

「設計津波」の波源域

岩 崎 敏 夫*

1. 序 論

津波対策としての防災施設はチリ地震津波（昭和35年）以来関係当局によって鋭意整備が進められ、これによって三陸地方沿岸は低平な海浜地帯に限ればほとんど至るところに防潮壁、あるいは防潮堤が張りめぐらされた。また主要河川についても津波の遡上対策が施こされようとしている。しかしながら、これら構造物設計の慣用的方法としては既往の津波のうち事業対象としての津波を指定し、その津波の際の最大痕跡高を基準とし、その高さかあるいはこれに若干の余裕高を加えるかするのが普通で、わずかに佐々木 忍氏が普代海岸および津軽石海岸について Green および Kaplan の公式を適用された例があるにすぎない¹⁾。

元来津波は地震による海底変動によって生じた一種の Cauchy-Poisson 波であり、発生地域における波形は津波の伝播とともに次第に変形する。また近海津波の発生域はタスコラ海溝の西側崖の斜面と考えられ、三陸沿岸までは 200 km 以内の距離であるのに大津波になると波源域の幅もその程度であるために陸岸に到達した津波は分散過程にある遷移波である。さらに陸棚斜面の反射、大陸棚波、エッジ波、等深線屈曲による屈折その他が加わる。こうして湾の入口に到達する津波の波形を推定することははなはだ困難である。

津波対策は沿岸における津波の挙動、ことに構造物に対する津波の作用が明らかになってはじめてある程度の安全性をもってたてることができる。この場合には湾内振動、shoaling 効果、種々の縦断形状を有する汀線近傍の津波の変形、遡上ならびに陸堤に作用する津波の挙動が明らかにされねばならない。このことはたとえば津波防波堤、泊地浚渫、岸壁増設、土地造成、港湾区域の拡張などの工事が毎年さかに行なわれつつあり、従って湾水振動特性が変化しつつあること、同様に防潮堤、防潮壁、水門、河川堤防の新設、増設、かさ上げ、増強に伴って、遡上反射屈折の特性が変化をうけつつあることに想到すれば、当然であり、過去の痕跡高に依存することについての検討が必要と考えられる。

さて海洋中に発生して沿岸に到達するプロセスと、湾

の入口または沿岸沖合に到達して遡上あるいは構造物への衝突に至るプロセスについて従来数多くの研究がなされ、その大要について著者は別の機会に解説を行なった^{2), 3)}。また東北大でも沿岸におけるプロセスについて研究の努力をつづけてきた^{4)~10)}。このような趨勢から、津波の研究における成果を実際の設計に反映させることが、ことにコンピューターによる数値計算法の進歩に伴って可能でないかと考えられ、このような見地に立って著者らは「設計津波」の提案を行なった¹¹⁾。すなわち妥当な投資額が非超過確率による便益予想とのバランスによって見込まれるという考え方に立ち、現在三陸海岸で実施されている事業対象が昭和8年三陸津波あるいは昭和35年チリ地震津波でその津波マグニチュード m が3であることと、その平均発生年が日本全体では30年程度、三陸地方では50年程度であること²⁾とより、確率的にこの程度のものを投資対象として適当な津波規模と考え、これによる災害予測の方法として波源域より沿岸に至る津波の伝播、変形、遡上を数値計算により実行し、便益計算の基礎を与えようというものである。このことは津波がケース・スタディでなければならぬという特質からも必然的に要求されてくる手法であるが、本論文においてはこのような提案の裏づけのために、まず既往の資料を用いて波源域の設定の仕方について考察を加えようとするものである。

2. 波源域のディメンション

波源域の推定はまず津波のマグニチュード m より地震のマグニチュード M を求め、そのような地震の楕円形余震域をもって波源域とする¹²⁾。

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

$$M = 6.27 + 0.76 \log_{10} l \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon = \tanh \left[1.5 \tanh \left\{ \left(\frac{\pi}{2012} \right)^{1/2} \cdot l^{2/3} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$2a = l / \epsilon \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$2b = l \cdot (1 - \epsilon^2)^{1/2} / \epsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S = \pi ab \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\log_{10} E_t = 0.6 m + 11.4 - \log_{10} 9.8 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに ϵ , l , a , b , S は波源楕円の離心率, 焦点間距離 (km), 長径 (km), 短径 (km), 面積 (km²)。 E_t は津波

