

造波水路における波浪実験の二、三の問題点について

合 田 良 実*

1. ま え が き

海岸工学の分野において実験的研究の占める比重は相当に大きい。試みに最近5回の本講演会の発表論文について調べてみると、215編中114編が実験を行っており、このうち99編は実験を主とする研究である。また114編中96編は波浪に関連した実験である。

波に関する実験は一見単純なようであるが、実際に担当してみるといろいろな問題があって所期の実験精度を確保することは容易でない。波高にして5%の精度を上げるとはかなりむずかしく、あまり注意しないで実験すると10%以上の誤差を軽く生じてしまう。波に関する実験は、今後、風波あるいは機械的不規則波によるものがしだいに主流を占めるものと予想されるが、不規則波の実験であってもその基礎は規則波実験であると考えられる。そこで本報文では、規則波を用いる実験における種々の問題点を指摘し、実験精度を上げるための方法について考察を加えてみた。

2. 波高測定の精度

波高測定が一番簡単な方法は、水路のガラス窓に物差しを当てて波の山と谷を読みとる方法である。波高が数センチメートル以上あれば5%の精度で読むことはむずかしくない。

オシログラフに記録を取るためには、並行抵抗線式の波高計を用いることが多い。この波高計の精度に影響をおよぼす要素としては、

- i) 水の表面張力によるメニスカス効果
 - ii) ブリッジ印加電圧の変動
 - iii) 水質・水温変化による電気伝導度の変化
 - iv) 検定曲線を直線で近似するための誤差
- などがあげられる。

まず i) は、抵抗線に付着するメニスカスが水面の上昇時と下降時でその形が変わり、波高を小さ目に記録することが考えられる。しかし、この波高計では抵抗線に付着する水そのものよりも、2本の抵抗線間の水全体の伝導性を利用しているので、メニスカスの形状はそれほど重要ではない。周期0.4~0.5秒以上の波が対象であれば、抵抗線の径を十分細くすることによって波高1cm

以下の波でも十分の精度で測定できる。

ii) は、ストレインメーターの性能が劣化している場合などに見られるもので、実験中のドリフトや、他のモーターの起動・停止の際の電圧変化などとして現われる。この電圧変動は波高計出力を直接に左右するもので、ときには10%以上の差を生ずることがある。実験中は、ブリッジ印可電圧を時々チェックしたほうがよい。

iii) は、水を導体として利用している以上やむを得ないので、精度の高い測定を行なうためには、1~2時間ごとに検定をくり返す必要がある。水の伝導性は、微量の溶解イオンによるものであり、イオン伝導度は1°Cの温度上昇によって1.5~2.5%増加する¹⁾。したがって、実験中に水温変化があれば、波高計の検定曲線も当然に変化する。また、溶解イオンの濃度が変われば、これも波高計の出力を変えることになる。なお、増幅器および記録器の2チャンネルを使うことにすれば、ステップ式のエレメントを併置した自動検定型の波高計²⁾を利用することができる。

iv) は、この波高計の特性として完全な直線性を得ることがむずかしいのであるが、ブリッジ各辺の抵抗値を上手に選んだり、また特殊な回路を使うことによって5~10%の精度で直線性を持たせることができる。しかしこの場合でも直線近似を用いることは測定精度を低下させる大きな原因となる。とくに、換算が簡単のように記録紙上の縮尺が1/5, 1/10などとなるようにあらかじめゲイン調整を行なう方式では、ii), iii)の誤差も累積して10%以上の誤差を生ずる可能性がある。面倒でも検定曲線から読み取るようにすべきであろう。

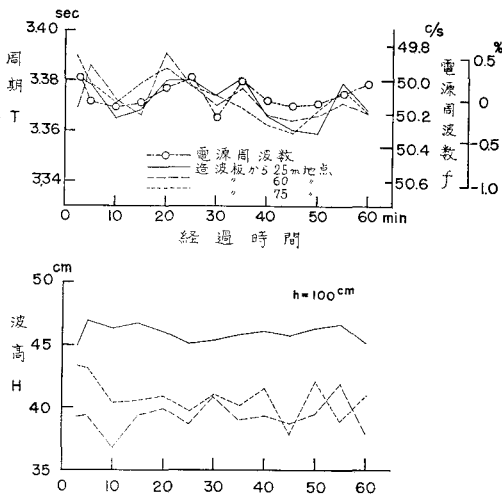
なお波高の計測の際は、以上のほかに波高計から増幅器までのリード線の容量の問題などにも注意する必要がある。

3. 実験波の定常性

実験に用いる規則波は、波高、周期が一定であることが要求される。発生波の周期の定常性は、原動機および変速機の安定性に左右されるが、通常の誘導電動機では電源電圧および電源周波数の変化の影響を直接に受け、±0.2%程度の変動は避けられない。原動機および変速機の容量が不足の場合は造波板の運動が不斉一となり、

