

天端の低い直立壁に作用する波圧に関する研究

久保 弘 一*・井田 康 夫**

1. 緒 言

重複波条件をそなえた直立堤において、波頂高が堤頂よりも高くなって越波を生ずる場合の波圧に関する取扱いについては、堤頂が高く越波を生じない場合の波圧分布から、堤頂より上の波圧を除いた波圧の合力が作用するものとして計算している¹⁾。しかしながら越波を生ずる場合には堤前面の波浪はすでに重複波の性質を失い、ことに堤頂付近における水の挙動は重複波の場合とかなり異なったものになることが予想され、したがってこれが波圧分布にも相当の影響をおよぼすものと考えられる。このような点に着目した研究が従来から行われているが^{2),3),4)}、越波によって波圧合力が若干減少するという点を除けば一致した結論には到達していないようである。越波によって反射率が減少し、したがって堤前面の波高が減少するのは当然のことであるが、一方堤前面の堤頂付近の水に水平速度成分が付与されることは明らかであるので、常に越波によって波圧合力が減少するとは限らず、また波圧合力が減少する場合でも局部的に波圧が増加する場合も充分考えられるので、局所的な設計の場合には必要な知識となる。

この研究では越波をともなう条件下における波圧の従来のような重複波的取扱いに若干の疑問を持ち、堤頂が波頂高よりも低い直立壁を対象として現象を観察すると共に、波圧に影響をおよぼすと考えられる諸量を測定し、

- (1) 天端高と波圧分布形式、波圧強度および合力との関係
 - (2) 反射率と波圧合力との関係
 - (3) 越波量と波圧合力との関係
 - (4) 越波にともなう堤前面の水の挙動の変化
 - (5) 越波にともなう圧力変動形式の変化
- などの各点に着目し、実験的に検討を加えたものである。

2. 実験の種類と方法

実験は水深 $h=70$ cm の水平床上に波圧計を取付けた

直立壁を設置し、天端高を非越波の高さから 0 まで種々に変え、表—1 に示すような特性の波を作用させて、波圧分布、反射率、越波量を測定し、同時にテレビカメラおよびビデオコーダーによって堤前面の水の挙動を撮影し、再生することによって水面の昇降速度を求めた。

この実験に用いた条件ではどの波も越波、非越波を問わず堤前面で外観的にはもちろん、記録上でも部分碎波的な形を一切とっていない。

なお反射率は 5 cm 間隔に波高計を設置し、Healy の方法で求めたが、間隔がやや広すぎたため腹相当部分を過小に、節相当部分を過大に評価しすぎたきらいがあり、したがって反射率も予想より下まわった。また越波量は幅 51 cm の容器を堤裏側に設置して連続 3 波の越波水採取して求めた。

表—1 実験の条件

水 深 h (cm)	70
周 期 T (sec)	1.44~3.32
波 高 H (cm)	9~21
波 長 L (cm)	290~834
波形勾配 H/L	0.010~0.072
相対水深 h/L	0.084~0.241
天 端 高 h_t (cm)	0, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 16, 30

3. 非越波時の波圧

重複波の波圧曲線は一般に単峯の緩やかな曲線の場合が多く、この場合には各点の波圧のピークはほぼ同時に到達する。しかし条件によっては一部の測点に 2 倍周波数の圧力変動が現われる場合があり、この場合には各点のピーク到達時刻にずれが起り、あるいはピークが不明瞭になる。したがって波圧合力には最大同時波圧合力を用いた。

波圧合力の実験値との比較対象としては Sainflou 式 P_s 、微小振幅波式

$$P_t = \frac{1}{2} w_0 (h^2 - H^2) + w_0 H \times \left\{ h + H + \frac{\sinh m(h+H)}{m \cosh mh} - (h+H) \frac{\cosh m(h+H)}{\cosh mh} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

および永井式

* 正会員 大阪工業大学助教授 土木工学科

** 正会員 大阪工業大学講師 土木工学科

$$P_N = \frac{1}{2} w_0 (h^2 - H^2) + w_0 \frac{H}{m} \tanh m(h+H)$$

.....(2)

ただし $m=2\pi/L$ を用いた。もちろんほとんどの場合、 $P_S > P_N > P_i$ で波形勾配 H/L の小さい場合には三者の値は比較的近くなるが、 H/L が大きくなると P_i は他の二者に比べて非常に小さくなるのはこの式の性質上当然のことである。

