

## 「設計津波」の一提案

東北大学工学部 教授 工博 ○岩崎敏夫  
同 助手 楊 沢民

### §1. 序論

わが国には三陸沿岸において過去にしばしば大津波による災害を経験してきた。従って津波対策としての施設を構築することから、その重要な課題である。しかるに従来構造物設計の為の外力としての津波については、必ずしも明確でなく、いわば経験的なものにすぎなかったと考えられる。本論文は、著者等が10数年にわたって行なってきた研究成果に基づき、津波対策の為の設計津波に学問的根拠をあたえようという目的で提案するものである。

### §2. 従来の津波対策構造物の設計方法と問題点

津波対策としては、防潮壁、防潮堤、<sup>津波防波堤</sup>防潮林、防潮建築などの構造物の設置、避難道路、街区高地移転などの都市計画がある。従来これら構造物を設計するに当たってはまず対象とする津波を選定し、対象地帯における浸水高さの記録によって設計水位としてきた。しかし一寸考えれば分るように、津波の発生確率や、遡上時の非線形効果等よりしてこの設計方法が、何等根拠をもたないことは明らかである。他方津波理論については震源域の地盤変形が与えれば、一種の Cauchy-Poisson 波としての遷移波が求められ、また屈折、大陸棚反射、エッジ波の存在などの波形変化の理論、湾内変形理論、さらに遡上理論に至る迄、津波の性質がかなり細かく分るようになった。ただ、これらの一連の津波発生より遡上に至るプロセスは相互に関連なく研究が進められており、これを実際の設計に役立たせることは何等試みられていない。

つぎに防潮壁や防潮堤に衝突する津波は、衝突前の水深より著しく高くなる。図-1は、陸上を遡上する津波の先端のフルード数を岩崎・富樫(1969)が求めた値  $F=2$  として、横軸に防潮堤高さ  $H_d$  と侵入津波の水深  $h_1$  との比をとり、防潮堤に衝突した為には生じた反射波の高さ  $h_2$  と  $h_1$  との比を縦軸にとって、岩崎・富樫(1967)が求めた理論値を画いたものである。

従って  $H_d = h_1$  の場合  $h_2 = 2.0 h_1$ 、 $H_d = 2h_1$  の場合  $h_2 = 3.2 h_1$ 、 $H_d = 3h_1$  の場合  $h_2 = 3.4 h_1$  であって、完全に阻止する為には実  $h_1$  の3.5倍程度の防潮堤を設計する必要を生じることになる。この結果よりすれば従来の防潮堤においては既往の津波が来襲した場合、殆んど越流を免れぬことになる。しかし従来の防潮堤の高さが高すぎて住民が日常不便を蒙っていることよりすれば、この高さを2.5倍にすることは殆んど不可能であり、ここに改めて、設計津波の概念に再検討が必要とされるわけである。従って以下にこの問題につき考察を加え、「設計津波」についての提案を行なうこととする。

### §3. 設計津波

前節で述べたようにして津波対策を講ずる場合、問題とすべき津波は既往最大という概念では解決できない。しかるに河川においての計画洪水は当初、既往最大であったものの、確率洪水の概念が発達してくるにつれて、対象とすべき河川、あるいは工作物の重要度に応じて return period を設定し、さらに

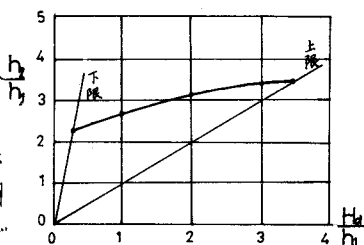


図-1.  $H_d/h_1$  と  $h_2/h_1$  の関係

時間配合も問題として計画高水招る概念を導入されてきたことは周知の通りである。いかなる自然災害要因においても、生起する最大量に上限はつけられており、既往最大の概念によると次々に更新されるべき設計量を想定せざるを得なくなる。これに反し確率量の設定においては、当然超過確率が見込め、従ってそれによる被害の予想が立てられるべきである。これと非超過確率による便益予想とのバランスによって妥当な投資額が見込めることになる。

