

高知港の津波と振動特性に関する模型実験

中 村 重 久*

1. 緒 言

高知港においては、港湾計画と防災対策の一環として、津波防波堤が計画され、その検討がこれまで各方面において行なわれてきた。すなわち、運輸省では、数値実験や模型実験による検討が行なわれ¹⁾、また、著者らは、津波造波装置を試作し、これを用いて高知港の津波模型でチリ津波の再現が可能であることを実験的に明らかにした²⁾。この模型で、高知港の現況地形における計画津波の挙動、すなわち波形の変形、波高分布、波峰高分布、伝播速度などについて検討し、航路しゅんせつや港内埋立時の計画津波を検討するための基礎資料を得た³⁾。

高知港に津波防波堤が建設された場合、その津波対策としての効果が、どの程度になるかという問題については、著者らが模型実験によって検討している^{3), 4)}。

本文では、はじめに現況と将来計画実現後について計画津波の挙動を実験的に比較し、同時に津波防波堤の効果を検討する。このような計画津波が高知港内の湾水振動を誘起するかどうかを検討するためには、高知港の振動特性を知る必要がある。このようなことから、とくに、将来計画実現後の高知港の振動特性を実験的に検討した結果についても述べる。

2. 計画津波からみた津波防波堤の効果

高知港の津波に関する模型実験における諸条件の詳細はすでに述べられているので³⁾、ここではその要点を記す。用いた模型は、水平縮尺1/250、鉛直縮尺1/100の高知港の現況模型(図-1)と将来計画実現後の模型(図-2)である。津波造波装置³⁾を用いて、計画津波を発生させ、模型内の測点(図-3)の水位変化を電気抵抗式水位計を通して自記させる。

ここで、計画津波というのは、将来来襲する可能性のあると考えられる最大級の津波であって、過去の資料により決定されたものであって、St. 1における津波の山が平均満潮面上2.4m、谷が-1.5mとなるようになっている。また、津波の周期は30minとした。すなわち、高知港口で平均満潮位がみられる時刻に計画津波が