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

のエネルギーで ton-m 単位である。

式(1)は飯田波事博士の提案式ですでに多く引用されて広く認められているものである。

式(2)については飯田博士によれば、

$$M = 6.27 + 0.63 \log_{10} l \dots\dots\dots (8)$$

で与えられ、文献(12)にもこの式が引用されている。他方 B. Wilson は次式を提案している¹³⁾。

$$M = 6.35 + (2/3) \log_{10} l \dots\dots\dots (9)$$

しかし羽鳥徳太郎博士は1959年より1962年までに日本近海に起こった津波および1968年の十勝沖地震津波による波源域を逆屈折図の方法によって克明に推定された¹⁴⁾。その他の資料を含めて1929年以来のほとんどの津波を網羅した波源域がえられているが、これを用いて M と l との関係を表(2)、(8)、(9)とともに示したのが図-1である。これによると式(8)は大きい M の場合

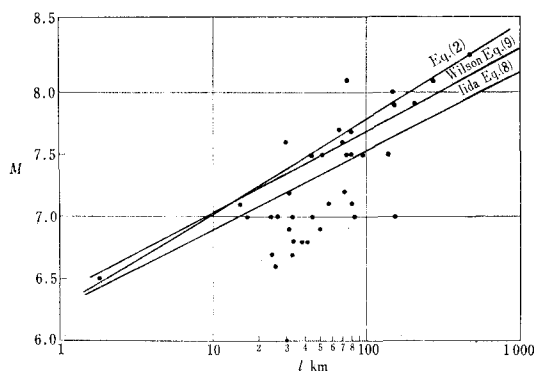


図-1 M と l との関係

に過大な焦点間距離を与える。また式(9)もやや改良されているが、式(2)は $M \geq 8.0$ に対しよく羽鳥博士の資料と一致しており、設計津波のモデルとして適当と考えたので、式(2)のように係数を修正した。次に式(3)は Wilson により提案された式である。やはり羽鳥博士の資料を用いて換算し ϵ と l との関係を式(3)とともに示すと図-2のようになり、これも点がかなりばらついて

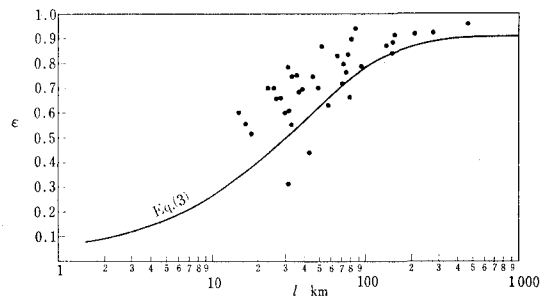


図-2 ϵ と l との関係

いるが、大きい l に対してはかなり近い値を与える。式

(7)は高橋龍太郎博士によって与えられたものである¹⁵⁾。この式の適合度を調べるために、かつて筆者がまとめた津波のエネルギーに関する表(文献2))を用いて m と E_t に関する実測例および式(7)(ただし E_t を erg 単位で表わしたもの)を図-3に示す。 $m=3$ の場合のデータの散乱は著しいが一応津波エネルギーについて平均的な性質が示されているものといえよう。

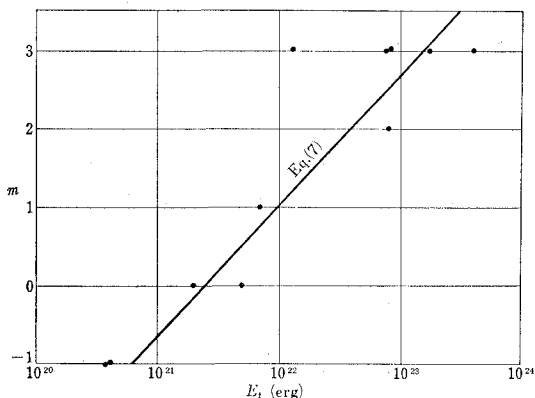


図-3 m と E_t との関係

波源域における海底面の運動については種々の仮説が唱えられている。たとえば楕円の長軸を断層線とし、縁辺を0偏位とする直線状食違い偏位とか、波源域内の偏位分布の最適化の試みなどである¹⁶⁾。しかしその研究は地震学者の将来の研究にまたねばならないものであるので、設計津波を考える上では羽鳥博士の方法が簡単かつ明快であるとして次式によることとした。

