

II-12 長方形港湾泊地の不規則振動について

京都大学工学部 正員 岩垣雄一

京都大学工学部 正員 小村エナミ

1. はしかぎ： 大規模港湾の開発、計画等に際し、港湾内に生ずる波の諸特性を明確に把握しておく必要がある。とくに港湾内に長周期の波浪が進入した場合には港湾特有の振動を起し、船舶その他の港湾施設に被害をもたらす原因にもなりかねない。このように湾水振動を生じさせる長周期の波浪に、比較的波高の大きい短周期の波浪が乗るような場合には、港湾内に異常に大きい波高が生ずることも予想され、従来の規則波を対象とした考え方では湾水振動の特性を十分説明しえない場合が少くない。本研究は2成分合成波を用いて、港口が全開した長方形港湾泊地の不規則振動現象を調べ、規則波の振動特性と比較検討し、合成波によって生ずる非線形効果を見い出そうとしたものである。

2. 実験方法： 実験水槽は幅50cm、高さ70cm、長さ約30mの両面ガラス張りで、一端に造波機が設置されている。造波機から22.75mの位置に湾軸と水槽の中心線が一致するように、アクリル製港湾模型を設置し、湾長を0~80cmまで自由に变化できるようにした。造波機は8個のピストンからなり、各ピストンは同相の波がたかいたに1:√2の度係になっている。実験を通じて水深は10cmとした。

実験順序は、組合わすべき各ピストンによる単一波(規則波)の実験後、つぎのような2種類の場合作について合成波の実験を行なった。1) 長周期波として $T_1=2.0\text{sec}$ 、短周期波として $T_2=0.707\text{sec}$ の波の合成。この場合には、合成した際に下の2成分波の成分が下の成分周期と重なることを避け、各成分波の変化を明確に分離できるようにした。2) 長周期波として $T_1=2.0\text{sec}$ 、短周期波として $T_3=1.0\text{sec}$ の波の合成。この場合、 T_1 の2倍周期波の成分が下の周期波と一致し、各成分周期を明確に分離することができず、1) では下の2次の共振ピークが下の1次の共振ピークとほぼ等しくなるため、合成した際に下の成分波は下の影響と共振とを受けることが予想されるので、2) では、 T_3 の共振ピークが T_1 のそれと重ならざるようにした。同時に共振とそれと離れていても、倍周期波の波が重なれば、 T_1 の共振特性および下の共振特性などのように変化することを調べようとした。

長周期波の波高は2次波峰が発生すれば約3mmの波である。波高の測定は長周期波が造波機から再反射して模型に到達するまで計測し、データレコーダに記録し、周波数分析を行ない、各測定の波高を求めた。

3. 実験結果および考察： 湾軸上の任意点の波高と港口を用いたときの港口位置での波高(以下基準波高と呼ぶ)との比を共振増幅率 R と定義する。また、 $T_1=2.0\text{sec}$ と $T_2=0.707\text{sec}$ に関する実験を実験Ⅰ、 $T_2=2.0\text{sec}$ と $T_3=1.0\text{sec}$ に関する実験を実験Ⅱと呼ぶことにする。一般に港湾の共振モードは図-1のように表わすことができ、湾長 L を0~80cm変化させる間に、 $T_1=2.0\text{sec}$ の波では(a)に、 $T_2=0.707\text{sec}$ の波は(a)~(c)の範囲に、 $T_3=1.0\text{sec}$ の波については(a)~(b)

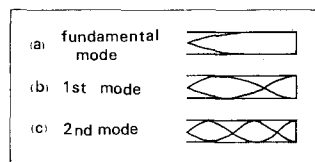


図-1 共振モード

の範囲にわたり変化する。以下実験ⅠとⅡについて考察する。

実験Ⅰ) 図-2は湾奥の波高の変化にともなう湾奥の波高変化を調べたものである。横軸に湾奥の波高と水深の比 h/l 、縦軸に R をとっている。図中の●印および○印は規則波、○印および○印は合成波の各成分波による振動特性を示している。 $T_1=2.0\text{sec}$ による共振長は $h/l \approx 4.3$ ($h=4.3\text{cm}$) R は約3.4 (入射波高の約6.8倍) になる。一方、 $T_2=0.70\text{sec}$ の波による共振長は $h/l \approx 1.0, 4.1, 7.2$ 付近になり、 R はそれぞれ約2.2, 2.7, 2.6になる。図中には T_1 に関して合田およびMilesとMunkの理論による共振長を入れてあるが、外海の条件が異なるので必ずしも一致しない。 R に関して理論は湾口のエネルギー損失を考慮していないことであって、合田の理論およびMilesとMunkの理論ではそれぞれ R が6.48および4.87になり実験値よりむしろ大きくなる。

