

低天端ケーソン堤に作用する波力特性について

藤原 隆一*・貝沼 憲男**・興野 俊也**
石崎 崇志*・小竹 康夫***・津田 宗男****

1. はじめに

大水深の外洋に防波堤を建設する場合、設計波高を越えるような高波浪時にはある程度越波を許容するような考え方によって、防波堤の天端高さを低くして設計の合理化をすることが考えられる。防波堤の天端高さを低くすることにより、高波浪時には越波の影響を受け、ケーソン堤に作用する波力特性が異なることが考えられるため、このような場合の波力特性を明確にする必要がある。

低天端ケーソン堤の波力特性に関しては、伊藤ら(1966)は規則波の重複波領域においては天端高の違いが波圧に与える影響はあまりないとしており、合田・福森(1972)は、越波による波圧の変化は複雑であるが、その変化は10~20%程度であるので実用上は無視するのが妥当であるとしている。一方、中田ら(1984)は滑動安定性の検討から、碎波領域であり水深波長比が0.1前後の場合、相対天端高が低いときには波力が低減することを報告している。しかし、低天端ケーソン堤の波力特性については、まだ十分に明らかにされていない。

本研究は、低天端ケーソン堤に作用する波力特性を水理模型実験によって系統的に調べて明らかにするとともに、実ケーソン堤での波圧観測による検証を行い、低天端ケーソン堤の波力算定手法を提案したものである。

2. 実験方法

実験に使用した造波水路は、長さ60m×幅1m×高さ2mの吸収式不規則波造波装置付きの2次元水路である。実験では堤体に作用する波力特性とその滑動安定性を検討することを目的に、規則波および不規則波を作用させた。

ケーソン模型は、水路内に設けた海底勾配1/100の仮設床上で水深 $h=40$ cmとなる位置に設置した(図-1参照)。この地点の水深波長比 h/L (L :波長)が0.09~0.19となるように3種類の周期 T (1.27s, 1.98s, 2.26s)の規則波を選び、それぞれ重複波から碎波までの波が

ケーソンに作用するように波高 H を変化させた。不規則波の場合、 $T_{1/3}$ を3種類(1.27s, 1.98s, 2.26s)、波高を2種類変化させた。また、相対天端高の範囲が0.09~2.13となるように天端高 h_c を3種類(3cm, 9cm, 17cm)変化させるとともに、マウンド高も2種類(8cm, 16cm)変化させ、衝撃波力が生じるような場合も設定した。

ケーソンに作用する波力は、図-2のように前面、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求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 波力特性

(1) 波力の時系列

図-3は $T=2.26$ sで $H=21.5$ cmの規則波による波力時系列の例である。前面波力 F_h および底面波力 F_u は

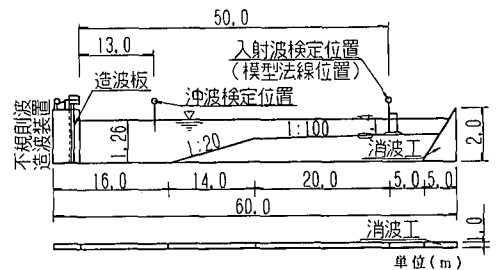


図-1 造波水路内の配置

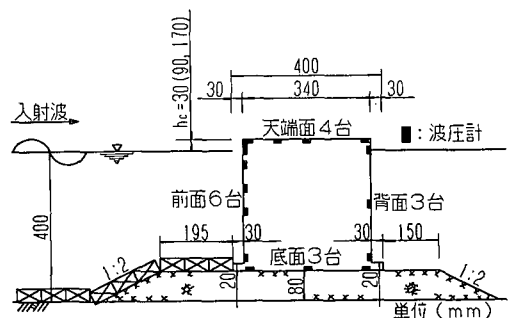


図-2 模型断面図

* 正会員 工修 東洋建設㈱鳴尾研究所水工研究室
** 正会員 東京電力㈱電力技術研究所構造研究室
*** 正会員 工博 東洋建設(株)鳴尾研究所水工研究室
**** 正会員 工修 東亜建設工業(株)大阪支店土木部

ここに示すようにほぼ同時に最大となる。一方、天端面波力 F_h および背面波力 F_b は前面波力に比べて $0.1T$ 以上遅れて最大となる場合が多い。ケーソンの安定性は、全体に同時に働く力が重要であり、天端面波力、背面波力は、前面波力、底面波力よりも位相が遅れることから、滑動安定性に大きな影響を与えないと考えられる。

