

波浪侵入抑止ゲートの開発

A study of gate-type wave attenuators

加藤雅也*・村田優**・塚田景一**・小田健次*・渡会英明*

Masaya Kato, Masaru Murata, Keiichi Tsukada, Kenji Oda, Hideaki Watarai

A new type of gate structures for harbour entrances is proposed in this paper. The principal objective of the proposed structures is provide protection from incident wave from the outer harbour in rough condition, thus creating a inner area of calm water for the mooring of small boats. The bottom hinged flap type was proposed as one of the typical structures and the side hinged double flaps type was proposed for shallow water for not be an obstacle of boat passage. It was evaluated the wave attenuation characteristics and the forces from wave loading of the structures by numerical analysis comparing with physical model test results.

Keywords : gate, wave attenuation, bottom hinged flap type, side hinged double flaps type

1. まえがき

プレジャーボート用係留施設の慢性的な不足を補い、不法係留対策を図るためには、ソフト面・ハード面共に充実したサービスを安価に提供できるマリーナ施設の建設を積極的に促進していく必要がある。マリーナの建設費を低減し、延いては係留料金を低減するためには、既存の漁港内にマリーナのスペースを設けるフィッシャリーナ事業やPBS事業、ボートパーク事業などが有効である。これらの事業を行う際、対象船舶規模の違いや使用区域の拡大等により港内静穏度の向上が望まれる場合がある。既存港湾の静穏度を向上させる方法として、従来は、①既存の防波堤を延長したり、既存港湾の外側に防波堤を新設する方法、②港内の一部に比較的簡易な波除堤、例えばカーテンウォール型防波堤等、を設置する方法などがとられてきた。しかしながら、①の方法では建設費が多大となること、②の方法では港内スペースが制限されることにより、比較的小規模な港湾に適用するには問題がある。そこで著者らは、既存の港内スペースを減少することなく、比較的安価に港内静穏度を向上させるために、内防波堤港口部に設置する開閉式のゲート（以下、波浪侵入抑止ゲートと記す。）を開発した。

波浪侵入抑止ゲートは、常時には開放しておき、荒天時等の必要に応じて全閉し、港内の静穏度を確保するものである。その開閉方法は、図-1(a)に示す転倒式、図-1(b)に示す合掌扉式等があり、設置位置の条件等により選択する。例えば、設置位置の水深が浅く、転倒式では航行船舶の障害になるような場合には、合掌扉式を用いる方が望ましい。

本論文では、波浪侵入抑止ゲートの基本的な波浪制御特性と波力特性を水理模型実験および数値解析により調べると共に、作用波力に関する実験データに基づき試設計を行ったのでその結果について述べる。

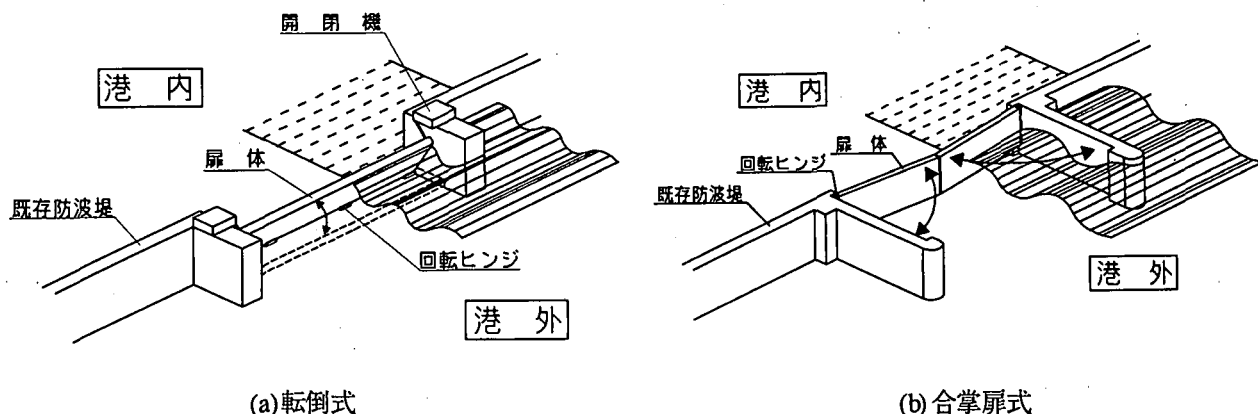


図-1 波浪侵入抑止ゲート概念図

* 正会員 東急建設株式会社技術本部土木技術部技術第四課 (150 渋谷区渋谷1-15-21)

