

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL.38

NO.4

DEC. 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第4号 (Vol. 38, No. 4), 1999年12月 (Dec. 1999)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 第3世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討  
.....橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 ..... 3  
(Examination of the Prediction Accuracy of the Third Generation Wave Prediction Model (WAM)  
.....Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI, Toshiyuki MAKI  
and Toshihiko NAGAI)
  
2. 水の制震効果を付与した直杭式栈橋に関する研究  
.....中原知洋・上部達生・三藤正明 ..... 49  
(A Study on Sea Water Seismic Response Control of Pile-supported Quay  
.....Tomohiro NAKAHARA, Tatsuo UWABE and Masaaki MITO)

## 水の制震効果を付与した直杭式栈橋に関する研究

中原知洋\*・上部達生\*\*・三藤正明\*\*\*

### 要 旨

兵庫県南部地震による港湾施設の被災の甚大さに鑑み、大都市直下の大地震に対する運輸基盤施設の耐震性を合理的に確保するための基礎的研究を行った。本研究では、代表的な港湾構造物である栈橋式構造物に水の制震効果を付与した制震技術の提案を行った。その構造は、栈橋上部工に設置する制震版の一部を水中に浸水し、制震版と水の連成効果により地震時に作用する慣性力の低減を図り、耐震性を合理的に高める構造である。実用化を図る前の基礎的研究として、模型振動実験および地震応答解析を実施し、主に制震効果の確認とメカニズムの把握について検討を行った。研究で確認された事実を下記に示す。なお、栈橋模型は、土留護岸、基礎捨石のない栈橋本体だけをモデル化した。

- ①制震版を設置することで、直杭式栈橋模型は上部工の応答変位および杭頭部のひずみがおおよそ50%低減し、その固有周期は増大した。
- ②制震版の応答加速度は、剛性が大きい場合に上部工と同位相を示し、小さい場合には逆位相を示す。その値は剛性が大きいほど大きい。動水圧も、剛性が大きいほど大きい。
- ③制震効果は、制震版の浸水長さが長く制震版の剛性が大きく、設置枚数が多いほど制震効果が大きいことが確認された。
- ④制震版を設置した栈橋模型の減衰の大きさは、制震版のない栈橋模型と比べて約3倍に増え、その値は約5%程度と推定される。
- ⑤制震版を設置すると栈橋の固有周期が長くなるが、その主な要因は制震版に生じる動水圧による付加質量効果である。
- ⑥実験により得られた制震効果等の結果は、地震応答解析で概ね説明できる。

キーワード：制震技術，栈橋式岸壁，減衰，付加質量，模型振動実験，地震応答解析

---

\* 運輸施設整備事業団派遣研究員

\*\* 構造部長

\*\*\* 五洋建設（株）技術研究所

運輸省港湾技術研究所

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

Phone: 0468-44-5030 Fax: 0468-44-0839 E-mail: nakahara@ipc.phri.go.jp

## A Study on Sea Water Seismic Response Control of Pile-supported Quay

Tomohiro NAKAHARA\*

Tatsuo UWABE\*\*

Masaaki MITO\*\*\*

### Synopsis

Realizing the terrible damage of port facilities by Hyogoken-Nanbu earthquake, The fundamental study have been made to investigate new seismic response control system which can economically maintain the function of the important port against big earthquakes occur near big cities. Through this study, the new seismic response control system was proposed. This system is as follows, the seismic response controlled panels are attached to deck and partly soaked in the sea water, damping force is caused by the effect between the panels and sea water, the damping force decreases inertia force and perform high seismic resistance economically. Before practical use, an experimental study using under water shaking table and a seismic response analysis have been made to verify effects of the new system and to investigate its mechanism. The facts obtained from these studies are as follows in which the model composed only piled-pier without retaining wall and rubble mound was used.

- ① The seismic response controlled panels attached to deck contribute to reduce deformation of deck and strain of pile head by more than where as 50% , and to increase natural period.
- ② As for the phase of the acceleration between the panels and the deck, stiffened panel makes the phase same, and soft panel makes the phase reverse. And stiffened panel makes the value of the acceleration and dynamic water pressure of the panels big.
- ③ The effects of this seismic response control is increased in proportion to the length of soaking part of the panels, stiffness of them and number of panels.
- ④ Compared with normal pier, the value of damping increase three times and is presumed around 5%.
- ⑤ The decreased of the pier's natural frequency is considered to be due to the added mass effects, which is generated by dynamic water pressure to the panels.
- ⑥ The seismic response analysis showed relatively good agreement with results of the experiment.

**Key words** : Seismic response control, Pill-supported quay, Damping, Added mass, Shaking table model test, Seismic response analysis

---

\* Corporation for Advanced Transport and Technology,

\*\* Director of Structural Engineering Division

\*\*\* Institute of Technology, PENTA-OCEAN Construction Corp. LTD.

Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport

Address: 3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-468-44-5030 Fax: +81-468-44-0839 E-mail: nakahara@cc.phri.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	49
1. はじめに .....	53
1.1 研究の背景 .....	53
1.2 研究の目的 .....	53
2. 直杭式栈橋への制震構造の適用について .....	55
2.1 構造形式と特性 .....	55
2.2 耐震性能照査の概要 .....	55
2.3 制震の概念 .....	56
2.4 直杭式栈橋への制震の適用の可能性と課題 .....	57
3. 模型振動実験による検討 .....	59
3.1 実験の内容 .....	59
3.2 実験結果 .....	72
3.3 制震版の効果の検討 .....	97
3.4 制震のメカニズムに関する検討 .....	102
3.5 模型振動実験に関するまとめ .....	120
4. 地震応答解析による検討 .....	123
4.1 地震応答解析の概要 .....	123
4.2 解析結果および結果の検討 .....	125
4.3 地震応答解析結果のまとめ .....	129
5. まとめ .....	131
6. あとがき .....	132
謝 辞 .....	132
参考文献 .....	132
記 号 表 .....	133
付 録 .....	135

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、わが国の外貿コンテナ貨物の約3割を取り扱う神戸港の港湾施設が壊滅的な被害を受けた。本地震は1923年の関東地震以降初めて発生した大都市直下の大地震であり、災害復旧費用は神戸港だけでも約5600億円に達した<sup>1)</sup>。また、関係者の鋭意努力にも拘わらず復旧には約2年を要し、わが国のみならずアジア全域の経済活動に深刻な影響を与えた。さらに、本地震では港湾施設は貨物や旅客の単なるターミナルに留まることなく、被災時には緊急物資の荷役や救助活動などの拠点として地震直後から機能を果たせることが求められた。

被災の甚大さに鑑み、港湾整備の将来のあり方について検討が進められ、設計理念や港湾の果たすべき機能について、大幅な見直しが進められてきている。港湾施設の設計に関しては、平成7年度後半から「技術基準」の見直し作業が進められ、平成11年4月に改訂が行われた<sup>2)</sup>。最近の技術的知見を踏まえた追加・修正が行われ、設計の自由度の確保、耐震性能を考慮した設計法が導入されている。この内容は仕様規定型設計から性能照査型設計への動き、国際基準の具体化、情報公開、公共工事のコスト削減等の社会要請を踏まえたものである。特に、耐震強化施設の耐震設計法は基準改正における重要な項目の一つであり、兵庫県南部地震に相当するような大都市直下の地震動（レベル2地震動）を設計地震動として定め、性能照査型設計法が明記された。

この新しい「技術基準」では港湾整備の基本方針に関しては、地震動の強さ（レベル1・レベル2）に応じた地震時の被災の程度、機能低下、復旧の難易度（費用および時間）を考慮して、施設の重要度に応じて耐震性能が規定されている<sup>3)</sup>。また、同一形式の構造で整備を進めた場合には、地震動の特性によっては岸壁が一様な被害を受け、機能が全て停止することが考えられている。このことから、地震時の応答特性の異なる構造形式を組み合わせ、構造形式の多様化に十分配慮することが求められる。つまり、将来新しく整備される港湾の構造形式ならび耐震性能を多様化し、大地震に対して柔軟に対応することで、緊急物資輸送の確保、経済社会活動の維持、防災拠点としての機能を確保する方向性が示された。

加えて、日本の港湾が国際ハブ港として競争力を確保していくためには、水深15m級の大水深の耐震強化岸壁を適宜整備することが必要不可欠である。一方、日本を

取り巻く経済状況は悪化し、公共施設の建設コストの縮減が叫ばれるなか、耐震性を合理的に確保することはより厳正に求められる傾向にある。

兵庫県南部地震による被災を踏まえた港湾施設の「技術基準」の改訂、将来の港湾施設整備のあり方、日本を取り巻く経済情勢を総合的に考えると、これからの港湾施設の建設および技術開発は、耐震性を確保した港湾の整備を図りつつ建設コストの縮減を目指さなければならない。以上が、将来の港湾施設に求められる「耐震性を合理的に高度化させる新しい耐震技術の開発」を目指す本研究の背景となっている。

### 1.2 研究の目的

前述したような港湾整備を取り巻く状況に鑑み、大都市直下の大地震に対する港湾施設の耐震性を合理的に確保するために、新しい耐震技術の開発を目的とする研究を行った。

港湾施設の耐震性を合理的に確保する手段の一つとして、免震および制震技術の港湾施設への適用が挙げられる。免震技術は、構造物を構成する部材の復元力を意図的に調整し、地震時発生する慣性力の低減を図る技術である。また、制震技術は構造物にエネルギー吸収装置を付加し、慣性力の低減を図る技術である。免震・制震技術は、土木分野に先駆けて建築分野で導入され、実施工において多数の実績を有し、設計法が確立されるとともに合理的な耐震性の高度化に寄与している。また、土木分野においても高架橋、道路橋、鉄道橋で適用が試みられており、設計法が整備され<sup>4)</sup>、実用化がかなり進んでいる。

一方、港湾施設に対して免震・制震構造が取入れられた事例は無く、その適用が遅れている。これは、港湾構造物が基本的に「抗土圧型」の構造であるために構造物が土圧を背負うことになり構造物が独立して振動することにはならないので、免震・制震化に適していないと考えられる。ただし、全ての港湾構造物が「抗土圧型」の構造ではなく、港湾施設の代表的な構造の一つである直杭式横棧橋は基本的には土圧を背負う構造とは異なる。したがって背後地盤の液状化やすべりによる地震時土圧の影響を受けにくく、かつ棧橋本体と背後地盤との間に十分な遊間がある場合には棧橋が独立して挙動を許されることから、十分に免震・制震構造の適用が可能である構造形式を有している。

そこで、港湾施設の代表的な構造の一つである直杭式横棧橋に制震構造を適用することを試みた。提案した構

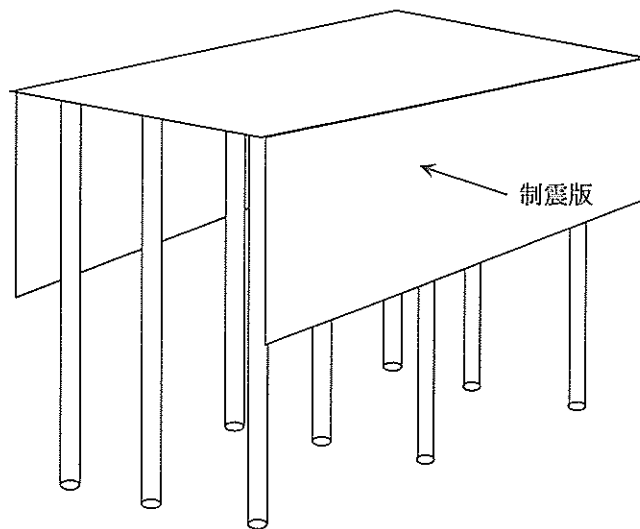


図-1.1 制震栈橋

造を図-1.1に示す。従来の栈橋の上部工に“制震版”を設置し水中に浸水させることで水と制震版の動的相互作用により生じる減衰効果つまり“水の制震効果”を付与する構造である。水の制震効果により、地震時に上部工に作用する慣性力を低減させ応答変位や杭頭部モーメントの低減を図り耐震性を高度化することが可能である。

この水に制震効果を期待する構造は、制震器を設置する従来の制震の考え方とは大きく異なるとともに、これまで港湾構造物に対して常に敵として振る舞う水を味方にする技術であるために、効果が確認され実用化されれば、栈橋にとどまること無く他の港湾施設の耐震設計法への波及効果は非常に大きいものと想像される。また、制震版を設置するだけで大きな効果が確認されれば、構造がシンプルだけにその対費用効果はかなり大きいものと考えられる。提案した制震構造の特徴をまとめると下記のとおりになる。

- 1) 港湾構造物へ制震技術の適用の初めての試みである。
- 2) 制震効果は水の付与する制震効果に起因する。
- 3) 動水圧や土圧を増大させ、港湾構造物に対して常に敵として振舞ってきた水を逆に味方にする技術である。
- 4) 制震版を上部工に設置するだけのシンプルな構造である。
- 5) 実用化されれば対費用効果に優れた構造である。

なお、研究で対象とする栈橋は、鋼管杭を用いた標準的な構造諸元を有する直杭式横栈橋であり、栈橋本体の動的応答特性に与える制震効果だけを対象としている。実

際の栈橋式岸壁では、背後に土留護岸を有したり、マウンドの捨石が斜めに敷設されている。このため土留護岸にマウンドが栈橋本体の動的応答に影響を与えるが、この影響については本研究では取り扱つかわない。

本研究では、模型振動実験および地震応答解析を行い提案した制震栈橋の制震効果を確認するとともに、制震のメカニズムを把握し、新しい耐震設計法を確立する。制震技術の港湾施設への適用に関する検討は、本研究が最初の試みであり、基礎的研究の色彩が強いが、本研究成果に基づき、最終的には港湾施設の新しい耐震技術の実用化を目指している。

本研究では、まず、2.において提案する制震栈橋の詳細について述べる。栈橋構造の振動特性や周辺の地盤・水との連成作用の観点から、制震技術の栈橋への適用性について検討し、期待される効果や解決すべき課題についてとりまとめる。つぎに、3.では提案された制震栈橋を対象とした大型水中振動台を用いた模型振動実験を示し、提案した制震技術の効果の確認を行う。実験結果に基づき、大きな制震効果を与える制震版の長さ(浸水長)・剛性・形状・設置形式等の条件を把握するとともに、制震効果のメカニズムについて実験的検討を行う。さらに、4.において、模型振動実験を対象として地震応答解析を実施し、制震効果を確認した実験結果との比較検討を行う。最後に、5.において模型振動実験および地震応答解析結果に基づき、制震効果を明らかにし、そのメカニズム、物理現象について検討を行う。本研究の目的をとりまとめると下記のとおりになる。

- ①制震構造栈橋の提案
- ②制震効果の確認および制震のメカニズムの把握
- ③制震構造の地震応答解析の模型振動実験結果による妥当性の検証

## 2. 直杭式栈橋への制震構造の適用について

ここでは、港湾施設の代表的構造形式の一つである直杭式栈橋構造の特徴を述べたうえで、さらに設計基準と提案する栈橋構造を照らし合わせながら、栈橋に制震構造を取り入れることが実際に可能であるのか検討を行う。また、適用にあたり検討すべき内容を取り上げて、耐震設計あるいは設計法の確立を目指す上での解決すべき課題についてとりまとめを行う。

### 2.1 構造形式と特性

通常の直杭式栈橋の設計例を図-2.1に示す。栈橋は、鋼直杭あるいは斜め組杭の上端に桁と床版が一体となる上部構造が結合された構造である。さらに、栈橋背後に矢板あるいは重力式の土留護岸が設けられ、栈橋と護岸は渡版で連結される。

栈橋本体の過去の震害統計からは、この構造形式はその他の港湾施設と比べて比較的耐震性が高いことが知られている<sup>5),6)</sup>。また兵庫県南部地震の被災調査でも、約75%（8岸壁中6岸壁）の栈橋式岸壁が軽微な被害に留まったのに対して、ケーソン式で軽微な被害に留まったのは約23%（127岸壁中29岸壁）であったことから、改めて耐震性の高いことが確認された<sup>1)</sup>。

このことは、栈橋構造が基本的には土圧を背負わないこと、したがって背後地盤の液状化やすべりによる地震時土圧の影響を受けにくいことから説明される。ただし、このことが成立するのは、縦栈橋係船岸および横栈橋係船岸であって、栈橋背後の矢板あるいは重力式の護岸と栈橋本体の間に十分な遊間があり、栈橋が独立して挙動を許されていることが前提となる<sup>7)</sup>。また、栈橋と背後の護岸の位置する地盤が全体的にすべりを生じないことが必要となる。この条件が満たされない場合には、背後の裏埋土の液状化に伴い護岸のせり出しが生じ、渡版を介して床版に想定外大きな荷重が伝わる。それと同時に、土留護岸ケーソンのせり出しが栈橋下の捨石層を移動させ、その結果、杭に直接側方土圧が作用して、地中で座屈が発生し、栈橋に大きな被害を生じる。兵庫県南部地震の際にはそれまでの地震事例には見られなかったような大規模な震害が報告されている<sup>8)</sup>。この被災事例として、神戸港高浜栈橋が図-2.2のように1.45m程度せり出した事例が報告されている<sup>9),10)</sup>。

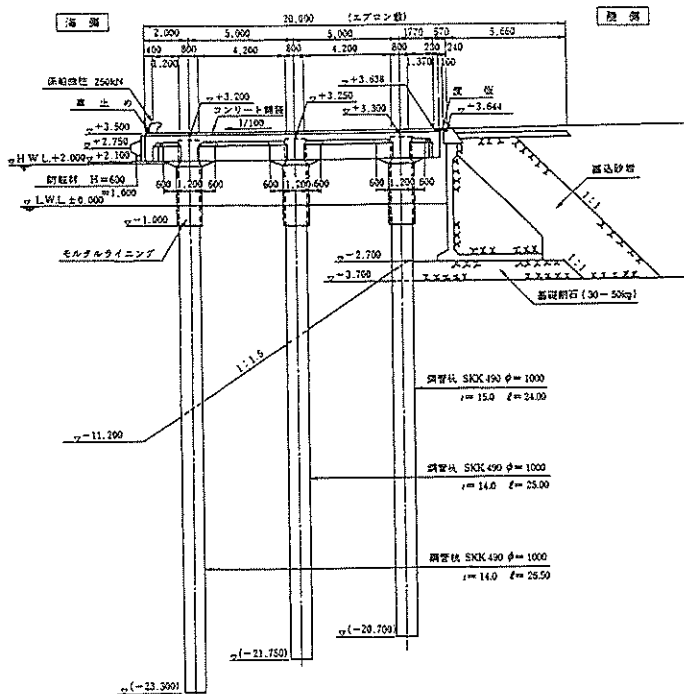


図-2.1 直杭式栈橋の設計例

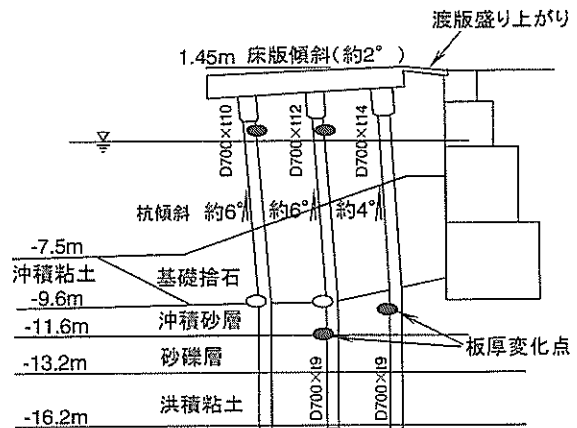


図-2.2 直杭式栈橋の被災例

### 2.2 耐震性能照査の概要

栈橋の耐震性が高いもう一つの要因として以下のことが挙げられる。栈橋に設計震度以上の地震力が作用し、



栈橋各杭の発生する応力が許容応力を越えるものであっても、それ以降各杭が順次に塑性ヒンジ等の局所的な損傷過程を経て構造物全体の終局状態に達すると考えられる。このことから、栈橋は全体の破壊に至るまでには構造的に余裕が大きいものと考えられる<sup>9)</sup>。この特性を考慮すれば、栈橋の終局時の耐力を照査し、局所的な損傷は許容するものの構造全体の崩壊には至らせない設計が可能となり、合理的な断面の設計が可能となる。新しい技術基準<sup>2)</sup>ではこの保有耐力照査を核とした耐震性能照査体系が採用されている。

(1) 照査の流れ

耐震性能照査のフローを図-2.3に示す。通常岸壁ではレベル1地震動に対して終局状態のみを照査する。耐震強化岸壁では、レベル1地震動に対しては「機能を損なわない」ことを、レベル2地震動に対しては「終局状態」を照査する2段階の照査となる。終局状態の照査とは、部分的な破壊は許容するものの構造全体の破壊を防止し、復旧に支障となるような過大な損傷や変形が生じないことを検討することである。言い換えれば、構造物を弾性

領域で考えるのではなく降伏から終局に至るまでの損傷過程を把握し、施設の要求性能に応じた損傷程度を満足するかどうかを照査することに他ならない。

(2) 要求性能

耐震性能照査とは、各々の栈橋の重要度や果たすべき機能に応じて、求められる性能が地震時および地震後に確保できるのか照査することである。栈橋の要求性能を設定する際の主要な指標は以下のとおりである。

- 1) 損傷程度
- 2) 最大変位
- 3) 残留変位

まず、損傷度に関しては、鋼管杭が地中部において全塑性化し、塑性ヒンジあるいは座屈が発生する時点が標準的な終局状態の目安となる。これは地中部に座屈が生じた場合には発見することが難しく、また補修等の対策も困難であることによる。さらに上部工においては、せん断破壊が生じると耐力が急激に低下することから、せん断破壊を生じさせないことが望ましい。つぎに、最大変位の照査に関しては、栈橋と護岸の間の距離が関係する。栈橋と護岸の距離が狭まる変形モードでは、渡版により想定外の過大な水平力が上部工に伝達するのを防ぐ必要がある。また、距離が広まる変形モードでは、渡版が落下することを防ぐ必要がある。さらに、残留変位に関しては、船舶の種類や荷役の形態等により求められる性能が異なるために明確な値を示すことはできないが、重力式岸壁等で目安となる値を参考に設定する。

この他にも周辺地盤の変形を完全に抑えることが困難な場合等では、特に重要な施設について数値解析等により地盤の変形程度を定量的に検討し、これを性能判断の要因としている。

2.3 制震の概念

水の制震効果に関する理解を深めるために、制震技術について説明を行う。制震の概念と原理による分類を図-2.4に示す<sup>11)</sup>。制震という呼称は、パッシブコントロール（受働的制御）としての震動吸収器と、アクティブコントロール（能動的制御）との両方の意味で用いられている。どちらも主に風や交通による振動の低減に用いられることが多かったが、最近では地震による振動の低減に対しても適用する努力が払われている。また、上記以外にも最近では、次の場合に制震という語は使われる。

「構造物の部材構成を変更することなく、付加的にエネルギー吸収の装置を設けることによって慣性力の低減を図る」。提案した制震栈橋構造にこの考え方を適用すれば、従来の栈橋の構造を変更することなく、取り付けた制

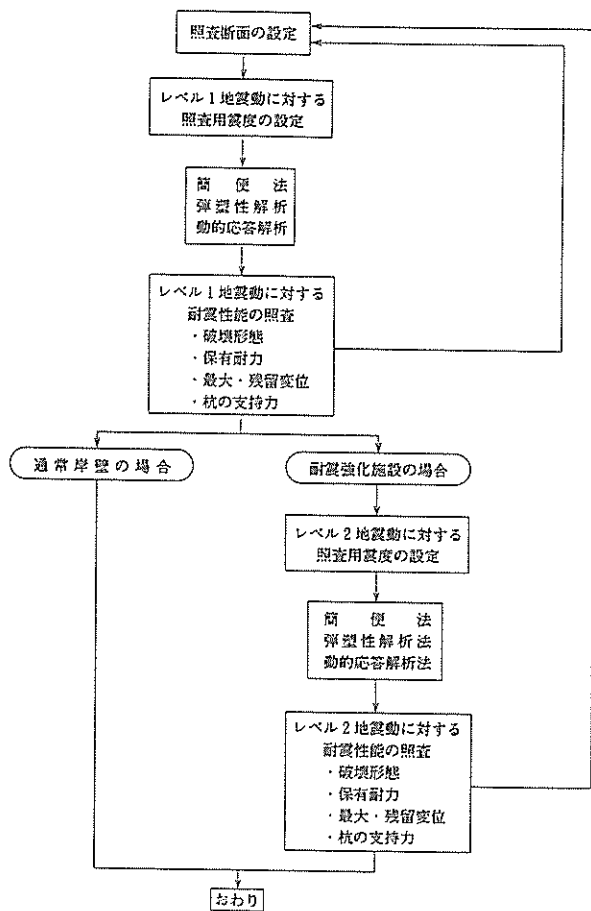


図-2.3 栈橋の耐震性能照査のフロー

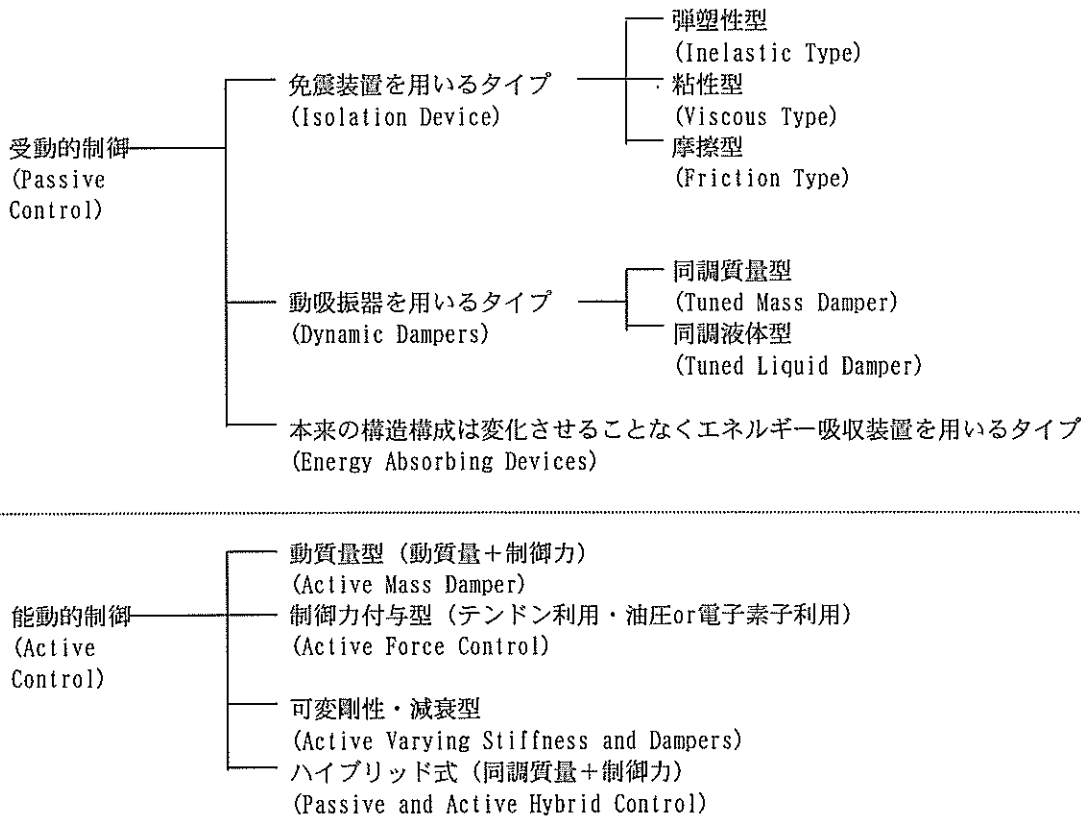


図-2.4 免震・制震の概念と原理による分類

震版が、付加的に設置されるエネルギー吸収装置ということになる。

つぎに、地震力の低減効果を有する免震と制震の違いについて述べる。免震とは「構造物を構成する部材の復元力特性を意図的に調整し、地震時に発生する慣性力を低減しようとする設計手法」である。具体的には、復元力特性を調整するために免震装置を用い、免震装置の柔軟性を利用して構造系の固有周期を伸長して構造系の応答を長周期化するとともに、免震装置の非線形の復元力による履歴減衰などを利用して構造系の減衰性能を増加する効果を期待する技術である。つまり、本来は一元化した部材であったり、一般の支承で連結されている部分を免震装置に置き換えることによって、構造の剛性を柔軟な方向へ変化させることである。一方、制震は前述したように本来の構造構成は変化させることなく、エネルギー吸収装置を付加することにより慣性力の低減を図っている。

## 2.4 直杭式栈橋への制震の適用の可能性と課題

ではどのような制震装置が栈橋には適しているのか。制震装置の信頼性と安全性の観点から、制震装置を採用する場合の条件として以下の点が挙げられる。

- 1) 制震装置を採用した全体系の力学特性が明確なこと
- 2) 地震時荷重以外の荷重（活荷重，温度，波浪等）に対して十分な安全性を確保できること
- 3) 制震装置の機構がなるべく単純，コントロール可能で明確な力学特性を有すること
- 4) 取り付け部材を含め，十分な耐久性を有すること

上記の条件に基づき直杭式栈橋を制震化する場合には、チューンドマスダンパー(TMD)，あるいはチューンドリキッドダンパー(TLD)と呼ばれるタイプの制震を適用することが有効である可能性がある。これらの制震装置の原理は、以下のとおりである。構造物にはその剛性や質量によりそれぞれ決まった固有周期があり地震時には固有周期にしたがって振動する。この性質を利用して、制震装置ではこのような揺れに対して制震装置の付加質量体が

その揺れを打ち消すように動き振動エネルギーを吸収する。TMDは付加質量体として剛体を利用し、TLDは水の質量を利用する。

ここでTLDタイプの原理を拡張して考えると、栈橋式係船岸の周辺には水があるので、制震器を省略して内部隔壁に相当する版を係船岸の杭間に設けることが考えられる。内部隔壁に相当する版間内の水の挙動による制震効果を期待すれば、栈橋の構造特性を変えることなく、荷重に対しても十分安全であり、単純な、そして耐久性を有する制震構造が確立される。ただし、水と版の動的相互作用の現象を正確に把握する必要があるために、その力学特性を制御することに困難が伴うことが予想される。特に、制震装置の付加質量体は構造物の振動を抑制させる向きに作用するが、水と版の相互作用により生じる動水圧による付加質量は構造物の振動を増幅させる向きに作用するとも考えられることから、何らかの手段を用いて抑制させる向きに作用させる必要があると考えられる。

さらに、応答変位の低減に寄与すると考えられる減衰が栈橋についても効果を及ぼすのか検討を行う必要がある。

提案した制震栈橋は、内部隔壁に相当するものを杭間に設けるのではなく、上部工に設置した構造とした。これは、施工性と保守作業の簡易化を図るためであり、また上部工に抑制力を直接作用させた方が制震効果が大きいと考えたためである。

以上述べたように、ここでは、直杭式栈橋の特性、栈橋に求められる性能、制震の概念、適応への条件等を総合的に検討して、「水の制震効果を付与した直杭式栈橋構造」を新たに提案した。

本研究では、提案した制震栈橋の制震効果の確認ならびにそのメカニズムを把握するために、模型振動実験および地震応答解析を実施する。これらの結果に基づき、直杭式栈橋への制震構造の適用の可能性と課題について検討を行い、新しい耐震構造および耐震設計法の確立を目指す。

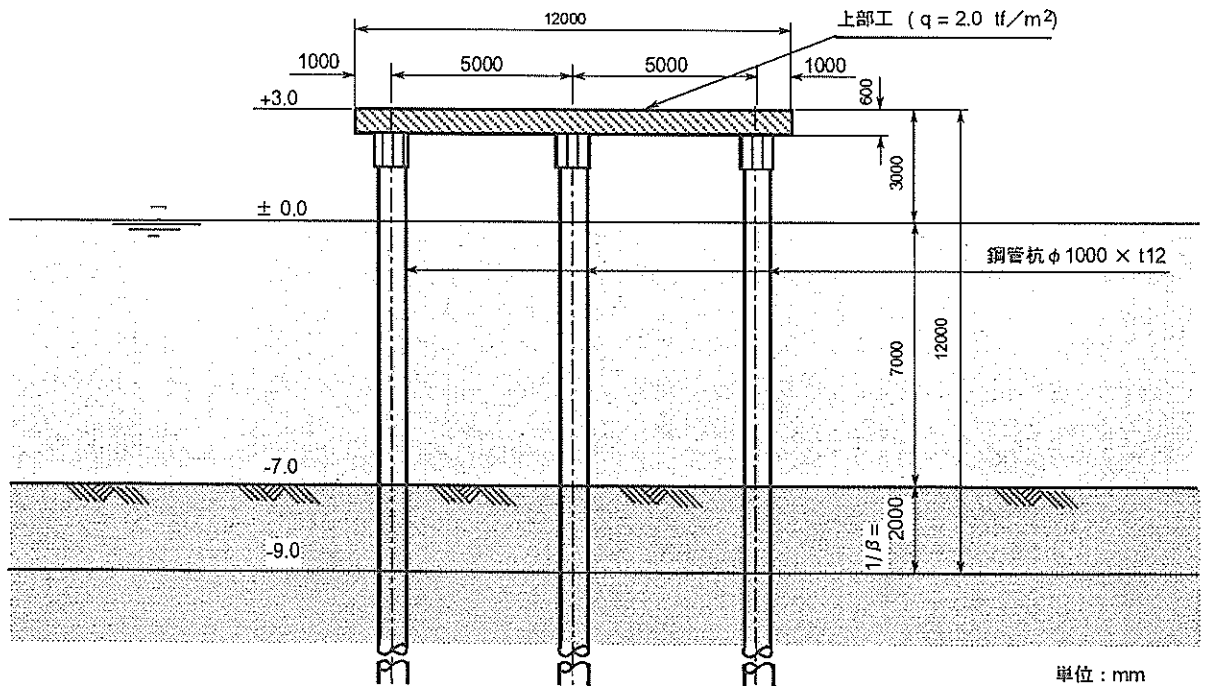


図-3.1 直杭式縦栈橋の標準断面図

### 3. 模型振動実験による検討

#### 3.1 実験の内容

本研究は、水が付与する制震効果に関する研究としては初の試みであるために、参考とすべき研究報告はほとんど無く、その効果やメカニズムについての確認が全く無い状態から研究が開始された。そのために研究の方向性を明確にするための模型振動実験を実施し、主に下記に示す2つの事項の確認を行った。

##### 1) 制震効果の確認

##### 2) 制震メカニズムの明確化

模型振動実験により、計測結果から制震効果を数値的に捉え、制震版と水の間に生じている物理現象を把握することで、制震効果のメカニズムに対する検討が可能となる。また、制震版の条件を変化させて実験を行うことで、大きな制震効果を及ぼす制震版の形状や配置等に対する考察を深めることができる。さらに、模型振動実験で計測された結果を対象とした地震応答解析を行い、数値解析的な検討を行うことで制震効果の論理的根拠付けやその効果がより明確なものとなる。このことから模型振動実験は、研究を効率的かつ効果的に進める上での貴重な基礎データを提供するとともに、さらに研究が進んだ段階では新しい耐震構造の検討や耐震設計法の確立に寄与する新たな知見を与えてくれる。

##### (1) 対象とする栈橋の標準断面

模型振動実験で対象とした栈橋の標準断面を図-3.1に示す。本実験では、1ブロック(12m×23m)に鋼管杭をそれぞれ15m間隔に縦3列×横5列の計15本を打設した水深-7.0mの直杭式栈橋を対象とした。選定した断面は既設の栈橋式岸壁の土留護岸および捨石部を除いたものである。護岸を形成する構造の中で、土留め護岸や捨石層は対象とせず直杭式栈橋の構造のみを対象としたのは、構造を出来るだけシンプルにすることにより、制震効果の要因を捉え易くして栈橋本体の動的応答による耐力を照査対象とするためである。

通常、栈橋設計の実務では、Changの式から推定される仮想固定点を用いて、実海底面より $l/\beta$ 下方の位置を固定点とするラーメンモデルに栈橋断面を置換して行われている。ここでの仮想固定点 $l/\beta$ は2.0mである。この場合、仮想固定点はC.D.L-9.0mの地点となる。また、海面はC.D.L±0.0mとし、栈橋上部工天端高はC.D.L+3.0mとした。なお、上部工の単位面積当たりの重量は $q=2.0\text{ t/m}^2$ とした。また、2次元の弾塑性解

析プログラムTDAPを用いて対象栈橋の固有周期を数値解析的に求めた結果、固有周期は約0.52sであった。既往の研究<sup>12)</sup>によれば98事例の実栈橋を対象とした固有周期の頻度分布は、0.45~0.55sが最も多く、約8割の栈橋が0.40~0.70sに集中している。このことから、実験で対象とした栈橋は平均的な固有周期を有しており、対象断面としては妥当であると判断される。対象栈橋の杭および上部工(床版)の諸元を表-3.1および表-3.2にそれぞれ示す。

表-3.1 実構造栈橋杭の諸元

種別	定数
杭外径d1 (cm)	100.00
杭内径d2 (cm)	97.60
肉厚t (cm)	1.2
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	454544
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	954542417110

表-3.2 実構造栈橋上部工(床版)の諸元

種別	定数
幅B (cm)	1200.0
奥行W (cm)	2300.0
高さH (cm)	30.0
単位面積重量q (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.2
上部工質量M (kg)	552000.0

##### (2) 相似則

実験で適用した相似則<sup>13)</sup>を表-3.3に示す。この相似則に従い栈橋模型は、杭に関しては曲げ剛性EI、上部工に関しては質量の相似則をそれぞれ満たしている。対象とする現象を栈橋の振動特性とし、さらに現象をよりシンプルにするために地盤の作製を行わないことから線形の相似則を用いた。

表-3.3 相似則

物理量	表記	実物/模型	縮尺
長さ	L	$\lambda$	8.0
時間	T	$\lambda^{0.5}$	2.8
ひずみ	$\epsilon$	$\lambda/\lambda$	1.0
質量	M	$\lambda^3$	512.0
曲げ剛性	EI	$\lambda^5$	32768.0

### (3) 構造模型

実験模型は、長さに関する縮尺比を $\lambda=8.0$ （実物／模型）として作製されたものであり、用いた線形の相似則に従い、杭に関しては曲げ剛性 $EI$ 、上部工（床版）に関しては質量の相似則をそれぞれ満たしている。模型栈橋の杭および上部工（床版）の諸元を表-3.4、表-3.5にそれぞれ示す。実構造栈橋と模型栈橋の各諸元が相似則を満足することの検証を行うために、表-3.6に実構造栈橋および模型栈橋の杭の曲げ剛性と上部工の質量および固有周期を併記し、各々の比を求めた。表-3.3に示す相似則の剛性と質量に関する縮尺比の値と比較すると、杭の曲げ剛性に関しては、規格品の鋼管を使用したために、約15%程度実構造栈橋杭の方が高めであるが、固有値解析結果から得られた固有周期の両者の比は時間に関する相似則を概ね満たすことから、実験的には妥当な値と思われる。上部工（床版）の重量に関しては相似則を満たしている。

### (4) 予備実験による栈橋模型の検討

本実験の前に予備実験を行い、栈橋模型において、模型地盤が必要なのか否かの検討を行った。この予備実験では、制震版による効果の検討が若干不明確となるような実験結果となった。実際の栈橋の地震時応答特性に与える地盤の影響が大きいことが推測されるが、今回の実験ではあくまで制震版の効果に主眼をおいていたので、予備実験の結果を踏まえて、本実験では地盤のない栈橋本体だけの模型とした。この場合、実際の構造物との整合性を確保するために、Changの式から求められる仮想固定点の位置までを杭の長さとし、杭下端は振動台上に固定した。図-3.2に実験に使用した栈橋模型を示す。写真-3.1には水槽内の振動台上の栈橋模型を示す。この振動台については後述するが、模型の所定の位置まで水槽内に水を満たすことができる水中型の大型振動台である。

### (5) 制震版

提案した新しい栈橋の制震構造は、制震版を栈橋に設置し、水と制震版の相互作用による制震効果を期待するものである。模型振動実験で使用した制震版には厚さ $t=2\text{mm}$ の鉄板を用いた。制震版に剛性を持たせるために厚さ $t=5\text{mm}$ ×幅 $W=24\text{mm}$ の鉄板を帯鉄として制震版の左右端部に2枚取り付けた。また、制震版の長さを95cmから81cmに変化させた場合に制震版自体の固有振動数を調整するために、制震版の下端に付加質量として鉄板（6.69kgf）を設置した。しかし、81cmの場合に実験で計測された制震版の固有振動数が解析値とは異なり、栈橋自体の固有振動数を制御することが難

しかったために、67cmとさらに短くした場合には錘を設置しなかった。表-3.7, 3.8, 3.9に長さが95cm, 81cm, 67cmの制震版1枚の諸元を示す。表-3.10, 3.11, 3.12に長さが95cm, 81cm, 67cmの帯鉄板1枚の諸元を示す。実験では制震版の剛性を大きい・小さい（硬い・軟い）の2段階に変化させて行うために、制震版と上部工にブレース（補強材）を設置して剛性を調整した。ブレースにはアルミニウム製角パイプを用い制震版1枚あたり2本ボルトで連結し設置した。図-3.3に制震版および帯鉄の設置状況、図-3.4にブレースの取付け状況、写真-3.2に制震版およびブレースの設置状況をそれぞれ示す。さらに、図-3.5に栈橋模型に制震版を設置した状態の正面図および側面図を図示し、制震版を5枚設置した状態の栈橋模型を写真-3.3および写真-3.4にそれぞれ示す。

### (6) 実験条件および実験ケース

表-3.13に実施した模型振動実験の全体の流れをまとめて示す。研究の対象となる現象が複雑となることから、予想されたことから、所要の目的に沿った実験を行うために、実験は予備実験と本実験の2段階に分けて実施した。さらに、この本実験を共振実験と正弦波加振実験に分けて実施した。まず、共振実験で栈橋および制震版の振動特性に関する検討を行い、固有振動数等を十分に把握した後、続いて正弦波加振実験を実施した。共振実験結果から、正弦波加振に使用する加振入力加速度および加振周波数等の実験条件を決定し、精度の高い実験を効果的に行った。本実験で実施した、a) スウィープ波加振による共振実験、b) パルス波加振による共振実験、c) 正弦波加振実験の実験目的および加振条件を説明し実験の概要を以下に述べる。

#### a) スウィープ波加振による共振実験

栈橋および制震版からなる栈橋模型全体の振動特性を把握するためにスウィープ波を入力加振波とした共振実験を行った。この実験の目的は以下に示すとおりである。

- 1) 栈橋全体の振動特性に及ぼす水の影響の検討
- 2) 加速度応答倍率 $S_a$ の計測
- 3) 栈橋全体の固有振動数 $f_1$ の計測

水が栈橋の振動特性に及ぼす影響は、水中振動台の水槽に水を注水する前と後に共振実験を行うことで検討した。振動特性は入力に対する栈橋上部工の応答加速度の応答倍率 $S_a$ と振動数と与えられる共振曲線により検討した。共振曲線から固有振動数 $f_1$ と粘性減衰定数 $h_v$ が得られる。実験では制震版の長さや剛性を変化させた実験を実施したが、この実験により制震版の条

表-3.4 模型栈橋杭の諸元

種別	定数
杭外径d1 (cm)	4.86
杭内径d2 (cm)	4.22
肉厚t (cm)	0.32
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	.11.8
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	24816978

表-3.7 制震版一枚 (95cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	57.0
長さL (cm)	95.0
厚さt (cm)	0.2
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.038
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	79800.0
質量M (kg)	8.512

表-3.8 制震版一枚 (81cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	57.0
長さL (cm)	81.0
厚さt (cm)	0.2
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.038
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	79800.0
質量M (kg)	7.258

表-3.9 制震版一枚 (67cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	57.0
長さL (cm)	67.0
厚さt (cm)	0.2
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.038
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	79800.0
質量M (kg)	6.003

表-3.5 模型栈橋上部工 (床版) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	150.0
奥行W (cm)	287.4
高さH (cm)	3.2
単位面積重量q (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.025
上部工質量M (kg)	1077.4

表-3.6 実構造栈橋と模型栈橋の比較

種別	実構造	模型	実構造/模型
曲げ剛性 (kgf・cm <sup>2</sup> )	9.55E+11	2.48E+07	38463
上部工質量 (kg)	5.52E+05	1.08E+03	512
固有周期 (s)	0.519	0.194	2.68

表-3.10 帯鉄板一枚 (95cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	2.4
長さL (cm)	95.0
厚さt (cm)	0.5
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.025
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	52500.0
質量M (kg)	0.896

表-3.11 帯鉄板一枚 (81cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	2.4
長さL (cm)	81.0
厚さt (cm)	0.5
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.025
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	52500.0
質量M (kg)	0.764

表-3.12 帯鉄板一枚 (67cm) の諸元

種別	定数
幅B (cm)	2.4
長さL (cm)	67.0
厚さt (cm)	0.5
密度ρ (kg/cm <sup>3</sup> )	0.00786
ヤング係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	2100000
断面2次モーメントI (cm <sup>4</sup> )	0.025
曲げ剛性EI (kgf・cm <sup>2</sup> )	52500.0
質量M (kg)	0.632

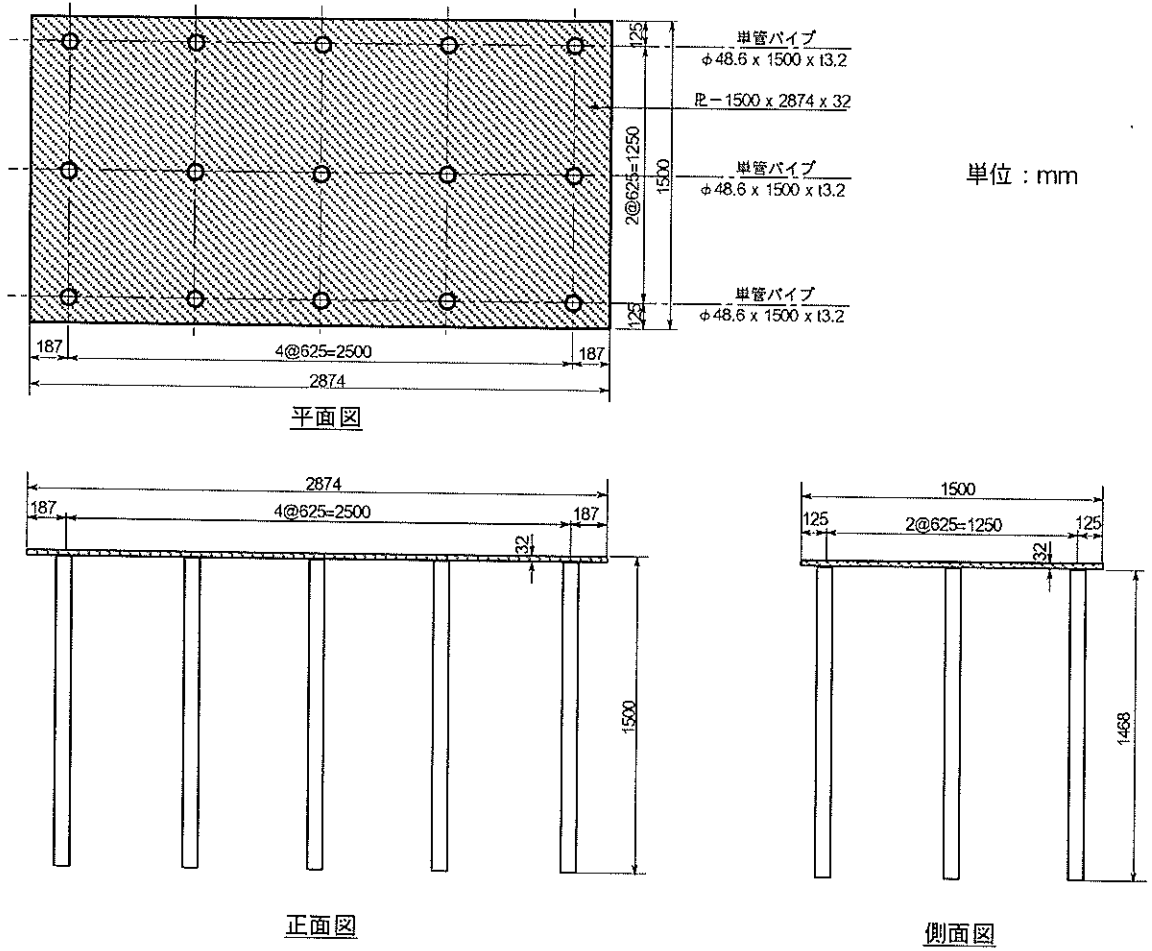


図-3.2 栈橋模型

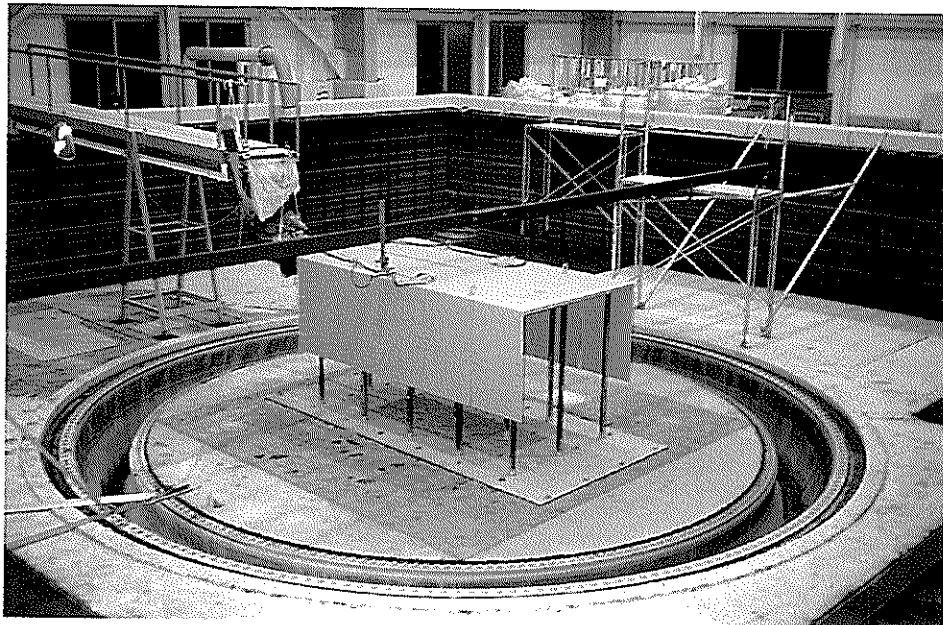


写真-3.1 栈橋模型の振動台への設置状況

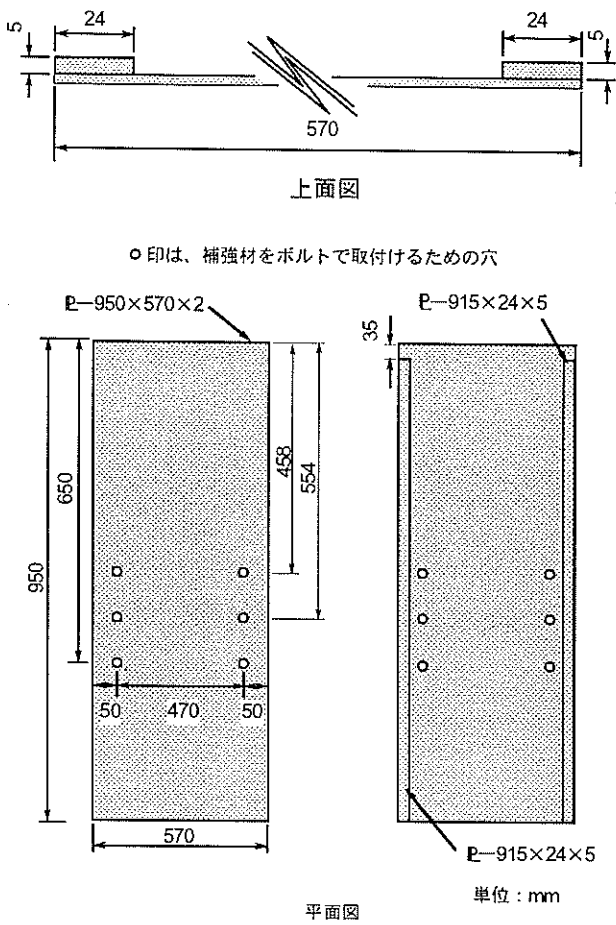


図-3.3 制震版および帯鉄設置状況

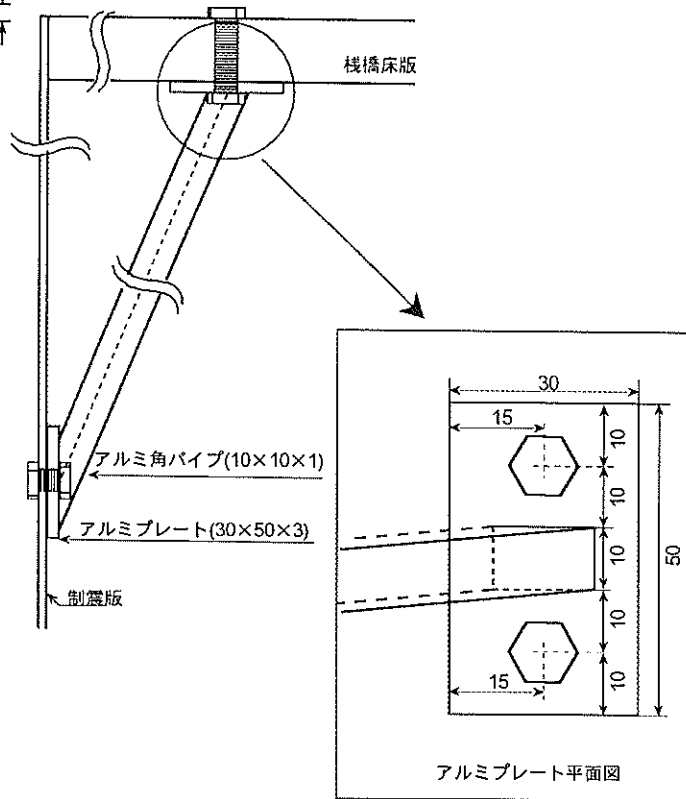


図-3.4 ブレースの取付状況

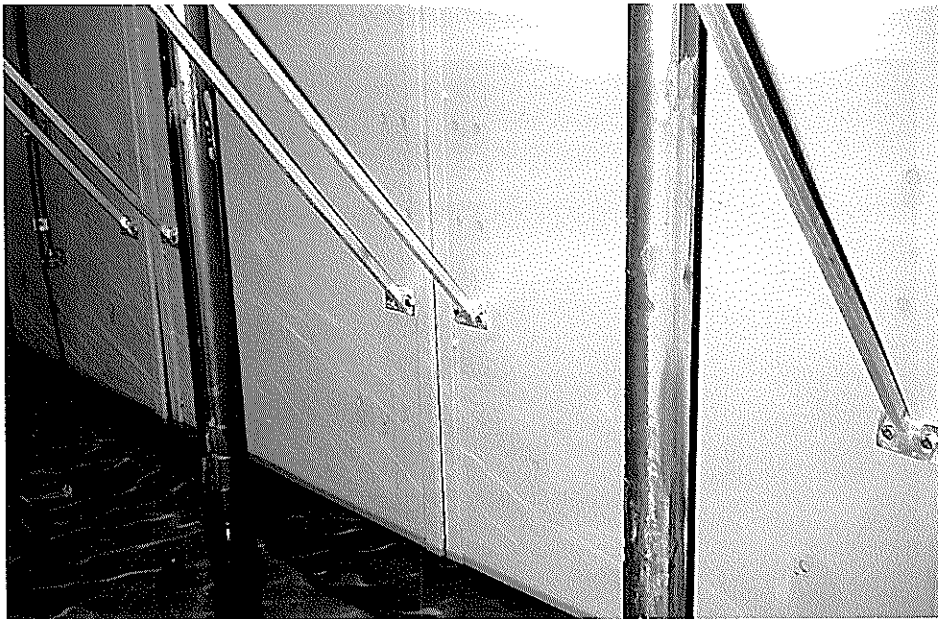


写真-3.2 制震版およびブレースの設置状況



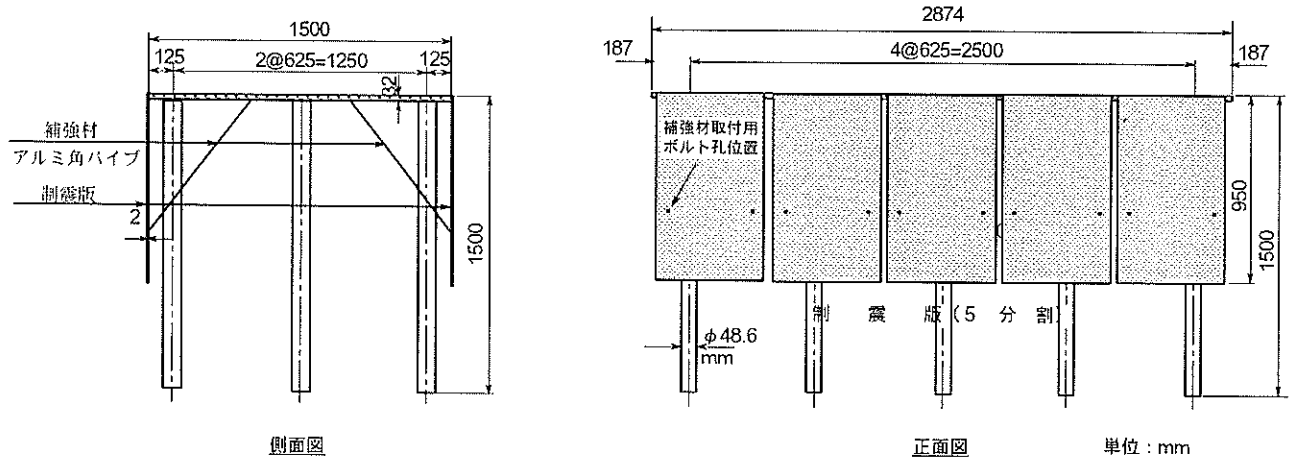


図-3.5 制震版の設置状況（5枚）

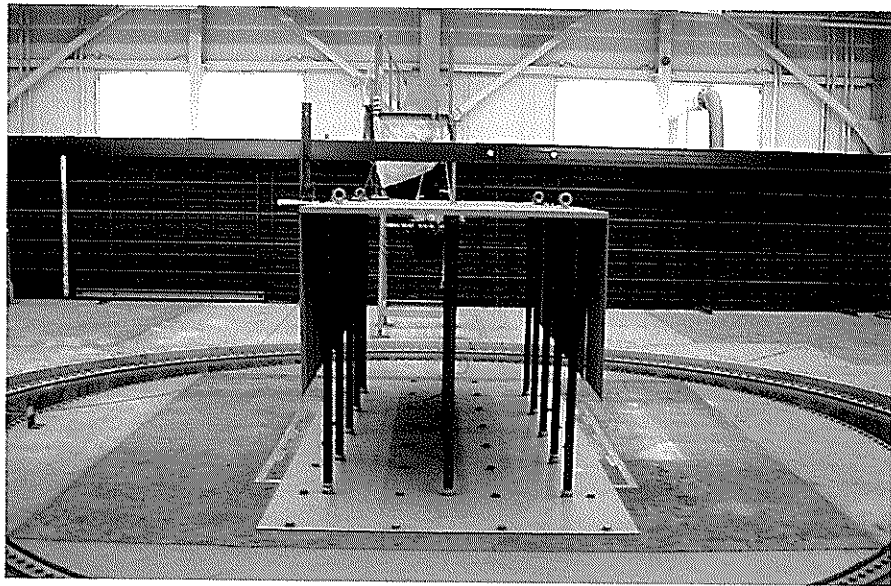


写真-3.3 制震版の設置状況（側面）

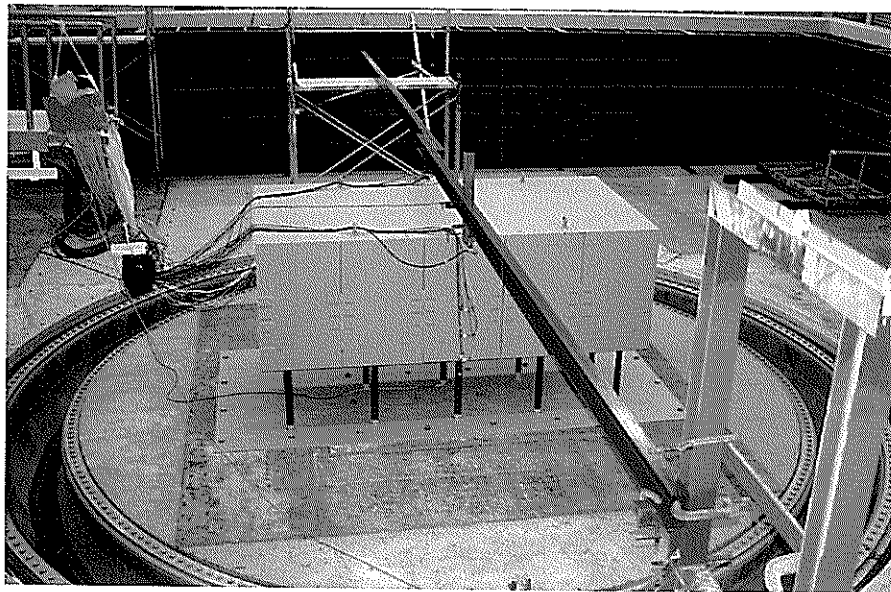


写真-3.4 制震版の設置状況（正面）

表-3.13 実験全体の流れ

<p>1. 予備実験：実験条件の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 栈橋模型が予想した固有振動数等の動特性を有していることの確認.</li> <li>・ 制震版の固有振動数や形状が制震効果に及ぼす影響の把握.</li> <li>・ 模型杭の振動台への固定条件の確認.</li> <li>・ 制震版のブレース（補強材）の検討</li> <li>・ 地盤の有無の決定.</li> <li>・ 加振条件の検討.</li> <li>・ 制震効果の確認.</li> </ul>
<p>▼ 実験条件の確認</p>
<p>2. 本実験：制震効果およびメカニズムに関する検討</p>
<p>A. 共振実験</p> <p>a) スウィープ波加振による共振実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 栈橋および制震版の模型の振動特性についての検討.</li> <li>・ 加速度応答倍率 <math>S_a</math> の計測.</li> <li>・ 栈橋全体の固有振動数 <math>f_1</math> の計測.</li> <li>・ 減衰定数 <math>h_v</math> の検討のための計測.</li> </ul> <p>b) パルス波加振による共振実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主に制震版の振動特性についての検討</li> <li>・ 制震版自体の固有振動数 <math>f_2</math> の計測.</li> </ul>
<p>B. 正弦波加振実験</p> <p>c) 正弦波加振実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 変位・ひずみ・加速度・動水圧の測定.</li> <li>・ 定常状態での「水-制震版-栈橋」連成系の動的特性と制震効果の確認.</li> <li>・ 制震効果の確認.</li> <li>・ 制震メカニズムの把握.</li> <li>・ 制震効果が大きい制震版の条件の把握.</li> </ul>

