

ケーソン防波堤の越波・波力算定への数値波動水路の適用

藤井直樹* ・青野利夫** ・興野俊也***
中野 修**** ・五明美智男***** ・阿部光信*

1. はじめに

大水深部防波堤は、高波浪時の越波を許容することによって堤体の天端を低くし、断面の合理化が図れる。この低天端ケーソン堤に作用する波力は越波の影響により、通常天端高のケーソン堤と異なることが考えられるため、越波を含む防波堤周辺の波浪・流況場や作用する波力に関する詳細な検討が必要である。近年、数値波動水路と呼ばれる VOF 法による数値計算手法が開発され(磯部ら 1999)、水理模型実験に代わる設計波力評価手法として期待されている。

数値波動水路を用いた防波堤・護岸の越波や波力に関する研究例として、蔣ら(1999)はケーソン防波堤を例として広範な構造形式の条件下において、計算結果、また一部の実験結果との比較により、碎波など問題も少なくないが、波力算定への数値波動水路の適用性が高いことを報告している。また、榊山・香山(1997)は、消波護岸への越波を対象に数値波動水路の妥当性を検証している。しかしながら、例としてはまだまだ少なく、本格的に実務に用いるためには今後さらに詳細な検討が必要である。

そこで、本研究では低天端ケーソン堤として直立堤と半没水上部斜面堤を取り上げ、ケーソン堤周辺の水位変動や作用波圧について実験と数値波動水路による計算を比較し、数値波動水路の適用性について検討した。また、越波時の流況に着目し、伝達波や波力との関係について検討した。

2. 水理模型実験および数値解析の概要

(1) 水理模型実験の概要

計算の対象とした実験は、直立堤と半没水上部斜面堤の 2 種類である。図-1 に直立堤の実験、図-2 に半没水上部斜面堤の実験で使用した 2 次元造波水路と模型の断面形状を示す。実験縮尺は 1/50 である。ケーソン模型は、

2 種類の実験とも 2 次元造波水路内に設けた 1/100 勾配斜面上の水深 40 cm (現地換算 20 m) の位置に設置した。表-1 に示すように、天端高は、直立堤の場合 2 種類、上部斜面堤の場合 3 種類変化させた。入射波は、現地換算で波高 7.5 m、周期を 3 種類変化させて規則波を作用さ

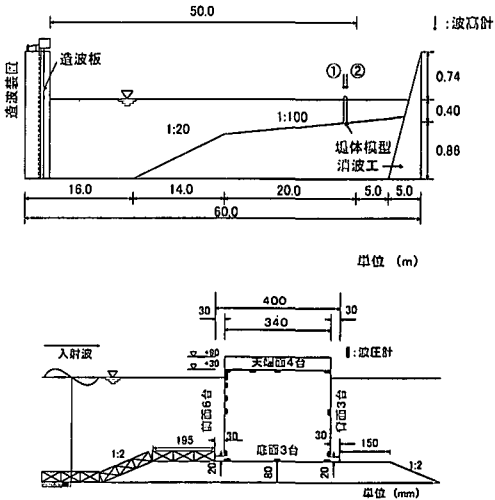


図-1 直立堤の実験水路と断面形状 (藤原ら, 1996)

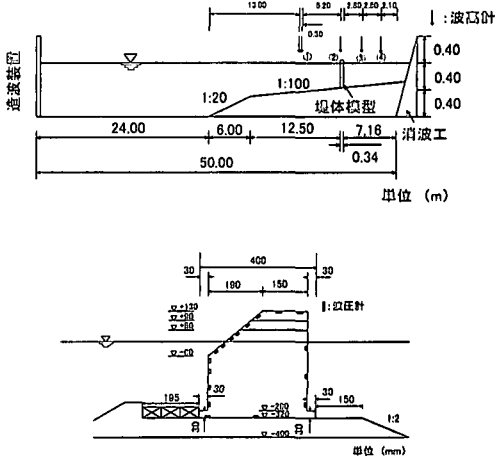


図-2 半没水上部斜面堤の実験水路と断面形状

* 正会員 東電設計(株) 第二土木本部
** 正会員 工 博 東亜建設工業(株) 技術研究所
*** 正会員 東京電力(株) 電力技術研究所 土木 G
**** 正会員 修(工) 東電設計(株) 第二土木本部
***** 正会員 水 修 東亜建設工業(株) 技術研究所

