

3. 計測の概要

試験堤に取り付けた計測機器を表-1に示す。

外力としての波浪については、試験堤から約 250 m 離れた地点に水圧式波高計と超音波式の波高計、波向計を設置して観測を実施している。サンプリング周波数 20 Hz で計測されたデータは、海底ケーブルで陸上観測室に送られ、カセットテープで自動的に格納されるようになっている。図-2 に試験堤、波高計、観測室の位置を示す。

4. 波浪データと砕波変形

試験期間中に取得された高波浪の観測データの一部を表-2 に示す。

当海域は漂砂現象が著しく、深浅測量によれば試験堤沖 100 m から 200 m の範囲に砂の堆積が生じ、1993 年 12 月で D.L.-5.5 m, 1994 年 8 月で D.L.-5.0 m の浅部が出現していた。この浅部領域で砕波した波が、試験堤に作用すると考えられるので、砕波帯内の波高算定図を用いて砕波変形後の波高を算出し、同表に示している。ケース 3~6 の 9319 号台風と 9407 号台風時における観測値の H_{max} は、6 m を超えているが、砕波減衰により 2 年確率波程度に低減している。

なお、砕波変形後の波高を観測するため試験堤前 80 m

表-2 波浪観測値と砕波計算波高

ケース No.	年月日時	波浪観測値				砕波計算波高		β (°)	潮位 (m)	備考
		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	H_{max} (m)	T_{max} (s)	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)			
1	93/8/10 0:50~1:10	2.86	10.5	4.73	12.0	3.20	5.15	19	+1.55	9307号台風
2	93/8/27 8:50~9:10	3.11	12.3	5.23	13.6	3.50	4.79	23	+0.64	9311号台風
3	93/10/7 9:50~10:10	5.26	11.1	6.19	11.8	4.55	5.69	30	+2.05	9319号台風
4	94/7/24 19:30~19:50	4.19	10.4	6.50	11.7	4.03	5.59	21	+2.32	9407号台風 水平波力最大
5	" 19:50~20:10	4.79	10.4	6.85	11.5	4.25	5.68	27	+2.36	9407号台風 潮位最大
6	" 21:50~22:10	4.26	10.4	6.39	13.6	3.93	5.35	26	+1.99	9407号台風
7	94/8/13 5:50~6:10	4.06	10.3	5.75	11.3	3.66	4.86	13	+1.20	9414号台風
8	94/9/29 15:50~16:10	3.80	11.6	5.92	11.9	3.80	5.35	26	+1.88	9426号台風

の位置に直記式の水圧式波高計 (DLUP 型) を設置し、1994 年 9 月 21 日から 11 月 21 日までの期間について観測を行い、砕波計算波高と観測波高がおおむね対応することを確認した。

5. 波力特性

(1) アーチ部曲面に作用する波圧

a) 波圧記録

滑動堤の波圧計の全測点の観測を行った平成 5 年のデータの中から、水平波力が大きい 9319 号台風時のケース 3 を選び、アーチ部外周面の波圧波形を図-3 に示す。同図から、各測点の位置によって大きさとピーク波圧の起時に違いがあることが確認される。

波圧の大きさは静水面付近の WPS-6 で最大で、上にいくにしたがい曲面の影響を受けて小さくなっている。ピーク波圧の起時はアーチ下端部で速く、上部で遅い。各測点の波圧から求めた港外側外周面に作用する波力を同図の下に示すが、以上の特性から滑動を生ぜしめる水平波力 f_h (波の進行方向が正) は低減するといえる。また、水平波力 f_h が最大になるときに鉛直波力 f_v (下向き方向が正) も大きくなっており、滑動抵抗が増大す

