

# 数値波高シミュレーションの実用化について

山本隆一\*・横田基紀\*・滑川伸孝\*

**要旨** 海岸において、あるかこまれた海域における波高の変化を Green 関数を用いて解く方法は、以前から提案されていたが、それを今回大型電子計算により、実際の港湾の静穏度を求める方法として実用化できたので、ここに報告する。

## 1. 緒言

高度経済成長の波によって来たわが国における港湾建設は、今まで機能面での効果追求に終始していたきらいがあるが、最近港湾における欠陥が種々指摘されるようになった。その一つに安全性がある。港湾における安全性には、防災上、航行上、荷役、停泊等多岐にわたるが、共通していえることは、所定の静穏度が確保されているか、という点がある。

港湾における静穏度を予測する方法として、水理模型実験が行われて来たが、これと並行して、微小振幅波の回折理論による数値解析が進められている。数値解析では以前から単純な境界形状の半無限堤<sup>1)</sup>(1895)、開口部<sup>2)</sup>(1951)、島堤<sup>3)</sup>(1971)、防波堤の隅角部<sup>4)</sup>(1967)について解かれており、最近に至っては、コンピュータの急速な発展に伴って、任意の港湾形状について解析されるようになった。任意の港湾形状の波高変化を解析する方法として次のものがある。

### (1) 簡略法(合田の折返し図法)

単純な境界形状の解析解をもとに反射されてくる波動の部分を修正し、港湾の静穏度を計算するものである。

### (2) 波動の基礎方程式を直接解く方法(数値波動解析)

波動の基礎方程式を差分近似して解く差分法<sup>5),6)</sup>(1971)、(1972)と、有限要素法<sup>7)</sup>(1973)とがあるが大容量の大型計算機が必要であり広い海域の港湾に適用する場合には困難である。

### (3) Green 関数を用いる方法

Green 関数を用いる方法は、境界値の求め方により種々あるが、Lee, Jiin Jen<sup>8)</sup>(1970)の方法では海岸線が一直線で、完全反射のケースしか解析できず、井島の方法<sup>9)</sup>(1973)では、これらの点が克服され、透過防波堤に拡張

されてはいるものの水深変化の問題が考慮できない。

さて、フランスでは、1961年に半平面の Green 関数を用いて任意形状の港内の波高分布を求める方法が開発され<sup>10)</sup>、1967年に水深変化の問題に拡張された<sup>11)</sup>。

現段階では、この方法が最も実用的であると考えられるので、筆者らは最近の透過防波堤にも適用しうるように拡張し、数値波高シミュレーションと称して実用化するに至った。

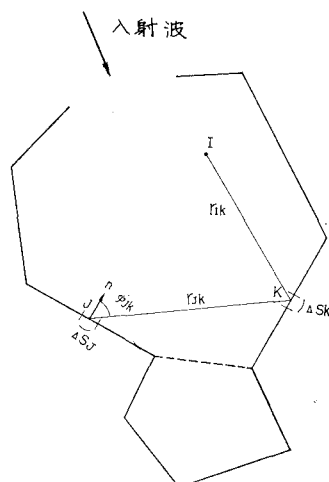
## 2. 基礎方程式と境界条件

この方法の特長は、港内を凸形の領域に分割し、おのこの領域に進入してくる波と、出ていく波に仮想的に分解し、各境界要素をいわば防波堤開口部のように考えていることである。この考え方は、従来の折り返し図法と同じであり、幾何学的な同図法を半平面の Green 関数を用いて、数値化したものと考えることができる。この方法は、文献 11) に詳述されているので、基本式と境界条件を水深が一定の場合を例にとって簡単に説明するにとどめる。

微小振幅波理論によれば、周期  $T$  の波が港内に侵入した場合、水位は次式のように示すことができる。

$$\eta(x, y, t) = \zeta(x, y) \cdot e^{-ikt} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $k = 2\pi/L$ ,  $i = \sqrt{-1}$



図一 数値波高シミュレーションモデル

\* 正会員 日本港湾コンサルタント(株)システム開発室

図-1のように、海域を凸形状に分割すると港内の任意点  $I$  の時間項をのぞいた水位、 $\zeta_I(x, y)$  は、港内に侵入してくる波の境界に対する法線方向の水位勾配を  $\partial\zeta/\partial n$  とすれば Green 関数の性質により、次式のように示すことができる。

$$\zeta_I = \sum_{K=1}^N S_{IK} \left( \frac{\partial\zeta}{\partial n} \right)_K \dots\dots\dots (2)$$

