

図-3 上部工の形状

実験波はすべて修正プレットシュナイダー光易型のスペクトルを持つ不規則波で、1波群500波を標準とした。標型縮尺は1/25である。設計波は、周期 $T_{1/3}=15.4\text{ s}$ (3.08 s)、波高 $H_{1/3}=10.4\text{ m}$ (41.6 cm) である。以下特に断らない限り全ての諸量は現地量を用いて記述する。反射・伝達実験では設計波の他に周期 $T_{1/3}$ を 6.5 s, 9.0 s, 13.0 s, 18.0 s の4種類、波高 $H_{1/3}$ を 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m, 7.5 m, 9.0 m の6種類で実験した。実験項目は各上部工形状に対して以下の3つである。

- ①反射・伝達波実験
- ②波圧・波力実験
- ③滑動実験

3. 実験結果

(1) 基本型の反射・伝達特性

図-4には、H. H. W. L. での設計周期 ($T_{1/3}=15.4\text{ s}$) および周期 9 s における波高伝達率と反射率を示す。入射波高が 7.5 m を越えると波高伝達率は増大し、0.15を上回るが、設計波高程度 ($H_{1/3}=1.0h_0$) でも波高伝達率が 0.18 を上回ることはない。これは通常の混成堤 ($h_0/H_{1/3}=0.6$) や上部斜面堤 ($h_0/H_{1/3}=1.0$) の場合とほぼ同様の結果であり、消波ブロックに波が乗り上げ、越波を助長し、波高伝達率が増大することはないことが確認された。反射率は操船上問題となる短周期 (9 s) で入射波高が 2.0 m の波に対して 0.4 となっている。また、設計波に対する反射率は 0.5 である。これは消波ブロックの被覆幅が十分でない消波ブロック被覆上部斜面堤でも消波機能が低下するものではないことを示している。これらの結果から消波ブロック被覆上部斜面堤は水利特性の面からはほぼ所要の機能を満たすものであることが確認された。

(2) 上部工の改良による反射・伝達特性の変化

図-5には、設計周期における各上部工形状の波高伝達率および反射率を示す。同じ天端高の上部工について波高伝達率を比べれば、基本型の波高伝達率が最も高く、次いで斜面消波型、斜面透過型の順で小さくなる。斜面透過型の中では④の開口率が 50% のものが最も低くなった。設計波高程度 ($H_{1/3}=10\text{ m}$) では、基本型