天端が高く越波を生じない場合の波圧合力は図-1 および 2 の左端に示すように、波形勾配の小さい範囲では P_i よりも小さい値をとるが、波形勾配の増大と共に P_i よりも大きくなり、 $H/L > 0.039$ では P_i と P_N の中間の値をとる。もちろん P_S よりも常に小さく同式の 42~68% である。

なお水面における波圧強度は Sainflow 式の 58~98% で $H/L=0.030, 0.039$ の場合には Sainflow 式に近い値をとる。

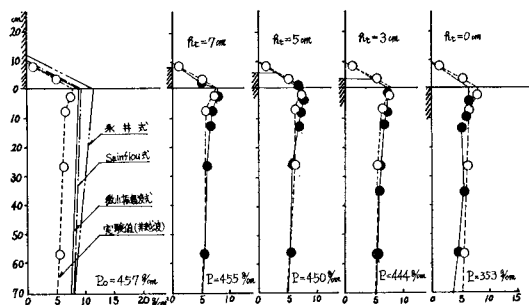


図-1 波圧分布 ($H=9$ cm, $T=3.32$ S, $H/L=0.010$)

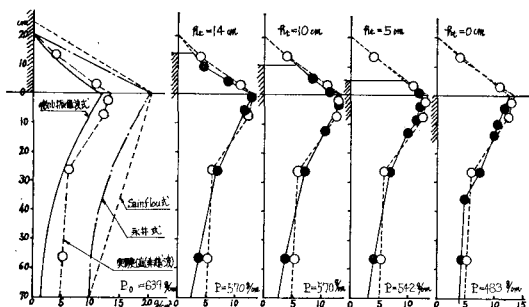


図-2 波圧分布 ($H=20$ cm, $T=1.56$ S, $H/L=0.061$)

4. 天端高と波圧の関係

(1) 波圧分布について

越波時の波圧分布を非越波時の波圧分布と比較するとその相違点は波圧測定間隔が粗いため確言することは難しいがおよそ4つの形式に要約できるように思われる。すなわち、

(1) 越波時の波圧強度 p がすべての点で越波しない場合の波圧強度 p_0 よりも小さい場合

(2) 静水面と水底との間で一部 $p > p_0$ となる場合

(3) 静水面においては $p_0 > p$ であるが水底では逆になっている場合

(4) (3) の逆の場合

など多様なパターンがあり、越波することにより必ずしも波圧が減少しないことは明らかである。すなわち波形勾配の小さい場合には (1), (2) のタイプが多いが、波形勾配が大きくなると (3), (4) のように水面あるいは水底で $p > p_0$ となる傾向がある。また相対天端高 h_t/H が低い場合には一般に $p < p_0$ であるが、 h_t/H が大きくなるにつれて静水面より上、あるいは水底付近で $p > p_0$ となる傾向がある。しかしすべての点において $p > p_0$ となる事例は見当らない。

(2) 最大波圧強度について

$h_t/H=0$ の場合には最大波圧強度 p_m は越波しない場合の最大波圧強度 p_{0m} に比べて小さく、 $p_m/p_{0m}=0.73 \sim 0.95$ の範囲にあるが、 h_t/H の増加にともなって p_m/p_{0m} は次第に大きくなって行き、 $h_t/H=0.8$ 付近においては $p_m/p_{0m}=0.88 \sim 1.11$ となり、非越波時より 10% 程度波圧強度が大きくなる場合がある。

(3) 波圧合力について

越波時の波圧合力 P と非越波時の波圧合力 P_0 の比、 P/P_0 と h_t/H の関係を H/L をパラメーターとして図示すると図-3 の通りである。すなわち $h_t/H=0$ の時の $P/P_0=0.7 \sim 0.8$ から h_t/H の増加と共に次第に増大するが、 $h_t/H=0.4 \sim 0.8$ の範囲において波形勾配の大きい波では $P/P_0 > 1$ の場合も生じる。堤頂がさらに高くなり越波しない高さに近付くと P/P_0 は 1 に収束する。すなわち堤頂が余り低くないある範囲において、2, 3 の波形勾配の波については非越波時を数% ないし 10 数% 上まわる値になることが明らかになった。これはもちろん水面付近の波圧の増大によるものである。