また、境界値は次式で求める。ここに  $(\partial\zeta^*/\partial n)_J$  は、考えている領域から出ていく波の境界上の点  $J$  における水位勾配である。

$$\left( \frac{\partial\zeta^*}{\partial n} \right)_J = \sum_{K=1}^N R_{JK} \left( \frac{\partial\zeta}{\partial n} \right)_K \dots\dots\dots (3)$$

境界条件は次式に示すとおりである。

- i) 入射部 (造波板) においては沖波の値
- ii) 防波堤、護岸などの構造物においては、構造物の反射率を  $K_r$  とすると、 $\frac{\partial\zeta}{\partial n} = -K_r \frac{\partial\zeta^*}{\partial n}$
- iii) 各ブロックの共通な仮想境界においては、 $\frac{\partial\zeta}{\partial n} = -\frac{\partial\zeta^*}{\partial n}$
- iv) 透過性構造物においては、透過率を  $K_T$  とすると、 $\frac{\partial\zeta}{\partial n} = -K_T \frac{\partial\zeta^*}{\partial n}$

式 (3) と境界条件 i), ii), iii), iv) により反復法で各境界要素の  $\partial\zeta/\partial n$  を求め、式 (2) で各点の波高を求めらる。

水深が変化する Green 関数は非常に複雑になるが、もし水深が一定であれば、Green 関数は円筒波、即ち Hankel 関数で示され、 $S_{IK}, R_{JK}$  は次式のようになる。

$$S_{IK} = \begin{cases} -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(k\gamma_{IK}) \Delta S_K \dots\dots \gamma_{IK} \neq 0 \\ -\frac{i}{k} \bar{P} \left( \frac{k\Delta S_K}{2} \right) \dots\dots \gamma_{IK} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{P}(x) = \int_0^x H_0^{(1)}(u) du$$

$$R_{JK} = \begin{cases} -\frac{ik}{2} H_1^{(1)}(k\gamma_{JK}) \cdot \cos \phi_{JK} \cdot \Delta S_K \dots\dots J \neq K \\ 0 \dots\dots J = K \end{cases}$$

- ここに、
- $n$ : 境界に対する内側方向の法線
- $N$ : 境界の要素数
- $H_0^{(1)}(x)$ : 0 次の第1種 Hankel 関数
- $H_1^{(1)}(x)$ : 1 次の第1種 Hankel 関数
- $\gamma_{IK}$ : 点  $I$  と  $K$  の間の距離
- $\gamma_{JK}$ : 点  $J$  と  $K$  の間の距離
- $\Delta S_K$ : 点  $K$  を含む境界要素長、ただし波長  $L$  に比し十分小さくする
- $\phi_{JK}$ : 点  $J$  を含む境界線の法線と、点  $J, K$  を結ぶ線となす角

### 3. 数値波高シミュレーション

水理模型実験ならびに、現地観測との比較により、数値波高シミュレーションの精度の検証を行った。水理模型実験結果としては第二港湾建設局の委託で日本港湾コンサルタントが行った鹿島工業港の実験値、現地記録としては、東京電力で観測を行った福島原子力発電所専用港の実測値を用いた。模型実験との比較の場合は、実験に対応して単一波のシミュレーションを行った。しかし、現地の波は不規則波であり、開口部を有する福島港では、波向の不規則性による影響が大であると考えられるので、線型重ね合わせにより方向不規則性を考慮したシミュレーションを行った。なお両港の位置図を図-2に示す。

#### (1) 単一波によるシミュレーション (水理模型実験との比較)

数値波高シミュレーションの精度についてはすでに、Barailler, L. Gaillard, D.<sup>1)</sup> が水理模型実験と比較し、検証を行っているが、筆者らも多くの水理模型実験値と比較し、両結果がほとんど一致するという結論をえた。その一例として鹿島工業港のシミュレーションを示す。このときの沖波の諸元は、波高 6 m、周期 14 秒、波向 NE であるので、周期、波向を同一とし、反射率を波形勾配に対応するように、直立護岸で 80%、消波工護岸で 30% とした。各境界要素は 1/8 波長に分割し、波高は 100 m 間隔の格子点の値を求めた。このようにして求めた値をもとに等波高比線をひき、水理模型実験結果と比較したのが図-3である。両結果を比較すると、シ

