

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

配管系のフラジリティ評価は、配管本体の破損又は配管支持構造物の支持機能喪失という損傷モードからそれぞれの損傷確率を算出している。ただし、配管系としての機能限界を考えると、配管支持構造物が損傷したとしても直ちに配管系としての機能が喪失するものではない。

配管としての機能限界という観点から、複数の支持構造物の機能喪失に伴う配管本体の構造健全性に関する知見を得て、リスク評価手法の高度化に資することを目的とする。

(1) 水平加振試験

水平加振試験体を用いて、複数の支持構造物が波及的に機能喪失する場合、配管本体の地震時応答に生じる影響について検討を行う。

① 試験体の設計・製作

試験体作成にあたり、基本的な考え方を以下に示す。

- ・サイズ及び加振性能の観点から試験体は小口径配管より構成されるものとする。
- ・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 に例示するような配管系試験装置を設計・製作する。

② 入力地震動

水平加振試験に用いる入力は、3.1 節で得られた観測記録 1 波及び模擬地震波 2 波の計 3 波を用いる。入力レベルは、特に支持構造物が設計荷重を超える領域に重点を置き、5 レベル実施する。

加振方向は水平 1 方向(X 方向)のみを対象とする。

③ 試験の計測について

水平加振試験の計測については、配管要所に加速度計とひずみゲージを設置する。これらは荷重再配分の結果が計測でき、膜応力と曲げ応力を分離できるように配置する。

なお、配管本体の地震時応答に生じる影響に関連する知見を整理する観点から、支持構造物の限界特性を把握するための確認試験を行う。また、配管系試験体の固有振動数や固有モードなどの基本的な振動特性を把握するための小振幅での正弦波加振試験を実施し解析モデルによる結果比較する。続いて、支持構造物の機能喪失が配管系へ及ぼす基本的な特性を把握するために正弦波の掃引試験を実施する。

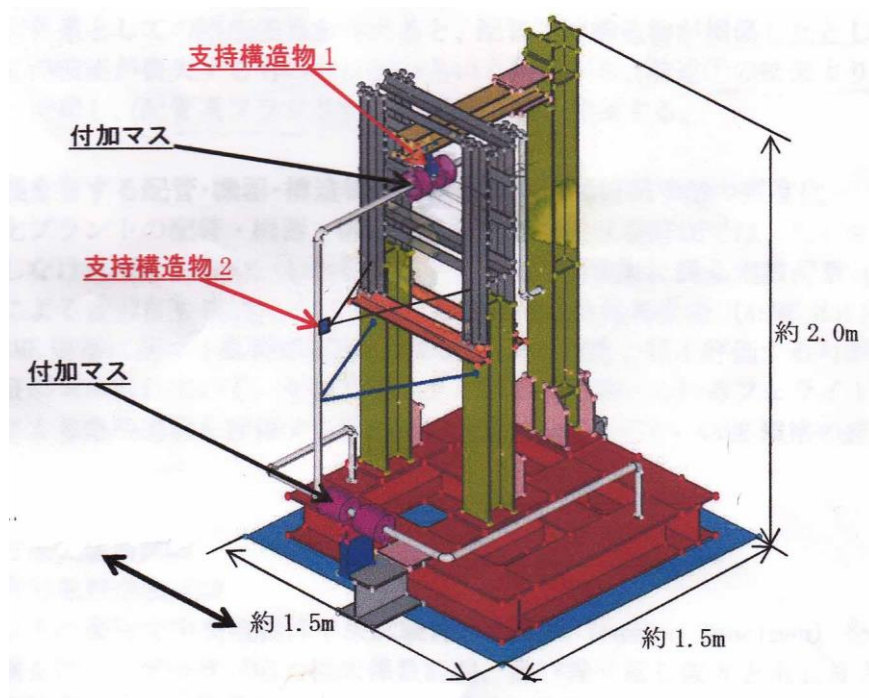


図 3.2-1 配管系試験体のイメージ図

(2) 配管フラジリティ評価手法の検討

配管系の機能限界という観点に基づく配管系フラジリティ評価は、従来の地震 PRA に用いられる保守的な配管フラジリティ評価とは異なると考えられる。地震応答解析手法の高度化に伴う地震時応答の検討及びそれに基づくフラジリティ評価検討から配管系フラジリティ評価手法を検討する。

① 地震応答解析手法の高度化

支持構造物の支持条件の変化を模擬した地震応答解析モデルを作成し、配管本体の荷重再配分が評価できるような地震応答解析手法の高度化を図る。評価手法高度化の一環として H26 年度成果と(1)の水平加振試験を用いた解析を行い、試験結果との比較を行う。また、損傷する支持構造物を付けた従来の地震応答解析モデル及び損傷する支持構造物をあらかじめ削除した地震応答解析モデルによる床応答スペクトルを用いた地震応答解析を行う。解析結果は試験結果及び上述の高度化を図った地震応答解析の結果と比較して整理を行う。

② 配管系フラジリティ評価手法の提案

配管系としての機能限界を考えると、配管支持構造物が損傷したとしても直ちに配管系としての機能喪失するものではないという観点から、①の結果よりフラジリティを算定・比較し、配管系フラジリティ評価手法を提案する。

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鳥瞰図及び写真を図 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 の支柱を立てている。手前の 2 本の H-150×150 により支持構造物 1,2 を支持する架構を作成する。この架構の上端に支持構造物1の支持部を取り付け、前面には H-100×100 で構成させる水平架構を作成し支持構造物 2 の支持部を設置する。H-150×150 の鉛直方向の架構及び H-100×100 の水平架構は剛性を高くするために水平つなぎ材や斜めブレース材を取り付けている。

配管は配管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))。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た。

用い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:H150×150、H100×100(一般構造用鋼材 SS400)
- その他鉄骨 L50×50 等の鋼材(一般構造用鋼材 SS400)

(2) 配管サポート

図 3.2-3(1)～(2)に示すように、損傷(破断)を対象とした配管サポートとして、上方の横方向配管を支持する支持構造物1、手前の鉛直方向配管の上方部分に支持構造物 2 を設ける。さらに、手前の鉛直方向配管の下方部分に市販のロッドレストレイントを V 字型として 2 本設置し、下方の横方向配管には自重を支持するためのサポートを設置する。ロッドレストレイントは 6KN 用であり、外径は 34mm である。両端ピン支持として設置される。下方の横方向配管のサポートは上からの自重を支持するために設置し、水平方向(X,Y 方向)には滑動するように設置している。

(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。上方の横方向配管の支持構造物1付近には付加マス 1 として約 10kg(5.12kg の錘を 1 箇所、2.14kg の錘を 2 か所)を、下方の横方向配管のサポート付近には付加マス 2 として 20kg(10.56kg の錘を 2 か所)を設置する。

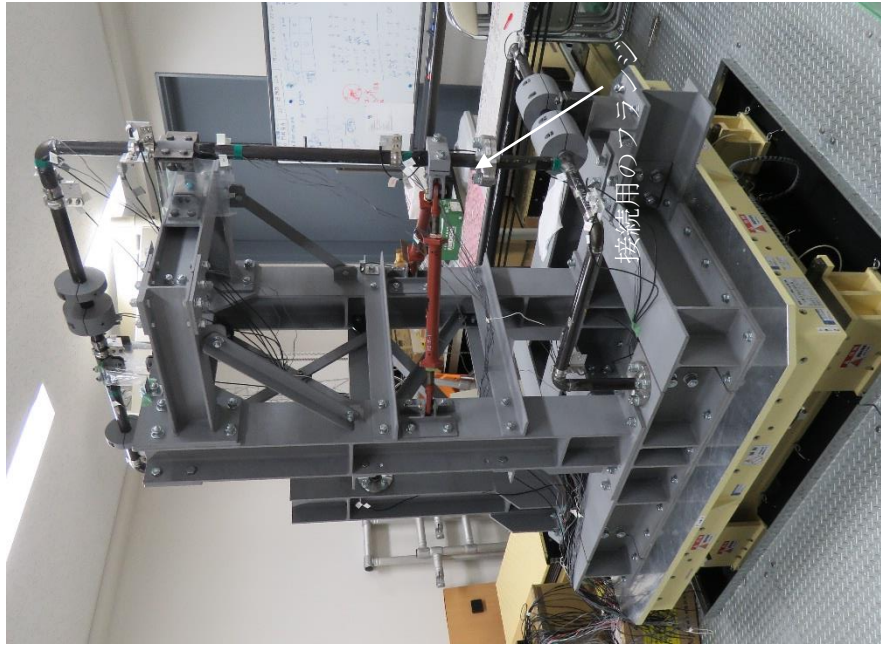


図.3.2-3(2) 試験体設置状況

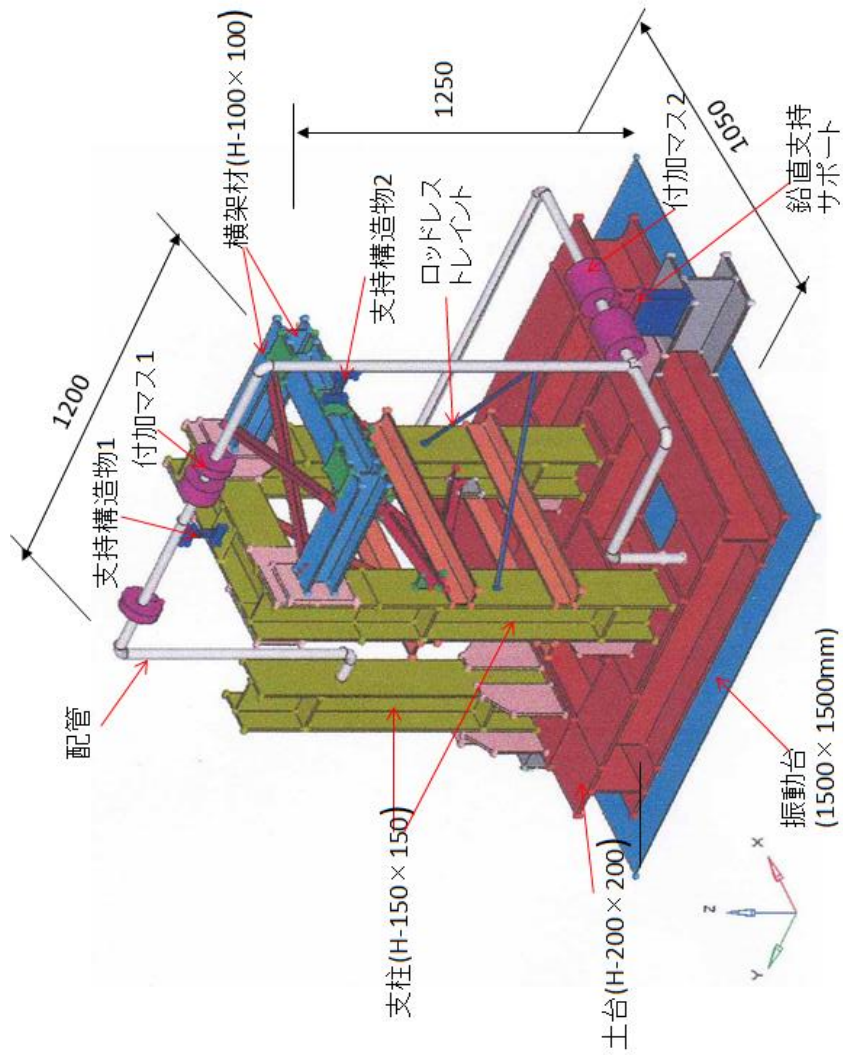


図 3.2-3(1) 試験体概要

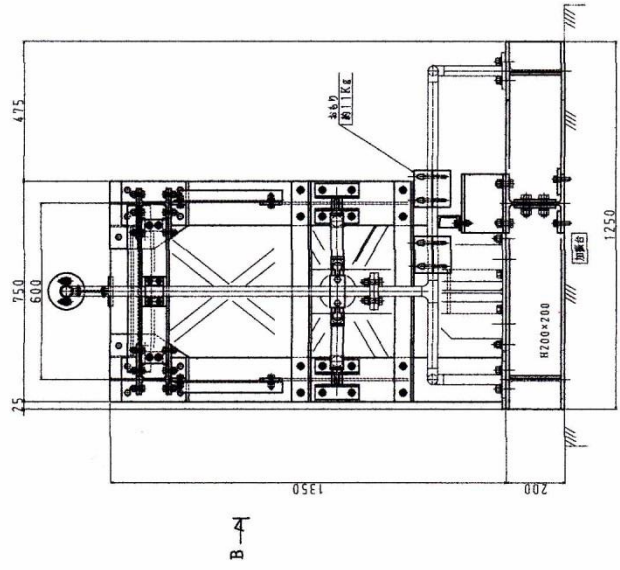
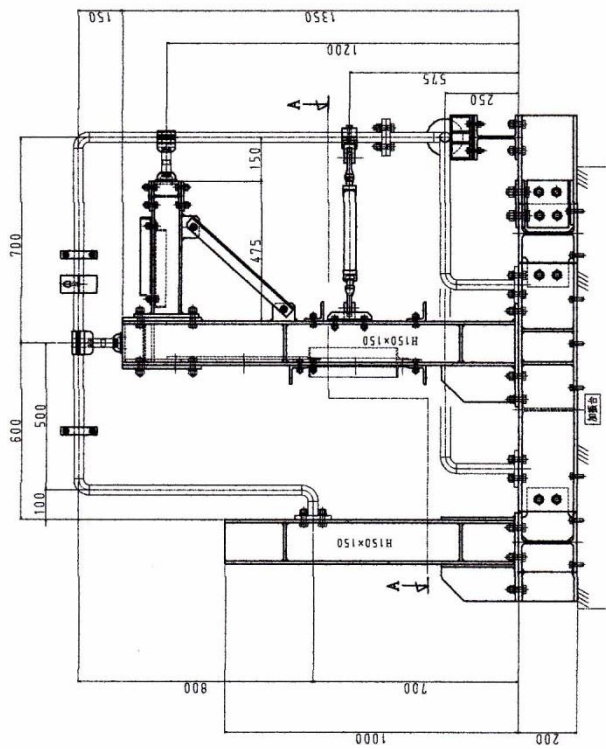
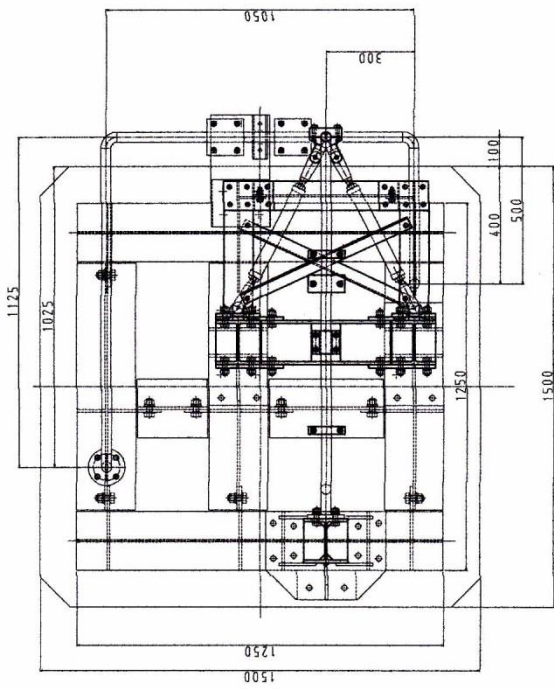


図 3.2-4(1) 試験体の図面(全体図)

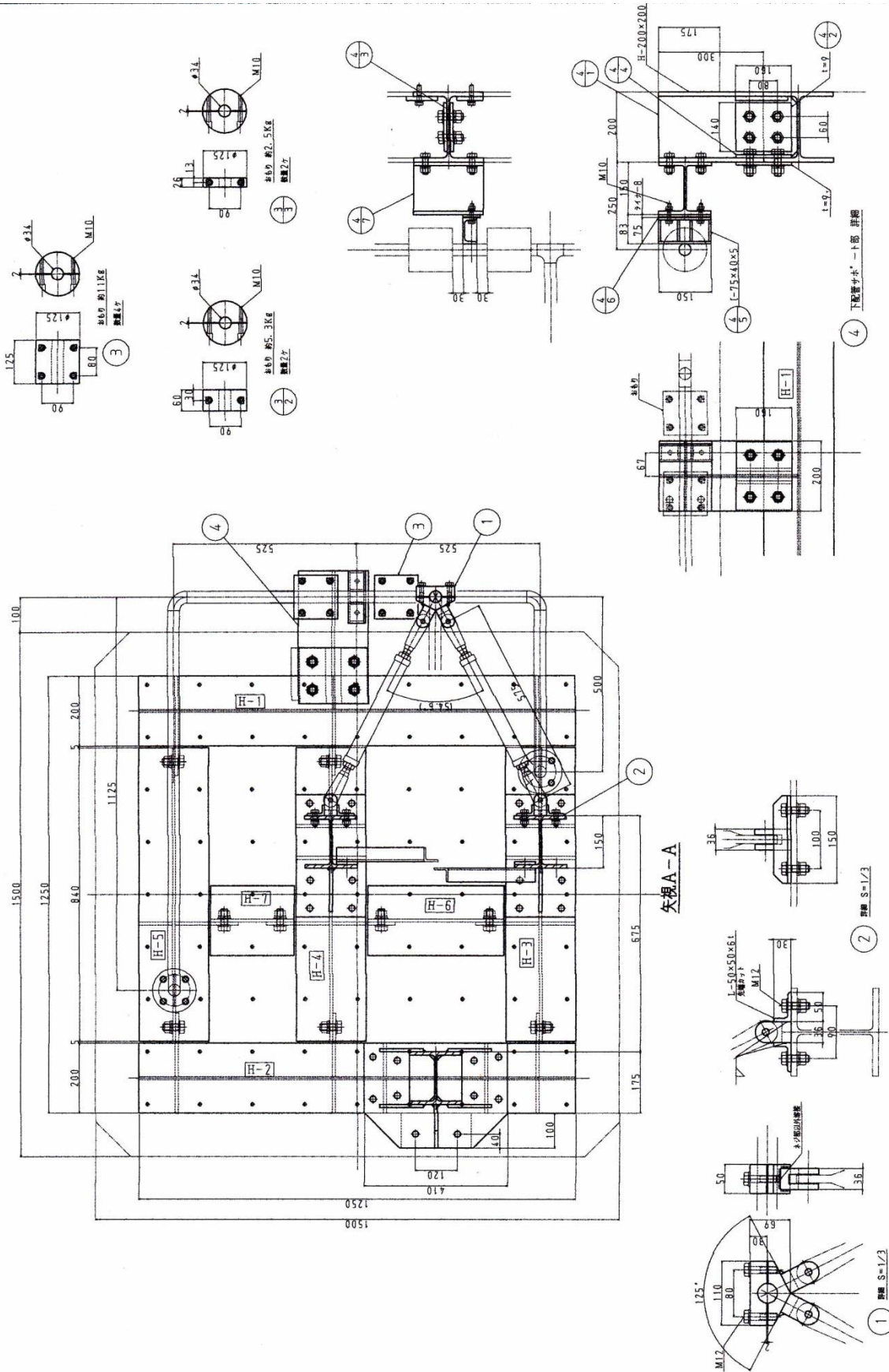


図 3.2-4(2) 試験体の図面(平面詳細図)

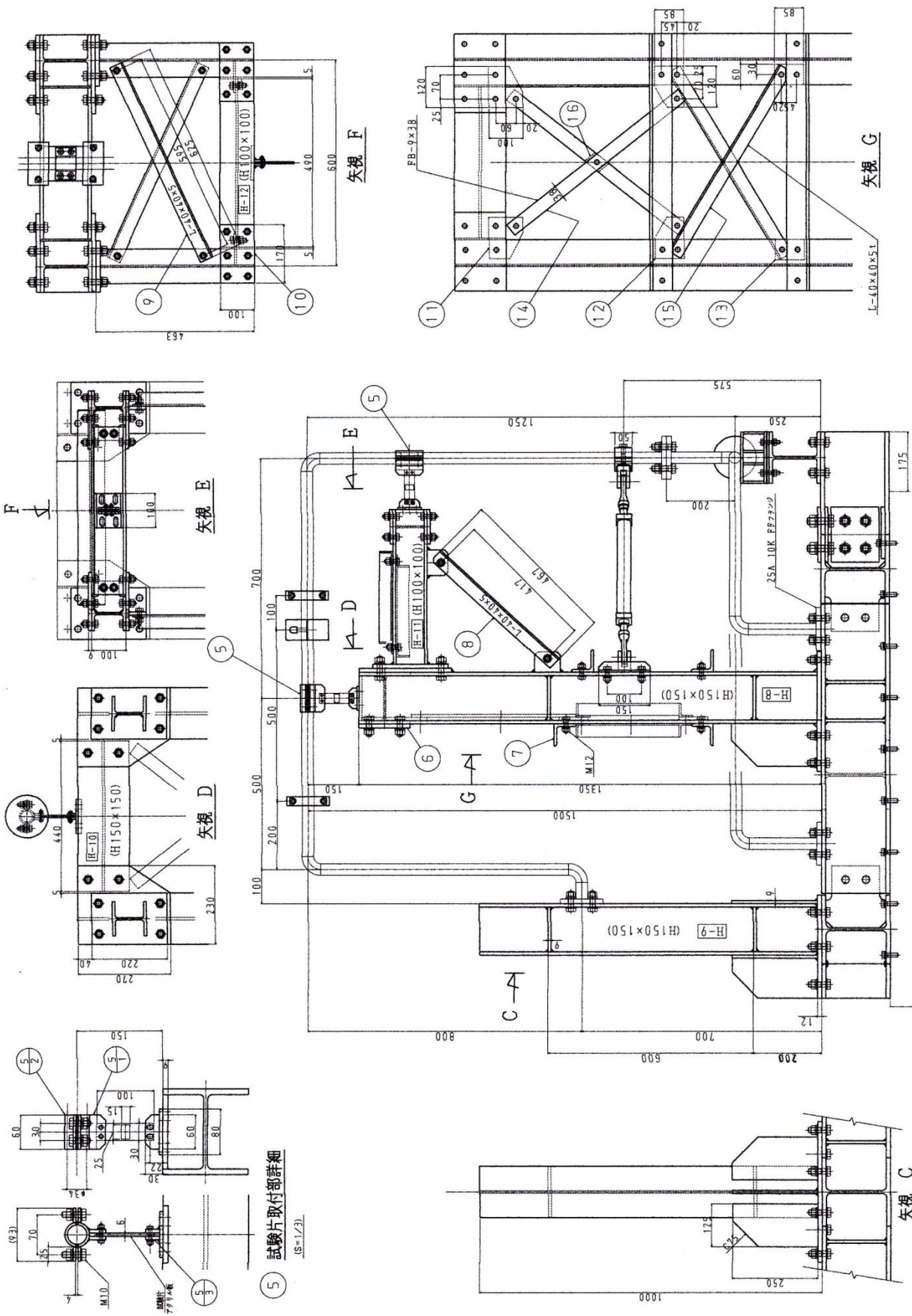


図 3.2-4(3) 試験体の図面(立面詳細図)

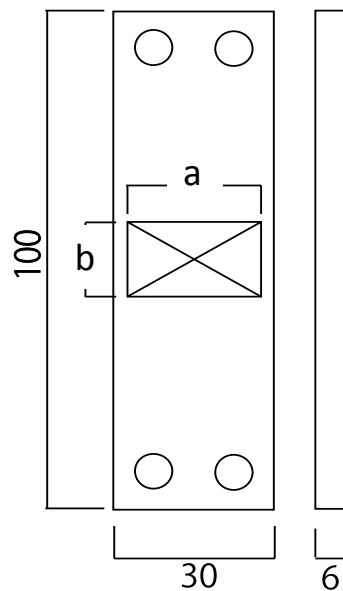
3.2.2.2 支持構造物の支持機能特性

3.2.2.2.1 支持構造物の概要

支持構造物 1,2 は振動試験中に損傷を発生させるサポートである。

平成 26 年度の試験を参考として、図 3.2-5 に示すように、長さ 100mm としたアクリル板(厚さ 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、図中に示すように、20mm×15mm(以下、AK(20×15))とする。ただし、後述する解析手法の高度化において平成 26 年度の振動試験結果と比較する場合の支持構造物の開口は、25mm×15mm(以下、AK(25×15))である。

支持構造物はアクリル板(厚さ 6mm)の長さは、100mm であるが、両端部分(各 15mm)は固定のためにボルト締めを行うために使用するので、変形する部分の長さは 70mm である。



中央に開口を有するアクリル板(厚さ 6mm)

中央開口の大きさとその記号

記号	a(mm)	b(mm)	備考
AK(20×15)	20	15	本年度検討で使用
AK(25×15)	25	10	平成26年度の検討(3.2.5.1.1)で使用

図 3.2-5 配管系試験体の製作

3.2.2.2.2 支持構造物の支持機能特性調査

支持構造物の支持機能特性(荷重－変位関係)を把握するため、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。支持構造物の試験片は、振動台試験と同様の変形状態(逆対称曲げ変形)を生じ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。試験片の下端は固定支持とし、上端は固定支持した加力点が水平方向にのみ変位するように、試験片上端の回転を拘束するフレームと加力点が水平方向に移動する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。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。ロードセルは引張・圧縮型とし、加力点は押し引きに対応できるように作成している。

ロードセルの容量:5kN

変位計の容量:50mm

計測データはデータロガーに集められ、PC に収録される。

(1) 静的加力試験

支持構造物の荷重－変位関係を測定するために試験片の静的加力試験を実施した。

静的加力試験では、最大水平変位 $\pm 2.5\text{mm}$ 、 $\pm 4.5\text{mm}$ 载荷を実施したのち正方向に破断まで载荷している。計測は変位 0.1mm 間隔で実施する。

AK(20×15)の荷重－変位関係の例を図 3.2-9 に示す。繰り返すことによってわずかに面積を囲む傾向がみられ、変形が大きくなると少々反り上がりハードニングする傾向も見られるが、ほぼ線形的な挙動であることがわかる。表 3.2-2 には No.1, No.2 試験結果を示すが、破断変位は 8mm 程度であることがわかる。最大荷重と最大変位の関係から求めた傾き(剛性)は 0.04～0.045kN/mm 程度である。

(2) 破断時の荷重の変化

破断時の状況を計測するために、時間間隔 0.001 秒で計測する静加力実験を実施した。加力方法は正方向に破断まで载荷した。荷重と载荷時間との関係を図 3.2-10 に示す。破断の瞬間には、荷重が急激に低下し、逆方向にも破断の反動と思われる荷重が生じているが、その直後には、荷重は 0 となっている。

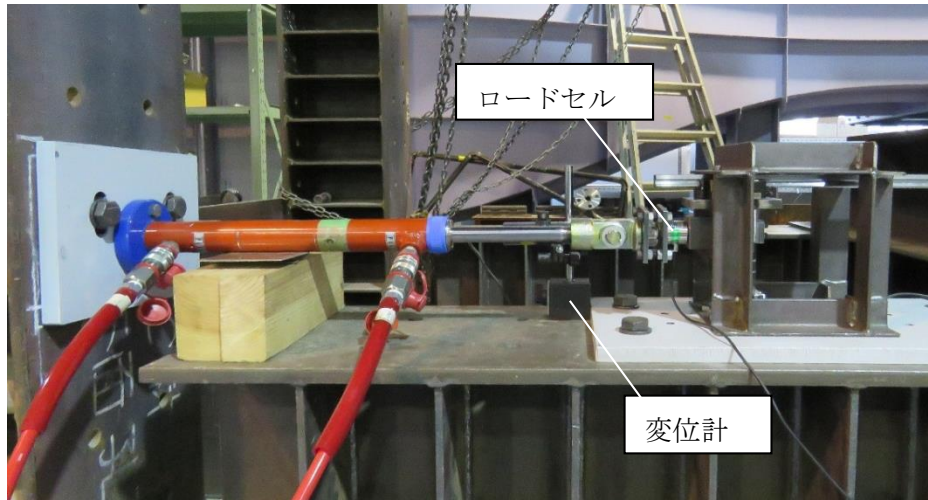


図 3.2-6(1) 静的加力試験の状況

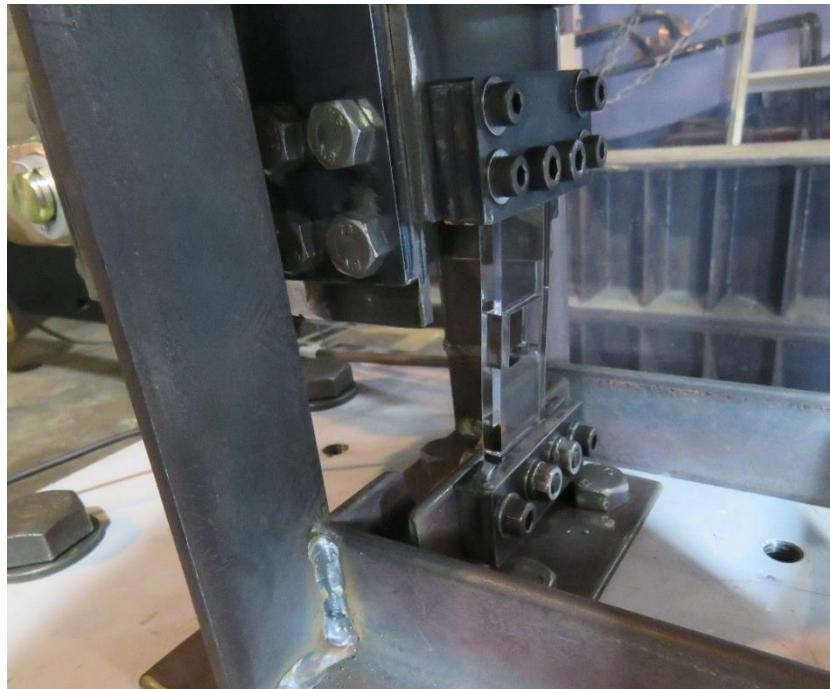


図 3.2-6(2) 静的加力試験の状況(アクリル板の変形状況)

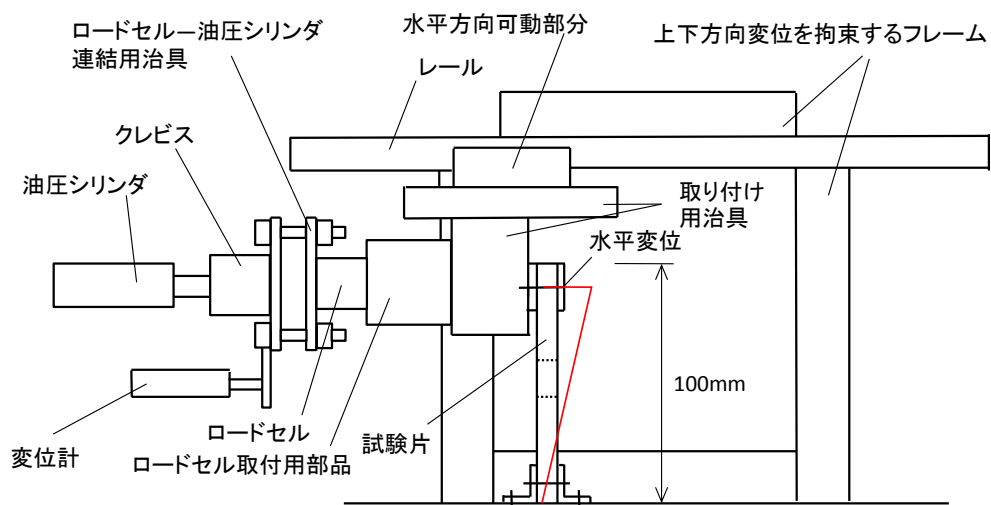


図 3.2-7 加力用治具(イメージ)

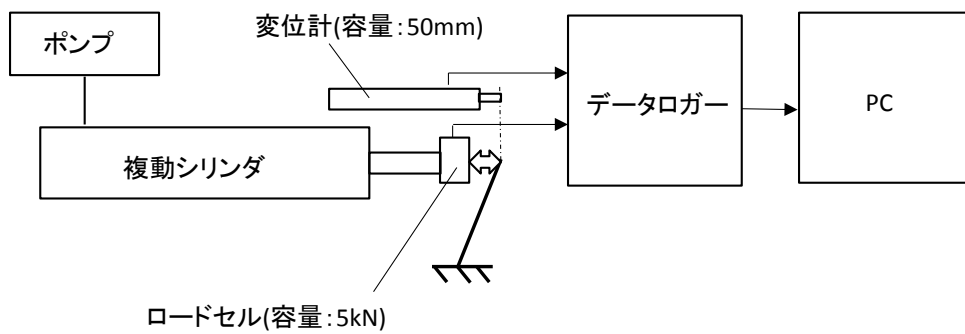
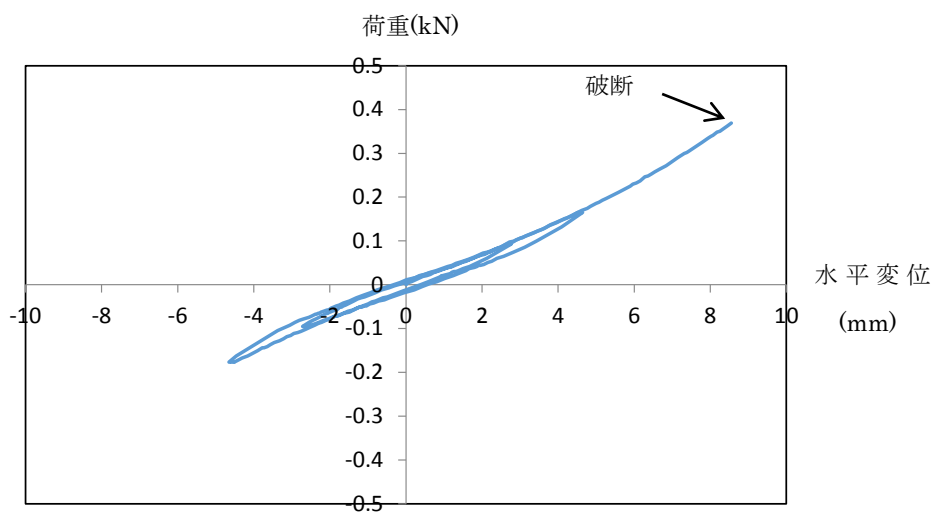


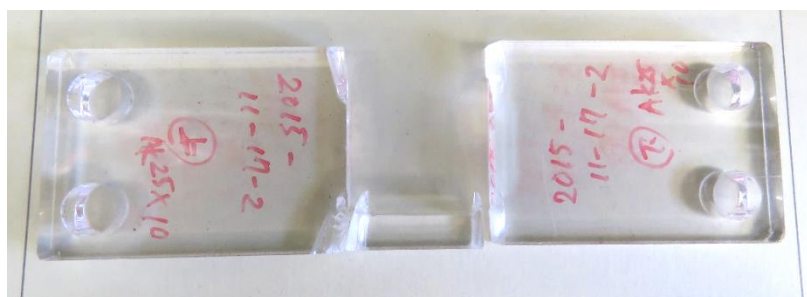
図 3.2-8 加力計測システム

表 3.2-2 AK(20×15)の試験結果一覧(1)

	破断荷重(A, kN)	破断変位(B,mm)	A/B(kN/mm)
No1(2015-11-17-2)	0.37	8.5	0.044
No2(2015-11-26-3)	0.33	7.9	0.042



荷重-変位関係の例(No.1)

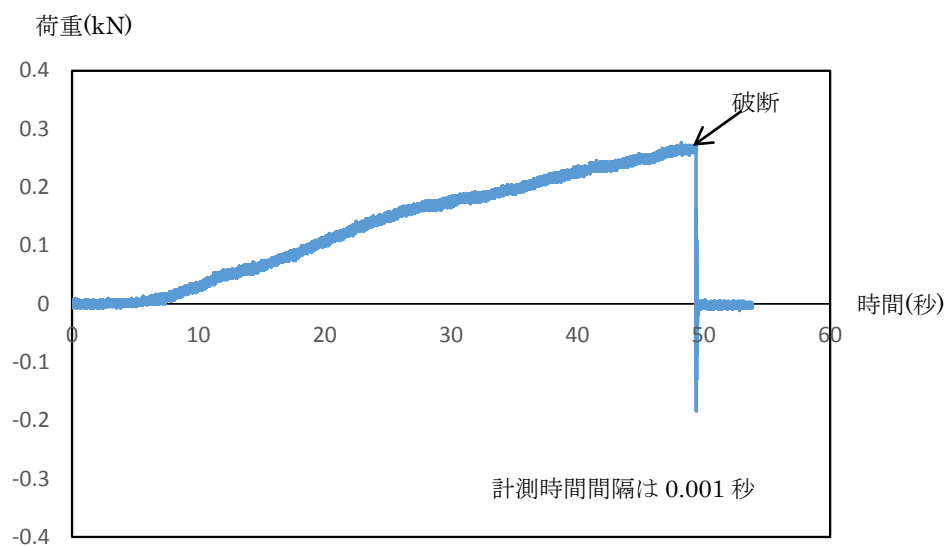


破断状況の例(No.1, 破片1つ紛失)

図 3.2-9 AK(20×15)の荷重-変形関係

表 3.2-3 AK(20×15)の試験結果一覧(2)

	破断荷重(kN)	破断変位(mm)	破断時刻(秒)
No3(2015-12-10-2)	0.28	6.8	49.400



荷重の経時的変化(No.3)



破断状況の例(No.3)

図 3.2-10 AK(20×15)の破断時の荷重の変化

3.2.3 配管系試験体の振動特性

3.2.3.1 振動台試験から得られた固有振動数と固有モード

小振幅の X 方向正弦波加振の結果から、試験体の固有振動数と固有モードを検討する。

最大加速度一定の正弦波加振であるが、1 次振動を対象とするときは最大加速度を 0.2m/s^2 、2 次振動を対象とするときは 1.0m/s^2 として実施している。

振動試験から得られた固有振動数を表 3.2-4 に示す。支持構造物 1,2 付き、支持構造物 1,2 なしの場合、3.2.3.3 で減衰定数を検討するための共振曲線を求めているので、そのピークの振動数を用いている。支持構造物 1 のみ、支持構造物 2 のみの固有振動数は、掃引試験による加速度フーリエスペクトルのピーク振動数として得られた値である。

支持構造物 1,2 付きの 1 次、2 次振動数は 14.3Hz 、 27.1Hz であり、支持構造物 1,2 なしの 1 次、2 次振動数は 8.0Hz 、 24.6Hz である。支持構造物 1 のみの 1 次、2 次振動数は 12.3Hz 、 25.3Hz であり、支持構造物 2 のみの 1 次、2 次振動数は 10.2Hz 、 26.5Hz である。支持構造物 1 のみの 1 次振動数は支持構造物 1,2 付きにより近く、支持構造物 2 のみの 2 次振動数は支持構造物 1,2 付きの 2 次振動数により近くなっている。これは、1 次モードが上方の横方向配管が大きく振動し、2 次モードが手前の縦方向配管が大きく振動するモード形状であることに起因していると考えられる。

振動試験から得られた支持構造物 1,2 付き、支持構造物 1,2 なしの固有モードを図 3.2-11(1)~(2)に示す。X 方向加速度記録のみから求めているので、X 方向の振幅のみが示されている。これは、3.2.3.3 で減衰定数を検討するため抽出した固有振動数を中心とした $1.0\text{Hz}(\pm 0.5\text{Hz})$ 間隔の成分の時刻歴波形の振幅比から求めている。

1 次、2 次のモード形状は支持構造物 1,2 付き、支持構造物 1,2 なしで大きな相違は見られない。1 次モードは、ロッドドレストレイントから上方が大きく振動し、特に上方の横方向は配管が大きく振動している。2 次モードは上方の横方向配管は振れるような形状となり手前の縦方向配管はロッドドレストレイントを中心に回転するような形状となっている。

表 3.2-4 水平振動試験(X 方向)から得られた固有振動数

	1次	2次
支持構造物 1,2 AK(20×15)	14.3Hz	27.1Hz
支持構造物 1,2 なし	8.0Hz	24.6Hz
支持構造物 1のみ AK(20×15)	12.3Hz	25.3Hz
支持構造物 2のみ AK(20×15)	10.2Hz	26.5Hz

注)固有モードは X 方向加振で X 方向加速度から作成したものである。

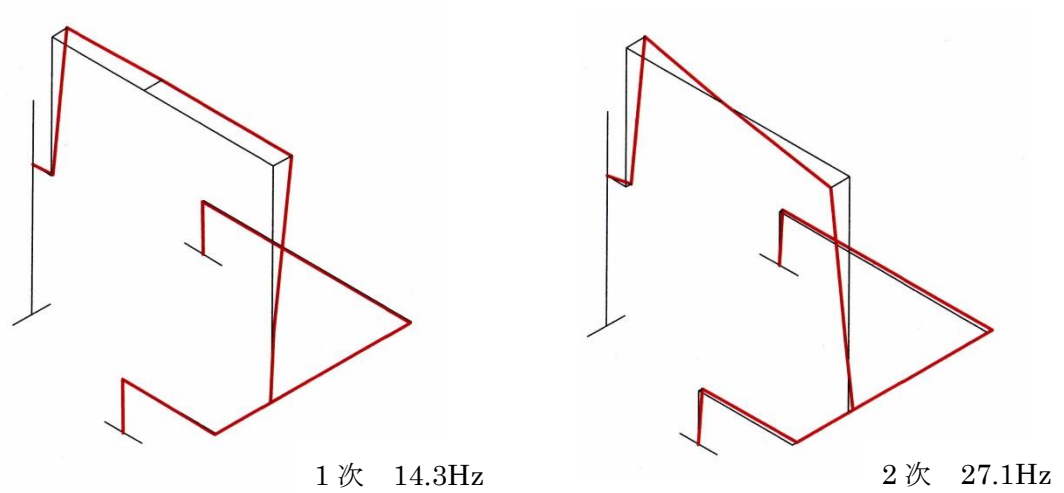
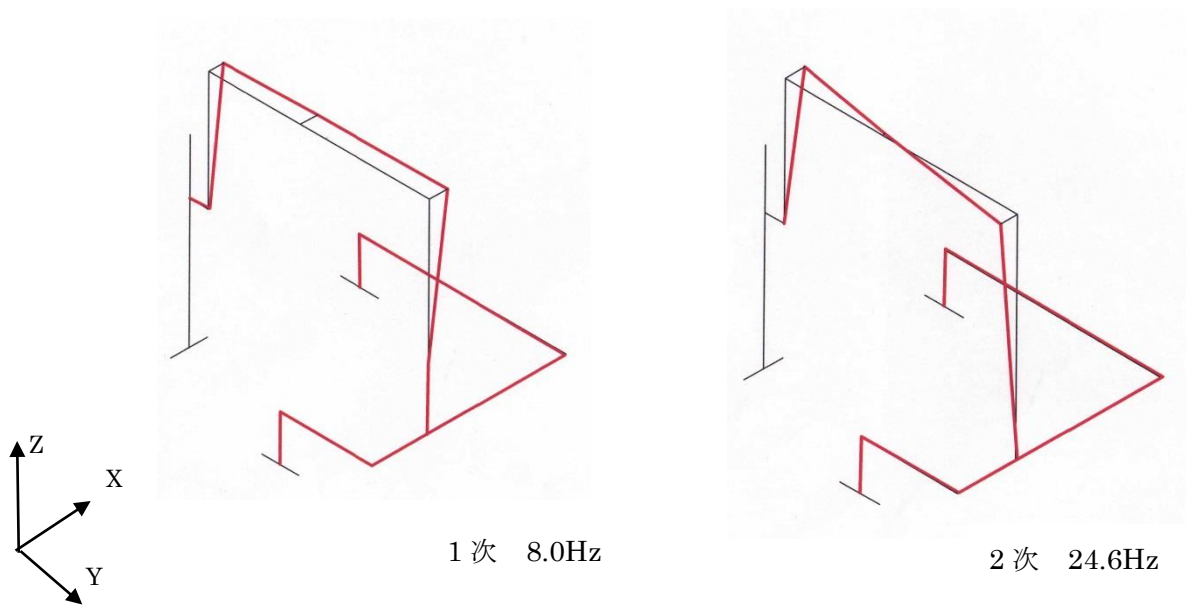


図 3.2-11(1) 支持構造物 1,2 付き(AK20×15)試験体



支持構造物 1,2 なし試験体

図 3.2-11(2) 水平振動試験(X 方向)から得られた固有モード

3.2.3.2 解析モデルによる固有振動数と固有モード

配管系試験体の振動解析モデルを作成して、固有振動数、固有モードを求め振動台試験結果と比較する。本報告の固有値解析、地震応答解析(時刻歴解析、応答スペクトルを用いる方法)は DYNAS2E³⁾を用いて実施する。

(1) 解析モデルの作成

図 3.2-12 に解析モデルを示す。土台部分は無視し配管系試験体と支柱部分をモデル化している。

配管及び支持鉄骨は 3 次元梁要素を用いてモデル化する。ロッドレストレイントは軸力のみ負担する棒要素、支持構造物はばね要素を用いてモデル化する。

配管などの梁要素は、約 100mm 間隔で節点を設け、地震応答解析結果の部材応力を細かい間隔で算定できるように配慮している。

土台と配管の接続部分、支柱と土台の接続部分の支点は、すべて固定としている。

支持構造物のモデル化は、X,Y,Z 方向に独立な3つのばね要素でモデル化しているが、設定したばね剛性を表 3.2-5 に示す。

面外方向の剛性は、静的加力試験の結果を参考として 45N/mm^2 としている。面内方向は、断面 2 次モーメント等から得られる水平剛性の比率を面外方向剛性に対して考慮した。高さ方向は、断面積を考慮して得られる剛性の比率を面外方向剛性に対して考慮して算出している。

(2) 解析モデルによる固有振動数と固有モード

解析モデルを用いて得られた固有振動数を表 3.2-6 に示す。

振動試験の固有振動数は X 方向加振による結果として得られる値であるので、解析において X 方向に刺激係数の大きいモードが表れているものと考えられる。表 3.2-6 の固有振動数で Y 方向卓越と示した次数は振動試験との比較では除いて考えてもよいと考えられる。

支持構造物 1,2 付きの場合、振動試験の 1 次、2 次である 14.4Hz、27.1Hz に対応する解析結果の固有振動数は 13.46Hz、24.35Hz である。支持構造物なしの場合、振動試験の 1 次、2 次である 8.0Hz、24.6Hz に対応する解析結果の固有振動数は 8.2Hz、21.45Hz である。両者ともに 2 次振動数において 3Hz 程度の相違が見られる。この理由としては、解析ではロッドレストレイントと配管との接合部分において、ロッドレストレイントは配管の回転に影響しないと考えられるが、試験では取り付け部分が配管の回転に影響を及ぼしている可能性があること、下方横方向配管を鉛直方向に支持するサポートは、解析では水平方向フリーとしているが、試験ではすべり面で多少摩擦などが生じている可能性があること、などが考えられる。

支持構造物 1,2 付き、支持構造物なしについて解析による固有モードを図 3.2-13 に示す。図中には各方向の刺激係数も示している。固有モード形状を見ると、振動試験結果と比較して、2 次モードにおいてロッドレストレイントから下方がより大きく振動している。この傾向は、支持構造物なしの場合に特に大きくなっている。

表 3.2-5 支持構造物の剛性

面外方向	面内方向	高さ方向
45N/mm ²	1125N/mm ²	630N/mm ²

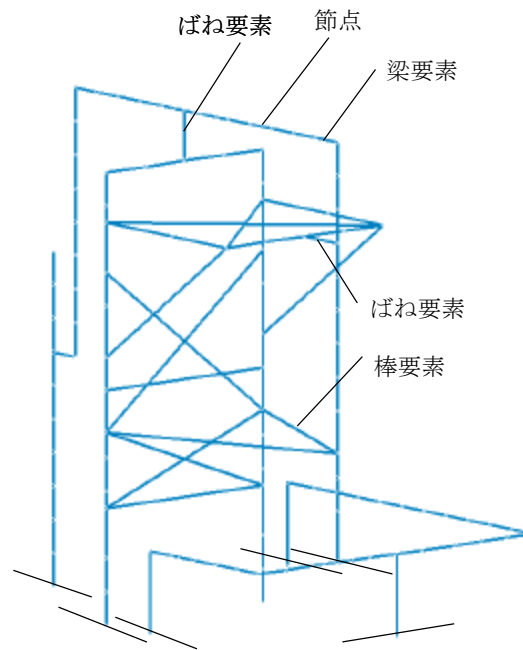
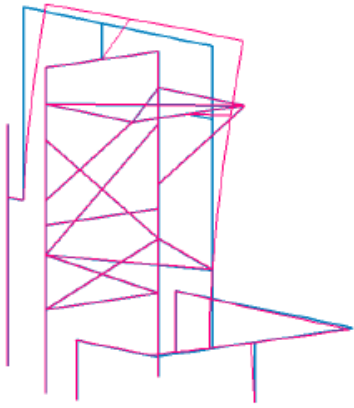


図 3.2-12 解析モデル

表 3.2-6 解析モデルによる固有振動数

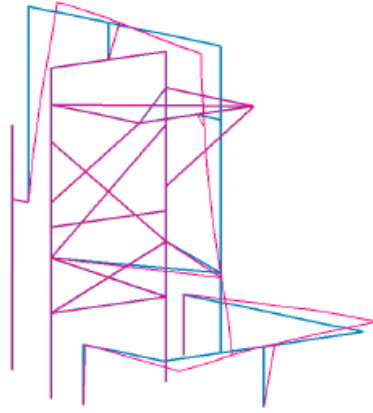
	1次	2次	3次
支持構造物 1,2 AK(20 × 15)	13.46Hz	24.35Hz	29.99Hz (Y方向卓越)
支持構造物 1,2 なし	8.20Hz	15.59Hz (Y方向卓越)	21.45Hz
支持構造物 1のみ AK(20 × 15)	11.71Hz	21.88Hz	28.54Hz (Y方向卓越)
支持構造物 2のみ AK(20 × 15)	9.98Hz	23.88Hz	25.22Hz (Y方向卓越)

注) β は各方向の刺激係数を示す。



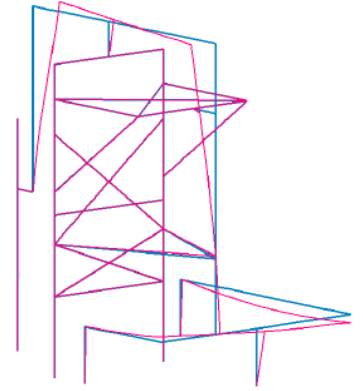
$$\begin{aligned}\beta_x &= -2.966 \\ \beta_y &= 0.106 \\ \beta_z &= -0.058\end{aligned}$$

1次 13.46Hz



$$\begin{aligned}\beta_x &= -4.958 \\ \beta_y &= 0.810 \\ \beta_z &= -0.343\end{aligned}$$

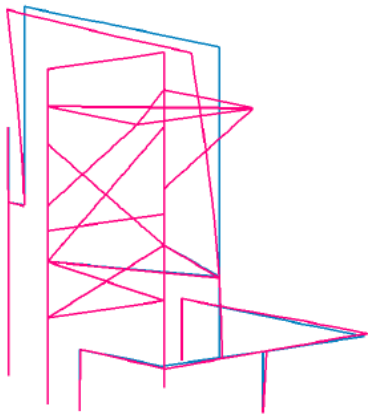
2次 24.35Hz



$$\begin{aligned}\beta_x &= -1.111 \\ \beta_y &= 3.604 \\ \beta_z &= -0.106\end{aligned}$$

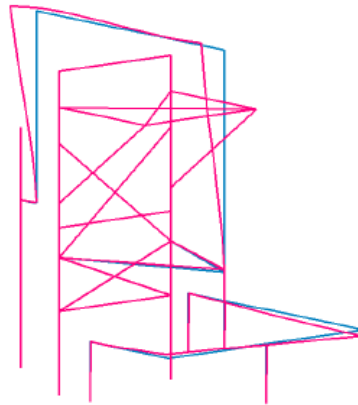
3次 29.99Hz

支持構造物 1,2 付き(AK20×15)



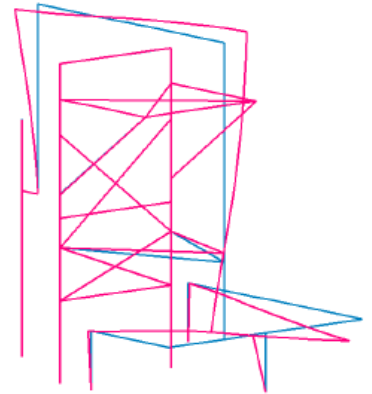
$$\begin{aligned}\beta_x &= -2.785 \\ \beta_y &= -0.011 \\ \beta_z &= -0.123\end{aligned}$$

1次 8.20Hz



$$\begin{aligned}\beta_x &= -0.917 \\ \beta_y &= 3.030 \\ \beta_z &= 0.325\end{aligned}$$

2次 15.59Hz



$$\begin{aligned}\beta_x &= 4.748 \\ \beta_y &= 1.229 \\ \beta_z &= -0.754\end{aligned}$$

3次 21.459Hz

支持構造物なし

図 3.2-13 解析モデルから得られた固有モード

3.2.3.3 振動台試験から得られた減衰定数

(1) 共振曲線を用いた検討

小振幅の振動数を一定とした正弦波加振を実施し、配管系試験体の減衰定数について検討する。

掃引試験から設定した固有振動数付近を0.1Hz 間隔で最大加速度と振動数を一定とした正弦波加振を実施する。最大加速度は1次振動を対象とした場合には 0.2m/s^2 、2次振動を対象とした場合には 1.0m/s^2 とする。計測記録から対象振動数を中心とする $1.0\text{Hz}(\pm 0.5\text{Hz})$ の成分を抽出し、比較的安定している区間を用いて、共振曲線を作成した。共振曲線の増大率は上方横方向配管に設定した ch1(計測点の位置は後述する)の振幅を入力加速度(ch12に相当)である 0.2m/s^2 、 1.0m/s^2 で除することによって作成する。作成した共振曲線(増大率曲線)を図 3.2-14 に示す。1次振動で増大率がより大きくなっており、特に支持構造物なしの1次振動で大きいことがわかる。

-

$$\text{増大率} = \frac{\text{ch1の最大加速度振幅}}{\text{入力最大加速度}}$$

共振曲線に対して $1/\sqrt{2}$ 法を適用して得られた支持構造物 1,2 付きと支持構造物なしに対する1次振動と2次振動の減衰定数を表 3.2-7 に示す。 $1/\sqrt{2}$ 法は中心振動数(ピーク振動数)がパラメータに入ってくるので、ピーク形状が直接減衰定数(h)の大小関係とはならず、支持構造物 1,2 と支持構造物なしの場合ともに、1次振動に対しては $h=1.8\sim 2\%$ 程度、2次振動に対しては $h=0.7\sim 0.8\%$ 程度になっている。

(2) 自由振動波形を用いた検討

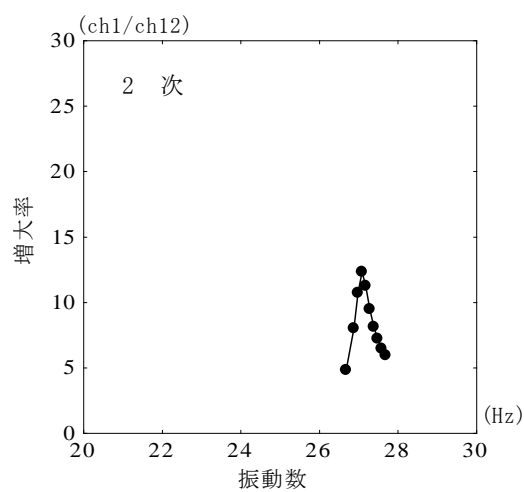
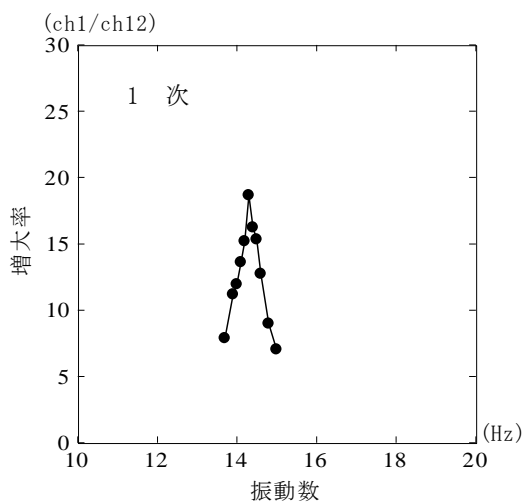
頂部の横方向配管を強く押し初期変位を与えることによる自由振動試験を実施し、その波形から1次振動の減衰定数について検討する。支持構造物1,2 を付いた場合には、初期変位により支持構造物 1 に亀裂が生じてしまったので、支持構造物なしの場合のみについて実施する。

頂部の横方向配管の A3(計測点の位置は後述する) の X 方向(ch3)の加速度波形を示す。波形は1次固有振動数が8Hz であるので10Hz 以上の成分をカットしている。図中には1質点系として得られる自由振動の包絡線も示しているが、自由振動波形にフィッティングするように包絡線形状を決めると $h=0.012$ となった。

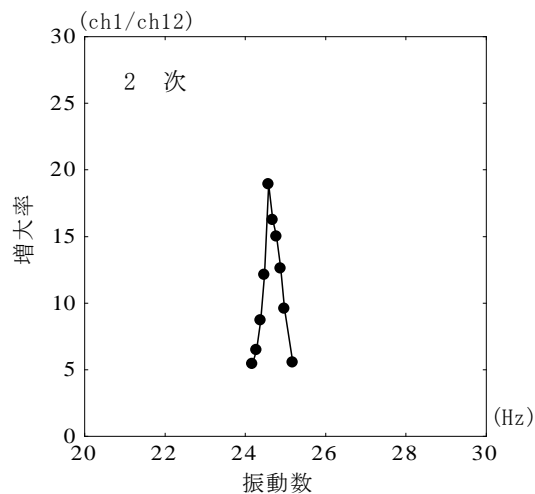
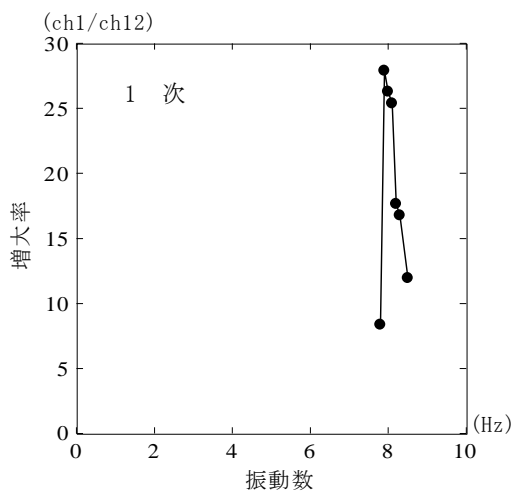
支持構造物なしの1次振動の減衰定数を比較すると、共振試験からは $h=0.0177$ 、自由振動試験からは $h=0.012$ となっている。これらの値は一般に支持具なしの設計用減衰定数として用いられる 0.5% と比較して高い値となっている。設計に用いられる値は多くの条件で得られた値の最小値を考慮して設定される場合も多いこと、 $1/\sqrt{2}$ 法、自由振動波形からの算出共に、試験状況に依存するなど誤差を伴う方法であることなどを考慮すると、今回の試験条件の中で得られた値は一つの参考値として捉えることができると考えられる。

表 3.2-7 共振曲線に $1/\sqrt{2}$ 法を適用して得られた減衰定数(h)

	1次	2次
支持構造物 1,2 AK(20×15)	0.0177	0.0079
支持構造物 1,2 なし	0.0196	0.0071

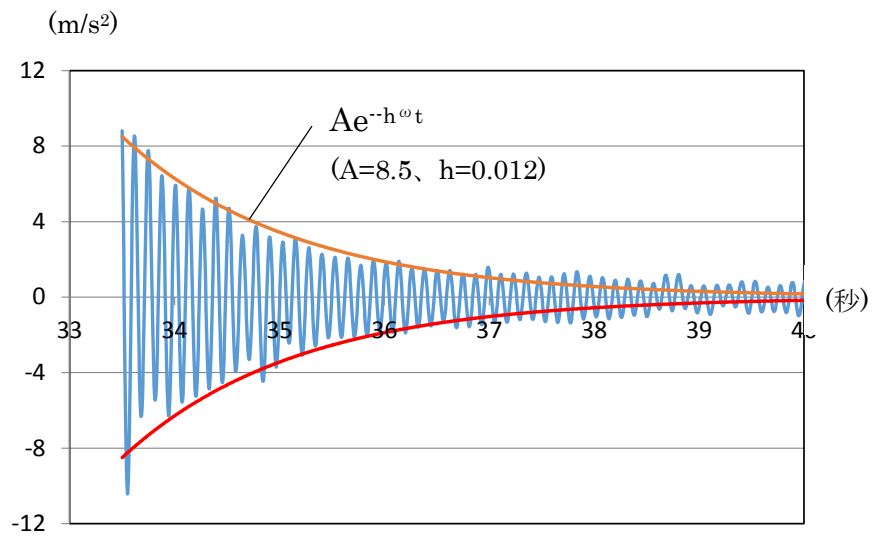


支持構造物 1,2 付(AK(20×15))試験体



支持構造物 1,2 なし試験体

図 3.2-14 振動試験から算出した共振曲線



注) A : 初期条件、t : 自由振動を開始してからの時間
 ω : 試験体の角振動数(8Hz として)、 h : 減衰定数

図 3.2-15 自由振動による加速度波形(A3 の X 方向(ch3))

3.2.4 水平加振試験

支持構造物1と2の破断を対象とした振動台試験を実施する。

3.2.4.1 計測計画等

図 3.2-16 に加振、計測システムのイメージを示す。計測は配管各部の加速度とひずみを中心に行う。

加速度計は 23ch、歪ゲージは 25ch を設置し、合計 48ch のデータを 200Hz の間隔で収録する。

加速度計と歪ゲージの設置状況は図 3.2-17(1)に示す。加速度計は1方向加速度計を用いており、各加速度計はアルミ片の取り付け板に取り付け、配管とは結束バンドを用いて接続している。

加速度計の記号と設置位置を図 3.2-18(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。図中には加速度の計測方向も示している。

上方の横方向配管には、A1(X)、A2(X,Y,Z)、A3(X,Y)を設置している。()内は方向を示し A2 は支持構造物1の近傍なので、X,Y,Z の 3 成分を計測している。前面の縦方向配管に A4(X,Y,Z)、A5(X)を設置している。A4 は支持構造物2の近傍であり、A5 位置はロッドレストレイントの近傍である。後面の縦方向配管の立ち上がり支持近傍に A6(X)を設置している。下方の横方向配管には、A7(X)、A8(X,Z)、A9(X,Z)、A10(X)を設置している。A8とA9では鉛直成分が大きくなることが予測されるのでZ方向にも設置している。さらに、土台部分上面に A11(X)、振動台上(土台下部分)に A12(X)を設置して、試験体への入力波形を計測している。支持鉄骨には、A13(X)、A14(X)、A15(X)、A16(X)を設置し、支持鉄骨の挙動を計測している。A13(X)、A14(X)は、支持構造物 1,2 の近傍であり、支持構造物 1,2 が受ける相対変位の計算に用いことができる。

ひずみゲージの記号と設置位置を図 3.2-18(2)に示す。X 方向を中心に、配管応力が大きくなると予想される位置に設置している。図中にはひずみゲージを設置した方向も示している。ひずみゲージは、基本的に配管応力を膜応力と曲げ応力として評価できるように、配管の前後面などの材軸方向に 2 枚貼ることとしている。上方の横方向配管には、S1、S2 位置に貼っている。S1 は支持構造物1の近傍なので、X 方向と Z 方向の応力が計測できるように 4 枚張っている。前面の縦方向配管には S3、S4、S6位置に貼っている。S3 は支持構造物 2 の近傍なので、X 方向と Y 方向振動による応力が計測できるように 4 枚張っている。S4 はロッドレストレイントの近傍であり同様に 4 枚張っている、S5 は下方の横方向配管との接続部分の近傍である。後面の縦方向配管の立ち上がり支持近傍には S6 位置に貼っている。この位置は支持鉄骨への固定点の近傍であり複雑な応力状態と考えられるので、3 軸ゲージを 2 枚貼っている。3 軸は材軸、材軸直行方向、45 度方向である。後面の縦方向配管と支持鉄骨をつなぐ配管には S9 として、ねじれ応力を計測するために 45 度方向に 1 枚張っている。さらに、ロッドレストレイントの応力を計測するために S7,S8 として、軸方向応力を計測する歪ゲージを各 1 枚貼っている。

図 3.2-17(2)に支持構造物1及び2の配管と支柱(支梁)との接続状況を示す。アクリル板の取り付け部分は、現場での調整を考慮して長穴とし、ボルト止めできるようにしている。また、アクリル板の長さは 100mm であるが、取り付け部分があるので可変部分 70mm となっている。

計測したデータを以後の検討に使用する場合には、40Hz 以上の成分をカットするフィルターを適用する。

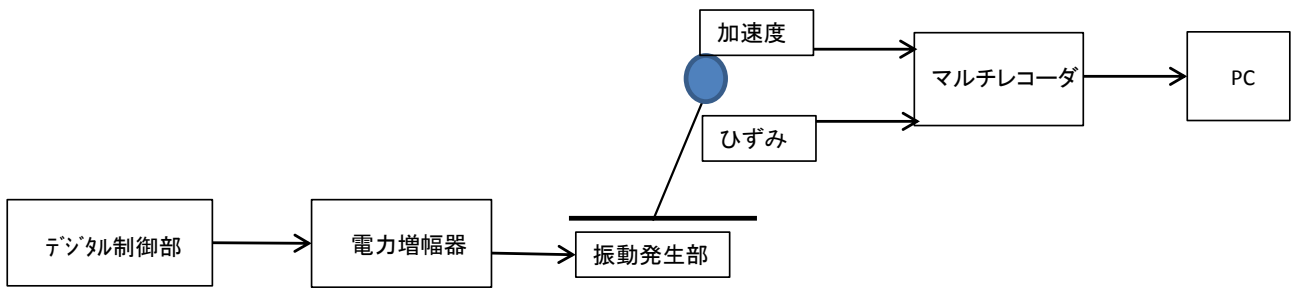
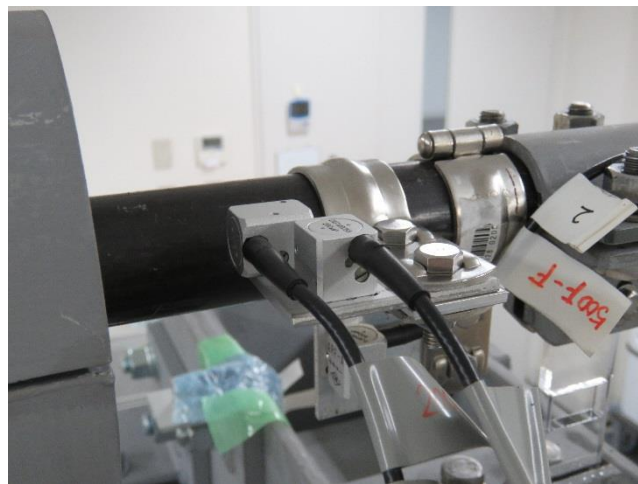


図 3.2-16 振動台試験の加振、計測システムの概要



加速度計の設置状況



歪ゲージの設置状況

図 3.2-17(1) 加速度計、歪ゲージの設置状況

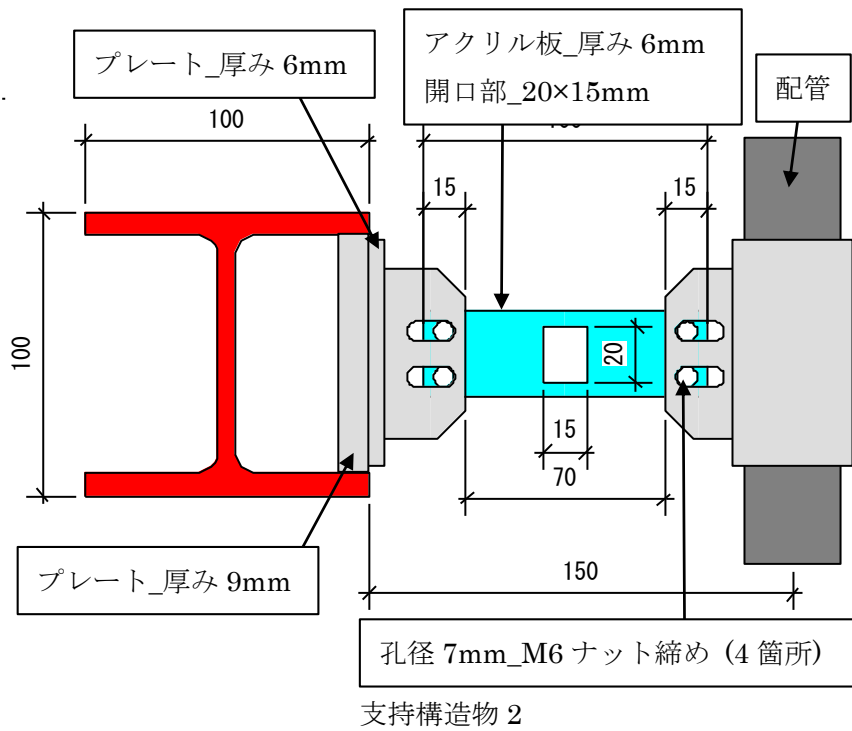
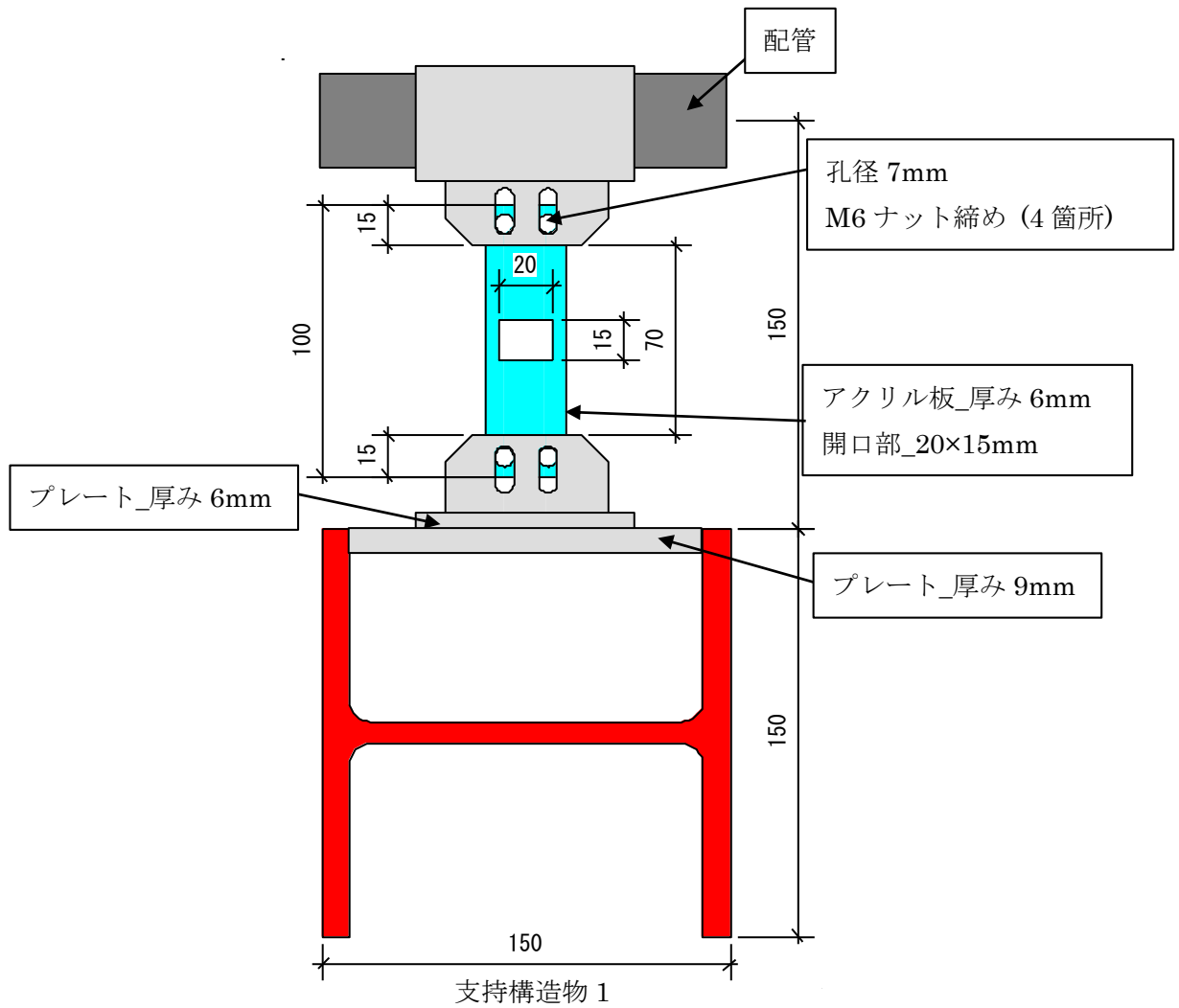


図 3.2-17(2) 支持構造物の配管への取り付け

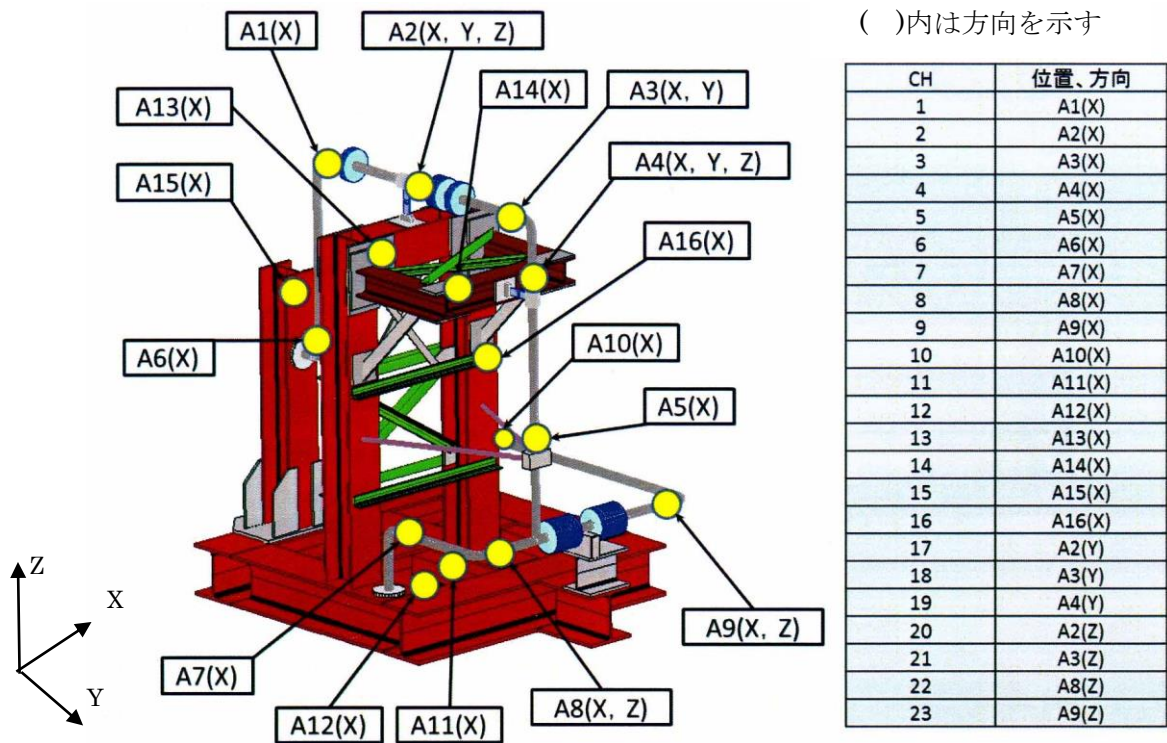


図 3.2-18(1) 加速度計の設置位置とその番号

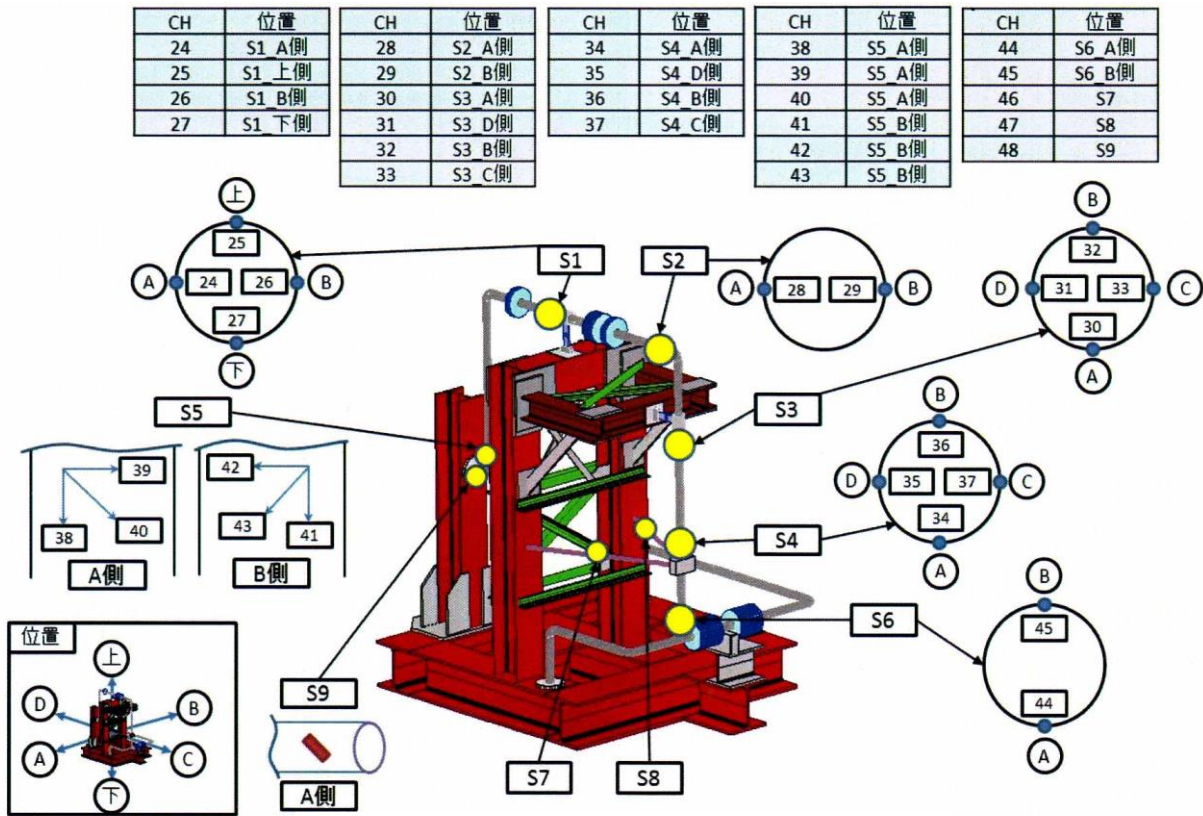


図 3.2-18(2) 歪ゲージの設置位置とその番号

3.2.4.2 正弦波入力による水平加振試験

3.2.4.2.1 支持構造物 1 又は 2 の破断の影響

支持構造物 1 又は 2 の個別の損傷(破断)が配管系試験体全体に及ぼす影響を検討するために、支持構造物 1 又は 2 を単独に設置した配管系試験体の正弦波の掃引試験を実施する。

(1) 支持構造物 1 の損傷(破断)の影響

正弦波の掃引試験は、表 3.2-8 に示すように、支持構造物 1 のみを設置した試験体の 1 次固有振動数である 12.3Hz を対象として 5~16Hz の間隔で行った。最大加速度を 0.5m/s^2 増分とし、5→16Hz の昇順で試験を行った結果、 1.5m/s^2 で破断に至った。さらに、最大加速度 1.5m/s^2 で 16→5Hz の降順の試験も実施し、支持構造物が破断に至ることを確認している。支持構造物 1 の破断状況は図 3.2-19 に示している。中央開口の両側部分の上下端が破断していることが分かる。

ここでは、最大加速度 1.5m/s^2 で 5→16Hz の昇順の試験結果について述べる。

図 3.2-20 には、上方横方向配管 A3 位置の X 方向(ch3)の全 90 秒間の加速度記録を示す。60 秒付近の共振の影響で振幅が増大し支持構造物 1 は破断に至り、固有振動数が変化するので振幅は急激に低下している。全継続時間(90 秒)を通して計測された最大加速度、最大ひずみを表 3.2-9 に示す。最大加速度の最大値には、後述する支持構造物破断時のパルスの影響が含まれているので、非常に大きな値となっている加速度計も見られる。

次に、破断の影響が配管系試験体に及ぼす影響を検討するために、破断時刻を中心に 10 秒を抜出して結果について示す。表 3.2-10(1)~(2)は加速度とひずみの最大値が示されている。10 秒間通しての最大値、破断の影響で波形的に乱れの見られる 2 秒間程度を除いた破断前後に分けて求めた最大値も示している。破断前後の間隔は定常的に振動していると思われる時刻を採用している。加速度の最大値には応答倍率も示しているが、破断前後で比較すると破断後の応答倍率が小さくなっていることが分かる。破断の前後において最大ひずみが大きいのは、S4 と S5 の X 方向振動となっている。破断前に最も大きなひずみは S4-A 側、S4-B 側で発生しているが、破断後には S5-A 側と S5-B 側と変化している。これは、支持構造物 1 の破断後に、後面の縦方向配管が大きく振動するようになったことに起因していると考えられる。

図 3.2-21(1)~(5)はこの 10 秒間の加速度、配管ひずみの時刻歴である。縦軸は波形形状を見るための最大値としており。パルスのな波形で振幅が大きくなる場合は右上の max の値で表示するようにしている。上方の横方向配管の X 方向加速度計には破断に伴い大きな加速度パルスが見られる。支持構造物 1 の近傍は A2 では Y 方向にも大きな加速度パルスが見られる。縦方向配管の X 方向加速度計(A5、A6)には破断による乱れは見られるが、大きなパルスなどは発生していない。上方の横方向配管支持構造物 1 近傍の S1 における X 方向振動のひずみ(S1-A 側、S1-B 側)には、破断時に中心軸が片側にシフトする傾向が見られる。縦方向配管の X 方向振動のひずみには、その影響によるものと考えられる中心軸のシフトが見られる。この中心軸の片側へのシフトは、支持構造物の破断によって、元の中立軸へ戻そうとする復元力が消滅したため発生したものと考えられる。

(2) 支持構造物 2 の損傷(破断)の影響

支持構造物 1 と同様の正弦波の掃除引試験を行った。試験結果の概要を表 3.2-11 に示す。最大加速度 1.0m/s^2 の昇順の試験で、開口の両側の上端部分に亀裂が発生し、最大加速度 1.5m/s^2 の昇順と降順の試験において破断が発生した。各試験の破断状況は図 3.2-22 に示している。

ここでは、最大加速度 1.5m/s^2 の昇順(5→16Hz)の結果を示す。支持構造物1のみの場合と同様に、全継続時間の A3 X 方向(ch3)の加速度時刻歴と計測値の最大値の一覧を図 3.2-23、表 3.2-12 に示す。各部位の最大ひずみは支持構造物1のみの場合と比較して、2 倍程度となっている。

破断前後の 10 秒間の最大値の一覧と時刻歴を表 3.2-13(1)～(2)と図 3.2-24(1)～(5)に示す。

破断前に最も大きなひずみは S5-A 側、S5-B 側で発生しており、後面の縦方向配管が大きく振動していたことがわかる。破断後は、大きさは小さくなるが、S4とS5のX方向振動が同レベルとなっている。時刻歴的には、支持構造物 2 近傍の加速度に限らず、縦方向配管、上下方向の横方向配管の加速度波形に乱れが見られる。ひずみの時刻歴に見られる破断時の乱れは支持構造物 1 の場合より小さくなっている。

表 3.2-8 正弦波_支持構造物 1 のみの加振結果の概要

支持構造物1のみ取付時の試験				
	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	5→16Hz, 90秒間	2016-2-5-31	破断・亀裂無し
	1.0	5→16Hz, 90秒間	2016-2-5-32	上部_両側に亀裂
	1.5	5→16Hz, 90秒間	○2016-2-5-33	60.7s付近で支持構造物1破断
D	1.5	16→5Hz, 90秒間	2016-2-5-34	23.0s付近で支持構造物1破断 ※36s付近から破断部が噛み合い始め、 51s付近で破片が飛散

注)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:2016-2-5-32



試験番号:2016-2-5-33



試験番号:2016-2-5-34

図 3.2-19 支持構造物 1 の破断・亀裂状況

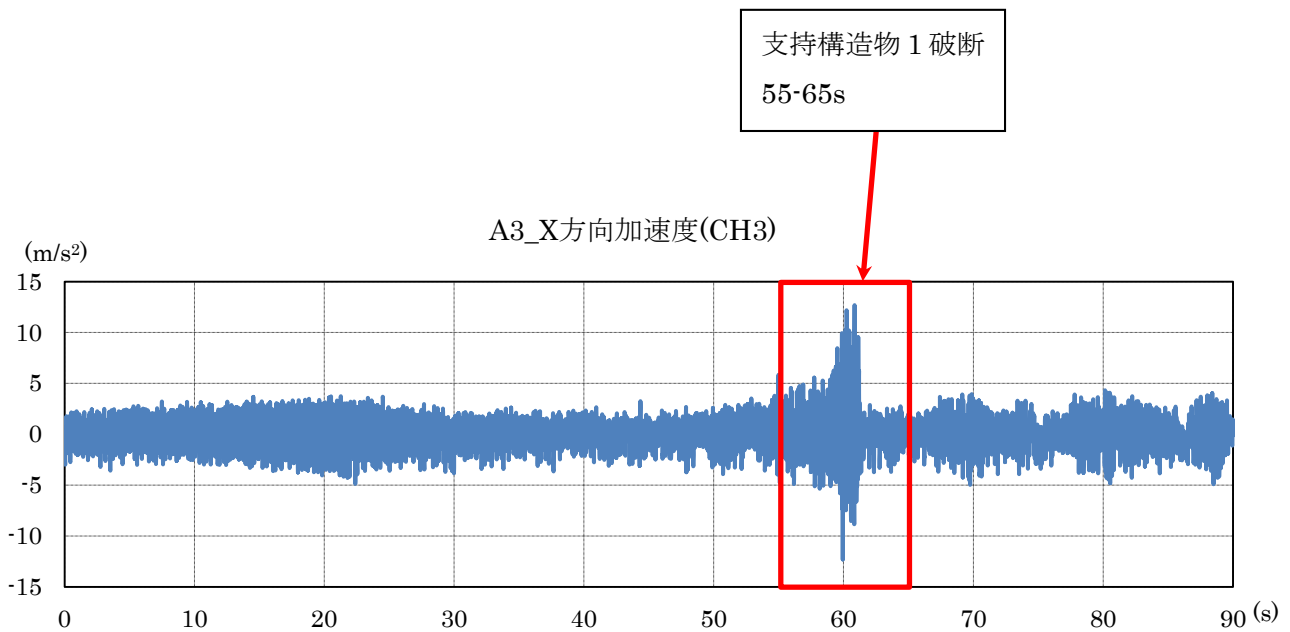


図 3.2-20 試験番号 2016-2-5-33_全区間(0-90s)の加速度時刻歴

表 3.2-9 全区間の最大加速度の応答倍率, 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²) 全区間 0~90s	応答倍率 全区間 0~90s
A1_X方向加速度(ch1)	23.21	11.43
A2_X方向加速度(ch2)	45.14	22.24
A2_Y方向加速度(ch17)	58.36	-
A2_Z方向加速度(ch20)	9.46	-
A3_X方向加速度(ch3)	66.70	32.86
A3_Y方向加速度(ch18)	12.35	-
A4_X方向加速度(ch4)	25.31	12.47
A4_Y方向加速度(ch19)	13.02	-
A4_Z方向加速度(ch21)	8.75	-
A5_X方向加速度(ch5)	12.69	6.25
A6_X方向加速度(ch6)	33.14	16.33
A7_X方向加速度(ch7)	20.82	10.26
A8_X方向加速度(ch8)	6.13	3.02
A8_Z方向加速度(ch22)	18.22	-
A9_X方向加速度(ch9)	9.26	4.56
A9_Z方向加速度(ch23)	25.87	-
A10_X方向加速度(ch10)	18.54	9.13
A12_X方向加速度(ch12)	2.03	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz	
ひずみ位置	最大ひずみ (μ) 全区間 0~90s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	44.43
S1-上側方向ひずみ(ch25)	17.93
S1-B側方向ひずみ(ch26)	47.75
S1-下側方向ひずみ(ch27)	19.70
S2-A側方向ひずみ(ch28)	26.77
S2-B側方向ひずみ(ch29)	25.98
S3-A側方向ひずみ(ch30)	47.02
S3-D側方向ひずみ(ch31)	13.34
S3-B側方向ひずみ(ch32)	47.70
S3-C側方向ひずみ(ch33)	11.31
S4-A側方向ひずみ(ch34)	114.82
S4-D側方向ひずみ(ch35)	51.39
S4-B側方向ひずみ(ch36)	116.14
S4-C側方向ひずみ(ch37)	45.76
S6-A側方向ひずみ(ch44)	107.91
S6-B側方向ひずみ(ch45)	99.58
S5-A側方向ひずみ(ch38)	130.39
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	42.54
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	52.91
S5-B側方向ひずみ(ch41)	134.41
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	46.95
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	40.79
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	4.51
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	5.13
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	103.76

