

高知港模型における長周期波の特性について

中 村 重 久*・土 屋 義 人**

1. 緒 言

高知港の港湾計画には、従来、津波防災対策が考慮されてきたが、昭和 45 年 8 月台風 7010 による高潮災害以来、津波と同時に高潮の対策もとられられるにいたった。これらの対策に関連して、すでに多くの研究調査が行なわれ、その一部は港湾計画の基礎資料として役立てられている。

著者らは、これまでも、高知港の現況模型において、チリ津波の再現実験を行ない^{1)~3)}、また、潮汐および台風 7010 による高潮の再現を実験的に試みた⁴⁾。ここでは、この模型によって、津波から潮汐までの広い長周期波帯の波の高知港における挙動を検討し、港内長周期波の特性が港口における波形勾配に関係していることを明らかにし、また、港口における水位および流速の関係からも検討する。

さらに、これらの実験結果を津波、高潮および潮汐と対応させ、模型実験の再現性について再検討を加える。特に、高潮はその発生が津波などと異なっているので、長周期波としてどの程度近似できるかについても吟味し、また、港湾振動あるいは誘起された振動も検討する。

2. 模型実験の概要

高知港の模型実験における諸条件の詳細は、すでに述べたので^{1)~3)}、ここではその要点のみを記す。用いた模型は、水平縮尺 1/250、鉛直縮尺 1/100 の高知港現況模型(図-1)であり、改良された造波装置⁵⁾を用いて長周期波を発生させ、港口および港内検潮所位置の水位変動を電気抵抗線式水位計を用いて自記させ、また港口流速は光電式小型プロベラ流速計によった。

3. 長周期波の波高の港内分布

高知港の平均潮位は D.L.+0.90 m であり、平均満潮位は D.L.+1.89 m である。桂浜ほか 4 検潮所位置の水位変動を、現地周期 7.5 min~17.3 hr の長周期波について実験的に検討した。実験にあたって、初期水位は D.L.+0.85~2.00 m とした。それぞれの周期の波に対して微小振幅波理論が適用できるとして、港口桂浜(水深約 h

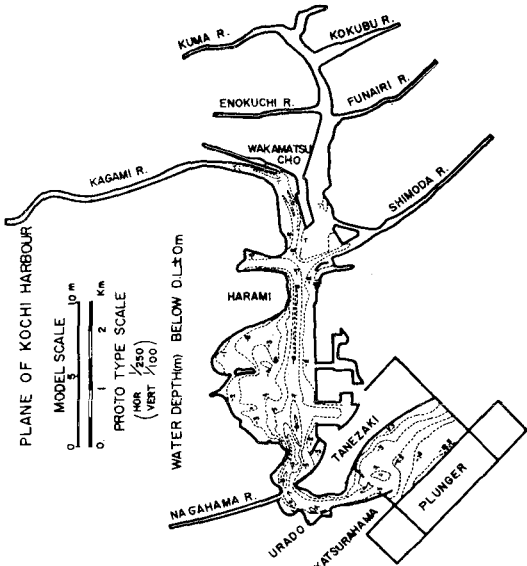


図-1 高知港現況模型の平面図

10 m) における波形勾配をもとめ、これをパラメータとした。高知港に進入する長周期波は外洋から来襲するから、外洋にもっとも近い検潮所桂浜を基準点にえらぶ。港口桂浜の波高 H_0 に対する港内検潮所位置の波高 H の比をたて軸、港口桂浜から航路沿いにとった距離をよこ軸にとると、実験の結果は 図-2 のように表わされる。

津波の典型的な周期は、現地記録あるいはスペクトル解析の結果⁶⁾ をみると、高知港では 25~30 min と考えられるが、実験結果では、7.5~50 min の周期帯の範囲では、港口から港内への距離とともに波高は減少する傾向がある。

