

実海底地形を対象とした不規則波のマッハ反射に関する研究

間瀬 肇*・由比政年**・北野利一***・目見田 哲****

1. はじめに

防波堤や大規模人工島の直立壁に平行に近い角度で波が入射すると、直立壁に垂直な方向に波峰が発達し、その波（ステム波）が壁に沿って進行して波高が増加するマッハ反射が起こる（Perroud, 1957; Wiegel, 1964; Yoon and Liu, 1989）。しかし、直立壁直前の波高変化に限ってみると、防波堤先端や隅角部からの回折散乱としての波高変化と類似している（Berger and Kohlase, 1976）。実際には、波浪条件によって、マッハ反射あるいは回折・散乱のどちらかの現象が卓越すると考えられる。

間瀬ら（1999）は規則波のマッハ反射と不規則波のそれとの類似点・相違点を検討するとともに、不規則波の非線形平面変形理論を用いたマッハ反射の計算結果、回折理論による算定結果、および一方不規則波を用いた実験結果との比較・検討を行い、不規則波の直立壁前面における波浪場の特性を検討した。その結果、i) ステム波の発達特性に及ぼす入射波の非線形性および入射角の影響は、非線形性が大きいほど、また入射角が小さいほど入射波高で無次元化した波高が小さくなり、これはクノイド波の結果（Yoon and Liu, 1989）と同じであること、ii) 不規則波のステム波の幅（壁面から垂直方向に波高が最小値となるまでの距離とする）はクノイド波の結果とは異なり、入射波周期が同じであれば非線形性によらずほとんど同じであること、iii) 浅海条件においては、実験結果は非線形理論モデルによる計算結果と非常によく一致することがわかった。

本研究は、実海底地形を対象として、水深変化による浅水変形、屈折、屈折・回折、碎波の影響が含まれる不規則波のマッハ反射特性を、種々の条件を変化させて、主として数値シミュレーションによって調べる。また、別途行われた水理実験の結果と数値シミュレーション結果を比較することによって、理論モデルの妥当性を検証する。

2. 理論モデルの概略

予測計算に用いる理論は、間瀬ら（1997）による不規則波の非線形ハイブリッド平面変形理論であり、その理論式は以下のように表される。

$$A'_{nx} + \frac{(C_{gn})_x}{2C_{gn}} A'_n - i(k_n - n\bar{k}_1) A'_n - \frac{i}{2(CC_{\theta})_n} ((CC_{\theta})_n A'_{ny})_y + \frac{3ink_1}{8h} \left[\sum_{i=1}^{n-1} A'_i A'_{n-i} + 2 \sum_{i=1}^{N-n} A'_i A'_{n+i} \right] + a_n A'_n = 0 \quad (n=1, \dots, N) \quad (1)$$

ここで、 n は成分波の識別番号、 N は成分波の個数、 h は水深、 k_1 は基準波数（基準角周波数とは $\omega_1 = \sqrt{gh} k_1$ の関係で結ばれる）、 $\bar{k}_1$ は k_1 の y 方向の平均値、 k_n は成分波の波数、 C_n は成分波の波速、 C_{gn} は成分波の群速度、 a_n は碎波減衰係数、 i は虚数単位、下付添字の x, y はそれぞれの変数についての微分を表す。計算で求める成分波の振幅 A'_n は、水位変動と以下の関係がある。

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} A'_n(x, y) e^{in \int h(x) dx - \omega_n t} + c.c. \quad (2)$$
$$A'_n = A_n e^{in \int h(x) dx - \int \bar{k}_1 dx} \quad (3)$$

ここで、 $c.c.$ は共役複素数である。式（1）の空間発展型連立微分方程式で表される振幅 A'_n を求めた後、式（3）によって A_n を求め、その A_n を逆フーリエ変換して水位変動 ζ を求める。水位変動から各種の波代表諸量が求められる。

式（1）において A'_n の y に関する 2 階微分項がないものが 1 次元の浅海変形理論モデルである。 A'_n の非線形項がないものが、各周波数成分に対する放物型波動方程式である。断面 2 次元および平面 2 次元の理論モデルの応用例は Mase and Kitano (2000) を参照されたい。

マッハ反射を扱う場合の式（1）の境界条件は、以下のように与える。いま、 x 方向を直立壁に沿う方向（ $i=1 \sim L$ ）とし、それに垂直に y 軸をとる（ $j=1 \sim M$ ）。直立壁が $j=1$ にあるとすれば、そこでの境界条件は次式で与

