「海ー自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第３巻第２号　1-9頁（2005）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.3 No.2 pp. 1-9, 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

関田欣治*1・野本由紀夫*2・吉成岳彦*2・下地　亮*2・石川裕和*3

A Study on Wave Transformation and Wave Forces Acting on Gravity Navigation Aid Towers Fixed onto a Sloping Seabed

Kinji SEKITA, Yukio NOMOTO, Takehiko YOSHINARI, Akira SHIMOJI and Hirokazu ISHIKAWA

Abstract

Navigation aid towers fixed onto the seabed have been constructed by Japan Coast Guard to indicate their positions and avoid collisions of ships with offshore facilities such as manmade islands. These kind of structures, composed of a column and gravity base, are often installed on reefs close to shore. While an impulsive wave pressure is said to act on the circular column above sea surface, the large wave force also acts on the box shaped base. Though the wave force on the column has been evaluated by a conventional formula, there is no appropriate formula applicable to the base. Therefore, in order to develop an evaluation method, we conducted a series of model tests to measure wave forces on a pipe and a box shaped base, together with pressures induced in the pipe. Furthermore, we conducted numerical analyses by using the potential theory and Navier Stokes theory to simulate the measured wave forces and wave transformations run-up on 1/30slope. The paper describes a comparison of experimental and analytical results together with the evaluation of the wave force calculation method developed.

1．はじめに

海上保安庁は，海上に建設された施設を船舶の衝突から回避するため，また，浅瀬，岩礁など船舶通行の障害物から船舶を守るために，昼間は形状や色彩により夜間は灯火によりそれらの方位や位置を視認できるように，海底の潜堤基礎にタワーを設けた固定式の航路標識灯を設置してきた．このような重力式構造物は海底斜面上の浅瀬に設置されるので，斜面を遡上し砕波する波浪がもたらす滑動等に対する安定性の担保に加え，タワーに作用する衝撃波力（谷本勝利ほか，1986）などに対する鋼管製タワーの圧壊に関する強度確認が設計上の課題であった．そのため，タワーや基礎に作用する波力を的確にまた簡便に見積もる算定法が求められている．そこで，本研究では斜面を模擬した1/30勾配の人工海底上の平坦部に1/16.3縮尺の重力式灯標模型を設置し，遡上する波浪の変形や波力等を実験的に調べた．ついで，Navier-Stokes 式(以下 N-S 式と記す)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）を用いて 2 次元解析を行い，波の変形，波圧および波圧から算定される波力の解析結果と実験結果を比較した．さらに，設計には簡便な波力公式の適用が慣習となっているので，直方体形状の基礎部についてはグリーン関数に基づく 3 次元特異点分布法（Newman, J.N.1984）により解析し Morison 式の適用を前提に慣性力係数を求めた．加えて，タワー部に関しては，航路標識構造物設計基準（海上保安庁，1976）による検討も行った．以下に主要な検討項目について示す．

1）斜面の波浪変形の測定と N-S 式による波形変化の解析
2）斜面上の重力式灯標に作用する波圧測定と N-S 式による解析
3）N-S 式と特異点分布法を用いた波力解析と慣性力係数の算定

2005年 9 月14日受理
＊1　東海大学海洋学部海洋土木工学科（Department of Marine Science, School of Marine and Technology, Tokai University）
＊2　(株)緑星社　龍ヶ崎工場　設計部（Ryokuseisya Corp., Ryugasaki Factory, Design Department）
＊3　(株)菱和ライフクリエイト（Ryowa Life Create Co. Ltd）

4）タワー部波力についての航路標識構造物設計基準との比較

2．実験条件及び解析条件

(1) 実験装置と灯標模型の諸元

実験は，東海大学海洋学部臨海実験所の循環水路付2次元水路を用いた．実験装置の仕様及び主な諸元を Table 1 に示すが，研究対象とする重力式灯標の諸元及び自然環境条件を考慮し模型実験の縮尺を 1/16.3 とした（Table 2 and 3 を参照）．しかしながら，Table 3 に示すように模型縮尺レベルでの最大波は 20cm を超えるが，装置の制約から波高 10cm を最大波高とした．一方，2 次元水路では，波高 10cm を造波できる波浪周期範囲は 0.6〜3.0s までであることから，反射波などの影響も考慮し，沖合水深 35.1，41.3，47.4cm（それぞれ模型位置での水深 13.5，19.7，25.8cm），沖合波高 4，6，8，10cm，周期 0.6，0.8，1.0，1.2，1.5，2.0s とした．

Table 1　Wave channel characteristics

Apparatus	Dimension
Channel	Width：1.0m，Depth：0.6m， Length：38m
Wave generator	Piston Type（power0.6kW） Wave height：maximum 10cm Period：0.6〜5.0s

