

港内波高の数値シミュレーション手法の検証について

榎 木 亨*・広 畑 彰 一**

1. まえがき

港の静穏性を支配する要因には種々なものがあり、その総合的な評価は容易ではないが、今日のところ港内波高の大きさでもって静穏度の基準を与えているのが一般的である。このため従来より、港内波高を算定する方法がいろいろと研究開発されてきており、既に実用の段階にはいつているものも少くはない。しかしながら、各計算手法の検証という点では必ずしも十分であるとはいえず、おのおの単独には水理実験によって検証されているものの、実港湾における計測値との比較例は実測の困難さもあり少ない。

本研究は、まず簡単な形状のモデル港湾を設定して、いくつかの手法による計算結果を比較し、その相異点について検討する。次に、これらの計算手法を検証し、妥当な計算手法を確立するために、琵琶湖の港湾施設における港内波の実測を行って、港内静穏度の計算手法について考察を加えた。

2. 港内波高の計算方法

(1) 計算方法の選定

任意形状境界を有する港の波高の計算方法はほぼ次の三つの方法に大別される。

- 波動の基礎方程式を離散化し、港内の波高が定常に達するまで微小時間間隔で計算を進めていく方法²⁾。
- Helmholtz 方程式を積分方程式に変換して Green 関数を用いる方法^{3), 4), 5)}。
- 不規則波を対象とし、回折係数を重ね合わせる方法^{6), 7)}。

今回は、上記の各計算手法のうち、A に属するものとしては数値波動解析法²⁾を、B から Lee の行った解法³⁾と Barailler & Gaillard による近似解法⁵⁾を、また C としては折り返し図法⁶⁾の 4 種類をとり上げる。なお、

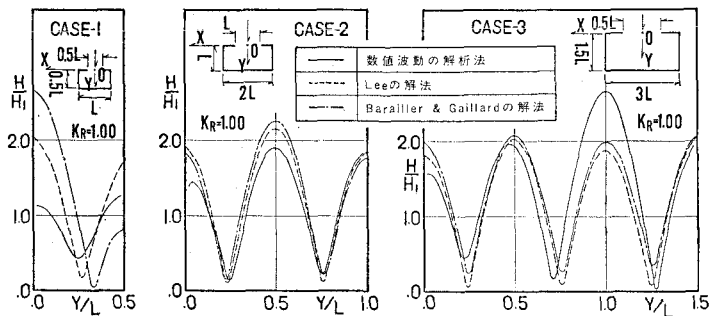
これらの計算方法の理論的な展開についてはおのおのの文献に詳しいため、本文では省略する。また、以後の折り返し図法による波高は既往の回折図を用いて、人為的に計算したものであり、電算機を利用した他の数値計算法とはいくぶんニュアンスが異なるが、本文では特に語句上の区別は行っていない。

(2) モデル港湾における計算結果の比較

周知のとおり、数値波動解析法、Lee の解法、および Barailler & Gaillard の解法は規則波を対象とした計算法であり、これらと不規則波を対象とした折り返し図法を同一の次元にみることは無理があろう。ここでは、まず三前者の結果を比較してから、折り返し図法について言及することとする。なお、前三者の計算条件としてはトライアル計算の結果より次の値を用いている。

A. 数値波動解析法：格子間隔 $\Delta s = L/24$ ，時間間隔 $\Delta t = T/40$

B. Lee の解法および Barailler & Gaillard の解法：



図一 モデル港における計算値の比較 (1)

境界要素長 $\Delta l = L/10$

図一は同図中に示す反射率 $K_R=1.0$ のモデル港における計算結果のうち、 $x/L=1/24$ の線上で入射波高 H_1 に対する港内波高の分布を示したものである。 $x/L=1/24$ はほぼ港の中央部にあたり、各解法による解の相異が比較的少ない計算線であるが、ケース 1 の計算結果には手法の違いによる差異が顕著に現われ、港口部においては 1.0 以上の差がみられる。しかし、入射波長に対してモデル港のディメンションを大きくしていったケース 2 およびケース 3 では解法による波高の差は小さくな

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 三井共同建設コンサルタント(株)

