

越波を利用した水位差獲得に関する基礎的研究

A Study on the Gain of Water Head by Wave Overtopping

小松利光*・松永信博**・藤田和夫***・

増輪一彦****・細山田得三*****・樋田操*****

By Toshimitsu KOMATSU, Nobuhiro MATSUNAGA, Kazuo FUJITA,
Kazuhiko MASUWA, Tokuzo HOSOYAMADA and Misao HASHIDA

Purification of polluted sea water in deep bays is essential from the viewpoints of coastal environment. Development of artificial fishing grounds is also desirable from the standpoint of coast fisheries. These two social problems need commonly the development of technology to generate net flow in coastal region and to control it. We are demonstrating how to gain the difference of water head by overtopping waves into a coastal structure, and how to discharge the overtopped sea water into a bay or deep sea by using the head difference. This study is concerned with the maximum quantity of wave overtopping gained when two-dimensional regular waves climb up a sloping bed. The maximum quantity can be evaluated by using non-dimensional empirical diagrams.

Keywords : wave overtopping, coastal environment, difference of water head

1. 緒言

産業の発達、それに伴う都市への人口集中によって沿岸海域の水質の悪化が著しく進んでいる。特に、東京湾・博多湾・洞海湾のような奥深い内湾においてこの問題はことさら深刻である。また、世界各国の200海里宣言に伴うわが国の漁場の縮小も大きな問題であり、沿岸海域における水産資源の開発が叫ばれている。

1988年から、土木学会水理委員会に環境水理部会が設置されたが、それ以後の打ち合せにより「海域における人工湧昇流の発生とその応用」が基本テーマの1つとして決定された。さらに議論を重ね、沿岸環境の保全と人工漁場の開発といった、より現実的な問題へと発展させることが必要であるとの結論に達した。この研究プロジェクトの目的は、海洋・大気に内在している自然エネルギーを利用して内湾と外海との間の海水交換を促進したり、内湾の表層水と深層水との交換を促進することにより沿岸海域の水質改善を図ることである。また、栄養塩の豊富な深層水を太陽光の届く表層付近まで揚水することにより、動・植物プランクトンを増殖させ人工漁場を開発しようとするも

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部 水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

** 正会員 工博 九州大学助手 工学部 水工土木学科
(同上)

*** 正会員 九州大学技官 工学部 水工土木学科
(同上)

**** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科修士課程水工土木学専攻
(同上)

***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部
(〒239 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

***** 正会員 工修 日本文理大学教授 工学部 土木工学科
(〒870-03 大分市一木)

のである。

我々のプロジェクトチームは沿岸の波浪を人工構造物を用いて越波させ、水位差を獲得し、導水パイプで深層に表層水を送り込むことによって人工湧昇流を発生させる方法を考案した。(図-1参照)この方法によると、沿岸域の温かい海水を低温度の深層に放出するため、深海における温度成層効果を有効に利用することができる。また、水質が悪化している閉鎖性内湾に対して埋設パイプで外海と内湾とを結び、外海のきれいな海水を流入させることにより湾内の水質改善を図ることも可能である。

これまで、海岸工学において越波に関する研究は堤内地の保護のため極力越波を防ぐという立場からのものであり、数多くの研究がなされてきた^{1)~6)}。本研究では、それとは逆により多く