(2) 計測内容

模型及び波高計等の計測装置の配置を Fig. 1 に示す．遡上し変形する波浪は，沖合，斜面上端部，斜面上端と模型との中間，及び模型位置での波高計により測定した．海底斜面について 1/30 勾配だけで特定の長さが与えられなかったので，施設に備えられた傾斜板を組み合わせて約 6.5m とし，これを造波機から約 16.5m に設置した．一方，模型の設置位置は，斜面端部から現地での常時波浪（周期 3.0s）2〜3 波長相当位置にあたる 2.0m のところに模型をセットした．模型を吊ったアームに貼ったひずみゲージにより水平波力を，また水圧計で静水面近傍でのタワー部に作用する波圧を測定した．基礎部とタワー一体の全体模型及び円筒状タワー部のみの円柱模型に対しそれぞれ実験を行った．

(3) 解析条件

解析では，2 次元 N-S 式に基づく方法とグリーン関数を用いた 3 次元特異点分布法を用いて解析を行った．両解析モデルに用いた計算定数等の解析条件を Table 4 に示

Table 2　Model Dimensions

Items	Prototype	1/16.3 Model
Tower length（cm）	730	44.9
Mass of Base（kg）	20,000	4.6
Width of base（cm）	270	16.6
Height of base（cm）	119	7.3
Submerged weight of base（kN）	110	25.0
Diameter of tower（mm）	406	25.0
Thickness of tower（mm）	8	0.49
Length of tower（mm）	6,000	369.1
Mass of tower（kg），(g)	630	146.7
Center of gravity（mm）	3,500	215

Table 3　Natural environmental conditions

	Prototype	1/16.3 Model
Water depth-LWL（cm）	100	6.2
Water depth-HWL（cm）	300	18.5
Wave height（m），(cm)	3.5	21.5
	2.0	12.3
	1.0	6.2
Period（s）	8.0	2.0
	5.0	1.2
	3.0	0.7
Design wave force（kN），(N)	27.44	6.39

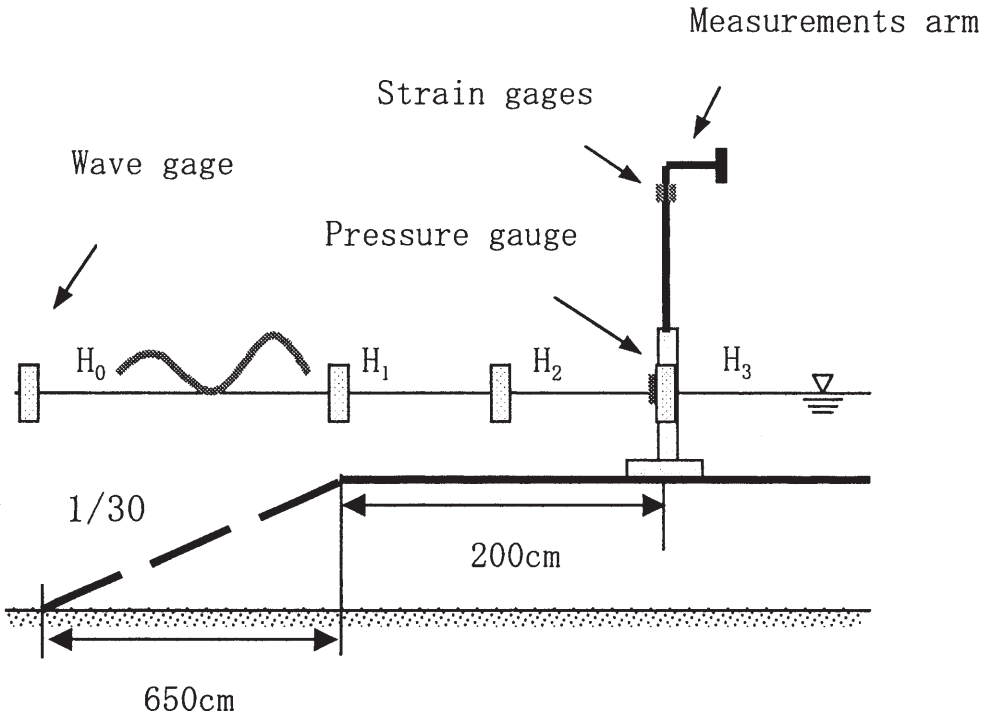

Fig. 1 Setup of model with measurement apparatus

Table 4 Analysis conditions

Time increment (s)	0.01
Boundary condition	Left : Wave generation Right : Sommerfeld condition
Length (m)	400
Vertical distance (m)	7.5
Numbers of elements	Horizontal : 400 Vertical : 15
Size of element (m)	Horizontal : 1.0 Vertical : 0.5
Water depth (m)	3.51～4.74
Wave period (s)	1.90～6.32
Wave height (m)	0.4～1.0

す．なお，実験で用いた模型が小さく，実物を対象としたコードでは精度良く計算ができなかったため，模型の縮尺を10倍して解析し，後で縮尺を考慮し模型レベルに換算した．なお，N-S 式に基づく解析では実験と同じ斜面形状を模擬し，灯標模型を設置し解析しているが，３次元特異点分布法では模型設置位置での一様水深とした．