次に上記の事実をさらに明らかにするため天端高の如何にかかわらず常時波圧の作用する静水面下の波圧合力 P_i について同様の整理を行った。その結果は図-4 の

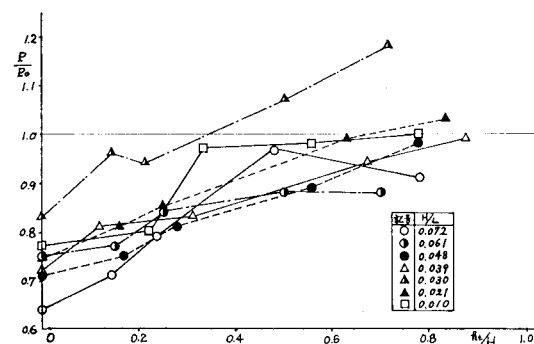


図-3 P/P_0 と h_t/H の関係

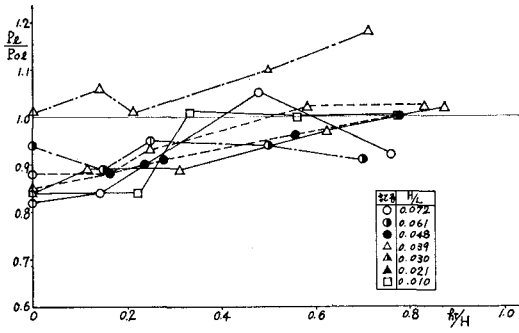


図-4 P_s/P_{0t} と h_t/H の関係

通りで図-3の結果と全く同じである。なお静水面上の波圧についても同様の検討を行ったが、静水面上の波圧は値そのものが小さく、かつ測点も不足しているのでその傾向を明らかにすることができなかった。

5. 越波量と波圧との関係

(1) 相対天端高と越波量の関係

越波量を無次元化した相対越波量 $2\pi Q/H \cdot L$ と h_t/H の関係を図示すると図-5の通りである。図-5 から明らかに h_t/H の増加にともなって $2\pi Q/H \cdot L$ はほぼ直線的に減少し、 $h_t/H \approx 1$ 付近においてはほぼ 0 となるが、波形勾配 H/L が大きいほど、 $2\pi Q/H \cdot L$ は大きく、かつ h_t/H が小さいほど H/L による $2\pi Q/H \cdot L$ の変化が大きく、 h_t/H が大きくなると波形勾配の影響は非常に小さくなる。

次に相対越波量と波圧合力の関係を示すと図-6の通りである。ただし P_u は静水面上の波圧合力を示す。図から明らかに相対越波量の増大にともなって波圧合力の減少することが明らかに見られ、特にパラメーター H/L によって全波圧合力の大きさが明らかに分離している。ただし P_u/w_0H^2 は値そのものが小さいので、その関係は余り明瞭ではない。

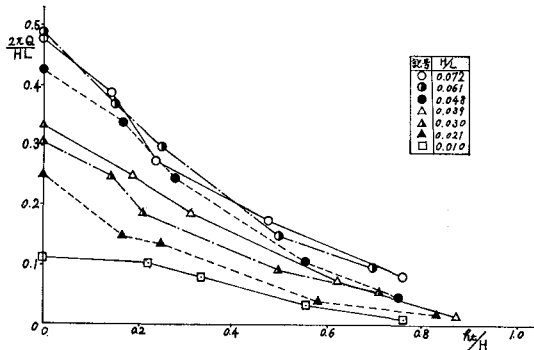
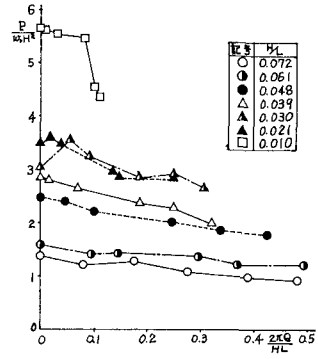


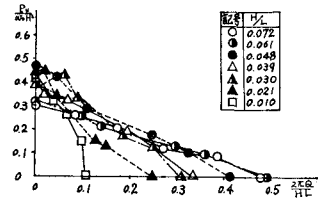
図-5 $2\pi Q/HL$ と h_t/H の関係

6. 反射率と波圧合力の関係

反射率 K_R と P/w_0H^2 の関係を図示すると図-7の



(a)



(b)