(2) 波圧分布

規則波を作用させた場合の各面の最大波力時における波圧分布で天端が低い場合の特徴が表れている例を図-4に示す。図中には有限振幅重複波理論の4次近似解(合田・柿崎, 1966)、波高修正解および合田式による波圧分布を併せて示した。波高修正解は有限振幅重複波理論では取り入れることのできないマウンドや天端高による波高の変化を便宜的に4次近似解に取り込んだもので、土屋・山口(1970)にならい、堤体からの反射波を考慮し実験時の壁面から3cm沖側における波高を $1/2$ としたものを入射波高として計算したものである。前面波圧は天端高に関係なく波高修正解とよく一致している。合田式および4次近似解は実験値に比べて大きいが、分布形状は相似である。これによって、波圧の低減は前面波高の減少に起因していることが分かる。底面波圧は、前面端で合田式による波圧に比べて小さいが、分布形状は三角形分布で近似できる。

(3) 合田式との比較

前面波力 F_h および底面波力 F_u の特性を明らかにするために、前面および底面の平均波力(平均波圧強度に相当)、 $\bar{F}_h = F_h/l$ および $\bar{F}_u = F_u/b$ を求めた。ただし、 l はケーソン底面から天端までの距離であって、波の作用高さが天端以下のときには底面から波の作用高までの距離とし、 b はケーソンの底面幅である。図-5は $\bar{F}_h/w_0H$

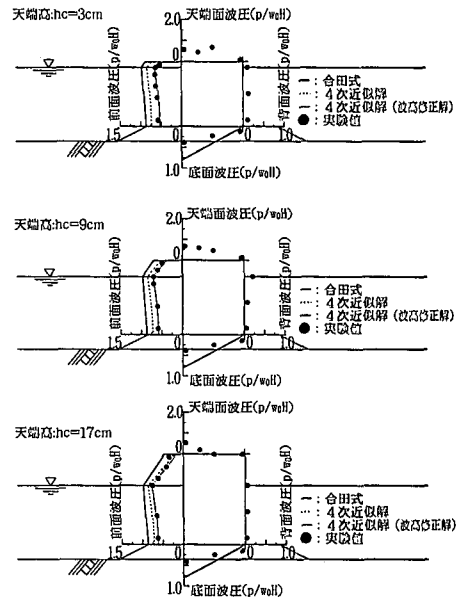


図-4 波圧分布の例 ($T=2.26$ s, $H=21.5$ cm)

(w_0 : 水の単位体積重量) と相対天端高 h_c/H の関係をマウンド厚 8 cm の場合について示したものである。図中の直線は、天端高が同じ場合の実験結果の傾向を明らかにするために実験結果を $h/L=0.09$, 0.11 と $h/L=0.19$ の2ケースに分類し、それぞれを直線近似したものである。破線はその条件に対応した合田式による計算値である。 $h_c=3, 9$ cm の場合、 $h/L=0.09, 0.11$ の実験値は h_c/H の減少に応じて $0.8 \sim 0.6$ に減少している。一方、 $h/L=0.1$ とした合田式による計算値は h_c/H が減少するのに逆比例して $0.8 \sim 1.0$ に増加している。これは合田式では波高 H が大きくなってマウンドによる波圧増大が顕著となることを反映したものである。 $h/L=0.19$ の場合、実験値と合田式による $\bar{F}_h/w_0H$ はほぼ同じと言える。

底面波力の場合、実験値は h_c/H に関係なく $\bar{F}_u/w_0H = 0.2 \sim 0.3$ 程度に分布している。合田式による計算値は h_c/H に関係なく一定となるが、 $h/L=0.1$ および $h/L=0.19$ の値が、実験値のそれぞれ上限および下限となっている。底面波力には前面波力で見られたような平均波力の変化は表れない。

このように、 $h/L=0.1$ 程度の波が相対天端高が $h_c/H < 1.0$ のケーソンに作用する場合、合田式で算定される波力は、マウンドによる波圧増大を過大に評価するため、波力が大きくなることが分かる。

前面波力、底面波力および滑動合成波力の最大波力について、実験値と合田式の比を波力低減係数 λ_k と定義した。前述したように合田式が過大となる領域は h/L および H に関連する。そこで、外力となる波のパラメタであ

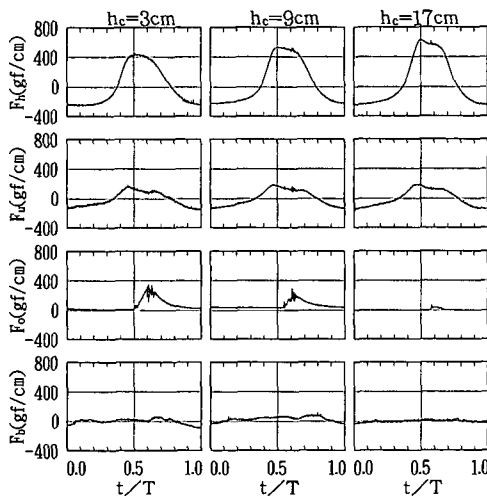


図-3 各面の波力の時系列の例 ($T=2.26$ s, $H=21.5$ cm)

