

重力式灯標を構成する潜堤基礎に作用する 揚圧力の低減に関する研究

関田欣治^{*1}・野本由紀夫^{*2}・吉成岳彦^{*2}・近藤要介^{*2}・下地 亮^{*2}

Experimental Study on The Reduction of Uplift Wave Forces Acting on A Submerged Gravity Base Building A Navigation Aid Tower

Kinji SEKITA, Yukio NOMOTO, Takehiko YOSHINARI, Yosuke KONDO and Akira SHIMOJI

Abstract

Navigation aid towers composed of a column and a submerged gravity base have been constructed on sloping sea beds to shore. However, as large horizontal and vertical wave forces act on the base, there is a high probability such structures will slide or overturn. In order to sustain stability, it is generally necessary to increase the weight or extend the width of the base of the structure and reduce uplift wave pressures that form the vertical forces. In this study we proposed increasing stability using a simple reduction method for perforating the base so as to decrease uplift forces. A 1/16.3 scale model test was conducted on box shaped bases with five different sizes of penetrating holes to examine the reduction effect on vertical wave forces. We also conducted a numerical analysis using potential theory. This paper also describes the appropriate inertia force coefficients of the experimental and theoretical wave forces using a conventional formula, the Morison's equation, to evaluate the vertical wave forces.

1. はじめに

固定式航路標識灯標は重力式海洋構造物に分類され、最上部に標識灯を搭載した円筒状タワーを支える鉄筋コンクリート製の潜堤上に設けられる。これは、一般的に沿岸部海底斜面上の平坦なところに据付けられ、斜面を遡上してくる波浪がもたらす波力の水平及び鉛直成分により、滑動や転倒に対する安定性が損なわれるおそれがある。安定性確保には、滑動については摩擦力を高め潜堤を重くする一方、転倒については潜堤を広げることで対応してきた。直方体状の潜堤では、長さをいたずらに広げる結果、必要以上に重くなることもある。そこで、潜堤やタワーに作用する水平力波力を明らかにし報告した(関田他, 2005)。

ここでは、潜堤に作用する鉛直波力はその下面に働く揚圧力によってもたらされることに着目し、上下に貫通する孔を設けることで鉛直波力の低減を図れないか、模型実験

とグリーン関数に基づく3次元特異点分布法(Newman, J. N. 1984)により調べた。また水槽実験では、1/16.3縮尺の孔のない直方体模型及び開口率(模型水平断面に対する貫通孔面積の割合)が異なる孔の開いた5種類の模型を用いて、それぞれに作用する水平及び鉛直波力を測定した。

本研究においては、このような解析と実験により鉛直波力の低減効果を検証し、さらにMorison式を用いた実用的な波力算定法確立のため、実験結果を慣性力係数と潜堤長さ波長比の関係で一般的に表すことを試みるものである。

2. 模型実験の方法

(1) 模型寸法と実験条件

実験は、海洋学部臨海実験所にある循環水路付造波水槽(2次元水路)を用いた。その仕様等をTable 1に示す。

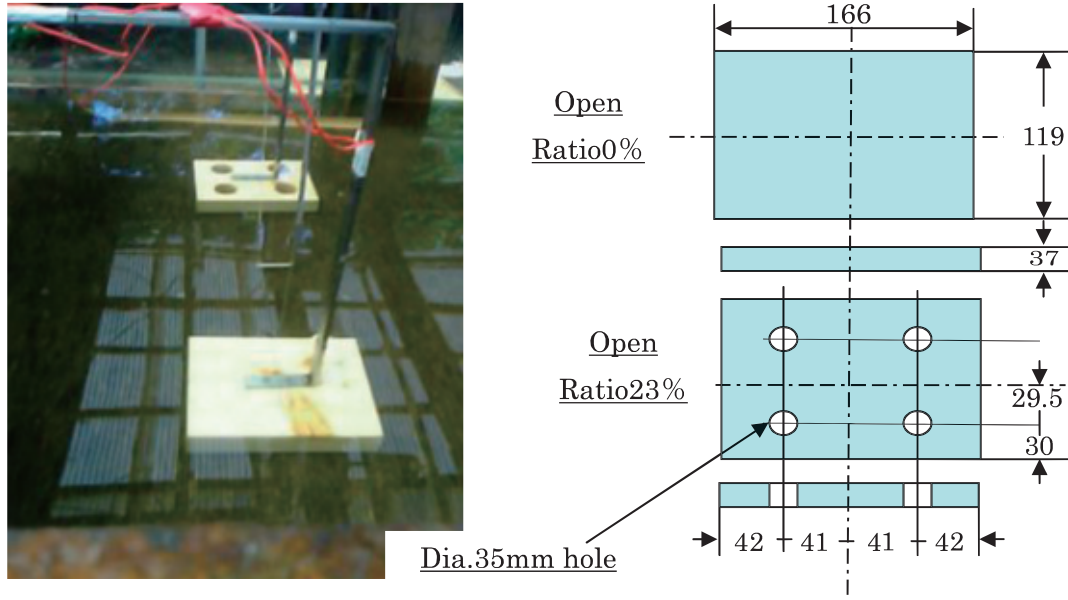
2006年1月16日受理

*1 東海大学海洋学部海洋土木工学科 (Department of Marine Civil Engineering, The School of Marine Science and Technology, Tokai University)