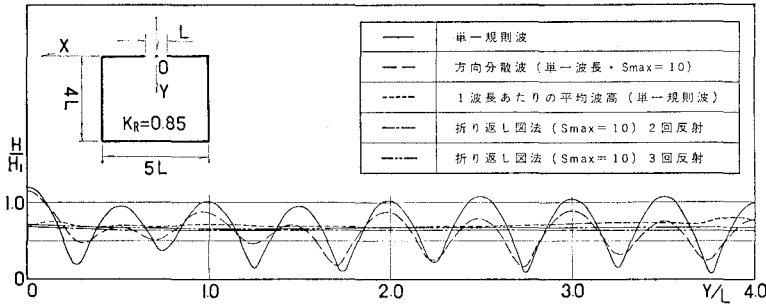


図-2 モデル港における計算値の比較(2)

り、特に Lee の解法と Barailler & Gaillard の解法は波高の極小値を除けばよく一致している。ケース1で Barailler & Gaillard の解法が Lee の解法と大きく異なるのは、Kirchhoff の理論に基づく同法の適用の限界を示唆するものであろう。また、数値波動解析法は他の二者と比較すれば、ケース2よりもケース3の方が差が大きくなっているが、これは時間ステップの増加による離散化誤差の累積が大きな要因と考えられる。

次に、本研究では折り返し図法に対応するものとして、Barailler & Gaillard の解法を用いて、波の方向分散を考慮した計算を行った。計算方法は 20° 間隔で等分割した波長の等しい9成分波の計算を行い、得られた各成分波の波高をエネルギー的に合成するものである。図-2に同図中のモデル港の $x/L=24/24$ における規則波、単一波長方向分散波および折り波し図法の波高分布を示す。折り返し図法の波高分布は極めて滑らかで、図-2では2回反射、3回反射共に波高の最大値と最小値の差は0.05程度にすぎない。一方、方向分散を考慮した計算値の分布は単一の規則波と比較すればいくらか滑らかにはなっているものの、場所的な変動は明確に残っている。図-2における破線は1地点の波高をその点を中心とした1波長の矩形内に存在する($L/24$ に1個)単一規則波の波高値の平均でもって表わした曲線である。このように1地点の波高として平均波高を用いると、その波高分布は折り返し図法の分布に最も近い。

3. 港内の波浪実測について

波浪の実測を行ったのは図-3および図-4に示す牧舟溜および浜分漁港である。牧舟溜は港口部の消波堤を除けば、港内のほぼ全域が直立壁で囲まれている。図-3の消波堤は昭和53年に新たに設置されたが、構造的には鋼管ぐいの枠内に異形ブロックを投入したものである。また、浜分漁港は図-4のI~J間が階段となっている以外は全て直立壁である(なお、現在は浜分漁港においても港口部に消波堤が設けられている)。

実測は港外の反射波の影響が無視できると考えられる地点(図-3、4の0の位置)を選んで簡易の足場を設

置し、容量式波高計を用いて入射波の計測を行った。一方、港内は図-3および図-4に数字で示すそれぞれ20数点の壁面に沿った測点を設定した。港内には5本の容量式波高計を使用し、測点を順に移動させて壁面に沿う波高を計測している。また、入射波高は目視に頼らざるをえなかった。

実測は牧舟溜で2回、浜分漁港で3回行ったが、実測期間中の入射波の波向、周期の変化が小さかったため、後の計算値との比較には各測点の波高比は2または3回の値の平均値を用いている。なお、計測は牧舟溜では数隻、浜分漁港では10数隻の漁船が係留された状態で行ったものであるが、一応これらの漁船の影響はないものとして解析を進めている。

