

高知港津波模型による津波の変形特性 に及ぼす河川流の影響について

中 村 重 久*

1. 結 言

高知港においては、港湾計画と防災対策の一環として、港口に津波防波堤が計画され、各方面において種々の検討がなされてきた。著者も、高知港の津波に関する模型実験に關与する機会があって高知港内における津波の特性を実験的に明らかにしようと努めてきた^{1),2)}。ここでは、高知港に流入する河川流量が、港口から進入する津波の変形に対してどのように影響するかを実験的に検討する。また、港口の津波防波堤の津波および河川流に及ぼす効果についても考察する。特に、河川流の津波への作用については、波と流れの相互作用に関する従来の基礎的研究によって若干の説明を試みる。

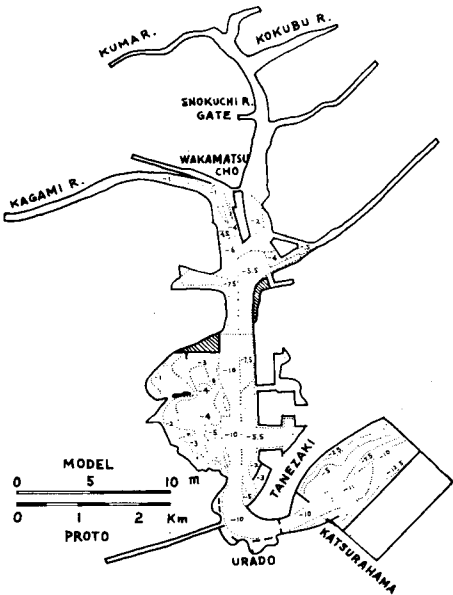
2. 実験模型について

実験に用いた模型は、高知港の将来計画実現後の地形のものとし(図一1)、河川流量として計画高水流量を与え、港口の潮位としては津波進入前桂浜で平均満潮位が与えられているものとする。津波としては、波高 4 m、周期 30 min の波を対象とし、これまでの実験と同様に力学的相似律にもとづいて実験模型における流量などの縮尺を定めた³⁾。

3. 河川流に及ぼす津波防波堤の効果

高知港の津波への河川流の影響を検討するにさきだって、河川流のある場合港内水位に津波防波堤がどのような影響を及ぼすかを検討する。模型は水平縮尺 1/250、鉛直縮尺 1/100 であるから、河川流量として計画高水流量をとると、相似律から表一1が得られる。実験では、表中流量の大きい5河川を対象とした。港口の桂浜では平均満潮位(DL+1.89 m)とし、河川流量を与えた場合、桂浜を起点として航路に沿う水面形は、実験によって図一2のように得られた。桂浜の潮位を同一に保っても、河川流として計画高水流量が与えられた場合、津波防波堤より港内側では防波堤による 20~30 cm のせきあげがみられ、その影響は港口から 8 km以上に及ぶ。高知港

の航路を流軸とするような1次元開水路を考え、漸変流の仮定のもとに、Escoffier 法⁴⁾により計算して得られた水面形は図一3のようになる。桂浜の潮位と河川流量とは図一2の場合と同じである。計算では、防波堤の効果は顕著ではないが、同時に断面急変や湾曲など地形の効果と渦流による効果が含まれていないことに留意すべきである。ただし、本実験によれば航路横断面水面形は桂浜付近で図一4のようになっており、航路中心の水位をとると図一2と図一3のような差が現われる。



図一1 高知港模型平面図

表一1 高知港流入河川計画高水量

河 川 名	計 画 高 水 量	模 型 計 画 高 水 量
長 浜 川	50(m ³ /s)	0.20(l/s)
鏡 川	1700	6.8
江 ノ 口 川	85	0.34
久 万 川	670	2.68
国 分 川	800	3.20
舟 入 川	127	0.51
下 田 川	273	1.09
計	3705	14.82

* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

4. 津波の峯高分布

航路に沿って図-2で与えられるような背水曲線で示される流況時に津波が進入してきた場合、津波の峯高分布がどのようになるかを実験的に検討する。この場合津波は桂浜で初期水位(DL+1.89m)を基準として峯が2.4m, 谷が-1.5mとした。実験の結果は図-5の実線であらわされる。地形は複雑であるが、津波の峯高は港内で減衰する傾向が見出される。もし、河川流と津波とが線型的に重ね合わせができる現象であるならば、図-2の背水曲線に、河川流のない場合の津波の峯高分布を加えると、図-3の実線と一致するはずである。この線型的な操作が可能であるとして両者を重ね合わせた結果は図-5の破線で示される。港口での実線と破線との差は主として図-4の理由によるが、港内では実線の方が破線よりも高くなっている。これは航路の流水断面変化や渦流の効果が線型的でないことを示しているものと考えられる。

5. 津波の波高分布

河川流のある場合、津波波高の航路沿いの分布をみると、図-6のように、津波防波堤の効果が顕著であることがわかる。図-6には示されていないが河川流のない場合で津波防波堤のある場合には、津波波高分布は図一

6の点線とほとんど一致する。この一致は河川流量をたまたま計画高水量にとったために得られたものであるが他の流量条件でも、波高減衰の効果があらわれるであろう。

6. 流れの中の波

河川流による津波の変形として問題を考えると、これまでに示された実験結果の理論的な検討がある程度可能になる。流れの中の波に関しては、従来多くの研究があり、たとえば、Biesel⁵⁾, Hunt⁶⁾, 浜田ら^{7), 8)}, Longuet-Higgins⁹⁾などの理論もあるが、これらの理論は定常解であり、波の伝播にともなう波高減衰の問題を扱うには適当ではない。深海波に対する実験的研究として Yu¹⁰⁾の例があり、樫木¹¹⁾はさらにこれを浅水波の場合に拡張し、浅水比の効果を考慮した。ところが、これらの研究でも定常状態を前提としている。流れのない場合、実験波の相当波長は $L = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/L)$ で与えられ、 $h \ll L$ では $L \approx T\sqrt{gh}$ である。航路水深 $h=10$ m, 津波周期 $T=30$ min を入れると $L \approx 18$ km を得る。したがって、浅水比 $h/L \approx 0.0005$ である。また、静水中を進行する波の波速は $C = (gL/2\pi) \tanh(2\pi h/L)$ であり、 $h \ll L$ ならば近似的に $C \approx \sqrt{gh}$ である。港口流速を $V=2$ m/s とすると、 $V/C=0.2$ である。流れの中の波に関する樫木¹¹⁾の計算によれば、向かい流れが大きい

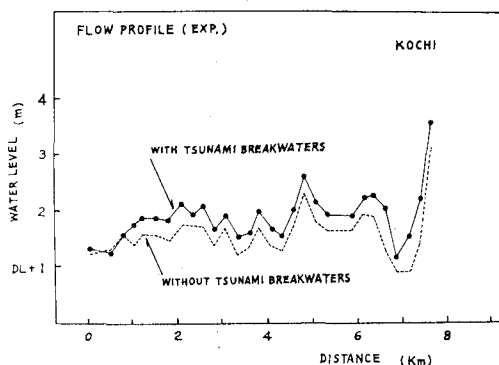


図-2 せきあげ背水(実験)

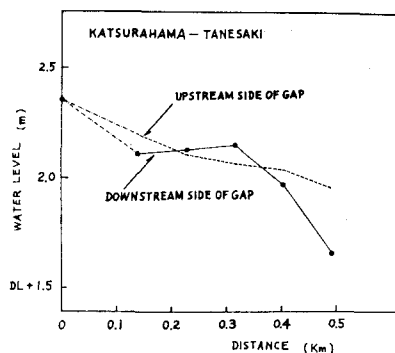


図-4 航路横断水面形

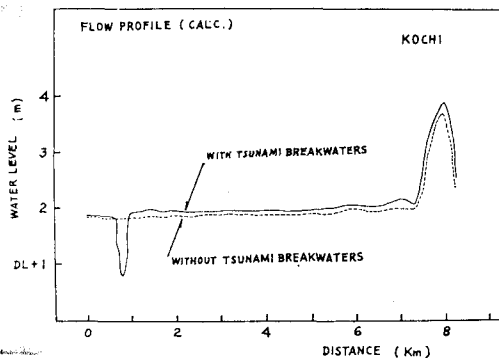


図-3 せきあげ背水(計算)