*2 (株)緑星社 龍ヶ崎工場 設計部 (Ryokuseisya Corp., Ryugasaki Factory, Design Department)

Table 1 Wave channel characteristics

Apparatus	Dimension
Channel	Width: 1.0m, Depth: 0.6m, Length: 38m
Wave generator	Piston Type (power 0.6kW) Wave height: maximum 10cm Period: 0.6~5.0s


Fig. 1 Models used for measurements (unit: mm)

著者らによるこれまでの実験（関田他，2005）と同様に，潜堤の諸元と自然環境条件を想定し，模型の縮尺はFroude則に基づき1/16.3とした．潜堤模型として，長さ16.6cm（実物で2.7m），幅11.9cm（1.9m），高さ3.7cm（0.6m）の木製の直方体を水路長さ方向に設置した．なお，長さ幅のアスペクト比は1.40である．Fig. 1には開口率0％と23％の模型に対する実験中の写真およびそれぞれの模型寸法等を示す．揚圧力低減のためにあける孔の面積は，タワーとの取付け法や強度から潜堤水平断面の1/4程度が限度であろうと考えた．この孔面積と断面積の割合を開口率と定義し，比較のために用いる孔のない潜堤0％を含め，開口率3.6，8.6，14.4，23％である5種類の直方体模型を作製した．孔あき模型では対称に4個の円孔をあけた．

現地波浪は，恒常的に発生する風波（周期3.0s）から台風やうねり（10.0s）までである．したがって，模型実験における波浪には規則波を用い，その周期は0.6，0.8，0.9，1.2，1.5，2.0，2.5sとした．最大の波高は水槽の制約から8.0cmとし，それに6.0cm，4.0cmの波高についても実験した．これら模型実験における波高を現地波高に換算するとそれぞれ1.3，0.98，0.65mとなる．

模型を設置する水深は，現地水深3.23m（H.W.L.）及び2.20m（L.W.L.）に対応し19.8cmと13.5cmの2種類とした．したがって，沖合水深に相当する造波機前の位

置では，それぞれ35.1cmと41.4cmである．なお，水深13.5cmでは造波可能な波高は4.0cmのみであり，実験のケースは水深13.5cmでは35，水深19.8cmでは105ケースとなる．

(2) 模型配置と計測法

模型の配置は，Fig. 2に示すように造波機から約16.5mの位置に長さ約6.5mの1/30勾配海底斜面に設け，その終端から消波装置までの間に高さ21.6cm長さ約10mの平坦な海底床を設置した．模型は，斜面端部から現地での常時波浪（周期3.0s）の2～3波長に相当する位置にあたる2.0mのところに取り付けた．

測定は，造波機で発生した沖合波，斜面を遡上した後の模型横における波形，模型に作用する水平及び鉛直波力について行った．

模型に作用する波力は，海底床面下の2軸ロードセルを設置し測定することも考えたが，模型の数が多く水中での交換が困難であると予想されたので，ここでは歪ゲージにより波力を測定することとした．Fig. 3に示すように，矩形断面（幅15mm，板厚5mm）を有するステンレス製アームを使用した．そのL型のアームの水平部（長さ300mm）と鉛直部（長さ350mm）に，それぞれ2枚の歪ゲージを表裏に貼り発生するモーメントを測定した．

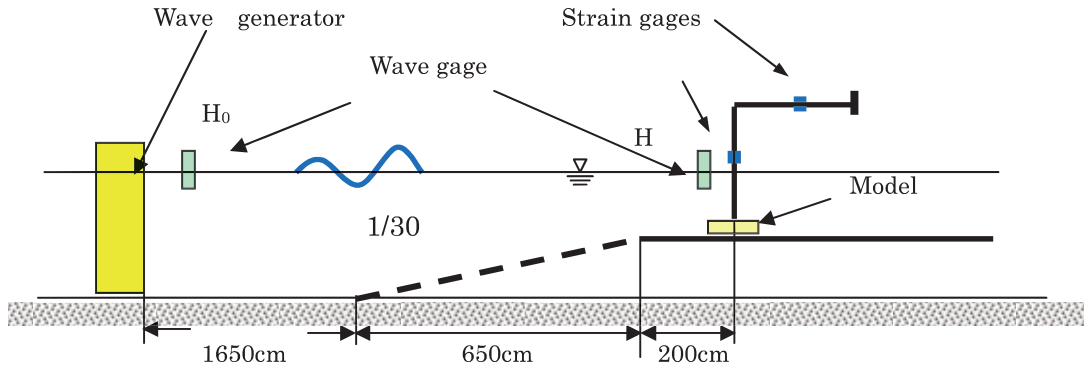


Fig. 2 Setup of a model with measurement apparatus

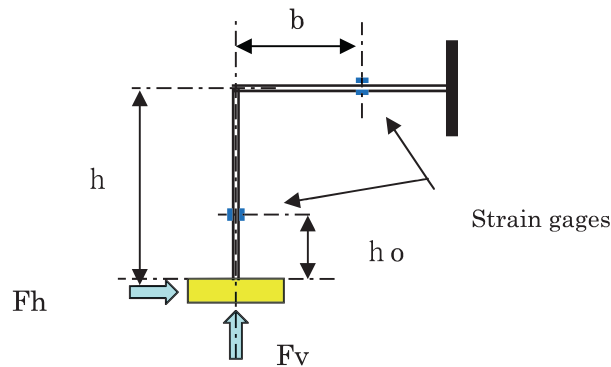


Fig. 3 Schematic method of wave force measurements

この方法では、鉛直部に発生する曲げ歪 ϵ_1 は水平力 F_h によるものだけである一方、水平部に発生する歪 ϵ_2 は鉛直力 F_v だけでなく水平力も含んでいるので、(1)と(2)式の関係を用いて鉛直力成分だけ取り出す必要がある。