表 3.2-10(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz						
加速度計	最大加速度(m/s ²)			応答倍率		
	全区間 55~65s	破断前 55~60s	破断後 62~65s	全区間 55~65s	破断前 55~60s	破断後 62~65s
A1_X方向加速度(ch1)	23.21	15.12	3.47	11.43	9.39	2.04
A2_X方向加速度(ch2)	45.14	15.01	3.21	22.24	9.32	1.89
A2_Y方向加速度(ch17)	58.36	3.98	1.13	-	-	-
A2_Z方向加速度(ch20)	9.46	4.29	1.50	-	-	-
A3_X方向加速度(ch3)	66.70	18.76	5.03	32.86	11.65	2.96
A3_Y方向加速度(ch18)	12.35	2.38	1.16	-	-	-
A4_X方向加速度(ch4)	25.31	16.56	3.53	12.47	10.29	2.08
A4_Y方向加速度(ch19)	13.02	5.28	1.22	-	-	-
A4_Z方向加速度(ch21)	8.75	5.52	1.30	-	-	-
A5_X方向加速度(ch5)	12.69	12.30	3.72	6.25	7.64	2.19
A6_X方向加速度(ch6)	33.14	9.46	2.53	16.33	5.88	1.49
A7_X方向加速度(ch7)	20.82	9.85	6.93	10.26	6.12	4.08
A8_X方向加速度(ch8)	6.13	4.18	2.48	3.02	2.60	1.46
A8_Z方向加速度(ch22)	18.22	10.82	4.54	-	-	-
A9_X方向加速度(ch9)	9.26	3.26	2.88	4.56	2.02	1.69
A9_Z方向加速度(ch23)	25.87	15.47	7.21	-	-	-
A10_X方向加速度(ch10)	18.54	10.35	4.58	9.13	6.43	2.69
A12_X方向加速度(ch12)	2.03	1.61	1.70	1.00	1.00	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-10(2) 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz			
ひずみ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 55~65s	破断前 55~60s	破断後 62~65s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	44.43	20.56	27.68
S1-上側方向ひずみ(ch25)	17.93	8.40	4.54
S1-B側方向ひずみ(ch26)	47.75	20.38	29.88
S1-下側方向ひずみ(ch27)	19.70	8.81	6.23
S2-A側方向ひずみ(ch28)	26.77	19.81	5.95
S2-B側方向ひずみ(ch29)	25.98	19.63	3.70
S3-A側方向ひずみ(ch30)	47.02	28.76	22.90
S3-D側方向ひずみ(ch31)	13.34	9.72	4.01
S3-B側方向ひずみ(ch32)	47.70	28.57	23.31
S3-C側方向ひずみ(ch33)	11.31	8.91	2.71
S4-A側方向ひずみ(ch34)	114.82	84.07	64.51
S4-D側方向ひずみ(ch35)	51.39	22.61	9.14
S4-B側方向ひずみ(ch36)	116.14	84.78	64.71
S4-C側方向ひずみ(ch37)	45.76	20.69	8.45
S6-A側方向ひずみ(ch44)	107.91	85.02	21.60
S6-B側方向ひずみ(ch45)	99.58	79.49	21.77
S5-A側方向ひずみ(ch38)	130.39	56.64	69.85
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	42.54	17.93	20.52
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	52.91	28.59	28.20
S5-B側方向ひずみ(ch41)	134.41	59.81	70.72
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	46.95	19.45	21.73
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	40.79	14.69	21.28
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	4.51	3.46	3.17
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	5.13	4.25	2.70
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	103.76	41.87	49.30

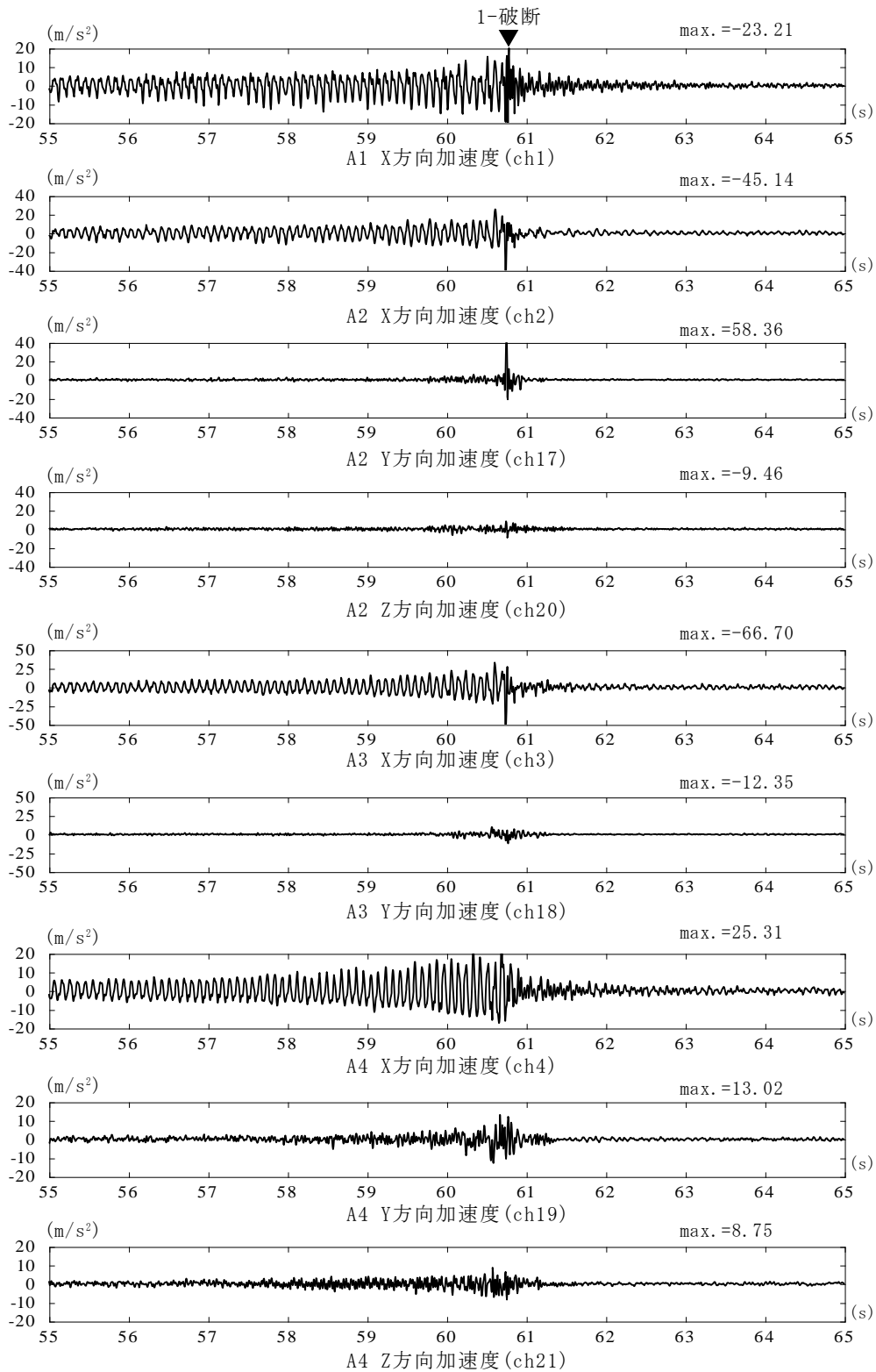


图 3.2-21(1) 加速度時刻歴、A1~A4,振動数昇順(UP)

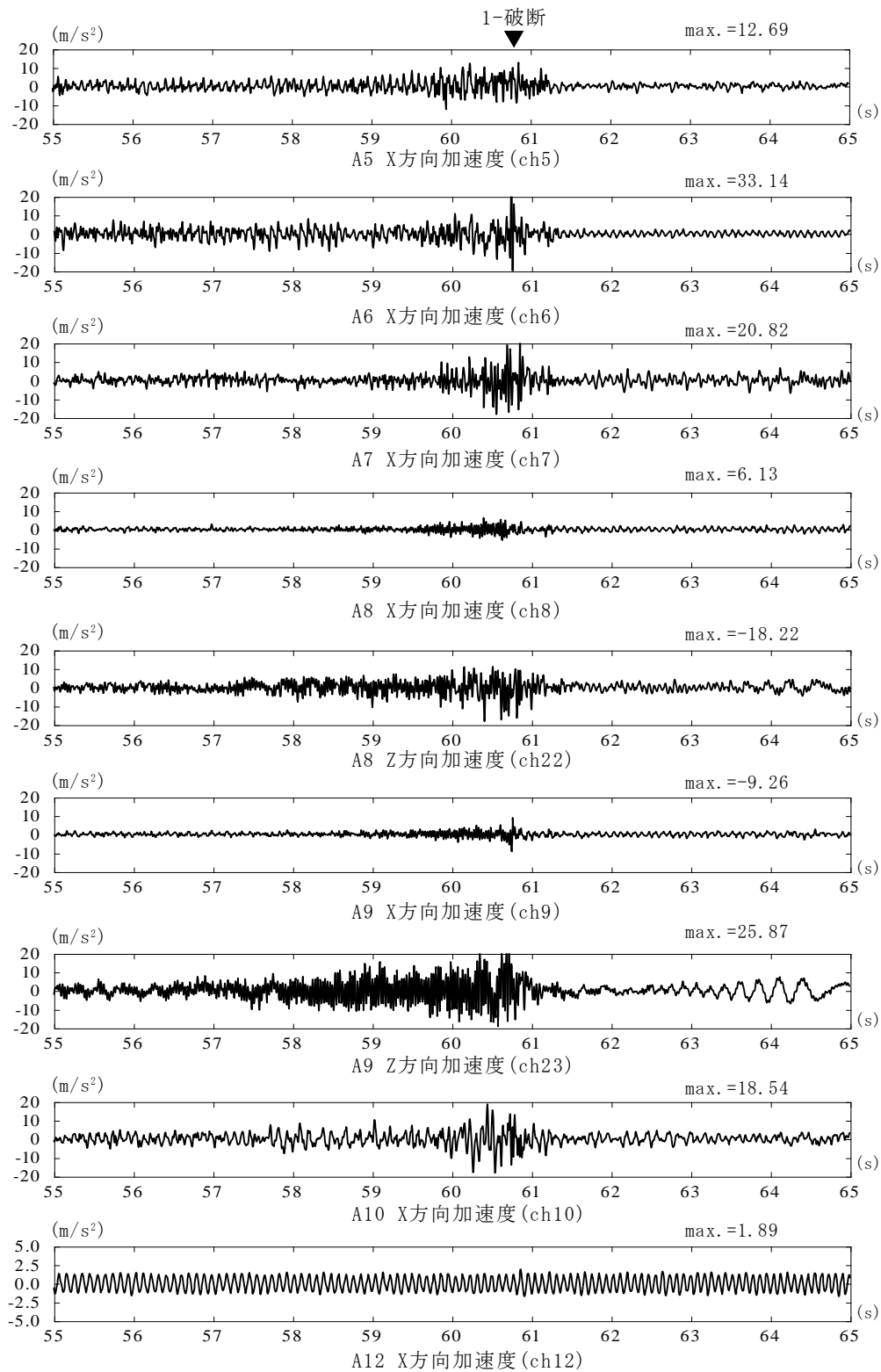


图 3.2-21(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12,振動数昇順(UP)

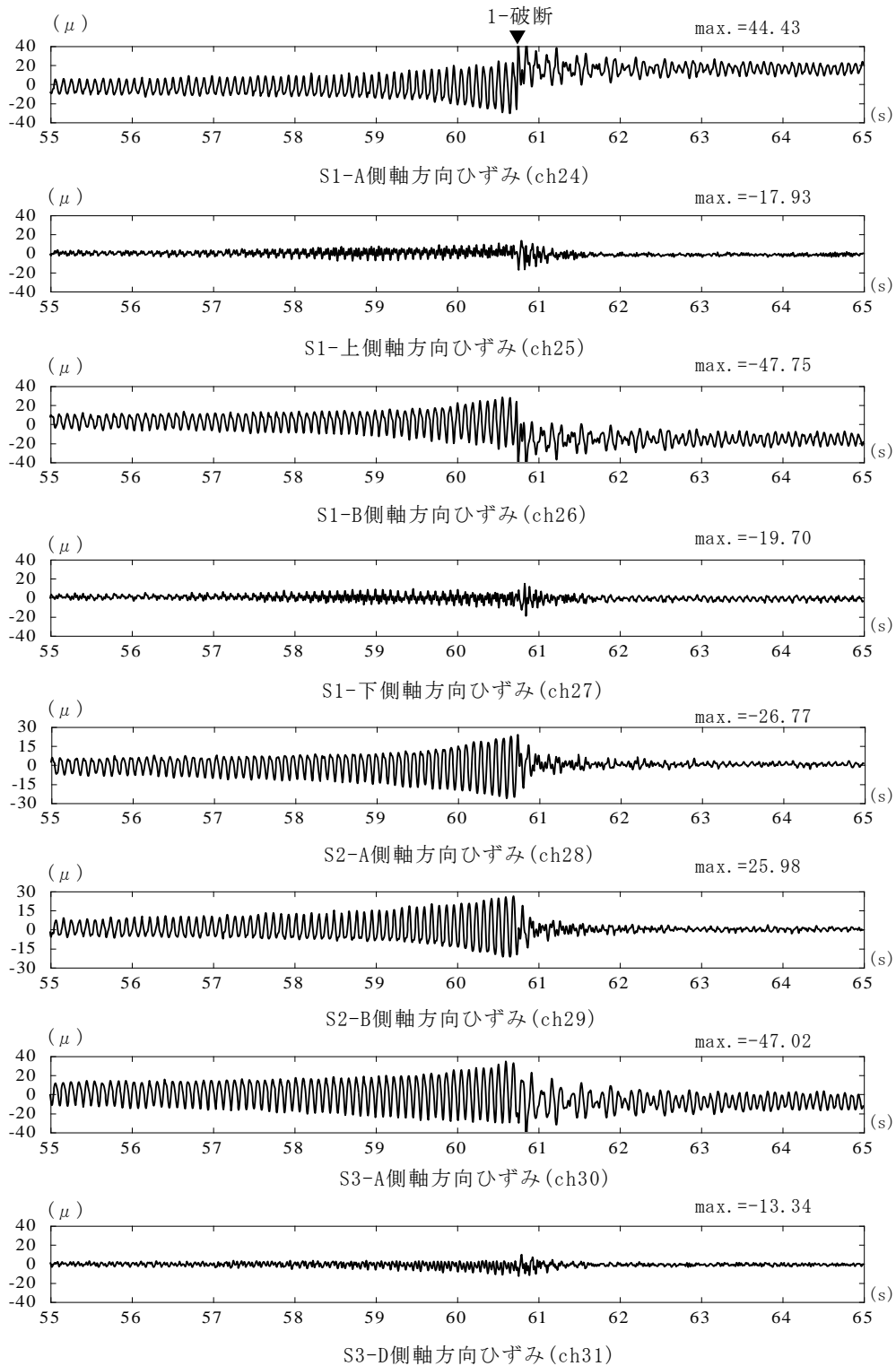


図 3.2-21(3) ひずみ時刻歴、S1～S3,振動数昇順(UP)

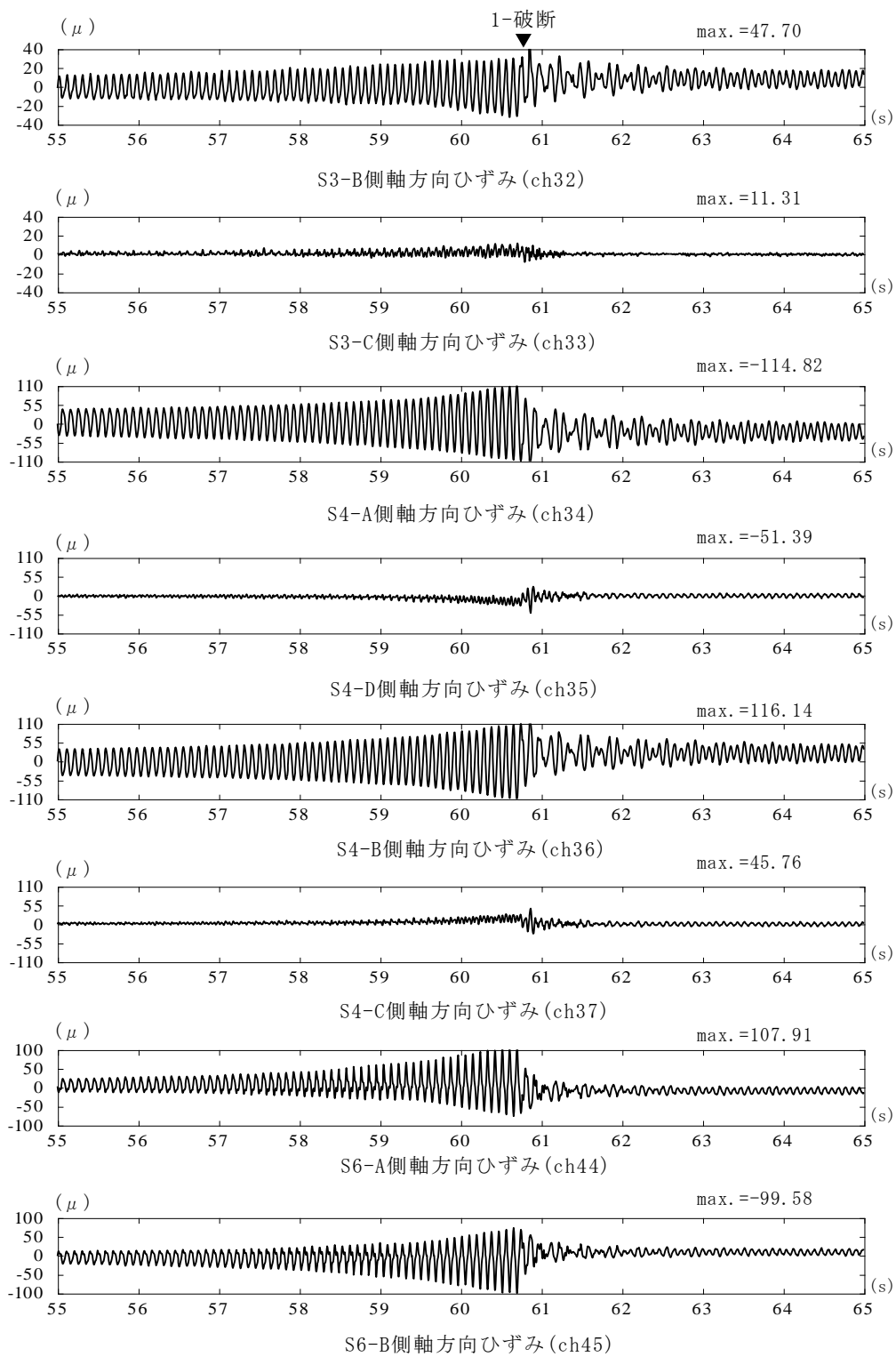


図 3.2-21(4) ひずみ時刻歴、S3・S4・S6振動数昇順(UP)

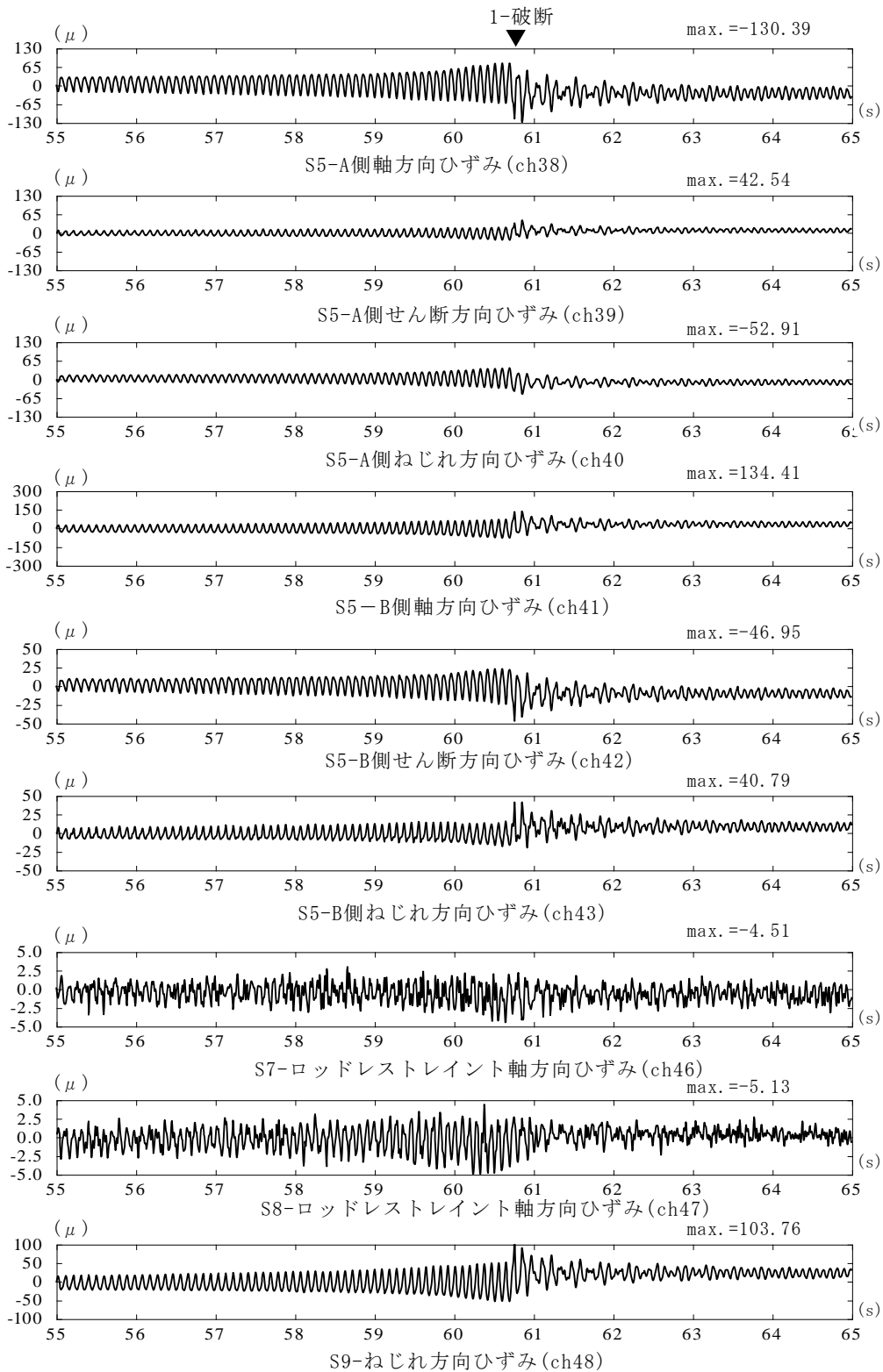


図 3.2-21(5) ひずみ時刻歴、S5・S7～S9,振動数昇順(UP)

表 3.2-11 正弦波_支持構造物 2 のみの加振結果の概要

支持構造物2のみ取付時の試験				
	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	5→16Hz, 90秒間	2016-2-16-11	破断・亀裂無し
	1.0	5→16Hz, 90秒間	2016-2-16-12	52.0付近で支持構造物2_上部-右側が破断
	1.5	5→16Hz, 90秒間	○2016-2-16-13	49.8s付近で支持構造物2破断
D	1.5	16→5Hz, 90秒間	2016-2-16-14	33.3s付近で支持構造物2破断 ※34s付近で破断部が噛み合い始め、 45s付近で破片が飛散

注)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:2016-2-16-12



試験番号:2016-2-16-13



試験番号:2016-2-16-14

図 3.2-22 支持構造物 2 の破断・亀裂状況

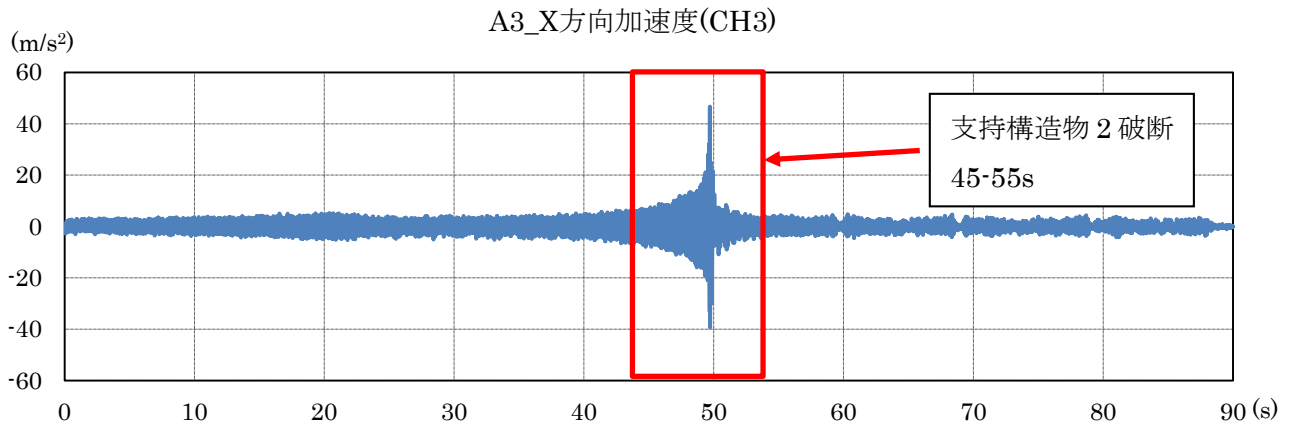


図 3.2-23 試験番号 2016-2-16-13_全区間(0-90s)の加速度時刻歴

表 3.2-12 全区間の最大加速度の応答倍率, 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz		
加速度計位置	最大加速度(m/s ²)	応答倍率
	全区間 0~90s	全区間 0~90s
A1 X方向加速度(ch1)	32.37	15.87
A2 X方向加速度(ch2)	30.25	14.83
A2 Y方向加速度(ch17)	21.46	-
A2 Z方向加速度(ch20)	12.83	-
A3 X方向加速度(ch3)	46.65	22.87
A3 Y方向加速度(ch18)	32.58	-
A4 X方向加速度(ch4)	55.29	27.10
A4 Y方向加速度(ch19)	37.72	-
A4 Z方向加速度(ch21)	20.36	-
A5 X方向加速度(ch5)	70.12	34.37
A6 X方向加速度(ch6)	70.29	34.46
A7 X方向加速度(ch7)	18.41	9.02
A8 X方向加速度(ch8)	11.91	5.84
A8 Z方向加速度(ch22)	18.63	-
A9 X方向加速度(ch9)	13.49	6.61
A9 Z方向加速度(ch23)	23.37	-
A10 X方向加速度(ch10)	23.07	11.31
A12 X方向加速度(ch12)	2.04	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz	
ひずみ位置	最大ひずみ(μ)
	全区間 0~90s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	90.21
S1-上側方向ひずみ(ch25)	27.72
S1-B側方向ひずみ(ch26)	92.25
S1-下側方向ひずみ(ch27)	30.51
S2-A側方向ひずみ(ch28)	37.19
S2-B側方向ひずみ(ch29)	35.31
S3-A側方向ひずみ(ch30)	127.76
S3-D側方向ひずみ(ch31)	38.74
S3-B側方向ひずみ(ch32)	129.90
S3-C側方向ひずみ(ch33)	34.96
S4-A側方向ひずみ(ch34)	204.83
S4-D側方向ひずみ(ch35)	47.23
S4-B側方向ひずみ(ch36)	203.90
S4-C側方向ひずみ(ch37)	41.52
S6-A側方向ひずみ(ch44)	154.48
S6-B側方向ひずみ(ch45)	149.15
S5-A側方向ひずみ(ch38)	264.83
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	89.25
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	92.77
S5-B側方向ひずみ(ch41)	282.66
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	97.04
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	95.12
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	7.23
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	6.91
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	213.95

表 3.2-13(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz						
加速度計	最大加速度(m/s ²)			応答倍率		
	全区間 45~55s	破断前 45~49s	破断後 52~55s	全区間 45~55s	破断前 45~49s	破断後 52~55s
A1_X方向加速度(ch1)	32.37	20.02	4.50	16.69	13.17	2.76
A2_X方向加速度(ch2)	30.25	18.89	4.43	15.59	12.43	2.72
A2_Y方向加速度(ch17)	21.46	2.21	0.84	-	-	-
A2_Z方向加速度(ch20)	12.83	2.72	3.34	-	-	-
A3_X方向加速度(ch3)	46.65	15.88	5.39	24.05	10.45	3.31
A3_Y方向加速度(ch18)	32.58	4.12	2.68	-	-	-
A4_X方向加速度(ch4)	55.29	12.83	4.08	28.50	8.44	2.50
A4_Y方向加速度(ch19)	37.72	2.93	1.38	-	-	-
A4_Z方向加速度(ch21)	20.36	5.29	1.48	-	-	-
A5_X方向加速度(ch5)	70.12	5.66	3.06	36.14	3.72	1.88
A6_X方向加速度(ch6)	70.29	7.74	3.39	36.23	5.09	2.08
A7_X方向加速度(ch7)	18.41	5.41	4.40	9.49	3.56	2.70
A8_X方向加速度(ch8)	11.91	2.36	2.45	6.14	1.55	1.50
A8_Z方向加速度(ch22)	18.63	7.38	3.43	-	-	-
A9_X方向加速度(ch9)	13.49	1.94	2.23	6.95	1.28	1.37
A9_Z方向加速度(ch23)	23.37	5.29	4.20	-	-	-
A10_X方向加速度(ch10)	23.07	5.47	4.68	11.89	3.60	2.87
A12_X方向加速度(ch12)	1.94	1.52	1.63	1.00	1.00	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-13(2) 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz			
ひずみ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 45~55s	破断前 45~49s	破断後 52~55s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	90.21	73.08	15.87
S1-上側方向ひずみ(ch25)	27.72	9.70	5.65
S1-B側方向ひずみ(ch26)	92.25	76.90	16.64
S1-下側方向ひずみ(ch27)	30.51	14.24	9.07
S2-A側方向ひずみ(ch28)	37.19	19.65	6.38
S2-B側方向ひずみ(ch29)	35.31	19.94	6.18
S3-A側方向ひずみ(ch30)	127.76	104.75	23.51
S3-D側方向ひずみ(ch31)	38.74	12.87	8.75
S3-B側方向ひずみ(ch32)	129.90	105.30	23.32
S3-C側方向ひずみ(ch33)	34.96	14.01	4.54
S4-A側方向ひずみ(ch34)	204.84	123.31	64.16
S4-D側方向ひずみ(ch35)	47.23	42.80	14.05
S4-B側方向ひずみ(ch36)	203.90	123.61	65.33
S4-C側方向ひずみ(ch37)	41.52	37.89	14.39
S6-A側方向ひずみ(ch44)	154.48	54.63	27.01
S6-B側方向ひずみ(ch45)	149.15	52.30	24.99
S5-A側方向ひずみ(ch38)	264.83	201.75	53.10
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	89.25	66.85	18.23
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	92.77	72.65	20.75
S5-B側方向ひずみ(ch41)	282.66	217.52	58.72
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	97.04	69.04	19.26
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	95.12	71.86	17.41
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	7.23	4.92	3.79
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	6.91	4.47	2.92
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	213.95	151.24	40.85

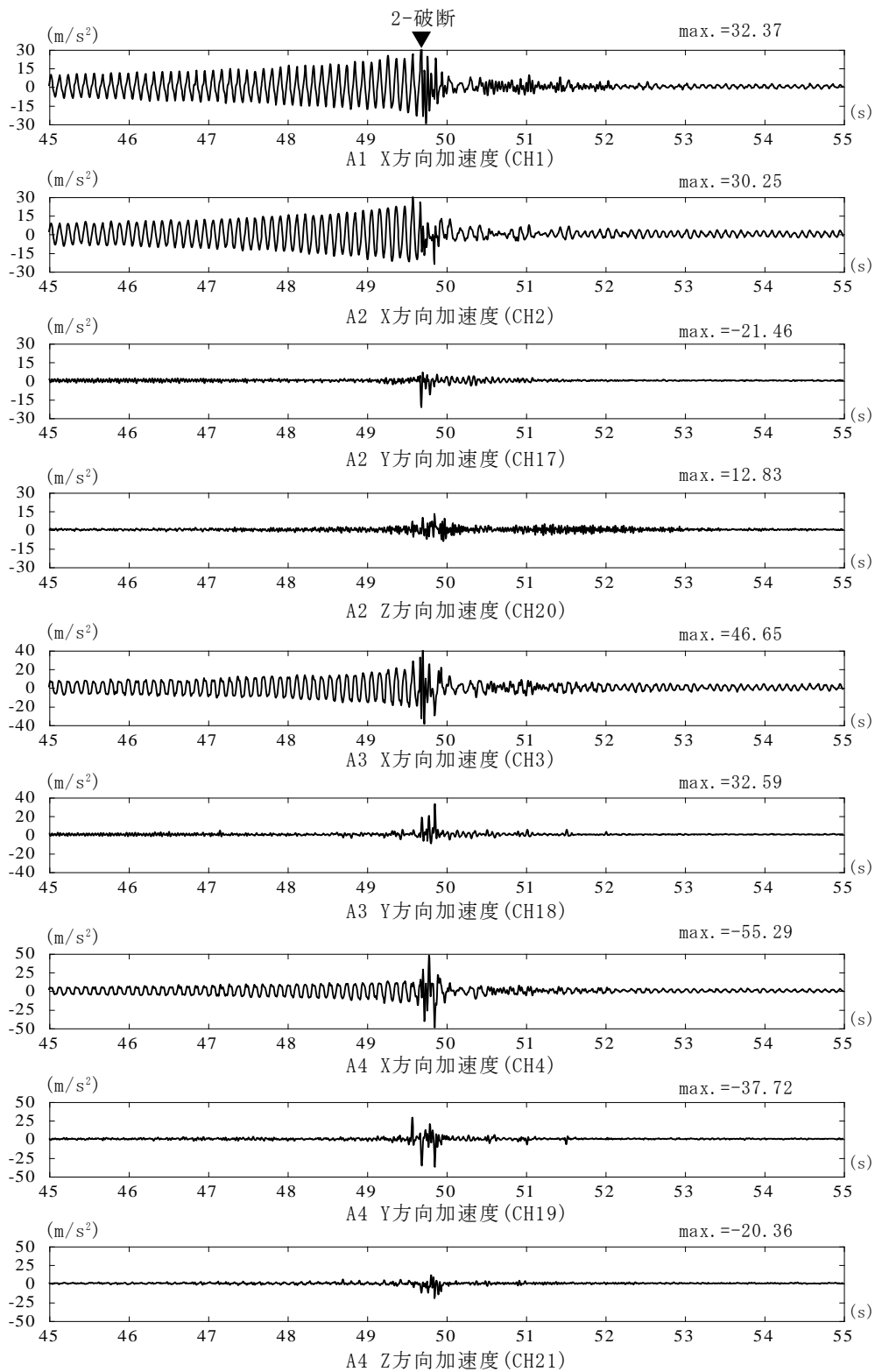


図 3.2-24(1) 加速度時刻歴、A1~A4,振動数昇順(UP)

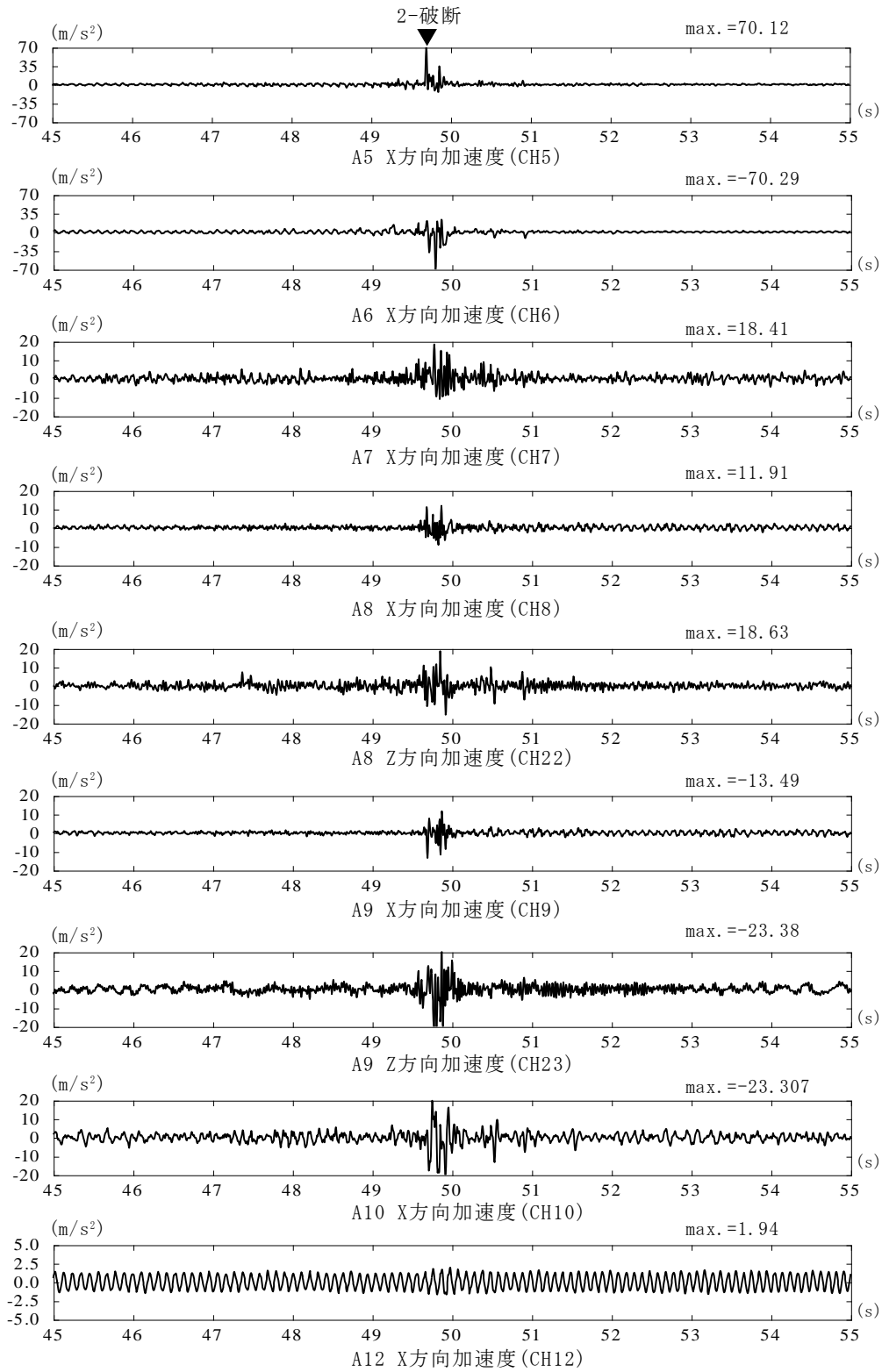


图 3.2-24(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12,振動数昇順(UP)

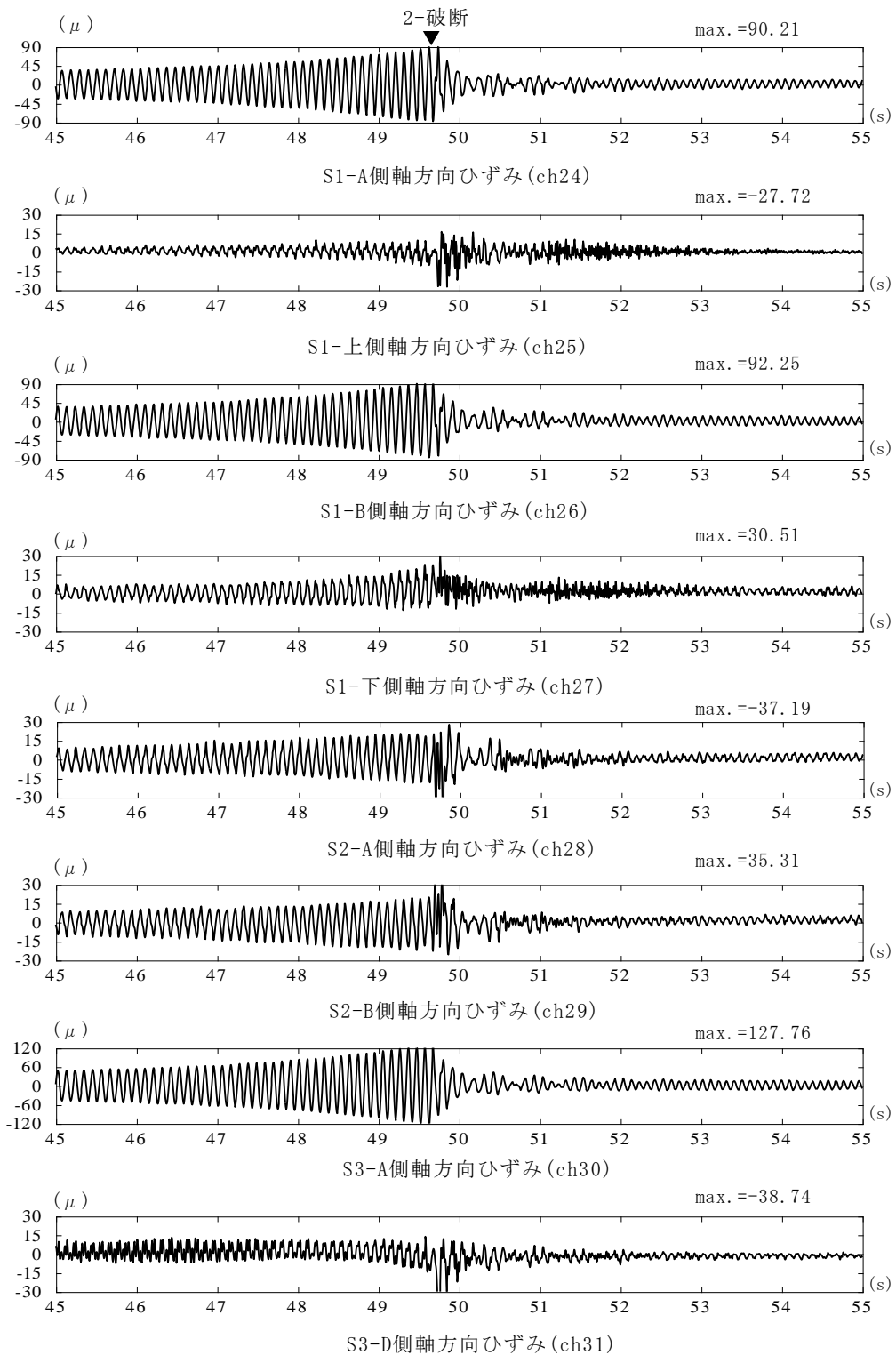


図 3.2-24(3) ひずみ時刻歴、S1～S3,振動数昇順(UP)

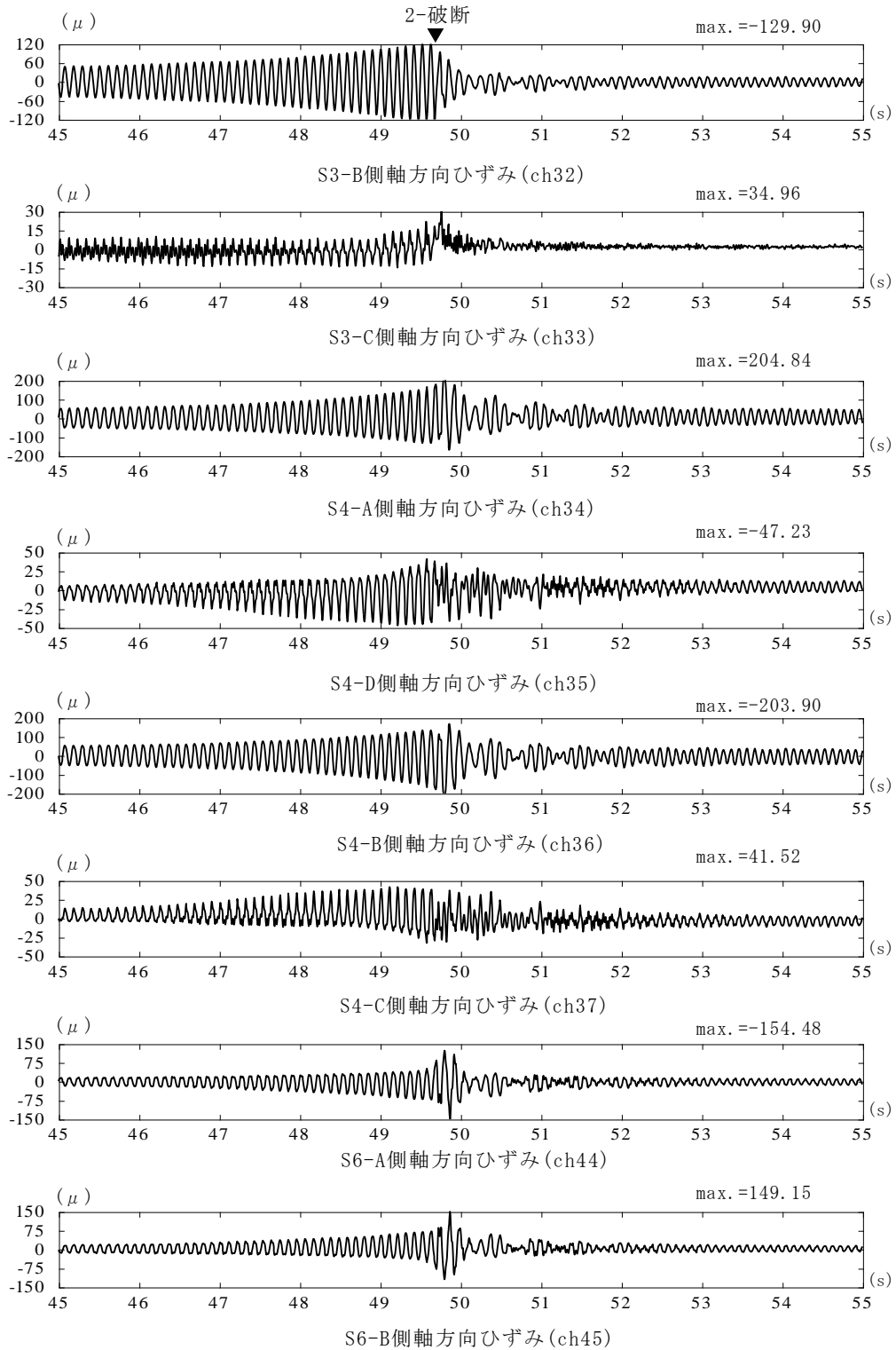


図 3.2-24(4) ひずみ時刻歴、S3・S4・S6振動数昇順(UP)

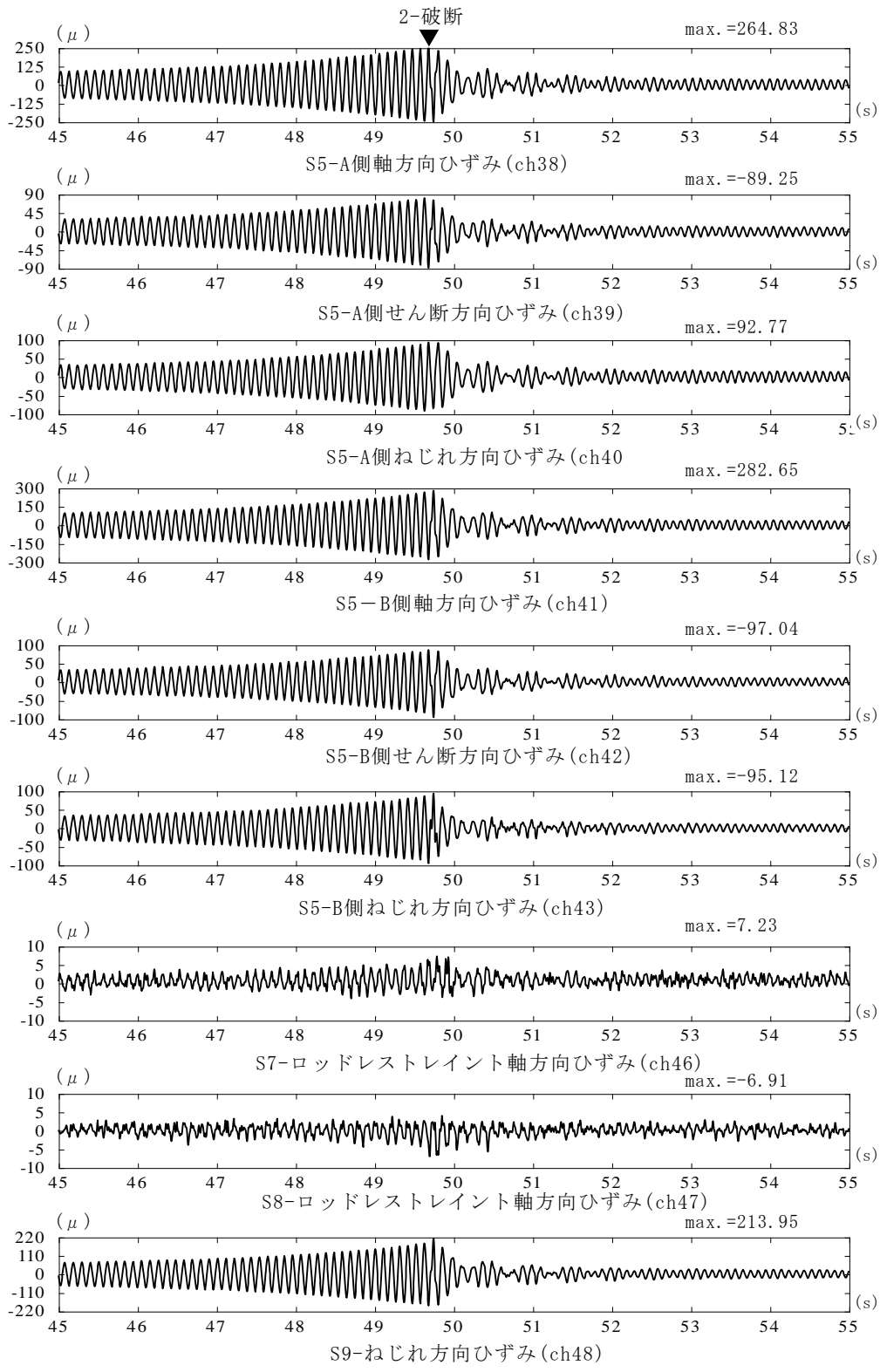


図 3.2-24(5) ひずみ時刻歴、S5・S7～S9,振動数昇順(UP)

3.2.4.2.2 支持構造物1, 2 の破断を対象とした水平加振試験

支持構造物 1 と 2 を設置した配管系試験体の正弦波の掃引試験を実施する。

正弦波の掃引試験は、表 3.2-14 に示すように、支持構造物 1,2 を設置した試験体の 1 次固有振動数である 14.23Hz を対象として 5~16Hz の間隔で行った。最大加速度 0.5m/s^2 増分で、5→16Hz の昇順で試験を行い、 1.5m/s^2 で支持構造物 1 のみが破断に至った。さらに、最大加速度 1.5m/s^2 で 16→5Hz の降順の試験を実施し、支持構造物 1 と 2 が破断に至った。支持構造物 1 と 2 の破断状況は図 3.2-25 に示している。

ここでは、最大加速度 1.5m/s^2 で 5→16Hz の昇順と 16→5Hz の降順の試験結果について示す。支持構造物 1 のみの破断、1 と 2 の破断といった損傷モードの相違について、掃引試験の加振振動数と配管系試験体の固有振動数の変化の観点から考察も加える。

(1) 5→16Hz の正弦波の掃引試験(最大加速度 1.5m/s^2)

図 3.2-26 には、上方横方向配管 A3 位置での X 方向(ch3)の全 90 秒間の加速度記録を示す。72~73 秒付近の共振の影響で振幅が増大し支持構造物 1 は破断に至り、破断後には、試験体の固有振動数が変化するので振幅は急激に低下している。このときの加振振動数は 14Hz 付近と考えられ、支持構造物 2 のみの試験体の 1 次振動数は 10Hz 程度であるので、その後に支持構造物 2 は破断に至らなかったものと考えられる。全区間(90 秒)を通して計測された最大加速度、最大ひずみを表 3.2-15 に示す。

表 3.2-16(1)~(2)には破断時刻を中心とした 10 秒間の加速度と配管ひずみの最大値、破断の影響で波形的に乱れの見られる 2 秒間程度を除いた破断前後に分けて求めた最大値が示されている。図 3.2-27(1)~(5)は破断時刻を中心とした 10 秒間の加速度、配管ひずみの時刻歴である。加速度波形には、破断の影響によるパルスの成分と波形の乱れが見られる。支持構造物 1 近傍の S1 の X 方向振動のひずみは破断後に増大が見られ、支持構造物 2 が設置されていない 3.2.4.2 の結果とは異なる傾向が見られる。縦方向配管の時刻歴にも中心軸のシフトが見られる。最大ひずみが大きいのは破断前後で S5, S4 の X 方向振動である。

(2) 16→5Hz の正弦波の掃引試験(最大加速度 1.5m/s^2)

昇順(5→16Hz)と同様の表、図を示す。A3 X 方向(ch3)の全区間の加速度時刻歴と計測値の最大値の一覧を図 3.2-28、表 3.2-17 に示す。10 秒過ぎで加振振動数と支持構造物 1,2 付きの 1 次振動数(14.3Hz)との共振により支持構造物 1 が破断し、30 秒手前で支持構造物 2 のみの 1 次振動数(10.2Hz)との共振で支持構造物 2 が破断している。その後、45~55 秒程度で支持構造物 1,2 なしの 1 次振動数(8.0Hz)との共振で大きな振幅となっている。計測値の最大値は支持構造物 1,2 破断後の 8Hz 付近の共振によって発生している。最も大きなひずみは S5-A 側、S5-B 側で発生しており、次に大きいのは S4-A 側、S4-B 側であり、これは支持構造物なしの 1 次振動で、大きなひずみの発生する部位と考えられる。

1) 支持構造物1の破断

支持構造物1の破断前後 10 秒間の最大値と時刻歴を表 3.2-18(1)~(2)、図 3.2-29(1)~(5)に示す。

破断前の最も大きなひずみは S5-A 側、S5-B 側であり、次は S4-A 側、S4-B 側となっており、上述の支持構造物なしの場合同一となっている。また、S5,S4 のひずみの大きさの順序は、破断前後において変わらない。加速度波形に大きなパルス波形と乱れが見られ、支持構造物 1 近傍の S1 の X 方向振動のひずみが破断後に増大が見られるのは、(1)の昇方向と同様である。

2) 支持構造物 2 の破断

支持構造物 2 の破断前後 10 秒間の最大値と時刻歴を表 3.2-19(1)~(2)、図 3.2-30(1)~(5)に示す。

破断前の最も大きなひずみは S5-A 側、S5-B 側であり、次は S4-A 側、S4-B 側と順番は、支持構造物 1 の破断前と変わらないが、後方の縦方向配管のひずみ(S5)が表 3.2-18(2)の 2 倍程度になっており大きく振動していることがわかる。破断後は、S5 と S4 の順序は変わらないが、その差は小さくなっている。加速度時刻歴では、支持構造物 2 近傍の A4 の Y 方向振動(ch19)で破断時の乱れが大きくなっている。ひずみの時刻歴では、上方の横方向配管、支持構造物 2 近傍の S3 において、破断に伴い中心軸がシフトする傾向が見られる。

また、図 3.2-30(5)のロッドレストレイントの S7,S8(軸方向ひずみ)の波形において、破断前後の振幅を他ひずみ(例えば S5-A,S5-B の軸方向ひずみ)と比較した場合、支持構造物 2 の破断後にも比較的大きな振幅がみられ、支持構造物 2 が負担していた荷重が再配分されている様子を見ることができる。

表 3.2-14 正弦波の加振結果の概要

	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	5→16Hz, 90秒間	2016-2-9-53	破断・亀裂無し
	1.0	5→16Hz, 90秒間	2016-2-9-54	支持構造物1のみ亀裂(上部_右側)
	1.5	5→16Hz, 90秒間	○2016-2-9-55	支持構造物1のみ破断 72.5s付近で支持構造物1破断
D	1.5	16→5Hz, 69秒間 (緊急停止を行った為)	○2016-2-9-56	支持構造物1・2共に破断 10.8s付近で支持構造物1破断 29.2付近で支持構造物2破断 ※2の破断と同時に、1の破片飛散 30s付近から、2の破断部が噛み合い 34s付近で2の破片が飛散

注)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:2016-2-9-54(支持構造物 1)



試験番号:2016-2-9-55(支持構造物 1)



試験番号:2016-2-9-56(支持構造物 1)



試験番号:2016-2-9-56(支持構造物 2)

図 3.2-25 支持構造物の破断・亀裂状況

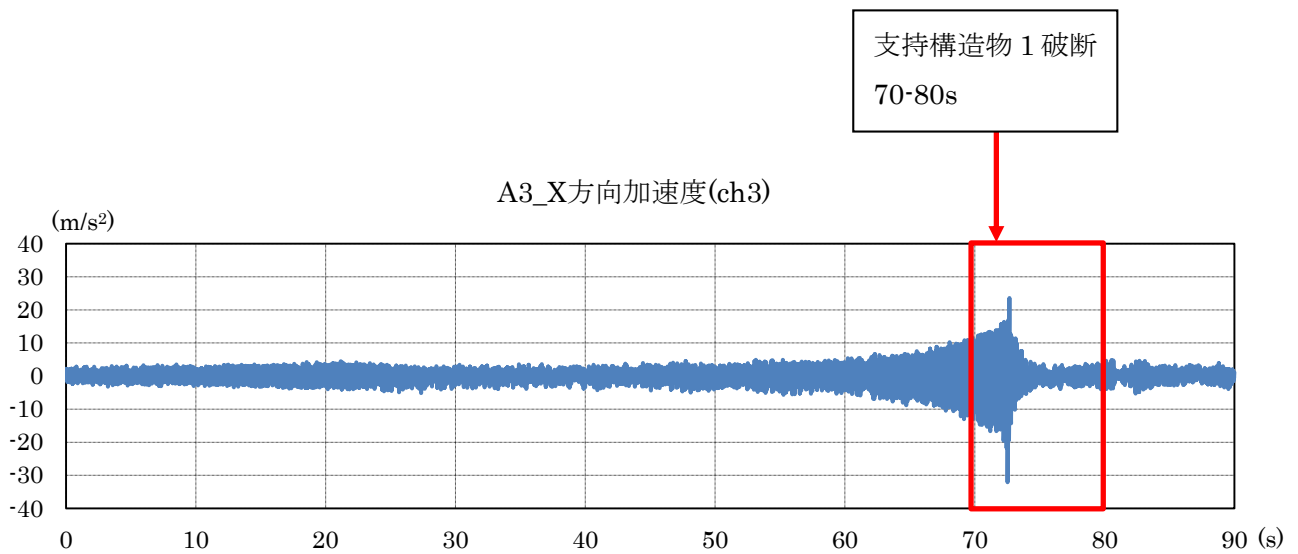


図 3.2-26 試験番号 2016-2-9-55_全区間(0-90s)の加速度時刻歴

表 3.2-15 全区間(0-90s)の最大加速度の応答倍率, 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz		
加速度計位置	最大加速度(m/s ²)	応答倍率
	全区間 0~90s	全区間 0~90s
A1_X方向加速度(ch1)	22.03	10.11
A2_X方向加速度(ch2)	28.07	12.88
A2_Y方向加速度(ch17)	18.09	-
A2_Z方向加速度(ch20)	10.90	-
A3_X方向加速度(ch3)	32.70	15.00
A3_Y方向加速度(ch18)	12.04	-
A4_X方向加速度(ch4)	18.23	8.36
A4_Y方向加速度(ch19)	14.47	-
A4_Z方向加速度(ch21)	16.36	-
A5_X方向加速度(ch5)	8.18	3.75
A6_X方向加速度(ch6)	22.01	10.10
A7_X方向加速度(ch7)	8.46	3.88
A8_X方向加速度(ch8)	4.65	2.13
A8_Z方向加速度(ch22)	7.04	-
A9_X方向加速度(ch9)	4.06	1.86
A9_Z方向加速度(ch23)	9.43	-
A10_X方向加速度(ch10)	11.38	5.22
A12_X方向加速度(ch12)	2.18	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz	
ひずみ位置	最大ひずみ(μ)
	全区間 0~90s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	68.17
S1-上側方向ひずみ(ch25)	15.41
S1-B側方向ひずみ(ch26)	70.56
S1-下側方向ひずみ(ch27)	21.19
S2-A側方向ひずみ(ch28)	21.83
S2-B側方向ひずみ(ch29)	22.43
S3-A側方向ひずみ(ch30)	86.79
S3-D側方向ひずみ(ch31)	13.32
S3-B側方向ひずみ(ch32)	87.47
S3-C側方向ひずみ(ch33)	8.84
S4-A側方向ひずみ(ch34)	105.25
S4-D側方向ひずみ(ch35)	22.48
S4-B側方向ひずみ(ch36)	106.51
S4-C側方向ひずみ(ch37)	17.28
S6-A側方向ひずみ(ch44)	37.13
S6-B側方向ひずみ(ch45)	33.24
S5-A側方向ひずみ(ch38)	171.91
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	55.93
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	58.51
S5-B側方向ひずみ(ch41)	185.69
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	60.40
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	67.09
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	3.86
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	4.07
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	125.91

表 3.2-16(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz						
加速度計	最大加速度(m/s ²)			応答倍率		
	全区間 70~80s	破断前 70~72s	破断後 74~80s	全区間 70~80s	破断前 70~72s	破断後 74~80s
A1_X方向加速度(ch1)	22.03	15.54	4.29	10.11	9.84	2.42
A2_X方向加速度(ch2)	28.07	16.43	5.26	12.88	10.40	2.97
A2_Y方向加速度(ch17)	18.09	1.94	2.90	-	-	-
A2_Z方向加速度(ch20)	10.90	1.91	1.90	-	-	-
A3_X方向加速度(ch3)	32.07	16.66	4.39	14.71	10.54	2.48
A3_Y方向加速度(ch18)	12.04	2.80	0.95	-	-	-
A4_X方向加速度(ch4)	18.23	12.49	2.96	8.36	7.91	1.67
A4_Y方向加速度(ch19)	14.47	4.95	1.43	-	-	-
A4_Z方向加速度(ch21)	16.36	2.48	1.78	-	-	-
A5_X方向加速度(ch5)	8.18	6.38	5.07	3.75	4.04	2.86
A6_X方向加速度(ch6)	22.01	8.39	2.99	10.10	5.31	1.69
A7_X方向加速度(ch7)	8.46	5.87	7.23	3.88	3.72	4.08
A8_X方向加速度(ch8)	4.65	1.79	2.90	2.13	1.13	1.64
A8_Z方向加速度(ch22)	7.04	4.01	5.12	-	-	-
A9_X方向加速度(ch9)	4.06	1.85	3.39	1.86	1.17	1.92
A9_Z方向加速度(ch23)	9.43	4.82	8.69	-	-	-
A10_X方向加速度(ch10)	11.38	5.64	6.24	5.22	3.57	3.53
A12_X方向加速度(ch12)	2.18	1.58	1.77	1.00	1.00	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-16(2) 最大ひずみの一覧(振動数昇順(UP))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 5→16Hz			
ひずみ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 70~80s	破断前 70~72s	破断後 74~80s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	68.17	12.19	30.43
S1-上側方向ひずみ(ch25)	15.41	10.16	5.19
S1-B側方向ひずみ(ch26)	70.56	9.61	31.83
S1-下側方向ひずみ(ch27)	21.19	9.66	11.94
S2-A側方向ひずみ(ch28)	21.83	6.13	7.36
S2-B側方向ひずみ(ch29)	22.43	7.28	6.16
S3-A側方向ひずみ(ch30)	86.79	58.50	30.70
S3-D側方向ひずみ(ch31)	13.32	10.16	5.03
S3-B側方向ひずみ(ch32)	87.47	58.23	31.47
S3-C側方向ひずみ(ch33)	8.84	6.59	3.86
S4-A側方向ひずみ(ch34)	105.25	71.58	39.88
S4-D側方向ひずみ(ch35)	22.48	13.19	6.50
S4-B側方向ひずみ(ch36)	106.51	69.41	40.98
S4-C側方向ひずみ(ch37)	17.28	11.48	5.88
S6-A側方向ひずみ(ch44)	37.13	22.54	14.95
S6-B側方向ひずみ(ch45)	33.24	20.08	14.04
S5-A側方向ひずみ(ch38)	171.91	94.25	61.04
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	55.93	31.81	19.26
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	58.51	33.91	21.56
S5-B側方向ひずみ(ch41)	185.69	101.23	66.73
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	60.40	31.61	20.51
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	67.09	33.83	22.19
S7-ロッドストレイント軸方向ひずみ(ch46)	3.86	2.67	2.68
S8-ロッドストレイント軸方向ひずみ(ch47)	4.07	3.61	3.33
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	125.91	68.85	44.36

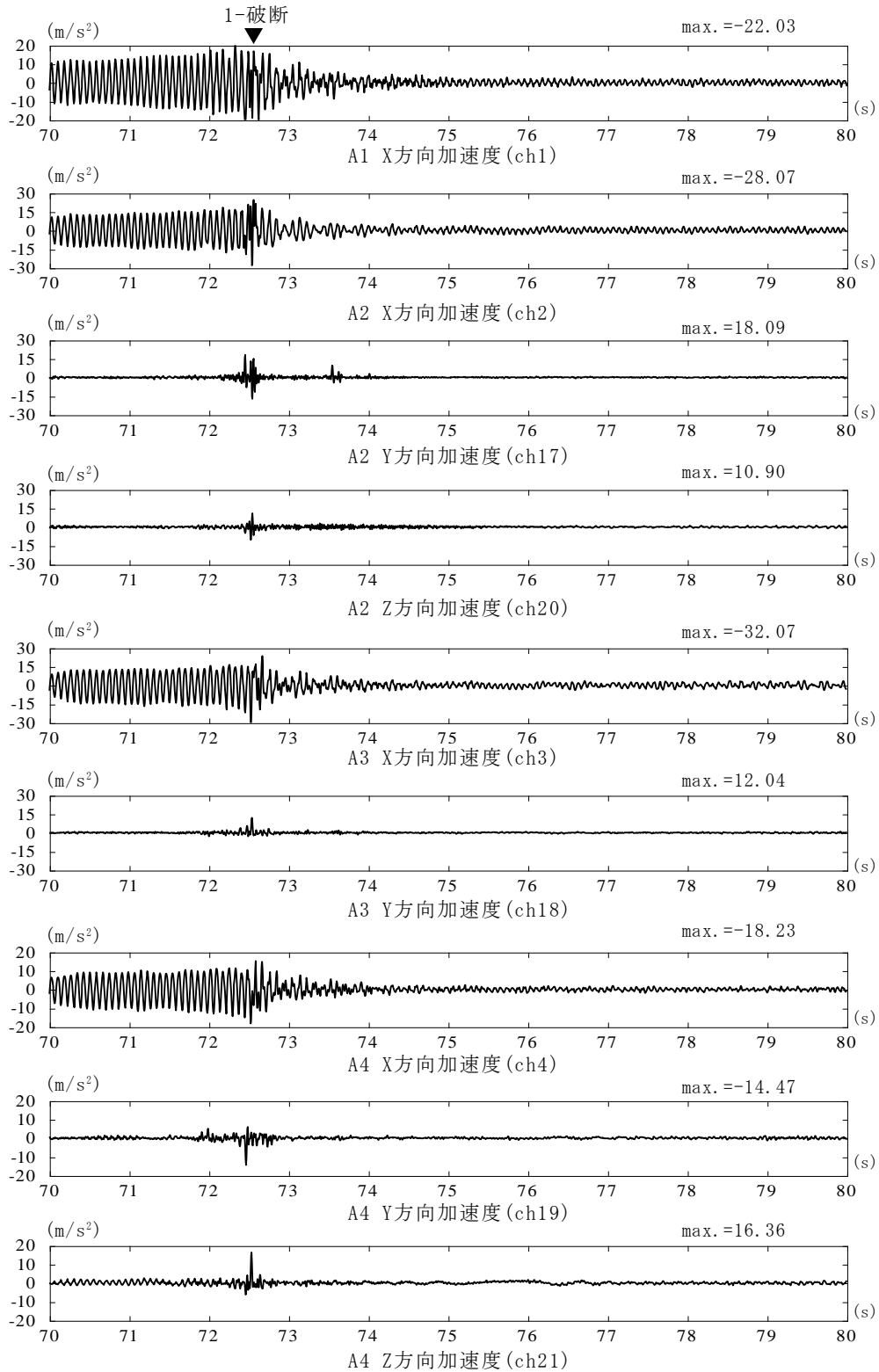


图 3.2-27(1) 加速度時刻歴、A1~A4,振動数昇順(UP)

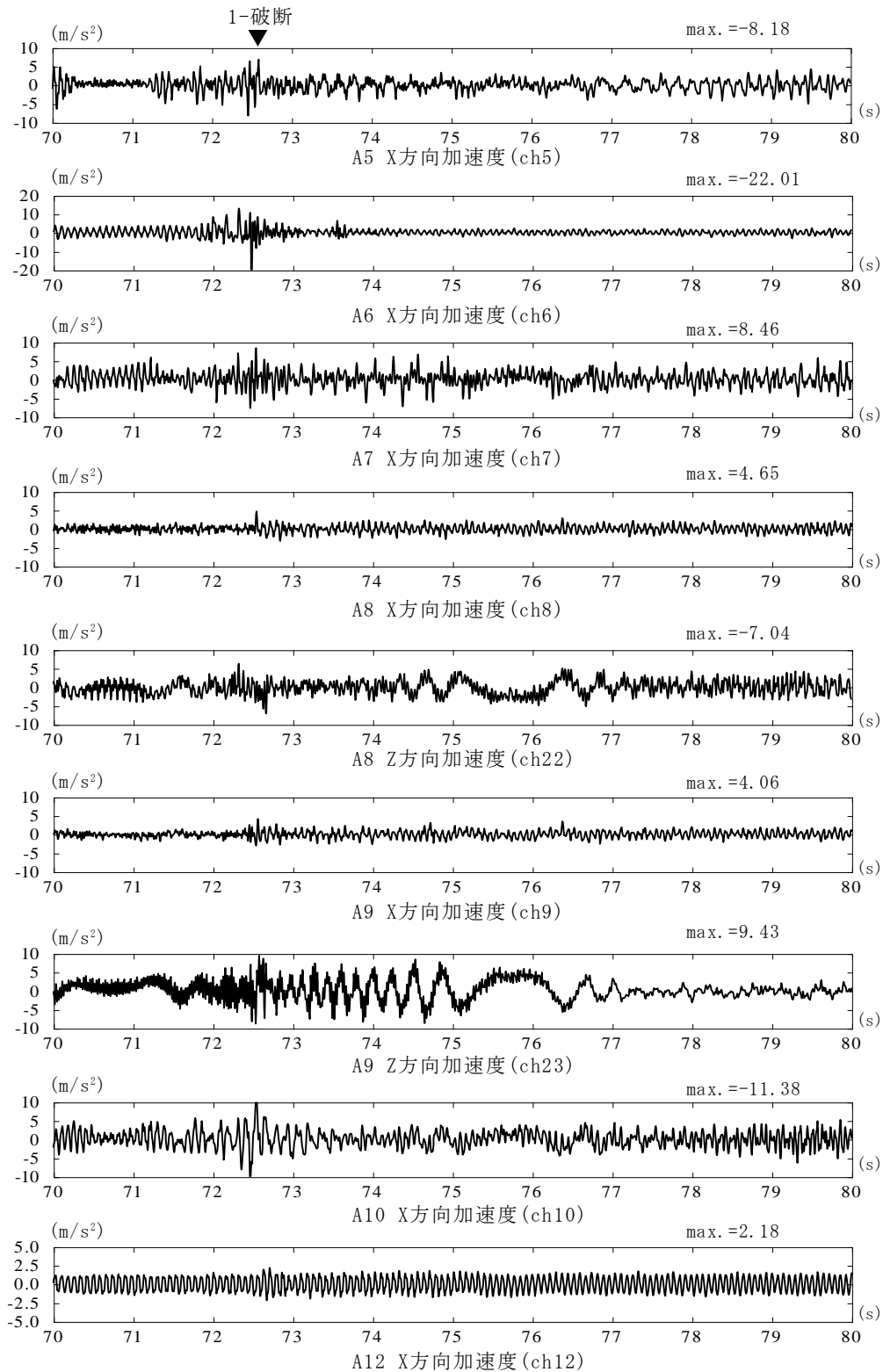


图 3.2-27(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12,振動数昇順(UP)

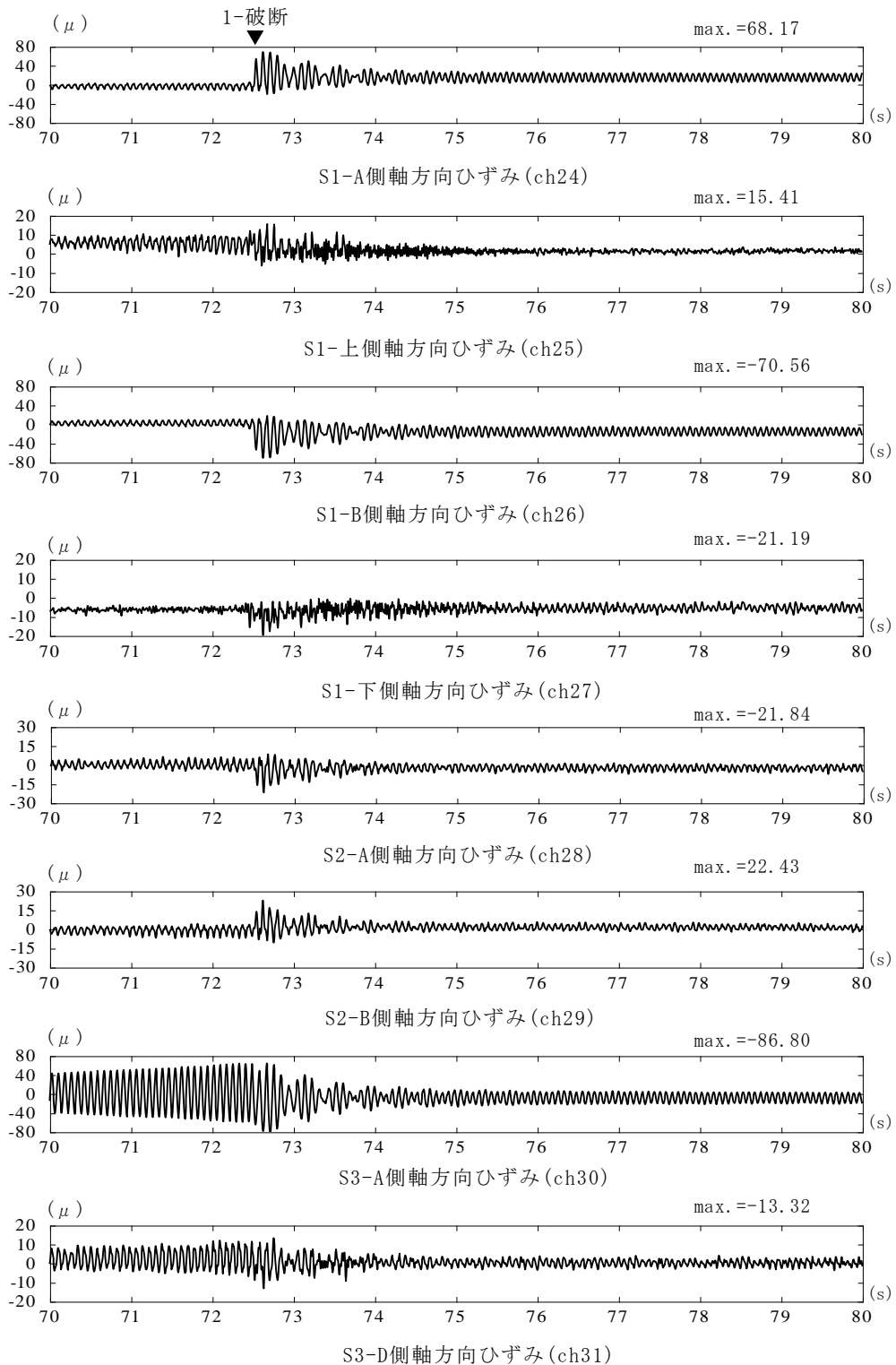


図 3.2-27(3) ひずみ時刻歴、S1～S3,振動数昇順(UP)

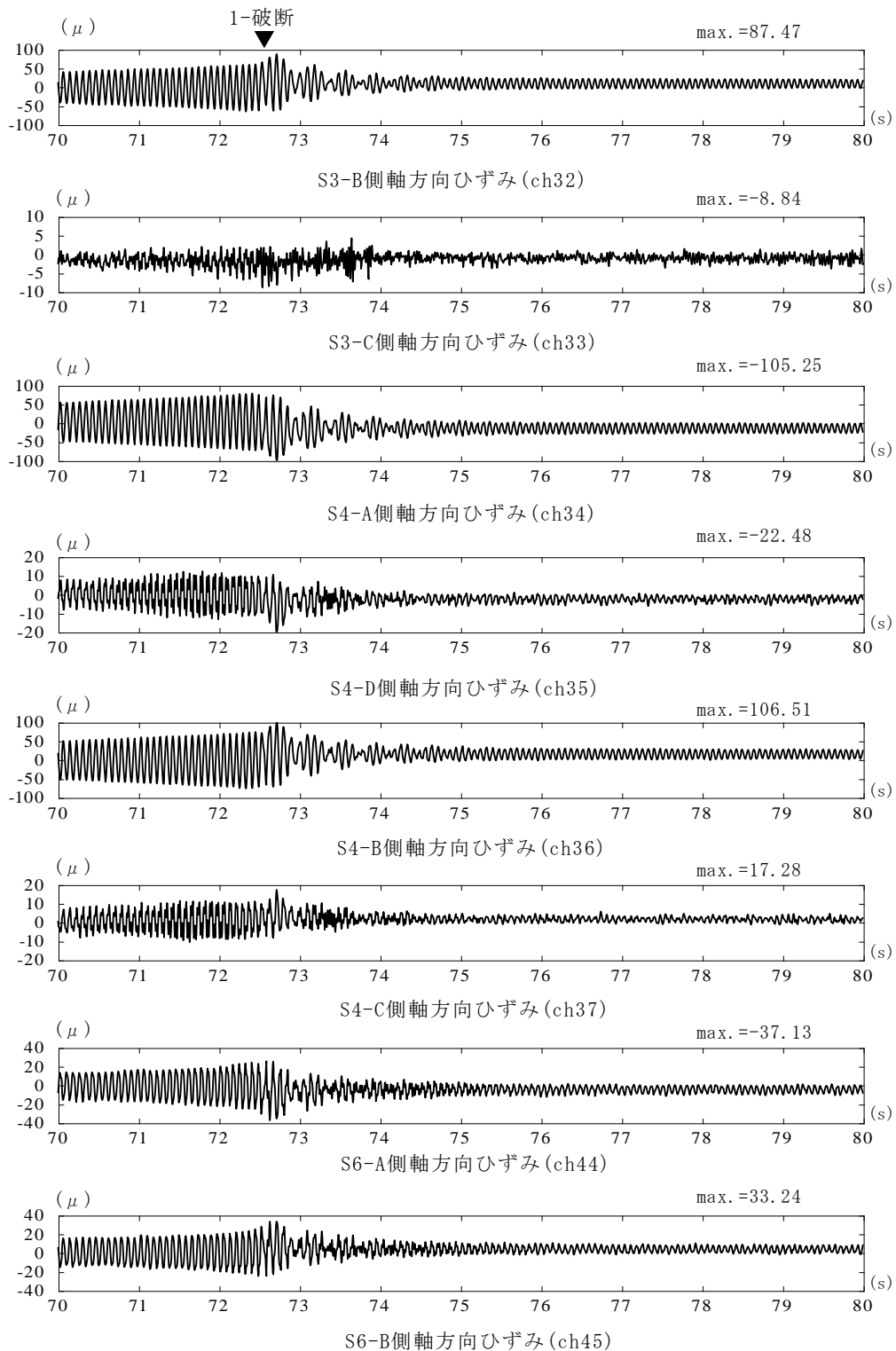


図 3.2-27(4) ひずみ時刻歴、S3・S4・S6,振動数昇順(UP)

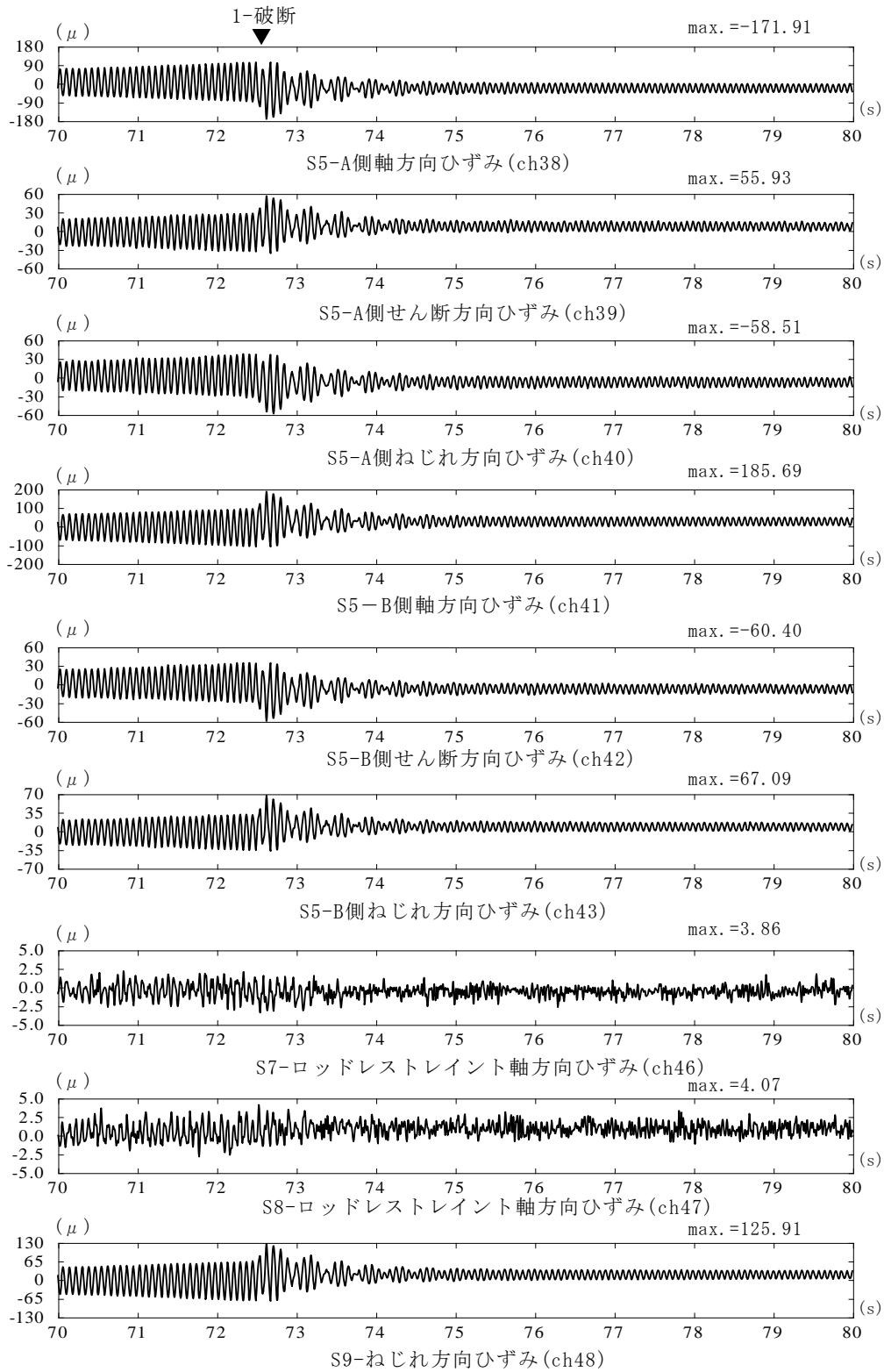


図 3.2-27(5) ひずみ時刻歴、S5・S7～S9,振動数昇順(UP)

