

港湾技研資料

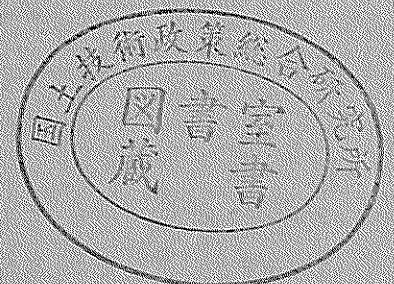
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 932 Mar. 1999

根入れ鋼板セル護岸の地震観測と地震応答解析

中 村 充 裕
上 部 達 生

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 地震観測内容	4
2.1 観測場所と根入れ鋼板セル護岸の概要	4
2.2 計測項目と計測目的	5
2.3 計測位置と計測機器	5
2.4 変換器の設置方法	8
2.5 観測データの検討フロー	8
2.6 土質調査	12
3. 観測結果とその考察	13
3.1 観測された地震	13
3.2 地盤とセルの振動特性	13
3.3 セル護岸の地震時挙動	20
4. 有限要素法による地震応答解析	29
4.1 解析条件	29
4.2 解析モデル	31
4.3 入力地震波	37
4.4 解析結果	37
4.5 地盤がセルの挙動に及ぼす影響	71
5. 現行設計法の安定計算値と観測値との比較	72
5.1 根入れ鋼板セルの設計法	72
5.2 計算条件	72
5.3 安定計算結果及び比較	73
6. まとめ	80
7. あとがき	80
謝辞	80
参考文献	80
主要記号表	81
付録	83

Earthquake Observation and Seismic Response Analysis of Embedded Steel Plate Cellular Bulkheads

Mitsuhiro NAKAMURA*
Tatsuo UWABE**

Synopsis

Observation of the dynamic behavior of the embedded steel plate cellular bulkhead during earthquake have been performed at Nagoya Port since December, 1985. Dimensions of the cell are 20m in diameter and 19.5m in height. The embedment length was set as 12.7m. The monitoring items are the acceleration in the ground, the cell fill, and the top of the cell, and earth pressure at the front, the bottom, and the back of the cell.

In this study, seven major records are analyzed for the dynamic behavior of the embedded steel plate cellular bulkhead during earthquake.

Following conclusions are obtained in this study.

- 1)According to the observation, it was found that the acceleration on the top of the cell is larger than that on the seabed.
First natural frequency estimated from the transfer function between the cell's top and the seabed is about 2Hz, and the predominant mode of the cell is rocking.
- 2)The distributions of the front and back earth pressure during earthquakes are close to those of rocking mode of the cell.
- 3)The calculated result by earthquake response program "BEAD III" gives good agreement with measured result. Therefore, this calculation method is useful for evaluating the earthquake behavior of steel plate cellular bulkheads.
- 4)The distributions of the front and back earth pressure calculated by the present design standard give good agreement with measured result.

Key Word : Cellular Bulkhead, Earthquake Response Observation, Seismic Response Analysis, Earthquake Resistant Design Method.

*Trainee of Earthquake Disaster Prevention Laboratory ,Structural Engineering Division
(Harbor Department,Mitsui Collaboration Construction Consultants)

**Director of Structural Engineering Division

Address:3-1-1,Nagase,Yokosuka 239,JAPAN Tel:+81-468-44-5030 Fax:+81-468-44-0839 E-mail address:uwabe@cc.phri.go.jp

根入れ鋼板セル護岸の地震観測と地震応答解析

中村 充裕*
上部 達生**

要 旨

名古屋港第二ポートアイランド護岸の根入れ鋼板セルに各種計測器を取り付け、昭和61年12月から長期地震観測を実施した。観測対象のセルの緒言は、直径20.0m、高さ19.5m、根入れ深さ12.7mである。計測項目は①地盤、中詰土、セルの加速度、②セル根入れ部前壁土圧、底面反力、裏埋土圧である。ここでは、根入れ鋼板セルの地震時における動的挙動を把握するために、比較的最大の大きな7記録について解析を行った。

得られた成果は以下のとおりである。

1)セルの加速度記録より、基盤から天端へ加速度が増幅していることが確認された。

伝達関数の計算結果から、セルの一次固有振動数が2.0Hz付近であることが確認された。またセル全体の挙動は、ロッキング振動が卓越していた。

2)地震時の側壁土圧の分布は、セルのロッキング振動に基づく分布形状を示す。

3)有限要素法の地震応答解析（BEADⅢ）による応答計算結果は観測結果と比較的良好一致を示しており、根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動をある程度推定しうると考える。

4)現行設計法による設計計算値は、側壁土圧の分布形状において観測値と良好一致が見られた。

キーワード：鋼板セル，地震応答観測，地震応答解析，耐震設計法

*構造部 地震防災研究室 研修生（三井共同建設コンサルタント（株）港湾部）

**構造部長

所在地：〒239 横須賀市長瀬3-1-1，TEL：(0468)44-5030，FAX：(0468)44-0839，E-mailアドレス：uwabe@cc.phri.go.jp

1. まえがき

本報告で対象としている名古屋港第二ポートアイランド護岸の構造形式に採用された「根入れ鋼板セル」は、粘性土を貫通して支持層に打ち込まれたセル体である。根入れ鋼板セルの現行の設計は、(財)沿岸開発技術研究センターによる「根入れ式鋼板セル設計指針」(昭和60年10月)¹⁾及び「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(平成元年2月)²⁾に基づいている。それ以前の設計との大きな相違点は、セルを重力式壁体とみなして有効質量係数を用いる点と、支持地盤をバネに置換する点である。この設計法は港湾技術研究所報告「根入れ鋼板セルの耐震性に関する実験的研究」³⁾に地震時安定計算法として提案された手法を反映している。しかし、この提案された設計法は、模型振動実験を主体に開発された手法であったため、実在構造物での地震応答観測などによってその妥当性を検証し、より合理的な設計法に発展させることが望まれていた。これまでに砂質土に根入れした(粘性土を砂置換)鋼板セルの地震観測結果については「根入れ鋼板セル護岸の地震観測」として港湾技研資料⁴⁾にとりまとめられている。その観測結果によると、鋼板セルは剛体としてのロッキング振動が卓越していると考え、地盤をバネ評価した現行設計法の妥当性が確認されている。また、観測結果は既往の模型振動実験結果や有

限要素法による解析結果との良い一致がみられていた。本研究においては、粘性土に根入れした鋼板セルを対象として地震観測記録を取りまとめている。砂質土に根入れした鋼板セルに続いて、粘性土に根入れした鋼板セルの地震時挙動を明確にすることは、現行の設計基準²⁾に対する信頼性をより向上させるものと考えられる。

2. 地震観測内容

2.1 観測場所と根入れ鋼板セル護岸の概要

地震観測の対象とした護岸は名古屋港第二ポートアイランドC工区に施工された根入れ鋼板セル護岸で、建設位置を図-2.1に示す。名古屋港の港湾整備に伴う発生土砂の処分場として、昭和50年より第一ポートアイランドの公有水面埋立が行われた。その後の整備計画に基づいて増加する浚渫土砂に対応して、約6,000千 m^3 の土砂処分場として第一ポートアイランドに隣接し第二ポートアイランドが計画された。規模としては、埋立面積約63.3ha、土砂処分量6,140千 m^3 、埋立護岸延長2,260mであり、そのうち220.0mが根入れ鋼板セル部である。

本護岸が設計された当時には、前出の港研報告をはじめとする様々の研究結果が「根入れ式鋼板セル技術基準検討委員会」で検討中であったが、①セル体を重力式壁体とみなし、地盤をバネ評価して安定計算を行うこと、②重力式壁体としての形状保持が出来るかどうかを中詰

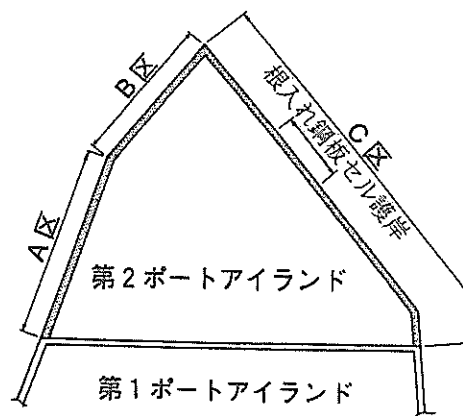
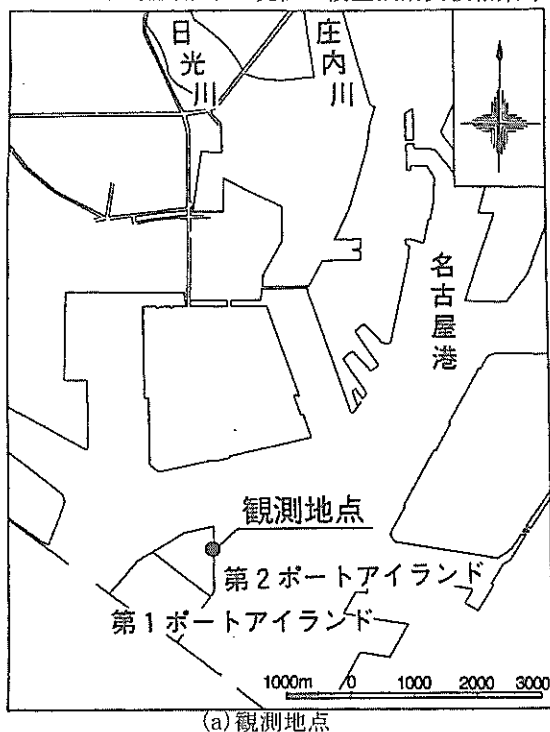


図-2.1 根入れ鋼板セル護岸の観測地点

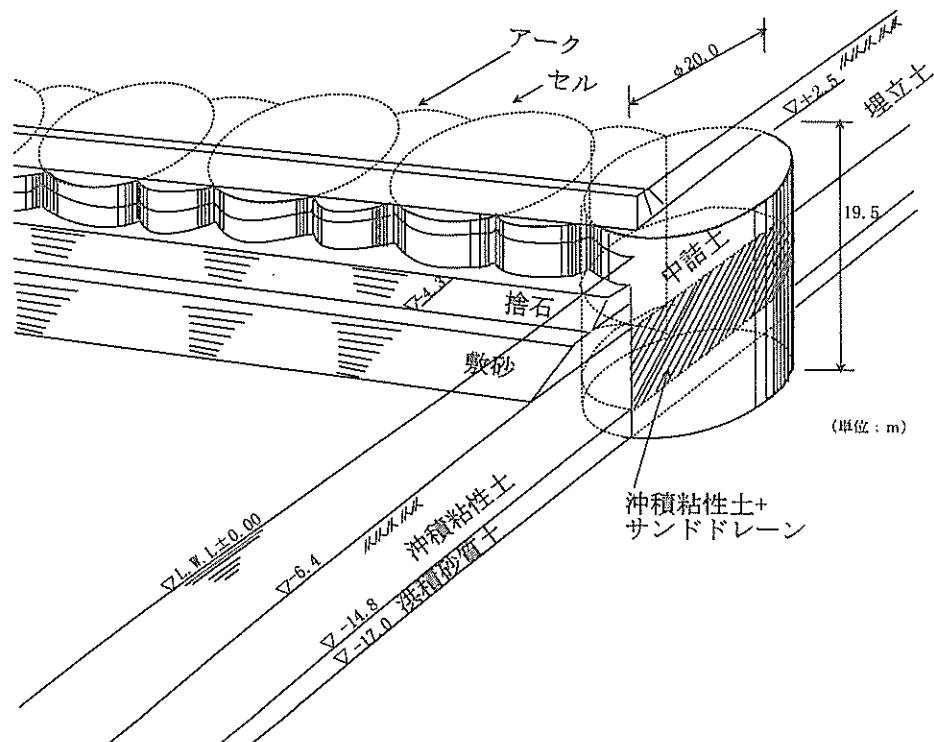


図-2.2 構造図

め土のせん断抵抗で検討すること、③セル及びアークの板厚は海底面を基準面とし、常時の水平方向引張力に対して安全となるように検討することを基本的な考えとして設計は行われている。耐震設計は震度法に基づいており、設計水平震度 K_h は 0.1 であった。今回対象とした根入れセル護岸の構造概要を図-2.2に示す。使用されたセルは、 $\phi 20.0\text{m} \times h19.5\text{m} \times t10.0\text{mm}$ であり根入れ深さは 12.7m である。原地盤は、海底面から 8.1 ~ 8.8m の深さまでシルト質粘土の軟弱地盤であるが、セル中詰によるセル内沈下を早期に完了させるために、セル内の粘性土にはサンドドレーン改良が行われている。その下層は洪積砂質土であり支持層相当の強度も得られている。セルはこの沖積粘土層を貫通し、洪積砂質土層の支持層と見なしうる深さまで根入れされている。地震観測は護岸背後の埋立土がない時期から実施され、これまでに観測記録が得られた時点での護岸背後の埋立状況が異なっている。この埋立の進捗状況を図-2.3に示す。以下に示す観測記録は、この埋立状況が異なっている点に注意がいる。なお、観測対象としたセル護岸及びその中詰土部での土質調査結果については 2.6 に示す。

2.2 計測項目と計測目的

計測項目は、①地盤、中詰土、セルの加速度、②セル根入れ部前壁土圧、底面反力、裏埋土圧であり、各項目に対する計測の目的を表-2.1に示す。加速度計の計測

位置は、セルのロッキング振動卓越の有無、セルを剛体としてモデル化する事の適否などが確認できるような配置とした。また、セル中詰土の有効質量係数の裏付けとなるデータを入手するため、中詰土内の同一高さの 2カ所に加速度計を設置した。土圧計の計測位置は、地盤をバネに置換えてモデル化する事の妥当性を検証するための配置とし、さらに、裏埋土圧の低減を確認するため、埋立土側にも土圧計を設置した。具体的な加速度計、土圧計の設置位置は以下に示す。

2.3 計測位置と計測機器

計測位置は図-2.4に示すように、①地盤、中詰土、セルの加速度測定に加速度計 9 点、②セル根入れ部前壁土圧、底面反力、裏埋土圧測定用に土圧計を 16 点設置した。加速度計 A-1 ~ A-3 は、セル殻に取り付け、A-4 ~ A-9 は、中詰土及び地盤内に埋設した。加速度の計測方向は、A-1・A-2 が鉛直方向加速度を測定することを除いて、護岸法線に直角方向である。また、土圧計は E-1 ~ E-12 まではセル体に取り付けており、E-1 ~ E-4 は中詰土圧測定用、E-5 ~ E-8 まではセル根入れ部前壁土圧測定用、E-9 ~ E-12 がセル背後土圧測定用である。土圧計の E-13 ~ E-16 は底面土圧測定用である。

計測機器の名称と概略仕様を表-2.2に示す。加速度計は実績も多く信頼性の高いサーボ型を用い、土圧計は動的応答性に優れるといわれる二次ダイヤフラム式差動

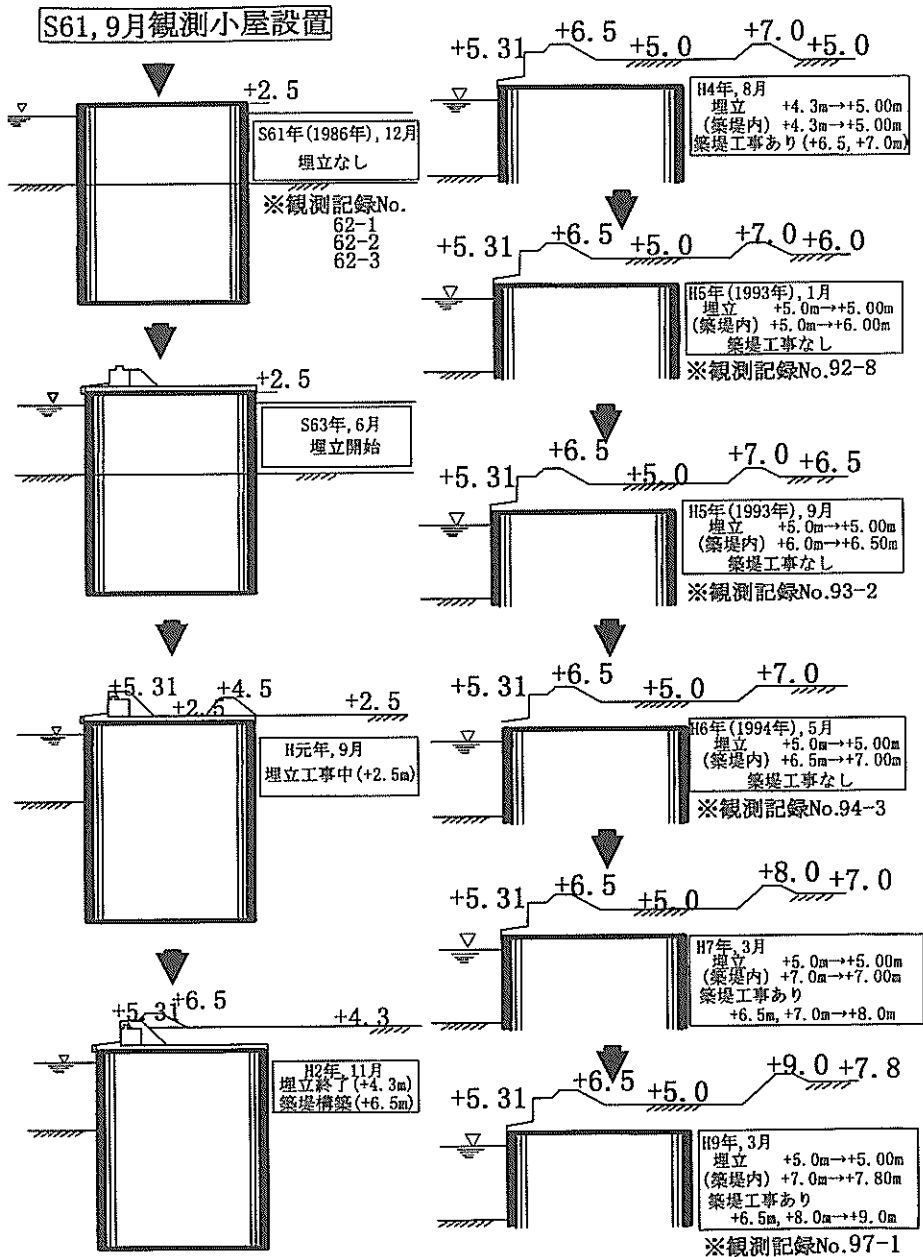
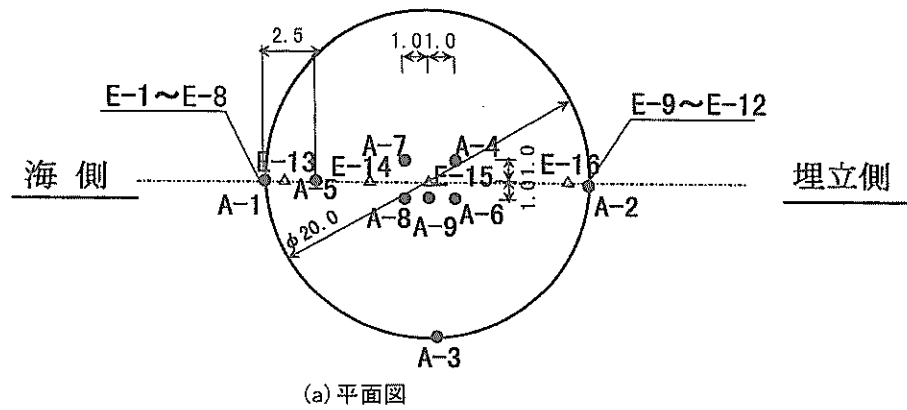


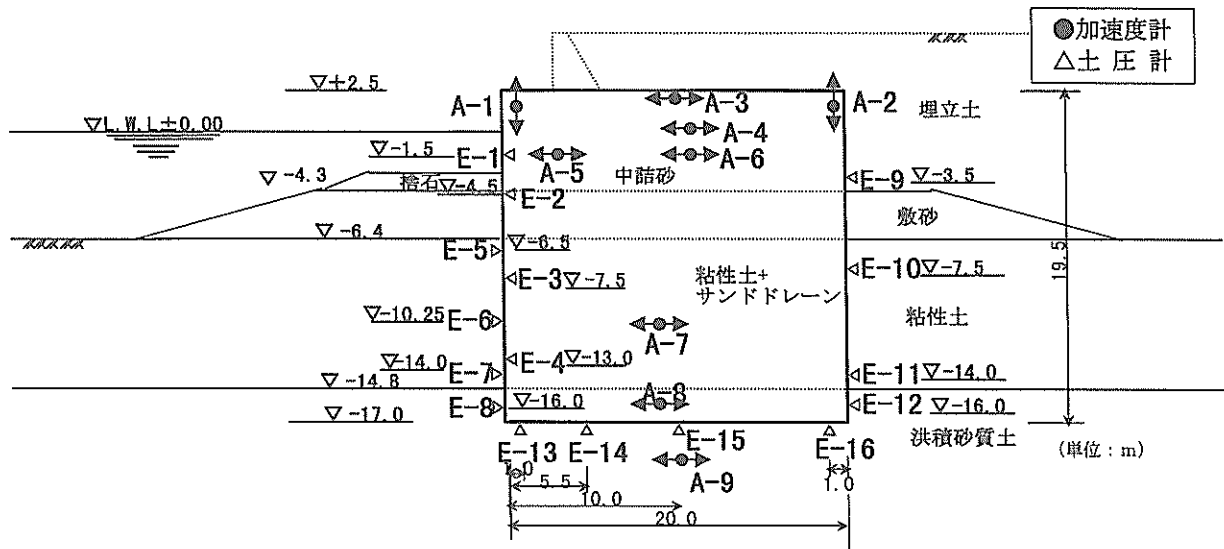
図-2.3 埋立進捗図

表-2.1 計測項目と目的

計測項目	目的
(1) 地盤、セルの加速度	①セルを剛体としてモデル化することの適否 ②セルのロッキング振動モード卓越の有無 ③中詰土の有効質量についての裏付けデータの入手
(2) 前壁土圧、底面土圧、後壁土圧	①根入れ部前壁と底面の地盤をバネ置換してモデル化することの適否 ②裏埋土圧の低減の確認



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.4 構造図及び計器設置図

表-2.2 計測機器名と概略仕様

計測機器名		数量	性能	
変換器部	底面反力用土圧計	4個	7kgf/cm ² 、210φx15t mm、差動トランス型二次ダイヤフラム方式	
	側壁土圧計	海側	4個	5kgf/cm ² (最深部1個10kgf/cm ²)、148φx75t mm 差動トランス型、二次ダイヤフラム方式
		埋立側	4個	5kgf/cm ² (最深部1個10kgf/cm ²)、148φx75t mm 差動トランス型、二次ダイヤフラム方式
	中詰土圧計	4個	5kgf/cm ² 、148φx75t mm、差動トランス型二次ダイヤフラム方式	
	加速度計	水平	7台	2G、サーボ型加速度計、0.1~35Hz、80φx209h mm
鉛直		2台	2G、サーボ型加速度計、0.1~35Hz、80φx209h mm	
増幅器部	土圧計用増幅器	16CH	周波数特性 0.2~30Hz、測定レンジ6段(2.5、10、20、50、100%)、測定精度±0.5%以内、自動平衡、自動校正回路付	
	加速度計用増幅器	9CH	測定周波数 0.1~30Hz、最小分解能0.01Gal、±1000Gal、測定レンジ6段(3、10、30、100、300、1000Gal)	
制御部・記録部	デジタル集録装置	1台	32CH、サンプリング周波数100Hz/CH、AD変換12bit、遅延時間 5秒、記録メモリーバッファ54.4s、スターター回路 3CHのAND、OR判読	
	メモリー	3個	磁気パルプメモリーカセット512バイト	

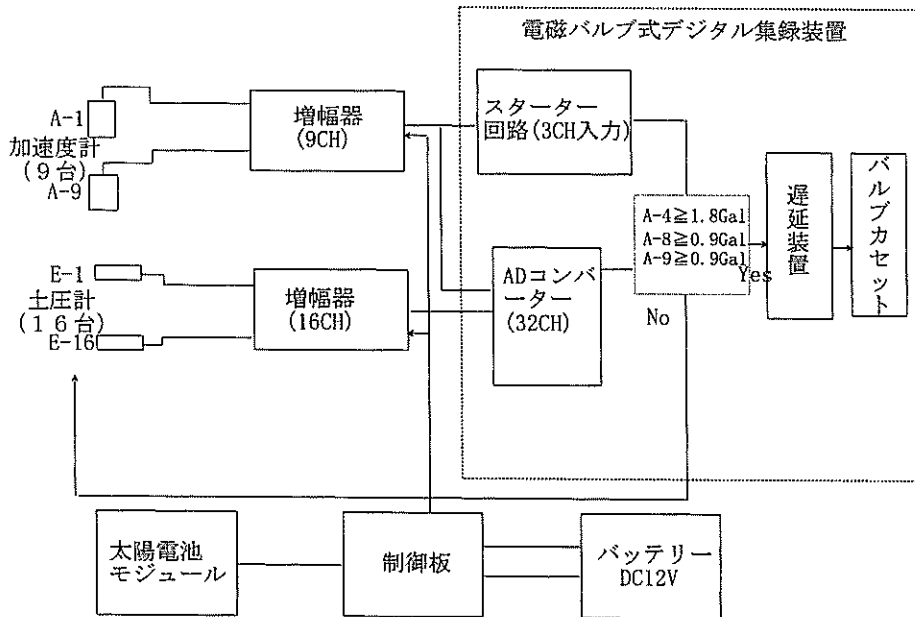


図-2.5 地震観測システム

トランス型を用いた。

地震時のデータ集録は、図-2.5の流れ図に従って行われる。このシステムでは加速度計のうちの A-4 に 1.8Gal, A-8 と A-9 に 0.9Gal 以上の加速度信号がいずれも入力された場合にデータを集録するシステムとなっている。ただし、実際には遅延装置により、起動時刻の 5 秒前から 55 秒間のデータがバルブカセットに集録される構造になっている。また、集録装置のメモリーが Full (最大 6 個) になり、新たなデータが入力した場合は、A-4, 8, 9 の起動後 30 秒間のデータについて大小を判断し、最も小さいデータを消去し、新しいデータを記録するようになっている。ただし、このシステムだと遠方で発生した地震の場合、P 波が到達してから S 波が到着するまで 30 秒以上時間差があることもあり、大きな値を示す S 波は大小判断に扱われなくなり上書きされてしまう。このことから、平成 7 年度の兵庫県南部地震の本震は主要動を収録できなかった。また、記録計は図-2.6に示すようにバルブカセットに地震データを集録する。その集録した地震データを再生装置によりパソコンに転送した上で図化処理を行い、プロッターで振動波形記録としての出力が可能である。今回は、振動波形記録を 3.5 インチフロッピーディスクに所定の様式で保存したものを使用した。

2. 4 変換器の設置方法

根入れ部前壁土圧計及び後壁土圧計はセル打設前にセル殻に取付けた。底面反力用土圧計及び加速度計については、セル打設中詰後、所定深さまでケーシングにてボーリング孔を掘削し設置した。図-2.7, 2.8に加速度計及び土圧計の設置治具を、また図-2.9, 2.10に設置方法の概要を記す。セル背後に観測小屋を設置し、その中に測定機器を置いた。また、観測小屋上に設置された架台に、太陽電池架台をボルトで固定し、その太陽電池架台と太陽電池をボルトで固定した。測定機器の配置及び太陽電池・架台をそれぞれ図-2.11, 2.12に示す。

2. 5 観測データの検討フロー

図-2.13に本研究の検討フロー図を示す。まず①「種々地震データの取得」を行う。その際に、加速度が比較的大きいものや卓越振動数の高いもの低いものといった点に着目し地震記録データを選び出す。続いて「データ整理」に進み、フーリエスペクトルや伝達関数を計算することでセルの②「振動特性」の把握を行う。同じくデータ整理の③「地盤・セルの地震時挙動」では、加速度・土圧・変位等の分布図の作成を行い、セルに作用する慣性力、土圧等の把握を行う。以上の結果を踏まえ次の段階の「解析」に進み④「有限要素プログラムによる検討」ではセルの地震挙動を再現する計算手法を検討する。

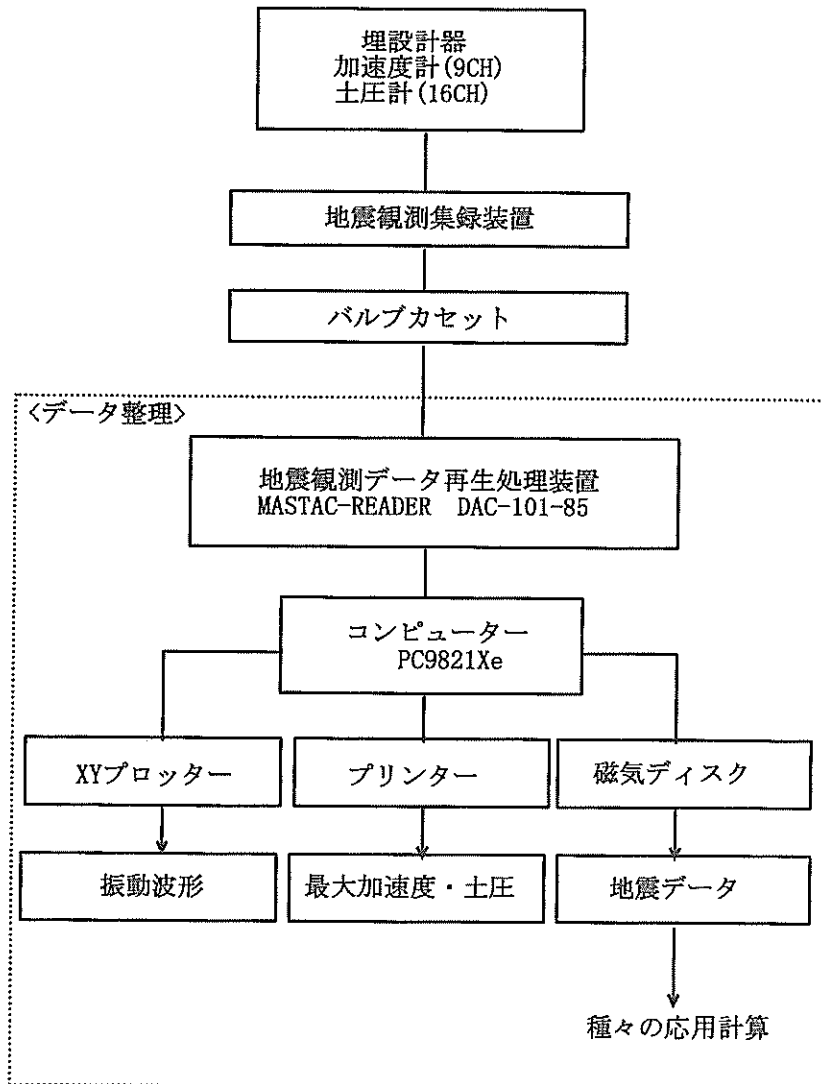


図-2.6 記録整理の流れ図

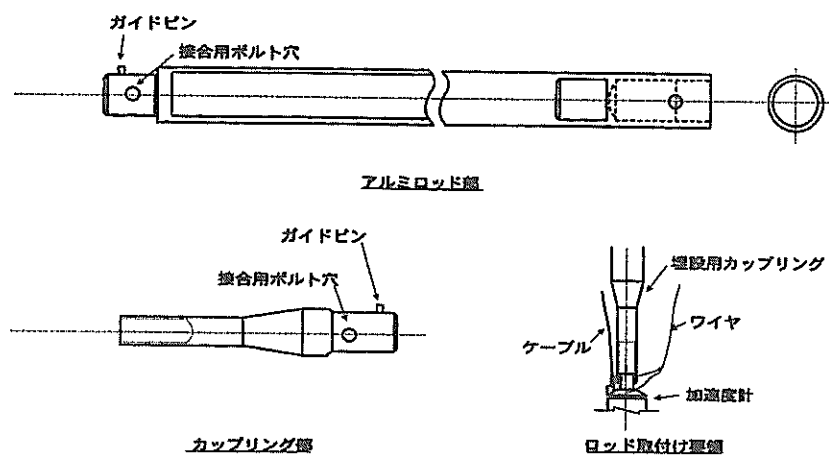


図-2.7 加速度計設置治具

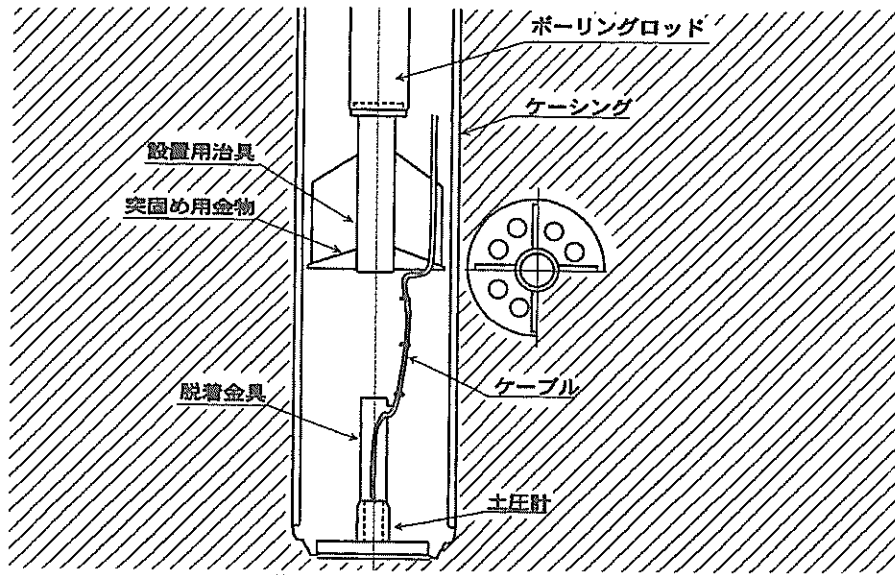


図-2.8 土圧計設置治具

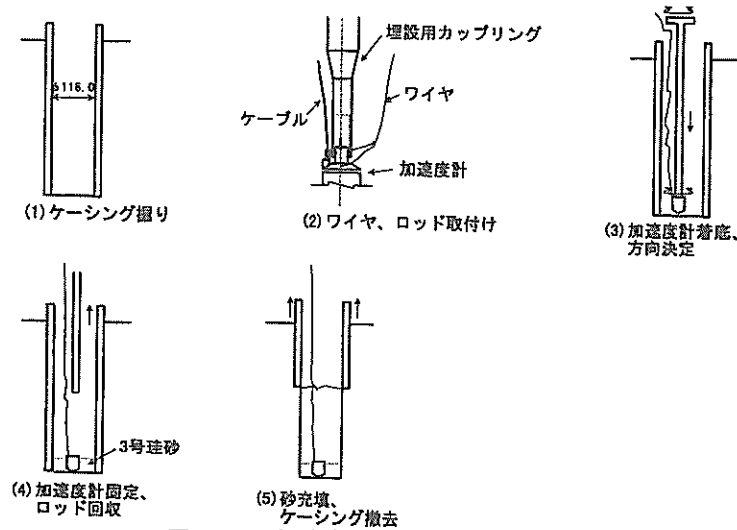


図-2.9 加速度計設置手順

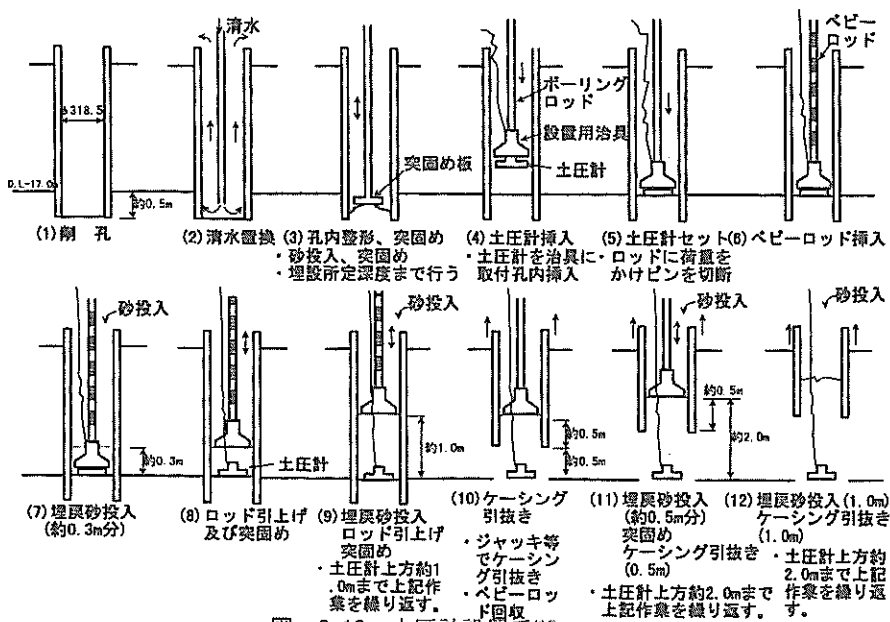


図-2.10 土圧計設置手順

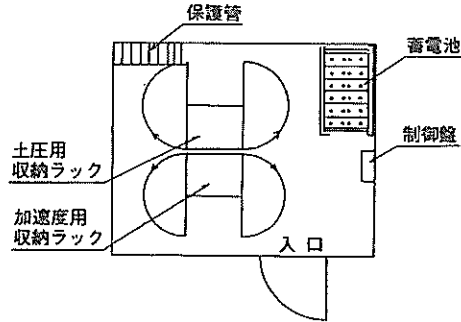


図-2.11 観測小屋内測定機器配置

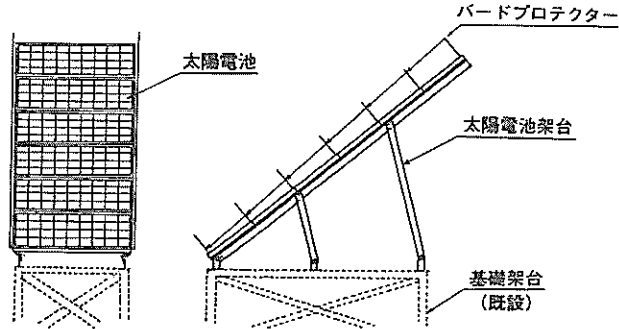


図-2.12 太陽電池及び太陽電池架台

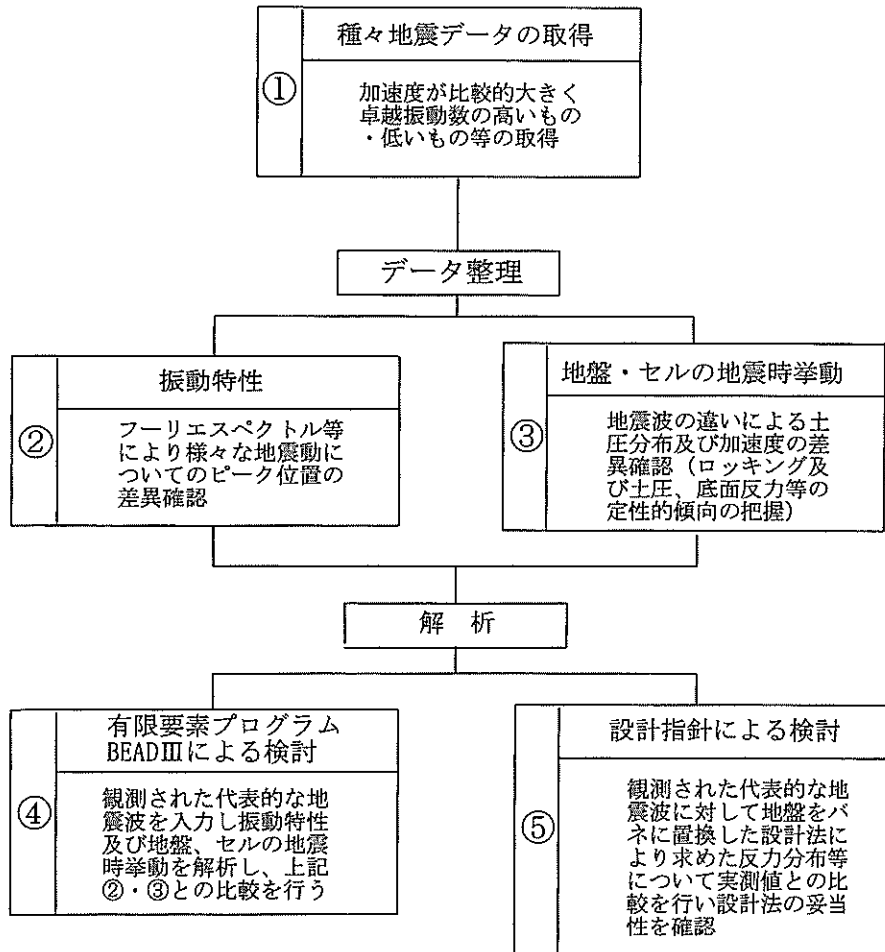


図-2.13 検討フロー

また、⑤「設計指針による検討」では現行設計法による安定計算を行い、観測結果と比較することにより、設計法の妥当性を確認する。

2.6 土質調査

昭和61年度に、セル殻打設・中詰め後に土質調査が

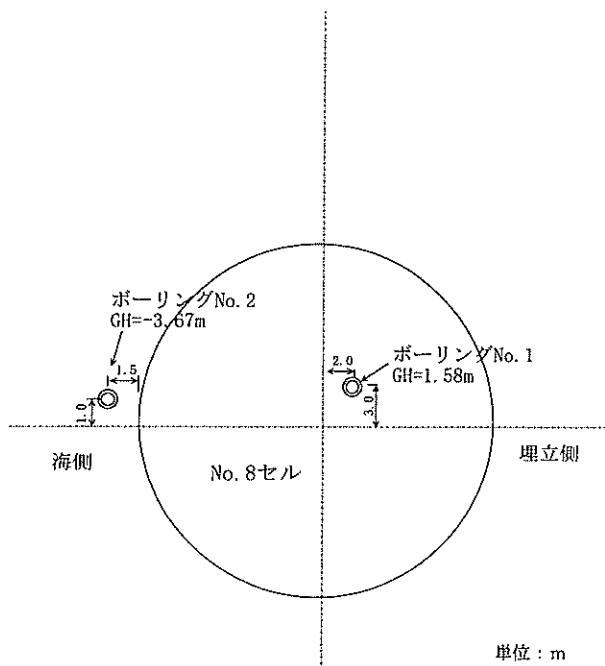


図-2.14 土質調査位置図

行われているが、その調査位置を図-2.14に示す。ボーリング No.1 は中詰土位置における調査結果、ボーリング No.2 は、セル前面の海底面以下の調査結果である。特にボーリング No.1 については、標準貫入試験の他にPS検層も行われておりその結果を合わせて図-2.15に示す。図より、地盤は、埋土層、沖積粘性土層、洪積砂層という構成を示している。以下に確認された各層の特性を記する。

①埋土層（中詰砂B）

暗灰色の細砂、NP-4.0m 付近までは含水比大、NP-4.5m 付近より ϕ 2.0 ~ 5.0mm のレキを混入する。

N値は2 ~ 9を示し、相対密度は非常に緩い~緩い状態である。

三軸試験結果(CD)は $\phi=44^\circ \sim 45^\circ$ である。

②沖積粘性土層（Ac）

暗青灰色~暗灰色のシルトを主体とする層、層厚は8.4 ~ 9.1m、貝片・雲母等を混入、粒度組成はシルト分・粘土分が94 ~ 100%である。

一軸圧縮強度 qu は、0.28 ~ 0.81kgf/cm² で深度方向への増大は認められない。

③洪積砂質土層（Ds）

暗灰色~黄灰色の細砂、熟田層の特徴である浮石の混入が認められる。浮石の径は $\phi=2 \sim 20$ mm程度、 $\phi_{max}=40$ mm程度である。

N値は8 ~ 50/13を示し、相対密度は緩い~非常に密な状態である。粒度組成は、砂分が64 ~ 89%を示す。

三軸圧縮試験結果(CD)は $\phi=38^\circ$ である。

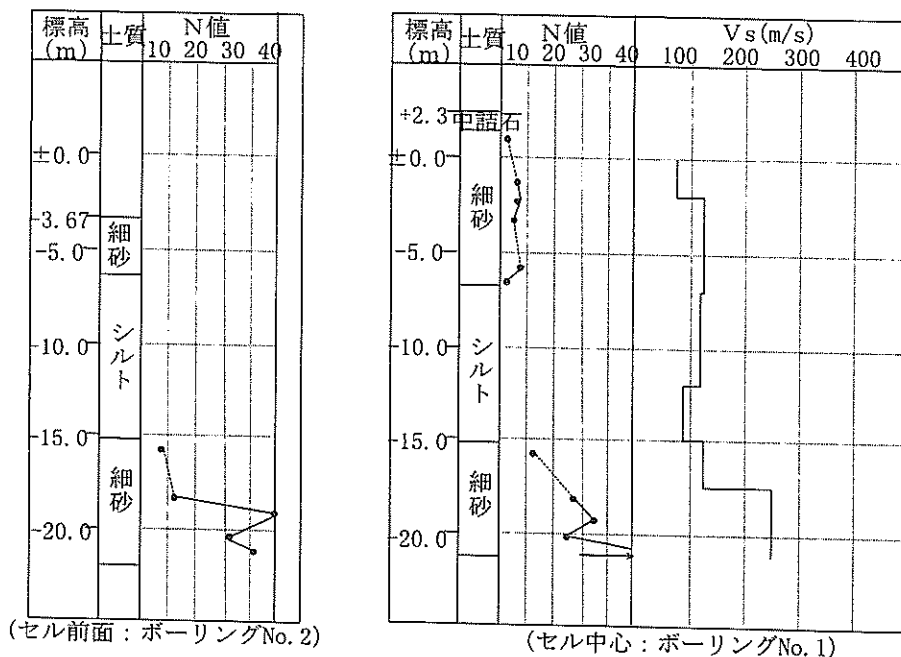


図-2.15 土質柱状図

3. 観測結果とその考察

3.1 観測された地震

昭和 61 年から観測されてきた記録の中から加速度の比較的大きいものを表-3.1に示す。記録 No.97-1, 93-2, 92-8 は震源の深い地震の記録で他の記録と比較して、後述するように低振動数が卓越する。また、観測記録 No.62-1, 62-2, 62-3, 94-3 は震源が浅く、後述するように卓越振動数が高いことに特徴がある。特に観測記録 No.62-1, 62-2, 62-3 は 1986 年 12 月 11 ~ 14 日発生の伊勢湾北部を震源とする震央距離 10km 前後の直下型地震の記録である。観測記録 No.97-1, 94-3, 93-2, 92-8 は震央距離 70km 未満の近距離の記録である。観測中最も大きな加速度を示した観測記録 No.97-1 は、基盤 A-9 で 48Gal, セル天端 A-4 で 71Gal であり、セル天端で増幅した最大加速度を示した。

観測記録 No.97-1 の加速度ならびに土圧の時刻歴波形の一部を図-3.1, 3.2に示す。また、加速度を2回積分することにより算出した変位波形を図-3.3に示す。変位波形は、加速度波形に比較して高周波成分の影響が小さくなり波形が滑らかとなっている。なお変位波形算出の際には、加速度波形の数値化に伴う誤差の成分を除去するため、ローカット及びハイカットフィルターを用いた。フィルターのカットオフ振動数は、加速度計の測定周波数が 0.1 ~ 35Hz, また、増幅器の周波数特性が 0.1 ~ 30Hz であることと、対象構造物・地盤の振動特性を考慮して 0.5 ~ 20Hz とした。

3.2 地盤とセルの振動特性

(1) 地盤とセルの振動特性

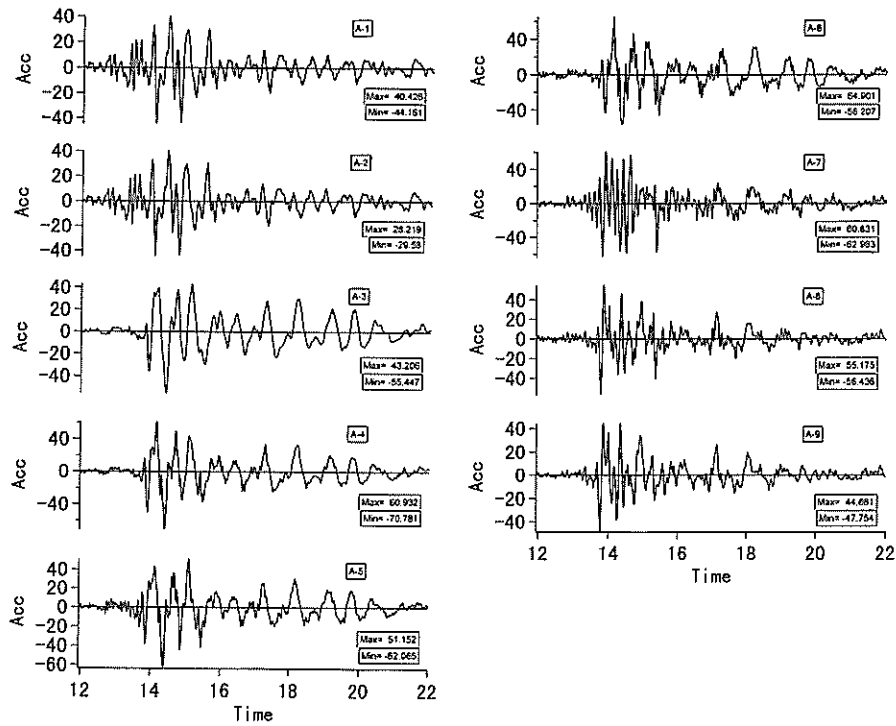
各地震について、基礎地盤(A-9)の記録のフーリエスペクトルを図-3.4に示す。この図から地震毎の卓越振動数が確認された。観測記録 No.62-1 ~ 62-3 は高い振動数が卓越し、直下型地震動の振動特性を示す。また、観測記録 No.94-3, 92-8 でも 10Hz 前後にもピークが現れており比較的高振動数を含んでいることが分かる。観測記録 No.97-1 及び 93-2 については 5Hz 未満の低い振動数が卓越している。

次に各地震に対するセル天端の伝達関数(A-4/A-9)を図-3.5に、また各測点の伝達関数を算出したものを図-3.6~3.12に示す。観測記録 No.62-3 及び 92-8 を除く観測記録では、中詰部 A-3 ~ A-7 において 2.0Hz 付近のピークを示している。また 2.0Hz 付近の応答倍率は上へ向かうにつれてほぼ増加していることから、この振動数はセルの一次固有振動数と思われる。これについては過去実施された自由振動実験でも確認されている。

2.0Hz 付近の振動数に着目すると中詰土(A-4)とセル殻(A-3)とは計測位置が高さ方向に若干ずれているが、両者の応答倍率がほぼ等しい値を示すことから、この振動数付近においてセル殻と中詰土がほぼ一体となって振動していたことが想定される。なお、5.0Hz 以上の振動数に関して、中詰土(A-4)はセル殻(A-3)と伝達関数の形状が異なっており、しいていうと中詰土(A-6)に形状が似ていることより、これはセル内の中詰土の振動特性によるものと考えられる。観測記録 No.62-3 については

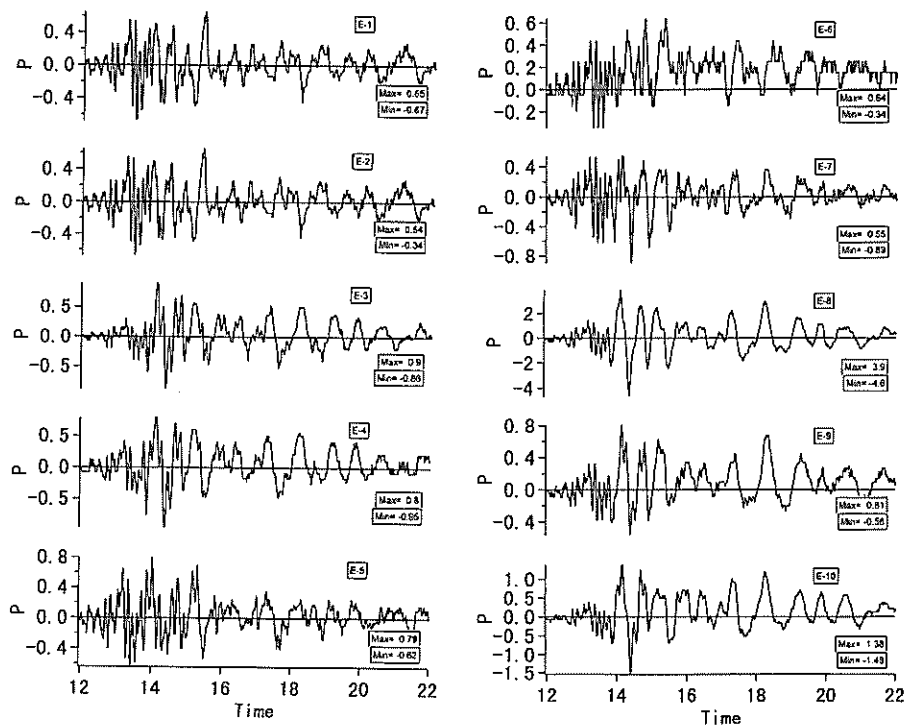
表-3.1 観測表

観測記録No	97-1	94-3	93-2	92-8	62-1	62-2	62-3
発生日	1997/3/16	1994/5/28	1993/9/23	1993/1/11	1986/12/11	1986/12/11	1986/12/14
発生時	14:51:52	17:04:53	15:53:02	9:59:11	13:28:12	13:40:38	09:04:46
震源地	愛知県東部	滋賀県中部	愛知県西部	愛知県中部	伊勢湾北部	伊勢湾北部	伊勢湾北部
マグニチュード	5.8	5.2	4.8	4.8	3.8	3.5	—
震度	IV	III	III	III	III	I	I
最大加速度 支持地盤	48	14	13	35	19	10	9
度(Gal) セル上部	71	12	21	33	28	16	12
震源深さ(km)	39.0	14.0	50.0	56.0	9.0	10.0	10.0
震央距離(km)	65.0	60.0	18.0	57.0	8.6	12.0	10.4



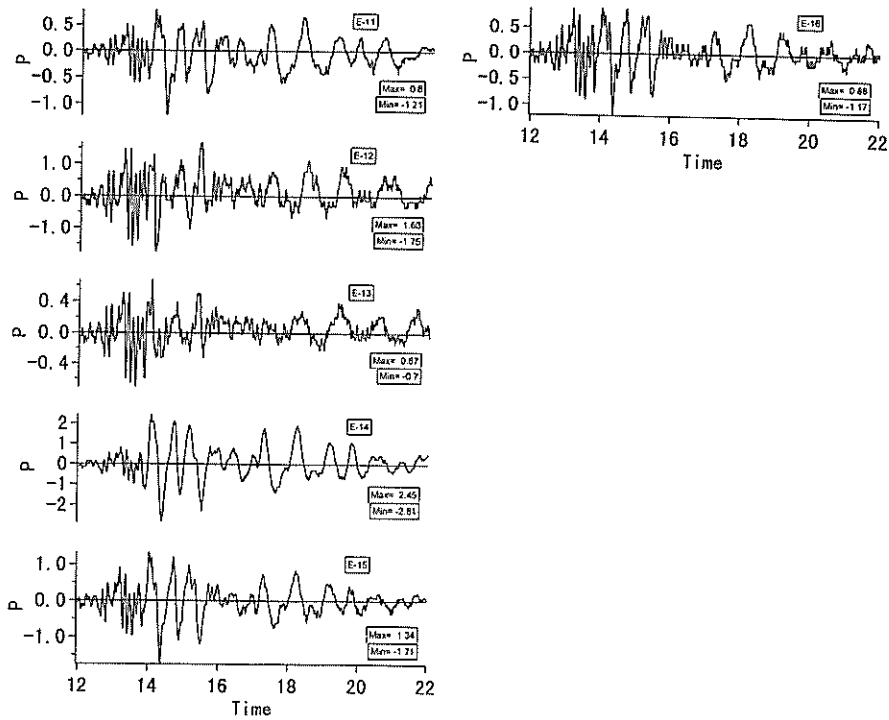
單位：Acc (Gal), Time (s)

図-3.1 加速度記録波形 (観測No. 97-1)



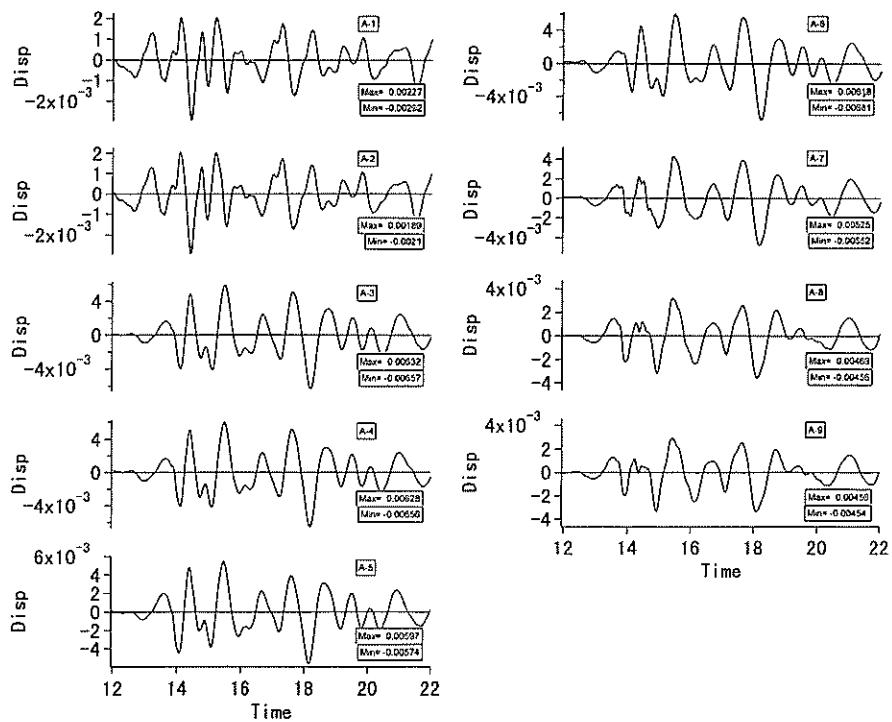
單位：P (tf/m²), Time (s)

図-3.2 土圧記録波形 (観測No. 97-1: E-1~E-10)



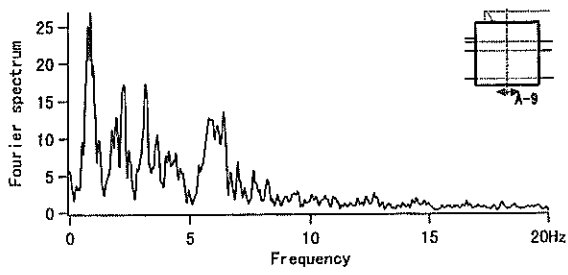
單位：P(tf/m²), Time(s)

圖-3.2 土圧記録波形 (観測No. 97-1 : E-11~E-16)

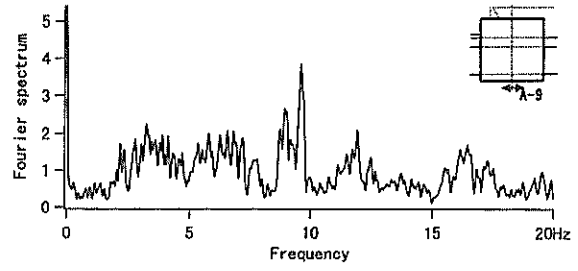


單位：Disp(m), Time(s)

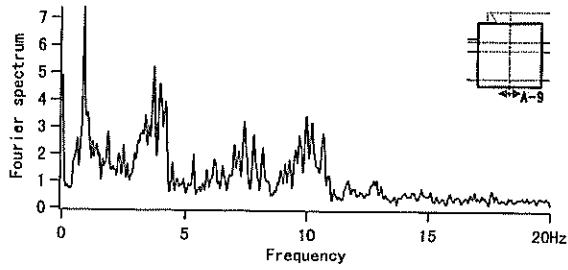
圖-3.3 変位記録波形 (観測No. 97-1)



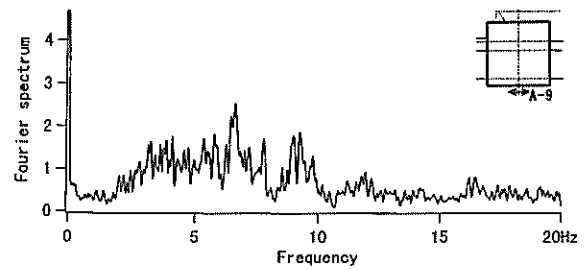
(a) 観測No. 97-1



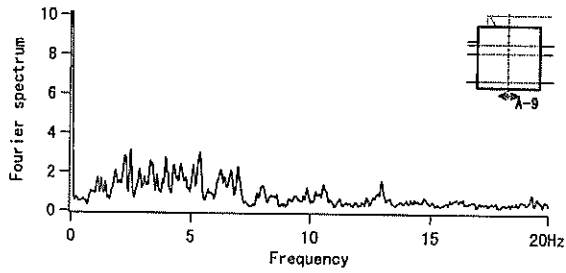
(e) 観測No. 62-1



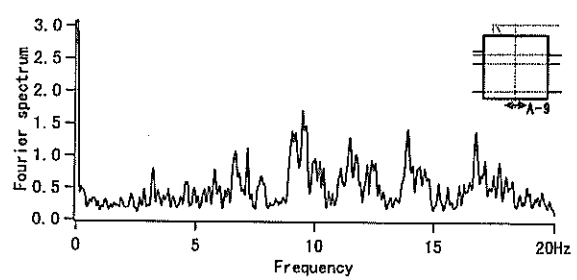
(b) 観測No. 94-3



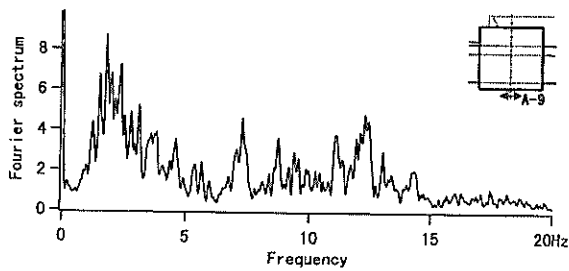
(f) 観測No. 62-2



(c) 観測No. 93-2



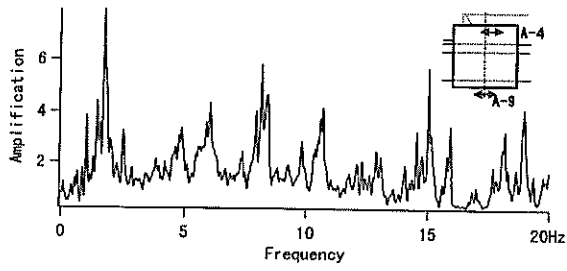
(g) 観測No. 62-3



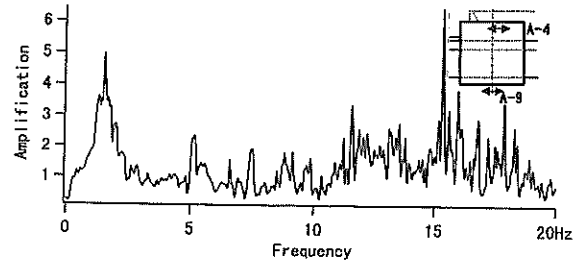
(d) 観測No. 92-8

単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

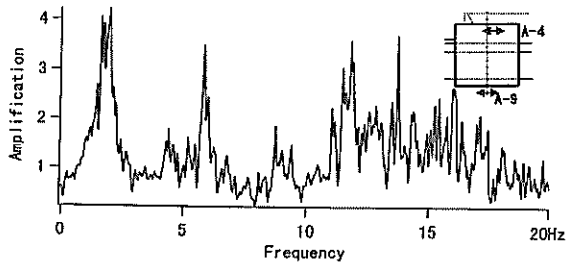
図-3.4 各地震に対するフーリエスペクトル (基礎地盤A-9)



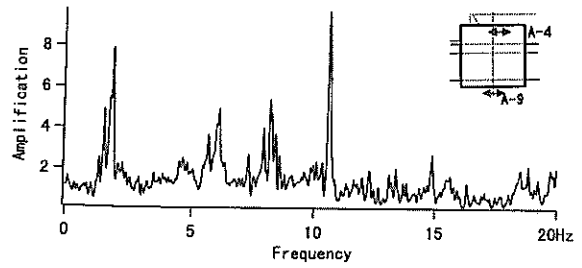
(a) 観測No. 97-1



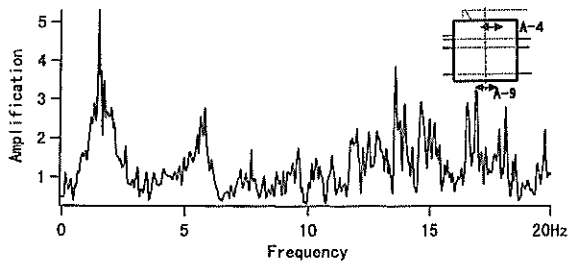
(e) 観測No. 62-1



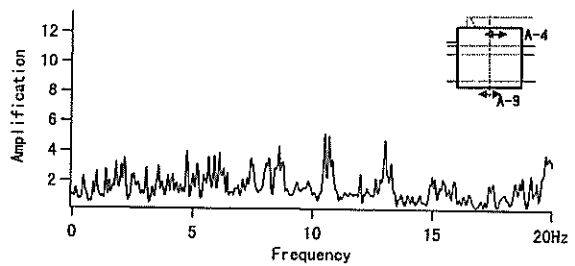
(b) 観測No. 94-3



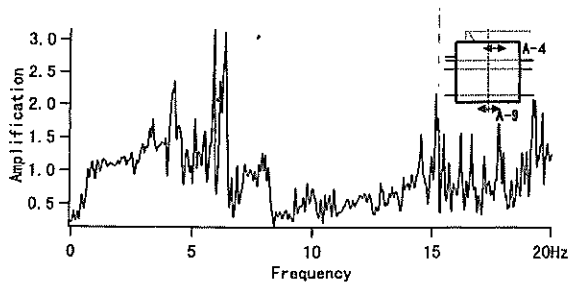
(f) 観測No. 62-2



(c) 観測No. 93-2



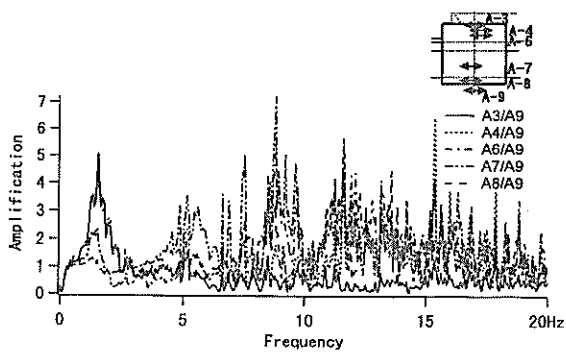
(g) 観測No. 62-3



(d) 観測No. 92-8

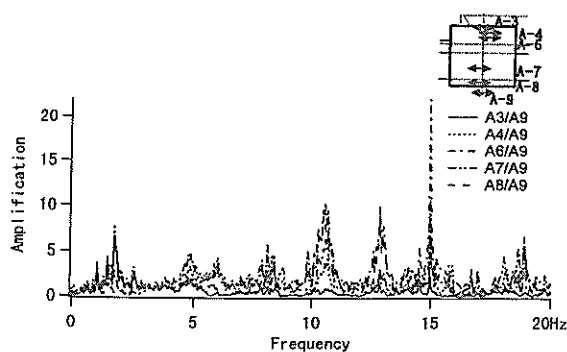
単位：Frequency (Hz)