$$F_h = \alpha EZ / h_0 \epsilon_2 = \alpha_h V_2 \quad (1)$$

$$F_v = \alpha EZ / b \epsilon_1 - F_h h / b = \alpha_v V_1 - F_h h / b \quad (2)$$

ここで、 Z はアームの断面係数 (0.0625cm^3)、 E はヤング係数 ($1.96 \times 10^7 \text{N/cm}^2$) である。係数 α はゲージ率、動歪アンプによる印加電圧やアッテネータから決まる。 b と h_0 はゲージ位置であり、 h は水平部と模型重心までの高さである。両式をさらに変形し、出力電圧（それぞれ V_1 、 V_2 ）に対する較正值 (α_h 、 α_v) が得られる。2セットの測定アーム (arm1, arm2) に荷重計で载荷し測定された較正值と、(1)と(2)式から得られる理論値とを比較した (Table 2 参照)。この結果、両者がよく一致することから、波力の水平成分と鉛直成分に分離できることを確認した。

Table 2 Calibration values

Calibration factors (N/V)	Theoretical values	Measured values of arm1	Measured values of arm2
α_h	-1.085	-0.983	-0.972
α_v	-1.776	-1.793	-1.765

他方、アームに発生する歪を十分な大きさと精度よく計ろうとすると、アームを細くせざるを得ないので変形しやすくなる。その結果、模型が海底床と接触してしまうので、ある程度の剛性が必要である。ここでは、模型底部と海底床の隙間は 4mm とし、試行錯誤の結果、アーム断面と模型質量 (約 625g) を決めた。水槽天端に固定されたアームと模型で構成される測定系についての自由振動試験から得られた固有周期は、模型の開口率により若干異なるが、鉛直力に対しては 0.27~0.28s、水平力に対しては 0.28~0.32s の範囲にあった。また、減衰定数は両者とも 1.7~1.6% であり、実験周期 0.6~2.5s に対する応答倍率は 1.25~1.05 となる。したがって、測定された水平及び鉛直力を対応する応答倍率で除し、水平及び鉛直波力として修正した。

3. 実験及び解析結果

(1) 解析方法

はじめに特異点分布法による解析結果を述べる。解析にあたり潜堤を直方体要素でモデル化した。モデル化には 2 軸対称性により 1/4 部分を立体要素であらわすこととし、Fig. 4 に開口率 β が 23% の例を図示するが高さ 37mm、片幅 59.5mm、83mm 長さである。この図のように、モデルは 1/4 領域で波浪進行方向にあたる方向に 3 分割、直

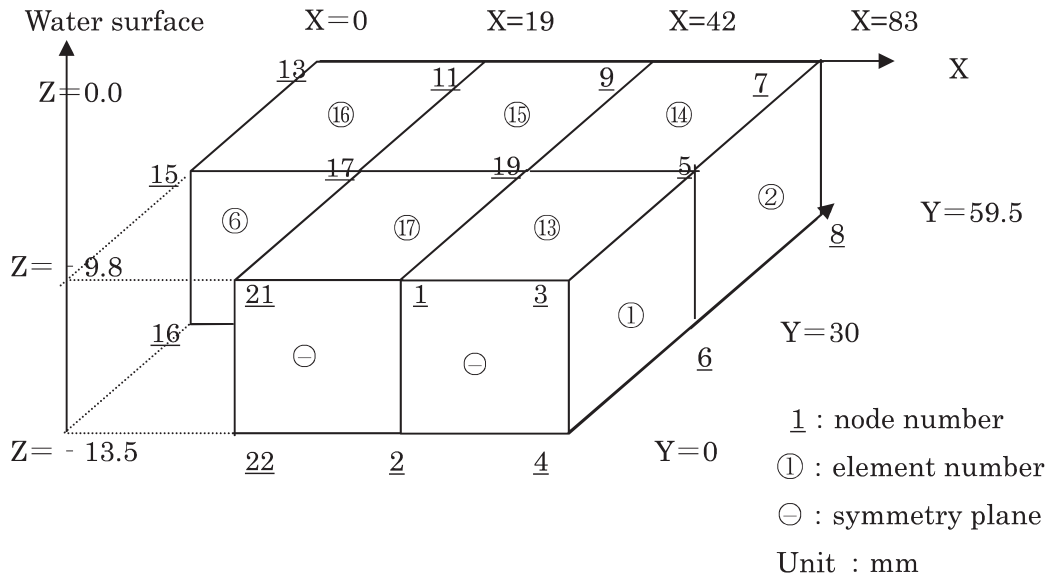


Fig. 4 Model for wave force analyses

角の Y 軸方向に 2 分割，鉛直 Z 軸方向に 1 分割した。実際の模型では中央に一つの開口部を設けると測定アームの取り付けが難しいので，同じ面積の開口となるよう 2 ないし 4 孔を設けた。開口のある解析モデルでは，幅方向の要素長さは一定のまま X 軸の要素長が β 3.6~23% に対し 3~19mm となる矩形要素を模型中央部から取り除いた。

