

護岸に働く波力について

本間 仁*・堀川 清司**・長谷 直樹***

1. 緒 言

海岸護岸（堤防）の設計にあたっては、まず天端高の決定が最も重要な問題となる。したがって数多くの研究が、測上高あるいは越波量についてなされ、種々な条件の組合わせに対して一応天端高の決定が可能となった。あわせて模型実験による検討が行なわれ、かなり合理的に断面を決定することができる¹⁾。しかしながら、構造物の強度、あるいは安定性に関する検討はほとんどなされていないのが現状である。一般に護岸は汀線より岸側、あるいはかなり浅いところに築造され、したがって護岸に到達する波はすでに碎波してしまったものであり、このような波力については信頼しうる算定式が知られていないからである。

さて波力に関する研究としては、主眼が重複波圧および碎波による衝撃波圧におかれており、前者に対しては Sainflou 簡略公式が最も広く利用され、また後者に対しては、広井公式、Minikin 公式がある。また最近では Ross²⁾、浜田・光易・長谷³⁾・林・服部⁴⁾・Rundgren⁵⁾、永井⁶⁾、光易⁷⁾らの研究があり、干拓堤防に関連して加藤⁸⁾の研究がある。以上のようにして主として防波堤を対象として研究が進められ、碎波の波圧の性質は次第に明らかにされてきたが、護岸のような構造物に作用する碎波後の波力に関しては、Beach Erosion Board⁹⁾の提案した式を見るに止まる。護岸の堤脚水深が沖波波高に比してかなり大きいときには、重複波現象を呈し、静的な圧力を生ずるのみであるが、次第に水深が浅くなると碎波による衝撃的な波圧が作用する。さらに浅くなると波はすでに堤の前方で碎波し、碎波してしまったのちの波がなおも衝撃的な波圧をおよぼすが、これも堤脚水深をさらに減少させることにより、いちじるしく小さくなってしまふ。

ここで問題になるのは ① 重複波圧と衝撃波圧の限界はいかなる堤脚水深で起こるか、② 碎波の波圧が最も顕著になる堤脚水深はどうか、③ 碎波後の波圧は堤脚水深の減少により、いかに低下するかである。筆者らは護岸の設置される条件から主として上記項目中 ② および ③ に主眼をおくことにする。

2. 実験施設および実験方法

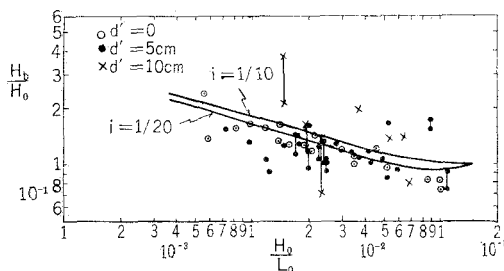
実験に使用した水路は長さ 17 m、高さ 0.6 m、幅 0.7

m の 2 次元波動水槽で、一端に波起こし機を、他端には 1/15 勾配の斜面ならびに直立模型護岸を設けた。波高は沖一様水深部ならびに護岸前方約 2 cm で測定し、碎波の状態は目視した。護岸模型には磁歪式波圧計を 2、3 台使用し、電磁オシロ グラフに記録して、300 サイクルの現象まで観測するようにした。堤脚水深 d' は 0、3、5、6、9、10 cm に変化させ、これらにしたがって一様水深部の水深 d は 31、34、36、37、40、41 cm とした。しかしながら、おもな実験は $d'=0、5、10$ cm の 3 種について行なった。また波は周期 $T=0.8、1.2、1.4、2.0$ sec、沖波換算波高 $H_0=2\sim 18$ cm として、適宜組合わせた。

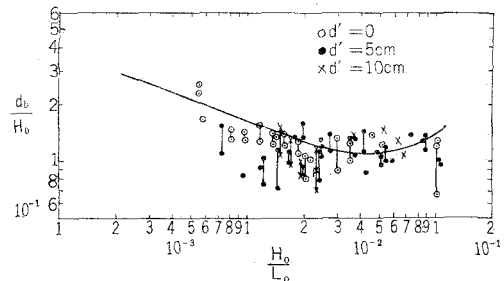
3. 碎波の衝撃圧を生ずる水深

まず模型護岸を水中に設置することにより、入射する波の性質が変化するのではないかと推測される。そこでこのような条件のもとでの碎波の性質を調べたのが 図—1 および 図—2 であり、 H_b 、 d_b はそれぞれ碎波波高および碎波水深を示す。