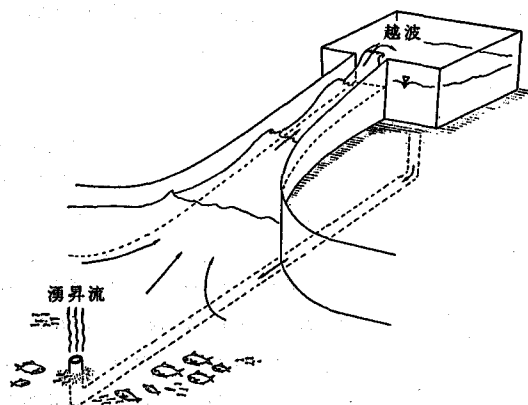


図-1 越波による位置エネルギーの獲得方法の概念図

の越波量および水位差を得るためにどのような構造物をつくれればよいかという点が主目的となる。すでに、このような立場から越波の研究がなされた例は2,3ある。宮江・手操⁷⁾は集波堤と越波堤による越波現象を利用して非定常で平面的に分散している波浪エネルギーを位置エネルギーに変換するための水理実験を行った。その結果、越波堤ののり面勾配は $1/\sqrt{3}$ が最適であること、波浪密度を高めるのに必要な集波堤の集波比(集波堤の入口幅に対する出口幅の比)は $1/6$ が効果的であること等が明らかにされている。川村ら⁸⁾は閉鎖性水域の水質改善のために越波を積極的に利用して外海水の導入を促進する技術開発を試みている。彼らはV字状集波堤と潜堤を用いて越波量を増大させる実験を行い、集波堤の開角度が 45° 、潜堤の天端が静水面よりやや高いときに越波量が最大となることを提示している。しかしながら、これら2つの研究において、獲得された最大越波量が十分に正確に、また普遍的に評価されているとはいえない。本研究の目的は、二次元規則波が入射したとき、越波によって効率よく水位差を獲得するために最も有利な二次元構造物の形状を決定すると同時に、最大越波量の定量的評価を行うことである。

2. 実験装置および実験方法

実験は、図-2に示すような二次元造波水槽が用いられた。水槽は長さ16m、高さ0.6m、幅0.25mである。水槽平坦部の水深 H を36cmに固定し、傾斜底面の勾配 $\tan \alpha$ を $1/30$ に設定した。越波堤の堤脚水深 h を8.6cmに固定し、のり面勾配を9通り変化させた。その逆数 $\cot \theta$ は0, 1, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, 2.0,

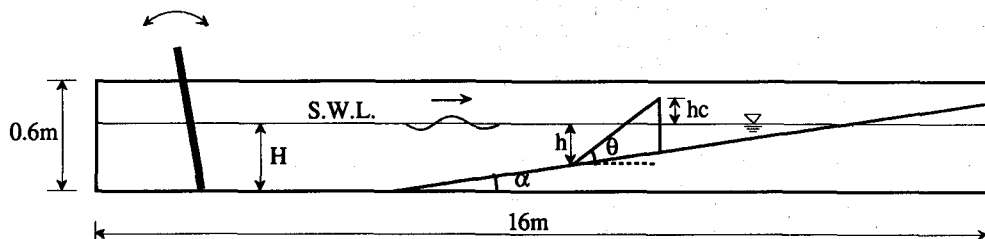


図-2 実験装置

2.3, 2.6, 3.0, 4.0であった。それぞれのり面勾配に対し、斜板の長さを変えることにより天端高 h_c を 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 cm と変化させた。従って、36 通りの越波堤に関する実験を行った。入射波としては、堤脚水深に達するまで砕波しない 5 種類の波 ($H_0/L_0 = 2.02 \times 10^{-2}$, 3.28×10^{-2} , 4.49×10^{-2} , 5.27×10^{-2} , 6.59×10^{-2}) が選ばれた。ここで H_0, L_0 はそれぞれ沖波の波高と波長である。

測定においては越波量が多いときには造波開始後第6波から第10波の5波について、また、少ない場合には第6波から第15波の10波による越波量を5回ずつ測定し、その平均から入射波 1 波による単位幅当たりの越波量 Q ($\text{cm}^2/\text{1 波}$) を算定した。

3. 実験結果およびその考察

単位幅当り1入射波による越波量 Q は、 L_0, H_0, h_c, h および $\cot \theta$ に依存するものと考えられる。これらの間の関係を次元解析を用いて無次元表示すると、無次元越波量 Q/H_0L_0 は

$$\frac{Q}{H_0L_0} = f \left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h_c}{H_0}, \cot \theta, \frac{h}{L_0} \right)$$

