

直立ケーソン式海水交換型防波堤の耐波設計に対する 数値波動水路の適用性

藤原隆一*・山崎智弘**・橋川正男***・早瀬松一****

海水交換機能を有する防波堤として、遊水室内に浮体構造物を配置し、潮位の影響を受けにくい直立ケーソン式の防波堤の耐波安定性が検討された。防波堤に作用する波力の算定には、VOF 法に基づいて自由表面の処理を行う数値波動水路 CADMAS-SURF が用いられ、その検証には水理模型実験による波圧、滑動のデータが用いられた。その結果、数値波動水路の計算値は、水理模型実験結果をよく再現し、妥当であることが確認された。これにより、CADMAS-SURF は、本構造物のような遊水部および通水口をもつ複雑な構造形式に対する耐波安定性に対しても適用可能であることが確認された。

1. はじめに

港内の静穏度は、港内施設の保全および利用目的から決まるが、港内の静穏度を高めると、港内外の海水交換が抑止され、港内の水質悪化が問題となることがある。漁港では水産物を取り扱うことから新鮮で清浄な海水が必要となることが多く、また港内を養殖場として利用することもあり、港内の海水交換に対する要望は大きい。

海水交換を行う方法は、波および潮汐の作用を利用する場合に大別できるが、波エネルギーを利用する場合には静穏度を確保するための工夫が必要となる。山本ら (1987) が開発した「潜堤付き防波堤」は、港内の静穏度を確保した上で港内外の海水交換を可能にした代表的な例である。著者らの中の橋川ら (2002) も、直立ケーソン式海水交換型防波堤を提案し、高い海水交換機能を発揮することを水理模型実験によって確認している。この構造の特徴は、嵩上げされた遊水室とその遊水室内に設置された浮体構造物にある。すなわち、嵩上げされた遊水室上で入射波を砕波させることにより、遊水室内の水位を上昇させて港内外の水位差を発生させ、ケーソン内に設けた通水口を通じて導水するもので、遊水室上に設けた浮体構造物によって、効率よく導水することが可能である。潜堤付き防波堤とは構造形式が異なるものの、砕波を利用して波エネルギーの減殺と海水交換を促進す

る点においては類似の構造物であると言える。

この直立ケーソン式海水交換型防波堤の実用化には、耐波安定性に関する検討が必要となる。本研究では、堤体に作用する波力を合理的に求める方法として、数値波動水路 CADMAS-SURF に着目し、その妥当性を水理模型実験によって検証した結果について報告する。

2. 検討条件

(1) 実験条件

a) 実験断面

水理模型実験は、中部電力株式会社の電力技術研究所が保有する 2 次元不規則波造波水路を用いて行った。実験時の模型および計測器の配置状況を図-1 に示す。仮設床は斜面部 (1/10 勾配, 7.5 m) と一様水深部 (2.205 m) から構成される。斜面部から 0.3 m 離れた位置がのり先となるように砕石マウンド (0.1 m 厚) を作成し、その上に模型堤体を設置した。海水交換防波堤の模型断面は図-2 のようであり、通水部上の中詰部は設けなかった。

b) 実験ケース

実験は、波圧測定を目的としたケースと全波力を評価することを目的とした滑動実験の 2 ケースについて行った。波圧測定時の実験ケースは表-1 に示すとおりである。滑動実験では、のり先水深 h_i を 0.35 m、また波の周

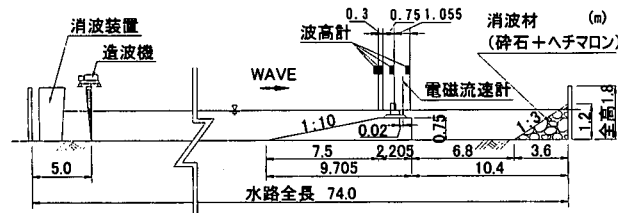


図-1 実験断面

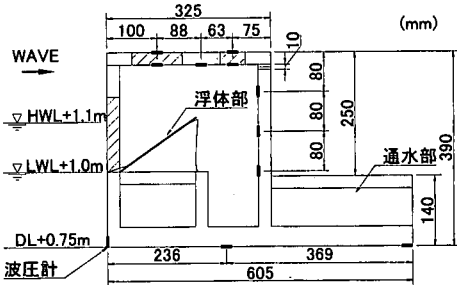


図-2 海水交換防波堤模型の断面

* 正会員 博(工) 東洋建設㈱鳴尾研究所 水環境研究室長
** 正会員 修(工) 東洋建設㈱技術本部技術部
*** 正会員 修(工) 中部電力㈱技術開発本部電力技術研究所
**** 正会員 (株)シーテック土木建築本部技術コンサルタント
部

