

港湾技研資料

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

No.944 Sept. 1999

大水深混成式防波堤（水深60m級）の地震応答観測と解析

篠	沢	巧
林		恒一郎
平	出	友信
井	合	進
上	部	達生

運輸省港湾技術研究所



目 次

要旨	3
1. はじめに	4
2. 大水深防波堤における地震観測	4
2. 1 釜石湾口防波堤	4
2. 2 地震計と水圧計	8
2. 3 地震時の加速度・動水圧記録	14
3. 大水深防波堤の地震記録の簡易解析	33
3. 1 最大加速度応答比	33
3. 2 振動数応答特性	33
3. 3 動水圧	36
4. 地震応答解析	40
4. 1 解析手法	40
4. 2 解析結果と観測結果の比較	40
5. 結論	48
参考文献	49
記号表	49

Earthquake response observation & analysis of composite breakwater in deep sea(60m depth class)

Takumi SHINOZAWA *
Kouichirou HAYASHI **
Tomonobu HIRAIDE ***
Susumu IAI ****
Tatsuo UWABE *****

Synopsis

Seismic response of a composite breakwater 60 m deep has been recorded, including accelerations and hydro dynamic pressures during earthquakes. The maximum accelerations at the base are less than 100 Gals and, thus, this report constitutes an interim report. The following tentative conclusions are obtained.

- (1) Frequency response of the composite breakwater consists of a predominant frequency of 1.6 Hz for a rubble mound-caisson system and 2.2 Hz for a caisson, both of which predominate in the seismic response at the top of the caisson.
- (2) Maximum hydro dynamic pressures measured during earthquakes are equal to or smaller than those computed based on Westergaard's and Zanger's formulae.
- (3) Maximum accelerations and hydrodynamic pressures computed based on equivalent linear analysis are consistent with those measured. This indicates the applicability of the equivalent linear analysis for seismic response of a composite breakwater 60 m deep during earthquakes up to 100 Gals.

Keyword: offshore structure in deep sea, strong-motion earthquake observation,
hydro dynamic pressure, earthquake response analysis

* Member of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

** Director General of Yokohama Investigation & Design Office, The Second District Port Construction Bureau

*** Director General of Kamaishi Port Construction Office, The Second District Port Construction Bureau

**** Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

***** Director of Structural Engineering Division

Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport

Address:3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826 Japan Phone:+0468-44-5030 FAX:+0468-44-0839 E-mail:shinozawa@cc.phri.go.jp

大水深混成式防波堤（水深60m級）の地震応答観測と解析

篠沢 巧^{*}
林 恒一郎^{**}
平出 友信^{***}
井合 進^{****}
上部 達生^{*****}

要 旨

水深 60m 級の大水深混成式防波堤で強震観測および動水圧観測を実施し、観測結果の中間報告的なとりまとめを行った。今回のとりまとめまでに得られた観測記録は、最大加速度が高々 100Gal 程度のもので、観測された地震時動水圧にも、波浪の影響などが含まれている可能性があり、現時点で大水深混成式防波堤の地震時挙動に関する断定的な結論を下すことは時期尚早である。しかし、以下の点については、ある程度の見通しが得られた。

(1) 今回観測対象とした水深 60m 級の大水深混成式防波堤の振動数増幅特性は、マウンドを含む防波堤全体系の固有振動数 1.6Hz およびマウンド上に設置されたケーソン部分の固有振動数 2.2Hz が重ね合わさったものとなり、ケーソン天端ではこれら両振動数が卓越するものとなった。

(2) 動水圧観測により得られた動水圧の観測値は、Westergaard 式、Zanger 式による計算値よりも小さな値を示した。

(3) 等価線形法に基づく水-地盤-構造物連成系の地震応答計算を実施し、観測結果と比較した結果、応答加速度および動水圧の最大値は、観測値と計算値でほぼ一致し、100Gal レベルの地震に対する本解析法の適用性について、ある程度の見通しが得られた。

キーワード：大水深構造物，強震観測，動水圧，地震応答解析

^{*} 構造部 地震防災研究室

^{**} 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長

^{***} 第二港湾建設局 釜石港工事事務所長

^{****} 構造部 地震防災研究室長

^{*****} 構造部長

運輸省 港湾技術研究所

〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 Phone:0468-44-5030 FAX:0468-44-0839 E-mail:shinozawa@cc.phri.go.jp

1. はじめに

建設分野における技術開発の方向性には、空間開発、地中開発および海域（海洋）開発があり、それぞれ、空間利用の高度化・高層化、地下利用空間の深度化、海域開発の大水深化に向けた技術的展開が図られている。このうち海域開発については、時代とともに大水深化が進み、近年では水深-20～-60m程度の沖合に人工島、湾口防波堤などが建設されるようになってきている。これら大水深構造物の建設では大水深化にともなう設計上の新たな課題を解決する必要がある、地震活動が活発なわが国においては、地震に対する大水深構造物の挙動検討が特に重要な検討課題の一つとなっている。

陸上に建設される大規模構造物と異なり、大水深構造物は水中に建設されるため、静水圧（浮力）および動水圧の影響が著しく、その検討においてはこれらの影響下における地震時挙動を適切に評価することが必要である。特に、動水圧は、大水深になるにつれてその影響が加速的に大きくなるものと予想されるため¹⁾、特に慎重な検討が必要とされている。このような背景のもと、港湾技術研究所を中心として、水深35m級の大水深防波堤における地震時動水圧の現地観測に基づく研究^{2)~6)}、模型実験と解析^{7)~9)}が実施されてきた。しかし、これまでに得られた現地観測データなどの成果は限られたもので、今後さらに実証的な研究を積み重ねていくことが必要な段階にある。

本論文では、水深-60m級の大水深防波堤の建設に伴って、新たな現地観測を実施する機会を得たのに伴い、その観測および解析結果を報告する。これにより、大水深構造物の地震時挙動、特に地震時動水圧に関する一連

の研究に新たな観測データおよび解析結果を追加し、研究全体の信頼性を高めようとするのが、本研究の最終目的である。しかし、今回とりまとめたデータの範囲は、最大加速度が100Gal程度をやや上回るレベルに留まっており、耐震設計で対象としている強地震動の記録は未だ得られていない。この点で、本論文は中間報告的な位置づけとすべき内容に留まっている。

2. 大水深防波堤における地震観測

2.1 釜石湾口防波堤

本研究で観測対象とした大水深構造物は釜石湾口防波堤である。同防波堤は図-1に示すとおり岩手県釜石湾の湾口に位置し、防波堤位置における最大水深が-63mに達する大水深構造物である。防波堤法線は、北西から南東方向に延び、中央部300mは航路用の開口部となっている。この開口部より270m北西の位置に、種々の計器類を設置し、地震時に大水深構造物に作用する加速度・動水圧を観測している。

この観測地点における防波堤の断面（北西から南東方向を望む断面）は図-2に示すとおりであり、対象断面は捨石マウンドとコンクリートケーソンからなるケーソン式混成防波堤である。コンクリートケーソンは水深25mの大型のもので、水深6m以浅の上部は直立壁、水深6m以深は傾斜壁の形状をなしている。ケーソン上部の湾外側には消波スリットが設けられている。マウンドの基礎割石は5～800kg/個、天端部及び湾外側の法面被覆は10～800kg/個のものが用いられている。地震観測のための計器は図-3に示す各点に設置されており、加

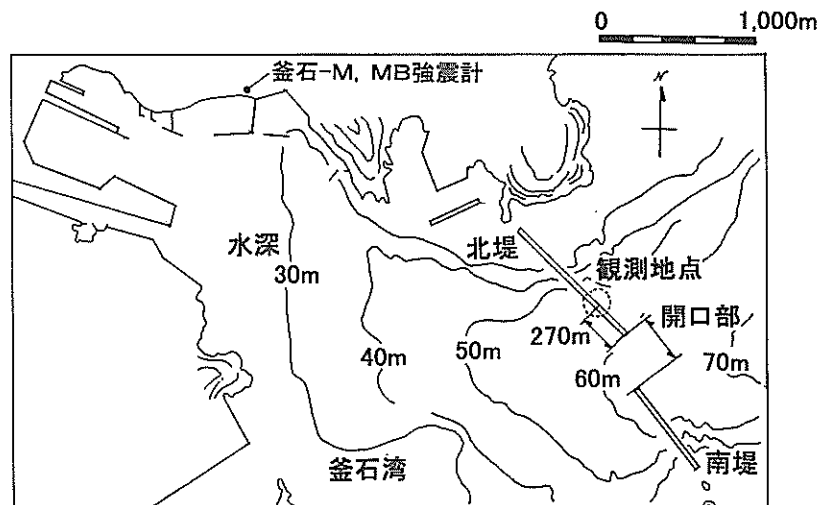


図-1 釜石湾口防波堤平面図

速度計3カ所 (S1 ~ S3), 動水圧計6カ所 (P1 ~ P6) から構成される観測網となっている。観測機器の詳細については、次節に詳しく述べることにしたい。

防波堤の縦断面は、図-4に示すとおり、総延長2,060mで、それぞれ北堤990m、南堤670mからなり、この間300mと両岸側にそれぞれ50m開口部を設けている。建

設過程は図-5に示すとおり順次建設され、平成4年4月から観測が開始された。

基礎割石マウンド下の地盤条件は図-6~7に示すとおりである。地盤は、開口部から南堤にかけて層厚2m程度のシルト層や礫層の互層が見られるが、観測対象地点はほぼ砂層で構成されている。

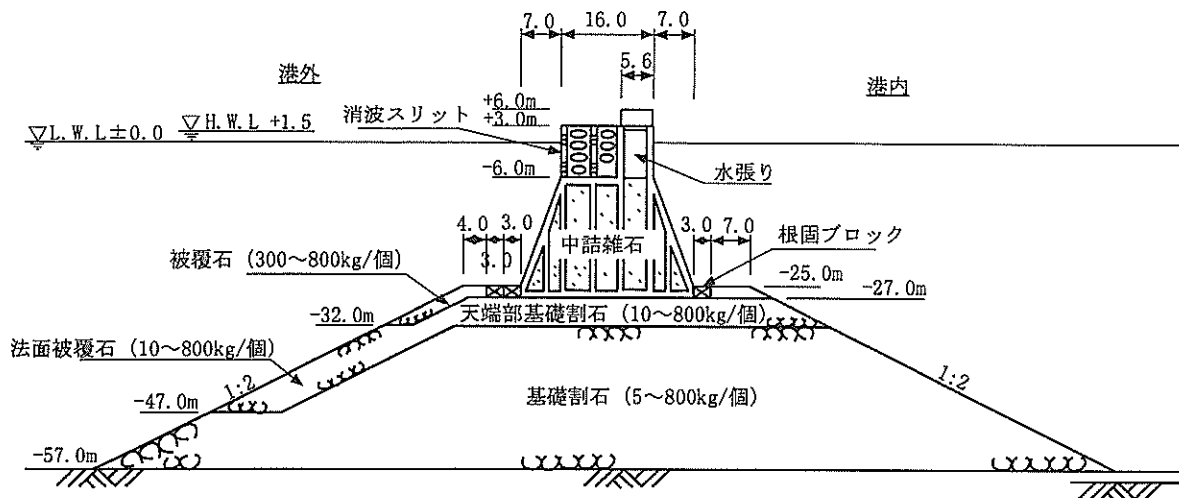


図-2 釜石湾口防波堤標準断面図

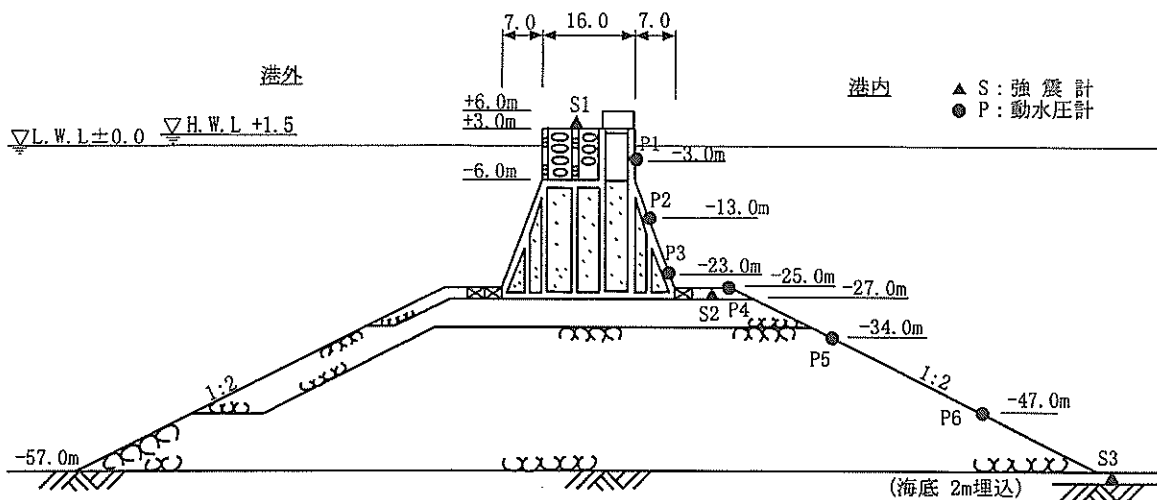


図-3 釜石湾口防波堤標準断面図 (計器設置図)

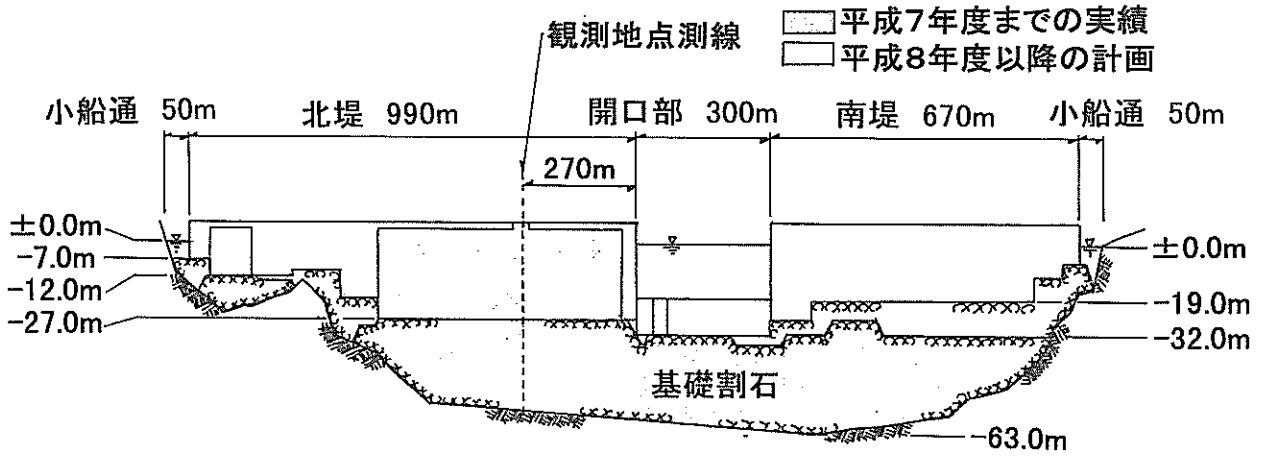
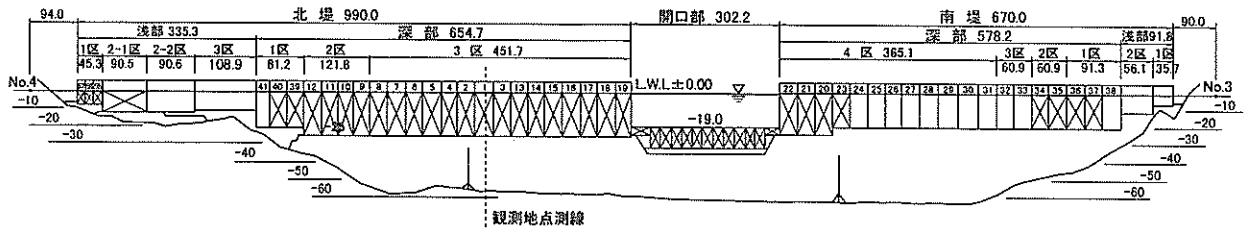


図-4 釜石湾口防波堤縦断面図



	北堤 浅部			北堤 深部															開口部	南堤 深部								南堤浅部																			
	2-1区	2-2区	3区	1-1区	1-2区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区	10区	11区	12区	13区	14区	15区	16区	17区	18区	19区	4区(台形)	4区(矩形)				3区	2区	1区	2区	1区														
昭和57~58年度				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38					
平成元年度																																															
2																																															
3																																															
4																																															
5																																															
6																																															
7																																															
8																																															
9																																															
10																																															
11																																															

図-5 防波堤建設過程

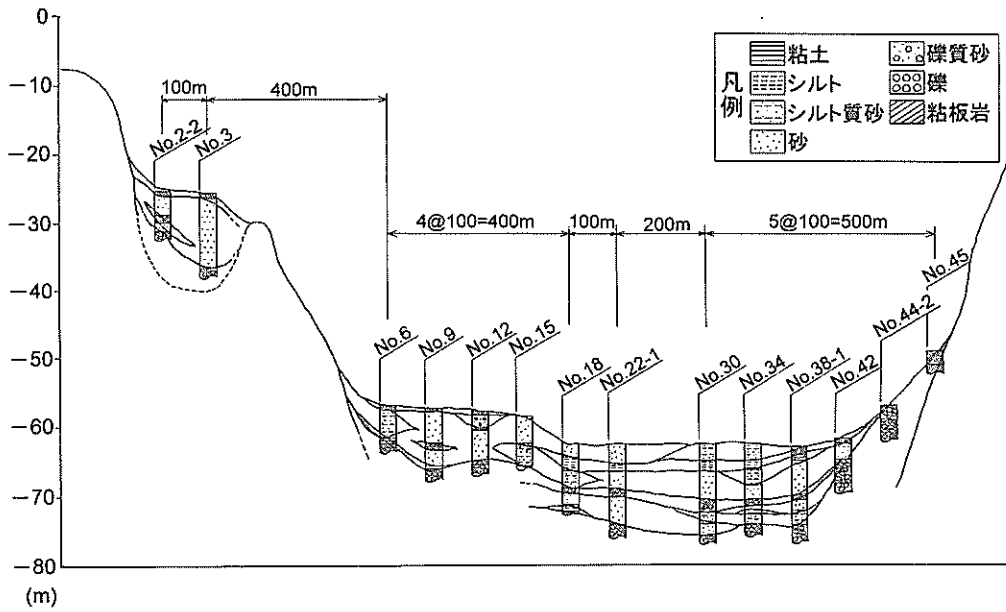


図-6 防波堤下部地盤条件 (縦断面)

ボーリング孔：No. 9

標尺 (m)	標高 (m)	土質記号	土質名
0	-57.40 -57.80		礫質粗砂
1			細砂
2			
3			
4			
5	-62.60		中礫
6	-63.40		
7			細砂
8	-65.70		粘土
9	-66.40		粘土
10	-67.80		中礫
11			

ボーリング孔：No. 12

標尺 (m)	標高 (m)	土質記号	土質名
0			中礫
1	-58.80		礫質細砂
2			
3	-60.80		細砂
4			
5			
6			細砂
7			
8	-63.50		中礫
9	-67.30		
10			
11			

図-7 防波堤下部地盤条件 (土質柱状図)

2. 2 地震計と水圧計

水深 60m 級の大水深構造物における地震加速度および動水圧の同時観測は、世界でも類例のない観測であり、その観測記録は極めて貴重なものと考えられることから、本節では、その観測方法について詳しく述べることにしたい。

図-8 に計器設置断面の詳細を、また、図-9 に計器設置平面図を示す。これに示すように、地震動加速度を記録する強震計は、防波堤のケーソン天端上とマウンド法肩、および基礎地盤の地中-2m の3カ所に設置されている。同時に動水圧の観測も行われており、ケーソン側壁に3点、マウンド法面上に3点、いずれも波浪の影響を受けないように湾内側に設置されている。なお、マウンド上の強震計、動水圧計は、図-10~12に示すとおり、コンクリート製のブロックを作成し、これに固定した上、ブロック底面および周辺を砂袋で固定して設置した。動

水圧計は、図-12に示すとおり、コンクリートブロックの上面に、受圧面を上に向けて設置している。動水圧計を2連タイプとしたのは、計器故障による欠測の可能性を小さくすることをねらったもので、一方の水圧計が故障した場合には、配線接続切替えにより他方の水圧計を用いて観測が継続できる構造としている。これら計器により観測された加速度および動水圧データは、図-8に示すように、ケーブルを通じて、ケーソン上に設置された観測タワー内の記録装置に保存される仕組みとなっている。

大水深防波堤の地震動加速度の計測のため ERS-F 強震計を用いている。ERS-F 強震計は磁気バブルメモリを備えたデジタル式の強震計であり、その主な性能および振動数特性を、それぞれ表-1 および図-13に示す。動水圧の計測のための計器としては、図-14に示す形状の2連型のものを用いている。その主な性能は表-2 に示すとおりである。