合成波の成分波に関して、 T_1 の場合は共振長付近で規則波と異なる様相を示し、 T_2 の第1次ピークおよび第3次ピークの近傍でも規則波の場合とわずかに異なる。しかし、 T_2 の共振長にある近傍を除けば、波を合成しても振動性が維持されることかわかる。 T_2 の場合は第2次、第3次ピーク付近に従い減衰が著しくなってくる。入射波の周期が湾奥の固有周期に近づくにつれ、波高が増大し、入射波が微小振幅波であっても、共振長の付近では有振幅波になり、2倍周波数成分の波が現われる。合成波の場合には、他に各成分周波数の和および差の周波数をもつ拘束波と称される一定の振幅の波が現われる。¹⁾ 図-3および図-4はそれぞれ湾奥の波高の変化にともなう拘束波の変化および合成波周波数成分折しにとき現われる2倍周波数成分波の変化を図-1と同補式で示している。図-3によれば、 T_1 および T_2 の共振長で顕著なピークが現われ、和の成分は T_1 の共振長で最大、差の成分は T_2 の共振長近傍で、ことに T_2 の第3次ピークにあるときに最大振幅とほぼ等しいとされていることかわかる。図-4から各成分波の共振長に相当するところでのみ2倍周波数成分波が存在し、 T_1 の場合は基準波高の $1/2$ 、すなわち入射波高程度の波が現われている。 T_2 については共振長の第1次ピークでのみわずかながらこの成分の波が現われている。上述のことから、とくに T_1 の成分波による共振特性にはかなりの非線形な効果が作用していることかわかる。

実験Ⅱ) 図-5は実験Ⅰと同様の方法で規則波および合成波の場合について湾奥の波高の変化にとも

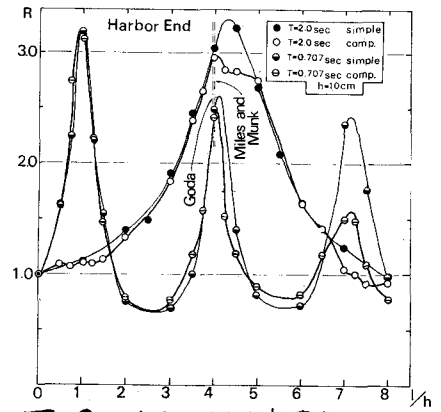


図-2 湾奥の振動特性

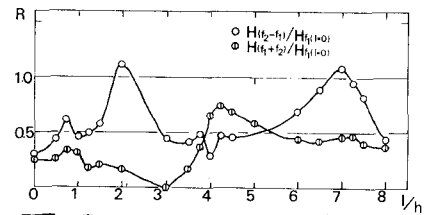
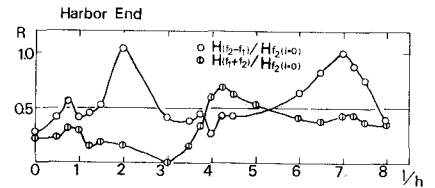


