

L型カーテンウォールの波浪制御特性 に関する研究

—数値波動水路の耐波設計への適用—

STUDY ON FUNCTION OF A L-TYPE CURTAIN WALL WAVE BARRIER USING A NUMERICAL WAVE FLUME

蔣 勤¹・高橋重雄²・珠久正憲³・磯部雅彦⁴

Qin JIANG, Shigeo TAKAHASHI, Masanori SHUKU and Masahiko ISOBE

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部特別研究員 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部特別研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 三菱重工業(株) 船舶技術部次長 (〒100-0005 千代田区丸の内2-5-1)

⁴フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

A new wave barrier named 'L-Type Curtain Wall Wave Barrier' is developed and its function is studied using a numerical wave flume. The wave barrier comprises a curtain wall and a horizontal flat plate to reflect incident wave effectively; the transmission coefficient of the new wave barrier even with its relatively small width B and small submerged depth d is very low compared with a curtain wall or with a horizontal plate. The calculations were made using the numerical wave flume which is under development by a special research group including the authors. The calculation with its animation can clearly show the mechanism of wave reflection and wave energy dissipation.

Key Words : *L-type curtain walls, submerged horizontal plates, curtain walls, wave, wave barrier, wave reflection, wave transmission, wave energy dissipation.*

1. まえがき

カーテンウォールや没水平板などの波浪制御構造物は、堤体下部を通しての海水交換機能を持つため、内湾域や深海域及び軟弱地盤上の防波堤、あるいは超大型浮体の前面の波浪制御構造物として期待されている。しかしながら、カーテンウォールや没水平板によって十分な波浪制御効果を得るためには、十分なカーテンウォールの没水深さ、あるいは水平板の長さが必要であり、設計上の問題点となっている。

L型カーテンウォールはカーテンウォールの沖側に没水平板を付き加えたもので、反射あるいは砕波によって波浪制御するものであり、従来のカーテンウォールや没水平板より優れた消波機能を持つことと考えられる。

本研究は数値波動水路を用いてL型カーテンウォールの水理特性について検討を行うものである。ただし、通常のカーテンウォール、没水平板、矩形固定浮体、矩形潜堤など類似した構造についても、検討を行っており、L型カーテンウォールと比較している。

2. 数値波動水路

(1) 水理模型実験と数値波動水路

新しい耐波構造物の開発に際しては、これまで水理模型実験を用いた検討が行われている。しかしながら、水理模型実験は多くの費用と時間が必要であり、模型のスケール効果が問題となる。更に、構造物周辺の詳細な流速や圧力などの大量の情報を得ることは困難であり、構造物と流体との相互作用を十分に把握することは容易ではなかった。

「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」では、こうした水理模型実験にかわる数値実験の実用化を目指して、数値波動水路の開発を行っている(磯部ら 1999)。数値波動水路は、波と構造物との相互干渉による非線形波動問題を迅速かつ容易に解析するための数値計算モデルであり、砕波や越波に対しても適応でき、従来の断面二次元造波水路に代わりうる数値的な造波水路である。

本報告は、種々の波浪制御構造物、特に新しく開発されたL型カーテンウォールを設置した波の場を詳

細に解明し、その波浪制御メカニズムを明らかにするものであり、数値波動水路が、こうした実務に適用できることを示すものである。

(2) 数値波動水路による解析（アニメーションと波パワーの計算）

計算では、水位だけでなく、圧力や流速の分布が各時間ステップごとに出力され、これによって構造物と波との相互作用が把握できる。特に、その出力結果をアニメーションとして見ることも可能であり、全体像を比較的容易に理解することができる。

また、計算では水路のいくつかの断面に検査面を設けており、ここでの波パワー（圧力と流速の積を鉛直方向に積分した値の1周期分の平均値）を求めており、それによって波の反射や伝達、渦によるエネルギー損失がよく分かる。例えば、あらかじめ入射波の波パワー E_i も求め、構造物から十分離れた前方と後方の断面での波パワー E_t と E_r を求めれば、反射波の波パワー E_r （ $=E_i - E_t$ ）と伝達波の波パワー E_t が求まり、反射率 K_r と伝達率 K_t が求められ、エネルギー損失率（ $= (E_i - E_t) / E_i$ ）も求められる。