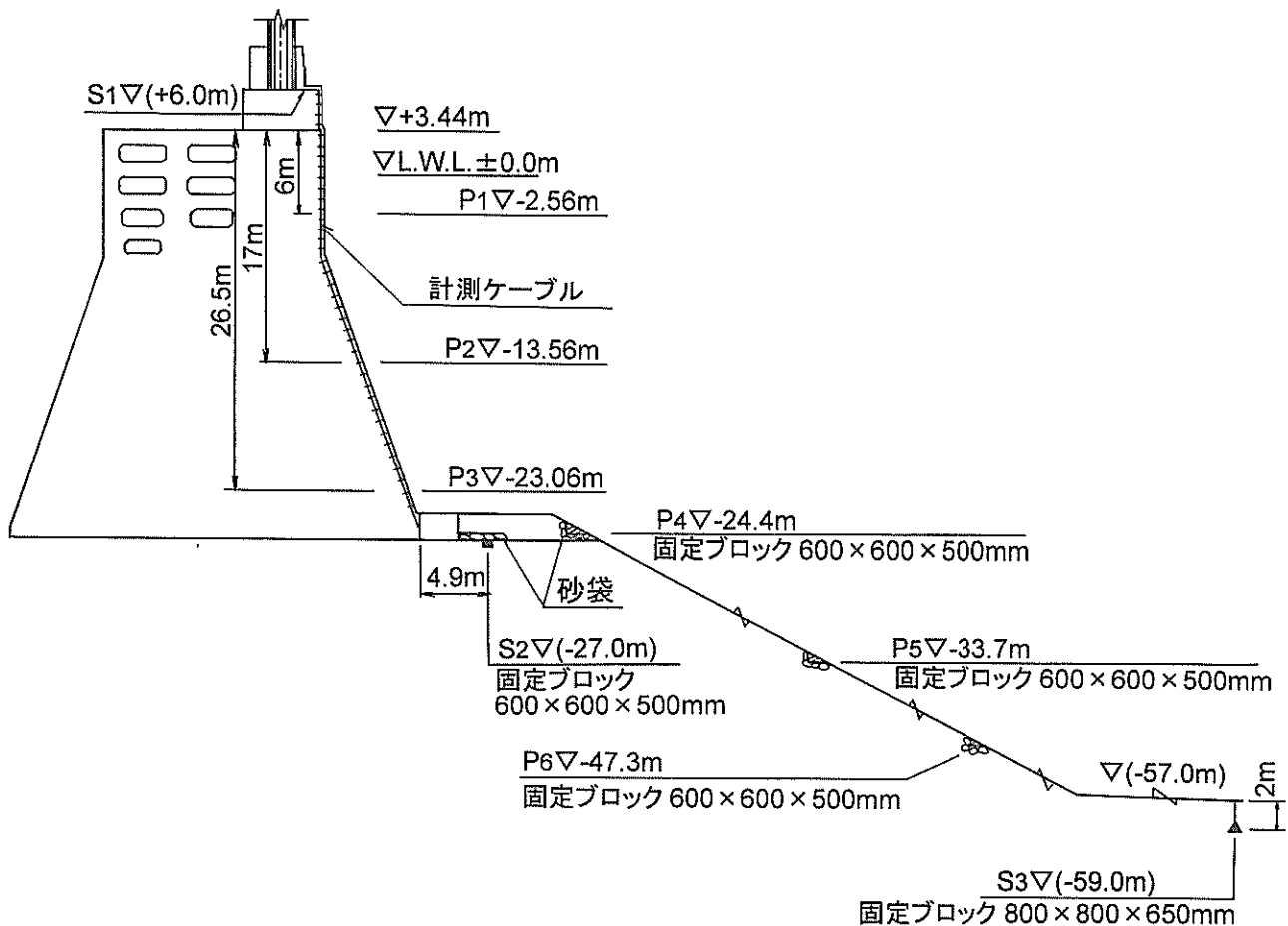
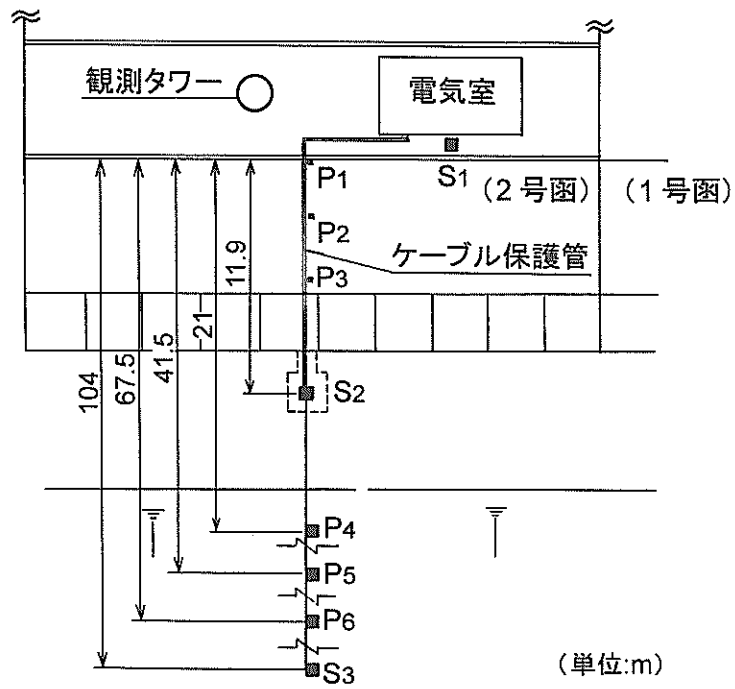


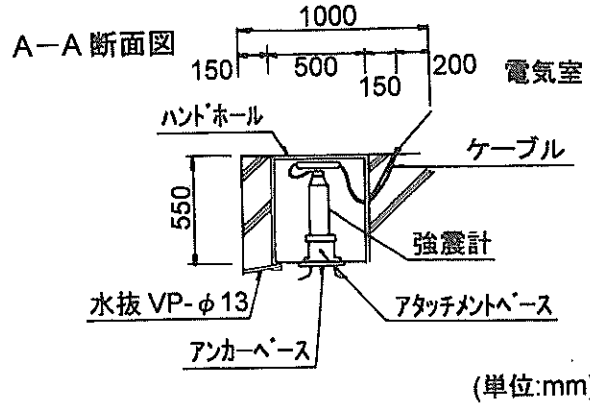
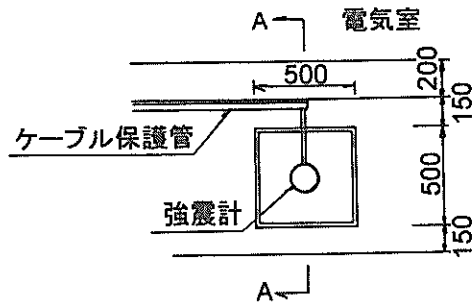
図-8 計器設置断面図



平面図

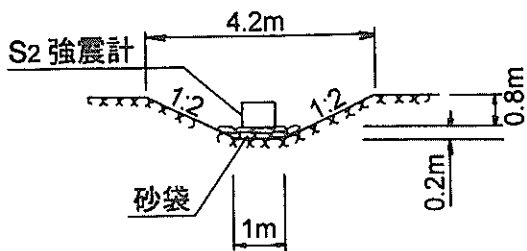
図-9 計器設置平面図

平面図

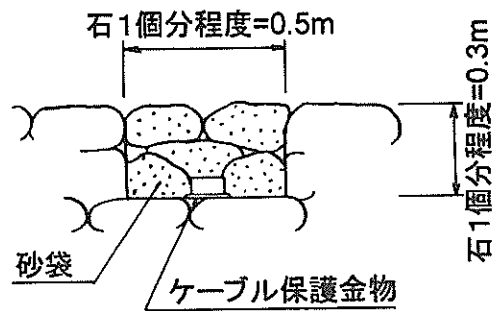


S1 設置状況

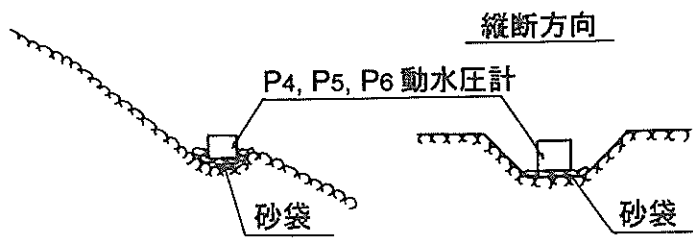
S2 設置状況



根固方塊底部～S2 までのケーブル敷設図



P4, P5, P6 設置状況



ケーブル固定図

※10m に 3ヶ所のピッチで固定

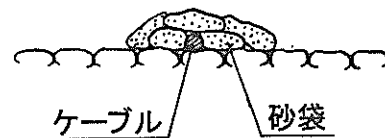


図-10 計器設置状況詳細図

強震計 S₂, S₃

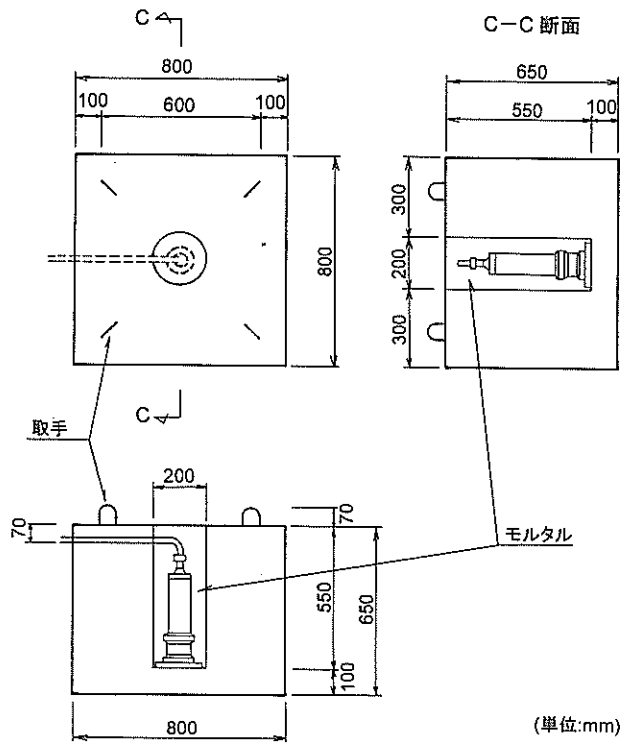


図-11 S₂, S₃ 強震計固定ブロック

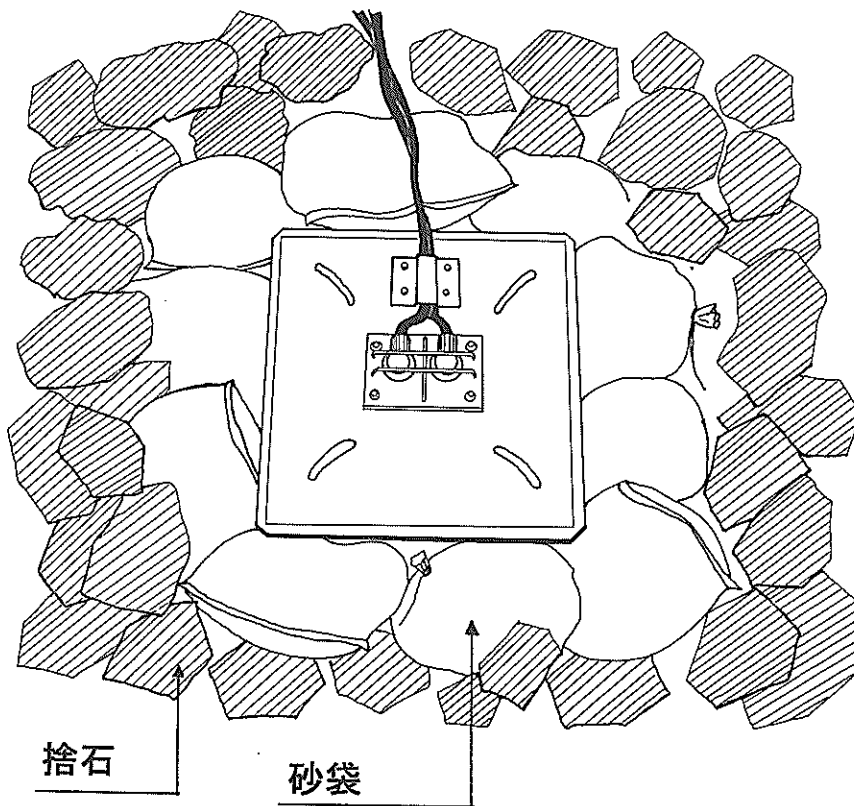
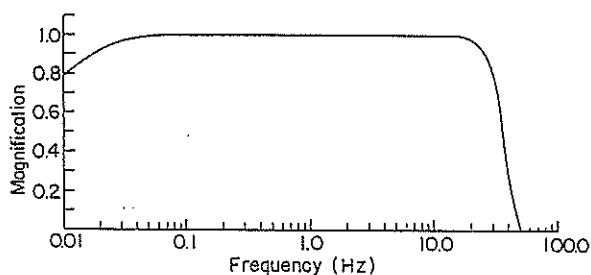


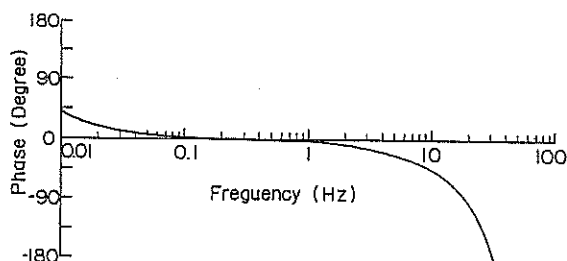
図-12 P₄, P₅, P₆ 動水圧計固定ブロック

型式	EAS-BU2-10
チャンネル数	10 ch (信号9 ch, タイム1 ch)
分解能	±1000 gal フルスケールの時 ±0.12 gal/digit
バブルメモリー	1 M byte/ユニット
記録時間	1 ユニットに約8分 (最小時間約1分の記録を8回)
遅延時間	10秒 ON/OFF 可能
スタータ	3チャンネルの or トリガーレベル10gal) スタータ連動出力付き 記録時間は、地震が終了するまで記録する
増幅器	LPF.30Hz -18dB/oct 周波数特性 0.05 ~ 25Hz 1000gal フルスケール アナログ出力 (アイソレーション付)
外形寸法	約540 (奥) × 540 (幅) × 380 (高さ) mm バブルユニット1台増設 (本体に2台実装可能)
センサー	STBH-3CK 速度帰還型 固有振動数: 7 Hz

表-1 ERS-F 強震計仕様



(a) 振幅



(b) 位相

図-13 ERS-F 強震計振動数特性

型式	EAS-BU2-7W
チャンネル数	7 ch (信号6 ch, タイム1 ch)
分解能	±14.08 kg/cm ² フルスケールの時 ± 1.72 kg/cm ²
バブルメモリー	1 M byte/ユニット
記録時間	1ユニットに約92分 (最小時間約46分の記録を2回)
遅延時間	10秒 ON/OFF 可能
スタータ	地震計10チャンネル型からの連動信号による 記録時間は、約46分間
増幅器	LPF.30Hz -18dB/oct 周波数特性 DC～25Hz 14.08kg/cm ² フルスケール アナログ出力 (アイソレーション付)
外形寸法	約540 (奥) × 540 (幅) × 380 (高さ) mm バブルユニット1台増設 (本体に2台実装可能)
センサー	S-PW 型 圧力レンジ: 14.08 kg/cm ² ブリッジ電圧: 5V DC 出力感度: 約20 mV/V 温度特性: 約0.02%/°C 測定範囲: 0～14.08 kg/cm ² 耐衝撃耐振動: 50G フルスケール: P1 4.768 V/kg/cm ² P2 2.799 P3 1.379 P4 1.393 P5 0.682 P6 0.670

表-2 動水圧計仕様

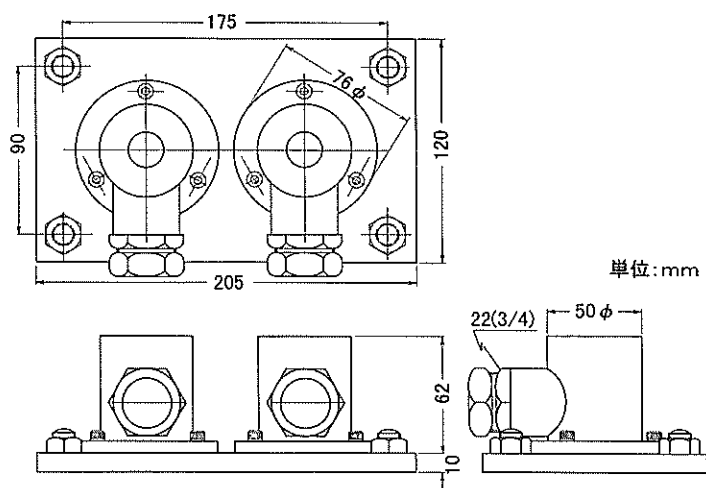


図-14 動水圧計外形図

2. 3 地震時の加速度・動水圧記録

釜石湾口防波堤では、平成4年4月の観測開始以来、平成10年現在までに57地震の記録が観測されている。取得された観測記録の最大値一覧を表-3に示す。同表に示すとおり、地震動加速度については、1地震につき法線平行方向(x)、法線直角方向(y)の水平2成分、および鉛直方向(z)の3成分について記録している。これまでに観測された記録の基盤最大加速度は100Galをやや越えるレベルに留まっている。

なお、表中の釜石-M、釜石-MBは港湾地域強震観測網の一地点として、釜石湾口防波堤から約3kmにある強震観測地点の記録である。同観測地点位置は、図-1中に示すとおりである。なお、釜石-Mは地表に、釜石-MBは基盤層(-11m)に設置したもので、その地盤条件は図-15に示すとおりである³⁾。

表-3に示す観測記録のうち、最大加速度が比較的大きい記録を2例取出して以下に示す。第1は、表-3中に記録番号REC.16として示した記録で、'93年1月の釧路沖地震の観測記録である。同地震の震央と観測点との位置関係は図-16に示すとおりであり、震央距離が400kmと比較的離れた地震の記録例である。観測された加速度および動水圧の時刻歴を図-17~19に示す。加速度および動水圧時刻歴の包絡線は、図-17に示すとおり加速度および動水圧とで相互に似た形状を示しており、地震波の主要動部分の到来とともに、加速度・動水圧とも著しくなる傾向を示している。

観測された時刻歴の主要動部分の波形の細部を詳細に検討するため、これらを抽出して表示しなおしたものが図-18である。図-18(a)に示す加速度時刻歴は、それぞれ防波堤法線直角方向(Y)および鉛直方向(Z)成分を示している。この記録から、水平方向加速度成分(Y)については、基盤(S3)に見られる高周波成分を取り除いた形で防波堤ケーソン天端(S1)が振動している傾向が見られる。しかし、マウンド法肩(S2)部分の加速度波形は、50~60sではS1、S3の波形とかなり異なっており、この点が特徴的である。ただし、70sに近づくにつれ、S1の波形と似た成分も見られるようである。

図-18(b)に示した動水圧の波形は、いずれの水深の波形もよく似たものとなっている。マウンドの下方に行くにしたがって、高周波成分が乗ってくることで、マウンド下方のP6の水圧は同じマウンド法面のP5と比べかなり小さい値を示していることが特徴的である。

防波堤の地震応答加速度と動水圧には Westergaard 式³⁾にも見られるとおり、特に密接な関係があると考えら

れ、この観点から両者を重ね書きしたものが図-19である。図-18にも示されるとおり、防波堤天端(S1)の水平成分(Y)の55s付近の正弦波状の波形部分については、P1~P5に見られる動水圧の波形と、ある程度の類似性が認められる。しかし、57~60s間においてP1~P5で卓越している正弦波状の動水圧波形は、S1~S3のいずれの加速度波形とも類似していない。また、S2の加速度波形は、P1~P5の動水圧の波形との共通点を見いだすのは困難である。以上のとおり、今回の観測結果からは、水深35m級の混成式防波堤における観測結果³⁾に見られたような防波堤の加速度と動水圧の波形の類似性は見られず、観測結果の解釈がかなり難しいことが予想されるものとなった。

先に述べたとおり、波形全体の包絡線の形状については、図-17に示すように加速度と動水圧に整合性が認められるのに対して、波形の細部については、図-18~19に示すとおり、あまりよい整合性が見られない。この点については、波浪の影響など、地震動以外の条件を含めた総合的な検討が必要とも考えられる。

以上の点について、確認のため、他の地震記録の例についても同様の検討を行った。その一例として、表-3中に記録番号REC.41として示した記録で、基盤における最大加速度が100Galを越えるレベルとなった記録を示す。同地震の震央と観測点との位置関係を図-20に、記録波形を図-21~23に示す。これらの記録の特徴は、加速度と動水圧の波形の全体的な整合性、波形細部に關する不整合性などの点を含めて先に示した釧路沖地震の記録の特徴とほぼ同様となり、これらの特徴は、複数の観測記録に共通するものであることが確認された。

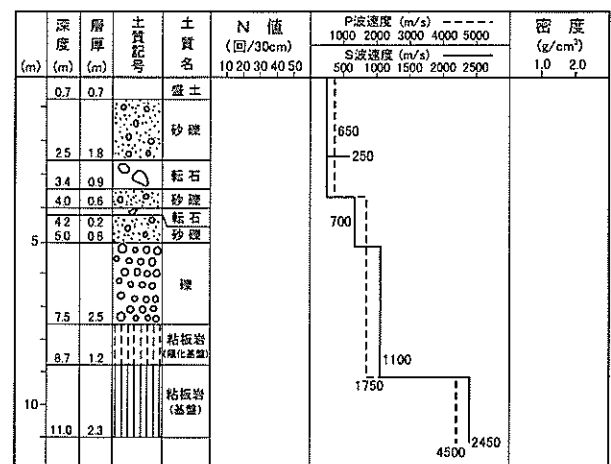


図-15 釜石-M、MB強震計設置地盤

REC.	地震						最大加速度(Gal)			動水圧記録		
	発震年月日	震源地名	震源		深さ (km)	マグニ チュード	観測位置	X	Y	Z	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)
			北緯	東経				(法線方向)	(法線直角)	(鉛直方向)		
1	92/07/18	三陸 はるか沖	39° 24'	143° 28'	2	6.6	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	13.00 17.00 50.00 3.00 3.00	19.00 17.00 27.00 3.00 3.00	8.00 14.00 11.00 2.00 2.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	25.50 43.60 44.20 36.80 48.30 36.90
2	92/07/18	三陸 はるか沖	39° 27'	143° 37'	0	4.7	S3 S2 S1	14.00 11.00 37.00	12.00 15.00 23.00	6.00 12.00 8.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	18.90 29.20 23.60 18.20 28.60 18.40
3	92/07/18	三陸 はるか沖	39° 25'	143° 21'	0	6.3	S3 S2 S1	15.00 14.00 33.00	13.00 9.00 17.00	7.00 9.00 9.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	18.20 19.20 25.80 21.50 27.40 21.10
4	92/07/18	三陸 はるか沖	39° 25'	143° 19'	0	6.1	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	6.00 7.00 20.00 3.00 3.00	10.00 8.00 17.00 3.00 3.00	3.00 6.00 5.00 2.00 2.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	10.00 18.00 16.50 11.10 15.50 11.10
5	92/07/27	TEST									P1 P2 P3 P4 P5 P6	
6	92/07/29	三陸 はるか沖	39° 34'	143° 42'	0	6.2	S3 S2 S1	6.00 5.00 14.00	6.00 7.00 12.00	4.00 6.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	6.70 - 12.80 9.50 14.40 10.30
7	92/08/24	渡島支庁 東部	41° 56'	140° 47'	121	6.3	S3 S2 S1	12.00 4.00 12.00	10.00 6.00 7.00	4.00 4.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	5.30 - 7.50 6.60 8.70 8.20
8	92/10/05	岩手県 中部	39° 46'	141° 09'	96	4.6	S3 S2 S1	12.00 4.00 7.00	11.00 8.00 6.00	4.00 4.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	3.20 - 7.50 6.40 8.90 10.10
9	92/10/24	福島県沖	37° 33'	141° 30'	76	4.7	S3 S2 S1	24.00 3.00 6.00	22.00 8.00 6.00	5.00 4.00 3.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.30 - 6.80 8.40 8.90 8.90
10	92/12/28	宮城県沖	38° 56'	142° 33'	34	5.9	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	47.00 11.00 23.00 25.00 11.00	51.00 21.00 24.00 24.00 9.00	21.00 15.00 19.00 22.00 9.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	10.90 25.60 32.70 35.50 47.30 26.30

