

非定常緩勾配不規則波動方程式を用いた漁港内の静穏度解析

TRANQUILITY SIMULATION FOR FISHING PORT APPLYING TIME-DEPENDENT MILD SLOPE EQUATION FOR RANDOM WAVES

大場慶夫*・櫻庭雅明**・寺田俊朗*

Yoshio OHBA, Masaaki SAKURABA and Toshiro TERADA

This paper presents the application of a time-dependent, mild-slope equation for random waves to tranquility simulation for fishing port analysis. This model is able to analyze almost all wave deformation (shoaling, diffraction-refraction, reflection, breaking etc.) caused by multi-directional random waves. It can be used to calculate the wave deformations approximating real phenomena in ports and harbors with the complex shapes. As a practical application, the method was applied to the development of a maintenance plan for the fishing port. The method is also useful for the basic investigation of coastal sediment transport.

Key Words : mild-slope equation, numerical simulation, random waves, wave deformation, fishing port

1. はじめに

漁港および港湾の外郭施設の計画を行う上で、港内の静穏度を定量的に確認することは重要であり、港内静穏度を評価する手法としては、数値シミュレーションによる方法が一般的になってきている。

港内静穏度解析は、沖から来襲する波浪の波浪変形(屈折、回折、浅水変形、反射、砕波等)を解析し、港内の波高分布を計算するものである。近年の海岸および港湾工学の分野では、このような波浪現象を的確に表現することを目的とした波浪変形モデルの各種検討が行われ、より実現象に近い解析が可能となってきている¹⁾。

一方、漁港計画策定時の静穏度解析では、これまで漁港標準静穏度解析プログラム(非定常緩勾配方程式)を統一して使用していたが、次期長期計画策定時は波の屈折、回折、浅水変形、反射、砕波現象に加えて波の多方向不規則性を考慮して計算を行うことが必要条件となっている。

本報告では、上記の要件を満たす波浪変形モデルの一つである非定常緩勾配不規則波動方程式を漁港の静穏度解析に適用した例について述べる。非定常緩勾配不規則波動方程式は、従来の非定常緩勾配方程式が規則波を対象としたものであるのに対し、不規則波の波浪変形を成分波に分解せず、直接計算することができるように緩勾配方程式から誘導された方程式であり、複雑な港形を有する漁港および港湾施設においても、より実現象に近い波浪変形解析が可

能である。また、このモデルは港内静穏度解析のみならず、海岸における漂砂特性把握のための基礎調査などにも有効な手法である。

2. 静穏度解析の概要

(1) 静穏度解析モデル

波は浅海域に進入すると地形(水深変化)や構造物などの影響を受けて変形する。図-1は浅海域における波浪変形の諸要素を模式的に示したものである。波浪変形の現象としては、地形変化による浅水変形・屈折・砕波、構造物による反射・回折・透過があげられる。港内静穏度解析は、これらの波浪変形を解析し、港内における波高分布を計算するものである。

現在用いられている波浪変形の解析モデルの代表例とその適用範囲を表-1に示す²⁾。これらのうち、静穏度解析に用

浅海域における波浪変形

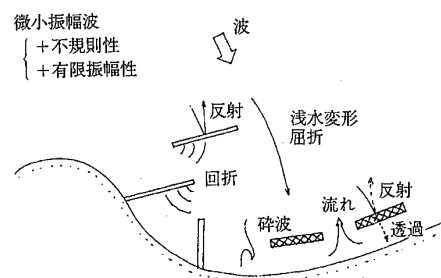


図-1 浅海域における波浪変形の諸要素

* 首都圏事業部 交通運輸部

** 首都圏事業部 統合情報技術部

表 1 モデル方程式の適用範囲(文献 2)を一部修正)