3．実験結果

(1) 波

ここでは波の変形を調べるために，沖合（H_0），斜面上端部（H_1），模型横（H_3）の３箇所で計測した波高 4cm 周期 0.8s の波列を Fig. 2 に示す．この例にあるように造波機で発生する沖合波（H_0）はほぼ上下対称な波浪であり，約 16.5m 斜面開始端まで進行し，約 6.5m の斜面を遡上すると峰がとがり谷は平べったい形状の波浪（H_0 と H_3）に変形する．観察された波浪変形の概略を述べると，斜面を遡上してきた沖合波は，全般に周期が短いと波高がやや減少する一方，周期が長いと増加する傾向にある．波高変化の詳細については，４．解析結果で述べる．

(2) 波圧

灯標模型に取り付けた波圧計の波形を比較するため，衝撃波圧と通常の波圧の計測例を Fig. 3 に示すが，浅い水深で周期が長く，波高が高い場合において衝撃波圧が一部観測された．多くは下側の波形のようであるものの，それでも特に周期が短い場合は山が鋭がった波圧波形となる．

(3) 波圧力係数

円柱に波圧計を衝撃圧が作用しやすい水面付近に２個取り付け，水深と波高が及ぼす波圧力への影響を調べた．航路標識構造物設計基準で用いられている (1) 式を用いて，円柱部分に取り付けた波圧計測圧結果 $P(t)$ から無次元である波圧力係数 α について，計測した３波の中から最大の値を用いて整理した．