侵入してくる場合について、計画津波の高知港内における挙動を検討するわけである。

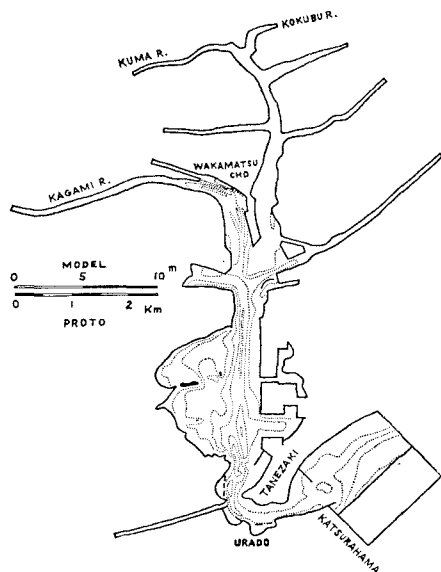


図-1 高知港現況模型平面図

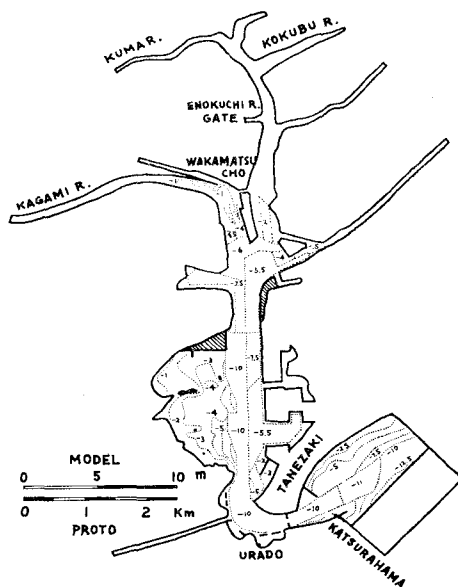


図-2 高知港将来計画実現後の模型平面図

* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

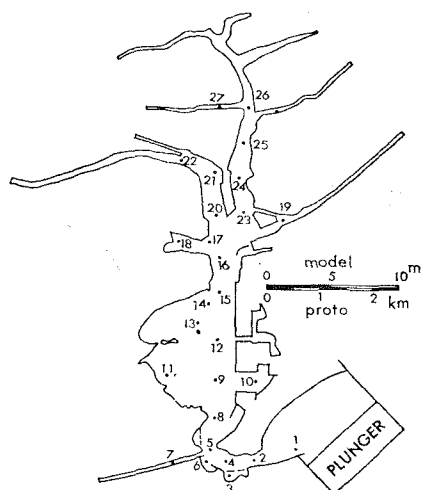


図-3 高知港津波模型測点配置図

港内の諸施設の保全を考えると、津波はその周期が長いので、堤防を越えて堤内の諸施設に浸水することのないようにすることが必要である。波としての津波の検討も必要であるが、さしあたって直接的で有用な情報は計画津波の峯高分布であろう。高知港のように海岸線や海底地形の複雑なところでは、一般に峯高分布は2次元的に検討されなくてはならないと考えられる⁵⁾。ところで、峯高分布によって港口に設けられた津波防波堤の効果を知らうとすると、1次元的表现も便利である。実験の結果は図-4のようにになっている。計画津波の峯高は平均満潮面を基準として現地尺度で示し、St. 1を起点として航路沿いに距離をとった。図中、黒丸印は現況の場合の峯高分布であって(曲線1)、白丸は将来計画実現後で津波防波堤のない場合(曲線2)、半黒丸は津波防波堤のある場合(曲線3)である。St. 17からSt. 22は鏡川筋であり、St. 17からSt. 25は国分川筋である。曲線1と曲線2とから航路しゅんせつによって港内における津波波高の減衰はみられなくなり、航路しゅんせつのため計画津波の峯高は全般的に現況よりも高くなっていることがわかる。とくに、St. 2ではその差が顕著である。曲線2と曲線3と比較すると、たしかに津波防波堤

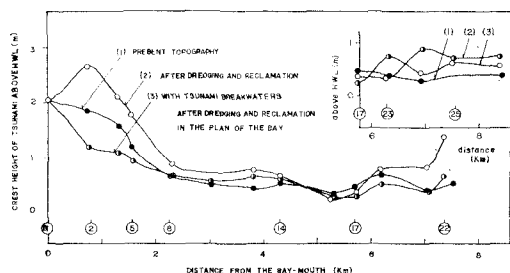


図-4 計画津波の峯高分布

による波高減少の効果は最も顕著である。St. 8からSt. 17の間の峯高分布をみると曲線2および3ではSt. 14付近で高くなっているが、これは港内埋立地の影響であると考えられる。

3. 高知港の振動特性

一般に港湾の振動特性の研究においては1次元的な理論による例が多く、港内に侵入した波の反射についても適当な仮定が設定されている。また、海底などの境界条件も単純化されている。このような理論的モデルの境界条件に対応させて考えると、高知港の海岸線はすでに港口をせまくした場合に相当する。さらに、港内の地形は複雑であるので、ここでは高知港の将来計画実現後の模型について振動特性を実験的に検討する。

実験においては、計画津波で考えた周期を中心として0.3~3 min(現地で7.5~75 min)の範囲にとり、任意の波高の正弦波を発生させた。はじめに、St. 1の波高を基準として、St. 3の波高およびSt. 21の波高について、次に、津波防波堤開口部(St. 2)およびSt. 15とSt. 16との中間点における最大流速について検討する。

この実験では、津波防波堤の開口率と対称性について、その効果をみる。ここで、St. 2の水路幅を B 、防波堤の開口幅を b とすると、開口比は $\beta = (b/B)$ で与えられるものとする。また、St. 2の左岸より開口部中心までの距離を l とし、対称性が $\sigma = l/(B/2)$ で定義されるものとする。開口部が対称形の場合は $\sigma = 1$ であり、 σ は条件によって0から2の間の値をとる。

