

釜石・両石両湾を含む水域における津波の挙動に関する研究

岩 崎 敏 夫*・真 野 明**・前 原 隆 生***

1. は し が き

三陸海岸には大小種々雑多な湾が並んでいるが、津波の襲来を受けると多様な応答をして受ける被害も一様ではない。これに対する防災対策を構ずる場合には、過去の大津波が再来した場合に、沿岸や湾内で、最大浸水高や流速がどうなるかを求め、設計された構造物によって被害が防止できるか、あるいは軽減されるとすれば、どの程度かを予知することが必要である。地質学者の意見によれば、過去1万年ほど以前には海水準は約140m程低下していたとされ、その後の上昇の過程において海岸線はほとんど現在の汀線の平面形状と平行に刻まれており、したがって現在の湾内の谷線を形成している。

このような地形であるから、津波の挙動の予知を行うのに、まず考えられるのは模型実験の手法である。東北大学においては大型津波実験水槽を具えて、基礎的研究段階を終え、昭和48年度より実際の港湾における津波の研究に着手した。その第1着手として、釜石・両石両湾を含む水域を対象に選んだ。

本研究のいまひとつの目的は数値解析の有用性の検討である。模型実験のためには設備、人員、時間、費用など莫大な量の要求が満たされねばならず、大変である。もし数値解析がよい結果を与えるならば、計算機と、計算時間およびプログラムさえあればよい。もちろん、それとても容易なものではないが、模型実験ほどの大変さはない。このことは津波の防災上、大変重要なことである。

本論文は以上の見地より行った模型実験と数値解析および両者の比較について述べるものである。

2. 実験水槽および対象水域と実験方法

本実験では、東北大学の既存の大型平面水槽を一部改造し、延長60m、幅17.7m、側壁高さ90cmとし、造波施設の反対側に、釜石湾・両石湾の、水平縮尺1/600、垂直縮尺1/120のひずみ模型を設置した。図一1に模型に

取り入れた区域を示す。水深の関係上、陸上部標高 T.P. 20m から海底最深部 -100m までを取り入れた。

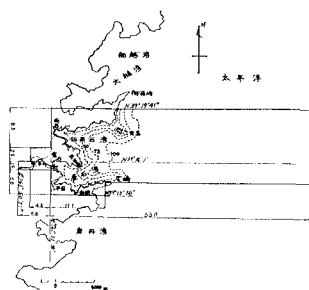
津波の造波は、既報の長波研究用造波装置¹⁾によって行うが、今回データレコーダーから直接入力

信号を与えることができるようにしたので、不規則波の造波も容易に行うことが可能となった。

水位の測定においては、波高計の検出部に2個の端子を付置し、水位がそのレベルに達すると、検定装置の回路のスイッチが入り、パルスが発生するようにすることにより、自動的に検定できるようにした。別に汀線に沿って鉛筆のキャップをうめ、これに竹の箸を立てる。箸には、硫酸第2アンモニウムの水溶液を塗った紙を乾燥させ、これにフェロシアン化カリウムの粉末を塗ったものが、はりつけてある。この2種類の薬品は水に触れると、ベルリンブルーという紺色の化合物に変色するので、これで最大痕跡高が容易に多数、測定できる。

本実験の対象とする津波は明治29年の三陸津波であり、この津波の調査報告として、釜石で T.P. 5.4m~7.9m、両石で T.P. 10.0m~13.0m という結果がある。この津波の周期は明確ではないが、予備計算の結果などから、一応周期16分を明治29年津波の周期と考える。そして最大痕跡高 T.P. 7.9m になるような波を、周期16分について造波し、その時の外海波高を他の周期についても適用した。

明治29年三陸津波における潮位は、満潮時 T.P. 0.64m である。外海波の検出点は P₁₄ (馬田岬沖) とし、ここでの検出偏差高の1/2をもって外海波の偏差ととっている。その値は0.456m、模型で0.38cm である。