** 西田鉄工株式会社マリーナ事業部

2. 実験装置および実験方法

実験は、二次元造波水路（幅1.0m、高さ0.8m、長さ50.0m）を用いて、表-1に示す条件で行った。表中の記号の説明を図-2に示す。実験Aでは、波浪侵入抑止ゲートの基本的な波浪制御特性のうち、扉体下端部の空隙高さとして扉体部分の厚さの影響について調べた。次に、実験Bでは扉体の傾斜角度と波浪制御特性や作用波力の関係について調べた。実際の波浪侵入抑止ゲートは、作用する波圧分布に対して経済的な形状とするため、また、消波効果向上のために、最終的に若干複雑な形状になるが、本実験では基本的な性能を知るために模型は全て矩形とした。反射率は、合田らの方法¹⁾に倣い、模型沖側に設置した2台の波高計の計測データから算定した。また、透過率は、模型岸側に設置した波高計の計測データを入射波高で除して求めた。なお、波高のサンプリング周波数は20Hzで、計測時間は20秒である。実験Bでの波圧計の位置は図-2に示すとおりである。波圧の計測は波高の計測と同時にを行ったが、そのサンプリング周波数は100Hzとした。さらに、実験Bでは浪侵入抑止ゲートの扉体前後の水位の位相差を調べるために、模型の前面と後面の壁面に沿って波高計を設置し、壁面に沿って変動する水位を測定した。

表-1 実験条件

	自然条件			模型構造条件			測定項目
	h (m)	H (m)	T (sec)	B (m)	hs (m)	$\theta (^{\circ})$	
実験A	0.25	0.035~0.050	0.962~2.500	0.05, 0.10	0.025, 0.050	0	反射率, 透過率
実験B	0.25	0.05	1.12, 3.13	0.1	0.000, 0.025, 0.050	0, ± 15 , ± 30 , ± 45	反射率, 透過率 ゲート作用波圧 ゲート前後の水位差

3. 解析方法

本研究で行った解析のうち、実験との比較には、波動場の解析で広く用いられているGreen公式に基づく境界要素法を用いた。この解析方法は、線形ポテンシャル理論に基づく解析であり、流体のもつ粘性や回転運動および水面の非線形性等は考慮されない。

3. 実験および解析結果

3.1 波浪制御特性

図-3および図-4に、波浪侵入抑止ゲートの扉体が鉛直の場合の、相対水深 (h/L) と透過率 (K_t) および反射率 (K_r) の関係を示す。図-3は波浪侵入抑止ゲートの扉体下端の空隙 (h_s) と水深 (h) の比 (以下、下端空隙比と記す。) $h_s/h=0.1$ の場合で、図-4は下端空隙比 $h_s/h=0.2$ の場合である。従来のカーテンウォール型防波堤の研究 (例えば、森平ら²⁾, 中村³⁾) に示されているのと同様に、波浪侵入抑止ゲートも入射波の周期が長くなるのに従って透過率が大きくなる傾向がある。しかしながら、カーテンウォール型防波堤の下端空隙比が概ね0.3以上であるのに比べて、波浪侵入抑止ゲートの下端空隙比は高々0.2程度であるため、長周期波に対しても比較的透過率を小さく抑えることができる。また、扉体の厚さを増すことによっても透過率を低減することができるが、その効果は、下端空隙比が小さいほど、また、入射波の周期が長いほど大きい。なお、反射率に関しては、透過率と逆の傾向を示している。

