

湾口防波堤による津波波高の低減効果

後藤 智明*・吉田 行秀**・山 木 滋***

1. はじめに

三陸沿岸は、過去に幾度となく津波の来襲を受けている地域である。最近の 100 年間に於いても、明治 29 年 (1986 年) および昭和 8 年 (1933 年) の三陸大津波といった高さ 30 m に達する巨大な津波、さらに南米からわが国まで太平洋を伝播してきた昭和 35 年 (1960 年) のチリ地震津波により大きな被害を被っている。

三陸沿岸においては、津波対策事業のひとつとして湾口防波堤の建設が計画されてきた。最初の事業としては、チリ地震津波で被災した大船渡湾が選ばれ、昭和 43 年に延長 736 m の湾口防波堤が竣工している。現在、釜石湾において計画延長 1,660 m の防波堤を施工中であり、さらに久慈湾においても計画策定されている。

湾口防波堤の津波に対する効果については、伊藤ら (1964)、中村・林 (1978) などに報告されているように、各々の港湾において計画された時点での適切な手法として数値計算・模型実験などを用いて検討されてきた。しかし、当時の検討手法においては、津波初期波形の研究が十分でなかったことや、実験の相似率、あるいは計算機の能力と計算技術などに課題が残されていた。

現在では、津波初期波形として地震断層モデルを用いる手法、および、陸域への遡上を含む計算技術が確立され、痕跡記録などとの比較により、近地津波の打ち上げ高を精度良く再現できることが数多くの例により示されている。さらに、遠地津波に対しても、今村ら (1987)、永野ら (1989) により太平洋を伝播する計算手法が用いられるようになり、日本沿岸における計算と接続することにより、その精度の検討が行われている。

以上の背景を踏まえて、本研究では、遠地津波を含む上記の 3 津波・3 地点を対象とし、最新の津波数値シミュレーション手法を用いて、既往津波の再現性を検討するとともに、湾口防波堤の津波低減効果を統一的に把握し、考察を行った。

2. 計算方法

2.1 太平洋伝播計算

チリ地震津波の計算は、チリ沖から日本沿岸までの太平洋伝播計算と三陸沿岸における近海域計算の 2 種類に分けて行った。太平洋伝播計算は、今村ら (1987) の手法と同様に、コリオリ力と波数分散性を考慮した線形 Boussinesq 理論を、球面座標系により表した次の支配方程式を用いた (後藤, 1991)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \lambda} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (M \cos \lambda) + \frac{\partial N}{\partial \phi} \right] = 0 \quad \cdots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = -fN + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{h^3}{3} F_3 \right] \quad \cdots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \lambda} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = fM + \frac{1}{R \cos \lambda} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{h^3}{3} F_3 \right] \quad \cdots (3)$$

$$F_3 = \frac{1}{R \cos \lambda} \left[\frac{\partial^2}{\partial t \partial \lambda} (u \cos \lambda) + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial \phi} \right]$$

ここに、 R は地球の半径、 (λ, ϕ) は緯度・経度座標、 M, N は各方向の線流量、 η は水位変動、 h は静水深、 g は重力加速度、 f はコリオリ因子である。

計算範囲は、太平洋全域を含むように南緯 60°～北緯 60°、東経 120°～西経 70°の範囲である。空間格子間隔は緯度・経度ともに 10' (赤道距離で 18 km) である。地震断層モデルによる鉛直変位を初期水位として太平洋全体の伝播計算を行い、次に述べる近海域計算では、ここで得られた水位を強制入力波として用いた。

2.2 近海域計算

近地津波およびチリ地震津波の近海域計算は、図一 1 に示す範囲で行った。空間格子長は、沖側から順に 5.4 km, 1.8 km, 600 m, 200 m, 100 m, 50 m のように細分化し、全ての領域を同時に計算した。50 m 格子は湾口防波堤を含む湾内領域をカバーするように設定した。

格子長が 200 m よりも小さい領域では底面摩擦を考慮した次式で表される浅水理論を用いた (後藤・小川, 1982)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \cdots (4)$$

