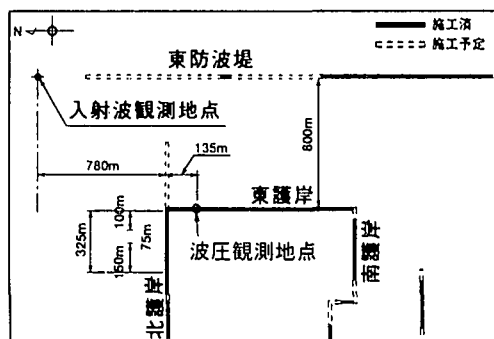


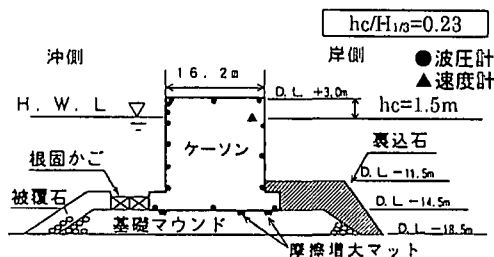
興野俊也*・貝沼憲男*・高橋由多加**
青野利夫***・藤原隆一****

本研究では、低天端ケーソン堤に作用する波力が低減していることを明らかにするため、実ケーソン堤での現地波圧観測を行い、現地観測データを用いて堤体に作用する波力特性を検討したものである。

このため、設計にあたっては外洋の波浪に対して安定性を確保できる断面として設計する必要がある、耐用年数期間（3年間）の遭遇確率（33%）を考慮し、設計波の再現期間を8年にするなどして、ケーソン堤体幅を16.2mとした。これは、護岸としての地震時安定上必要な堤体幅15.5mに比べ大きくしており、防波堤としての設計条件で断面が決定されている。図-2に東護岸の断面図、表-1に設計波浪条件を示す。



圖一-1 現地觀測位置圖



圖一-2 東護岸断面圖

・ 正会員	東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
・ 正会員	工修 東京電力(株)開発計画部総括グループ
・ 正会員	工博 東亜建設工業(株)技術研究所数値解析研究室
・ 正会員	工修 東洋建設(株)鳴尾研究所水工研究室

表-1 東護岸の設計波浪条件

有義波高	$H_{1/3}=6.4\text{ m}$
最大波高	$H_{\max}=11.4\text{ m}$
周期	$T_{1/3}=14\text{ s}$
入射角	$\beta=0^\circ$

3. 現地観測

(1) 観測概要

波圧観測は、図-2示すようにひずみゲージ式波圧計 ($\phi 110\text{ mm}$, 2 kgf/cm^2) をケーソンの前面に6台、底面、天端面、背面に各3台埋込み、ケーソン内部に埋設した海上観測室にてデータを収録した。また、観測室内に速度計 X, Y 2成分を設置した。観測方法は、陸上から約2 km 離れていることから海上観測室内での鉛蓄電池方式による海上無人観測方式を採用し、約23日間の観測後、データの回収を行った。入射波は、東護岸沖合約0.8 km、水深25 mの地点において、超音波式波高計と水圧式波高計を併用して観測した。計測は、毎正時の前後20分間行い、サンプリング間隔は、波圧計0.05秒、波高計0.5秒とした。観測は、1995年3～5月(低気圧)、9～11月(台風)および1996年9月～10月(台風)の約8ヶ月間行った。

(2) 波高観測結果

水面変動データは、超音波式および水圧式波高計から得られるデータを用いて算定した。水面変動は基本的に超音波式波高計からの出力を用いているが、高波浪時の水面は、砕波によって大量の気泡が発生し、超音波式波高計では欠測が多くなる。そのため、超音波式波高計で観測された水面変動から得られる波の数が、100波以下の場合、水圧式波高計から得られる水圧波形を水面波形に換算して用いた。水圧波形から水面波形への変換には水圧波の方向分散を考慮した橋本ら(1992)と同様の方法によって行い、超音波式波高計で得られた水面波形と比較して変換波形の妥当性を確認した。入射波および波圧、波力の有義波諸元は、ゼロダウングロス法により統計処理して算定した。

表-2に観測期間中の上位5波の諸元を示す。観測データは、 $H_{1/3}=2.5\text{ m}$ 以上のデータが147ケースあり、

表-2 観測された波浪

日 時	$H_{\max}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	波 向 (度)	$h_c/H_{1/3}$
1996. 9. 22 20時	11.29	6.08	11.2	98	0.31
19時	10.63	6.07	11.3	100	0.29
17時	10.64	5.98	9.2	95	0.28
18時	8.95	5.85	9.7	102	0.29
16時	8.73	5.82	9.5	102	0.29