$$P(t)=\alpha w H_3 \tag{1}$$

ここで，w (N/cm^3)：水の単位体積重量，H_3(cm)：模型設置した水深での波高である．

波圧力係数は，全般に周期が長くなるにつれて大きくな

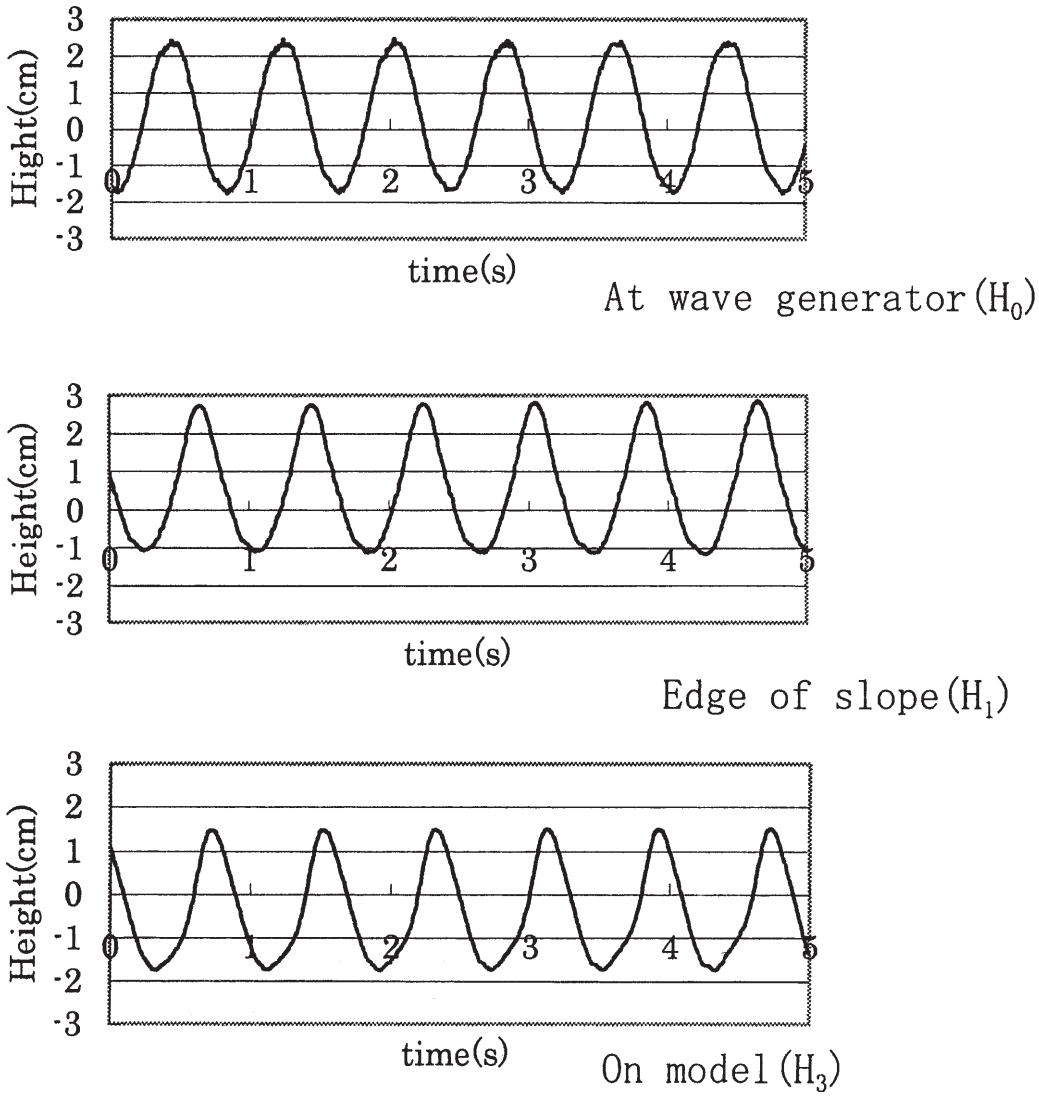

Fig. 2　Measured waves

る傾向が見られるが，数例を除けば上記基準での推奨値0.5を下回る場合がほとんどである（Fig. 4 参照）．この適用にあたっては，本来なら水深方向に波圧が指数関数的に減少するものを一様波圧として波力を算定することになっている。ここでは，波圧分布を考慮した包括的な検討を行っていないので十分な議論ができないが，一様波圧として波力算定を行うとしても推奨値は適正になるどうかの確認が重要であろう。

一方，直径 5mm の波圧計で捉えることのできた衝撃波圧が周期 1.5 と 2.5s で観測され，これを基に算定した衝撃波圧力係数はそれぞれ 5.0 と 4.5 となり，谷本ほか (1986) による提案式により算定した結果とほぼ一致する．しかしながら，衝撃波圧の作用範囲が狭いこと等から全体に作用する波力には影響しないので，灯標の安定解析には考慮しなくてよいと考えられるが，中空部材からなるタワーの局所的圧壊などの検討には重要な項目である．ついで，Fig. 5 に灯標模型に作用する計測された最大波力を示すが，これと円柱模型に作用する波力を比べると，大きな基礎を有する灯標模型の方が受圧面積も体積も大きいので，受ける力が設計波高によらず約10倍大きい．また，灯標模型も円柱模型も，水深が浅いほうが深い場合より全般に波力が大きい．

4．解析結果

(1) 波高

ここでは，実験で求めた沖合波(H_0)，模型位置(H_3)での波高について，N-S 式に基づく方法による解析値との比較を行った．沖合水深 35.1cm(模型位置水深 13.5cm)での結果を Fig. 6 に実験結果（Ana.と表示)，解析結果(Exp. と表示）を示す．水深に関係なく，波は斜面を遡上し砕波することにより模型位置での波高は沖合波よりも低くなる傾向があり，周期が 2.0s の場合の波高は増加する．この傾向は，解析結果も実験結果も一致するものの，周期