図-3.5 各地震に対するセル天端の伝達関数(A-4/A-9)



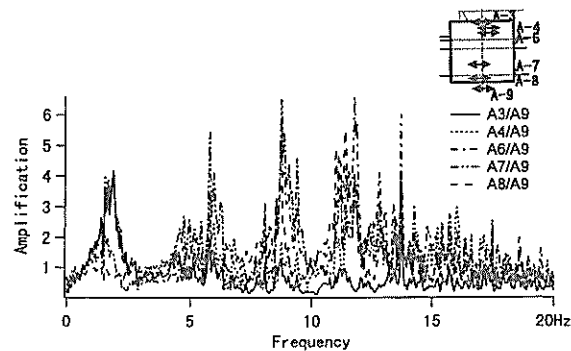
単位：Frequency (Hz)

図-3.6 護岸各部の伝達関数 (観測No. 97-1)



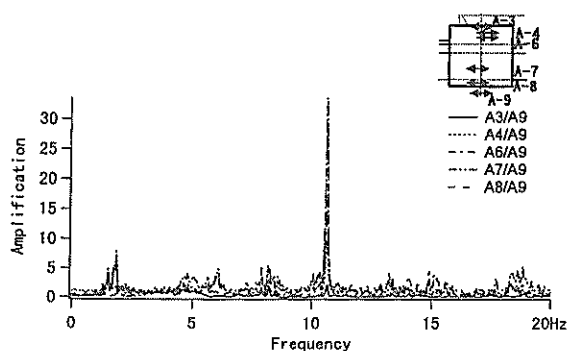
単位：Frequency (Hz)

図-3.10 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-1)



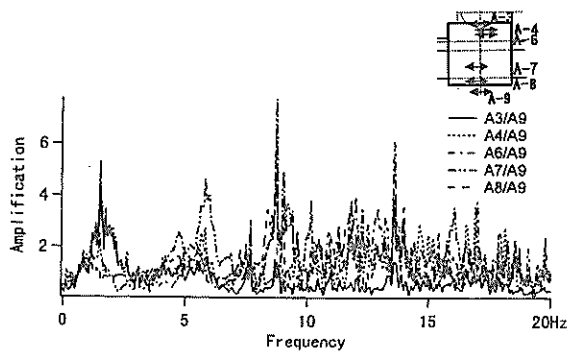
単位：Frequency (Hz)

図-3.7 護岸各部の伝達関数 (観測No. 94-3)



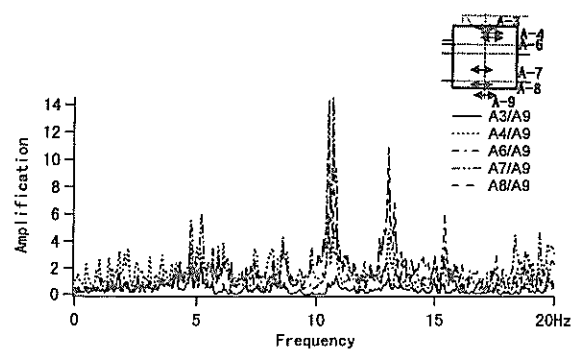
単位：Frequency (Hz)

図-3.11 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-2)



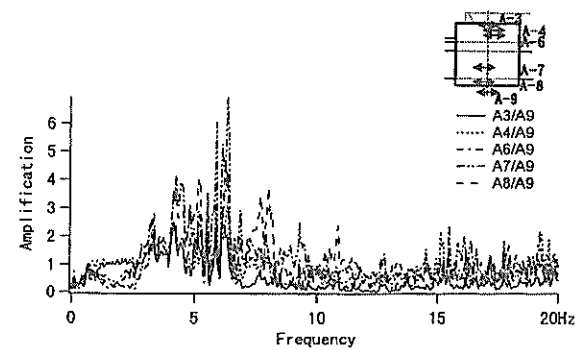
単位：Frequency (Hz)

図-3.8 護岸各部の伝達関数 (観測No. 93-2)



単位：Frequency (Hz)

図-3.12 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-3)



単位：Frequency (Hz)

図-3.9 護岸各部の伝達関数 (観測No. 92-8)

2.0Hz 付近のピーク及び高い応答倍率が見られなかった。この地震記録は高振動数が卓越する直下型地震動であること、最大加速度も基盤 A-9 で 9Gal, 天端 A-4 で 12Gal と小さく、セル本体の振動が卓越しなかったためと推察される。また、観測記録 No.92-8 についても同様に、伝達関数(A-4/A-9)において 2.0Hz 付近のピーク及び高い応答倍率が見られなかった。これは後にも述べるが主要動の卓越方向が観測方向(護岸の横断面方向)と直角だったためセル本体の振動が卓越せず、このようなフラットな伝達関数の形状となったと想定される。

(2) 観測記録 No.92-8 地震波の特性について

観測記録 No.62-3 及び 92-8 を除く他の地震記録において伝達関数のピークがいずれも 2.0Hz 付近に見られ、高さ方向に増幅する一次固有振動数の振動特性を示すのに対して、これらの観測記録は異なる特性を示した。特にセルの一次固有振動数と思われる 2.0Hz 付近でピークが無く、他の観測記録に対する特異性を見せていた観測記録 No.92-8 について検討を行う。図-3.5に伝達関数(A-4/A-9)に関する各地震波毎の比較を示したが、観測記録 No.92-8 の特異性が確認できる。

観測記録 No.92-8 は、愛知県中部(北緯 35° 11'・東経 137° 25')の深さ 56km を震源とする地震の記録で、同様の震源深さの地震の記録と同じく卓越振動数は低いものと思われたが、上述したような結果になっていたためこの点について検討した。ここでは、「港湾地域強震観測年報」⁹⁾において示されている観測記録 No.92-8 地震の他の観測地点の強震観測結果について検討を行う。

「港湾地域強震観測年報」⁹⁾における記録のうち四日市港石炭埠頭構内における構造物(セル型タッチドピア)で観測された記録番号 M-1441 について検討する。図-3.13に四日市港と第二ポートアイランドの位置図、図-3.14に四日市港の加速度記録の NS 及び EW 成分を示す。記録が開始されてから第一波目に大きな振幅の波が両方向とも観測されており、EW 成分に比較して NS 成分の加速度の方が大きい傾向を示す。次に加速度の軌跡を図-3.15に示す。これは記録された水平二成分の真北への補正を行っており、最初の一波目に NS 方向に大きな振幅をもって挙動していた事が確認できる。図-2.1の観測位置図から護岸法線が NS 方向にのびており、ポートアイランド護岸の加速度計の観測方向は EW 方向であったことが分かる。以上の事より、四日市港の強震記録が構造物の上ということもありその挙動の影響を受けている可能性もあるが、第一波目の主要動の卓越する方向が、加速度観測方向と直交する護岸法線方向であったことが確認できた。そのため、主要動付近でセルは

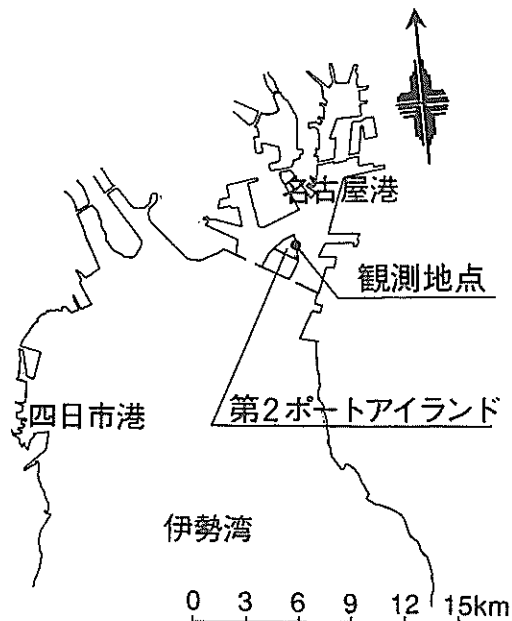


図-3.13 観測位置図

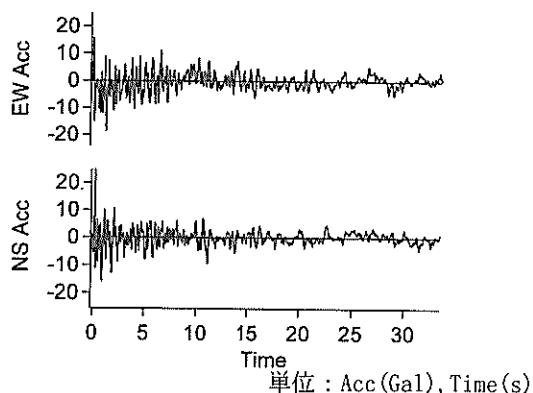


図-3.14 四日市港における加速度記録波形 (記録番号M-1441)

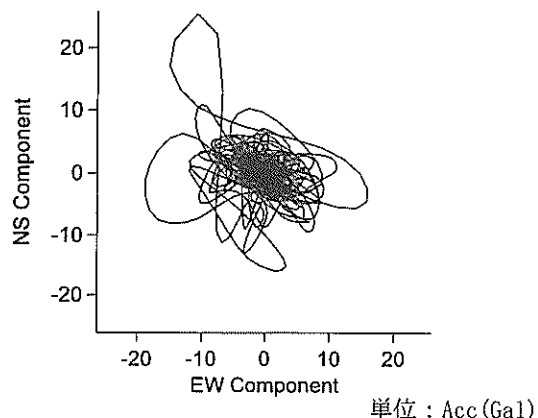


図-3.15 観測加速度軌跡

支持地盤と一体となって挙動し、また、セル体の高さ方向にも(基盤:A-9 とセル天端:A-4 において)同じ挙動

を示していたのではないかと推定される。このことから判断すると、地震観測の通例として断面方向及び法線方向の二方向に対して観測を行う必要性が再確認された。

3.3 セル護岸の地震時挙動

(1) 加速度、土圧及び変位の最大値分布

観測記録波形に基づき各計測点の最大加速度分布を図-3.16に、側壁土圧、中詰土圧及び底面反力の最大値分布を図-3.17に、最大変位分布を図-3.18に示す。これらの図では各波形間の位相差は考慮していない。

図-3.16より、加速度の最大値は高さ方向に必ずしも一様に増幅されていないが、セル上部へいくほど加速

度値が大きくなる傾向が見られる。

図-3.17の側壁土圧の最大値分布は海底面に近いほど大きな値となる逆三角形分布を示す。また砂質土部は、粘性土部より大きな値を示す。一方、埋立側の側壁土圧は、沖積粘性土以深において、埋立前後とも前面の側壁土圧とほぼ同様の分布形状を示している。

底面土圧は観測記録 No.62-1 ~ 62-3 においては、ほぼ矩形分布を示す。これは、最大値発生時刻に縦波が卓越していたためと考えられる。また、観測記録 No.92-8 ~ 97-1 においては、セル中心付近で零に近づく分布を示し、これは地震時のセルの挙動がロッキングであったことを示すと考えられる。

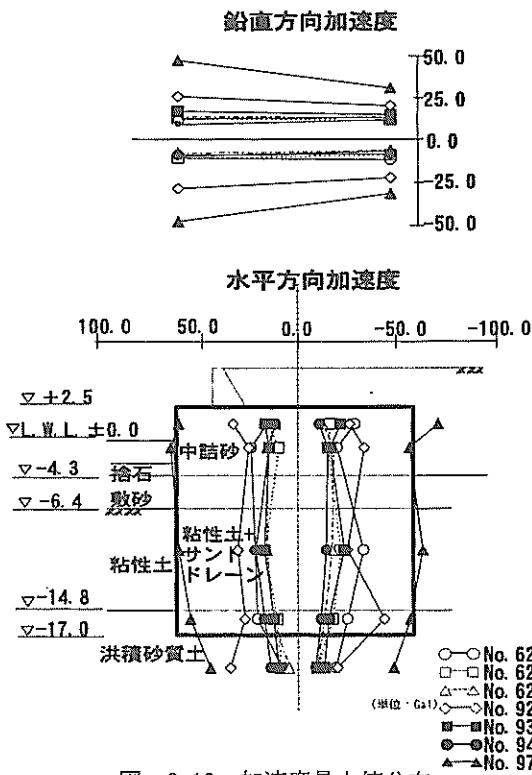


図-3.16 加速度最大値分布

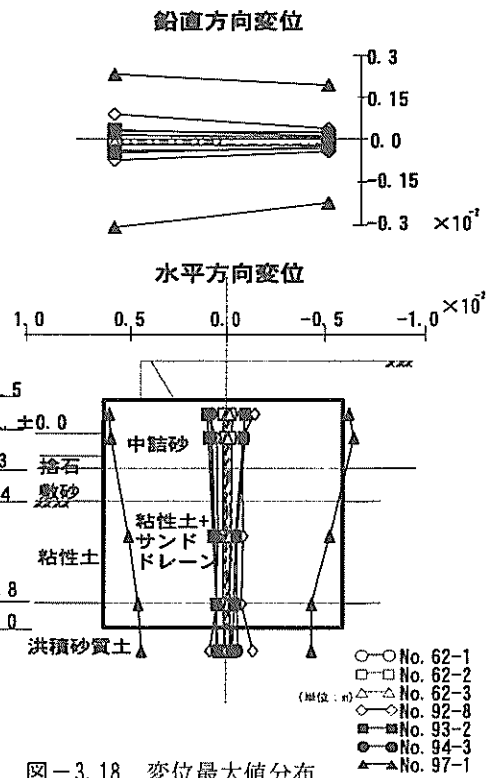


図-3.18 変位最大値分布

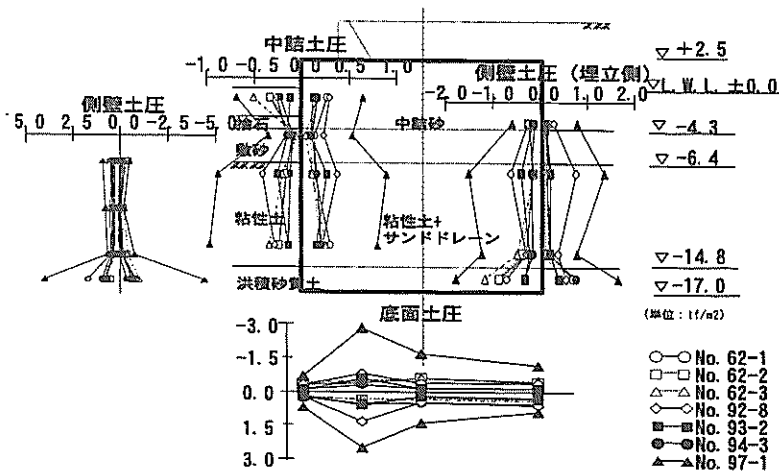


図-3.17 土圧最大値分布

中詰土圧は海底面付近で小さくなることを除けば、ほぼ深さ方向に一定の直線分布に近くなる。

図-3.18によれば変位の最大値分布は、観測記録 No.62-1 ~ 62-3 においてほぼ一樣な分布となっている。一方、観測記録 No.92-8 ~ 97-1 においては、天端に向かうにつれ大きくなっており、この地震によるセルの振動挙動は根入れ下端を中心としたロッキングであったと想定される。また、変位の最大値は加速度の最大値に応じて大きくなっている。

(2) 同一時刻における加速度、土圧及び変位分布

各地震について、地震の主要動におけるある瞬間での各測点の加速度、土圧及び変位の分布を図-3.19~3.45に示す。各測点は、それぞれ異なった時刻で最大値を示すが、この各測点の最大値を示すいくつかの時刻について分布図を作成した。また、観測記録 No.62-1 ~ 62-3 では、最大値が縦振動卓越時に発生していたため、縦振動卓越時以外での振動特性を検討するために、縦波振動卓越時以外で各測点が最大値を示すいくつかの時刻における同一時刻分布図を別途作成した。

図-3.19より観測記録 No.97-1 では低振動数が卓越するため加速度分布は、天端へいくほど大きくなる1次の加速度モードの分布である。図-3.20~3.28では加速度の高さ方向分布は一樣ではなく根入れ部を境として位相が逆転した振動モードの加速度分布を示す。

セル天端の鉛直方向加速度 A-1, A-2 は加速度値がほぼ等しく符号が逆転していることが分かる。また、同一高さの加速度測点である A-5 と A-6 は明確な傾向を示していないので、高振動成分の影響をうけ、中詰土は複

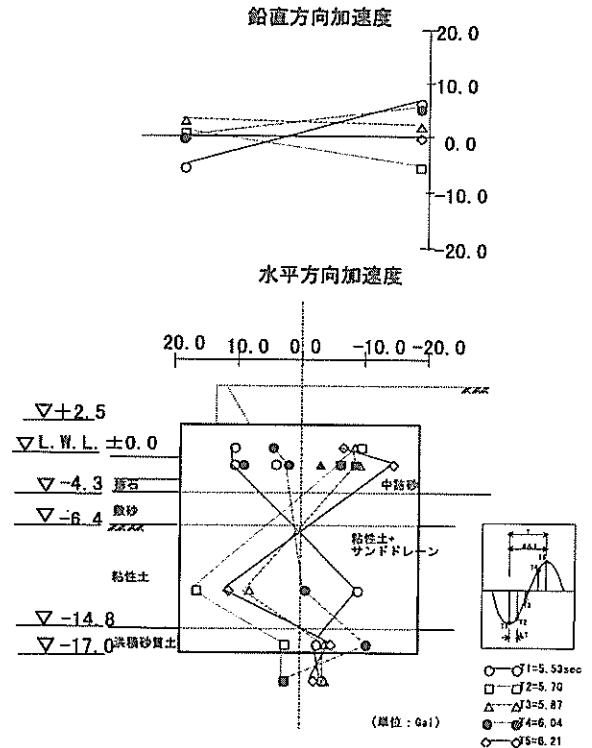


図-3.20 同一時刻における加速度分布 (観測No. 94-3)

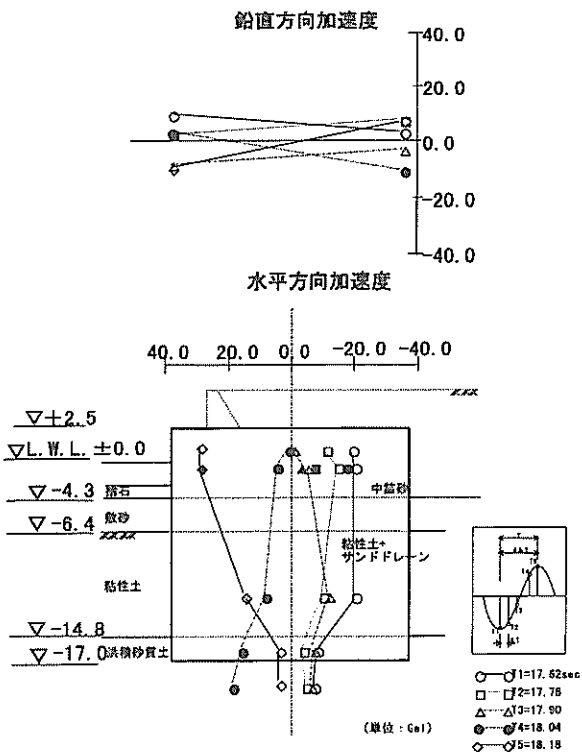


図-3.19 同一時刻における加速度分布 (観測No.97-1)

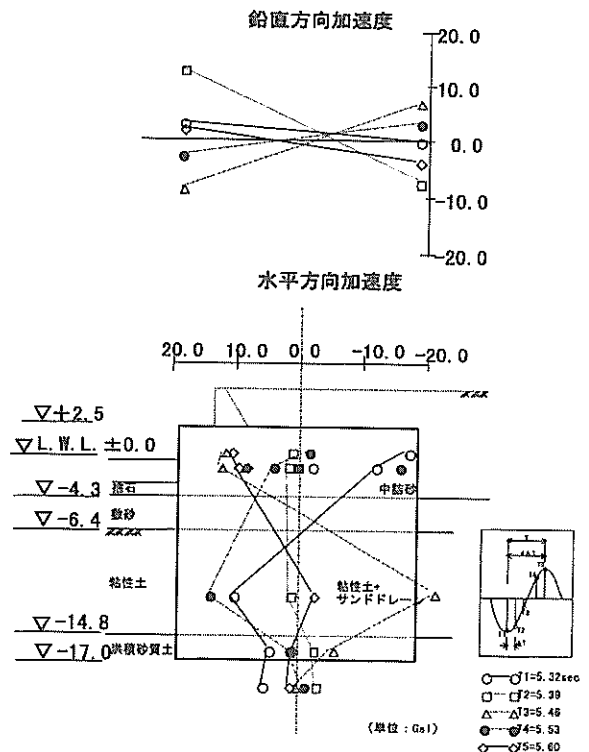


図-3.21 同一時刻における加速度分布 (観測No.93-2)

雑な挙動を示していると想定される。ただし、観測記録 No.97-1 では、両者はほぼ近い値を示し、中詰土はセルと一体となって挙動していたと想定される。

図-3.29~3.35より側壁土圧は海底面付近で大きな

値を示す逆三角形分布を示す。また、砂質土の土圧値は粘性土のそれよりも大きくなっている。埋立側側壁土圧の分布は、観測記録 No.62-1 ~ 62-3(埋土なし)においては、前面の側壁土圧と同様の逆三角形分布を示す。一方、

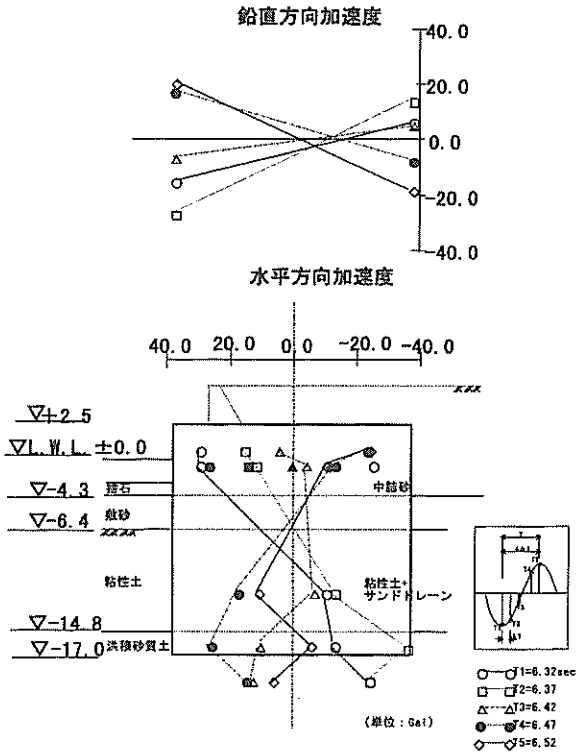


図-3.22 同一時刻における加速度分布 (観測No. 92-8)

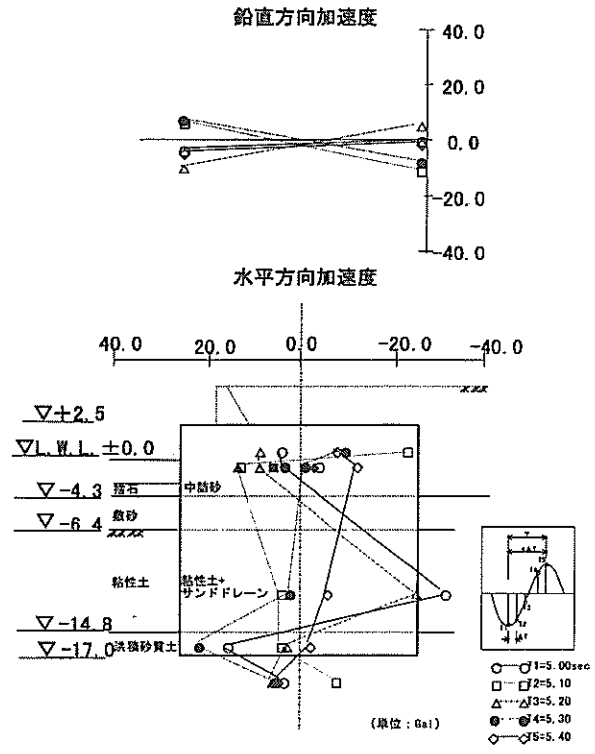


図-3.23 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-1)

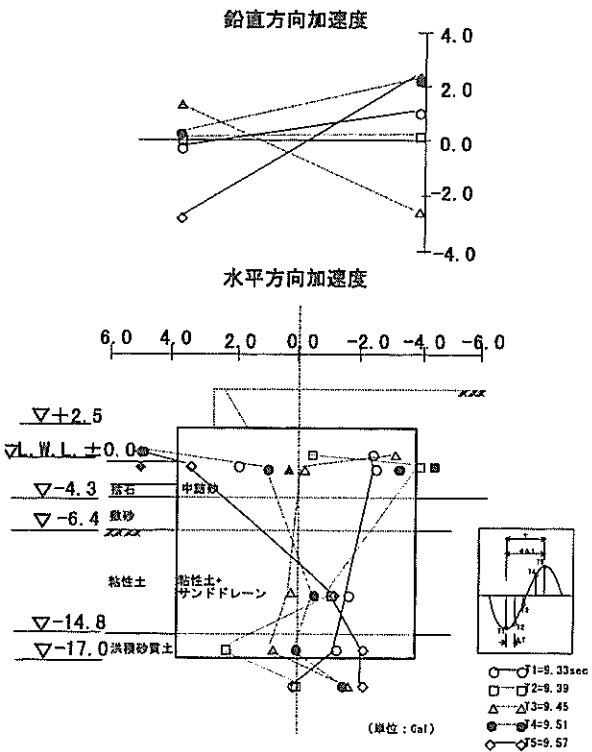


図-3.24 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-1)

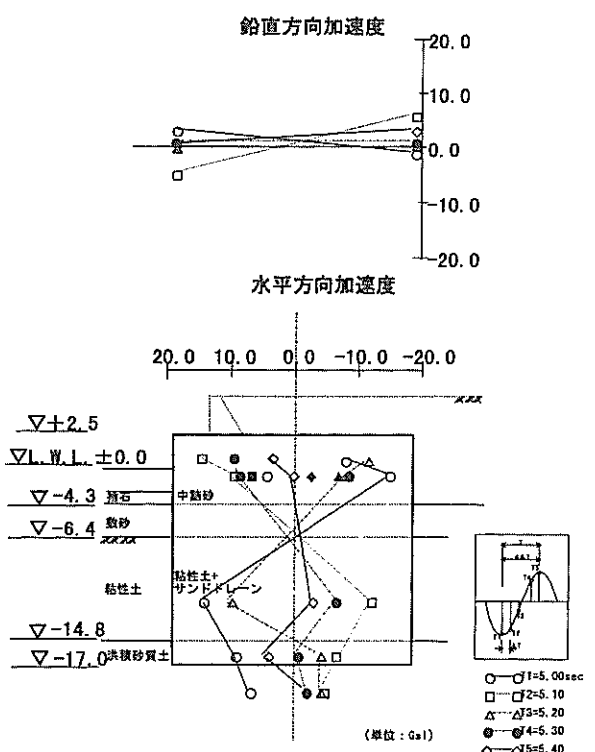


図-3.25 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-2)

観測記録 No.92-8 ~ 97-1 においては、埋土内で小さな値を示すが、粘性土以深は前面側壁土圧の分布と同様の形状である。一方、底面反力分布では前し位置の符号に逆転が見られる。

図-3.36~3.45より観測記録 No.62-1, 62-2 の最大値付近の時刻の変位分布と 62-3 の変位分布を除いた同一時刻の変位分布は、天端から根入れ部下端までほぼ一直線で表せるロッキング振動によるものと考えられる。

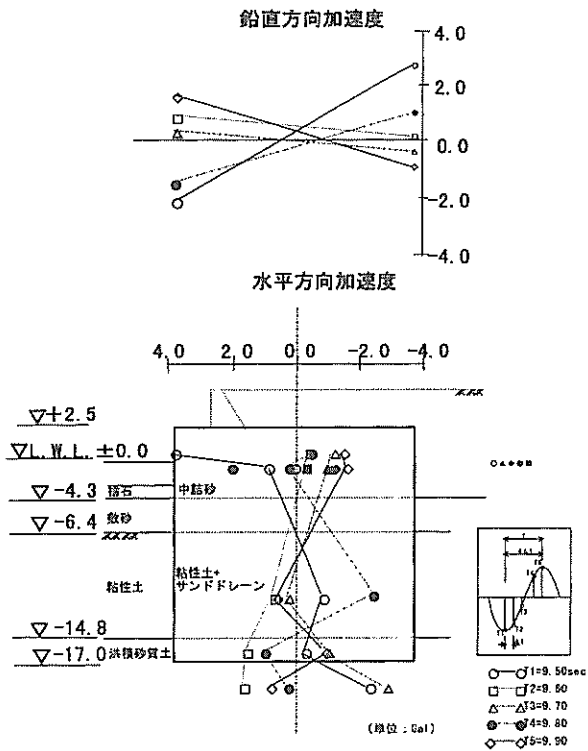


図-3.26 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-2)

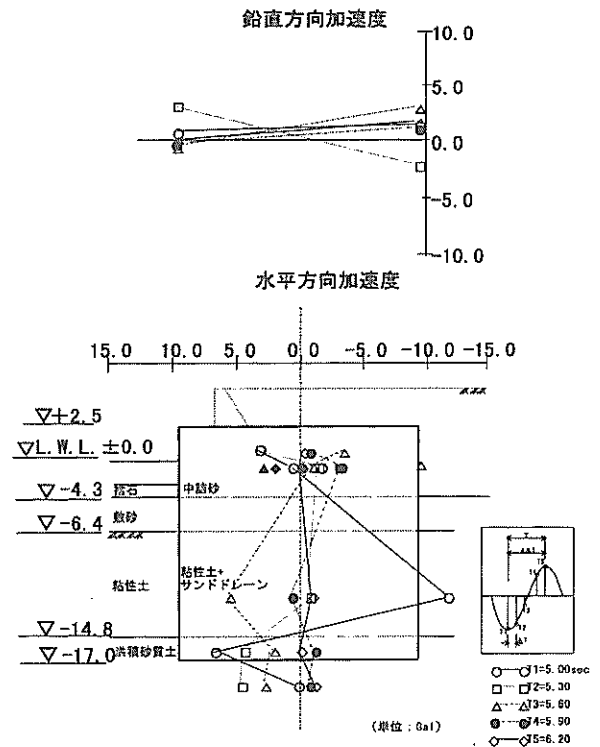


図-3.27 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-3)

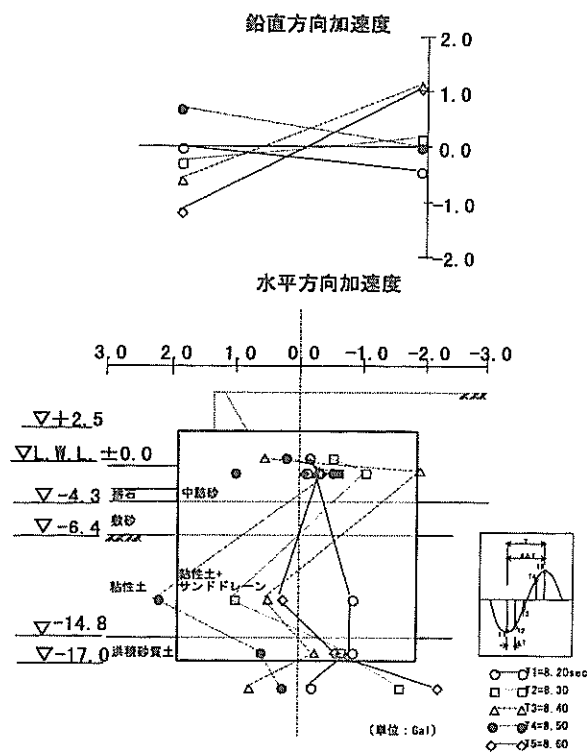


図-3.28 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-3)

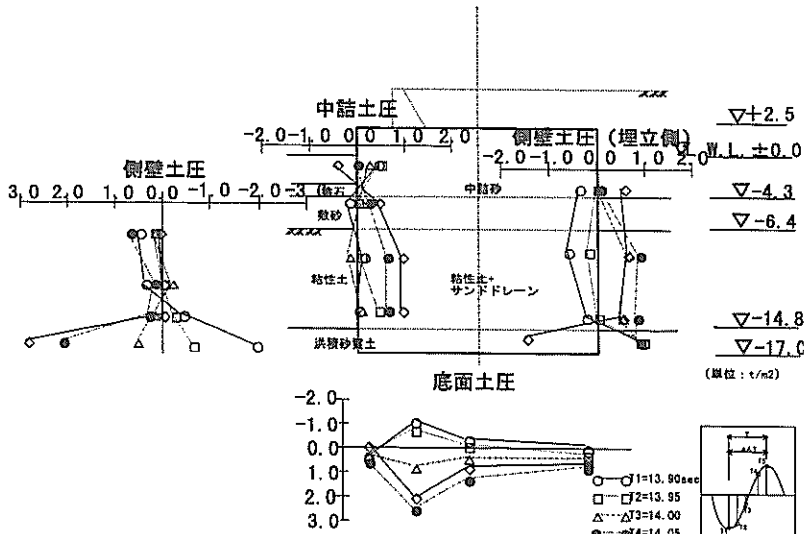


図-3.29 同一時刻における土圧分布 (観測No. 97-1)

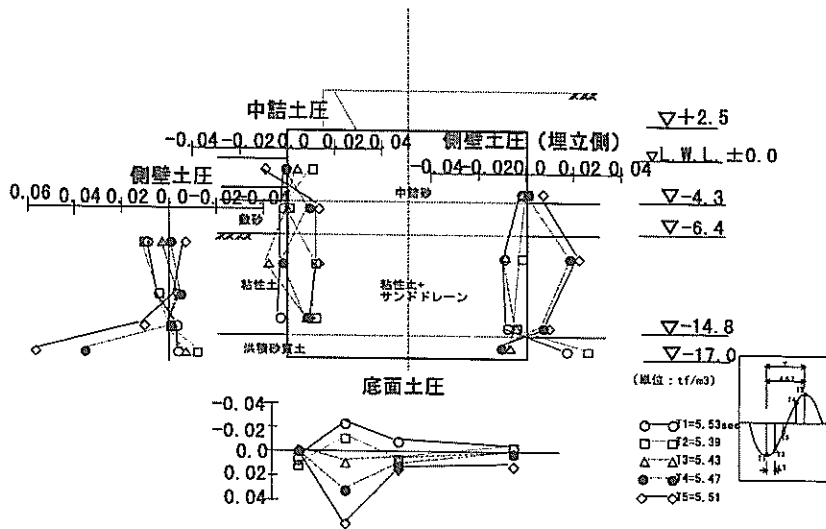


図-3.30 同一時刻における土圧分布 (観測No. 94-3)

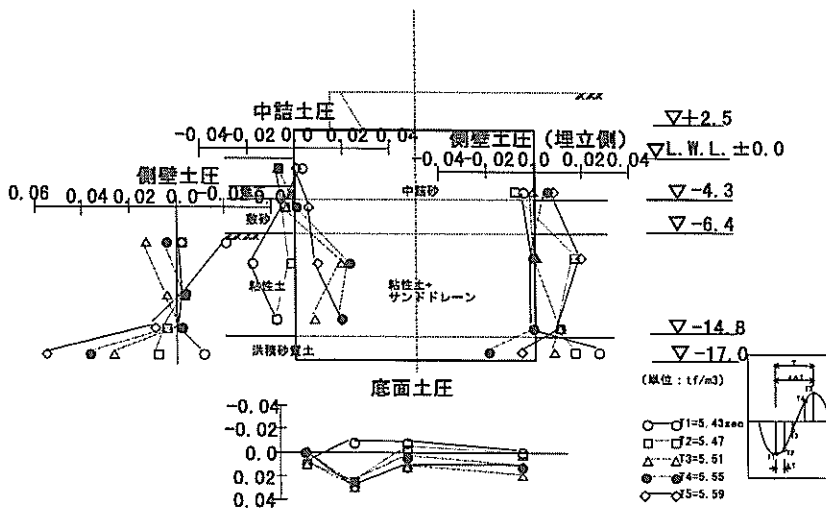


図-3.31 同一時刻における土圧分布 (観測No. 93-2)

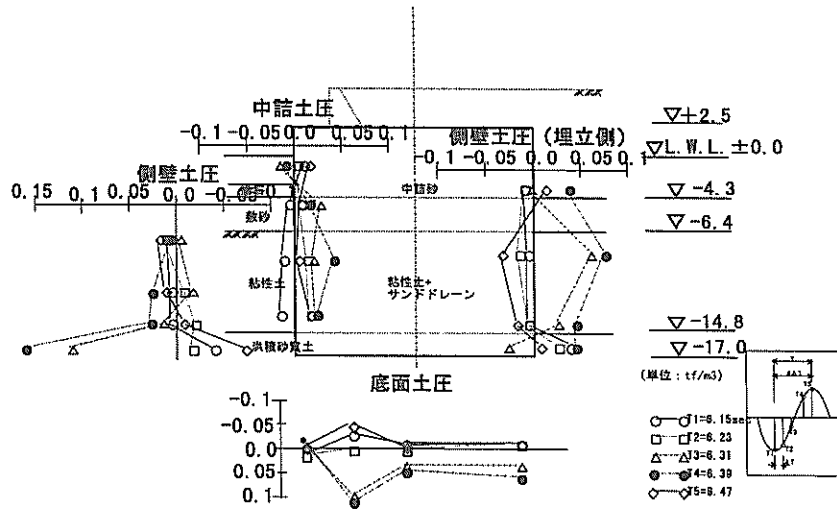


図-3.32 同一時刻における土圧分布 (観測No. 92-8)

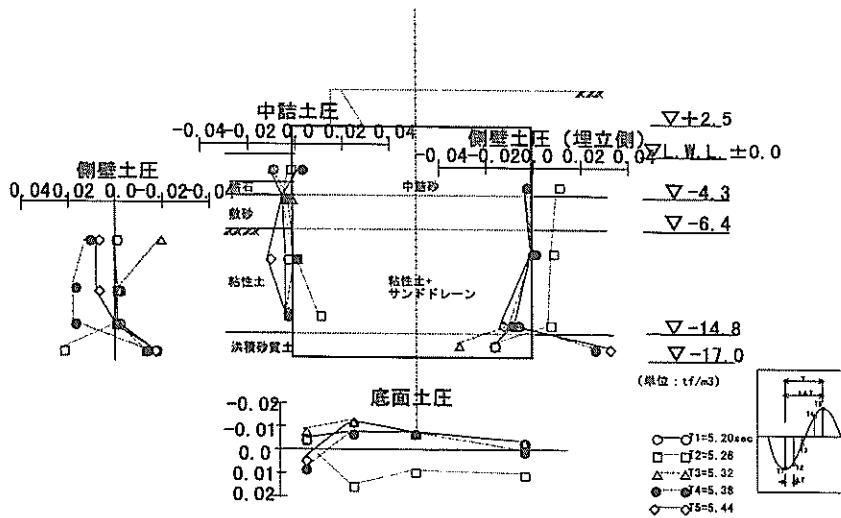


図-3.33 同一時刻における土圧分布 (観測No. 62-1)

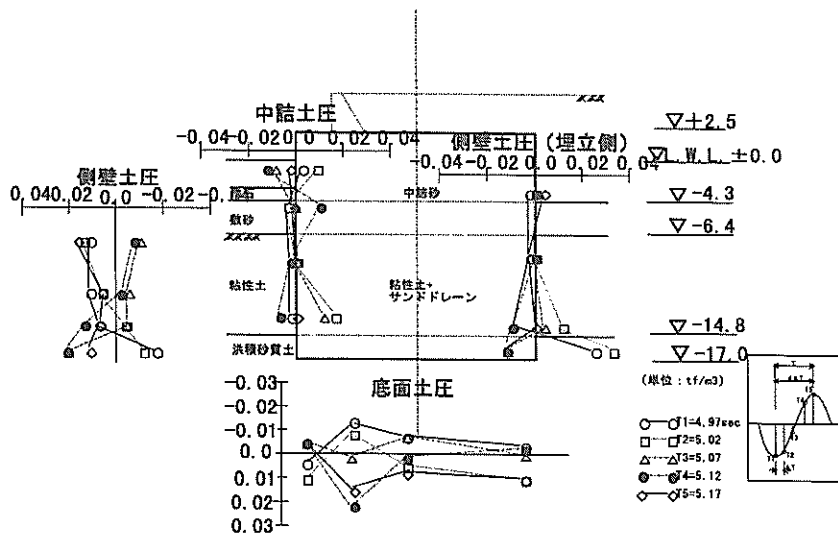


図-3.34 同一時刻における土圧分布 (観測No. 62-2)

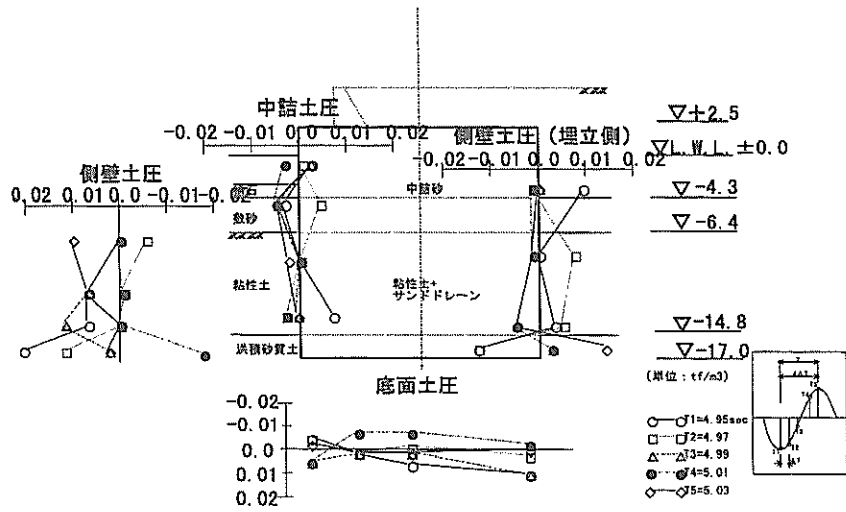


図-3.35 同一時刻における土圧分布 (観測No. 62-3)

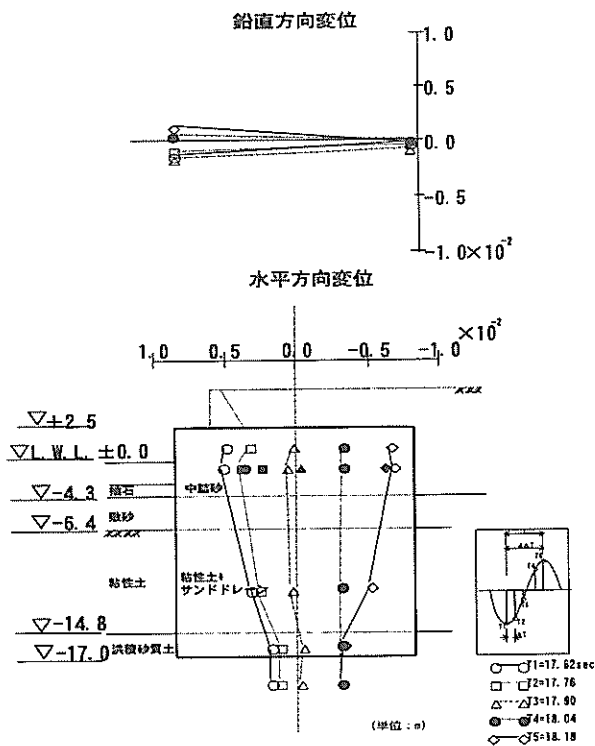


図-3.36 同一時刻における変位分布 (観測No. 97-1)

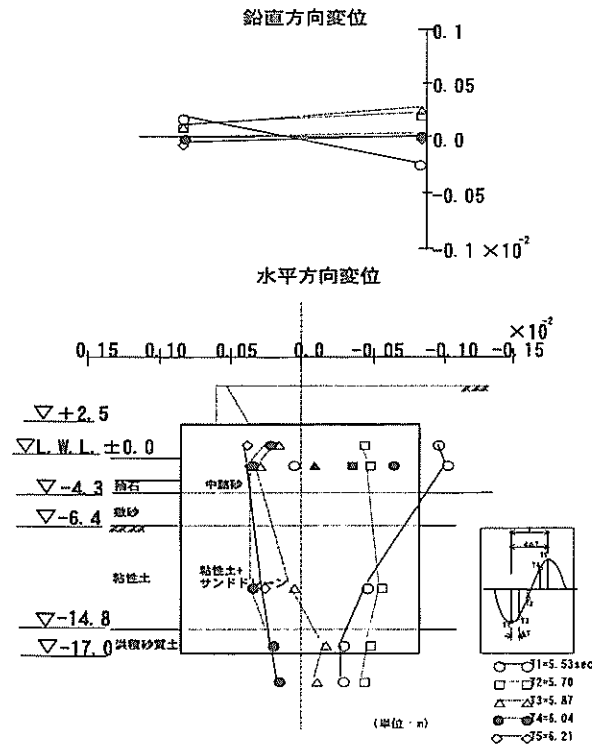


図-3.37 同一時刻における変位分布 (観測No. 94-3)

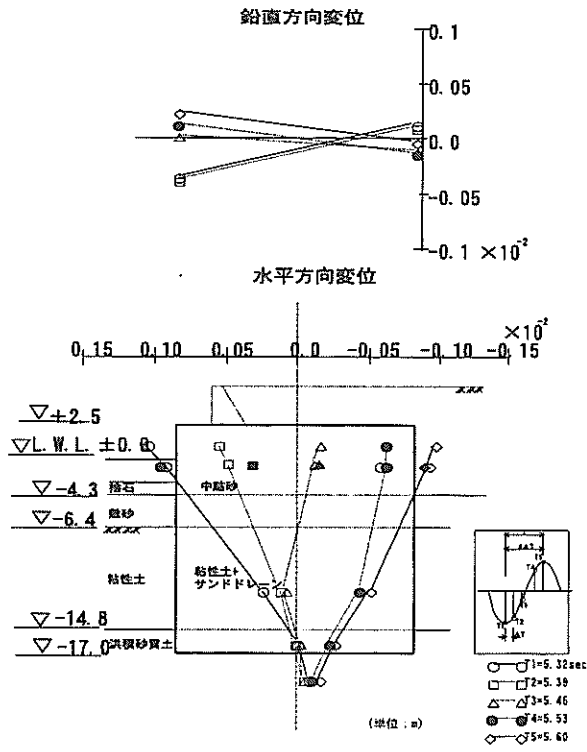


図-3.38 同一時刻における変位分布
(観測No. 93-2)

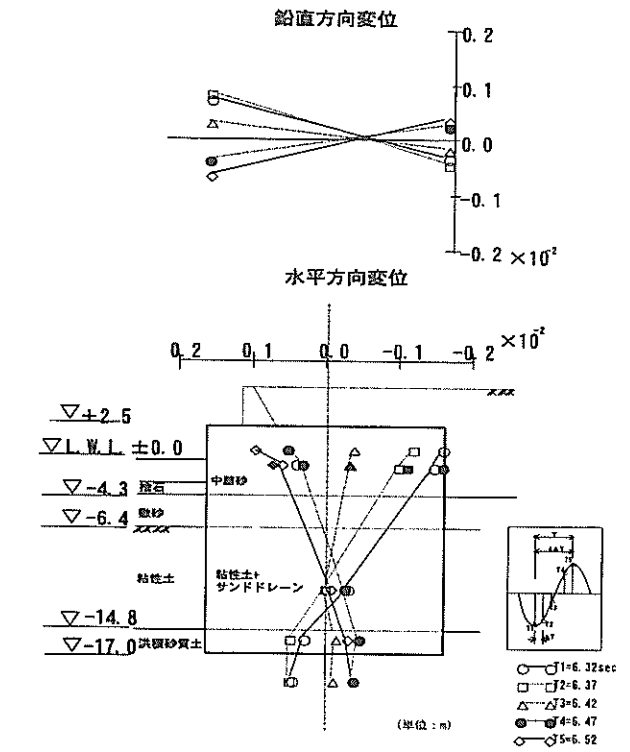


図-3.39 同一時刻における変位分布
(観測No. 92-8)

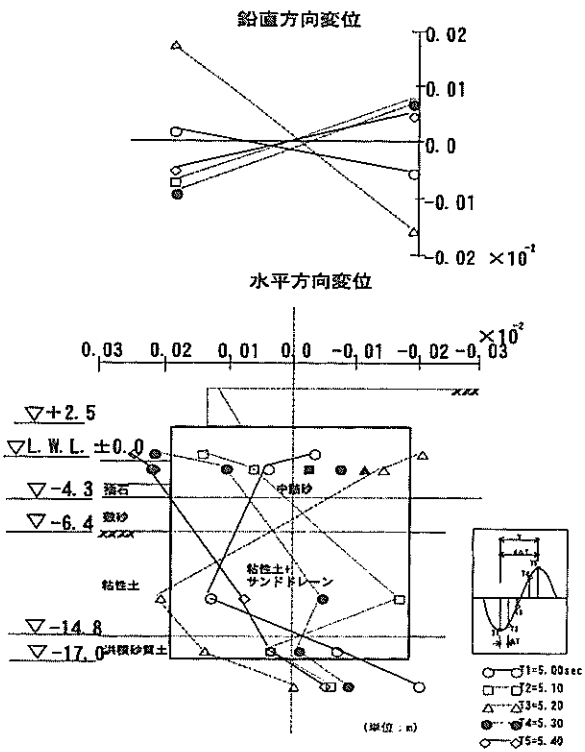


図-3.40 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-1)

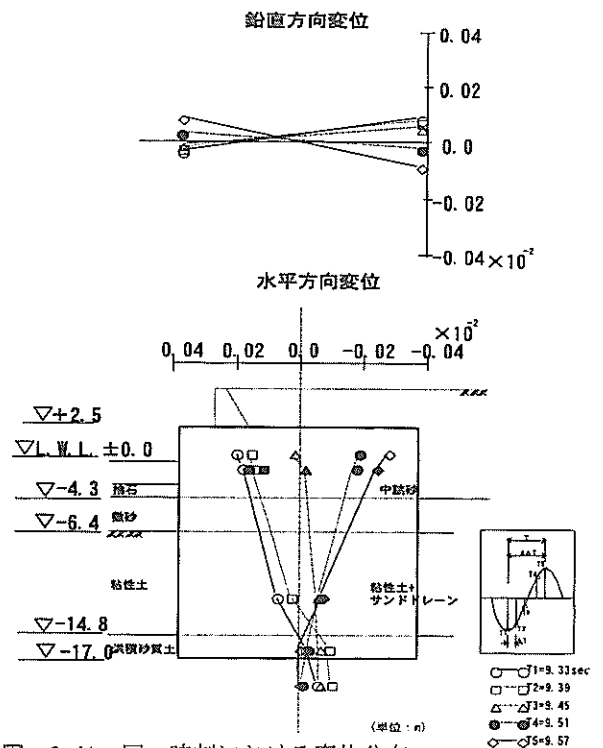


図-3.41 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-1)

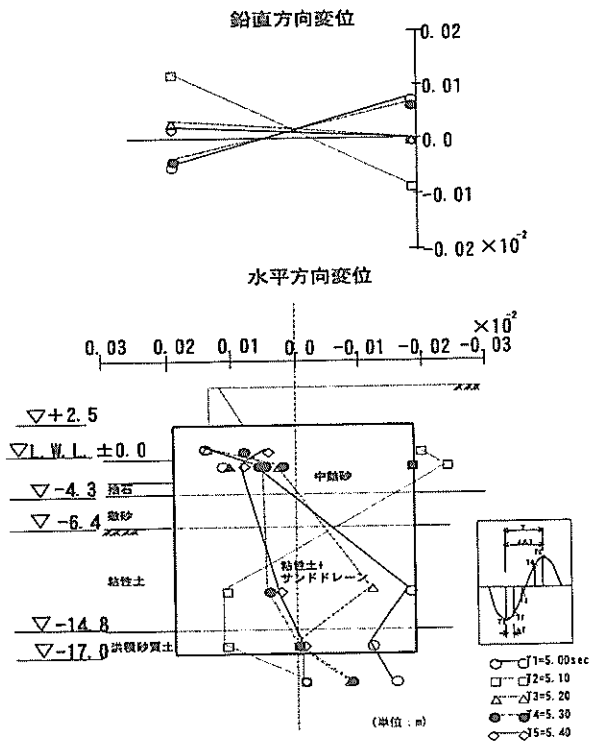


図-3.42 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-2)

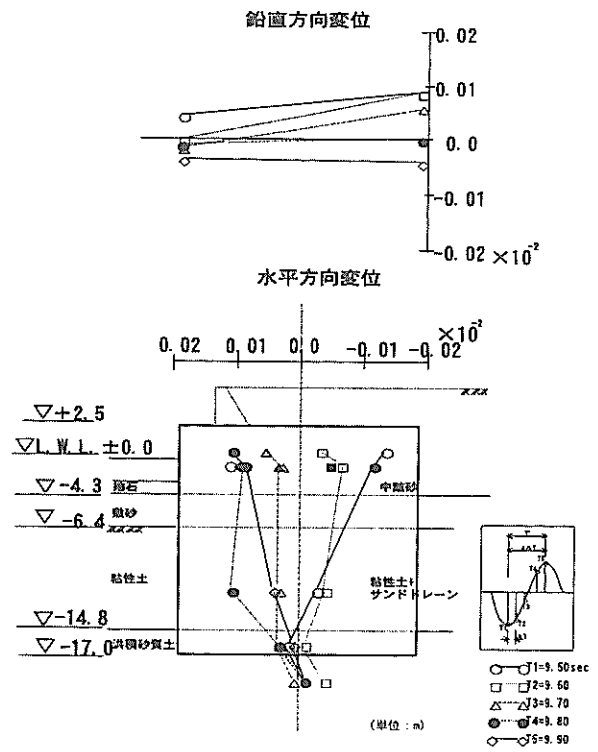


図-3.43 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-2)

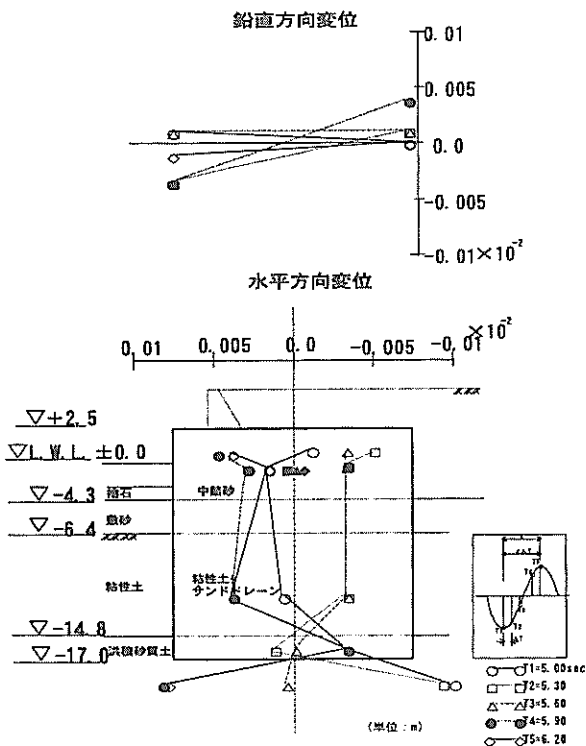


図-3.44 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-3)

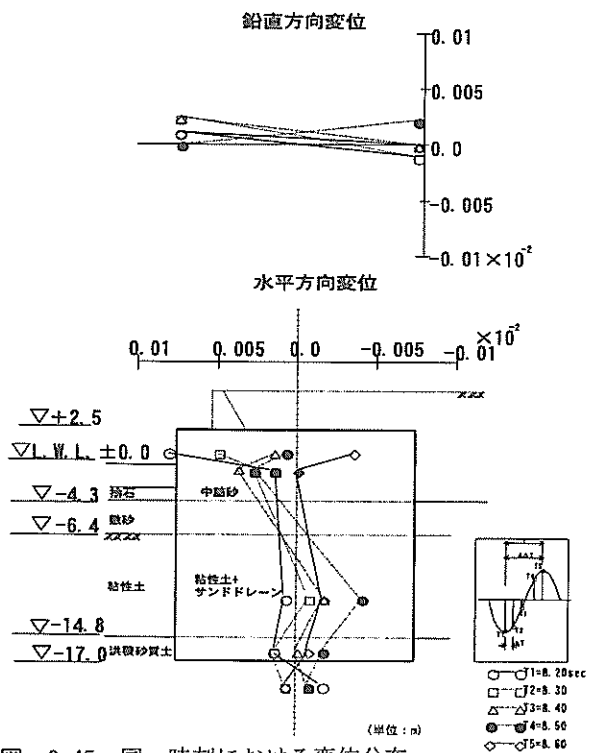


図-3.45 同一時刻における変位分布
(観測No. 62-3)

4. 有限要素法による地震応答解析

根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動を表現できる解析手法の妥当性を検証するため、有限要素法による解析結果と観測結果との比較を行う。解析は当所所有の等価線形計算プログラム"BEAD III"を用いた。

4. 1 解析条件

(1) 解析範囲及び境界条件

解析範囲は、水平方向境界の影響を受けないように陸側、海側それぞれ 65m 程度、また深さ方向については、A-9 加速度の設置されていた -20.0m までとする。なお、-22.5 ~ -40.0 m は、洪積砂層であり、剛性の極端な変化も考えられないことから -20.0m 以深は様な基盤面とした。

境界条件は底面は固定境界とし、側方は両端とも自由境界を用いることとした。

解析モデルを図-4.1に示す。

(2) 材料物性値

各種の土質定数は、昭和 61 年度のボーリング結果を基にして、セル中詰土・セル直下の地盤については、PS 検層の結果を、その他については N 値及び一軸圧縮強度 q_u からの換算値を用いた。

a) せん断弾性係数 G_0

PS 検層が実施されているセル中詰土、セル直下の地盤については、以下の式で計算する。

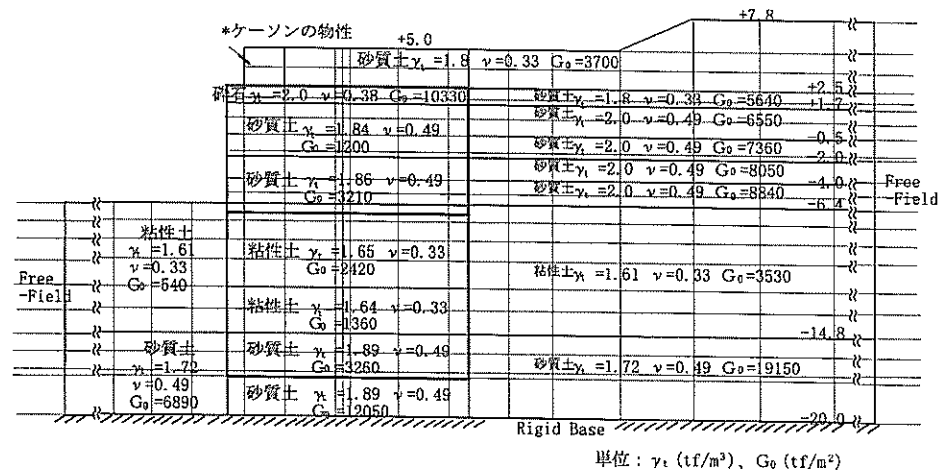
$$G_0 = V_s^2 \frac{\gamma_t}{g} \dots \dots \dots (4.1)$$

ここ G_0 : 微小ひずみ時のせん断弾性係数 (tf/m²)
 V_s : せん断波速度 (m/s)
 γ_t : 土の単位体積重量 (tf/m³)
 g : 重力加速度 (m/s²)

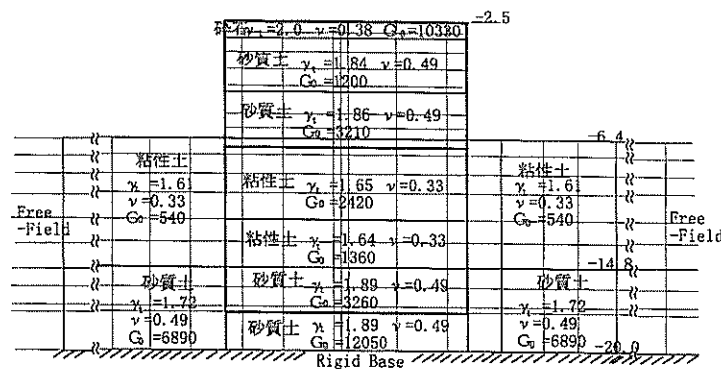
それ以外は、 N 値及び一軸圧縮強度 q_u から以下の式を用いて求める。

$$G_0 = 1440 N^{0.680} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$G_0 = 170 q_u \dots \dots \dots (4.3)$$



(a) 護岸形状



(b) 防波堤形状

図-4.1 解析モデル (境界条件・物性値)

ここに、

G_0 : 微小ひずみ時のせん断弾性係数 (tf/m²)

q_u : 一軸圧縮強度 (tf/m²)

また、埋立が開始されてからのボ-リングデータがないことより、埋立土の物性については「液状化ハンドブック」⁶⁾を参考にし以下の式にて算定を行った。

$$G_0 = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m'^{0.5} \dots\dots\dots (4.4)$$

ここに、 G_0 : 微小ひずみ時のせん断弾性係数 (tf/m²)

e : 間隙比

$$\sigma_m' = \frac{(1+2K_0)}{3} \sigma_v' \quad (\sigma_m' \sigma_v': \text{kgf/cm}^2)$$

同様に埋立て直下の地盤についても、有効上載圧増加による補正からせん断波速度 V_s の算定を行い、せん断弾性係数 G_0 に反映させた。この補正時の V_s の算定については以下の式を用いた。

$$V_s = V_{s0} \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right)^B \dots\dots\dots (4.5)$$

ここに、 V_s : 施工後のせん断波速度 (m/s)

V_{s0} : 施工前のせん断波速度 (m/s)

σ_v' : 施工後の有効上載圧 (tf/m²)

σ_{v0}' : 施工前の有効上載圧 (tf/m²)

B : 砂質土の場合は0.25, 粘性土の場合は0.5

せん断弾性係数の設定値を表-4.1に示す。

b) 単位体積重量 γ 、

各材料の単位体積重量を表-4.1に示す。

c) ボ-アソン比 ν

等価線形計算による全応力解析を行うことから、残留水位以下の砂質土については土と水が一体の要素であるとしてボ-アソン比 0.5 (=0.49) を用いる。また、残留水位以上の砂質土及び粘性土については 0.33, 砕石 0.38, ケーソン 0.167 とした。

d) 土のひずみ依存性

土の非線形性を導入するため土のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存曲線を図-4.2の様に設定した。⁶⁾

(3) セルのモデル化及び鋼材物性値

セル殻及び中詰土の挙動を把握するために、セルに見

表-4.1 土の物性値

護岸前面					
土層	深度 (m)	湿潤単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	せん断弾性係数 G_0 (tf/m ²)	ボ-アソン比 ν	ひずみ依存性
沖積粘性土 A c	-6.4 ~ -14.8	1.61 (*1)	540 ($q_u=3.2$ tf/m ²)	(*1)	0.33 粘性土
洪積砂質土 D s	-14.8 ~ -20.0	1.72 (*2)	6890 (N 値=10)	(*3)	0.49 砂質土
セル内及び直下					
土層	深度 (m)	湿潤単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	せん断弾性係数 G_0 (tf/m ²)	ボ-アソン比 ν	ひずみ依存性
埋立土 B	+5.0 ~ +2.5	1.8 (*4)	3700 ($\sigma_m'=0.15$ kgf/cm ²)	(*5)	0.33 砂質土
中詰石	+2.5 ~ +1.7	2 (*6)	10330 ($V_s=225$ m/s)	(*7)	0.38 砕石
中詰土 B	+1.7 ~ -2.0	1.84 (*8)	1200 ($V_s=80$ m/s)	(*9)	0.49 砂質土
中詰土 B	-2.0 ~ -6.4	1.86 (*8)	3210 ($V_s=130$ m/s)	(*9)	0.49 砂質土
沖積粘性土 A c	-6.4 ~ -12.0	1.65 (*10)	2420 ($V_s=120$ m/s)	(*9)	0.33 粘性土
沖積粘性土 A c	-12.0 ~ -14.8	1.64 (*10)	1360 ($V_s=90$ m/s)	(*9)	0.33 粘性土
洪積砂質土 D s	-14.8 ~ -17.5	1.89 (*11)	3260 ($V_s=130$ m/s)	(*9)	0.49 粘性土
洪積砂質土 D s	-17.5 ~ -20.0	1.89 (*11)	12050 ($V_s=250$ m/s)	(*9)	0.49 粘性土
護岸背後					
土層	深度 (m)	湿潤単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	せん断弾性係数 G_0 (tf/m ²)	ボ-アソン比 ν	ひずみ依存性
埋立土 B	+7.8 ~ +5.0	1.8 (*4)	3700 ($\sigma_m'=0.15$ kgf/cm ²)	(*5)	0.33 砂質土
埋立土 B	+5.0 ~ +2.5	1.8 (*4)	3700 ($\sigma_m'=0.15$ kgf/cm ²)	(*5)	0.33 砂質土
埋立土 B	+2.5 ~ +1.7	1.8 (*4)	5640 ($\sigma_m'=0.348$ kgf/cm ²)	(*5)	0.33 砂質土
埋立土 B	+1.7 ~ -0.5	2 (*4)	6550 ($\sigma_m'=0.469$ kgf/cm ²)	(*5)	0.49 砂質土
埋立土 B	-0.5 ~ -2.0	2 (*4)	7360 ($\sigma_m'=0.593$ kgf/cm ²)	(*5)	0.49 砂質土
埋立土 B	-2.0 ~ -4.0	2 (*4)	8050 ($\sigma_m'=0.709$ kgf/cm ²)	(*5)	0.49 砂質土
埋立土 B	-4.0 ~ -6.4	2 (*4)	8840 ($\sigma_m'=0.856$ kgf/cm ²)	(*5)	0.49 砂質土
沖積粘性土 A c	-6.4 ~ -14.8	1.61 (*1)	3530 ($V_s=146.484$ m/s)	(*12)	0.33 粘性土
洪積砂質土 D s	-14.8 ~ -20.0	1.72 (*2)	19150 ($V_s=330.297$ m/s)	(*12)	0.49 砂質土

(*1) S61年度ボ-リング No2 A c 層の平均値
 (*2) S61年度ボ-リング No2 D s 層の値
 (*3) S61年度ボ-リング No2 D s 層の最小値を平均したものと (*9) S61年度ボ-リング No1 の PS 検層
 (*4) 「液状化ハンドブック」砂質土より (*10) S61年度ボ-リング No1 A c 層の平均値
 (*5) 有効土被圧より算定。含水比20%、間隙比0.767。 (*11) S61年度ボ-リング No1 D s 層の値
 (*6) 「液状化ハンドブック」捨石裏込めより (*12) S61年度ボ-リング No2 を基に有効土被圧より算定
 (*7) 「液状化ハンドブック」裏込めせん断波速度より
 (*8) S61年度ボ-リング No1 B 層の値