* 正会員 Sc. M 運輸省港湾技術研究所水工部

図一 波高・周期の時間的変動の測定例



周期変動はさらに大きくなる。

図一は、港研の105 m大型造波水路で起動後5分ごとに4波ずつ波形を記録し、平均周期および平均波高の変化を調べた一例である。この際、電磁オシログラフのタイマーが電源周波数に比例することを利用し、これを較正済みの電接時計による1秒間隔のマークと比較して電源周波数の変動も調査した。測定位置によって差はあるが、周期の変動は大勢として電源周波数の変動に追随している。この例では、標準偏差にして周期測定値（4波平均）は0.22～0.27%，電源周波数は0.14%の変動率である。一方、波高については変動率がやや大きく、25, 60, 75 m地点でそれぞれ1.4%, 2.8%, 3.6%である。

また表一は、同じく105 m水路の特性試験から拾ったもので、連続10波および55波の記録について造波板の周期、および60 m地点における発生波の周期と波高の変動率を次式で求めたものである。ただし $\bar{X}$ は平均値。

$$S = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \dots \dots \dots (1)$$

造波板の周期よりも発生波の周期の変動率が大きい

表一 発生波の周期・波高の変動率の例

No.	N	造波板周期		発生波周期		発生波高	
		平均値 (sec)	変動率 (%)	平均値 (sec)	変動率 (%)	平均値 (cm)	変動率 (%)
1	10	2.020	0.24	2.025	0.34	52.2	2.3
2	10	2.527	0.31	2.534	0.23	68.4	1.7
3	10	3.046	0.49	3.044	0.63	66.3	1.5
4	10	4.332	0.23	4.325	0.34	47.6	1.3
5	10	5.882	0.27	5.894	0.40	31.8	2.5
6	10	7.346	0.16	7.357	0.49	28.7	1.2
7	10	4.032	0.15	4.026	0.27	58.0	1.5
8	10	5.025	0.18	5.023	0.36	60.9	1.3
9	10	5.961	0.13	5.970	1.29	61.0	1.3
10	10	7.003	0.16	6.985	0.38	74.6	1.1
11	55	4.258	0.20	4.257	0.30	59.4	1.7

は、zero-up-cross 点の微細な水位変動や読み取り誤差によるもので、数波まとめて周期を読みとれば変動率はもう少し減少する。いずれにしても、周期は $\pm 0.2 \sim 0.3$ %、波高は $\pm 2 \sim 3$ %変動することはやむを得ない。この同一地点における波高変動が数%以上になる場合は、波が碎波限界に近くて不安定、あるいは造波機の出力が不足で周期自身が不安定、のいずれかであると見られる。

なお、遮蔽実験などの水槽実験では、波高記録が1～2分周期のビート状になることが珍しくなく、 ± 50 %以上の周期的変動を示すこともある。これは実験水域内の波が単一の進行波だけでなく、あちこちからの反射波が重なり合っているためである。すなわち、わずかながらでも周期変動が存在すると、各波列の進行距離が長いために合成時の位相差が大きく変化して、合成波の波高が変動する。この変動は、合成重複波の節にあたる所ほど著しい。

4. 波高の場所的変動と2次波峯

同一地点における周期および波高は前節のように安定しているのが普通である。しかし図一でも認められるように、水路内の波高は必ずしも一定ではなく、場所によって相当変化している。この原因としては、

- 消波装置からの反射波による部分重複波の形成
- 発生波の進行にともなう変形
- 水路内の横断方向の変化

などがあげられる。

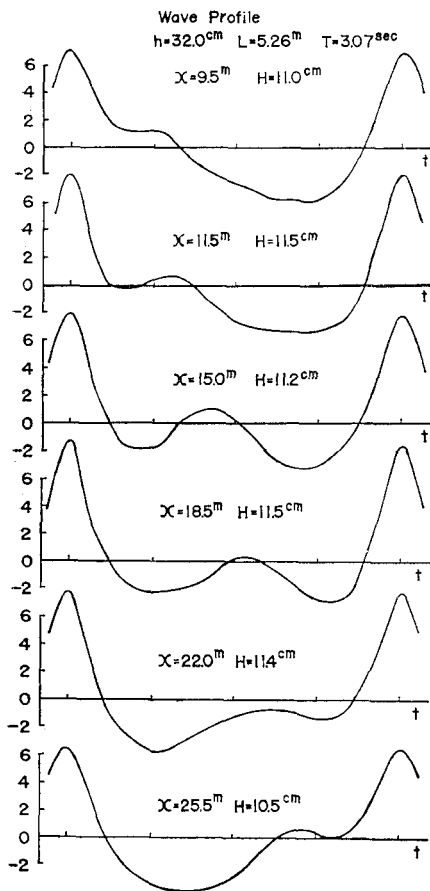
i) の部分重複波による変動は、波高の極大・極小が1/4波長間隔で規則的に現われる。波高変動の幅を10%以下に抑えるためには、消波装置の反射率を5%以下にすることが必要である。