図一1 釜石湾両石湾模型範囲
数字は模型寸法、単位 m
等高線数字は実物、単位 m

3. 数値実験の方法

津波の発生および伝播について従来よりたびたび利用

* 正 会 員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 工修 建設技術研究所

されている数値積分法を本研究においても採用する²⁾。
 今回の目的は、これによって得られる計算波形と模型実験による測定波形とを比較することにあるので、数値実験においてはあくまでもひずんだ模型の寸法通り、忠実に寸法をよみ取って用いている。したがって以下には模型の物理的寸法で記述することとし、現地換算値はカッコ内に示した。

表一1 に計算ケースをあげる。

運動方程式中で慣性項および摩擦項の取扱いはしばしば問題となるところである。しかし模型実験の経験より

表一1 計 算 ケ ー ス

入射波高 0.76 cm (91.2 cm)

P_{14} 1.52 cm (182.4 cm)

× 考慮せず; ○ 考慮; $h < a$ のみ考慮

$\gamma^2 = 0.0026$

ケース番号	DS		DT		慣性項	摩擦項
	cm	m	sec	sec		
c-1	83.3	(500)	0.2	(10.96)	×	○
c-2	41.6	(250)	0.1	(5.48)	×	○
c-3	41.6	(250)	0.1	(5.48)	$h < 50\text{cm}$ (60m)	○
c-4	41.6	(250)	0.1	(5.48)	$h < 30\text{cm}$ (36m)	○

すれば湾内振動を論ずる限り理論的興味のためならとにかく、摩擦項は無視できない。したがって4ケースとも摩擦項は考慮することとした。

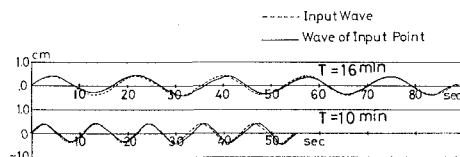
c-1 と c-2 はいずれも慣性項を省略し、ただ距離格子間隔を変えて比較しようとしたものである。

c-2, 3 と 4 は格子間隔を一定にとり、慣性項を全領域無視した場合と、水深 30 cm (36 m) 以浅に考慮した場合および水深 50 cm (60 m) 以浅に考慮した場合で、この効果を調べようとしたものである。

陸側境界は水際線にとり、ここで鉛直壁になっていると仮定し陸上遡上はないものとした。また津波後退時に海底が露出するけれども計算上では不都合を生じるので、最浅部分の水深を釜石湾奥で 15 cm (18 m)、両石湾奥で 20 cm (24 m) にとった。

沖側境界は長波研究用造波装置の末端たる圧力水槽吐出部を模擬すべきである。この位置は釜石港水際線より 53 m のところであるが、外海水深は一様に 83.3 cm (100 m) になっているので、c-1 では釜石港水際線より 25 メッシュ分 20.82 m (12.49 km)、c-2~4 では 60 メッシュ分 24.96 m (14.94 km) へだたった断面を流入端にとった。

この沖側境界点での境界条件は、強制入力波として偏差分 $\zeta(t)$ を与え、流速はやや近似を高めた微小振幅波として $u = \sqrt{g(h + \zeta)} \cdot \zeta/h$ (ただし h は