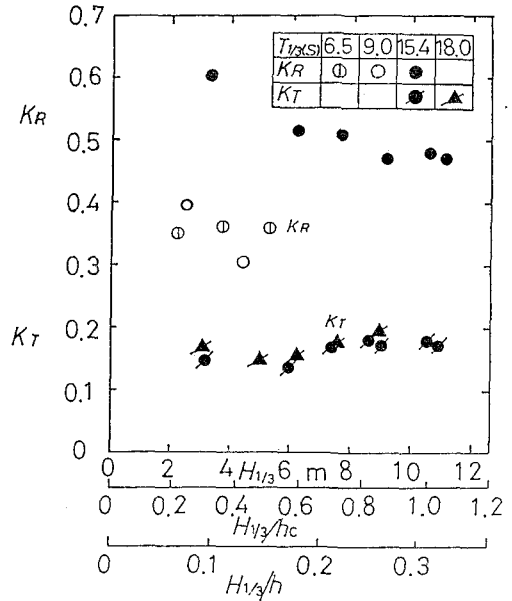


図-4 基本型の波高伝達率と反射率

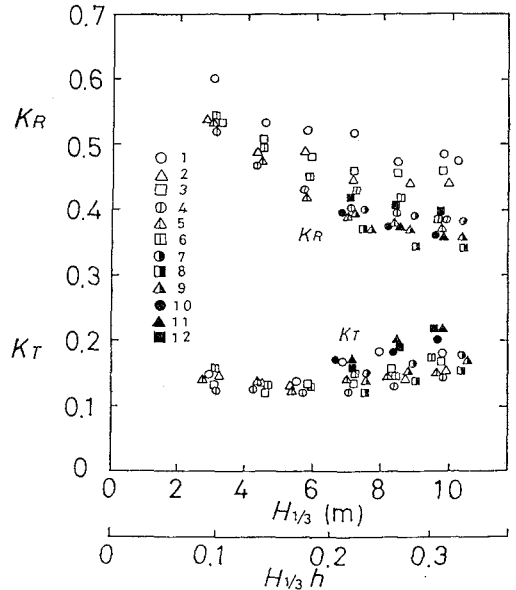


図-5 改良上部工の波高伝達率と反射率

の波高伝達率が 0.18 であるのに対し、④では 0.14 となり、上部工の改良により波高伝達率を低減することができることがわかる。また、改良型で天端高を 40% 低減した場合 ($h_0/H_{1/3}=0.6$, ⑩~⑫) には、設計波付近で波高伝達率が 0.2 を上回っている。しかし天端高を 20% 低減した場合 ($h_0/H_{1/3}=0.8$, ⑦~⑨) では、波高伝達率は若干増加するがほぼ基本断面 (①) 以下である。したがって、上部工を改良すれば低天端にしても、ここで目標としている波高伝達率 (0.18) を満足できる

ことがわかる。

反射率は、基本型が最も高く、次いで斜面消波型、斜面透過型の順に低くなる。また天端高や上部工形状による反射率の違いは入射波高 $H_{1/3}$ が 6.0 m 以上の場合に認められる。従って、上部工の改良は高波浪時の反射率の低減に有効であることがわかる。

(3) 基本型の波圧・波力

図-6 は、設計波を作用させた場合の波圧や波力の時系列の一例である。なおこれらはすべて実験値で示している。この図には、作用させた 500 波のうち滑動合成波力が最大となるものが示されている。図中の縦線は滑動合成波力 F_s がピークとなる位相であり、縦の矢印はそれぞれの波圧や波力のピークである。縦の線と縦の矢印のずれは、各波圧・波力と滑動合成波力のピークに位相差が生じていることを示す。すなわちまず直立部に作用する波力が最大となり、その後上部工に作用する波力がピークをとる。このように各位置での波圧のピークに位相差が生じ、全波力のピーク値が低減されることが斜面

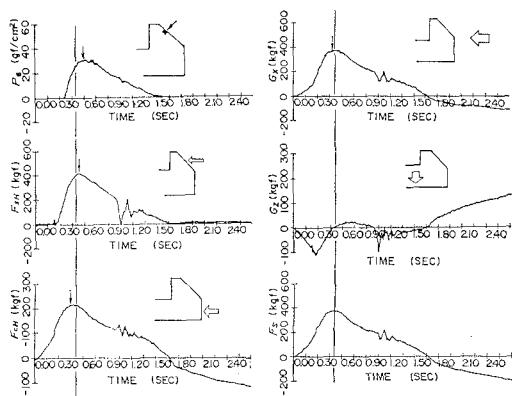


図-6 波圧および波力の時系列 (基本断面)

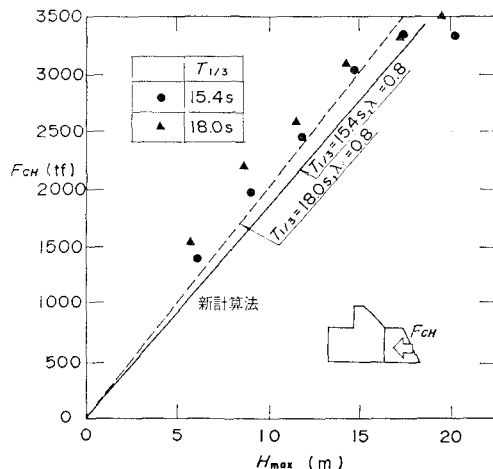


図-7 ケーソン直立部に働く水平波力

堤の特徴である。図中の全鉛直力の時系列は、揚圧力と堤体に作用する鉛直下向き波力の合力である。鉛直下向きを正としている。この鉛直波力合力は、まず揚圧力のため負の値をとるが上部工に作用する鉛直下向き波力によって急激に増加に転じ、滑動合成波力がピークとなる位相では 0 となり、揚圧力が鉛直下向き波力によって相殺されていることがわかる。このように鉛直下向きの波力によって、堤体全体の安定性が増加することが、斜面構造の大きな特徴の一つである。