計算手法	浅水変形	屈折	回折	反射	砕波モデル	任意水深	流れの影響	不規則性	有限振幅性	計算領域			備考
										広	中	狭	
波向線法	◎	◎	×		◎	○	○	△	○	○	○	○	波速に有限振幅性を含める
材料平衡方程式	◎	◎	○	△	◎	○	◎	×	◎	○	○	○	回折考慮型もある
ベルトラ方程式	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×				領域ごとに一様水深のみ
簡便法			◎	◎	×	◎	×	◎	×			○	一様水深のみ
緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	△				○	
非定常緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×			○	砕波モデル・境界条件処理が容易
数値波動解析法	○	◎	◎	◎	◎				×			○	
非定常緩勾配不規則波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×			○	
放物型波動方程式	◎	◎	◎	△	○	◎	○	△		○	○		
非線形長波方程式	◎	◎	◎	◎	○	×	◎	◎				○	鉛直加速度が無視される浅海域に限定される
ガリソ方程式	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎			○	
強非線形・強分散性の緩勾配波動方程式	◎	◎	◎	◎	◎		◎	◎	◎			○	

(注 1) ◎: 基本型で適用可能, ○: 応用形で一般的適用可能, △: 応用形で部分的適用可能,

▽: 基本理論では考慮されていないが実用上適用可能,

空白: 研究により適用できる可能性あり, ×: 適用不可能

(注 2) 計算領域=広: 深海から浅海を含む程度, 中: 構造物周辺の海域程度, 狭: 港内程度

いられる代表的なモデルとしては、高山の方法、非定常緩勾配方程式、非定常緩勾配不規則波動方程式がある。以下にこれらについての概要を示す。なお、今回適用した非定常緩勾配不規則波動方程式については次節に詳細を示す。

1) 高山の方法

高山の方法³⁾は、成分規則波の計算を半無限防波堤と島堤による回折波の重ね合わせとして近似的に表現し、不規則波に対する港内の波高分布を求める方法である。

この方法は、港内の水深が一様で、著しい多重反射が起きない場合に適している。

2) 非定常緩勾配方程式

非定常緩勾配方程式^{4),5)}は、屈折と回折を同時に解析することができる緩勾配方程式に時間項を導入し、開境界条件や砕波減衰を取り扱いやすくしたものである。この方程式は第 9 次漁港計画策定時における静穏度解析の標準プログラムとして用いられていた手法であり、規則波に対するほとんどの波浪変形を考慮することができる。なお、不規則波に対しては、成分規則波の計算を重ね合わせることで計算が可能である⁶⁾。

3) 非定常緩勾配不規則波動方程式

非定常緩勾配不規則波動方程式⁷⁾は緩勾配方程式の不規則波への拡張における計算時間の問題や砕波モデルの組み込みの問題を解決するために導かれたモデルであり、浅水変形、屈折、回折、反射、砕波等、波浪変形のほとんどの現象を再現することができる解析モデルである。詳細については次節に示す。

(2) 漁港内の静穏度解析

従来(第 9 次漁港計画策定時)の漁港内の静穏度解析は、同一の尺度で安全係船岸充足率を算定するために、原則として漁港標準静穏度解析プログラムを統一して使用していた。なお、この静穏度解析モデルは非定常緩勾配方程式で、規則波(単一周期、単一方向の波浪)の検討であった。

しかしながら、現実の波浪は様々な方向からの周期が短い波から長い波まで入り混じった不規則波である。従来までは不規則波を単一周期の仮想的な波浪(いわゆる有義波)で代表させていた。この手法はあくまで仮定に基づいた方法であり、物理的に実際の状況を反映しているとは言い難い。

以上の状況と近年のコンピュータ性能の向上に伴って、不規則波をそのまま扱える静穏度解析手法が普及し、現在(次期長期計画策定時)の漁港内の静穏度解析は、波の屈折、回折、浅水変形、反射、砕波現象に加えて、波の多方向不規則性を考慮して計算を行うことが必要条件となっている。以下に、水産基盤整備の次期長期計画の策定における基本的な考え方の一部を示す。

- 大多数の漁港は水深 5~6m 以浅の水深帯に立地しており、砕波帯内となることが多いため、砕波が生じる可能性がある波浪で計算を行う際は、砕波現象を取り扱うこと。
- 水深の変化により浅水変形や屈折が生じるので、これらを取り扱うこと。
- 防波堤や物揚場といった構造物によって、反射や回折が生じるので、これらを取り扱うこと。
- うねり性の波浪などで多方向性が極めて小さく、1方向での取り扱いでも支障がないと判断できる場合を除いては、波の多方向性の影響を考慮すること。
- 実海域の波浪は不規則な波であるため、不規則波として取り扱うこと。