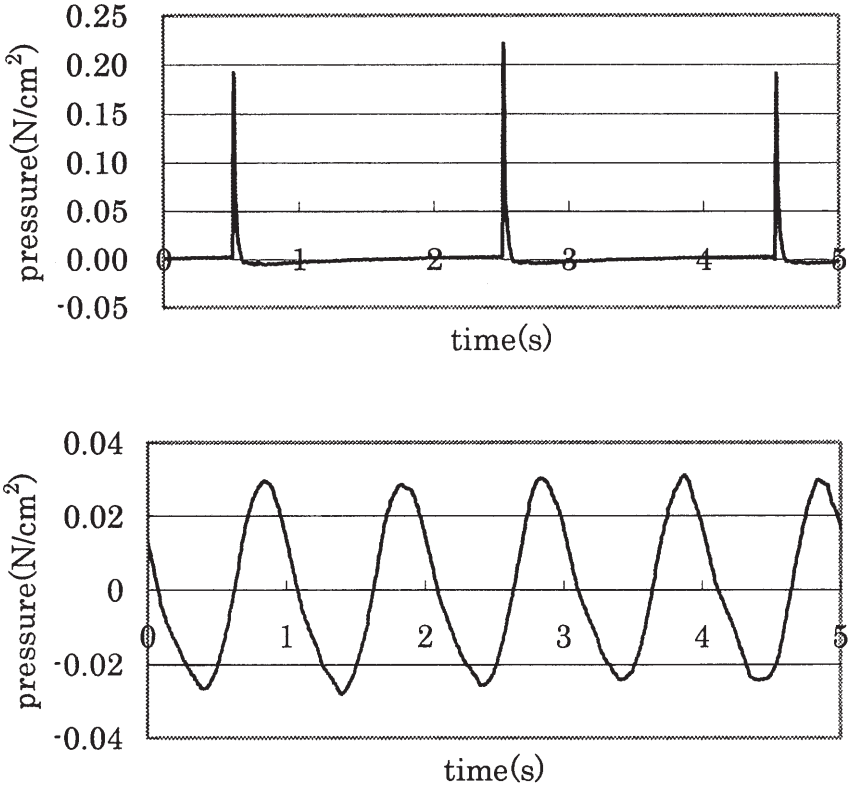

Fig. 3 Time history of hydro pressures

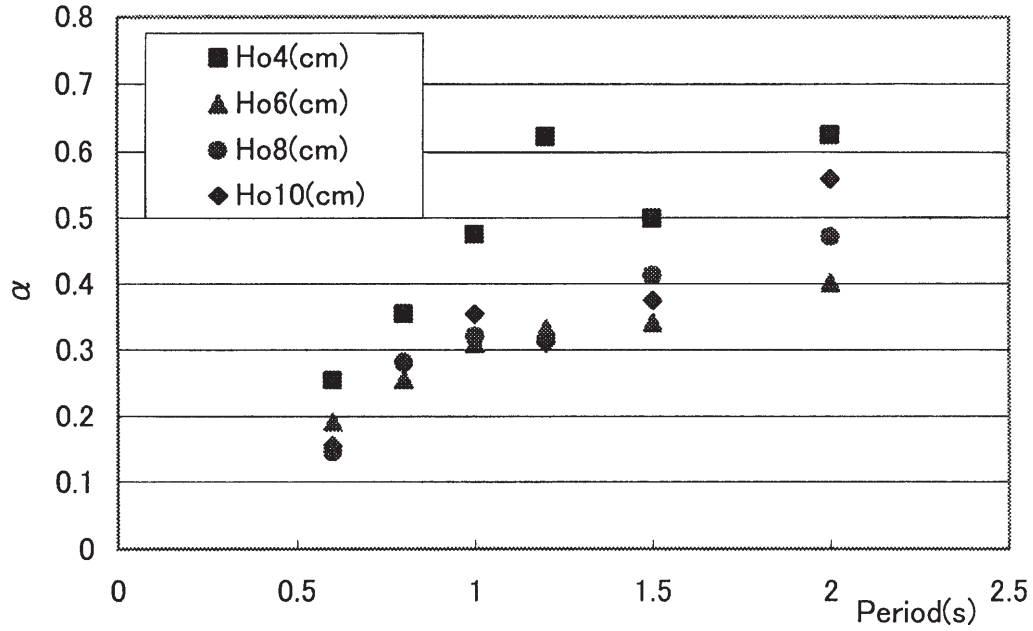

Fig. 4 Wave pressure coefficients

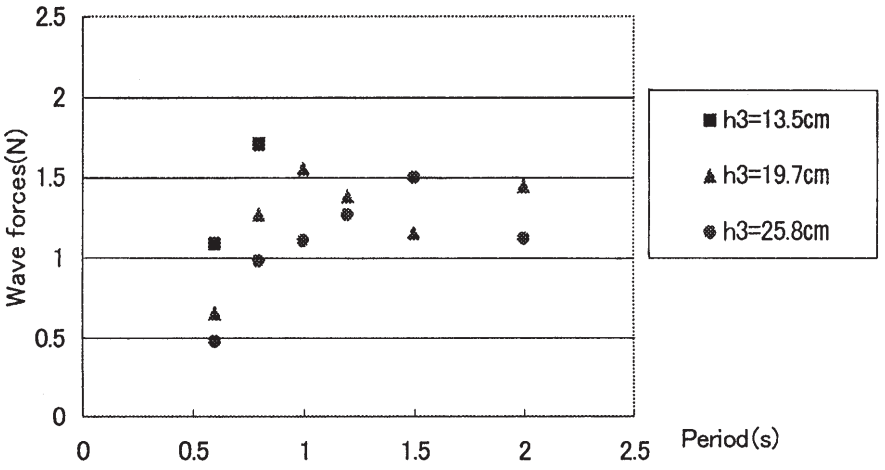

Fig. 5　Measured wave forces on tower model

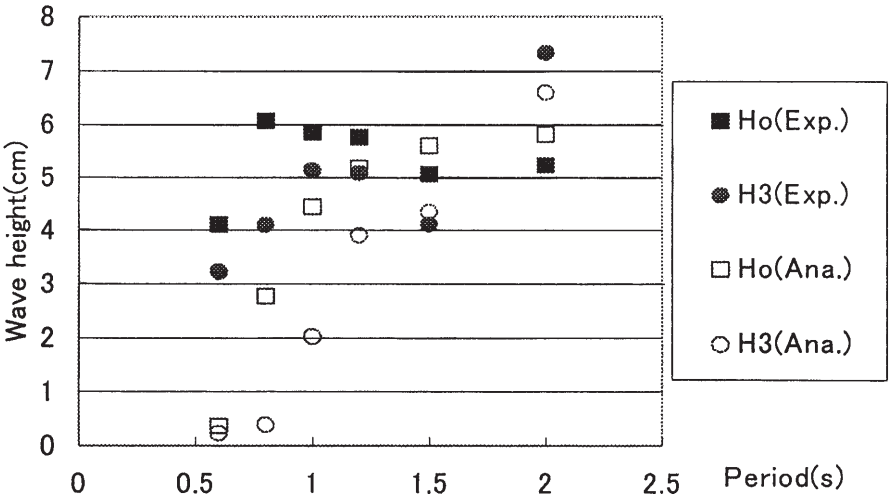

Fig. 6　Comparison of measured and computed run-up wave heights

が短い範囲では実験により得られた波高の方が，解析値よりかなり大きい．本解析では Table 4 に示したように二次元造波水槽を造波機から消波装置まですべて要素に分割してモデル化したので，計算機の容量や計算時間の制約から長手方向には400分割と荒い分割長さとなった．その結果，波長が短い周期では実験値と合わないと考えられ，本解析での信頼できる範囲は 1.2s 以上であろう．そこで，実験によって得られた波高に関し，運輸省港湾局監修（1989）をもとに海底勾配 1/30 における砕波限界波高を別途推算した．ここではそれら結果を明示していないが，従来の実験結果に基づく推算値は実験結果を若干下回るかほぼ一致した波高であった．