図—1



図—2



および碎波水深を示す。それぞれ Iversen によって与えられた曲線と対比させてあり、かなり実測値の散乱はあるにしても、碎波の変動にともなう測定値の精度、また一様勾配上での Iversen の実験値のちらばりから考え合わせて、かなり良好な一致を示していると見る事ができよう。したがって工学的には護岸の碎波におよぼす影響は無視しうると見なしてよいようである。もっとも碎波

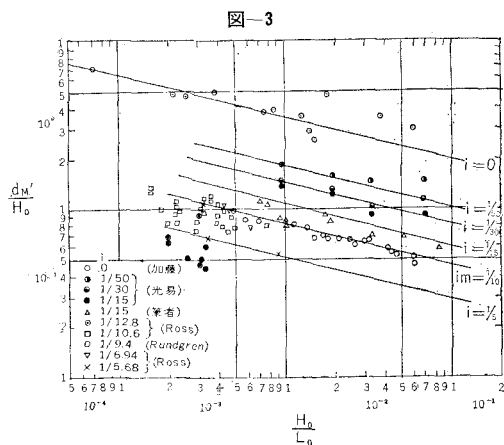
* 正員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 ** 正員 東京大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正員 東京大学助手 工学部土木工学科

がかなりの幅をもって変動するのは、護岸から反射された波が干渉しあうからである。一樣勾配においてもわずかながら反射波があり部分重複波が認められているが、護岸の存在によりいっそう助長されていることは確かである。

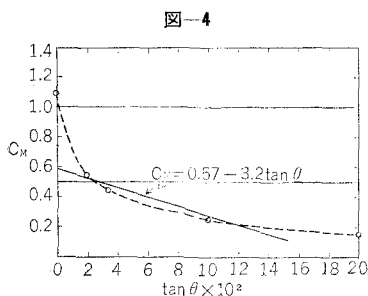
つぎに砕波の衝撃圧が最も顕著になる堤脚水深 d_M' について考えよう。これについては Rundgren は 1/9.4 の斜面について実験を行ない⁵⁾、また光易は 1/15, 1/30, 1/50 の斜面について実験を行ない、 d_M'/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 、斜面勾配 $i = \tan \theta$ との関係を求めて次式を提案している。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_M'}{H_0} &= C_M \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/4} \\ C_M &= 0.59 - 3.2 \tan \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

そこで筆者らも 1/15 勾配についてのわれわれの実験結果、ならびに加藤、光易、Ross, Rundgren の資料を整理して図示したのが 図-3 である。このうち加藤の $i=0$ の実験条件は直立壁ではなく堤脚部に斜面が付加された断



面 (原著 N-1) のものであり参考のために記入した。これから、一応 $i=0, 1/50, 1/30, 1/15, 1/10$ および $1/5$ に対する関係を推定した直線を記入してみた。またこれをもとにして C_M を求め、光易の式 (1) と比較したのが 図-4 である。さて 図-3 と 図-2 とを比較すれば明らかなように、 d_M' は砕波水深 d_b に等しくはなく、たとえばわれわれの実験条件 $i=1/15$ では、 d_M' は常に d_b よりも小さく、護岸よりやや前方で砕けた波が衝突するときに最大の衝撃力を生ずることが知れる。しかも d_M' は斜面勾配 i にいちじるしく影響を受ける点はきわめて重要であり、護岸 (あ

