

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

運輸省 港湾技術研究所 上部達生
 " " 土田 肇
 " " 倉田栄一

1. まえがき

近年、水深の大きい海中に大水深フィルタイプ構造物を建設する事例が増えつつある。ここでいう大水深フィルタイプ構造物は大規模な捨石マウンドから成る構造物、あるいは大規模な捨石マウンドとその上に設置された剛構造（たとえばコンクリートケーソン）から成る構造物を指す。具体的としては、昭和42年に完成した大船渡湾口防波堤（最大水深-38m）、現在建設中の釜石湾口防波堤（最大水深-65m）がある。この両防波堤は津波に対して湾内を防護することを目的とした津波防波堤である。

地震の発生が予想される地域にこのような大水深フィルタイプ構造物が建設される場合には、耐震性の検討が重要な課題である。特に津波防波堤は、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から、耐震性の検討はきわめて重要である。

ここで対象としている大水深フィルタイプ構造物は先に例として挙げた大船渡湾口防波堤である。この防波堤は図-1に示すように捨石マウンドの上にコンクリートケーソンが設置された構造となっている。捨石マウンドはその高さが19.2mもあり、かなり規模の大きい堤体である。大船渡湾口防波堤では昭和42年の完成と同時に強震計が設置され、強震観測が実施されてきた。また、昭和57年からは動水圧観測も行われてきている。この大船渡湾口防波堤で強震記録および動水圧記録が得られているので、本研究ではこれらの記録を以下の点について検討する。

- i) 大水深フィルタイプ防波堤の振動性状の把握
- ii) フィル材料の動的性状の把握
- iii) 大水深フィルタイプ防波堤に作用する動水圧

2. 大船渡湾口防波堤

大船渡湾口防波堤は岩手県の大船渡湾の湾口に位置している津波防波堤である。防波堤位置における最大水深は-38mであり、防波堤の延長方向の中心線（防波堤の法線）方向はほぼ南北方向である。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736mである。防波堤ケーソンの延長は両岸からそれぞれ291m、243mであり、この間202mは航路用として防波堤開口部となっている。

大船渡湾口防波堤の完成後に1968年十勝沖地震があったが、この際に防波堤は安定を維持するとともに、津波に対する湾内防護施設として立派に機能した¹⁾。

3. 強震観測および動水圧観測

(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地震観測を実施してきている²⁾。この港湾地域強震観測網の一地点として大船渡湾口防波堤で強震観測が実施されている。図-1、2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動水圧観測も実施されており、図-1に示す位置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