さらに、ポテンシャル理論に基づく解析結果と実験結果を比べると、透過率、反射率共に実験値が解析値を下回っている。これは、構造物と海底面の間を流体が通過する際の摩擦損失や構造物周辺で起こる流れの剥離に伴うエネルギー損失等によるものと考えられる。実験結果から、 $K_L^2=1-(K_r^2+K_t^2)$ によってエネルギー損失率を調べると、図-5に示すとおりである。図より、入射波の周期が長くなるほど、また、下端空隙比が小さいほどエネルギー損失が大きくなっている。また、下端空隙比が大きくなると扉体の厚さによる違いはほとんど表れないが、若干、扉体の厚さが小さい方がエネルギー損失が大きくなっている。これは、扉体の厚さが厚くなると流れに対して鈍い構造となり、剥離現象のような流れの急変が起こりにくくなるためであると考えられる。

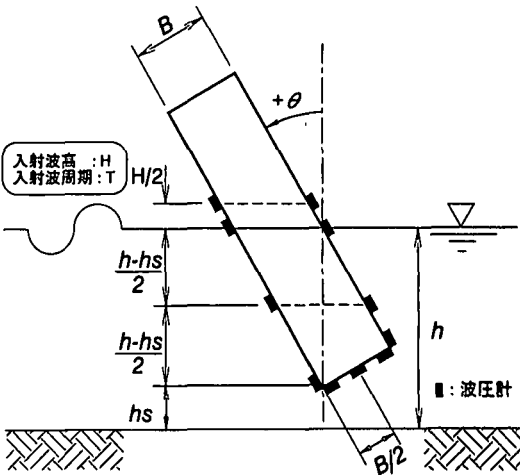
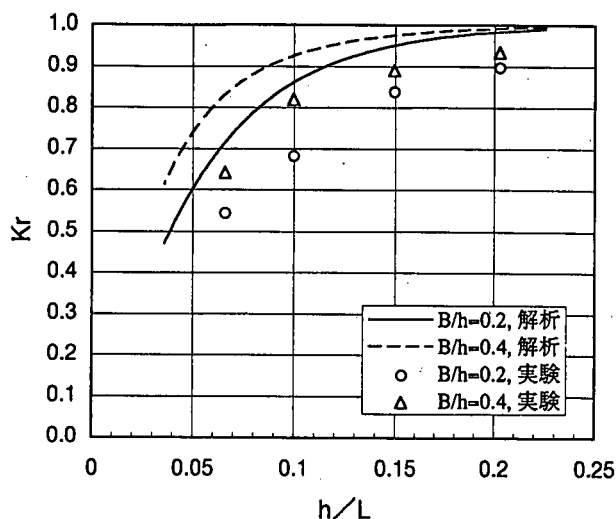
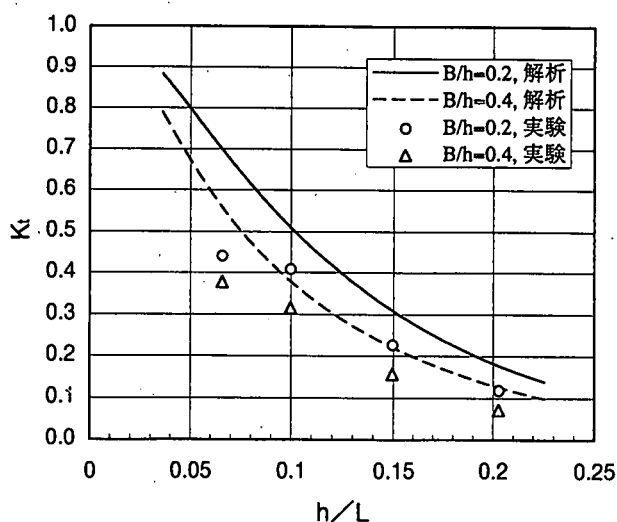