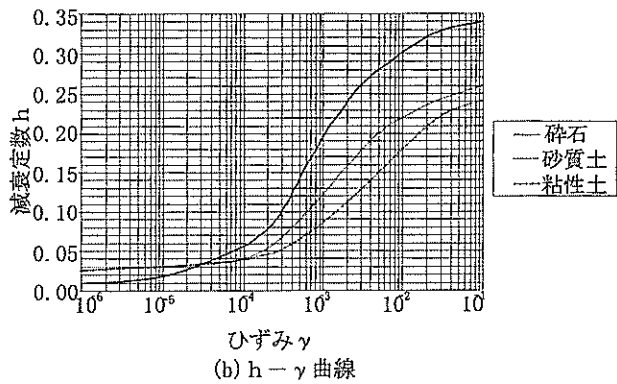
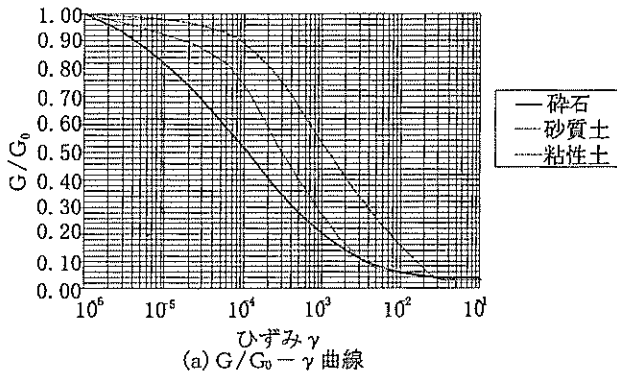


図-4.2 $G/G_0 - \gamma$, $h - \gamma$ 曲線

立てた梁部材で土要素を挟み、側壁同士が一体となって挙動するよう大きな剛性を持つ仮想梁で水平方向につないだ。セルのモデル化を図-4.3に示す。

a)セルのモデル化

セル殻をモデル化した梁部材の(図-4.3の仮想梁(1))剛性に関しては「セル殻+アーク鋼板のセル中心軸回りの単位奥行き当たり剛性」の1/2の剛性を与えた。また、その断面積は、「セル殻+アーク鋼板の単位奥行き当たり断面積」の1/2と等しい断面積を与えた。

図-4.3の仮想梁(1)を水平方向につなぐ仮想梁(2)には、大きな剛性を与え仮想梁が一体になって挙動するようにした。解析上、土要素と節点は共有させなかった。

b)鋼材物性値

セル殻等の鋼材物性値を表-4.2に示す。

c)セルのモデル化にあたって

上記の様な仮定のもとセルをモデル化し解析を行ったが、セル殻の剛性については、その値を変化させ計算し、その結果と観測値との一致度が最も良いものを仮定することとした。この比較結果によれば、当初仮定の1/100 ~ 1/10000にまで剛性を落とすことで結果との一致度が高いことが確認された。一例として観測記録 No.97-1 についてセル殻の剛性を1/1 ~ 1/10000まで変化させた結果を図-4.4に示す。今回のような加速度レベルの小さい

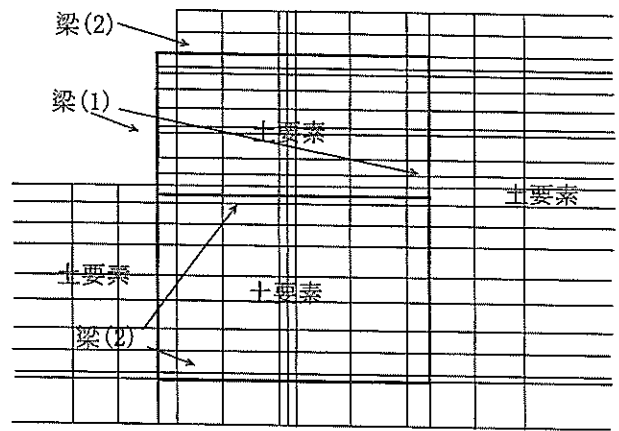


図-4.3 セルのモデル化

表-4.2 鋼材の物性

1本当たり

ヤング係数(tf/m ²)	21000000
単位体積重量(tf/m ³)	7.85
アーク外径(m)	11.940
アーク内径(m)	11.922
アーク肉厚(m)	0.009
アーク角度(°)	100.000
アーク断面積(m ²)	0.1874117
アーク断面二次モーメント(m ⁴) (セル中心軸に関する)	7.2463895
1/2断面分	
杭外径(m)	20.000
杭内径(m)	19.980
鋼管肉厚(m)	0.010
ヤング係数(tf/m ²)	21000000
鋼管断面積(m ²)	0.6280044
鋼管断面二次モーメント(m ⁴)	31.3688341

単位奥行き当たり

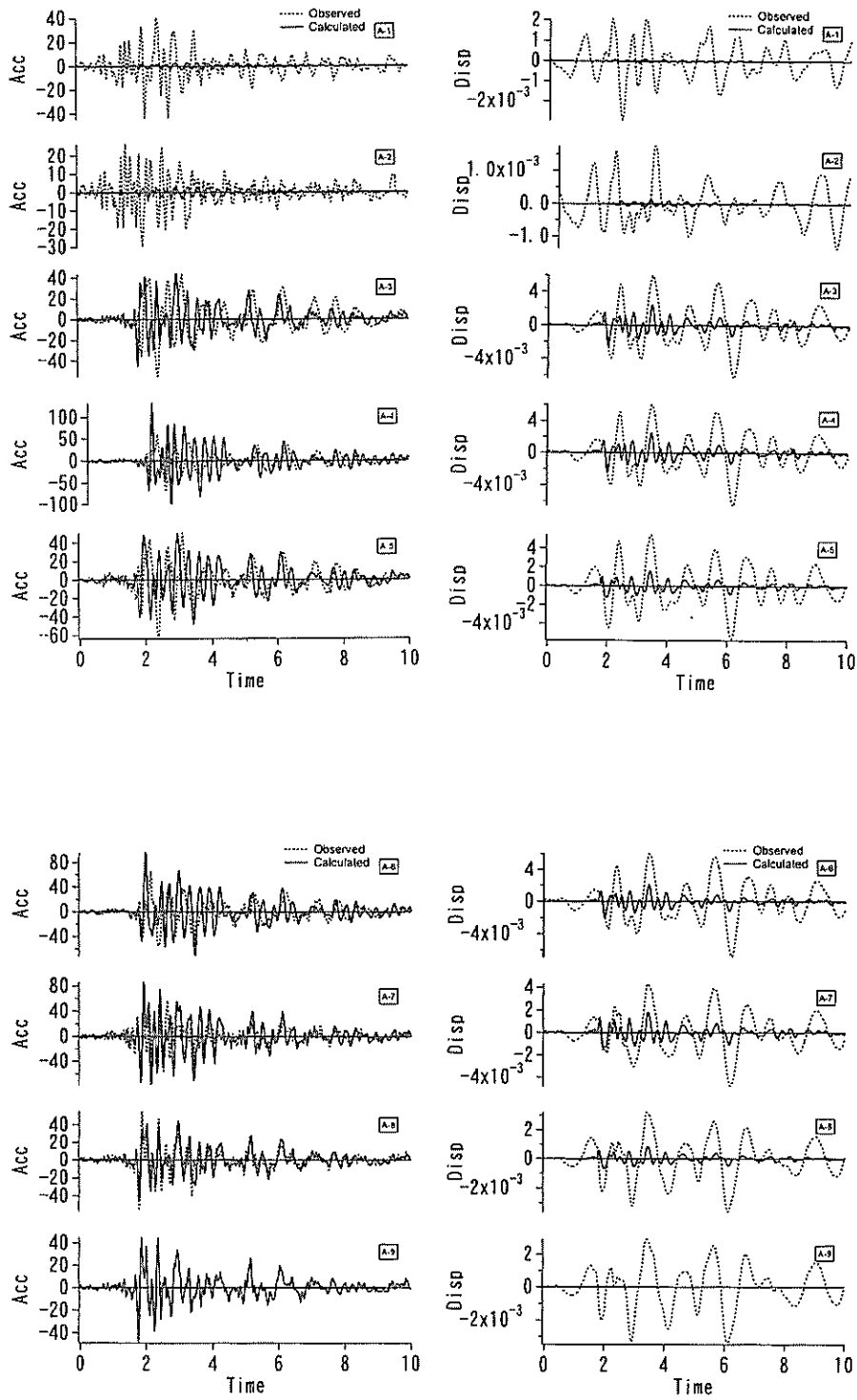
	全断面分	1/2断面分
密度(tf/m ³)	7.850	
ポアゾン比	0.280	
せん断弾性係数(tf/m ²)	8203125	
単位幅当たりの断面積(m ²)/m	0.0407708	0.0203854
断面二次モーメント(m ⁴)/m	1.9307612	0.9653806

(基盤 48Gal) 範囲内では、セルの円筒形としての剛性よりも断面方向の二枚の板としての剛性によるモデル化が、セル護岸の地震時挙動を表現することに適していたと思われる。

以下、各観測記録の計算結果と観測結果の比較では一致度の高いセル殻の剛性に落としたものの結果について述べる。

4.2 解析モデル

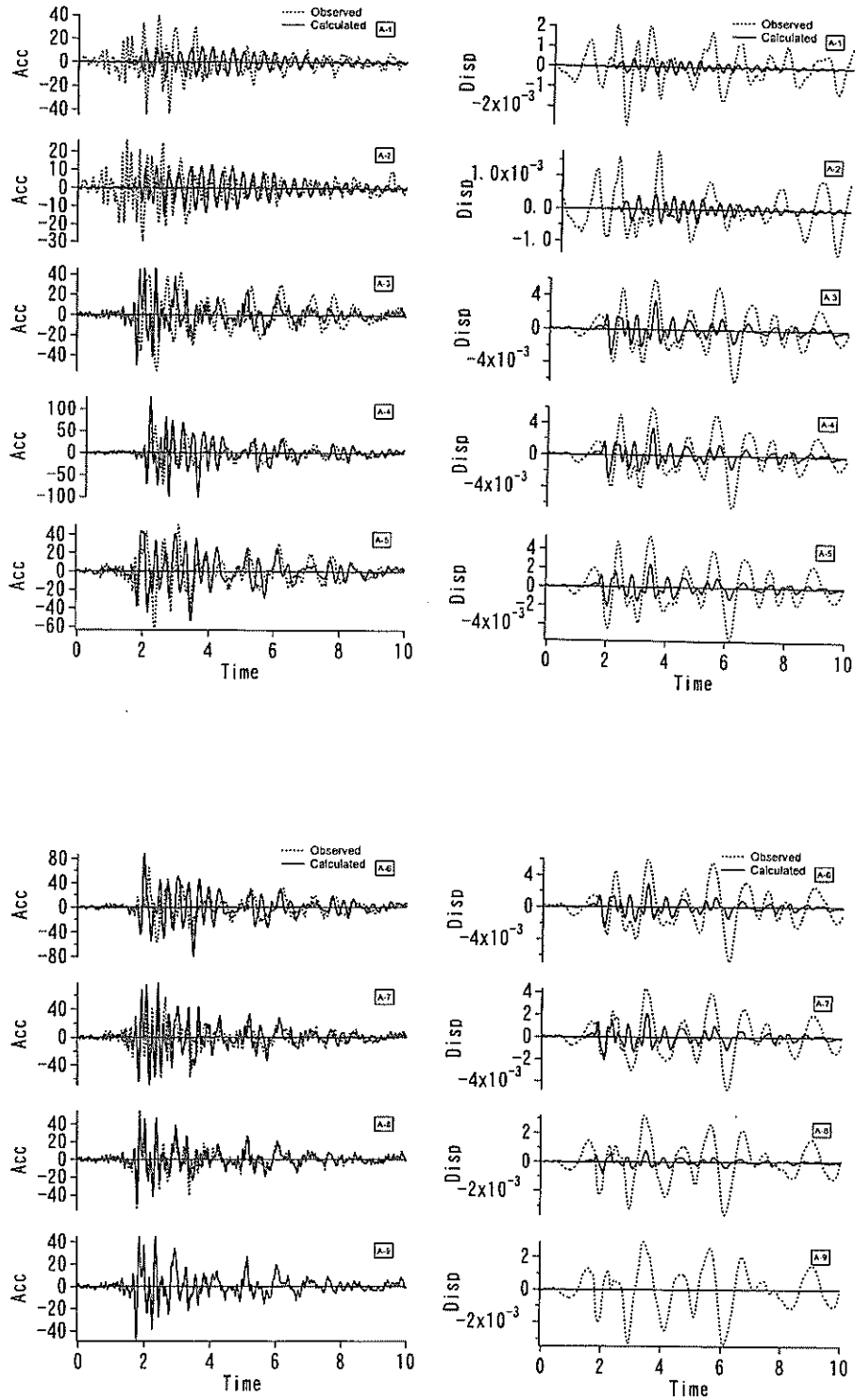
解析モデルの境界条件及び物性値を図-4.1, 4.2に、解析メッシュ図を図-4.5に示す。



単位 : Acc (Gal), Disp (m), Time (s)

(a) 加速度・変位波形 ($G_0' = 1/1G_0$)

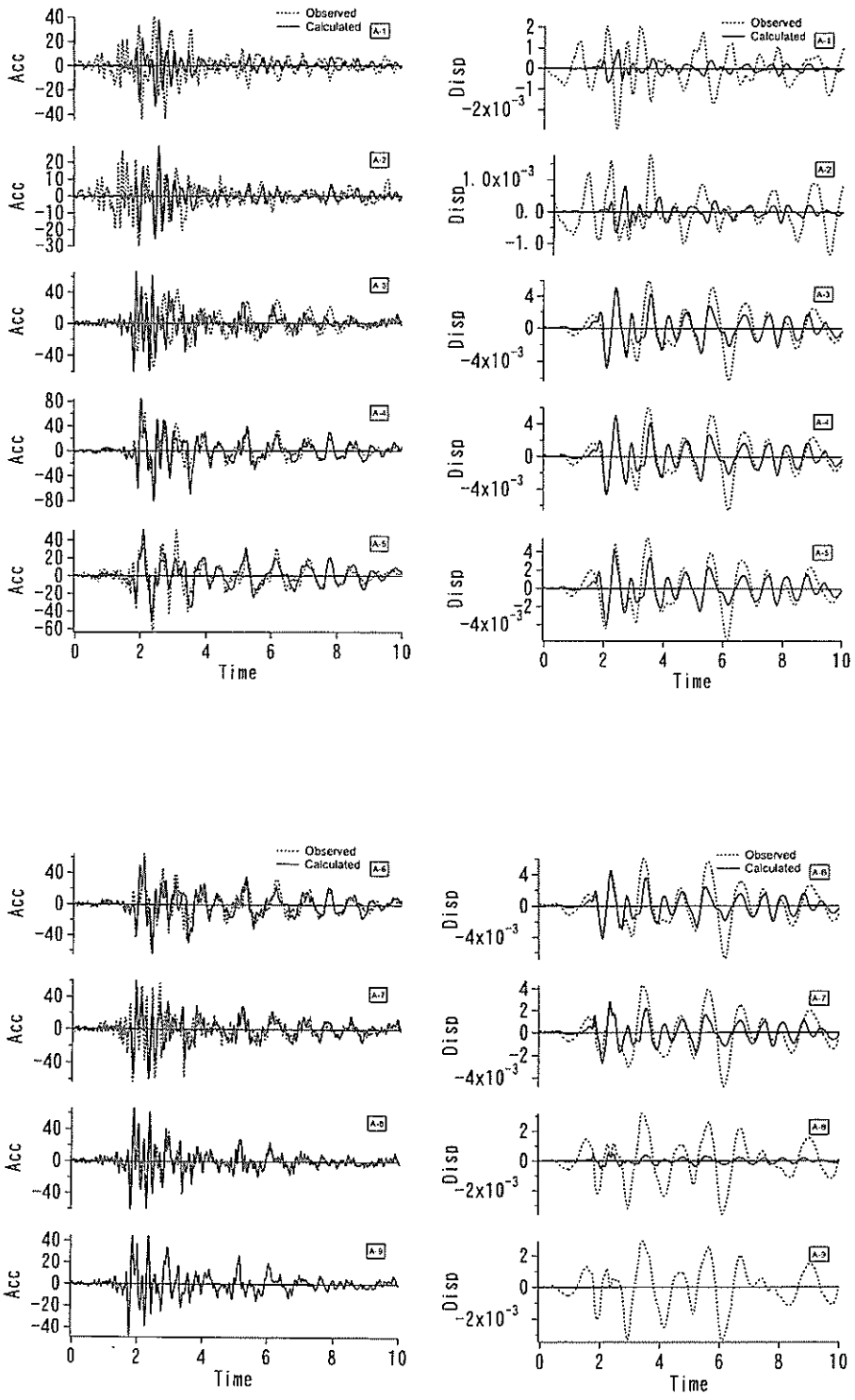
図-4.4 計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



単位：Acc(Gal), Disp(m), Time(s)

(b) 加速度・変位波形 ($G_0' = 1/10G_0$)

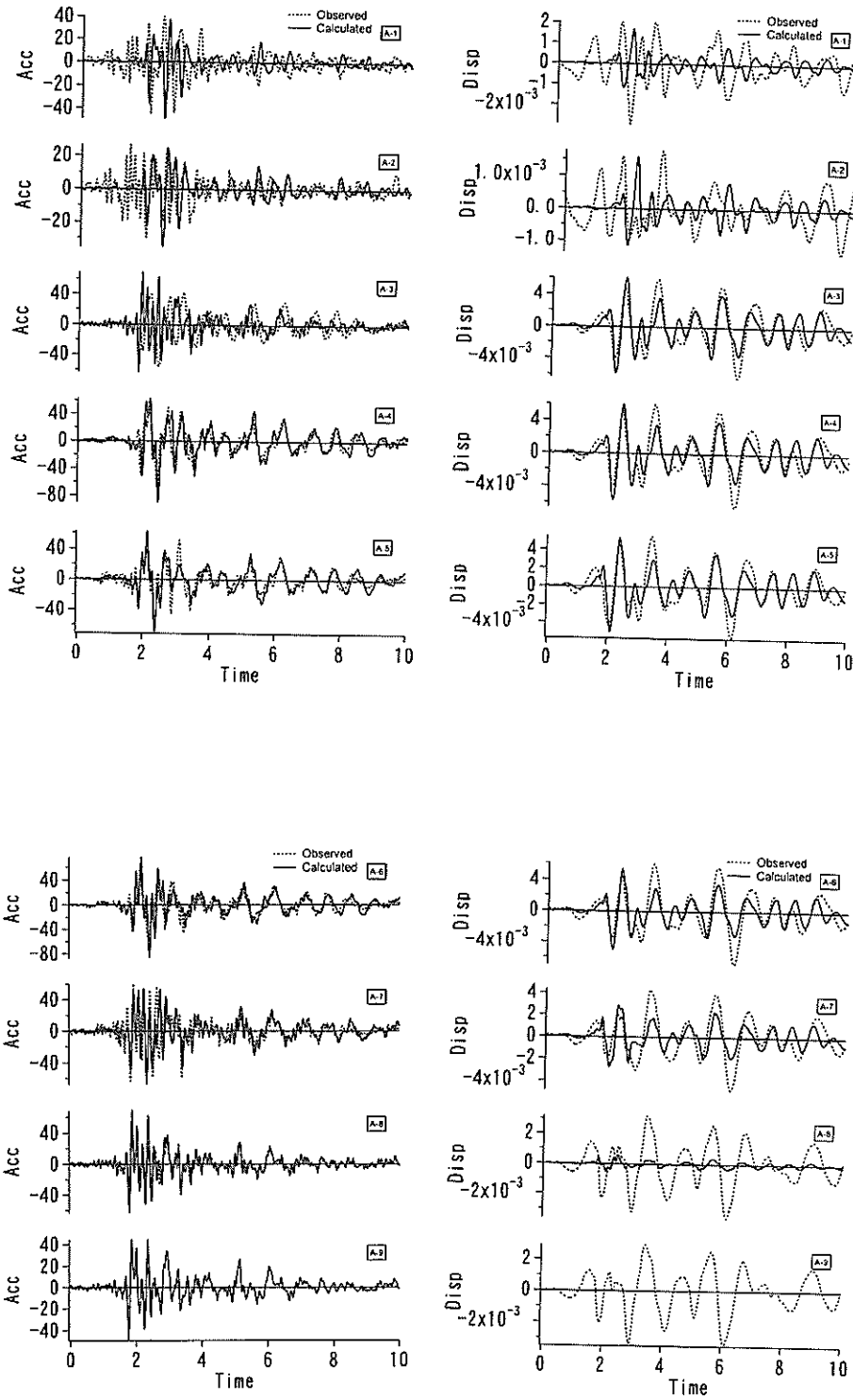
図-4.4 計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



単位：Acc (Gal), Disp (m), Time (s)

(c) 加速度・変位波形 ($G_0' = 1/100 G_0$)

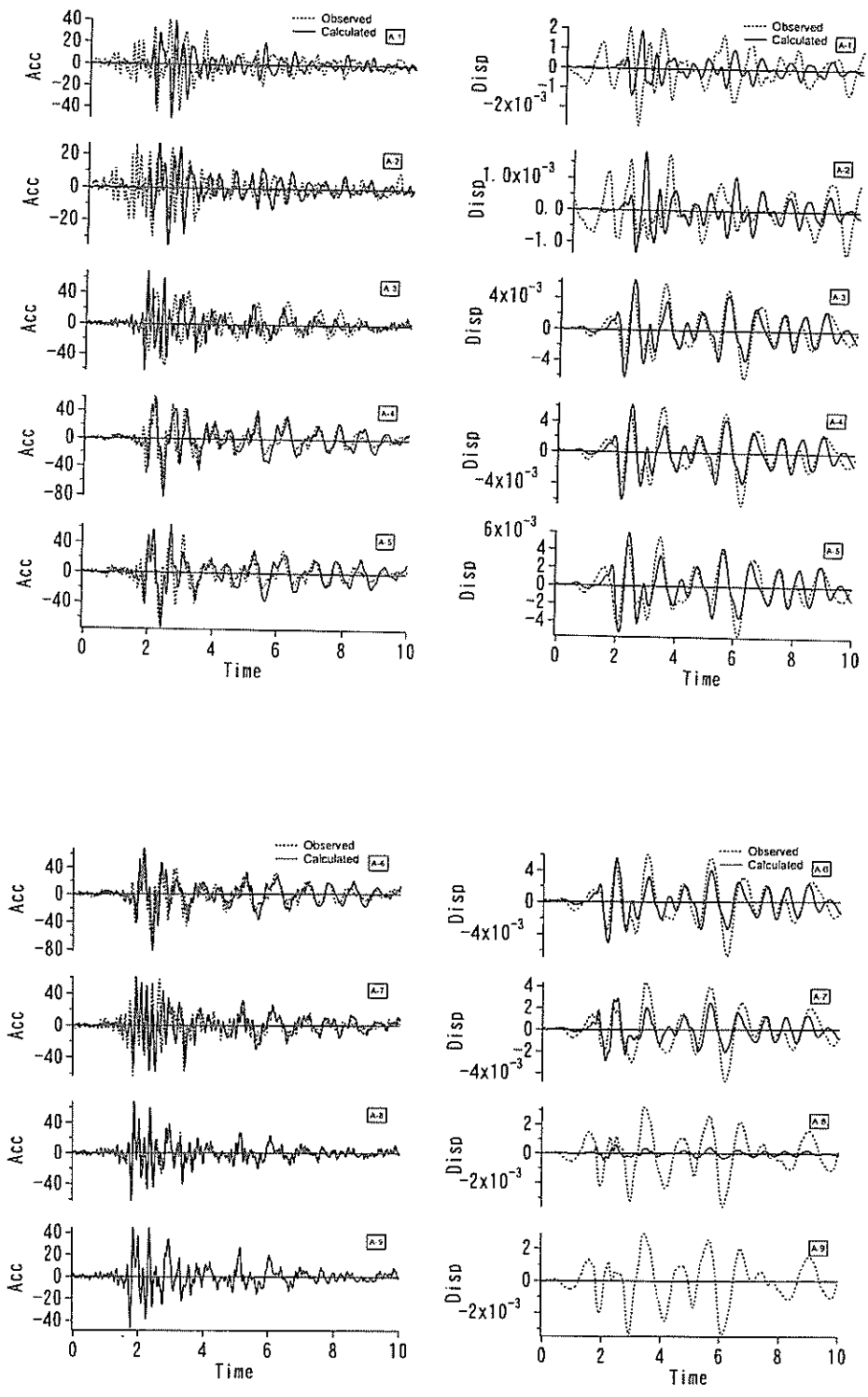
図-4.4 計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



単位 : Acc (Gal), Disp (m), Time (s)

(d) 加速度・変位波形 ($G_0' = 1/1000 G_0$)

図-4.4 計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



単位 : Acc (Gal), Disp (m), Time (s)

(e) 加速度・変位波形 ($G_0' = 1/10000 G_0$)

図-4.4 計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)

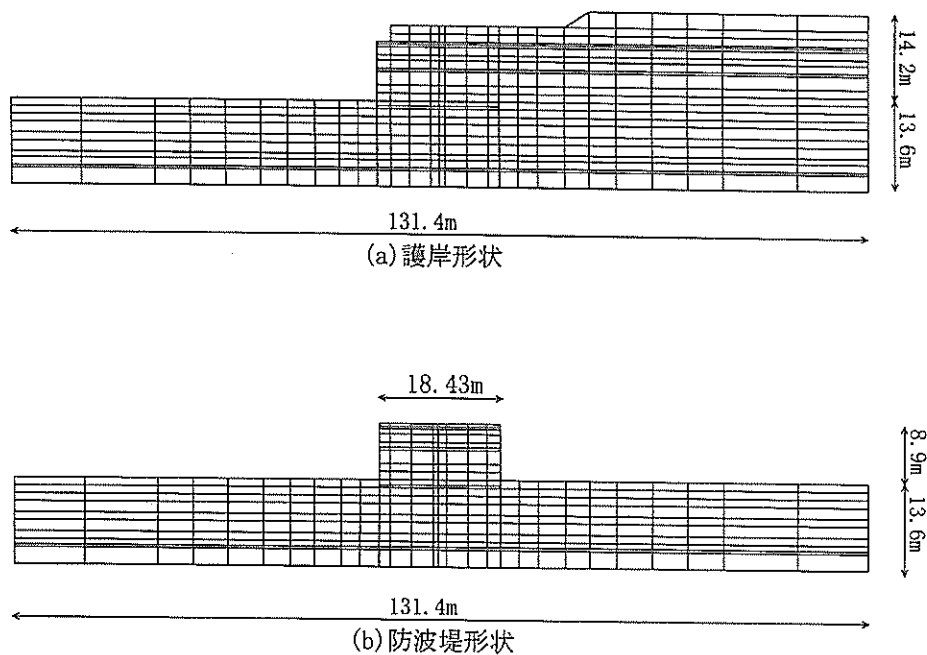


図-4.5 解析メッシュ図

4.3 入力地震波

上述したモデルでの地震応答計算では、観測深さが最深部のA-9における観測波形を入力波とした。

4.4 解析結果

(1) 加速度及び変位波形

図-4.6に観測記録 No.97-1 に対するBEADⅢにより得られた加速度波形と観測波形の比較を示す。また図-4.7に、変位波形の計算値と観測値を示す。

この結果は、加速度計算波形が護岸各部の観測波形に近づくようにセル殻の剛性を変化させ、最も観測値との一致度の高いものを示している。各深さ位置でよく一致している。しかし、波形の短周期成分の一致度は必ずしも良くない。計算では粘性土がローパスフィルターとして高い振動数成分をカットしすぎる傾向があり、これについてはさらに検討が必要であると考えられる。

変位波形について、計算値は基盤に近づくにつれ振幅が小さくなり基盤位置 A-9 では零になっている。これはモデル化による問題で、解析境界を基盤位置で固定基盤としたためである。

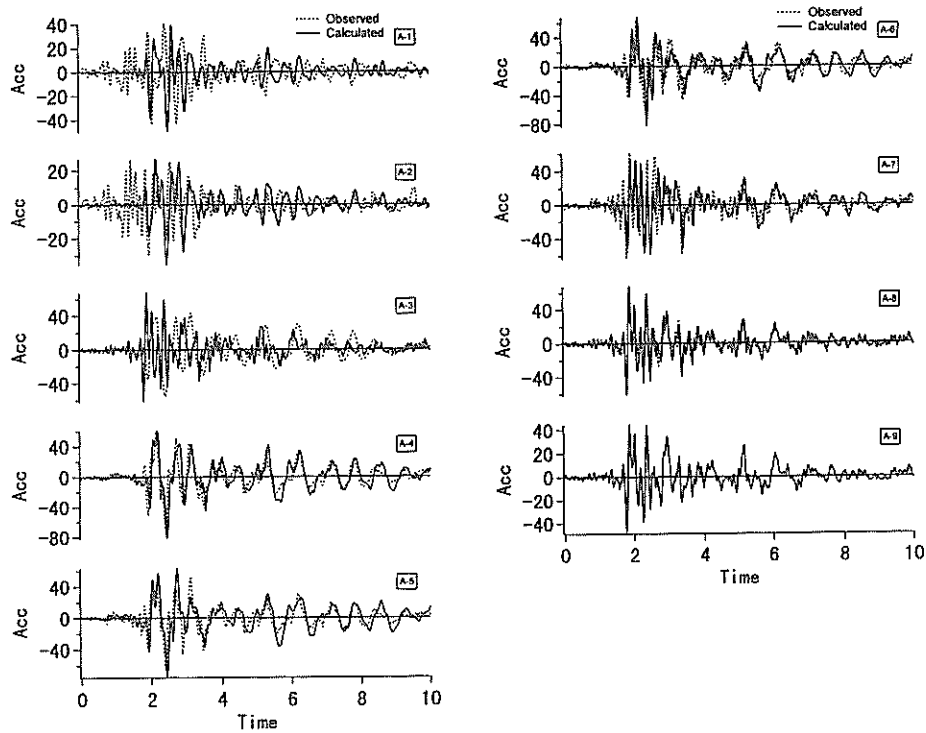
(2) 振動特性

図-4.8~4.14に天端と根入れ下端との伝達関数(A-4/A-9)を、計算結果と観測結果を比較して示す。観測記録 No.62-3 及び No.92-8 を除く観測値で見られた2.0Hz 付近ピークが、いずれの計算結果にも現れている。また、計算値では観測値と比較して高振動数成分が少なくなっている。これは加速度波形で示した傾向と同じである。

(3) 地盤、セルの地震時挙動 (最大値・同一時刻)

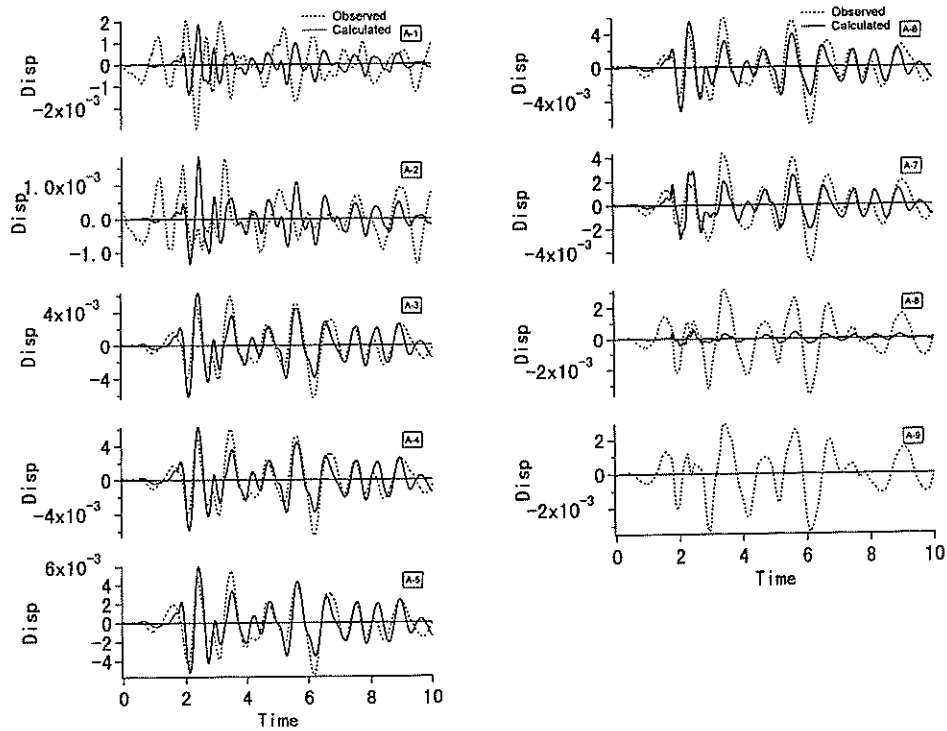
図-4.15~4.28に最大加速度及び最大変位について、計算値と観測値の比較を示す。両者は、観測記録 No.92-8 以外でほぼ良好な一致を示している。観測記録 No.98-2 が異なるのは、2) 振動特性で述べたように観測方向と垂直な、構造物法線方向の振動が卓越する地震波だったためと考えられる。

図-4.29~4.35に最大土圧及び最大底面反力について、計算値と観測値の比較を示す。堤体前壁土圧の計算値は観測値同様、逆三角形分布を示す。また、後壁土圧でも計算値は観測値とほぼ同様の分布を示している。ただし、いずれの側壁土圧とも砂質土部での土圧の計算値が観測値を下回っている。観測記録 No.62-1 ~ 62-3 については、観測値が計算値より大きい、これは観測値



単位：Acc(Gal), Time(s)

図-4.6 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



単位：Disp(m), Time(s)

図-4.7 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)

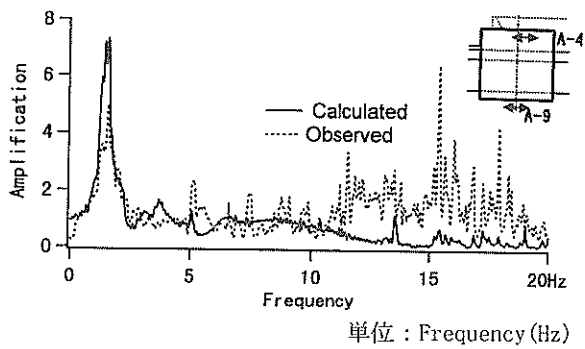


図-4.8 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 97-1)

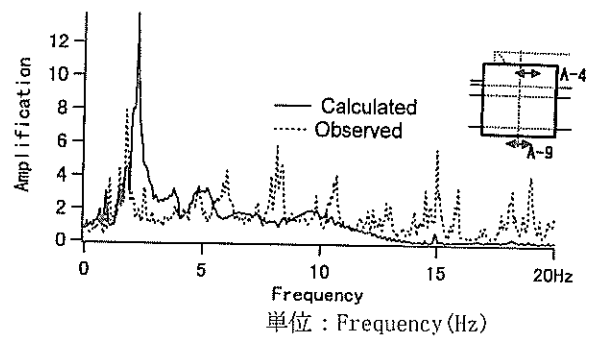


図-4.12 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 62-1)

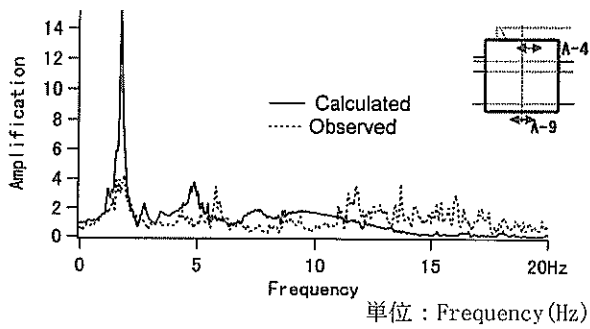


図-4.9 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 94-3)

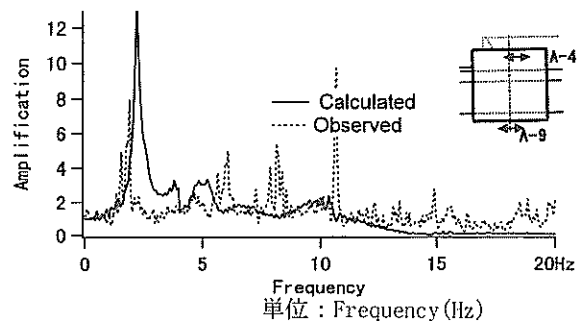


図-4.13 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 62-2)

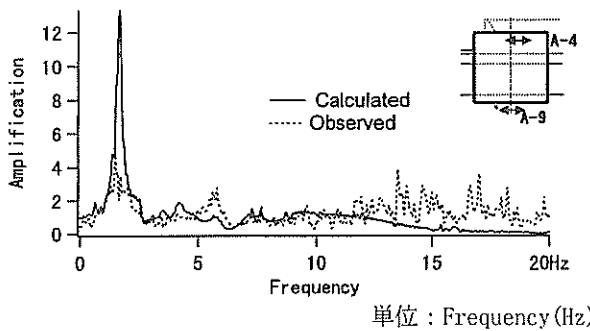


図-4.10 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 93-2)

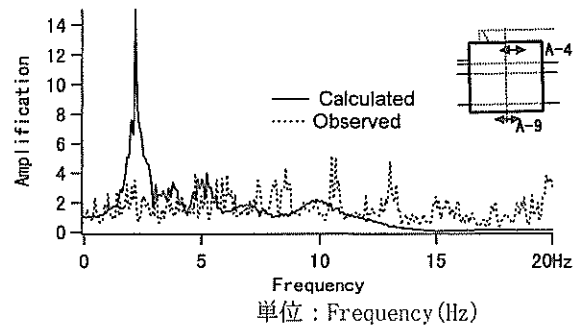


図-4.14 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 62-3)

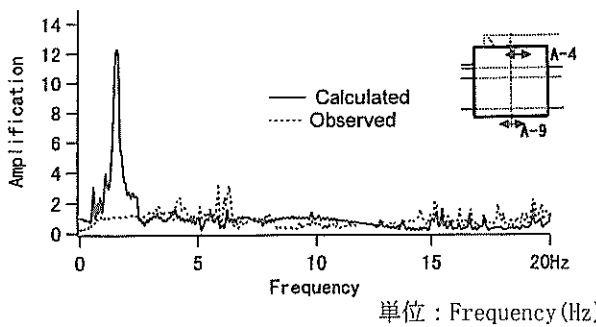


図-4.11 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (観測No. 92-8)

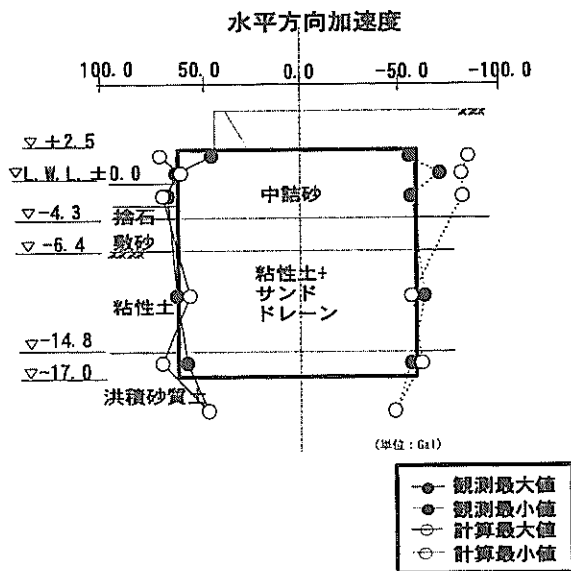


図-4.15 計算値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

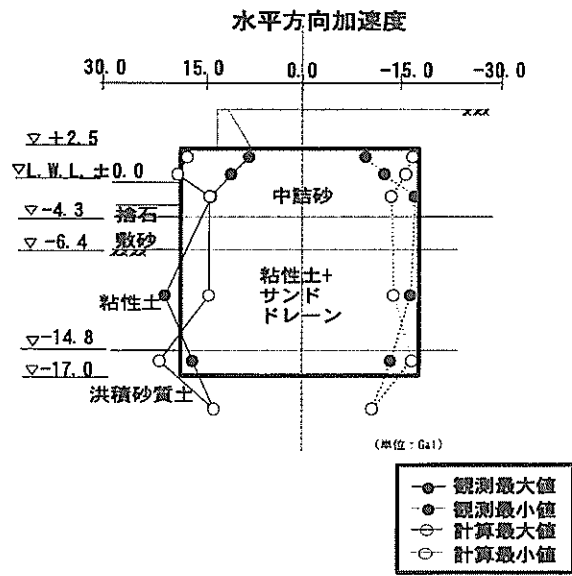


図-4.16 計算値と観測値の比較 (観測No. 94-3)

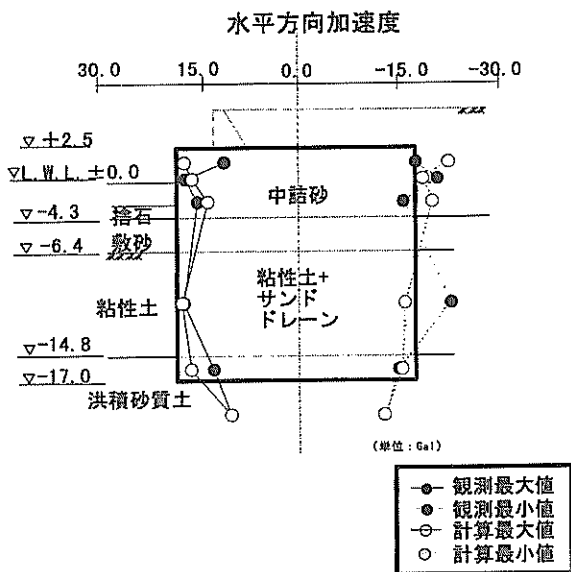


図-4.17 計算値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

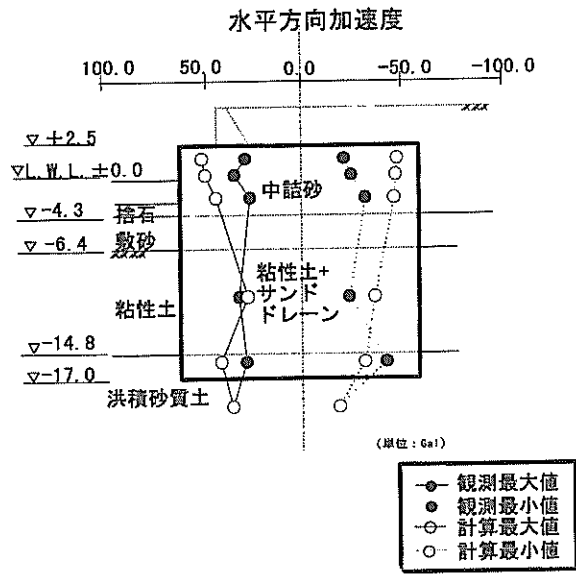


図-4.18 計算値と観測値の比較 (観測No. 92-8)

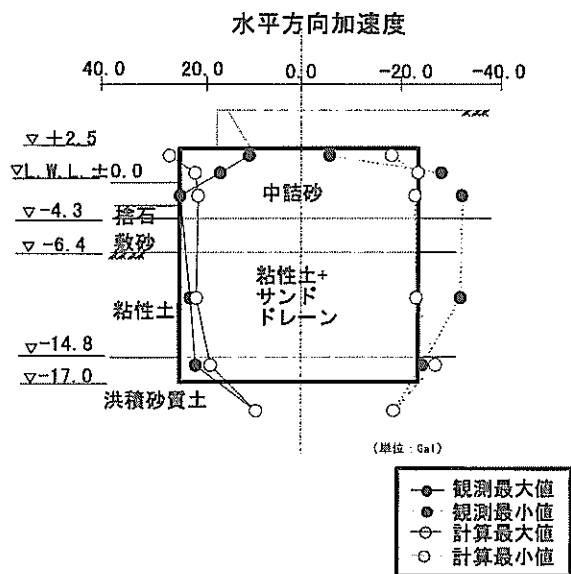


図-4.19 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

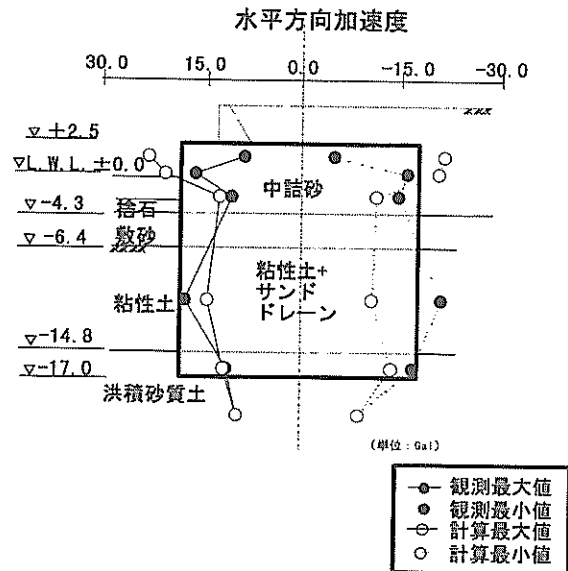


図-4.20 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-2)

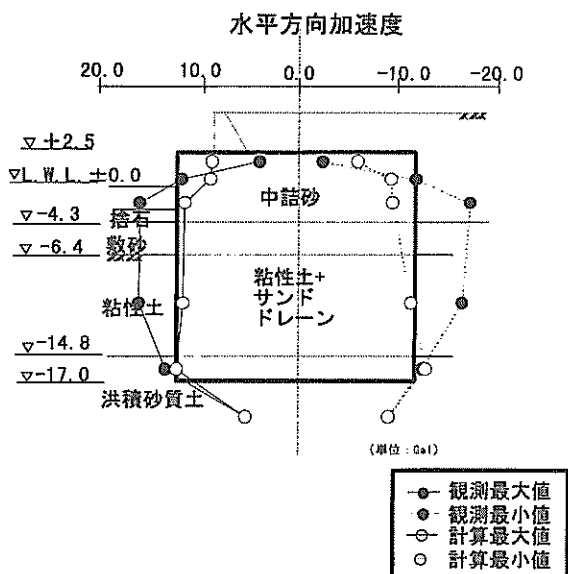


図-4.21 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

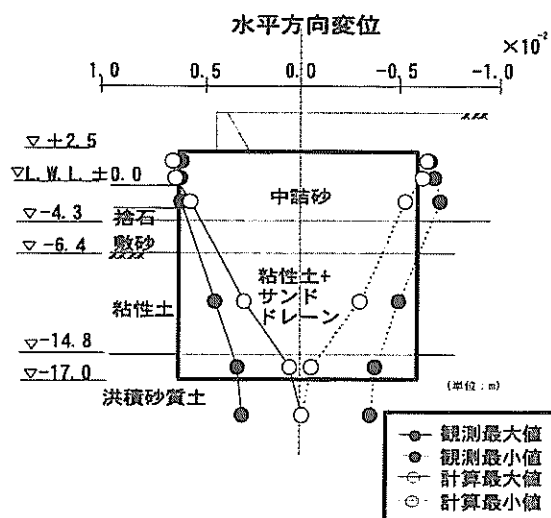


図-4.22 計算値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

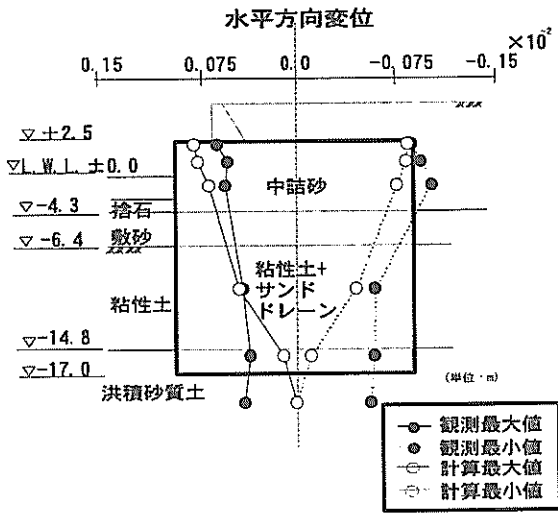


図-4.23 計算値と観測値の比較 (観測No. 94-3)

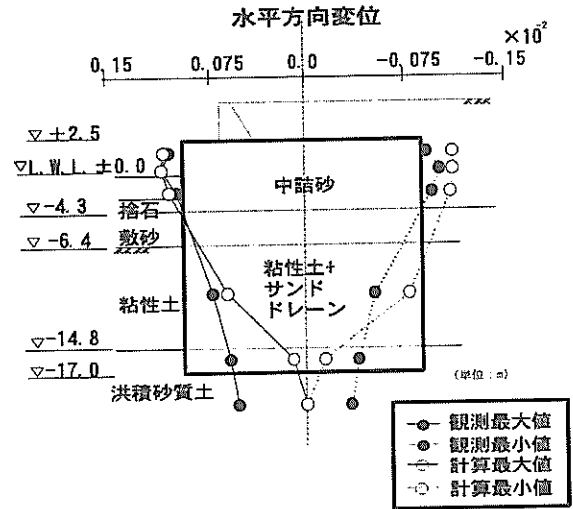


図-4.24 計算値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

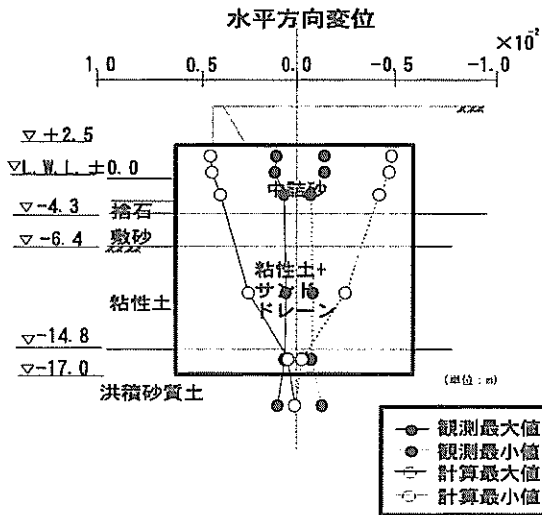


図-4.25 計算値と観測値の比較 (観測No. 92-8)

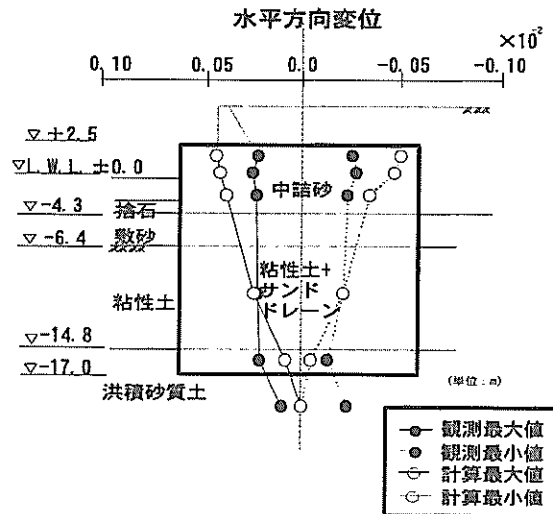


図-4.26 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

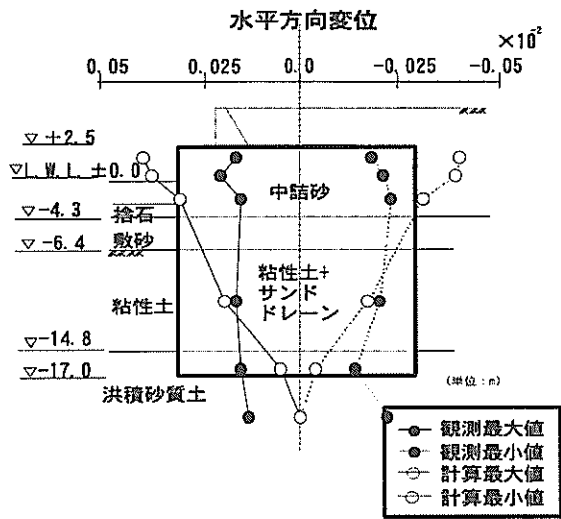


図-4.27 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-2)

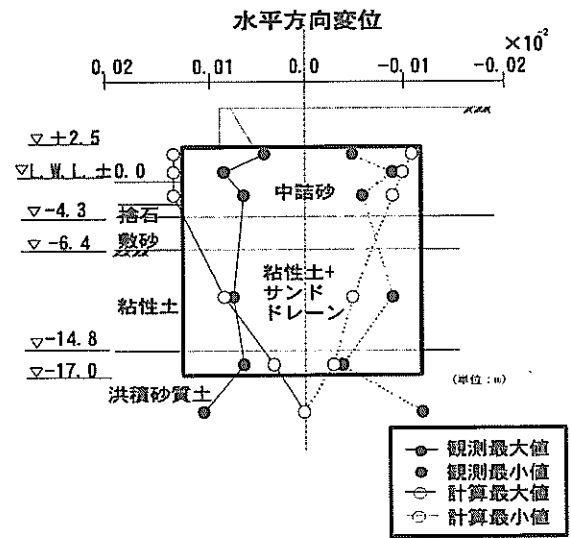


図-4.28 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

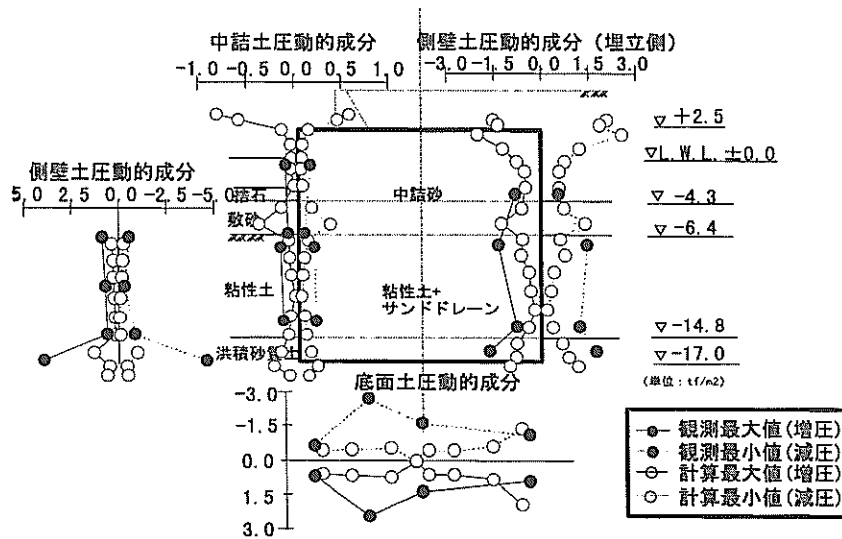


図-4.29 計算値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

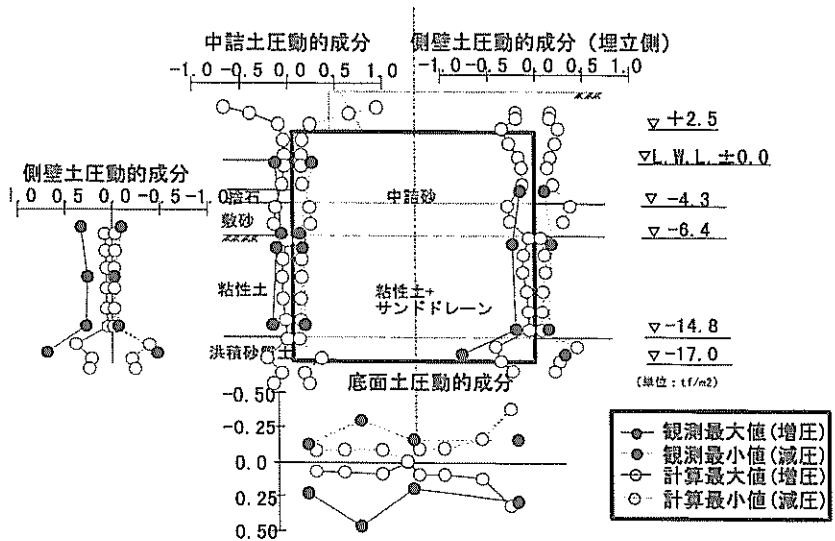


図-4.30 計算値と観測値の比較 (観測No. 94-3)

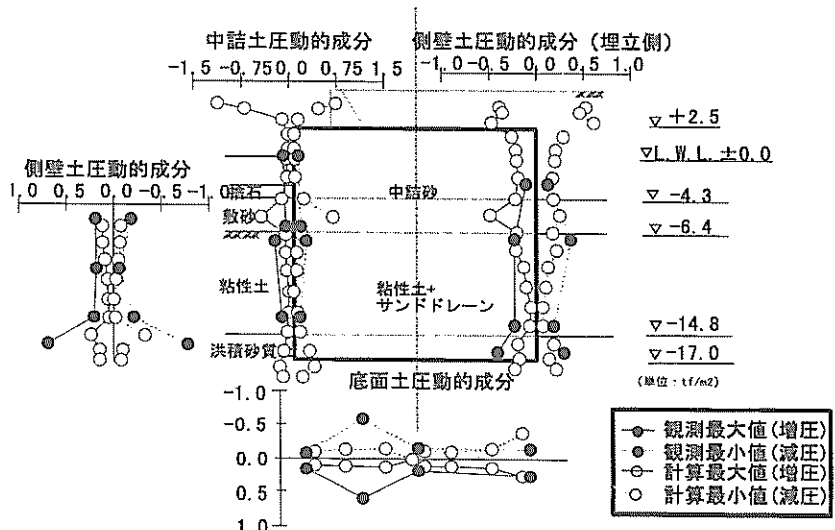


図-4.31 計算値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

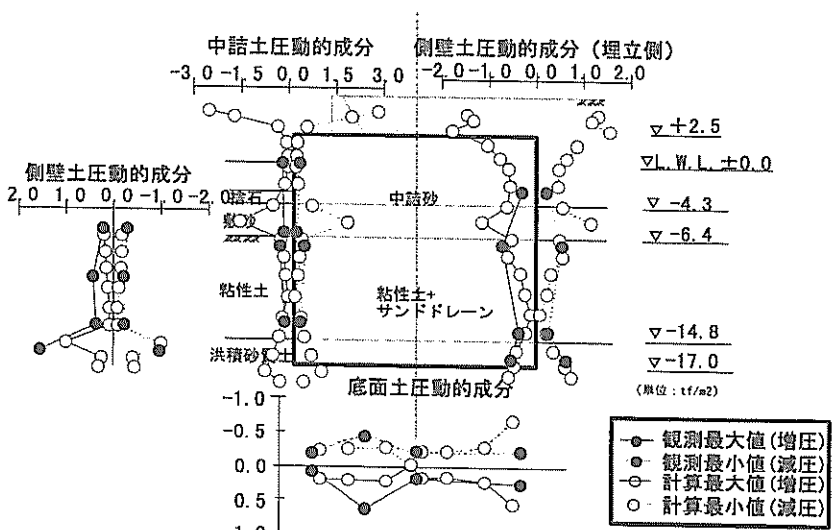


図-4.32 計算値と観測値の比較 (観測No. 92-8)

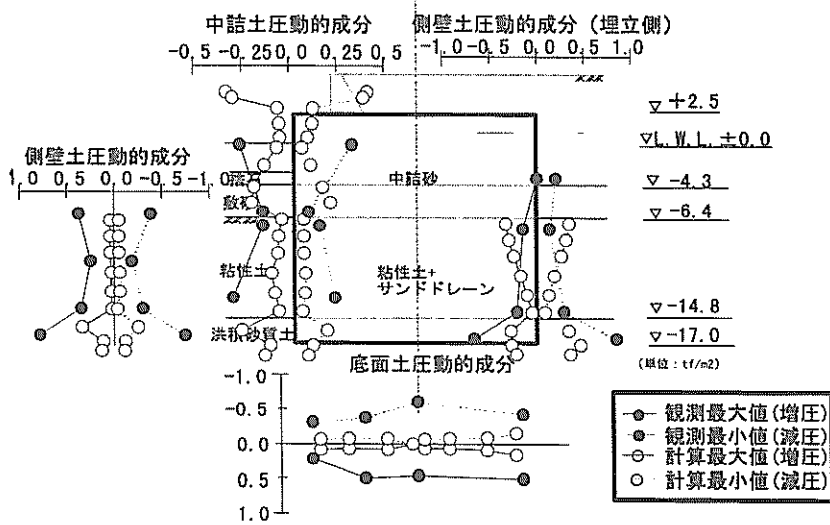


図-4.33 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

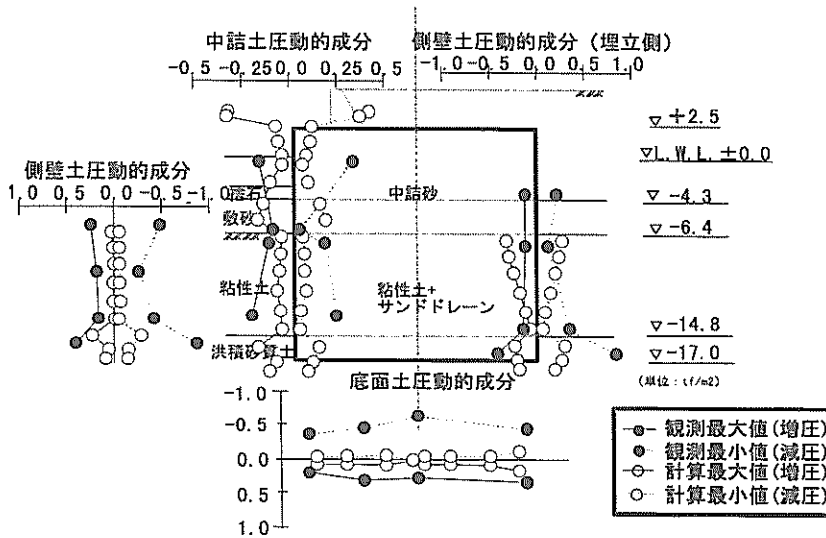


図-4.34 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-2)

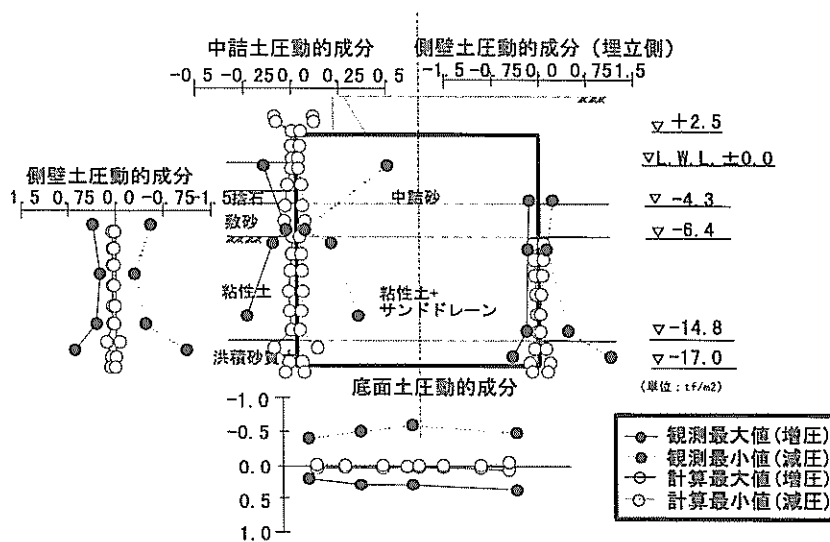


図-4.35 計算値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

の最大値を示す縦振動を今回のモデルでは十分表現していないためと思われる、今後の検討課題である。

観測記録 No.97-1 ~ 92-8 の中詰土圧分布については、観測値との一致が見られる。

底面反力について、計算値はセル中心付近で零に近く分布を示し、これは計算されたセルの挙動がロッキングであったことを示す。一方、観測値は矩形の分布示しており、底面反力の分布形状においては余り良い一致が見られなかった。

図-4.36~4.49に同一時刻における加速度及び変位の計算値の分布を示す。加速度分布においては、正負の符号の逆転が見られるが、これは中詰土の複雑な挙動によると考えられる。一方変位分布においては、いずれも高さ方向にほぼ直線で表される分布形状を示し、ロッキング挙動の卓越が確認できる。また、計算値と観測値との比較を図-4.50~4.70に示す。加速度及び変位についての計算値と観測値は比較的良く一致している。

側壁土圧及び中詰土圧については、一部符号の逆転が見られるが、土圧レベルにおいてはほぼ一致しており分布形状もほぼ同様である。しかし、底面反力については分布形状に余り良い一致が見られない。

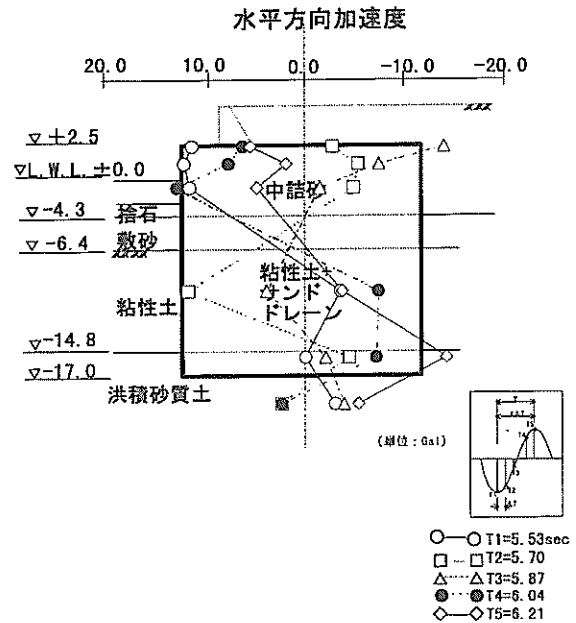


図-4.37 同一時刻における加速度分布 (観測No. 94-3)

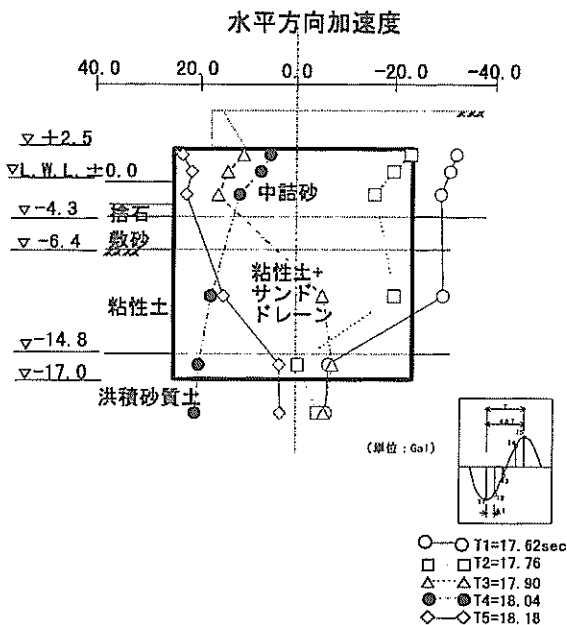


図-4.36 同一時刻における加速度分布 (観測No. 97-1)

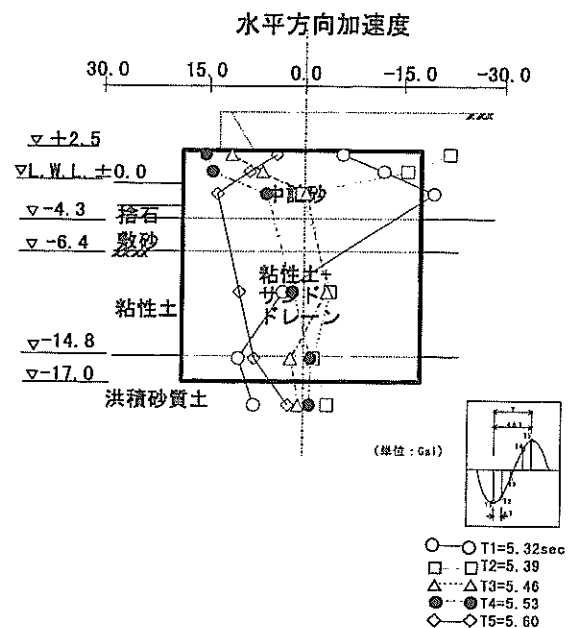


図-4.38 同一時刻における加速度分布 (観測No. 93-2)