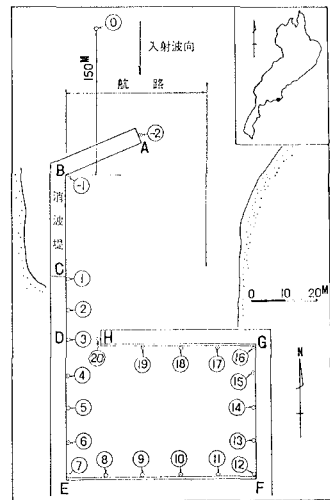


図-3 牧舟溜平面図

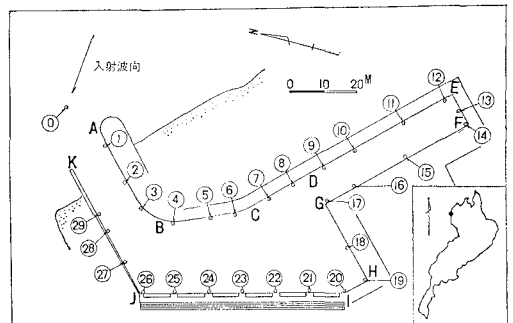


図-4 浜分漁港平面図

4. 実測波高と計算波高の比較

(1) 計算方法と計算条件

実測値との比較に用いた計算方法は Barailler & Gailard の解法と折り返し図法である。このうち、Barailler & Gailard の解法では規則波を用いており、計算結果には壁面に沿って顕著な波動がみられる。このため、図-2 の破線で示した方法に類似して、壁面に沿って 0.1 波長間隔で得られた計算値を実測点を中心とした 1 波長区間にわたって平均してその地点の代表波高を求めている。これは、壁面方向において平滑化した値を与えるものである。なお、壁面前方においては重複波形でよく知られているように腹と節とが存在するが、この計算においては壁面の値のみを用いた。一方、折り返し図法は、本来入射波と反射波の位相干渉が無視できない壁面近傍では適用できないとされている。しかし、同法は今回とり上げた手法のうちでは唯一の不規則波をとり扱ったものであり、また計算が比較的簡単なため、同法における比較を行うこととした。

計算はいずれも直立壁の反射率を数種類に変化させて与えたが、それ以外の両港の計算条件を以下に示す。

a) 牧舟溜における計算条件

Barailler & Gailard の解法による計算では、まず直立壁（図-3 の C-H 部）の反射率を $K_R=0.90$ として、消波堤の反射率を $K_R=0.70$ と $K_R=0.50$ 、また A-B 部からの透過率を $K_T=0.50$ と $K_T=0.00$ に変化させて解を比較したところ、これらの相異による波高の差異は極めて小さかった。したがって、以後の計算には消波堤の反射率は全て $K_R=0.70$ を使い、透過波は与えていない。一方、折り返し図法では A-B 部および G-H 部を半無限堤として回折係数を求めた。回折図は地形条件を考慮して $S_{\max}=75$ を使用し、消波堤の反射率は $K_R=0.70$ 、透過波はないとしている。

また、牧舟溜における入射波向は図-3 に示す方向であり、入射周期は実測の平均値 $T_{1/3}=2.70$ sec である。

b) 浜分漁港の計算条件

折り返し図法では、図-4 の A-B 部、B-C 部を半無限堤とし、D-G 間には波が直角に入射するものとした。入射波の方向集中パラメータは $S_{\max}=75$ である。

実測より、浜分漁港における入射波向は港口に対して、約 20° （図-4 参照）、入射周期は $T_{1/3}=2.50$ sec である。

(2) 実測値と計算値の比較

a) 牧舟溜における比較

牧舟溜における実測波高と計算波高の分布を図-5 (a), (b) に示す。まず、Barailler & Gailard の解法による波高分布を実測値と比較した図-5 (a) では、測

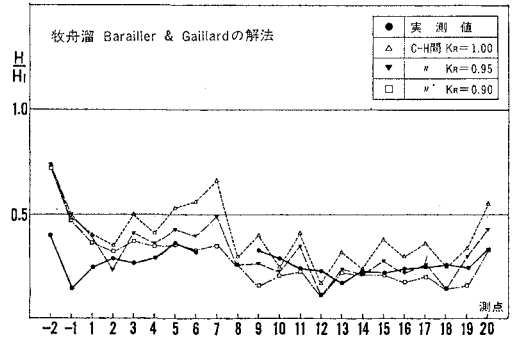


図-5(a) 実測値と計算値 (Barailler & Gailard の解法) の比較 (牧舟溜)