図-2 記号の説明と波圧計の配置

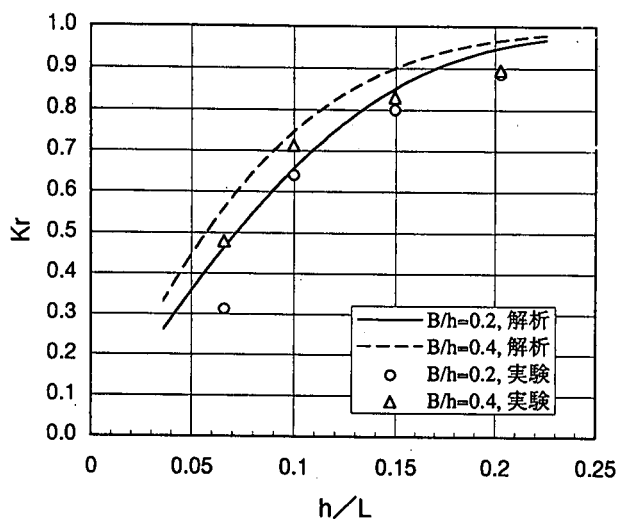


(a) 反射率と相対水深の関係

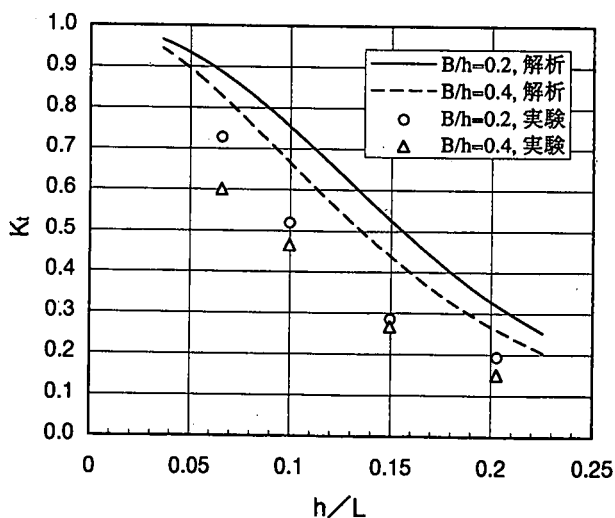


(b) 透過率と相対水深の関係

図-3 波浪侵入抑止ゲートの波浪制御特性 ($hs/h=0.1$, $\theta=0.0^\circ$)

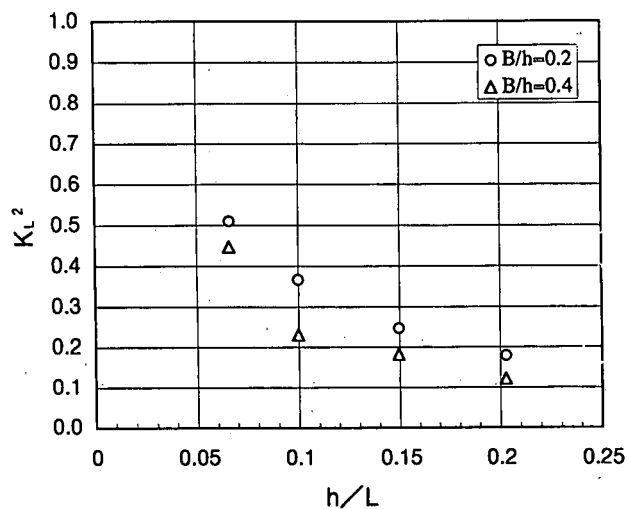


(a) 反射率と相対水深の関係

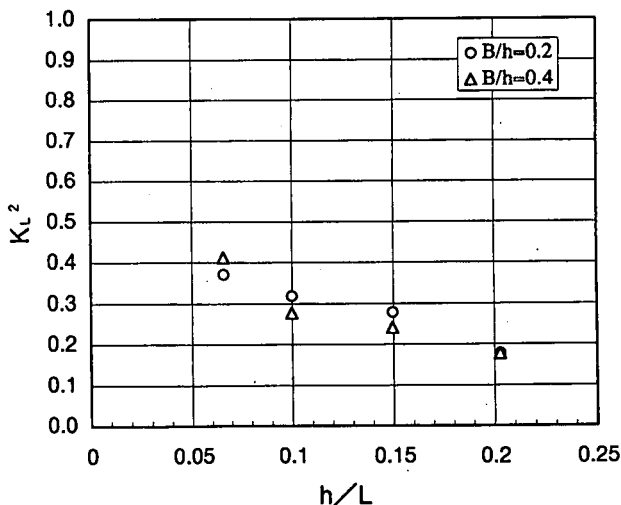


(b) 透過率と相対水深の関係

図-4 波浪侵入抑止ゲートの波浪制御特性 ($hs/h=0.2$, $\theta=0.0^\circ$)