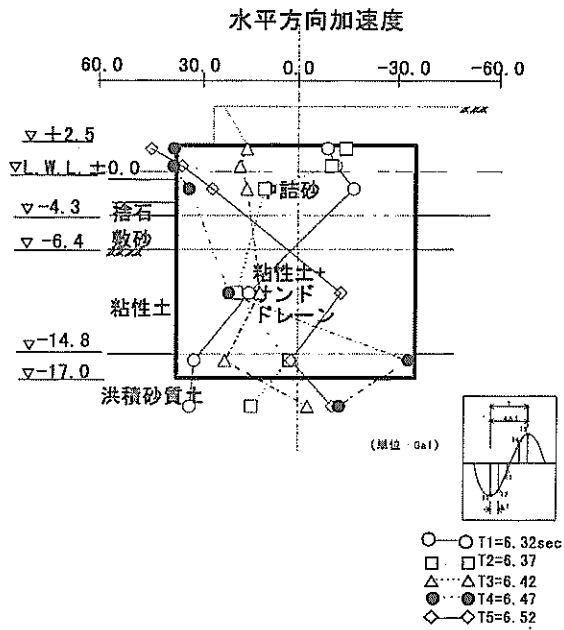


図-4.39 同一時刻における加速度分布 (観測No. 92-8)

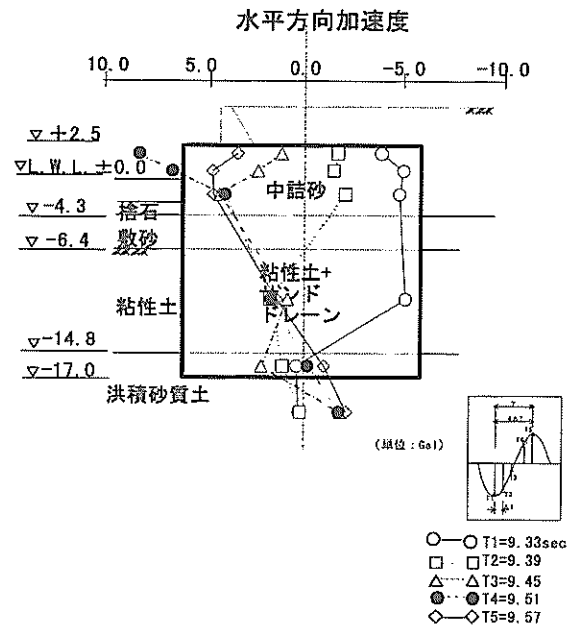


図-4.40 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-1)

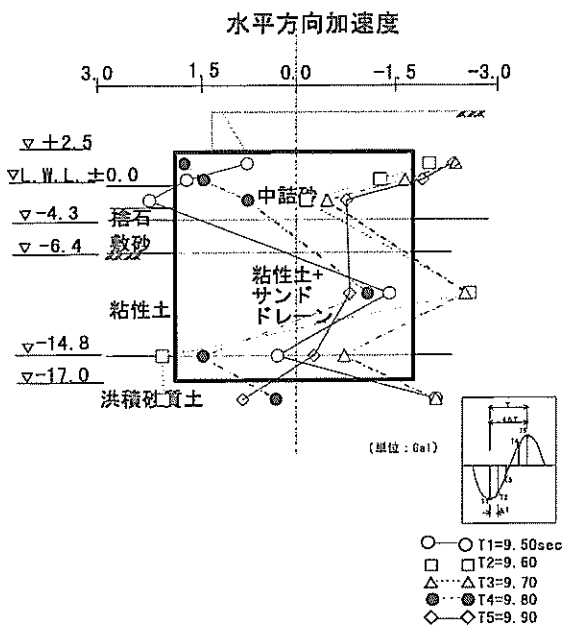


図-4.41 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-2)

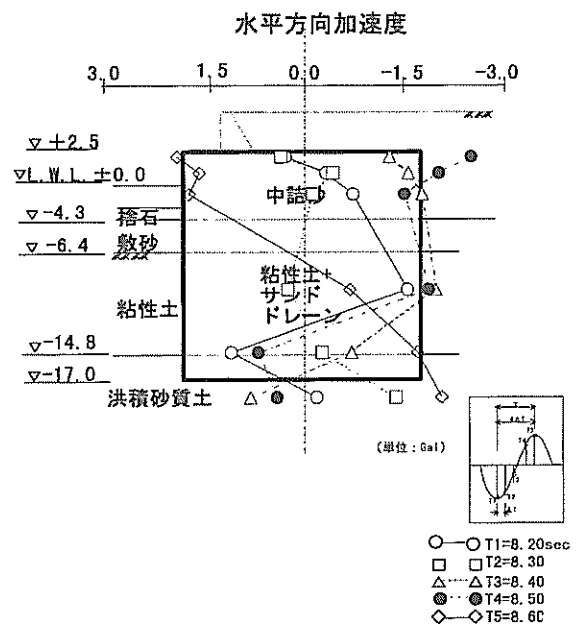


図-4.42 同一時刻における加速度分布 (観測No. 62-3)

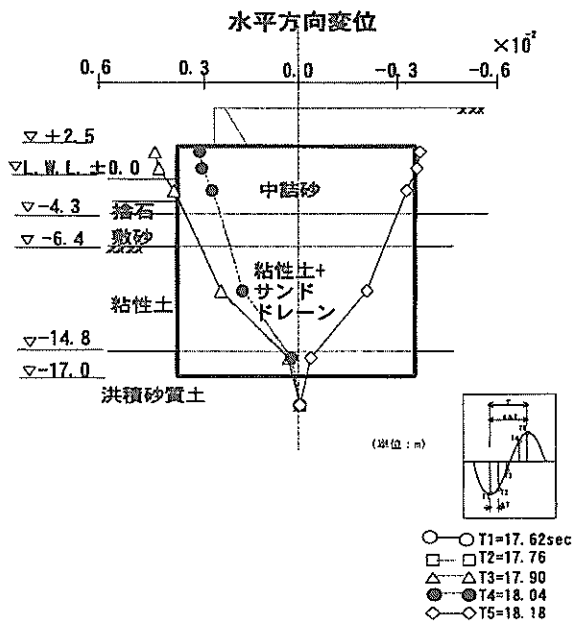


図-4.43 同一時刻における変位分布 (観測No. 97-1)

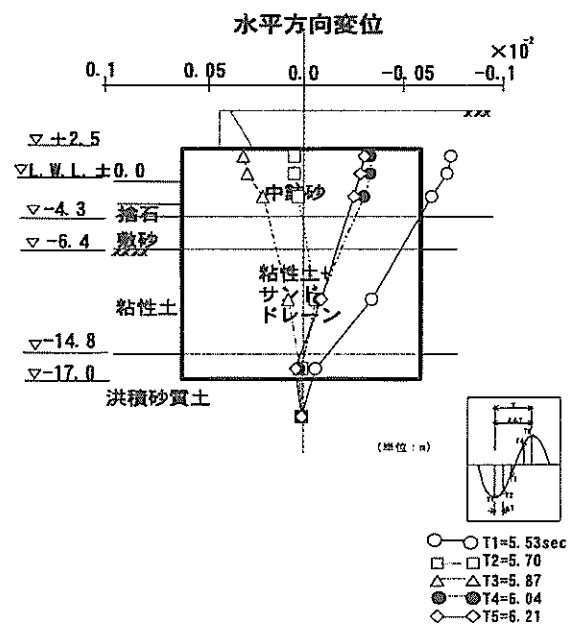


図-4.44 同一時刻における変位分布 (観測No. 94-3)

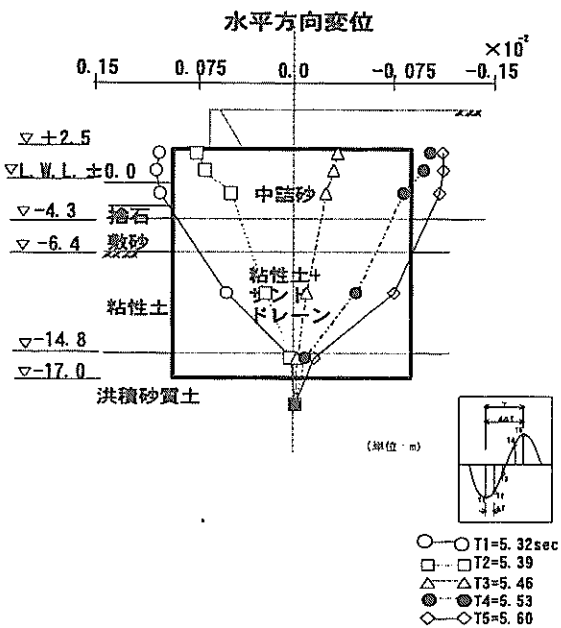


図-4.45 同一時刻における変位分布 (観測No. 93-2)

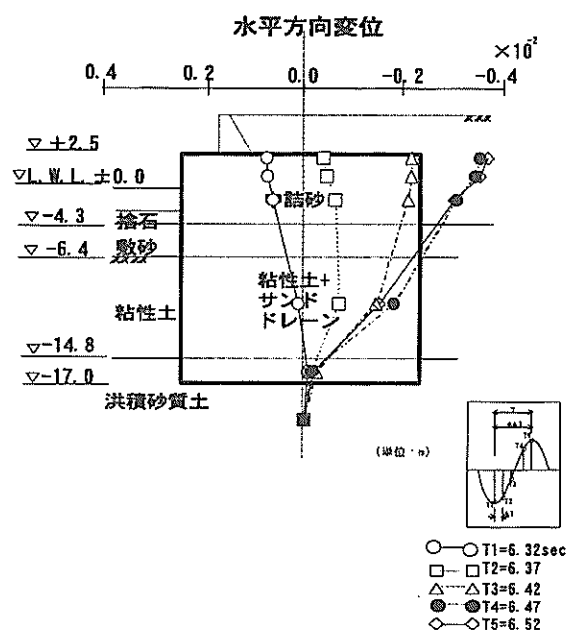


図-4.46 同一時刻における変位分布 (観測No. 92-8)

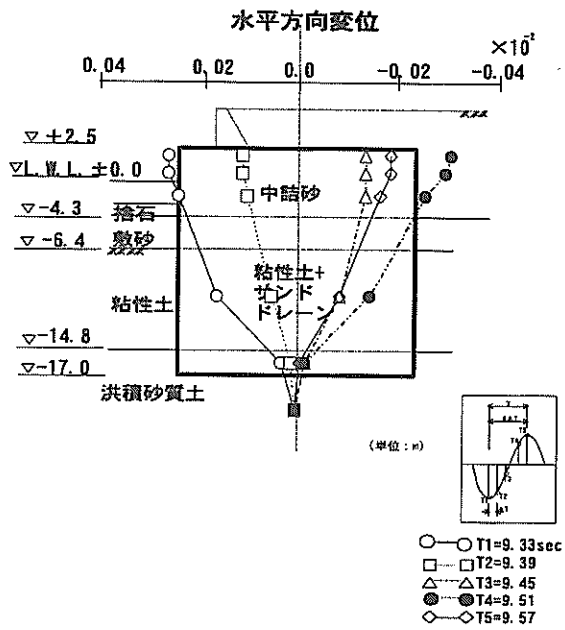


図-4.47 同一時刻における変位分布 (観測No. 62-1)

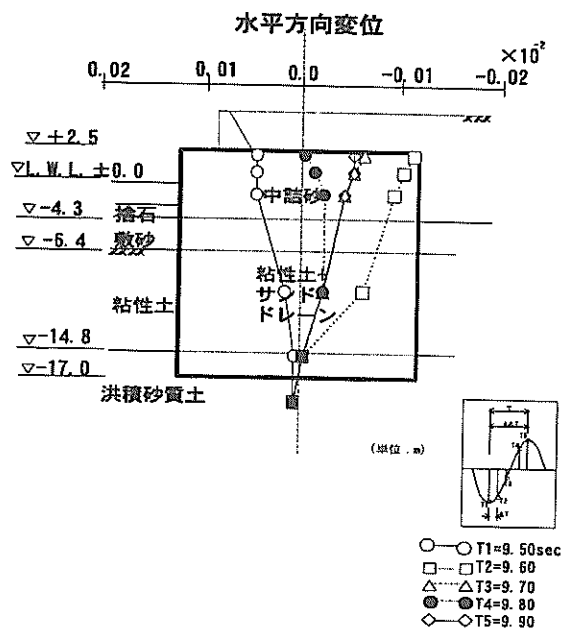


図-4.48 同一時刻における変位分布 (観測No. 62-2)

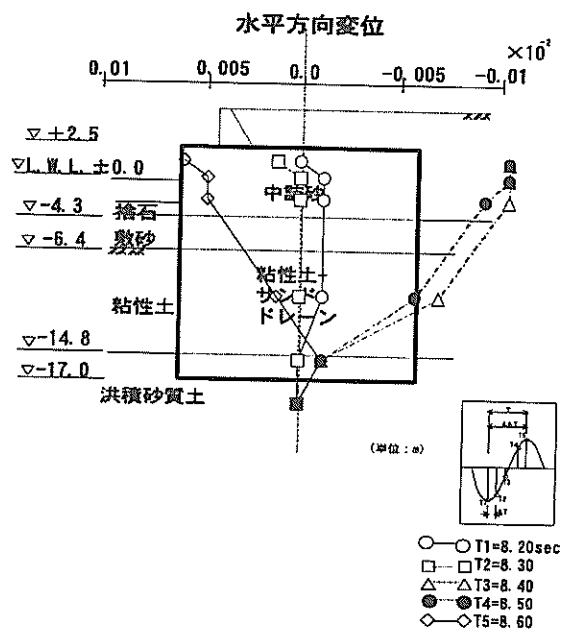


図-4.49 同一時刻における変位分布 (観測No. 62-3)

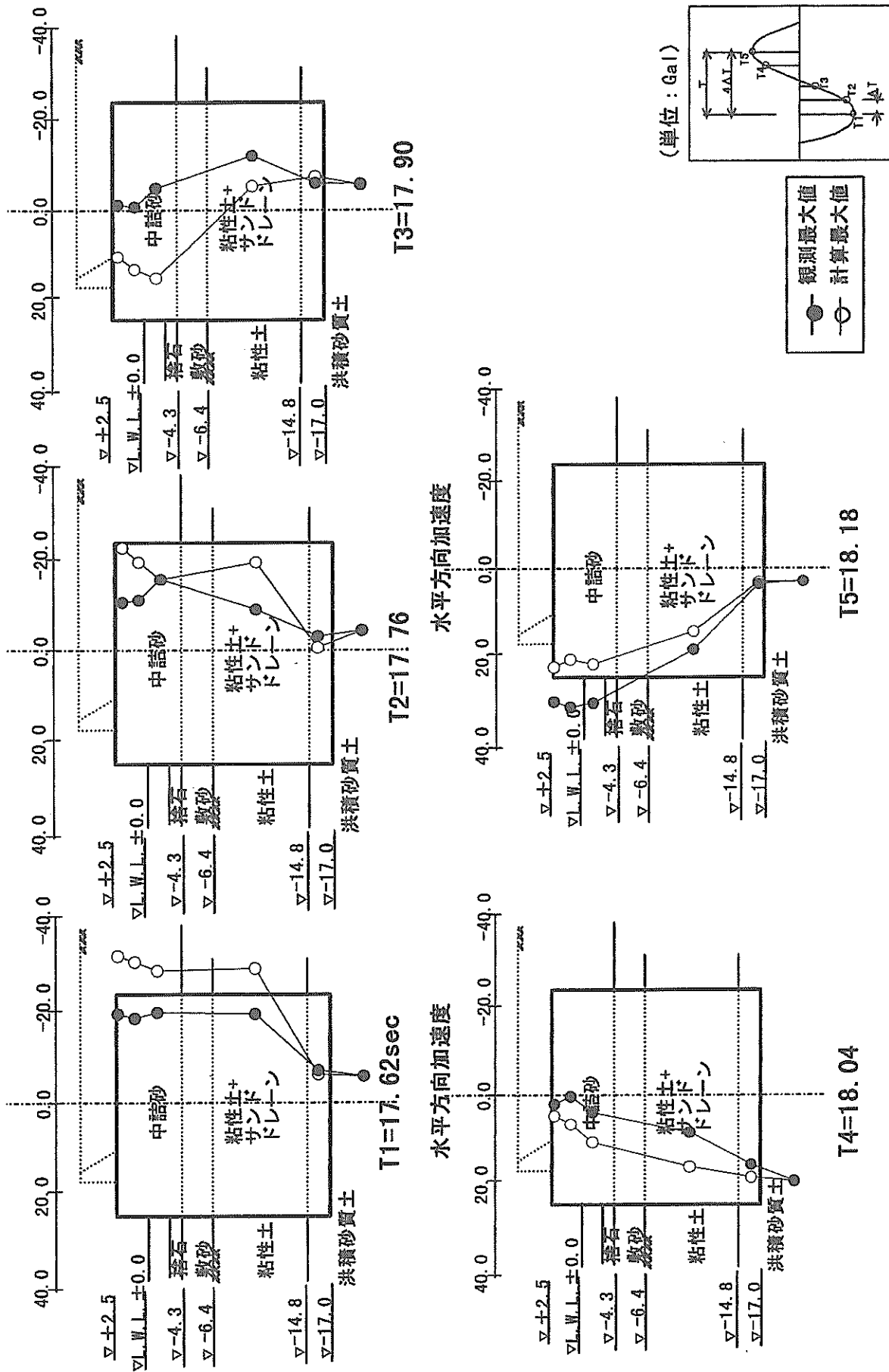


図-4.50 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

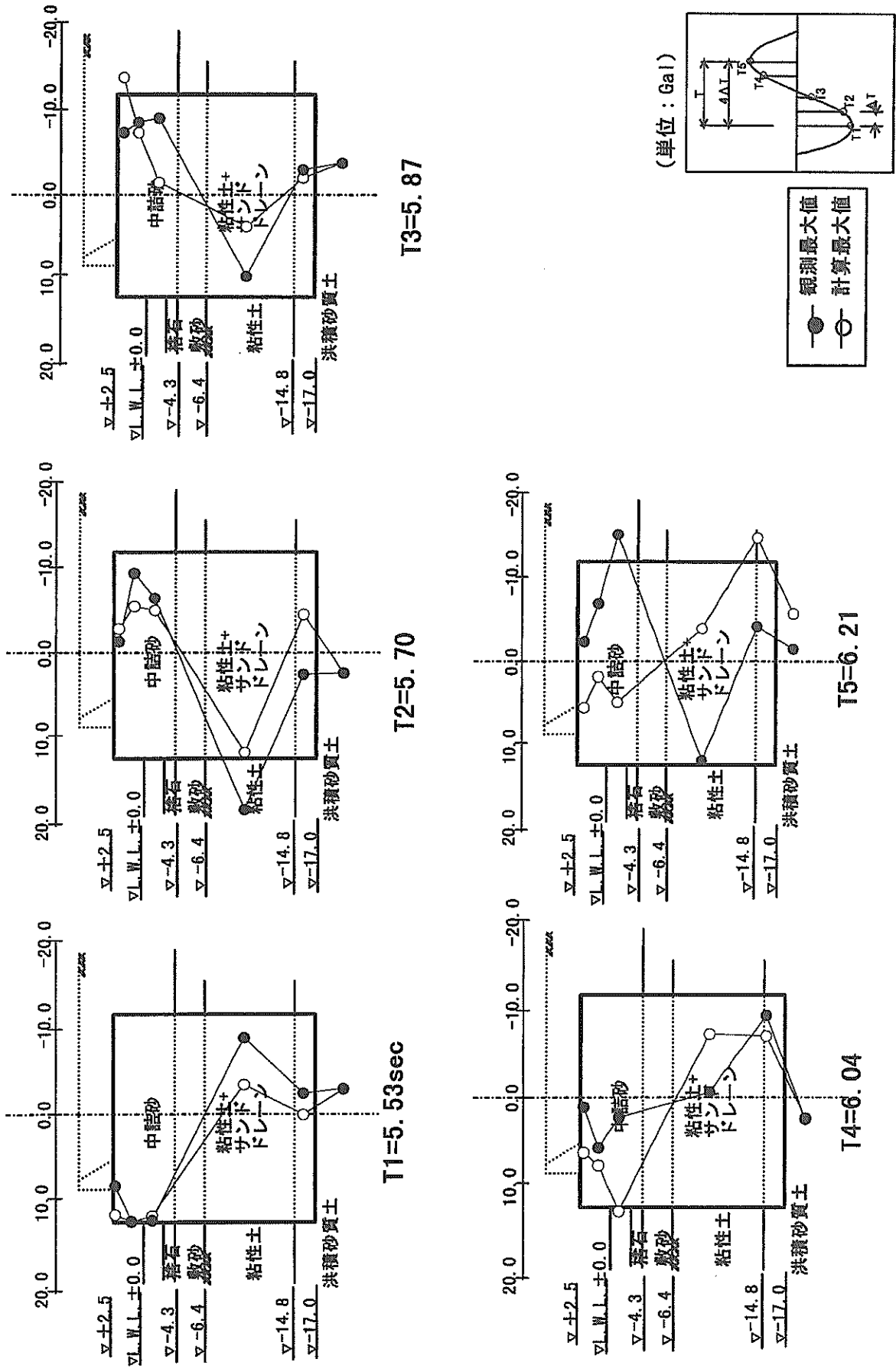


図-4.51 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No.94-3)

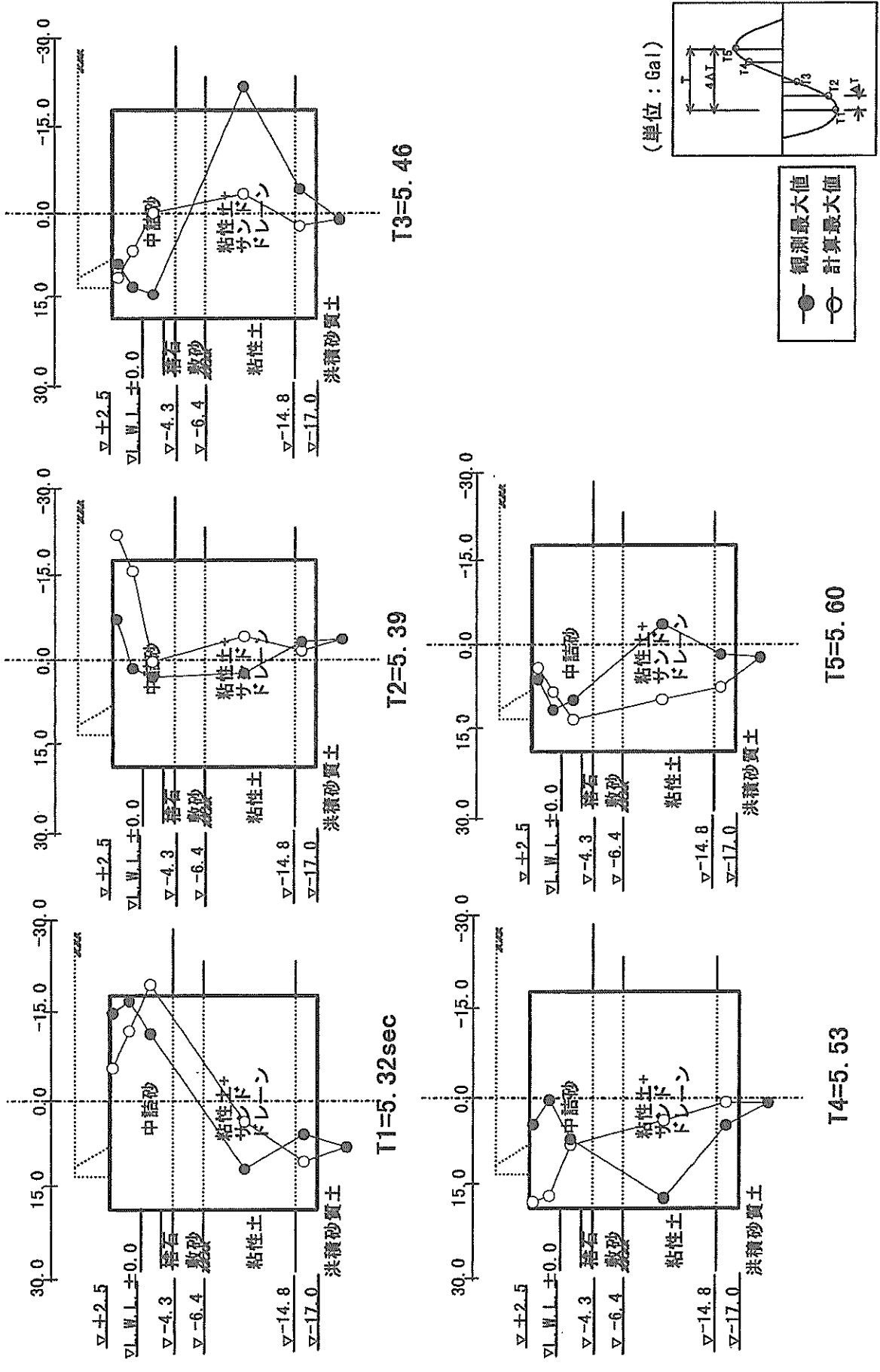


図4.52 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

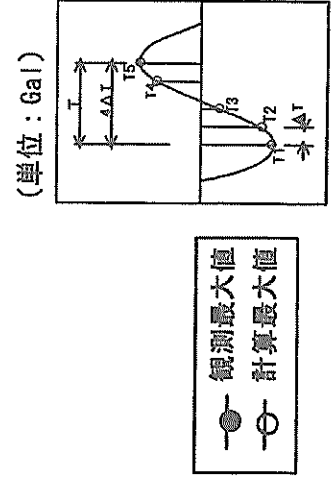
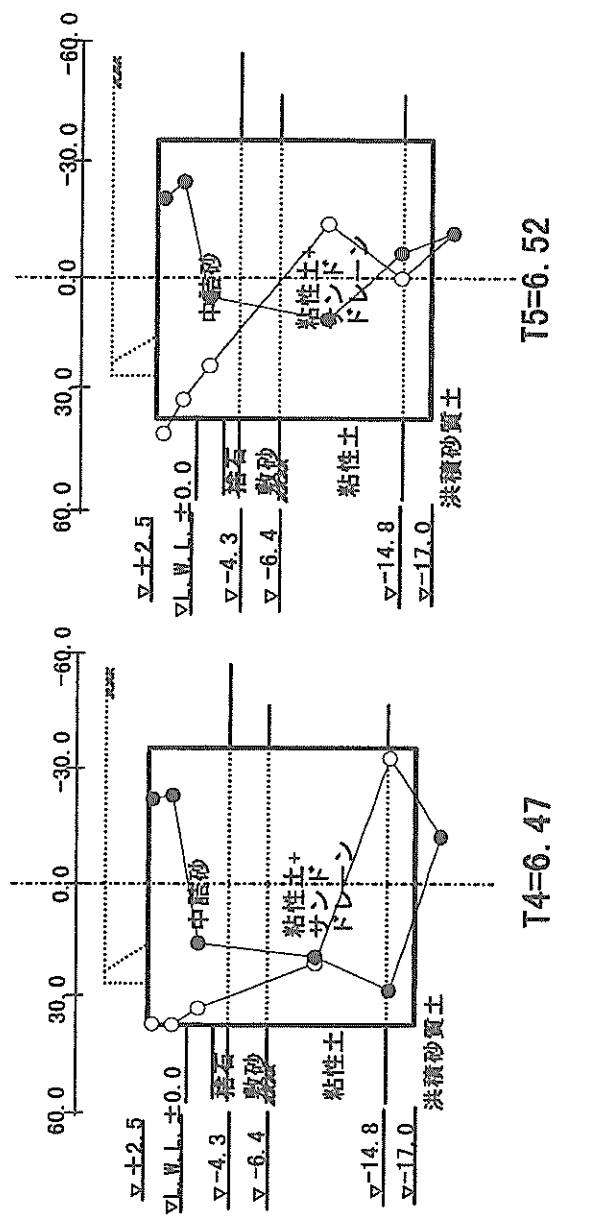
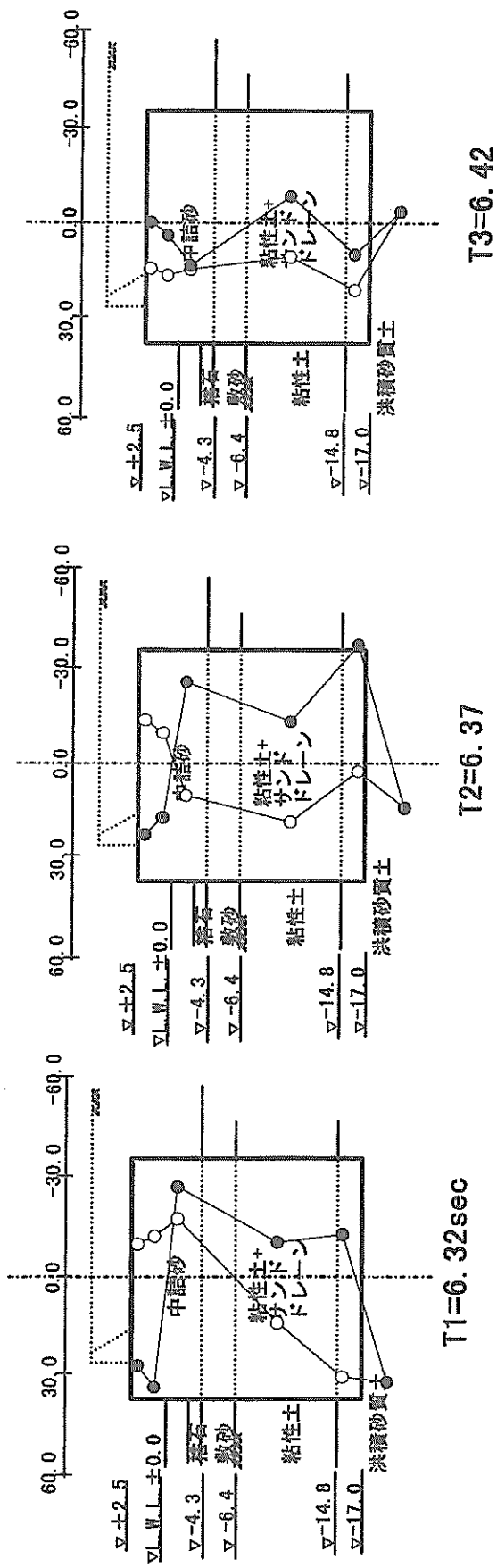
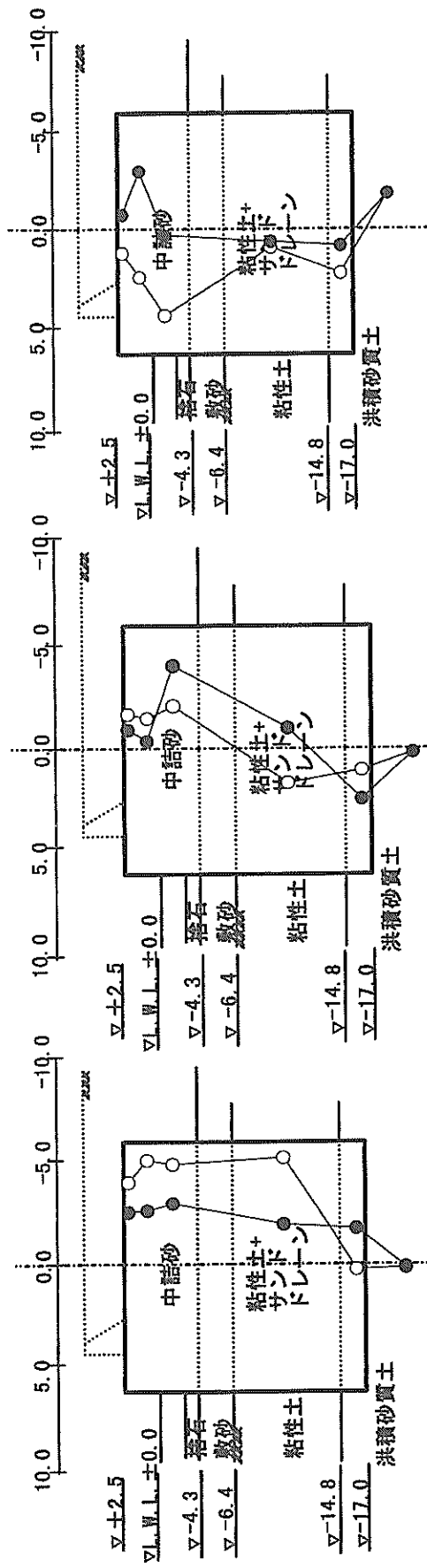


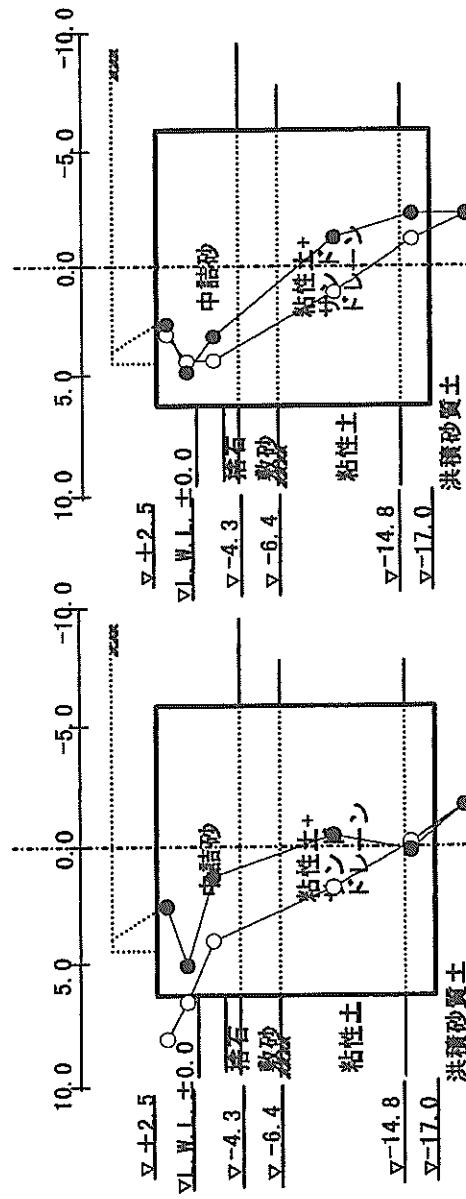
図-4.53 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 92-8)



T1=9.33sec

T2=9.39

T3=9.45



T4=9.51

T5=9.57

T6=9.63

図-4.54 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

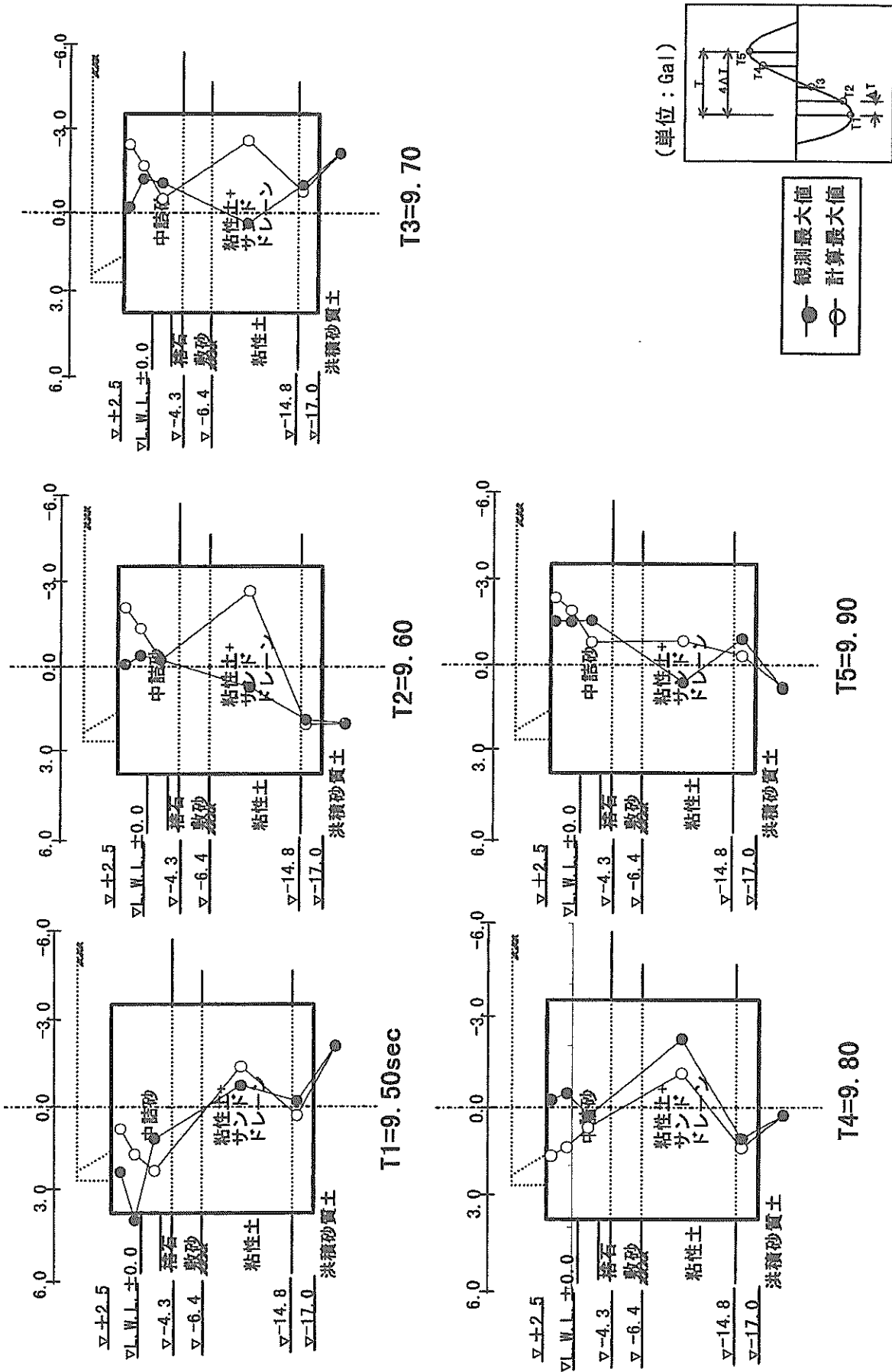
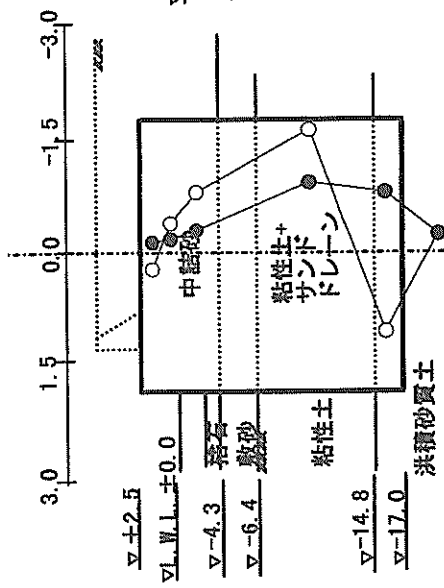
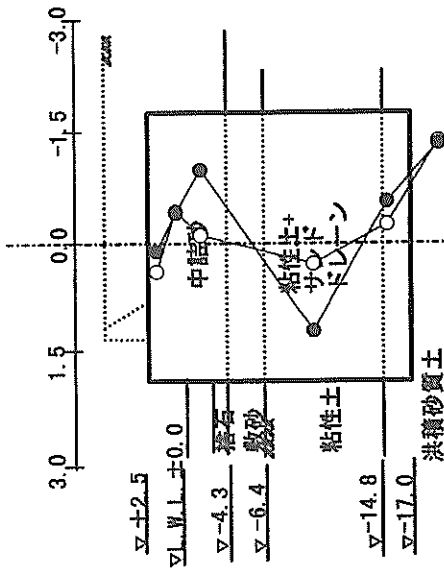


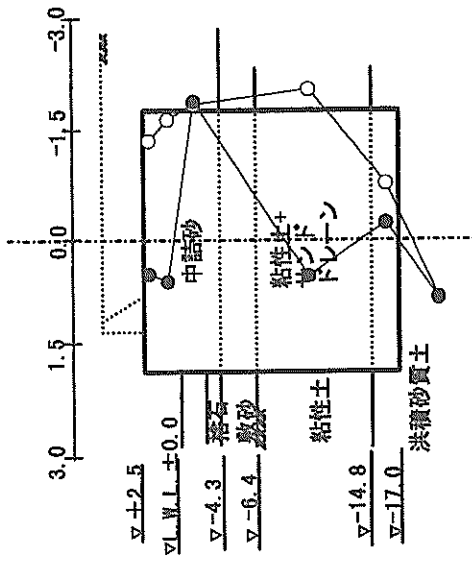
図-4.55 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-2)



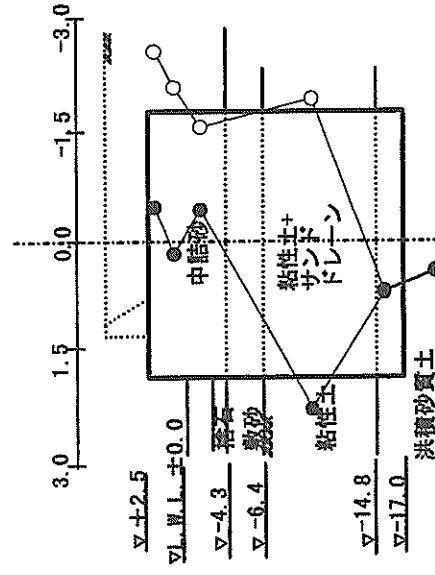
T1=8.20sec



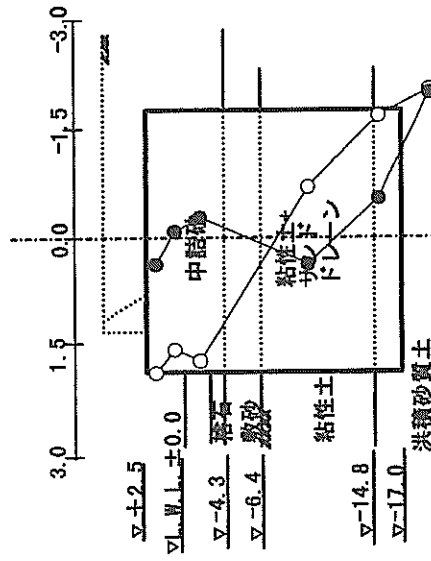
T2=8.30



T3=8.40

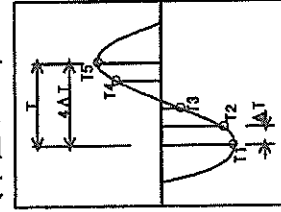


T4=8.50



T5=8.60

(単位: Gal)



● 観測最大値
 ○ 計算最大値

図-4.56 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

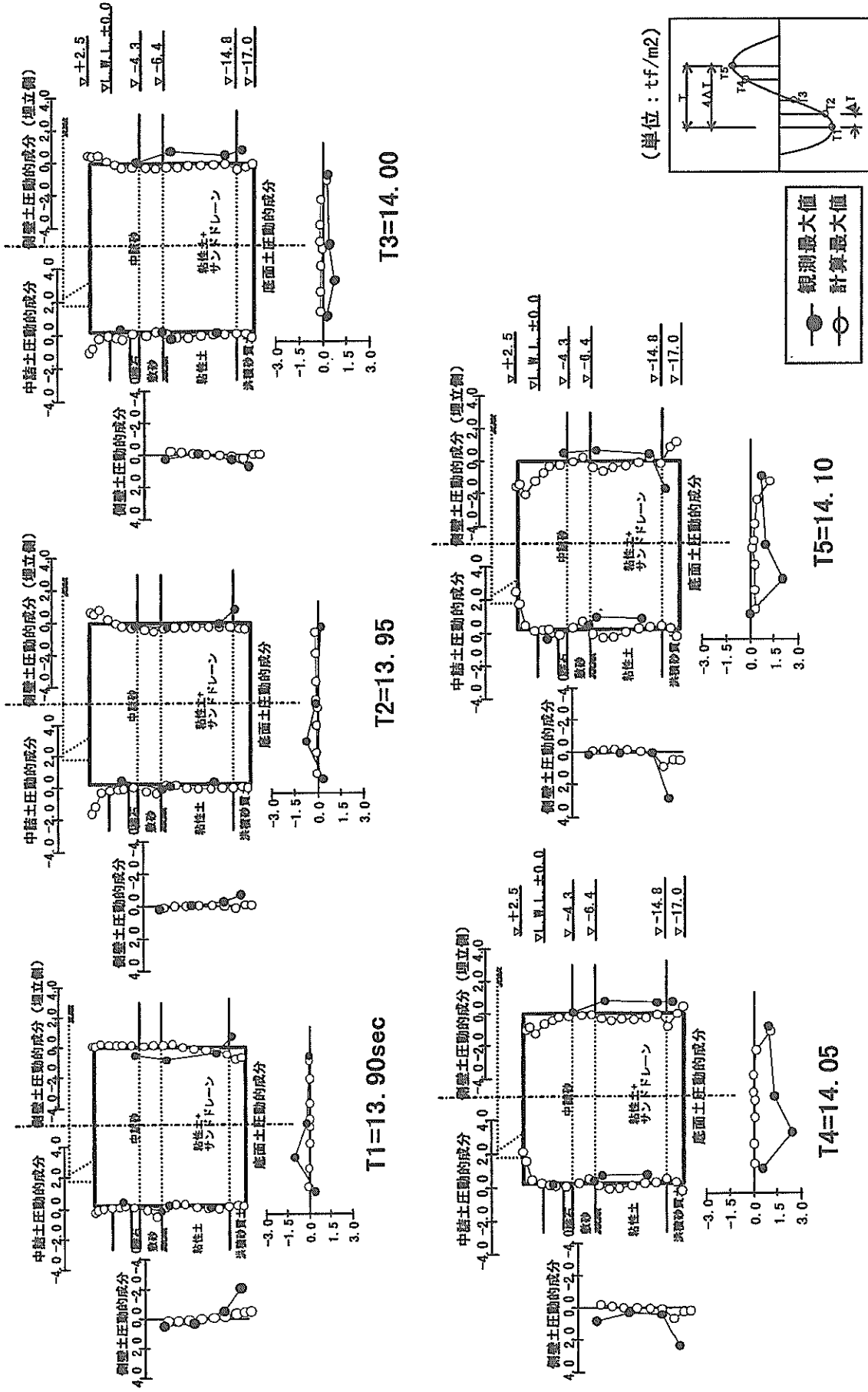


図-4.57 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

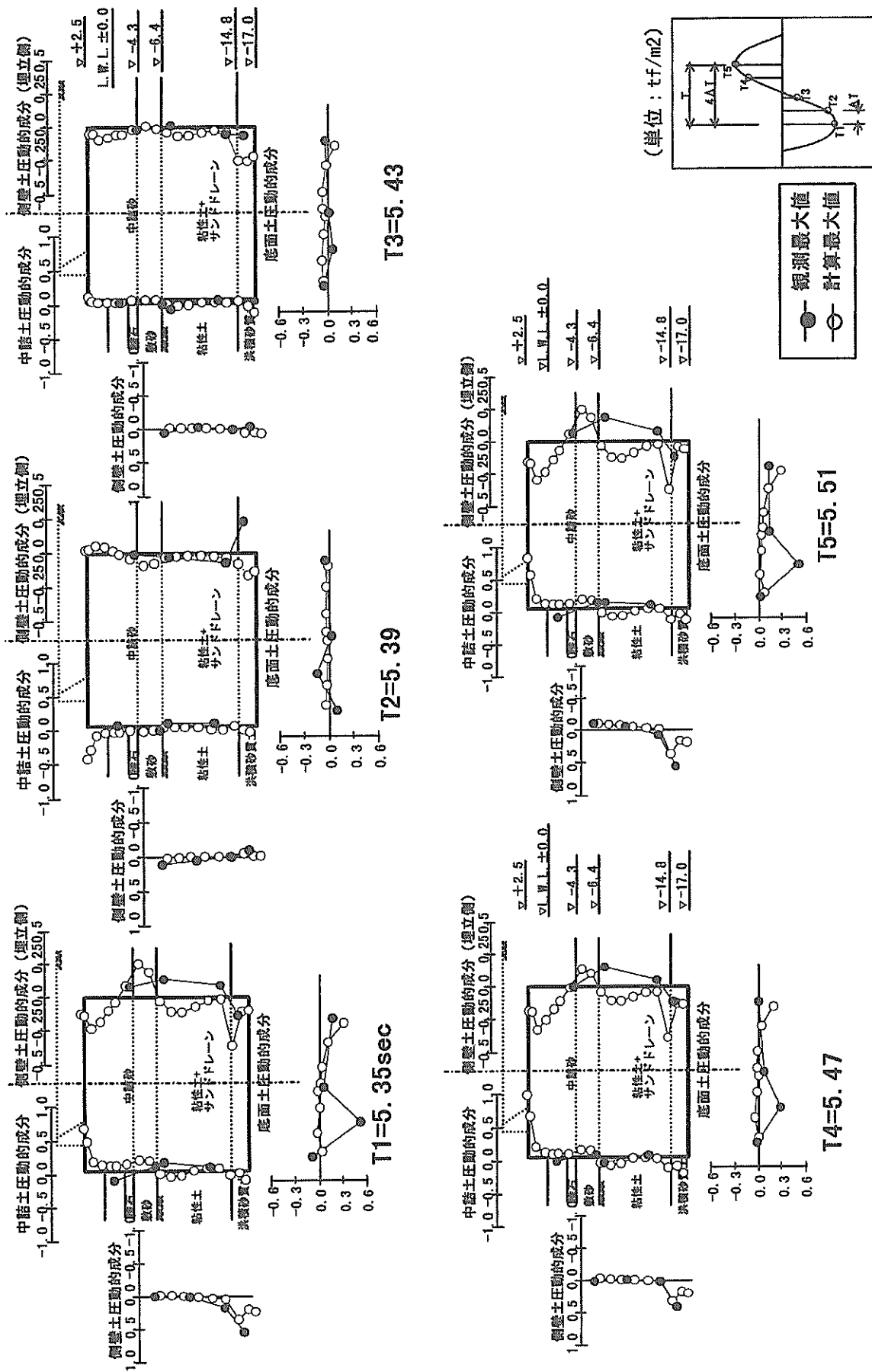
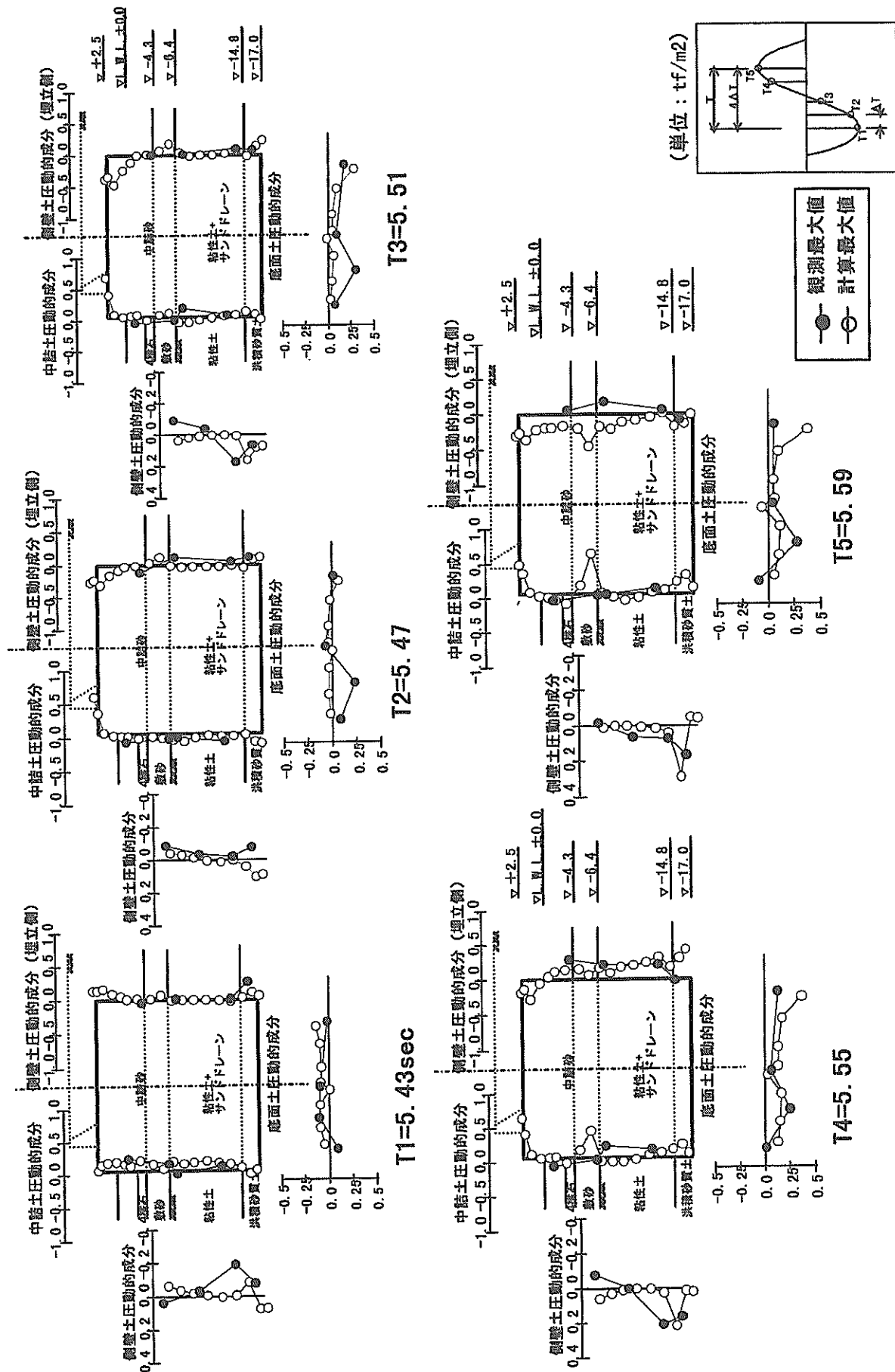


図-4.58 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 94-3)



図一4.59 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

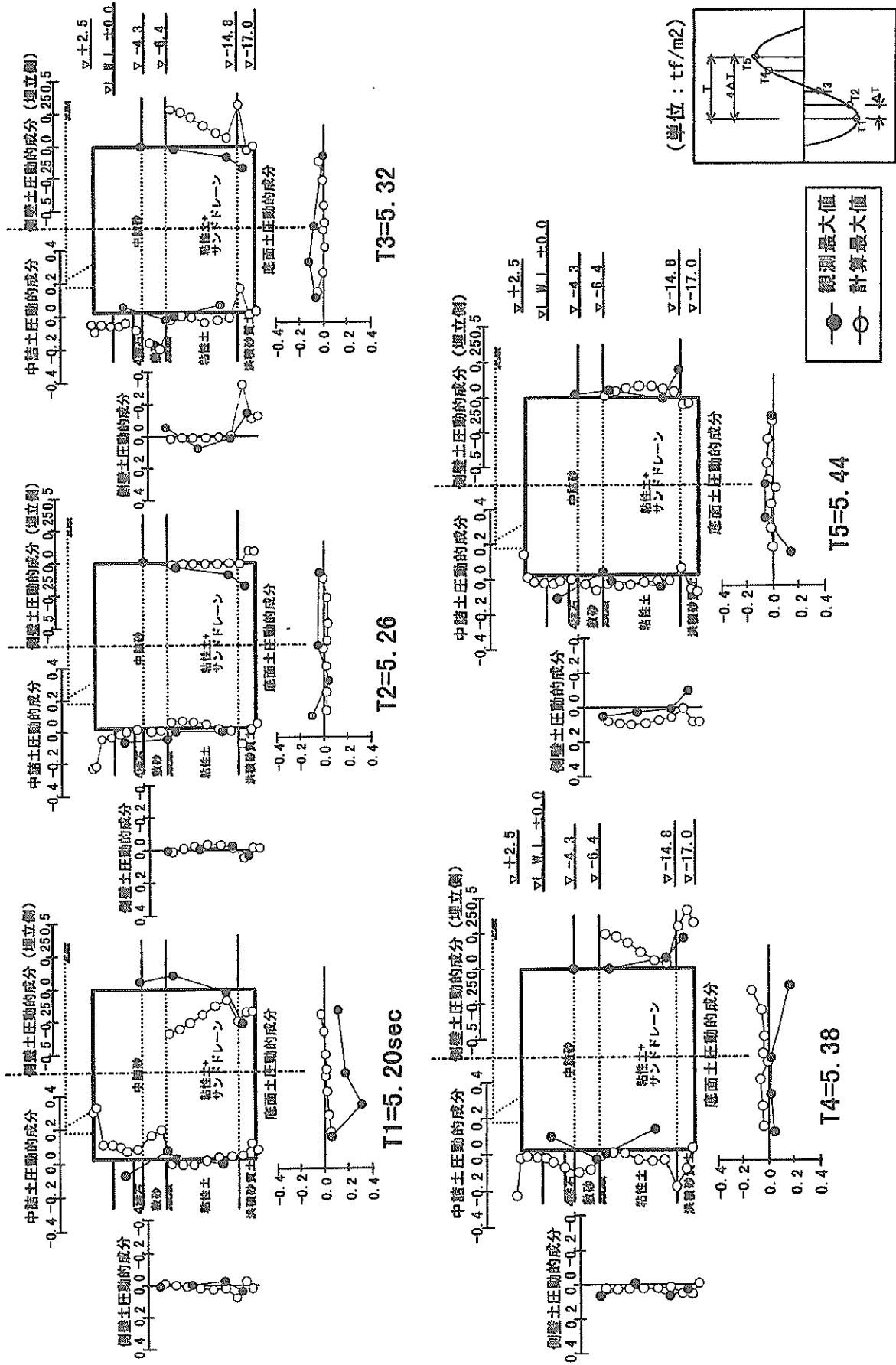


図-4.61 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

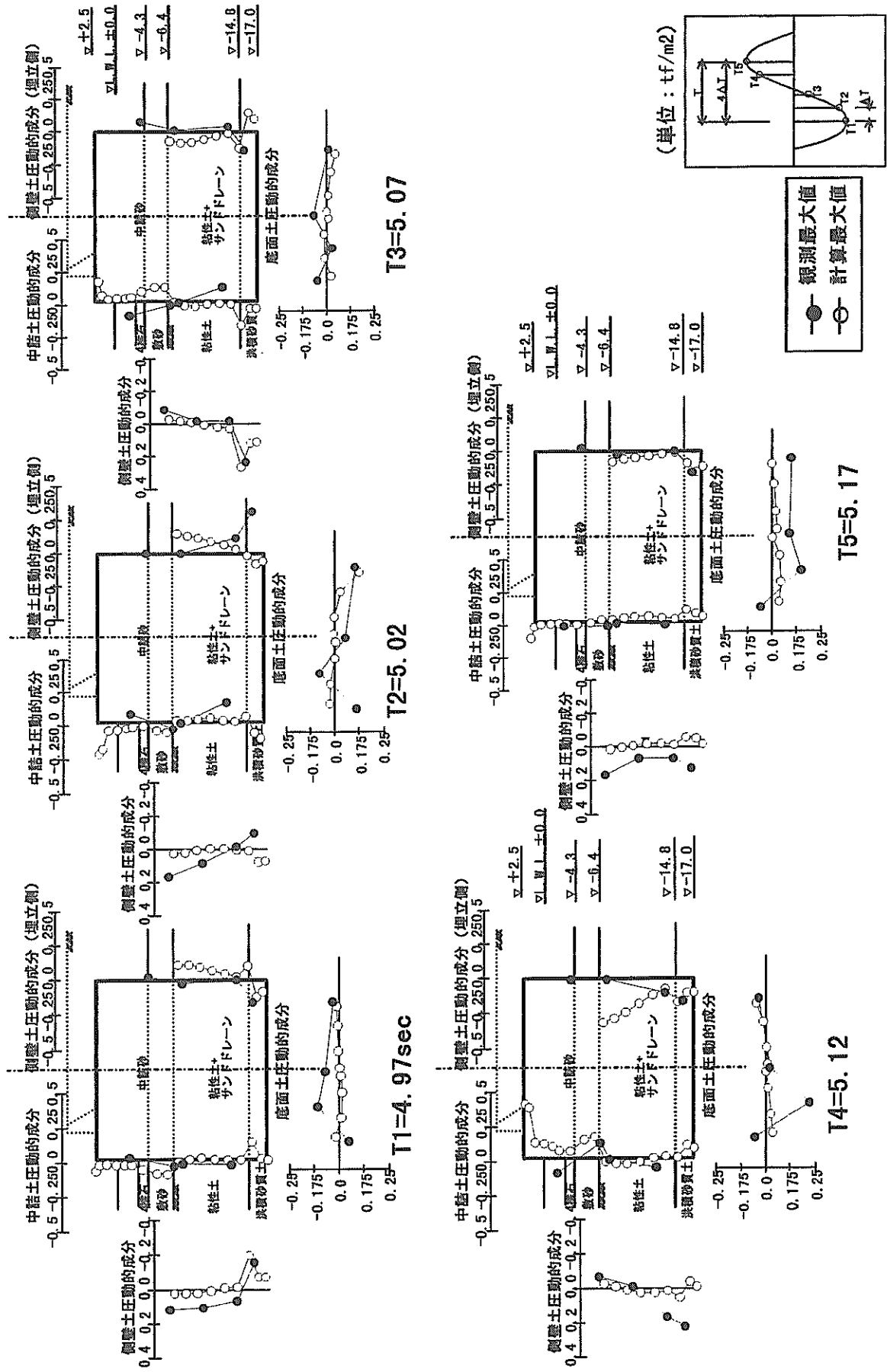


図-4.62 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No.62-2)

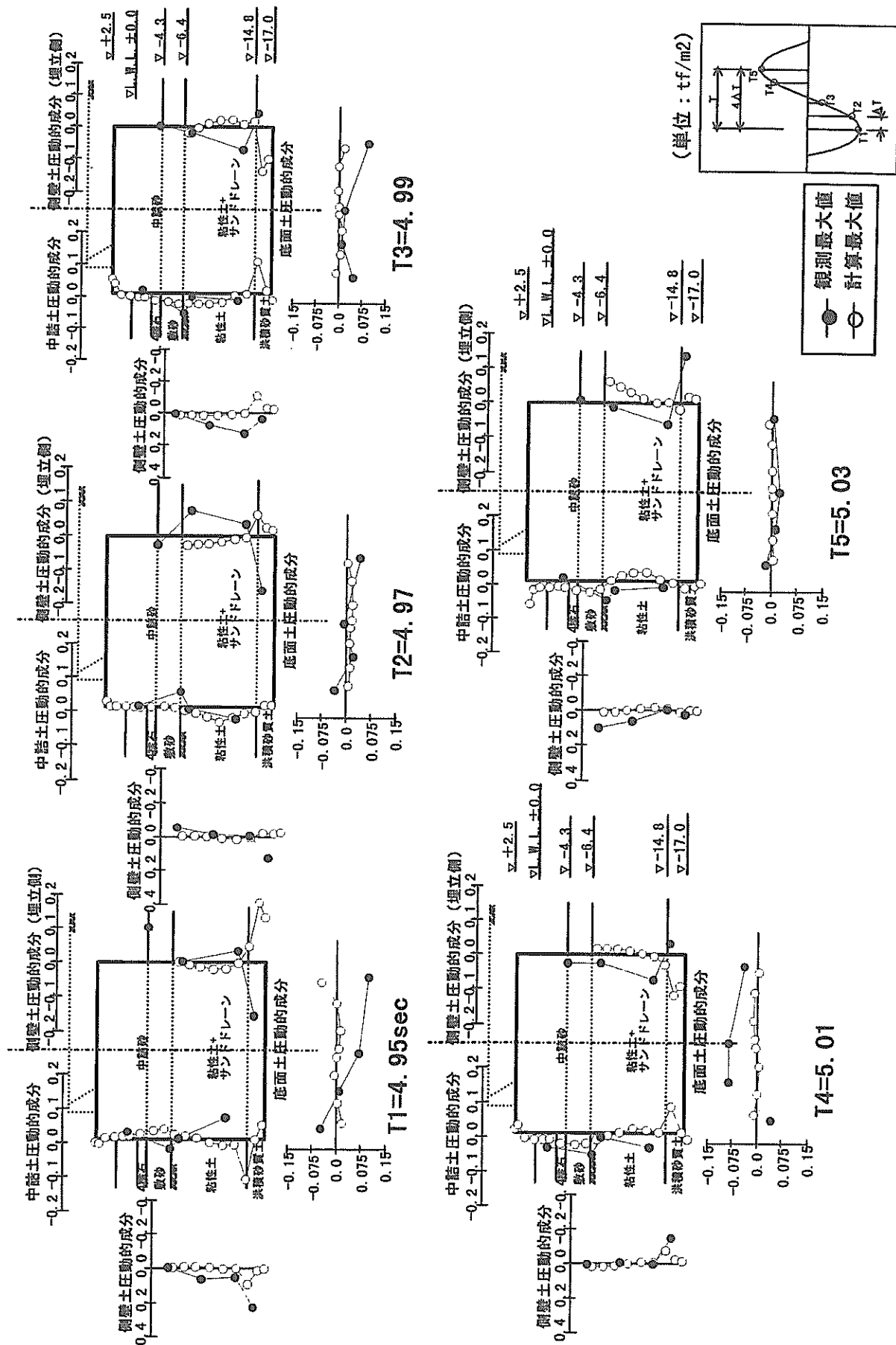
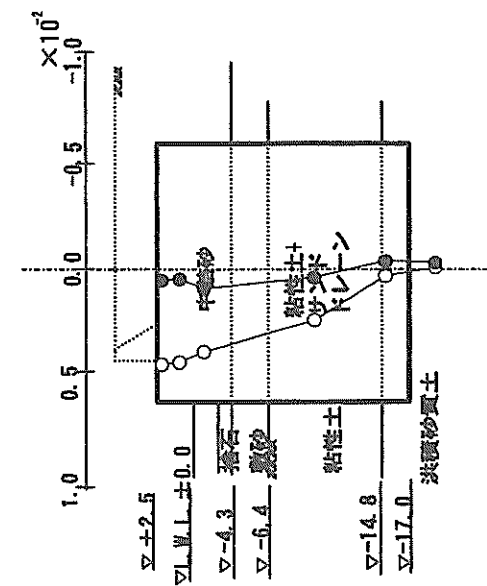
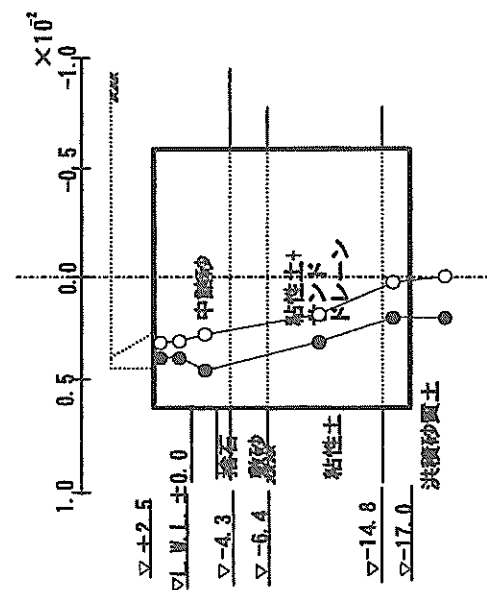


