

等間隔に設置した円柱防波堤の水利・波圧特性の実験的研究

A Hydraulic Experimental Study on Cylinder Caisson Breakwaters with Openings Intermittently along the Center Line of Breakwaters

宍戸達行* 白岩成樹** 尾崎靖*** 山本悟*** 下迫健一郎****
 Tatsuyuki Shishido Shigeki Shiraiwa Yasushi Ozaki Satoru Yamamoto Ken-ichiro Shimosako

A series of model experiments were conducted for cylinder caisson breakwaters with openings intermittently along the center line of breakwaters. This type breakwater is economical, able to exchange sea-water between bay and ocean and suitable for rapid construction. The wave forces on the breakwater are investigated as well as the hydraulic characteristics. The wave reflection and transmission coefficients are both around 50% when the opening ratio is 10-15%. The wave forces of this type breakwater reduced to 70-80% compared with that of conventional breakwater.

Keywords: Cylinder caisson breakwater, Wave reflection, Wave transmission, Wave force

1. はじめに

近年港湾整備においては建設費の縮減、施設の早期共用等への取り組みを行っているところである。さらに、現地の要請から周辺海域への反射波の影響や景観等に配慮した施設が求められている。

図-1のような等間隔に設置した円柱形状の防波堤は、①反射波の低減が図れる。②海水交換機能をもつ。③早期製作が可能である。等の特徴を持ち、また、鋼殻ケーソンを設置し中詰めを行う工法をとることも可能であることから、建設費縮減の可能性があると考えられる。

本報告は、等間隔に設置した（隙間部を有する）円柱形状の防波堤について、現地の諸条件下における水利特性および波圧・波力特性等の基礎的なデータを得るために水理模型実験を行い知見を得たので、その結果を報告するものである。

2. 水理模型実験

2.1 実験の概要

本構造は堤体間から波が入射するため港内静穏度の低下が予想される。そこで、実験に先立ち、今回の検討対象であるA港におけるその港内静穏度や周辺海域への影響を考慮にいれ、透過率（透過波高／入射波高）の目標値を0.5、反射率（反射波高／入射波高）の目標値を0.5とした。また、設計波は、現地条件より $H=5.0\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$ とした。

模型製作にあたっては、滑動安定性から適切な円柱の大きさを決めるため、谷本らが提案している二重円筒ケーソン堤のスリット部に作用する波力計算式を流用して円柱に作用する波力の計算をした。すなわち、合田波圧に対して $\lambda=0.65$ の低減係数を乗じて求める式である。この結果、円柱部の直径は 9.0m となった。

実験は神戸調査設計事務所水理実験所の2次元水路（長さ 64m 、幅 1.5m 、深さ 1.5m ）を用いて行った。実験断面を図-1に示す。実験の縮尺は $1/33.7$ である。円柱部の直径を D 、空隙部の幅を d としたときの $d/(D+d)$ を開口率 ε とした。実験は大きく分けて水利特性実験と波圧・波力実験に分けて行った。なお、本報告では、実験の結果は原則として現地スケールに換算して示している。

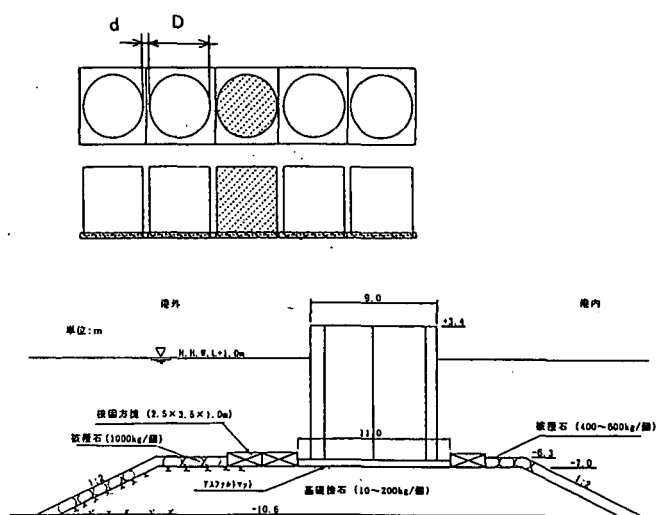


図-1 円柱防波堤の実験模型

* 正会員 運輸省 第三港湾建設局 神戸調査設計事務所 (650-0024 神戸市中央区海岸通)
 ** 運輸省 第三港湾建設局 神戸調査設計事務所
 *** 運輸省 第三港湾建設局 神戸機械整備事務所 (前 運輸省 第三港湾建設局 神戸調査設計事務所)
 **** 正会員 運輸省 港湾技術研究所 水工部