さて津波について既往最大が適用し難い事情はすでに述べた。しかるに飯田氏は1868年より1962年の94年間に於ける地震津波について表-1のような統計処理を行った。

表 1. 津波の発生頻度 (1868~1962)

| 最大遡上高          | 0-0.63 m | 0.63-1.25 m | 1.25-2.50 m | 2.50-5.0 m | 5.0-10.0 m | 10.0-20.0 m | 20.0-40.0 m |
|----------------|----------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 日本全体           | 発生数 37   | 24          | 10          | 6          | 4          | 1           | 2           |
|                | 累加数 84   | 47          | 23          | 13         | 7          | 3           | 2           |
|                | 平均発生年 11 | 20          | 41          | 7.2        | 13.4       | 31.3        | 47.6        |
| 三陸地方           | 発生数 21   | 11          | 5           | 3          | 2          | 0           | 2           |
|                | 累加数 44   | 23          | 12          | 7          | 4          | 2           | 2           |
|                | 平均発生年 21 | 44          | 7.8         | 13.4       | 23.1       | 47.6        | 47.6        |
| 津波のマグニチュード $m$ | -1       | 0           | 1           | 2          | 3          | 4           |             |

表-1にはさらに津波

のマグニチュード  $m$  をほぼ相当する位置につけ加えた。表-1に見る限り昭和8年の津波は  $m=3$  と考えられ、従ってその発生頻度は、日本全体では30年程度、三陸地方では50年程度となる。

従来の三陸地方の津波対策は、殆んど昭和8年5月31日地震津波(昭和35年)を対象として行っているが、確率的にはこの程度があると考えてよい。つまり津波により予想される湾内各地の津波の浸水高、陸上への遡上高を求めねばならぬわけであるが、津波防波堤、泊地浚渫、岸壁増設、埋立土地造成など湾の形状や湾水振動特性に直接影響をあたえる工事が毎年盛んに行なわれ、さらに防潮壁、防潮堤、河川堤防、水門等の新設、補強、嵩上げに伴って遡上の状況も今後相当変わることを考えられる。従って実際湾には襲来する津波について、その規模の定ならず、波形すらも想定することから、湾内振動及び遡上を計算する為には必須の條件となるわけである。従来、莫然と来襲波の周期及び波高が問題とされ、湾にあっては湾の固有周期との関連によって共振するかなど論じられていたが、正弦規則波が莫然と予想されていたものを解される。津波の湾水振動を考えた場合、外洋波のスペクトル  $S_1(f)$ 、港湾のスペクトル  $S_2(f)$ 、港湾のパワー増巾度  $A^2(f)$  との間には、 $S_2(f) = A^2(f) \times S_1(f)$  なる関係があり、岩崎・森河(1972)はこの点の研究を進めている。また遡上は非線型現象であり従来侵入波として孤立波をあてな計算がおこなわれていたが、設計に際してはケース・スタディとしてどうして波形の想定をせねばならぬ。これは河川における計画高水と相通じる概念である。そこで、つぎにまづ波源域とその運動を推定し、さらに大陸棚を含めて湾にまで津波の計算を行おうと試みる。

