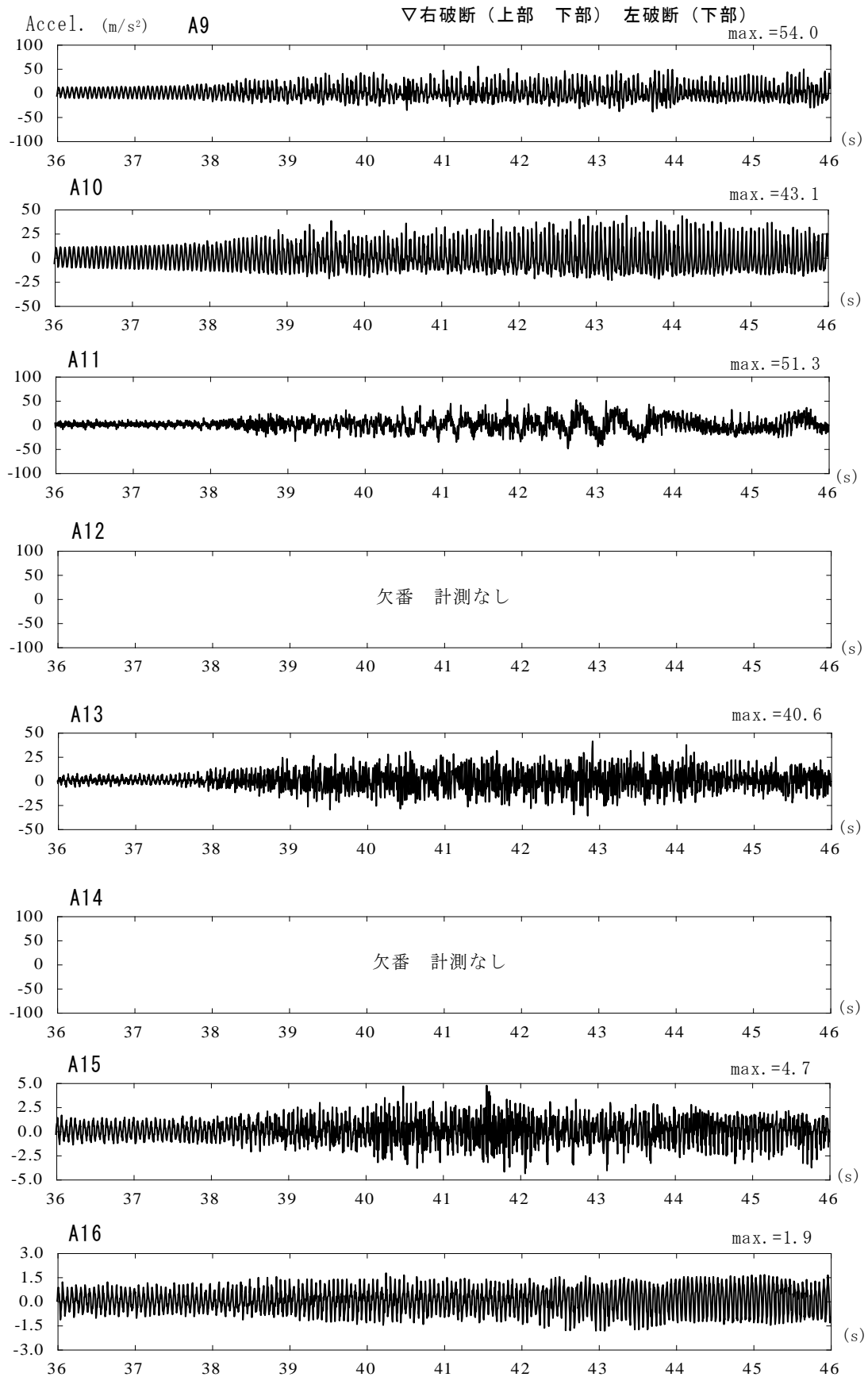


図 3.2-49(2) 加速度時刻歴、A9～A16(AK(25×15),15Hz 以上.振動数昇順(UP))

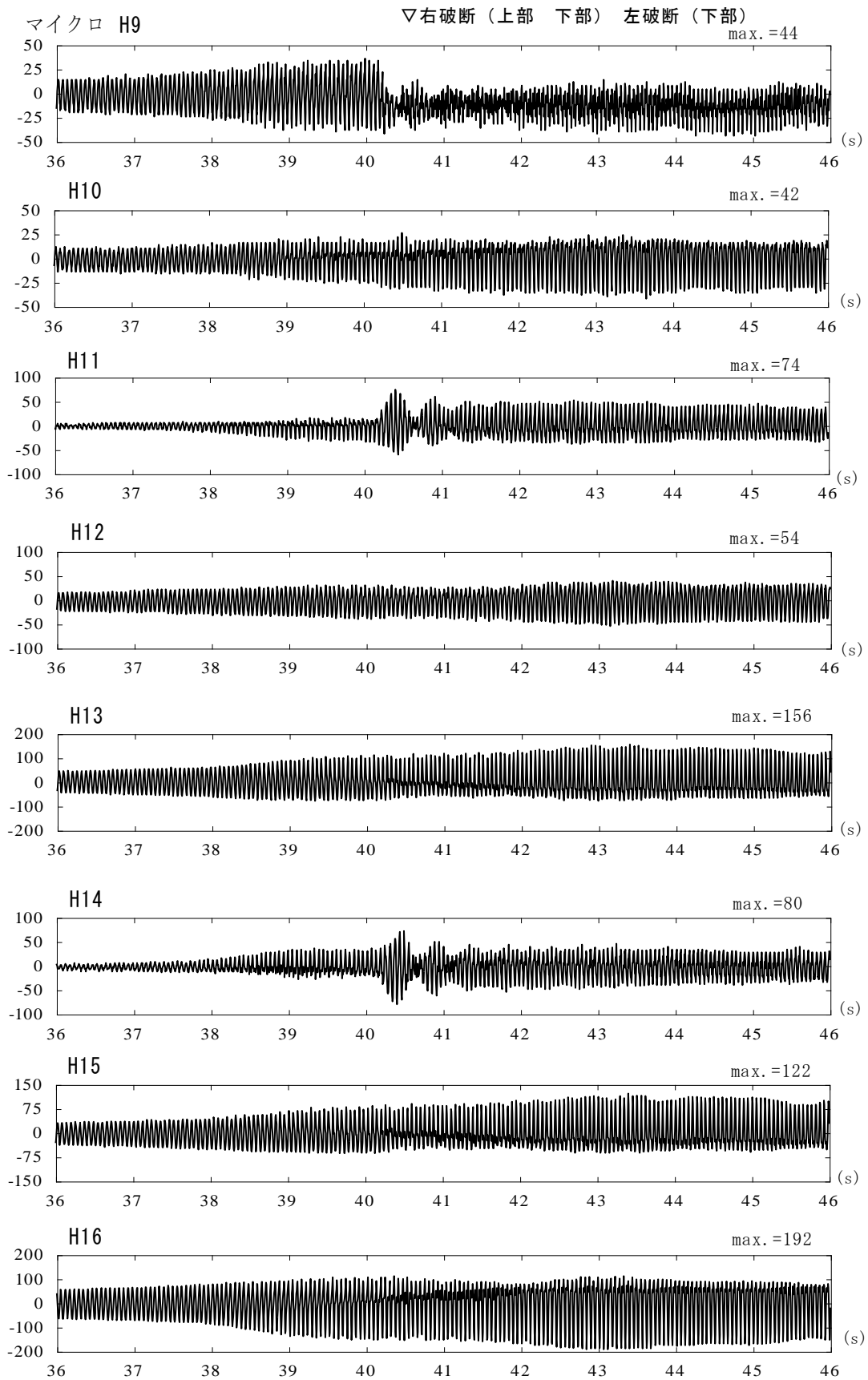


図 3.2-49(4) 配管のひずみ時刻歴、H9~H16(AK(25×15),15Hz 以上,振動数昇順(UP))

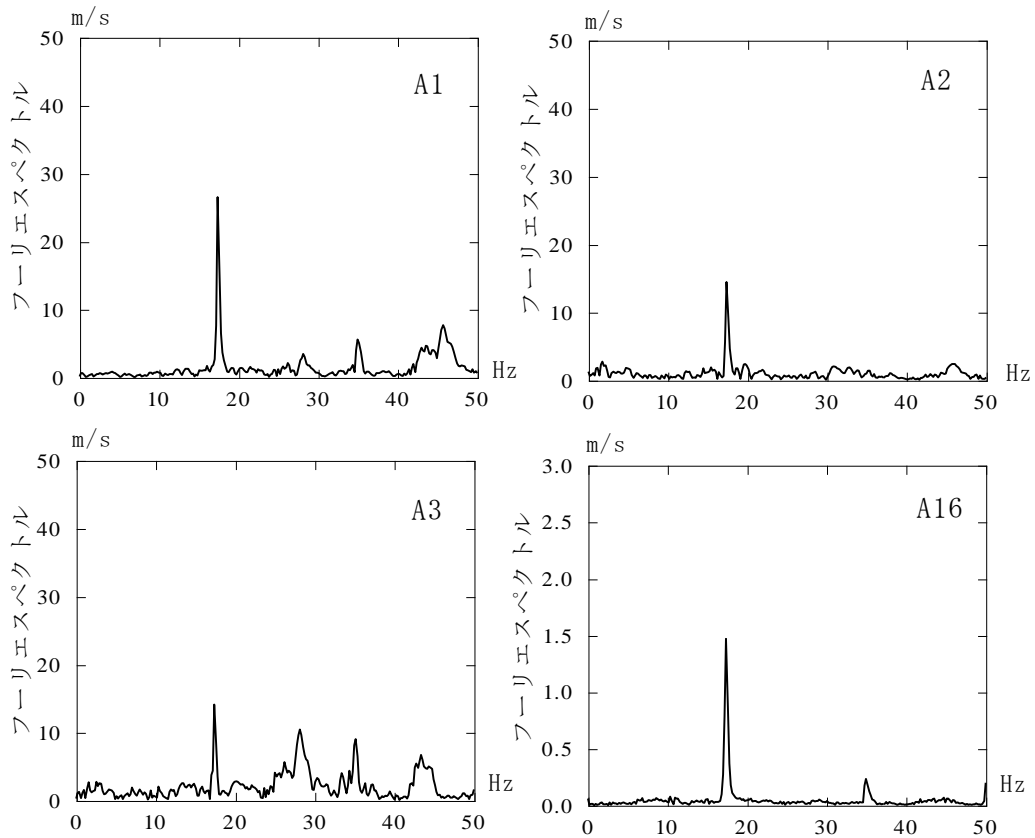


図 3.2-50(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(35~40s 間隔)

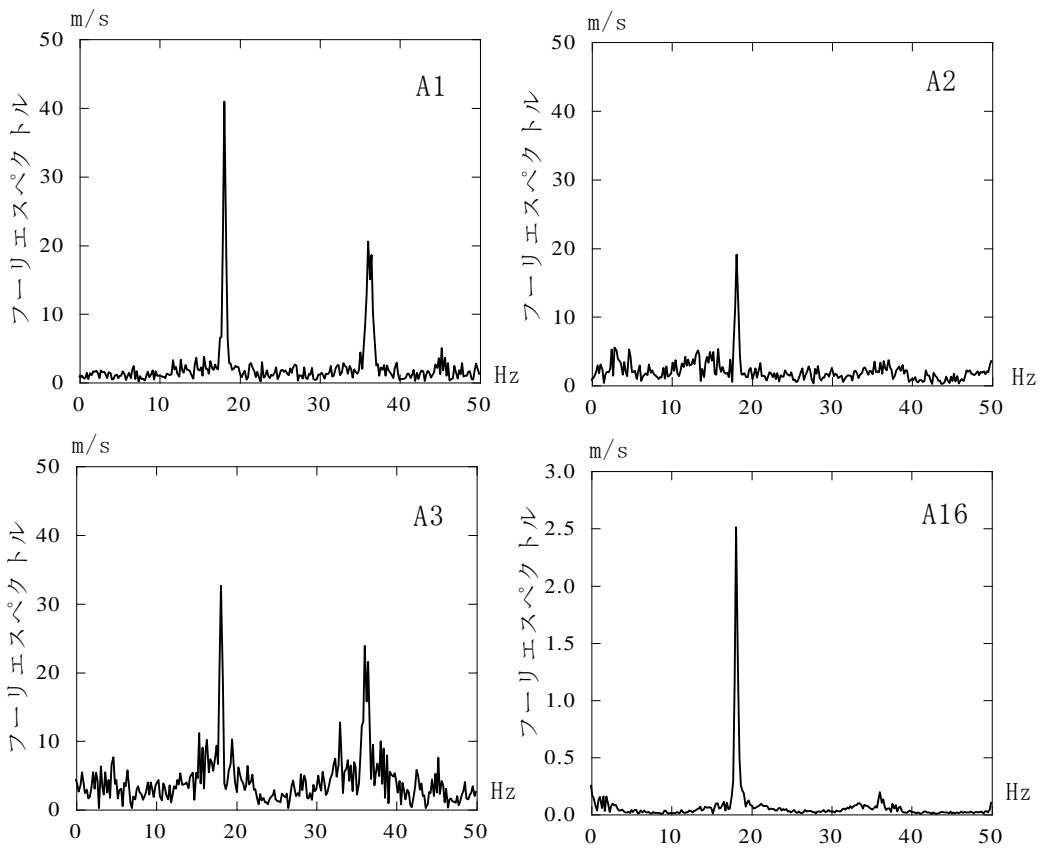


図 3.2-50(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(42~47s 間隔)

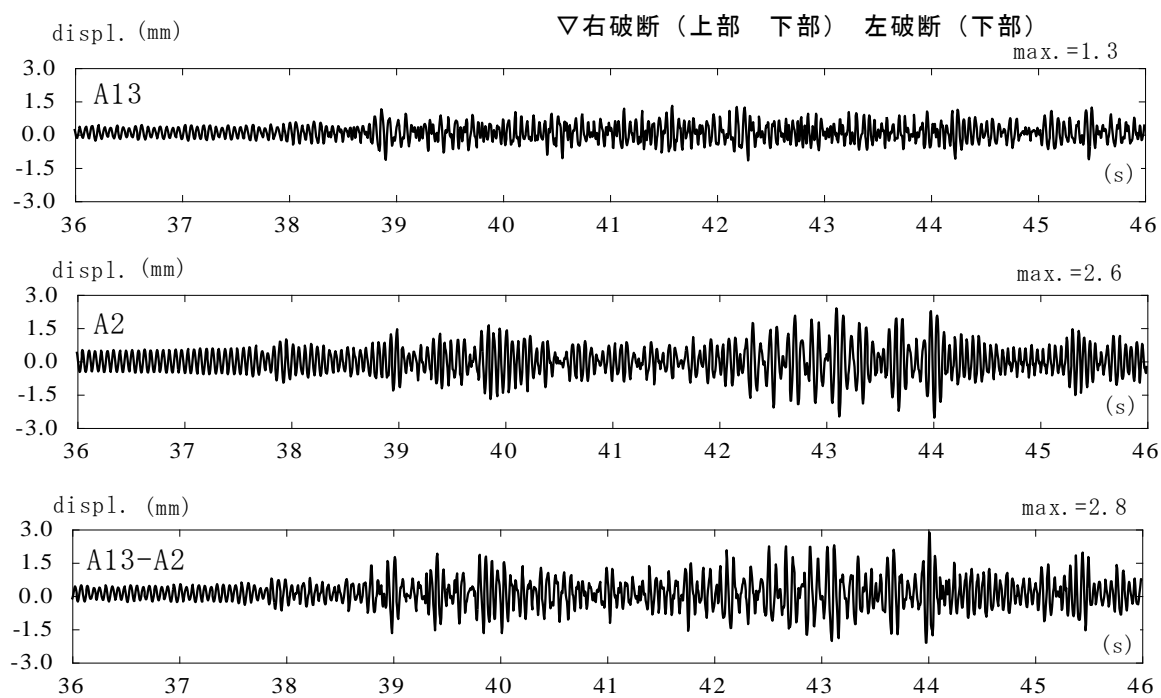


図 3.2-51 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),15Hz 以上,振動数昇順(UP))

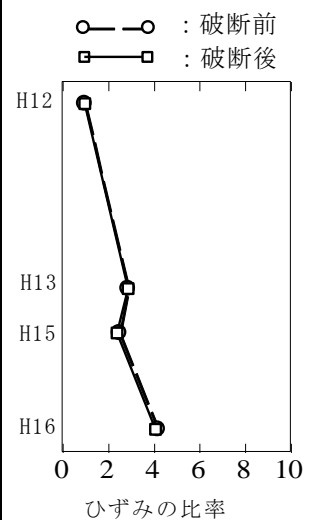
表 3.2-24(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(AK(25×15),15Hz 以上,振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.0m/s ² , 振動数範囲: 22→15Hz									
加速度計	最大加速度 (m/s ²)			応答倍率1			応答倍率2		
	全区間 34~44s	破断前 34~38s	破断後 40~44s	全区間 34~44s	破断前 34~38s	破断後 40~44s	全区間 34~44s	破断前 34~38s	破断後 40~44s
A1	51.58	39.34	51.58	12.61	19.28	12.61	29.14	24.74	29.14
A2	45.28	21.75	45.28	11.07	10.66	11.07	25.58	13.68	25.58
A3	76.84	48.54	76.84	18.79	23.79	18.79	43.41	30.53	43.41
A4	11.89	10.16	11.89	—	—	—	—	—	—
A5	32.07	19.73	32.07	—	—	—	—	—	—
A6	116.95	34.87	116.95	28.59	17.09	28.59	66.07	21.93	66.07
A7	92.61	32.24	92.61	22.64	15.80	22.64	52.32	20.28	52.32
A8	144.05	61.30	144.05	35.22	30.05	35.22	81.38	38.55	81.38
A9	61.80	28.44	61.80	15.11	13.94	15.11	34.92	17.89	34.92
A10	40.55	29.41	40.55	9.91	14.42	9.91	22.91	18.50	22.91
A11	49.22	30.16	49.22	12.03	14.78	12.03	27.81	18.97	27.81
A12	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A13	33.93	15.18	33.93	8.30	7.44	8.30	19.17	9.55	19.17
A14	欠番	欠番	欠番	—	—	—	—	—	—
A15	4.09	2.04	4.09	1.00	1.00	1.00	2.31	1.28	2.31
A16	1.77	1.59	1.77	0.43	0.78	0.43	1.00	1.00	1.00

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

表 3.2-24(2) 最大ひずみの一覧(AK(25×15),15Hz 以上,振動数降順(DOWN))

ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 34~44s	破断前 34~38s	破断後 40~44s
H1	40	40	24
H2	10	10	8
H3	92	78(3.9)	92(3.8)
H4	42	42	30
H5	24	20(1.0)	24(1.0)
H6	38	32	38
H7	42	38	28
H8	66	42	66
H9	42	20	42
H10	36	30	36
H11	50	50	48
H12	48	38(1.0)	48(1.0)
H13	138	112(2.9)	138(2.9)
H14	52	50	46
H15	114	94(2.5)	114(2.4)
H16	198	158(4.2)	198(4.1)



H12を1.0とした時の比率

※()内はH5又は、H12に対する比率である。

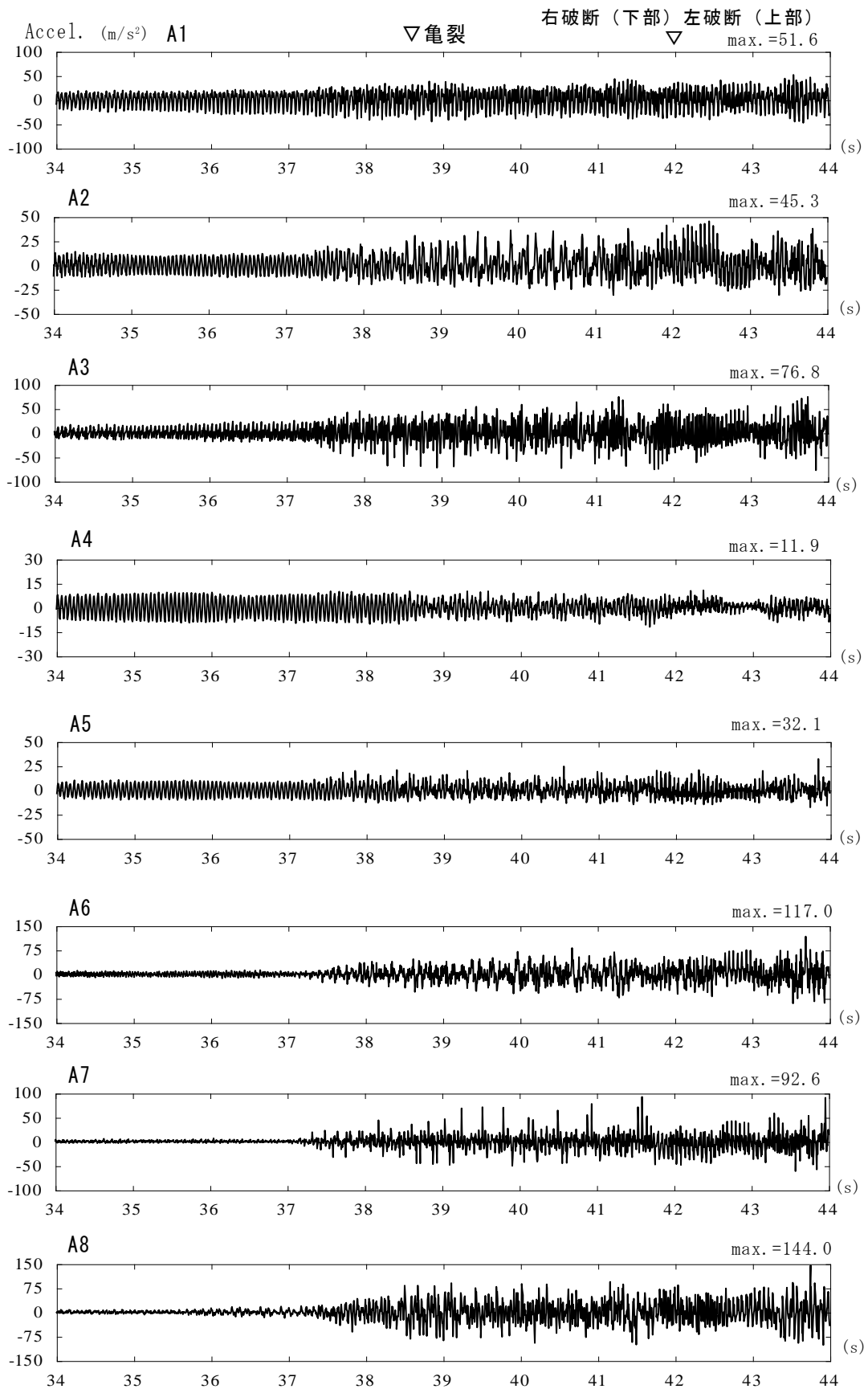


図 3.2-52(1) 加速度時刻歴、A1~A8(AK(25×15),15Hz 以上,振動数降順(DOWN))

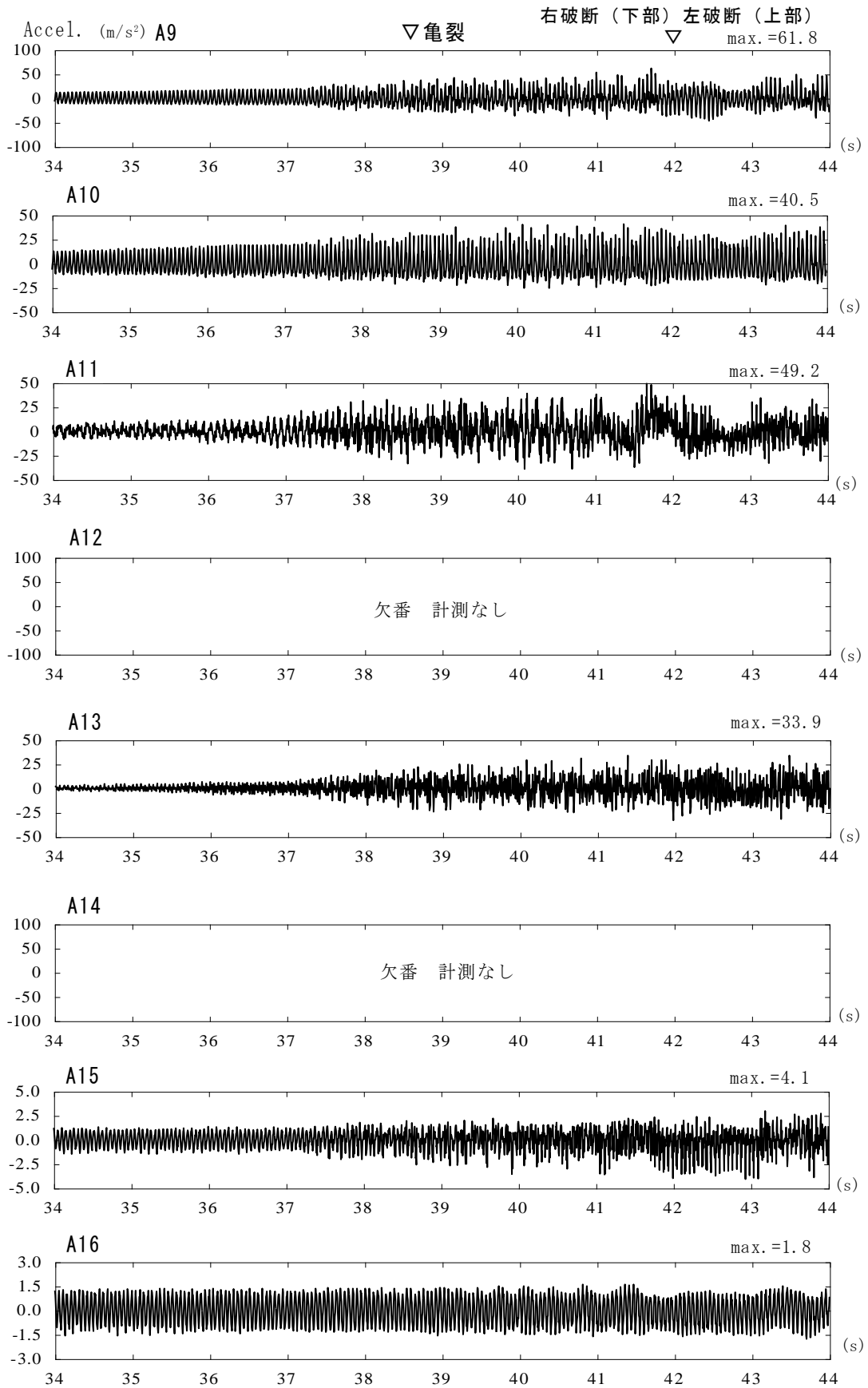


図 3.2-52(2) 加速度時刻歴、A9~A16(AK(25×15), 15Hz 以上, 振動数降順(DOWN))

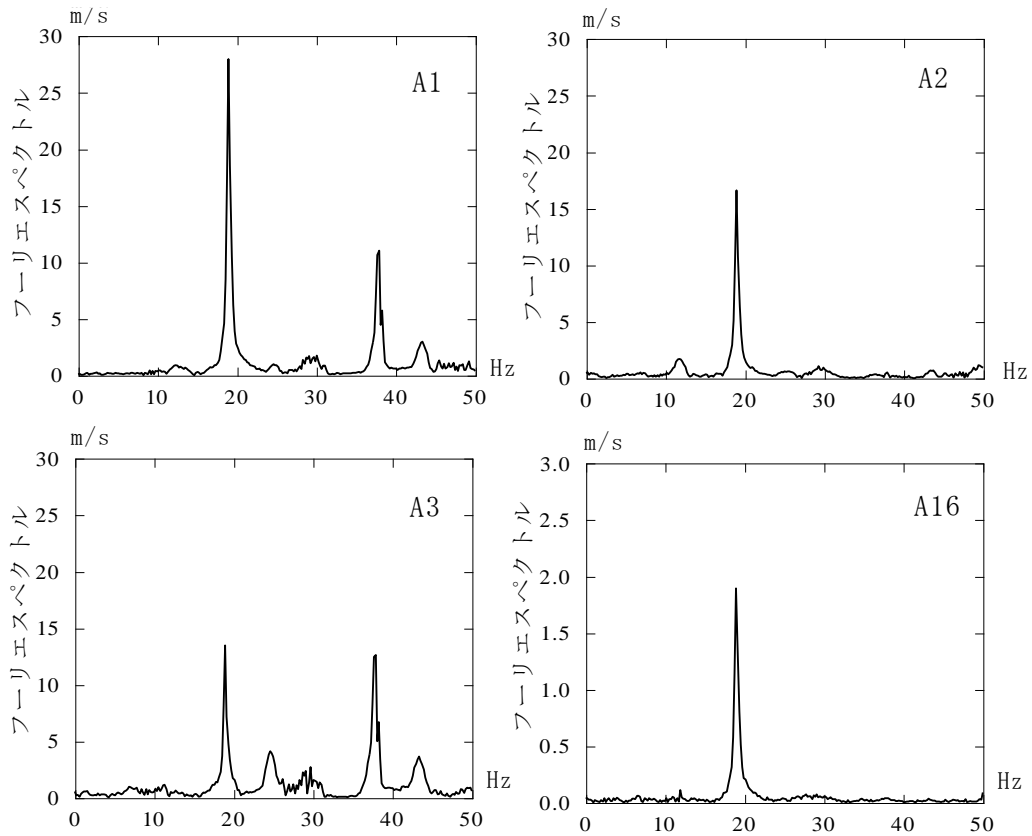


図 3.2-53(1) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断前のフーリエスペクトル(33~38s 間隔)

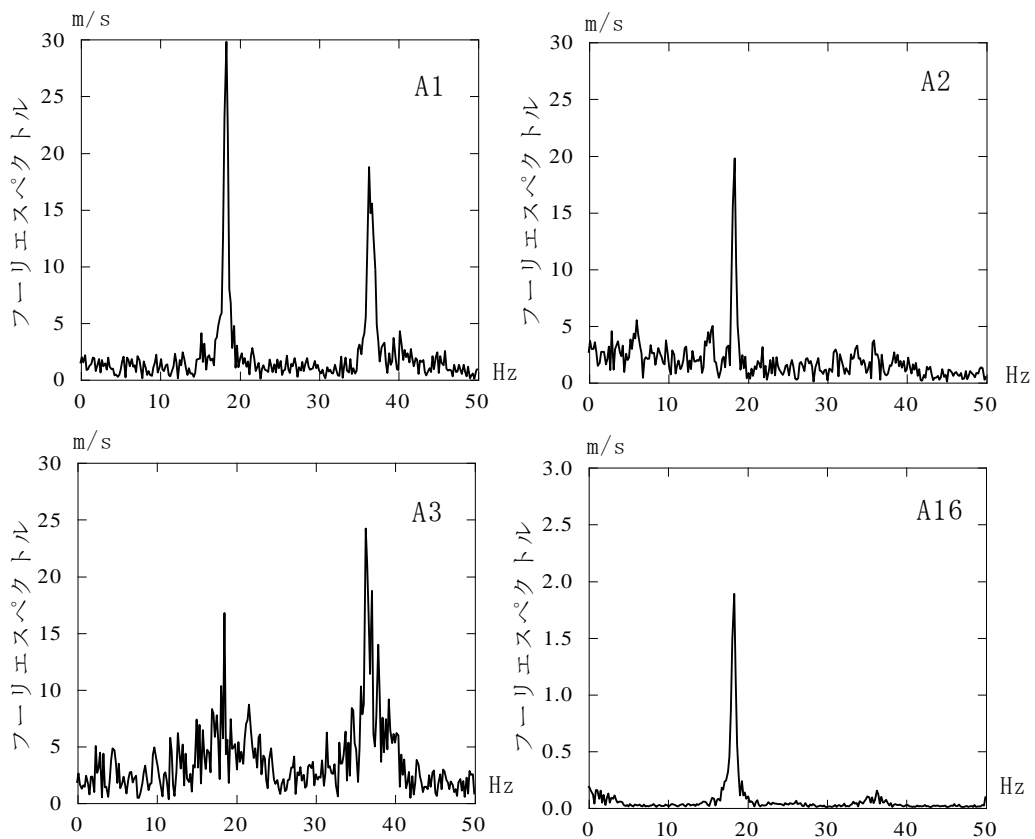


図 3.2-53(2) A1,A2,A3,A16 の亀裂・破断後のフーリエスペクトル(40~45s 間隔)

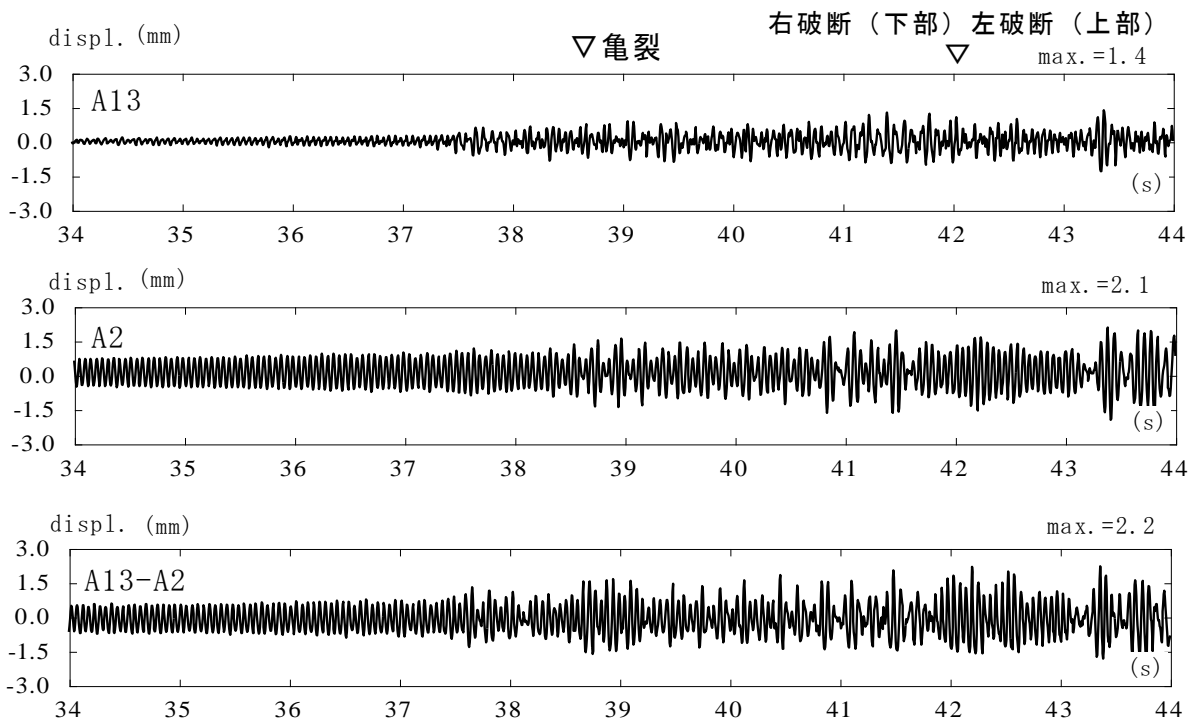


図 3.2-54 サポートA位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),15Hz以上,振動数降順(DOWN))

3.2.5.3 地震波入力による水平加振試験

3.2.5.3.1 水平加振試験及び結果の概要

(1) 水平加振試験概要

サポートAの損傷発生を対象とした地震波入力の水平振試験を実施する。

振動台水平実験には3.2.4.2で示した4つの地震動を用いるが、振動台で加振可能な最大変位との関係で、1.5Hz以下をカットして使用している。

加振方向は水平X方向のみである。

(2) 水平加振結果の一覧

サポートAとして4種類のアクリル板と鋼棒を対象とする。

倍率100%を上限に入力地震動の倍率を20%間隔で増大させる試験を行い、サポートAが破断した倍率で終了する。サポートAの破断・亀裂に関する実験結果の一覧を表3.2-25に示す。図中において赤線で囲った条件が、サポートAに破断・亀裂が生じた加振条件である。

鋼棒は、4つの地震動共に100%でも破断しなかった。n05-ns1000ではどのサポートAにおいても破断しなかった。n05-ew1000では開口25×15mm(AK(25×15))のアクリル板のサポートA、mwave-01では開口25×12.5mm(AK(25×12.5))、25×15mm(AK(25×15))のアクリル板のサポートA、mwave-02では4種類のアクリル板のサポートAが破断する結果となった。

(3) 本報告に掲載するアクリル板のサポートA及び入力地震動

アクリル板のサポートAは4種類について実施したが、開口25×15mm(AK(25×15))、20×15mm(AK(20×15))の結果について掲載する。また、入力地震動においては、n05-ns1000では、すべてのサポートAにおいても破断・亀裂が生じなかったため、本報告では省略する。

全アクリル板及び鋼棒のサポートA、全地震動による試験結果は添付資料(DVDに収録)に示す。

表 3.2-25(1) サポート A の破断に関する水平加振試験の結果一覧

サポートA		地震波			
		mwave-01	mwave-02	n05-ns1000	n05-ew1000
アクリル板 (厚さ6mm)	開口: 25 × 12.5 AK(25 × 12.5)	試験番号: 2015-2-16-E-3 入力波の倍率: 80%	試験番号: 2015-2-16-E-32 入力波の倍率: 60%	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず
	開口: 25 × 15 AK(25 × 15)	試験番号: 2015-2-14-E-62 入力波の倍率: 60% 試験番号: 2015-2-14-E-63 入力波の倍率: 80%	試験番号: 2015-2-11-E-54 入力波の倍率: 60%	— 100%でも破断せず	試験番号: 2015-2-11-E-14 入力波の倍率: 100%
	開口: 20 × 12.5 AK(20 × 12.5)	— 100%でも破断せず	試験番号: 2015-2-16-E-24 入力波の倍率: 100%	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず
	開口: 20 × 15 AK(20 × 15)	— 100%でも破断せず	試験番号: 2015-2-11-E-64 入力波の倍率: 100%	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず
鋼棒 (直径6mm)	両端で直径3mm STφ 6	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず	— 100%でも破断せず

: 破断・破断の生じた加振条件

表 3.2-25(2) 本報告に掲載する水平加振条件の一覧

サポートA		地震波		
		mwave-01	mwave-02	n05-ew1000
アクリル板 (厚さ6mm)	開口: 25 × 15 AK(25 × 15)	試験番号: 2015-2-14-E-62 入力波の倍率: 60% 試験番号: 2015-2-14-E-63 入力波の倍率: 80%	試験番号: 2015-2-11-E-54 入力波の倍率: 60%	試験番号: 2015-2-11-E-14 入力波の倍率: 100%
	開口: 20 × 15 AK(20 × 15)	入力波の倍率: 100%	試験番号: 2015-2-11-E-64 入力波の倍率: 100%	入力波の倍率: 100%
鋼棒 (直径6mm)	両端で直径3mm STφ 6	入力波の倍率: 100%	入力波の倍率: 100%	入力波の倍率: 100%

3.2.5.3.2 mwave-01による加振試験結果

mwave-01 入力での試験で破断・亀裂が発生した加振条件を表 3.2-26 に示している。sin 波入力試験と同様に表中の破断・亀裂の発生時刻は、時刻歴波形の変化と試験状況を撮影した動画を参考として設定している。また、サポート A の破断・亀裂状況等は図 3.2-55 に示している。

AK(25×15)、AK(20×15)、ST φ6 の 3 つのサポート A において、破断・亀裂の生じた試験結果を示すが、破断・亀裂の発生しないサポート A では 100% 入力の試験結果を示す。

(1) AK(25×15)のサポート A

AK(25×15)のサポート A では、倍率 60%と 80%の 2 ケースで破断・亀裂は発生している。図 3.2-55 の破断状況に見られるように、60%では開口の片側で下端に亀裂が発生しているが、80%では両側の部分が完全に破断し分離した状態となっている。ここでは、この損傷程度が及ぼす影響を検討するため 2 ケースを掲載する。

1) 倍率 60%入力による試験結果

表 3.2-27 に最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を示す。応答倍率は sin 波入力と同様に、最大加速度の比率で A15 又は A16 を基準としているが、sin 波入力の場合のように破断前後で分けることなく継続時間を通した最大加速度に対してのみ算出している。図 3.2-56(1)～(2)は、計測した 16ch の加速度である。ひずみの時刻歴は、表 3.2-27 の最大ひずみの一覧に見られるように比較的小さいのでここでは省略する。図 3.2-57 は、加速度計 A1, A2, A3 と A16 のフーリエスペクトルであり、図 3.2-58 は、A13(支梁 H-100 の先端)と A2(上方向横方向配管の中央)の 2 つの加速度計の記録をバンドパスフィルター通して積分した変位時刻歴と両者の差として求めた相対変位時刻歴である。相対変位時刻歴はサポート A が受ける変位に相当するとみなしている。

時刻歴から、亀裂の発生した時刻にパルス的な波形は発生していることが、これは、後述する破断・亀裂の発生していない AK(20×15)又は ST φ6 でも、この時刻にパルス的な波形が見られるので破断の影響かどうかは判断できない。フーリエスペクトルから、開口付きアクリル板のサポート A による 1 次振動数である 13Hz 付近で振動していることが分かる。サポート A 部分の最大相対変位 2.5mm 程度である。最も大きいひずみ度は、ロッドストレインの支持点付近の H13 で 108μ である。

2) 倍率 80%入力による試験結果

同様の表、図を示す。表 3.2-28 に最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を示す。図 3.2-59(1)～(4)に加速度、ひずみの時刻歴、図 3.2-60 にフーリエスペクトル、図 3.2-61 にサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。時刻歴波形から左右が破断して分離する 19.2 秒付近から応答が急激に大きくなっており、サポート A なしの 1 次振動数である 8Hz 付近で振動していることがフーリエスペクトルからわかる。これは、3.2.4 に示した地震応答スペクトルに見られる mwave-01 の卓越成分と一致したために発生したものと考えられる。この影響は、A2 の最大加速度の応答倍率は 4.8 程度であり、60% 入力の 2.0 程度より 2 倍以上であることも見る事ができる。サポート A 部分の最大相対変位は共振の影響で発生しているが 14.5mm 程度である。

上方の横方向配管の H7～H11 のひずみ時刻歴において、破断に伴い時刻歴の中心軸がシフトする傾

向は H11 に見ることが出来る。最も大きいひずみ度は、共振の影響で発生しているが H3 の 482μ である。

(2) AK(20×15)及び STφ6 のサポート A

AK(20×15)、STφ6 のサポート A では、倍率 100%を入力しても破断・亀裂は発生しなかったため倍率 100%入力時の結果を示す。

表 3.2-29、表 3.2-30 にそれぞれの最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を、図 3.2-62(1)～(4)、図 3.2-65(1)～(4)にそれぞれの加速度、ひずみの時刻歴を、図 3.2-63、図 3.2-66 にそれぞれのフーリエスペクトルを、図 3.2-64、図 3.2-67 にそれぞれのサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。2つのケース共にサポート A は破断していないので、12～13Hz 付近の影響を大きく受けて振動していることがわかる。サポート A 部分の最大相対変位は、AK(20×15)で 4.5mm 程度、STφ6 で 3.7mm 程度である。最も大きいひずみ度は、AK(20×15)で H13,H15 の 166μ 、STφ6 で H3 の 192μ である。

表 3.2-26 mwave-01 入力の加振結果の概要

サポートA	地震波 mwave-01		破断・亀裂状況
	倍率(%)	試験番号	
アクリル板 25×15mm AK(25×15)	40	2015-2-14-E-61	破断・亀裂なし
	60	○2015-2-14-E-62	19.63s付近:右亀裂(下部)
	80	○2015-2-14-E-63	19.19s付近:左右破断(上部 下部)
アクリル板 20×15mm AK(20×15)	40	2015-2-11-E-1	破断・亀裂なし
	60	2015-2-11-E-2	破断・亀裂なし
	80	2015-2-11-E-3	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-11-E-4	破断・亀裂なし
鋼棒直径6mm ST(φ6)	40	2015-2-14-E-2	破断・亀裂なし
	60	2015-2-14-E-3	破断・亀裂なし
	80	2015-2-14-E-4	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-14-E-5	破断・亀裂なし

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号:2015-2-14-E-62



試験番号:2015-2-14-E-63



試験番号:2015-2-14-E-5(破断・亀裂なし)

図 3.2-55 サポート A の破断・亀裂状況等(mwave-01 入力)

表 3.2-27 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(25×15),mwave-01(60%))

地震波	mwave-01 倍率60%					
	加速度計	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1		19.02	2.45	2.55	H1	16
A2		15.51	2.00	2.08	H2	18
A3		37.23	4.80	4.98	H3	98
A4		4.45	—	—	H4	18
A5		5.86	—	—	H5	10
A6		23.61	3.04	3.16	H6	14
A7		24.36	3.14	3.26	H7	14
A8		18.83	2.43	2.52	H8	42
A9		9.85	1.27	1.32	H9	14
A10		8.95	1.15	1.20	H10	18
A11		15.08	1.94	2.02	H11	18
A13		12.05	1.55	1.61	H12	14
A15		7.75	1.00	1.04	H13	108
A16		7.47	0.96	1.00	H14	22
A17		8.92	—	—	H15	106
A18		10.86	—	—	H16	50

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

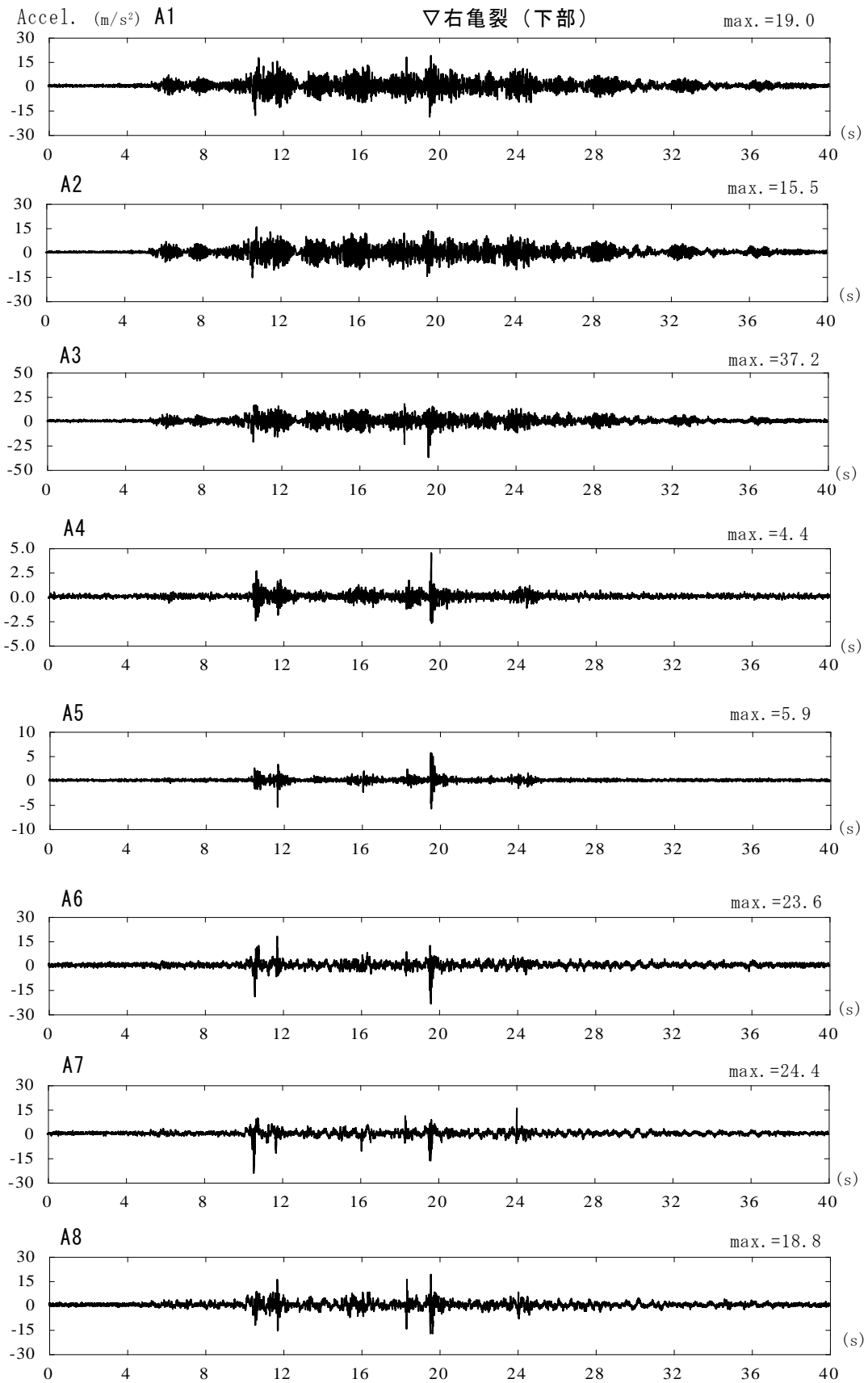


图 3.2-56(1) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-01(60%))