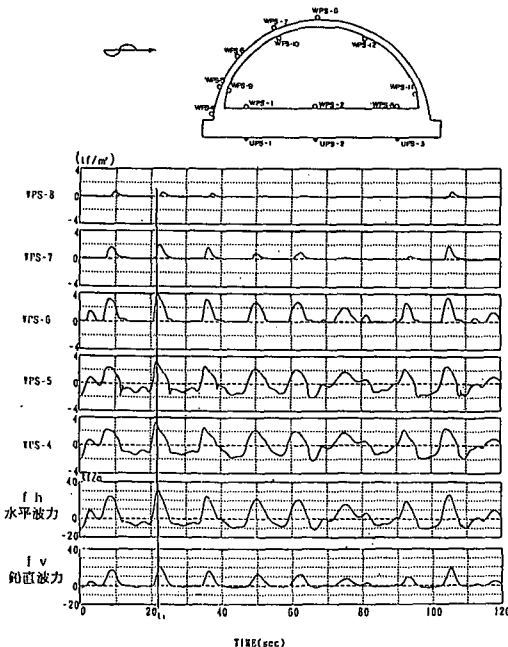


図-3 アーチ部外周面の波圧波形 (ケース 3)

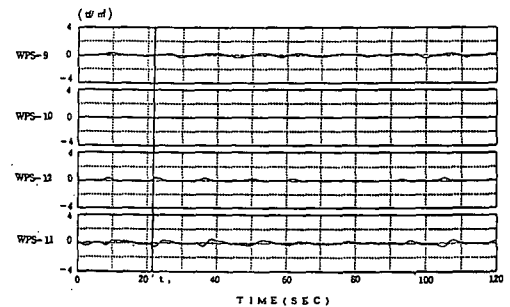


図-4 アーチ部内周面の波圧波形 (ケース 3)

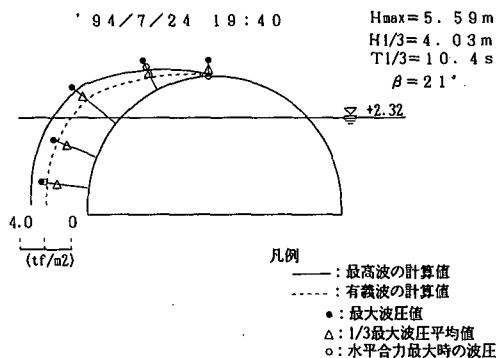


図-5 外周波圧の分布 (ケース 4)

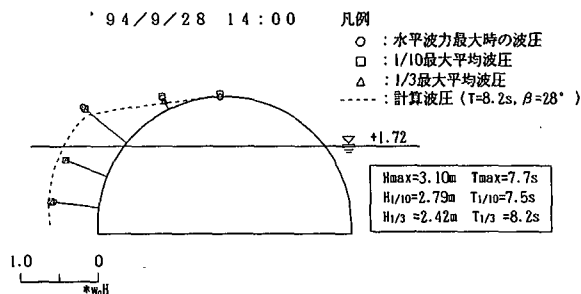


図-7 小さい波の外周波圧の無次元表示

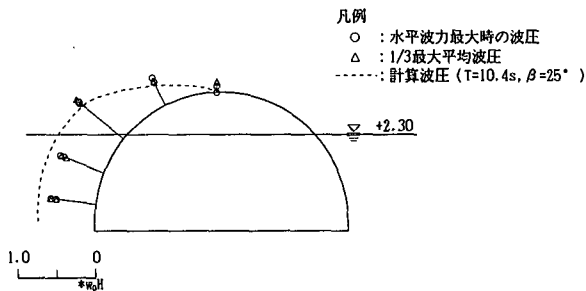
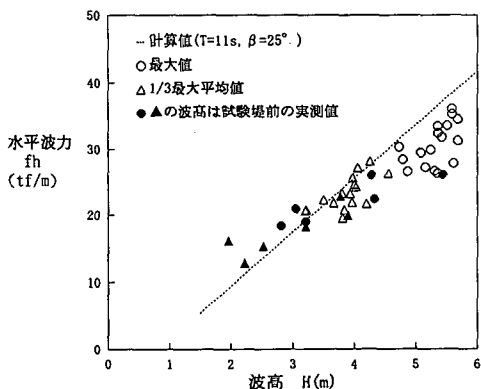


図-6 外周波圧分布の無次元表示 (9407 号台風時)