件と制震効果の関係を把握した。また、共振曲線より得られる減衰定数  $h_v$  と固有振動数  $f_1$  を用いて制震効果のメカニズムを検討する。

スウィープ波加振では、最大加速度を30Galに固定した正弦波の振動数を2Hzから30Hzまで漸増させて入力した。スウィープ波加振は低周波数の正弦波を含むので入力波のエネルギーが大きくなり、非線形性を有するシステムへの使用には注意を要するが、振動特性を明確に把握できる。

b) パルス波加振による共振実験

制震栈橋は「水-制震版-栈橋本体」の連成系である。ブレースの無い制震版の場合は、制震版が上部工からぶら下がった状態であり、制震版が栈橋本体と異なった振動特性を示すことが想定される。制震版を含めた栈橋全体の振動特性に対し、制震版の振動特性がどのように影響しているかを把握するために、パルス波加振による共振実験を行った。この実験の目的は以下に示すとおりである。

- 1) 制震版の振動特性に及ぼす水の影響の検討
- 2) 制震版自体の固有振動数  $f_2$  の計測

入力するパルス波の最大加速度は100Galとした。パルス波は周波数領域で全ての周波数に対して常に一定値をとる波形を、時間領域に変換したものである。スウィープ波加振と同様に周波数応答特性が確認できる。ただし、パルス波はスウィープ加振と比較して入力エネルギーが小さいために非線形性が大きな構造の振動特性の把握に一般的に適している。こうしたパルス波加振による共振実験の特徴から、制震版自体の振動特性の把握のため共振実験ではパルス波加振を実施した。

c) 正弦波加振実験

定常状態における「水-制震版-栈橋本体」の連成系に生じる応答特性について検討を行い、制震効果の確認とそのメカニズムに関する検討を行うために正弦波を用いた加振実験を行った。正弦波実験では、上部工および制震版等の要所に適宜計測器を配置して応答変位、ひずみ、加速度、動水圧の計測を行う。以下に正弦波加振の主な目的を示す。

- 1) 定常状態における「水-制震版-栈橋本体」の連成系に生じる振動現象の検討
- 2) 制震効果の確認およびそのメカニズムの検討
- 3) 制震版の条件が制震効果に及ぼす影響の把握

予備実験から制震版による応答値の低減および固有振動数の変化が確認された結果を踏まえ、正弦波加振実験では制震効果のメカニズムをより明確にするために制震版の条件を下記の3要素に絞り込み、その条件をパラメトリックに変化させて、それらが制震効果に及ぼす影響を観察した。

- 1) 制震版の長さ、つまり制震版の浸水長を大・中・小の3段階に変化させる。
- 2) 制震版の剛性を大・小の2段階に変化させる。
- 3) 制震版の設置枚数を5枚・3枚の2段階に変化させる。

正弦波加振実験の実験ケース一覧を制震版等の実験

表-3.14 実験ケース一覧

実験 ケース	制震版 の長さ (cm)	制震版の剛性 (固有振動数)		制震版 の枚数 (枚)	入力条件		実験 管理名	備考
		ブレース無し (剛性が小)	ブレース有り (剛性が大)		入力最大 加速度	入力 波数		
①	—			—	30, 100Gal	20	NN	通常直杭式栈橋
②	95	○		5	100Gal	10	LL5	制震版が長く、剛性が小さく、5枚
③	95		○	5	100Gal	10	LH5	" , 剛性が大きく、5枚
④	81	○		5	30Gal	20	ML5	制震版が中位、剛性が小さく、5枚
⑤	81		○	5	30Gal	20	MH5	" , 剛性が大きく、5枚
⑥	67		○	5	30Gal	20	SH5	制震版が短く、剛性が大きく、5枚
⑦	67		○	3	30Gal	20	SH3	制震版が短く、剛性が大きく、3枚

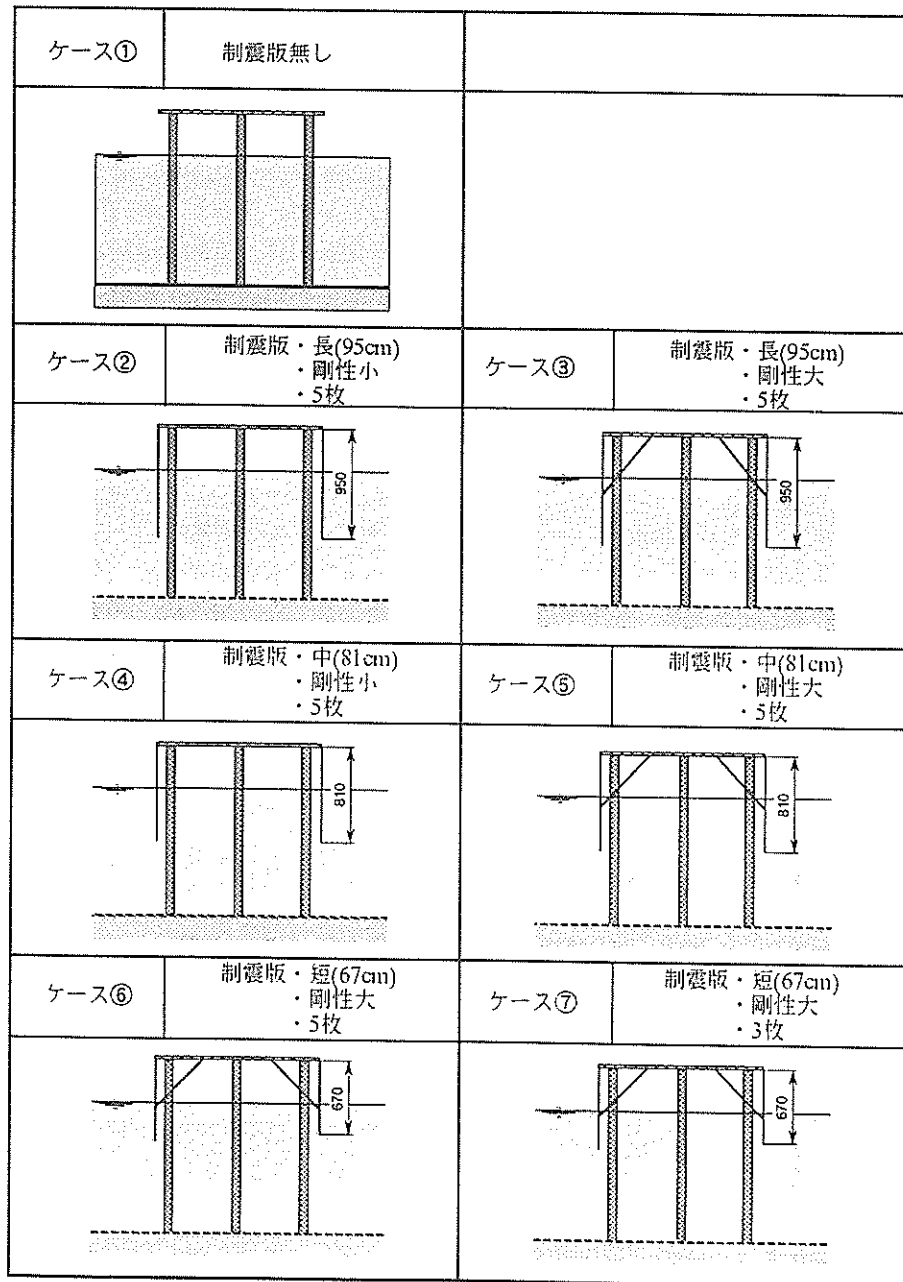


図-3.6 実験条件一覧

条件とともに表-3.14に示す。また、各ケース毎の制震版の条件を図-3.6に示す。

各実験ケースの概要とその位置付けは下記のとおりである。まず、通常の直杭式栈橋構造を対象としたケース①を実施する。制震版は設置せず制震効果やメカニズムの検討を行うための基本ケースとなる。

つぎに、制震版の長さ（浸水長）と制震版の剛性（固有振動数）が制震効果に及ぼす影響を把握するために、制震版の枚数を5枚に固定して、制震版の長さを $L1=95\text{cm}$ （ケース②、ケース③）、 $L2=81\text{cm}$ （ケース④、ケース⑤）、 $L3=67\text{cm}$ （ケース⑥）の3段階に変化させて実験を実施した。制震効果が制震版の長さ（浸水長）の変化にどのような影響を受けるのか比較検討できるように設定した。また、制震版の長さを固定して、制震版をブレースで補強することで制震版自体の剛性を小さくする場合（ブレース無し）と大きくした場合（ブレース有り）について実験を行った。これは、予備実験から得られた知見を踏まえ、共振点および振動モードの違いが制震効果に及ぼす影響を明確にするためである。さらに、制震版の剛性の大小により作用する動水圧が変化することが想定されるが、このことが栈橋全体の振動特性にどのように影響するかも検討した。

さらに、制震版の長さを一定（ $L3=67\text{cm}$ ）にして制震版を1枚おきに栈橋の両側に3枚ずつ設置した条件で実験ケース⑦を行った。これは、栈橋の両側に5枚ずつ設置したケース⑥の結果と比較することで、制震版の配置が及ぼす影響を確認するためである。

各実験ケースともに構造はそのまま、水有りまたは水無しの条件で実験を実施した。これは本研究の主題である、制震版と水の動的相互作用による制震効果を把握するためであり、水による減衰効果、動水圧の作用による付加質量効果等を実験的に観察するものである。

加振波は正弦波を用い、その加振周波数は栈橋模型の固有振動数を基準として、その値から $\pm 0.1\text{Hz}$ 、 $\pm 0.2\text{Hz}$ 、 $\pm 0.3\text{Hz}$ 、 $\pm 0.4\text{Hz}$ 、 $\pm 0.5\text{Hz}$ とした11振動数に加え、 $2.0\text{Hz}$ 、 $8.0\text{Hz}$ 、 $10.0\text{Hz}$ の合計14振動数とした。一方、入力最大加速度に関しては、栈橋周辺の水の挙動から $100\text{Gal}$ 加振が最適と判断した。しかしながら、実験の過程で制震版の長さを短くするに従い、水の挙動が予備実験同様大きく動揺する傾向が観察された。そこで、制震版の長さが $L1=95\text{cm}$ （ケース②、ケース③）では入力最大加速度を $100\text{Gal}$ にし、制震版の長さが $L2=81\text{cm}$ （ケース④、ケース⑤）ならびに $L3=67\text{cm}$ （ケ

ース⑥、ケース⑦）では入力最大加速度を $30\text{Gal}$ に修正して実験を行った。ケース①では入力最大加速度が $30\text{Gal}$ および $100\text{Gal}$ の場合について行った。さらに、入力した正弦波の波数は長さが $L1=95\text{cm}$ （ケース②、ケース③）では10波を用いたが、その他のケースでは20波とした。これは、実験当初10波を用いて実験を実施したが波数が若干少ないために定常状態になる前に加振が終了してしまう傾向が確認されたことから、後のケースでは余裕をみて波数を十分大きくとったためである。しかし、実験終了後に実験結果を詳細に見ると10波で行った実験の波形もほぼ定常状態に達しており、10波の場合も20波の場合と同様に評価しても実験結果に大きな影響はないと判断される。

#### (7) 計測

実験では栈橋の制震効果を的確に把握するために、ひずみゲージ、変位計、動水圧計、加速度計を適宜配置した。各実験ケース毎の計器配置および実験断面を図-3.7に示す。

まず、ひずみゲージは中央の杭の海側陸側を一对として等間隔に4箇所合計8枚を貼付した。海側陸側を一对とすることで加振時に杭に作用する曲げ応力および軸力による応力が計測できる。ひずみゲージは水の悪影響を受けないように防水処置を施した。つぎに、変位計は栈橋上部工の応答変位を地盤を基準とする絶対変位で計測するために振動台上（図中D1で示す）と、上部工の位置（図中D2で示す）に設置した。各時刻歴ステップ毎にD2の計測値からD1のそれを差し引くことで絶対変位が計測できる。写真-3.5に振動台上に設置した変位計、写真-3.6に上部工に設置した変位計をそれぞれ示す。さらに、制震版に作用する動水圧を計測するために、動水圧計を中央の制震版の表裏に3個ずつ合計12箇所を設置した。加速度計は振動台台座、栈橋模型の上部工天端、制震版にそれぞれ設置した。制震版には動水圧との相互関係が得られるように動水圧計と同じ位置に設置した。写真-3.7に制震版に設置した動水圧計および加速度計の設置状況を示す。

#### (8) 模型の固有振動数の検討

予備実験では制震効果が確認されたものの、この制震効果を検討するための計測値は不十分なものであった。これは、制震版自体の固有振動数が栈橋本体の固有振動数と大きくずれたためと判断された。この経験を踏まえ本実験では、制震版の剛性（固有振動数）を事前に検討した。

1) 栈橋本体とブレースを取り付けない制震版（制震版の剛性が小さい場合）の固有振動数が概ね等し

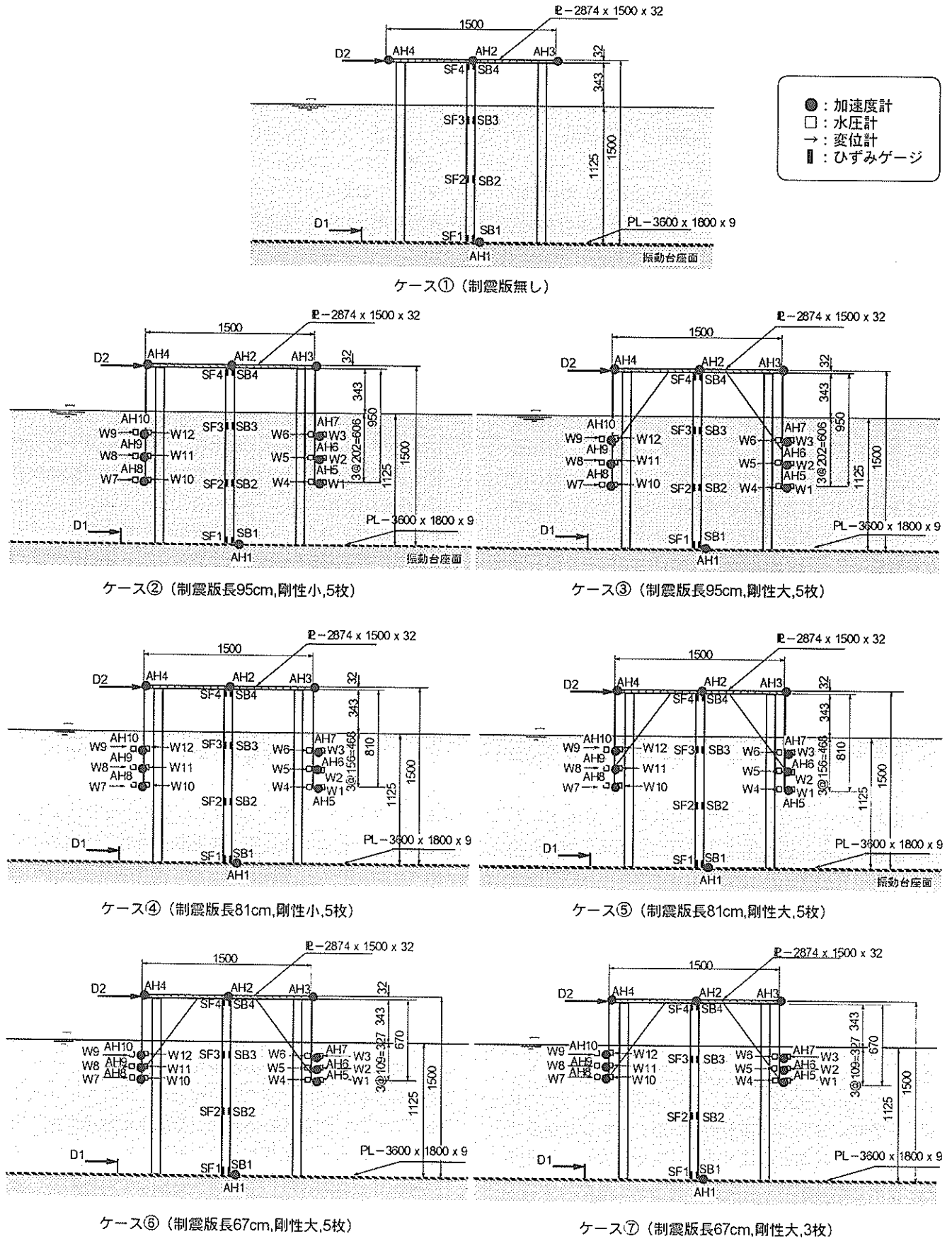


図-3.7 実験模型断面および計器配置図

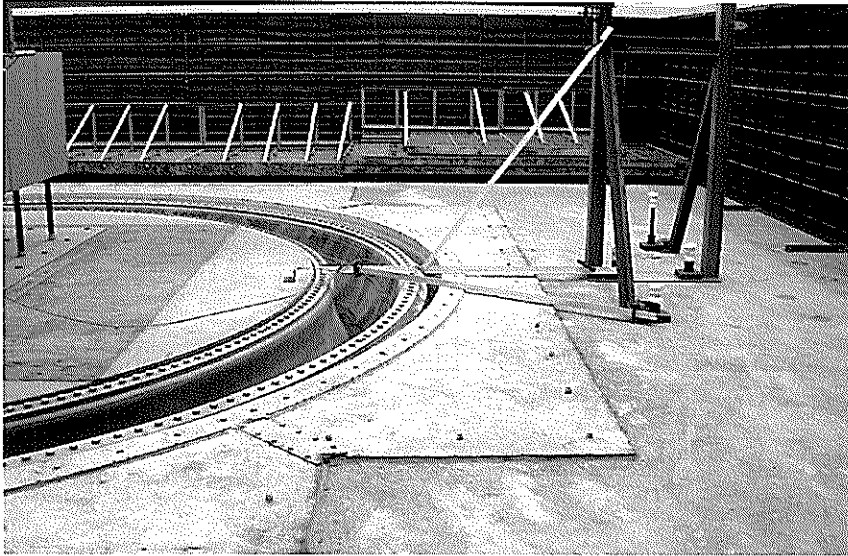


写真-3.5 振動台台座の変位計の設置状況

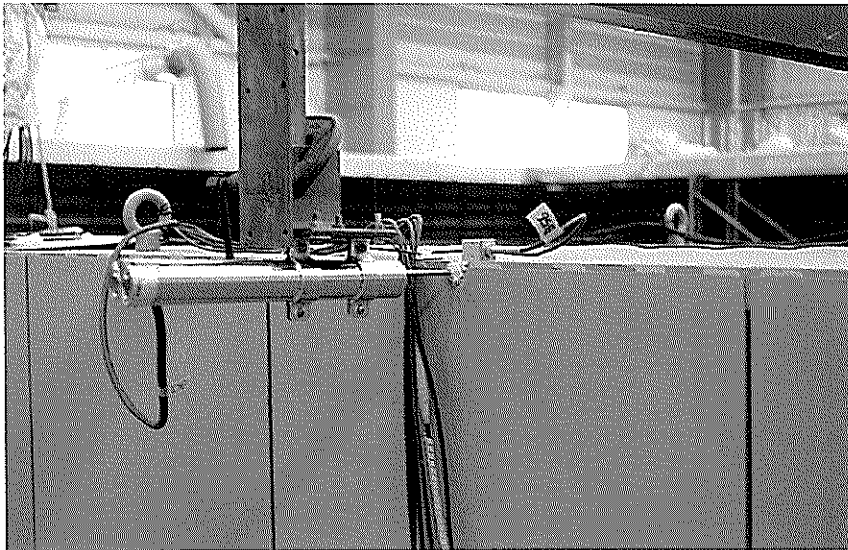


写真-3.6 上部工の変位計の設置状況



写真-3.7 制震版の水圧計および加速度計の設置状況

表-3.15 固有値解析結果および制震版の条件一覧

固有値 解析 ケース	実験 管理名	栈橋模型の 固有振動数 $f_1$ (Hz)	制震版の 固有振動数 $f_2$ (Hz)	栈橋と制震版の 固有振動数比 $a=f_2/f_1$	制震版の条件		
					長さ (cm)	剛性	枚数 (枚)
①	NN	5.162	-	-	-	-	-
②	LL5	4.723	4.911	1.040	95	小	5
③	LH5	5.131	24.457	4.767	95	大	5
④	ML5	4.678	5.003	1.069	81	小	5
⑤	MH5	5.037	24.748	4.913	81	大	5
⑥	SH5	5.191	48.796	9.400	67	大	5

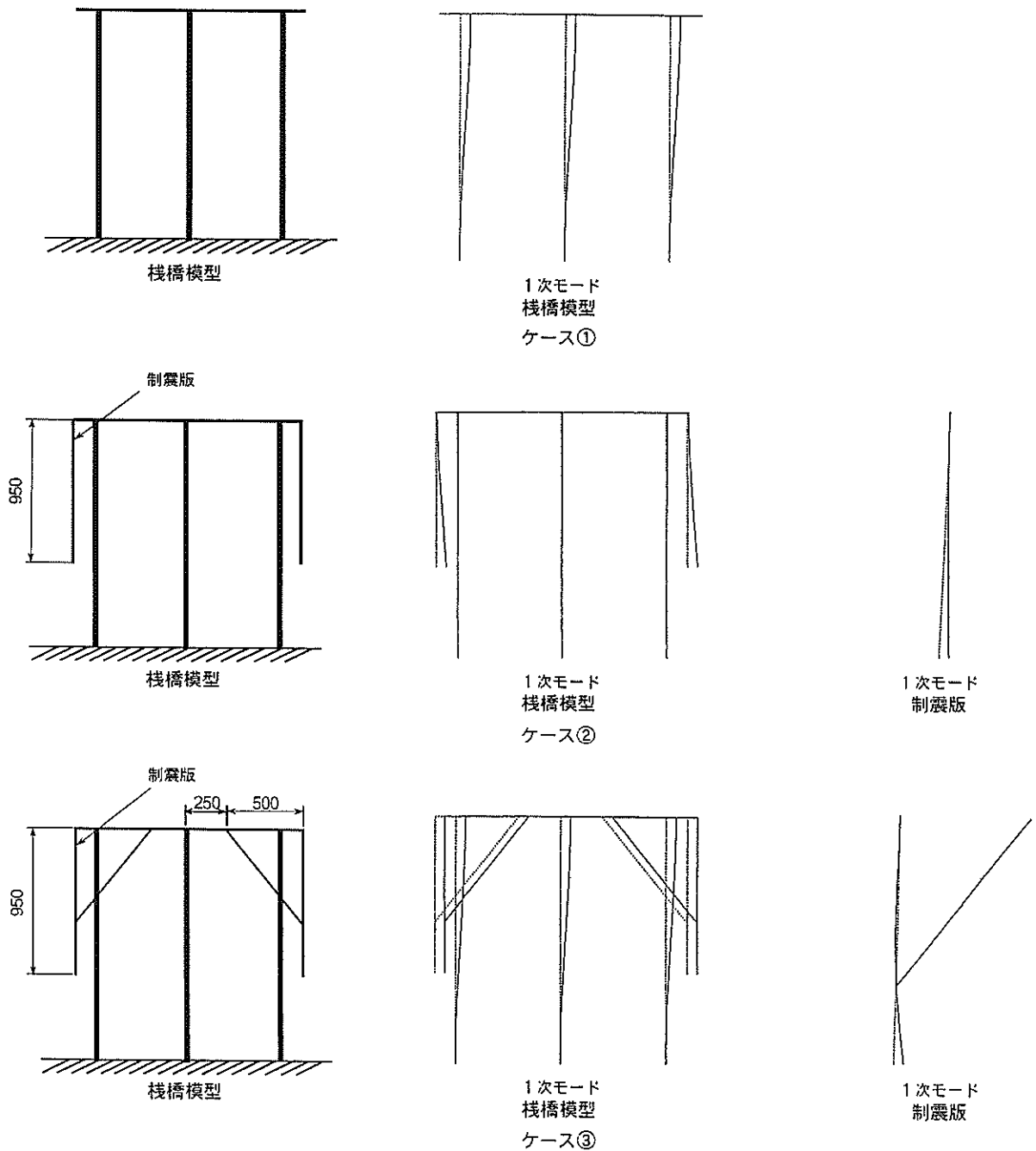


図-3.8 栈橋模型, 栈橋および制震版の1次モード (ケース①, ②, ③)

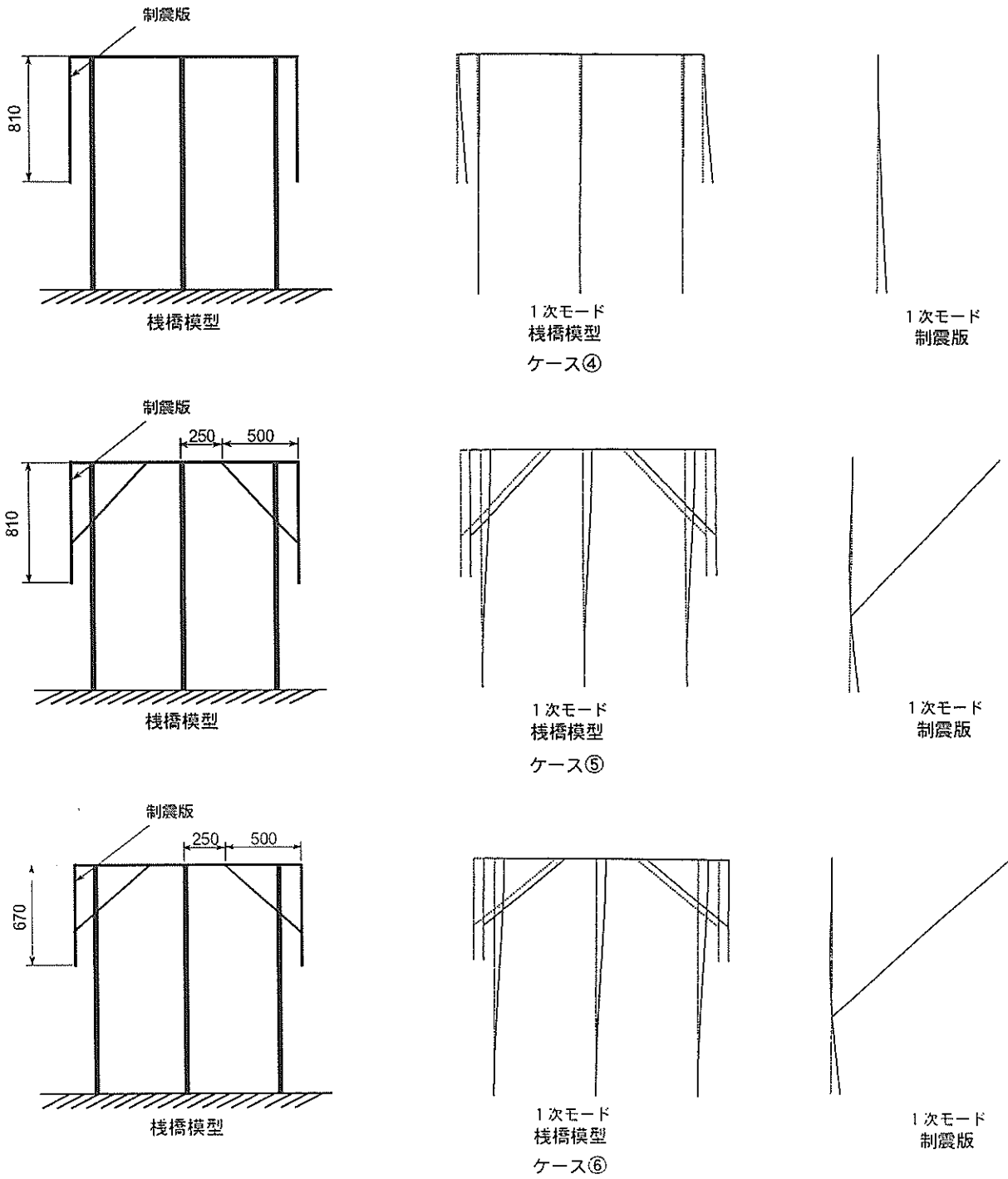


図-3.9 栈橋模型, 栈橋および制震版の1次モード (ケース④, ⑤, ⑥)



い。

2) プレースを取り付けた制震版(制震版の剛性が大きい場合)の固有振動数が栈橋本体と比べて十分に高い。

以上2つの条件を満たすように固有振動数を設定した。2次元弾塑性解析プログラムTDAPを用いた固有値解析を行い、所要の固有振動数を概ね満たすことを確認してから栈橋模型を作製した。固有値解析では、いずれのケースも水要素はモデル化せず、制震版を取付けた栈橋だけモデル化した。

固有値解析の条件一覧と得られた解析結果を表-3.15に示す。また、各々のケースにおける栈橋模型本体と設置する制震版の1次の固有振動モードを図-3.8および図-3.9に示す。

固有値解析から、通常の栈橋模型の固有振動数は $f=5.162\text{Hz}$ と求められた。対象とした実構造栈橋の固有振動数が $f=1.928\text{Hz}$ であることから、解析的に求められる固有振動数の比は2.675となった。この実構造栈橋と模型栈橋の固有振動数の比は、実験に用いた線形の相似則の時間に関する縮尺比 $\lambda t=2.828$ と比較して概ね一致しており、作製した栈橋模型の妥当性が示されている。また、制震版自体の固有振動数は概ね5Hzであり栈橋自体の固有振動数とほぼ等しい。プレースを設置し剛性を高めた制震版自体の固有振動数は約25~50Hz程度であり栈橋自体の振動数の約5~10倍程度にあたる。さらに、制震版の長さに関わらずプレースを設置した栈橋模型は設置しない場合と比較して、固有振動数が約0.4Hz(約8~9%)程度高くなる傾向が確認された。この原因としては、プレースを設置したことで栈橋構造全体の剛性が高くなったことが考えられる。

(9) 実験管理名

本報告では実験ケースの区別を容易にするために、各実験ケース毎に管理コードを設定する。コードは3桁の英数文字で表す。まず、1文字目が制震版の長さ(N:無し・L:長い(L1=95cm)・M:中間(L2=81cm)・S:短い(L3=67cm))、つぎに、2文字目が制震版の固有振動数(H:高い(約20Hz)・L:低い(約5Hz))、さらに、3文字目が制震版の設置枚数(5枚または3枚)、をそれぞれ示す。例えば、LL5とは長い制震版(L)で、プレースの無い固有振動数の低い(L)場合で、制震版は5枚であることを示している。なお、制震版の無い場合はNNで示している。

(10) 水中振動台

加振装置としては、3次元6自由度の加振性能を持

つ大型の水中振動台を用いる。本振動装置は15m×15m×2mの大型水槽の底面に設置したものであり、水際線や水中に構築される構造物の模型振動実験が行える他、水を排除して使用することにより通常の振動装置として陸上構造物や建築構造物の振動台実験も可能である。表-3.16に振動台の性能を示す。

表-3.16 加振装置の性能

項目	性能
振動台テーブルサイズ	直径6m円形テーブル
載荷荷重	定格20(tf), 最大60(tf)
載荷方向	3軸(X, Y, Z), 6自由度
水槽サイズ	15m×15m×2m
加振能力 (変位, 速度, 加速度)	X: 200mm, 75cm/s, 2.0G Y: 300mm, 100cm/s, 1.0G Z: 100mm, 50cm/s, 1.5G
加振振動数	DC~70Hz

3.2 実験結果

(1) 共振実験結果

共振実験としてa)スウィープ波加振実験およびb)パルス波加振実験を行った。共振実験から栈橋および制震版の振動特性ならびに水の及ぼす制震効果が計測されたので、その実験結果を示す。

a) スウィープ波加振による共振実験の結果

図-3.10に共振実験の結果を示す。スウィープ波を入力した場合に栈橋上部工AH2で計測された応答加速度スペクトルを入力波AH1の応答加速度スペクトルで除したものである。同図の縦軸の値は応答加速度倍率 $S_a$ (周波数伝達関数に相当する)を意味し、 $S_a$ が最大値を取る振動数が各ケースの栈橋模型の固有振動数 $f_1$ である。結果を表-3.17にとりまとめた。各ケースの固有振動数 $f_1$ を求め、通常栈橋に相当するケース①(制震版無し)の水有りの固有振動数に対する共振振動数の比を示した。また共振点の応答倍率については、ケース①の値に対する各ケースの値との比を求めている。さらに、応答値の低下が水と制震版の相互作用により生じる減衰によるものと推測し、これに対する考察を行うために共振曲線から減衰定数 $h_v$ を図解的方法で読み、その値を併記した。ここでいう図解的方法による減衰定数 $h_v$ は式(3.1)より求めた。なお、式中の振動数幅 $\Delta\omega$ は、共振曲線の最大値(固有振動数に対する加速度応答倍率)の $1/\sqrt{2}$ のところで横線を引き、共振曲線との交点を $\omega_1, \omega_2$ とすれば、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ で求められる。

表-3.17 共振実験結果 (スイープ波加振)

実験 ケース	水の有無	固有 振動数 (Hz)	固有振動数の低減率 (各ケースの固有振動数 /ケース①の固有振動数)	共振点の加速度 応答倍率 $S_a$ (応答/入力)	応答倍率の低減率 (各ケースの応答倍率 /ケース①の応答倍率)	制震版の条件			管理名	減衰定数 hv
						長さ (cm)	剛性	枚数 (枚)		
①	有り	4.84	—	48.9	—	—	—	—	NN	0.013
	無し	4.84	1.00	53.7	1.10					0.013
②	有り	4.77	0.99	36.7	0.75	95	小	5	LL5	0.013
	無し	4.94	1.02	57.7	1.18					0.011
③	有り	3.27	0.67	14.9	0.30	95	大	5	LH5	0.027
	無し	4.66	0.96	63.0	1.29					0.011
④	有り	4.86	1.00	33.7	0.69	81	小	5	ML5	0.019
	無し	4.94	1.02	34.5	0.71					0.019
⑤	有り	3.70	0.76	19.6	0.40	81	大	5	MH5	0.028
	無し	4.56	0.94	43.5	0.89					0.017
⑥	有り	4.16	0.86	28.3	0.58	67	大	5	SH5	0.024
	無し	4.59	0.95	35.7	0.73					0.020
⑦	有り	4.37	0.90	48.8	1.00	67	大	3	SH3	0.014
	無し	4.69	0.97	57.3	1.17					0.013

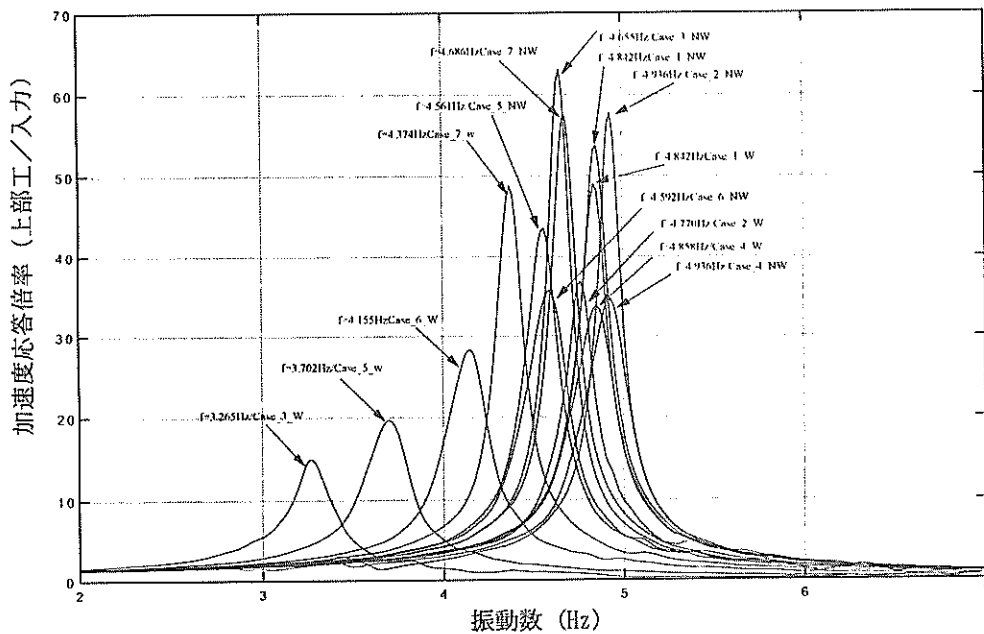


図-3.10 共振実験結果 (スイープ波加振)

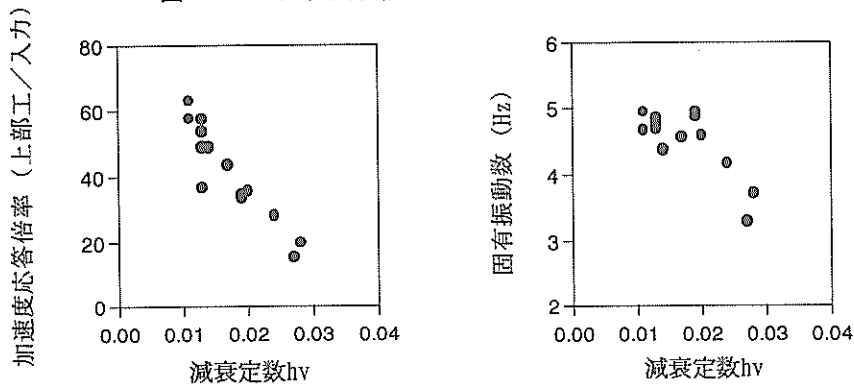


図-3.11 応答倍率および固有振動数の減衰定数hvとの関係

表-3.18 共振実験結果 (パルス波加振)

実験 ケース	水の有無	固有 振動数 (Hz)	制震版の条件			管理名
			長さ (cm)	剛性	枚数 (枚)	
①	有り	—	—	—	—	NN
	無し					
②	有り	7.47	95	小	5	LL5
	無し	3.25				
③	有り	6.50	95	大	5	LH5
	無し	22.69				
④	有り	19.31	81	小	5	ML5
	無し	2.63				
⑤	有り	7.13	81	大	5	MH5
	無し	13.94				
⑥	有り	12.13	67	大	5	SH5
	無し	16.88				
⑦	有り	11.44	67	大	3	SH3
	無し	16.88				

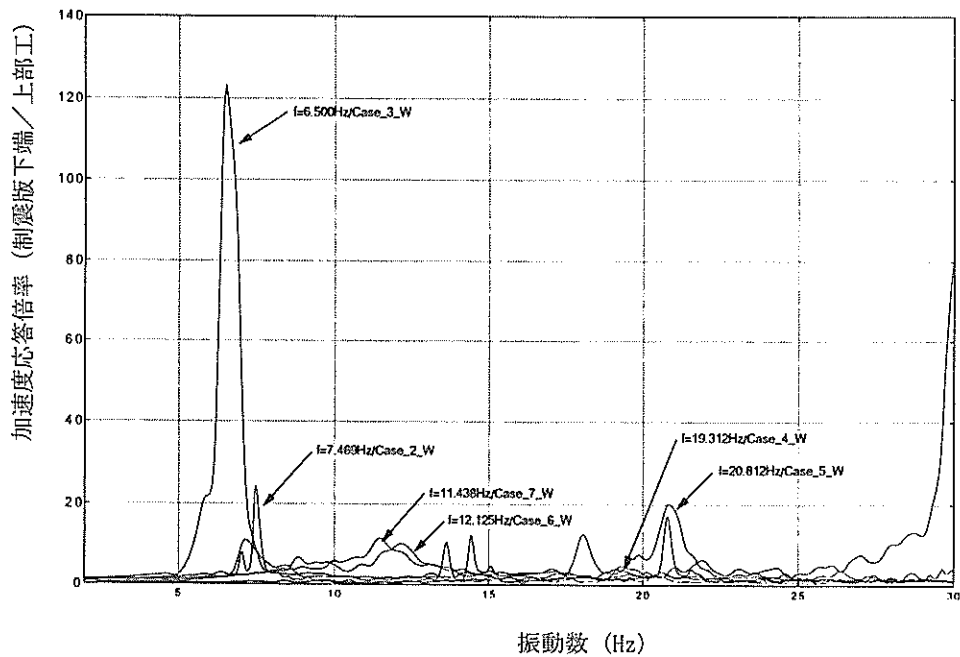


図-3.12 共振実験結果 (パルス波加振)

$$hv = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (3.1)$$

ここに、 $\Delta\omega$ ：振動数の幅  
 $\omega_0$ ：非減衰固有振動数

制震版による応答値の低減および固有振動数 $f_1$ の変化と、減衰定数 $hv$ の関係を図-3.11に示した。応答倍率 $S_a$ は $hv$ の増加に伴い一様に低下し、固有振動数も概ね $hv$ の増加とともに低下（長周期化）する傾向が確認された。これらの実験結果は、水が存在することにより応答倍率の低減ならびに固有振動数の低下が生じることを明確に示している。

#### b) パルス波加振による共振実験の結果

図-3.12にパルス波加振でおこなった共振実験の制震版の結果を示す。パルス波を入力した場合に制震版下端AH8で計測された応答加速度スペクトルを栈橋上部工の制震版設置位置AH4で計測された応答加速度スペクトルで除したものである。同図の縦軸の値は応答加速度倍率 $S_a$ （周波数伝達関数）を意味し、 $S_a$ が最大値を取る振動数をここでは制震版の固有振動数 $f_2$ と仮定した。実験結果を表-3.18にとりまとめた。また、図-3.13には各ケースにおける水有り、水無しの場合の制震版の共振実験結果を示した。制震版が柔らかいケース②およびケース④では、水が有ることにより一様に固有振動数が大きくなる傾向にあるのに対して、制震版が剛なケース③、ケース⑤、ケース⑥、ケース⑦では反対に水が有ることにより固有振動数が低下している。さらに、図-3.12に水が有る条件での各ケースの比較を行うと、制震版が長くなることにより、固有振動数は低下する傾向にあることが分かる。

#### (2) 正弦波加振実験結果

##### a) 共振点加振時の時刻歴および最大値分布

各ケースの共振振動数を入力振動数として加振（共振点加振）を行った場合の、入力波AH1および上部工加速度AH2、上部工変位D2、杭のひずみSF1～SF4、制震版設置位置の上部工加速度AH4と制震版の応答加速度AH8～AH10、制震版上の加速度計と等しい設置深度における制震版外側の動水圧W7～W9および制震版内側の動水圧W10～W12それぞれの時刻歴を各ケース毎に図-3.14～図-3.21に示す。さらに同図には、杭のひずみ、入力に対する上部工の応答加速度、制震版の応答加速度、制震版海側の動水圧、制震版内側の動水圧の最大値の分布を併せて示す。なお、ここで図示したケース②およびケース③の波形は、制震版の応答加速度

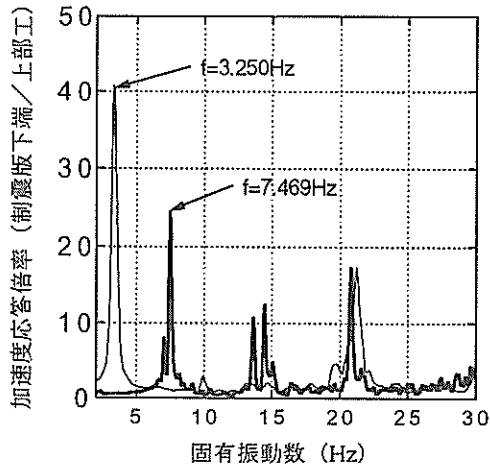
および動水圧の波形にパルス状のノイズが計測されたために、ローパスフィルター（10Hz以上を削除してHanningウィンドウを用いて平滑化を1回施した）により高周波数成分を除去した成分を示した。なお、ローパスフィルターを施さないケースを含め、全ての実験ケースの時刻歴波形の最大最小値および最大値の分布を付録Aにとりまとめて示す。

杭のひずみの最大値の分布では全てのケースで杭頭SF4で最大値を示し、振動台と杭の結合部SF1でも大きなひずみが発生している。このことから、当初計画どおりに栈橋と振動台の結合部は剛結されていると考えられ、下端固定のラーメンとしてモデル化できたものと判断される。また、入力AH1に対する上部工の応答加速度AH2の最大値分布ならびに時刻歴波形から、栈橋模型は概ね線形的な挙動を示していると考えられる。さらに制震版の応答加速度に関しては、制震版の剛性が大きい場合には、最大値の分布は上部工から制震版先端に近づくにしたがい僅かながら増幅される傾向を示す。さらにケース③、ケース⑤、ケース⑥の最大値を比較すると、制震版が長いほど制震版先端の加速度は増幅される傾向にある。一方、制震版の剛性が小さい場合には、ケース②およびケース④の結果から、制震版の長さによらず制震版の加速度は浸水長の半分近くで振幅の節にとり先端で増幅している。動水圧は応答加速度と同様な傾向を示すが、制震版先端に近づくほどその値は小さくなり、理論に基づいた傾向を示すものと考えられる。各ケース毎の計測された波形と最大値の分布から分かることをまとめると以下のとおりとなる。

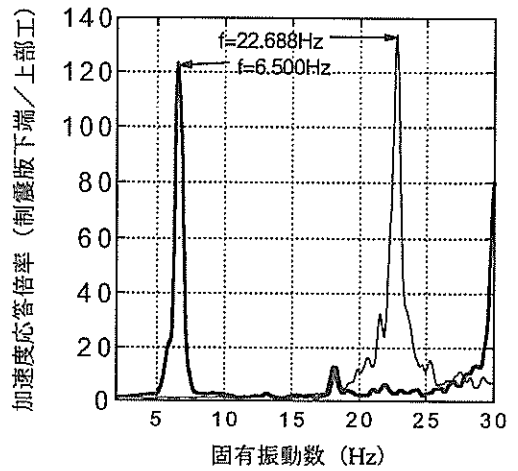
- ①制震版の応答加速度は、制震版の剛性が大きい場合には、上部工設置位置から先端に近づくにしたがい僅かに増幅する。
- ②一方、制震版の剛性が小さい場合には、制震版の応答加速度は、浸水長さの半分近くで節をとって先端で増幅する。
- ③制震版に作用する動水圧は、概ね応答加速度と同様な傾向を示す。
- ④栈橋模型のモデル化の妥当性が確認された。

b) 制震版の応答加速度と動水圧の相関および位相差  
 さらに、制震効果の根幹を為す制震版と水の相互作用に関する考察を行うために、制震版の応答加速度と動水圧について検討した。制震版の応答加速度と動水圧の位相差および相関を調べるために、図-3.22にケース⑤（制震版81cm、剛性大、5枚）で計測された制震版の応答加速度と動水圧を、それぞれの絶対値の最

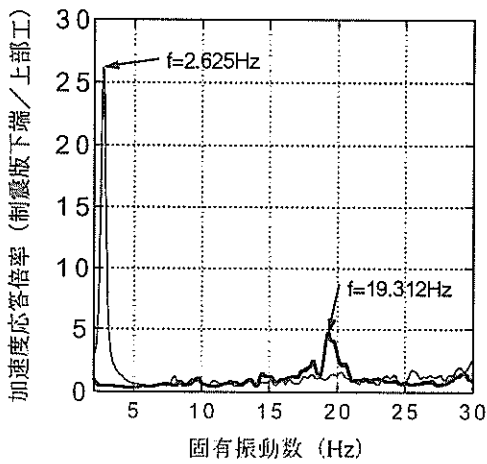
— : 水無し  
 — : 水有り



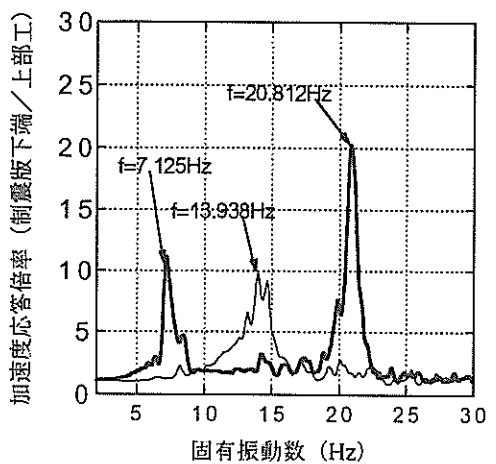
ケース② (制震版95cm, 剛性小, 5枚)



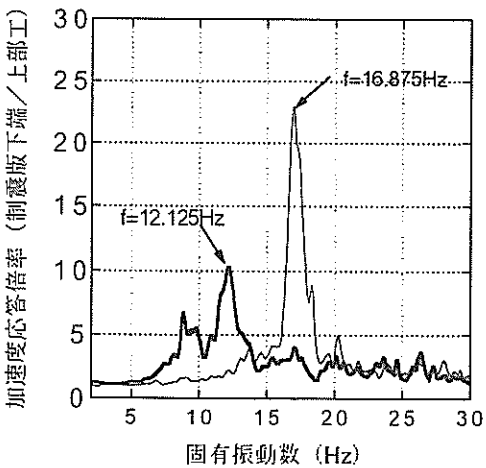
ケース③ (制震版95cm, 剛性大, 5枚)



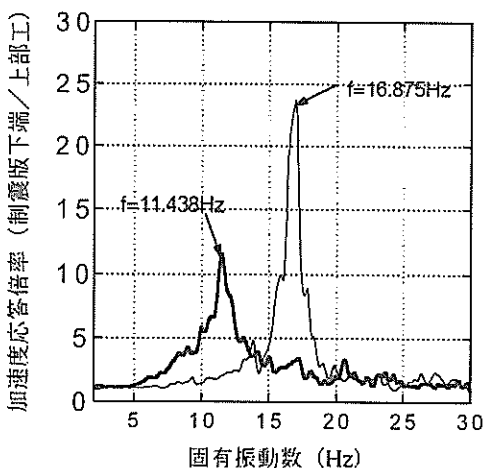
ケース④ (制震版81cm, 剛性小, 5枚)



ケース⑤ (制震版81cm, 剛性大, 5枚)



ケース⑥ (制震版67cm, 剛性大, 5枚)



ケース⑦ (制震版67cm, 剛性大, 3枚)

図-3.13 共振実験結果 (パルス波加振における水有り・水無しの比較)