津波防波堤開口部で $\sigma = 1$ の場合、 β の値によって高知港の振動特性にどの程度差があらわれるかどうかを検討したのが図-5である。図の横軸は周期の模型尺度である。計画津波の周期は模型実験では1.2 minである。この周期では波高に顕著な差があるとはいえないが、さらに長い周期の波では β が大きいほど港内で波高は減衰しにくいことがわかる。周期の短いところでは港口から

奥へと波高の減衰は顕著であり、港口の局部的地形によって共振が生ずる場合があるものと考えられる。

一定の開口比の場合、 σ の値によって振動特性がどのようになるかを示したのが図-6である。一連の資料を検討してみると、かならずしも

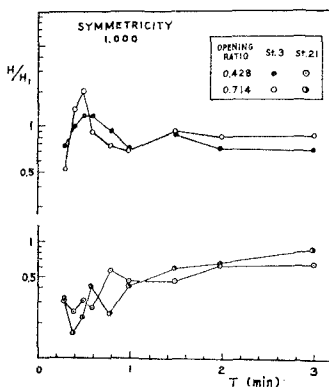


図-5 津波防波堤の開口比の効果

系統的な傾向はつかめないが、ある場合には σ が1に近い値をとるとき波高が極小値となる例がある。しかし、この傾向も波の周期の短い場合には、港奥でかなりしも顕著ではない。

さらに、流速の特性から波高に関する振動特性では明瞭でなかった傾向を知ることができかどうかを検討してみる。ある一連の系統の実験に基づいて、図-7が得られている。これは St. 1 における正弦波型の入射波に対する流速の特性を示すものである。St. 2 (津波防波堤開口部)における最大流速についてみると、周期が 0.6 min 付近で周期特性として極小がみられる。これは波高に関する振動特性からみると H/H_1 が 1 より大きくなる範囲に近い。開口比および対称性についてみると、 β が小さくなるほど、そして σ が 1 よりはずれるほど流速は大きくなる。しかし、このような顕著な傾向は港奥では認められない。

開口比と対称性とを津波防波堤について考えたが、開口比を一定とし、対称性をパラメーターとしたときの流速の特性をみれば、これからそれぞれの要素の重要性がわかるはずである。図-8に示すように、防波堤開口部の対称性は開口部流速の特性にほとんど影響しないと考えられる。したがって、図-7においてパラメーターとしては開口比のみをとって十分である。

このように高知港の計画津波に近い周期で流速の特性をみると、局地的地形による共振

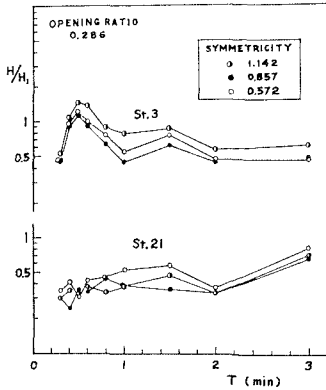


図-6 津波防波堤の対称性の効果 (波高の特性)

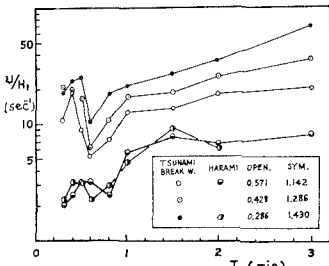


図-7 津波防波堤の効果 (流速の特性)