#### 5.4. 波源域とその運動

飯田による津波のマグニチュード  $m$  と地震のマグニチュード  $M$  の間に次式が提案されている。

$$m = 2.61M - 18.44 \quad (1)$$

昭和8年の津波のクラスを  $m=3$  とし、これを設計津波のマグニチュードとすると式(1)より、 $M=8.23$

となり、昭和8年の  $M=8.3$  とほぼ一致するので、式(1)を用いてよい。

Richterの修正による地震のエネルギー  $E_s$  (エルグ)は、

$$\log_{10} E_s = 13.0 + 1.5 M \quad (2)$$

であって、 $M=8.3$  とおくと  $E_s = 2.818 E+25$  エルグ である。

津波のエネルギー  $E_t$  は高橋龍太郎博士による

$$\log_{10} E_t = 0.6 m + 21.4 \quad (3)$$

$m=3$  とすると  $E_t = 1.583 E+23$  エルグ となり、 $E_t/E_s = 0.55 E-2$ 、すなわち  $1/200$  位のエネルギーが津波に転化していることとなる。飯田、高橋、渡辺らは昭和8年津波では  $1/10$  程度の値であると計算しているが、この差違はRichterの修正による式(1)の常数項の差によるものである。

つぎに浪源域の大きさは殆んど余震域に対応するものとする。余震楕円の大きさと地震マグニチュード  $M$  の関係は従来の資料によつて Wilson がおこなっているが、今回羽島の津波は羽島おこなった過去76年間の津波の浪源域の図より大体適用できる式として、余震域の焦点間距離  $l$  について、

$$l = 10^{\frac{M-6.27}{0.76}} \quad (4)$$

なる経験式を導いた。従つて  $M=8.23$  に対し  $l = 380 \text{ Km}$  となる。

離心率  $E$  は、

$$E = \tanh \left[ 1.5 \tanh \left\{ \left( \frac{\pi}{2012} \right)^{1/2} \times l^{2/3} \right\} \right] \quad (5)$$

$l = 380 \text{ Km}$  に対し、 $E = 0.969$  となり、従つてつぎの楕円が浪源域となる。

$$\text{長軸} \quad 2a = l/E = 380/0.969 = 393 \text{ Km}, \quad \text{短軸} \quad 2b = l \cdot (1-E^2)^{1/2}/E = 96 \text{ Km} \quad (6)$$

浪源域の面積  $S = \pi ab = 3.14 \times 197 \times 48 = 2.97 E+10 \text{ m}^2$ 。

浪源域の面積  $S$  において一様に平均3mの垂直変位があったと仮定し之を水柱位置エネルギー  $\frac{1}{2} \rho g \bar{z}^2 S$  と津波エネルギー  $E_t$  と等しいとして垂直変位を求める。  $1 \text{ ton-m} = 9.8 E+10$  エルグ であるから、

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{2 E_t}{\rho g S}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.585 E+23}{9.8 \times 2.97 E+10}} = 10.4 \text{ m} \quad (7)$$

従つて浪源域は10m程度の海底の上昇があったこととなる。羽島らの研究によると  $S$  と  $M$  の間には次式が適用される。

$$\log S = 1.07 M - 4.12 \quad (8)$$

$M=8.23$  に対し  $S = 4898 E+10 \text{ m}^2$  となるが、これを(7)に入れると  $\bar{z}$  は  $8.15 \text{ m}$  となる。

#### §5. 浪源域の決定と大陸棚上の伝播

以上は浪源域推定の第一段階である。しかるに問題とする海岸について考へる場合、津波の来襲方向が問題となるが、どの方向について上述の浪源域が設定できるわけではない。いま過去三陸沖に発生した津波の推定浪源域を参照し、つぎの条件を設定する。(i) 浪源楕円の短軸は波向線に平行。(ii) 浪源域はタスカロフ海溝の縁辺に存在する。(iii) 浪源域は水深2000m以上の大陸棚領域に存在する。いま田巻を対象地と考へ、任意の方向に入射角をもつ波向線の送信描図を画き、上述の条件に従つて最も大きな浪源域を求める。しかるべきには図-2に示すような Model 1, 2, 3 を典型的なものとし、これより斜め方向では浪源域の大きさは急減する。従つてこの三種の Model につ