で表される。今回の実験において、堤脚水深と波長の比 h/L_0 は $0.04 \sim 0.084$ の範囲で変えられているが、一般に h/L_0 はかなり大きな値までとりうることを考えれば、この範囲における Q/H_0L_0 の変化を評価することは困難であると思われる。従って、以下の議論では、 Q/H_0L_0 と $H_0/L_0, h_c/H_0, \cot \theta$ との関係が明らかにされている。

図-3 は、 $H_0/L_0 = 5.27 \times 10^{-2}$ の波に対する無次元越波量を $\cot \theta$ をパラメータとして相対天端高に対して示したものである。無次元越波量は相対天端高が増加するにつれ単調に減少することがわかる。また、 $h_c/H_0 > 0.20$ の範囲において $\cot \theta = 1.73$ のとき無次元越波量は、最大となることがわかる。

図-3 から $h_c/H_0 = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ における Q/H_0L_0 の値を内挿により求め h_c/H_0 をパラメータに Q/H_0L_0 の値を $\cot \theta$ に対してプロットしたものが図-4 である。最大無次元越波量 ($Q/H_0L_0)_{\max}$ は、 h_c/H_0 の値に無関係に $\cot \theta = 1.73$ の時に生じ、 $\cot \theta$ が 1.73 よりも小さい場合も大きい場合も Q/H_0L_0 は減少することがわかる。