期を2.0 sおよび2.5 sの2種類として、堤体が滑動するまで波高を増大させた。波はすべて規則波である。

表-1 実験ケース

マウンドのり先水深 h_t (m)	0.25, 0.35
周期 T (s)	2.00, 2.25, 2.50
波高 H_m (m)*)	0.10~0.35

*)造波板前面の一樣水深部での入射波高

c) 測定方法

水平方向および鉛直方向の波圧分布が把握できるように波圧計を11カ所設置し、造波開始より2分後から0.001 s間隔で25,600個のデータを取得した(図-2参照)。

滑動実験では、堤体岸側にレーザ式変位計を設置して、造波開始直後から0.05 s間隔で180 s間の測定を行い、滑動量を算出した。

(2) 計算条件

a) 計算断面

水理模型実験と同様の断面を設定したが、造波板全面の一樣水深部は、計算上の波浪安定化領域として必要と考えられる長さに短縮した(図-3参照)。また、造波方法として造波ソースを用いたことから、計算領域の両端にエネルギー減衰帯を設けた。模型断面は図-4に示すように設定した。すなわち、遊水室上の浮体構造は、実験時の観察から波が激しく作用している間は遊水室に押しつぶされていたので、本検討では無視できると考えた。また、通水口部は2次元断面で設定する必要性から、単位幅当たりの開口面積が同じとなるように開口幅を調整することとした。

b) 計算ケース

計算ケースは表-2に示すように設定した。

c) 計算格子の配置

空間格子間隔は、図-5に示すように構造物周辺で密となるように配置した。また、時間刻み幅はCFL条件および粘性項安定条件を満足するように自動計算とした。

d) 解析条件

解析対象時間は、計算開始後25-35 sとし、0.001 s間隔でデータの出力を行った。また、計算で用いたCADMAS-SURFの代表的なパラメタ設定値を表-3に

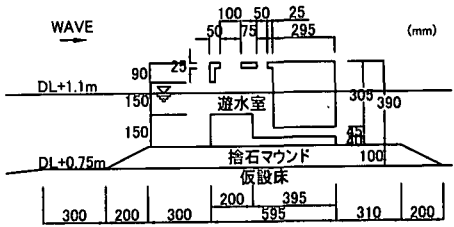


図-4 模型断面

表-2 計算ケース

マウンドのり先水深 h_t (m)	0.35
周期 T (s)	2.00, 2.50
波高 H_m (m)*)	0.10~0.25

示す。

3. 検討結果

(1) 無堤時の波の変形

堤体に作用する波圧の検討に先立ち、無堤時の入射波の時系列変化を一樣水深部、斜面部の代表的な点と比較した。その結果、紙面の都合上示すことはできないが、計算値と実験値の整合性はよく、再現性が確保されていることを確認した。

(2) 最大波圧

CADMAS-SURFにはスパイクノイズ処理のアルゴリ

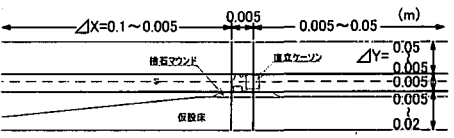


図-5 空間格子間隔

表-3 CADMAS-SURFの代表的なパラメタ設定値

バージョン	Ver. 4.0	減衰帯	DEGREE	2
ΔX (m)	0.005-0.1		PARAX-X	0.6
ΔZ (m)	0.005-0.05		PARAX-Z	0.8
$\Delta X/L_0$	0.00008-0.01		WIDTH (m)	15.0, 10.0
差分スキーム	DONOR-0.4	捨石マウンド	空隙率	0.44
ボラス下限値	0.001		C_D	1.0
造波モデル	造波ソース		C_c	1.2