3. 波浪制御メカニズムの検討

(1) カーテンウォール

カーテンウォールは、基本的に鉛直版で波を反射するものであり、また鉛直版下端から発生する渦によるエネルギー損失を期待するものである。

図-1 (a) は、周期 $T=3.0s$ 、水深 $h=1.0m$ （波長 $L=8.69m$ ）、波高 $H=0.15m$ 、カーテンウォールの没水深 $d=0.5m$ の条件における計算結果であり、流れと圧力場を示している。こうした図やアニメーションから判断すると、やはり鉛直版前面に重複波が形成され、鉛直版下部に大きな流速が現れ、そして大きな渦が発生していることが分かる。この場合、 $E_i=67.0W/m$ 、 $E_t=38.0W/m$ 、そして $E_r=16.0W/m$ であり、 $K_r=0.48$ 、 $K_t=0.75$ となり、エネルギー損失率 $E_{loss}=0.21$ となる。

図-1 (b) は、同様の条件で波高 $H=0.45m$ の場合である。やはり鉛直版下部での流速が大きくなり、エネルギーの損失が大きくなっている。従って、 $K_r=0.51$ 、 $K_t=0.62$ となり、 $E_{loss}=0.36$ となる。

(2) 没水平板

図-2 (a) は、図-1 (a) と同じ条件で、長さ $B=3.7m$ （ $B/L=0.425$ ）の没水平板に対する計算結果である。水平版の下側では、圧力が沖側から岸側にすぐ伝わっており、没水平板上では水深が浅くなり、波長が短くやや遅くなった波が伝わっているのが分

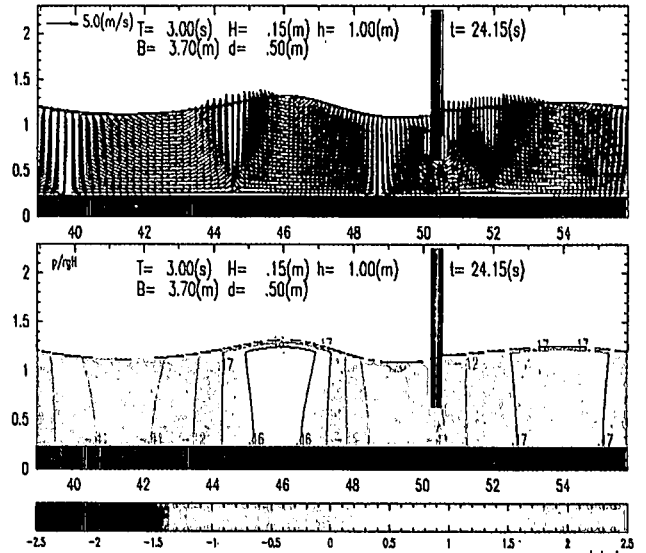


図-1 (a) 波の伝播状況
(カーテンウォール, $H=0.15m$)

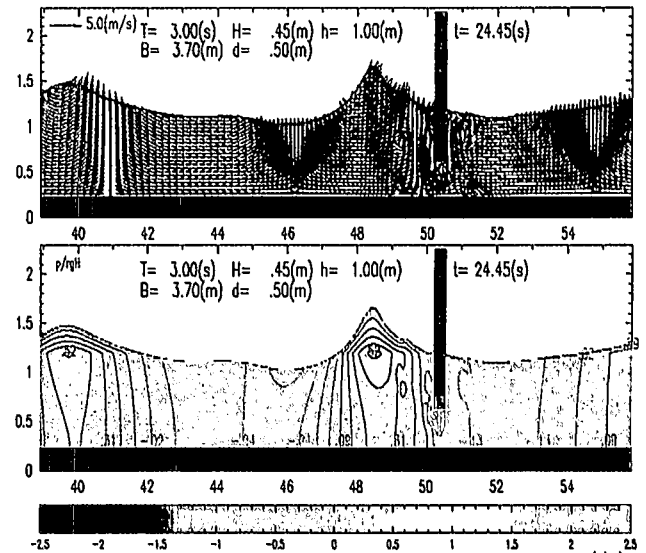


図-1 (b) 波の伝播状況
(カーテンウォール, $H=0.45m$)