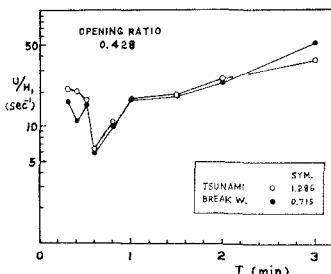


図-8 津波防波堤対称性の流速特性への影響

などが関係しているようなので、大阪市内河川の高潮模型実験における河口付近の流れの場合のように⁶⁾、簡単な実験式を導くわけにはいかないようである。

4. 振動特性に関する検討

津波に関連して港湾の振動特性はいろいろの面から検討されている。ここでは、港口に設けられる津波防波堤の開口比と港内波高との関係に着目する。防波堤のないときの港内最大波高 H を基準として、防波堤のあるときの港内最大波高 H_B をとることとし、 H_B/H と防波堤開口比との関係を見る。

岩崎らは津波防波堤の効果を気仙沼湾について実験的に検討し⁷⁾、その結果から、周期の長い場合には岩崎らが導いた理論曲線⁸⁾ (図-9 参照) が湾奥の実験値とよく一致することを示した。しかし、周期が短くなると、実験値は後に述べる梶浦の理論曲線よりも小さくなる。岩崎らはこの理由を波の透過率の減少と非線型効果によるものとしている。

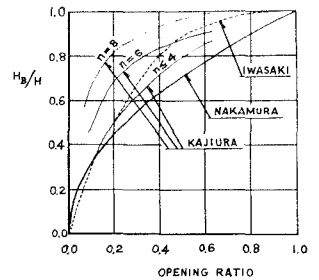


図-9 港内波高に対する津波防波堤開口比の効果

ところで、梶浦の理論によれば (図-9 参照)⁹⁾、入射波の周期が港の基本周期よりも短いとき ($n \leq 4$) には H_B/H は周期にかかわらず一定であり、 $n > 4$ では入射波の周期が長いほど同一の開口比に対して防波堤の効果は小さいとされている。この傾向は高知港の津波に関する実験結果にもあらわれていて、とくに、St. 21 における例 (図-5, 6) にみるように港の奥において明瞭である。

ここで、高知港のような港湾に津波が侵入する場合について考察する。港の周辺は浅くなっていて、波の反射はほとんど考えなくてよいものとする。底面摩擦も考慮しなくてよいような、1次元方向に伝わる長波が、津波に対応するものとする。このとき、水深 h における入射波の最大波高 H と最大流速 u との関係は

$$u/(c/h) \cdot H = \sqrt{g/h} \cdot H$$

で与えられる。ただし、 g は重力加速度、 c は波速とし、また港口の断面積 A_0 にくらべて港内の水面積が非常に大きいものとする。このとき、港口を通過する水流の運動エネルギーの最大値および長波のエネルギー束は

$$E_0 = \int_{A_0} \frac{1}{2} \rho u_0^2 dA$$

$$\text{および } F_0 = c_{g0} E_0 \approx c_0 E_0 \cdots \cdots (1)$$

このような波が防波堤のない港へ入ってきたとする。港内水深 h のところで波峯線の長さを l とし、波峯線上に式 (1) で与えられる運動エネルギーが等分配されるものとする。港内では式 (1) のかわりに

$$E = \int_A \frac{1}{2} \rho u^2 dA \div \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot (l \cdot h)$$

および $F = c_g E \div cE$

が満たされているとし、流速は水面で最大、水底で 0 とし、平均流速が $\bar{u} \div \frac{1}{2} u$ で与えられるとすると、

$$E \div \frac{1}{8} (\rho g H^2) \cdot l$$

および $F \div \frac{1}{8} \rho \cdot g^{3/2} \cdot h^{1/2} \cdot H^2 \cdot l \dots \dots (2)$

これは波峯線の長さ l をもった長波の単位幅について得られる式と同じ型である。

港口に津波防波堤のある場合、津波が侵入してきたとすると、港口を通過する長波のエネルギー束は開口幅の減少した割合に応じて減少するものと考え。ここで、防波堤のない場合の幅員が B 、防波堤の開口幅が b であるとする、防波堤のある場合について式 (2) に対応して

$$E_B = \frac{1}{8} (\rho g H_B^2) \cdot l_B \quad \text{および}$$

$$F_B = \frac{1}{8} \rho \cdot g^{3/2} \cdot h_B^{1/2} \cdot H_B^2 \cdot l_B = \frac{b}{B} F \dots \dots (3)$$