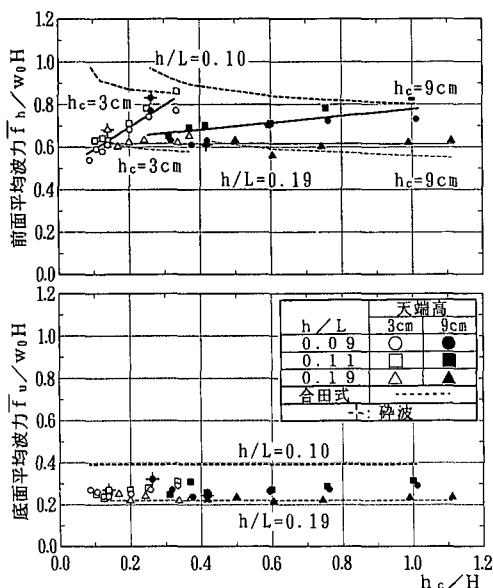


図-5 平均波力と相対天端高の関係

る h , L および H に着目し, これらを包含したアーセル数 HL^2/h^3 による分類を試みた結果, 波力が低減できる条件が明らかとなった. 図-6 はマウンド厚 8 cm について各 λ_K を示したものである. 不規則波については滑動合成波力のみ示してあり, H_{max} , $L_{1/3}$ が H , L に対応するものとして図示した.

前面波力について見ると, HL^2/h^3 が大きくなるほど λ_K は小さくなっていることが明らかである. $HL^2/h^3 \leq 30$ の場合は, λ_K が約 1.2 となる場合もあるが, 合田式の推定範囲内と言える. $HL^2/h^3 = 30 \sim 60$ の場合, λ_K は 0.8 程度となっている. さらにアーセル数が大きくなって $HL^2/h^3 > 60$ になると, λ_K はほぼ 0.8 以下となる. なお, 砕波する場合, 砕波しない場合に比べると λ_K は若干大きくなるようである.

底面波力の λ_K は前面波力の場合に比べるとばらつきが大きく, $HL^2/h^3 \leq 30$ では約 0.8~1.2 に分布している. $HL^2/h^3 > 30$ のときには $\lambda_K = 0.6 \sim 0.8$ となる場合が多くになっており, 前面波力と同様 λ_K は 0.8 以下となっている.

滑動合成波力の λ_K は, 前面波力の場合とほとんど同じとなる. 中田ら(1984)の実験条件はアーセル数が 50~70 程度であるが, 実験結果は今回の実験結果のほぼ上限となっている.

不規則波による滑動合成波力に対する λ_K も規則波の場合と同じであり, $HL^2/h^3 \leq 30$ の場合は $\lambda_K = 0.8 \sim 1.0$ となり, $HL^2/h^3 > 30$ では $\lambda_K = 0.8$ 以下となっている.

(4) 堤体の滑動安定性

合田式によって求める滑動限界波高に対する滑動合成

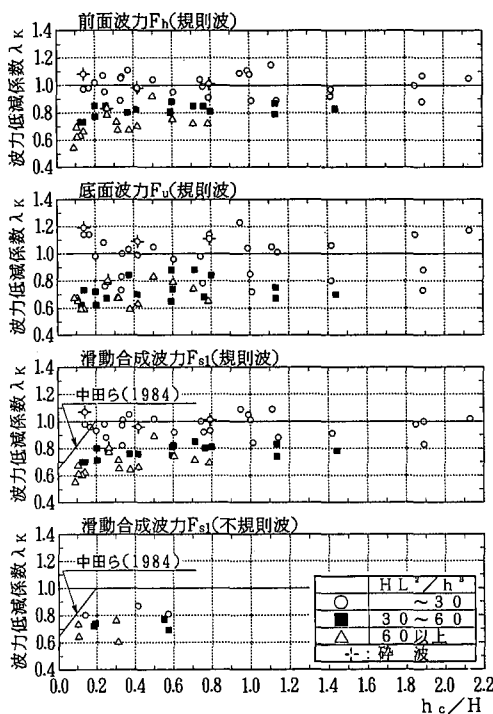


図-6 波力低減係数と相対天端高の関係

波力と滑動抵抗力 ($= \mu W$, W : 模型静水中重量) の比から波力低減係数 λ_K を求め, 波力実験の結果の妥当性を確かめた (図-7 参照). なお, μ は水平引張試験によって $\mu = 0.62$ (標準偏差 0.02) と定めた. 従来から言われているように僅かの引張力によって堤体は微小変位し, μ は変位量の増加に応じて増大した (例えば森平ら, 1978). μ がほぼ一定となったのは変位量が 0.4 cm のときで, 1 波当たりの変位量がこれに相当する波高を滑動限界波高とした.