かる。没水平板上での水深 $0.5m$ では波長 $L'=6.39m$ であり、 $B/L'=0.58$ となり、水平板の沖側と岸側では位相が約 180° 違い、没水平板の岸側の端でこの上部と下部で位相が 180° 違っており、これが反射を促進している。この場合、 $K_r=0.40$ 、 $K_t=0.80$ 、 $E_{loss}=0.20$ となる。

図-2 (b) は波高が $0.45m$ の場合である。水平板上で碎波しており、 $K_r=0.41$ 、 $K_t=0.48$ 、 $E_{loss}=0.60$ となる。このように、没水平板のもう一つの消波機能は、大きな波高の場合の没水平板上の碎波によるエネルギー消費であり伝達率が小さくなっている。

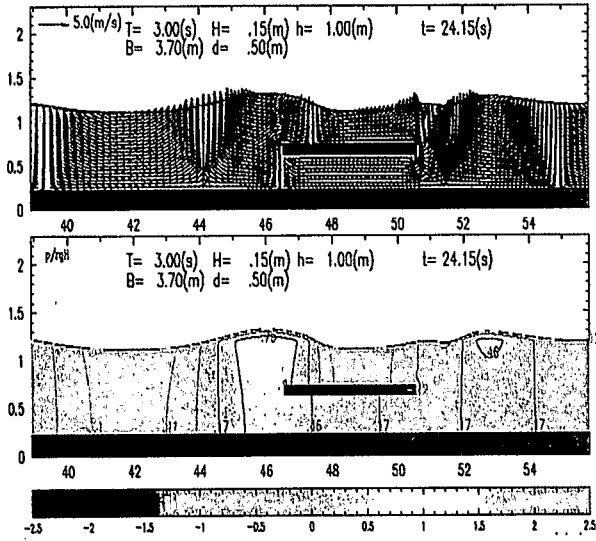


図-2 (a) 波の伝播状況
(没水平板, $H=0.15\text{m}$)

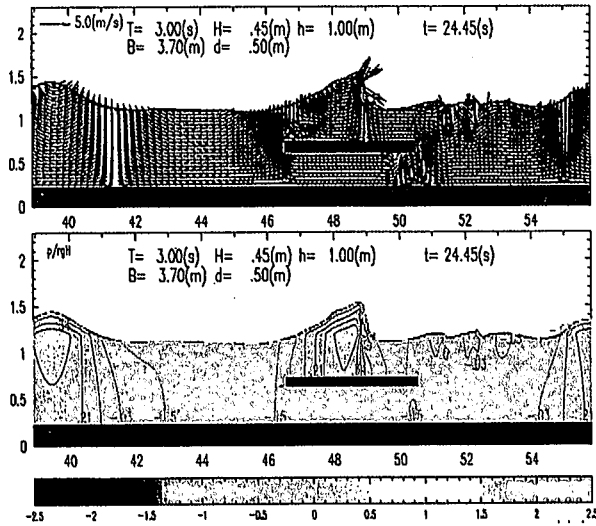


図-2 (b) 波の伝播状況
(没水平板, $H=0.45\text{m}$)

(3) 矩形潜堤

図-3 (a)は、図-1 (a)と同じ条件で、矩形潜堤の場合であり、潜堤の長さや没水深さは没水平板と同じである。この場合、水平板の下部が不透過となるため、波は潜堤上部に乗り上げていく。ただし、波高が小さいため、砕波していない。従って、 $K_r=0.39$, $K_t=0.86$, $E_{\text{loss}}=0.11$ となり、反射率が小さく伝達率が大きくなる没水深さの大きな潜堤の特徴が現れている。前述した没水平板の方と比べて、伝達率と反射率がほぼ同じである。

図-3 (b)は、波高 $H=0.45\text{m}$ の場合で、潜堤上で砕波するため、波高が小さいときより E_{loss} が大きく、伝達率は小さくなる。ただし、反射率はほぼ同じであ