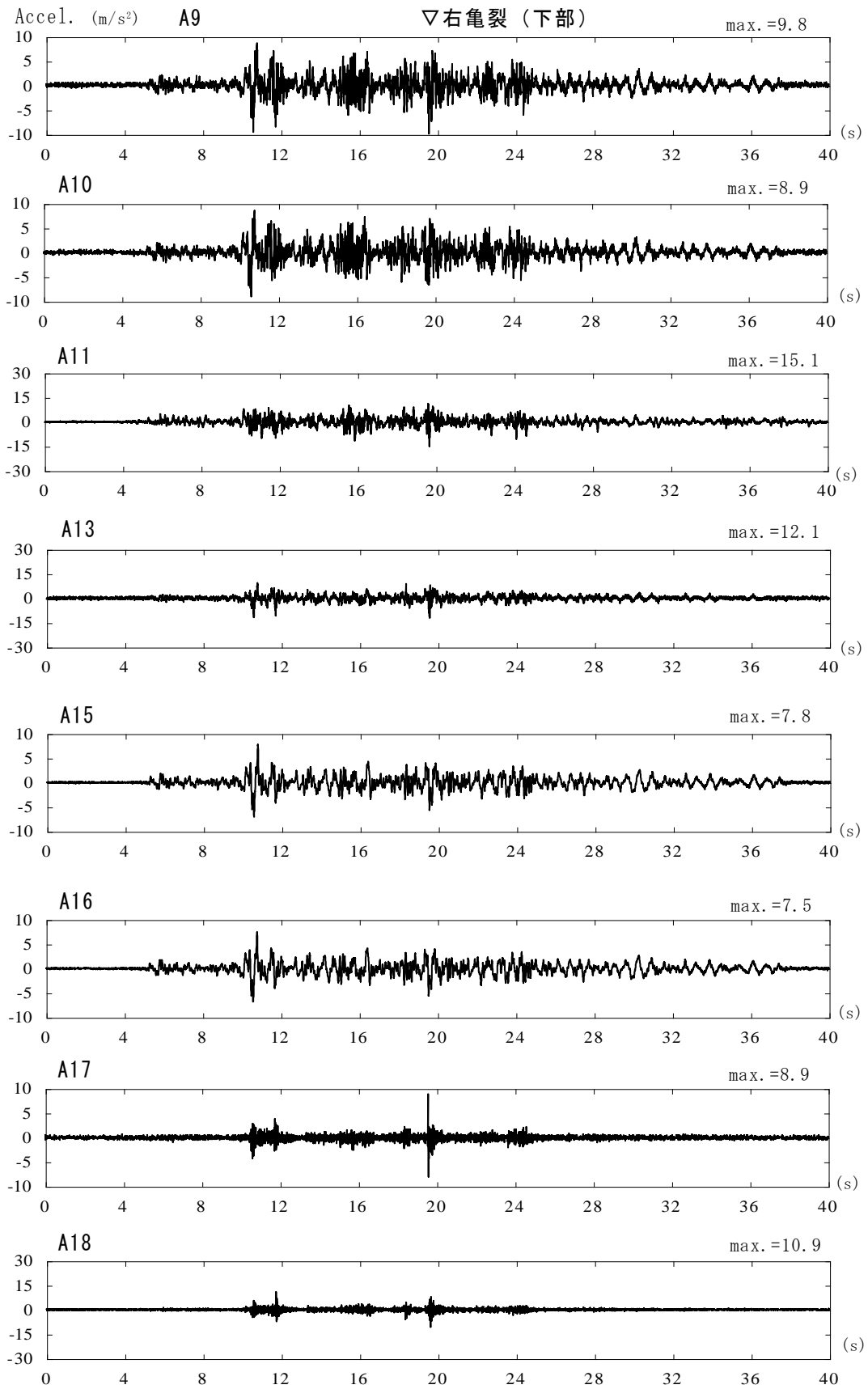


图 3.2-56(2) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-01(60%))

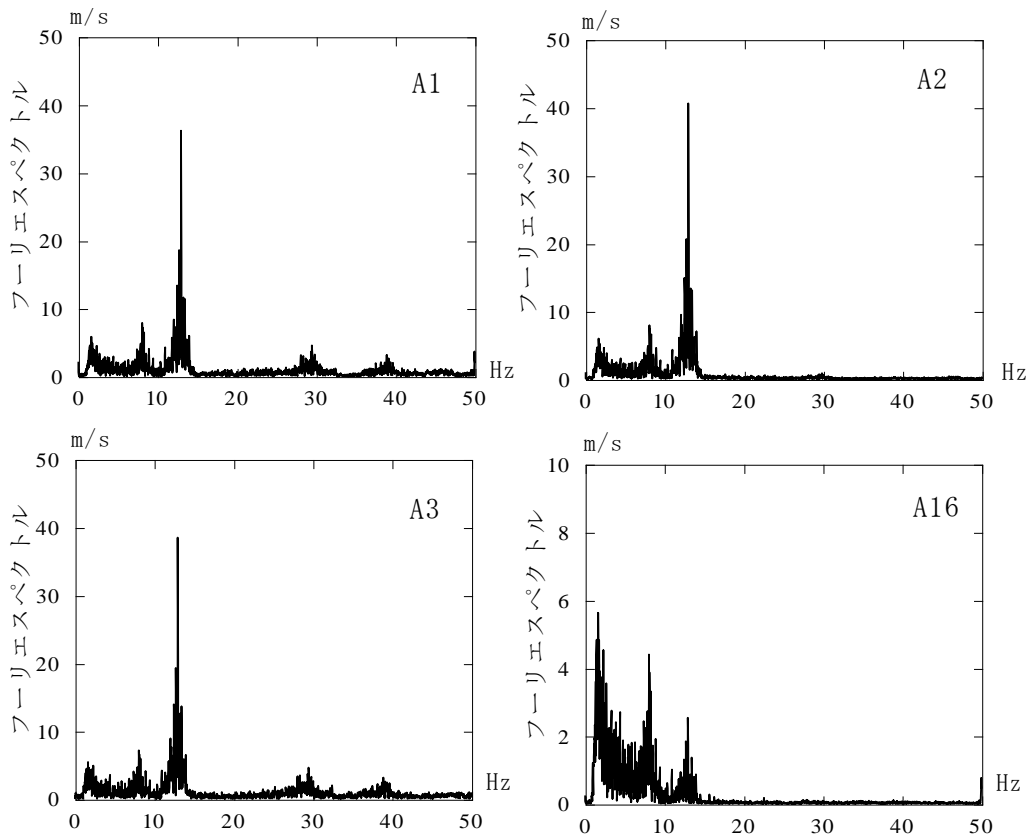


図 3.2-57 A1,A2,A3,A16のフーリエスペクトル(AK(25×15),mwave-01(60%),0~40s)

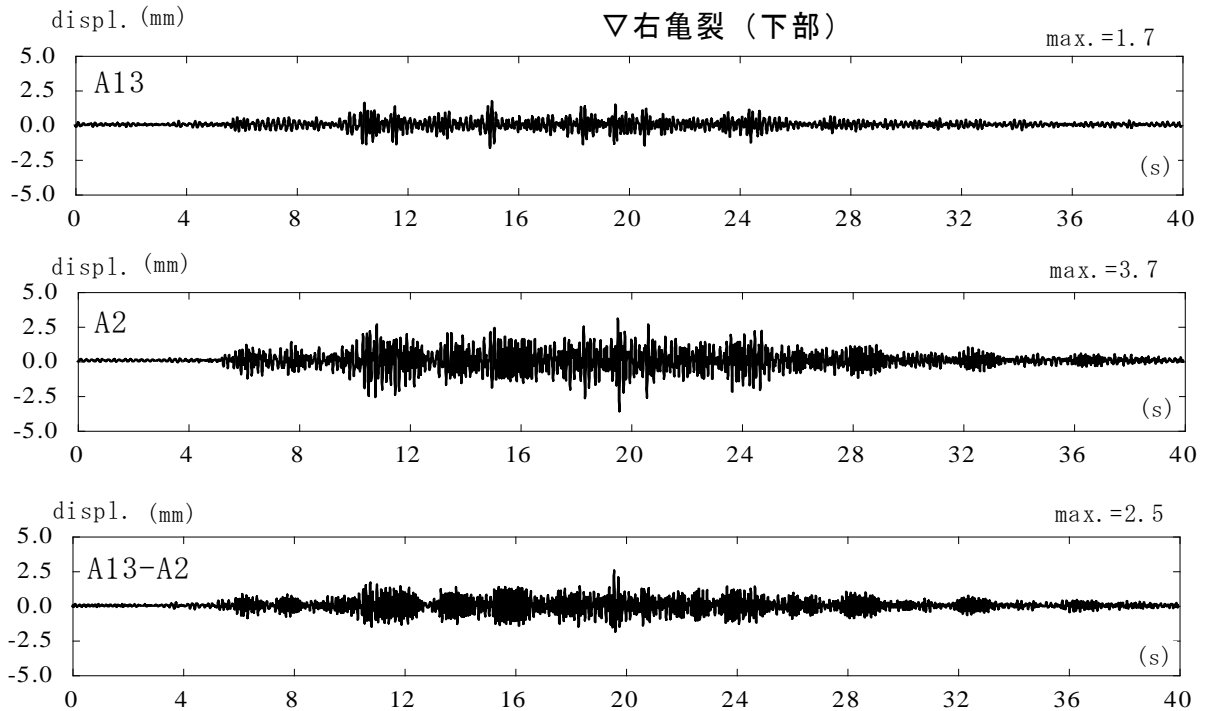


図 3.2-58 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),mwave-01(60%),0~40s)

表 3.2-28 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(25×15),mwave-01(80%))

地震波	mwave-01 倍率80%				
加速度計	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	52.68	5.30	5.27	H1	40
A2	48.13	4.84	4.82	H2	82
A3	84.21	8.48	8.43	H3	482
A4	10.25	—	—	H4	52
A5	14.59	—	—	H5	90
A6	86.37	8.69	8.65	H6	22
A7	128.43	12.93	12.86	H7	32
A8	53.42	5.38	5.35	H8	212
A9	24.25	2.44	2.43	H9	84
A10	20.64	2.08	2.07	H10	48
A11	44.02	4.43	4.41	H11	40
A13	46.43	4.67	4.65	H12	50
A15	9.94	1.00	0.99	H13	428
A16	9.99	1.01	1.00	H14	48
A17	48.71	—	—	H15	448
A18	34.02	—	—	H16	248

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

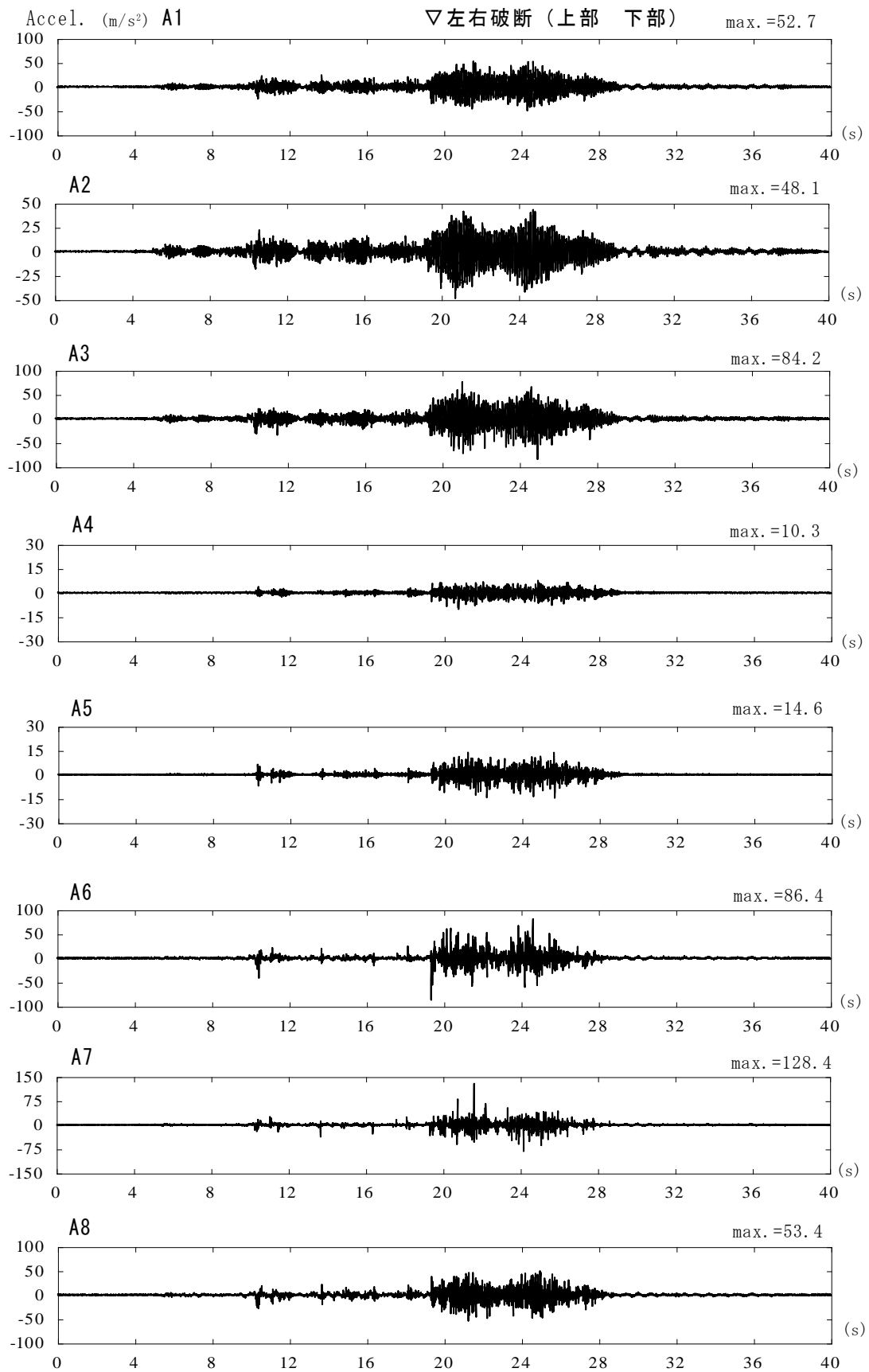


图 3.2-59(1) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-01(80%))

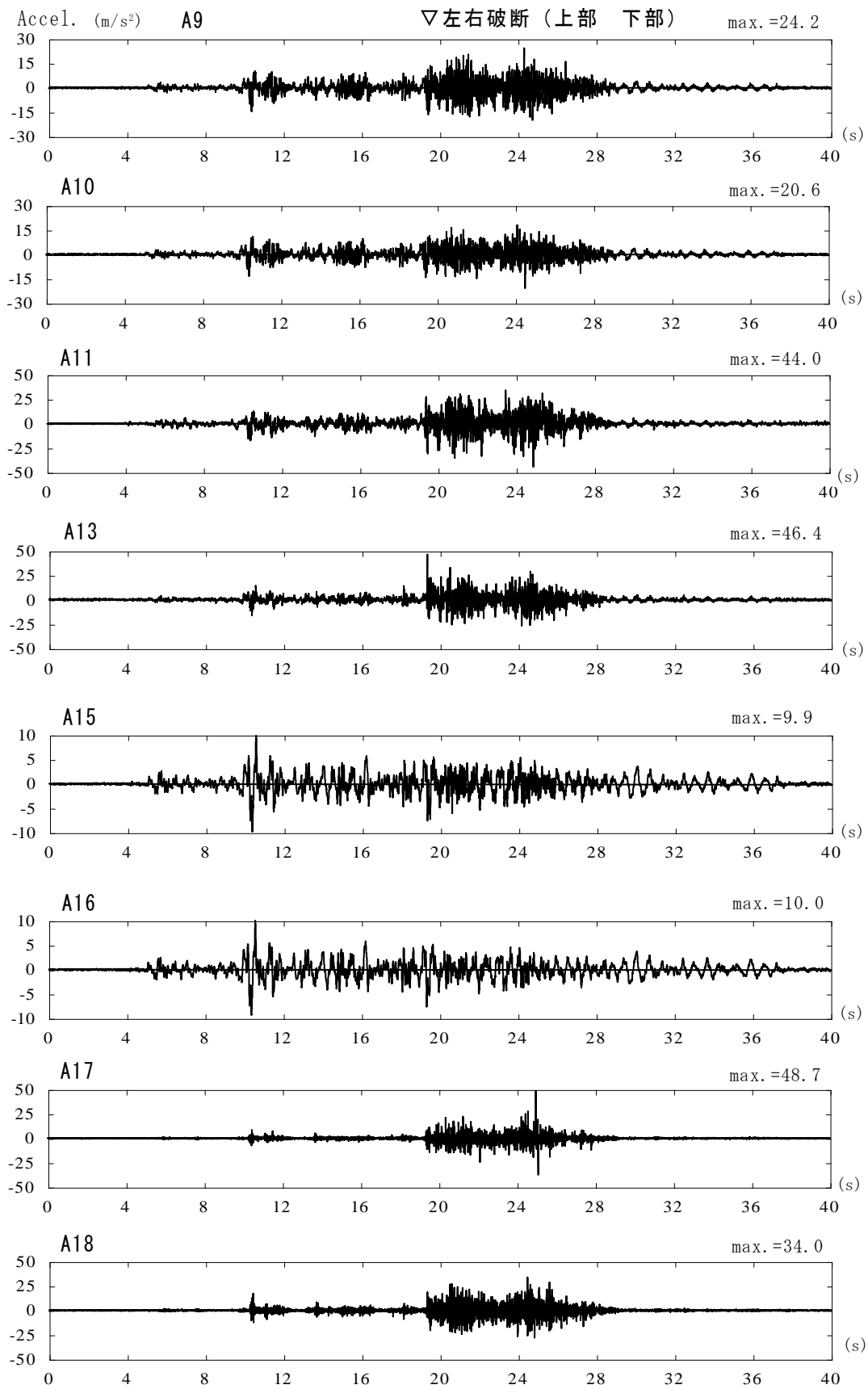


图 3.2-59(2) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-01(80%))

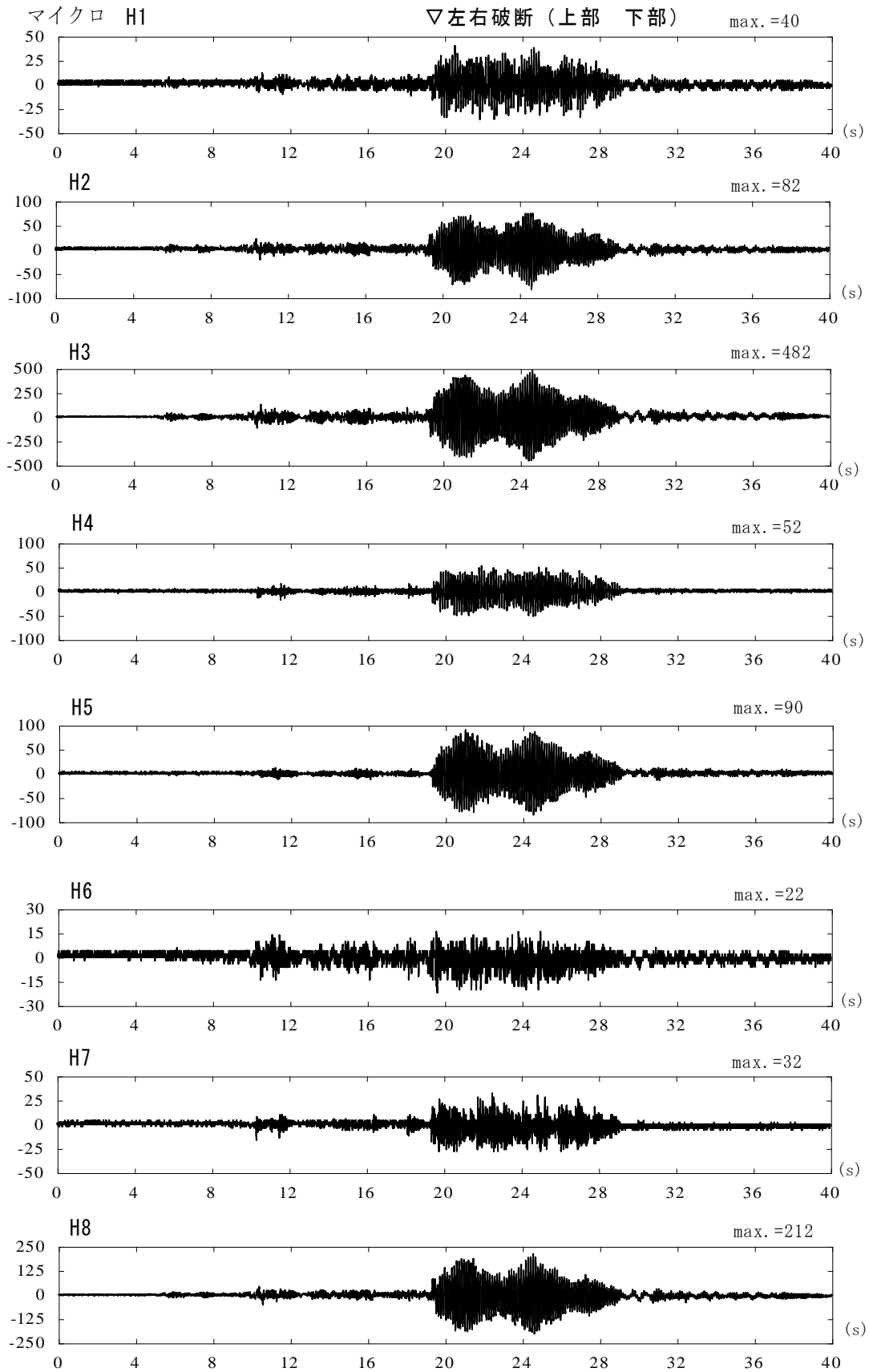


図 3.2-59(3) 配管のひずみ時刻歴((AK(25×15),mwave-01(80%))

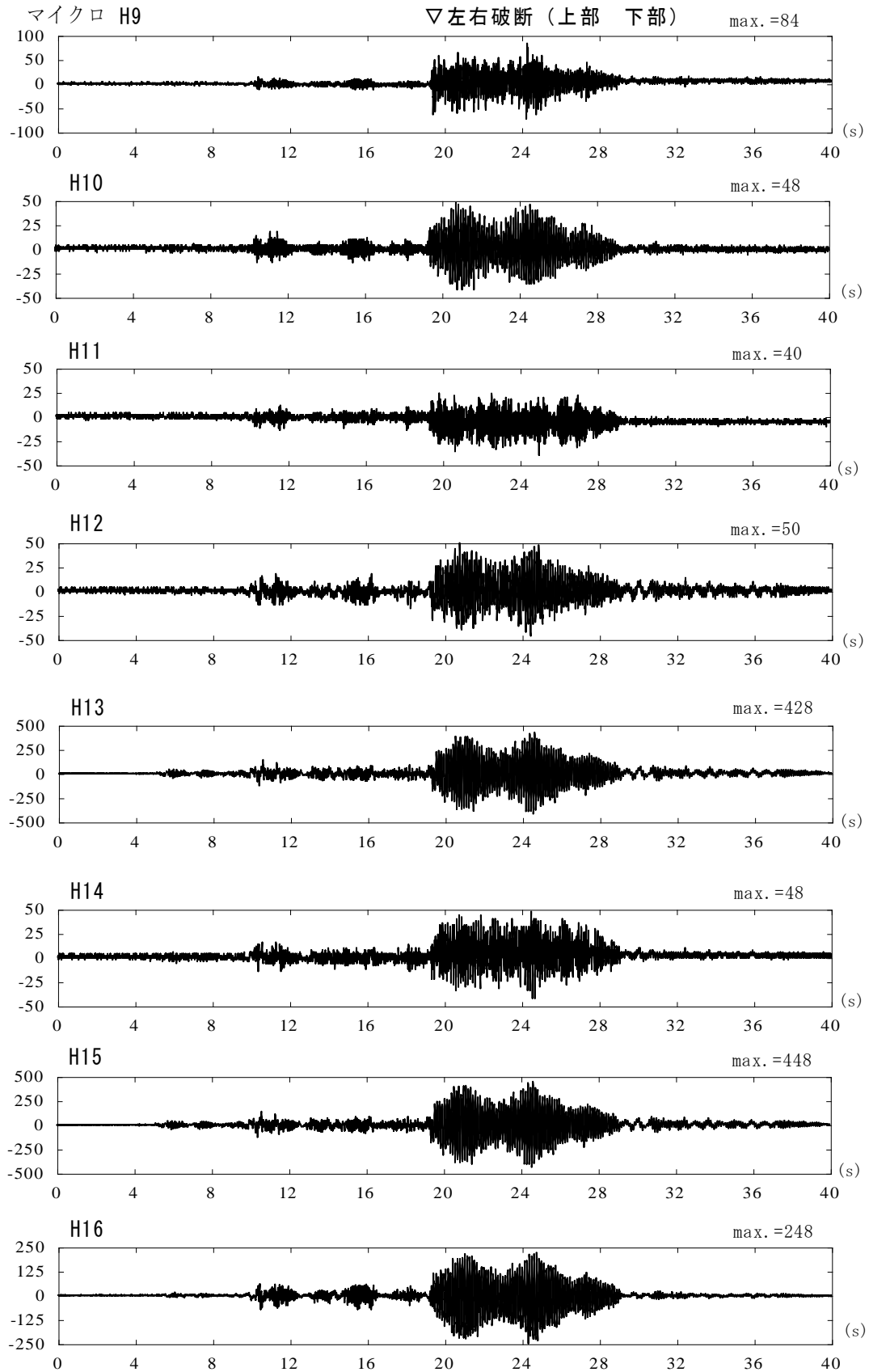


図 3.2-59(4) 配管のひずみ時刻歴((AK(25×15),mwave-01(80%))

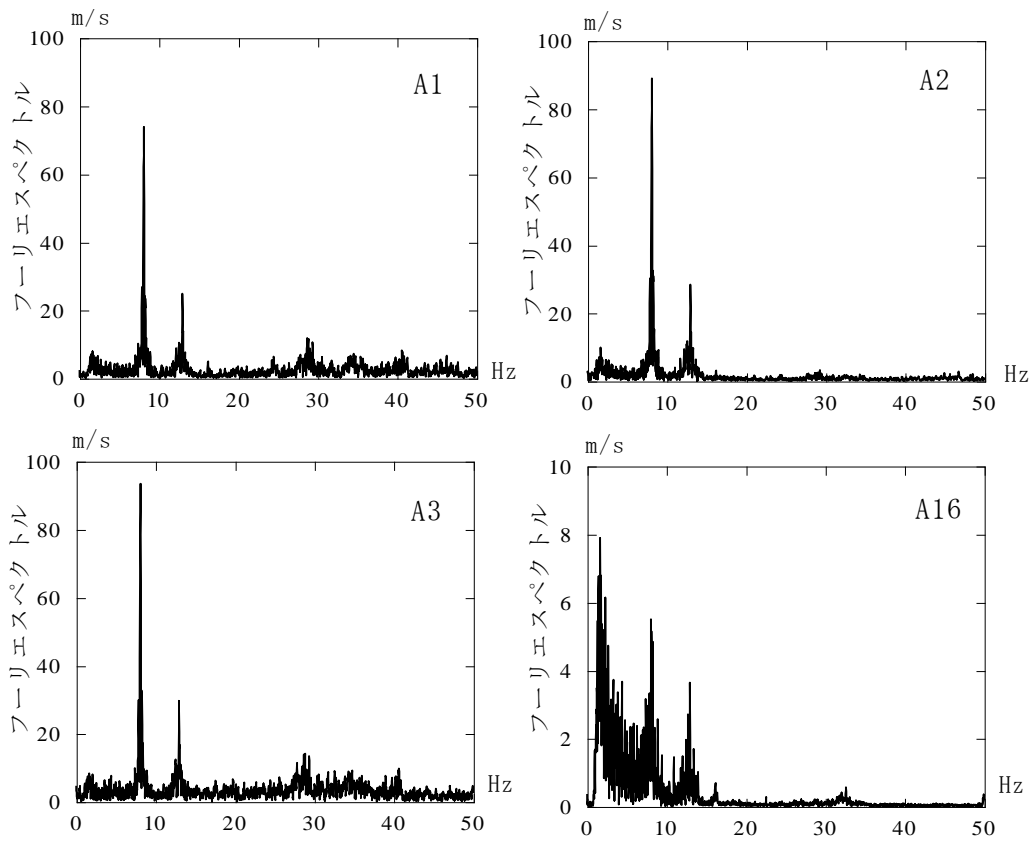


図 3.2-60 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(25×15),mwave-01(80%),0~40s)

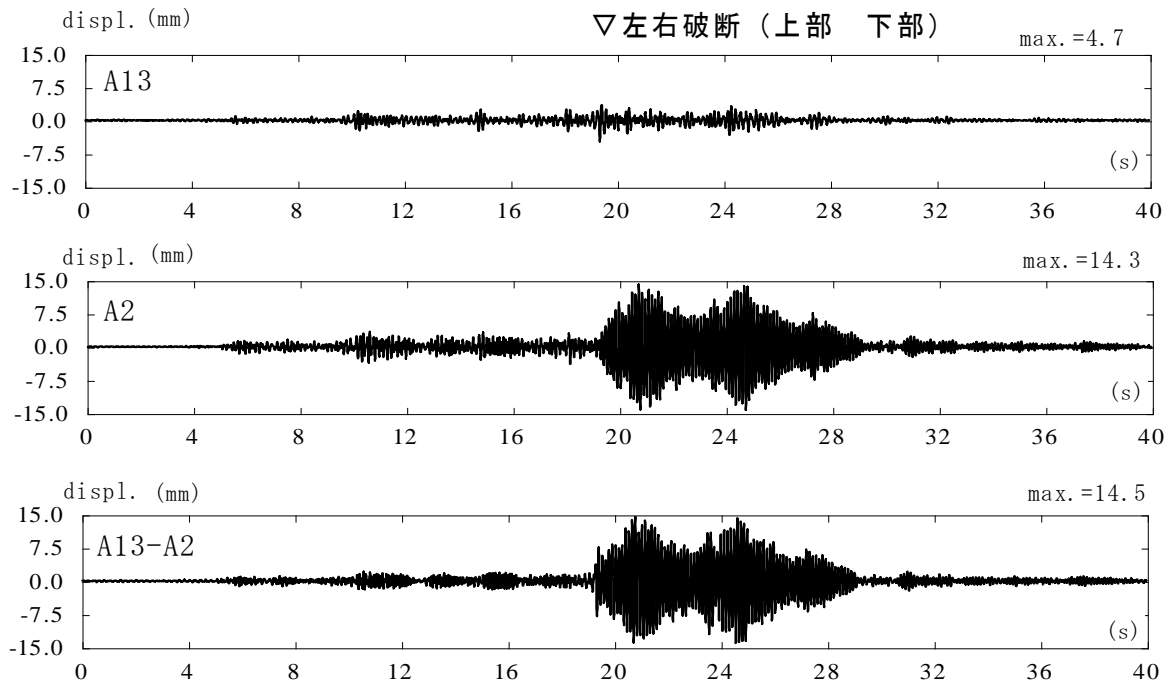


図 3.2-61 サポートA位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),mwave-01(80%),0~40s)

表 3.2-29 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(20×15),mwave-01(100%))

地震波	mwave-01 倍率100%				
加速度計	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	34.97	2.89	3.03	H1	16
A2	32.44	2.68	2.81	H2	24
A3	50.09	4.14	4.34	H3	150
A4	8.53	—	—	H4	16
A5	8.47	—	—	H5	18
A6	49.89	4.12	4.33	H6	20
A7	41.63	3.44	3.61	H7	14
A8	58.23	4.81	5.05	H8	56
A9	22.06	1.82	1.91	H9	32
A10	16.07	1.33	1.39	H10	28
A11	21.32	1.76	1.85	H11	28
A13	19.20	1.59	1.67	H12	22
A15	12.11	1.00	1.06	H13	166
A16	11.53	0.95	1.00	H14	24
A17	20.24	—	—	H15	166
A18	21.37	—	—	H16	98

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

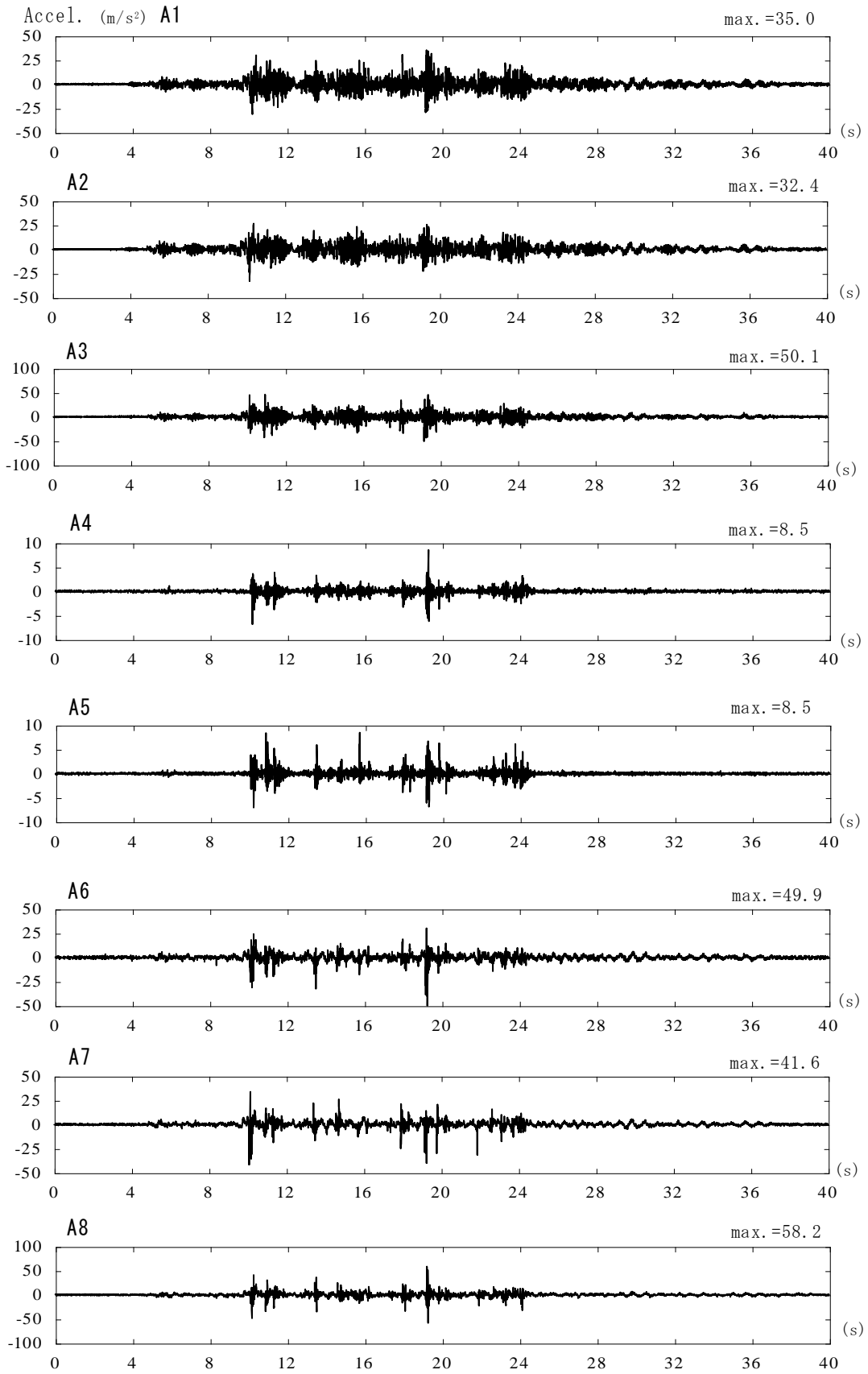


图 3.2-62(1) 加速度時刻歴((AK(20×15),mwave-01(100%))

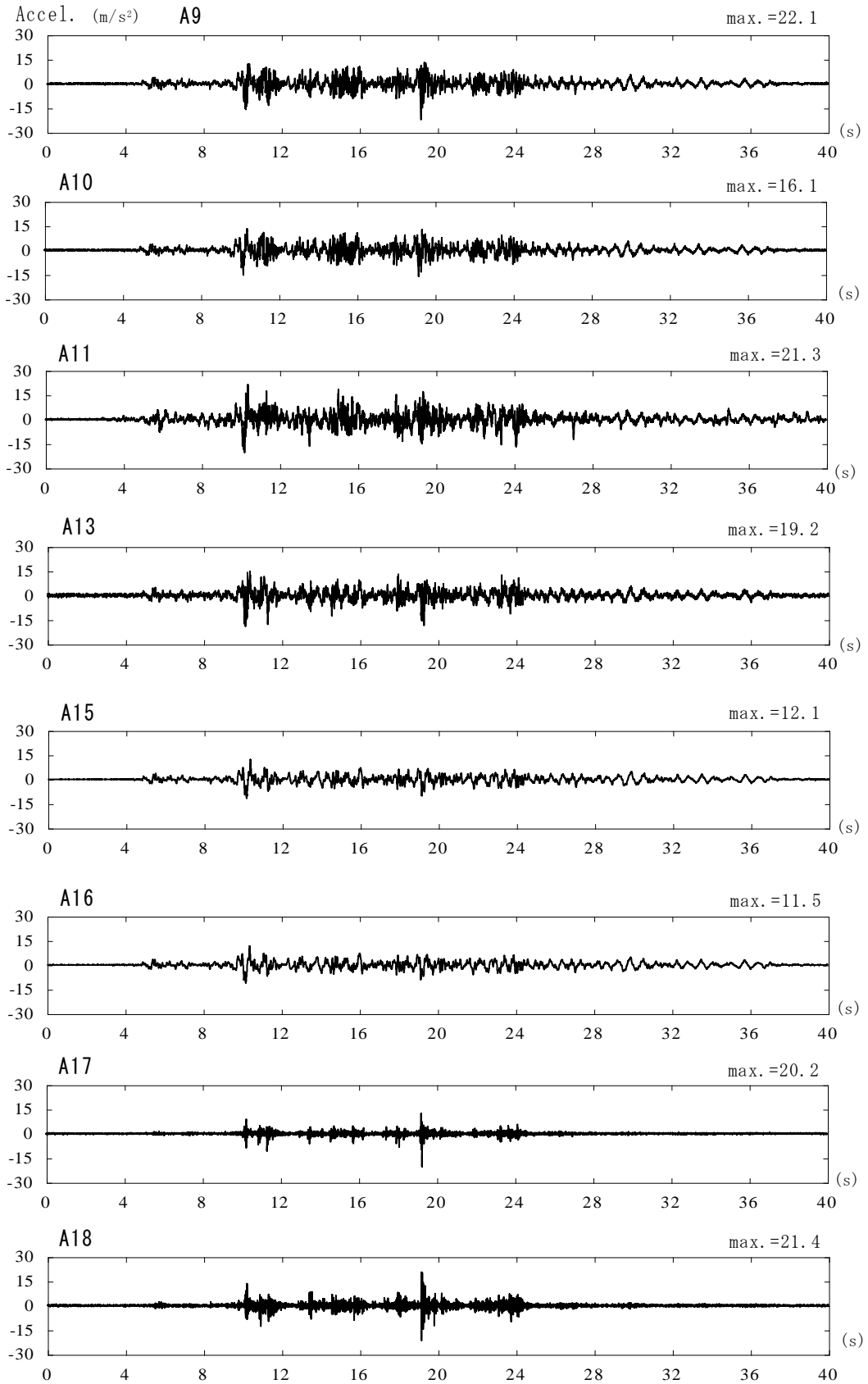


图 3.2-62(2) 加速度時刻歴((AK(20×15),mwave-01(100%))

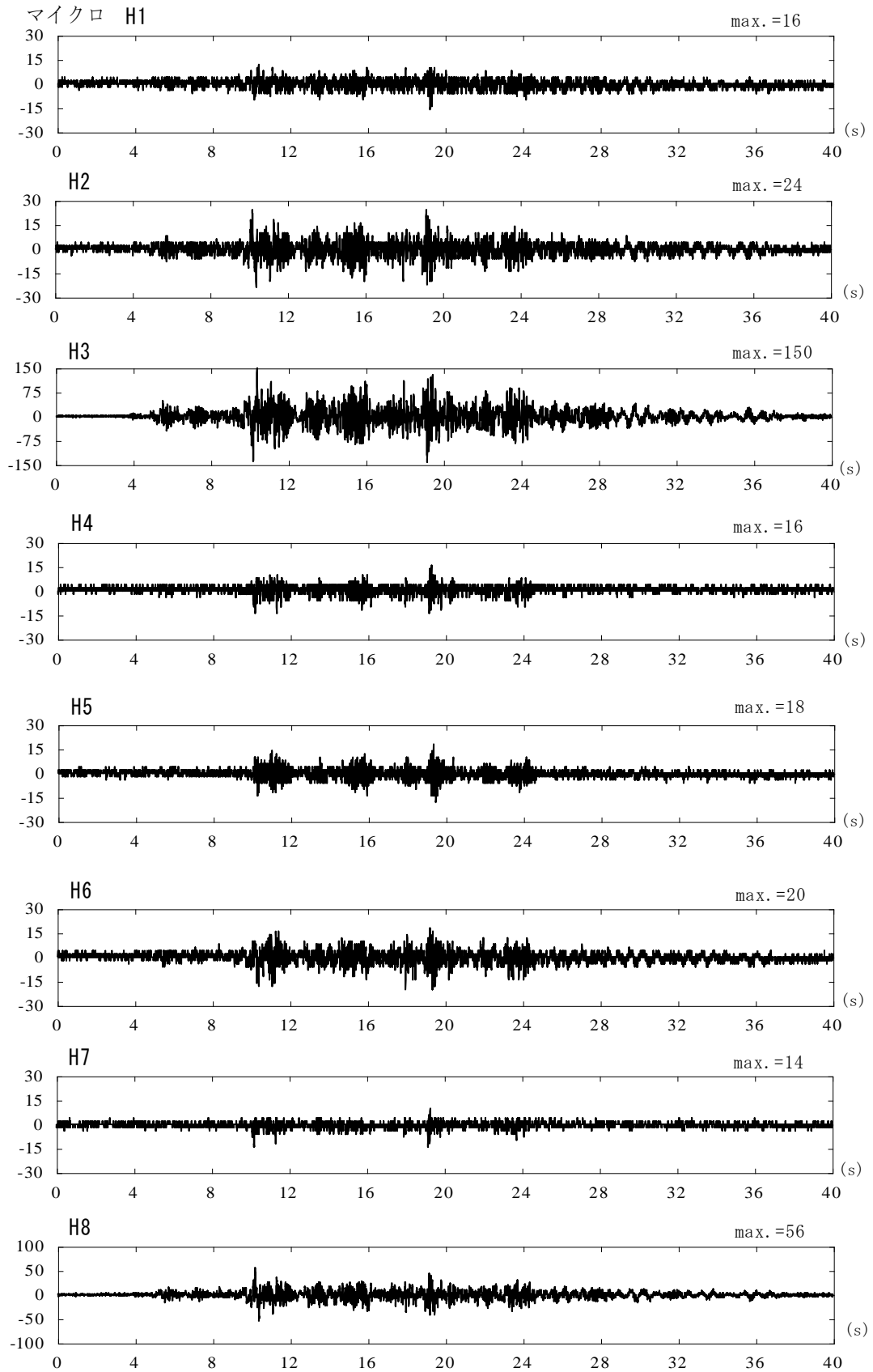


図 3.2-62(3) 配管のひずみ時刻歴((AK(20×15),mwave-01(100%))

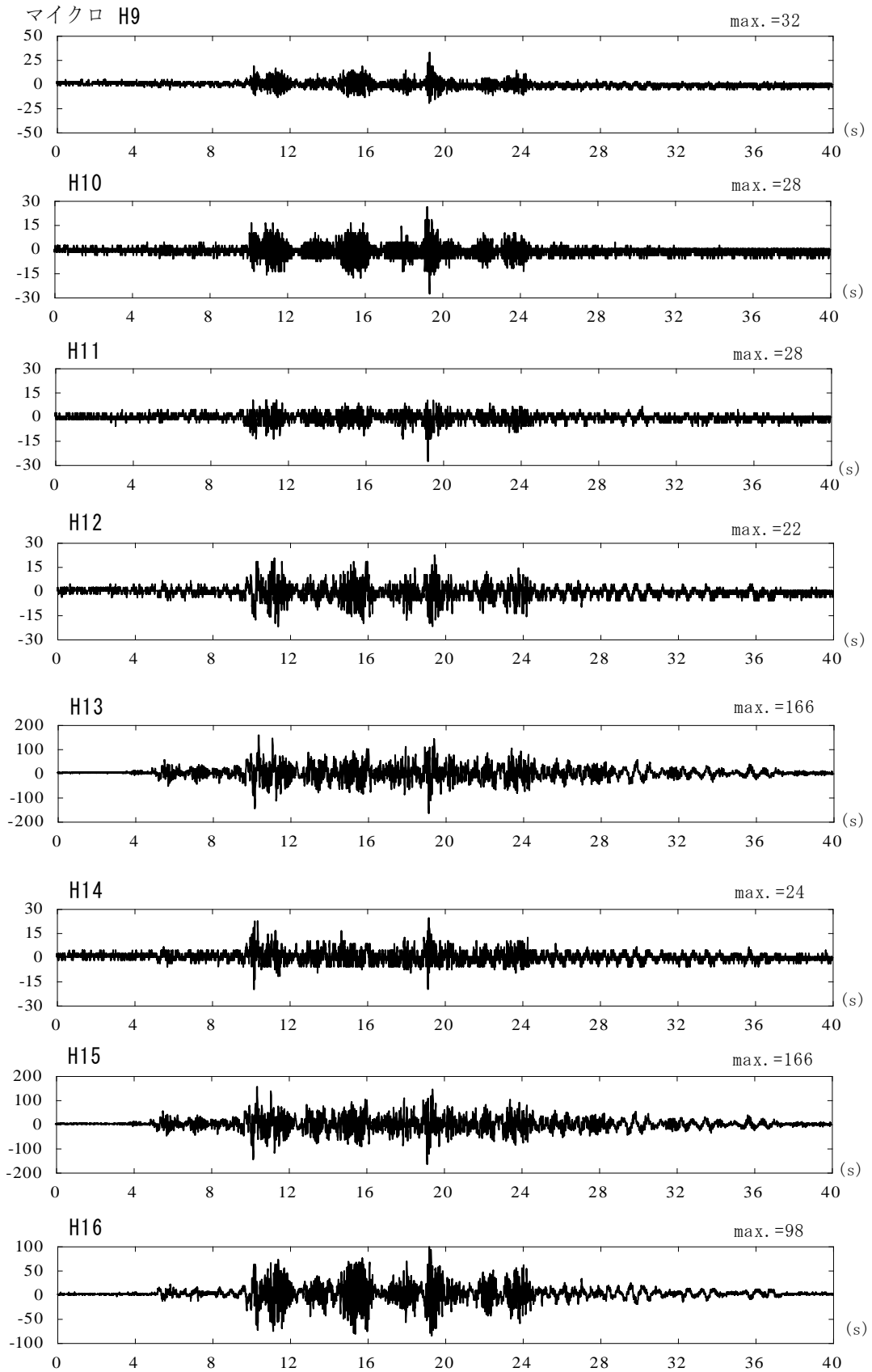


図 3.2-62(4) 配管のひずみ時刻歴((AK(20×15),mwave-01(100%))

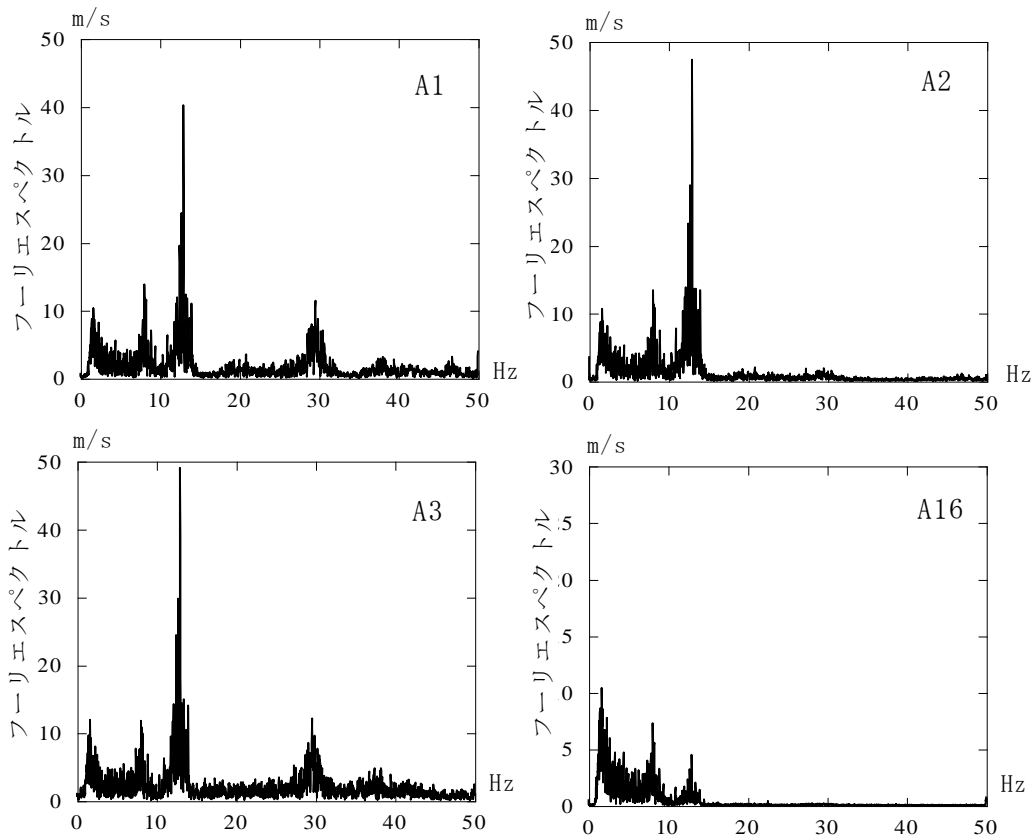


図 3.2-63 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(20×15),mwave-01(100%),0~40s)

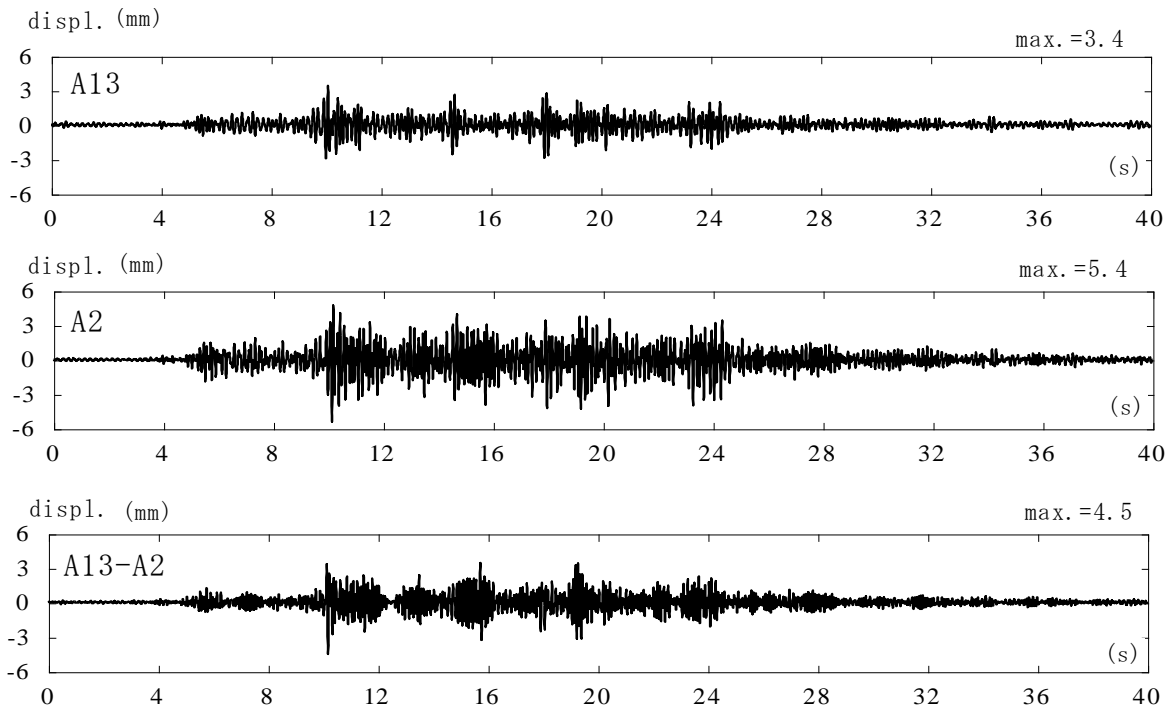


図 3.2-64 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(20×15),mwave-01(100%),0~40s)