図-3 周波数和および差の波高変化

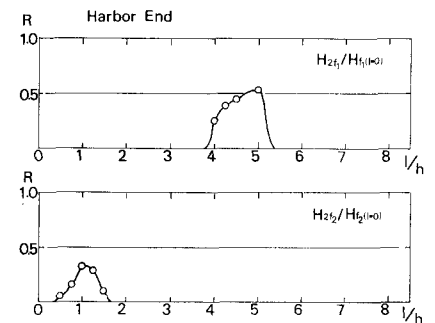


図-4 T_1 および T_2 成分波の2倍周波数成分波の変化

ばう湾奥の波高変化を示したものである。図中の●印、○印および□印、△印はそれぞれ規則波および合成波の各成分波を表わしている。 $T_1=2.0\text{sec}$ の規則波については実験Ⅰと同様であり、 $T_3=1.0\text{sec}$ の波について規則波による共振長 L_R を求めると、1.75 および 6.5 の近傍にあり、波高振幅 R はそれぞれ約3.8 および 3.2 程度の値をとる。合成波の T_1 成分波のみをとると共振長では規則波に比し、 R が1.2倍程度大きくなっている。また、 L_R が1.75の近傍でも規則波とは相当に異なる様相を示し、 L_R が6~8の範囲では全く規則波とは相違する。 T_3 成分波では規則波に比しいくぶん小さい値を示しているが、 L_R が3.5~5.5の範囲、すなわち T_1 の共振長付近を除けば、比較的方向性はよく一致している。図-6は T_1 および T_3 の規則波に対する2倍周波数成分の波高変化を示したものである。実験Ⅰでも述べたように共振長の近傍では2倍周波数成分の波が現われ、非線形効果が入ってくるのがよくわかる。しかもその程度は最大、基準波高の1/2程度になる。

図-7は図-3と同様は方法で周波数の和の成分を求めたものである。 L_R が6.5~7.5の範囲では R が最大1.5に上っている。この原因についてはよくわからないうが、図-5の L_R が6~8の範囲では合成波の T_1 成分波が規則波の振動特性と異なることから判断して、和の成分の効果があるものと考えられる。なお、和の成分は T_1 の波の3倍周波数に相当し、規則波の T_1 の波の解折の際にも L_R が6~8の範囲で基準波高の40%程度の波高が現われ、これが認められ、このように大きい値になるのかも知れない。

周波数の差の成分については T_1 の周期と一致し、差の成分波のみをとりだすことが不可能である。図-5の T_1 成分波について考えると、 T_1 の共振長の近傍で規則波の振動特性と比較して、 R が1.2倍程度大きくなっており、差の成分が加えられたものと考えられる。また、 L_R が1.5~2.0の範囲に属して、 T_3 の共振長にあたる付近で規則波の振動特性と異なっているのは、差の成分の効果かなり大きく効いたものと思われる。この範囲で T_1 の成分波高が小さくなっており、差の成分にエネルギーが移行したのであろう。 T_1 の成分波全般にわたり規則波の振動特性と異なっている

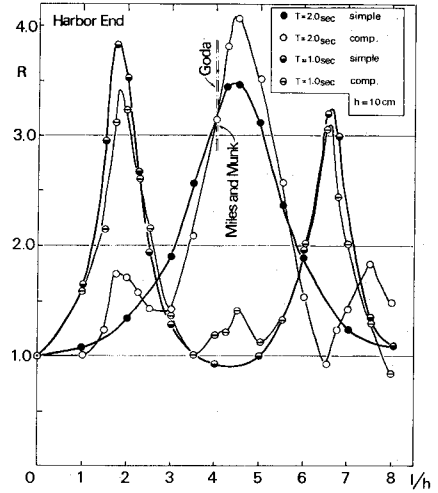


図-5 湾奥の振動特性

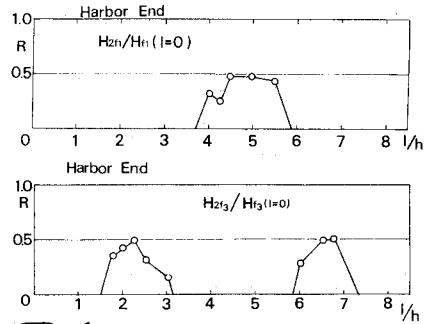


図-6 2倍周波数成分波の変化(規則波)