る ($K_r=0.38$, $K_t=0.43$, $E_{\text{loss}}=0.67$)。やはり通常言われているように潜堤では没水深さを波高に比して十分小さくする必要がある。

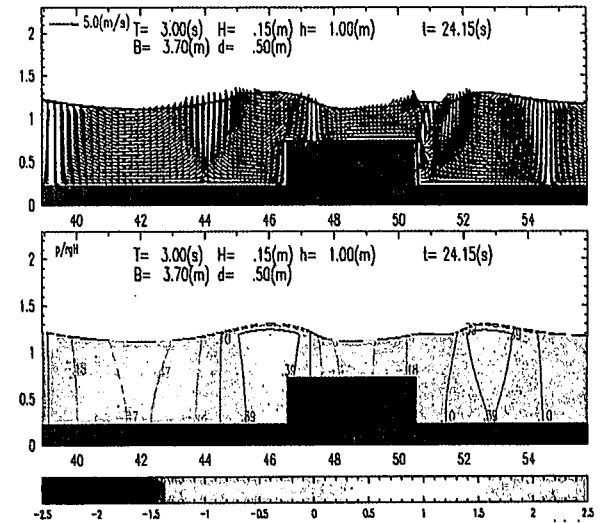


図-3 (a) 波の伝播状況
(矩形潜堤, $H=0.15\text{m}$)

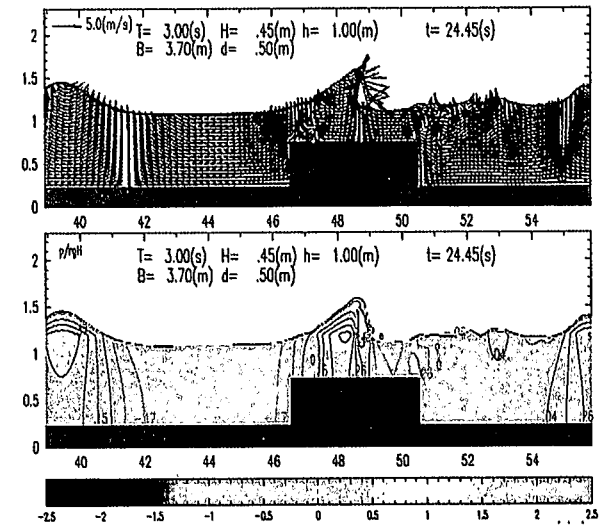


図-3 (b) 波の伝播状況
(矩形潜堤, $H=0.45\text{m}$)

(4) 固定矩形浮体

図-4 (a)は、図-1 (a)と同じ条件で矩形固定浮体の場合である。矩形浮体の長さや底面の位置は、没水平板と同じであり、没水平板と比べると水平板の上が不透過となった状態である。やはり矩形浮体前面では重複波が形成され、底面では沖側から岸側に圧力が直接伝わっている。また底面の両端では渦の発生が認められる。計算結果では、 $K_r=0.83$, $K_t=0.22$, $E_{\text{loss}}=0.26$ であり、矩形潜堤より反射率が大きく、没水平板より小さい伝達率になっているこ

とが分かる。また、カーテンウォールと比較するとこれより反射率が大きく伝達率が小さく、長さ B の効果が現れている。

図-4 (b) は、波高が大きい場合であり、波高の増大によって渦によるエネルギー損失は大きくなるが、矩形潜堤のような砕波によるエネルギー損失はもちろん見られず、波高の増大による伝達率の変化は小さい ($K_r=0.85$, $K_t=0.22$, $E_{loss}=0.23$)。

