

湾奥における津波遡上高

岩崎 敏夫*・真野 明**・足立 有平***

1. はじめに

湾奥における津波遡上高を推定することについて考える。従来このために簡単な形状の湾であれば理論解析により、複雑な形状の湾であれば有限階差法を用いた数値解析や物理模型実験によって振幅、周期一定な規則波に対する応答特性を求めることが一般に行なわれてきた。他方において過去に起こった大津波の際の津波の発生、伝播、湾内振動を数値解析によって得ることが認められ、不規則な遷移波として湾内振動が得られるようになった。本論文は数値解析と物理実験とを対応せしめつつ規則波および不規則波について検討し、さらに湾奥における津波高を推定する方法と配慮すべき要件について研究したものである。

2. 調査方法

表—1 に本研究において検討した津波の調査方法を示す。

(1) 実験概要

物理実験は既報¹⁾の津波水槽に水平 1/600、鉛直 1/120 の縮尺で模擬した釜石・両石両湾の歪模型を用いて行なった。図—1 に示すように水深 100m 以深の部分は 100m で一様水深にとられており、測定点は図示のように吐出口、P₁₄、両石湾軸に沿う R₁~R₇、および釜石湾奥 K である。また、波形入力アナログデータレコーダで行ない、造波はフィードバック自動制御系の長波発生装置により行なっている。一方、数値実験は吐出口から湾奥までの境界条件を模型水槽と等しくし、この領域

表—1 調査方法

水 域	波の性質	物理モデル等	数値モデル
三陸沖太平洋水域	不規則波*	実際の津波	MODEL C ²⁾
		MODEL E ₂	MODEL F ₂
津 波 水 槽	規 則 波	MODEL E ₁	MODEL F ₁

* 明治 29 年三陸大津波および昭和 8 年三陸大津波の 2 ケースとした。

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科
*** 学生会員 東北大学大学院 工学研究科

を有限階差により組み入れて行なった。最浅部は海底露出を避けるため水深 15m としている。差分格子は水深 100m 以深部で $\Delta S=10/9$ km, $\Delta t=24$ sec, それ以浅で $\Delta S=10/27$ km, $\Delta t=8$ sec とし、境界で空間・時間格子の接続を行なった。支配方程式は水深 60 m 以深部で線型非コリオリの運動方程式および連続方程式を用い、それより浅い所では非線型項と海底摩擦項を加えている。

(2) 入 力 波

規則波と不規則波の場合について実験を行なった。規則波は周期 10, 16, 20, 45 分の 4 種類について 10 波ずつ入力し、入力波の振幅は釜石で明治 29 年三陸津波の最大痕跡高 T.P. 7.9m になるような周期 16 分の波の沖波波高に合わせるようにした。沖波波高検定点は図—1 の P₁₄ である。不規則波としては、波源域の異なる明治 29 年と昭和 8 年津波の 2 種類を選ぶ。実物換算で造波吐出口は両湾東方 25 km に存在するが、MODEL C の結果を用いてこよりそれらの津波を入力せしめることができれば数値モデルと物理実験とが結合したことになる。実験水槽での造波吐出口より湾奥までの伝播時間に等しい時間において実際の地形で伝播する距離を湾口より真東にとり、その地点を造波相当地点とし文献²⁾の仮想入力境界にとって MODEL C より得られた波形からその地点の波形を内挿法によって求め、さらにその値を Green の法則を用いて水深補正した。また、造波吐出口では線型特性曲線式を用いて、進行波入力条件式 (1), (2) または重複波入力条件式 (2), (3) を用いる。

$$\zeta_A = \zeta_B + \frac{1}{2} Z^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

$$q_A = \left(\zeta_B - \frac{1}{2} Z^{-1} \right) \sqrt{gh_0} \dots\dots\dots (2)$$

$$\zeta_A = \zeta_0^{\pm} \dots\dots\dots (3)$$

$$q_A = (\zeta_0^{\pm} - Z^{-1}) \sqrt{gh_0} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\zeta_B, \zeta_0^{\pm}$ は進行波あるいは重複波水位で入力設定値、 Z^{-1} は負方向設定値、 ζ_A, q_A は吐出口における水位、流量である。