表 3.2-30 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(ST φ6,mwave-01(100%))

地震波 加速度計	mwave-01 倍率100%				
	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	37.60	3.01	3.20	H1	18
A2	26.56	2.13	2.26	H2	32
A3	35.46	2.84	3.01	H3	192
A4	5.54	—	—	H4	28
A5	8.11	—	—	H5	22
A6	29.51	2.36	2.51	H6	20
A7	31.89	2.55	2.71	H7	22
A8	34.59	2.77	2.94	H8	82
A9	19.51	1.56	1.66	H9	46
A10	14.43	1.16	1.23	H10	22
A11	22.70	1.82	1.93	H11	20
A13	20.98	1.68	1.78	H12	24
A15	12.49	1.00	1.06	H13	188
A16	11.76	0.94	1.00	H14	32
A17	14.24	—	—	H15	188
A18	16.38	—	—	H16	98

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

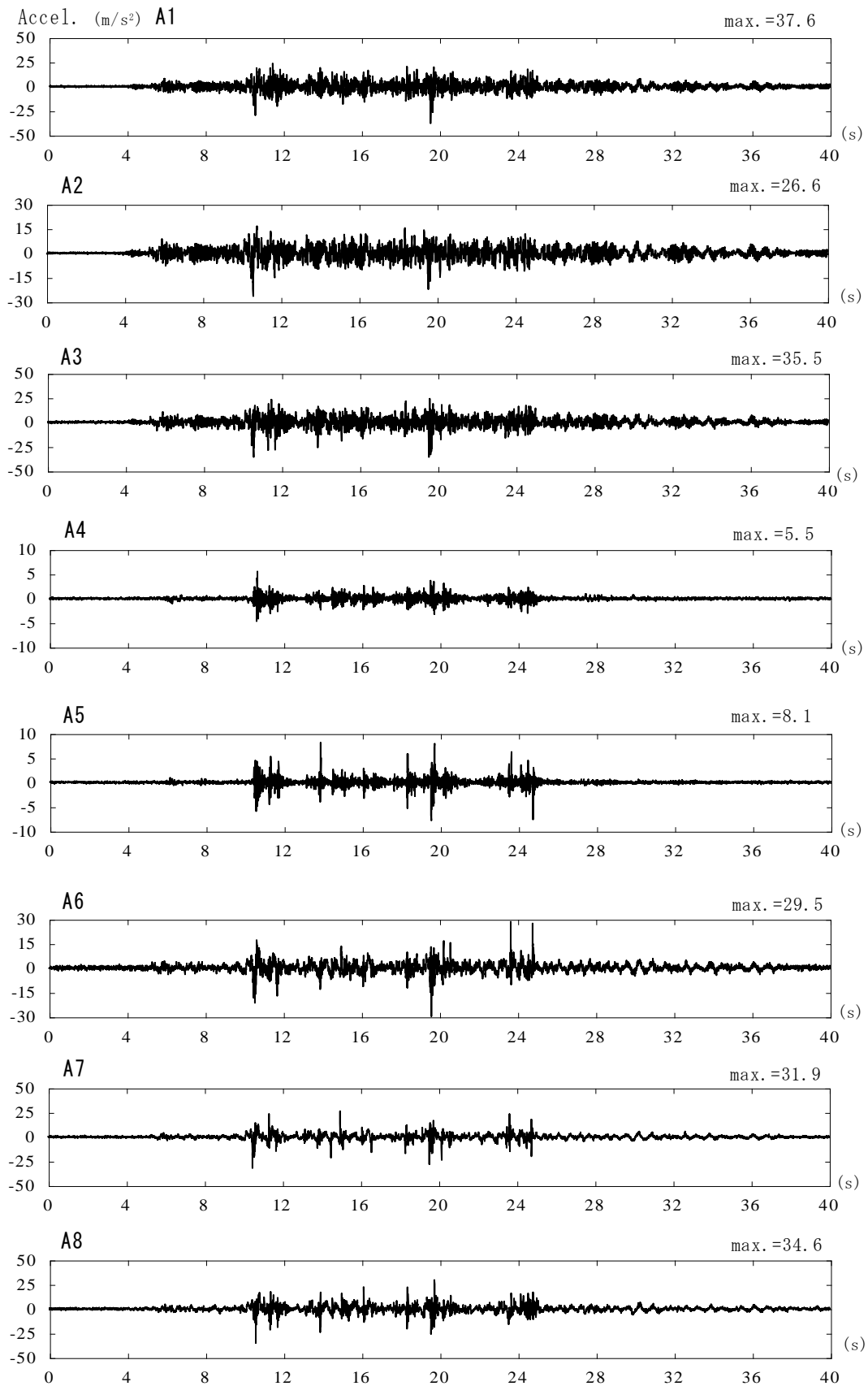


图 3.2-65(1) 加速度時刻歴(ST φ6,mwave-01(100%))

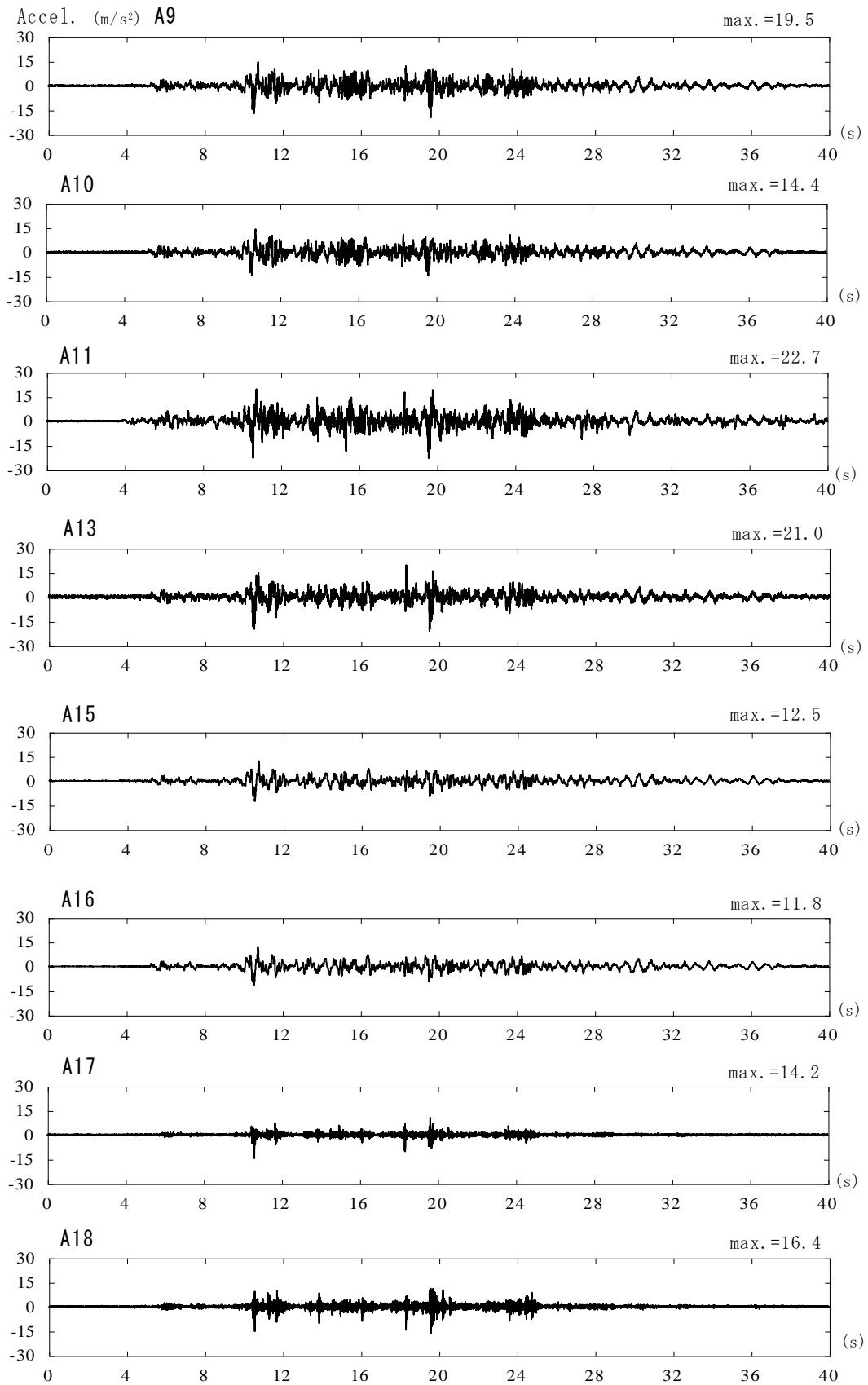


图 3.2-65(2) 加速度時刻歴(ST φ6,mwave-01(100%))

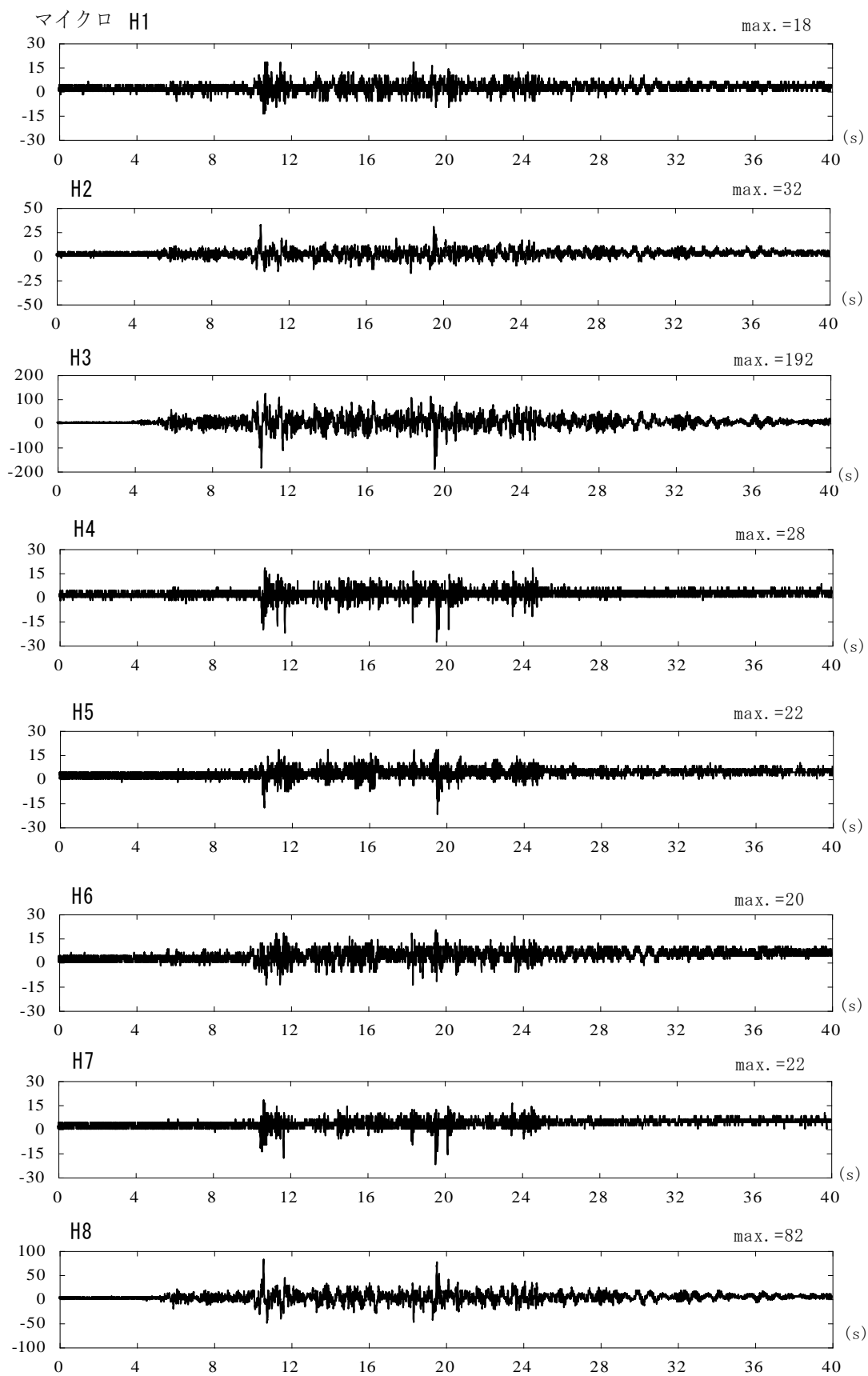


図 3.2-65(3) 配管のひずみ時刻歴(ST $\phi 6$, mwave-01(100%))

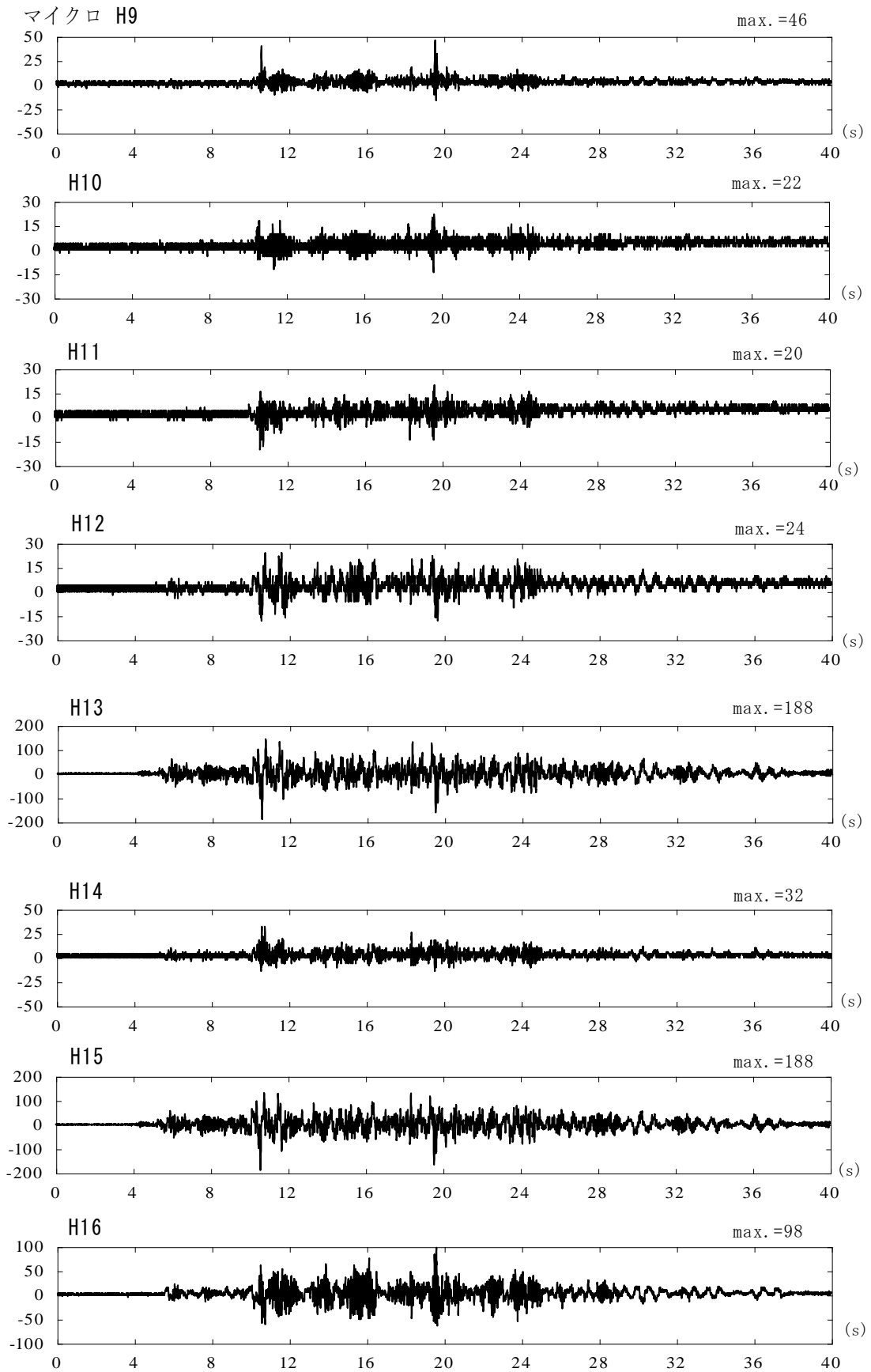


図 3.2-65(4) 配管のひずみ時刻歴(ST ϕ 6,mwave-01(100%))

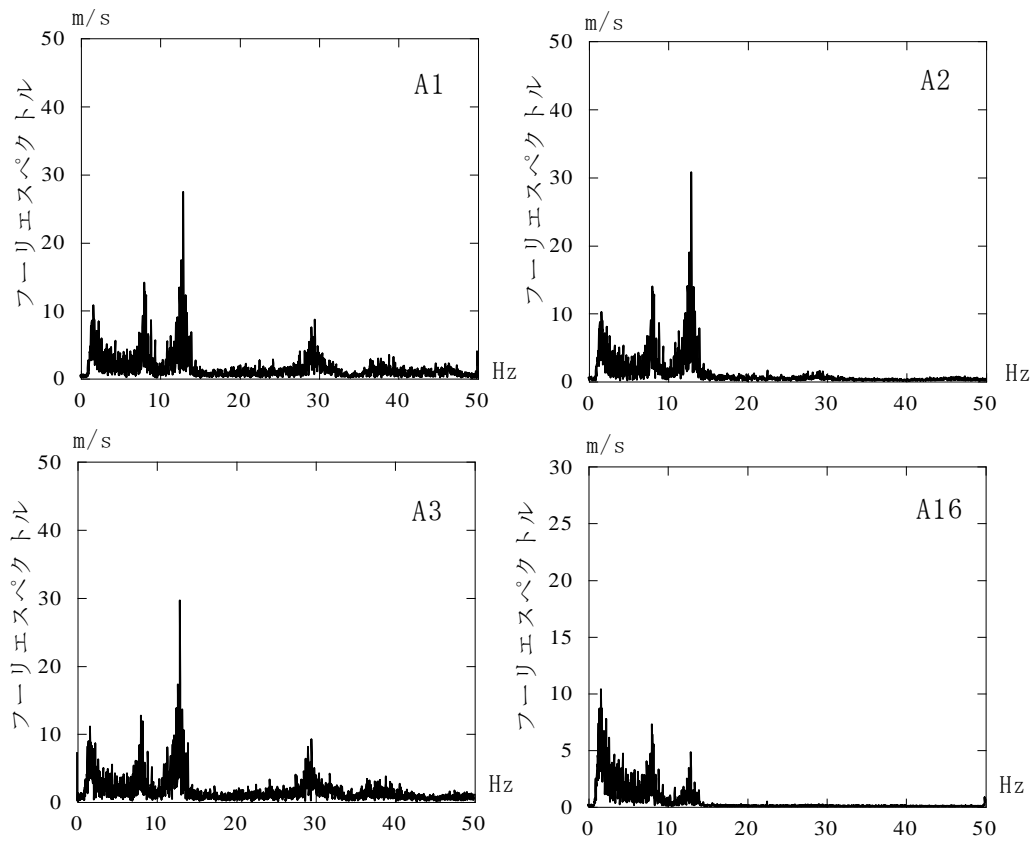


図 3.2-66 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(ST φ6,mwave-01(100%),0~40s)

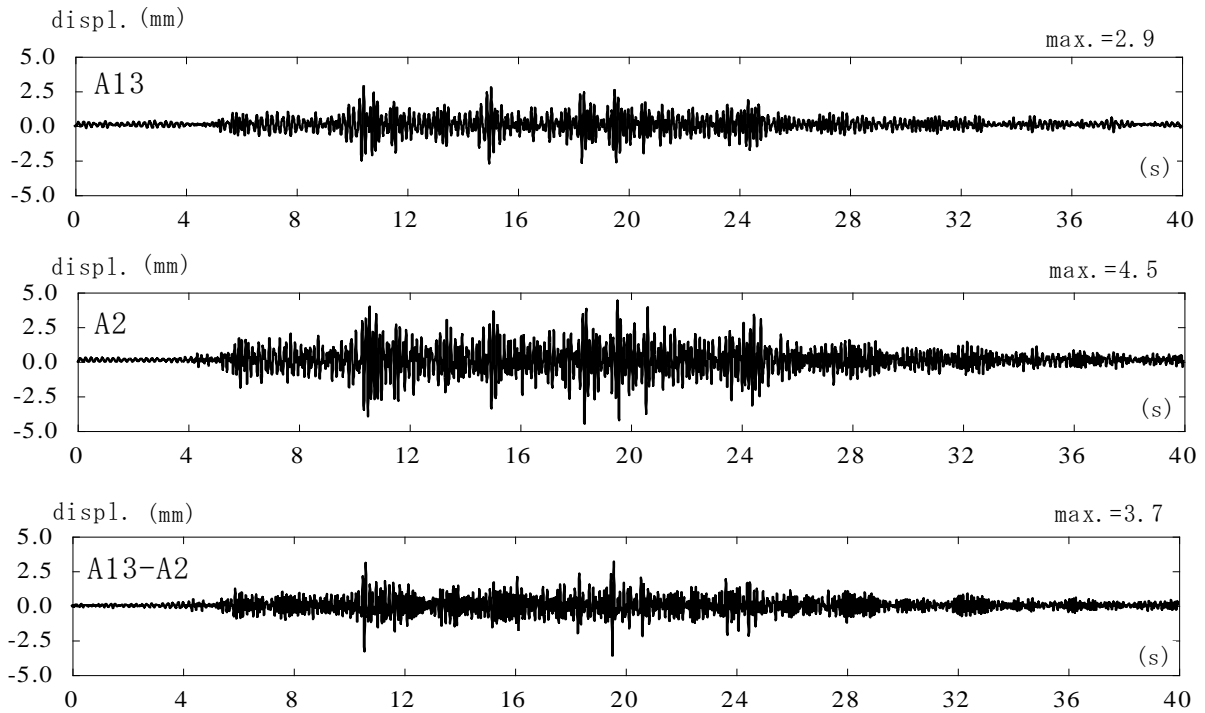


図 3.2-67 サポート A 位置の相対変位時刻歴(ST φ6,mwave-01(100%),0~40s)

3.2.5.3.3 mwave-02 による水平加振試験結果

mwave-02 入力の実験で破断・亀裂が発生した加振条件を表 3.2-31 に示している。サポート A の破断・亀裂状況等は図 3.2-68 に示している。

AK(25×15)のサポート A は倍率 60%、AK(20×15)のサポート A は倍率 100%で上下に分離する破断をしている。

(1) AK(25×15)のサポート A

同様の表、図を示す。表 3.2-32 に 60%入力した場合の、最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を示す。図 3.2-69(1)～(4)に加速度、ひずみの時刻歴、図 3.2-70 にフーリエスペクトル、図 3.2-71 にサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。

加速度時刻歴波形から 30 秒付近の左右破断(下部)時にパルス的な波形が発生していることが分かる。A2 のフーリエスペクトルからサポート A なしの 1 次振動数である 8Hz 付近の影響が大きいことが分かるが、A1,A3 のフーリエスペクトルからは 2 次振動数の 18Hz 付近以外に 20Hz 以上のピークも見られる。これは支柱の振動数の影響を受けている可能性も考えられる。サポート A 部分の相対変位時刻歴では、支梁(H-100×100)の振幅も大きくなっていることがわかる。サポート A 部分の最大相対変位 4.4mm 程度である。最も大きいひずみ度は、H3,H15 で 148 μ である。

(2) AK(20×15)のサポート A

同様の表、図を示す。表 3.2-33 に 100%入力した場合の、最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を示す。図 3.2-72(1)～(4)に同様の加速度、ひずみの時刻歴、図 3.2-73(1),(2)にフーリエスペクトル、図 3.2-74 にサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。

加速度時刻歴波形から 30 秒付近の左右破断(上部),(下部)以降に配管の応答が急激に大きくなっていることがわかる。これは、A2 の最大加速度の応答倍率が 4.6 程度と大きくなっていることにも見ることができる。(1)で述べた AK(25×15)の場合と同様に A2 のフーリエスペクトルから 1 次振動数の 8Hz 付近の影響が大きいことが分り、A1,A3 は、18Hz 付近の 2 次振動数とより高い振動数の影響を見ることができる。mwave-02 による応答は、mwave-01 が 1 次振動中心であったのに対して 1 次と 2 次による応答振動を伴うことがわかる。

Z 方向の A18 の時刻歴において、38 秒付近にピークが見られる。このピークは他の X 方向の時刻歴においても見られ、上下方向の振動を伴う 3 次モードの可能性もある。この振動数は、図 3.2-73(2)に示した A18 のフーリエスペクトルから 25Hz 付近であることがわかる。Z 方向(上下方向)の加速度記録では、A17 は 57.46m/s²、A18 は 80.14m/s²であり、mwave-01(80%,AK(25×15))での A17 の 48.71m/s²、A18 の 34.02m/s²と比較して、高い結果が得られている。この要因として、mwave-02 波は、高振動数成分が卓越しているために鉛直方向に対して高い応答をもたらしたと考えられる。

上方横方向配管のひずみ時刻歴において、破断に伴い時刻歴の中心軸がシフトする傾向は、中央の Z 方向 H9 にはっきり見ることができる。サポート A 部分の最大相対変位 13.5mm 程度に達している。最も大きいひずみ度は、ロッドレストレインの支持点付近の H15 で 378 μ である。

(3) STφ6のサポートA

STφ6は倍率100%でも破断・亀裂は発生しなかったため、倍率100%入力の試験結果を示す。

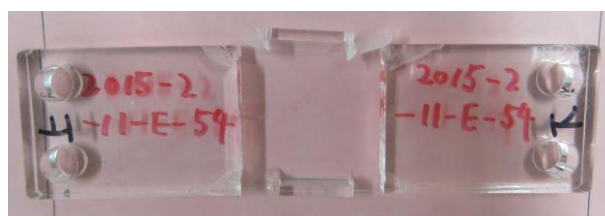
同様の表、図を示す。表3.2-34に100%入力した場合の、最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を、図3.2-75(1)～(4)に加速度、ひずみの時刻歴を、図3.2-76にフーリエスペクトルを、図3.2-77にサポートA部分の相対変位時刻歴を示す。

A2のフーリエスペクトルでは、STφ6をサポートAに用いた時の1次振動数である12Hz付近の影響も見られるが、18Hz付近の2次振動数とより高い振動数の影響を見ることができる。A2の最大加速度の応答倍率が3.7程度と(2)で述べたAK(20×15)の場合より小さくなっているが、破断の有無による固有振動数の相違による影響と考えられる。サポートA部分の最大相対変位5.6mm程度である。最も大きいひずみ度は、2次モードの影響を大きく受けると考えられる下方の横方向配管に近いH16で218μである。

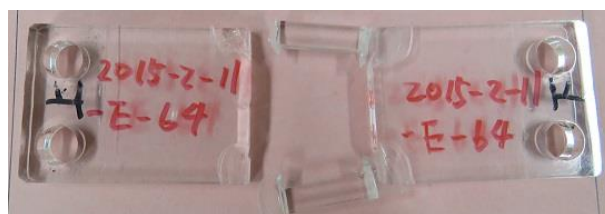
表 3.2-31 mwave-02 入力に加振結果の概要

サポートA	地震波 mwave-02		破断・亀裂状況
	倍率(%)	試験番号	
アクリル板 25×15mm AK(25×15)	40	2015-2-11-E-52	破断・亀裂なし
	60	○2015-2-11-E-54	30.0s付近:左右破断(下部) 36.0s付近:左右破断(上部)
アクリル板 20×15mm AK(20×15)	40	2015-2-11-E-61	破断・亀裂なし
	60	2015-2-11-E-62	破断・亀裂なし
	80	2015-2-11-E-63	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-11-E-64	23.0s付近:亀裂 30.0s付近:左右破断(下部) 32.0s付近:左右破断(上部)
鋼棒直径6mm ST(φ6)	40	2015-2-14-E-12	破断・亀裂なし
	60	2015-2-14-E-13	破断・亀裂なし
	80	2015-2-14-E-14	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-14-E-15	破断・亀裂なし

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号:2015-2-11-E-54



試験番号:2015-2-11-E-64



試験番号:2015-2-14-E-15(破断・亀裂なし)

図 3.2-68 サポート A の破断・亀裂状況等(mwave-02 入力)

表 3.2-32 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(25×15),mwave-02(60%))

地震波	mwave-02 倍率60%				
加速度計	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	29.29	3.99	4.68	H1	32
A2	24.42	3.33	3.90	H2	28
A3	36.79	5.02	5.88	H3	148
A4	5.26	—	—	H4	30
A5	8.11	—	—	H5	30
A6	46.67	6.36	7.46	H6	18
A7	28.79	3.92	4.60	H7	30
A8	34.59	4.71	5.53	H8	76
A9	13.86	1.89	2.21	H9	54
A10	11.32	1.54	1.81	H10	22
A11	30.16	4.11	4.82	H11	26
A13	66.52	9.06	10.63	H12	30
A15	7.34	1.00	1.17	H13	144
A16	6.26	0.85	1.00	H14	32
A17	14.07	—	—	H15	148
A18	21.37	—	—	H16	124

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

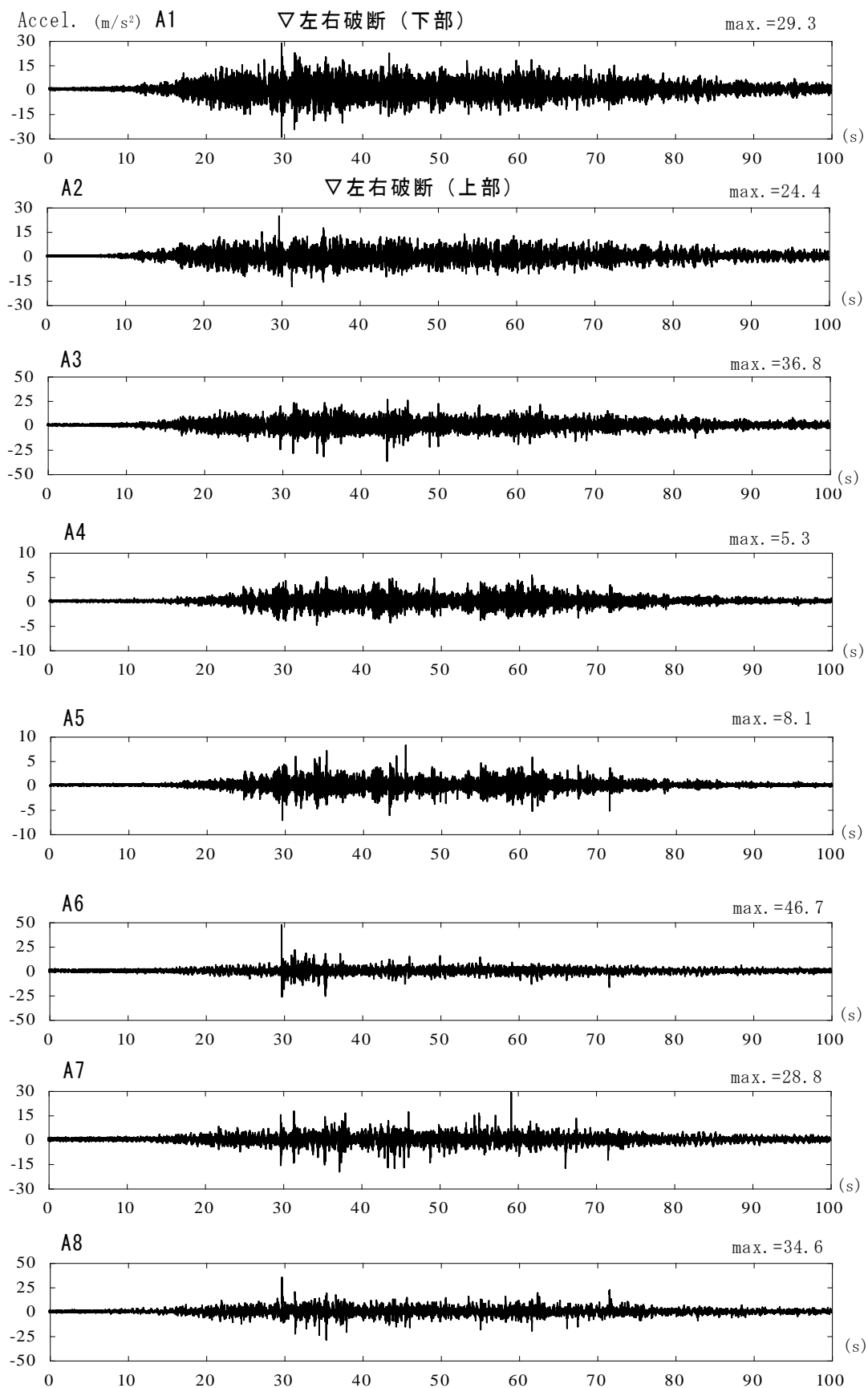


图 3.2-69(1) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-02(60%))

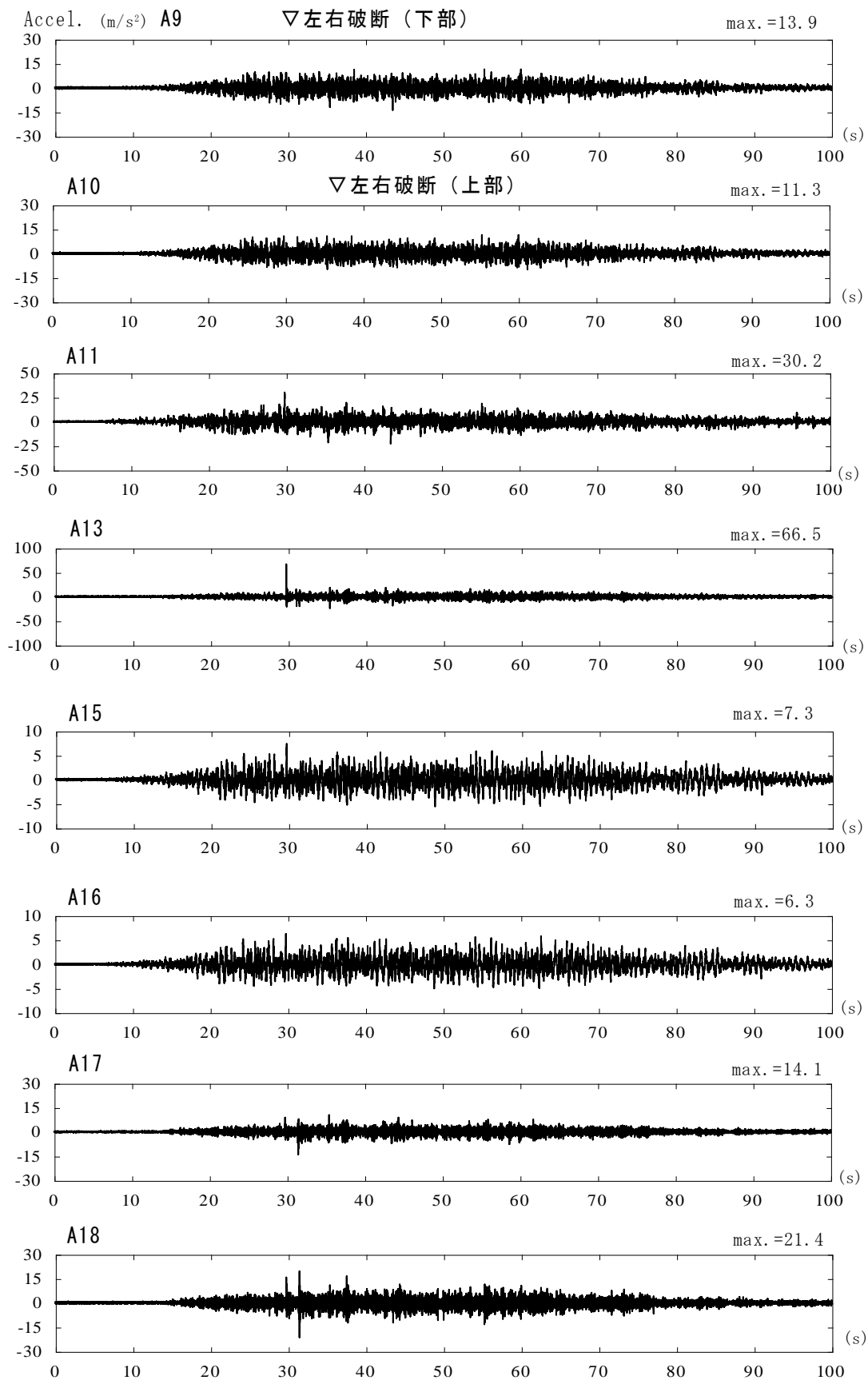


图 3.2-69(2) 加速度時刻歴((AK(25×15),mwave-02(60%))

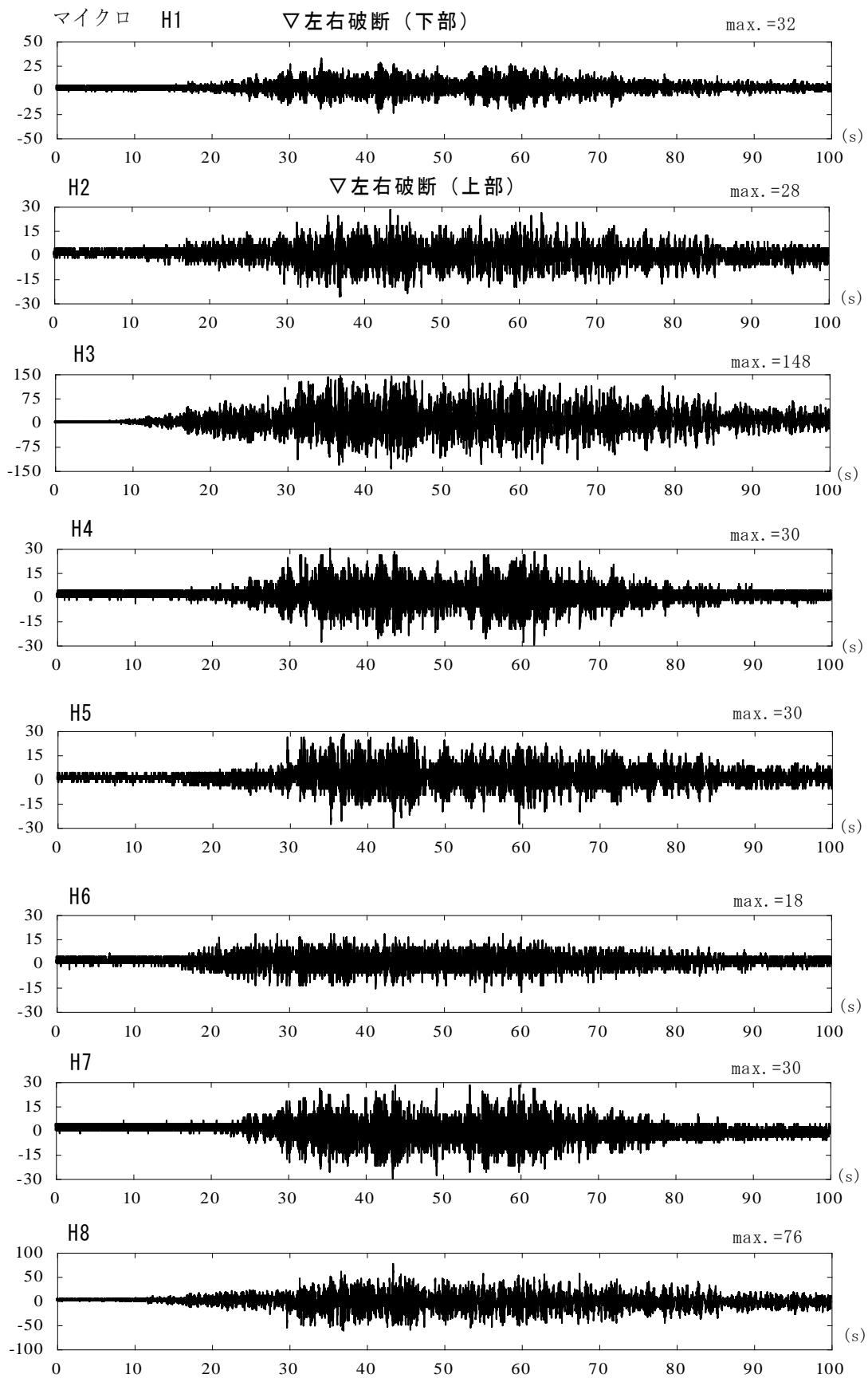


図 3.2-69(3) 配管のひずみ時刻歴((AK(25×15),mwave-02(60%))

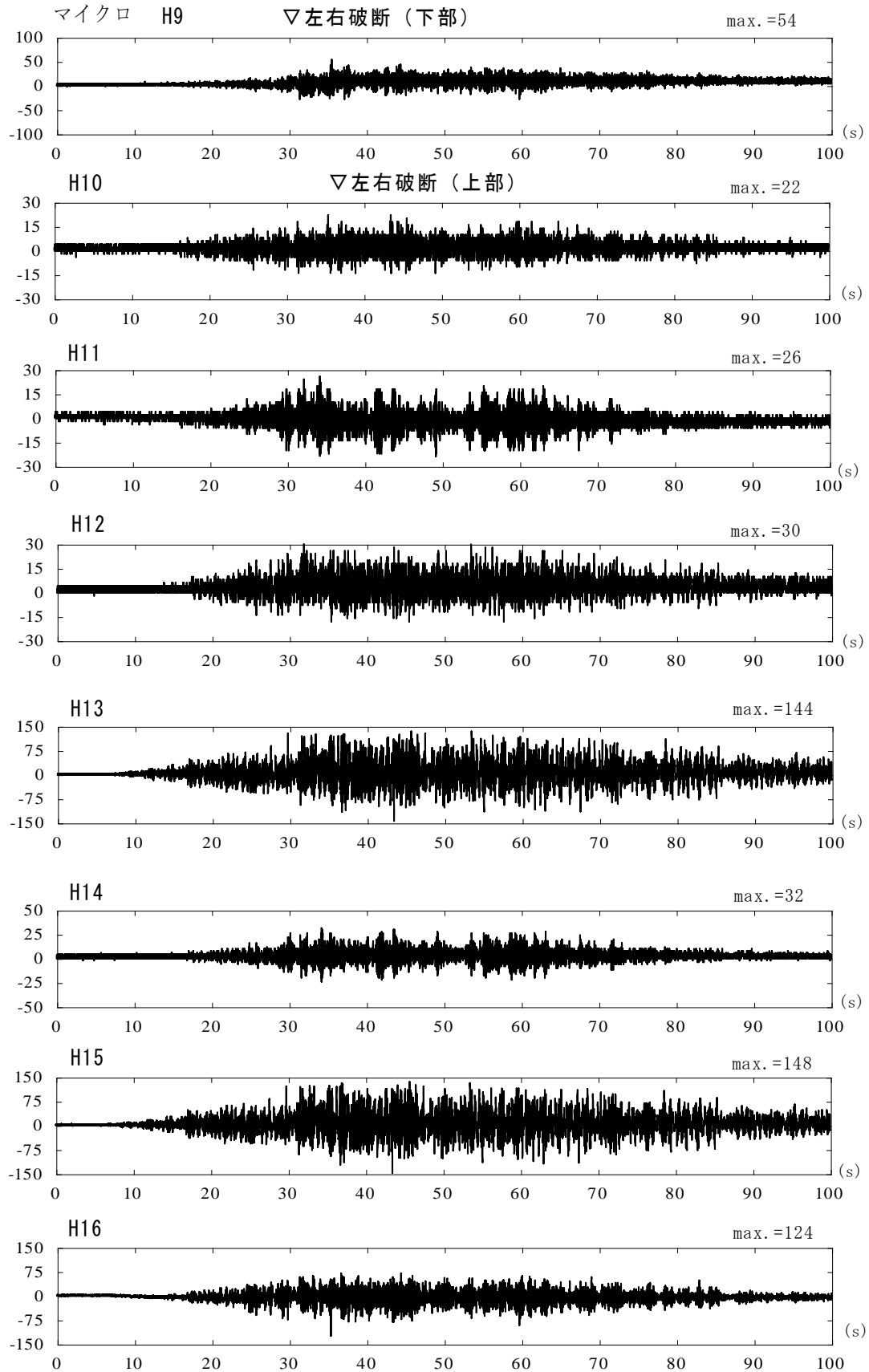


図 3.2-69(4) 配管のひずみ時刻歴((AK(25×15),mwave-02(60%))

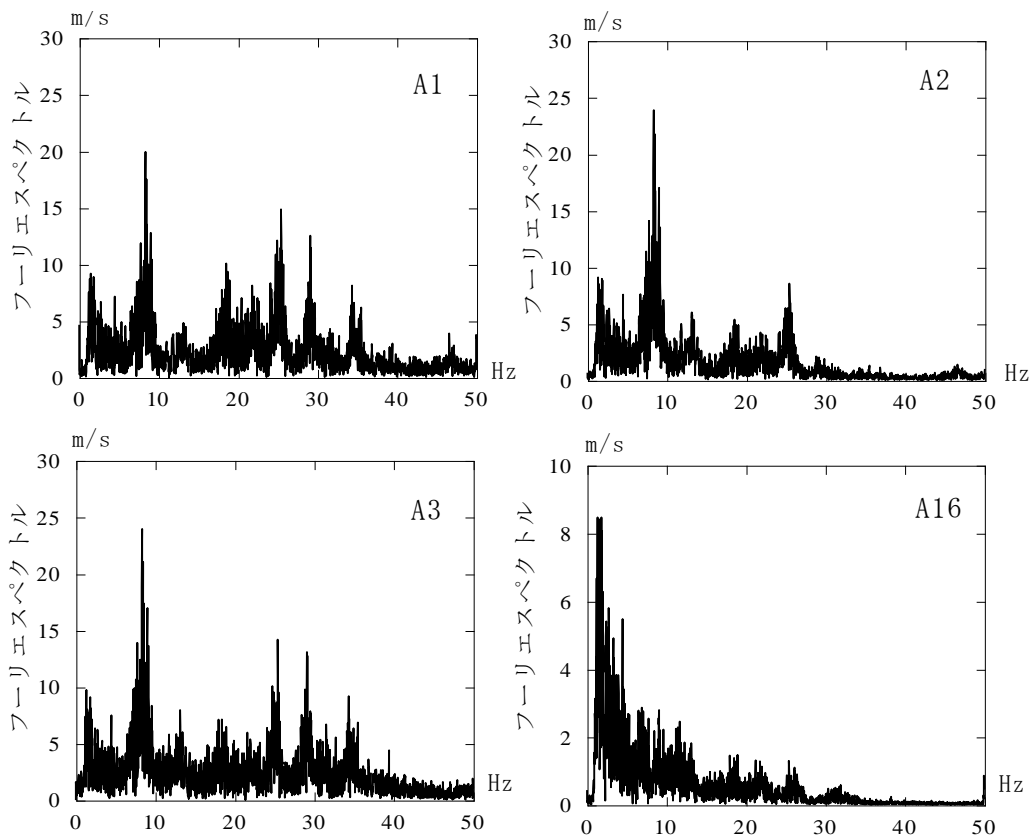


図 3.2-70 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(25×15),mwave-02(100%),25～65s)

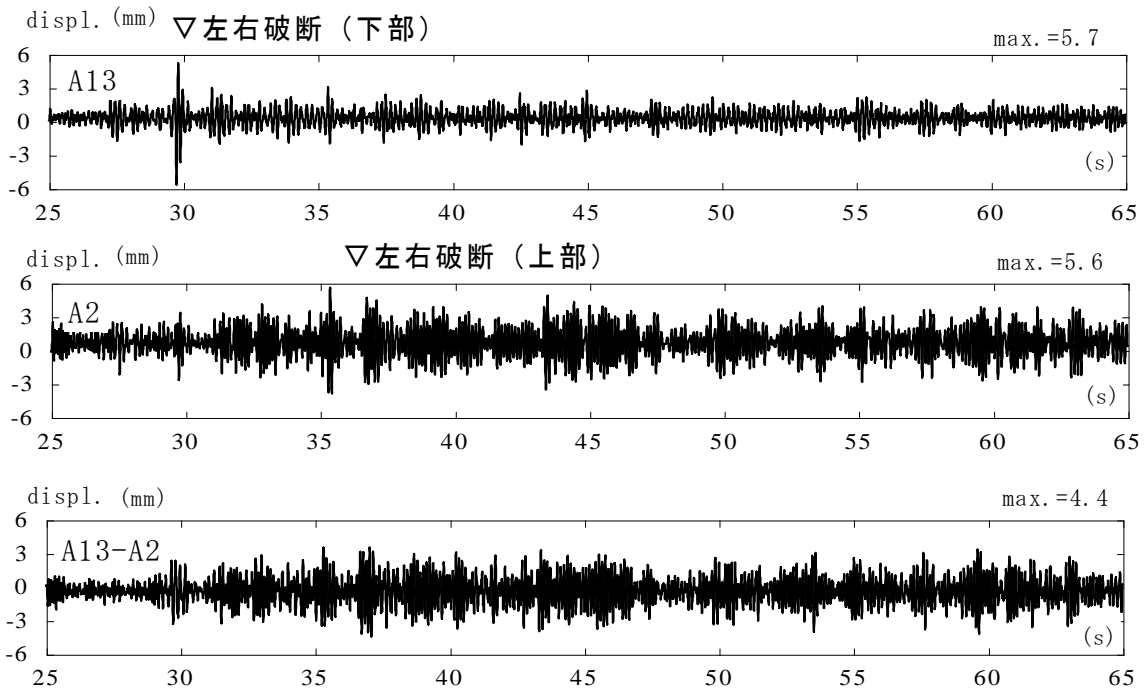


図 3.2-71 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15),mwave-02(60%),25～65s)