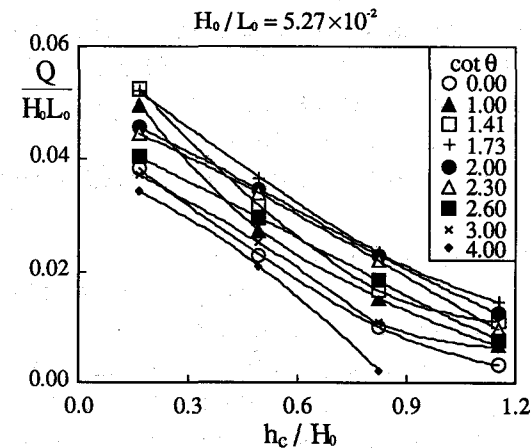


図-3 $H_0/L_0 = 5.27 \times 10^{-2}$ の波に関する無次元越波量と相対天端高との関係

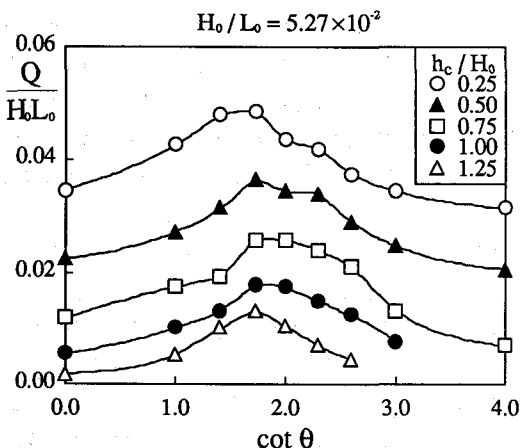


図-4 $H_0/L_0 = 5.27 \times 10^{-2}$ の波に関する無次元越波量と $\cot \theta$ との関係

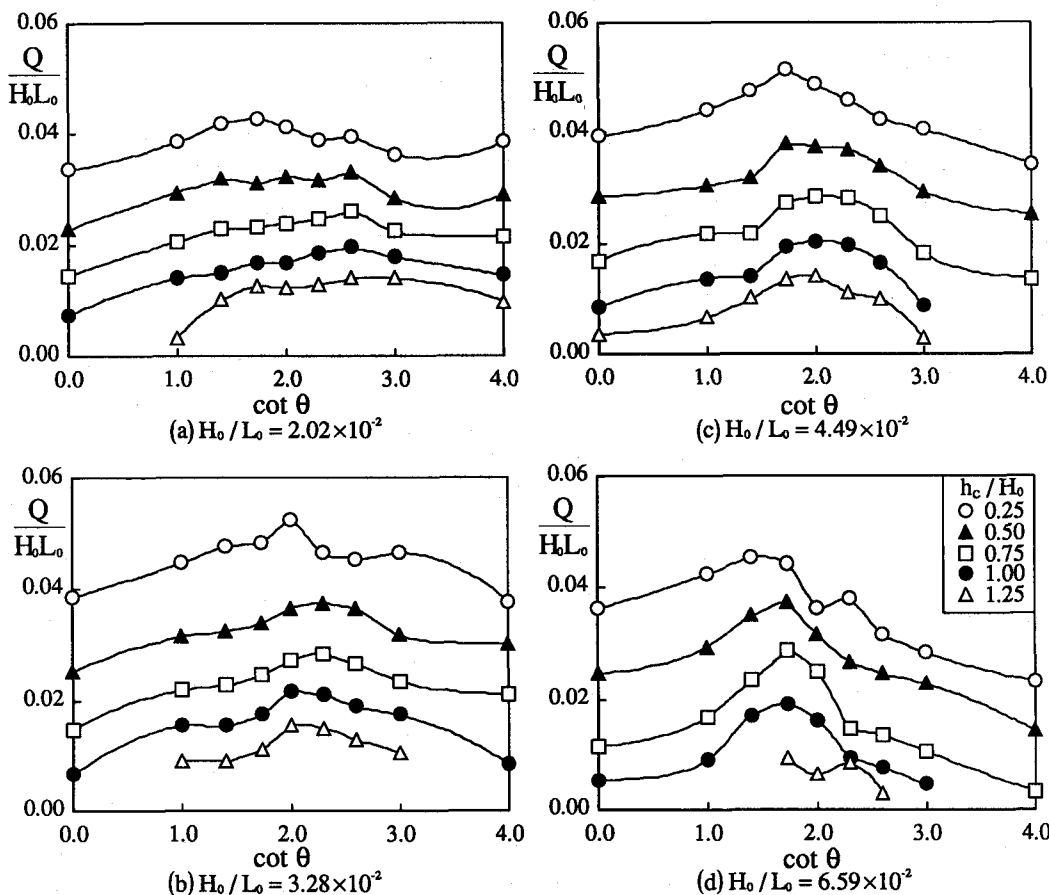


図-5 無次元越波量と $\cot \theta$ との関係

$H_0/L_0 = 2.02 \times 10^{-2}, 3.28 \times 10^{-2}, 4.49 \times 10^{-2}, 6.59 \times 10^{-2}$ の波に関しても、同様な手順で $Q/H_0 L_0$ の値を $\cot \theta$ に対してプロットしたものが図-5 (a)~(d) である。沖波波形勾配が小さいとき無次元越波量は明瞭な最大値をとらないが、波形勾配が増加するにつれ最大無次元越波量の存在が明瞭となることがわかる。 $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ が生ずる $\cot \theta$ の値は 1.73~2.5 の範囲にあり、沖波波形勾配が大きくなるにつれて 1.73 に近づく傾向にある。これは宮江・手操による研究結果と一致している。しかしながら、 H_0/L_0 が一定のとき $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ となる $\cot \theta$ の値は相対天端高には系統的に依存せずほぼ一定値をとる傾向が見られる。また、相対天端高が増大するにつれ無次元越波量は系統的に減少する。

図-4 と図-5 (a)~(d) に示された $Q/H_0 L_0$ と $\cot \theta$ の関係を普遍表示するために、図-6 に示されるように代表諸量を定義する。 $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ は無次元最大越波量でありそのときの $\cot \theta$ の値を $(\cot \theta)_{\max}$ とする。 $(\cot \theta)_{\max} / 2$ における無次元越波量を $(Q/H_0 L_0)_*$ と定義する。

図-7 は図-4 と図-5 (a)~(d) で示された図からこれらの代表量を読み取り、無次元越波量を規格化したものである。 $\cot \theta / (\cot \theta)_{\max} > 2$ と $\cot \theta / (\cot \theta)_{\max} < 1/2$ ではデータにかなりのばらつきが見られるが、最小二乗近似で得られた実線によって、無次元越波量は普遍表示されることがわかる。