また、一定周期の場合には、桂浜の波形勾配の値によって、波高減少の傾向に差異があることがわかる。図-2 は実験結果を現地尺度に換算して示されているところから、周期 7.5 min~12.5 hr のひろい範囲にわたって波形勾配の効果が顕著である。一般に、波形勾配が大きいほど港内における波高減少は顕著である。

周期帯 37.5 min~2.1 hr で、特に波形勾配が小さい場合、港内で減少した波が港奥でふたたび大きくなる傾向があり、すでに河川部の浅水効果として説明を与えてい

* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

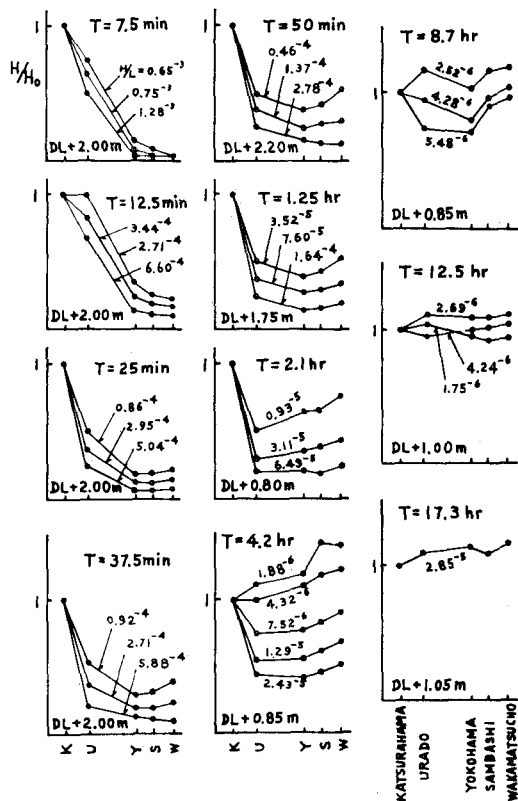


図-2 高知港内における波高分布

たが³⁾, これだけで十分説明されたと考えるわけにはいかないようである。進入した波の港内における反射, 回折, 屈折なども考慮にいれるべきであろう。また, 港口で高潮波形が与えられ, 港内では海面気圧や風応力による波形の変形はなく, 長波の伝播をずっと考えてよい場合には, 実験結果と対比してみることも意義がある。波高に対応するものとしては, 高潮波形あるいは潮位の偏差量をとることになる。

4. 港口の波高および流速

高知港における長周期波の特性を, ここでは, 港口狭窄部 (St. 1) における波高 H および流速 $u_{\max}$ の周期特性の面から検討する。図-3 および 4 に示された実験結果をみても, 波高および流速の周期特性が波形勾配によって顕著に異なっていることがわかる。

また, St. 1 の水位および流速の時間的変化を対応させると, たとえば 図-5 のように, 両者の間に位相差のあることがわかる。ただし, 流速は港内向きを正としてある。図-6 のよこ軸 $T\sqrt{g/h}$ が $3 \sim 7 \times 10^3$ では, この位相差はほとんどないとみてよいが, その他の場合には, 水位の位相が流速の位相よりやや進んでいる。