表 3.2-33 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(20×15),mwave-02(100%))

地震波	mwave-02 倍率100%					
	加速度計	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1		82.62	7.29	7.34	H1	60
A2		51.87	4.58	4.61	H2	60
A3		148.49	13.11	13.20	H3	360
A4		13.25	—	—	H4	76
A5		28.20	—	—	H5	86
A6		141.63	12.50	12.59	H6	54
A7		229.85	20.29	20.43	H7	78
A8		105.08	9.27	9.34	H8	174
A9		44.67	3.94	3.97	H9	128
A10		31.78	2.80	2.82	H10	56
A11		90.81	8.02	8.07	H11	62
A13		93.30	8.23	8.29	H12	68
A15		11.33	1.00	1.01	H13	370
A16		11.25	0.99	1.00	H14	66
A17		57.46	—	—	H15	378
A18		80.14	—	—	H16	238

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

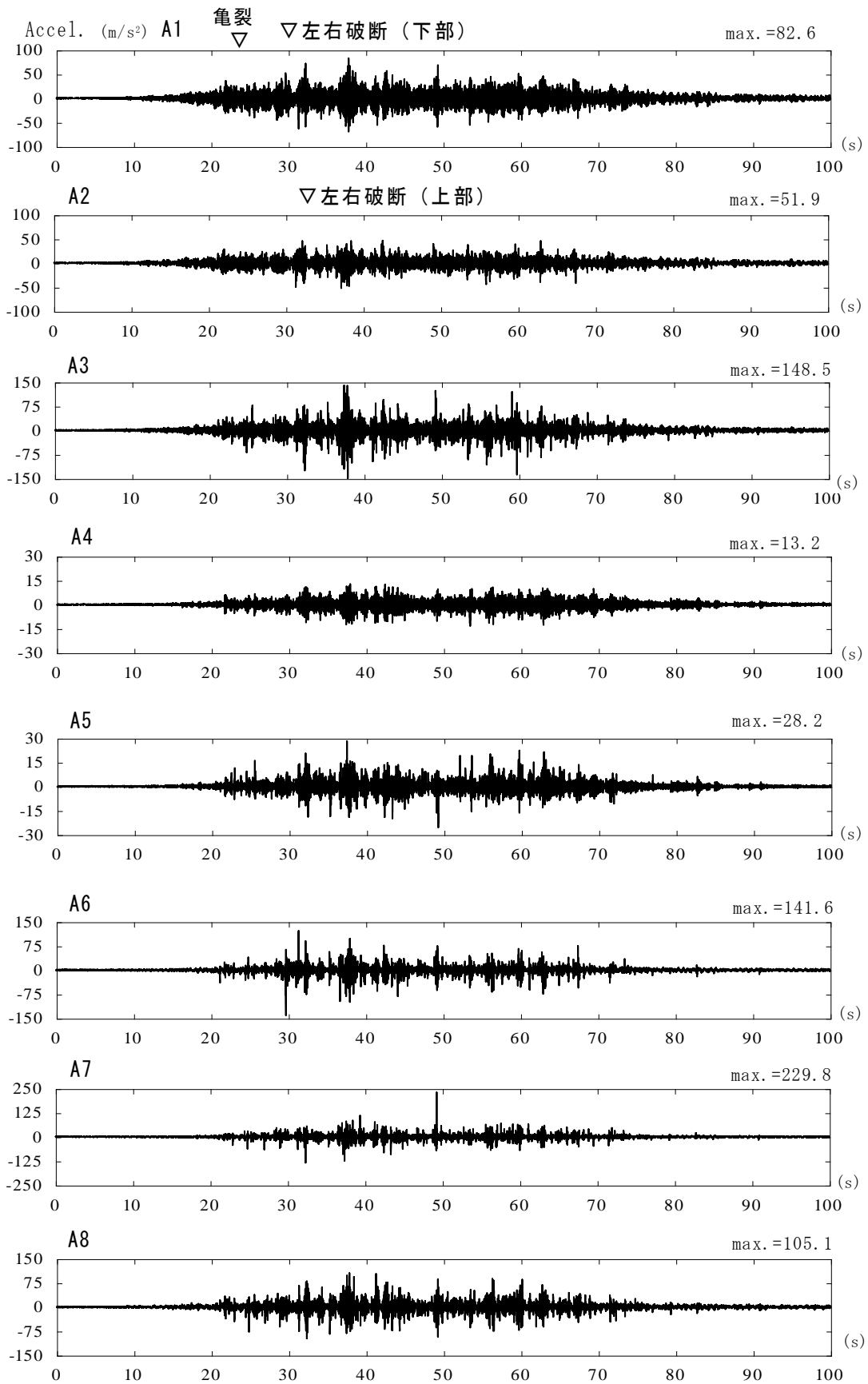


图 3.2-72(1) 加速度時刻歴((AK(20×15),mwave-02(100%))

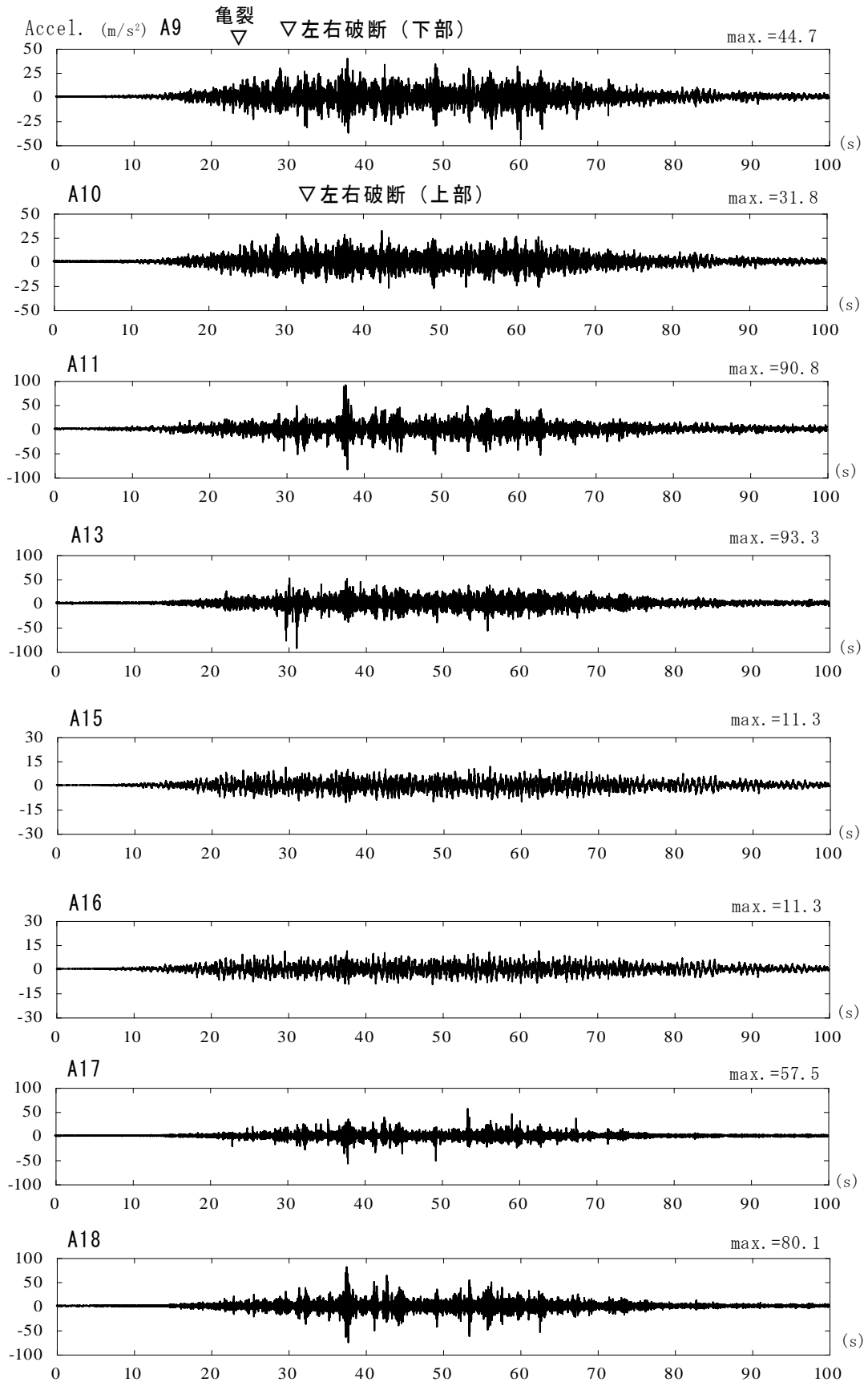


図 3.2-72(2) 加速度時刻歴((AK(20×15),mwave-02(100%))

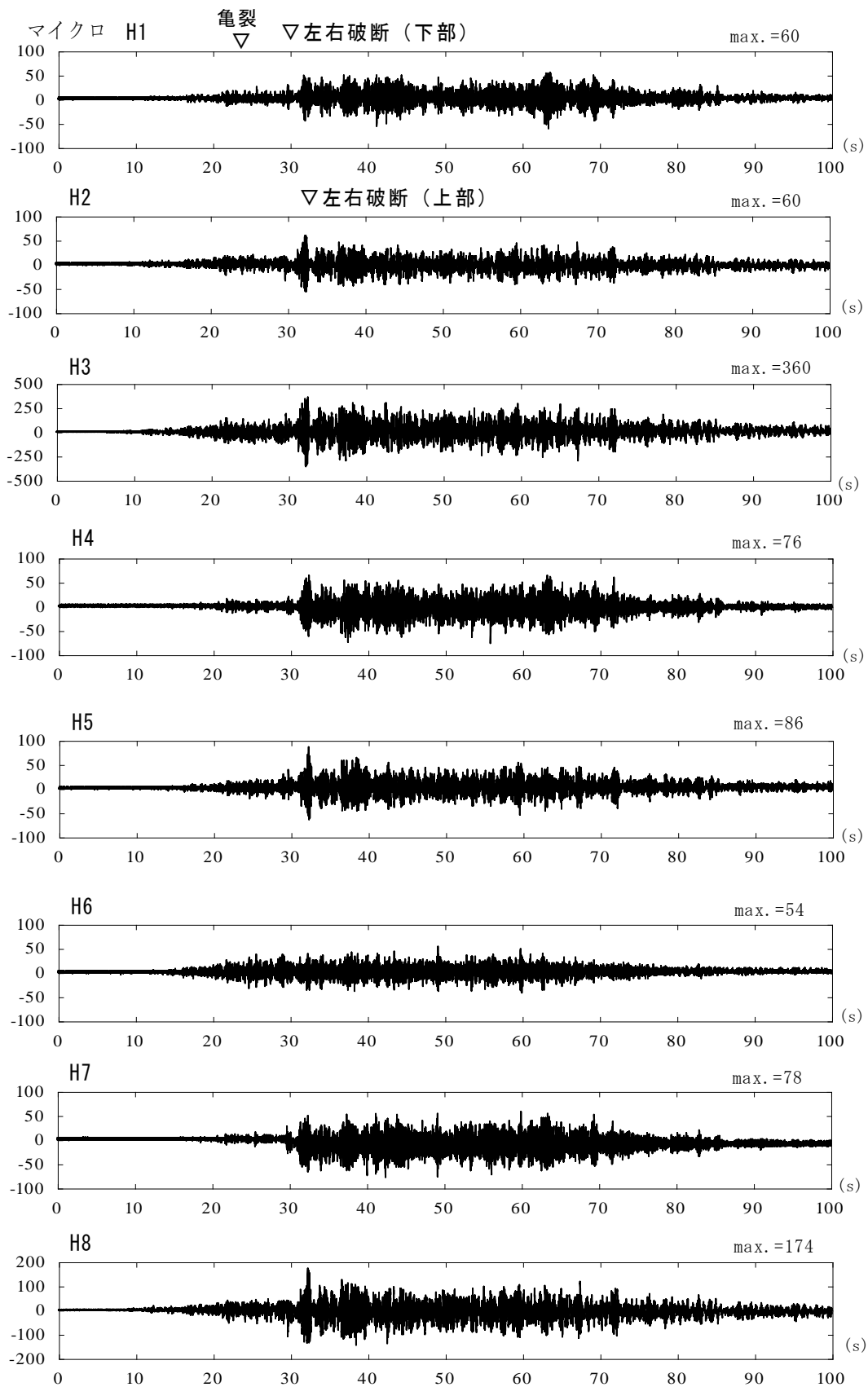


図 3.2-72(3) 配管のひずみ時刻歴((AK(20×15),mwave-02(100%))

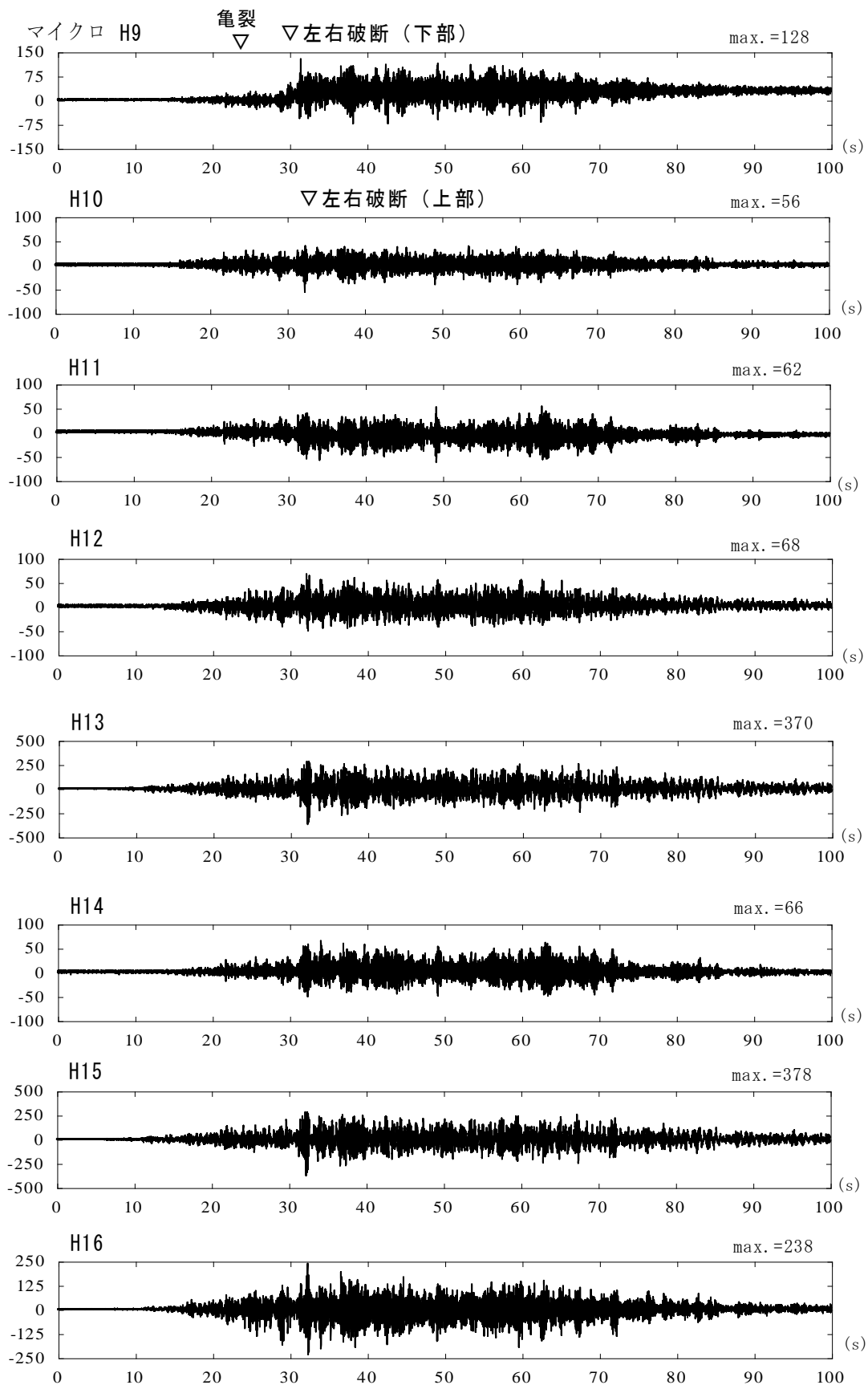


図 3.2-72(4) 配管のひずみ時刻歴((AK(20×15),mwave-02(100%))

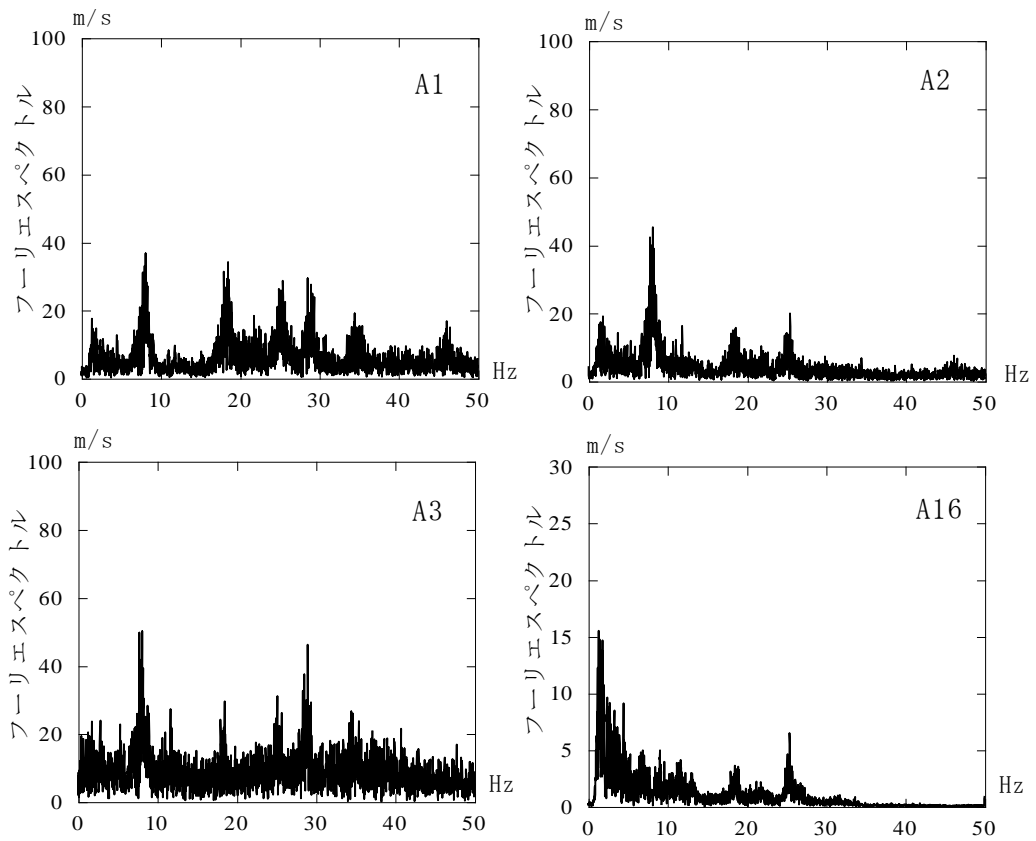


図 3.2-73(1) A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(20×15),mwave-02(100%),25~65s)

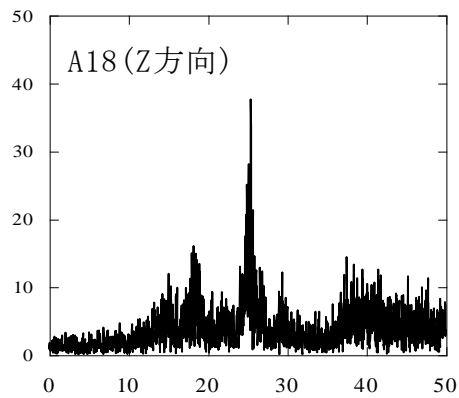


図 3.2-73(2) A18 のフーリエスペクトル(AK(20×15),mwave-02(100%),25~65s)

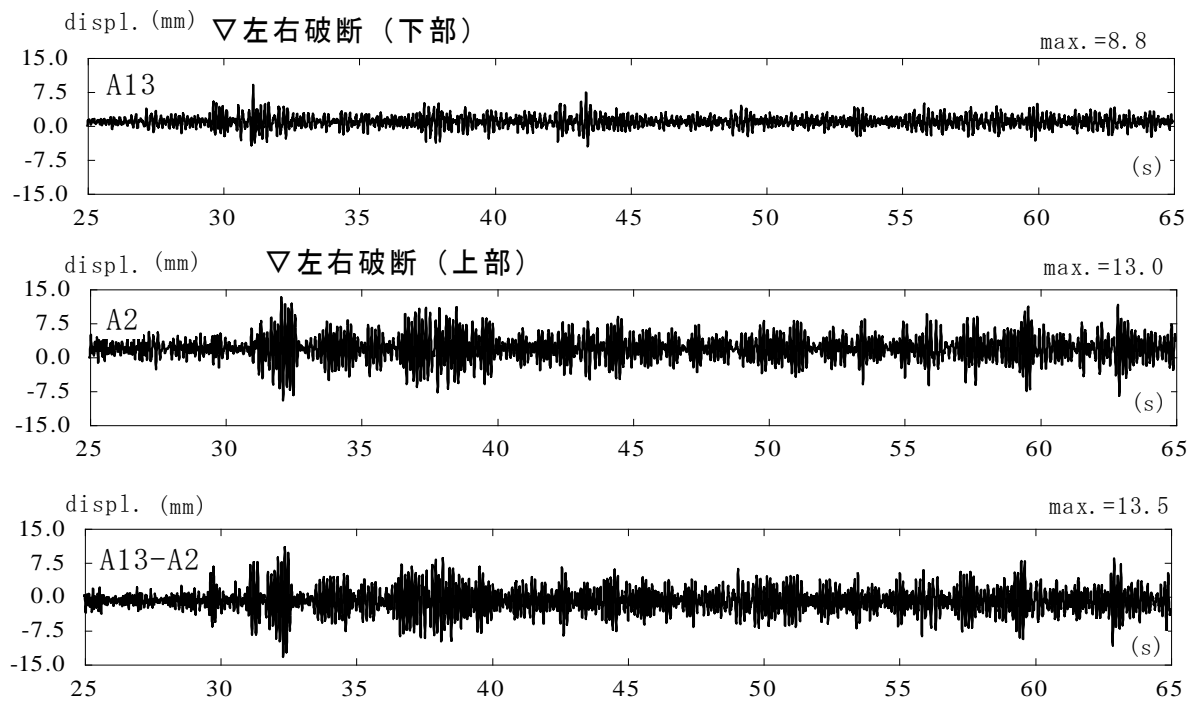


図 3.2-74 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(20×15),mwave-02(100%),25~65s)

表 3.2-34 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(ST φ6,mwave-02(100%))

地震波 加速度計	mwave-02 倍率100%				
	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	61.42	5.68	5.65	H1	46
A2	39.75	3.67	3.65	H2	28
A3	87.77	8.11	8.07	H3	192
A4	13.88	—	—	H4	46
A5	26.13	—	—	H5	34
A6	84.76	7.84	7.79	H6	52
A7	94.77	8.76	8.71	H7	44
A8	71.37	6.60	6.56	H8	88
A9	39.02	3.61	3.59	H9	54
A10	35.07	3.24	3.22	H10	54
A11	68.63	6.34	6.31	H11	62
A13	44.64	4.13	4.10	H12	52
A15	10.82	1.00	0.99	H13	198
A16	10.88	1.01	1.00	H14	52
A17	46.83	—	—	H15	186
A18	76.05	—	—	H16	218

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

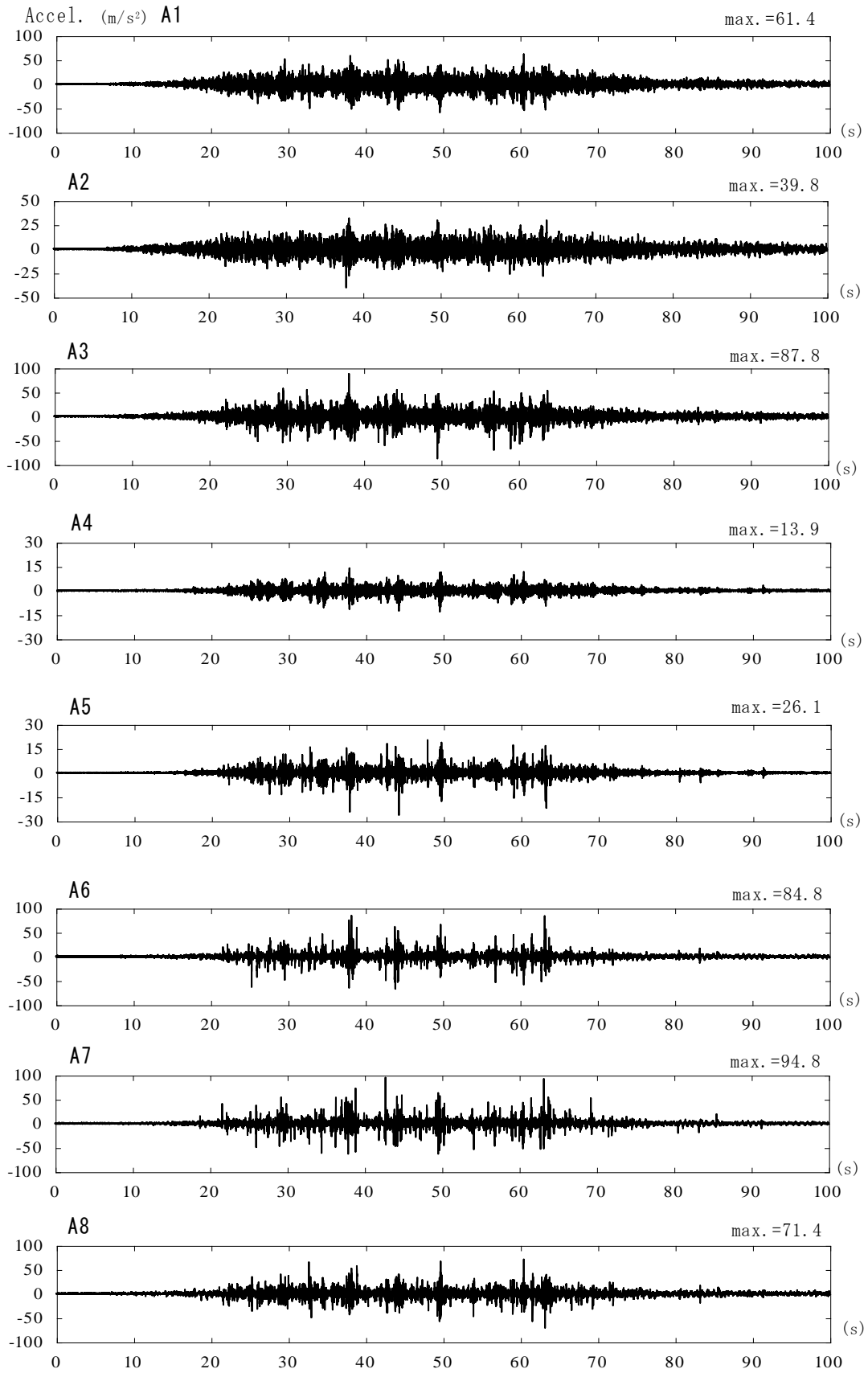


图 3.2-75(1) 加速度時刻歴(ST φ6,mwave-02(100%))

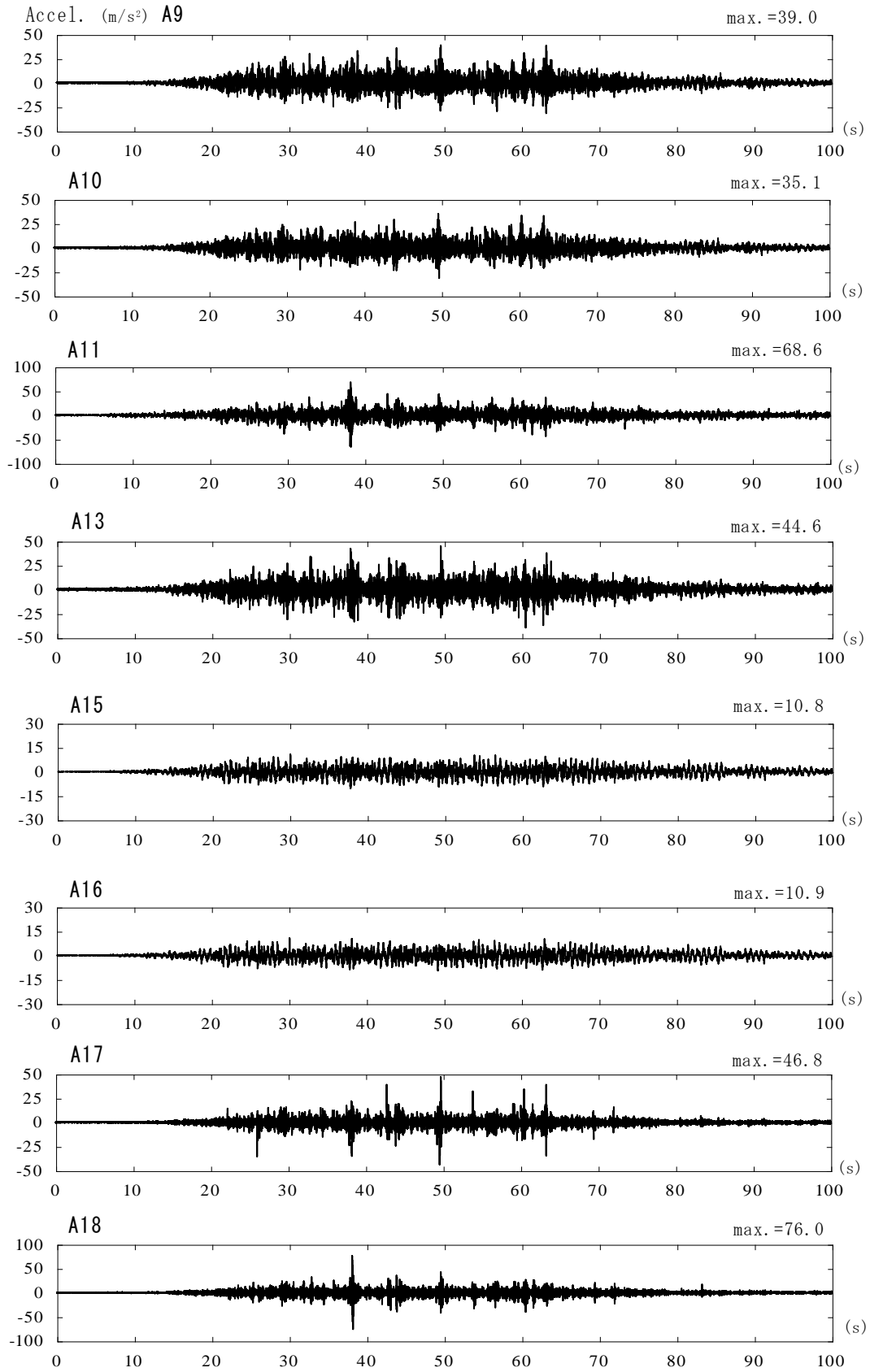


图 3.2-75(2) 加速度時刻歴(ST φ6,mwave-02(100%))

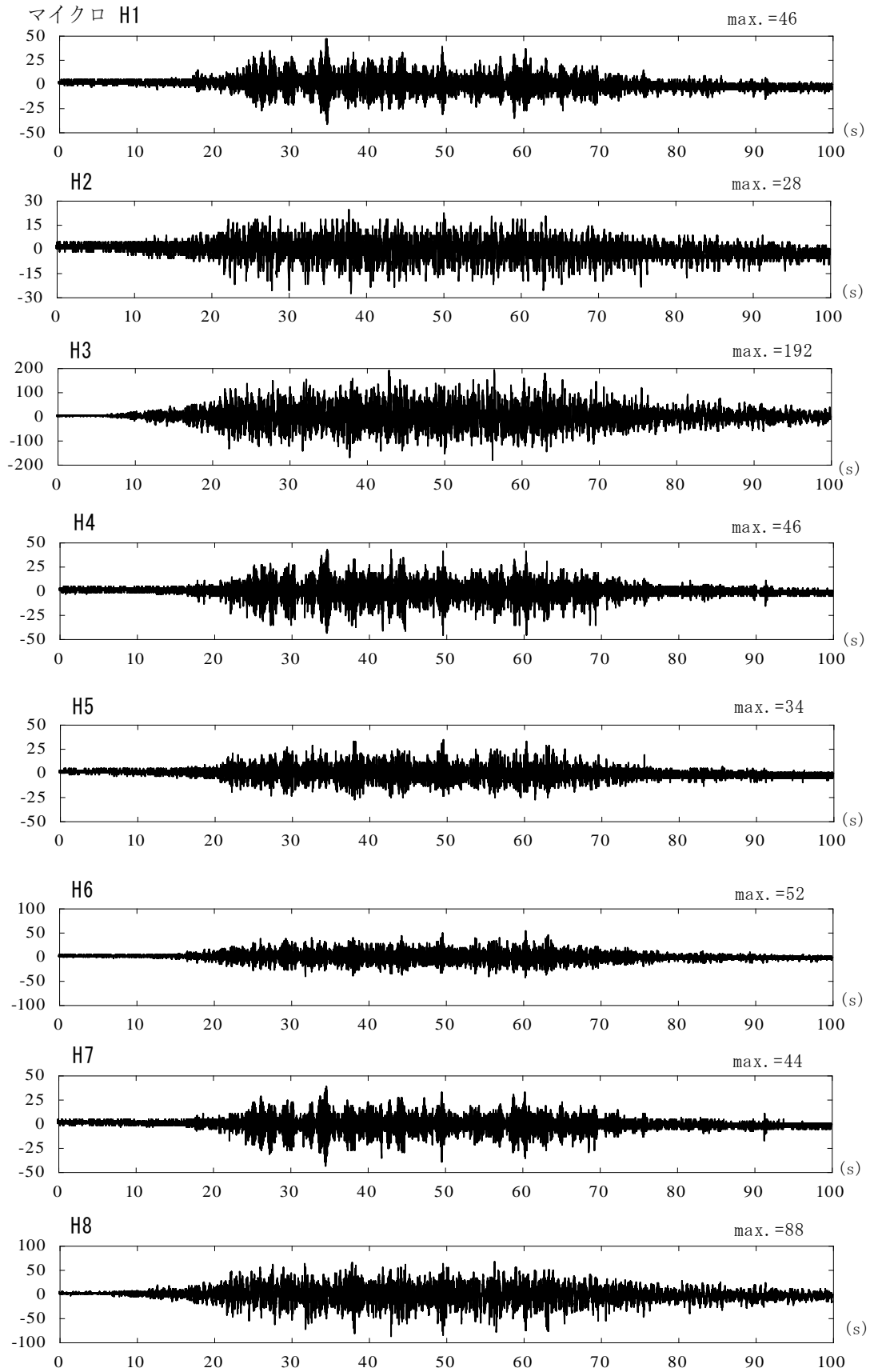


図 3.2-75(3) 配管のひずみ時刻歴(ST $\phi 6$, mwave-02(100%))

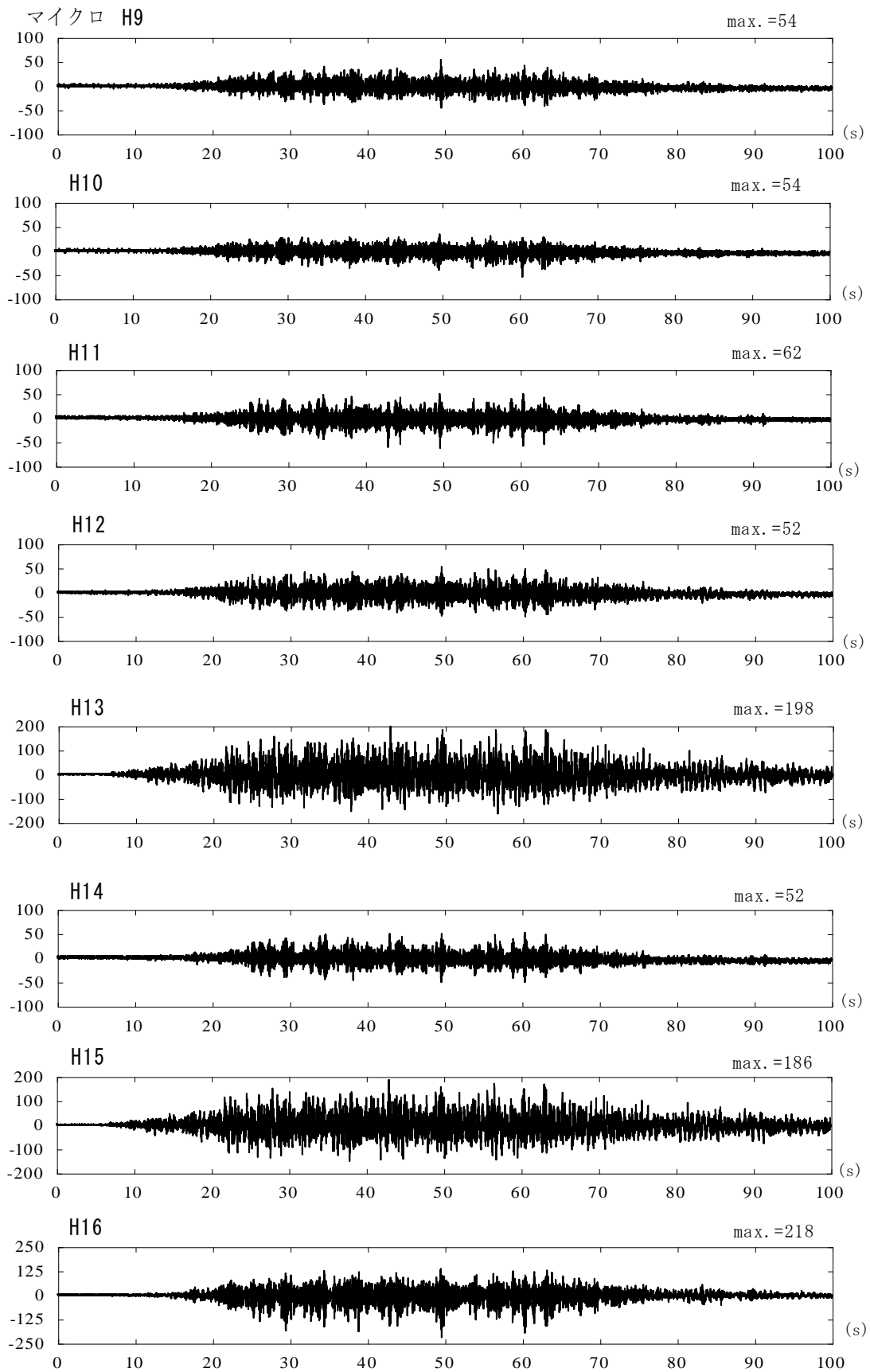


図 3.2-75(4) 配管のひずみ時刻歴(ST $\phi 6$, mwave-02(100%))

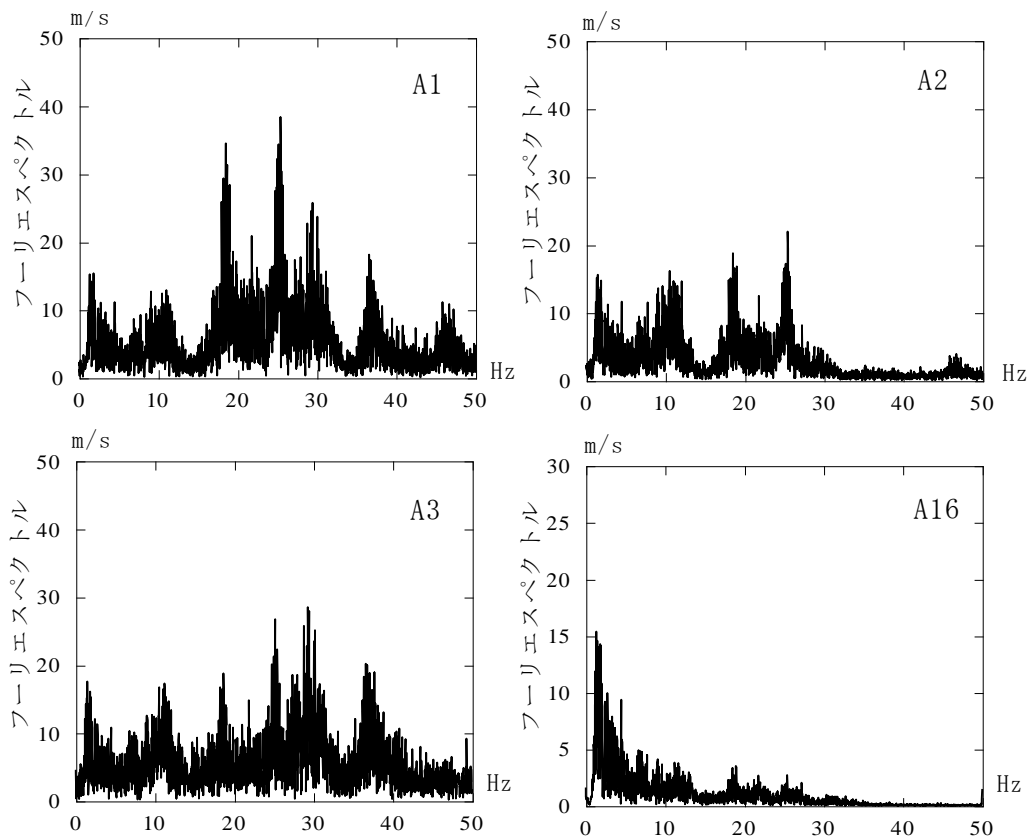


図 3.2-76 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(ST $\phi 6$,mwave-02(100%),25~65s)

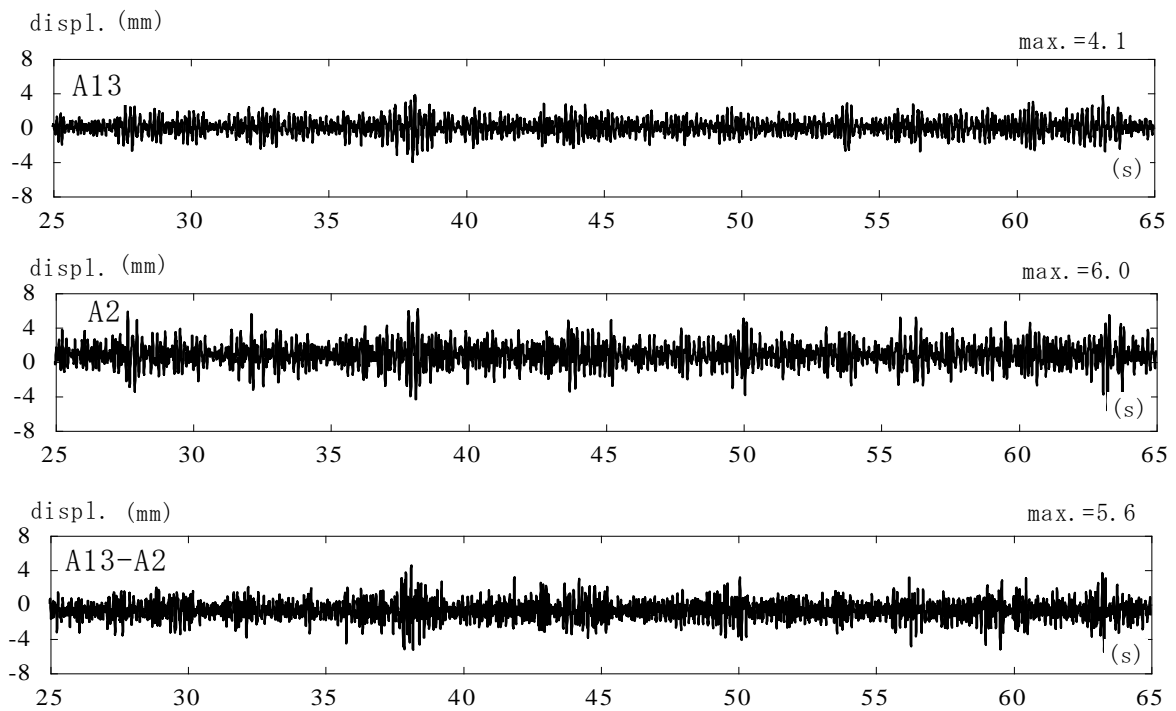


図 3.2-77 サポート A 位置の相対変位時刻歴(ST $\phi 6$,mwave-02(100%),25~65s)

3. 2. 5. 3. 4 n05-ew1000 による水平加振試験結果

n05-ew10001 入力の試験で破断・亀裂が発生した加振条件を表 3. 2-35 に示す。また、サポート A の破断・亀裂状況等は図 3. 2-78 に示す。

AK(25×15)の倍率 100%入力において、開口の左側片下側に亀裂が発生している。

(1) AK(25×15)のサポート A

表 3. 2-36 に 100%入力した場合の、最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を示す。図 3. 2-79(1)～(2)に同様の加速度を示す。また、ひずみの時刻歴は、最大ひずみの一覧に見られるように比較的小さいのでここでは省略する。図 3. 2-80 にフーリエスペクトル、図 3. 2-81 にサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。

加速度時刻歴波形から 17 秒付近で左側(下部)に亀裂は発生おり、応答も急激に大きくなっているが、これは亀裂の発生していない後述の AK(20×15)及び ST φ6 でも同様の傾向が見られるので、入力地震動の影響が大きいと考えられる。また、A1, A2, A3 のフーリエスペクトルから開口付きアクリル板のサポート A に用いた場合の 1 次振動数である 13Hz 付近の影響が大きいことが分かり、亀裂が生じただけでは配管系の固有振動数に及ぼす影響は小さいことが分かる。サポート A 部分の相対変位時刻歴では、支梁(H-100×100)の振幅も大きくなっており、配管部分と同様の振動をする傾向も影響して、相対変位が小さくなっている。サポート A 部分の最大相対変位 1.7mm 程度である。最も大きいひずみ度は、ロッドレストレインの支持点付近の H13 で 134 μ である。

(2) AK(20×15)及び ST φ6 のサポート A

AK(20×15)、ST φ6 のサポート A では、倍率 100%を入力しても破断・亀裂は発生しなかったため、倍率 100%入力時の結果を示す。

表 3. 2-37、表 3. 2-38 に倍率 100%の最大応答加速度と最大ひずみ及び応答倍率を、図 3. 2-82(1)～(2)、図 3. 2-85(1)～(2)にそれぞれの加速度を示している。また、ひずみの時刻歴は(1)の AK(25×15)と同様に省略する。図 3. 2-83、図 3. 2-86 にそれぞれのフーリエスペクトルを、図 3. 2-84、図 3. 2-87 にそれぞれのサポート A 部分の相対変位時刻歴を示す。2つのケース共にサポート A は破断していないので、12～13Hz 付近の影響を大きく受けて振動していることがわかる。サポート A 部分の最大相対変位は、AK(20×15)で 2.3mm 程度、ST φ6 で 2.8mm 程度である。最も大きいひずみ度は、AK(20×15)で H13 の 118 μ 、ST φ6 で H3 の 148 μ である。

表 3.2-35 n05-ew1000 入力の加振結果の概要

サポートA	地震波 n05-ew1000		破断・亀裂状況
	倍率(%)	試験番号	
アクリル板 25×15mm AK(25×15)	40	2015-2-11-E-11	破断・亀裂なし
	60	2015-2-11-E-12	破断・亀裂なし
	80	2015-2-11-E-13	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-11-E-14	17.0s付近:左亀裂(下部)
アクリル板 20×15mm AK(20×15)	40	2015-2-11-E-21	破断・亀裂なし
	60	2015-2-11-E-22	破断・亀裂なし
	80	2015-2-11-E-23	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-11-E-24	破断・亀裂なし
鋼棒直径6mm ST(φ6)	40	2015-2-14-E-32	破断・亀裂なし
	60	2015-2-14-E-33	破断・亀裂なし
	80	2015-2-14-E-34	破断・亀裂なし
	100	○2015-2-14-E-35	破断・亀裂なし

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号:2015-2-11-E-14



試験番号:2015-2-14-E-35(破断・亀裂なし)

図 3.2-78 サポート A の破断・亀裂状況等(n05-ew1000 入力)

表 3.2-36 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(25×15), n05-ew1000(100%))

地震波	n05-ew1000 倍率100%					
	加速度計	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1		19.02	1.67	1.70	H1	22
A2		17.47	1.53	1.56	H2	18
A3		35.90	3.14	3.20	H3	104
A4		3.63	—	—	H4	18
A5		7.75	—	—	H5	10
A6		24.14	2.11	2.15	H6	14
A7		40.74	3.57	3.64	H7	14
A8		25.83	2.26	2.31	H8	40
A9		15.86	1.39	1.42	H9	10
A10		12.24	1.07	1.09	H10	12
A11		21.14	1.85	1.89	H11	14
A13		14.29	1.25	1.27	H12	20
A15		11.42	1.00	1.02	H13	134
A16		11.20	0.98	1.00	H14	20
A17		8.58	—	—	H15	128
A18		9.44	—	—	H16	66