図-8 波高と外周面に作用する水平波力 (f_h) の代表値

る。

同時時間帯のアーチ部内周面に作用する波圧記録を図-4に示すが、港外側の上部 WPS-10 ではゼロで、他の測点の波圧の値も小さい。このことから、港外側開口部による内部波圧は開口率が1%と小さいため、生じていないといえ、内周面の波圧成分は無視できる。

b) 波圧分布

アーチ部外周面の実測波圧分布を、試験期間中における水平波力の最大値を記録した9407号台風のケース4について図-5に示す。

実測波圧として1/3最大平均波圧、最大波圧、水平波力最大時の波圧を選び、このときの有義波と最高波を入射波とした既報の波力式(谷本ら, 1988)による計算波圧を付した。同図によれば、滑動に関係する水平波力最大時の実測波圧は、静水面より上で計算波圧とほぼ一致している。しかし、静水面下ではどの実測波圧も計算波圧より小さくなっている。図-6は9407号台風時の他のケース5, 6も追加して1/3最大平均波圧を有義波高、水平波力最大時の波圧を最高波高で無次元表示したものであり、計算波圧は平均的な条件のものである。同図からも前述と同様な傾向がみられる。

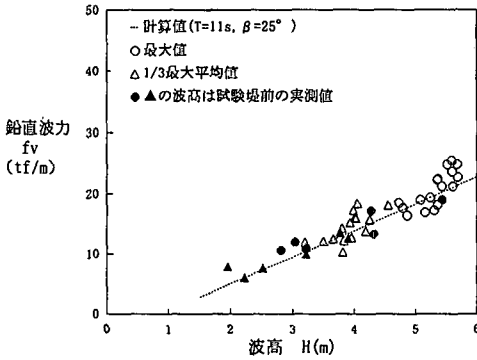
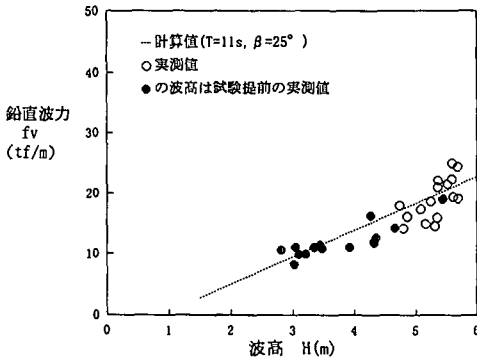
図-7は波高が静水面天端高より小さく、越波の影響が小さいケースの波圧分布を同様に無次元表示したものである。このとき用いた波高は試験堤前の実測波高

である。同図には有義波による計算波圧を付しているが、実測波圧はこの計算波圧に近い値である。このことから波高が大きいケースで静水面下の波圧低減現象が生じる1つの要因として、越波による影響が考えられる。

c) 波高と波力

図-8は波高と水平波力の代表値の関係をプロットし、既報の波力式(谷本ら, 1988)から算定した計算値を付したものである。図の白印は波高として碎波計算波高を用い、黒印は試験堤前80mの位置の実測波高を用いたものである。計算波圧の条件は、検討ケースの平均的な値を用いて周期11s、防波堤垂線に対する波向 $\beta=25^\circ$ 、潮位D.L.+1.8mとしている。同図において波高が大きくなるにしたがい、実測値が計算値より小さくなる傾向がみられ、波圧が大きい範囲で波力算定法の値は安全側となっている。この傾向は、前述の実測波圧分布の傾向と対応している。

同様に波高と鉛直波力の代表値の関係を示したものが図-9であるが、実測値と計算値はほぼ一致している。滑動時は水平波力が最大になる時点と考えられ、このときの鉛直波力と最高波高の関係を図-10に示す。鉛直波力最大時が、水平波力最大時の位相より少し遅れることから、計算値に比較してやや小さめの点が多くなっているが、計算値でおおむね代表できる範囲である。

図-9 波高と外周面に作用する鉛直波力 (f_v) の代表値図-10 波高と水平波力最大時の鉛直波力 (f_v)

(2) 底版に作用する揚圧力

図-11 に示す揚圧力 UPS-2 の値とアーチ下部の水平波圧 WPS-4 の値を比較すると揚圧力の値が 20% 程度に低減している。これは底版に配置された鋼管の開口部 (開口率 10%) から揚圧力を生ぜしめる流れがケーソン内の遊水部に吸収され、水中に没した背面開口部から流出していくためであると考えられる。なお、同図には示していないが、UPS-1、UPS-3 の値も UPS-2 と同程度で