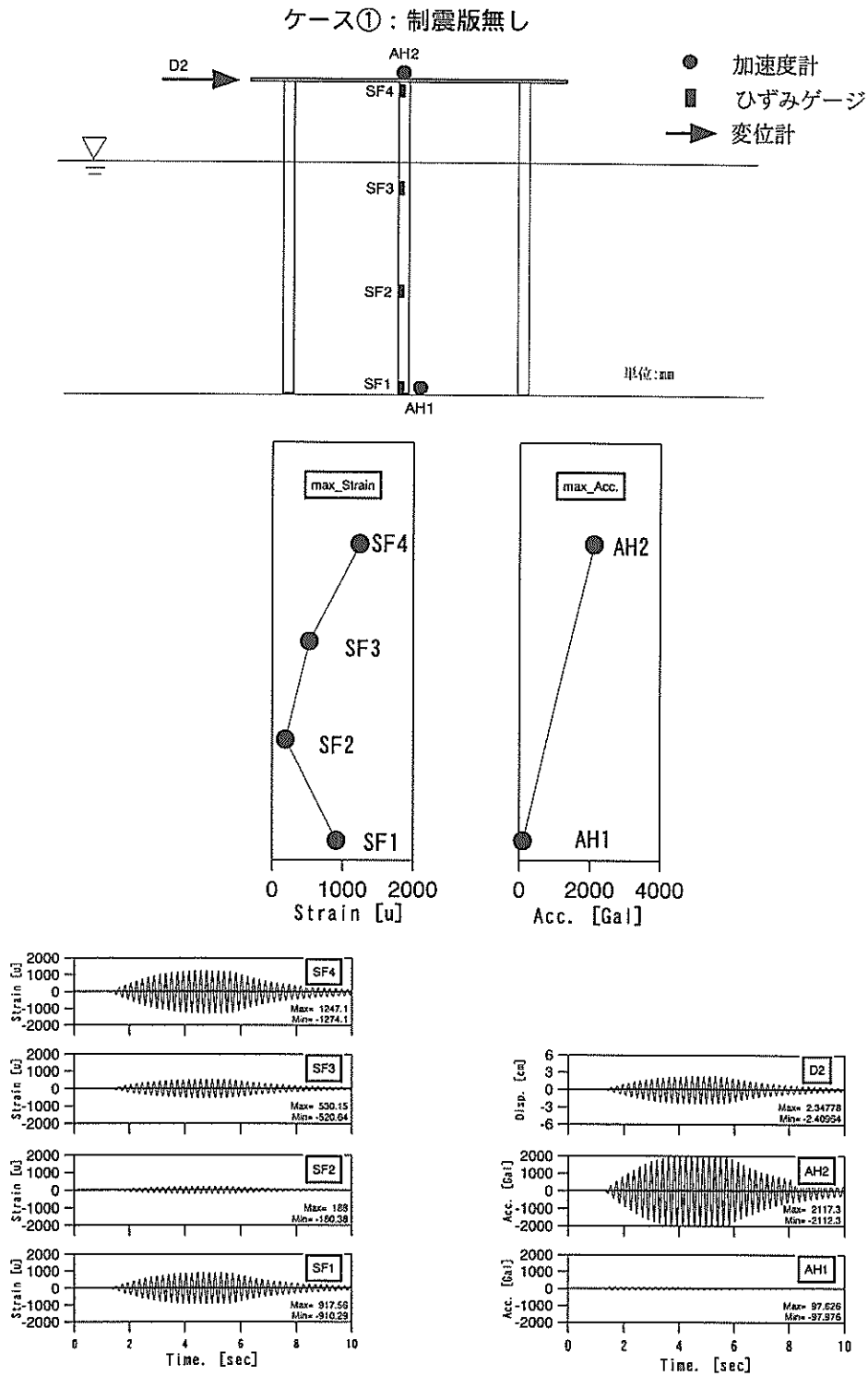


図-3.14 ケース①100Gal 加振における計測波形および最大値分布（共振点加振）

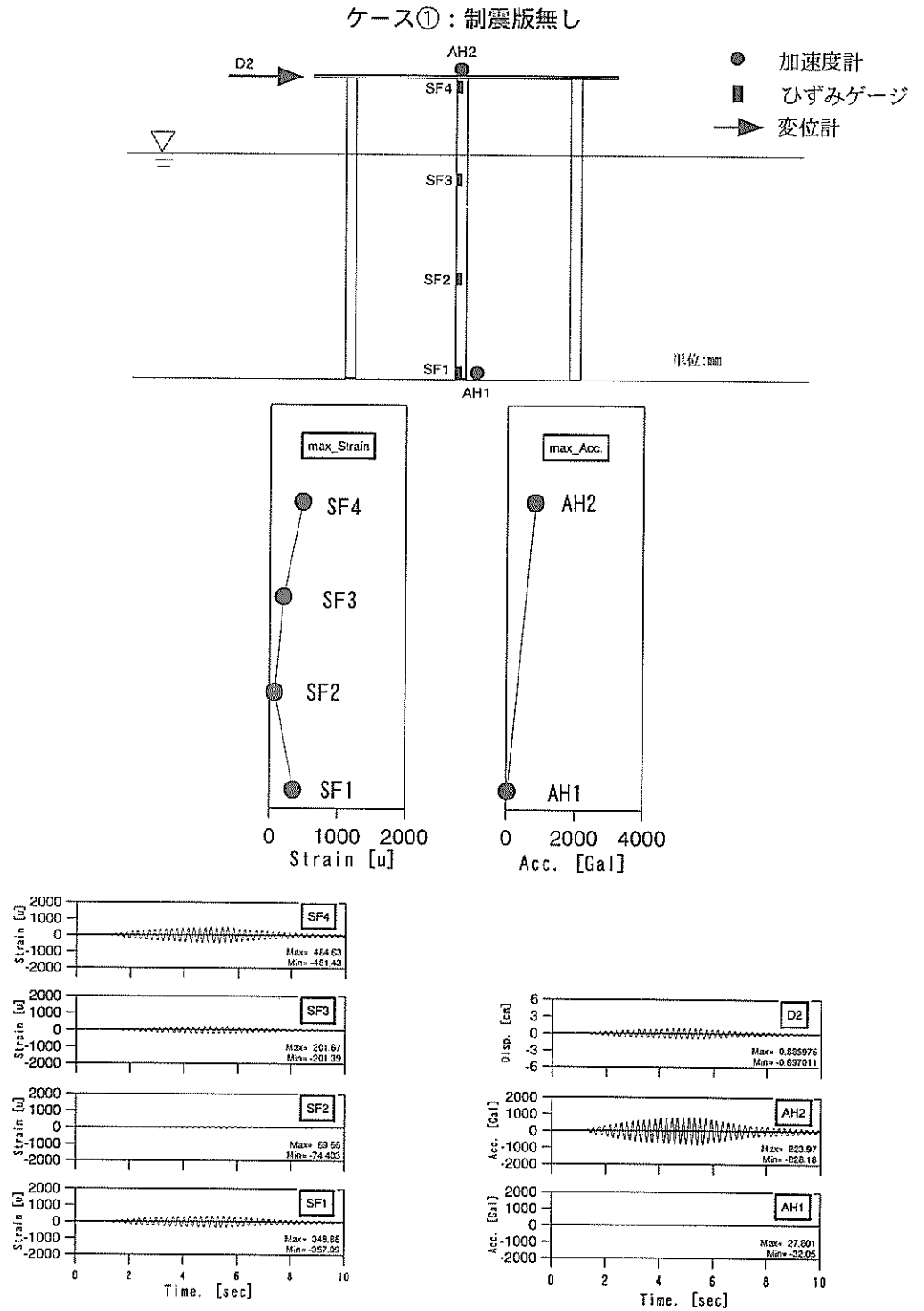


図-3.15 ケース①30Gal 加振における計測波形および最大値分布（共振点加振）

ケース②：制震版95cm, 剛性小, 5枚

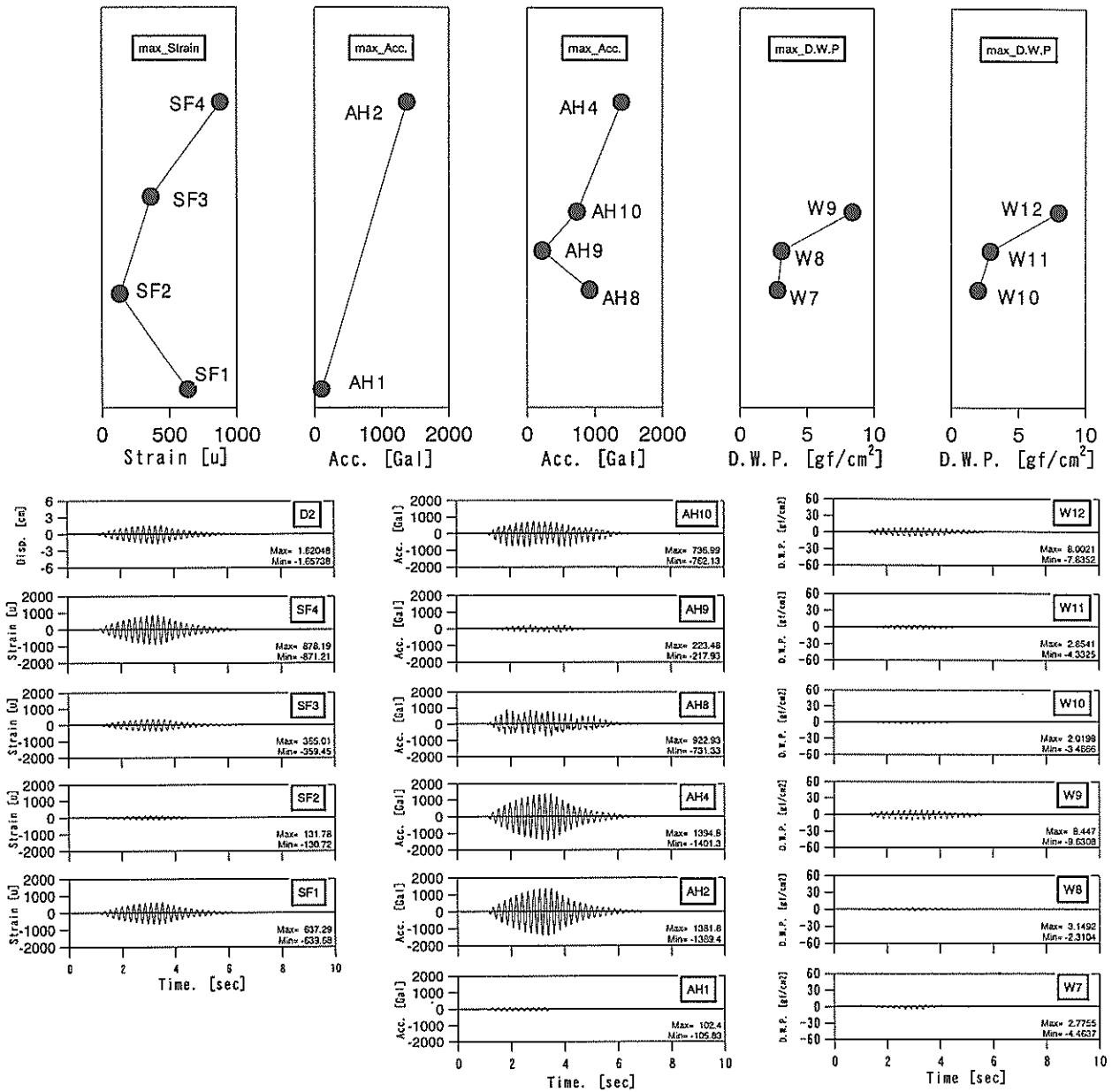
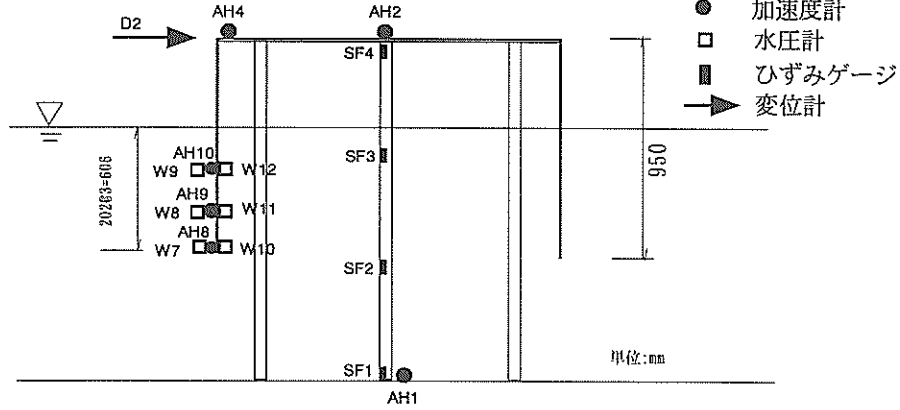


図-3.16 ケース②の計測波形および最大値分布 (共振点加振: フィルター有り)



ケース③：制震版95cm，剛性大，5枚

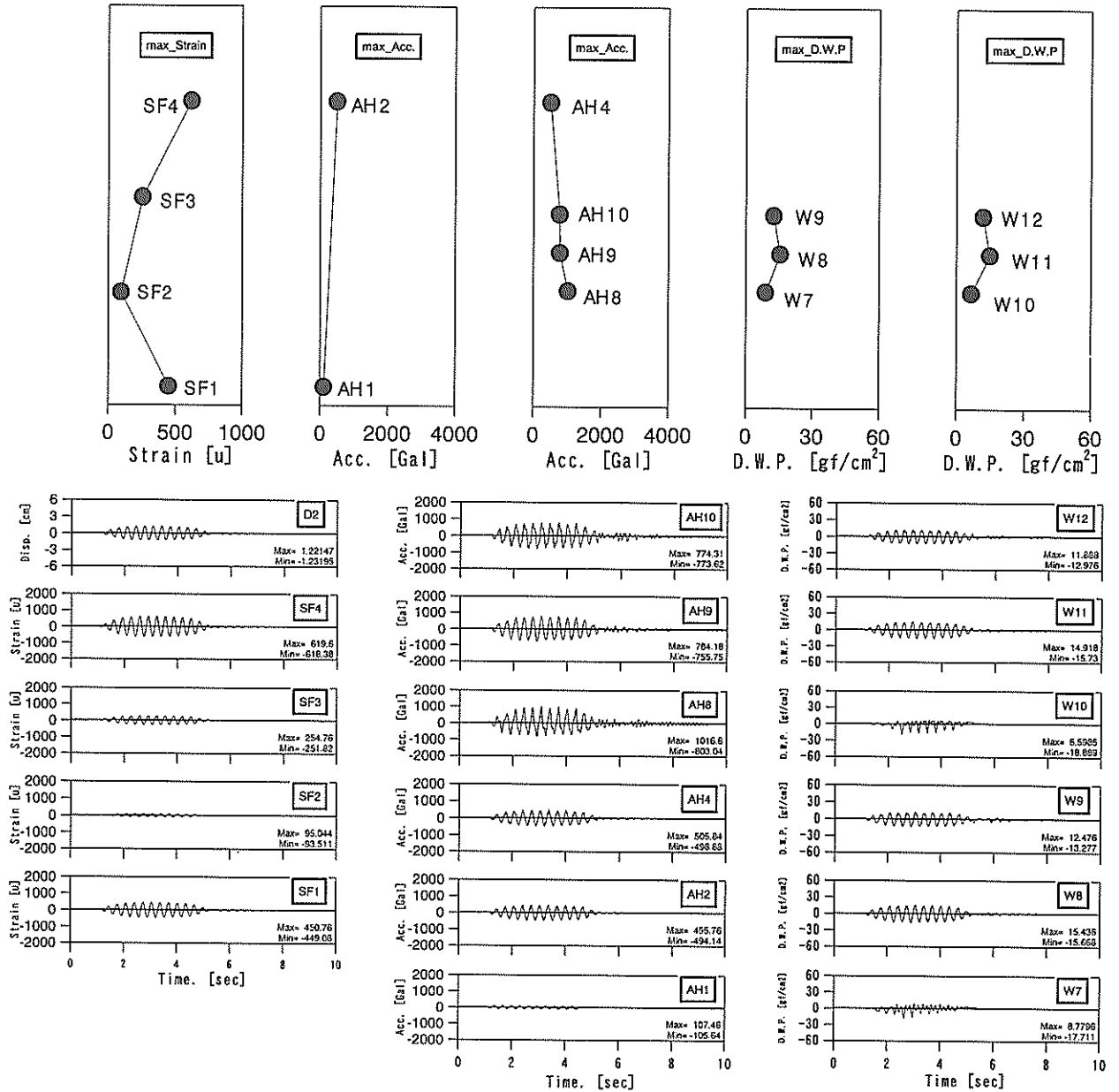
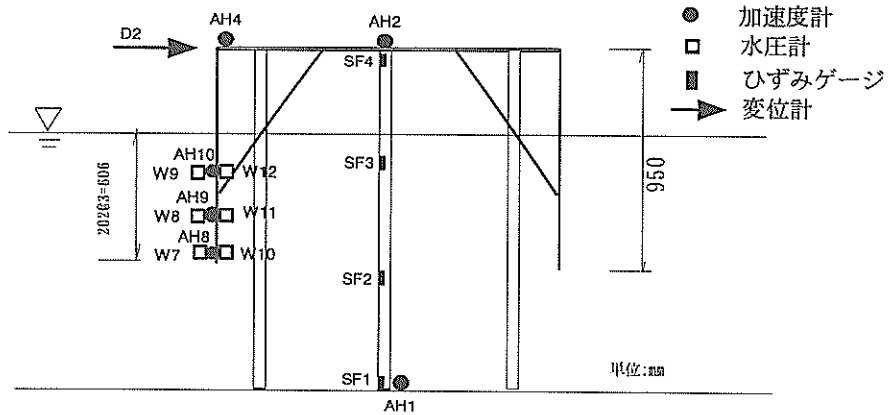


図-3.17 ケース③の計測波形および最大値分布 (共振点加振:フィルター有り)

ケース④：制震版81cm, 剛性小, 5枚

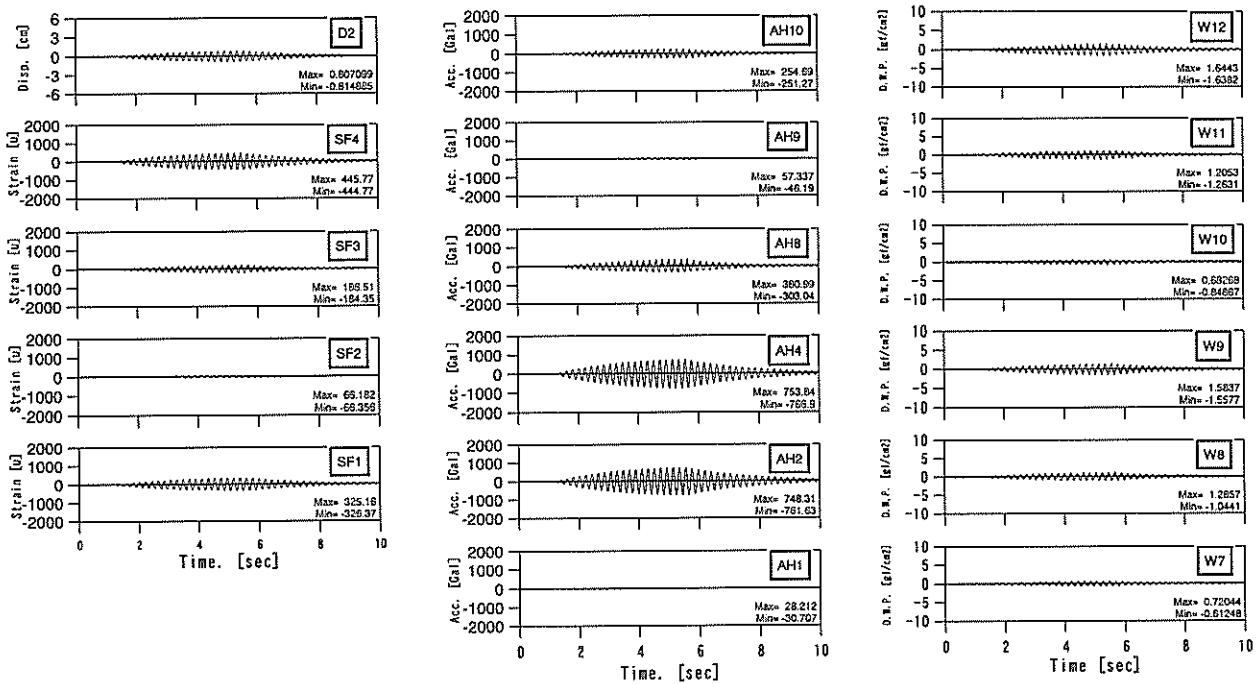
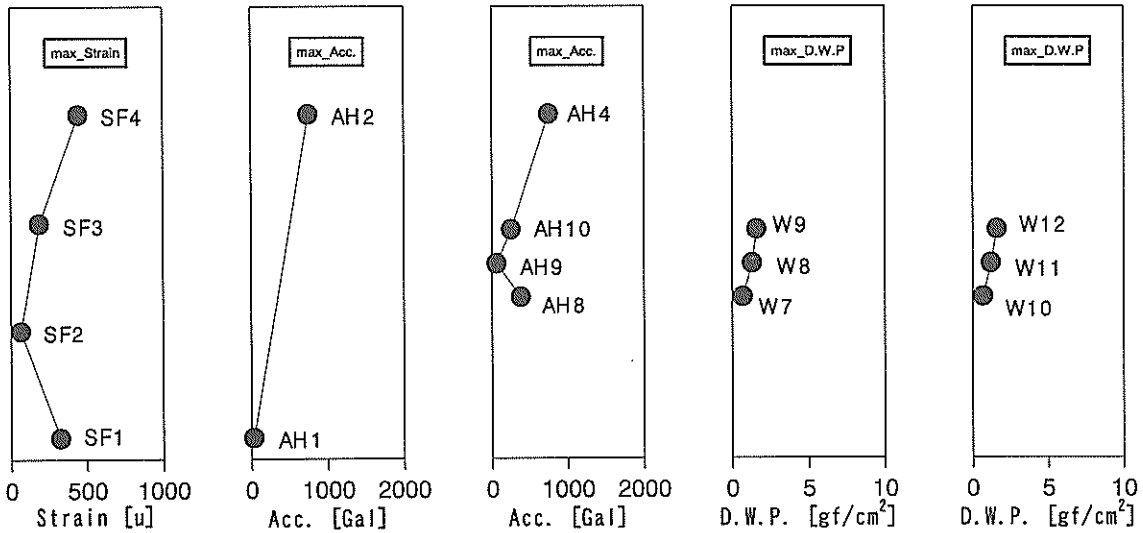
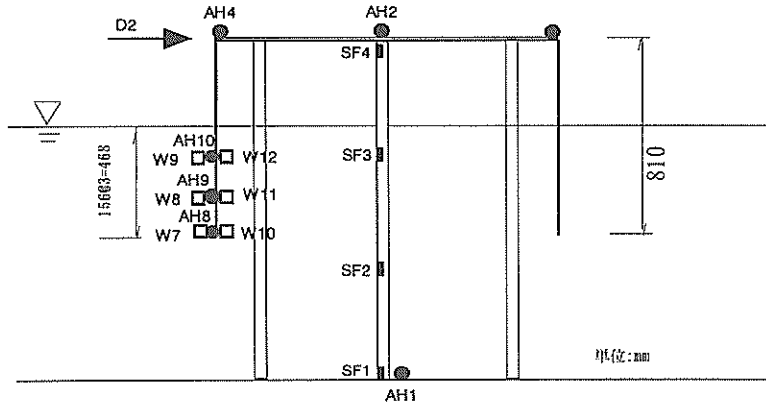


図-3.18 ケース④の計測波形および最大値分布 (共振点加振)

ケース⑤：制震版81cm, 剛性大, 5枚

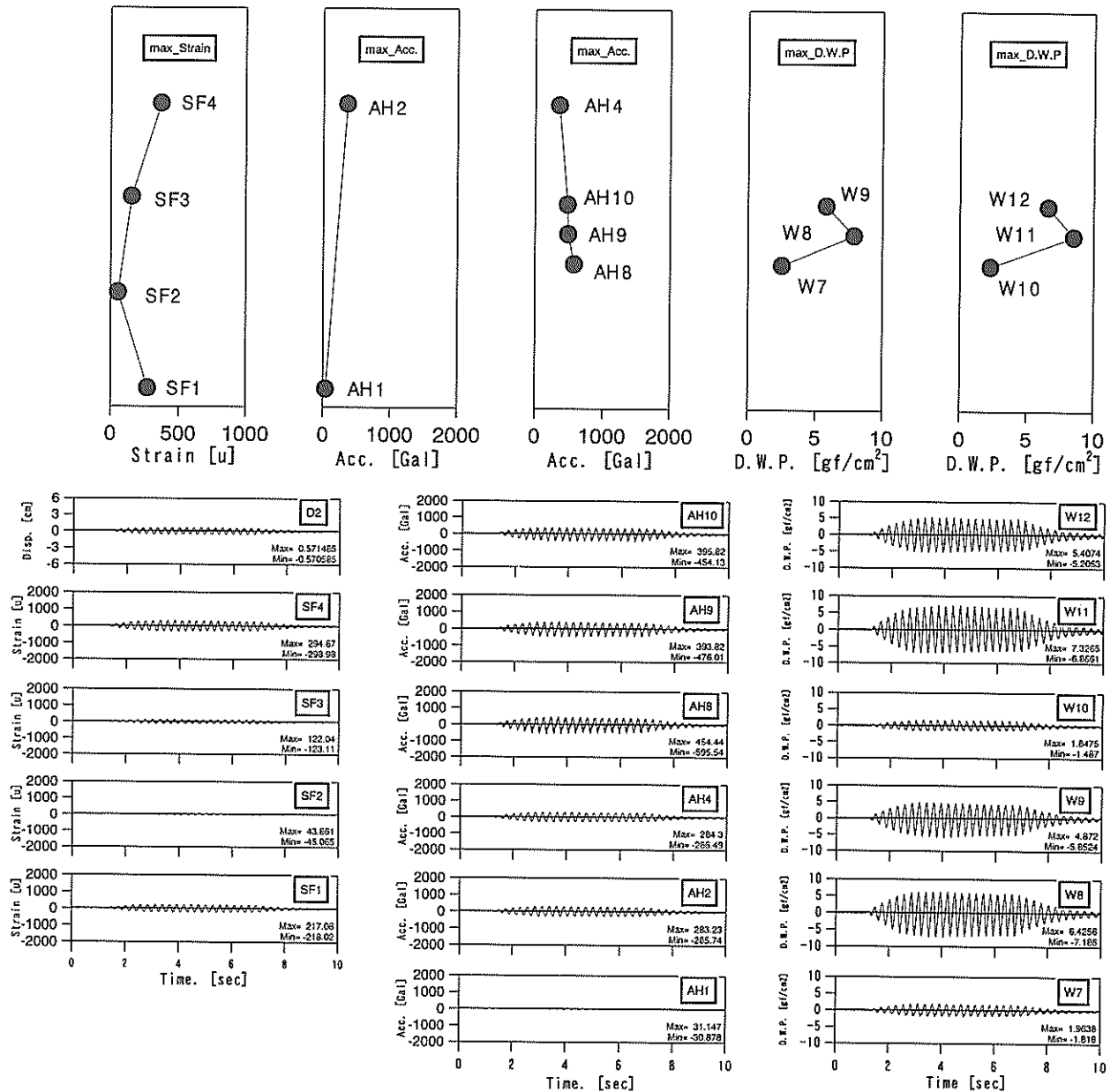
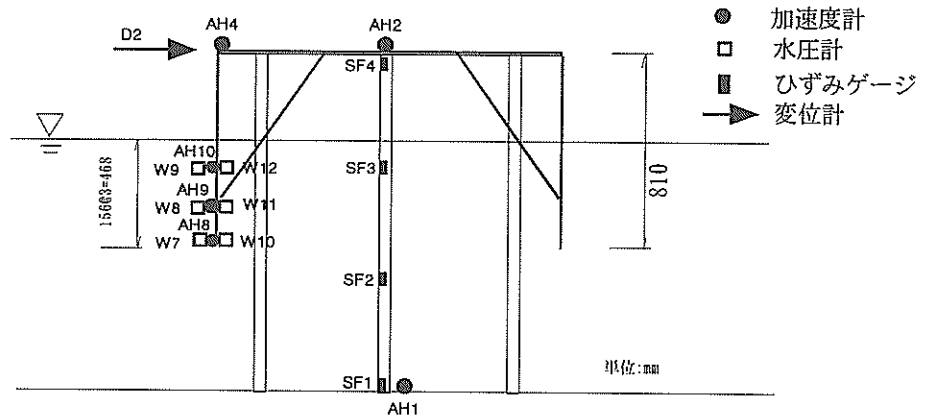
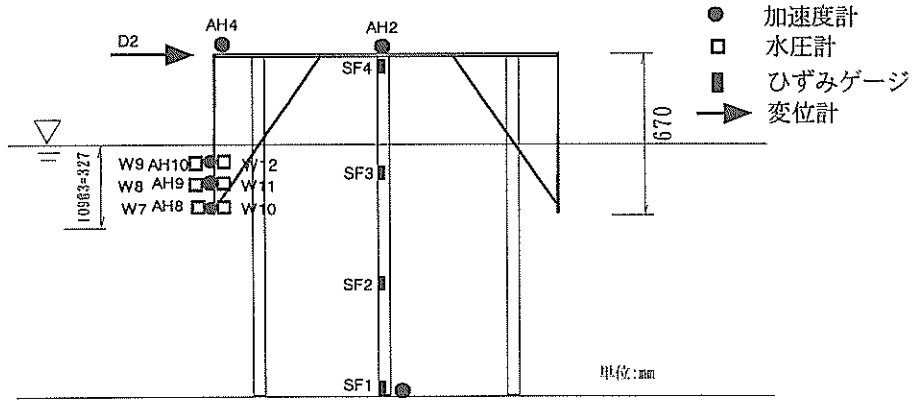


図-3.19 ケース⑤の計測波形および最大値分布 (共振点加振)

ケース⑥：制震版67cm, 剛性大, 5枚



- 加速度計
- 水圧計
- ひずみゲージ
- ➔ 変位計

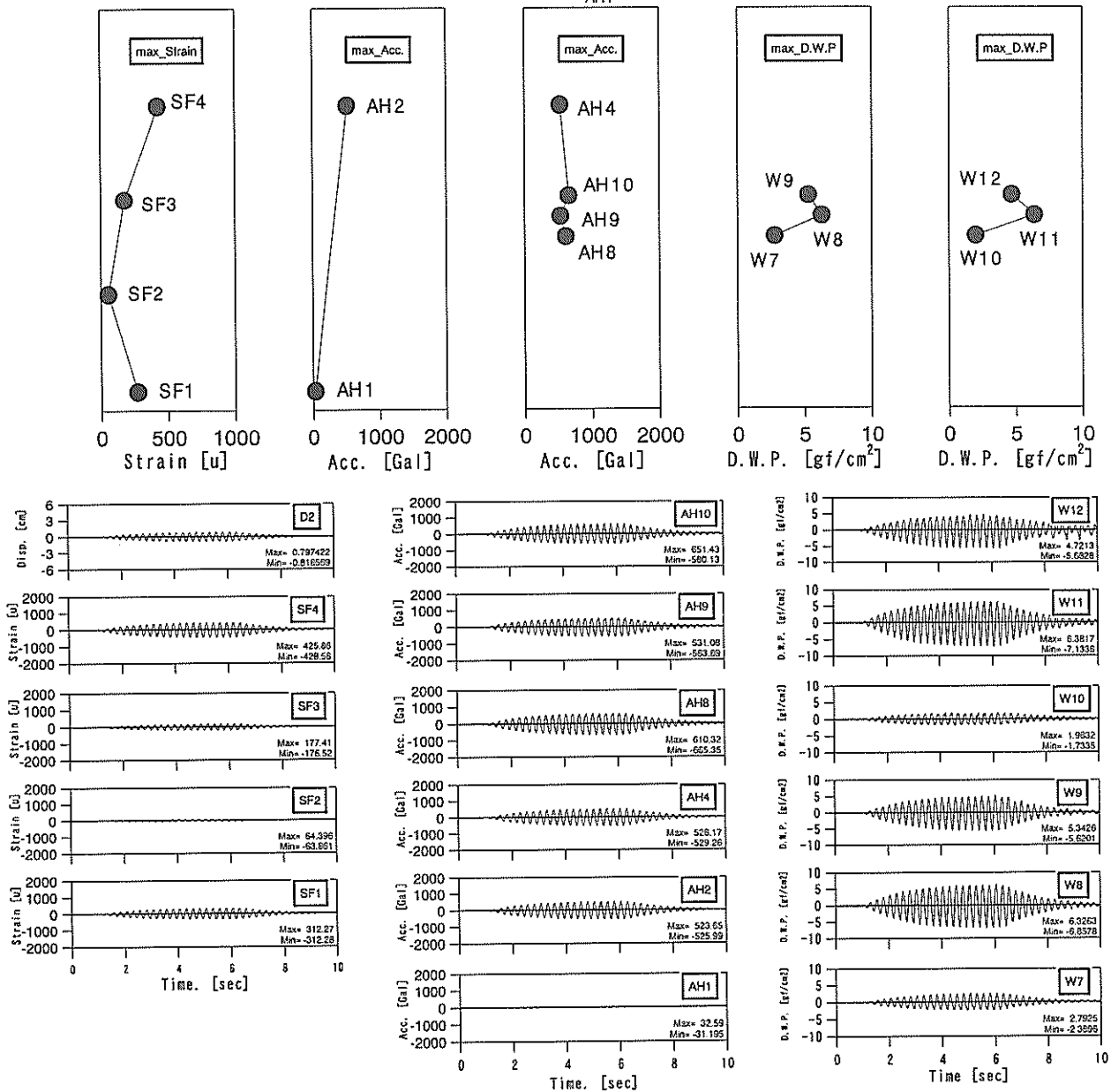


図-3.20 ケース⑥の計測波形および最大値分布（共振点加振）

ケース⑦：制震版67cm，剛性大，3枚

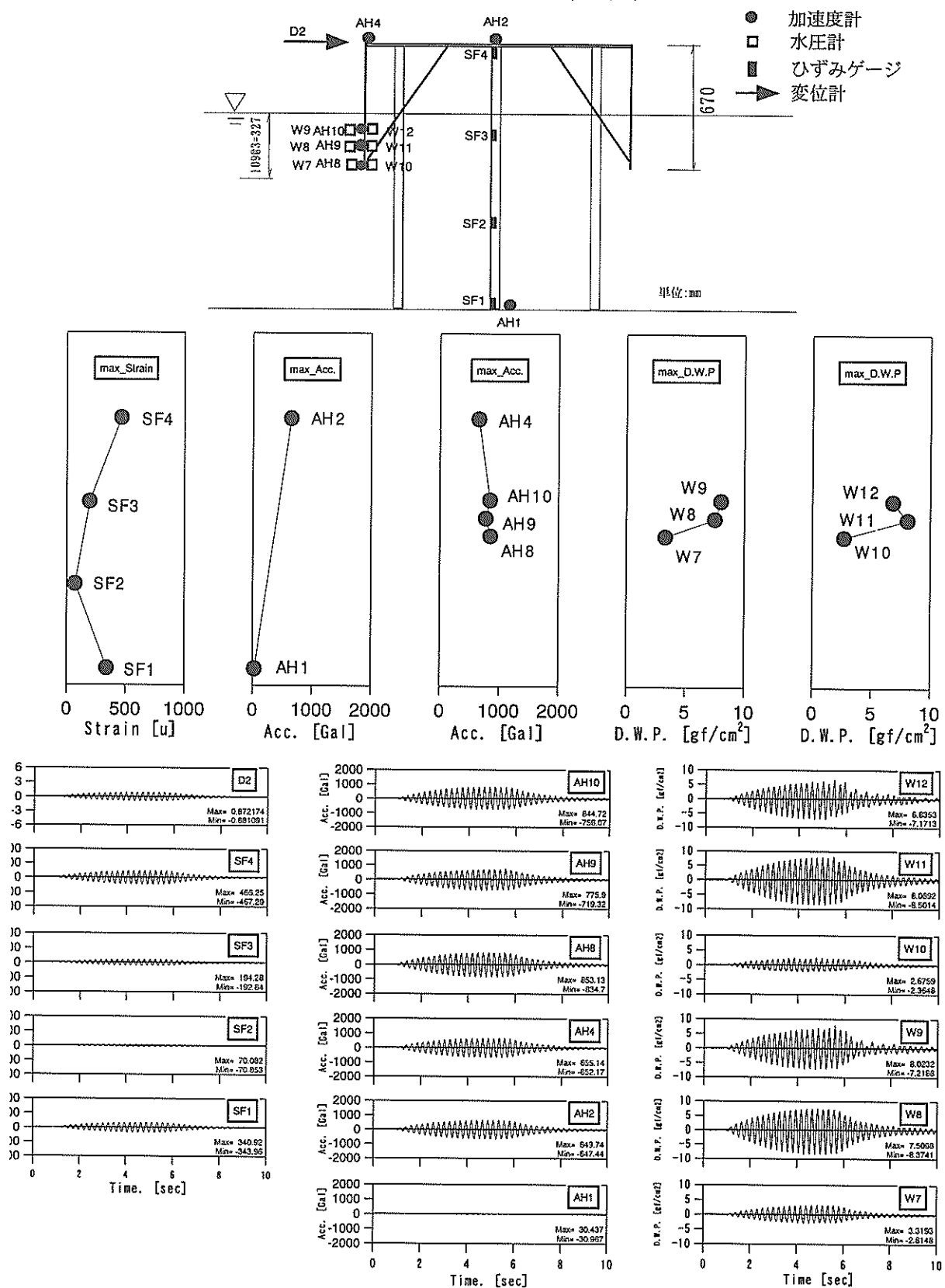


図-3.21 ケース⑦の計測波形および最大値分布（共振点加振）

大値で基準化した波形を重ねて示した。図中向かって右側に慣性力が作用するときには、外側の動水圧 (W7, W8, W9) は全て制震版との間に圧力が生じるが、内側の動水圧 (W10, W11, W12) は反対に全て負圧を生じている。つまり、制震版に作用する動水圧は理論に基づき、制震版の慣性力と同じ向き (増幅させる向き) に生じている。制震版の剛性が小さい場合についても検証するために図-3.23にケース④ (制震版81cm, 剛性小, 5枚) の応答加速度と動水圧の波形を重ねて示す。制震版の剛性が小さい場合にも大きい場合と同様に制震版に作用する動水圧は慣性力と同じ向きに生じている。

つぎに、応答加速度と動水圧の相関および位相差を求めた。ここでは、入力  $X(t)$  と出力  $Y(t)$  の周波数伝達関数, 両者の線型性の度合を示すコヒーレンス, 両者の周波数成分別位相差は次式より求めて, 波形の相関の強さを評価した。

$$A(f) = Z_{YX}(f) P_X(f) \quad (3.2)$$

$$Z_{YX}(f) = \sqrt{P_{YX}^2(f) + Q_{YX}^2(f)} \quad (3.3)$$

$$\gamma(f) = Z_{YX}(f) / \sqrt{P_X(f) \cdot P_Y(f)} \quad (3.4)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \{ Q_{YX}(f) / P_{YX}(f) \} \quad (3.5)$$

ここに,

$A(f)$  : 周波数伝達関数

$Z_{YX}(f)$  : クロススペクトルの絶対値

$\gamma(f)$  : コヒーレンス

$\theta(f)$  : 位相差

$P_X(f)$  : 入力  $X(t)$  のパワースペクトル

$P_Y(f)$  : 入力  $Y(t)$  のパワースペクトル

$P_{YX}(f)$  : コスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの実数部)

$Q_{YX}(f)$  : クオドラチャスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの虚数部)

周波数伝達関数  $A(f)$  とコヒーレンス  $\gamma(f)$  とは次式で示す関係がある。

$$\gamma^2(f) = \left| A^2(f) \right| \cdot P_X(f) / P_Y(f) \quad (3.6)$$

$\gamma(f)$  が 1 に近いほど, 入出力の相関性が強いことを示す。

図-3.24, 図-3.25にケース⑤およびケース④のコヒーレンスならびに位相差を示した。制震版の剛性が

大きいケース⑤の応答加速度と動水圧のコヒーレンスは共振振動数付近を中心として (約4~5Hz) 広い周波数帯で大きな値を示している。位相差も外側の動水圧 (W7, W8, W9) はほぼ等しく, 内側の動水圧 (W10, W11, W12) は反対にほぼ逆位相を示している。制震版の剛性が小さいケース④のコヒーレンスならびに位相差は, 剛性が大きい場合と同様の傾向を示すが, コヒーレンスの値は共振振動数付近では比較的大きいが共振振動数から遠ざかるにしたがい小さくなる。位相差についても剛性が大きい場合と同様の傾向を示すが, 位相差のばらつきが確認される。その他のケースでもこの傾向が確認された。

制震版の応答加速度と動水圧の関係についてまとめると以下のとおりとなる。

- ①制震版に作用する動水圧は, 制震版の慣性力と同じ向きに作用する。
- ②制震版の剛性が大きい場合には小さい場合と比較して, 応答加速度と動水圧の相関がより強くなる。
- c) 動水圧の計測値とWestergaad算定式との比較

正弦波加振実験で計測された, 制震版に作用する動水圧と制震版の応答加速度の関係を検討するために, Westergaadによる動水圧の算定式との比較検討を行った。

$$p_{max} = \frac{7}{8} w_0 (\alpha / g) \sqrt{hy} \quad (3.7)$$

ここに,

$p_{max}$  : 任意点の動水圧の最大値 (tf/m<sup>2</sup>)

$h$  : 水深 (m)

$y$  : 水面から任意点までの深さ (m)

$w_0$  : 水の単位体積重量 (tf/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  : 制震版の応答加速度の最大値 (m/s<sup>2</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

図-3.26に各実験ケースで計測された制震版の動水圧の最大値と, 制震版の応答加速度からWestergaadの算定式で求められる動水圧の最大値を重ねて示した。算定式では, 与える水深の条件で求められる動水圧の値が大きく異なってくる。ここでは, 水深として制震版の浸水長の2/3の値を与えた (水面から2段目の動水圧計および加速度計の設置位置までの距離)。図中の▲印が実験値を示し, ●印が算定式の値を示す。制震版の剛性の大きさや長さによらず, 全てのケースで概ね実験値と算定値はほぼ等しい値を示すことから, 浸水長の2/3の値を水深として与えれば, 制震版に作

ケース⑤：制震版81cm, 剛性大, 5枚

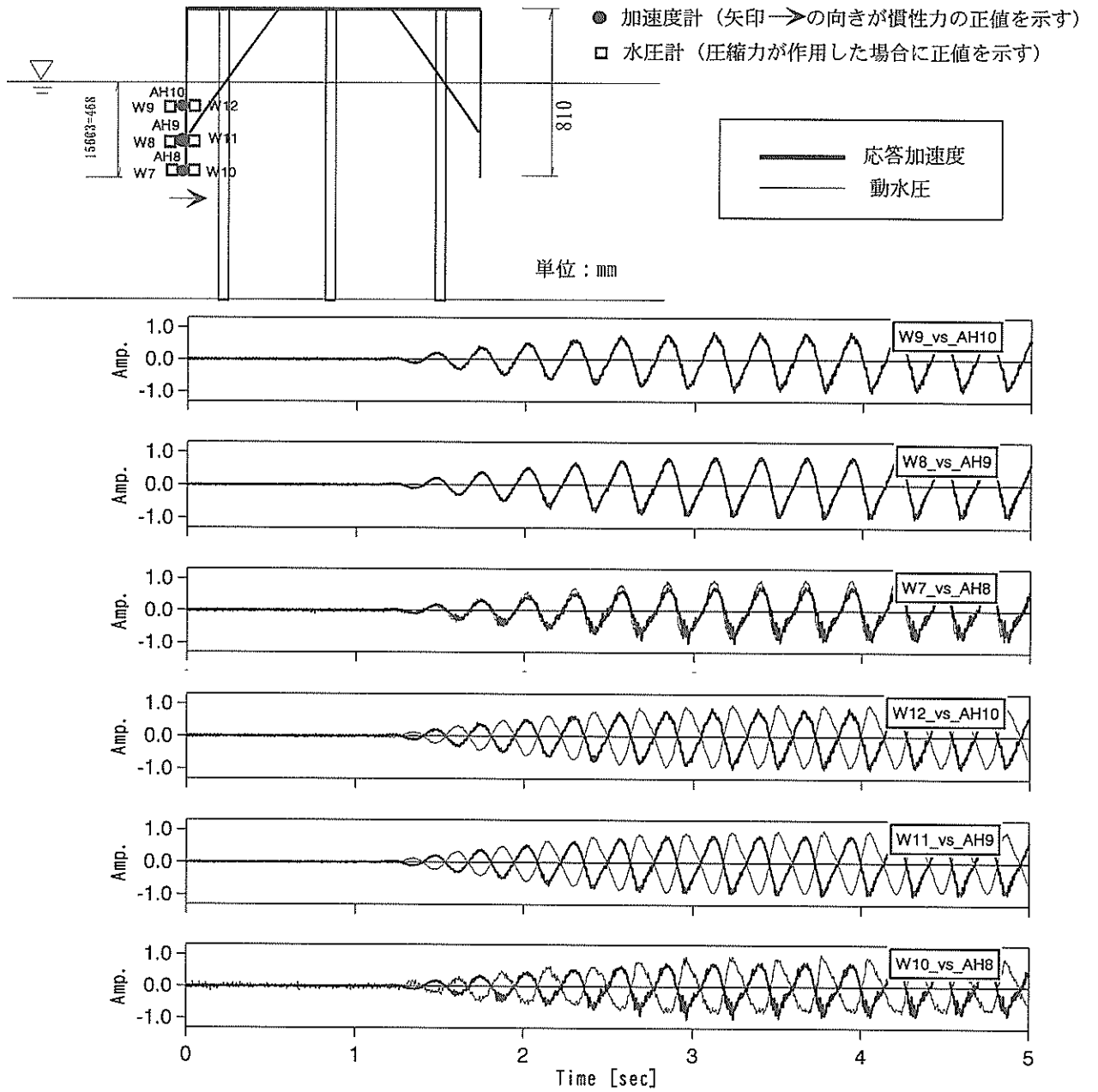


図-3.22 ケース⑤の制震版の応答加速度と動水圧の時刻歴 (共振点加振)

ケース④：制震版81cm, 剛性小, 5枚

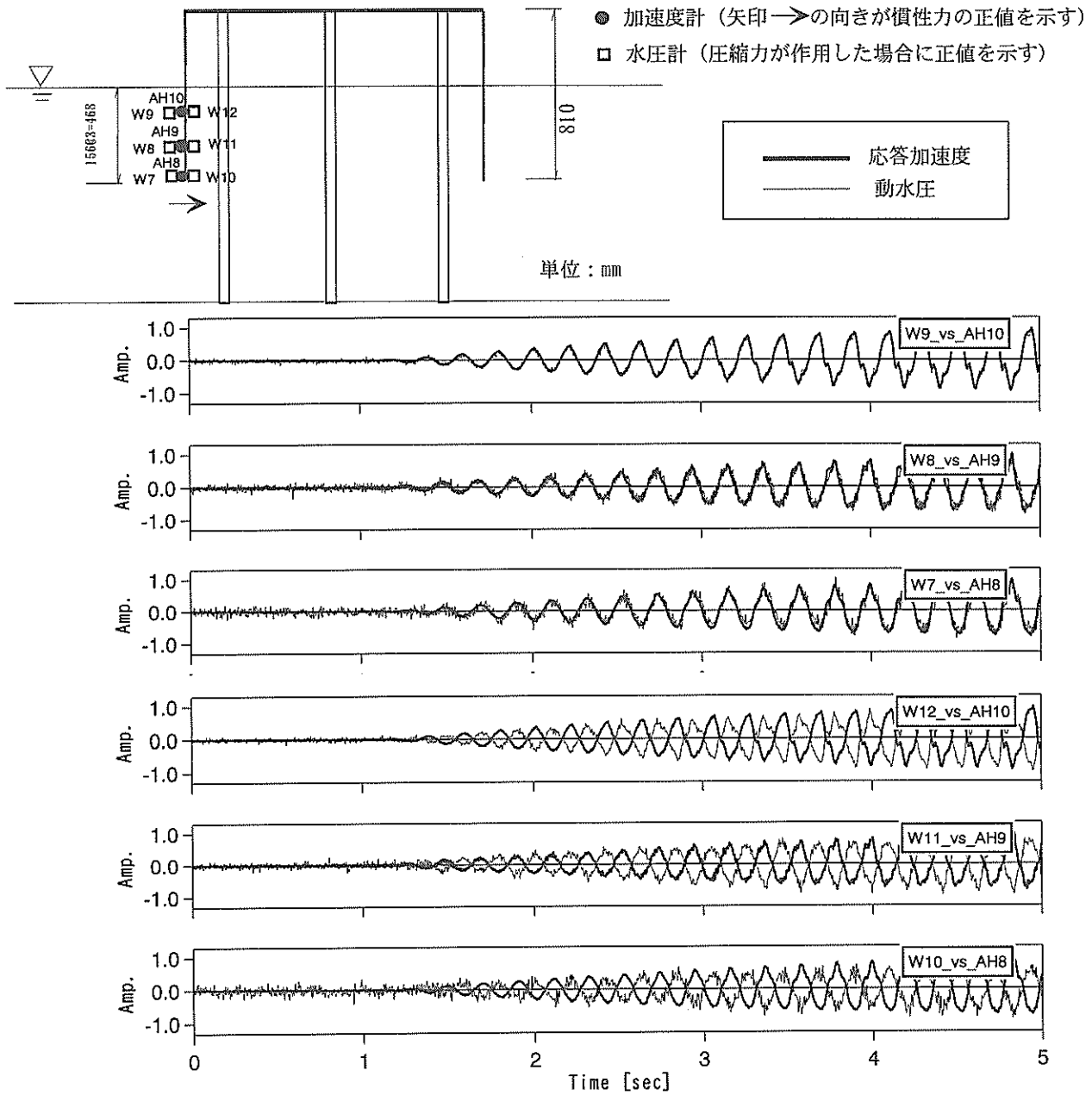


図-3.23 ケース④の制震版の応答加速度と動水圧の時刻歴 (共振点加振)



ケース⑤：制震版81cm, 剛性大, 5枚

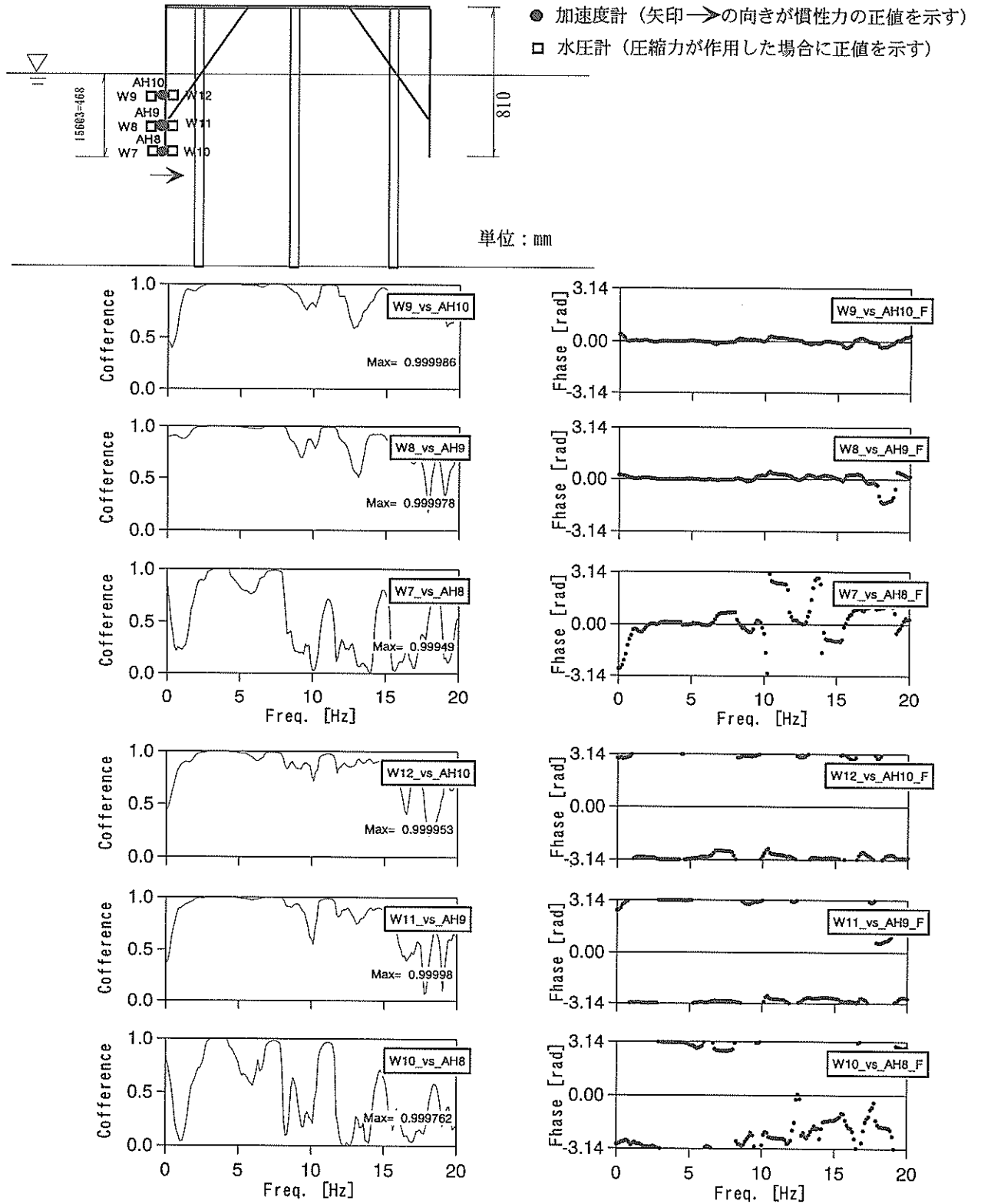


図-3.24 ケース⑤の制震版の応答加速度と動水圧の相関および位相差 (共振点加振)

ケース④：制震版81cm, 剛性小, 5枚

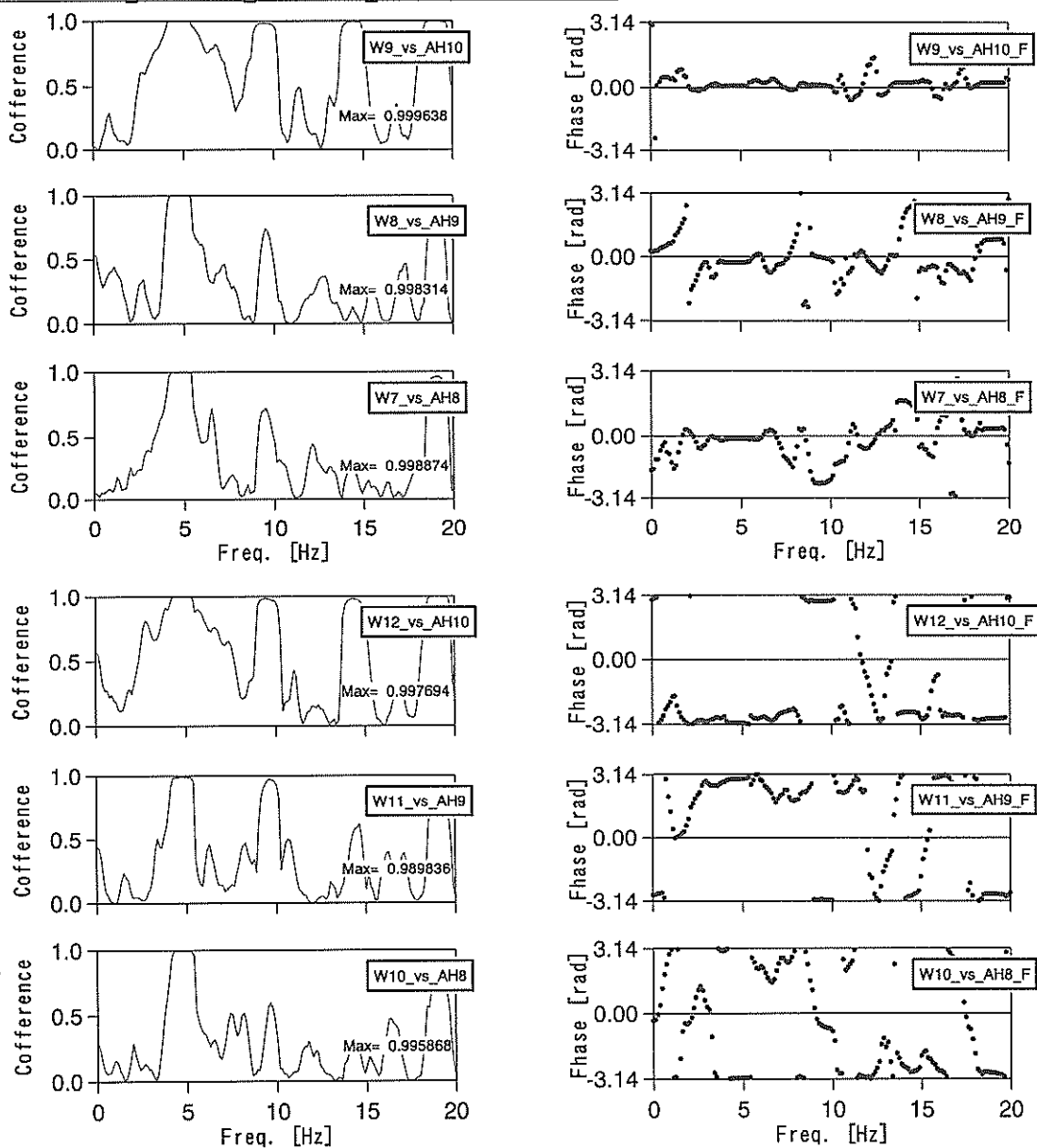
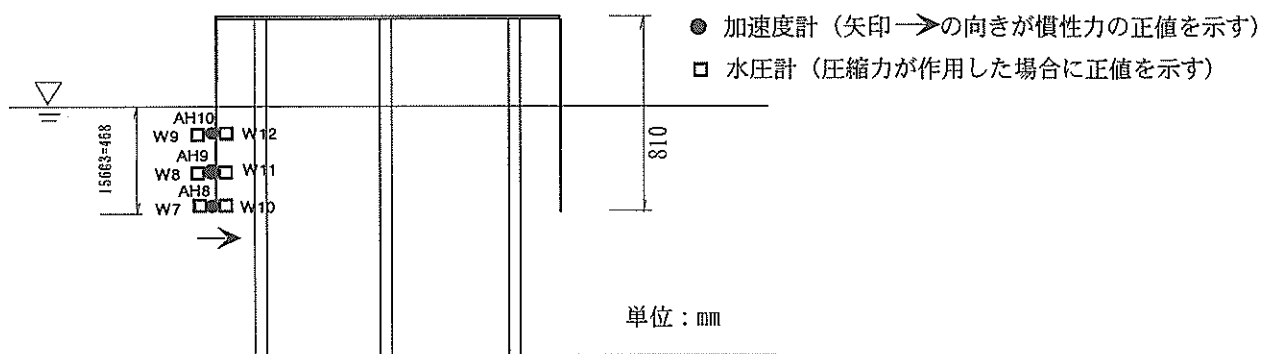


図-3.25 ケース④の制震版の応答加速度と動水圧の相関および位相差 (共振点加振)

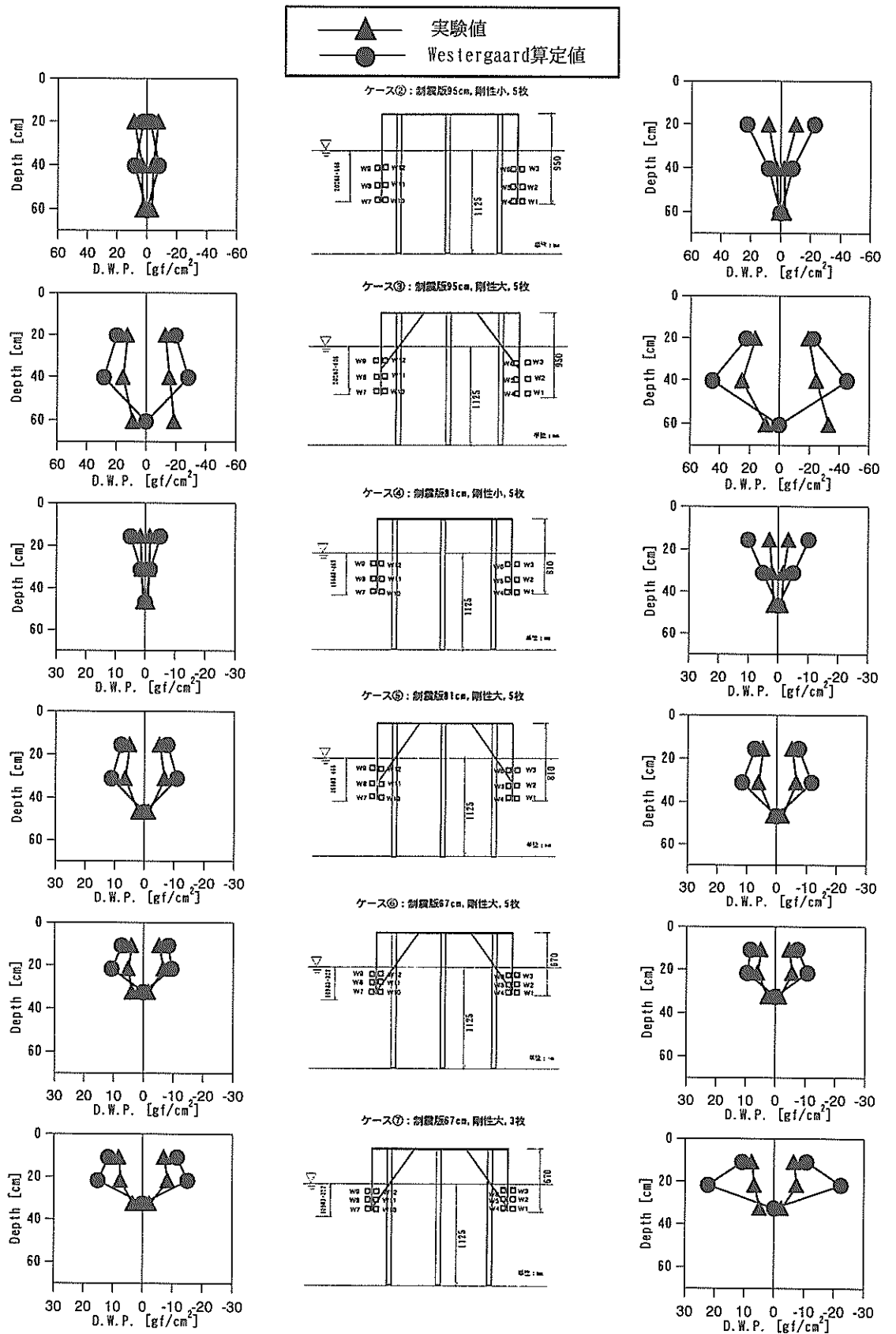


図-3.26 実験で計測された動水圧とWestergaardから算定される動水圧との比較  
(浸水長さの2/3をWestergaardの算定式の水深とした場合)

用する動水圧の値は、Westergaadの算定式で求めることが可能である。計測された動水圧と算定式により求められる動水圧の比較検討の結果は、以下のとおりである。

- ①制震版に作用する動水圧は、Westergaadの算定式で概ね求めることができる。
- ②算定式に代入する水深としては、制震版の浸水長の2/3の値を与える。
- (3)制震版の剛性、長さ、枚数を変化させた場合の実験結果

正弦波加振実験では制震版の条件が制震効果に及ぼす影響を把握するために、制震版の剛性、長さ、枚数を変化させて加振を行った。制震版が異なる条件で計測された上部工の応答加速度および杭のひずみ等から、制震版の条件が制震効果に及ぼす影響が明らかになる。また、制震版の応答加速度と動水圧の相関等を検討することで、制震メカニズムに対する検討も同時に行える。制震版の条件を変化させることで（剛性、長さ、枚数の組み合わせ）、下記に示す合計5パターンの制震版の条件について検討が可能である。

- 1)剛性に関する検討（長さを一定（95cm）にして剛性を変化させる）。
- 2)剛性に関する検討（長さを一定（81cm）にして剛性を変化させる）。
- 3)長さに関する検討（剛性を小さな一定値にして長さを変化させる）。
- 4)長さに関する検討（剛性を大きな一定値にして長さを変化させる）。
- 5)枚数に関する検討（剛性を大きな一定値にして枚数を変化させる）。

a)剛性を変化させた場合

1)の剛性に関する検討として、長さを一定（95cm）にして剛性を変化させた場合と、制震版を設置しない場合の応答値の最大値分布を図-3.27に示す。制震版の剛性が大きいほど杭頭部の最大ひずみや上部工の最大応答加速度が低減することから、長さが一定の条件では、制震版の剛性が大きいほど制震効果が大きい。制震版の応答加速度の最大値分布は、制震版の剛性により大きく異なる。剛性が大きいと制震版の上部工設置位置AH4から制震版の先端AH7に近づくにしたがい漸増するが、剛性が小さいと浸水長の中心点付近に節を有する応答を示す。動水圧は応答加速度と同様の傾向を示し、剛性が大きい場合に大きな値を示す。制震版の剛性により制震効果が異なる原因の一つとして、この動水圧の大きさの違いが挙げられる。つぎに、長さ