港口から進入した波は, 港奥で反射したのち, 港口から外洋へ出て行く。港口がせまい場合には, 波の一部が

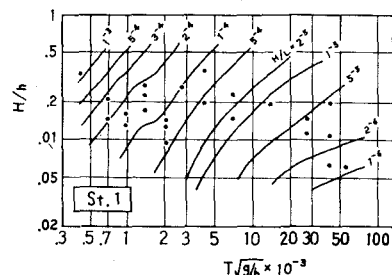


図-3 波高の周期特性

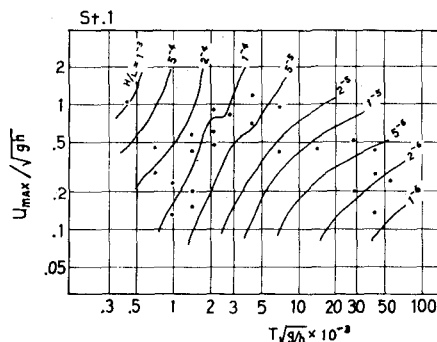


図-4 流速の周期特性

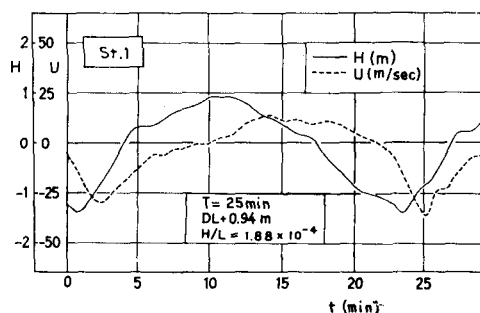


図-5 水位と流速の時間変化

外洋へ出て行き, 残りは港内で反射をくりかえすことになる。ここで, 波として港の規模の数倍以上の波長をもった微小

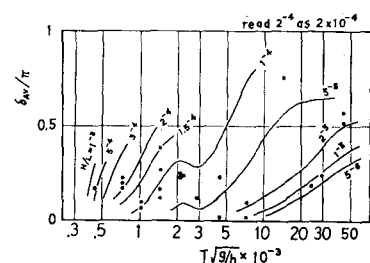


図-6 水位と流速との位相差

振幅波を対応させることができれば, 進行波については, 水位と流速との位相差はないことになる。進行波と向きが逆でその他の性質が全く同じ二つの波とを重ね合わせた場合は, その位相差は $\pi/2$ となり, 完全重複波の性格をもつ。このような波の特性を利用して, 水位と流速との位相差から, みかけの反射特性を見積もることができる。ところで, 実際には, 高知港は地形的に複雑

で、反射以外の回折、屈折などの影響も考慮しなくてはならない。

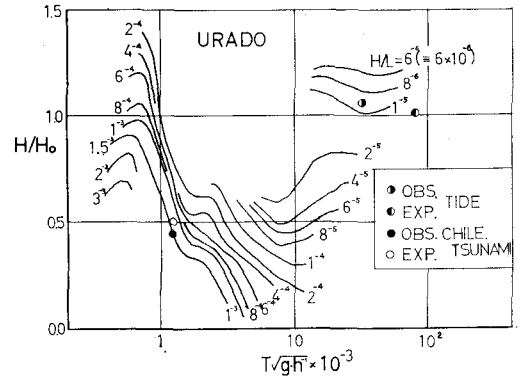
水位と流速との位相差がどのような周期特性をもっているかは、たとえば、図—6 によって明らかになる。この図の位相差 δ_{Av} は、たとえば、図—5 の位相差 δ_{crest} と δ_{trough} との算術平均である。図—5 のような水位および流速の時間曲線をフーリエ級数に展開し、基本周期成分について位相差を比較してみても 図—6 と同様な傾向がみとめられる。

5. 港湾振動との関係

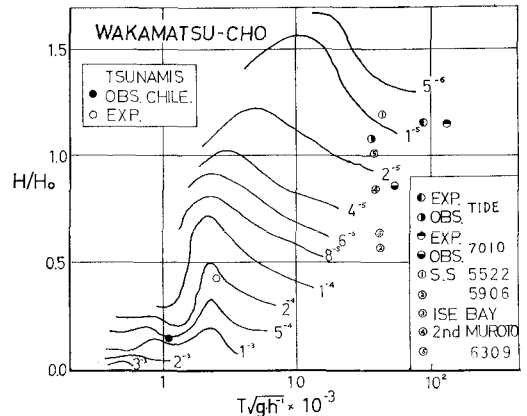
高知港の場合、港湾振動をどのように考えたらよいかを考察する。港湾振動に関する研究は従来数多いが⁹⁾、これらの研究を概観してみると、次のような2つのパターンに分類することができる。すなわち、その1つは、湾口付近に節が存在する条件下での研究であり、他は、湾口で水位変動を強制的に与えた場合である。最近のわが国の研究において用いられた実験波の特性を比較したのが表—1 である。この表からわかるように、高知港の長周期波に関する模型実験では、その他よりも l/h が大きく、 $T\sqrt{g/h}$ も大きいことがわかる。