2.2 水理特性実験

2.2.1 実験条件

開口率、波浪条件と伝達率、反射率との関係を明らかにするため、水理特性実験を行った。表-1に水理特性実験の実験諸元を示す。

入射波高 H_I 、反射波高 H_R および透過波高 H_T は、図-2のように設置した波高計によって測定したデータを用いて解析を行った。港内側の波高計は10.5秒の波の1波長分防波堤より離して設置した。透過率 K_T および反射率 K_R はこのようにして得られた H_I 、 H_R 、 H_T より、 $K_T=H_T/H_I$ 、 $K_R=H_R/H_I$ として算定した。また、エネルギー損失率を $K_L^2=1-K_T^2-K_R^2$ として算定した。

表-1 水理特性実験諸元

波浪条件(不規則波)				開口率 ε (%)	測定項目
H _{1/3}		T _{1/3}			
現地 (m)	模型 (cm)	現地 (s)	模型 (s)		
1.0	3.0	4.0	0.69	0 5 10 15 20	伝達率 反射率
		6.0	1.03		
		9.0	1.55		
		12.0	2.07		
2.0	5.9	6.0	1.03		
		9.0	1.55		
5.0	14.8	10.5	1.81		

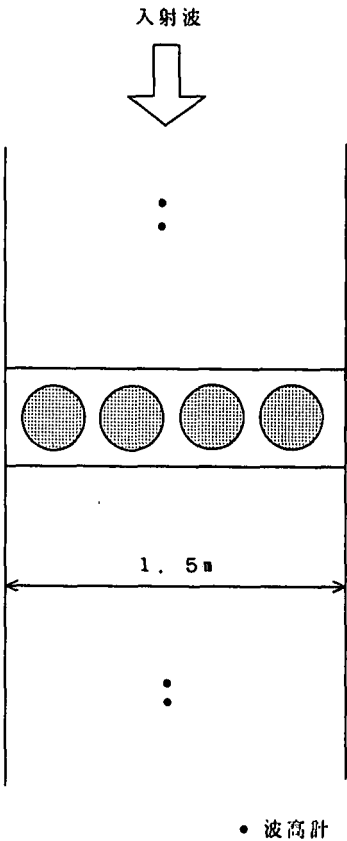


図-2 波高計設置位置図

2.2.2 水理特性実験結果

図-3、図-4、図-5は実験結果をまとめたものである。開口率 ϵ が増大すると反射率は減少し、波高の大きな波ほど低反射率となった。伝達率は ϵ が大きいほど増加するが、 ϵ が15%と20%では殆ど違いはみられなかった。さらにエネルギー損失率については、 ϵ による傾向はあまり認められない。また、一般に周期が短いほど、反射率が高く、伝達率が低くなる傾向にある。波高の大きいケースほど損失が大きい傾向がみられるが、越波による損失が大きいものと思われる。

