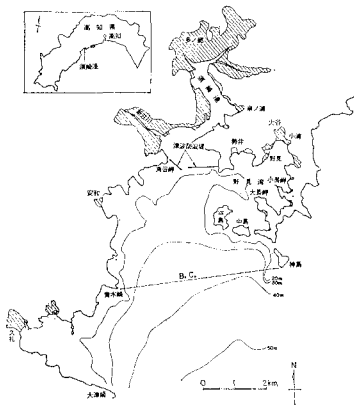


須崎湾における南海地震津波の水理模型実験

高山 知司*・平石 哲也**

1. まえがき

津波の来襲によって被害を受けると想定される港湾においては、津波に対する防災施設の整備および防災対策の充実を図らなければならない。そのためには、来襲する津波の高さ、およびその挙動を推定しておく必要がある。これらを推定する方法としては、数値計算および水理模型実験がある。数値計算は経費が安く、計算の所要時間が短い上、広領域での津波の挙動が推定できる、地形を容易に変更できる等の利点があるため、数多く行われてきている。しかし、数値計算では細かい地形の再現が困難であること、津波によって生じる渦等の再現が難しいなどの問題がある。一方、水理模型実験では地形を現地に合わせて模型を再現するため、細かい地形変化や渦の発生などの再現が可能であるという利点がある。しかし、対象とする湾内だけの狭い領域にしか対応できないことや、陸上境界から反射された波の側壁からの再反射に対する対応などの問題がある。そのため津波の解析においては、模型実験および数値計算両者の利点を利用して、相互に補って津波の特性を求める必要がある。そこで、本研究では、模型実験において数値計算をどのように利用したかについて述べるとともに、数値計算の適用範囲について検討した。



図—1 須崎湾の位置と地形

本研究の対象とした港湾は、湾口部に津波防波堤が計画されている高知県須崎港である。図—1 に須崎湾の位置および地形を示す。須崎湾は過去幾度も津波の被害を受けており、近年では 1946 年の南海地震津波および 1960 年のチリ地震津波が大きな被害をもたらしている¹⁾。特に、南海地震津波による被害が大きい。南海道沖を震源とする地震によって起こされた大津波は、慶長、宝永、安政年間にも発生しているので将来においても発生する可能性が高い。そこで、模型実験および数値計算では、最近に生じ最も資料が豊富な 1946 年南海地震津波を対象とした。

2. 数値計算による湾口津波波形の設定

実験室で南海地震津波を再現するためには、湾口における津波波形を設定し、水理模型の湾口部においても同一の波形が生じるように造波を行う必要がある。しかし、須崎湾口における南海地震津波の波形については実測資料がないため、数値計算によって湾口部の津波波形を求めることにした。

(1) 数値計算法

本研究で用いた数値計算法は、相田²⁾が開発した計算法に、著者³⁾が改良を加えた計算法である。初期の水面分布は地震による海底地盤変動量に等しいと仮定して、海底地盤変動量を断層モデル⁴⁾によって求めた。計算領域は、津波の波源域を含んだ西日本および南方海上とした。

(2) 断層モデルの設定

1946 年南海地震のモデル断層については、数値計算で求めた津波波形が細島、宇和島、堺、内浦、伊東における検潮記録と最も良く一致するように相田²⁾が最適なモデル断層を提案している。図—2 は、相田²⁾が示した 1946 年南海地震のモデル断層の位置と地盤の変位量を示している。このモデル断層を基本ケースとして、基本ケースの断層面の位置および縦ずれ変位量を若干変化したケースを用いて計算した地盤変動量および最大津波高が実測された地盤変動量⁵⁾および痕跡高に最もよく一致するようなモデルを設定することにした。表—1 は、数値計算に用いた一部の断層モデルのパラメータを示し

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所波浪研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所波浪研究室