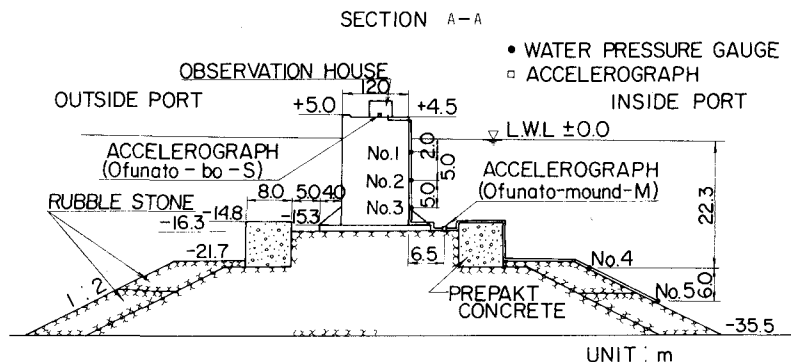


図-1 大船渡湾口防波堤の断面図

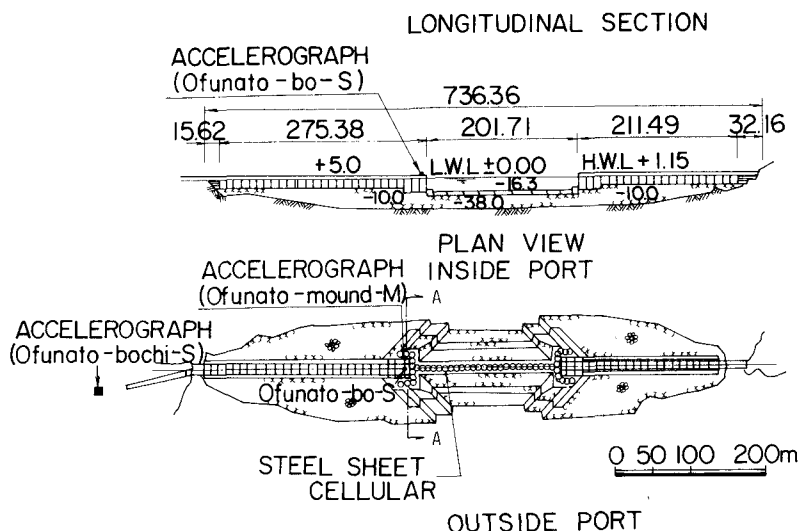


図-2 大船渡湾口防波堤の縦断面図と平面図

種類、設置年を表-1に示す。図-2に示すように、基礎岩盤上の強震計は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ているが、この岩盤は防波堤基礎岩盤と連続しているものである。基礎岩盤の強震計の設置地点は他の計測器が設置されているA-A断面位置とは約400m離れている。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。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、同期するようになっていなかった。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。したがって、防波堤のマウンド天端に強震計が設置された昭和54年度以後は、3つの強震計の加速度記録は同期のとれたものとなっている。

4. 観測結果

(1) 強震観測結果

表-2、3に主要な記録を示す。表-2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り、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-3の記録は動水圧計が設置された以降の記録である。表-2、3に示す強震記録の最大加速度は数字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に定規をあてて読み取った値である。表-2、3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開始される以前に最大値が発生し、その近傍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た。また、表中の口内の数値は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

表-1 強震計および動水圧計の概要

Brief name of station	Installation site	Measuring item	Used instrument		Start year of observation
			Type of measuring system	Model	
Ofunato-bo-S	on caisson	Acceleration	Mechanical	SMAC-B2	1967
Ofunato-mound-M	on mound		Electro-magnetic	ERS-C	1979
Ofunato-bochi-S	on rock		Mechanical	SMAC-B2	1968
Ofunato-do-1~3	Side of caisson	Hydrodynamic pressure	Strain-gauge	DAMS-2006	1982
Ofunato-do-4,5	Slope of mound			DAMS-2006	1982

表-2 強震記録 (1970年~1982年10月)

Date and time	Earthquake data					Strong motion earthquake records				
	Location of hypocenter			Depth (km)	Magni-tude	Record number	Installation site	Max.acceleration(Gal)		
	Epicentral region	Latitude	Longitude					N-S	E-W	U-D
1970- 9-14*	E off S Tohoku	38°41'	142°40'	40	6.2	S- 554 S- 569	on rock on caisson	25 90	66 163	21 29
1977- 6- 8	E off S Tohoku	38°28'	141°20'	70	5.8	S-1022 S-1021	on rock on caisson	49 139	79 195	38 61
1978- 6-12*	E off S Tohoku	38°09'	142°10'	40	7.4	S-1210 S-1211	on rock on caisson	138 350	161 269	60 106
1978- 6-14	E off S Tohoku	38°21'	142°29'	40	6.3	S-1212 S-1214	on rock on caisson	4 13	4 39	1 6
1978- 6-21	E off S Tohoku	38°15'	142°00'	50	5.8	S-1223 S-1222	on rock on caisson	10 (13)	4 (16)	4 (10)
1978-12- 6*	Near Kunashiri Is.	44°44'	146°58'	100	7.7	S-1274 S-1275	on rock on caisson	5 13	3 27	3 5
1981- 1-19* (3:17)	E off Mid-Tohoku	38°36'	142°58'	0	7.0	S-1408 M- 437 S-1409	on rock on mound on caisson	9 24 [18] 15	9 37 [22] 41	5 25 [14] 11
1981- 1-19 (10:14)	E off Mid-Tohoku	38°36'	143°05'	0	6.0	S-1412 M- 438 S-1411	on rock on mound on caisson	1 3 3	1 7 10	1 3 1
1981- 1-23*	S coast off Hokaido	42°25'	142°12'	130	7.1	S-1424 M- 449 S-1422	on rock on mound on caisson	8 28 [18] 20	8 25 [19] 35	4 21 [15] 10
1981-12- 2	E off N Tohoku	40°53'	142°36'	60	6.2	S-1456 M- 501 S-1455	on rock on mound on caisson	4 16 (13)	4 13 (25)	1 16 4
1982- 6- 1	E off S Tohoku	38°41'	143°20'	40	6.2	S-1494 M- 544 S-1493	on rock on mound on caisson	21 68 [36] 42	40 100 [80] 173	9 42 [24] 32
1982- 7-23	E off Kanto	36°11'	141°57'	30	7.0	S-1524 M- 570 S-1523	on rock on mound on caisson	4 8 5	3 10 18	4 6 3