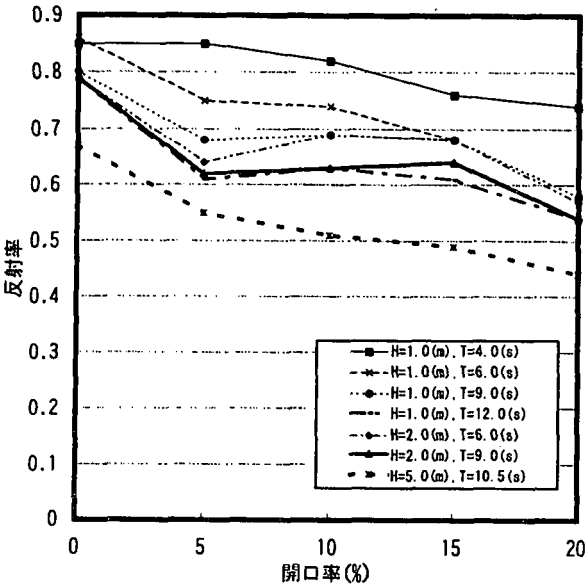


図-3 開口率と反射率の比較

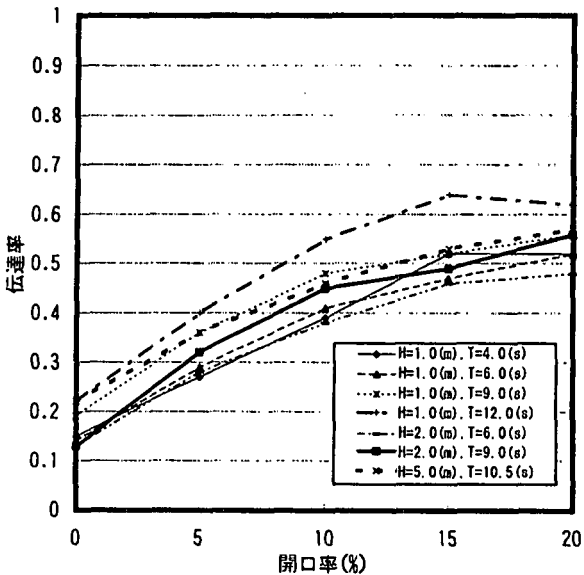
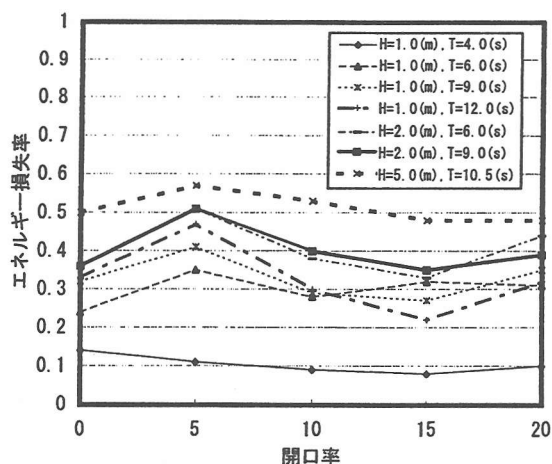


図-4 開口率と伝達率の比較



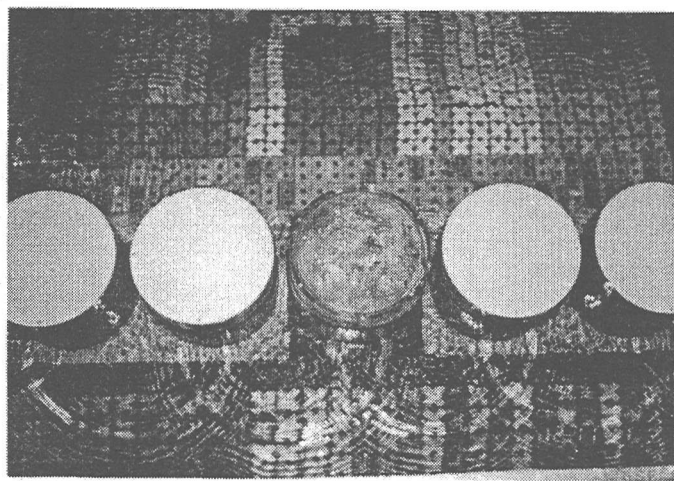
図－５ 開口率とエネルギー損失

写真－１は実験の一例である。開口率 $\epsilon=10\%$ 、波浪条件 $H=1.0\text{m}$ 、 $T=9.0\text{s}$ における反射および伝達の状況である。堤体背後の伝達波（回折波）が隙間部から円状にはっきりと確認できる。

A港の設計波（ $H_{1/3}=5.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.5\text{s}$ ）に対する結果は表－２の通りである。この結果、 $\epsilon=10\sim15\%$ の形状が、設定した伝達率、反射率の条件をほぼ満たす形状であると考えられる。

