

港湾技研資料

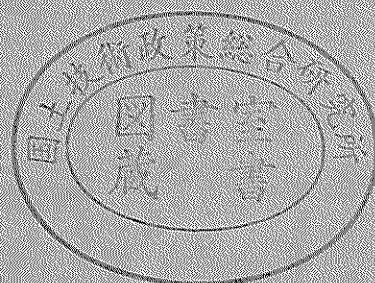
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.746 Mar. 1993

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

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. 大船渡湾口防波堤	6
3. 強震観測および動水圧観測	7
3.1 設置位置	7
3.2 強震計および動水圧計	8
3.3 記録の処理	8
4. 観測結果	10
4.1 強震観測結果	10
4.2 強震計の機種の違いによる補正	10
4.3 3観測地点の強震記録相互間の時間差の補正	11
4.4 動水圧観測結果	
5. 観測記録の解析	31
5.1 防波堤の加速度応答	31
5.2 防波堤の周波数伝達関数	32
5.3 動水圧の観測結果の検討	43
6. 地震応答計算と観測結果の比較と考察	47
6.1 地震応答計算手法	47
6.2 計算結果と観測結果の比較および考察	47
7. 結論	65
参考文献	66
記号表	66

Coupled Hydrodynamic Response Analysis Based of Strong-motion and Hydrodynamic Pressure Records of Composite Breakwater in Deep Sea

Tatsuo UWABE*

Synopsis

Strong-motion and hydrodynamic pressure records obtained on the Ofunato breakwater which consist of rock-fill mound of 19m high and concrete caissons of 20 m high on the mound were analyzed, and the validity of a coupled hydrodynamic response calculation method were studied based on the above records. Comparing the accelerograms of the caisson's top with those of the base rock, the top of the caisson shows clear response. The response ratio of the caisson's top to the base rock decreased with increase of the maximum acceleration of the base rock. According to the transfer function between the caisson's top and the base rock, the frequency of the first order which showed the peak of the transfer function decreased with the increase of the base rock acceleration. This seismic behavior was due to the nonlinear characteristics of the mound's material. The hydrodynamic pressures observed at vertical surface of the concrete caisson were a little small compared with those calculated from the Westergaard's formula. The comparison of the coupled hydrodynamic response using the equivalent linear method with the observed data showed a relatively good agreement.

Key Words: offshore structure, strong-motion observation, hydrodynamic pressure, earthquake response analysis

*Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division

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

上 部 達 生*

要 旨

大水深構造物の合理的な耐震設計法の確立のために、大水深混成式防波堤で観測された強震記録、動水圧記録により大水深構造物の振動性状解析を行い、さらに、観測結果によりその地震応答計算手法の妥当性を検証した。

強震記録の解析結果によると、ケーソン天端の最大加速度応答比は1以上の値を示し、防波堤は明瞭な応答を示すことが確認された。さらに、このケーソン天端の最大加速度応答比は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少した。また、ケーソン天端の基礎岩盤に対する周波数伝達関数によれば、周波数伝達関数の一次のピークを示す振動数は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少した。これらの結果は、防波堤マウンド材が非線型性を有することによるものと考えられる。動水圧観測より得られたコンクリートケーソンに作用する動水圧はウェスターガード (Westergaard) の簡略公式を近似的に適用した (ケーソン天端とマウンド天端の最大加速度の平均値を重力加速度で除した値を震度として与えている) 計算値よりやや小さい値を示した。等価線形化手法による有限要素法の水-構造物連成系の地震応答計算と観測結果と比較し、計算手法の妥当性を確認した。

キ-ワ-ド：大水深構造物，強震観測，動水圧，地震応答解析

*構造部 地震防災研究室長

1. まえがき

最近、水深が-20m~-50mの大水深域の沖合に人工島を建設し、流通・情報拠点、観光レクリエーション施設、研究文化施設、生活関連施設等を建設しようとする沖合人工島計画が検討されている。対象地域が地震活動度の高い地域の場合、大水深構造物および埋立て地盤の地震時挙動に関する検討が重要課題となる。一方、日本は地震多発国であり、地震動による被害とともに津波による被害も多く、津波対策が重要な課題である。過去に幾度となく津波による大被害が発生しているリアス式海岸の地域では、津波防護を主要な目的として、湾口に津波防波堤が建設されている。リアス式海岸は周辺に山が迫って湾内の水深は急激に深くなっており、津波防波堤も大水深構造物となっている。この大水深防波堤は津波防護が主要な目的であり、また、大水深防波堤は構造物が大型化しており地震時に大きな応答を示すと考えられること、大水深のため動水圧が大きくなることから設計時の構造断面を決定する外力が地震外力となり、その耐震性の検討が重要な課題である。

大水深構造物の耐震設計の考え方は、現行設計法を基本にしているものの、現行設計法で用いている震度法では現象と設計法との乖離が著しく、設計法の合理性が保証されない部分については地震応答解析を用いようとする

ものである。具体的には、大きな応答を示す構造物に作用する地震外力、複雑な構造物に作用する動水圧等の算定に地震応答解析を実施する。地震応答解析には、既存の構造物の地震観測結果による振動性状解析、模型振動実験、構造物をモデルに置き換えて実施する地震応答計算がある。地震応答計算を行う場合には、その計算手法、モデル化、計算定数等の妥当性を十分検証する必要がある。本報告では、大水深構造物の合理的な耐震設計法の確立のために、大水深防波堤の地震観測結果による振動性状解析を行い、その観測結果による地震応答計算手法の妥当性の検証を行う。

岩手県の大船渡湾の最大水深-38mの位置に大船渡湾口防波堤（写真-1）がある。この防波堤は航路部を除く部分で大船渡湾内の水と外海の水の運動を遮断し、外海の津波が湾内に及ぼす影響を軽減するものである。こうした津波防波堤は、ほとんどの場合津波が来襲する直前に地震動の影響を受けるので、耐震性の検討はきわめて重要である。この津波防波堤のさらに合理的な耐震設計法の開発のために、昭和42年の防波堤の完成と同時に強震計が設置され地震観測が実施されてきている。また、昭和57年には防波堤に動水圧計が設置され、動水圧の観測も地震観測と同時に実施されてきた。得られた地震記録の解析を実施した研究の初期のものとしては、土田、上部、倉田、林¹⁾の研究がある。地震記録がある程度ま

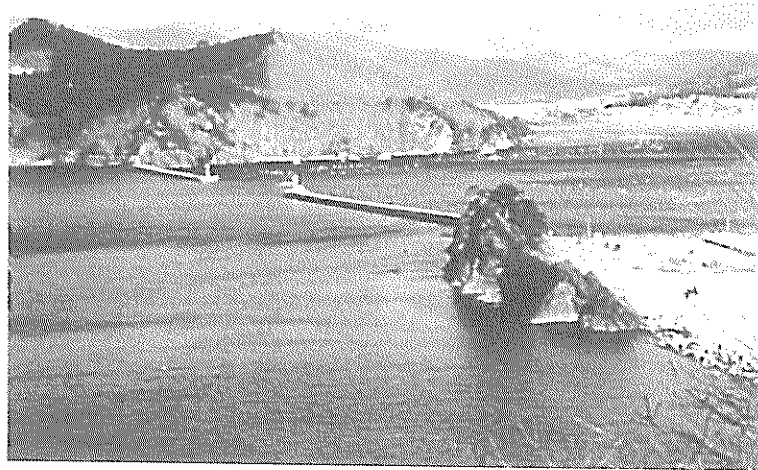


写真-1 大船渡湾口防波堤

とまった段階に実施された研究としては上部、土田、倉田²⁾の研究がある。さらに、動水圧の観測初期の時点で実施された研究としては上部、土田、倉田³⁾の報告がある。動水圧観測は昭和63年で中止したが、それまでにかんりの記録が得られている。そこで、本報告では既往の研究成果を踏まえて総合的な記録の解析を実施し、大水深防波堤の振動性状解析を実施した。

地震観測結果による大水深防波堤の振動性状解析に続いて、防波堤の地震観測結果により地震応答計算手法の妥当性を検証した。ここで用いる計算手法は筆者等が開発した等価線型化手法による有限要素法の水-構造物連成系の地震応答計算手法(BEADIII)である^{4,5)}。この地震応答計算手法は上部、野田、千葉、桧垣⁴⁾と、上部、

守屋⁵⁾により模型振動実験に基づいてその妥当性が模型実験結果との整合性の範囲では確認されている。また、防波堤のマウンド材の動的変形特性等の計算定数は、参考文献2)と上部、長田⁶⁾の研究成果において検討されている。本報告は過去の研究成果を踏まえて、地震応答計算結果がどの程度、実在構造物の観測結果に一致するか検討し、地震応答計算手法の妥当性を検証する。

本報告の内容は概略次の通りである。まず大船渡湾口防波堤とその強震観測、動水圧観測について紹介し、得られた観測記録を示す。次に、観測記録を解析して防波堤の振動性状について検討を行う。さらに、地震応答計算を実施して、計算結果と観測結果を比較し、地震応答計算手法の妥当性を検証する。

2. 大船渡湾口防波堤

大船渡湾口防波堤は図-1に示すように岩手県の大船渡湾の湾口に位置し、防波堤位置における最大水深は-38mである。防波堤の法線方向は南北方向よりやや東寄りである。図-2には防波堤全体の平面図と縦断面図を示す。図-2に示すように防波堤の総延長は約736mである。防波堤ケーソン部の延長は両岸からそれぞれ約291m、約243mであり、この間約202mは航路用として防波堤開口部となっている。

図-2の平面図のC-C位置の防波堤の断面図を図-3に示す。この図に示すようにこの防波堤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。図-3に示す防波堤の断面は航路近くで流速が大きい部分であるので、プレキャストコンクリートの中詰とした高さ6mの鋼板セルが据付けられ補強されている。マウンドの割石は全て防波堤南側の長磯の原石山から採取された。この防波堤のマウンドに用いられた割石の数量は約113万 m^3 となった。コンクリートケーソンの中詰にはマウンドの割石を採取した際に処理されたズリが用いられている。

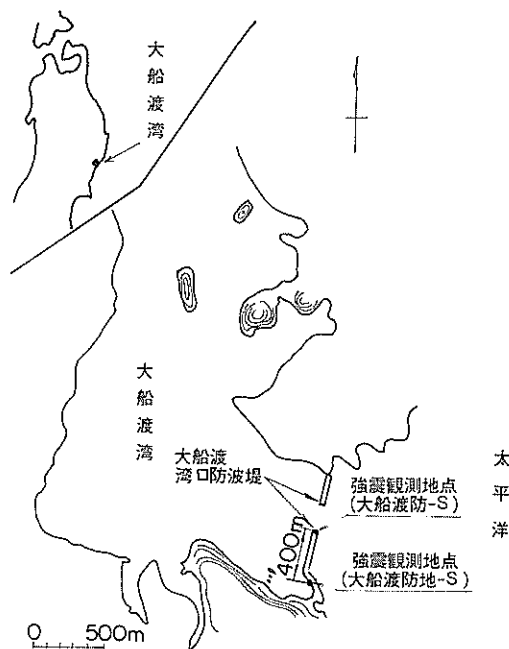


図-1 大船渡湾口防波堤の位置

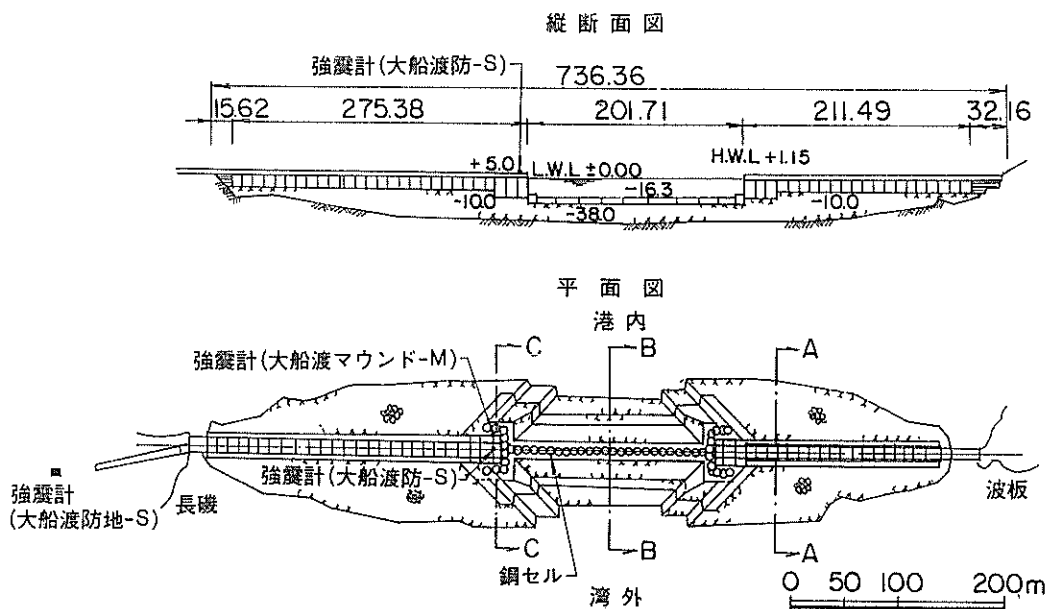


図-2 大船渡湾口防波堤の縦断面図と平面図

3. 強震観測および動水圧観測

3.1 設置位置

運輸省港湾技術研究所では昭和37年より港湾地域における強震観測を実施してきている。この港湾地域強震観測網の一地点として昭和42年から大船渡湾口防波堤で強震観測が実施されてきている。図-1～3に示すように強震計が3か所に設置されている。この港湾地域強震観測とは別に昭和57年から動水圧観測も実施されており、図-3に示す5ヶ所に動水圧計が設置されている。これら強震計、動水圧計の設置地点略称、設置位置、強震計と動水圧計の種類、設置年を表-1に示す。

防波堤のケーソン天端には昭和42年の防波堤完成と同時に強震計が設置された。港湾地域強震観測網ではこの設置位置を大船渡防-Sという略称で呼んでいる⁷⁾。また、昭和43年には基礎岩盤の強震計が南側の防波堤が陸

地と結ばれる地点近くの岩盤上に設置された。この観測地点は大船渡防地-Sと略称されている⁸⁾。写真-2にこの大船渡防地-Sの観測小屋を示す。写真の左に小さく見えるのが防波堤である。大船渡防地-Sは大船渡防-Sから約400m離れて位置している。防波堤マウンド天端の強震計は上記2台の強震計よりかなり遅れて、昭和54年度に設置されている。この位置はケーソン天端の強震計の位置から法線に直角に引いた線上の港内側のマウンド天端である。この観測地点は大船渡マウンド-Mと略して呼ばれている。強震観測地点の略称の最後に示されているアルファベット文字のSおよびMは設置されている強震計の種類を示している。表-1に示すように、SはSMAC-B2強震計を意味し、MはERS強震計を意味している。

動水圧計は、現在建設中の釜石湾口防波堤の耐震性の検討時に、重要な地震時外力と指摘された動水圧特性の

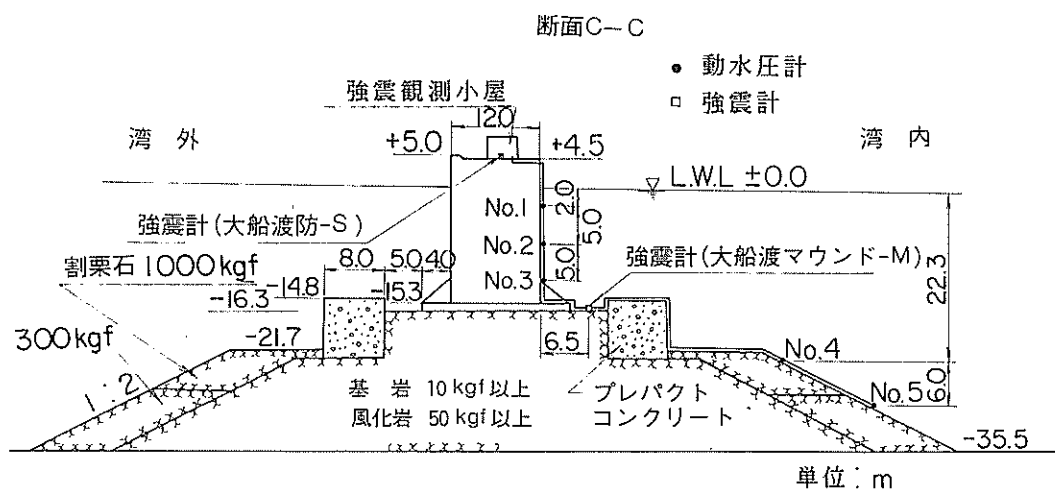


図-3 大船渡湾口防波堤の断面図

表-1 強震観測、動水圧観測の設置概要

観測地点略称	設置位置	強震計/動水圧計	設置年
大船渡防-S	ケーソン天端	SMAC-B2	昭和42年
大船渡マウンド-M	マウンド天端	ERS-C	昭和54年
大船渡防地-S	基礎岩盤	SMAC-B2	昭和43年
大船渡防-1～3	ケーソン側面	ひずみゲージ式圧力変換器	昭和57年
〃 - 4、5	マウンド法面	〃	〃

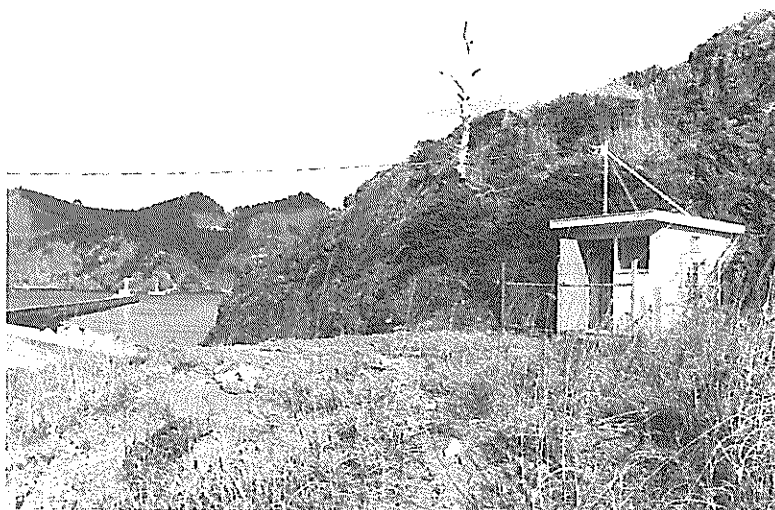


写真 - 2 大船渡防地 - Sの観測小屋

検討のために昭和57年に設置された。しかしながら、昭和63年頃から動水圧計の防水性不良による、欠測が多くなったので平成2年に動水圧観測は中止した。

3.2 強震計および動水圧計

表 - 1 に示したように用いられている強震計は、SMAC-B2 強震計と ERS-C 強震計である。SMAC-B2 強震計はわが国の強震観測に広く用いられている機械式の加速度計である。ERS 強震計は可動線輪型換振器と電磁オシログラフとを組み合わせた加速度計であり、港湾技術研究所構造部耐震構造研究室（現地盤震動研究室）で開発されたものである。ERS 強震計には ERS-B、ERS-C、ERS-D の 3 種類がある。大船渡マウンド - M に用いられているのは ERS-C である。

SMAC-B2 強震計と ERS-C 強震計の性能を表 - 2 に、振動数特性を図 - 4 に示す。図 - 4 に示すように 2 つの強震計の振動特性はかなり異なるので、両強震計で得られた加速度記録を比較する場合注意が必要であり、この点については 4.2 において述べる。SMAC-B2 強震計および ERS-C 強震計はともに地震動の水平動 2 成分と上下動成分を記録する。大船渡湾口防波堤に設置された 3 台の強震計は水平動 1 成分が防波堤の法線に平行に、他の 1 成分が法線と直交するよう設置されている。

昭和54年度に防波堤のマウンドに強震計が設置される以前は、防波堤ケーソン天端と基礎岩盤上の強震計は別々のスターターで起動し、同期してはいなかった。しかし、昭和54年に防波堤のマウンド天端に強震計を設置

する際に、3 つの強震計が 1 つのスターターで起動するように改良された。

動水圧計は受圧面の直径が 74.5mm のひずみゲージ式圧力変換器である。設置水深に応じて、5 台の動水圧計の定格容量をそれぞれ 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.0 kgf/cm² とした。捨石マウンドは滑らかな斜面ではないので、袋詰コンクリートで基礎を作り、その上に受圧面を水平にして動水圧計を設置した。動水圧計の記録は強震計のスターターで起動するようにした。

3.3 記録の処理

対象とした強震記録は港湾地域強震観測の解析システム⁹⁾によりデジタル化を行った。このシステムでは SMAC-B2 強震計および ERS-C 強震計の記録はそれぞれのデジタル化処理方法により、0.1Gal の量子化単位でデジタル化される。また、デジタル化された記録は時間間隔の補正により、0.01 秒間隔の記録に直される。

後に示す本報告の解析対象記録はこのシステムによりデジタル化されている。ただし、1970年9月14日の地震の記録は、現在の強震記録解析システムが整備される以前にデジタル化された。

強震記録のデジタル化に関する各種の誤差には、円弧誤差とデジタル化装置のデジタル化誤差とオペレーターの読取り誤差がある¹⁰⁾。この報告で対象とした SMAC 強震計の記録は円弧誤差以外の誤差の補正は行われていない。SMAC 強震計の記録のうち最大加速度が小さい SMAC 強震計の記録についてはデジタル化装置のデジタル化誤差とオペレータ

表 - 2 強震計の性能

	SMAC-B2強震計	ERS-C強震計
成分数	水平2成分と上下成分	水平2成分と上下成分
固有振動数	7.14Hz(固有周期0.14秒)	3Hz
感 度	記録紙上12.5Gal/mm(0.125m/s ² /mm)	2または10Gal/mm(0.02または0.1m/s ² /mm)
減 衰	臨界減衰	減衰係数=17
減 衰 方 法	空気減衰	電磁制動
最大記録範囲	500Gal(5m/s ²)	500Gal(5m/s ²)
記録速度	10mm/s	40m/s
記録紙	スタイラスペーパー	電磁オシログラフ用紙(198mm(幅)×30(長さ))
起動加速度	5Gal	5Gal
刻時マーク	1秒間のパルスマーク	0.1秒
電 源	乾電池(3V)×4個	蓄電池(自動充電)
記録時間	3分間	—
ス タ ー タ	電気式接点上下成分型地震計	—
駆 動 方 式	手巻ぜんまい式	—
ガルバノメーターの固有振動数	—	—

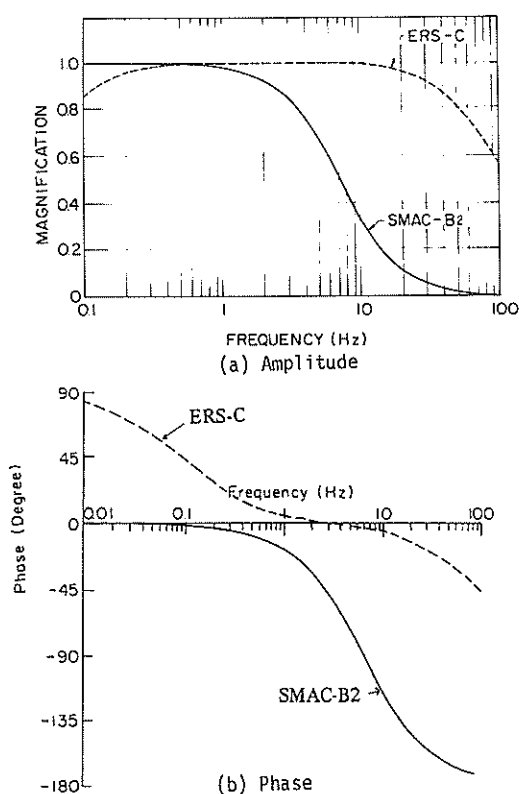


図 - 4 SMAC-B2, ERS-C強震計の振動特性

一の読取り誤差がデジタル化した後の波形に占める割合が大きいと考えられる。したがって、以下で検討する強震記録のうち最大加速度が3Galの記録についてはやや精度に問題があると考えられた。しかし、3Galに対して量子化単位が0.1Galであるのでここでは解析可能であると判断し、以下の検討を実施した。

動水圧記録ではデータレコーダーで記録されたものをA/D変換器によりデジタル化した。A/D変換器は最大から最小のフルスケールで4V、11ビットの分解能があるものを用いた。動水圧計は定格容量がそれぞれ異なるので、量子化単位も動水圧計により異なり約0.1gf/cm²から約0.2gf/cm²の値となった。サンプリングタイムは0.02秒とした。動水圧記録には周期10秒程度の湾内の波が記録されている場合があり、このときはデジタル化後にフィルターによりこの波の成分を除去した。

4. 観測結果

4.1 強震観測結果

平成1年12月までに大船渡湾口防波堤の強震観測で得られた記録の数は、大船渡防-Sで98本、大船渡防地-Sで61本、大船渡マウンド-Mで47本となっている。また、大船渡マウンド-Mで強震観測が実施される以前は、大船渡防-Sと大船渡防地-Sの強震計は同期がとられていなかったため、2つの地点の強震記録は同一本数となっていない。

表-3、4に主要な記録を示す。表-3に示すもののうち、1978年12月6日までの記録は大船渡マウンド-Mが設置される以前の記録である。また、1978年1月9日から以後の記録は大船渡マウンド-Mが設置され3台の強震計の同期がとられた記録である。表-4の記録は動水圧計が設置されてから以降の記録である。表-3、4に示す強震記録の最大加速度はデジタル化されているものについてはその最大値であり、その他の記録については記録の最大値に定規をあてて読み取った値である。表-3、4において最大値が括弧書きされている記録は、スターターにより記録紙の送りが開始される以前に最大値が発生し、その時点の波が重ね書きされた状態となっているものである。地震動の最大加速度が小さく、強震計の起動加速度の値に近い場合にこうした記録が得られることが多い。これらの強震記録は最大値を示す波が正常な波形とは考えられないので他と区別し、5.の強震記録の解析ではこれらの記録を使用しなかった。また、表中の〔 〕内の数値はERS強震計の記録をSMAC-B2強震計の記録に等価なものに変換したあとの最大加速度である。この変換については次節で説明する。

強震計の水平動1成分は防波堤の法線直交方向に一致しており、これを強震記録のE-W成分と称している。この報告では強震記録の水平動2成分のうち地震応答解析で対象とする断面方向である法線直交方向の成分について主に検討している。

表-3、4に示す37地震の強震記録から、各設置位置の記録波形のデジタル化が可能な*で示した14の強震記録を選択し、次章の防波堤の周波数伝達関数の検討に用いた。基礎岩盤の最大加速度がほぼ同じ記録がいくつかある場合には代表的なものを選び、前述した重ね書きされた波形を示す記録は除いた。選択したこれら14の強震記録は3.で述べた港湾地域強震観測の解析システムによりデジタル化を行った。デジタル化した記録を図化したものを図-5(a)~(f)に示す。