湾口で水位変動を与えた場合の湾内振動の研究も数多いが、たとえば樋口¹³⁾や梶浦¹⁴⁾らのものをあげることができる。樋口は、湾形特性を定量的にあらわすために、湾口通水断面積に対する湾内水面積の比をパラメータとしてとったが、これに対して岩垣ら¹¹⁾は港長と港内水深との比の重要性に着目した。このことは、港湾振動の初期の研究では、湾の固有周期に対する波の周期の比や、湾長に対する波長の比によって振動特性が検討されてきた⁹⁾が、それだけでは十分といえないことを示していると考えられる。堀川ら⁹⁾は入射波の波高によって共振特性が異なることを指摘しているが、これは著者らがここで検討している波形勾配の効果に対応するものと考えられる。

高知港の模型が、地形的に複雑ではあっても、微小振幅波理論の単純な適用が妥当であるならば、以上のよう



図—7 浦戸における波高比の周期特性



図—8 若松町における波高比の周期特性

な周期特性において波形勾配が重要な役割を演じることはならないはずである。

6. 津波の再現性と長周期波の応答関数

チリ地震および日向灘地震による津波の場合について、港口桂浜と港内検潮所位置との波高比を、図—7(浦戸)および図—8(若松町)に示す。現地記録から、津波の代表的波高をとって得たものに比べて、チリ津波の再現実験から得られたものは値がやや大きい。浦戸にお

表—1 最近の港湾振動の研究における波の基本特性

	岩垣ら ¹¹⁾	堀川ら ^{7)~10)}	岩崎ら ¹²⁾	著者ら ^{1)~5)}	高知港
水深 h	10 cm	10~20 cm	10~20 cm	10 cm	10 m
湾長 l	0~1 m	0~1 m	0~12 m	~40 m	~10 km
湾口幅 B	0.5 m	1~5 m	15 m	7 m	—
(b)	(0~0.5 m)	(0~3 m)	(0~3 m)	(1 m)	(250 m)
波高 H	0.3~0.6 cm	1~2 cm	2 cm	1~4 cm	1~4 m
周期 T	0.7~2 sec	1~3 sec	10~60 sec	0.3~40 min	0.25~12 hr
波長 L	0.7~2 m	1~5 m	10~100 m	18~2400 m	9~4000 km
l/L	0~1.5	0~1	0~0.1	$2 \sim 10^{-3}$	$1 \sim 4 \times 10^{-2}$
l/h	0~10	0~10	0~100	~400	~4000
$T\sqrt{g/h}$	7~20	10~30	$10^2 \sim 10^3$	$2 \times 10^2 \sim 2.4 \times 10^3$	$10^3 \sim 10^5$
H/L	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-6}$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$

ける波高比は、現地記録では 0.44 であるが、実験では 0.50 であり、若松町における波高比は、それぞれ 0.12 および 0.43 である。図-7 および 8 には、現地尺度に換算された波形勾配をパラメータとして、波高比の周期特性があらわされている。この波形勾配は模型のひずみに関係するので、現地より 2.5 倍大きな波形勾配を実験に用いた場合、図-7 および 8 で、チリ津波の現地記録から得られた波高比とその実験値とは、近い値をとるがかならずしも一致しない。しかし、波形に着目するかぎりにおいて、津波の再現性は認めることができる。これは、ハワイのヒロ港の場合も同じである^{15), 16)}。