を一定（81cm）にして剛性を変化させた場合の分布を図-3.28に示す。2)の検討は1)より制震版の長さが若干短くなった場合の検討を行うものである。1)と同様に剛性が大きいほど、ひずみおよび応答加速度の最大値は低減しており、1)と概ね同様の傾向を示す。1)と2)の検討から、制震版の長さが同じ場合には剛性が大きいほど、その制震効果は大きな傾向を示すことが確認された。

b)長さを変化させた場合

つぎに、剛性を等しくして制震版の長さに関する検討を行う。まず、3)で剛性が小さく、長さを変化させた場合の検討を行う。応答値の最大値の分布を図-3.29に示す。杭のひずみおよび上部工の応答加速度は、制震版が長いほど大きく低減する。制震版の剛性が等しい場合には、長いほど制震効果が大きいと考えられる。制震版の応答加速度は、浸水長の中心点付近に節を有する。動水圧は、先端に近づくにしたがい低減する。4)で剛性が大きく、長さを変化させた場合の検討を行う。最大値の分布を図-3.30に示す。3)と同様に、上部工応答加速度および杭のひずみから、制震版の剛性が大きい場合にも制震版が長いほど、制震効果が大きいことが確認できる。制震版の応答加速度は、設置位置から先端に近づくにしたがい僅かに増幅する。増幅の程度は制震版が長いほど大きくなり、最も長い場合には制震版先端での増幅が顕著になる。動水圧は概ね同様の傾向を示し、上段から中段にかけて増幅し、中段から先端にかけて減少する。3)および4)の検討から剛性が等しい場合には、制震版の長さが長いほど、その効果が大きいことが確認された。この傾向は剛性が大きい場合により顕著となる。

c)枚数を変化させた場合

さらに、5)で制震版の設置枚数に関する検討を行った。剛性を大きくして、枚数を変化させた場合の最大値の分布を図-3.31に示す。設置枚数が3枚から5枚になると上部工応答加速度および杭のひずみの低減が確認されたことから、制震版の枚数が多いほど制震効果が大きくなることが確認された。

なお、正弦波加振では入力最大加速度として30Galと100Galを用いている。30Gal加振で行った実験結果と100Galのそれを比較する場合には、100Gal加振の値に30/100を掛けて補正した値を使用した。この手法は、非線形性が強い場合には使用できないが、入力に対する上部工の応答加速度等は、ほぼ線形的な応答を示す実験結果から、この検討手法により得られた評価は妥当なもの判断した。

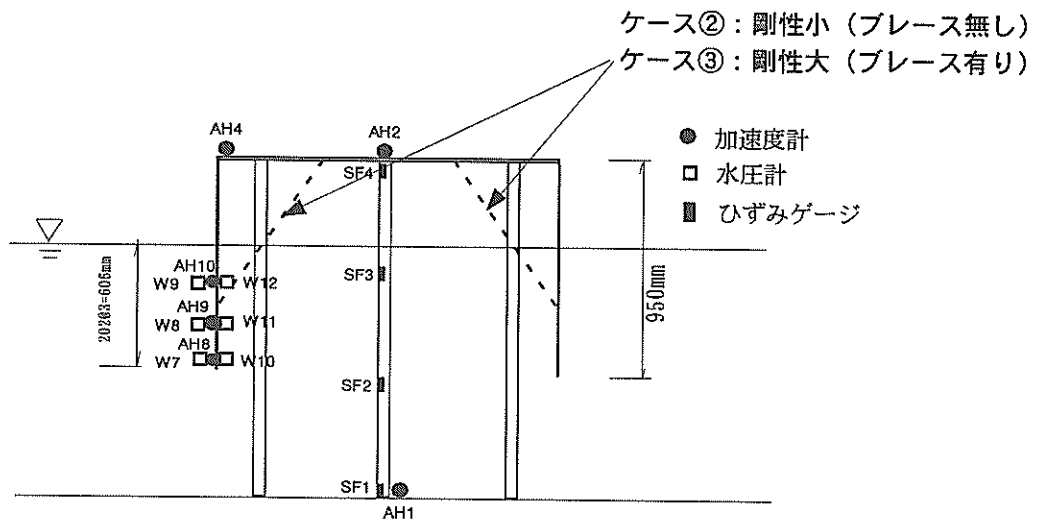
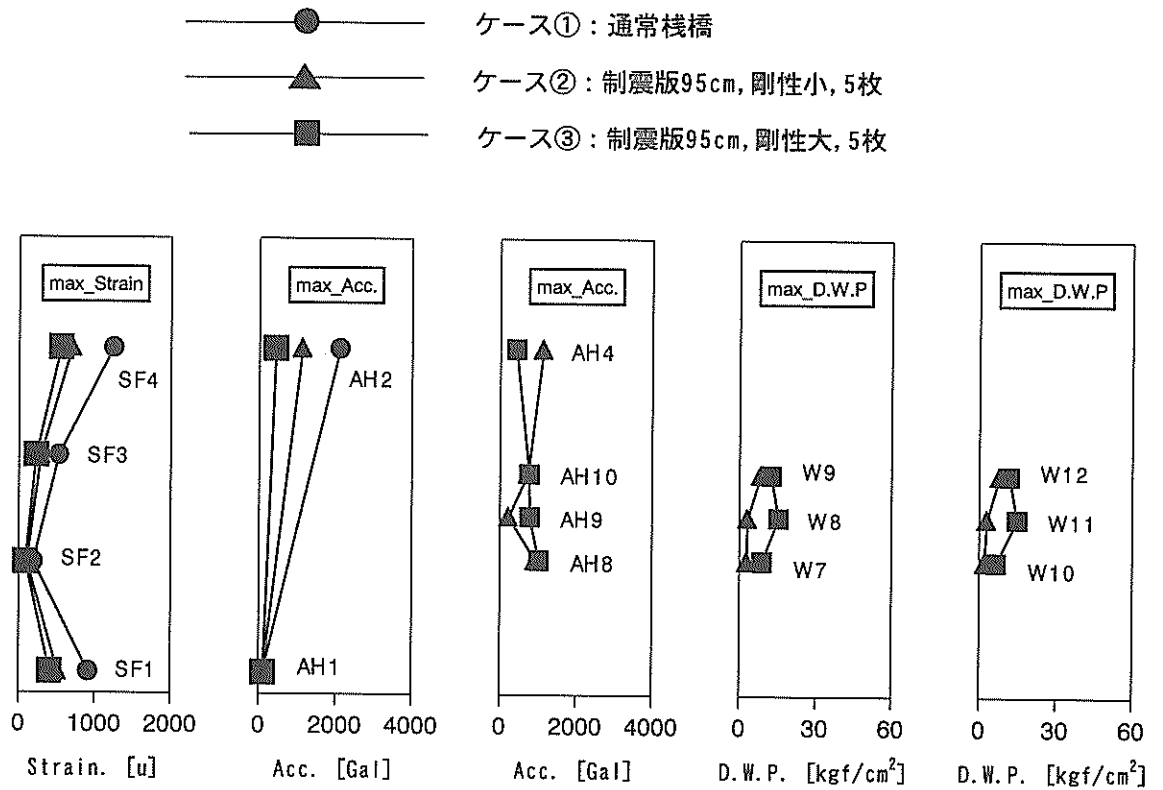


図-3.27 剛性に関する検討 (制震版の長さを95cmに固定して剛性を変化させた場合: ケース②およびケース③はフィルターあり)

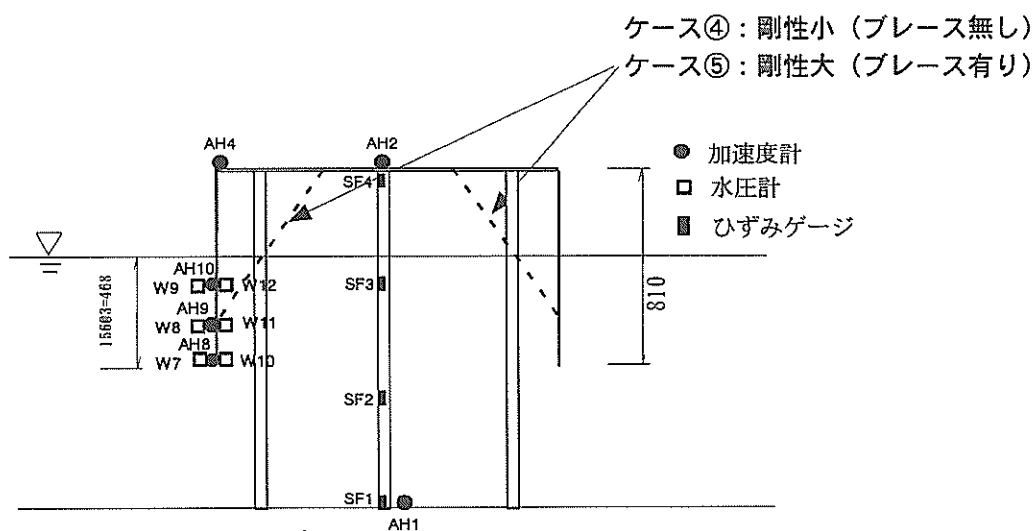
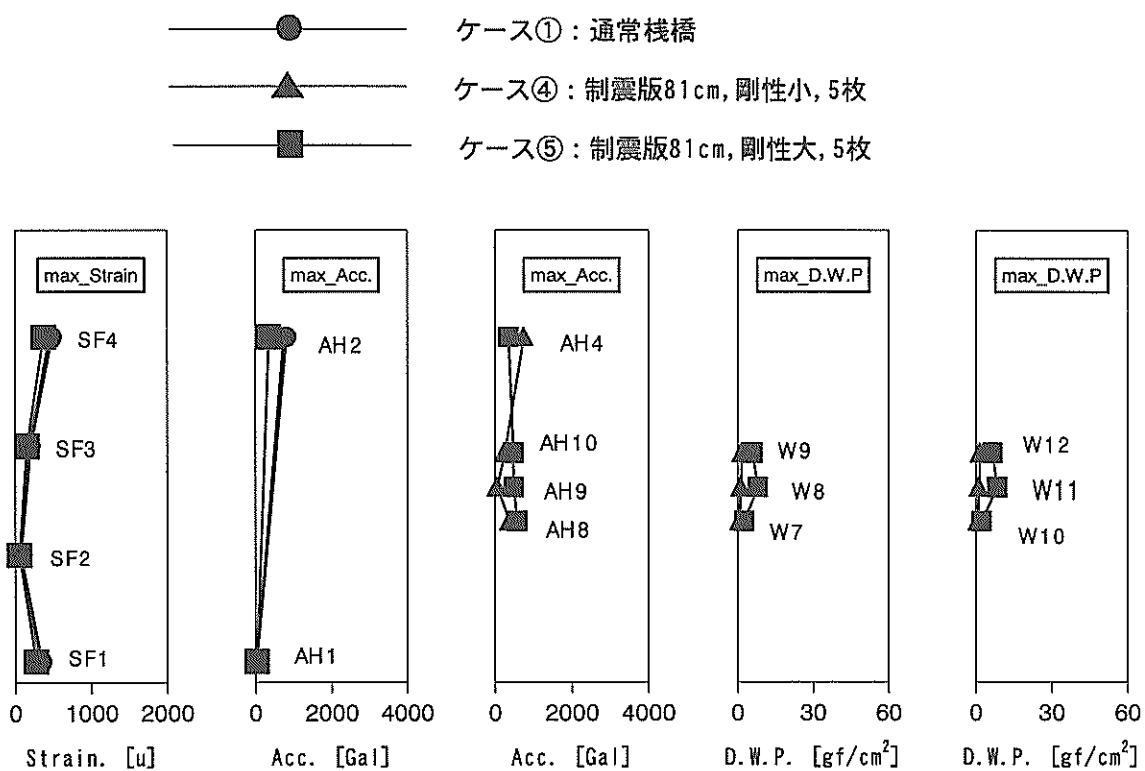


図-3.28 剛性に関する検討 (制震版の長さを 81cm に固定して剛性を変化させた場合)

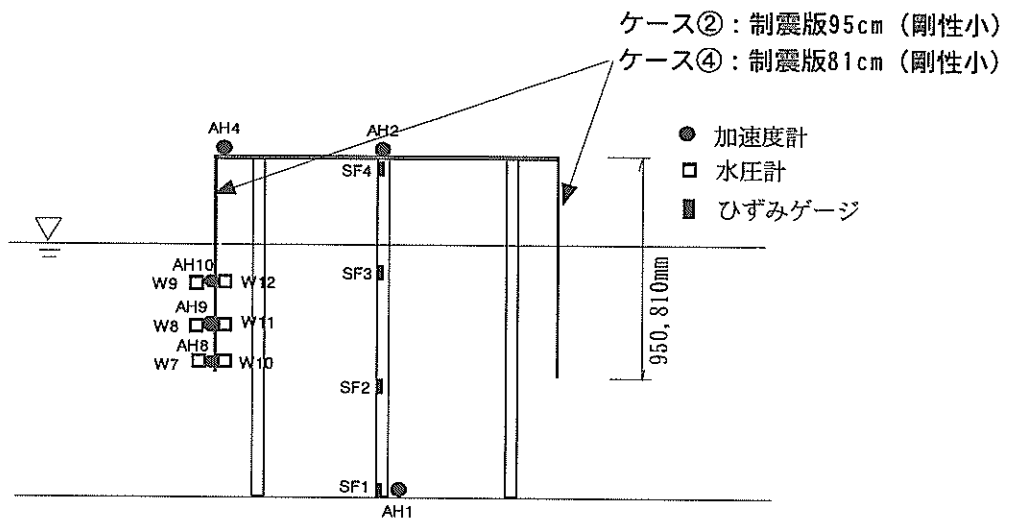
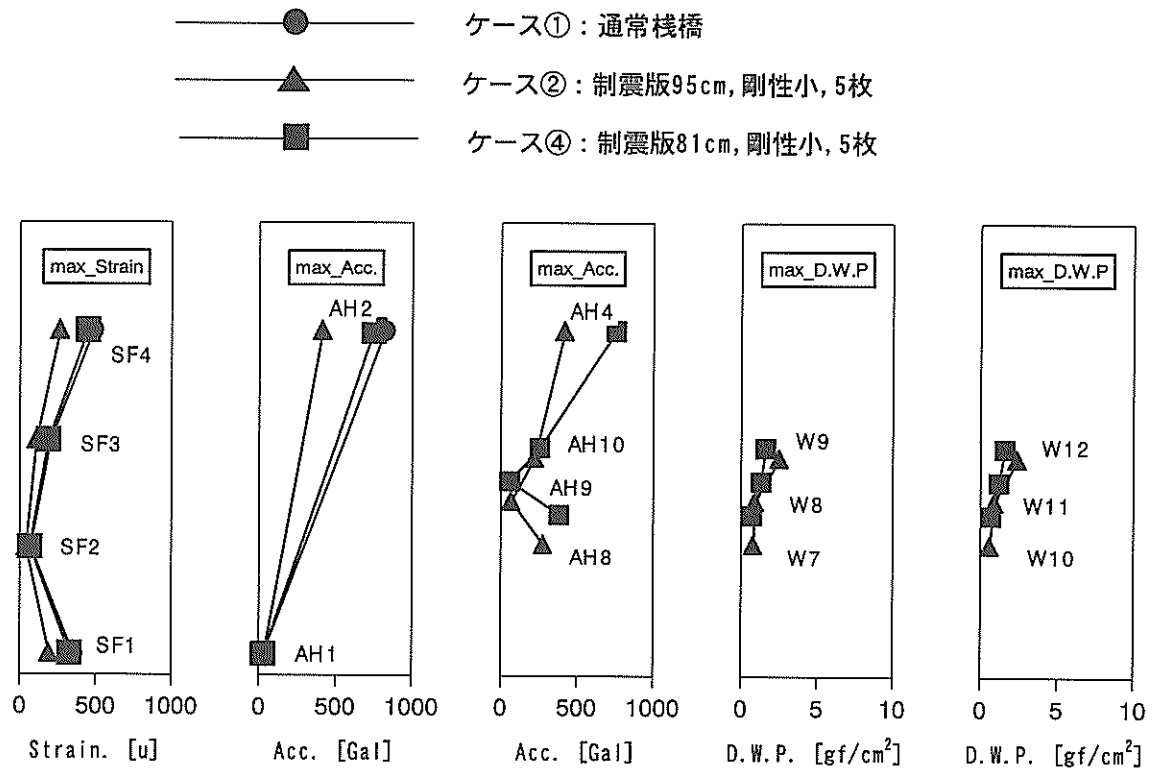


図-3.29 長さに関する検討(制震版の剛性を剛性小に固定して長さを変化させた場合:  
ケース②はフィルター有り)

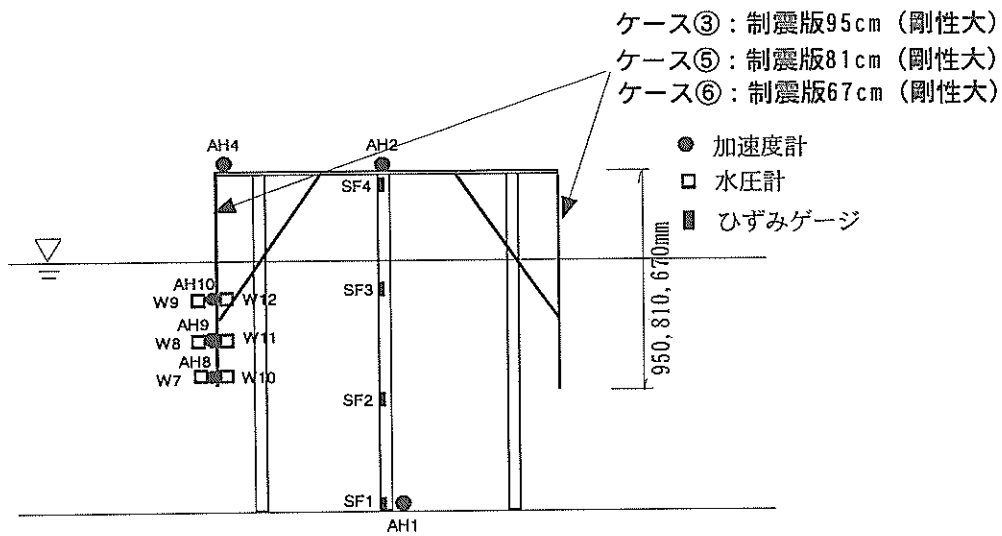
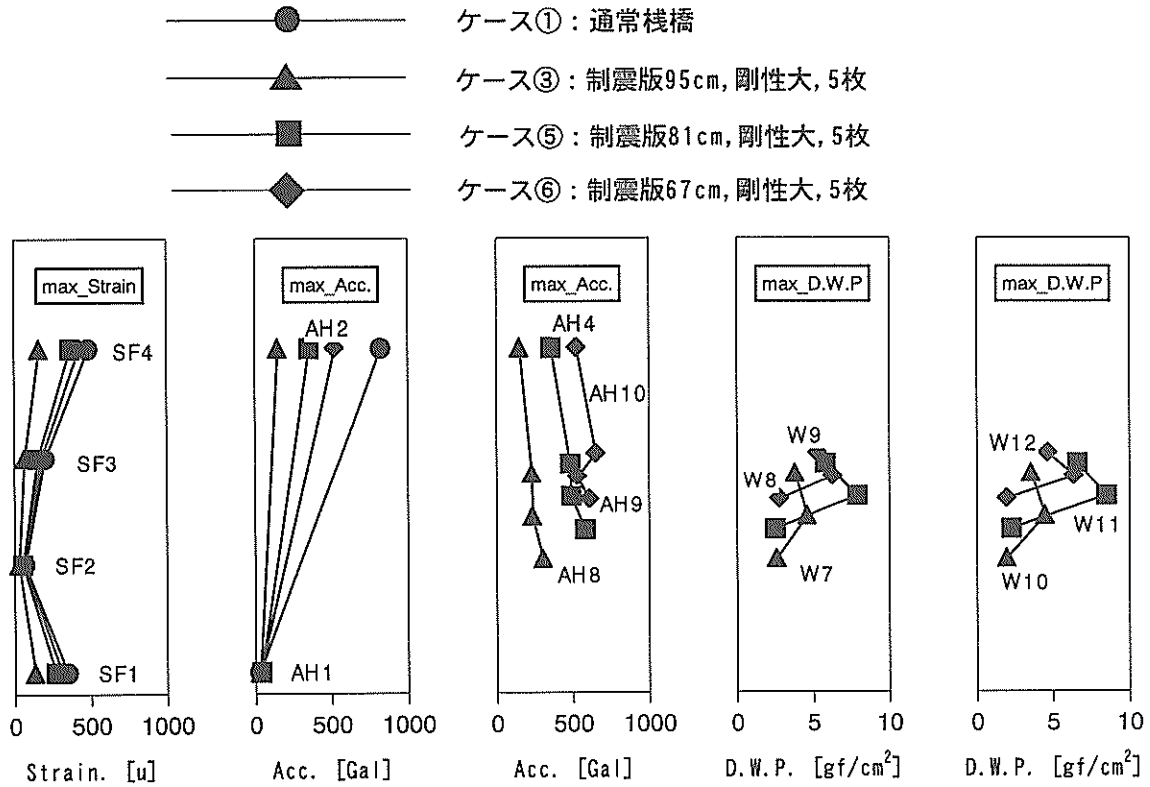


図-3.30 長さに関する検討 (制震版の剛性を剛性大に固定して長さを変化させた場合：  
 ケース③はフィルター有り)



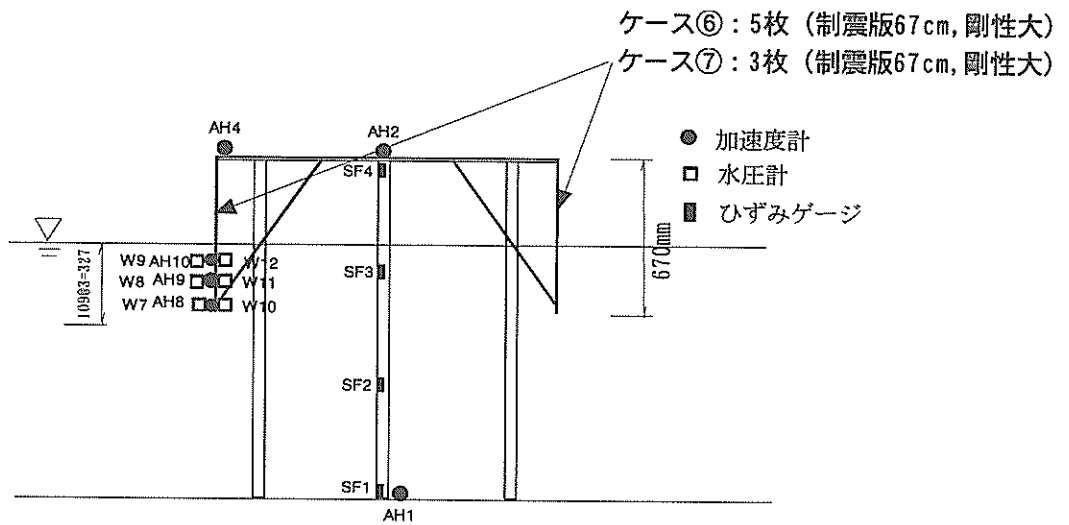
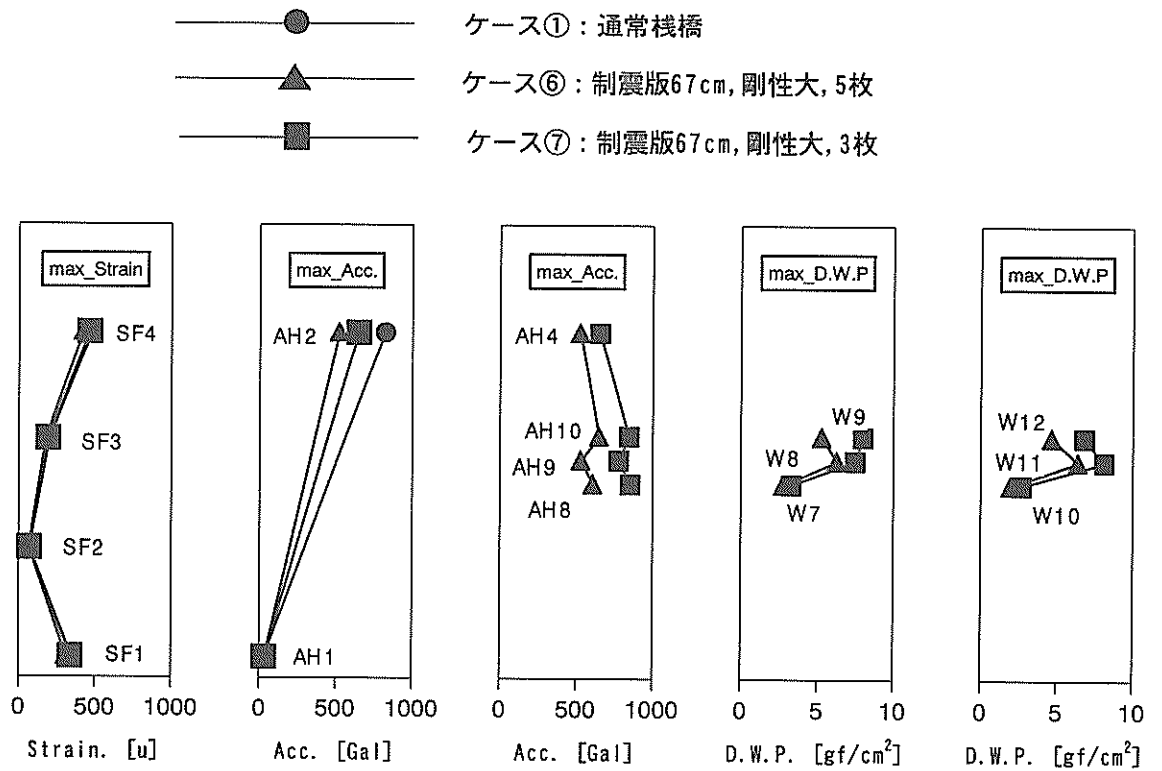


図-3.31 設置枚数に関する検討 (制震版の剛性および長さを一定にして設置枚数を変化させた場合)

表-3.19 共振実験結果

実験 ケース	固有 振動数f1 (Hz)	固有振動数の低減率 各ケースの固有振動数 /ケース①の固有振動数	加速度 応答倍率Sa 応答/入力	応答倍率の低減率 各ケースの応答倍率 /ケース①の応答倍率	制震版の条件			減衰定数 hv
					長さ (cm)	剛性	枚数 (枚)	
①	4.84	—	48.9	—	—	—	—	0.013
③	3.27	0.67	14.9	0.30	95	大	5	約0.050
⑤	3.70	0.76	19.6	0.40	81	大	5	0.028
⑥	4.16	0.86	28.3	0.58	67	大	5	0.024
⑦	4.37	0.90	48.8	1.00	67	大	3	0.014

ケース③の減衰定数hvは、共振曲線から図解的方法で求められた値0.027に補正を施した値 (hv≒0.050) を示す。

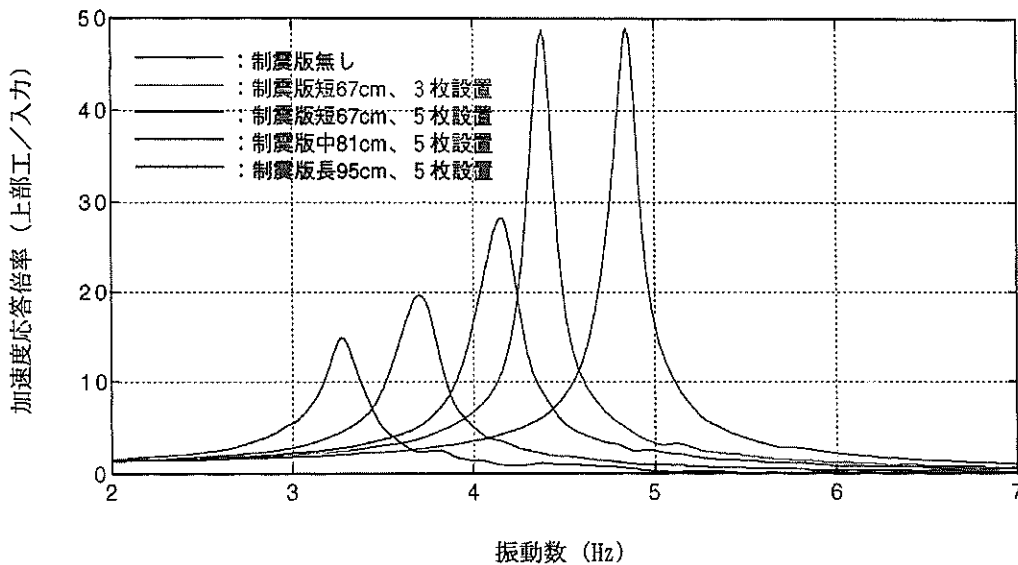


図-3.32 スウィープ波加振による共振実験結果

### 3.3 制震版の効果の検討

共振実験および正弦波加振実験から、制震効果が確認された。また、制震効果が大きい制震版の条件も明らかになった。ここでは、制震効果とその要因についてさらに詳細に検討を行う。

#### (1) 共振実験結果

3.2の(1)のa)のスウィープ波加振による共振実験の結果では、加速度応答倍率Saと栈橋全体の固有振動数f1から共振曲線を描き、この共振曲線から減衰定数hvを図解的方法で求めた。応答倍率Saはhvの増加に伴い一様に低下し、固有振動数f1も概ねhvの増加とともに低下する傾向が確認された。また、水がある場合には水が無い場合と比べて、hvの値が大きくなる傾向にあ

る。これらの実験結果は、水が存在することにより、減衰が大きくなり応答値の低減および固有振動数の低下が生じることを明確に示している。制震効果は水と制震版の相互作用により「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰が大きくなることに起因する現象であると推測される。ここでは、制震版の剛性が大きく、制震効果および長周期化が顕著であったケースに注目し、制震のメカニズムの検討をより詳細に行う。

制震版を設置しない通常形式の栈橋(ケース①)と、制震版の剛性が大きいケースで、制震版の長さ枚数を変化させた場合(ケース③、ケース⑤、ケース⑥、ケース⑦)のスウィープ波加振による共振実験の結果を表-3.19、図-3.32に示す。ここで示した共振曲線は、全て振動台の水槽に注水して加振を行い計測され

た結果である。応答加速度倍率 $S_a$ の最大値および固有振動数 $f_1$ に着目すると、制震版を設置しない通常形式の栈橋と比較して、制震版が長くなるほど、加速度応答倍率 $S_a$ が低減するとともに、固有振動数 $f_1$ が低下する傾向にある。特に、ケース③（制震版が長い： $L_1=95\text{cm}$ ）ではケース①（通常栈橋）と比較して、応答倍率 $S_a$ の最大値が約70%低減し、固有振動数 $f_1$ が約30%低下する。減衰定数の値も $h_v=0.013$ から $h_v=0.050$ と約3倍になる。その他の全てのケースでも、応答倍率 $S_a$ は $h_v$ の増加に伴い一様に低下し、固有振動数 $f_1$ も $h_v$ の増加とともに低下する傾向が確認された。

応答倍率 $S_a$ は $h_v$ の増加に伴い一様に低下し、減衰定数 $h_v$ が減衰の大きさを示す指標であることから、制震効果（応答倍率 $S_a$ の低減）の要因としては、前述したとおり、水と制震版の相互作用により「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰が大きくなることが挙げられる。スウィープ波加振による共振実験からは、減衰の大きさは制震版の条件を整えれば、通常形式の栈橋と比べて最大で約3倍に増え、その値は約5%程度と推測される。なお、ここで検討に用いたケース③の減衰定数 $h_v$ は、実験から $h_v=0.027$ と求められたが、一自由度系の自由振動理論から得られる共振曲線に基づき補正された値 $h_v=0.050$ を用いている（補正の方法は付録.Cを参照）。

一方、固有振動数 $f_1$ の低減に対する要因としては、付加質量が作用したことが要因として挙げられる。栈橋の固有周期 $T_s$ の算定方法は式(3.8)で示される。

$$T_s = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} \quad (3.8)$$

ここに、 $T_s$ ：栈橋の固有周期

$M$ ：栈橋本体と制震版の質量

$K$ ：栈橋の水平方向バネ定数

さらに、付与された付加質量を $M_a$ とすると、付加質量が作用した栈橋の固有周期 $T_s'$ は式(3.9)で求められる。

$$T_s' = 2\pi\sqrt{\frac{M+M_a}{M}} \quad (3.9)$$

ここに、 $T_s'$ ：付加質量が作用した栈橋の固有周期

$M$ ：栈橋本体と制震版の質量

$M_a$ ：付加質量

$K$ ：栈橋の水平方向バネ定数

式(3.9)から、付加質量が作用すると栈橋の固有周期 $T_s'$ は大きくなる。つまり、固有振動数 $f_1$ は低くなり長周期化が顕著になる。固有振動数 $f_1$ の低減率から、付加質量 $M_a$ の栈橋の質量 $M$ に対する比 $M_a/M$ を式(3.9)より逆算すると、最も固有振動数 $f_1$ の低下が大きいケース③では、固有振動数が約0.7に低下していることから、計算上求められる付加質量は、栈橋全体質量とほぼ等しくなり、かなり大きな値となる。固有振動数の低下は、応答値の低下と同様に制震版の剛性が大きい場合に顕著になる。制震版の剛性が大きい場合には、制震版の動水圧が大きくなり、制震版に付与される付加質量が大きくなることで、固有振動数が大きく低下するものと推測される。

#### (2) 制震版の剛性、長さ、枚数が制震効果に与える影響

前節3.2の(3)において制震版の剛性、長さ、枚数を変化させた場合に杭に生じるひずみ、入力に対する上部の応答加速度、制震版の応答加速度、制震版の動水圧の最大値を比較した。それらの結果から、制震版の条件が制震効果に及ぼす影響が明らかになるとともに、制震効果が大きい制震版の条件を把握することができた。ここでは、制震版の条件を変化させた場合の、上部工の応答変位 $D_2$ 、上部工の応答加速度 $AH_2$ 、杭頭部のひずみ $SF_4$ の最大値、時刻歴、応答値の周波数依存性（スペクトル）に注目し、制震版の条件が制震効果と振動特性に及ぼす影響をさらに詳細に検討する。

##### a) 制震版の剛性の及ぼす影響

制震版の剛性が制震効果に及ぼす影響を検討するために、制震版の長さを一定（95cm）にし、制震版の剛性を変化させた場合の結果を表-3.20、図-3.33に示す。共振点加振時の上部工の応答変位 $D_2$ 、上部工の応答加速度 $AH_2$ 、杭頭部のひずみ $SF_4$ の最大値を比較すると、剛性が大きい場合（ケース③：剛性大）の低減率は約48~77%程度であり、剛性が小さい場合（ケース②：剛性小）の低減率は約30~35%程度である。このことから、制震版を設置することで応答値を大きく低減する制震効果が発揮され、その効果は長さが等しい場合には、制震版の剛性が大きいほど顕著になることが確認された。共振点加振時の波形からも同様に、制震版の剛性が大きいほど最大値は小さくなる傾向が確認される。また、入力振動数に対する上部工変位および杭頭部のひずみの最大値のスペクトルから、剛性が大きい場合には固有振動数 $f_1$ に対する応答値が大きく低減するとともに、固有振動数 $f_1$ も低下する。剛性が小さい場合には、応答値は低減するものの、大きな固

表-3.20 剛性に関する検討 (制震版の長さを一定95cmにし, 剛性を变化させた場合)

正弦波 加振実験 ケース	固有 振動数 f1 (Hz)	計測最大値			低減率			制震版 の条件
		上部工 変位(D2) (cm)	杭頭 ひずみ(SF4) ( $\mu$ )	上部工 加速度(AH2) (Gal)	上部工 変位(D2) (%)	杭頭 ひずみ(SF4) (%)	上部工 加速度(AH2) (%)	
①	4.84	2.37	1260	2114	-	-	-	無し
②	4.77	1.64	875	1386	30.8	30.6	34.5	95cm, 剛性小, 5枚
③	3.27	1.23	619	495	48.1	50.9	76.6	95cm, 剛性大, 5枚

\* 低減率はケース① (制震版無し) から低減した割合を%表示したものである

表-3.21 剛性に関する検討 (制震版の長さを一定81cmにし, 剛性を变化させた場合)

正弦波 加振実験 ケース	固有 振動数 f1 (Hz)	計測最大値			低減率			制震版 の条件
		上部工 変位(D2) (cm)	杭頭 ひずみ(SF4) ( $\mu$ )	上部工 加速度(AH2) (Gal)	上部工 変位(D2) (%)	杭頭 ひずみ(SF4) (%)	上部工 加速度(AH2) (%)	
①	4.84	0.89	483	826	-	-	-	無し
④	4.86	0.81	445	755	9.0	7.8	8.6	81cm, 剛性小, 5枚
⑤	3.70	0.71	371	358	20.2	23.3	56.7	81cm, 剛性大, 5枚

\* 低減率はケース① (制震版無し) から低減した割合を%表示したものである

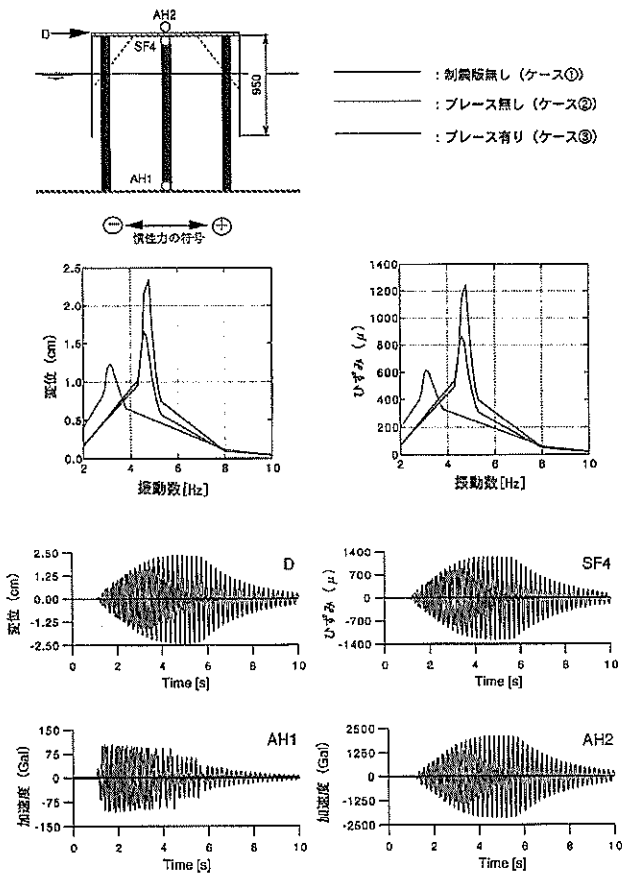


図-3.33 剛性の及ぼす影響 (長さは95cmで一定)

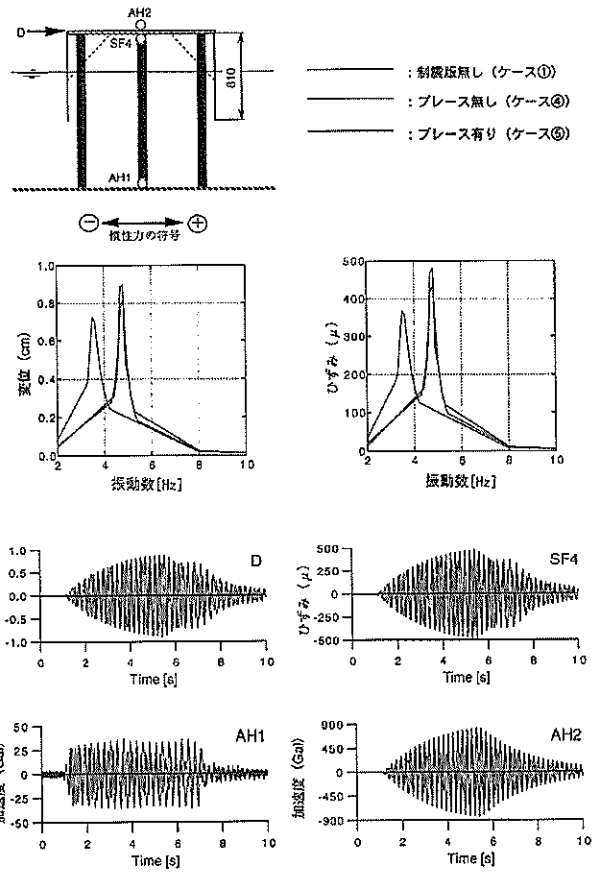


図-3.34 剛性の及ぼす影響 (長さは81cmで一定)

表-3.22 長さに関する検討 (制震版の剛性を小さく一定にし、長さを変化させた場合)

正弦波 加振実験 ケース	固有 振動数 f1 (Hz)	計測最大値			低減率			制震版 の条件
		上部工 変位(D2) (cm)	杭頭 ひずみ(SF4) ( $\mu$ )	上部工 加速度(AH2) (Gal)	上部工 変位(D2) (%)	杭頭 ひずみ(SF4) (%)	上部工 加速度(AH2) (%)	
①	4.84	0.89	483	826	-	-	-	無し
②	4.77	0.47	251	398	47.1	48.0	51.8	95cm, 剛性小, 5枚
④	4.86	0.81	445	755	9.0	7.8	8.6	81cm, 剛性小, 5枚

\* ) 低減率はケース① (制震版無し) から低減した割合を%表示したものである

\* ) ケース②は入力を100Gal行ったので比較のため30/100で補正した値を示す

表-3.23 長さに関する検討 (制震版の剛性を大きく一定にし、長さを変化させた場合)

正弦波 加振実験 ケース	固有 振動数 f1 (Hz)	計測最大値			低減率			制震版 の条件
		上部工 変位(D2) (cm)	杭頭 ひずみ(SF4) ( $\mu$ )	上部工 加速度(AH2) (Gal)	上部工 変位(D2) (%)	杭頭 ひずみ(SF4) (%)	上部工 加速度(AH2) (%)	
①	4.84	0.89	483	826	-	-	-	無し
③	3.27	0.35	178	142	60.3	63.2	82.8	95cm, 剛性大, 5枚
⑤	3.70	0.71	371	358	20.2	23.3	56.7	81cm, 剛性大, 5枚
⑥	4.16	0.81	427	525	9.0	11.6	36.5	67cm, 剛性大, 5枚

\* ) 低減率はケース① (制震版無し) から低減した割合を%表示したものである

\* ) ケース③は入力を100Gal行ったので比較のため30/100で補正した値を示す

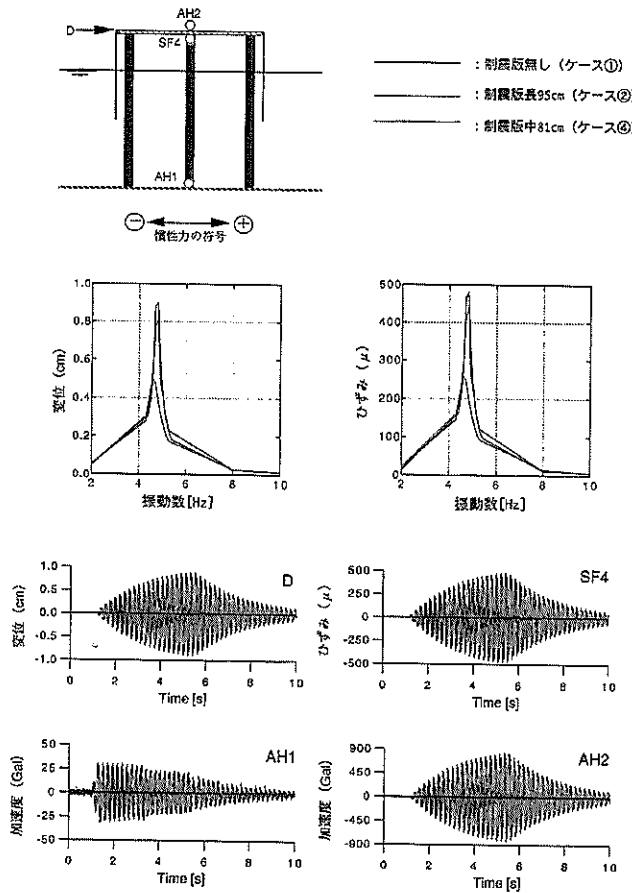


図-3.35 長さの及ぼす影響 (剛性小で一定)

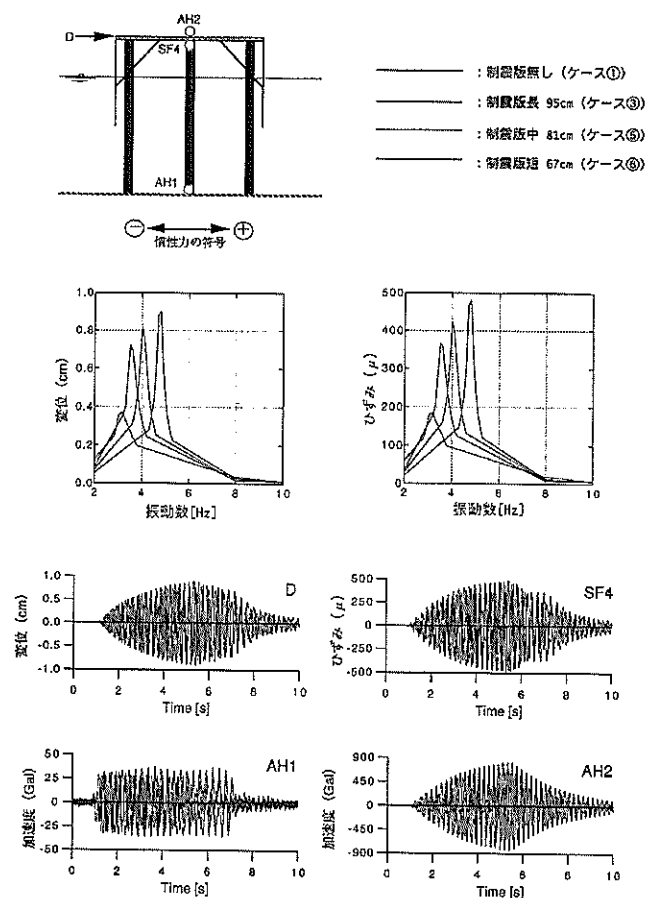


図-3.36 長さの及ぼす影響 (剛性大で一定)

表-3.24 設置枚数に関する検討（制震版の枚数を5枚、3枚と変化させた場合）

正弦波 加振実験 ケース	固有 振動数 f1 (Hz)	計測最大値			低減率			制震版 の条件
		上部工 変位 (D2) (cm)	杭頭 ひずみ (SF4) ( $\mu$ )	上部工 加速度 (AH2) (Gal)	上部工 変位 (D2) (%)	杭頭 ひずみ (SF4) (%)	上部工 加速度 (AH2) (%)	
①	4.84	0.89	483	826	-	-	-	無し
⑥	4.16	0.81	427	525	9.0	11.6	36.5	67cm, 剛性大, 5枚
⑦	4.37	0.88	467	649	1.1	3.4	21.5	67cm, 剛性大, 3枚

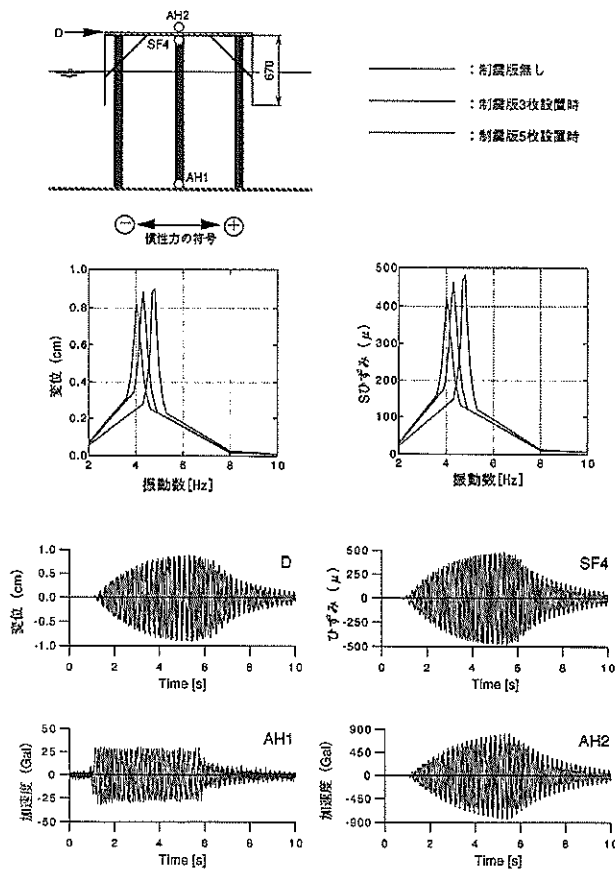


図-3.37 枚数の及ぼす影響（長さ67cm, 剛性大で一定）

有振動数 $f_1$ の低下は見られない。

同様に、制震版の長さを一定（81cm）にし、剛性の及ぼす影響の検討を行う。実験結果を表-3.21、図-3.34に示す。剛性が大きい場合（ケース⑤：剛性大）の低減率は約20～57%程度であり、剛性が小さい場合（ケース④：剛性小）の低減率は約8～9%程度である。制震版の長さが81cm場合には、全般的に長さが95cmの場合と同様の傾向を示すが、応答値の低減の程度が小さく、制震効果が小さくなる。剛性が大きい場合には固有振動数 $f_1$ が低下するが、剛性が小さい場合には大きな固有振動数 $f_1$ の低下は見られない。これらの結果から以下のことが確認された。

①制震版の長さが一定の場合には、剛性が大きいほど制震効果は大きい。

②固有振動数 $f_1$ は、制震版の剛性が大きい場合には低下するが、剛性が小さい場合には変化しない。

b)制震版の長さの及ぼす影響

制震版の長さが制震効果に及ぼす影響を検討するために、制震版の剛性を一定（小さく）にし、制震版の長さを変化させた場合の結果を表-3.22、図-3.35に示す。共振点加振時の上部工の応答変位 $D_2$ 、上部工の応答加速度 $AH_2$ 、杭頭部のひずみ $SF_4$ の最大値を比較すると、長い場合（ケース②：95cm）の低減率は約47～52%程度であり、それより短い場合（ケース④：81cm）の低減率は約8～9%程度である。このことから、制震効果は剛性が等しい場合には、制震版が長いほど、制震効果が大きくなることが確認された。波形からも、同様の傾向が確認される。また、変位およびひずみのスペクトルから、制震版の長さによらず、固有振動数 $f_1$ の大きな変化は確認できない。このことから、制震版の剛性が小さい場合には、制震版の長さに関係無く固有振動数 $f_1$ の変化は生じないことが確認された。

つぎに、制震版の剛性を一定（大きい）にし、制震版の長さを変化させた場合の結果を表-3.23、図-3.36に示す。応答値の低減率は、長さが95cm（ケース③）の場合に約60～83%、長さが81cm（ケース⑤）の場合に約20～57%、長さが67cm（ケース⑥）の場合に約9～37%程度であり、剛性が小さい場合と同様に制震版が長くなるにしたがい応答値が低下し、制震効果が大きくなる。しかし、変位およびひずみのスペクトルから、剛性が大きい場合には制震版が長くなるにしたがい、固有振動数 $f_1$ は低下する。これらの結果から以下のことが確認された。

①制震版の剛性が一定の場合には、制震版が長いほど制震効果は大きい。

②固有振動数 $f_1$ は、制震版の剛性が大きい場合には制震版の長さに応じて低下するが、制震版の剛性が小さい場合には大きな変化は見られない。

c)制震版の枚数の及ぼす影響

制震版の枚数が制震効果に及ぼす影響を検討するために、制震版の剛性を大きく長さを一定（67cm）にし、制震版の枚数を変化させた場合の結果を表-3.24、図-3.37に示す。共振点加振時の上部工の応答変位 $D_2$ 、上部工の応答加速度 $AH_2$ 、杭頭部のひずみ $SF_4$ の最大値を比較すると、5枚の場合（ケース⑥）の低減率は約9～37%程度であるのに対して、3枚の場合（ケース⑦）の低減率は約1～22%程度である。このことから、制震効果は剛性および長さが等しい場合には、制震版の枚数が多いほど、制震効果が大きくなることが確認された。時刻歴の比較でも、同様の傾向が確認される。また、変位およびひずみのスペクトルから、制震版の枚数が多いほど、固有振動数 $f_1$ は低下することが分かった。制震版の枚数に関する検討から以下のことが明らかになった。

①制震版の剛性および長さが一定の場合には、制震版の枚数が多いほど制震効果は大きい。

②制震版の剛性および長さが一定の場合には、制震版の枚数が多いほど固有振動数 $f_1$ の低下は大きい。

### 3.4 制震のメカニズムに関する検討

3.3で述べたとおり、共振実験および正弦波加振実験から、本研究で新たに提案した制震栈橋の制震効果が確認された。制震版を設置することで、直杭式栈橋の上部工の応答変位や応答加速度、杭頭部のひずみが最大で約50～80%低減するとともに、栈橋が長周期化することが明らかになった。ここでは、これらの制震効果および長周期化のメカニズムを明らかにするために、下記に示す3つの要因に的を絞り、模型振動実験で計測されたデータに基づき検討を行う。

1)減衰の増加が制震効果に及ぼす影響。

2)応答加速度、応答変位、動水圧のそれぞれの関係が制震効果に及ぼす影響。

3)動水圧による付加質量効果が栈橋の長周期化に及ぼす影響。

(1)減衰の増加が制震効果に及ぼす影響に関する検討

共振実験および正弦波加振実験で確認された制震効果の要因として、「水-制震版-栈橋」の構造系の中で、制震版と水の相互作用等によるエネルギーの損失、つまり減衰が増加することで、制震効果が生じるもの

と推測される。ここでは、実験で計測されたデータに基づき下記に示す3種類の減衰定数を求め、制震効果と減衰定数の関係について検討を行い、制震のメカニズムを明らかにする。

- a) スウィープ波加振による共振実験で図解的方法から求められる減衰定数 $h_v$ 。
- b) 正弦波加振終了後の自由振動中の対数減衰率から求められる減衰定数 $h_g$ 。
- c) 正弦波加振の共振点加振時の上部工の荷重（慣性力）と変位が描く履歴曲線から求められる定数 $\zeta$ 。

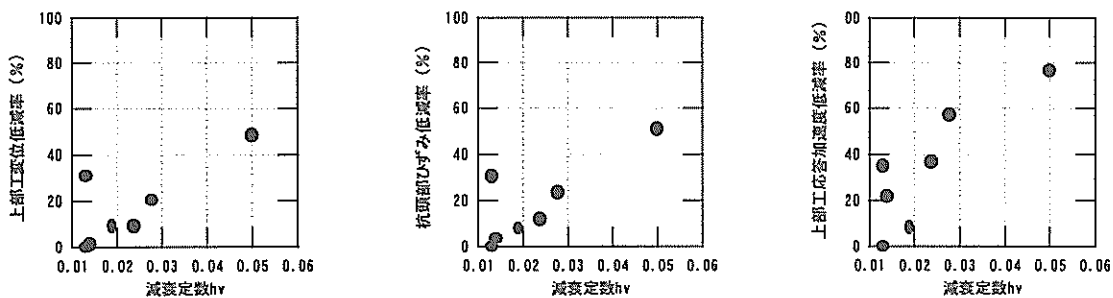
上部工の応答変位、杭頭部のひずみおよび上部工応答加速度の低減率と、上記の3種類の減衰定数 $h_v$ 、 $h_g$ 、 $\zeta$ の関係について検討を行った結果、全ての減衰定数に対して、減衰定数が高いほど低減率も大きくなり、制震効果が大きくなることが明らかになった（図-3.38、図-3.41）。減衰定数が構造系の減衰の大きさを表すことから、制震効果は構造系の減衰が大きくなることで生じることが確認された。以上のことから、減衰の増加により制震効果が生じることが確認され、制震効果のメカニズムを明らかにすることができた。ここではさらに、構造系全体の減衰が増加するメカニズムを検討する。対象とする構造系に作用する減衰は、

構造減衰、粘性減衰、履歴減衰、造波減衰等が挙げられる。実際には、これらの減衰が複雑に絡み合い減衰が生じるものと推測される。各々の減衰定数 $h_v$ 、 $h_g$ 、 $\zeta$ ごとに、制震効果と減衰定数の関係に基づき、減衰が増加するメカニズムについて検討する。

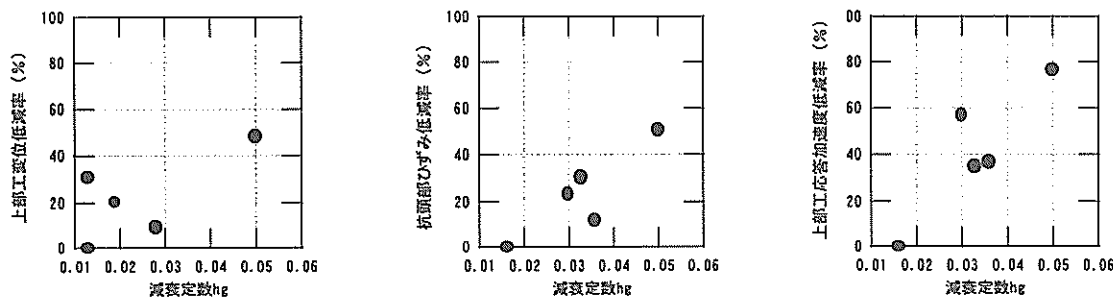
a) 制震効果と減衰定数 $h_v$ の関係に関する検討

スウィープ波加振による共振実験から得られた共振曲線から図解的方法で減衰定数 $h_v$ を求めた。研究対象である「水-制震版-栈橋」の構造系を、地震力を外力とする強制振動が作用する一自由度の振動系と想定した場合に、この減衰定数 $h_v$ は粘性減衰定数に相当する。この場合に、制震版の速度に比例した抵抗力が栈橋に作用して栈橋の振動が抑制される。この抵抗力が作用する減衰を粘性減衰と呼び、 $h_v$ は粘性減衰の大きさを示すパラメータである。一般の制震装置等に採用される粘性減衰は、粘性を有する液体の抵抗を利用して、振動を抑制させるが、ここで述べる粘性減衰は、制震版と水の相互作用により波や渦等が発生し、エネルギーの損失に起因する減衰を主に意味する。