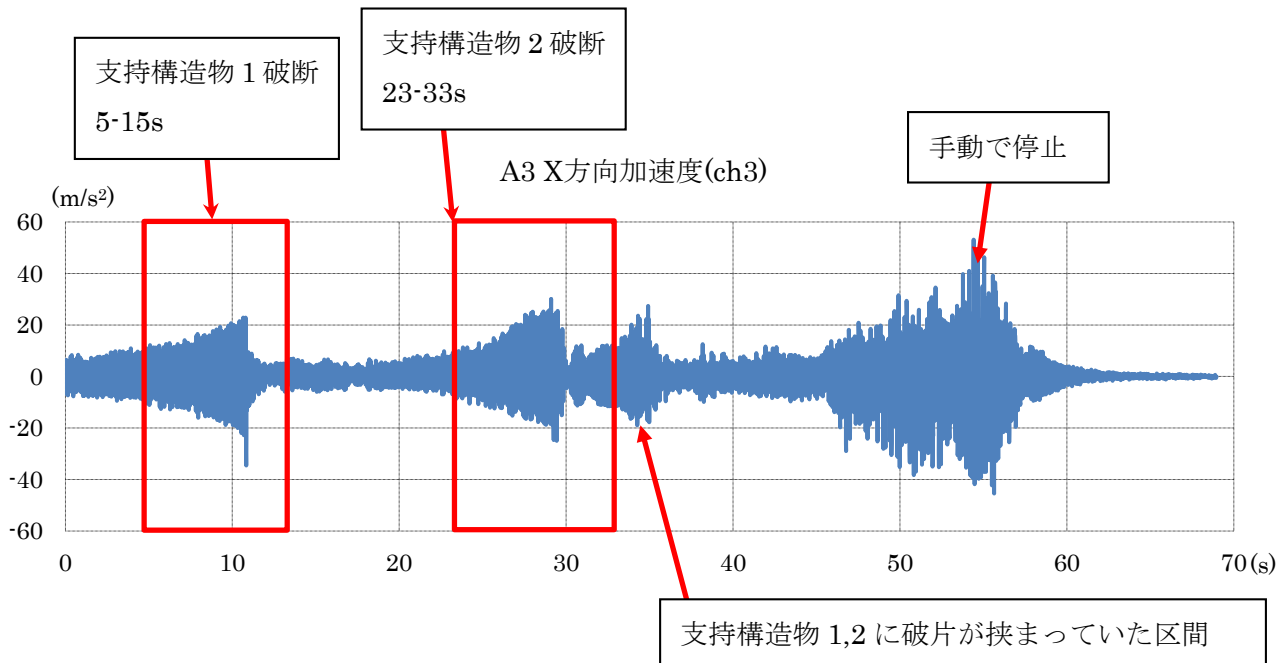


図 3.2-28 試験番号 2016-2-9-56_全区間(0-69s)の加速度時刻歴

表 3.2-17 全区間(0-69s)の最大加速度の応答倍率, 最大ひずみの一覧(振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
	全区間 0~69s	全区間 0~69s
A1_X方向加速度(ch1)	52.02	24.89
A2_X方向加速度(ch2)	51.00	24.40
A2_Y方向加速度(ch17)	36.84	-
A2_Z方向加速度(ch20)	15.56	-
A3_X方向加速度(ch3)	53.11	25.41
A3_Y方向加速度(ch18)	27.74	-
A4_X方向加速度(ch4)	47.22	22.59
A4_Y方向加速度(ch19)	30.20	-
A4_Z方向加速度(ch21)	16.29	-
A5_X方向加速度(ch5)	44.90	21.48
A6_X方向加速度(ch6)	49.16	23.52
A7_X方向加速度(ch7)	40.28	19.27
A8_X方向加速度(ch8)	11.72	5.61
A8_Z方向加速度(ch22)	37.29	-
A9_X方向加速度(ch9)	12.27	5.87
A9_Z方向加速度(ch23)	37.82	-
A10_X方向加速度(ch10)	34.48	16.50
A12_X方向加速度(ch12)	2.09	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz	
ひずみ位置	最大ひずみ (μ)
	全区間 0~69s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	104.42
S1-上側方向ひずみ(ch25)	38.13
S1-B側方向ひずみ(ch26)	107.30
S1-下側方向ひずみ(ch27)	33.35
S2-A側方向ひずみ(ch28)	38.01
S2-B側方向ひずみ(ch29)	38.11
S3-A側方向ひずみ(ch30)	125.99
S3-D側方向ひずみ(ch31)	59.92
S3-B側方向ひずみ(ch32)	127.37
S3-C側方向ひずみ(ch33)	52.51
S4-A側方向ひずみ(ch34)	289.95
S4-D側方向ひずみ(ch35)	92.56
S4-B側方向ひずみ(ch36)	292.37
S4-C側方向ひずみ(ch37)	80.40
S6-A側方向ひずみ(ch44)	171.93
S6-B側方向ひずみ(ch45)	164.00
S5-A側方向ひずみ(ch38)	343.60
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	111.57
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	133.60
S5-B側方向ひずみ(ch41)	371.19
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	118.11
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	113.12
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	12.49
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	11.15
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	256.32

表 3.2-18(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz						
加速度計	最大加速度(m/s ²)			応答倍率		
	全区間 5~15s	破断前 5~10.5s	破断後 12~15s	全区間 5~15s	破断前 5~10.5s	破断後 12~15s
A1_X方向加速度(ch1)	27.18	20.15	6.04	14.85	11.07	3.30
A2_X方向加速度(ch2)	24.00	21.48	4.78	13.11	11.80	2.61
A2_Y方向加速度(ch17)	29.19	2.51	3.78	-	-	-
A2_Z方向加速度(ch20)	9.77	3.19	2.23	-	-	-
A3_X方向加速度(ch3)	34.53	21.50	6.94	18.87	11.81	3.79
A3_Y方向加速度(ch18)	11.49	2.00	1.76	-	-	-
A4_X方向加速度(ch4)	15.78	15.78	5.44	8.62	8.67	2.97
A4_Y方向加速度(ch19)	19.30	3.35	2.01	-	-	-
A4_Z方向加速度(ch21)	10.36	2.85	1.89	-	-	-
A5_X方向加速度(ch5)	11.46	5.28	4.37	6.26	2.90	2.39
A6_X方向加速度(ch6)	38.50	7.88	3.80	21.04	4.33	2.08
A7_X方向加速度(ch7)	9.51	6.24	7.01	5.20	3.43	3.83
A8_X方向加速度(ch8)	9.54	3.43	2.89	5.21	1.88	1.58
A8_Z方向加速度(ch22)	9.45	4.81	5.06	-	-	-
A9_X方向加速度(ch9)	6.86	3.34	2.90	3.75	1.84	1.58
A9_Z方向加速度(ch23)	11.24	3.77	9.31	-	-	-
A10_X方向加速度(ch10)	21.29	6.71	4.76	11.63	3.69	2.60
A12_X方向加速度(ch12)	1.83	1.82	1.83	1.00	1.00	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-18(2) 最大ひずみの一覧(振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz			
ひずみ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 5~15s	破断前 5~10.5s	破断後 12~15s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	51.75	16.64	27.21
S1-上側方向ひずみ(ch25)	26.92	21.59	9.60
S1-B側方向ひずみ(ch26)	51.99	14.86	26.37
S1-下側方向ひずみ(ch27)	19.44	16.35	7.55
S2-A側方向ひずみ(ch28)	13.25	9.11	6.15
S2-B側方向ひずみ(ch29)	17.08	7.29	9.43
S3-A側方向ひずみ(ch30)	73.92	73.01	25.76
S3-D側方向ひずみ(ch31)	14.93	14.50	6.79
S3-B側方向ひずみ(ch32)	71.42	70.31	29.12
S3-C側方向ひずみ(ch33)	7.89	6.59	3.71
S4-A側方向ひずみ(ch34)	94.55	90.25	32.23
S4-D側方向ひずみ(ch35)	13.42	13.42	4.93
S4-B側方向ひずみ(ch36)	92.09	88.78	32.82
S4-C側方向ひずみ(ch37)	13.81	12.03	7.02
S6-A側方向ひずみ(ch44)	28.81	27.20	13.12
S6-B側方向ひずみ(ch45)	28.81	25.90	12.09
S5-A側方向ひずみ(ch38)	123.05	110.26	51.96
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	41.91	35.55	19.17
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	43.35	41.70	18.74
S5-B側方向ひずみ(ch41)	134.50	114.05	57.19
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	41.90	36.52	17.54
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	48.98	36.40	21.54
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	4.89	4.89	3.13
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	3.53	3.53	2.85
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	91.16	80.32	38.80

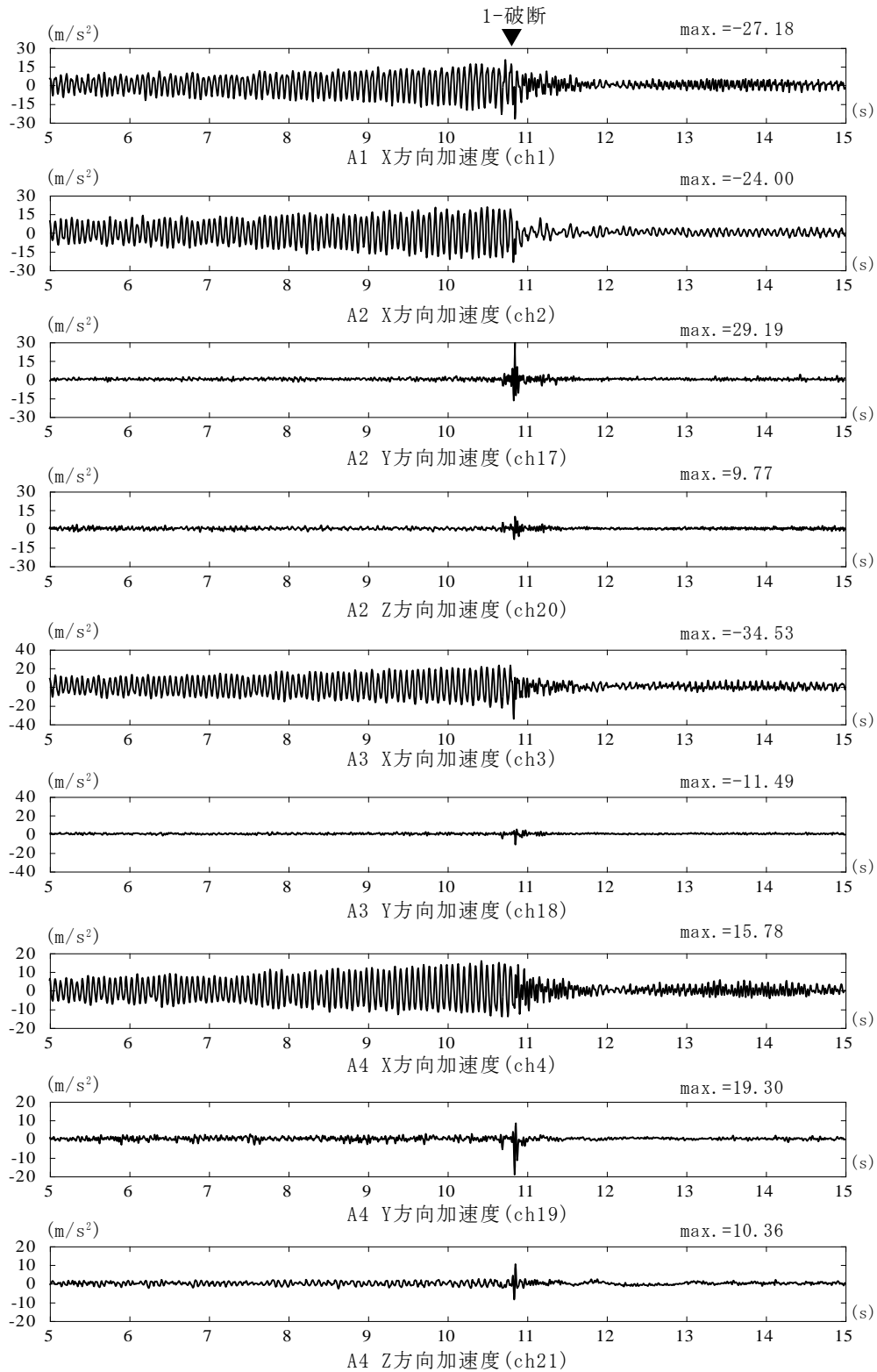


图 3.2-29(1) 加速度時刻歴、A1~A4,振動数降順(DOWN)

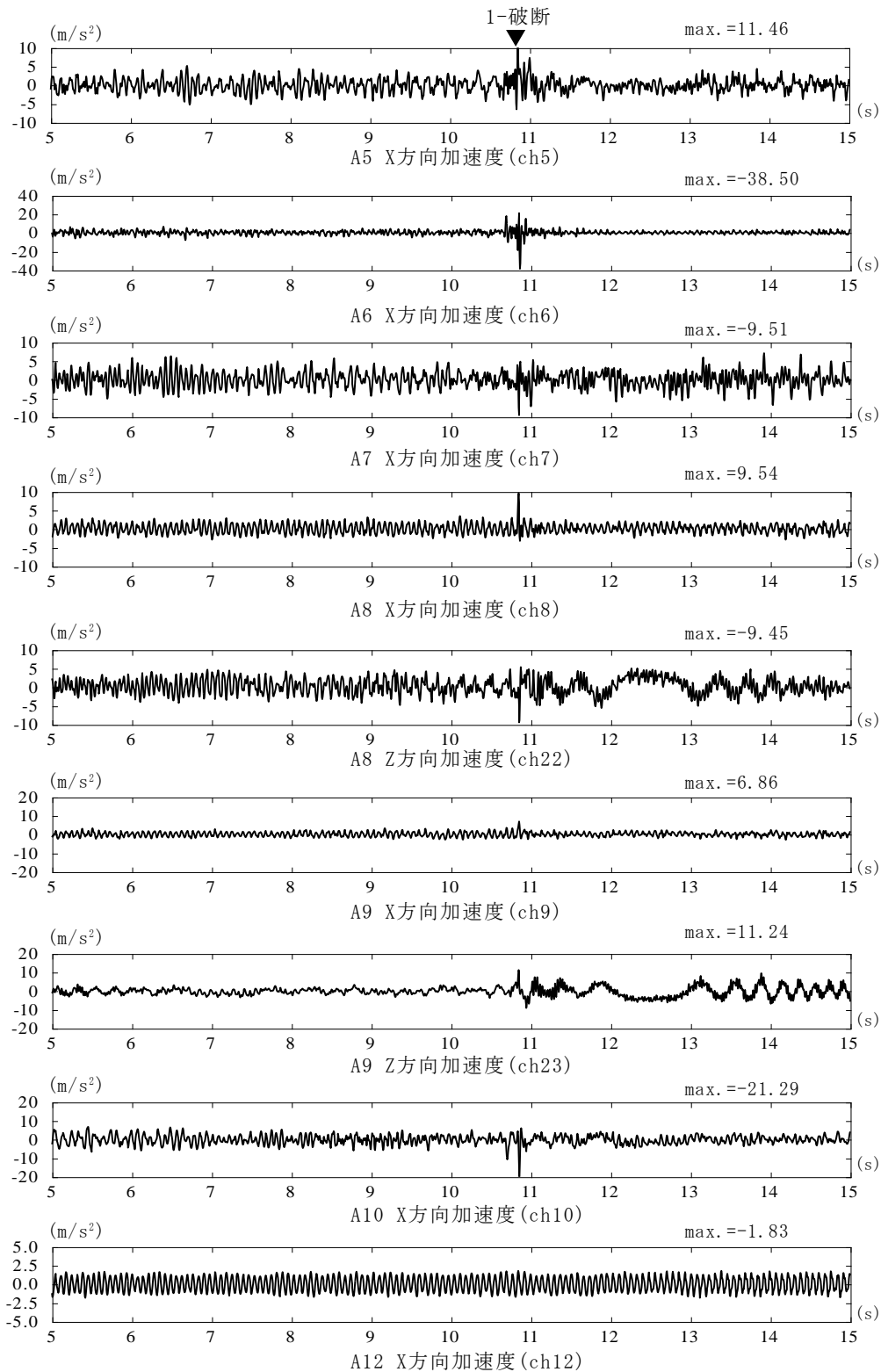


图 3.2-29(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12, 振動数降順(DOWN)

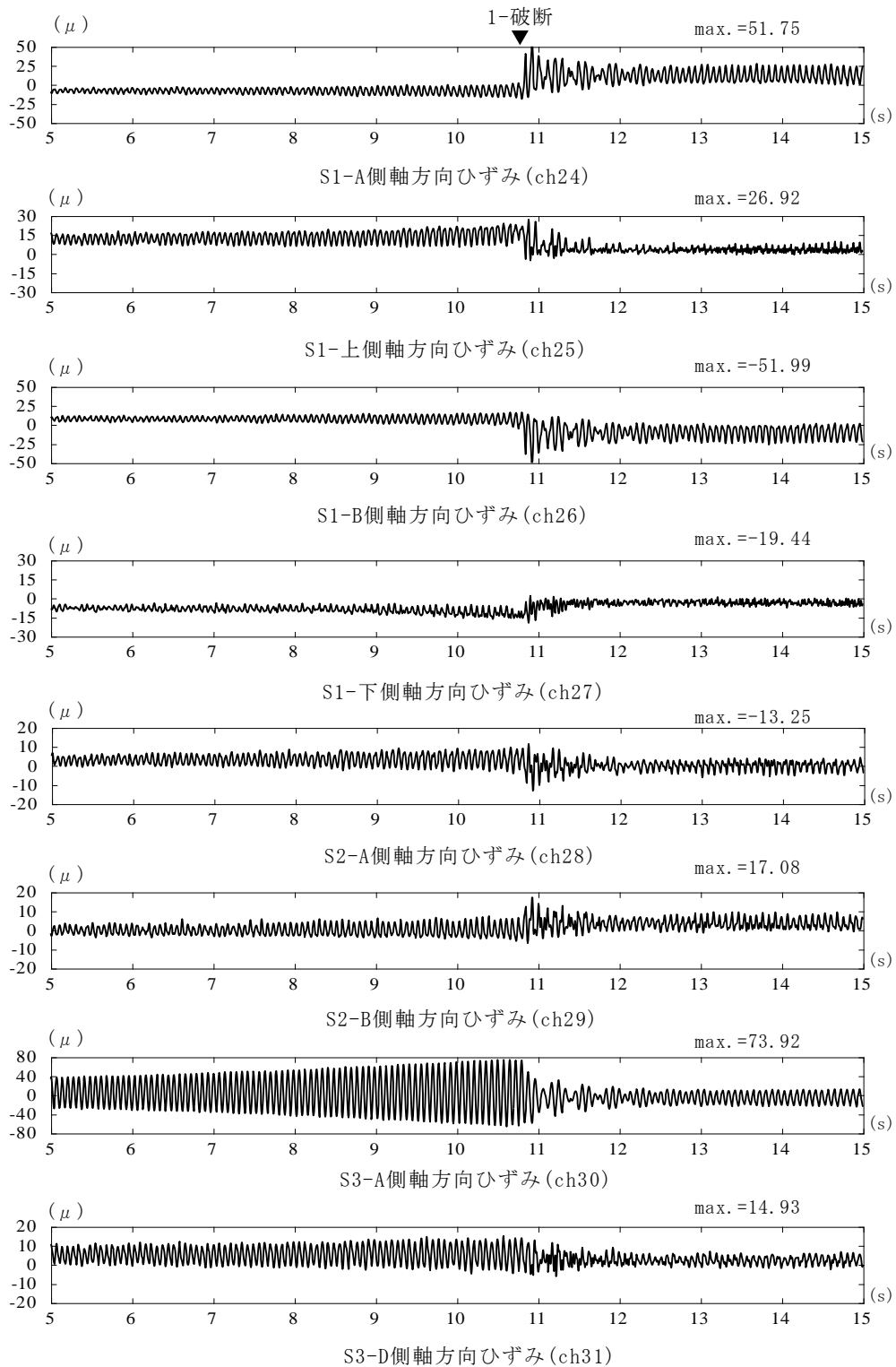


図 3.2-29(3) ひずみ時刻歴、S1~S3振動数降順(DOWN)

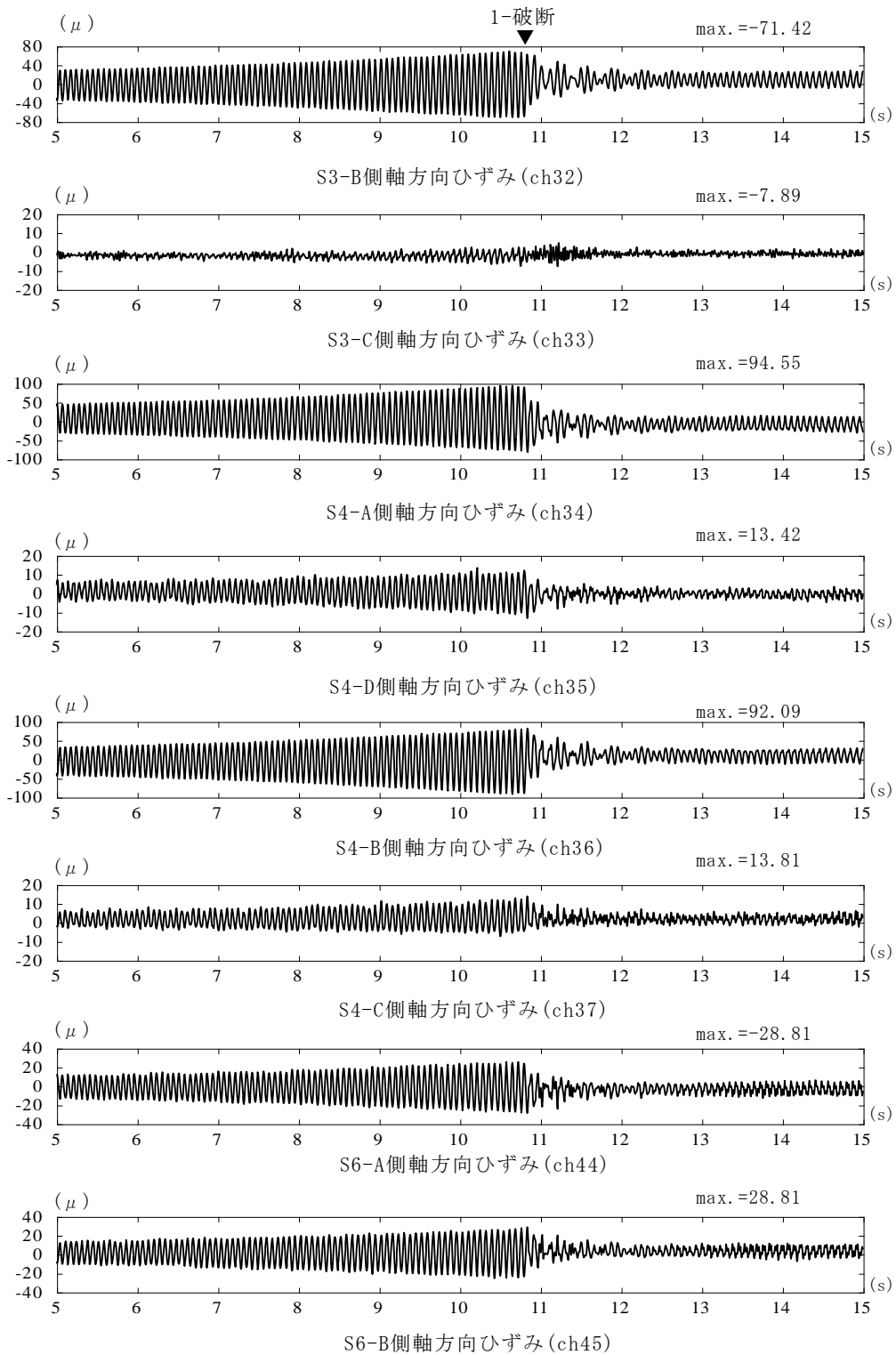


図 3.2-29(4) ひずみ時刻歴、S3・S4・S6振動数降順(DOWN)

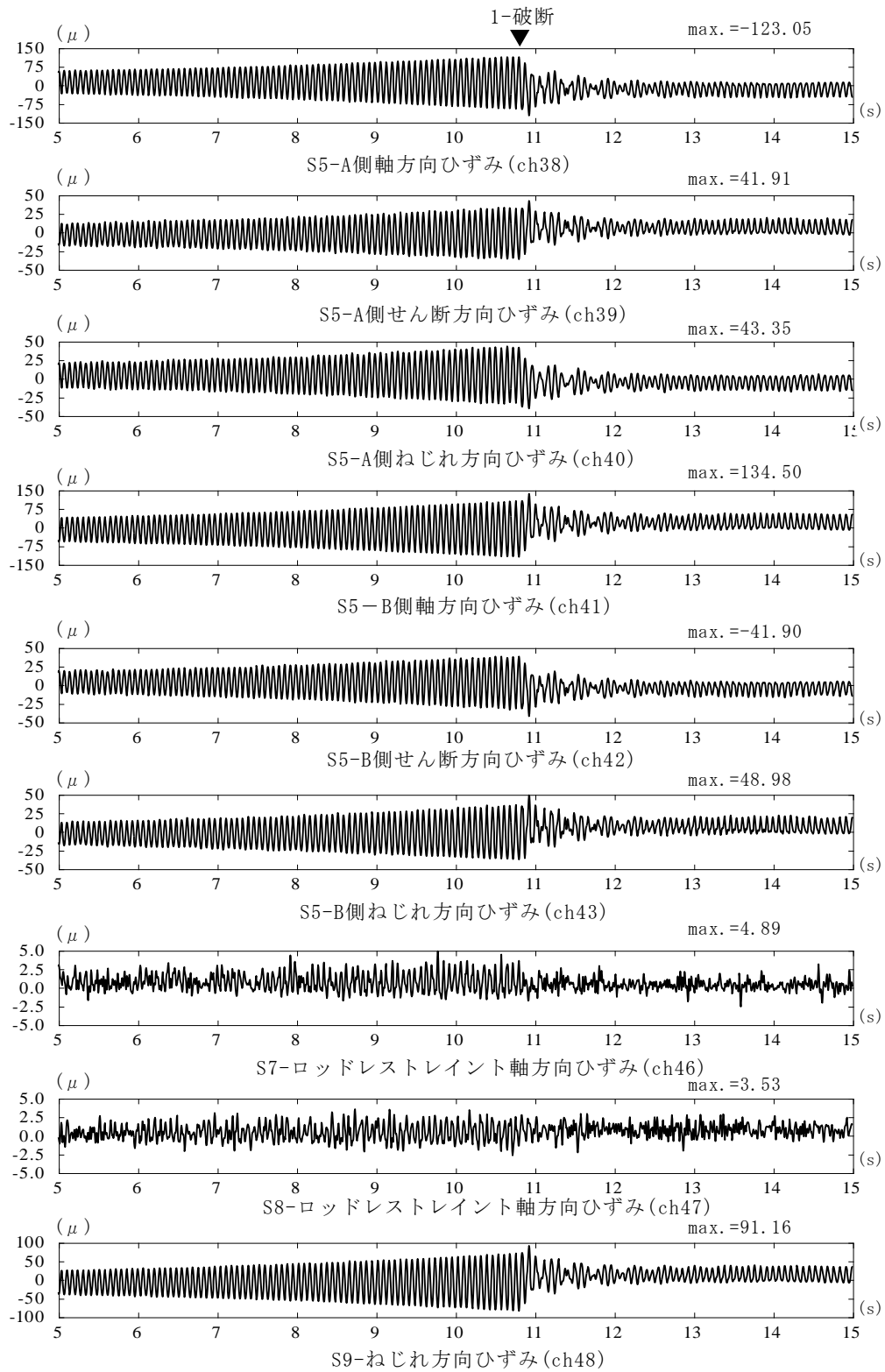


図 3.2-29(5) ひずみ時刻歴、S5・S7～S9,振動数降順(DOWN)

表 3.2-19(1) 最大加速度の応答倍率の一覧(振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz						
加速度計	最大加速度(m/s ²)			応答倍率		
	全区間 23~33s	破断前 23~29s	破断後 32~33s	全区間 23~33s	破断前 23~29s	破断後 32~33s
A1_X方向加速度(ch1)	35.05	25.02	10.11	18.26	14.46	5.84
A2_X方向加速度(ch2)	29.47	28.15	12.38	15.35	16.27	7.16
A2_Y方向加速度(ch17)	36.83	8.87	1.69	-	-	-
A2_Z方向加速度(ch20)	10.36	5.30	3.59	-	-	-
A3_X方向加速度(ch3)	30.07	25.28	12.08	15.66	14.61	6.98
A3_Y方向加速度(ch18)	10.03	5.88	2.10	-	-	-
A4_X方向加速度(ch4)	21.79	21.79	8.98	11.35	12.60	5.19
A4_Y方向加速度(ch19)	17.80	7.43	3.10	-	-	-
A4_Z方向加速度(ch21)	9.86	6.88	2.68	-	-	-
A5_X方向加速度(ch5)	16.94	9.98	3.20	8.82	5.77	1.85
A6_X方向加速度(ch6)	49.00	10.72	2.13	25.52	6.20	1.23
A7_X方向加速度(ch7)	16.14	8.49	4.76	8.41	4.91	2.75
A8_X方向加速度(ch8)	6.32	3.94	2.22	3.29	2.28	1.28
A8_Z方向加速度(ch22)	18.85	11.79	5.57	-	-	-
A9_X方向加速度(ch9)	7.08	4.18	2.78	3.69	2.42	1.61
A9_Z方向加速度(ch23)	18.83	9.19	8.06	-	-	-
A10_X方向加速度(ch10)	22.50	9.01	4.32	11.72	5.21	2.50
A12_X方向加速度(ch12)	1.92	1.73	1.73	1.00	1.00	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-19(2) 最大ひずみの一覧(振動数降順(DOWN))

振動台の最大加速度: 1.5m/s ² , 振動数範囲: 16→5Hz			
ひずみ	最大ひずみ(μ)		
	全区間 23~33s	破断前 23~29s	破断後 32~33s
S1-A側方向ひずみ(ch24)	94.75	90.85	57.31
S1-上側方向ひずみ(ch25)	37.81	35.73	9.79
S1-B側方向ひずみ(ch26)	93.91	93.09	56.94
S1-下側方向ひずみ(ch27)	28.05	24.43	14.09
S2-A側方向ひずみ(ch28)	22.33	20.58	11.03
S2-B側方向ひずみ(ch29)	26.44	25.72	16.56
S3-A側方向ひずみ(ch30)	126.00	122.83	72.52
S3-D側方向ひずみ(ch31)	22.51	14.57	9.75
S3-B側方向ひずみ(ch32)	127.37	125.51	76.53
S3-C側方向ひずみ(ch33)	19.10	15.76	9.67
S4-A側方向ひずみ(ch34)	143.84	136.62	89.98
S4-D側方向ひずみ(ch35)	47.11	46.28	21.00
S4-B側方向ひずみ(ch36)	142.97	138.80	89.74
S4-C側方向ひずみ(ch37)	42.93	41.83	18.74
S6-A側方向ひずみ(ch44)	74.90	73.91	46.11
S6-B側方向ひずみ(ch45)	72.39	69.62	42.20
S5-A側方向ひずみ(ch38)	247.00	242.60	135.70
S5-A側せん断方向ひずみ(ch39)	82.27	81.44	46.47
S5-A側ねじれ方向ひずみ(ch40)	89.68	86.97	50.15
S5-B側方向ひずみ(ch41)	263.85	259.81	148.01
S5-B側せん断方向ひずみ(ch42)	82.29	81.00	45.89
S5-B側ねじれ方向ひずみ(ch43)	89.54	87.53	49.13
S7-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch46)	6.10	5.31	3.35
S8-ロッドレストレイント軸方向ひずみ(ch47)	5.28	4.63	5.28
S9-ねじれ方向ひずみ(ch48)	179.53	176.32	102.12

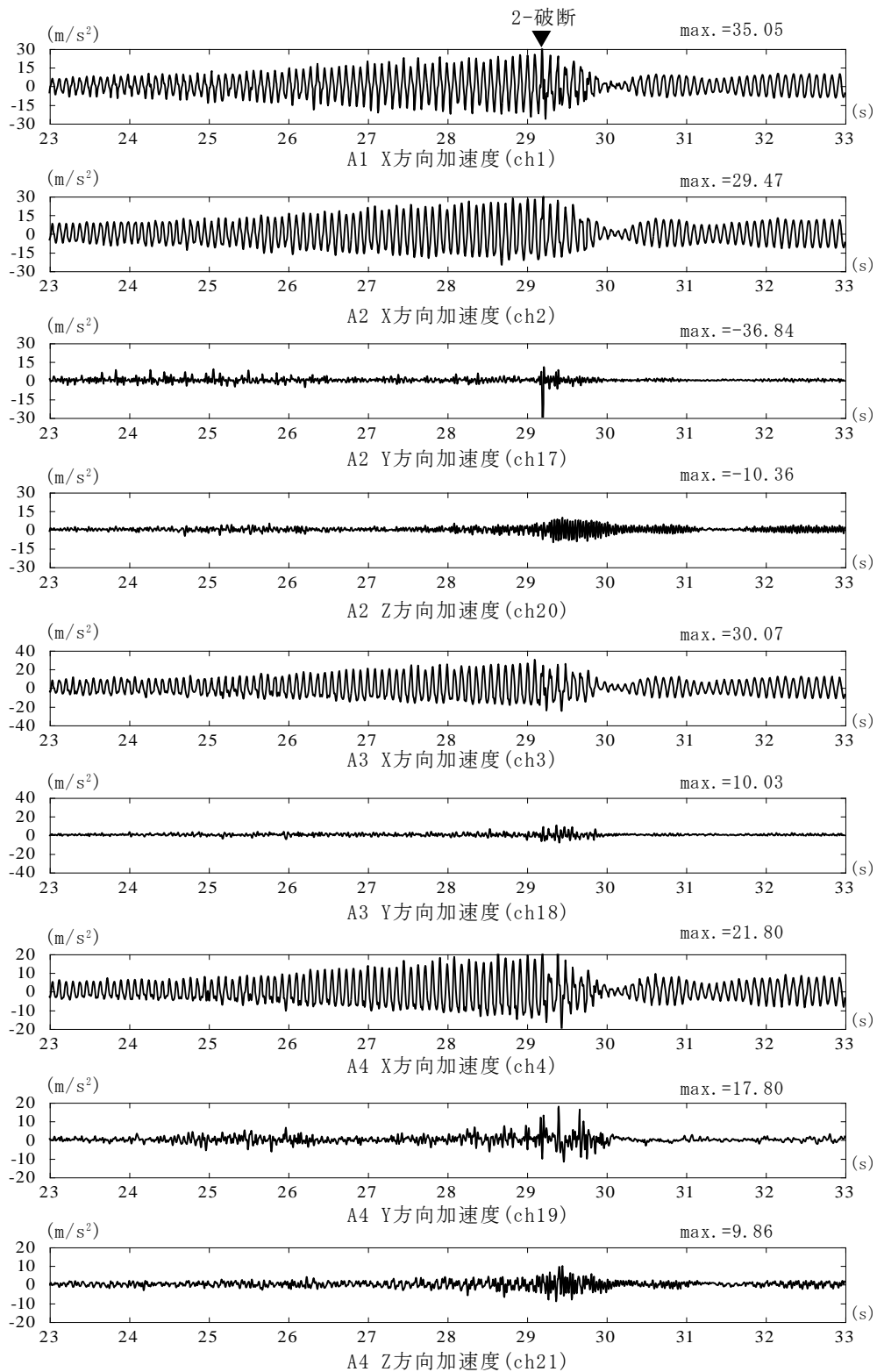


图 3.2-30(1) 加速度時刻歴、A1~A4,振動数降順(DOWN)

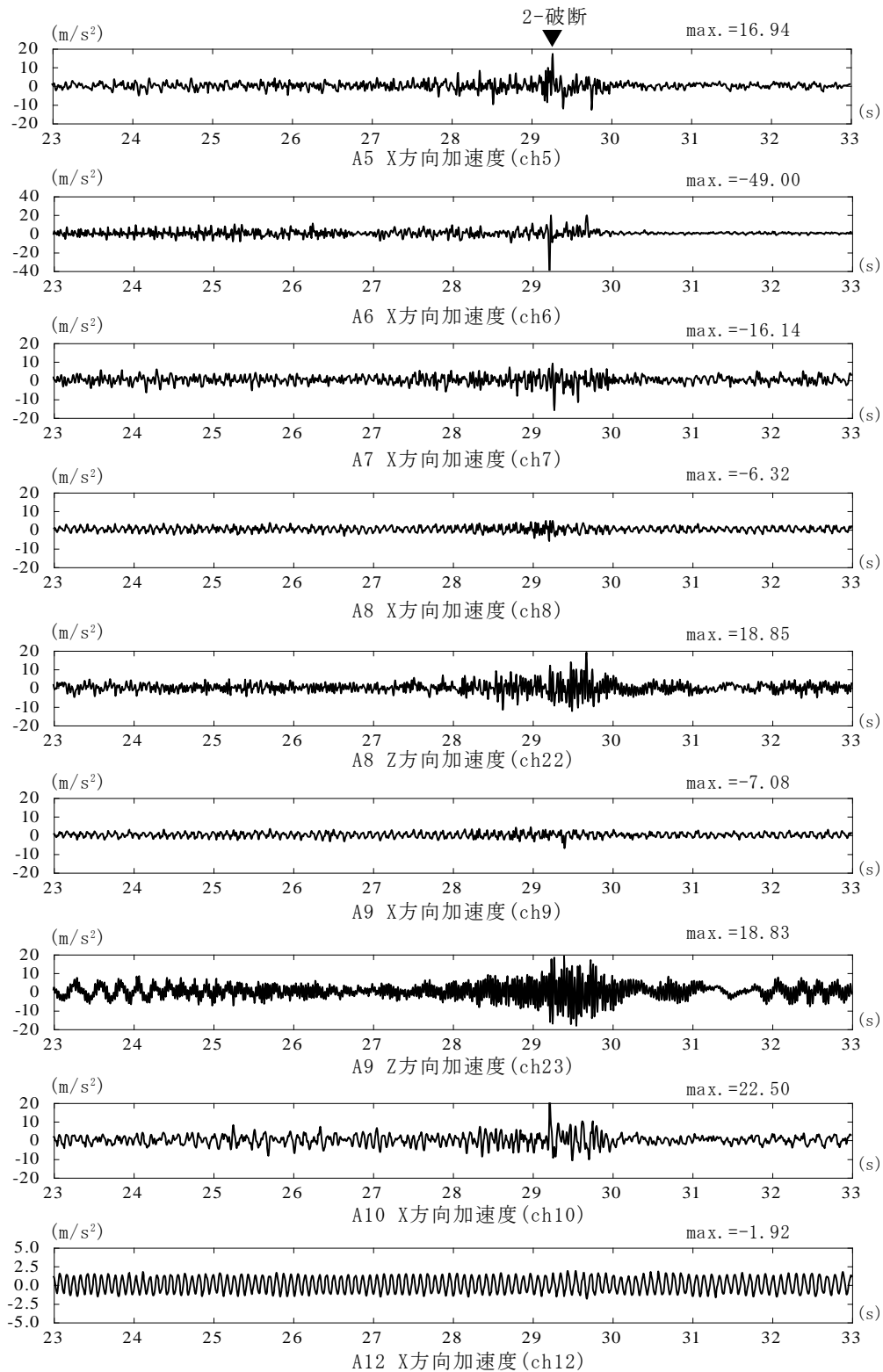


图 3.2-30(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12, 振動数降順(DOWN)

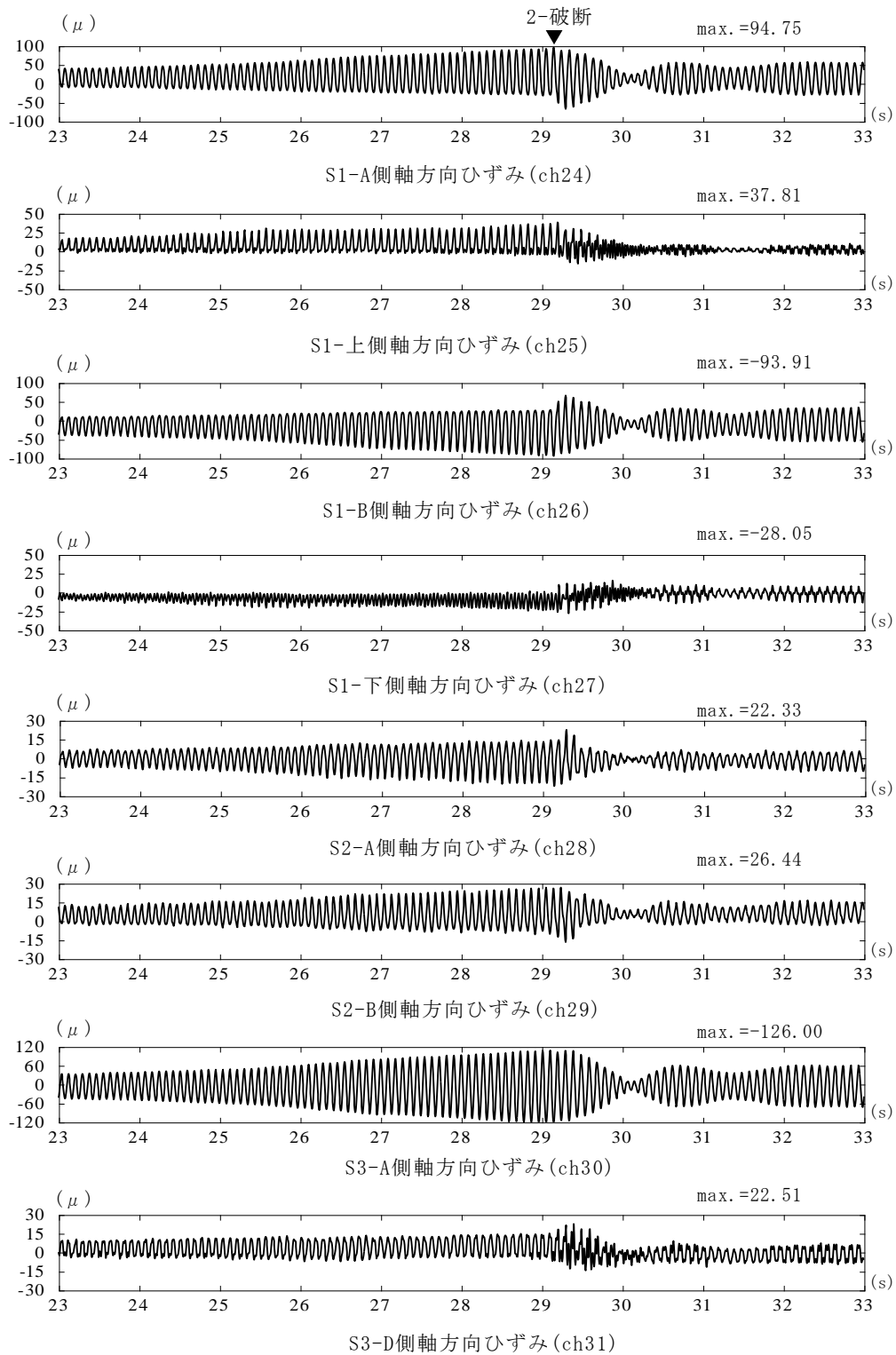


図 3.2-30(3) ひずみ時刻歴、S1~S3,振動数降順(DOWN)

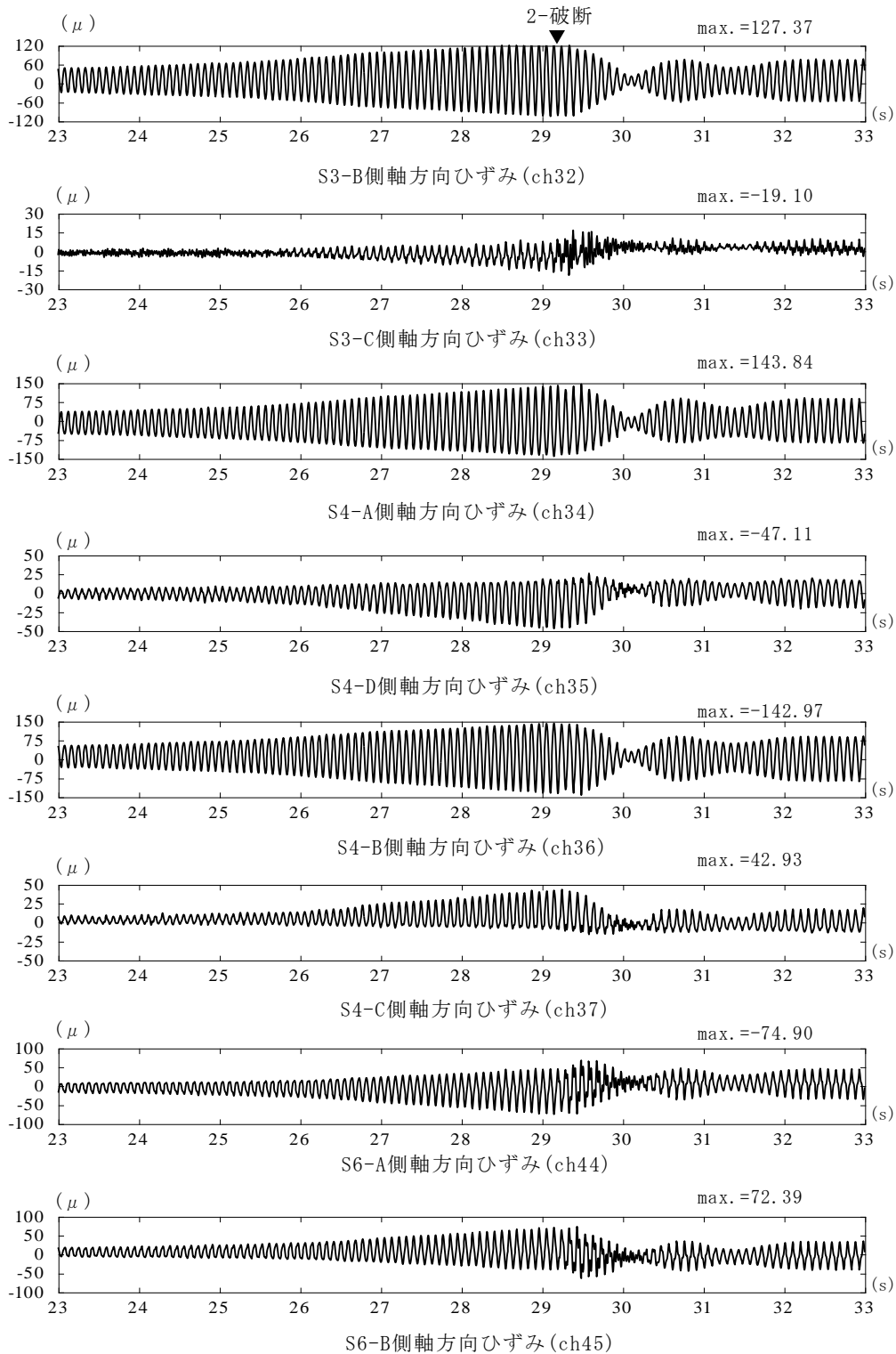


図 3.2-30(4) ひずみ時刻歴、S3・S4・S6、振動数降順(DOWN)

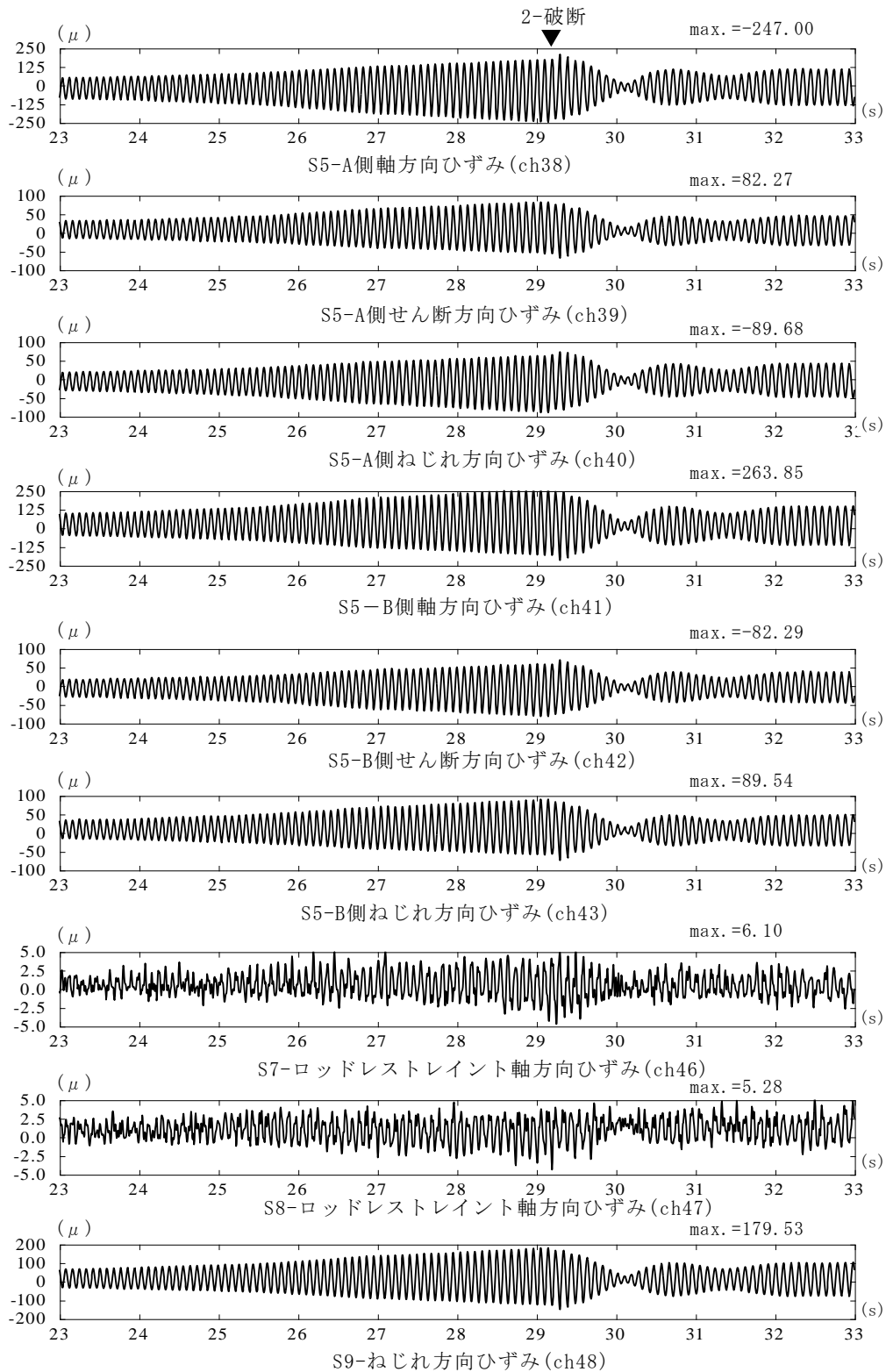


図 3.2-30(5) ひずみ時刻歴、S5・S7～S9,振動数降順(DOWN)

3.2.4.2.3 振動台及び土台上の加速度波形

図 3.2-31 には、3.2.4.2.2で掲載した最大加速度 1.5m/s^2 の正弦波による $16\rightarrow 5\text{Hz}$ の掃引試験結果について、振動台及び土台上の X 方向の加速度波形を示している。振動台上加速度計(ch12)と土台上加速度計(ch11)は剛な鉄骨(H200×200)を介しているのと同じ挙動をすることが予測される。しかし、上部の配管系試験体が支持構造物なしの 1 次振動数(8Hz)で共振して振幅が大きくなる 47 秒付近から、土台上(ch11)の振幅は上部配管系の振動に対応して大きくなっている。振動台上(ch12)では、この影響をほとんど受けずにほぼ一定の振幅が計測している。図 3.2-32 には、配管系試験体がほとんど振動していない 12~22 秒間と、激しく振動している 47~57 秒間の土台上と振動台上の加速度フーリエスペクトルを示す。土台上と振動台上共に、12~22 秒間でもピークとなっている加振振動数以外の振動数に小さなノイズのような成分が見られるが、47~57 秒間の土台上では、成分が大きく増大されていることが分かる。土台上の時刻歴の乱れはこの影響と考えられるが、土台上で大きく見られることから、試験体の振動に影響された土台部分の振動に起因する可能性が考えられる。

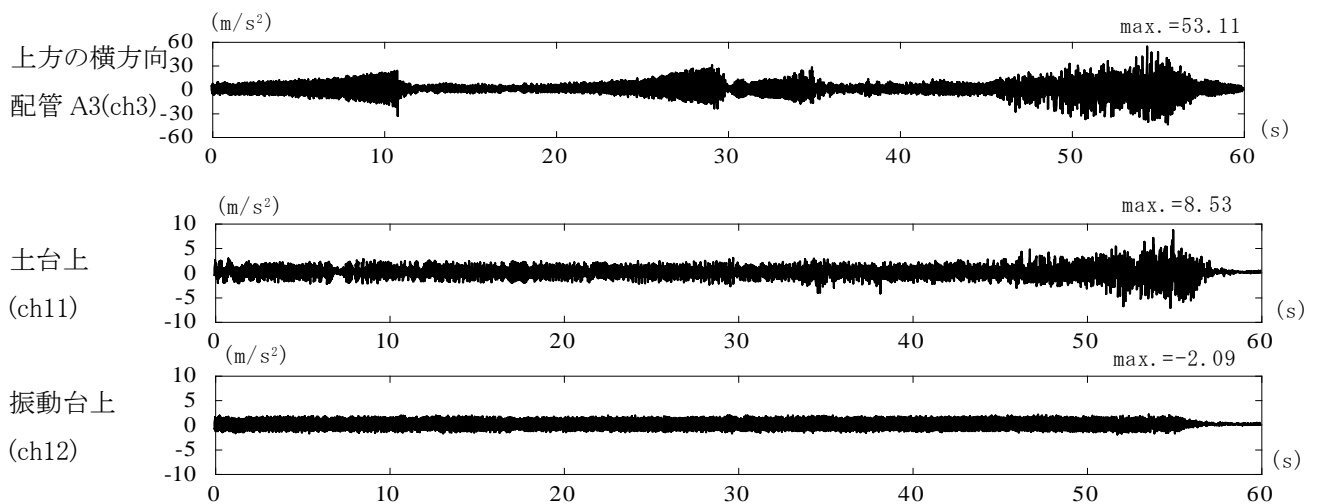


図 3.2-31 振動台と土台上の加速度時刻歴波形(X 方向)
(試験番号:2016-2-9-56、 $16\rightarrow 5\text{Hz}$ 、最大加速度 1.5m/s^2)

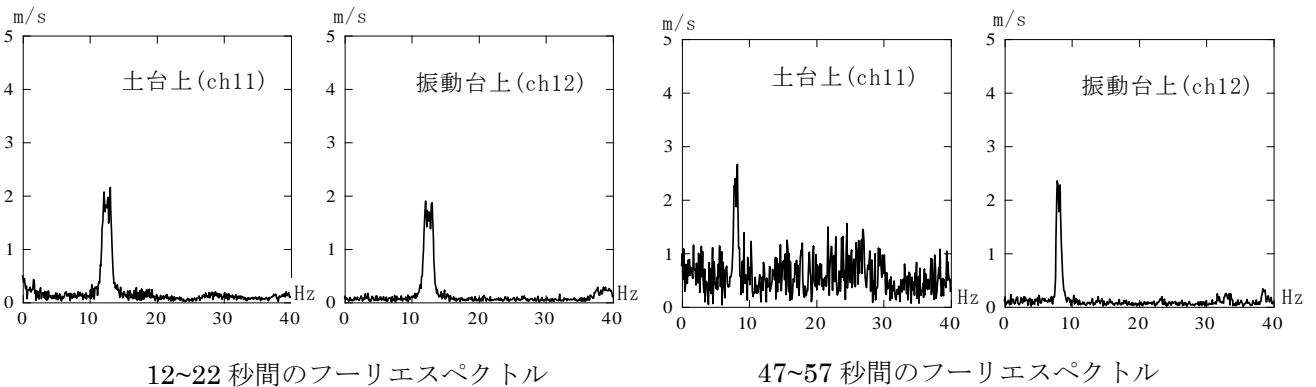


図 3.2-32 振動台と土台上の加速度記録のフーリエスペクトル

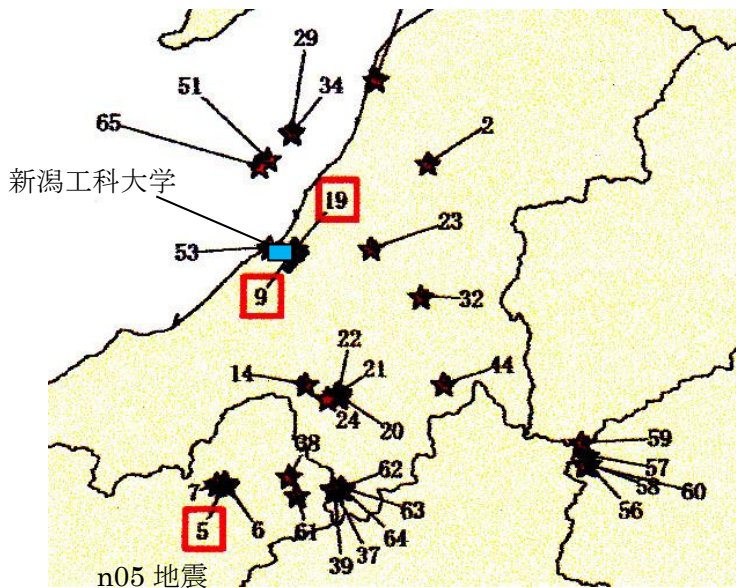
3.2.4.3 地震動入力による水平加振試験

3.2.4.3.1 入力地震動と水平加振試験の概要

(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1つの新潟工科大での観測地震動(wave n05ew)を用いる。wave-n05ew の震源情報は図 3.2-33 に示す。新潟工科大の観測プロジェクトでの観測地震動の中で代表的なものであるが、最大加速度は 7.56cm/s^2 である。

2 つの模擬地震動(mwave-01、mwave-02)と観測地震動(wave-n05ew)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図 3.2.34~36 に示す。



2012年7月10日 12:48:57.44

震央：経度 138.3883

緯度 36.8315

深さ：59.4km

震央距離：58.8km

Mj :5.2

図 3.2-33 wave-n05ew の震央位置と震源情報

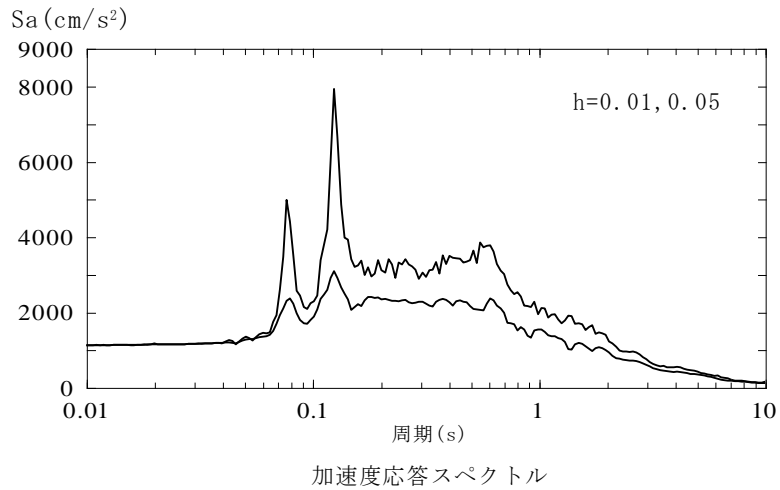
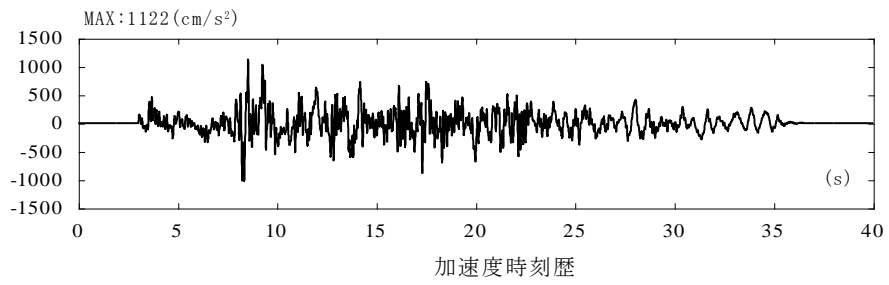


図 3.2-34 mwave-01 の時刻歴と応答スペクトル

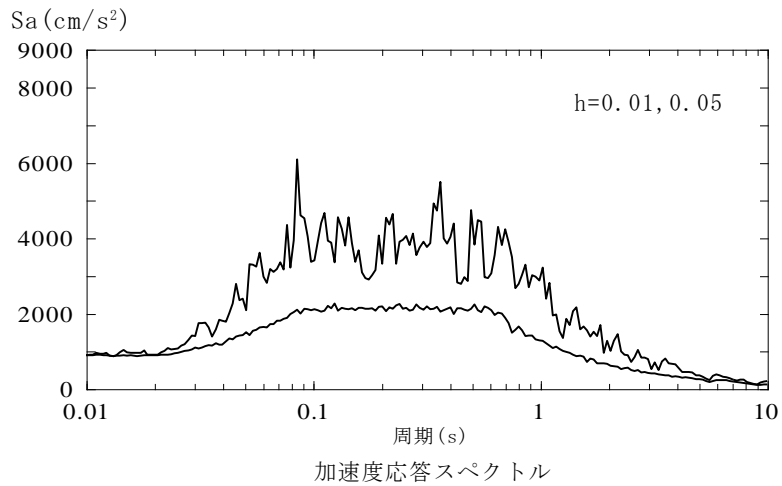
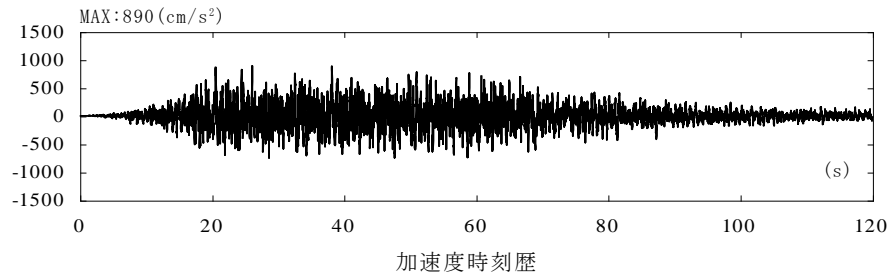
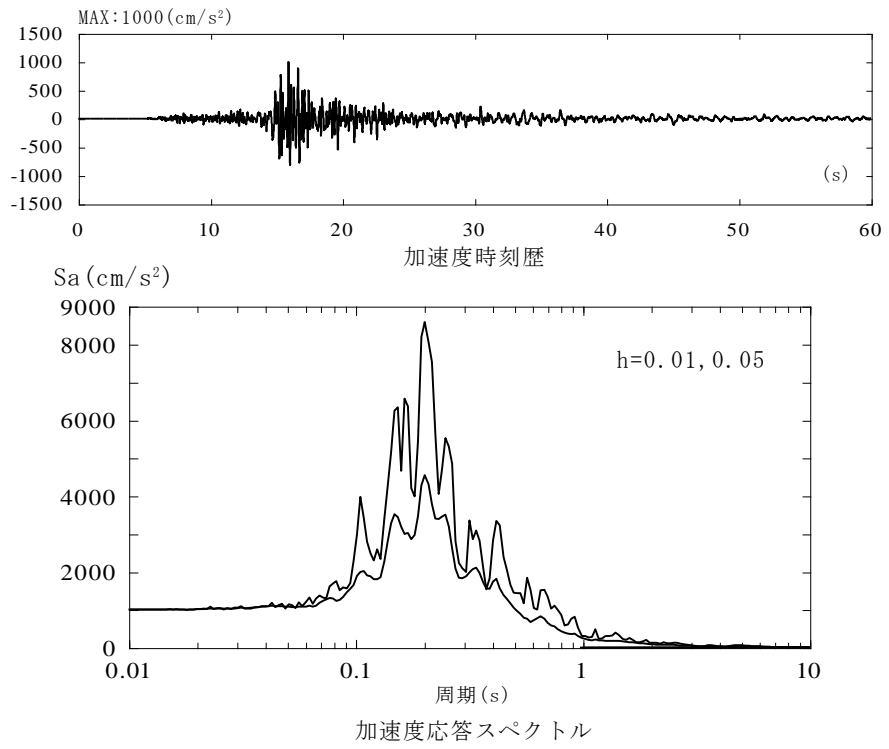


図 3.2-35 mwave-02 の時刻歴と応答スペクトル



柱) 最大値を 1000cm/s^2 に規準化している。

図 3.2-36 wave-n05ew の時刻歴と応答スペクトル

(2) 水平加振試験の概要

3つの地震動の最大加速度を以下の5つのレベルに調整して、水平加振試験を実施する。

最大加速度レベル : 2.5m/s²、5.0m/s²、7.5m/s²、10.0m/s²、12.0m/s²

3つの地震動の各入力レベルに対する支持構造物 1,2 の損傷(破断)状況を表 3.2-20 に示す。

mwave-01 では 10.0m/s²、12.0m/s² で支持構造物1のみが破断し、支持構造物 2 は破断していない。
mwave-02 では、10.0m/s²、12.0m/s² で支持構造物1と 2 が破断している。wave-n05ew の場合、破断には至らなかった。

wave-n05ew でどちらの支持構造物も破断に至らなかったのは、応答スペクトルに見られるように支持構造物1,2 付きモデルの1次固有振動数である14Hz 付近(0.07秒付近)を励起させる成分がほとんど見られないためと考えられる。

mwave-01 では、支持構造物1のみが破断している。これは、mwave-01 の試験結果では、3.2.4.3.2 項に示すように地震動時刻歴の10秒手前の大きなパルス的な成分によって支持構造物1が破断しており、その後の地震動成分は、応答スペクトルに見られるように周期 0.1 秒(10Hz)付近が谷となっているように、支持構造物 2 のみの1次振動(10.2Hz)を、支持構造物 2 の破断に至るほど励起させることが出来なかったものと推定される。

mwave-02 では、3.2.4.3.3 項に示すように振幅の増大に伴い支持構造物1がまず破断し、続いて支持構造物 2 が破断している。支持構造物1が先に破断するのは、1次モード中心で振動した場合、支持構造物1の位置がより大きな相対変位となるためと考えられる。続いて支持構造物 2 が破断しているが、これは、mwave-02 は応答スペクトルに見られるように広帯域に卓越成分を持つため、支持構造物1が破断した後に、支持構造物 2 のみの1次振動が低減することなく励起されていたためと考えられる。

表 3.2-20 試験条件と支持構造物 1,2 の破断状況

	最大加速度				
	2.5m/s ²	5.0m/s ²	7.5m/s ²	10.0m/s ²	12.0m/s ²
mwave-01	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断なし
mwave-02	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断
wave-n05ew	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし

3.2.4.3.2 mwave-01 による水平加振試験結果

mwave-01 による水平加振試験結果の概要を表 3.2-21 に示す。10.0m/s²、12.0m/s²において支持構造物 1 のみが破断している。2 つの入力レベルにおける支持構造物 1 の破断状況を図 3.2-37 に示す。10.0m/s² の場合には、開口両側の上端が破断しているが下端は破断していない。12.0m/s² の場合には、片側は上下端で破断し、破片は分離している。

ここでは、破断が発生していない最大加速度 5.0m/s² のケースと破断が発生した 12.0m/s² のケースについて述べる。

(1) 最大加速度 5.0m/s² における試験結果

地震動入力による結果では、計測された配管ひずみから応力に換算して表示する。配管応力は膜応力と曲げ応力として表示するが、配管の表裏に貼られたひずみゲージの計測ひずみ(μ)に鋼材のヤング係数($2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)を乗じてその位置の応力を求め、さらにこの応力を曲げ応力の中立軸が配管中央にあると仮定して、膜応力と曲げ応力に分離する。

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表 3.2-22(1)~(2)に示す。加速度の最大値は、振動台上の X 方向最大加速度(ch12)に対する増大率を応答倍率として示している。支持構造物 1 の近傍 A2X 方向(ch2)の加速度応答倍率は 2.63 である。大きな最大応力は S5 の X 方向振動による曲げ応力、S4 の曲げ応力、S9 のねじれ方向応力の順である。

図 3.2-38(1)~(5)に計測された加速度と配管応力の時刻歴を示す。加速度時刻歴から入力方向の X 方向の応答が大ききことが分かる。応力の時刻歴を見ると、曲げ応力の割合が大きく、膜応力の割合は小さいことが分かる。

(2) 最大加速度 12.0m/s² における試験結果

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表 3.2-23(1)~(2)に示す。支持構造物 1 の近傍の A2X 方向(ch2)での加速度応答倍率は 3.12 であり、5.0m/s² の場合より大きくなっている。これは、支持構造物 1 の破断により試験体の固有振動数が変化している影響と考えられる。

表 3.2-23(2)の最大応力一覧には、最大応力の比率(12.0m/s² での最大応力/5.0m/s² での最大応力)も示している。大きな最大応力は S5 の曲げ応力、S9 のねじれ方向応力、S4 の曲げ応力の順で発生しているが、12.0m/s² と 5.0m/s² の最大応力の比率をみると、支持構造物 2 が健全であった前面の縦方向配管の S4 曲げ応力(ch34-ch36)は 2.46 で最大加速度の比 2.4(12.0m/s²/5.0m/s²)と同程度であるが、後面の縦方向配管の S5 曲げ応力(ch38-ch41)は 3.37、S9 ねじれ方向応力(ch48)は 3.41 となっており、支持構造物 1 の破断の影響により後面の縦方向配管が大きく振動していることがわかる。また、破断した支持構造物 1 近傍の S1 の曲げ応力(ch24-ch26)は、11.70 倍となっており、上方の横方向配管が、支持構造物 1 の破断によって大きく振動するようになっていることがわかる。

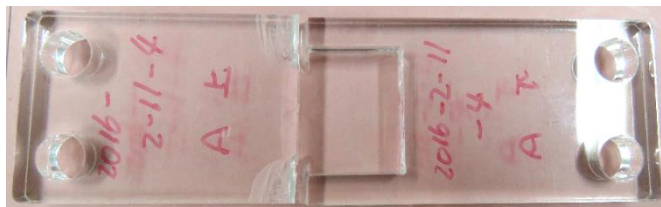
図 3.2-39(1)~(5)に加速度と配管応力の時刻歴を示す。破断時刻は時刻歴中に示しているが、12 秒付近である。支持構造物 1 近傍の A2 では X 方向の他に Y 方向、Z 方向の加速度時刻歴において、破断時

に大きなパルス波形が見られる。また、応力の時刻歴波形から破断に伴い振幅が急増していることが分かる。特に、図 3.2-39(3)に見られるように支持構造物1近傍の S1 曲げ応力(ch24-ch26)から、破断に伴い上方の横方向配管の X 方向の振動が急増していることが分かる。

表 3.2-21 地震波_mwave-01 の加振結果の概要

地震波	加速度(m/s ²)	試験番号	破断・亀裂状況
mwave-01	2.5	2016-2-11-1	破断・亀裂なし
	5.0	○2016-2-11-2	破断・亀裂なし
	7.5	2016-2-11-3	破断・亀裂なし
	10.0	2016-2-11-4	支持構造物1のみ破断 12.0s付近で支持構造物1が破断
	12.0	○2016-2-11-6	支持構造物1のみ破断 12.0s付近で支持構造物1が破断

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号:20162-11-4(支持構造物 1)



試験番号:2016-2-11-6(支持構造物 1)

図 3.2-37 支持構造物の破断・亀裂状況

表 3.2-22(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(mwave-01(5.0m/s²))

地震波: mwave-01,5.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1_X方向加速度(ch1)	14.11	2.73
A2_X方向加速度(ch2)	13.57	2.63
A2_Y方向加速度(ch17)	2.11	—
A2_Z方向加速度(ch20)	1.52	—
A3_X方向加速度(ch3)	14.23	2.76
A3_Y方向加速度(ch18)	2.83	—
A4_X方向加速度(ch4)	12.68	2.46
A4_Y方向加速度(ch19)	3.11	—
A4_Z方向加速度(ch21)	2.53	—
A5_X方向加速度(ch5)	6.70	1.30
A6_X方向加速度(ch6)	9.00	1.74
A7_X方向加速度(ch7)	7.46	1.45
A8_X方向加速度(ch8)	4.91	0.95
A8_Z方向加速度(ch22)	6.91	—
A9_X方向加速度(ch9)	4.80	0.93
A9_Z方向加速度(ch23)	7.09	—
A10_X方向加速度(ch10)	9.49	1.84
A12_X方向加速度(ch12)	5.16	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-22(2) 最大応力の一覧(mwave-01(5.0m/s²))

地震波: mwave-01,5.0m/s ²	
応力位置	最大応力 (N/mm ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	0.48
S1曲げ応力(ch24-ch26)	1.71
S1膜応力(ch25-ch27)	0.45
S1曲げ応力(ch25-ch27)	0.77
S2膜応力(ch28-ch29)	0.57
S2曲げ応力(ch28-ch29)	1.14
S3膜応力(ch30-ch32)	0.56
S3曲げ応力(ch30-ch32)	9.87
S3膜応力(ch31-ch33)	0.86
S3曲げ応力(ch31-ch33)	1.49
S4膜応力(ch34-ch36)	0.55
S4曲げ応力(ch34-ch36)	12.01
S4膜応力(ch35-ch37)	0.48
S4曲げ応力(ch35-ch37)	4.01
S6膜応力(ch44-ch45)	0.56
S6曲げ応力(ch44-ch45)	5.88
S5-膜応力(ch38-ch41)	0.74
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	16.89
S5-せん断方向応力(ch39)	5.43
S5-ねじれ方向応力(ch40)	5.53
S5-せん断方向応力(ch42)	5.69
S5-ねじれ方向応力(ch43)	5.83
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	0.74
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	0.64
S9-ねじれ方向応力(ch48)	11.82

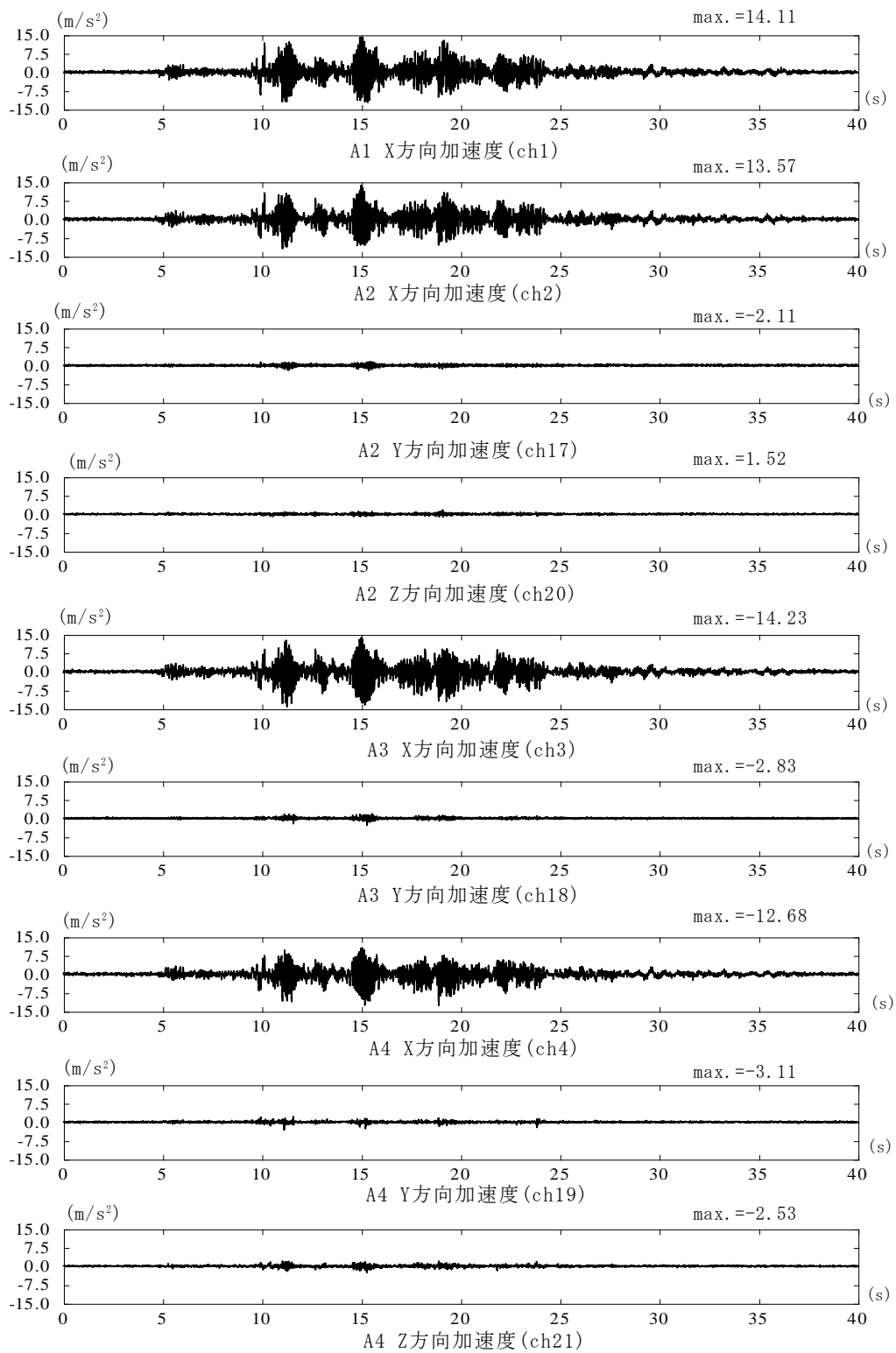


图 3.2-38(1) 加速度時刻歴、A1~A4(mwave-01(5.0m/s²))

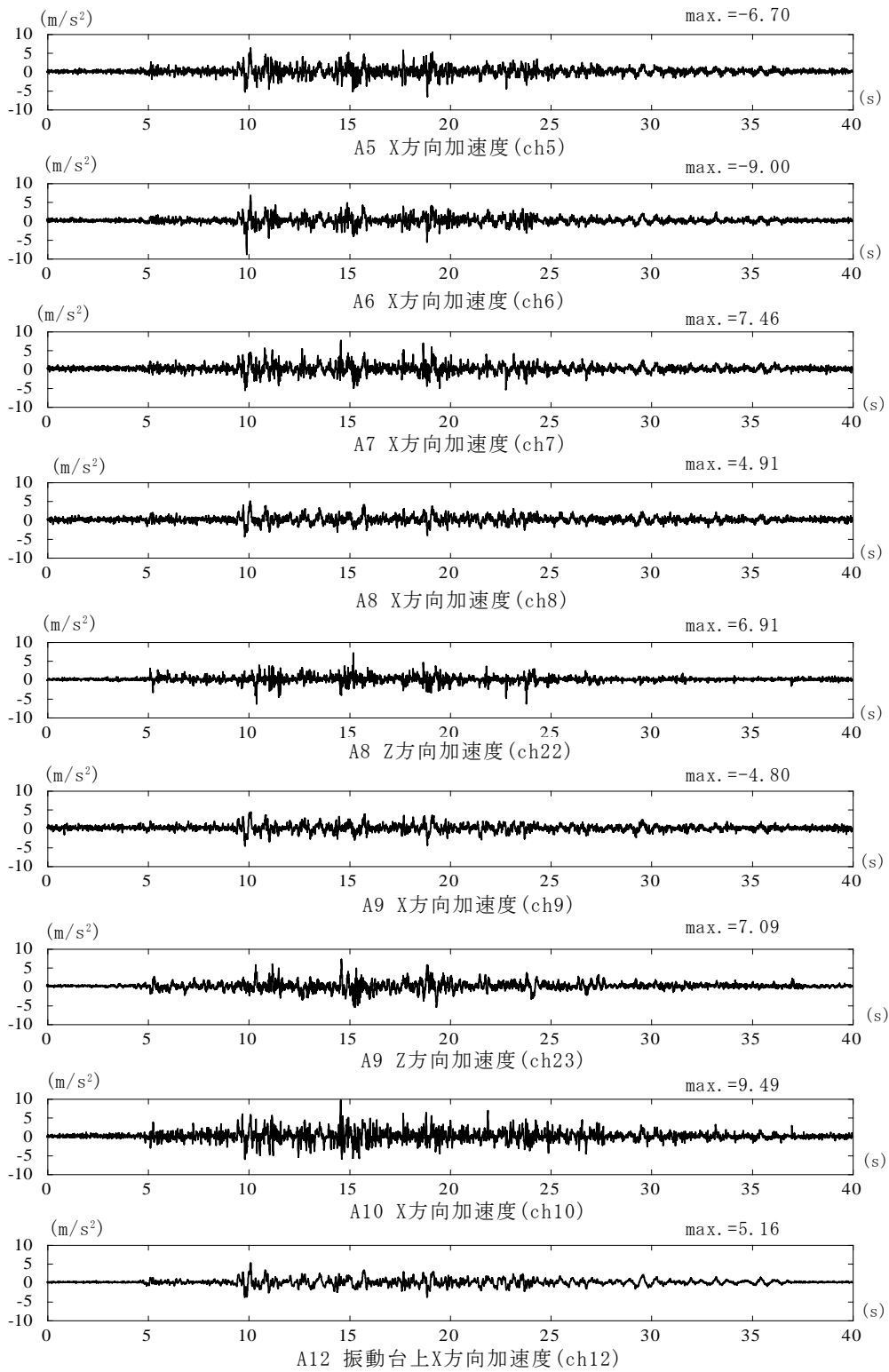


図 3.2-38(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12(mwave-01(5.0m/s²))

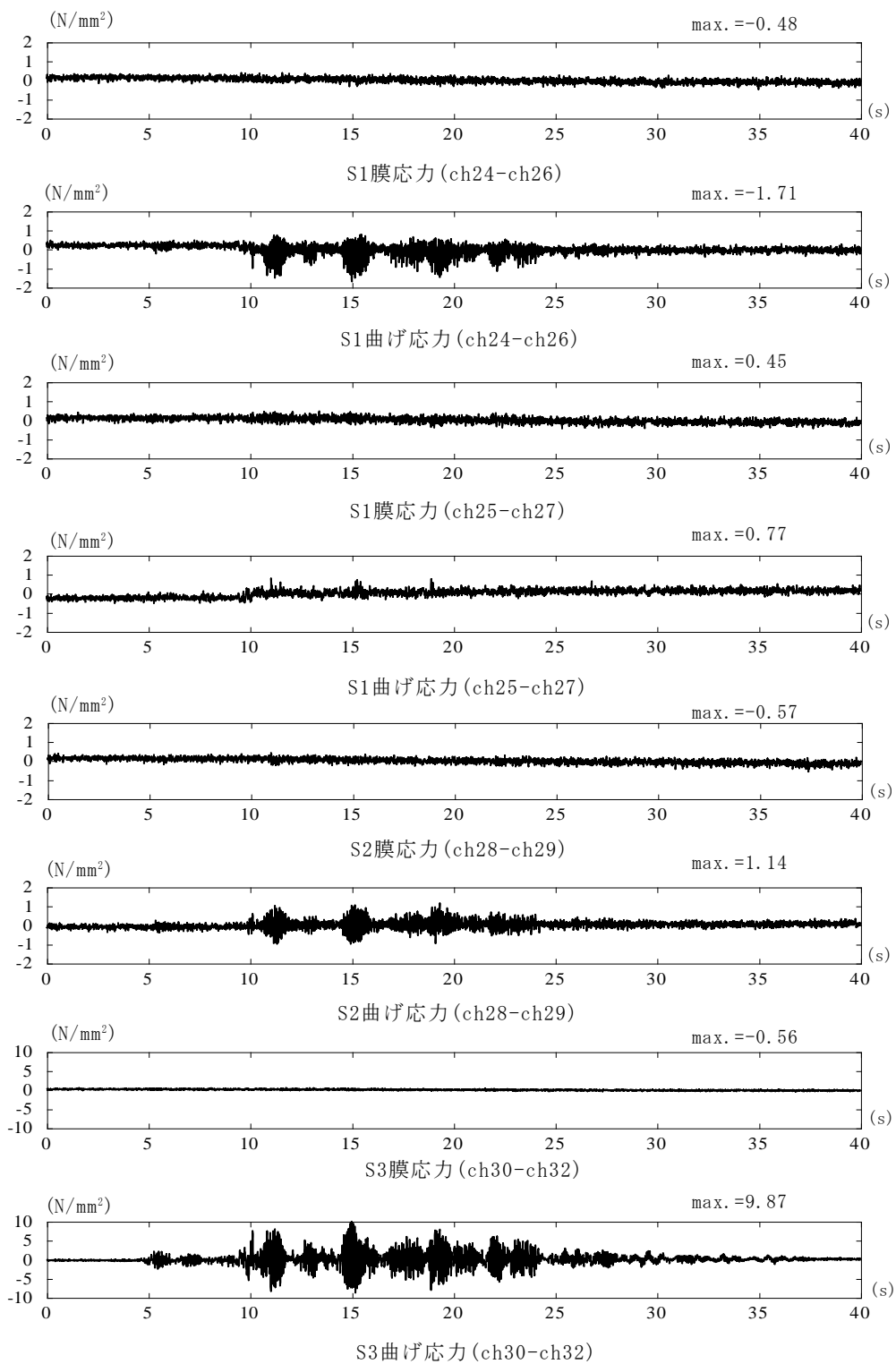


図 3.2-38(3) 各応力時刻歴、S1~S3(mwave-01(5.0m/s²))

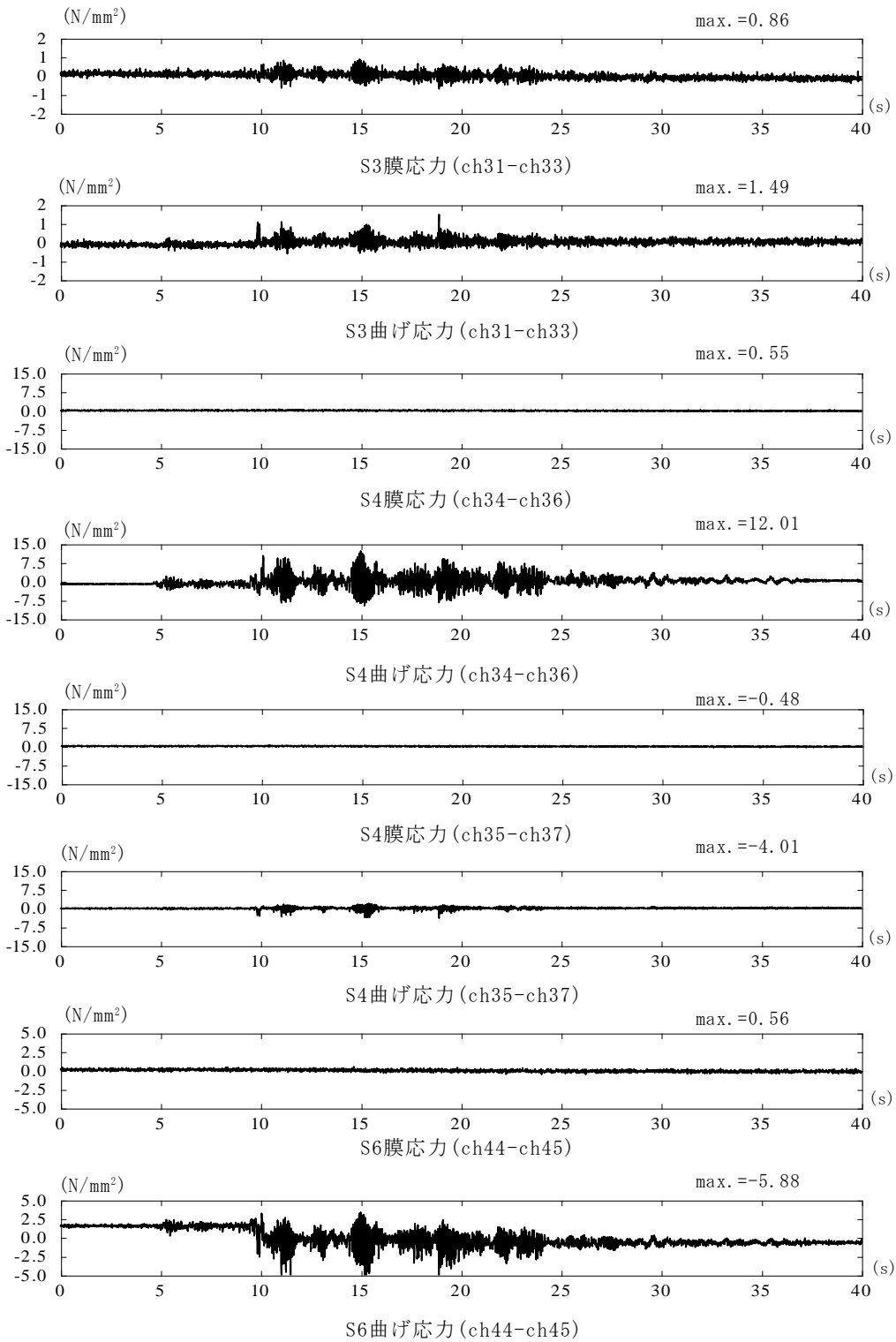


図 3.2-38(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (mwave-01(5.0m/s²))