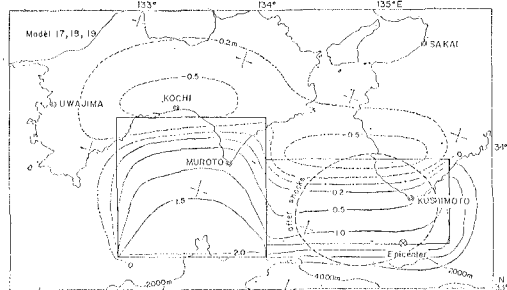


図-2 南海地震津波の断層面の位置

表-1 断層モデルの諸元

ケース	断層の長さ $2L$ (km)	断層幅 W (km)	断層面の深さ Z_d (km)	傾き θ ($^{\circ}$)	横ずれ位 U_s (m)	縦ずれ位 U_d (m)
基本	150	70	10	10	2.4	-3.2
	120	120	1	20	1.2	-4.8
8	150	70	10	10	2.4	-5.0
	120	120	1	20	1.2	-7.0
6	150	70	10	10	2.4	-5.0
	120	120	1	20	1.2	-9.0

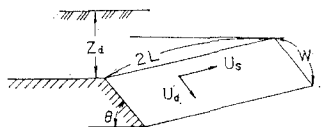


図-3 断層モデルの模式図

たものである。図-3 は、表-1 に示された各パラメータを用いて示した断層モデルの模式図である。地盤変動量の計算の結果、断層面の位置を数 km 程度変化させても地盤変動量はほとんど変化しないことがわかった。縦ずれ変位量を変化させたと、基本ケースより縦ずれ変位量が大きいケース 8, 9 の方が地盤変動量の計算値が実測値によく一致した。そこで、これらの 3 ケースを用いて、1946 年当時の須崎湾における数値計算を行った。図-4 は、数値計算で求めた須崎湾における最大津波高を示した図である。図の横軸は図-1 の B.C. 線より内側の沿岸部の地名を带状に示し、縦軸に各地の最大津波高を平均海面を基準として示した。実線が基本ケース、破線および一点鎖線がそれぞれケース 8, 9 の計算結果を示す。○印は、実測痕跡高^{6),7)}を示す。図-4

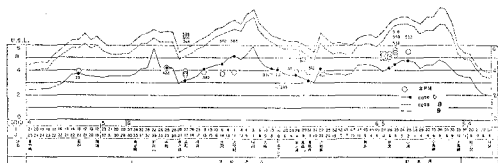


図-4 数値計算による最大津波高の分布

に示されるようにケース 8, 9 の最大津波高は痕跡高よりも全体的に大きく、一致しない。基本ケースでは、地盤変動量が実測値の約半分であったけれども、最大津波高の分布は、実測痕跡高の分布によく一致する。そこで、本数値計算においては、相田が示したモデル断層を南海地震のモデル断層として用いた。

(3) 津波波形の設定

基本ケースのモデル断層を用いて南海地震津波の数値計算を行ったところ、地震発生後 3 時間以内に最大波が生じたので、余裕をみて 5 時間分の計算を行った。そして、図-1 に示された湾口部の B.C. 線における水位変動を求めた。ただし、計算された水位変動の初期値は、0 から変動が始まるように設定した。

3. 南海地震津波の模型実験

(1) 須崎湾の水理模型と実験

水理模型製作範囲は、図-1 に示した等深線にほぼ平行な B.C. 線より湾内側の海域と、津波による浸水が生じる可能性のある陸域を十分含む範囲とした。模型製作範囲の最大水深は約 50 m である。陸上部は、津波の遡上高が測定できるように標高 20 m まで再現し、それ以上の地域は標高 20 m の平坦部とした。水槽の大きさを考慮して、水平縮尺は 1/350、鉛直縮尺は 1/70 とし、1:5 の歪模型とした。水槽端には等深線にほぼ平行に空気室があり、内部の空気圧を変化させることによって津波を造波した。図-5 は、須崎湾水理模型の平面図を示しており、図の下端が空気室となっている。須崎湾は 1946 年に降一部埋立てられており、この埋立地は取りはずし可能な構造とした。

模型実験では、湾内の津波高、沿岸部の浸水高、湾口部の流速および流況を調べた。津波高は、図-5 の 1~12, N9~N10 の 19 点に波高計を設置して測定した。沿岸部の浸水域は、硫酸第二鉄アンモニウムの水溶液に浸した後、十分乾燥させ、フェロシアン化カリウムの粉末を塗りつけた角棒を模型床上で 50 cm 間隔の格子点毎に設置して求めた。水に濡れると両薬品が化合して青く変色するため、角棒の変色した部分を測ることによって浸水高を求めることができる⁸⁾。湾口部の流速は図の ×印に 2 成分電磁流速計を設置して求めた。流速計の x 軸は北を正とする南北方向に、y 軸は西を正とする東西方向に一致させた。流況は、直径 5 cm のフロートを多数浮かべ、その軌跡をカメラのシャッターを開放して撮影することによって求めた。