図-7で与えられた無次元越波量のグラフと、水理学的条件 $\cot \theta$, h_c , H_0 , L_0 から越波量を算定するには $(Q/H_0 L_0)_{\max}$, $(Q/H_0 L_0)_*$, $(\cot \theta)_{\max}$ の定量化がなされる必要がある。

図-8 は、 $\cot \theta$ を変化させたときの最大無次元越波量 $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ と相対天端高さとの関係を示した図である。図-3 で示されたのと同様に、 $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ も h_c/H_0 が増加するに連れて単調に減少する。一方、図-9 に示されるように $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ は H_0/L_0 にはほとんど依存せず一定である。従って、 $(Q/H_0 L_0)_{\max}$ と水理条件の関係は図-8において最小二乗近似に基づいて描かれた実線で表される。

図-10は図-6で定義された $(Q/H_0 L_0)_*$ と h_c/H_0 の関係を示している。 $(Q/H_0 L_0)_*$ は相対天端高が増加するにつれ急激に減少しており、沖波波高による系統的傾向もなく、データの散らばりもそれほど大きくないことがわかる。従って、 $(Q/H_0 L_0)_*$ は h_c/H_0 のみの関数として、図中の最小二乗近似曲線で表されるものと考えられる。

図-11 は $(\cot \theta)_{\max}$ と H_0/L_0 の関係を示している。 h_c/H_0 の変化により $(\cot \theta)_{\max}$ の値もかなりの幅をもつが、図中の実線で示されているように $2.02 \times 10^{-2} < H_0/L_0 < 6.59 \times 10^{-2}$ の波に対し無次元越波量を最大にするのり面勾配 $\tan \theta$ は $1/\sqrt{3} \sim 1/2.5$ の値をとることがわかる。