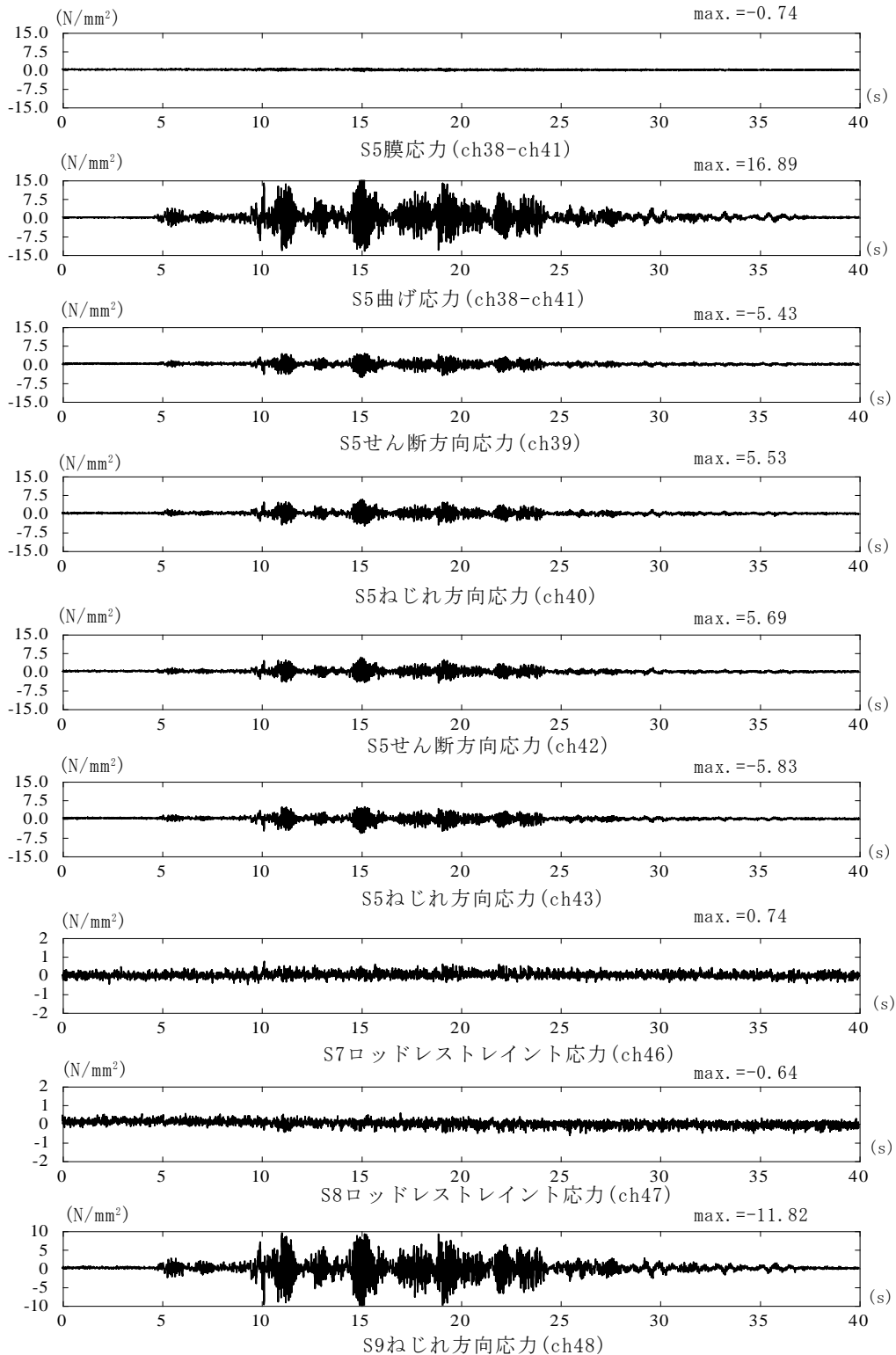


図 3.2-38(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(mwave-01(5.0m/s²))

表 3.2-23(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(mwave-01(12.0m/s²))

地震波 : mwave-01, 12.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1 X方向加速度(ch1)	31.65	2.79
A2 X方向加速度(ch2)	35.43	3.12
A2 Y方向加速度(ch17)	126.23	—
A2 Z方向加速度(ch20)	30.99	—
A3 X方向加速度(ch3)	32.76	2.88
A3 Y方向加速度(ch18)	19.39	—
A4 X方向加速度(ch4)	30.90	2.72
A4 Y方向加速度(ch19)	11.60	—
A4 Z方向加速度(ch21)	8.99	—
A5 X方向加速度(ch5)	29.64	2.61
A6 X方向加速度(ch6)	66.40	5.85
A7 X方向加速度(ch7)	31.74	2.79
A8 X方向加速度(ch8)	14.23	1.25
A8 Z方向加速度(ch22)	17.68	—
A9 X方向加速度(ch9)	13.69	1.21
A9 Z方向加速度(ch23)	12.54	—
A10 X方向加速度(ch10)	20.46	1.80
A12 X方向加速度(ch12)	11.36	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-23(2) 最大応力の一覧(mwave-01(12.0m/s²))

地震波 : mwave-01, 12.0m/s ²		
応力位置	最大応力 (N/mm ²)	比率 12.0(m/s ²)/5.0(m/s ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	0.51	1.06
S1曲げ応力(ch24-ch26)	20.01	11.70
S1膜応力(ch25-ch27)	2.32	5.16
S1曲げ応力(ch25-ch27)	2.56	3.32
S2膜応力(ch28-ch29)	0.43	0.75
S2曲げ応力(ch28-ch29)	5.10	4.47
S3膜応力(ch30-ch32)	0.37	0.66
S3曲げ応力(ch30-ch32)	27.81	2.82
S3膜応力(ch31-ch33)	2.27	2.64
S3曲げ応力(ch31-ch33)	4.80	3.22
S4膜応力(ch34-ch36)	0.64	1.16
S4曲げ応力(ch34-ch36)	29.60	2.46
S4膜応力(ch35-ch37)	0.90	1.88
S4曲げ応力(ch35-ch37)	12.15	3.03
S6膜応力(ch44-ch45)	0.52	0.93
S6曲げ応力(ch44-ch45)	15.24	2.59
S5-膜応力(ch38-ch41)	1.96	2.65
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	56.87	3.37
S5-せん断方向応力(ch39)	18.50	3.41
S5-ねじれ方向応力(ch40)	19.58	3.54
S5-せん断方向応力(ch42)	18.45	3.24
S5-ねじれ方向応力(ch43)	20.33	3.49
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	1.33	1.80
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	1.10	1.72
S9-ねじれ方向応力(ch48)	40.28	3.41

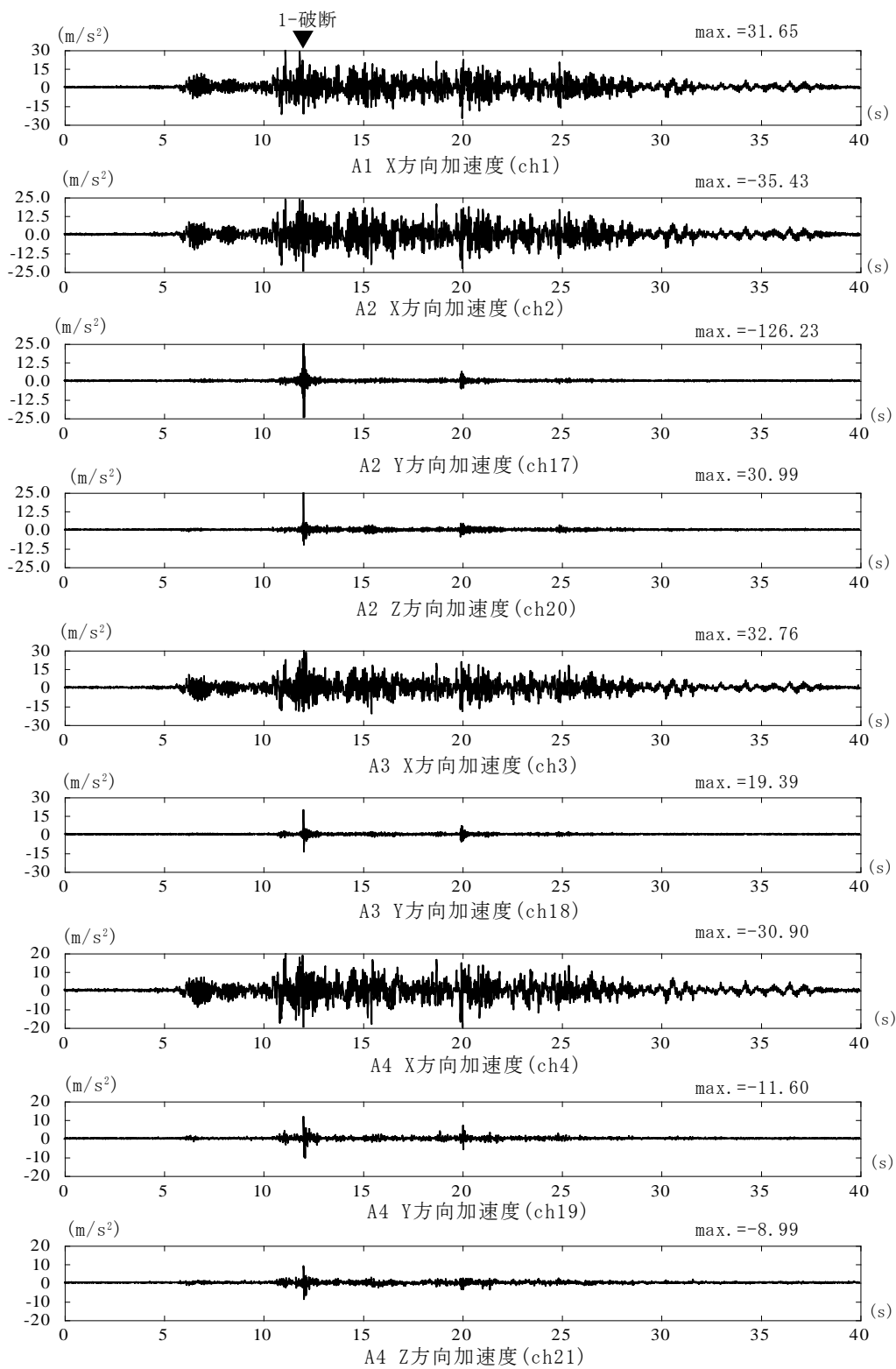


图 3.2-39(1) 加速度時刻歴、A1~A4(mwave-01(12.0m/s²))

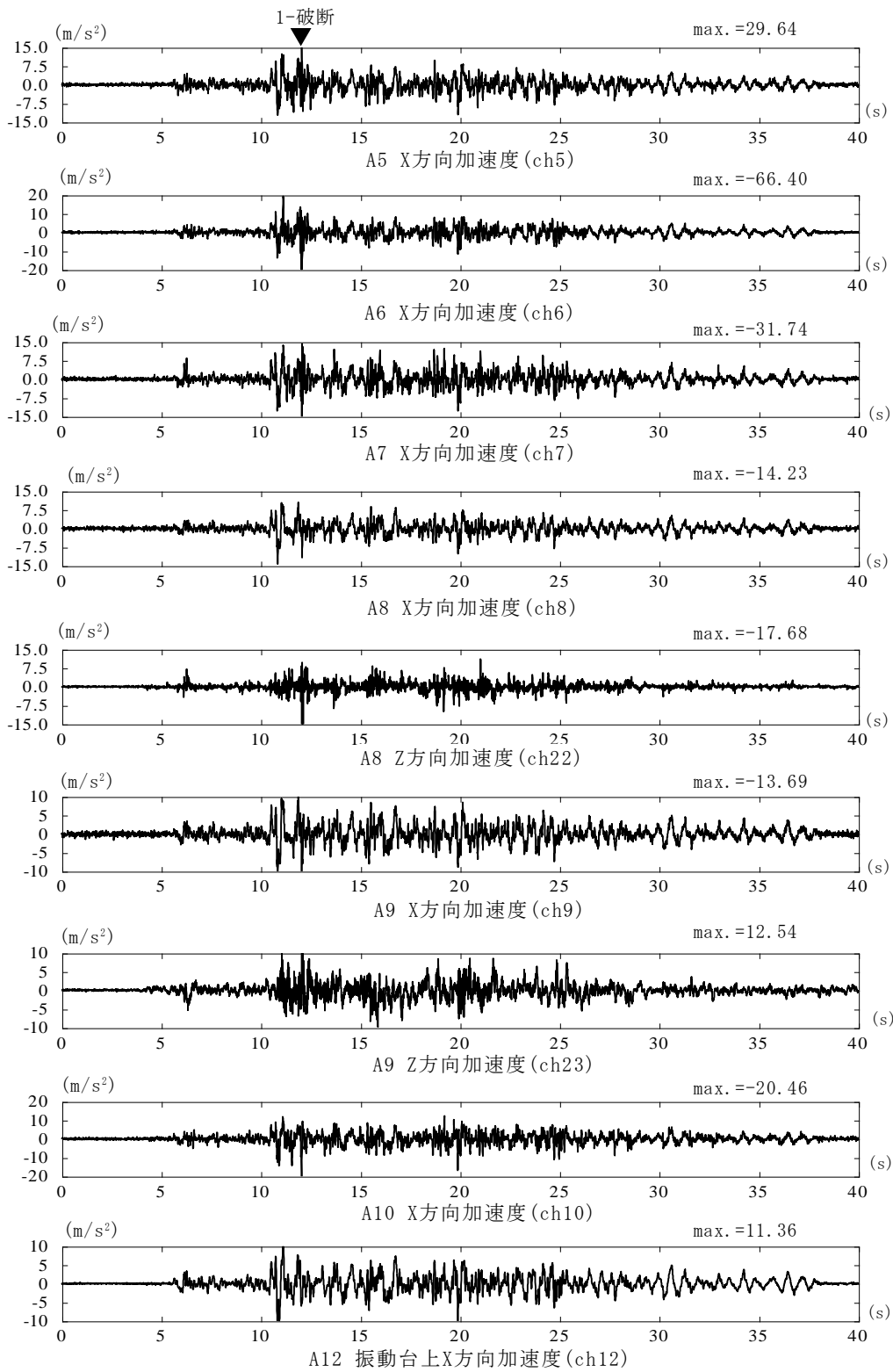


图 3.2-39(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12(mwave-01(12.0m/s²))

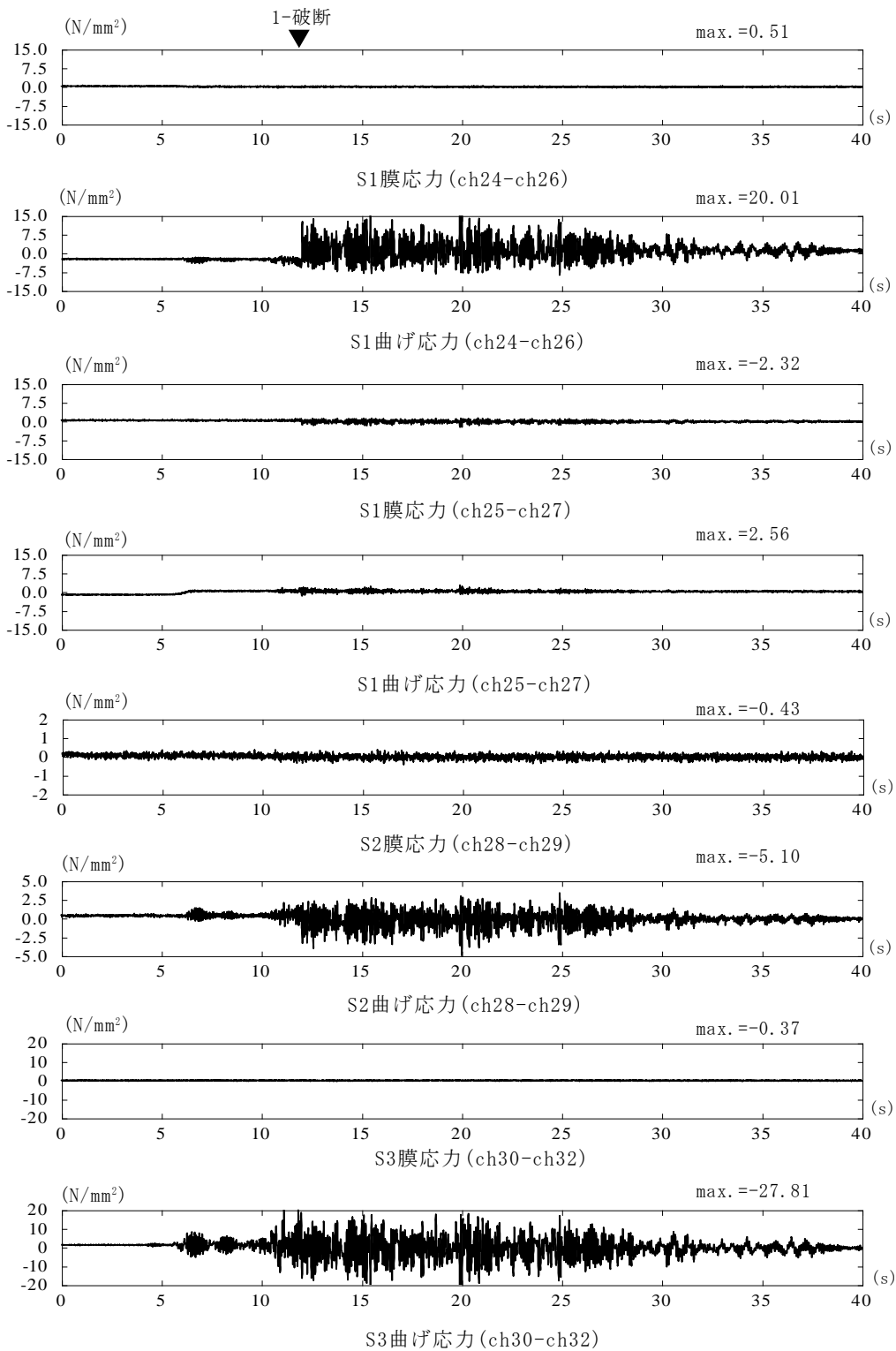


図 3.2-39(3) 各応力時刻歴、S1~S3(mwave-01(12.0m/s²))

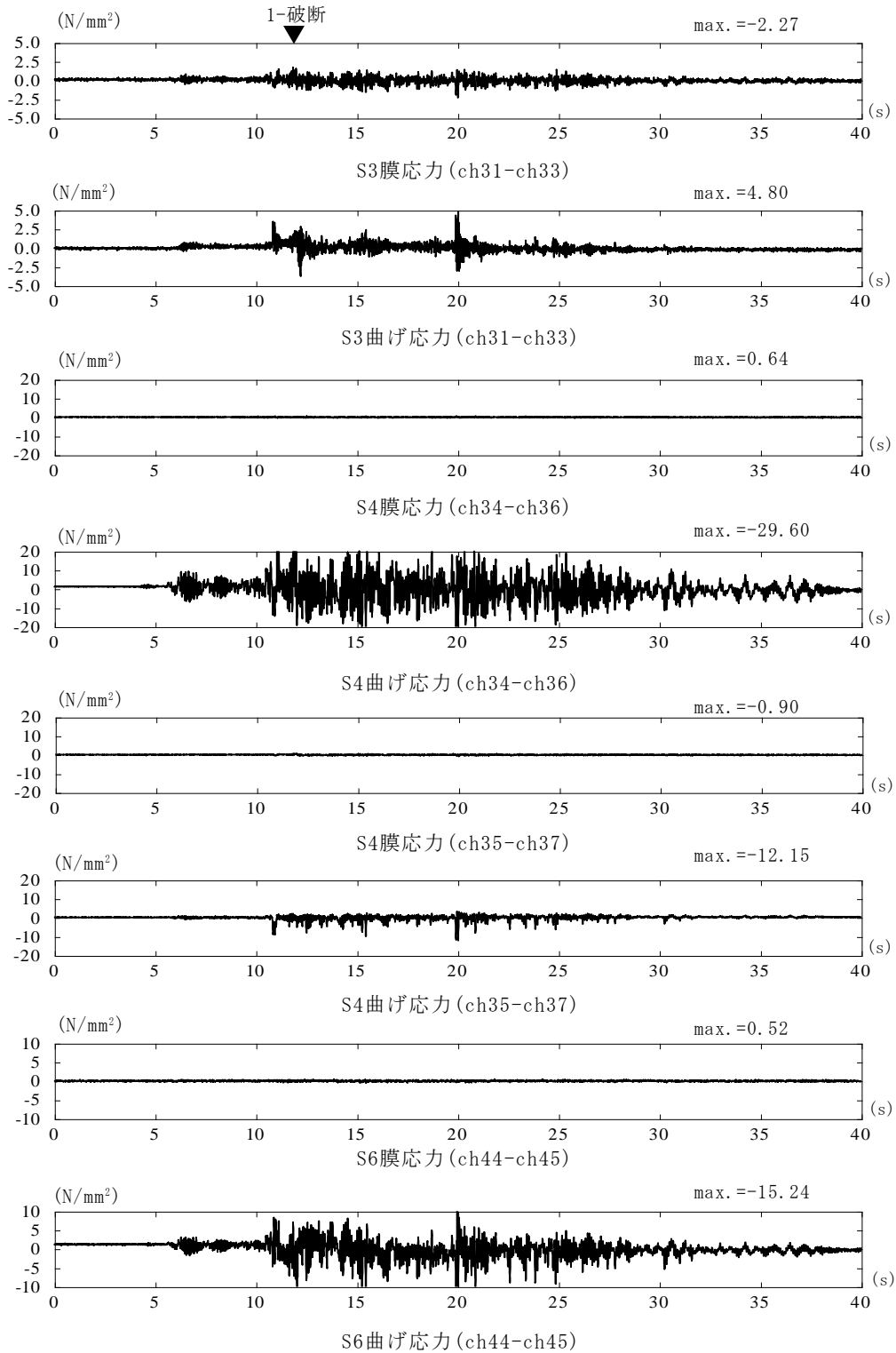


図 3.2-39(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (mwave-01(12.0m/s²))

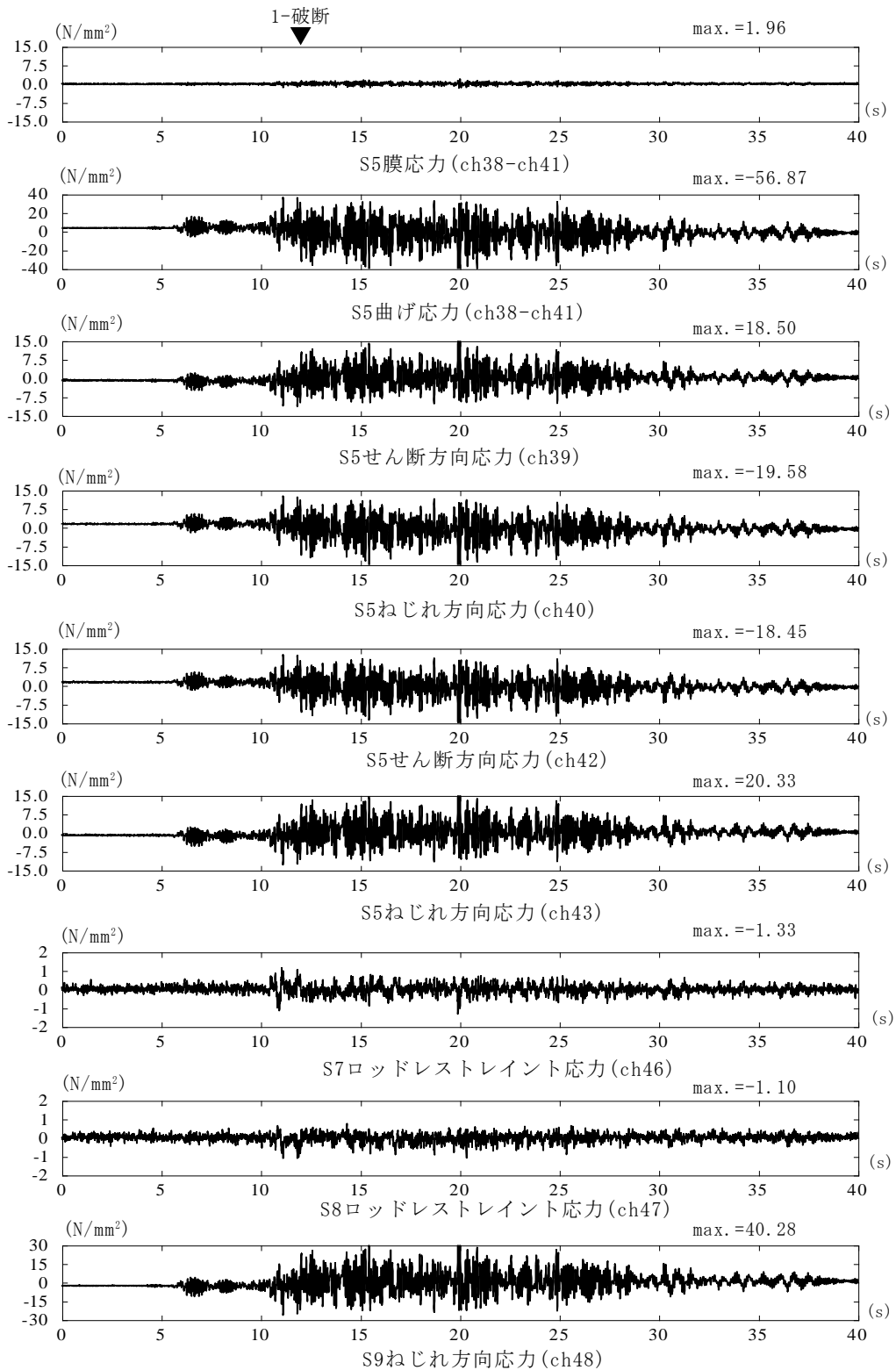


図 3.2-39(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(mwave-01(12.0m/s²))

3.2.4.3.3 mwave-02 による水平加振試験結果

mwave-02 による水平加振試験結果の概要を表 3.2-24 に示す。10.0m/s²、12.0m/s²において支持構造物 1 と 2 が破断している。2 つの入力レベルにおける支持構造物 1 と 2 の破断状況を図 3.2-40 に示す。各入力レベルの 2 つの支持構造物は、開口両側の上下端で破断しており、破片は分離している。細かい繰り返しの多い応答していたことが推察される。

ここでは、破断が発生していない 5.0m/s² のケースと破断が発生した 12.0m/s² のケースについて述べる。

(1) 最大加速度 5.0m/s² における試験結果

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表 3.2-25(1)～(2)に示す。支持構造物 1 の近傍 A2X 方向(ch2)の加速度応答倍率は 2.85 であり、mwave-01 の 5.0m/s² の場合と同程度である。大きな最大応力は S5 の X 方向振動による曲げ応力、S4 の曲げ応力、S9 のねじれ方向応力の順であり、mwave-01 の 5.0m/s² の場合と同様である。

図 3.2-41(1)～(5)に加速度と配管応力の時刻歴を示す。加速度時刻歴から入力方向の X 方向の応答が大ききことが分かる。図 3.2-41(3)で上方横方向配管の X 方向振動を S1 曲げ応力(ch24-ch26)と S2 曲げ応力(ch28-ch29)で見ると、小さな応力がほぼ同レベルの値が連続しており、上方の横方向配管が曲げ変形をしないことを示しており、支持構造物 1 の拘束効果の影響が表れている。

(2) 最大加速度 12.0m/s² における試験結果

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表 3.2-26(1)～(2)に示す。支持構造物 1 の近傍 A2 の X 方向(ch2)の加速度応答倍率は 4.94 であり、5.0m/s² の 1.7 倍であり、2 つの支持構造物の破断による固有振動数が変化し、応答が増大したことがわかる。大きな最大応力は S5 の曲げ応力、S4 の曲げ応力、S9 のねじれ方向応力の順であり、mwave-01 の 12.0m/s² の場合の S5 の曲げ応力、S9 のねじれ方向応力、S4 の曲げ応力の順となっているので、支持構造物 2 の破断の影響により前面の縦方向配管の振動が大きくなり S4 の曲げ応力が増大したものと考えられる。

表 3.2-26(2)中の 12.0m/s² と 5.0m/s² との最大応力の比率をみると、支持構造物 2 が破断した前面の縦方向配管の S4 曲げ応力(ch34-ch36)は 7.28、後面の縦方向配管の S5 曲げ応力(ch38-ch41)は 6.48、S9 ねじれ方向応力(ch48)は 6.86 となっている。全体的に mwave-01 の 2 倍以上であるが、支持構造物 2 の破断の影響で前面の縦方向配管の S4 曲げ応力(ch34-ch36)は 3 倍程度になっている。また、支持構造物 1 近傍の S1 の曲げ応力(ch24-ch26)における 12.0m/s² と 5.0m/s² との最大応力の比率は 39.07 となっており、上方の横方向配管が、支持構造物 1 の破断によって大きく振動するようになっていることがわかる。一方、支持構造物 2 近傍の S3 曲げ応力(ch30-ch32)の比率は 3.25 であり、5.0m/s² から縦方向配管の振動に伴いある程度の応力を負担していたためと考えられる。支持構造物 1 と 2 近傍の S1, S3 では、上述の X 方向以外に、Z 方向(上下方向)、Y 方向の最大応力の比率も大きな値となっており、支持構造物の破断の影響をみることができる。

図 3.2-42(1)～(5)に加速度と配管応力の時刻歴を示す。破断時刻は時刻歴中に示しているが、25 秒手

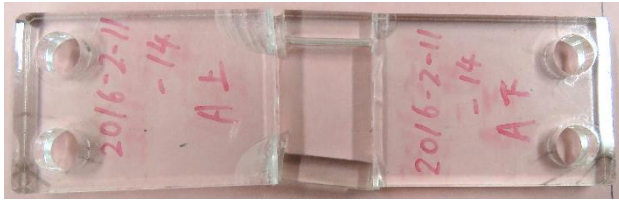
前で支持構造物1が破断し、その直後に支持構造物 2 が破断している。支持構造物 1 近傍の A2 Y 方向 (ch17)の加速度時刻歴において、支持構造物 1 破断に伴いで大きなパルスが見られる。支持構造物 2 近傍の A4 の Y 方向(ch19)、Z 方向 (ch21)の加速度時刻歴はほとんど振幅の増大は見られなかったが、支持構造物 2 破断以降に振幅が増大し、X 方向と同様に振動している。特に、配管応力の時刻歴からの支持構造物1の破断により振幅が増大し、支持構造物 2 の破断によりさらに増大している様子を見ることができる。

図 3.2-42(5)の最大加速度 12.0m/s^2 での S7(ch46)と S8(ch47)のロッドレストレイントの応力時刻歴を、図 3.2-41(5)の 5.0m/s^2 の場合と比較する。 5.0m/s^2 の場合には、全継続時間を通して負担応力(軸応力)に大きな変化は見られないが、 12.0m/s^2 では、支持構造物の破断に伴い振幅は増大し、負担応力が増している。特に支持構造物2の破断後は急激する傾向を見ることができ、荷重再配分の結果ロッドレストレイントの荷重が増加したことが確認できる。

表 3.2-24 地震波_mwave-02 の加振結果の概要

地震波	加速度(m/s ²)	試験番号	破断・亀裂状況
mwave-02	2.5	2016-2-11-11	破断・亀裂なし
	5.0	○2016-2-11-12	破断・亀裂なし
	7.5	2016-2-11-13	破断・亀裂なし
	10.0	2016-2-11-14	支持構造物1・2共に破断 22.2s付近で1・2同時に破断 26.0s付近で1・2の破片が飛散
	12.0	○2016-2-11-15	支持構造物1・2共に破断 22.0付近で支持構造物1が破断 26.5s付近で支持構造物2が破断 支持構造物2破断と同時に、1・2の破片が飛散

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。



試験番号:20162-11-14(支持構造物 1)



試験番号:20162-11-14(支持構造物 2)



試験番号:20162-11-14(支持構造物 1)



試験番号:2016-2-11-15(支持構造物 2)

図 3.2-40 支持構造物の破断・亀裂状況

表 3.2-25(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(mwave-02(5.0m/s²))

地震波 : mwave-02,5.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1 X方向加速度(ch1)	12.47	2.50
A2 X方向加速度(ch2)	14.21	2.85
A2 Y方向加速度(ch17)	4.20	—
A2 Z方向加速度(ch20)	2.12	—
A3 X方向加速度(ch3)	16.20	3.25
A3 Y方向加速度(ch18)	4.17	—
A4 X方向加速度(ch4)	13.32	2.67
A4 Y方向加速度(ch19)	3.31	—
A4 Z方向加速度(ch21)	3.44	—
A5 X方向加速度(ch5)	9.71	1.95
A6 X方向加速度(ch6)	5.37	1.08
A7 X方向加速度(ch7)	11.18	2.24
A8 X方向加速度(ch8)	5.30	1.06
A8 Z方向加速度(ch22)	10.19	—
A9 X方向加速度(ch9)	5.80	1.16
A9 Z方向加速度(ch23)	14.66	—
A10 X方向加速度(ch10)	13.37	2.68
A12 X方向加速度(ch12)	4.99	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-25(2) 最大応力の一覧(mwave-02(5.0m/s²))

地震波 : mwave-02,5.0m/s ²	
応力位置	最大応力 (N/mm ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	0.58
S1曲げ応力(ch24-ch26)	0.73
S1膜応力(ch25-ch27)	0.55
S1曲げ応力(ch25-ch27)	1.26
S2膜応力(ch28-ch29)	0.59
S2曲げ応力(ch28-ch29)	0.72
S3膜応力(ch30-ch32)	0.62
S3曲げ応力(ch30-ch32)	10.79
S3膜応力(ch31-ch33)	0.95
S3曲げ応力(ch31-ch33)	1.58
S4膜応力(ch34-ch36)	0.52
S4曲げ応力(ch34-ch36)	13.25
S4膜応力(ch35-ch37)	0.45
S4曲げ応力(ch35-ch37)	2.68
S6膜応力(ch44-ch45)	0.61
S6曲げ応力(ch44-ch45)	5.33
S5-膜応力(ch38-ch41)	0.87
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	16.11
S5-せん断方向応力(ch39)	5.28
S5-ねじれ方向応力(ch40)	5.71
S5-せん断方向応力(ch42)	4.92
S5-ねじれ方向応力(ch43)	5.37
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	0.85
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	0.66
S9-ねじれ方向応力(ch48)	11.30

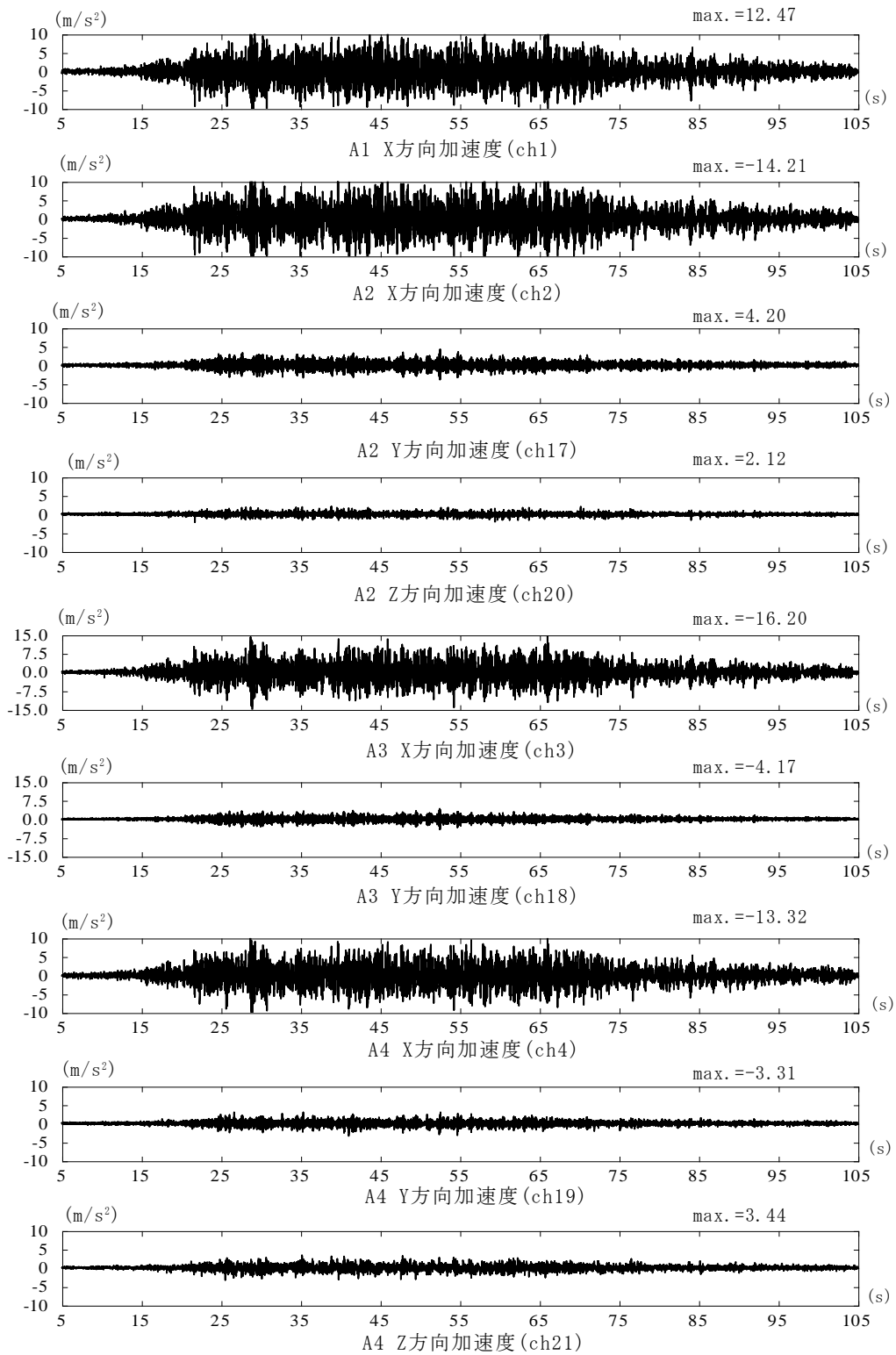


图 3.2-41(1) 加速度時刻歴、A1~A4(mwave-02(5.0m/s²))

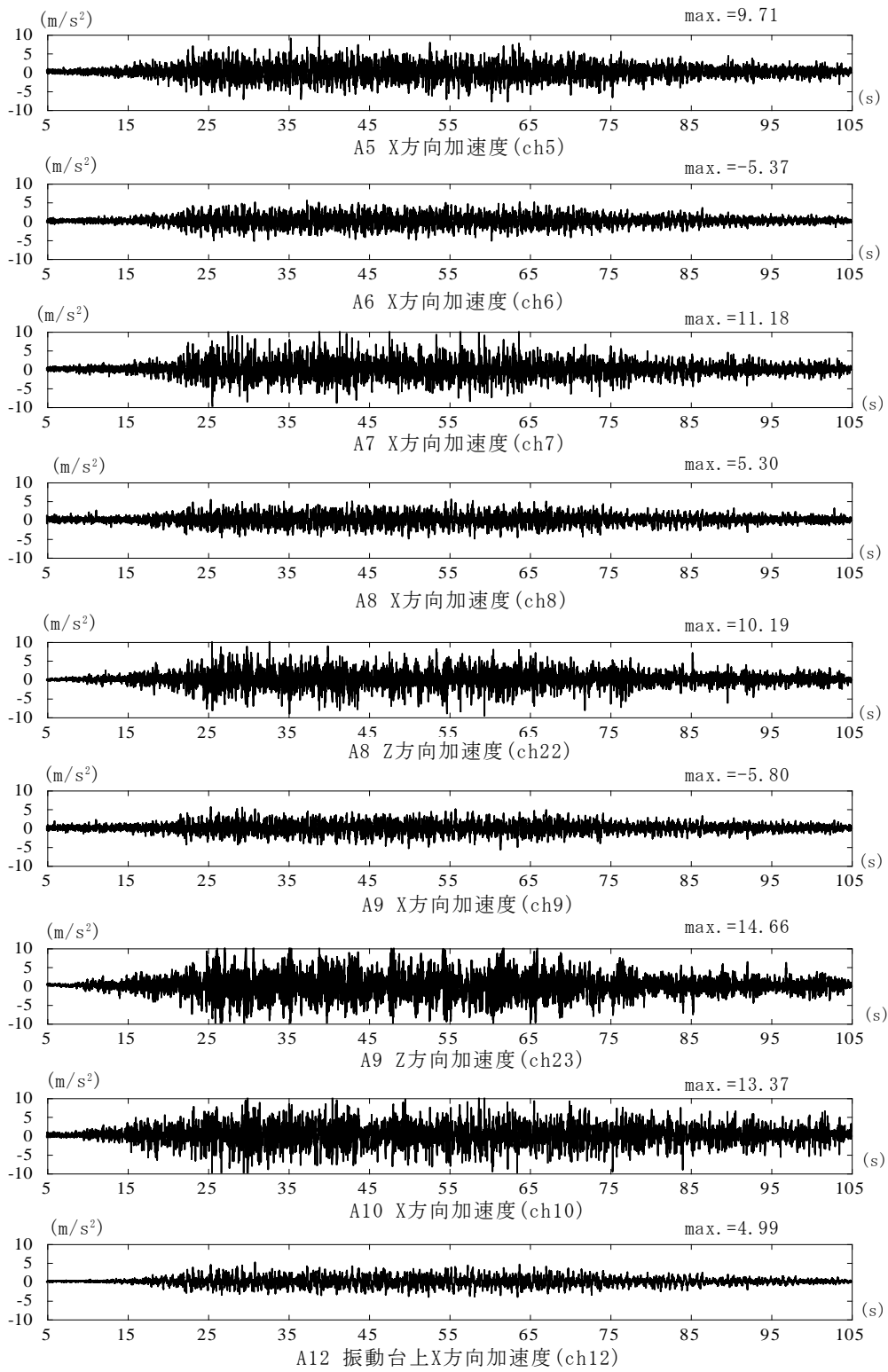


图 3.2-41(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12(mwave-02(5.0m/s²))

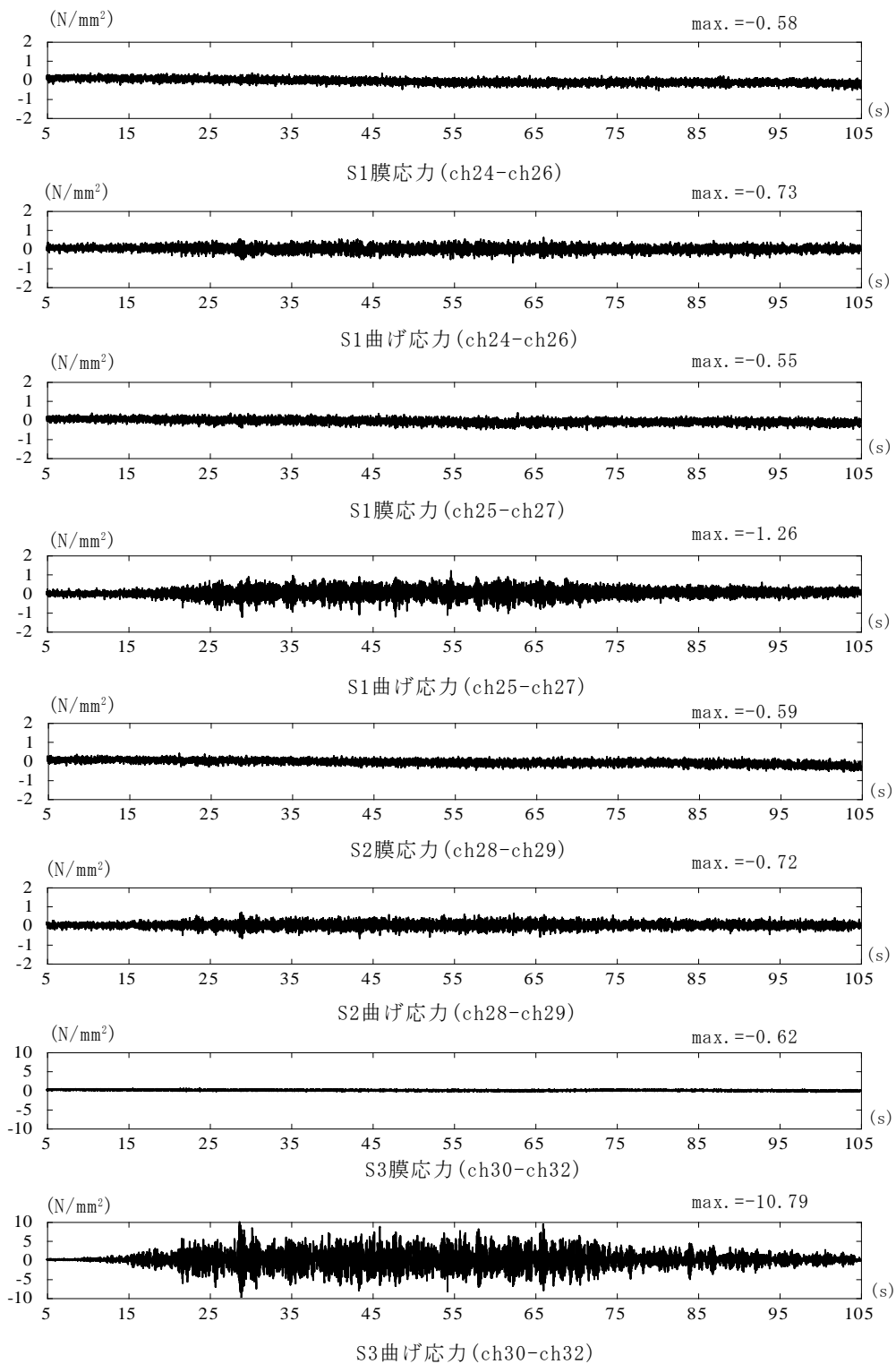


図 3.2-41(3) 各応力時刻歴、S1~S3(mwave-02(5.0m/s²))

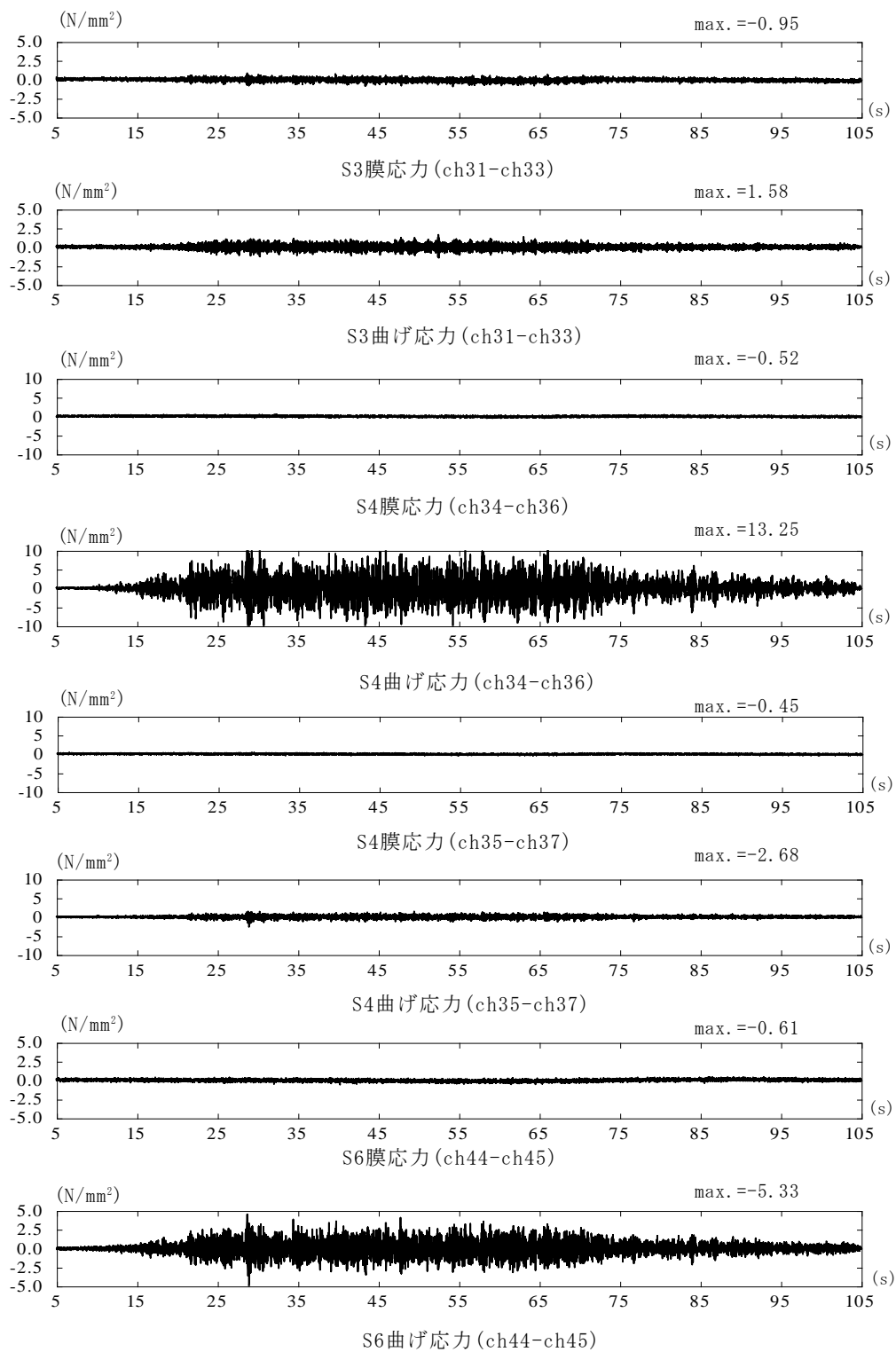


図 3.2-41(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (mwave-02(5.0m/s²))

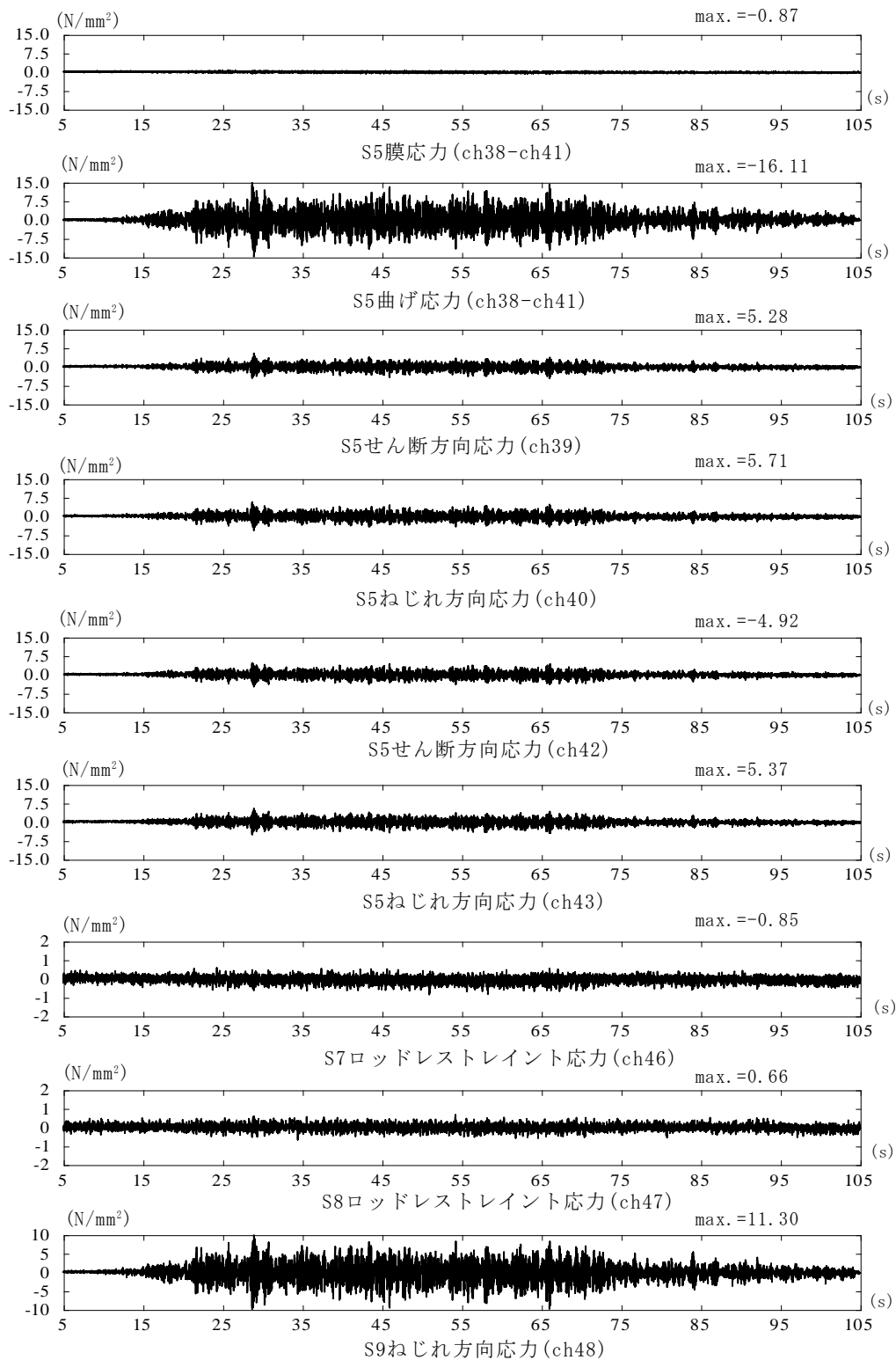


図 3.2-41(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(mwave-02(5.0m/s²))

表 3.2-26(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(mwave-02(12.0m/s²))

地震波:mwave-02,12.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1_X方向加速度(ch1)	49.89	3.80
A2_X方向加速度(ch2)	64.85	4.94
A2_Y方向加速度(ch17)	69.23	—
A2_Z方向加速度(ch20)	27.52	—
A3_X方向加速度(ch3)	60.80	4.63
A3_Y方向加速度(ch18)	30.11	—
A4_X方向加速度(ch4)	60.30	4.60
A4_Y方向加速度(ch19)	68.23	—
A4_Z方向加速度(ch21)	26.22	—
A5_X方向加速度(ch5)	89.39	6.81
A6_X方向加速度(ch6)	70.57	5.38
A7_X方向加速度(ch7)	47.98	3.66
A8_X方向加速度(ch8)	24.35	1.86
A8_Z方向加速度(ch22)	41.08	—
A9_X方向加速度(ch9)	21.63	1.65
A9_Z方向加速度(ch23)	46.00	—
A10_X方向加速度(ch10)	48.70	3.71
A12_X方向加速度(ch12)	13.12	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-26(2) 最大応力の一覧(mwave-02(12.0m/s²))

地震波:mwave-02,12.0m/s ²		
応力位置	最大応力(N/mm ²)	比率 12.0(m/s ²)/5.0(m/s ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	2.06	3.55
S1曲げ応力(ch24-ch26)	28.52	39.07
S1膜応力(ch25-ch27)	3.78	6.87
S1曲げ応力(ch25-ch27)	17.00	13.49
S2膜応力(ch28-ch29)	1.25	2.12
S2曲げ応力(ch28-ch29)	12.35	17.15
S3膜応力(ch30-ch32)	1.03	1.66
S3曲げ応力(ch30-ch32)	35.02	3.25
S3膜応力(ch31-ch33)	2.75	2.89
S3曲げ応力(ch31-ch33)	10.94	6.92
S4膜応力(ch34-ch36)	2.40	4.62
S4曲げ応力(ch34-ch36)	96.43	7.28
S4膜応力(ch35-ch37)	2.03	4.51
S4曲げ応力(ch35-ch37)	37.43	13.97
S6膜応力(ch44-ch45)	2.01	3.30
S6曲げ応力(ch44-ch45)	58.87	11.05
S5-膜応力(ch38-ch41)	6.21	7.14
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	104.15	6.46
S5-せん断方向応力(ch39)	32.82	6.22
S5-ねじれ方向応力(ch40)	41.00	7.18
S5-せん断方向応力(ch42)	34.86	7.09
S5-ねじれ方向応力(ch43)	32.32	6.02
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	3.72	4.38
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	3.51	5.32
S9-ねじれ方向応力(ch48)	77.52	6.86

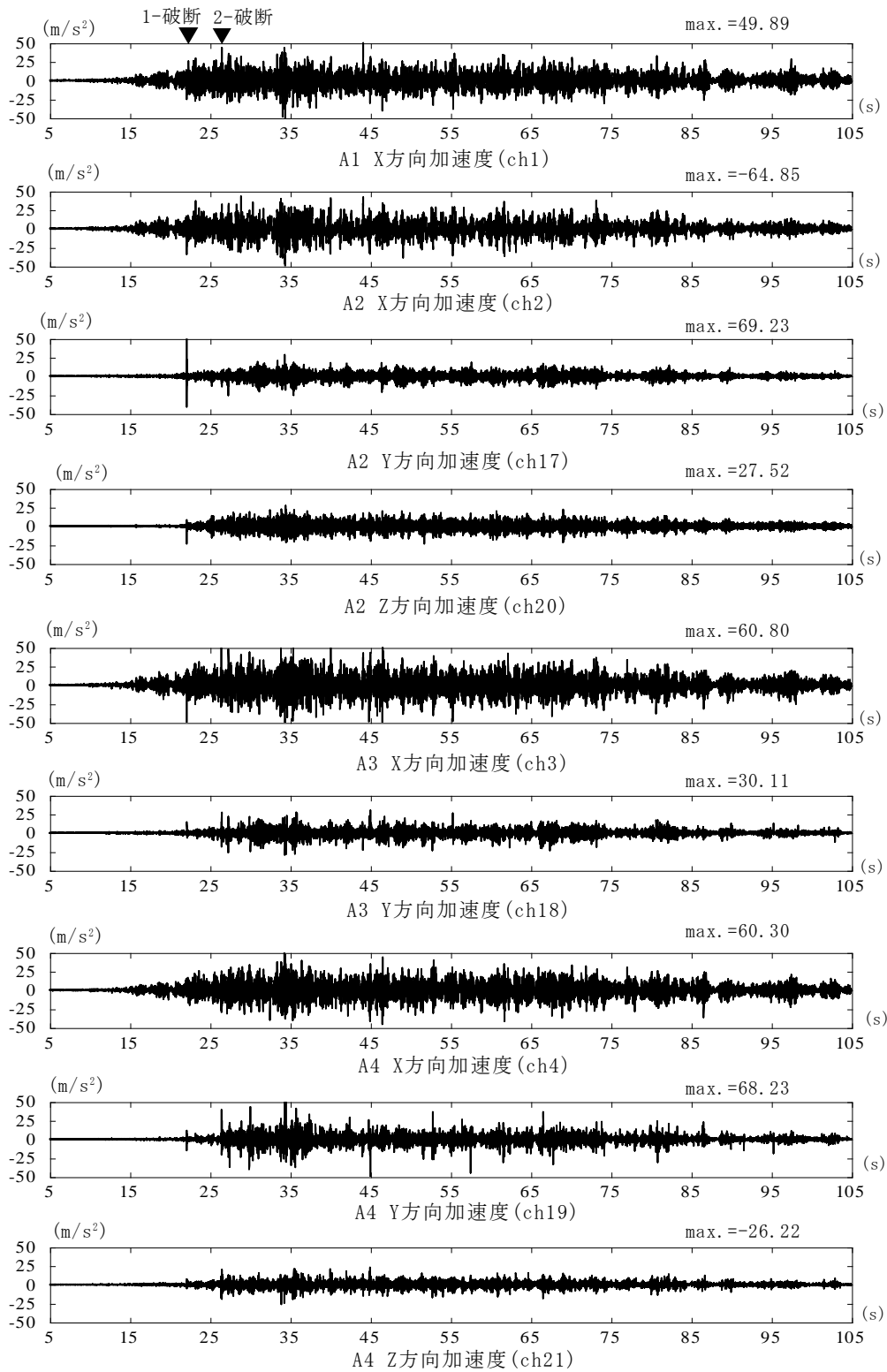


图 3.2-42(1) 加速度時刻歴、A1~A4(mwave-02(12.0m/s²))

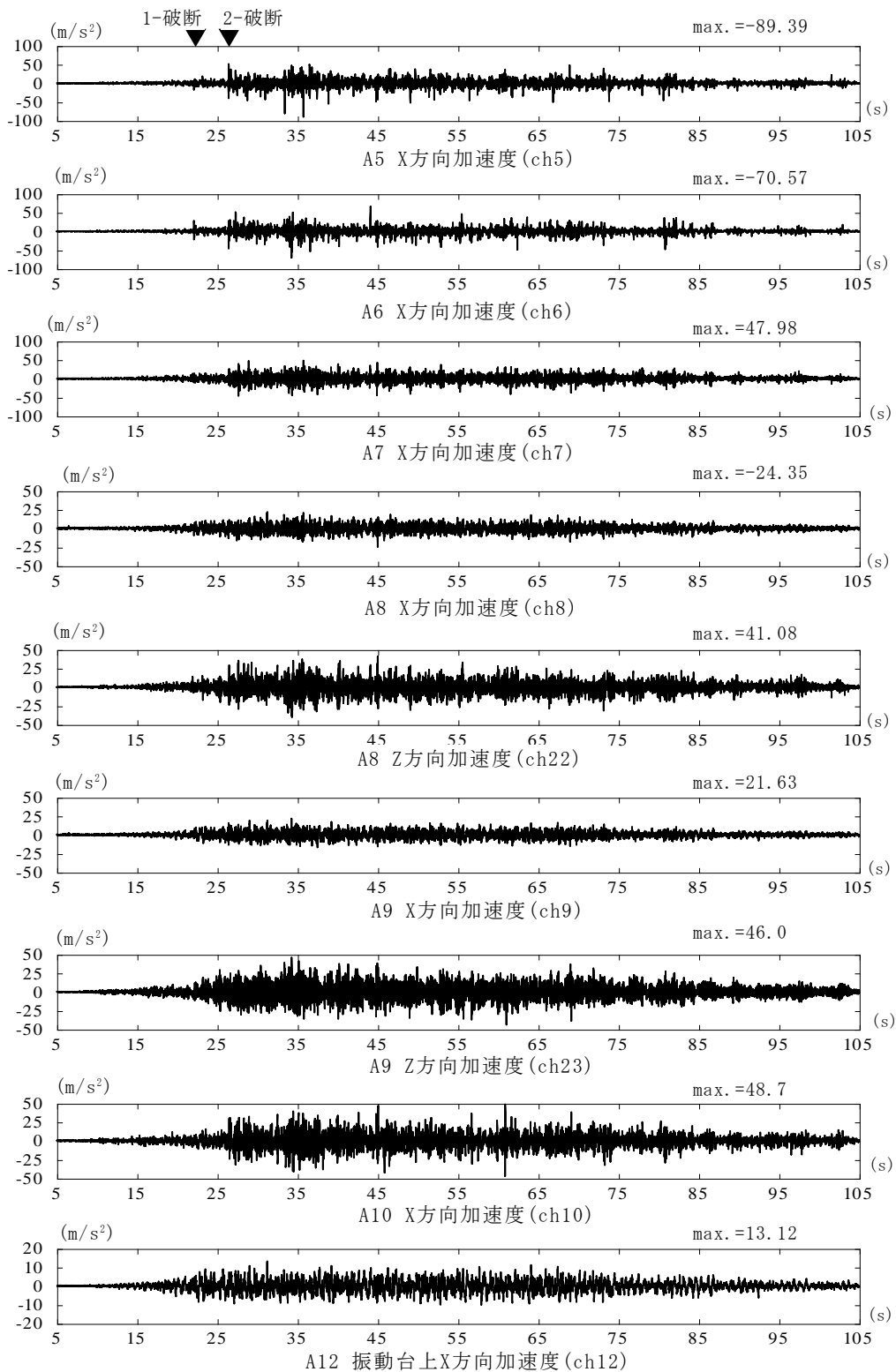


图 3.2-42(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12(mwave-02(12.0m/s²))

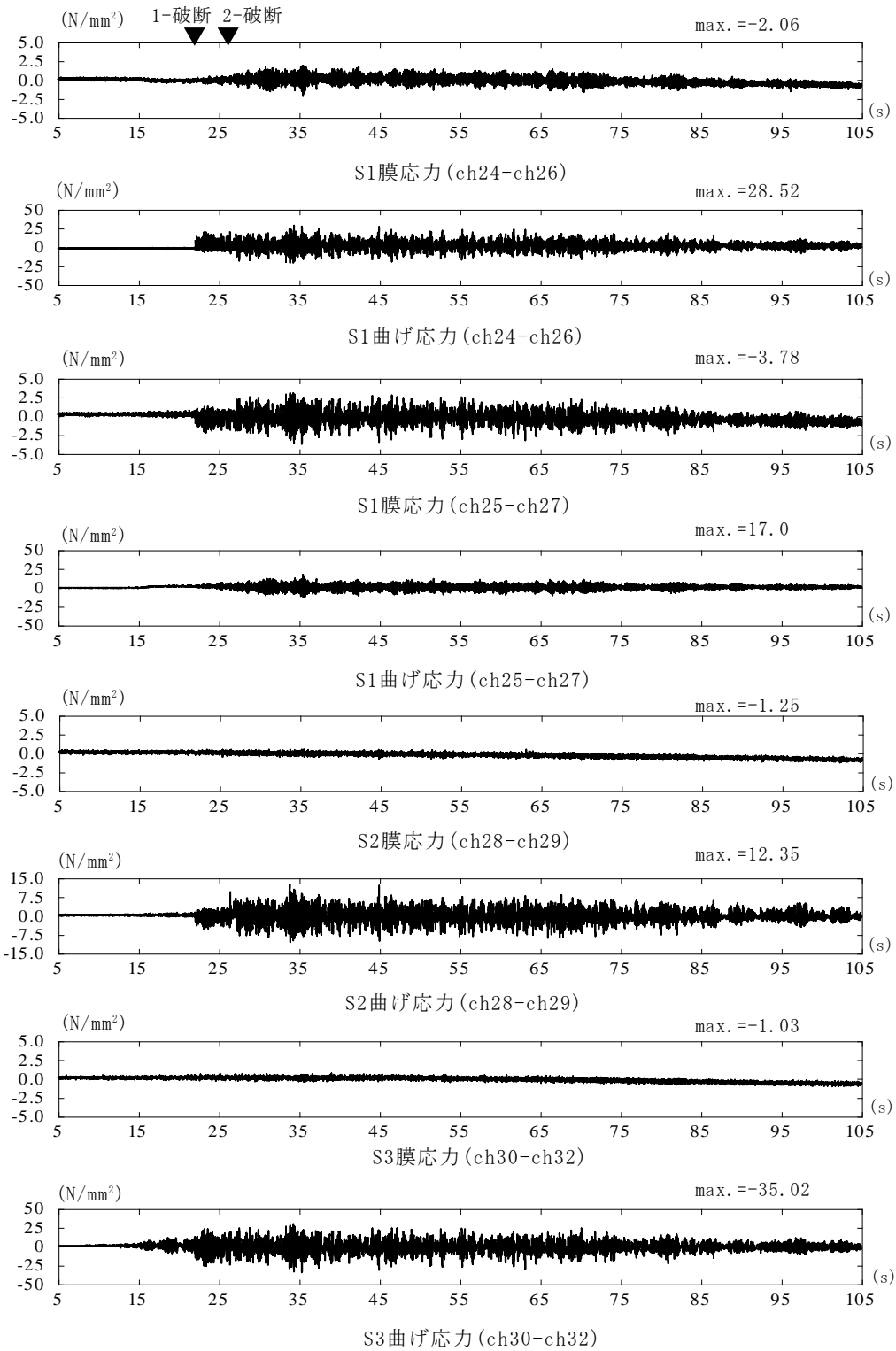


図 3.2-42(3) 各応力時刻歴、S1~S3(mwave-02(12.0m/s²))

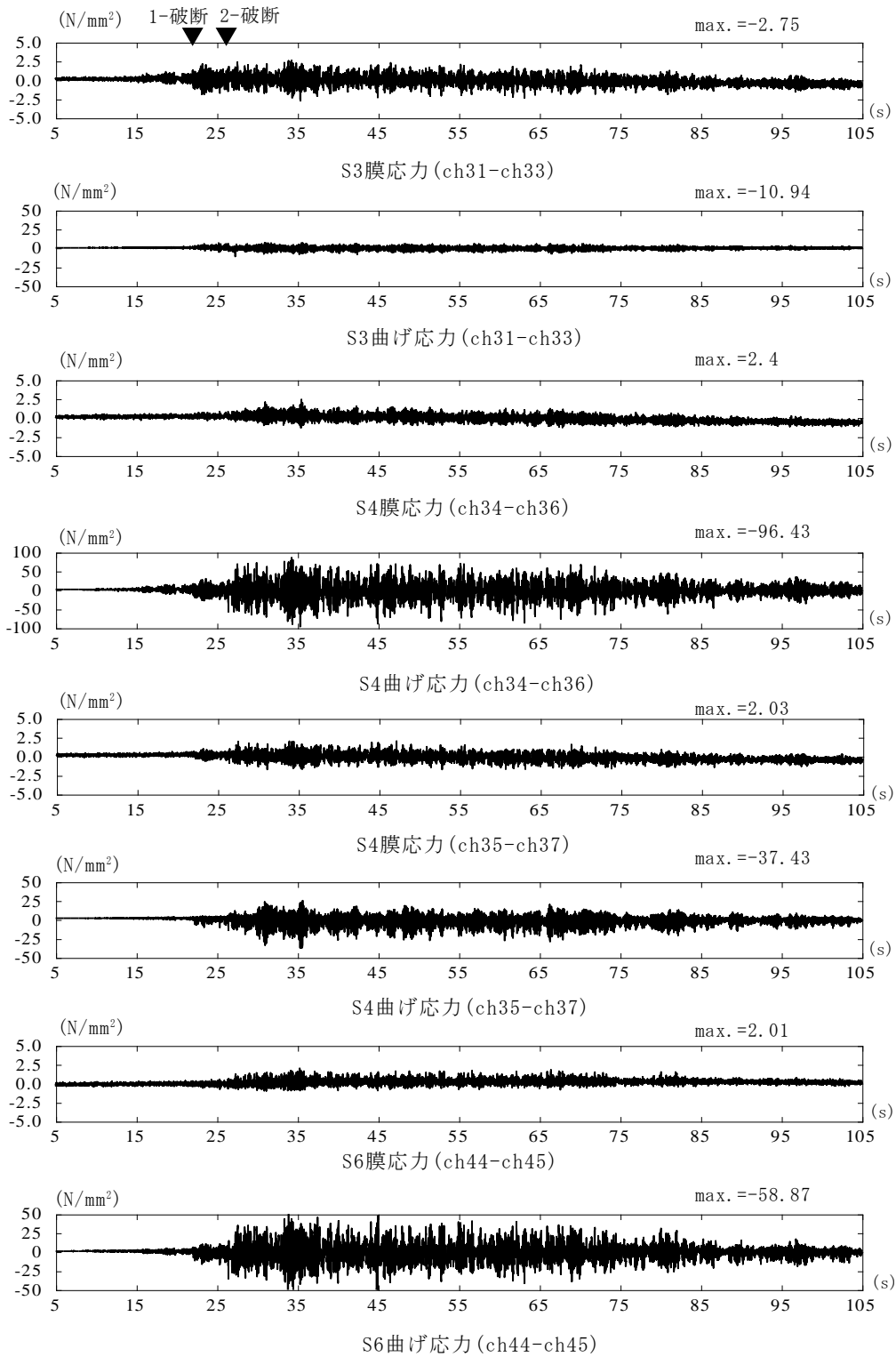


図 3.2-42(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (mwave-02(12.0m/s²))

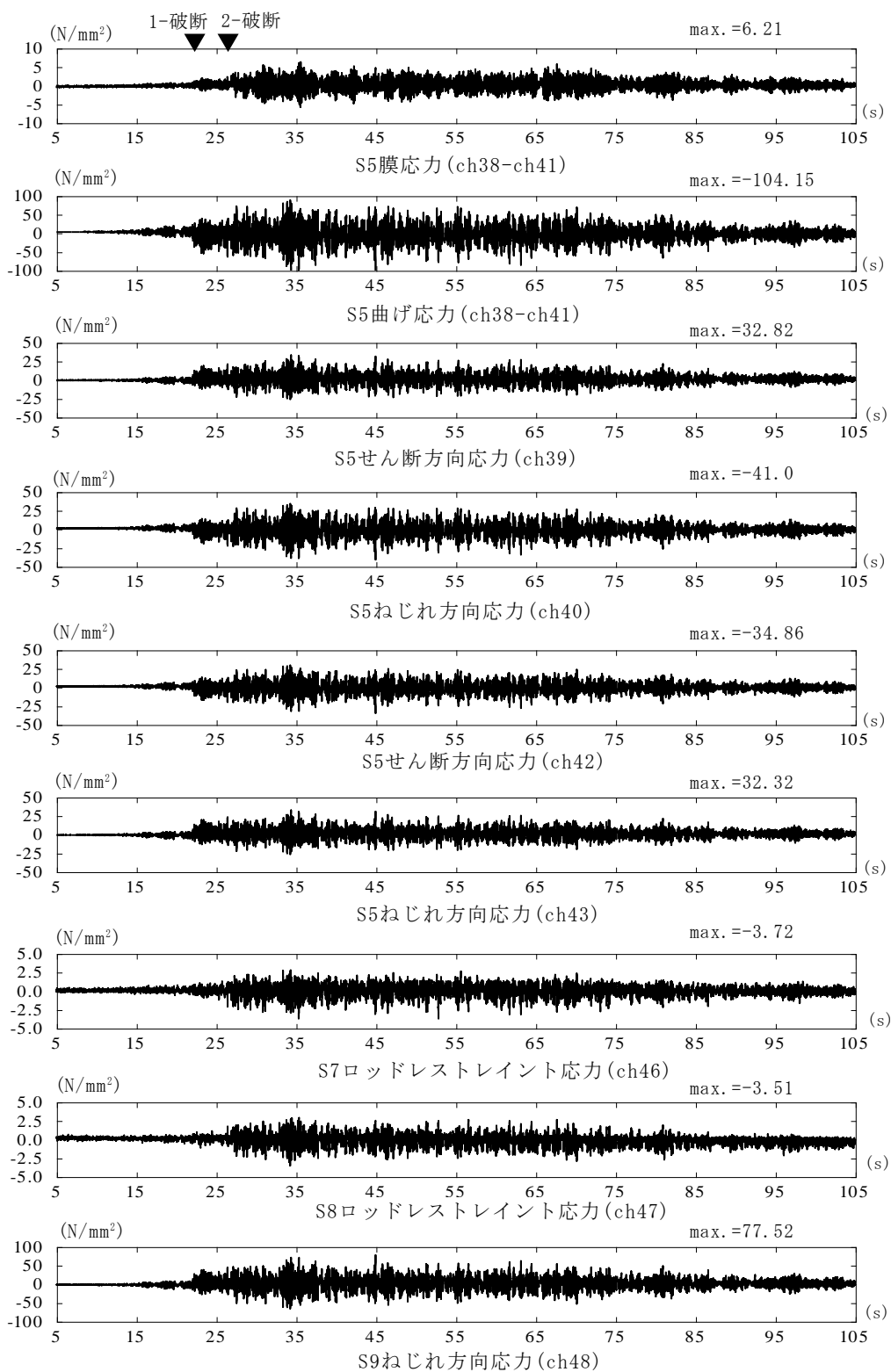


図 3.2-42(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(mwave-02(12.0m/s²))

3.2.4.3.4 wave-n05ew による水平加振試験結果

wave-n05ewによる水平加振試験結果の概要を表3.2-27に示す。すべての最大加速度の入力レベルにおける支持構造物1と2の破断は見られなかった。これは、地震応答スペクトルに見られるように卓越成分は10Hz以下(0.1秒以上)であり、支持構造物1,2付きの試験体の固有振動数である14Hzを励起する成分が少ないためと考えられる。

ここでは、他の地震動と同様に 5.0m/s^2 と 12.0m/s^2 のケースについて述べる。

(1) 最大加速度 5.0m/s^2 における試験結果

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表3.2-28(1)~(2)に示す。支持構造物1の位置(ch2)での応答倍率は1.4程度である。mwave01、mwave02よりも小さく、応答倍率が非常に小さいことがわかる。大きい最大応力はS5のX方向振動による曲げ応力、S4の曲げ応力、S9のねじれ方向応力の順である。

図3.2-43(1)~(5)に加速度時刻歴と応力の時刻歴を示す。加速度時刻歴から入力方向のX方向の応答が大ききことが分かるが、固有周期成分が励起されていないため、X方向の加速度波形は入力地震動の近い形状になっている。

横縦方向配管のX方向振動の曲げ応力の波形には、加速度波形と同様の傾向を見ることができる。

(2) 最大加速度 12.0m/s^2 における試験結果

最大加速度と最大応力の最大値の一覧を表3.2-29(1)~(2)に示す。支持構造物1の位置(ch2)での最大加速度の応答倍率1.3程度であり、 5.0m/s^2 とほぼ同じである。最も大きい最大応力はS5の曲げ応力とS4の曲げ応力でほぼ同程度ある。その次にS9のねじれ方向応力となっている。表3.2-29(2)中の 12.0m/s^2 と 5.0m/s^2 との最大応力の比率をみると、S4曲げ応力(ch34-ch36)は2.72であり、S5曲げ応力(ch38-ch41)は2.37、S9ねじれ方向応力(ch48)は2.41となっており、最大加速度の比率2.4と同程度である。

図3.2-44(1)~(5)に加速度時刻歴と応力の時刻歴を示す。最大加速度 5.0m/s^2 と同様の傾向が見られる。

表 3.2-27 地震波_wave-n05ew の加振結果の概要

地震波	加速度(m/s ²)	試験番号	破断・亀裂状況
wave-n05ew	2.5	2016-2-11-21	破断・亀裂なし
	5.0	○2016-2-11-22	破断・亀裂なし
	7.5	2016-2-11-23	破断・亀裂なし
	10.0	2016-2-11-24	破断・亀裂なし
	12.0	○2016-2-11-25	破断・亀裂なし

※○は次頁以降に時刻歴等を示す試験である。

支持構造物の破断なし

表 3.2-28(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(wave-n05ew(5.0m/s²))

地震波: wave-n05ew,5.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1 X方向加速度(ch1)	6.90	1.33
A2 X方向加速度(ch2)	7.13	1.38
A2 Y方向加速度(ch17)	0.92	—
A2 Z方向加速度(ch20)	1.01	—
A3 X方向加速度(ch3)	8.67	1.67
A3 Y方向加速度(ch18)	1.08	—
A4 X方向加速度(ch4)	6.85	1.32
A4 Y方向加速度(ch19)	1.34	—
A4 Z方向加速度(ch21)	1.47	—
A5 X方向加速度(ch5)	6.12	1.18
A6 X方向加速度(ch6)	5.36	1.03
A7 X方向加速度(ch7)	7.80	1.51
A8 X方向加速度(ch8)	5.97	1.15
A8 Z方向加速度(ch22)	4.07	—
A9 X方向加速度(ch9)	6.45	1.25
A9 Z方向加速度(ch23)	3.73	—
A10 X方向加速度(ch10)	6.31	1.22
A12 X方向加速度(ch12)	5.18	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-28(2) 最大応力の一覧(wave-n05ew(5.0m/s²))

地震波: wave-n05ew,5.0m/s ²	
応力位置	最大応力 (N/mm ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	0.45
S1曲げ応力(ch24-ch26)	1.17
S1膜応力(ch25-ch27)	0.51
S1曲げ応力(ch25-ch27)	0.50
S2膜応力(ch28-ch29)	0.56
S2曲げ応力(ch28-ch29)	0.39
S3膜応力(ch30-ch32)	0.45
S3曲げ応力(ch30-ch32)	5.76
S3膜応力(ch31-ch33)	0.47
S3曲げ応力(ch31-ch33)	0.44
S4膜応力(ch34-ch36)	0.55
S4曲げ応力(ch34-ch36)	8.72
S4膜応力(ch35-ch37)	0.38
S4曲げ応力(ch35-ch37)	0.87
S6膜応力(ch44-ch45)	0.38
S6曲げ応力(ch44-ch45)	2.28
S5-膜応力(ch38-ch41)	0.50
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	9.84
S5-せん断方向応力(ch39)	2.97
S5-ねじれ方向応力(ch40)	3.41
S5-せん断方向応力(ch42)	3.29
S5-ねじれ方向応力(ch43)	3.19
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	0.66
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	0.63
S9-ねじれ方向応力(ch48)	6.95

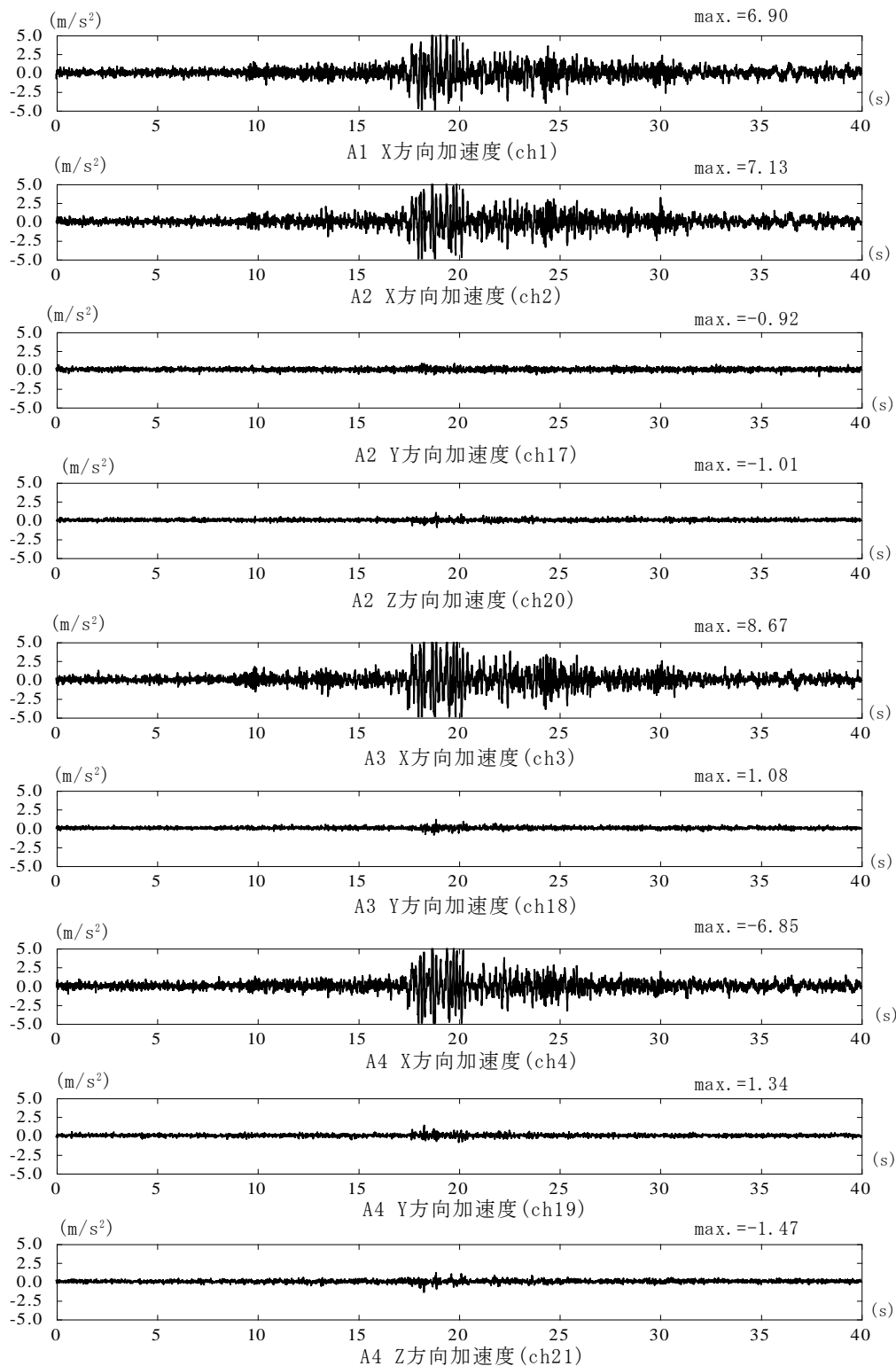


图 3.2-43(1) 加速度時刻歴、A1~A4(wave-n05ew(5.0m/s²))

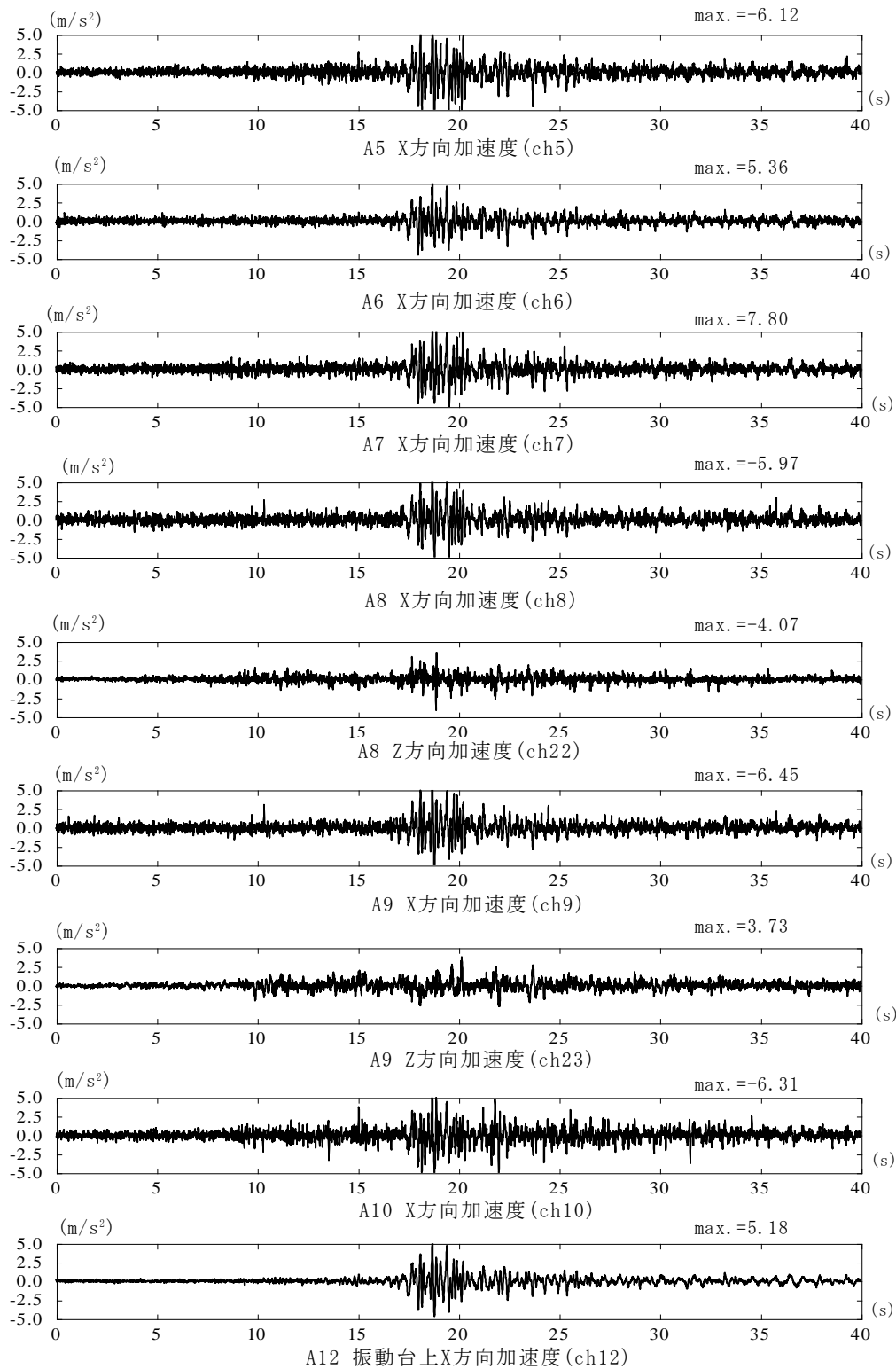


図 3.2-43(2) 加速度時刻歴、A5～A10・A12(wave-n05ew(5.0m/s²))