(2) 津波波形の振幅の設定

図-5 に示した湾口部の No. 1, 2, 3 の 3 点で測定した津波波形が数値計算で設定した津波波形にできるだけ一致するように空気室内の圧力信号を調整した。図-6 は、数値計算で設定した湾口部の津波波形と模型で再現

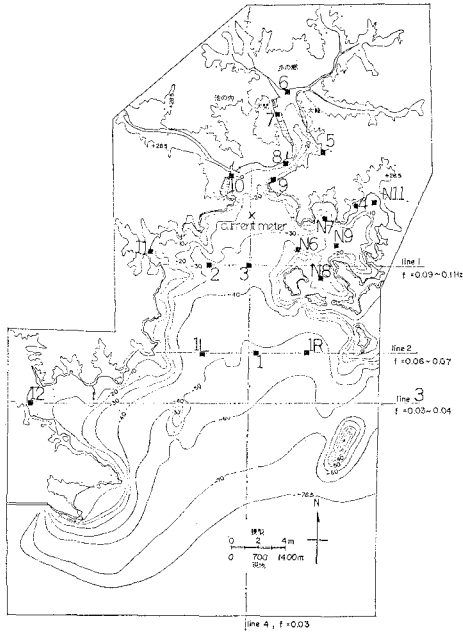


図-5 須崎湾の水利模型

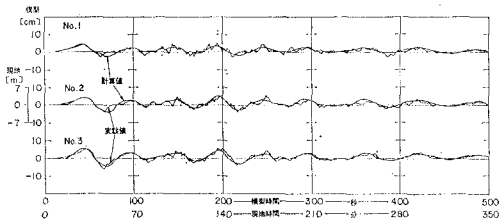


図-6 計算波形と実験波形の比較

した津波波形を比較したものである。実験波形には、水槽側壁および空気室からの反射波によると思われる振幅の小さな短周期波の成分が多く含まれているものの、目標とする計算波形にほぼ一致させることができた。

数値計算においては、境界条件、海底摩擦、港口部エネルギー損失等に多くの仮定が含まれているため、南海地震津波の波形、つまり波の連り状態については数値計算で求めたものを用いることにし、波形の振幅については1946年当時の地形を用いた再現実験を行って、南海地震津波の実測浸水域と実験で測定した浸水域が一致するように設定することにした。津波による浸水域は、地盤沈下量に大きな影響を受ける。現地調査によれば⁶⁾南海地震発生直後、須崎湾周辺では約1.2mの地盤沈下が生じている。ただし、この報告は、数点の測量結果に基づいており須崎湾およびその周辺全域が一律に1.2m沈下したかどうかは明確ではない。そこで、本実験では地盤沈下について2つの考え方を採用した。i) 須崎湾では局所的に1.2mの地盤沈下が生じたものの、模型で再現した範囲に含まれる地域では、それほど大きな地盤

沈下が生じなかった。従って、実験では全く地盤沈下を考慮しない。ii) 須崎湾およびその周辺域では一律に1.2mの地盤沈下が生じた。従って、実験でも1.2mの地盤沈下を考慮する、という2つの考え方である。そして、地盤沈下を考慮しない場合、および地盤沈下を考慮した場合の2ケースについて、それぞれ別個に入射波を設定することにした。模型実験では、模型床を沈下させることはできないので、実験の初期水位を上昇させることによって地盤沈下を表し、また津波来襲時の潮位がほぼ満潮位で平均海面(M.S.L.)+40cmであったことを考慮して初期水位を設定した。