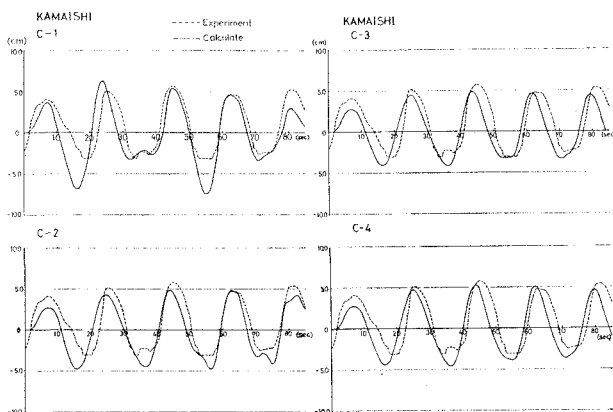


図一2 入力波形

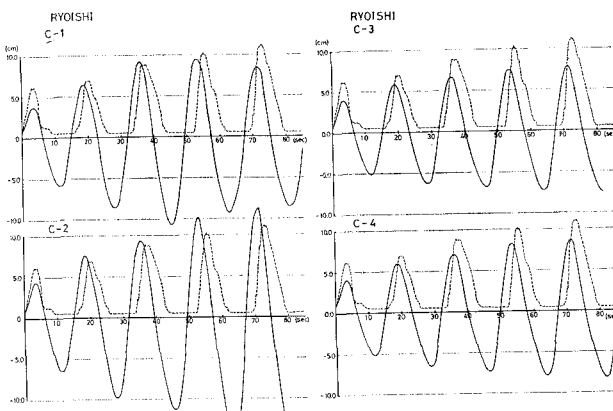
静水時水深) によって求める。入力地点での波形を図一2 に示す。このように両者の波形は十分一致して正弦的である。

4. 数値実験と模型実験の結果の比較

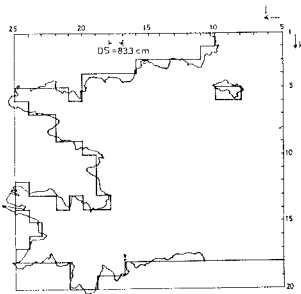
周期 16 分における釜石の波形を図一3 に示す。破線は模型実験の測定値で、実線は数値実験の計算値であり、両者は第 1 波のピークを合致させて描いた。また同じ周期における両石の波形を同様に描いて図一4 に示す。模型実験の方では引き波のときに海底が露出するために、波の谷が平坦になっている点は注意せねばならない。数値実験では、わざと水深をとってあるために、このようなことはないが、このために波が早く伝播し、位相が早くなる。



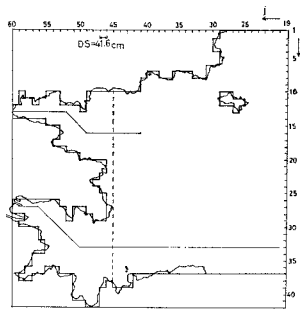
図一3 時間波形, 釜石 $T=16$ 分



図一4 時間波形, 両石 $T=16$ 分



図—5 数値計算領域
 $DS=83.3\text{ cm}$



図—6 数値計算領域
 $DS=41.6\text{ cm}$

(1) 格子間隔の影響

図—5, 6 は $DS=83.3\text{ cm}$ と $DS=41.6\text{ cm}$ における境界形状を表わしており、これより海岸線の凹凸は $DS=41.6\text{ cm}$ の場合の方がよく表わされていることがわかる。

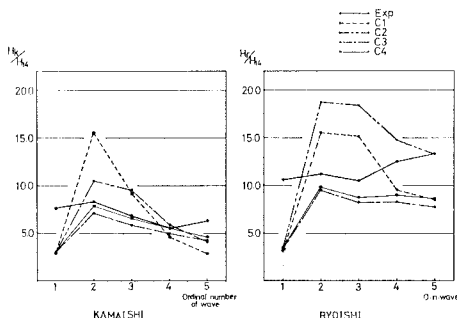
一方、図—3, 4 において c-1, c-2 と実験値とを比較した場合、釜石ではかけ離れていずれかが良いとはいえないが、両石では5波目までの間に次第に増幅の傾向を示す模型実験の結果を c-2 の方がよく現わしているようにもとれる。しかし全般的に見て、この程度の格子間隔の差異は、あまり問題にならないのではないかと考えられる。

これは津波の波長に比して、湾形の細かい凹凸が問題にはならないことを示す。

(2) 慣性項の影響

c-3, 4 と c-2 とを比較するとただちに、慣性項の影響が非常に著しいことに気づく。釜石においては、c-3, 4 はいずれも模型実験の結果をよく表わしているし、両石においても c-2 に見られたような著しい増幅性はおさえられていて、実験値にほぼ対比できる程度の増幅性を示している。