先述の波浪変形モデル(表 1 参照)のうち、これらの要件を満たすモデルとしては、

- ① 従来の緩勾配方程式(1方向規則波)の計算結果を成分波重ね合わせ法により、多方向不規則波を再現する方法。
- ② 多方向不規則波の波形を直接造波境界で与えて、この波形の伝播・変形過程を時系列的に計算する方法。

がある。

①の成分波重ね合わせ法とは、不規則波を方向別、周期別、波高別の成分波に分け、成分波毎に従来の規則波の計算をして、エネルギー的に重ね合わせることで、多方向不規則波を再現する方法である。②の方法としては、非定常緩勾配不規則波動方程式や Boussinesq 方程式がある。

本報告では、②の方法のうち静穏度解析のような短周期波に対する適用例が多い非定常緩勾配不規則波動方程式を漁港内の静穏度解析に適用した。

3. 非定常緩勾配不規則波動方程式

(1) 概要

非定常緩勾配不規則波動方程式は、不規則波の波浪変形を成分波に分解せず、直接計算することができるように緩勾配方程式から誘導された方程式である。

従来の緩勾配方程式には微小振幅波における周期と水深の関係である波速・群速度が含まれるため、成分波に分解して計算せざるを得ないので、不規則波を時系列的に取り扱うことができなかった。非定常緩勾配不規則波動方程式は、波速・群速度を近似式で表すことにより、直接不規則波の時系列波形を扱うことを可能にしたものである。

この近似係数が一次の場合、適用できる不規則波の周波数範囲が近似の中心となる代表周波数近傍の狭い範囲に限られるため、変数および近似係数の取り扱いについての研究がなされてきた。本報告では、近似係数の精度を高め、より広い範囲の周波数の波を再現することを可能とした石井らのモデル⁸⁾を用いた。

(2) 非定常緩勾配不規則波動方程式の誘導

Berkhoff による緩勾配方程式は(1)式に示すとおりである。

$$\frac{1}{\sqrt{(cc_g)_m}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\sqrt{(cc_g)_m}} \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) + k^2 (12 if_D) cc_g \xi = 0 \quad (1)$$

ここに、 c : 波速、 c_g : 群速度、 k : 波数、 ξ : 複素水面変動である。

(1)式に(2)式の Radder 変換式を適用し、(3)式の Helmholtz 型方程式へ変換する。なお、ここでは砕波によるエネルギー減衰を考慮している。

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{(cc_g)_m}} \hat{\lambda}_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{\lambda}_m}{\partial t^2} + 2k_m^2 (12 if_D) \hat{\lambda}_m = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\hat{\lambda}_m$: ξ の Radder 変換後の係数、 f_D : 砕波によるエネルギー減衰係数、添字 m は成分波を表す。

(2)、(3)式に含まれる係数は、角周波数により変化するため直接 $\hat{\lambda}$ を求めることができない。そこで、以下に示すように、角周波数によらない係数を用いて、 $1/\sqrt{(cc_g)_m}$ 、 k_m^2 を 2 次式および有理式で近似する。

$$\frac{1}{\sqrt{(cc_g)_m}} = d_0 + 2d_1 \bar{\omega}_m + 2d_2 \bar{\omega}_m^2 \quad (4)$$

$$k_m^2 = \frac{b_0 + 2b_1 \bar{\omega}_m + 2b_2 \bar{\omega}_m^2}{14a_1 \bar{\omega}_m} \quad (5)$$

$$\bar{\omega}_m = \frac{\omega_m}{\bar{\omega}} \quad (6)$$

ここに、 ω : 成分波の角周波数、 $\bar{\omega}$: 代表角周波数である。

これらを(2)、(3)式に代入し、周期関数からの変分(7)を変数とする。

$$\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda} e^{4i\bar{\omega}_m t} \quad (7)$$

以上より、最終的に用いる有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式が導かれる。

$$\xi = d_0 \tilde{\lambda} + 2id_1 \frac{\epsilon \tilde{\lambda}}{\epsilon t} + 4d_2 \frac{\epsilon^2 \tilde{\lambda}}{\epsilon^2 t^2} \quad (8)$$

$$\left[\frac{\epsilon^2 \tilde{\lambda}}{\epsilon x^2} + 2 \frac{\epsilon^2 \tilde{\lambda}}{\epsilon y^2} + 4ia_1 \frac{\epsilon^3 \tilde{\lambda}}{\epsilon x^2 \epsilon t} + 2 \frac{\epsilon^3 \tilde{\lambda}}{\epsilon y^2 \epsilon t} \right] - 2/b_0 + 2ic_0 \tilde{\lambda} + 2i/b_1 + 2ic_1 \tilde{\lambda} + 4b_2 \frac{\epsilon^2 \tilde{\lambda}}{\epsilon^2 t^2} = 0 \quad (9)$$