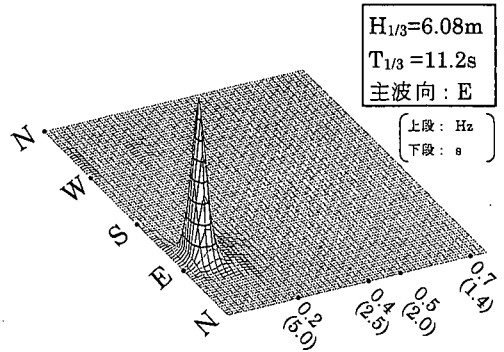


図-3 方向スペクトル解析結果 (1996. 9. 22. 20時)

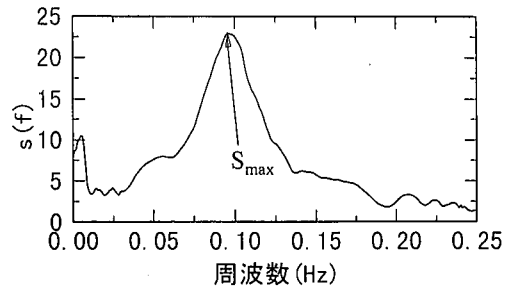


図-4 方向集中度パラメータの分布

観測期間中最大の波高を記録したのは1996年9月22日の台風17号通過時で、その日の20時に $H_{\max}=11.29\text{ m}$, $H_{1/3}=6.08\text{ m}$, $T_{1/3}=11.20\text{ s}$ の波浪が観測された。この波高は、設計有義波高の約95%であり、設計波高に近い記録が取得できた。この時の方向スペクトルを図-3に示す。拡張最大エントロピー原理法 (EMEP法, 橋本ら, 1993) を用いて方向スペクトルを解析した結果、台風の強風により急に発達した風波に見られるような尖った単一のピークを持ち、波向きは東護岸に直角に入射する波向きEが卓越しており、エネルギーは小さいものの方向分散が見られる分布となっている。また、図-4に示すように方向集中度パラメータ $S_{\max}$ を磯部 (1989) による方法で算定した結果、25程度であった。

4. 堤体に作用する波力特性

堤体に作用する波力は、前面、底面、天端面および背面に取り付けた波圧計によって測定し得られた波圧を積分して各面の波力を算出した。

(1) 波力の時系列と位相差

図-5は $H_{\max}=11.29\text{ m}$, $H_{1/3}=6.08\text{ m}$, $T_{1/3}=11.20\text{ s}$ (1996年9月22日20時)の波力時系列の例である。滑動合成波力 F_{st} は式(1)に示すように前面波力 F_h と底面波力 F_u に摩擦係数 μ を乗じたものとの和であり、式(2)は式(1)に越波による天端面波力 F_0 を考慮して算

出した F_{S2} である。摩擦係数は 0.6 とした。

$$F_{S1} = F_h + \mu F_u \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{S2} = F_h + \mu(F_u - F_0) \dots\dots\dots (2)$$

図-5 に示すように前面波力 F_h および底面波力 F_u は滑動合成波力 F_{S1} が最大となる位相とほぼ同時に最大となる。一方、天端面波力 F_0 および背面波力 F_b は周期により異なるものの前面波力に比べて 2 秒から 3 秒程度遅れて最大となる場合が多い。図-6 は $H_{1/3}=2.5\text{ m}$ 以上の 147 ケースについて、滑動合成波力 F_{S1} が最大となる時刻に対して各面の波力が最大となる位相差を有義波周期 $T_{1/3}$ で無次元化したものである。正が遅れの時間を示す。アーセル数については、藤原ら (1996) が行った低天端ケーソン堤の水理模型実験結果において、合田式が過大となる領域は h/L および H に関連していたことから、アーセル数 $H_{\max}L_{1/3}^2/h^3$ により整理した。前面波力の位相

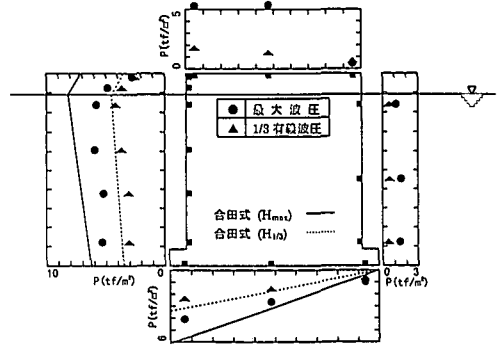


図-7 各面の最大波圧分布 (1996. 9. 22. 20 時)