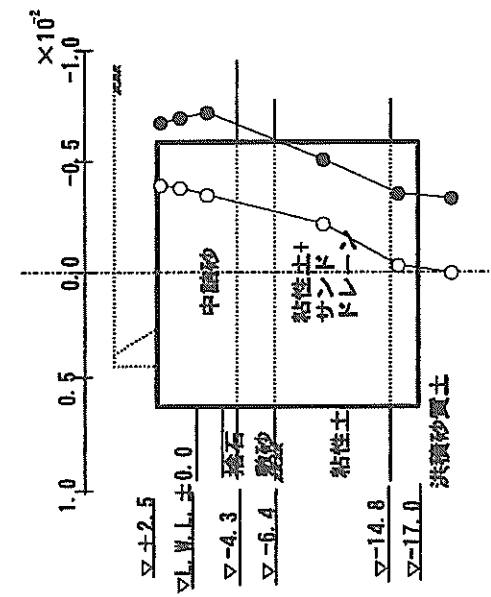
図-4.63 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-3)



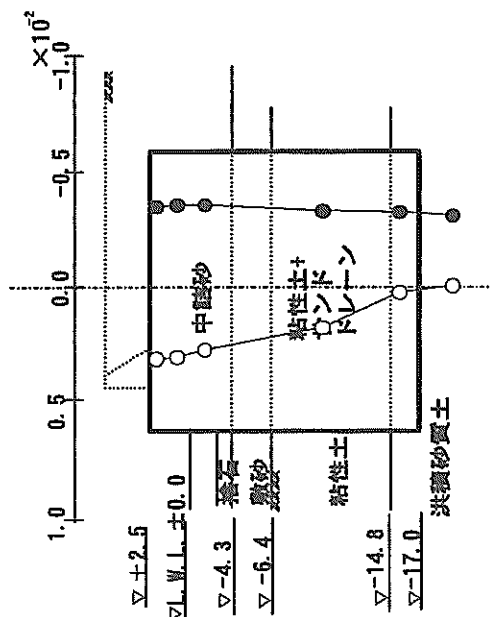
T1=17.62sec



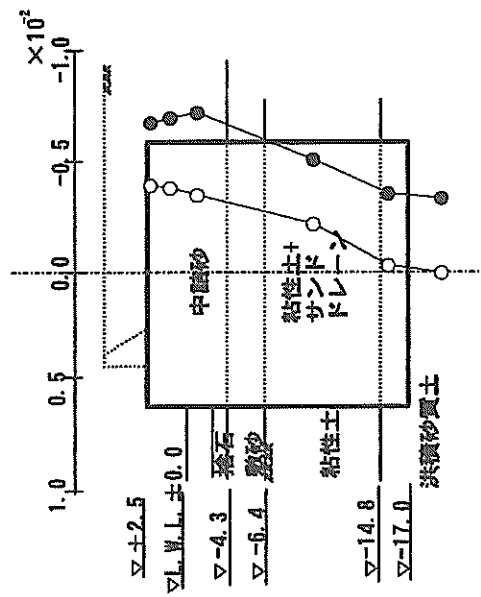
T2=17.76



T3=17.90



T4=18.04



T5=18.18

(単位: m)

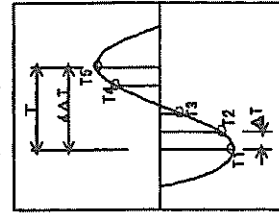


図-4.64 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

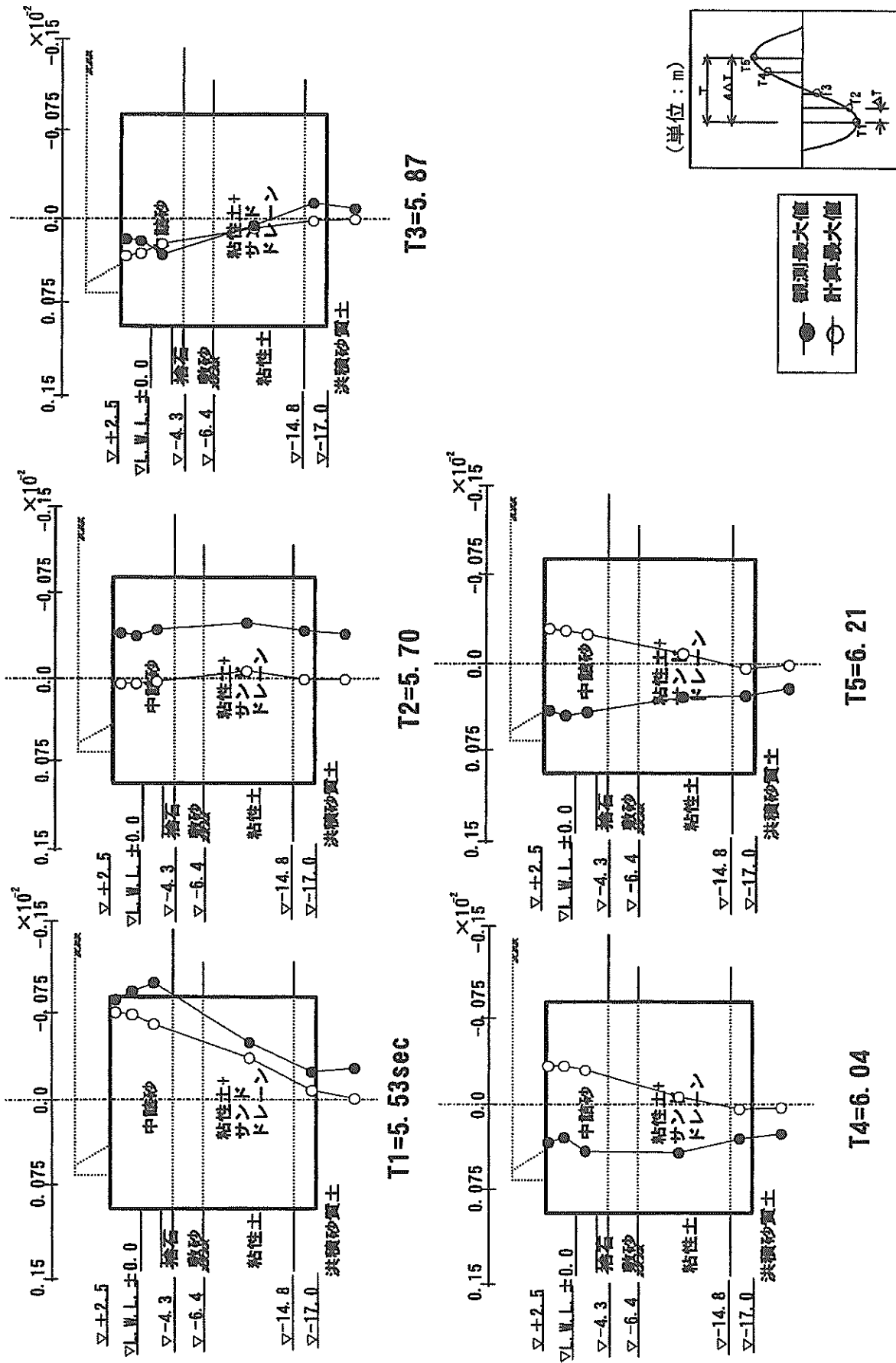
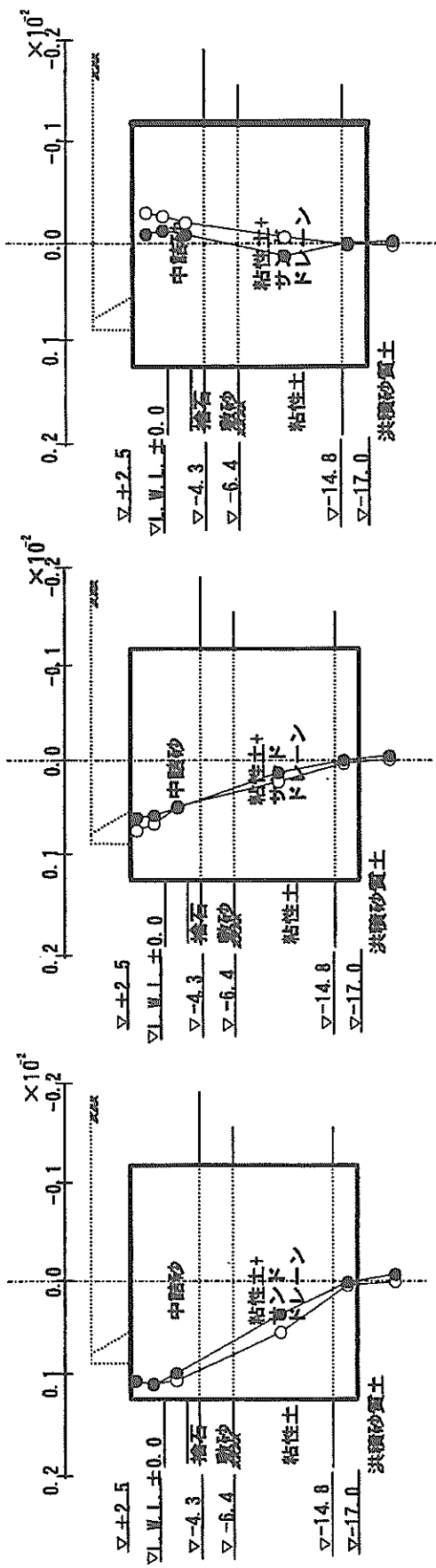


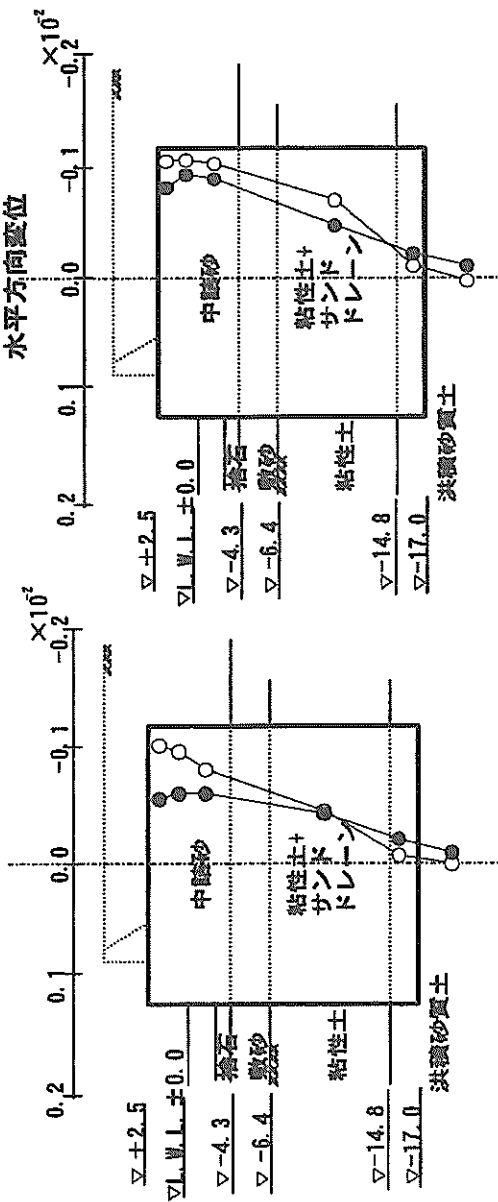
図-4.65 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No.94-3)



T1=5.32sec

T2=5.39
水平方向変位

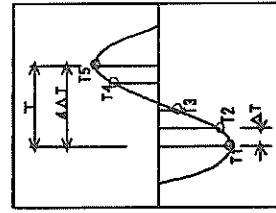
T3=5.46



T4=5.53

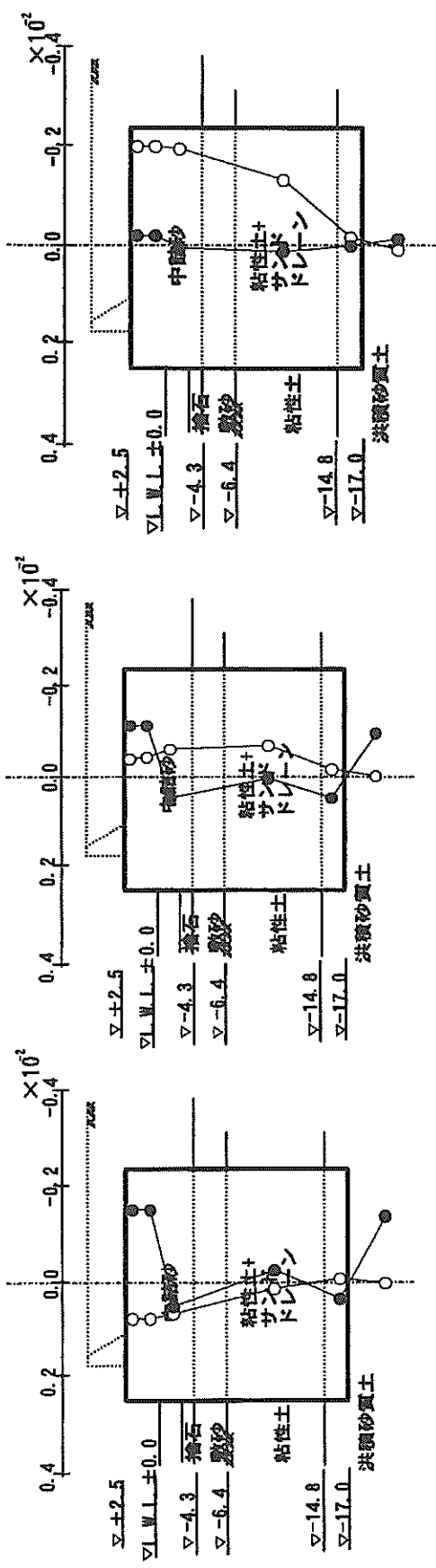
T5=5.60

(単位: m)



● 観測最大値
○ 計算最大値

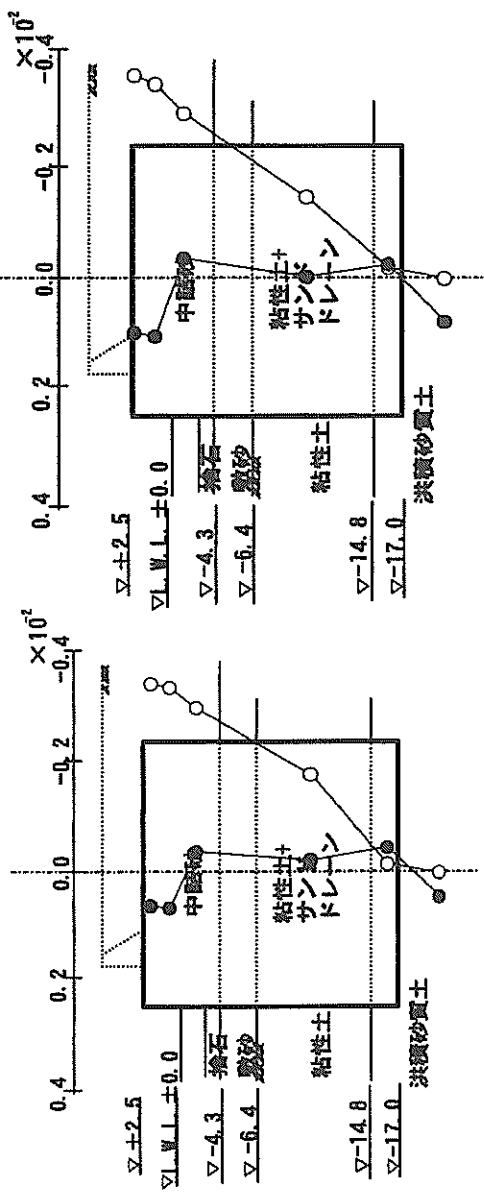
図4.66 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 93-2)



T1=6.32sec

T2=6.37

T3=6.42



T4=6.47

T5=6.52

T6=6.57

(単位：m)

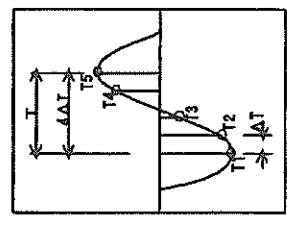


図-4.67 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 92-8)

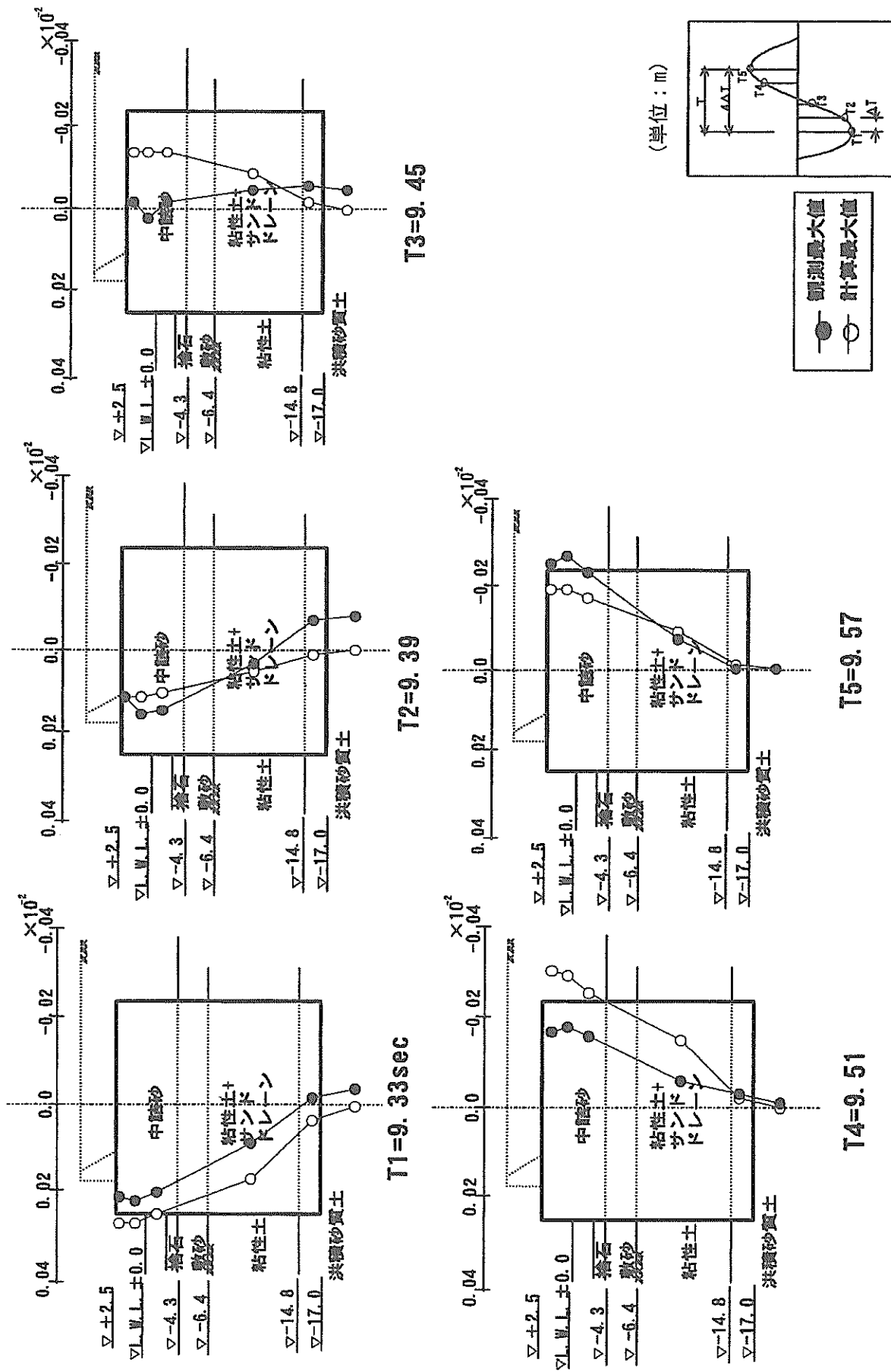


図-4.68 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No.62-1)

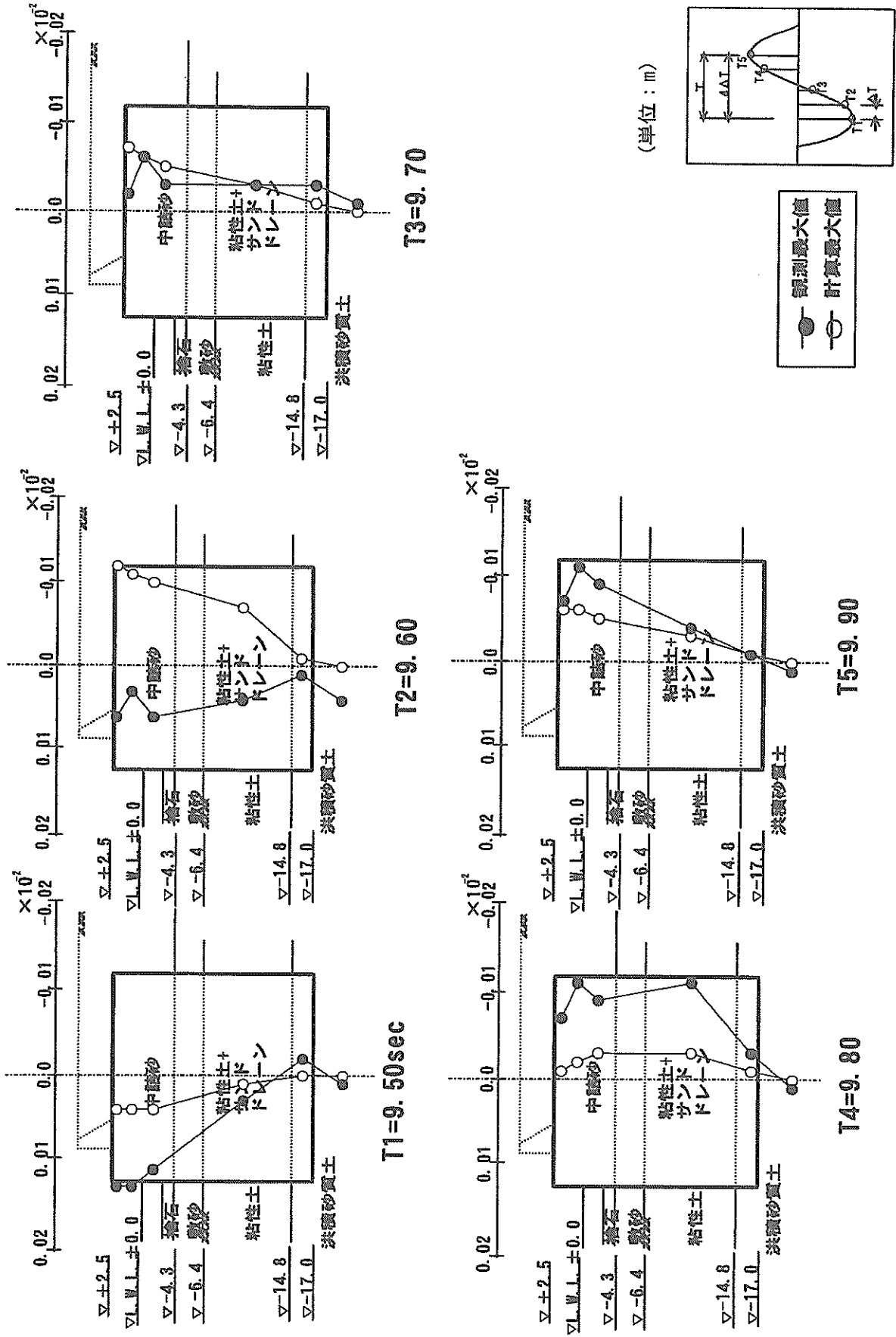


図-4.69 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-2)

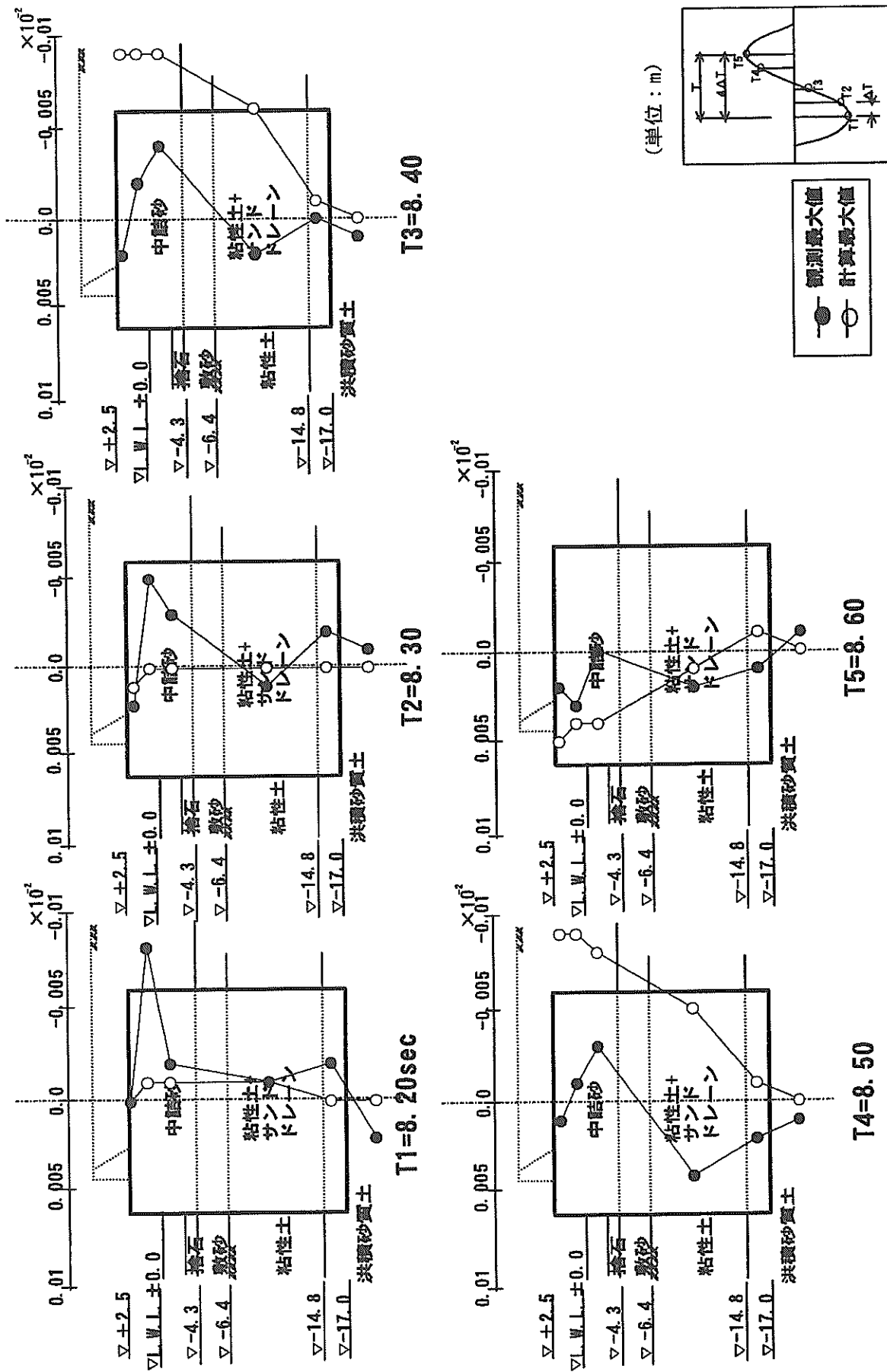


図-4.70 同一時刻における設計値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

4. 5 地盤がセルの挙動に及ぼす影響

4.4 2) に記したように、護岸各部の伝達関数の計算値は、第一のピークにおける振動数帯域で観測結果と良い一致を示した。ここでは、根入れ鋼板セルの振動特性に関する今後の基礎資料を得ることを目的として、地盤の固有振動数を求めセルの卓越振動数と比較することで地盤がセルの地震時挙動に与える影響を確認した。地盤の固有振動数は中詰土位置及び裏埋土位置が成層地盤の表面とみなし SHAKE による解析を行った。解析条件は定数及び層分割ともに BEAD III 検討時と同様とした。ただし、入力波に関してはホワイトノイズを観測記録 No.97-1 と同レベル(48Gal)に合わせ入射した。計算結果と観測記録 No.97-1 との比較を図-4. 71~4. 76に示す。第一のピークの着目すると図-4. 74の裏埋土の振動特性よりも図-4. 75のセル周辺の沖積粘性土層の振動特性との一致が見られる。他の土層についても 2.0Hz 付近に一次のピークを示しているが、いずれも観測値と若干ずれている。このことから今回のような根入れの深いセルの挙動は、最も根入れ量の大きい沖積粘性土に支配されていたと考えられる。また、そのことは観測結果において裏埋土ありなしでセルの固有振動数に大きな違いがなかったことから確認できる。

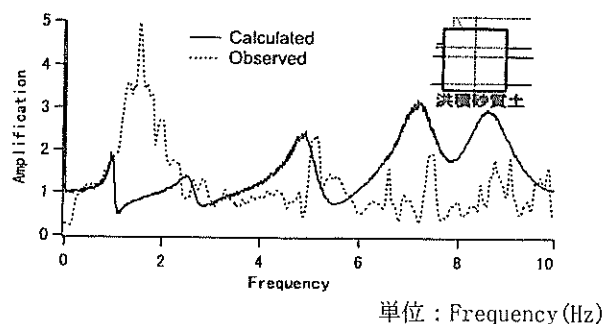


図-4.73 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (セル内洪積砂質土)

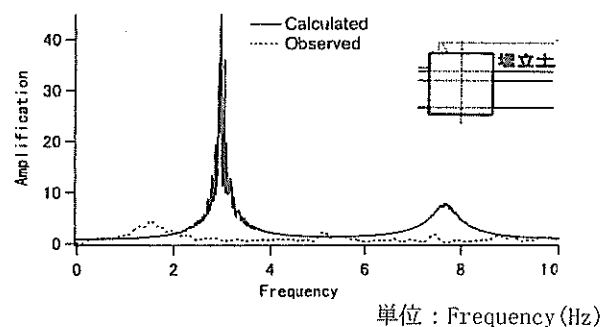


図-4.74 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (裏埋土)

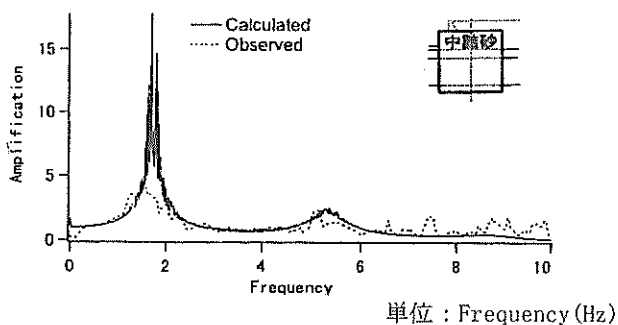


図-4.71 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (セル内中詰土)

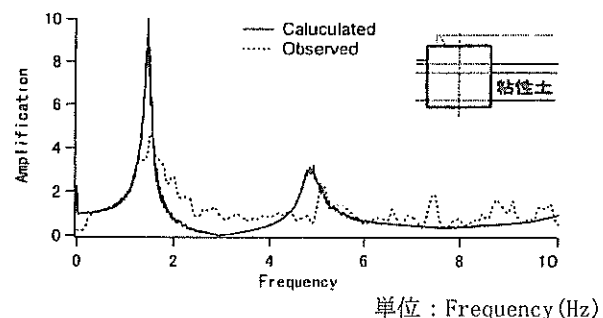


図-4.75 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (沖積粘性土)

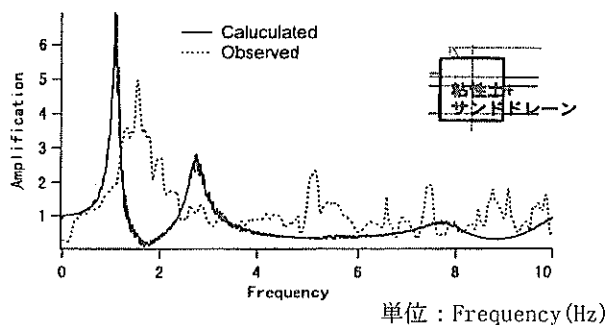


図-4.72 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (セル内沖積粘性土)

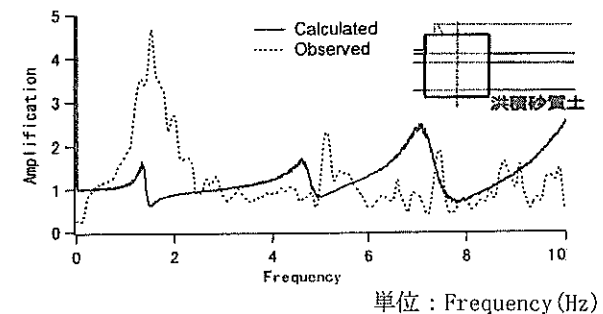


図-4.76 計算波形と観測波形のセル天端における伝達関数 (洪積砂質土)

5. 現行設計法の安定計算値と観測値との比較

ここでは、現行設計法による設計計算値と観測値とを比較することで、設計法の妥当性の検証を試みた。

5.1 根入れ鋼板セルの設計法

根入れ鋼板セル護岸の設計における安定計算の外力を図-5.1, 5.2に示す。現行設計法による安定計算の概要は以下のとおりである。

- ①セル体は地盤に弾性支持されている剛体とみなし、荷重に対する地盤反力及び壁体の変位を求める。

- ②水平地盤反力は受働土圧強度をこえないものとする。
- ③鉛直摩擦抵抗力は砂質土の場合は作用水平土圧と $\tan \delta$ との積とし、粘性土においては無視する。
- ④壁体底面の鉛直地盤反力において引張応力は生じないものとする。
- ⑤根入れ部には裏埋土の重量による静止土圧を考慮する。

5.2 計算条件

観測記録 No.62-1 ~ 62-3 までは裏埋土のない防波堤形状、観測記録 No.92-8 ~ 97-1 までは裏埋土のある護岸形状での安定計算条件を示す断面図を図-5.3, 5.4に示す。

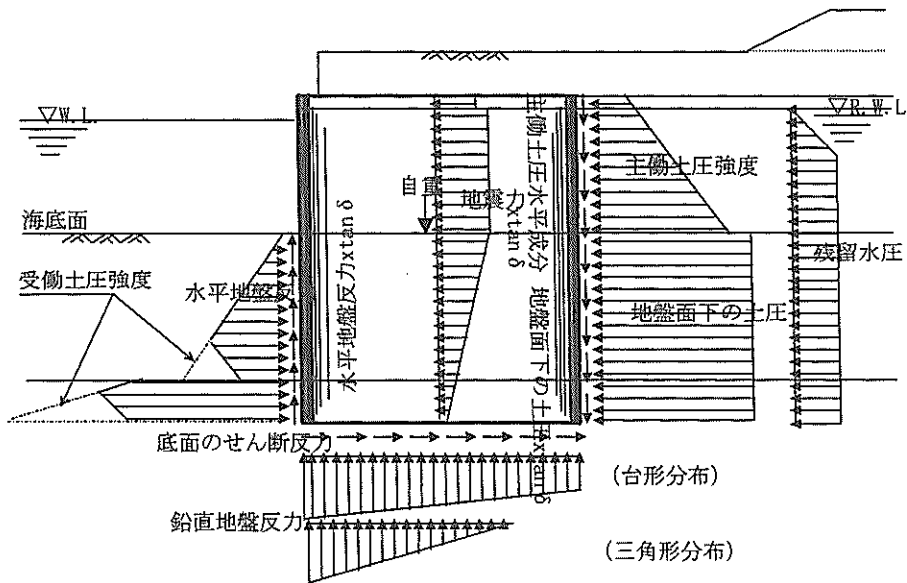


図-5.1 安定計算における外力（護岸形状）

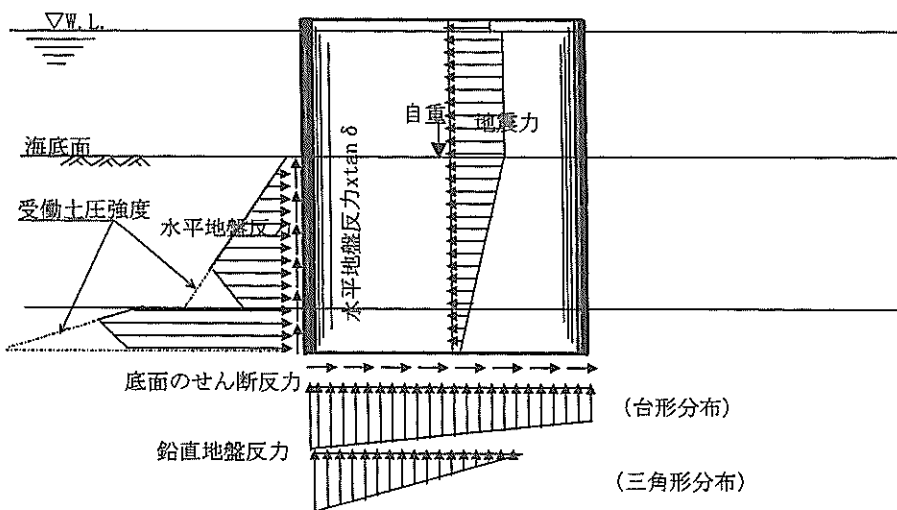


図-5.2 安定計算における外力（防波堤形状）

いずれの断面においても、計算の簡略化のため護岸前面の捨石及び敷砂層を無視することとする。また埋立部天端高さが観測記録の取得時期によって若干異なるが、同様に簡略化のため+5.0mとする。

設計計算における設計水平震度算定には、セル天端A-4位置の加速度観測値を用いた。通常、重力式護岸の設計震度は背後地盤の地表面加速度から求めることとなっており、今回の鋼板セル護岸設計でもこれにならって、地表面に最も近いA-4位置の加速度観測値を採用した。

(1)換算壁体幅

円形セルを断面積の等しい矩形断面に置き換えた換算壁体幅Bを有する連続壁体として解析する。セル殻半径R=10m、セルとアークの接点までの角度 $\theta_1=40^\circ$ 、アーク半径 $r=5.97m$ 、アーク角度 $\theta_2=100^\circ$ とすると換算壁

体幅B=18.43mとなる。

(2)土質条件

解析に用いる土質条件を図-5.3, 5.4に示す。昭和61年度に実施された土質調査結果を用いた。なお、解析時の海底面は敷砂層を無視した粘性土層上端レベル(-6.4m)とした。

5.3 安定計算結果及び比較

(1)土圧及び土圧の動的成分

図-5.5~5.11に土圧及び土圧の動的成分の計算値と観測値をプロットしたものを示す。計算値の動的成分とは、設計震度を考慮した値から設計震度を零とした値を引いたものである。また観測値は最大値をプロットしたものであり、各々の発生時刻は同一でない。

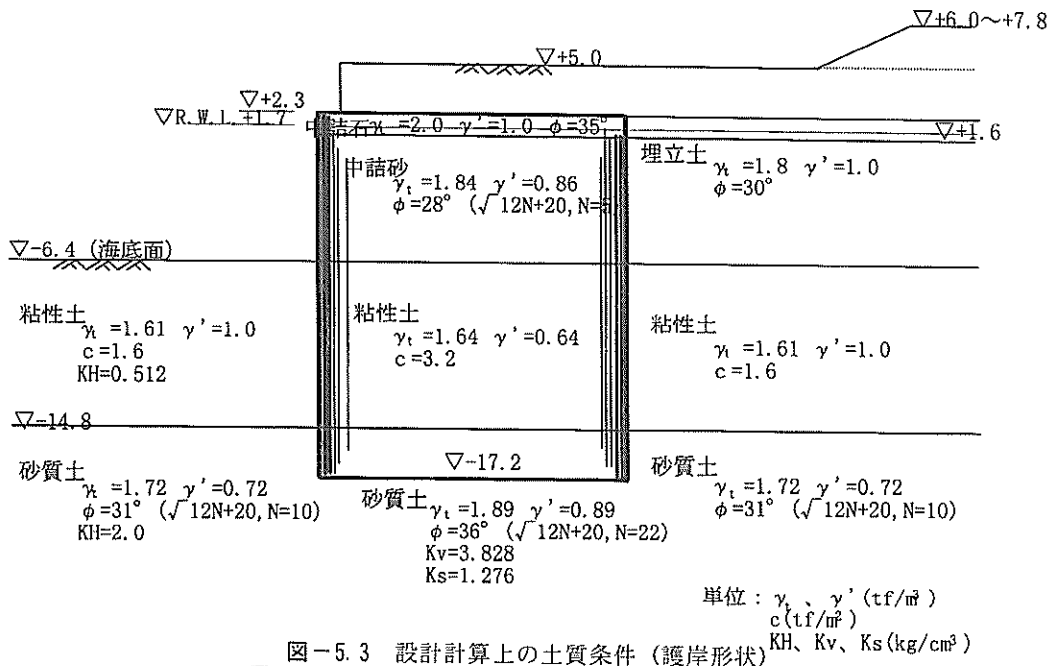


図-5.3 設計計算上の土質条件 (護岸形状)

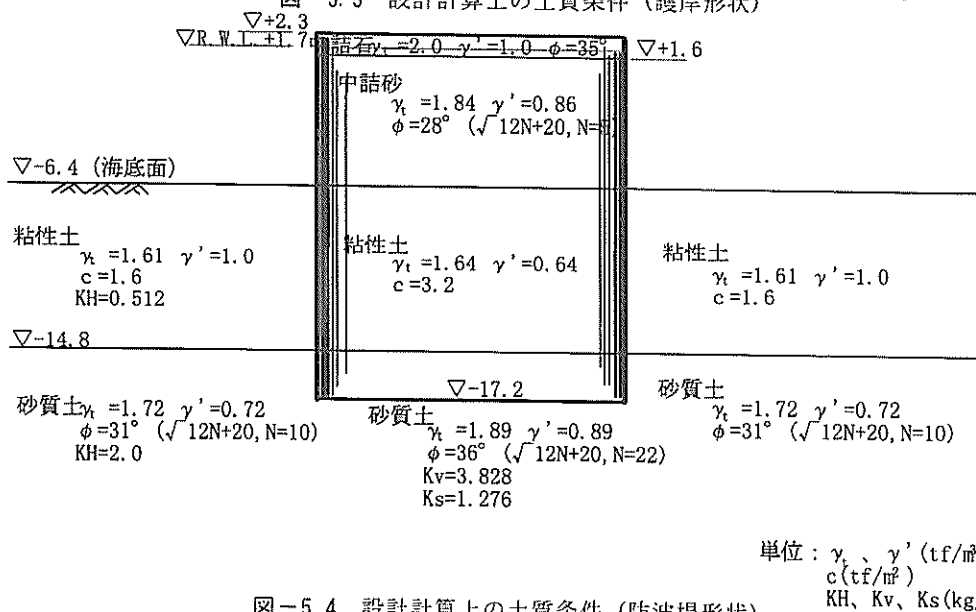


図-5.4 設計計算上の土質条件 (防波堤形状)

前壁土圧は上方で大きく下方で小さい値を示す逆三角形分布となっており、これは観測値と同様の分布である。

底面反力においては、計算値が前しと後しで最大値を示し、セル中央でほぼ零となる分布に対して、観測値は矩形の分布を示し計算値に比較しかなり小さい値を示

す。

前壁土圧及び底面反力とも計算値の方が観測値よりも大きく計算値は安全側であるといえる。ただし、観測記録 No.62-1 ~ 62-3 の前壁土圧に関して計算値より観測値のほうが大きな値を示している。また、既往の研究⁷⁾で

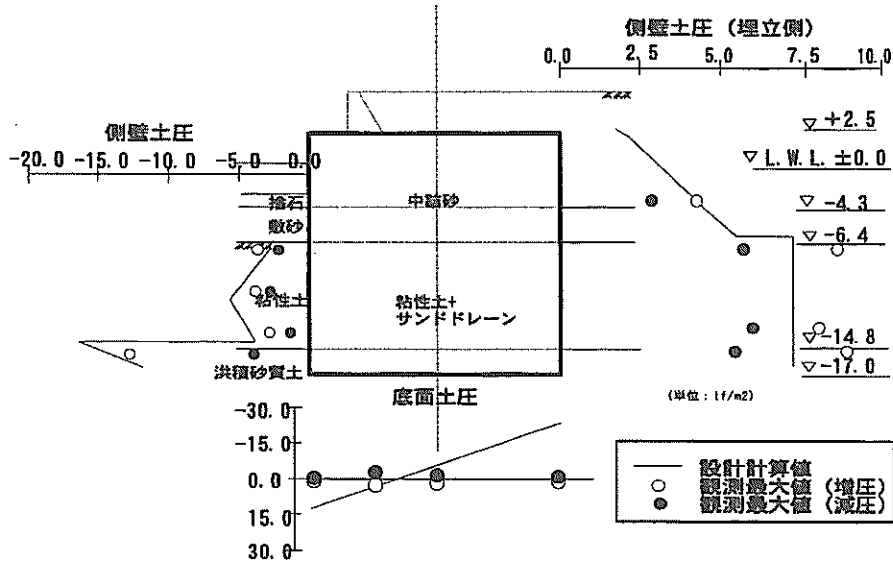


図-5.5 設計値と観測値の比較 (観測No. 97-1)

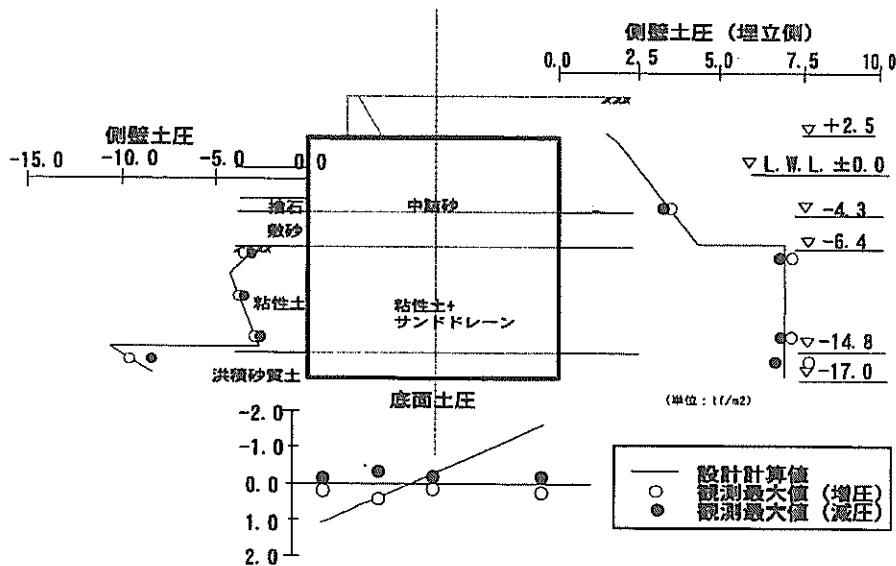


図-5.6 設計値と観測値の比較 (観測No. 94-3)

もあるように側壁動土圧の分布は、入力地震動の周波数特性によって支配的となる要因を異にする。構造物の固有振動数を境にそれより小さい場合には地盤と構造物の相対的な挙動によるものや地盤の挙動のみによるものが支配的となる。一方、それより大きな振動数が卓越する

場合は地盤の挙動によるものが支配的となる。また、固有値付近では構造物の挙動に支配される。一方、設計においては固有値付近における構造物の挙動すなわちロッキング振動の卓越する地震時の変位から側壁土圧を求めている。今回、設計計算値との比較を行っている観測最

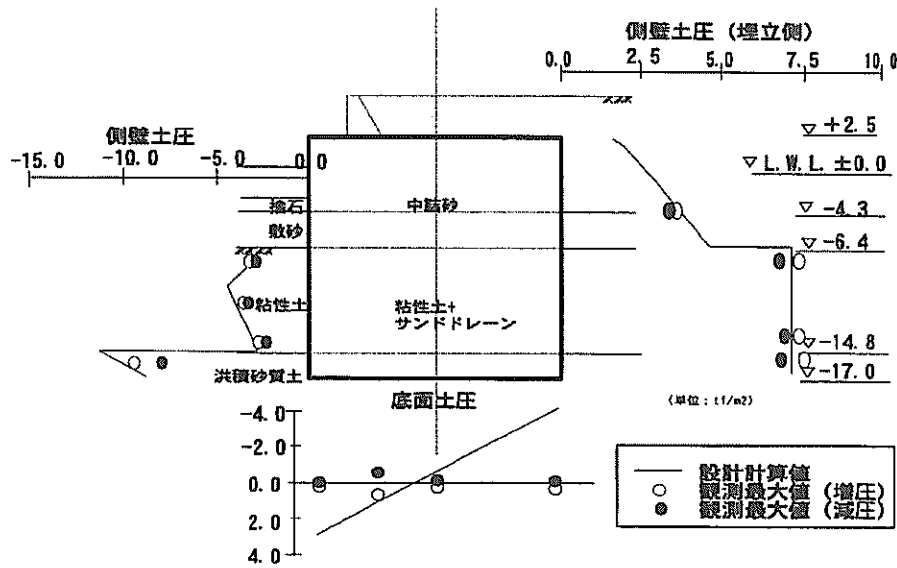


図-5.7 設計値と観測値の比較 (観測No. 93-2)

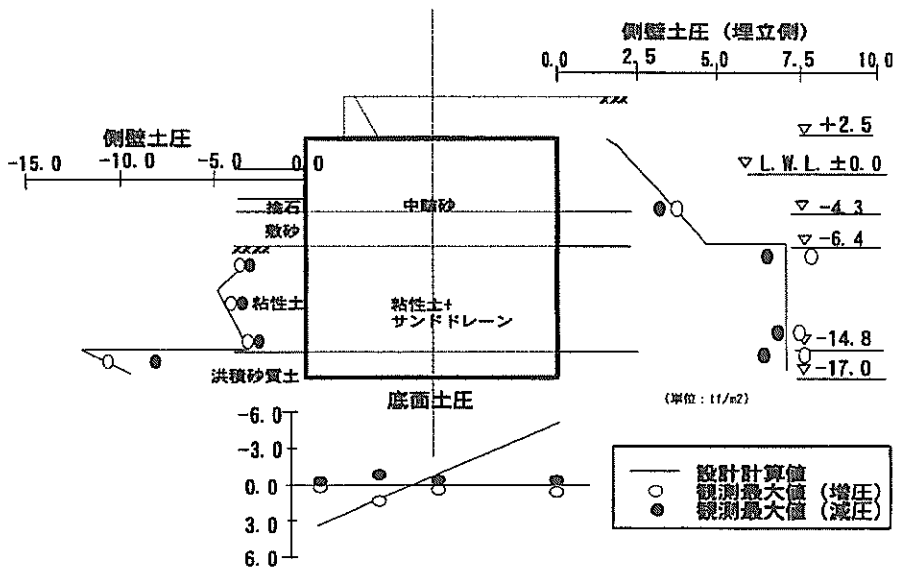


図-5.8 設計値と観測値の比較 (観測No. 92-8)

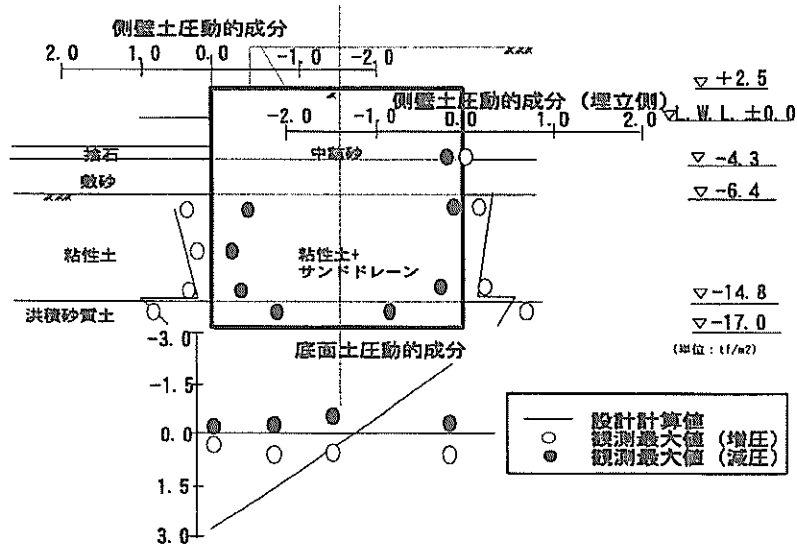


図-5.9 設計値と観測値の比較 (観測No. 62-1)

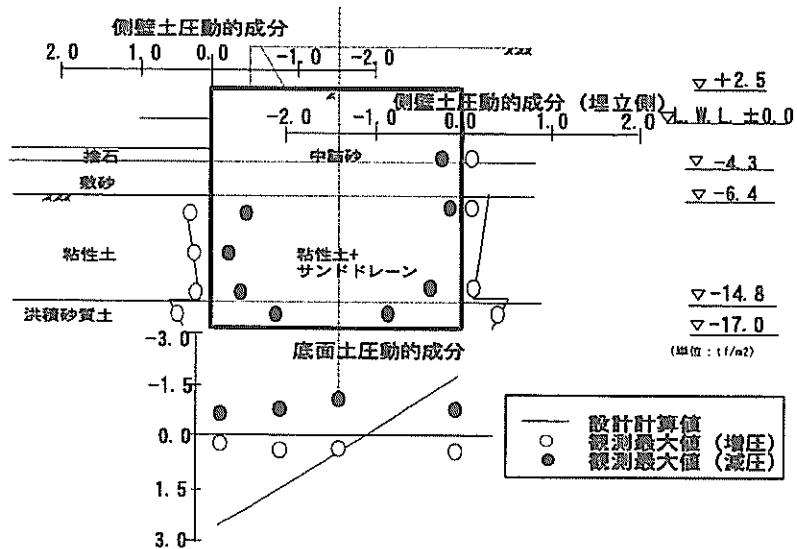


図-5.10 設計値と観測値の比較 (観測No. 62-2)

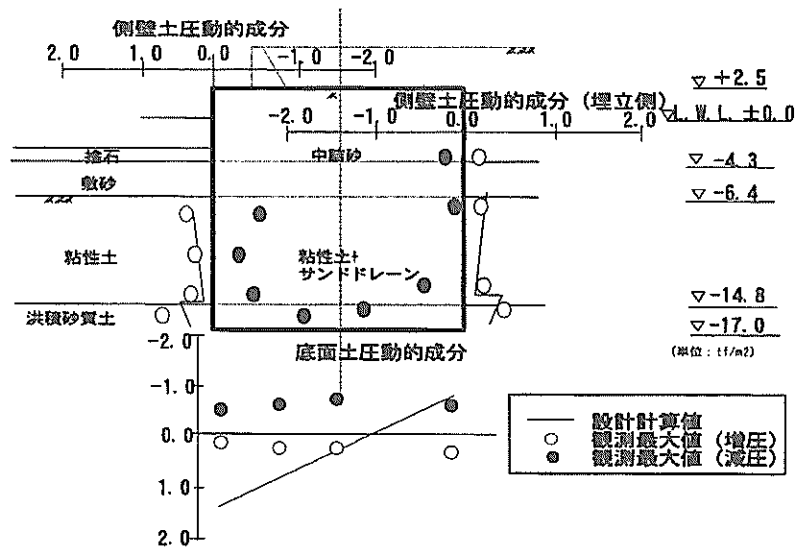


図-5.11 設計値と観測値の比較 (観測No. 62-3)

大値が、構造物と土のどのような相互作用によるものか明確となっていないため、ロッキング振動を仮定する設計計算値では、地盤と構造物との相互作用もしくは地盤による動的挙動を忠実に表現し得ていないと思われる。このことが計算値と観測値との一致が見られない原因一つと考えられる。

(2) 加速度に対する分布

図-5.12~5.23に加速度に対する土圧、底面反力及び変位の計算値及び観測値をプロットしたものを示す。検討対象としては、設計の安定計算において重要となってくる前壁海底面部、裏埋土部、底面前し及び後し部とする。また、変位については頭部変位として加速度計 A-4 位置において検討を行う。図-5.12~5.17までは裏埋土ありの観測記録 No.97-1 ~ 92-8 のもの、図-5.18~5.23までは裏埋土なしの観測記録 No.62-1 ~ 62-3 のそれぞれ加速度の向きを異にするものである。

前壁土圧は、図-5.12, 5.18 (E-5 の位置) を除いて計算値と観測値は加速度の増加とともに大きくなる傾向にあり、かつ計算値のほうが安全側を示す。E-5 の位置で観測値が計算値を上まわった原因としては、一つには現行設計法では「水平地盤反力は受働土圧強度をこえない」としているため海底面に近づくにつれ土圧計算値が小さくなってしまふことが考えられる。また、もう一つの原因としては計算の簡略化により捨石及び敷砂層を設計条件から除いたためと考えられる。

底面反力及び変位の場合も、計算値と観測値は加速度の増加とともに大きくなるが観測値の増加割合が低く、今回観測の加速度レベル(基盤位置で 48Gal)以下では動的成分の発生量は少なかった。

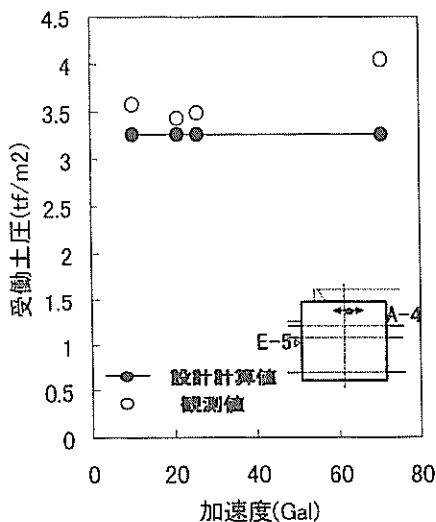


図-5.12 前壁土圧の観測値と設計計算値の比較

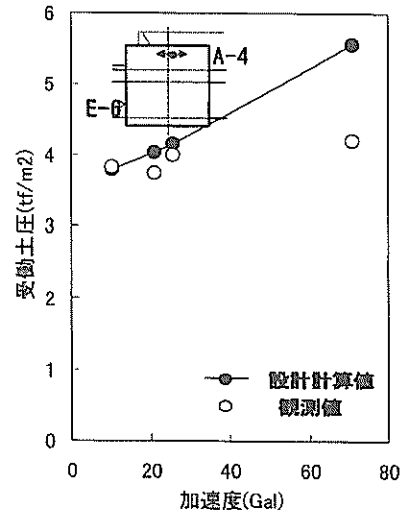


図-5.13 前壁土圧の観測値と設計計算値の比較

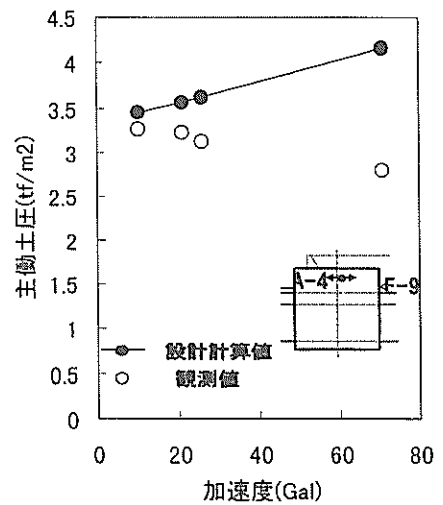


図-5.14 後壁土圧の観測値と設計計算値の比較

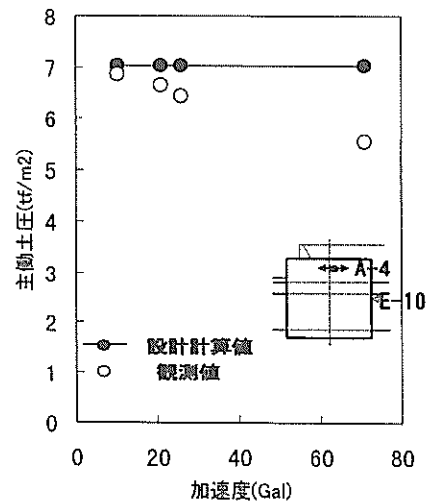


図-5.15 後壁土圧の観測値と設計計算値の比較

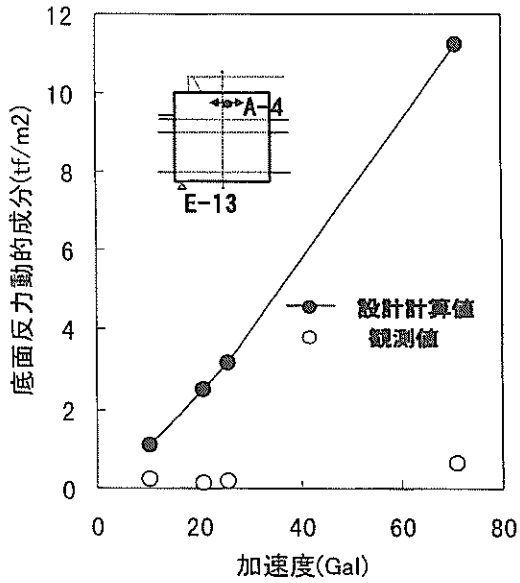


図-5.16 底面反力の観測値と設計計算値の比較

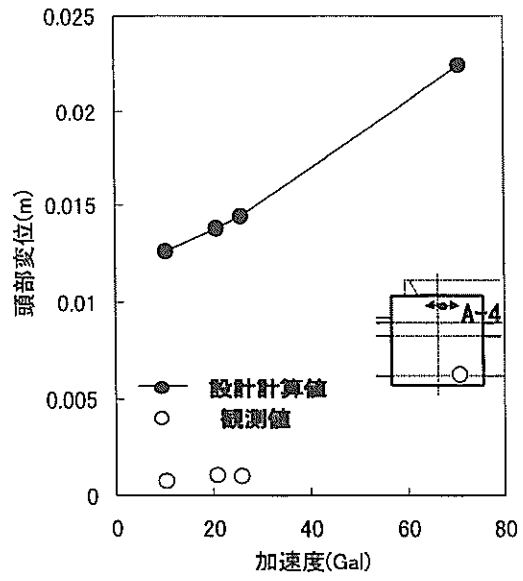


図-5.17 頭部変位の観測値と設計計算値の比較

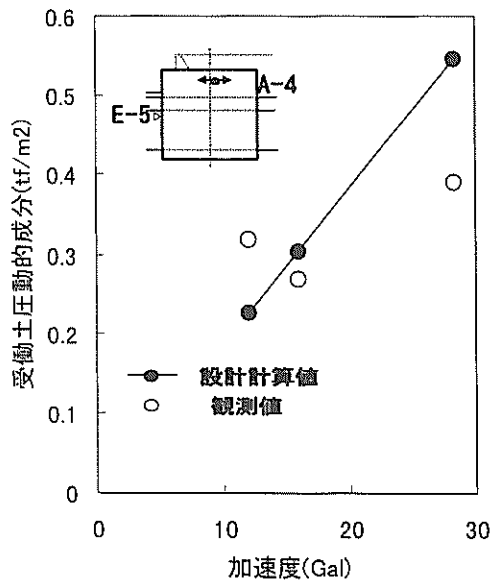


図-5.18 前壁土圧の観測値と設計計算値の比較

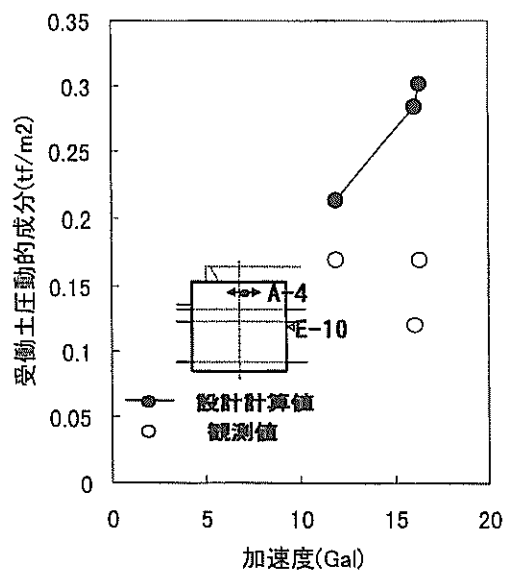


図-5.19 後壁土圧の観測値と設計計算値の比較

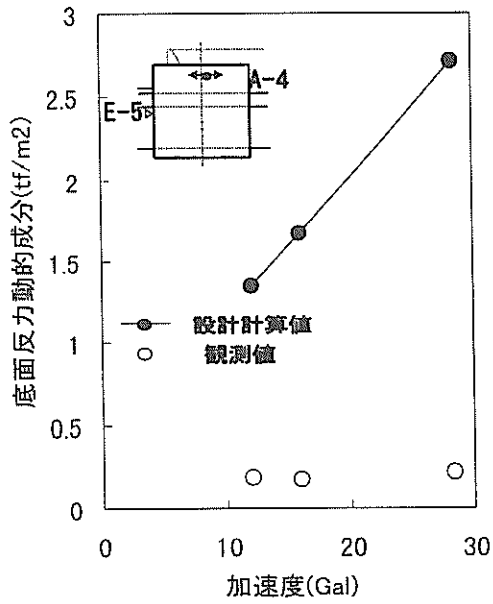


図-5.20 底面反力の観測値と設計計算値の比較

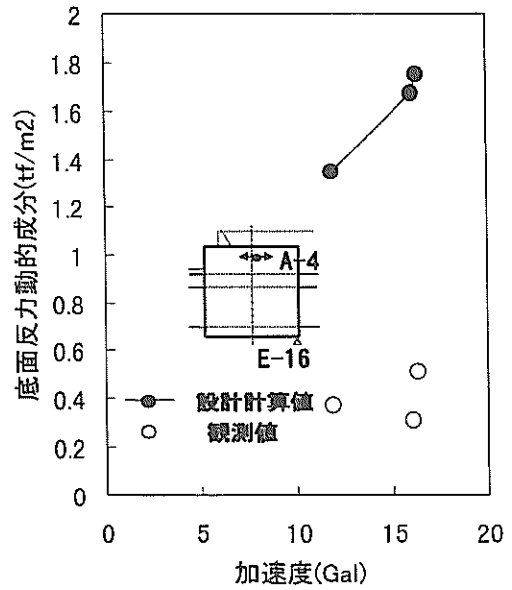


図-5.21 底面反力の観測値と設計計算値の比較

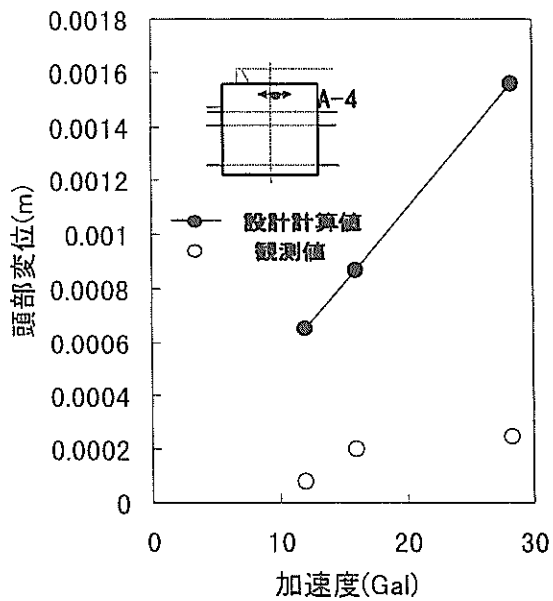


図-5.22 頭部変位の観測値と設計計算値の比較

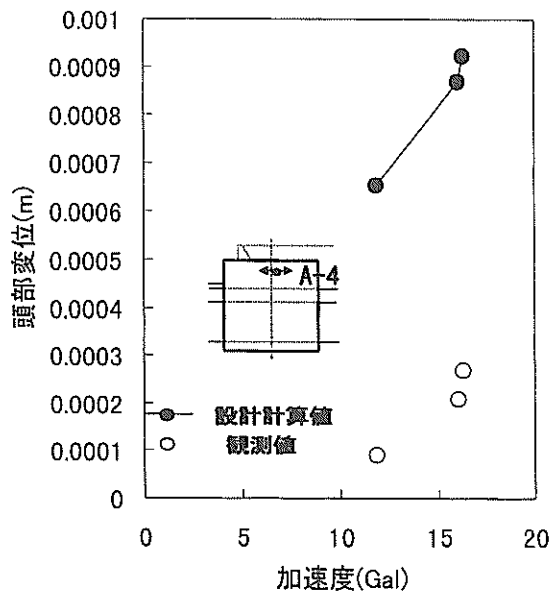


図-5.23 頭部変位の観測値と設計計算値の比較

6. まとめ

名古屋港第二ポートアイランド護岸の根入れ鋼板セルで地震観測を行い、その結果を解析し、観測値と、地震応答解析結果及び現行設計法による安定計算結果と比較した。得られた主な知見は次のとおりである。

(1) 観測地震波

観測された地震波から、加速度レベルの大きな7記録を解析対象とした。この中で最も大きな加速度は基盤で48Gal、セル天端で71Galであった。これらの記録は地震により異なった周波数特性を示していた。

(2) 振動特性

地震時のセル体各部の周波数伝達関数では2.0Hz付近にピークが認められ、その応答倍率が上へ向かうにつれて増幅していることから、この振動数はセルの一次固有振動数と思われる。

(3) 地盤、セルの地震時挙動

最大値ならびに同一時刻の値の分布図から、側壁土圧は海底面付近で大きな値を示す逆三角形に近い分布形状を示していることが判明した。底面土圧分布は前し付近の土圧の符号に一部逆転は見られるが一様な三角形分布は明確には確認できなかった。この底面土圧分布が明確でなかったのは、セル体の地震時変位が微小であること、または土圧計埋設時の埋戻し土の重量がアーチング作用によって土圧計に充分伝達されていないこと等が原因と思われる。

セル天端の両端の鉛直方向加速度を与えるA-1・A-2両者の加速度値はほぼ等しく、符号が逆転していた。これは変位についても同様の傾向がみられていた。これらのことからセルはロッキング振動をしているものと推定される。

(4) 解析

① 根入れ鋼板セルの設計指針による側壁土圧の計算値は海底面付近で大きな値を示す逆三角形分布となり、砂質土部の土圧が粘性土部に比較して大きな値を示す。これは観測値と同様の傾向である。底面土圧及び変位の計算値は観測値を上まっていた。

② BEAD IIIによる計算値と観測値の比較を行った。計算値の伝達関数は観測値同様、2.0Hz付近においてピークが発生していた。また、側壁土圧の計算値は観測値と同様、逆三角形を示していた。底面土圧の計算値は三角形分布を示すのに対して観測値は、台形分布を示して

いる。一方、加速度及び変位についての計算値は比較的よく一致している。これらのことから、今回の加速度レベル（基盤で約50Gal）の範囲内においては、セルの地震時挙動をBEAD IIIによる地震応答解析により再現可能であると考えられる。

7. あとがき

名古屋港第二ポートアイランド護岸に採用された根入れ鋼板セル護岸に対し地震観測及び地震応答解析を行った。また現行設計法による設計計算を行い、その妥当性を検証した。今回観測の加速度レベルが設計震度に比較すると小さかったことや、BEAD IIIによる解析においてセル殻剛性の低減の仮定を行ったこと等が今後の検討課題として考えられる。また以前行われている根入れ鋼板セル護岸地震観測（港研資料 No.648）に比して根入れが深い今回の観測結果では、底面反力に関して設計・解析ともにその形状及び値に観測値との良い一致が見られなかった。この原因の1つに計測誤差も考えられるが、比較的根入れの深い鋼板セル護岸の底面反力について重力式構造物と同様の三角形及び台形分布を適用することにも検討の余地があると思われる。

上記をまとめ、以下の事項を今後の検討課題とする。

- (1) 設計条件に近い大きな震度での根入れ鋼板セル護岸の挙動。（設計時 $K_h=0.1$ に対し、今回の観測では $K_h=0.072$ ）
- (2) 有限要素法による地震応答解析（BEAD III）における大きな加速度レベルでのセルのモデル化の手法及びその妥当性。
- (3) セル護岸の根入れが比較的深い場合における底面反力の形状及び低減の検討。

（1998年11月30日受付）

謝辞

本研究で対象とした観測記録は第五港湾建設局名古屋港湾空港工事事務所から提供されたものである。また、解析にあたって種々の資料を第五港湾建設局名古屋港湾空港工事事務所、設計室から提供していただいた。最後ではあるが関係者に対し心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター：根入れ式鋼板セル設計指針、1985年
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、改訂版(下巻)、第8偏8章根入れ鋼板セル式係船岸、1997

年, pp.125 ~ 135

3) 野田節男, 北澤壯介, 飯田毅, 森 信夫, 田淵 博:
根入れ鋼板セルの耐震性に関する実験的研究, 港湾技術
研究所報告, 第 21 卷, 3 号, 1982 年, pp.79 ~ 167.