減衰のメカニズムとしては、水が存在することで制震版と水の相互作用が生じ、粘性減衰に相当する何らかの減衰が生じて、制震効果が大きくなるものと推測



上部工応答変位、杭頭部ひずみ、上部工応答加速度の低減率と減衰定数 $h_v$ の関係



上部工応答変位、杭頭部ひずみ、上部工応答加速度の低減率と減衰定数 $h_g$ の関係

図-3.38 制震効果による低減率と減衰定数  $h_v$ ,  $h_g$  の関係



される。3.3の(1)の共振実験の結果(表-3.17, 図-3.10)から、水が有る場合には水が無い場合と比べて、減衰定数 $h_v$ が大きくなり、応答値が低下する傾向が強くなる。また、図-3.38に示した $h_v$ と低減率の関係でも同様の傾向を示す。このことから想定したとおりに、この減衰定数 $h_v$ は水が存在することで制震版と水の間に相互作用が生じ、減衰が増加して制震効果が生じることが明らかになった。ただし、主な抵抗力と推定された動水圧は、実験データから、栈橋の振動を助長する向きに作用しており、これまでの検討からは、抵抗力を明確に示すことができない。提案された制震技術を確立するためには、抵抗力を含めて減衰のメカニズムを明らかにする必要がある。

b) 制震効果と減衰定数 $h_g$ の関係に関する検討

自由振動中の対数減衰率から減衰定数 $h_g$ を求めた。ここで求めた $h_g$ は、前項a)で述べた減衰定数 $h_v$ とは求め方が異なるものの、物理的に等価な意味を有する定数である。つまり、構造系に粘性減衰が作用した場合の、減衰の大きさを示すパラメータであり、 $h_g$ が大きくなるほど減衰が大きくなり制震効果も大きくなると推測される。

図-3.38に示した、減衰定数 $h_g$ と応答値の低減率の関係から、制震効果が大きいほど $h_g$ は大きく、制震効果と減衰定数 $h_g$ は正の相関関係にある。このことから、制震効果は、系の減衰が増加することが主な要因であることが明らかになった。ただし、前項a)の $h_v$ に関する検討結果と同様に、これまでの検討からは抵抗力を明確に示すことができず、減衰が増加するメカニズムについては明らかにすることができない。

構造物の設計では、減衰定数で構造全体の減衰の大きさを評価して設計が行われる。そこでここでも、提案された制震栈橋の制震効果を、減衰定数 $h_v$ および $h_g$ の大きさで把握することで数値的にその効果を評価した。ケース①とケース③の減衰定数の値を比べると、ケース③の値はケース①の値と比べて約3倍の値を示す。ケース①は制震版を設置しない通常形式の栈橋を対象としたケースであり、ケース③は制震版が長く、剛性が大きく、制震効果が最も大きなケースである。このことから、制震効果を付与させた栈橋は、構造系全体で減衰が最大で約3倍増加し、その減衰の大きさは約5%程度となることが明らかになった。

表-3.25に減衰定数 $h_v$ と $h_g$ の値を示す。定数の物理的意味は $h_g$ と $h_v$ でともに等しく、実験結果から求められる値も等しければならない。 $h_v$ 、 $h_g$ ともに実験で得られた共振曲線および波形から読みとった値である

が、概ね等しい値が算定された。このことから、 $h_g$ 、 $h_v$ の値は信頼できるものであり、算定手法も妥当なものである。減衰定数 $h_g$ および $h_v$ と制震効果に関する検討から得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ① 制震効果は、系の減衰が大きくなることが主な要因である。
- ② 減衰の大きさは通常の栈橋と比べ約3倍に増え、その値は約5%程度と推定される。
- ③ 算定された減衰定数 $h_v$ と $h_g$ の値は信頼できるものであり、算定手法も妥当なものである。

表-3.25 減衰定数 $h_v$ と $h_g$ の値

実験ケース	管理名	制震版の条件	減衰定数 $h_v$	減衰定数 $h_g$
①	NN	制震版無し	0.013	0.016
②	LL5	長く、剛性小	0.013	0.033
③	LH5	長く、剛性大	0.050	0.050
⑤	LH5	中位、剛性大	0.028	0.030
⑥	LH5	短く、剛性大	0.024	0.036

c) 制震効果と定数 $\zeta$ の関係に関する検討

前述したとおり、制震効果は主に減衰の大きさに起因するものと考えられる。一方、栈橋の構造系には、構造減衰、履歴減衰、造波減衰、粘性減衰等の減衰が作用していると想定される。ここでは、減衰が増加するメカニズムをさらに詳細に検討するために、上部工荷重(慣性力)と変位から荷重と変位の履歴曲線を描き、減衰の大きさを表す指標として式(3.10)で定義される定数 $\zeta$ を定め検討を行なった。

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \tag{3.10}$$

ここで、 $\zeta$ ：減衰の大きさを示す定数

$\Delta W$ ：履歴曲線の描く面積

$W$ ：弾性ひずみエネルギー

定数 $\zeta$ を用いて減衰のメカニズムに関する検討を行う前に、まず、定数 $\zeta$ の値自体の信頼性について説明する。制震版を設置しない通常栈橋を対象としたケースで水が無い場合に実験で計測されたデータに補正を施さず、式(3.10)から求められる値は $\zeta \approx 0.18$ となる。鋼構造物が有する減衰の大きさは概ね $h_0 = 0.01 \sim 0.02$ と考えられ、定数 $\zeta$ はこの値と比べて約10倍程度大きな値を示すことから、何らかの誤差が含まれている

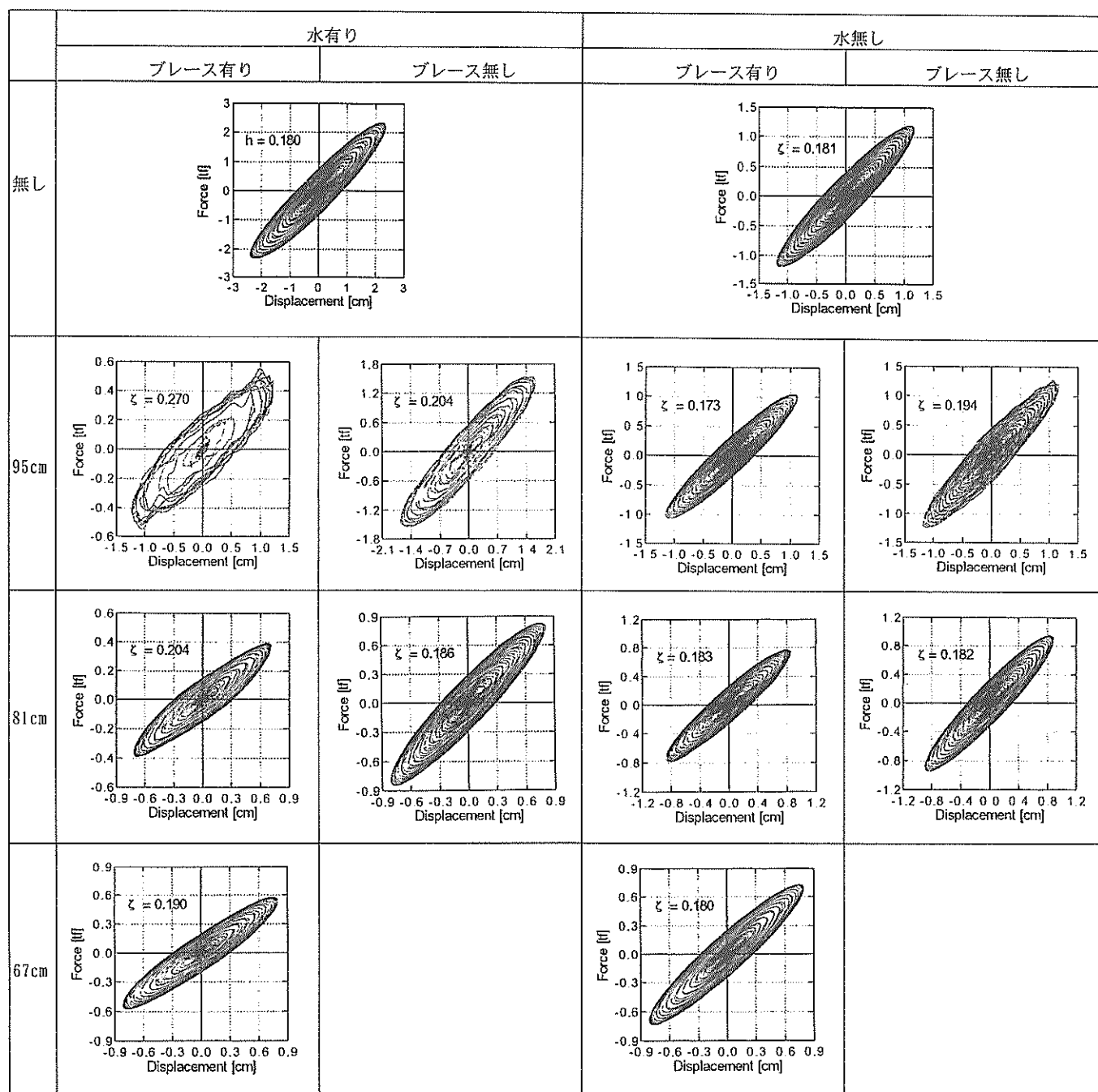


図-3.39 履歴曲線と定数 $\zeta$ の一覧（正弦波加振共振点加振：水有り・水無し）

ものと推測される。この誤差として、計測に使用した加速度計および変位計の位相特性が挙げられる。この点に関しては今後の研究課題とし、実験結果から制震効果が大きくなるにしたがい定数 $\zeta$ の値も明らかに大きくなることから、制震効果と減衰の増加に関する検討を行うための有効な指標と判断し、以下に減衰のメカニズムに関する検討を行う。

正弦波加振実験の各共振点加振時の履歴曲線を図-3.39に示す。縦軸に上部工に作用する荷重(慣性力)、横軸に上部工の変位をとり履歴曲線を描いた。図中左側に振動台の水槽に注水して加振を行った場合、右側に注水を行わない場合の結果を示す。下段になるほど制震版の長さは短くなる。この履歴曲線から式(3.10)により定数 $\zeta$ を求め表-3.26に各ケース毎にとりまとめて示した。

通常栈橋を対象としたケース①の定数 $\zeta$ の値と各ケース水無しの場合の値を比べると、その値は全てのケースで概ね $\zeta \approx 0.180$ となり大きな差が見られない。このことから、制震版の長さや剛性に関係無く、水が無い場合には、大きな $\zeta$ の変化は生じない。 $\zeta$ は減衰の大きさを表すことから、水が無い場合には減衰が増加せず、栈橋に制震効果が作用しない。

一方、水が存在する場合は、制震版の剛性の大小によりその傾向は大きく異なる。例えば、剛性が大きいケース③の定数 $\zeta$ の値は $\zeta = 0.270$ と通常栈橋と比べて約0.090大きい、剛性が小さいケース②では $\zeta$ の値は $\zeta = 0.204$ で大きな変化がみられない。図-3.40に制震版の浸水長と定数 $\zeta$ の関係を制震版の剛性ごとに示す。剛性が小さい場合には、水の有無に関係無く定数 $\zeta$ はほぼ一定であるが、剛性が大きい場合には、定数 $\zeta$ は浸水長が長いほど大きくなる。さらに、浸水長が48cmを越えた時点で定数 $\zeta$ は急に大きくなる。表-3.27、図-3.41に、通常栈橋(ケース①)に対する低減率と定数 $\zeta$ の関係を示す。低減率は定数 $\zeta$ が0.20を越えると急増し、 $\zeta$ の増加とともに大きくなる。定数 $\zeta$ が減衰の大きさを表すことから、減衰が大きくなるにしたがい制震効果が大きくなることが明らかにされた。

ここで求めた定数 $\zeta$ は、非線形の復元力特性を有する振動系の履歴減衰定数 $hb$ と物理的に等価な値である。実験結果から求められる $\zeta$ は、通常工学的に用いられている値と比較して全体的にかなり大きめであった。この原因としては、前述した計測器の位相特性によるものも含めて、栈橋自体の減衰が本当に大きかったのか、または実験誤差によるものかについては詳細な検

討が必要である。しかしながら、確認された制震効果と $\zeta$ の間には明確な対応関係があり、 $\zeta$ が大きくなるにしたがい上部工変位と応答加速度、杭頭部ひずみの最大値は大きく低減する傾向にある。このことから判断して、構造系に履歴減衰に相当するような減衰、例えば、加振力と抵抗力(減衰力)の位相差などによる減衰等が、構造系に作用して減衰が増加するものと考えられる。

履歴減衰は、地盤等の非線形性の強い材料では減衰の主要因であり、線形性の強い栈橋を対象とした実験で履歴減衰として大きな値が計測されることは考えにくい。しかし、次節で詳細に説明するが、制震版が95cmと最も長いケース②とケース③の、上部工の応答加速度と抵抗力と考えられる制震版に作用する動水圧の相関ならびに位相差の検討から、非線形ループに相当するような位相のずれが確認され、減衰を大きくする主な要因ではないかと推測される。そのメカニズムは明らかではないが、履歴減衰に相当するような何らかの減衰が生じている可能性は大きく、今後検討すべき課題と考えられる。以下に検討で得られた結果についてとりまとめて示す。

- ①制震効果の主な要因は、減衰の増加によるものである。
  - ②制震版が長く、剛性が大きいほど減衰は大きい。
  - ③水が有る場合に減衰は大きくなる。
  - ④履歴減衰の影響が大きい可能性がある。
- (2)応答加速度、応答変位、動水圧のそれぞれの関係が制震効果に及ぼす影響

前項(1)の減衰効果に関する検討から、共振実験および正弦波加振実験で確認された制震効果の主な要因として、「水-制震版-栈橋」の構造系の中で、制震版と水の相互作用等により生じるエネルギーの損失(減衰)が挙げられた。減衰が生じるためには、何らかの抵抗力が作用して、地震力を低減しなければならない。制震栈橋の減衰による制震効果として、以下のメカニズムが考えられる。

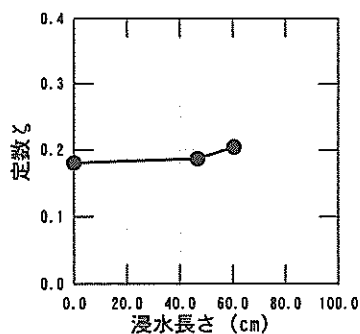
- 1)地震力が杭を伝わり、上部工に作用し、上部工の揺れが発生する。
- 2)上部工の揺れに応じて、上部工に設置された制震版の揺れも発生する。
- 3)制震版の揺れとともに、制震版と周囲の水の動的相互作用により何らかの抵抗力が生じ、その作用により減衰が起こる。
- 4)減衰の発生に伴い、上部工の応答をはじめ構造系の応答が低下する。つまり、制震効果が生じる。

表-3.26 定数 $\zeta$

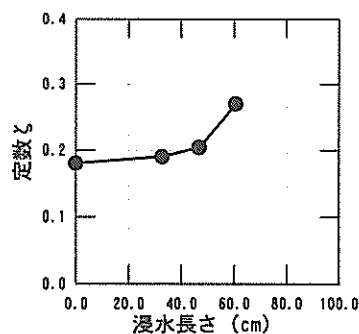
実験 ケース	管理名	定数 $\zeta$		制震版 の条件
		水有り	水無し	
①	NN	0.180	0.181	制震版無し
②	LL5	0.204	0.194	95cm, 剛性小, 5枚
③	LH5	0.270	0.173	95cm, 剛性大, 5枚
④	ML5	0.186	0.182	81cm, 剛性小, 5枚
⑤	MH5	0.204	0.183	81cm, 剛性大, 5枚
⑥	SH5	0.190	0.180	67cm, 剛性大, 5枚

表-3.27 定数 $\zeta$ と低減率の関係

実験 ケース	$\zeta$ 水有り	低減率(%)			制震版 の条件
		変位	ひずみ	加速度	
①	0.180	-	-	-	制震版無し
②	0.204	30.8	30.6	34.5	95cm, 剛性小, 5枚
③	0.270	48.1	50.9	76.6	95cm, 剛性大, 5枚
④	0.186	9.0	7.8	8.6	81cm, 剛性小, 5枚
⑤	0.204	20.2	23.3	56.7	81cm, 剛性大, 5枚
⑥	0.190	9.0	11.6	36.5	67cm, 剛性大, 5枚



剛性が小さい場合



剛性が大きい場合

図-3.40 定数 $\zeta$ と浸水長さの関係 (剛性小・剛性大)

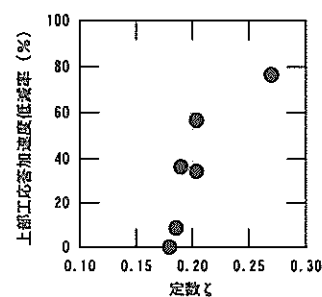
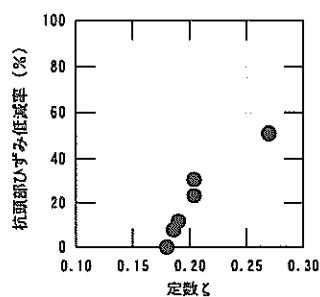
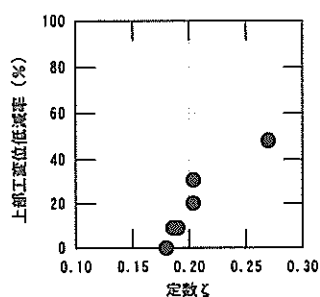


図-3.41 定数 $\zeta$ と上部工変位, 杭頭部ひずみ, 上部工応答加速度の低減率の関係 (正弦波加振共振点加振: 水有り)

ここでは、制震効果が上記のメカニズムにより生じるものと想定して、上部工の揺れを上部工の応答加速度 $AH2$ で表し、制震版に生じる抵抗力が制震版の応答加速度と動水圧に起因するものと仮定する。制震版の上部工の応答加速度 $AH2$ と制震版の応答加速度および動水圧の相関ならびに位相差を求め、減衰のメカニズムに関する検討を行う。相関ならびに位相差は3.2実験結果(2)正弦波加振実験b)制震版の応答加速度と動水圧の相関および位相差の検討に使用した、コヒーレンスおよびその位相差で評価する。

#### a) 上部工の応答加速度と上部工の変位 $D2$ の相関と位相差

まず、上部工の応答加速度 $AH2$ と上部工の変位 $D2$ の相関と位相差について検討を行う。前述したメカニズムから、上部工に地震力が発生して上部工に揺れが生じる。想定したメカニズムの検証を行うとともに、用いた評価手法の信頼性を確認するために、上部工の応答加速度と変位の検討を行う。図-3.42に正弦波加振の共振点加振で計測された値を用いて得られた、コヒーレンスおよび位相差を図示する。いずれのケースでも、コヒーレンスの値が大きく、両者の相関が大きい。位相差から、上部工の応答加速度に対して変位が若干遅れている。上部工の慣性力により上部工の変位が生じることから、上部工の慣性力と変位の相関は大きく、位相差は小さいと考えられる。

#### b) 上部工の応答加速度と制震版の応答加速度の相関と位相差

減衰のメカニズムを検討するために、上部工の応答加速度 $AH2$ と制震版の応答加速度 $AH9$ の相関と位相差について検討を行う。図-3.43に両者のコヒーレンスおよび位相差を図示する。制震版の剛性が大きい場合には、制震版の揺れの向きと上部工の向きが等しいために、制震版に作用する抵抗力が大きくなり、大きな減衰と制震効果を生じるものと想定される。制震版の剛性が小さい場合には、制震版の揺れの向きと上部工の向きが異なり、制震版に作用する抵抗力が小さく、大きな減衰と制震効果は生じないものと想定される。得られた結果から、制震版が中位ならびに短い場合(81, 67cm)には、コヒーレンスの値も大きく、位相についても、剛性が大きい場合には上部工と制震版の位相が等しく、剛性が小さい場合には反対に逆位相を示し、想定したとおりである。しかしながら、制震版が長く、大きな制震効果が確認されたケース②およびケース③では、コヒーレンスの値も他のケースと比べて小さく、位相差もばらばらであり、大きな相関は確認されない。

#### c) 上部工の応答加速度と制震版の動水圧の相関と位相差

減衰のメカニズムを検討するために、上部工の応答加速度 $AH2$ と制震版外側の動水圧 $W8$ の相関と位相差について検討を行う。図-3.44に両者のコヒーレンスおよび位相差を図示する。抵抗力は主に制震版と周囲の水との相互作用により生じると想定される。制震版の応答加速度と同様に、制震版の剛性が大きく長いほど、制震版に作用する抵抗力が大きく、減衰および制震効果が大きいものと推定される。得られた結果から、制震版が中位ならびに短い場合(81, 67cm)には、コヒーレンスの値も大きく、位相についても、剛性が大きい場合には上部工の応答加速度と制震版の動水圧の位相が等しく、剛性が小さい場合には反対に逆位相を示している。しかしながら、制震版が長く、大きな制震効果が確認されたケース②およびケース③では、コヒーレンスの値も他のケースと比べて小さく、位相差もばらばらであり、大きな相関は確認されない。制震版内側の動水圧 $W11$ についても同様の検討を行い、同じ傾向を示すことを確認した(図-3.45参照)。

#### d) 制震版が長い場合の上部工の応答加速度 $AH2$ と制震版の動水圧の相関と位相差

前項のb)とc)の検討から、制震版が最も長いケース②とケース③の上部工の応答加速度に対する、制震版の応答加速度および動水圧の相関ならびに位相は、その他のケースと傾向が異なる。制震版が81cm, 67cmの場合には、コヒーレンスの値が大きく相関は強い。位相差は、制震版の剛性が大きい場合にほぼ同位相、剛性が小さい場合にほぼ逆位相を示した。しかし、制震版の長さが95cmの場合には、制震版の剛性の大小によらず、コヒーレンスの値はそのほかのケースと比べて小さく、位相差も全ての周波数に対してばらつきが目立った。

この相関および位相の違いが生じるメカニズムを検討するために、上部工の応答加速度 $AH2$ に対する、制震版の応答加速度と動水圧の位相差についてより詳細に検討を行った。図-3.46、図-3.47に、ケース②およびケース③の上部工の応答加速度 $AH2$ に対する制震版の応答加速度 $AH9$ と動水圧( $W8$ :外側,  $W11$ :内側)のコヒーレンス、位相差、正規化した波形をそれぞれ示す。まず、図中下段の正規化した波形を重ねて描いたところ、ケース②では加振開始時から10波目、ケース③では6波目程度から徐々に新たな位相のずれが生じている。この新たな位相のずれは、その他のケースでは確認されなかった。

上部工応答加速度(AH2)と応答変位(D2)の相関および位相差

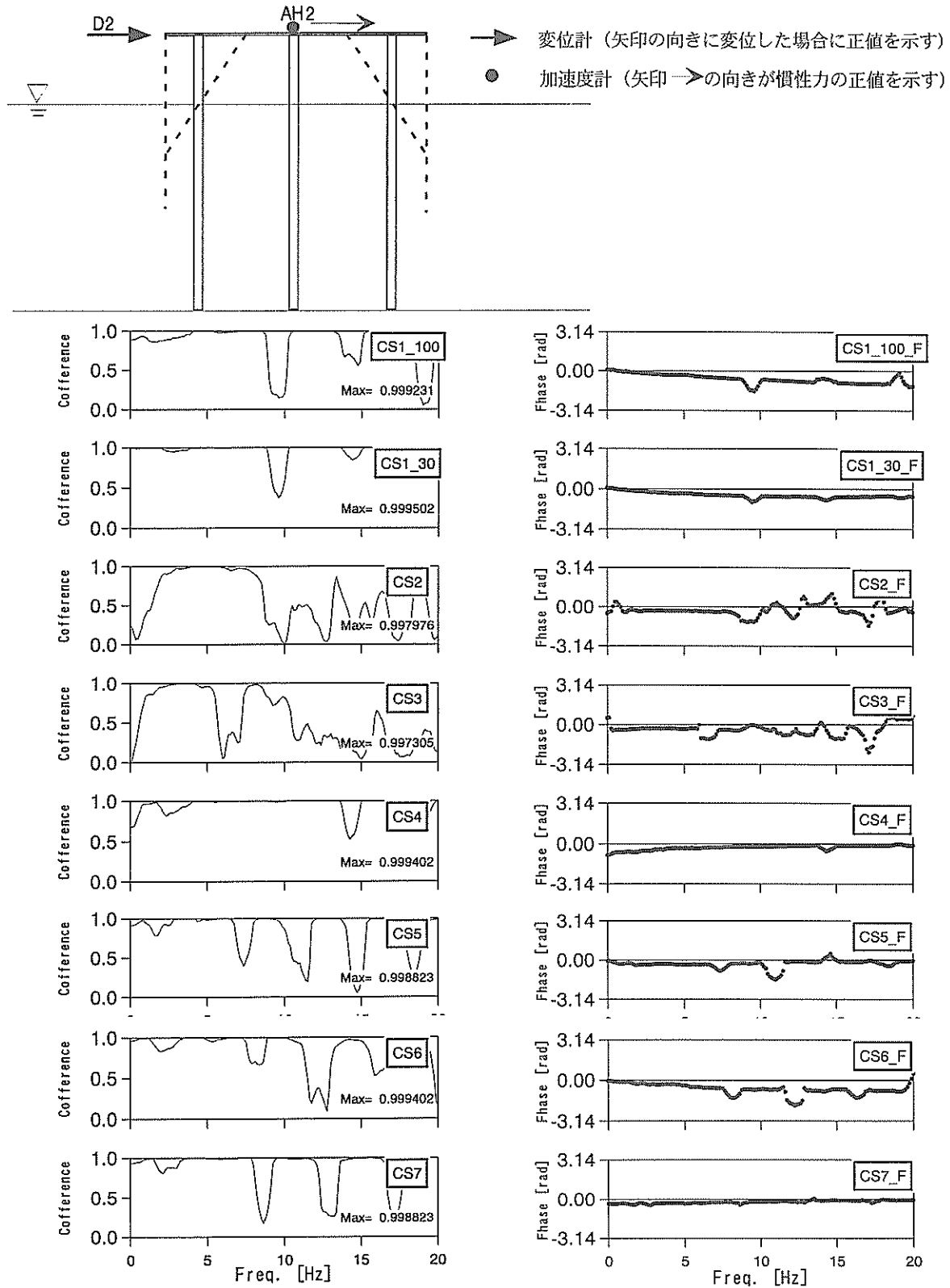


図-3.42 各ケース毎の上部工の応答加速度と上部工変位の相関ならびに位相差

上部工応答加速度(AH2)と制震版応答加速度(AH9)の相関および位相差

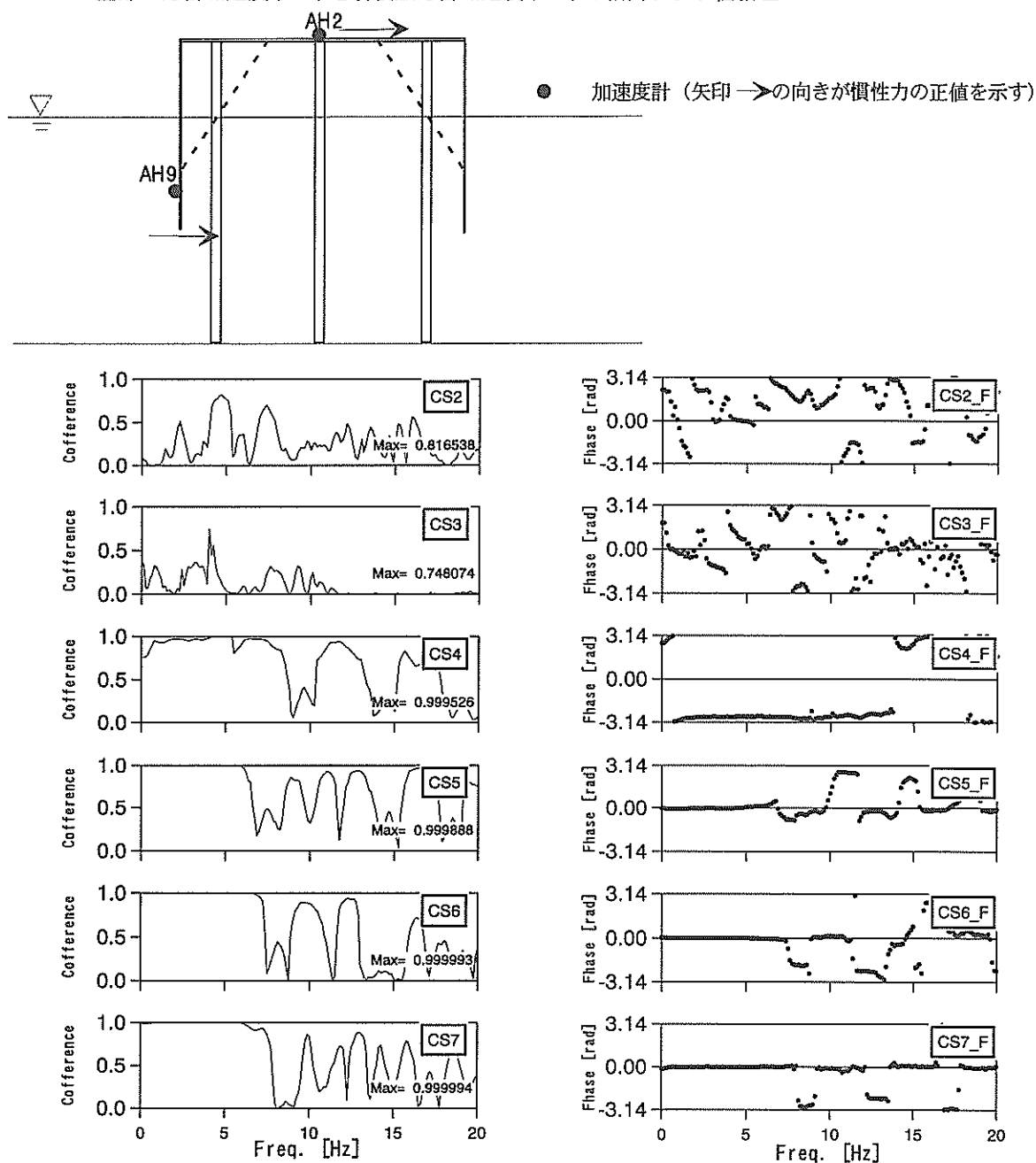


図-3.43 各ケース毎の上部工の応答加速度と制震版応答加速度の相関ならびに位相差  
(ケース②およびケース③はフィルターあり)

上部工応答加速度(AH2)と制震版間外側の動水圧(W8)の相関および位相差

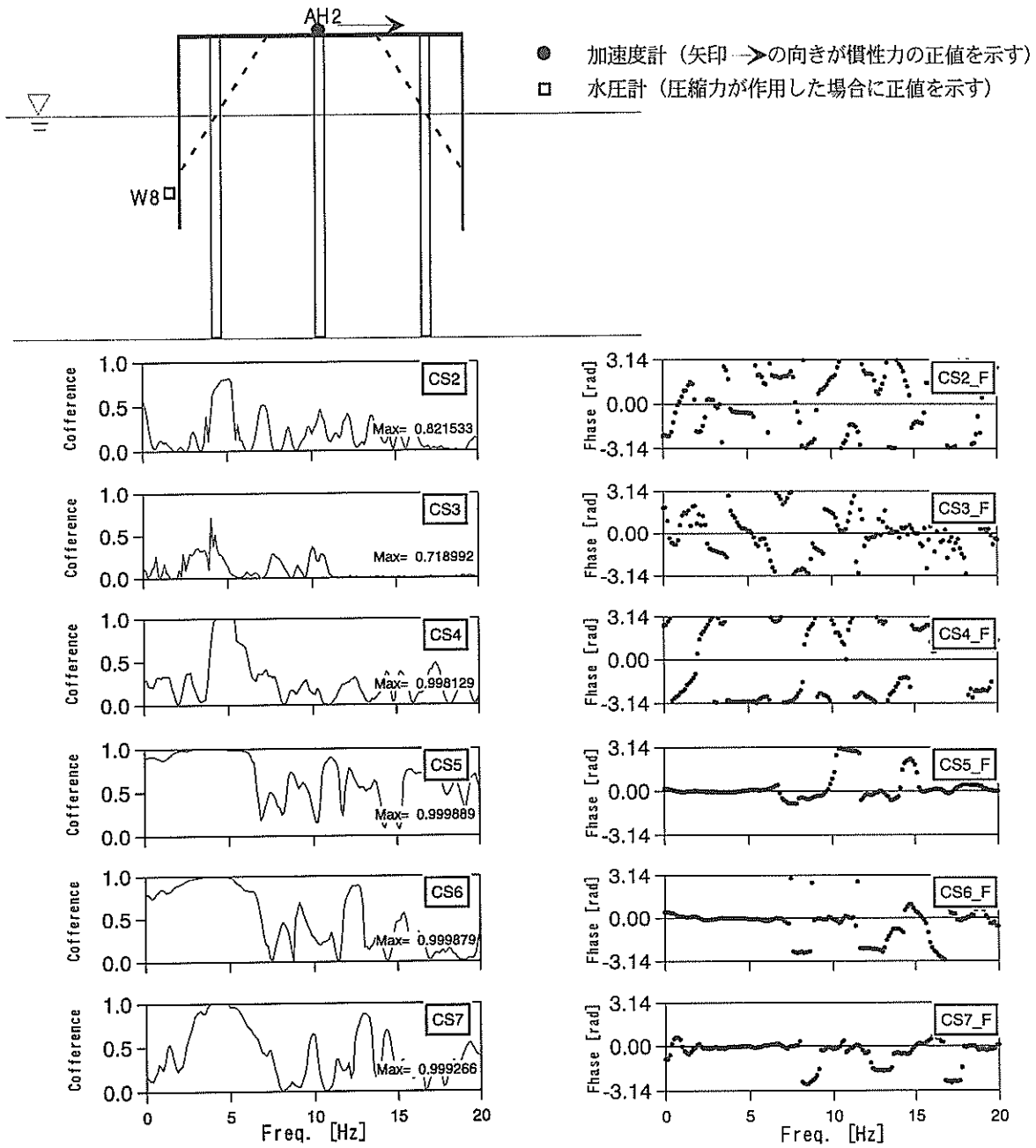


図-3.44 各ケース毎の上部工の応答加速度と制震版外側水圧の相関ならびに位相差 (ケース②およびケース③はフィルターあり)



上部工応答加速度(AH2)と制震版間内側の動水圧(W11)の相関および位相差

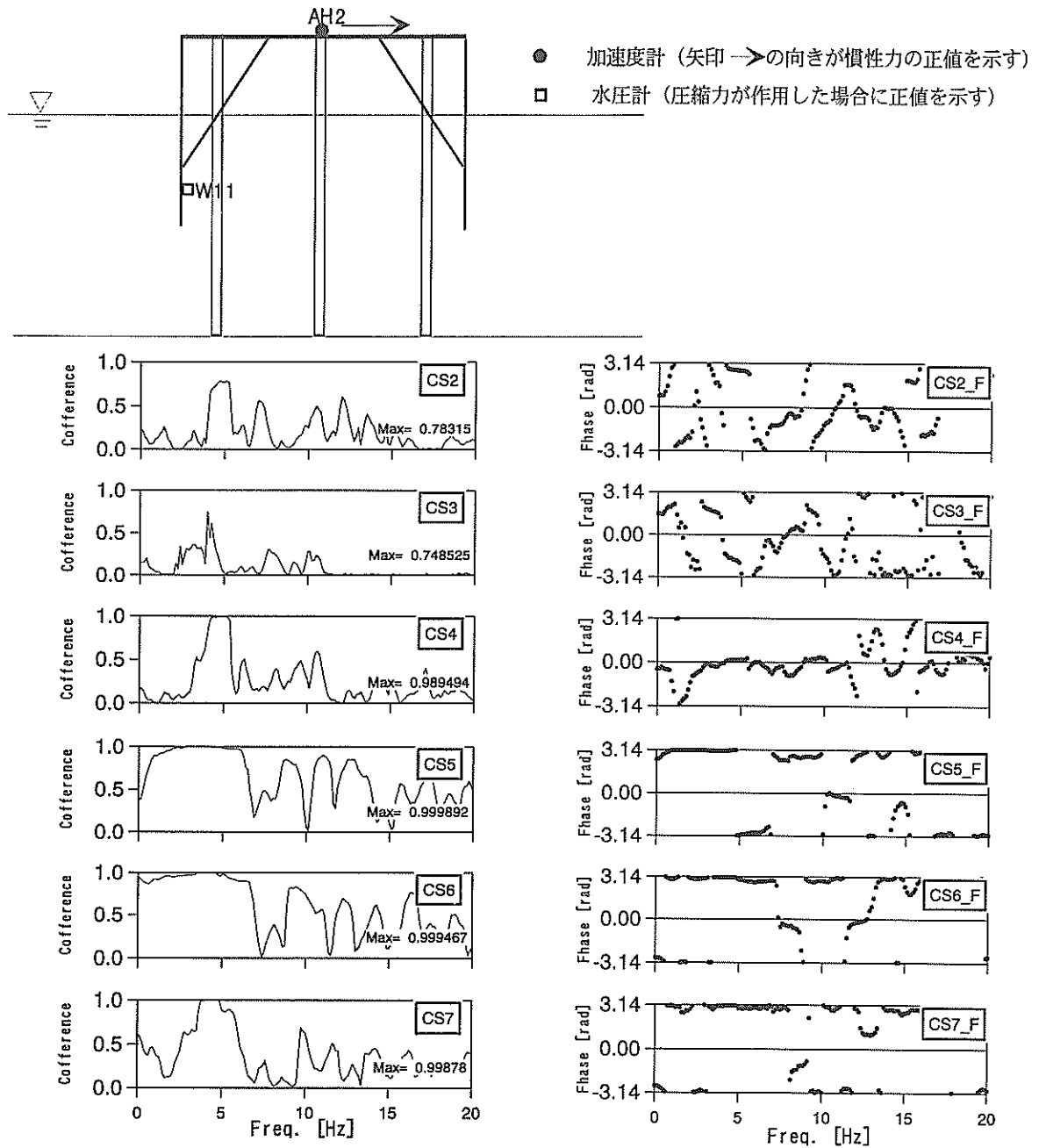


図-3.45 各ケース毎の上部工の応答加速度と制震版内側動水圧の相関ならびに位相差 (ケース②およびケース③はフィルターあり)

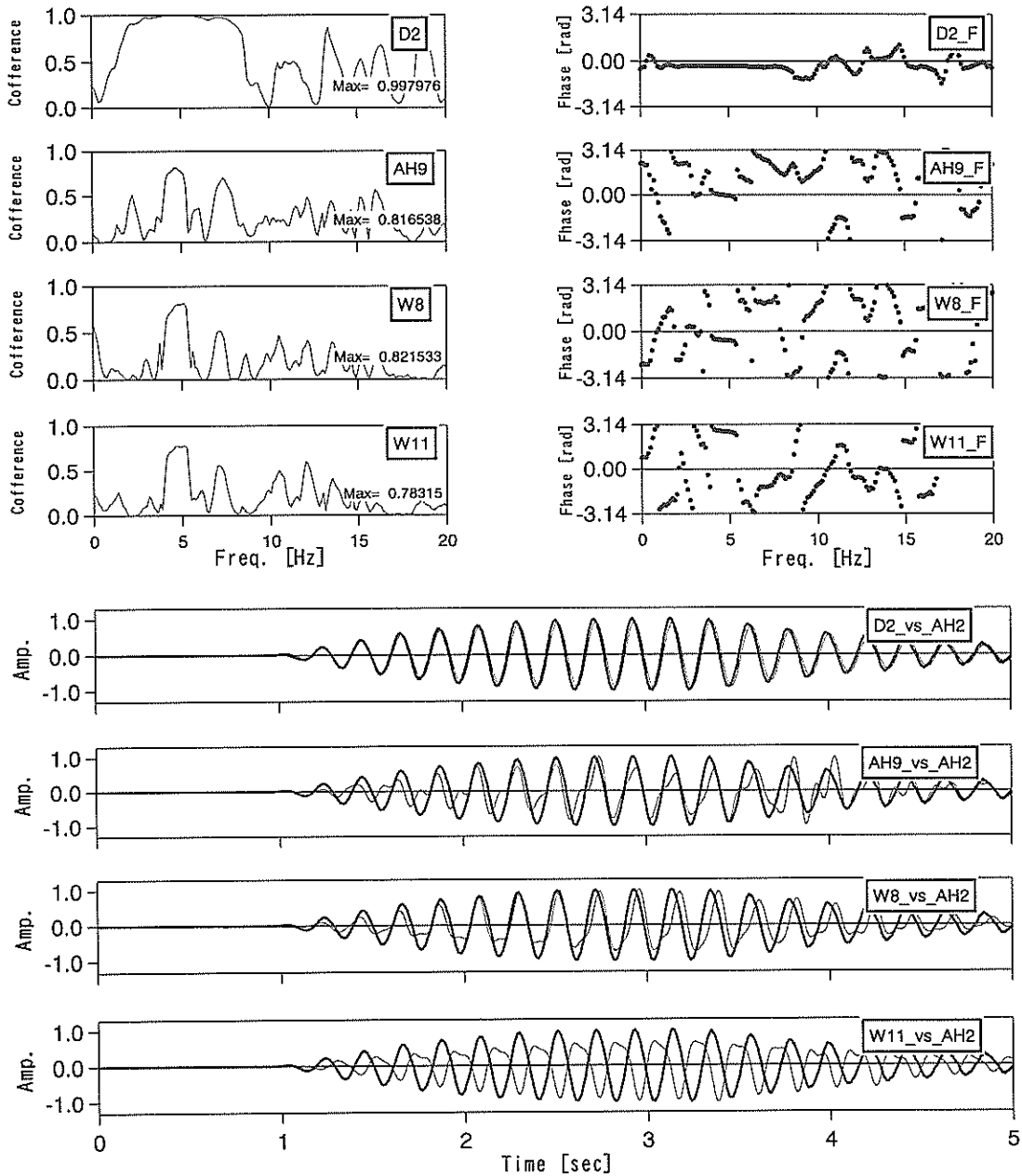
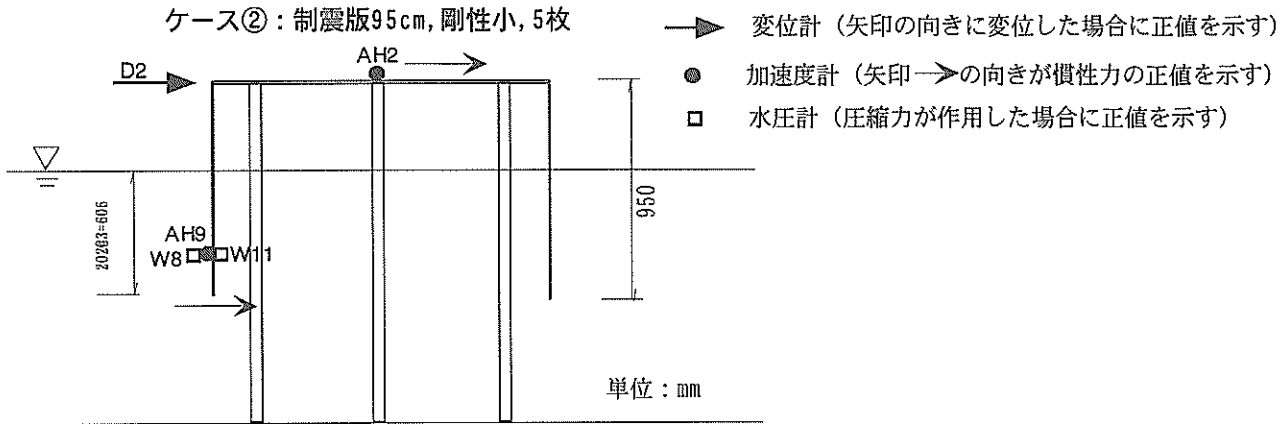


図-3.46 上部工の応答加速度と制震版の応答加速度・動水圧・上部工変位の相関ならびに位相差 (ケース②：フィルター有り)

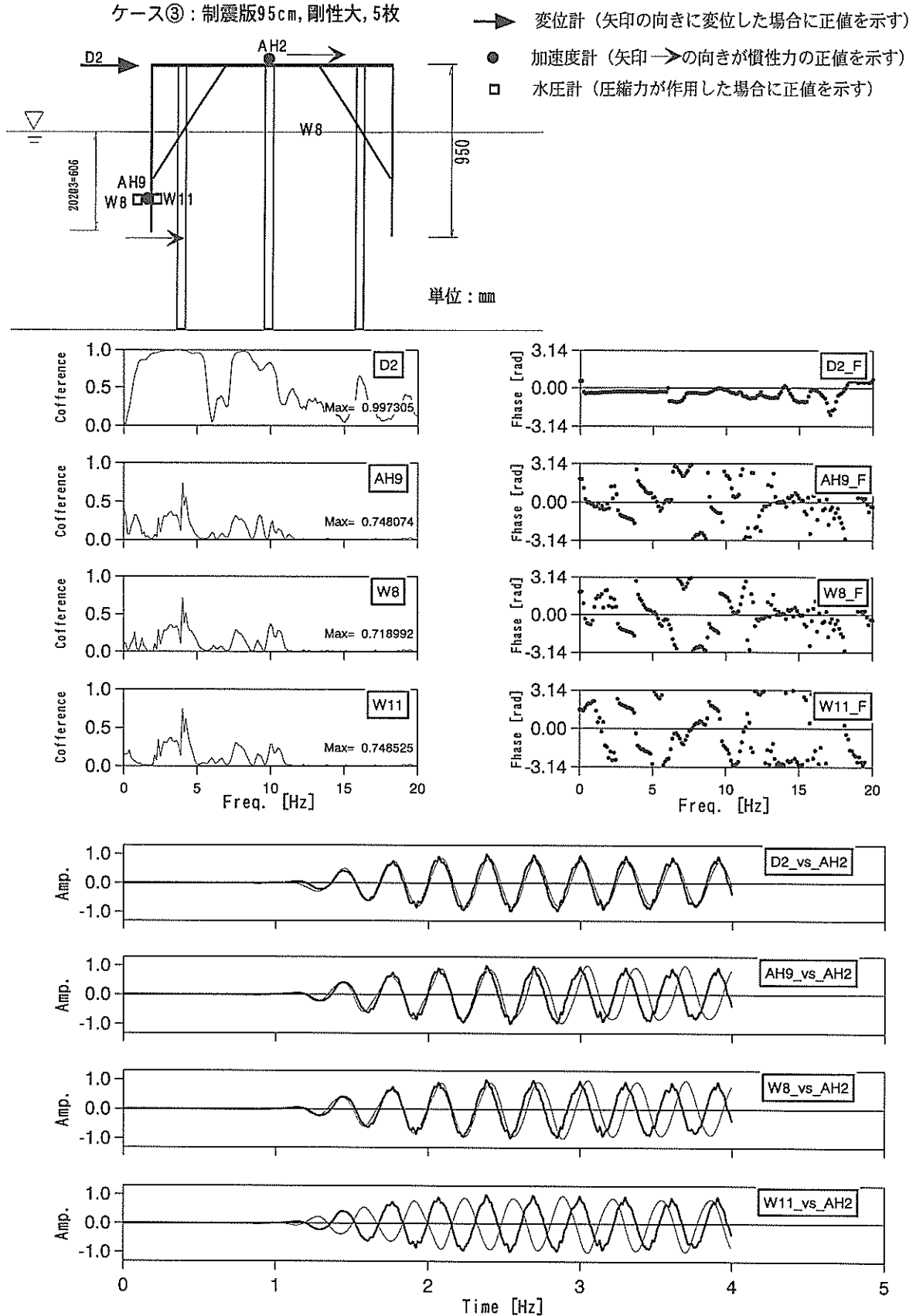


図-3.47 上部工の応答加速度と制震版の応答加速 ・動水圧・上部工変位の相関ならびに位相差 (ケース③：フィルター有り)

ケース②およびケース③は、その他のケースと比べて大きな制震効果が確認されたことから、この位相のずれを減衰として評価すれば、上部工の応答加速度 $AH_2$ と、抵抗力と考えられる制震版の動水圧の位相差により減衰が生じ、大きな制震効果が起こるものと推測される。

さらに、図中上段に示すコヒーレンスおよびその位相差から、ケース②に比べてケース③のコヒーレンスの値は全体的により小さくなる。ケース③はケース②と比べてより大きな制震効果が確認されたことから、上部工の応答加速度と制震版の動水圧により大きな位相差が生じて、相関が低下するものと考えられる。

前節3.4(1)のc)で、制震効果と減衰の大きさを示す定数 $\zeta$ の関係から、制震版の浸水長がある値以上になると、急激に $\zeta$ の値が大きくなり制震効果も大きくなった。この傾向は、ここで確認された位相のずれで説明できる。制震版が長くなると、それより短い場合にみられる上部工と制震版の動水圧の明確な相関関係が崩れ、位相差が生じ始める。位相差が生じることで、制震版と周囲の水との間に渦などの複雑な相互作用が起こり、大きな減衰が作用し、制震効果が大きくなるものと判断される。

一方、制震効果が大きくなるほど、上部工の応答加速度 $AH_2$ と主な抵抗力と推定される制震版の動水圧の相関が低下することは、一見矛盾するように思われる。しかしながら、制震効果がより小さいその他のケースの制震版の動水圧は、上部工の慣性力と同じ向きに水圧が作用し、揺れを助長させる向きに作用する。このことから、相関が低下するほど揺れを抑制する向きに動水圧が作用すると考えればこの現象は理解できる。

詳細な検討から、制震効果は、上部工の応答加速度と制震版の動水圧の大きさと両者の位相のずれにより、「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰が大きくなることで生じる効果であると推測される。しかし、ケース②やケース③以外の大きな位相のずれが確認されない場合でも制震効果が確認されていることから、位相差による減衰以外にも減衰が作用して、制震効果が生じると考えられる。このことから、検討の余地は残されるものの、実験により確認された制震効果は、位相の差による減衰をはじめ、その他の減衰が複雑に重なりあって生じる減衰に起因するものと考えられる。

a), b), c), d)で上部工の応答加速度 $AH_2$ に対する上部工の変位 $D_2$ と制震版の応答加速度 $AH_9$ ならびに動水圧 $W_8, W_{11}$ に対する検討を行い、得られた考察は下記のとおりである。

①制震効果は、主に、上部工の応答加速度と制震版の動水圧の大きさと両者の位相のずれにより、「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰が大きくなることで生じる効果であると推測される。ただし、これ以外にも様々な減衰が複雑に重なりあい制震効果が生じると考えられる。

(3)動水圧による付加質量効果が栈橋の長周期化に及ぼす影響に関する検討

スウィープ波加振による共振実験および正弦波加振実験から、栈橋の固有振動数 $f_1$ の変化が確認された。制震版が長く、剛性が大きいほど固有振動数 $f_1$ は低下し、栈橋は長周期化した。栈橋の固有周期 $Ts$ は、3.3の(1)の式(3.8)から求められる。また、付与された付加質量を $Ma$ とすると、付加質量が作用した栈橋の固有周期 $Ts'$ は式(3.9)で求められる。固有振動数 $f_1$ は、固有周期 $Ts'$ の逆数として求められることから、付加質量が大きくなるにしたがい固有振動数 $f_1$ は低下する。このことから、制震版に動水圧が作用することで付加質量が生じ、栈橋の見かけの質量が大きくなるのが、長周期化の主な要因として想定される。

図-3.48に正弦波加振実験のケース④とケース⑤の共振点加振で計測された、制震版の応答加速度と動水圧ならびに上部工の制震版設置位置での応答加速度の時刻歴波形を並べて示す。両ケースでは制震版の剛性が異なり、ケース④は剛性が小さく、ケース⑤は剛性が大きい。3.3の(2)の剛性に関する検討で示したとおり、ケース⑤では大きな制震効果が計測されたが、ケース④では制震効果がみられず、制震効果に大きな差が生じた。固有振動数に関しても、ケース④では大きな変化はみられないが、ケース⑤では通常形式の栈橋に対して、固有振動数 $f_1$ が約20%程度低下し、長周期化の程度に大きな差が生じた。

この制震効果と長周期化が異なる主な要因として、制震版の応答加速度と動水圧の違いが挙げられる。波形を比べると、応答加速度、動水圧ともにケース⑤が大きな値を示す。このことから、制震版の剛性が大きい場合には小さい場合と比べて、制震版に大きな動水圧が生じ付加質量も大きくなり、栈橋全体の固有振動数が低下したものと想定される。

ここでは、下記に示す2つの事項について検討をおこない、長周期化のメカニズムを明らかにする。

1)固有振動数の低下から求められる付加質量と、制震版の動水圧から求められる付加質量を比較して、長周期化が動水圧による付加質量効果であることを示す。

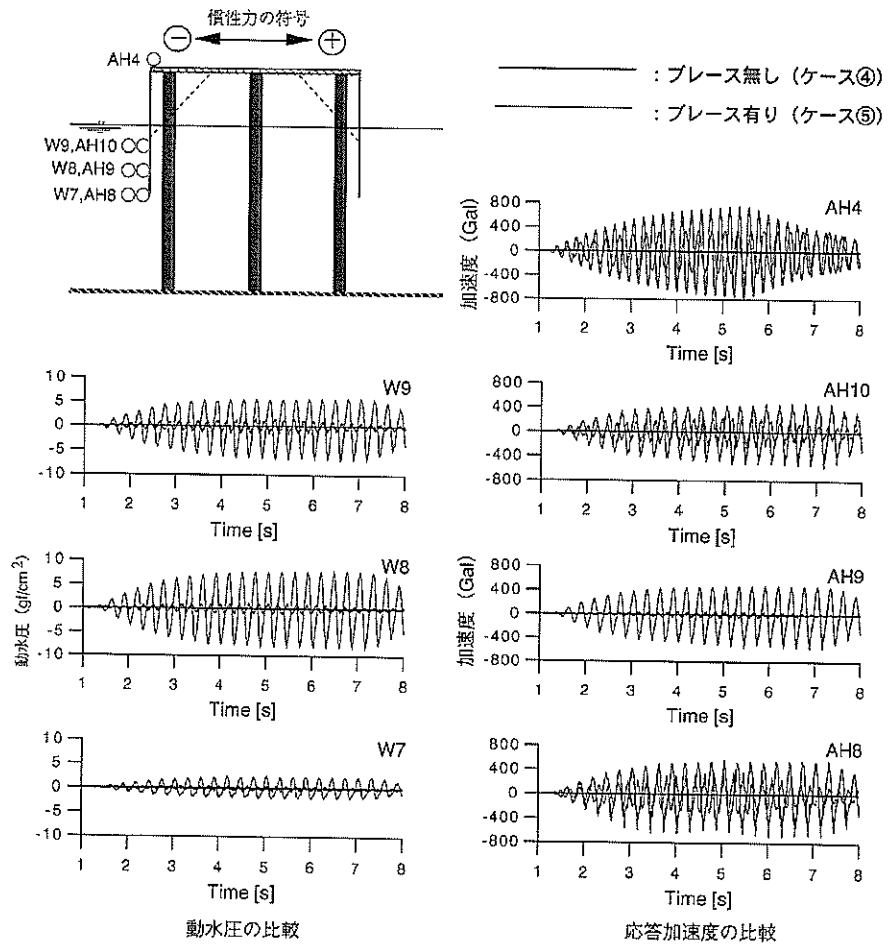


図-3.48 制震版の応答加速度および動水圧に制震版の剛性が及ぼす影響  
(制震版の長さ81cmで一定)

表-3.28 固有振動数の変化から求められる付加質量

実験 ケース	(1) 水の有無	(2) 固有 振動数 f1 (Hz)	(3) 固有振動数比 (水有り/水無し) f1w/f1nw	水無しの場合の栈橋総重量の算定							(10) 栈橋の剛性 (水無しの場合) K (kgf/cm)	(11) 杭に作用する付加質量 (杭が排除する水の質量) Mapi (kg)	(12) 制震版に作用する付加質量 MasP (kg)
				(4) 上部工 Mp (kg)	(5) 制震版 Msp (kg)	(6) 補強帯鉄 Mhp (kg)	(7) おもり Mw (kg)	(8) 杭 Mpi (kg)	(9) 総重量 M (kg)				
①	有り	4.842	1.00	1077.4	0.0	0.0	0.0	39.5	1116.9	1033766.1	12.9	-	
	無し	4.842	-	1077.4	0.0	0.0	0.0	39.5	1116.9	1033766.1	0.0	-	
②	有り	4.770	0.97	1077.4	85.1	17.9	0.0	39.5	1219.9	1173403.3	12.9	73.5	
	無し	4.936	-	1077.4	85.1	17.9	0.0	39.5	1219.9	1173403.3	0.0	-	
③	有り	3.265	0.70	1077.4	85.1	17.9	0.0	39.5	1219.9	1043605.5	12.9	1246.9	
	無し	4.655	-	1077.4	85.1	17.9	0.0	39.5	1219.9	1043605.5	0.0	-	
④	有り	4.858	0.98	1077.4	72.6	14.9	6.7	39.5	1211.1	1164890.9	12.9	26.3	
	無し	4.936	-	1077.4	72.6	14.9	6.7	39.5	1211.1	1164890.9	0.0	-	
⑤	有り	3.702	0.81	1077.4	72.6	14.9	6.7	39.5	1211.1	994615.2	12.9	614.4	
	無し	4.561	-	1077.4	72.6	14.9	6.7	39.5	1211.1	994615.2	0.0	-	
⑥	有り	4.155	0.90	1077.4	60.0	12.6	0.0	39.5	1189.6	990266.9	12.9	250.5	
	無し	4.592	-	1077.4	60.0	12.6	0.0	39.5	1189.6	990266.9	0.0	-	
⑦	有り	4.374	0.93	1077.4	36.0	7.6	0.0	39.5	1160.5	1006025.4	12.9	158.6	
	無し	4.686	-	1077.4	36.0	7.6	0.0	39.5	1160.5	1006025.4	0.0	-	

(1) 水の有無：各ケースともに振動台の水槽に注水を行った場合（水有り）と、注水を行わない場合（水無し）を対象とする。

(2) 固有振動数f1：スウィープ波加振による共振実験で計測された固有振動数f1。

(3) 固有振動数f1の低減率：各ケース毎の水無しの場合の固有振動数f1nwに対すする水有りの場合の固有振動数f1wの比を表す。

(4) 上部工の質量：上部工に使用した鉄板の質量を表す。Mp=1077.4(kg)

(5) 制震版の質量：制震版の質量を表す。Msp=制震版の1枚の質量×設置枚数で求められる。

(6) 補強帯鉄の質量：制震版の剛性を調整するために貼付された鉄板の質量。Mhp=帯鉄1枚の質量×貼付枚数。

(7) おもり：制震版の固有振動数を調整するために制震版に設置されたおもりの質量Mw。

(8) 杭長さ1/2相当の質量：模型杭の質量。ただし、ここでは固有振動数を算定するために、杭長さの1/2相当分の質量を用いる。Mpw=1/2×杭の質量×本数(15本)

