

台形ケーソンの設計における波力の算定法

谷本 勝利*・木村 克俊*・錦織 誠司**・田中 典明***

1. ま え が き

ケーソン式混成堤は我が国で最も一般的な防波堤の構造形式であり、数多くの研究成果と施工実績がその有効性を証明している。しかしながら、近年のように防波堤の建設水深が増大してくると従来型の直立ケーソンでは著しく大きな断面が必要とされるため、より経済的な構造形式の研究開発が重要な課題となっている。

その解決策のひとつとして、ケーソン前面壁を傾斜壁とした斜面ケーソンが有力であることはよく知られている¹⁾。この構造では斜面に作用した波圧の鉛直分力が堤体の安定に寄与するため、その分だけ堤体の必要重量が低減できコストダウンが可能になると考えられ、上部斜面ケーソンなどが実用化されている^{2),3)}。しかし、その設計上問題となる波圧の鉛直分力の効果については、滑動波力による間接的な検討は行われているが、これを直接的に評価した例はない。

本研究では、こうした斜面ケーソンの一形式である等脚型の台形ケーソンを対象として実施した二次元水理模型実験結果をもとに、その波力特性を明らかにするとともに、設計における波力算定法を提案するものである。

2. 実験の概要

(1) 実験の種類および実験の方法

本研究では、まず規則波を用いて行った波圧・全波力実験結果を述べ、台形ケーソンの前面壁の傾斜角を変え

た場合の波力特性を示す。そして実験結果から台形ケーソンの波力算定法を求め、滑動合成波力と転倒モーメントについてのその妥当性を検討する。さらに、不規則波により実施した滑動実験結果によっても同算定法の妥当性を確認する。

規則波実験では造波板による再反射波が堤体に到達するまでを有効波とし、実験結果は有効波で平均した。不規則実験波は Bretschneider・光易型のスペクトルを目標とし、ひとつの実験周期に対し成分波の位相のみが異なる3種類の波群を作成した。実験結果は同一の波高レベルに対して実施した3波群の値を平均した。なお、不規則波実験での有効波数は造波開始直後の非定常性の強い部分を除く120波を標準とした。

(2) 実験水路

実験に使用した水路は港湾技術研究所内の中型平面水槽(30m×20m×1m)を4分の1に区切った部分に設けた仮設水路である。水路の断面図を図-1に示す。造波板の幅は区切った部分の全幅にほぼ等しい4.8mであり、仮設水路の側壁は造波板の中立位置より6.6mの地点から始まる。このように側壁の開始点と造波板の間に距離を設けてあるのは、不規則波実験において水路内の模型からの反射波を分散させ、造波板からの再反射波による波高変化の影響を軽減させるためである。

(3) 実験断面

実験を行った断面の形状は図-2に示すとおりであり、設置水深およびケーソン基面水深は全ケースを通じ

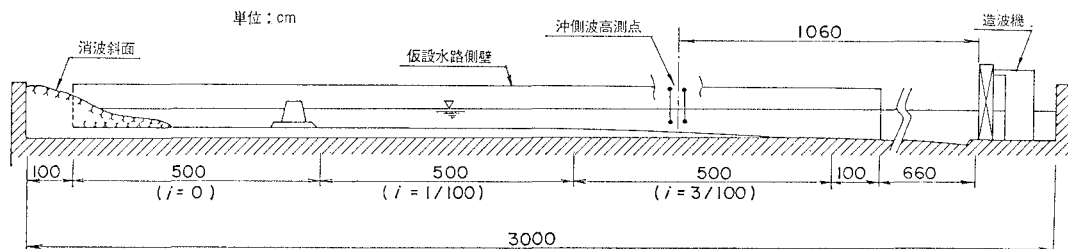


図-1 実験水路断面図

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

** (財)沿岸開発技術研究センター

*** 正会員 東京電力(株) 建設部 土木調査課

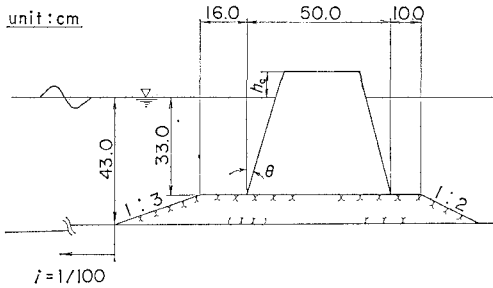


図-2 実験断面

て一定とした。ケーソンの形状は底辺長を一定として、鉛直となす角度で定義する傾斜角 (θ) を変化させた。マウンドは碎石を用いて成形したが、被覆ブロックおよび根固めブロックは設置していない。なお、水路壁直角方向のケーソン幅は 47 cm とし、水路幅 (50 cm) に対し両側に 1.5 cm の余裕を設けた。