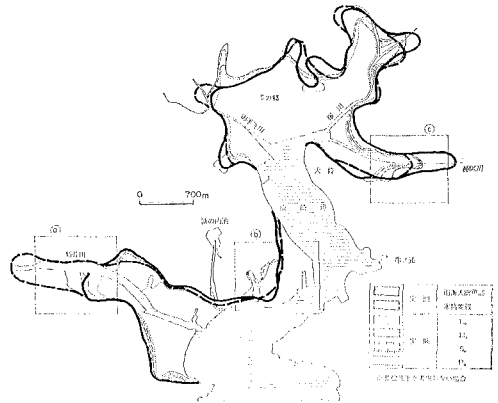


図-7 津波による浸水域

図-7は、i)の地盤沈下を全く考慮しない場合の、実測浸水域と実験で測定した浸水域を比較した図である。太実線で示された実測浸水域は、文献6)に示された浸水域で、太破線で示された実測浸水域は文献7)に示されたものである。図-7に示すように両資料の浸水域は異なっている。細線は、津波波形の振幅を4段階に変化させた実験において求められた浸水域を示す。ここでは、それらの各実験波の振幅を大きい順に L_0 、 M_0 、 S_0 、 P_0 としている。このうち、振幅 S_0 の波の湾口部における振幅が数値計算で求めた湾口部の振幅とほぼ一致しており、 L_0 、 M_0 、 P_0 はそれぞれ S_0 の約1.2、1.1、0.9倍にあたる。

図-7の①地域において、実測浸水域と実験で求めた浸水域を比較すると、振幅 L_0 の津波による浸水域は2つの実測浸水域のほぼ中間にあり、振幅 M_0 による浸水域は文献6)の太実線の浸水域に最も良く一致する。②の地区では、実験波の振幅を変化させても浸水域はほとんど変化していないが、実測浸水域よりも広がっており、振幅を L_0 より大きくすると、津波が低地に流れ込んで実測浸水域とは大きく異なってしまい、③の地区では、振幅 M_0 による浸水域は文献7)の太実線の実測域とほぼ一致する。以上の比較から、振幅 M_0 の津波による浸水域は、特定地区では実測浸水域より小さい

方に一致し、振幅 L_0 による浸水域は、2つの実測浸水域の平均程度となっていることがわかる。そこで、地盤沈下を考慮しない場合の実験波の振幅として L_0 と M_0 を選び、それらの振幅を持つ波をそれぞれ WAVE L_0 、WAVE M_0 とした。地盤沈下を考慮した場合についても同様の考察を行って、WAVE L_D と WAVE P_D を選んだ。

本実験では、現在の須崎湾の地形を再現して、3. (1) で示した測定を行った。将来、南海地震と同規模の地震が生じた場合にも地盤沈下が生じる可能性があるので、実験は i) 地盤沈下を考慮しない場合、ii) 地盤沈下を考慮した場合に分けて実施し、i) の場合には WAVE L_0 および WAVE S_0 を、ii) の場合には WAVE L_D および WAVE P_D を作用させた。津波来襲時の潮位は、M.S.L. とした。

4. 現況地形における模型実験の結果

(1) 湾内の津波高および津波波形

図-8 は、地盤沈下を考慮しない場合の M.S.L. を基準とした湾内の最大津波高 h_{max} の分布を示した図である。図の下段の λ は、湾内の最大津波高を湾口の No. 1 における最大津波高で除した津波高増幅率を示す。横実線は防潮堤天端高を示す。須崎湾内では湾奥の No. 6 における津波高が最大となり、WAVE L_0 で 6.0 m、WAVE S_0 で 5.3 m であった。湾口の測点である No. 9 では、WAVE L_0 で 5.5 m、WAVE S_0 で 4.9 m であり、湾口付近と湾奥との差は 0.5 m 以内と小さかった。 λ の分布をみても、湾内ではほぼ 1.3~1.8 程度で大きな差は生じず、最大津波高は湾内ではほぼ一樣になることがわかった。これは、湾口付近に起こる越流および渦によって津波のエネルギーがある程度失われ、湾奥に全エネルギーが集中することがないためと推測される。地盤沈下を考慮した場合にも同様の結論を得た。図-8 には、×印で数値計算結果も示している。数値計算における λ の値は湾口の No. 9 で 1.4、湾奥の No. 6 で 2.5 となり、その差が 1 以上と大きく実験結果とは異なる。数値計算では、越流や渦の発生が再現されていないため、津波の最大値としてみた場合にこのような差がでるのではないかと考えられる。