水路内の波高変化には、この1/4波長間隔よりもさらに長くて数波長にわたるもの、あるいは不規則に変化するものがある。これは発生波が変形しながら進行するため、波高の大きな波に著しく、この顕著な例が2次波峯である。これは、波の山と山の間に小さな波峯が現われる現象で、この発生限界は堀川⁹⁾が実験的に示したように、Miche によるつぎの式でほぼ与えられる。

$$(H/L)_{\text{crit}} = \frac{1}{3\pi} \sinh^2 kh \tanh kh \dots \dots \dots (2)$$

この2次波峯は主峯よりも遅い速度で前進する。このため、図二の例のように主峯に追いつかれ、追い越され、再び主峯の中間に現われ、この過程をくり返す⁴⁾。追い越し地点では波高が減少し、出現地点では波高が増大する。この追い越し、または出現間隔同志の間隔 λ は、水深波長比 h/L と波高水深比 H/h に関係し、ほぼ図三のように表わされる。この出現間隔はそのまま波高変動間隔である。2次波峯の出現を見るにい

図-2 2次波峯の移動例



Results of Fourier Analysis

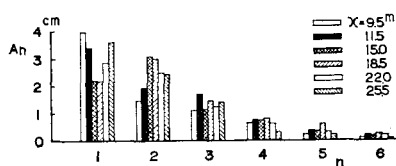
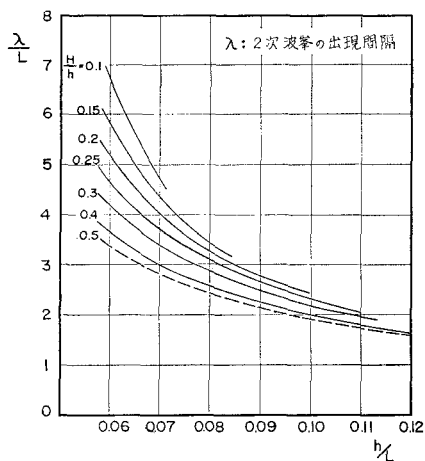


図-3 2次波峯の出現間隔



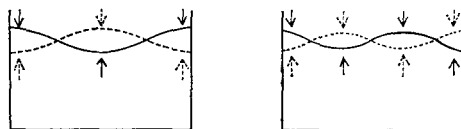
たらない波でも、やはり波形の変形をとまうのが普通であり、この変形も図-3に似たような間隔でくり返すものと考えられる。

2次波峯の発生、または発生波の変形の原因については定説がないが、筆者は造波板を機械的に正弦運動させるためではないかと考える。有限振幅波の理論波形は、いずれも山が高くて短く、谷が浅くて長く続くものであるのに対し、造波板で強制しているのは山も谷も等しい正弦波形であり、このため発生波は最も安定した形である有限振幅波の波形に近づこうとして変形をくり返すのであろう。したがって、もし造波板を有限振幅波の粒子運動に近い形で動かすことができるならば、2次波峯の発生および波の変形を相当に防止できるのではないかとと思われる。

なお、発生波の変形の問題は、高調波成分波の単純な合成としては取り扱えない。図-2の波形の調和分析結果に示されているように、各成分波の振幅は一定でなく、進行とともに増減をくり返しているのである。

iii) の横方向の変化は常に現われるものではないが、短周期で波高の大きな波のときや、水槽実験などで見られる。水路末端から波を眺めると、図-4のように波の峯の線が上下に揺れながら進んでくる。造波板の左右の隙間の差、導波板のひずみ、あるいは左右の越波の差とかわずかの原因から発達し、また波が右か左かいずれか先に崩れ始めるとこうした変化が助長されるものである。

図-4 横波による波の峯の上下運動



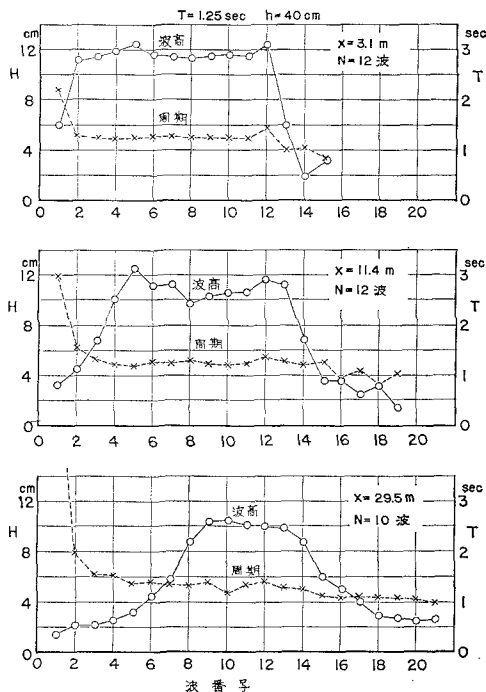
5. 波群の伝播と有効測定時間

構造物に対する波の作用に関する実験では、模型構造物からの反射波を考えておかなければならない。すなわち、模型からの反射波が造波板で再反射されると、本来の発生波と干渉して入射波高を変えるからである。このため造波部分で波をほとんど反射しない鉛直振動流型の造波装置^{3)~7)}が用いられることもあるが、一般のピストン型、フラップ型、プランジャー型などの造波装置では再反射による制約を避けることができない。したがって測定可能時間は、第1波が模型に到達してから反射波が造波板との間を往復する時間である。しかし、発生波群の先端は一般につぎのような性質をもつので、有効測定時間は上記の測定可能時間よりも短くなる。