3. 規則波入力の実験結果

入力波の周期を次のように分類し、それらに対する結



図-1 実験領域平面図

果をまとめてみた(図-2 参照)。

(1) 湾の共振周期に一致した場合

釜石で周期 20 分, 両石で周期 16 分がそれぞれあり, おのおの定常的な増幅を示し, 飽和状態に達したところで最大浸水高としてよいことがわかった。

(2) 共振周期に近い周期の場合

釜石では周期 16 分, 両石では周期 10 分, 20 分の場合が相当すると思われるがいずれも唸りを生じ, 定常状態が得られなかった。これらの場合には湾奥最大波高は唸りの最も高いところによらなければならないであろう。今回の実験ではおおむね第 2 波に最大波を生じた。

したがって, 数波の波高を平均した値をもってその周期の湾の応答波高とすることには問題がある。

(3) 共振周期から離れた周期の場合

周期 45 分の場合である。この場合湾での増幅はほとんど見られず, 沖波振幅と同程度の振幅で振動するだけであった。物理実験では水槽の共振を誘発し, 唸りを生じている。

4. 遡上高の理論計算

地形モデルとして 2 次元水路の step type と slope type とを考える(図-3 参照)。前者は遡上を許さない

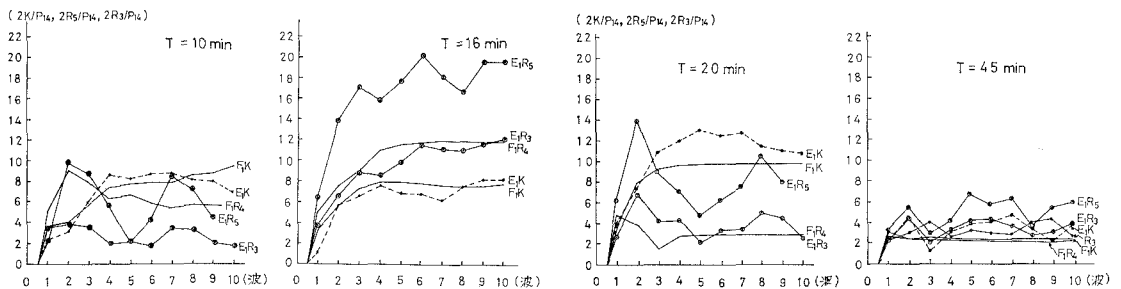


図-2 周期に対する増幅状況

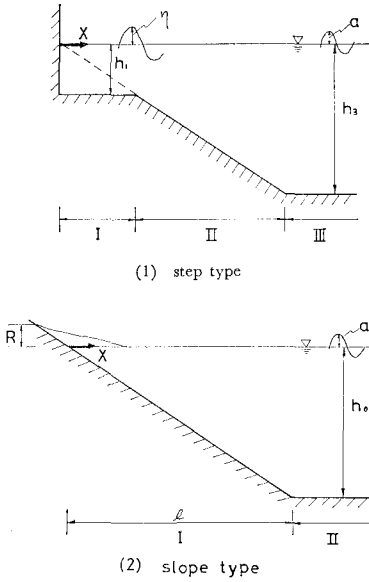


図-3 地形モデル

場合で数値実験に、後者は物理実験や実際の海岸に、おの対応する。ここでは、線型定常解を求めている。

(1) step type の解

支配方程式は、

$$u_t + g\eta_x = 0 \quad (5)$$

$$\eta_t + (uh)_x = 0 \quad (6)$$

で、 $\eta = H(x)e^{i\omega t}$ を用いて、

$$\eta_{xx} + (h_x/h) \cdot \eta_x + (\omega/g h) \cdot \eta = 0 \quad (7)$$

(7) 式の η は $H(x)$ を置き換えたものである。各領域について (7) 式を解くと、

$$\text{I: } \eta_1 = E e^{ik_1 x} + F e^{-ik_1 x} \quad (8)$$

$$\text{II: } \eta_2 = C Y_0(2n\sqrt{x}) + D J_0(2n\sqrt{x}) \quad (9)$$

$$\text{III: } \eta_3 = A e^{ik_3 x} + B e^{-ik_3 x} \quad (10)$$

ここに、 A, B, C, D, E, F は積分定数、 $n = \omega / \sqrt{g a}$ 、 $k = \omega / \sqrt{g h}$ 、 Y_0, J_0 はベッセル関数である。

境界条件から $E = F$ で、 $\eta_1 = 2E \cos k_1 x$ となり、 $x = 0$ で $\eta_1 = 2|E|$ が得られる。

(2) slope type の解

首藤³⁾ は 図-3 (2) のような地形に振幅 a の正弦波が入射した場合の定常状態に対する遡上高 R に関して (8) 式に示す解を得ている。

$$R/2a = [J_0^2(4\pi \cdot l/L) + J_1^2(4\pi \cdot l/L)]^{-1/2} \quad (11)$$

ここに、 $L = CT = \sqrt{g h_0} \cdot T$ 、 J_0, J_1 はベッセル関数である。

(3) 両石湾への適用

(1), (2) の結果を両石湾に適用すると 図-4 のような結果が得られた。slope の勾配は模型での汀線と 100m 等深線とを結んだ直線のそれとしている。これによ