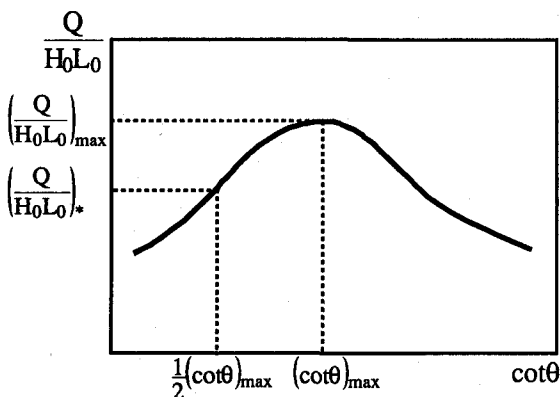


図-6 無次元越波量を普遍表示するための代表諸量

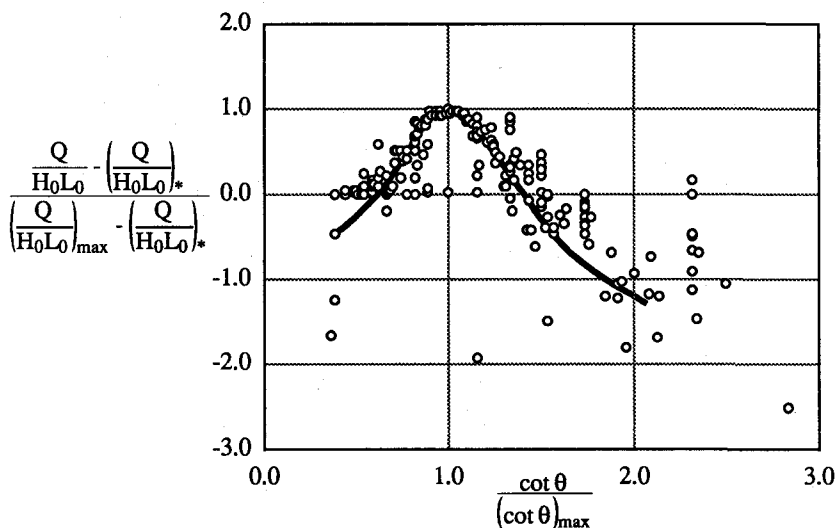


図-7 無次元越波量の普遍表示

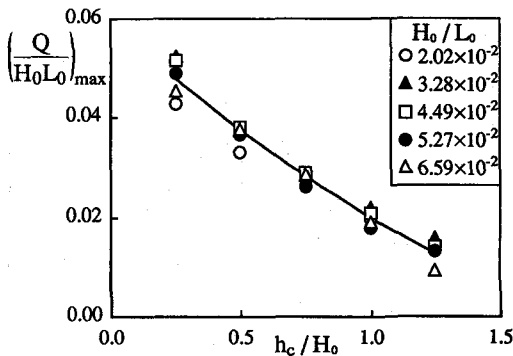


図-8 最大無次元越流量と相対天端高との関係

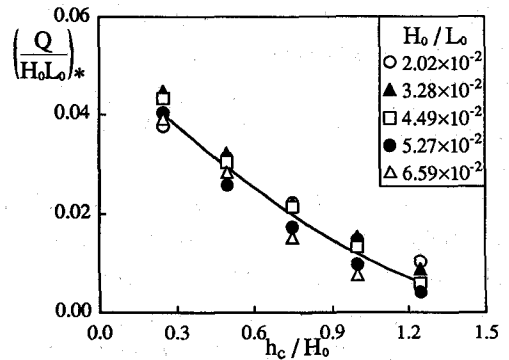


図-10 $(Q/H_0L_0)^*$ と h_c/H_0 との関係

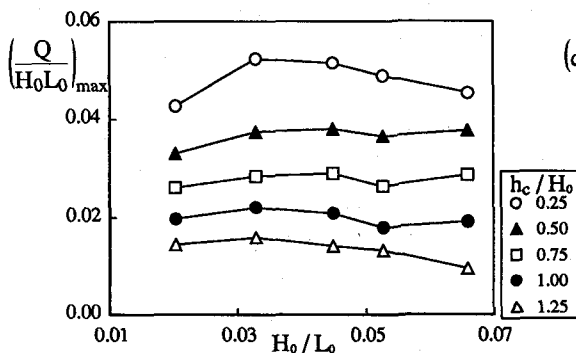


図-9 最大無次元越流量と沖波波高勾配との関係

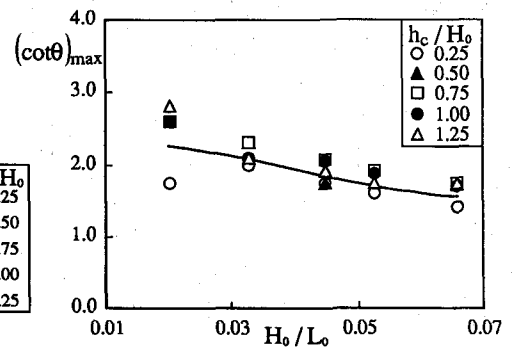


図-11 $(\cot\theta)_{\max}$ と H_0/L_0 との関係

従って、沖波波高 H_0 、沖波波長 L_0 の波が入射してくる海域に、越波堤を造り、海水交換あるいは湧昇流を発生させるために必要な水位差が h_c であった場合図-7, 8, 10, 11 を用いることにより堤体の最適のり面勾配と最大越流量が決定されることになる。今後は、平面造波水槽を用いて集波堤の最適形状を決定し、得られる最大越流量を評価する予定である。

本研究は人工湧昇流開発利用研究会の援助を受けて行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第4号, pp.1 - 41, 1970.
- 2) 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3 - 44, 1975.
- 3) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1977.
- 4) 高山知司・永井紀彦・西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp.151 - 189, 1982.
- 5) 山本正昭・西裕司：越波の少ない低天端堤の開発, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.537 - 541, 1984.
- 6) 井上雅夫・島田広昭・本田静高・殿最浩司：不規則波の越波量, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.582 - 586, 1988.
- 7) 宮江伸一・手操能彦：集波堤による波浪エネルギーの位置エネルギーへの変換実験, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp.145 - 154, 1984.
- 8) 川村正司・小松英則・山本敦・中野晋・三井宏：V字集波堤と潜堤による越波量の増大, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.623 - 627, 1989.