4.2 強震計の機種の違いによる補正

SMAC-B2強震計とERS-C強震計の振動数特性は異なっており(図-4)、両者の強震記録を同時に検討する場合には注意が必要であることは3.においてすでに述べた。したがって、この研究でも両強震計の記録を得られたままの状態と同一に議論することは避けた。過去においてSMAC-B2強震計の記録が耐震工学の分野において非常によく用いられてきており、現在でもその傾向が強い。また、SMAC-B2強震計の振動数帯域はERS-C強震計のそれより狭く、SMAC-B2強震計の記録をERS-C強震計の記録に相当するものに補正するのは誤差が多く含まれる可能性が高い。さらに、SMAC-B2強震計の振動数特性が低下する振動数範囲の成分が強震記録に占める割合は補正しても後に示す記録の解析で検討する振動数範囲の成分のそれに比較して小さい恐れがあると判断した。これらのことから、この研究では大船渡マウンド-MのERS-C強震計の記録をSMAC-B2強震計の記録と等価なものに変換し、これとSMAC-B2強震計の記録を用いて解析することとした。この変換方法は港湾地域強震観測年報に示されている手法⁹⁾によった。図-6にはM-437とM-449についてERS-C強震計のデジタル化の補正後の記録波形と、それをSMAC-B2強震計の記録と等価な加速度波形に変換した後の波形を示す。図-5に示した大船渡マウンド-Mの加速度波形はSMAC-B2強震計の記録と等価なものに変換したあとの波形である。

4.3 3観測地点の強震記録相互間の時間差の補正

すでに述べたように大船渡マウンド-Mの地震計の設置以前はケーソン天端と基礎岩盤の強震計は別々に起動していた。また、大船渡マウンド-Mが設置された後は同一スターターで起動するようになったものの、大船渡防地-Sと大船渡防-Sとは約400m離れているので、大船渡防-S地点直下の地震動と大船渡防地-S地点の地震動に時間のずれが生ずる可能性がある。そこで、各観測地点の強震記録について相互相関関数を計算し、これにより、各記録相互の対応が最もよくなるように各記録間の時間的対応を定めた。大船渡湾口防波堤はかなり大きな構造物であるので基礎岩盤の入力波形に対してケーソン天端の応答波形に位相差があることが考えられるが、これについてここでの時間差の補正を行うと、位相差に関する情報に誤差を持ち込むおそれ強いこと、同一スターターで起動していない記録については補正の方法がないことにより、本報告ではこの構造物各位置の位相差を考慮しなかった。相互相関関数より得られた記録間の時間差だけそれぞれの強震記録をずらし、以後の周波数伝達関数の検討に用いることとした。図-5の加速度波

形はこのように上記の時間差をずらした後の波形である。

4.4 動水圧観測結果

昭和57年12月に動水圧計が設置されてから、昭和63年12月までに33地震について記録が得られている。33地震

の記録のうち動水圧の値が小さく、数字化の困難なものを除いた25地震の記録の最大値を表-4に示した。図-7(a)~(h)には対象とした動水圧記録の波形を示す。

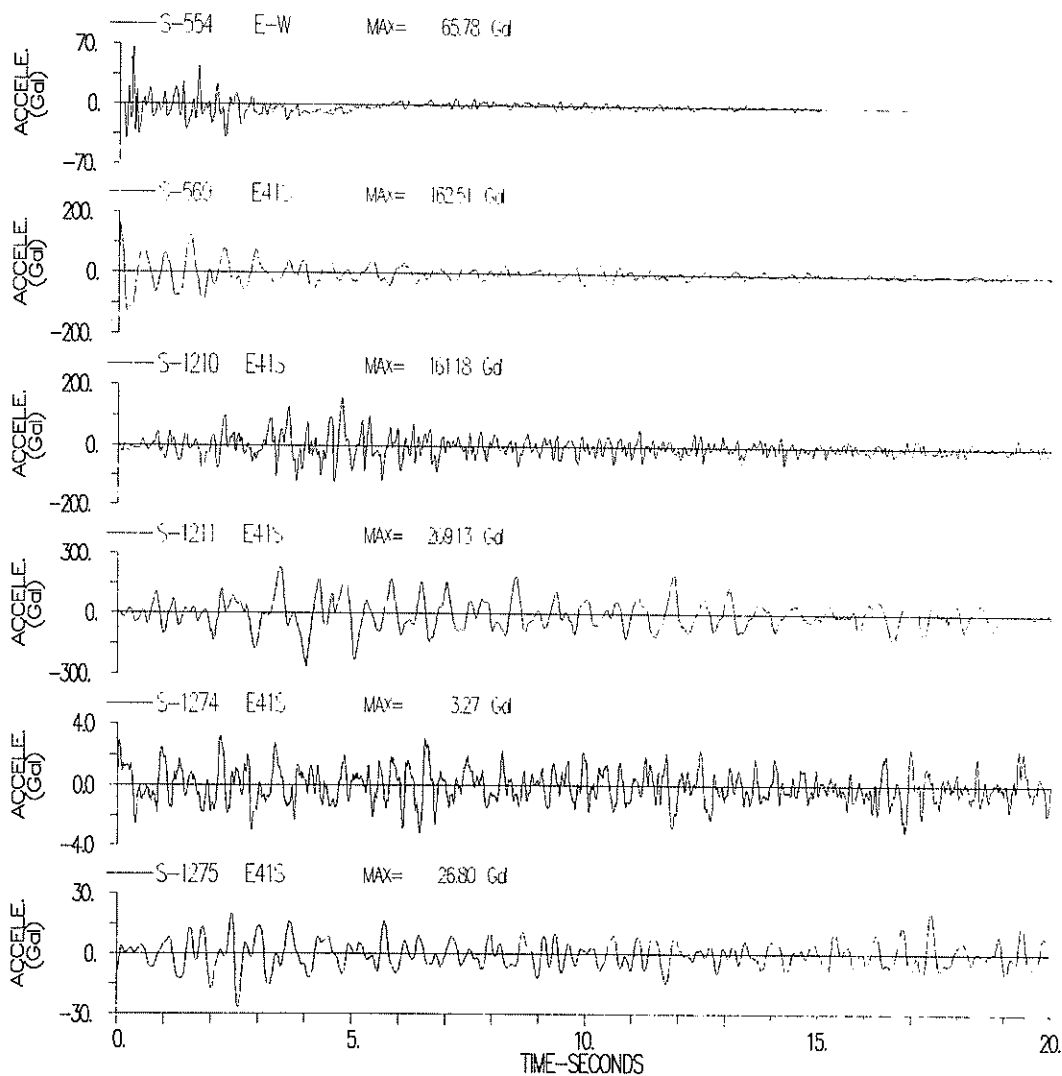


図-5(a) 大船渡湾口防波堤の強震記録(その1)

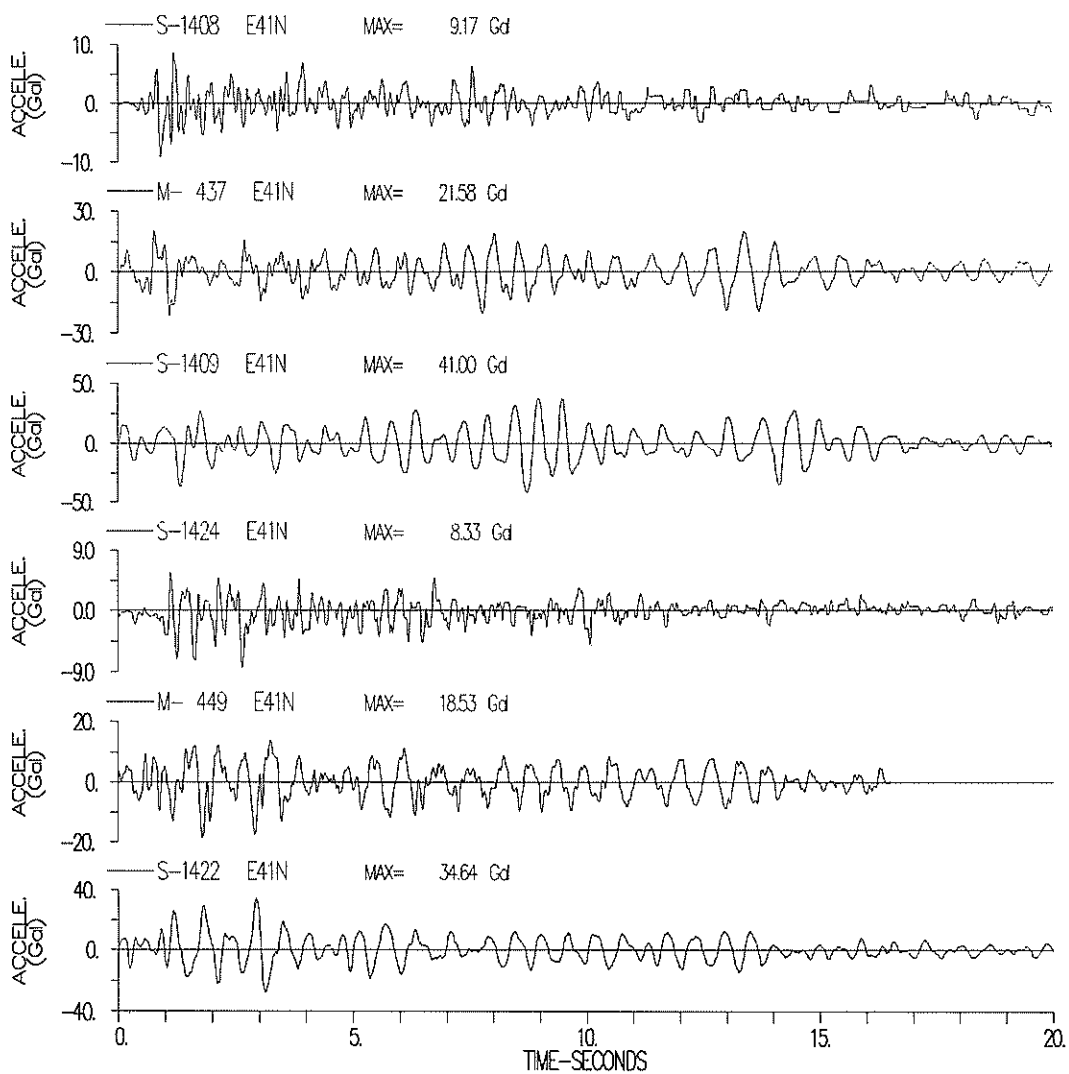


図 - 5 (b) 大船渡湾口防波堤の強震記録 (その2)

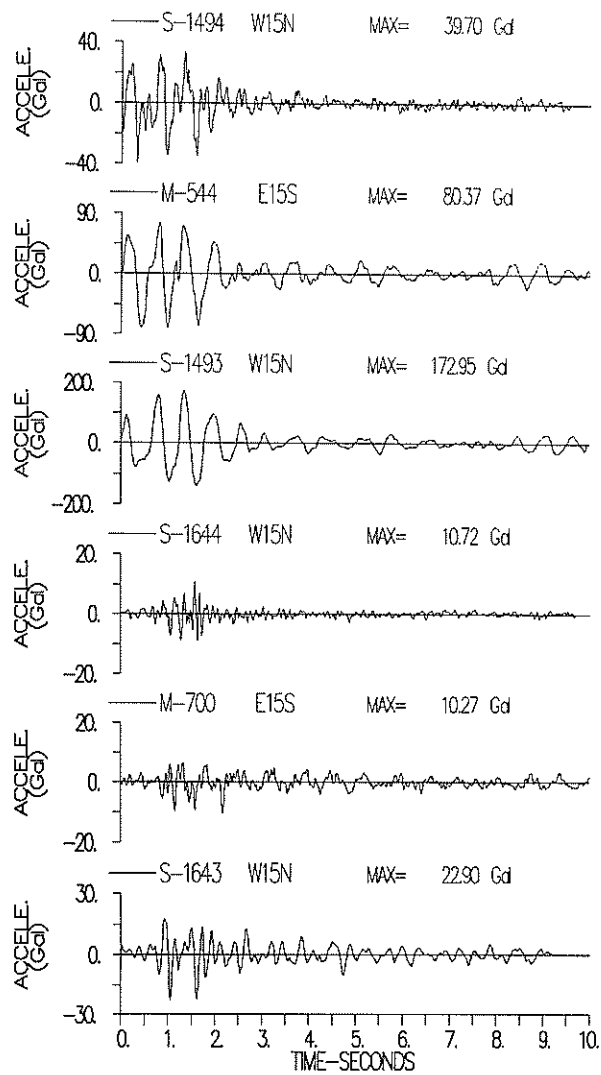


図 - 5 (c) 大船渡湾口防波堤の強震記録 (その 3)

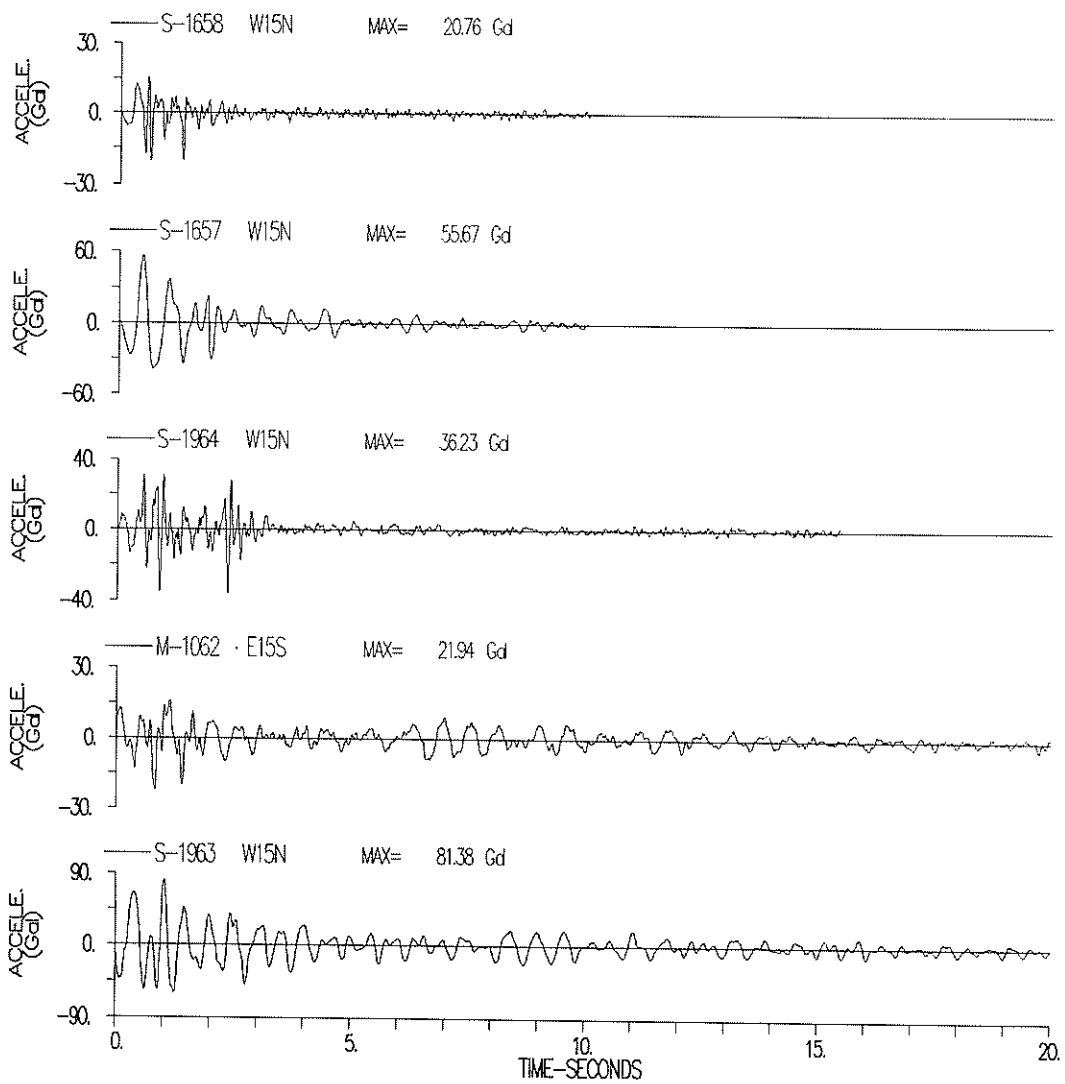


図 - 5 (d) 大船渡湾口防波堤の強震記録 (その 4)

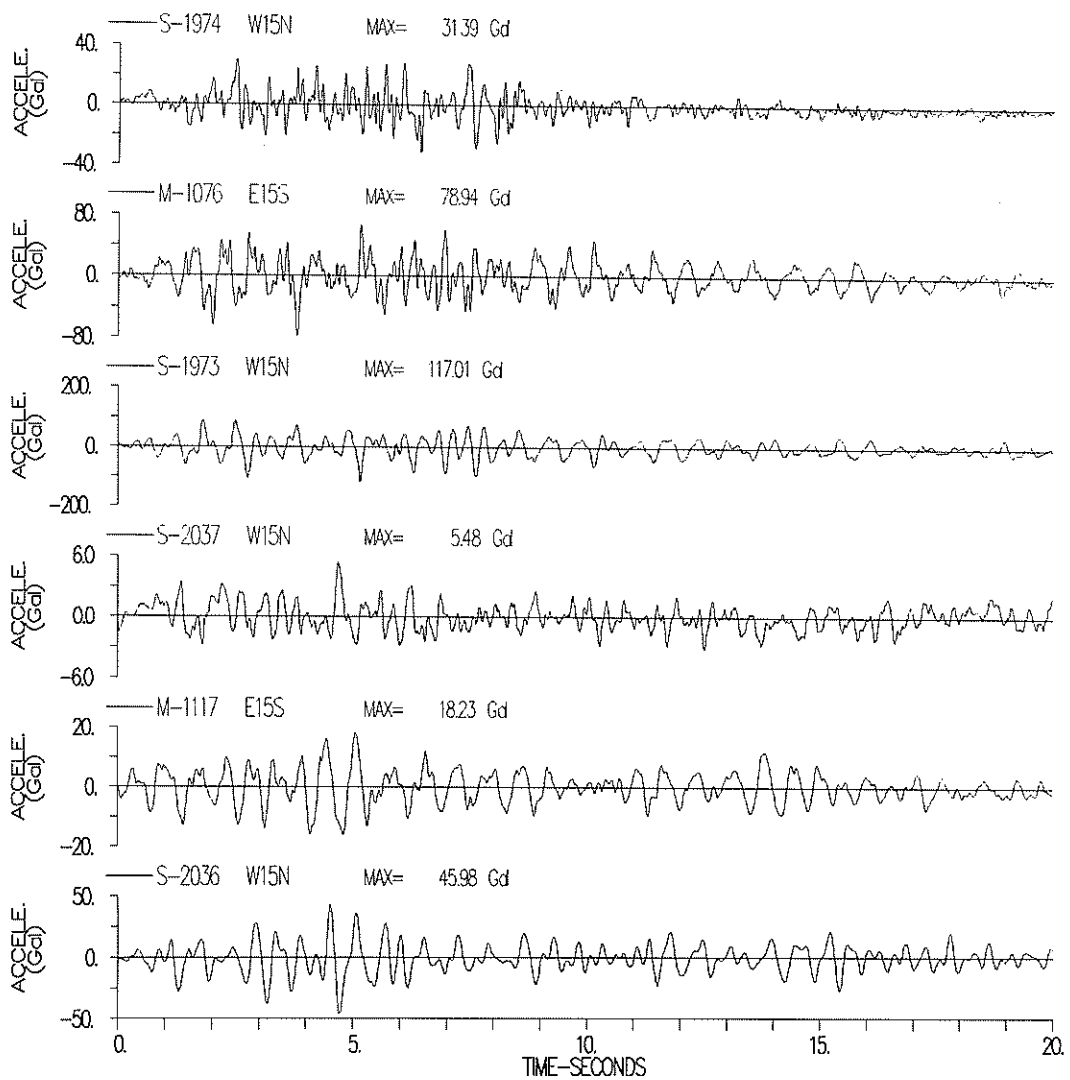


図 - 5 (e) 大船渡湾口防波堤の強震記録 (その 5)

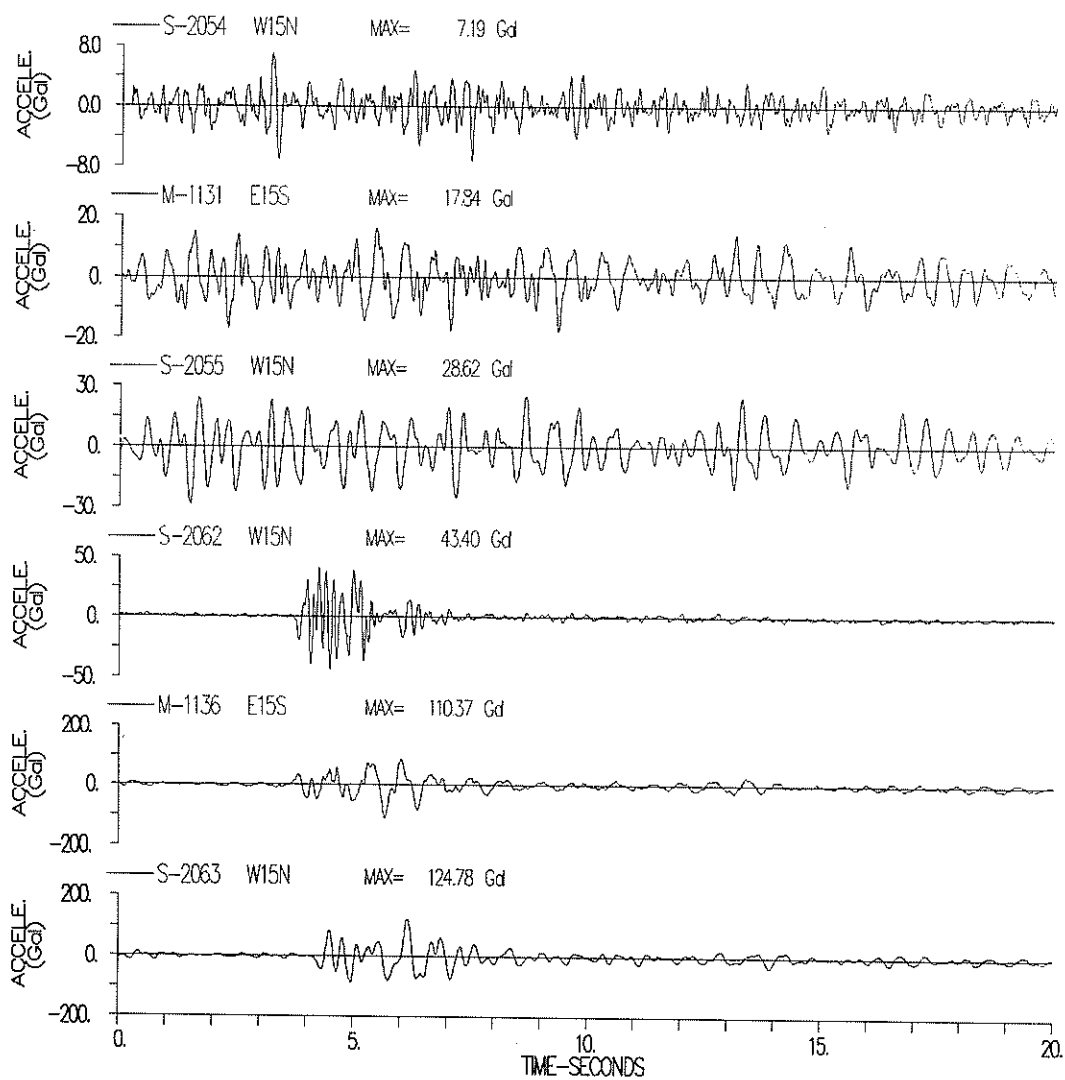


図 - 5 (f) 大船渡湾口防波堤の強震記録 (その6)

表 - 3 大船渡湾口防波堤の強震記録 (昭和45～57年11月)

地震				強震記録						
発震年月日	震源			マグニチュード	記録番号	観測位置	最大加速度 (Gal)			
	震央地名	北緯	東経				深さ (km)	N-S (法線平行)	E-W (法線直交)	U-D
*1970 - 9 - 14	宮城県沖	38° 41'	142° 20'	40	6.2	S - 554 S - 569	岩盤上 ケーソン天端	25 90	66 163	21 29
1977 - 6 - 8	宮城県沖	38° 28'	141° 40'	70	5.8	S - 1022 S - 1021	岩盤上 ケーソン天端	49 139	79 195	38 61
*1978 - 6 - 12	宮城県沖	38° 09'	142° 10'	40	7.4	S - 1210 S - 1211	岩盤上 ケーソン天端	138 350	161 269	60 106
1978 - 6 - 14	宮城県沖	38° 21'	142° 29'	40	6.3	S - 1212 S - 1214	岩盤上 ケーソン天端	4 13	4 39	1 6
1978 - 6 - 21	宮城県沖	38° 15'	142° 00'	50	5.8	S - 1223 S - 1222	岩盤上 ケーソン天端	10 (13)	4 (16)	4 (10)
*1978 - 12 - 6	国後島沖	44° 44'	146° 58'	100	7.7	S - 1274 S - 1275	岩盤上 ケーソン天端	5 13	3 27	3 5
*1981 - 1 - 19 (3 : 17)	三陸沖	38° 36'	142° 58'	0	7.0	S - 1408 M - 437 S - 1409	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	9 24 (18) 15	9 37 (22) 41	5 25 (14) 11
1981 - 1 - 19 (10 : 14)	三陸沖	38° 36'	143° 05'	0	6.0	S - 1412 M - 438 S - 1411	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	1 3 3	1 7 10	1 3 1
*1981 - 1 - 23	日高地方 西部	42° 25'	142° 12'	130	7.1	S - 1424 M - 449 S - 1422	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	8 28 (18) 20	8 25 (19) 35	4 21 (15) 10
1981 - 12 - 2	青森県 東方	40° 53'	142° 36'	60	6.2	S - 1456 M - 501 S - 1455	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	4 16 (13)	4 13 (25)	1 16 4
*1982 - 6 - 1	宮城県沖	38° 41'	143° 20'	40	6.2	S - 1494 M - 544 S - 1493	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	21 68 (36) 42	40 100 (80) 173	9 42 (24) 32
1982 - 7 - 23	福島県沖	36° 11'	141° 57'	30	7.0	S - 1524 M - 570 S - 1523	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	4 8 5	3 10 18	4 6 3