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室長

** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

*** 正会員 理修 (株)アイ・エヌ・エー新土木研究所

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{h+\eta} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{MN}{h+\eta} \right] + g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{(h+\eta)^{7/3}} MQ = 0 \quad (5)$$

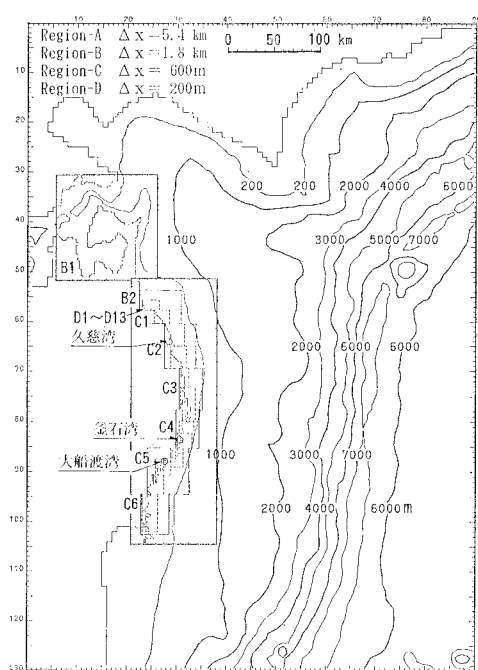
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N^2}{h+\eta} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{MN}{h+\eta} \right] + g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{(h+\eta)^{7/3}} NQ = 0 \quad (6)$$

ここに、 n はマニングの粗度係数 ($=0.025$)、 (M, N) は各々 (x, y) 方向の線流量、 $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ である。また、格子長が 200 m よりも大きな領域では (5), (6) 式から非線形項と摩擦項を除いた線形長波理論式を用いた。

陸域への遡上は、格子長 50 m の領域でのみ考慮し、境界条件は岩崎・真野(1979)の方法を用いている。湾口防波堤の湾口部においては流れの急縮・急拡に伴うエネルギー損失が考えられるが、ここでは考慮していない。近地津波の初期水位は、相田(1977)により検討された断層モデルにより計算される鉛直変位を与えた。

2.3 計算ケース

対象地点は、久慈・釜石・大船渡の3湾、対象津波は明治29年、昭和8年の三陸津波およびチリ地震津波の3津波とした。各々の津波来襲時に相当する湾口防波堤のない地形条件と湾口防波堤が建設された地形条件の2種類について、計18ケースの数値シミュレーションを実施した。



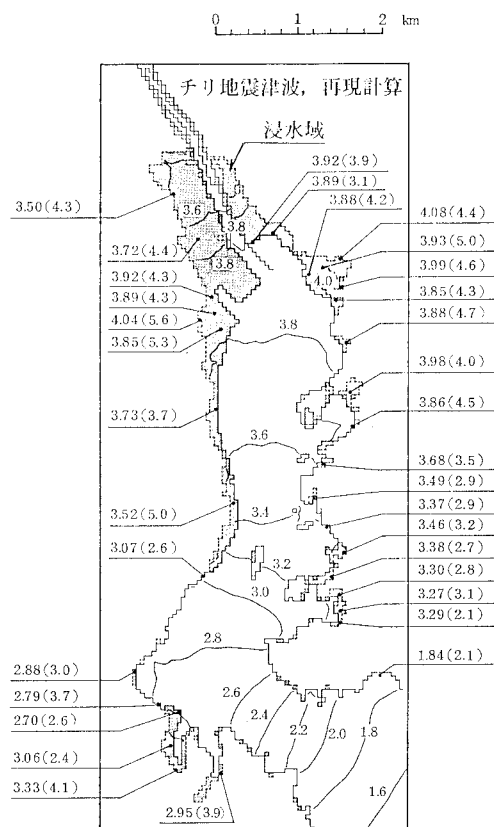
図—1 近海計算領域

3. 最高水位の再現性

3.1 チリ地震津波の再現性

計算例として、大船渡湾におけるチリ地震津波の再現計算の結果を図—2 に示す。計算により得られた格子点の最高水位の分布を等水位線および代表的な地点での数値により示したものである。() 内の数値は痕跡高である。また、計算による浸水域を併せて示した。湾口部では 2 m 程度の水位が湾奥部で 4 m 程度となる様子がわかる。