i) 造波板が駆動後直ちに定常運転に入ったとしても、第1波の周期は伝播とともに長くなる。

ii) 波高がほぼ一定となる部分は、波速ではなく群速度で進行する。

図-5 波群の変形の一例



iii) 起動後しばらくは、波高変動があり、波高を正確に決めがたい。

図-5 はこのような波群先端部の特性を示す測定例で、幅 50 cm、水深 40 cm の水路で、電磁クラッチの操作によって造波板を 12 または 10 周期だけ動かし、造波板から $x=3.1$ m, 11.4 m および 29.5 m の地点で波形を記録して、各波ごとの波高および周期を読みとったものである。ただし、造波板の周期は $T=1.25$ 秒である。

この測定例では、第 1 波の周期が波の進行とともに 2.2, 3.0, 4 秒以上と延び、また第 2 波も 1.3, 1.6, 2.0 秒と増大している。これらの先端部分の波は、ほぼその周期と水深に対応した波速で進行し、波高をしだいに減ずる。この例で第 2 波の $x=3.1 \sim 29.5$ m における伝播速度を求めると $C=1.83$ m/sec となり、これは $T=1.90$ 秒に相当する。また $x=3.1$ m では第 2 波以降ほぼ波高一定となるが、 $x=11.4$ m では第 4 波以降、 $x=29.5$ m では第 9 波以降と、波高一定の部分がしだいに遅れる。この速度を求めると約 1.05 m/sec となり、 $T=1.25$ sec の群速度 1.15 m/sec にほぼ一致する。

規則波の実験は波高が一定であることを条件にするから、測定時間として有効なのは波高一定の部分が模型に達してから以後、造波板で再反射された第 1 波が戻ってくる以前であり、これは次式で表わされる。

$$t = \frac{3l}{C_1} - \frac{l}{C_G} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 l は造波板と模型との距離、 C_1 は第 1 波の伝播

速度、 C_G は発生波の周期に対応する群速度である。したがって、もし $C_1 > 3C_G$ であれば定常状態の波を使った実験は不可能である。 $C_1 \approx \sqrt{gh}$ の近似を用いると、この条件は $h/L \geq 0.4$ で成立する。もっとも第 1 波の波高は減衰が大きいため、第 1 波の影響を無視することによれば有効測定時間をもう少し長くとれる。しかし、いずれにしてもこの方式で深海波の実験を行なう場合は、波高の精度を犠牲にせざるを得ない。なお、逆に浅海性の強い波では波速が周期に無関係で $C \approx C_G \approx \sqrt{gh}$ となるので、 $t = 2l/\sqrt{gh}$ で略算できる。

また、この有効測定時間の間であっても波高は完全には一定でなく、詳しく観察すると 10~20% の変動がある。この変動は、図-5 のように一度最大値を示してから減少し、再びやや増大して一定値に近づくものが多いが、波によってはビート状の変動をしばらく続けることもある。ただ各波ごとの変化は定まっていて実験をくり返しても同じように現われるので、精度の良い実験を行なうためには何波目を測定対象とするかを定めておき、この波の波高は模型設置前にその位置における通過波高として測定しておくのがよいであろう。この場合、造波板の起動位置は一定にしておき、通過波測定、模型構造物のテストともに数回くり返してその平均値と比較すれば間違いはない。

6. 仕切壁の有効性

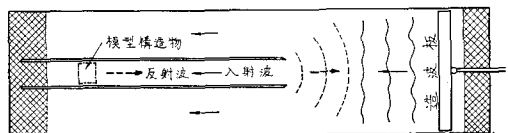
模型構造物からの反射を処理する手法の一つとして図-6 のように広幅の水路または水槽内に仕切壁を設けて小水路を作り、模型をこの中に置いて反射波を幅の広い本水路へ拡散させる方式が用いられることがある。この方式は、反射波の再反射の問題が軽減され、連続運転が可能とされているけれども、これを使用した経験ではつぎの 2 点に問題があり、無条件では使用できない。

i) 本水路側壁沿いに十分な消波装置が準備されていないかぎり、反射波は側壁で再反射をくり返し、入射波をひずめることになる。

ii) 模型構造物からの反射波が小水路を離れるとき、小水路内へ負の反射を生ずるため、小水路の入射波高が変化する。

まず第 1 の問題は、反射波が広幅の部分に拡散されたとはいっても、そのエネルギーが吸収されないかぎり水路内で多重反射を起こすことは当然である。したがって仕切壁方式を用いるときは側壁沿いの消波装置を完備することがまず必要であり、この意味で水路実験に仕切壁