(9) 模型の総重量：栈橋模型の総重量M。

(10) 栈橋の剛性：水が無い場合に、栈橋の総重量Mと固有振動数f1nwから算定される、栈橋の剛性K。

(11) 杭に作用する付加質量Mapi：水有りの場合に杭に作用する付加質量で、杭が排除する水の質量に相当する。ここでは、浸水長の1/2相当分の質量を用いる。

(12) 制震版に作用する付加質量MasP：水有りの場合に制震版に作用する付加質量で、固有振動数の変化の主な要因と考えられる。

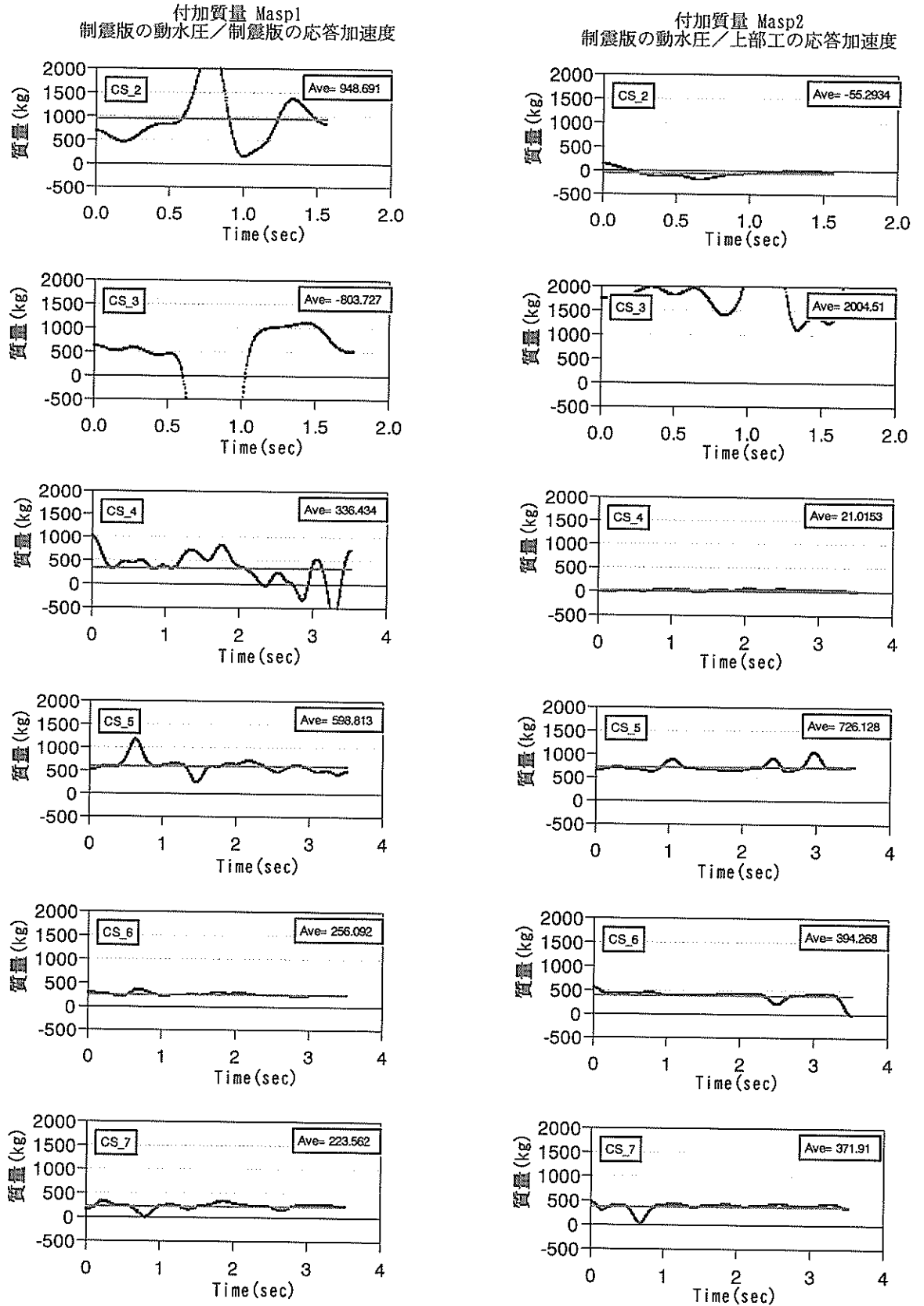


図-3.49 制震版の動水圧と制震版の応答加速度または上部工の応答加速度から求められる付加質量

2) 上部工の応答加速度と制震版の動水圧の値と位相差が、長周期化に及ぼす影響を検証する。

a) 固有振動数の低下から算定される付加質量と、動水圧から求められる付加質量の比較

固有振動数 $f_1$ が変化したメカニズムを検証するために、固有振動数の低下から算定される付加質量と計測された動水圧から算定される付加質量を比較する。

まず、固有振動数の変化から栈橋本体に作用する付加質量 $M_{asp}$ を求める。スウィープ波加振による共振実験で、振動台の水槽に注水する前の栈橋の固有振動数 $f_{1nw}$ と注水した後の固有振動数 $f_{1w}$ から、制震版に作用する付加質量 $M_{asp}$ を算定し、表-3.28に示す。同表の注釈に付加質量を求める過程での考え方を説明した。固有振動数の低下に伴い、算定される付加質量の値も大きくなる。固有振動数 $f_1$ の低下が最も顕著なケース③では、算定される付加質量は約1250kgとなり、栈橋の総重量(約1220kg)と比べて同等かそれ以上の値となり、加振中にかなり大きな値が付加質量として作用したと推測される。

つぎに、固有振動数の低下から算定された付加質量 $M_{asp}$ の値を検証するために、正弦波加振の共振点加振で計測された制震版の動水圧、制震版の応答加速度、上部工の応答加速度に基づき、以下の2通りの方法を用いて付加質量を計算から求めた。

1) 実験で計測された制震版の動水圧を、制震版の応答加速度で除して質量に変換し、付加質量( $M_{asp1}$ )を算定する。

2) 実験で計測された制震版の動水圧を、栈橋上部工の応答加速度で除して質量に変換し、付加質量( $M_{asp2}$ )を算定する。

求められた付加質量の時刻歴波形を図-3.49に示す。図中左側に1)制震版の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp1}$ の時刻歴を、上段から下端に向かってケース順に示す。同様に、右側に2)上部工の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp2}$ の時刻歴波形を示す。加振中に応答加速度および動水圧の波形が定常状態を示す時間帯を対象として算定した。定常状態以外の時間帯で求められる付加質量は、値の変動が大きく真の付加質量として評価できず、比較検討には適さないと判断したためである。

制震版の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp1}$ は、制震版の応答に対する見かけの質量の増加と考えられる。一方、上部工の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp2}$ は、制震版の上部工の応答に対する見かけの質量の増加と考えられる。両者の波形

を比較すると、上部工の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp2}$ の方が、全てのケースで安定した値を示す。加振中の上部工の応答加速度が制震版の応答加速度と比べて、応答値の変化が緩やかなことが主な要因と考えられる。

固有振動数の低下から算定される付加質量 $M_{asp}$ と計測された動水圧から算定される付加質量 $M_{asp1}$ 、 $M_{asp2}$ を表-3.29に示す。固有振動数の低下から算定される付加質量 $M_{asp}$ と、上部工の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp2}$ を比較すると、制震版が長く大きな制震効果が確認されたケース③がやや大きめであるが、両者の値は概ね等しい。また、制震版の応答加速度で除して求められた付加質量 $M_{asp1}$ でも、制震版が長いケース②およびケース③を除けば、 $M_{asp}$ とほぼ同様の値を示す。以上のことから、固有振動数の低下から算定される付加質量 $M_{asp}$ は、制震版の動水圧と制震版の応答加速度または上部工の応答加速度から求められる付加質量とほぼ等しい。言い換えれば、固有振動数 $f_1$ の低下は、制震版に作用する動水圧による生じる付加質量によるものである。得られた結果を以下に示す。

①固有振動数 $f_1$ の低下は、制震版に作用する動水圧により生じる付加質量によるものである。

②制震版が長く剛性が大きいほど、付加質量は大きくなり、固有振動数 $f_1$ の低下も大きくなる。

b) 上部工の応答加速度と制震版の動水圧の位相差  
制震版の条件により付加質量の大きさが大きく異なり、固有振動数 $f_1$ の低下に差が生じることが、前項a)で確認された。制震版が長く剛性が大きいほど付加質量も大きくなる。制震版の剛性が大きい場合には、上部工の揺れに伴い制震版も同じ向きに揺れるために、制震版に大きな動水圧が生じると推測される。また、剛性が小さい場合には、上部工と制震版は独自に揺れることが可能なために、制震版は上部工と反対方向に揺れる傾向が強まり、加振中に動水圧を小さくする向きに揺れると推測される。さらに、動水圧の大きさに加えて、剛性が大きい場合には、上部工と制震版は同じ向きに揺れるために、制震版に作用する動水圧は付加質量という形で上部工にそのまま伝えられるのに対して、剛性が小さい場合には、上部工と制震版は同じ向きに揺れないために(概ね逆位相と推測される)、伝達されるべき付加質量は上部工に伝わらない。つまり、上部工の応答加速度と制震版の動水圧の位相の違いが、振動特性に大きな差が生じる要因の一つと考えられる。



表-3.29 制震版の動水圧と制震版の応答加速度または上部工の応答加速度から求められる付加質量

実験 ケース	固有	固有振動数比	固有振動数の変化から	付加質量	
	振動数 f1 (Hz)	(水有り/水無し) flw/flnw	算定される付加質量 Masp (kg)	制震版の動水圧/制震版加速度 Masp1 (kg)	制震版の動水圧/上部工加速度 Masp2 (kg)
②	4.770	0.97	73.5	値が一定しない	約-50
③	3.265	0.70	1246.9	値が一定しない	約2000
④	4.858	0.98	26.3	約350	約20
⑤	3.702	0.81	614.4	約600	約730
⑥	4.155	0.90	250.5	約250	約400
⑦	4.374	0.93	158.6	約220	約370

位相差が及ぼす影響を検討するために、上部工の応答加速度AH2に対する、制震版の応答加速度と動水圧の位相差を比較した。図-3.50に、ケース④の上部工の応答加速度に対する制震版の応答加速度AH9と動水圧(W8:外側, W11:内側)のコヒーレンス、位相差、正規化した波形を示す。同様に、図-3.51にケース⑤の検討結果を示す。計器の特性上、応答加速度は計測点に作用する慣性力を意味し、動水圧は圧力が生じた場合に正の値を示す。図中下段に正規化した波形を重ねて描いたところ、剛性が小さいケース④では、上部工の応答加速度AH2に対する制震版の応答加速度AH9と制震版外側の動水圧W8は逆位相を示し、制震版内側の動水圧は同位相を示す。制震版の応答加速度が逆位相を示すことから、推定したとおりに制震版の剛性が小さい場合には、上部工と制震版は加振中に逆方向に揺れている。一方、制震版の剛性が大きいケース⑤では、上部工の応答加速度AH2に対する制震版の応答加速度および動水圧の波形は、全てケース④と逆位相を示す。

以上のことから、a)、b)で栈橋の長周期化のメカニズムに関する検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ①固有振動数f1の低下は、制震版の動水圧による付加質量効果で生じる。
- ②固有振動数f1の低下から求められる付加質量は、制震版の動水圧から求められる付加質量と等しい。
- ③制震版が長く剛性が大きいほど、付加質量が大きくなり、長周期化する。
- ④制震版の剛性が大きい場合に、上部工と制震版は同位相となり、大きな付加質量が作用し、長周期化する。
- ⑤制震版の剛性が小さい場合に、上部工と制震版は

逆位相となり、大きな付加質量が作用せず、長周期化の程度が小さい。

### 3.5 模型振動実験に関するまとめ

直杭式栈橋に水が付与する制震効果を検討するために模型振動実験を実施した。実験では主に下記に示す2つの項目について検討を行った。

- 1)提案した制震栈橋の制震効果の確認
- 2)制震効果のメカニズムの解明

実験結果に基づいた検討から、水の付与する制震効果が確認されるとともに、大きな制震効果を与える制震版の条件も明らかになった。このことから、模型振動実験の目的の一つである制震効果の確認は、達成することができた。一方、もう一つの大きな目的である、制震効果のメカニズムに関しては、減衰定数を実験で計測されたデータから算定し、減衰定数と制震効果の関係を詳細に検討した。その結果、「水-制震版-栈橋」の構造系の中で、制震版と水の相互作用により減衰が生じて、制震効果が起こるものと推測される。

模型振動実験を実施し、今後更に研究を進める上で貴重なデータを計測することができ、また制震技術に関する新たな知見を得ることができたので、ここにとりまとめを行う。

#### (1) 制震効果の確認

制震版の条件が制震効果に及ぼす影響を検討するために、実験は、制震版の長さ、剛性、枚数を変えて合計7ケース実施した。長さは長(95cm)・中(81cm)・短(67cm)と3段階に変化させ、剛性は大きい・小さいの2段階に変化させ、設置枚数は5枚・3枚に変化させた。

実験結果から、通常形式の栈橋と比べて、制震版を

ケース④：制震版81cm，剛性小，5枚

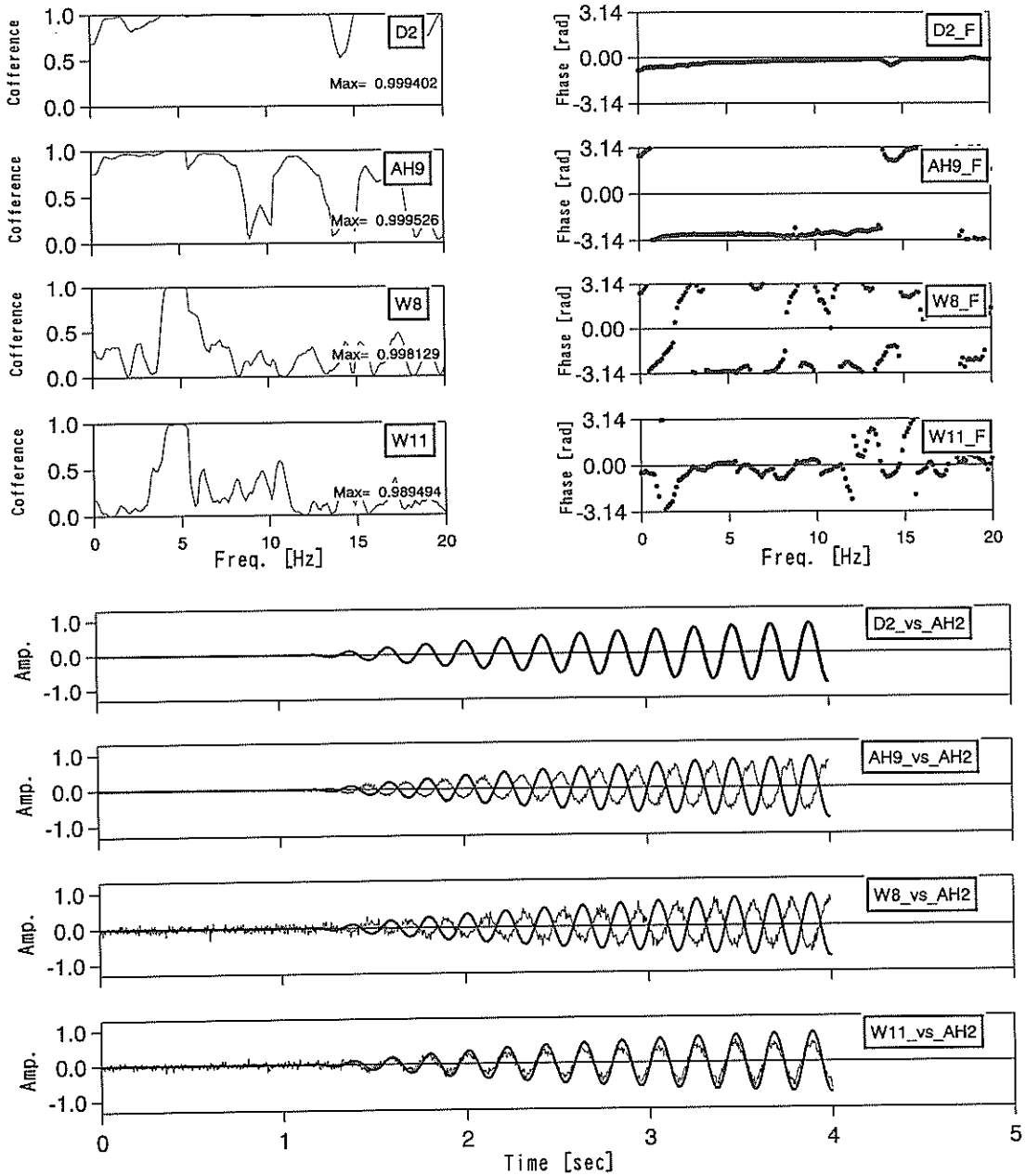
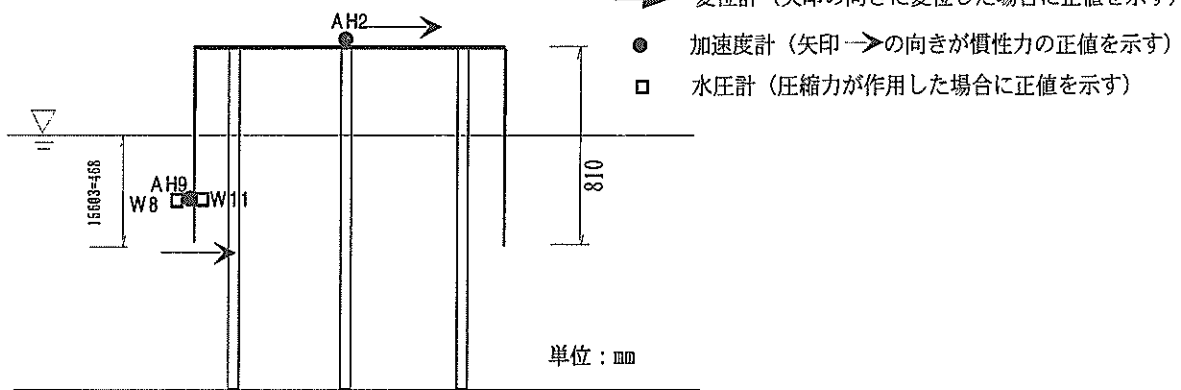


図-3.50 上部工の応答加速度と制震版の応答加速度・動水圧・上部工変位の相関ならびに位相差 (ケース④)

ケース⑤：制震版81cm, 剛性大, 5枚

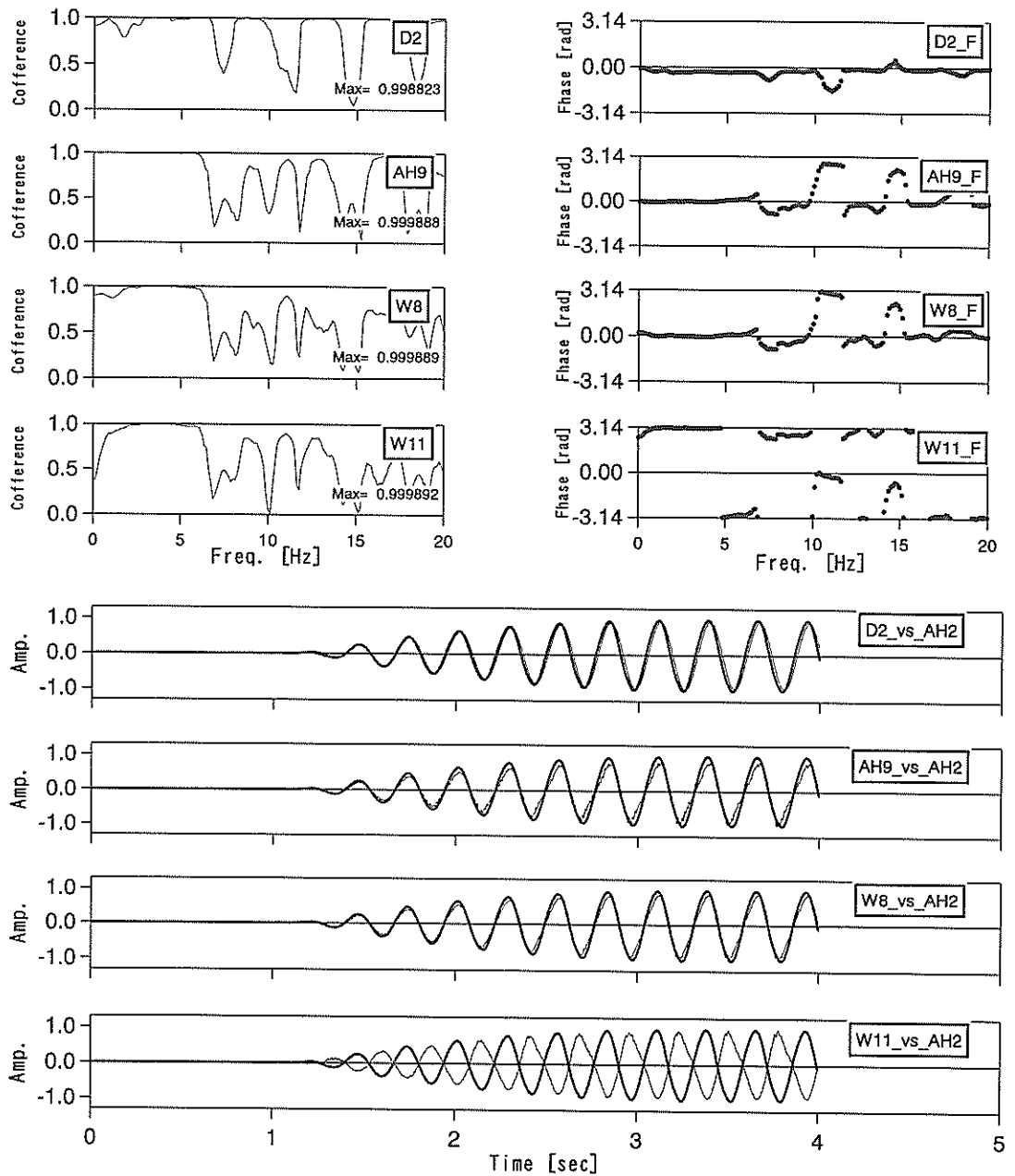
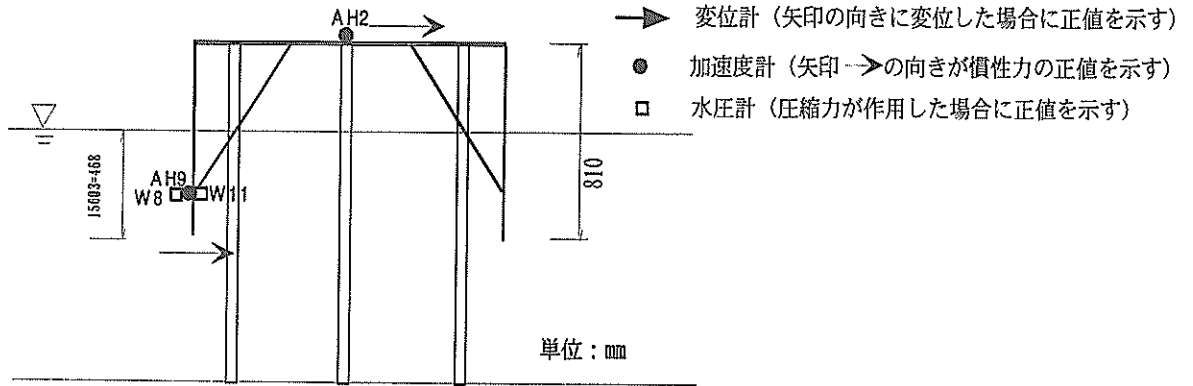


図-3.51 上部工の応答加速度と制震版の応答加速度・動水圧・上部工変位の相関ならびに位相差 (ケース⑤)

設置した制震栈橋では、栈橋上部工の応答変位や応答加速度、杭のひずみが最大で50～80%低減し、制震効果が確認された。さらに、制震版が長く、剛性が大きく、設置枚数が多いものほど、制震効果が大きかった。

#### (2) 制震効果のメカニズムの解明

実験の結果から、「水-制震版-栈橋」の構造系の中で、制震版と水の相互作用により減衰が生じ、制震効果が生じるものと推測される。実験で計測されたデータに基づき、下記に示す3種類の減衰定数を求めて、減衰定数の大きさと制震効果の関係を検討した。

- 1) 減衰定数 $h_v$ ：スウィープ波加振による共振曲線から求められる減衰定数。
- 2) 減衰定数 $h_g$ ：正弦波加振の後の自由振動曲線の包絡線の対数減衰率から求められる減衰定数。
- 3) 減衰定数 $\zeta$ ：正弦波加振時の上部工の荷重（慣性力）と変位の履歴曲線から求められる減衰定数。

詳細な検討から、いずれの減衰定数でも、その値が大きいほど制震効果も大きいことが確認された。

減衰定数は減衰の大きさを表すことから、制震化された栈橋では、減衰が大きくなることで制震効果が生じたものと判断される。また、減衰の大きさは、制震化することで通常栈橋と比較して、最大で約3倍程度大きくすることが可能である。実験で確認された制震栈橋の減衰定数の値は、おおよそ5%程度であった。

制震効果が大きい場合に、上部工の応答加速度と減衰力と考えられる制震版の動水圧の位相差が大きいことから、減衰の主な要因は位相差によるものと推測される。この位相差だけでなく、その他に「水-制震版-栈橋」の構造系で複雑な相互作用が起り、様々な要因が重なり合った減衰も生じていると考えられる。制震効果のメカニズムの解明は、今後の重要な課題である。

#### (3) 制震版の応答加速度

制震版の応答加速度は、制震版の剛性によりその挙動は大きく異なる。制震版の剛性が大きいほど、応答加速度は大きい。剛性が大きい場合には、上部工と制震版は同位相で振動し、上部工と制震版の最大値の分布はほぼ等しく、制震版の先端で若干増幅する程度である。一方、剛性が小さい場合には、上部工と制震版は逆位相で振動し、最大値の分布も浸水長の中間付近に節が生じる。この制震版の挙動の違いにより、制震版に作用する動水圧が異なり、制震効果に大きな差が生じる。

#### (4) 制震版の動水圧

制震版の剛性が大きいほど、制震版の動水圧は大き

い。これは、制震版の剛性が大きい場合に制震版の応答加速度が大きいためである。また、制震版の動水圧は、制震版の浸水長の2/3を水深とすれば、Westergaardの算定式で求められる。

#### (5) 長周期化について

模型実験から、制震栈橋の制震効果とともに、長周期化が確認された。固有振動数の変化から推定される付加質量と制震版の動水圧から求められた付加質量の値が概ね等しいことから、長周期化は制震版の動水圧によるものである。また、制震版の剛性が大きいほど、制震版の動水圧が大きく、長周期化の程度が大きい。

### 4. 地震応答解析による検討

3.で示したように模型振動実験から制震栈橋の制震効果が確認された。この効果は、栈橋上部工の応答変位ならびに杭頭部ひずみの最大値を通常形式の栈橋と比較して、おおよそ50%低減するものであった。これらの現象の主な要因として、応答値の低減に対しては「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰が増加したこと、栈橋の長周期化に対しては付加質量効果によるものと考えられる。ここでは、地震応答解析により、制震栈橋の制震効果について検討する。地震応答解析の概要および計算結果を述べるとともに、解析結果に基づいて制震効果に関する考察を深める。主な検討内容は下記のとおりである。

- 1) 実験結果との比較による計算手法の妥当性の検証
- 2) 解析による制震効果の確認
- 3) 制震のメカニズムの数値解析的な検討

なお、解析には運輸省港湾技術研究所で開発された、有限要素法に基づく流体-構造物連成系の三次元地震応答解析プログラムNONL3Dを使用した（プログラムの概要については付録Dを参照）。

#### 4.1 地震応答解析の概要

##### (1) 栈橋のモデル化

栈橋のモデル化は以下のとおりとした。栈橋杭は三次元はり要素でモデル化し、これに対する水の影響は理論的に概算した付加質量で考慮した。床版と制震版は板曲げ要素でモデル化した。なお、制震版には補強材が付加されているのでモデル化に当たっては版厚を平均厚にし、この版厚で曲げ剛性が等価になるようにヤング係数を調整した。水槽に満たされた水は流体要素でモデル化し、制震版との連成を考慮した。

解析は、制震版を設置しない通常形式をモデル化し

たものと、制震版を設置した制震栈橋をモデル化したものを対象として行った。さらに、制震版を設置したものはブレースを取り付けて剛性を大きくしたものと、設置せず剛性が小さいものを対象とした。合計3断面に対して固有値解析と地震応答解析を実施した。

予備解析として二次元解析を実施し、解析で与える構造体および水要素の物性値、さらにメッシュの分割幅の妥当性を検証したうえで三次元解析を実施した。

(2) 水のモデル化

三次元解析では、模型振動実験で制震版間および制震版近傍の表面波の動揺が大きかったことから、水の扱いに関しては、1) 非圧縮性または圧縮性、2) 表面波を考慮するまたはしない、の条件を与えて検討を行った。検討の結果、水の圧縮性および表面波が栈橋本体の応答に与える影響が小さいことが確認されたことから、今回の解析では水を非圧縮性として取り扱い、表面波も考慮せずに解析を行った。解析に大きな影響を及ぼさない理由としては、水は音速で伝播することと、水槽内が15m×15mと狭いために瞬時に伝播するためであると推測される。

(3) 制震版と水の相互作用の取扱い

模型振動実験から制震栈橋の減衰効果および長周期化が確認された。これらの原因として、制震版と水の相互作用により生じる動水圧の及ぼす影響が大きいものと考えられる。解析上では、制震版と水の境界面に連成面要素を作成し、お互い法線方向の力のつり合いを保つように定式化している。

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_f(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{gn}) \quad (4.1)$$

- $\rho_f$  : 流体の密度
- $u_n$  : 法線方向構造変位
- $\ddot{u}_{gn}$  : 法線方向入力加速度
- $n$  : 法線方向

(4) 杭に作用する動水圧の取扱い

杭と水の相互作用により生じる動水圧の影響は、理

論的に導かれる付加質量の考え方にしたが、杭をモデル化したはり要素を構成する節点に、杭が水中で占める体積相当の水の質量を付加質量として与えた。

(5) 減衰定数

解析を行うに当たり実験結果により減衰定数hを求めた。減衰定数hは、正弦波加振後の自由振動中の対数減衰率から求めた。さらに、これを解析プログラムNONL3Dで用いるレーレ減衰パラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ に変換した。変換にあたっては5Hz近傍の主たる振動モードに対して当該減衰定数が実現するよう、式(4.2)からレーレ減衰のパラメータ $\alpha$ と $\beta$ を設定した。

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i h_i \quad (4.2)$$

ここに、 $\omega_i$ : 主たる振動モードの固有円振動数  
 $h_i$ : 減衰定数

(6) 解析ケース

模型振動実験から、制震版が長くかつブレースを設置し剛性を大きくした場合に、制震効果が最も大きいことが明らかになっている。そこで解析は、通常栈橋と制震栈橋で起きる現象の違いを確認するために、制震版を設置しない通常形式をモデル化したものと(ケース①)、最も長い制震版L=95cmでブレースを設置して剛性を大きくしたケース③を対象として実施した。さらに、制震版の剛性に対する検討を行うために、長さが等しくブレースを設置しない剛性の小さいケース②も対象とし、合計3断面に対して固有値解析と地震応答解析を実施した。表-4.1に地震応答解析の一覧を示す。地震応答解析は、まず二次元解析を行い、解析で与える構造体および水要素の物性値、さらにメッシュの分割幅の妥当性を検証した後に、三次元解析を実施した。三次元解析では固有値解析を行い系の固有振動数を求め、固有振動数を加振振動数とする正弦波加振を実施した。加振最大加速度は100Galとし、加振時間は実験で入力した波数に合わせた。表-4.1には、(5)で示した方法により求めた減衰定数hも示してある。

表-4.1 地震応答解析ケース一覧

解析 ケース	構造	減衰定数 h	加振振動数 (Hz)	加振加速度 (Gal)	加振波数 (波数)	制震版の条件			実験 管理名
						長さ	剛性	枚数	
ケース①	制震版無し	0.016	5.40	100	20	-	-	-	NN
ケース②	制震版の剛性小	0.033	5.26	100	10	95	小	5	LL5
ケース③	制震版の剛性大	0.050	3.24	100	10	95	大	5	LH5

表-4.2 固有値解析の結果

解析 ケース	制震版 の条件	固有振動数		各ケースの固有振動数 / ケース①の固有振動数	
		実験値	解析値	実験	解析
		f1 (Hz)	f3 (Hz)		
ケース①	無し	4.84	5.40	-	-
ケース②	剛性小	4.77	5.26	0.99	0.97
ケース③	剛性大	3.27	3.24	0.68	0.60

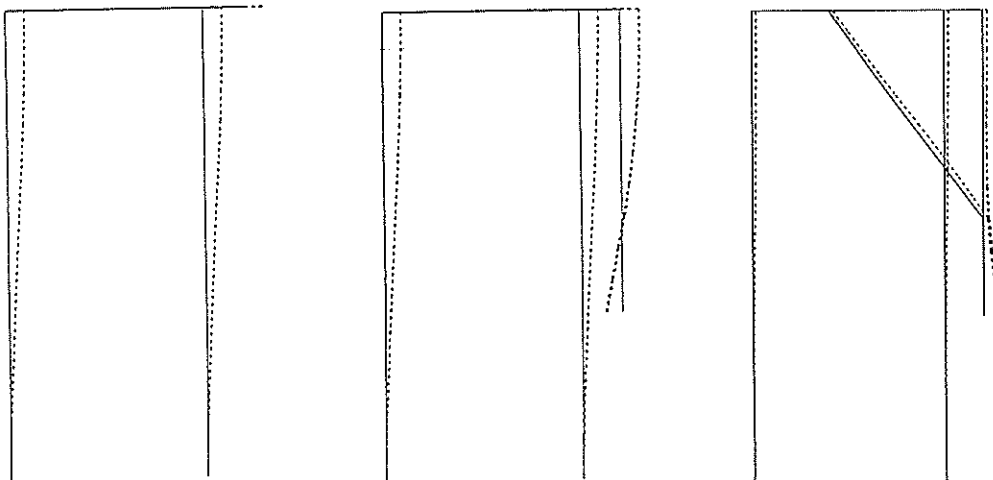


図-4.1 固有振動モード (左: ケース①, 中: ケース②, 右: ケース③)

#### 4.2 解析結果および結果の検討

##### (1) 固有値解析の結果

固有値解析の結果を表-4.2に示す。また、固有値解析で得られた各々の固有振動モードを図-4.1に示す。固有振動数は制震版の無い場合(ケース①)と有る場合、ブレースを設置して剛性を大きくした場合(ケース③)と、小さい場合(ケース②)のそれぞれで実験結果と概ね整合している。また、制震栈橋の固有振動数と通常栈橋の固有振動数の比は、制震版の剛性によらず概ね一致している。特に、制震版の剛性が大きい場合に、実験から求められた固有振動数f1と固有値解析で得られた固有振動数f3は、共に通常栈橋の固有振動より約3割程度低下し、同様の傾向を示している。この結果から、解析のモデル化で与える構造体および水要素の物性値、さらにメッシュの分割幅の妥当性が確認された。

##### (2) 地震応答解析の結果

三次元解析では、固有振動数を加振振動数とする正弦波加振を実施した。加振最大加速度は100Galとし、加振時間は実験で入力した波数に合わせた。このような条件で実施した地震応答解析で得られた波形を正弦

波加振実験で計測された波形と並べて示す。通常栈橋(ケース①)の波形を図-4.2に、制震版にブレースを設置せず剛性が小さい場合の制震栈橋(ケース②)の波形を図-4.3に、制震版にブレースを設置して剛性が大きい場合の制震栈橋(ケース③)の波形を図-4.4にそれぞれ示す。また、各ケースの波形の最大値を表-4.3にまとめ、図-4.5に最大値の分布状況を示した。

図-4.2に示した通常栈橋の(ケース①)の波形から、上部工の応答変位D2および応答加速度AH2は、解析値と実験値で概ね等しい波形を示す。また、図-4.5の最大値の分布状況から上部工の応答加速度の最大値は、両者でほぼ一致する。このことから、与えた減衰定数hの値をはじめ、用いた解析手法ならびに解析のモデル化で与える構造体および水要素の物性値、さらにメッシュの分割や与えた付加質量などの妥当性が示された。さらに、制震版と水の相互作用を解析対象に含めない場合には、地震応答解析で実現象を精度良く再現できることが確認された。

図-4.3に示した制震版の剛性が小さい制震栈橋(ケース②)の波形から、上部工の応答変位D2および上部

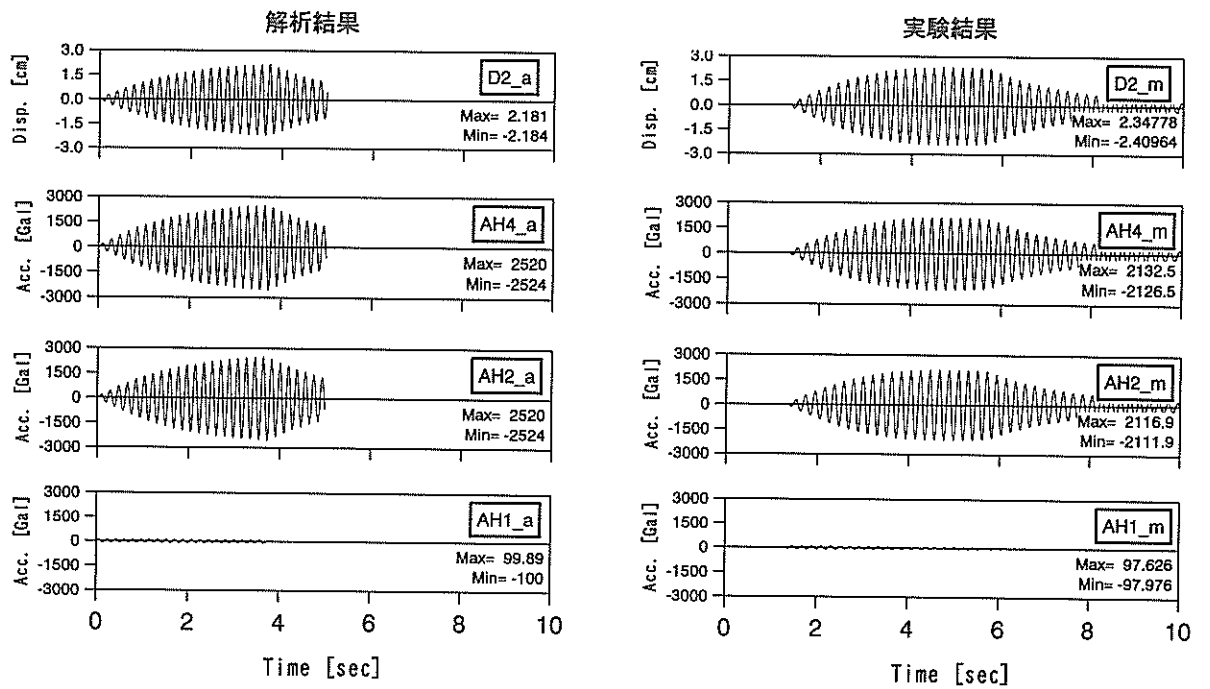


図-4.2 解析および実験結果の比較 (制震版なし)

表-4.3 解析値と実験値の最大値の分布

	ケース①		ケース②		ケース③	
	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値
変位 D2 (cm)	2.18	2.35	1.09	1.30	1.44	1.09
加速度 AH1 (Gal)	99.9	97.6	99.8	102.4	100.0	107.5
加速度 AH2 (Gal)	2520.0	2116.9	1185.0	1381.8	607.8	495.8
加速度 AH4 (Gal)	2520.0	2132.5	1185.0	1394.8	607.8	505.8
加速度 AH8 (Gal)			976.7	922.9	2296.0	1016.8
加速度 AH9 (Gal)			212.7	223.5	1288.0	784.2
加速度 AH10 (Gal)			481.9	737.0	680.8	774.3
動水圧 W7 (gf/cm <sup>2</sup> )			1.07	2.8	1.3	8.8
動水圧 W8 (gf/cm <sup>2</sup> )			2.70	3.1	26.0	15.4
動水圧 W9 (gf/cm <sup>2</sup> )			6.27	8.4	16.4	12.5
動水圧 W10 (gf/cm <sup>2</sup> )			1.07	2.0	1.3	6.6
動水圧 W11 (gf/cm <sup>2</sup> )			2.66	2.9	24.9	14.9
動水圧 W12 (gf/cm <sup>2</sup> )			6.64	8.0	15.9	11.9

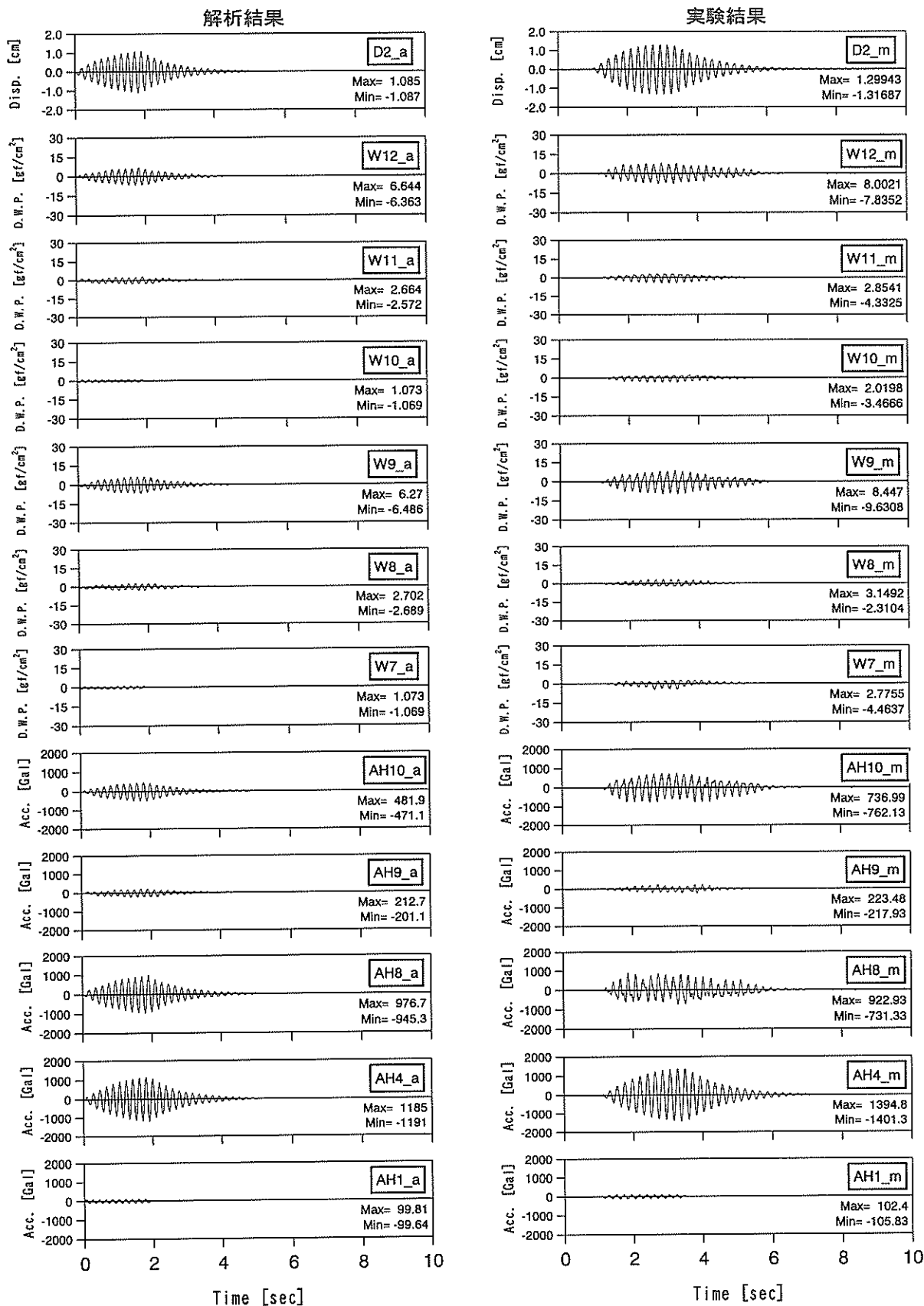


図-4.3 解析および実験結果の比較 (ケース②: 制震版95cm, 剛性小: フィルター有り)



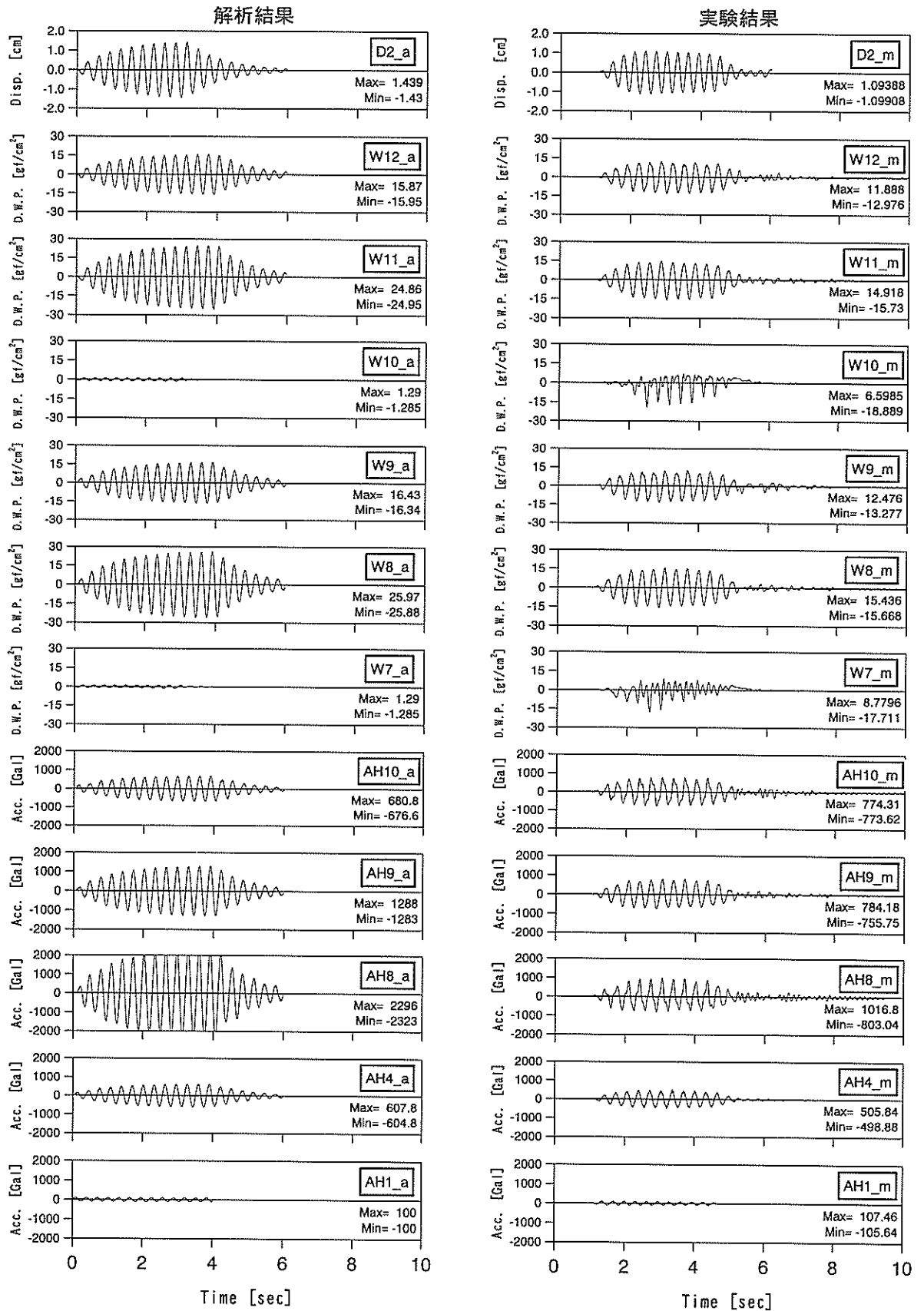


図-4.4 解析および実験結果の比較 (ケース③: 制震版95cm, 剛性大: フィルター有り)

工の応答加速度AH2などの栈橋本体に加えて、制震版の応答加速度(AH8, AH9, AH10)と動水圧(W7~W12)の波形は、振幅および周期ともに解析値と実験値で概ね一致した。また、図-4.5の最大値の分布状況から、上部工の応答加速度、制震版の応答加速度および動水圧の最大値の分布は、解析値と実験ではほぼ一致する。このことから、制震版と水の相互作用を解析対象とする場合にも、地震応答解析で実現象を精度良く再現できることが確認された。この要因としては、制震版と水の相互作用を連成面要素を作成し、力のつり合いを保つように定式化したことや、制震版の剛性等の物性値が適切であることなどが考えられる。さらに、通常栈橋の解析結果と比較すると、上部工の応答変位および応答加速度の値が低減し、実験で確認された制震効果も再現されている。解析で得られた応答値の低下は、主に入力する減衰定数を大きくしたことで表現されている。このことから、減衰定数を適切に入力すれば、地震応答解析で制震効果を精度良く再現できることが確認された。

図-4.4に示した制震版の剛性が大きい制震栈橋(ケース③)の波形は、上部工の応答変位D2および上部工の応答加速度AH2などの栈橋本体に加えて、制震版の応答加速度(AH8, AH9, AH10)と動水圧(W7~W12)の波形は、振幅および周期ともに解析値と実験値では、細部で若干異なる傾向を示す。上部工の応答変位D2の解析値は実験値と比べて約1.5倍の値を示す。制震版の応答加速度も実験値が大きく、特に先端の応答加速度AH8では約2倍の値を示す。また、加振後の自由振動も解析値の振動が長く継続する。しかし、細部では傾向が異なるものの、図-4.5の最大値の分布状況から、入力に対する上部工の応答や動水圧の分布などの全体的な挙動は、解析値と実験値で概ね等しいと考えられる。このことから、制震版と水の相互作用を解析対象とし、制震版の剛性が大きく制震版に大きな動水圧が生じ、制震効果がより大きい場合にも、地震応答解析で実現象を概ね再現できることが確認された。当初、制震版の挙動が激しく、制震版と水の間には渦等の複雑な現象が生じ、実験で確認された制震効果を解析で再現するのは困難であると予想された。しかし実際に解析を行ってみると、上部工の応答変位や応答加速度が大きく低減し、制震効果が再現されている。応答値の低下は入力した減衰定数 $h$ を大きくしたことで得られたものと推測される。ここで入力した減衰定数は、正弦波加振実験の自由振動中の対数減衰率から得られた値 $h=0.05(5\%)$ を用いた。実際の構造系の減衰の大きさに

相当する減衰定数を入力すれば、制震効果を精度良く地震応答解析で再現できる。

なお、ここで用いたケース②およびケース③の波形は、実験で計測された制震版の応答加速度および動水圧の波形にパルス状のノイズが生じたことから、ローパスフィルターで10Hz以上の波の成分を除去し、Hanningウィンドウで1回平滑化を行った波形を用いた。

#### 4.3 地震応答解析結果のまとめ

模型振動実験を行い新たに提案した制震栈橋の制震効果が確認された。制震効果は主に制震版と水の相互作用により「水-制震版-栈橋」連成構造系の減衰が大きくなることで生じるものと推測される。地震応答解析を行い、解析結果に基づき制震効果の確認およびメカニズムに関する検討を行ったので、ここにとりまとめを行う。

##### (1) 実験結果との比較による計算手法の妥当性の検証

制震効果およびそのメカニズムに関する検討を行う前に、まず、実験結果と解析結果を比較して、ここで用いた解析手法の妥当性を確認した。固有値解析から、制震版の有無、制震版の剛性の大小によらず、解析で得られた固有振動数 $f_3$ と実験で計測された固有振動数 $f_1$ は概ね一致した。また、実験では制震版の剛性を大きくすると固有振動数 $f_1$ は約3割程度低下したが、解析からも同程度の固有振動数の低下が確認された。これらの結果から、解析のモデル化で与える構造体および水要素の物性値、さらにメッシュの分割幅や用いた解析プログラムの妥当性が確認された。

地震応答解析でも、制震版の有無、制震版の剛性の大小によらず、解析で得られた波形ならびに最大値は、実験の計測結果と概ね一致した。制震版と水の相互作用には、渦等の複雑な現象が生じ、実験で確認された制震効果を解析で再現するのは困難であることが予想されたが、実験結果を概ね解析で説明できた。この要因として、制震版と水の相互作用を、連成面要素を作成して力のつり合いを保つように定式化した手法や、制震版の剛性等の物性値が適切であったことが挙げられる。また、ここでは実験から求められた減衰定数 $h_g$ を用いたが、この減衰定数が実際の構造系の減衰の大きさに相当したことや、使用した解析プログラムの減衰を扱うアルゴリズムが実現象を適切に表現できたことが、解析の精度を確保できた要因と考えられる。以上のことから、実験結果との比較による、計算手法の

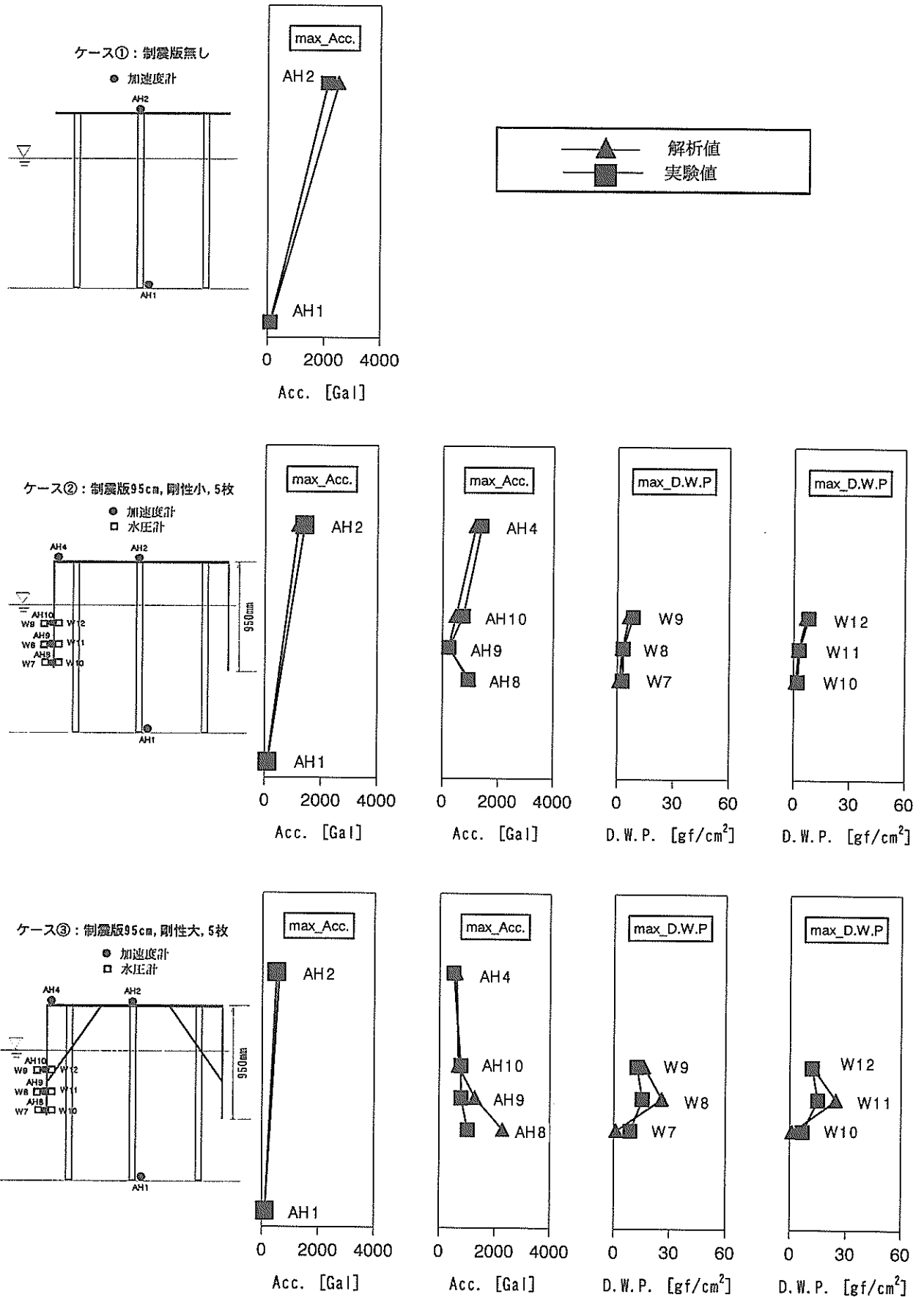


図-4.5 解析および実験値の最大値分布の比較 (ケース②およびケース③はフィルター有り)

妥当性は確認できた。

## (2) 解析による制震効果の確認

制震版の有無、制震版の剛性の大小によらず、解析で得られた、上部工の応答変位や応答加速度、制震版の応答加速度と動水圧の波形ならびに最大値は、実験で計測された結果と概ね一致した。制震版を設置することで通常栈橋と比べて応答値が低下し、さらに制震版の剛性が大きい場合には小さい場合と比べて、応答値の低下が顕著に現れる。つまり、実験で確認された制震効果を地震応答解析でも確認することができた。

また、制震効果と同時に固有振動数の長周期化に関しても、固有値解析を行い確認することができた。実験では制震版の剛性が小さい場合には固有振動数の変化は見られず、剛性が大きい場合に固有振動数は約3割程度低下した。解析でも同様の固有振動数の変化が確認され、解析からも制震効果が確認された。

## (3) 制震のメカニズムの数値解析的な検討

前項2)にも述べたとおり、制震版の有無、制震版の剛性の大小によらず、実験で確認された制震効果を地震応答解析でも確認することができた。制震版を設置することで通常栈橋と比べて応答値が低下し、制震版の剛性が大きい場合には小さい場合と比べて、応答値の低下が大きくなる。各ケースで入力が変わったのは、減衰定数 $h$ と制震版のみであり、その他の水と制震版の連成面要素や、表面の水要素等の条件は全て等しい。このことから、制震効果は減衰の大きさにより異なり、減衰が大きくなるほどその効果は大きくなるものと想定される。地震応答解析の用いた減衰定数は、自由振動中の対数減衰率から求められる減衰定数 $hg$ を用いた。ケース①(制震版無し)で $hg=0.016$ 、ケース②(制震版の剛性小)で $hg=0.033$ 、ケース③(制震版の剛性大)で $hg=0.050$ である。このことから、減衰の増加に応じて解析で得られた制震効果が大きくなり、想定したとおりに、実験で計測された制震効果は減衰の増加により生じたことが明らかになった。

地震応答解析による検討から、制震効果は減衰の増加により生じることが明らかにされたものの、解析に用いられている減衰はレーレ減衰であり、解析対象とする構造系全ての減衰を含んだものである。このことから、減衰が増加した要因については検証できない。減衰のメカニズムの解明は今後の重要な課題である。

制震効果とならび栈橋本体の長周期化が確認された。実験結果から、長周期化のメカニズムとしては制震版に作用する動水圧による付加質量効果と想定された。作製した解析モデルでは、水と制震版の間に生じる動

水圧が付加質量として作用する連成面要素を用いている。このモデルを用いて解析を実施し、長周期化を確認できたことから、長周期化は動水圧の付加質量効果により生じることが確認された。

これまで述べたとおり、実験で確認された制震効果および栈橋本体の長周期化のメカニズムが地震応答解析を行い明らかにすることができた。

## 5. まとめ

本研究では、港湾施設の代表的な構造形式である直杭式栈橋の耐震性をより合理的に確保するために、水の制震効果を加味した直杭式栈橋構造を提案した。その構造は、制震版を通常形式の栈橋の上部工に設置し水中に浸水させ、水と制震版の連成作用により生じる抵抗力により、地震時に作用する慣性力を低減し、栈橋の耐震性を高めるものである。このような水が付与する制震効果に関する研究実績は皆無であり、その効果およびメカニズムに関しては全くの未知数であった。