次に、周期 T に対して港口桂浜および港内検潮所位置の長周期波についてのパワースペクトル $S_0(T)$ および $S(T)$ が得られている場合、長周期波の応答関数が $R(T) = \sqrt{S(T)/S_0(T)}$ で与えられ、この $R(T)$ が波高比に対応できるものとする。このとき、すでにみたように⁴⁾、現地記録の解析から得られたものに比べて、チリ津波の再現実験から得られたものは約 2.5 倍大きい値を示す。このことから、長周期波の水理模型実験において、波形を再現させることができて、さらにその精度をあげて応答関数をも再現させることは困難であることがわかる。

模型のひずみの効果は、実験波形勾配や模型の海底勾配に顕著にあらわれることに留意すると、一般に、この種の模型実験でさらに詳細な検討をするにあたっては、波形勾配を考慮する必要があるといえる。

7. 潮汐および高潮の再現実験の評価

港口桂浜の波高 H_0 と港内検潮所位置の波高 H との比が、前節の $R(T)$ と線型的に対応するとすれば、高知港の周期特性を広い範囲の周期帯にわたる実験結果に基づいて検討できることになる。高知港で実在する波として津波と潮汐を考え、その周期を比較してみても、その差は 10 倍以上に達し、しかも、その中間の周期帯の波は実在するとしてもごくまれである。

潮汐を長周期波として検討するために、高知港内約 19 点で観測された潮汐 (1971 年 1 月 19 日) の潮位差を波高としてとり、これから H/H_0 をもとめると⁴⁾、模型実験から得られた結果とかなりよい一致を示す (図-7, 8 および 9)。これをみると、模型における潮汐の周期帯では、津波の場合と異なり、模型のひずみの効果が顕著ではないことがわかる。

高潮は、その発生原因が台風など気象条件によるものであるから、一般に、長周期波の特性をもつと考えることは無理である。ところで、台風 7010 による高潮について、桂浜において高潮波形を与え、この波形が風や気圧などの影響をうけず高知港内に進入したという場合について、模型実験を行なった結果は⁴⁾、たとえば、横浜

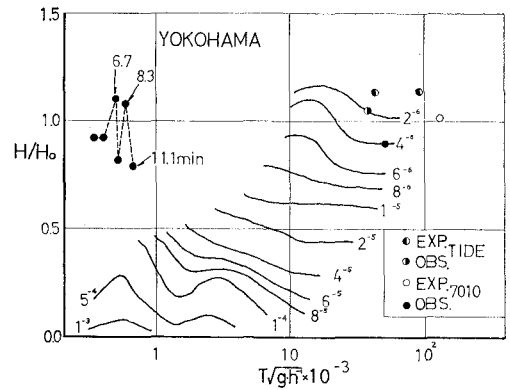


図-9 横浜における波高比の周期特性

および若松町についてみると、図-8 および 9 のようになり、十分再現できているようである。現地記録と実験との差は、高潮時の越水と破堤の効果が実験では考慮できなかったことによるとしているが、これは、この高潮が潮汐と同程度の再現性をもっているという前提にたってはじめて可能な帰結である。

ところで、その他の高潮について、偏差が波高に対応するとして解析すると、図-8 (若松町) のような結果が得られる。図中、高潮の現地資料がばらついている原因を検討してみると、高潮を長周期波で近似して再現するには台風の規模や経路など気象条件を十分考慮してやる必要があることがわかる。この意味で、一般に、高潮は条件つきで再現可能であるといえよう。

8. 誘起振動

図-7 (浦戸) の $T\sqrt{g/h} \sim 0.8 \times 10^3$ 付近の周期特性をみると、James^{17), 18)} が指摘しているように港口付近の泊地が港口 Resonator の役割を果たしているのではないかと考えられ、この効果も港内における波高減少に関与しているものとみられるが、定量的には彼の得た結果をそのままあてはめるわけにはいかないようである。