表一 実験ケース

CASE	防波堤	天端高 h_c (m)	波高 H (m)	周期 T (sec)
A-1	直立堤	標準天端 +4.5	7.5	9
A-2			7.5	14
A-3			7.5	16
A-4		標準天端 +1.5	7.5	9
A-5			7.5	14
A-6			7.5	16
B-1	半没水上部斜面堤	標準天端 +6.5	7.5	9
B-2			7.5	12
B-3			7.5	14
B-4			7.5	16
B-5			7.5	9
B-6		低天端 1 +4.5	7.5	12
B-7			7.5	14
B-8			7.5	16
B-9		低天端 2 +2.5	7.5	9
B-10			7.5	12
B-11			7.5	14
B-12			7.5	16

せた。計測は、図に示す位置で水位変動と作用波圧を測定し、各波力を計算した。また、直立堤の実験では、越波量も測定した。

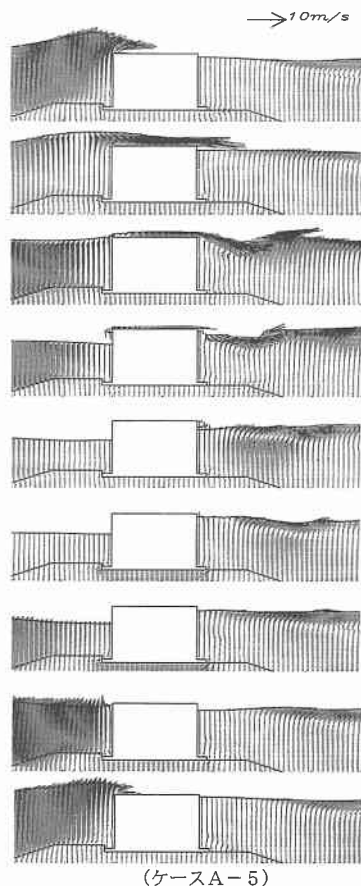
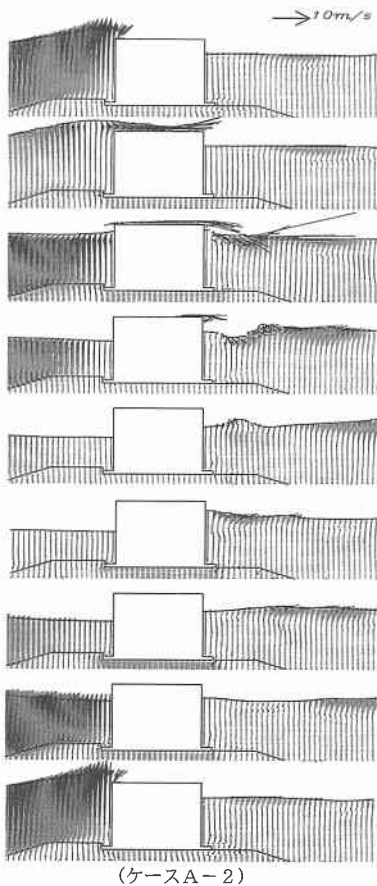
(2) 数値解析の概要

数値解析は、磯部ら(1999)のVOF法に基づく数値波動水路を用いた。解析は、現地スケールにて計算し、防波堤の遡上や越波による波の変形を精度良く再現するため堤体周辺の計算格子間隔(水平方向1m,鉛直方向0.5m)を細かくし、それ以外の領域は徐々に粗い格子とした。堤体は不透過としているが、揚圧力を算定するため捨石マウンド内では舩山・鈴木(1998)を参考に、空隙率0.43,抗力係数1.0,慣性力係数1.2の透過層を設定した。また、越波によって混入した気泡は計算時間の経過に従い蓄積されるため、Timer-Door法(喜田ら,2000)により気泡の上昇処理を行った。

3. 越波特性

(1) 越波状況

図一3に天端高の違いによる直立堤の越波状況を示す。低天端の場合は、標準天端に比べ越波量が多く、堤体を呑み込むように越流し、堤体背後の水面上を滑るように流れる。その結果、堤体背面に時計回りの大きな循



図一3 直立堤の流速ベクトル

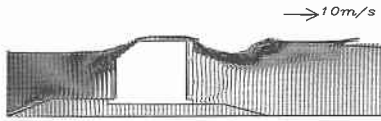


図-4 上部斜面堤の流速ベクトル

環流が形成され、底面まで達する。その後、渦の中心は徐々に移動している。標準天端の場合、堤体背面への越波水塊の作用範囲は低天端の場合よりも狭く、また浅いため渦の形成が顕著にみられない。一方、図-4の上部斜面堤の場合は、天端高により程度は異なるが、直立堤と比較して上向き鉛直速度が小さいため、水平速度が非常に大きく、流れが卓越した越波流況となる。このような越波流況の再現性が越波量、伝達波、背面波圧や堤体背後マウンドの安定に重要であることが理解できる。