実験諸元の決定にあたっては縮尺 50 分の 1 を想定しており、設置水深を現地換算すると 20.0 m + 1.5 m (H.W.L.) となる。

3. 波圧・全波力特性

(1) 測定方法

波圧・全波力特性は表-1 のように周期 3 ケースに対し波高を 5 または 6 種類に変えており、ひとつの傾斜角に対し合計 17 ケース実施した。

表-1 波圧全波力実験ケース

傾斜角 (θ)	設置条件	周期: T (s)	波高: H (cm)	H/L
0°	$h=43$ cm	1.13 ($h/L=0.239$)	8.0	0.044
			10.0	0.056
			12.0	0.067
			14.0	0.078
			16.0	0.089
			17.0	0.094
10°	$d=33$ cm	1.70 ($h/L=0.137$)	12.0	0.038
			16.0	0.051
			20.0	0.064
			22.0	0.070
			24.0	0.076
			25.0	0.080
15°	$h_c=9$ cm	(一定)	14.0	0.034
			18.0	0.044
			22.0	0.054
			25.0	0.061
			27.0	0.066
20°	(一定)	2.12 ($h/L=0.106$)	14.0	0.034
			18.0	0.044
			22.0	0.054
			25.0	0.061
			27.0	0.066

模型は天端高 $h_o=9$ cm ($h_o/h=0.209$) で一定とし、傾斜角 θ が 0°, 10°, 15°, 20° の 4 種類をアクリル板で製作した。波圧の測定は定格 100 gf/cm² (9.8 kPa) の超小型波圧計を使用した。前壁面には 5 個の波圧計をそれぞれの分担面積が等しくなるように取付けてあり、傾斜角が変わっても各波圧計の設置高さは同じである。また、底面にも 3 個の波圧計を同様に取付けた。

ケーソン全体は背面で三分力検出器に剛結し、これにより作用した全波力の水平成分 (F_H)、鉛直成分 (F_V)

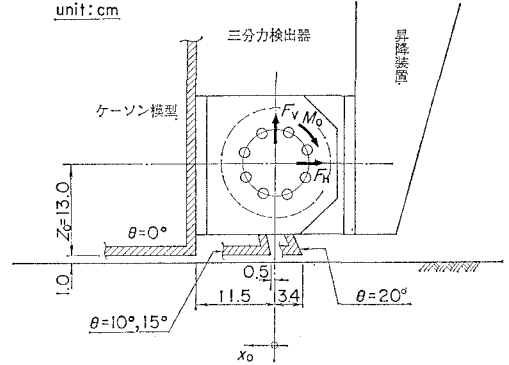


図-3 三分力検出器取付部の詳細図

およびセンサー中心のまわりのモーメント (M_0) を測定した。三分力の方法は図-3 の矢印の方向を正と定義する。なお、測定系全体としての固有振動数は水中でおよそ 10 Hz であった。

ケーソン後趾まわりの転倒モーメント M_T は、センサー中心とケーソン後趾の位置が異なるため次のような補正が必要である。

$$M_T = F_H \cdot z_0 - F_V \cdot x_0 + M_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x_0 はセンサーの中心とケーソン後趾の水平距離、 z_0 は同じく鉛直距離を表わす (図-3 参照)。

(2) 前面壁に働く波圧の特性

前面壁の波圧測点で得られた波圧強度を $p_1 \sim p_5$ とすると、前面壁に作用する平均波圧強度 $\bar{p}$ は各波圧計の分担面積を等しくしているため単純平均で求められる。 $\bar{p}$ についての実験結果を図-4 (○印) に示すが、ここで横軸は入射波の波長 (L) に対する静水面下の斜面部分の水平距離 (d) の比で、縦軸は直立ケーソン ($\theta=0^\circ$) の $\bar{p}$ に対する同一条件の台形ケーソン ($\theta=10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) の $\bar{p}$ の比である。同図においては、直立ケーソンと台形ケーソンの前面壁平均波圧強度に差がみられないことから、水平波力 F_H は次のように表わされる。

$$F_H = \bar{p} \cdot \left(\frac{h_*}{\cos \theta} \right) \cdot \cos \theta = \bar{p} \cdot h_* \quad \dots\dots\dots (2)$$