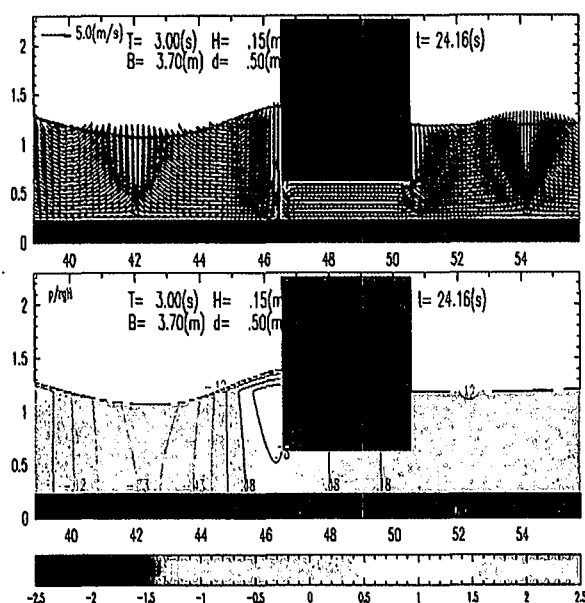


図-4 (a) 波の伝播状況
(矩形固定浮体, $H=0.15\text{m}$)

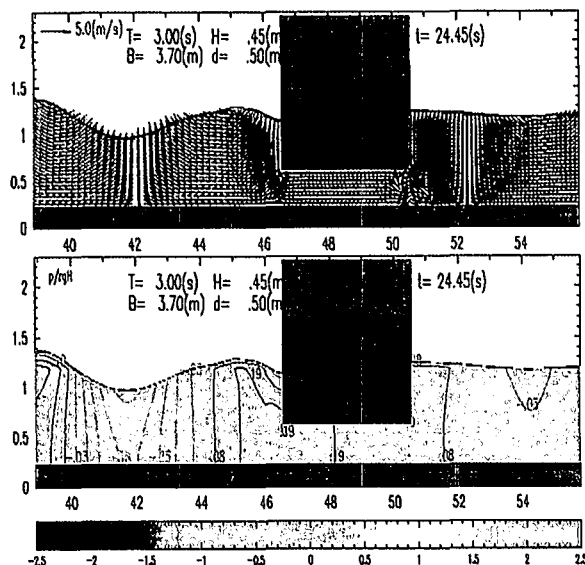


図-4 (b) 波の伝播状況
(矩形固定浮体, $H=0.45\text{m}$)

(5) L型カーテンウォール

図-5 (a) は、図-1 (a) と同じ条件で L 型カーテンウォールの場合である。没水平板上沖側の端にお

ける圧力や流速が波の伝播に大きく係わっていると思われるが、没水平板上では重複波が形成され、通常の没水平板とは大きく異なっている。伝達率は没水平板よりもかなり小さく、反射率は大きくなっている ($K_r=0.66$, $K_t=0.21$, $E_{loss}=0.52$)。

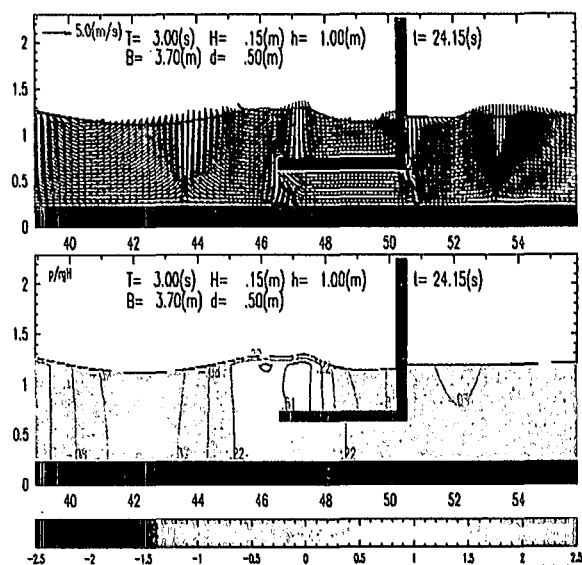


図-5 (a) 波の伝播状況
(L型カーテンウォール, $B=3.7\text{m}$, $H=0.15\text{m}$)