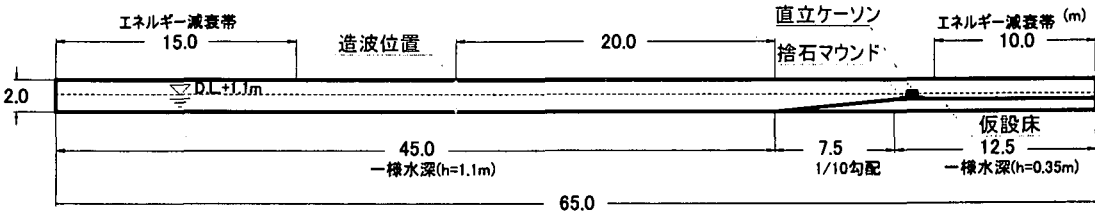


図-3 計算断面

ズムが入っているが、入射波高が大きくなってくると、水平波圧合力および鉛直波圧合力の時間変化に、スパイクノイズのような変化が見られる場合が多くなった。同条件の実験結果にはそのような短時間の時間変化は生じていなかったのので、本検討では、対象点と前後10個のデータの平均値を取り、対象点の値が平均値の1.5倍以上の場合、対象点のデータを平均値に置き換える処理を2回繰り返して、データの平滑化を行った。

各計算点における最大波圧を実験値と比較した結果について、堤体位置の通過波が砕波していない場合およびちょうど砕波するような場合を図-6に示す。波圧は $p/\rho gH$ (ρ : 密度, g : 重力加速度, H : 入射波検定時の堤体位置通過波高) で無次元化されており、鉛直方向成分の結果は塗りつぶして表示されている。実験値の数が限られているが、計算値は実験値をよく表している。また、上床版の影響により、入射波高が大きくなると静水面上の波圧が大きくなる。

(3) 滑動合成波力

a) 波力の時間変化

ケーソン堤の安定性には、滑動および転倒に対する検討が必要となるが、一般に滑動に対する安定性が制約条件となることが多く、今回対象とするケーソン堤も滑動に対する安定性が厳しい。そこで、次式で計算される滑動合成波力 F_c を用いて検討することとした。

$$F_c = F_H + \mu F_v \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F_H : 水平波力, F_v : 鉛直波力, μ : ケーソン堤底面と捨石マウンドの間の摩擦係数である。計算値については、全波圧合力を用いて算出した。一方、実験値は、測定された波圧から計算される波圧合力を用いて算出し

た。

図-7は計算値に対する滑動合成波力の時間変化(1周期分)および滑動合成波力が最大となる時の水面形状を表したもので、 $T=2.0$ s, $H_{in}=0.10$ m についての結果である。図中には水平および鉛直方向の波圧合力が併せて示されている。滑動合成波力には2つのピークが見られる。第1ピークおよび第2ピークは、それぞれ鉛直波力のピークおよび水平波力のピークに対応している。また、最大時の水面形状から、第2ピークは波の峰が遊水室背面壁に衝突したときに発生していることが分かる。なお、第1のピークは、波の峰が堤体沖側到達時に発生している。このように、本構造物は遊水室を有する構造であることから、水平波力と鉛直波力のピークに位相差が発生するものと考えられる。

波高が大きく、また周期が長くなった場合($T=2.5$ s, $H_{in}=0.20$ m) について同様に示したものが図-8である。この場合、水平波力は鉛直波力が最大となる位相付近でもピークを持つような時間変化を示すようになるが、遊水室背面壁に波の峰が到達する第2のピークのほうが大きい。このため、滑動合成波力が水平波力および鉛直波力のピークに応じて2つのピークを持つこと、また波の峰が遊水室背面壁に到達したときに最大となるのは同じである。入射波がさらに大きくなる後述する滑動時には、堤体沖側付近に波の峰が到達する位相において滑動合成波力が最大となった。

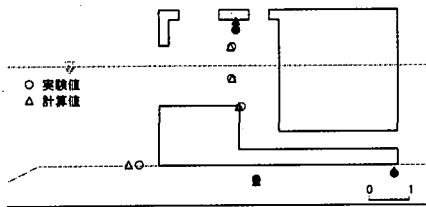
このように、本構造物に作用する波力特性は、直立壁の前に遊水室を設けた直立消波ケーソン堤と同様に、波の峰の位相によって特徴づけられる。

b) 滑動合成波力最大時の波圧分布

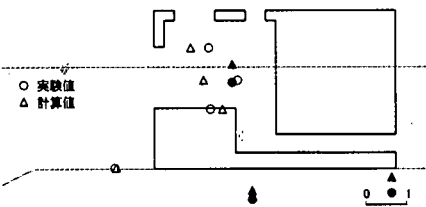
滑動合成波力最大時の波圧分布形状について検討した結果を以下に示す。波力の時間変化特性に見られるように、遊水部を持つことの影響が顕著である。そこで、高橋ら(1991)が縦スリットケーソンに対する実験結果から提案している波力算定法と比較することとした。高橋らの方法は、一般化した合田波圧式(谷本ら, 1987; 高橋ら, 1991)の修正係数を与えることによって得られる。