* Records analyzed in this report

** S of record number : Records of SMAC-B2
M of record number : Records of ERS-C
*** Value in □ means SMAC-B2 equivalent acc.

表-3 強震記録および動水圧記録 (1982年11月~1986年)

Date and time	Earthquake data					Strong motion earthquake records					Hydrodynamic pressures record	
	Location of hypocenter			Depth (km)	Magni-tude	Record number	Installation site	Max.acceleration(Gal)			Instal-lation level(m)	Max. value (gf/cm ² :x98Pa)
	Epicentral region	Latitude	Longitude					N-S	E-W	U-D		
1983- 5-26	W off N Tohoku	40°21'	139° 5'	14	7.7	S-1584 M- 637 S-1583	on rock on mound on caisson	6 12 25	6 16 31	4 10 5	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	12 18 21 25 24
1983-10-14	E off S Tohoku	38°41'	142° 3'	63	5.3	S-1644 M- 700 S-1633	on rock on mound on caisson	16 36 [21] 16	10 22 [10] 26	5 19 [11] 6	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	7 12 16 19 27
1983-11-11	E off S Tohoku	38°53'	142° 6'	47	5.4	S-1658 S-1657	on rock on mound on caisson	12 — 17	21 — 56	5 — 10	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	19 26 27 26 26
1985- 2- 3	Kinkazan Region	38°56'	142°10'	56	4.7	S-1817 M- 879 S-1818	on rock on mound on caisson	8 10 9	9 12 24	3 9 3	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	6 — 12 12 11
1985- 8-12	E off Fukushima	37°42'	141°54'	52	6.4	S-1876 M- 945 S-1875	on rock on mound on caisson	9 — 32	10 — 51	5 — 16	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	8 14 14 32 27
1986- 3- 2	E off Miyagi	38°28'	142°19'	33	6.0	S-1917 M-1010 S-1916	on rock on mound on caisson	6 36 [19] 11	11 28 [20] 39	4 26 [13] 4	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	17 17 21 29 30
1986-12- 1	E off Iwate	38°54'	142° 5'	50	6.0	S-1964 M-1062 S-1963	on rock on mound on caisson	36 54 [24] 19	36 35 [22] 70	13 40 [26] 13	- 2 - 7 -12 -22.3 -28.3	23 20 23 38 49

** S of record number : Records of SMAC-B2
M of record number : Records of ERS-C
*** Value in □ means SMAC-B2 equivalent acc.