(2) 解析結果

Fig. 5 に水深 19.8cm における解析結果を，波高で除した鉛直波力片振幅と波浪周期の関係として示す。これか

ら，周期 0.6 ~ 3.2s の範囲にわたり低減効果が認められ， β が 23% では鉛直波力が最大 65% に低下することが分かる。水深 13.5cm の鉛直波力にも同様に低減効果がみられ，一方水平波力でも，両水深とも最大 3% 程度の低減が認められた。

次に，模型が海底床から上に 4mm 離れた位置に固定されているので，この影響を述べる。解析の結果，模型が 4mm 上に離れると床に接触するように置いた条件より，全周期範囲にわたり水平波力が約 4%，鉛直波力が約 8% 大きいことが判明した。これは開口率が異なっても同程度

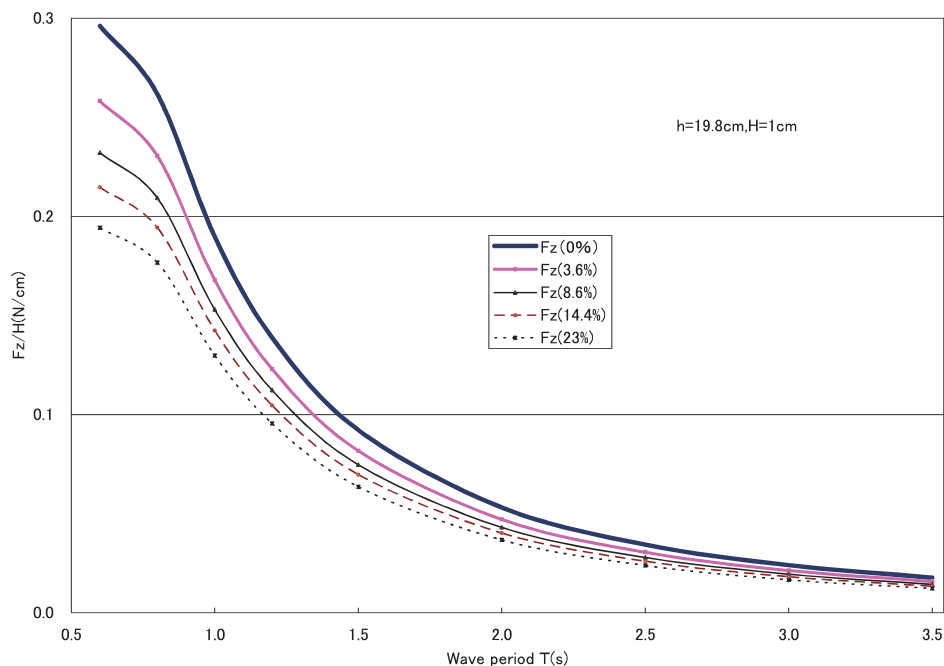


Fig. 5 Vertical wave forces computed

であり、海底床より離れるに及び水粒子速度や加速度が大きくなるためであると考えられる。したがって、以下床から 4mm 模型が離れた状態で実験値を整理することとした。

(3) 実験結果とその考察

水深 19.8cm 条件における水平波力及び鉛直波力の実験結果を縦軸は波力の片振幅を波高で除し、周期との関係で、Fig. 6 と 7 に示す。それぞれ Ana (0%), Ana (23%) と記した太線と細線は開口率 0 と 23% モデルに対する解析である。

〔水平波力〕

・解析結果では開口率の影響が小さいが、概ね実験結果は解析結果をほぼ上限に分布し、開口率の大きいほど解析結果よりもかなり下回る。

- ・潜堤長さが波長の約 1/4 に相当する周期 0.8s (実機では 3.2s) で、最大の水平波力が発生する。
 - ・波高の大きさによる影響は少なく、同じ波高でも水深が浅い 13.5cm の方が 19.8cm よりも波力は大きくなる。
- 〔鉛直波力〕
- ・解析結果は開口率が大きいと全般の周期範囲にわたり 25% 程度と大きく低減するが、実験結果は周期が長くなると一部解析結果を上回るものもある。
 - ・特に、短周期では解析よりも実験結果は小さく、開口による低減効果が著しい。
 - ・水平波力と異なり、鉛直波力は水深が深い方が大きくなる傾向がある。
 - ・鉛直波力は開口率に応じて明らかに減少し、水平波力と異なり、鉛直波力は水深が深い方が大きくなる傾向があ