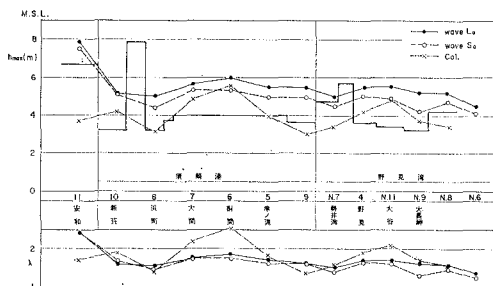


図-8 模型実験による湾内の最大津波高

図-9 は、地盤沈下を考慮しない場合の No. 6, No. 8 における津波波形を示している。一点鎖線および破線が、それぞれ WAVE L_0 および WAVE M_0 の波形を示す。図では第 1~6 波が示されているが、第 7 波以降は第 1~6 波に比べて小さかった。また、実験では、第 3 波または第 4 波が最大となっており、この

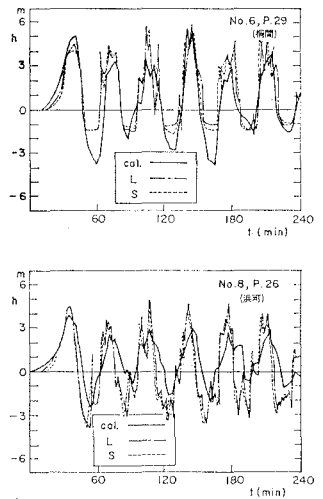


図-9 湾内の津波波形

ことは現地調査で得られた証言⁷⁾ともよく一致している。さらに、第 1 波を除くと、各波とも分裂して複数のピークを有している。No. 6 の実験波形の負側の平らな部分は、海底が引波時に露出したことを示す。図-9 の実線は、数値計算で求めた波形で、各波のピーク出現時刻および概略の波形は実験値とはほぼ一致するが、第 1 波が最大波となっており実験結果とは異なっている。また、各波が分裂し複数のピークが出現する現象は表すことができなかった。

(2) 流速および流況

図-10 は、WAVE L_0 を作用させたときの湾口部流速の変動を示した図である。流速の絶対値 V の最大値は 20 m/s 以上になっているが、図からわかるように非常に変動が激しい。流速が急激に大きくなっている部分については、流速計センサー部に気泡があった可能性も考えられる。しかし、10 m/s 以上の大きな流速が生じたことは確実であり、フロートによる流況観測あるいは目視観測によれば、湾口部に非常に強い渦が生じていることが観測された。この渦は、湾内の地形急変部におけるはく離によって生じたものと思われ、この渦によって局所的に大きな流速が生じたものと推測できる。渦の状況およ