図—3 は、チリ地震津波に関して対象3湾の痕跡高と再現計算水位の比較を示したものである。大船渡湾では良好に一致していることがわかる。しかし、若干ではあるが痕跡高の高いところで計算値が小さく、一方、痕跡高が低いところでは計算値が大きくなる傾向が見られる。痕跡高が大きい地点が湾奥部であることから、入射津波の周期特性が実際とやや異なったため共振の効果が十分に現れなかった可能性があると考えられる。また、湾の中央部および湾口部の大きな痕跡高に対しては、痕跡高の測定精度、痕跡高として周囲に比べて高い値を測定する傾向があること、等の問題とともに、計算水位は



図—2 最高水位分布 (大船渡湾, 再現計算)

50 m 格子の平均的な値であるため、津波の局所的な挙動を再現できないこと、なども考えられる。

一方、釜石湾では全比較地点で計算値がかなり大きい結果となった。久慈湾では痕跡高が湾内各地でほぼ一定であるのに対して計算値は 4~6 m とかなりの幅があり、ばらつきが大きい。久慈と釜石では湾の固有周期が大船渡湾に比べて短いことから、入射津波波形に含まれる比較的短周期の成分が太平洋伝播計算の過程で実際のものとならずにしまった可能性が考えられる。

3.2 再現性の評価

計算の再現性を量的に評価するために、Aida(1978)により提案されている指標 K, κ

$$\log K = (1/n) \sum \log K_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\log \kappa = [(1/n) \sum (\log K_i)^2 - (\log K)^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

を算出し、表—1 および図—4 に示した。ただし、通常とは逆に $K_i = (\text{計算水位}/\text{痕跡高})$ とした。 K は痕跡高に対する計算水位の平均的な比率（幾何平均）であり、 κ はそのばらつき（対数で表した標準偏差に相当）を表す。

釜石湾における昭和 8 年津波、チリ地震津波を除くと、ほぼ 20% 程度の誤差範囲で再現性が評価できる。特に、大船渡湾はいずれの津波でも 10% 程度の誤差範囲で良好な再現性が得られた。釜石湾ではいずれの津波でも計算値が大きく、初期波形の問題よりは、沖側海底地形の精度の影響が大きいと考えられる。

なお、再現精度に問題がある地点では、 K 値が 1 に近くなるように入射津波の振幅を補正した計算も考えられるが、ここでは湾口防波堤の効果の把握を主眼とするため、このような補正は行わなかった。

4. 湾口防波堤の効果

4.1 大船渡湾におけるチリ地震津波

湾口防波堤が設置された条件のもとでの大船渡湾にお

けるチリ地震津波の結果を図—5 に示す。また、図—6 には、湾口防波堤の有無で比較した主な地点での最高水位を示す。

湾口防波堤により津波の高さはほぼ半減し、最大で 2 m 程度の高さとなる。浸水域は地盤高の極めて低い地域に限られる。また、先の図—2 と比較すると、湾口防波堤背後に 1.3 m の等水位線に表される水位の谷が生じているとともに、湾中央部から湾奥にかけての水位上昇の様子が湾口防波堤のない場合とやや異なっている。

図—7 には湾奥部地点における水位時間波形の比較を示す。第 1 波のピークは変わらないが後続のピークは湾口防波堤により大きく減少している。また、湾口防波堤がある場合には時間の経過とともに短周期の成分が生じていることがわかる。

これらの結果から、大船渡における湾口防波堤が、湾の共振特性を変化させることによりチリ地震津波の波高を減少させる効果が確認できた。さらに湾口防波堤外の隣接地点においても、最高水位が 1.84 m から 1.58 m と減少しており、防波堤による共振特性の変化が堤外にも効果をもたらしていることがわかる。