図-6 仕切壁の設置例



方式を用いるのは無理である(入射波自身の減衰を生ずる)。

第2の問題は、たとえば長波について考えると、水路の幅が b_1 から b_2 に急変するときはここで部分反射を生じ、その反射率および波高伝達率は質量保存および水面連続の条件からつぎのように求められる⁸⁾(ただし、簡単のため水深の変化しない場合を示す)。

$$K_R = \frac{b_1 - b_2}{b_1 + b_2}, K_T = \frac{2b_1}{b_1 + b_2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

上式は b_1, b_2 の値に何も制限がないから、 $b_1 < b_2$ と急拡の場合を考えると、反射率は $K_R < 0$ と負の値をとる。すなわち、位相が逆転した反射波が幅 b_1 の水路へ戻って行く。

図-6 の仕切壁は一般に浅海表面波が対象であって、上記の長波の取り扱いをそのまま適用することはできないが、模型からの反射波が小水路の先端から回折波的に拡散される際には、やはり何らかの負の反射波を残して行く。このため、第1波が模型構造物と仕切壁先端との間を1往復すると、模型への入射波高が明らかに変化する。したがって、前節に述べた有効測定時間は、模型と造波板ではなく、模型と仕切壁先端との距離で制約されてしまい、有効測定時間はかえて減少する。幅 3.0 m の水路内に 0.85 m 幅の小水路を設けたときの例^{2), 3)}では、この負の反射波および本水路側壁間での多重反射のために、小水路内の波高はビートの的に不規則に変化し、連続実験は全く不可能であった(この実験では、この波を逆に不規則波のサンプルとして解析を行なった)。

また、本水槽内に十分な消波装置を配置すれば水槽内の多重反射は解決されるが、負の反射波は依然として存在する。このため、模型に対する入射波高は模型設置前の通過波高から変化するの、別の方法で入射波高を推定することが必要である。

なお、仕切壁は同時に数個の模型断面について試験するための方法としても用いられる。この場合は、負の反射波の問題を生じないよう仕切壁を造波板の直前まで延ばし、独立な小水路として働くように設計するのがよいと思われる。

7. 反射率測定における Healy の方法の適用限界

模型構造物の反射率の測定や、反射波があるときの入射波高の推定には、普通 Healy の方法が用いられる。これは、水路内の波高分布を求め、この極大、極小波高から次式で入射波高、反射波高、および反射率を計算する方法である。

$$\left. \begin{aligned} H_I &= \frac{1}{2} (H_{\max} + H_{\min}) \\ H_R &= \frac{1}{2} (H_{\max} - H_{\min}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

これらの式は、波を正弦波形の微小振幅波と仮定したものであるから、波高がある程度大きくなると誤差を生じ、 H_I は過大、 H_R は過小に見積ることになる¹⁰⁾。近似計算として、第2次近似解の入射波と反射波を単純に重ね合せて考えると、部分重複波の波形はつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} \eta &= a_I \cos(kx - \sigma t) + Ba_I^2 \cos 2(kx - \sigma t) \\ &\quad + a_R \cos(kx + \sigma t) + Ba_R^2 \cos 2(kx + \sigma t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{ここに } B = \frac{1}{4} k(3 \coth^2 kh - \coth kh)$$

ただし、 a_I, a_R は入射波および反射波の振幅、 $k = 2\pi/L$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ である。また、入射波が2次波峯をとまなわれないもの ($1 - 4Ba_I < 0$) として、入射波高、反射波高はそれぞれ $2a_I, 2a_R$ である。

この式(7)の波形から、 $x = nL/2$ の腹における極大波高は、

$$H_{\max} = 2(a_I + a_R) \quad \dots\dots\dots(8)$$

と計算され、これは入射波高と反射波高の和に等しい。つぎに $x = (2n+1)L/2$ の節における極小波高は、この地点の波形が2次波峯を示すかどうかによって異なり、つぎのようになる。

$$a_I - a_R > 4B(a_I^2 + a_R^2) : H_{\min} = 2(a_I - a_R) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\begin{aligned} a_I - a_R < 4B(a_I^2 + a_R^2) : \\ H_{\min} &= 2(a_I - a_R) \\ &\quad + \frac{[4B(a_I^2 + a_R^2) - (a_I - a_R)]^2}{8B(a_I^2 + a_R^2)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(9)は2次波峯が生じない場合で、このときの $H_{\min}$ は入射波高と反射波高の差となり、式(5)、(6)が成立する。しかし、2倍周波数成分が卓越して2次波峯が生ずるときは、式(10)で表わされるように $H_{\min}$ は式(9)の値よりも大きくなる。したがって、この場合に式(5)を使うと H_I は $2a_I$ よりも大きく、 H_R は $2a_R$ よりも小さく見積られることになる。極端な場合として $a_I = a_R$ の完全反射のときは式(10)によって $H_{\min} = 2B(a_I^2 + a_R^2) > 0$ であり、反射率を式(6)で計算すれば見掛け上 $K_R < 1$ となる。