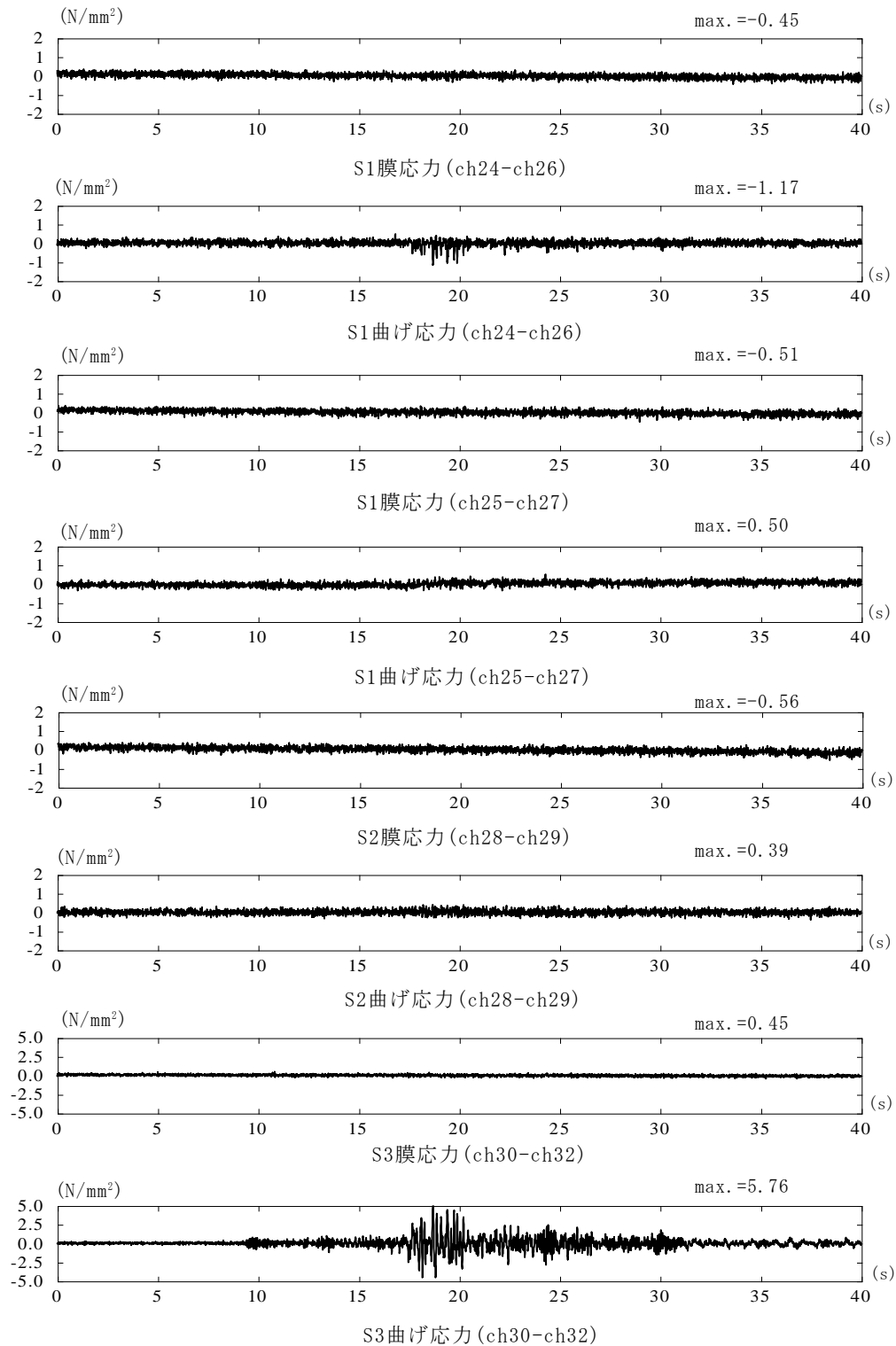


図 3.2-43(3) 各応力時刻歴、S1~S3(wave-n05ew(5.0m/s²))

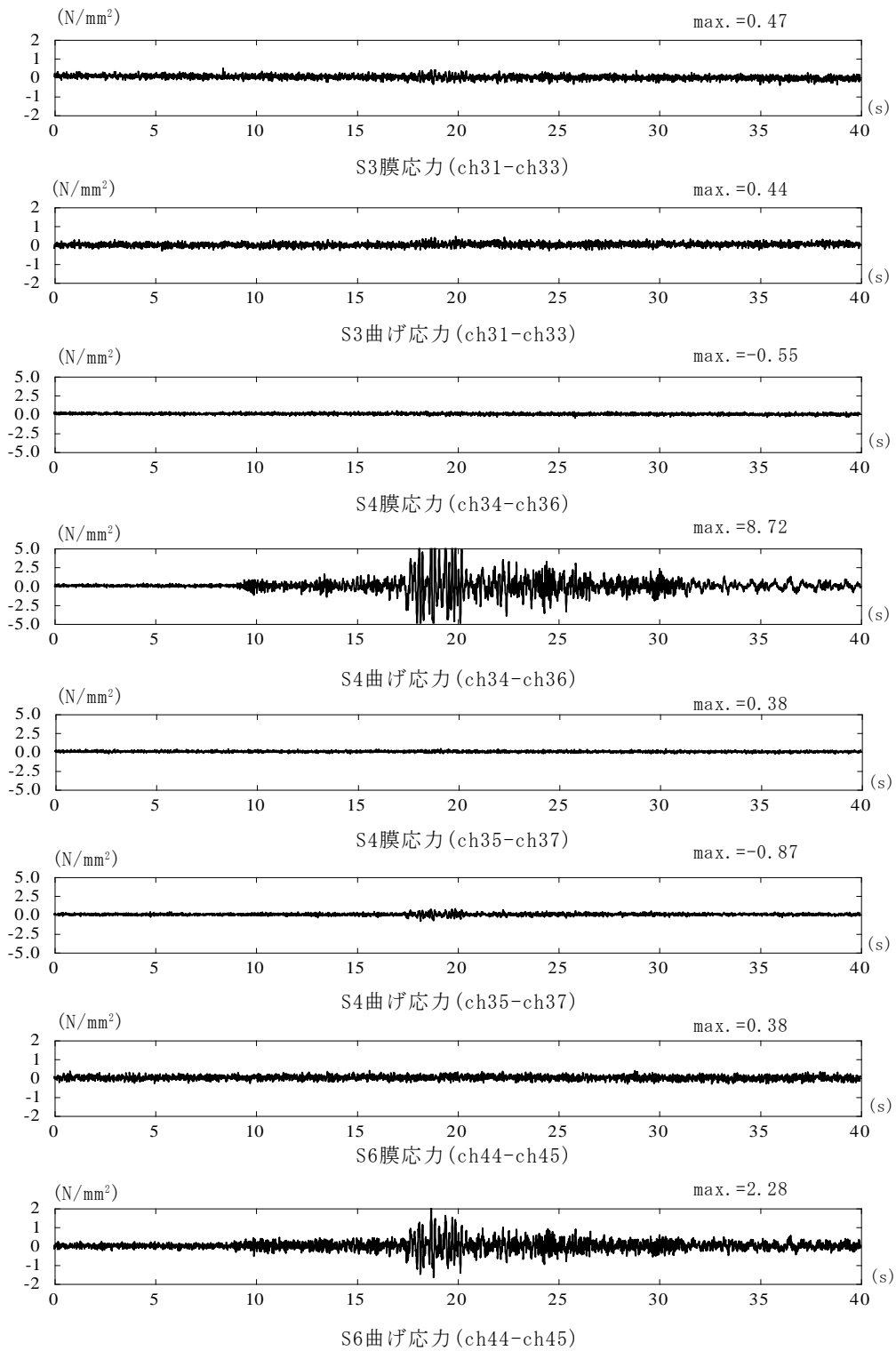


図 3.2-43(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (wave-n05ew(5.0m/s²))

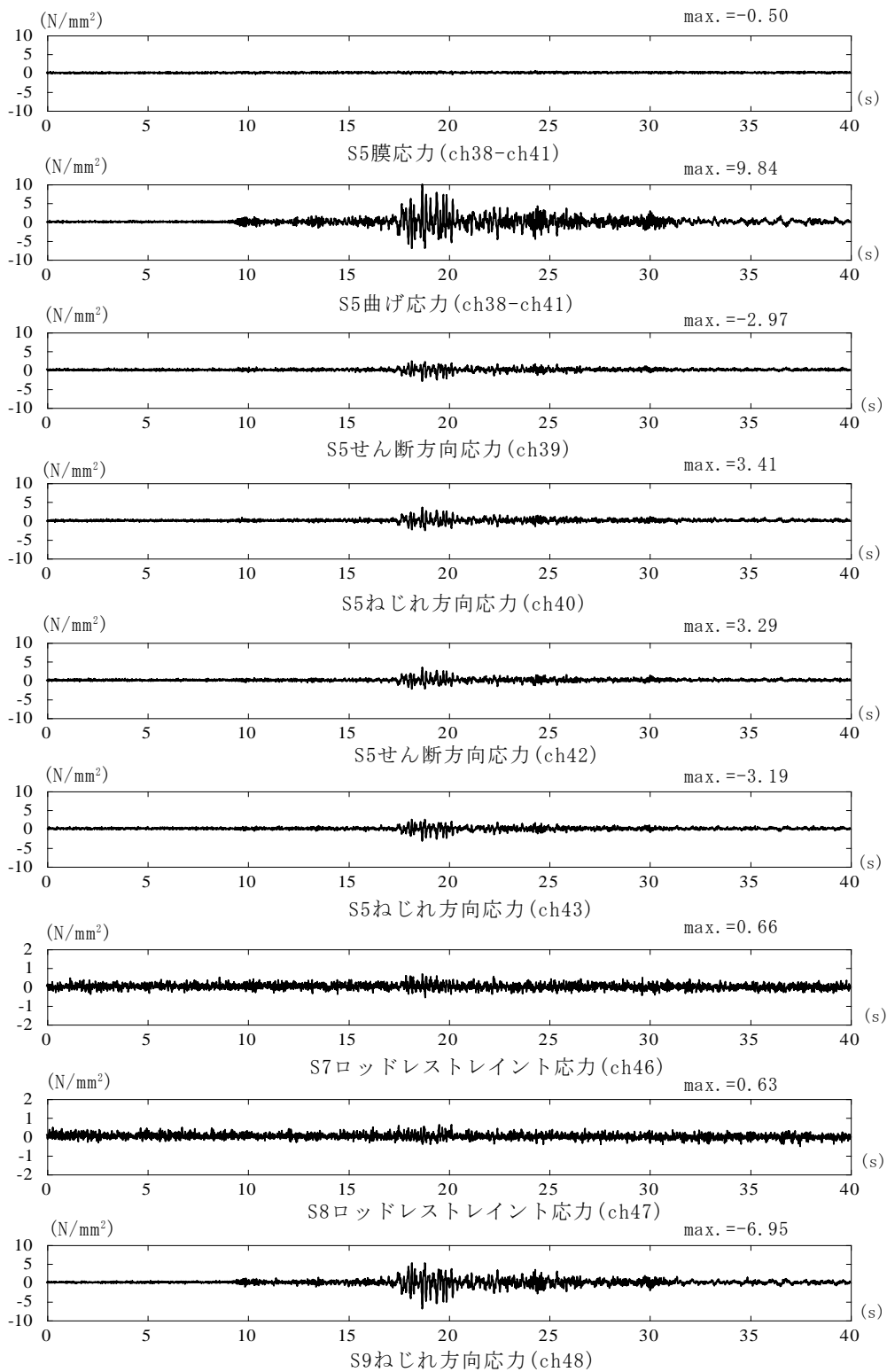


図 3.2-43(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(wave-n05ew(5.0m/s²))

表 3.2-29(1) 最大加速度と応答倍率の一覧(wave-n05ew(12.0m/s²))

地震波 : wave-n05ew,12.0m/s ²		
加速度計位置	最大加速度 (m/s ²)	応答倍率
A1_X方向加速度(ch1)	18.51	1.27
A2_X方向加速度(ch2)	18.74	1.28
A2_Y方向加速度(ch17)	3.60	—
A2_Z方向加速度(ch20)	1.50	—
A3_X方向加速度(ch3)	24.46	1.68
A3_Y方向加速度(ch18)	3.39	—
A4_X方向加速度(ch4)	25.86	1.77
A4_Y方向加速度(ch19)	3.93	—
A4_Z方向加速度(ch21)	3.05	—
A5_X方向加速度(ch5)	22.20	1.52
A6_X方向加速度(ch6)	13.71	0.94
A7_X方向加速度(ch7)	17.26	1.18
A8_X方向加速度(ch8)	19.95	1.37
A8_Z方向加速度(ch22)	7.28	—
A9_X方向加速度(ch9)	20.21	1.38
A9_Z方向加速度(ch23)	7.89	—
A10_X方向加速度(ch10)	15.78	1.08
A12_X方向加速度(ch12)	14.60	1.00

※応答倍率はA12_X方向加速度(ch12)に対する倍率である。

表 3.2-29(2) 最大応力の一覧(wave-n05ew(12.0m/s²))

地震波 : wave-n05ew,12.0m/s ²		
応力位置	最大応力 (N/mm ²)	比率 12.0(m/s ²)/5.0(m/s ²)
S1膜応力(ch24-ch26)	0.50	1.11
S1曲げ応力(ch24-ch26)	2.69	2.30
S1膜応力(ch25-ch27)	0.44	0.86
S1曲げ応力(ch25-ch27)	1.65	3.30
S2膜応力(ch28-ch29)	0.46	0.82
S2曲げ応力(ch28-ch29)	1.46	3.74
S3膜応力(ch30-ch32)	0.44	0.98
S3曲げ応力(ch30-ch32)	14.19	2.46
S3膜応力(ch31-ch33)	1.18	2.51
S3曲げ応力(ch31-ch33)	4.05	9.20
S4膜応力(ch34-ch36)	0.52	0.95
S4曲げ応力(ch34-ch36)	23.76	2.72
S4膜応力(ch35-ch37)	0.51	1.34
S4曲げ応力(ch35-ch37)	8.28	9.52
S6膜応力(ch44-ch45)	0.41	1.08
S6曲げ応力(ch44-ch45)	12.84	5.63
S5-膜応力(ch38-ch41)	0.94	1.88
S5-曲げ応力(ch38-ch41)	23.31	2.37
S5-せん断方向応力(ch39)	7.35	2.47
S5-ねじれ方向応力(ch40)	8.60	2.52
S5-せん断方向応力(ch42)	7.84	2.38
S5-ねじれ方向応力(ch43)	7.90	2.48
S7-ロッドレストレイント応力(ch46)	1.39	2.11
S8-ロッドレストレイント応力(ch47)	1.55	2.46
S9-ねじれ方向応力(ch48)	16.74	2.41

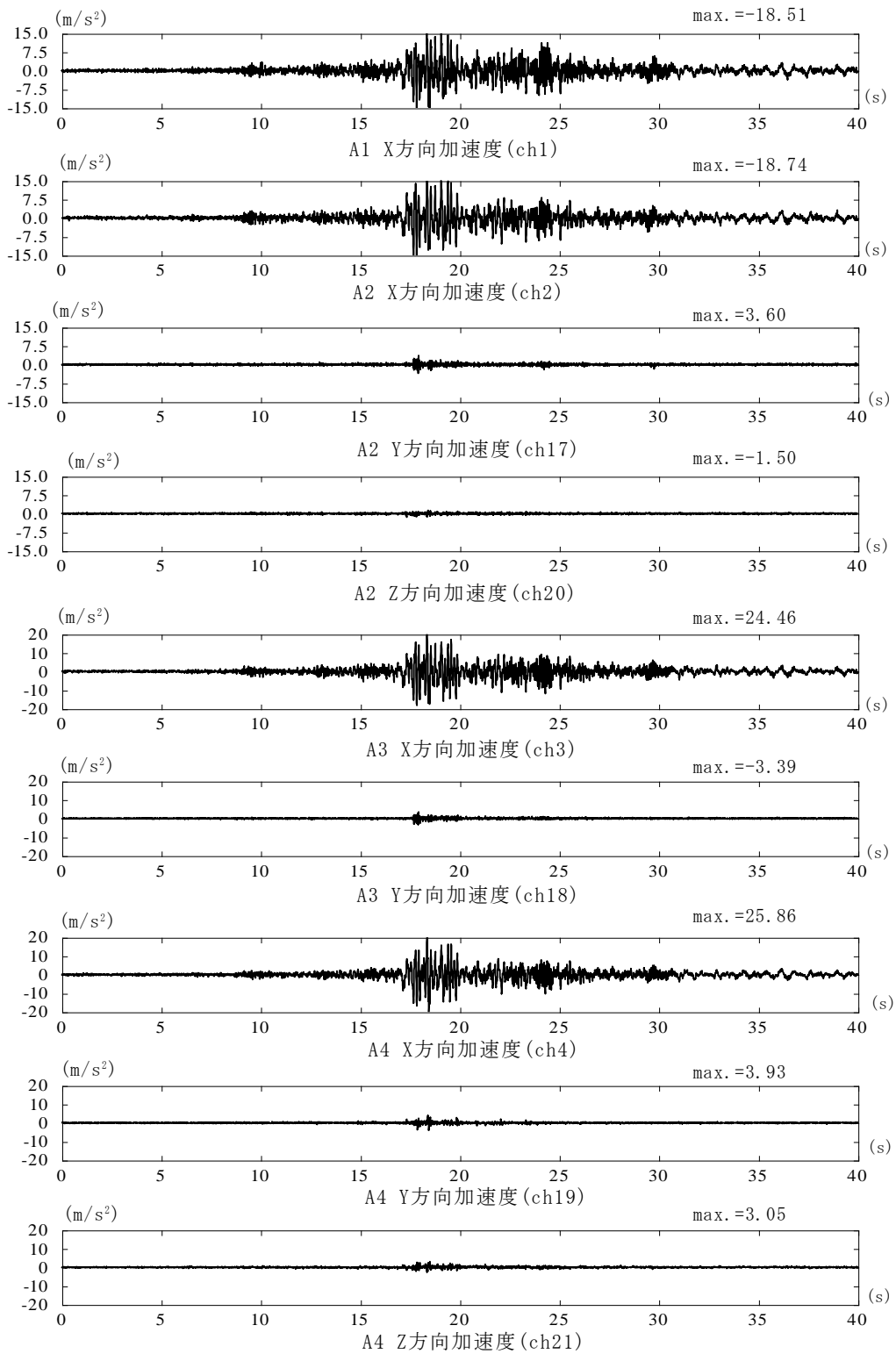


图 3.2-44(1) 加速度時刻歴、A1~A4(wave-n05ew(12.0m/s²))

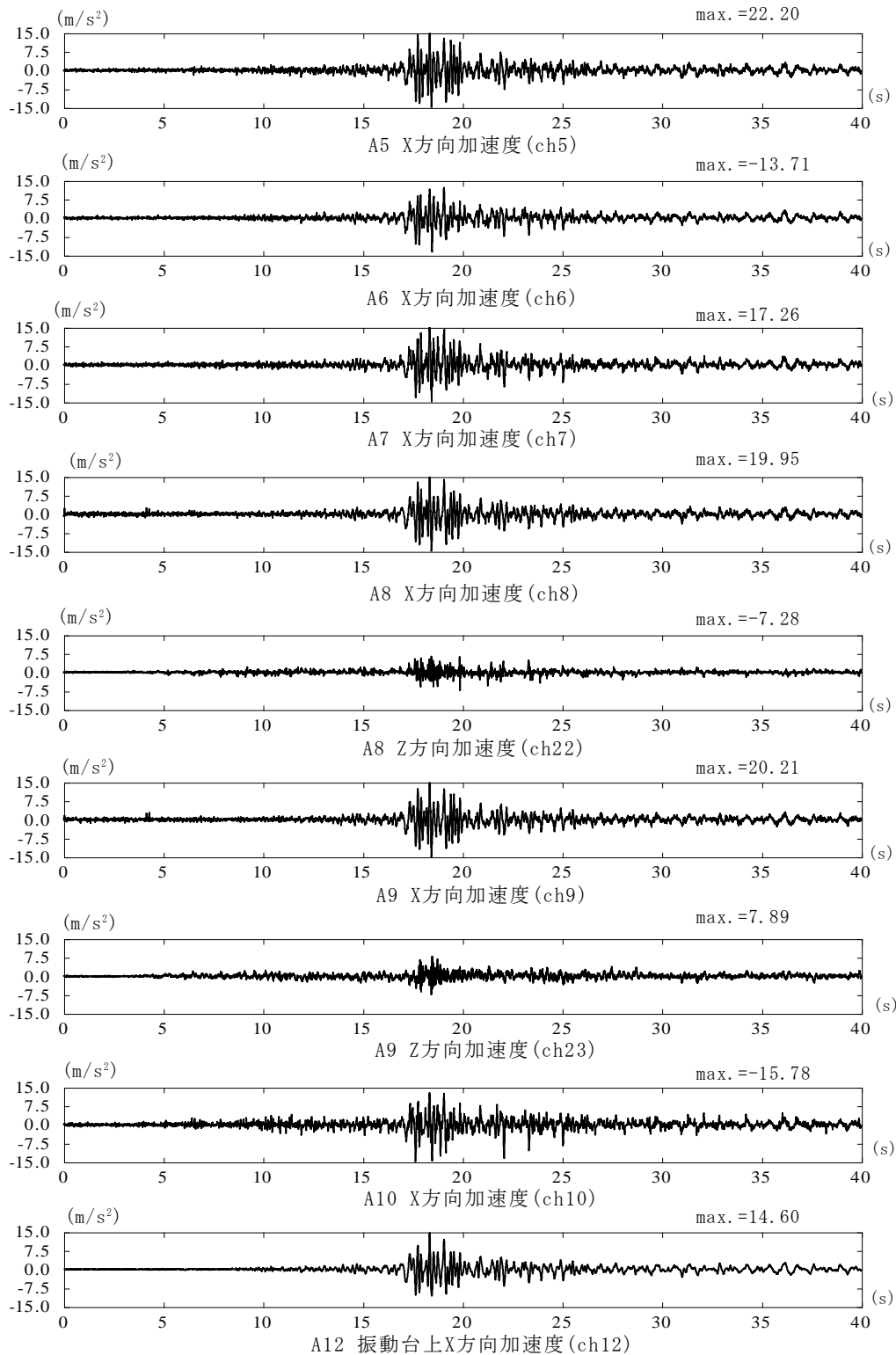


図 3.2-44(2) 加速度時刻歴、A5~A10・A12(wave-n05ew(12.0m/s²))

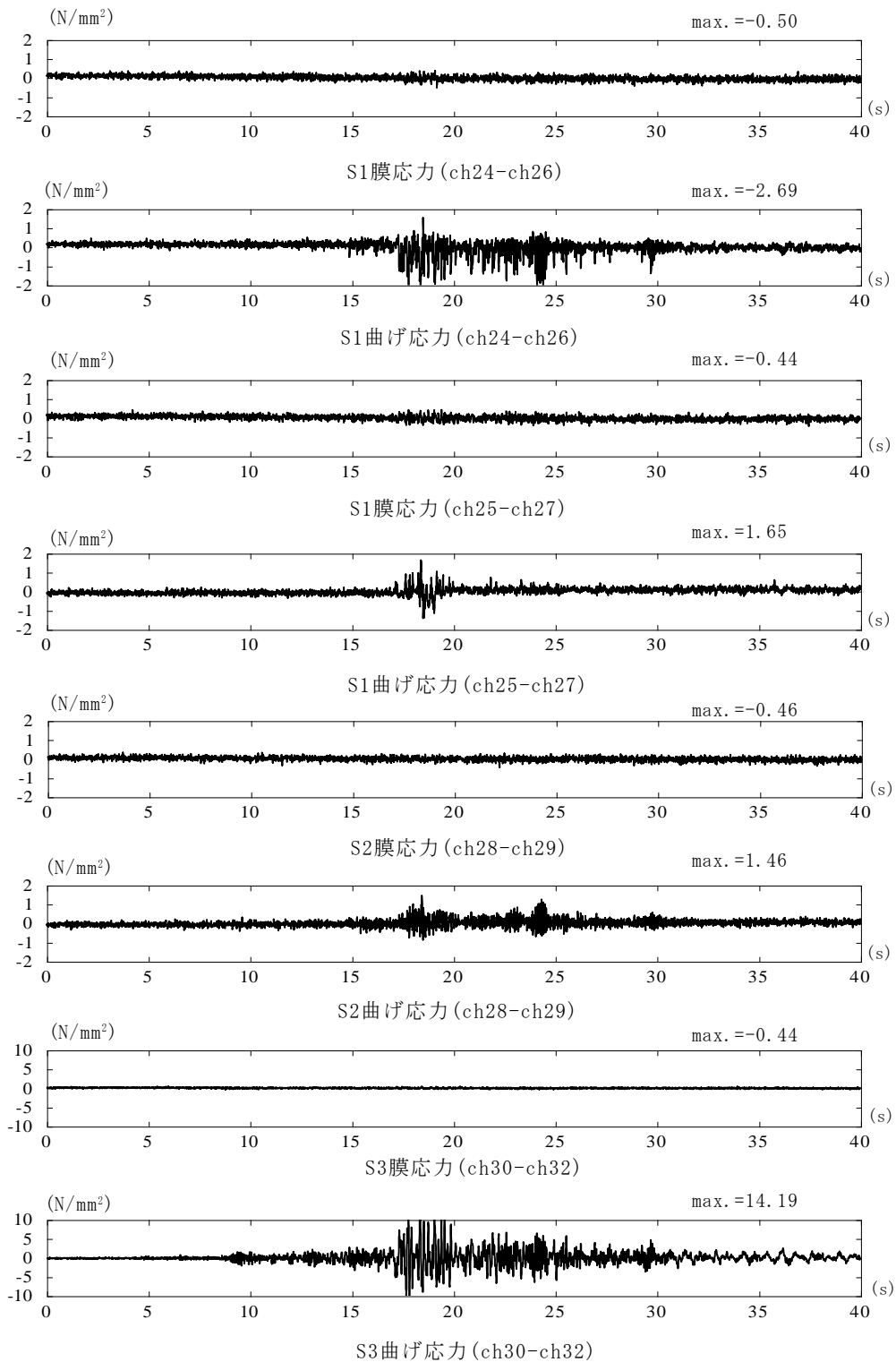


図 3.2-44(3) 各応力時刻歴、S1～S3(wave-n05ew(12.0m/s²))

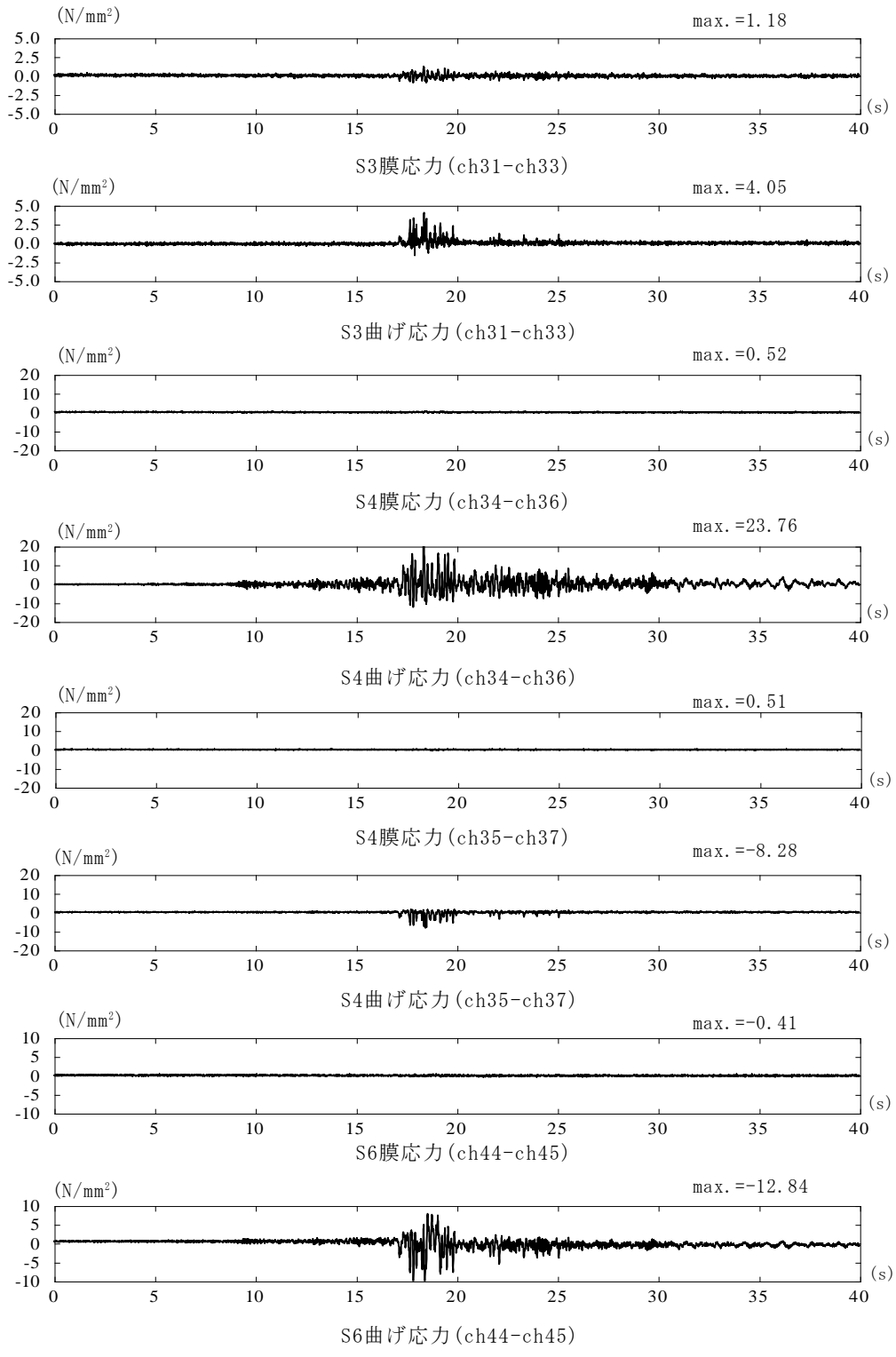


図 3.2-44(4) 各応力時刻歴、S3・S4・S6 (wave-n05ew(12.0m/s²))

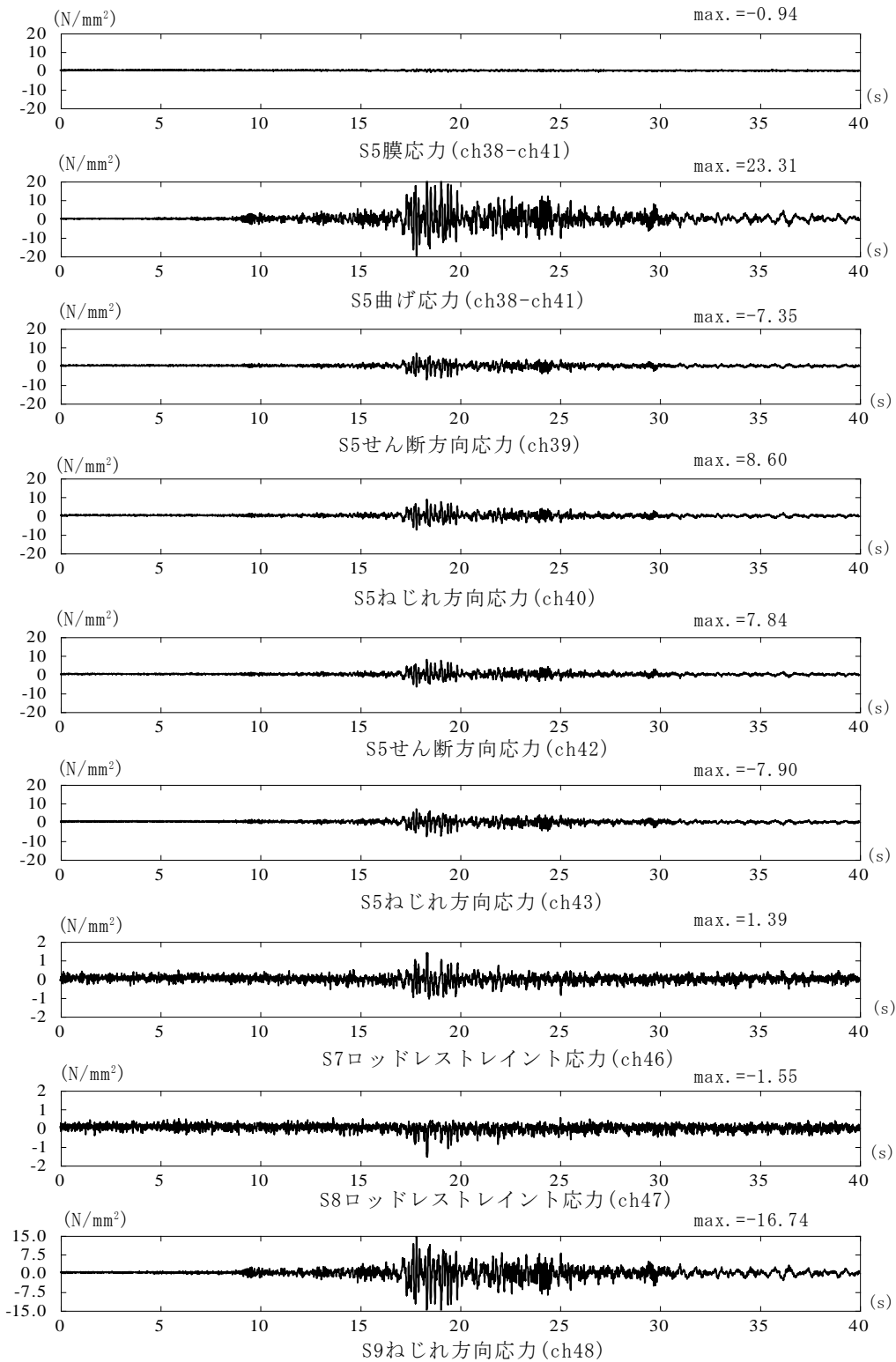


図 3.2-44(5) 各応力時刻歴、S5・S7～S9(wave-n05ew(12.0m/s²))

3.2.5 配管系フラジリティ評価手法の検討

3.2.5.1 地震応答解析手法の高度化

3.2.5.1.1 支持構造物の損傷(破断)を対象とした復元力特性

支持構造物の破断を対象として図 3.2-45 の復元力特性を用いる。

荷重が P_t または $-P_t$ を超えるまでは初期剛性 k_1 で線形に挙動する。 P_t または $-P_t$ を超えた場合は破断とみなし、負担荷重を 0 とした挙動をする。

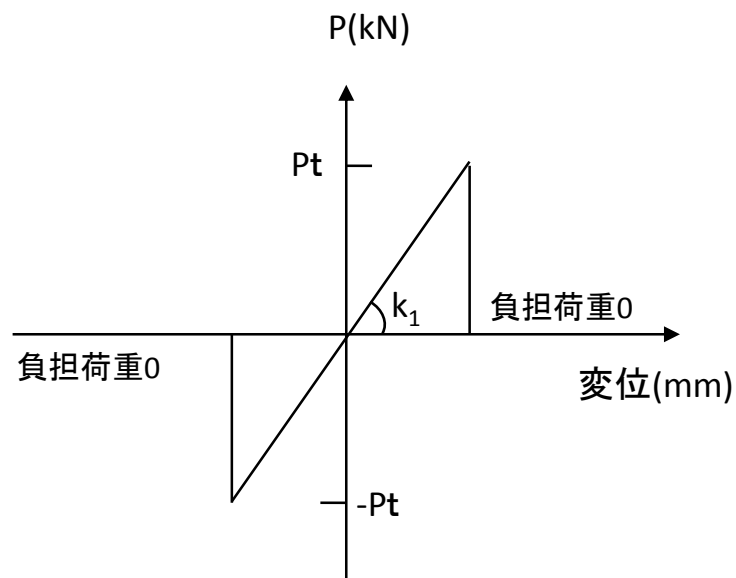


図 3.2-45 支持構造物の破断を対象として復元力特性

3.2.5.1.2 平成 26 年度の試験結果を用いた比較

支持構造物の損傷(破断)を模擬した復元力特性を用いた時刻歴地震応答解析を実施し、その妥当性について検討する。

支持構造物が 1 ヶ所の昨年度(平成 26 年度)の水平加動試験¹⁾の結果を用いて、応答解析結果と比較する。

また、平成 26 年度の試験結果は本年度同様に 40Hz 以上の成分を除いている。

(1) 解析モデル

平成 26 年度の配管系試験体の解析モデルは、図 3.2-46 に示すが、上方の水平方向配管に対しての支持構造物が 1 つである。

配管系試験体の形状、配管の径は本年度(平成 27 年度)と同一であるが、ロッドレストレイントによる支持が 125mm 高い位置で行われている。また、配管支持鉄骨は、本年度支持構造物の位置が 2 ヶ所になった関係で異なっている。

解析結果の比較に用いる平成 26 年度の配管系試験体では、支持構造物を中央に 25×15mm の開口を設けた厚さ 6mm のアクリル板(AK(25×15))とし、支持構造物の復元力特性では、初期剛性を 40N/mm²、破断変位を 2.5mm とする。破断変位は正弦波の掃引試験などを参考として設定した値である。

表 3.2-30(1)に示した解析モデルによる固有振動数を表 3.2-30(2)の試験結果と比較する。試験結果の支持構造物付き場合は支持構造物が AK(20×15)の場合であるので参考として示しているが、解析による固有振動数は比較的近い値が得られていると考えられる。

(2) 応答解析結果

比較のために行った応答解析は以下の 2 ケースである。

- ・正弦波の掃引試験(3→17Hz、最大加速度 1.5m/s²)
- ・地震波 mwave-02 の 60%入力(100%の最大加速度は 8.9m/s²)

解析モデルの粘性減衰は、レーリー減衰して 10Hz と 30Hz で $h=0.015$ となるように設定する。これは、3.2.3.3 で示した本年度検討の共振曲線に $1/\sqrt{2}$ 法を適用して得られた結果と同手法にはばらつきが大きいことを考慮して設定したものである。支持構造物 1,2 なしの 1 次固有周期 8.0Hz で $h=0.017$ 、支持構造物 1,2 付きの 1 次固有周期 14.460Hz で $h=0.013$ が設定されている。

1) 正弦波の掃引試験(3→17Hz、最大加速度 1.5m/s²)の試験結果との比較

解析モデルへの入力正弦波は振動台上で計測されたものを使用する。

最大応答値を試験結果と比較して表 3.2-31 に示し、支持構造物の履歴特性を図 3.2-49 に示している。応答解析と振動試験の時刻歴波形について、代表的なものを図 3.2-50(1)～(2)に示す。試験の計測点位置とその記号については図 3.2-48(1)～(2)に示している。試験結果の配管応力は計測された配管力ひずみに鋼材のヤング率($2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)を乗じて算出している。応答解析結果の配管応力は、解析結果の

部材曲げモーメントを断面係数で除して算出した曲げ応力である。時刻歴波形の A2(X)、A3(X)は上方の横方向配管の計測点における X 方向加速度であり、A9(X)は下方の横方向配管における手前の計測点の X 方向加速度である。H3(X)は後面の縦方向配管の下部支持部分近傍での X 方向振動の配管応力、H13(X)は前面の縦方向配管のロッドレスト近傍での X 方向振動の配管応力である。H8(X)は支持構造物近傍の X 方向振動の配管応力である。

解析の時刻歴波形は試験と同様に、正弦波入力による共振の影響で振幅が大きくなり破断が生じ、破断が発生すると配管系試験体の固有振動数が変化するので、応答が急激に小さくなっている。破断時刻は、応答解析では 170 秒手前であるが、振動試験では 170 秒を過ぎている。これは、固有振動数の相違などが影響していると考えられる。最大値の一覧において、試験結果の加速度値が極端に大きい部位は、破断時のパルス波の影響も考えられる。また、解析の Y 方向の加速度が試験より小さくなっている傾向が見られるが、これは、解析の場合、支持構造物の破断は X 方向の自由度のみであるので、Y、Z 方向には直接影響しないためと考えられる。最大応力の発生する部位とその大きさはよい対応関係が見られると考えられる。

2) mwave-02 の 60%入力による試験結果との比較

昨年度の mwave-02 入力の試験は、支持構造物の破断を対象とした場合に 60%入力として実施した。mwave-02 が 100%の場合の最大加速度は 890m/s^2 である。解析の入力地震動は、原波の振幅を 60%にしたものを使用する。振動台上の記録を用いていないので時刻歴波形の時刻は試験と解析で同一の時刻を示していない。

正弦波加振の場合と同様の、最大応答値の比較の一覧、代表点での時刻歴波形の比較などを表 3.2-32、図 3.2.52 (1)～(2)に示している。破断は、解析で多少早く発生しているが、破断後に特に応力の応答波形が大きくなる傾向は両者に見られる。全体的に試験結果の値が大きくなる傾向が見られるが、最大応力においては、解析と試験の差は小さいと考えられる。

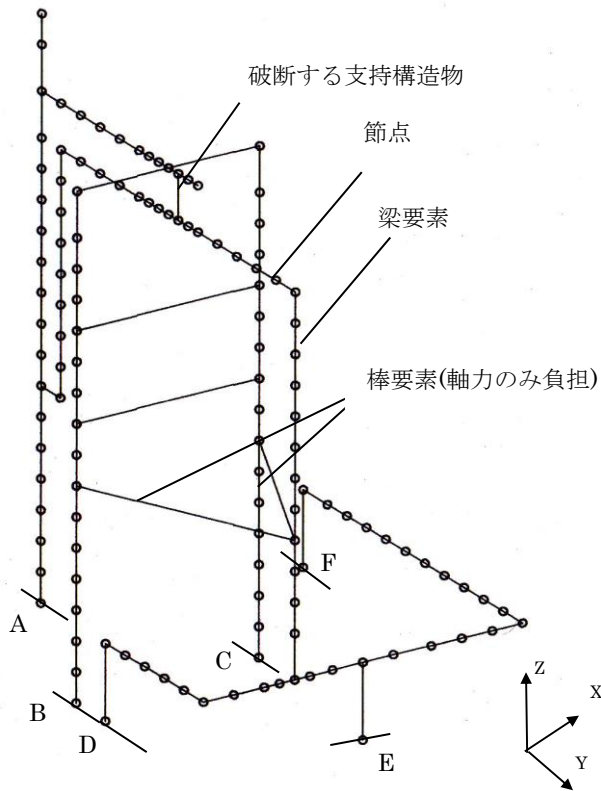
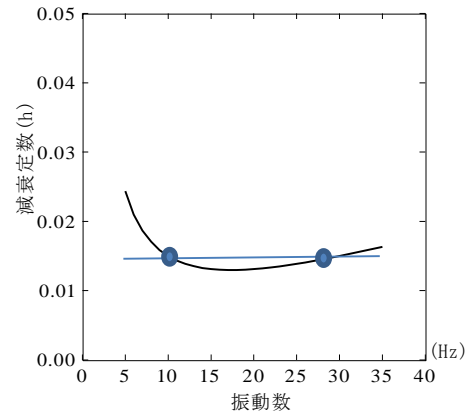


図 3.2-46 解析モデル(平成 26 年度)



(10Hz と 30Hz で $h=0.015$ として)

図 3.2-47 設定した粘性減衰特性
(レーリー減衰として設定)

表 3.2-30(1) 解析モデル(平成 26 年度)の固有振動数

	1次	2次	3次
支持構造物なし	8.62Hz	(16.27Hz)	18.88Hz
支持構造物AK(25×15)	11.84Hz	18.96Hz	(29.03Hz)

注:()内はY方向が卓越する振動モード

表 3.2-30(2) 振動試験による固有振動数(平成 26 年度)

	1次	2次
支持構造物なし	8.2Hz	17.8Hz
支持構造物AK(20×15)	13.3Hz	18.0Hz

注: 支持構造物AK(20×15)の場合である参考として示す。

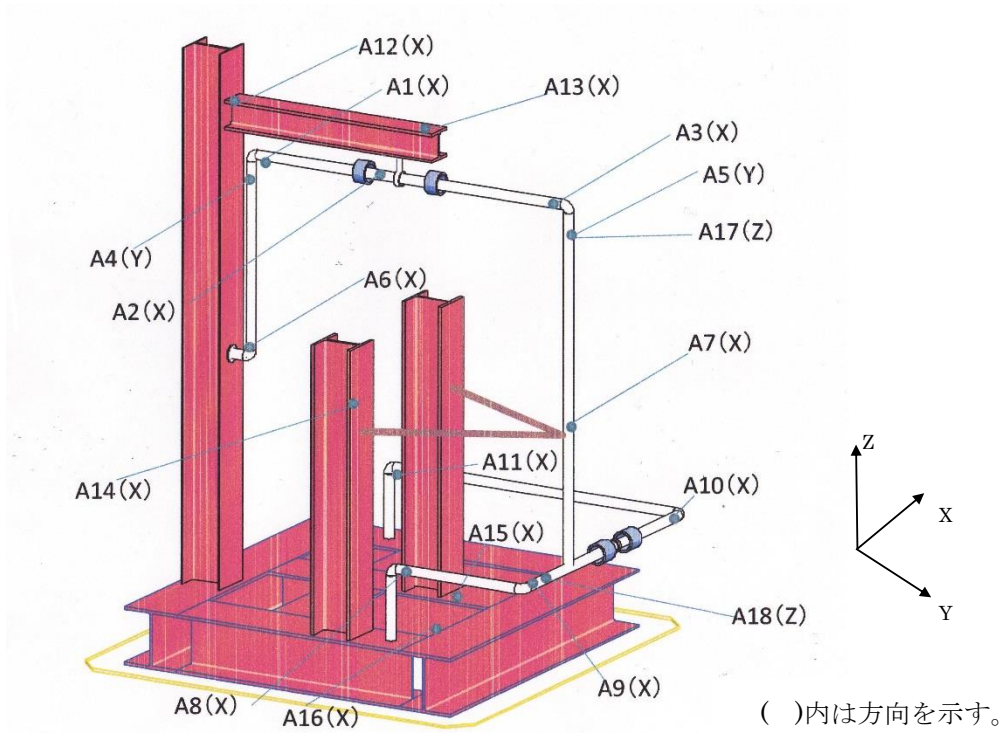


図 3.2-48(1) 加速度計の設置位置と記号(平成 26 年度試験)

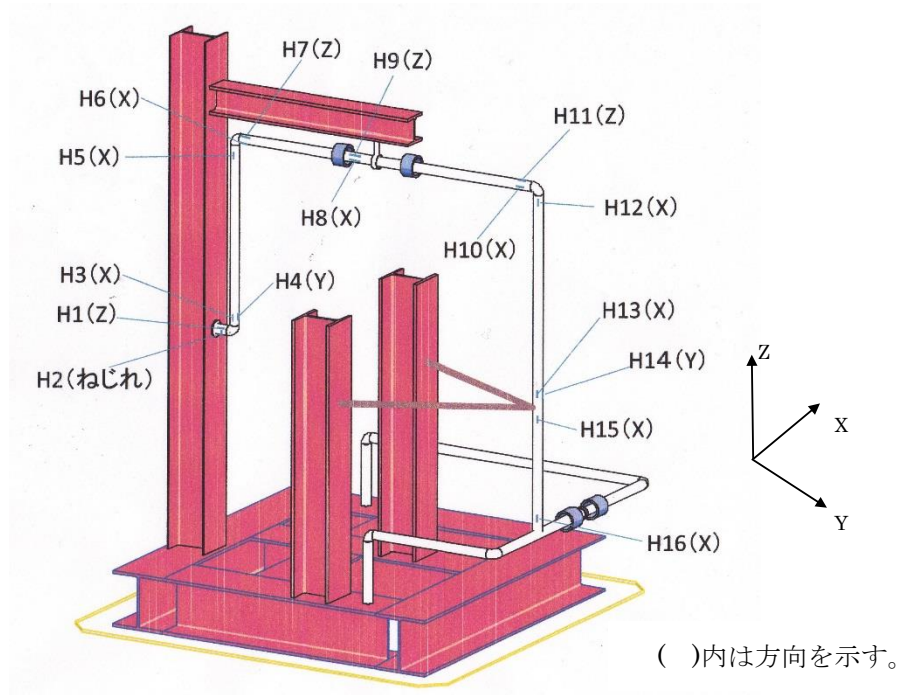


図 3.2-48(2) 歪ゲージの設置位置と記号(平成 26 年度試験)

表 3.2-31 最大応答値の比較(3→17Hz、最大加速度 1.5m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1(X)	15.93	14.85	H1(Z)	2.36	6.56
A2(X)	17.69	15.97	H2(ねじれ)	3.71	—
A3(X)	21.12	15.28	H3(X)	21.03	23.28
A4(Y)	3.53	0.24	H4(Y)	2.72	0.20
A5(Y)	3.25	0.24	H5(X)	5.76	3.86
A6(X)	35.06	2.09	H6(X)	2.71	3.83
A7(X)	15.95	2.42	H7(Z)	2.56	0.21
A8(X)	24.26	1.96	H8(X)	8.79	9.44
A9(X)	8.25	5.52	H9(Z)	9.29	1.50
A10(X)	6.53	5.53	H10(X)	3.93	2.02
A11(X)	26.81	1.91	H11(Z)	2.08	2.03
A16(X)	1.81	1.81	H12(X)	3.49	1.64
A17(Z)	—	1.22	H13(X)	19.40	18.52
A18(Z)	—	2.14	H14(Y)	2.92	2.21
			H15(X)	20.52	18.52
			H16(X)	19.00	12.84

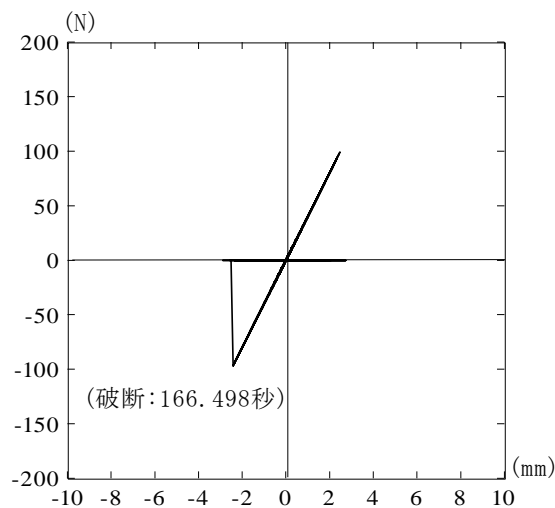


図 3.2-49 支持構造物の荷重—変位関係(3→17Hz、最大加速度 1.5m/s²)

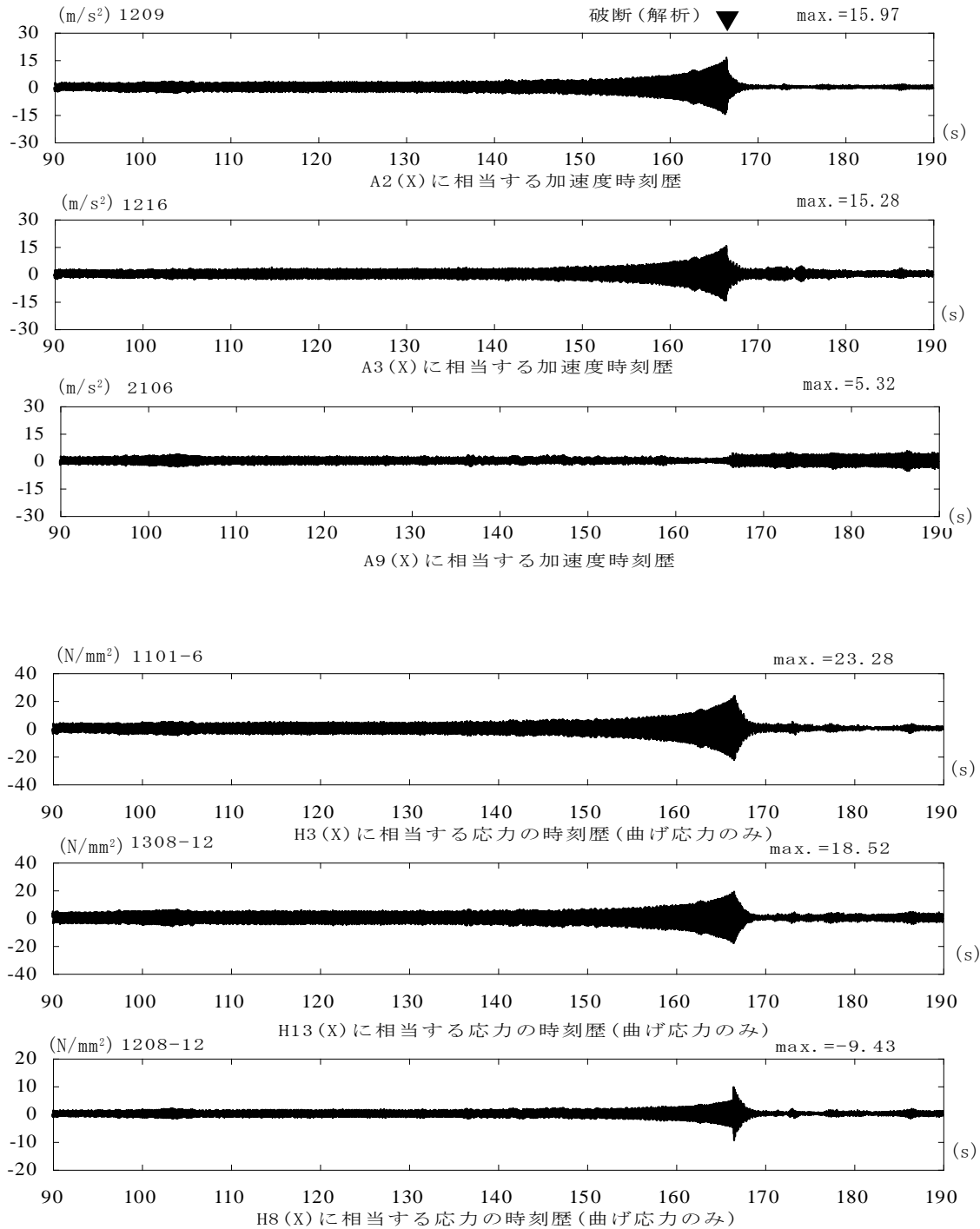


図 3.2-50(1) 地震応答解析による時刻歴(3→17Hz、最大加速度 1.5m/s²)

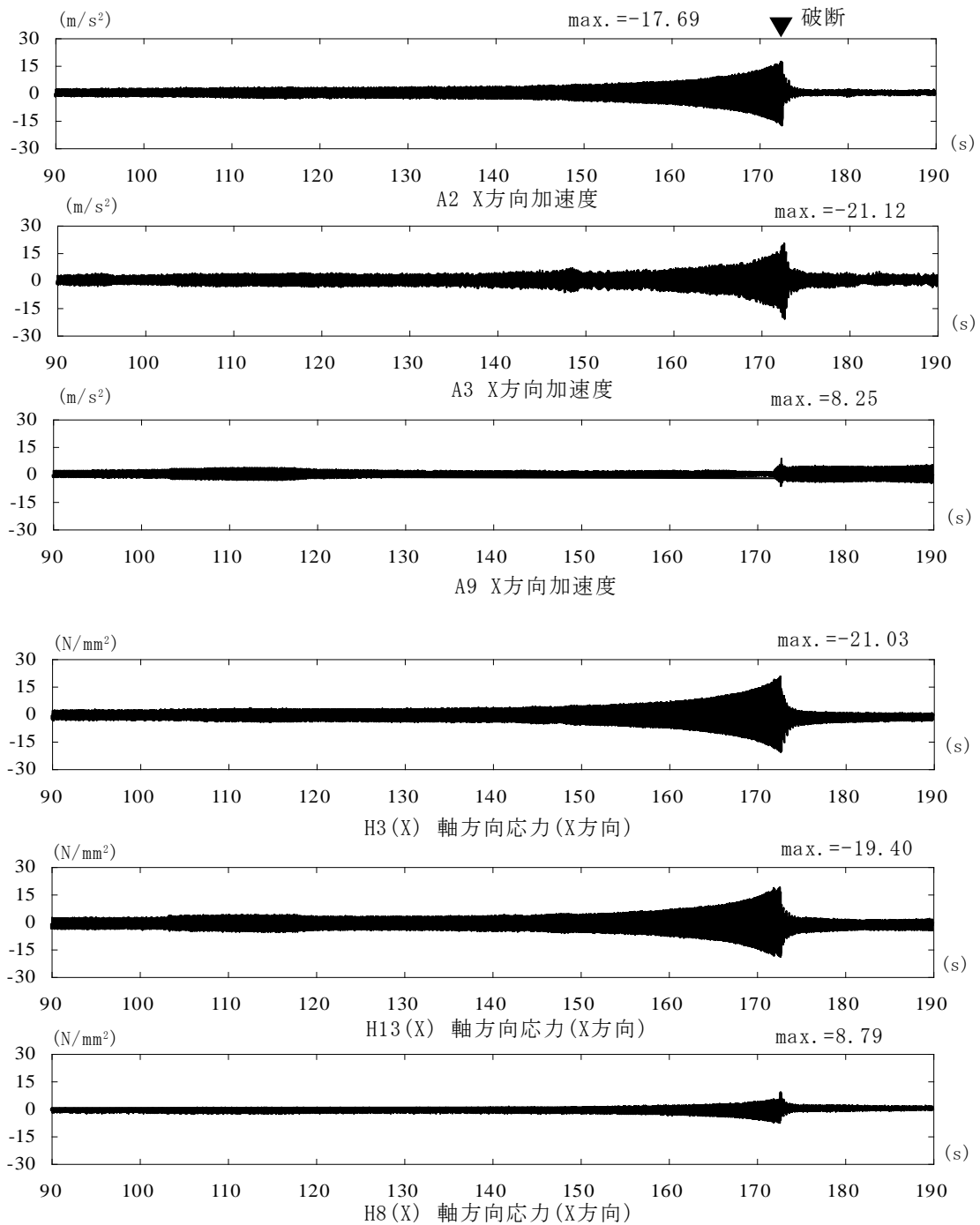


図 3.2-50(2) 振動試験(平成 26 年度)による時刻歴(3→17Hz、最大加速度 $1.5m/s^2$)

表 3.2-32 最大応答値の比較(mwave02, 60%)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1(X)	20.71	19.42	H1(Z)	6.05	10.24
A2(X)	20.82	17.31	H2(ねじれ)	5.78	—
A3(X)	31.61	17.30	H3(X)	29.87	40.45
A4(Y)	5.17	0.45	H4(Y)	6.07	0.50
A5(Y)	5.15	0.31	H5(X)	6.29	3.96
A6(X)	39.12	5.57	H6(X)	3.70	5.66
A7(X)	15.73	5.46	H7(Z)	6.07	0.76
A8(X)	29.49	5.57	H8(X)	13.72	16.57
A9(X)	10.66	21.03	H9(Z)	9.61	4.56
A10(X)	10.76	21.05	H10(X)	4.34	6.09
A11(X)	28.08	5.35	H11(Z)	5.71	5.70
A16(X)	6.19	5.32	H12(X)	5.82	6.77
A17(Z)	8.03	5.46	H13(X)	29.12	36.43
A18(Z)	11.79	9.67	H14(Y)	5.97	5.48
			H15(X)	30.45	36.43
			H16(X)	23.29	32.46

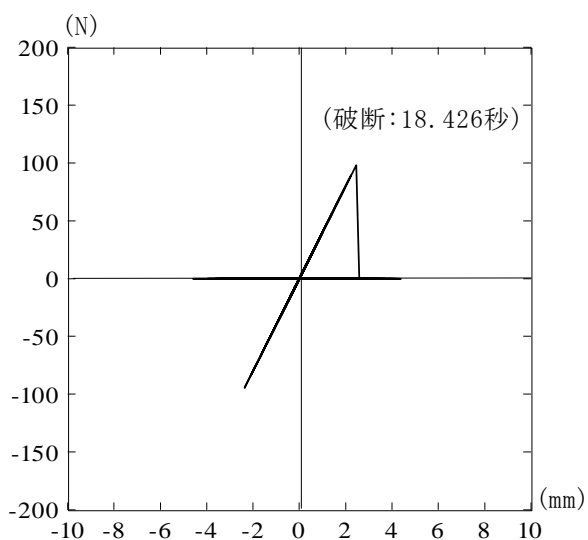


図 3.2-51 支持構造物 1 の荷重—変位関係(mwave02、60%)

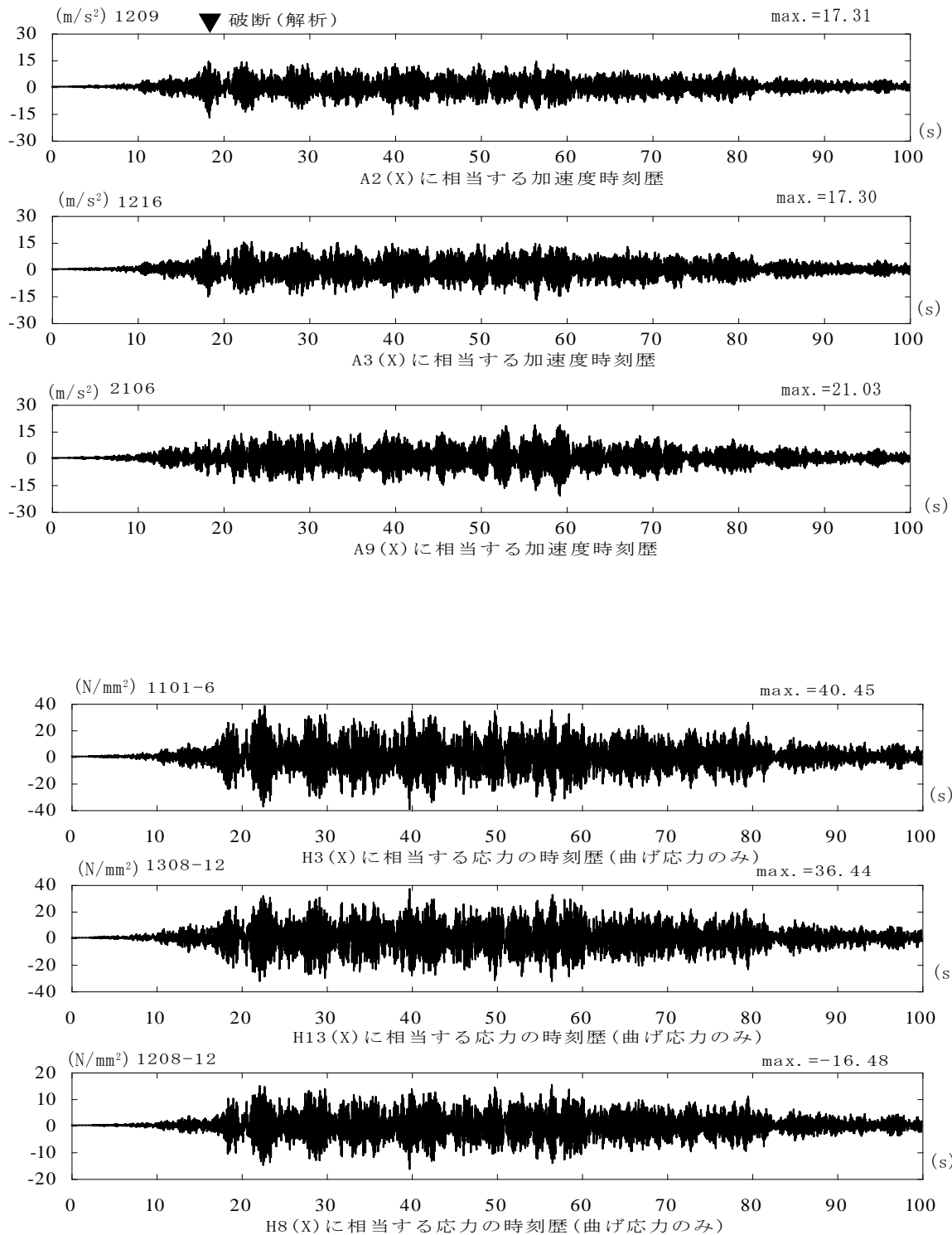


図 3.2-52(1) 地震応答解析による時刻歴(mwave02、60%)

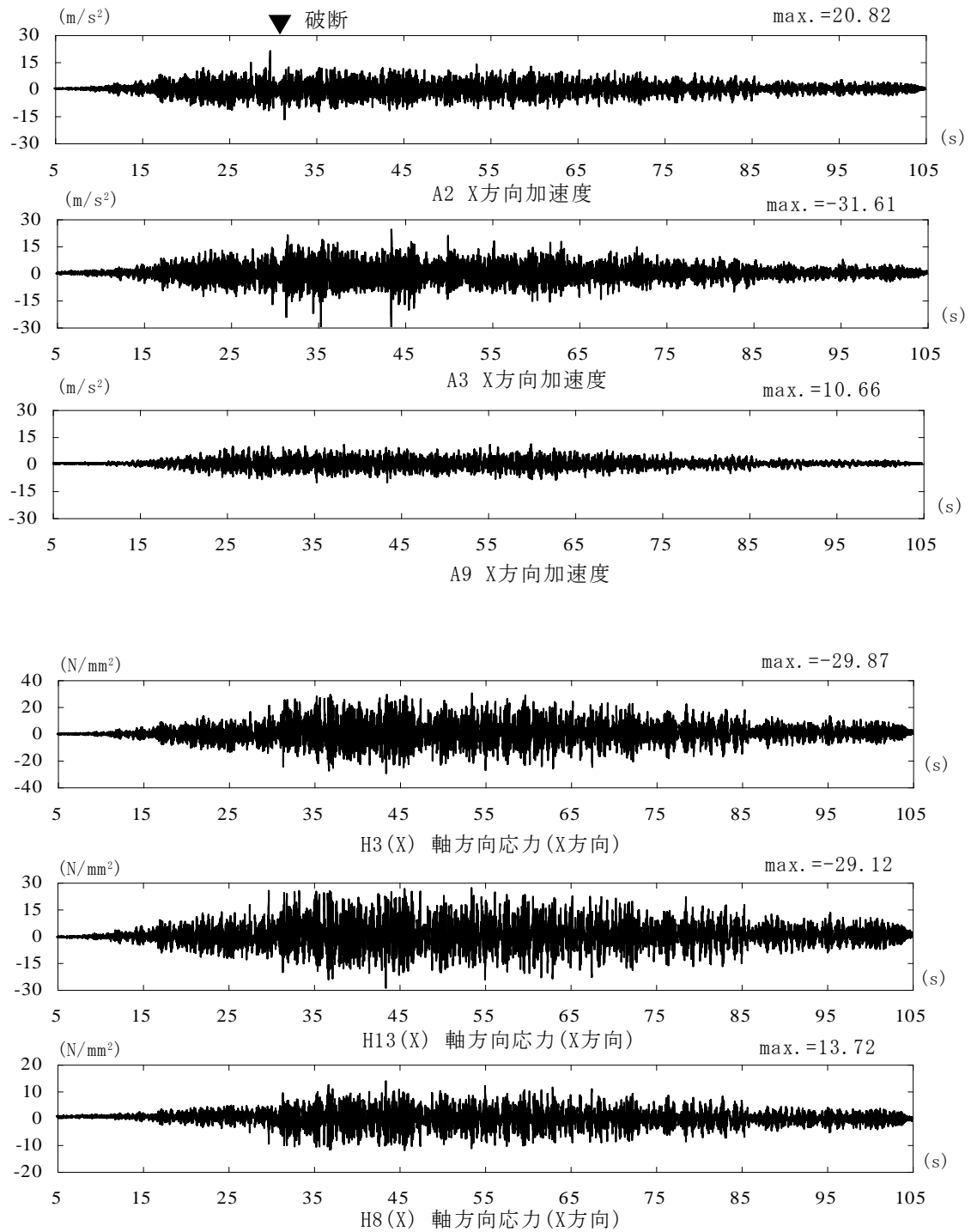


図 3.2-52(2) 試験結果(平成 26 年度)の時刻歴(mwave02、60%)

3.2.5.1.3 正弦波入力による水平加振試験結果を用いた比較

本年度の解析モデルを用いて、正弦波入力による応答解析結果と振動試験結果とを比較する。

(1) 解析条件

解析モデルは 3.2.3.2 項の固有値解析に用いたものと同一である。支持構造物 1 と 2 は AK(20×15)である。初期剛性は、3.2.2.2 の静的試験結果を参考として 45N/mm^2 とし。破断変位は正弦波の掃引試験を参考として 3.0mm とし、復元力特性に適用する。解析モデルの粘性減衰は、平成 26 年モデルの検討と同様に、レーリー減衰とし 10Hz と 30Hz で $h=0.015$ として設定する。解析モデルへの入力波は、振動台上(ch12)で計測された波形を入力として用いる。

応答解析は、支持構造物に破断が見られた以下の 2 ケースについて実施する。

- ・正弦波の掃引試験(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s^2)
- ・正弦波の掃引試験(16→5Hz、最大加速度 1.5m/s^2)

表 3.2-33 に破断状況を整理している。試験結果では、5→16Hz の掃引試験で支持構造物 1 のみが破断し、16→5Hz の掃引試験で支持構造物 1 及び 2 が破断しているが、応答解析でも同様の結果が得られている。

(2) 正弦波の掃引試験(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s^2)の試験結果との比較

表 3.2.34 に最大加速度、配管の最大応力の比較を示す。振動試験による膜応力、曲げ応力は 3.2.4.3.2 項の地震動入力の水平加振試験と同様に、平成 27 年度試験体では、ひずみゲージが配管の表裏面に貼ってあるので、2 面の配管応力を求め曲げ応力の中立軸が配管中央にあると仮定して、膜応力、曲げ応力に分離したものである。応答解析結果では、該当する部位の最大曲げモーメントを断面係数で除した値を最大曲げ応力の欄に示し、膜応力の欄には最大軸方向力を断面積で除して求めた軸方向応力を記載している。図 3.2-53 には、支持構造物 1 と 2 の荷重変形関係の履歴を示している。図 3.2-54(1)～(2)には、代表的な位置での時刻歴の比較を示している。A2(X)、A4(X)は支持構造物 1,2 の設置位置近傍の X 方向加速度であり、A8(X)は下方の横方向配管の前方部分の記録である。S5 曲げ応力、S4 曲げ応力は後面の縦方配管の支持部分近傍、前面の縦方向配管のロッドレスト近傍での X 方向振動による曲げ応力、S1 曲げ応力、S3 曲げ応力は支持構造物 1, 2 近傍の X 方向振動による曲げ応力を示している。

時刻歴から応答解析の破断時刻が両者の固有振動数の相違などのため振動試験結果に対して多少相違が見られるが、共振により大きくなった振幅が支持構造物の破断に伴う試験体の固有振動数の変化によって急激に小さくなる傾向は共通である。また、支持構造物近傍位置の応力の時刻歴に見られる中心軸がシフトする傾向は解析結果には見られない。また、全体的に試験で応答が多生大きくなっている傾向が見られる。

(3) 正弦波の掃引試験 16→5Hz、最大加速度 1.5m/s^2 の試験結果との比較

(2)と同様の最大加速度の一覧比較を表 3.2-35 に、時刻歴波形の比較を図 3.2-56(1)～(2)に示す。図 3.2-55 に示した解析結果の支持構造物 1 と 2 の荷重変位関係からも 2 ヶ所で破断していることがわかる。

時刻歴波形から、2つの破断の時刻を比較すると、最初の支持構造物1の破断は10秒過ぎでほぼ一致しているが、2回目の支持構造物2の破断で、解析の方で5秒程度遅れている様子が見られる。支持構造物2のみの1次固有振動数の相違が影響していると考えられるが、2つの破断のタイミングは捉えられていると考えられる。最大値の一覧に掲載されている値は、主に、時刻歴最後の支持構造物なしの1次固有振動数(8Hz付近)の共振で発生していると考えられるが、S4,S5の最大曲げ応力を比較した場合、比較的よい対応が見られている。

(昇順)5→16Hzで支持構造物1のみ破断、(降順)16→5Hzで支持構造物1と2が破断した損傷モードの相違が試験結果と整合していることから、損傷モードは、単純な周波数特性のみならず、高振動数成分が低振動数成分に先行して試験体に入力されるなどの経時的な周波数特性の変化にも依存して変化することを示していると考えられる。このような現象は、地震 fragility 評価において偶発による不確定性 (aleatory uncertainty)として扱われてきたと考えられる。

表 3.2-33 支持構造物の破断状況の比較

加振条件	振動試験	応答解析
5→16Hz、90秒間 最大加速度:1.5m/s ²	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断なし
16→5Hz、90秒間 最大加速度:1.5m/s ²	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断

表 3.2-34 最大応答値の比較(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	22.03	24.61	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.63	0.00
A2X方向(ch2)	28.07	49.60	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	14.22	10.12
A2Y方向(ch17)	18.09	0.12	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	1.80	0.00
A2Z方向(ch20)	10.90	0.75	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	2.90	0.97
A3X方向(ch3)	32.07	32.08	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.57	0.02
A3Y方向(ch18)	12.04	0.12	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	4.54	2.60
A4X方向(ch4)	18.23	22.45	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.63	0.33
A4Y方向(ch19)	14.47	0.62	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	17.86	12.06
A4Z方向(ch21)	16.36	1.76	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	1.33	0.33
A5X方向(ch5)	8.18	2.60	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	1.68	0.42
A6X方向(ch6)	22.01	2.77	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.61	0.33
A7X方向(ch7)	8.46	2.17	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	21.71	18.00
A8X方向(ch8)	4.65	6.16	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.56	0.33
A8Z方向(ch22)	7.04	4.60	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	4.08	2.73
A9X方向(ch9)	4.06	6.18	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.53	0.32
A9Z方向(ch23)	9.43	4.01	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	7.21	17.98
A10X方向(ch10)	11.37	2.25	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	1.41	0.01
A12X方向(ch12)	2.18	2.18	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	36.65	31.94

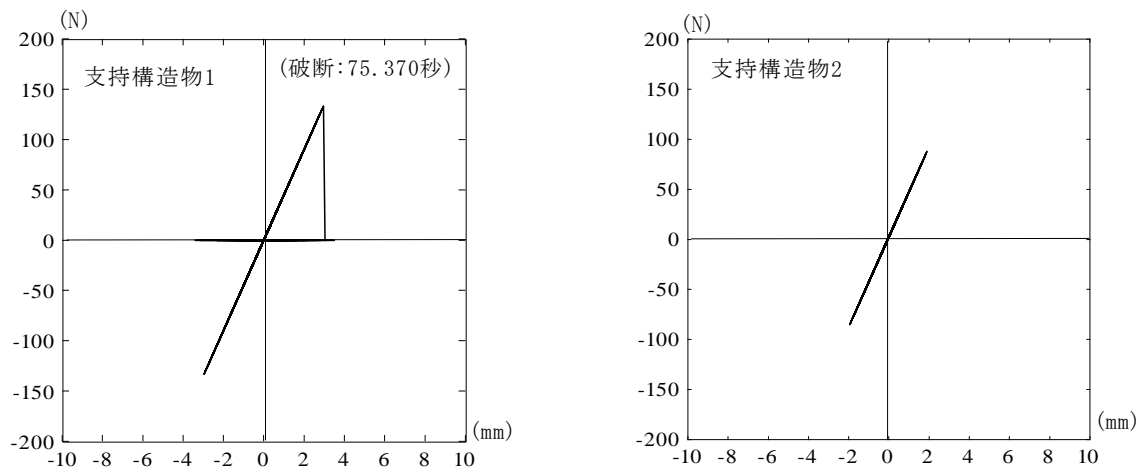
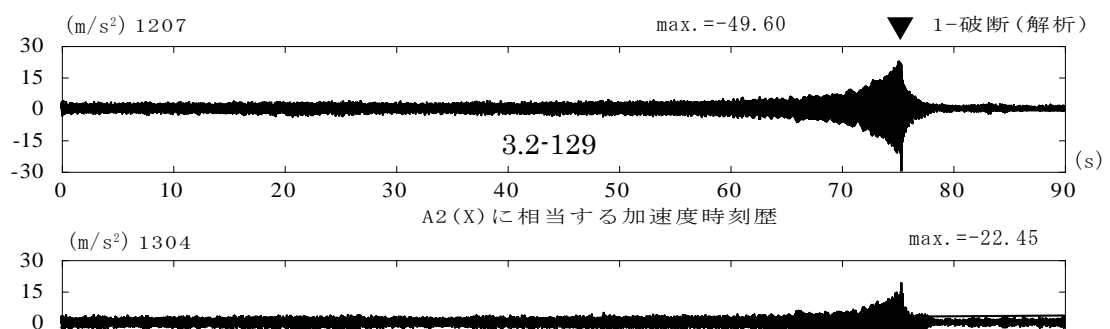


図 3.2-53 支持構造物の荷重—変位関係(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s²)



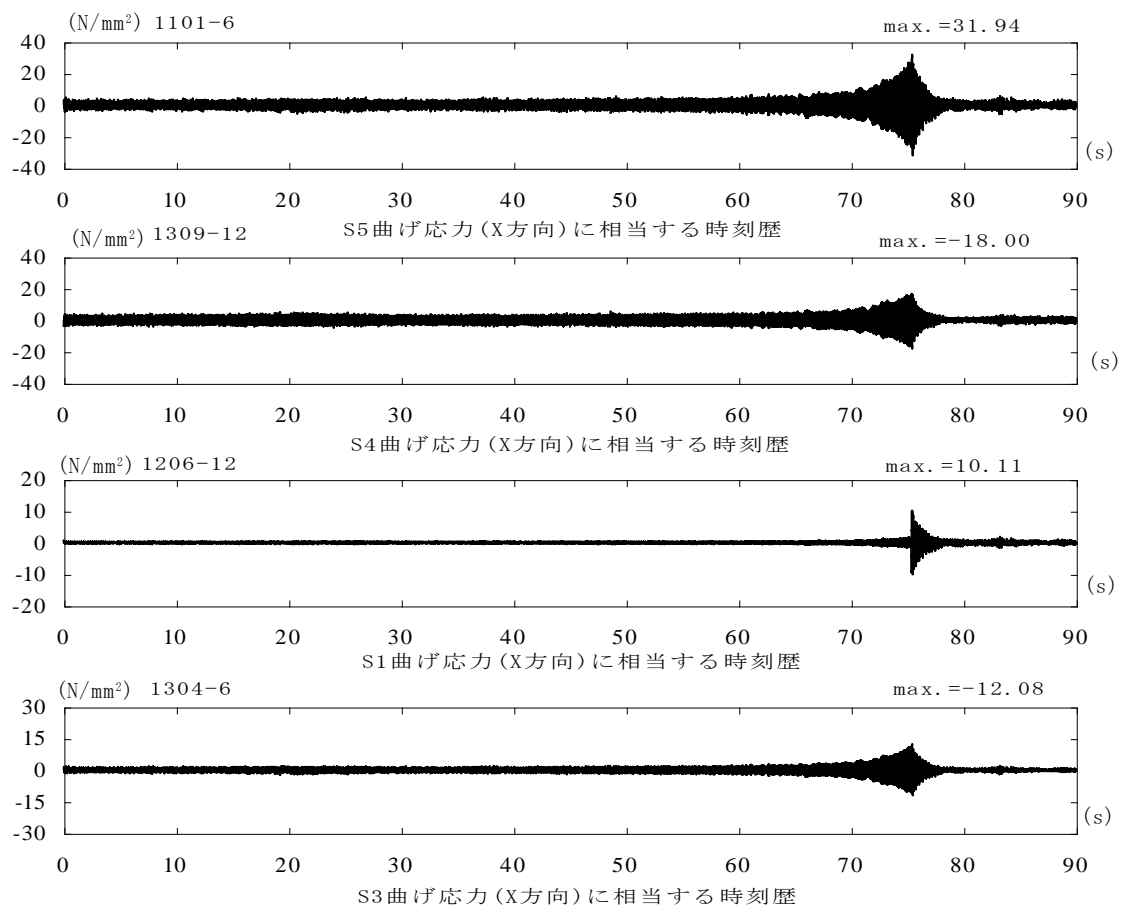


図 3.2-54(1) 応答解析による応答波形の例(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s²)

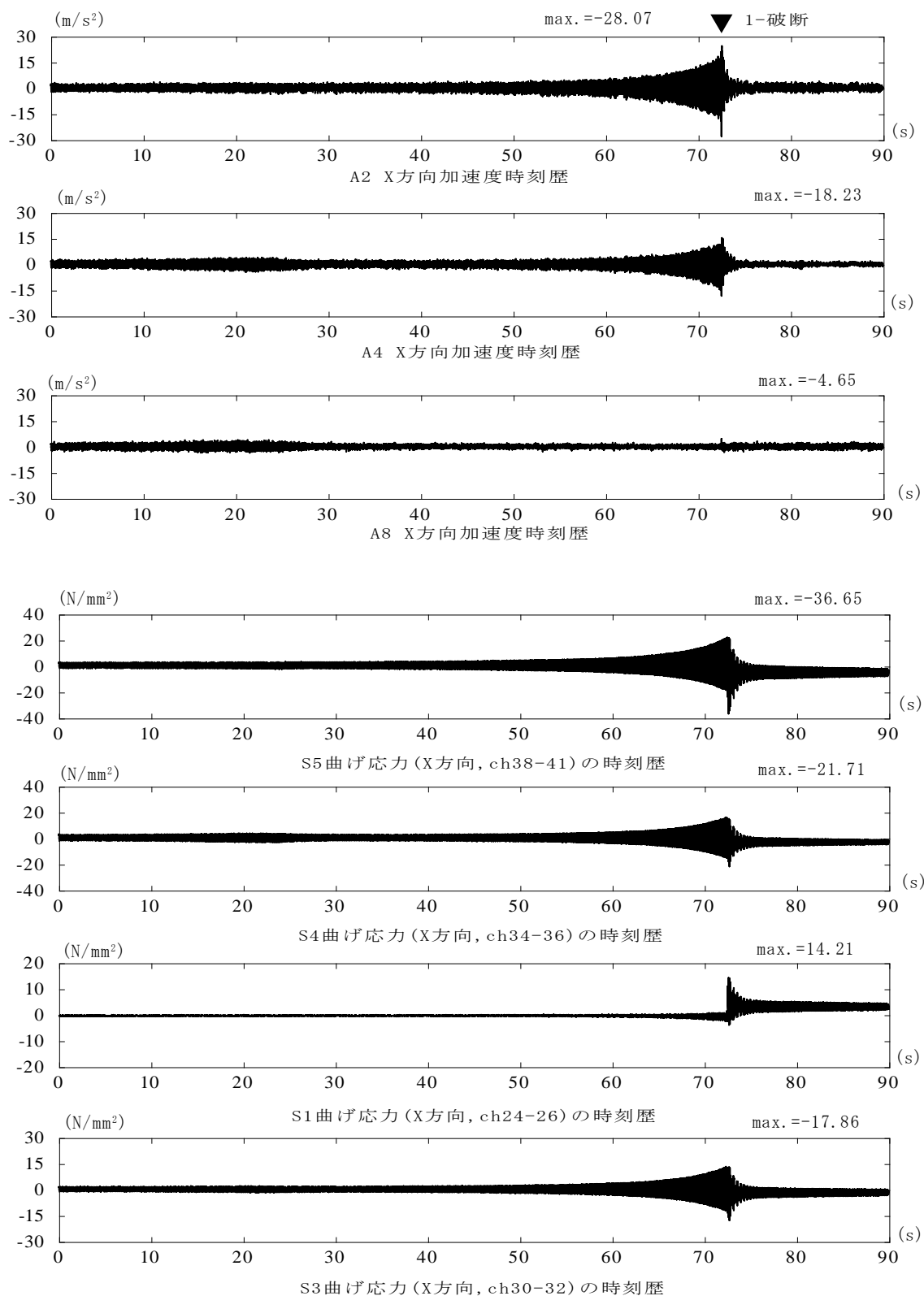


図 3.2-54(2) 振動試験による応答波形の例(5→16Hz、最大加速度 1.5m/s²)

表 3.2-35 最大応答値の比較(16→5Hz、最大加速度 1.5m/s²)

最大加速度(m/s ²)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	51.98	50.29	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	1.10	0.01
A2X方向(ch2)	51.01	50.94	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	20.76	15.79
A2Y方向(ch17)	36.87	0.33	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	2.72	0.01
A2Z方向(ch20)	15.55	1.56	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	6.75	1.86
A3X方向(ch3)	53.11	65.32	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.75	0.04
A3Y方向(ch18)	27.78	0.33	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	7.62	3.84
A4X方向(ch4)	47.23	61.80	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.64	0.64
A4Y方向(ch19)	30.21	1.19	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	25.45	18.93
A4Z方向(ch21)	16.29	3.36	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	2.26	0.64
A5X方向(ch5)	44.89	6.11	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	11.31	0.85
A6X方向(ch6)	49.14	3.51	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.99	0.64
A7X方向(ch7)	40.31	3.20	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	59.19	55.30
A8X方向(ch8)	11.67	7.83	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	1.57	0.64
A8Z方向(ch22)	37.29	6.85	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	17.62	5.34
A9X方向(ch9)	12.29	7.84	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	1.10	0.63
A9Z方向(ch23)	37.81	4.95	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	34.57	37.12
A10X方向(ch10)	34.51	2.19	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	4.28	0.02
A12X方向(ch12)	2.09	2.09	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	71.92	63.72