* 解析した強震記録

記録番号のS: SMAC-B2強震計の記録

// M: ERS-C強震計の記録

() 内の最大加速度はSMAC-B2強震計の
特性と等しくした場合の値

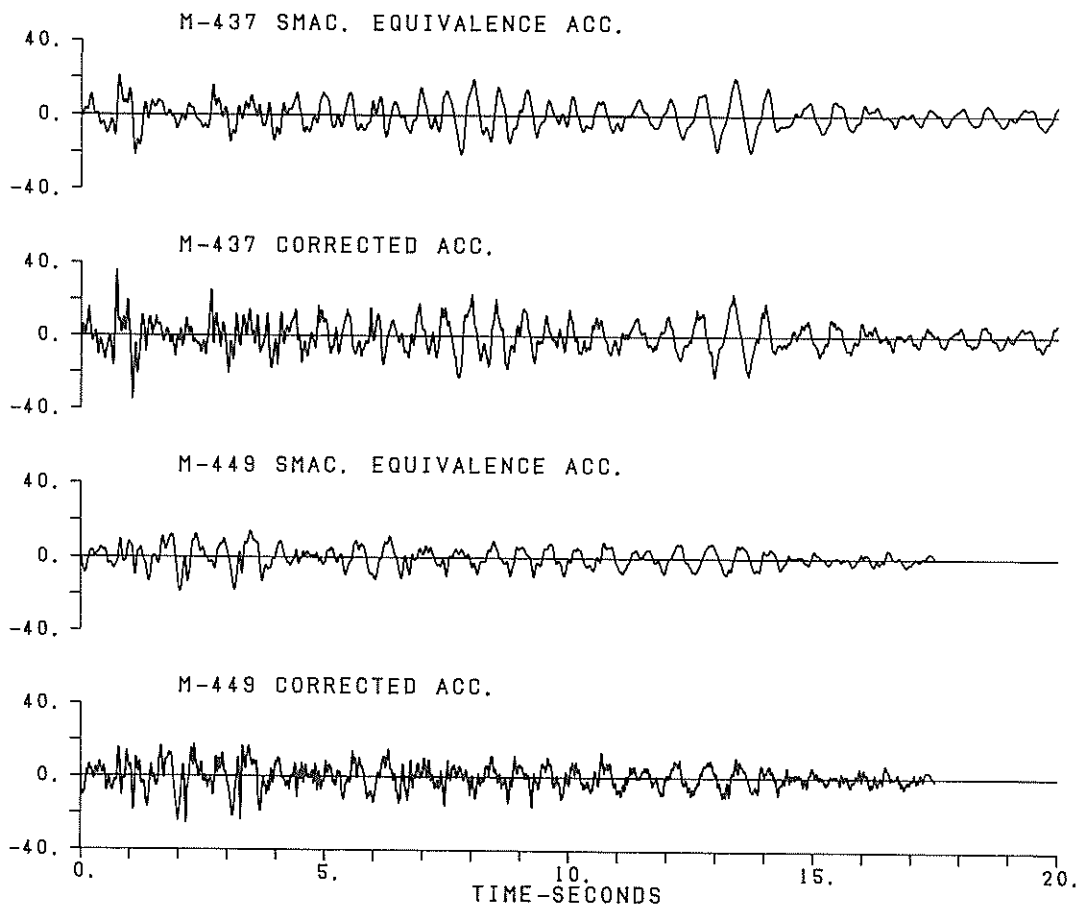


図 - 6 SMAC-B2強震計の記録と等価な加速度波形と，補正後の加速度波形

表 - 4 (a) 大船渡湾口防波堤の強震記録と動水圧記録 (No.1、昭和57年12月～58年)

地 震 源				強 震 記 録				動水圧記録					
発 震 年 月 日	震央地名	北緯	東経	深さ (km)	マグニ チュード	記録番号	観測位置	最大加速度 (Gal)			No	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)
								N - S (法線平行)	E - W (法線直交)	U - D			
1982 - 12 - 27	宮城県沖	38° 17'	141° 53'	50	4.9	S - 1538 M - 594 S - 1537	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	3	3	1	1	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	4 5 9 21 20
								8	8	9			
								13	(6)	4			
1983 - 5 - 26	日本海 中 部	40° 21'	139° 05'	14	7.7	S - 1584 M - 637 S - 1583	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	6	6	4	2	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	12 18 21 25 24
								12	16	10			
								25	31	5			
1983 - 7 - 2	茨城県沖	36° 54'	141° 12'	54	5.8	S - 1607 M - 658 S - 1606	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	3	3	1	3	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	6 8 9 10 10
								12	9	9			
								(8)	(9)	(13)			
1983 - 9 - 6	宮城県沖	38° 10'	142° 05'	39	5.3	S - 1636 M - 686 S - 1635	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	6	2	4	5	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	4 6 7 12 13
								6	7	8			
								6	14	6			
*1983 - 10 - 14	宮城県沖	38° 41'	142° 03'	63	5.3	S - 1644 M - 700 S - 1643	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	16	10	5	7	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	7 12 16 19 27
								36 (21)	22 (10)	19 (11)			
								16	26	6			
*1983 - 11 - 11	宮城県沖	38° 53'	142° 06'	47	5.4	S - 1658 - S - 1657	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	12	21	5	8	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	19 26 27 26 26
								-	-	-			
								17	56	10			

*解析した強震記録

記録番号のS : SMAC-B2強震計の記録

M : ERS-C強震計の記録

() 内の最大加速度はSMAC-B2強震計の特性と等しくした場合の値

表-4 (b) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (No2、昭和60年2月~61年6月)

地 震 源				強 震 記 録				動水圧記録					
発 震 年 月 日	震央地名	北 緯	東 経	深さ (km)	マ グ ニ チ ュード	記録番号	観測位置	最大加速度 (Gal)			Na	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)
								N - S (法線平行)	E - W (法線直交)	U - D			
1985 - 2 - 3	金華山沖	38° 56'	142° 10'	56	4.7	S - 1817 M - 879 S - 1818	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	8	9	3	9	- 2	6
								10	12	9		- 7	—
								9	24	3		- 22.3	12
1985 - 3 - 1	岩手県	39° 20'	142° 03'	51	4.8	S - 1821 M - 881 S - 1820	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	5	3	1	10	- 2	4
								8	5	5		- 12	—
								9	10	1		- 22.3	8
1985 - 6 - 26	宮城県	38° 46'	141° 08'	20	4.3	S - 1854 M - 922 S - 1853	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	2	2	1	12	- 2	3
								5	5	5		- 12	4
								6	8	1		- 22.3	4
1985 - 7 - 19	岩手県	39° 39'	142° 05'	35	4.5	S - 1860 M - 923 S - 1859	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	1	3	—	13	- 2	2
								3	3	3		- 12	4
								1	6	—		- 22.3	4
1985 - 7 - 29	福島県	37° 19'	140° 41'	90	5.5	S - 1870 M - 939 S - 1869	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	3	1	1	14	- 2	3
								—	—	2		- 12	4
								5	15	2		- 22.3	3
1985 - 8 - 12	福島県	37° 42'	141° 54'	52	6.4	S - 1876 M - 945 S - 1875	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	9	10	5	15	- 2	8
								—	—	—		- 12	14
								32	51	16		- 22.3	13
1985 - 8 - 29	岩手県	40° 10'	142° 44'	29	5.3	S - 1878 M - 948 S - 1877	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	1	1	1	16	- 2	3
								3	5	3		- 12	4
								2	10	1		- 22.3	4
*1986 - 3 - 2	宮城県	38° 28'	142° 19'	33	6.0	S - 1917 M - 1010 S - 1916	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	6	11	4	17	- 2	17
								36 (19)	28 (20)	26 (13)		- 12	17
								11	39	4		- 22.3	21
1986 - 6 - 24	房総半島 沖	34° 49'	140° 43'	73	6.5	S - 1940 M - 1026 S - 1939	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	2	2	1	18	- 2	5
								7	8	5		- 12	2
								4	11	2		- 22.3	9

* 解析した強震記録

記録番号のS: SMAC-B2強震計の記録

" M: ERS-C強震計の記録

() 内の最大加速度はSMAC-B2強震計の特性と等しくした場合の値

表 - 4 (c) 大船渡湾口防波堤の強震記録と動水圧記録 (No.3、昭和61年12月～62年5月)

発 震 年 月 日	震 源			マグニチュード	記録番号			最大加速度 (Gal)			動水圧記録		
	震央地名	北緯	東経	深さ (km)	観測位置	N - S (法線平行)	E - W (法線直交)	U - D	No	観測位置 (m)	最大動水圧 (gf/cm ²)		
*1986 - 12 - 1	金華山沖	38° 52'	142° 08'	51	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	36 54 {24} 21	36 35 {22} 81	13 40 {26} 14	19	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	19 17 15 28 23		
*1987 - 1 - 9	岩手県	39° 50'	141° 47'	72	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	41 95 {71} 139	41 118 {65} 117	31 54 {35} 36	20	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	21 28 31 75 90		
1987 - 1 - 14	日高地方	42° 32'	142° 56'	119	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	4 15 13	4 11 20	3 12 3	21	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	4 5 5 10 12		
1987 - 1 - 17	岩手県北	39° 50'	141° 49'	72	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	3 14 6	2 9 13	1 8 1	22	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	2 4 4 11 15		
*1987 - 1 - 21	宮城県沖 東方	38° 36'	142° 08'	50	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	10 43 19	9 25 34	3 16 7	23	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	7 6 8 10 11		
*1987 - 4 - 7	福島県沖 東方	37° 18'	141° 52'	44	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	5 26 {22} 22	5 21 {18} 46	3 14 {10} 7	24	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	10 10 12 — —		
*1987 - 4 - 23	福島県沖 東方	37° 05'	141° 38'	47	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	6 24 {15} 16	7 24 {19} 29	4 16 {10} 5	25	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	6 7 9 — —		
*1987 - 5 - 12	金華山	38° 52'	142° 08'	50	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	45 57 {36} 34	44 130 {110} 125	13 39 {28} 14	26	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	21 27 23 — —		
1987 - 5 - 13	宮城県沖 東方	38° 50'	142° 11'	48	岩盤上 マウンド天端 ケーソン天端	2 8 7	3 5 16	1 6 3	27	- 2 - 7 - 12 - 22.3 - 28.3	2 4 5 — 8		

* 解析した強震記録

記録番号の S : SMAC - B2強震計の記録

M : ERS - C強震計の記録

{ } 内の最大加速度はSMAC - B2強震計の特性と等しくした場合の値

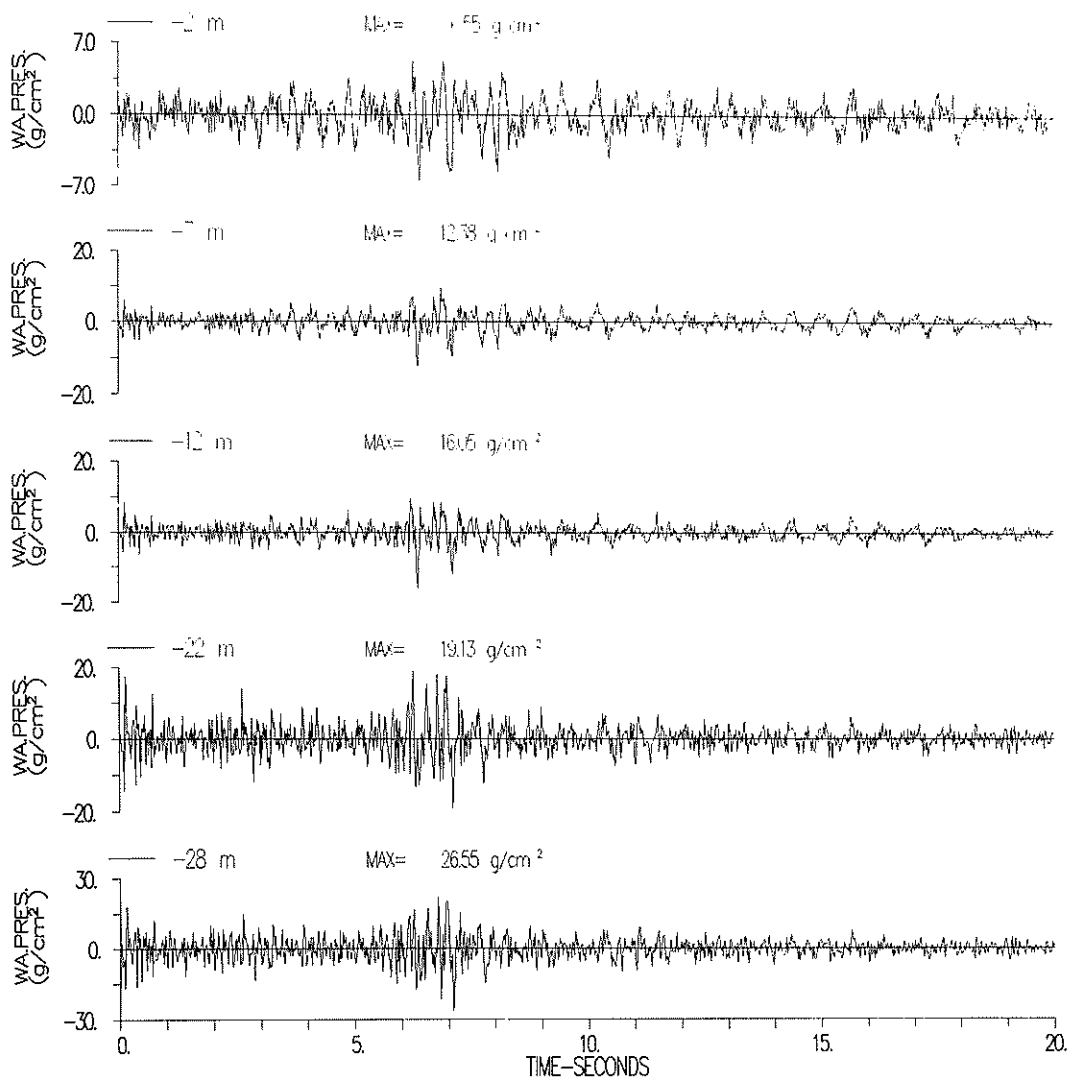


図 - 7 (a) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その1, No.7)

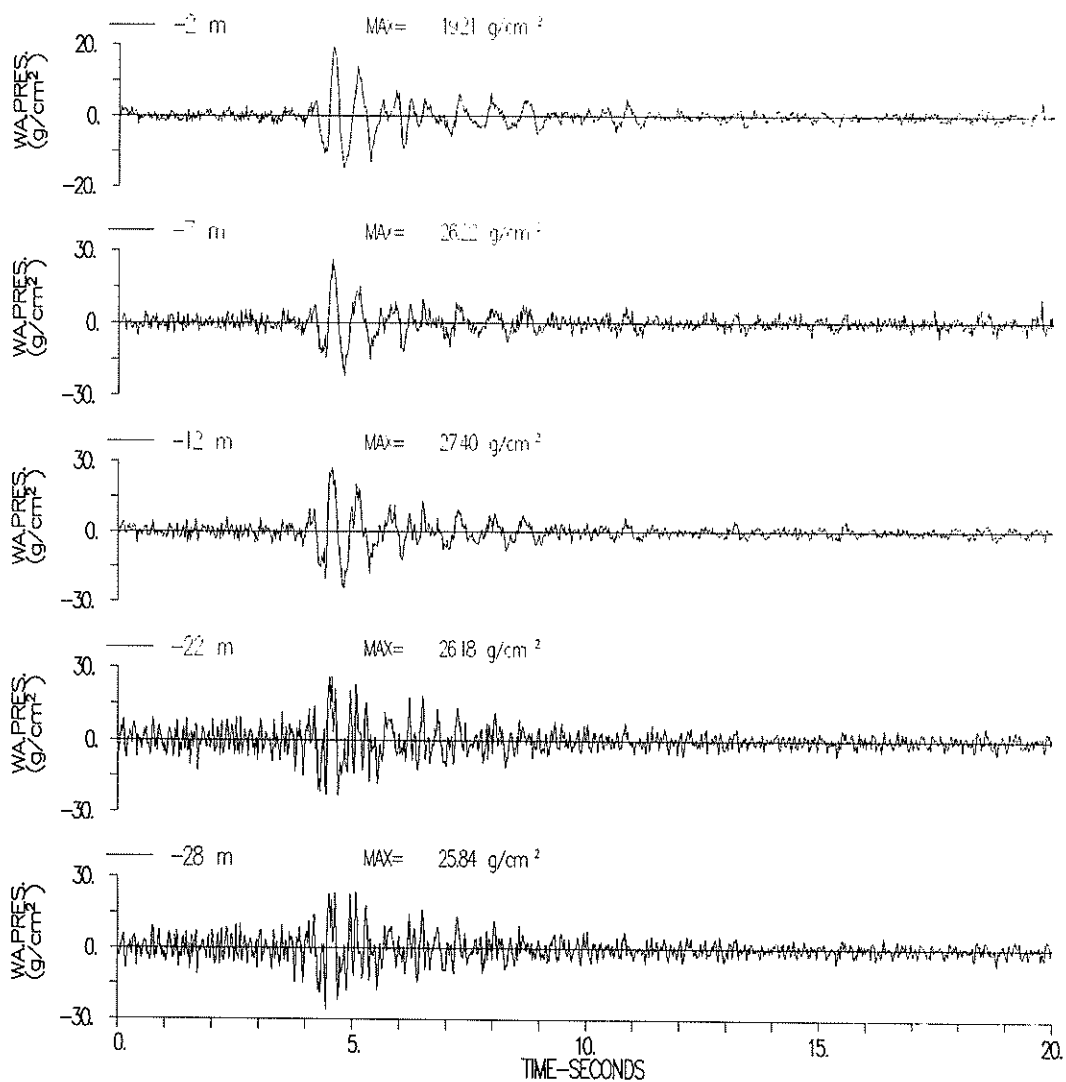


図 - 7 (b) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その2, No. 8)

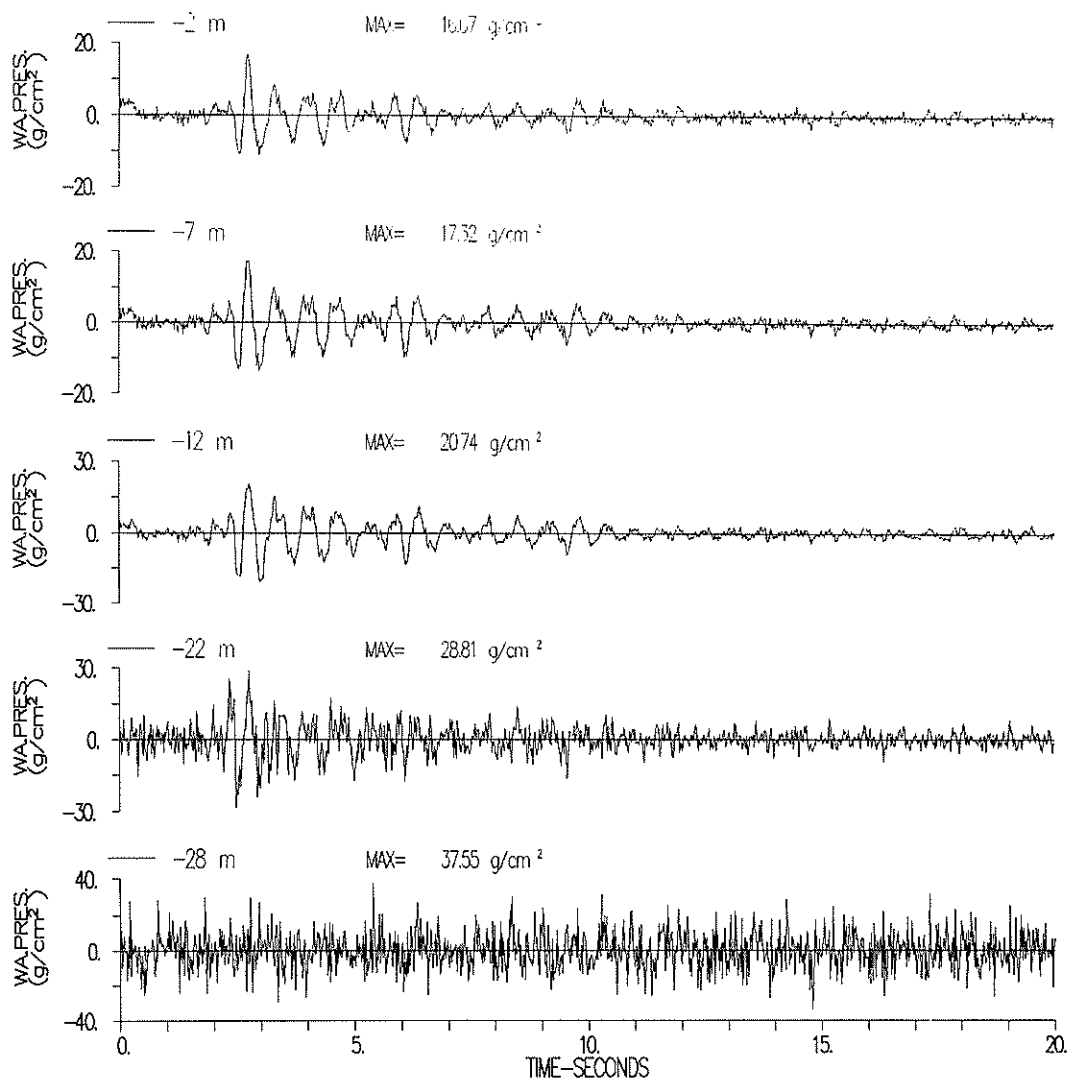


図 - 7 (c) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その3, No.17)

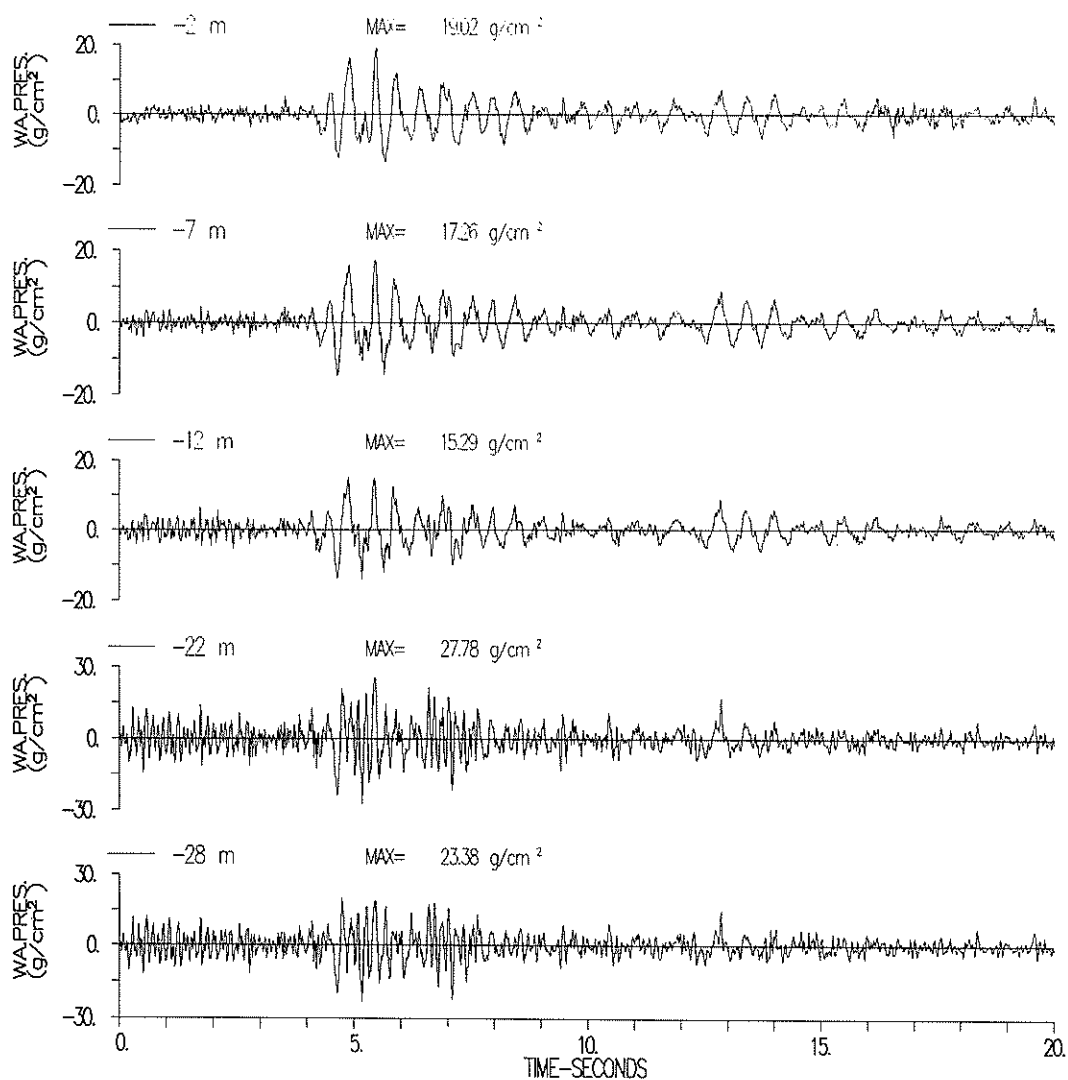


図 - 7 (d) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その4, No.19)

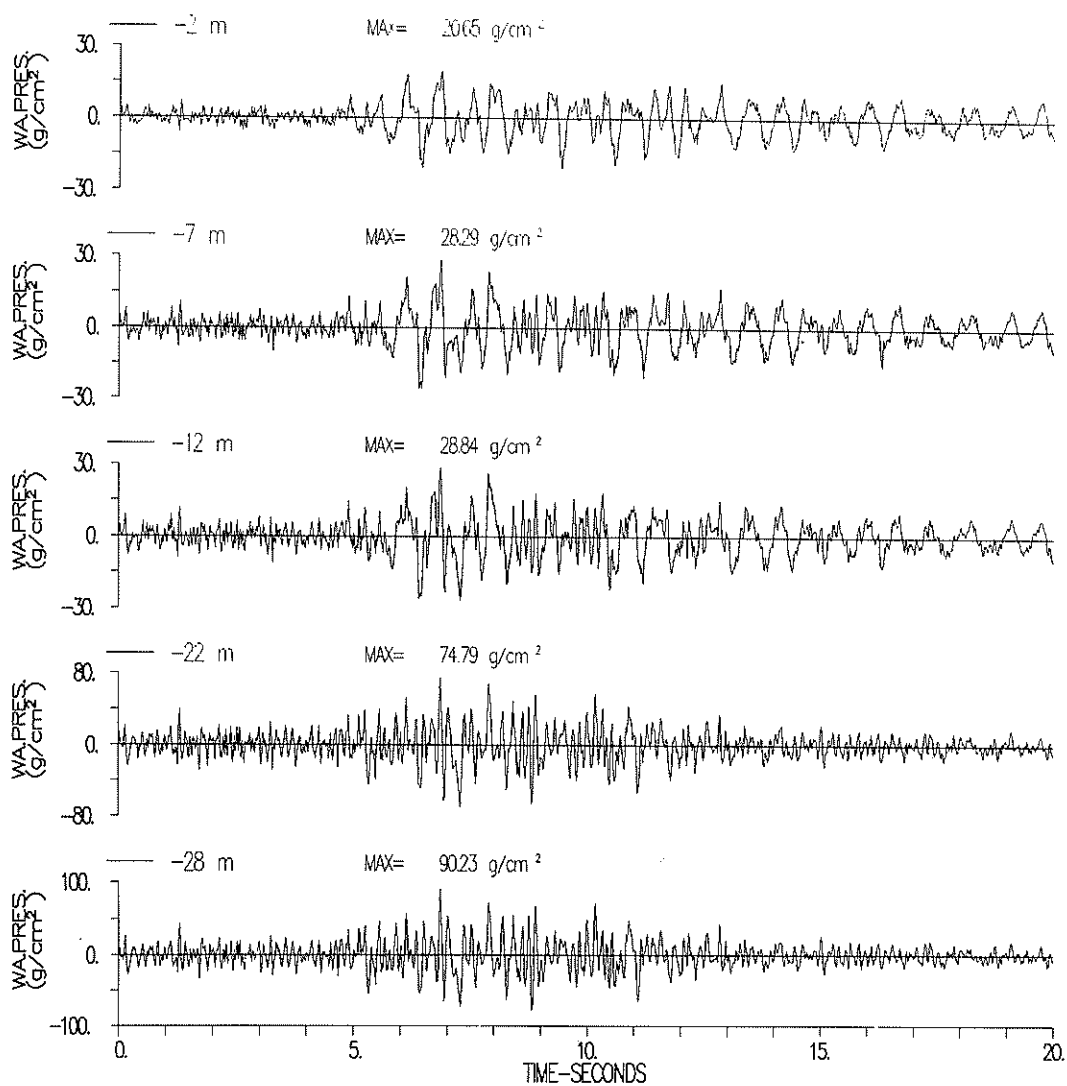


図 - 7 (e) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その5, No.20)