(2) 水位と波圧の時系列

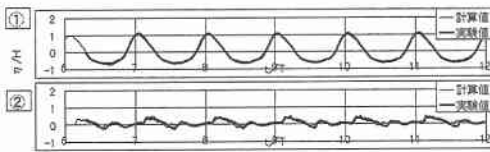
図-5に堤体前後における実験と計算の水位変動波形の比較を示す。堤体前水位波形は、直立堤と上部斜面堤とも良く一致している。堤体背後の水位は、直立堤の場合、堤体背後直近で越流を含む複雑な水面を計算しているにもかかわらず非常に良く一致している。上部斜面堤の場合、実験では入射波の周波数成分に越波による高周波成分が重なり、計測点③ではクレストに2つのピークが明瞭に見られる。計算結果にもその傾向は僅かに現れているが明瞭でない。計測点④の実験と計算結果では、高周波数成分が減衰し、全体的な波形として一致しているが、波高は計算結果の方が若干小さい。

図-6は、そのときの各面ごとに1点を例に取り、波圧の時系列波形の比較を示したものである。計算結果は、位置によらず実験値を良く再現できている。上部斜面の

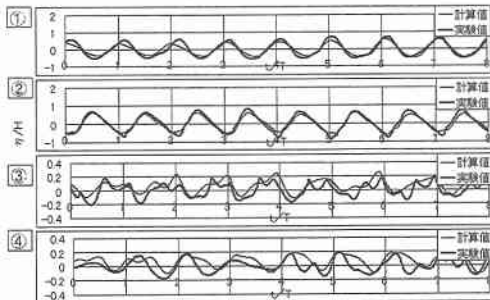
波圧は前面、斜面、天端の順に小さくなり、正の波圧作用時間が短くなる。天端の波圧は急激に立ち上がり、一度下がった後また立ち上がる場合もあり、良く再現できている。しかし、直立堤の背面や天端における計算結果には、スパイクノイズが発生している。この原因は不明だが、衝撃砕波を扱うためには、この問題を解決する必要がある。

(3) 越波量と伝達率

直立堤の実験では越波量が計測されているため、計算結果から求めた越流量と比較した。図-7の計算による越波流量は、天端上に検査測線を設定し、測線における水平流速を鉛直積分して求めたものである。計算では、相対天端高が小さくなると越波量が多くなる傾向を表現できている。しかし、周期が長くなると相対天端高に関係なく、計算による越波量は実験と比較して周期14秒で1.5倍、周期16秒で2倍程度大きくなった。堤体前後の水位変動や天端上の波圧は、計算と実験で顕著な差が認められないことから、計算の流速値が実験よりも大きかった可能性が考えられる。実験では高流速で越流するため天端上の摩擦あるいは乱れの影響があり、計算ではこれらを考慮していないこと、および天端上の水位が非常に薄く数格子しかないため自由表面の計算精度の低下

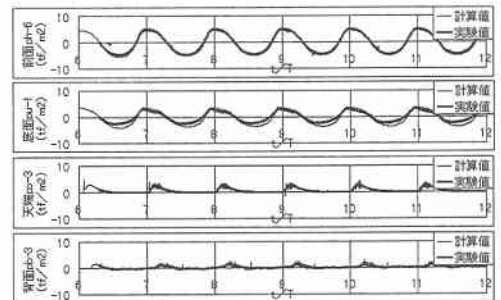


(a) 直立堤 (ケースA-5)

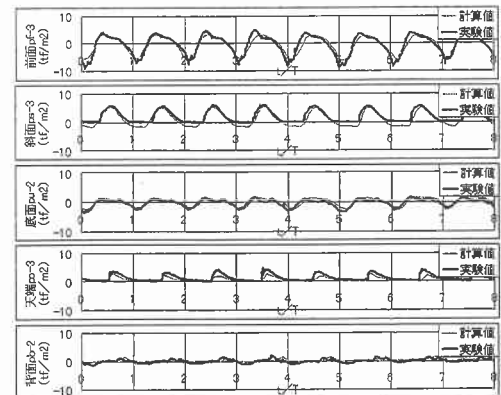


(b) 半没水上部斜面堤 (ケースB-9)

図-5 水位の時系列波形



(a) 直立堤 (ケースA-5)



(b) 半没水上部斜面堤 (ケースB-9)