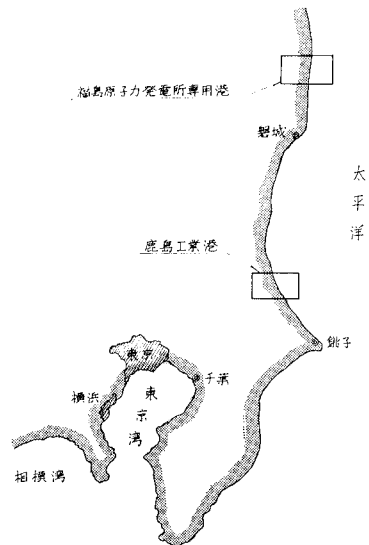


図-2 鹿島工業港と福島原子力発電所専用港の位置

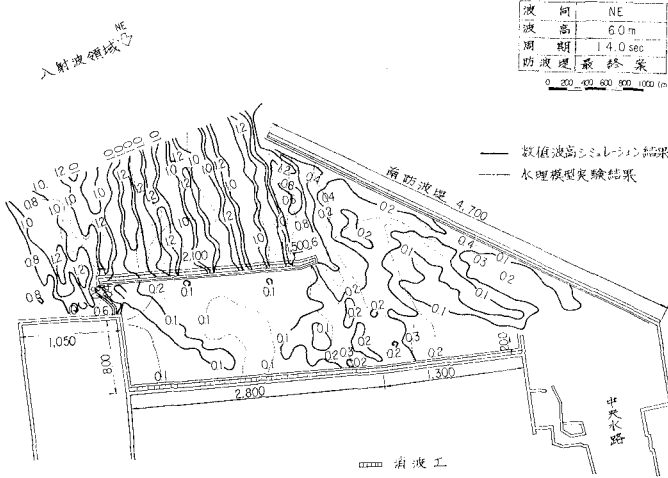


図-3 単一波による数値波高シミュレーション (水理模型実験との比較)

点  $P$  に水圧式波高計が設置され沖波が観測されている。港内には波高計は設置されていないが、昭和44年10月23日、昭和45年9月27日、昭和45年9月28日の3日間には、トランシットにより20数点(図中の○印)の波高の観測を行った記録がある。波向に関しては図-4の波向観測小屋でトランシットにより港の沖合2km地点の波向を波高観測時と同時刻に計測している。これらの観測は厳密には同時観測でなく、1時間ないしは1時間半の観測時刻のずれがある。各ケースの沖波の諸元と潮位、波高観測開始時刻を表-1に示す。表によれば時間のずれはあっても、波向は $5^\circ$ 、有義波周期は1秒以内であり、有義波波高は若干変動はあるが港内の測点の波高比は同時

刻の沖波の波高に対する比で表わすから、ほぼ定常状態と仮定した解析と比較しうると考えられる。厳密に言えば、点  $P$  の波高をもって沖波波高とすることには問題があるが、波と港湾形状から、港湾による反射、回折ならびに屈折の影響が少ないと考えられるので、沖波と近似しうるとした。

(2) 方向の不規則性を考慮したシミュレーション (現地観測との比較)

港内の波高分布については、数値解析結果と水理模型実験結果を比較した例は多いが、現地の観測記録と比較検討した例はきわめて少ない。このことの原因は、現地の波は不規則波であり、代表的な波向と周期で表わされる単一波による水理模型実験結果や計算結果と同一次元で比較することに無理があること、ならびに現地での観測記録が少ないためである。さいわい、福島原子力発電所専用港において、港内外に20数点の観測記録を得たので、観測時の静穏度の推定を数値波高シミュレーションで行い、観測記録と比較してみた。

a) 現地の観測記録

図-4に示す、福島原子力発電所専用港では、港外の

b) 数値波高シミュレーションの境界条件

前述の3ケースのシミュレーションを行った。境界形状はなるべく現地の形状にそった形にし、沖波の諸元と潮位は表-1の代表的な値もしくは平均値を用い表-2

表-1 沖波の諸元と潮位、波高観測開始時刻

観測日時	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	波向	潮位 (m)	観測開始時刻
S44.10.23	2.09	13.8	$80^\circ 03'$	+0.78	10:36
	2.12	13.0	$77^\circ 00'$	+0.87	11:02
	2.11	13.3	$74^\circ 58'$	+0.95	11:28
S45.9.27	1.09	11.7	$83^\circ 00'$	+1.20	14:14
	0.98	11.7		+1.22	14:35
	0.90	11.0	$85^\circ 40'$	+1.23	15:01
	0.91	11.6		+1.20	15:27
S45.9.28	1.99	11.70	$85^\circ 40'$	+1.17	13:58
	1.70	11.65	$85^\circ 40'$	+1.15	14:11
	1.92	11.75	$87^\circ 35'$	+1.20	14:26
	1.57	11.90	$88^\circ 25'$	+1.22	14:39
	1.81	11.85	$87^\circ 15'$	+1.20	14:55
	2.04	12.5	$87^\circ 30'$	+1.21	15:08
	1.59	12.0	$87^\circ 30'$	+1.23	15:23
	1.78	12.25	$87^\circ 50'$	+1.21	15:36