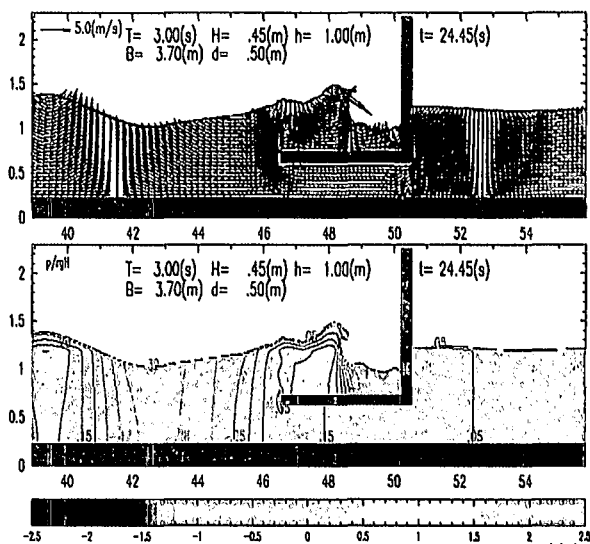


図-5 (b) 波の伝播状況
L型カーテンウォール, $B=3.7\text{m}$ $H=0.45\text{m}$)

また、図-5 (b) は、波高が大きい場合であり、このときには、没水平板上で砕波が発生しており、波高伝達率も小さくなっている ($K_r=0.54$, $K_t=0.16$, $E_{loss}=0.68$)。

さらに、図-5 (c) は図-5 (a) と同じ条件であるが、没水平板の長さ B がほぼ $1/2$ となったケースで

ある。この場合も伝達率は小さく、ここには示していないが、通常の没水平板で同じ長さの時に比べてかなり伝達率は小さくなっている ($K_r=0.31$, $K_t=0.22$, $E_{loss}=0.86$)。これは、没水平板上で重複波が

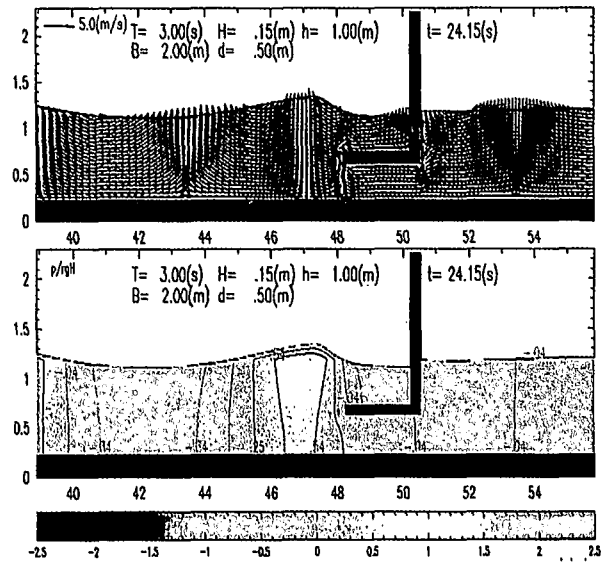


図-5(c) 波の伝播状況
(L型カーテンウォール, $B=2.0\text{m}$, $H=0.15\text{m}$)

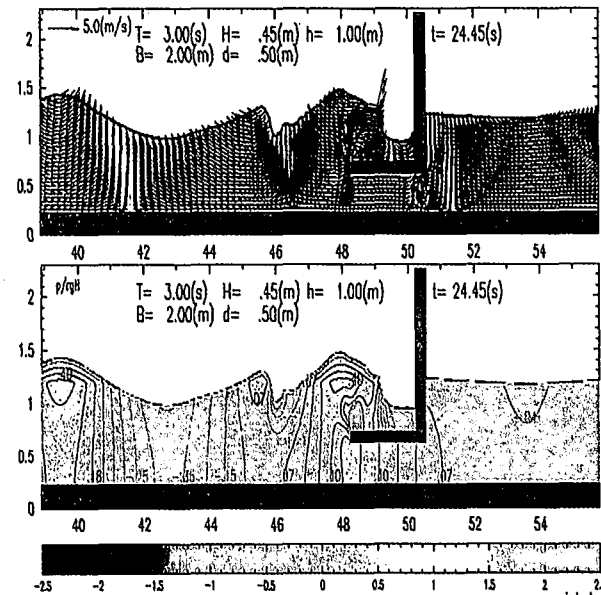


図-5(d) 波の伝播状況
(L型カーテンウォール, $B=2.0\text{m}$, $H=0.15\text{m}$)

形成されるため、水平板が波長の $1/4$ 程度の長さでは水平板沖側端での圧力が小さくなり、流速は大きい。没水平板下部からの圧力の伝播が小さくなるため、伝達波が小さくなると思われる。