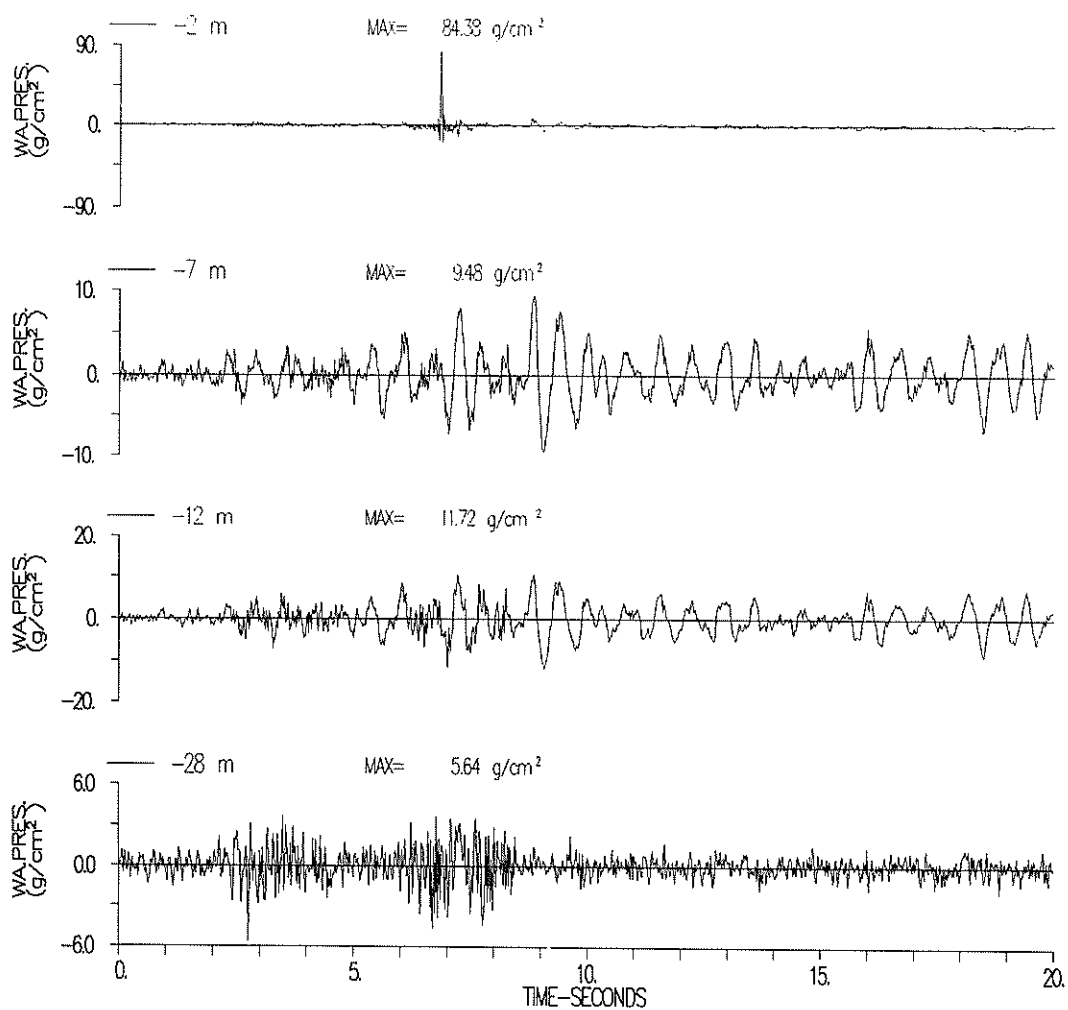


図 - 7 (f) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その6, No.24)

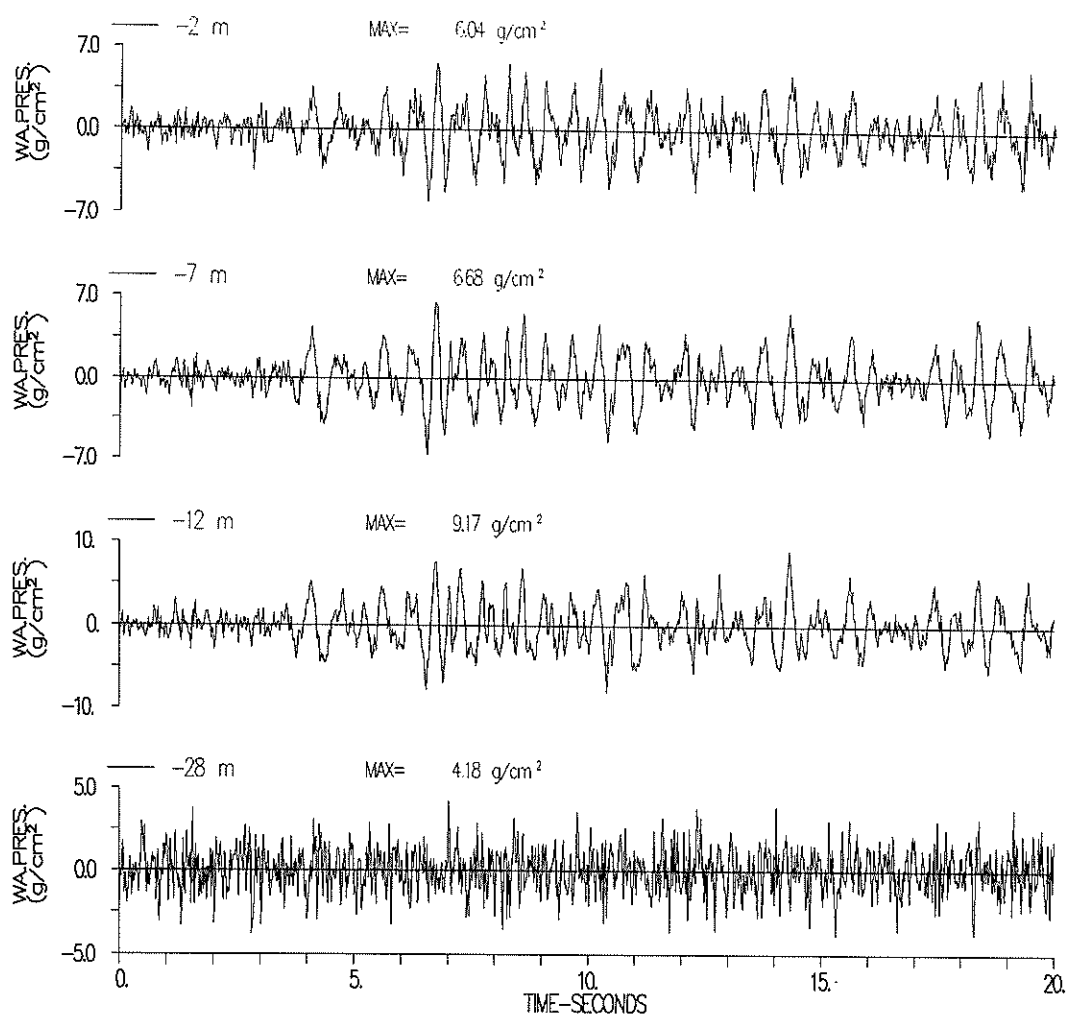


図 - 7 (g) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その7, No.25)

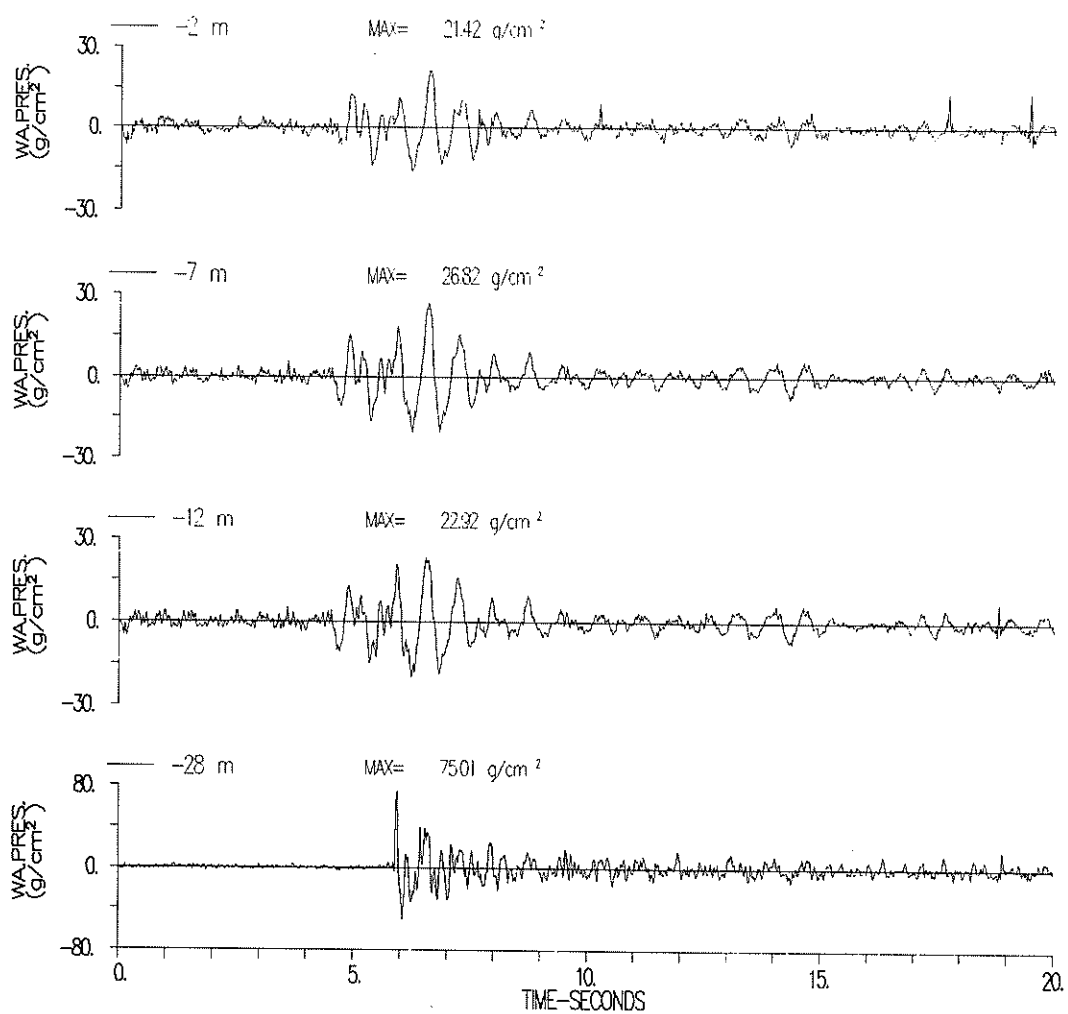


図 - 7 (h) 大船渡湾口防波堤の動水圧記録 (その8, No.26)

5. 観測記録の解析

5.1 防波堤の加速度応答

防波堤のケーソン天端およびマウンド天端の強震記録の最大加速度は、表-3, 4に示したように基礎岩盤の強震記録の最大加速度より大きい。また、図-5に示したように加速度波形も基礎岩盤と防波堤の各位置とは異なった様子を示している。基礎岩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みるため、ケーソン天端およびマウンド天端の強震記録の最大加速度を

基礎岩盤の強震記録の最大加速度で除した値を最大加速度応答比として求め、基礎岩盤の最大加速度に対して示したのが図-8, 9である。図-8は防波堤法線に直角方向の水平成分の最大加速度応答比、図-9は防波堤法線に平行方向の水平成分の最大加速度応答比である。マウンド天端の最大加速度応答比はSMAC-B2強震計の記録に等価なものに変換した後の加速度について求めた結果である。図-8, 9には記録のスタート時点でいくつかの波が重ね書きされている強震記録の最大加速度応答比は示していない。図-8, 9をみると記録の最大加速度応答

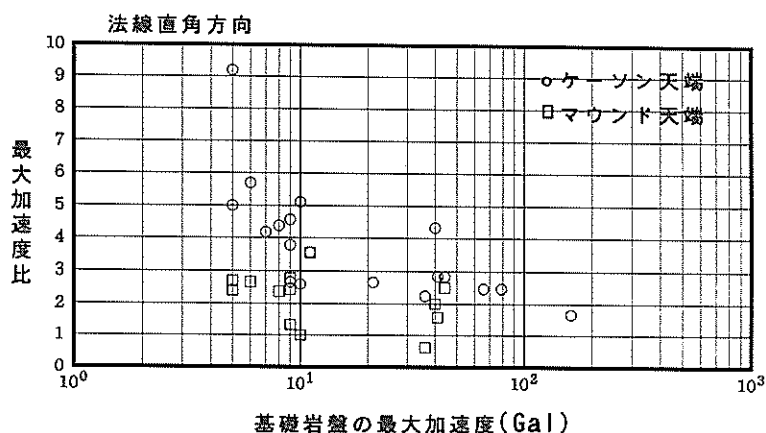


図-8 防波堤法線直角方向の最大加速度比

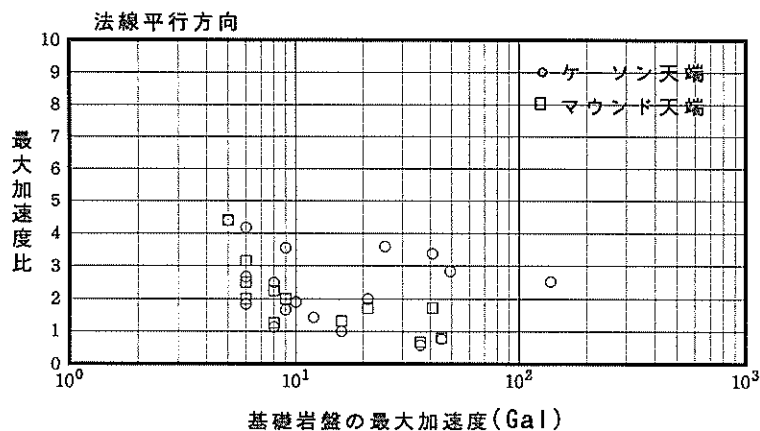


図-9 防波堤法線方向の最大加速度比

比はほぼ1以上となっており、防波堤が明瞭な増幅応答を示しているのがわかる。

図-8に示すように、法線直角方向では明かに最大加速度応答比は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少している。これは、防波堤のマウンド材の非線形特性のためであると考えられる。一方、図-9に示すように法線平行方向では、基礎岩盤の最大加速度の増加に伴う最大加速度応答比の減少の程度は法線直角方向ほど明瞭ではない。これは、防波堤の法線方向の一端が基礎岩盤と接していること、防波堤の法線方向は防波堤のケーソンが線状に連なる方向である等の影響を受けているためだと推察されるが、これに関する詳しい検討は今後の検討課題とする。

5.2 防波堤の周波数伝達関数

(1) パワースペクトルと周波数伝達関数の計算

ここでは、各強震記録のパワースペクトルと防波堤の周波数伝達関数を検討する。周波数伝達関数は基礎岩盤の強震記録を入力とし、防波堤のケーソン天端またはマウンド天端の強震記録を出力として求めた。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。

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

$$A(f) = \frac{Z_{yx}(f)}{P_x(f)} \quad (1)$$

$$Z_{yx}(f) = \sqrt{P^2_{yx}(f) + Q^2_{yx}(f)} \quad (2)$$

$$r(f) = \frac{Z_{yx}(f)}{\sqrt{P_x(f) \cdot P_y(f)}} \quad (3)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left\{ \frac{Q_{yx}(f)}{P_{yx}(f)} \right\} \quad (4)$$

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

$r(f)$: 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

$P_y(f)$: 出力 $Y(t)$ 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 $r(f)$ とは次式で示す関係がある。

$$r^2(f) = |A^2(f)| \frac{P_x(f)}{P_y(f)} \quad (5)$$

したがって、 $r(f)$ が1に近いほど、入出力の相関性が強いことを示す。この報告で用いた周波数伝達関数を求めるプログラムは桑島、永井¹¹⁾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-5に示した強震記録の最初から10秒間について実施した。3.3で示したように強震記録のデジタルデータの時間きざみは0.01秒であるので、データ数は1000個となる。スペクトルの移動平均幅は約0.4Hzとして、スペクトルの出力は約0.2Hzきざみで20Hzまでとした。図-10にはパワースペクトルと、周波数伝達関数の計算結果を示す。

表-5にパワースペクトルの卓越振動数、周波数伝達関数のピークを示す振動数を示す。パワースペクトルの卓越振動数はパワースペクトルのピーク値の大小の順に示してある。一方、周波数伝達関数の方はピークを示す振動数の値の小さい順に示してある。この周波数伝達関数のピークを示す振動数は防波堤の固有振動数と考えられるものである。

(2) 岩盤上の強震記録のパワースペクトル

最大加速度がほぼ同じ岩盤上の強震記録を三つのグループに分け、それぞれのグループ内でパワースペクトルの比較を行った。図-11は最大加速度が10Gal以下の岩盤上の強震記録のパワースペクトルで、図-12は最大加速度がほぼ10Galのもの、図-13は最大加速度が30~40Galのものである。

図-11に示された二つの強震記録の震源位置およびマグニチュードはかなり異なる(表-3, 4参照)ものの、パワースペクトルのピーク値およびその形状ともかなり似たものとなっている。図-12に示されたS-1408とS-1428は、震源位置は異なっているが、マグニチュードはほぼ等しい。両者の卓越振動数はややずれているが、パワースペクトルの形は良く似ている。これら二つの強震記録よりマグニチュードの小さいS-1644とS-2054のパワースペクトルは前述の二つの強震記録のそれと異なっている。

次に、表-4に示すように図-13の上半分に示すS-1964とS-2062の強震記録は同じ震源位置であり、マグニチュードもほぼ等しい。この二つの強震記録のパワースペクトルは卓越振動数はややずれているが、パワースペクトルの形は似ている。一方、図-13の下半分の二つ

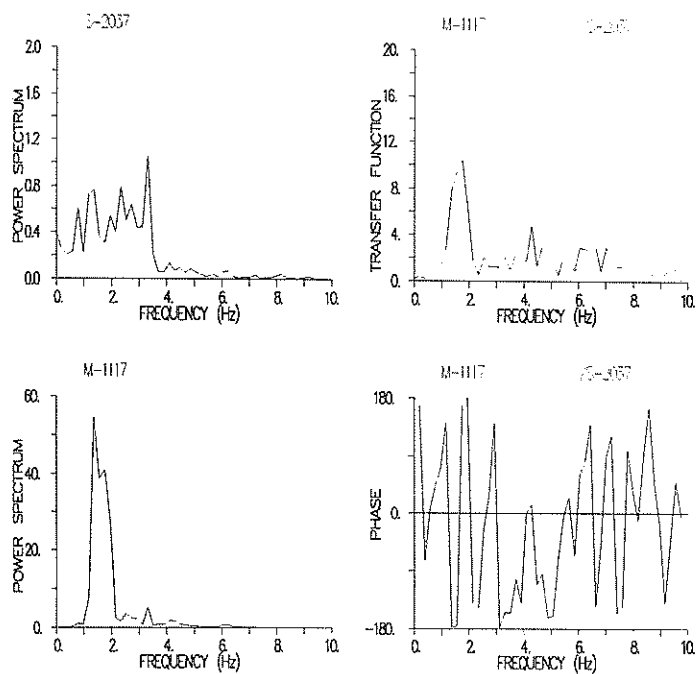


図 - 10(a) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その1, M - 1117/S - 2037)

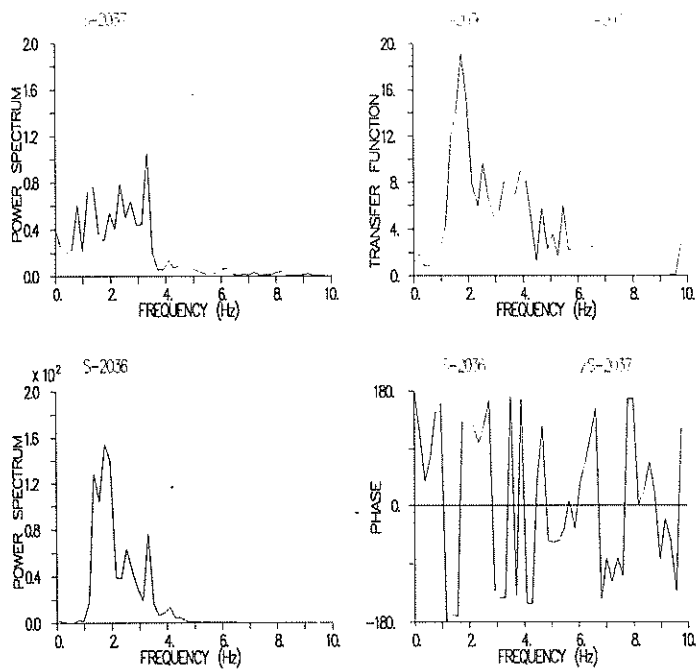


図 - 10(b) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その2, S - 2036/S - 2037)

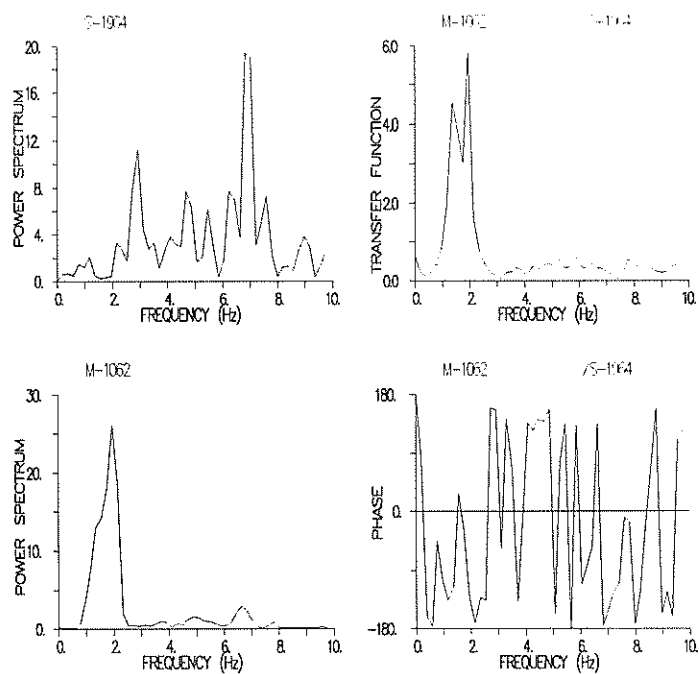


図-10(c) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その3, M-1062/S-1964)

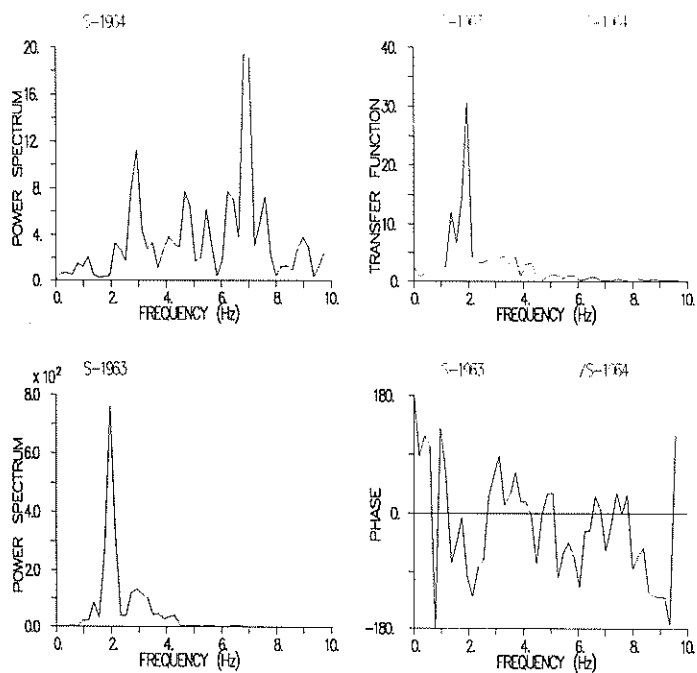


図-10(d) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その4, S-1963/S-1964)

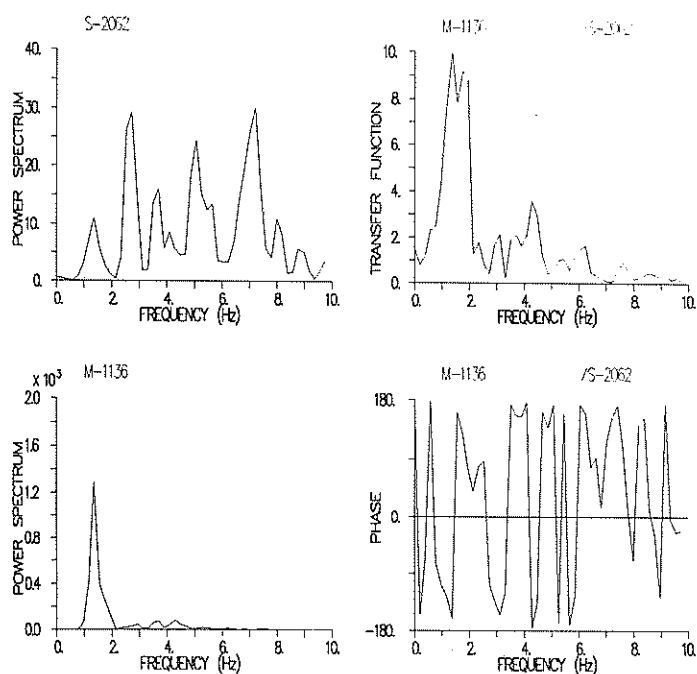


図 - 10(e) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その5, M - 1136/S - 2062)