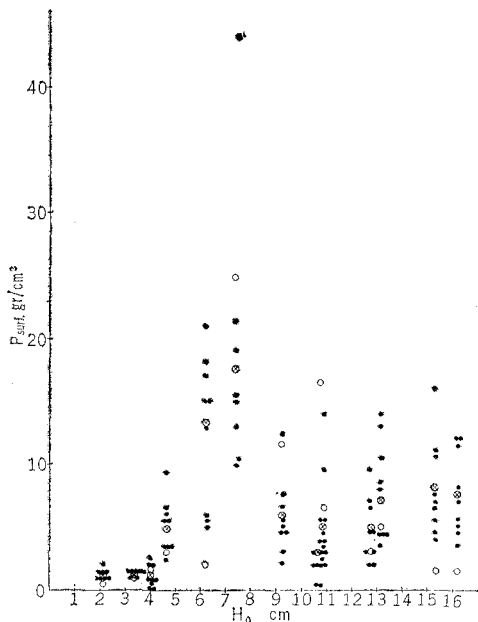


るいは堤防) を考えるとき、現地の海浜勾配がどれほどかは、遡上高を算定する場合と同様に、ぜひ知らねばならぬ重要な事項である。またこのような水深になるようなところに護岸を設置するのはさけるのが賢明である。

4. 砕波後の波圧に関する検討

いま、堤脚水深 d' ならびに波の周期 T を一定に保ち、波高を次第に大きくして行ったときの、静水面での圧力の変化状況を調べてみよう。図-5 は $d'=5$ cm, $d=36$ cm, $T=1.2$ sec の場合の結果で、○印は第1波の波圧を、⊗印は第1波を除いた約10波の平均波圧を示している。これから明らかなように波高の小さい、したがって d'/H_0 が大きい間は重複波圧の領域で波圧が小さく、また個々の測定値はほぼ一樣な値を示す。波高がやや大きくなって、 d'/H_0 がやや小さくなると、先に示した d_M'/H_0 の値に近づき、波圧は急速に大きくなり衝撃波圧の様相を明確に示し、また個々の測定値のちらばりは広範囲におよんでいる。さらに波高を大きくし d'/H_0 が小さくなると波圧は一度下がり、やがて再びゆるやかに大きくなっていく様子が認められる。これがいわゆる砕波後の波圧の作用する領域である。

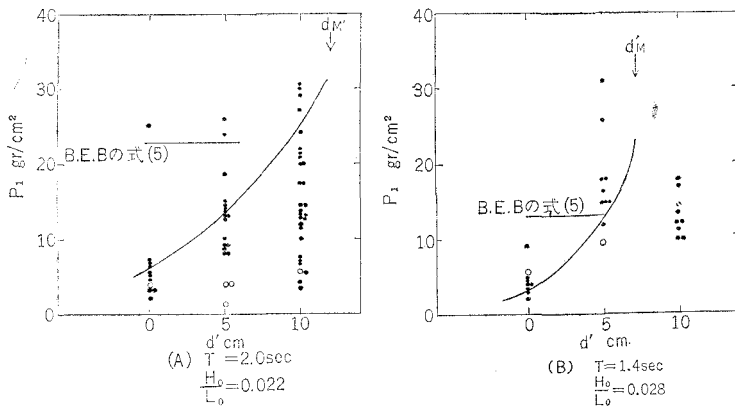
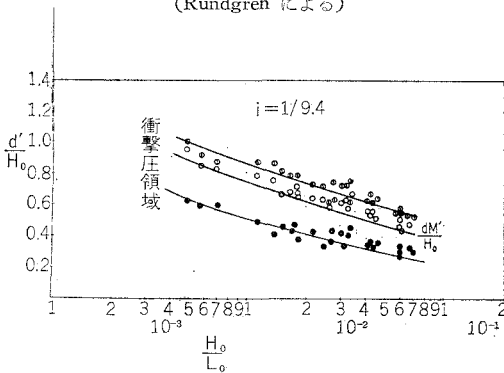
図-5 静水面における波圧
($T=1.2$ sec, $d=36$ cm, $d'=5$ cm)



つぎに波の条件はほぼ一定として、堤脚水深 d' の変化にともなう静水面での波圧の変化を見てみよう。図-6 (A) は $H_0/L_0=0.022$, $T=2.0$ sec の場合であり、図-6 (B) は $H_0/L_0=0.028$, $T=1.4$ sec の場合である。これから明らかなように堤脚水深の減少にともなって波圧は小さくなるようである。