上記の $H_{\max}$ および $H_{\min}$ の値は、第2次近似解による計算のため正確でなく、さらに高次の理論解を用いて求めなければならないが、いずれにしても式(5)、(6)で算出した値であり、 H_I', K_R' とでも表わすのが適当である。部分重複波の第3次近似解によってこの H_I', K_R' を計算した結果は、 $h/L_A = 0.12$ については図-7 のようになる (L_A は微小振幅波の波長)。たとえば完全反射の場合、見掛けの反射率は0.5にまで減少し、見掛

図-7 見掛けの入射波高および反射率の算定図表

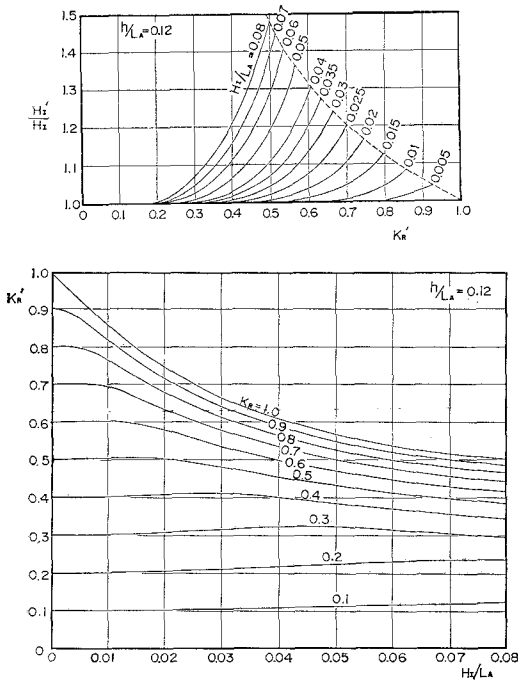
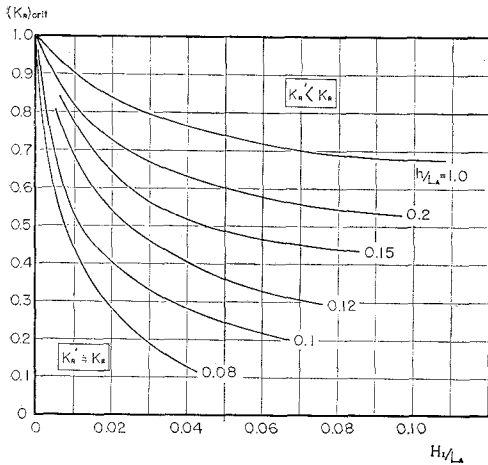


図-8 見掛けの反射率の出現限界



けの入射波高は真の値の 50% 増になる可能性がある。

図-7 でも、 K_R 、 H_1/L_A とともに小さい部分では、見掛けの値が真の値とあまり変わっていない。これは節の位置で 2 次波峯が発生していない場合に相当する。そこで、図-7 のような補正図表から $K_R' \approx K_R$ の境界線を拾ってプロットすると、図-8 が得られる。実験で求めた H_1' 、 K_R' の値を図-8 にプロットしてみて、その水深波長比に対応する線の下にあれば実験値が真の値にほぼ近いと見なすことができるが、もし線の上であれば図-7 のような補正が必要である。この意味で、筆者が先に発表した越波による防波堤の波高伝達率のデータ^{11), 12)}の一部は入射波高を過大に推定していたと思わ

れるので、近いうちに補正データを発表する予定である。なお、文献 10) には $h/L_A = 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.2$ および 1.0 に対する補正図表を示してあるので参照されたい。

また、部分重複波の第 3 次近似解によると、束縛波の発生のために、極大波高は 2 次波峯が生じなくとも式 (8) の値よりもやや大きくなることが示される。このため、完全重複波の腹の波高も、厳密には入射波高の 2 倍よりも 0~15% 程度大きく、この増大率は波形勾配の大きな波ほど大きくなる。

8. 入射波高の推定精度

波浪実験の中でも波形や粒子速度、あるいは碎波現象の測定など波自身を対象とする場合は、その位置における波高を直接に測定できる。しかし、波圧実験などのように構造物に関する実験では、入射波は間接的に推定するよりほかない。このためには、一般につきのような方法が用いられる。

i) 構造物のかなり前方に波高計を置き、この地点の波高から入射波高を算出する。

ii) 構造物前面の部分重複波の波高分布を求め、式 (5) で入射波高を算出する。

iii) 構造物の設置予定地点に波高計を置き、実験条件をなるべく同じにして通過波の記録を取り、この波高を入射波高とする。

iv) 完全重複波の場合には、前面波高の 1/2 を入射波高とする。

前節までの説明で明らかのように、これらの方法はいずれも短所があり、入射波高の推定誤差をとまなう。まず i) の方法は、第 1 波が波高計の設置地点を通過してから模型構造物で反射されて波高計の所に戻ってくる間の波形記録しか利用できず、波が十分定常状態に達していない可能性がある。また、波群としての先端部分は図-5 のようにどんどん変形するから、波順ごとの整理も不可能である。ほぼ長波に近い波で分散を起こさない場合でも、波高計位置から模型地点に到達するまでに 4. で述べた変形の問題があり、また側壁および底面摩擦などによる波高減衰ともなう。この方法では、まず $\pm 10\%$ 程度の誤差を見込まなければならないであろう。

ii) の方法は、単純に式 (5) を使ったのでは 0~50% の過大評価に陥る。図-7 のような補正図表を併用すれば、この誤差は相当に縮小できて $\pm 5\%$ 程度にできるのではないと思われる。ただし、碎波限界に近い波では波形が不安定になるため、精度が低下する。

iii) の方法は、造波板の周期、振幅、起動位置、起動方法を同一に保ち、検定および本実験とも数回くり返すことにすれば、 $\pm 3\%$ 程度の精度をあげるものと思われる。この際、i) の方式を併用し、造波板側の波