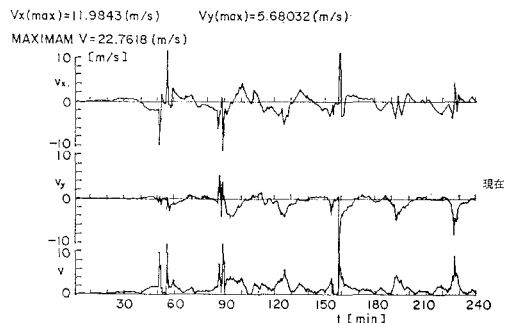


図-10 流速の測定結果

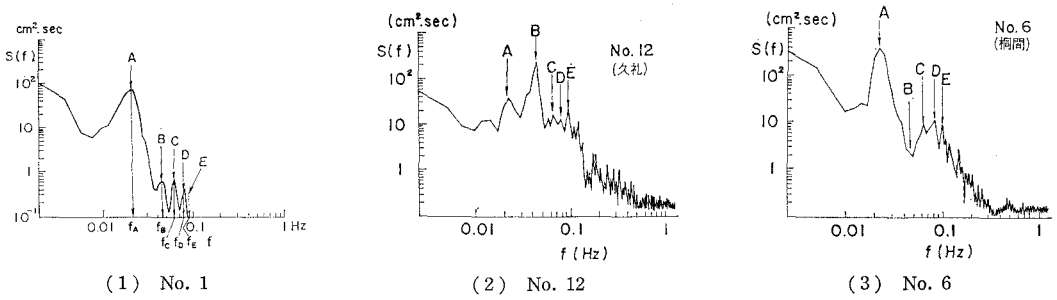


図-11 津波の周波数スペクトル

び湾内の各点での流速をフロート撮映によって定量的に求めようとしたが、フロートの移動速度が大ききく、軌跡を正確にとらえることができなかった。

数値計算によると、湾口部の最大流速は $1\sim 2$ m/s 程度で小さかった。流速ベクトルは押波時には一様に湾口から湾奥を向き、引波時には湾奥から湾奥を向いて、渦は表現できなかった。従って、本数値計算法では地形の急変部のはく離による渦の発生を再現することは困難である。そのため、局所的に発生する大きな流速を数値計算で求めるためには、非常に細かいメッシュで計算するなどの計算方法を考える必要がある。

(3) 模型実験の問題点と側壁の影響

図-8 においては、No. 11 の h_{max} が 7 m 以上で、計算値および痕跡高と比較すると非常に大きくなっている。この原因としては、模型がひずんでいるため海底勾配が現地と異なっていることが考えられる。合田⁹⁾によれば、通常の波の場合には砕波限界波高は海底勾配が大きいほど大きくなることから推定して、No. 11 の南側の海域は浅瀬が広がっており、現地では砕波によって失われるべきエネルギーが、模型の海底勾配が大きいので、砕波によって失われずに沿岸まで達するため、実験において津波高が非常に大きくなったのではないかと推測される。

水槽側壁からの再反射波が実験結果に及ぼす影響を調べるために、各測点における水位変動の周波数スペクトルを求めた。図-11 (1) は、数値計算で求めた No. 1 における周波数スペクトルで、湾口部における津波の周波数スペクトルに相当する。図からわかるように、A のピークが顕著であり周波数 f_A の振動が卓越していることがわかる。(2) および (3) は、それぞれ空気室に近い No. 12 と湾奥の No. 6 におけるスペクトルを示している。No. 12 のスペクトルでは、ピーク A よりもピーク B のエネルギー密度が高くなっている。津波波形においても、周波数 f_B の振動が顕著に現れていた。図-5 の平面図において、No. 12 と右端の側壁をむすぶ line 3 における水槽内の水面の固有振動数を調べると、 f_B と

ほぼ一致した。従って 造波信号中に含まれる周波数 f_B の振動成分が共振によって増幅され No. 12 において顕著になったものと推定される。No. 6 のスペクトルにおいては、ピーク A のエネルギー密度が顕著になっており、他の周波数の振動が顕著に現れることはない。以上のことから、水槽側壁による反射によって固有振動は生じるけれども湾内の水位変動には大きな影響を及ぼさないことがわかる。

5. あとがき

本研究では、須崎湾を対象として、数値計算を応用した水理模型実験を実施した。その結果、湾内の津波波形においては、波のピークが分裂し複数のピークが出現すること、湾口部のはく離によって渦が生じ局所的に大きな流速が生じること、側壁による固有振動は湾奥部の水位変動には大きな影響を生じないこと等が明らかになった。なお、本研究の実施にあたっては、運輸省第三港湾建設局の多大なる御支援を受けたことに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 高山知司・平石哲也: 須崎港における津波に関する水理実験, 港湾技研資料, No. 549, 131 p., 1986.
- 2) 相田 勇: 1923 年関東地震津波の数値実験, 地震研究所集報, Vol. 48, pp. 73~86, 1970.
- 3) 高山知司・永井紀彦・平石哲也: 東京湾の津波計算, 港湾技研資料, No. 454, 100 p., 1983.
- 4) L. Mansinha and D. E. Smylie: The displacement fields of inclined faults, Bull. of the Seismological Soc. of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433~1440, 1971.
- 5) 相田 勇: 南海道沖の津波の数値実験, 地震研究所集報, Vol. 52, pp. 71~101, 1977.
- 6) 高知県: 南海大震災誌, 1949.
- 7) 海上保安庁水路部: 昭和 21 年南海大地震報告津波編, 水路要報増刊号, 39 p., 1948.
- 8) 岩崎敏夫・真野 明・前原隆生: 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, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 448~453, 1976.
- 9) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 3, pp. 59~106, 1975.