の最大加速度である。この変換については後述する。

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。この研究では強震記録の水平動2成分のうちこの法線直交方向の成分について検討している。

表-2、3に示す19地震の強震記録から*で示した5つの強震記録を選択し、次章の防波堤の周波数伝達

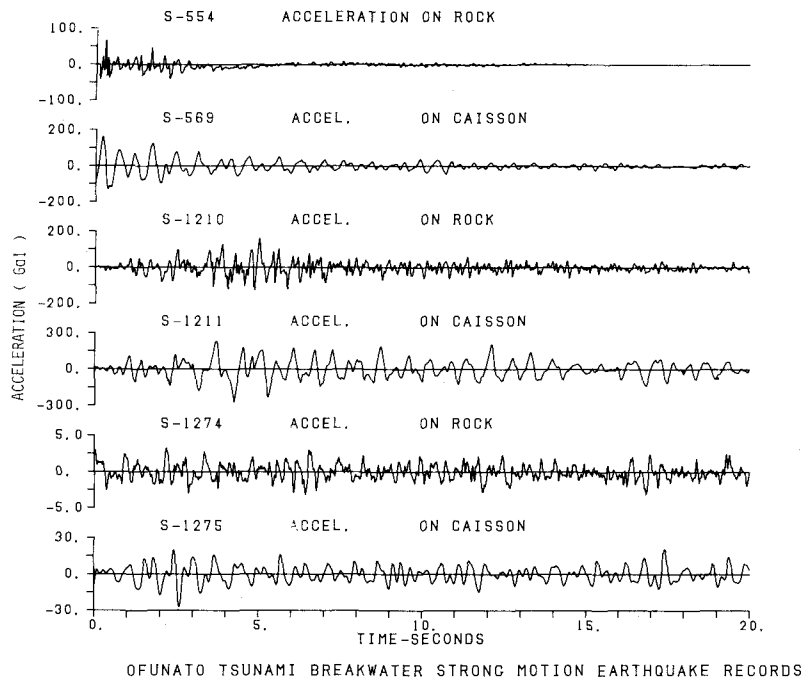


図-3 大船渡湾口防波堤の強震記録

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、前述したかさね書きされた波形を示す記録は除いた。選択したこれら5つの強震記録は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を行った。デジタル化した記録を図化したものを図-3に示す。

(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、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で同一に議論することは避けた。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²⁾によった。図-3に示したマウンド天端の加速度波形は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。

(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しても大船渡防地-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。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、以後の検討に用