また、図-5(d)は、波高が大きいときである。やはり砕波によって、波が砕けており、波高伝達率がや

や低下している ($K_r=0.41$, $K_t=0.13$, $E_{loss}=0.82$)。

4. 構造物の諸元と波浪制御特性

(1) 計算条件

没水平板やカーテンウォールと同じように、L型カーテンウォールの波浪制御効果は入射波条件、すなわち、波の周期 T 、波高 H 、及び水深 h 、そして構造形状や設置状態、例えば鉛直壁の没水深 d 、水平板長さ B 、板の厚さなどに支配される。

本節では、そうした影響を検討するため、水深 1.0m の数値水路において、鉛直壁の没水深 d を 0.5m と 0.25m 、没水平板の長さを 0.5m , 0.10m , 0.15m , 0.20m , 0.37m 及び 0.47m と変化させて計算を行った。ただし、周期 3.0s で波高は $d=0.5\text{m}$ のとき 0.45m と 0.25m , $d=0.25\text{m}$ のとき 0.15m であり、L型カーテンウォールだけでなく、没水平板や通常のカーテンウォールについて計算を行っている。

(2) 計算結果

図-6～8は、相対没水深 (d/h) をパラメータにとり、水平板の相対長さ (B/L) を横軸にとって波の伝達率、反射率及びエネルギー損失率の計算結果を示したものである。ただし、L型カーテンウォールで $B/L=0$ としたケースは、通常のカーテンウォールだけのケースであることに留意する必要がある。

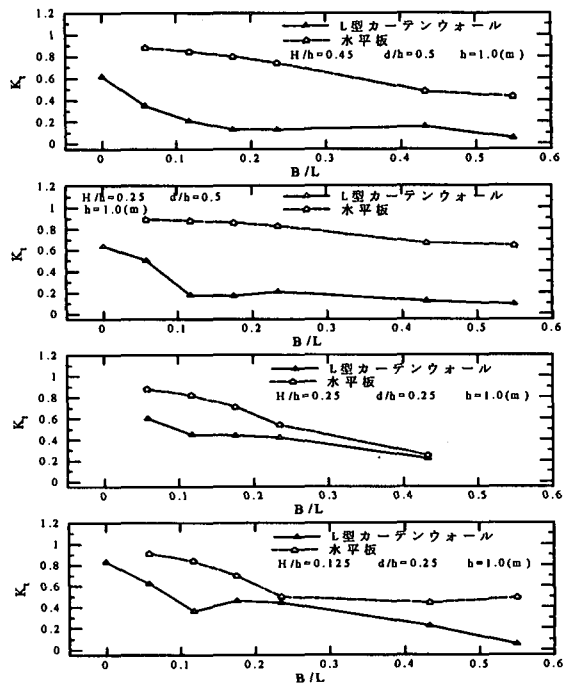


図-6 波の伝達率

図-6は、波高伝達率 K_t を示すものである。いずれの場合にも、没水平板に比べL型カーテンウォールの波高伝達率は小さく、またカーテンウォールだけの場合より波高伝達率は小さく、 B/L の増加とともに波高伝達率は小さくなっている。 B/L が 0.1 以上であれば、伝達率が 0.3 以下となり、短い長さで波高伝達率が小さくなることを示している。