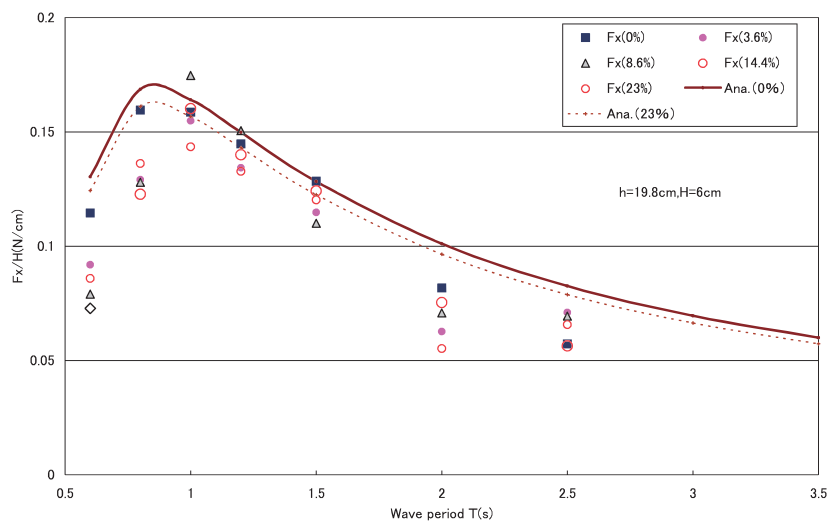


Fig. 6 Measured and computed horizontal wave forces

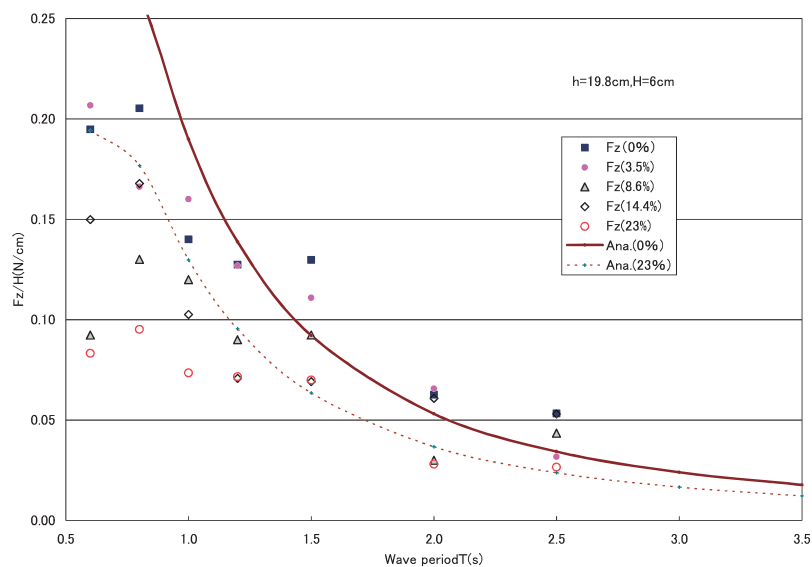


Fig. 7 Measured and computed vertical wave forces

る。

〔考察〕

実験結果の考察を、Fig. 8 に示す概念図を用いて説明する。図の横軸は波の周期の代わりに、本実験におけるような小さな構造物から大きなものまで比較し考察できるように、無次元量である波長と構造物の長さの比をとった。構造物の大小に関わらず、構造物が設置される外洋の波浪周期はほぼ同程度の範囲になるので、構造物が大きい場合はこの比が小さくなり、波浪周期の増加とともに水平及び鉛直波力とも大きくなる。構造物が小さいと、反対に波浪周期の増加とともに水平及び鉛直波力は減少する。また、水平波力は物体前後の圧力差によって生じるので、水平波力が最大になる条件は、それぞれ前後の波圧が逆向きに作用する場合であり、波長が物体長さの4倍に相当する場合であることが理解できよう。このことと次に述べる鉛直波力の波圧分布と最大波力の関係は、前回の論文における Navier-Stokes 式に基づく数値波動水路解析コード CADMAS-SURF（沿岸開発技術研究センター，2001）を用いた数値解析により判明している。その結果、実験においても波長が物体長さの4倍に相当する0.8s 近傍で水平波力のピークが表れた。

一方、物体底面に働く揚圧力は、波面が全体的に一番下がる谷になる瞬間であると考えられるので、波長の半分が物体長さになる場合に鉛直波力が最大となる。したがって、周期としては0.5s 程度あるが、今回の実験がこの範囲を十分カバーしてはしないものの解析結果にはその傾向が捉えられている。

他方、孔による波力低減については、水平波力が両端の圧力差によって生じることを考えると、物体を鉛直に貫通する孔があっても圧力分布にあまり関与しない。したがって、開口率が増加すると物体の体積が減少する程度に波力が減少するだけと思われる。反対に、鉛直方向に貫通する孔が存在すれば、その部分に揚圧力が分布しないので鉛直波力は開口率が大きいほど小さくなるといえる。