表－２ 設計波に対する伝達率等の結果

開口率 (ϵ)	伝達率	反射率	エネルギー 損失率
0	0.22	0.67	0.50
5	0.36	0.55	0.57
10	0.46	0.51	0.53
15	0.53	0.49	0.48
20	0.57	0.44	0.48



写真－１ 反射波および伝達波の様子

2.3 波圧・波力実験

2.3.1 実験方法

防波堤の設計条件として必要となる波圧および波力の測定およびその合田波圧との比較を行った。表－３は波圧・波力実験の実験諸元である。

波圧の測定には、波圧計を図－６のように直柱部（0、40、80度各4点）と底板底面（円柱下部に相当する面）3点（0、90、180度各1点）に設置した。直柱部前面の各部（0度、40度、80度）に垂直に作用する水平波圧合力を P_{m0} 、

表－３ 波圧・波力実験諸元

波浪条件				開口率 ε (%)	測定項目
H		T			
現地 (m)	模型 (cm)	現地 (s)	模型 (s)		
4.0	11.9	10.5	1.81	10 15	波 圧 揚圧力 波力(分力計)
5.0	14.8				
6.0	17.8				
6.5	19.3				
6.5	19.3			20	波 圧 揚圧力
7.0	20.8				

P_{m40} 、 P_{m80} とし、図-6に示した分担長によって合力を算定した。また、堤体前面に作用する水平波圧合力 P_{mH} は、 P_{m0} 、 P_{m40} 、 P_{m80} をもとには0~40度、40度~90度まで一様に波圧が変化するものとして算定した。また、背後の静水圧は底版底面180度の値をもとに算定した。これらの波圧を合計して堤体に作用する全水平波圧合力 P_H を求めた。さらに底版底面の圧力が一様に変化するものとして揚圧力 P_u を求めた。解析は1ケースにつき5波の繰り返し3回の実験による計15波の平均値を用いた。水平波力 F_H は、堤体底面の下部に図-7のように3分力計を設置して測定した。