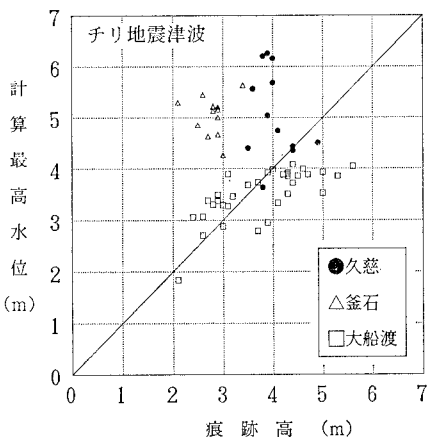
4.2 波高低減効果

このような湾口防波堤の有無により津波高低減効果を、防波堤内の代表的な地点（30 点程度）での水位の比をとり、(7)、(8)式と同様の指標で整理した。先の K_i をここでは（湾口防波堤ありの水位/なしの水位）として用い、このときの K, κ を各々 A, α と表記する。 A は湾

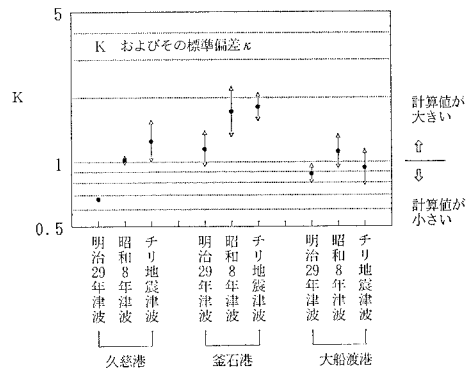
表—1 再現計算結果による K, κ

	明治 29 年津波		昭和 8 年津波		チリ地震津波	
	K	κ	K	κ	K	κ
久慈港	0.67	— ¹⁾	1.02	1.03	1.25	1.23
釜石港	1.15	1.19	1.72	1.28	1.81	1.14
大船渡港	0.88	1.09	1.12	1.18	0.94	1.19

1) 痕跡高は 1 地点のみ



図—3 痕跡高と計算水位の比較



図—4 既往津波の再現性

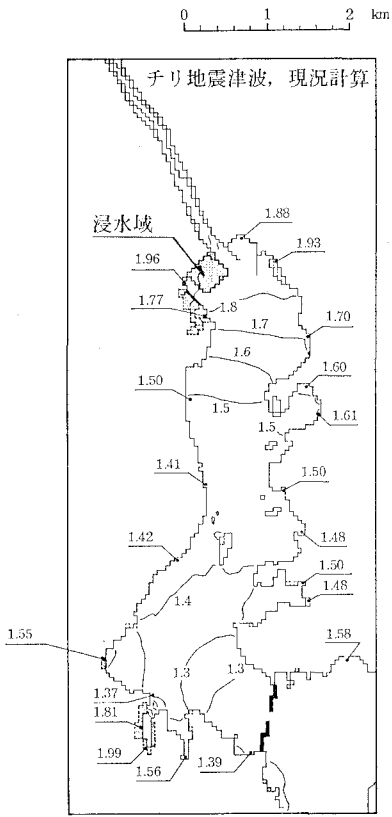


図-5 最高水位分布 (大船渡湾, 現況計算)

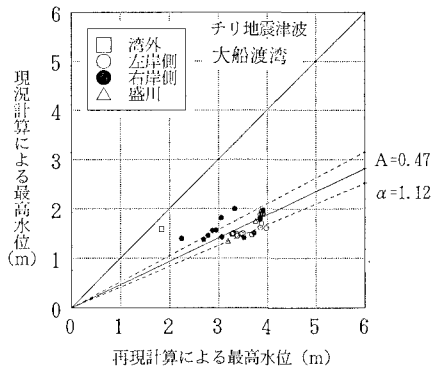


図-6 湾口防波堤の有無による最高水位の比較

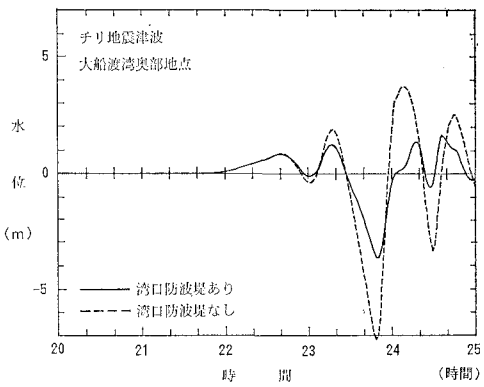


図-7 水位時間波形の比較

表-2 波高低減効果に関する指標 A, α

	明治29年津波		昭和8年津波		チリ地震津波	
	A	α	A	α	A	α
久慈港	0.53	1.41	0.53	1.31	0.59	1.25
釜石港	0.49	1.25	0.49	1.31	0.50	1.07
大船渡港	0.64	1.20	0.74	1.27	0.47	1.12