き84の方法で再計算をすると表-2をうる。

これによって岩崎は $N85^{\circ}W$ の入射角において最大の津波を求算することになる。これは、 $N80^{\circ}W \sim N90^{\circ}W$ を外れるとあまり脅威ある津波はないことがわかる。岩崎・楊わかつて行なった計算(1970)によると、云を一定とし、変動の継続時間を表として湾には到達する津波の形状は著しい変化を示さぬ。従って計算のメッシュの取り方の技術より変動時間を600 secにとり、大陸棚上の伝播について、基本方程式を積分することにより、湾内の波形を決定できるのである。

#### §6. 本すい

津波の発生より大陸棚伝播については相田(1969)、岩崎・楊(1970)の計算が既になされており、その方法を用いれば容易に湾には到達する津波を求めることができる。

ここに提案した方法は同波におけるS Verdrup-Munk, あるいは板本・井島の方法に対応するものと考えている。最後に本研究は昭和46年度文部省科学研究費(特定研究)「資料の解析と蒐集」代表者石原安雄の援助を蒙った。

#### 参考文献.

- (1) 岩崎・富樫 "瀬上津波先端の境界条件と試算法" 才16回海岸工学講演集(1969)
- (2) 同上 "瀬上津波に対する陸堤効果に関する研究" 才14回海岸工学講演集(1967)
- (3) Aida I. "Numerical exp. for Tsunami caused by moving deformation of sea bottom" Bull. of the earthquake research Inst. Vol. 47 (1969)
- (4) 岩崎・楊 "湾内津波の計算才2報" 才7回自然災害科学総合シンポジウム(1970)
- (5) 岩崎 "津波" 水工学に関する夏期研修会講演集, A. 海岸・港湾コース(1970)
- (6) 岩崎 "津波特論" 同上(1971)

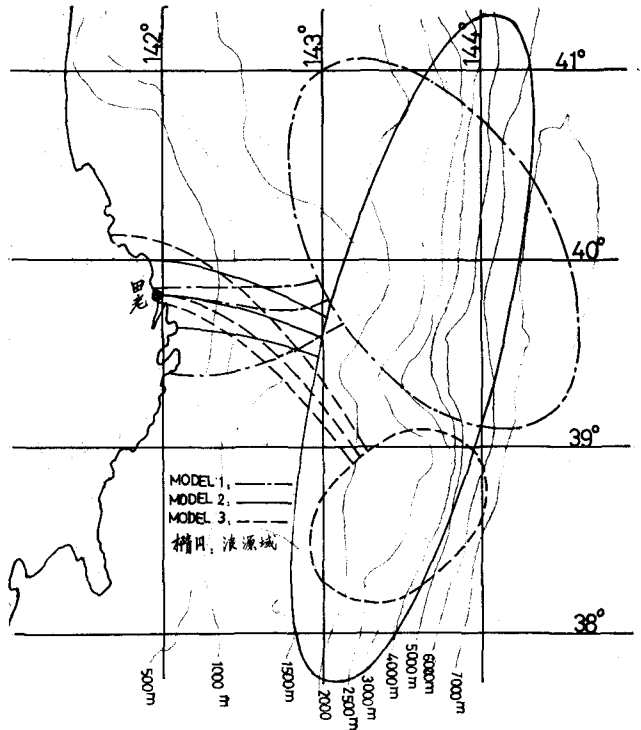


図-2. 浪源域のMODELS.

表-2

| MODEL<br>NO. | 入射角<br>$\theta$ | 浪源棚の<br>面積<br>$S(km^2)$ | 津波の<br>エネルギー<br>$E_t(erg)$ | 最終変動高<br>$Z(m)$ |      |
|--------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|------|
| 1            | $N80^{\circ}W$  | 21126.                  | 2.44                       | 0.73E23         | 8.4  |
| 2            | $N85^{\circ}W$  | 29692.                  | 3.00                       | 1.58E23         | 10.4 |
| 3            | $N90^{\circ}W$  | 6390.                   | 1.70                       | 0.26E23         | 9.2  |