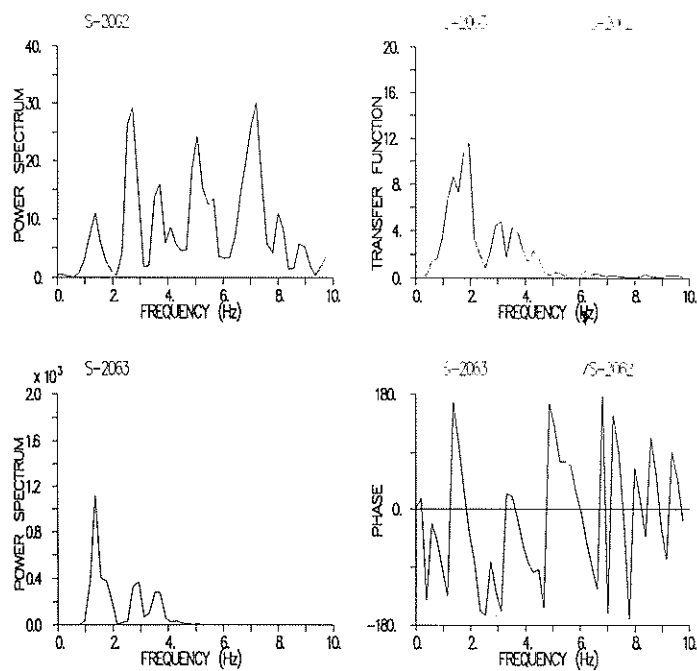


図 - 10(f) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その6, S - 2063/S - 2062)

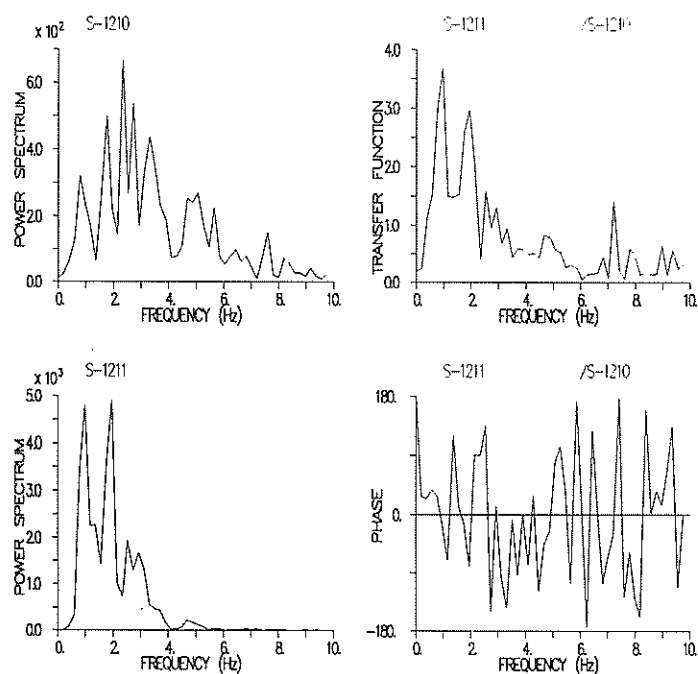


図 - 10 (g) パワースペクトルと周波数伝達関数 (その7, S - 1211/S - 1210)

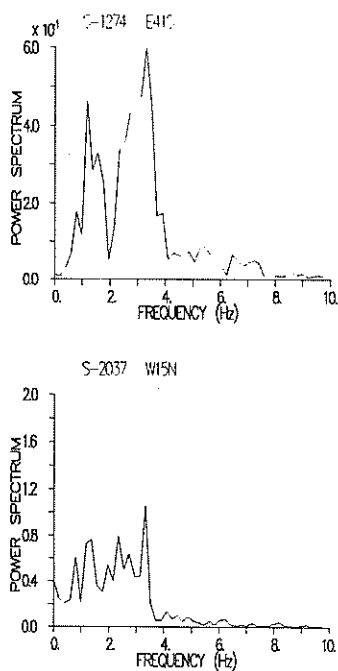


図 - 11 岩盤上の最大加速度が10Gal以下の2つの記録のパワースペクトルの比較

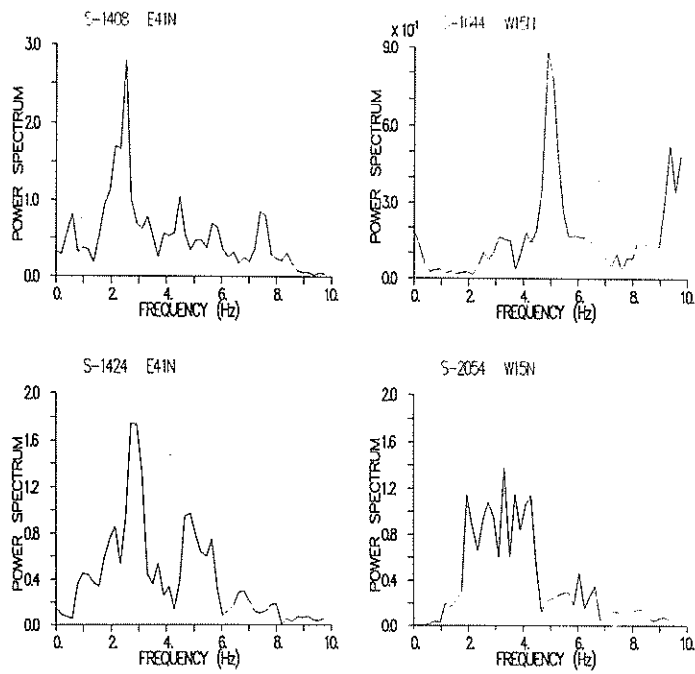


図 - 12 岩盤上の最大加速度が約10Galの記録のパワースペクトルの比較

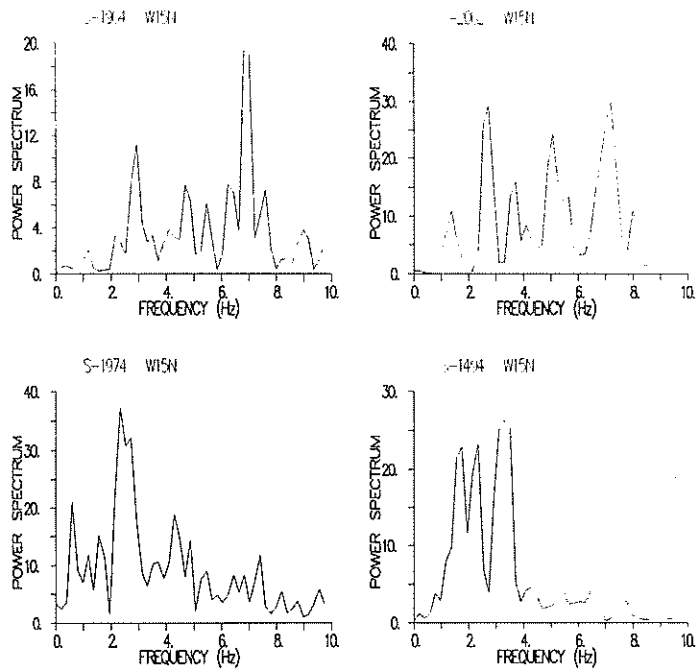


図 - 13 岩盤上の最大加速度が約30Gal～40Galの記録のパワースペクトルの比較

表-5 パワースペクトルの卓越振動数と周波数伝達関数のピークを示す振動数

地震	強震計 の位置	記録番号	最大加速度 (Gal)	パワースペクトルの 卓越振動数 (Hz)	伝達関数のピーク を示す振動数 (Hz)
1970-9-14	岩盤上	S-544	66	2.7, 5.8, 3.1	1.2, 1.9, 2.9, 3.5
	ケーソン	S-569	163	1.4, 1.9, 2.9	
1978-6-12	岩盤上	S-1210	161	2.3, 2.7, 1.8, 3.3, 1.8, 5.1	1.0, 1.9, 2.5, 2.9
	ケーソン	S-1211	269	1.9, 1.0, 2.5	
1978-12-6	岩盤上	S-1274	3	3.3, 1.2	1.6, 1.9, 2.7, 3.1, 4.3
	ケーソン	S-1275	37	1.6, 3.3, 2.7	
1981-1-19	岩盤上	S-1408	9	2.5, 4.5, 0.6	1.6, 1.9, 3.5
	マウンド	M-437	22	1.9, 1.6, 3.5	
	岩盤上	S-1408	9	2.5, 4.5, 0.6	1.4, 1.9, 2.7, 3.1, 3.7
	ケーソン	S-1409	41	1.9	
1981-1-23	岩盤上	S-1424	8	2.7, 4.9, 2.1	1.4, 1.8, 3.3, 3.5, 3.9, 4.3
	マウンド	M-449	19	1.8	
	岩盤上	S-1424	8	2.7, 4.9, 2.1	1.4, 1.8, 2.5, 2.9, 3.3, 3.9
	ケーソン	S-1422	35	1.8, 2.7	
1982-6-1	岩盤上	S-1494	40	3.3, 2.3, 1.8	1.6, 2.5, 4.1
	マウンド	M-544	80	1.6	
	岩盤上	S-1494	40	3.3, 2.3, 1.8	1.6, 3.1, 4.1
	ケーソン	S-1493	173	1.6	
1983-10-14	岩盤上	S-1644	10	4.9, 4.1, 3.1	1.6, 2.1, 3.7
	マウンド	M-700	10	1.6, 3.7, 4.9, 6.8	
	岩盤上	S-1644	10	4.9, 4.1, 3.1	1.8, 2.1, 2.7, 3.9, 5.3
	ケーソン	S-1643	26	5.3, 4.1, 3.5, 2.7, 1.6	
1983-11-11	岩盤上	S-1658	21	2.9, 7.0, 7.6, 6.2	1.2, 1.6, 3.5
	ケーソン	S-1657	56	1.6, 1.9	
1986-12-1	岩盤上	S-1964	36	6.8, 2.9, 4.7, 6.2	1.4, 1.9
	マウンド	M-1062	22	1.9, 6.6	
	岩盤上	S-1964	36	6.8, 2.9, 4.7, 6.2	1.4, 1.9
	ケーソン	S-1963	81	1.9, 2.9, 1.4	
1987-1-9	岩盤上	S-1974	41	2.3, 0.6, 4.3, 1.6	1.0, 1.4, 1.8, 3.3, 5.1
	マウンド	M-1076	65	1.6, 1.0, 4.3, 3.3	
	岩盤上	S-1974	41	2.3, 0.6, 4.3, 1.6	1.0, 1.4, 1.8, 3.1
	ケーソン	S-1973	117	1.8, 2.7	
1987-4-7	岩盤上	S-2037	5	3.3, 2.3, 1.4, 0.8	1.8, 4.3
	マウンド	M-1117	18	1.4, 1.8	
	岩盤上	S-2037	5	3.3, 2.3, 1.4, 0.8	1.8, 2.5, 3.3, 3.9
	ケーソン	S-2036	46	1.8, 1.4, 3.3, 2.5	
1987-4-23	岩盤上	S-2054	7	3.3, 3.7, 1.9, 4.3, 2.7	1.4, 1.8, 3.3, 4.7
	マウンド	M-1131	18	1.8, 3.3	
	岩盤上	S-2054	7	3.3, 3.7, 1.9, 4.3, 2.7	1.4, 1.8, 2.5, 3.1, 3.5
	ケーソン	S-2055	29	1.8, 3.1	
1987-5-12	岩盤上	S-2062	43	7.2, 2.7, 5.1, 3.7	1.4, 1.8, 2.3, 3.1, 3.7, 4.3
	マウンド	M-1136	110	1.4	
	岩盤上	S-2062	43	7.2, 2.7, 5.1, 3.7	1.4, 1.9, 3.1, 3.5
	ケーソン	S-2063	125	1.4, 2.9, 3.5	

の強震記録のマグニチュードは先に述べたS-1964とS-2062より大きく、これらのパワースペクトルは5 Hz以上の成分が小さくなっている。以上の結果より、最大加速度が10Gal以上の岩盤上の強震記録のパワースペクトルは、最大加速度が同じでもマグニチュードの大きさにより異なることが推察される。

(3) マウンド天端とケーソン天端の周波数伝達関数の比較

マウンド天端とケーソン天端の強震記録の周波数伝達関数を比較したのが、図-14である。図中では、マウンド天端の周波数伝達関数を実線で、ケーソン天端のそれを破線で示している。これらの図によれば、マウンド天端およびケーソン天端の応答はともに、1 Hzから2 Hz付近の振動数成分が大きく増幅されている。その増幅の程度は、M-700とS-1643の組み合わせを除いて、ケーソン天端の増幅度が大きいことがよくわかる。また、周波数伝達関数の全体的傾向はケーソン天端とマウンド天端で良く似たものとなっている。

(4) 岩盤上の最大加速度と、パワースペクトルと周波数伝達関数の関係

1) 最大加速度が同じ岩盤上の記録の周波数伝達関数

の比較

図-15には、岩盤上の最大加速度がほぼ10Galの記録の周波数伝達関数を示している。図-15の右図は、四つの周波数伝達関数を同時に示したものである。これらの図によれば、各周波数伝達関数とも2 Hz付近がほぼ等しく、振動数の高い成分で各記録に差異があることがわかる。図-16は、岩盤上の最大加速度が30~40Galの記録の周波数伝達関数である。図-16によれば、S-1493が3 Hz付近のピークが認められないのと、S-1963の1.9 Hzのピーク値が大きい以外は、周波数伝達関数の全体的傾向はほぼ等しい。

2) 岩盤上の最大加速度の増加によるパワースペクトル、周波数伝達関数の変化

図-17, 18は岩盤上の最大加速度が異なる記録のパワースペクトルを比較して示したものである。図-17がケーソン天端の記録、図-18がマウンド天端の記録のパワースペクトルである。これらの図によれば、岩盤上の最大加速度の増加とともに、パワースペクトルのピーク値は増加し、ピークを示す振動数が低下している。

図-19, 20は岩盤上の最大加速度が異なる記録の周波数伝達関数を比較して示したものである。図-19がケー

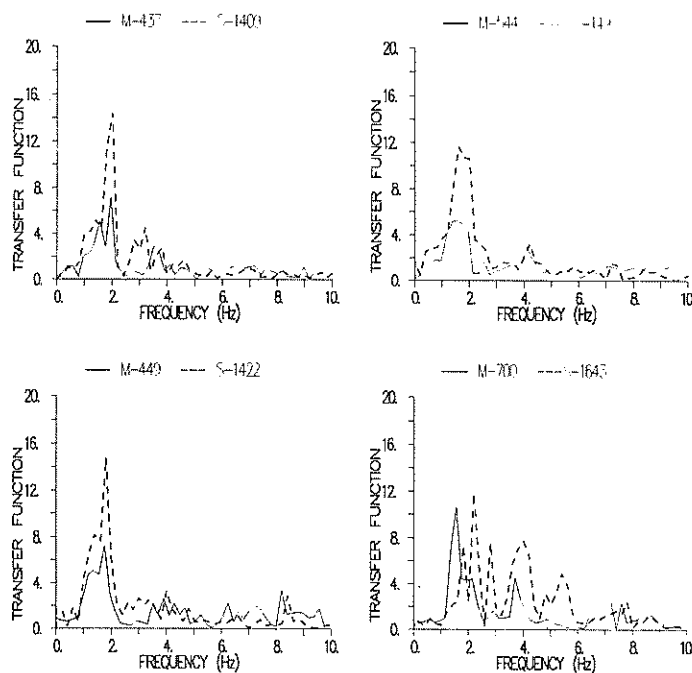


図-14(a) マウンドとケーソン天端の周波数伝達関数の比較 (その1)

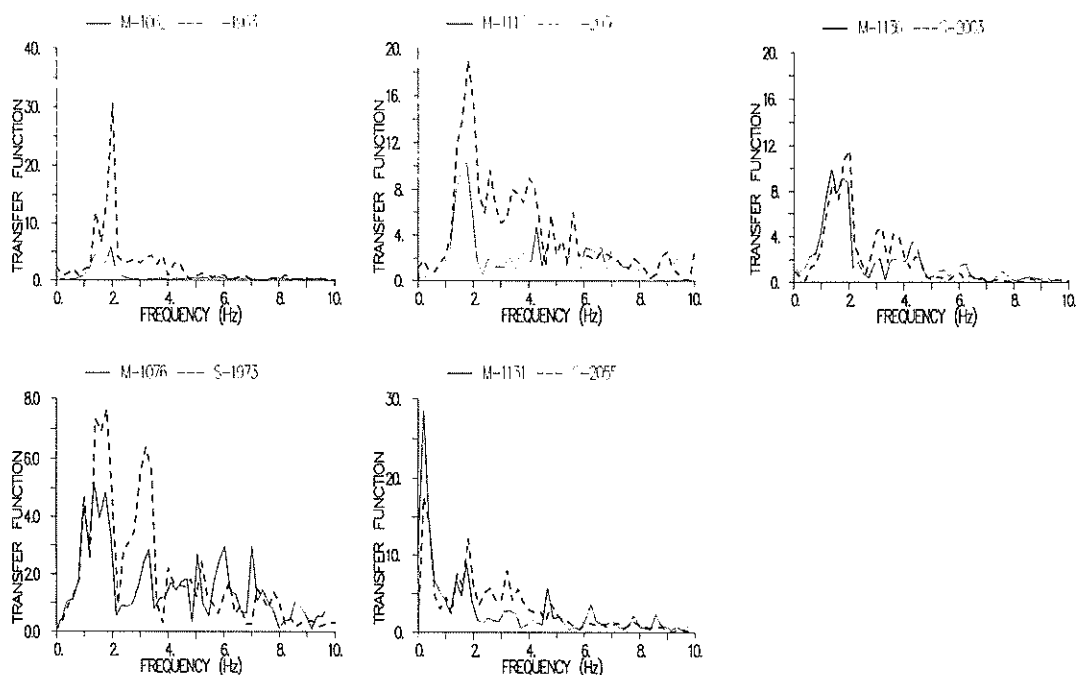


図 - 14(b) マウンドとケーソン天端の周波数伝達関数の比較 (その 2)

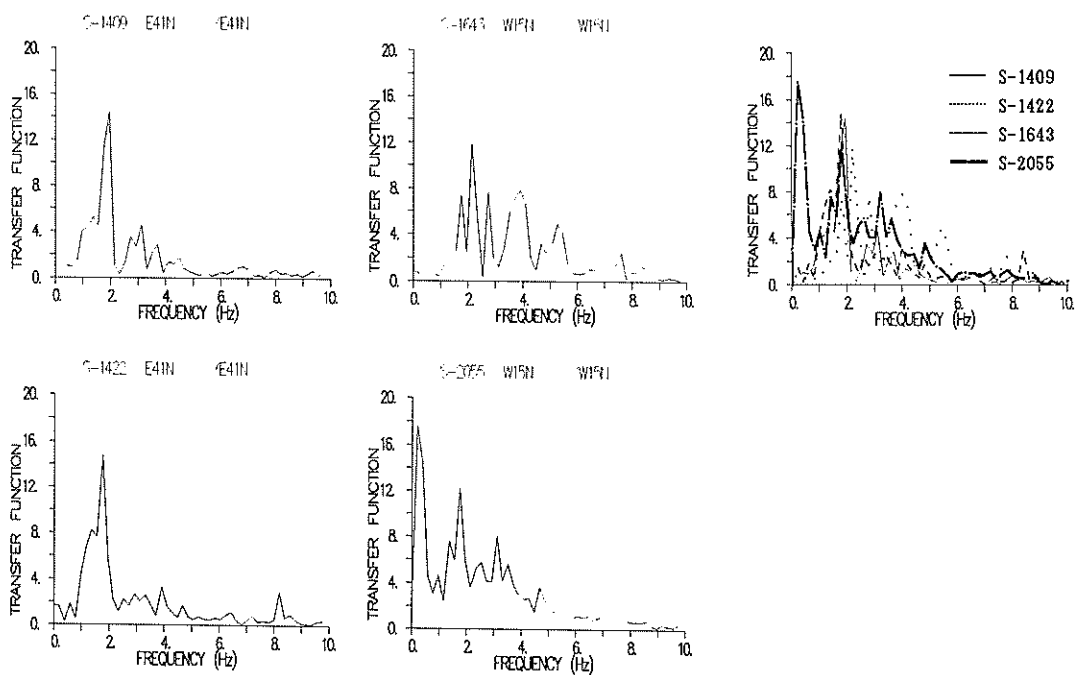


図 - 15 ほぼ同じ岩盤上の最大加速度の記録の周波数伝達関数の比較

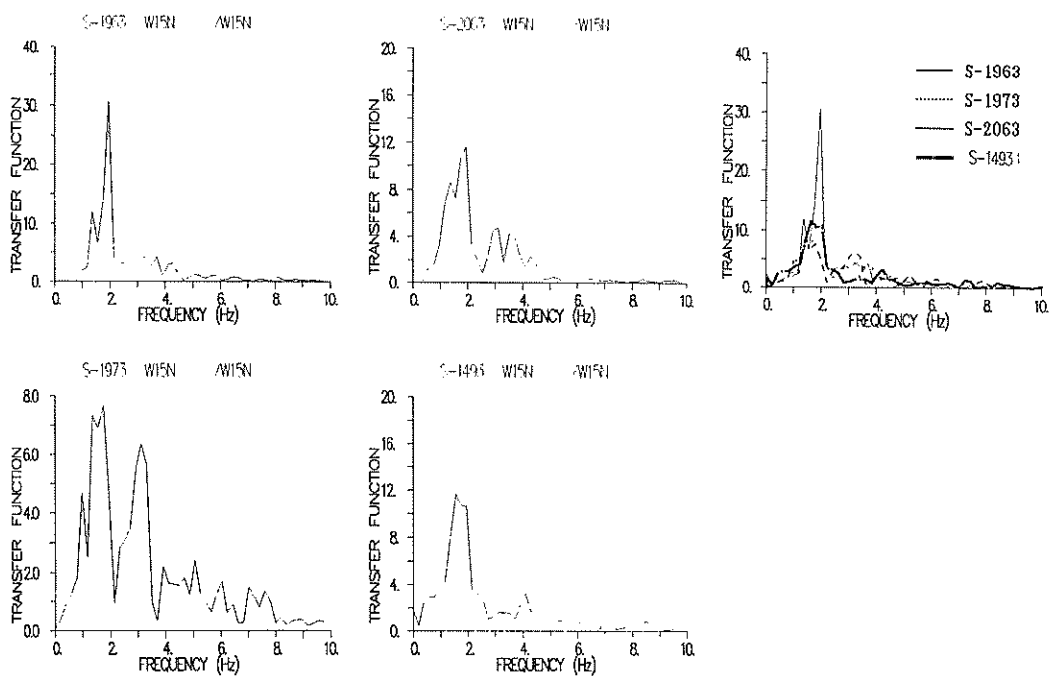


図 - 16 ほぼ同じ岩盤上の最大加速度の記録の周波数伝達関数の比較 (その 2 の A)