(4) 水平及び鉛直慣性力係数

ここでは、慣性力係数を明らかにする。実験や解析から得られた水平波力 F_x に対し、(3)式で示される Morison 式を適用し慣性力係数 C_{mx} を、一方、鉛直波力には抗力成分がほとんどないので、すべて慣性力であるとして、(4)式で慣性力係数 C_{mz} を求めて比較する。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_{Dx} A |U_x| U_x + \rho C_{mx} V \dot{U}_x \quad (3)$$

$$F_z = \rho C_{mz} V \dot{U}_z \quad (4)$$

ここで、 U_x と U_z は水平及び鉛直方向水粒子速度、 $\dot{U}_x$ と $\dot{U}_z$ は水平及び鉛直方向水粒子加速度であり、模型位置での水深を用いた微小振幅波理論からとまる。 ρ は海水の密度であり、 A と V は波浪進行方向からみた物体の投影面積と体積である。開口率のある場合の体積は直方体の体積でなく、その欠損体積を除いた実体積を用いて算定する。抗力係数 C_{Dx} は、直方体ではレイノルズ数影響が小さいので、この形状寸法における一般的な1.2を用いた。こうして決定された水平及び鉛直方向慣性力係数を、潜堤長さ波長比で整理した。なお、潜堤表面から底部まで貫通する孔を設けた潜堤の体積は、開口率を考慮し決定した実体積として慣性力係数を算定した。実験結果のうちから、水深13.5cm、波高4cmの条件における結果をFig. 9及び10に図示する。

〔 C_{mx} 〕

- ・水平慣性力係数 C_{mx} は、開口率にあまり関係なく潜堤の長さ・波長比 L_b/L に比べ1.6~0.8と若干減少する傾向にある。
- ・図に示していないが19.8cmに比べ、水深が浅い13.5cmでは C_{mx} が幾分小さい。
- ・開口率のない場合と23%の解析結果から分かるように、実験結果は解析を下回る。
- ・水平波力は先にも指摘したように、 L_b/L が1/4でピークを有するので、0.25に近づくほど C_{mx} は下がる傾向にある。