表-3.1 観測地震一覧

REC.	地震						最大加速度 (Gal)				動水圧記録	
	発震年月日	震源				観測位置	X (法線方向)	Y (法線直角)	Z (鉛直方向)	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)	
		震央地名	北緯	東経	深さ (km)							マグニ チュード
11	92/12/28	宮城県沖	38° 51'	142° 36'	31	5.4	S3 S2 S1	13.00 4.00 6.00	11.00 6.00 4.00	3.00 3.00 3.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	19.45 15.20 13.66 13.93 13.24 8.50
12	92/12/31	宮城県沖	38° 56'	142° 34'	32	5.7	S3 S2 S1	17.00 5.00 8.00	16.00 8.00 9.00	6.00 6.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	9.60 11.10 11.90 14.80 17.70 12.20
13	92/12/31	宮城県沖	38° 56'	142° 36'	30	5.8	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	40.00 12.00 22.00 17.00 7.00	45.00 24.00 23.00 16.00 7.00	14.00 15.00 13.00 17.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	13.10 24.30 28.80 38.20 57.50 30.40
14	93/01/05	岩手県沖	38° 58'	142° 32'	29	4.7	S3 S2 S1	12.00 3.00 5.00	13.00 6.00 6.00	4.00 5.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	13.00 10.30 9.60 9.80 14.30 8.70
15	93/01/13	宮城県沖	38° 54'	142° 35'	36	5.3	S3 S2 S1	15.00 4.00 7.00	11.00 6.00 7.00	4.00 5.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	4.20 7.20 7.00 8.30 10.00 7.00
16	93/01/15	釧路沖	42° 51'	144° 23'	107	7.8	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	70.00 31.00 70.00 27.00 17.00	61.00 33.00 52.00 31.00 14.00	21.00 27.00 22.00 19.00 16.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	35.90 62.70 59.50 58.90 68.40 28.60
17	93/02/25	岩手県沖	40° 14'	142° 27'	29	5.9	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	24.00 13.00 28.00 7.00 6.00	22.00 21.00 34.00 10.00 7.00	8.00 11.00 11.00 7.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	15.60 23.80 14.10 21.70 23.60 14.00
18	93/04/16	岩手県沖	39° 39'	142° 15'	33	4.2	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	64.00 12.00 24.00 9.00 4.00	60.00 27.00 15.00 11.00 4.00	13.00 18.00 10.00 11.00 3.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	8.30 18.50 17.70 24.70 27.20 10.90
19	93/05/06	岩手県 南部	39° 08'	141° 47'	107	5.6	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	118.00 21.00 54.00 36.00 19.00	59.00 34.00 34.00 38.00 9.00	22.00 29.00 28.00 21.00 16.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	16.90 33.40 33.20 47.20 50.50 25.60
20	93/06/01	岩手県沖	40° 08'	142° 30'	32	5.4	S3 S2 S1	15.00 5.00 14.00	12.00 7.00 8.00	4.00 5.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	7.00 11.90 10.70 9.90 13.30 7.50

表-3.2 観測地震一覧

REC.	地震						最大加速度(Gal)				動水圧記録	
	発震年月日	震源地名	震源		深さ (km)	マグニ チュード	観測位置	最大加速度(Gal)			観測位置 (m)	最大動水圧 (g/cm ³)
			北緯	東経				X (法線方向)	Y (法線直角)	Z (鉛直方向)		
21	93/08/21	岩手県沖	39° 11'	142° 19'	51	3.8	S3 S2 S1	18.00 5.00 8.00	17.00 6.00 6.00	5.00 6.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	2.00 4.50 5.30 7.70 12.40 7.60
22	93/09/06	岩手県 中部	39° 22'	141° 33'	22	4.0	S3 S2 S1	45.00 8.00 12.00	28.00 14.00 8.00	7.00 7.00 8.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	2.20 5.90 6.50 8.80 8.60 7.40
23	93/09/30	岩手県 中部	39° 47'	141° 58'	71	3.7	S3 S2 S1	14.00 4.00 7.00	10.00 11.00 8.00	5.00 5.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.50 3.20 3.90 4.70 7.60 7.30
24	93/10/12	東海道 はるか沖	32° 01'	138° 14'	388	7.1	S3 S2 S1	7.00 5.00 12.00	6.00 6.00 8.00	2.00 4.00 3.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	5.90 5.60 7.80 7.40 10.90 9.20
25	93/11/11	岩手県沖	39° 04'	142° 22'	36	5.5	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	75.00 19.00 40.00 23.00 10.00	46.00 28.00 22.00 22.00 10.00	25.00 24.00 22.00 20.00 8.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	16.40 25.90 27.30 39.50 46.30 17.20
26	93/11/27	宮城県 北部	38° 35'	141° 20'	112	5.9	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	87.00 41.00 59.00 25.00 14.00	67.00 45.00 45.00 50.00 20.00	30.00 33.00 23.00 26.00 13.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	21.00 31.10 36.70 47.80 66.40 28.30
27	93/12/12	岩手県 南部	39° 10'	141° 48'	103	4.4	S3 S2 S1	48.00 6.00 7.00	23.00 12.00 8.00	9.00 6.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	3.30 5.80 8.60 12.50 17.00 10.40
28	93/12/17	岩手県沖	39° 11'	142° 16'	63	5.3	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	88.00 20.00 63.00 39.00 11.00	87.00 31.00 47.00 44.00 9.00	24.00 39.00 31.00 29.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	23.00 45.50 45.50 56.40 58.00 24.40
29	93/12/28	岩手県沖	39° 29'	142° 22'	36	5.5	S3 S2 S1	13.00 4.00 6.00	13.00 4.00 2.00	3.00 5.00 2.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.10 1.80 3.10 4.40 - -
30	94/03/01	岩手県沖	42° 43'	142° 14'	45	3.7	S3 S2 S1	11.00 4.00 4.00	11.00 5.00 4.00	3.00 4.00 2.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.20 2.30 3.70 6.30 8.20 9.00

表-3.3 観測地震一覧

REC.	地震						最大加速度(Gal)				動水圧記録	
	発震年月日	震源				観測位置	X (法線方向)	Y (法線直角)	Z (鉛直方向)	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)	
		震央地名	北緯	東経	深さ (km)							マグニ チュード
31	94/05/03	岩手県 中部	39° 51'	141° 55'	65	3.7	S3 S2 S1	21.00 5.00 9.00	12.00 9.00 6.00	4.00 5.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.40 2.80 5.40 8.80 9.30 -
32	94/07/22	日本海 北部	42° 17'	133° 33'	551	7.6	S3 S2 S1	9.00 14.00 32.00	11.00 9.00 23.00	4.00 7.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	12.80 18.40 27.30 25.70 24.30 8.80
33	94/07/24	岩手県沖	39° 38'	142° 08'	52	4.0	S3 S2 S1	28.00 6.00 12.00	25.00 7.00 7.00	6.00 9.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	1.90 3.80 5.50 7.90 8.60 6.40
34	94/08/14	宮城県沖	38° 41'	142° 23'	42	6.0	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	50.00 14.00 37.00 13.00 7.00	30.00 18.00 23.00 13.00 8.00	18.00 14.00 16.00 17.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	9.10 14.90 25.50 26.90 50.40 8.00
35	94/08/16	福島県沖	37° 50'	142° 36'	22	6.0	S3 S2 S1	9.00 14.00 27.00	13.00 11.00 19.00	5.00 8.00 5.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	8.50 16.10 26.70 24.30 27.70 11.90
36	94/09/25	福島県沖	37° 08'	141° 10'	70	4.4	S3 S2 S1	41.00 9.00 11.00	21.00 12.00 5.00	5.00 8.00 7.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 1.80 5.00 7.20 - -
37	94/12/28	三陸 はるか沖	40° 27'	143° 43'	0	7.5	S3 S2 S1 釜石-M 釜石-MB	78.00 57.00 127.00 24.00 19.00	59.00 45.00 68.00 28.00 21.00	23.00 54.00 33.00 17.00 14.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	3.30 39.00 78.60 66.30 101.40 34.70
38	94/12/29	三陸 はるか沖 余震					S3 S2 S1	31.00 21.00 42.00	19.00 20.00 34.00	12.00 12.00 12.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 13.20 27.30 20.40 31.70 16.50
39	94/12/29	三陸 はるか沖 余震					S3 S2 S1	11.00 7.00 18.00	14.00 8.00 8.00	4.00 6.00 6.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 5.40 11.20 8.40 11.00 -
40	94/12/31	北海道 南西沖	42° 07'	139° 27'	9	3.6	S3 S2 S1	18.00 10.00 26.00	17.00 12.00 17.00	7.00 11.00 9.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 7.70 14.30 11.50 20.50 10.20

表-3.4 観測地震一覧

REC.	地 震						最大加速度(Gal)				動水圧記録	
	発震年月日	震 源				観測位置	X (法線方向)	Y (法線直角)	Z (鉛直方向)	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)	
		震央地名	北緯	東経	深さ (km)							マグニ チュード
41	95/01/07	岩手県沖	40° 18'	142° 24'	30	6.9	S3 S2 S1	89.00 56.00 91.00	101.00 67.00 85.00	35.00 49.00 40.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 31.40 78.20 68.00 104.80 48.20
42	95/01/07	岩手県沖	40° 18'	142° 30'	30	6.2	S3 S2 S1	16.00 9.00 28.00	18.00 10.00 15.00	6.00 13.00 10.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 7.80 14.60 11.80 18.70 10.70
43	95/03/01	岩手県沖	40° 18'	142° 00'	50	3.9	S3 S2 S1	17.00 5.00 6.00	24.00 12.00 11.00	5.00 5.00 4.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 2.20 6.30 5.80 10.20 -
44	95/03/11	岩手県沖	40° 18'	142° 06'	60	4.8	S3 S2 S1	56.00 17.00 30.00	57.00 35.00 42.00	17.00 21.00 22.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 10.40 31.30 29.30 50.70 18.20
45	95/04/18	岩手県 内陸南部	39° 02'	140° 57'	12	3.9	S3 S2 S1	15.00 2.00 4.00	7.00 4.00 3.00	3.00 3.00 3.00	P1 P2 P3 P4 P5 P6	- 1.40 3.50 3.90 8.00 7.80
46	96/04/23	岩手県 岸部	39° 12'	141° 31'	74	5.0	S3 S2 S1	62.00 19.92 38.27	76.90 27.88 30.07	18.63 21.06 14.21	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.50 17.77 26.36 20.97 2036.00 14.55
47	96/05/23	宮城県沖	38° 39'	142° 19'	39	5.0	S3 S2 S1	63.29 14.53 20.01	45.01 16.55 10.82	14.39 14.11 11.42	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.40 8.61 11.96 10.89 105.78 12.99
48	96/06/05	岩手県 沿岸北部	39° 29'	141° 42'	12	4.4	S3 S2 S1	15.60 4.05 8.94	15.09 7.04 7.79	4.24 4.15 3.49	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.36 3.65 5.08 4.23 53.24 16.91
49	96/06/20	宮城県沖	39° 02'	142° 27'	49	4.0	S3 S2 S1	19.34 2.77 4.90	13.70 5.45 4.65	3.30 4.20 3.03	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.43 2.33 3.49 3.42 153.20 11.38
50	96/07/08	宮城県 南部	38° 00'	140° 16'	121		S3 S2 S1	6.10 5.16 12.28	6.65 5.75 12.44	2.55 4.38 3.65	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.38 4.84 9.18 6.28 11.29 6.10

表-3.5 観測地震一覧

REC.	地 震						最大加速度 (Gal)				動水圧記録	
	発震年月日	震 源				観測位置	X (法線方向)	Y (法線直角)	Z (鉛直方向)	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)	
		震央地名	北緯	東経	深さ (km)							マグニ チユド
51	96/09/25	岩手県沖	39° 06'	142° 08'	48	3.6	S3 S2 S1	12.78 3.29 4.63	15.44 5.98 5.13	3.72 3.32 2.20	P1 P2 P3 P4 P5 P6	
52	96/11/06						S3 S2 S1	11.39 3.41 7.40	12.29 6.51 5.08	4.25 4.71 3.35	P1 P2 P3 P4 P5 P6	
53	96/11/26	岩手県沖	39° 32'	142° 09'	28	3.7	S3 S2 S1	26.58 3.74 5.86	8.14 6.83 3.14	3.45 5.41 2.96	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.53 1.94 3.41 2.96 123.01 4.60
54	97/01/28	岩手県沖	39° 19'	142° 04'	52	3.6	S3 S2 S1	12.36 3.15 3.61	13.79 6.42 5.31	3.48 3.81 2.23	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.25 0.98 1.57 1.66 2.44 0.88
55	97/09/13						S3 S2 S1	14.00 3.81 6.50	16.35 5.86 4.86	4.49 5.22 4.56	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.25 0.90 1.52 1.55 1.69 2.58
56	97/09/17						S3 S2 S1	14.03 3.61 5.48	13.73 5.80 5.87	5.44 4.27 3.18	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.25 0.93 1.55 1.58 1.40 1.24
57	97/11/08						S3 S2 S1	14.56 4.76 8.53	14.19 6.85 6.43	5.80 6.27 5.12	P1 P2 P3 P4 P5 P6	0.25 0.92 1.54 1.65 2.40 1.29

表-3.6 観測地震一覧

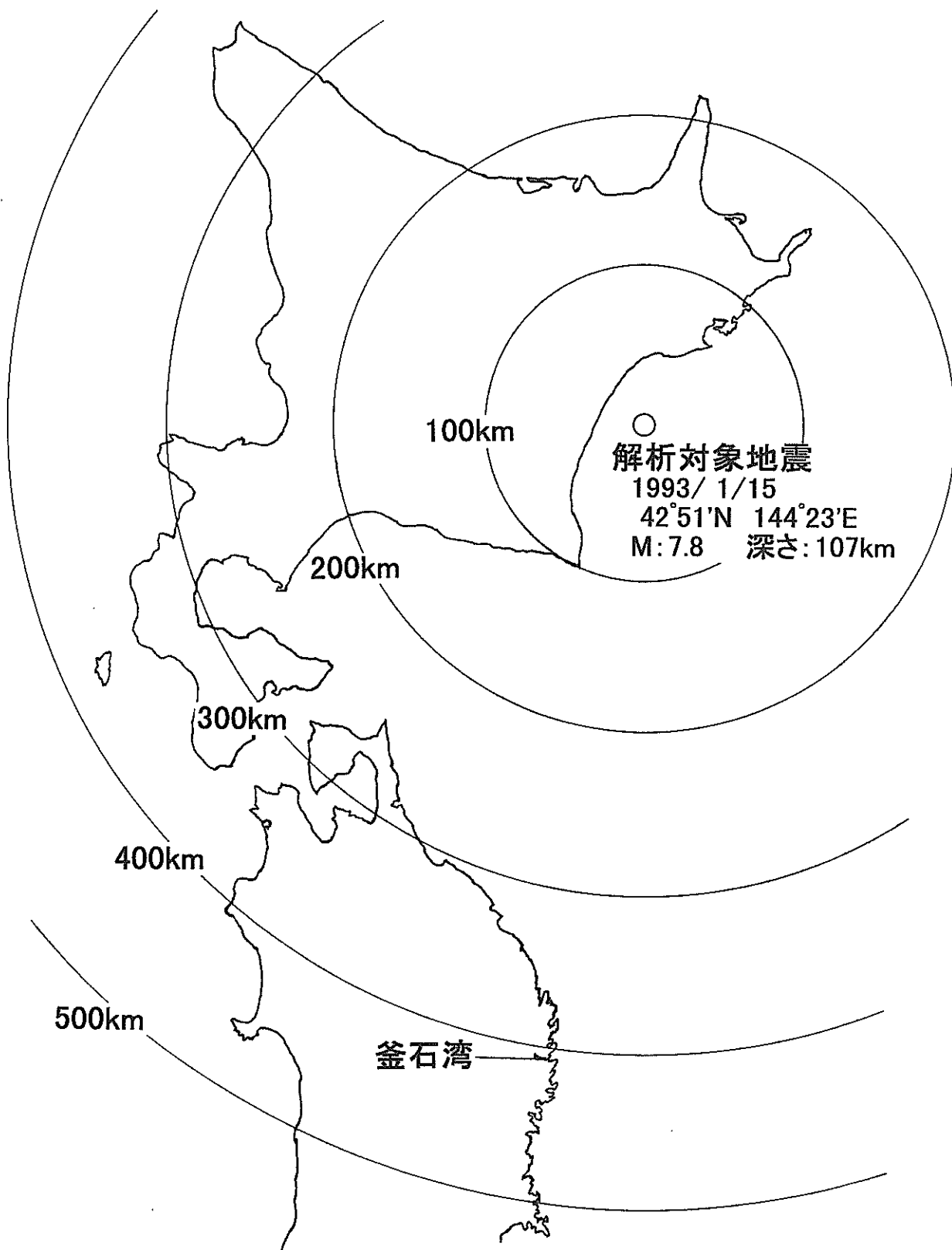


図-16 Rec.16 震央位置図

Acceleration REC.16

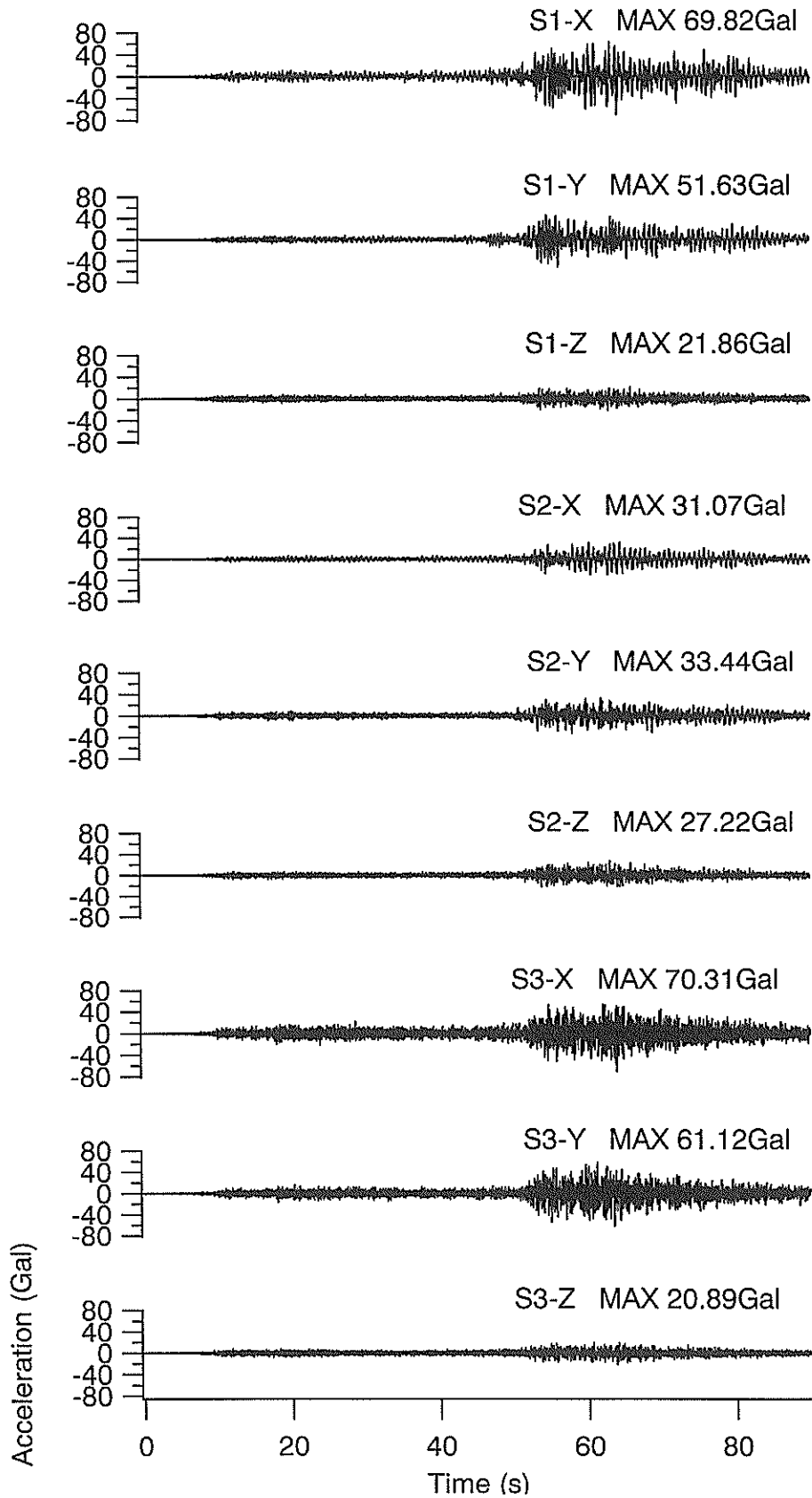


图-17(a) Rec.16 観測地震記録 (加速度)

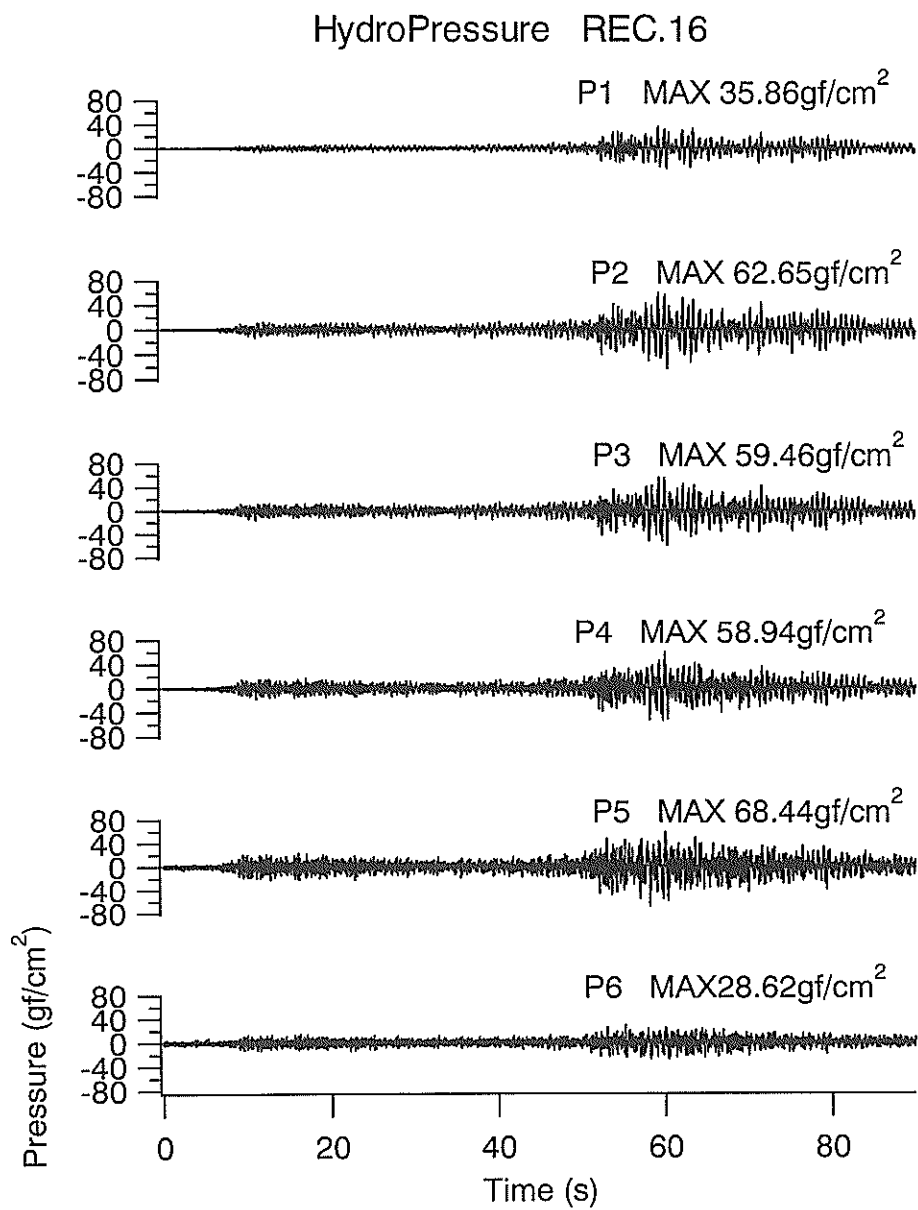
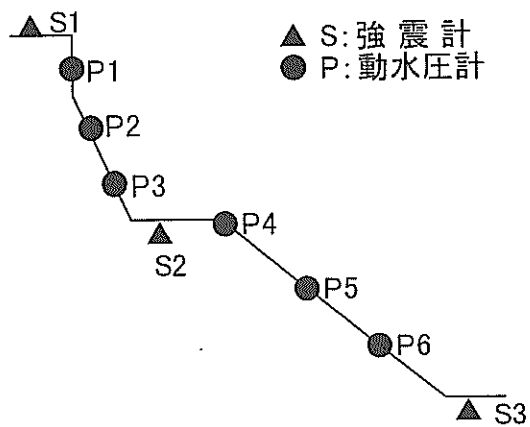