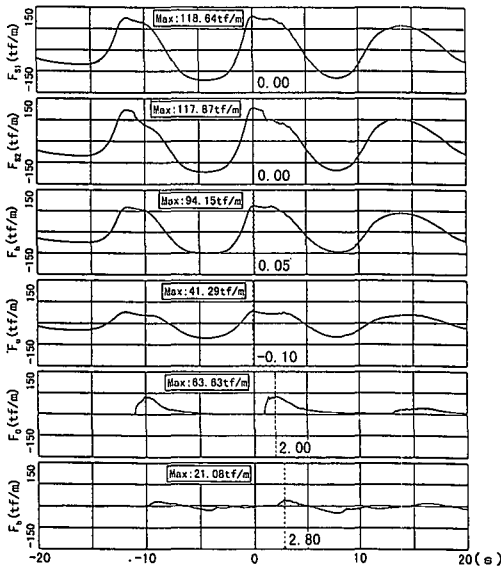


図-5 波力時系列の例 (1996. 9. 22. 20 時)

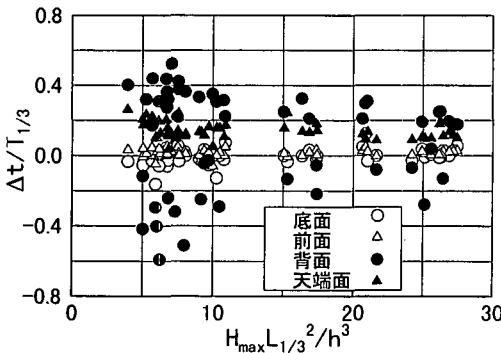


図-6 位相差とアーセル数の関係

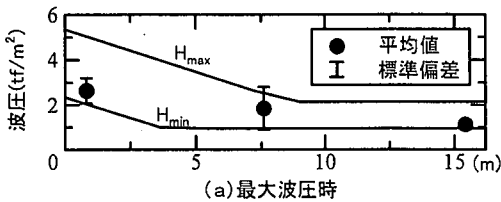
差は、滑動合成波力 F_{S1} が最大となる時とほぼ同時であるが、底面波力は若干早めに最大となる傾向がある。天端面波力は滑動合成波力 F_{S1} 最大時から $0.1T_{1/3} \sim 0.25T_{1/3}$ 程度の時間遅れがあり、アーセル数が大きくなると位相差が小さくなる傾向にある。背面波力は、天端面波力より位相差が大きく $0.25T_{1/3}$ 以上時間遅れがあり、堤体の滑動に対してはあまり寄与していない。

(2) 波圧分布

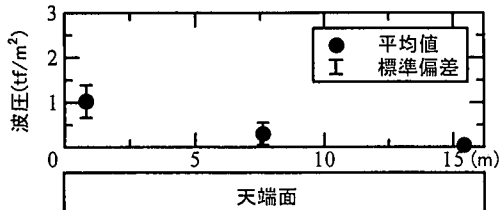
図-7 は最大波高発生時 (1996 年 9 月 22 日 20 時, $h_c/H_{1/3}=0.31$) の各面の最大波圧を示したもので、図中の線は合田式 (実線: 最大波高, 点線: 有義波高) である。入射波の最大波高については、波別解析で分離された個々の波の波高分布がレーリー分布に従うものと仮定し、観測された入射波浪の波数に対して導かれる確率分布の平均値を有義波高の実測値に乗じて算出した。周期は、有義波周期とした。

天端が低いケーソン堤に作用する波圧は、前面および底面波圧とも設計で用いられる合田式より小さくなっており、前面波圧分布は堤体下部よりほぼ一様な分布を示し、水面付近の波圧がより顕著に低減している。底面の圧力分布も三角形分布よりは台形分布に近い形状を示している。さらに、天端が低い場合高波浪時には越波が大きくなることから、低天端ケーソン堤の特性である天端面波圧とそれに伴う背面波圧が作用していることが分かる。

図-8 に有義波高 3 m 以上 51 ケース ($H_{1/3}=3.03\text{ m} \sim 6.08\text{ m}$, $T_{1/3}=7.5\text{ s} \sim 14.6\text{ s}$, $h_c/H_{1/3}=0.28 \sim 0.92$) の天端面波圧分布を示す。最大波圧時の平均値は、天端面中央の波圧のばらつきは大きいものの天端面沖側から岸側に向けてほぼ直線的な分布になっている。図中には高橋ら (1992) の提案した越流時の波力算定式で 51 ケースの最大波高, 最小波高を用いて天端面波圧を計算した結果を示したが、観測値の平均値 $\pm$ 標準偏差はほぼ計算値の上, 下限値の範囲に入っており、概ね妥当な天端面波圧