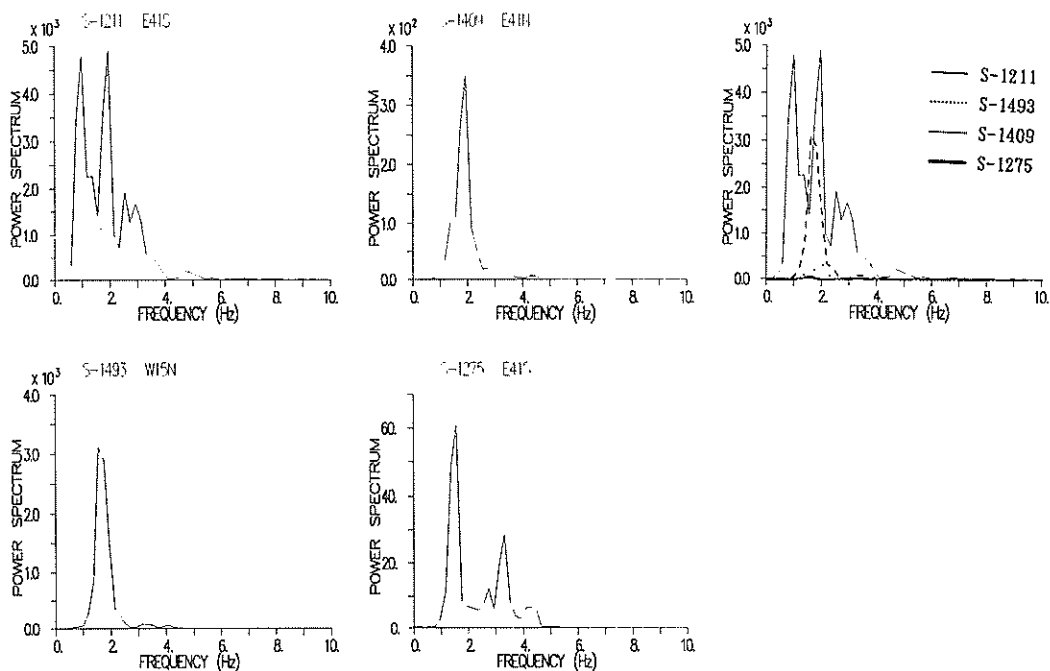


図 - 17 岩盤上の最大加速度の違いによるパワースペクトルの比較

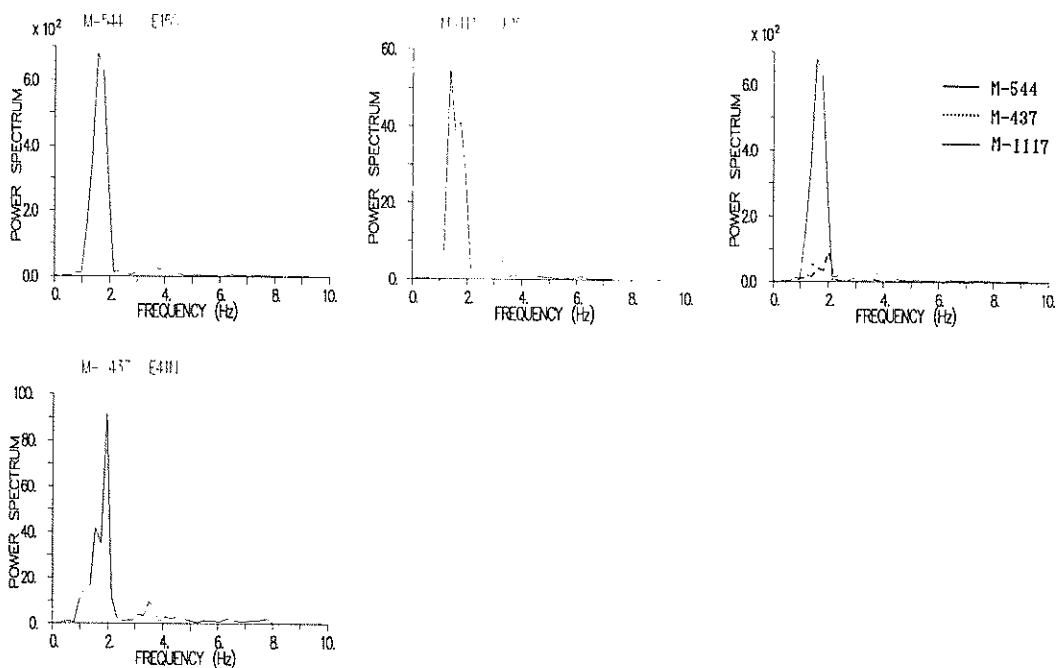


図-18 岩盤上の最大加速度の違いによるパワースペクトルの比較

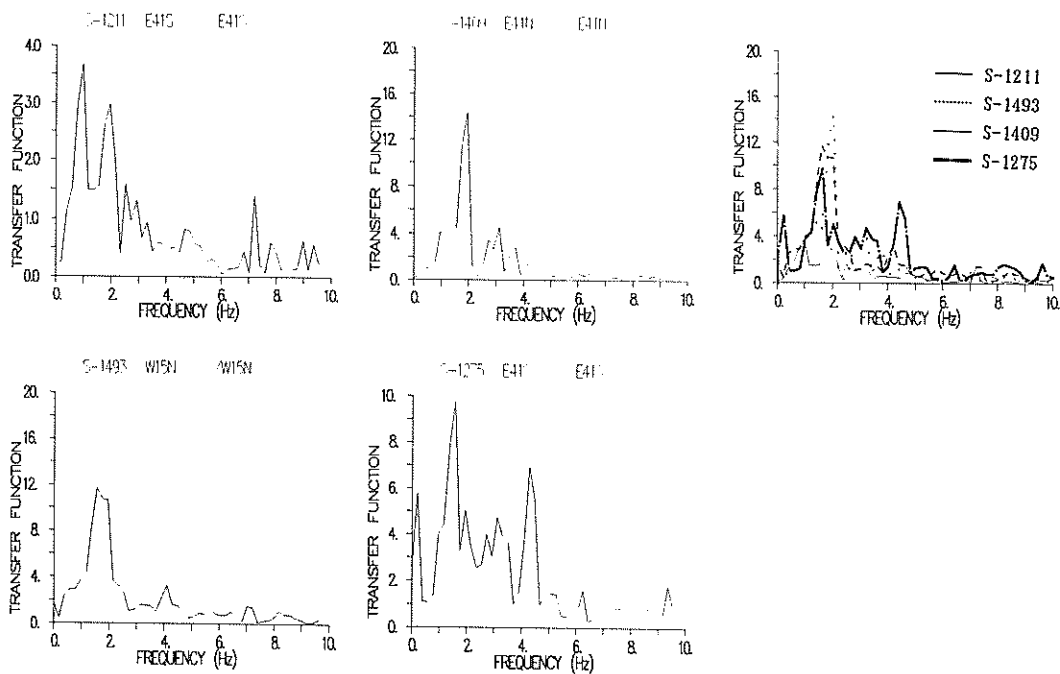


図-19 岩盤上の最大加速度の違いによる周波数伝達関数の比較

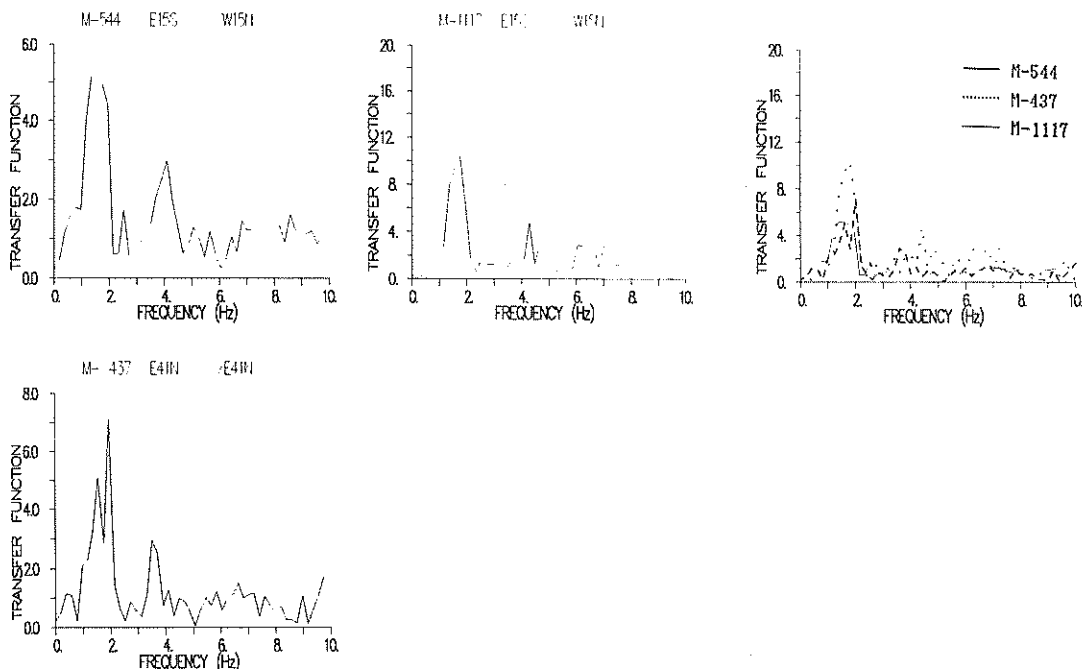


図-20 岩盤上の最大加速度の違いによる周波数伝達関数の比較

ソントン端の記録，図-20がマウンド天端の記録の周波数伝達関数である。これらの図によれば，岩盤上の最大加速度の増加とともに，表-5にも示した一次の固有振動数は低下しており，そのピーク値も小さくなっている。このように一次の固有振動数が岩盤上の最大加速度の増加とともに減少しているのは，防波堤マウンド材の非線形特性によるものと考えられる。表-5および図-19, 20に示したように，マウンド材の非線形特性が20Gal程度の低い最大加速度においても認められている。

5.3 動水圧の観測結果の検討

1) 加速度波形と動水圧波形の比較

図-21に二つの地震の観測結果について，ケーソン天端の加速度波形と，動水圧波形を比較して示す。図中細い実線がケーソン天端の加速度波形，太い一点鎖線がケーソンの-2m位置の動水圧波形を示す。比較のために最大値が一致するように図化している。図より加速度波形と動水圧波形はほとんど一致しているのが解る。図-22には両者のパワースペクトルを示すが，振動数の高い部分でややずれがあるもののほとんど一致しているのが解る。

2) ケーソンとマウンドの動水圧記録の比較

図-23にケーソンとマウンドの動水圧記録波形を比較して示す。図中の細い実線がケーソンの-2m位置の動水圧記録，太い一点鎖線がマウンドの-22m位置の動水圧記録を示す。No.8の記録の場合にはそうでもないが，No.20の記録の場合には両者の差が大きい。この差をパワースペクトルで比較したものが図-24である。マウンドの動水圧記録はケーソンのそれと比較して高い振動数成分が多いのがよくわかる。

3) 動水圧の深さ方向の分布

図-25～28に主要な動水圧記録の深さ方向の分布を示す。図中の○は観測値，点線は通常良く用いられているウェスターガード (Westergaard) の簡略式である。ケーソン天端の最大加速度とマウンド天端の最大加速度の平均値を重力加速度で除したものを震度とし，水深をマウンド天端までの水深として計算している。図に示した動水圧の計算値は観測値よりやや大きい値を示している。このようにウェスターガードの簡略式は安全側の値を与えるので，ケーソンに作用する動水圧を算定する場合は，ウェスターガードの簡略式が適用可能である。しかし，ケーソンの応答を考慮して，正確にケーソンに作用する

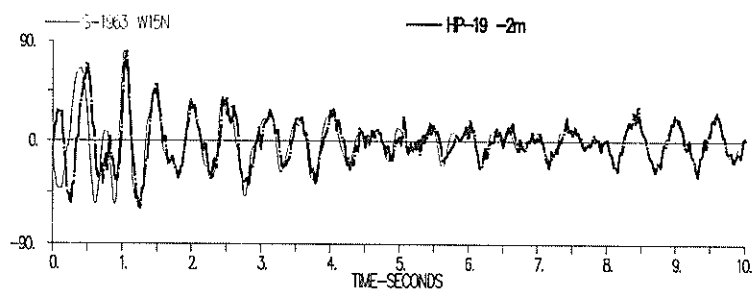


図 - 21 (a) ケーソン天端の加速度波形と動水圧波形の比較 (その1, S - 1963)

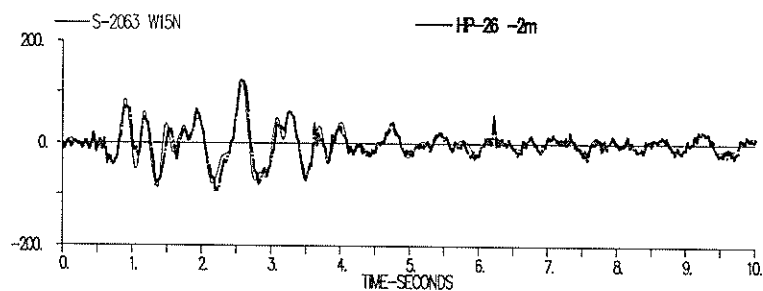


図 - 21 (b) ケーソン天端の加速度波形と動水圧波形の比較 (その2, S - 2063)

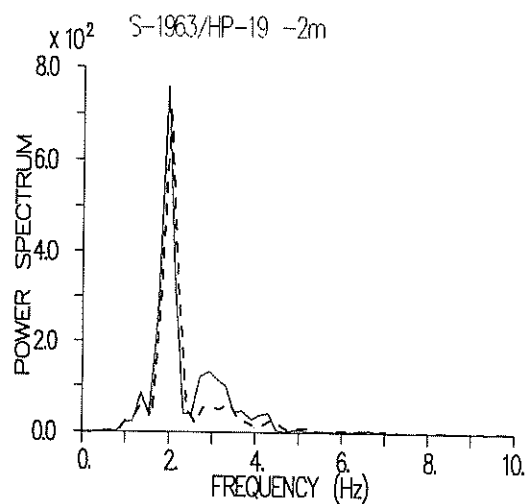
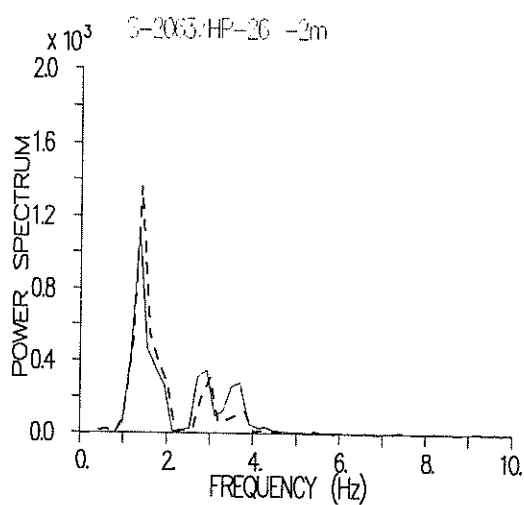


図 - 22 ケーソン天端の加速度と動水圧のパワースペクトルの比較

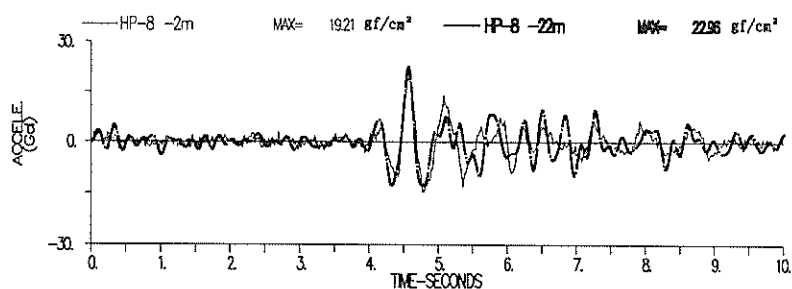


図-23(a) ケーソンとマウンドの動水圧記録波形の比較 (No. 8)

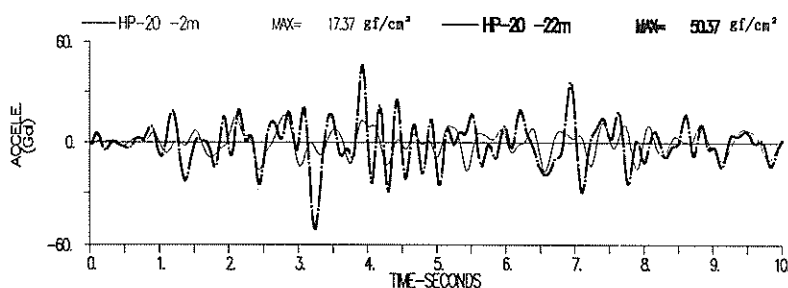


図-23(b) ケーソンとマウンドの動水圧記録波形の比較 (No.20)

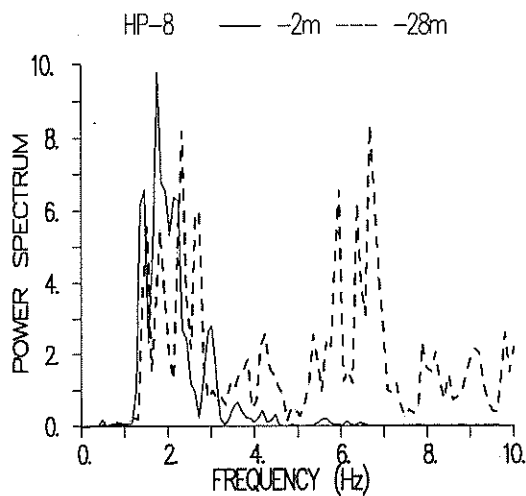


図-24(a) ケーソンとマウンドの動水圧記録のパワースペクトル比較 (No. 8)

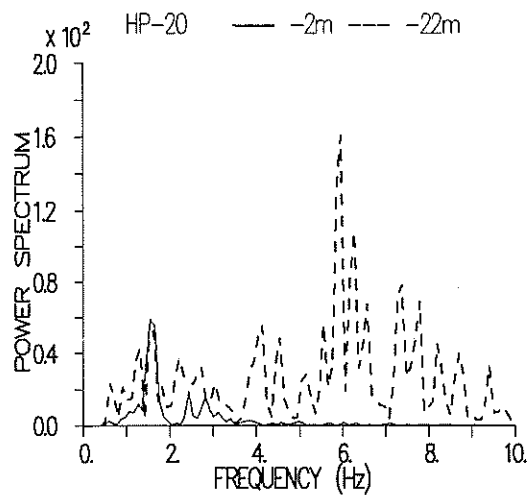


図-24(b) ケーソンとマウンドの動水圧記録のパワースペクトル比較 (No.20)

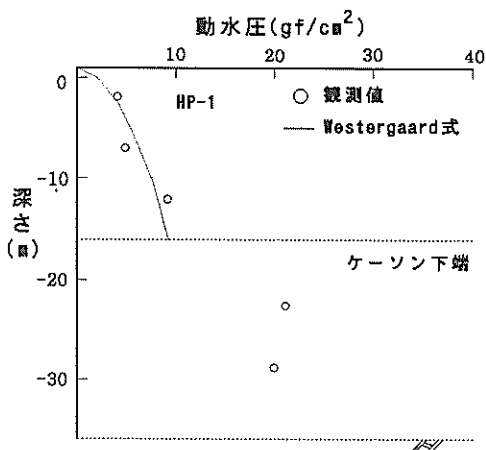


図 - 25 動水圧の深さ方向の分布 (No. 1)

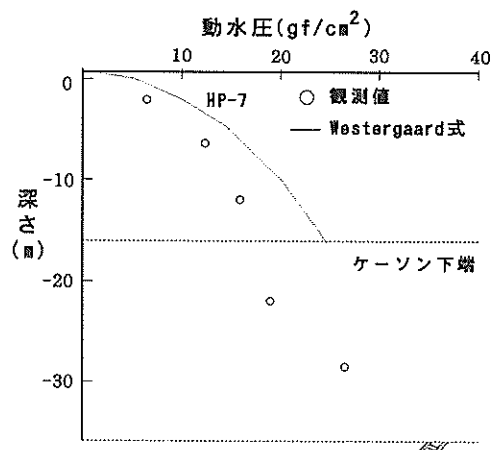


図 - 27 動水圧の深さ方向の分布 (No. 7)

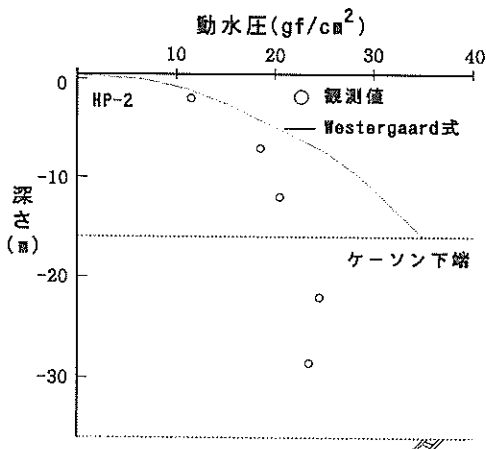


図 - 26 動水圧の深さ方向の分布 (No. 2)

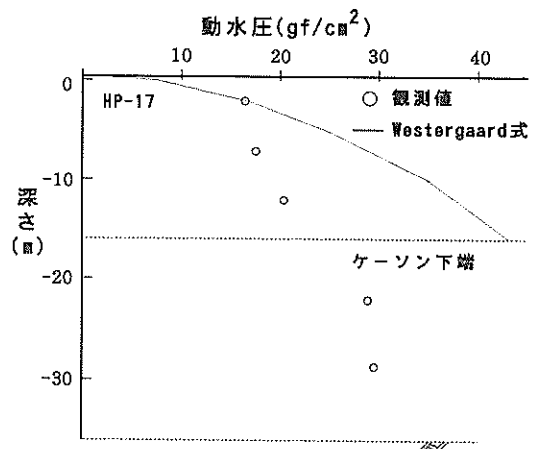


図 - 28 動水圧の深さ方向の分布 (No. 17)

動水圧を算定する場合には、水と構造物の連成を考慮した地震応答解析による検討が必要である。

斜面に作用する動水圧の算定式としてザンガー (Zanger) の公式があるが、この式より算定した値は観測値より小さい値を示した。しかし、著者等が過去に行った碎石マウンドの振動実験結果¹²⁾では、碎石マウンドの斜面に作用する動水圧の測定値はザンガー式より小さい値を示していて、ここで得られた観測結果とは逆の

結果となっている。図 - 24 に示したようにマウンド斜面の動水圧記録には振動数の高い成分が多く含まれており、これが大きく影響していると考えられる。防波堤のマウンドのような水中にある大きな捨石からなる斜面に作用する動水圧については、実物の捨石斜面の振動実験等の詳細な検討が更に必要である。ここで得られたマウンドの動水圧記録を利用する場合には動水圧記録に含まれる高い振動数成分について十分配慮する必要がある。

6. 地震応答計算と観測結果の比較と考察

6.1 地震応答計算手法

5. の防波堤の強震記録の解析によって、防波堤の周波数伝達関数から推定された防波堤の一次の固有振動数、およびケーソン天端の最大加速度応答比は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少していることが示された。これは防波堤マウンド材の動的変形特性の非線形性によるものであると考えられる。地震応答計算を実施する場合には、防波堤マウンド材の動的変形特性の非線形性を考慮しなければならない。その場合、厳密には時々刻々、せん断弾性係数を変化させて非線形地震応答計算を行わねばならない。しかしながら、計算手法が複雑であるため、スーパーコンピュータを用いても膨大な計算時間となり、あまり実用的とは考えられない。

そこで、厳密な意味での非線形地震応答計算ではないが、材料のせん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存特性を考慮した等価線形手法による地震応答計算手法が開発され、良く用いられている。ここでは、この等価線形手法の有限要素法により防波堤の地震応答計算を行う。

防波堤は水中にあり、地震応答計算を行う場合には水

の影響を考慮する必要がある。ここでは、筆者等が開発した構造物と境界を成す二次元平面流体を考え、水の圧縮性を無視した構造物-水連成系の地震応答計算プログラムBEADⅢ⁴⁾を用いる。このプログラムでは土と構造物の接触面を表現できるジョイント要素¹³⁻¹⁵⁾が使用できる。

上部、守屋⁴⁾は、防波堤の模型振動実験結果とBEADⅢの計算結果とを比較し、両者がほぼ一致することを確認している。計算手法の妥当性を更に高めるためには、計算結果と実在の構造物の地震観測結果を比較する必要がある。本報告では実構造物の地震観測結果と計算結果と比較することにより、BEADⅢの計算手法の妥当性をさらに検討する。

6.2 計算結果と観測結果の比較および考察

(1) 防波堤のモデル化と計算に用いた定数

図-29に防波堤の有限要素モデルを、図-30に水部の有限要素モデルを示す。防波堤の構造は左右対称であるので半断面モデルとした。また、コンクリートケーソンとマウンドの間にはJoint要素を用いた。図-29の各要素内の数字は材料種別を示しており、その値は同図に示してある通りである。

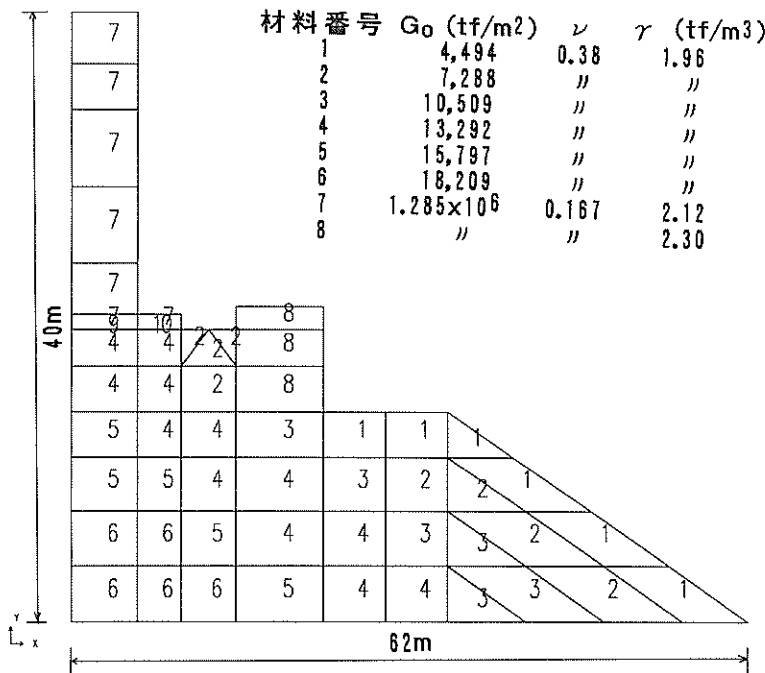


図-29 防波堤の有限要素モデルと各材料定数

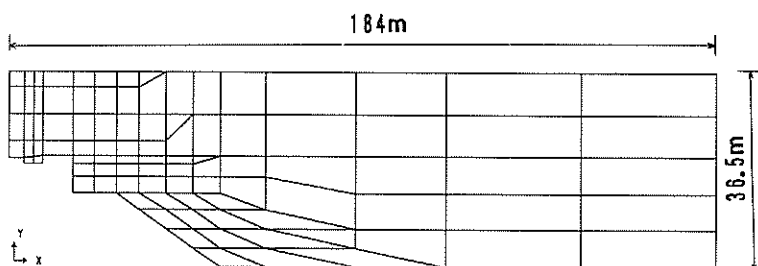


図-30 水部の有限要素モデル

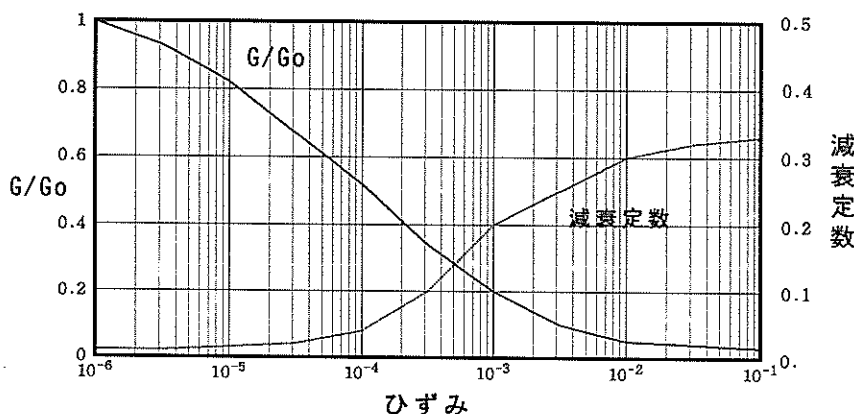


図-31 マウンド材の G/G_0 と減衰定数のひずみ依存特性

ケーソンおよびプレキャストコンクリート部分は線形材料とし、図-29に示すようにせん断弾性係数として、 $1.285 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ を用い、ポアソン比は0.167とした。単位体積重量は防波堤の設計資料から決めた。マウンド材の飽和単位体積重量は防波堤の施工記録において示されている60tfトラックスケールを用いた割石計量試験より 1.96 tf/m^3 とした。この時の間隙比は0.79である。また、ポアソン比は大船渡防波堤現地における弾性波探査試験より得られた値を用いた。

微小ひずみ時（ひずみが 1.0×10^{-6} の時）のせん断弾性係数（ G_0 ）、マウンド材の動的変形特性は大型せん断リング土槽振動実験による割石の動的変形特性の検討結果⁵⁾を基本的に用いることとした。本報告の計算で用いるマウンド材のせん断弾性係数のひずみ依存特性は上記の振動実験の結果をそのまま用いた。 G_0 と減衰定数のひずみ依存特性は地震応答計算結果と観測結果の比較結果を踏まえて、振動実験結果のものを微小修正したものをを用いることとした。減衰定数のひずみ依存特性は図-

31に示す通りであり、 G_0 は次式を用いた。

$$G_0 = 1260 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.55} \quad (6)$$

ここに、 G_0 ：せん断弾性係数（ kgf/cm^2 ）

e ：間隙比

σ'_m ：平均有効主応力（ kgf/cm^2 ）

Joint要素のばね係数、減衰定数は上部、守屋¹³⁾の模型振動実験の検討結果を参考にして実施した本報告での地震応答計算結果と、観測結果の比較結果より、図-32の値を用いることとした。