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
*** 正会員 工博 名古屋工業大学助手 社会開発工学科
**** 正会員 工博 関西電力(株) 総合技術研究所

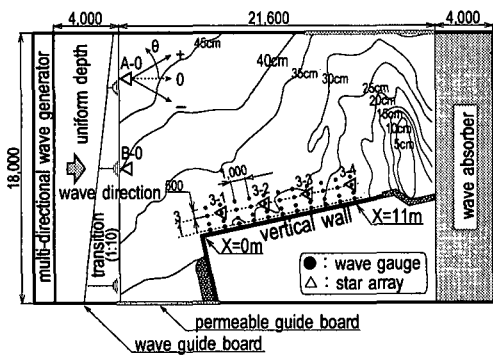
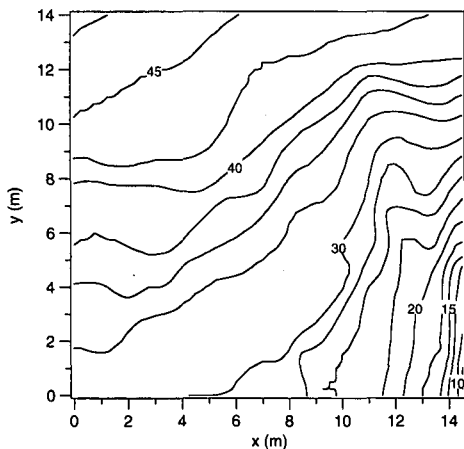


fig. wave basin(unit : mm)

(a) 実験装置・人工島模型の配置図



(b) 直立壁前面の等水深線図

図一 実験装置概要図および直立壁前面の等水深線図

える。

$$\partial A_n^1 / \partial y = 0 \quad (A_n^0 = A_n^1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

入射波側の側方境界条件は、計算領域外の格子点の水深は境界におけるそれと同じとして、以下の透過条件を用いる。

$$A_n^{M+1} = A_n^M \exp(ik_n \sin \theta \Delta y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 Δy は格子間隔、 θ は入射角である。

3. マッハ反射の実験結果

図一(a)に実験装置・人工島模型の配置図、および図一(b)に直立壁前面の水深を示した。この海底地形は、ある現地海底地形を再現したものである。 $y=0$ mの測線に直立壁がある。直立壁は越波が生じない高さである。

実験における不規則波は、有義波高が1.5, 2.5, 5.0, 6.0 cm, 有義波周期が0.89, 1.12, 1.34, 1.73, 2.00 s, 入射角が10°, 20°, 方向集中度パラメータが25, 75, ∞ (一方不規則波) の条件を組み合わせ、造波したもので

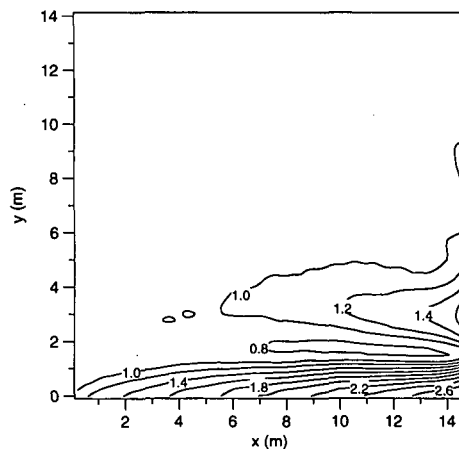
ある(目見田・酒井, 1999)。そのうち、ここで解析の対象とした実験条件は、波の方向性に関して一方不規則波である。

水位変動は、直立壁に平行に4つの測線(y軸方向に50 cm間隔)を設定し、直立壁直前ではx軸方向に50 cm間隔、その他の測線では1 m間隔ごとに計測された。計測時間は約5分、サンプリング間隔は0.025 sである。

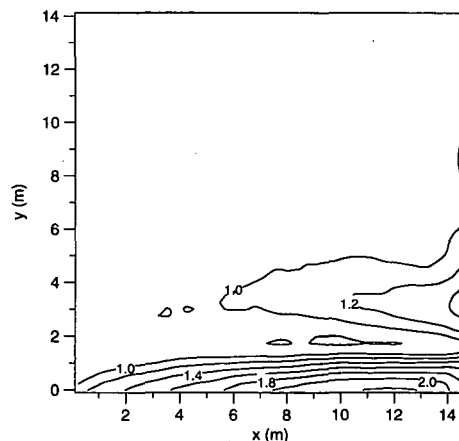
4. 解析結果

(1) 実験結果と計算結果の比較

図一2は、入射有義波高で無次元化した、直立壁前面での波高の空間分布を示したものである。(a)図は入射有義波高が2.5 cmのケースで碎波が全く生じないケース、(b)図は入射有義波高が5.0 cmで浅海域で碎波が生じるケースである。入射角度は20°である。 $y > 6.0$ mの領域は水深が20 cm以上であり、浅水変形の影響がほとん