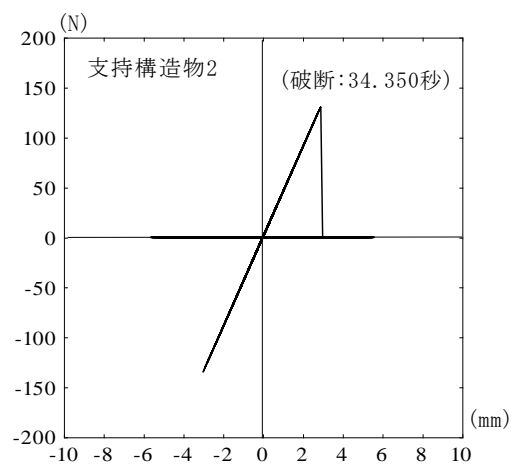
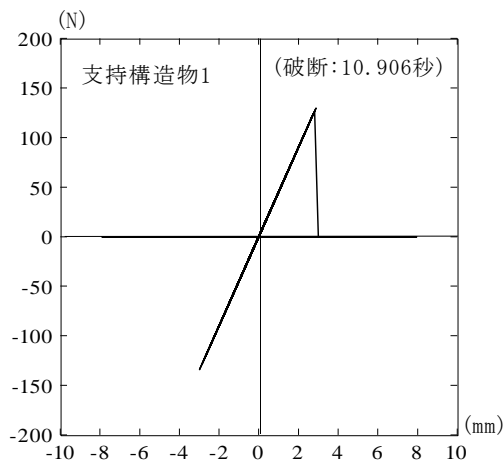
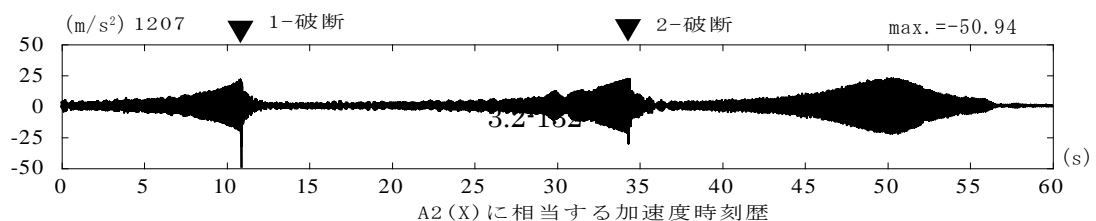


図 3.2-55 支持構造物の荷重—変位関係(16→5Hz、最大加速度 1.5m/s²)



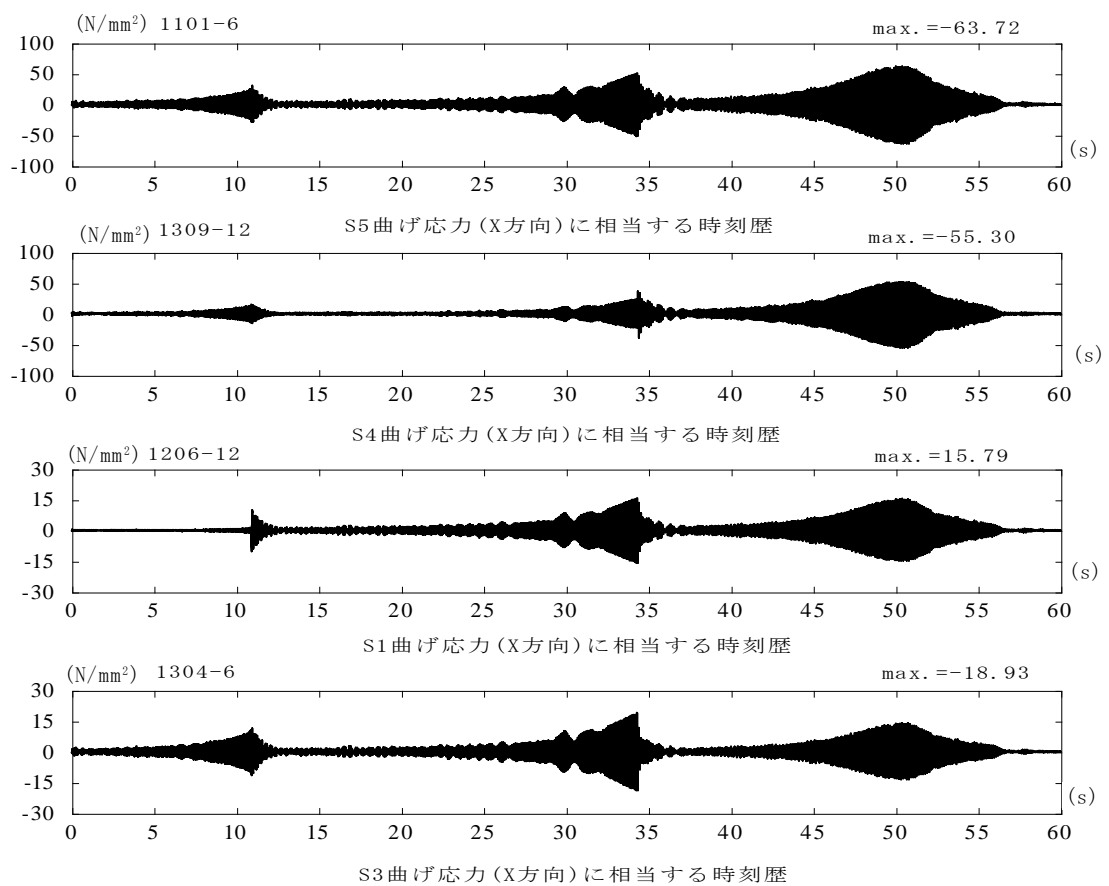
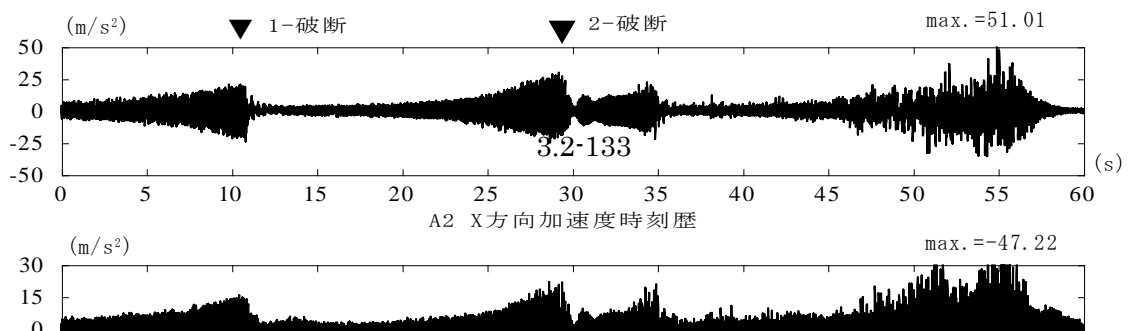


図 3.2-56(1) 応答解析による応答波形の例(16→5Hz、最大加速度 1.5m/s²)



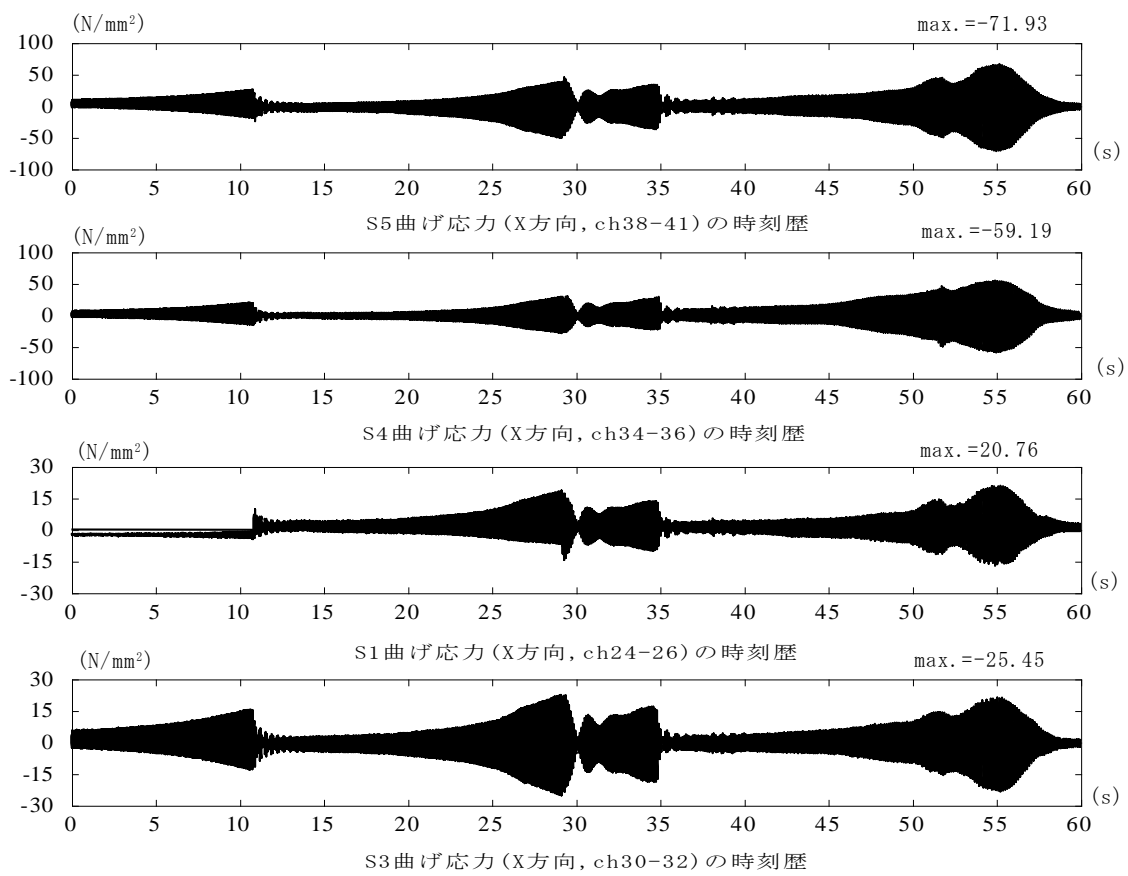


図 3.2-56(2) 振動試験による応答波形の例(16→5Hz、最大加速度 1.5m/s²)

3.2.5.1.4 地震動入力による水平加振試験結果を用いた比較

本年度の解析モデルを用いて、地震動入力による応答解析結果と振動試験結果とを比較する。

(1) mwave-01 による試験結果との比較

振動解析モデルの特性、粘性減衰の設定は正弦波入力の場合と同一である。

mwave-01 の最大加速度を 2.5m/s^2 、 5.0m/s^2 、 7.5m/s^2 、 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 とした場合の支持構造物 1 と 2 の破断状況の比較を表 3.2-36 に示す。振動試験では 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 で支持構造物 1 のみで破断が見られたが、応答解析結果でも同様の結果が得られた。

以下では、破断の発生していない最大加速度 5.0m/s^2 と破断の発生する 12.0m/s^2 のケースにおいて、応答解析結果と試験結果とを比較する。解析モデルへの入力地震動は、原波を用いるので、応答結果に示す時刻歴波形の時刻は、解析と試験で同一ではない。

1) 振動台、土台上の加速度記録

地震応答解析の入力地震動は原波を用いるので、振動台、土台上での加速度時刻歴、応答スペクトルを示し、3.2.4.3.1 項に示した原波と比較する。

振動台上(ch12)の加速度記録(X 方向)の時刻歴と加速度応答スペクトルを最大加速度 5.0m/s^2 と 12.0m/s^2 の場合について図 3.2-57(1)~(2)に示し、土台上(ch11)の加速度時刻歴(X 方向)と加速度応答スペクトルを図 3.2-58(1)~(2)に示す。原波の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルは 3.2.4.3.1 項に示している。振動台加振にあたって、振動台の加振能力の関係で振動台の最大変位を抑えるために mwave-01 の場合では 1.05Hz 以下をカットする操作を行っているので、周期 1.0 秒以上の応答スペクトル値は小さくなっている。最大加速度 5.0m/s^2 と 12.0m/s^2 共に、振動台上の応答スペクトルのピークの形状等は、周期 0.2 秒程度以下で原波より若干小さくなり、 0.2 秒程度以上で若干多くなっている。この傾向は、土台上の記録でもほぼ同様である。最大加速度 12.0m/s^2 の場合の、振動台上、土台上の最大加速度が若干小さくなっているが、再現性は比較的高いものと考えられる。

2) 最大加速度 5.0m/s^2 の応答結果の比較

表 3.2-37 に最大加速度、配管の最大応力の比較を示し、図 3.2-59 に支持構造物 1,2 の荷重変形関係の履歴を示している。図 3.2-60(1)~(2)には、代表的な位置での時刻歴の比較を示している。掲載している加速度、配管応力は正弦波の場合と同一である。応答波形の形状はよく似ている。最も大きな最大応力は S5、その次は S4 の曲げ応力で発生しており、解析と試験の対応関係はよいと考えられる。

3) 最大加速度 12.0m/s^2 の応答結果の比較

同様に表 3.2-38 に最大値の一覧比較し、図 3.2-61 に支持構造物 1,2 の荷重変形関係の履歴、図 3.2-62(1)~(2)に代表的な位置での時刻歴の比較を示している。両者で、支持構造物 1 の破断は 10 秒付近に見られる。支持構造物 1 の破断によって、応答時刻歴波形の振幅が大きくなっている傾向は両者に見られる。最も大きな最大応力は S5、その次は S4 の曲げ応力で順番は両者一致しているが、最大応力の大きさなどで試験が幾分大きくなる傾向が見られる。

」

表 3.2-36 支持構造物 1,2 の破断状況

最大加速度(m/s ²)	振動試験	地震応答解析
2.5	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし
5.0	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし
7.5	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし	支持構造物1: 破断なし 支持構造物2: 破断なし
10.0	支持構造物1: 破断 支持構造物2: 破断なし	支持構造物1: 破断 支持構造物2: 破断なし
12.0	支持構造物1: 破断 支持構造物2: 破断なし	支持構造物1: 破断 支持構造物2: 破断なし

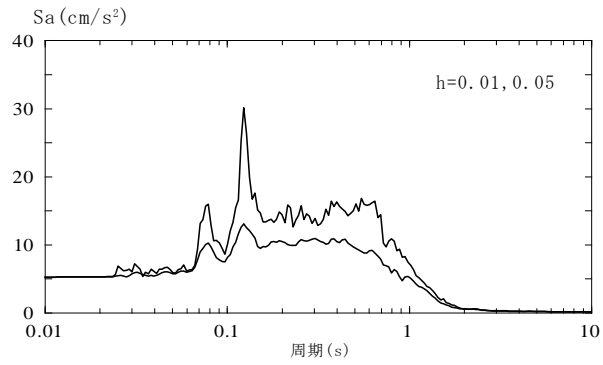
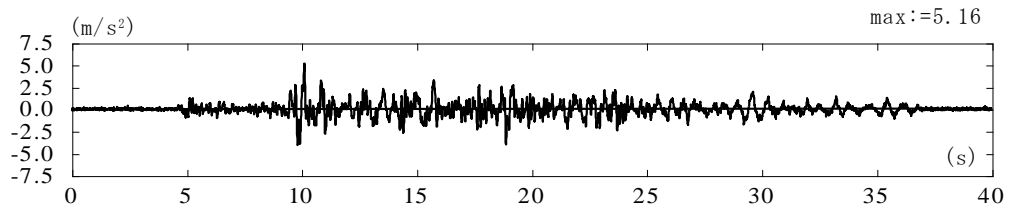


図 3.2-57(1) 振動台上の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-01,5.0m/s²)

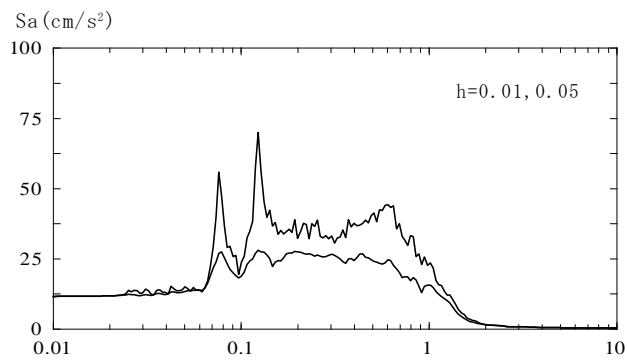
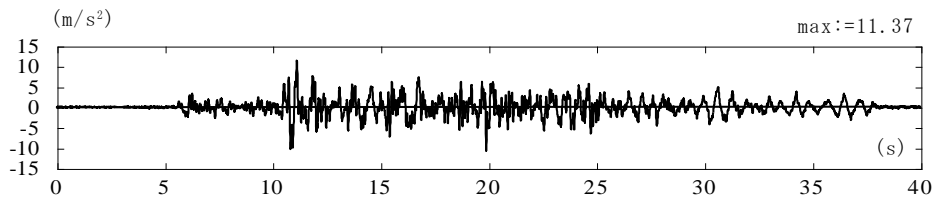


図 3.2-57(2) 振動台上の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-01,12.0m/s²)

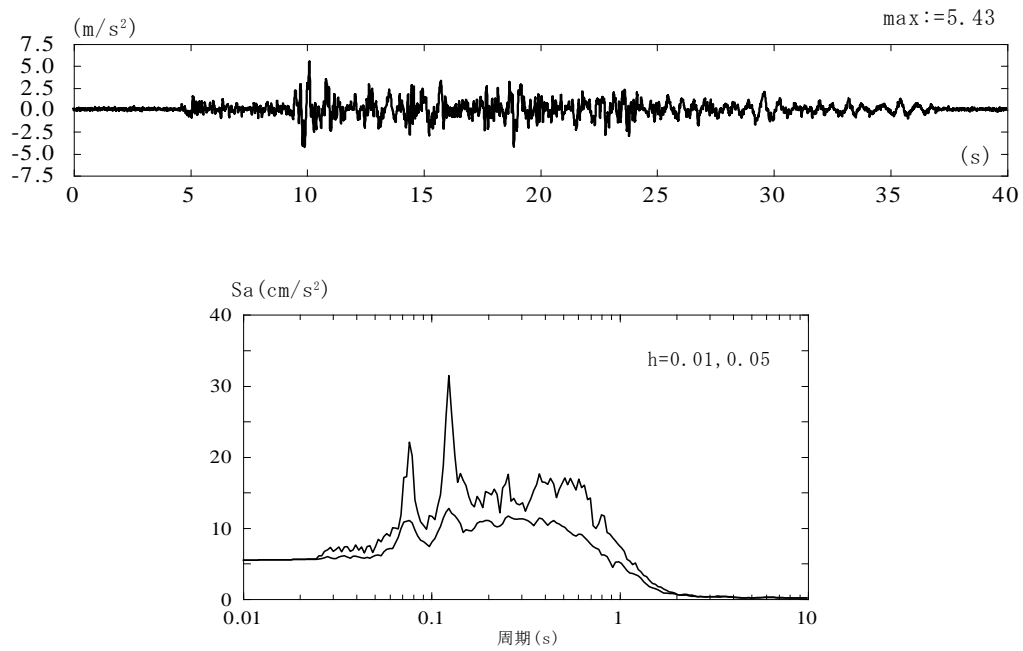


図 3.2-58 (1) 土台上(ch11)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-01,5.0m/s²)

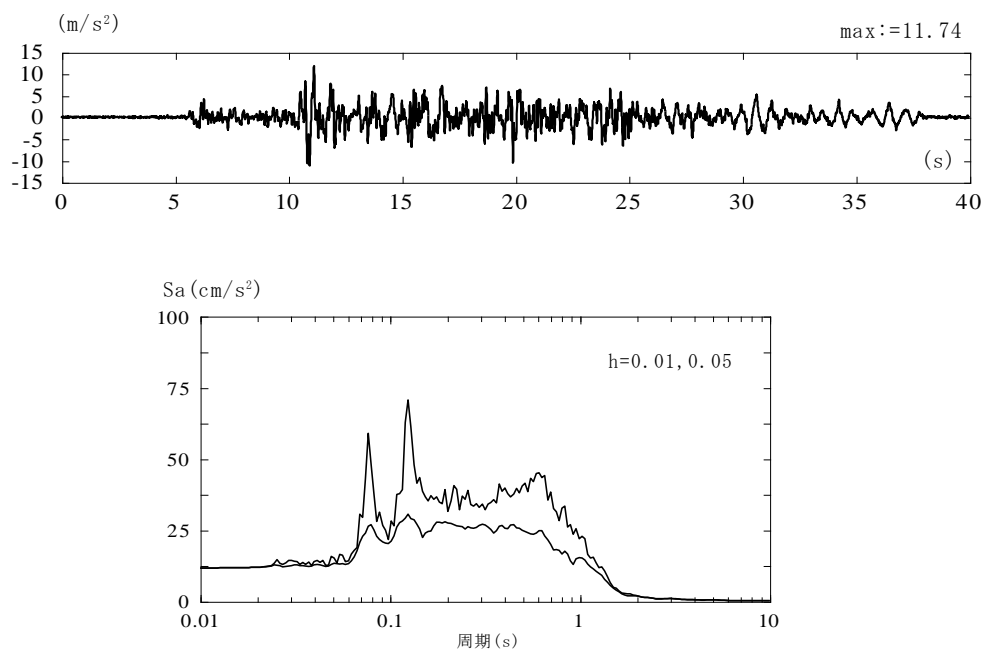


図 3.2-58(2) 土台上(ch11)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-01,12.0m/s²)

表 3.2-37 最大応答値の比較(mwave-01,5.0m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	14.11	10.28	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.48	0.00
A2X方向(ch2)	13.57	12.05	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	1.71	0.97
A2Y方向(ch17)	2.11	0.02	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.45	0.00
A2Z方向(ch20)	1.52	0.06	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	0.77	0.42
A3X方向(ch3)	14.23	12.35	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.57	0.01
A3Y方向(ch18)	2.83	0.02	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	1.14	0.82
A4X方向(ch4)	12.68	8.13	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.56	0.15
A4Y方向(ch19)	3.11	0.02	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	9.87	6.16
A4Z方向(ch21)	2.52	0.24	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.86	0.15
A5X方向(ch5)	6.70	5.02	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	1.49	0.19
A6X方向(ch6)	9.00	5.03	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.55	0.14
A7X方向(ch7)	7.46	4.98	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	12.01	11.10
A8X方向(ch8)	4.91	4.90	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.48	0.14
A8Z方向(ch22)	6.91	0.64	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	4.00	0.90
A9X方向(ch9)	4.79	4.90	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.55	0.14
A9Z方向(ch23)	7.09	0.32	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	5.88	8.65
A10X方向(ch10)	9.49	4.99	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.74	0.01
A12X方向(ch12)	5.16	5.00	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	16.89	14.50

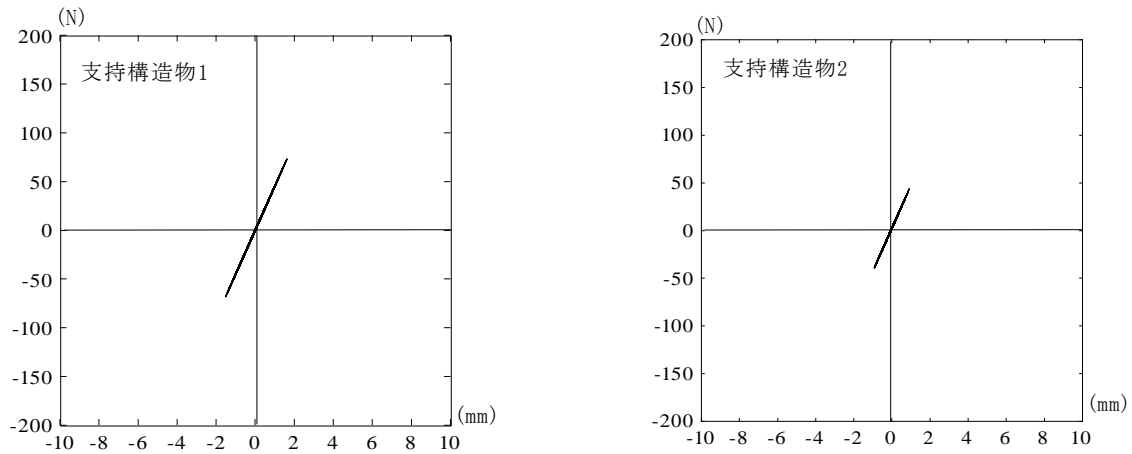


図 3.2-59 支持構造物の荷重—変位関係(mwave-01,5.0m/s²)

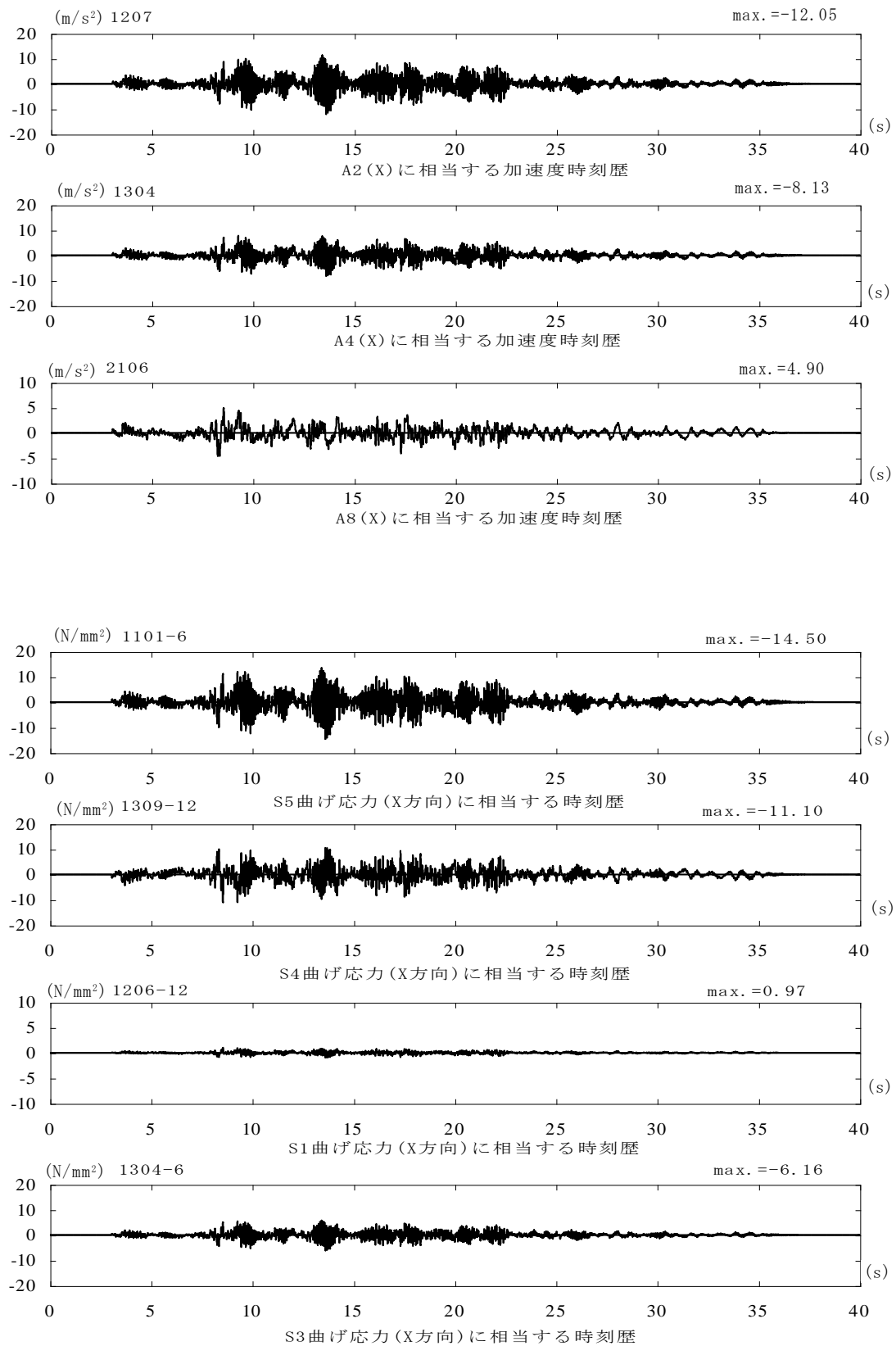


図 3.2-60(1) 地震応答解析による応答波形の例(mwave=01,5.0m/s²)

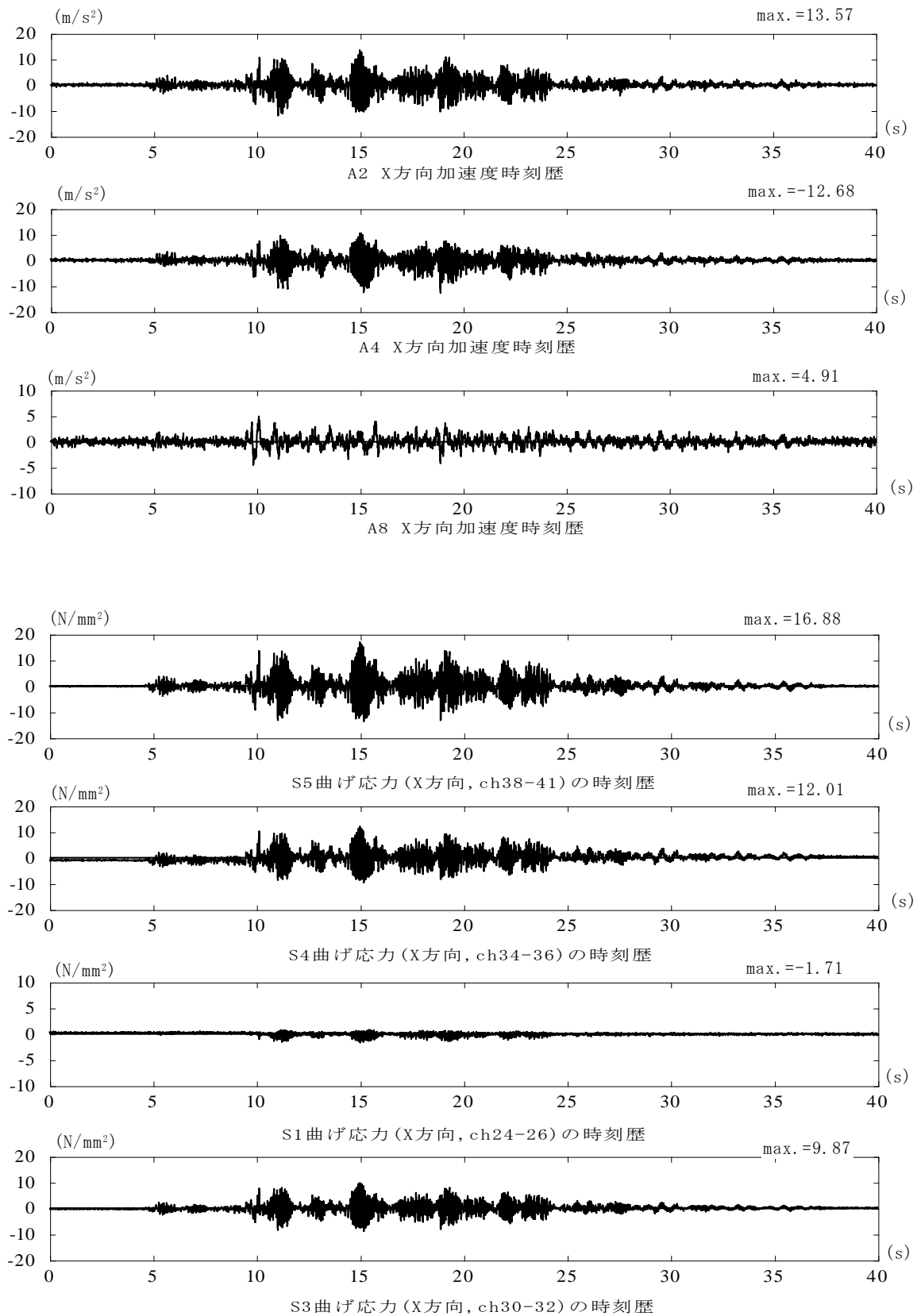


図 3.2-60(2) 振動試験による応答波形の例(mwave=01,5.0m/s²)

表 3.2-38 最大応答値の比較(mwave-01,12.0m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	31.65	34.11	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.51	0.00
A2X方向(ch2)	35.43	50.63	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	20.01	13.84
A2Y方向(ch17)	126.23	0.10	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	2.32	0.00
A2Z方向(ch20)	30.99	0.58	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	2.56	0.85
A3X方向(ch3)	32.76	33.86	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.43	0.02
A3Y方向(ch18)	19.39	0.10	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	5.10	3.97
A4X方向(ch4)	30.90	27.76	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.37	0.29
A4Y方向(ch19)	11.60	0.57	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	27.81	17.01
A4Z方向(ch21)	8.99	1.17	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	2.27	0.29
A5X方向(ch5)	29.64	12.34	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	4.80	0.40
A6X方向(ch6)	66.40	12.22	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.64	0.29
A7X方向(ch7)	31.74	11.96	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	29.60	26.68
A8X方向(ch8)	14.23	11.91	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.90	0.29
A8Z方向(ch22)	17.68	3.72	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	12.15	2.39
A9X方向(ch9)	13.69	11.91	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.51	0.29
A9Z方向(ch23)	12.54	2.37	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	15.24	16.76
A10X方向(ch10)	20.46	11.98	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	1.96	0.01
A12X方向(ch12)	11.36	12.00	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	56.86	44.62

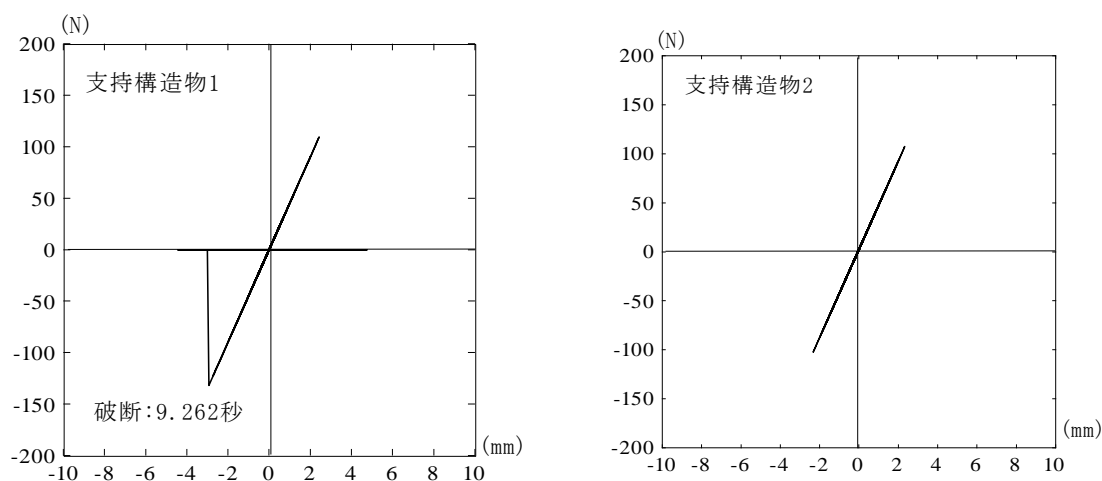


図 3.2-61 支持構造物の荷重—変位関係(mwave-01,12.0m/s²)

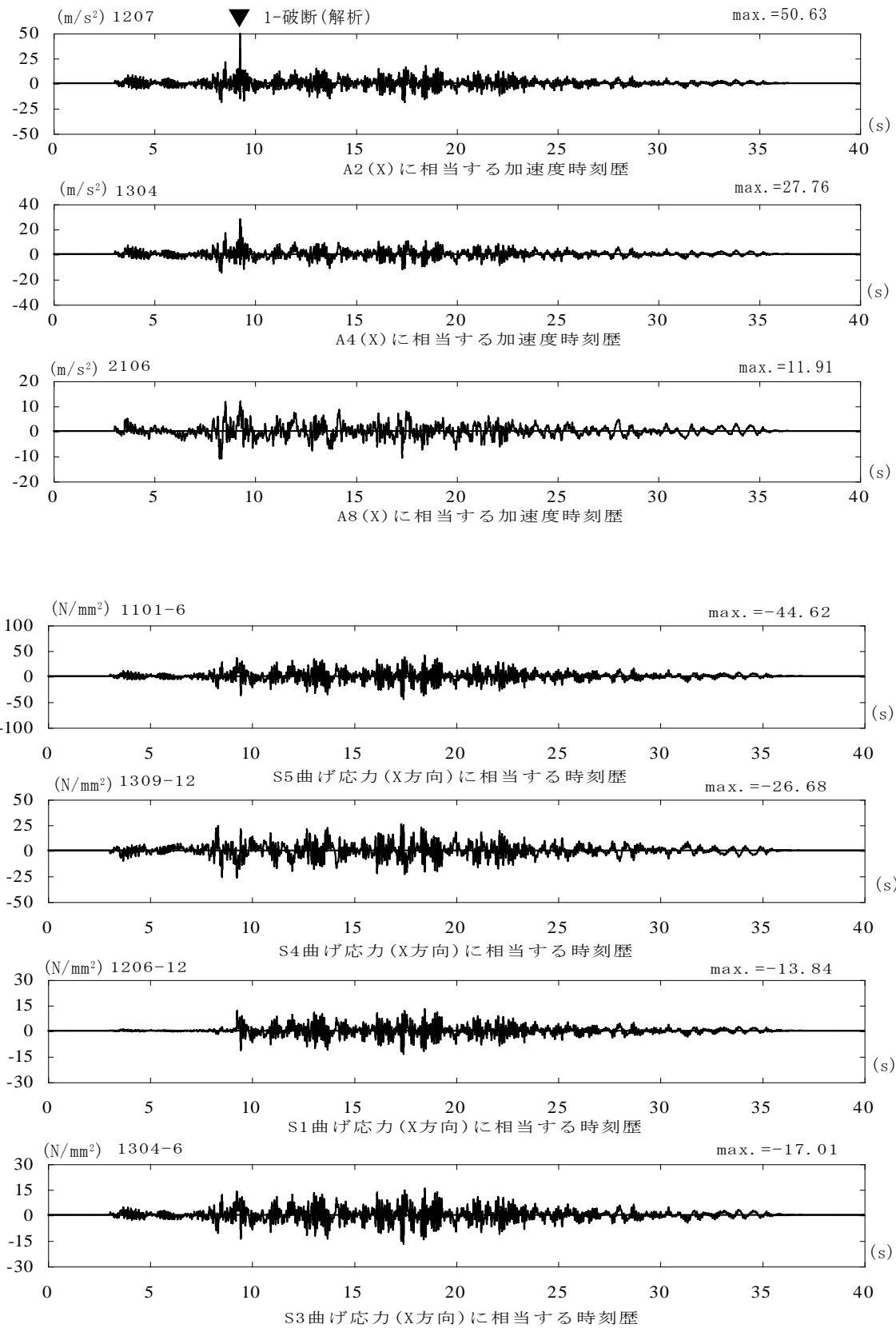


図 3.2-62(1) 地震応答解析による応答波形の例(mwave-01,12.0m/s²)

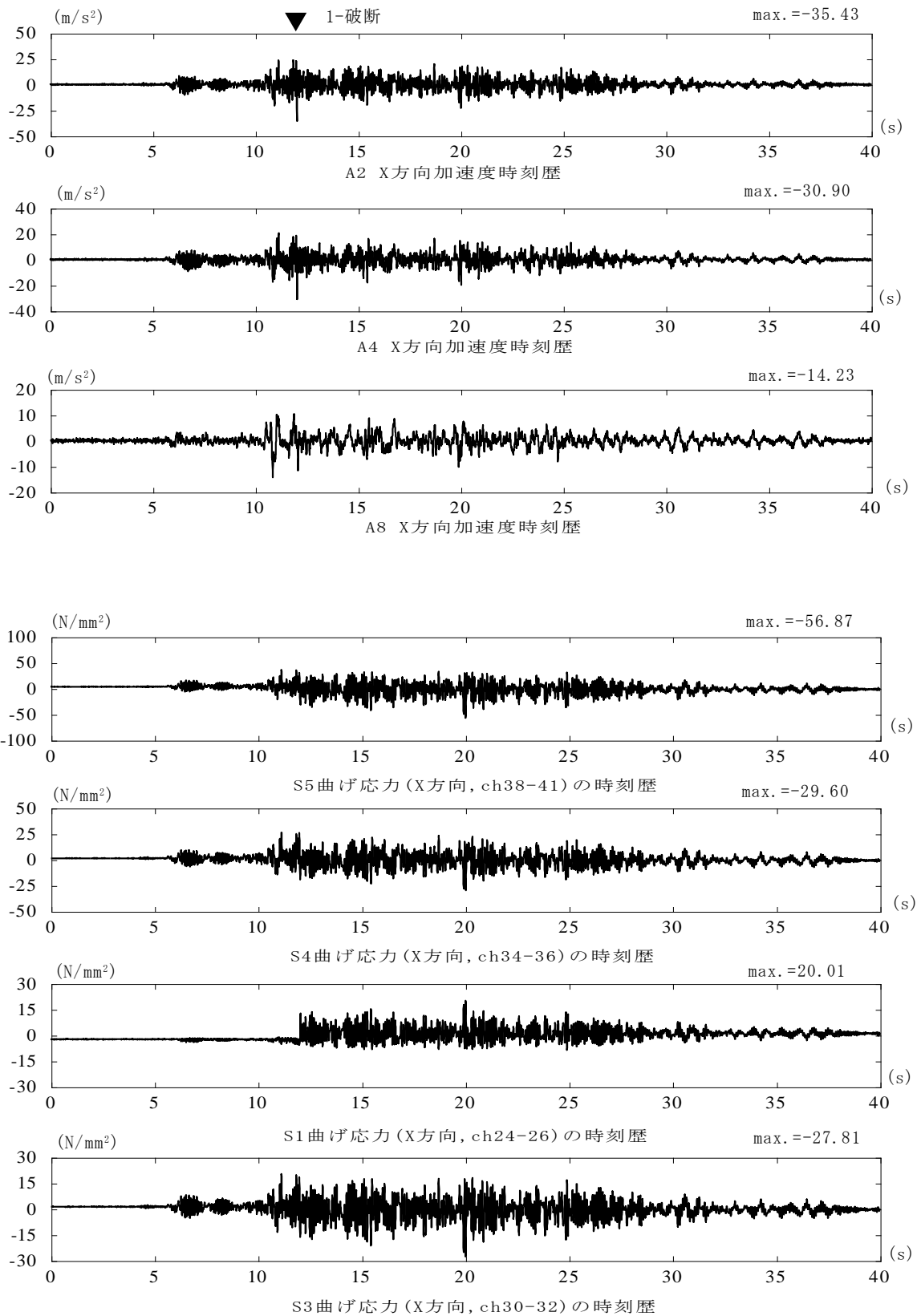


図 3.2-62(2) 振動試験による応答波形の例(mwave-01,12.0m/s²)

(2) mwave-02 による試験結果との比較

振動解析モデルの特性、粘性減衰の設定は mwavv-01 の場合と同一である。

mwave-02 の最大加速度を 2.5m/s^2 、 5.0m/s^2 、 7.5m/s^2 、 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 とした場合の支持構造物 1 と 2 の破断状況を表 3.2-39 に示す。振動試験では 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 で支持構造物 1 と 2 に破断が見られた。応答解析結果は 7.5m/s^2 で支持構造物 1 のみに破断が発生して相違が見られる。 7.5m/s^2 の場合、別途行っていた予備試験では支持構造物 1 にひび割れの発生も観察されているので、破断するかどうかの境界付近であるため、解析と試験に相違が生じたものと考えられる。

ここでは、破断の発生しない最大加速度 5.0m/s^2 と破断の発生する 12.0m/s^2 のケースにおいて、応答解析結果と試験結果を比較する。解析モデルへの入力地震動は、原波を用いるので、応答結果に示す時刻歴波形の時刻は、解析と試験で同一ではない。

1) 振動台、土台上の加速度記録

mwave-01 と同様に、振動台上(ch12)の加速度時刻歴(X 方向)と加速度応答スペクトルを最大加速度 5.0m/s^2 と 12.0m/s^2 について図 3.2-63(1)～(2)に示し、土台上(ch11)の加速度時刻歴(X 方向)と加速度応答スペクトルを図 3.2-64(1)～(2)に示す。

原波の時刻歴と加速度応答スペクトルは 3.2.4.3.1 項に示している。振動台への入力波の設定において、振動台の最大変位を抑えるために mwave-02 の場合 1.1Hz 以下をカットする操作を行っているので、1 秒程度以上の応答スペクトル値は小さくなっている。

最大加速度 5.0m/s^2 と 12.0m/s^2 共に、振動台上の応答スペクトルのピークの大きさ等は、0.1 秒程度以上で若干多くなっている。一方、土台上の応答スペクトルでは、振動台での傾向に加え、周期 0.1 秒以下の成分に盛り上がりが見られる。特に最大加速度 12.0m/s^2 の場合に、0.1 秒以上の成分と同程度の大きさになっている。これは、土台上でみられることから、土台での増幅の可能性が考えられる。最大加速度においては、最大加速度 12.0m/s^2 の場合に、大きくなる傾向があり、土台上では 1.3 倍程度(15.68m/s^2)になっており、現波との相違が見られる。

2) 最大加速度 5.0m/s^2 の試験結果との比較

表 3.2.40 に最大加速度、配管の最大応力の比較を示し、図 3.2-65 に支持構造物 1,2 の荷重変形関係の履歴を示している。図 3.2-66(1)～(2)は代表的な位置での時刻歴の比較を示している。試験と解析共に最も大きな最大応力は S5、その次に大きいのは試験では S4 の曲げ応力であるが、解析では S6 の曲げ応力となっている。S6 は前面の縦方向配管の下端で下方の横方向配管との接続部分の近傍であるので、3.2.3 項で示したように、試験の 2 次モードに相当するモード形状の相違が影響している可能性がある。最大応力等は解析が若干大きくなる傾向が見られる。

3) 最大加速度 12.0m/s^2 の応答結果との比較

表 3.2.41 に最大値の一覧比較し、図 3.2-67 に支持構造物 1 と 2 の荷重変形関係の履歴、図 3.2-68(1)～(2)に代表的な位置での時刻歴の比較を示している。解析と試験共に、支持構造物の破断は 20 秒付近で、支持構造物 1、支持構造物 2 の順に連続的に発生している。両者に支持構造物の破断によって、応答時刻歴波形の振幅が大きくなっている傾向が見られ、特に支持構造物 2 が破断した後は大きくなっている。

試験と解析共に、最も大きい最大応力は S5 の曲げ応力、その次は S4 の曲げ応力、S6 の曲げ応力の順である。また、解析の支持構造物 1 と 2 近傍の最大応力も 5.0m/s^2 と比較して大きくなっており、破断の影響を見ることができる。最大応力等は試験結果が幾分大きくなる傾向が見られる。

mave-01、mwave-02 共に最大加速度 5.0m/s^2 の場合には、各部位の最大応力等は同程度の結果が得られていたが、支持構造物の破断が生じる最大加速度 12.0m/s^2 の場合に試験結果の方が大きくなる傾向が見られた。この原因としては、解析で設定される粘性減衰定数(h)は、支持構造物なしの 1 次固有振動数 8Hz で 1.7%、支持構造物 2 のみ付きの 1 次固有振動数に相当する 10Hz で 1.5%が設定されているが、3.2.3.3 項で実施した自由振動波形からは 1.2%(支持構造物なしのケース)であったことから、今回設定した減衰定数は多少大きかった可能性が考えられる。さらに、mwave-02 の場合であるが、解析モデルには土台を考慮していないので、解析モデルの入力に相当する土台上の地震動はその最大加速度に見られたように、振幅的に原波より大きかったことも一因していると考えられる。

表 3.2-39 支持構造物 1,2 の破断状況

最大加速度(m/s^2)	振動試験	地震応答解析
2.5	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
5.0	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
7.5	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断なし
10.0	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断
12.0	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断	支持構造物1:破断 支持構造物2:破断

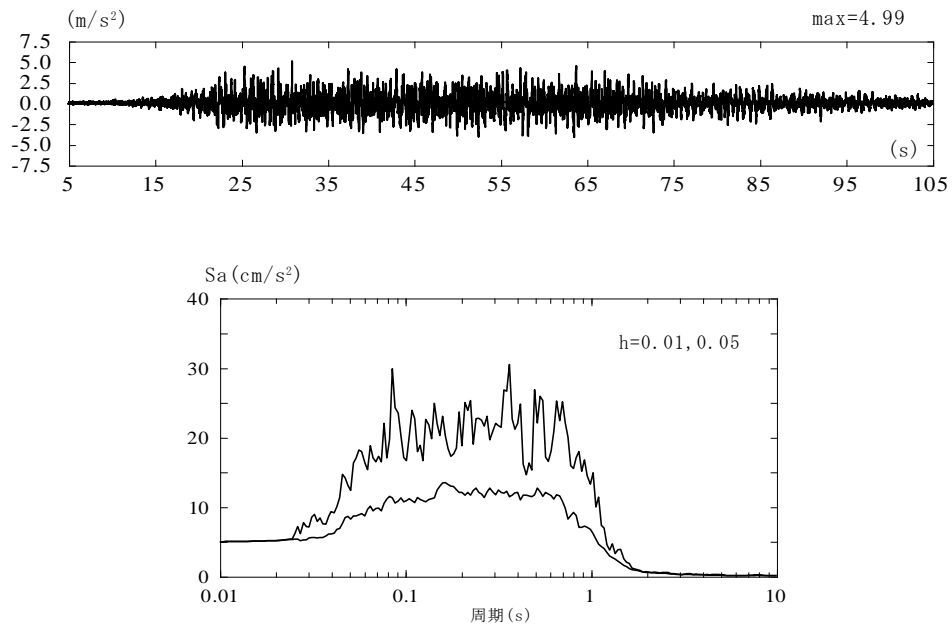


図 3.2-63 (1) 振動台上(ch12)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-02,5.0m/s²)

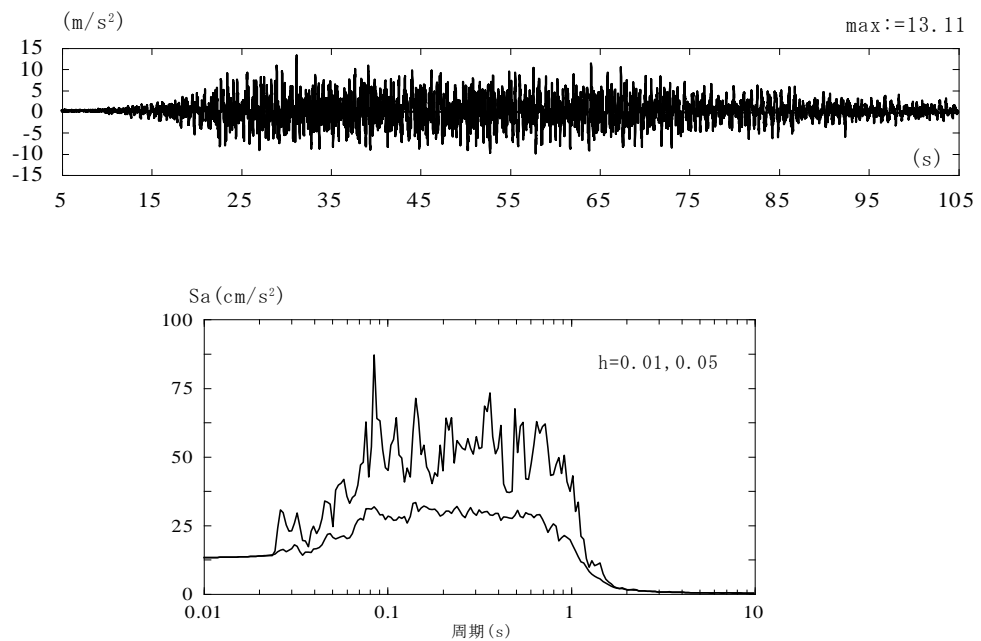


図 3.2-63(2) 振動台上(ch12)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-02,12.0m/s²)

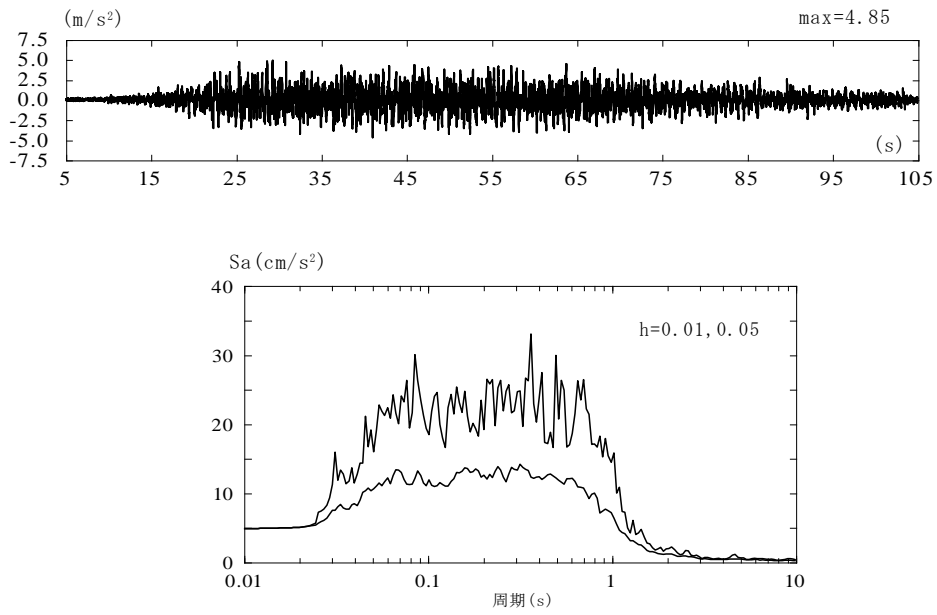


図 3.2-64 (1) 土台上(ch11)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-02,5.0m/s²)

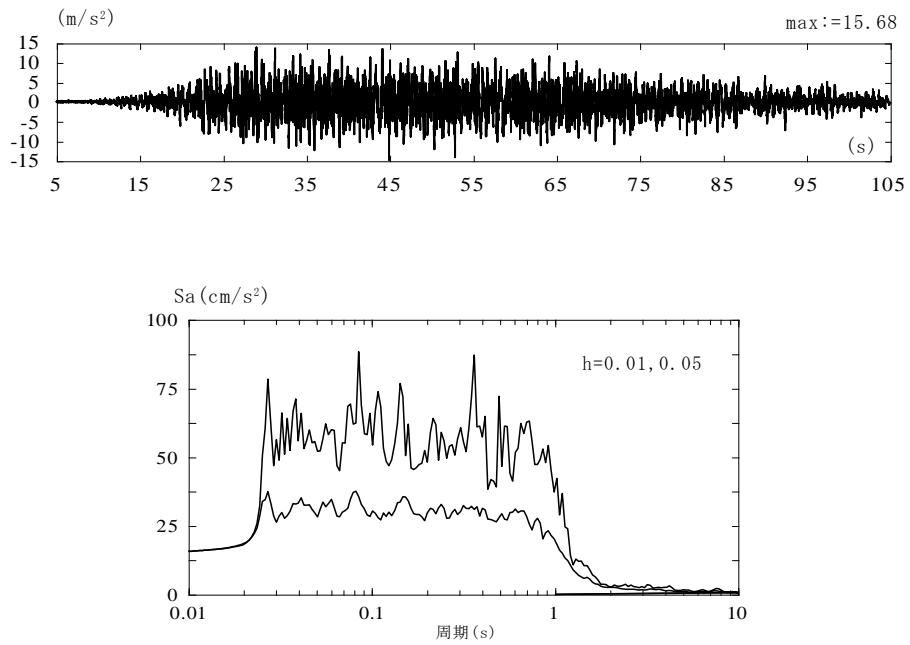


図 3.2-64(2) 土台上(ch11)の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(mwave-02,12.0m/s²)

表 3.2-40 最大応答値の比較(mwave-02,5.0m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	12.47	17.27	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.58	0.00
A2X方向(ch2)	14.21	15.30	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	0.73	1.66
A2Y方向(ch17)	4.20	0.13	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.55	0.00
A2Z方向(ch20)	2.12	0.49	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	1.26	0.92
A3X方向(ch3)	16.20	18.21	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.59	0.02
A3Y方向(ch18)	4.17	0.13	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	0.72	1.97
A4X方向(ch4)	13.32	12.48	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.62	0.31
A4Y方向(ch19)	3.31	0.35	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	10.79	8.00
A4Z方向(ch21)	3.44	1.66	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.95	0.31
A5X方向(ch5)	9.71	5.06	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	1.58	0.39
A6X方向(ch6)	5.37	5.12	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.51	0.30
A7X方向(ch7)	11.18	5.11	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	13.25	15.18
A8X方向(ch8)	5.30	8.60	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.45	0.30
A8Z方向(ch22)	10.19	4.09	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	2.68	2.59
A9X方向(ch9)	5.80	8.62	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.61	0.30
A9Z方向(ch23)	14.66	3.01	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	5.33	17.20
A10X方向(ch10)	13.37	5.02	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.87	0.01
A12X方向(ch12)	4.99	5.00	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	16.11	18.83

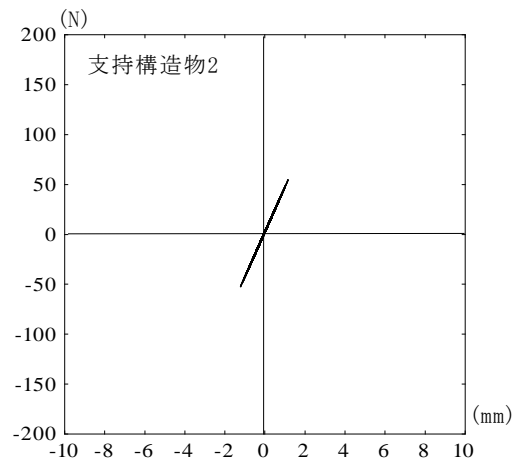
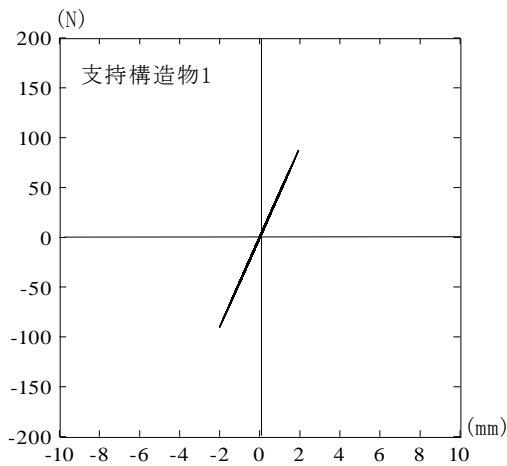


図 3.2-65 支持構造物の荷重—変位関係(mwave-02,5.0m/s²)

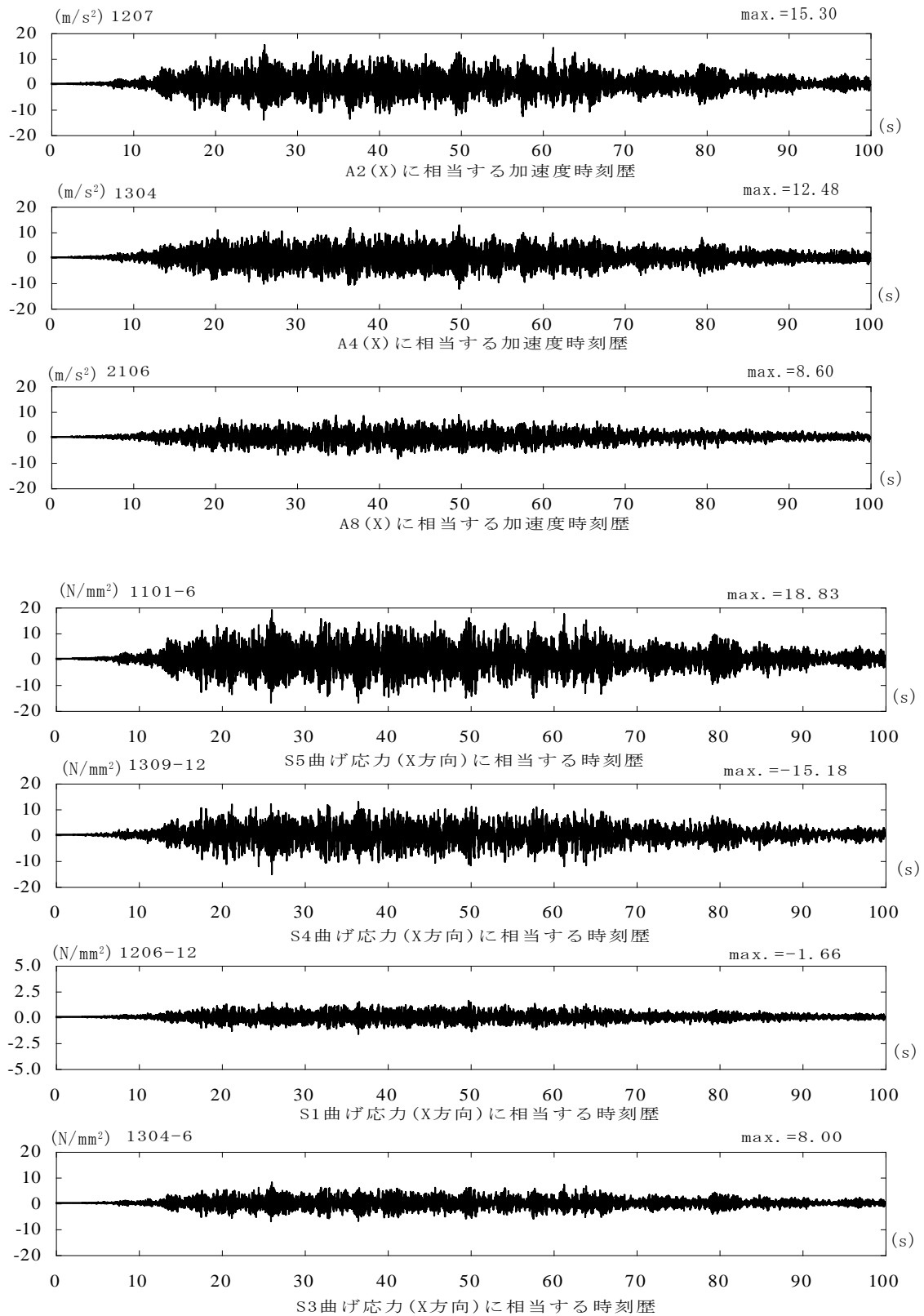


図 3.2-66(1) 地震応答解析による応答波形の例(mwave-02.5.0m/s²)

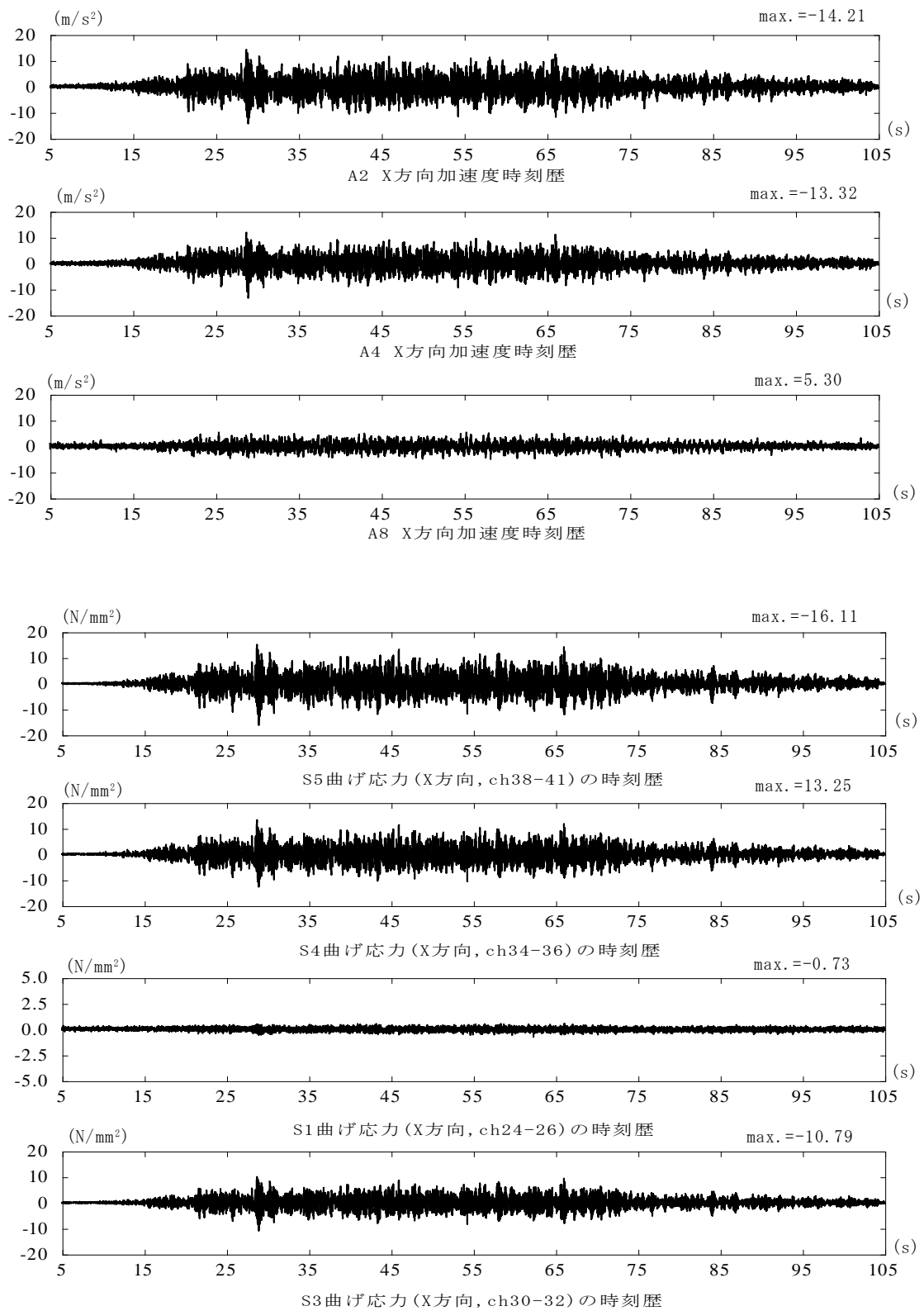


図 3.2-66(2) 振動試験による応答波形の例(mwave-02,5.0m/s²)

表 3.2-41 最大応答値の比較(mwave-02,12.0m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	49.89	56.82	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	2.06	0.01
A2X方向(ch2)	64.85	53.48	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	28.52	23.18
A2Y方向(ch17)	69.23	0.39	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	3.78	0.01
A2Z方向(ch20)	27.52	1.81	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	17.00	3.04
A3X方向(ch3)	60.80	67.32	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	1.25	0.05
A3Y方向(ch18)	30.11	0.39	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	12.37	6.32
A4X方向(ch4)	60.30	60.00	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	1.03	1.04
A4Y方向(ch19)	68.23	1.08	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	35.02	21.77
A4Z方向(ch21)	26.32	4.06	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	2.74	1.04
A5X方向(ch5)	89.39	12.10	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	10.94	1.32
A6X方向(ch6)	70.57	12.13	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	2.40	1.03
A7X方向(ch7)	47.98	12.36	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	96.43	86.03
A8X方向(ch8)	24.35	19.61	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	2.03	1.03
A8Z方向(ch22)	41.08	9.84	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	37.43	7.33
A9X方向(ch9)	21.63	19.63	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	2.01	1.02
A9Z方向(ch23)	46.00	6.87	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	58.87	59.45
A10X方向(ch10)	48.70	11.98	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	6.21	0.04
A12X方向(ch12)	13.12		S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	104.15	93.30

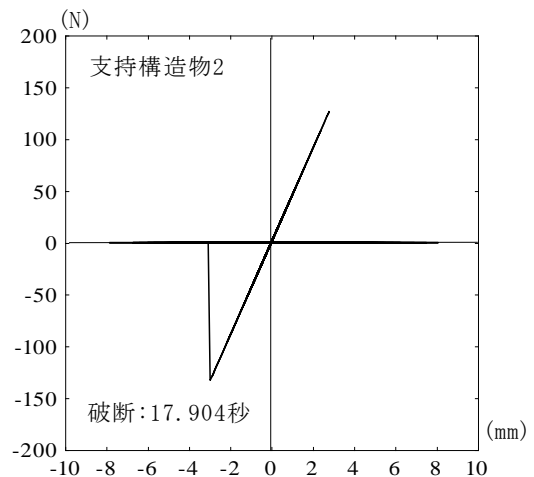
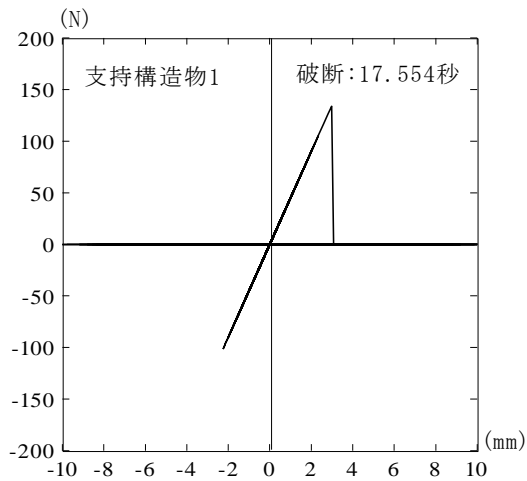


図 3.2-67 支持構造物の荷重—変位関係(mwave-02,12.0m/s²)

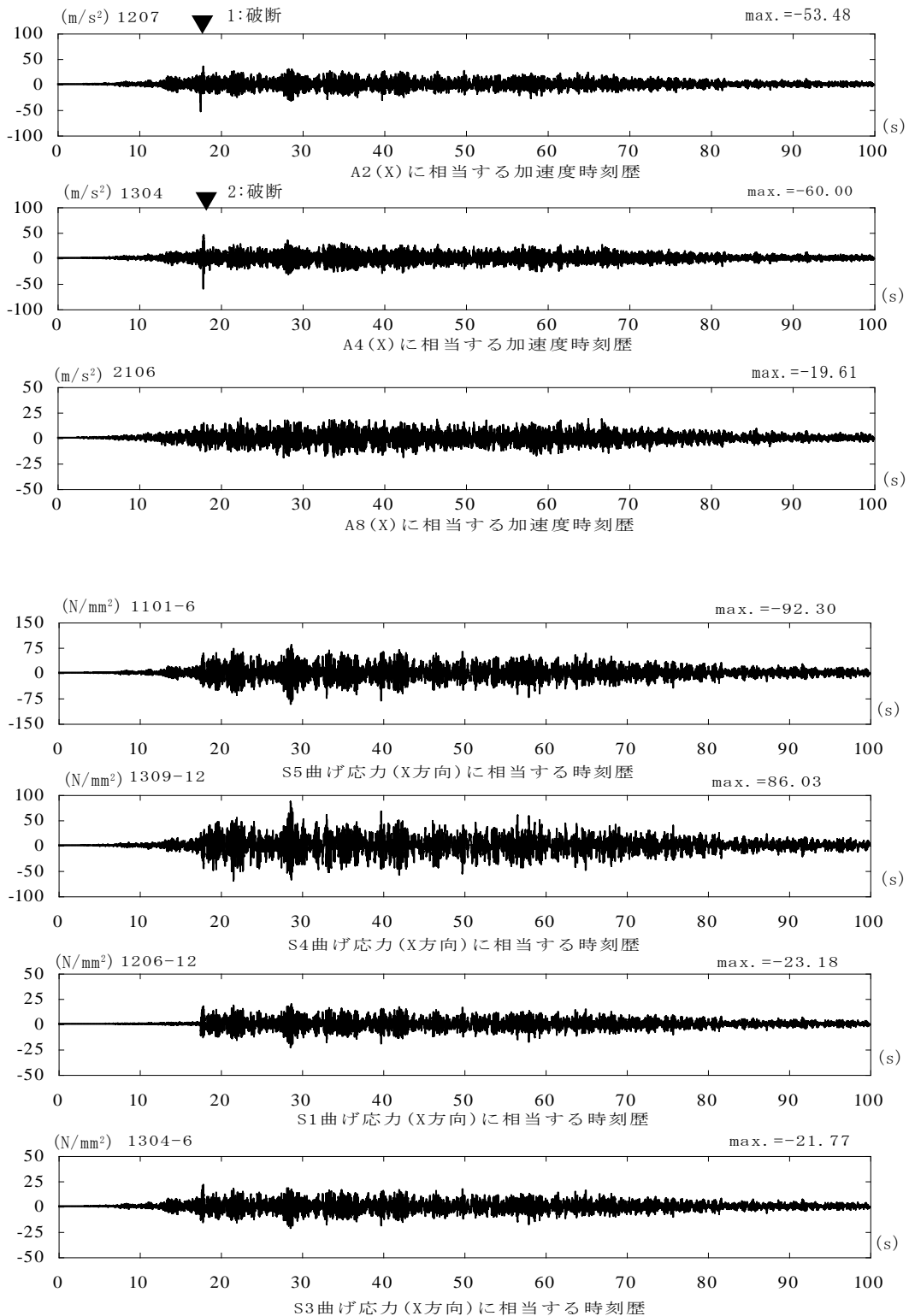


図 3.2-68(1) 地震応答解析による応答波形の例(mwave-02,12.0m/s²)

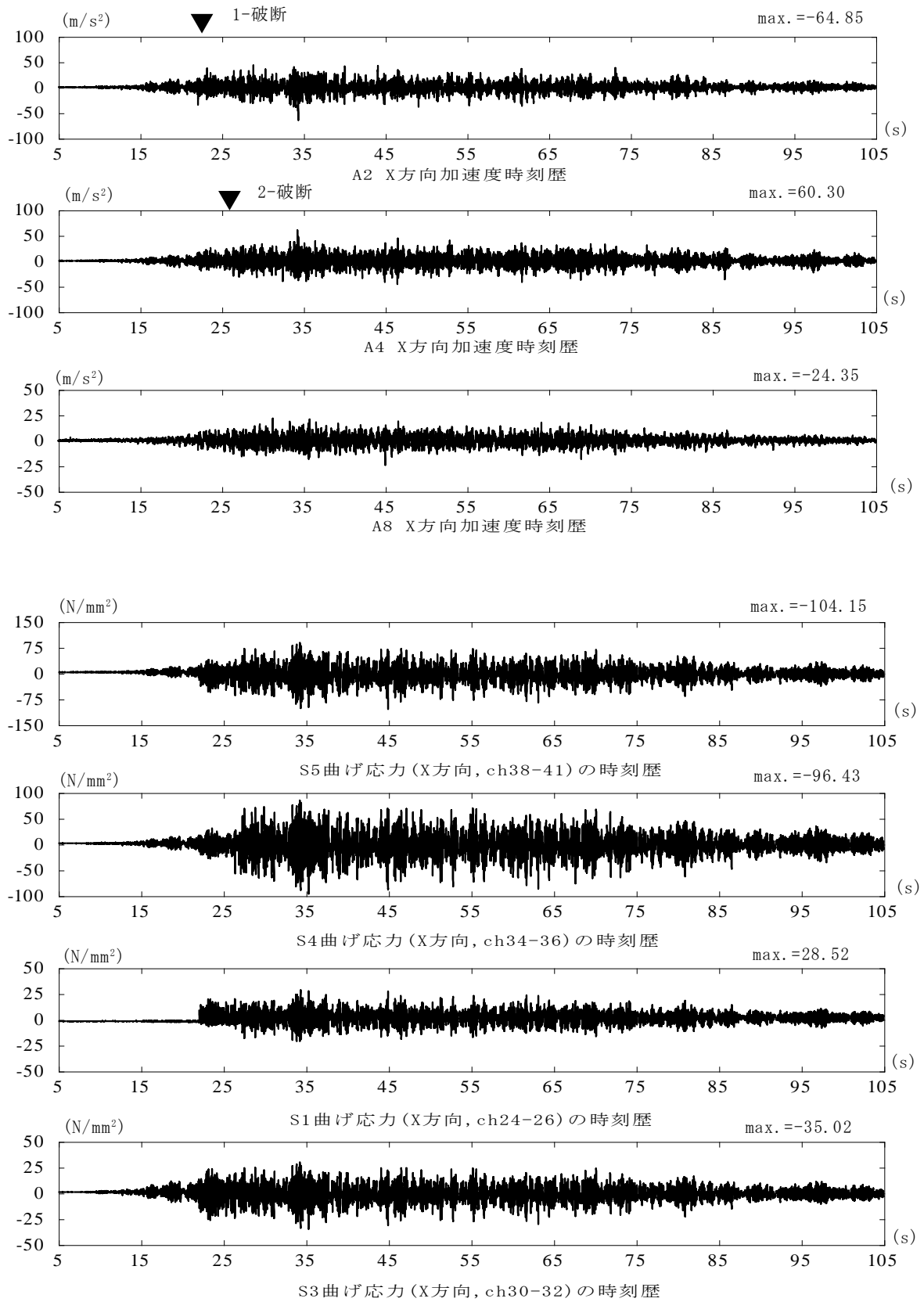


図 3.2-68(2) 振動試験による応答波形の例(mwave-02,12.0m/s²)

(3) wave-n05ew による試験結果との比較

振動解析モデルの特性、粘性減衰の設定は正弦波入力の場合と同一である。

wave-n05ew の最大加速度を 2.5m/s^2 、 5.0m/s^2 、 7.5m/s^2 、 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 とした場合の支持構造物 1 と 2 の破断状況を表 3.2-42 に示す。振動試験ではどの入力レベルでも支持構造物 1,2 で破断は見られないが、応答解析結果でも同様の結果が得られている。

wave-n05ew では破断が生じなかったため、最大加速度 5.0m/s^2 の場合のみ示す。解析モデルへの入力地震動は、原波を用いるので、応答結果に示す時刻歴波形の時刻は、解析と試験で同一ではない。

1) 振動台、土台上での加速度記録

振動台上(ch12)と土台上(ch11)で得られた加速度記録の時刻歴と加速度応答スペクトルを最大加速度 5.0m/s^2 について図 3.2-69、70 に示し、3.2.4.3.1 に示した原波と比較する。振動台での入力波は、最大変位を抑えるために wave-n05ew の場合 0.7Hz 以下をカットする操作を行っているため、周期 1.4 程度以上の範囲が応答スペクトル値は小さくなっている。最大加速度は大きめであるが、振動台、土台上の応答スペクトルは、原波と大きな相違は見られない。

2) 最大加速度 5.0m/s^2 の応答結果の比較

表 3.2.43 に最大加速度、配管の最大応力の比較を示し、図 3.2-71 に支持構造物 1,2 の荷重変形関係の履歴を示している。図 3.2-72(1)～(2)には、代表的な位置での時刻歴の比較を示している。試験体の固有振動数付近に優勢な振動数成分を持たないので振動台と同じ動きとなる傾向が強くなるためと考えられるが、計測点の応答波形は入力地震動の波形形状と似た形状となっている。解析の最も大きな最大応力は S4 の曲げ応力で、試験では S5 の曲げ応力で発生しており、大きき的にはわずかな相違であるが発生位置に相違が見られる。

表 3.2-42 支持構造物 1,2 の破断状況

最大加速度(m/s^2)	振動試験	地震応答解析
2.5	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
5.0	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
7.5	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
10.0	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし
12.0	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし	支持構造物1:破断なし 支持構造物2:破断なし

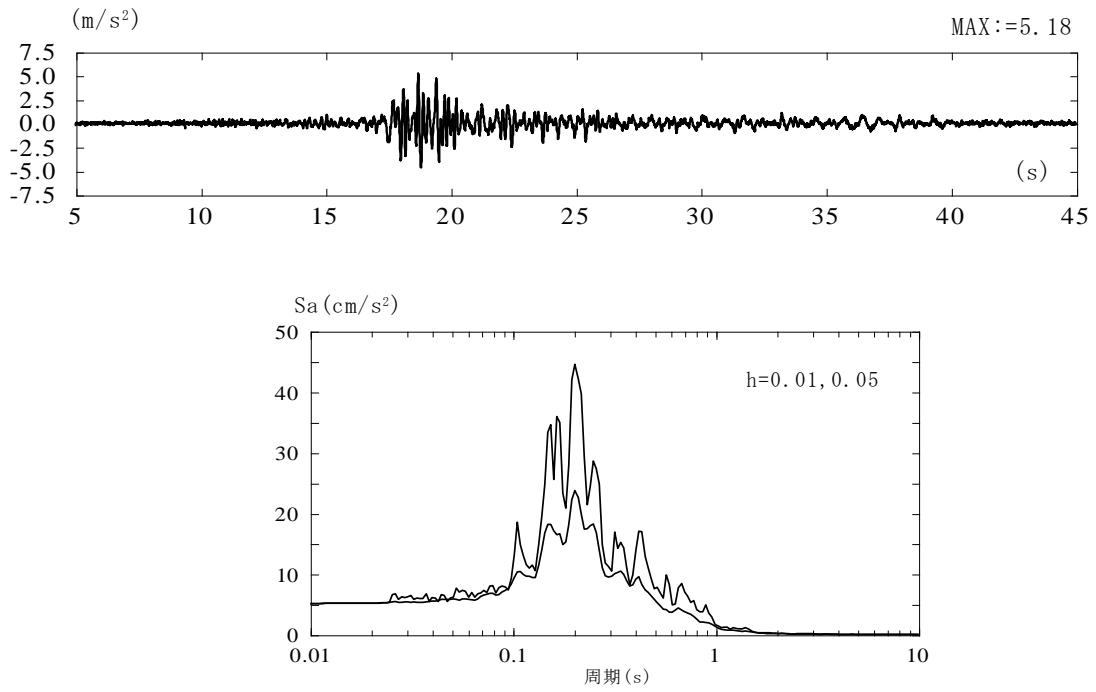


図 3.2-69 振動台上の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(wave-n05ew,5.0m/s²)

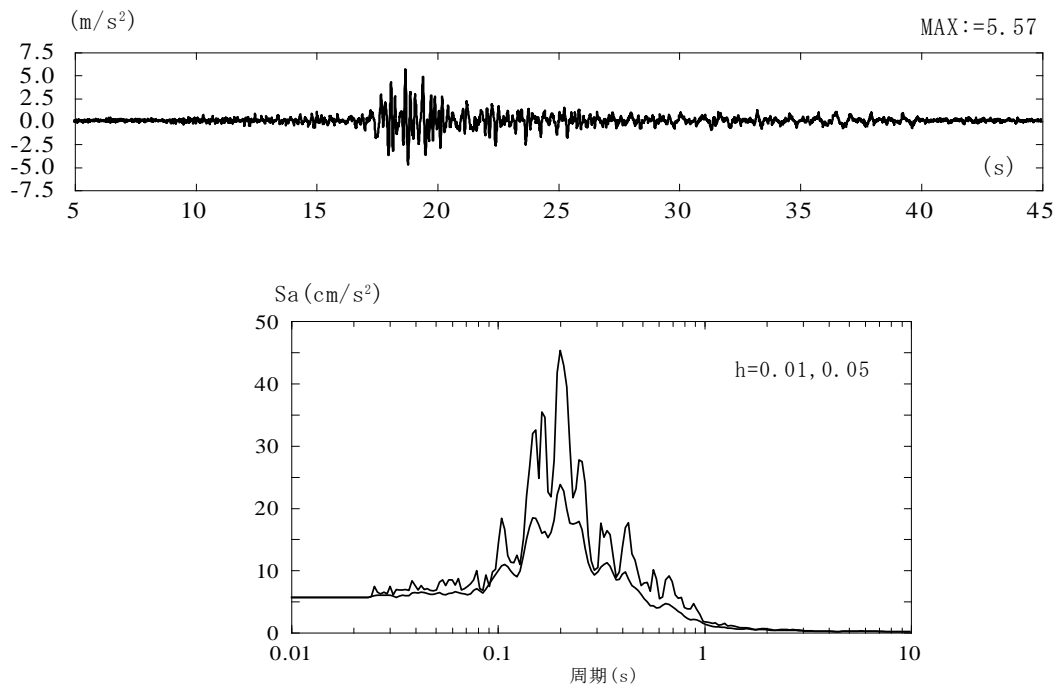


図 3.2-70 土台上の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル(wave-n05ew,5.0m/s²)

表 3.2-43 最大応答値の比較(wave-n05ew,5.0m/s²)

最大加速度(m/s)			最大応力(N/mm ²)		
加速度計	振動試験	数値解析	ゲージ位置	振動試験	数値解析
A1X方向(ch1)	6.90	6.20	S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.46	0.00
A2X方向(ch2)	7.13	6.11	S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	1.17	0.83
A2Y方向(ch17)	0.91	0.01	S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.48	0.00
A2Z方向(ch20)	1.01	0.06	S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	0.48	0.35
A3X方向(ch3)	8.66	5.67	S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.52	0.01
A3Y方向(ch18)	1.09	0.01	S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	0.39	0.80
A4X方向(ch4)	6.85	5.23	S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.47	0.12
A4Y方向(ch19)	1.34	0.04	S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	5.76	3.67
A4Z方向(ch21)	1.47	0.18	S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.48	0.12
A5X方向(ch5)	6.20	5.02	S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	0.44	0.15
A6X方向(ch6)	5.36	5.01	S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.53	0.12
A7X方向(ch7)	7.80	5.02	S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	8.72	9.26
A8X方向(ch8)	5.97	5.43	S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.38	0.12
A8Z方向(ch22)	4.08	0.44	S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	0.87	0.67
A9X方向(ch9)	6.44	5.43	S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.38	0.12
A9Z方向(ch23)	3.73	0.35	S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	2.28	7.62
A10X方向(ch10)	6.31	5.01	S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.51	0.00
A12X方向(ch12)	5.18	5.00	S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	9.83	7.85

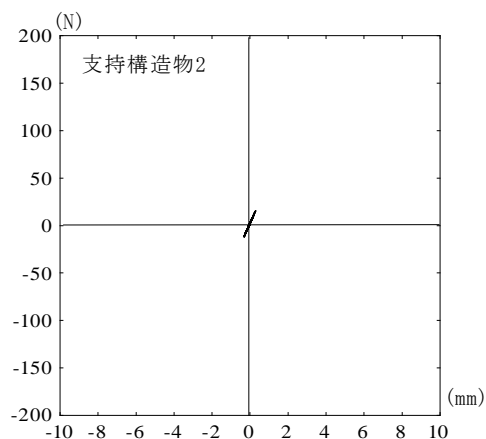
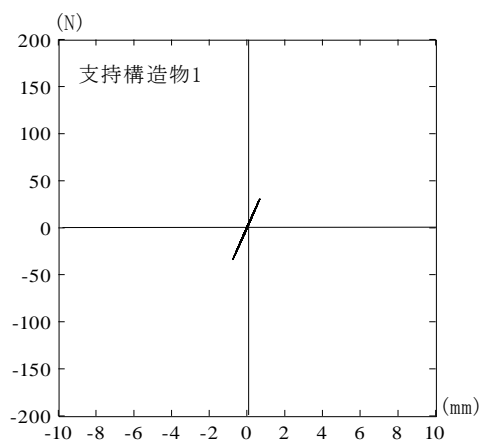


図 3.2-71 支持構造物の荷重—変位関係(wave-n05ew,5.0m/s²)