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

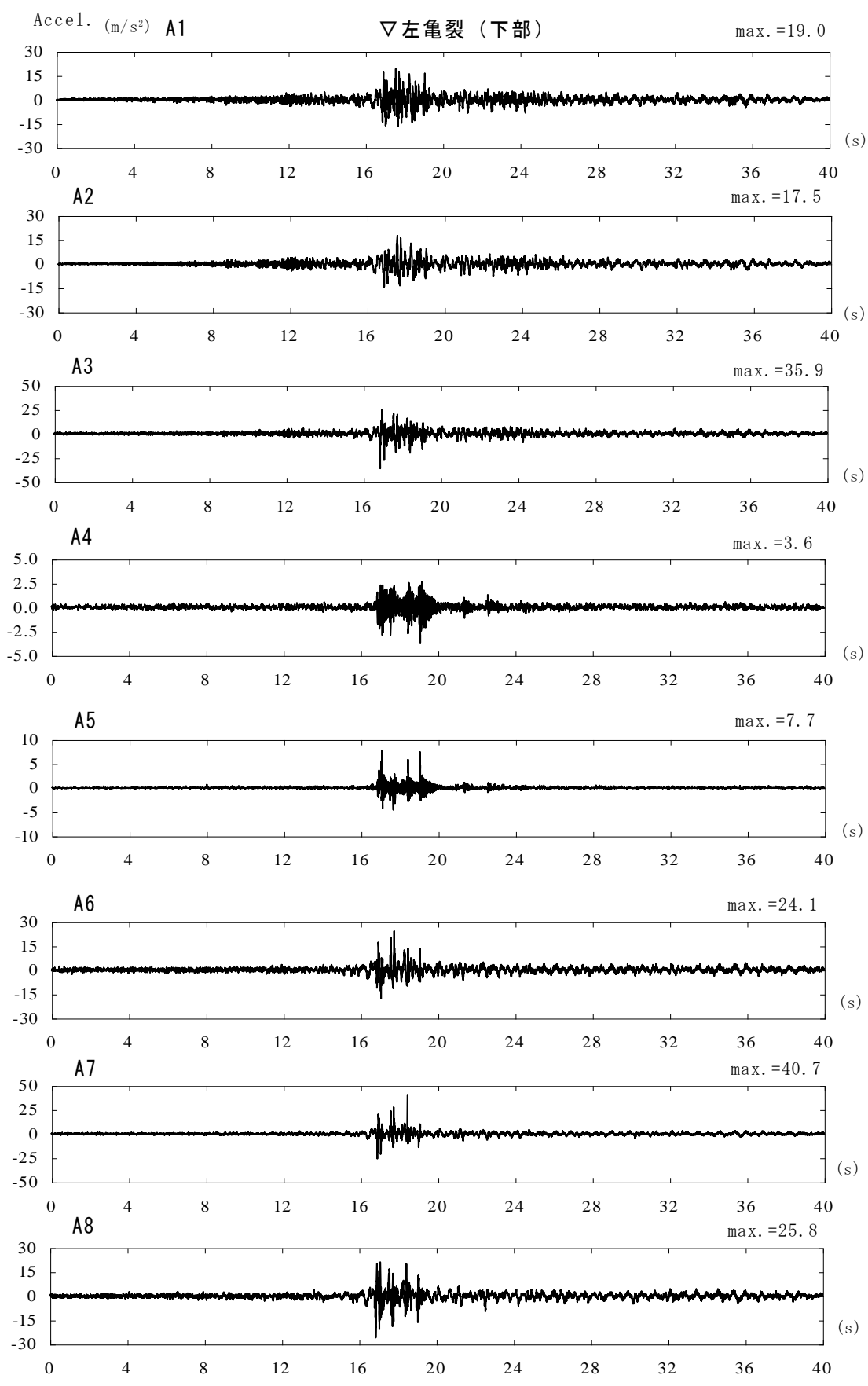


图 3.2-79(1) 加速度時刻歴 (AK(25×15), n05-ew1000(100%))

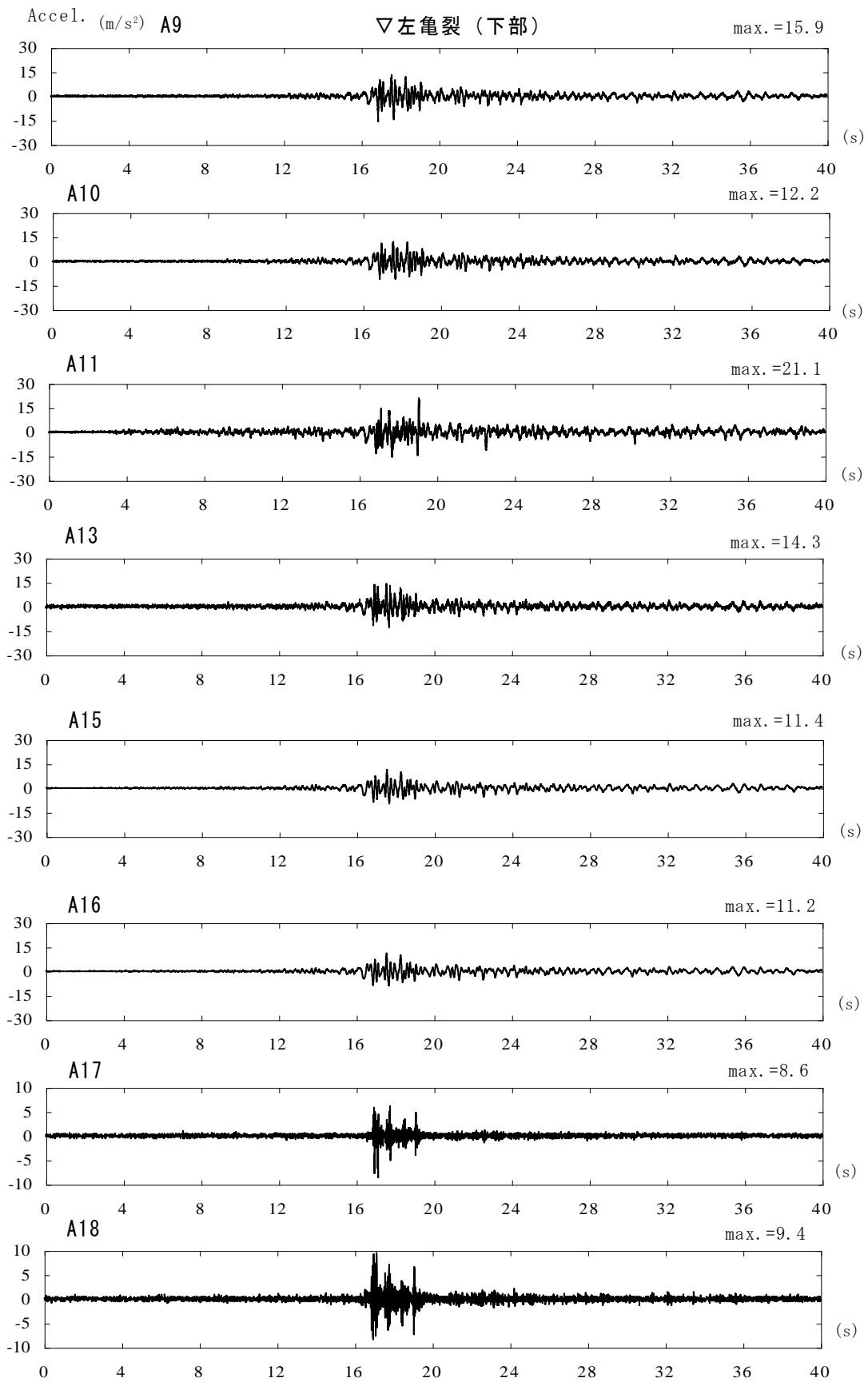


图 3.2-79 (2) 加速度時刻歴 (AK(25×15), n05-ew1000(100%))

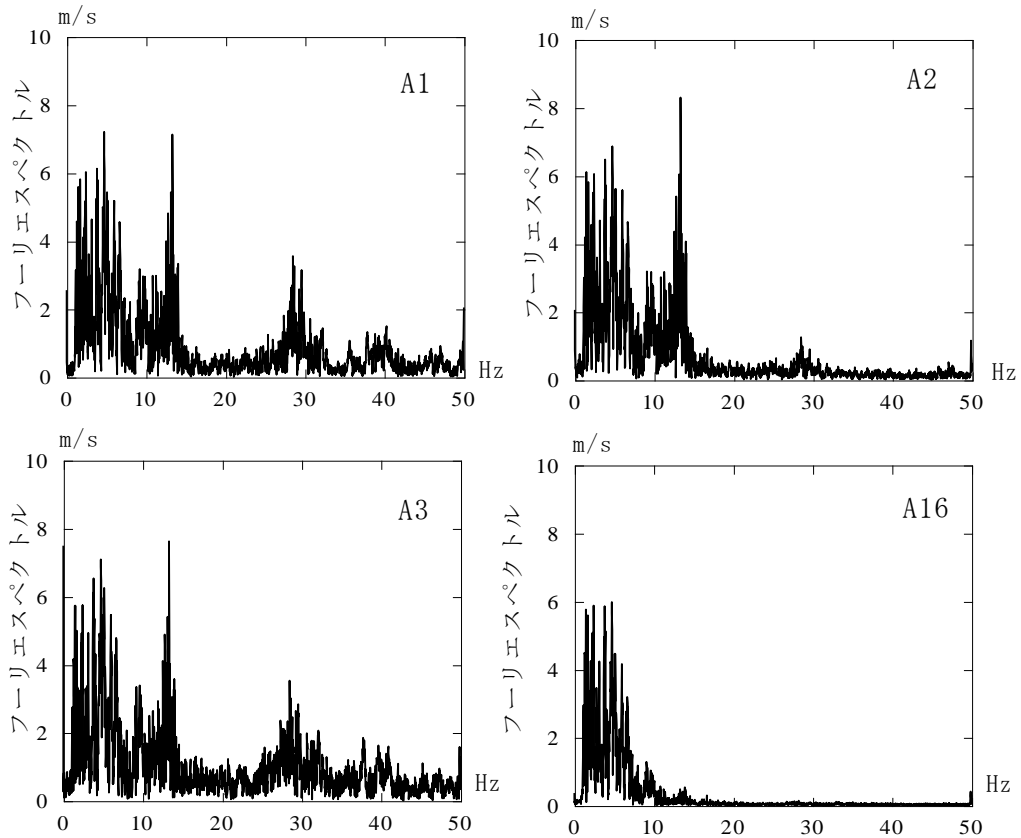


図 3.2-80 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(25×15), n05-ew1000(100%),0~40s)

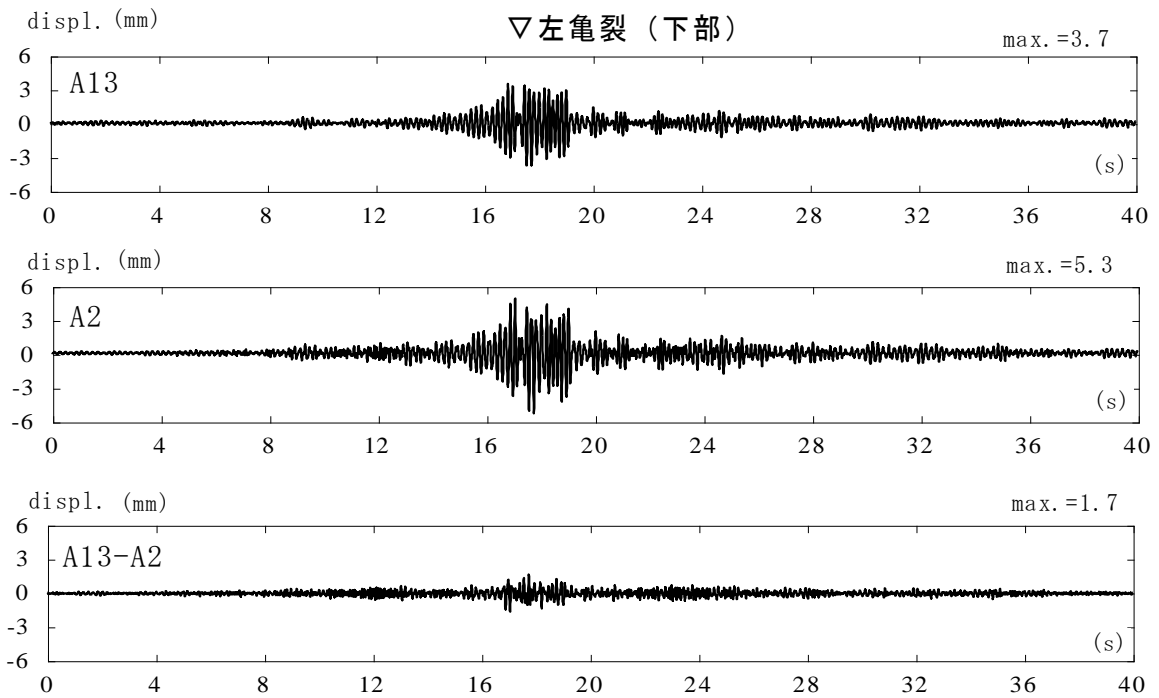


図 3.2-81 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(25×15), n05-ew1000(100%),0~40s)

表 3.2-37 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(AK(20×15), n05-ew1000(100%))

地震波	n05-ew1000 倍率100%				
	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1	20.77	1.84	1.82	H1	10
A2	18.72	1.66	1.64	H2	14
A3	30.14	2.67	2.65	H3	80
A4	2.81	—	—	H4	8
A5	5.77	—	—	H5	8
A6	23.07	2.05	2.03	H6	16
A7	38.53	3.42	3.38	H7	6
A8	28.46	2.52	2.50	H8	32
A9	15.13	1.34	1.33	H9	12
A10	13.15	1.17	1.15	H10	10
A11	19.24	1.71	1.69	H11	14
A13	14.29	1.27	1.25	H12	16
A15	11.28	1.00	0.99	H13	118
A16	11.39	1.01	1.00	H14	18
A17	8.75	—	—	H15	112
A18	10.33	—	—	H16	68

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

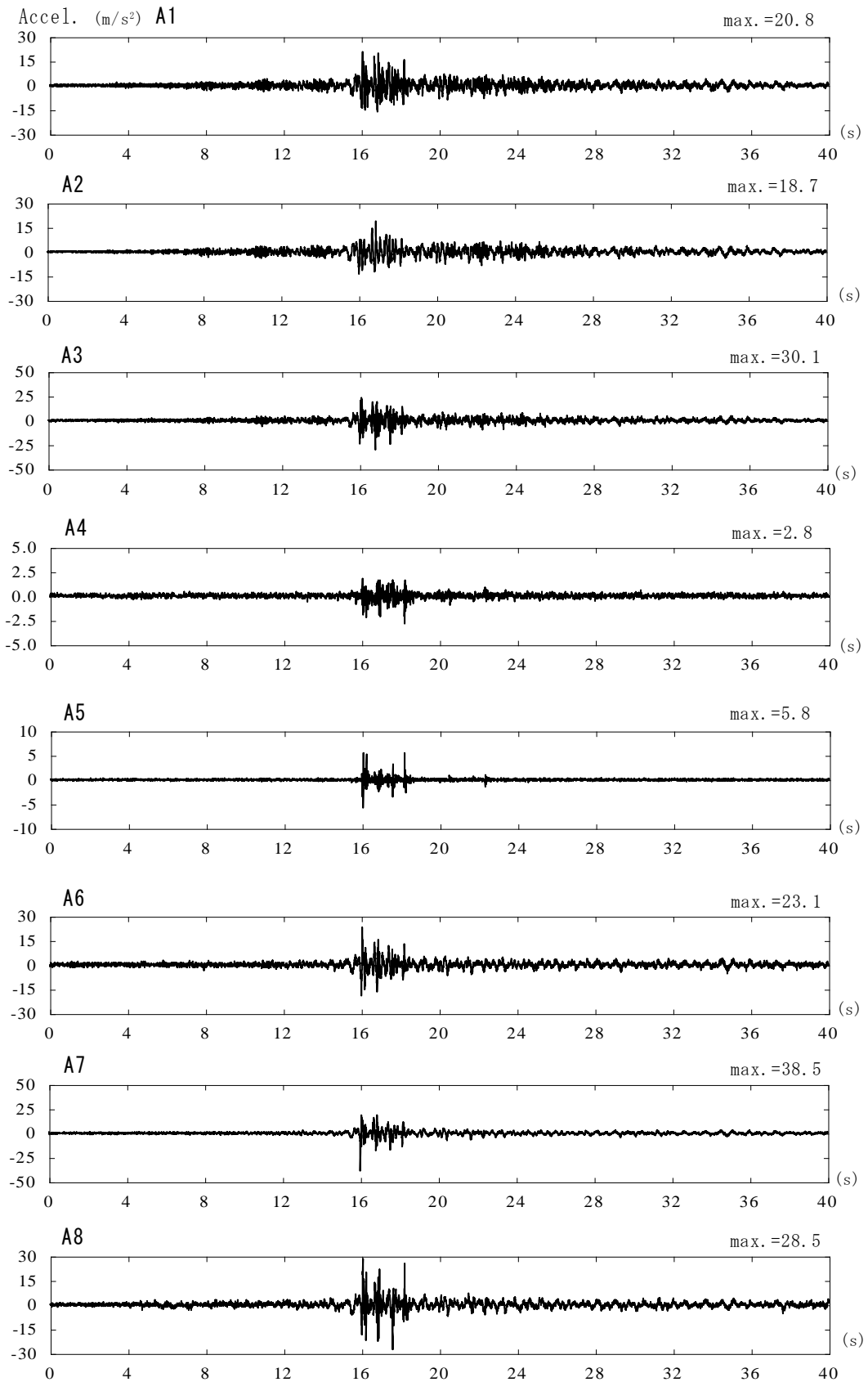


图 3.2-82(1) 加速度時刻歴((AK(20×15),n05-ew1000(100%))

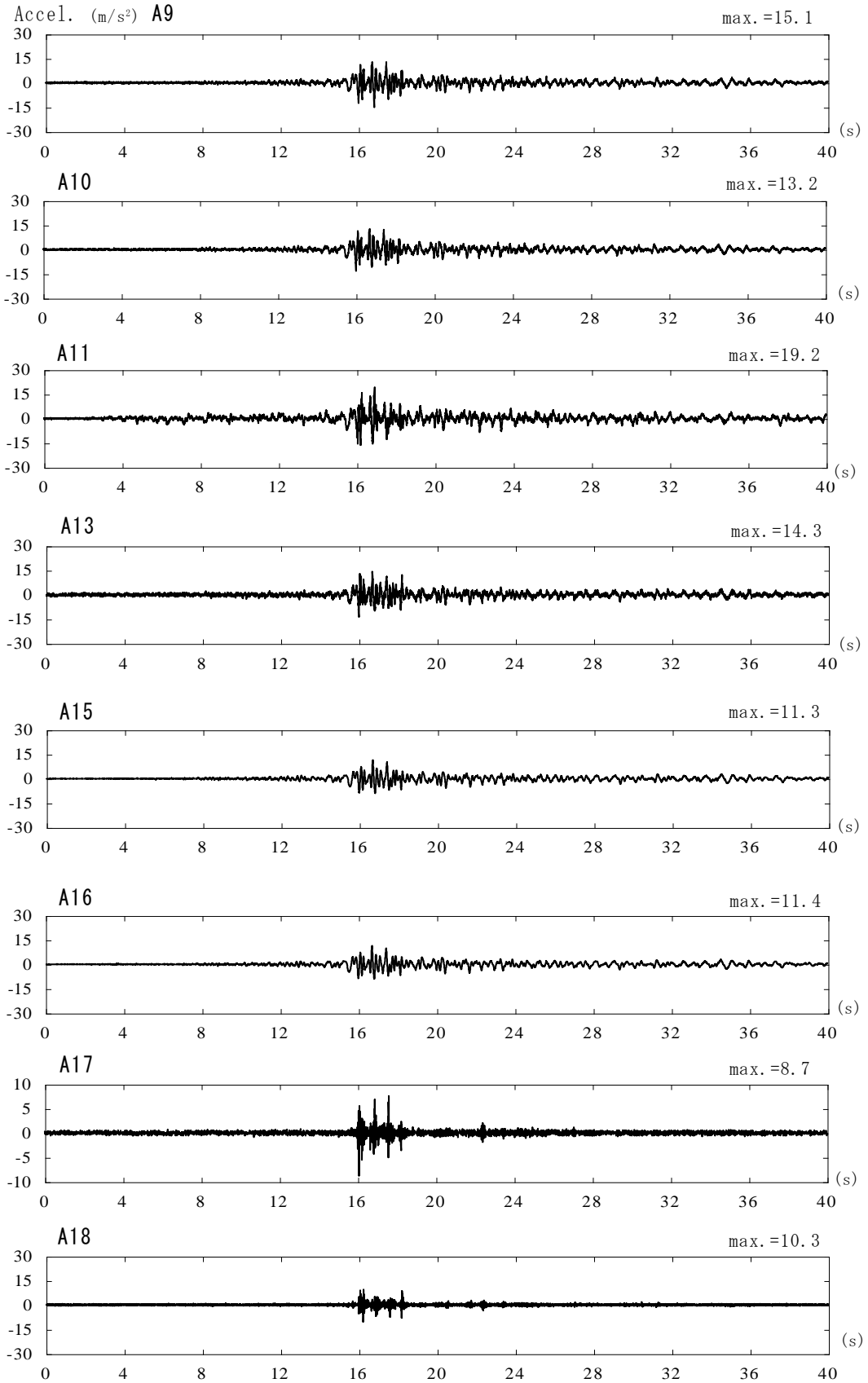


图 3.2-82(2) 加速度時刻歴((AK(20×15),n05-ew1000(100%))

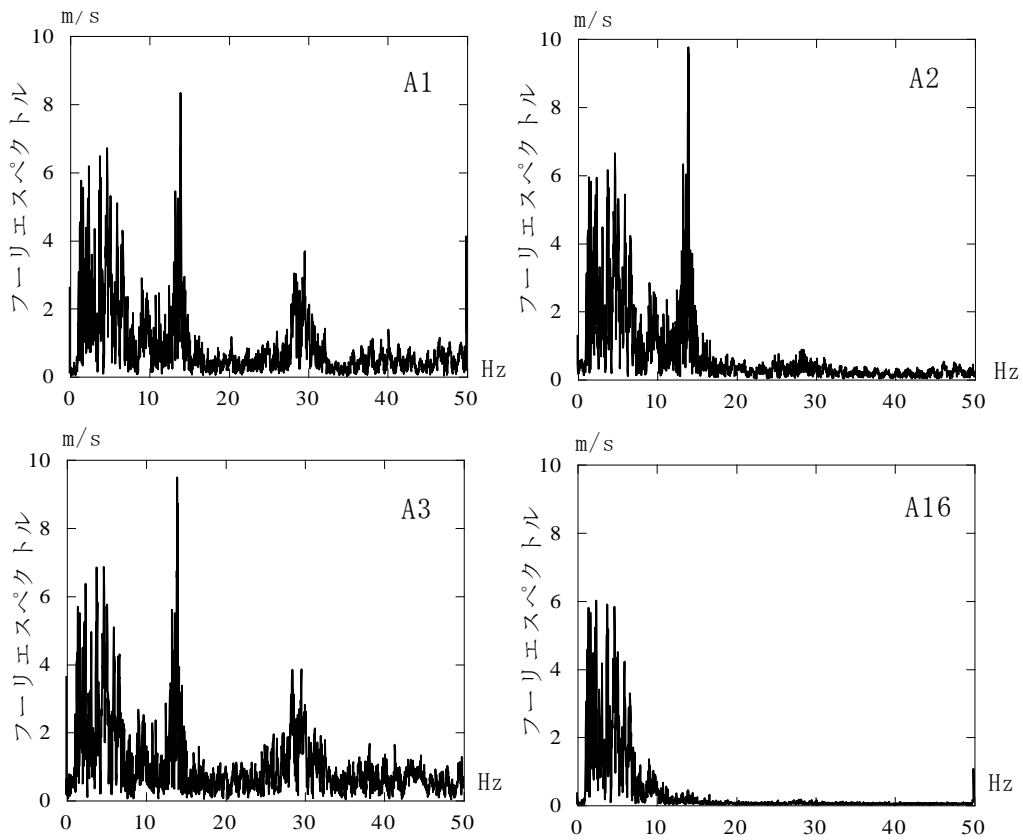


図 3.2-83 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(AK(20×15), n05-ew1000(100%),0~40s)

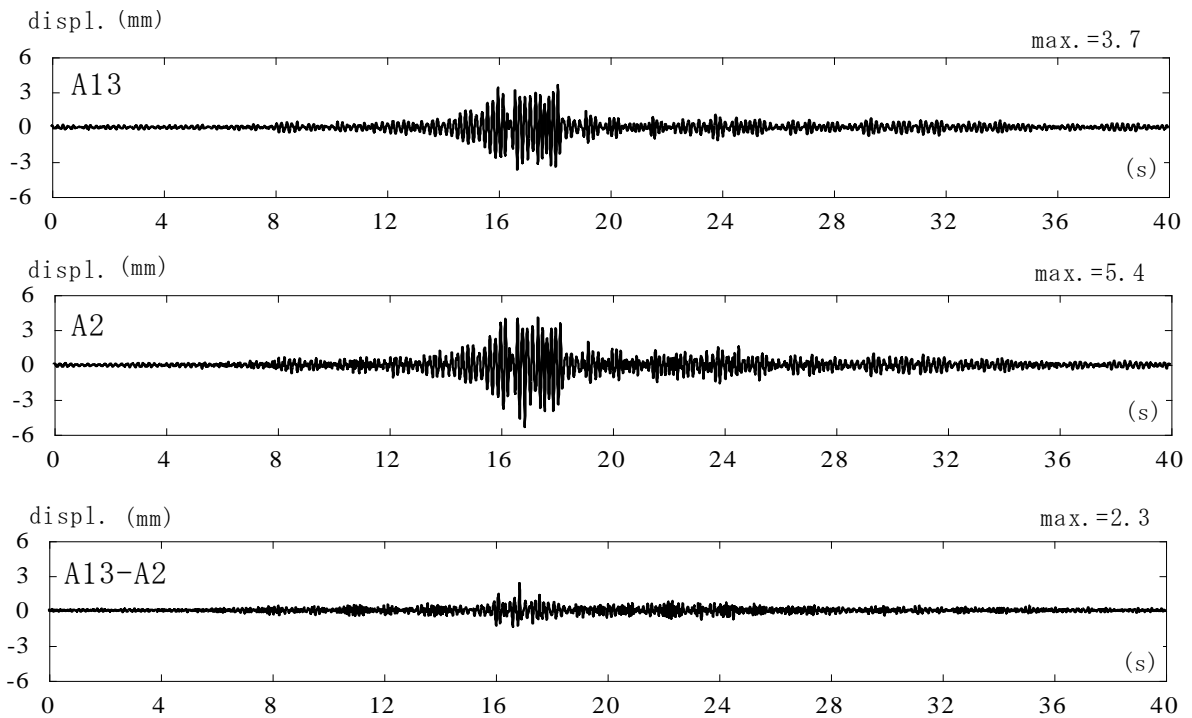


図 3.2-84 サポート A 位置の相対変位時刻歴(AK(20×15), n05-ew1000(100%),0~40s)

表 3.2-38 最大加速度・最大ひずみ及び応答倍率の一覧(ST φ6, n05-ew1000(100%))

地震波	n05-ew1000 倍率100%					
	加速度計	最大加速度(m/s ²)	応答倍率1	応答倍率2	ひずみゲージ	最大ひずみ(μ)
A1		22.95	2.00	2.04	H1	18
A2		15.86	1.38	1.41	H2	20
A3		20.83	1.82	1.85	H3	120
A4		3.99	—	—	H4	20
A5		4.96	—	—	H5	10
A6		22.53	1.96	2.00	H6	18
A7		29.23	2.55	2.60	H7	18
A8		21.89	1.91	1.95	H8	52
A9		13.13	1.14	1.17	H9	18
A10		12.79	1.11	1.14	H10	10
A11		18.20	1.59	1.62	H11	14
A13		14.29	1.25	1.27	H12	22
A15		11.47	1.00	1.02	H13	148
A16		11.25	0.98	1.00	H14	20
A17		7.38	—	—	H15	138
A18		8.37	—	—	H16	54

※応答倍率1はA15(X方向)に対する倍率であり、応答倍率2はA16(X方向)に対する倍率である。

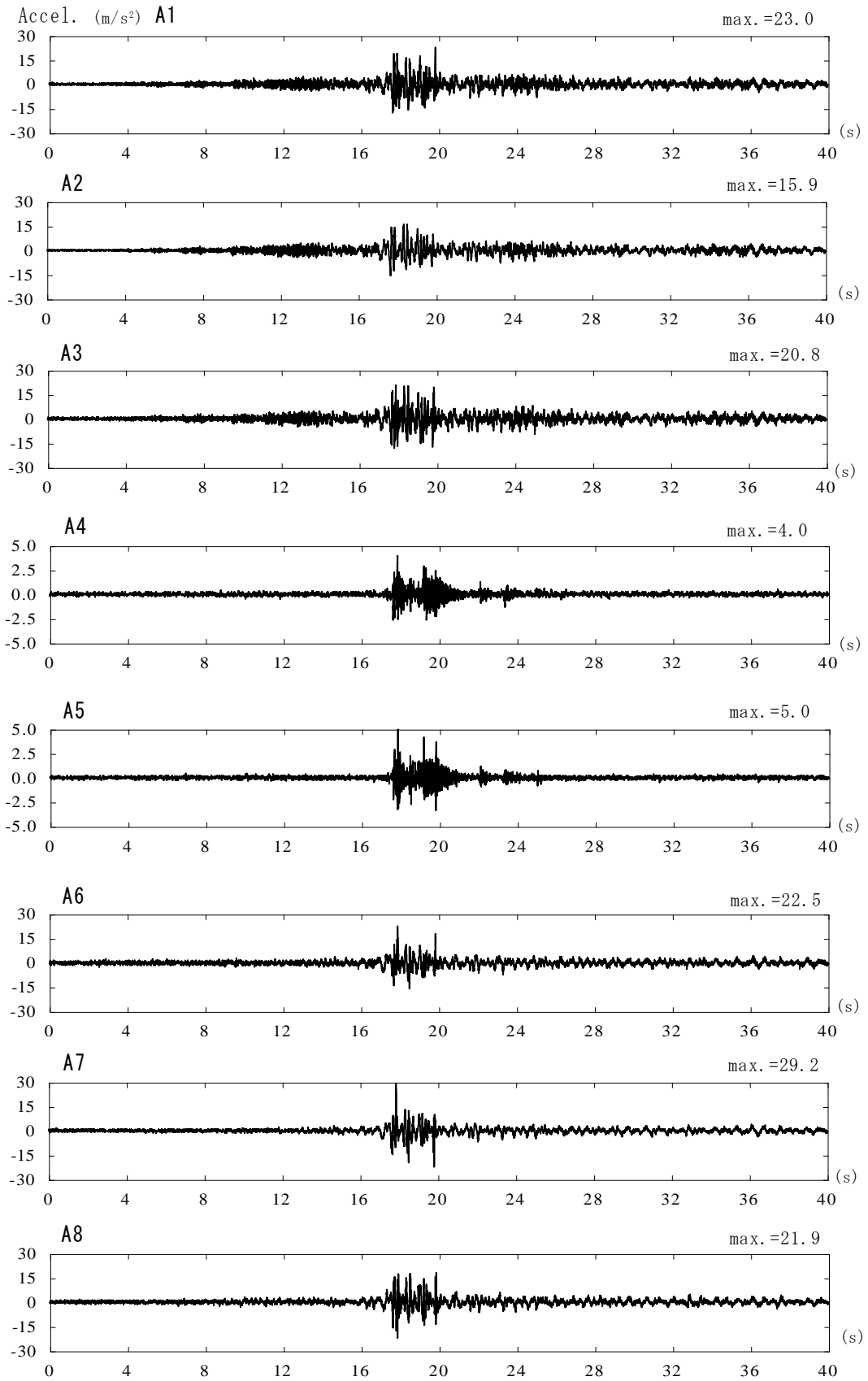


图 3.2-85(1) 加速度時刻歴(ST φ6,n05-ew1000(100%))

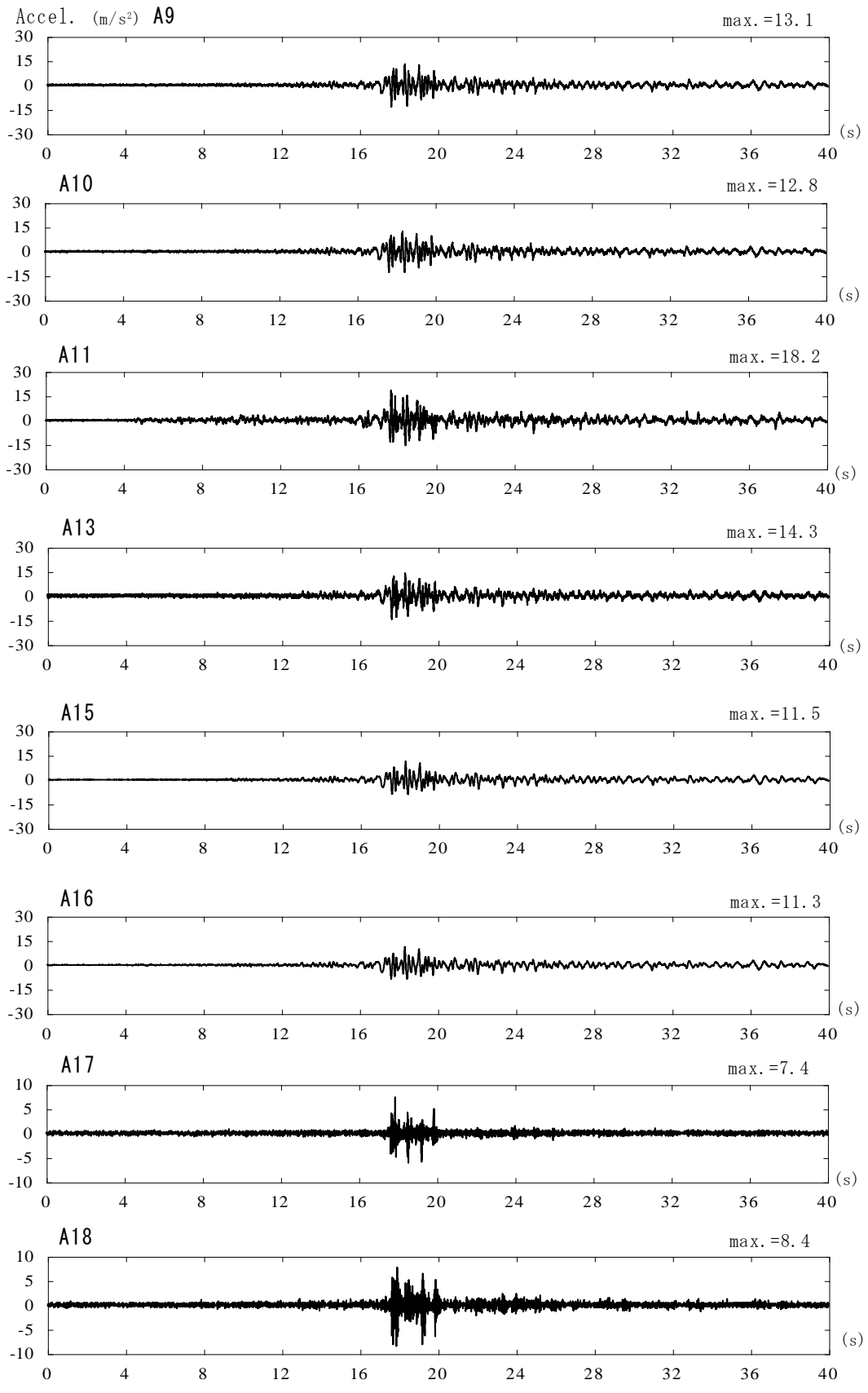


图 3.2-85(2) 加速度時刻歴(ST φ6,n05-ew1000(100%))

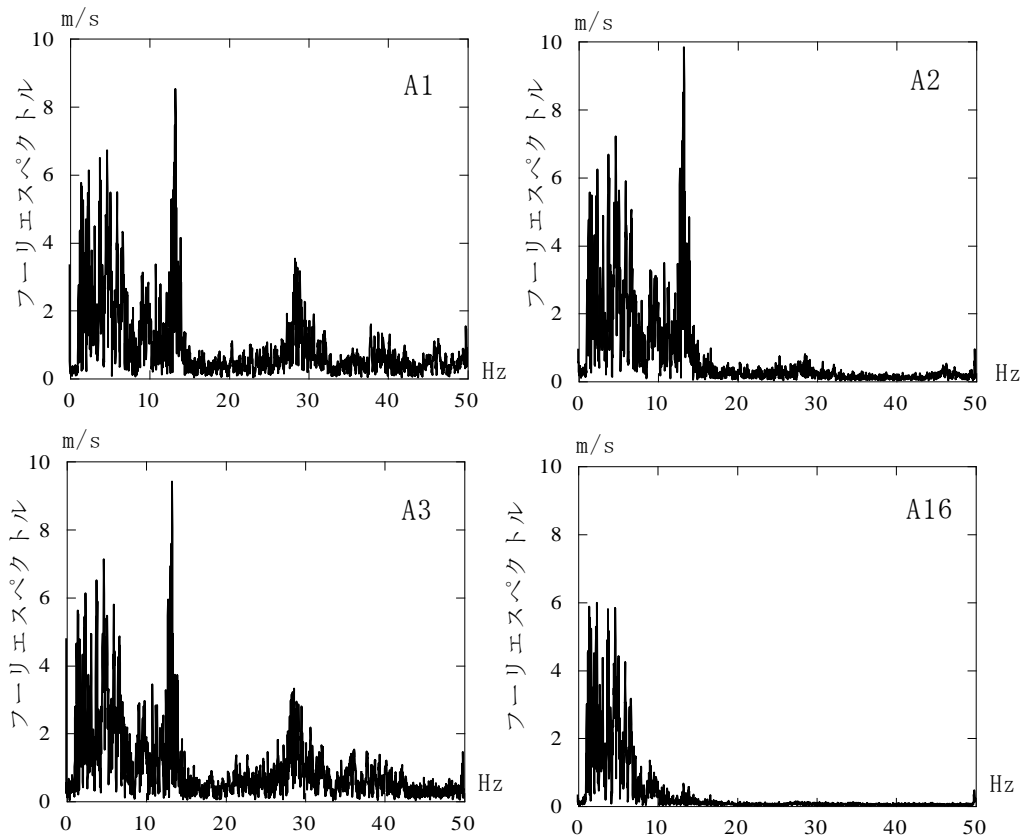


図 3.2-86 A1,A2,A3,A16 のフーリエスペクトル(ST φ6,n05-ew1000(100%),0~40s)

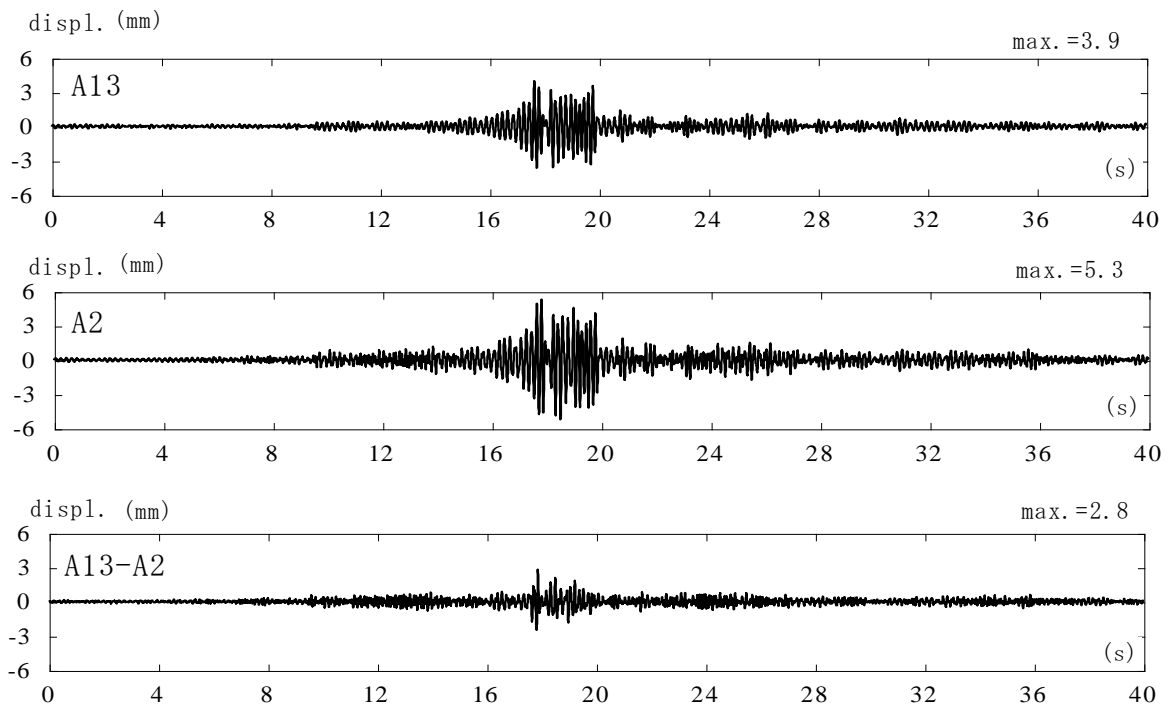


図 3.2-87 サポート A 位置の相対変位時刻歴(ST φ6,n05-ew1000(100%),0~40s)

3.2.6 まとめ

耐震性評価における配管系の地震時損傷に係る検討を行うことを目的として、配管サポートの支持機能喪失を想定した配管系の振動台水平加振試験を実施した。小型振動台で加振可能な配管系試験体を設計、製作し、水平加振試験を実施した。検討は以下の手順で実施した。

- ①小型振動台で加振可能な配管系試験体を設計・製作した。
- ②加振時に損傷を受け支持機能喪失するサポート(サポート A)として、中央に開口を有するアクリル板の試験片と両端に断面積が小さい部分を有する鋼棒の試験片を作成した。さらに、これら試験片の支持機能特性(荷重-変形関係)を検討した。
- ③解析モデルを構築し、固有値解析、地震動入力の実験解析を実施し、固有振動性状及びサポートAの応答性状を把握した。
- ④比較的小振幅の sin 波入力による水平加振試験を行い、サポート機能喪失前後の状態の固有振動数、固有モードを検討した。
- ⑤サポートAの損傷発生を対象として、基本的特性を把握することを目的として sin 波入力での1次振動と2次振動による共振を利用する水平加振試験を実施した。
- ⑥サポートAの損傷発生を対象として、地震動入力による水平加振試験を実施した。
- ⑦加速度計、ひずみ計の計測データを用いて、サポート条件の変化が配管系の耐震性に及ぼす影響について検討した。

得られた知見等を以下に示す。

- 1)水平加振試験の計測結果から算出した固有振動数、固有モードと解析モデルを用いた結果とを比較し、解析モデルの改善点等をあげた。
- 2)サポートAの損傷を対象とした sin 波入力の加振試験において、1次振動を対象とした場合では、サポートAの破断により固有振動数が変化するので共振で大きくなっていた振幅が急激に低下した。しかし2次振動では、2次振動数がサポートAの有無にかかわらず18Hz付近であったので、振動の振幅に大きな変化は見られなかった。
- 3)サポートAの損傷を対象とした地震波入力の加振試験において、破断により固有振動数が変化し、入力地震動の卓越成分と一致することにより応答が急激に大きくなることが観察された。
- 4)中央に開口を有するアクリル板のサポートAでは、加振試験中の破断時に、特に加速度時刻歴において衝撃によるパルスの波形が発生していた。これは、配管支持材の支持点付近の加速度計で特に大きくなる傾向が見られた。開口を有するアクリル板は、静的加力試験から試験片によって異なるが4~6mm程度の破断変位まで、ほぼ弾性的な荷重-変位関係が得られた。水平加振試験で推定された破断変位はより小さくなる傾向がみられた。
- 5)両端の断面積が小さい部分を有する鋼棒のサポートAは、水平変位10mmまでの静的加力試験から変形に伴う弾塑性特性を確認できた。この際、破断は発生していない。水平加振試験結果では、sin波入力において、破断が発生した。破断変位は10mm以下と推定されること、変形状況、ひび割れの発生状況が静的試験結果と異なることから、加振試験では疲労破壊の影響を受けていた可能性がある。また、鋼

棒の破断時にはパルスの波形は発生していない。

鋼棒の場合、変形に伴う塑性化も損傷の一つと考えられるが、破断前には固有振動数が初期状態より小さくなっていることも確認された。これは、鋼棒の両端部分に塑性ヒンジが形成されたことためと考えられる。

- 6)計測された配管ひずみでは、サポート A が設置されていた上方の横方向配管部分の上下方向(Z 方向)を計測したひずみ時刻歴において、破断に伴って時刻歴の中心軸がシフトする傾向がみられた。これはサポート A が負担していた Z 方向の応力が解放されたためと考えられるが、移動量としては最大のケースでも 50μ 以下であったと推定される。

アクリル板のサポート A の場合、破断の影響によりひずみの時刻歴においてもパルスの波形が見られた。sin 波の水平振動試験に見られたその増大率は最大で、影響を含まない振幅に比べて 2 倍程度であった。また、sin 波の水平振動試験結果から得られた縦方向配管のひずみ分布を、破壊前後で比較すると、サポート A が負担している水平荷重(応力)の再配分の影響と考えられるが、破断後に増大する傾向がみられた。

また、計測された配管ひずみの最大値は、サポート A 破断後に共振の影響により振幅が大きくなった場合でも 700μ 程度であった。したがって、配管自体の構造強度健全性は維持されていたことが確認された。

- 7)選定した地震動と試験体の応答特性の関係として、mwave-01 では、主に 1 次モードによる応答特性が再現され、mwave-02 では、1 次モードに加えて 2 次モードを含む応答特性が再現される結果が得られ、各地震動の位置付けが明確になった。さらに、mwave-02 では、高振動数成分が卓越するため鉛直方向に対しても高い応答結果を示した。

- 8)水平方向振動試験結果から、サポート A が破断するまでの高加速度レベルの地震応答が再現され、サポート A の支持機能喪失により変化した支持条件下においても、荷重の再配分により配管自体の構造健全性は維持されることが確認された。

参考文献[3.2]

- [1] 株式会社サンエス、3次元永久磁石地震波振動台総合システム(SPT3D-15K-85L-50T)取扱説明書
- [2] 株式会社東京測器研究所、ひずみ測定講習会 資料、2014年6月、
- [3] 三和テッキ株式会社、管系支持装置、2009年3月、
- [4] 株式会社アーク情報システム、TDAPⅢ 使用手引書 バージョン 3.06、2014年4月、
- [5] 大崎順彦、建築振動理論、1996年11月、彰国者
- [6] 大崎順彦、新・地震動のスペクトル解析入門、1994年5月、鹿島出版会
- [7] 田治見宏、建築振動学、1965年5月、コロナ社

3.3 亀裂を有する機器・構造物の地震時亀裂進展評価法の高度化

3.3.1 目的

原子力発電プラント機器における地震荷重に対する構造健全性は、実機模擬試験によって確認されている。しかし、亀裂が存在した場合は亀裂を起点とした破壊が発生する可能性は否定できない。従って、地震荷重を受ける亀裂構造物の健全性と亀裂進展評価技術の高度化が重要となっている。経年化プラントを対象とした高経年化評価技術における疲労亀裂進展評価は、日本機械学会の発電用原子力設備維持規格(以下、単に「維持規格」と呼ぶ)を適用した評価手法が用いられる。しかし、フェライト鋼を対象とした場合、維持規格が準拠している米国機械学会(American Society of Mechanical Engineers、ASME) Boiler & Pressure Vessel Code Section XI Appendix A-4300では、圧縮応力を含む繰り返し荷重を受ける亀裂に対して、亀裂進展則(以下、単に「ASME 亀裂進展則」と呼ぶ)[1]が規定されているにもかかわらず、維持規格では規定されていない。地震動による疲労亀裂進展では、圧縮応力を含む繰り返し荷重に対する疲労亀裂進展が想定されるため、維持規格に基づく疲労亀裂進展評価の妥当性は十分に検証する必要がある。

ASME 亀裂進展則では、繰り返し荷重を受ける亀裂の進展速度 da/dN は、空気中の場合、次式で評価される。

$$da/dN = C_0(\Delta K_I)^n$$

ここで、 n は $n=3.07$ 、 C_0 は

$$C_0 = 3.78 \times 10^{-9} S$$

である。 S はスケーリングパラメータで応力比 R (最大応力 σ_{\max} と最小応力 σ_{\min} の比、 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) の影響を示し、 $R < 0$ の場合、 $S=1$ である。 ΔK_I は applied stress intensity factor であり、 $K_{\max} - K_{\min}$ と閾値 ΔK_t の大小関係により ΔK_I の評価式が以下のように異なる。

$$K_{\max} - K_{\min} > \Delta K_t \text{ の場合、} \Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$$

$$K_{\max} - K_{\min} \leq \Delta K_t \text{ で } -2 \leq R \leq 0 \text{ の場合、} \Delta K_I = K_{\max}$$

ここで、 K_{\max} 、 K_{\min} は最大および最小の応力拡大係数である。ASME 亀裂進展則では閾値 ΔK_t は、

$$\Delta K_t = 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

が用いられている。ここで、 σ_f は流動応力で、降伏応力 σ_Y (0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$) と引張強度 σ_B より

$$\sigma_f = \frac{\sigma_Y + \sigma_B}{2}$$

で与えられる。しかし、米国原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission、NRC)は、ASME 亀裂進展則に対して根拠としている試験データが十分でないこと、ASME 亀裂進展則では亀裂進展速度を過小評価する恐れがあることを指摘している[2][3]。また、NRC は、亀裂進展則の閾値 ΔK_t には

$$\Delta K_t = 0.8 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

を用いることを提言している(以下、NRCが提言している閾値を用いた亀裂進展則をNRC推奨亀裂進展則と呼ぶ)。

そこで、原子力配管系や原子炉圧力容器管台等で用いられるフェライト鋼を対象として、圧縮応力を含む繰り返し負荷による亀裂進展速度を評価するため、試験および調査を行い、「ASME 亀裂進展則」を検証することを目的とする。

3.3.2 実験方法

3.3.2.1 供試材

供試材は、原子力配管系や原子炉圧力容器管台等で用いられるフェライト鋼のひとつである JIS G3120 SQV2AG SR 鋼である。化学組成と熱処理条件を表3.3-1、表3.3-2に示す。

表3.3-1 供試材の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	As	Sb	Sn	Co
0.17	0.24	1.46	0.01	0.009	0.09	0.59	0.10	0.51	0.003	0.0005	0.001	0.003

表3.3-2 熱処理条件

焼入れ	焼戻し	PWHT
880°C - 水冷	650°C × 4hr, 空冷	615°C × 15hr, 炉冷

3.3.2.2 引張試験

供試材から評点部直径 8 mm、評点部長さ 40 mm の丸棒試験片を 3 本採取し、引張試験を実施した。

3.3.2.3 破壊靱性試験

ASTM E1820-13 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness に従い、破壊靱性試験を実施した。破壊靱性試験は、油圧サーボ疲労試験機(100 kN)で実施し、荷重線変位はクリップゲージで計測した。破壊靱性試験の試験室環境は、室温 20~23°Cとした。使用設備と試験片形状を表3.3-3と図3.3-1に示す。