図-17(b) Rec.16 観測地震記録 (動水圧)



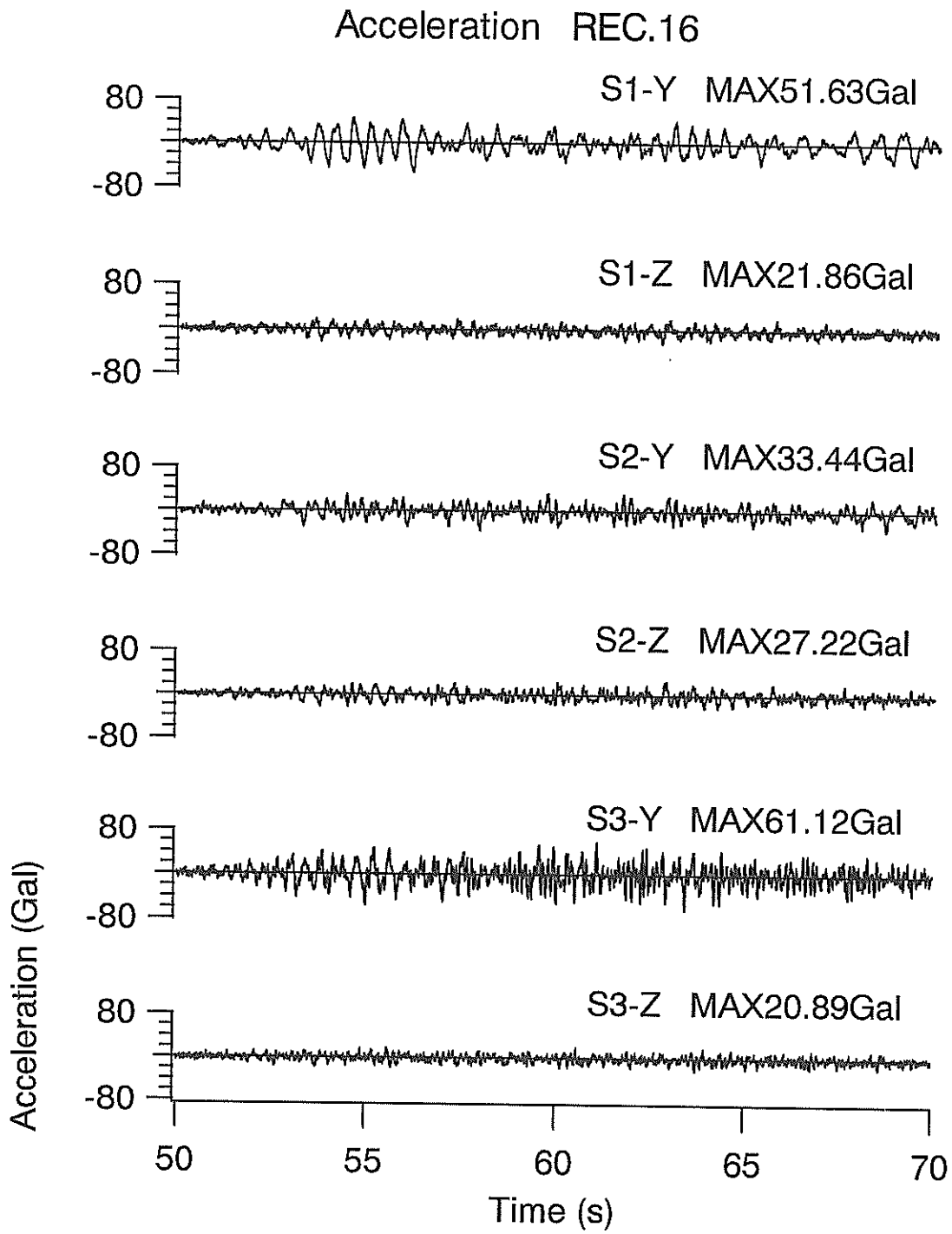


圖-18(a) Rec.16 觀測地震主要動部分 (加速度)

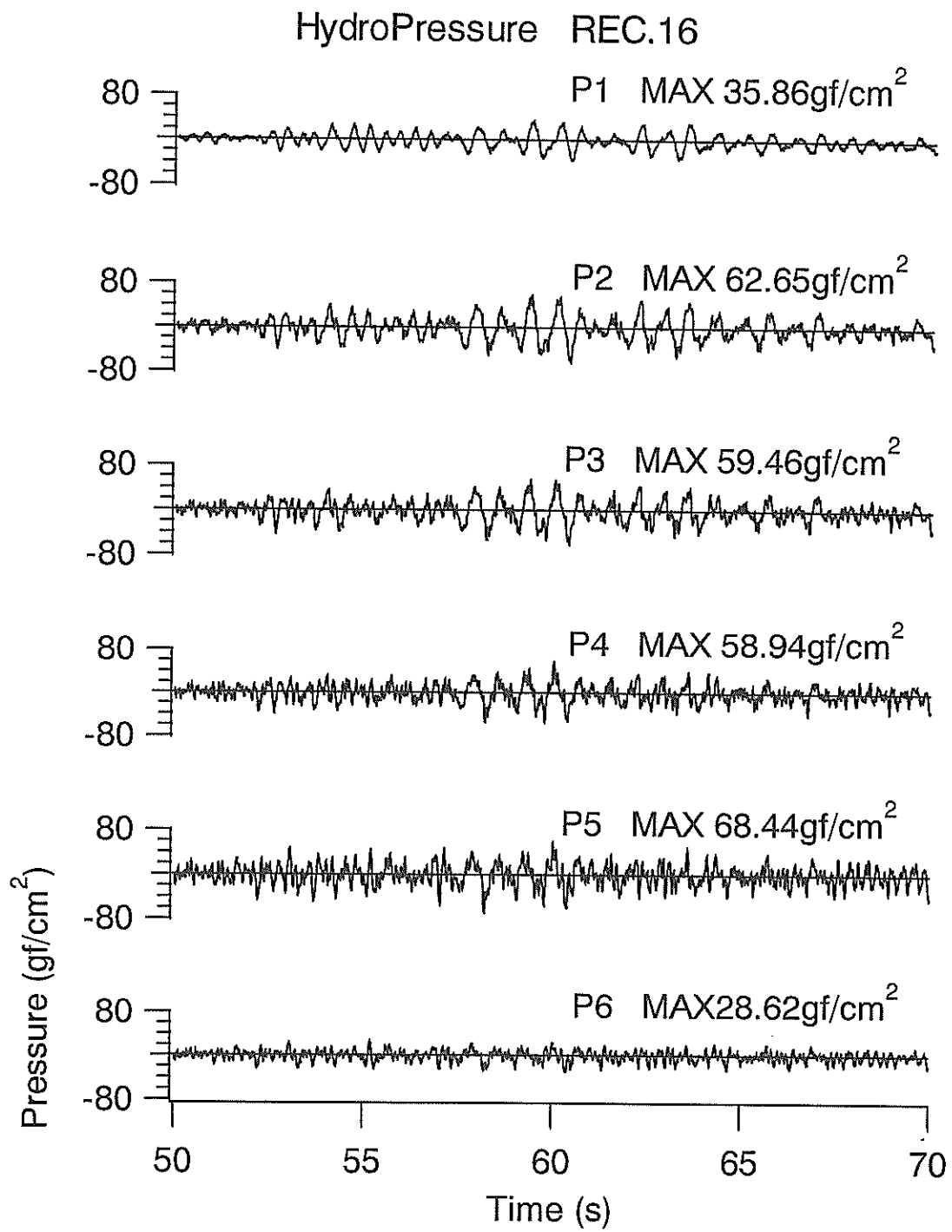
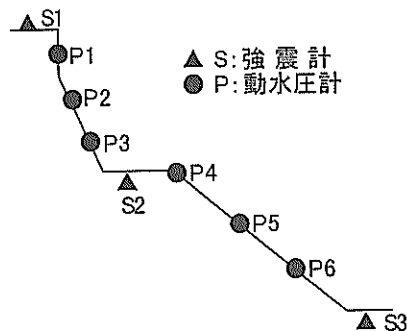


図-18(b) Rec.16 観測地震主要動部分 (動水圧)



Rec.16

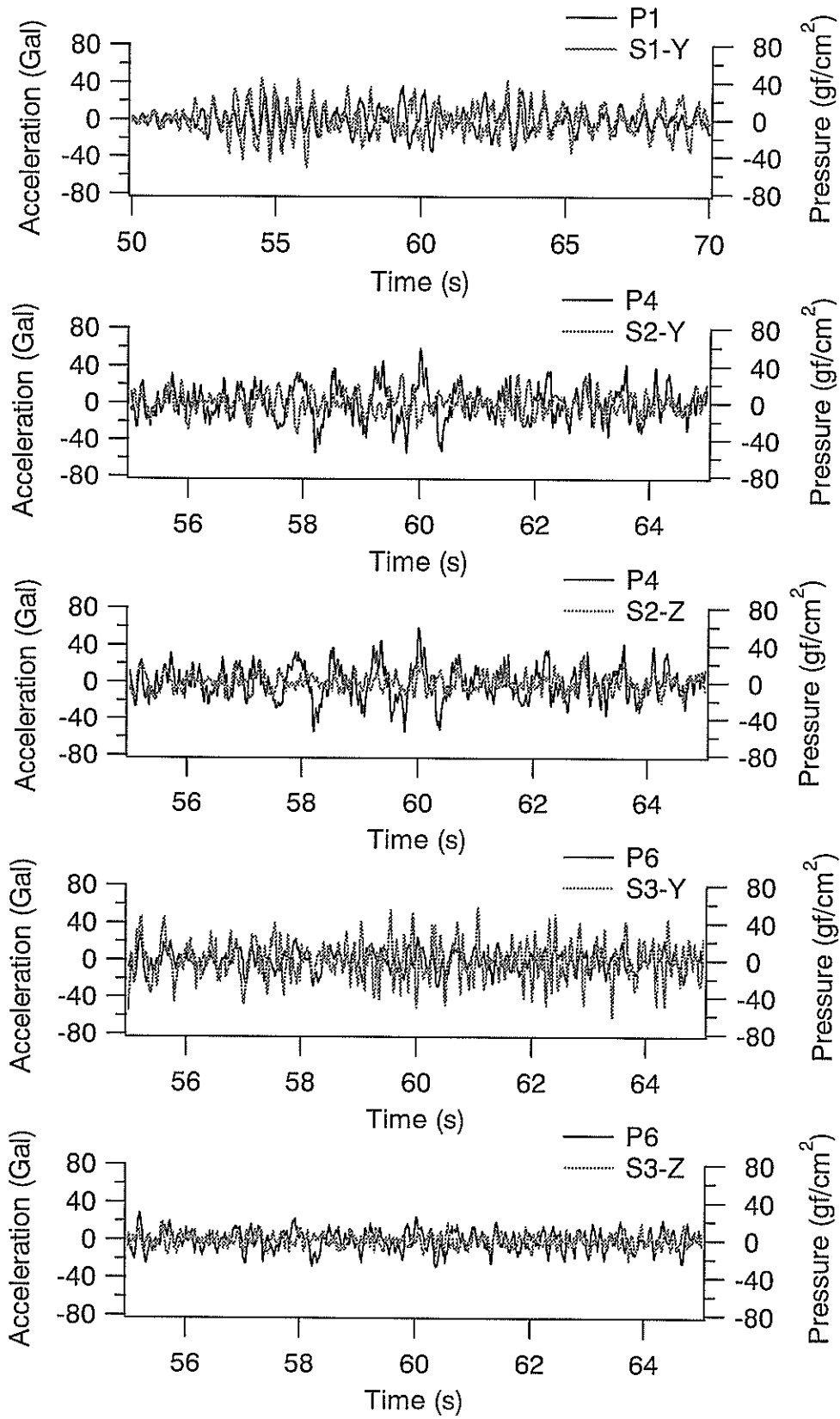


圖-19 Rec.16 加速度・動水圧波形比較

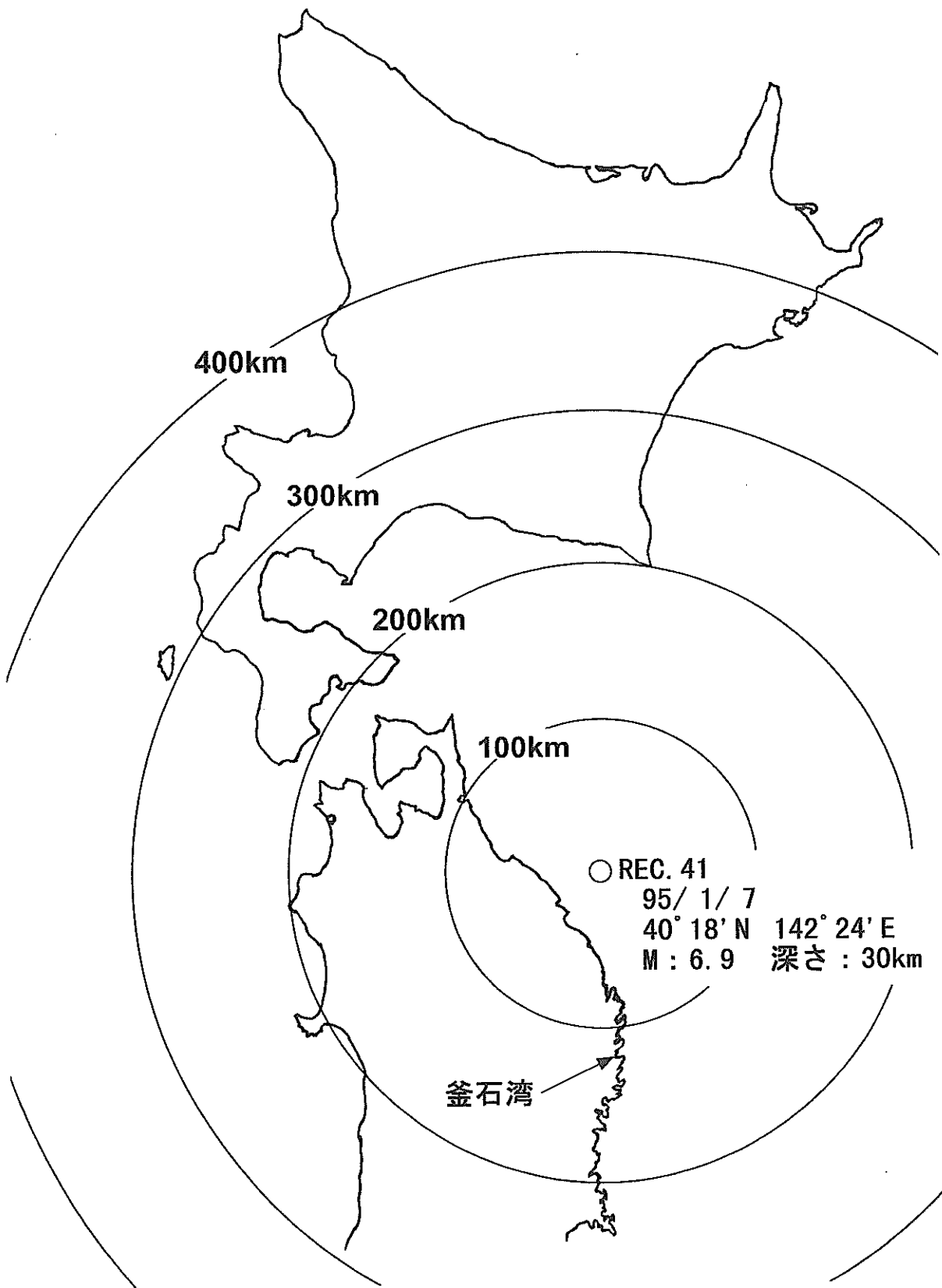


図-20 Rec.41 震央位置図

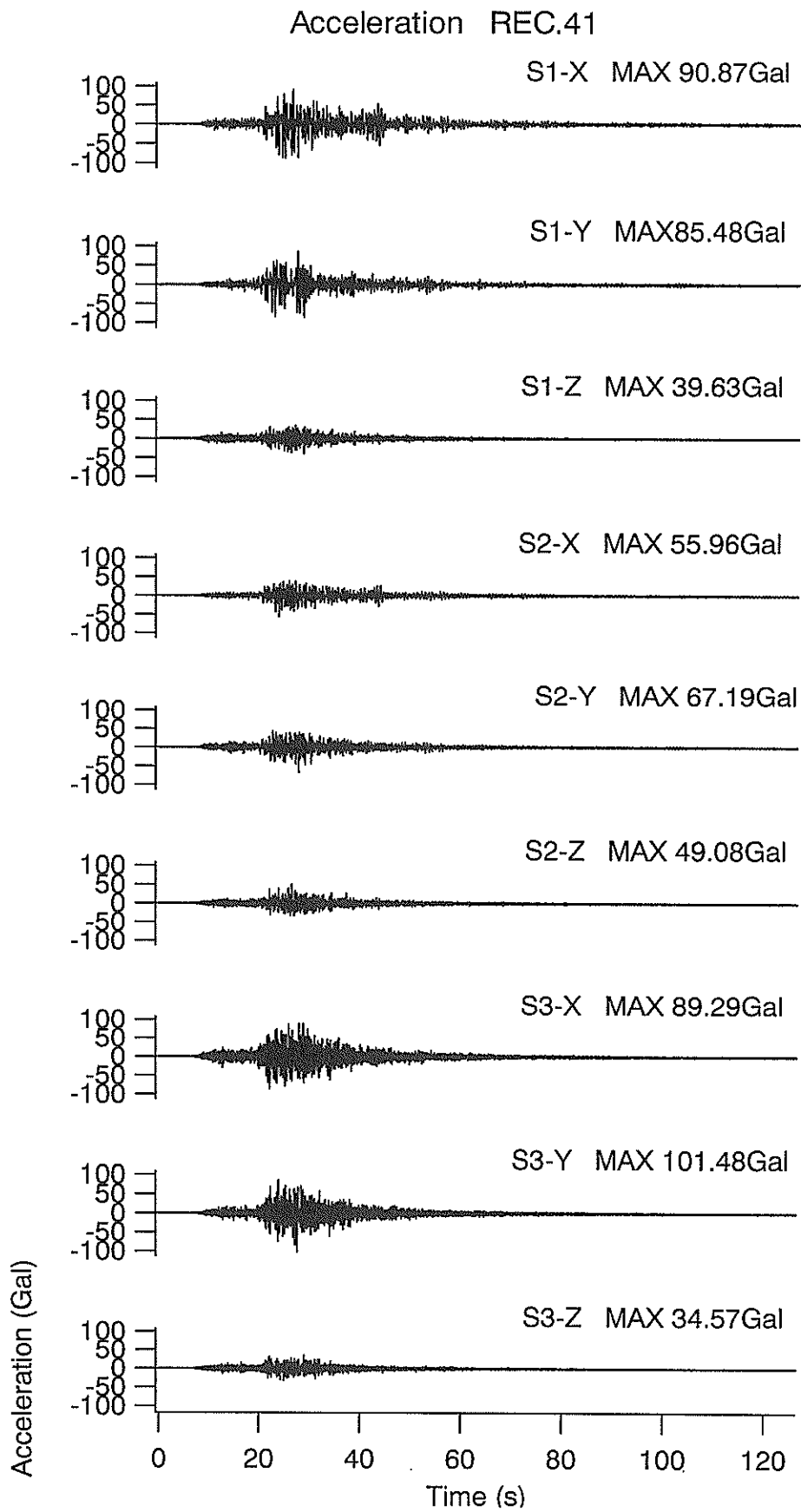


図-21(a) Rec.41 観測地震記録 (加速度)