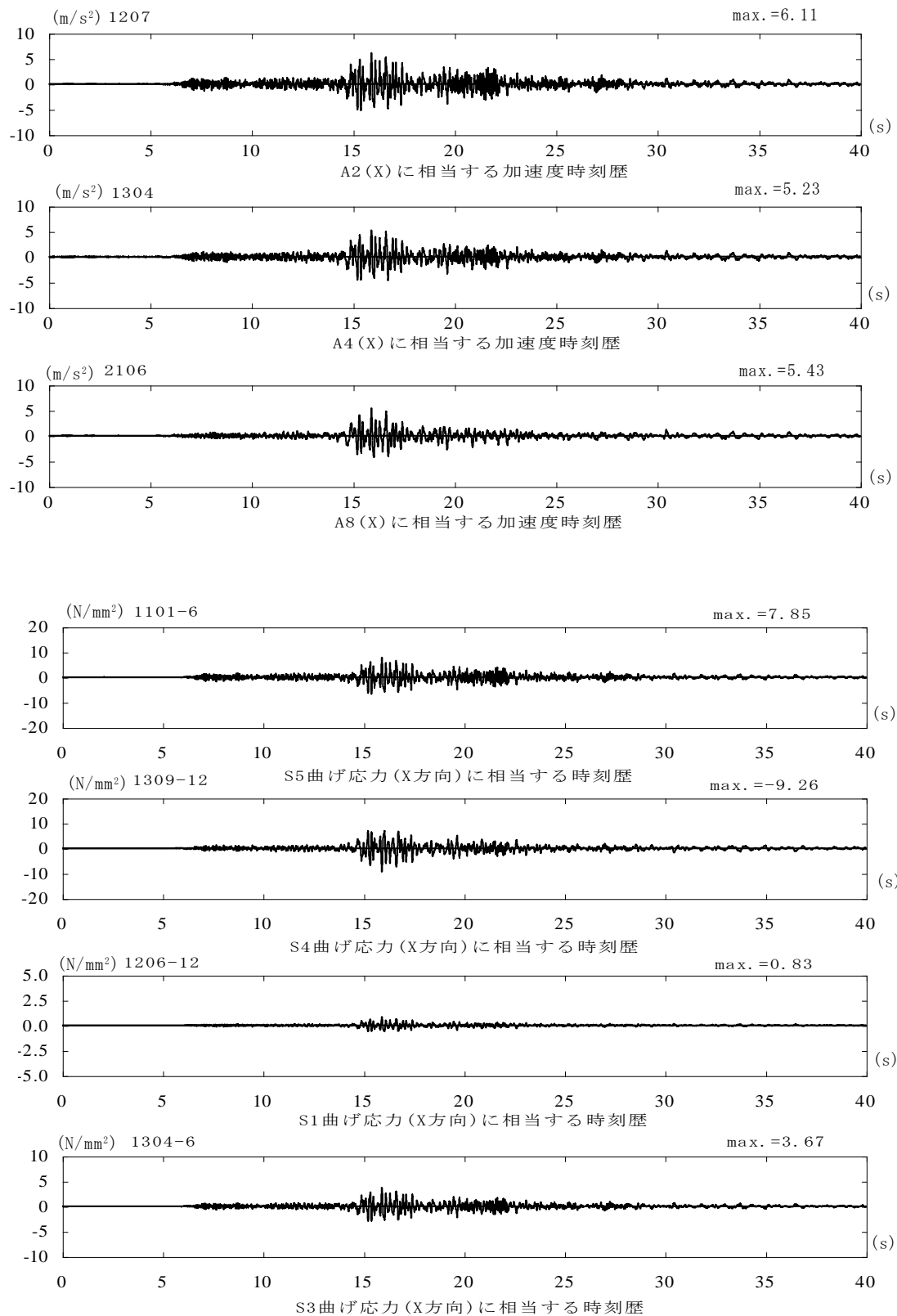


図 3.2-72(1) 地震応答解析による応答波形の例(wave-n05ew,5.0m/s²)

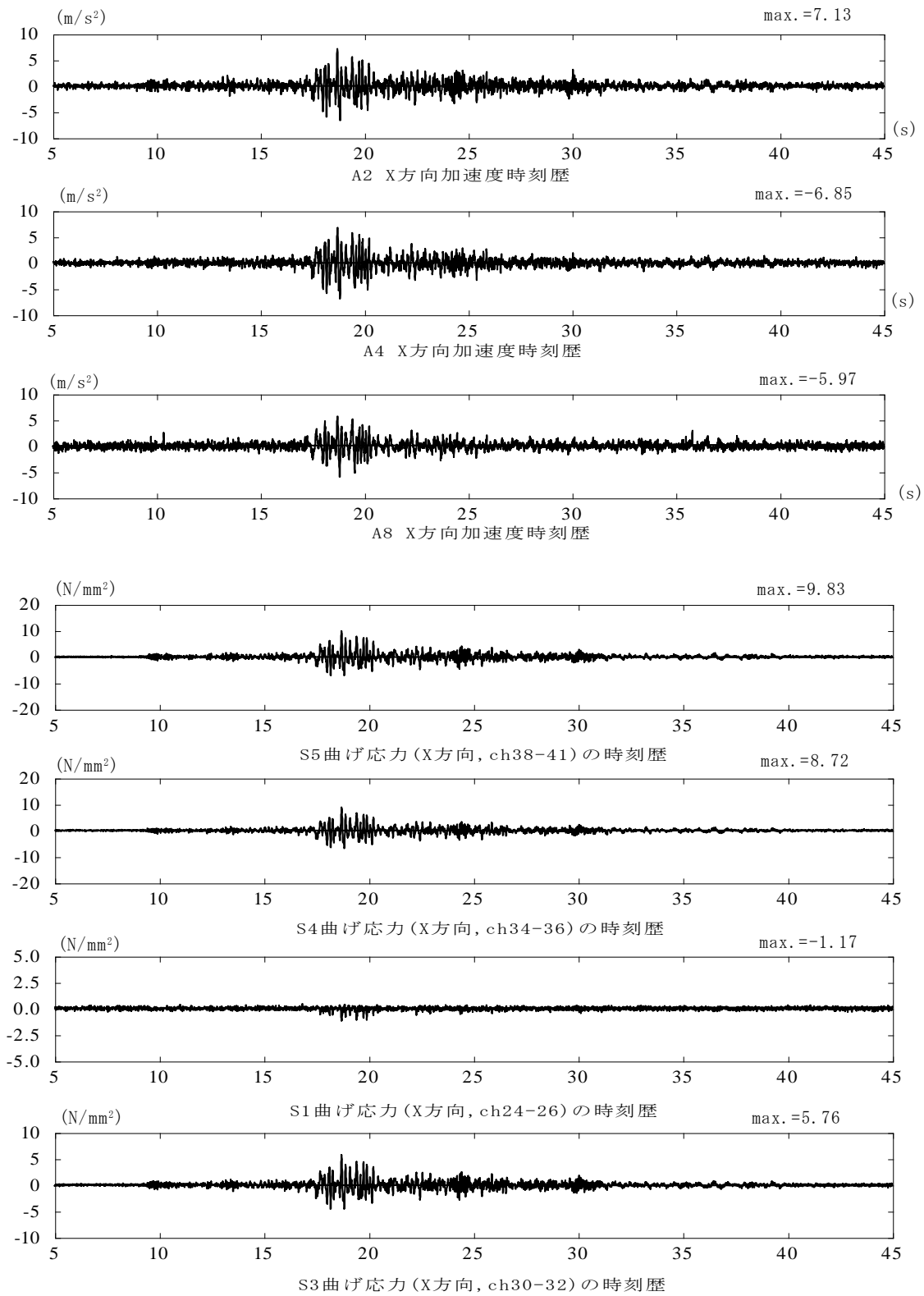


図 3.2-72(2) 振動試験による応答波形の例(wave-n05ew,5.0m/s²)

3.2.5.1.5 応答スペクトルによる応答解析を用いる方法の検討

ここでは、応答スペクトルを用いた地震応答解析を利用して、支持構造物の損傷を考慮した配管の最大応力等の算出について検討する。

支持構造物 1,2 を設定した解析モデルと支持構造物 1,2 をあらかじめ削除した解析モデルを用いた応答スペクトルによる地震応答解析を実施し、配管の最大応力等について高度化の検討をしてきた時刻歴地震応答解析の結果、振動試験の結果と比較する。

支持構造物の損傷(破断)を想定とする検討であるので、mwave-01 と mwave-02 を対象とする。応答スペクトルを用いる地震応答計算では、考慮する次数は 20 次までとし、各次数に対する粘性減衰は時刻歴解析と同様に設定し、モードの重ね合せには SRSS 法を用いる。応答スペクトルは原波から作成したものを使用する。

(1)mwave-01 を入力とする結果との比較

表 3.2-44 は、最大加速度を 2.5m/s^2 とした mwave-01 による支持構造物 1,2 付き試験体の最大応力を、振動試験、時刻歴解析、応答スペクトルを用いる方法の 3 種類で比較している。最も大きい最大ひずみは S5 の X 方向振動による曲げ応力で 3 種類とも同じであり、比較的近い数値が評価されている。2 番目、3 番目に大きい部位は、時刻歴解析と応答スペクトルを用いる方法では S4 の曲げ応力と S6 の曲げ応力となっているが、試験結果では S4 の曲げ応力と S3 の曲げ応力となっている。解析において S6 の影響が大きくなるのは、試験結果の 2 次モードに相当する振動形の形状が試験と解析とで相違見られることが一因していると考えられる。

表 3.2-45 は、最大加速度を 2.5m/s^2 とした mwave-01 による支持構造物 2 のみ付きの配管系試験体の最大応力を比較している。mwave-01 入力の振動試験では支持構造物 1 のみが破断しているため、支持構造物 2 のみ付きモデルの解析を実施している。また、このケース振動台試験は 3.2.4 項で掲載していないので、表中では参考として示している。最も大きい最大ひずみは S5 の曲げ応力で 3 種類とも同じであるが、2 番目、3 番目に大きい部位の傾向は支持構造物 1,2 付きの場合と同じである。

(2)mwave-02 入力による応答値の比較

表 3.2-46 は、最大加速度を 2.5m/s^2 とした mwave-02 による支持構造物 1,2 付き配管系試験体の最大応力を、3 種類で比較している。最も大きい最大ひずみは S5 の曲げ応力で 3 種類とも同じである。2 番目、3 番目に大きい部位の傾向は mwave-01 の場合と同じである。

表 3.2-47 は、最大加速度を 2.5m/s^2 とした mwave-02 による支持構造物 1,2 なしの配管系試験体の最大応力を比較している。このケースの振動台試験は 3.2.4 で掲載していないので、表中では参考として示している。支持構造物 1 と 2 がいないので、縦方向配管が上方で大きく振動するため、大きな応力は縦方向配管の支持部近傍の S4, S5 での曲げ応力となる傾向が強くなり、3 種類共に、1 番目、2 番目に大きな最大応力は、S5 の曲げ応力、S4 の曲げ応力となっている。

(3) 応答スペクトルを用いる応答解析を用いた支持構造物が破断する配管系の最大応力の推定

各部位を通して最大となる応力を対象として、応答スペクトルを用いる応答解析から得られる結果と振動試験、時刻歴地震応答解析による結果とを比較する。

1) mwave-01 に関する検討

表 3.2-48(1)は mwave-01 による 5 つの最大加速度において各部位の中での最大応力を、振動試験、時刻歴解析、応答スペクトルを用いる方法で比較したものである。応答スペクトルを用いる方法は、支持構造物を設置したモデルと破断の発生した支持構造物1を除いた支持構造物 2 のみ付モデルの 2 ケースについて示し、 2.5m/s^2 の結果を最大加速度の比率倍している。最大応力は最大膜応力と最大曲げ応力の和として求め、()内には発生した部位を示している。表からわかるように、発生部位はすべて S5 である。

図 3.2-73(1)は、表 3.2-48(1)をグラフで示したものである。支持構造物1が破断する最大加速度 10.0m/s^2 から応力が大きくなっている。 7.5m/s^2 までは、支持構造物 1,2 付きモデルの応答スペクトルを用いる方法と時刻歴解析、振動試験の結果は比較的よく一致している。 10.0m/s^2 以上では、支持構造物 2 のみ付きモデルの応答スペクトルを用いる方法と時刻歴解析結果はよく一致しているが、振動試験から得られる最大応力は多少大きくなる傾向が見られる。振動試験で応答が大きくなる原因は 3.2.5.1.4 項で考察した。

2) mwave-02 に関する検討

mwave-02 の場合、最大加速度 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 で支持構造物 1 と 2 が破断したのは、振動試験と時刻歴解析で共通であったが、最大加速度 7.5m/s^2 では、時刻歴解析で支持構造物1が破断し、振動試験で支持構造物 1,2 の破断は見られなかった。そこで、応答スペクトルによる応答解析では、支持構造物 1,2 付きモデル、支持構造物 2 のみ付きモデル、支持構造物 1,2 なしモデルの 3 ケースについて実施した。

mwave-02 に関しても同様の表、図を表 3.2-48(2)、図 3.2-73(2)に示す。最も大きな最大応力の発生部位は mwave-01 と同様にすべてのケースで S5 である。振動試験では、支持構造物1,2 が破断した最大加速度 10.0m/s^2 から、時刻歴解析では、支持構造物1が破断した 7.5m/s^2 から、それぞれ最大応力は大きくなっている。

図 3.2-48(2)において、支持構造物 1,2 付きモデルの応答スペクトルを用いる方法の結果は、時刻歴解析では 5.0m/s^2 まで、振動試験では 7.5m/s^2 までの結果と比較的よく一致している。支持構造物 1,2 なしモデルの応答スペクトルを用いる方法の結果は、最大加速度時 10.0m/s^2 、 12.0m/s^2 の時刻歴解析の結果と比較的よく一致しているが、振動試験から得られる最大応力より大きくなる傾向が見られる。振動試験で応答が大きくなる原因は 3.2.5.1.4 項で考察した。

以上のように mwave-01, mwave-02 とともに、損傷を受ける支持構造物の状態を考慮した応答スペクトルにより応答解析を用いる方法の結果は、対応する時刻歴応答解析の結果とよく一致していた。

表 3.2-44 最大応答値の比較(支持構造物 1,2 付、mwave-01、2.5m/s²)

最大応力(N/mm ²)			
ゲージ位置	振動試験	時刻歴解析	応答スペクトルを用いる方法
S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.68	0.00	0.00
S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	1.09	0.48	0.62
S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.56	0.00	0.00
S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	1.00	0.21	0.31
S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.59	0.00	0.01
S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	0.87	0.41	0.62
S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.45	0.07	0.10
S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	4.55	3.08	2.74
S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.55	0.07	0.10
S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	0.81	0.10	0.13
S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.44	0.07	0.10
S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	5.67	5.55	4.12
S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.47	0.07	0.10
S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	2.52	0.45	0.95
S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.47	0.07	0.10
S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	3.24	4.33	5.53
S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.49	0.00	0.01
S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	8.02	7.25	6.83

表 3.2-45 最大応答値の比較(支持構造物 2 のみ付、mwave-01、2.5m/s²)

最大応力(N/mm ²)			
ゲージ位置	時刻歴解析	応答スペクトルを用いる方法	振動試験(参考)
S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.00	0.01	0.49
S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	3.02	3.06	3.78
S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.00	0.01	0.59
S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	0.03	0.50	0.41
S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.00	0.03	0.61
S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	0.77	0.81	1.04
S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.06	0.09	0.47
S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	3.72	3.66	5.11
S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.06	0.09	0.59
S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	0.13	0.66	0.51
S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.06	0.09	0.44
S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	6.33	4.87	6.37
S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.06	0.09	0.52
S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	0.41	0.89	0.83
S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.06	0.09	0.39
S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	3.97	5.06	1.80
S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.00	0.02	0.67
S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	9.71	9.86	10.14

表 3.2-46 最大応答値の比較(支持構造物 1,2 付、mwave-02、2.5m/s²)

ゲージ位置	最大応力(N/mm ²)		
	振動試験	時刻歴解析	応答スペクトルを用いる方法
S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.87	0.00	0.00
S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	0.56	0.83	0.80
S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.92	0.00	0.00
S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	0.73	0.46	0.47
S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.98	0.01	0.01
S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	0.51	0.99	1.06
S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.65	0.15	0.16
S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	5.16	4.00	3.37
S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.68	0.15	0.16
S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	0.76	0.20	0.20
S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.56	0.15	0.15
S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	6.38	7.59	5.28
S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.51	0.15	0.15
S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	0.82	1.29	1.46
S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.53	0.15	0.15
S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	1.91	8.60	8.35
S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.66	0.01	0.01
S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	7.32	9.42	8.59

表 3.2-47 最大応答値の比較(支持構造物 1,2 なし、mwave-02、2.5m/s²)

ゲージ位置	最大応力(N/mm ²)		
	時刻歴解析	応答スペクトルを用いる方法	振動試験(参考)
S1膜応力(X方向のひずみch24,26)	0.03	0.04	0.83
S1曲げ応力(X方向のひずみch24,26)	6.08	4.79	7.69
S1膜応力(Z方向のひずみch25,27)	0.03	0.04	1.41
S1曲げ応力(Z方向のひずみch25,27)	0.96	1.20	3.46
S2膜応力(X方向のひずみch28,29)	0.03	0.03	0.70
S2曲げ応力(X方向のひずみch28,29)	1.75	1.79	4.10
S3膜応力(X方向のひずみch30,32)	0.04	0.05	0.60
S3曲げ応力(X方向のひずみch30,32)	6.02	4.54	10.95
S3膜応力(Y方向のひずみch31,33)	0.04	0.05	0.91
S3曲げ応力(Y方向のひずみch31,33)	0.81	1.08	2.07
S4膜応力(X方向のひずみch34,36)	0.05	0.06	0.65
S4曲げ応力(X方向のひずみch34,36)	20.38	16.00	30.48
S4膜応力(Y方向のひずみch35,37)	0.05	0.06	0.62
S4曲げ応力(Y方向のひずみch35,37)	2.44	2.72	9.32
S6膜応力(X方向のひずみch44,45)	0.05	0.06	0.62
S6曲げ応力(X方向のひずみch44,45)	12.54	11.83	16.26
S5膜応力(X方向のひずみch38,41)	0.05	0.06	1.97
S5曲げ応力(X方向のひずみch38,41)	24.86	19.90	28.31

表 3.2-48 最大応力の一覧

(1) mwave-01

最大応力(N/mm ²)					
	最大加速度 2.5m/s ²	最大加速度 5.0m/s ²	最大加速度 7.5m/s ²	最大加速度 10.0m/s ²	最大加速度 12.0m/s ²
応答スペクトルを用いる方法 支持構造物1,2付	6.84 (S5)	13.68 (S5)	20.52 (S5)	27.36(S5)	32.83 (S5)
応答スペクトルを用いる方法 支持構造物2のみ付	9.88 (S5)	19.76 (S5)	29.64 (S5)	39.52(S5)	47.42 (S5)
時刻歴応答解析	7.25 (S5)	14.51 (S5)	21.76 (S5)	36.93 (S5)	44.63 (S5)
振動試験	8.51 (S5)	17.63 (S5)	24.97 (S5)	49.32 (S5)	58.82 (S5)

注) 最大応力は最大膜応力と最大曲げ応力の和として算出、()は発生位置

(2) mwave-02

最大応力(N/mm ²)					
	最大加速度 2.5m/s ²	最大加速度 5.0m/s ²	最大加速度 7.5m/s ²	最大加速度 10.0m/s ²	最大加速度 12.0m/s ²
応答スペクトルを用いる方法 支持構造物1,2付	8.60 (S5)	17.20 (S5)	25.80 (S5)	34.40 (S5)	41.28 (S5)
応答スペクトルを用いる方法 支持構造物2のみ付	17.86 (S5)	35.72(S5)	53.58(S5)	71.44(S5)	89.3(S5)
応答スペクトルを用いる方法 支持構造物なし	19.96 (S5)	39.92 (S5)	59.88 (S5)	79.84 (S5)	95.80 (S5)
時刻歴応答解析	9.43 (S5)	18.84 (S5)	55.79 (S5)	76.47 (S5)	93.34 (S5)
振動試験	7.98 (S5)	16.98 (S5)	26.80 (S5)	102.74 (S5)	110.36 (S5)

注) 最大応力は最大膜応力と最大曲げ応力の和として算出、()は発生位置

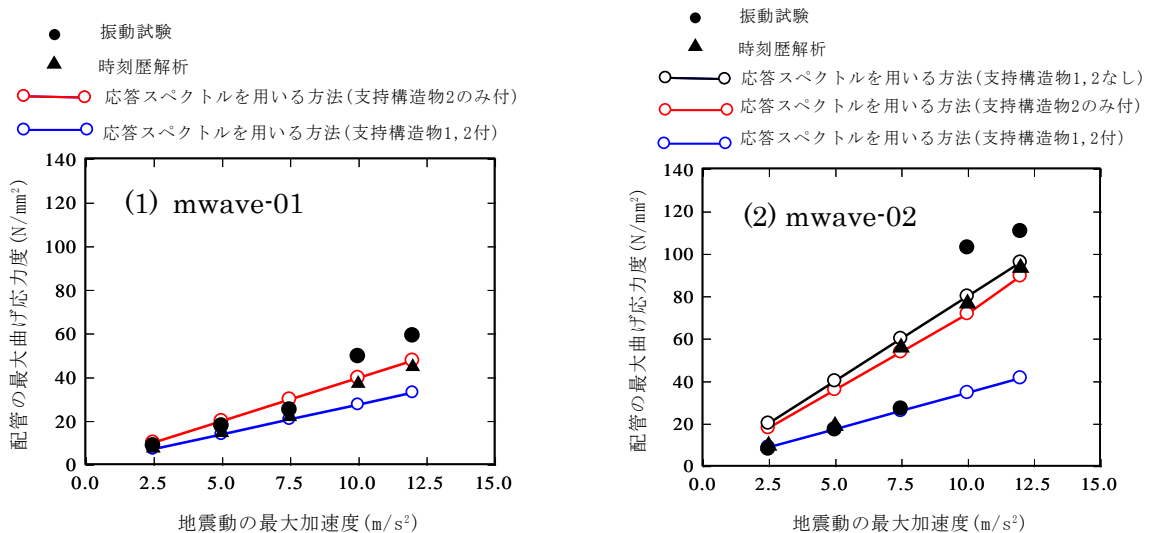


図 3.2-73 応答スペクトルを用いる方法による最大応力と試験結果の関係

3.2.5.2 配管系フラジリティ評価手法の提案

振動試験の結果は、支持構造物 1,2 が損失(破断)しても、配管系としての機能は維持されていたと考えられる。この観点から、配管系としての機能限界を対象とした、配管系フラジリティ評価手法について検討する。フラジリティ評価に用いる応答評価には、高度化を行ってきた時刻歴応答解析と損傷を受ける支持構造物の状況を考慮した応答スペクトルによる応答解析を用いる方法の2種類を用いる。

ここでは、3.2.5.1 の検討において、試験結果と解析結果との整合性は確認されたので、解析による結果を用いて実施する。

3.2.5.2.1 フラジリティ評価の条件

入力地震動は支持構造物 1,2 が損傷(破断)した mwave-02 を用いたケースとする。

フラジリティ評価の対象部位は図 3.2-74 に示すように以下の 2 点とし、配管応力を指標として行う。

評価部位①: 上方の横方向配管の手前側(C 側)の端部

評価部位②: 前面の縦方向配管の下部で下方の横方向配管からの分岐近傍の位置

各部位の中で最大の応力についても検討するが、対象部位は、図 3.2-74 に示す S1~S6 の 6 か所とする。また、ここでの応力は、各部位における X 方向振動による応力とする。

3.2.5.2.2 耐力と応答に関する評価

損傷確率は文献 2)の現実的耐力分布と現実的応答分布を用いる方法に従って算出する。

耐力及び応答の分布は、対数正規分布に従うものとする。

耐力の分布の諸元を表 3.2-49 に示す。耐力の中央値は 46.8N/mm^2 と仮定した。これは、今回の配管系試験体による最大応力に対応して、フラジリティ曲線を見やすくするために設定した値である。対数標準偏差は $\beta_u=0.07$ 、 $\beta_r=0.07$ とし、2乗和平方根にて耐力の対数標準偏差 $\beta_R=0.099$ として設定する。

応答分布の諸元を表 3.2-50 に示す。中央値は 5 つの最大加速度レベルでの評価部位①、②の最大応力とする。対数標準偏差は、対数標準偏差は文献 2)を参照し $\beta_u=0.27$ 、 $\beta_r=0.25$ とし、2乗和平方根にて応答の対数標準偏差 $\beta_S=0.368$ として設定する。

3.2.5.2.3 サポート損傷を考慮した時刻歴応答解析結果を用いたフラジリティ評価

応答値として、時刻歴応答解析結果を用いた場合について検討する。この手法では、支持構造物が損傷(破断)することによる応力の再配分が考慮できる。

5 つの最大加速度レベルにおける評価部位①、②の最大応力と S1~S6 を通しての最大応力を表 3.2-51 に示す。最大応力は各部位において最大膜応力と最大曲げ応力の和として求めている。

時刻歴解析の場合、最大加速度 7.5m/s^2 で支持構造物 1 が破断し、 10.0m/s^2 から 1 と 2 が破断している。評価部位①、②で、最大加速度 5.0m/s^2 と 7.5m/s^2 における最大応力の比率($7.5/5.0$)は 2.2 と 1.6 であり、最大加速度の比率 1.5 より大きくなっている。S1~S6 を通しての最大である S5 応力では、この比率は約 3 倍になっており、上方横方向配管を支持する支持構造物 1 が破断することによる影響が見られる。

表 3.2-52 に算出した損傷確率を示す。最大加速度と損傷確率との関係を図 3.2-75 に示し、その関係を

対数正規分布で近似したフラジリティ曲線を図 3.2-76 に示す。評価部位①では、応力が小さいので破壊確率も小さくなっている。評価部位②では、支持構造物が破断する最大加速度 7.5m/s^2 から、破壊確率が急増するフラジリティ曲線となっている。

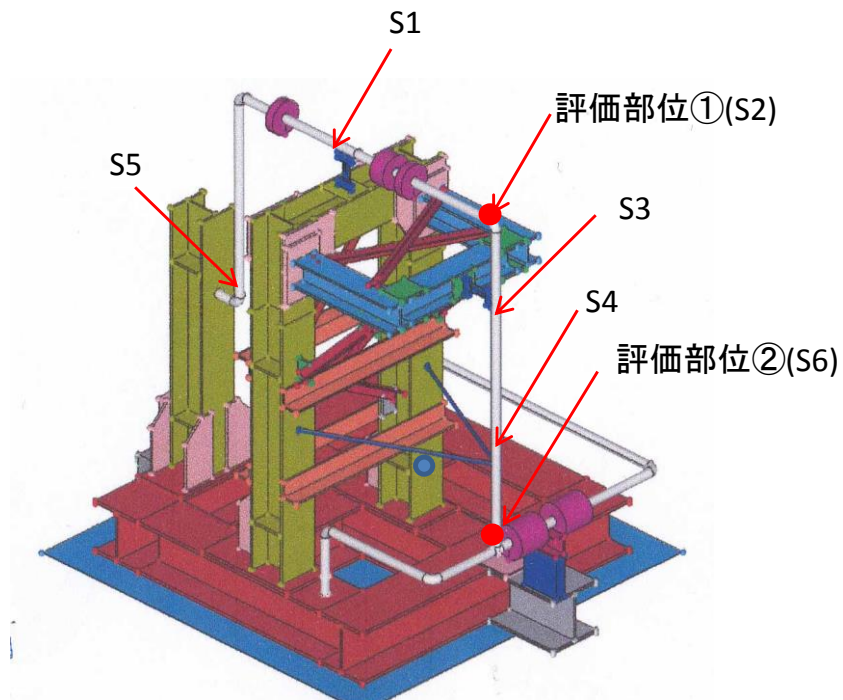
3.2.5.2.4 サポート損傷を考慮した応答スペクトル解析結果を用いたフラジリティ評価

評価部位の最大応力を、応答スペクトルを用いる応答解析から算出しフラジリティ評価を実施する。時刻歴応答解析の支持構造物の破断状況に応じた解析モデルを設定する。最大加速度 2.5 m/s^2 、 5.0m/s^2 では支持構造物1,2付きモデル、 7.0m/s^2 では支持構造物2のみ付きモデル、 10.0 m/s^2 、 12.0m/s^2 では支持構造物1,2なしモデルを用いる。

5つの最大加速度レベルにおける評価部位①、②の最大応力と S1～S6 を通しての最大の応力を表 3.2-53 に示す。各レベルの最大応力は、対応する解析モデルによる最大加速度 2.5m/s^2 の最大応力を最大加速度の比率倍して求めている。また、最大応力は各部位において最大膜応力と最大曲げ応力の和として求めている。

各レベルの評価部位①、②の最大応力及び S1～S6 を通しての最大の応力と最大加速度との関係は、時刻歴解析の結果と同様の傾向を示し、算出される最大応力も時刻歴解析結果と非常に近い値となっている。

表 3.2-54 に算出した損傷確率を示す。最大加速度と損傷確率との関係を図 3.2-77 に示し、フラジリティ曲線を図 3.2-78 に示す。破壊確率は時刻歴解析による値と非常に近い値となり、フラジリティ曲線も時刻歴解析の結果と同様の形状が得られている。



注) S1～S6 は最も大きな応力を検討するために用いた部位

図 3.2-74 フラジリティ評価の評価対象部位

表 3.2-49 耐力分布の諸元(対数正規分布)

中央値 (N/mm ²)	対数標準偏差		
	β_r	β_u	β_R
46.8	0.07	0.07	0.099

表 3.2-50 応答分布の諸元(対数正規分布)

中央値 (N/mm ²)	対数標準偏差		
	β_r	β_u	β_s
地震応答解析結果	0.27	0.25	0.368

表 3.2-51 評価部位等の最大応力(時刻歴応答解析)

	最大加速度				
	2.5m/s ²	5.0m/s ²	7.5m/s ²	10.0m/s ²	12.0m/s ²
評価部位①(S2)の最大応力	1.00	1.99	4.40	5.31	6.37
評価部位②(S6)の最大応力	8.75	17.50	28.12	49.24	60.47
S1~S6の最大応力(発生箇所)	9.43(S5)	18.84(S5)	55.79(S5)	76.47(S5)	93.34(S5)

単位: N/mm²

表 3.2-52 損傷確率(時刻歴応答解析)

最大加速度	損傷確率 (Pf)	
	評価部位①	評価部位②
2.5m/s ²	2.931×10^{-24}	5.384×10^{-6}
5.0m/s ²	5.756×10^{-17}	4.914×10^{-3}
7.5m/s ²	2.727×10^{-10}	9.061×10^{-2}
10.0m/s ²	5.581×10^{-9}	5.531×10^{-1}
12.0m/s ²	8.279×10^{-8}	7.494×10^{-1}

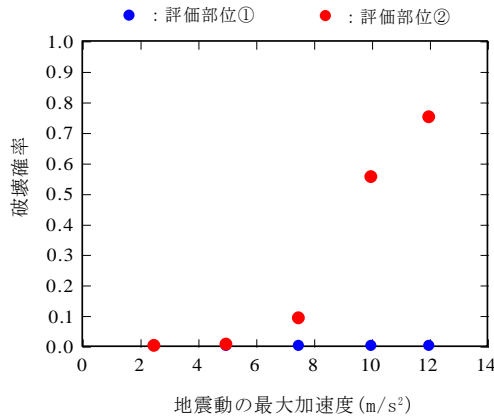


図 3.2-75 破壊確率-最大加速度関係(時刻歴応答解析)

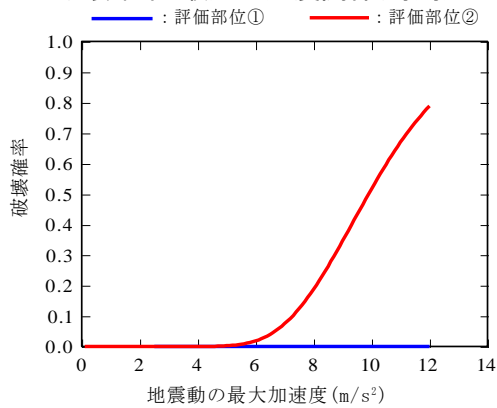


図 3.2-76 フラジリティ曲線(対数正規分布に近似)

表 3.2-53 評価部位等の最大応力(応答スペクトルを用いる応答解析)

	最大加速度				
	単位: N/mm ²				
	2.5m/s ²	5.0m/s ²	7.5m/s ²	10.0m/s ²	12.0m/s ²
評価部位①(S2)の最大応力	1.07	2.14	4.56	7.28	8.74
評価部位②(S6)の最大応力	8.50	17.00	27.75	47.56	57.07
S1～S6の最大応力(発生箇所)	8.60(S5)	17.20(S5)	53.58(S5)	79.84(S5)	95.81(S5)

注) 2.5,5.0m/s²は支持構造物1,2付、7.5m/s²は支持構造物2のみ付、10.0,12.0m/s²は支持構造物1,2なし の解析モデルを使用

表 3.2-54 損傷確率(応答スペクトルを用いる応答解析)

最大加速度	損傷確率 (Pf)	
	評価部位①	評価部位②
2.5m/s ²	1.763×10^{-23}	3.871×10^{-4}
5.0m/s ²	2.809×10^{-16}	3.931×10^{-2}
7.5m/s ²	4.929×10^{-10}	8.507×10^{-1}
10.0m/s ²	5.201×10^{-7}	5.169×10^{-1}
12.0m/s ²	5.281×10^{-6}	6.988×10^{-1}

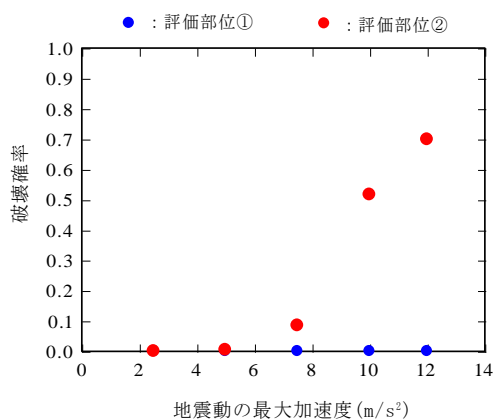


図 3.2-77 破壊確率-最大加速度関係(応答スペクトルを用いる応答解析)

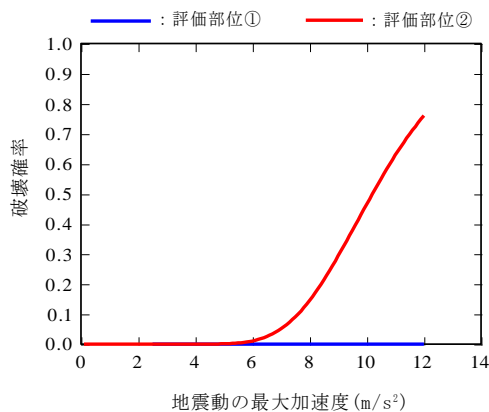


図 3.2-78 フラジリティ曲線(対数正規分布に近似)

3.2.6 まとめ

配管系のリスク評価手法の高度化を目的として、配管系の機能限界の立場から、複数の支持構造物の機能喪失に伴う配管本体の構造健全性について、複数の支持構造物の支持機能喪失を想定した配管系試験体の振動台水平加振試験を実施した。さらに、試験結果に基づき支持構造物が支持機能を喪失した場合のフラジリティ評価手法について検討した。

水平振動試験の配管系試験体は小型振動台で加振可能なように設計・製作し、加振時に損傷を受ける支持構造物は中央に開口を有するアクリル板の試験片を用い、試験体の2ヵ所に支持構造物1,2として設定した。さらに、予備検討として試験片の支持機能特性(荷重-変形関係)を把握した。

検討は以下の手順で実施した。

- ①正弦波入力による水平加振試験を行った。支持機能喪失前後の固有振動数、固有モード、減衰定数を検討し、さらに、支持機能喪失に伴う試験体の振動性状の変化について検討した
- ②地震動入力による水平加振試験を実施した。支持構造物の支持機能喪失(破断)が配管の健全性に及ぼす影響について検討した。
- ③支持構造物の損傷に伴う支持条件の変化を模擬した地震応答解析モデルを作成し、地震応答解析手法(時刻歴解析)の高度化を図った。さらに、損傷を受ける支持構造物を健全とした従来の解析モデルと損傷(破断)する支持構造物を予め削除した解析モデルを用いて応答スペクトルを用いる地震応答解析手法を適用し、解析結果を試験結果と時刻歴応答解析と比較した。
- ④ ③の検討結果に基づき配管系試験体のフラジリティ評価を実施し、機能喪失する支持構造物を有する配管系のフラジリティ評価手法を提案した。

得られた知見等を以下に示す。

- (1) 正弦波の水平加振試験(1次振動を対象)を実施した。

振動数降順(16→5Hz)の正弦波の掃引試験を行った。約14Hzで支持構造物1,2付きの固有振動数での共振の影響で支持構造物1が破断し、約10Hzで支持構造物2のみの固有振動数での共振の影響で支持構造物2が破断し、さらに約8Hzで支持構造物なしの固有振動数での共振が発生していた。一方、振動数昇順(5→16Hz)の掃引試験では、8Hz、10Hzでの上述の現象は見られず、約14Hzで支持構造物1が破断したのみであった。加振振動数と支持構造物の損傷状態による試験体の固有振動数との関係によって、発生する損傷モードに相違が生じることが確認された。

支持構造物の破断により、破断する位置を中心に加振方向意外にもパルス的な加速度波形が計測され、加速度と配管ひずみの波形に破断直後に乱れが見られたが、全体的には安定した応答性状を示していた。試験を通して最も大きな配管ひずみは、支持構造物1と2の破断後の共振で発生していたが、このときの最大配管ひずみは400～500 μ 程度であった。

- (2) 3種類の地震動入力による水平加振試験を5つの最大加速度レベルで実施した。入力レベルが大きくなると支持構造物1と2で破断が発生したが、地震動特性の関係で損傷モードが異なっており、mwave-01では支持構造物1のみ、mwave-02では支持構造物1と2が破断する結果となった。

wave-n05ew ではいずれの支持構造物も破断に至らなかった。支持構造物が破断することにより、加速度と配管応力が増大する傾向を確認することができ、特に 2 つの支持構造物が破断した mwave-02 において増大は大きかった。大きな配管応力は、2 本の縦方向配管の下方支持部分で発生する傾向が見られた。支持構造物の破断前後で最も大きい応力は後面の縦方向配管の S5 で発生していたが、前面の縦方向配管のロッドレストレイントの支持部分の S4 の応力は支持構造物 2 の破断後に特に増大する傾向が見られた。また、支持構造物 1 と 2 の支持部分の配管応力は、破断に伴い大きく増大する傾向が見られた。振動試験を通して最も大きな配管応力は 100～110N/mm² 程度であった。

また、前面の縦方向配管を支持しているロッドレストレイントの応力は、支持構造物 1,2 が破断後に増加していたことから、地震慣性力が再配分される現象が再現され、かつ配管の健全性が維持されたことが確認された。

(3) 支持構造物の破断を模擬した復元力特性を組み込んだ解析モデルを作成し、配管本体の荷重再配分が評価できるような時刻歴解析による地震応答解析を実施した。正弦波入力、地震動入力の場合共に、破断するタイミングなど再現することができ、試験の振動性状の変化を再現することができた。

さらに、損傷(破断)を受ける支持構造物を設置した解析モデルと予め削除した解析モデルを用いて応答スペクトルによる地震応答解析を実施し、最大配管応力について振動試験及び時刻歴応答解析で比較した。損傷(破断)を受ける支持構造物を設置とした解析モデルによる結果は、支持構造物が損傷(破断)する前の結果と、予め削除した解析モデルによる結果は、支持構造物が損傷(破断)する状態の結果と、良い対応関係が見られた。

(4) (3)の結果から評価対象部位を設定して、配管本体の構造健全性の立場からフラジリティ評価を実施した。ここでの応答の評価は、高度化を図った時刻歴応答解析と損傷に応じて支持構造物を予め削除した解析モデルを用いる応答スペクトル解析の 2 種類から算出した。

両者の損傷確率はほぼ一致した。2 つの応答評価手法を用いて、配管系の機能限界の立場から支持構造物の損傷を対象とした配管系フラジリティ評価手法の提案を行うことができた。

[3.2参考文献]

- [1] 新潟工科大学: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 業務成果報告書 平成 27 年3月
- [2]日本原子力学会:日本原子力学会標準 原子力発電所の地震に起因とした確率論的安全性評価実施基準:2007
- [3] DYNA2E VER8.0 使用説明書 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 2011 年 3 月
- [4] 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
- [5] 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、

3.3 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_t 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、300℃における試験および調査を行い、昨年度の試験結果も加味して、「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 SQV2AQ 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℃ - 水冷	650℃×4hr, 空冷	615℃×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、JIS G 0567 に従って引張試験を実施した。なお、負荷速度は、0.2%耐力程度までは 0.3%/min、0.2%耐力以降は 7.5%/min の条件とした。

3.3.2.3 疲労亀裂進展試験

3.3.2.3.1 試験片形状

試験片形状は昨年度と同様に評点部が幅 $2W = 25$ mm、厚さ $B = 2$ mm の平板形状の採用した。なお、試験片は図 3.3-1 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。 $\Phi 25$ mm の丸棒形状から $B = 2$ 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無く、両端が $\Phi 25$ 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 mm² と 50 mm² 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。

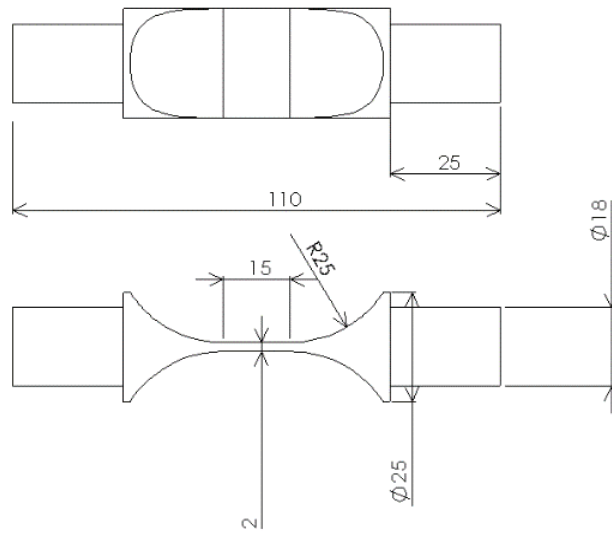


図 3.3-1 試験片形状 (mm)

3.3.2.3.2 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 : $(\sigma_Y + \sigma_B)/2 = 532$ 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、

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

ξ : a/W

$2W$: 試験片幅

$2a$: 亀裂長さ

である。

塑性域寸法 r_p は平面応力条件とすると

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式 3.3-3}$$

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_p および r_p/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

$$a > 2.5 \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式 3.3-4}$$

を満たすものとして、式 3.3-3 と式 3.3-4 より

$$\frac{r_p}{a} < \frac{1}{2.5\pi} = 0.127$$

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 3.3-3 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 3.3-2 より、負荷応力範囲が $\Delta\sigma=0.5 \times 1.12\sigma_f$ 近傍で $r_p/a = 0.127$ 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 3.3-3 塑性寸法と亀裂長さの関係

2a [mm]	$\xi = a/W$	K_{\max} [MPam ^{0.5}]	F(ξ)	r_p [mm]	r_p/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

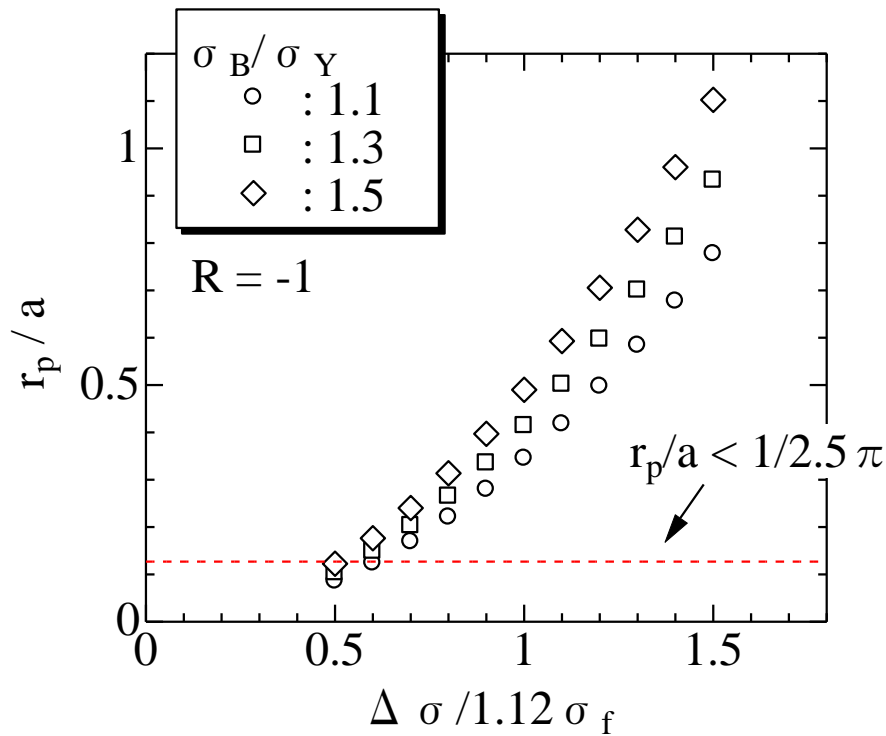


図 3.3-2 塑性域寸法と負荷応力の関係

3.3.2.3.3 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 3.3-3 に試験装置の概要を示す。試験片の加熱には高周波誘導加熱装置を用い、試験温度の計測・制御は、試験片評点部側面に取り付けた K タイプ熱電対を用いておこなった。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光学顕微鏡により計測した。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、昨年度採用した直流電位差法は、高周波誘導加熱装置を用いた加熱を行ったため採用しなかった。

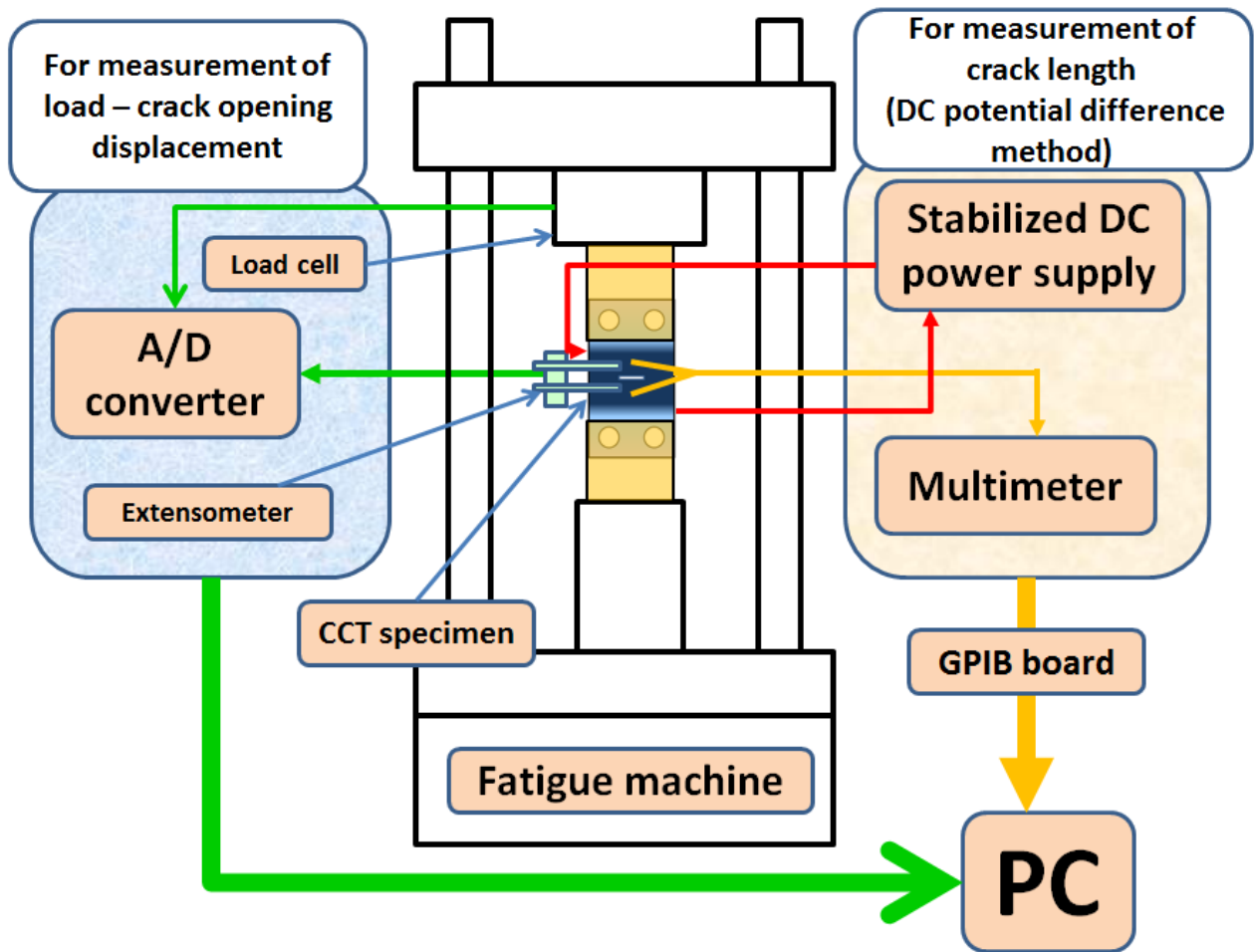


図 3.3-3 疲労亀裂進展試験システム

3.3.2.3.4 試験条件

導入した切り欠きから、300°Cにおいて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 3.3-4 の条件で行った。

予亀裂を有する試験片を対象として、300°C、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 3.3-5 の条件にて行った。さらに、表 3.3-6 および表 3.3-7 に示す条件で、300°C および室温で応力比 $R=0.5$ における疲労亀裂進展試験も実施した。なお、参考のため昨年度実施した室温における疲労亀裂進展試験条件を表 3.3-8 に示す。

表 3.3 - 4 疲労予亀裂導入条件

温度	300 °C
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 - 5 疲労亀裂進展試験条件 (300°C両振)

温度	300 °C
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	10 Hz (0.4 Hz ※)
Δσ	Δσ=σ _f ×0.5 (232.8MPa)
	Δσ=σ _f ×0.7 (325.9MPa)
	Δσ=σ _f ×0.8 (372.4MPa)
	Δσ=σ _f ×0.9 (419.0MPa)
	Δσ=σ _f (465.5MPa)
	Δσ=σ _f ×1.05 (488.8MPa)
	Δσ=σ _f ×1.10 (512.1MPa)
	Δσ=σ _f ×1.15 (535.3MPa)
	Δσ=σ _f ×1.2 (558.6MPa)
Δσ=σ _f ×1.25 (581.9MPa)	

※ 亀裂開閉口測定時

表 3.3 - 6 疲労亀裂進展試験条件 (300°C片振)

温度	300 °C
制御方法	軸荷重制御
応力波形	正弦波形
応力比 (R 比)	0.1
負荷周波数	10 Hz (0.4 Hz ※)
Δσ	Δσ=σ _f ×0.5 (232.8MPa)

※ 亀裂開閉口測定時

表 3.3 - 7 疲労亀裂進展試験条件 (室温片振)

温度	室温
制御方法	軸荷重制御
応力波形	正弦波形
応力比 (R 比)	0.1
負荷周波数	10 Hz (0.4 Hz ※)
$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 0.45$ (232.8MPa)

※ 亀裂開閉口測定時

表 3.3 - 8 昨年度の疲労亀裂進展試験条件 (室温両振)

温度	室温
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 ※)
$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 0.775$ (400.0MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 0.896$ (462.9MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f$ (516.7MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 1.03$ (532.2MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 1.1$ (568.3MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 1.15$ (594.2MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 1.2$ (620.0MPa)
	$\Delta\sigma=\sigma_f\times 1.258$ (650MPa)

※ 亀裂開閉口測定時

3.3.2.3.4 試験条件

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。この様な場合、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。

3.3.2.3.5 亀裂長さの測定方法

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。

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

$$x = 1 - e^{\frac{-\sqrt{(EBC+\eta)(EBC-\eta+c_1\eta+c_2\eta^2+c_3\eta^3)}}{2.141}} \quad \text{式 3.3-5}$$

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、 $c_1=-0.03, c_2=0.013, c_3=4.0$

3.3.2.4 微小硬さ・弾性率評価試験

疲労試験後、最小および最大負荷条件の試験片から亀裂先端部周辺を切り出し、再研磨を施した後、島津製作所・ダイナミック硬度計にて亀裂先端周辺の微小硬さと弾性率を評価した。試験条件を表 3.3-9 に示す。なお、圧子押し込み位置の測定にはコンフォーカル顕微鏡を用い、測定は 500 倍にて行った。

表 3.3 - 9 微小硬さ弾性率評価試験条件

温度	室温
圧子の種類	Triangular115 (Bercovich)
硬さ単位	ダイナミック硬さ (DHT)
圧子弾性率	1140 GPa
圧子ポアソン比	0.07
試験力	98.07 mN
負荷速度	2.6648 mN/sec
負荷保持時間	5 s

3.3.3 実験結果及び考察

3.3.3.1 引張試験

300°Cの引張試験中の応力-ひずみ関係を図3.3-4から図3.3-6に示す。また、引張試験の結果を総括して、表3.3-10に示す。各試験片の平均値から0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は386 MPa、引張強さ σ_B は546 MPa、流動応力 σ_f は465.3 MPaであった。

一方、参考のため室温の引張試験結果を表3.3-11に示す。室温の引張強度特性は、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。

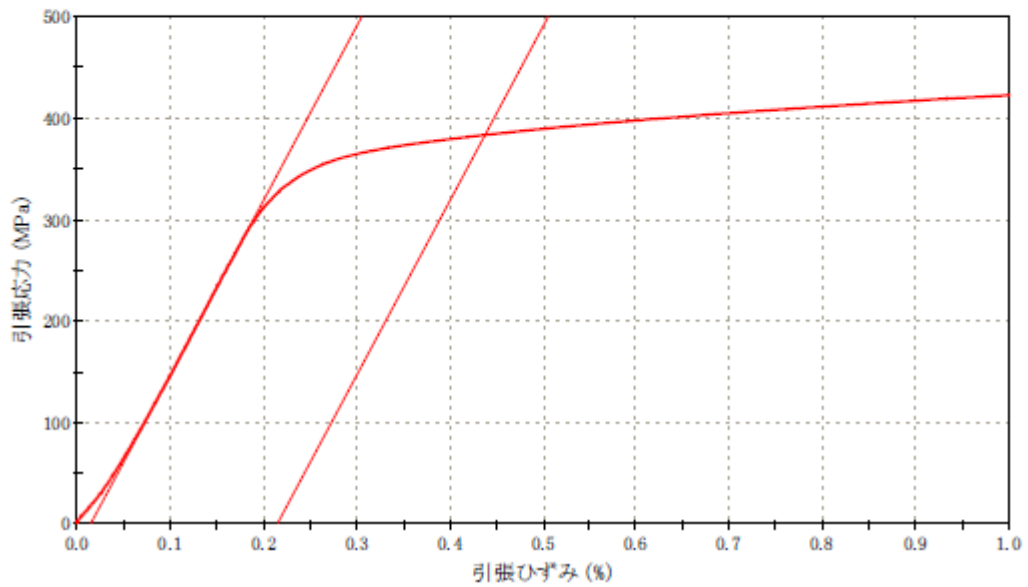
直径:8.008mm 標点距離:40.0mm

試験温度:300°C

	弾性率 (MPa)	0.2%耐力荷重 (kN)	0.2%耐力 (MPa)	最大荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
1	171852	19.35	384	27.54	547	19.3	64.7

引張速度:耐力まで ⇒ 0.3%/min 耐力以降破断まで ⇒ 7.5%/min

[耐力]



[破断まで]

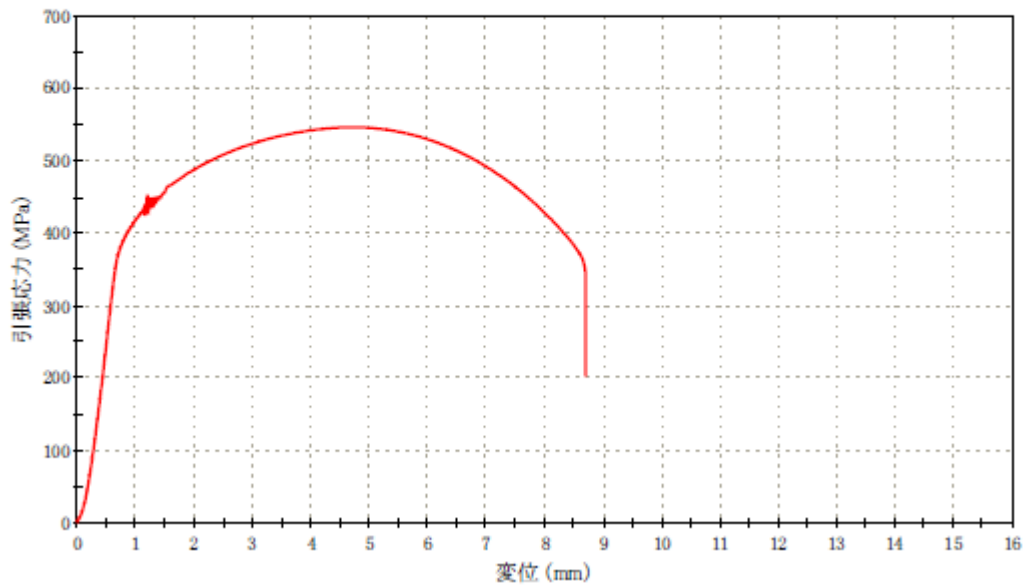


図 3.3 - 4 引張試験中の応力-ひずみ関係：試験片 1

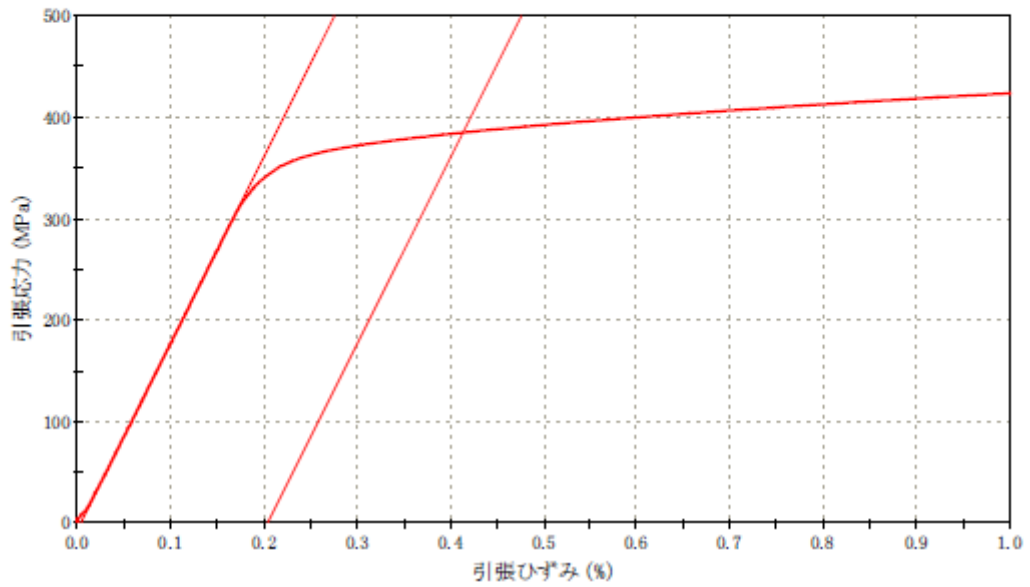
直径:8.008mm 標点距離:40.0mm

試験温度:300°C

	弾性率 (MPa)	0.2%耐力荷重 (kN)	0.2%耐力 (MPa)	最大荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
1	183722	19.42	385	27.47	545	18.6	64.5

引張速度:耐力まで⇒0.3%/min 耐力以降破断まで⇒7.5%/min

[耐力]



[破断まで]

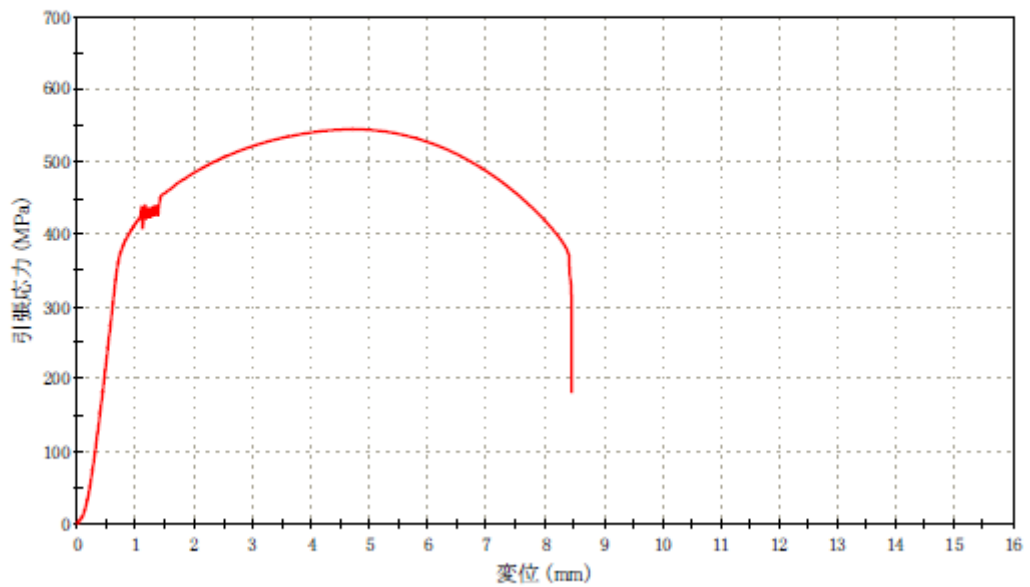


図 3.3 - 5 引張試験中の応力-ひずみ関係：試験片 2

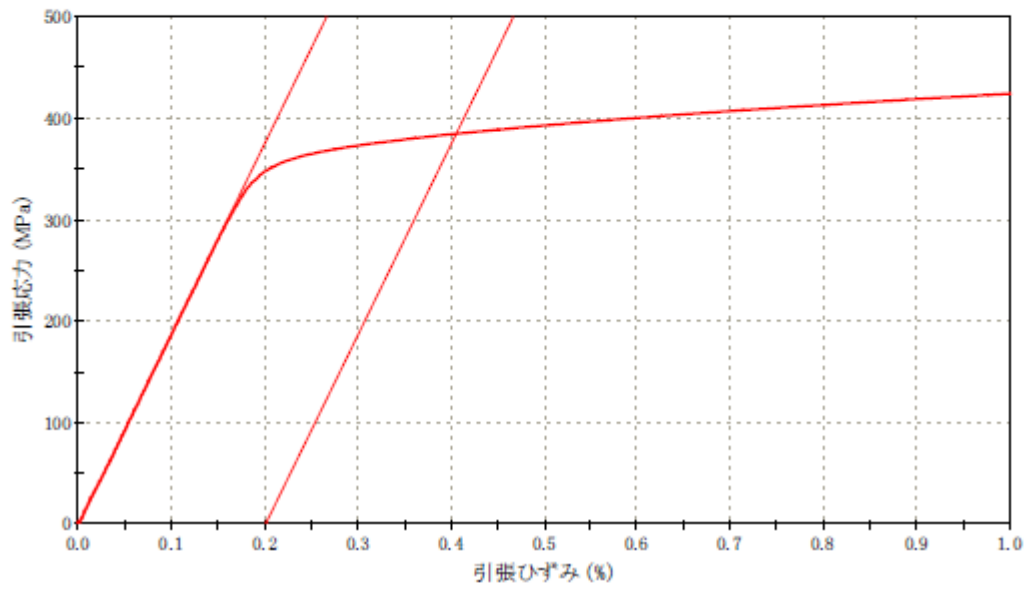
直径:8.008mm 標点距離:40.0mm

	弾性率 (MPa)	0.2%耐力荷重 (kN)	0.2%耐力 (MPa)	最大荷重 (kN)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
1	188121	19.41	385	27.51	546	19.4	68.0

試験温度:300℃

引張速度:耐力まで⇒0.3%/min 耐力以降破断まで⇒7.5%/min

[耐力]



[破断まで]

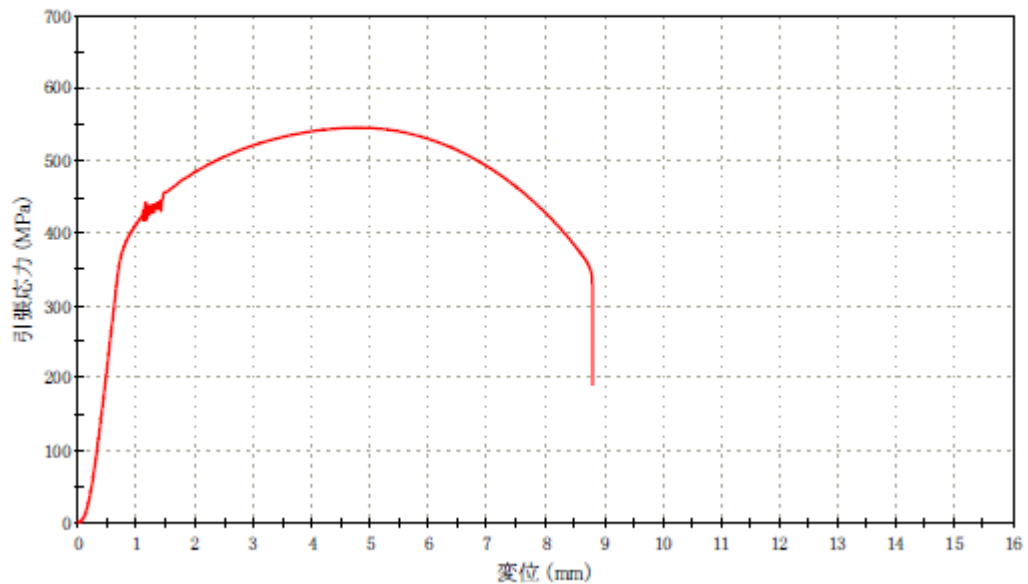


図 3.3-6 引張試験中の応力-ひずみ関係：試験片 3

表 3.3-10 300℃における引張試験結果

	試験片寸法		試験結果					
	直径	評点距離	ヤング率	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	破断位置
	mm	mm	GPa	MPa	MPa	%	%	
1	8.008	40.0	171.9	384	547	19.3	64.7	A
2	8.008	40.0	183.7	385	545	18.6	64.5	A
3	8.008	40.0	188.1	385	546	19.4	68.0	A

表 3.3-11 室温における引張試験結果

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 疲労亀裂進展試験

3.3.3.2.1 亀裂長さ計測手法の比較

図 3.3-7 に光学顕微鏡およびコンプライアンス法で計測した亀裂長さの関係を、図 3.3-8 に光学顕微鏡およびコンプライアンス法で計測した亀裂長さとの繰り返し数の関係をそれぞれ示す。コンプライアンス法で計測した亀裂長さは、光学顕微鏡で計測した亀裂長さに対して、最大 20% 以上の相違が認められ、そのため亀裂進展挙動の計測結果にばらつきが大きい。従って、本研究では、亀裂長さ計測法としては計測に手間がかかるものの精度が高い光学顕微鏡法を用いた。

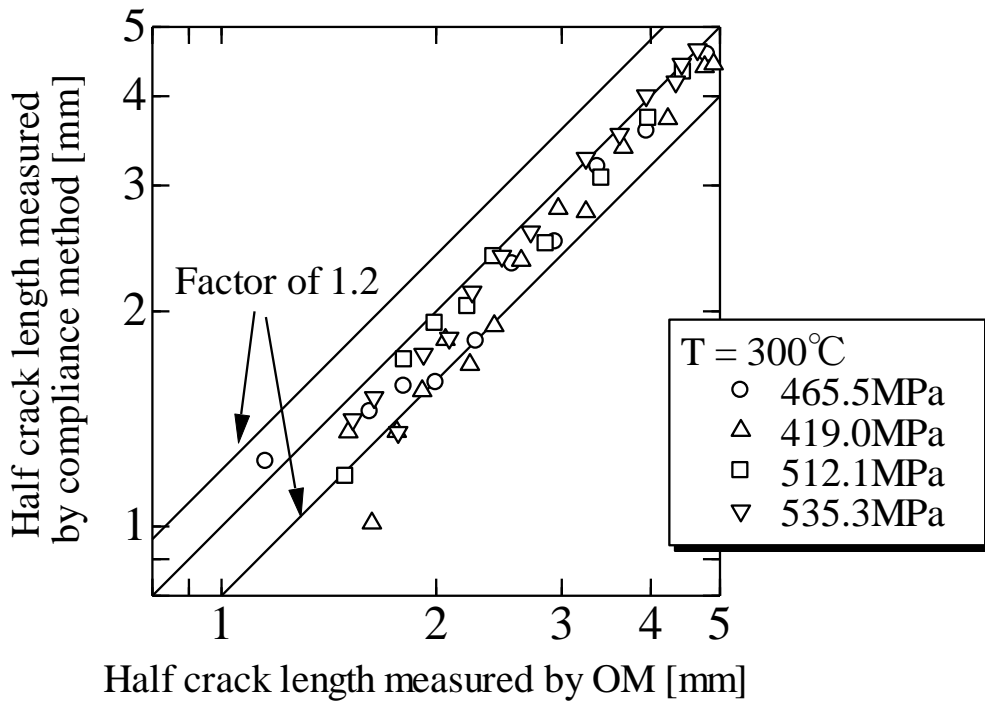


図 3.3-7 光学顕微鏡およびコンプライアンス法で計測した亀裂長さの関係

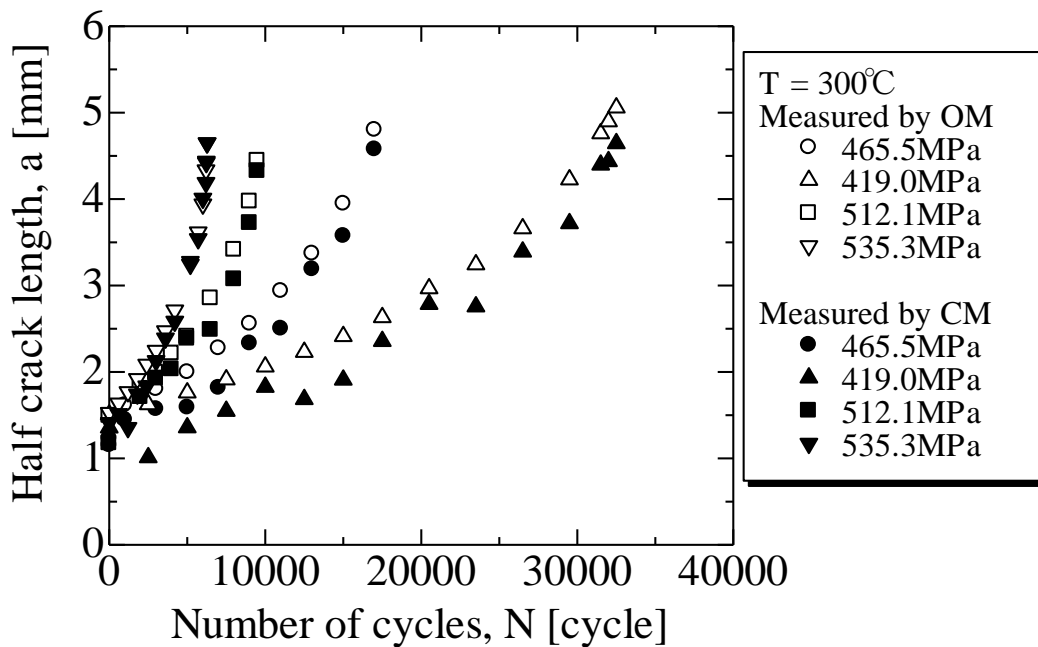


図 3.3-8 亀裂長さと繰り返し数の関係

3.3.3.2.2 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3.3-9から図3.3-11に示す。図3.3-11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3.3-11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、後述の亀裂開閉口挙動が関連しているものと考えられる。

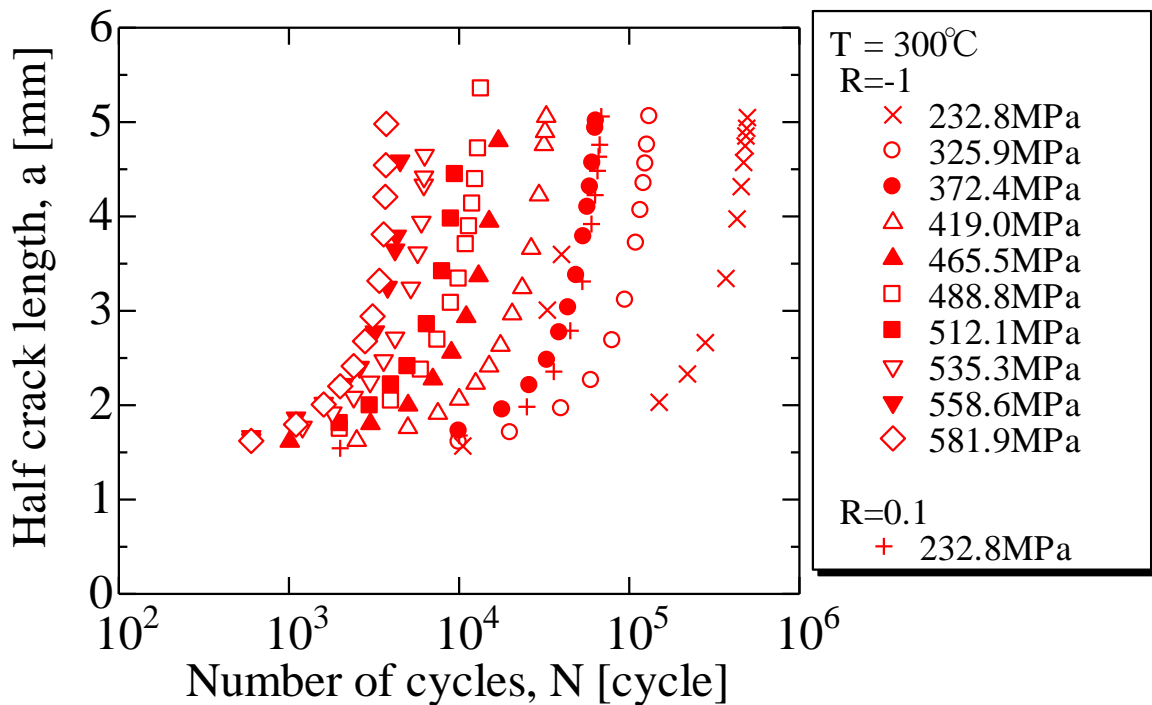


図3.3-9 亀裂長さと繰り返し数の関係

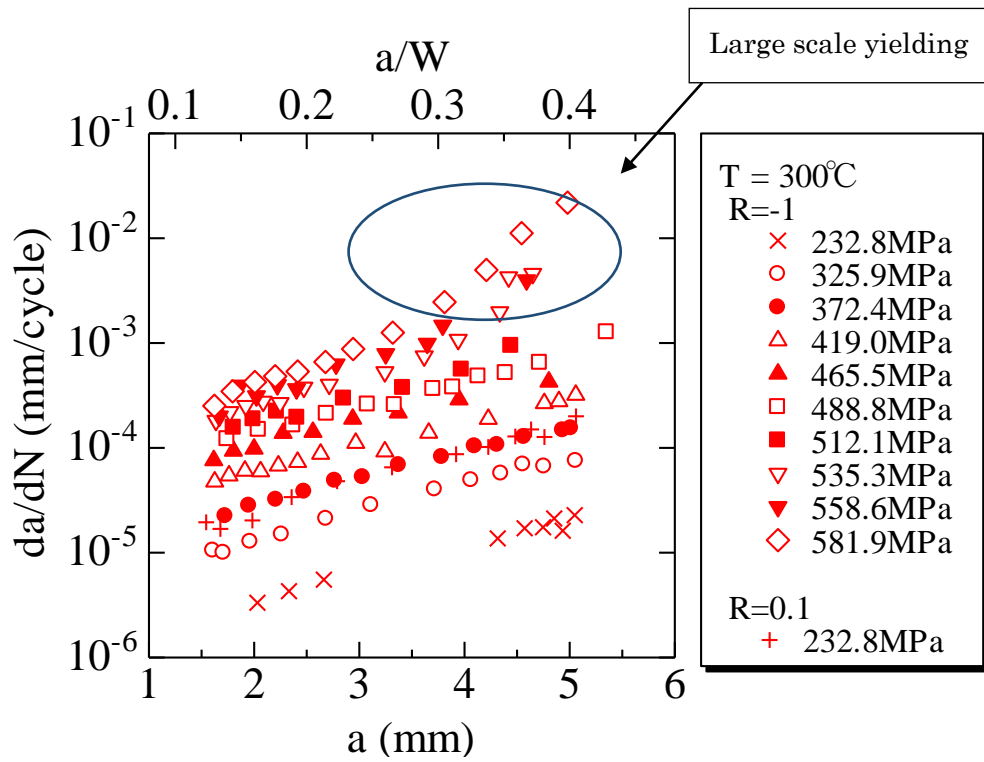


図 3.3-10 亀裂長さと亀裂進展速度の関係

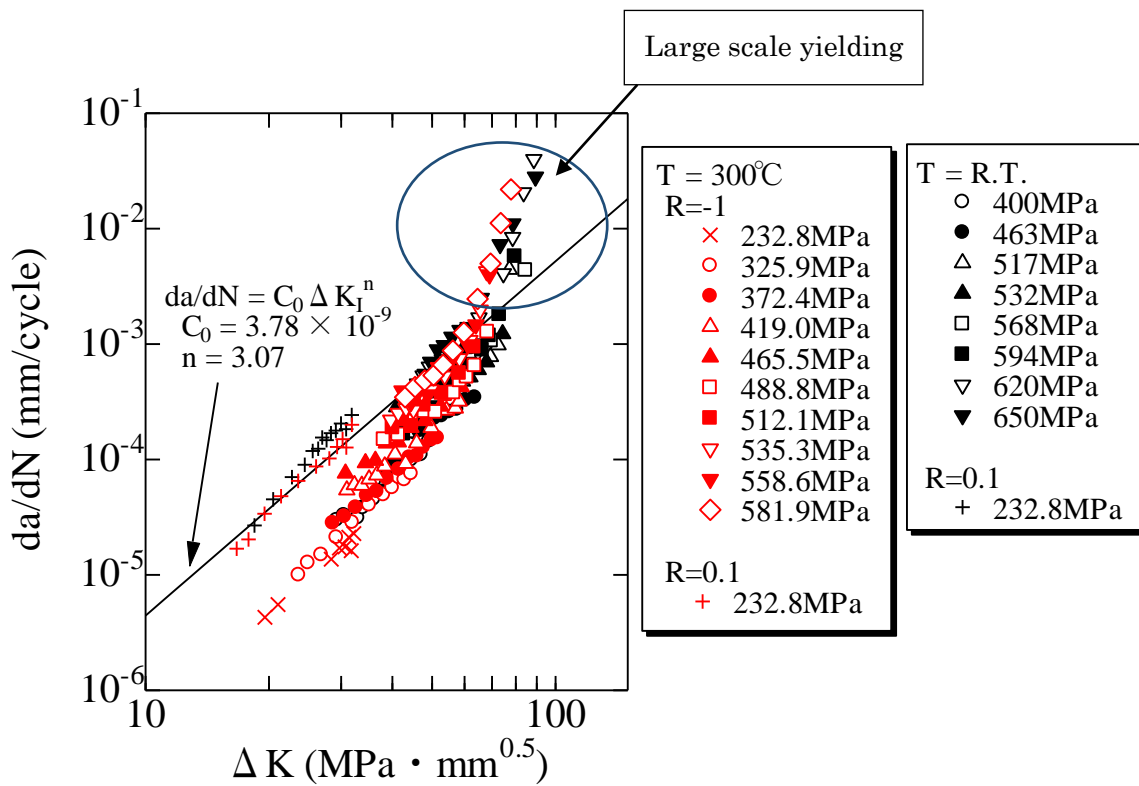


図 3.3-11 亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

3.3.3.3.3 亀裂開閉口挙動と有効応力拡大係数範囲による評価

図 3.3-12 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 3.3-13 に示す。なお、亀裂は巨視的には負荷軸と垂直に近い面を進展していた。図 3.3-13 に示すように、負荷が十分小さい $\Delta\sigma=232.8\text{MPa}$ の条件で亀裂進展試験を実施した試験片では (図 3.3-13(a))、除荷後、亀裂が完全に閉口しており、亀裂閉口レベル U_{cl} ($= P_{cl} / P_{max}$) は $U_{cl} \geq 0$ であることが確認できる。一方、負荷が最も大きい $\Delta\sigma=581.9\text{MPa}$ の条件で亀裂進展試験を実施した試験片では (図 3.3-13(b))、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 3.3-11 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 3.3-11 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のと考えられる。

図 3.3-12 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 3.3-14 に示す。

$$\Delta K_{eff} = \Delta\sigma_{eff} \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad \text{式 3.3-7}$$

ここで、

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

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

$$\xi : a/W$$

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 3.3-15 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 3.3-15(b) 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。

なお、次式で示される弾性疲労J積分 ΔJ_e で亀裂進展速度を整理した結果を図3.3-16に示す。弾性疲労J積分 ΔJ_e により、試験温度の依存性が小さくなっており、の亀裂進展抵抗の温度依存性は弾性係数の温度依存性に起因した変形抵抗の相違が原因と考えられる。

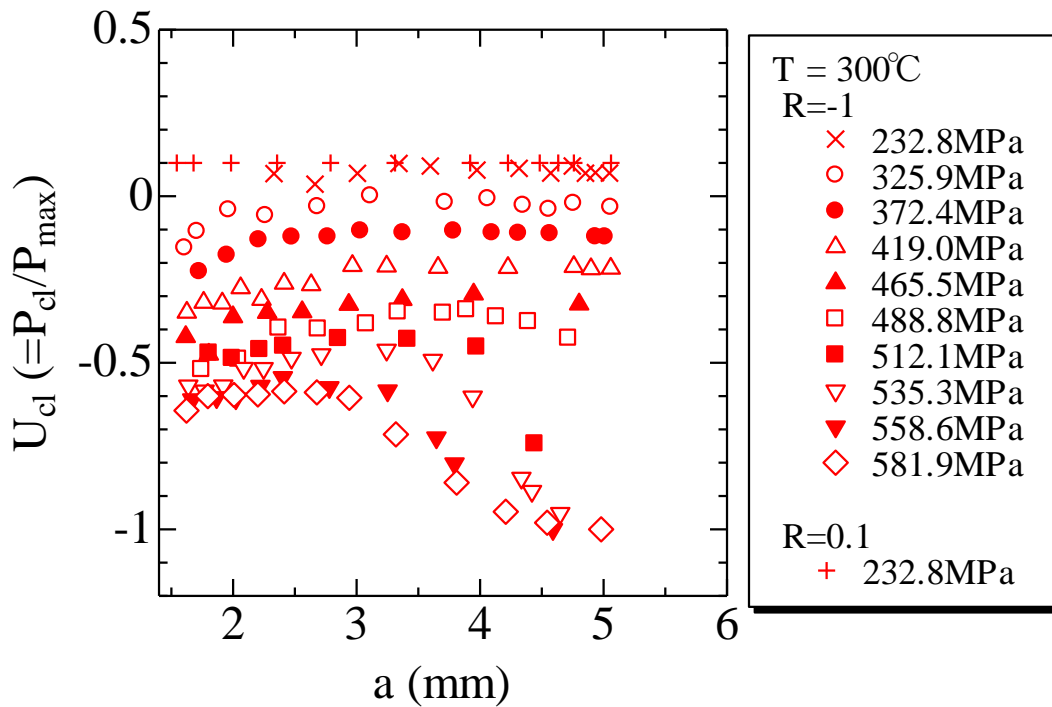
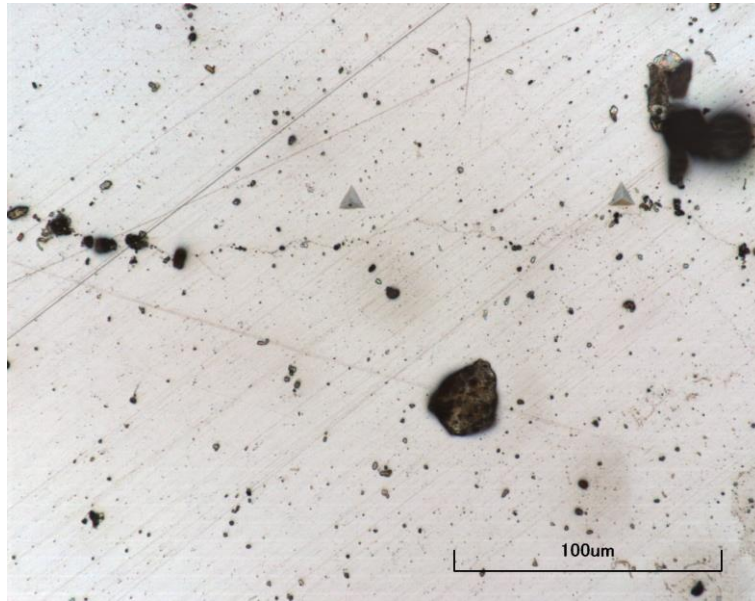
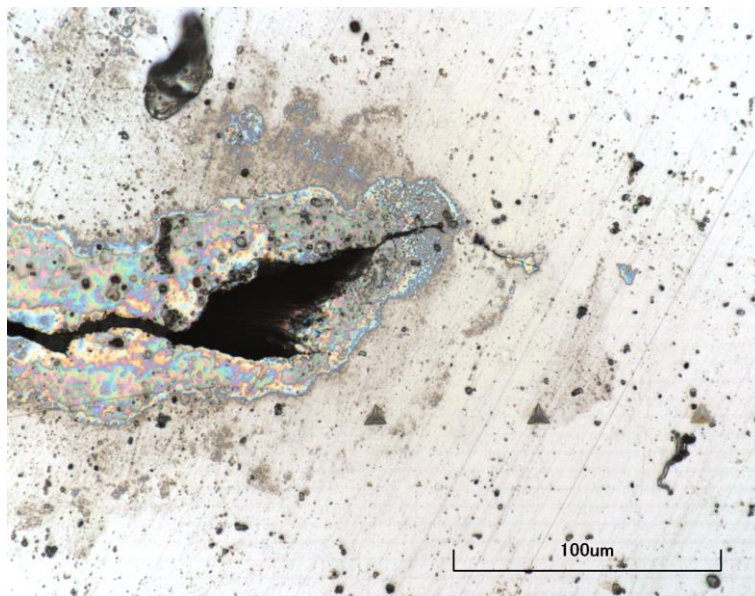


図3.3-12 亀裂開口レベル亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係



(a) $\Delta\sigma = 232.8$ MPa



(b) $\Delta\sigma = 581.9$ MPa

図 3.3 - 1 3 亀裂進展試験後の亀裂の観察結果：300°C

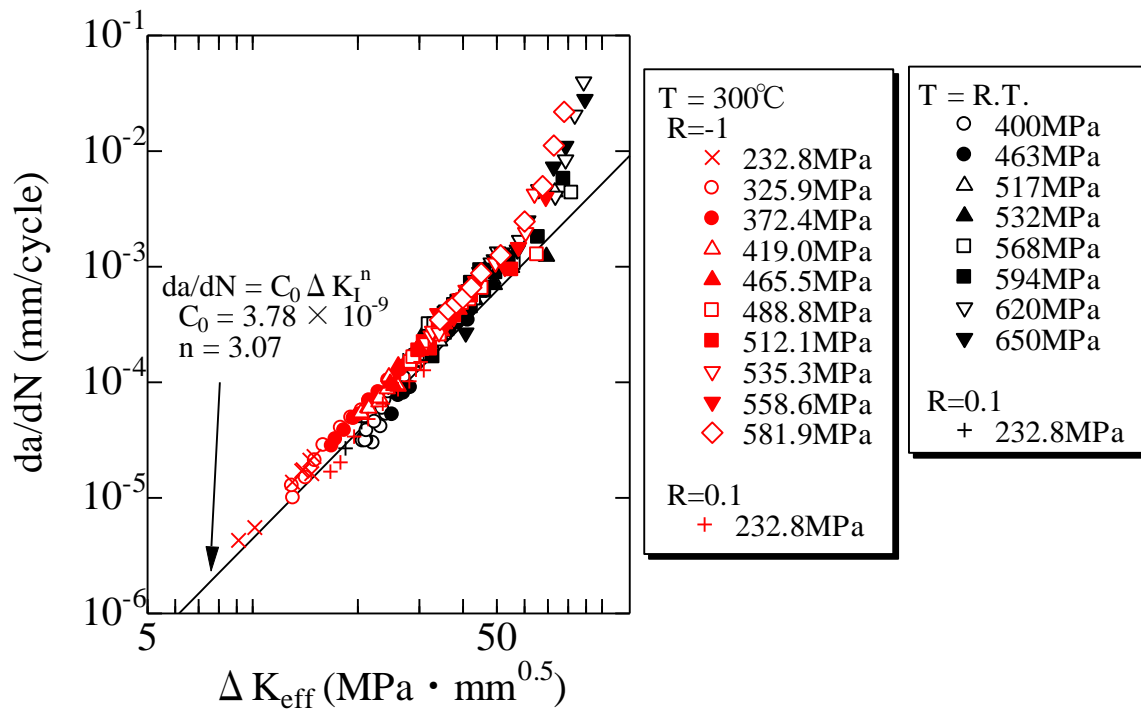


図 3.3 - 1 4 亀裂進展速度と有効応力拡大係数範囲の関係



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



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

図 3.3 - 1 5 試験後の試験片表面の様子 (室温の結果)