表-2 シミュレーションの沖波の諸元と潮位

ケース	周期 (sec)	波向	潮位 (m)
S44.10.23	13.0	$77^\circ 00'$	+0.9
S45.9.27	11.7	$84^\circ 20'$	+1.2
S45.9.28	12.0	$87^\circ 30'$	+1.2

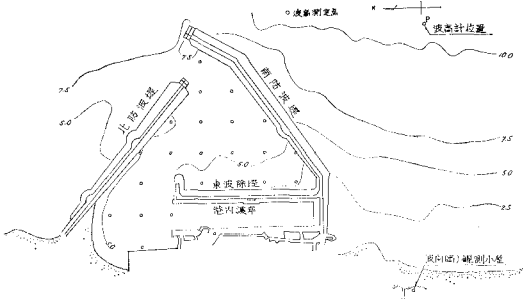


図-4 福島原子力発電所専用港

のようにした。港の形状から港内波の大部分が開口部(100m)から侵入すると考えられるので、波向の要因が大きいと思われる。そこで波向の不規則性については、方向スペクトルを  $\cos^2\theta$  と仮定し5成分波に分割して考慮した。分割方法は各成分波が等エネルギーになるように分割し、各成分波の波向は分割要素のエネルギーを2等分する値とした。周期の不規則性については、影響が少ないと考え考慮しなかった。防波堤の大部分が捨石ブロック堤であり、波浪の港内への透過は無視できないので、これらの防波堤には実験により求められた透過率<sup>12)</sup>

を参考にしておのおののケースの条件に対応する透過率(10%~40%)を仮定して透過波を考慮した。また反射率は波形勾配を考慮して、直立護岸では90%、消波工が設置されているところでは沖波が直接入射する部分では40%、港内では60~70%程度としている。また自然海岸では反射率を0~10%とした。このような境界条件のもとに前回と同様に境界要素を1/8波長にして、20m間隔の格子点の波高分布を求めた。また、時間的なずれやその他のことがらを考慮して、観測点に対応する点を頂点とする20mの正方形(計4個)の格子点の値を相加平均した値をもって観測点の推定値とした。これらのシミュレーションによる推定値を上段に、実測値を下段に示したのが図-5(1)~(3)である。両数値を比較すると、例外的な2,3点をのぞけばほぼ良くあっているといえる。

4. 今後の問題点

数値解析により静穏度を予測する場合の問題点として、反射率・透過率をどうみつめるかということがある。反射率に関する実験は非常に多いが、港内に侵入して減衰し、波形勾配がきわめて小さくなったケースについての実験値が非常に少ない。透過率についても同じことがいえる。今後は種々の勾配、材質、構造様式の港内の反射率をみつめるのに必要な波高、波形勾配の小さいケースの実験も必要であろう。同じようなことは水理模型実験においても指摘される。具体的には模型の縮小率が大きくなった場合、反射率、透過率に関係してくる防波堤、護岸、消波工の材質、構造様式などすべての相似律を満たすことが困難になってくることである。また従来の港内静穏度予測は、一つの周期と波向を有する単一波を沖波としてとり扱ってきたが、現地の波は不規則波であり、今後、現地の波に対応した不規則波による静穏度予測が必要になってくると考えられる。そのためには現地の不規則波の性質を前もって知っておく必要があり、周波数スペクトル、方向スペクトルの実測データの集積と解析が今後必要であろう。今回は福島港の沖波の方向スペクトルを  $\cos^2\theta$  と仮定してシミュレーションを行ったが、実測により求めたスペクトルよりシミュレーションを行い、実測値と比較し検討しておく必要がある。