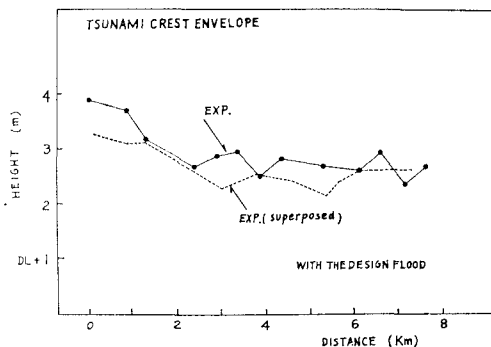


図-5 津波峯高分布

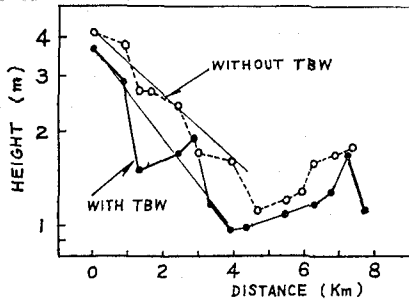


図-6 津波波高分布

くなると波高は増大し、浅水比が大きいほどその傾向は顕著である。著者の模型実験と樁木の計算との条件は相異なっているので、実験結果をそのまま計算結果と対応させるわけにはいかない。ここで、ひとまずそのまま応用できるとすると $V/C=0.2$, $h/L=0.0005$ なる実験値に対しては計算上 $H/H_0 \geq 1.45$ でなくてはならないことになるが、模型実験から得られた波高から、港口波高 H_0' に対する港内平均波高 H' の比を H/H_0 に対応するとしとて、 $H/H_0 < 1$ である。樁木の計算でも $H/H_0 > 1$ となると期待される V/C と h/L の条件の下で、実験結果が $H/H_0 < 1$ となる場合があることが指摘されている¹¹⁾。著者の実験の $H/H_0' < 1$ となった原因は樁木の実験の場合と全く同一であるとは考えられないが、模型港内地形の影響をうけて、流水断面積の変化による波のエネルギー損失や渦流の発生がその主な原因であろうと考えられる。しかし、上の検討は理論的計算が導かれたときの条件が模型と同じであるとして可能なものであるから、これによって著者の実験結果がすべて説明できたと考えるわけにはいかない。また、流れの中を伝搬する波として模型実験における津波(図-6)をみると、波の伝播とともにみられる波高減衰を説明するには、別の面からの理論的検討が必要である。

7. 理論的考察

著者らの解析における同じ座標系を用いると、流れと波の共存系での基礎式は、つぎのように書ける¹²⁾。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -f|v|v - g \left(I_0 + \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [(H+h)v] \quad \dots\dots(2)$$

ここで、河川流は時間的に一定で v_0 とし、津波による流れを u とし、 $v=v_0+u$ 、また、 $\alpha=\partial v_0/\partial x$ とする。一般に、上式を解いて求めるべき解はスペクトル表示で求められるべきであり、

$$u = \int_0^\infty \phi e^{i\omega t} d\omega, \text{ および } H = \int_0^\infty \psi e^{i\omega t} d\omega \quad \dots\dots(3)$$

なる形をもつものと考えられる。式(3)を式(1)お

よびに(2)に代入すると、

$$\begin{aligned} & \int \left[(i\omega + \alpha)\phi + v_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} + g \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] e^{i\omega t} d\omega \\ & + 2f \left| \int (v_0 \phi) e^{i\omega t} d\omega \right| \\ & = \int_0^t \left[\int \phi e^{i\omega \tau} d\omega \right] \cdot \left[\int \left(\phi + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega \right] d\tau \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \int \left[(i\omega + \alpha)\psi + v_0 \frac{\partial \psi}{\partial x} + h \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] e^{i\omega t} d\omega - \alpha h \\ & = - \int_0^t \left[\int \psi e^{i\omega \tau} d\omega \right] \cdot \left[\int \left(\phi + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega \right] d\tau \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

あるいは簡単のために、

$$(i\omega + \alpha)\phi + v_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} + g \frac{\partial \psi}{\partial x} = F \quad \dots\dots(6)$$

$$(i\omega + \alpha)\psi + v_0 \frac{\partial \psi}{\partial x} + h \frac{\partial \phi}{\partial x} = G \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 F および G は ϕ および ψ の非線型項をあらわす。