〔 C_{mz} 〕

- ・実験結果である C_{mz} は C_{mx} と異なり、 L_b/L の減少とともに著しく減少する。

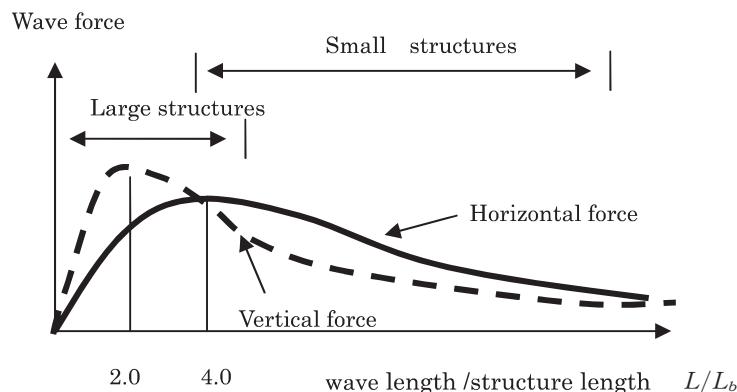


Fig. 8 Wave forces vs. Structural length

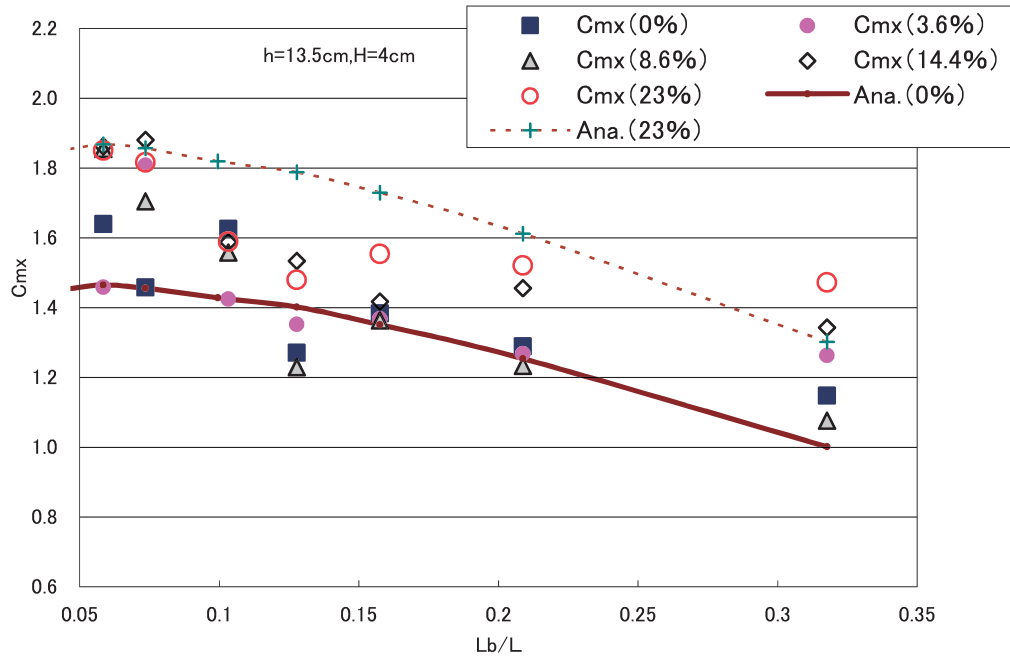


Fig. 9 Measured and calculated horizontal inertia coefficients

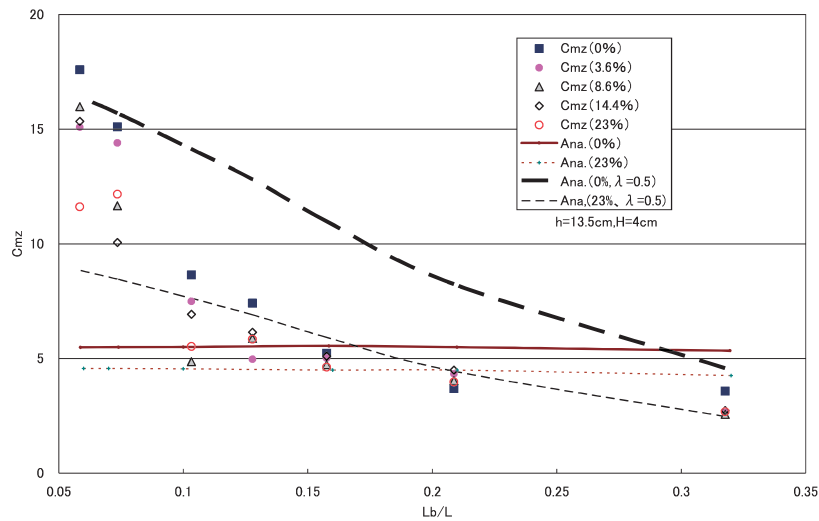


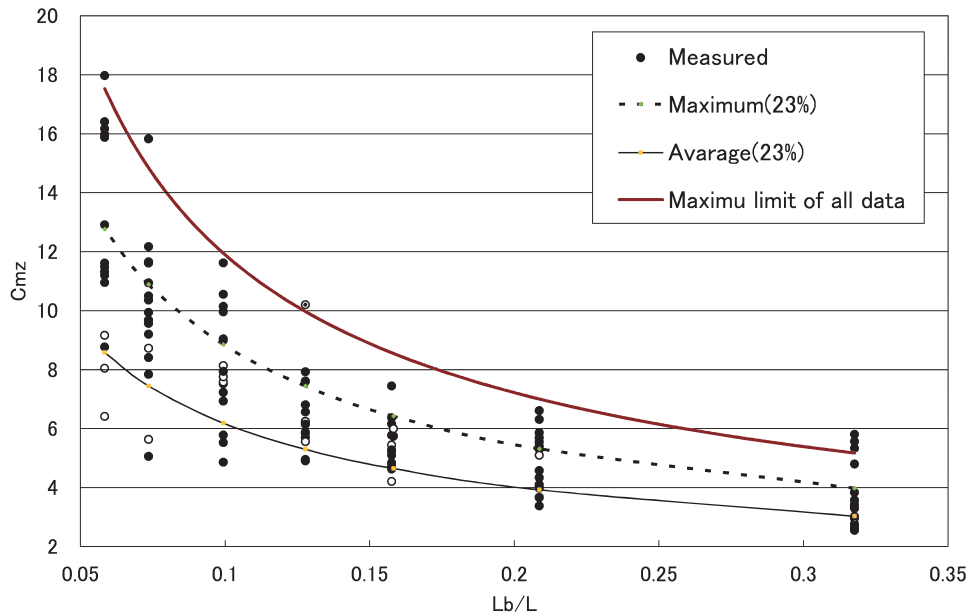
Fig. 10 Measured and computed vertical inertia coefficients

- 解析結果は L_b/L に対する敏感性は少なく、4～6の範囲に分布し実験値と傾向が異なる。
- また開口率が大きいほど C_{mz} に関しても低減の効果が認められる。即ち、無垢の直方体では L_b/L が0.1の場合10程度であるが、開口率が23%では8.8と減少する。また、 L_b/L が0.2の場合は、同じく開口率が0%の場合6.8であるが開口率が23%で5.3と同じく減少する。一般的な設計条件における潜堤の L_b/L は0.05～0.1程度にあるので、 C_{mz} は12～5程度と想定される。
- その他、安定性評価のために用いる水平波力と鉛直波力の位相差は、特に明示しなかったが概ね90度異なる。

4. 波力算定法の提案

重力式灯標を構成する潜堤は灯標全体の中でも大半の波力を受け、しかも慣性力が卓越するので、ここでは実験結果と特異点分布法の解析結果を踏まえ、Morison式を適用するための波力係数を一般化して示す。

水深潜堤高さ比 h/D が0.19 ($h=19.8\text{cm}$) の条件における上下に貫通する孔を有する潜堤に関する鉛直方向慣性力係数 C_{mz} を、潜堤の長さ波長比 L_b/L の関係でFig. 11に示した。実験値はばらつくので安全サイドになるよう、


 Fig. 11 Measured vertical inertia force coefficients vs. L_b/L

各開口率 β における実験結果の最大値を結ぶ限界線を、 L_b/L を変数とする(5)式で表される冪数式で近似し、その係数、 α_1 、 α_2 を決定した。

$$C_{mz} = \alpha_1 (L_b/L)^{\alpha_2} \quad (5)$$

図中には、すべての実験結果の上限を与えた太い実線で示す近似線その他、 β が 23% の結果に対しては破線で上限を与える近似線および細い実線で平均値を結ぶ近似線を示した。さらに、他の開口率の実験結果と区別するため β が 23% の実験結果を○印で示した。したがって、同じ開口率でも最大と平均値はかなりばらつく。Table 3 には、すべての β に対する水深潜堤高さ比 h/D が 0.19 における C_{mz} に関わる係数 α_1 、 α_2 を示す。係数 α_1 は 1.81~2.76、 α_2 は -0.56~-0.69 の範囲にあり、開口率 β が増加すると両係数とも減少する。また、Table 3 中には h/D が 0.19 および 0.27 における実験結果の最大値を結ぶ限界線 (Maximum limits と表示) を与える係数も比較し示した。 h/D が 0.27 では α_1 および α_2 もかなり小さく、水深が深いと C_{mz} が減少することがわかる。