(2) 波圧力係数

ここでは，波圧力係数の実験値と，N-S 式に基づく方法による解析値との比較を行った．水深 41.3cm（模型水深 19.7cm）比較した結果を Fig. 7 に示す．周期 0.6s を除くと，波高 4cm の実験値の値は変動が大きいが，他の波高ではばらつきが小さく解析値に近い．実験値，解析値ともに波圧力係数は周期が長くなると増加する傾向にあり，解析値のほとんどは前述の推奨値 0.5 程度を下回る．また，実験値で値が一部大きくなっているところでは，衝撃波圧の影響ではないかと考えられる．しかしながら，衝撃波圧は水面付近の波峰が作用するごく狭い領域で発生するため，今回高さ方向に 2 つ波圧計を取付けたが適確に捕捉することができなかったものと思われる．

(3) 波力

Fig. 8 に，灯標模型及び円柱模型に作用する波力に関する実験結果（それぞれ▲と●印）及び，N-S 式（N-S と表示）及びグリーン関数法に基づく特異点分布法（Green と表示）による解析値と比較し示した．図中で Mode と表示したものは直方体基礎と円柱から構成される灯標模型に対する解析結果であり，Pipe と表示したものは円柱模型に対するものである．この結果は，沖合水深 41.3cm（模型水深 19.7cm），波高 8cm の条件におけるものであ