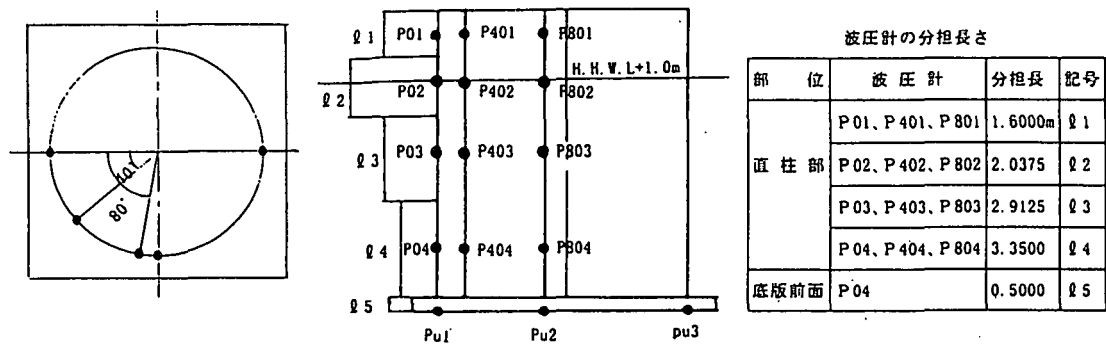


図-6 波圧計位置図および分担長

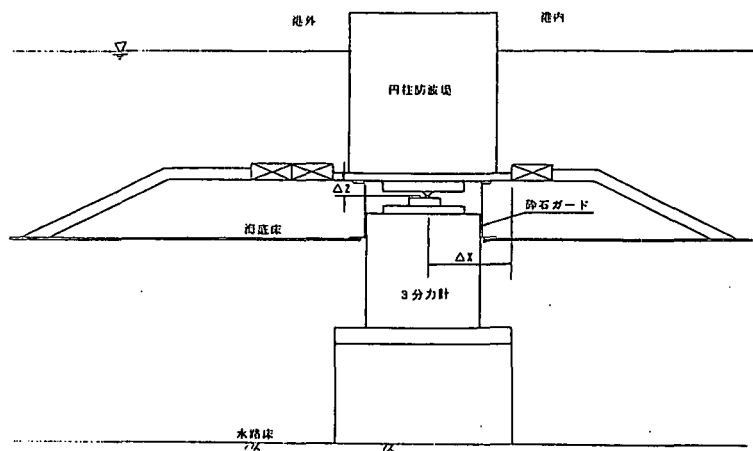


図-7 分力計設置模式図

2.3.2 波圧・波力実験結果

(1) 波圧実験の解析結果

図-8は波圧および波圧合力の経時変化の一例で $H=4.0$ m、 $\varepsilon=15\%$ のケースである。波圧は W_0H で、波圧合力は W_0HL で除し無次元化した値である。ここで、 W_0 は堤体の水中重量、 L は円柱の高さである。

このケースではピークの切り立った衝撃的波圧はほとんどみられないが、波高の大きいケースではやや大きなピークをもつ波形がみられた。

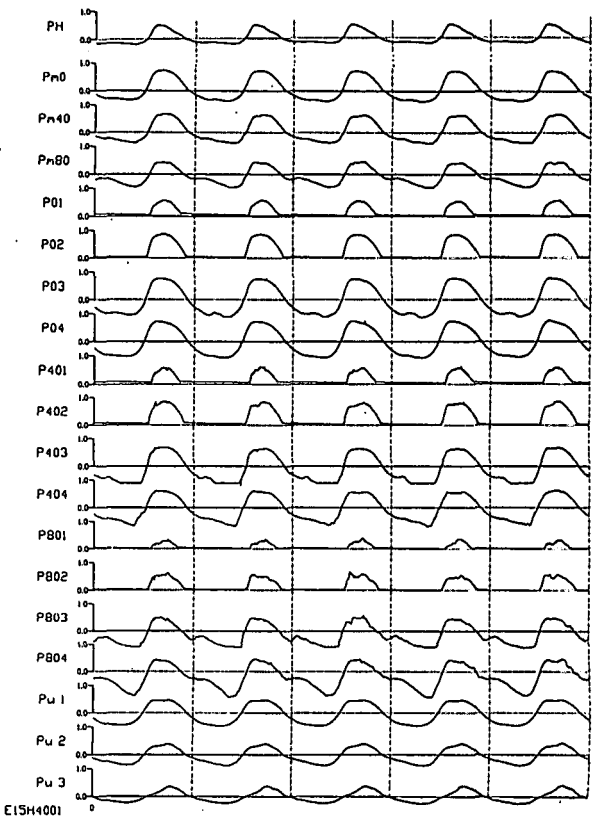


図-8 波圧および波力合力の経時変化データ

図-9、図-10、図-11はそれぞれ $\varepsilon=10\%$ 、 15% 、 20% の時の全水平波圧合力最大時の直柱部に作用する波圧および揚圧力の分布を示したもので、 $H=4.0\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$ の例である。点線は合田式で算定した値である。波圧、揚圧力分布は ε による違いはあまりなく、 0 度の波圧分布は水面下の値はほぼ合田式に一致するが、静水面上はかなり小さな値になる。これは、堤体間からの伝達波の影響によるものである。

写真-2は $\varepsilon=15\%$ 、 $H=4.0\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$ の波が堤体に作用した様子である。

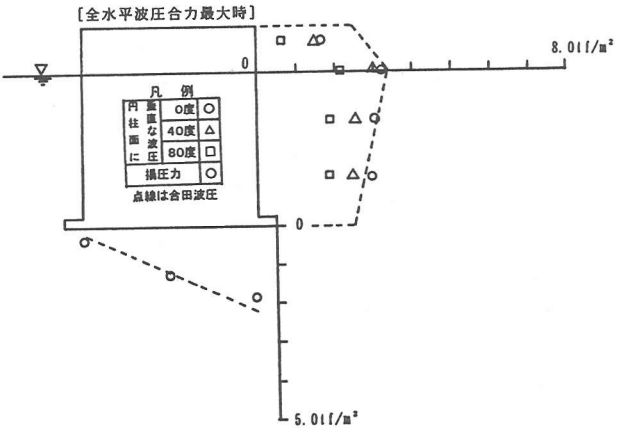


図-9 作用波圧図($\varepsilon=10\%$)