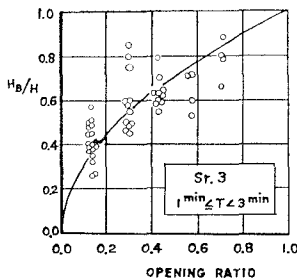
港内のしゅんせつや埋立がなければ、港内の同一の場所における h は変わらないが、波峯線の長さ l_B が若干変わることになるであろう。これらのことを考慮して式 (2) および (3) より、

$$\left(\frac{H_B}{H} \right) = \left(\frac{b}{B} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{l}{l_B} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{h}{h_B} \right)^{1/4}$$

とくに、 $l \sim l_B$ の場合は、

$$\left(\frac{H_B}{H} \right) = \left(\frac{b}{B} \right)^{1/2} = \beta^{1/2}$$

なる関係が満たされることが期待される。高知港口は湾曲しているが、計画津波に関して模型実験における水位変化 (波形) と流速変化との位相はほとんど一致していることから³⁾、港内からの反射波は無視できる程度に小さいと考えられる。港内の津波伝播図からみても、津波の走時の実験値と計算値とはほとんど一致しているとみてよいことが知られている。このことから、高知港口では上の理論の適用条件を満たしているものと考えられる。高知港における津波模型実験結果のうち、St. 3 に



図—10 高知港内波高からみた津波防波堤開口比の効果

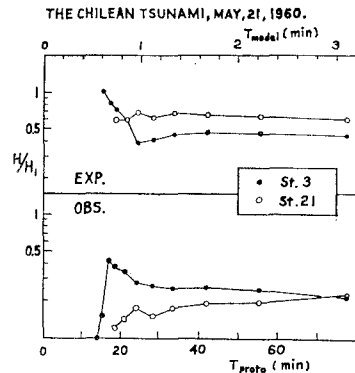
おける周期 1~3 min の波の資料を用いて検討してみると、図—10 のようになっており、実験における H_B/H と β との関係をよくあらわしている。周期の短い波については、さらに共振などの諸要素を考慮してやらなくてはならない。ところで、St. 21 においては、周期が長い波については St. 3 と同様な傾向が認められるようである。ところで、ここでは防波堤開口部の流量係数を考慮していない。また、実在の波はある周波数の範囲のスペクトルをもっている。しかも、境界条件としての港内の海岸線や海底地形が複雑な場合には、上にみた理論曲線のいずれもが実験や観測の結果をうまく説明できるかどうかは明確であるとはいえない。

津波防波堤開口部の流量係数は現地では 1 に近い値をとるものと考えられるが、模型実験の場合、流量係数は 1 よりも小さく、 Re 数あるいは Fr 数が大きいほど大きくなることが知られている。実験では 0.6~0.7 を流量係数とするのが適当であろう¹⁰⁾。これからみて、模型実験で、津波防波堤や狭窄部などの断面急変部における津波のエネルギー損失の割合は、現地におけるよりも大きいことになる。ここに、流量係数 C を考慮すれば、

$$\left(\frac{H_B}{H} \right) = C \cdot \beta^{1/2}$$

ところで、実験的に再現したチリ津波のパワ・スペクトル³⁾から、線型性を仮定して求めた振動特性は図—11 のようになっている。この図は模型の方の波高が減衰しにくいことをあらわして、上述の推論のみでは本文の実験結果のすべてを十分説明できない。これは港内への津波の侵入とともに海底地形や海岸線の影響をうけて生ずる渦によるエネルギー消費に関係していると考えられるので、図—11 の実波高 H を考慮して、さらに検討しなくてはならない。