(2) 計算結果と観測結果の比較および考察

加速度波形の観測結果と計算結果の比較を図-33~45に示す。また、パワースペクトルと周波数伝達関数の観測結果と計算結果の比較を図-46~56に示す。

ケーソン天端の加速度波形の比較結果によると、記録開始から大加速度が記録されているS-554、S-1494、S-1658の波形の一致度は良くない。これら以外の波形

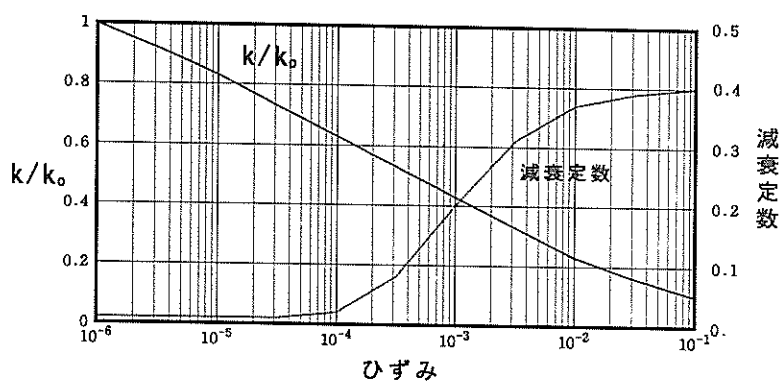


図 - 32 ジョイント要素の k/k_0 と減衰定数のひずみ依存特性

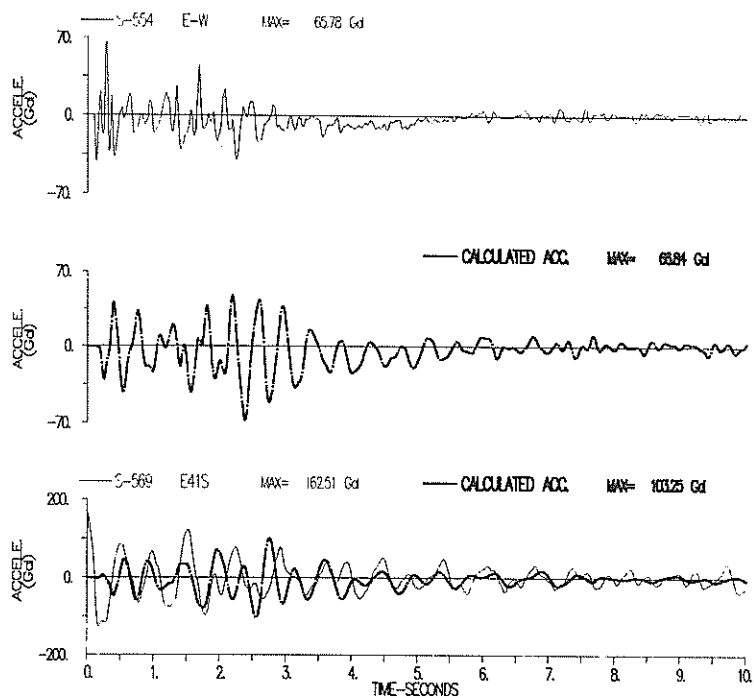


図 - 33 強震記録と計算結果の比較 (S - 554)

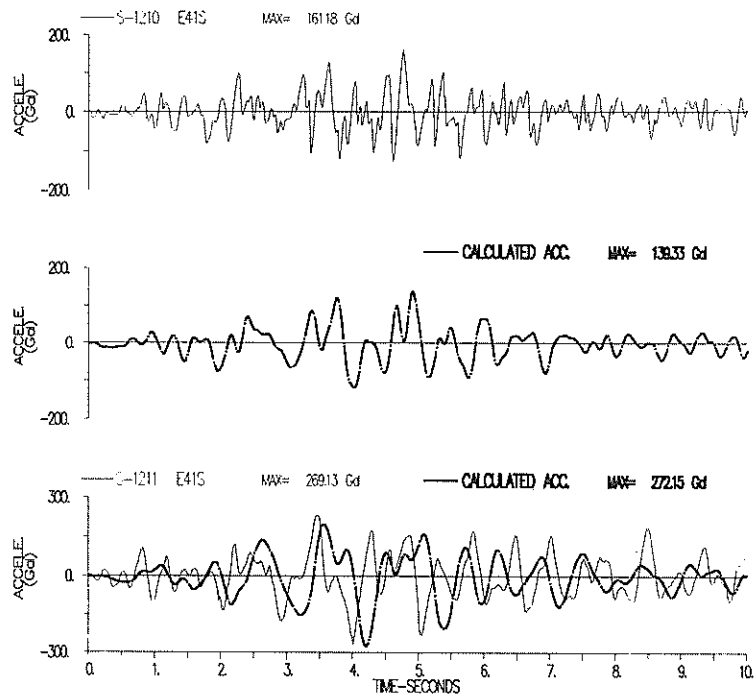


図 - 34 強震記録と計算結果の比較 (S - 1210)

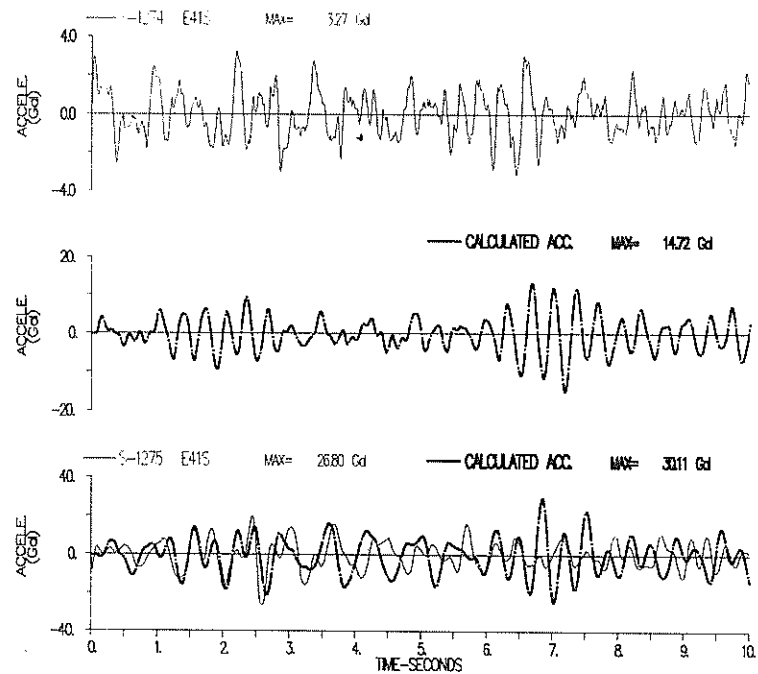


図 - 35 強震記録と計算結果の比較 (S - 1274)

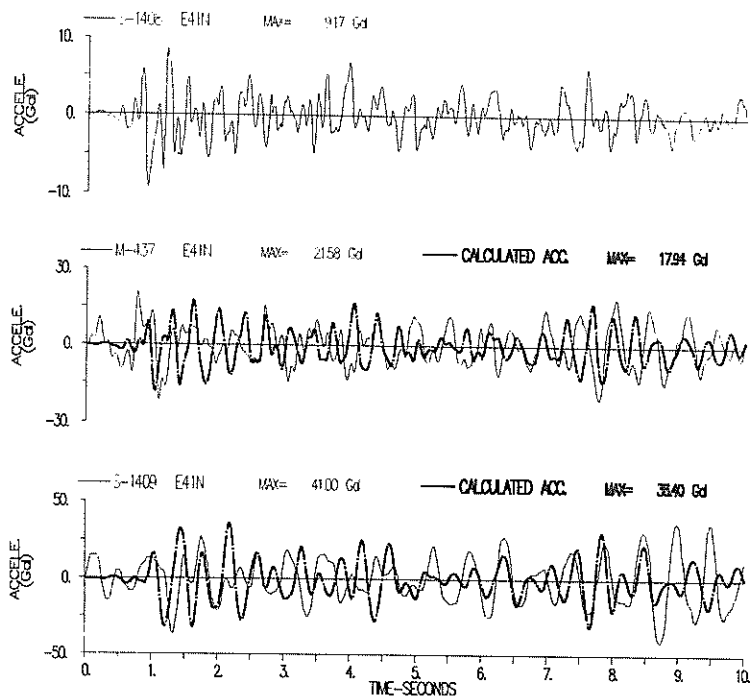


図 - 36 強震記録と計算結果の比較 (S - 1408)

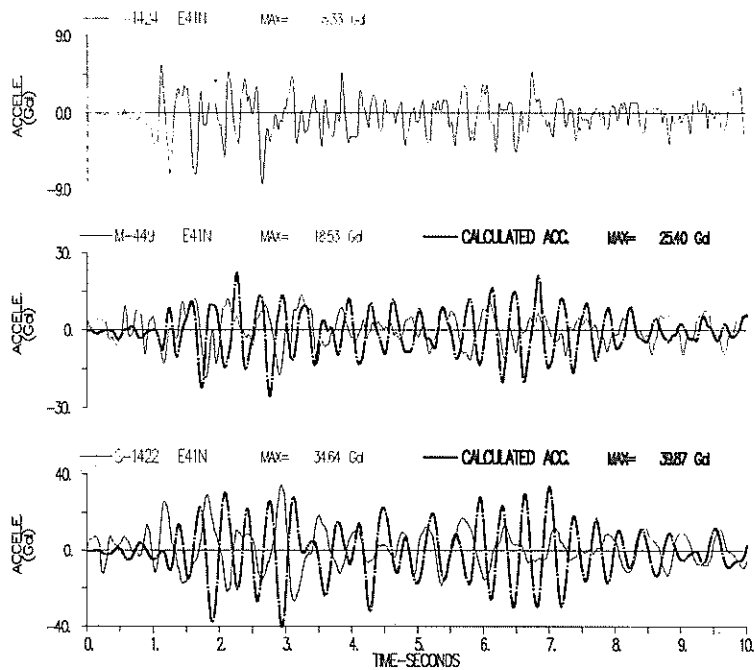


図 - 37 強震記録と計算結果の比較 (S - 1424)

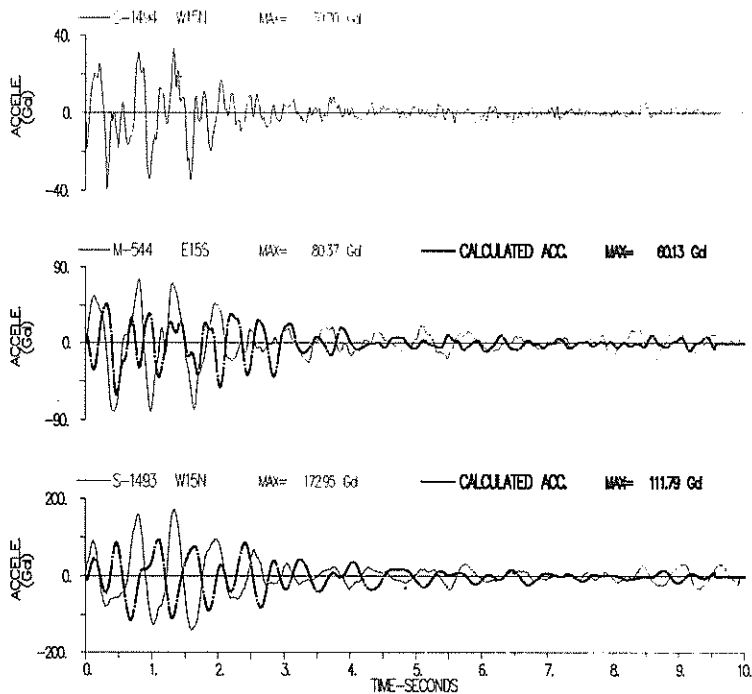


図 - 38 強震記録と計算結果の比較 (S - 1494)

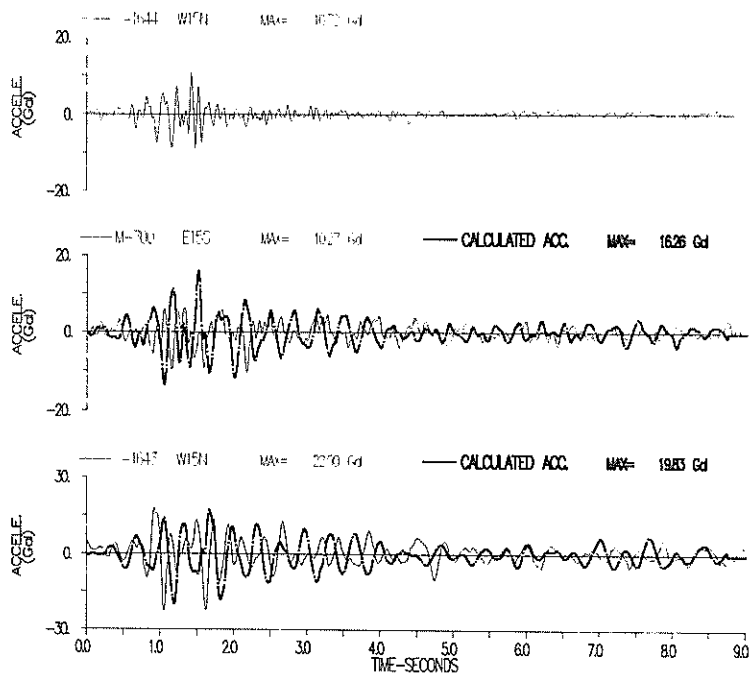


図 - 39 強震記録と計算結果の比較 (S - 1644)

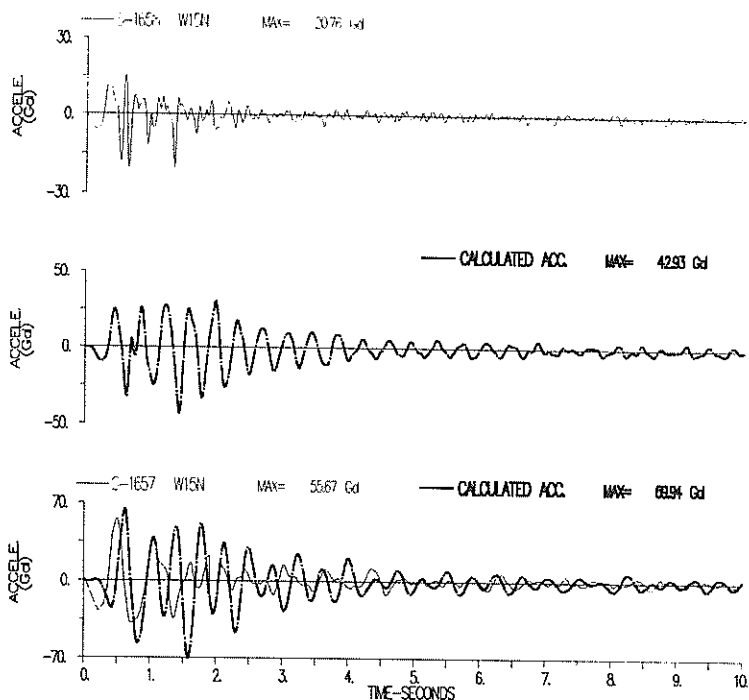


図 - 40 強震記録と計算結果の比較 (S - 1658)

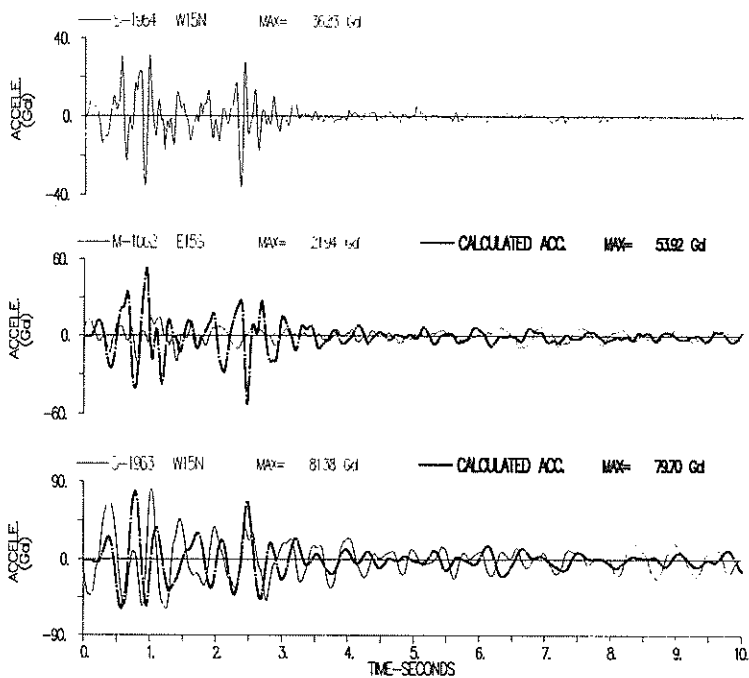


図 - 41 強震記録と計算結果の比較 (S - 1964)

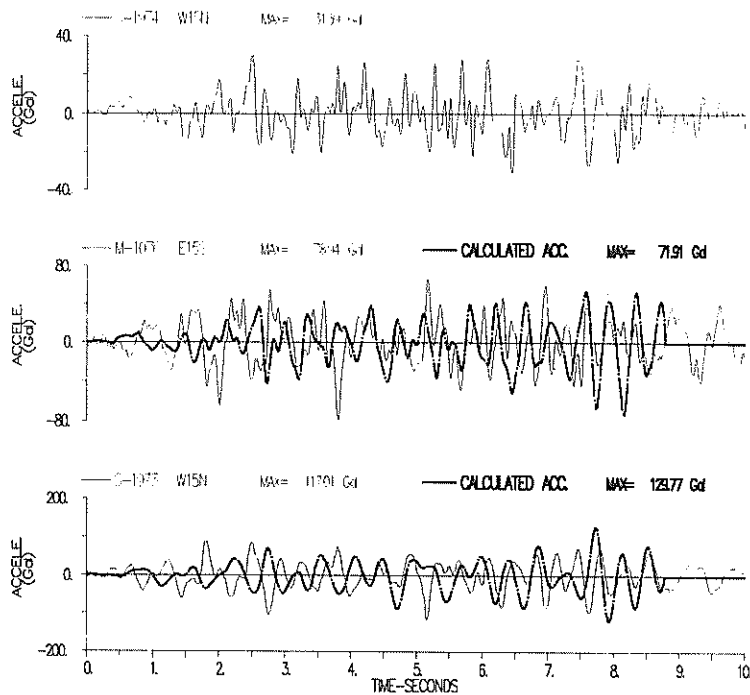


図 - 42 強震記録と計算結果の比較 (S - 1974)

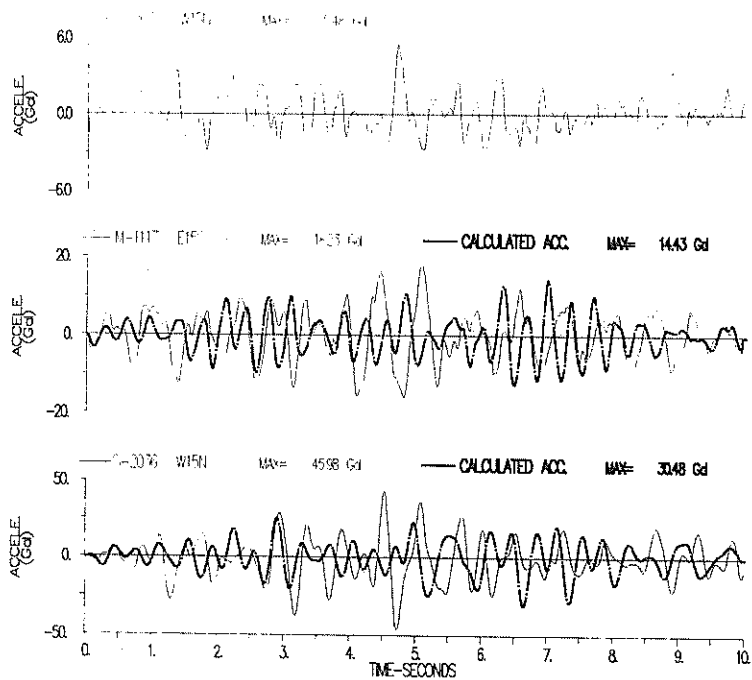


図 - 43 強震記録と計算結果の比較 (S - 2037)

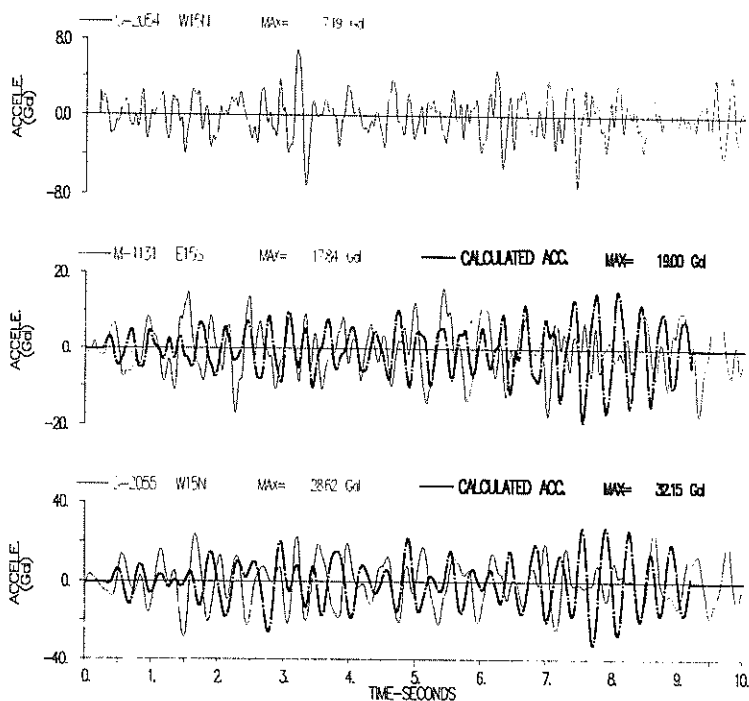


図 - 44 強震記録と計算結果の比較 (S - 2054)

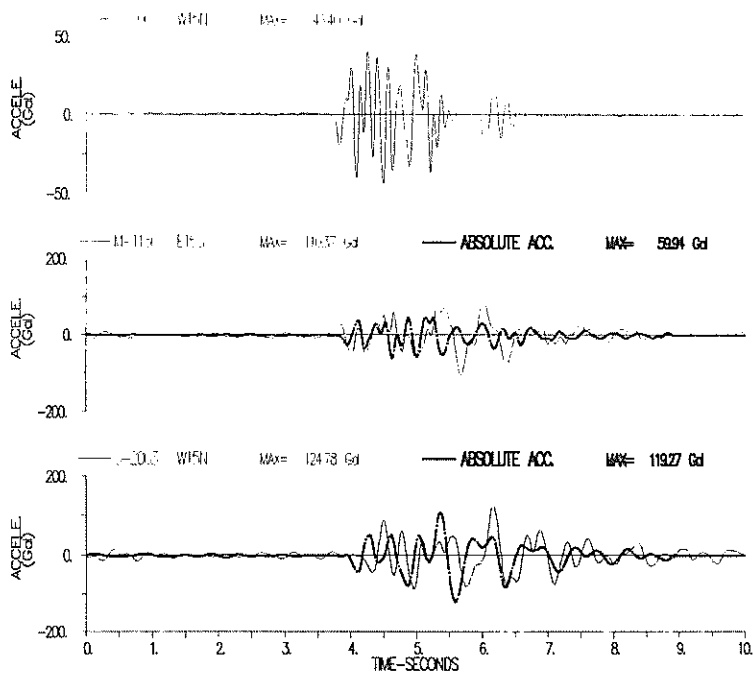


図 - 45 強震記録と計算結果の比較 (S - 2062)

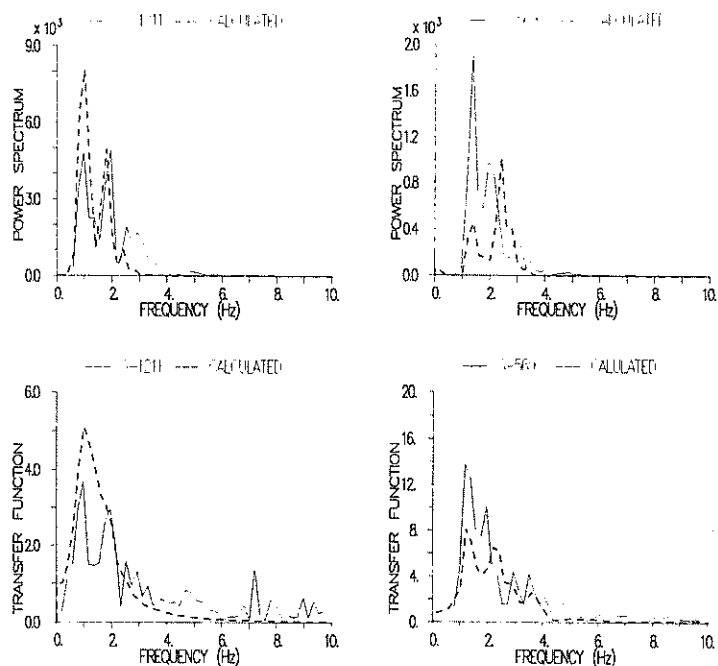


図-46 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S-554, S-1210)

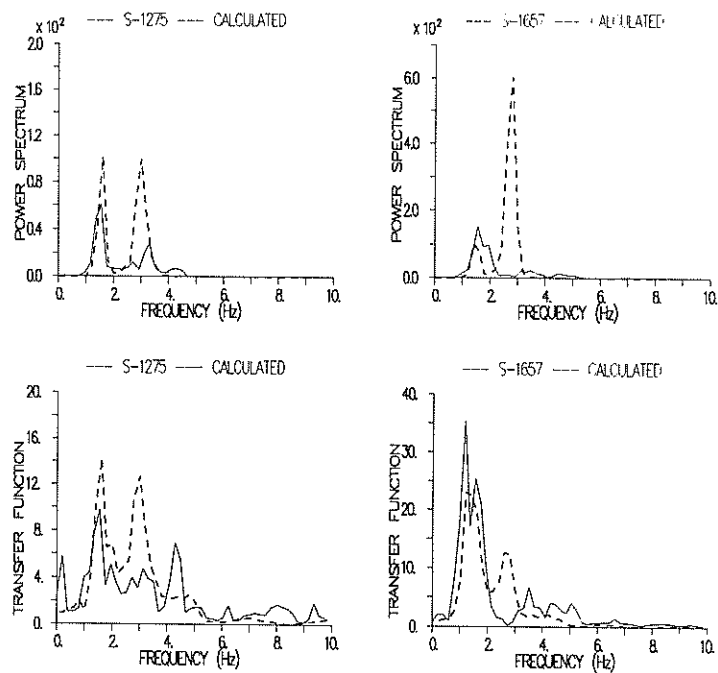


図-47 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S-1274, S-1658)