(a) $hs/h=0.1$ の場合



(b) $hs/h=0.2$ の場合

図-5 波浪侵入抑止ゲートによるエネルギー損失 ($\theta=0.0^\circ$)

図-6に、下端空隙比 $hs/h=0.2$ の場合の、波浪侵入抑止ゲート扉体傾斜角と透過率 (K_t) および反射率 (K_r) の関係を示す。図中の横軸に示す $\tan \theta$ が負の場合はゲートの上端が沖側に傾斜し、正の場合は岸側に傾斜していることを表している。実験結果は、透過率、反射率共に傾斜角の正負に対してはほぼ対象となっている。透過率は15~30度に特異点のある傾向を示し、解析結果と定性的に良く一致しているが、反射率は傾斜角の増加と共に緩やかに減少し、解析結果に見られるような特異点は現れていない。これらの結果より、傾斜角が45° の場合にエネルギー損失が大きく、高い消波効果を得ることがわかる。ただし、ここには示していないが、波浪制御特性が特異点を示す傾斜角は入射波の周期によって変化する。これは構造形状と入射波の波長による共振特性の違いであると考えられる。また、周期が長くなるに従って波浪制御特性の傾斜角による影響は小さくなり、特異点も不明瞭となる。なお、下端空隙比 $hs/h=0.1$ の場合も、 $hs/h=0.2$ の場合と同様の傾向を示した。

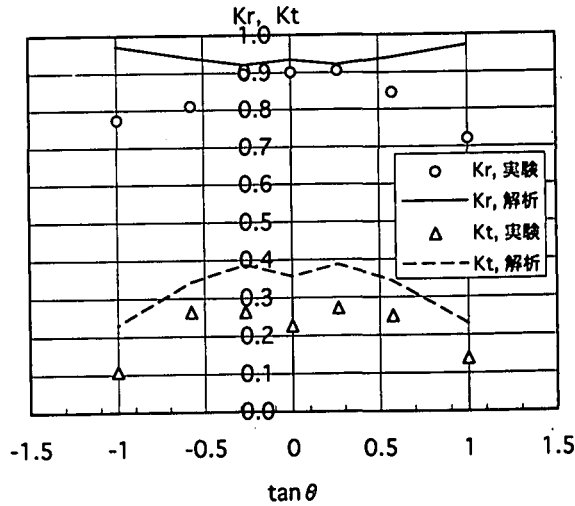
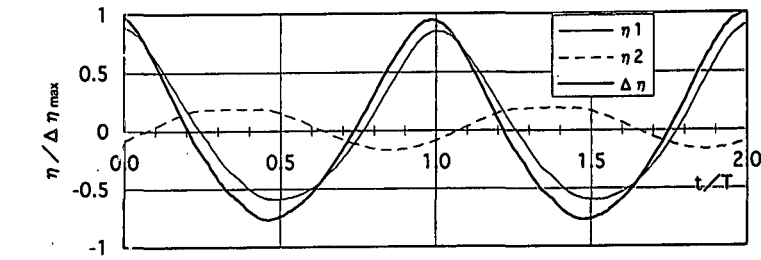


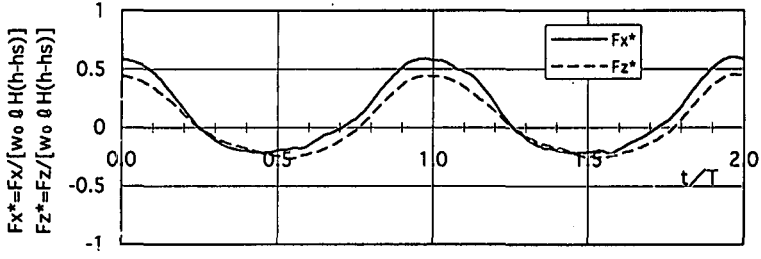
図-6 扉体の傾斜効果 ($hs/h=0.2$, $h/L=0.164$)