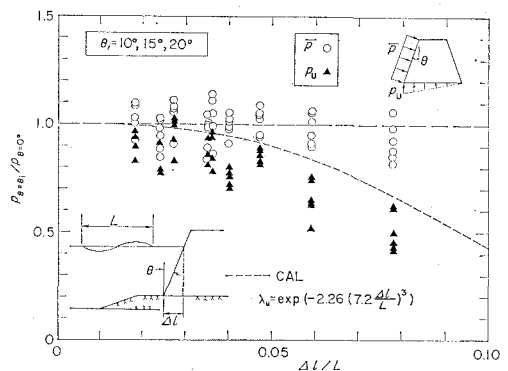


図-4 波圧実験結果

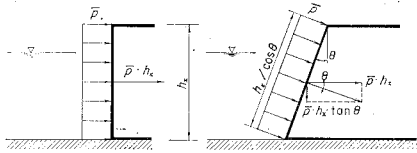


図-5 傾斜壁の効果

ここに、 h_* は底面から受圧部上端までの高さである。式(2)は、図-5に示すように斜面での波力減少効果が受圧部分の増大効果により相殺され、結局水平波力は傾斜角にかかわらず一定となることを意味している。

一方、鉛直方向には次式で示される波力分力(ΔF_v)が作用し、台形ケーソンの場合に堤体の安定に寄与する力が生ずることになる。

$$\Delta F_v = \bar{p} \cdot \left(\frac{h_*}{\cos \theta} \right) \cdot \sin \theta = \bar{p} \cdot h_* \cdot \tan \theta \quad \dots\dots (3)$$

(3) 底面に働く揚圧力の特性

揚圧力の測定結果は三角形分布を仮定した場合の前趾での波圧強度 p_u で整理した。前出の図-4には $\bar{p}$ が最大のとき p_u の値をプロットしてあるが、 $\Delta l/L$ が大きいほど直立ケーソンの揚圧力に比べ、台形ケーソンの揚圧力が小さい傾向がみられる。

斜面壁に働く重複波圧に関する加藤・服部の研究⁴⁾によると、斜面壁の水底付近における波圧の時間変化と静水面付近におけるそれとの間には位相差が生じるため両者のピークが一致しないこと、および重複波の節が斜面上に存在する場合($\Delta l/L \geq 0.25$)には、静水面付近での波圧がピークするとき水底付近で負圧が発生することが報告されている。今回の実験は $\Delta l/L \leq 0.1$ の範囲ではあるが、揚圧力にこれと同様な傾向がみられる。

以上の実験結果をもとに台形ケーソンの揚圧力低減係数を求めると次のようになる。

$$\lambda_u = \exp[-2.26(7.2\Delta l/L)^3] \quad \dots\dots (4)$$

図-4の点線はこの関係を示したものであるが、実験値のほぼ上限に対応しており、やや安全側に設定している。

(4) 全波力の特性

図-6は $h/L = 0.137$ のケースについて最大水平波力(上段)およびそのときの鉛直波力(下段)を示している。ともに平均波圧強度のかたちに変換しているが、ケーソン底面の幅(B)および全高(l)は全ケースを通じて一定なので、傾斜角による全波力の相違は同図で判断できる。

最大水平波力については、傾斜角による差異はみられず、波圧特性によって示された式(2)と同じ結果が得られたことになる。一方、水平波力が最大のときの鉛直波力については、傾斜角が大きいほど斜面に作用した波力の鉛直成分が揚圧力を打ち消す傾向が顕著である。しか

しながら、(3)で述べたように傾斜角が大きいほど揚圧力が小さくなる傾向があるから、 $\theta = 0^\circ$ の値との差を鉛直成分の効果とみなすと過大評価することになる。