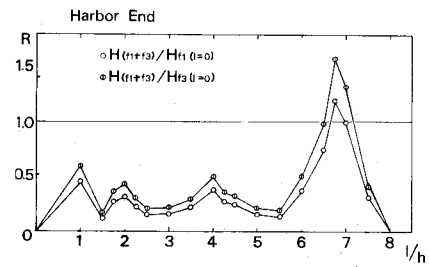


図-7 周波数和の波高変化

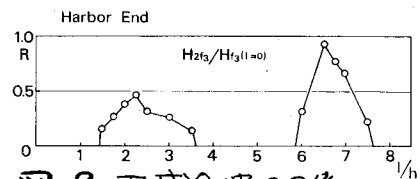


図-8 T_3 成分波の2倍周波数成分波の変化

のも、この差の成分の効果が徹底的に振動特性に影響を与えたとと思われる。

図-8は合成波に属する T 成分波の2倍周期波成分の変化を示したものであり、規則波に属する T の2倍周期波成分と同様、 T の共振長の近傍のみに現われている。共振長の第1次ピークに相当するところでは規則波の場合と同程度、第2次ピークに比べると基準波高程度に下がっている。

T の2倍周期波数 λ の周期波数 λ と一致して、独立にとりだすことができない。しかし、図-5から、 T の共振長の近傍で、 T の波高増幅率 R の値が1.5倍程度大きくなっていることから、 T の2倍周期波成分が加えられたことがわかる。

4. 港口部の考察：図-9および図-10はそれぞれ実験ⅠおよびⅡに属する港口部の解析結果を示したものである。図中の各印は図-2および図-5のそれらと対応している。図-9から T の共振長にある λ/λ_c が4.3のとき、港口で節(node)にならず、 λ/λ_c が5で最小値をとっている。MilesとMunkが港口が全府の場合、節の位置は共振波長 λ より $\Delta\lambda$ だけ、沖側になることを示したが、彼らの理論にもとづくと $\lambda=40.91\text{cm}$ 、 $\Delta\lambda=7.84\text{cm}$ になり、本実験においても約7cm程度ずれている。 T についても節になる位置は港口よりも沖側になっている。しかも外海に相当する領域が水槽の側壁で限られているため、港口の部分で水槽の幅方向にも振動(横振動)し、それは逆周期波ほど激しくなる。 λ/λ_c が0.75では水槽側壁で水面変動がほとんどなく、港口で著しい水面変動を生じ、 λ/λ_c が1.5では、逆に港口で変動が小さく、水槽側壁近くで変動が著しい横振動が認められ、これらの横振動の影響により共振長でも港口で節にならず、 R が1.8程度の大きい値を示したものである。実験Ⅱの場合においても、上述の実験Ⅰと同様な値が認められた。

5. あとがき：規則波および2成分合成波に属する実験を行って、振動特性が種々異なることを示した。とくに合成波の場合には、波の干渉による非線型の効果が顕著にあらわれることがわかった。規則波については、合田およびMilesとMunkの理論値と比較しながら、いずれの場合も波高増幅率を過大にみつもり、工学的に重要なこの値の適確な評価が今後の研究の課題である。最後に、本研究は文部省特定研究および奨励研究による研究の一部であることを記す。

- 参考文献 1) 浜田勝一：表面波の2次干渉，第11回沿岸工学講演会講演集，昭. 39.
2) Miles, J., Munk, W.: Harbor paradox, Proc. A.S.C.E. WWS. 1961

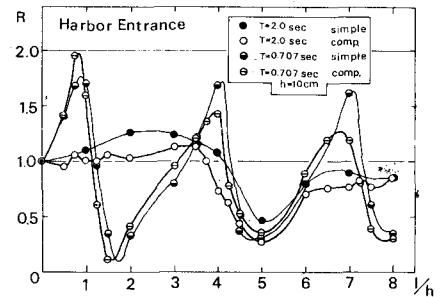


図-9 実験Ⅰにおける港口の振動特性

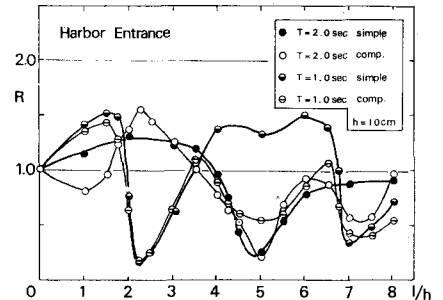


図-10 実験Ⅱにおける港口の振動特性