(a) 入射有義波高 2.5 cm



(b) 入射有義波高 5.0 cm

図二 直立壁前面の波高分布(入射角 20°, 有義波周期 1.73 s)

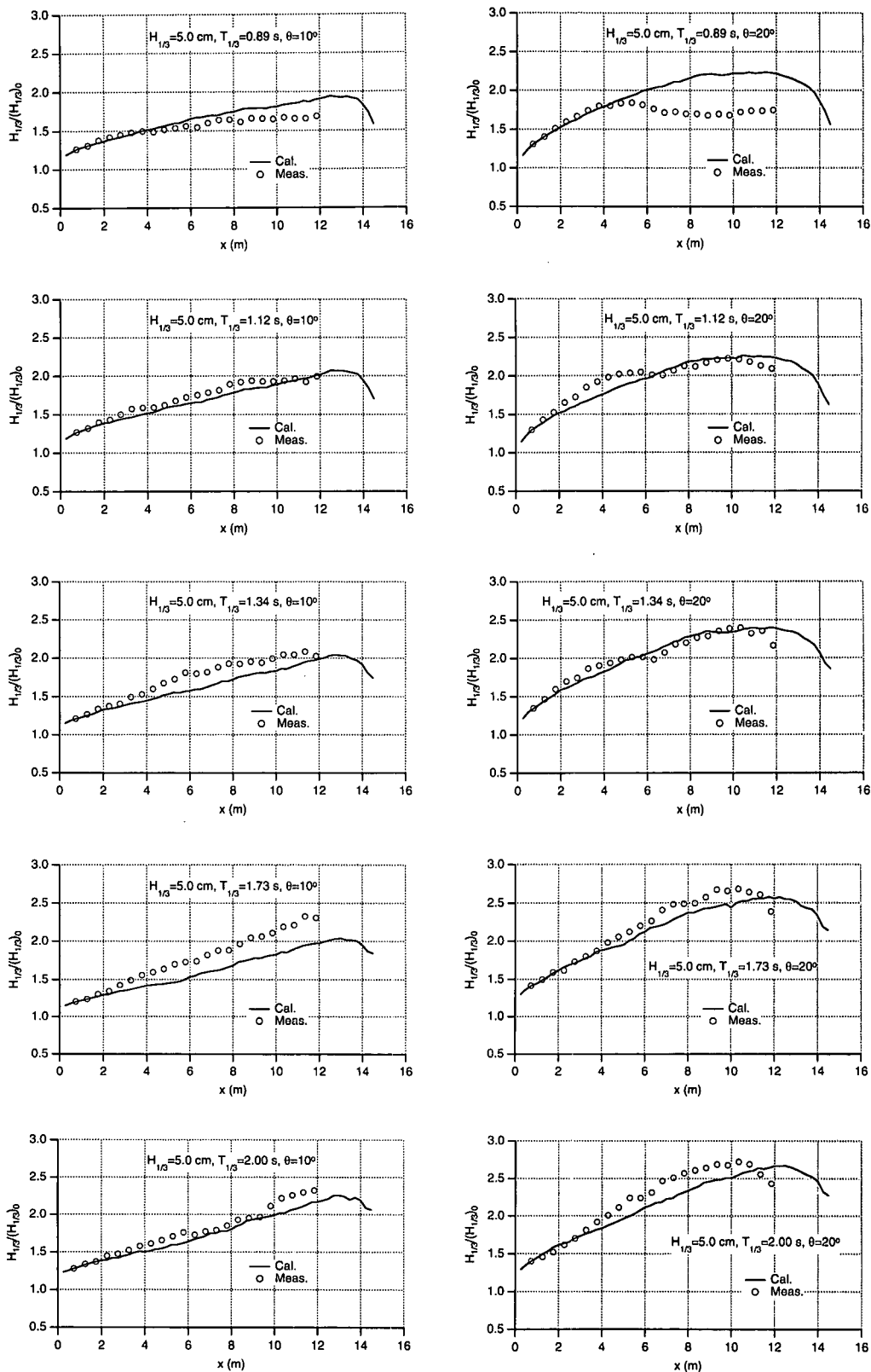


図-3 直立壁に沿っての波高分布 (入射有義波高 5.0 cm)