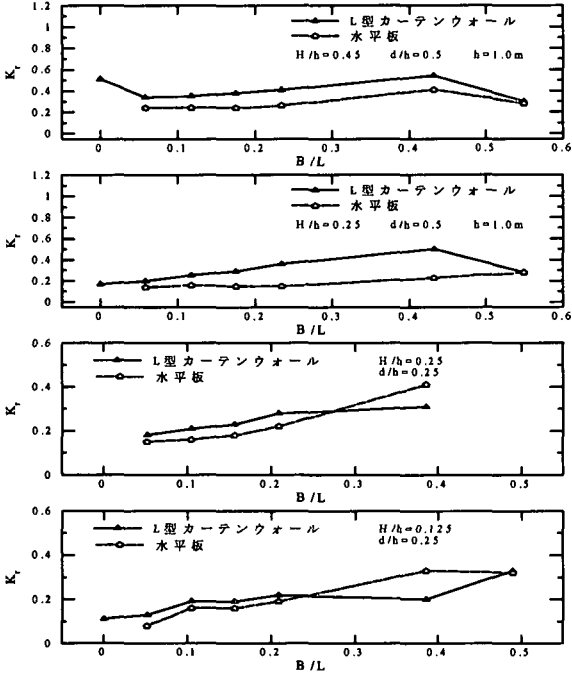


図-7 波の反射率

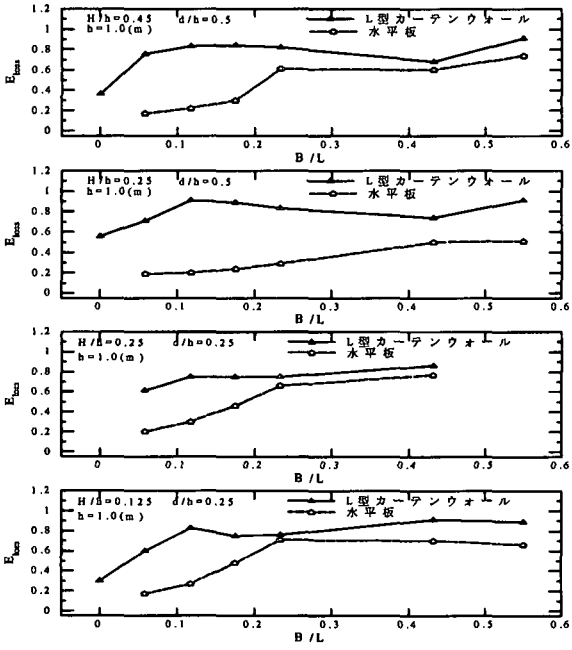


図-8 波のエネルギー損失率

なお、 $d/h=0.25$ では、 B/L が 0.15 付近で伝達率が極小値を持つようになっている。このとき水平板上の波長 L' は 4.7m であり、水深 1m の場合の 0.54 倍であるため、 B/L' では 0.28 程度となる。また、 $d/h=0.5$ の場合には 0.21 付近で極小値を持っているように思われる。この場合の波長 L' は水深が 1m の場合の 0.73 倍であり、 B/L' では 0.28 程度となる。やはり、 B が $L'/4$ 程度でかなり伝達率が小さくなるようである。一方、水平板の場合には、 B/L が 0.2 付近ではそれほど伝達率は小さくなっていない。

図-7は、反射率 K_r を示しており、 B/L が大きいほど反射率は増大しているが、L型カーテンウォールでは B/L が 0.2 付近に一つのピークが認められる。また、図-8のエネルギー損失率 E_{loss} についてみると全体的にL型カーテンウォールが大きくなっている。

5. あとがき

数値波動水路を用いて、没水平板、カーテンウォール及びL型カーテンウォール等を対象に、その波浪制御機能について数値的な検討を行った。

入射波条件や構造条件・設置位置を変化させて、いくつかの計算を行い、各種の消波構造物における波の反射率、透過率ならびにエネルギー減衰率について定量的な評価を行ったが、L型カーテンウォールは鉛直壁の沖側に付き加えられた水平板によって、従来のカーテンウォールや没水平板に比べて、効率的な波浪制御機能を持つことが分かった。

また、こうした新しい耐波構造物の開発において、数値波動水路による検討が非常に有効であることが確認された。

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

- 1) C.W.Hirt et al.: Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201p., 1991.
- 2) Yu, Xiping, Isobe, M., Watanabe, A.: Numerical Simulation of Nonlinear Wave Transformation over A Submerged plate, *Proc. 22nd ICCE, ASCE*, Vol.1, pp.136-149, 1990
- 3) 磯部雅彦, 高橋重雄他: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する-VOF法基本プログラムの作成-, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 15, pp. 321-326, 1999.
- 4) 中村孝幸, 神川裕美他: 透過波と反射波の低減を可能にするカーテン防波堤の構造形式について, 海岸工学論文集, 土木学会, 第46巻, pp. 786-790, 1999