Table 3 Vertical inertia force coefficients

Opening ratio ($h/D=0.19$) β (%)		C_{mz} 'factor	
		a_1	a_2
0.0		2.76	-0.56
3.6		2.67	-0.57
8.6		2.30	-0.61
14.4		1.98	-0.65
23.0		1.81	-0.69
Maximum limits	$h/D=0.19$	2.27	-0.72
	$h/D=0.27$	0.97	-1.01

一方、水平方向の慣性力係数 C_{mx} については L_b/L に依存性が低いので、 h/D が 0.19 および 0.27、 β が 0~23.0% の条件におけるすべての結果の平均および最大値を Table 4 に示した。 C_{mx} にもばらつきがあるので参考に全データの最大値 (Maximum) と平均値 (Average) を示したが、 h/D が 0.19 の条件では最大 2.01、平均 1.45 であり、 h/D が 0.27 ではそれぞれ 1.82、1.50 であ

Table 4 Horizontal inertia force coefficients

Opening ratio β (%)	C_{mx} ($h/D=0.19$)		C_{mx} ($h/D=0.27$)	
	Average	Maximum	Average	Maximum
0.0	1.34	1.66	1.40	1.64
3.6	1.30	1.74	1.42	1.81
8.6	1.49	1.77	1.50	1.79
14.4	1.52	1.85	1.64	1.82
23.0	1.60	2.00	1.54	1.63
all data	1.45	2.00	1.50	1.82

る。これから開口率や水深潜堤高さ比の影響を見てみると、体積に実体積を用いているので開口による体積減少の影響が大きく表われたため、 β が大きいと C_{mx} の平均値はかなり増加するが、 h/D に対してはあまり変化しないことが分かる。

以上のように L_b/L や h/D のパラメーターを用いて慣性力係数を一般化することにより、潜堤に作用する波力を簡便に推定でき、またばらつきを考慮し平均値や最大値を適確に用いることで合理的な評価ができると思われる。

5. 結 論

重力式灯標の波浪安定性を改善するために、揚圧力の低減効果に関する実験と解析を行った。これらの結果を踏まえ、以下を結論とする。

- (1) 潜堤に鉛直貫通孔をあけることで、鉛直波力を低減することが確認できた。
- (2) 潜堤長さが波長の約 4 分の 1 の条件で水平波力は最大となり、さらに 2 分の 1 の条件で鉛直波力が大きくなる傾向を見出した。
- (3) 開口率が大きいと実体積も減少し、併せて鉛直方向の慣性力係数も潜堤の長さ波長比に応じて減少する。

(4) 得られた C_{mx} 及び C_{mz} を L_b/L の関係で一般化しこれを用いることで、Morison 式により波力を簡便に算定できる。

今後、本研究で提案した揚圧力低減法が実用的な手法と認知してもらうためには、どのようなコストメリットが期待できるか施工法まで含めた定量的な把握が必要であると思われる。そのためにも、一般化を試みた慣性力係数に関し、様々な形状や寸法を有する潜堤に適用することで、一般性や精度を高めていく必要があると考える。

参考文献

- 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, CADMAS-SURF, pp.5~14
- Newman, J. N. (1984): An Expansion of the Oscillatory Source Potential, Applied Ocean Research, Vol. 6, No. 2, pp.116-117
- 関田欣治, 野本由紀夫, 吉成岳彦, 下地 亮, 石川裕和 (2005): 海底斜面上に設置された重力式灯標に作用する波力と波浪変形に関する研究, 「海-自然と文化」, 東海大学紀要海洋学部, 第 3 巻第 2 号, pp.1~9
- 運輸省港湾局監修 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上) 改訂版, 社団法人日本港湾協会, pp.111

要 旨

航路標識灯標は重力式海洋構造物に分類され、最上部に標識灯を装備するタワーとそれを支える鉄筋コンクリート製潜堤から構成される。これは、沿岸の海底斜面上の平坦な浅瀬に据付けられ、遡上する波浪により滑動や転倒するおそれがある。安定性確保には、滑動については摩擦力を高め潜堤を重くする一方、転倒については潜堤を広げることで対処してきた。直方体状の潜堤では、長さや幅をいわずらに広げる結果、必要以上に重くなることもある。そこで、今回は潜堤やタワーに作用する水平波力を定量的に明らかにし報告した。本研究では、鉛直波力とりわけ、その源泉である潜堤下面に分布し作用する揚圧力に着目し、潜堤に上下に貫通する孔を設けることで鉛直波力の低減を図れないかどうか 1/16.3 縮尺模型実験により検証した。実験では、無垢の直方体と開口割合を変えた 5 種類の模型に対し、水平及び鉛直波力を測定した。あわせてグリーン関数に基づく特異点分布法による数値解析による考察を行い、さらに Morison 式を用いた実用的な波力算定法確立のため、実験結果を慣性力係数と潜堤長さ波長比の関係で一般的に表すことを試みた。