亀裂長さ増分の算出は、除荷コンプライアンス法を用い、除荷時のコンプライアンスから除荷直前の亀裂長さを求めた。CT 試験片の亀裂長さ算出式を以下に示す。

$$a_i = W(1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5)$$

$$u = \frac{1}{(B_e E' C_{c(i)})^{1/2} + 1}$$

$$C_{c(i)} = \frac{C_i}{\left(\frac{H^*}{R} \sin \theta_i - \cos \theta_i\right) \left(\frac{D}{R} \sin \theta_i - \cos \theta_i\right)}$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B$$

$$E' = E / (1 - \nu^2)$$

ここで、

B：板厚

B_N：正味板厚

a_i：亀裂長さ

a₀：初期亀裂長さ

E：ヤング率

ν：ポアソン比

W：試験片幅

C_i：試験片弾性コンプライアンス計測値（荷重線における）

H*：荷重点初期半幅（ピン穴中心）

R：亀裂中心線の回転半径、(W+a)/2、ここで a は亀裂長さ

D：変位測定点間の初期間隔の半長

θ：未破壊中央線周りの剛体要素の回転角、または、

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{(d_m / 2 + D)}{(D^2 + R^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1}(D/R),$$

ここで、d_mは全荷重線変位。

また、除荷直前の各変位に対する亀裂長さ増分を以下に示す。

$$\Delta a = a - a_0 \quad \Delta a = \text{き裂長さ増分 (mm)}$$

一方、除荷直前のJ積分は、図3. 3-2に示すように、試験中の荷重-荷重線変位曲線の面積 A_{pl}を計測し、次式で評価した。

$$J = J_{el} + J_{pl}$$

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}$$

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_0}$$

$$b_0 = W - a_0 \quad : \quad \eta = 2 + 0.522b_0 / W$$

$$K = \frac{P_i}{\sqrt{B \cdot B_N \cdot W}} \cdot f\left(\frac{a_i}{W}\right)$$

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{(2 + a_i / W) \left[0.886 + 4.64a_i / W - 13.32(a_i / W)^2 + 14.72(a_i / W)^3 - 5.6(a_i / W)^4 \right]}{(1 - a_i / W)^{3/2}}$$

ここで、

K : 応力拡大係数

B : 板厚

B_N : 正味板厚

a_i : 亀裂長さ

E : ヤング率

ν : ポアソン比

W : 試験片幅

A_{pl} : 図 3. 3-2 に示す面積

P_i : 荷重

表3.3-3 使用設備

項目	名称	型式
試験機	MTS 810 油圧サーボ式疲労試験機	MTS 810
ロードセル	MTS661.20F-03 ロードセル(±100kN)	661.20F-03
COD ゲージ	Displacement Gage(GL:5mm, Travel:+3/-1mm)	632.02F-20
	Displacement Gage(GL:6mm, Travel:+6/mm)	632.03F-30
測定機器	ミツヨ 測定顕微鏡および画像ユニット	MF-UA1720TH, 176-43
	ミツヨ 画像測定器※	QV-X302PIL-C

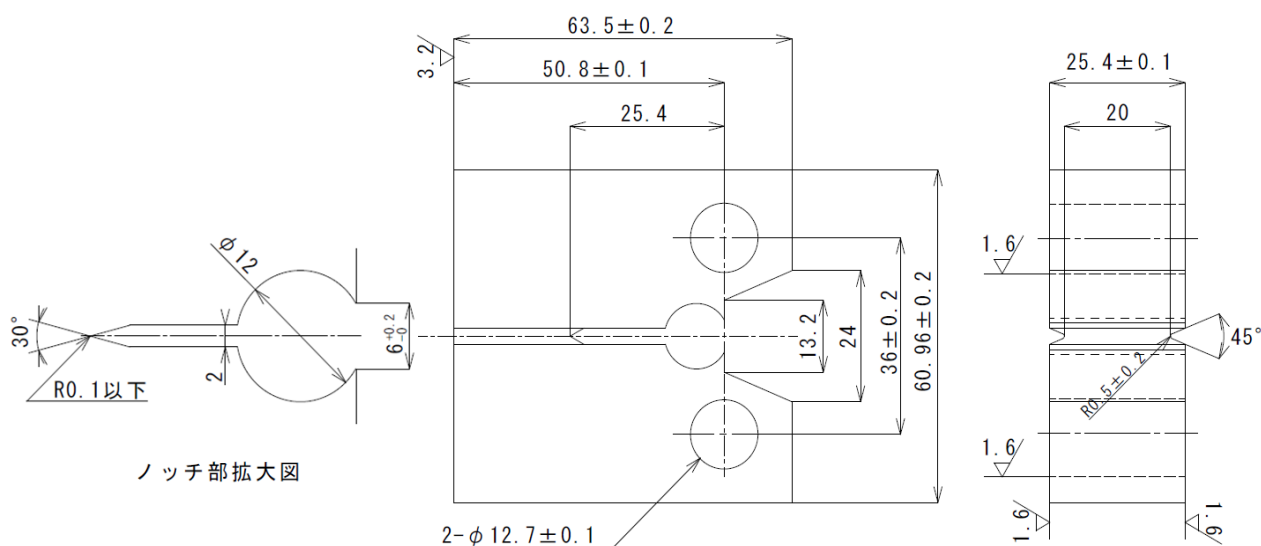


図3.3-1 破壊靱性試験片(CT 試験片)

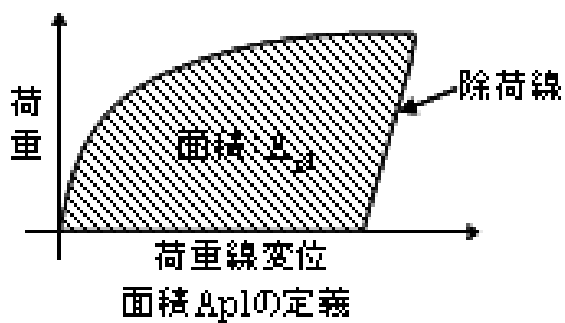


図3.3-2 面積 A_{pl} の定義

3.3.2.4 疲労亀裂進展試験

3.3.2.4.1 試験片形状

試験片形状はこれまで実績がある評点部が幅 $2W = 25 \text{ mm}$ 、厚さ $B = 2 \text{ mm}$ の平板形状を採用した。なお、試験片は図3.3-3のように丸棒の中央部を平板上に加工することにより、軸芯のずれを最小とする形状としている。 $\Phi 25 \text{ mm}$ の丸棒形状から $B = 2 \text{ mm}$ の平板形状の評点部を加工する際、 $R25$ のR部を用いることにより、応力が最も集中するR部近傍においても評点部中央に対して3.5%以下の応力集中に抑制できていることをFEMより確認できた。また、評点部断面は厳密には平板ではなく、両端が $\Phi 25 \text{ mm}$ の外径となっているが、それによる断面積の差は0.1%程度 (49.946615 mm^2 と 50 mm^2 の差) であり、無視できる程度である。この試験片の評点部(厚さ 2 mm の部分)の中央に長さ 2 mm 、幅約 0.2 mm の切り欠きを導入して亀裂進展試験に供した。

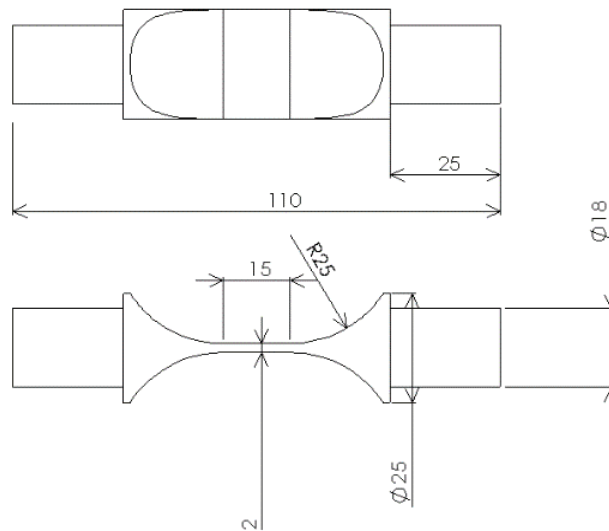


図3.3-3 試験片形状 (mm)

3.3.2.4.2 負荷条件の検討

実験に先立ち、小規模降伏条件を満足する条件を検討した。検討には、以下のミルシート記載の力学特性を用いた。

降伏応力 σ_Y (0.2%耐力): 467 MPa

引張強さ σ_B : 597 MPa

流動応力 σ_f : $(\sigma_Y + \sigma_B)/2 = 532 \text{ MPa}$

破壊力学パラメータの評価式は

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad \text{式3.3-1}$$

$$K_{max} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad \text{式3.3-2}$$

ここで、

$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi\xi/2)}$$

$$\xi : a/W$$

2W: 試験片幅

2a: 亀裂長さ

である。

塑性域寸法 R は平面応力条件とすると

$$R = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式3. 3-3}$$

である。

表3. 3-4に上記の材料定数を用いて負荷応力振幅 $\Delta\sigma$ が

$$\Delta\sigma = 1.12\sigma_f$$

の条件のときの塑性域寸法 R および R/a と亀裂長さの関係を示す。ASTM E399 を参考にすると、小規模降伏条件は

$$a > 2.5 \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式3. 3-4}$$

を満たすものとき、式3. 3-3と式3. 3-4より

$$\frac{R}{a} < \frac{1}{2\pi} = 0.127$$

を満たす必要がある。しかし、表3. 3-4より、亀裂長さにかかわらず、すべての条件で小規模降伏条件を満たしていない。また、リガメント部の面積で荷重を除いた実断面応力 σ_{net} も $2a > 9.5\text{mm}$ 以上で降伏応力を超え、全断面降伏状態となっている。

表3. 3-4に示すように、実断面応力 σ_{net} が降伏応力以下の条件、 $2a < 9.5\text{mm}$ では、 ΔK の形状係数 $F(\xi)$ は 1.1 以下である。そこで、簡単のため $F(\xi)=1$ として、負荷応力レベルと塑性域寸法との関係を求めた。結果を図3. 3-4に示す。なお、降伏応力と引張強さの比 σ_B/σ_Y を 3 水準で検討している。(供試材の場合は、 $\sigma_B/\sigma_Y=1.28$ である)。図3. 3-4より、負荷応力範囲が $\Delta\sigma=0.5\times 1.12\sigma_f$ 近傍で $R/a=0.127$ を超え、小規模降伏条件から大規模降伏へ遷移している。

以上より、想定している負荷条件では小規模降伏条件を満たすことは本質的に困難である。従って、本研究では、小規模降伏条件を逸脱する範囲も検討の対象とする。また、破壊力学パラメータとしては本来弾性破壊力学に基づく応力拡大係数範囲 ΔK を用いることは小規模降伏条件を逸脱しているため正確では無いが、規格が応力拡大係数範囲 ΔK を用いていることから、本研究でも亀裂進展速度は応力拡大係数範囲 ΔK を用いて整理する。

表3. 3-4 塑性域寸法と亀裂長さの関係

2a [mm]	$\xi = a/W$	K_{\max} [MPa $m^{0.5}$]	F(ξ)	R [mm]	R/a	σ_{net} [MPa]
2	0.08	16.8	1.0038	0.4101	0.4101	323.8
2.5	0.1	18.8	1.0060	0.5148	0.4118	331.0
3	0.12	20.6	1.0086	0.6210	0.4140	338.5
3.5	0.14	22.4	1.0118	0.7291	0.4166	346.4
4	0.16	24.0	1.0155	0.8393	0.4197	354.7
4.5	0.18	25.5	1.0197	0.9521	0.4232	363.3
5	0.2	27.0	1.0245	1.0679	0.4271	372.4
5.5	0.22	28.5	1.0298	1.1870	0.4316	381.9
6	0.24	30.0	1.0358	1.3099	0.4366	392.0
6.5	0.26	31.4	1.0424	1.4371	0.4422	402.6
7	0.28	32.8	1.0496	1.5692	0.4483	413.8
7.5	0.3	34.2	1.0575	1.7068	0.4551	425.6
8	0.32	35.6	1.0662	1.8505	0.4626	438.1
8.5	0.34	37.0	1.0756	2.0011	0.4708	451.4
9	0.36	38.5	1.0859	2.1594	0.4799	465.5
9.5	0.38	39.9	1.0970	2.3263	0.4897	480.5
10	0.4	41.4	1.1090	2.5029	0.5006	496.5
10.5	0.42	42.9	1.1221	2.6903	0.5124	513.7
11	0.44	44.5	1.1363	2.8900	0.5255	532.0
11.5	0.46	46.1	1.1516	3.1034	0.5397	551.7
12	0.48	47.8	1.1682	3.3325	0.5554	572.9
12.5	0.5	49.5	1.1862	3.5792	0.5727	595.8

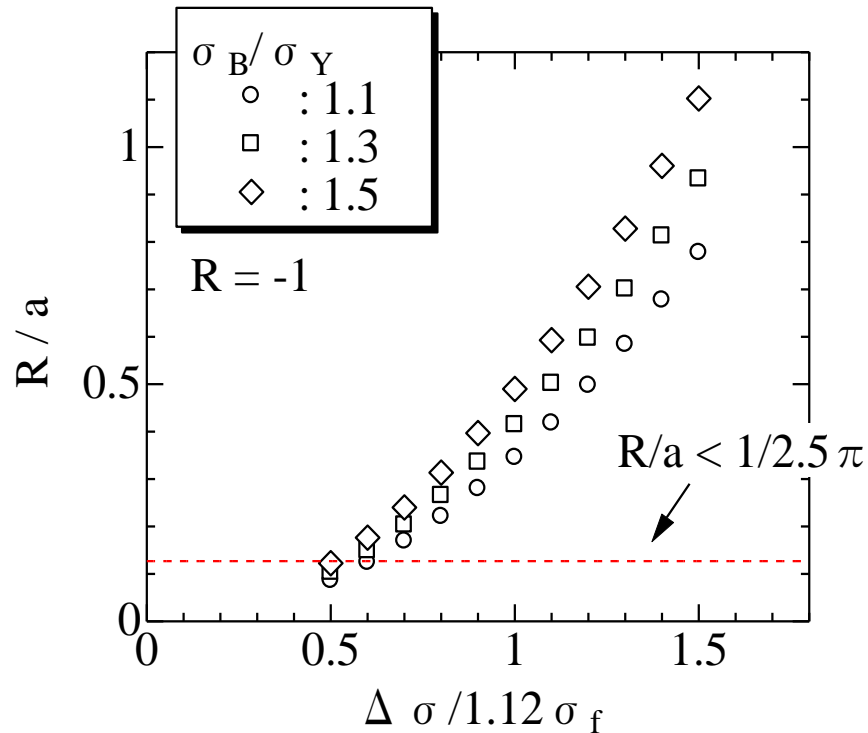


図3. 3-4 塑性域寸法と負荷応力の関係

3. 3. 2. 4. 3 試験装置

疲労予亀裂導入、および、亀裂進展試験には、島津製作所製の電気油圧サーボ弁式疲労試験機と INSTRON 製の軸方向変位検出装置を組み合わせた疲労試験機を使用した。図3. 3-5に亀裂進展データ取得システムを示す。図3. 3-5に示すように、亀裂の開閉口挙動は、切り欠きを挟むように $GL=5\text{mm}$ の伸び計を取り付け、計測した。亀裂長さは除荷コンプライアンス法と直流電位差法による計測を試みた。前者は、負荷サイクル中の最大荷重の90%から60%の範囲の荷重－亀裂開口変位曲線に除荷コンプライアンス法を適用して計測を試みた。一方、直流電位差法では、試験片の平行部両端に10Aの直流を負荷し、亀裂を挟んで取り付けた端子間の電位差を測定した。なお、電位差の測定は各サイクルの最大荷重点付近(亀裂開口時)において行った。後で述べるように、両測定法による亀裂長さの計測を試みた結果、除荷コンプライアンス法による亀裂計測はノイズの影響が大きく進展速度を算出することが困難であった。そのため、亀裂長さはノイズが小さい直流電位差法を用いて計測した。なお、直流電位差法は正味最小断面積の変化に伴う電気抵抗を電位差として計測する手法である。

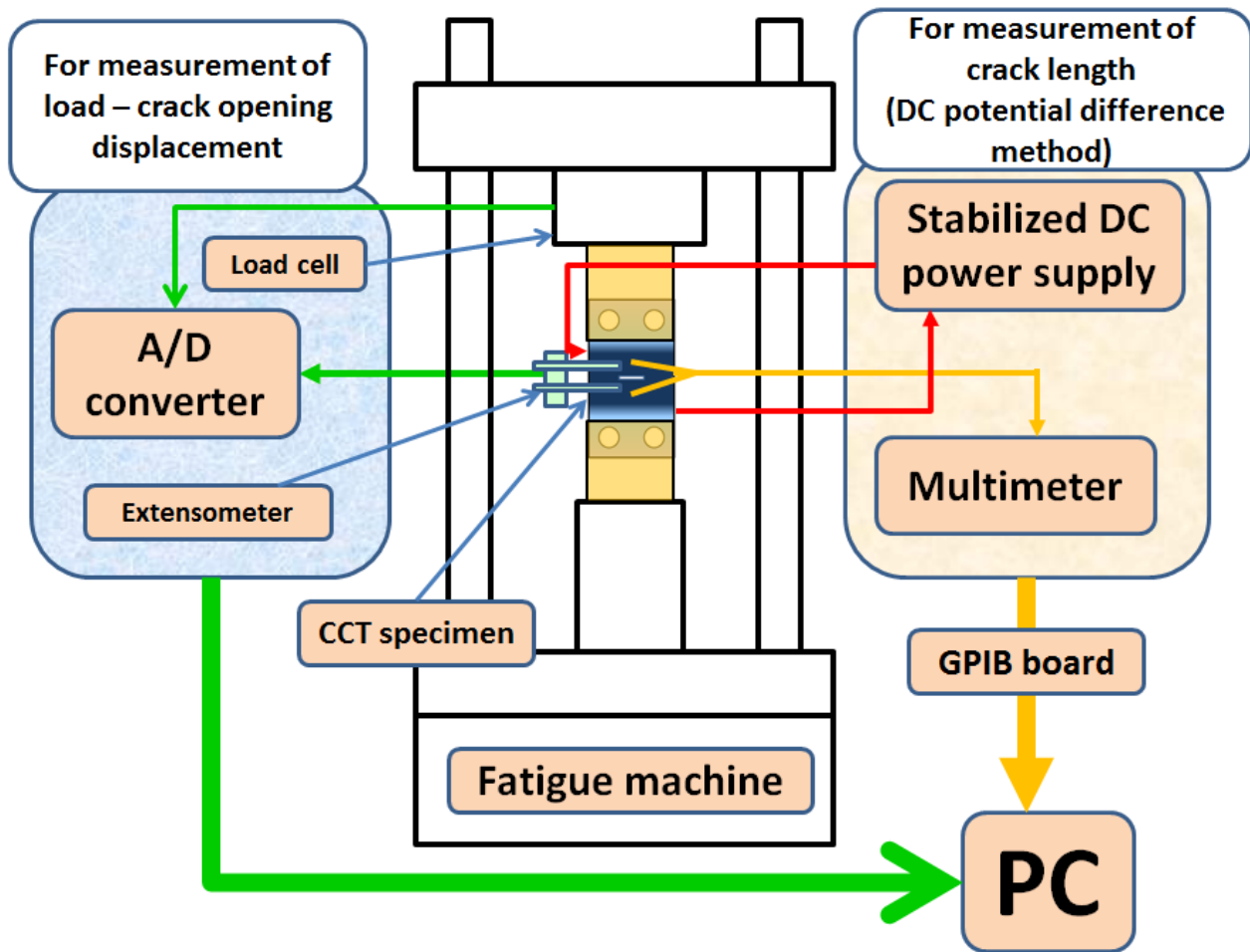


図3. 3-5 疲労亀裂進展試験システム

3. 3. 2. 4. 4 試験条件

導入した切り欠きから、室温繰り返し負荷により疲労予亀裂を導入した。導入した予亀裂長さは $a = 1.5\text{mm}$ 程度、すなわち切り欠き先端から各 0.5mm 程度前方まで予亀裂を導入した。疲労予亀裂の導入は油圧疲労試験機を用い、表3. 3-5の条件で行った。

予亀裂を有する試験片を対象として、室温、大気中にて疲労亀裂進展試験を実施した。実験は、油圧疲労試験機(島津サーボパサー)に制御装置および亀裂開閉口測定システムを組み合わせた試験装置にて、表3. 3-6の条件にて行った。

表3. 3-5 疲労予亀裂導入条件

制御方法	軸荷重制御
荷重波形	正弦波形
荷重比	-1
負荷周波数	10 Hz
亀裂導入初期最大応力拡大係数	11.3 MPa・m ^{0.5}
最終最大応力拡大係数	13.8 MPa・m ^{0.5}

表3. 3-6 疲労亀裂進展試験条件

制御方法	軸荷重制御
応力波形	正弦波形
応力比(R比)	-1
負荷周波数	1 Hz (0.4 Hz ※)
Δσ	Δσ = σ f × 0.775 (400.0MPa)
	Δσ = σ f × 0.896 (462.9MPa)
	Δσ = σ f (516.7MPa)
	Δσ = σ f × 1.03 (532.2MPa)
	Δσ = σ f × 1.1 (568.3MPa)
	Δσ = σ f × 1.15 (594.2MPa)
	Δσ = σ f × 1.2 (620.0MPa)
	Δσ = σ f × 1.258 (650MPa)

※ 亀裂開閉口測定時

高サイクル疲労亀裂の進展速度は小規模降伏条件を満たす限り、応力拡大係数範囲 ΔK で関連付けられる。しかし、負荷応力が大きくなると、小規模降伏条件を逸脱し、もはや線形破壊力学が適用できなくなる。このような場合、一般的に ΔK に代わって、疲労 J 積分範囲 ΔJ_f が疲労亀裂進展速度を取り扱う際のパラメータとして用いられる。しかし、本研究は、ASME 規格の検証を行うことが目的であるため、小規模降伏条件を逸脱する条件においても、ASME 規格の亀裂進展速度の整理に用いられている ΔK を亀裂進展速度を整理する破壊力学パラメータとして用いた。以下に、本研究で用いた応力拡大係数範囲 ΔK の算出法を示す。

CCT 試験片の応力拡大係数範囲 ΔK は次式で算出した。

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad \text{式 3. 3-1 (再)}$$

ここで、

$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi\xi/2)}$$

ξ : a/W

2W: 試験片幅

2a: 亀裂長さ

である。

3. 3. 2. 4. 5 亀裂長さの測定方法

CCT 試験片 (center cracked tension specimen, 中央切り欠き試験片) の LCF 試験では、電圧変化によって 1 cycle 毎の亀裂進展量を得る事が出来る直流電位差法での亀裂長さの計測を行った。

以下に、本研究で用いた直流電位差法での亀裂長さの算出法を示す。

直流電位差法では、図3. 3-6に示すように、試験片の平行部両端に 10 A の直流を負荷し、亀裂を挟んで取り付け端子間の電位差を測定し、次式により亀裂長さを算出した。なお、亀裂面の接触の影響を避けるため、電位差の測定は各サイクルの最大荷重点付近(亀裂開口中)において行った。ただし、電位差は亀裂の開閉口に影響を受けず、1 サイクル中でほとんど変化がなかった。

$$a = \frac{W}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{W} \times Y_o\right)}{\cosh \left[\frac{V}{V_r} \times \cosh^{-1} \cdot \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi}{W} \times Y_o\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{W} \times a_r\right)} \right] \right]} \right]$$

$$\text{for } 0 \leq \frac{2a}{W} \leq 1$$

式3. 3-5

ここで、

2a: 亀裂長さ

2a_r: 初期亀裂長さ

V: 測定電圧

V_r: 初期電圧

Y_o: 電圧測定間隔

また、亀裂開口変位 δ を測定し、ASTM-E647 に準拠して次式のコンプライアンス法を用いて、亀裂長さを計測した。

$$a/W = 1.06905x + 0.588106x^2 - 1.01885x^3 + 0.361691x^4$$

$$x = 1 - e^{-\frac{\sqrt{(EBC+\eta)(EBC-\eta+c_2\eta+c_2\eta^2)} \delta}{2.141}}$$

式3. 3-6

ここで、

2a: 亀裂長さ

B: 試験片厚さ

2W: 試験片幅

C: コンプライアンス

E: ヤング率

y: 半評点間距離

η : y/W

c_1, c_2, c_3 : 試験片形状と負荷方法による定数, $c_1=-0.03, c_2=0.013, c_3=4.0$

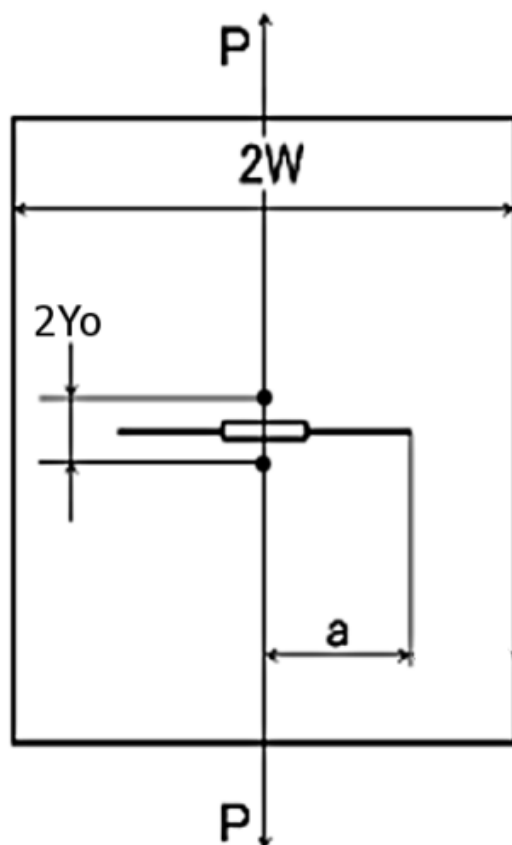


図3. 3-6 直流電位差法における諸元

3. 3. 3 実験結果及び考察

3. 3. 3. 1 引張試験

引張試験中の応力-ひずみ関係を図3. 3-7から図3. 3-9に示す。また、引張試験の結果を総括して、表3. 3. -7に示す。各試験片の平均値から0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は448.7 MPa、引張強さ σ_B は584.7 MPa、流動応力 σ_f は516.7 MPaであった。

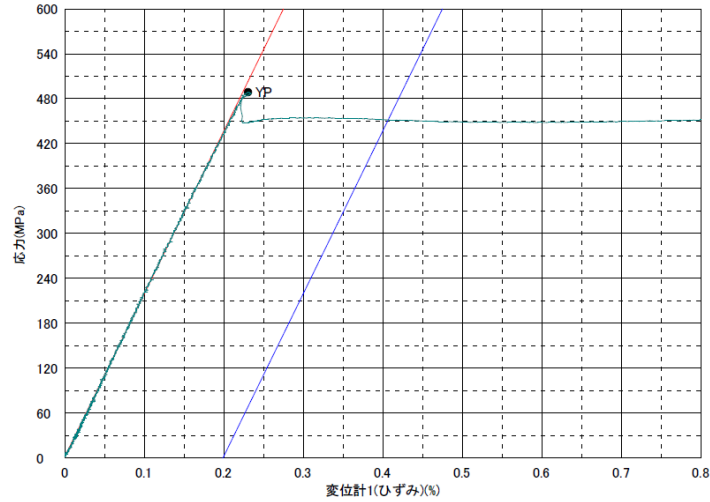
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
1	7.9980	40.0000

名前	弾性率 Standard	上降伏点 試験力	上降伏点 応力	耐力点1 試験力	耐力点1 応力
ハマーダ	100, 400 MPa	0.1 %/FS	0.1 %/FS	0.2 %	0.2 %
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
1	217490.	24.56	489.	22.70	452.

名前	最大点 試験力	最大点 応力	突き合せ伸び	絞り
単位	kN	MPa	%	%
1	29.39	585.	23.4	68.8



(a) 耐力近傍まで

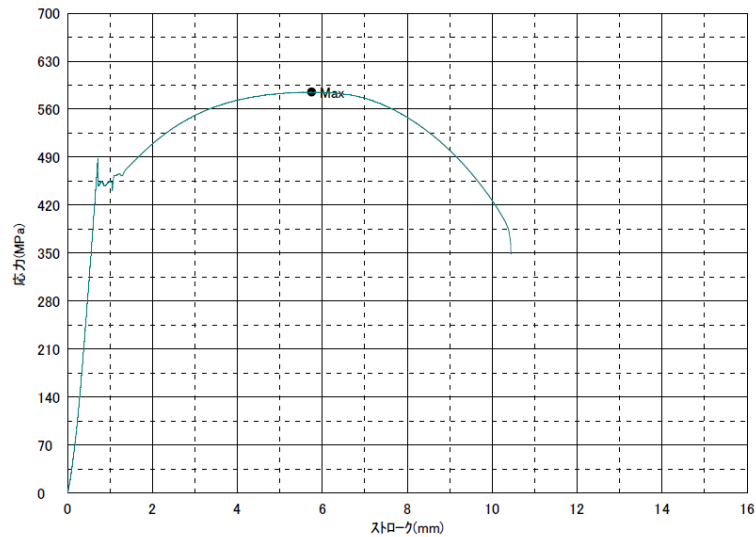
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
1	7.9980	40.0000

名前	弾性率 Standard	上降伏点 試験力	上降伏点 応力	耐力点1 試験力	耐力点1 応力
ハマーダ	100, 400 MPa	0.1 %/FS	0.1 %/FS	0.2 %	0.2 %
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
1	217490.	24.56	489.	22.70	452.

名前	最大点 試験力	最大点 応力	突き合せ伸び	絞り
単位	kN	MPa	%	%
1	29.39	585.	23.4	68.8



(b) 破断まで

図3. 3-7 引張試験中の応力-ひずみ関係: 試験片 1

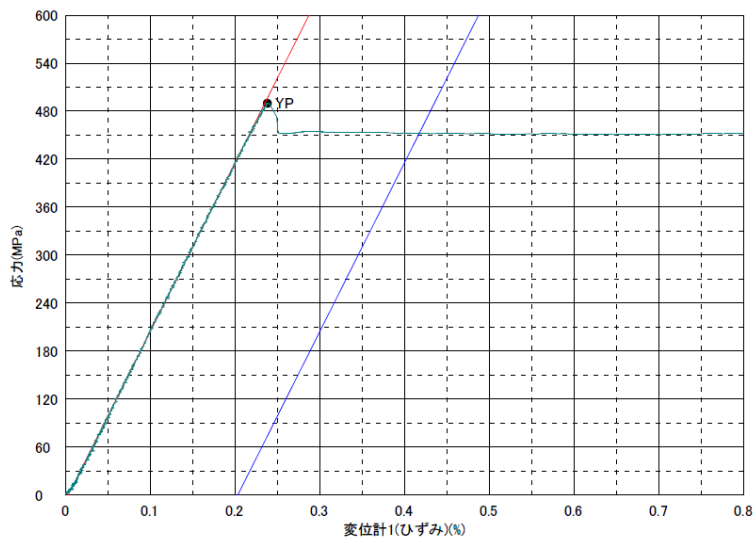
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状: 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
2	8.0050	40.0000

名前	弾性率 Standard	上降伏点 試験力	上降伏点 応力	耐力点1 試験力	耐力点1 応力
ハマータ	100,400 MPa	0.1%/FS	0.1%/FS	0.2%	0.2%
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
2	211220.	24.65	490.	22.78	453.

名前	最大点 試験力	最大点 応力	突き合せ伸び	伸び
単位	kN	MPa	%	%
2	29.37	584.	25.6	71.3



(a) 耐力近傍まで

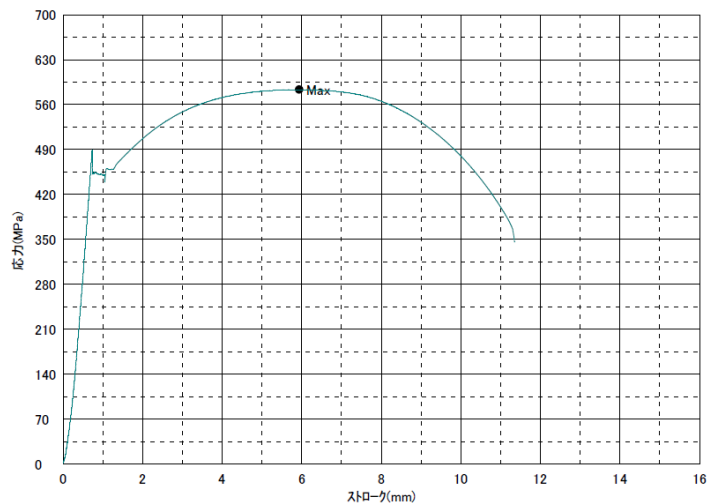
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状: 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
2	8.0050	40.0000

名前	弾性率 Standard	上降伏点 試験力	上降伏点 応力	耐力点1 試験力	耐力点1 応力
ハマータ	100,400 MPa	0.1%/FS	0.1%/FS	0.2%	0.2%
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
2	211220.	24.65	490.	22.78	453.

名前	最大点 試験力	最大点 応力	突き合せ伸び	伸び
単位	kN	MPa	%	%
2	29.37	584.	25.6	71.3



(b) 破断まで

図3.3-8 引張試験中の応力-ひずみ関係: 試験片2

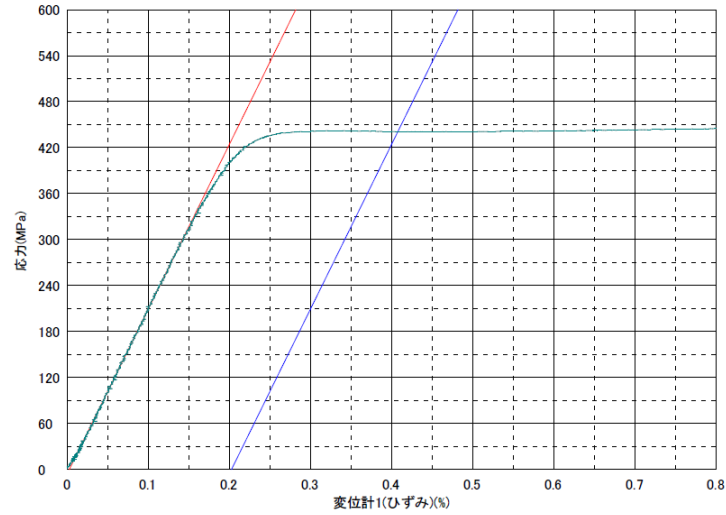
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状: 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
3	8.0060	40.0000

名前	弾性率 Standard	耐力点1 試験力	耐力点1 応力	最大点 試験力	最大点 応力
ハマーダ	100,300 MPa	0.2 %	0.2 %		
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
3	214983	22.20	441	29.46	585

名前	突き合せ伸び	絞り
単位	%	%
3	25.4	71.4



(a) 耐力近傍まで

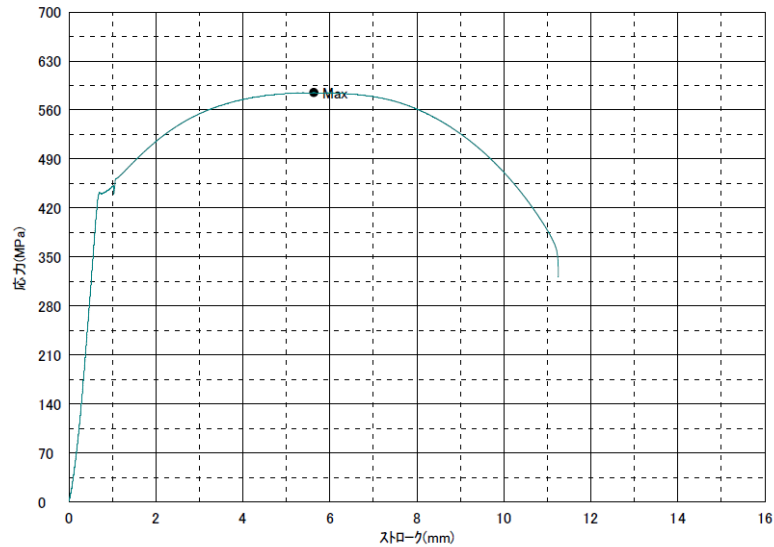
耐力まで: 10MPa/sec 耐力以降破断まで: 20%/min

形状: 丸棒

	直径	つかみ具間距離
単位	mm	mm
3	8.0060	40.0000

名前	弾性率 Standard	耐力点1 試験力	耐力点1 応力	最大点 試験力	最大点 応力
ハマーダ	100,300 MPa	0.2 %	0.2 %		
単位	MPa	kN	MPa	kN	MPa
3	214983	22.20	441	29.46	585

名前	突き合せ伸び	絞り
単位	%	%
3	25.4	71.4



(b) 破断まで

図3. 3-9 引張試験中の応力-ひずみ関係: 試験片3

表3. 3-7 引張試験結果

項目 試験片番号	試験片寸法			引張試験						
	直径 mm	標点距離 mm	試験温度 ℃	ヤング率 MPa	上降伏点 MPa	0.2%耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %	破断 位置
1	7.998	40.0	22	217490	489	452	585	23.4	68.8	A
2	8.005	40.0	22	211220	490	453	584	25.6	71.3	A
3	8.006	40.0	22	214983	-	441	585	25.4	71.4	A
備考										

3. 3. 3. 2 破壊靱性

ASTM E1820-13 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness に従い、破壊靱性試験を実施した。得られた破壊靱性試験結果を表3. 3-8に示す。ここで、 J_{Ic} は平面ひずみ破壊靱性値、 J_Q は ASTM 規格に基づく5%減セカント線で定義される J 、 K_{JIC} と K_{JQ} はそれぞれ J_{Ic} と J_Q より得られる応力拡大係数 K である。また、試験中の荷重-荷重線変位曲線を図3. 3-10から図3. 3-12に、J-R 曲線を図3. 3-13から図3. 3-15に、試験後の破面の様子を図3. 3-16に示す。

試験片1では亀裂開口変位計の問題で破壊靱性値は得られなかった。また、試験片2では J_Q 値は得られたものの、亀裂長さの実測値と予測値の差に関する規定を満足していなかったため、 J_{Ic} は得られなかった。試験片3のみ、規格の有効条件を満足し、 J_{Ic} が得られた。

表3. 3-8 破壊靱性試験結果

試験温度 (℃)	試験片寸法(mm)					破壊靱性値			
	幅 W	厚さ B	正味厚さ B_n	機械ノッチ長さ a_n	疲労予き裂長さ a_o	J_Q (kJ/m ²)	K_{JQ} (MPa·m ^{1/2})	J_{Ic} (kJ/m ²)	K_{JIC} (MPa·m ^{1/2})
22	50.81	25.4	19.99	25.41	30.57	N/A	N/A	×	×
21	50.78	25.4	19.99	25.39	30.81	290.7	261.7	×	×
21	50.8	25.4	20	25.4	30.66	365.5	293.5	365.5	293.5

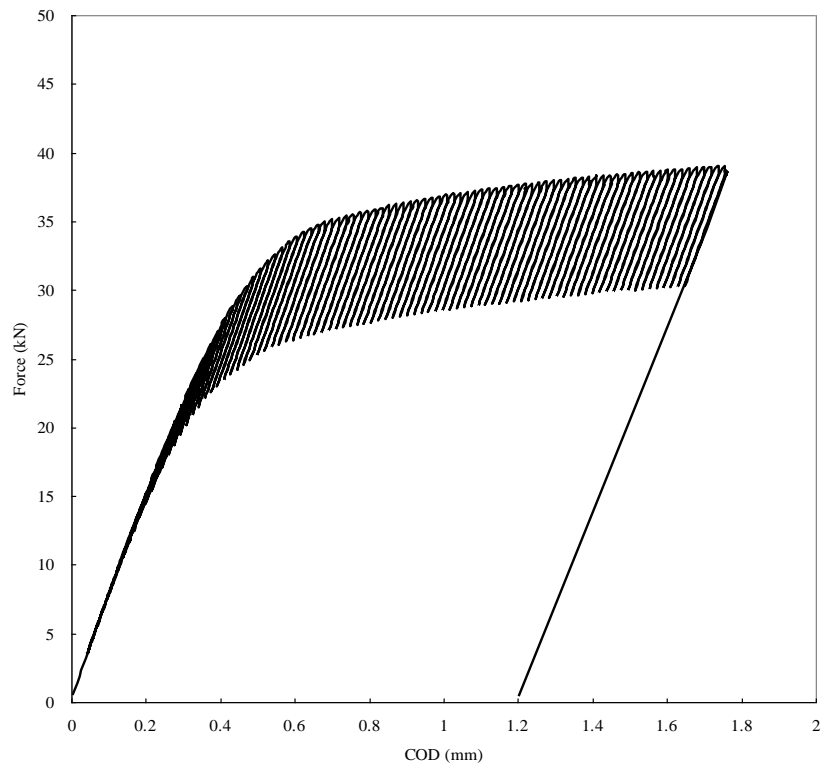


图3. 3-10 荷重—亀裂開口変位曲線: 試験片1

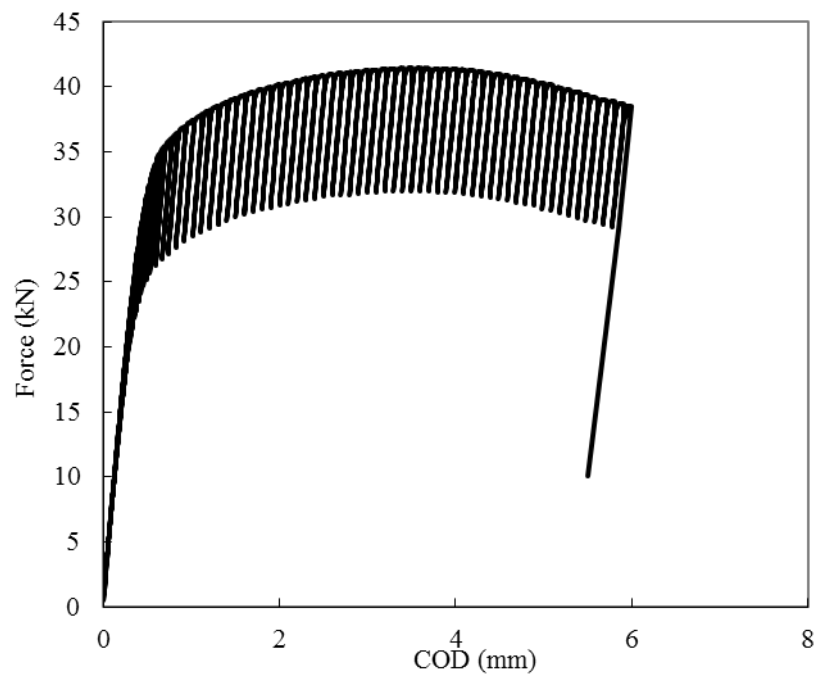


图3. 3-11 荷重—亀裂開口変位曲線: 試験片2

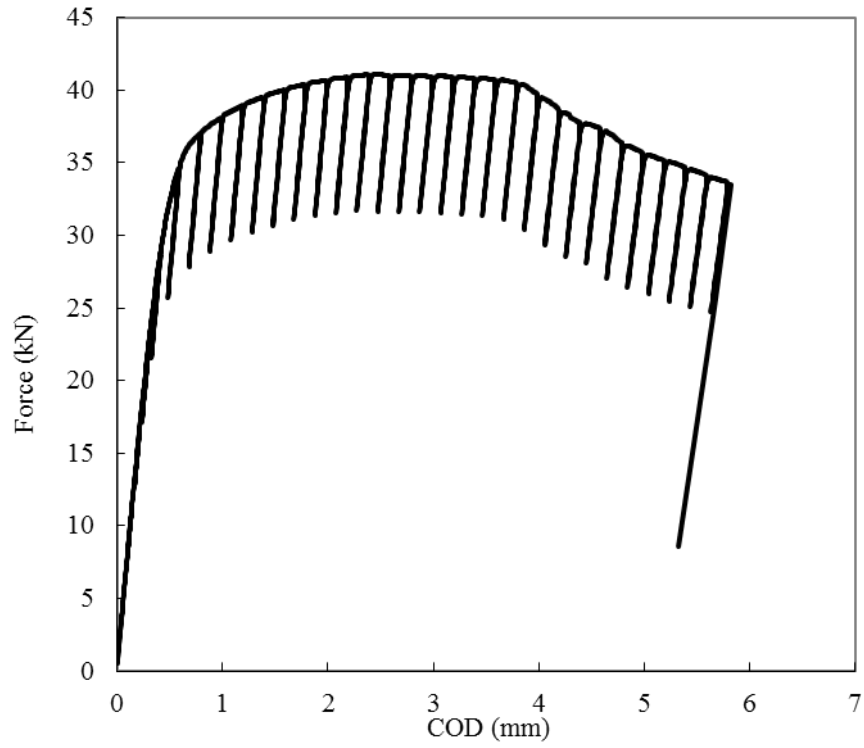


图3. 3-12 荷重—龜裂開口變位曲線:試驗片3

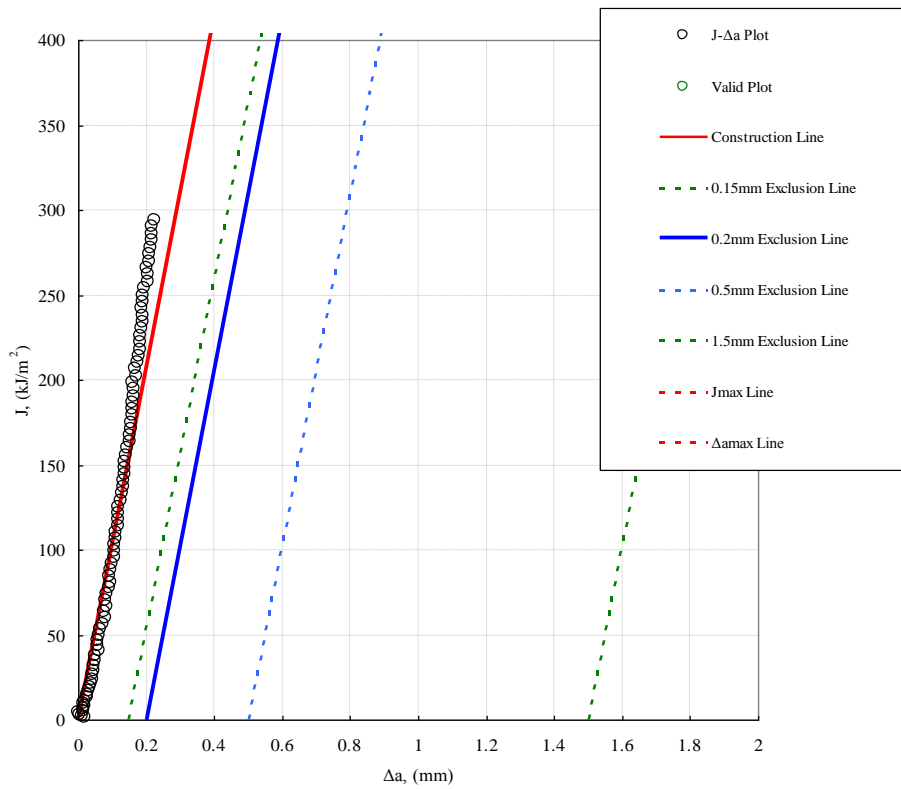


图3. 3-13 J-R 曲線:試驗片1

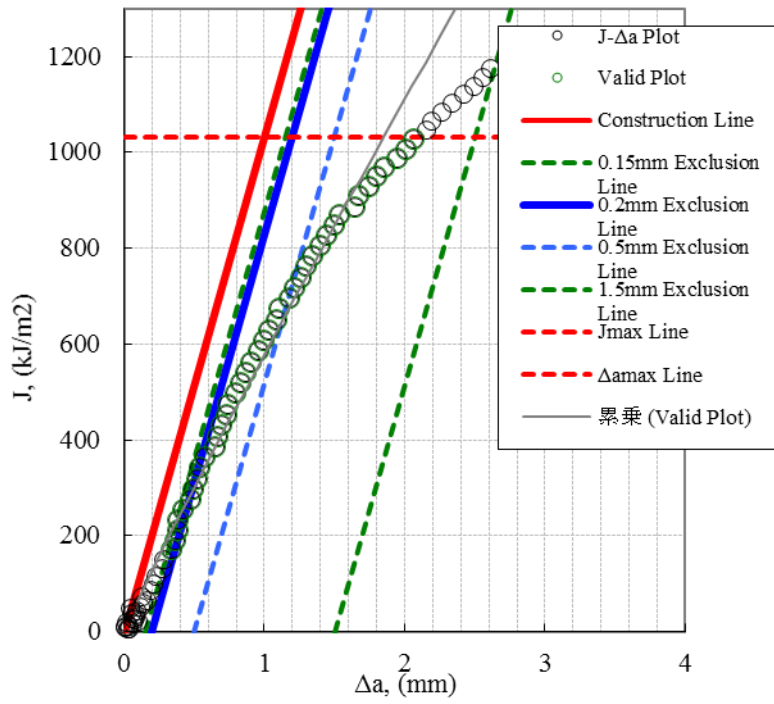


图3.3-14 J-R 曲线: 试验片2

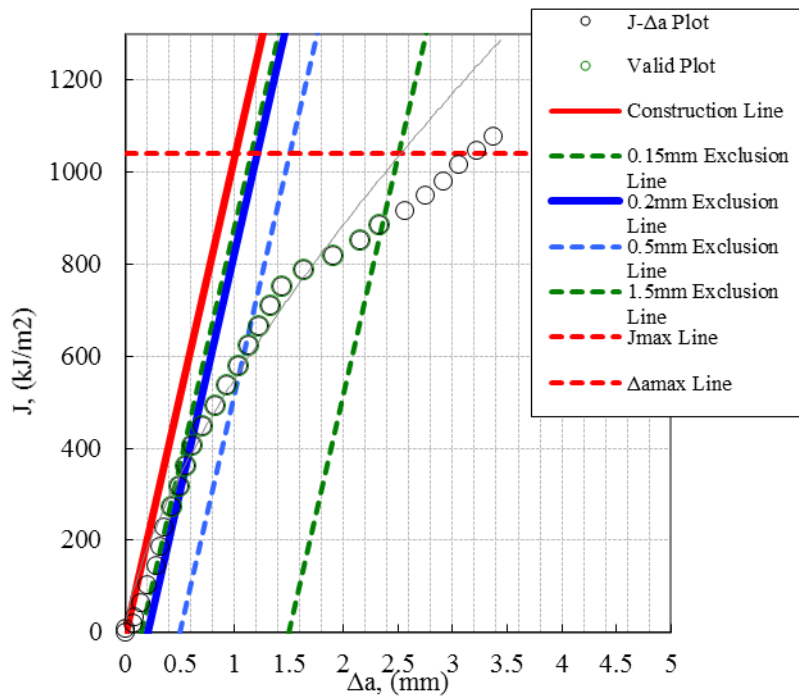


图3.3-15 J-R 曲线: 试验片3

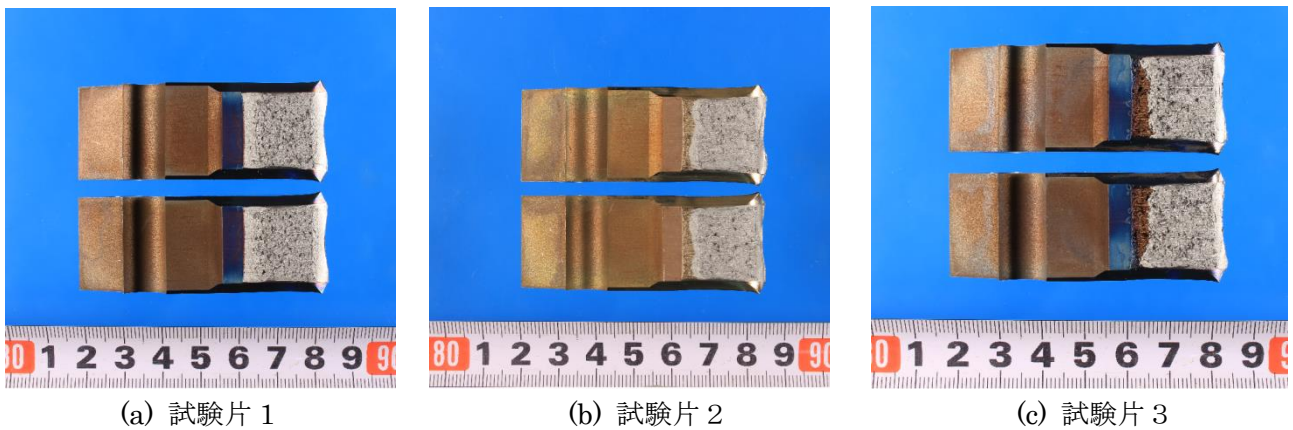


図3. 3-16 試験後の破面

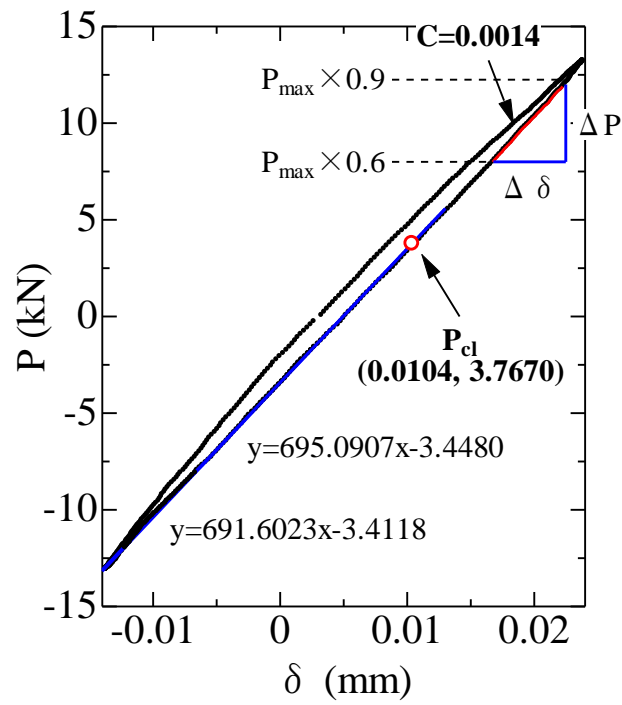
3. 3. 3. 3 疲労亀裂進展試験

3. 3. 3. 3. 1 亀裂長さ計測手法の比較

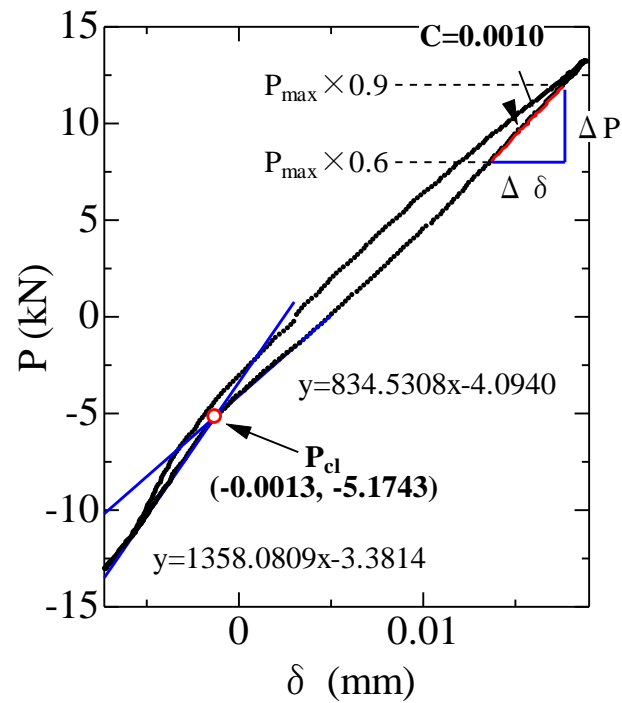
図3. 3. -17に試験中に計測された負荷荷重と亀裂開口変位の代表例を示す。荷重－亀裂開口変位曲線は全ての条件でヒステリシス挙動を示した。