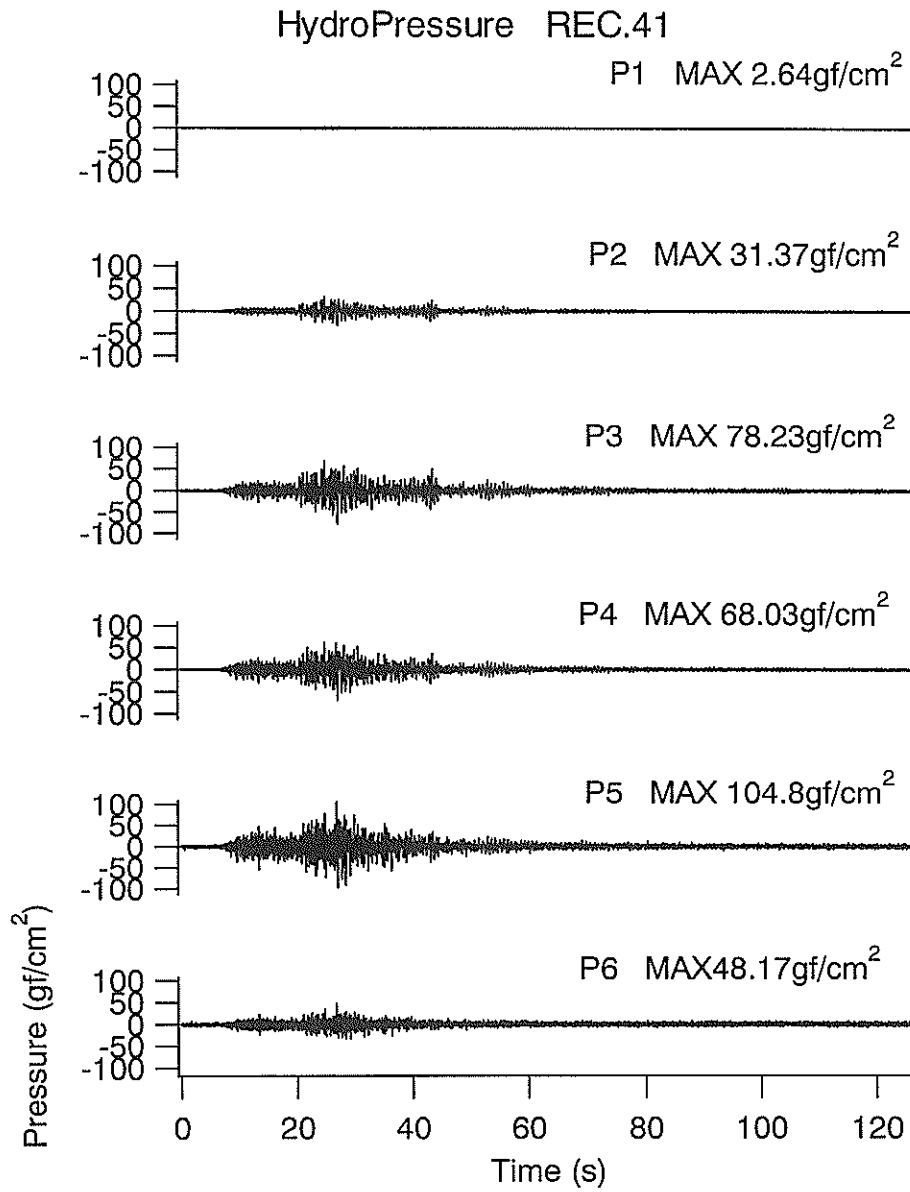
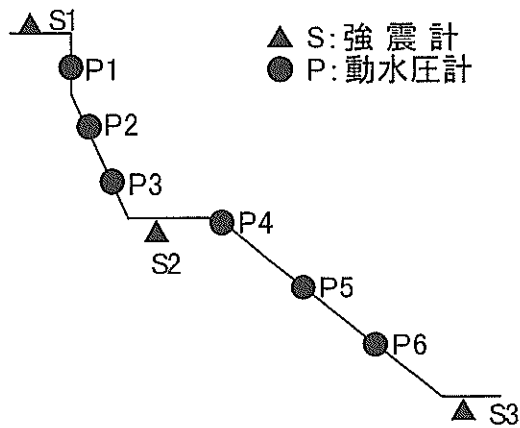


圖-21(b) Rec.41 觀測地震記錄 (動水圧)



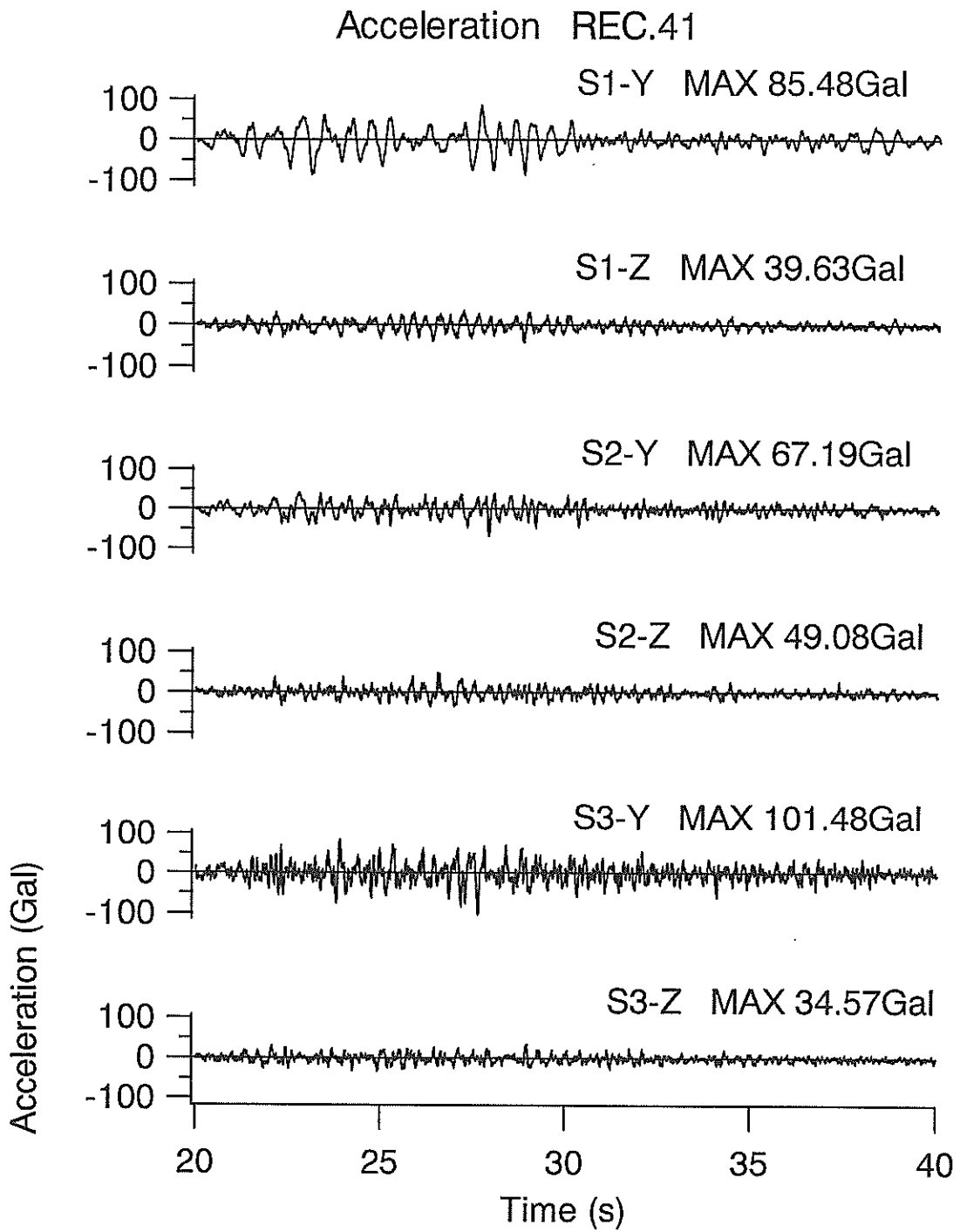


図-22(a) Rec.41 観測地震主要動部分 (加速度)

HydroPressure REC.41

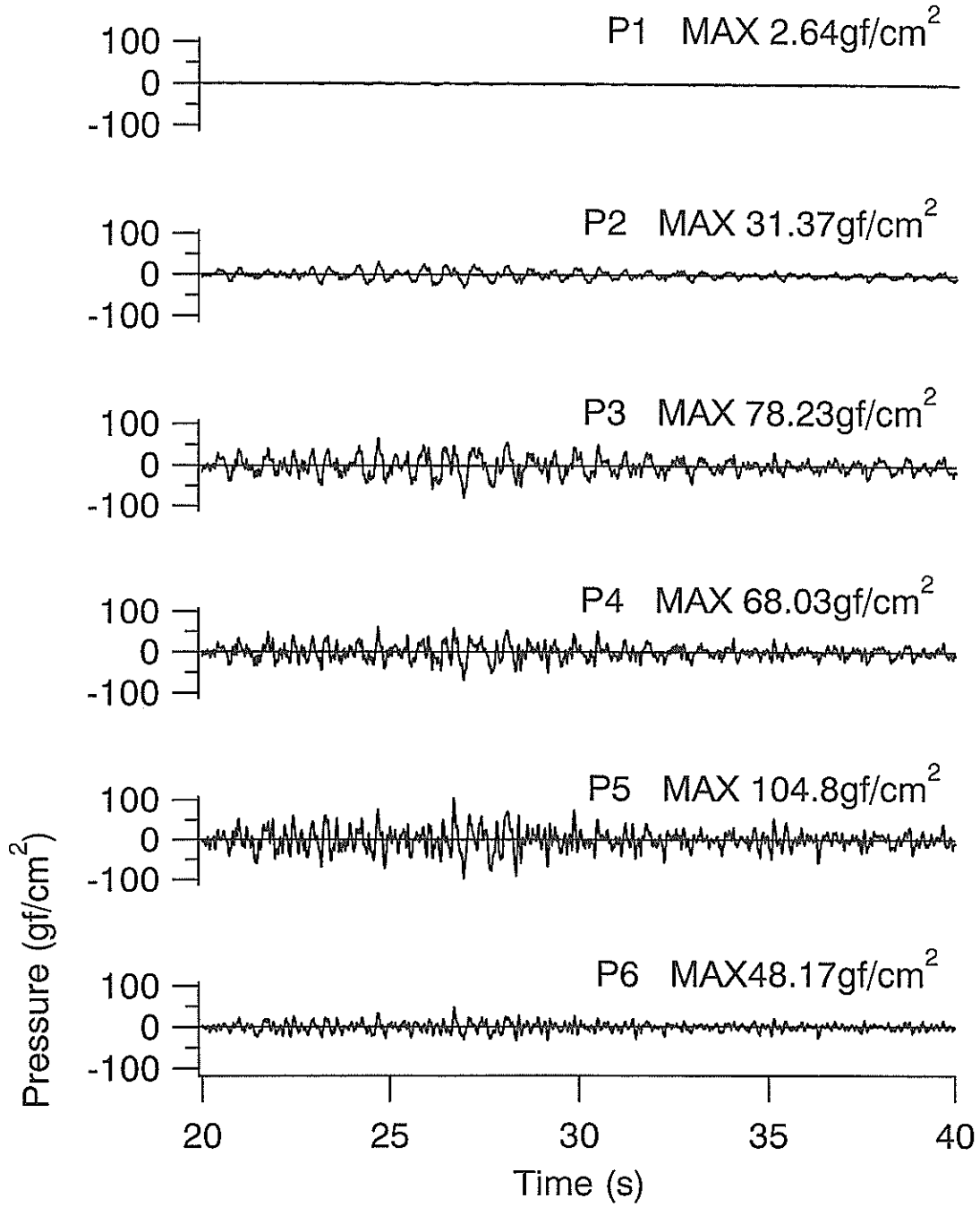
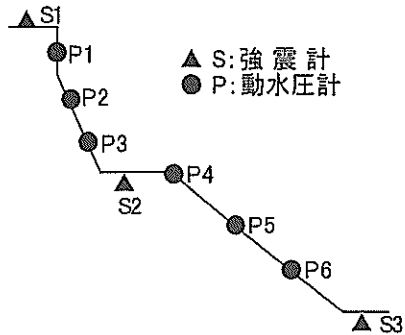


圖-22(b) Rec.41 觀測地震主要動部分 (動水圧)



Rec.41

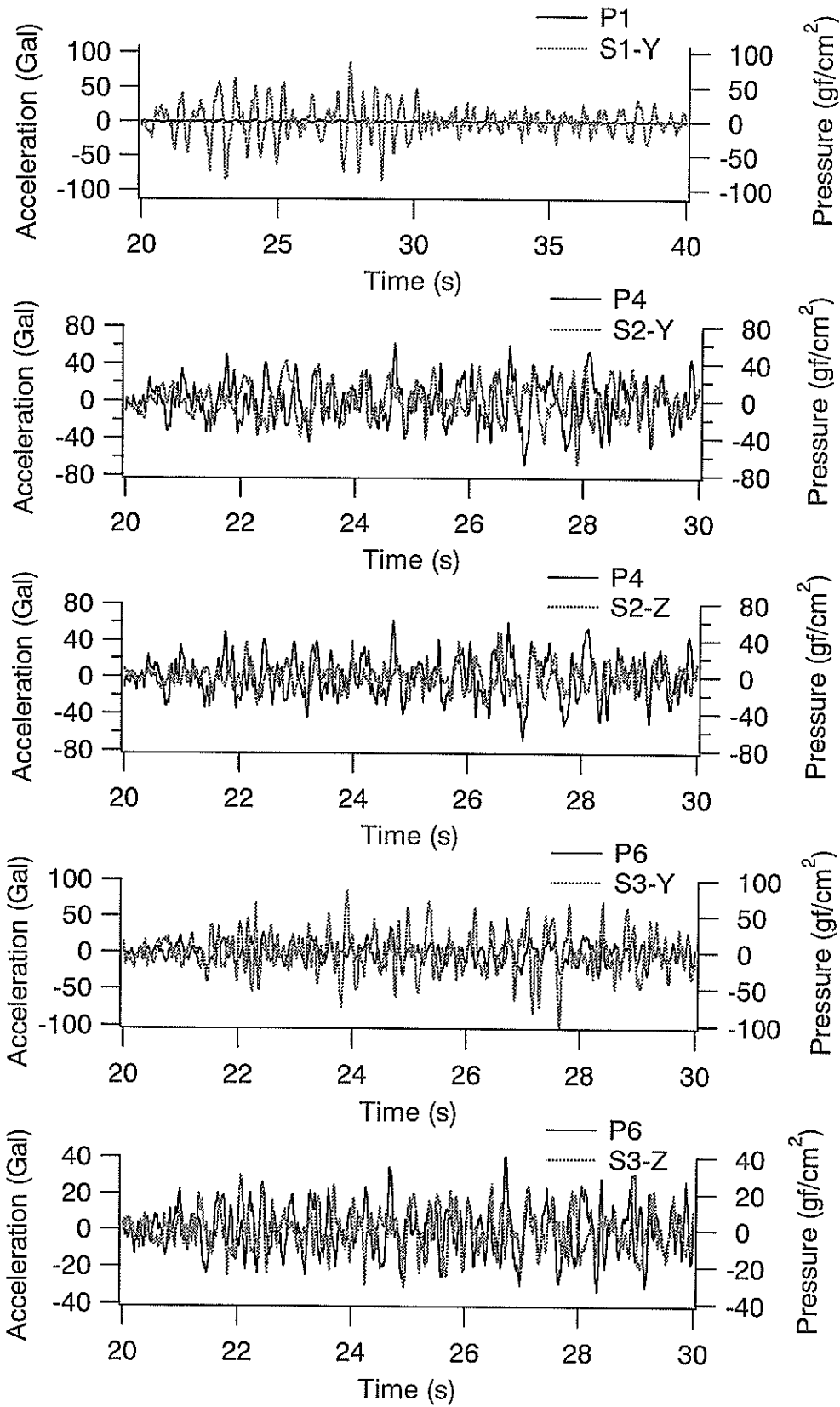


圖-23 Rec.41 加速度・動水圧波形比較

3. 大水深防波堤の地震記録の簡易解析

3. 1 最大加速度応答比

基礎地盤に対して防波堤がどの程度の加速度応答を示しているのかを見るため、ケーソン天端(S1)およびマウンド法肩(S2)の法線直角方向最大加速度を基礎地盤の最大加速度(S3)で除した値を最大加速度応答比として求めた。この最大加速度応答比を基礎地盤の最大加速度に対して示したものを図-24に示す。

この結果によれば、図-24(a)に示すとおり、基礎地盤に対するケーソン天端の最大加速度比は、1.0を下回るケースも多いのが特徴的である。この原因として、先に述べたとおり、基礎地盤(S3)に優勢に含まれている高周波成分がケーソン天端(S1)では消える傾向があることが挙げられる。基礎地盤(S3)に対するマウンド法肩(S2)の最大加速度比は、図-24(b)に示すとおり、明らかに1.0を下回っているのが特徴的である。マウンド法肩(S2)に対するケーソン天端(S1)の最大加速度比は、概ね1.0を上回っている。なお、これらのプロットの上限の包絡線を目視により設定すれば、地盤最大加速度が大きくなるにつれて、加速度応答比が小さくなる傾向を示しているようにも見えるが、実は最大加速度が大きくなるにつれてデータ数が少なくなっているために見かけ上このような結果となっているためと考えられ、最大加速度が100Galレベルまでの範囲では、地盤や捨石マウンド材の非線形性の影響はないと見るべきであろう。

3. 2 振動数応答特性

前節に続いて、大水深混成式防波堤の地震応答特性をさらに詳しく検討するため、法線直角方向加速度のパワースペクトルと伝達関数を計算した。周波数伝達関数は基礎地盤の加速度記録を入力とし、ケーソン天端またはマウンド天端の加速度記録を出力として、両者の比により求めた。この周波数伝達関数より防波堤の固有振動数を推定する。

パワースペクトル、周波数伝達関数はFFTにより算出した。入力 $X(t)$ と出力 $Y(t)$ の周波数伝達関数、両者の線形性の度合を示すコヒーレンス、両者の周波数成分別位相差は次式より求めた。

$$A(f) = Z_{YX}(f) P_X(f) \quad (1)$$

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

$$\gamma(f) = Z_{YX}(f) / \sqrt{P_X(f) \cdot P_Y(f)} \quad (3)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \{ Q_{YX}(f) / P_{YX}(f) \} \quad (4)$$

ここに、

$A(f)$: 周波数伝達関数

$Z_{YX}(f)$: クロススペクトルの絶対値

$\gamma(f)$: コヒーレンス

$\theta(f)$: 位相差

$P_X(f)$: 入力 $X(t)$ のパワースペクトル

$P_Y(f)$: 入力 $Y(t)$ のパワースペクトル

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

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

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

$$\gamma^2(f) = |A^2(f)| \cdot P_X(f) / P_Y(f) \quad (5)$$

$\gamma(f)$ が1に近いほど、入出力の相関性が強いことを示す。この報告で用いたプログラムは桑島、永井¹³⁾のプログラムを強震記録解析用に変換したものである。このプログラムで使用されているウィンドウはB.G.T型データウィンドウと放物線型のスペクトル平滑化関数である。

パワースペクトル、周波数伝達関数の計算は図-17に示した強震記録の主要動の部分と思われる2.0秒間(図-18に表示部分)について実施した。図-25にパワースペクトル、図-26に周波数伝達関数の計算結果を示す。

図-25に示すとおり、基礎地盤(S3)のパワースペクトルは2.2Hzに大きなピークがあり、振動数の比較的高い7.7Hzにもピークが認められる。マウンド法肩(S2)のパワースペクトルは1.8Hz、5.0Hzに、ケーソン天端(S1)は高い振動数成分が少なくなり、1.8Hz、2.2Hzにピークが現れている。

図-26に示すとおり、周波数伝達関数については、基礎地盤(S3)に対するケーソン天端(S1)では、1.6Hz、2.2Hz、5.0Hzに、また、マウンド法肩(S2)ではケーソン天端で見られた3つのピーク振動数のうち1.6Hz、5.0Hzの2つに共通して主要なピークが見られる。これに対して、マウンド法肩(S2)に対するケーソン天端(S1)では2.2Hz、8.3Hzに主要なピークが見られ、基礎地盤に対する伝達関数で見られた1.6Hzのピークは欠落している。このことから、マウンド上に設置されたケーソンの固有振動数(2.2Hz)と、マウンドとケーソンの両者からなる全体系の固有振動数(1.6Hz)とは異なり、マウンドでは

主に全体系の固有振動数(1.6Hz)に対応した増幅特性が、
また、ケーソン天端では全体系の固有振動数(1.6Hz)と

ケーソン部分の固有振動数(2.2Hz)の両者が重なった増
幅特性が支配的であると考えられる。

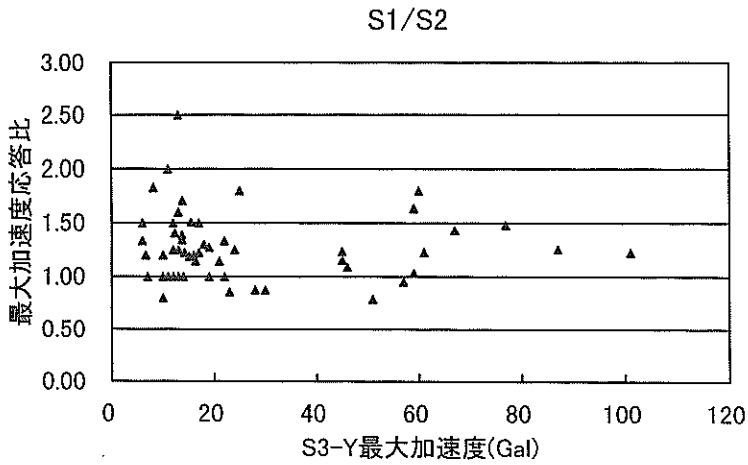


図-24(a) 最大加速度応答比 (S1/S2)

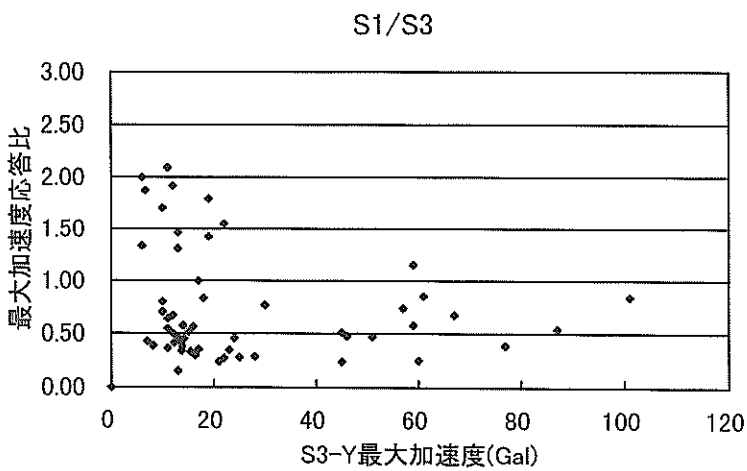


図-24(b) 最大加速度応答比 (S1/S3)

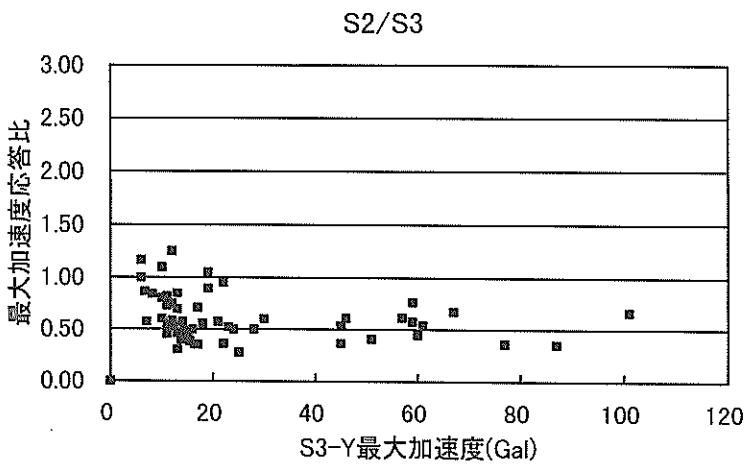
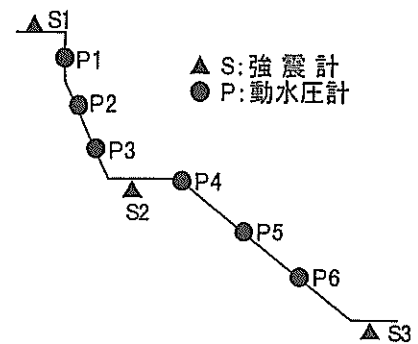


図-24(c) 最大加速度応答比 (S2/S3)