従来いわれているように、津波が浅水長波で近似できるものと考えると、問題は線型問題として考えて十分である。この場合、式(6)および(7)の右辺の関数 F および G は近似的に0とおいて差支えない。高知港の津波に関する模型実験においては、海岸線や海底地形など境界条件が複雑であるので、局所的には非線型効果の顕著な場合もあるはずである。この局所的な問題を完全に考慮にいれてやると、関数 F および G は非常に複雑な関数形になることが予想される。ここで、便宜的に F および G は数値的に小さい場合で、式(6)および(7)において $F=G=0$ とみなせるとすると、一般に ϕ および ψ は伝播距離に関して指数関数的に増大する項と減少する項とからなる。境界条件として、港口における津波の波高と周期を与え、港内で反射がないとすると波の伝播にともなう指数関数的な波高減衰特性が解として得られる。

ところで、このような理論的考察の対象である実験波の特性を、さらに別の面から検討すると、次のようになる。Sarpkaya¹³⁾ は理論的に流れの中の波について研究するとともに、実験の結果をまとめて F , R_e および L/h の関係を示した(図-7参照)。彼によれば、流れの中で波の存在しうる限界条件は、

$$F = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\} \sqrt{\frac{L}{2\pi h} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad \dots\dots(8)$$

とくに、 $h \ll L$ ならば $F \approx 1$ となる。問題とすべき実験波について、 $L/h=1800$, $F_{\max}=0.2$, $R_e=2 \times 10^3$ を得るから、図-7で外挿できるとしても波高減衰領域にあることがわかる。このような波高減衰は、乱流境界層理論で、内部摩擦応力が流速の深さに対するこう配に

比例すると考え、渦動粘性係数が一定とみなせる場合指数関数的であることが知られている¹⁴⁾。また、著者らは式(3)のかわりに

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} u_m \exp[jm\sigma(t-\delta)] \quad \text{および}$$

$$H = \sum_{m=1}^{\infty} H_m \exp[jm\sigma(t-\delta)] \dots\dots\dots (9)$$

なる形の解をもとめた¹²⁾。とくに、 $m=1$ のみをとった近似を考え、高知港内で反射波がなくて境界条件が満たされているとすると、図-8によって、水深と流速がわかっていれば波高減衰率がわかる。水路幅を一定と考え、水深10mで、流速は場所によって変わらないとすると、 $\sigma=10^{-2}$ の波の波高が $1/e=0.357$ 倍になるに要する伝播距離は流速2m/sのとき約8kmとなる。津波の周期を 1.8×10^3 secで近似し、正弦波を考えるならば、津波の流れによる変形特性は図-8によって知ることができる。

実験波が、基本的に港口から港内へと進入して距離とともに指数関数的に波高を減衰していくものと考え、とくに、港口桂浜の H_0 と桂浜から4km港内の H_4 に

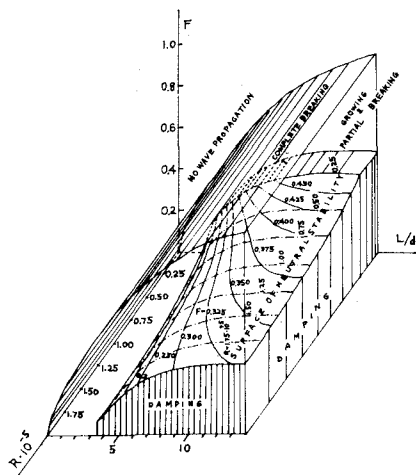


図-7 流れの中の波の特性

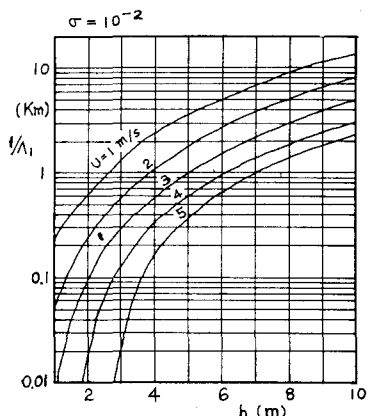


図-8 流れによる波高減衰

ついて、それらの比 H_4/H_0 を考える。実験で得られた結果では、津波防波堤のある場合には $H_4/H_0=0.263$ であり、これに対してない場合には0.342であった。後者の条件を満たすためには図-8で水深10m、 $1/A_1=4$ kmで $u=3.5$ m/sでなくてはならない。 $1/A_1=8$ kmとしても $u=2$ m/sが必要である。しかし、実験では津波による港口流速は $u_{\max}=2$ m/sであり、港内での流速はさらに小さい。