規則波の滑動実験における λ_K は, これまでに示した波力から求められる滑動合成波力の場合と同様に, HL^2/h^3 が大きい場合のほうが λ_K は小さくなっており, $HL^2/h^3 > 30$ の場合, $h_c/H < 0.35$ では $\lambda_K \leq 0.8$ となっている. したがって, 波力実験による滑動合成波力から求められる波力低減係数は, 滑動実験によって妥当なものと評価した.

3.2 波力算定手法の検討

(1) 波力低減の算定式

波力の低減に相対天端高の影響が明確に表れるのはアーセル数が 60 以上となる場合に限られていること, またアーセル数が 30 より大きい場合にはほぼ相対天端高に関係なく合田式の 80% 程度の波力となることから, 合田式を基準に波力を算定する場合, 相対天端高よりもアーセル数との関係を明らかにするほうがよいと判断した. 図-8 は滑動合成波力から求められる波力低減係数

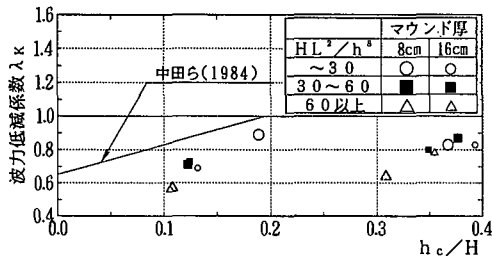


図-7 滑動実験による波力低減係数

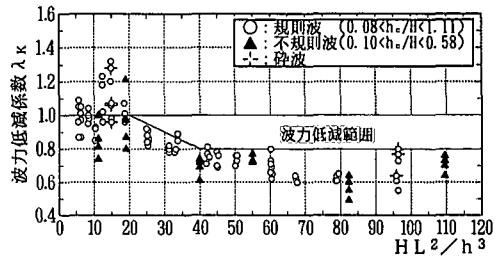


図-8 波力低減係数とアーセル数の関係

とアーセル数の関係を示したものであるが、実験結果の中から現地に適用する場合非常に高い天端高となる $h_c = 17$ cm の結果は除いてある。規則波、不規則波の波力実験のいずれの場合においても、アーセル数が 20 より大きい範囲では λ_K が 1 より小さくなっている。これより、波力低減は、アーセル数が 20~40 のときには $\lambda_K = 1.0 \sim 0.8$ に直線的に減少させ、アーセル数が 40 より大きいときには $\lambda_K = 0.8$ の一定値とすればよいと考えられる。波力低減を取り入れた算定式は、堤体の滑動安定性に寄与する滑動合成波力の特性が前面波力と同じになることから、次式に示すように合田式によって算定される前面波力 F_{hc} および底面波力 F_{uc} に同じ λ_K を乗じればよい。

$$F_h = \lambda_K \cdot F_{hc} \quad (1)$$

$$F_u = \lambda_K \cdot F_{uc} \quad (2)$$

(2) 波力算定式の適用範囲

実験は砕波まで含んでおり、その場合の波力の低減は重複波の場合と同じであったが、外力となる波の性質に大きく影響されるため、波力低減を考慮した波力算定式は、重複波領域に適用する。また、海底勾配は実験条件である 1/100 のように緩い場合に限るべきである。実験における天端高 h_c の範囲は規則波の場合で $h_c/H < 1.1$ となるが、これは $H_{max} = 1.8H_{1/3}$ の関係を用いると $h_c/H_{1/3} \leq 0.6$ に対応する。また、実験におけるマウンド水深 d の条件は $d/h \geq 0.53$ であり、通常的设计で行われる $d/h \geq 0.6$ を包含している。

なお、実験ではマウンドが高く、周期が短い場合にしか衝撃波力が発生しなかったが、海底勾配が急な場合など衝撃的な波力が発生する恐れのある場合には、水理模型実験で波力特性を把握することが望ましい。