$$\zeta_0 = \sqrt{\frac{2E_t}{w_0 S}} \dots\dots\dots (10)$$

ここに ζ は海底隆起高で時間の関数であるが、 ζ_0 は最大隆起高である。また w_0 は海水の単位重量である¹⁷⁾。式(1)~(7)および式(10)によって地震のマグニチュード M が与えられれば津波のマグニチュード m 、波源域の規模、津波エネルギー及び波源域の海底上昇高がすべて求められる。Wilson は断層線に沿う地盤の最大偏位の観測例を集計している。これは ζ_0 と若干意味が異なるが比較のためにまとめたのが図-4である。図中曲線は上述の方法で求めた地盤最大上昇高さであって、 $M=7.8$ 付近に最大値を有すること、観測例をほとんどすべて包含する最大偏位を与えることがわかる。これよりはずれた3例は美濃尾張大地震(1891)およびアッサム・インド(1897)、ヤクタート・アラスカ(1899)であった。

さて元来津波のマグニチュードは波源より最も近い外洋ぞい沿岸での天体潮よりの偏差 H の大きさによって定義される。したがって上にのべた波源域より生じた津波が沿岸においていかなる偏差を生ずるかを検討してお

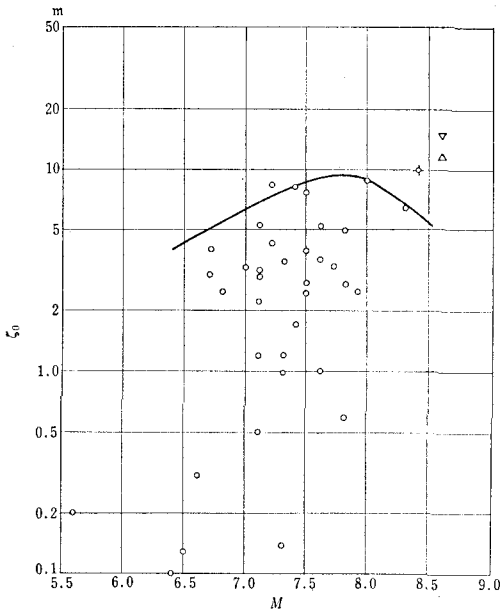


図-4 最大地表変位と地震のマグニチュード

かねばならないわけであるが、詳細な数値計算の結果は稿を改めて報告することとして、ここでは簡単な考察を行なうにとどめる。

まず Wilson は最大偏差 H' (m) と M との関係式として次式を示した。

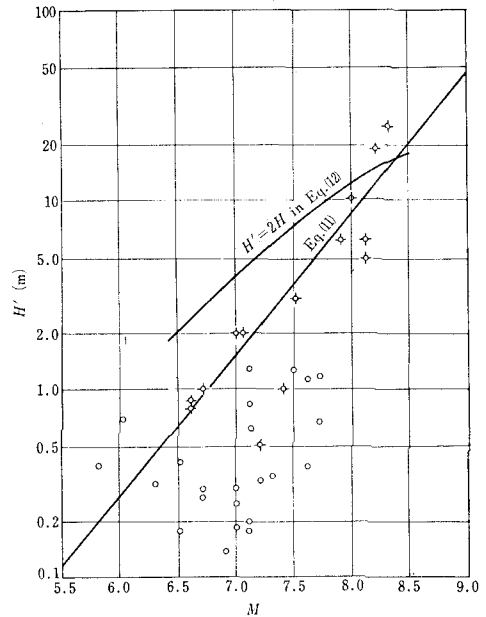
$$\log_{10} H' = 0.75 M - 5.07 \dots\dots\dots (11)$$