図-6 波圧の時系列波形

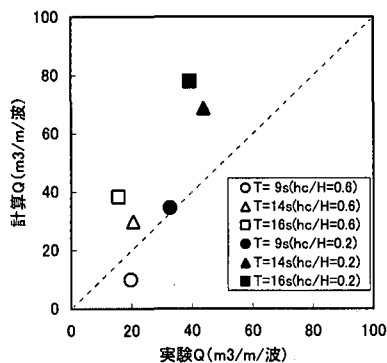


図-7 1波当たりの平均越波量の比較

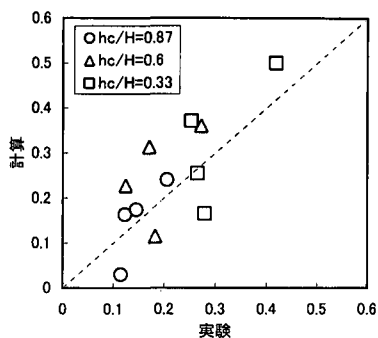


図-8 波高伝達率

があることが原因として考えられる。

図-8は、上部斜面堤の実験と計算の波高伝達率を比較したものである。計算では、天端高が低くなるほど伝達率が大きくなる傾向がある。相対天端高0.87の場合は、僅かに計算の方が大きいものの良く一致している。計算結果が実験に比べ伝達率が小さいケースは3ケースあり、いずれも周期9秒の場合である。他のケースは、計算の方が実験よりも伝達率が高い。周期が長い場合の直立堤の計算による越波量は実験より多かったが、上部斜面の場合も越波量が多いため伝達率が大きくなったと考えられる。

4. 波力特性

(1) 波力の再現性

図-9と図-10は、直立堤と半没水上部斜面堤の各面に作用する無次元波力の経時変化を示したものである。各面の波力計算値は、実験値を良く再現できている。ただし、波圧の時系列波形と同様に、計算結果には頻繁にスパイクノイズが発生している。

図-11は、滑動合成波力最大時の半没水上部斜面堤の波圧分布が示されている。滑動合成波力 F は、式(1)によって算定した。

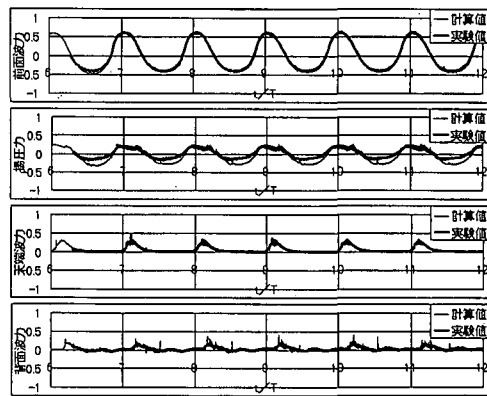


図-9 直立堤の無次元波力の時系列波形 (ケース A-5)

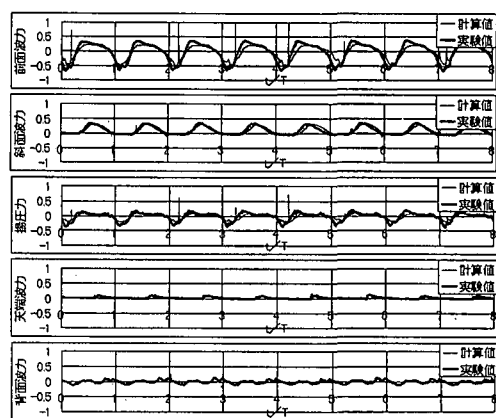


図-10 半没水上部斜面堤の無次元波力の時系列波形 (ケース B-9)

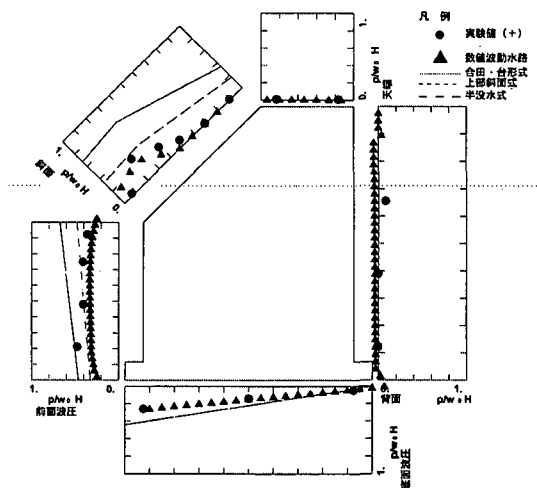


図-11 滑動合成波力最大時の波圧分布 (ケース B-9)