ど見られない。 $y < 6.0$ m の領域では、屈折、浅水変形、ステム波の発達といった 3 者の影響が現れて、波高分布が複雑になっている。(a) 図においては、直立壁に沿ってのステム波の波高増加が $x = 14$ m の地点まで見られる。(b) 図においては、 $x = 12$ m 付近で波高が最大となった後、減少に転じる。また、両図とも $y = 3$ m の測線に沿っての波高増加が見られる。このように水深が変化する場では、構造物前面の波高分布が複雑である。

直立壁に沿っての波高変化に関する計算値と実験値の比較結果を図-3 に示す。図-2 に示したケースも含まれている。入射有義波高はすべて 5.0 cm である。左段の図は入射角が 10° 、右段の図は入射角が 20° ケースであり、上から下に有義波周期が 0.89, 1.12, 1.34, 1.73, および 2.00 s となっている。○印が実験値であり、実線が計算結果を示している。これらの図より、左段の上から 4 番目のケースおよび右段の最上段のケースをのぞいて、実験結果と計算結果はかなり良く一致しているのがわかる。

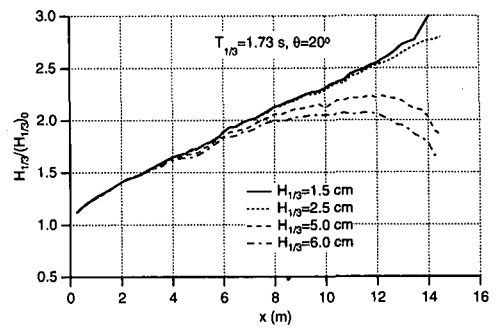
(2) ステム波の波高変化に及ぼす水深変化の影響

図-4 は直立壁に沿ってのステム波の波高変化を示したものであり、(a) 図は本研究で用いた実海域海底地形に対して計算した結果、(b) 図は水深を 30 cm と一定にした計算結果である。入射有義波周期は 1.73 s、入射角度は 20° とし、入射有義波高を 1.5 cm から 6.0 cm と変化した。(a) 図と (b) 図を比較することにより、ステム波の発達に対する水深変化の影響を見ることができる。 $x < 6$ m までは水深は 30 cm 以上となっており、波高変化の様子は (a) 図および (b) 図とも同じである。水深がより浅くなると浅海性の影響が現れてきて、入射有義波高が 1.5 cm および 2.5 cm と小さい場合には、波高の増加が継続する。入射有義波高が 5.0 cm および 6.0 cm と大きい場合には $x = 12$ m 付近で波高が最大値をとった後、減少していく。この波高減少は砕波による。このように水深変化がある場合のステム波の発達には、屈折、浅水変形、屈折・回折、砕波変形の影響が現れる。

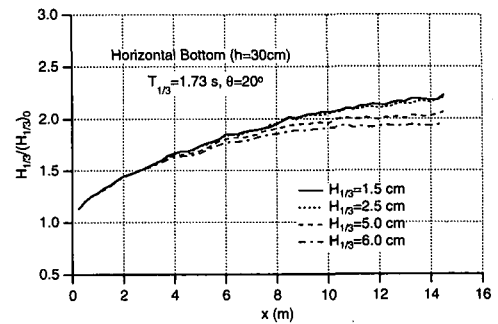
(3) ステム波の波高変化に及ぼす入射波の非線形性

式(1)から非線形項を除いた式を用いて計算を行った。これは各成分波に対して放物型波動方程式により振幅変化を計算し、それらの結果を加えあわせた線形解を求めたものである。それによる波高の計算結果を図-3 および図-4(a) と比較したところ、両者はほとんど同じであることがわかった。

入射有義波高を 5.0 cm、入射角を 20° とし、直立壁に沿った $x = 10$ m の地点において計算されたエネルギースペクトルおよび実験結果を図-5 に示す。破線が実験結果、実線が非線形項が入った計算結果、点線が線形の



(a) 実海底地形の場合



(b) 一様水深地形の場合

図-4 実海底地形および一様水深地形における直立壁に沿っての波高変化に及ぼす入射波高の影響

計算結果である。この図を見ると、実験結果は非線形計算結果と良く一致していることがわかる。線形計算結果は、入力したスペクトル形と相似形を保ったまま変化するのみである。