3.2 波力特性と波圧分布

図-7に、波浪侵入抑止ゲート扉体前後面の水位の位相変化と無次元波力の時間変化を合わせて示す。ここに示すデータは、扉体傾斜角 $\theta=30^\circ$ 、下端空隙比 $hs/h=0.2$ 、相対水深 $h/L=0.164$ の場合のものである。図に示す η_1 、 η_2 は各々模型前面および後面の水位の変化で、模型に沿って計測したものであり、 $\Delta \eta$ は η_1 と η_2 の差 ($\Delta \eta = \eta_1 - \eta_2$) である。また、波力は、計測した波圧のデータより、計測地点間の波圧は直線的に変化すると仮定して算定した水平成分 (F_x) と鉛直成分 (F_z) を無次元表示している。ここで、図中の $\varnothing$ は扉体の横方向の長さ、 w_0 は水の単位体積重量である。扉体前後面の水位変化には、約130° の位相差が見られ、波力と水位差 $\Delta \eta$ の位相が一致している。また、水平波力と鉛直波力の位相も一致しており、岸向きに水平波力が最大になるとき、上向きに鉛直波力が最大となっている。他の実験条件では、入射波の周期、下端空隙比、傾斜角等により、扉体前後面の水位変化の位相差は異なるものの、波力と水位差 $\Delta \eta$ の位相が一致している点や、水平波力と鉛直波力の位相が一致している点は同様であった。



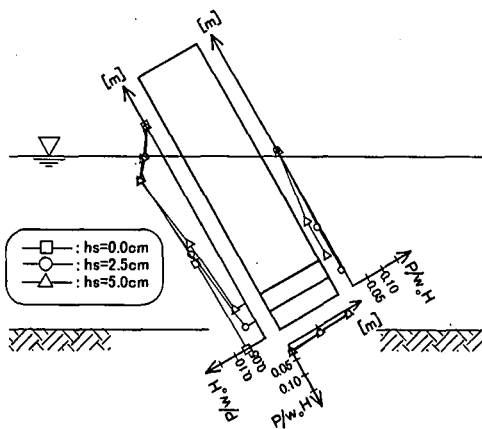
(a) 扉体前後の水位変化



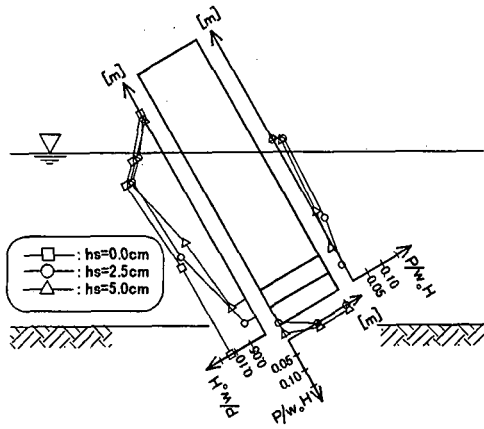
(b) 波力の時間変化

図-7 波浪侵入抑止ゲートの波力特性

図-8に、波浪侵入抑止ゲート扉体傾斜角 $\theta=30^\circ$ の場合の波圧分布を示す。(a)は $h/L=0.164$ の場合、(b)は $h/L=0.050$ の場合で、いずれも扉体前後の水位差が最大になっている位相の波圧分布である。下端空隙比の違いによる波圧の相違は、扉体下端部付近に現れ、水面付近ではほとんど変化はない。また、 $h/L=0.164$ の場合と $h/L=0.050$ の場合を比較すると、図-8に示す位相では、扉体前面に作用する圧力分布形は類似しているが、扉体下端部や後面の圧力分布形は異なっており、扉体周辺の流況に相違があることが窺える。



(a) $h/L=0.164$ の場合



(b) $h/L=0.050$ の場合

図-8 波浪侵入抑止ゲートの波圧分布 ($h_s/h=0.2$, $B/h=0.4$, $\theta=30^\circ$)