図-9は、図-7と同条件の波圧分布を計算値と実験値で比較した結果を示す。図中には、高橋らの波圧分布および参考までに合田波圧分布を併せて示してある。計算値は実験値をよく表している。計算では上床版の影響で静水面以上の水平波圧が大きくなる。また、高橋らの方法による波圧分布は、遊水室背面壁の水平波圧が実験値よりやや過小となるものの、実験値をよく表している。

また、図-10は、図-8と同条件に対する波圧分布を示したものである。入射波が大きくなると実験値の測点が密ではなく、また上床版付近にないので、詳細な比較はできないが、遊水室背面壁の計算値は静水面上で大きく



(a) 通過波が非砕波 ($T=2.0$ s, $H_{in}=0.10$ m, $h_t=0.35$ m)



(b) 通過波が砕波 ($T=2.5$ s, $H_{in}=0.20$ m, $h_t=0.35$ m)

図-6 最大波圧の比較

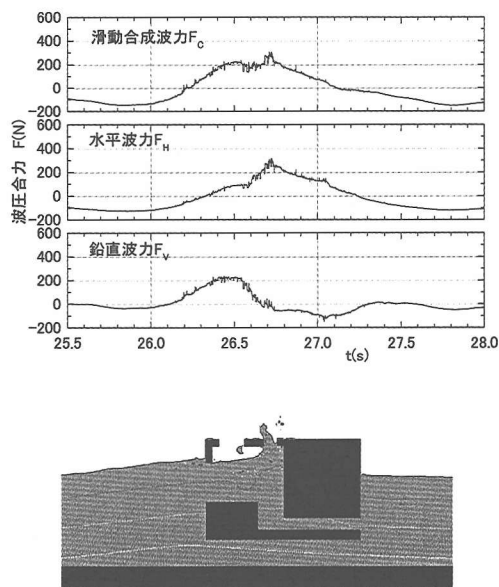
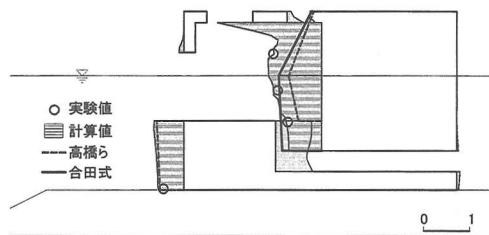
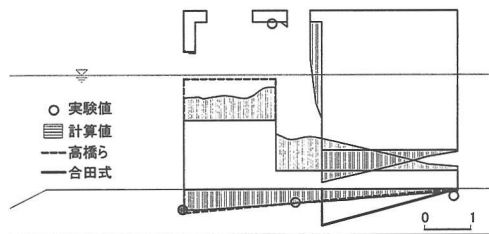


図-7 滑動合成波力の時間変化と最大時の水面形状 ($T=2.0$ s, $H_{in}=0.10$ m, $h_t=0.35$ m)



(a) 水平方向の波圧



(b) 鉛直方向の波圧

図-9 波圧の比較 ($T=2.0$ s, $H_{in}=0.10$ m, $h_t=0.35$ m)

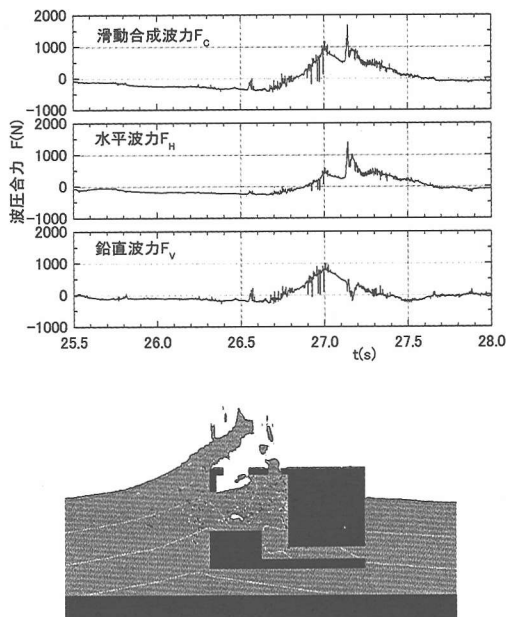
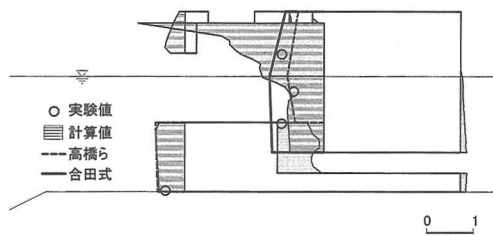