ここに、

$$\begin{aligned} c_0 &= \bar{k}^2 f_D \\ c_1 &= \left[\frac{8b_2}{14b_1} \right] c_0 \end{aligned} \quad (10)$$

である。

(3) 境界条件

入射境界条件は境界線入射法⁹⁾を用いる。境界線入射法とは、図-2に示すように、計算領域内に入射位置とする境界線を設定し、その内側では入射波と放出波の共存場、外側では放出波のみとなるように、数値計算時に、境界を挟む計算格子点を中心とする差分式に入射波項 ξ_{in} を加えたり、差し引いたりする操作を行い、入射波項を差分式中に導入し、入射を行う方法である。

また、開境界条件は解析の対象とする領域の外側にエネルギー吸収帯を設け、波浪エネルギーを減衰させ、エネルギー吸収帯の外側端では完全反射境界条件とした。

入射波の周波数スペクトルには(11)式に示す「合田修正版 Bretschneider—光易型」を用いる。

$$S(f) = aH_{1/3}^2 T_{1/3}^{44} f^{45} \exp(4bT_{1/3}^{44} f^{44}) \quad (11)$$

ここに、 $a = 0.205, b = 0.75$ である。また、スペクトルの分割にはエネルギー分割法を用いる。周波数スペクトルの全エネルギー m_0 を M 個の成分波に分けると、各成分波の振幅 A_k ($k = 1, 2, \dots, M$) は、(12)式のとおりである。

$$A_k = \sqrt{\frac{2m_0}{M}} \sqrt{\frac{a}{2bM}} H_{1/3} \quad (12)$$

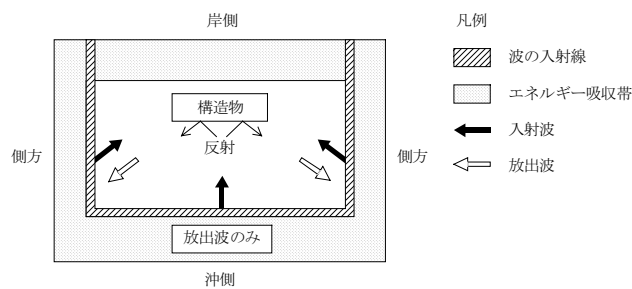


図-2 境界線入射法の概念図

(4) 基礎方程式の離散化

(9)式の離散定式化には、高速に、安定よく、しかもある程度の精度を確保して解くために、ADI 法 (Alternating Direction Implicit method)を用いる⁹⁾。ADI 法は、 x または y 方向の一直線上の格子点の値について連立方程式を解き、各時刻ステップごとに交互に x 、 y の方向を変えて計算を行うものである。