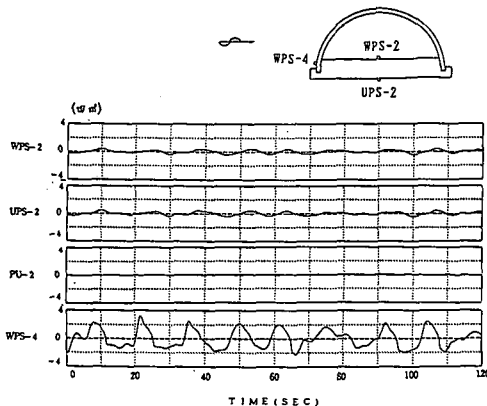


図-11 底版に作用する波圧 (ケース 3)

ある。

また、同時刻においては揚圧力 UPS-2 と底版上面の内部波圧 WPS-2 はほぼ同じ値を示し、その合力 PU-2 は 0.1 tf/m^2 オーダーであり、きわめて小さい。これは、底版開口部によりケーソン内の遊水部が、底版下面と連通し、同一の流れの場になるため遊水部の内部波圧 WPS-2 と揚圧力 UPS-2 がほぼ等しくなり、向きが逆であることから相殺されるためである。

以上のことから底版全体に作用する揚圧力は、外周波圧に比較して十分小さく、無視できる。

(3) 滑動合成波力と耐波安定性

滑動に寄与する波力として、アーチ部外周面に作用する水平波力 (f_h)、滑動抵抗に寄与する波力として外周面に作用する鉛直波力 (f_v) を考える。なお、ここでは底版の上面と下面に作用する揚圧力の合力 (P_v) の値も、滑動に寄与する成分とみなして考慮する。

外周面に作用する鉛直波力と揚圧力の合力 (F_v) を鉛直下向き波力と定義する。

$$F_v = f_v - P_v \quad \dots\dots (1)$$

この鉛直下向き波力に摩擦係数 (μ) を乗じて滑動水平力に換算し、滑動合成波力 (f_s) を式 (2) のように定義する。

$$f_s = f_h \mp \mu F_v \quad (\text{押波時} -, \text{引波時} +) \quad \dots\dots (2)$$

ここで摩擦係数 μ はコンクリートと捨石の設計値 0.6 を仮定するものとする。

試験期間中における滑動合成波力の最大値が出現しているケース 4 の滑動合成波力の時系列グラフを図-12 に示す。滑動合成波力の最大値は、 25.23 tf/m であり、水平波力の最大値 35.27 tf/m の約 70% に減少しており、鉛直下向き波力 (F_v) が滑動抵抗に寄与していることを確認できる。また、この時の潮位と堤体重量から計算される滑動ケーソンの滑動限界合成波力 $f_c = 25.12 \text{ tf/m}$ を若干上回っているが、滑動変位は見られなかつ

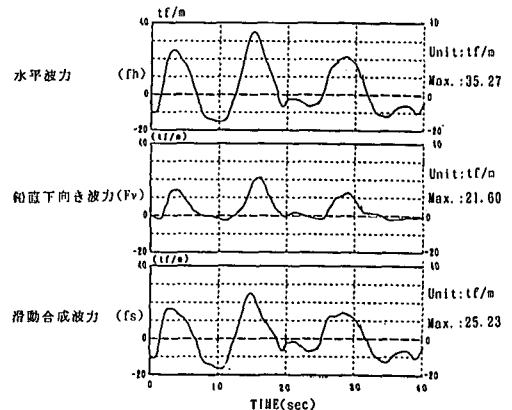


図-12 滑動合成波力の時系列グラフ (ケース 4)

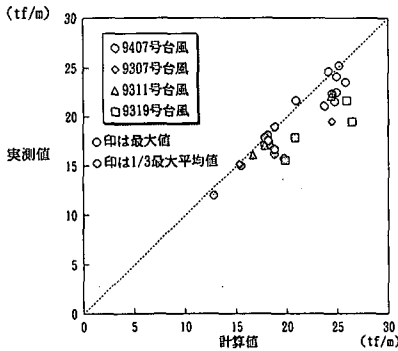


図-13 滑動合成波力の実測値と計算値

た。このことから摩擦係数は設計上期待している 0.6 以上が確保され、滑動限界状態についての耐波安定性が確認された。

図-13 は波力算定法より得られる水平波力と鉛直波力から同様に計算された滑動合成波力を横軸として、縦軸に実測値の滑動合成波力を、表-2 以外にも検討ケースを加えてプロットしたものである。滑動合成波力の実測値が波力算定法による計算値とほぼ同程度か、それ以下であり、計算値より小さい範囲に分布しているケースが多いことから、現行の波力算定法は平均的には安全側の値を示すといえる。このことは波高が大きいケースで、静水面下の波圧低減現象と水平波力の低減傾向がみられることと符合する。