そこで、波圧計によって得られた揚圧力の合力(U)から三分力検出器で得られた鉛直波力(F_v)を差し引いて、斜面に作用した波力の鉛直分力(ΔF_v)のみの値を示したのが図-7である。これによると、 F_H と ΔF_v の実験結果は傾き $\tan \theta$ の直線によく合致しており、両者の間に、

$$\Delta F_v = F_H \cdot \tan \theta \quad \dots\dots (5)$$

なる関係が成立している。このことは波圧特性によって示された式(3)と同様の結果が得られたことを意味するものである。

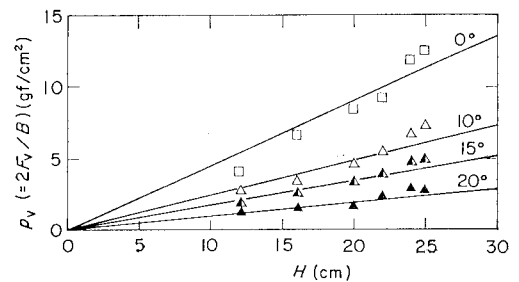
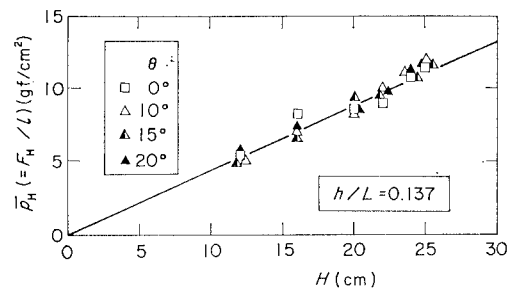
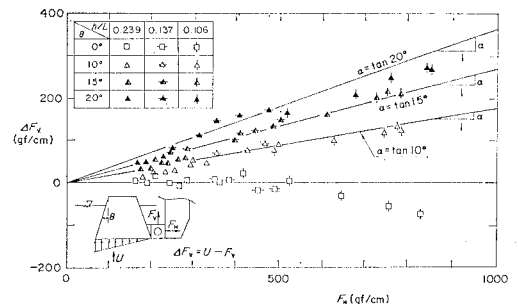
図-6 全波力実験結果 ($h/L=0.137$)

図-7 鉛直分力の効果

4. 設計波力の算定法

(1) 算定法の提案

3.で示した波圧・全波力特性をもとにして台形ケーソンの設計波力の算定法を次のように提案する。

(i) 台形ケーソンの前面壁に働く波圧は、全高が等しい直立ケーソンに働く波圧がそのまま斜面に直角に作用するものとして算定する(図-8 参照)。

(ii) 台形ケーソンに働く揚圧力は直立ケーソンの場合の揚圧力に式(4)で求めた低減係数 λ_u を乗じて算定する。

(iii) 図-8 中の代表波圧強度等は合田式により求める⁹⁾。

(2) 滑動合成波力に対する算定法の妥当性

ここでは三分力検出器の実験結果を用いて堤体全体の滑動に対する算定法の妥当性を検討する。一般に、滑動限界状態においては次の関係式が成立する。

$$F_H = \mu(W' - F_V) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 F_H 、 F_V は水平および鉛直波力、 μ は摩擦係数、 W' は F_H 、 F_V が作用しているとき堤体が滑動しないための限界重量(静水中)を示している。式(6)を変形して、

$$\mu W' = F_H + \mu F_V \dots\dots\dots (7)$$

とすると、重量 W' の堤体の滑動の有無が式(7)の右辺の値によって決定することを意味する。この値を滑動合成波力⁹⁾と呼ぶことにする。

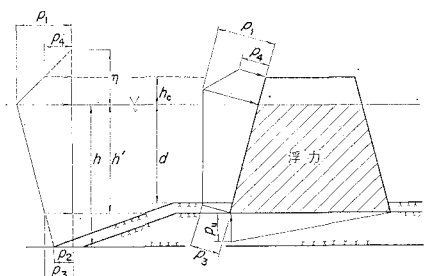


図-8 波力算定法

これに対し提案した算定法によると、

$$F_{HG} = \mu(W' + F_{HG} \cdot \tan \theta - U_G)$$

$$\therefore \mu W' = F_{HG}(1 - \mu \cdot \tan \theta) + \mu U_G \dots\dots\dots (8)$$

となり、滑動合成波力は式(8)の右辺で表わされる。ここに、 F_{HG} 、 U_G は提案した算定法により求めた水平合力と揚圧力合力である。

滑動合成波力について三分力検出器による実験値と、これと同一条件に対する計算値を求めて両者を比較したのが図-9である。同図では台形ケーソンの滑動合成波力に対する直立ケーソンのその比を示す κ_s について、実験値(EXP.)と計算値(CAL.)の比をプロットしたもので、横軸はマウンド上天端水深 d で無次元化した入射波高である。結果はおおむね 0.8~1.2 の範囲に分布しており、提案した算定法は滑動合成波力の計算に対してほぼ妥当な結果を与えている。