(5) 計算手順

図-3 に非定常緩勾配不規則波動方程式による静穏度解析の計算フローを示す。

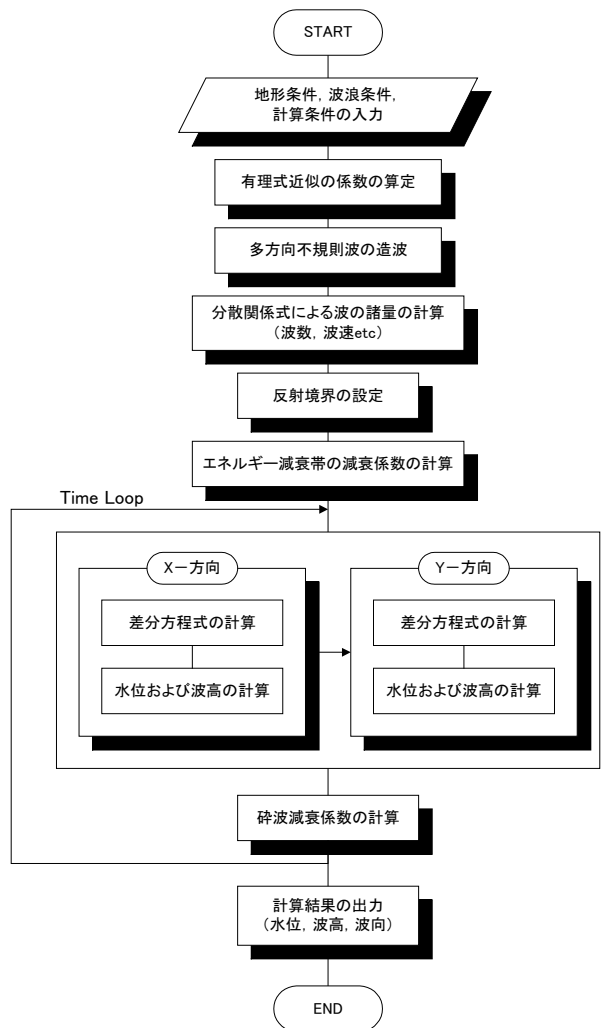


図-3 計算フロー図

4. 適用例

非定常緩勾配不規則波動方程式の適用具体例として、漁港の静穏度解析の検討内容を示す。

検討内容は、次期(第 10 次)漁港整備計画の策定にあたり、今後の漁港施設などの整備について対象漁港の現状港形および漁港整備計画の提案港形の港内静穏度解析を行い、所要の静穏度を満足するような最適な港形(最終港形)を決定したものである。図-4 に対象漁港の次期計画港形および地形条件を示す。なお、図-4 中の斜線は次期整備計画である。

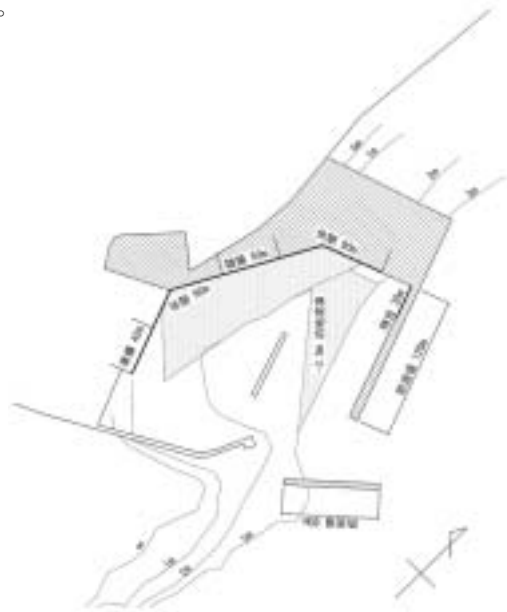


図-4 対象漁港の次期計画港形

(1) 検討条件

1) 地形条件

対象漁港の整備計画平面図より地形条件および港形データを読みとりメッシュデータの作成を行った。メッシュ間隔は計算対象波浪を再現できるように 1m (対象波浪の波長の 1/5～1/15 程度)とした。計算に用いた解析メッシュ図(次期計画港形)を図-5 に示す。なお、計算格子はエネルギー吸収帯を含め x 、 y 方向それぞれ 450×500 分割としている。

2) 波浪条件

対象波浪としては、①平時波浪(出漁限界波浪)、②暴風時波浪(1年確率波浪)を用いた。対象漁港での波浪は湾内波であるため、風速は、平時波浪については漁港利用者のヒアリング等により、暴風時波浪については既存資料「太平洋中北部海域(宮城、福島、茨城)沖波推算調査報告書」の確率風速算定図より設定した。これらの風速から SMB 法により対象漁港の沖波を推算した。以上より設定した沖波諸元から、港内静穏度の対象波浪(換算沖波)を算定した結果を表-2 に示す。

表-4 利用限界波高

施設の 利用目的	対象波浪	施設の水深	利用限界 波高
陸揚・準備	出漁限界波浪 (平時)	-3.0m 未満	0.30m
		-3.0m 以上	0.40m
休けい	1 年確率波浪 (暴風時)	-3.0m 未満	0.40m
		-3.0m 以上	0.50m



図-5 解析メッシュ図(次期計画港形)