図-8 滑動合成波力の時間変化と最大時の水面形状 ($T=2.5$ s, $H_{in}=0.20$ m, $h_t=0.35$ m)

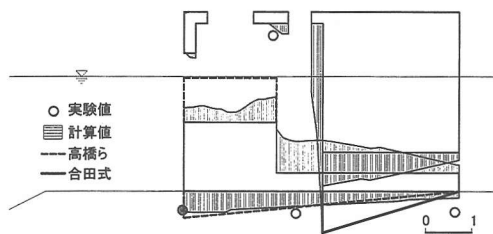
なるのに比べ、高橋らの方法による波圧分布は実験値をよく表しているようである。その他の測点における計算値と実験値の整合性はよい。

(4) 全波力

これまでの検討で、計算値はほぼ妥当であるが、静水面上の波圧分布については、入射波が大きくなる場合に



(a) 水平方向の波圧



(b) 鉛直方向の波圧

図-10 波圧の比較 ($T=2.5$ s, $H_{in}=0.20$ m, $h_t=0.35$ m)

過大となっている可能性が見いだされた。上床版の影響があるため、静水面上の波圧に関する詳細な検討は行えないが、高橋らの方法による波圧分布はほぼ妥当であると考えられる。しかし、通水口の部分ほかについては詳細な評価はできない。そこで、滑動実験における堤体の安定性を指標として、計算値の全波力に対する妥当性を評価することとした。

滑動実験時の模型と碎石マウンドの間の摩擦係数 μ

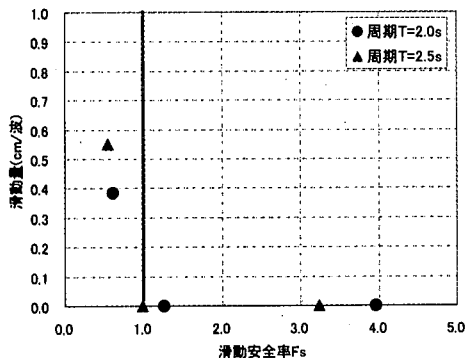


図-11 滑動安全率と滑動量の関係

は、事前に行った引っ張り試験により 0.503 と設定した。この摩擦係数を用いて模型の滑動抵抗力を求め、計算において式 (1) に示す滑動合成波力を算出する。このようにして求めた滑動合成波力の計算値と模型堤体の滑動抵抗力から滑動安全率 F_s を式 (2) で評価した。

$$F_s = \mu W / (F_H + \mu F_V) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに W は模型の有効重量であり、滑動実験時には 2.73 kN (空中 3.11 kN) とした。このようにして求めた滑動安全率と実験時の滑動量との関係を示したものが図-11 である。計算による滑動安全率が 1.0 以上では実験時の模型は滑動しておらず、また 1.0 未満では滑動する結果を得た。これによって、計算による滑動合成波力は妥当であり、構造物全体に作用する波力を適切に評価していることが確認された。

4. おわりに

直立ケーソン式海水交換型防波堤に作用する波圧および波力について、CADMAS-SURF による検討を行い、その妥当性を水理模型実験によって検証した。その結果、CADMAS-SURF は、遊水部および通水口を有するようなかなか複雑な構造形式に対する耐波安定性を評価することが可能であることを確認した。

CADMAS-SURF による波力の計算結果を用いて、本構造物に対するより合理的で簡便に耐波設計を行う手法を構築したいと考えている。

参 考 文 献

- 有川太郎・磯部雅彦・高橋重雄 (2001): VOF 法を用いた衝撃碎波圧の計算と適用性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 831-835.
- 橘川正男・依田 眞・早瀬松一 (2002): 浮体構造物を内部に配したケーソン式海水交換型防波堤の実験的研究, 第 57 回年次学術講演会概要集, II-97-II-98.
- 榊山 勉・鈴木一広 (1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸出し評価, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 741-745.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均 (1991): 直立ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告, 第 30 巻, 第 4 号, pp. 3-34.
- 谷本勝利・高橋重雄・木村克俊 (1987): Structures and hydraulic characteristics of breakwaters—The state of the art of breakwater design in Japan—, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 5 号, pp. 11-55.
- 山本正昭・中泉昌光・間部本文 (1987): 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 675-679.