いま計算波高をおのおのの波ごとに求め、基準点 P_{14} の波高との比をとり、これを波の順番数を横軸にして描いて見ると図—7 のようになる。図中太黒線で示した模

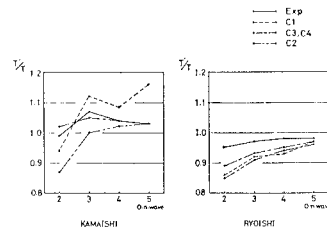


図—7 増幅状況

型実験の結果と比較すると、慣性項の考慮が良い結果を与えていることが明らかである。しかし両石の場合は釜石の場合ほどは良くあっていない。

次に図—8 において周期を比較した。すなわち各波のピークの時刻から、第1波のピークの時刻を差引き、波の数でわったところの、いわば平均周期 T' と、外海波周期 T との比を縦軸にして、波の順番数を横軸にとって画いたもので、この比の値は波の順番数が増えるほど1に近づく性質のものである。これによっても慣性項の考慮が良い結果を与えることが示される。

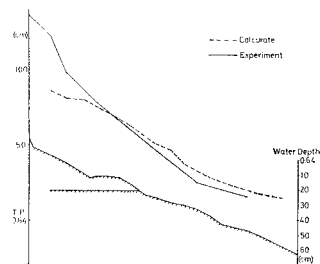
ただし以上の検討において、c-3 と c-4 との差異は著しくなく、水深 36m までは慣性項を無視できる。



図—8 ピーク出現周期の変化

(3) 海底露出の影響

図—9 に両石湾軸に沿う空間波形を、最大浸水高を生じた時点で比較した。これより、海底露出を避けるために水深をつけた分だけ水面が低く計算されているように見える。



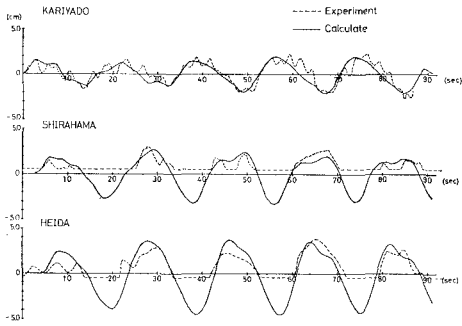
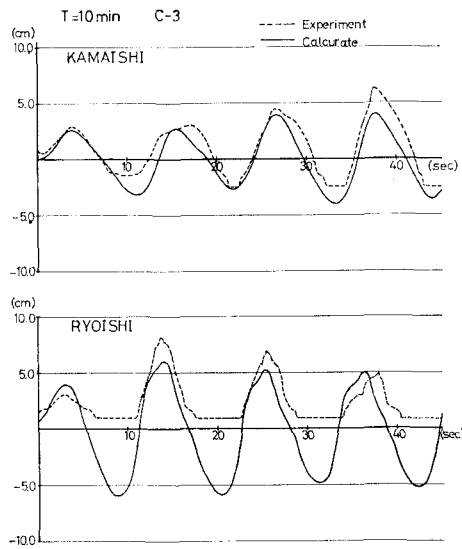
図—9 空間波形、両石 $T=16\text{ 分}$

(4) 適合性に関するその他の資料

図—10 に周期 16 分の場合の c-4 の計算結果と、模型実験の比較を、仮宿、白浜、平田について行ったものを示し、図—11 に周期 10 分の場合の c-3 の計算結果と模型実験の比較を、釜石、両石について行ったものを示した。いずれもかなりよく両者が一致していることがわかる。