(a)最大波圧時



(b)滑動合成波力最大時

図一八 天端面波圧分布

を算定できると考えられる。また、最大波圧時は堤体前面最上部の波圧と天端面沖側の波圧はほぼ同じ値になっている。

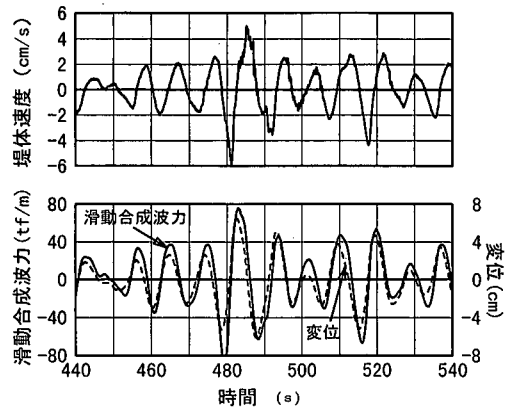
滑動合成波力 F_{S1} 最大時は、最大波圧時と位相差があるため天端面波圧が小さくなっている。波圧分布は、天端面沖側の波圧を頂点とする三角形分布になっており、波高、周期によっては天端面中央に波圧が作用しないこともある。天端面沖側の波圧は、堤体前面最上部の水平波圧の1/2程度しか作用していなかった。

5. 堤体の安定性評価

(1) 堤体の挙動特性

高波浪が来襲したときの低天端ケーソン堤の堤体挙動を把握するため、ケーソン内部に埋設した観測室の底版部に設置した速度計（水平2成分）を用いて検討した。堤体の変位量は速度計データを台形則で数値積分して算出した。ただし、直接数値積分を行うと変位データに長周期成分が含まれるため、変位データに対して数値フィルターをかけて長周期成分を取り除いた。数値フィルターの遮断周波数は変位データのスペクトル解析結果から算定した。図一9に1995年9月17日12時 ($H_{max}=7.77$ m, $H_{1/3}=4.75$ m, $T_{1/3}=8.9$ s)の堤体の速度と変位および滑動合成波力の時系列を示す。

図一9に示すように速度と変位の関係は、速度が0のときに変位が最大となる。また、変位と滑動合成波力の関係は、位相が多少ずれているものの滑動合成波力が大きくなると変位が大きくなる傾向にあり、個々の波と対応していることからケーソン堤は動的応答をしているものと考えられる。また、残留変位量については 10^{-4} のオーダーでありほとんど滑動していないと評価できる。

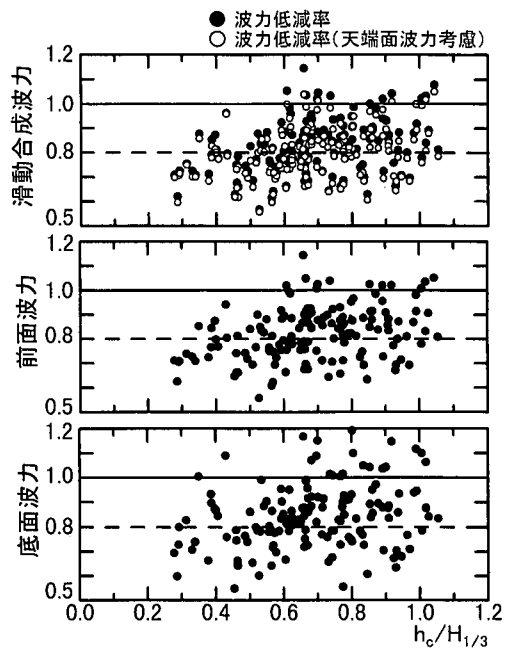


図一九 滑動合成波力と速度、変位の時系列

(2) 合田式との比較

合田式に対する波力の低減を把握するため、有義波高 $H_{1/3}=2.5$ m以上の147データを用いて、実測値と合田式の比を求めた。ここでは、前面波力、底面波力および滑動合成波力について、実測値と合田式の比を波力低減率 λ_K と定義する。図一10に相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ と波力低減率 λ_K 、図一11にアーセル数 $H_{max}L_{1/3}^2/h^3$ と波力低減率 λ_K の関係を示す。

図一10, 11に示すように前面波力は、相対天端高が $h_c/H_{1/3} \leq 0.4$ 、アーセル数 $H_{max}L_{1/3}^2/h^3 \geq 20$ では、波力低減率 $\lambda_K \leq 0.8$ であり、相対天端高が小さくなるほど、また、アーセル数が大きくなるほど波力が低減していることが