5. 結 語

水理模型実験と観測記録により数値波高シミュレーションの精度の検討を行った。この結果、この数値波高シミュレーションの実用性が確認された。今後はより完全なシミュレーションを行うために、反射率、透過率、不規則波のスペクトルのデータを集積する必要がある。最後に数値波高シミュレーションの開発に御指導いただいた港湾技術研究所谷本勝利防波堤研究室長、第二港湾建

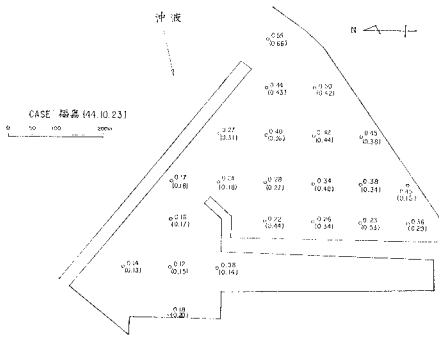


図-5(1) 方向性不規則波による数値波高シミュレーション(実測値との比較)

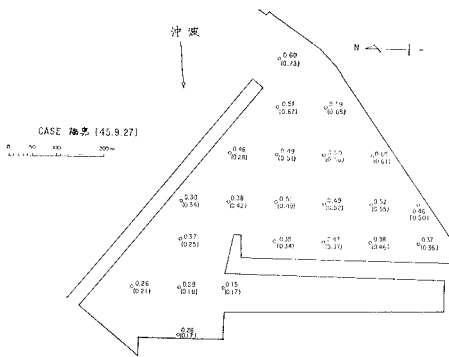


図-5(2) 方向性不規則波による数値波高シミュレーション(実測値との比較)

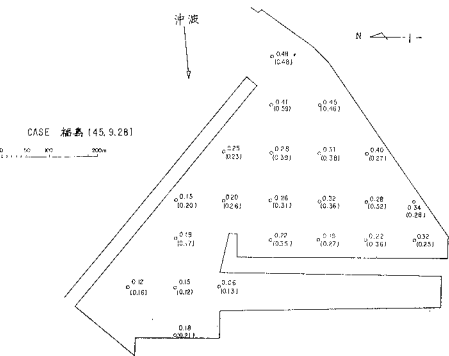


図-5(3) 方向性不規則波による数値波高シミュレーション(実測値との比較)

設局横浜調査設計事務所赤塚雄三所長, 竹田英章次長, 川上俊雄調査課長, 佐藤正一技官, 第一港湾建設局伏木富山港工事事務所高井俊郎次長, ならびに必要なデータを提供していただいた東京電力(株)上野功氏, 電力中央研究所の諸氏に深謝の意を表すものである。なお計算には芙蓉情報センターの協力を得たことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Sommerfeld, O.: Mathematische theorie der Diffraction, Math. ann., Vol. 47, 1895.
- 2) Car, T. H. and Sterzride, M. E.: Diffraction of water waves by breakwater, Proc. Symposium on Gravity waves, National Bureau of Standards, pp. 109~125, 1951.
- 3) 合田良実・吉村知司・伊藤正彦: 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港湾技術研究所報告第10巻2号, pp. 1~52, 1971.
- 4) 三井 宏: 海岸構造物不連続部の波高分布について(第2報) 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 53~59, 1967.
- 5) 伊藤喜行・谷本勝利: 新しい方法による波動の数値計算, 港湾技術研究所報告, 第10巻第2号, pp. 97~120, 1971.
- 6) 伊藤喜行・谷本勝利・山本庄一: 波向線交差領域における波高分布, 港湾技術研究所報告, 第11巻第3号, pp. 87~109, 1972.
- 7) 坂井藤一・河合三四郎: 波動解析への有限要素法の適用, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 393~396, 1973.
- 8) Lee, Jiin-Jen: Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape, Calif. Inst. of Tech, 1970.
- 9) 井島武士・周 宗仁・湯村やす・田淵幹修: 任意形状の透過および不透防波堤による波の散乱と波力, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 79~87, 1973.
- 10) Biesel, F. et Ranson, B.: Calcul de la diffraction de la houle, A.I.R.H., Dubrovnik, pp. 688~699, 1961.
- 11) Barailler, L. Gaillard, D.: Evaluation récente des modèles mathématiques d'agitation due a la houle; Calcul de la diffraction en profondeur non uniform, La Houille Branche, No. 8, pp. 861~869, 1967.
- 12) 千秋信一・鹿島遼一・島田真行・斎藤昭三: 福島原子力発電所海岸構造物の水理設計の検討, 技術研究所依頼報告, No. 69551, pp. 1~27, 1969.