これに対し波高 H 、波長 L の波が震央より同心円状にひろがるものすると、半径 R の位置での波エネルギーは、

$$E_t = w_0 \pi R_0 \left(\frac{H^2}{4} \right) L \dots\dots\dots (12)$$

式(12)に式(7)を代入し、 L は波源楕円の短軸長 $2b$ 、また $R_0 = 190$ km と仮定することにより M と H との関係を求めることができる。ただし、式(12)より得る H は進行波のそれであるので外洋に面した陸岸では重複波が形成されるものとし、 $2H$ をもってそこでの波高とする。陸上に遡上する場合にはほぼこの値に等しいから、 $H' = 2H$ となる。

以上によって H' を求め、飯田博士の実測値と比較した結果を図-5に示す。また図中には式(11)も示されている。これによると M の小さいところで波高が過大に出ており、 $M=8.0$ あるいは $m=3$ のところでもやや大きい値を与えるが、 ζ_0 の場合のような極大値を生じないので、このような計算法の根拠が得られたものといえよう。ただ M が小さい場合の波高についてはむしろこの方法によって得られる結果は実測値のうちの上限を与えるので、設計の目的よりすれば式(11)よりも適当とい

図-5 M と H' との関係

えよう。

3. 波源域の地盤上昇速度

津波の発生機構は今村明恒博士以来多くの研究者によって解析が進められたが、ことに高橋龍太郎博士、中村公平博士、市栄 啓博士の貢献は重要であり、そして最後に、梶浦欣二郎教授の理論が美麗に展開されている。

最近 Hammack, Jr. J. L. は1次元伝播の際に exponential および half-sine time-displacement history を波源域に与えた場合を研究したが、ことに波源域の地盤変動の規模および時間スケールの無次元化をはかり、発生波の物理的特性をこの無次元スケールの関数として表わすことを試みた¹⁸⁾。これによると津波発生域の波を定義する際重要な無次元パラメーターは、波源域の半幅 b 平均水深 h としたとき、

$$a. \text{ disturbance-amplitude scale } \frac{\zeta_0}{h}$$

$$b. \text{ disturbance-size scale } \frac{b}{h}$$

$$c. \text{ disturbance-time scale } t_c \sqrt{\frac{g}{h}}$$

$$\text{または disturbance time-size ratio } \frac{t_c \sqrt{gh}}{b}$$

である。 t_c の定義は後述する。 $t_c \sqrt{gh}/b$ が非常に小さい場合を impulsive bed deformation といい、波源域の最大偏差 η_0 と ζ_0 との比は $t_c \sqrt{gh}/b$ の値にかかわらず一定になる。かしし $t_c \sqrt{gh}/b$ が非常に大きい場合を

creeping bed movement といい、 η_0/ζ_0 の値は、 $t_0\sqrt{gh}/b$ の値に逆比例する。さらにこの2領域の中間に transition region がある。また波源域境界近傍における波形は impulsive bed movement の際には実際の地盤変形の時間的様相にかかわらないが、creeping の際には強く影響される。

impulsive region の範囲は地盤変動が exponential の際 $t_0\sqrt{gh}/b$ がほぼ 0.5, half sine の際ほぼ 1.0 となっている (ここに t_0 は exponential の際は $2/3\zeta_0$ を与える t の値, half sine の際は ζ_0 に達する t の値である)。

さて設計対象を三陸海岸とし、近海津波を考えた場合波源域の地理的分布は海底傾斜の激しい海溝付近に大津波の波源があり、水深 2 000 m より浅い地域に多数の微小津波の波源がある¹⁴⁾。さらに地震の際の地盤変動が 10 分間も継続するというのも一寸考えにくく、数秒程度であろうと想像される。したがって前章の方法で a または b を求めて試算すれば、 $t_0\sqrt{gh}/b$ は half-sine と考えた場合大体 1 以内におさまリ、三陸沖の設計津波を考える限り、impulsive bed deformation, したがって η_0/ζ_0 の値は $t_0\sqrt{gh}/b$ の値にかかわらないことが推定される。かつてアナログ計算機による 1 次元伝播を解いて同様の結果をえたことがあるが Hammack は $|\zeta_0/h| < 0.2$ に対しこの region では線型方程式が波構造をよく表現すると述べており、裏付けがえられたといえよう¹⁹⁾。