高計記録をチェック データとして利用すれば、さらに信頼度が上がる。

最後の iv) の方法は、7. に述べたように 0~15% の過大評価をとまなう。ただし、重複波高の増大率のくわしい値は、第 3 次近似解ではやや精度不足で正確には求められない。

なお、以上の概略精度は波高計の測定誤差が無視できる場合の値であり、波高記録に誤差があればこれは最後まで加算される。

9. 表面波の減衰

小縮尺の模型実験、とくに大規模港湾の遮蔽実験などでは、模型波の周期をできるだけ短くしたいことがある。この場合に制約となるのは、波高の減衰現象である。減衰の原因は、底面摩擦、内部粘性摩擦、および表面異質層との間の粘性摩擦である。底面摩擦による減衰については岩垣・土屋ほか^{13)~15)}の詳細な研究があり、また内部粘性による波高減衰はたとえば文献 16) にあるように、深海波については次式で与えられる。

$$H=H_0 \exp[-\alpha_s x], \alpha_s=4\nu k^3/\sigma \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 H_0 は初期波高、 x は H_0 の位置からの距離、 ν は水の動粘性係数である。

この底面摩擦および内部粘性摩擦による波の減衰はよく知られているが、実験波を観察しているとこれよりもはるかに著しい減衰を示すことがある。図-9 はこうした観察の一例で、長さ 11 m の室内の小水槽でプランジャー型造波装置からの発生波の波高減衰状況を測定した

結果である。実験波の周期は 0.33 秒、水深 25 cm ($h/L \approx 1.5$)、水温は 21°C であった。実験開始に先立ち、長時間のオーバーフローによって表面の汚れは取り除いたが、時間の経過 ($4t$) とともに水路末端側から強い減衰が始まるのが認められる。 $4t=1.5$ hr の減衰曲線から求めた波高半減距離は $l \approx 30$ m で、内部粘性による値 65 m と対比可能である。しかし、 $4t=25$ hr 後の減衰曲線では約 3.1 m ごとに波高が半減しており、減衰率は 10 倍にもなっている。

このように強い減衰は、水面付近に漂うほこりやわずかの油性膜、あるいは溶解物質などによって水の表面に異質層が形成され、これが波本来の動きには追従しきれないために、この異質層とその直下の水との間に粘性摩擦を生ずることに起因するものである。ただし、異質層とはいっても Van Dorn¹⁷⁾ が指摘しているように、肉眼ではほとんど清浄な水面のように見えるような場合でも、相当の減衰効果が現われる。この表面異質層による波高減衰は Miles¹⁸⁾ によって計算が行なわれており、深海における進行波の形で表わすとつぎのようになる。

$$H=H_0 \exp[-\alpha_s x],$$

$$\alpha_s=\frac{1}{2}k^2\sqrt{\frac{2\nu}{\sigma}}[C_r-C_i] \dots\dots\dots(12)$$

ここで C_r-C_i は、異質層の屈伸性によって定まる無次元の係数で、Miles はつぎのパラメーター ξ および異質層の溶解性の関数として図表で与えている。

$$\xi=\left(\frac{1}{2}\mu\rho\sigma^3\right)^{-1/2}k^2\chi \dots\dots\dots(13)$$

図-9 $T=0.33$ 秒の波の波高減衰の例

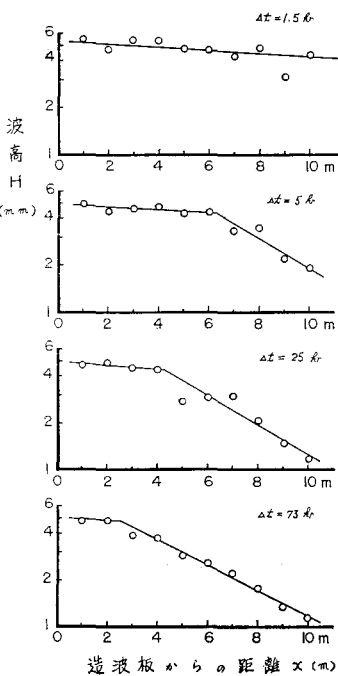
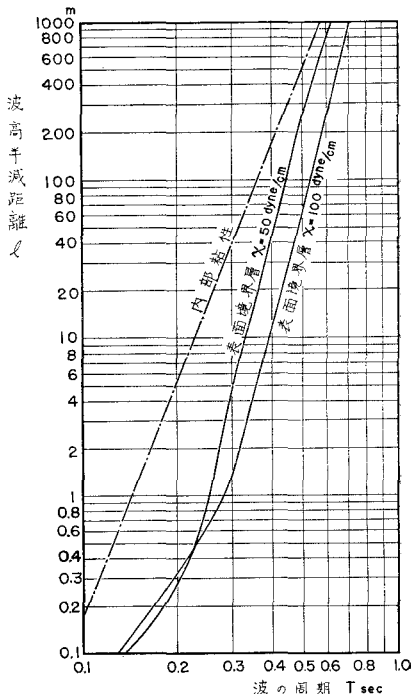