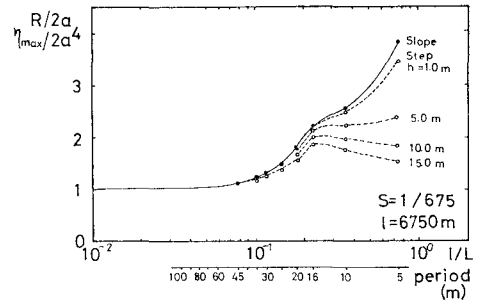


図-4 理論遡上高

ば、 l/L が 1 程度のところでは h_1 の影響が大きく、 h_1 は小さくなるほど slope type に近づく。 l/L が 0.1 付近では slope type とほぼ一致することがわかる。次に各周期の定常波に対する振幅の空間分布を調べると周期 10 分では湾奥から 2000m 付近に、周期 16 分では 5000m 付近に振動の節が存在しており、周期 20 分、45 分ではさらに沖側となることがわかった。

5. 不規則波入力の実験結果

両石湾奥での時間波形を 図-5 に示し、第 1 波から第 6 波までの個々の波の峰高と周期を表-2 に記す。

6. 遡上高の検討

理論による step type の汀線上最大波高を $\eta_{\max}(0)$ 、slope type のそれを H_s とし、最大遡上高を R とする。

(1) 規則波実験の場合

表-3 に汀線での最大波高に関する理論と実験の結果との比較を示す。 $\bar{R}_5/\bar{R}_4$ は R_5 と R_4 における 7 波から 10 波までの平均値の比である。物理実験の方が 4~10%

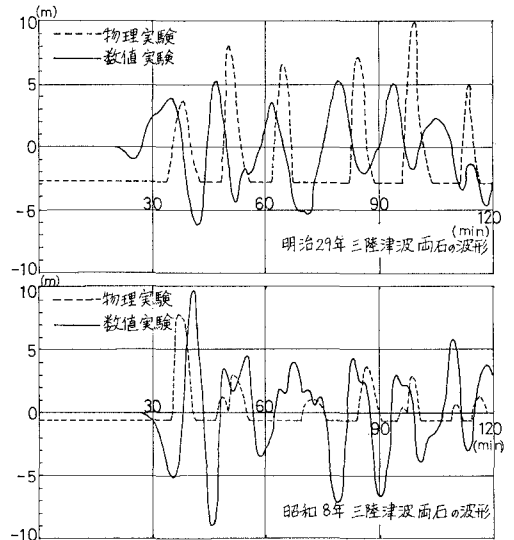


図-5 両石での時間波形

表—2 両実験の両石での比較

	第1波	第2波	第3波	第4波	第5波	第6波
AM29の峰高(m)	3.61	8.24	6.63	7.19	10.90	5.03
BM29の峰高(m)	4.09	5.26	3.68	5.33	5.02	2.26
AM29の周期(分)		12	15	20	14	14
BM29の周期(分)	17	12	15	17	14	11
AS 08の峰高(m)	7.97	3.94	2.38	4.46	3.89	
BS 08の峰高(m)	9.70	4.58	4.23	4.37	3.02	5.75
AS 08の周期(分)		15	21	14	12	11
BS08の周期(分)	9.2	14	13	16	11	15

A: 物理実験, B: 数値実験

表—3 規則波実験結果と理論との比較

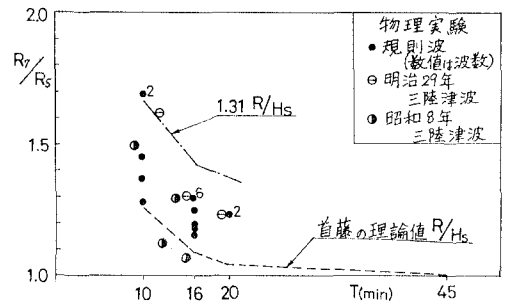
	周 期	10 分	16 分	20 分	45 分
理 論	$R/\eta_{\max}$	1.44	1.18	1.11	1.02
	R/H_s	1.27	1.09	1.05	1.01
	$H_s/\eta_{\max}$	1.13	1.08	1.06	1.01
実 験	$\bar{R}_s/\bar{R}_4$	1.18	1.20	1.12	