6. 波力作用下の部材安全性

波力成分による鉄筋計の観測データのなかから前述のケース 4 を選び、最大実測応力の分布を図-14 に示す。

ここで応力は図の円周上をゼロとして、外方向を引張

応力、内方向を圧縮応力とする。同図に押波時の最大実測波圧による計算応力を付した。応力計算においてはコンクリートの設計基準強度を 400 kgf/cm^2 とし、コンクリートのひびわれが生じていないことから、コンクリートの引張応力を考慮している。波圧が大きい港外側アーチ外周部の静水面よりやや上部と、港内側のほぼ同じレベルの位置、ならびに港外側アーチ基部の応力が大きい実測応力の分布形状は、計算応力と類似している。

このことから、応力計算法の妥当性が確認でき、各点における鉄筋の最大実測応力は最大でも 229 kgf/cm^2 と小さいことから部材の安全性に問題がないといえる。また、実測応力が計算応力より小さく、計算法による応力が安全側である。なお、設計においては使用限界状態としてひびわれ幅を設定していることから、コンクリート引張応力を無視しており、さらに安全側になる。

7. おわりに

半円形ケーソン式防波堤の耐波安定性、部材の安全性について現地試験から貴重なデータが得られた。これらのデータ解析により、位相差による水平波力の低減効果と鉛直波力による滑動抵抗の増大、底版上面に作用する内部波圧により揚圧力がほぼゼロに低減すること、波高が大きい範囲で静水面下の波圧が低減し、滑動合成波力の実測値（揚圧力を含む）も計算値（揚圧力を無視）より小さくなることから、提案されている波力算定法が安全側であることを確認した。

また、堤体重量に摩擦係数の 0.6 を乗じた滑動抵抗力より大きい波力が作用したが、滑動しなかったことから、摩擦係数を設計値の 0.6 以上期待できることを確認した。

部材鉄筋の波力成分による実測応力は 200 kgf/cm^2 のオーダーであり、部材の安全性に問題はないこと、また計算応力が安全側であることを確認した。平成 7 年度には、これらの解析結果にさらに検討を加えて、半円形防波堤の設計マニュアルのとりまとめを行う予定である。なお、この実証実験は、半円形防波堤技術開発調査委員会（委員長 谷本勝利）の指導のもとに実施している。また、現地実証実験にあたっては運輸省宮崎港工事事務所山下所長をはじめとして、多くの方々の協力を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 谷本勝利・吉本靖俊・滑川伸孝・石丸敬純 (1987): 半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 551-555.
- 谷本勝利・滑川伸孝・関本恒浩 (1988): 半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力(その 2), 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 662-666.

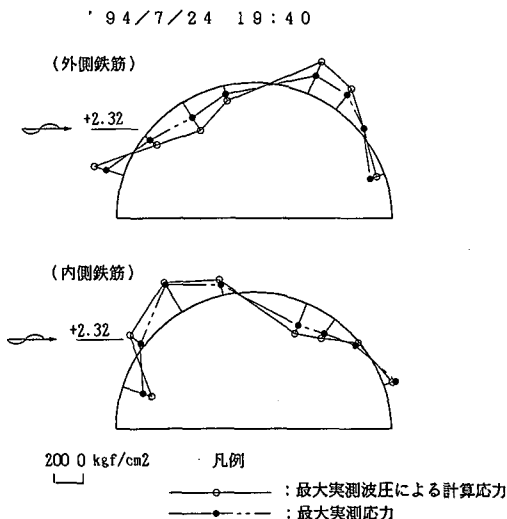


図-14 波力作用時の鉄筋応力分布 (ケース 4)