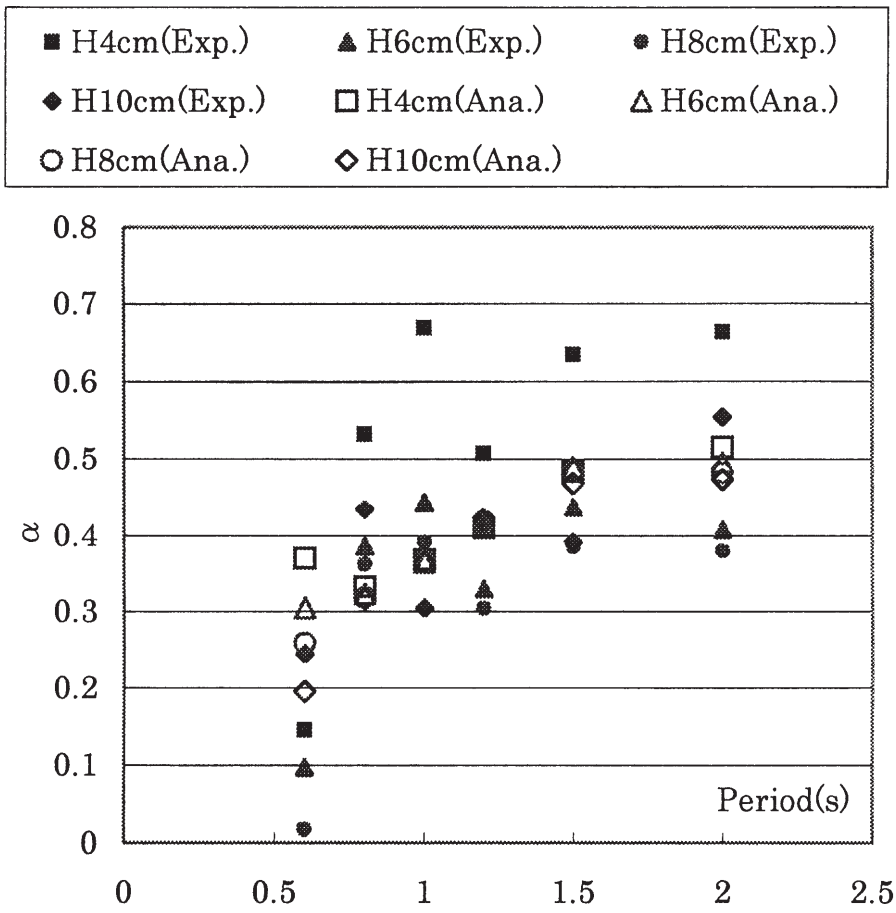

Fig. 7 Comparison of measured and computed wave pressure coefficients

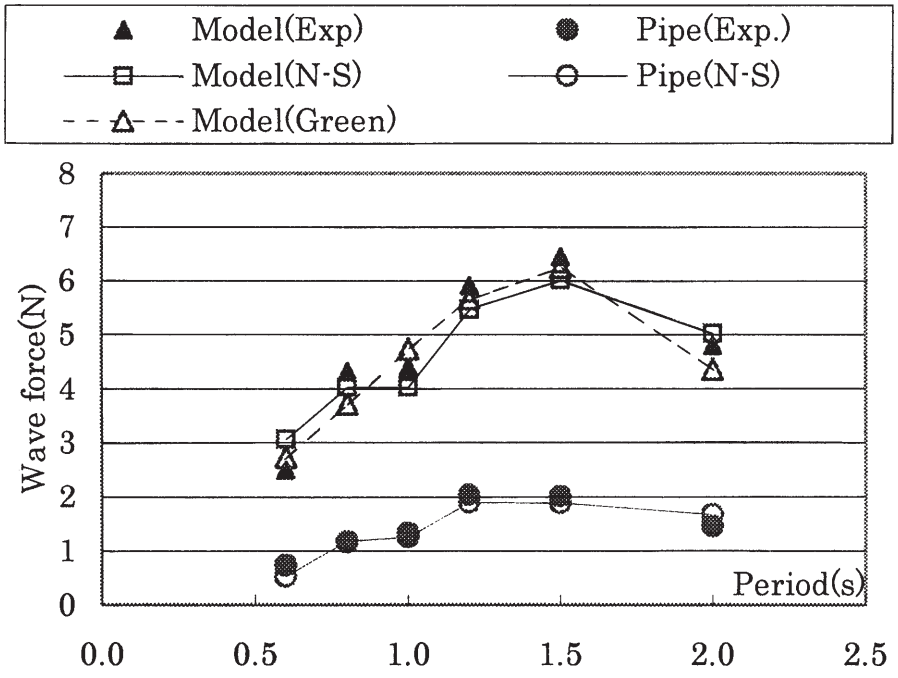

Fig. 8 Comparison of measured and computed wave forces

るが，実験値の波力は周期が長くなるにつれて大きくなり，周期1.5sで最大となり長周期では減少する．なお，N-S式による解析では，Table 4に示したように沖合水深では15分割したが，模型位置では下端から水面までの高さ方向に6つの要素(円柱4分割，基礎2分割)でモデル化し，要素に作用する波圧を解析し積分して波力を算定した．一方，特異点分布法においては，模型位置の深さに相当する一様水深とし，基礎部を長さ方向20分割，幅方向10分割，高さ方向4分割し基礎部に作用する波力を解析した．さて，N-S式によるものも特異点分布法による結果とも，解析結果は実験値と比較してよく一致する．なかでも，N-S式による方法は灯標模型に作用する波力が約1/3程度である円柱模型に対しても実験結果と一致する．解析値同士を比較すると，特異点分布法はN-S式による方法よりも周期1.0～1.5sで若干大きめの値となる．模型位置での水深13.5cmと25.8cmの場合も，図示していないが解析と実験結果は比較的よく一致する．N-S式によりえられた波高や波圧力係数の比較では，実験と解析結果は必ずしもよく一致しなかったが，波力に関しては要素幅が適切でない短周期でもこのように実験と解析結果がよく一致する．これは，物体表面にわたり波圧を積分して波力が得られるので局所的な波圧分布の影響が弱められ平均化されたためかと考えられる．

(4) 慣性力係数

ここでは，実験や解析によって得られた水平波力 Fw に対し，(2)式で示されるMorison式を適用し慣性力係数 C_M を求めて比較する．

$$Fw=\frac{1}{2}\rho C_D A|U|U+\rho C_M V\dot{U} \qquad (2)$$

ここで，ρ は海水の密度であり，A 及び V は波浪進行方向からみた物体の投影面積及び体積である．また U は水平方向水粒子速度，$\dot{U}$ は水平方向水粒子加速度であり，これらと波長Lの算定には，模型位置での水深を用いた微小振幅波理論を適用した．さらに，直方体はレイノルズ数影響が少ないので，この形状寸法における抗力係数 C_D1.2を用いた．Fig. 9に波高8cm，模型の設置水深（h3＝25.8cm）における結果を示すが，横軸B/Lは模型基礎部の波浪進行方向の奥行きを波長で除した値である．ここでの解析に用いたN-S式に基づく方法は2次元的であるため，3次元特異点法による解析結果に対しても同様に C_M を算定したところ，3次元の効果がでにくい条件であるけれども両解析結果はほぼ一致した．慣性力係数は，全体的にB/Lの増加とともに6.0～3.0に減少する．波高による相違は明示してないが，波高が小さいほど C_M は大きく，設置水深が浅いと例えば19.7cmではB/Lの増加とともに4～1.5程度と小さくなる．一般に，水底に接するように水平に置かれた円柱における C_M は3.3程度と大きく，水底から離れるにつれ小さくなり直径の1.5倍離れた水中で値2.3となる（DNV，1991）．したがって，今回の直方体形状である基礎部の解析結果にも底面境界の影響が水平円柱と同様に現れた結果と推察される．すなわち，水中部にある直方体基礎の C_M は約1.68であるのに対し，本実験のように水底に接する条件下では実験や解析結果のように大きくなるものといえる．

5．結　　論

模型実験及び二つの解析手法を適用し，1/30海底斜面上を遡上する波の変形，及び海底斜面上の平坦部に設置される航路標識灯が受ける波圧や波力特性を明らかにした．さらに，従来からの波力評価に用いられてきた適用式の妥当性も検証した．これらの実験及び解析結果を踏まえ，重力式灯標の波力評価法の観点から以下本研究の結論をまと