図-7 は、最大波高 H_{max} を横軸にとってケーソン直立部に作用する水平力を示すものである。以下の波力はすべて長さ 20 m のケーソン一箇に作用するものである。図には周期 15.4 s と 18 s の場合の実験結果が示されているが、その差は少なく、波高が大きくなると波力が頭打ちの傾向が認められる。図中の実線および点線は合田式による波力の計算値である。また図中の波力低減係数 λ は、通常の混成堤に対する設計波力に対する補正係数であり、消波ブロックによる波力の低減を示す係数である。波高が小さい時、 λ を 1.0 とした場合の計算値とよく一致しているが、波高が大きくなるにつれて $\lambda=0.8$ を用いた計算値と一致し、高橋ら (1990) の通常の消波ブロック被覆堤の波力低減係数と同様の傾向を示す。

図-8 は、横軸を最大波高 H_{max} にとって基本断面の上部工 (斜面部) に作用する水平力を示すものである。図には周期 15.4 s と 18 s の場合の実験結果が示されているが、その差は少なく、波高が大きくなると波力の増加率が低下する傾向にある。水平波力がピークになる位相は、滑動合成波力が最大となる位相とわずかであるが時間差があり、図にはそれぞれの瞬間の水平波力が示されている。ただし、時間差が少ないため両者の値の

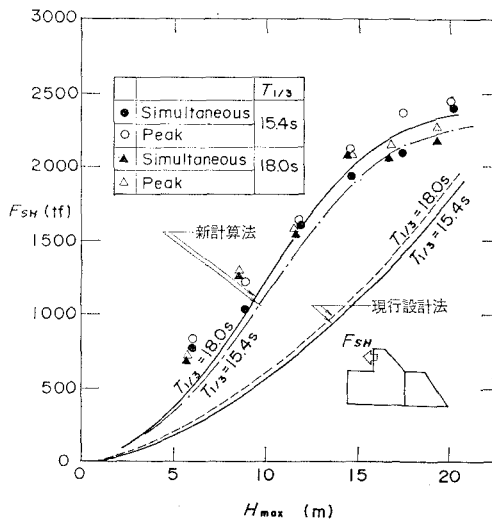


図-8 上部工 (斜面部) 水平波力

差は少ない。

上部斜面に作用する波力は、既往の上部斜面堤の実験結果（中田ら，1983）によれば下記の計算値で求められる。

$$\left. \begin{aligned} P_h &= P_2 \sin^2 \theta \\ P_v &= 0.5 P_2 \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 P_h 、 P_v 、 θ は、それぞれ斜面に作用する水平力、斜面に作用する鉛直力、斜面の角度である。 P_2 は、斜面部を直立壁とした場合の水平波力である。

図中の細い実線および点線は、式（1）を用いて計算された波圧である。波高が 15 m 以下の場合、実験値は計算値よりもかなり大きくなる。しかし、設計波程度の波高では実験値の増加が鈍くなり計算値に近づくが、それでも実験値は計算値の 1.4 倍にも達している。これは式（1）を求める際の仮定（斜面に作用する波力を動的な流体力とした仮定）が十分成り立っていないためである。長周期で波高が小さく、静水圧的な波力が作用する場合、斜面に作用する水平力は直立面に作用する水平力と等しく、式（1）は成立しない。そこで式（1）に割増係数 λ_{FS} を導入し新設計法として以下の式を提案する。

$$\left. \begin{aligned} P_h &= \lambda_{FS} P_2 \sin^2 \theta \\ P_v &= 0.5 \lambda_{FS} P_2 \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