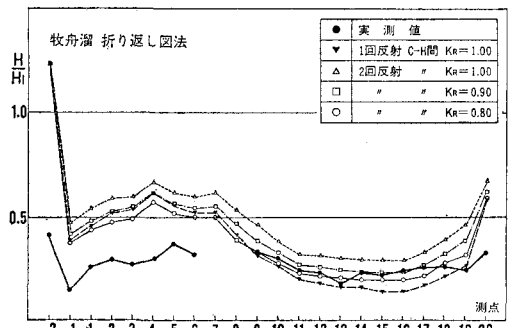


図-5(b) 実測値と計算値 (折り返し図法) の比較 (牧舟溜)

点 -2~6 では反射率にかかわらず、計算値は実測値をうわまわる傾向にある。しかし、測点 10~20 では $K_R=0.95$ と $K_R=0.90$ の計算は、ほぼ波高比で（実測値 ± 0.1 ）の範囲におさまっており、場所的な変動があるものの、平均的には両者はよく似た値をとっている。なお、 $K_R=1.00$ と $K_R=0.95$ の計算では隅角部にあたる測点 7 で波高がきわだって高くなっている。同点は船舶保留のため計測が行えなかった点であるが、消波堤が設置されるまでの冬の強風時には岸壁を越えて越波が生じていた極めて波高の高い箇所でもあったことを付記しておく。

次に、折り返し図法による波高分布については、図-5 (b) に示すとおり、測点 -2~6 では実測値より大きい、測点 10~19 の間は両者はよく一致している。

図-5 (a), (b) 共に測点 -2 と -1 で計算値が実測値を大きくうわまわるのは、実測時のこれらの点の波高計の位置が壁面の前というよりは、むしろ異形ブロックの空隙内にあり、十分な波高が得られなかったためと判断せざるを得ない。

b) 浜分漁港における比較

牧舟溜と同様に実測値と計算値の分布を図-6 (a), (b) に示す。図-6 (a) では、反射率の違いによる解の差異が牧舟溜以上に大きい、計算結果のうちでは

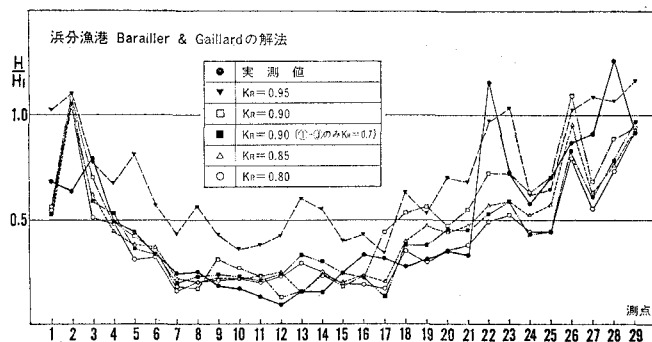


図-6(a) 実測値と計算値 (Barailler & Gaillard の解法) の比較 (浜分漁港)

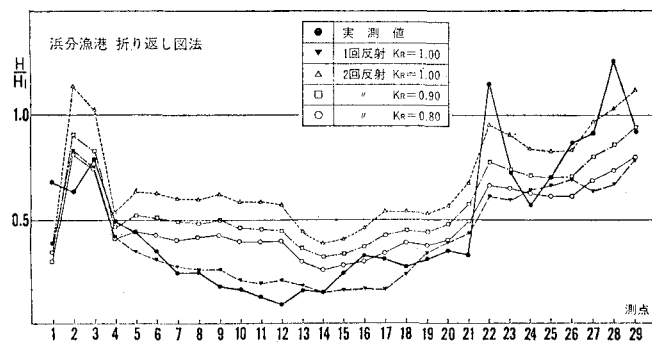


図-6(b) 実測値と計算値 (折り返し図法) の比較 (浜分漁港)