台風 7010 による高潮時に、桂浜とて 3~12 min の周期帯の振動が記録された⁴⁾。これを解析して応答関数をもとめると、図-9 の破線のようになる。浦戸と若松町の周期特性をみると、この周期帯での波形勾配は 10^{-4} より小さいと考えられる。しかし、図-9 の破線に対応するものは、現在までのところ、高潮実験記録にはあらわれていないので、この周期帯の波の発生原因は高潮の模型実験で相似させることのできない種類のものかもしれない。

9. 結 語

高知港の模型を用いて長周期波の変形特性を実験的に調べたが、その結果、港内における波高分布は波の周期のほかに波形勾配によっても支配され、同様に港口にお

ける水位および流速の周期特性にも波形勾配をパラメータとして導入する必要があることがわかった。

長周期波の実験結果をもとに、再現性を検討した結果、全体的な波形に主眼をおけば、津波および潮汐ではひずみ模型においても再現できるといえる。高潮については、気象条件などに留意すれば、条件つきで、力学的相似律による再現性を確保できる。一般に、現象に関与する外力の特性と模型のひずみ効果について、力学的に十分な検討が与えられれば、現地と実験との対応性を保持できるものと考えられる。なお、港湾振動などについても、今後さらに検討を加える必要がある。

終りに、本研究に関連して適切な示唆を与えられた工学部 岩垣雄一教授に心から謝意を表わす。資料調査には運輸省ならびに高知県の協力をいただいた。また、工学部 土木工学教室の村上仁士助手には貴重な資料を利用させていただいた。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, pp. 2089-2102.
- 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, 京大防災研年報, No. 14B, 1971, pp. 471-488.
- 4) 防災研究協会: 高知港における高潮の変形に関する実験的研究, 1971, pp. 1-55.
- 5) 中村重久: 高知港の津波と振動特性に関する模型実験, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 435-439.
- 6) たとえば, Ippen, A.T.: Estuary and coastline hydraulics, McGraw Hill Inc., 1966, pp. 213-215.
- 7) 本間仁・堀川清司・西村仁嗣: L字型湾の振動特性について, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966, pp. 236-241.
- 8) 堀川清司・首藤伸夫・西村仁嗣: L字型湾の振動特性について(2), 第15回海岸工学講演会講演集, 1966, pp. 236-242.
- 9) 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.
- 10) 堀川清司・首藤伸夫・西村仁嗣: 津波防波堤の効果について(2), 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 421-426.
- 11) Iwagaki, Y. and H. Murakami: Harbour oscillations induced by composite waves in rectangular basins, Bull. DPRI, Kyoto Univ., Vol. 21, Part. 4, No. 196, 172, pp. 265-277.
- 12) 岩崎敏夫・揚 沢民・佐藤栄司・新井信一・抜橋勝一郎: 矩形湾の波高増幅率に関する研究, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, II-13, 1971, pp. 33-36.
- 13) Higuchi, H.: Hydraulic model experiment involving tidal motion, Parts 1, 2, 3 and 4, Bull. DPRI, Kyoto University, No. 59, 1963, pp. 1-65.
- 14) 堀浦欣二郎: 湾水振動におよぼす防波堤の効果, 東大地震研報, No. 41, 1963, pp. 403-418.
- 15) Palmer, R.Q., M.F. Mullvihill and G.T. Funasaki: Hilo harbour tsunami model-reflected waves superimposed, Coastal Eng., St. Barbara, Specialty Conf., ASCE, 1965, pp. 21-32.
- 16) Palmer, R.Q. and G.T. Funasaki: The Hilo harbour tsunami model, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., 1966, pp. 1227-1247.
- 17) James, W.: Rectangular resonators for harbour entrances, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., Chap. 98, 1968, pp. 1512-1530.
- 18) James, W.: Spectral response of harbour resonator configurations, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., Chap. 132, 1970, pp. 2181-2194.