4) 野田節男, 倉田栄一, 飯田毅, 武藤裕之, 吉田洋二郎,
萩野秀雄: 根入れ鋼板セル護岸の地震観測, 港湾技研資
料, No.648, 1989 年

5) 松永康男, 桜井博孝, 森田年一, 井合進: 港湾地域強
震観測年報 (1992 & 1993), 港湾技研資料, No.776, 1994
年, pp.234

6) (財) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対
策ハンドブック (改訂版), 1997 年

7) 風間基樹, 稲富隆昌: 根入れのある剛体構造物の地震
時安定性に関する解析的研究, 港湾技術研究所報告, 第
25 卷, 第 3 号, 1986 年, pp.71 ~ 124.

主要記号表

e : 間隙比

G_0 : 微小ひずみ時のせん断弾性係数 (tf/m²)

g : 重力加速度 (m/s²)

q_u : 一軸圧縮強度 (tf/m²)

V_s : せん断波速度 (m/s)

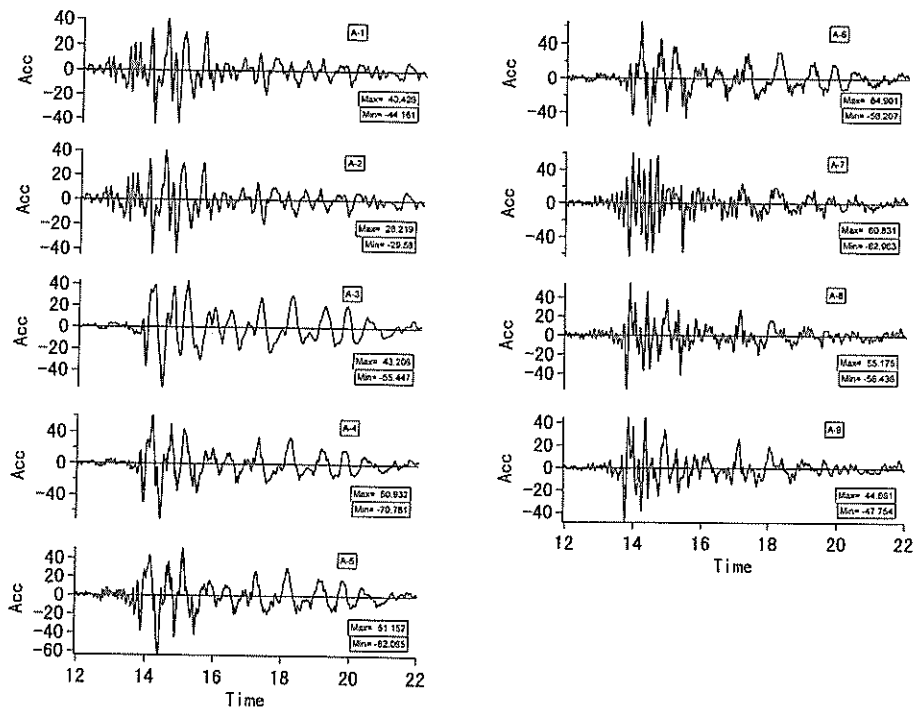
V_{s0} : 施工前のせん断波速度 (m/s)

γ_s : 土の単位体積重量 (tf/m³)

σ_v' : 施工後の有効上載圧 (tf/m²)

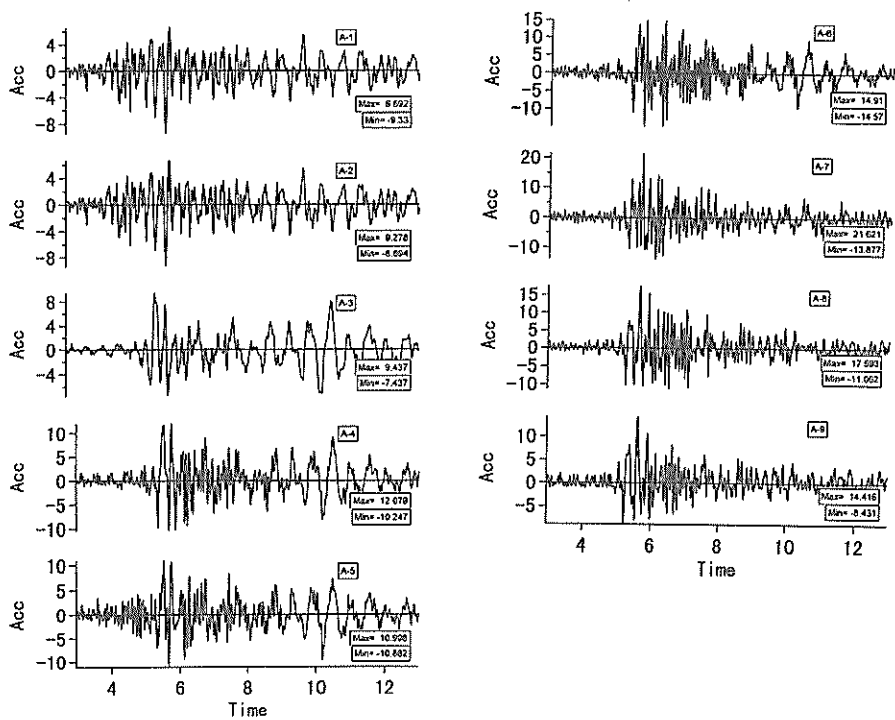
σ_{v0}' : 施工前の有効上載圧 (tf/m²)

付 録



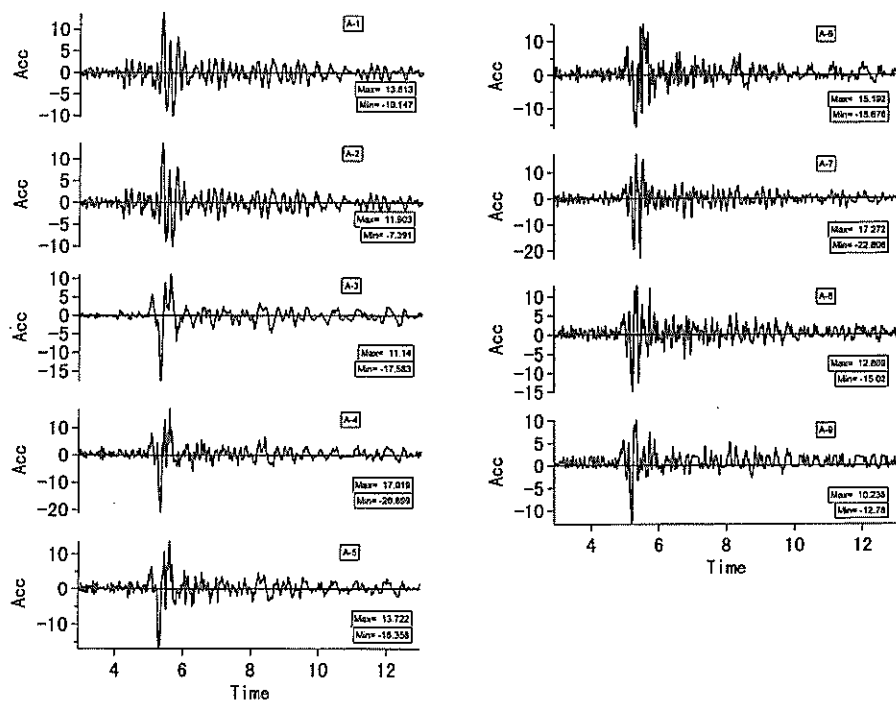
単位：Acc (Gal), Time (s)

付図-1(a) 加速度記録波形 (観測No. 97-1)



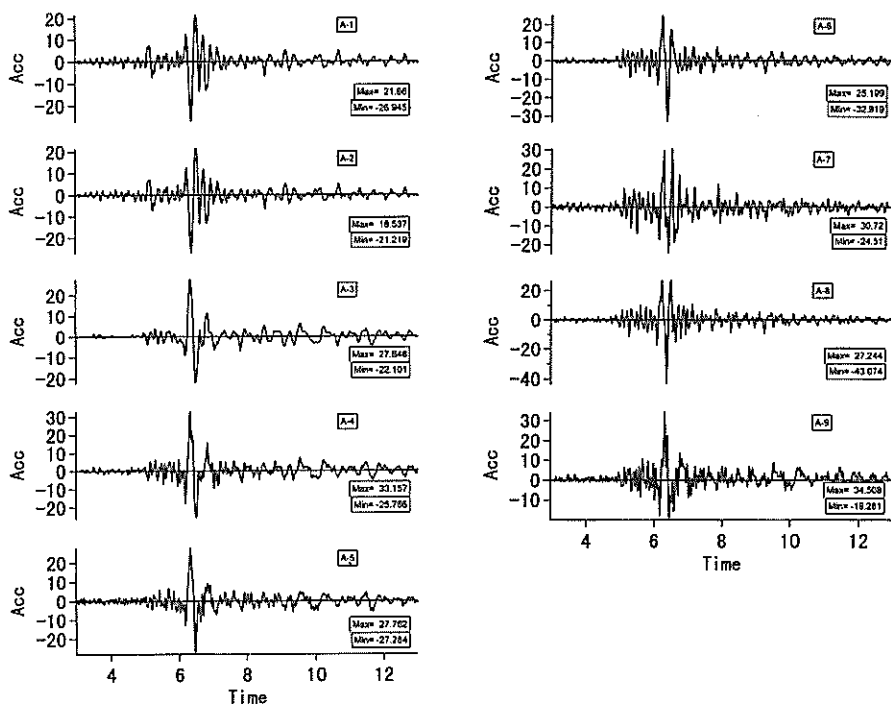
単位：Acc (Gal), Time (s)

付図-1(b) 加速度記録波形 (観測No. 94-3)



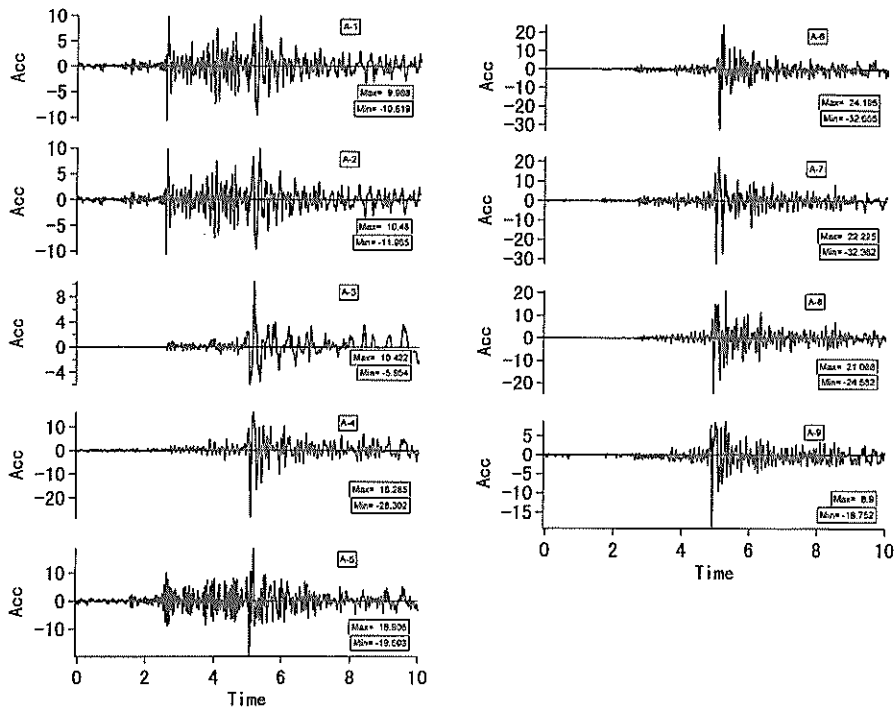
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-1(c) 加速度記録波形 (観測No. 93-2)



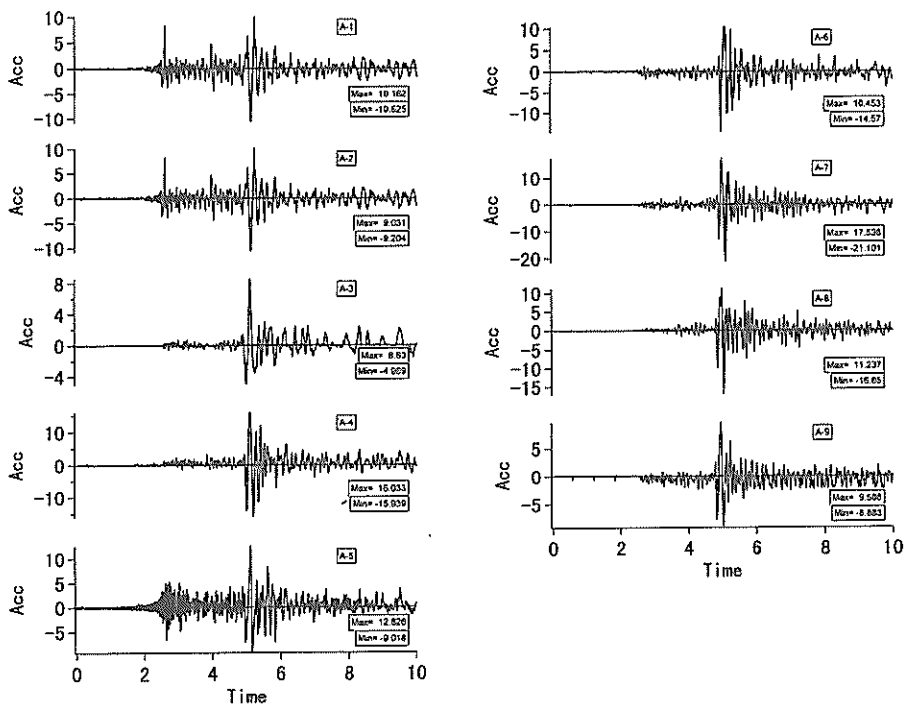
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-1(d) 加速度記録波形 (観測No. 92-8)



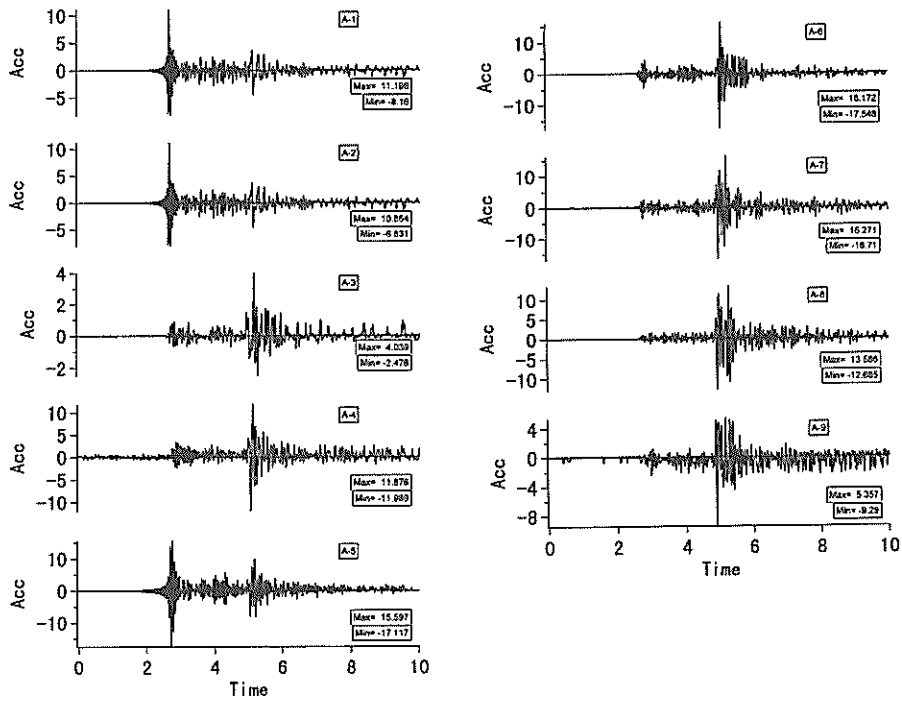
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-1 (e) 加速度記録波形 (観測No. 62-1)



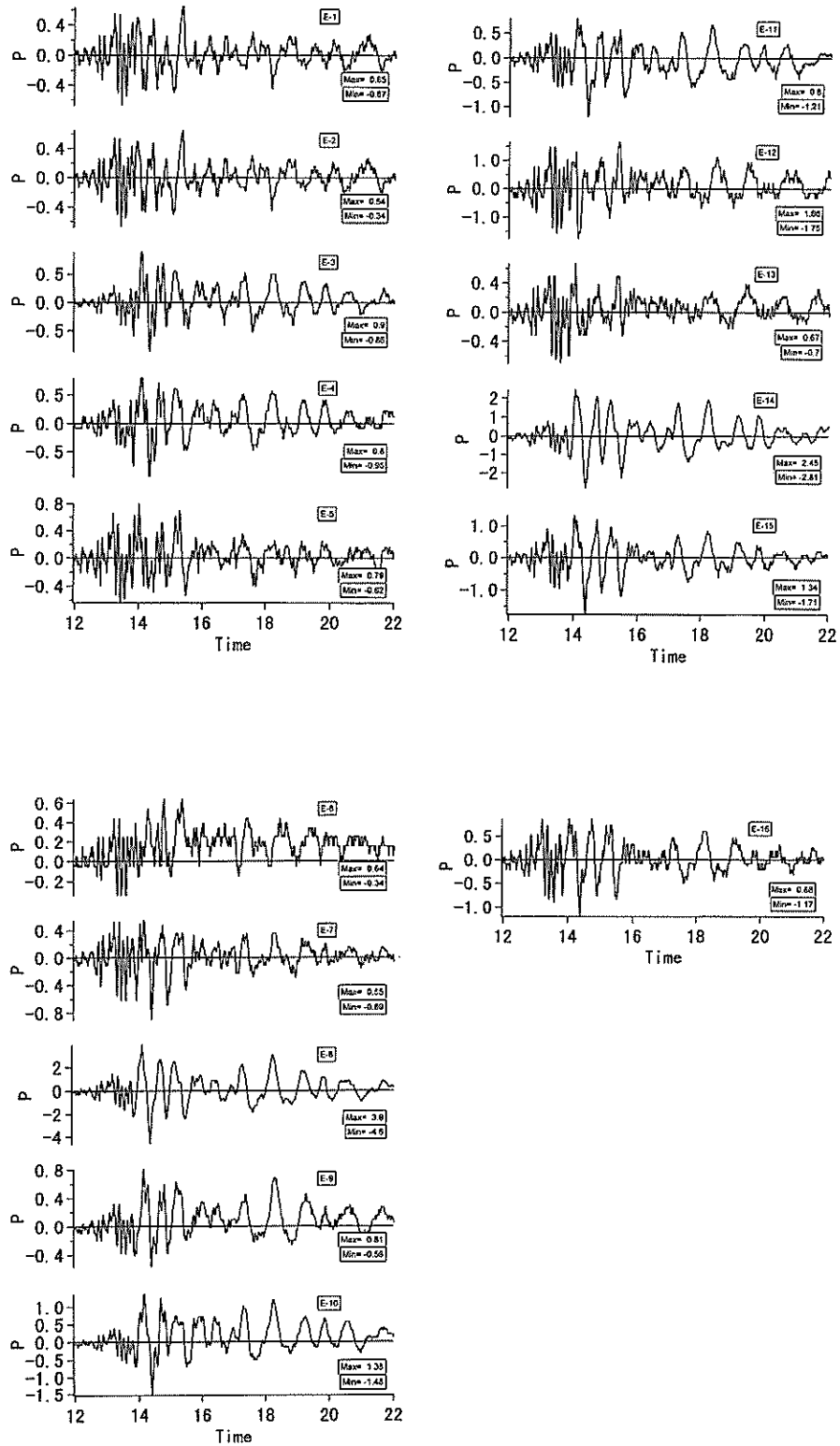
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-1 (f) 加速度記録波形 (観測No. 62-2)



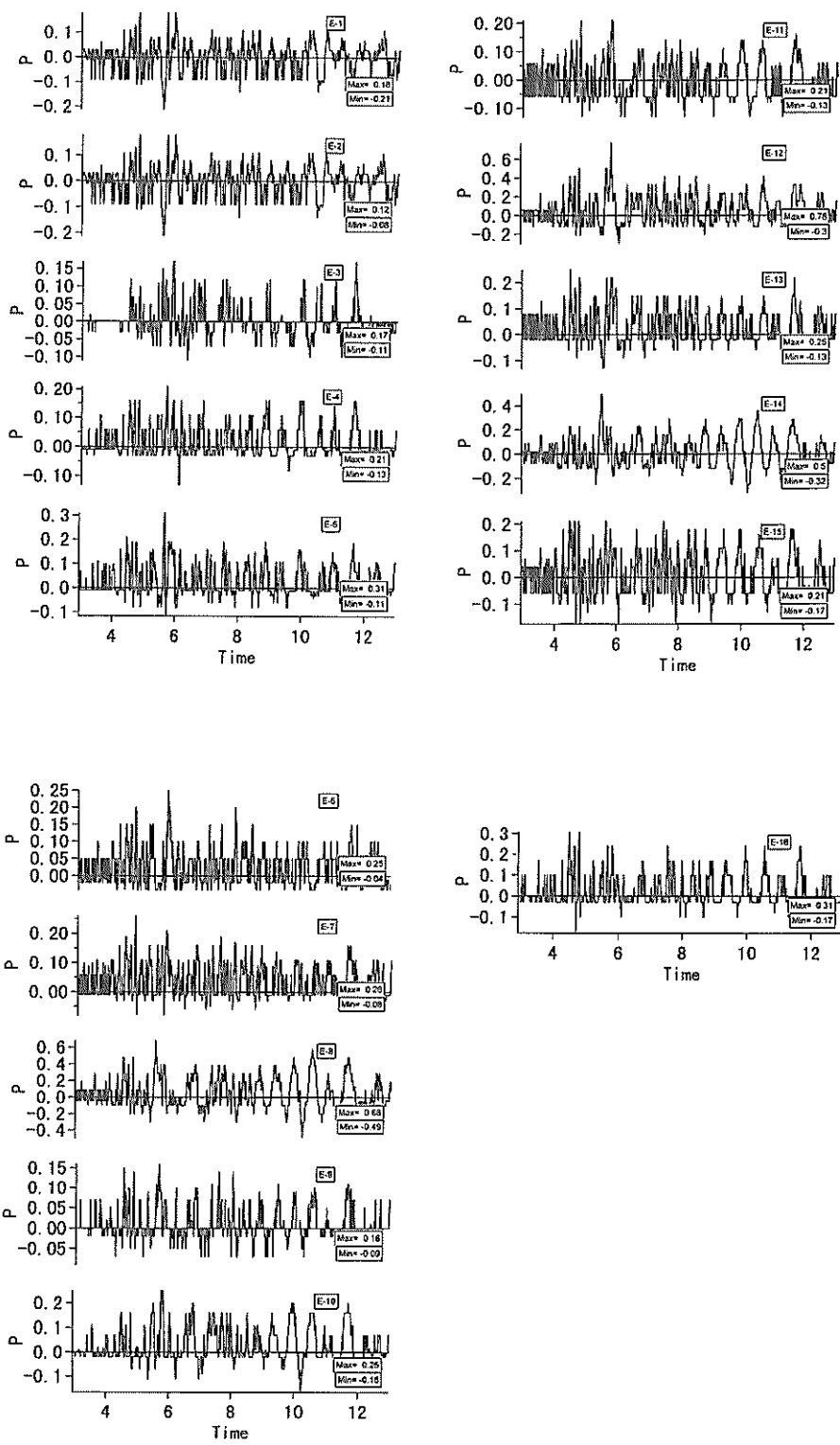
単位：Acc(Gal), Time(s)

付図-1(g) 加速度記録波形 (観測No. 62-3)



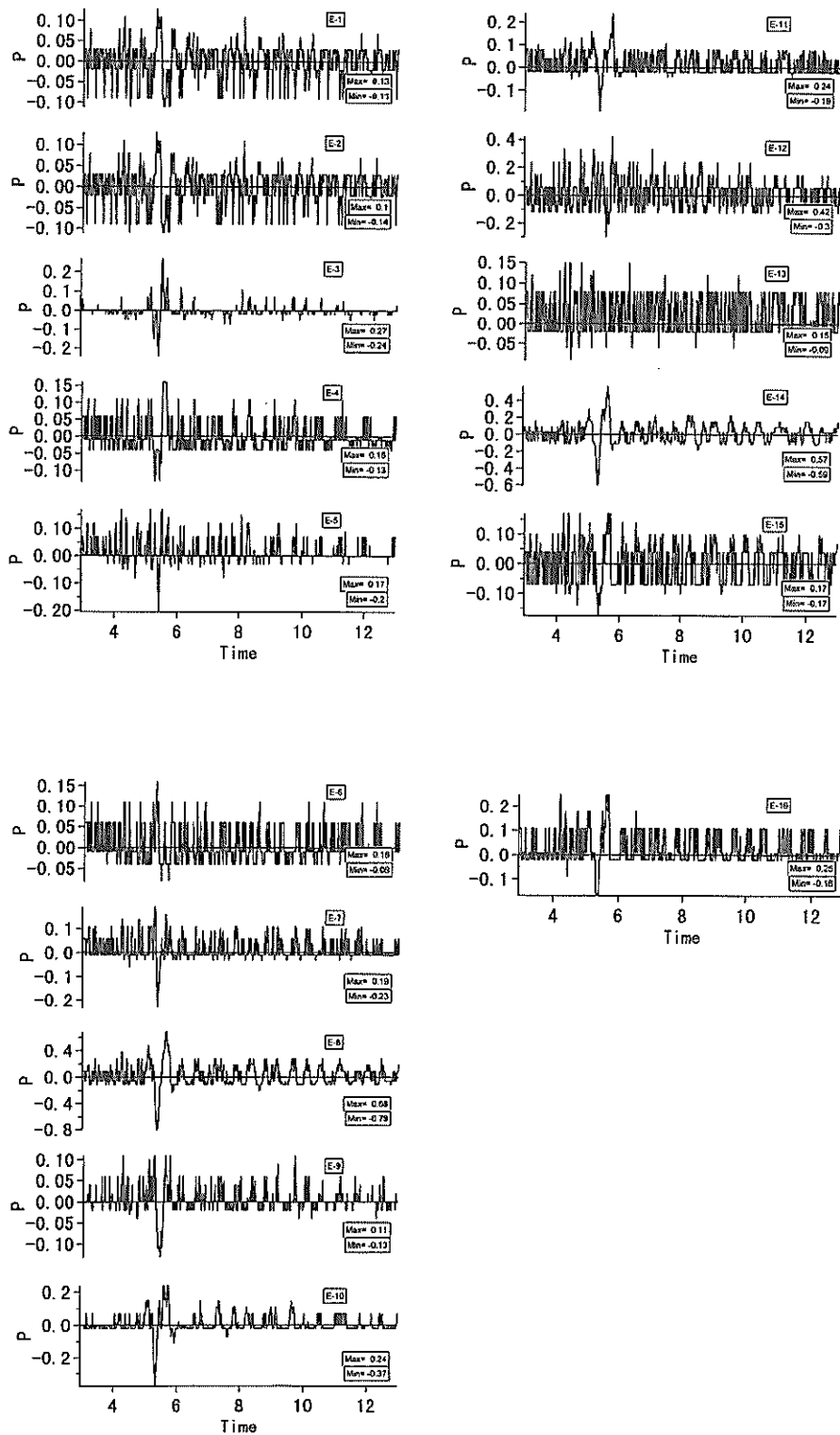
単位：P(tf/m²), Time(s)

付図-2(a) 土圧記録波形 (観測No. 97-1)



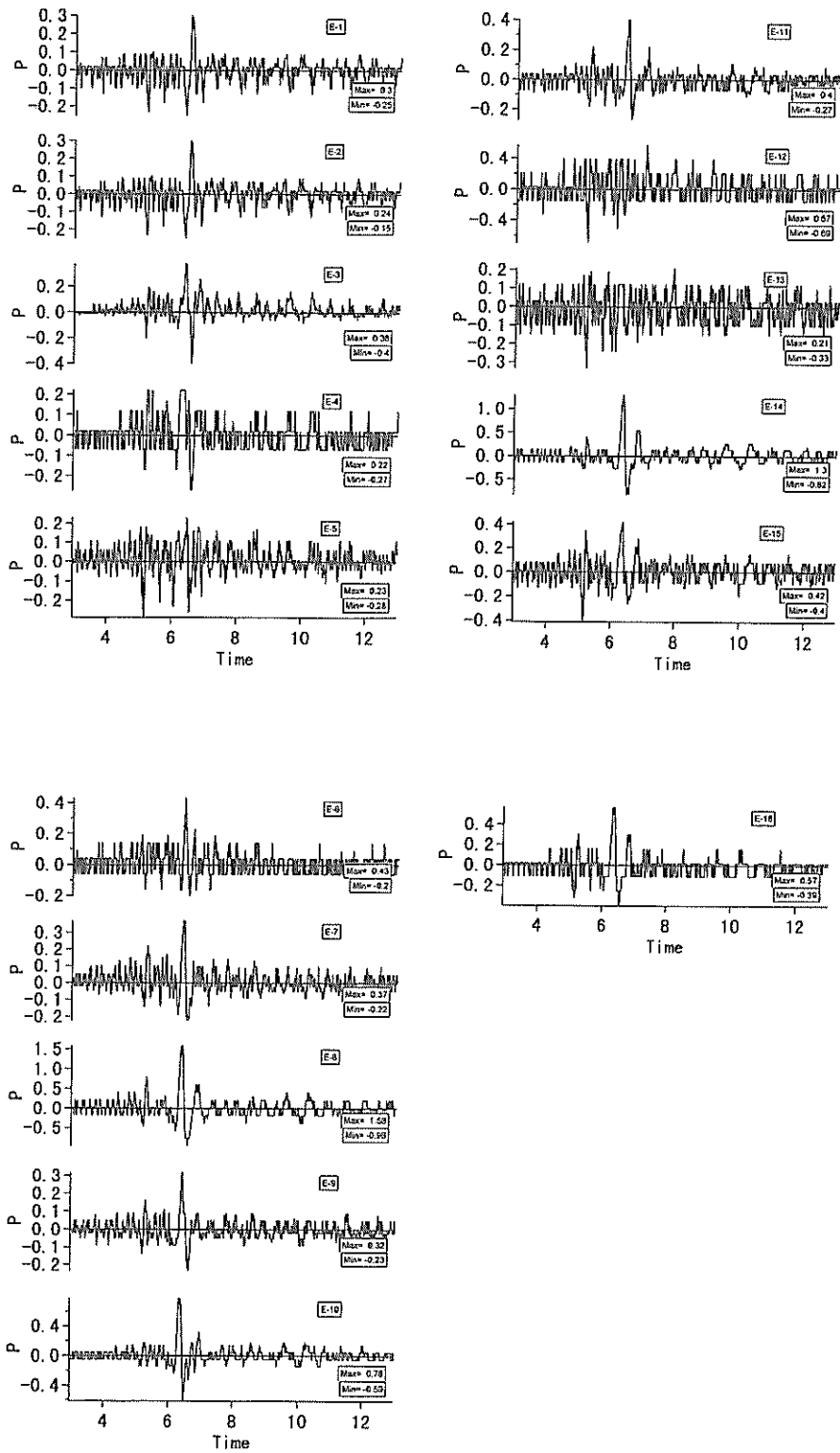
單位：P(tf/m²), Time(s)

付図-2(b) 土圧記録波形 (観測No. 94-3)



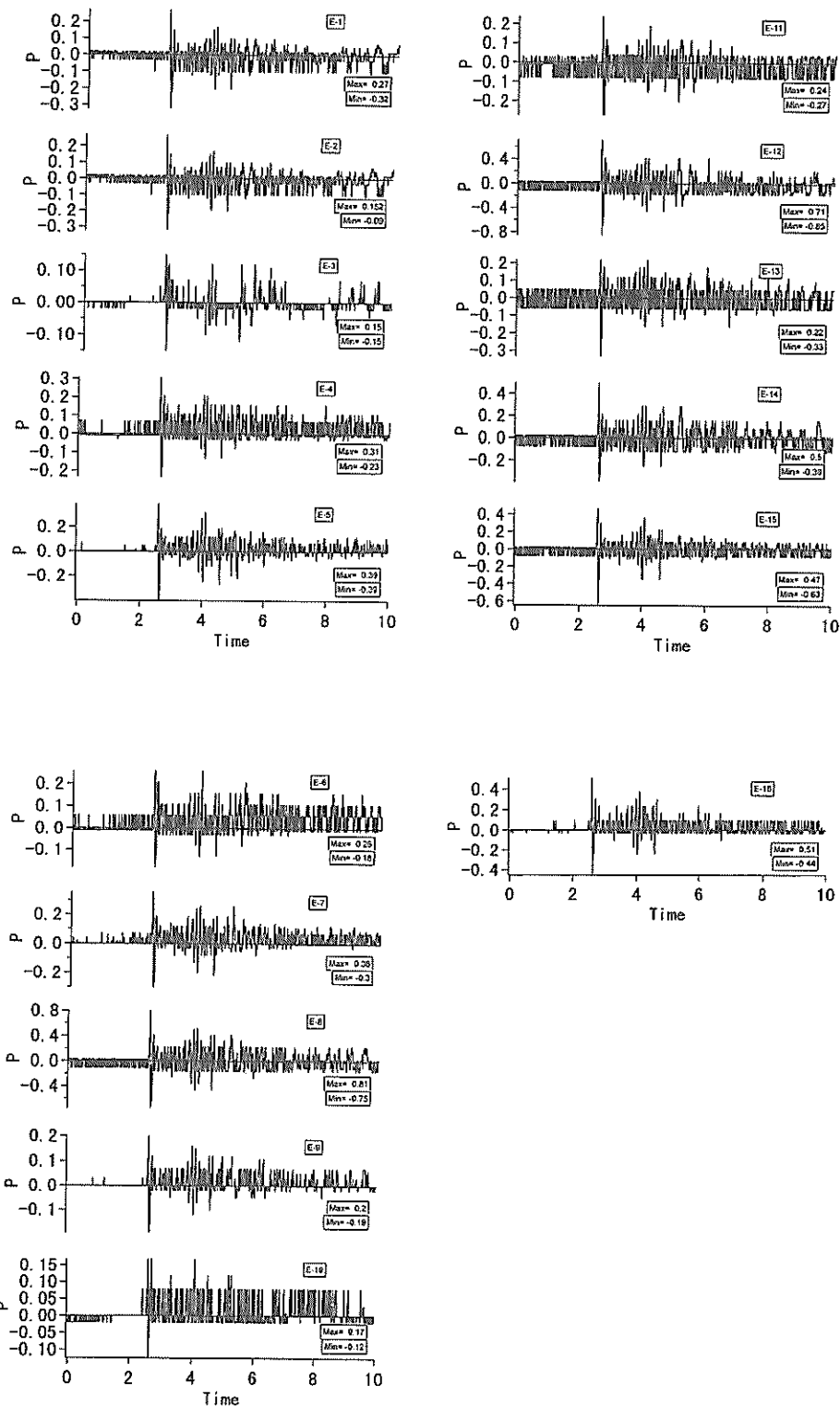
単位 : P(tf/m²), Time (s)

付図一2(c) 土圧記録波形 (観測No. 93-2)



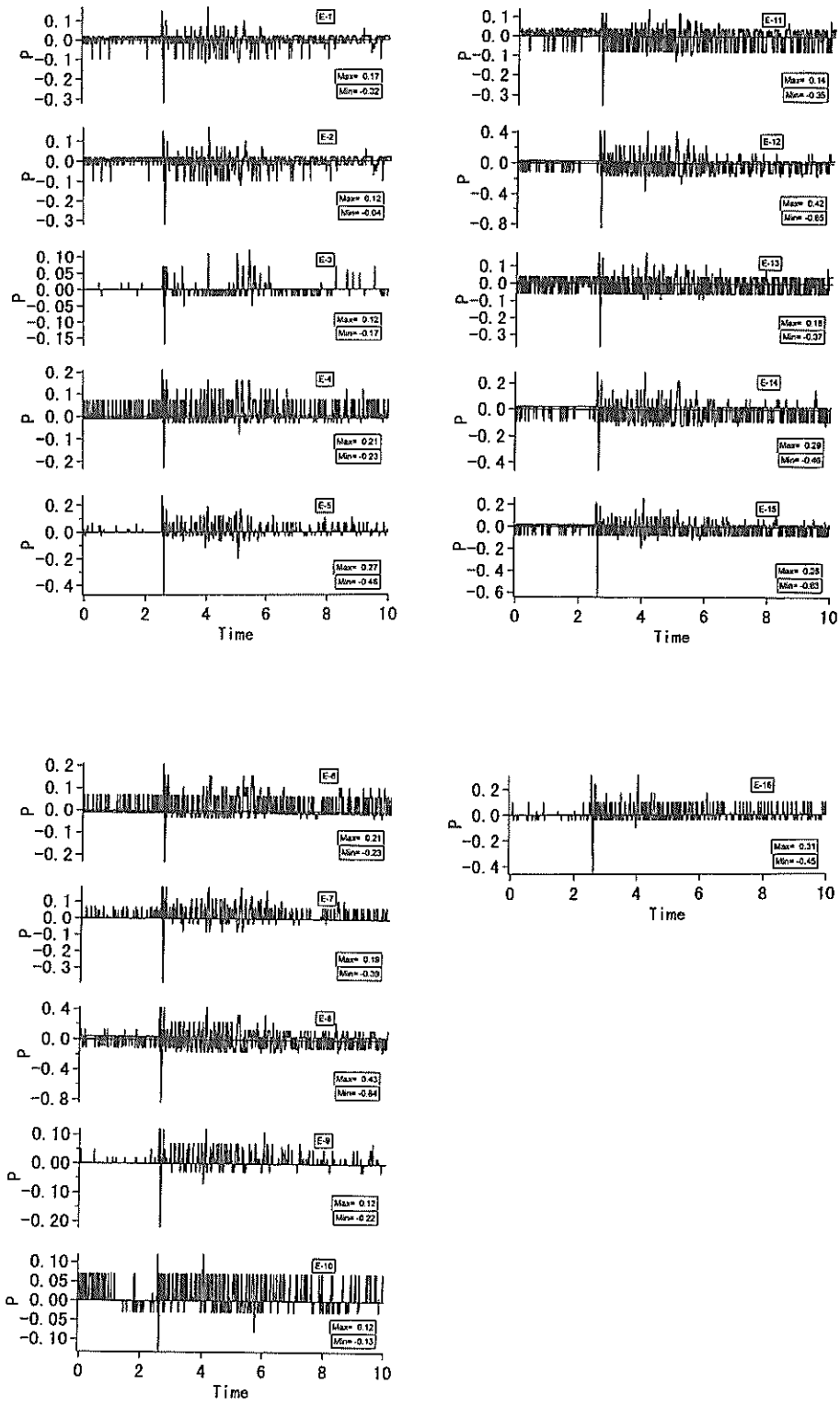
単位：P(tf/m^2), Time(s)

付図-2(d) 土圧記録波形 (観測No. 92-8)



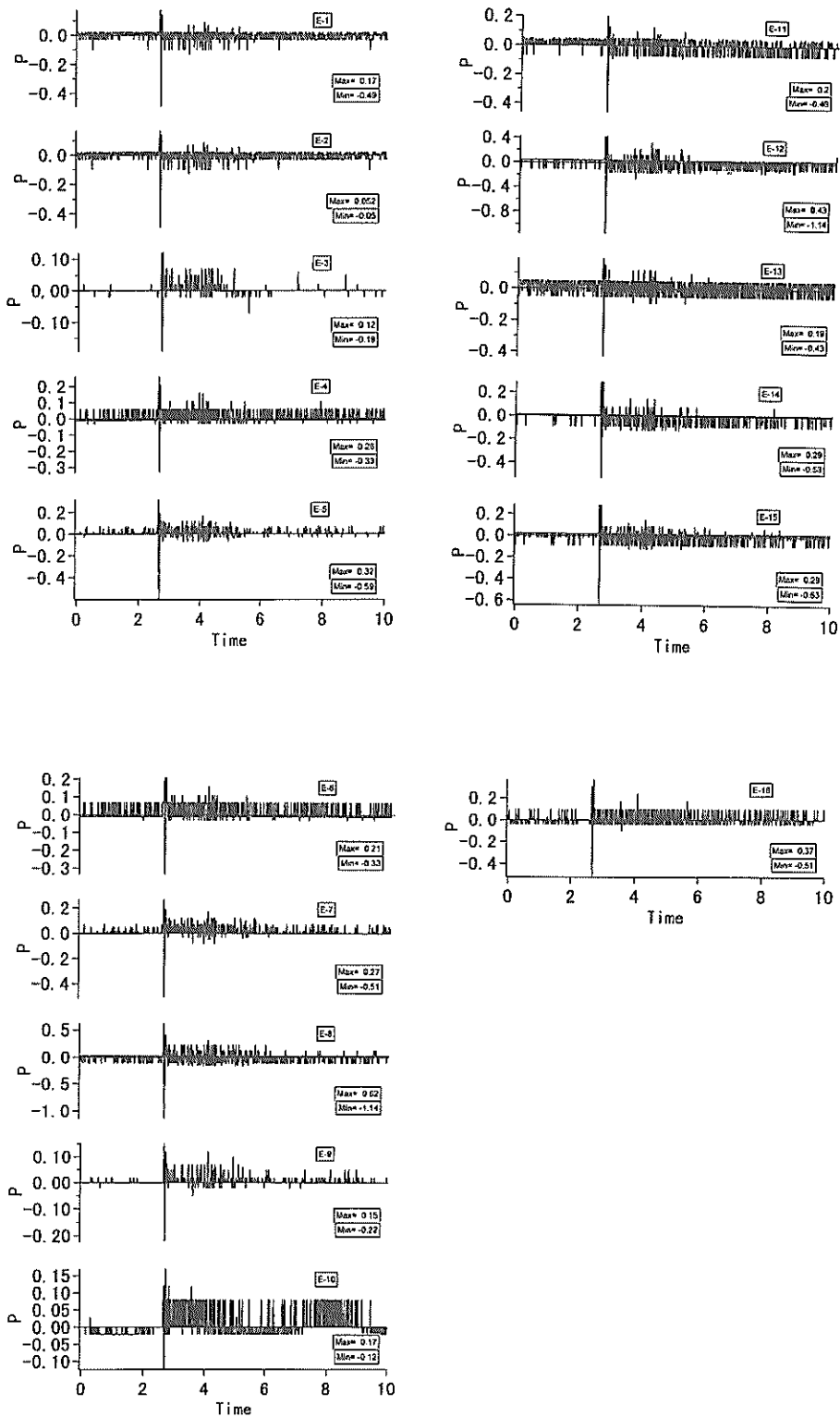
單位 : P (tf/m²), Time (s)

付図-2(e) 土圧記録波形 (観測No. 62-1)



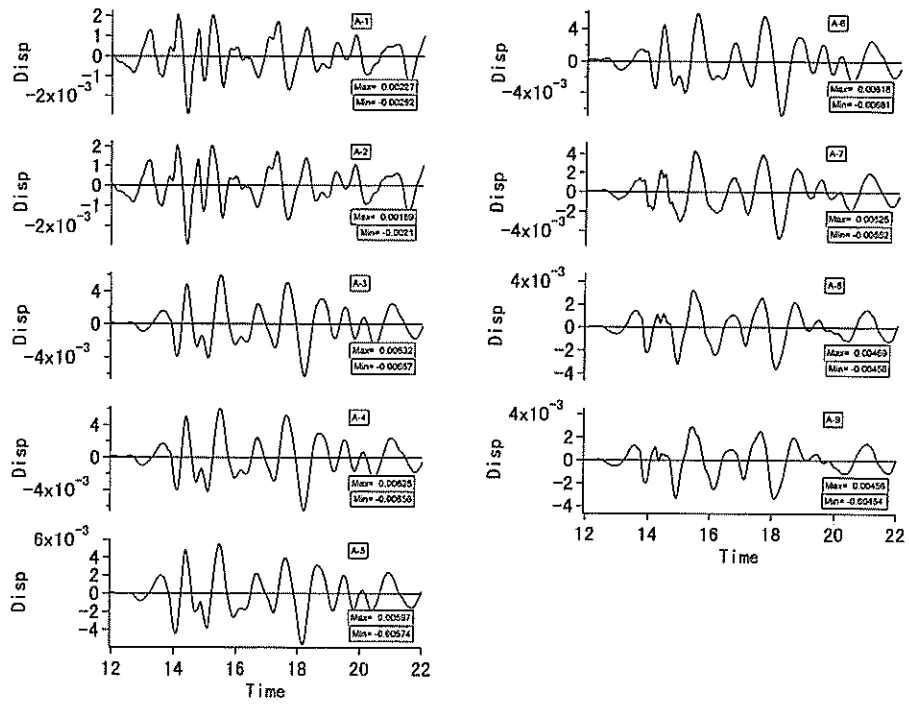
単位：P(tf/m^2), Time(s)

付図-2(f) 土圧記録波形 (観測No. 62-2)



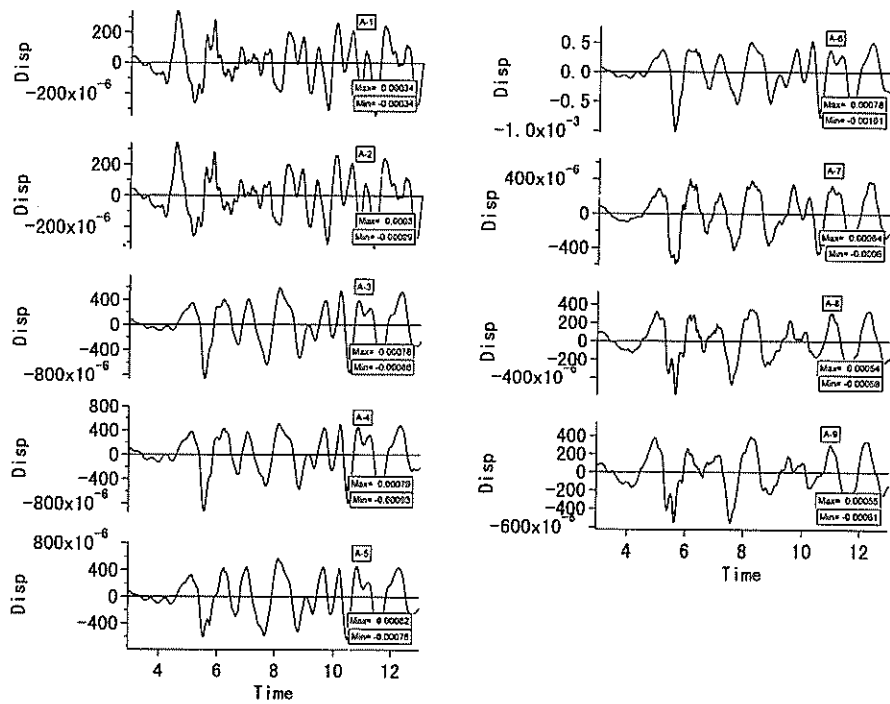
単位：P(tf/m^2), Time(s)

付図-2(g) 土圧記録波形 (観測No. 62-3)



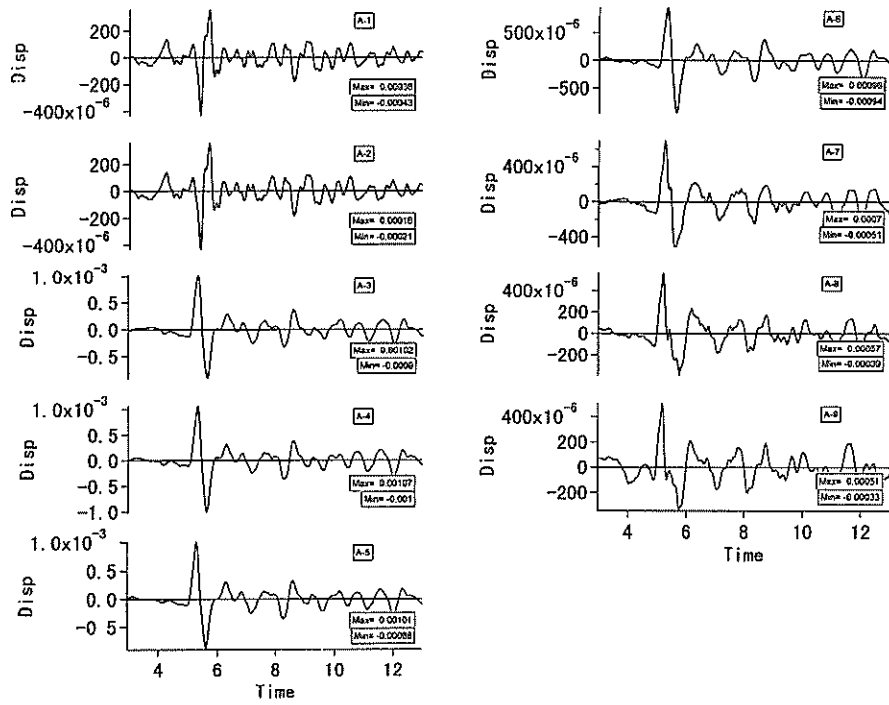
単位：Disp(m), Time(s)

付図-3(a) 変位記録波形 (観測No. 97-1)



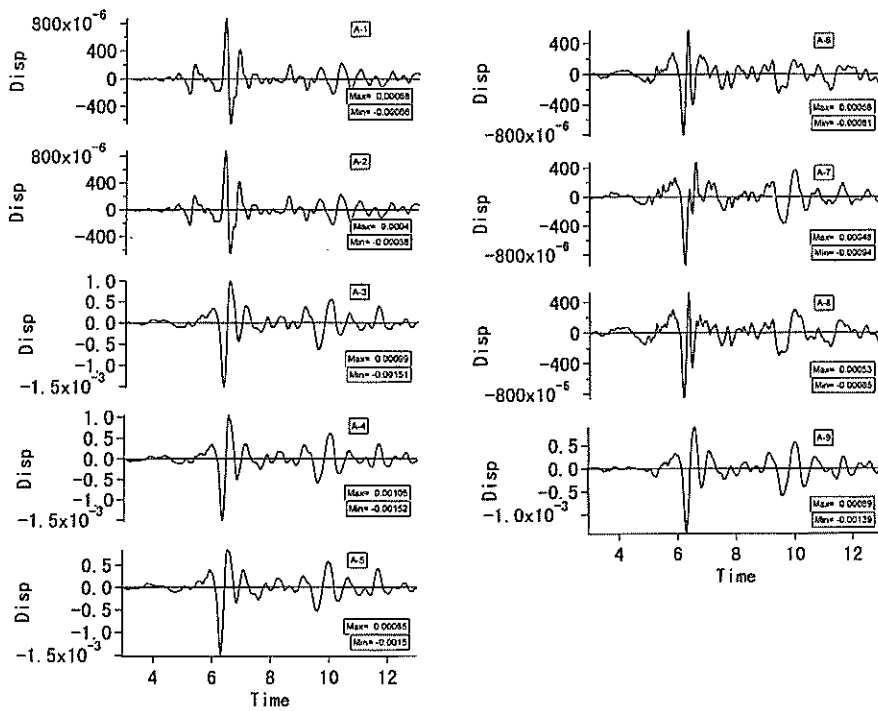
単位：Disp(m), Time(s)

付図-3(b) 変位記録波形 (観測No. 94-3)



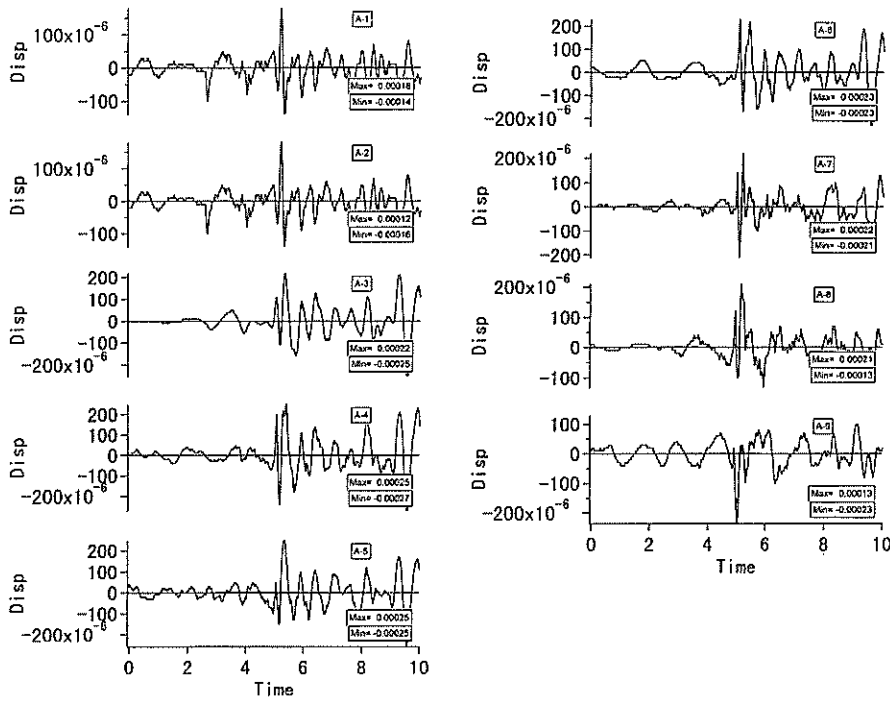
単位：Disp (m), Time (s)

付図-3(c) 変位記録波形 (観測No. 93-2)



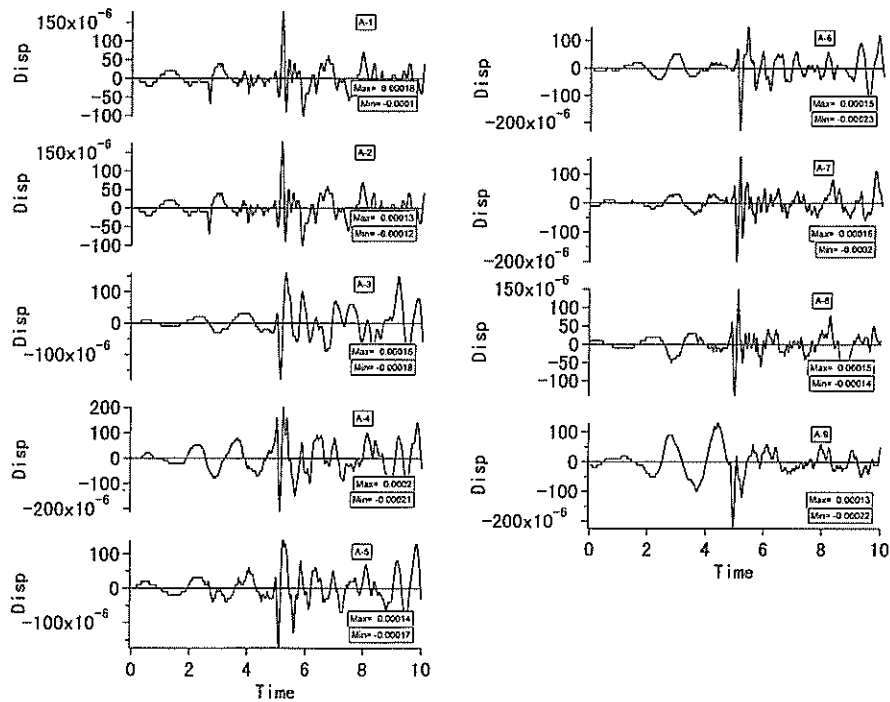
単位：Disp (m), Time (s)

付図-3(d) 変位記録波形 (観測No. 92-8)



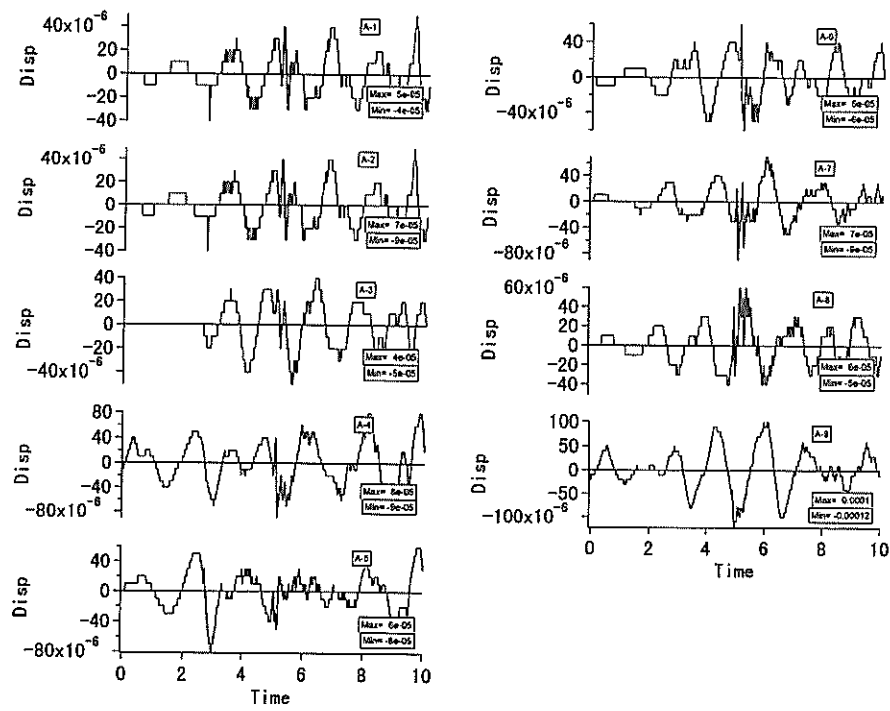
単位：Disp(m), Time(s)

付図-3(e) 変位記録波形 (観測No. 62-1)



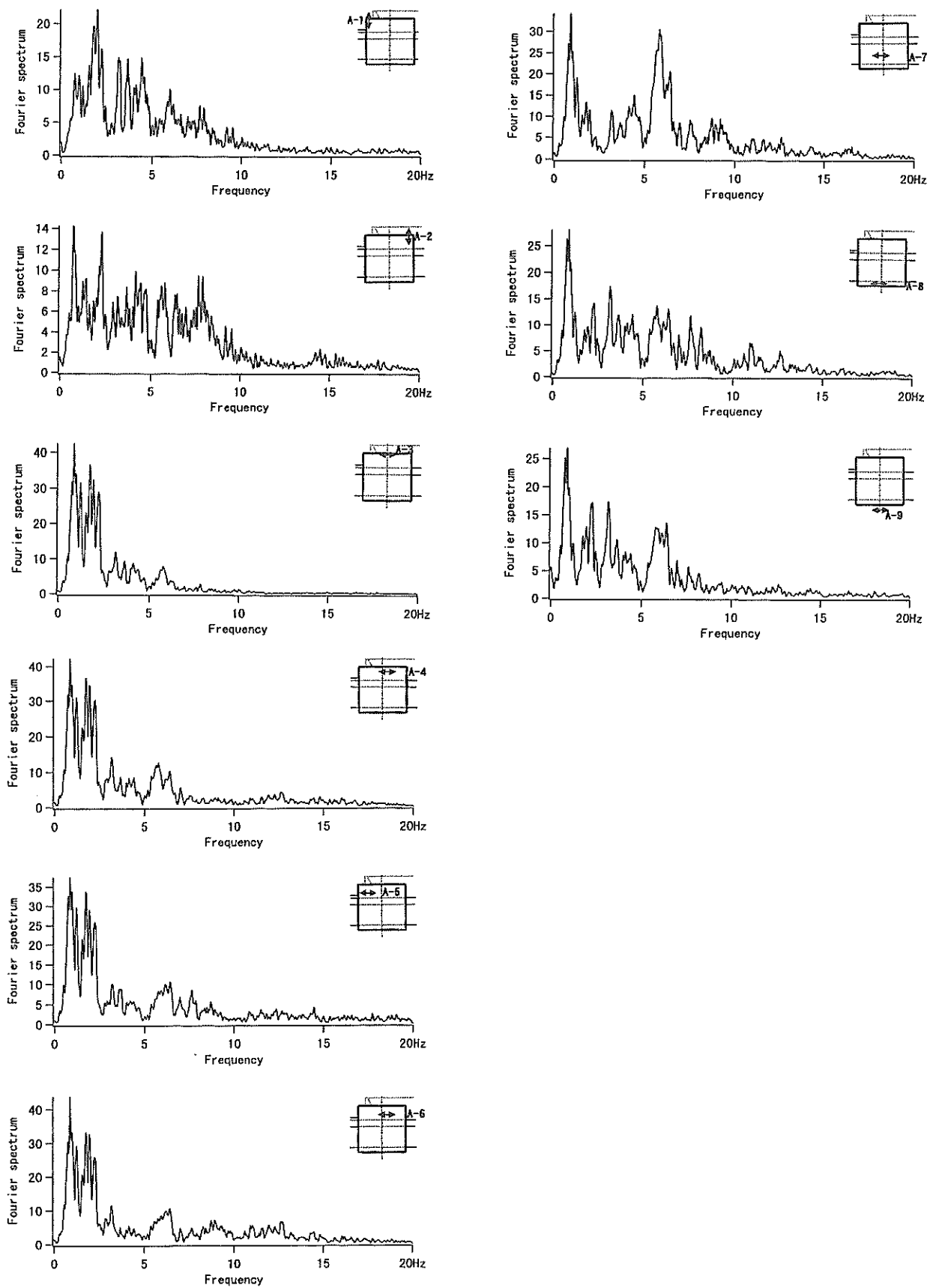
単位：Disp(m), Time(s)

付図-3(f) 変位記録波形 (観測No. 62-2)