以下に示す式（3）は、実験結果より得られた各波高に対する割増係数 λ_{FS} である。

$$\left. \begin{aligned} H_{\max}/h &\leq 0.35 & \lambda_{FS} &= 2.0 \\ 0.35 &\leq H_{\max}/h \leq 0.65 & \lambda_{FS} &= -10 H_{\max}/(3h) + 19/6 \\ 0.65 &\leq H_{\max}/h & \lambda_{FS} &= 1.0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

図-8 の太い実線および一点鎖線は、上式で算定された割増係数を用いて式（2）より計算した水平波力であり、実験値とよく一致している。

図-9 は、最大波高 $H_{\max}$ に対する滑動合成波力 F_s を示す。図中の実線及び点線は計算値である。ケーソン

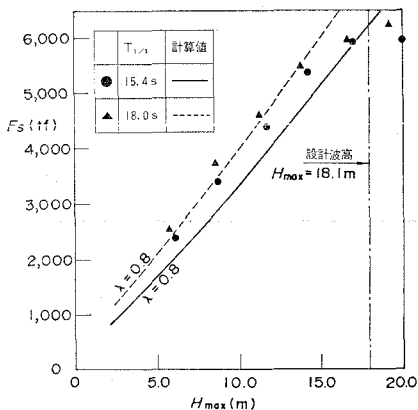


図-9 滑動合成波力

直立部の波力計算値は合田公式の係数 $\alpha_2=0$ 、波力低減係数 $\lambda=0.8$ として求め、上部斜面部は新しい算定法である式（2）を用いたものである。周期 15.4 s で波高が 15 m 以下の場合、若干実験値が計算値を上回っているものの設計波高程度では算定値と実験値が一致している。

なお、実験値はやはり波高の増大とともに増加率が鈍っている。これは高波浪時にねばり強い構造であることを示し、例えば設計波高以上の波が作用した場合でも急激に滑動が生じないという、この構造のもう一つの特徴を示す。

（4）改良上部工の波力特性

図-10 には、各上部工形状に対する滑動合成波力の最大値、1/10 最大値、1/3 最大値を柱状図として示す。同一天端高である上部工①～⑥の結果を比べると、上部工②の波力が最も大きく、上部工⑤の波力は最も小さい。また天端が 20% 低減された上部工⑦～⑨は、天端高が高い①～⑥よりも波力が低減されている。しかしながら天端高を 40% 低減した上部工⑩～⑬と上部工⑦～⑨の波力との差はそれほど大きくはない。これらの結果から滑動合成波力は上部工の形状、天端高によってある程度低減されることがわかった。したがって改良上部工は、天端高を 20% 程度低減しても所定の波高伝達率を満足させ、ある程度の波力低減効果を期待できると思われる。

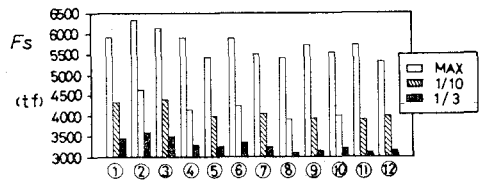


図-10 改良型の滑動合成波力の比較

（5）ケーソンの滑動実験結果

図-11 は、基本型の上部工①に対する滑動実験結果で、周期は 15.4 秒の設計周期の場合である。縦軸はケーソンの水中重量で、横軸は最高波高 $H_{\max}$ である。図

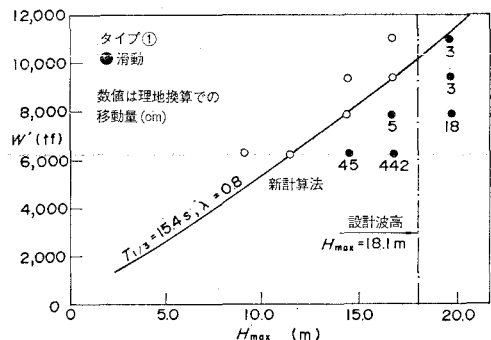


図-11 滑動実験結果（基本型）

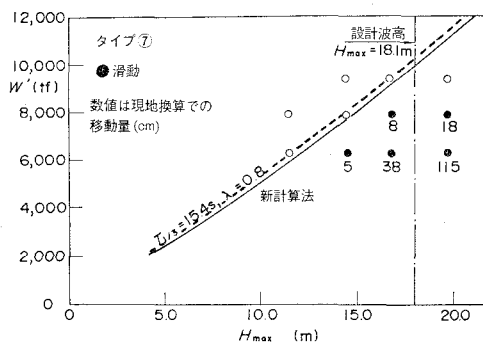


図-12 滑動実験結果 (改良型)