程度高くなっている。陸上部の遡上高については実験結果の最大遡上高 R_7 を R_5 で割った値が理論の R/H_s の値に相当するのでそれらの比較を図—6 に示したが、物理実験の値の方が大きくなっている。これは湾奥での谷幅効果のためと考えられ、Green の法則より得た補正率 1.31 を乗じると実験値のほぼ上限を与えることができた。

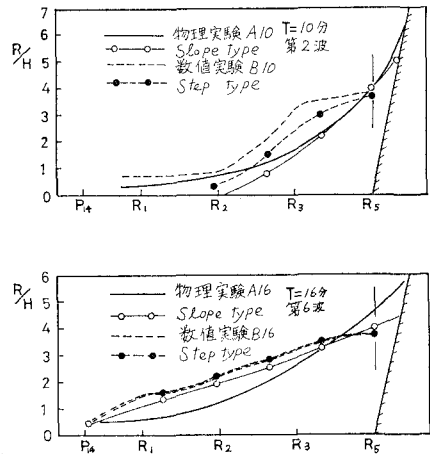
(2) 不規則波実験の結果

図—5 でわかるように物理実験と数値実験とでは波高の大小が対応していないなど一波ごとの対応ができない。そこで、一波一波に対して理論の R/H_s に相当する R_7/R_5 を求めることにする。図—6 にこの値を書き入れた。概して明治 29 年津波は理論曲線の上限に位置し、昭和 8 年津波は下限にある。これは周期特性の現われで、明治 29 年津波の周期を 20 分、昭和 8 年津波を 10 分と考えれば 図—2 から説明がつく。

次に MODEL C により得られた湾奥での最大波高に対して理論値および痕跡高から推定遡上高を検討してみる。理論による補正率は、傾斜海浜である両石に対して $R/\eta_{\max}$ 、比較的フラットな海浜である釜石には $H_s/\eta_{\max}$ を考える。大津波の周期は先に記したとおりとし、両石では幅の補正率をも加味をする。さらに、この結果に対して痕跡記録を合わせるため、波源モデルの海底変位量に補正を加えた。この操作は便宜上のもので今後の



図—6 遡上高の検討



図—7 両石での空間波形

検討を待たねばならない。表—4 にこれらの値をまとめた。

7. おわりに

以上の研究から、次の結論を得た。

(1) 規則波入力の結果、湾の共振周期に一致した場合には湾内で定常的に増幅し、一定値に近づくが、共振周期を少しはずれた周期では喰りを生じ、さらに共振周期からはずれた周期に対しては湾内増幅現象はほとんど起こらない。

(2) 定常規則波を入力した場合、汀線上最大水位は数値実験の値の 1.1~1.2 倍として得られ、両石のような所ではさらに谷幅補正率を乗じてやれば陸上遡上高の上限を得る。

(3) MODEL C のような数値計算値に対しては、

表—4 津波遡上高の推定

	波源域補正率	両 石			釜 石		
		$(R/\eta_{\max}) \times (\text{幅効果})$	補正值 η (m)	痕 跡 (m)	$H_s/\eta_{\max}$	補正值 η	痕 跡 (m)
明治 29 年津波	1.33	1.45	13.7	6.7~13.7	1.06	6.2	5.4~7.9
昭和 8 年津波	0.82	1.89	10.4	5.5~10.4	1.13	4.2	3.7~5.4

第1波の周期を求めておき、対象とする地点の地形に応じて理論補正值 $R/\eta_{\max}$ あるいは $H_s/\eta_{\max}$ を乗じ、必要に応じて幅効果による補正を行なうことにより遡上高の推定が可能となる。

(4) 今回は(3)においてさらに波源モデルに補正を加えたが、これは便宜上の処置であり、今後の課題となろう。

最後に、運輸省第二港湾建設局には実験遂行上多大の便宜をうけた。さらに本研究は昭和51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。また、東北大学助手佐藤淳、同技官佐藤栄

司、同大学院鈴木義和、学生の宇賀神義宣、三浦磨、中沢英明の諸氏には、研究を遂行するにあたり多大の協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫・真野 明・前原隆夫：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，土木学会第23回海岸工学講演会論文集，1976.
- 2) 岩崎敏夫・真野 明：三陸沖の断層地震による大津波の追算，土木学会第23回海岸工学講演会論文集，1976.
- 3) Shuto, N.: Standing wave in front of a sloping dike, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., 1972.