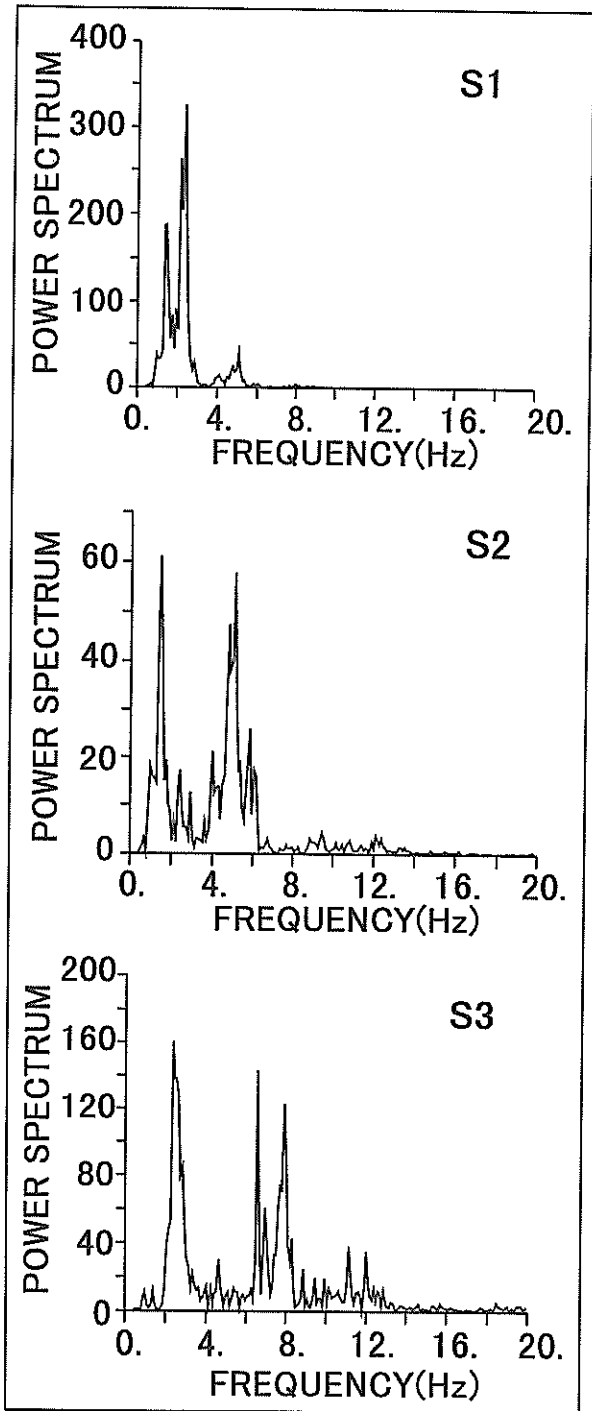


図-25 パワースペクトル

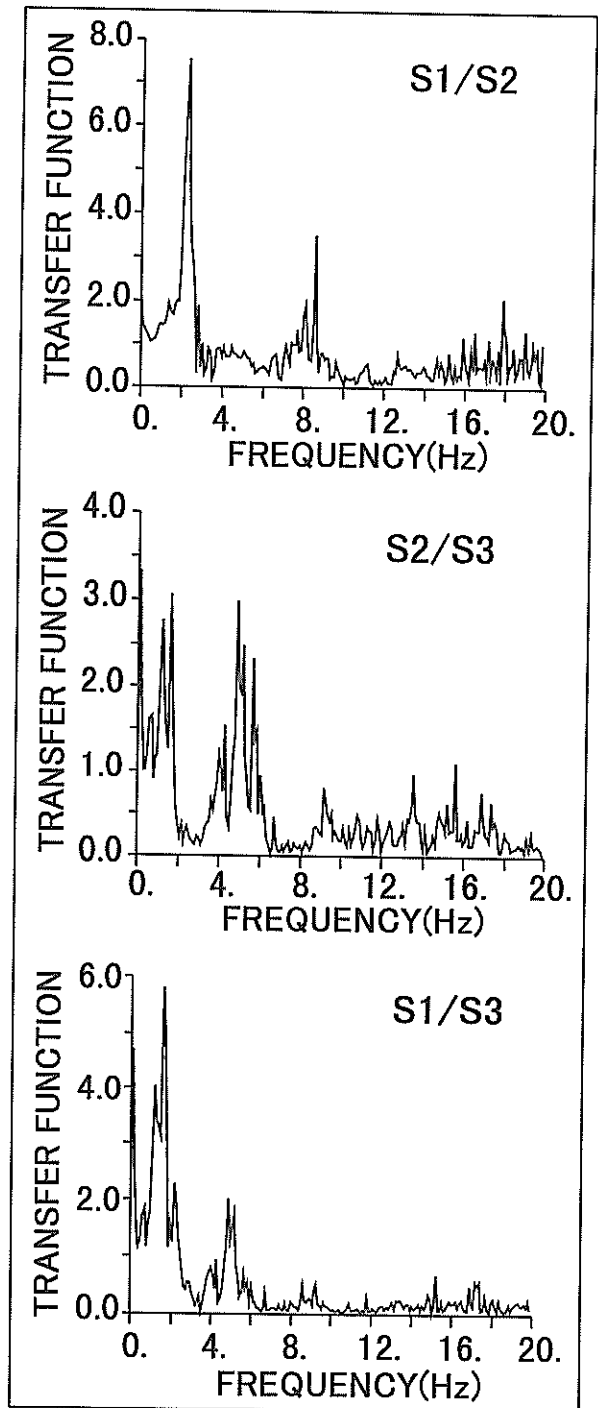
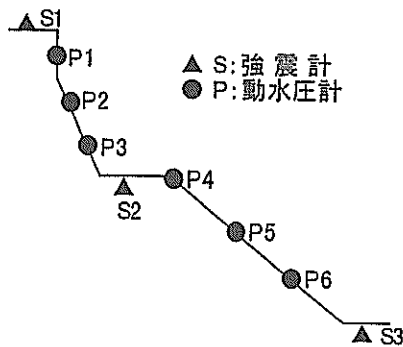


図-26 周波数伝達関数



3. 3 動水圧

観測された動水圧の最大値と地震最大加速度の関係を概略検討するため、Zanger¹²⁾および Westergaard¹⁾による動水圧の算定式との比較を行った。

(1) Zanger 式

Zanger はダムの上流面が傾斜している場合の剛な斜面に作用する動水圧について、電気模擬法によって実験を行い、その実験結果により次のような実験式を導いた¹³⁾。

$$p_d = C w_0 a h \quad (6)$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (7)$$

ここで、

p_d : 傾斜したダム上流面に働く動水圧 (tf/m²)

α : 地震の水平震度

h : 貯水池の水深 (m)

y : 水面から任意点までの深さ (m)

C : 圧力係数

D_m : 与えられた斜面に対する C の最大値

(図-27参照)

w_0 : 水の単位体積重量 (= 1.0tf/m³)

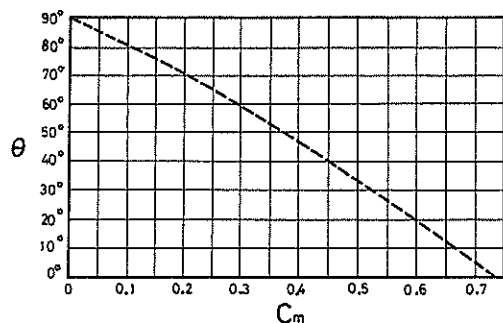


図-27 与えられたダムの上流面に対する C の最大値

(2) Westergaard の近似式¹⁾

均質・非粘性な流体で、線形圧縮性を持つ微小振幅・非回転流れにに対して、流体と構造物の境界の運動によって生じる動水圧は次の波動方程式によって支配される。

$$\Delta^2 p = \frac{1}{c^2} \ddot{p} \quad (8)$$

ここで、

Δ^2 : 2次元のラプラシアン

p : 動水圧 (tf/m²)

c : 水中音速 = $\sqrt{K/\rho_f}$ (m/s)

K : 水の体積弾性率 (tf/m²)

ρ_f : 水の質量密度 (tf・s²/m⁴)

Westergaard は鉛直な上流面を持つ剛なダムに対して地盤とダムが調和運動すると仮定して、式(8)から動水圧の理論を求めた。

$$p = \frac{8\alpha w_0 h}{\pi^2} \cos \frac{2\pi}{T} \sum_n \frac{1}{n^2 C_n} e^{-q_n y} \sin \frac{n\pi y}{2h} \quad (n=1,3,5\dots) \quad (9)$$

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16w_0 h^2}{n^2 g K T^2}}, \quad q_n = \frac{n\pi C_n x}{2h}$$

ここで、

p : 貯水池内任意点の動水圧 (tf/m²)

α : 地震の水平震度

h : 貯水池の水深

x : ダムの上流面からの水平距離

y : 水面から任意点までの深さ

T : 振動周期 (s)

K : 水の体積弾性率 (tf/m²)

w_0 : 水の単位体積重量 = $\rho_f g$ (tf/m³)

g : 重力加速度 (9.80m/s²)

式(9)のダム上流面 ($x=0$) における任意深さ y の動水圧を与える近似式として次の式が導かれている。

$$p_{\max} = \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{h y} \quad (10)$$

式(10)を y に関して、ダム底面から水面まで積分すれば、動水圧の合力 P が求まる。

$$P = \frac{7}{12} w_0 a h^{1/2} y^{3/2} \quad (11)$$

(3) Westergaard, Zanger 算定式と観測値の比較

以上の算定式を用いて、観測値との比較を行った。なお、算定は各水圧計の設置高について行い、ケーソン側壁の水圧計設置部分については最大水深を-25m (マウンド天端の水深)、マウンド上の水圧計設置部分については-57m を最大水深として用いた。

この結果を、まず、地震動最大加速度に対する動水圧の最大値の形で、図-28に示す。地震動最大加速度としては、マウンド天端-ケーソン天端間は、それぞれ観測地点 (S1,S2) の法線直角方向の最大加速度を平均した値を、また、基礎地盤-マウンド天端間については、両観測地点 (S2,S3) の観測最大加速度の平均値を用いた。

さらに、これらの結果を動水圧の深さ方向の分布として総合し、図-29に示した。ここで、 P =動水圧観測値 (gf/cm²)、 α =震度 (=最大加速度/重力加速度) である。

これらの結果より、動水圧の観測値のほとんどは Zanger 式、Westergaard 式による算定値より小さな値を示すことが分かった。

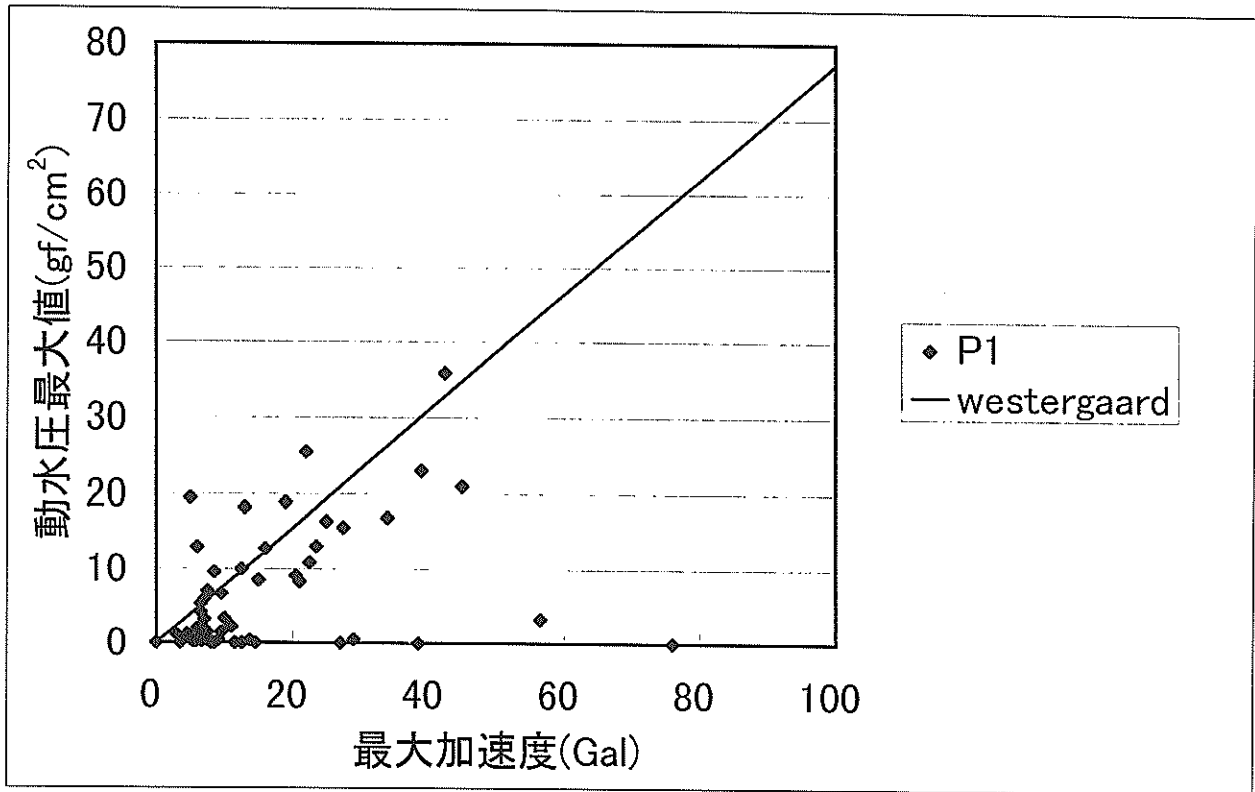


図-28(a) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P1)

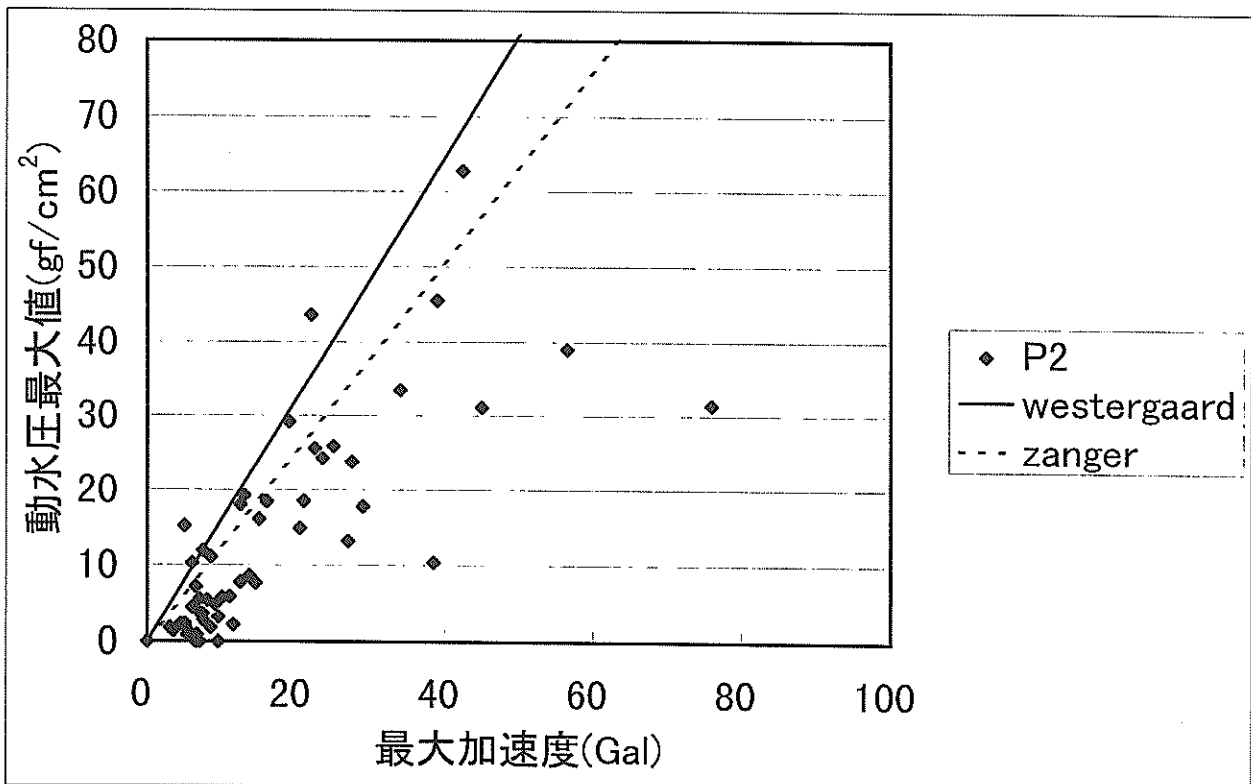


図-28(b) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P2)

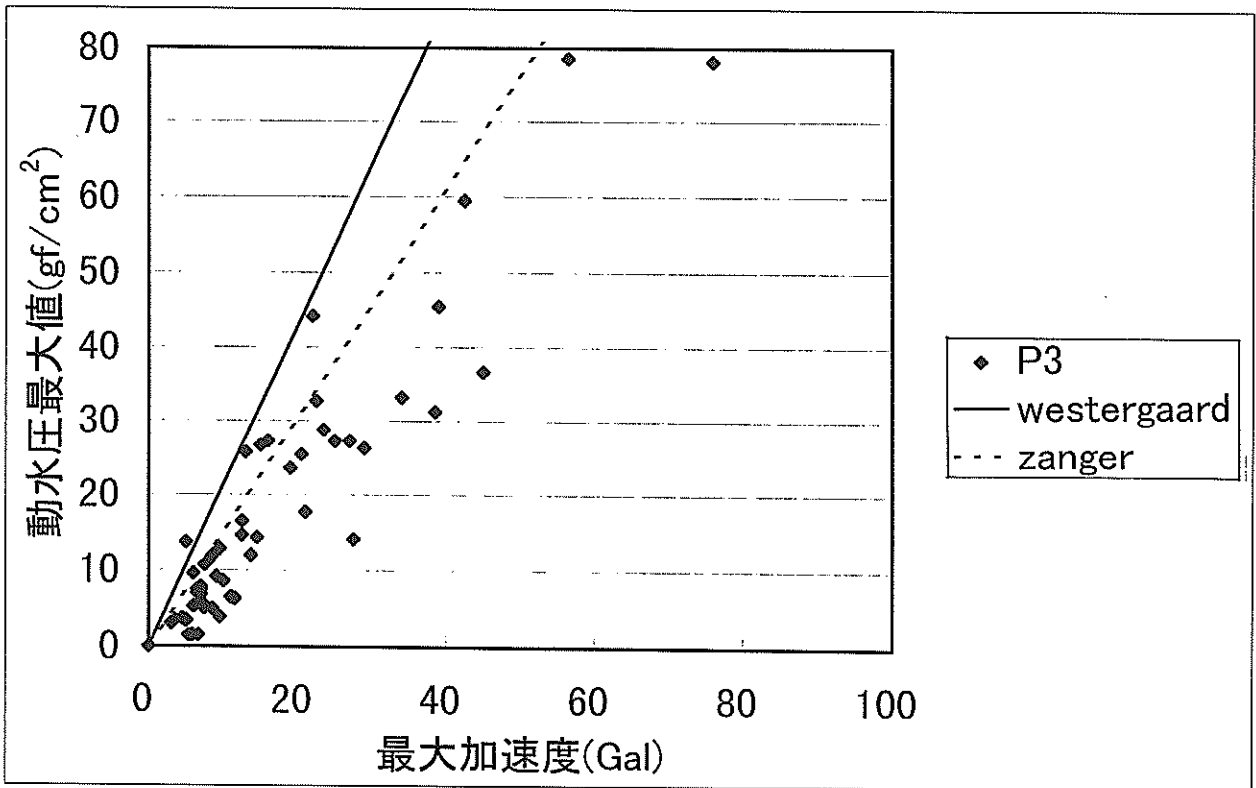


図-28(c) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P3)

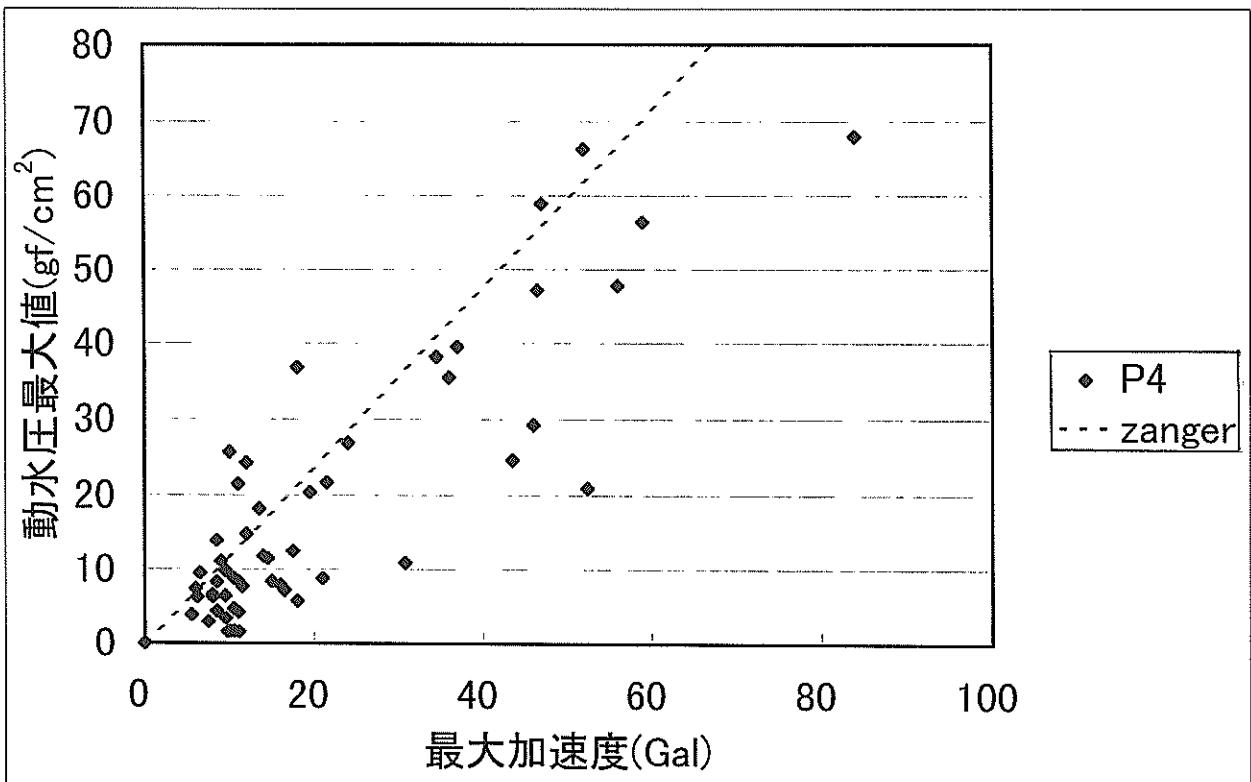


図-28(d) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P4)