図-6 $P/w_0H^2, P_u/w_0H^2$ と $2\pi Q/HL$ の関係

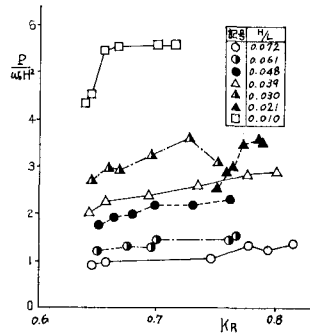


図-7 P/w_0H^2 と K_R の関係

通りである。すなわち全体的に見れば K_R の増大と共に P/w_0H^2 も緩やかに増大し、部分的に見ると反射率の小さい場合ほど、 K_R の増大にともなう P/w_0H^2 の増加率が大きく、反射率が大きくなると P/w_0H^2 の増加は顕著でなくなる。また波形勾配の小さな波ほど P/w_0H^2 が大きくなっているが、これは H/L の大きい波では越波によるエネルギー減少と水平運動要素の発生による動水圧の増加がバランスしているのに対し、 H/L の小さい波では前者より後者的の方が大きいためである。

7. 越波による壁前面の水の挙動の変化

越波にともなって壁前面の水の運動は非越波時とはかなり違ったものになる。この研究ではそのうち堤前面の水面変動をテレビカメラでとらえ、越波が水面の昇降速度におよぼす影響を確認した。いま水面昇降速度を判断する一つの指標として重複波波形を sine 波、楕円トロ

コイド波とした時の水面の昇降速度の分布はそれぞれ (3), (4) 式のように表わされる。

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + (\eta/H)^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{v}{v_0} &= \frac{\pi^2}{2} \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \sin \frac{4\pi}{T} t \\ &\quad + \frac{\pi}{2} \cos \frac{2\pi}{T} t \\ \frac{n}{H} &= \pi \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \sin^2 \frac{2\pi}{T} t \\ &\quad + \sin \frac{2\pi}{T} t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし, $v_0 = 4H/T$: 壁前面の水面の平均昇降速度,

η : 静水面から波面までの高さ

実験に用いた波の諸元を対象として v/v_0 の分布図を描くと 図-8 の通りである。これと $H/L=0.010$ の非越波時の実験値を比較すると水面下降速度は (3) 式とはほぼ同じ分布をしているが, 上昇速度は静水面よりやや上部で急に小さくなっており, 水面上昇の段階で現象がやや不連続になっている点のあることがわかるが (3) 式とは余りかけ離れた分布ではない。越波が始まると速度分布は乱れ始め, 水面付近を中心として速度は速くなるが, 特に水面付近では下降速度の割合が著しく増加する。これは越波が始まると水面の上昇流体の連続運動の形態を示すが, 下降速度はこれとは異なり水塊の自由落下的な形態を示すようになるためと考えられる。別の例 ($H/L=0.061$) でも水面付近の下降速度の著しい増加が目立ち, 静水面下では急激に減少する。ただし h_t/H が 0 または非常に小さい場合には昇降速度とも極だった増加の見られないこともある。なお現時点では種々の特性の波について実験を終了していない点, 測定の精度に若干, 問題が残っているなどの点をも含めて結論を今後に持ち越したい。

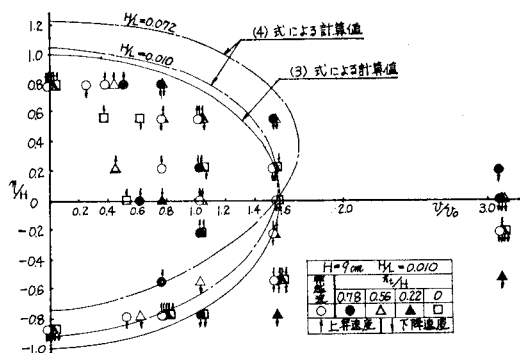


図-8 直立壁前面の水面昇降速度

8. 波圧変動の特性について

h/L が大きな場所に生ずる重複波では水底における圧

力は水面波動の 2 倍周波数の特性を持って振動をする場合が多く, 特に H/L (あるいは H) が大きくなると水底ばかりではなく, 水面付近の波圧にまで影響をおよぼし, 2 倍周波数の特性が顕著に現われたいわゆる双峯型⁵⁾の波圧変動を示すようになっていわれている。永井博士の実験および有限振幅波の第 3 次および第 4 次近似解⁶⁾に基づいて提示されている水底, 静水面で圧力が 2 倍周波数で振動する限界から見ると本実験に用いた 7 種類の波のうち $H/L=0.010, 0.021$ および 0.030 の三波は 2 倍周波数が出現しない波, $H/L=0.039, 0.048$ の二波は水底で 2 倍周波数の振動を伴う波, $H/L=0.061$ および 0.072 の二波は水底のみならず静水面でも 2 倍周波数の圧力変動を起こすことになる。