EARTHQUAKE OF OCT. 14, 1983

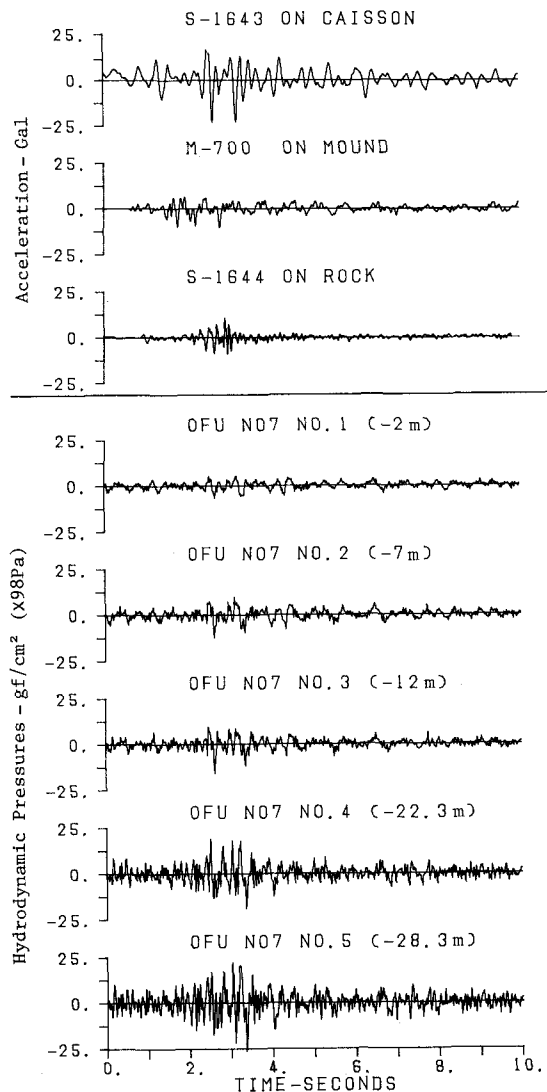


図-4 強震記録および動水圧記録

いることとした。図-3の加速度波形はこのようにずらした後の波形である。

(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61年12月までに22地震について記録が得られている。22地震の記録のうち動水圧の値が小さいものを除いた主要な7地震の記録の最大値を表-3に示す。図-4には動水圧波形の1例を強震記録波形と同時に示す。

5. 観測記録の解析と考察

(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最大加速度は、表-2、3に示したように基礎岩盤の最大加速度より大きい。また、図-3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で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かをみるために、ケーソン天端の最大加速度を基礎岩盤のそれと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-5である。マウンド天端の最大加速度応答比はS-MAC-B₂強震計の記録と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-5には記録のスタート地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-5をみると防波堤は最大加速度応答比が1以上の応答を示していることがわかる。マウンド天端の最大加速度応答比のデータは5記録と少なく、2つの記録が1.0以下であり、他は2.0~2.4の値を示している。一方、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が1~5Galで5~11と大きい値を示しているが、基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少し、基礎岩盤の最大加速度が161Galで、その比は1.7となっている。このようにケーソン天端の最大加速度応答比が基礎岩盤の最大加速度の増加とともに減少しているのは、防波堤のマウンド材の非線形特性によるものであると考えられる。

(2) 防波堤の周波数伝達関数

ここでは、デジタル化した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により防波堤の固有振動数を推定する。

パワースペクトル、周波数伝達関数の計算は図-3に示した強震記録の最初から10秒間について実施した。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10Hzまでとした。

図-6には防波堤ケーソン天端の周波数伝達関数を4つの地震について示す。図-6に示すS-1275には0.2Hzにピークが認められるが、これはS-1275に長周期成分の誤差が含まれていたことによるものであり、固有振動数とは考えなかった。1.8Hzあるいは1.9Hzに二次の固有振動数があり、一次の固有振動数は最大加速度の増大とともに減少している。これを図に示したのが図-7である。このように一次の固有振動数が基礎岩盤の最大加速度とともに減少しているのは、防波堤のマウンド材の非線形特性によるものと考えられる。すでに示した図-5およびここに示した図-7にみられるように、マウンド材の非線形特性が20Gal程