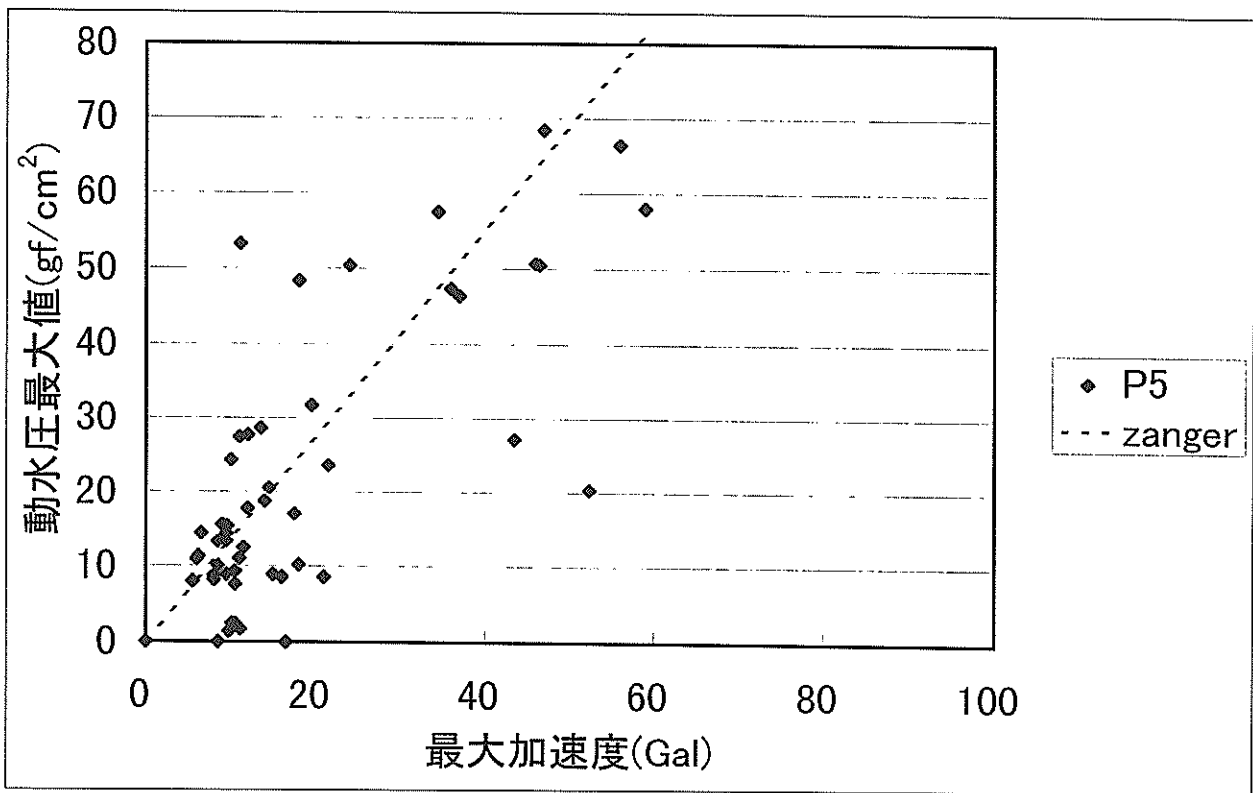


図-28(e) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P5)

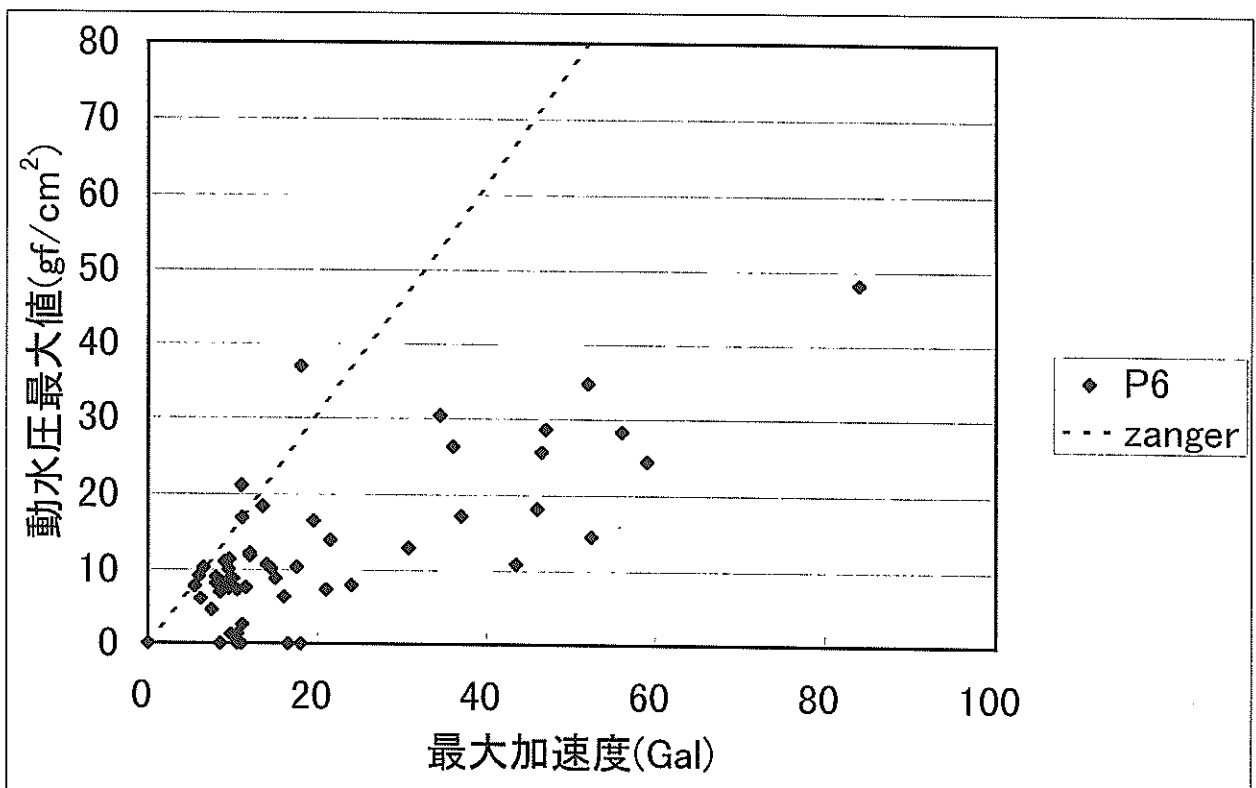


図-28(f) 動水圧の最大加速度に対する分布 (P6)

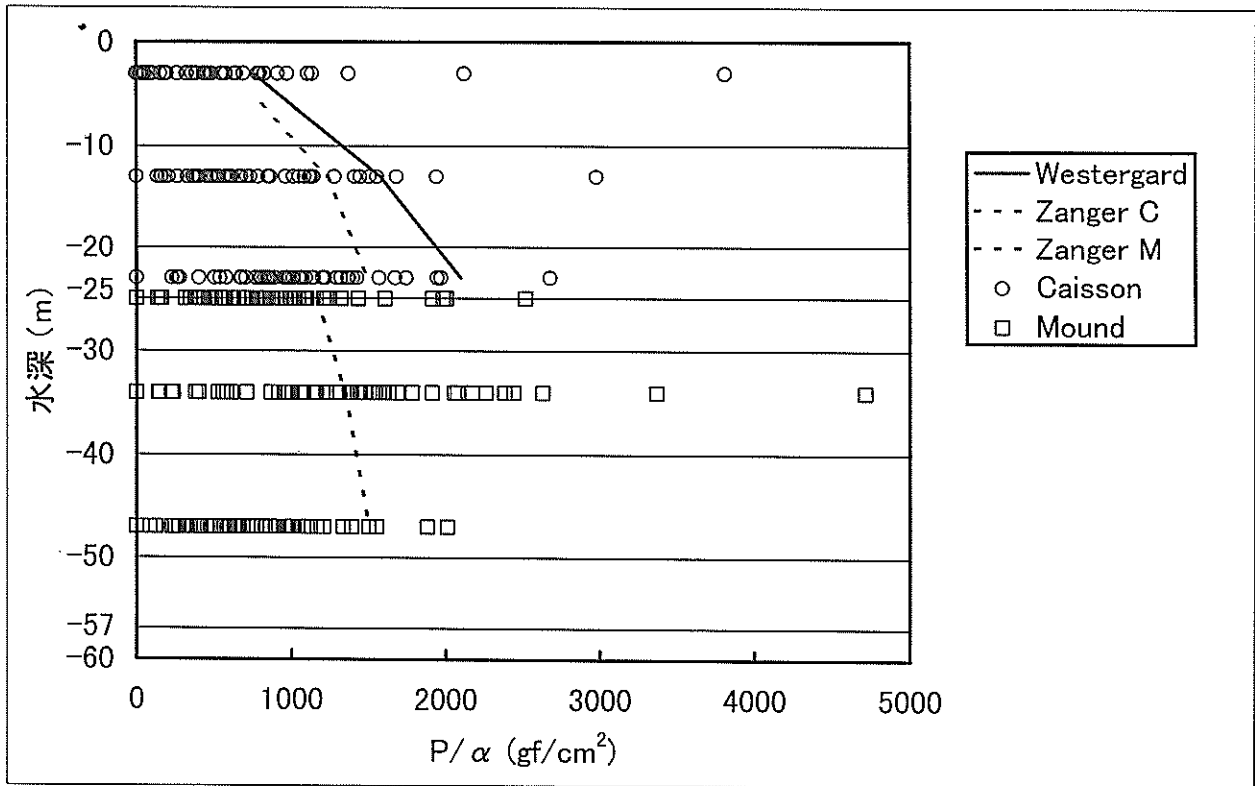


図-29 動水圧の深さ方向の分布

4. 地震応答解析

4. 1 解析手法

大水深混成式防波堤の地震加速度および動水圧について、水-構造物連成系としての地震応答解析を行った。観測された地震動レベルは高々 100Gal レベルのものであり、地盤-構造物系に発生したひずみレベルはかなり小さいものと考えられることから、地盤・捨石マウンドなどの地盤材料は、等価線形モデルで表現した。また、混成式防波堤をとりまく海水は、非圧縮流体としてモデル化した。なお、数値解析には、著者らの一人が開発した有限要素法解析プログラム BEAD III[®]を用いた。

解析対象とした地震は、先に記録番号 REC.16 として示した釧路沖地震とした。

4. 2 解析結果と観測結果の比較

等価線形解析による混成防波堤の地震応答解析を行うにあたり、基盤に設置された加速度計 S3 が海底地盤の地中-2m 埋込みで設置されていることを考慮し、マウンド下部の砂層について1次元等価線形解析¹³⁾を行い、基

盤への入射波を求めた。表-4に解析に用いたマウンド下部砂層の地盤モデル定数の一覧を、また、図-30に解析に用いた砂層のひずみ依存曲線を示す。なお、この時に使用した微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 の値は自重解析によって求めた σ'_v 、 e より算出した¹⁴⁾。等価線形解析の結果は、図-31に示すとおりとなった。

次に、算定された基盤への入射波を用いて防波堤の地震応答計算を行い、応答加速度の時刻歴波形、動水圧の時刻歴波形、パワースペクトル、および伝達関数を出力し、観測値との比較を行った。なお、入力地震波は法線直角方向のみとした。

図-32に防波堤の有限要素モデルを、図-33に水部の有限要素モデルを示す。また、図-34に材料種別を示し、表-5に各材料毎の値を示す。各材料のひずみ依存曲線は、図-35に示すとおりである。

加速度波形の観測結果と計算結果の比較を図-36に、動水圧の比較を図-37に、パワースペクトルと周波数伝達関数の比較を図-38に示す。また、動水圧に関する深度分布の比較を図-39に示す。

比較の結果、やや位相のズレはあるものの、応答加速度、動水圧とも最大値はほぼ一致しているといっている。しかし伝達関数とパワースペクトルに関しては、S3 のパワースペクトルのピーク (2.2Hz) 以外はあまり良い

Layer	土の種類	γ (t/m ³)	V_s (m/sec)	層厚 (m)	σ_m' (kg/cm ²)	e
No.1	砂	1.88	105.3	2.0	0.201	1.08
No.2	砂	1.91	111.4	3.0	0.328	0.85
No.3	砂	1.89	111.4	3.0	0.368	0.81
No.4	砂	1.89	111.4	4.0	0.760	1.06
No.5	砂	1.89	120.0		1.015	1.06

表-4 SHAKEによる地盤モデル

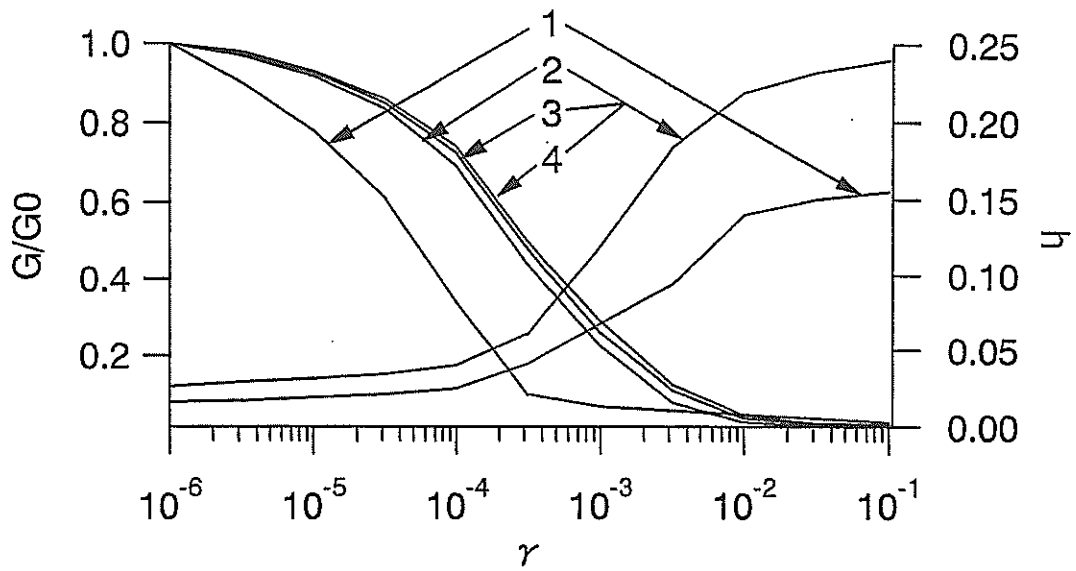


図-30 SHAKE 地盤モデルひずみ依存曲線

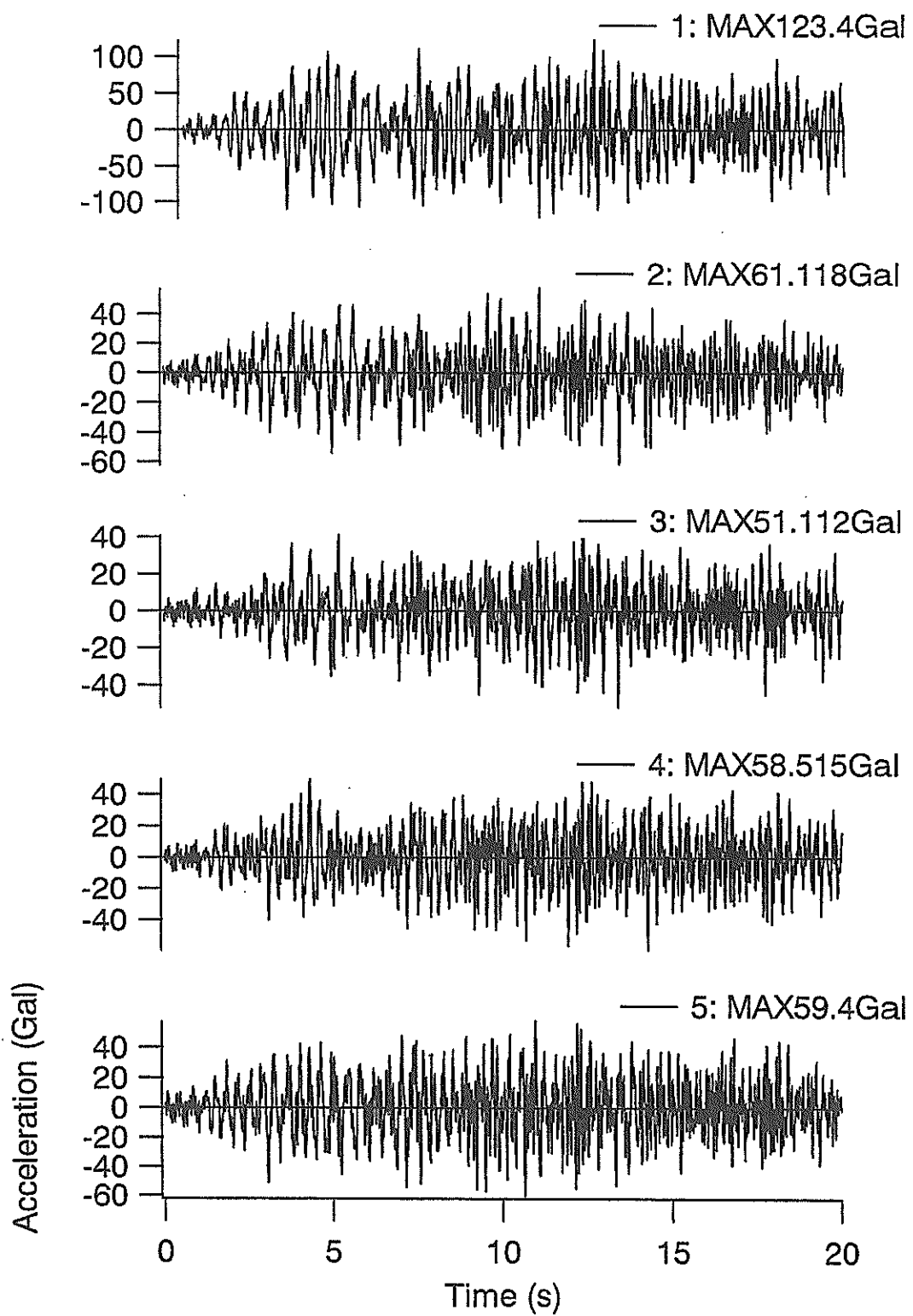


圖-31 SHAKE 計算結果

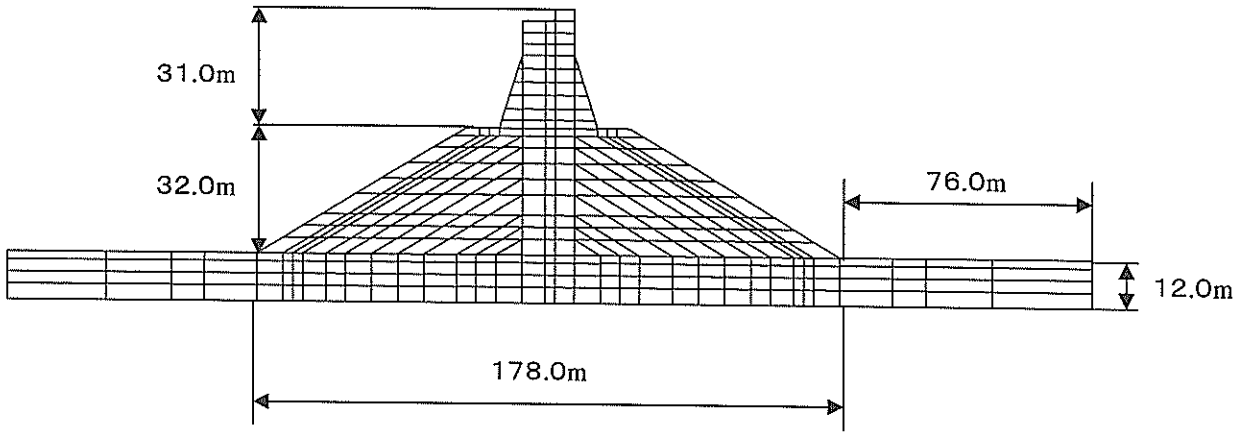


図-32 BEAD 防波堤モデル

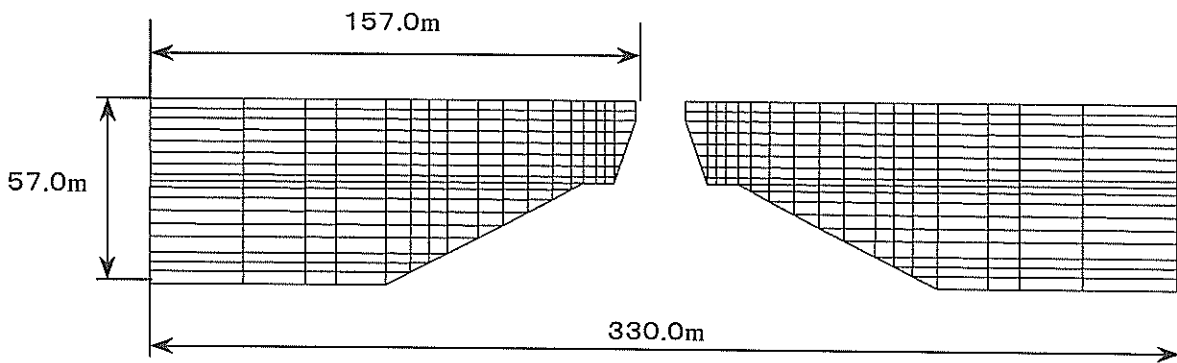


図-33 BEAD 水部モデル

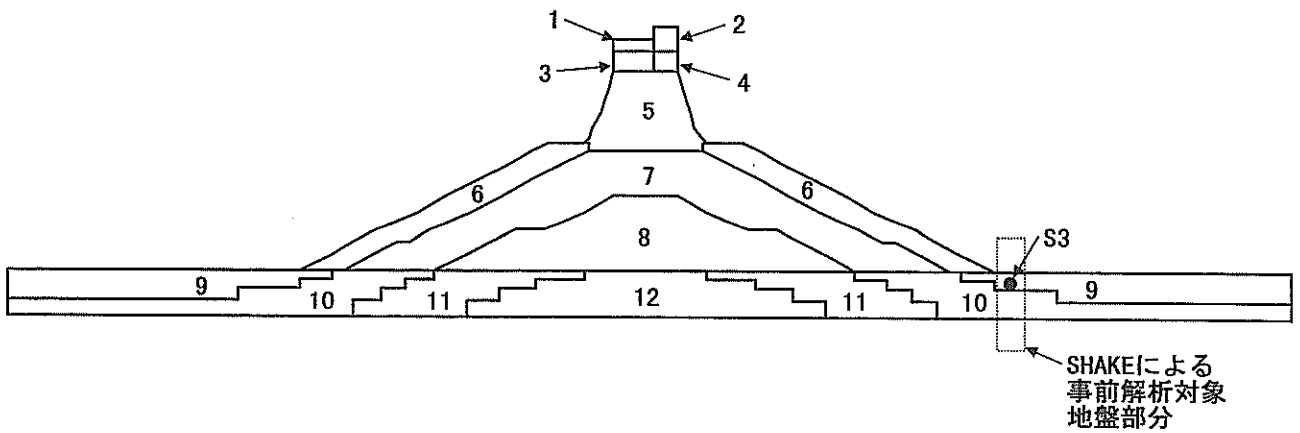


図-34 材料種別

材料番号	密度 (tf/m^3)	ポアソン比	透水係数 (m/sec)	ポロシティ	G0 (tf/m^2)
1	0.9	0.167	—	—	1,285,000
2	2.45	0.167	—	—	1,285,000
3	0.9	0.167	—	—	1,285,000
4	1.6	0.167	—	—	1,285,000
5	2.12	0.167	—	—	1,285,000
6	1.96	0.38	0.07	0.441	8,620
7	1.96	0.38	0.07	0.441	19,330
8	1.96	0.38	0.07	0.441	24,110
9	1.91	0.33	0.0001	0.487	21,193
10	1.89	0.33	0.0001	0.487	23,449
11	1.89	0.33	0.0001	0.487	22,730
12	1.89	0.33	0.0001	0.487	24,826