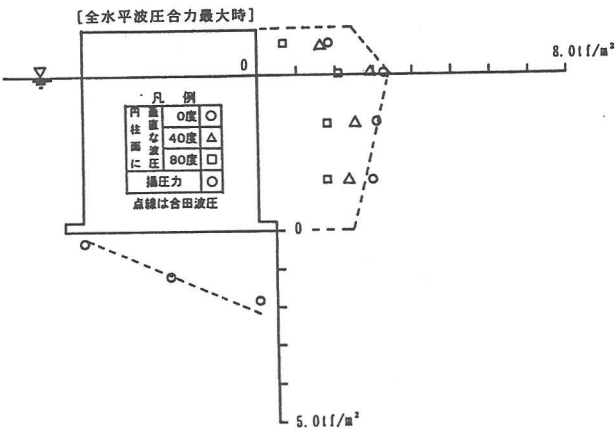


図-10 作用波圧図($\varepsilon=15\%$)

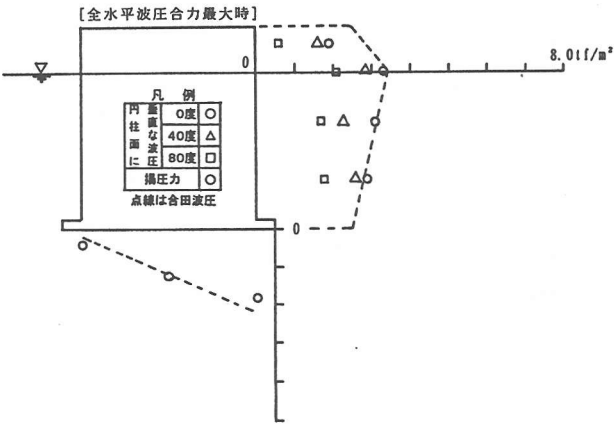


図-11 作用波圧図($\varepsilon=20\%$)

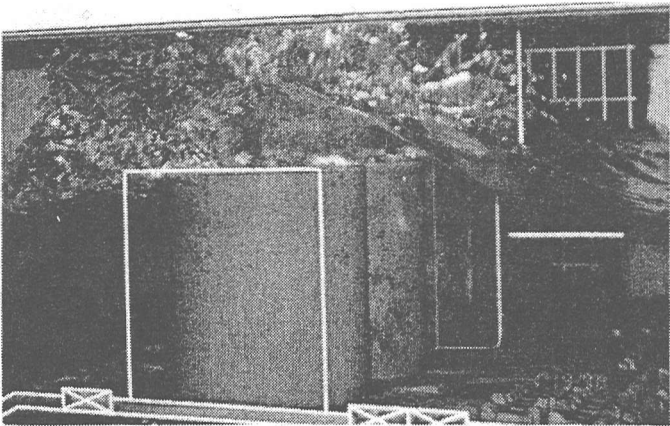


写真-2 波圧実験状況写真

(2) 波力実験の解析結果

分力計を用いた波力実験結果について、ここでは水平波力 F_H の解析結果と波圧計による水平波圧合力 P_H の比較を行った。図-12にその結果を示す。2つの実験によって得られた結果は比較的一致しており、前述の波圧から合力を求める方法がほぼ妥当であることがわかる。

合田波圧の波圧分布より通常の矩形ケーソンの場合の水平波圧合力を計算し、実験結果の水平波力 F_H および水平波圧合力 P_H の矩形ケーソンに対する波力補正係数 λ を算定した。その結果を波高に対して示したものを図-13に示す。 $\lambda=0.7\sim0.8$ 程度の低減係数となることがわかった。

3. おわりに

本実験では、モデルケースをもとに等間隔に設置した円柱防波堤の基礎的な水理特性および波力・波圧データの取得を行った。その結果、以下のことが分かった。

- ①開口率 ε が大きくなると、反射率は減少し伝達率は増加した。
 今回の設定条件に適する開口率は10~15%であった。
- ②波圧実験による水平波力の算定結果と波力実験による水平波力の解析結果が比較的一致し、波圧の推定結果の検証を行うことができた。その結果、堤体全体に作用する波圧の低減係数は0.7~0.8であった。