高応力条件では亀裂先端に大規模な塑性変形が生じている様子 (表面の波打ち) が認められる。

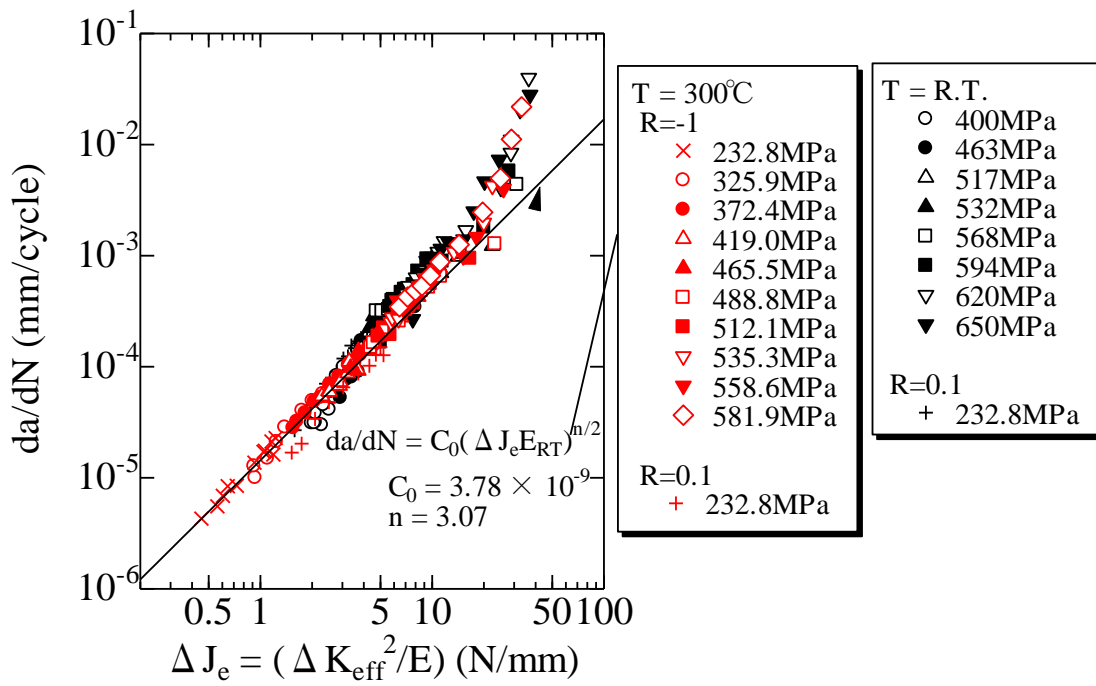


図 3.3 - 1 6 亀裂進展速度と弾性疲労 J 積分範囲の関係

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ったためであり、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と負荷応力より評価可能であるのに対して、J 積分は亀裂長さと変形曲線（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 3.3-14 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。

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{\text{eff}}^{m_1} \quad \text{式 3.3-8}$$

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_p と関連づけた結果を図 3.3-17 に示す。ここで、亀裂先端の塑性域寸法 r_p は

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式 3.3-3 (再)}$$

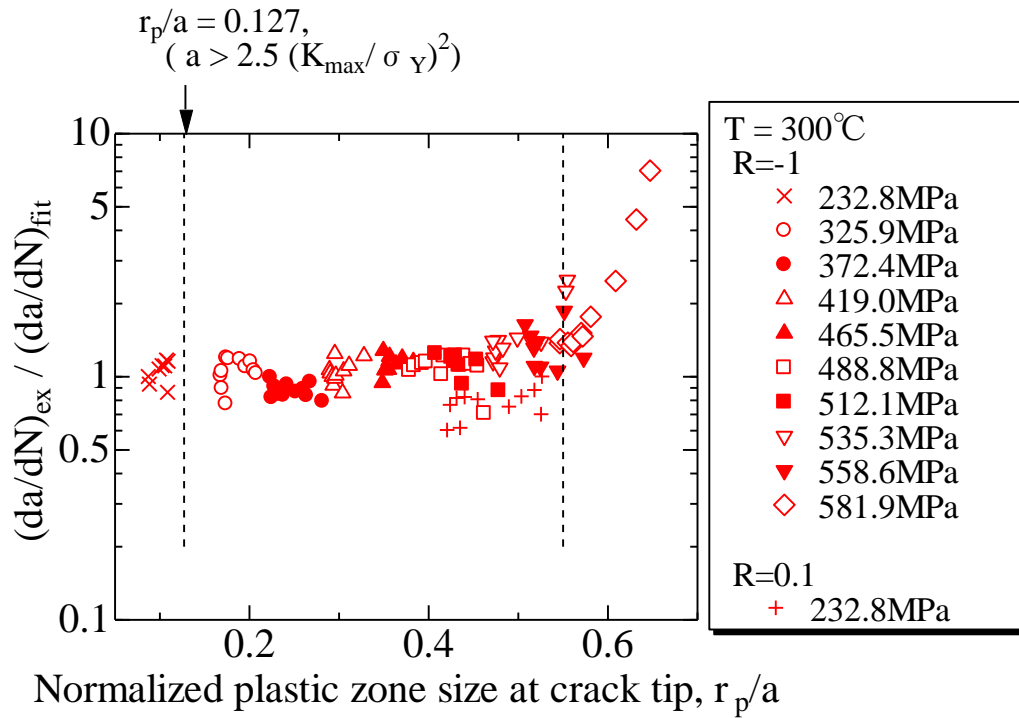
で評価し、亀裂長さ a で基準化した。なお、図中には ASME399 の小規模降伏条件を満足する条件範囲 ($r_p/a < 0.127$) も併記した。図 3.3-17 より、亀裂先端の塑性域寸法 r_p がある値までは亀裂進展速度 da/dN は有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} により評価可能であり、その範囲は $r_p/a < 0.55$ である。この条件を超える $r_p/a > 0.55$ の条件では、実際の亀裂進展速度は式 3.3-8 で予測される進展速度より高く、線形破壊力学パラメータで予測した場合、危険側の予測を与える。 $r_p/a < 0.55$ は式 3.3-4 の形で表した場合、

$$a > 0.579 \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式 3.3-9}$$

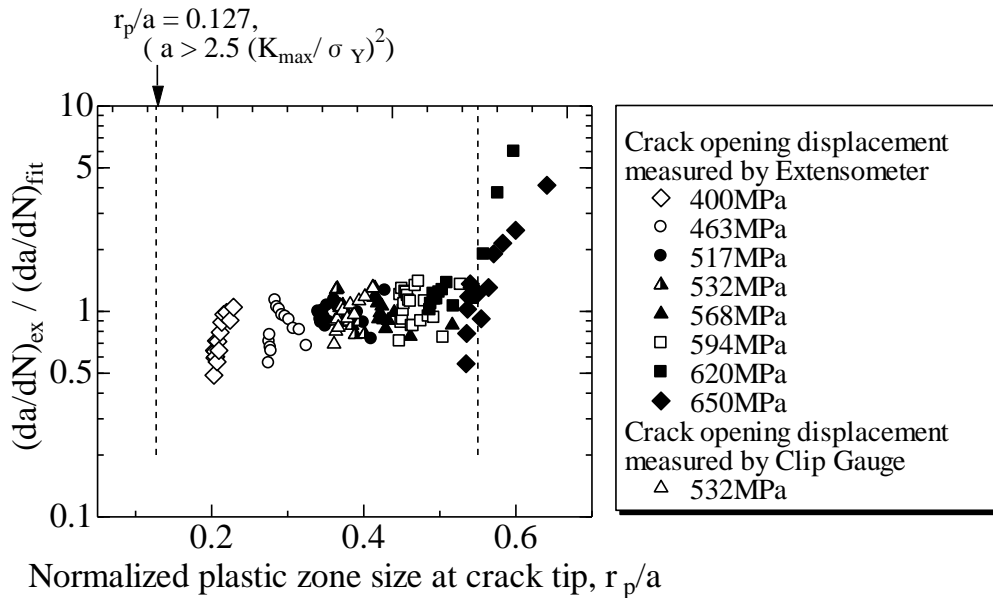
となる。式 3.3-9 は線形破壊力学パラメータの有効条件を示しており、これまで経験的に取り扱われてきた小規模降伏条件(式 3.3-4) が過度に安全側の評価になっていることを示唆している。

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、(試験片) 形状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 3.3-18 に亀裂先端周辺の微小硬さ及び弾性率を評価した結果を示す。なお、横軸は亀裂先端から水平方向の距離 (負荷軸と垂直な亀裂進展方向) である。図中には、亀裂から十分離れた平滑部で評価した微小硬さ、あるいは、弾性率の平均値も併記した。図 3.3-18(a) に示すように、負荷が大きい条件では亀裂先端周辺の微小硬さが高くなり、亀裂先端から 150 μm 程度離れると、亀裂から十分離れた領域の微小硬さとほぼ等しくなっている。すなわち、亀裂先端周辺では加工硬化が生じているようである。一方、負荷が小さい条件では、亀裂先端の加工硬化はほとんど認められない。なお、亀裂から十分離れた領域の微小硬さにも負荷条件の影響が若干認められ、負荷の上昇に伴い加工硬化が生じているようである。亀裂先端の微小硬さの上昇は亀裂先端周辺の塑性変形に関連していることから、亀裂先端周辺の微小硬さ分布表かは降伏条件を超えた領域の実験的検証に重要な知見を与えることが期待でき、今後の更なる調査が必要である。なお、図 3.3-18(b) に示す亀裂先端の弾性率分布には加工硬化の影響が認められない。

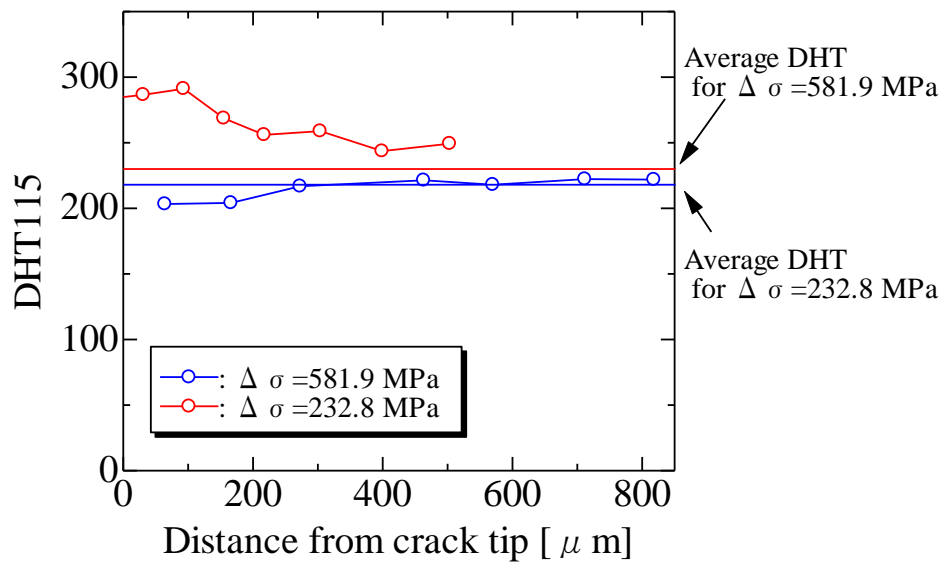


(a) 300°C

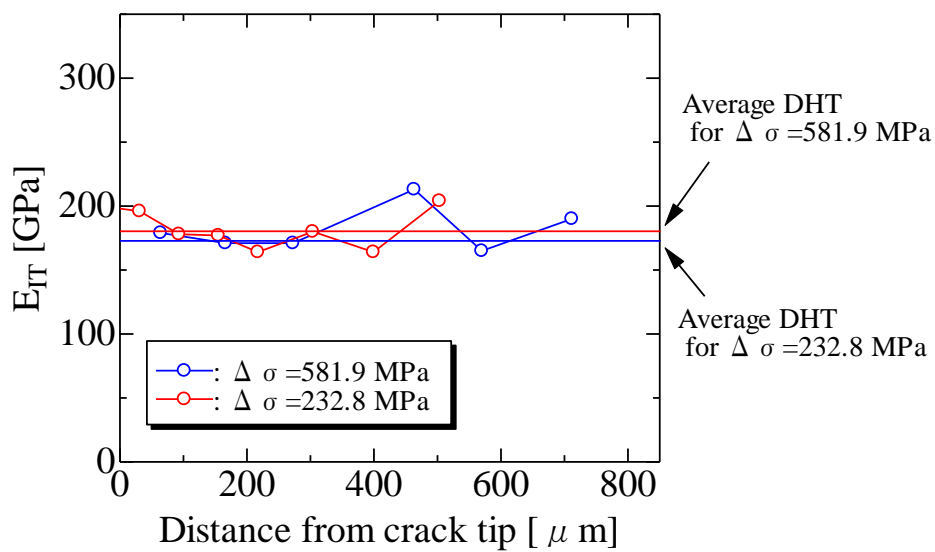


(b) 室温

図 3.3 - 1 7 亀裂先端塑性域寸法と亀裂進展曲線からの逸脱



(a) 微小硬さ分布



(b) 弾性率分布

図 3.3 - 18 亀裂先端近傍の微小硬さ分布と弾性率分布 (300°C)

3.3.3.3.5 ASME 亀裂進展則の検証

図 3.3-19 および図 3.3-20 に 300°C と室温における 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 3.3-19 および図 3.3-20 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いる。図 3.3-19 および図 3.3-20 の結果からは、危険側の評価を避けるためには、

$\Delta K_t < 0.6 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$ の場合

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

式 3.3-10

$\Delta K_t \geq 0.6 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$ の場合

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

式 3.3-11

とする必要がある (図中の緑線)。なお、図 3.3-19 および図 3.3-20 の結果からわかるように、提案した上記の閾値は亀裂閉口点が $U_{cl}=0$ から $U_{cl} \neq 0$ となる条件を意味している。以下、この基準を NIIT 推奨則と呼ぶ。NIIT 推奨則は、

$$0.6\sigma_f \sqrt{\pi a} < \Delta K_t < 1.25\sigma_f \sqrt{\pi a}$$

の条件下では、過度に安全側の予測となっている。そこで、負荷応力条件によって亀裂開閉口点が $U_{cl}=0$ から $U_{cl}=-1$ へほぼ線形に変化していく実験結果を考慮して、以下の推奨案が工業的に有益であろう (以下、NIIT 線形推奨則とよぶ)。

$$\Delta K_I = K_{\max} (1 - U_{cl})$$

式 3.3-12

$\Delta K_t < \alpha_L \sigma_f \sqrt{\pi a}$ のとき

$$U_{cl} = 0$$

式 3.3-13

$\Delta K_t > \alpha_H \sigma_f \sqrt{\pi a}$ のとき

$$U_{cl} = -1$$

式 3.3-14

$\alpha_L \sigma_f \sqrt{\pi a} \leq \Delta K_t \leq \alpha_H \sigma_f \sqrt{\pi a}$ のとき

$$U_{cl} = \frac{\Delta\sigma - \alpha_L \sigma_f F(\xi)}{(\alpha_L - \alpha_H) \sigma_f F(\xi)} \quad \text{式 3.3-15}$$

$\alpha_L = 0.6$: 材料及び負荷条件、形状で変化する実験定数

$\alpha_H = 1.25$: 材料及び負荷条件、形状で変化する実験定数

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

ξ : a/W

$2W$: 試験片幅

$2a$: 亀裂長さ

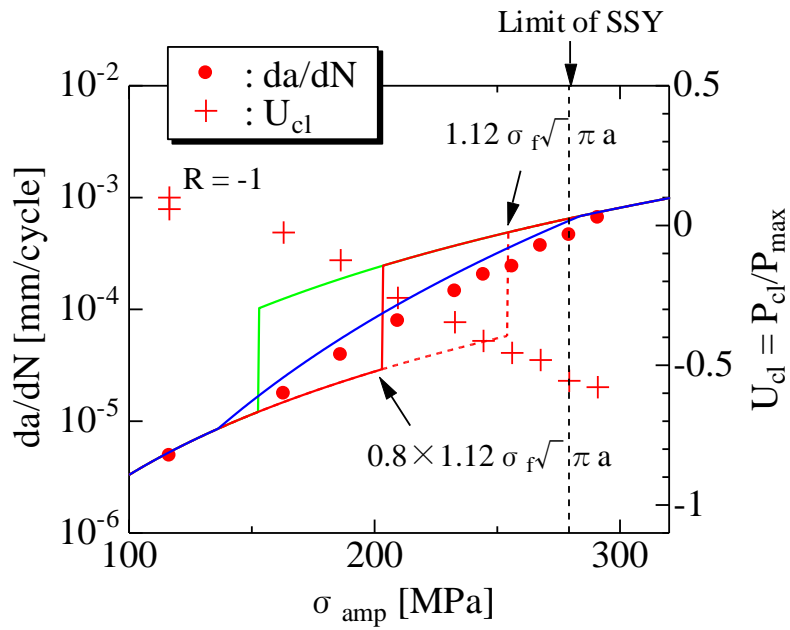
図 3.3-19 および図 3.3-20 では、上記の NIIT 線形推奨則による亀裂進展則を青線で表示している。図より、NIIT 線形推奨則による亀裂進展予測結果は実験結果を正しく予測できている。図 3.3-19 および図 3.3-20 には、室温における結果を同様に示しているが、室温に置いても ASME 亀裂進展則および NRC 推奨亀裂進展則に比べて NIIT 推奨則および NIIT 線形推奨則は実験結果を正しく予測できている。

なお、以上の検討および推奨案は応力比 $R = -1$ 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現段階では不明である。NIIT 線形推奨則は、亀裂開閉口挙動に基づく亀裂進展則であり、 $R = -1$ 条件以外においても基本的な考え方は同様に扱えるものと考えるが、 $R \neq -1$ における亀裂開閉口挙動は $R = -1$ と同一とは限らないため、式 3.3-15 の適用性および α_L 、 α_H を系統的に検討する必要がある。特に、応力比が $R < -1$ の条件については検証、および、必要に応じて応力比効果の定式化が必要である。また、材料や試験片形状の影響も受けることが考えられ、それらの検証も必要である。

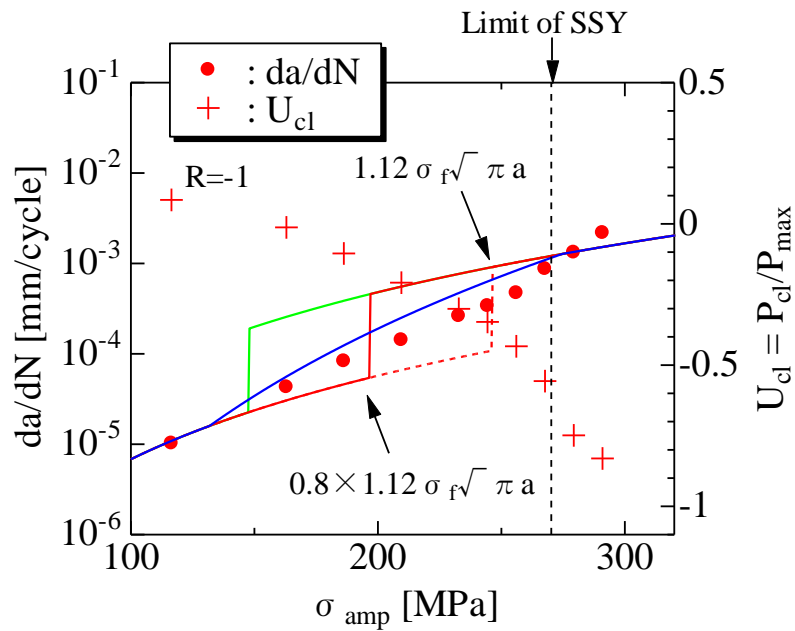
図 3.3-19 および図 3.3-20 中には、前節で検討した小規模降伏条件満たす限界

$$a > 0.579 \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{式 3.3-9 (再)}$$

(Limit of SSY と表記) を破線で示している (ASME E399 の小規模降伏条件では無いことに注意)。図 3.3-19 および図 3.3-20 では、小規模降伏条件を逸脱する条件の領域において試験結果が 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、小規模降伏条件を逸脱した大規模降伏状態と考えられ、線形破壊力学パラメータである応力拡大係数 K に基づいた亀裂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。



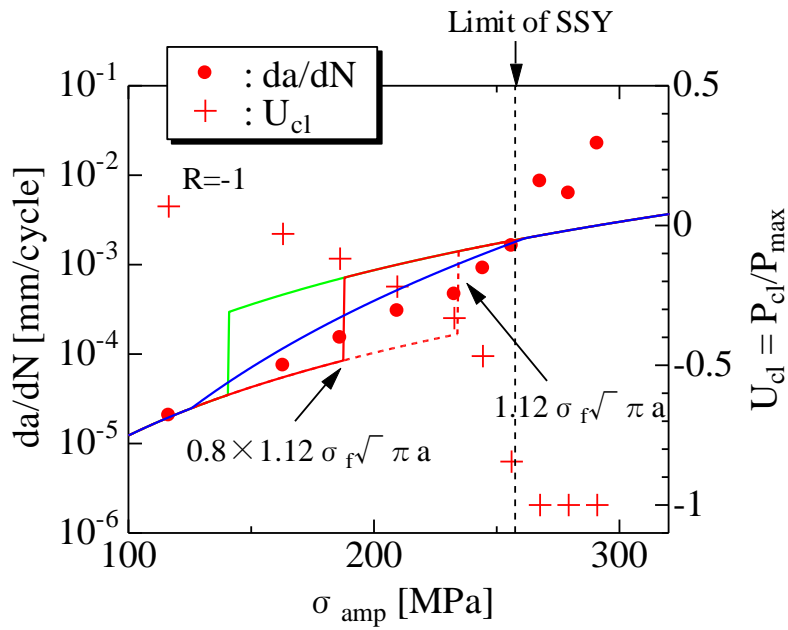
(a) $a/W = 0.2$



(b) $a/W = 0.3$

図 3.3 - 19 300°Cの実験結果と各亀裂進展則

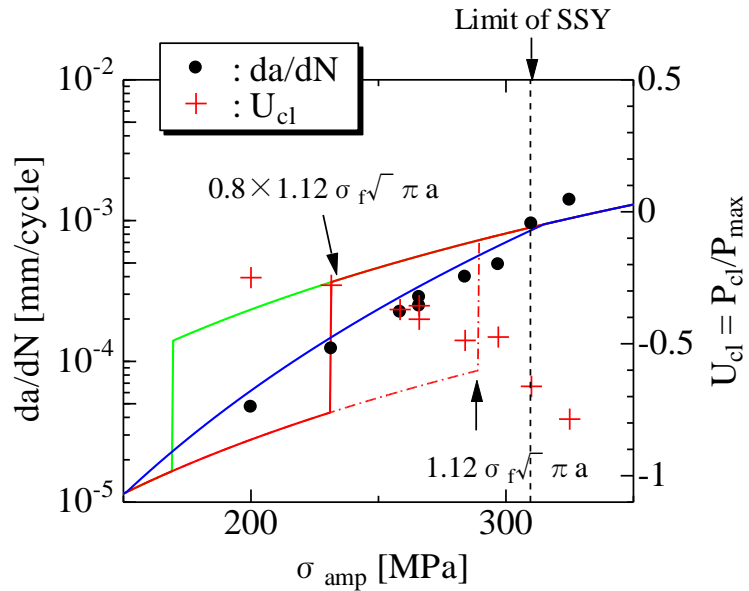
※SSY : Small scale yielding



(c) $a/W = 0.4$

図 3.3 - 19 300°Cの実験結果と各亀裂進展則

※SSY : Small scale yielding



(a) $a/W = 0.2$

図 3.3 - 20 室温の実験結果と各亀裂進展則

※SSY : Small scale yielding

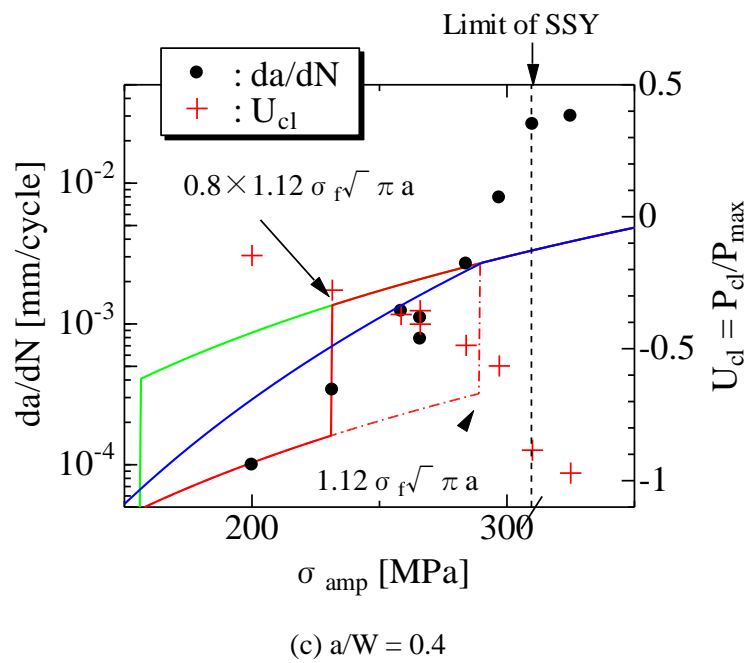
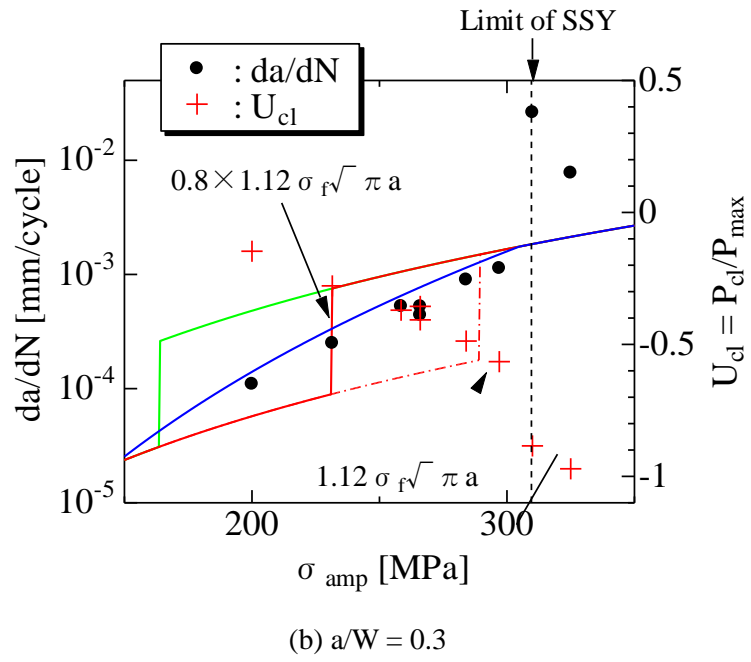


図 3.3 - 20 室温の実験結果と各亀裂進展則
 ※SSY : Small scale yielding

3.3.4 まとめ

本研究では、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 SQV2AQ 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、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. 300°Cにおける 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は 386 MPa、引張強さ σ_B は 546 MPa、流動応力 σ_f は 465.3 MPa であった。一方、室温における 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. 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。
3. 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。
4. 得られた実験結果の範囲内では、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可能性が考えられ、本実験の範囲では、

$\Delta K_I < 0.6 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$ の場合

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

$\Delta K_I \geq 0.6 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a}$ の場合

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

の条件、すなわち、閾値を $0.6 \times 1.12 \sigma_f \sqrt{\pi a} = 0.672 \sigma_f \sqrt{\pi a}$ 以下の条件とすることを推奨する (NIIT 推奨則)。なお、提案した上記の閾値は亀裂閉口点が $U_{cl}=0$ から $U_{cl} \neq 0$ となる条件を意味している。

5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。今回の実験データを包絡する進展則を提案するならば、亀裂閉口点の負荷応力依存性を考慮した以下の亀裂進展則 (NIIT 線形推奨則) が提案すること

ができ、提案式により実験結果を正しく予測できることを示した。

$$\Delta K_I = K_{\max} (1 - U_{cl})$$

$$\Delta K_t < \alpha_L \sigma_f \sqrt{\pi a} \text{ のとき}$$

$$U_{cl} = 0$$

$$\Delta K_t > \alpha_H \sigma_f \sqrt{\pi a} \text{ のとき}$$

$$U_{cl} = -1$$

$$\alpha_L \sigma_f \sqrt{\pi a} \leq \Delta K_t \leq \alpha_H \sigma_f \sqrt{\pi a} \text{ のとき}$$

$$U_{cl} = \frac{\Delta \sigma - \alpha_L \sigma_f F(\xi)}{(\alpha_L - \alpha_H) \sigma_f F(\xi)}$$

$\alpha_L = 0.6$: 材料及び負荷条件、形状で変化する実験定数

$\alpha_H = 1.25$: 材料及び負荷条件、形状で変化する実験定数

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

ξ : a/W

$2W$: 試験片幅

$2a$: 亀裂長さ

9. 本研究で提案した NIIT 推奨則および NIIT 線形推奨則は応力比が $R = -1$ の条件下の実験結果に基づく提案であり、 $R = -1$ 以外の条件に対する適用性の検証、および、必要に応じて応力比効果の定式化が必要である。

本研究成果については、2017 年開催の ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference をはじめ、日本機械学会材料力学カンファレンスなどでの公表を検討する。

参考文献[3.3]

- [1] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI Appendix A-4300 “Fatigue Crack Growth Rate”, 1983.
- [2] Federal Resister/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

4.1 「サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化」に関する知見調査

日本建築学会および日本地震工学会に参加し、サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化に関する最新知見の収集を行った。

4.1.1 日本建築学会における調査

2015年度日本建築学会大会(関東)において収集した論文について以下に記す。

(1) 開催場所:北海道大学 工学部

(2) 開催期間:9月4日～9月6日

(3) 調査結果

(a) 関東平野で観測された2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の地震動特性:(その7)東京湾沿岸部での微動アレイ観測によるサイト増幅特性評価 津野靖士 地元孝輔 佐口浩一郎 山中浩明 酒井慎一 三宅弘恵 瀨瀬一起

品川～川崎周辺の東京湾沿岸部の6サイトで数mから1km程度のアレイ観測からS波速度構造を推定しており、ボアホール地震計による地震観測結果と対応させている。その結果6サイトに共通してVs150m/sと400m/sの低速度層の存在を指摘している。

(b) 地震記録に基づくサイト特性と地震波到来方向の関係に関する研究 高橋広人 平井敬 福和伸夫
南海トラフの震源域に位置する中小地震を対象として、名古屋大学の大都市圏強震観測ネットワークの地震観測記録を用いてスペクトルインバージョンによりサイト特性を抽出し、地震間にとる地盤増幅特性の差異について考察している。その結果、濃尾平野・岡崎平野において、東海地震の震源域から到来する地震波よりも東南海地震の震源域から到来する地震波の方がサイト特性が大きくなる可能性があることを示している。その要因は表面波の励起によるものではないかと考えており、詳細な検討を今後の課題としている。

(c) 2013年栃木県北部の地震の震源域におけるKiK-net観測点を用いたサイト・伝播特性に関する検討 引間和人

M3～5.1の80地震に対してスペクトルインバージョンを行い、TCGH07(栗山西)への到来方向によるサイト増幅特性について検討している。その結果、地表・地中地震計共に到来方向による増幅率が異なることを示している。特に、全データを用いた解析結果で見られる地中地震計の短周期成分で卓越している0.2秒の成分は、到来方向別の解析結果より検討すると西・近傍領域からの地震動のみに特徴的に見られ、これはサイトの比較的近傍での伝播特性・サイト特性が影響していると推察している。

(d) 拡散波動場理論に基づく地震動水平上下スペクトル比と地表/地中スペクトル比を用いた地盤構造同定 長嶋史明 川瀬博 松島信一

高精度な被害予測をするために、拡散波動場理論に基づき、地震動上下スペクトル比(HVR)を用いて KiK-net(IWTH25)地点における浅部地盤の構造を同定している。また地中(G.L.-260m)の地震動観測記録より、地表/地中スペクトル比(TF)を用いて地盤構造の同定を行っている。HVR のみの同定では S 波速度および層厚を求めることができ、TFも考慮すると減衰も含めた観測結果に合う構造を同定できた。ただし減衰は、不整形地盤に起因するエネルギーの分散を1次元構造で再現するために大きな減衰が同定されてしまっている。

(e) 強震動予測のために和歌山平野の3次元地下構造モデル構築（その1 モデル化と微動H/Vスペクトルによるモデル検証） 上林宏敏 大堀道広 川辺秀憲 釜江克宏 岩田知考 山田浩二 宮腰研

和歌山平野の強震動の予測精度の高度化のために、3次元地下構造モデルを重力探査と反射法探査結果に基づいて構築し、微動観測記録による同モデルの検証を行っている。モデルの沖積層および基盤面深度はH/Vスペクトルピーク周期と高い相関となった。今後は今回のモデル化対象領域より東側の領域で追加実施した探査や微動アレイ、反射法、地震観測情報や新たに実施する反射法探査情報等を用いて、モデルの改良および拡張を行い、広帯域の強震動の計算を行う予定とのことである。

(f) CCA法とSPAC法によるRayleigh波分散曲線の違いが推定される地下構造に与える影響 神野達夫 金子正輝 岡宏記 高田将輝

これまでに実施した微動アレイ観測記録に対してSPAC法とCCA法の両方を適用し、得られたRayleigh波位相速度の違いがS波速度構造に与える影響について検討を行っている。S波速度構造とアレイ半径の関係を比較した結果、半径100m以上のアレイにおいては両方法を介して推定されるS波速度構造とアレイ半径の間に違いはなかったが、半径20m~40mのアレイから推定できるS波速度構造は、CCA法がSPAC法を上回り、場所によっては4~50倍程度の半径のアレイと同程度のS波速度を求めることが可能であったとしている。しかしながらこの発表に対して、同様の検討を行った結果ほとんど違いは見られなかったという意見もあり、さらなる検討を必要としている。

(g) 軟弱地盤における地震動強さに表層地盤増幅評価手法の違いが与える影響 小田佑生 護雅史 福和伸夫

液状化する可能性がある軟弱地盤に対して、表層地盤増幅評価手法の違いが予測地震動に与える影響について検討している。その結果、簡便法では、AVS30を算出する手法の影響が大きく、同地点においても手法によってAVS30の評価に幅があることに注意しなくてはならないことを指摘している。また地盤の非線形性を考慮した詳細法では、簡便法に比べて最大加速度は大きく減少するため、これを指標とすると地盤増幅を過小評価してしまう可能性があるとして述べている。そのため建物の振動による被害に関わる指標である震度増分は、被害予測のために構築されてきた簡便法の方が詳細法より大きく、建物の沈下や傾き、杭の損傷などの指標である地盤変位は詳細法の方が大きいことから、各手法がどのような目的で構築されてきたのか理解し、使い分けることが重要であるとしている。

(h) 2013 年 2 月 2 日十勝地方中部スラブ内地震(Mw6.9)による特異な加速度震源スペクトル 青木雅嗣 笹谷努 高井伸雄 重藤迪子

2013 年 2 月 2 日 23 時 17 分頃、十勝地方中部直下 102km を震源とする Mw6.9 のスラブ内地震では、観測記録と見かけのコーナー周波数の関係が既存の関係式から大きく離れることに着目し、K-NET および KiK-net で観測された記録を基に、観測点ごとに S 波の加速度震源スペクトルを推定することで、一般的な加速度震源スペクトルモデルとの相違を示している。本地震の加速度震源スペクトルは、低周波数帯域と高周波数帯域で 10 倍程度差があり、 ω^2 モデルとは異なることから、本地震の震源スペクトルが二つのコーナー周波数を有する特異なものであることを示唆している。今後は二つのコーナー周波数を持つ震源スペクトルモデル(DFC 震源モデル)も考慮すべきであると考えており、そのためにもその発生頻度や破壊メカニズムの解明をすることを重要な課題としている。

(i) 震度に対する地盤の非線形性の影響を考慮した大正関東地震の強震動生成域の推定 佐藤智美:

周期 0.05~5 秒で表面波や散乱波を考慮した改良統計的グリーン関数法と地盤が線形時と非線形時の計測震度の経験式を用いて、大正関東地震の震度分布に合う強震動生成域のフォワードモデリングを行っている。その結果、Sato et al.の震源インバージョンに基づくすべり量の大きい領域とほぼ同じ位置に2つの強震動生成域が推定された。内閣府では震度分布を再現するために、東京都東部や房総半島南端に SMGA を設定しているが、本研究からは、そのような SMGA が必要ないと述べている。また、応力降下量や短周期レベルは地殻内地震とほぼ同レベルであることがわかった。今後は、経験的サイト特性のモデル化を行って、面的な評価を行い、詳細な震度分布との比較の必要が有るとしている。

4. 1. 2 日本地震工学会

本地震工学会・年次大会 2015 において収集した論文について以下に記す。

(1) 開催場所:東京大学・生産技術研究所

(2) 開催期間:11 月 19 日~11 月 20 日

(3) 調査結果

(a) P1-14 2011 年東北地方太平洋沖地震 Small-TitanCCHG 観測点の強震記録にみられた地盤の非線形挙動 田中(鉄道総研)ほか

2011 年東北地方太平洋沖地震において、強震観測網 Small-Titan の CCHG で 142kine の大きな速度振幅が認められた。2011 年以前の地震記録を用いて、表層地盤の増幅特性について検討したところ、入力する地震動が大きくなると、振幅スペクトル比が小さくなり、ピーク周期が長周期化することが分かった。今後、定量的な検討を行う。

(b) P1-15_ 地盤非線形性を考慮した応答スペクトルの増幅率のモデル化に関する基礎的研究 池田・加藤(小堀研)

K-NET 豊里における地震観測記録から、岩盤から堆積層における地表での応答スペクトルの増幅率を計算し、線形時から大きなひずみが発生する強震時の、増幅率の変動を評価するモデル関数を作成した。作成したモデル関数より、2011 年東北地方太平洋沖地震の増幅率の再現計算を行っ

たところ、観測記録から得られる増幅率とほぼ整合したため、モデル関数の妥当性が確認できた。

(c) P1-17 微動の斜交成分の観測によりサーキットノイズと地盤震動を区別する試み 野津（港湾技研）

微動観測で得られる観測記録の振幅レベルが小さい場合の、サーキットノイズと地盤震動の区別する試みを、斜交成分が計測できる先進強震計の記録を用いて行った。その結果、微動の SN 値が低い周波数帯域では、コヒーレンス関数の値が小さく、サーキットノイズの影響が大きくなっていると推察された。サーキットノイズと微動との大小関係は、時刻歴波形だけではなく、コヒーレンス関数を利用した検討が有用であることが、本研究より示唆された。

(d) P1-24_ 関東平野の深部地盤構造モデルの長周期地震動増幅特性の比較 田中（大林組）

内閣府等から、既に公表されている関東平野の深部地盤構造モデルをもとに、到来方向が異なる複数の地震動シミュレーションを実施し、得られた結果から、長周期地震動による増幅特性の再現性を比較した。その結果、関東平野の南西方向から到来する地震では、観測記録の再現性があまり良くないことが分かった。北北西や北東から到来する地震では、観測記録の再現性が、ある程度良いことから、関東平野南西部における堆積盆地端部の地盤モデルの改良が必要と思われる。

(e) P2-22 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市内の高密度観測記録を用いた最大地動分布の推定 末富（エイト日本技術開発）ほか

2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた地震観測記録より、50m メッシュの地形分類データを構築し、地形分類ごとに AVS30 を求め、観測された地震記録より得られる SI 値の補間を行った。その結果、地震観測点が設置されていない盛土上で、地震動による大きな増幅が認められた。

(f) P2-26 AN ANALYSIS OF STRONG-MOTION RECORDS AND SITE AMPLIFICATION AT KANTIPATH, KATHMANDU FROM THE 2015 Mw7.8 GORHA EARTHQUAKE, NEPAL AND ITS AFTAERSHOCKS Dhakal (NIED) et al

2015 年ネパール地震の、本震と余震記録のコーダ部分の H/V スペクトル比から、1 次元深部地盤構造モデルを作成し、地震動の再現計算を行ったところ、既往の研究で提案されている地盤構造モデルによる再現計算よりも、より精度の高い計算結果が得られた。

(g) P4-37 強震動評価のための関東地域における浅部・深部統合地盤モデルの構築 先名（防災科研）ほか

広帯域での地震動評価ができるよう、これまで公表してきた浅部・深部統合地盤モデルについて、特に両者に影響が表れる周期帯（0.5～2.0 秒）のボーリング・データと微動観測データを収集し、統合地盤モデルの検討を行っている。得られたデータを基に、関東平野の統合地盤モデルの修正を行い、地盤震動特性の評価を検討したところ、修正前のモデルよりも、精度の高い地盤モデルが作成できた。今後、東海地方の地盤モデルの構築を行う予定である。

4. 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」に関する知見調査

4. 2. 1 日本建築学会

2015年度日本建築学会大会(関東)において収集した論文について以下に記す。

(1) 開催場所:東海大学 工学部

(2) 開催期間:9月4日～9月6日

(3) 調査結果

(a) 高層建築物における配管設備の応力解析による最適化 (その3)配管応力解析手法の確立(2)、(その4)配管支持の施工事例、八木敏明 三家本伊織 込山治良

高層建物の壁配管は、設計圧力(内圧)のみで管種や継手が選定される事例が多く見られる。しかし、実際には内圧以外に、地震荷重、配管自重、熱荷重などが作用しており、設計圧力のみ選定方法では、過剰設計や耐力不足にある可能性がある。本報告では、様々な設計荷重を対象に出来る配管設計の配管応力解析ソフトを提案し、適用事例が示されている。本配管応力解析手法では、仮拘束点を決定し、解析結果に応じて拘束点を再度設定し直し、再計算を行う、トライアンドエラーを繰り返す中で、どの部分にどのような支持を設定するのかノウハウを蓄積できる、

(b) 外付け式層間変形制御装置による建築物の地震応答制御に関する研究 (その3)小型3層鋼試験体の振動台加振実験、宮津裕次 伊藤彰保 曾田五月也 大崎純

大地震時に特定層へ損傷集中を抑制するための制振構造システムを提案している。提案する外付け式層間変形制御装置を設置した小型3層鋼製骨組みの振動台加振結果について報告されている。提案制震装置を設置することで、減衰性能は向上し、高振動側にシフトすることが認められた。また、地震動入力に対して各層の層間変形が一様化され、層崩壊を抑制できることが示されている。

(c) 等価線形化法による弾塑性地震応答の評価について 柴田明德

応答スペクトルを基いて、地震時最大応答変形を推定する限界耐力計算法の塑性率-減衰定数の関係及び応答スペクトルの低減式を用いた弾塑性応答の推定及び問題点について考察されている。応答スペクトルの減衰低減式が提案され、要求曲線から応答変位を求められており、精度が論じられている。

4. 2. 2 日本地震工学会

日本地震工学会・年次大会 2015において収集した論文について以下に記す。

(1) 開催場所:東京大学・生産技術研究所

(2) 開催期間:11月19日～11月20日

(3) 調査結果

(a) P3-20 非構造部材の耐震設計に用いる構造躯体の加速度について その1 せん断棒による検討 石原直 山中祐一 山田哲 元結正次郎 清家剛 脇山善夫

非構造部材の耐震設計に用いる構造躯体の加速度について標準的と思われる加速度の大きさと分布形

を改めて検討するとともに、指針の式の妥当性について考察されている。建築物を抽象化したせん断棒を対象に、応答スペクトル法によって検討する。その結果、層せん断力の差分から求めた擬似的な加速度が本来の加速度を下回る要因や、高さ方向の加速度分布の傾向、指針の式で改善すべき点を明らかにしている。

(b) P3-21 非構造部材の耐震設計に用いる構造躯体の加速度について その2 実際の建築物による検討 山中祐一 石原直 山田哲 元結正次郎 清家剛 脇山善夫

非構造部材に作用する地震時の慣性力は、想定した入力地震動に対する最大応答値(加速度)をもって評価すべきである。しかしながら、加速度を直接的に求める方法は、時刻歴応答解析によらなければならない、一般建築物においてそれを実現することは難しい。そこで、実際の建築物を想定し、時刻歴応答解析を通じて得られる層せん断力と慣性力の関係について明らかにすることで、非構造部材の耐震設計に用いる加速度の今後の方向性について考察している。

(c) P3-22 モード分解・合成による大地震時の床応答スペクトルの近似的評価 石原直 永野正行 鈴木賢人 佐藤航

大地震時の床応答スペクトルの近似的評価に関して、非線形応答での増幅を表す関数を経験的に得た上で、多自由度系に対するモード分解・合成の可能性について検討している。モデルや復元力特性、入力地震動などは限定的であるが、非線形の床応答スペクトルも近似的に線形モードでの分解・合成ができることを示した上で、比較的単純な近似評価式を提案している。

(d) P3-22 日本大学生産工学部における強震観測4号館(RC造)の振動性状の把握 高畠秩 郡司和弥 永井明男 藤本利昭 師橋憲貴 下村修一 工藤一嘉

日本大学生産工学部津田沼キャンパス内では強震観測を継続して行っており、2013年には強震観測システムを新たに整備している。その内の新たに強震計を設置した昭和30年代後半に建設されたRC造建物ならびに観測の概要を紹介するとともに、これまでに観測された記録から理解される諸特性(スウェイ振動・捩れ振動・ロッキング振動等)の基本的検討を行っている。検討の結果、建物平面の長辺・短辺方向共に2.7Hz付近に1次モードの卓越周期が存在すること、また短辺方向ではロッキング振動と捩れ振動が見られることが明らかとなった。

4. 3 「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」に関する知見調査

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、繰り返しの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、日本機械学会 2015 年度年次大会（2015 年 9 月 13 日（日）～16 日（水）、北海道大学）、日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス（2015 年 11 月 21 日（土）～23 日（月）、慶應義塾大学）、International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015（OCTOBER 4 – 8, 2015, LOISIR HOTEL TOYOHASHI, JAPAN）に参加し、疲労亀裂進展について最新動向を調査した。

4. 3. 1 日本機械学会 2015 年度年次大会の調査

- (1) 開催場所：北海道大学 工学部
- (2) 開催期間：平成 27 年 9 月 13 日（日）～16 日（水）
- (3) 調査内容

オーガナイズドセッション：J031 高温材料・機器の信頼性を中心に参加した。

- (4) 調査結果

亀裂進展評価についての研究がいくつか報告されていたが、原子炉用低合金鋼を対象とした研究や亀裂進展則を検討した研究は見当たらなかった。

以下に、いくつかの研究報告内容を示す。

- (a) G0301301：オーステナイト系ステンレス鋼の微小き裂発生および進展に及ぼす表面性状の影響

[1]

蓮沼将太、野呂亮太、小川武史

<概要> オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の表面性状の変化が微小き裂発生および進展挙動に及ぼす影響を調査した。試験片表面に対して電解研磨を施した試験片を準備し、 $\Delta\epsilon$ 一定条件下および二段変動振幅ひずみ条件下の低サイクル疲労試験を行い、低サイクル疲労試験中の表面性状の変化を観察した。そして、表面性状の変化が微小き裂進展に及ぼす影響について検討した。さらに、旋盤加工を施した試験片を対象とした試験も実施し、表面加工層が疲労強度と微小き裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにした。そして、実機における変動加重化の疲労寿命評価法について検討した。その結果、以下を明らかにした。

- ・二段二重変動ひずみ振幅試験の場合、試験条件により疲労試験中の粗さの変化が異なる。
- ・旋盤加工ママの試験片の場合、加工傷からき裂が発生し、疲労試験中の粗さの変化は電解研磨材と異なっていた。
- ・荷重が変動する場合や加工傷および表面加工層がある場合においても破壊力学的評価を行うことで実構造物の疲労寿命を予想できることを示した。

(b) G0301605 : Ni 基超合金鋳造材の疲労き裂進展特性とき裂進展機構 [2]

宮井悠真、蓮沼将太、小川武史、高梨正祐

<概要> コバルト添加型 Ni 基超合金鋳造材 246 合金を対象として疲労き裂進展試験を行い、EBSD 分析による結晶方位観察を行うとともに、画像相関法によって得られたき裂先端変位場から有効応力拡大係数を評価し、き裂進展特性を調査した。その結果、以下を明らかにした。

- ・低 ΔK_I 試験及び ΔK 漸減試験より 246 合金は混合モードのき裂進展が生じやすい材料であることを明らかにした。
- ・混合モード破面に対する EBSD の観察結果より、き裂はすべり面に沿って進展することを明らかにした。
- ・モード II に比べモード I でき裂進展速度が高くなった。
- ・き裂先端変位場から評価した ΔK_{eff} でき裂進展速度を関連付けた場合、モード I 条件では混合モード条件よりき裂進展抵抗が低くなることが示唆された。

(c) G0310101 : オーステナイト系鋳鋼の熱疲労き裂進展と温度条件 [3]

岡崎正和、林光宏

<概要> オーステナイト系鋳鋼を対象として、試験片最高温度を種々に変化させたもとの IP および OP 条件の TMF 試験を実施し、それぞれの条件における破壊形態を明らかにするとともに、試験中の熱疲労亀裂進展挙動を力学的に評価した。特に、TMF 試験中の温度域を通常の耐用温度以上の条件としたときに生じる特有の破壊挙動に注目して調査した。その結果、TMF 中の最高温度が高くなるにつれて亀裂進展速度を上昇し、材料内部にも多くの微小亀裂が発生すること、これらの微小亀裂の核形成部位はデンドライト境界であり、ミクロ偏析などの微視組

織的因子が関与していることを示した。

4. 3. 2 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンスの調査

- (1) 開催場所：慶應義塾大学
- (2) 開催期間：平成 27 年 11 月 21 日（土）～23 日（月）
- (3) 調査内容

オーガナイズドセッション：OS09 供用エネルギーおよび化学プラント機器の経年変化と健全性評価を中心に参加した。

- (4) 調査結果

亀裂進展評価についての研究がいくつか報告されていたが、原子炉用低合金鋼を対象とした研究や亀裂進展則を検討した研究は見当たらなかった。

以下に、いくつかの研究報告内容を示す。

- (a) OS0613-313：地震荷重に対するき裂構造物の健全性評価（大荷重下での疲労き裂進展予測方法） [4]

釜屋昌幸

<概要> 地震荷重を模擬した大きな繰り返し荷重で生じる疲労亀裂進展に対するひずみ拡大係数の適用性を調査した。供試材には SUS316 鋼と S45C 鋼を用い、延性亀裂発生の定義となる 0.2mm の亀裂進展が 1 回の繰り返し負荷で生じる応力振幅を最大応力振幅条件とし、応力振幅の異なる条件で亀裂進展試験を実施した。その結果、有効ひずみ拡大係数は、延性亀裂進展とみなせるような大きな荷重振幅下での疲労亀裂進展予測に用いることが可能であること、また、ステンレス鋼のみではなく炭素鋼に対しても適用できることを示した。

- (b) OS0906-118：疲労亀裂進展評価における下と荷重の順序について [5]

三浦直樹、永井正貴

<概要> 繰り返し荷重の振幅が一定である場合、亀裂進展量は Paris 則で与えられる疲労亀裂進展則を数値積分することによって容易に計算することが出来る。しかし、実機部材で過渡現象に応じて振幅の異なる繰り返し荷重が生じることが想定されるが、振幅の異なる繰り返し荷重のデータセットを複数考慮することが要求され、また、その順序が予測できない。ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI では個々の過渡を近似的な時系列に沿って考慮することが定められているが、その具体的な方法は明示されていない。また、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格の解説 E-11 でも典型的な評価モデルに対して過渡荷重の順序を入れ替えても亀裂進展量に大きな差が現れないことを根拠に、負荷荷重の順序について規定を設けないこととしている。

この論文では、疲労亀裂進展評価の保守性を担保するため、その順序が不安定であるようなかと荷重を以下に扱えば良いかについて一般的な方法を提示し、その妥当性について検証した。その結果、亀裂進展評価の保守性を担保するためには、振幅の大きい順に並べた荷重シーケンスを考えれば良いことを明らかにした。また、その影響は限定的であって、荷重シーケンスの違いによる亀裂進展長は計算誤差と同程度以下のオーダーとなり得ることを実証した。

(c) OS0606-477 : 316 ステンレス鋼の低サイクル疲労き裂発生・成長における環境効果 [6]

藤川亮祐, 北田孝典, 中村隆夫, 釜谷昌幸

<概要> 316 ステンレス鋼の PWR1 次冷却剤中での環境効果が亀裂の発生・成長に及ぼす影響の定量化について、環境中における軸方向ひずみ制御の低サイクル疲労試験を実施し、途中止めした試験片に対して中空試験片無い表面の亀裂観察を実施した。内表面の亀裂を観察するため、立体レプリカとフィルムレプリカを併用した 2 段レプリカ法を開発した。この方法は液体状のシリコンゴム（立体レプリカ）を中空試験片内に充填し、固まった円柱状のゴムを試験片から取り出した後、そのゴム表面をフィルムレプリカに転写することにより、試験片内表面の亀裂を観察する方法である。そして、亀裂発生・進展挙動に及ぼす環境効果の影響について検討した。その結果、以下の結果を得た。

- ・2 段レプリカ法により環境中疲労亀裂の成長を観察できることを示した。
- ・環境中では大気中より寿命比の小さい条件で亀裂が発生した。
- ・環境中における亀裂進展速度は、亀裂の合体の影響で見かけ上高い進展速度を示した。
- ・環境効果が疲労寿命に与える影響を評価するためには、疲労初期における亀裂発生の加速、環境中による亀裂進展速度の加速、亀裂の合体による加速、を考慮する必要があることを示した。

4. 3. 3 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 の調査

(1) 開催場所：LOISIR HOTEL TOYOHASHI, JAPAN

(2) 開催期間：平成 27 年 10 月 4 日（日）～8 日（木）

(3) 調査内容

オーガナイズドセッション：J Fatigue and fracture mechanics, Reliability of heat resisting alloys and coatings を中心に参加した。

(4) 調査結果

亀裂進展評価についての研究がいくつか報告されていたが、原子炉用低合金鋼を対象とした研究が報告されていたが[7]、亀裂進展則を検討した研究は見当たらなかった。

以下に、いくつかの研究報告内容を示す。

(a) OS8-11:A Fracture Mechanics Approach to Predict Low Cycle Fatigue Life of Steels under Variable Amplitude Loading [7],

Shota Hasunuma, Hiroaki Ozeki, Ryota Noro and Takeshi Ogawa

<概要> 原子力材料である炭素鋼 STS410、低合金鋼 SFVQ1A およびオーステナイト・ステンレス鋼 SUS316NG を対象として 2 段変動振幅による疲労試験を実施し、疲労亀裂進展と疲労寿命に及ぼす負荷振幅変化の影響を検討した。疲労寿命を疲労累積係数(UF)で評価した結果、SFVQ1A と STS410 に対しては、疲労寿命は疲労累積係数で整理可能であった。一方、SUS316NG では異なり、繰り返し硬化にともない ΔJ の増加と疲労府移係数の低下が生じた。 de/dN - ΔJ 関係と $\Delta\sigma$ -UF 関係

から SUS316NG の疲労寿命を予測する手法を提案した。

- (b) OS8-13: Effects of Harmonic Structure and Grain Size on Fatigue Crack Propagation of Ti-6Al-4V Alloy [8]

Hiroki Kubozono, Shoichi Kikuchi, Takafumi Imai, Yoshikazu Nakai, Akira Ueno and Kei Ameyama

<概要> Ti-6Al-4V のマイクロ構造を制御し、調和構造有する Ti-6Al-4V 合金を開発し、その疲労亀裂進展挙動を評価することにより、亀裂進展速度に及ぼす微視組織の影響を調査した。しかし、疲労亀裂進展則についての検討は行われていない。

- (c) OS8-14: Effects of Crystallographic Orientation and Grain Boundary on Stage I Fatigue Crack Propagation in Ni-base Superalloys [9]

Motoki Sakaguchi, Daichi Kouyama, Ryota Komamura and Hirotsugu Inoue

<概要> 第一段階疲労亀裂進展機構を検討するため、単結晶ニッケル基超合金を対象として室温における疲労亀裂進展試験を実施し、疲労亀裂進展挙動と結晶方位との関連性を調査した。しかし、疲労亀裂進展則についての検討は行われていない。

- (d) OS8-21: Fatigue Crack Propagation Behavior of a Friction Stir Welded Ti-6Al-4V [10]

M. Muzvidziwa, M. Okazaki and S. Hirano

<概要> 摩擦攪拌接合した Ti-6Al-4V 合金の疲労亀裂進展挙動を調査した。しかし、疲労亀裂進展則についての検討は行われていない。

- (e) OS8-22: Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth Behavior of Friction Stir Welded 6063-T5 Aluminum Alloy [11]

Toru Takase, Atsuhiko Koyama, Yuichi Yamashita, and Hyuma Saki

<概要> 摩擦攪拌接合された 6063T5 アルミニウム合金の疲労亀裂進展試験を実施し、疲労亀裂進展挙動に及ぼす試験片厚さの影響を検討した。しかし、疲労亀裂進展則についての検討は行われていない。

参考文献[4]

- [1] 蓮沼将太, 野呂亮太, 小川武史, “オーステナイト系ステンレス鋼の微小き裂発生および進展に及ぼす表面性状の影響”, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, (2015) G0301301
- [2] 宮井悠真, 蓮沼将太, 小川武史, 高梨正祐, “Ni 基超合金鋳造材の疲労き裂進展特性とき裂進展機構”, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, (2015) G0301605
- [3] 岡崎正和, 林光宏, “オーステナイト系鋳鋼の熱疲労き裂進展と温度条件” 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, (2015) G0310101
- [4] 釜屋昌幸, “地震荷重に対するき裂構造物の健全性評価(大荷重下での疲労き裂進展予測方法)”, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス講演論文集, (2015) OS0613-313
- [5] 三浦直樹, 永井正貴, “疲労亀裂進展評価における下と荷重の順序について”, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス講演論文集, (2015) OS0906-118
- [6] 藤川亮祐, 北田孝典, 中村隆夫, 釜谷昌幸, “316 ステンレス鋼の低サイクル疲労き裂発生・成長における環境効果”, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス講演論文集, (2015) OS0606-477
- [7] Shota Hasunuma, Hiroaki Ozeki, Ryota Noro and Takeshi Ogawa, A Fracture Mechanics Approach to Predict Low Cycle Fatigue Life of Steels under Variable Amplitude Loading, Proc. ATEM'15 (2015) OS8-11.
- [8] Hiroki Kubozono, Shoichi Kikuchi, Takafumi Imai, Yoshikazu Nakai, Akira Ueno and Kei Ameyama, Effects of Harmonic Structure and Grain Size on Fatigue Crack Propagation of Ti-6Al-4V Alloy, Proc. ATEM'15 (2015) OS8-13.
- [9] Motoki Sakaguchi, Daichi Kouyama, Ryota Komamura and Hirotsugu Inoue, Effects of Crystallographic Orientation and Grain Boundary on Stage I Fatigue Crack Propagation in Ni-base Superalloys, Proc. ATEM'15 (2015) OS8-13.
- [10] M. Muzvidziwa, M. Okazaki and S. Hirano, Fatigue Crack Propagation Behavior of a Friction Stir Welded Ti-6Al-4V, Proc. ATEM'
- [11] Toru Takase, Atsuhiko Koyama, Yuichi Yamashita, and Hyuma Saki, Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth Behavior of Friction Stir Welded 6063-T5 Aluminum Alloy, Proc. ATEM'15 (2015) OS8-22.

5 ヒアリングの実施

以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以下のとおり実施した。

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

第1回 平成27年9月2日に原子力規制庁において実施

第2回 平成27年12月14日に原子力規制庁において実施

第3回 平成28年3月1日に原子力規制庁において実施

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

第1回 平成27年8月18日に原子力規制庁において実施

第2回 平成27年10月2日に原子力規制庁において実施

第3回 平成28年2月1日に新潟工科大学において実施

第4回 平成28年3月11日に原子力規制庁において実施

③ 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ヒアリング

第1回 平成27年10月14日に東北大学において実施

第2回 平成27年11月11日に原子力規制庁において実施

第3回 平成28年3月1日に新潟工科大学において実施

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 工藤 一嘉 氏におけるヒアリング (1)

日時：平成 27 年 9 月 2 日 10 時 00 分から 13 時 00 分

場所：原子力規制庁 18 階 会議室

1). 議題

1. 調査・研究計画に関するヒアリング

- (1)平成 27 年度委託事業について
- (2)対象とする地震について
- (3)入力波形の計算法について
- (4)今後の研究スケジュールについて
- (5)その他

2) 提出資料

議題 1.(1)の関連資料として

- ・仕様書

議題 1. (2)、(3)の関連資料として

- ・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概要報告書
- ・平成 27 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 実施計画（案）

3) 上記議題に関する質疑等

提出資料を用いて本年度の調査・研究の概要の説明が行われた。続いて、提出資料を用いて昨年度の調査・研究成果の概要説明、提出資料を用いて本年度の調査・研究の計画に関して説明が行われた。

以下に工藤先生からの質問とそれに対する回答を示す。

提出資料②に関して

- ・JNES2007 モデルに比べ JNES2013 の説明性が向上しているが、これは表層の速度構造が考慮されているためか。

⇒そのとおりです。微動データを用いて 300 m/s までの S 波速度を考慮して計算しています。

- ・図 3 において、1Hz 付近があまり観測値と整合していない地点があるが、理由は何か。

⇒どのような原因で観測データに整合しないのか、今後検討します。

提出資料③に関して

- ・地震記録を合わせる際に、まずボーリング孔 3000m の記録を合わせてもらいたい。その際には、震源から観測点近傍までのある程度精度の高い速度構造モデルが必要である。表層の S 波速度構造については、表面波探査の結果もあるので検討してもらいたい。また、計算結果の工学的基盤の波形を地表に立ち上げるようにしてもらいたい。

⇒JNES2013 モデル、JNES2007 モデルや J-SHIS のモデルを組み合わせて震源からサイトまでを計算したい。表層モデルについては、2 つのモデルを検討し、表層地盤の応答を計算することになります。

- ・地下構造モデルの不確かさを確認するために、3 つのモデル（JNES2007 モデル、JNES2013A モデル、JNES2013B モデル）の計算結果の比較を行って議論してもらいたい。また、スペクトルだけでなく、波形の継続時間や包絡形状も比較するとよい。

⇒3 つのモデルの比較を行い、まずは波形の概略の形を説明するよう計算のチューニングを行います。

- ・Q 値については、既往の研究成果を取り入れて計算を行ってもらいたい。

⇒既往研究の差分法計算で用いている伝播経路の Q 値や検層結果の Q 値も参考とします。

5. 1. 2 工藤 一嘉 氏におけるヒアリング（2）

日時：平成 27 年 12 月 14 日 10 時 00 分から 13 時 00 分

場所：原子力規制庁 18 階 会議室

1) 議題

- ・委託研究の経過について（中間報告）
- ・その他

2) 提出資料

(1)差分法の計算結果について

(2)その他

(3)の関連資料：①平成 27 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打ち合わせ資料

(4)の関連資料：②水平アレー観測地点位置での微動計測

3) 上記議題に関する質疑等

① 差分法計算結果の確認

提出資料を用いて差分法に関する説明が行われた。

以下に工藤先生からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・地盤モデルをどのように接続したかについて整理してほしい。
⇒モデルの作り方をできる限り詳細に示すようにしたい。既往のモデルの作成方法についても整理を行う。
- ・表層 MODEL の取り扱いはどのようにしているのか。
⇒観測データの剥ぎ取り波形を作成し、最終的にはその波形との比較を行う。
- ・どこの地点があっていて、どこの地点があっていないのかを調べたほうがよい。距離減衰でも見てみたほうがよい。
⇒地下構造による卓越周期の観測と計算結果を比較しながら、地点毎の点検をしたい。
- ・Q 値の基準周期を変えてみて検討してみようか。
⇒基準周期を変えた検討を行う予定である。
- ・近傍の地震を使って、サイト近くで入力波形が説明できているのかを検討すべきと考える。
⇒近傍の地震の再現計算を行い、検討したい。
- ・スナップショットがあると波動場の理解が進むと考える。
⇒スナップショットについても作成するようにしたい。

② 水平アレー観測地点位置での微動計測果の確認

提出資料を用いて微動の計測結果に関する説明が行われた。以下に工藤先生からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・今後どのようにこの結果をまとめるのか。
⇒広域の地盤図との比較や現状モデルで観測データが説明可能なのかを検討したい。

5. 1. 3 工藤 一嘉 氏におけるヒアリング (3)

日時：平成 28 年 3 月 1 日 10 時 00 分から 13 時 00 分

場所：原子力規制庁 18F 会議室

1) 議題

- ・委託研究の成果について
- ・報告書のとりまとめについて
- ・その他

2) 提出資料

(1)差分法の計算結果について

(2)微動計測の H/V スペクトルについて

(3)の関連資料：①平成27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打ち合わせ資料

(4)の関連資料：②微動計測の H/V スペクトルに関する考察

2) 上記議題に関する質疑等

① 差分法計算結果の確認

提出資料を用いて差分法に関する説明が行われた。

以下に工藤先生および規制庁殿からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・1次モデルと JNES2007 モデルの作成方法について記してほしい。
⇒JNES2007 モデルでは、魚沼層や西山層、椎谷層を3つの層に層区分しているが、1次モデルでは行われていない。両方のモデルの特徴について整理を行う。
- ・川瀬・松尾の論文を参考に伝播経路のS波速度を3.6としているが、差分法の計算モデルと比較してどのように異なるか。
⇒深度10 kmにおいては、地盤モデルでは3.4である。
- ・たとえば、福島県沖の地震について、3000 mの記録はよく合っていると見えるが、浅い記録では差分法の結果がパルスが目立つ。
⇒水平アレイの観測記録などと比較し、評価を行いたい。
- ・疑似速度応答の比は物理的にはあまり意味がない。
⇒速度フーリエスペクトル比についての検討とともに評価を行いたい。
- ・直下の地震については、長周期帯域については表示しないほうがよい。
⇒周期1秒以上の指標については評価しないようにしたい。
- ・メカニズムの影響などは長周期の波形をみるとわかる。
⇒長周期の波形形状についても比較を行いたい。
- ・地震モーメントについて F_{max} の影響も無視できない。
⇒ F_{max} の影響についても検討を行いたい。

② 微動計測のH/Vスペクトルについて

提出資料を用いて微動の計測結果に関する説明が行われた。以下に工藤先生および規制庁殿からの質問とそれに対する回答を示す。

- ・今後どのようにこの結果をまとめるのか。

⇒微動のH/Vスペクトルと表面波探査の位相速度を用いて、浅部構造の推定を行い、計算結果に与える影響について検討を行いたい。

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 27 年 8 月 18 日 13:00～15:30

場所：原子力規制庁 会議室

1) 議題

- (1) 委託研究の概要について
- (2) 研究方針について
- (3) その他

2) 議事資料

①平成 27 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 仕様書

②平成 26 年度原子力施設等防災対策等委託費事業「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」成果報告

③平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費事業「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」実施計画(案)

3) 議題に関する質疑等

委託研究の概要及び研究方針について

議事資料②に基づき、平成 26 年度事業成果の確認を行った。続いて議事資料③に基づき、平成 27 年度の研究計画の説明が行われた。

以下に古屋先生からの質問とそれに対する回答を示す。

議事資料②に関して

- ・鋼棒のサポート A において、両端に直径の小さい部分を作成した理由は何か。
⇒サポート A には両端固定で逆対称変形を想定し、曲げ変形を両端部分の直径の小さい部分に集中させるためです。
- ・鋼棒のサポート A のひずみ測定していないのか。
⇒両端の曲げ変形が集中する部分は、直径 3mm 長さ 6mm であるので、ひずみゲージを貼ることは出来ませんでした。

議事資料③に関して

- ・今年度の試験体は、支持構造物を昨年度の 1 ヲ所に対して複数(2 ヲ所)を計画する試験体と考えてよいのか。2 ヲ所とする場合にサポート B(ロッドレストレイント)の扱いはどうなるのか。

⇒2ヶ所にすることを想定します。サポート B(ロッドレストレイント)の有無が試験体の振動に及ぼす影響を地震応答解析を実施し検討を加えます。

・支持構造物を2ヶ所とする場合、どのようなものを考えているか。

⇒現段階では昨年度のサポート A と同様のものを想定していますが、具体的には今後検討を加えていただきたいと思います。

・今年度実施する調査・研究では、日本原子力学会標準及び日本機械学会の刊行物等を参考として進めてほしい。

⇒了解しました。

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10月2日 13:00～15:00

場所：原子力規制庁 会議室

1) 議題

(1) 平成27年度委託事業の途中経過の報告

(2) その他

2) 議事資料

①平成27年度原子力施設等防災対策等委託費事業「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 第2回ヒアリング」資料

3) 議題に関する質疑等

(1) 平成27年度委託事業の経過について

議事資料①に基づき説明が行われた。以下に古屋先生からの質問とそれに対する回答を示す。

・資料は、今年度の配管系試験体を検討するために、昨年度破断を対象としたサポート A とロッドレストレイントのサポート B の有無を考慮した3ケースのモデルに関して検討した結果が示されていると考えてよいのか。

⇒その通りです。

・サポート A 及び B を除いたモデル3はどのような応答性状となっているのか。

⇒1次振動数は6.9Hzで、サポート B のみを設置したモデル2の8.6Hzと大きな相違はないように考えますが、地震応答解析による最大変形角は1/33radとなり、モデル2の1/87radよりかなり大きくなっています。P-Δ効果の影響を受ける応答範囲になっていると考えます。

・今年度の試験体もサポート B(ロッドレストレイント)を設置しておいた方がよいと思う。

⇒了解しました。設置位置を、昨年度より低くするなど工夫したいと思います。

・地震応答解析の結果において、配管の最大変形図と曲げモーメント図が示されているが、最大加速度の分布図もあった方がよい。

⇒今後の検討では、掲載するようにします。

・本日の意見を参考として、破断を対象をサポートを2ヶ所設定する今年度配管系試験体について、検討を継続すること。配管系試験体と計測計画の案は、確認したいので、作成後にEメールにて送付すること。

⇒承知しました。

5. 2. 3 東京都市大学 古屋 治 教授におけるヒアリング (3)

日時：平成 28 年 2 月 1 日 13:00～15:00

場所：新潟工科大学 原子力耐震・構造センター 会議室

1) 議題

- (1) 水平加振試験見学
- (2) 事業経過とそのとりまとめについて
- (3) その他

2) 議事資料

①平成 27 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 第3回ヒアリング 資料 及び 添付資料

3) 議題に関する質疑等

- (1) 水平加振試験見学

新潟工科大学原子力耐震・構造センター内の振動台にて、配管系試験体の振動台試験の見学が行われた。

- (2) 平成 27 年度委託事業の経過について

議事資料①に基づき説明が行われた。以下に古屋先生からの質問とそれに対する回答を示す。

・sin 波のスイープ加振試験において、実際の加振時刻と加振振動数の関係は示すことは出来ないのか。

⇒振動台上の加速度計の記録に基づき、後日ご報告します。

・計測のサンプリング間隔は何 Hz か。

⇒200Hz で計測しています。

・アクリル板の支持構造物として3種類を用いているが、設定した理由は何か。

⇒振動試験では振動台の能力により支持構造物の強度が高い場合には破断しない可能性があったので、破断強度の異なる3種類を用意しました。

その結果、入力レベルと破断状況との関係はどうであったか。

⇒今回は、5つの入力加速度レベルでの試験を実施しています。開口25×15mmの試験片は比較的低い入力レベルで破断しましたが、開口20×15mmの試験片は比較的高い入力レベルまで破断しませんでした。また、中央に8mm残した試験片は両者の中間でした。

・配管系試験体の減衰についても検討する予定はあるのか。

⇒sin波入力による共振試験を実施していますので、その結果を整理して後日ご報告します。

・振動台試験において、配管の最大ひずみはどの部位で発生しその数値はどのくらいであったのか。

⇒2本の縦方向配管の根元部分で発生していますが、1本はロッドレストレイント部分です。最大ひずみ度は500 μ 程度です。

・配管のフラジリティ評価には、代表部位を選択することになるが、決めているのか。

⇒最も応力が大きくなる部位にしたいと思っています。

5. 2. 4 東京都市大学 古屋 治 教授におけるヒアリング (4)

日時：平成28年3月11日 10:00～12:00

場所：新潟工科大学 原子力耐震・構造センター

1) 議題

(1) 事業経過とそのとりまとめについて

(2) その他

2) 議事資料

①平成27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 第4回ヒアリング 資料

3) 議題に関する質疑等

1. 平成27年度委託事業の経過について

議事資料①に基づき説明が行われた。以下に古屋先生からの質問とそれに対する回答を示す。

・正弦波の掃引試験で5~16Hzを90秒間で行っているが、0.01Hzを1秒間で行うような試験によって安定した結果が得られている例があるので、参考にするとよいと思う。

⇒ 了解しました。

・固有振動数が試験結果と数値解析結果の比較において、2次振動数において両者に多少相違が見られるが、原因として考えられることを報告書に記載しておくこと。

⇒ 了解しました。

・解析による固有モード図には刺激係数も示してほしい。

⇒ 了解しました。

・試験結果から得られた減衰係数が示されているがスペクトルから求める方法以外に自由振動波形から求めることも行ってはどうか。

⇒振動台を手動で強制的に停止している試験結果などありますので、行ってみたいと思います。

・地震動を用いた応答計算の入力地震動は、原波を用いているのか、振動台上での計測記録をもちいているのか。

⇒原波を用いています。

振動台上の加速度記録を報告書に示すこと。

⇒了解しました。

・今回報告の振動台試験結果の波形は、40Hzのローパスフィルターを使用しているとのことであるが、フィルター処理していない波形も示すこと。

⇒報告書に付録として掲載します。

・配管の応力において、最大の応力等の位置は支持構造物の破断前後で変化するのか。

⇒ 大きな応力となるのは、2本の縦方向配管の根元部分となっています。それは、試験も解析も同様ですが、破断の影響を受けているかどうかについては、検討して報告書に記載するようにします。

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 27 年 10 月 14 日 16 時 00 分から 17 時 00 分

場所：東北大学大学院研究科附属先端材料強度科学研究センター

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・小川和洋教授に昨年度実施した室温における実験成果の概要と本年度の研究計画の説明を行い、研究計画に関する助言を得た。

2) 上記概要に関する質疑等

1. 昨年度の成果の概要

- 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。

2. 本年度の計画

- 試験温度 300°Cにおける亀裂進展試験および引張試験を実施する。なお、供試材、試験方法等は昨年と同一とするが、亀裂長さの測定はコンプライアンス法と顕微鏡法で実施する。
- 亀裂進展試験は $R=-1$ の条件を中心として $R>0$ の条件も含め、6~10 条件の進展試験を実施する。
- ΔK と亀裂進展速度 da/dN の関係を明らかにし、ASME 亀裂進展則および昨年度実施の室温の結果と比較する。
- 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。
- 国内外の最新知見収集等の調査を実施する。なお、既に日本機械学会 2015 年度年次大会および ATEM'15 については実施済みであることを報告した。

3. コメント

- 小川教授より、妥当な計画であるがタイトな工程になる可能性がありデータ点を絞って取得すべきとのご助言を頂いた。

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 11 月 11 日 10 時 00 分から 11 時 30 分

場所：原子力規制庁 18 階会議室

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、亀裂進展試験結果の中間報告を行い、質疑応答と今後の計画に関する助言を得た。内容について以下に示す。

山崎教授から、配布資料に基づき、原子力配管系や原子炉压力容器漢代等で用いられるフェライト鋼のひとつである JIS G3120 SQV2AG SR 鋼についてのここまで得られている成果の概要について報告を行った。

（1）引張試験

- 引張試験は 3 本実施し、それぞれ 0.2% 体力を測定した後、破断まで試験を行った。
- ひずみが 1 % を超えた程度で負荷速度を増加させたがその影響は認められない。
- 0.2% 耐力と引張強さから流動応力を求め (465.3Mpa), 疲労亀裂の進展試験条件を決定した。
- 室温における引張試験結果と比較すると、流動応力が約 50Mpa 低下、ヤング率も約 15% (210→180) 低下している

Q 図 2.2-1、2.2-2、2.2-3 の上の方のグラフは真応力と真ひずみを示したものか？

A 公称応力である。

（2）疲労亀裂進展試験

- 試験片形状は図 3.1-1 のとおり
- 掴み部の軸心がアライメントのずれを防ぐことができることから、座屈破壊を防ぎやすいためこの形状としている（現状、座屈は生じていない）

Q 試験は両振りで実施しているのか？

A 完全両振りで実施している。

Q 平面応力、平面ひずみについて亀裂の先端をマイクロで見えていくと亀裂先端は必ず平面ひずみになるものではないのか？

A 板厚内部では平面ひずみとなっている。しかし、十分板厚が薄くほぼ平面応力と仮定しても問題ない程度と考えている

- 試験装置は図 3.2-1 のとおり
- 今年度は高周波誘導加熱装置を用いた加熱で実験を行った（電気炉よりも高周波の方が、試験実施が容易なため、昨年度採用した直流電位差方は採用しなかった）
- 試験条件は表 3.3-1、3.3-2 のとおり

Q 顕微鏡で亀裂を見るときに酸化影響は？

A 酸化膜がほとんど形成されずに明瞭に観察できたことから、初回に鏡面研磨したのみである（再研磨なし）。

- 亀裂長さの測定はコンプライアンス法と光学顕微鏡で計測した
- 光学顕微鏡は試験体を取外して測定しているので数ミクロンレベルの精度が出ている

Q 亀裂測定時は荷重が0なのか？

A 試験体を取外しているので0である。

Q 亀裂が見えないことはないのか？

A 閉口はしているが、荷重が大きいので見にくいことはない。今後見にくい試験条件があったときはコンフォーカル顕微鏡を用いるので問題ない。

- 応力振幅は現状では4条件（①応力振幅と同じ、②10%減、③10%増、④15%増）で実験が終わっている
- 上記の4条件で実験した結果が図4.4-1のとおりである、横軸が光学顕微鏡で計測した亀裂長さ、縦軸がコンプライアンス法で計測した値である
- コンプライアンス法はばらつきが激しいため、今年度は光学顕微鏡方法を採用することとした
- 亀裂進展曲線の結果は図4.2-1のとおりであり、傾向としては以下のとおり
 - ・ 300℃の結果と室温の結果とほぼ同等
 - ・ ASTM規格の亀裂進展曲線に比べて実験結果の亀裂進展速度が低い
 - ・ 亀裂進展速度に応力振幅依存性が認められる
- ΔK_{eff} で亀裂進展速度を整理した結果は図4.2-2のとおり
 - ・ 300℃の結果はほぼ直線上に並ぶ
 - ・ ASTM規格と同一曲線上となる
 - ・ 室温に比べて高温の方が、亀裂の進展が早い、これは弾性係数の温度依存性に起因した変形抵抗の相違が原因と考えられる

Q 維持規格の方はASMEと違い応力比マイナスは考慮しないとしているが、今回の結果を見ると危険側になるという事か？

A 危険側になる。低荷重領域だと問題ないが、荷重条件が厳しくなり小規模降伏条件を逸脱すると最大では ΔK を2倍に見積もらないと危険という事になる。

Q 流動応力まで近づくと維持規格の考え方は成立しないのか？

A クロージャーレベルがマイナスになるので危険側という事になる。

(3) 今後の実験計画について具体的な条件を説明した。

- 仕様書にもとづき11の条件で実験を実施（1から4までは終了）する予定である（配布資料12頁）
- 室温での片振り条件での実験も実施する予定（亀裂の計測は光学顕微鏡）

- 早めに実験が進めばもう少し条件を変えて実施する
 - 1 1 の条件で想定した結果が出なければ流動応力よりも小さな 0.4 の条件で実施したい
- Q 応力が低いとサイクル数が多くなり、実験が長くなるが？
- A 10 ヘルツだと、半日で 30 万サイクル振れる、各条件で 10 点以上のデータを取っているの
で、1 条件 2～3 週間掛かる。実験のセッティングと計測に時間が掛かる。
- Q 今年追加した装置はあるか？
- A ①コンフォーカルカメラ（レーザ顕微鏡の一種）を追加した。光学顕微鏡で見られないも
のの測定に使用。
- A ②ダイナミックインデント：亀裂先端の押し込み弾性変位を測定する。高負荷条件と低負荷条
件において、亀裂回りのヤング率と硬さの分布を測る。データが揃えば論文化したい。
- Q 継ぎ手の試験片実験も行うのか？
- A 今のところ計画はない。どこに亀裂を入れればよいか難しい

5. 3. 3 東北大学 小川 和洋 教授におけるヒアリング（3）

日時：平成 28 年 3 月 1 日 15 時 20 分から 17 時 20 分

場所：新潟工科大学

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、亀裂進展試験結果の最終報告を行った。内容について以下に示す。

山崎教授から、配布資料に基づき、原子力配管系や原子炉圧力容器漢代等で用いられるフェライト鋼のひとつである JIS G3120 SQV2AG SR 鋼を対象として得られた本年度の成果の概要について報告を行った。

2) 報告および協議内容

- 山崎より、資料に基づき、本年度の実験結果の概要を説明した。内容は以下の通りである。
 - a) 300℃における 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は 386 MPa、引張強さ σ_B は 546 MPa、流動応力 σ_f は 465.3 MPa であった。一方、室温における 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。
 - b) 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。
 - c) 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。
 - d) 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、本実験における閾値について提示した。
 - e) 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。

- f) 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、線形破壊力学が適用できる範囲では、負荷応力にかかわらず統一的に評価可能であった。
- g) 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。
- h) 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。亀裂閉口点の負荷応力依存性を考慮した以下の亀裂進展則 (NIIT 線形推奨則) を提案し、実験結果を正しく予測できることを示した。
- i) 本研究で提案した NIIT 推奨則および NIIT 線形推奨則は応力比が $R = -1$ の条件下の実験結果に基づく提案であり、 $R = -1$ 以外の条件に対する適用性の検証、および、必要に応じて応力比効果の定式化が必要である。

● 下記のような質疑応答があった。

Q: $R = -1$ では座屈が起こっていないが、 $R < -1$ の実験は可能か?

A: ある程度の範囲であれば $R = -1.5$ 程度の条件は可能と考えられる。

Q: NIIT 亀裂進展則の閾値の物理的意味は?

A: 亀裂開閉口挙動が負荷応力で変化することにより、閾値が変化すると理解できる。

Q: PVP 等の学会発表は計画されているか?

A: 本研究成果については日本機械学会材料力学カンファレンスなどでの公表を検討したい。

● 小川教授より、下記のような評価を受けた。

- ・十分な成果と有益な知見が得られている。
- ・線形破壊力学の適用限界 (小規模降伏条件) については非常に興味深い成果である。
- ・NIIT 亀裂進展則や線形破壊力学の適用限界について、材料、試験片形状、応力比などの影響について検討をすることが望ましい。

● 実験設備見学

本実験を実施した実験設備について見学した。

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、3種の三次元地下構造モデル(JNES2007 モデル、JNES2013A モデル 及び JNES2013B モデル)を用いた地震動シミュレーションを、震央位置が異なる3つの地震を対象として実施し、その結果を鉛直アレー記録1点(5深度)、及び水平アレー地震観測点28点(地表)における地震動観測記録と比較した。この際には、アンダーソンの指標を用いて定量的な評価を試みた。

その結果、JNES2013A モデルでは、すべての周期帯域で最も適合性のよいモデルであった。JNES2013B モデルは、JNES2013A モデルに比べ短周期帯域の説明性が低いモデルであった。このことより、短周期帯域の地震動を説明するためには、水平方向の不均質性も考慮する必要があることがわかった。JNES2007 モデルは、周期1秒以下においてアンダーソンの指標が極端に低くなっており、これは、S波速度0.5 km/s未達の層をモデル化していないためと考えられた。

以上のように各モデルの特徴を明らかにすることが出来た。しかし、JNES2013A、B モデルは、地震記録の増幅特性を説明するようにチューニングされているモデルであるが、観測点近傍で実施された表面波探査の記録と比較すると必ずしも観測記録を十分に説明できていなかった。今後は、表面波探査記録や微動のH/Vスペクトルデータを用いて表層地盤の精度を向上させ、周期0.5秒以下のモデルの精度をさらに向上させる必要があると考えられる。

「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、複数の支持構造物の支持機能喪失を想定した配管系試験体の振動台水平加振試験を実施した。さらに、試験結果に基づき支持構造物が支持機能を喪失した場合のフラジリティ評価手法について検討した。

まず、水平加振試験として正弦波の掃引試験を実施した。支持構造物1,2が順次破断するに従い試験体の固有振動数が変化し、変化した固有振動数の共振により次の支持構造物が破断して行く様子を示すことができた。続いて地震波入力による振動台試験を実施した。大きな配管応力となる部位が支持構造物の破断に伴い変化することを確認することができた。さらに、振動試験を通して、健全な支持構造物として設定したロッドレストレイントの応力が、支持構造物1,2の破断後に増加していたことから、地震慣性力が再配分される現象を確認することができた。また、配管の最大曲げ応力は110N/mm²程度であり、健全性が維持されていたことが確認された。

支持構造物の破断を模擬した復元力特性を組み込んだ解析モデルを作成し、配管本体の荷重再配分が評価できるような時刻歴解析を実施し、地震応答解析手法の高度化を図った。さらに、損傷(破断)する支持構造物を予め削除した解析モデルを用い、応答スペクトルを用いる地震応答解析手法等による検討

を実施することにより、機能喪失する支持構造物を有する配管系のフラジリティ評価手法の提案を行った。

「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、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、300℃と室温における試験および調査を行い、昨年度の試験結果も加味して、米国機械学会(American Society of Mechanical Engineers、ASME)による「ASME 亀裂進展則」検証することを目的とし、引張試験および亀裂進展試験を実施した。また、合わせて米国原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission、NRC)推奨亀裂進展則についても検討した。その結果、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る実験結果が得られた。しかしながら、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。本実験の範囲では、亀裂開閉口挙動に基づく亀裂進展推奨則(NIIT 推奨則、NIIT 線形推奨則)を提案した。

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。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複数の配管支持構造物損傷時の耐震性能を評価することができた。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高度化のあらたな基盤の知見が得られた。