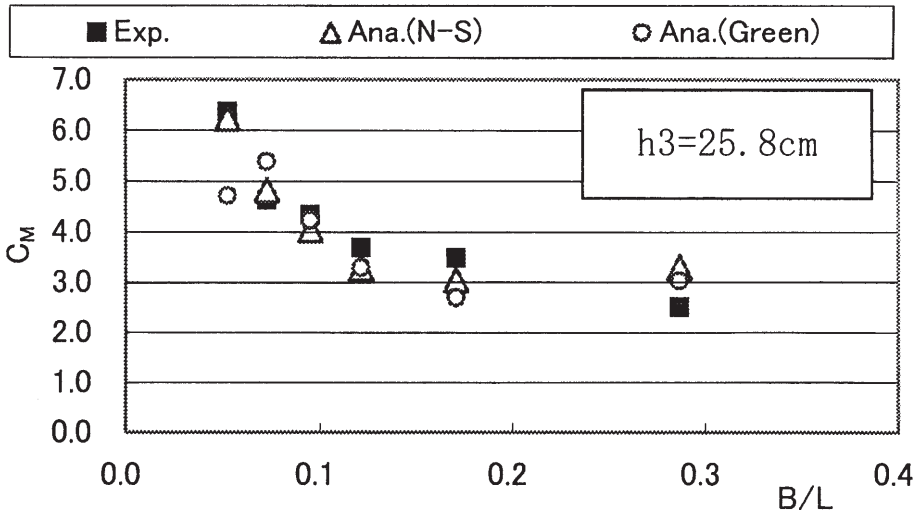

Fig. 9　Measured and computed Inertia coefficients

める．

(1) 斜面を遡上する波浪の作用高さは，N-S 式に基づく解析によってある程度評価できる．しかしながら，設計にこれを用いるためには，波長に対する適切な要素サイズなどをパラメータにした検討等により，その適用性を確認する必要がある．

(2) 航路標識構造物設計基準を適用しタワー部に作用する波圧を算定するための波圧係数 α に関しては，推奨値 0.5 を超える実験結果も一部みられたが全般にこれを下回る．したがって，この波圧係数 α を基に水深方向の波圧分布を考慮せずに一様としてタワーの波力を算定するとしても，現行基準が妥当な範囲の波力を与えるものかの確認が必要である．

(3) 一部発生が確認できた衝撃的波圧はその作用時間がきわめて短く，波圧力係数が 5 程度と大きいものの，谷本提案の衝撃波力評価式の結果とよく一致する．ただし，衝撃的波圧は重力式灯標を転倒させるまではいたらず，水面付近の鋼管タワー部材についての局部的圧壊等をもたらす可能性があるものと考えられる。

(4) 灯標全体に作用する波力のうち，基礎に作用する波力が大きいこと，また，3 次元特異点分布法による波力と 2 次元の N-S 式で得られる波圧から算定した波力が良く一致することから，実験や解析によって得られた慣性力係数を用いて Morison 式を適用し波力を算定することが合理的と思われる．この場合，抗力係数は 1.2 程度とし，C_M は灯標基礎長さと波長比 B/L を考慮し 2 ～ 5 程度を用いれば良いと思われる．

最後に，この実験では計測しなかった鉛直波力は安定性評価上重要な項目であり，今後の課題としてその解明と定量的把握を行なっていく必要があるものと思われる．

参考文献

DNV: (1991): Environmental Conditions and Environmental Loads, Classification Notes, No. 30.5, pp.14-21, DET NORSKE VERITAS

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

海上保安庁(1976)：航路標識構造物設計基準，32編，pp.9～10，pp.40

Newman, J.N. (1984): An Expansion of the Oscillatory Source Potential, Applied Ocean Research, Vol.6, No.2, pp.116-117

谷本勝利，高橋重雄，金子忠男，塩田啓介，小蔵紘一郎(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，第25巻第 2 号，pp.29～87

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，社団法人日本湖湾協会，pp.111

要　旨

海上保安庁などでは海上重要施設から衝突の回避を船舶に促すため，固定式の航路標識灯標を設置している．このような施設は，陸に近いところに設けるため斜面上の平らな浅瀬に据え付けられることが多く，コンクリート製の潜堤基礎と鋼製の円筒タワーが一体となった重力式海洋構造物である．これに，海底斜面を遡上してくる波浪が作用すると，潜堤基礎に過大な水平力が作用し全体的な安定性が損なわれる一方，タワー部には衝撃的な波圧が作用し局部変形するおそれがある．本研究では，斜面を模擬した 1/30 勾配の人工海底上に平坦部を設け，そこに 1/16.3 縮尺の灯標模型を設置し，遡上する波浪の変形や模型に作用する水平波力等を実験的に調べた．さらに，3 次元特異点分布法により基礎部に働く波力水平成分を、さらに Navier-Stokes の理論に基づく数値波動水路解析コード CADMAS-SURF を用いて水路方向鉛直断面に関わる 2 次元解析を行い，波浪変形，タワーと基礎に作用する波圧，および波圧から算定される波力を解析し、これら解析結果と実験結果を比較した．