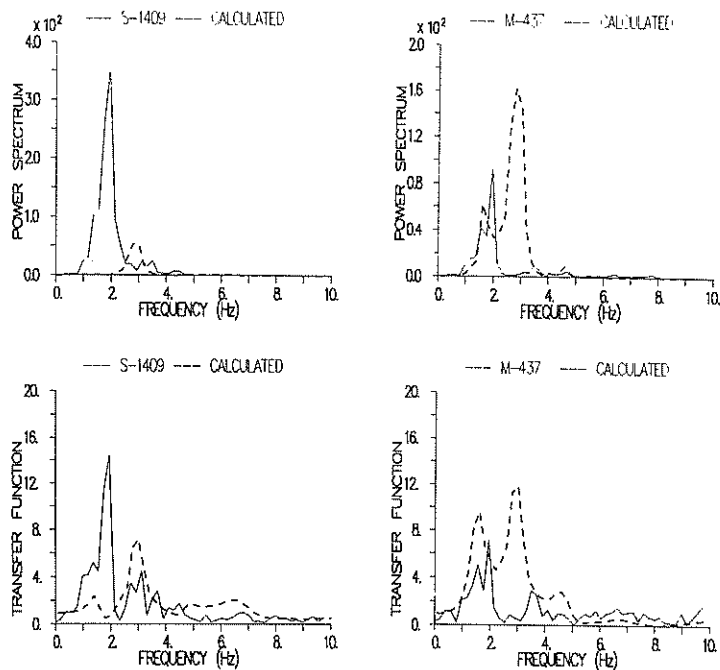


図 - 48 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 1408)

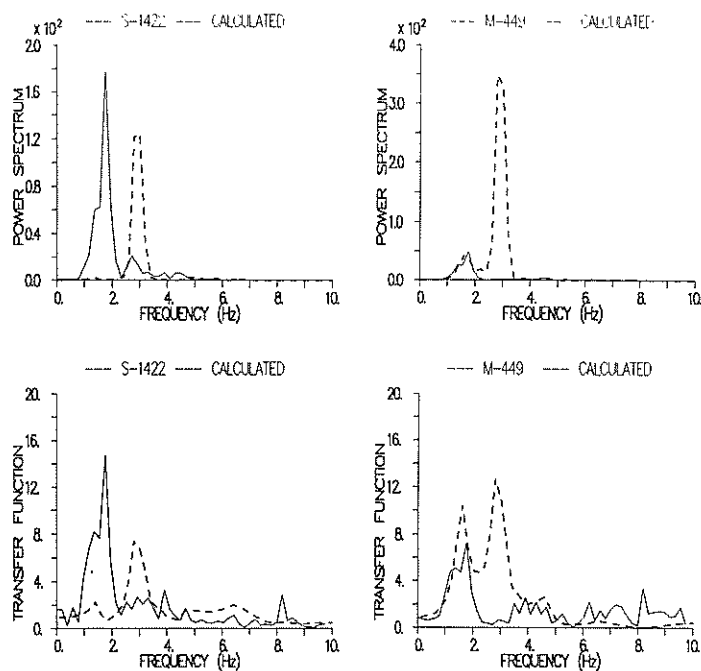


図 - 49 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 1424)

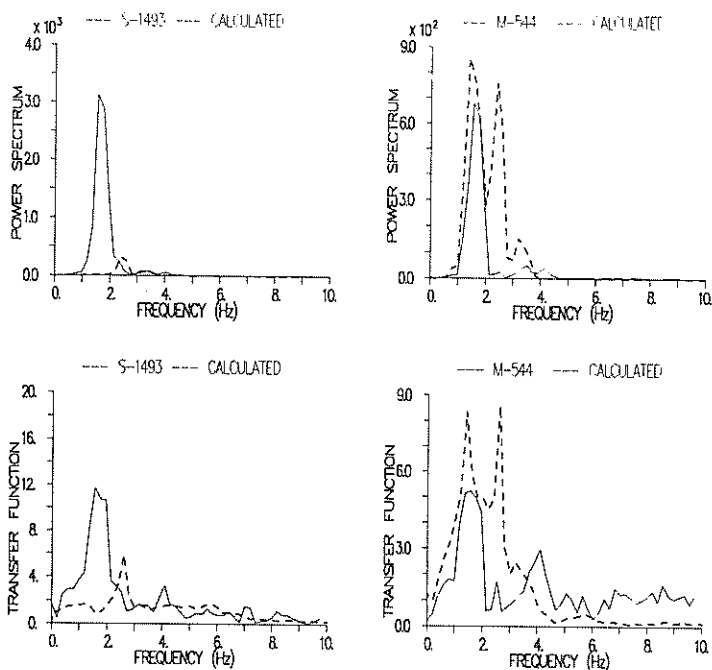


図 - 50 観測結果と計算結果のスペクトル, 伝達関数の比較 (S - 1494)

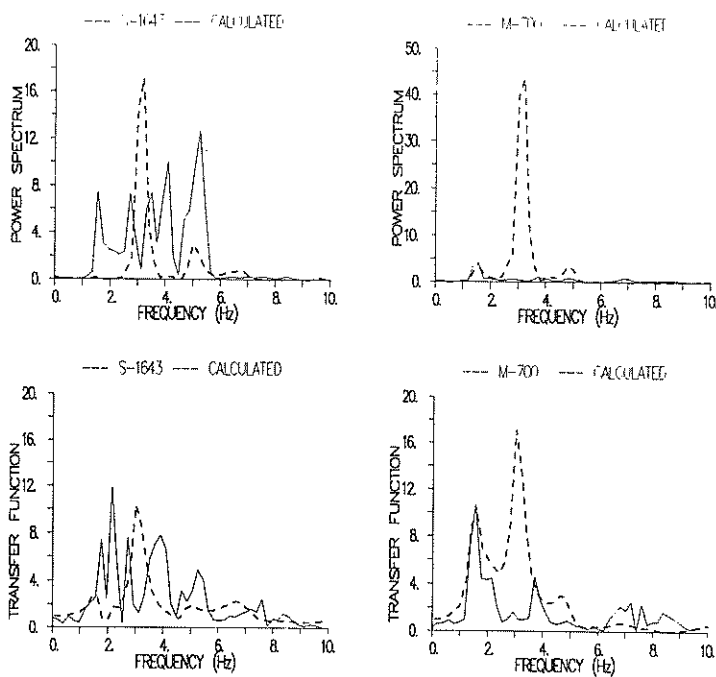


図 - 51 観測結果と計算結果のスペクトル, 伝達関数の比較 (S - 1644)

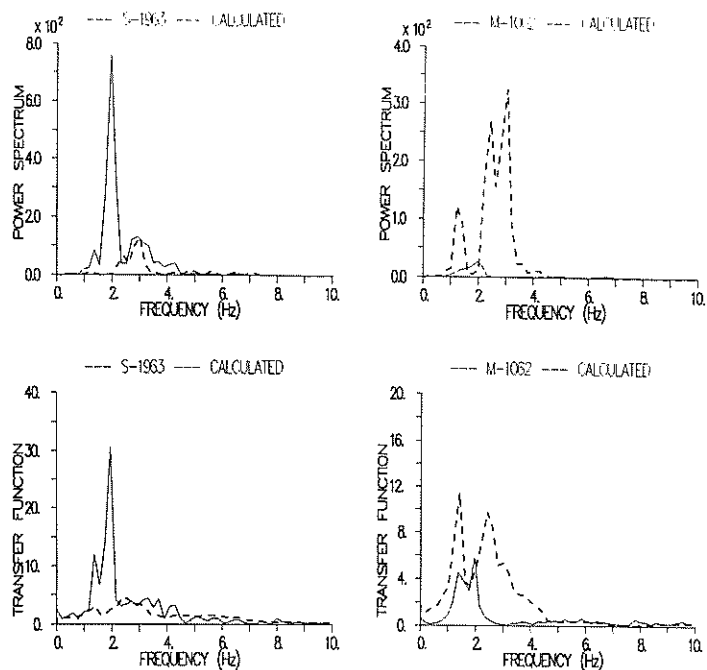


図 - 52 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 1964)

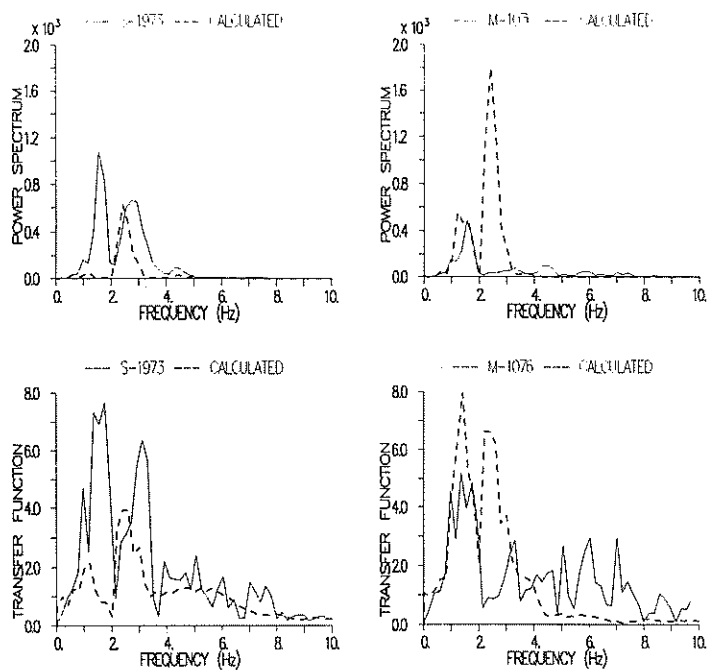


図 - 53 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 1974)

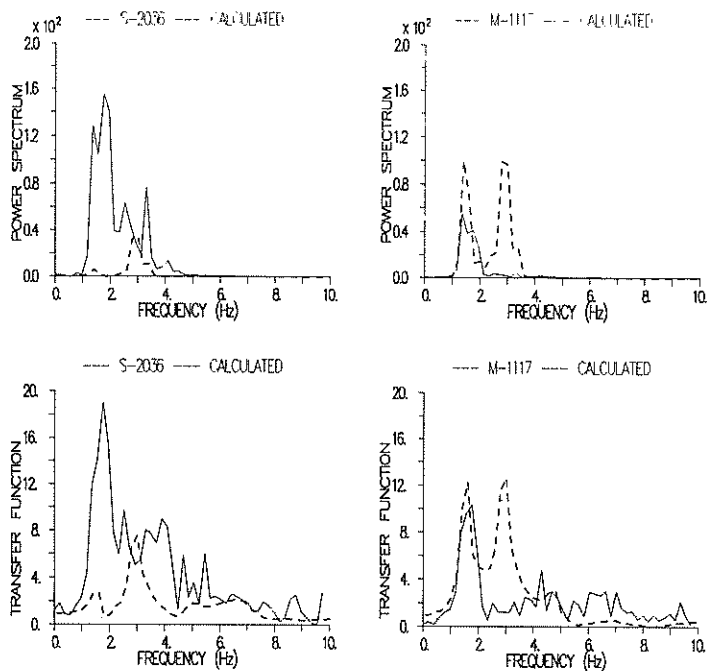


図 - 54 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 2037)

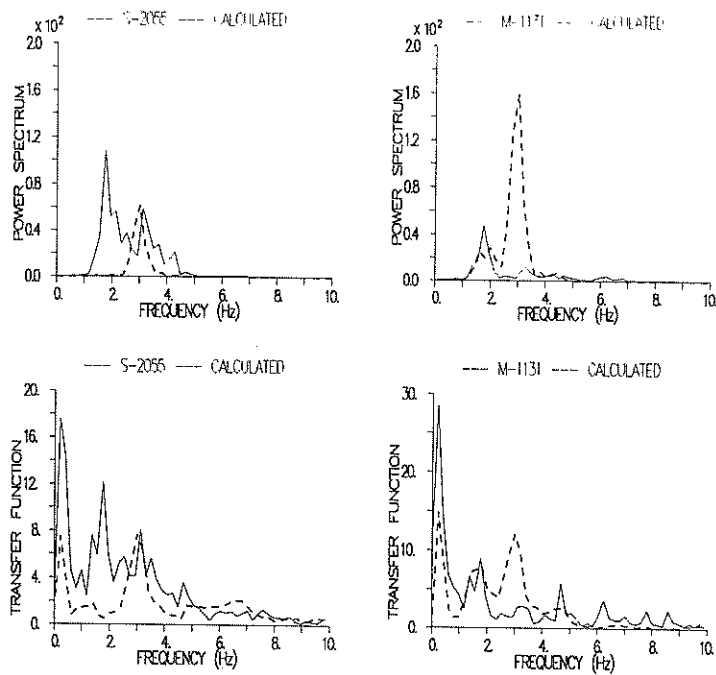


図 - 55 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 2054)

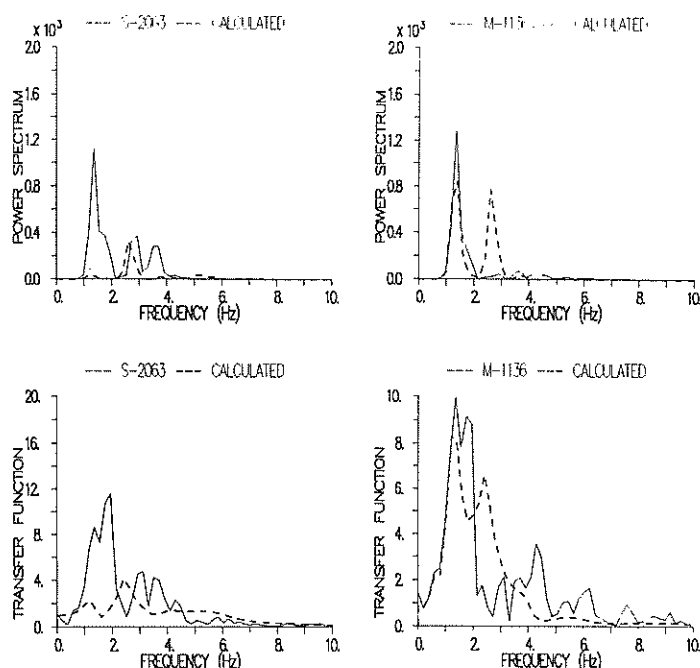


図 - 56 観測結果と計算結果のスペクトル，伝達関数の比較 (S - 2062)

では、S - 1408, S - 1424, S - 1974, S - 2054の4記録で観測結果と計算結果の一致度が悪い。S - 1210, S - 1274, S - 1644, S - 1964, S - 2037, S - 2062の6記録の波形では、位相がややずれている記録があり、記録の後半でやや一致度が悪い記録もある (S - 1274, S - 2037) が、観測結果と計算結果は比較的良い一致を示している。一方、マウンド天端の加速度波形の比較結果によれば、S - 1408, S - 2062の2記録以外は計算結果の加速度波形は観測結果のそれとあまり良い一致を示していない。

パワースペクトルと周波数伝達関数の比較結果によれば、計算結果の二つあるピークのうちの高い振動数のピークが観測結果と一致しなかった。もう一方の低い振動数のピークも、その振動数は観測結果とほぼ一致しているが、ピーク値は異なっている。しかし、加速度波形の観測結果と計算結果の一致度の良い記録 (ケーソン天端ではS - 1210, S - 1274, マウンド天端ではS - 1408, S - 2062) では、計算結果のパワースペクトルと周波数伝達関数は他の記録に比較して、観測結果と良く一致している。

表 - 6 に応答最大加速度と周波数伝達関数のピークを示す振動数の観測結果と計算結果を比較して示す。図 -

57に応答最大加速度値の観測結果と計算結果の比較を示す。図 - 57によれば、応答最大加速度の計算結果はほぼ観測結果に一致していることが解る。ケーソン天端の応答最大加速度の計算結果が観測結果よりかなり小さい2記録は、記録開始で大加速度を示している記録であり、このことが両者の違いに影響していると考えられる。マウンド天端の応答加速度でも計算結果が観測結果よりかなり小さい記録が一つあるが、この理由は不明であり、今後の検討課題である。図 - 58には周波数伝達関数のピークを示す振動数の計算結果と観測結果の比較を示す。1記録だけ計算結果と観測結果の差がやや大きい、その外は比較的良く一致している。この差が大きい記録は記録開始で大加速度を示しているS - 1494である。

表 - 7 に動水圧の計算値と観測値を比較して示す。また、図 - 59には動水圧の観測値と計算値の比の深さ方向の分布を示す。図 - 21に示したように観測された動水圧波形は加速度波形に似ており、計算された動水圧波形も加速度波形に似ているので、動水圧波形の観測結果と計算結果の比較結果は加速度波形の比較結果と同じ傾向を示している。図 - 59に示すようにケーソンに作用する動水圧は水面近くでは観測値が計算値を上回っているが、

表 - 6 観測値と計算値の比較

入力波形	応答加速度 (Gal)				伝達関数のピークの振動数 (Hz)			
	ケーソン天端		マウンド天端		ケーソン天端		マウンド天端	
	観測値	計算値	観測値	計算値	観測値	計算値	観測値	計算値
S - 554	163	103	-	67	1.3	1.3	-	1.2
S - 1210	269	272	-	139	1.0	1.0	-	0.9
S - 1274	27	30	-	15	1.5	1.6	-	1.6
S - 1408	41	36	22	18	1.5	1.6	1.5	1.5
S - 1424	35	40	19	25	1.5	1.6	1.3	1.4
S - 1494	173	112	80	60	1.6	1.3	1.4	1.3
S - 1644	23	20	10	16	1.4	1.6	1.6	1.6
S - 1658	56	70	-	43	1.2	1.3	-	1.3
S - 1964	82	80	22	54	1.4	1.4	1.4	1.4
S - 1974	117	130	79	72	1.1	1.3	1.4	1.3
S - 2037	46	31	18	14	1.5	1.6	1.6	1.5
S - 2054	29	32	18	19	1.5	1.6	1.5	1.5
S - 2062	125	119	110	60	1.4	1.2	1.4	1.2

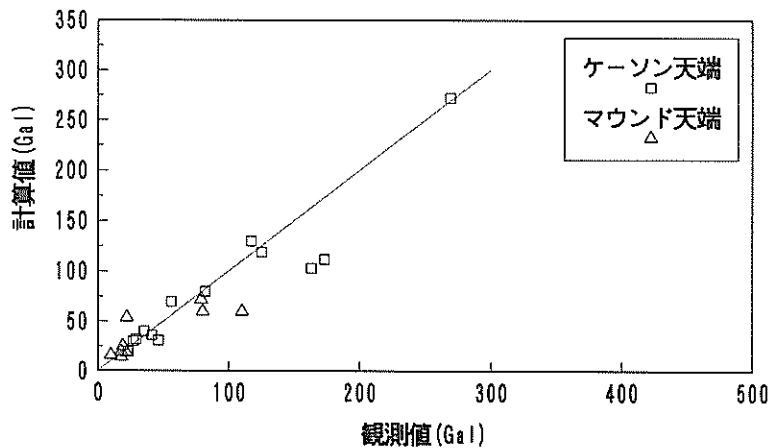


図 - 57 最大加速度の観測値と計算値の比較

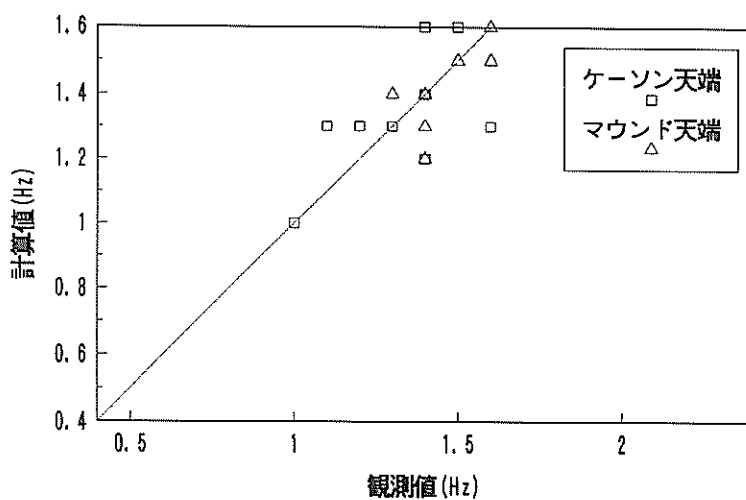


図 - 58 伝達関数のピークを示す振動数の観測値と計算値の比較

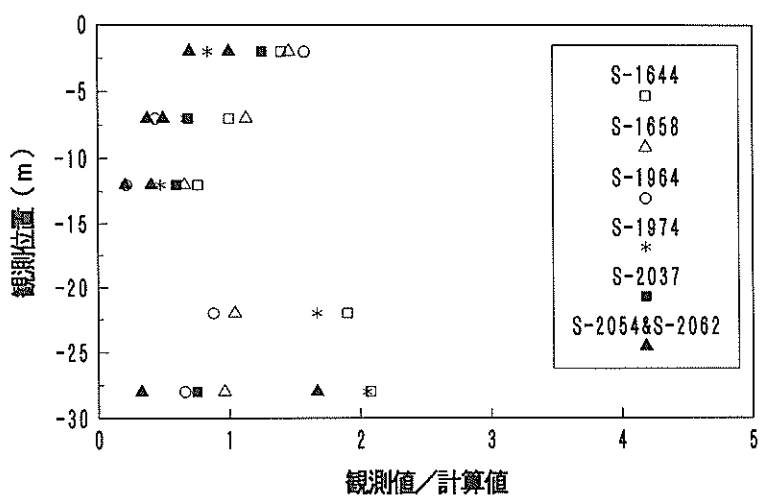


図 - 59 動水圧の観測値と計算値の比の深さ方向の分布

表 - 7 動水圧の観測値と計算値の比較

観測位置 (m)	S - 1644		S - 1658		S - 1964		S - 1974	
	観測値	計算値	観測値	計算値	観測値	計算値	観測値	計算値
-2	7	5	19	13	19	12	21	25
-7	12	12	26	23	17	39	28	42
-12	16	21	27	41	15	69	29	60
-22	19	10	26	25	28	32	75	45
-28	27	13	26	27	23	35	90	44

観測位置 (m)	S - 2037		S - 2054		S - 2062	
	観測値	計算値	観測値	計算値	観測値	計算値
-2	10	8	6	6	21	30
-7	9	13	7	14	27	72
-12	12	20	9	22	23	108
-22	—	8	—	11	—	36
-28	6	8	4	12	75	45

単位：(gf/cm²)

水深の増加とともに、観測値が次第に計算値より小さくなっている。水面近くで観測値と計算値の比が1以上になっているが、水面近くなので水深の深い位置より動水圧値は小さく、観測値と計算値の差はそれ程大きくない。動水圧合力では計算値は観測値より大きくなっている。

マウンド斜面に作用する動水圧の観測値と計算値の比は1前後で大きくばらついている。動水圧の観測値に振動数の高い成分が多く含まれており、この点を十分検討しなければこうした観測値と計算結果を一致させることはかなり難しいと思われる。

7. 結論

1) 捨石マウンドとコンクリートケーソン（高さはそれぞれ19.2mと20.3m）からなる大船渡湾口防波堤の最大加速度応答比（ケーソン天端と基礎岩盤の最大加速度の比）は1以上の値を示し、防波堤が明瞭な増幅応答を示していることがわかった。防波堤法線直角方向では、この最大加速度応答比は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少し、記録された中でもっとも大きい基礎岩盤の最大加速度値161Galで、その比は1.7となった。

2) 強震記録より求められたケーソン天端の基礎岩盤に対する周波数伝達関数によれば、周波数伝達関数の一次のピークを示す振動数は基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少した。

3) 1)および2)の結果は、防波堤マウンド材が非線型性を有することによるものと考えられる。

4) 動水圧観測より得られたコンクリートケーソンに作用する動水圧はウェスターガートの簡略公式を近似的に適用（ケーソン天端とマウンド天端の最大加速度の平均値を重力加速度で除した値を震度として与えている）した計算値よりやや小さい値を示した。

5) 等価線形化手法による有限要素法の水-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。この比較結果によると、応答最大加速度と周波数伝達関数

の一次のピークを示す振動数は観測値と計算値はほぼ一致した。ケーソンに作用する動水圧合力は、計算値が観測値よりやや大きい値を示した。基礎岩盤の最大加速度の大きい場合では、加速度波形も計算値は観測値とかなり良い一致を示した。こうしたことから、ここで示した地震応答計算手法によりコンクリートケーソンと捨石マウンドからなる防波堤の地震時の挙動が推定可能であると判断した。

この検討で用いた材料定数を同種の構造物について同じ計算手法で用いる場合には問題ないが、そうでない場合、たとえばここで検討した地震応答計算手法と異なる計算手法による場合等についてここで示した材料定数をそのまま用いる時はその妥当性について十分検討する必要がある。

地震観測位置は防波堤の開口部に近いので、強震記録、動水圧記録に防波堤の開口部の影響が含まれていることが推察される。これが観測値にどの程度影響しているのかは防波堤の三次元モデルの地震応答計算により検討可能であるが、これは今後の検討課題である。

本報告で指摘した課題は、現在、釜石湾口防波堤で実施している強震観測および動水圧観測の記録の取得を待って、将来検討を実施する予定である。

（1992年12月31日受付）

謝辞

本報告は港湾地域強震観測の成果によるところが大であり、大船渡湾口防波堤に設置されている強震計、動水圧計の管理に当たっていた第二港湾建設局宮古港工事事務所、岩手県港湾課、大船渡土木事務所、本研究で対象とした強震記録の数字化等に当たっていた港湾技術研究所情報センター倉田栄一主任研究官（当時構造部主任研究官）の協力に謝意を表する。また、上田茂構造部長には本報告の取りまとめに関して貴重な助言をいただいた。最後であるが、心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 土田肇, 上部達生, 倉田栄一, 林聰: 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
- 2) 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-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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 上部達生, 長田信: 大型せん断リング土槽振動実験によるレキ材の動的変形特性, 港湾技研資料, No.663, 1990年3月
- 7) 土田肇, 山田通一郎, 倉田栄一: 港湾地域強震観測地点資料 (その1), 港湾技研資料, No.34, 1967年11月, pp.83~84

- 8) 倉田栄一, 土田肇, 須藤克子: 港湾地域強震観測地点資料 (その2), 港湾技研資料, No.107, 1970年11月, pp.61~64
- 9) 倉田栄一, 野田節男: 港湾地域強震観測年報(1981), 港湾技研資料, No. 426, 1982年6月
- 10) 井合 進, 倉田栄一, 土田肇: 強震記録の数字化と補正, 港湾技研資料, No.286, 1982年6月
- 11) 桑島 進, 永井康平: 任意個数試料FFT (Fast Fourier Transform) 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) 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
- 13) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Brekke T. L.: A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. SM3, 1968, pp.637~659
- 14) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀: 地震時のおける地盤と構造物の間の剝離と滑動, 土木学会論文報告集, No. 302, 1980年10月, pp. 31~41
- 15) 土岐憲三, 三浦房紀, 寺田倫康: 水-地盤-護岸構造物系の地震応答解析, 京都大学防災研究所年報, No.25,B-2, 1982年4月, pp.1~17

記号表

$A(f)$	: 周波数伝達関数
e	: 間隙比
G_0	: せん断弾性係数 (kgf/cm^2)
$P_x(f)$	: 入力 $X(t)$ のパワースペクトル
$P_y(f)$	: 出力 $Y(t)$ 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)
$r(f)$	: コヒーレンス
$Z_{yx}(f)$	: コロススペクトルの絶対値
$\theta(f)$	: 位相差
σ'_m	: 平均有功主応力 (kgf/cm^2)

港湾技研資料 No.746

1993. 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 ニッセイエプロ株式会社

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

Copyright © (1993) 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。