中の○は滑動しなかったことを示し、●は、滑動したことを示す。●の下に数字は滑動量の現地換算値である。図中の曲線は、直立部の波力低減係数 λ および斜面部の波力割増係数 λ_{FS} を用いて計算したケーソンの滑動限界重量である。曲線はほぼ○と●の境界付近である。今回提案された設計法が妥当であり、ケーソン全体の安定性が評価できることが確認できる。

図-12 は、改良上部工⑦ (開口率 30%, $h_c/H_{1/3} = 0.8$, 斜面消波型) に対する滑動実験結果である。図中の実線は、基本型の設計法と同様の手法を上部工⑦に適用した計算値である。ただし、上部工のスリット部に作用する波力は、実験結果から別に評価している。上部工⑦についても計算値は安全側となり妥当な評価となっている。図中の点線は上部工①に対する算定値 (図-11 中の実線) を示す。上部工⑦に対する計算値は上部工①に対する計算値を下回っており、上部工の改良効果がわかる。

今回提案された消波ブロック被覆上部斜面堤 (基本型) の設計重量は、通常の混成堤の設計重量の 0.7 倍、上部斜面堤の 0.9 倍となり、消波ブロック被覆上部斜面堤の耐波安定性が高いことが確認できる。特に、これまでの上部斜面堤に比して斜面部の波圧が大きく計算されるにも係わらず、設計重量が小さくなるのは、直立部の消波による波力低減の効果が大きい。また、斜面部の波力は、たとえ大きくなっても実際には抵抗力も増すことになり、それほど影響が少ないことにも留意する必要がある。

4. まとめ

今回の実験で得られた知見は以下のとおりである。

①消波ブロック被覆上部斜面堤の上部工 (斜面部) に作用する波力は、現行設計法よりも大きくなり、割増係数を導入する必要がある。今回提案した割増係数によってほぼ妥当な設計ができる。

②消波ブロック被覆上部斜面堤の直立部に作用する波力の低減係数は 0.8 となった。滑動限界重量は、通常の混成堤に比して 3 割、上部斜面堤に比して 1 割低減できる。

③消波ブロック被覆上部斜面堤の波高伝達率は、上部斜面堤と同程度である。しかし上部工形状を改良すれば伝達波高を低減でき、天端を低減できる。

④消波ブロック被覆上部斜面堤は、消波ブロック被覆堤よりもブロックによる被覆幅が小さいが、消波ブロック被覆堤の反射率と同程度となる。

那覇港浦添第一防波堤の構造としての消波ブロック被覆上部斜面堤 (低天端の斜面消波型) が採用されることになり、ここに示した設計法が用いられている。

現在、現地で一部が施工中であり、ケーソンや消波ブロックに波圧計等を設置し現地観測を行うことも計画されている。今後は室内実験で得られたデータと現地データとを比較検討し消波ブロック被覆上部斜面堤の設計法をさらに検討するつもりである。また、この報告では述べることができなかったが、消波ブロック被覆上部斜面堤の消波部は、静水面付近までしかなく、その安定性については特に注意が必要であり、これについても一般的な設計法を確立する予定である。

参考文献

- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 85-117.
- 高地重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港研報告, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 53-75.
- 高橋重雄 (1992): 新形式防波堤の開発, (社) 寒地港湾技術研究センター 第 5 回技術講習会テキスト, pp. 11-34.
- 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆 (1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 313-316.
- 森平倫生・国田 治 (1979): 斜面堤の水理特性に関する模型実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 295-298.