表-2 波浪条件

	現状港形		次期計画港形	
	平時	暴風時	平時	暴風時
波高(m)	0.3	0.5	0.5	0.9
周期(sec)	1.6	2.0	2.5	3.0
波向	N45°	N45°	N112.5°	N112.5°
SMAX	10	10	10	10

3) 反射率条件

構造物による波の反射率は「漁港の技術指針 1999 年版 社団法人 全国漁港協会」の値を参考に、表-3 のように設定した。

表-3 反射率条件

構 造 様 式	反射率
直立壁	0.9
異形消波ブロック斜面	0.4
直立消波構造物	0.5
船揚場	0.2
岩礁域(きりたっている)	0.6

4) 利用限界波高

係留施設・水域施設の利用限界波高については、「漁港計画の手引き;平成 4 年度改訂版 社団法人 全国漁港協会」に基づき、表-4 のように設定した。

(2) 解析結果

解析結果として、現状の港形に対する平時波浪の計算結果を図-6 に、次期計画港形に対する暴風時波浪の計算結果を図-7 に示す。

解析結果に見られるように、来襲波による防波堤での反射、回折、港内での浅水変形、砕波による波高の減少などの波浪変形現象が再現されており、当モデルがほとんどの波浪現象を詳細に表現できることがわかる。また、単一方向規則波での静穏度解析では、入射波と反射波の重なりによる波高値の上下(波の山と谷の影響)がみられるが、当モデルの計算結果では、波高値が全体的に平均化されており、多方向不規則波の影響が表れているのがわかる。

現況の港形では平時の条件で対象施設(陸揚 83m)前面の波高が限界波高 0.3m を超過し、所要の静穏度が確保されていない結果となった。また、次期計画港形(港口沖に延長 80m および港東側に延長 120m の防波堤整備)でも、暴風時の条件で対象施設(休憩 90m)前面の波高が限界波高 0.4m を超過し、所要の静穏度が確保されてない結果となった。そこで、沖の防波堤の西側を 10m 延伸して再度検討を

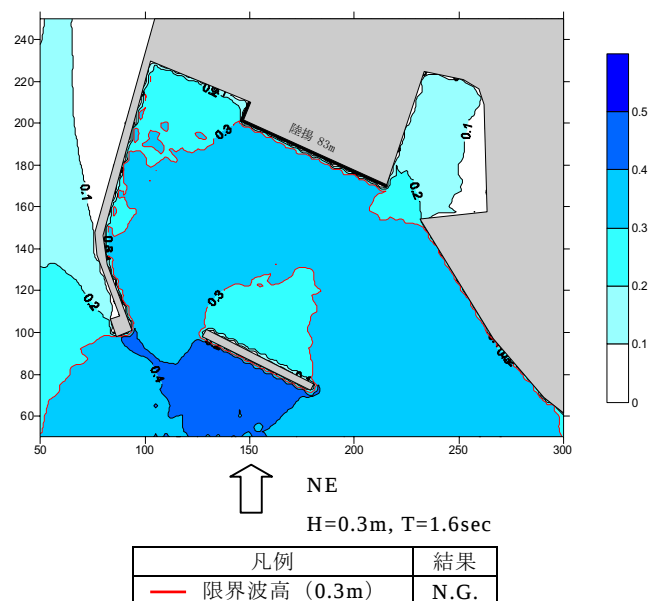
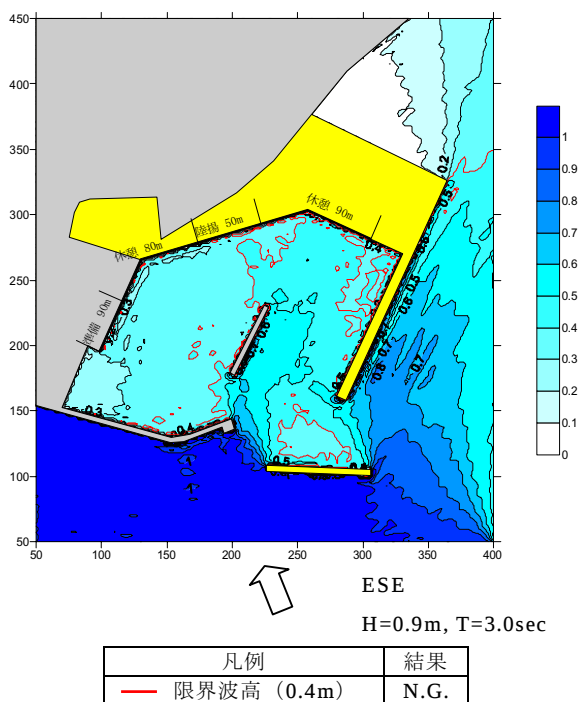
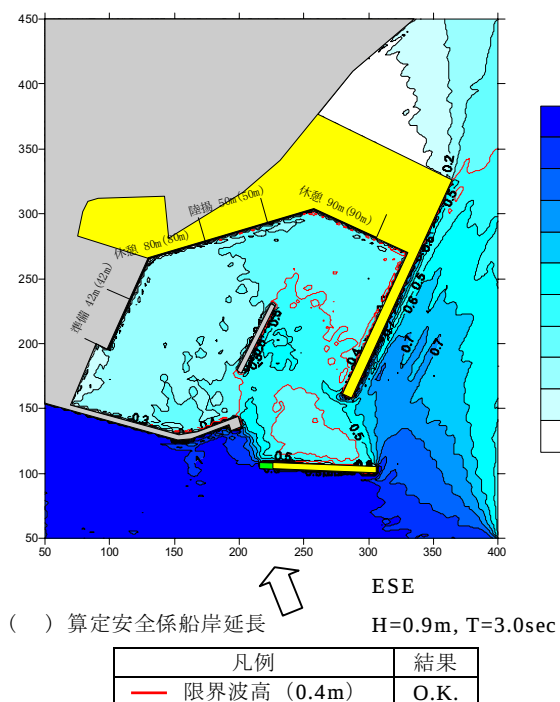