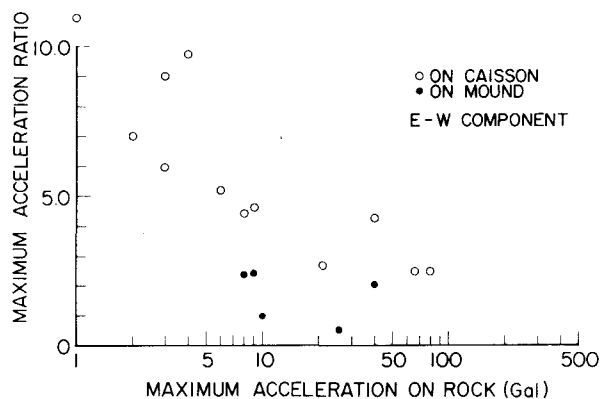


図-5 最大加速度応答比

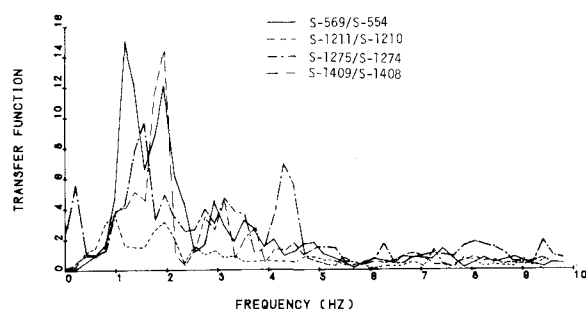


図-6 周波数伝達関数

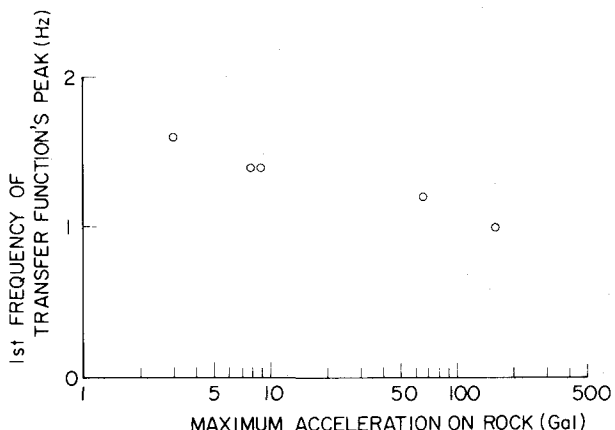


図-7 周波数伝達関数のピークを示す1次の振動数

度の低い最大加速度ですら認められるのは興味深い。

(3) 動水圧の深さ方向の分布

表-3で大船渡マウンド-Mの強震記録のデジタル化が実施されている動水圧記録の深さ方向の分布を図-8に示す。ケーソン天端とマウンド天端の最大加速度を平均し、それを重力加速度で除した値を震度とし、この震度で動水圧記録の最大値を除した値が図に示されている。図中の点線はWestergaardの簡略式で水深をマウンド天端までの水深とした値である。観測値の分布は各地震で異なっている。また、観測値はWestergaardの簡略値の計算値より小さい値を示している。防波堤のケーソンは捨石マウンドの上に設置され、大きな応答を示しているため、剛な鉛直壁に作用する動水圧を与えるWestergaardの簡略公式をそのまま適用することに問題があると考えられる。このように構造物に作用する動水圧を今後詳細に検討するには、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。

防波堤のマウンド斜面のように大きな捨石からなる斜面に作用する動水圧についてはその観測方法等の種々の検討事項があり、これについては今後の検討課題とする。

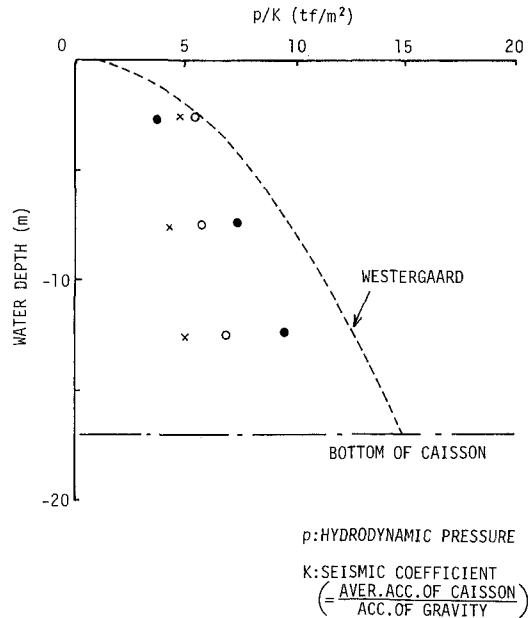


図-8 動水圧の深さ方向の分布

6. 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）は基礎岩盤の最大加速度が1~5Galで5~11と大きな値を示した。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、記録された中で最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形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Westergaard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。

謝辞：本報告は港湾地域強震観測の成果によるところ大であり、大船渡湾口防波堤に設置されている強震計あるいは動水圧計の保守管理にあたっている運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所、岩手県港湾課、岩手県大船渡土木事務所の協力を表す。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局・港湾技術研究所・第二港湾建設局・北海道開発局港湾部：1968年十勝沖地震港湾被害報告・津波調査報告、pp.264~267、1968年12月
- 2) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：港湾地域強震観測年報(1982)、港湾技研資料、No.486、1983年6月