(3) 転倒モーメントに対する算定法の妥当性

堤体を転倒させる波力モーメントの実験値 M_T は式

(1) により求められるが、この値と提案した算定法による計算値を比較したのが図-10である。比較の方法および図の表示法は(2)の滑動合成波力の検討の場合と同じであるが、結果についても同様に、転倒モーメントの計算に対して提案した算定法はほぼ妥当な結果を与えている。

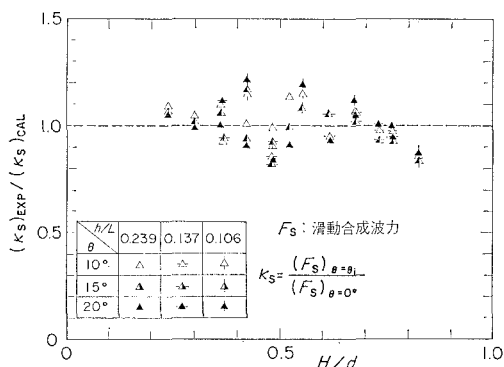


図-9 滑動に対する算定法の妥当性

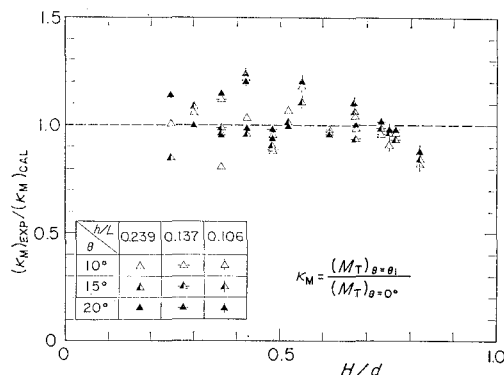


図-10 転倒に対する算定法の妥当性

(4) 滑動実験結果による算定法の妥当性の検討

不規則波による滑動実験は、直立ケーソンと $\theta=15^\circ$ の台形ケーソンのみについて実施した。模型は堤体重量を必要に応じて任意に変えられる中空のコンクリート製のものを使用した。

図-11は堤体重量3種について、有義波高の異なる5種の波を作用させたときの滑動特性を表わしている。ここに、 S は120波の作用による滑動量で3種の波群による平均値である。 H_{max} は120波中の最高波高の期待値である。また、 H_{CG} は直立ケーソンでは合田式、台形ケーソンでは提案した算定法を用いて堤体重量から逆算した滑動限界波高である。同図で H_{max}/H_{CG} が1.0を上まわる領域は、設計条件を上まわる波が作用したときの

滑動安定性を示すものであるが、直立ケーソンと台形ケーソンでその特性に差はなく、共に破線の範囲内に分布している。

このことは提案した算定法を用いて台形ケーソンを設計すれば、滑動に関しては通常の直立ケーソンと同程度の安定性の水準を確保できることを意味する。したがって、規則波による全波力実験により確認した滑動に対する提案法の妥当性が、不規則波を用いて堤体を実際に滑

動させて実験した滑動実験結果によっても確かめられたことになる。

6. ま と め

以上、台形ケーソンについての水理模型実験結果を述べ、台形ケーソンの波力算定法の提案とその妥当性の検討を行った。その結果、現行の直立ケーソンに対する波力算定法である合田式に、4.(1)で述べた事項を加えた方法が妥当であることが確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行： 特殊防波堤論，水工学に関する夏期講習会講義集，1968，pp. 6—1~31.
- 2) 森平倫生・国田 治： 斜面壁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，1979，pp. 295~298.
- 3) 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆： 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，1983，pp. 313~316.
- 4) 加藤教吉・服部昌太郎： 斜面に働く重複波の波圧，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 391~395.
- 5) 運輸省港湾局監修： 港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979.
- 6) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司： 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第19巻4号，1980.

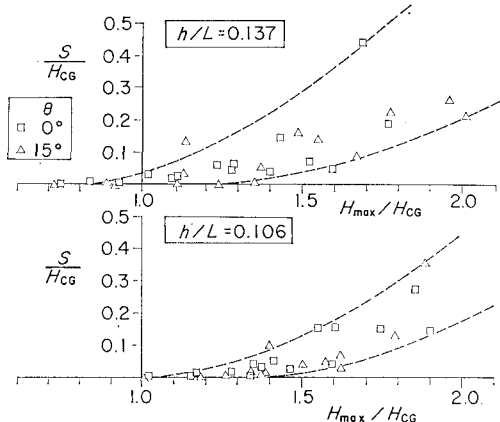


図-12 滑動実験結果