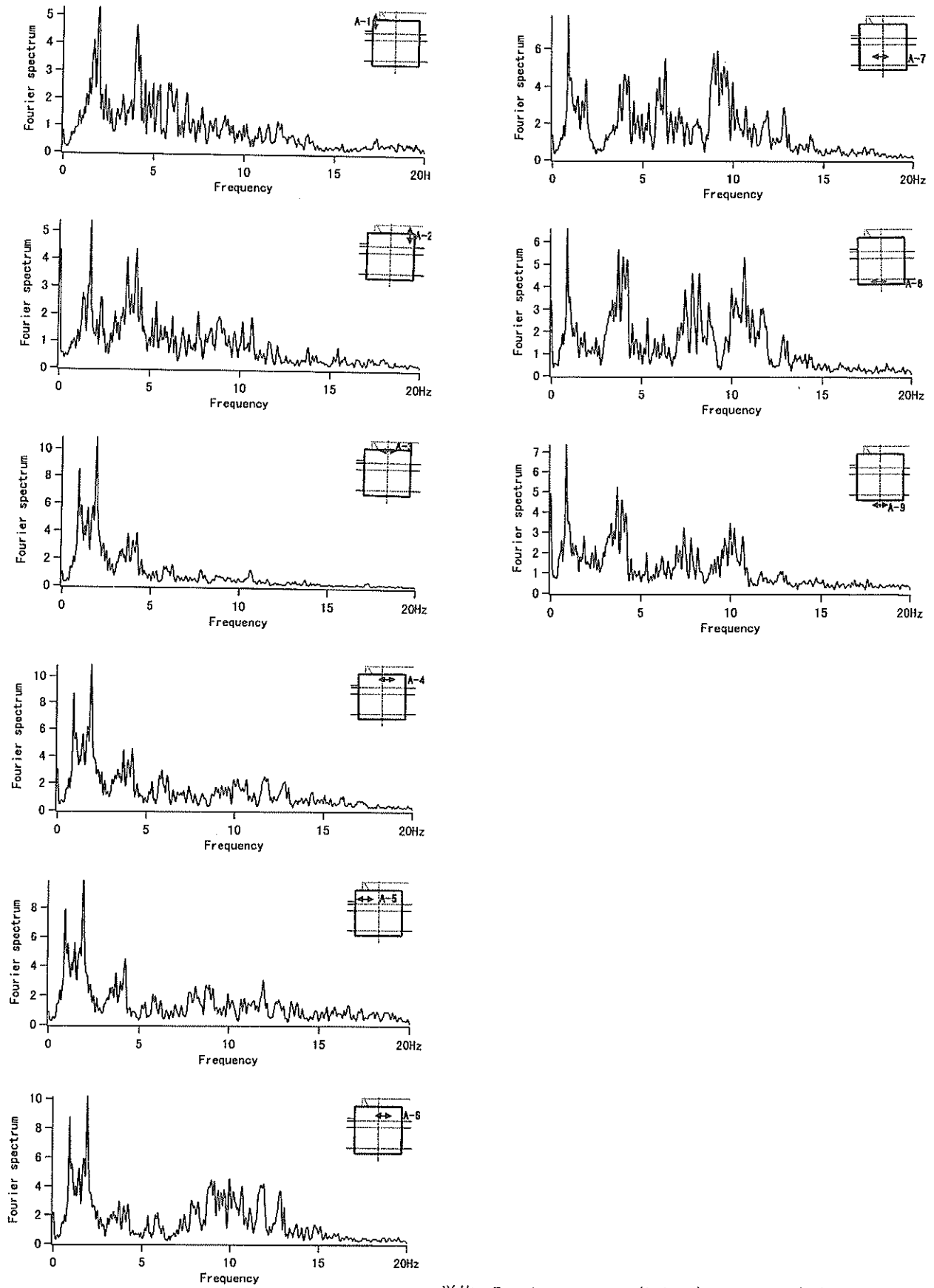
單位 : Disp (m), Time (s)

付図-3(g) 変位記録波形 (観測No. 62-3)



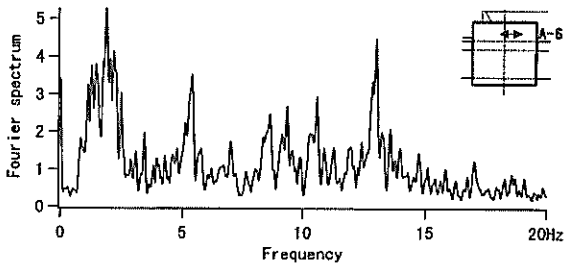
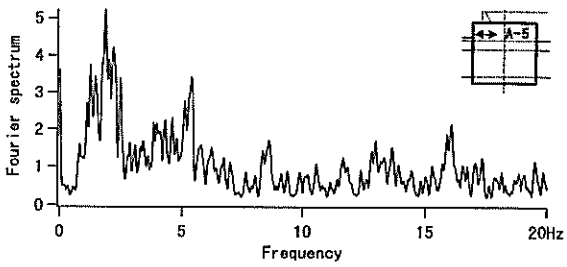
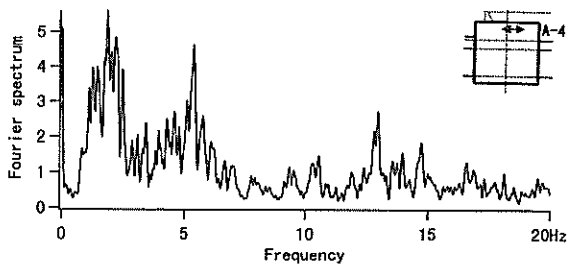
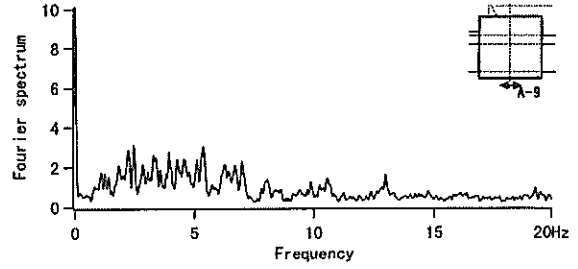
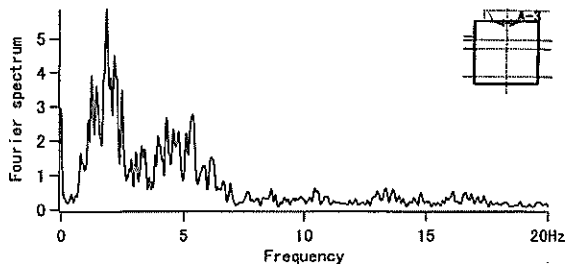
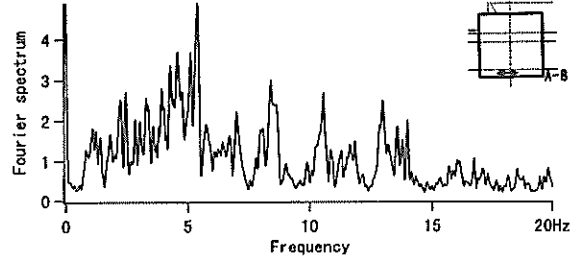
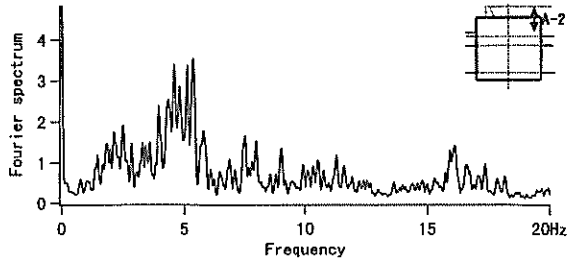
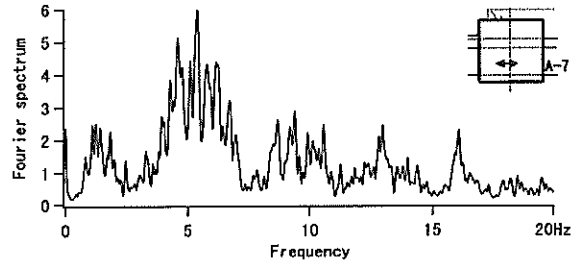
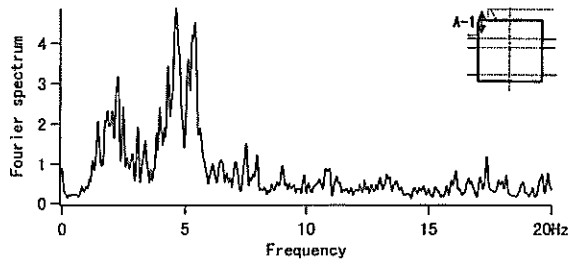
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-4(a) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 97-1)



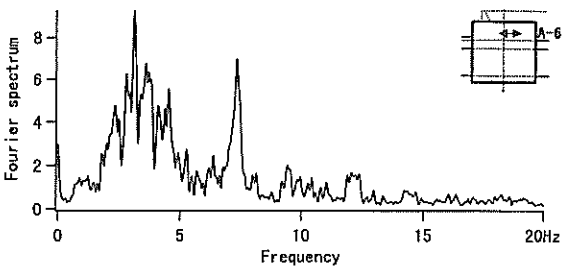
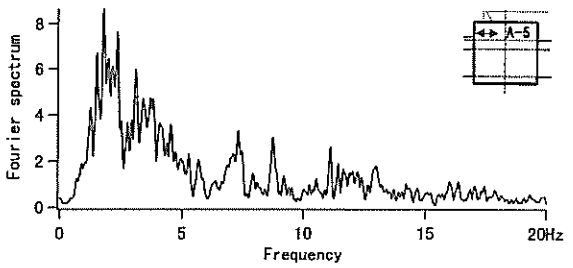
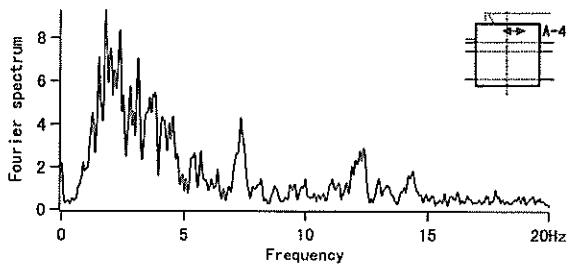
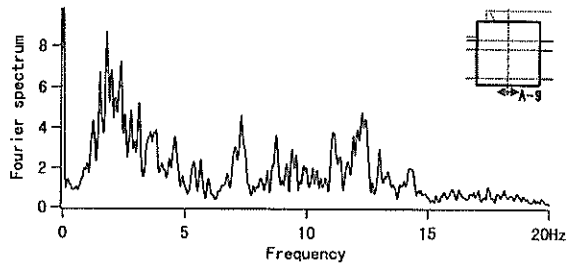
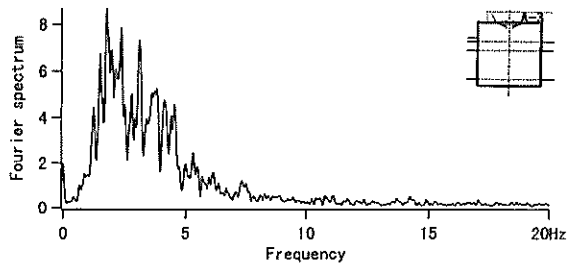
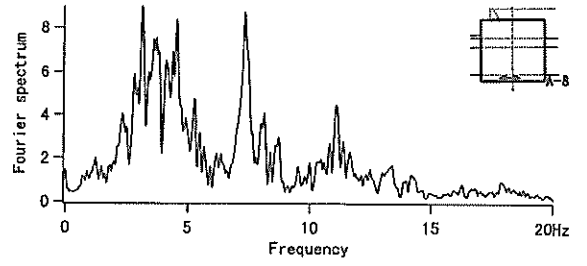
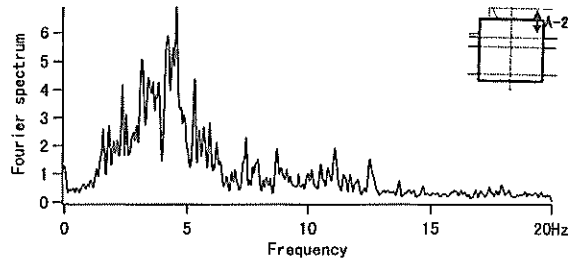
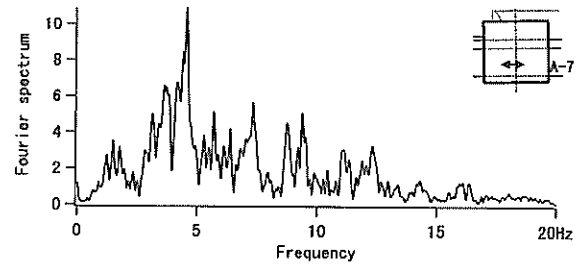
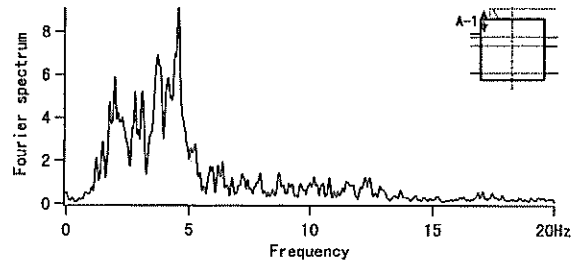
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-4(b) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 94-3)



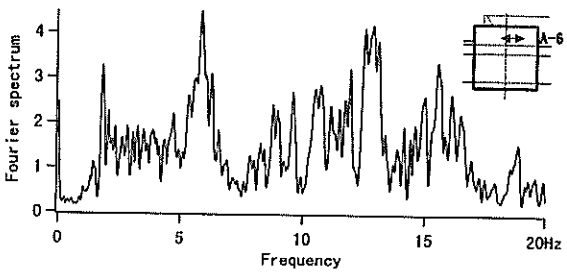
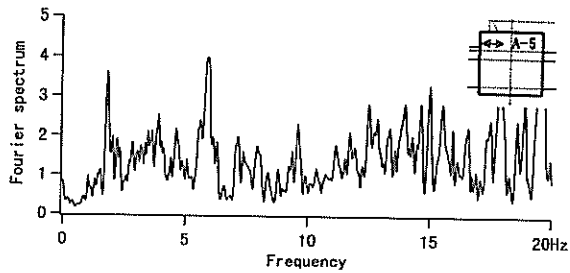
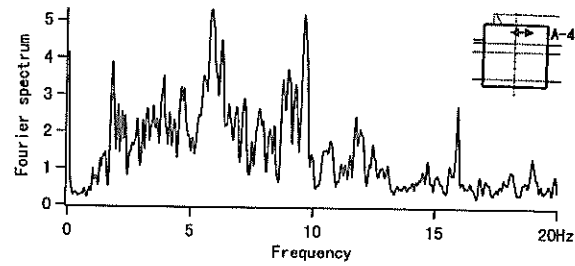
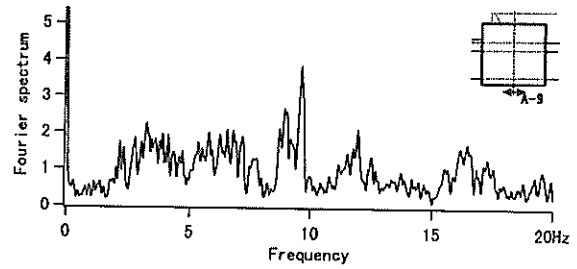
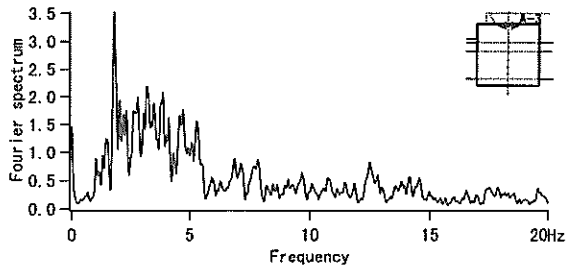
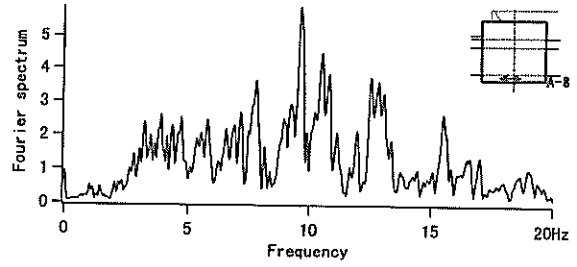
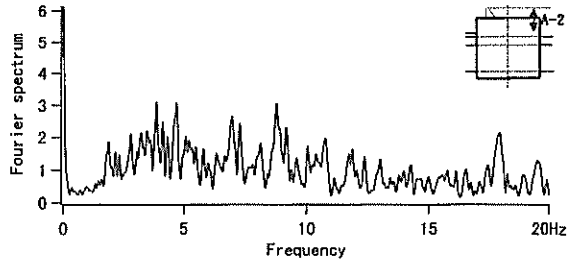
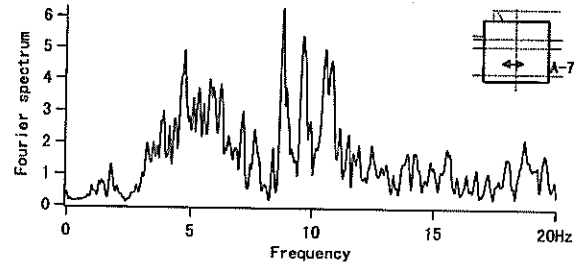
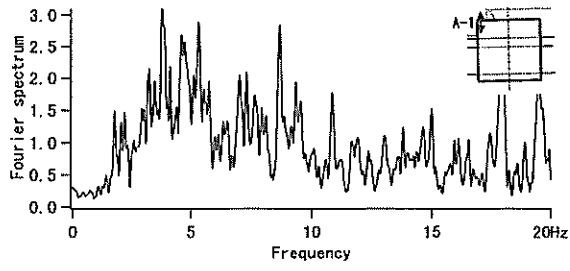
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-4(c) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 93-2)



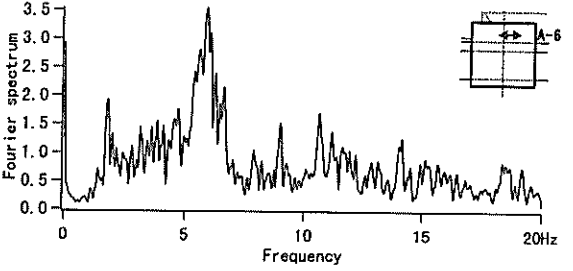
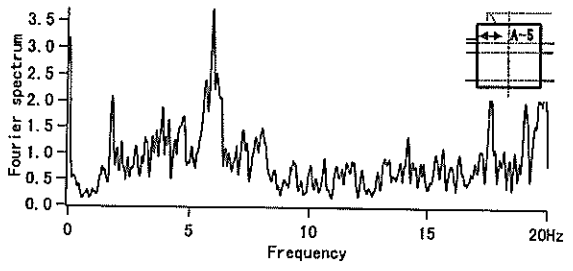
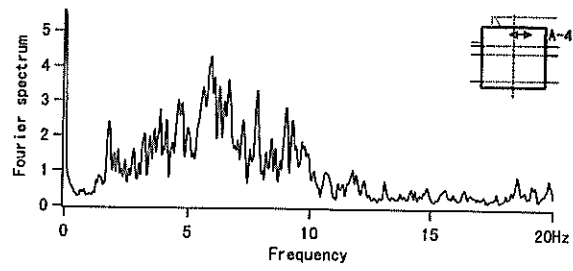
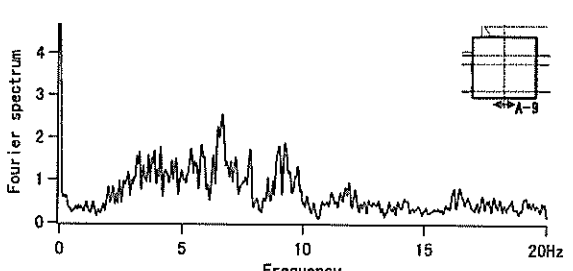
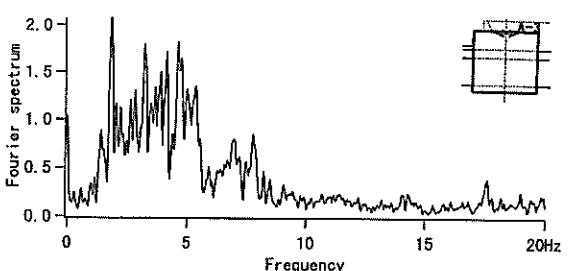
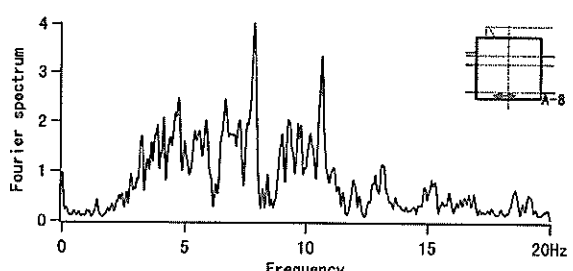
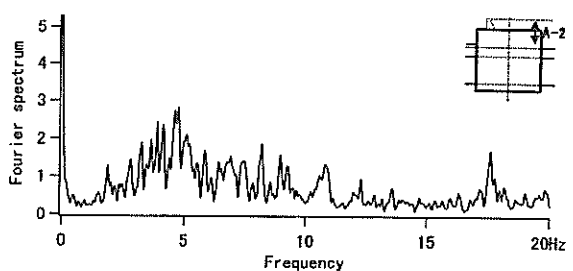
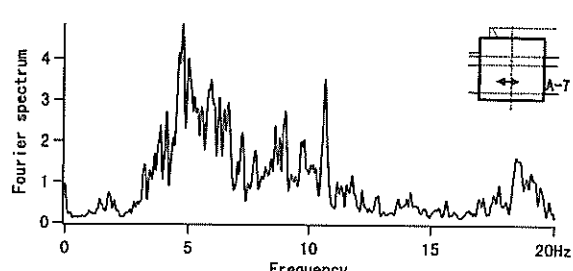
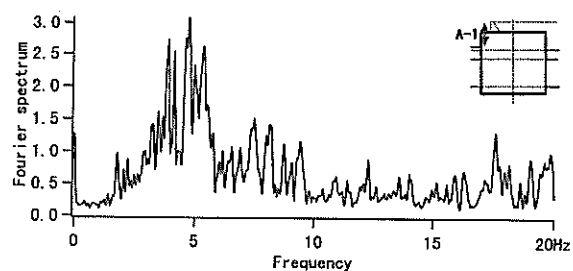
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-4(d) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 92-8)



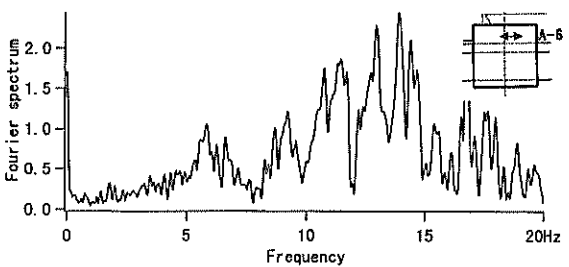
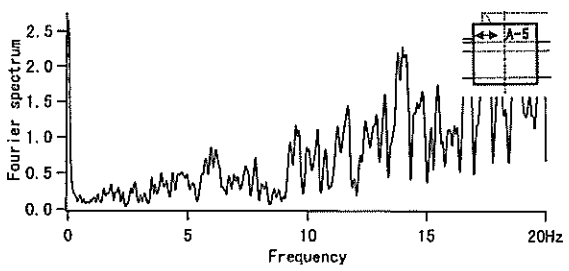
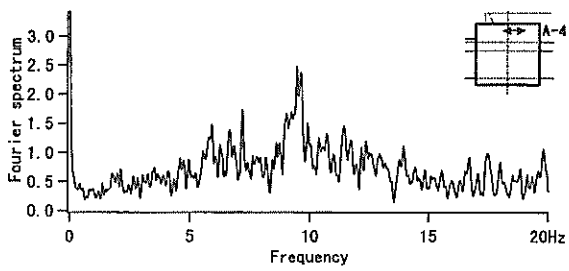
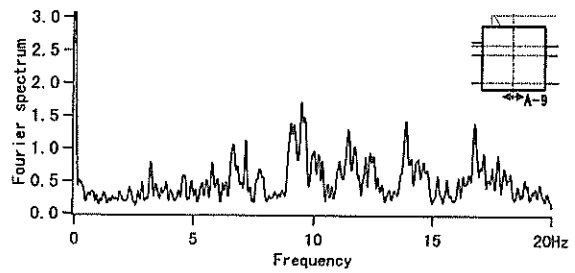
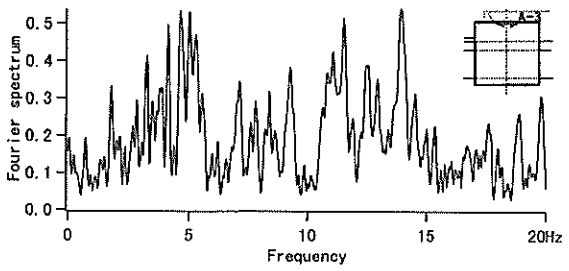
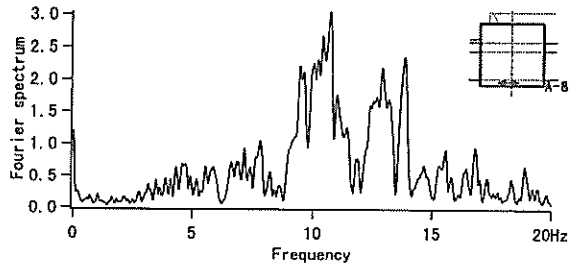
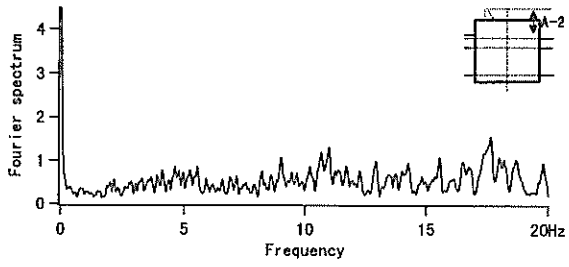
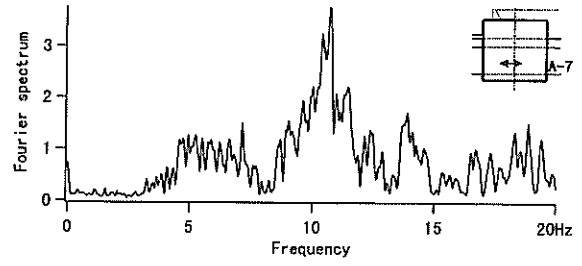
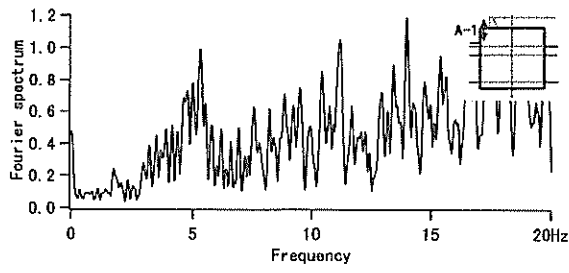
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-4(e) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-1)



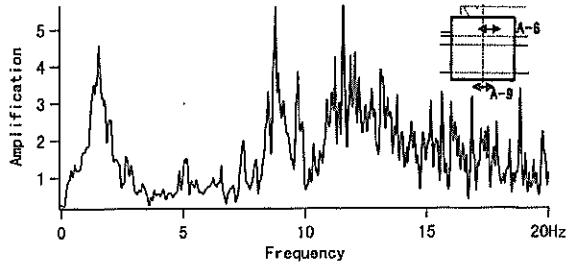
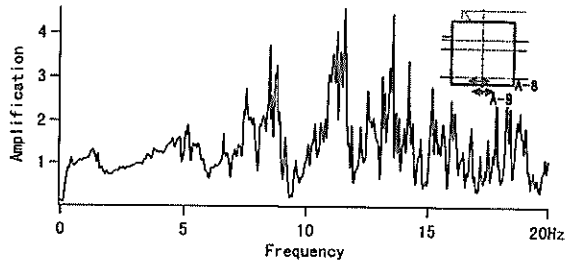
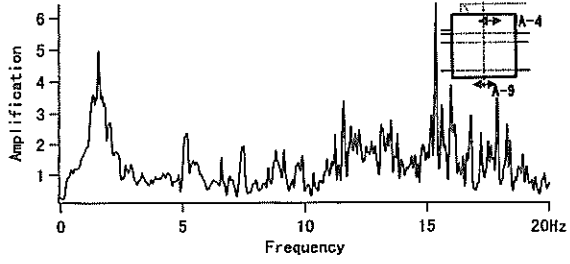
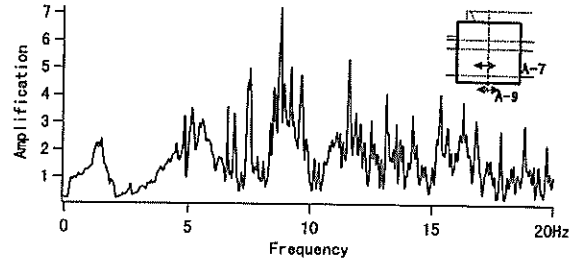
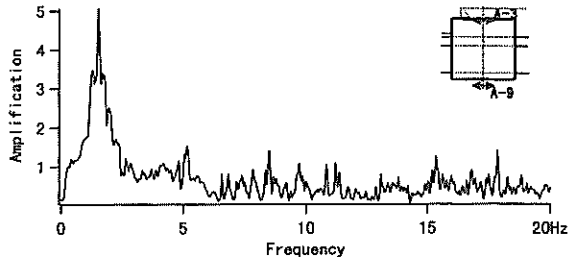
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-4(f) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-2)



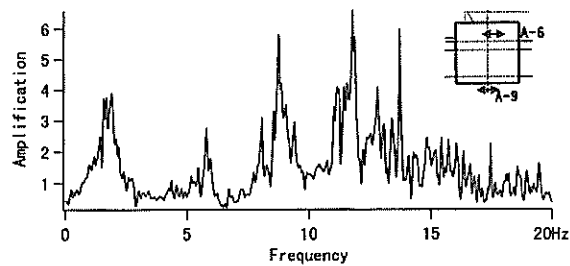
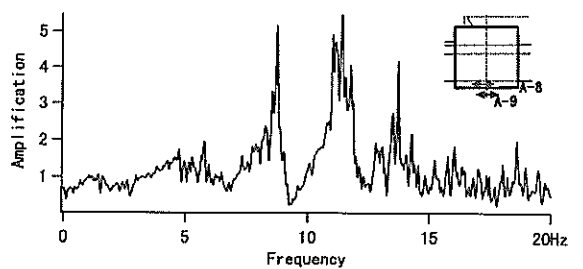
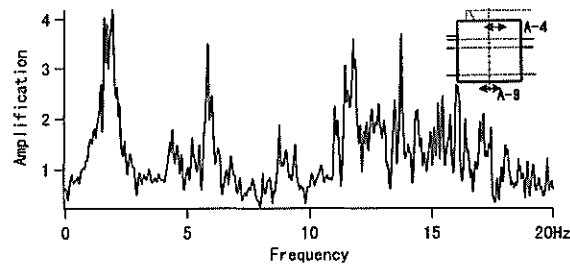
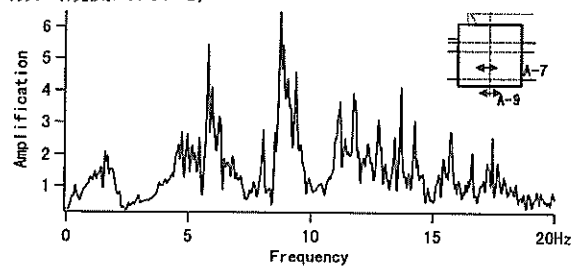
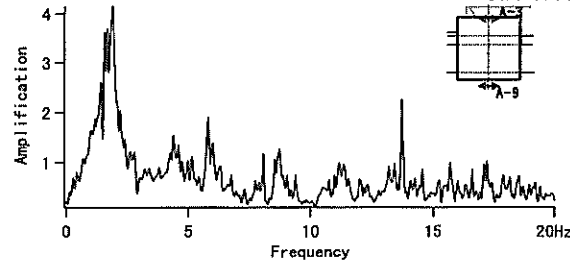
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-4(g) 護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-3)



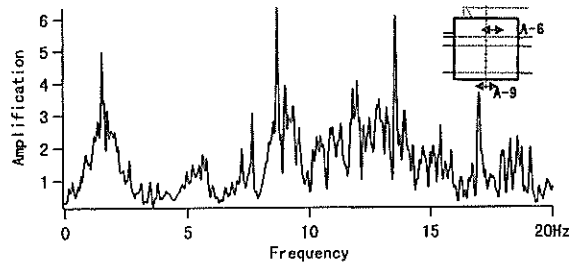
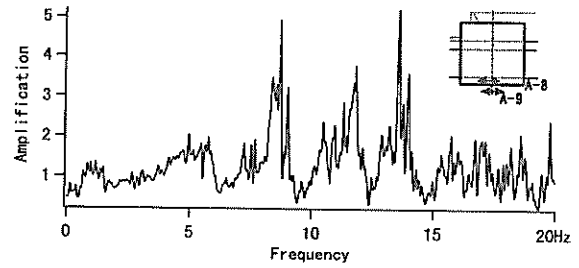
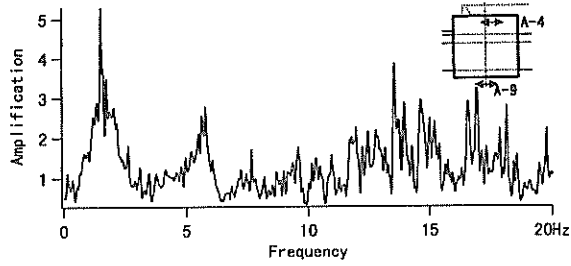
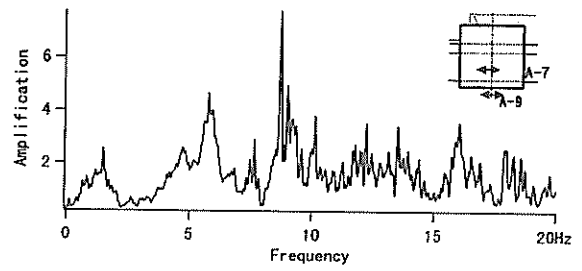
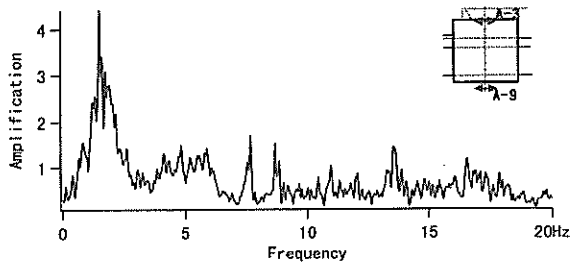
単位：Frequency(Hz)

付図-5(a) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 97-1)



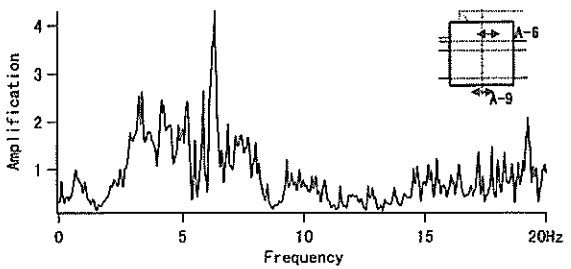
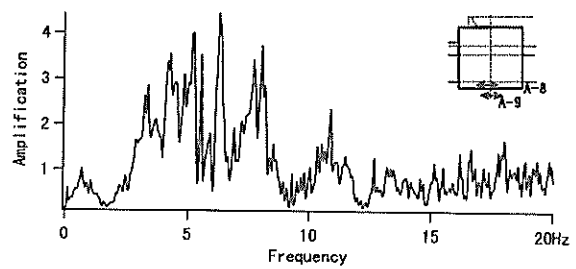
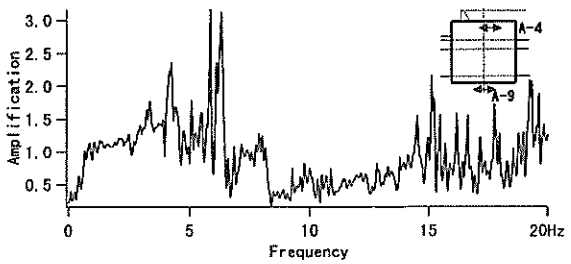
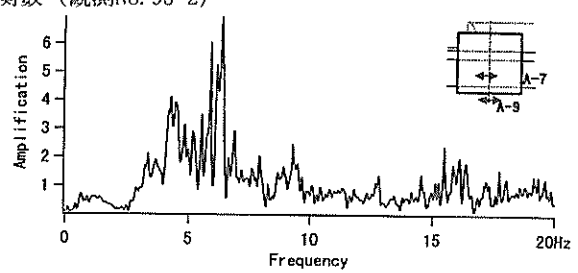
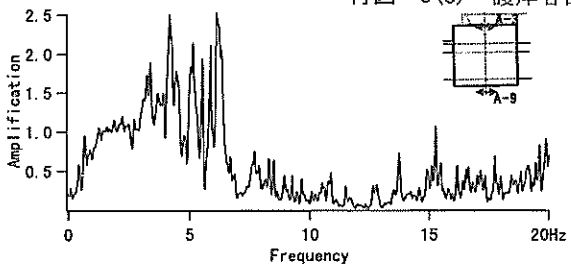
単位：Frequency(Hz)

付図-5(b) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 94-3)



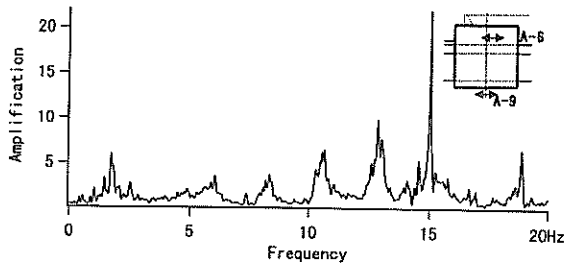
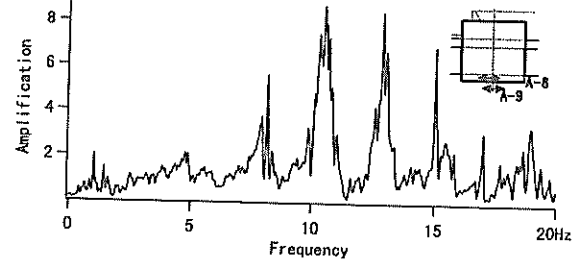
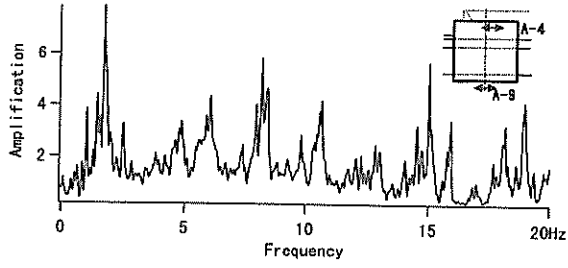
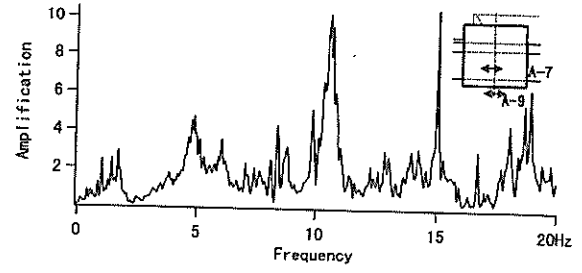
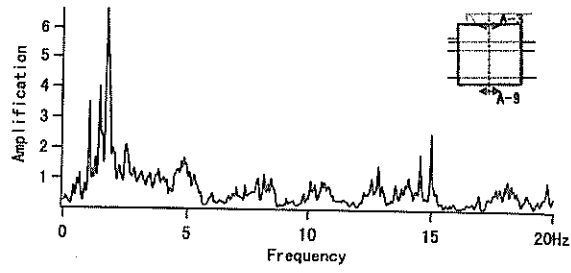
単位：Frequency (Hz)

付図-5(c) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 93-2)



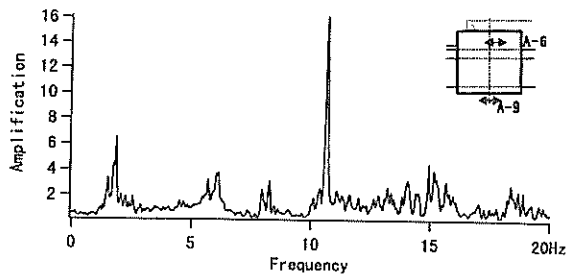
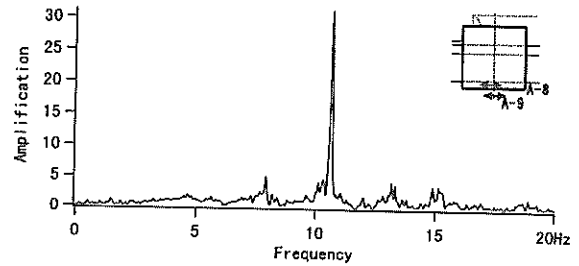
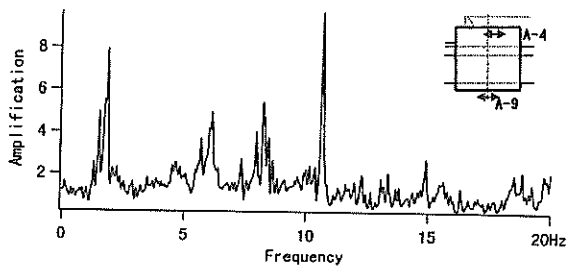
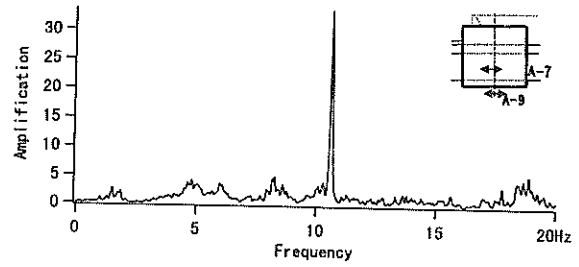
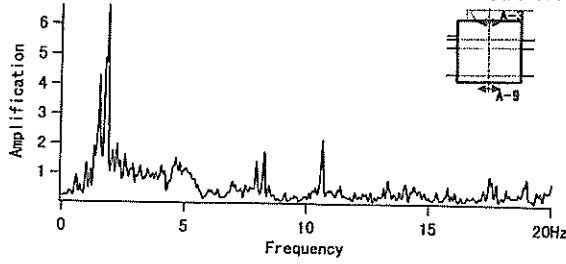
単位：Frequency (Hz)

付図-5(d) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 92-8)



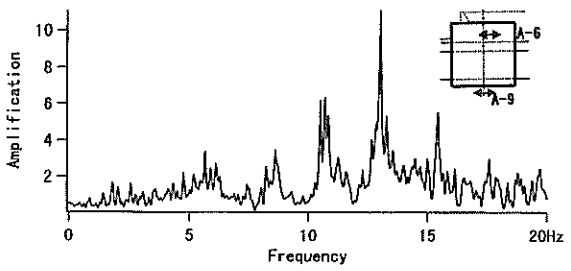
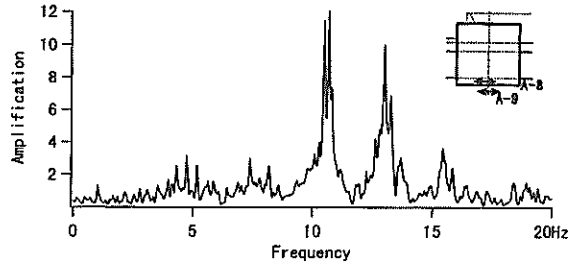
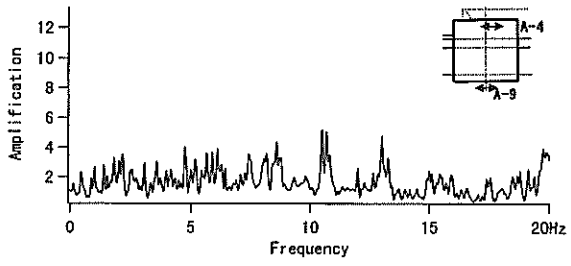
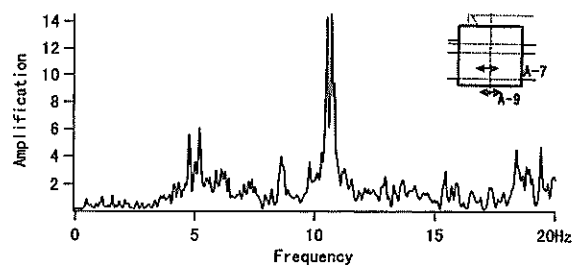
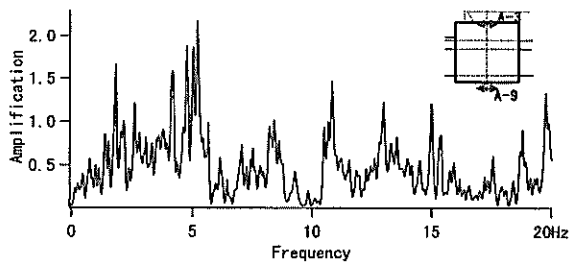
単位：Frequency (Hz)

付図-5(e) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-1)



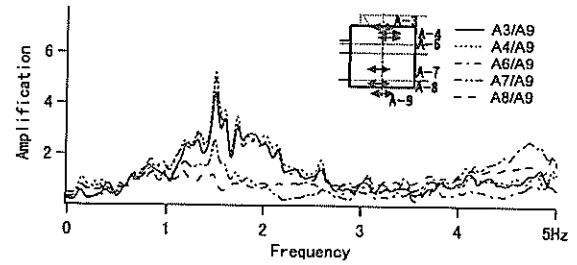
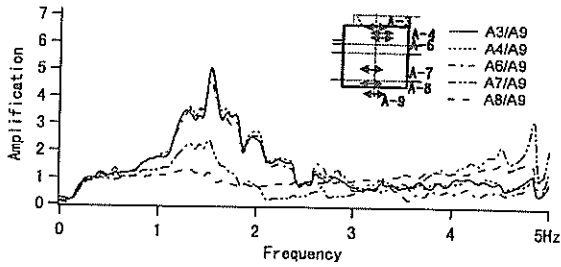
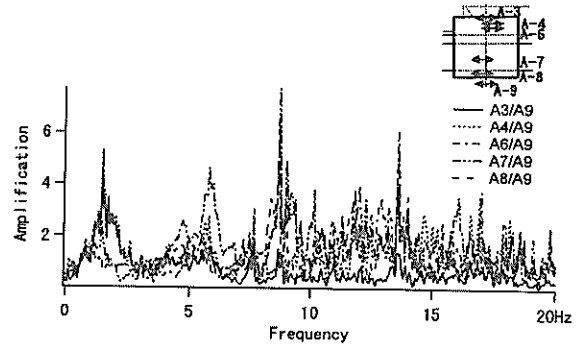
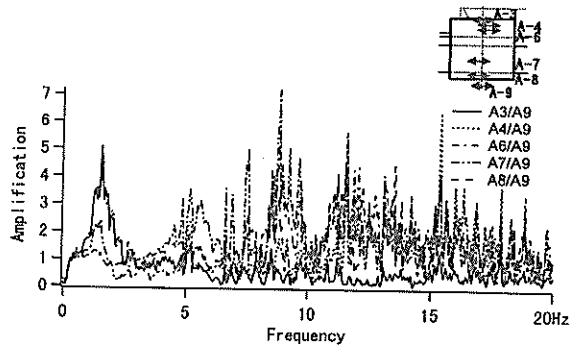
単位：Frequency (Hz)

付図-5(f) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-2)



単位：Frequency (Hz)

付図-5 (g) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-3)

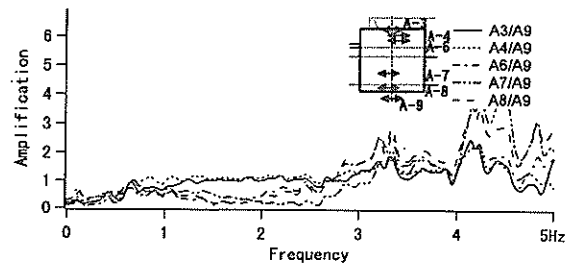
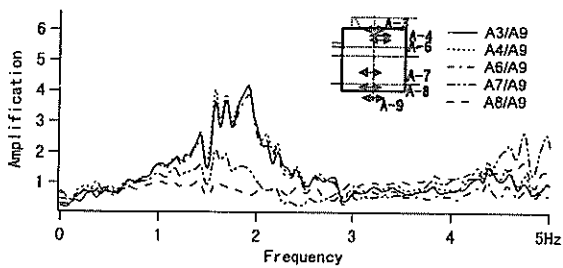
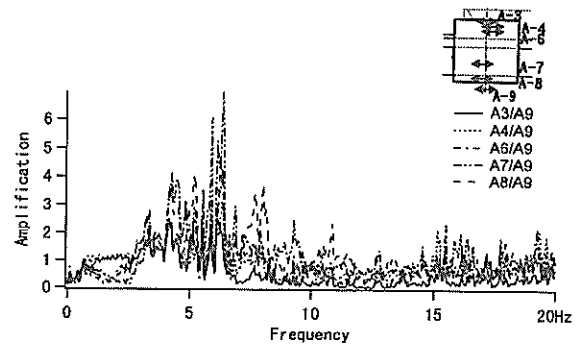
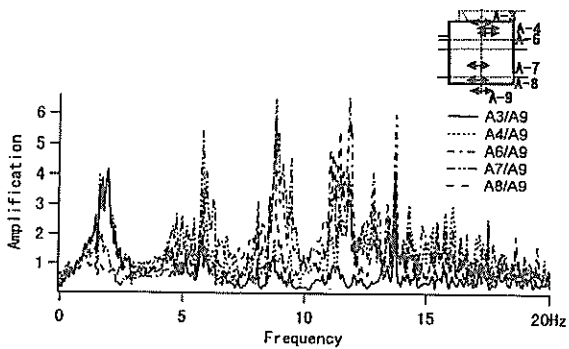


単位：Frequency (Hz)

単位：Frequency (Hz)

付図-6(a) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 97-1)

付図-6(c) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 93-2)

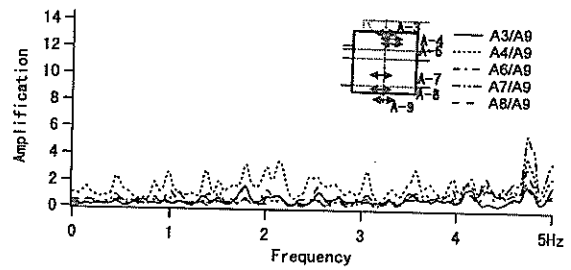
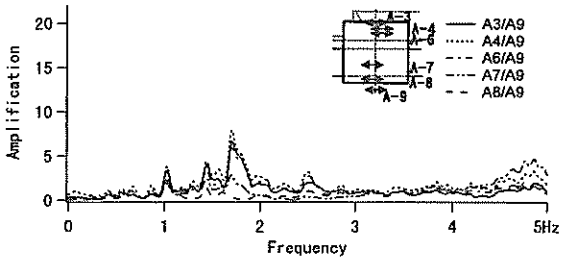
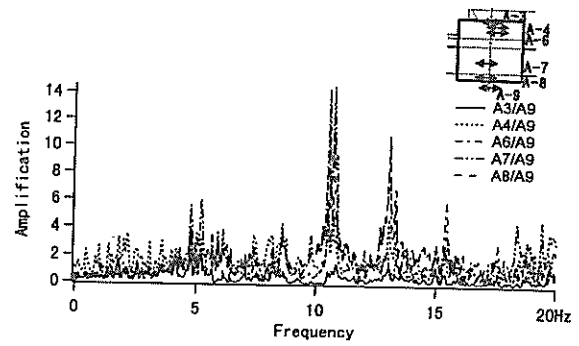
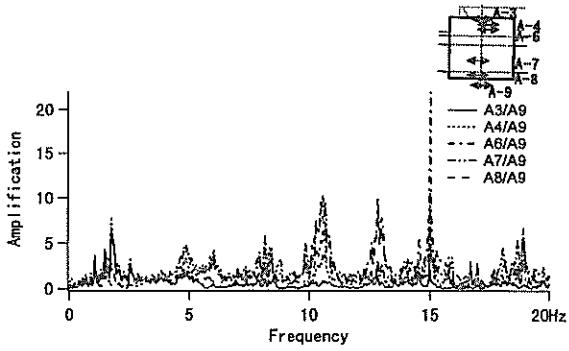


単位：Frequency (Hz)

単位：Frequency (Hz)

付図-6(b) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 94-3)

付図-6(d) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 92-8)

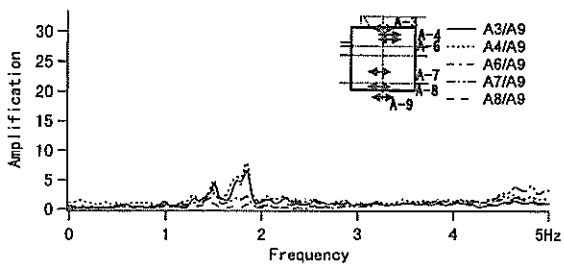
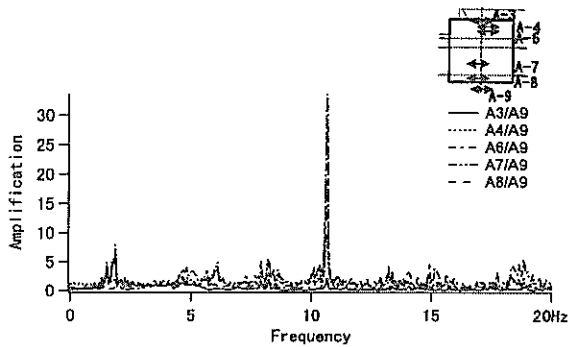


単位：Frequency (Hz)

単位：Frequency (Hz)

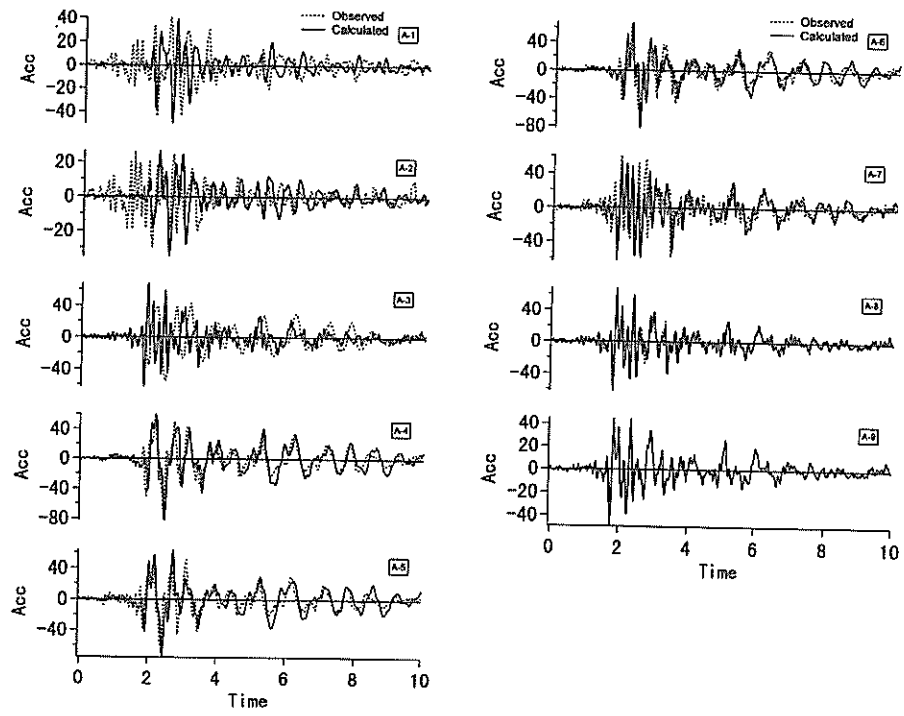
付図-6(e) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-1)

付図-6(g) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-3)



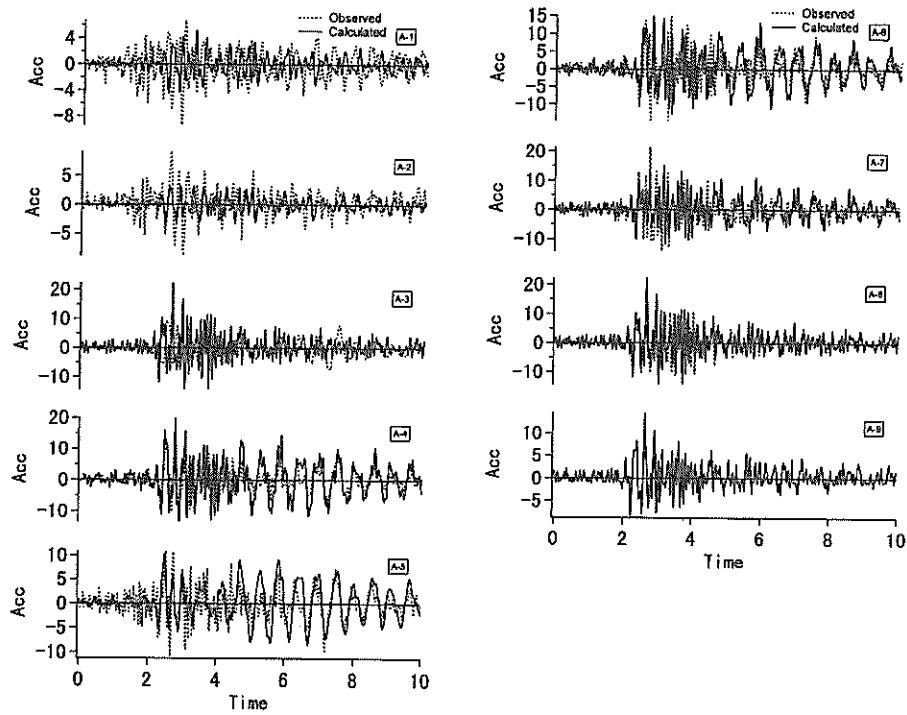
単位：Frequency (Hz)

付図-6(f) 護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-2)



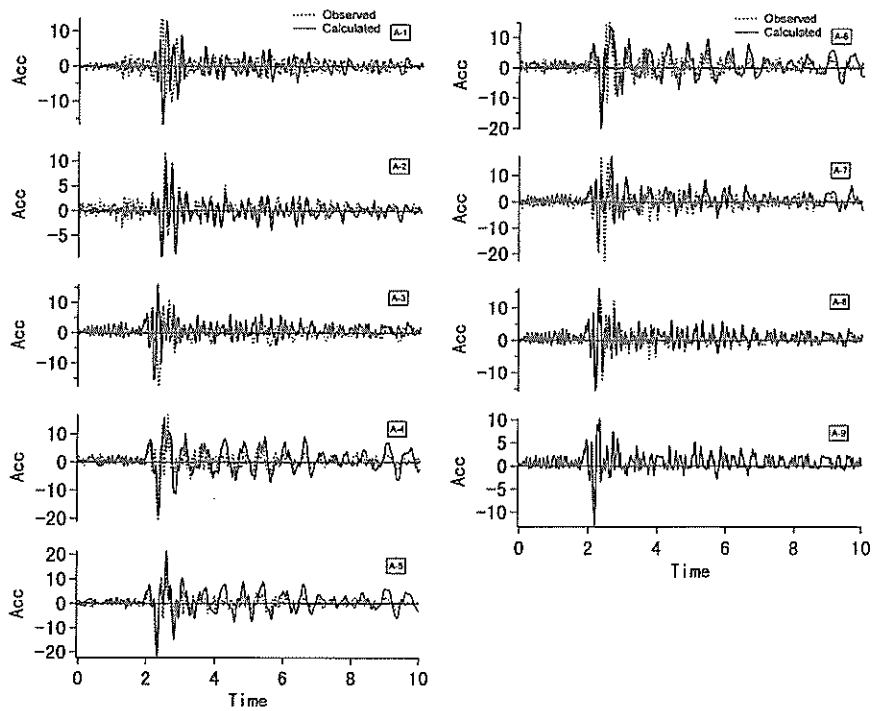
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-7(a) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



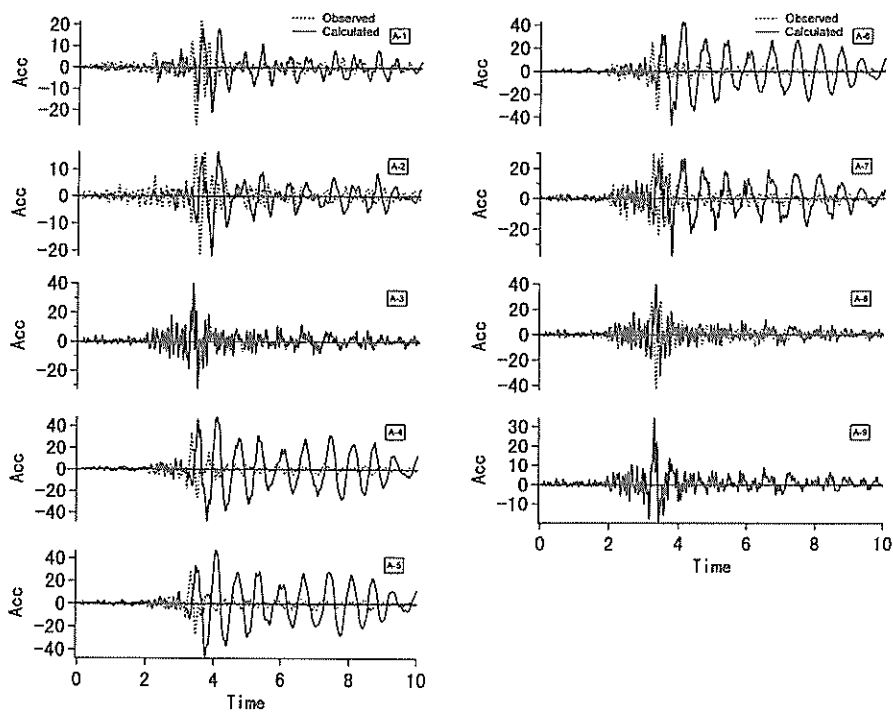
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-7(b) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 94-3)



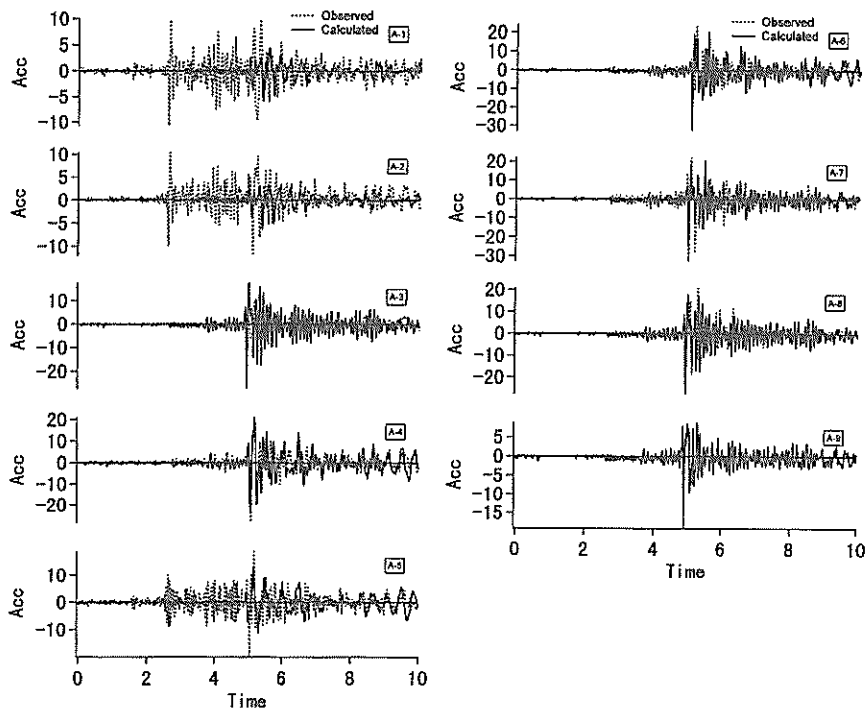
単位：Acc (Gal), Time (s)

付図-7(c) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 93-2)



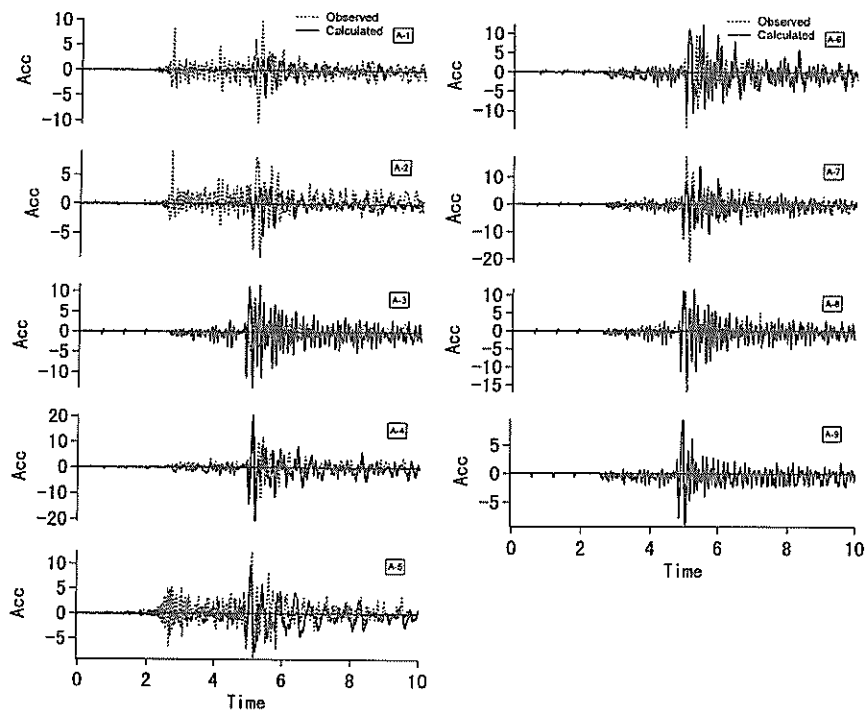
単位：Acc (Gal), Time (s)

付図-7(d) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 92-8)



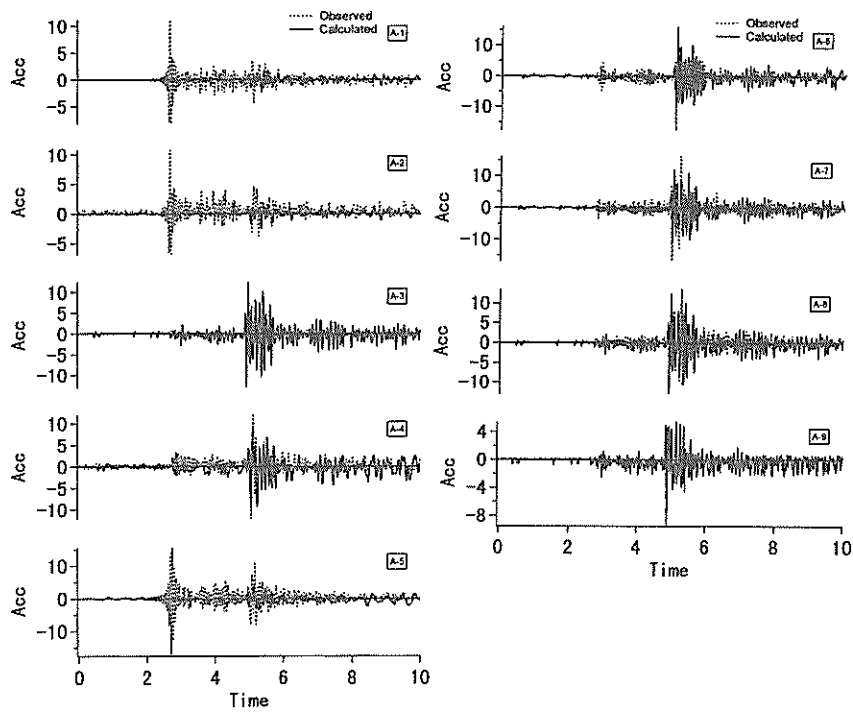
単位：Acc(Gal), Time(s)

付図-7(e) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-1)