非線形理論を用いた計算結果では、低周波数成分と高周波数成分のエネルギー密度の増加が見られる。これは、長周期水位変動が生じるとともに、波の峰は尖り、谷は

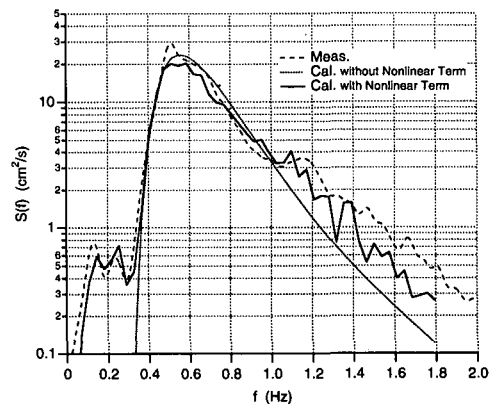


図-5 エネルギースペクトルの比較

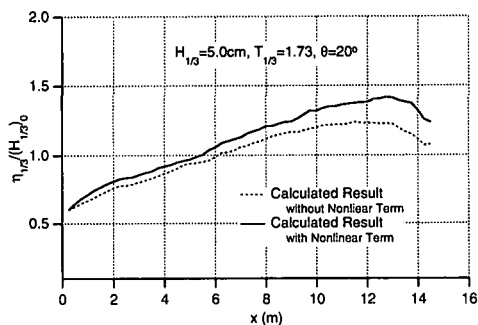


図-6 直立壁に沿った波峰高の変化

平たくなることを示している。しかし、ゼロアップクロス法により個々波を定義すると、尖った峰の分と浅くなった谷の分がキャンセルしあって、波高としては非線形効果が現れなくなる。したがって、線形理論を用いて計算した波高と、非線形理論を用いた波高の計算結果がほとんど変わらないことになる。

図-6は、直立壁に沿っての波峰高の変化を入射有義波高で無次元化してプロットしたものである。実線が非線形理論による計算結果、点線が線形の計算結果である。波高にはほとんど差はなかったが、この図によると x の増加につれて峰高の差が顕著になってくる。

5. あとがき

本研究は、実海底地形を対象として、水深変化の影響が含まれる不規則波のマッハ反射特性を、種々の条件を変化させて、主として数値シミュレーションによって調べたものである。また、水理実験の結果と数値シミュレーション結果を比較することによって、非線形波浪変形理論モデルの妥当性を検証した。本研究の主要な結論は、以下のとおりである。

(i) 水深が複雑な場においては、直立壁前面のステム波の発達に浅水変形、屈折、屈折・回折、碎波変形の影響が現れ、波高分布が複雑になる。ただし、直立壁に近い領域では、一様水深場と同様なステム波に特有な波高分布を示す。

(ii) 直立壁に沿ってのステム波の波高変化に関して、実験結果と非線形理論による計算結果と比較したところ、両者は良く一致することが確かめられた。理論式から非線形項を除いた線形理論による波高の計算結果は、非線形理論によるそれとほぼ同じであった。これは、ゼロアップクロス法により個々波を定義すると、尖った峰の分と浅くなった谷の分がキャンセルしあって、波高としては非線形効果は現れなくなることによる。

(iii) 波峰高に関しては、非線形計算結果と線形計算結果では、波の伝播距離の増加につれて差が顕著になる。また、エネルギースペクトルに関して、線形の計算結果は入力したスペクトル形と相似形を保ったままであるが、非線形計算結果は低周波数成分と高周波数成分のエネルギー密度の増加が見られる。

最後に本研究を行うに当たり、(財)鴻池奨学財団の補助を受けたことを付記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 間瀬 肇・北野利一・吉岡 洋 (1997): 不規則波のハイブリッド非線形平面変形モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 36-40.
- 間瀬 肇・目見田 哲・由比政年・高山知司 (1999): 不規則波のマッハ反射に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 26-30.
- 目見田 哲・酒井哲郎 (1999): 構造物沿いの斜め入射波の発達における入射波の非線形性および方向分散性の評価, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 226-230.
- Berger, U. and S. Kohlhase (1976): Mach-reflection as a diffraction problem, Proc. 15th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 796-814.
- Mase, H. and T. Kitano (2000): Spectrum-based prediction model for random wave transformation over arbitrary topography, Coastal Eng. Jour., JSCE, Vol. 42, No. 1, pp. 111-151.
- Perroud, P. H. (1957): The solitary wave reflection along a vertical breakwater for small angles of incidence, IER Tech. Report HEL 1-2, Univ. of California at Berkeley.
- Yoon, S. B. and P.L.-F. Liu (1989): Stem waves along breakwater, Jour. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 635-648.
- Wiegel, R. L. (1964): Water wave equivalent of Mach-reflection, Proc. 9th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 82-102.