そこで研究では、まず、制震版を設置した栈橋模型を作製し、模型振動実験を行った。実験から、栈橋上部工および杭頭ひずみの最大値を通常形式の栈橋と比較して、おおよそ50%低減させる制震効果とともに栈橋の長周期化が確認された。また、その効果は、制震版の長さ(浸水長さ)が長いほど、制震版の剛性が大きいほど、制震版の設置枚数が多いほど、その効果が大きいことが確認された。これらの効果のメカニズムに関して検討を行った結果、長周期化の要因は付加質量効果によるものと判断されるが、制震効果に関しては構造系の減衰が増加することが主な要因と考えられる。共振実験から減衰定数 $h_v$ 、正弦波加振後の自由振動から減衰定数 $h_g$ 、上部工の荷重と変位の履歴曲線から定数 $\zeta$ を求め、減衰に対する検討を行ったところ、 $h_v$ 、 $h_g$ 、 $\zeta$ ともに制震効果が大きくなるにしたがい大きくなる傾向を示した。このことから「水-制震版-栈橋」系の減衰が大きくなったことで制震効果が生じるものと考えられる。なお、 $h_v$ 、 $h_g$ の値はそれぞれ通常栈橋で約0.015、効果が最も大きい制震栈橋で約3倍の0.050程度であった。

実験で確認された制震効果を論理的に検討するために、実験を対象とした地震応答解析を実施した。解析では、加振終了後の自由振動中の対数減衰率から求められた減衰定数 $hg$ を用いた。制震版を設置しない通常形式の栈橋では減衰として $hg=0.016$ を与え、制震版が長く剛な最も効果が大きい制震栈橋には $hg=0.050$ を入

力することで、実験結果を概ね説明することができた。地震応答解析では、模型振動実験の特徴的な現象である、応答値の大きな低減と長周期化が概ね再現されており、理論的に制震効果を説明するものである。

制震栈橋に関する実験的ならびに解析的な検討から、制震効果が確認されるとともに大きな制震効果を与える制震版の条件も同時に明らかにされた。また、制震栈橋の構造系は減衰定数を適切に与えれば、数値解析で説明できることが明らかにされた。「水-制震版-栈橋」の複雑な相互作用を対象とするにも拘わらず、その制震効果ならびに長周期化が概ね再現できたことは、提案された新しい耐震技術の実用化および耐震設計法の確立の可能性を示唆するものである。水が付与する制震効果は従来形式の栈橋構造の減衰を約3倍程度大きくする耐震技術であり、実験的ならびに解析的に十分に説明ができる。

これまで本報告で述べてきたことを以下にとりまとめて示す。

- ①制震版を設置することで、直杭式栈橋模型は上部工の応答変位および杭頭部のひずみがおおよそ50%低減し、その固有周期は増大した。
- ②制震版の応答加速度は、剛性が大きい場合に上部工と同位相を示し、小さい場合には逆位相を示す。その値は剛性が大きいほど大きい。動水圧も、剛性が大きいほど大きい。
- ③制震効果は、制震版の浸水長さが長く制震版の剛性が大きく、設置枚数が多いほど制震効果が大きいことが確認された。
- ④制震版を設置した栈橋模型の減衰の大きさは制震版のない栈橋模型と比べて約3倍に増え、その値は約5%程度と推定される。
- ⑤制震版を設置すると栈橋の固有周期が長くなるが、その主な要因は制震版に生じる動水圧による付加質量効果である。
- ⑥実験により得られた制震効果等の結果は、地震応答解析で概ね説明できる。

## 6. あとがき

制震栈橋の制震効果が確認されたことから、今後は新しい耐震技術の実用化に向けた研究をさらに進める。特に、耐震設計法の確立を目指すためには、制震効果のメカニズムをより明確にして、得られる減衰の増加はいかなる要因によるものなのか検討を行い、減衰の原理およびその値に対する信頼性をさらに高める必要

がある。また、付加質量は制震栈橋に対しても設計上はやはり敵として振る舞うために、付加質量を増加させないで制震効果が大きくなる構造を目指す必要がある。

## 謝辞

本報告は、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的推進制度」に基づき採択された共同研究で得られた成果をとりまとめたものである。共同研究は、運輸施設整備事業団、港湾技術研究所、(財)沿岸開発技術研究センター、五洋建設(株)の関係研究機関の協力を得て進められている。新奇性および独創性に富む研究でありながら、実用化に資する貴重な成果を確認することができました。関係機関ならびに貴重な意見を戴きました皆様に対する甚大なる謝意をここに記して表します。

(1999年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) 稲富隆昌, 善功企, 外山進一, 上部達生, 井合進, 菅野高弘, 寺内潔, 横田弘, 藤本健幸, 田中祐人, 山崎浩之, 小泉哲也, 長尾毅, 野津厚, 宮田正史, 一井康二, 森田年一, 南兼一郎, 及川研, 松永康男, 石井正樹, 杉山盛行, 高崎伸彦, 小林延行, 岡下勝彦: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No.857, 1997年3月
- 2) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1999年4月
- 3) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, (社)日本道路協会, 平成8年12月
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編
- 5) 土田肇, 稲富隆昌, 野田節男, 上部達生, 柳生忠彦, 村田利治: 港湾・海岸施設耐震性調査手法について, 港湾技研資料, No.336, 1980年6月
- 6) 上部達生: 地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定, 港湾技研資料, No.473, 1983年12月
- 7) 横田弘, 高橋邦夫, 南兼一郎, 川端規之, 原田典佳: 地震時における鋼管杭式栈橋の被災メカニズムに関する解析的研究, 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計法に関するシンポジウム講演論文集, pp.279-282, 1998年1月
- 8) 藤本健幸: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その2) 被害状況-港湾荷役施設-, 港湾技研資料, No.813, pp.77-93, 1995年9月

- 9) 南兼一郎, 高橋邦夫, 園山哲夫, 横田弘, 川端規之, 関口宏二, 汐見夕一: 神戸港における横栈橋の被害調査と動的相互作用解析, 第 24 回地震工学研究発表会論文集, pp.693-696, 1997 年 7 月
- 10) Susumu Iai: Seismic Analysis And Performance of Retaining structures, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III Volume Two, pp.1020-1044, Geotechnical Special Publication No. 75
- 11) 鈴木方敏, 松本竹二, 阿比留久徳, 原田秀秋, 藤城学: 制振機構適用による構造物の防震, 日本建築学会大会学術講演概要集(北海道), pp.831-836, 1986年 8月
- 12) 横田弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 高橋邦夫, 川端規之, : 鋼管杭式栈橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第2号, pp.75-130, 1998年6月
- 13) 井合進: 1g場での地盤一構造物一流体系の模型振動実験の相似則, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第3号, pp.3-24, 1988年9月

## 記号表

$A(f)$ : 周波数伝達関数

Acc.: 応答加速度 (Gal)

Amp.: 絶対値の最大値で基準化した波形

Ave: 平均値

B: 幅

Coffarence: コヒーレンス

$d_1$ : 杭の外径 (cm)

$d_2$ : 杭の内径 (cm)

Disp.: 応答変位 (cm)

Displacement: 応答変位 (cm)

D. W. P.: 動水圧 ( $\text{gf}/\text{cm}^2$ )

E: ヤング係数 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

EI: 曲げ剛性 ( $\text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ )

$f_1$ : 栈橋全体の固有振動数 (Hz)

$f_2$ : 制振版自体の固有振動数 (Hz)

$f_3$ : 栈橋全体の固有振動数の解析値 (Hz)

$f_{1w}$ : 水が有る場合の栈橋全体の固有振動数 (Hz)

$f_{1nw}$ : 水が無い場合の栈橋全体の固有振動数 (Hz)

Phase: 位相差 (rad)

Force: 荷重 (上部工の慣性力)

Freq.: 振動数 (Hz)

$g$ : 重力加速度 ( $9.80\text{m}/\text{s}^2$ )

h: 減衰定数

$h_i$ : 減衰定数

$h$ : 水深 (m)

$h_0$ : 鋼構造物の減衰定数

$h_b$ : 履歴減衰定数

$h_v$ : 共振曲線から図解的方法で求められる減衰定数

$h_g$ : 自由振動中の対数減衰率から求められる減衰定数

$I$ : 断面二次モーメント ( $\text{cm}^4$ )

$K$ : 栈橋の剛性 (栈橋の水平方向バネ定数)

$L$ : 長さ

$L_1$ : 制震版の長さ (95cm)

$L_2$ : 制震版の長さ (81cm)

$L_3$ : 制震版の長さ (67cm)

LH5: ケース 3 の実験管理名 (制震版: 長・剛性大・5 枚)

LL5: ケース 2 の実験管理名 (制震版: 長・剛性小・5 枚)

$M$ : 質量 (kg)

$M_a$ : 付加質量 (kg)

$M_{a1}$ : 杭に作用する付加質量 (kg)

$M_{a2}$ : 制震版に作用する付加質量 (kg)

$M_{a21}$ : 制震版の動水圧と制震版加速度から算定される付加質量 (kg)

$M_{a22}$ : 制震版の動水圧と上部工加速度から算定される付加質量 (kg)

$M_p$ : 栈橋模型の上部工の質量 (kg)

$M_{hp}$ : 栈橋模型の補強帯鉄の質量 (kg)

$M_{pi}$ : 栈橋模型の杭の質量 (kg)

$M_{sp}$ : 栈橋模型の制震版の質量 (kg)

$M_w$ : 栈橋模型の制震版の固有振動数を調整するおもりの質量 (kg)

MH5: ケース 5 の実験管理名 (制震版: 中・剛性大・5 枚)

ML5: ケース 4 の実験管理名 (制震版: 中・剛性小・5 枚)

$n$ : 法線方向

NN: ケース 1 の実験管理名 (制震版: 無し)

$p_{max}$ : 任意点の動水圧の最大値 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )

$P_x(f)$ : 入力  $X(t)$  のパワースペクトル

$P_y(f)$ : 入力  $Y(t)$  のパワースペクトル

$P_{yx}(f)$ : コスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの実数部)

$q$ : 床版の単位体積面積当たりの重量

$Q_{yx}(f)$ : クオドラチャスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの虚数部)

Sa: スウィープ波加振による共振実験で求められる加

$Sa'$ : 一自由度系の自由振動理論による加速度応答倍率  
 Strain: 栈橋模型の杭のひずみ( $\mu$ )  
 SH3: ケース 7 の実験管理名 (制震版: 短・剛性大・3 枚)  
 SH5: ケース 6 の実験管理名 (制震版: 短・剛性大・5 枚)  
 $t$ : 杭の肉厚 (cm)  
 Time: 時間 (s)  
 $T$ : 時間 (s)  
 $T_s$ : 栈橋の固有周期 (s)  
 $T_s'$ : 付加質量が作用した栈橋の固有周期 (s)  
 TLD: チューンドリキッドダンパー  
 TMD: チューンドマスダンパー  
 $u_n$ : 法線方向構造変位  
 $\ddot{u}_{gn}$ : 法線方向入力加速度  
 $W$ : 栈橋模型の床版の奥行 (cm)  
 $W$ : 弾性ひずみエネルギー  
 $\Delta W$ : 履歴曲線の描く面積  
 $w_0$ : 水の単位体積重量 ( $t/m^3$ )  
 $y$ : 水面から任意点までの深さ (m)  
 $Z_{YX}(f)$ : クロススペクトルの絶対値  
 $\varepsilon$ : ひずみ ( $\mu$ )  
 $\lambda$ : 長さに関する縮尺比  
 $\lambda t$ : 時間に関する縮尺比  
 $\rho$ : 密度  
 $\rho_f$ : 流体の密度  
 $\alpha$ : 制震版の応答加速度 ( $m/s^2$ )  
 $\Delta\omega$ : 振動数の幅  
 $\omega_0$ : 非減衰固有振動数  
 $\omega_i$ : 主たる振動モードの固有円振動数  
 $\gamma(f)$ : コヒーレンス  
 $\theta(f)$ : 位相差  
 $\zeta$ : 栈橋模型の上部工の履歴曲線から算定される減衰の大きさを示す定数

付録. A

各実験ケースで計測された時刻歴波形および最大最小値



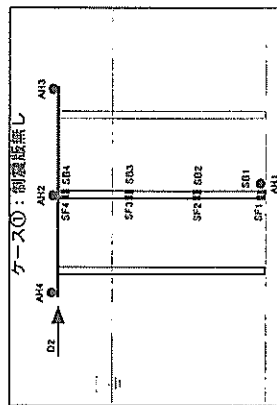


表-A-1 ケース①の最大最小値（共振点加振）

種別	計測点	下端からの高さ (cm)	100cal加振		300cal加振	
			最大値	最小値	最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	2.34	-2.40	0.89	-0.90
ひずみ (μ)	SF1	0.0	916.1	-993.8	848.9	-837.1
	SF2	50.0	188.0	-180.3	69.7	-74.4
	SF3	100.0	530.2	-520.6	201.7	-201.4
	SF4	150.0	1246.9	-1273.9	454.6	-481.4
(μ)	SB1	0.0	905.8	-910.3	848.7	-844.5
	SB2	50.0	190.9	-180.4	71.0	-70.1
	SB3	100.0	524.8	-520.6	200.8	-200.9
	SB4	150.0	1213.6	-1274.1	472.8	-477.5
加速度 (Gal)	AH1	0.0	97.6	-98.0	27.8	-32.1
	AH2	150.0	2116.9	-2111.9	824.0	-828.2
	AH3	150.0	2141.9	-2136.9	833.4	-838.4
	AH4	150.0	2132.9	-2126.9	829.4	-833.7

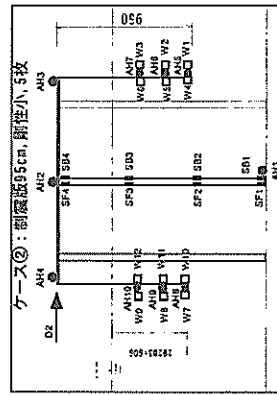


表-A-2 ケース②の最大最小値（共振点加振：フィルター有り）

種別	計測点	下端からの高さ (cm)	100cal加振		300cal加振（補正値）	
			最大値	最小値	最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	1.62	-1.66	0.49	-0.50
ひずみ (μ)	SF1	0.0	637.3	-639.7	191.2	-191.9
	SF2	50.0	131.8	-130.7	39.5	-39.2
	SF3	100.0	365.0	-359.3	109.5	-107.9
	SF4	150.0	878.2	-871.2	263.5	-261.4
(μ)	SB1	0.0	509.4	-505.1	132.8	-131.5
	SB2	50.0	108.7	-104.3	32.6	-31.3
	SB3	100.0	289.5	-285.9	86.9	-85.8
	SB4	150.0	639.4	-638.3	206.8	-205.5
加速度 (Gal)	AH1	0.0	102.4	-105.8	30.7	-31.7
	AH2	150.0	1381.8	-1389.4	414.5	-416.8
	AH3	150.0	1143.0	-1138.4	342.9	-341.5
	AH4	150.0	1384.8	-1401.3	418.44	-420.4
加速度 (Gal)	AH5	51.8	758.4	-1056.0	227.5	-316.8
	AH6	72	218.4	-247.7	65.5	-74.3
	AH7	92.2	883.3	-850.7	265.0	-195.2
	AH8	51.8	922.9	-731.3	276.9	-219.4
加速度 (Gal)	AH9	72	223.5	-217.9	67.1	-65.4
	AH10	92.2	737.0	-762.1	221.1	-228.6
	W1	51.8	2.4	-2.9	0.7	-0.9
	W2	72	3.4	-2.6	1.0	-0.8
加速度 (Gal)	W3	92.2	7.5	-10.4	2.2	-3.1
	W4	51.8	1.1	-1.9	0.3	-0.6
	W5	72	2.9	-4.1	0.9	-1.2
	W6	92.2	8.2	-7.2	2.5	-2.2
加速度 (Gal/cm <sup>2</sup> )	W7	51.8	2.8	-4.5	0.8	-1.4
	W8	72	3.1	-2.3	0.9	-0.7
	W9	92.2	8.4	-9.6	2.5	-2.9
	W10	51.8	2.0	-3.5	0.6	-1.1
加速度 (Gal/cm <sup>2</sup> )	W11	72	2.9	-4.3	0.9	-1.3
	W12	92.2	8.0	-7.8	2.4	-2.3

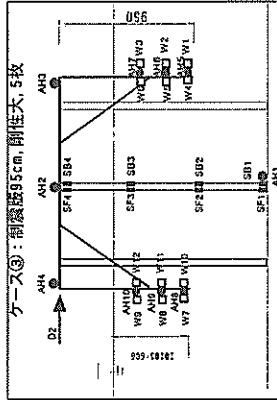


表-A-3 ケース③の最大最小値（共振点加振：フィルター有り）

種別	計測点	下端からの高さ (cm)	100cal加振		300cal加振（補正値）	
			最大値	最小値	最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	1.22	-1.23	0.37	-0.37
ひずみ (μ)	SF1	0.0	450.8	-449.1	135.2	-134.7
	SF2	50.0	95.0	-93.5	28.5	-28.1
	SF3	100.0	254.8	-251.8	76.4	-75.5
	SF4	150.0	619.6	-618.4	185.9	-185.5
(μ)	SB1	0.0	400.6	-402.0	120.2	-120.6
	SB2	50.0	84.9	-86.8	25.5	-26.0
	SB3	100.0	227.1	-225.4	68.1	-67.6
	SB4	150.0	545.9	-545.0	163.8	-163.5
加速度 (Gal)	AH1	0.0	107.5	-105.6	32.3	-31.7
	AH2	150.0	495.8	-494.1	148.7	-148.2
	AH3	150.0	440.9	-441.8	132.3	-125.9
	AH4	51.8	505.8	-498.9	151.74	-149.57
加速度 (Gal)	AH5	51.8	1319.6	-1908.4	395.9	-572.5
	AH6	72	1250.8	-888.5	375.2	-260.5
	AH7	92.2	877.2	-798.0	263.2	-239.4
	AH8	51.8	1016.8	-803.0	305.0	-240.9
加速度 (Gal)	AH9	72	784.2	-755.8	235.3	-226.7
	AH10	92.2	774.3	-773.6	232.3	-232.1
	W1	51.8	15.6	-33.0	4.7	-8.9
	W2	72	18.4	-24.8	5.5	-7.4
加速度 (Gal)	W3	92.2	15.3	-19.4	4.6	-5.8
	W4	51.8	9.0	-18.0	2.7	-5.4
	W5	72	24.9	-19.1	7.5	-5.7
	W6	92.2	19.3	-14.2	5.8	-4.3
加速度 (Gal/cm <sup>2</sup> )	W7	51.8	8.8	-17.1	2.6	-5.3
	W8	72	15.4	-15.7	4.6	-4.7
	W9	92.2	12.5	-13.3	3.8	-4.0
	W10	51.8	6.0	-18.9	2.0	-5.7
加速度 (Gal/cm <sup>2</sup> )	W11	72	14.9	-15.7	4.5	-4.7
	W12	92.2	11.9	-13.0	3.6	-3.9

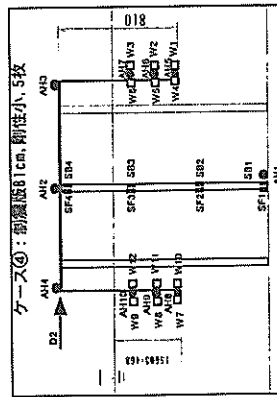
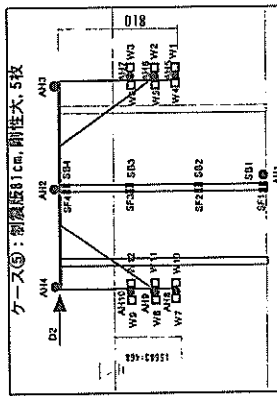
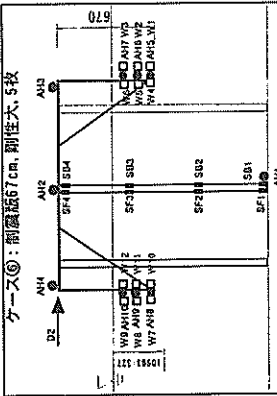
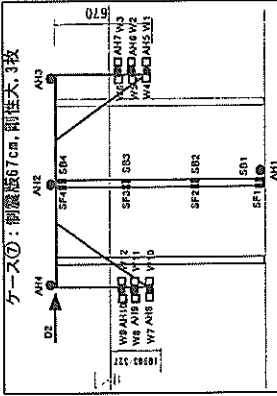


表-A.7 ケース①の最大最小値（共振点加振）

種別	計測点	下地からの高さ (cm)	300cal加振	
			最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	0.87	-0.88
ひずみ (μ)	SF1	0.0	340.9	-944.0
	SF2	50.0	70.1	-70.9
	SF3	100.0	194.3	-192.8
	SF4	150.0	466.3	-457.3
加速度 (Gal)	WB1	0.0	339.5	-835.3
	WB2	50.0	70.8	-69.7
	WB3	100.0	192.8	-192.1
	WB4	150.0	450.0	-458.6
	AH1	0.0	30.4	-31.0
	AH2	150.0	640.7	-647.4
動水圧 (gf/cm <sup>2</sup> )	W1	79.8	2.7	-2.5
	W2	90.7	7.3	-7.5
	W3	101.6	6.5	-6.6
	W4	79.8	4.8	-11.6
	W5	90.7	6.6	-7.5
	W6	101.6	7.5	-5.9
	W7	79.8	3.3	-2.8
	W8	90.7	2.8	-8.4
	W9	101.6	8.0	-7.2
	W10	79.8	2.7	-2.4

表-A.6 ケース②の最大最小値（共振点加振）

種別	計測点	下地からの高さ (cm)	300cal加振	
			最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	0.80	-0.82
ひずみ (μ)	SF1	0.0	312.3	-312.3
	SF2	50.0	64.4	-63.9
	SF3	100.0	177.4	-176.5
	SF4	150.0	425.9	-426.6
加速度 (Gal)	WB1	0.0	284.3	-284.3
	WB2	50.0	58.1	-60.6
	WB3	100.0	161.6	-160.7
	WB4	150.0	386.8	-385.6
	AH1	0.0	32.6	-31.2
	AH2	150.0	528.7	-526.0
動水圧 (gf/cm <sup>2</sup> )	W1	79.8	1.9	-1.5
	W2	90.7	5.4	-5.7
	W3	101.6	4.0	-4.7
	W4	79.8	3.9	-3.7
	W5	90.7	5.1	-5.7
	W6	101.6	5.1	-4.5
	W7	79.8	2.8	-2.4
	W8	90.7	6.3	-5.9
	W9	101.6	5.3	-5.6
	W10	79.8	2.0	-1.7

表-A.5 ケース③の最大最小値（共振点加振）

種別	計測点	下地からの高さ (cm)	300cal加振	
			最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	0.71	-0.72
ひずみ (μ)	SF1	0.0	270.8	-270.7
	SF2	50.0	55.6	-55.7
	SF3	100.0	153.2	-153.3
	SF4	150.0	368.8	-372.5
加速度 (Gal)	WB1	0.0	213.3	-215.9
	WB2	50.0	44.5	-45.8
	WB3	100.0	120.9	-121.6
	WB4	150.0	290.6	-290.9
	AH1	0.0	37.3	-35.7
	AH2	150.0	356.7	-358.3
動水圧 (gf/cm <sup>2</sup> )	W1	65.8	2.4	-2.0
	W2	81.4	7.0	-6.6
	W3	97	5.4	-5.2
	W4	65.8	1.2	-1.6
	W5	81.4	6.0	-6.9
	W6	97	4.7	-5.1
	W7	65.8	2.5	-2.1
	W8	81.4	7.9	-8.6
	W9	97	5.8	-7.2
	W10	65.8	2.3	-1.9

表-A.4 ケース④の最大最小値（共振点加振）

種別	計測点	下地からの高さ (cm)	300cal加振	
			最大値	最小値
変位 (cm)	DZ	150.0	0.81	-0.81
ひずみ (μ)	SF1	0.0	325.2	-326.4
	SF2	50.0	66.2	-66.4
	SF3	100.0	186.5	-184.4
	SF4	150.0	445.8	-444.8
加速度 (Gal)	WB1	0.0	323.9	-321.1
	WB2	50.0	68.1	-66.6
	WB3	100.0	182.8	-182.5
	WB4	150.0	434.7	-436.4
	AH1	0.0	28.2	-30.7
	AH2	150.0	748.3	-761.6
動水圧 (gf/cm <sup>2</sup> )	W1	65.8	1.8	-1.2
	W2	81.4	1.4	-1.8
	W3	97	4.2	-3.5
	W4	65.8	1.4	-2.2
	W5	81.4	2.0	-2.0
	W6	97	2.9	-3.7
	W7	65.8	0.7	-0.6
	W8	81.4	1.3	-1.0
	W9	97	1.6	-1.6
	W10	65.8	0.7	-0.8

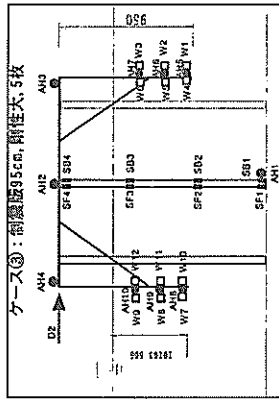


表-A.9 ケース③の最大最小値 (共振点加振：フィルタ無し)

種別	計測点	下端からの高さ (cm)	100Gal加振		300Gal加振 (修正値)		
			最大値	最小値	最大値	最小値	
変位 (cm)	D2	150.0	1.22	-1.23	0.37	-0.37	
ひずみ (μ)	SF1	0.0	430.8	-439.1	135.2	-134.7	
	SF2	50.0	95.0	-93.5	23.5	-23.1	
	SF3	100.0	254.8	-251.8	76.4	-75.5	
	SF4	150.0	619.6	-618.4	185.9	-185.5	
(μ)	SB1	0.0	400.6	-402.0	120.2	-120.6	
	SB2	50.0	84.9	-86.8	25.5	-26.0	
	SB3	100.0	227.1	-225.4	68.1	-67.6	
	SB4	150.0	545.9	-545.0	163.8	-163.5	
	AH1	0.0	107.5	-105.6	32.3	-31.7	
	AH2	150.0	495.8	-494.1	148.7	-148.2	
	AH3	150.0	440.9	-419.8	132.3	-125.9	
	AH4	51.8	505.8	-413.0	151.74	-123.891	
	加速度 (Gal)	AH5	51.8	3622.5	-438.9	1086.8	-149.7
		AH6	72	3102.0	-2302.1	930.6	-840.6
		AH7	92.2	3118.2	-2308.0	935.5	-832.4
		AH8	51.8	2434.5	-2794.9	730.4	-838.5
AH9		72	1236.3	-1362.7	370.9	-408.8	
AH10		92.2	1329.6	-1848.5	398.9	-554.6	
W1		51.8	13.4	-35.9	4.0	-10.8	
W2		72	23.9	-23.3	9.0	-8.8	
W3		92.2	18.8	-32.3	5.6	-10.0	
W4		51.8	7.3	-13.8	2.2	-4.2	
動水圧 (qt/cm <sup>2</sup> )	W5	72	31.5	-31.5	9.5	-9.4	
	W6	92.2	32.1	-19.2	9.8	-5.8	
	W7	51.8	9.0	-20.9	2.7	-6.3	
	W8	72	17.9	-17.2	5.4	-5.2	
	W9	92.2	15.5	-17.5	5.0	-5.3	
	W10	51.8	7.6	-22.1	2.3	-6.6	
	W11	72	17.4	-17.8	5.2	-5.4	
	W12	92.2	18.4	-17.6	5.5	-5.3	

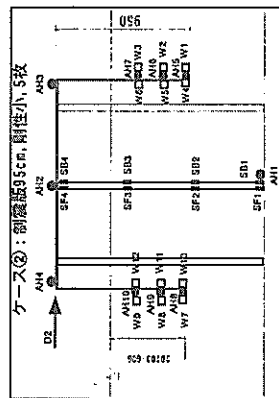


表-A.8 ケース②の最大最小値 (共振点加振：フィルタ無し)

種別	計測点	下端からの高さ (cm)	100Gal加振		300Gal加振 (修正値)		
			最大値	最小値	最大値	最小値	
変位 (cm)	D2	150.0	1.62	-1.65	0.49	-0.50	
ひずみ (μ)	SF1	0.0	637.3	-639.7	191.2	-191.9	
	SF2	50.0	131.8	-130.7	39.5	-39.2	
	SF3	100.0	365.0	-359.5	109.5	-107.8	
	SF4	150.0	878.2	-871.2	263.5	-261.4	
(μ)	SB1	0.0	509.4	-505.1	152.8	-151.5	
	SB2	50.0	108.7	-104.3	32.6	-31.3	
	SB3	100.0	289.5	-285.9	86.9	-85.8	
	SB4	150.0	689.4	-688.3	206.8	-206.5	
	AH1	0.0	102.4	-105.8	30.7	-31.7	
	AH2	150.0	1381.8	-1389.4	414.5	-416.8	
	AH3	150.0	1143.0	-1138.4	342.9	-341.5	
	AH4	150.0	1394.8	-1401.3	418.44	-420.39	
	加速度 (Gal)	AH5	51.8	3915.6	-3263.1	1174.7	-978.9
		AH6	72	2966.8	-2659.2	890.0	-877.8
		AH7	92.2	3018.8	-3236.9	905.6	-956.1
		AH8	51.8	3066.1	-3210.4	919.8	-963.1
AH9		72	2718.2	-2691.9	815.5	-807.6	
AH10		92.2	2684.4	-2714.8	805.3	-814.4	
W1		51.8	4.8	-4.6	1.4	-1.4	
W2		72	20.6	-22.5	6.2	-6.7	
W3		92.2	31.7	-29.4	9.5	-8.8	
W4		51.8	2.8	-3.2	1.2	-1.0	
動水圧 (qt/cm <sup>2</sup> )	W5	72	24.0	-21.9	7.2	-6.5	
	W6	92.2	27.7	-31.3	8.3	-9.4	
	W7	51.8	5.8	-7.0	1.7	-2.1	
	W8	72	24.2	-17.8	7.3	-5.8	
	W9	92.2	20.0	-36.3	6.0	-10.9	
	W10	51.8	6.3	-7.7	1.9	-2.3	
	W11	72	17.8	-24.8	5.3	-7.4	
	W12	92.2	32.1	-19.6	9.6	-5.9	

ケース①：制震版無し

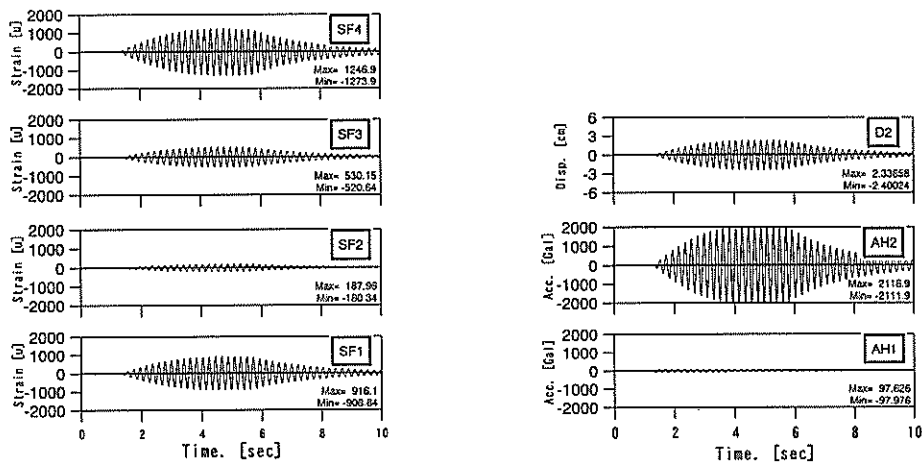
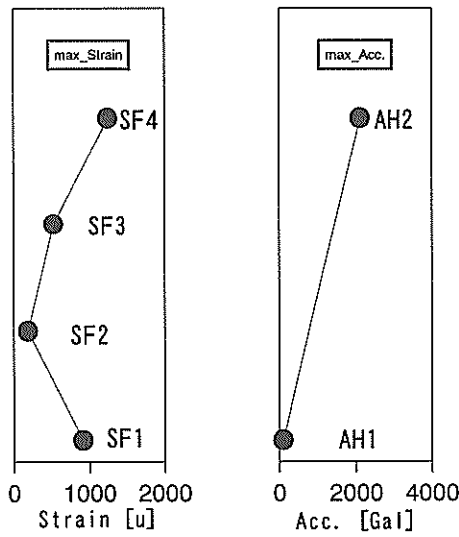
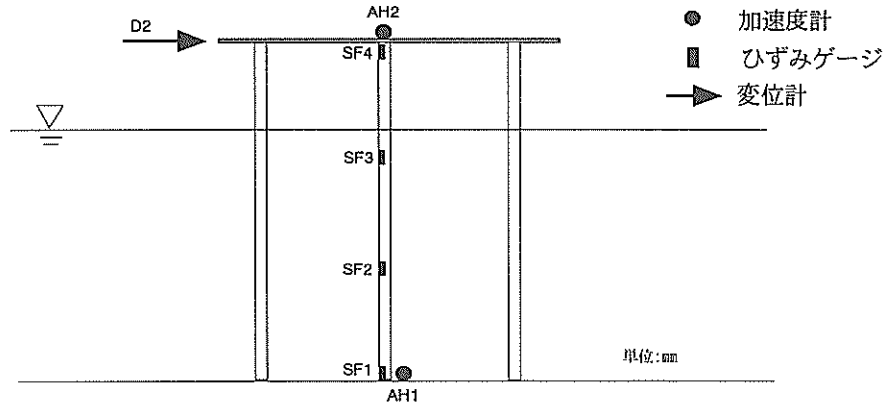


図-A.1 ケース①100Gal 加振における計測波形および最大値分布（共振点加振）

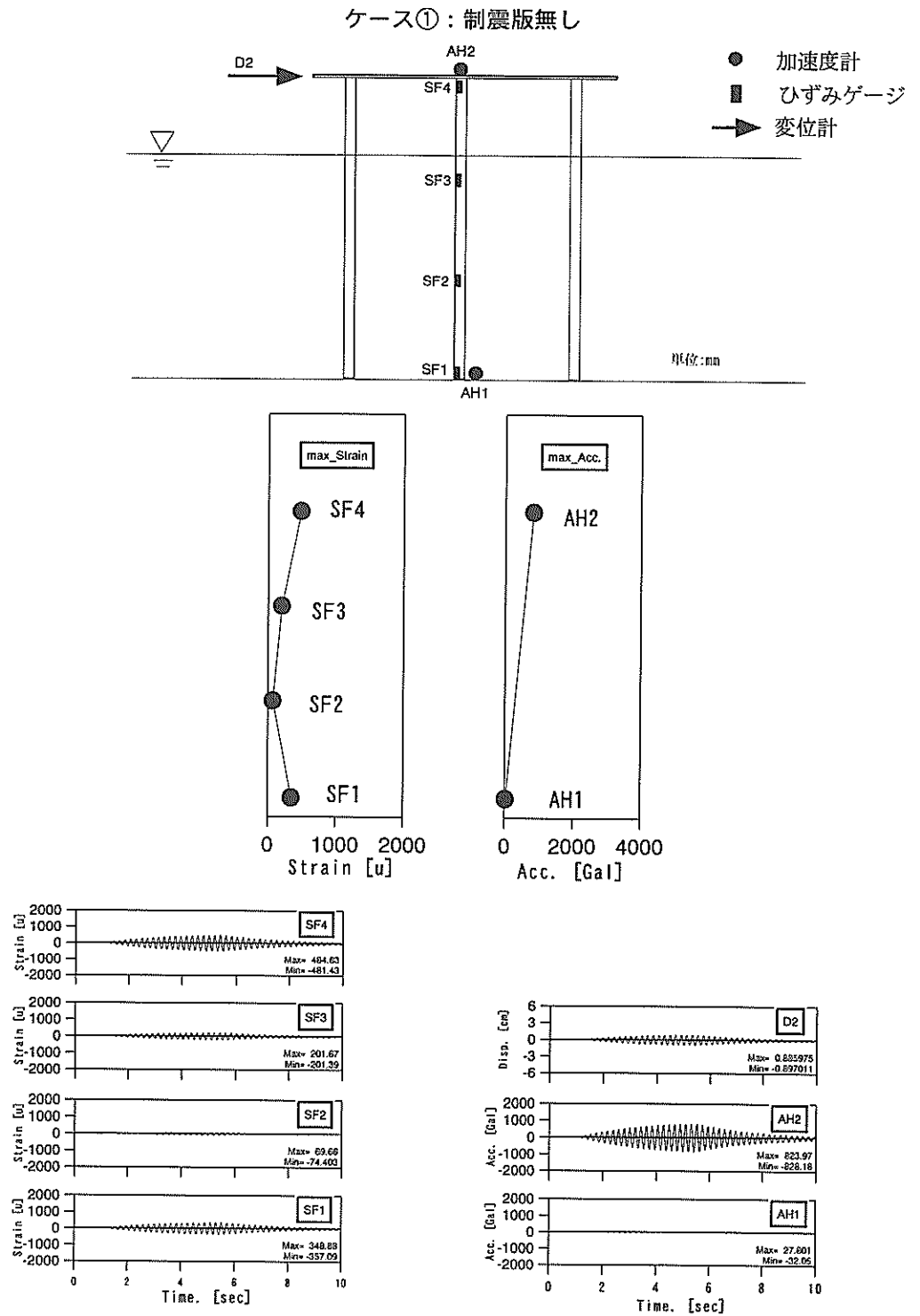


図-A.2 ケース①30Gal 加振における計測波形および最大値分布（共振点加振）

ケース②：制震版95cm，剛性小，5枚

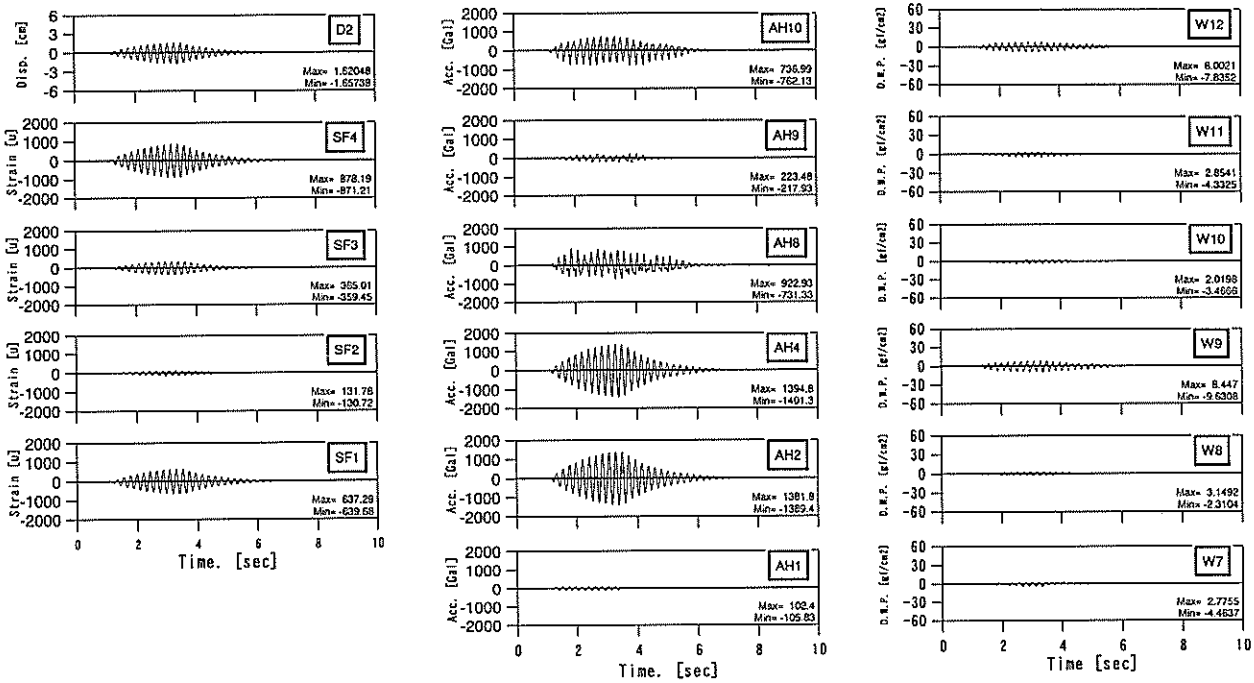
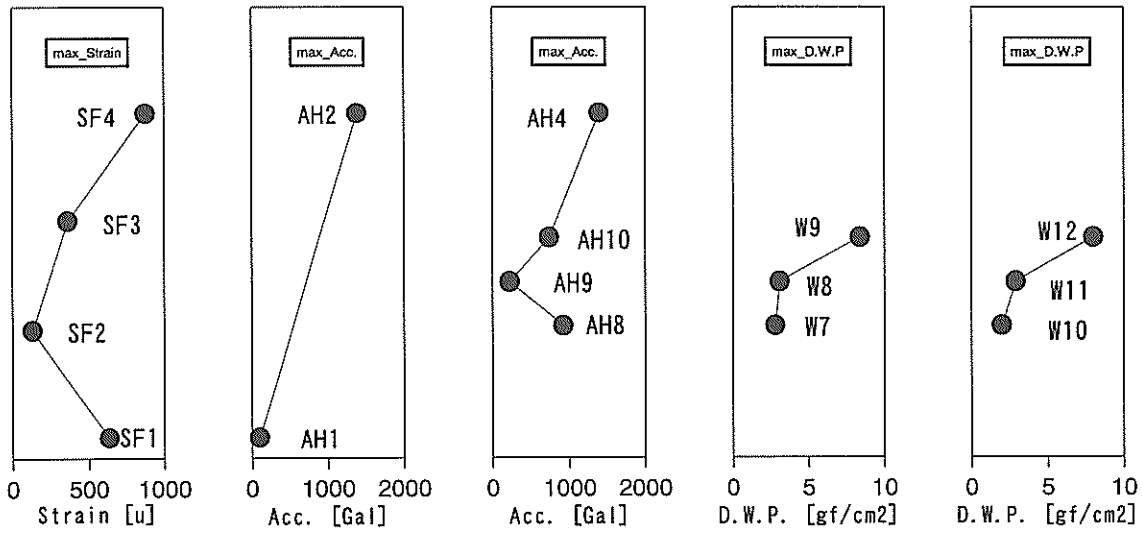
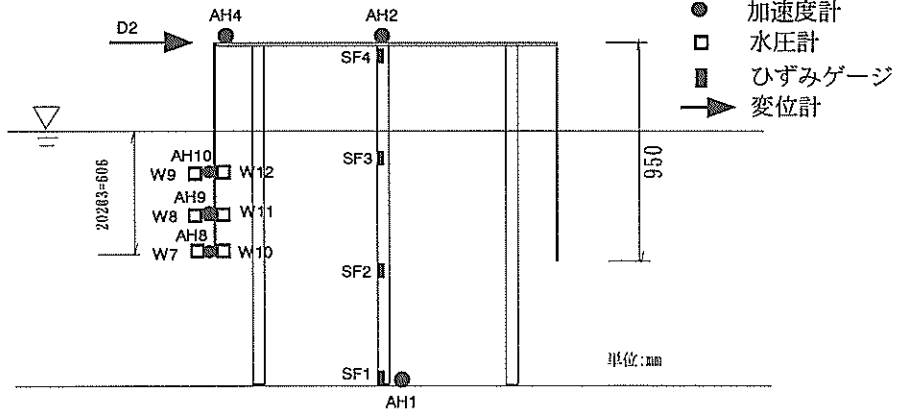


図-A.3 ケース②の計測波形および最大値分布（共振点加振：フィルター有り）

ケース③：制震版95cm, 剛性大, 5枚

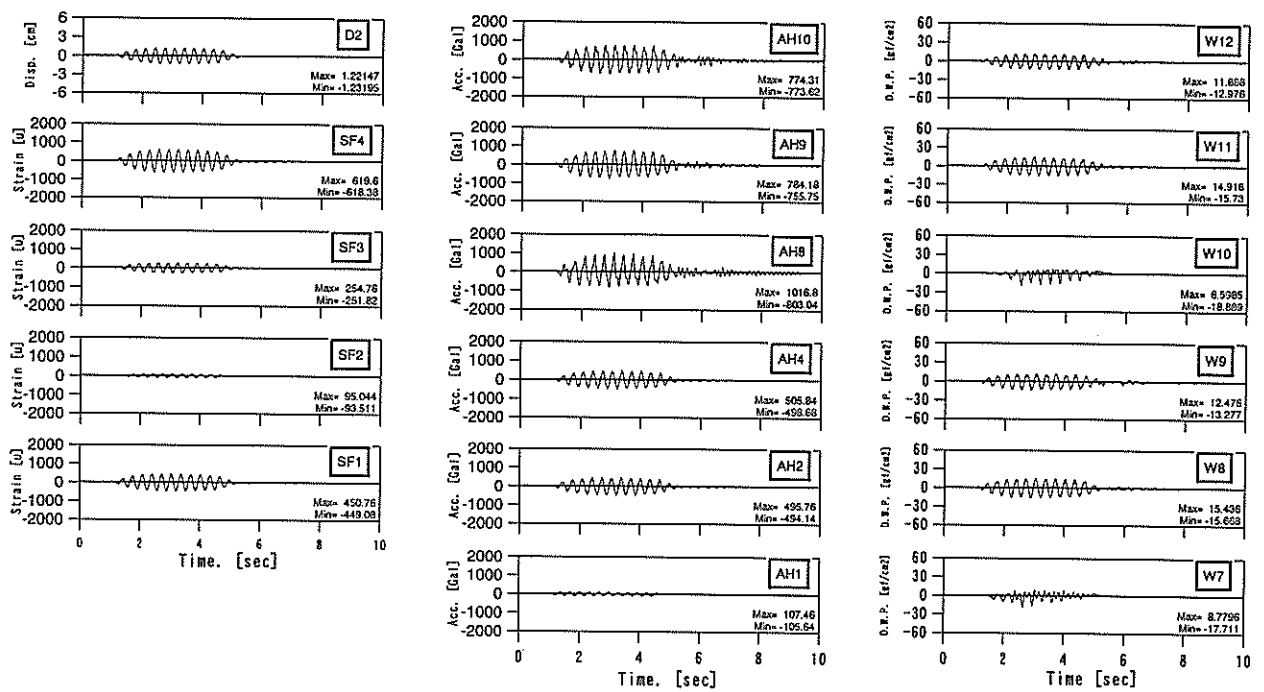
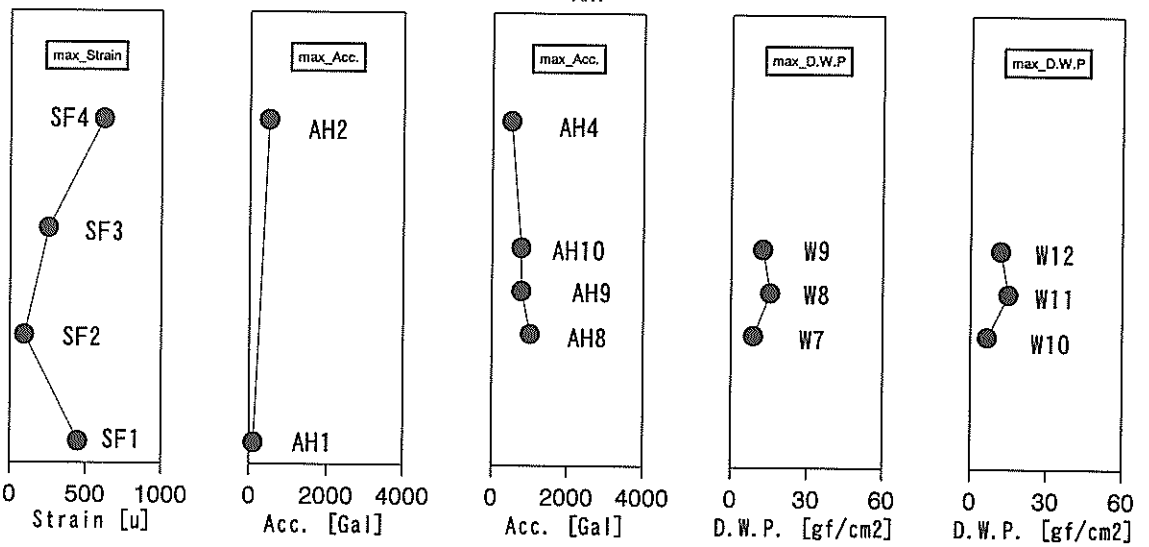
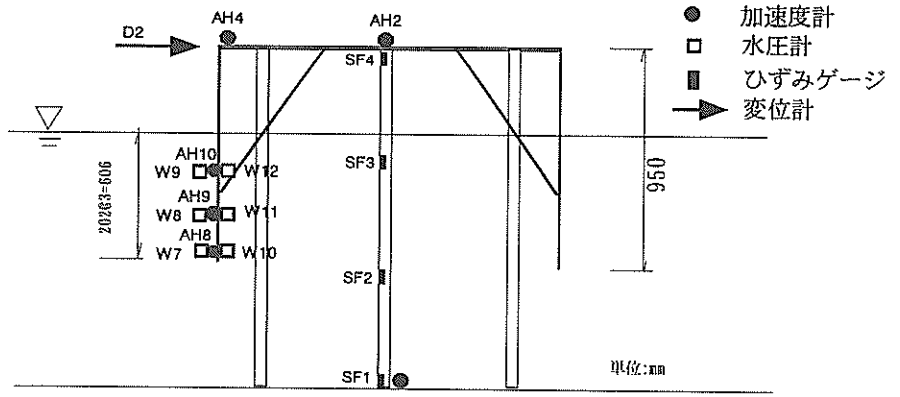


図-A.4 ケース③の計測波形および最大値分布 (共振点加振：フィルター有り)

ケース④：制震版81cm，剛性小，5枚

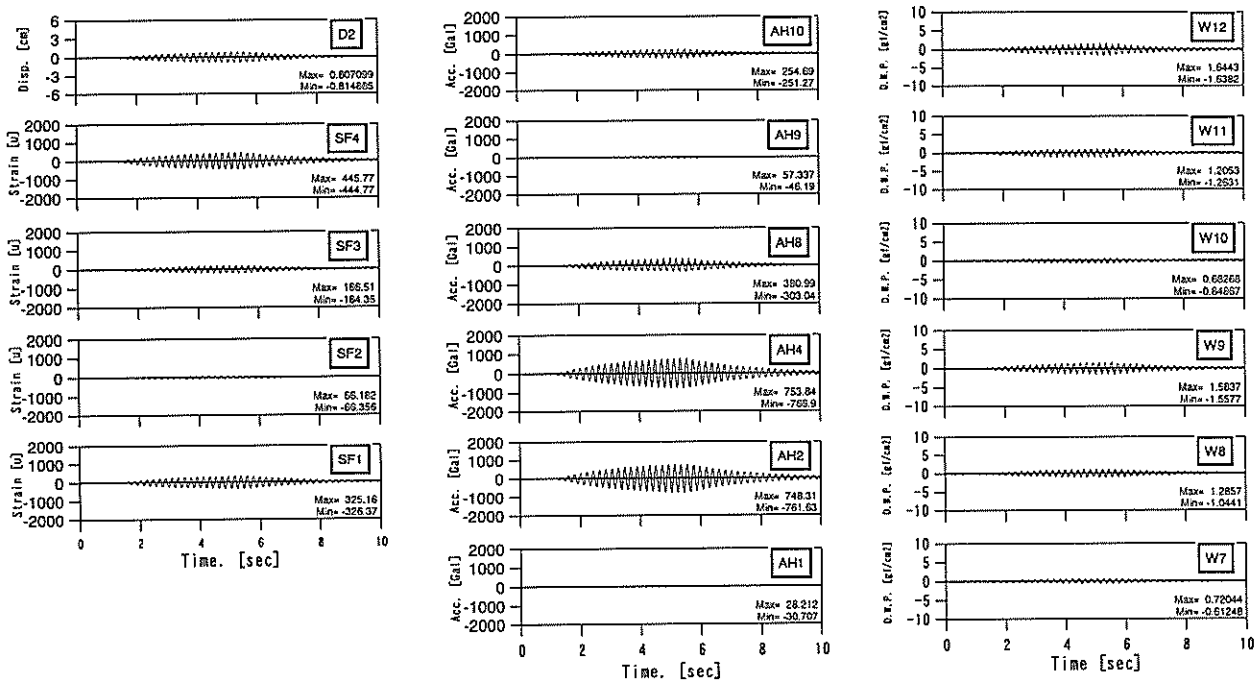
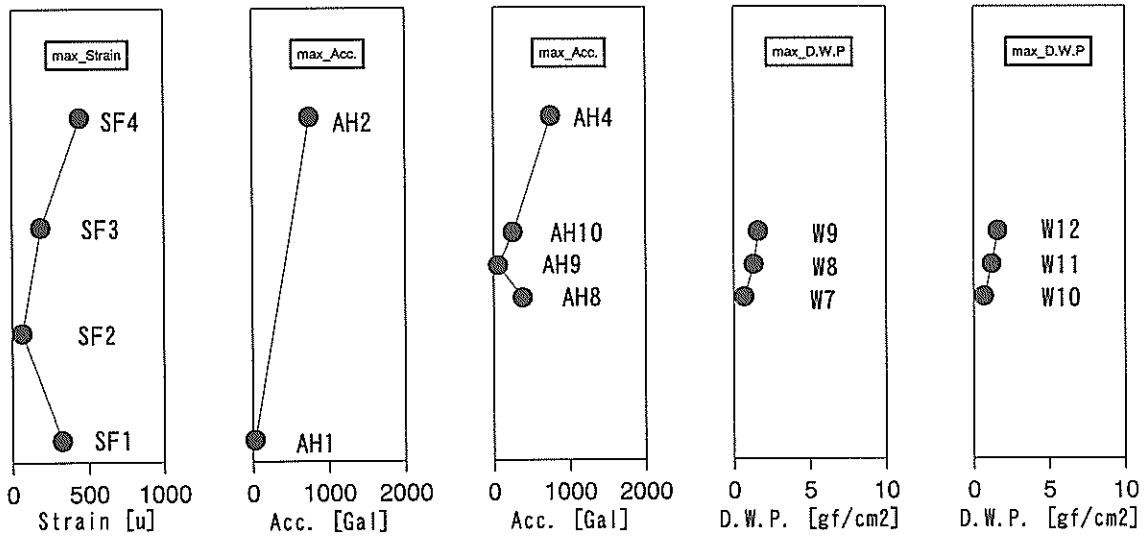
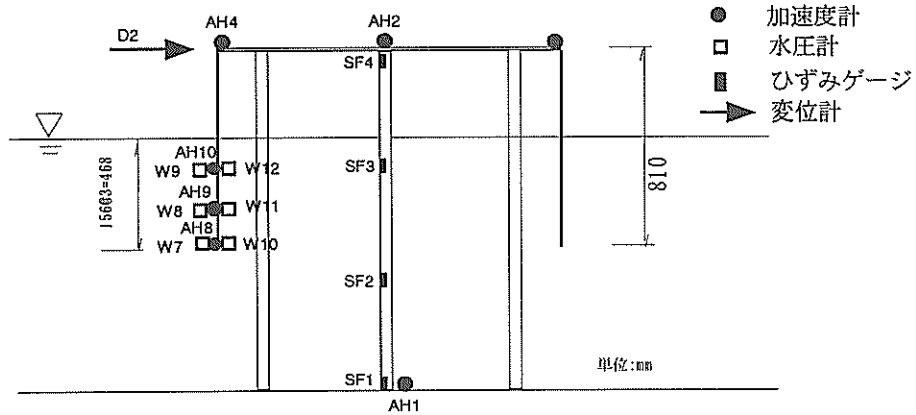


図-A.5 ケース④の計測波形および最大値分布（共振点加振）



ケース⑤：制震版81cm, 剛性大, 5枚

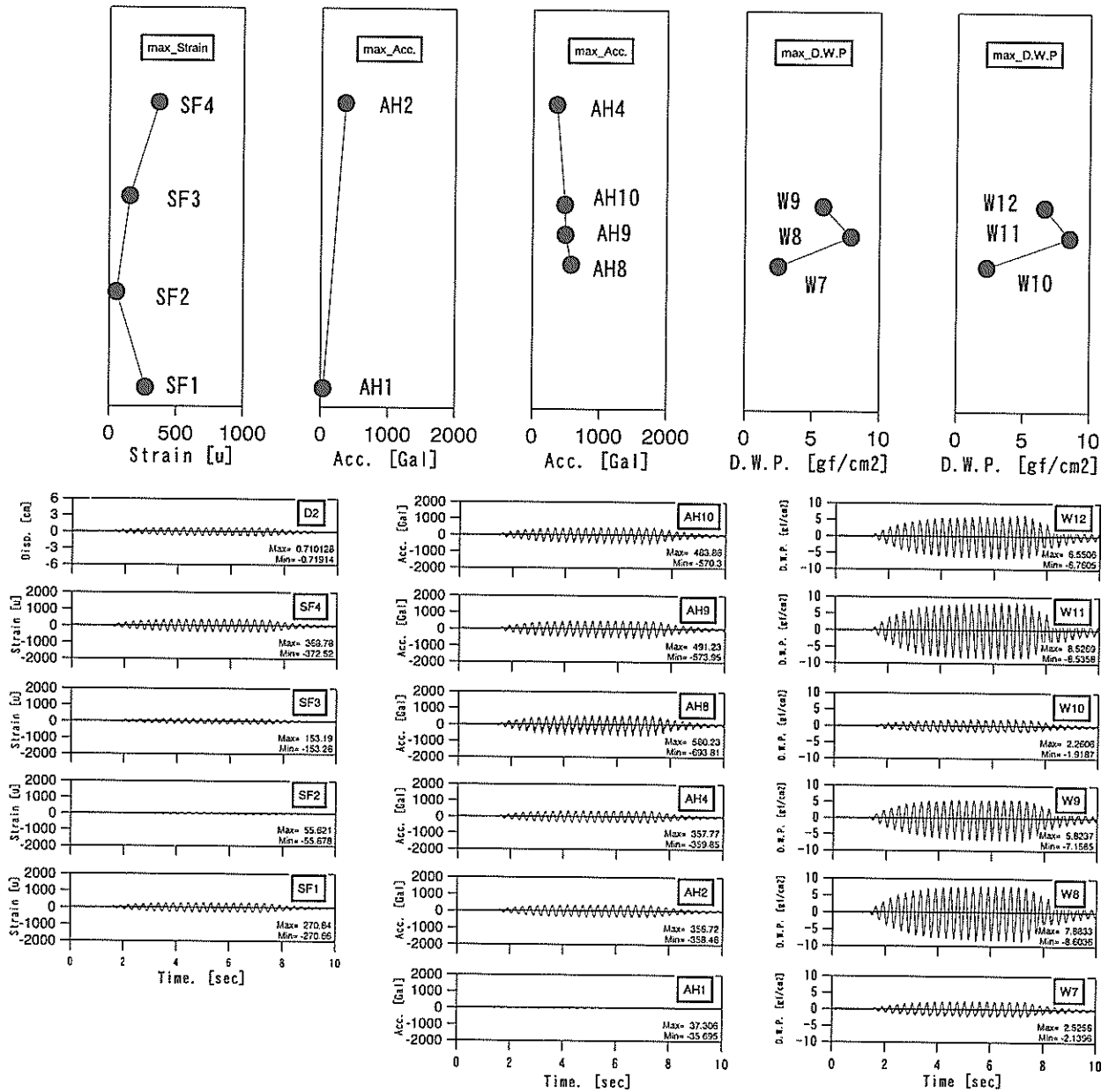
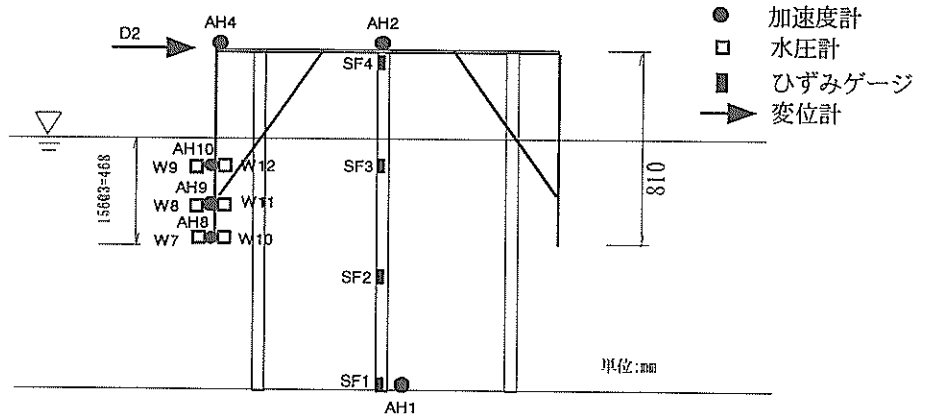