本研究では、除荷側の最大荷重の 60～90%の区間の曲線を直線近似し、コンプライアンスを計測し、亀裂長さを評価した。また、別途直流電位差法により亀裂長さを評価した。各測定方法で評価した亀裂長さを図3. 3-18に示す。コンプライアンス法は除荷側の応力－ひずみ関係の傾きから亀裂長さを評価するが、CCT 試験片では CT 試験片と異なり、亀裂開口量の絶対値が小さいため、コンプライアンス変化も CT 試験片に比べて小さくなる。また、僅かな測定誤差もコンプライアンス変化に大きな影響を与える。そのため、特に、亀裂が短い領域で直流電位差法に比べてコンプライアンス法で測定した亀裂長さは変動が大きく、また直流電位差法で計測した亀裂よりも誤差が大きかった。従って、本研究では亀裂長さの測定には直流電位差法を用いた。

一方、亀裂閉口点は図3. 3-17に示すように、コンプライアンスそのものではなく、ヒステリシスループの屈曲点が対象となるため、亀裂長さ測定に見られる誤差よりも小さくなる。しかし、クリップゲージと押し当て棒を用いて測定したヒステリシスループを比較すると、押し当て棒を用いた場合、クリップゲージを用いた場合に比べて測定が安定し、亀裂閉口点も良好に測定できた。これは、クリップゲージの固定部に問題があった可能性があり、クリップゲージを用いる場合は改良が必要であろう。以上のことから、本研究では、亀裂閉口点の評価には押し当て棒を用いて測定したヒステリシスループを用いた。

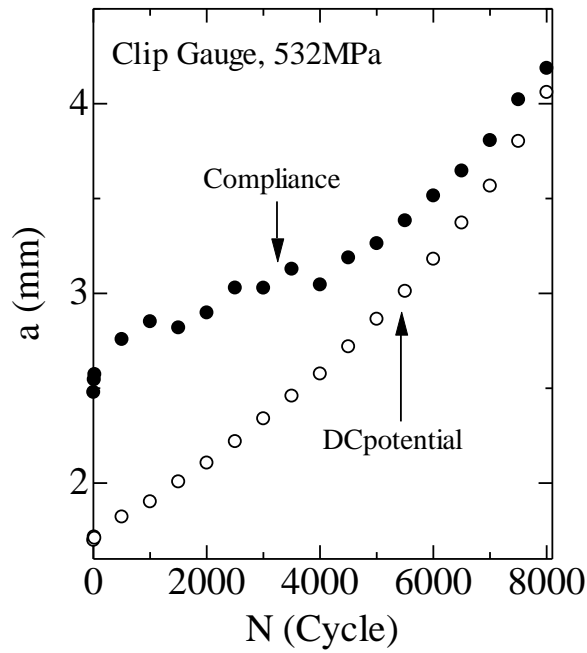


(a) クリップゲージの場合

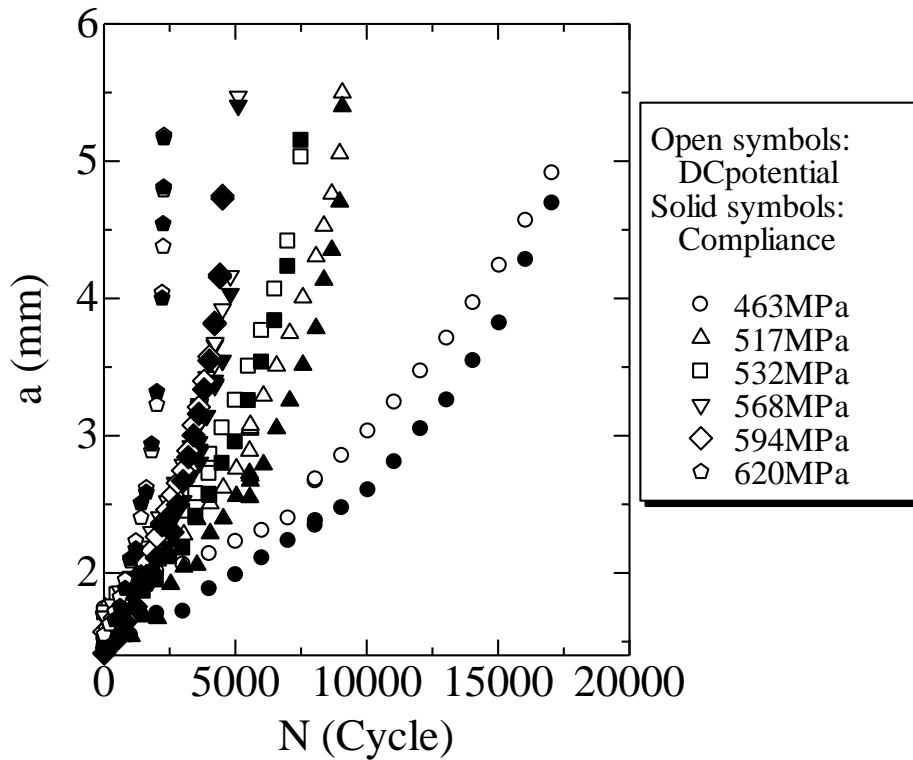


(b) 押し当て棒の場合

図3. 3-17 ヒステリシスループの代表測定例: $\Delta \sigma = 532 \text{ MPa}$



(a) 直流電位差法とクリップゲージによるコンプライアンス法の比較



(b) 直流電位差法と押し当て棒によるコンプライアンス法の比較

図3. 3-18 ヒステリシスループの代表測定例: $\Delta \sigma = 532 \text{ MPa}$

3. 3. 3. 3. 2 亀裂進展挙動と亀裂進展速度

亀裂進展挙動、亀裂進展速度と亀裂長さの関係、亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係をそれぞれ図3. 3-19から図3. 3-21に示す。図3. 3-21に示すように、全条件が小規模降伏条件を逸脱する負荷条件であるにもかかわらず、高応力で亀裂長さが長い条件を除き、亀裂進展速度は線形破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲で良好に整理できている。そして、負荷応力範囲の増加に伴い、亀裂進展速度が加速している。図3. 3-21には、ASME 規格の亀裂進展曲線を併記してある。負荷応力が高い条件のデータが ASME 規格の亀裂進展曲線上にプロットされているが、それ以外は低速側に位置している。これには、後述の亀裂開閉挙動が関連しているものと考えられる。

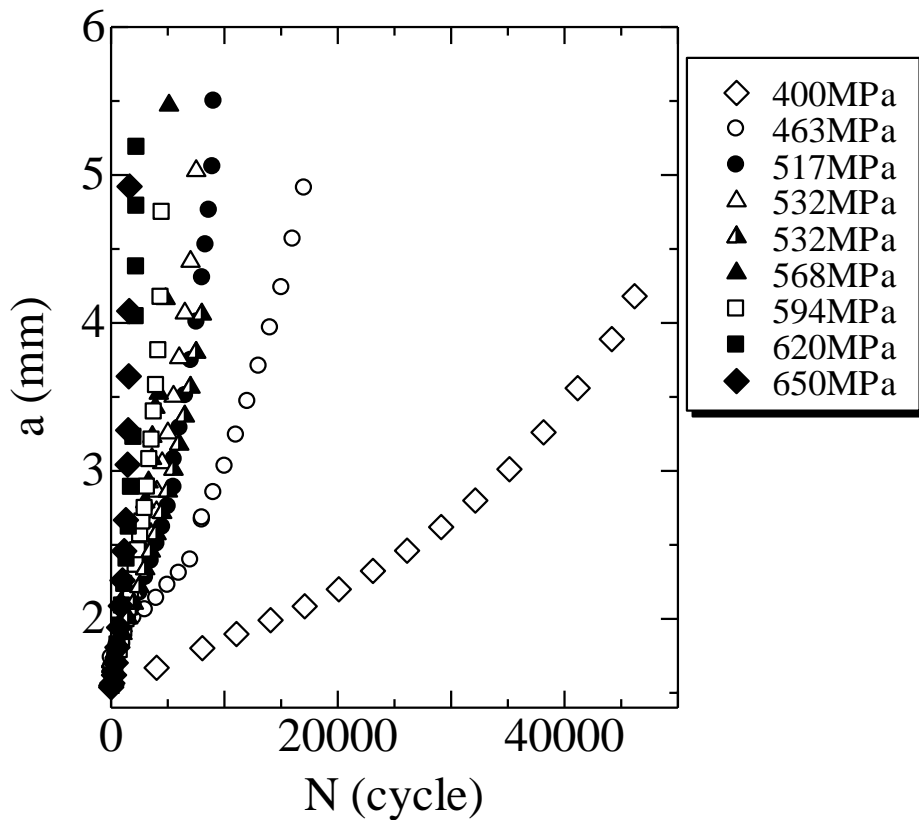


図3. 3-19 亀裂長さと繰り返し数の関係

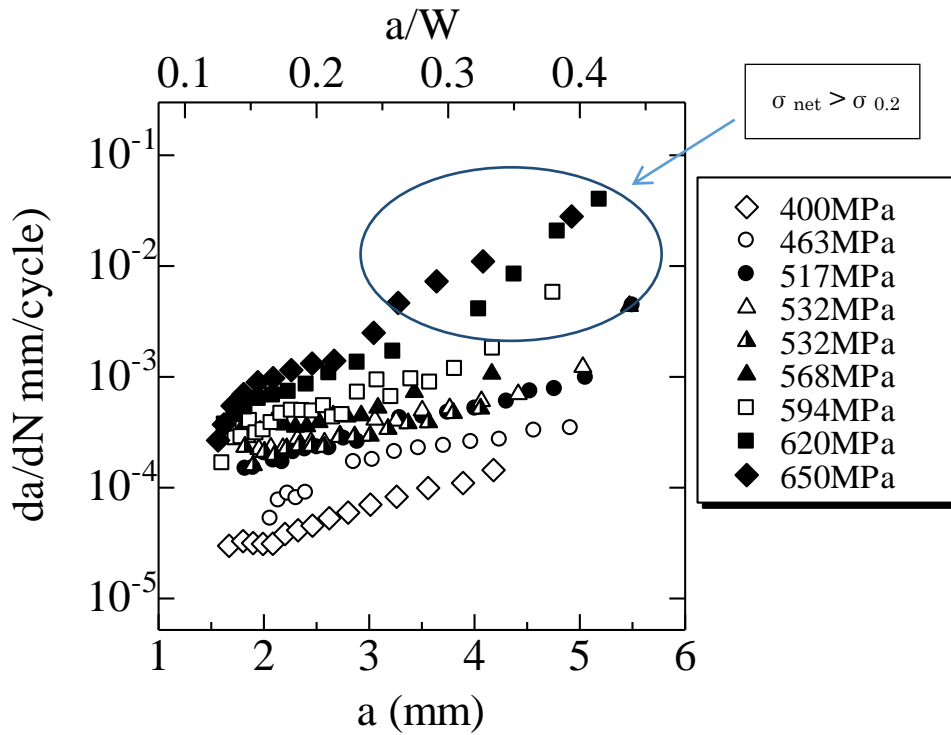


図3. 3-20 亀裂長さと亀裂進展速度の関係

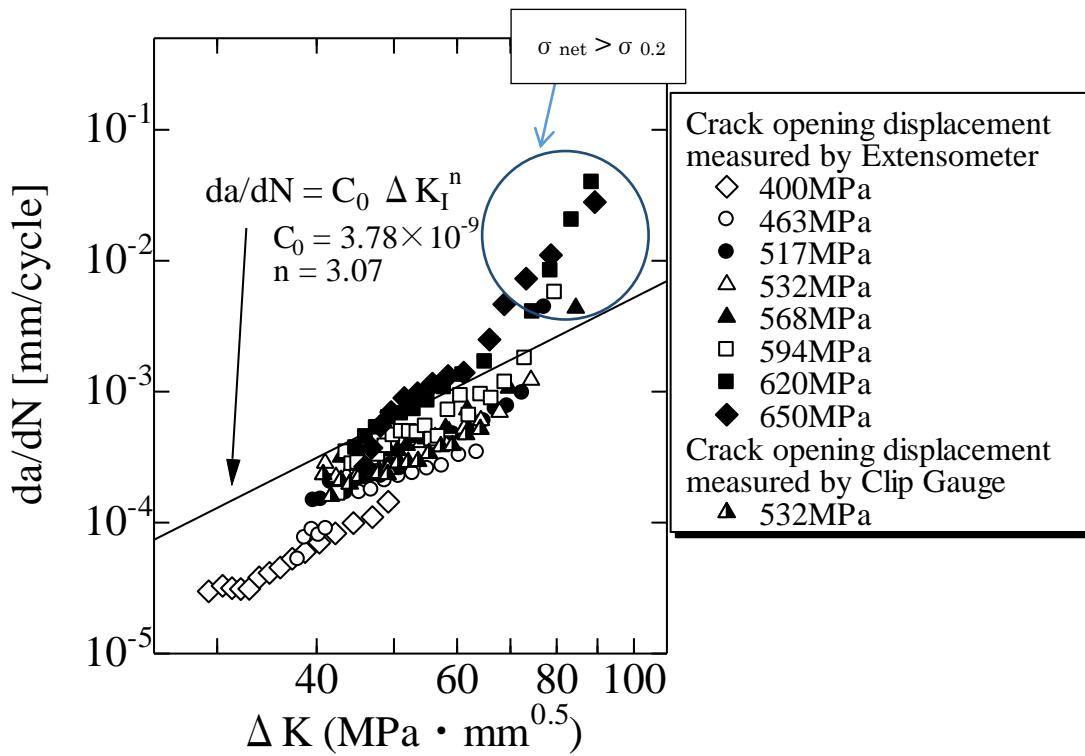


図3. 3-21 亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

3. 3. 3. 3 亀裂開閉口挙動と有効応力拡大係数範囲による評価

図3. 3-22に亀裂閉口点と亀裂長さの関係を示す。この結果から、1) 負荷応力範囲の上昇に伴い亀裂閉口点が低下する、2) 特に負荷応力範囲が大きい条件で亀裂長さがある程度以上になると急激に亀裂閉口点が低下し負荷中全般で亀裂が開口状態となる、ことが認められる。これは、負荷応力が大きくなると最大負荷時の亀裂先端の過大な塑性変形によるためと考えられる。

本研究で実施した応力比 $R = -1$ の条件では、亀裂閉口点は応力ゼロ点ではなく、閉口点荷重 P_{cl} と最大荷重 P_{max} の比である亀裂閉口レベル $U_{cl}(= P_{cl} / P_{max})$ は $U_{cl} < 0$ であり、負荷応力が大きくなるほど $U_{cl} = -1$ に近づく。すなわち、本研究範囲のように小規模降伏条件を逸脱して負荷応力が大きくなる条件では、応力範囲の圧縮負荷も考慮する必要がある。試験後の亀裂先端の代表例を図3. 3-23に示す。亀裂は巨視的には負荷軸と垂直に近い面を進展しているが、微視的には細かく屈曲しながら進展している様子が伺える。そして、図3. 3-23(b)に示すように、亀裂先端は除荷後でも完全に閉口していないことから、亀裂閉口レベル $U_{cl}(= P_{cl} / P_{max})$ は $U_{cl} < 0$ であることが理解できる。

図3. 3-20のASME規格の亀裂進展曲線は、応力比 $R \geq 0$ のデータを中心に整理した結果から得られたものと考えられる。一方、本研究の条件では、負荷条件によって閉口点が変わり、負荷が比較的小さい条件で $R \approx -0.3$ 、負荷応力範囲がある程度上昇してもほとんどの条件で $R \approx -0.5$ あるため、亀裂開閉口挙動を考慮した場合に比べて ΔK を大きく評価している。従って、図3. 3-20で負荷応力範囲が小さい条件では亀裂進展速度が低速側に位置したものと考えられる。

図3. 3-22の亀裂開閉口挙動を基に以下の式より有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を算出し、亀裂進展速度と関連付けた結果を図3. 3-24に示す。

$$\Delta K_{eff} = \Delta \sigma_{eff} \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad \text{式 3. 3-7}$$

ここで、

$$\Delta \sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{cl}$$

$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi \xi / 2)}$$

ξ : a/W

σ_{max} : 最大負荷応力

σ_{cl} : 亀裂閉口応力

$2W$: 試験片幅

$2a$: 亀裂長さ

である。図より、負荷応力範囲が大きく、かつ、亀裂が長い条件を除いて、大凡全ての条件が一本の直線上に分布しており、亀裂開閉口挙動を考慮することにより、亀裂進展速度を一義的に評価できている。亀裂進展試験後の亀裂周辺の状態を図3. 3-25に示す。負荷応力範囲が大きく、かつ、亀裂が長い条件(例えば、図3. 3-25(e)の条件)では、亀裂先端に大きな変形が生じていることが認められ、この部分で大規模な塑性変形が生じていると考えられる。すなわち、負荷応力範囲が大きく、かつ、亀裂が長い条件では、全断面降伏状態となり、延性亀裂進展の様相が付加され亀裂進展速度が高くなったものと考えられる。

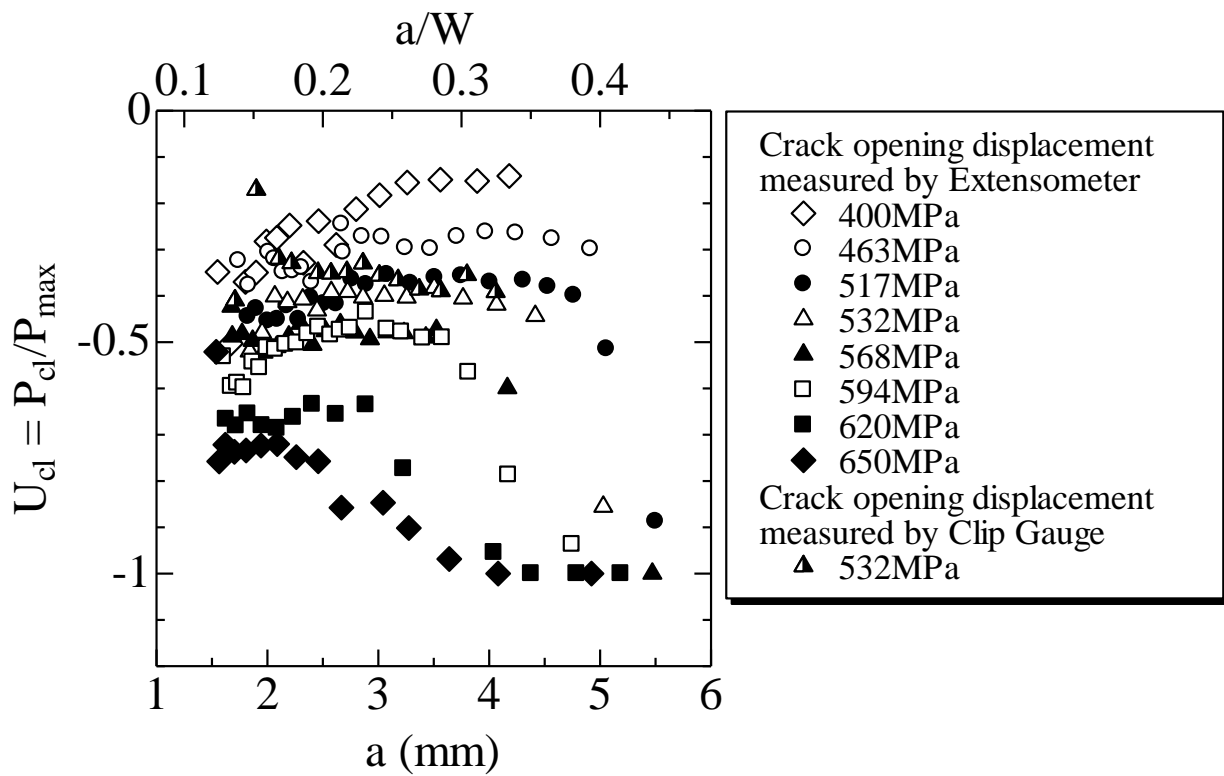
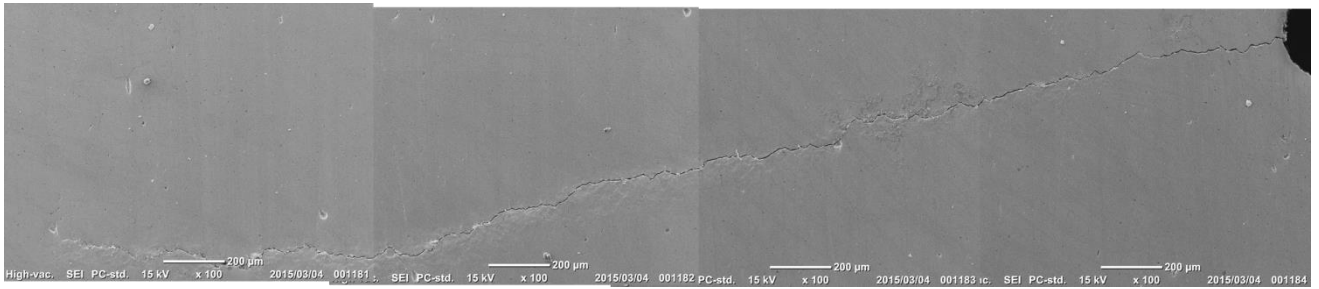
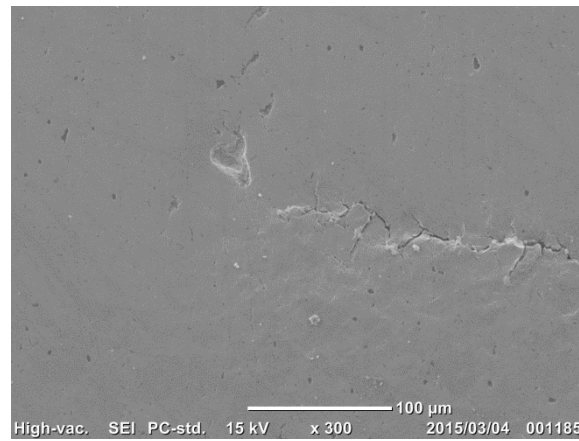


図3. 3-22 亀裂開口レベル亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係



(a) 亀裂の様子



(b) 亀裂先端近傍

図3. 3-23 亀裂進展試験後の亀裂の観察結果: $\Delta \sigma = 463 \text{ MPa}$

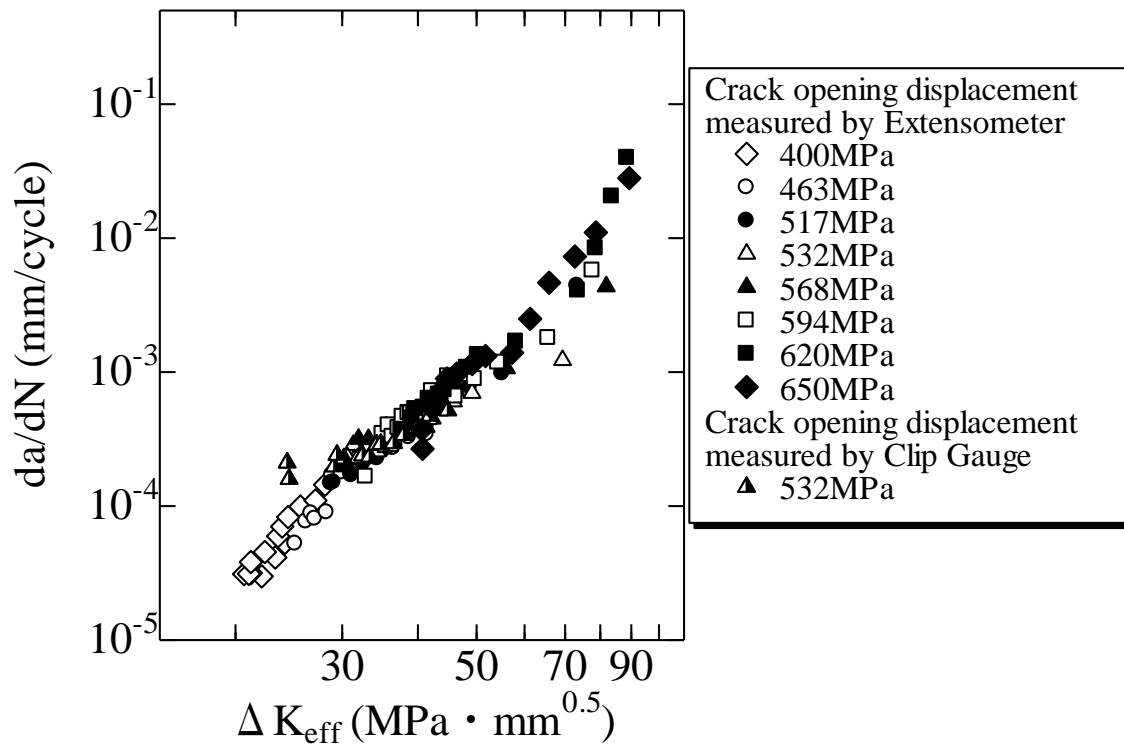
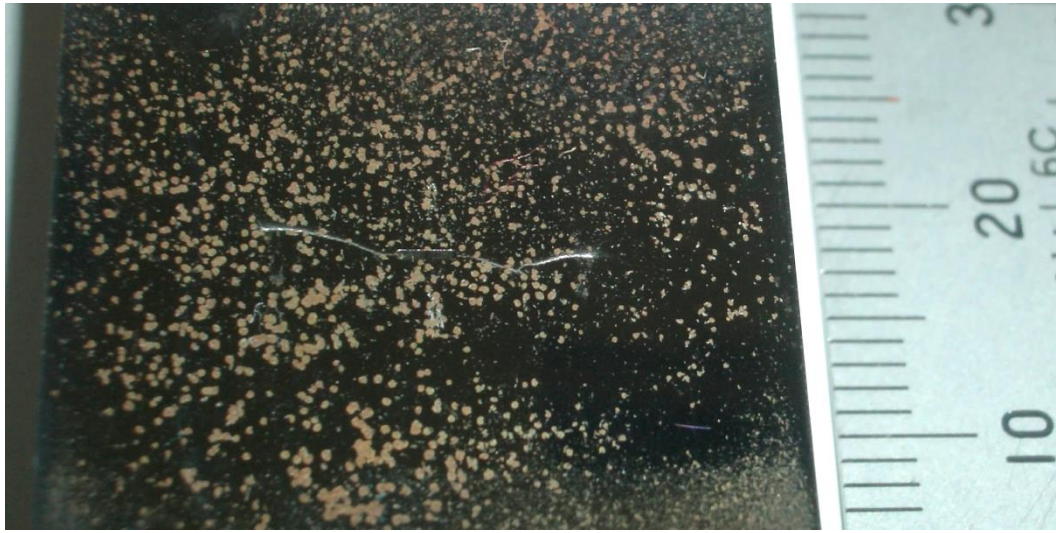


図3. 3-24 亀裂進展速度と有効応力拡大係数範囲の関係



(a) $\Delta \sigma = 516\text{MPa}$



(b) $\Delta \sigma = 532\text{MPa}$

図3. 3-25 試験後の試験片表面の様子



(c) $\Delta \sigma = 568\text{MPa}$



(d) $\Delta \sigma = 568\text{MPa}$

図3. 3-25 試験後の試験片表面の様子



(e) $\Delta \sigma = 532\text{MPa}$

図3. 3-25 試験後の試験片表面の様子

3. 3. 3. 3. 4 線形破壊力学パラメータが有効な条件

本研究で実施した負荷条件においては、ASTM E399 の小規模降伏条件

$$a > 2.5 \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式3. 3-4(再)}$$

を満たしていない。しかし、前項において示したように、負荷荷重が大きく、かつ、亀裂長さが長い条件を除いて、負荷応力に依存せずに亀裂進展速度 da/dN は有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で大凡一本の直線で整理可能であった。この結果は、式3. 3-4の条件を超えても、ある条件範囲内であれば線形破壊力学パラメータである応力拡大係数が有効であることを示している。また、負荷荷重が大きく、かつ、亀裂長さが長い条件で亀裂進展速度が加速した要因は、この条件を超えていたため線形破壊力学パラメータが適用できなかつたためであり、非線形破壊力学パラメータの適用が必要であることを示唆している。

一般に、小規模降伏条件の範囲内では線形破壊力学パラメータである応力拡大係数が適用可能であるが、本研究のように負荷荷重が大きく小規模降伏条件を超えるような負荷条件では非線形破壊力学パラメータであるJ積分を適用する必要がある。しかし、応力拡大係数が亀裂長さより評価可能であるのに対して、J積分は亀裂長さとは変形曲線(例えば、CT試験片では負荷荷重と亀裂開口点変位)が評価に必要である。実機では、このような変形挙動を実測することは困難であり、J積分を評価するためには有限要素法等を用いた高度な変形解析が必要となる。しかし、このような解析的J積分評価は極めて高度で労力を要するため、維持規格に採用するには問題がある。このような実際の使用の困難さが、小規模降伏条件を逸脱する条件においても線形破壊力学に基づく亀裂進展則をASME規格で採用した要因と考えられる。

前述の通り、ASME399 の小規模降伏条件(式3. 3-4)を超えても、ある条件範囲内であれば線形破壊力学パラメータである応力拡大係数が有効であった。ここでは、線形破壊力学パラメータの有効条件を検討する。

図3. 3-24の結果に対して、大凡一本の直線上にある試験結果に対して次式に最小自乗近似をして Paris 則の定数 C_1 と係数 m_1 を得た。

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{eff}^{m_1} \quad \text{式3. 3-8}$$

最小自乗近似で得られた定数 C_1 と係数 m_1 は

$$C_1 = 8.783 \times 10^{-9}$$

$$m_1 = 2.9389$$

である。ある ΔK_{eff} に対して最小自乗近似により得られた C_1 と m_1 を Paris 則に代入して得られる亀裂進展速度を da/dN_{fit} とし、 da/dN_{fit} と実験で得られた da/dN_{ex} の比を亀裂先端の塑性域寸法 R と関連づけた結果を図3. 3-26に示す。ここで、亀裂先端の塑性域寸法 R は

$$R = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式3. 3-3(再)}$$

で評価し、亀裂長さ a で基準化した。なお、図中には ASME399 の小規模降伏条件を満足する条件範囲 ($R/a < 0.127$) も併記した。図3. 3-26より、亀裂先端の塑性域寸法 R がある値までは亀裂進展速度 da/dN は有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} により評価可能であり、その範囲は $R/a < 0.4$ である。この条件を超える $R/a > 0.4$ の条件では、実際の亀裂進展速度は式3. 3-8で予測される進展速度より高く、線形破壊力学パラメータで予測した場合、危険側の予測を与える。 $R/a < 0.4$ は式3. 3-4の形で表した場合、

$$a > 0.798 \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式3. 3-9}$$

となる。式3. 3-9は線形破壊力学パラメータの有効条件を示しており、これまで経験的に取り扱われてきた小規模降伏条件(式3. 3-4)が過度に安全側の評価になっていることを示唆している。

式3. 3-9の線形破壊力学パラメータの有効条件は、機器の設計に対して、より広範な条件に線形破壊力学を基礎とした破壊力学設計が可能であることを示唆している。なお、線形破壊力学パラメータの有効条件は負荷条件(例えば応力比)や材料に依存することが考えられ、より広範な検証が必要である。

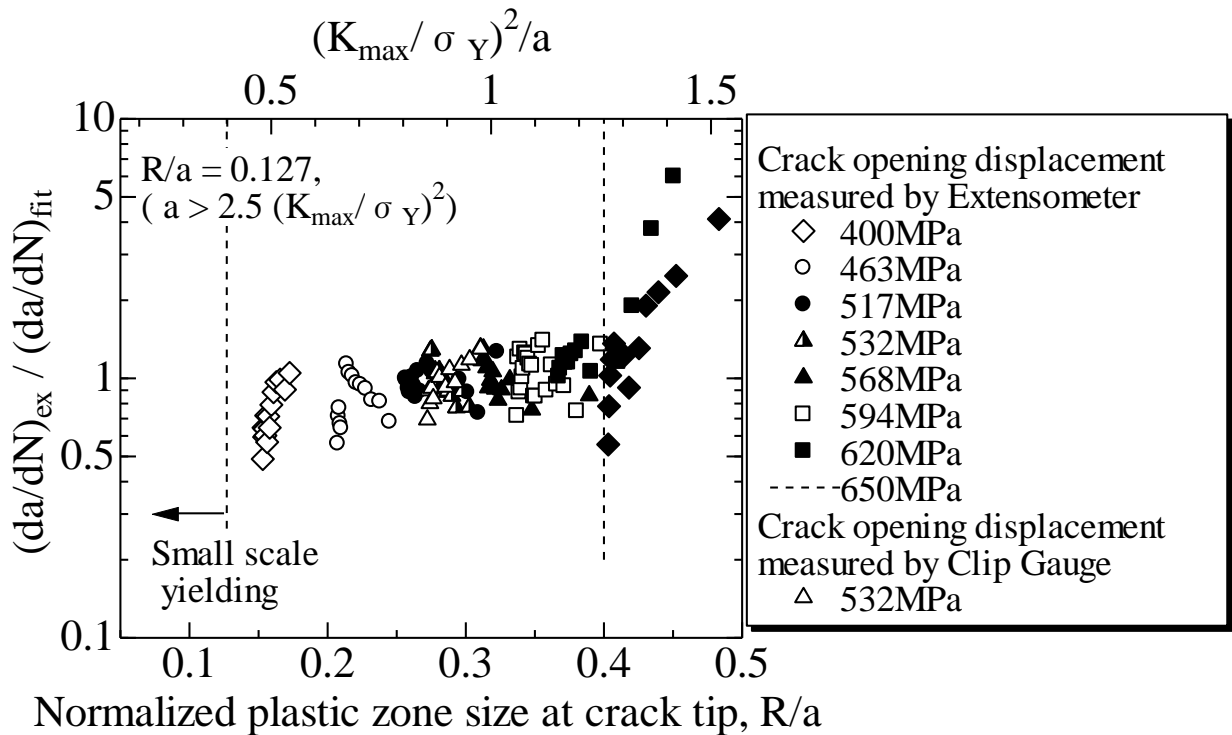


図3. 3-26 亀裂先端塑性域寸法と亀裂進展曲線からの逸脱

3. 3. 3. 3. 5 ASME 亀裂進展則の検証

図3. 3-27に ASME 亀裂進展則と NRC 推奨亀裂進展則および実験結果との関係を示す。亀裂長さにかかわらず、実験結果は ASME と NRC の亀裂進展則の中間近傍に位置している。ASME と NRC の亀裂進展則どちらにおいても、基準負荷 (ASME では $\Delta \sigma = 1.12 \sigma_f$, NRC 推奨では $\Delta \sigma = 0.8 \times 1.12 \sigma_f = 0.896 \sigma_f$) を超える場合は亀裂閉口レベルを $U_{cl} = -1$ であると仮定して $\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$ を採用しており、基準負荷以下の場合は亀裂閉口レベルを $U_{cl} = 0$ と仮定して $\Delta K_I = K_{\max}$ を採用している。しかし、実験では $\Delta \sigma = 0.8 \times 1.12 \sigma_f \sim 1.12 \sigma_f$ の範囲で $U_{cl} = -0.3 \sim -1$ に変化しているため、両者の中間近傍に位置したと考えられる。

また、図3. 3-27に示すように、亀裂長さにかかわらず NRC 推奨亀裂進展則に比べて ASME 亀裂進展則は危険側の評価となっている。なお、NRC 推奨亀裂進展則を採用しても一部危険側の評価を与えており、図3. 3-27の結果からは、 $0.7 \sigma_f = 180.8 \text{ MPa}$ であることから、

$\Delta \sigma < 0.7 \sigma_f$ の場合

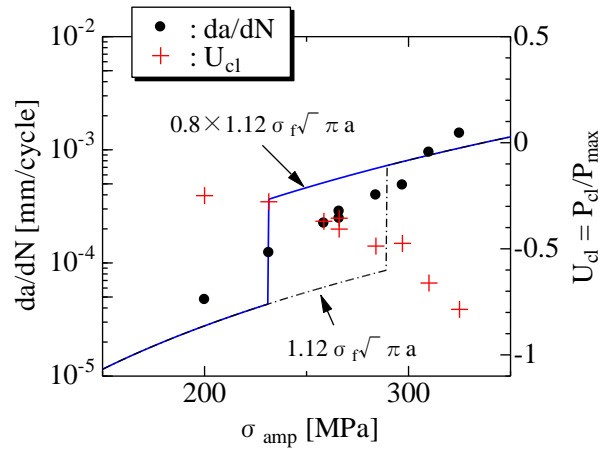
$$\Delta K_I = K_{\max}$$

$\Delta \sigma \geq 0.7 \sigma_f$ の場合

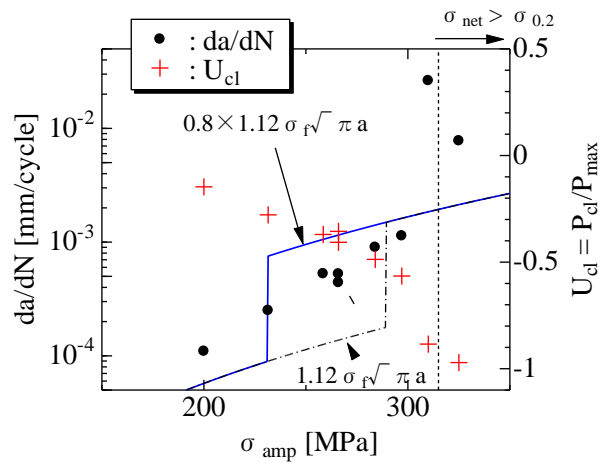
$$\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$$

程度の条件、あるいは、閾値が $0.7\sigma_f$ 以下の条件とする必要があると考えられる。なお、上記の条件は応力比 $R = -1$ の条件で得られた試験結果に基づくものであり、応力比が異なる場合の適用性は不明である。従って、応力比が異なる場合についても検証を行う必要がある。

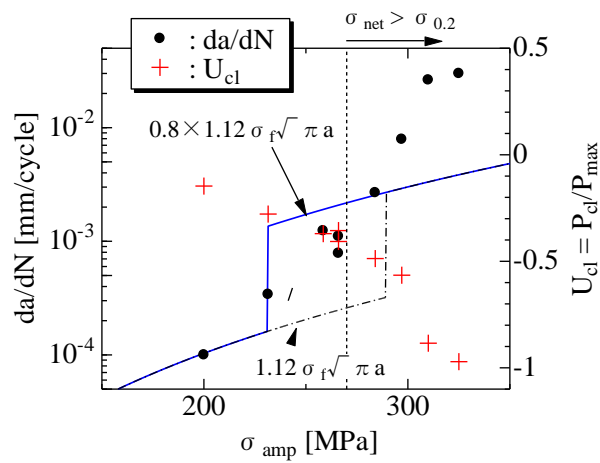
また、図3. 3-27の $\sigma_{net} > \sigma_{0.2}$ の領域で、試験結果が ASME 規格の進展則を実験値が大きく上回っている。この領域の負荷状態は、亀裂先端の応力集中を考慮せずともリガメント部全面にわたって降伏している状態と考えられ、線形破壊力学パラメータである応力拡大係数 K に基づいて決定された ASME 規格の進展則が破綻する負荷条件と考えられる。このような条件では、非線形破壊力学パラメータである J 積分に基づく亀裂進展則を検討する必要があるだろう。



(a) $a/W = 0.2$



(b) $a/W = 0.3$



(c) $a/W = 0.4$

図3. 3-27 ASME 亀裂進展則, NRC 推奨亀裂進展則と実験値

3.3.4 まとめ

原子力配管系や原子炉压力容器管台等で用いられるフェライト鋼のひとつである JIS G3120 SQV2AG SR 鋼を対象として、圧縮応力を含む繰り返し負荷による亀裂進展速度を評価するため、試験および調査を行い、「ASME 亀裂進展則」を検証することを目的として、引張試験結、 J_{Ic} 試験、および、亀裂進展試験を実施した。

得られた成果を以下に示す。

1. 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は 448.7 MPa、引張強さ σ_B は 584.7 MPa、流動応力 σ_f は 516.7 MPa であった。
2. 破壊靱性値 J_{Ic} は $J_{Ic} = 365.5 \text{ kJ/m}^2$ であった。
3. 応力拡大係数範囲で整理した場合、疲労亀裂進展速度は負荷応力の影響を受けた。
4. ASME 亀裂進展則より NRC 推奨亀裂進展則がより安全側の評価を与えた。
5. NRC 推奨亀裂進展則を適用しても実験結果を危険側に評価する場合があります、本実験の範囲は、

$\Delta\sigma < 0.7\sigma_f$ の場合

$$\Delta K_I = K_{\max}$$

$\Delta\sigma \geq 0.7\sigma_f$ の場合

$$\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$$

の条件、あるいは、閾値を $0.7\sigma_f$ 以下の条件とすることを推奨する。

6. ASME 亀裂進展則および NRC 推奨亀裂進展則と実験結果の関係は亀裂開閉口挙動で説明可能であった。
7. 亀裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲で疲労亀裂進展速度を評価することにより、負荷応力にかかわらず統一的に評価可能であった。
8. 負荷応力が高く、亀裂が長い場合は、疲労亀裂進展速度は応力拡大係数範囲で整理できず、加速傾向を示した。このような条件では、線形破壊力学パラメータである応力拡大係数 K に基づいた亀裂進展評価は適切ではなく、非線形破壊力学パラメータである J 積分に基づく亀裂進展則を検討する必要がある。
9. 亀裂閉口点は応力ゼロ点ではなく、亀裂閉口レベル $U_{cl} = P_{cl} / P_{\max} < 0$ となり、負荷応力が大きくなるほど $U_{cl} = -1$ に漸近した。すなわち、負荷応力が大きくなると、疲労亀裂進展挙動には圧縮負荷の影響を考慮する必要がある。

参考文献[3. 3]

- [1] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI Appendix A-4300 “Fatigue Crack Growth Rate”.
- [2] Federal Register/Vol.76, No.119/Tuesday, June 21, 2011/Rules and Regulations, Page 36240.
- [3] Kunio Hasegawa, “Fatigue Crack Growth Rates under Negative R Ratio”, ASME Code Sec. XI, WG on Flaw Evaluation, Montreal, Canada, August 13, 2013.