4. 結 語

「設計津波」の波源域のディメンション、および地盤変動について若干の提案を行なった。実際に「設計津波」の波源域を設定するにはさらに、構造物を設置する対象地点に対してこの波源域をどのような相対的位置に、かつ方向におくかが問題になる。これについては沿岸沖合波高あるいは湾内波高などの計算を行なわないと伝播機構を考慮に入れた議論ができない。すでに若干の成果を得てはいるが、紙数の関係もあり別の機会に発表した²⁰⁾。最後に本研究の費用の一部は昭和 47 年度文部省科学研究費補助金「浅海域における長周期波の変形と陸上遡上に関する研究」(代表者 岩崎敏夫)の助成をうけた。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐々木 忍：三陸沿岸の津波対策について、第 6 回海岸工学講演会講演集 (1956)
- 2) 岩崎敏夫：津波、土木学会水理委員会水工学シリーズ 70-04 (1970)
- 3) 岩崎敏夫：津波特論、土木学会水理委員会水工学シリーズ 71-B-10 (1971)
- 4) 岩崎敏夫・富樫宏由：水平な陸上への津波の遡上に関する研究、第 13 回海岸工学講演会講演集 (1966)
- 5) Iwasaki, T. & H. Togashi: On the Overland Flow of Tsunami and Effectiveness of Walls as Counter Measures, Proc. 8th Conf. on Coastal Engineering, London, (1968)
- 6) Iwasaki, T. & H. Togashi: On the Shoreline and Leading Front Conditions of Tsunami Waves in the Light of Method of Characteristics, Proc. of 13th Congress of IAHR, Kyoto (1969)
- 7) 岩崎敏夫・富樫宏由・佐藤栄司：津波の汀線における水理特性と陸上遡上、第 17 回海岸工学講演会論文集 (1970)
- 8) 岩崎敏夫・楊 沢民・佐藤栄司・新井信一・板橋勝一郎：矩形湾の波高増巾率に関する研究、土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集 (1972)
- 9) 岩崎敏夫・森河 久・真野 明：長周期波による矩形湾内の振動と湾口条件、土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集 (1973)
- 10) 岩崎敏夫・真野 明・長谷川明・前原隆生：津波の湾内変形に関する実験的研究、第 20 回海岸工学講演会論文集 (1973)
- 11) 岩崎敏夫・楊 沢民：「設計津波」の一提案、昭和 46 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要 (1972)
- 12) 土木学会編：海岸保全施設設計便覧、第 1 章第 7 節津波 (1969)
- 13) Wilson, B. W.: The Nature of Tsunamis, Their Generation and Dispersion in Water of Finite Depth, NESCO Tech. Rep. No. SN 57-2, (1962)
- 14) Hatori, T.: Dimensions and Geographic Distribution of Tsunami Sources near Japan, Bull. Earthquake Res. Inst. vol. 47 (1969)
- 15) Takahashi, R.: Potential Tsunami Inundation Along Japan Sea Coast, Bull. Earthquake Res. Inst. vol. 28 (1950)
- 16) 相田 勇：津波記録による波源数値モデルの推定、地震第 2 輯 第 25 卷 (1972)
- 17) Hatori, T.: Vertical Displacement in a Tsunami Source Area and the Topography of the Sea Bottom, Bull. Earthquake Res. Inst. vol. 44 (1966)
- 18) Hammack, Jr. J. L.: Tsunamis—A Model of Their Generation and Propagation. C. I. T. Report No. KH-R-28 (1972)
- 19) 岩崎敏夫・楊 沢民：湾内津波の計算(2)、第 7 回災害科学総合シンポジウム講演論文集 (1970)
- 20) 岩崎敏夫・楊 沢民：波源域と三陸沿岸における津波の波形との関係について、第 10 回災害科学総合シンポジウム講演論文集 (1973)