$$F = F_F + F_S \sin \theta + \mu(F_U - F_S \cos \theta - F_0) \cdots (1)$$

ここで、 F_F : 前面波力, F_S : 斜面波力, μ : 底面での摩擦

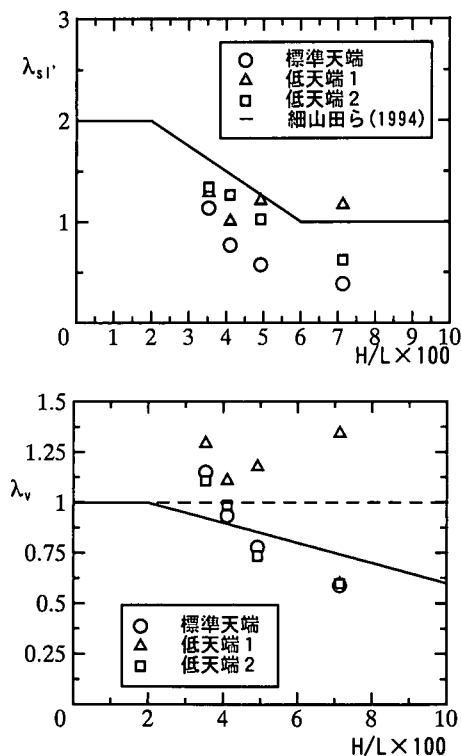


図-12 波力低減係数と波形勾配の関係(半没水上部斜面堤)

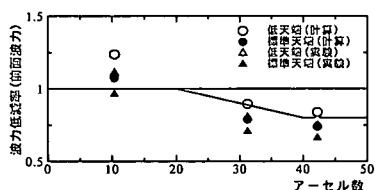


図-13 波力低減率とアールセル数の関係(直立堤)

係数 ($\mu=0.64$), F_v : 揚圧力, F_0 : 打ち込み波力, θ : 斜面の角度である。若干の位相のずれはあるものの、数値波動水路と実験値との対応は良好である。

(2) 波力低減率

図-12は、細山田ら(1994)による半没水上部斜面堤の提案式で用いられる波力補正係数と波形勾配の関係を数値波動水路の計算結果を用いて示したものである。波力低減率は細山田らの提案式と同様の傾向を示しているものの、ばらつきの多いものとなっている。特に斜面部に関しては、低めの傾向を示している。

図-13は、直立堤の波力低減率とアールセル数の関係を示したもので、藤原ら(1996)と同様な波力低減効果が数値波動水路を用いて得られた。

5. まとめ

本研究では、防波堤として直立堤と半没水上部斜面堤を対象に越波、波力の計算を実施し、水理模型実験との比較により数値波動水路の適用性について検討した。

本研究によって明らかになった点を以下に示す。

- ①堤体前後の水位変動や波圧の時系列を計算結果は、実験結果を良く再現できることを確認した。
- ②越波後の伝達波や背面波圧の再現には、越流形態と背後の循環流の再現が重要である。
- ③数値波動水路は、越波や斜面の遡上を含む実験の水位・波圧波形を良好に再現できるため、これまで別々に扱われてきた越波量と伝達波を同時に検討するのに有効なモデルである。
- ④周期の長い入射波に対する越波量の計算結果は、実験結果よりも1.5～2倍大きい傾向がある。
- ⑤数値波動水路は、今回検討した非砕波領域での波力特性を高い精度で再現することが可能であり、水理実験に対する代用手法として実務に耐えうる手法であるといえる。ただし、波圧の計算結果には、スパイクノイズが頻繁に発生するため、衝撃砕波を扱う場合には、この問題を解決する必要がある。

今後は、砕波を含む広範な条件下で引き続き検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(代表：東京大学磯部教授)の活動の一環として行われました。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錦平・榊山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔭 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究-VOF法基本プログラムの作成-海洋開発論文集, 第15巻, pp. 321-326.
- 榊山 勉・香山真裕 (1997): 海底斜面上で砕波を伴う消波固岸への越波の数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 741-745.
- 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い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 566-570.
- 蔭 勤・高橋重雄・磯部雅彦 (1999): 防波堤の波力算定への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 41-45.
- 喜田義輝・藤間功司・重村利幸 (2000): 数値波動水路による浅海波の解析に関する一考察, 第27回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 338-339.
- 藤原隆一・貝沼憲男・興野俊也・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.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利 (1994): 礁島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 706-710.