図-6 波高分布計算結果(現況港形、平時波浪)



図一七 波高分布計算結果(次期計画港形、暴風時波浪)



図一八 波高分布計算結果(最終港形、暴風時波浪)

行った。その結果を図一八に示す。これにより、対象施設(休憩 90m)前面は限界波高 0.4m 以下となり、所要の静穏を確保することができるので、これを最終港形とした。また、決定した最終港形に対し、安全係船岸延長を算定した。図一八には計画延長とともに算定した安全係船岸延長を示す。

5. おわりに

多方向不規則波に対する各々の波浪変形現象(屈折、回折、浅水変形、反射、砕波等)を考慮した解析が行える波浪変形モデルである非定常緩勾配不規則波動方程式を港内静穏度解析に適用した。

以下に、本検討における結論を示す。

- ① 非定常緩勾配不規則波動方程式は、多方向不規則波に対するほとんどの波浪変形現象を詳細に解析することができるモデルであり、複雑な港形を有する漁港内の波高分布を再現・予測することができた。
- ② 多方向不規則波の静穏度解析では、従来の単一方向規則波を外力とした場合に発生する波高値の上下(波の山と谷の影響)が現れず、実際の現象に近い波浪場の再現が可能である。

今後は、本手法を防波堤での越波現象の取り扱いの改良を行う等、より多くの現象を取り扱えるモデルにしたいと考えている。また、Boussinesq 方程式などの波の有限振幅性を考慮することができるモデルの検討を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 榎木亨 監修:環境圏の新しい海岸工学、フジ・テクノシステム、pp.387-402、1999
- 2) 土木学会 編:海岸波動、一波・構造物・地盤の相互作用の解析法一、1994
- 3) 高山知司: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、140p、1981
- 4) 本間仁 監修:海岸環境工学、東京大学出版社、1985
- 5) 渡辺晃、丸山康樹:屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法、海岸工学論文集、第 31 巻、pp.125-149、1984
- 6) 渡辺晃、磯部雅彦、泉宮尊司、中野英樹:非定常緩勾配方程式による不規則波の浅水砕波変形の解析、海岸工学論文集、第 35 巻、pp.173-177、1988
- 7) 磯部雅彦:有理式近似に基づく非定常緩勾配不規則波動方程式、海岸工学論文集、第 40 巻、pp.26-30、1993
- 8) 石井敏雅、磯部雅彦、渡辺晃:有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた平面 2 次元波浪場解析、海岸工学論文集、第 41 巻、pp.6-10、1994
- 9) 石井敏雅、磯部雅彦、渡辺晃:非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み、海岸工学論文集、第 40 巻、pp.31-35、1993