表-5 各材料の物性値

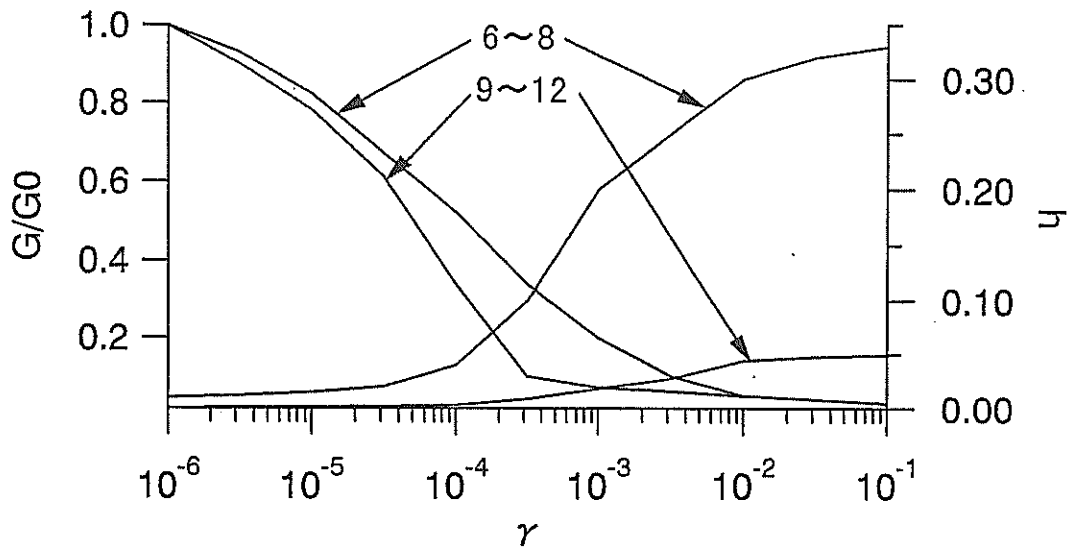


図-35 BEAD ひずみ依存曲線

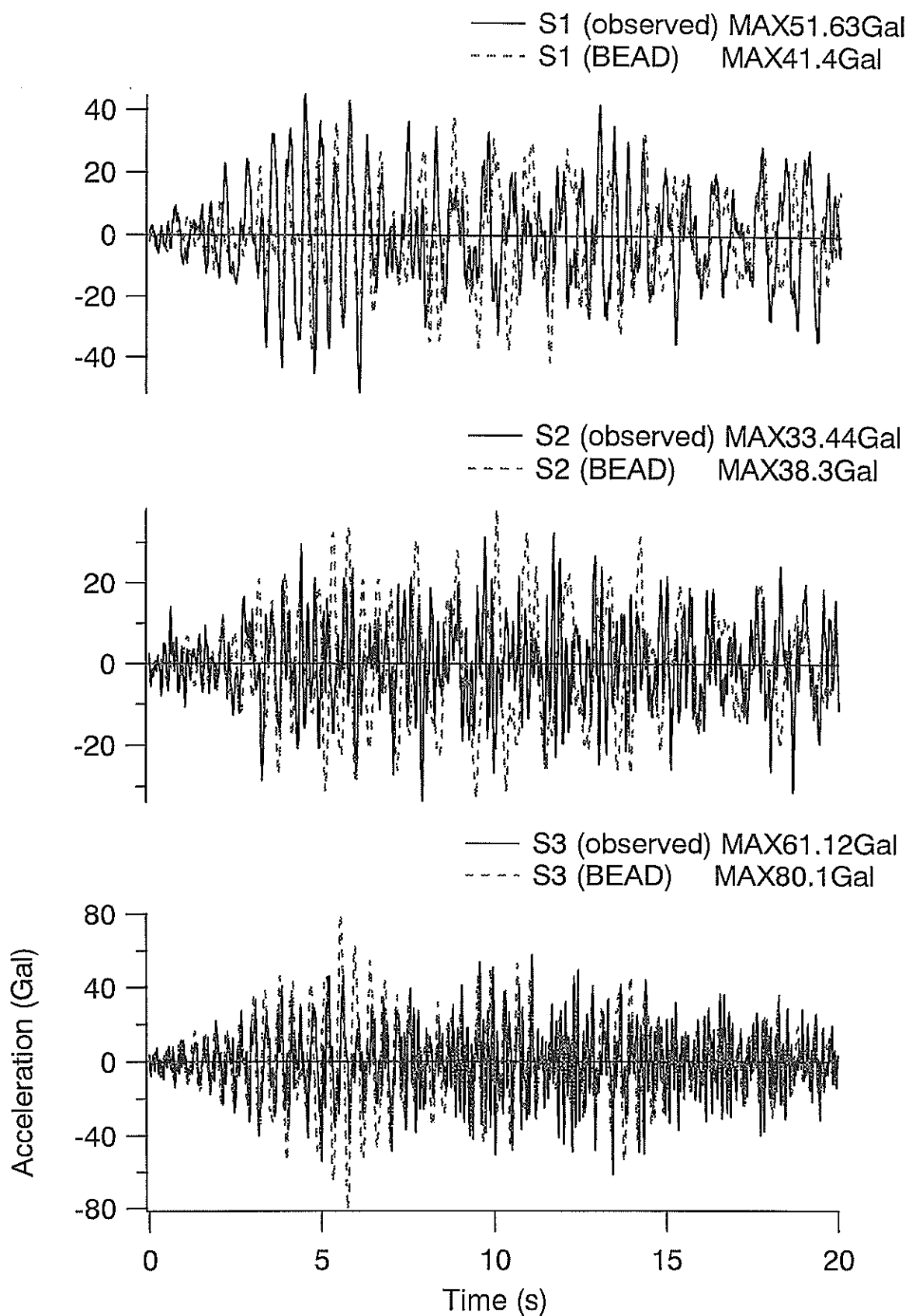


圖-36 加速度波形比較

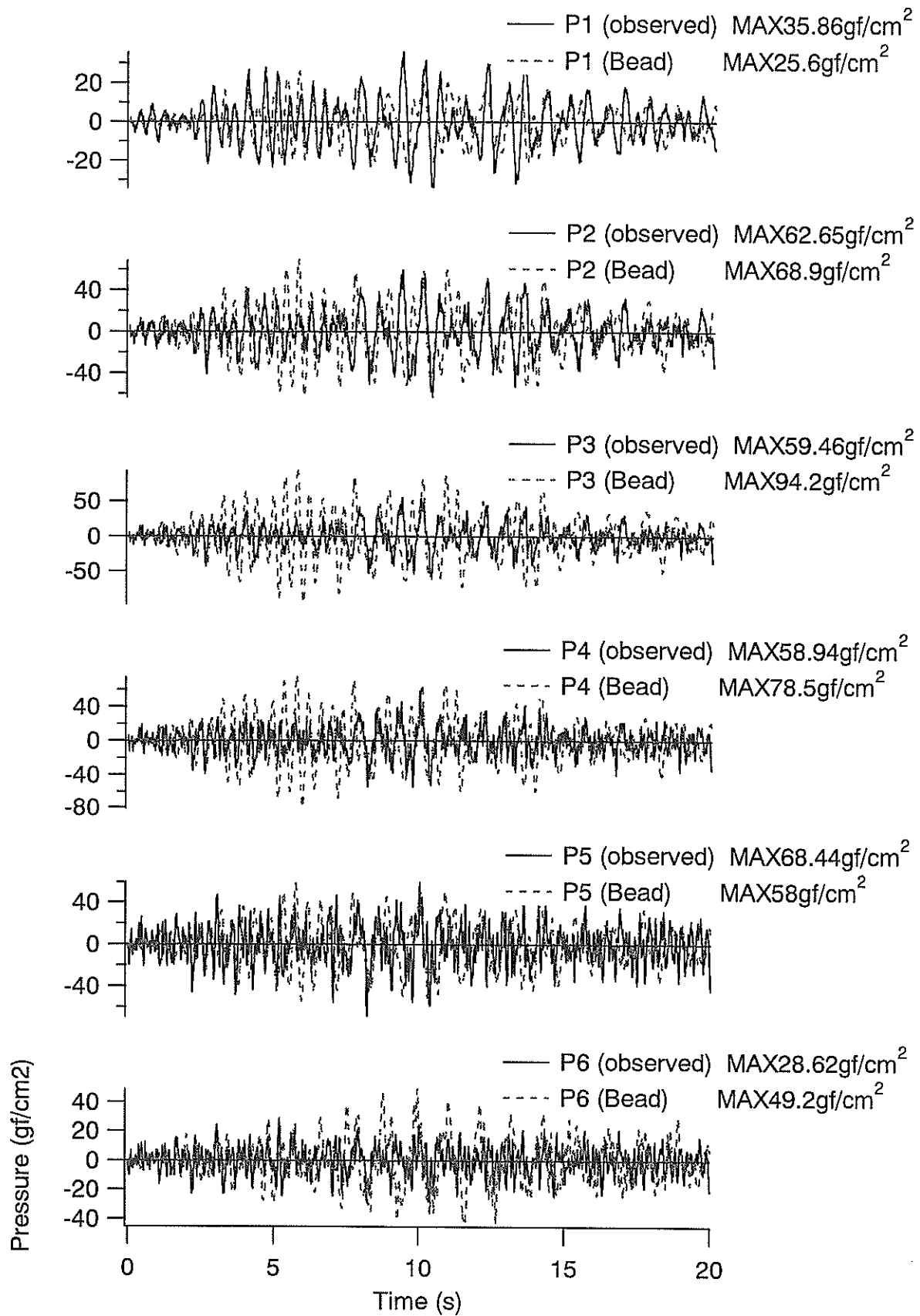


図-37 動水圧比較

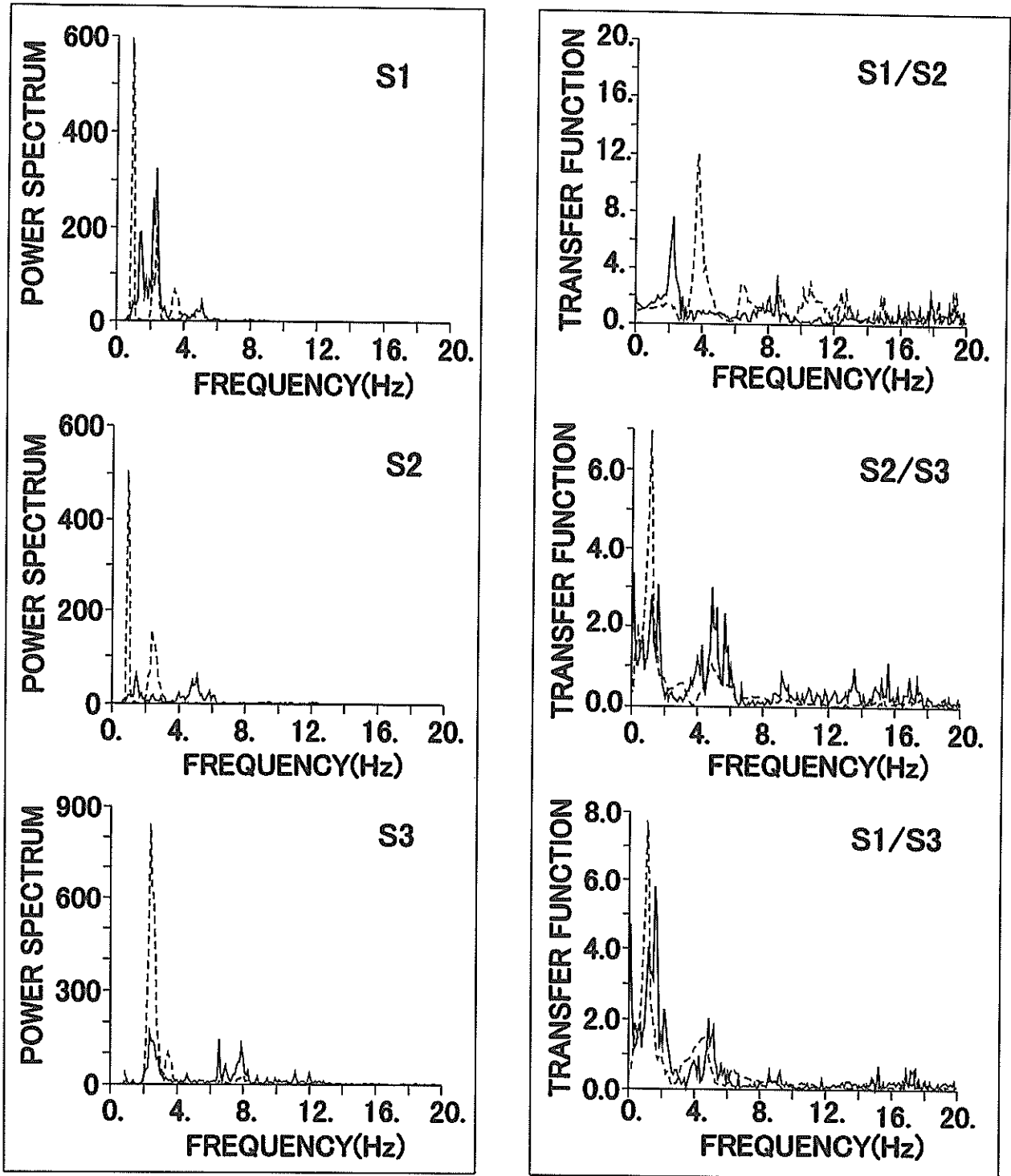
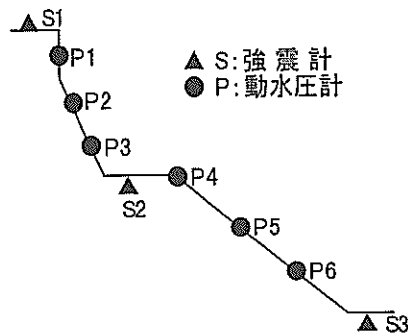


図-38 パワースペクトル，周波数伝達関数比較



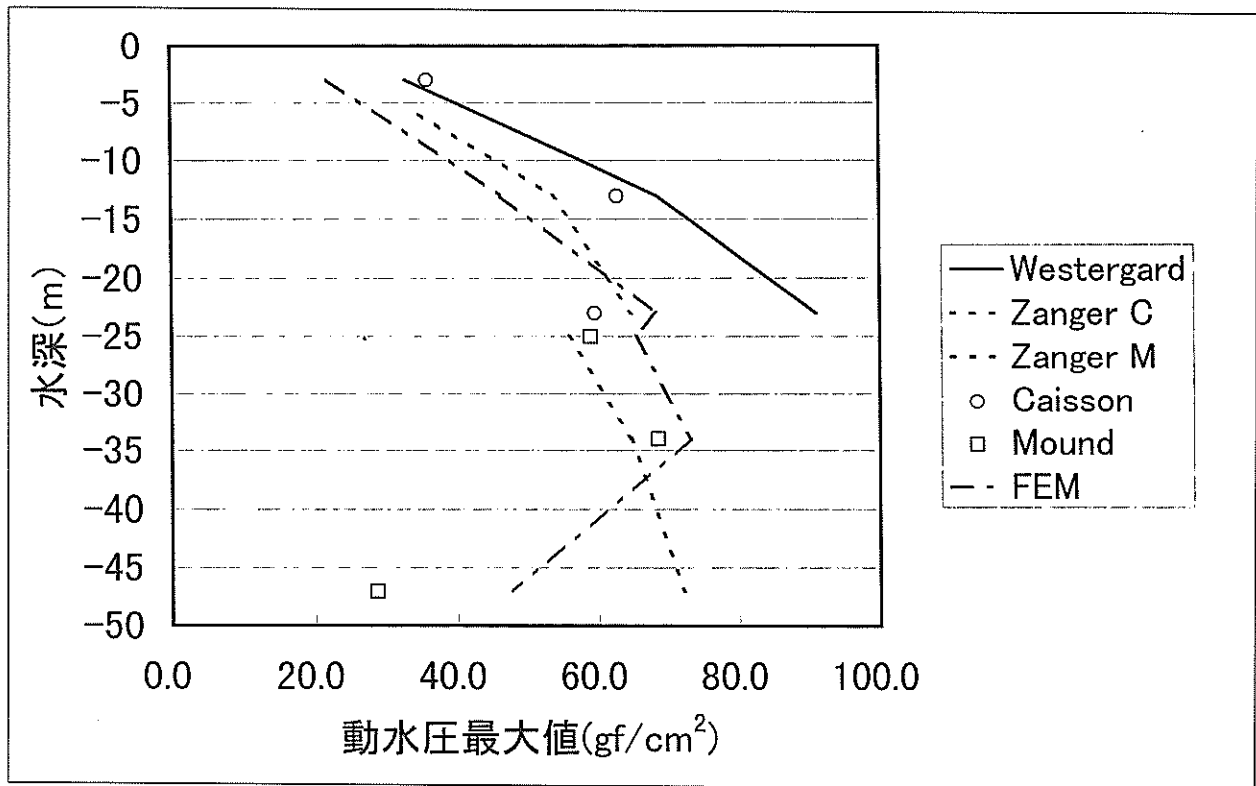


図-39 動水圧に関する深度分布の比較

一致が見られず、これは今後の検討課題とした。

以上の結果から、100Gal レベルの中小地震動に対してであれば、ここで示した地震応答解析手法により大水深での防波堤の地震時挙動がある程度評価できるであろうとの見通しが得られた。

5. 結論

水深 60m 級の大水深域に建設された釜石湾口防波堤で得られた強震観測、動水圧観測記録を解析し、有限要素法による地震応答計算結果との比較を行った。今回のとりまとめまでに得られた観測記録は、最大加速度が高々 100Gal 程度のもので、観測された地震時動水圧にも、波浪の影響などが含まれている可能性があり、現時点で大水深混成式防波堤の地震時挙動に関する断定的な結論を下すことは時期尚早である。しかし、現在までの検討で、ある程度見通しが得られた点についてとりまとめれば、以下のとおりである。

(1) 今回観測対象とした水深 60m 級の大水深混成式防波堤の振動数増幅特性は、マウンドを含む防波堤全体系の固有振動数 1.6Hz およびマウンド上に設置されたケ

ーソン部分の固有振動数 2.2Hz が重ね合わさったものとなり、ケーソン天端ではこれら両振動数が卓越するものとなった。

(2) 動水圧観測により得られた動水圧の観測値は、Westergaard 式、Zanger 式による計算値よりも小さな値を示した。

(3) 等価線形法に基づく水-地盤-構造物連成系の地震応答計算を実施し、観測結果と比較した結果、応答加速度および動水圧の最大値は、観測値と計算値でほぼ一致し、100Gal レベルの地震に対する本解析法の適用性について、ある程度の見通しが得られた。

(1999年6月30日受付)

参考文献

- 1) Westergaard, H.M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE 98, 1933, pp.418-434
- 2) 土田肇・上部達生・倉田栄一・林聡：有限要素法によるフィルタイプ防波堤の地震応答計算と観測結果の比較，関東地震 50 周年記念地震工学シンポジウム，1973 年 9 月，pp.357～364
- 3) 上部達生・土田肇・倉田栄一：大型混成式防波堤の強震記録に基づく水一構造物連成系の地震応答解析，港湾技術研究所報告，Vol.22, No.2, 1983 年 6 月，pp.289～326
- 4) 上部達生・土田肇・倉田栄一：大水深フィルタイプ防波堤の強震観測，動水圧観測とその記録の解析，土木学会論文集，No.362/I-4, 1985 年 10 月，pp.381～390
- 5) 上部達生・工藤勝己・長田信：混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験，港湾技研資料，No.641, 1989 年 3 月
- 6) 上部達生：大水深混成式防波堤の強震記録および動水圧記録に基づく地震応答解析，港湾技研資料，No.746/1993 年 3 月
- 7) 上部達生・野田節男・千葉忠樹・桧垣典弘：水との連成を考慮した大型混成式防波堤の振動特性と動水圧，港湾技術研究所報告，Vol.20, No.4, 1981 年 12 月，pp.41～81
- 8) 上部達生・守屋正平：砂地盤上の大水深混成式防波堤の大型模型振動実験と地震応答解析，港湾技研資料，No.589, 1987 年 6 月
- 9) 上部達生・工藤勝己・長田信：混成式防波堤に作用する動水圧の模型振動実験，港湾技研資料，No.641, 1989 年 3 月
- 10) 横山淑子・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その 5)，港湾技研資料，No.351, 1980 年 9 月，pp.67～72
- 11) 桑島進・永井康平：任意個数試料 F F T (FastFourierTransform) 算法とそのスペクトル解析への応用，港湾技研資料，No.155, 1973 年 3 月
- 12) Zanger, C.N.: Hydrodynamic Pressure on Dams due to Horizontal Earthquakes, Proc. Exper. Stress Analysis, Vol.10, No.2, 1953
- 13) Shanabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No.EERC72-12, University of California at Berkeley, 1972
- 14) (財) 沿岸開発技術研究センター：運輸省港湾局監修 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版)，1997 年，p.66

記号表

$A(f)$: 周波数伝達関数
C	: 圧力係数
C_m	: 与えられた斜面に対する C の最大値 (図- 参照)
c	: 水中音速 (m/s)
g	: 重力加速度 (9.80m/s ²)
h	: 水深 (m)
K	: 水の体積弾性率 (tf/m ²)
P	: 動水圧観測値 (gf/cm ²)
p	: 動水圧 (tf/m ²)
p_s	: 傾斜したダム上流面に働く動水圧 (tf/m ²)
$P_x(f)$: 入力 $X(t)$ のパワースペクトル
$P_y(f)$: 入力 $Y(t)$ のパワースペクトル
$P_{xx}(f)$: コスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの実数部)
$Q_{xy}(f)$: クオドラチャスペクトル (複素数で表されるクロススペクトルの虚数部)
T	: 振動周期 (s)
w_0	: 水の単位体積重量 (= 1.0tf/m ³)
x	: ダムの上流面からの水平距離
y	: 水面から任意点までの深さ (m)
$Z_{xx}(f)$: クロススペクトルの絶対値
α	: 地震の水平震度
$\gamma(f)$: コヒーレンス
ρ_s	: 水の質量密度 (tf・s ² /m ⁴)
$\theta(f)$: 位相差
Δ^2	: 2次元のラプラシアン

港湾技研資料 No.944

1 9 9 9 . 9

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 阿部写真印刷株式会社

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

Copyright ©(1999)by P.H.R.I.

All rights 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。