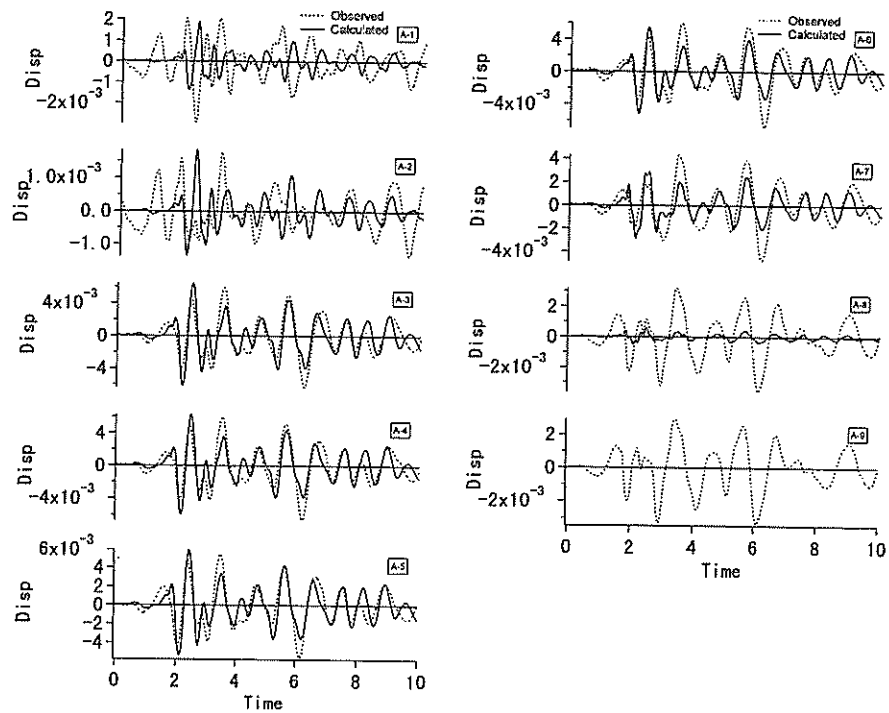
単位：Acc(Gal), Time(s)

付図-7(f) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-2)



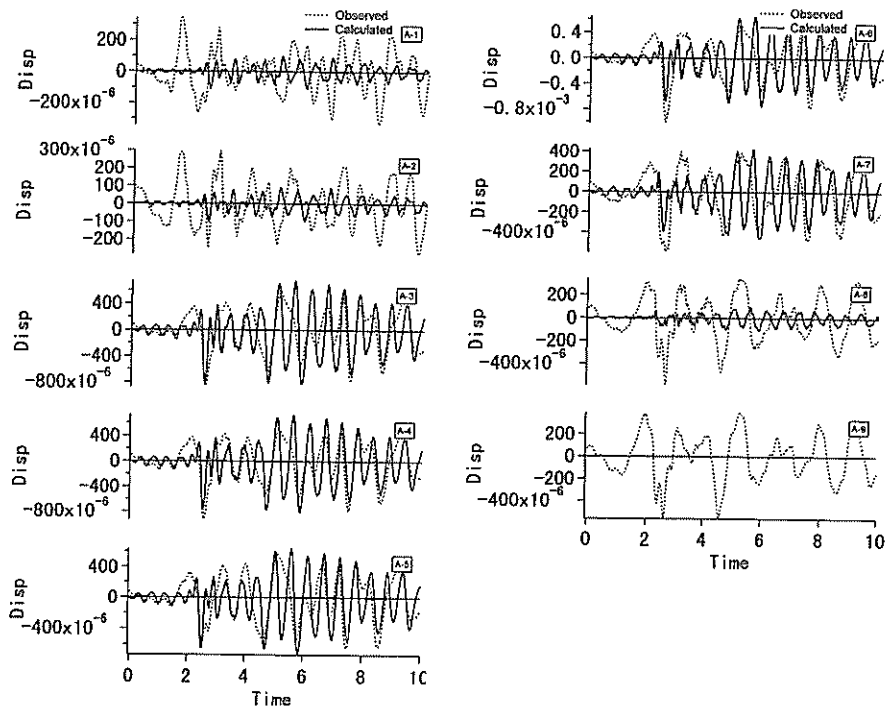
単位 : Acc (Gal), Time (s)

付図-7(g) 加速度における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-3)



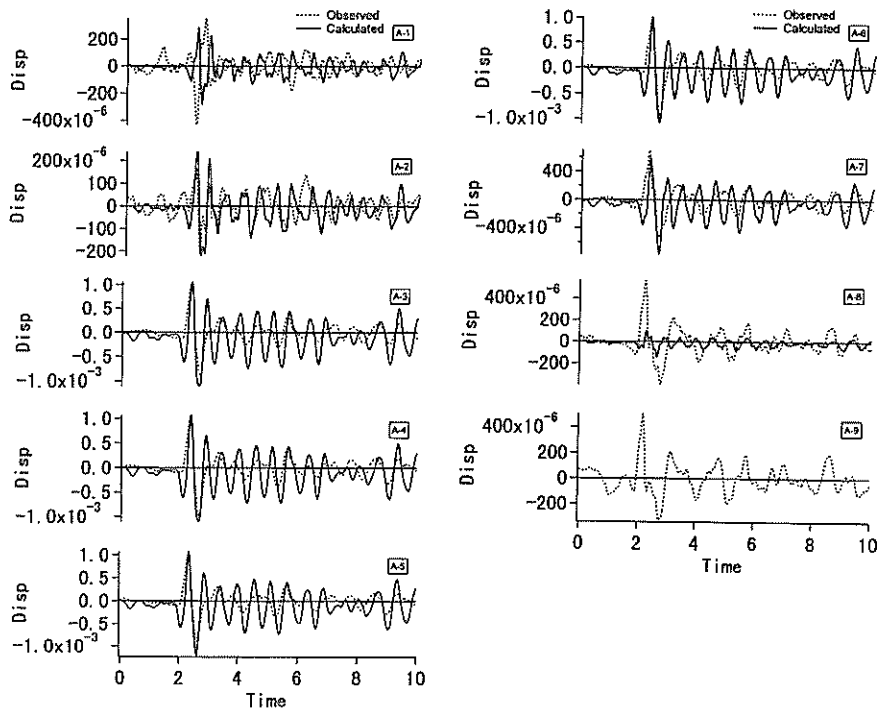
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(a) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 97-1)



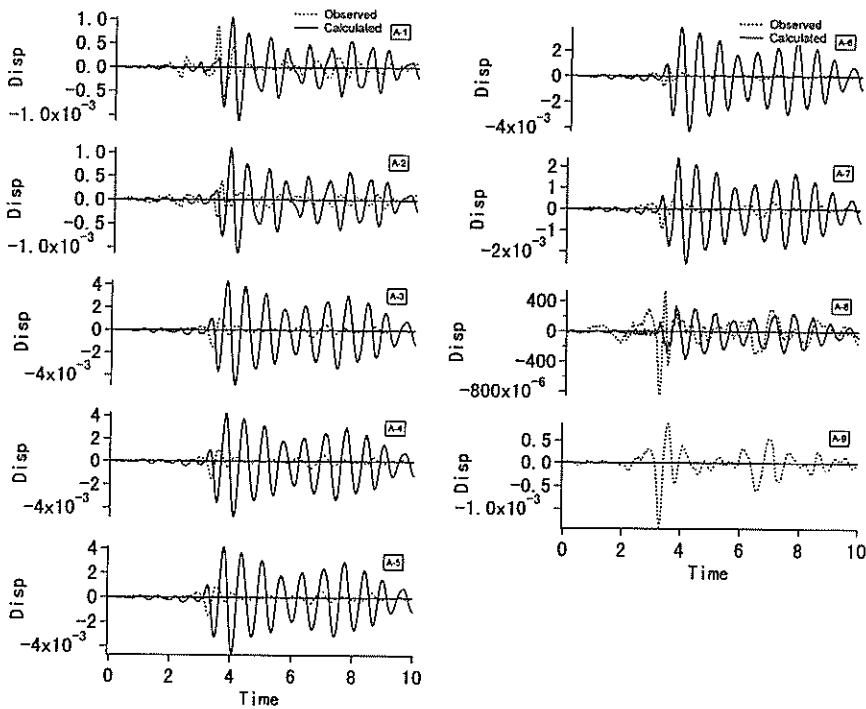
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(b) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 94-3)



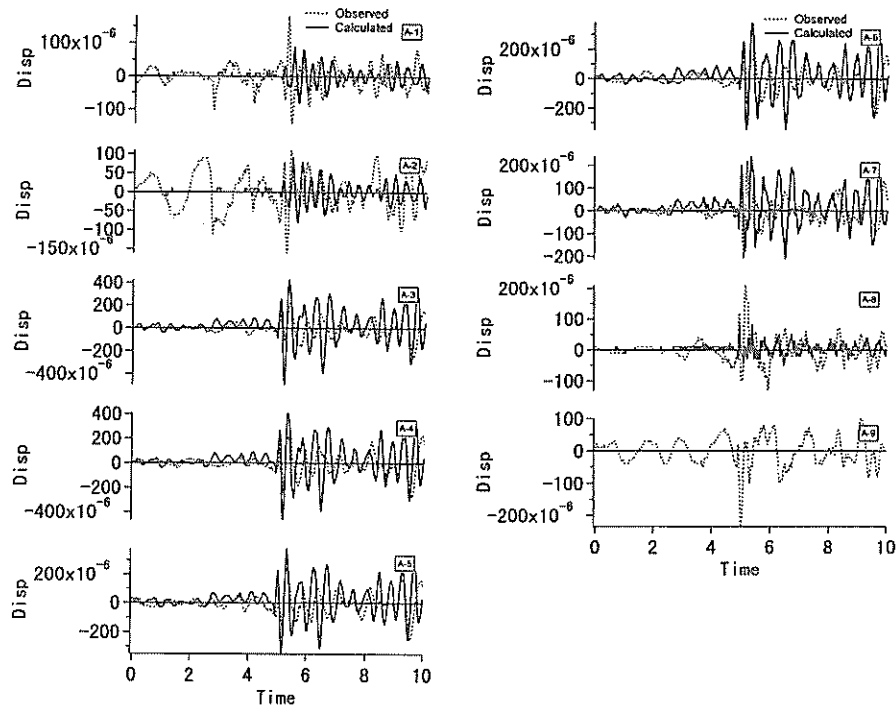
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(c) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 93-2)



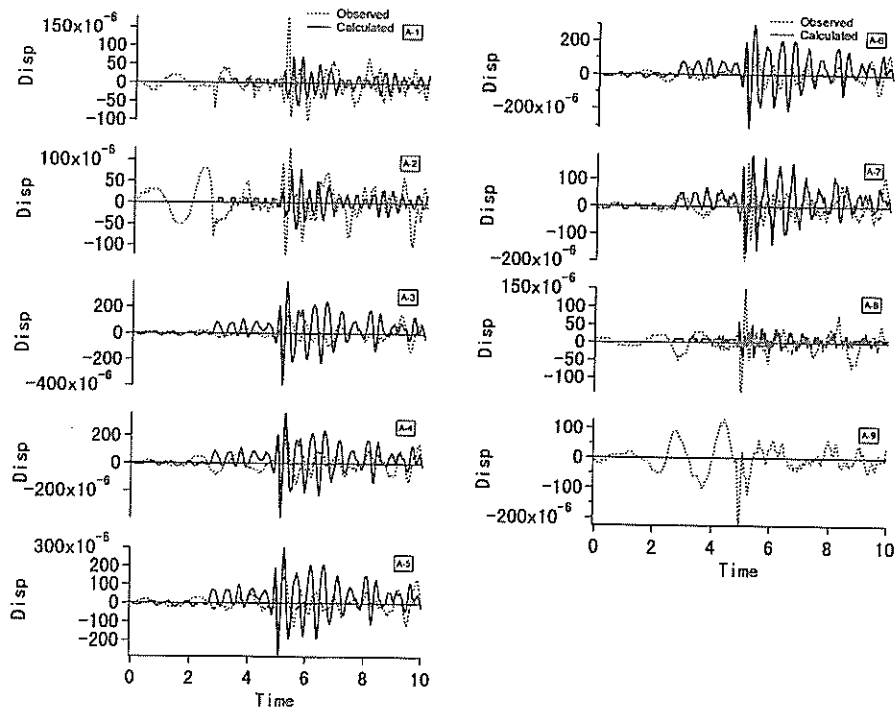
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(d) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 92-8)



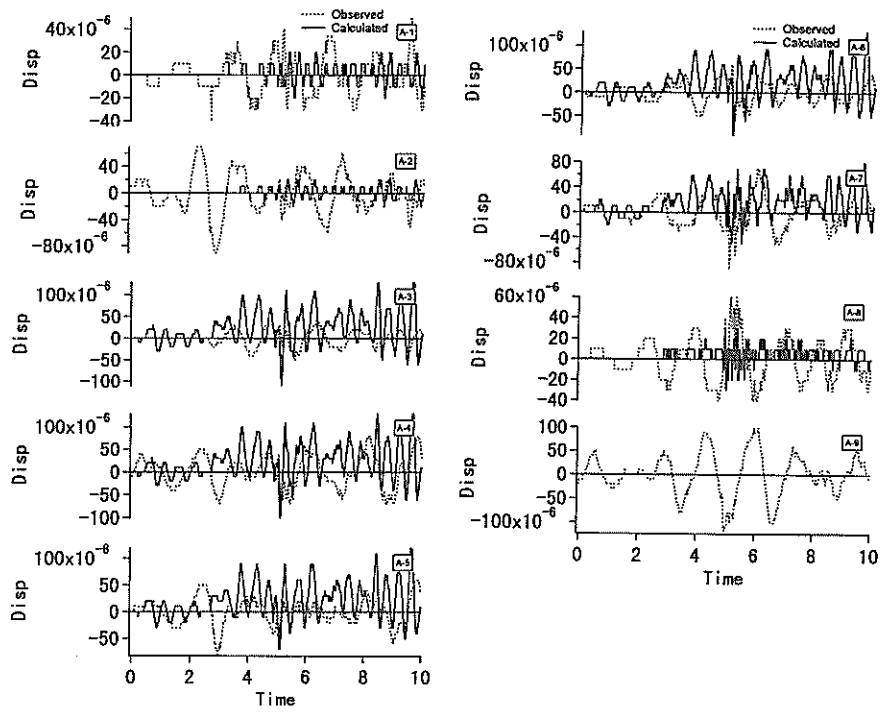
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(e) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-1)



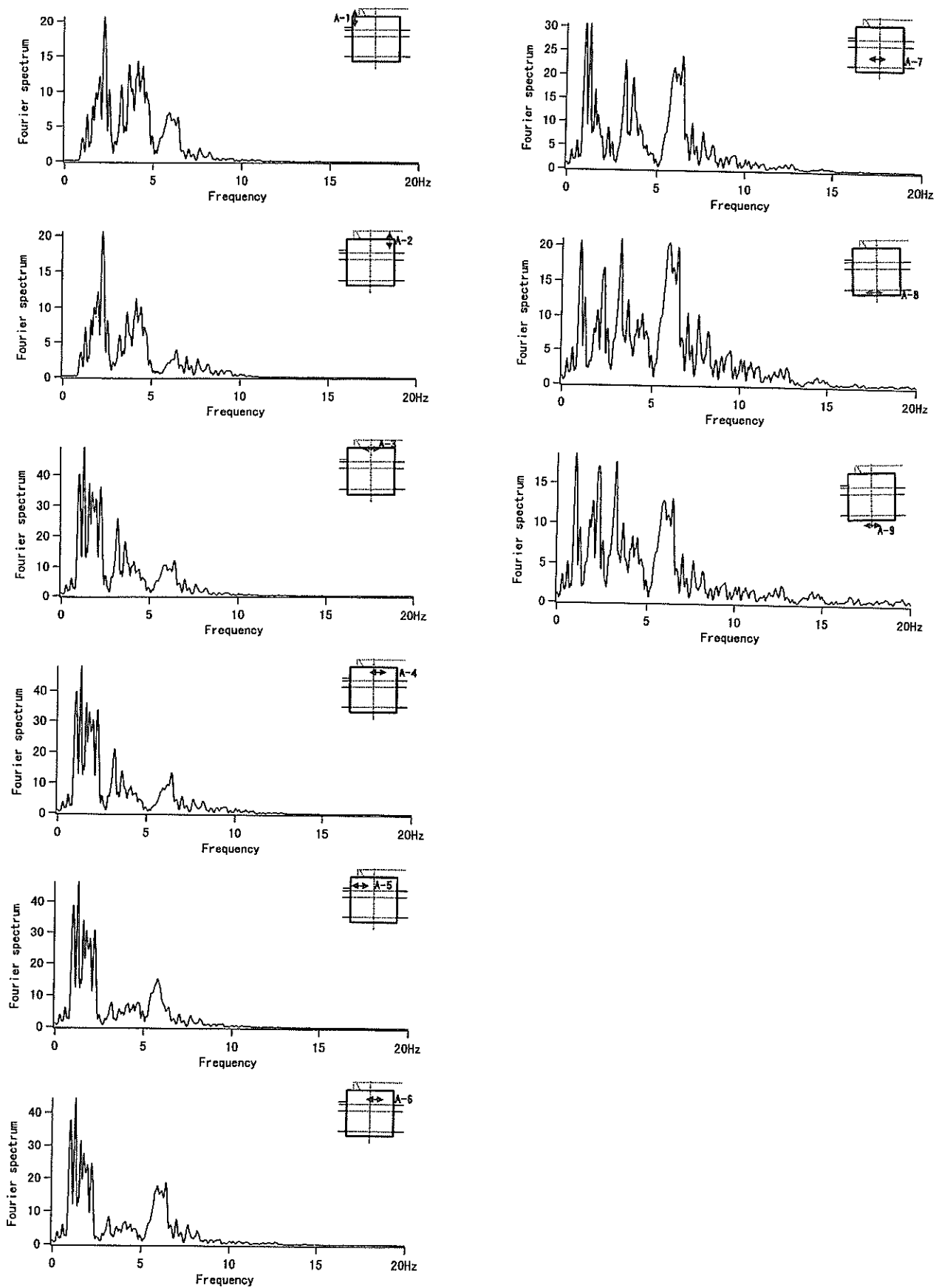
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(f) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-2)



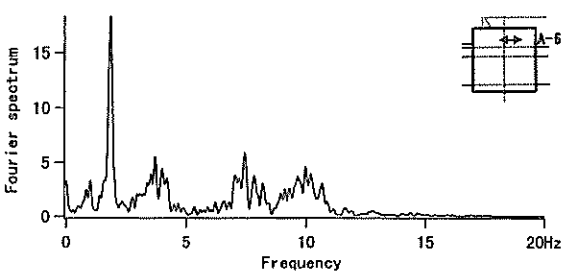
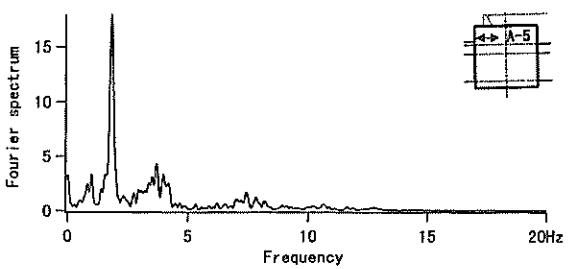
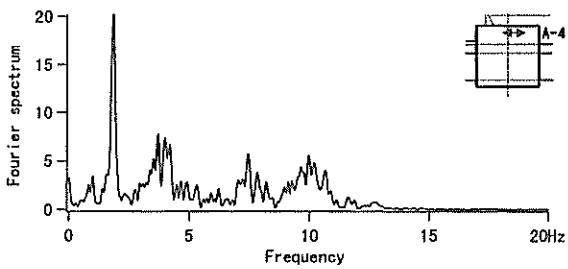
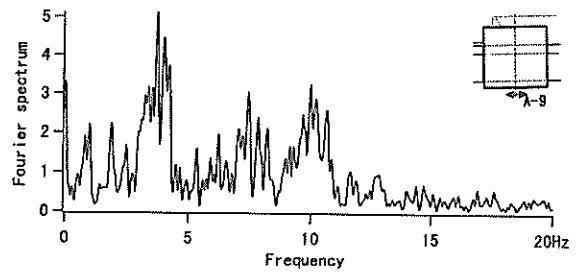
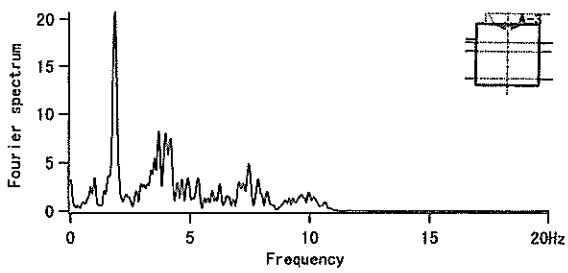
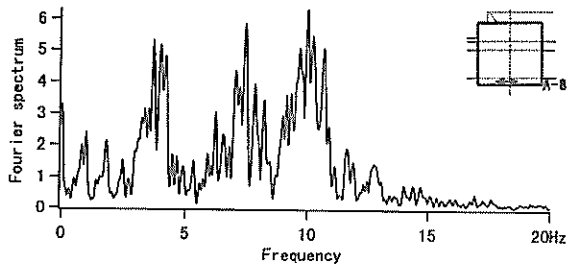
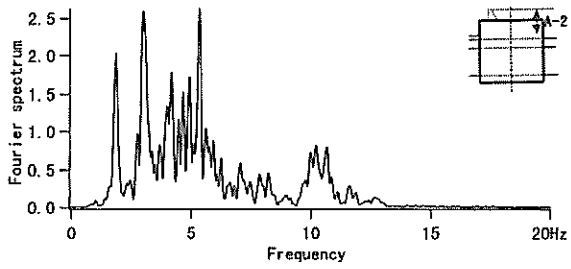
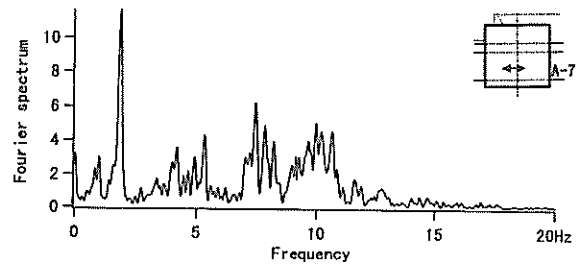
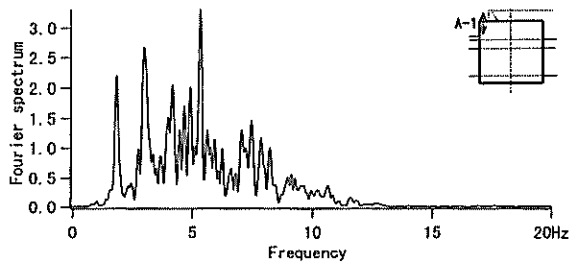
単位：Disp(m), Time(s)

付図-8(g) 変位における計算波形と観測波形の比較 (観測No. 62-3)



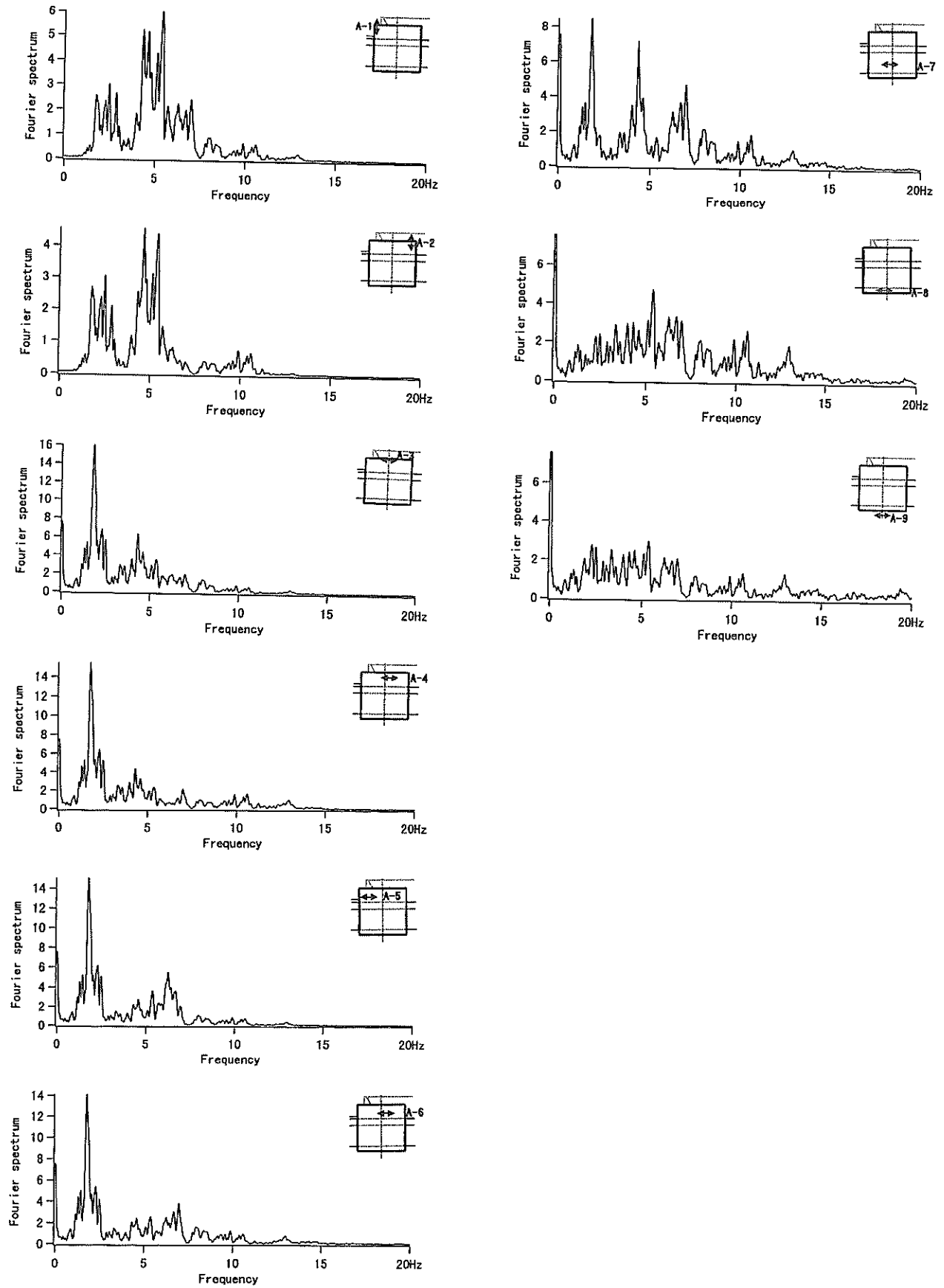
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-9(a) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 97-1)



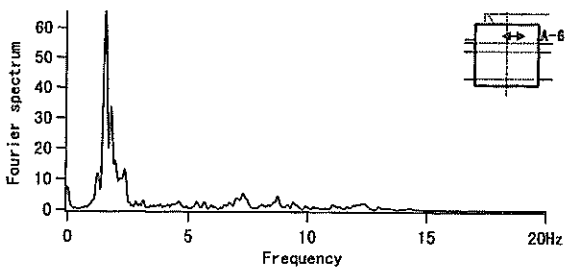
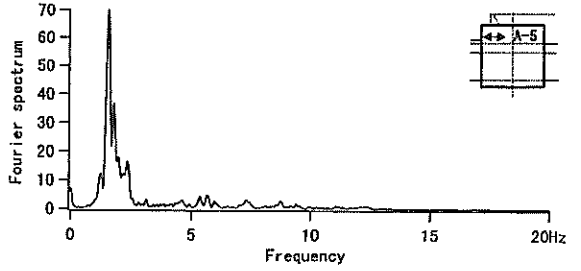
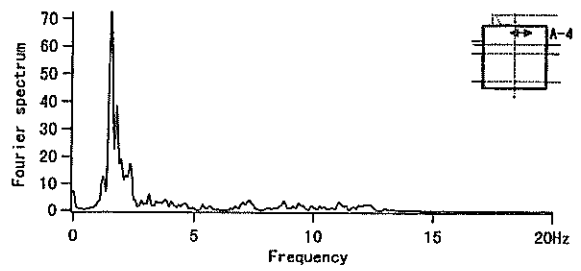
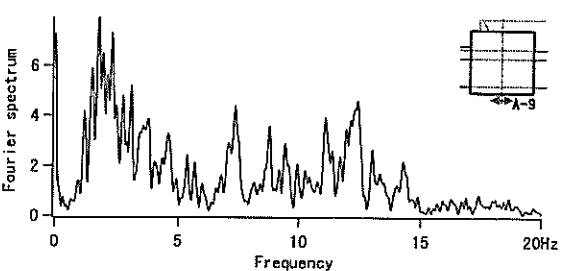
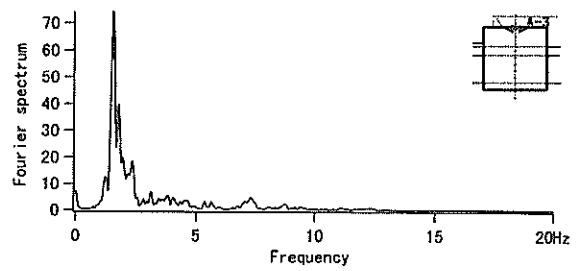
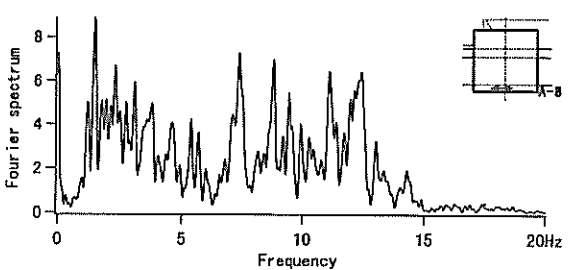
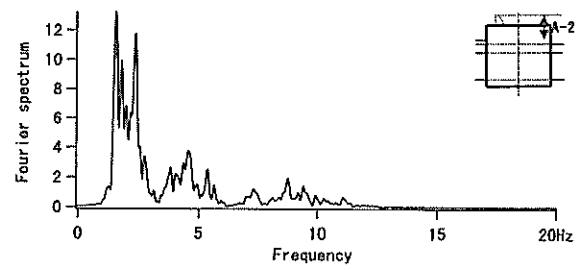
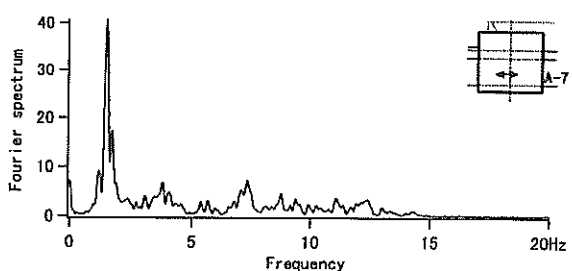
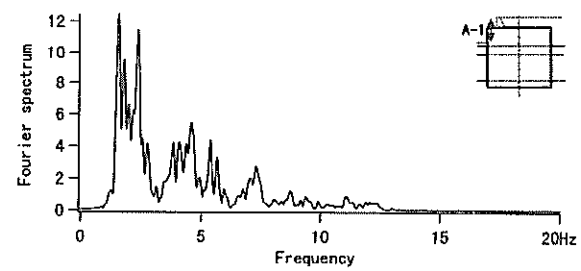
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-9 (b) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 94-3)



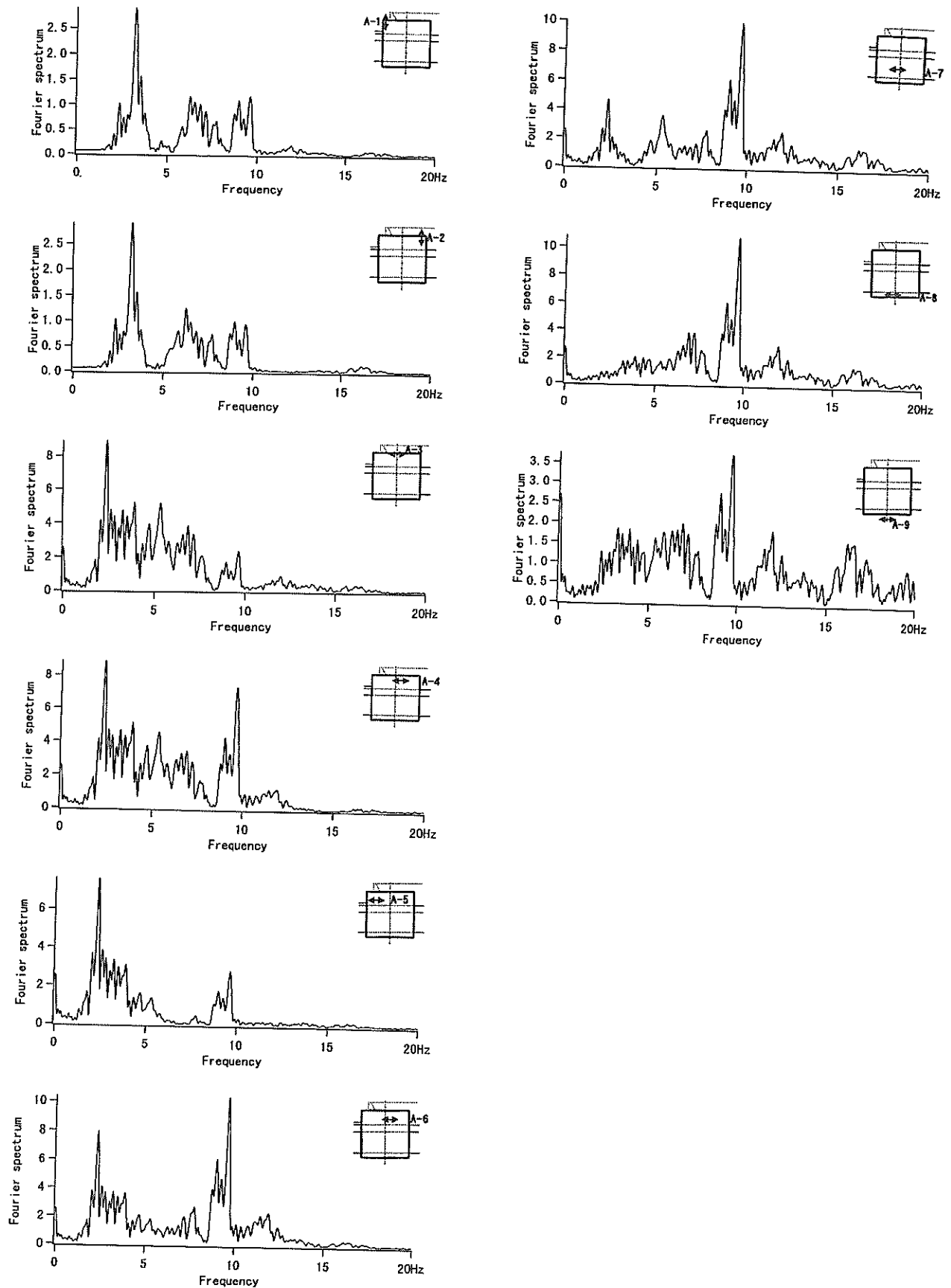
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-9(c) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 93-2)



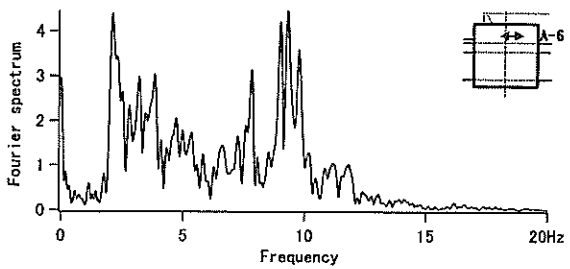
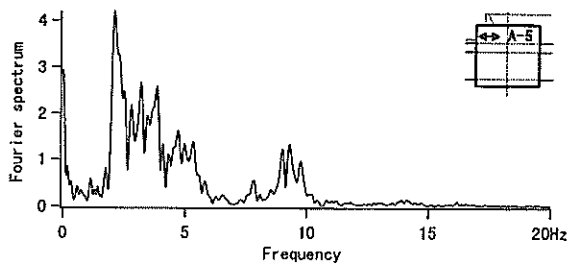
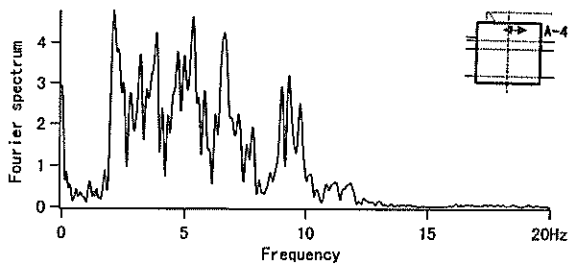
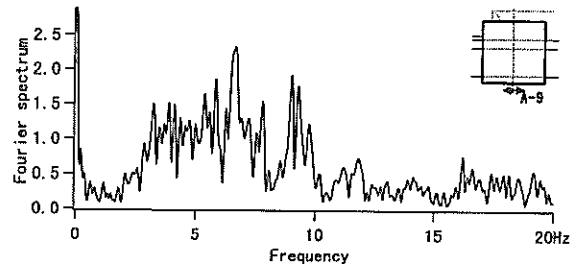
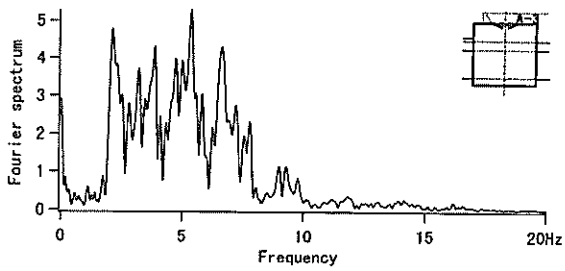
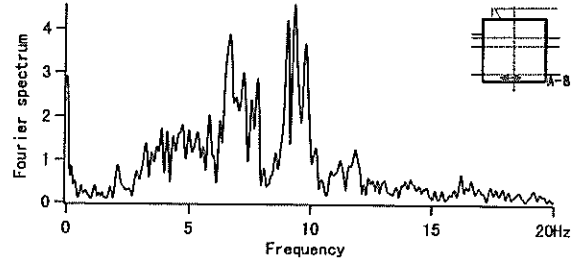
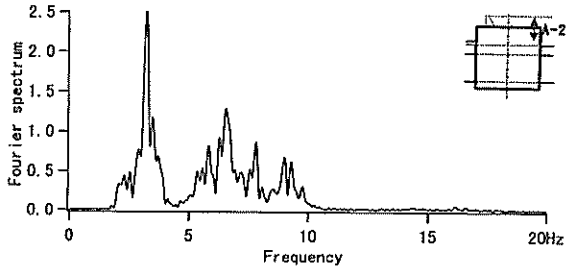
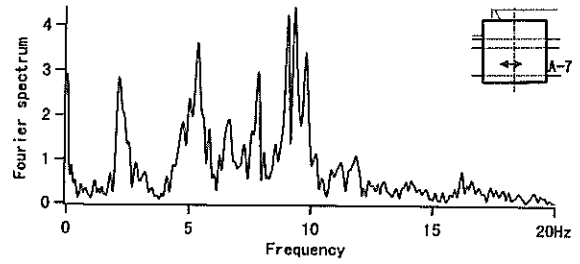
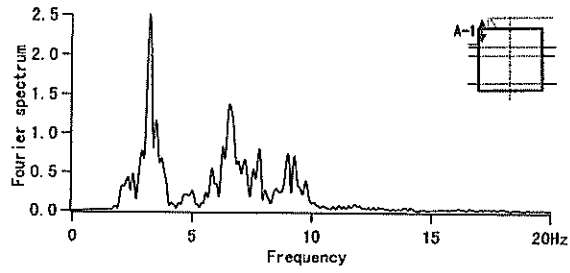
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-9(d) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 92-8)



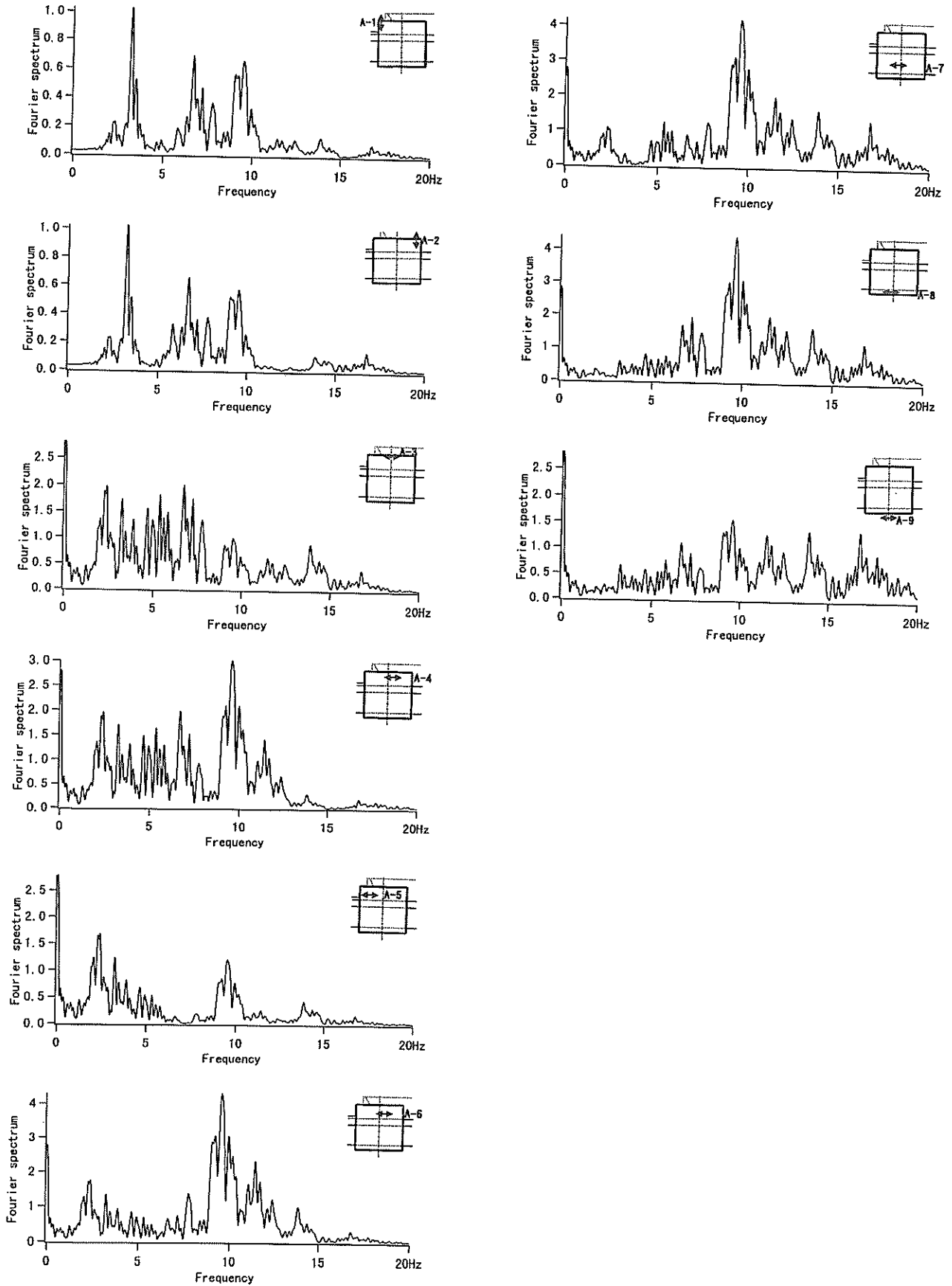
単位：Fourier spectrum(Gal · s), Frequency(Hz)

付図-9(e) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-1)



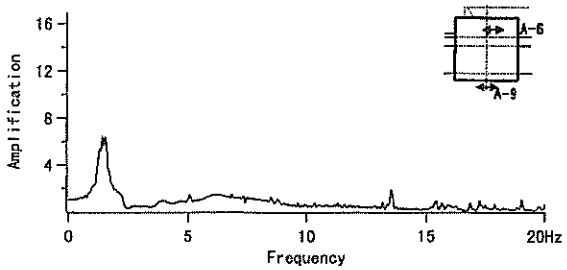
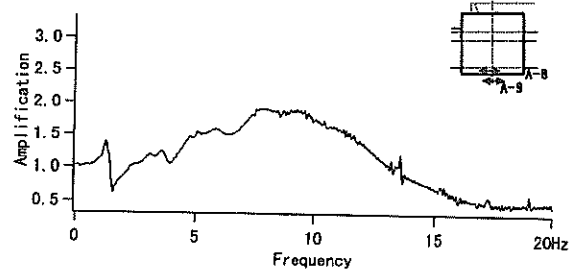
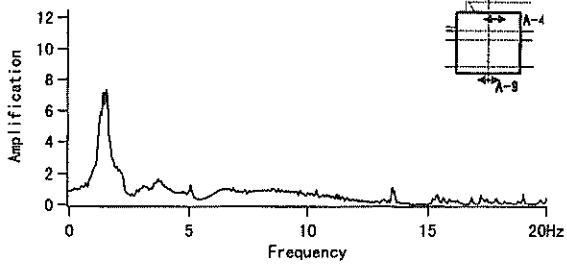
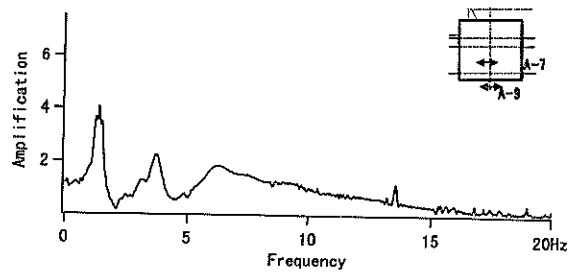
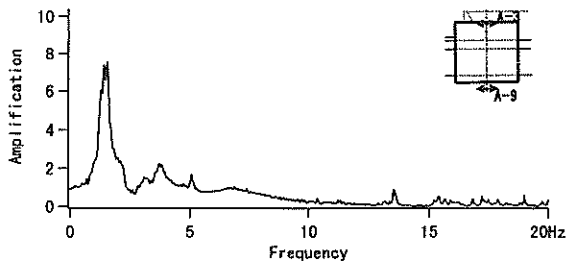
単位 : Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-9(f) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-2)



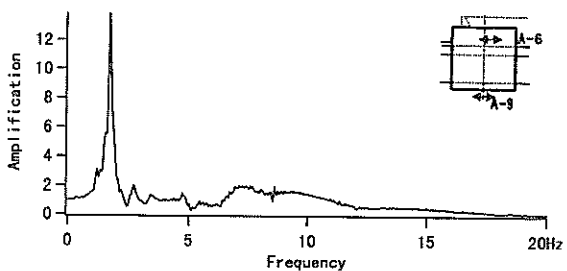
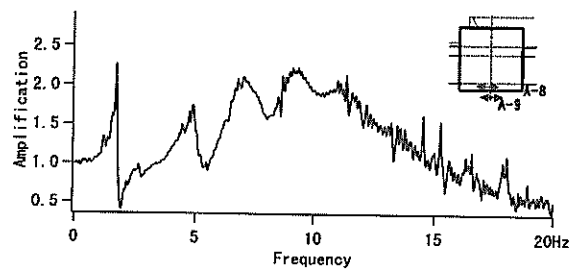
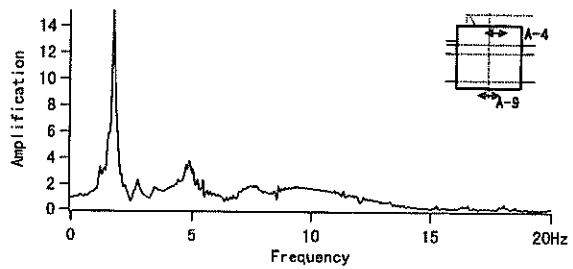
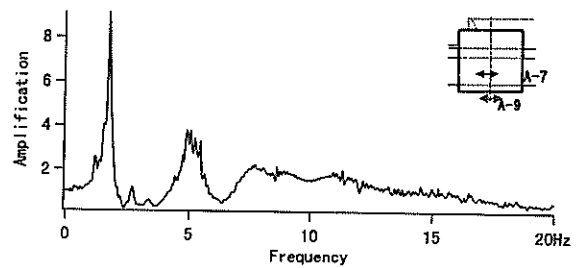
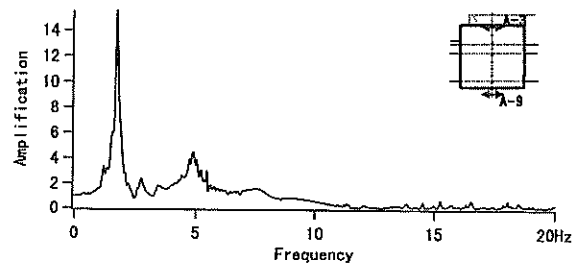
単位：Fourier spectrum (Gal · s), Frequency (Hz)

付図-9(g) FEM解析による護岸各部のフーリエスペクトル (観測No. 62-3)



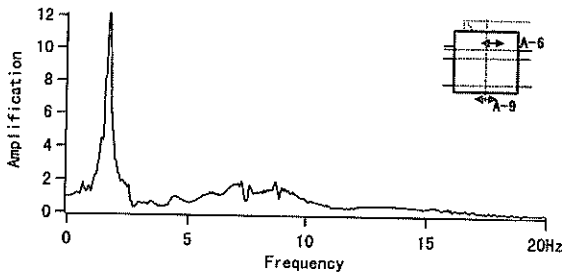
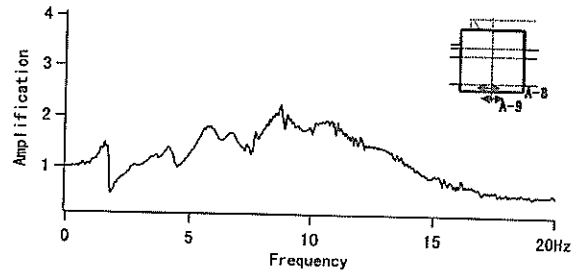
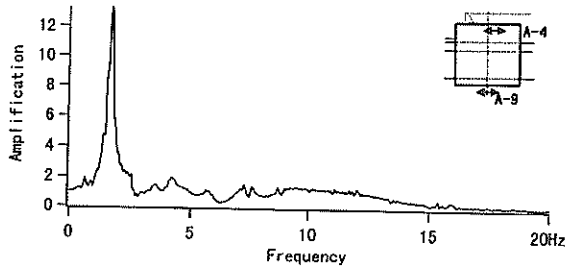
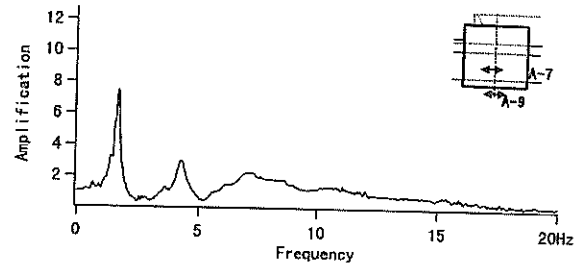
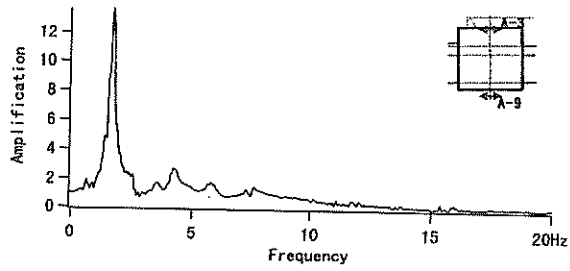
単位：Frequency (Hz)

付図-10(a) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 97-1)



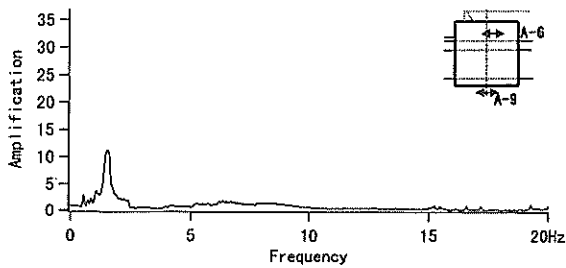
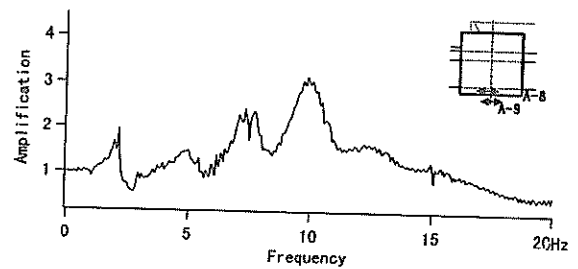
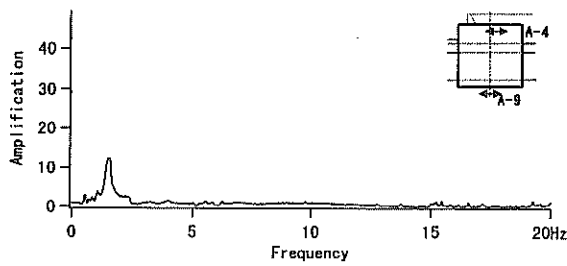
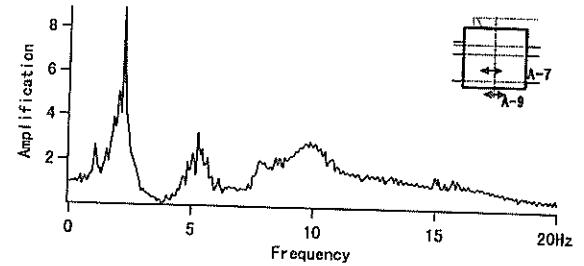
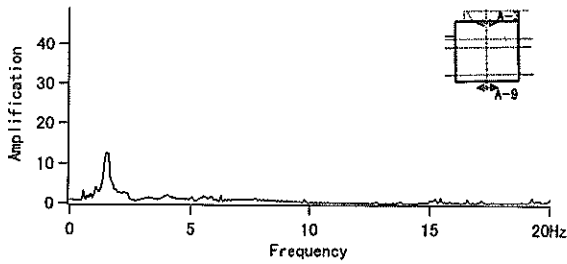
単位：Frequency (Hz)

付図-10(b) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 94-3)



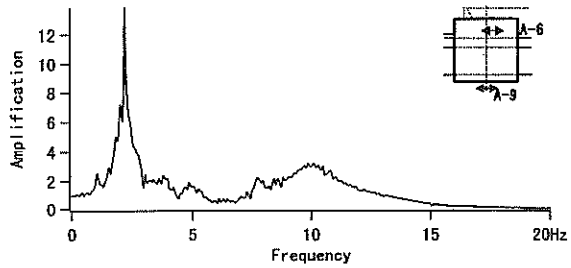
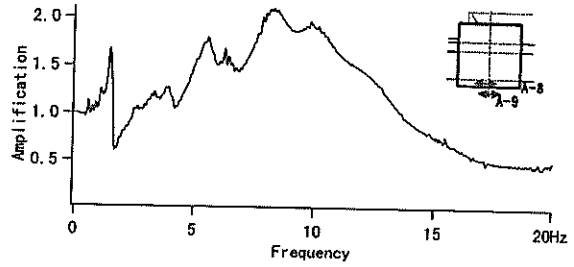
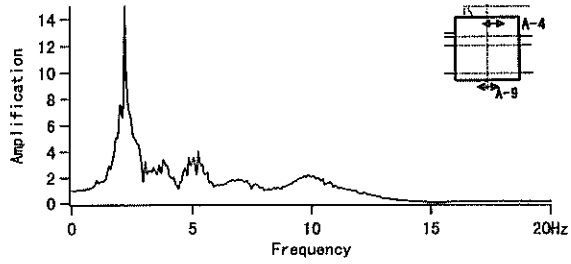
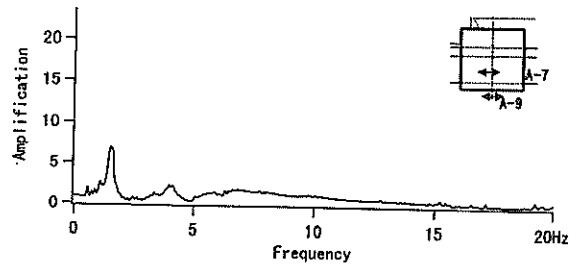
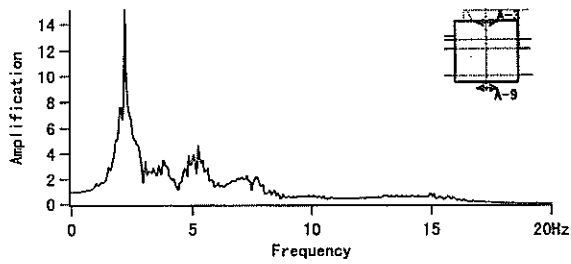
単位：Frequency (Hz)

付図-10(c) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 93-2)



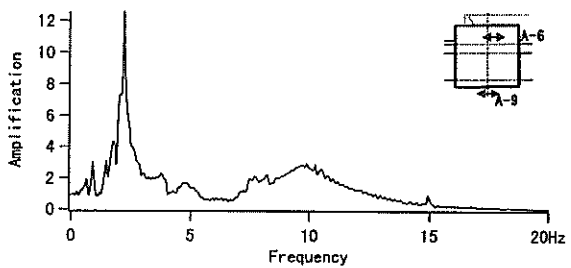
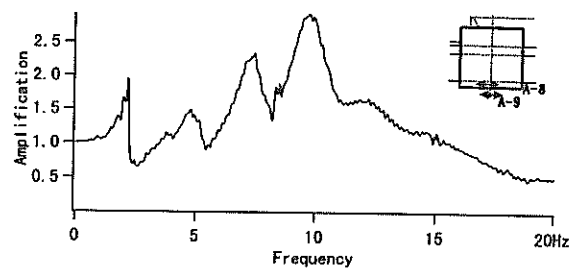
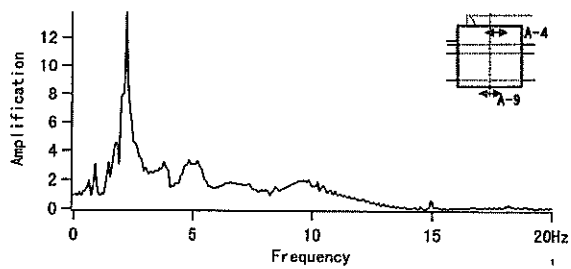
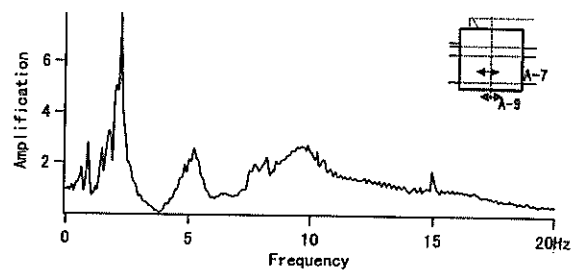
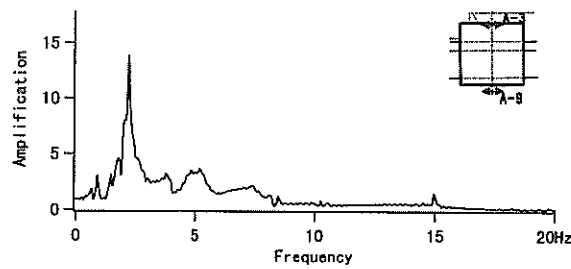
単位：Frequency (Hz)

付図-10(d) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 92-8)



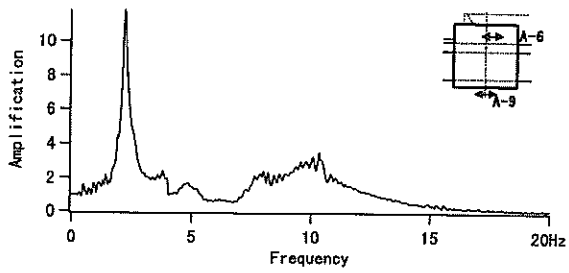
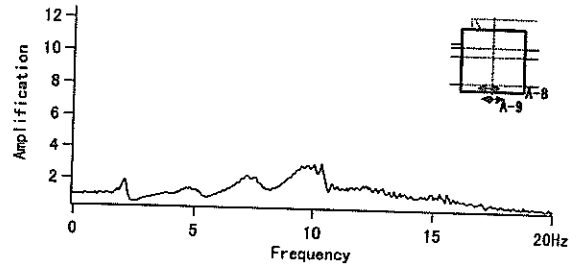
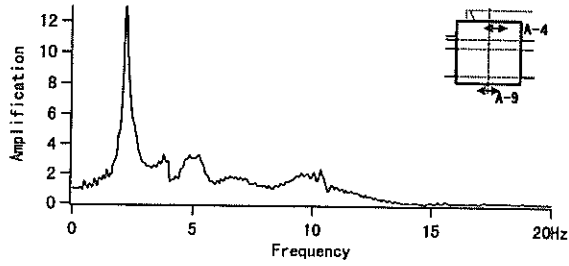
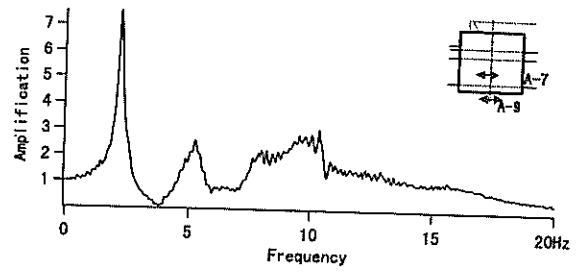
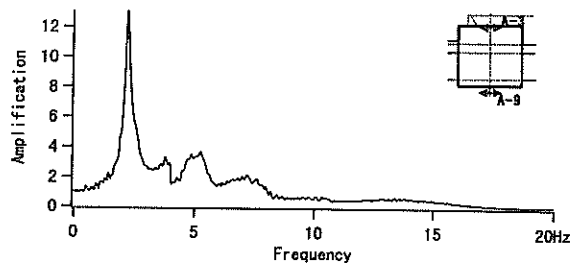
単位：Frequency (Hz)

付図-10(e) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-1)



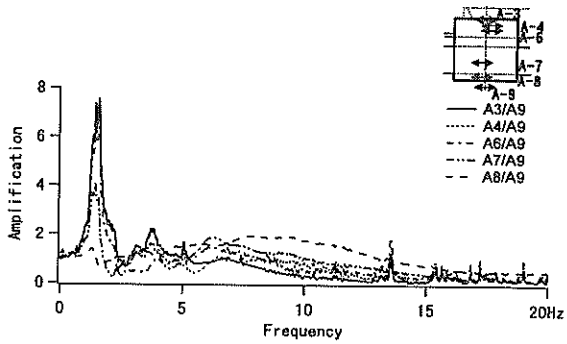
単位：Frequency (Hz)

付図-10(f) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-2)



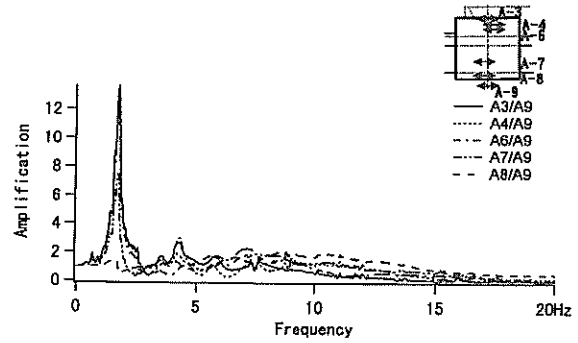
単位：Frequency (Hz)

付図-10(g) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 62-3)



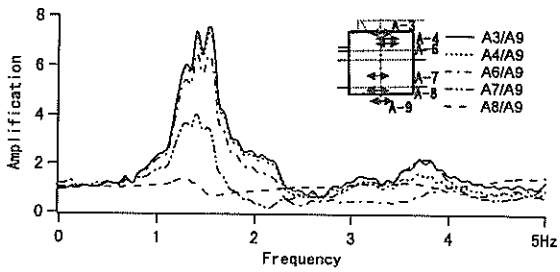
単位：Frequency(Hz)

付図-11(a) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 97-1)



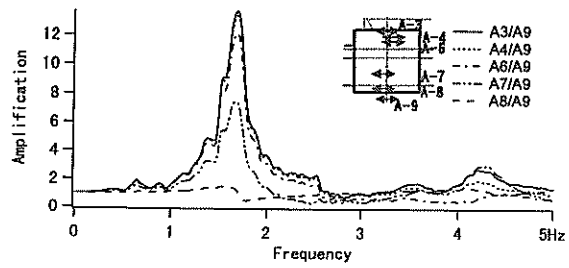
単位：Frequency(Hz)

図-11(c) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 93-2)



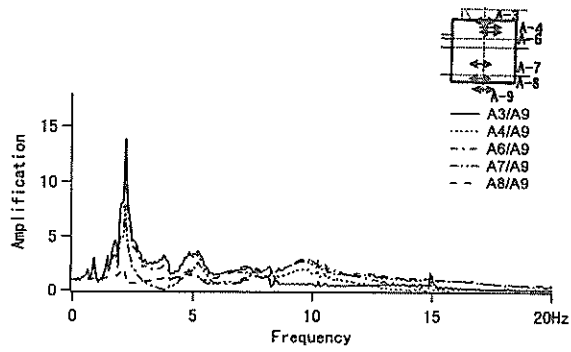
単位：Frequency(Hz)

付図-11(b) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 94-3)

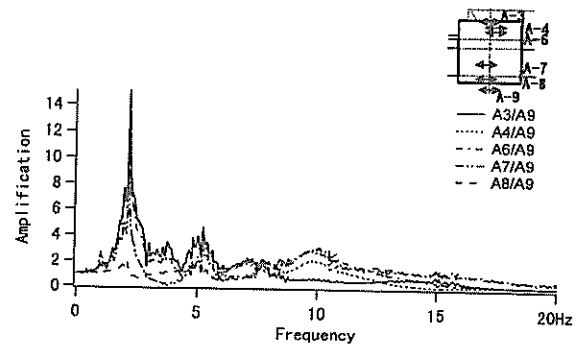


単位：Frequency(Hz)

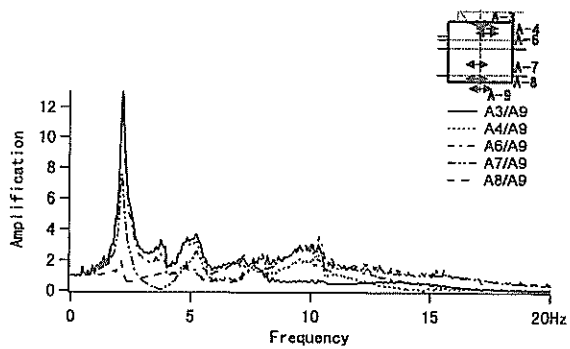
図-11(d) FEM解析による護岸各部の伝達関数 (観測No. 92-8)



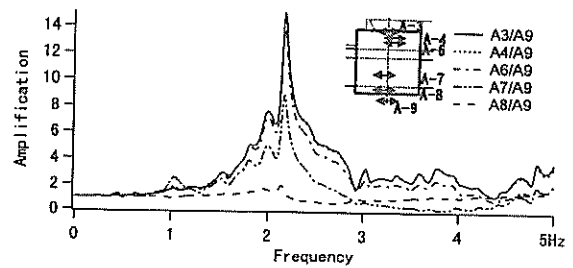
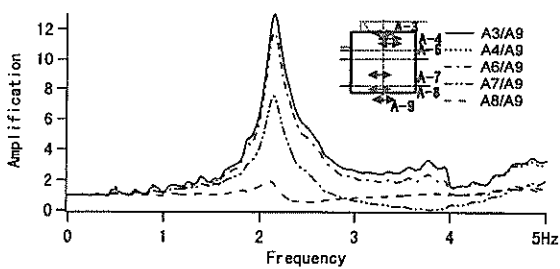
単位：Frequency (Hz)
 付図-11(e) FEM解析による護岸各部の
 伝達関数 (観測No. 62-1)



単位：Frequency (Hz)
 図-11(g) FEM解析による護岸各部の
 伝達関数 (観測No. 62-3)



単位：Frequency (Hz)
 付図-11(f) FEM解析による護岸各部の
 伝達関数 (観測No. 62-2)



港湾技研資料 No.932

1999.3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1999) by P.H.R.I

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of. P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。