振動特性に関する記録をチリ津波のパワ・スペクトル (図—12) などと対比してみると、計画津波の周期では港口に近い St. 3 でも最も波高が減衰しやすい条件にあり、共振しやすい周期 0.3~0.8 min (現地周期 7.5~



図—11 チリ津波の記録から算定した高知港の波高の特性

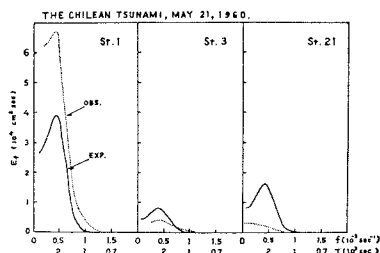


図-12 チリ津波のパワ・スペクトル

20 min) の成分は実波高としてはごく小さいものと考えられるので、高知港全体としてみれば、津波の侵入によって港内の水の振動が励起されにくいといえよう。ただし、港内泊地の共振については別に検討を加える必要がある。

気仙沼湾の場合には、津波防波堤建設の前と後において、それぞれ津波の来襲があり、直接的に津波防波堤の効果が明らかにされた。また、堀川らによって共振特性が検討され、同様に津波防波堤の効果が認められている¹¹⁾。このような津波防波堤建設後の現地の津波記録が得られると、さらに詳細な検討が可能になるものと考えられる。

5. 結 語

高知港の津波模型によって、はじめに、港内における計画津波の峯高分布を明らかにした。次に、振動特性を実験的に検討し、波高のみならず流速を考慮することによって、津波防波堤の対称性についての考察を行なった。これらの結果を考慮して、従来の理論を検討するとともに、津波防波堤開口部にみられる問題点を指摘した。

これらの結果を総括してみると、高知港全般に関して

津波の侵入によっては港内の水の振動は励起されにくいと考えられる。

なお、残された問題点については逐次検討を加えていきたい。

最後に、本研究をすすめるにあたりご教示をいただいた京都大学工学部 岩垣雄一教授、防災研究所 土屋義人教授ならびに関係各氏に心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 浜田徳一・堀口孝男・加藤 始・金子正久：水路に進入する津波の計算—高知港の場合—，第8回海岸工学講演会講演集，1961，pp. 30～35，運輸省第3港湾建設局神戸調査設計事務所：高知港津波防波堤に関する模型実験，1967，pp. 1～31
- 2) 岩垣雄一・土屋義人・中村重久：津波造波装置について，第16回海岸工学講演会講演集，1969，pp. 321～326
- 3) 岩垣雄一・土屋義人・中村重久：高知港の津波に関する模型実験，京大防災研究所年報，No. 13 B，1970，pp. 471～488
- 4) Nakamura, S., Y. Iwagaki and Y. Tsuchiya: A model study of the transformation of tsunamis in Urado Bay, 12th Conf. Coastal Eng., preprint, Washington, D. C., U. S., 1970.
- 5) 防災研究協会：高知港の津波に関する研究，1969，pp. 1～25
- 6) 中村重久：高潮に伴う河口付近の流れについて，日本海洋学会誌，Vol. 23, No. 4, 1967，pp. 175～181
- 7) Iwasaki, T., A. Miura and S. Terada: On the effect of the breakwater in case of tsunami, Part I, The Tech. Rep. Tohoku Univ., Vol 25, No. 2, 1961.
- 8) 岩崎敏夫・揚 沢 民：湾内津波の計算 (1)，第16回海岸工学講演会講演集，1969，pp. 371～375
- 9) 梶浦欣二郎：湾水振動におよぼす防波堤の効果，東大地震研究所彙報，No. 41, 1963，pp. 403～418
- 10) 樋口明生・吉田幸三：模型実験における防波堤開口部の流量係数について，第7回水理講演会講演集，(A-2)，1962，pp. 7～12
- 11) 堀川清司・西村仁嗣：津波防波堤の効果について，第16回海岸工学講演会講演集，1969，pp. 365～369