実際に本構造を現地に設置する場合は、マウンドの洗堀および航行船舶の安全性についても検討が必要となるので、堤体間の流速の測定も必要である。

本実験にあたっては、神戸調査設計事務所の天野俊調査課長、込山清水工係長、山下祥央技官および湯浅楠勝工事専門官、日本港湾コンサルタントの田川昌宏氏および野沢菊三郎氏に貴重な助言をいただいた。また港湾技術研究所の高橋重雄耐波研究室長からは、全体にわたって貴重な助言を得ている。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

合田良実・原中祐人・北畑正樹(1966)：直柱に働く衝撃砕波力の研究、港湾技術研究所報告 Vol. 5, No. 6, pp1~30
 伊藤善行・谷本勝利・小舟浩治(1972)：柱状構造物の波力応答解析 港湾技術研究所報告 Vol. 11, No. 3, pp59~86
 合田良実・池田龍彦・笹田正・岸良安治(1972)：岩礁上の円柱の設計波力に関する研究 港湾技術研究所報告 Vol. 11, No. 4, pp45~81
 高山知司(1981)：波の回折と港内波高分布に関する研究 港湾技研資料 No. 367
 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小蔵絃一郎(1986)：円柱に働く衝撃砕波力に関する実験的研究 港湾技術研究所報告 Vol. 25, No. 2, pp33~87
 岩垣好一郎・水谷法美・金昌済・真田武(1993)：3円筒大型構造物による波の変形と作用波力 海洋開発論文集 Vol. 9, pp205~210

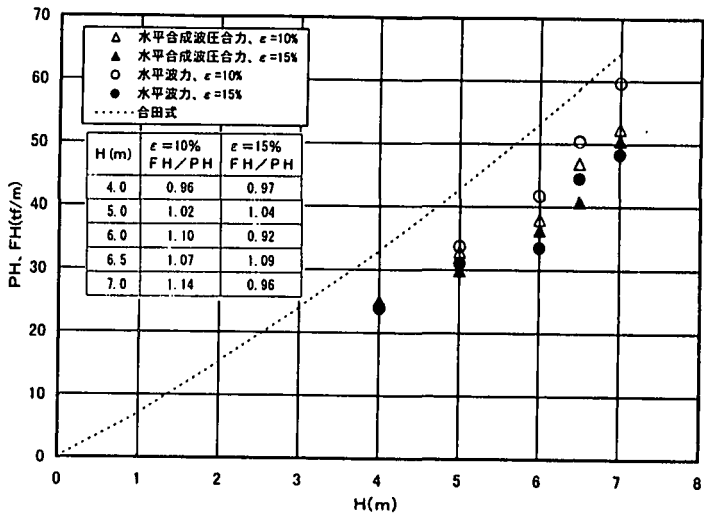


図-12 全水平波圧合力(PH)と水平波力(FH)の最大値の比較

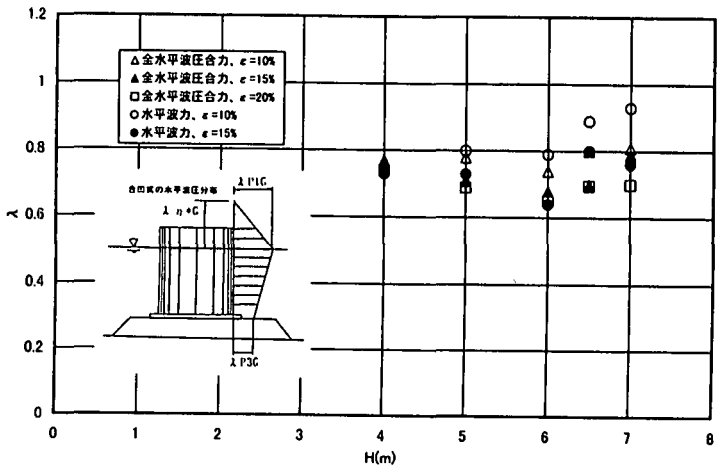


図-13 水平波力の補正係数λ