さて、図-8によれば、 $u=2$ m/s、水深10mとすると $H_4/H_0=0.598$ である。実験との差は、防波堤のある場合は0.439倍、ない場合0.571倍である。線型的な考えが可能とすればこの差が地形の影響および渦流によるエネルギー損失に関係しているものと考えられる。岩垣らによれば、海底摩擦による波高減衰(層流境界層理論)も距離に対して指数関数的である¹⁵⁾。また、反射のある現象に上の考え方をそのまま適用すると、みかけ上河川流のある場合の波高減衰は顕著ではなくなることになる。そして $0.439 \div 0.571=0.770$ 倍が津波防波堤の効果であるといえる。

他方、河川流のない場合についても¹⁶⁾、上と同様な手法が適用できるとして検討すると、津波防波堤のある場合 $H_4/H_0=0.104$ 、ない場合 $H_4/H_0=0.215$ となり、津波防波堤の効果は0.484倍となる。これらの波高減衰に関する数値の精度および信頼度にはなお検討すべき問題が残されているけれども、比較してみると、河川流のある場合の、津波波高減衰に寄与する津波防波堤の効果は、河川流の津波への影響にくらべて小さい。また、河川流のない場合の津波防波堤の効果にくらべて波高減衰効果は小さい。

8. 結 言

高知港について津波防波堤および河川流の津波の変形への影響を模型実験によって検討した。河川流のない場合にくらべて、河川流のある場合は津波防波堤の効果は小さくなる。河川流量として計画高水量をとると、河川流があり防波堤のない場合と、河川流がなく防波堤がある場合とでは津波波高減衰特性はほとんど同じであった。

港湾における津波の問題として、本文で検討した問題以外にも多くの問題が残されている。逐次検討して、解明したい。

終りに、本研究をまとめるにあたり、その端緒を与えられた岩垣雄一教授、ならびに適切な示唆と討論をいただいた土屋義人教授に心から謝意を表わす。また、運輸省ならびに高知県からはいろいろな資料をいただいた。ここに記して謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) Nakamura, S., Y. Iwagaki and Y. Tsuchiya : A model study of the transformation of tsunamis in Urado Bay,

- Proc. 12th Conf. Coastal Eng., Vol. 3, 1970.
- 2) 中村重久・岩垣雄一・土屋義人：高知港の津波に関する模型実験(第2報)，京大防災研年報，No. 14, 1971.
 - 3) 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.
 - 4) 石原藤次郎・本間仁編：応用水理学(上)，1957.
 - 5) Biesel, F.: Etude theorique de la houle en eau courante, La Houille Blanche, No. Sp. A, 1950.
 - 6) Hunt, J.N.: Gravity waves in flowing water, Proc. Roy. Soc., London, Ser. A, 1955.
 - 7) 浜田徳一・加藤始：流れをさかのぼる波についての一計算，第8回海岸工学講演会講演集，1961.
 - 8) 浜田徳一・加藤始：流れの中の有限振幅波の計算，第10回海岸工学講演会講演集，1963.
 - 9) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: The changes in amplitude of short gravity waves on steady nonuniform currents, Jour. Fluid Mech., Vol. 10, 1961.
 - 10) Yu, Yi-Yuan: Breaking of waves by an opposing current, Trans. AGU, Vol. 33, No. 1, 1952.
 - 11) 榎本亨：河口閉そく機構に関する基礎的研究，第12回海岸工学講演会講演集，1965.
 - 12) 矢野勝正・中村重久：河口付近の異常水位に関する研究(I)，京大防災研年報，No. 8, 1965.
 - 13) Sarpkaya, T.: Oscillatory gravity waves in flowing water, Proc. ASCE, Vol. 81, Pap. No. 815, 1955.
 - 14) 岩崎敏夫・佐藤道郎：流れを遡る波のエネルギーの減衰について，第17回海岸工学講演会論文集，1970.
 - 15) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行・陳活雄：海底摩擦による波高減衰機構に関する研究，京大防災研年報，No. 9, 1966.
 - 16) 防災研究協会：高知港の津波に関する研究，1969.