4. 現地観測データによる検証

(1) 現地観測の概要

現地観測は、東京電力(株)常陸那珂火力発電所東護岸ケーソン堤(幅 16.2 m、長さ 20.7 m、重量約 32 MN)で実施した(写真-1 参照)。波圧は、図-9 に示すようにケーソンの前面に 6 台と底面、天端面および背面に各 3

台取り付けたひずみゲージ式波圧計によって毎正時 20 分間の定時観測を行った。また、入射波は東防波堤の法線に設置した超音波式波高計のデータを用いた。観測は、平成 7 年 3 月~5 月(低気圧)、9 月~11 月(台風)の約 6 ヶ月間行った。取得されたデータの中で、 $H_{1/3} = 2.5$ m 以上のデータが 56 回あり、観測期間中の最大波浪は、昭和以降最大級の規模を持つ台風 12 号(9 月 17 日)に伴うものである。この日の 12 時に、 $H_{max} = 7.77$ m、 $H_{1/3} = 4.75$ m、 $T_{1/3} = 8.9$ s、波向き N 88 E の波浪を観測し、設計有義波高の 75% 程度の波高が取得された。

(2) 観測結果との比較

実験値と現地観測結果との比較を行ったものが図-10 である。図中には 2 次元水路で別途行った不規則波による現地再現実験の結果も併せて示した。現地の条件はアーセル数が 20 以下の場合しかないが、観測値および再現実験結果はこれまでに示した実験値とほぼ同じか、それ以下となっている。したがって、今回の実験結果から定めた波力低減の範囲は妥当なものと評価できる。

5. ま と め

本研究によって明らかになった点を以下に示す。

- ① 低天端ケーソン堤に作用する波力は、合田式により得られるものより小さく、合田式の 80% に低減できる場合がある。
- ② 波力が低減するのは、越波が生じることによって前面の波高が減少するためである。
- ③ 波力低減効果を取り入れた算定式は、合田式で算定される前面波力、底面波力に波力低減係数 λ_K を乗ずる。 λ_K はアーセル数 HL^2/h^3 が 20~40 のときには 1.0~0.8 に直線的に減少させ、 $HL^2/h^3 \geq 40$ のときには 0.8 の一定値とすればよい。
- ④ 波力低減は重複波領域、天端高 $h_c = 0.6H_{1/3}$ 以下、 $d/h \geq 0.6$ (d : マウンド上水深、 h : 水深)で海底勾配が緩いときに適用する。

謝辞：本研究の実施にあたっては、埼玉大学工学部建設基礎工学科谷本勝利教授から現地観測計画を始め懇切

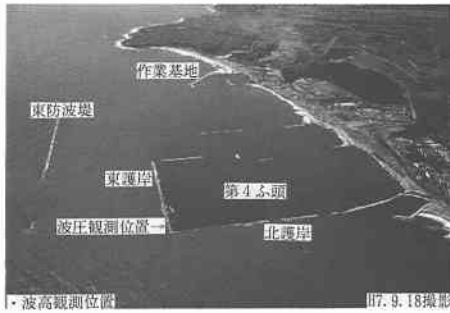


写真-1 現地観測点の全景

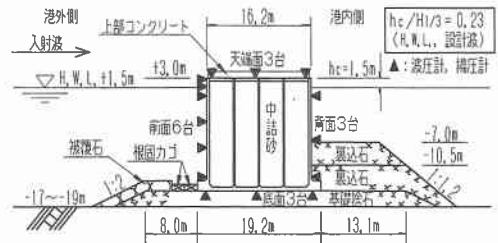


図-9 護岸ケーソンの断面および波圧計の配置状況

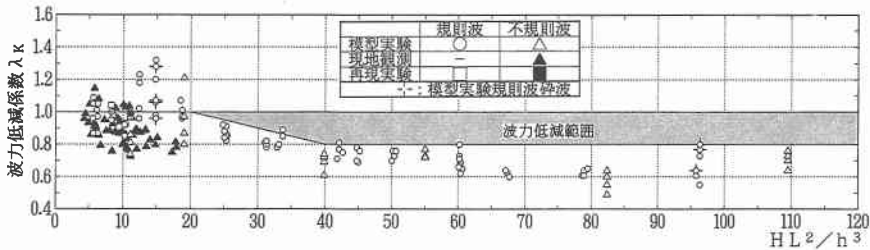


図-10 現地観測結果と実験値の比較

なるご指導をいただいた。ここに、心から感謝の意を表する次第である。

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.
 合田良実・柿崎秀作 (1966): 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, 第5巻, 第10号, 57 p.
 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.
 土屋義人・山口正隆 (1970): 越波のある場合の重複波の特性について, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 79-84.
 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.
 森平倫生・木原 力・堀川 洋 (1978): 混成防波堤の摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.