3.3 流れの様子

波浪侵入抑止ゲート周辺の流れの様子を詳しく調べるために、非圧縮性粘性流体解析も試みた。使用した解析コードは、Flow-3D (株) エス・イー・エイ) で、解析に用いた条件は表-2に示すとおりである。なお、計算は静止状態から開始し、流入境界と流出境界からの反射の影響が構造物近傍に達しない範囲で終了した。

表-2 数値解析条件 (非圧縮性粘性流体解析)

a. 基礎方程式	連続の式, N-S方程式 流体率の輸送方程式	d. 乱流モデル	RNGモデル
b. 計算格子	ストークス波 ($dx: 0.030m$, $dz: 0.016m$ x方向660セル×z方向25セル) クノイド波 ($dx: 0.050m$, $dz: 0.016m$ x方向994セル×z方向25セル)	e. 水面, 壁面 f. 水深 g. 流入条件 h. 流出条件 i. 構造条件	水面: VOF法, 壁面: No-slip $h=0.250m$ ストークス波 (5次), $H=0.05m$, $T=1.12sec$ クノイド波 (3次), $H=0.05m$, $T=3.13sec$ 自由流出 $B=0.100m$, $h_s=0.05m$, $\theta=-30^\circ$
c. 離散化法	有限差分法 (スタック・オート・メッシュ)		

図-9, 図-10に、波浪侵入抑止ゲート周辺の流れの様子を示す。入射波として図-9はストークス波の5次近似解を、図-10はクノイド波の3次近似解を用いている。いずれも、扉体の傾斜角 $\theta=30^\circ$ 、下端空隙比 $h_s/h=0.2$ であり、扉体前後の水位差が最大となる位相付近の様子を示している。入射波の周期によらず構造物周辺で剥離渦が形勢されているが、特に長周期波の場合、底面付近に激しい流れが発生しており、構造物基部周辺の洗掘が懸念される。なお、このような構造物周辺の激しい流れの様子は、実験中に染料を用いた観察からも確認されている。また、本解析の妥当性に関しては、構造物を設置しない状態での進行波のシミュレートを行い、榊山ら⁴⁾の数値解析解および摂動解との比較により確認している。しかしながら、構造物周辺での乱流を正しく再現しているかについては、水理模型実験等との数値による比較検証が必要で、今後の課題である。

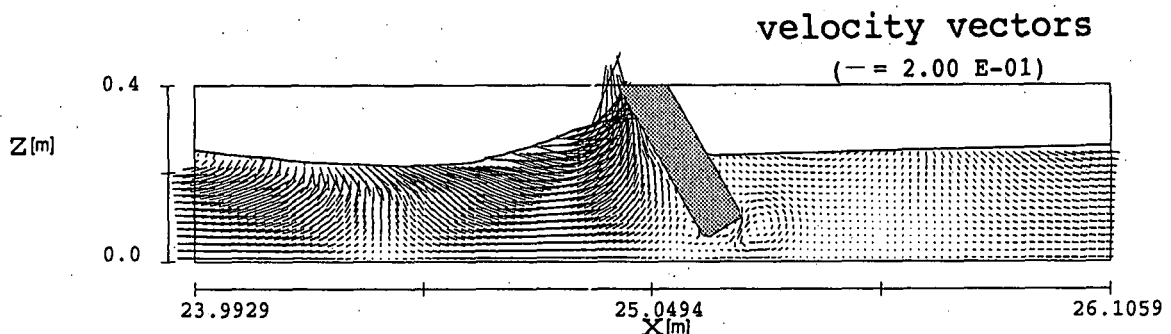


図-9 波浪侵入抑止ゲート周辺の流れの様子 ($h/L=0.164$, $\theta=30^\circ$, $h_s/h=0.2$, $B/h=0.4$)