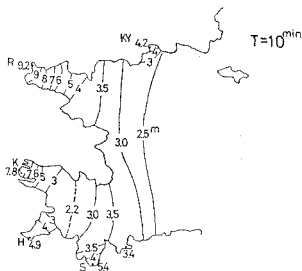
5. 釜石湾・両石湾の振動特性

本章ではまず模型実験の結果を説明する。そのため


 図—10 時間波形, 仮宿, 白浜, 平田 $T=16$ 分

 図—11 時間波形, 釜石, 両石 $T=10$ 分

に、現地換算値として以下に述べる。さきに述べたように、模型実験では波が繰返されるにつれて次第に湾内波高が増大する。この増幅性は7~10波でおさまリ、波高は定常的になる。その後造波を打ち切って最大浸水高を計測する。P₁₄の片振幅は1.86 mなので潮位 T.P. 0.64 mを加えると、P₁₄の浸水高は T.P. 2.50 mである。ここで重複波であるとする、外海の最高水位は、T.P. $0.64 + 1/2 \times 1.86 = 1.57$ mである。

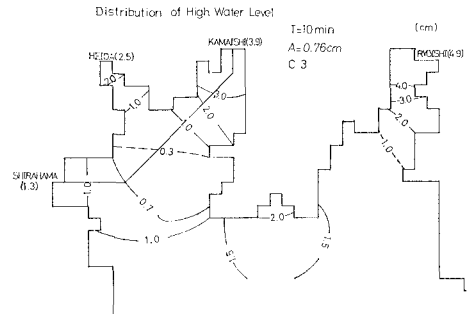
かくして得られた沿岸各地の浸水高の値によって、釜


 図—12 最大浸水高分布 $T=10$ 分

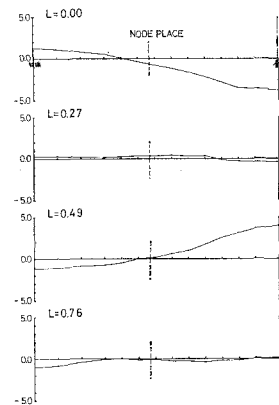
石湾・両石湾内の最大浸水高分布曲線を描くと、図—12, 15, 18, 19 をうる。図中 K, R, H, S, KY はそれぞれ、釜石, 両石, 平田, 白浜, 仮宿を示す。

図—12 は $T=10$ 分の場合で、両石湾では湾奥に行くほど高くなるが、釜石湾では中間に T.P. 2.2 m の谷があり、かつ湾口に T.P. 3.5 m の山がある。さらに釜石港, 平田, 白浜の各小湾について見ると湾奥に至るまで浸水高が高くなっている。

図—13 は同じ周期についての数値計算の出力値より描いた等波高線図であるが、節の位置などほぼ一致して


 図—13 等波高線図 $T=10$ 分

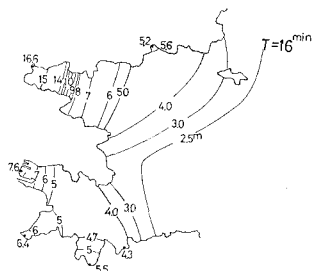
いる。すなわち釜石湾内には釜石港奥と白浜とを腹とする振動が存在していることが推察される。このことは、図—14 に示す釜石・白浜を両端として画いた空間波形によって証明される。図中 L は基準となる時刻よりの経過時間を周期で割った値である。



図—14 釜石湾内横振動

このような振動の存在は湾口に防波堤を設けても、消去できないことは注意すべき現象と考えられる。

図—15 は $T=16$ 分の場合で、両石湾では湾奥で湾幅が急に小さくなっている付近に水面の急勾配ができており、湾奥部ではむしろ水面勾配は平坦である。この平坦部分に防潮壁とか防波堤を設けてもなんら波高を軽減できない点は注意を要する。図—12 に見られた釜石湾内

図-15 最大浸水高分布 $T=16$ 分

の節の位置は、図示は省略したが $T=13$ 分の場合には白浜付近にまで出て来ており、 $T=16$ 分では図-15のように湾外に出てしまう。釜石湾内には水面勾配のゆるい水域が生じている。