4 国内外の最新知見収集等の調査

「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」に反映することを目的に経年設備の構造健全性評価に係るデータ、亀裂進展則、規格等について国内外の最新知見等を収集する。

4.1 概要

原子力発電プラント機器における地震荷重に対する構造健全性は、実機模擬試験によって確認されている。しかし、亀裂が存在した場合は亀裂を起点とした破壊が発生する可能性は否定できない。地震荷重を受ける亀裂構造物の健全性を評価するためには、以下の2つの方法が考えられる。

- (1) 繰り返しの荷重下での破壊靱性を用いて破壊評価を行う
- (2) 地震荷重による疲労亀裂進展を考慮した後に破壊評価を行う

亀裂構造物の破壊評価は、材料の破壊靱性を用いて実施する。一般に、破壊靱性試験は単調増加荷重を負荷しながら実施する。しかし、圧縮の荷重を含む繰返し荷重を負荷しながら試験を行うと、単調増加荷重を負荷した場合よりも低い破壊靱性が得られることが知られている。地震荷重では、繰返し荷重が作用するため、亀裂構造物の破壊の有無を判断するには、繰返し荷重下での破壊靱性の低下を考慮する必要がある。その方法として、(1)の繰返し荷重によって低下した破壊靱性を用いて破壊評価を行うことが考えられる。ただ、繰返し荷重下での破壊靱性試験の方法は規格化されていない。

一方、繰返し荷重下では疲労によって亀裂が進展することから、繰返し回数とともに亀裂寸法が増加する。亀裂が大きくなると、破壊強度も低下することから、初期の亀裂寸法を基準にした場合、繰返し荷重下では見かけ上の破壊靱性が低下することになる。そこで、繰返し荷重による亀裂成長を破壊評価に考慮することで、通常の単調増加荷重下での破壊靱性を用いて破壊評価を行う方法が上記(2)の方法となる。この方法では、一般的な単調増加荷重による破壊靱性試験結果を用いることができる。ただし、小規模降伏状態を逸脱するような大きな地震荷重による疲労亀裂進展をどのように予測するかが問題となる。

本調査では、米国機械学会(ASME)の Boiler and Pressure Vessel Code の Code Book(平成26年11月16日～21日開催)に参加し、亀裂進展評価法について米国規格の最新動向を調査するとともに、上記の(1)および(2)のアプローチに関連した文献のレビューを行った。

4. 2 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Week の調査

(1) 開催場所:オーランド World Center Marriott



(a) 会場となったマリオットホテル



(b) Working Group Flaw Evaluation 用の会議室

図4. 1-1 会場

(2) 開催期間:平成 26 年 11 月 16 日～21 日

(3) Code Week の概要

ASME Boiler and Pressure Vessel Code は米国機械学会 (ASME) の原子炉容器および配管の設計規格や維持規格を含む規格で、Code Week はこの規格の制定・改訂を行う作業会や委員会を 1 週間にわたって集中的に実施する定期会合。年 4 回実施され、規格本文以外にも事例規格 (Code Case と呼ばれる) の制定、改訂や、規格使用者から寄せられる質問の回答についても議論する。ほとんどの委員会は委員以外でも自由に参加できる。

議論される規格は、主に設計・建設 (Section III)、非原子力圧力容器 (Section VIII)、と検査、補修および欠陥評価 (Section XI) となるが、疲労亀裂進展関連の情報を収集するため Section XI の欠陥評価関係の委員会を聴講した。

(4) 調査内容

以下の委員会に参加した(下位から上位に記載)

- Task Group (一番下位の委員会、特定の課題について集中的に議論)
- Evaluation Procedures for Degraded Buried Pipe (埋設配管の評価タスク)
- Evaluation of Beyond Design Basis Events (設計想定超え事象評価タスク)
- Crack Growth Reference Curve (亀裂進展曲線タスク)
- Working Group (規格策定の実務を行う委員会)
- Pipe Flaw Evaluation (配管欠陥評価 作業会)
- Flaw Evaluation (欠陥評価 作業会)
- Subgroup on Evaluation Standard (欠陥評価を担当する分科会)
- BPV Committee on Nuclear Inservice Inspection (維持規格の専門委員会)

(5) 調査結果

亀裂進展評価については、PWR 環境中のオーステナイト鋼の疲労亀裂進展線図の策定、複数欠陥の

合体モデル化方法、ラミナー状欠陥のモデル化方法、応力拡大係数の充実など。

破壊評価に関しては、鋳造ステンレス鋼の欠陥許容基準(鋳造ステンレス鋼の破壊靱性)、原子炉容器の弾塑性破壊評価方法など。

地震荷重下での亀裂進展評価方法に関連した議論は見当たらなかった。

以下に、議事内容の詳細を示す。

Task Group Evaluation Procedures for Degraded Buried Pipe

(参加者:メンバー12名、ビジター20名程度)

埋設管の健全性評価基準(事例規格 N-806)の策定を目的としたタスク。米国原子力規制委員会(NRC)の担当者もオブザーバーとして参加し、腐食速度の設定方法などについて議論。減肉した場合(最低板厚を下回った場合)を許容することを目指している。

(1) NRC との打ち合わせ結果の報告

ASMEとNRCの担当者が腐食速度などについて去る9月25日に打ち合わせた。ASME側は、カナダの大学と協力してEPRIの腐食速度の統計解析を実施した。NRCは前回より予測精度が改善したことを評価したが、ばらつきが大きすぎるとの立場は変えず。また、湿り具合や場所による影響が考慮されていないとの見解。External Corrosionに加えInternal Corrosionも考慮するよう要求。現在提案されている事例規格(N-806)は現状のままでは了承できないとの考えが示された。

(2) 前回の会議およびNRCとの打ち合わせを踏まえての事例規格N-806の修正

前回の会合より以下の対応と議論を行った。

- 適用範囲 93°C(200F)以下、2.24MPa(325psig)のクラス2,3配管に限定する制限を新たに追加し、腐食データ絞込みを行うことで予測精度の向上を図った。これにより、埋設管の52%程度に適用範囲が絞られる。
- 圧力に制限を設定することについて議論。NRC担当者は腐食速度の精度を向上させるために圧力制限を設定すべきと主張したが、圧力で一様に制限するより肉厚を考慮して強度により制限するべきとの反対意見。埋設しているため、漏れても影響は少ないとの意見。逆に、圧力が0.1(単位は不明)ならば、リークしても検知しにくいとの反対意見も。
- 許容された運転期間の2分の1の時点で再度検査を実施、予測の妥当性を確認する継続検査の条項も新たに入れた(良い提案との意見)。
- それまでの時間と腐食量から外挿で予想し、その2倍(期間の半分)を予測とする意見が出された。
- クーポンを使って腐食速度を実測する案も出された。→採用する。
- NRCからは2箇所以上の腐食速度を調べるべきとの意見。しかし、初期の厚さがわからないではないかと他の委員は否定的。短期間(30日)の速度を調べ、外挿するという対応もある。→“Two measurements”という言葉が改訂に含めることとした(2箇所または同じ箇所でも2回という解釈。後者の場合、予め測定しておくことが必要)。
- NRCからは予測精度の悪さから安全率は4倍とすべきとの注文。同じ材料、同じ場所のデータを用いる場合は2倍で問題ないが、現実的にはそのようなケースはありえないので、1回目(最初に見つかったとき)と同じ場所を再度検査したときの腐食速度予測の安全率に差をつける案も出された。
- 今回はVoteしない。次回までに再度ドラフトをまとめ、Voteしたいとの議長発言。腐食速度以外はNRCと同意できたことが確認された。(NRCと同意できるように、予め規格をつくりこんでいるところが日本と大きく異なる)

- PVP2015 で Buried Pipe のセッションが企画されているが、現状 1 件の申し込みしかない。今回の改訂の論点をまとめたものと、計算例を紹介する 2 件を追加することとした。

Working Group Pipe Flaw Evaluation

(参加者:委員 18 名、オブザーバー20 名程度)

維持規格の亀裂の評価法を議論する WG。WG Flaw Evaluation とともに欠陥評価の中心となる委員会。

(1) PWR 環境中のオーステナイト鋼の疲労亀裂進展速度の事例規格案(N-809)の提案

欠陥評価と欠陥許容基準(UF = 1 到達時対応)に用いられる。日本の電共研のデータも参照されている。前回(8 月のミーティング)で、rise-time(最大応力に到達するまでの時間)と応力比($R = \text{最小応力} / \text{最大応力}$)の影響が、残された課題として挙げられていた。前者は 22,00sec を上限とする案、後者は低カーボン材と通常材で異なる式を提案した(通常材は $R = 1$ で速度が速くなる。低カーボン材は変化少ない)。実験データとの比較、いくつかの機関によるベンチマーク評価を実施した。また、他の規格との比較を行った。JSME と RES-M(仏の維持規格)よりも危険側となっているが、日本、フランスが保守的との立場。残された課題として、応力拡大係数の下限しきい値、マイナスの R 比、BWR 環境への拡張が挙げられた。

議論は以下、

- ・ 低カーボン材と通常材で応力比依存性が異なること、日本やフランスと異なること、について議論。いずれも、実験データによる経験的なもので、メカニズムベースの議論ではない。
- ・ rise-time 依存性に対するメカニズムについて議論。こちらも、経験的な議論が主体でメカニズムには深入りせず。
- ・ いくつかのマイナー変更が提案された。採決され保留 2 件で承認された(次は WG Flaw Evaluation、SG Flaw Evaluation)。
- ・ 合流部の亀甲状亀裂について紹介
- ・ Structural Integrity(検査と評価を行うコンサルタント会社、以下 SI と略す)の委員から配管合流部での高サイクル熱疲労についての紹介(問題提起)。EPRI では UT で高サイクル熱疲労の非破壊検査による検出の可能性を検討するプロジェクトを開始した。SI が検査を担当している。実機では亀甲状亀裂が発見されており、欠陥が見つかった場合は、亀甲状亀裂に対する欠陥評価が必要となる。
- ・ 火力では一般的に見られているとの発言や、亀裂進展は停留するなどの議論があった。紹介のみで具体的なアクションはなし。

(2) 内部欠陥の合体ルールについて

現行の規格では、亀裂が内部に存在していても、表面に近づくと表面亀裂と見なすことになっている。楕円亀裂が内部に存在するときの、表面からの距離と K 値の関係を X-FEM により計算した結果のプレゼン。

- ・ 現在は表面からの距離が「亀裂深さ×0.4」以下になると表面亀裂と見なす規定となっている。このしきい値を亀裂のアスペクト比の関数とするもの。
- ・ 前回提案されたものを X-FEM を用いて妥当性を確認した。
- ・ 板厚材に対しては現状の 0.4 倍の規定で十分との結果が得られた。パイプ材のように板厚が薄くなると、板厚にも依存することになる。
- ・ 合体条件を設定せず、表面にタッチする(K 値解がなくなる)ときに置き換えては、との意見。

- ・ 次回も議論を継続することとした。

(3) Further Discussion on Record 12-1200: Proposed Code Case N-838 on Flaw Tolerance of CASS Piping

鑄造ステンレス鋼(以下、CASS)の検査において、検査における必要検出精度を規定するための事例規格(N-838)の制定をすすめている。必要検出精度は、材料データを用いて確率論的破壊力学(PFM)を用いて策定している。それに対し、以下の問題が提起されている。

SI社のGriesbach氏がNUREG/CR-4513のJ-R曲線を用いてN-838の策定を進めているが、フランスではそれより小さいJ-R曲線が得られているとの指摘があった。コンサルタント会社Emc2社のWilkowski氏がフランスのデータを支持し、Griesbach氏と論争を展開しているとのこと。今回、Griesbach氏がフェライト量と化学成分で制限値を設定することで、フランスの低いJ-R曲線は排除できるとの説明を行った。また、Griesbach氏が用いているJ-R曲線(NUREG文献)の策定者であるChopra氏がプレゼン。NRCと新たなプロジェクトが進行中で、実機の長時間時効材のテストを実施している(計画している)との紹介。J-R曲線が見直すとの発言もあり、Griesbach氏の主張を必ずしも支持しない内容のプレゼンを行っており、問題が複雑化している。

a. 北条氏から日本(MHI)のCASSのJ-R曲線の予測モデル(H3Tモデル)の紹介

SCS14Aを10種類、SCS13Aを3種類。H3Tモデルが測定データを予測できていることを説明。NUREG/CR-4513は危険側となる場合もあった。

b. Griesbach氏から Resolution of Low Toughness Data Concerns Related to Code Case N-838 のタイトルでプレゼン

NUREG/CR-4815を使ったが、フランスや日本のデータは低いJ-R曲線を示す場合があった。文献データを追加し、NUREGの予測カーブと比較した。日本のデータが低い。

フェライト量が25%を超えると破壊靱性が明らかに低下している。Cr+Si+Mo含有量が24.2%を超えても破壊靱性が低下する。そこで、これらのフェライト量と、Cr+Si+Mo量を超えたデータを除外したところ、NUREGの予測が全てのデータに対して安全側となった。したがって、NUREGの予測曲線を使っているN-838は安全側だとの主張。

c. O.K.Chopra氏から Estimation of Thermal Aging Embrittlement of Cast Austenitic stainless Steel (CASS) Components during Service in LWRs

NUREG/CR-4515を改訂するためのNRCとのプロジェクトが進行中であることが紹介された。照射と熱脆化両方の影響を考慮すること、炉水環境中の破壊靱性試験とすること、Nb添加の影響を考慮すること、の3つが目的。実機使用材を用いて妥当性を確認した。

0.2%Nbが含まれている場合もある。

近年の改良。NUREG/CR-4513が改訂され、シャルピーからJ-R曲線に変換式の適用範囲が、フェライ

ト量で 25%以下から 40%以下に増加している。Ni 量の影響も考慮した。

NUREG/CR-7185 (近日出版予定) では照射と熱の脆化が考慮されている。

CF8 材は 350°C で 15 年脆化させた場合、PWR 環境で破壊靱性が低下する。また、54°C の大気中は、それ以上に破壊靱性が低下した。

d. Wilkowski 氏から N-838 の妥当性についてのプレゼン

Griesbach 氏とは別に PFM のコードを用いて米国のプラントを例に計算をしてみた。

MRP-362 に記載の材料特性を用いて実施した。要点は以下、

- DPZP 法 (Dimensionless Plastic zone Parameter 法) を弾塑性評価に適用した。この方法の評価では JIC 値が求められ、J-R 曲線は必要ない。
- 脆化による耐力の変化は破壊靱性と流動応力にどちらにも作用する。
- Griesbach 氏の設定したフェライト量と Cr+Si+Mo 含有量のしきい値は、しきい値と呼ぶには値が混みすぎており、適切でない。
- 耐力と靱性はトレードオフとの関係がある。Z 係数は (JIC/・f(オリジナル材料)) でなく (JIC/・f(脆化材)) とすべとの主張。実際に計算してみると、弾塑性破壊はそれほど問題ではない。
- 破壊靱性のばらつき (COV) は 40% とすべとの分析 (MRP は 10%)。なぜなら、破壊靱性は試験片の方向、試験片方向は、L-C 方向が破壊方向で、鋳鋼はデンドライト組織が発達する。方向によって 20 ~ 50% 靱性が低下する。
- フェライト量もばらつきの要因になる。測定における誤差、場所による化学組成のばらつきの要因になる。25% で制限しても、ばらつきにより、ローカルには 34% になっている可能性もある。

e. 議論の結果、以下の収束をみた

- まずは現状の事例規格の COV を 10% よりも大きくした場合の計算を実施する (Wilkowski 氏)。
- PFM の計算で、最悪ケースの J-R 曲線とフランスの J-R 曲線を比較する (現在の事例規格でフランスのデータをカバーできているか調べる)。
- 以上の計算を次回の Meeting の 4 週間前までに完成させ、違いが出た場合は解決して、次回 Meeting で報告する。
- ちなみに現状の提案について議決したところ、賛成 5 に反対 4 であった。

(4) NRA 東氏から高アスペクト比の亀裂 (深い亀裂) の相互作用に関するプレゼン

NRA (旧 JNES) で開発した 3 次元自動メッシュ FEM を使って、2 つの亀裂の距離を系統的に変化させて、応力拡大係数を計算した。現状の合体ルールで保守的に評価できる。旧 JNES で取り組んでいた、溶接部の SCC を想定した解析。

Working Group on Flaw Evaluation

(参加者:14名、ビジター13名)

欠陥評価法を議論するWG。WG on Pipe Flaw Evaluationとメンバーと内容が近く、内容が重複するものもある。こちらは容器の評価に関連したもの、K値解の整備がある。

(1) 重み係数法を適用した応力係数が書面投票にかけられたが、エディトリアルなコメントがついたが修正版が本会議で承認される予定。

(2) 円筒ない表面軸方向亀裂のK値の改訂が前回提案されて、式と数字のチェックが実施された。深さaが分母にある式があり、 $a \rightarrow 0$ で特異となることが議論された。深さに対する式の値の変化をチェックすることとした。

(3) 管外表面に存在する周方向亀裂のK値について

API(米国石油協会)とフランス維持規格のK値を比較し、定数を式で補間した。APIはK値解が充実していることで知られているが、解の信頼性が低いことが指摘されている。2001年版と2007年版が出版されているが、両者でも解が異なっており、改良が加えられていることが推察される。いろいろな形状について両者を比較したが、とくにアスペクト比が小さい亀裂で両者の差が見られた。2007年版のAPIにおいて、表のいくつかの定数(亀裂深さ毎に与えられている)を5次式で補間したところ、5%程度の誤差で、式により表が補間できるとの見通しを得た。浅い亀裂は式による補間は難しい(17%の誤差。それ以外は最大でも8%程度)。さらに検討を進める。

(4) 容器の評価に現状の線形破壊力学評価に加え、弾塑性破壊評価を取り入れる検討を行っている。延性・脆性遷移の取り扱いが問題となっている。(評価方法は事例規格N830として既に制定されており、その改良版N830-1の議論)。

現在は、靱性予測モデル(現状のKICに加え、 K_{Ia} とJICを追加)の議論をしている。下限包絡線となるJ0.1曲線も含めている。上部棚領域での破壊靱性を定義することが重要となる。材料定数はRTNDTに対する確率的に与えられる。ドラフトは完成してレビュー中。あと、テストケースについての計算、技術文書の準備が必要。

(5) WG on Pipe Flaw Evaluationでも審議されたPWR環境中のオーステナイト鋼の疲労亀裂進展速度の事例規格案(N-809)の提案

エディトリアルな修正を行った上、承認された。

(6) ラミナー状欠陥のモデル化方法(事例規格N-848)

表面に垂直な欠陥を想定しているモデル化のルールをラミナー状欠陥(表面に平行な亀裂)に適用できるように拡張するための事例規格が検討される。ドラフトに対して、NRCからのモデル化(合体評価法)につ

いていくつか質問が出た。それに対応する変更、エディトリアルな変更を加えたものが紹介された。エディトリアルな修正を加えた後、承認された。

(7) WG on Pipe Flaw Evaluation でも紹介された Surface to Subsurface Flaw Proximity Rules のプレゼン X-FEM を用いて内部亀裂の K 値を計算した結果。PVP-2015 で発表されるとのこと。

Symposium/Tutorial on Thermal Aging of CASS Piping

(参加者:30名程度)

WG on Pipe Flaw Evaluation で CASS の脆化予測で大きな議論があったことから企画されたもの。予定の関係で最初の 2 時間のみ聴講

(1) 「Effects of Thermal Aging and Neutron Irradiation on Fracture Toughness of Cast Austenitic Stainless Steels during Service in LWRs」(by O. K. Chopra ANL)

- WG on Pipe Flaw Evaluation で行ったプレゼンと重なる部分が多い。
- CASS の熱時効に対する破壊靱性、引張特性、吸収エネルギーの変化について複数の NUREG/CR を執筆。その中の NUREG/CR-4513 (熱時効による破壊靱性の変化) を紹介。
- データは実機で時効した材料を用いて取得。照射や炉水環境の影響は考慮していない。
- 初期の吸収エネルギーから破壊靱性を予測する。また、初期の流動応力から機械特性の変化も予測できる(しかし、一般には初期の値はないとの質疑)。
- 熱時効に影響を及ぼす照射量のしきい値は EPRI MRP-276 によると $6 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$
- フェライト量には局所的には分布があり、高い部分を選択的に亀裂が通る
- 550°C で 1 時間の熱処理で脆化はほぼもとにもどる
- フェライト量の測定にばらつきが多い。
- 今の NRC プロジェクトでは、熱時効と中性子照射の重畳を調べている(文献のデータまとめると照射により破壊靱性は低下している)。また、吸収エネルギーを使わないモデルとしたい。
- Ni 含有量、フェライト量、鑄造方法(静 or 遠心)によって脆化の新しいしきい値を提案。
- J_{IC} が 200kJ/m^2 を超えると JIC は試験温度に対して減少するが、それ以下では、試験温度に対して J_{IC} が増加する。

Task Group Evaluation of Beyond Design Basis Events

(参加者:メンバー5名、ビジター5名程度)

設計想定以上の地震経験後の再立ち上げの手順を事例規格としてまとめることが目的。再立ち上げのための To Do リストを準備するようなイメージ。SG on Flaw Evaluation の下に組織されている。また、タスクが立ち上がったばかりで、書記や NRC 委員の参加要請などを行っている。

(1) North Anna 発電所の地震後の再立ち上げについて説明資料

- 2011 年 8 月 23 日の地震が発生した。設計地震動をオーバーしていた。
- 地震後の点検を実施した。
- デミのタンクやブロック壁がずれやひび割れなどが確認されただけで、機能や構造に問題は確認されなかった。
- 複数の外部コンサルタントの評価を受けたことが強調されていた。

(2) 地震荷重下での亀裂管の解析(口頭)

地震動下での亀裂配管系の計算を多数実施している。亀裂が貫通し、荷重が低下する、変位制御のような挙動が再現された。設計マージンは 80 倍ほどあることを確認した。

段階としては、設計段階において、弾性から塑性まで評価体系を整備する。次は、亀裂を想定して不安点破壊、最終は PRA 評価との流れになる。ただし、事例規格にこれらの評価体系を織り込むかは今後議論。

(3) ディスカッション

- EPRI から関連する文書が発行されているらしい。ここでは、それをベースに再稼動に必要な To Do リストを含めた事例規格をまとめたい。後日開催された Subgroup on Evaluation Standard の会合での議論で EPRI 文書を引用できるかは確認が必要との指摘(EPRI の報告書は公開文献ではない)。
- IAEA のレポートも参考にする。
- 強度評価(弾性、弾塑性)、疲労評価法などを含めるのか、の質問に議長は、それらは含めずに、To Do リストとフローチャートにまとめるイメージとの回答

Subgroup on Evaluation Standard

(参加者:メンバー15名、ビジター10名程度)

WG on Pipe Flaw Evaluation、WG on Flaw Evaluation など、WG の上位委員会。WG での議論が踏まえつつ、採決がとられていく。

(1) Executive Meeting の報告

新しい編集方法の決定、NRC との折衝のあり方の議論、課題の優先順位付け、などの報告が議長 (Bamford 氏) から。

(2) 議決事項

課題リストの項目ごとに進捗を報告。WG での議論の内容や、書面投票対応状況など。

- CASS の欠陥許容基準
- さらなる議論が展開される。この事例規格のゴールは検査のために許容できるサイズを決めることが確認された。事例規格の使い方 (目的) が議論になった。評価不要欠陥、欠陥評価、欠陥許容基準に対して、検査のための目安である異質なものである (検査の Qualification のためのもの)。目的からすれば欠陥許容基準 (Section XI Appendix L) で十分との考え方も。
- CASS は耐 SCC を考えても良い材料で。信頼性の点からクリチカルなものではないことを前提に考えるべきだとの議長発言。
- その他、WG Pipe Flaw Evaluation での議論の要約の紹介。WG での対応をすることが追認された。
- ラミナー状欠陥のモデル化方法 (N-848)
- WG Flaw Evaluation で紹介された内容のプレゼン。NRC もこの改訂を了解済みであることを確認。全員賛成で採択された。
- ステンレス鋼の PWR 環境中の疲労亀裂進展速度
- 下限しきい値について議論になった。設定根拠を明確にする必要があるとして、投票は見送られた。

(3) 業務報告

- Errata (誤字脱字) の報告 (2箇所)
- Working Group の報告 (3つ)
- Task Group の報告 (3つ)
- 2015年版に向けた審議スケジュール

(4) その他

- "defect" の定義について議論。補修グループは補修が必要な欠陥、評価グループは補修が必要である可能性がある欠陥と解釈している。今後、議論する必要がある。
- 軽水炉以外に対応するために、Section XI の Division 2 を作成していることが紹介された。検査要求と評価不要欠陥から構成される。日本と協力してシステム化規格を導入している。案を送るので意見が

欲しいとのこと。

Task Group Crack Growth Reference Curve

(メンバー14名、ビジター8名程度)

評価に用いる亀裂進展速度の策定および関連する議論を行うための設置されたタスク。また、SCC 亀裂進展速度の評価には残留応力が必要となるが、そこで用いる代表的な残留応力分布を事例規格で提示することも目指している。

(1) 韓国の異材継手の残留応力について(資料なし)

- ・ ソウル大学の Huh 氏より。韓国で集約している残留応力の結果。
- ・ 出入口管台と Safety Injection 管台(韓国の炉は直接炉内に非常用冷却水を注入する?)、および補修溶接。事例規格の適用範囲に含まれない形状もある。
- ・ Abaqus による軸対象モデル、耐圧テストの後の運転内圧を考慮。
- ・ 実験データに基づく材料特性を Isotropic hardening モデルとして仮定。
- ・ 実際の工程を模擬し 10 層のパスを想定。
- ・ 内面に引張の軸方向残留応力が発生する。軸方向亀裂は相対的に小さく、運転内圧により圧縮となった。事例規格で規定する分布から傾向は一致するものの、逸脱する場合もあった。
- ・ 補修溶接は、補修する深さを変えて計算。いずれも、もとの溶接と同様の残留応力となった。

議論として

- ・ 事例規格では Isotropic hardening ではなく、Kinematic hardening との混合モデルを使用している。このモデルを用いた場合が一番実験結果とよく一致した。Isotropic hardening を用いた結果は、紹介された結果と似た傾向を得ている(事例規格の分布と一致しないのは納得できる)。
- ・ 事例規格ではキャンセル炉を用いた実測結果との検証もしている。

(2) 残留応力ガイドラインについて(資料は配布されなかった)

- ・ 残留応力の有限要素解析結果のマトリックスを与える事例規格を作成中
- ・ xLPR FEM コード、実験による検証を行う。
- ・ API-579(米国石油協会)と R6(英国)規格で規定されている残留応力分布との比較。
- ・ 降伏応力の影響と、解析による感度解析。
- ・ 周方向、軸方向とも、事例規格と実験結果はよく一致。R6 は安全側。
- ・ 降伏応力の変化、補修溶接の影響、材料の影響を感度解析。
- ・ ばらつきは定量化される予定(12月中旬に最終報告書がまとめられる)。
- ・ 残留応力分布を示した事例規格はあと図を完成させるだけ。
- ・ その次は、解析のガイドライン
- ・ ばらつき(計算の不確からしさ)が問題となった。ラウンドロビンで誤差は確認しているとの NRC のコメント。

(3) 照射ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度

- ・ 口頭の報告だけ。EPRI レポートを元に作成を考えている。次の PVP2015 で発表される予定。

(4) ステンレス鋼の PWR 環境中の疲労亀裂進展速度

- ・ 技術根拠を PVP2015 で発表する準備を進めている。設定根拠と計算事例の 2 編にまとめる予定。
- ・ 応力比依存性のメカニズム考察、フランスのデータとの比較も含めるようにコメント。
- ・ 応力拡大係数の下限しきい値の議論もすすめる(日本のデータを参照する)
- ・ 実機を想定してのサンプル問題の計算は重要とのコメント。とくに、この事例規格は欠陥許容基準に用いられる予定なので、それも考慮する必要がある。

(5) 690, 52, 152 合金の PWSCC について

EPRI のエキスパートパネルの議論内容の紹介。600 合金の進展速度の高度化と 690 合金の速度式策定が進められている。

現状の 600 合金のカーブは保守的すぎる場合もあるとの認識。ただし、ばらつきがおおきいことが議論となっている。

BPV Committee on Nuclear Inservice Inspection

(参加者:メンバー36名、ビジター40名程度)

Section XI の最上位にあたる委員会。評価の他に検査と補修分野も加わって議論される。

(1) 書面投票結果を受けての審議

前回の委員会以降、書面投票が実施された項目の結果と審議。再投票(前回反対意見で成立しなかった案件の再投票)7件、投票11件(可決は反対なしが条件)。欠陥評価関係は該当なし。

- ・ クラス2、3配管に対するスリーブ工法の変更。事例規格 N-786 の運用に際して NRC から要求事項があり、それを事例規格に反映するもの。
- ・ ”Evaluation” の用語が統一感なく使用されている。発見された欠陥の「評価」を行うことに対して “Analytical Evaluation” を新たに定義し、用語の統一を図った。変更は多くの箇所に渡り、適切でない箇所が反対票で指摘された。

(2) エディトリアルな変更

文言や式のエディトリアルな Errata を逐次説明。全てその場で承認された。

(3) 新規案件

全部で7件。各提案について担当の SG から説明、議論の後に採決がとられる。可決されれば書面投票が実施される。検査と補修の本文修正など。評価関係はなし。

ボルトの図を追加する提案は、図の完成度が低く、多くのコメントがついたため、10名が反対。この案件を含め全ての提案は書面投票入りが承認された。

(4) NRC 報告

エンドース、規格へのコメントなどの活動概要の報告

(5) その他の報告事項

- ・ 部門横断特別委員会、EPRI の NED 活動状況、MRP および BWRVIP の会合の開催状況やレポートの発行状況など。
- ・ ミーティングの予定。2017年5月の会合まで日程・場所が決まっている。
- ・ 投票および可決された場合の出版スケジュールの確認。次回開催まで2ヶ月と短く、クリスマス休暇をはさむことから細かい調整がなされた。

4.3 地震荷重に対する破壊評価法の文献レビュー

先に述べたように、繰返し荷重下によって破壊靱性値が低下する現象が実験的に確認されている。以下では、破壊靱性の低下傾向、原因の考察、影響因子について関連する文献をレビューするとともに、繰返し荷重に対する破壊評価法についても過去の研究事例を調査した。

(1) 繰返し荷重下での破壊靱性の低下

繰返し荷重下での破壊靱性の低下については、LBB(Leak Before Break)評価を目的として検討されてきた[1]。単調増加荷重に対して、繰返し荷重下で破壊靱性が低下する現象については、実験的に確認されている。荷重を負荷することで鈍化した亀裂先端が、圧縮荷重を負荷することで再鋭化することがその要因として考察されている[1,2]。実際に断面観察により亀裂先端が鋭化する様子が確認されている[3]。また、延性亀裂発生の起点となるボイドがつぶれて、合体が促進するからとの考察も示されている[3]。

一方、破壊靱性の低下する要因として、疲労亀裂進展によるもの見解が示されている[3]。その根拠として、繰返し荷重による破壊靱性試験では、破面にストライエーションが確認されているとの観察結果がある[2]。実際に亀裂進展速度を調べると、破壊靱性による亀裂成長速度と、通常の小規模降伏状態下での亀裂成長速度が ΔJ に対して一直線上にあることが確認されている[4]。さらに、繰返し荷重により誘起された残留応力により亀裂開口が促進され、有効 ΔJ が大きくなるとの検討結果も報告されている[5,6]。

(2) 影響因子

a. 応力比 R の影響

繰返し荷重下での破壊靱性試験では、応力変動における応力比 R(最小応力/最大応力)の影響が検討されている。通常の単調増加荷重での破壊靱性試験(J-R 曲線取得)では、一般に、試験中に除荷し、そのコンプライアンスから亀裂長さを推定する除荷弾性コンプライアンス法が適用される。除荷を行った場合でも、荷重が圧縮とならなければ、 $R = 0$ でも影響はないことが示されている[2,4]。

304LN 鋼を使った検討では、 $R = -1.0$ で破壊靱性(J-R 曲線)が最小となり、 $R = -1.2$ では逆に増加することが確認されている[1]。同様の傾向は炭素鋼でも確認されている[1,4]。ただし、 $R = -1.2$ の破壊靱性は $R = -1.0$ と同等との報告もある[6]。一方、R そのものが重要でなく、亀裂閉口が生じるか否かが破壊靱性の低下に寄与するとの指摘もある[2]。つまり、 $R < 0$ でも閉口がなければ破壊靱性は単調増加荷重の場合と同じとなる。

b. 負荷方法の影響

地震荷重の影響を評価する場合は、ひずみ速度の影響も考えておく必要がある。炭素鋼を用いた検討では、 $R = 0.8$ (繰返し荷重でない)において、変位速度 0.2 mm/min と 2 mm/min で比較し、速度を速くすると最大荷重や J-R 曲線が増加することを確認している。つまり、通常速度の試験結果を地震荷重の評価に用いることは安全側の評価となる[5]。

ステンレス鋼の溶接部を対象にした試験では、準静的(Quasi-static)と 4Hz の動的な試験による比較から、繰返し荷重による破壊靱性の低下は動的な方が小さい。つまり、準静的な試験の結果を用いれば安全側に評価できるとの結果が示されている[3]。

地震荷重の影響を評価する場合は、負荷変動の影響も重要となる。疲労亀裂進展に対する負荷変動の影響は多くの報告があるが、地震荷重を対象とした試験では、圧縮の過大荷重が亀裂進展を加速するとの結果が報告されている[7]。また、 $R = 0.1$ の試験ではあるが、高負荷から低負荷への変化によって、亀裂進展が遅くなるとの結果が報告されている[8]。

c. 試験方法

繰返し荷重下の破壊靱性試験では、繰返し毎の変位増加量 $\Delta\delta$ を設定する必要がある。 $R > 0$ では $\Delta\delta$ の影響はないが、 $R < 0$ では $\Delta\delta$ が小さくなると J-R 曲線が低下することが炭素鋼を用いた試験で報告されている[6]。また、同じく炭素鋼で、 $\Delta\delta$ を小さくして、繰返し数を多くすると J-R 曲線が低下することが示されている[5]。

以上のことから、繰返し荷重下での破壊靱性試験は単なる材料定数ではなく、試験条件にも依存したパラメータと考える必要がある[4]。

(3) 破壊評価法

繰返し荷重下での破壊靱性を実施した場合は、得られた J-R 曲線を用いて弾塑性破壊評価を行うことになる。ただ、繰返し荷重下での破壊靱性試験方法は $\Delta\delta$ や R の設定など試験方法が確立していない。また、地震荷重を対象とする場合、繰返し数や荷重大きさやその変動など、試験条件を注意深く検討する必要がある。

一方、単調増加荷重下での破壊靱性試験結果から破壊評価を行うことができるとの検討結果も示されている[2]。つまり、繰返し荷重による亀裂進展と、最大荷重による弾塑性破壊を組み合わせる方法となる。実際に、繰返し荷重下の破壊靱性試験において得られる最大荷重は、亀裂進展予測と単調増加荷重下の破壊靱性試験結果を組み合わせ評価した場合と一致することが確認されている[2,4]。

地震荷重を想定した比較的大きな負荷や変動する負荷下での亀裂進展予測についても、 ΔJ を用いた予測方法が検討されている[7,9,10]。ただし、繰返し荷重における ΔJ はさまざまな計算方法[1,4,5,9,11 など]があるので注意を要する。

参考文献[4]

- [1] H. Roya, S. Sivaprasadb, S. Tarafderb and K.K. Ray, Monotonic vis-à-vis cyclic fracture behaviour of AISI 304LN stainless steel, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.76 (2009), pp.1822-1832.[1039]
- [2] 楠元俊彦, 小林英男, 中澤一, 2・1/2Cr-Mo 鋼の疲労き裂進展の上限界特性と繰返し R 曲線, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 41 (1985), pp.2433-2440.(1024)
- [3] D. L. Rudland, F. Brust G. M. Wilkowski, The effect of cyclic and dynamic loading on the fracture resistance of nuclear piping steels, *NUREG-CR-6440* (1992).[1483]
- [4] K. Mogami, T. Hayashi, K. Ando, N. Ogura, Elastic-plastic fatigue crack growth and tearing instability behavior under cyclic loads, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.44 (1990), pp.85-97.[1476]
- [5] C. S. Seok, K. L. Murty, A study on the decrease of fracture resistance curve under reversed cyclic loading, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.77 (2000), pp.303-311.[1478]
- [6] P. K. Singh, V. R. Ranganath, S. Tarafder, P. Prasad, V. Bhasin, K. K. Vaze, H. S. Kushwah, Effect of cyclic loading on elastic-plastic fracture resistance of PHT system piping material of PHWR, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.80 (2003), pp.745-752.[1479]
- [7] 山口義仁, 李銀生, 杉野英治, 勝山仁哉, 鬼沢邦雄, 過大な圧縮荷重がき裂進展挙動に及ぼす影響, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.78 (2012), pp.613-617.[1495]
- [8] Y. Yamaguchi, J. Katsuyama, K. Onizawa, H. Sugino, Y. Li, Investigation on Evaluation Method Based on J Integral for Retardation of Crack Growth Due to Excessive Loading Beyond Small Scale Yielding Condition, *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2010)* (2010), PVP2010-25563.[1494]
- [9] 山口義仁, 李銀生, 杉野英治, 勝山仁哉, 鬼沢邦雄, 弾塑性破壊力学パラメータに基づく繰返し過大荷重による配管材のき裂進展評価法の提案, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.77 (2011), pp.685-689.[1498]
- [10] 山口義仁, 李銀生, 勝山仁哉, 鬼沢邦雄, 地震荷重下における配管のき裂進展評価手法の提案, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.79 (2013), pp.730-734.[1496]
- [11] H Kobayashi, T Kusumoto, H Nakazawa, The cyclic J-R curve and upper-limit characteristic of fatigue-crack growth in 2-1/2 Cr-Mo steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.52 (1992), pp.337-356.[1477]

5 ヒアリングの実施

解析方法や結果の妥当性等を確認するために、各分野の専門家にヒアリングを実施した。

5.1 サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化に係るヒアリング

5.1.1 日本大学 工藤 一嘉 教授におけるヒアリング(1)

日時:平成 26 年 11 月 13 日 東京ガーデンパレス 3F 桂の間にて

① 議題

1. 調査・研究計画に関するヒアリング

② 資料

(1) 委託研究の仕様について

(2) 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震性評価手法の高度化に係る調査・研究)事業のうちサイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化 調査計画書

(3) (2)の関連資料

- ・ 栃木県北部地震(Mj6.3)の加速度波形のペーストアップ
- ・ Haruhiko Suzuki・Hiroto Nakagawa(OYO)、Genyu Kobayashi(JNES):Estimation of S-wave velocity structure of deep sedimentary layers using geophysical data and earthquake ground motion records

③ 上記議題に関する質疑等

1. 実施内容の確認

資料(1)を用いて事業の概要に関する説明が行われた。続いて、資料(2)を用いて調査計画書の説明が行われた。以下に工藤教授からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・ 地震のデータが平成 25 年 10 月までに限定されている理由は何か。
⇒ 平成 25 年 10 月以降はデータの品質が低下しているため、期間を限定している。ただし、ターゲットとする中小地震については 50 個程度取得できている。
- ・ あらゆる地震のデータを収集するのではなく、サイト直下で発生している地震をメインに収集されてはどうか。
⇒ まずは、サイト近傍で発生している深い地震を収集する。その後、遠地で発生した地震を収集してゆきたい。

- 地震の発生している方向によって震動特性がどのように異なるかを調査するとよいのではないか。
⇒ データをグルーピングして整理する。

- 長周期の地震動の特徴の整理、そのあと短周期の地震動の特徴の整理を方針で行うとよいのではないか。
⇒ コヒーレントな波形の特徴をまとめてゆきたい。

- ターゲットとなる地震の選定に時間をかけたほうがよい。クローズアップすべき特徴の抽出に力点を置くべきだと考えるが、いかがであろうか。
⇒ まず、既往の検討で収集した地震について検討を行う。それらのデータにばらつきがみられた場合には、方位依存性などの特徴が抽出できるようにする。

5.1.2 日本大学 工藤 一嘉 教授におけるヒアリング(2)

日時:平成 27 年 1 月 22 日 原子力規制庁 18F 会議室にて

① 議題

1. 調査・研究に関するヒアリング

② 資料

(1) 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震安全性評価手法の高度化に係る調査・研究)事業のうちサイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化 打合せ資料

(2) (1)の関連資料

- ・ 長野県北部の地震鉛直水平アレイ記録

③ 上記議題に関する質疑等

1. 実施内容の確認

資料(1)を用いて調査・研究の中間報告が行われた。以下に工藤教授からの質問等とそれに対する回答を示す。

- ・ 直下で発生している地震 No.7 のメカニズムは何か。
⇒ 大きな地震でないので、公表されているメカニズムはない。
- ・ スペクトル比については S 波だけでなく H/V など両方を見るべきと考えるが。
⇒ 観測データについては、両方のデータを整理する予定である。
- ・ 特徴的な波群を説明するのではなく、一般的な地震波の特徴を抽出すべきと考えるが。
⇒ まずは、時系列の波形の整理ではなく、スペクトルの特徴の整理を行いたい。
- ・ 高周波数については、低速度の地盤構造を高速度の層で代用するか、基盤をはぎ取って解析する方法がある。解析しやすい方法で行う方がよいと考える。
⇒ 計算の都合上、高速度の層で代用する形としたい。
- ・ 時間の制約があるので、これから現実可能なことを優先して行ってもらいたい。これからの検討項目についてまとめて、示していただきたい。
⇒ 差分法の解析メニューについて早急にまとめ、報告する。

5.1.3 日本大学 工藤 一嘉 教授におけるヒアリング(3)

日時:平成 27 年 3 月 3 日 東京ガーデンパレス 3F 桂の間にて

① 議題

1. 調査・研究に関するヒアリング

② 資料

- (1) 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震安全性評価手法の高度化に係る調査・研究)事業のうちサイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化 打合せ資料

③ 上記議題に関する質疑等

1. 実施内容の確認

資料(1)を用いて調査・研究に関する最終報告が行われた。以下に工藤教授からの質問等とそれに対する回答を示す。

- ・ 資料はよくまとめられており、わかりやすい内容となっている。仕様書の記載事項に対して基本的なことは掲載されていると考える。
- ・ 日光の地震について解析を行っていないのはなぜか。
⇒ 日光の地震はごく浅い地震であり、シミュレーションに適していないと考えたため。
- ・ 解析モデルに用いたQ値と 3000m孔での実測値との関係はどうなっているか。
⇒ 今回は地震本部などで行われているQ値で設定した。ボーリング孔内で計測されたQ値との関係については報告書に記述する。
- ・ 表層の低速度の層を $V_s=300$ m/sの層で置き換えているが、探査が十分に行われている地点などを対象として、観測データを工学的基盤に引き戻す検討も考えられる。
⇒ 3次元地盤構造モデルを用いて、剥ぎ取り解析を行い解放基盤面における波形を計算することを機会があれば行いたい。
- ・ シミュレーション波形のペスタアップは、解析結果を吟味するうえで非常に役に立つので報告書に記載してほしい。
⇒ 資料に記載した図を報告書に記載する。

- ・ 35 頁の資料は、周波数レンジなどを変えるなど、見やすい形に修正してもらいたい。
⇒ データについて再度吟味を行い、図の修正を行う。

- ・ 報告書をまとめる上で、3000 m ボーリング孔データの有効性や意義についてコメントを記載してください。
⇒ ボーリング孔データの意義や物理探査を行った効果などについて記載したい。

5.2 サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化に係るヒアリング

5.2.1 東京都市大学 古屋 治 教授におけるヒアリング(1)

日時:平成 26 年 11 月 28 日 原子力規制庁 18F 会議室にて

① 議題

1. 調査・研究計画に関するヒアリング

② 資料

(1) 仕様書

(2) 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震性評価手法の高度化に係る調査・研究)事業 サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化 調査・研究計画

③ 上記議題に関する質疑等

1. 実施内容の確認

資料(1)を用いて事業の概要に関する説明が行われた。続いて、資料(2)を用いて調査計画書の説明が行われた。以下に古屋教授からの質問とそれに対する回答等を示す。

- ・ 本実験の試験体は特定の機器配管、サポートを想定しているのか。
⇒ 特定の配管、サポートを対象としてはいない。
- ・ サポートAには靱性を持つ、鉄筋のような鋼材の使用を考えてはどうか。
⇒ 今後予定しているサポートに関する静的予備実験に鋼棒も加えて実施したい。
- ・ 1次モード図において、サポートBより上方の配管の振動が大きくなっており、サポートBの拘束が大きく影響している。より全体として振動する形状が望ましいと考えられる。
⇒ 今後、試験体下側の付加質量などでの調整を検討する。
- ・ 今後の研計画を教えてください。
⇒ 12月に試験体の製作を行い、1月から本格的な実験を始めたい。

5.2.2 東京都市大学 古屋 治 教授におけるヒアリング(2)

日時:平成 27 年 2 月 26 日 新潟工科大学 原子力耐震・安全センター 会議室にて

① 議題

1. 調査・研究に関するヒアリング
2. 振動台加振試験の見学

② 資料

- (1) 平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震性評価手法の高度化に係る調査・研究)事業 サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化 本ヒアリング資料
- (2) (1)に関する添付資料

③ 上記議題に関する質疑等

1. 実施内容の確認

新潟工科大学原子力耐震・構造センター内の振動実験で、配管系試験体の振動台実験を見学したのち、資料(1)を用いて事業の進捗状況に関する説明が行われた。以下に古屋教授からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・ 実験では sin 波のスweep加振を行っているが、振動数一定の実験をしても良いのではないか。
⇒ 今回は、サポートAの破断前後での加振振動数の変化も含めて、応答の変化を検討している。
- ・ sweep加振等で加振条件とサポートAの破壊パターンに何か特徴は見られたか。
⇒ 検討していないので、検討して報告書に記載する。
- ・ 2次モードの共振実験でのアクリル板のサポートAの破断は、ねじれの影響が大きいと考えられ、1 次モードでの破断と様相が異なっている。アクリル板の耐震強度(耐力)において考慮した方が良い。
⇒ ねじれ剛性を考慮したい。
- ・ 鋼棒をサポートAに用いた場合には、疲労破壊の影響を受けるように思われる。影響について何か検討したほうが望ましいと考える。
⇒ 今回は、実験結果を整理して残すことに注力し、疲労破壊との関係性の検討は今後の課題としたい。

5.3 亀裂を有する機器・構造物の地震時亀裂進展評価法の高度化に係るヒアリング

5.3.1 東北大学 小川 和洋 教授におけるヒアリング(1)

日時:平成 26 年 11 月 21 日 東北大学大学院工学研究科

附属エネルギー安全科学国際研究センターにて

① 概要

東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター・小川和洋教授に研究計画の説明を行い、研究計画に関する助言を得た(ホテルグリーンパシフィックミーティングルームにて)。それに先立ち、東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センターを訪問し、同センター・竹田陽一准教授、市川裕士助教より、同センター保有の亀裂進展試験装置および同計測装置に関して知見収集を行い、今後の亀裂進展試験における情報交換を行った。

② 上記概要に関する質疑等

1. 疲労亀裂進展試験

- ・ 原子力配管系や原子炉圧力容器管台等で用いられるフェライト鋼のひとつである JIS G3120 SQV2AG SR 鋼を評価対象とする。
 - ・ 応力比 $R=-1$ の条件を中心として、応力範囲 $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ を変数とした交番荷重負荷条件下で、空气中室温雰囲気での亀裂進展速度を評価する。
 - ・ 亀裂長さ計測法は、コンプライアンス法及び直流電位差法を比較検討し、精度の高い計測法とする。
- ⇒ 以上により、応力拡大係数範囲 ΔK 、繰り返し数 N と亀裂長さ a の関係に関わるデータを取得し、ASME 亀裂進展則の検証試験データをとる事と ΔK と亀裂進展速度 da/dN の関係を明らかにし、 R と ΔK の da/dN への影響を検討し、ASME 亀裂進展則と比較解析する。また、亀裂開閉口挙動を調査し、亀裂進展挙動との関連性を明らかにすることは妥当な計画であるとの見解であった。また、各ケースの疲労亀裂試験の時間がかかるので、まず既存データ知見の多い応力比 $R=-1$ を中心条件に実施する事は妥当であり、応力比 (R) が一条件の試験であっても、本年秋開始事業では、かなりタイトな工程になる可能性があるとの見解だった。さらに、供試材の引張特性、および、破壊靱性値は、ISO/IEC17025 の認定を受けた機関にて取得することは、試験データの信頼性向上を図るために重要な点であるとの見解であった。

2. 疲労亀裂進展則の検証

- 疲労亀裂進展則について、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)や原子力安全システム研究所(INSS)等に訪問し、最新の知見を収集する。また、経年設備の構造健全性評価にかかわるデータ、亀裂進展則、規格等に関する知見を収集する。
- 実験データ解析結果と亀裂進展則、規格等に関する知見を収集し、ASME 亀裂進展則との比較解析することで、検証がなされるとの見解であった。

⇒ 以上により、「ASME 亀裂進展則」の検証を実施する。

5.3.2 東北大学 小川 和洋 教授におけるヒアリング(2)

日時:平成 27 年 2 月 25 日 ハロー貸会議室 新橋会議室 A にて

① 概要

東北大学大学院研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター・小川和洋教授に、資料に基づき引張試験結果、 J_{IC} 試験結果、亀裂進展試験結果の中間報告がなされた。

② 上記概要に関する質疑等

- ・ 応力拡大係数範囲で整理した場合、亀裂進展速度は負荷応力の影響を受ける
- ・ ASME 規格より NRC 提案がより安全側である
- ・ NRC 提案基準でも実験結果を危険側に評価する場合がある
- ・ 規格と実験結果の関係は亀裂開閉口挙動で説明可能である
- ・ 亀裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲で亀裂進展速度を評価すると負荷応力にかかわらず大凡一義的に評価可能である
- ・ 負荷応力が高く、亀裂が長い場合は、亀裂は応力拡大係数範囲で整理できず、加速する
- ・ 亀裂閉口点は負荷応力、亀裂長さによって変化し、負荷応力が大きく、亀裂が長くなると、開口点が圧縮側に移動する。

質疑応答の後、小川教授より、計画通り研究が進行し十分な成果が得られていること、得られた成果は維持規格に新たな知見を与えるとの評価を頂いた。

6 むすび

本事業では、損傷を受けることでプラントの安全性に大きな影響を与える配管系を対象に、実際に発生した地震動(観測地震動)等に対する配管系の耐震性の実耐力を把握すると共に、その経年変化が耐震性の実耐力に与える影響や影響評価方法について把握することを目的に、次の3つの基礎的研究「サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化」、「サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化」並びに「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」を行い、地震時損傷に係る検討を行った。

「サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化」では、配管構造に影響を及ぼす地震動の振動特性を把握するため、観測地震動記録を整理しデータベース化した。その際、地下深部からの地震動の伝播特性についても考慮する必要があるため、三次元地下構造モデルについて検証を行った。

「サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化」では、サポートが損傷した場合の配管系の地震時挙動に関する知見が少ないため、配管系の耐震性能把握の一環として、配管系の振動台加振試験を実施し、配管サポートの地震時損傷に係る検討を行った。

「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」では、配管等が想定を上回る地震動を受けた状況下において配管等が経年変化している場合、亀裂進展の影響が大きく出る可能性がある。そのため、交番荷重(圧縮を含む繰り返し荷重)による疲労亀裂進展を考慮した基礎試験を実施し、ASME「亀裂進展則」の妥当性を検証した。

これらの基礎研究の実施にあたり、学会等への参加や文献調査を通じて、国内外の最新知見を収集し、研究成果に反映した。

「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」に係る最新知見収集として、米国機械学会(ASME)のBoiler and Pressure Vessel CodeのCode Week(平成26年11月16日~21日開催)に参加し、亀裂進展評価法について米国規格の最新動向を調査するとともに、亀裂構造物の健全性を評価する2つのアプローチ「繰り返しの荷重下での破壊靱性を用いた破壊評価」、「地震荷重による疲労亀裂進展を考慮した後の破壊評価」に関連した文献のレビューを行った。また、本事業における基礎研究の解析方法や結果の妥当性を確認するにあたり、地震学、材料力学及び破壊力学等の研究者からヒアリングを行った。

本事業を通じて、実際に発生した地震動に対する配管系のサポート損傷時の耐震性能を把握することができた。また、経年変化が耐震性の実耐力に与える影響や既存の影響評価方法について、実験検証に基づく配管等に対する経年変化を考慮した維持規格の高度化について基盤となる知見が得られた。