本実験の結果では水中および水底付近の圧力変動はほぼこの分類に従ったが, 静水面付近では双峯型の圧力変動は記録されなかった。図-9~11 は圧力変動の例を示す。すなわち 図-9 ($H/L=0.010$) では単峯型で緩やかな圧力変動であり, h_t/H が小さく越波をとまうようになっても圧力の絶対値に多少の変化がある点だけで圧力変動の形態は全く変わらない。これに対し 図-10 ($H/L=0.048$) では $h_t/H=1$ の時に -26.5 cm および -56.5 cm にはやや双峯型の傾向が現われ始め, h_t/H が小さくなって越波が起ると次第に第 1 の山が第 2 の山よりも発達してくる。さらに 図-11 ($H/L=0.072$) の場合には越波が始まると双峯型の傾向は顕著になり, 特に $h_t/H=0.476$ には双峯型の傾向が顕著である。ただし圧力の絶対値には大きな変動はない。

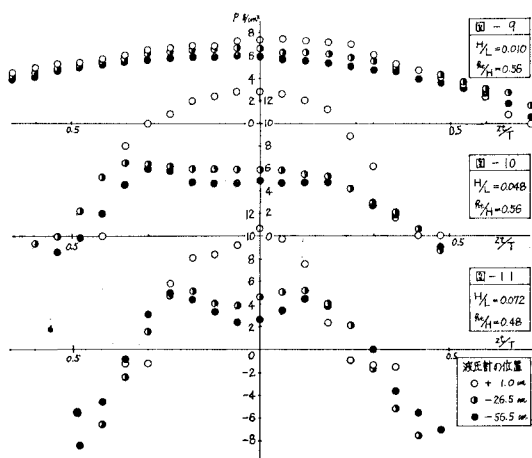


図-9~11 圧力変動記録

9. まとめ

越波による波圧の変動範囲が小さいにもかかわらず波圧計の間隔が粗かったこと, 天端が低い場合には静水面またはそれ以上の所に波圧計を取付け得なかったことな

どのために越波による波圧の変化を予期したほど明瞭にとらえることができなかった。しかしながら従来の諸研究で発表されているいくつかの研究成果を確認することもでき、さらに若干の新しい事実にも気付くことができたと思う。本実験で得られた結果を取りまとめて見ると次のようになる。

(1) 越波をとまなう場合には一般に非越波時に比べて波圧強度、波圧合力ともに減少するが、 h_u/H が比較的大きい時の越波については H/L が比較的大きい時には水面付近の波圧ならびに波圧合力は数 % から最大 10 数 % 程度まで増大する。しかしこの程度の波圧の変動は永井式の範囲に充分包含されるので局所的な圧力が必要となる時以外は余り問題にはならない。

(2) h_u/H の増加と越波量の減少はほぼ直線的な関係にあり、したがって越波量の増加にともなって波圧合力は減少する。ことに波形勾配（もしくは波高）の影響が大きい。

(3) K_R の増加と共に波圧合力は減少する傾向にあるが、重複波形態に比較的近くなると K_R が増しても波圧合力は余り変わらない。

(4) 越波を生ずようになると水面の昇降速度は静

水面付近で速くなるが、特に下降速度は著しく大となる。これは上昇した水塊の自由落下的な運動のためであると考えられる。

(5) 波形勾配 H/L の大きい波については水面以外の点で 2 倍周波数の双峯型圧力変動を記録することができた。この双峯は非越波時には対称であるが越波によっては対称性が失われ、第 1 の山が大きくなっている。

参 考 文 献

- 1) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1967.
- 2) 永井莊七郎：浅海波 および 深海波の重複波の圧力式，第 12 回海講講演集，pp. 92-98, 1965.
- 3) 永井莊七郎・大坪崇彦：低基堤成堤に働く波圧，第 15 回海講講演集，pp. 109-114, 1968.
- 4) 土屋義人・山口正隆：越波のある場合の重複波の特性について，第 17 回海講論文集，pp. 79-84, 1970.
- 5) 合田良美・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 回海講講演集，pp. 99-105, 1965.
- 6) 永井莊七郎：改訂水理学，コロナ社，p. 532, 1970.