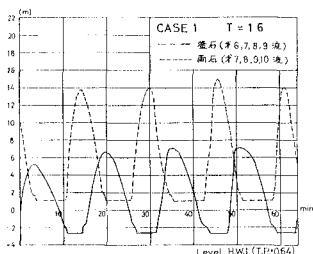
図-16 同時時間波形、釜石・両石
 $T=16$ 分

図-16 は $T=16$ 分における釜石と両石の同時観測波形を示したもので、周期 15~20 分においては釜石が押しのかきに両石が引き、逆に釜石が引きの時、両石が押しとなる。いま両者の位相のずれを $2\pi\Delta t/T$ (Δt はピークの時間差で両石の方が早く現われる) とすると、表-2 のようになる。

表-2 釜石・両石間ピーク (位相差角)

T (分)	10	13	15	16	18	20
両石の進み角	36.0°	5.47°	103.3°	117.0°	103.3°	59.4°

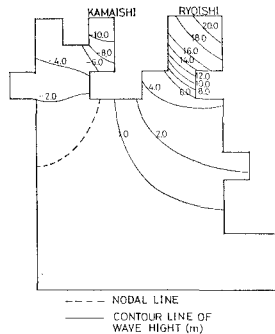
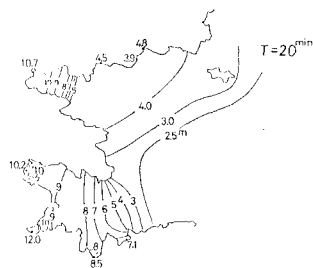
表示のように横振動は $T=16$ 分で最も著しい。二次元線型長波の方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[h \frac{\partial \zeta_0}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \frac{\partial \zeta_0}{\partial y} \right] + \frac{w^2}{g} \zeta_0 = 0 \quad \dots (1)$$

(ただし、 w は角振動数、 ζ_0 は波の振幅)

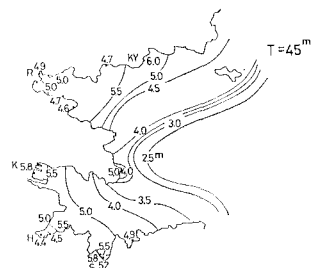
を用い固有値および固有関数を計算すると、固有周期は、36.7, 18.7, 13.3, 9.8, ... 分となった。図-17 に $T=18.7$ 分の場合の振動モードを示す。すなわち釜石湾口に節が存在し、両石湾と釜石湾とで位相が逆になっている。このような横振動は湾口防波堤によって防止できる。

図-18 は $T=20$ 分の場合の最大浸水高分布曲線で、このとき釜石湾奥においては他の周期に比して最も高い浸水高を示している。また両湾ともほぼ規則的な波高分

THE MODE OF OSCILLATION
NATURAL PERIOD $T=18.7$ min図-17 振動モード $T=18.7$ 分図-18 最大浸水高分布 $T=20$ 分

布を示し、湾口に至るほど波高は低くなる。

図-19 は $T=45$ 分の場合で全般的に水面勾配は平坦となっている。さらに両石湾、平田湾、白浜湾の湾奥にごくわずかであるが浸水高が低くなっている部分が存在する。

図-19 最大浸水高分布 $T=45$ 分

従来湾の固有周期より短い周期の津波では湾口ほど高く、湾内に行くほど低い水位になるとされ、長い周期の津波では逆の現象が起るとされていたが、規則的線返し波であればいちがいに断定できないことがわかる。

6. 結 語

本研究の結果、両湾の増幅率特性についても一応釜石湾では $T=20$ 分、両石湾では $T=16$ 分がえられる。そ

のことは 図—15 以降に明らかである。

最後に岩手県港湾課には実験遂行上多大の便宜をうけた。また計算には東北大学 NEAC 2250 モデル 700 を用いた。さらに本研究において昭和 50 年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (I)「三陸大津波来襲時の被害予測」に費用の一部の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫・楊 沢民：長波の研究用造波装置とその特性について (I)，第 13 回海岸工学講演会講演集，pp. 230-235，1966.
- 2) 岩崎敏夫・楊 沢民：三陸大津波の数値実験，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 83-89，1974.