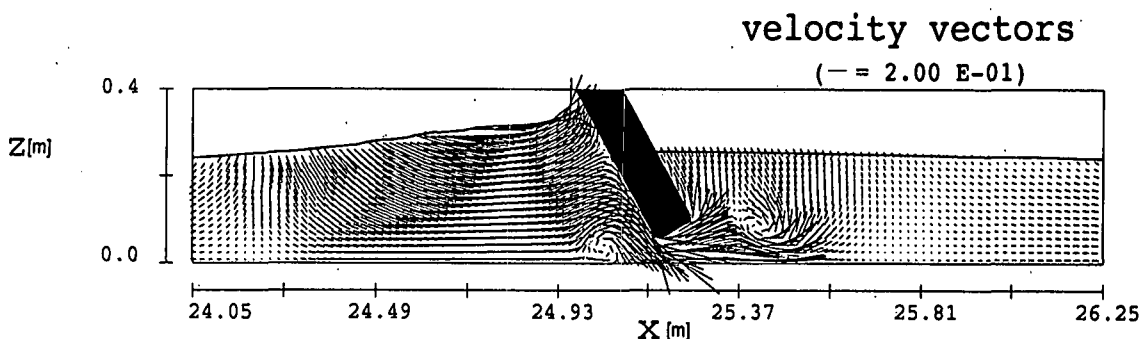


図-10 波浪侵入抑止ゲート周辺の流れの様子 ($h/L=0.050$, $\theta=30^\circ$, $h_s/h=0.2$, $B/h=0.4$)

4. 試設計

以上の実験データ等に基づき試設計を行った。設計条件は、水深5m、設計波の波高1.0m、周期14secで、港口幅は25mである。開閉方式に関しては、潮位変動と航行船舶の種類により決定するため、転倒式と合掌扉式の2タイプについて設計を行った。図-10に転倒式を用いた場合の断面形状を示す。扉体部は鋼製で、扉体の厚さは1.2m、扉体重量は68tとなった。なお、港口幅が25m程度であれば両開き式としても構造的には支障はないことも試設計の結果わかった。

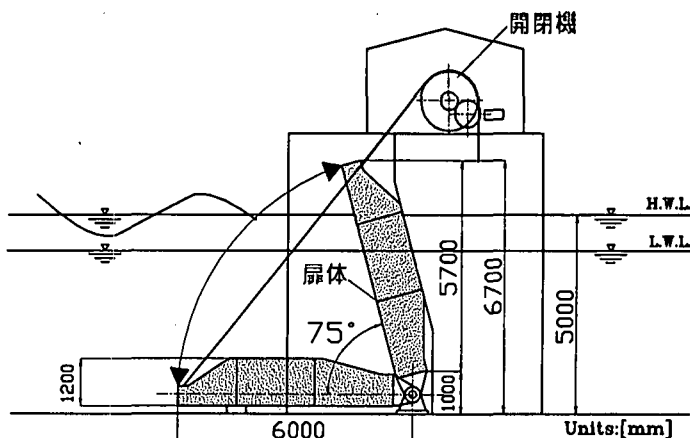


図-10 波浪侵入抑止ゲート断面図（転倒式）

5. あとがき

波浪侵入抑止ゲートの形状は、波浪侵入抑止の点からは、完全に不透過な構造が望ましいが、構造物周辺の堆砂・洗掘による海底面の凹凸を考慮すると、スムーズな開閉を確保するために下端部に空隙のある構造とする方がメリットがある。本実験ならびに解析によれば、下端空隙比が0.2程度であれば、適当な扉体厚を用いることにより、比較的広範な周波数範囲で十分な波浪侵入抑止効果が得られることがわかった。また、波浪侵入抑止ゲートの扉体の傾斜が波浪制御特性に及ぼす影響についても調べ、入射波の波長と扉体の傾斜角に依存する共振特性を見いだすことができた。さらに、波浪侵入抑止ゲートに作用する波力の特性や波圧分布を調べ、設計に必要なデータを取得することができた。

最後に、本研究で行った非圧縮粘性流体解析では、(株)エス・イー・エイの宮本氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976.
- 2) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実：カーテン防波堤とその特性について，港湾技術研究所報告，Vol. 3，No. 1，1964.
- 3) 中村孝幸：カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と作用波力に関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，p. 512-516，1984.
- 4) 榊山勉・鹿島遼一：ポラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動場解析手法の開発，電力中央研究所報告，U91048，1992.