図一10 相対天端高と波力低減率

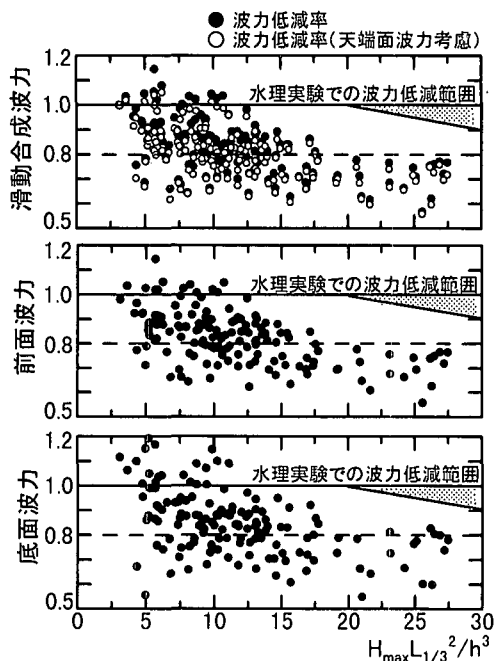


図-11 アーセル数と波力低減率

分かる。底面波力は、前面波力に比べばらつきが大きいものの前面波力と同様、アーセル数 $H_{\max} L_{1/3}^2 / h^3 \geq 20$ で波力低減率 $\lambda_K \leq 0.8$ となっている。

滑動合成波力は、前面波力とほとんど同じであり、水理模型実験で定めた波力低減範囲より現地のデータは広い範囲で低減している結果となっている。また、高波浪が来襲した場合、低天端ケーソン堤は越波が大きくなることから天端面波力を考慮すると波力低減率が5~10%低下する。現状の設計では、天端面波力は考慮していないことから、堤体の滑動に対する安定性は天端面波力分だけ大きくなる。背面波力については、滑動合成波力最大時の寄与率は大きくなかった。これらのことから、低天端ケーソン堤は、滑動合成波力の低減が見られ高波浪時には越波が多いため天端面にも波力が作用していること、滑動合成波力最大時からの位相差はあるものの数秒後には天端面に最大波力が作用し、背面にも波力が作用することから、滑動に対して安定性の高い形状であると考えられる。東護岸の現状の断面($B=16.2$ m)に対して、滑動合成波力を合田式の80%に低減した場合、現断面の設計波高 $H_{\max}=11.4$ m に対して滑動限界波高は $H_{\max}=14.0$ m となり、60年確率波まで安定な断面であると評価できる。

6. おわりに

本研究によって明らかになった点は以下の通りである。

① 現地波圧観測結果では、低天端ケーソン堤に作用する波力は、全体的に合田式より得られるものより小さくなる傾向にある。

② 波力の低減は、相対天端高 $h_c/H_{1/3} \leq 0.4$ 、アーセル数 $H_{\max} L_{1/3}^2 / h^3 \geq 20$ でより顕著であり、波力低減率 $\lambda_K \leq 0.8$ となっている。

③ 低天端ケーソン堤の特徴である越波による天端面波力を設計で考慮し滑動合成波力を求めた結果、天端面波力が滑動に対して寄与する割合は5~10%程度である。

④ 堤体の挙動は、位相差があるものの滑動合成波力が大きくなると変位が大きくなる傾向であり、個々の波に対応していることからケーソンが動的応答していると考えられる。

⑤ 東護岸については、8年確率波で設計した断面であったが、波力低減を $\lambda_K=0.8$ として試算すると60年確率波まで安定な断面であると評価できる。また、最適な断面としては、地震時安定上必要なケーソン幅15.5 m となることが分かった。

参考文献

- 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄 (1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港研報告, 第5巻, 第14号, pp. 3-45.
- 磯部雅彦 (1989): 標準化された方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 158-162.
- 合田良実・福森利夫 (1972): 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港研報告, 第11巻, 第2号, pp. 3-45.
- 佐藤潤一・今井澄雄・矢口真光 (1996): 常陸那珂港北ふ頭東護岸の設計と施工, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1276-1280.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992): 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究, 港研報告, 第31巻, 第1号, pp. 3-50.
- 中田邦夫・寺内 潔・西田仁志・梅木 功 (1984): 低天端混成堤の諸特性について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 532-536.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算方法について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 171-175.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・久高将信・小野修平 (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.
- 藤原隆一・興野俊也・貝沼憲男・石崎崇志・小竹康夫・津田宗男 (1996): 低天端ケーソン堤に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 761-765.