図-10 内部粘性および表面異質層による波高の半減距離



ただし μ は水の粘性係数, ρ は水の密度, χ は水と異質層との間の表面張力の差である。この χ の値は相当大きく変化すると思われるが, Miles のあげている例から $\chi=100$ dyne/cm およびその $1/2$ の 50 dyne/cm として異質層が非溶解性の場合について波高半減距離 $l_s=0.693/\alpha_s$ を計算したのが 図-10 である。図-9 の例の $l=3.1$ m は $\chi=100$ dyne/cm の場合にはほぼ相当する。したがって, もし半減距離 $l_s=100$ m を実験上の許容限界とすると, $T \approx 0.5$ 秒が実験可能な最小周期となる。なお, 内部粘性による半減距離 l_i は, 図-10 に併示したように 10 倍以上大きく, 表面異質層による減衰にくらべて無視される。

以上のように, 室内実験であっても約 0.5 秒以下の短周期波の実験はなるべく避け, やむを得ず実施するときは水の表面の汚れに十分注意してひんぱんにオーバーフローを行ない, 表面異質層を除去することが必要である。

10. あとがき

以上のように本報文は研究の報告ではなく, いろいろな実験における観察のメモ書であり, さらに率直に言えば筆者の失敗した事例集である。波浪実験に熟達された方々にとっては今さら説明する必要のないことが大半であるが, 波浪実験に親しんでいない方々にとっては実験の際の参考になるのではないかと思い, 取りまとめた次第である。本報文が波浪実験の精度を高める一助ともなれば, 誠に幸いである。

参 考 文 献

- 1) たとえば千谷利三: 一般物理化学, 内田老鶴圃, 昭 13. p. 416.
- 2) 合田良実・柿崎秀作: 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告第5巻 10 号, 1966 年 6 月.
- 3) Horikawa, K.: Secondary Wave Crest Formation, Trans. of J.S.C.E., No. 66, Jan. 1960.

- 4) 合田良実: 造波水路における二次波峯の移動現象について, 港研防波堤研究室資料 No. 8, 1961 年 (文献 12 の付録として再録).
- 5) Goda, Y. and Kikuya, T.: The Generation of Water Waves with a Vertically Oscillating Flow at a Channel Bottom, Report of P.H.R.I., No. 9, August 1964.
- 6) 合田良実: 鉛直振動流による造波の理論について, 第 11 回海岸工学講演集, 1964 年 11 月, pp. 69-73.
- 7) 広本文泰・阿部淑輝・須藤 茂: 鉛直振動流型造波装置の設計とその造波特性について, 港湾技研資料 No. 32, 1967 年 6 月, pp. 83-97.
- 8) Lamb, H.: Hydrodynamics (6th Ed.), Cambridge Univ. Press, 1932, § 176.
- 9) 合田良実・柿崎秀作: 重複波における双峯型波圧の出現について, 第 12 回海岸工学講演集, 1965 年 11 月, pp. 99-105.
- 10) 合田良実・阿部淑輝: 有限振幅波の部分反射に伴う見掛けの反射率について, 港研報告第 7 巻 3 号, 1968 年 9 月.
- 11) 合田良実・竹田英章: 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第 13 回海岸工学講演集, 1966 年 12 月, pp. 87-92.
- 12) Goda, Y., Takeda, H., and Moriya, Y.: Laboratory Investigation on Wave Transmission over Breakwaters, Report of P.H.R.I., No. 13, April 1967.
- 13) 土屋義人・井上雅夫: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (1), 第 8 回海岸工学講演集, 1961 年 11 月 pp. 19-24.
- 14) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (2), 第 11 回海岸工学講演集, 1964 年 11 月, pp. 62-68.
- 15) 岩垣雄一・土屋義人・陳活雄: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (3)——層流境界層方程式の非線型項の影響について——, 第 12 回海岸工学講演集, 1965 年 11 月, pp. 41-49.
- 16) たとえば Ippen, A.T.(ed.): Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, New York, 1966, p. 85.
- 17) Van Dorn, W.G.: Boundary Dissipation of Oscillatory Waves, J. Fluid Mech., Vol. 24, 1966, p. 773.
- 18) Miles, J.W.: Surface-wave Damping in Closed Basins, Proc. Roy. Soc., Ser. A, No. 1451, Vol. 297, March 1967, pp. 459-475.