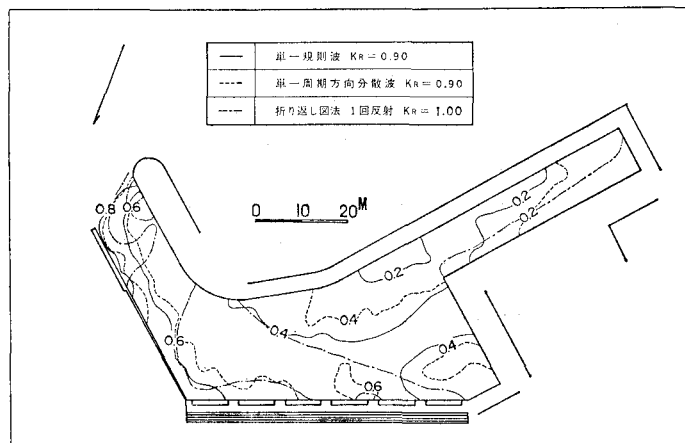


図-7 港内波高分布図の一例

$K_R=0.90$ と $K_R=0.85$ が全般的には実測値に近く、港口部近傍と測点の前後を除けば、ほぼ (実測値 ± 0.1) の範囲内にある。また、同図では、港口部近傍では波高の大きくなる位置が異なっているようである。すなわち、実測では測点 2 と 28 で波高が高いが、計算では測点 2 から約 1 波長離れた測点 3、および隅角部の測点 26 で高波高が現われている。測点 22 については実測では波高比が 1.0 を越えている。計算においても測点 22、23 で波高が高くなる傾向にはあるが、その値は実測値に比べて小さい、壁面 H—I に沿う測点 21~26 では実

測値の場所的な変動が計算値以上に大きい。が、実測時には壁面前面に多くの漁船が係留されており、これらの船の動揺が波高に影響を与えているものとも考えられる。

一方、図-6(b) では、1 次反射の計算結果が測点 21 まではほぼ妥当な値を与えているが、それ以降の波高が高くなる場所の値が小さい。また、2 次反射まで考慮した場合は港奥の波高は全般に過大に現われる傾向にある。

なお、今回の実測は全て壁面に沿って行ったものであり、港の中央部の波高は得られていないが、Barailler & Gaillard の解法と折り返し図法による計算結果の等波高線図の一例を示したものが図-7 である。

5. おわりに

港内波高の予測手法の有効性の検証として、本研究では、実測波高と計算波高の比較を行った。その結果、壁面の反射率を適当に選べば、Barailler & Gaillard の解法の平滑化した値 (1 波長区間の平均値) は平均的にはほぼ妥当であることが示された。しかしなが

ら、図-5(a) および 図-6(a) に示したように、計算の条件によっては解が大きく異なる場合もあり、境界条件の設定には注意を要する。一方、折り返し図法においては、反射率以外に反射回数によっても結果が異なる。本研究で行った計算では $K_R=1.0$ と過大評価して反射を 1 回とした場合が比較の実測値と一致するようであるが、反射率・反射回数などの設定条件のいかなる組み合わせが最良であるかは容易に決め難い。また、ここでは詳しく示すことができなかったが、各計算手法は使用の汎用性、あるいは経済性等いくつかの重要な問題を含んでおり、港湾および入射波の条件に応じた使

い分けが必要となると考えられる。

最後に本研究に御協力いただいた伊集院建設部長を始めとする水資源開発公団琵琶湖開発事業建設部の諸氏、ならびに Quek Keng Ngak 君 (昭和 53 年度大阪大卒、シンガポール国費留学生) に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山本隆一・横田基紀・滑川伸孝: 数値波高シミュレーションの実用化について, 第 22 回海講論文集, pp. 259~263,

- 1975.
- 2) 谷本勝利・小舟浩治: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 第22回海講論文集, pp. 249~253, 1975.
 - 3) Lee, Jinn-Jen: Wave induced oscillation in harbours of arbitrary shape, Calif. of Tech., 135 p., 1970.
 - 4) 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過防波堤による波の散乱と波力, 第20回海講論文集, pp. 79~87, 1973.
 - 5) Barailler, L. and P. Gaillard: Evaluation récente des modèles mathématiques d'agitation due à la houle: Calcul de la diffraction en profondeur non uniforme, La Houille Blanche, No. 8, pp. 861~869, 1967.
 - 6) 合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉: 不規則波を用いた港内静穏度解析, 港研資料, No. 271, 53 p., 1977.
 - 7) 高山知司・菊地 治: 港内波高分布の計算, 第25回海講論文集, pp. 103~107, 1978.
-