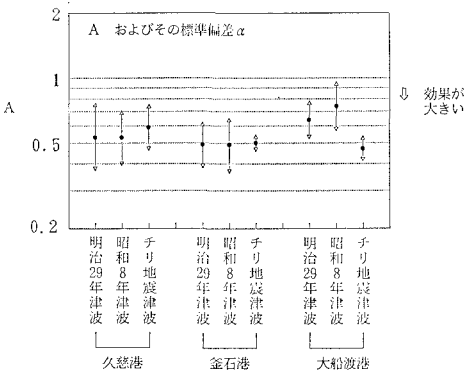


図-8 湾口防波堤による津波波高低減率

期が短いため湾内の小規模地形あるいは防波堤・埋立などにより局所的な水位が大きくなる場合があります。地点により効果のばらつきが生じている。久慈湾でばらつきが大きいのは、各津波の来襲当時に比べて、防波堤・埋立・掘削などにより海岸地形が大きく変化していることが一因である。

4.3 湾口防波堤による周辺への影響

湾口防波堤を設置した場合には、隣接した海岸への影響が懸念されるが、本計算結果により得られた主な影響としては次の点が挙げられる。

- ① 近地津波の場合には、湾口防波堤の外海側基部で反射波の影響により局所的に水位が大きくなるケースが見られた。

口防波堤による津波波高の低減率、 α は地点による低減率のばらつきを表す指標となる。結果を表-2 および図-8 に示す。

大船渡湾における近地津波の場合を除くといずれの港湾でも津波による水位上昇をほぼ半減する効果 ($A=0.5\sim0.6$) がある。チリ地震津波の場合には、地点によるばらつきも小さく、防波堤内水位がほぼ一様に減少することがわかる。一方、近地津波の場合には、津波の周

② 湾口防波堤からやや離れて隣接した海岸では、防波堤からの反射などの影響で水位が上昇する場合があるが、ほとんどのケースでは数 10 cm 程度の水位上昇であり、特に顕著な影響は見られなかった。逆に、先の大船渡の事例のように、湾口防波堤により周辺海域を含めた振動特性が変化したため、堤外隣接湾においても水位が顕著に低減するケースも見られた。

5. おわりに

津波シミュレーションにより得られた結果を基に、最高水位等について解析し、既往津波の再現性および湾口防波堤の効果に関して考察した。主要な結論として以下の事項が得られた。

① 3 港湾における 3 津波は、ほぼ 20 % 程度の誤差範囲内で再現された。特に、大船渡湾においては、近地・遠地、いずれの津波でも 10 % 程度の誤差範囲で良好な再現性が得られた。

② 湾口防波堤は、大船渡湾における近地津波の場合を除くといずれの湾でも津波による水位上昇量をほぼ半減する効果があることが確認された。ただし、周期が短い近地津波では、湾内の小規模地形あるいは防波堤・埋立

などにより局所的に水位が大きくなる場合があり、注意が必要である。

参考文献

- 相田 勇 (1977): 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, 52巻, pp. 71-101.
- 伊藤喜行・土岐祥介・森平倫生 (1964): 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第 2 報), 港研報告, 3 巻, 7 号, pp. 1-123.
- 今村文彦・永野修美・後藤智明・首藤伸夫 (1987): 1960 年チリ沖津波に対する外洋伝播計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 172-176.
- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波面上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 後藤智明 (1991): 遠地津波の外洋伝播計算に関する検討, 港研報告, 30 巻, 1 号, 印刷中.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, pp. 1-26.
- 永野修美・今村文彦・首藤伸夫 (1989): 数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性, 海岸工学論文集, 36 巻, pp. 183-187.
- 中村龍二・林 直樹 (1978): 釜石湾口防波堤による津波防止計画, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 585-588.
- Aida, I. (1978): Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, Vol. 26, pp. 57-73.