図-A.6 ケース⑤の計測波形および最大値分布 (共振点加振)

ケース⑥：制震版67cm，剛性大，5枚

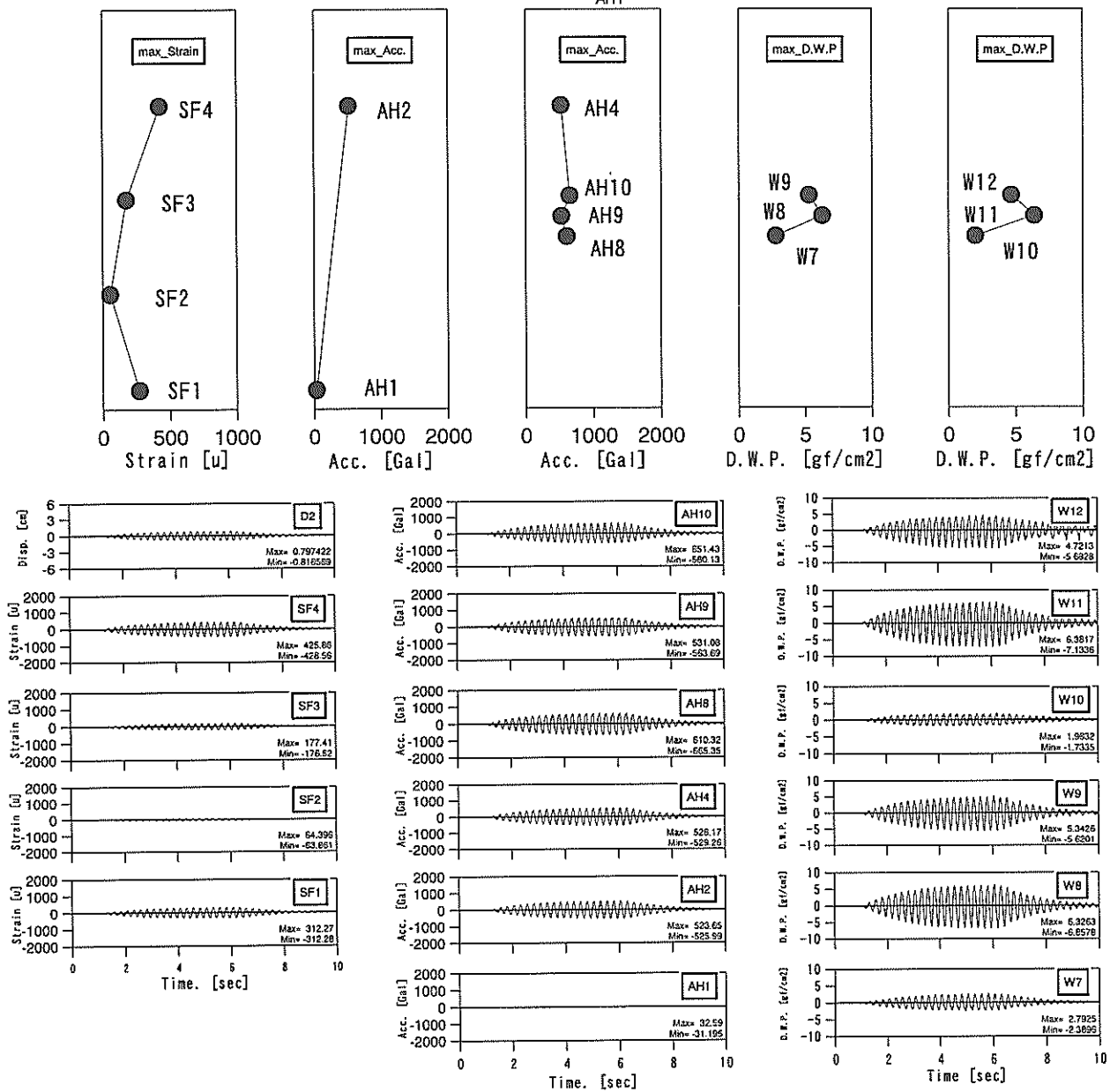
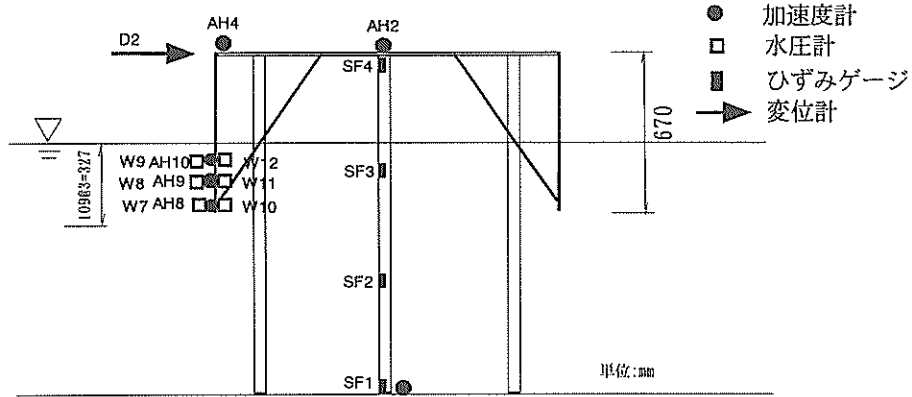


図-A.7 ケース⑥の計測波形および最大値分布（共振点加振）

ケース⑦：制震版67cm，剛性大，3枚

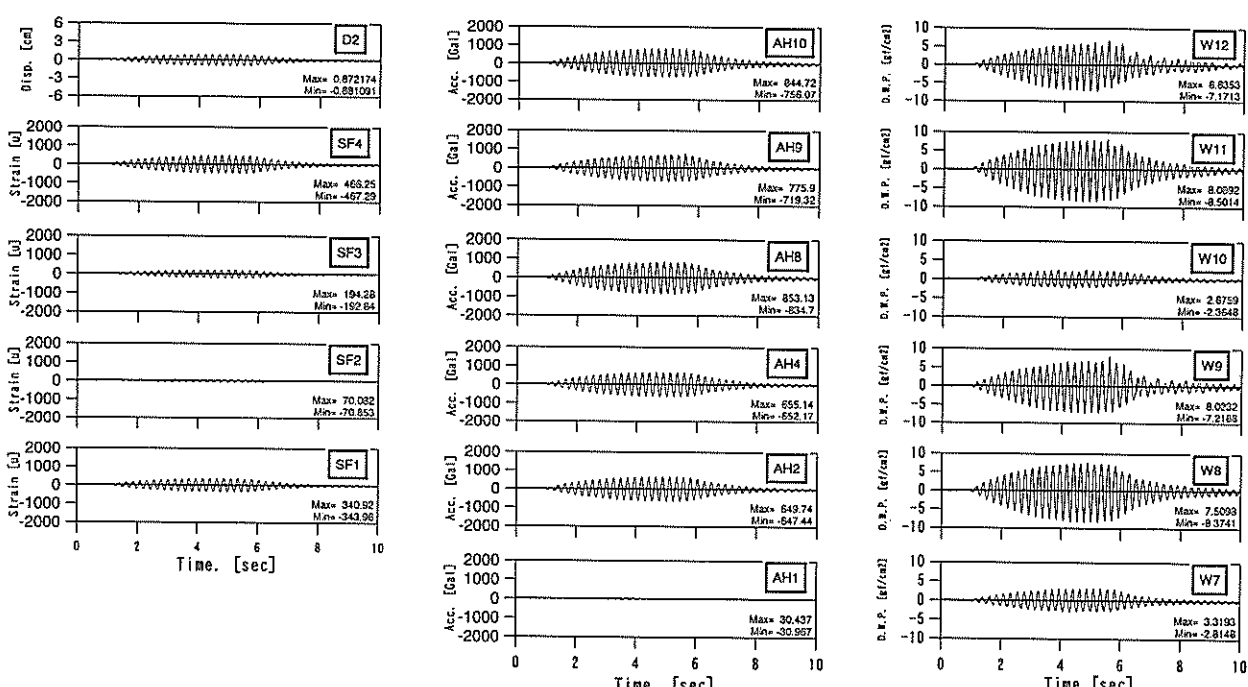
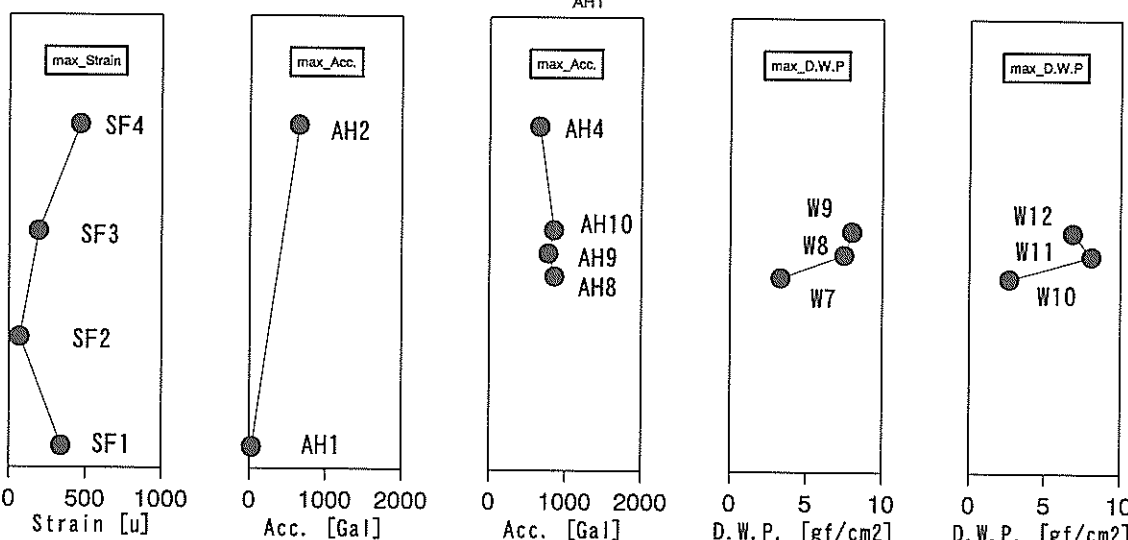
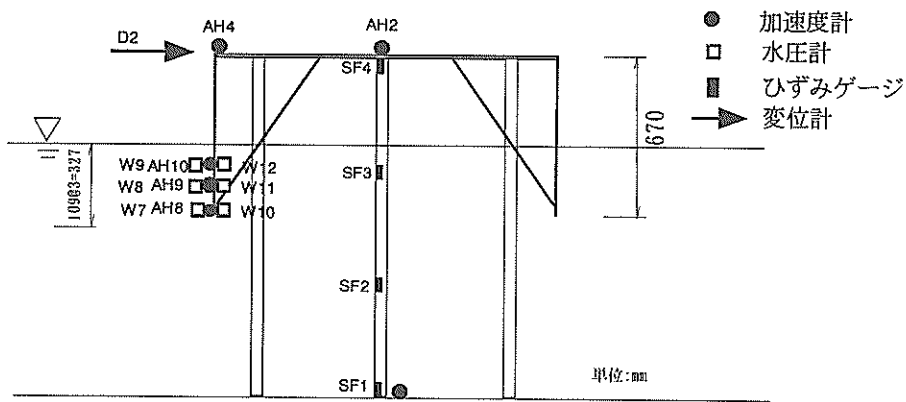


図-A.8 ケース⑦の計測波形および最大値分布 (共振点加振)

ケース②：制震版95cm，剛性小，5枚

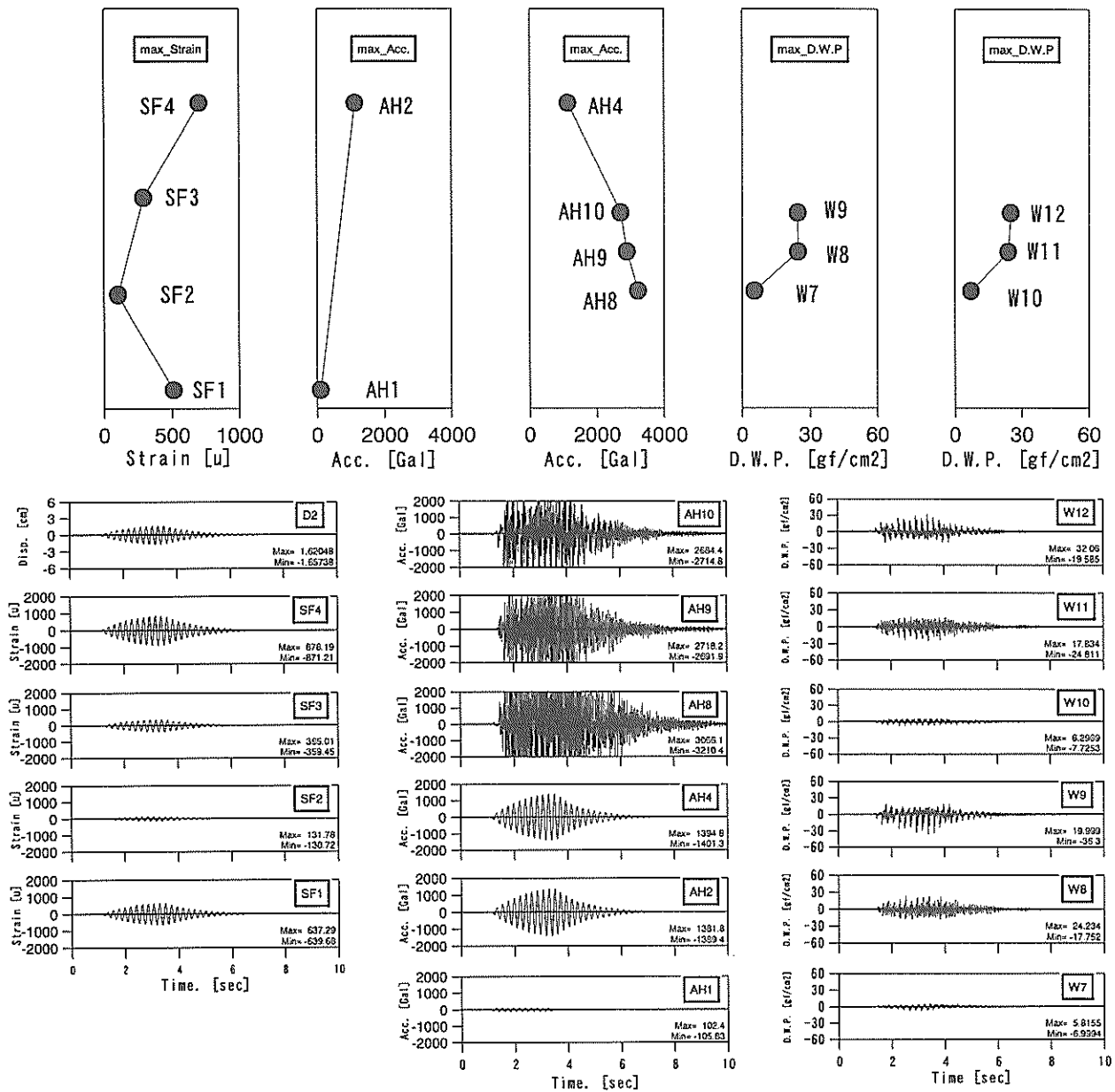
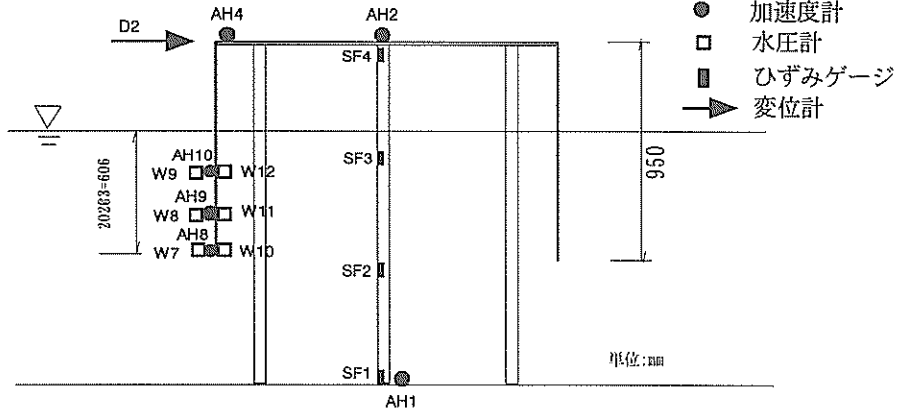


図-A.9 ケース②の計測波形および最大値分布 (共振点加振：フィルタリング無し)

ケース③：制震版95cm，剛性大，5枚

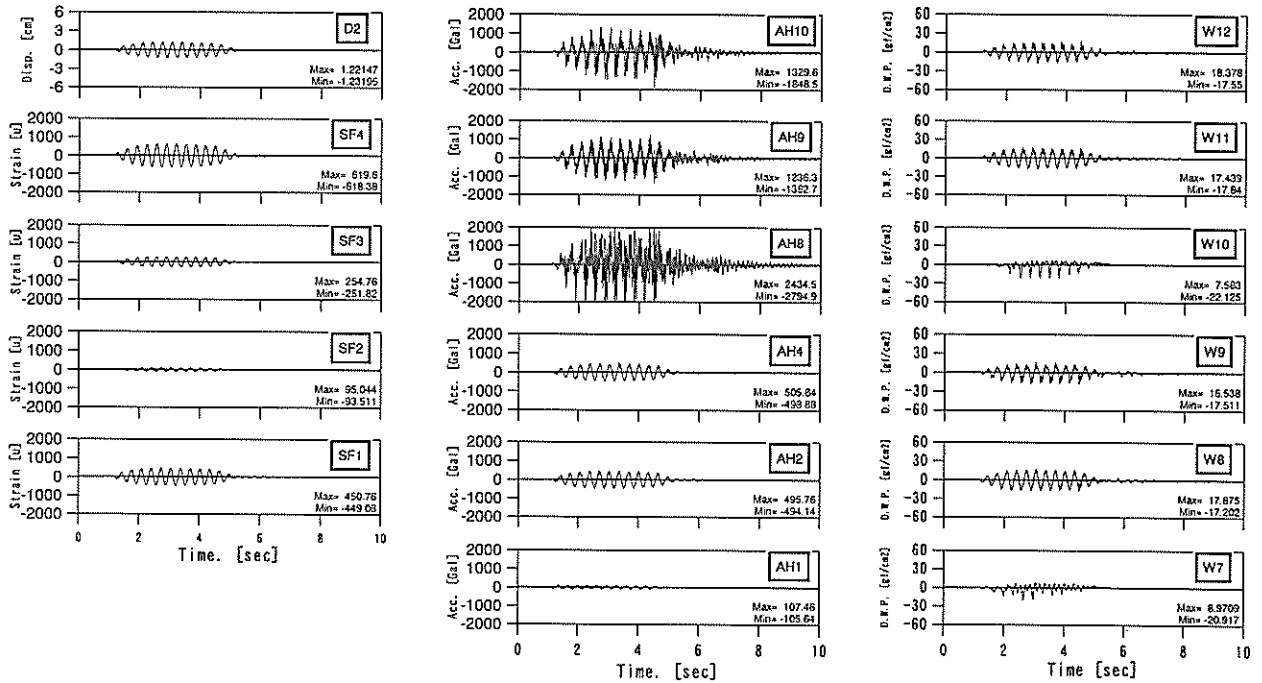
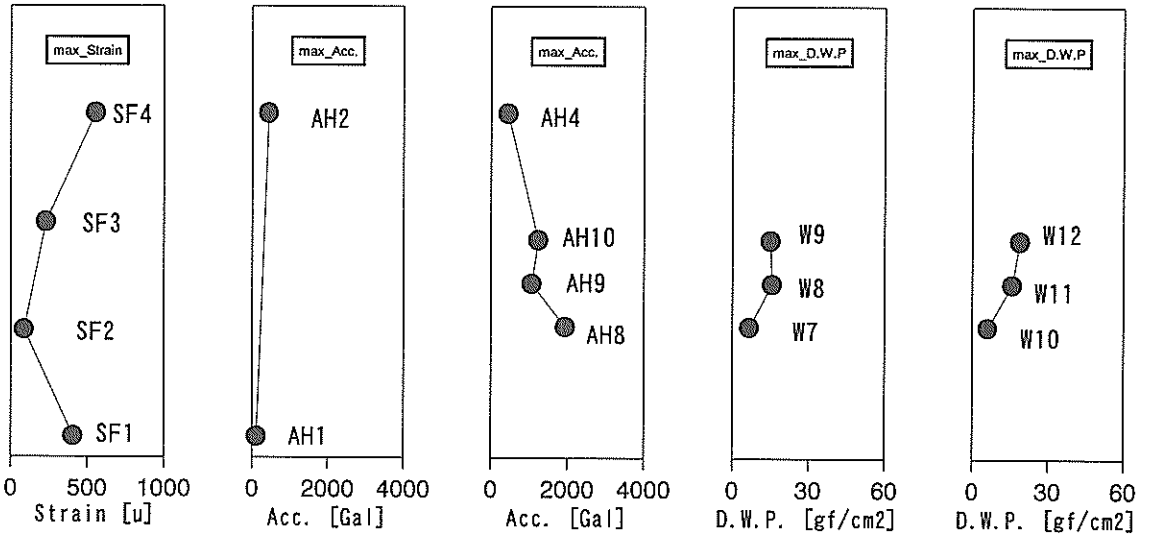
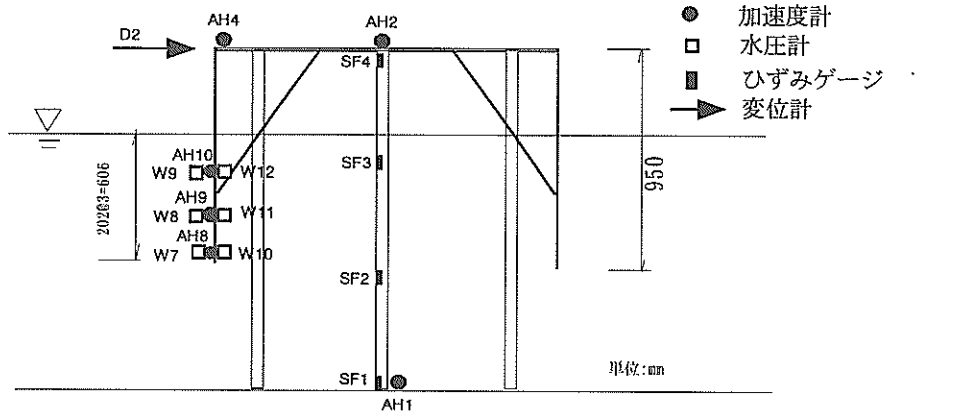


図-A.10 ケース③の計測波形および最大値分布（共振点加振：フィルタリング無し）

付録. B

上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との  
相関および位相差

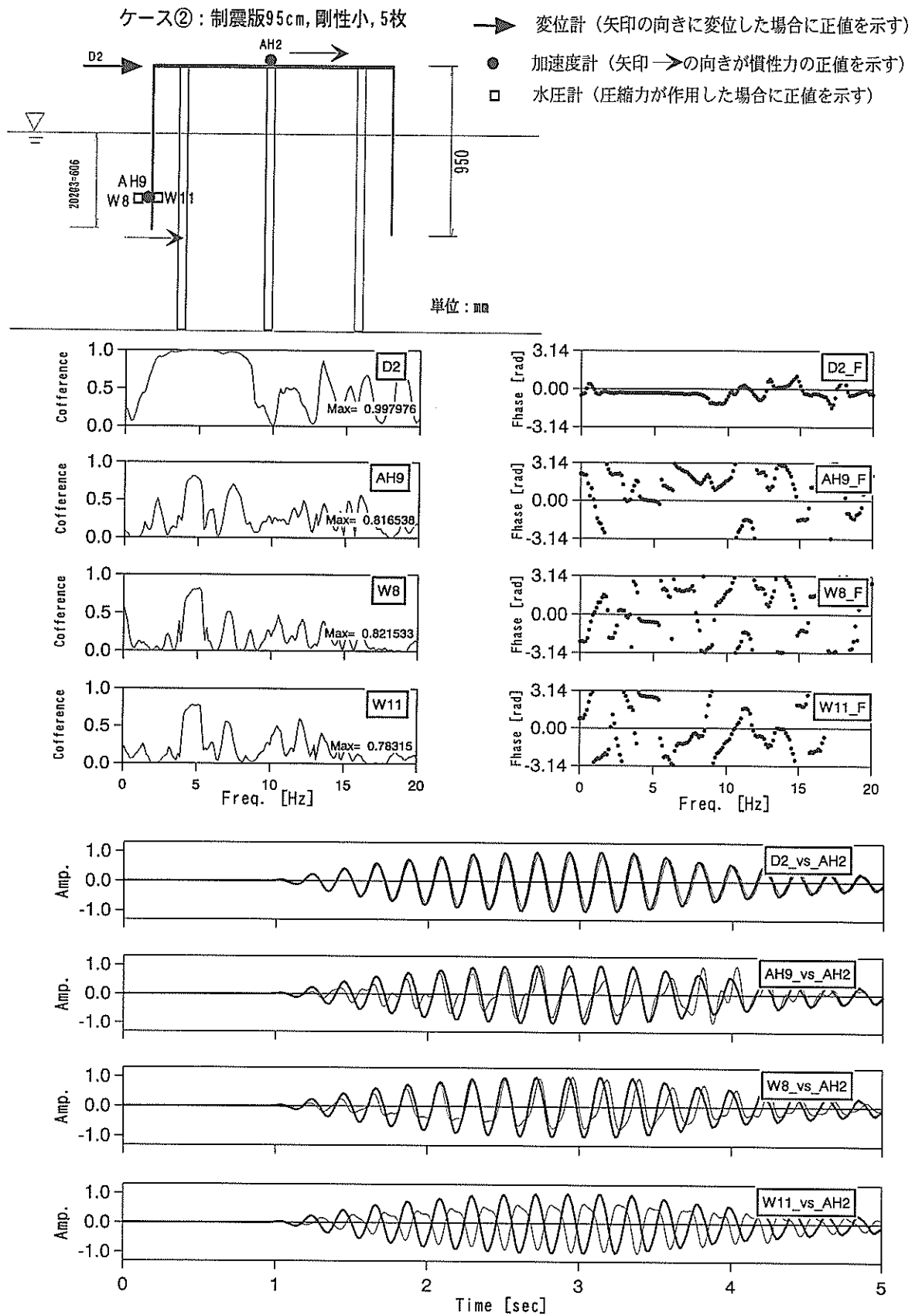


図-B.1 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差 (ケース②：フィルター有り)

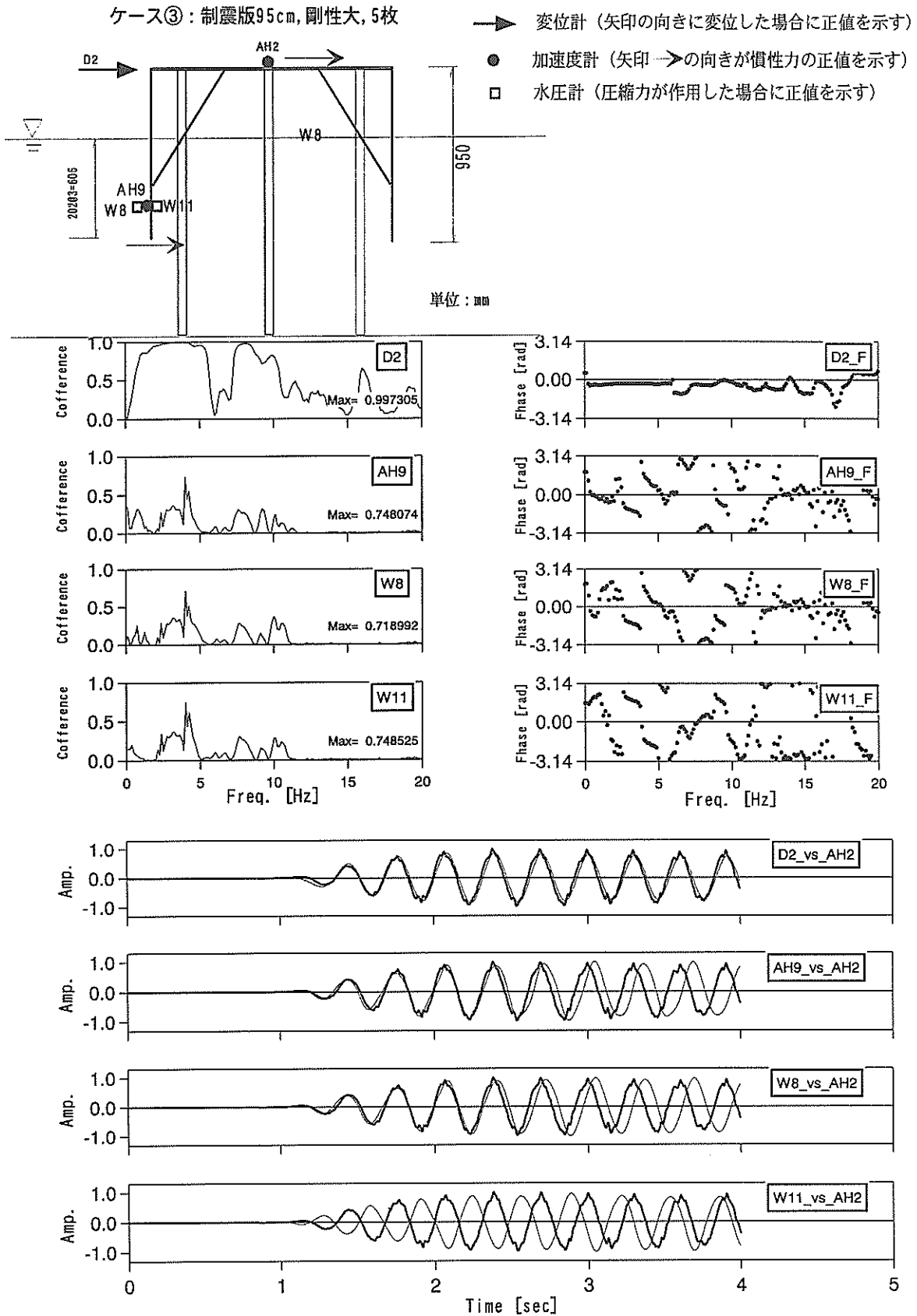
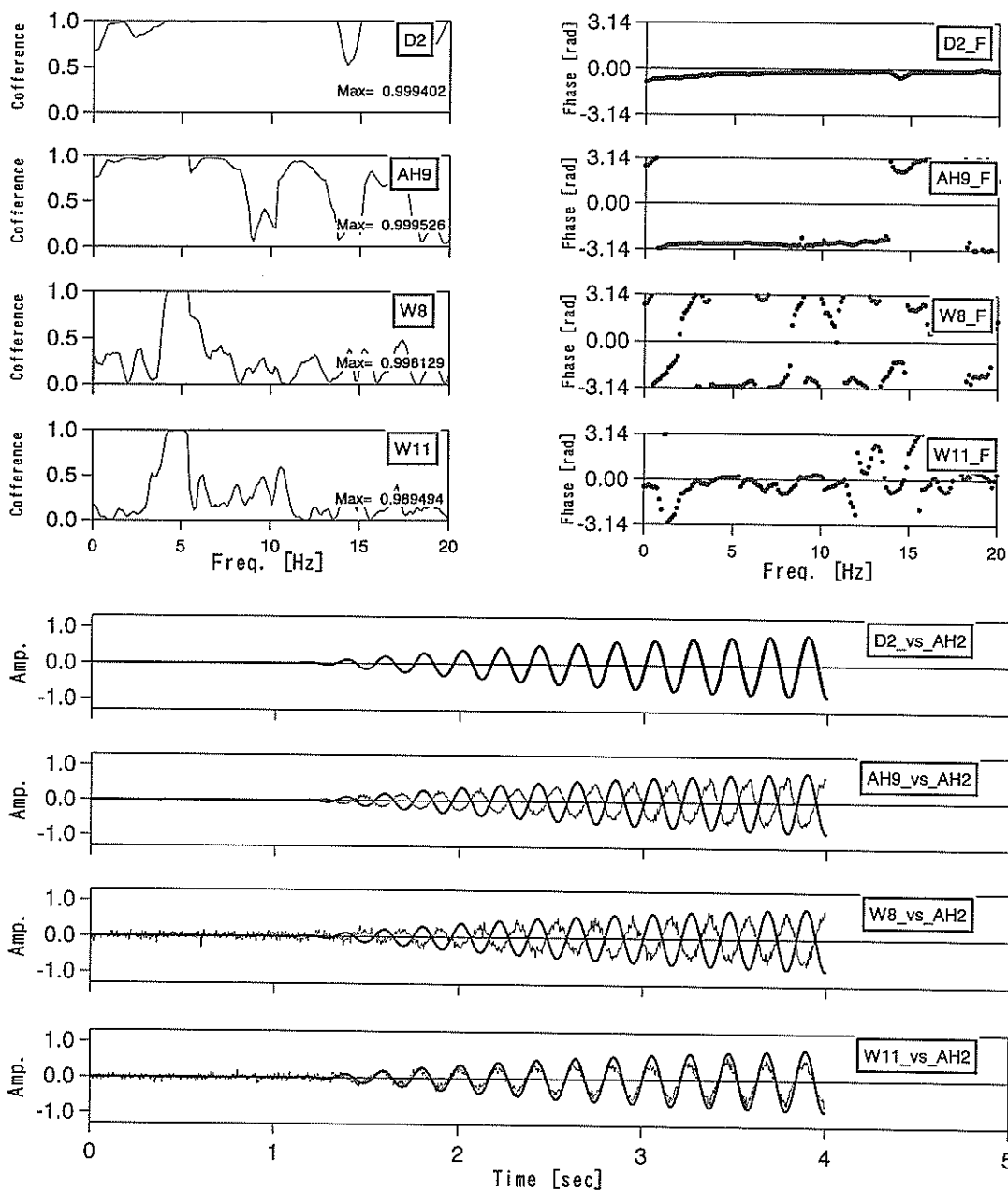
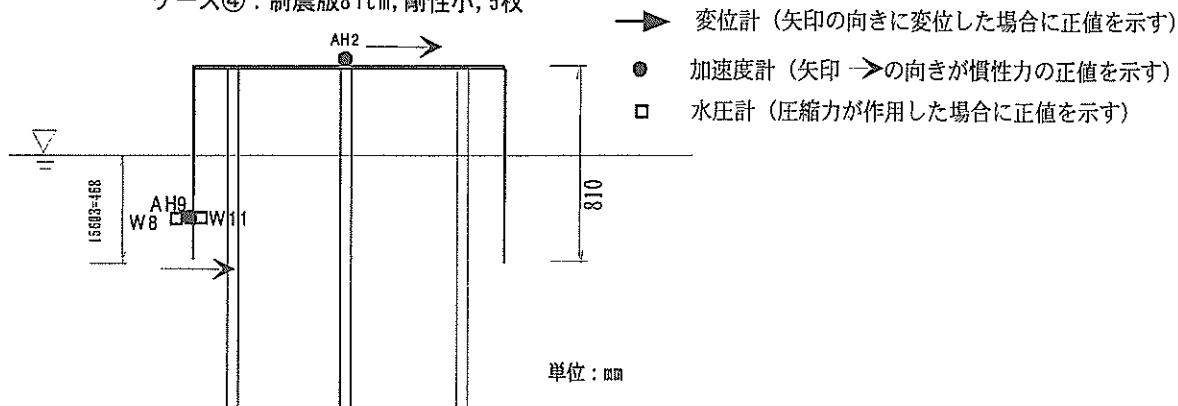


図-B.2 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差（ケース③：フィルター有り）



ケース④：制震版81cm，剛性小，5枚



図一B.3 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差 (ケース④)

ケース⑤：制震版81cm，剛性大，5枚

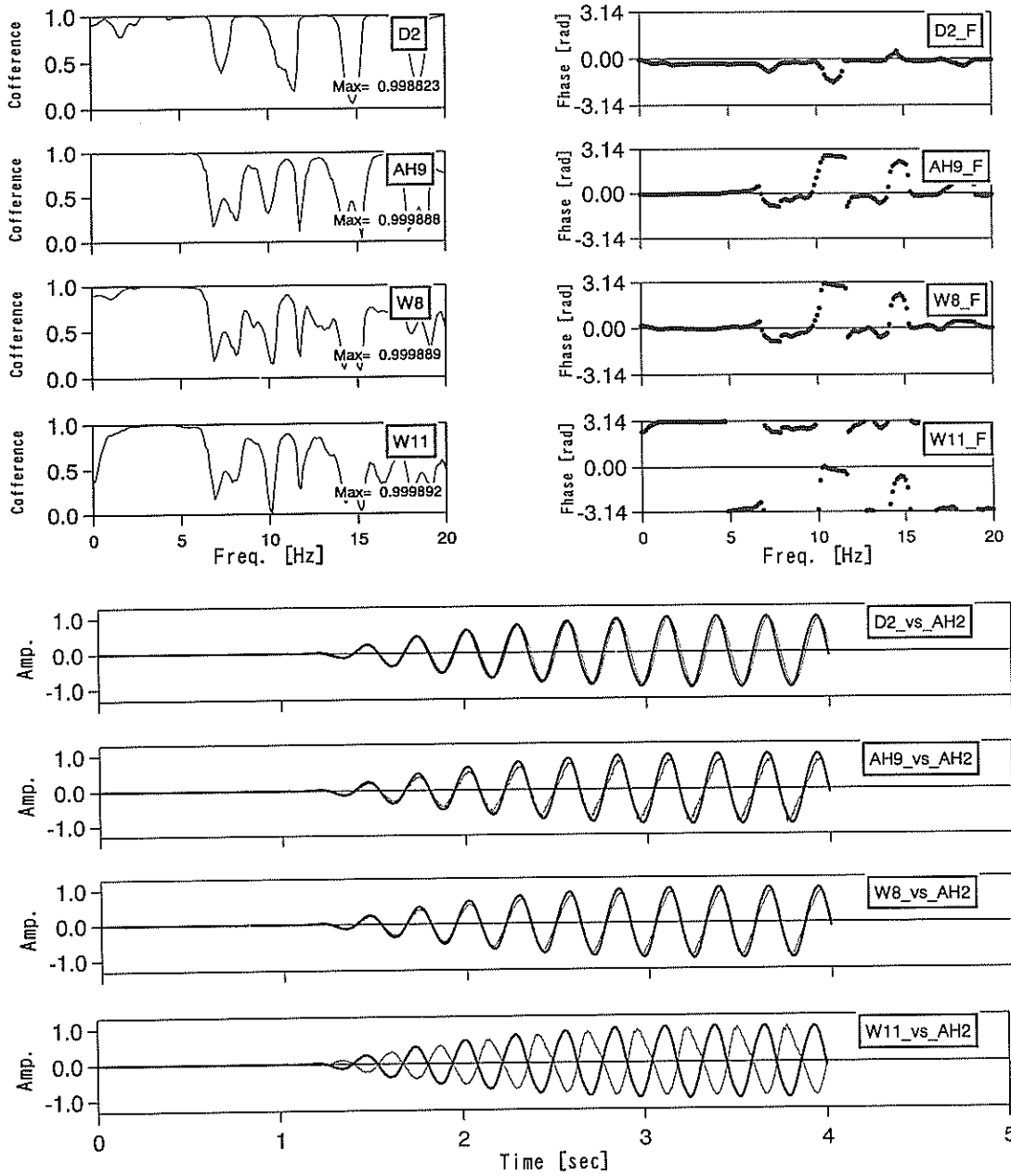
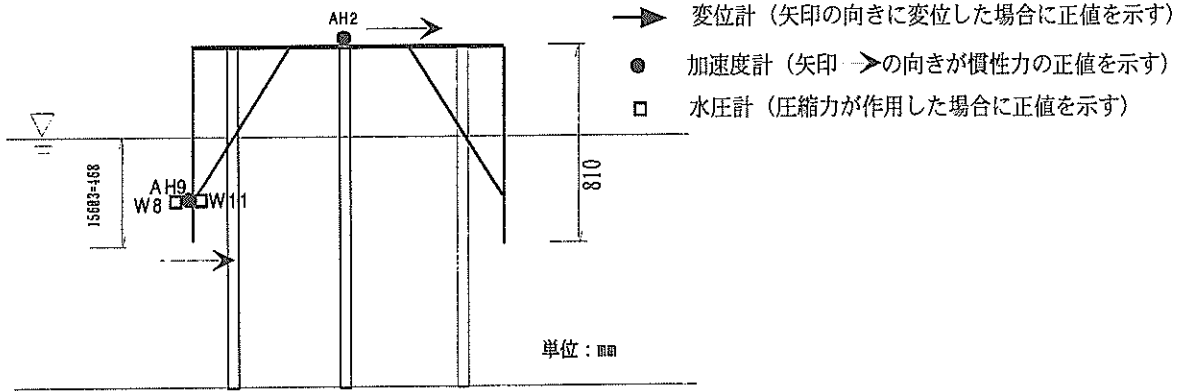


図-B.4 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差 (ケース⑤)

ケース⑥：制震版67cm, 剛性大, 5枚

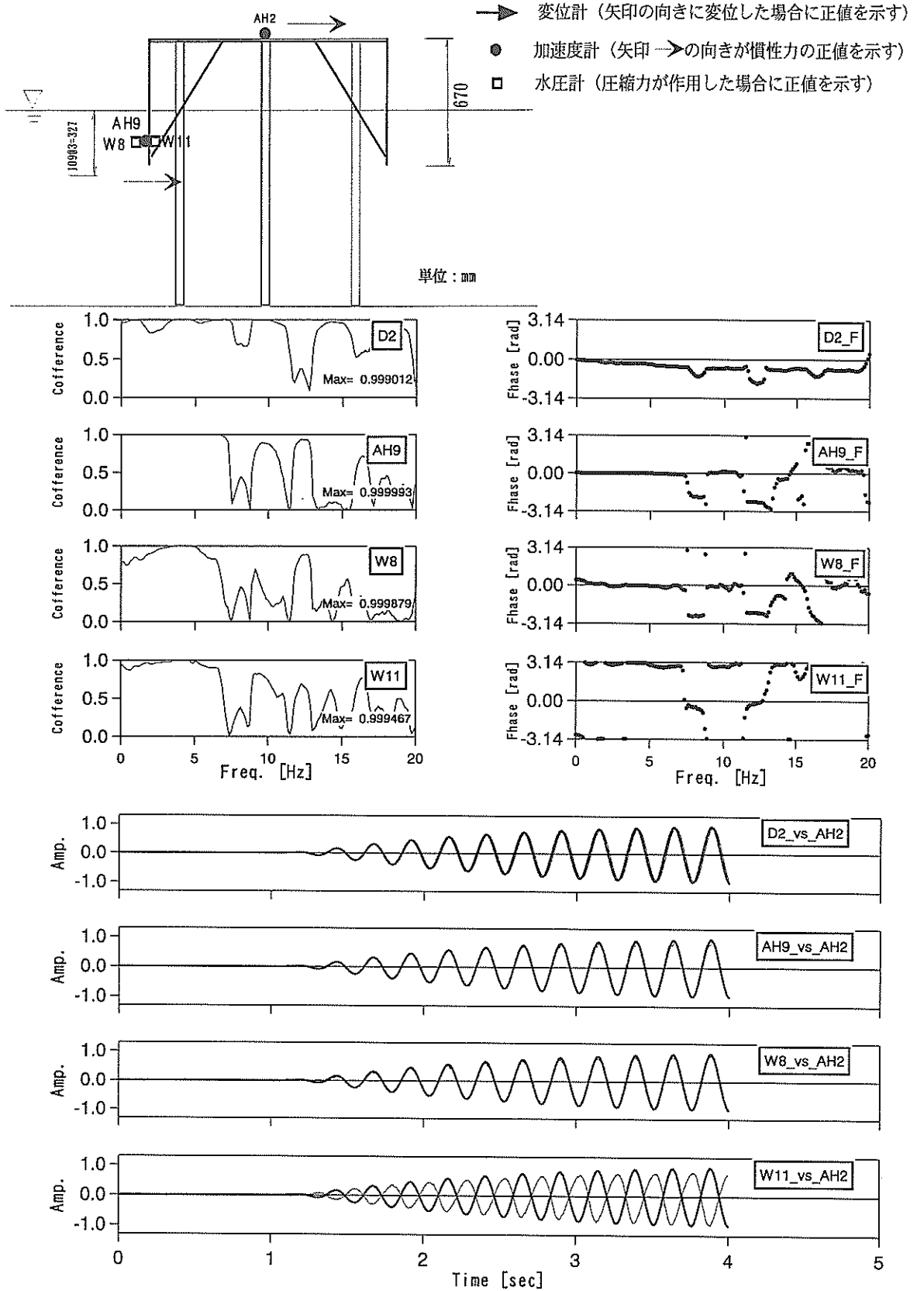


図-B.5 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差 (ケース⑥)

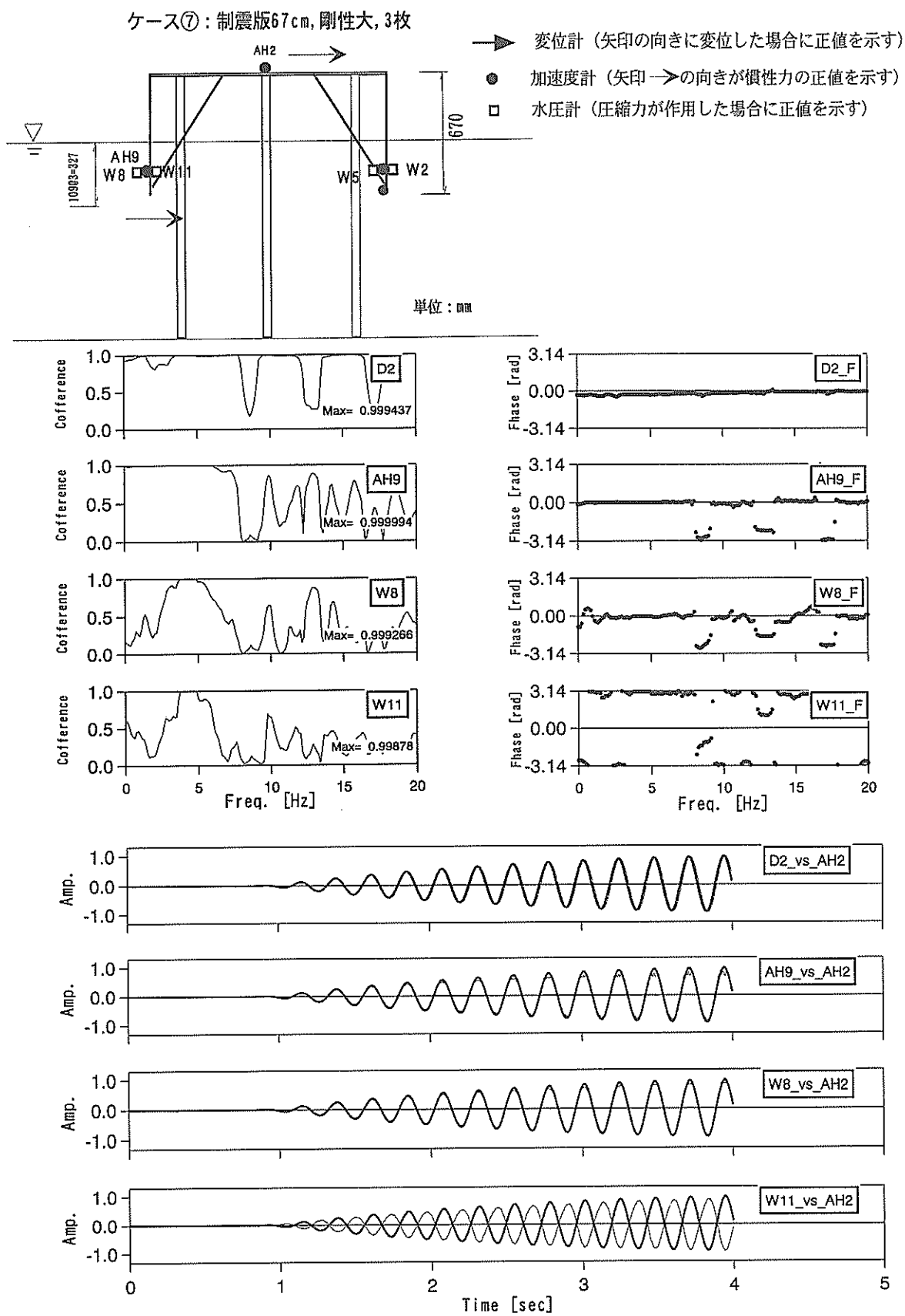


図-B.6 上部工の応答加速度と上部工変位・制震版応答加速度・制震版動水圧との相関および位相差 (ケース⑦)

付録. C

スウィープ波加振による共振実験から得られた減衰定数 $h\nu$ の妥当性と値の補正

付録.C スウィープ波加振による共振実験から得られた減衰定数 $h\nu$ の妥当性と値の補正

表-C.1 共振実験結果

実験 ケース	固有 周波数 (Hz)	固有周波数の低減率 各ケースの共振周波数 /ケース①の共振周波数	加速度 応答倍率 $S_a$ 応答/入力	応答倍率の低減率 各ケースの応答倍率 /ケース①の応答倍率	制震版の条件			管理名	減衰定数 $h\nu$
					長さ (cm)	剛性	枚数 (枚)		
①	4.84	—	49	—	—	—	—	NN	0.013
③	3.27	0.68	15	0.31	95	高	5	LH5	0.027
⑤	3.7	0.76	20	0.41	81	高	5	MH5	0.028
⑥	4.16	0.86	28	0.57	67	高	5	SH5	0.024
⑦	4.68	0.97	49	1.00	67	高	3	SH3	0.014

ここでは、一自由度系の自由振動理論から得られる共振曲線に基づき、報告書本編3.2の(1)のa)のスウィープ波加振による共振実験の結果で求められた減衰定数 $h\nu$ の妥当性を理論的に検討し、さらに、1つのケースの値の補正を行う。

スウィープ波加振による共振実験の結果から、加速度応答倍率 $S_a$ と栈橋全体の固有振動数 $f_1$ から共振曲線を描き、この共振曲線から式(3.1)より減衰定数 $h\nu$ を図解的方法で求めた。この減衰定数 $h\nu$ を基に3.3の(1)において検討を行った結果、応答倍率 $S_a$ は $h\nu$ の増加に伴って低下し(制震効果)、固有振動数も概ね $h\nu$ の増加とともに低下(長周期化)する傾向が確認された。減衰定数 $h\nu$ は「水-制震版-栈橋」の構造系の減衰の大きさを示す物理量であることから、制震効果および長周期化の主な要因が減衰の増加に起因することが明らかになった。

しかしながら表-C.1より、最も制震効果および長周期化が顕著であった制震版が長く剛性が大きいケース③の減衰定数は $h\nu=0.027$ であり、ケース③より制震効果および長周期化の傾向が小さい他のケースと比べて小さな値であった(ケース⑤で $h\nu=0.028$ 、ケース⑥で $h\nu=0.024$ )。ケース③の値を除けば、一様に $h\nu$ の増加とともに、減衰定数 $h\nu$ と制震効果および長周期化の傾向が大きくなることから、ケース③の値は明らかに計測値より大きいものと推測される。

図-C.1に理論的に導かれた加速度応答倍率 $S_a'$ (周波数伝達関数)を示す。横軸に非減衰固有振動数 $\omega_0$ で正規化された振動数、縦軸に粘性減衰定数 $h$ を変化させた場合の $S_a'$ を示す。 $S_a'$ で示される加速度応答倍率は、周波数伝達関数を意味し、共振実験で得られた加速度応答倍率 $S_a$ と等価な値である。

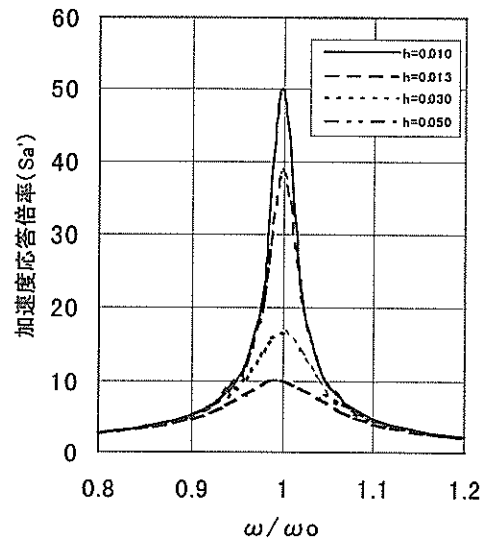


図-C.1 共振曲線の理論値

まず、図解的方法の信頼性について述べる。共振実験から求められる制震版を設置しないケース①の加速度倍率は約50倍、減衰定数 $h\nu$ は約0.014である。この値と理論値を比べると、図より共振点で加速度応答倍率 $S_a'$ が50倍となる減衰定数は $h=0.01$ である。この値と図解的方法で求められた値を比較すると概ね等しいことから、共振曲線から図解的方法で減衰定数を求めることの理論的妥当性が示された。

つぎに、ケース③の値の補正を行う。減衰定数 $h\nu$ は系の減衰の大きさを表すことから、図解的方法で求められた制震効果が最も大きいケース③の減衰定数 $h\nu=0.027$ が、制震効果がより小さいケース⑤の値 $h\nu=0.030$ と比べて小さいのは理解し難い。ケース①に対するケース③の低減率は約70%であることと、減衰

$h$ が0.010から0.030へと約3倍大きくなる場合に、図示した $Sa'$ の値が約70%の低減率を示すことから判断して、ケース③の減衰定数 $h_v$ はケース①の値 $h_v=0.013$ の3倍に当たる約0.050程度と考えるのが理論的にも妥当である。ケース③の粘性減衰定数 $h_v$ を0.050と修正した場合に、共振実験の全てのケースにおいて減衰定数 $h_v$ の増加とともに低減率も大きくなる。図解的方法でケース③の値が小さく求められたのは、曲線の形が他の曲線より尖がりぎみのために、曲線から読みとられる値が実際よりも過小評価されたものと推測される。

以上のことから、共振実験から求められた粘性減衰定数 $h_v$ はケース③を除けばほぼ妥当な値であり、ケース③の値は理論値と比較検討の結果、 $h_v=0.050$ に修正するのが妥当である。同時に、スウィープ波加振による共振実験から、制震栈橋模型の減衰の大きさは、通常形式の栈橋と比べて最大で約3倍に増え、その値は約5%程度と推測される。なお、この減衰定数 $h_v$ の推定値については、今後実施される実験を踏まえて再検討する予定である。

付録. D

3次元地震応答解析プログラムの概要



## 付録.D 3次元地震応答解析プログラムの概要

研究対象である実構造栈橋および栈橋模型の固有周期（固有振動数）の算定には、3次元弾塑性解析プログラムTDAPを使用した。また、模型振動実験で確認された制震効果を理論的に説明するために地震応答解析を実施した。この解析には、流体と構造物の相互作用が考慮可能な3次元地震応答解析プログラムNONL3Dを使用した。

ここでは、NONL3Dの概要を示す。なお、TDAPは市販の解析プログラムであり、その詳細については理論マニュアル等を参照されたい。

### (1) 3次元地震応答解析プログラムNONL3Dの概要

NONL3Dは港湾技術研究所が独自に開発した3次元地震応答解析プログラムである。流体-構造物-地盤連成系の3次元地震応答解析機能を有する。FLUSHやSHAKEのように等価線形解析機能を備えており、建設地点の地盤の非線形性を考慮することが可能である。また、土と構造物や構造物と構造物の間の滑り等を適切に表現することが可能である。さらに、非圧縮性あるいは圧縮性流体および線形化された流体表面の波を取り扱うことが可能で、これにより、実現象に則した流体-構造物連成系の加振応答解析や固有値解析を行うことができる。なお、FLUSHやSHAKE等が周波数領域で解析を行うのに対して、NONL3Dは時間領域で解析を行う。これは滑り等の非線形現象を時間領域で解析を行うための処置であり、NONL3Dの特徴的な機能である。

### (2) 解析対象および機能

#### (a) 解析対象

不連続面を有する地盤の地震応答解析、流体-構造物連成系の解析、容器中の水の固有値解析、浮体動揺解析、地中構造物の地震応答解析等。

#### (b) 要素種類

BRICK要素、板曲げ要素、3次元曲げせん断はり要素、3次元ジョイント要素、バネ要素、粘性要素、3次元水要素、連成面要素、表面要素、浮力要素。

#### (c) 非線形モデル

ジョイント要素<sup>1)</sup>およびバネ要素のみにパイリニア型の非線形モデルが指定可能である。また、地盤の非線形性は等価線形解析で考慮可能である。

#### (d) 連成面要素

構造物と水の境界面に連成面要素<sup>2)</sup>を作成し、お互いの法線方向の力の釣り合いを保つように定式化されている。

#### (e) 時間積分手法

直接積分法あるいはモード重ね合わせ法が選択可能。

### (3) 構造の定義

#### (a) 座標系

3次元右手直交座標系。

#### (b) モデル配置

3次元。

#### (c) 単位系

時間単位（秒）、周波数単位（Hz）、その他の物理量は無単位。

#### (d) 自由度

・ [3次元節点]

1. X方向並進自由度 Tx
2. Y方向並進自由度 Ty
3. Z方向並進自由度 Tz
4. X軸まわり回転自由度 Rx
5. Y軸まわり回転自由度 Ry
6. Z軸まわり回転自由度 Rz

・ [液体節点]

1. 流体領域の流体の動水圧 P

### (4) 減衰

- ・ レーレー減衰あるいはモード減衰（モード重ね合わせ法の場合）。これらは、ひずみエネルギー比比例型減衰から算定可能。
- ・ 粘性境界によるエネルギー逸散減衰
- ・ 非線形要素の履歴減衰

### (5) 拘束および荷重条件

#### (a) 拘束条件

SPC（単点拘束）、MPC（多点拘束）。

#### (b) 静的荷重

節点集中力、重力等の静的加速度。

#### (c) 動的荷重

節点集中力、一様基盤加振、地震波多点入力。

## 参考文献

- 1) 三浦房紀, 岡重よし泰, 土岐憲三: 3次元ジョイント要素の改良とその動的問題への適用, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部, Vol. 40th pp.763-764, 1985
- 2) O.C.Zienkiewicz: The finite element method third edition (McGraw-Hill), 1977 (邦訳は「マトリックス有限要素法三訂版」培風館, 1984)