以上によっても明らかなように重複波圧領域、最大砕

図-6

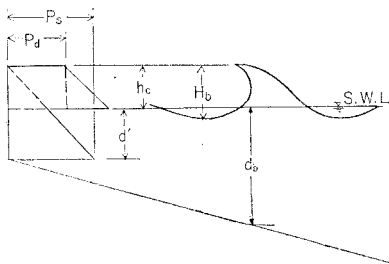
図-7
(Rundgren による)

波衝撃波圧を生ずる条件、砕波後の衝撃波圧のおよぶ領域を明確にすることはきわめて重要と考えられる。筆者らの資料はいまだ十分でなく $i=1/15$ についてこれらの領域を明確にわけにに至っていないが、Rundgren の得た結果を図示して参考に供しよう。これは $i=1/9.4$ について求められたもので、そのほかの勾配については適用できないことには注意されたい (図-7)。

さて Beach Erosion Board によって提案された砕波後の波圧式は、図-8 に示したように静水面上 $0.7 H_b$ の高さに衝撃波圧 p_d が作用し、そのほかに静水圧 p_s が作用すると考えている。これらの算出の根拠はつぎのようである。

㊸ 砕波点での波頂の静水面上の高さ h_c は次式で与

図-8



えられ、この高さは汀線に至るまで変わらない。

$$h_c = 0.7 H_b \dots \dots \dots (2)$$

㊹ 静水面より h_c の高さまで、次式で示す衝撃圧 p_d が作用する。いま、砕波点での水粒子の速度は、その点での長波の伝播速度に等しいとし、この動圧が作用し、かつ護岸の位置によっても変化しないと考える。

$$p_d = \frac{w \cdot v^2}{2g} = \frac{w(\sqrt{gd_b})^2}{2g} = \frac{w \cdot d_b}{2} \dots \dots \dots (3)$$

㊺ 静水圧は静水面より h_c だけ上のところから作用すると考える。たとえば堤脚では

$$p_s = w(d' + h_c) \dots \dots \dots (4)$$

ここに w および g はそれぞれ水の単位容積重量ならびに重力の加速度である。

(1) 静水面での波圧の大きさ

いま、静水面での波圧 p_1 について考えてみよう。上式 (2), (3), (4) より

$$p_1 = \frac{wd_b}{2} + wh_c = \frac{wd_b}{2} + 0.7 wH_b$$

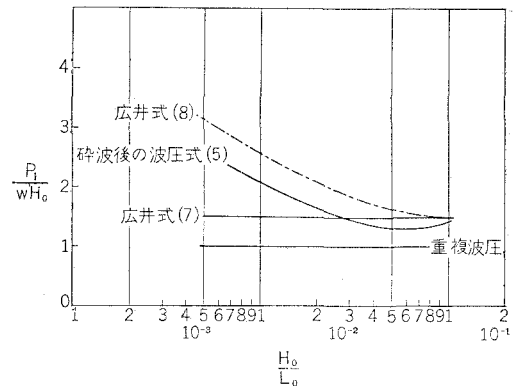
$$\therefore \frac{p_1}{wH_0} = \frac{1}{2} \frac{d_b}{H_0} + 0.7 \frac{H_b}{H_0} \dots \dots \dots (5)$$

ここに $d_b/H_0 = f_1(H_0/L_0)$, $H_b/H_0 = f_2(H_0/L_0, i)$ なることが知られているので、

$$\frac{p_1}{wH_0} = F_1\left(\frac{H_0}{L_0}, i\right) \dots \dots \dots (6)$$

の関係となる。いま $i=1/15$ として算出した結果を図-9 に示した。

図-9



上述 Beach Erosion Board の算式の導入を考えてみれば、広井式の求め方とかなり似かよっていることに気づく。一般には広井式は

$$\frac{p}{wH_0} = 1.5 \dots \dots \dots (7)$$

と、とられているようであるが、 H_0 の代りに H_b をとるとすれば

$$\frac{p}{w \cdot H_0} = 1.5 \frac{H_b}{H_0} = F_2\left(\frac{H_0}{L_0}, i\right) \dots\dots\dots (8)$$

を得る。前と同様にして $i=1/15$ として算出した結果を 図-9 に示した。また重複波圧に関して試算した結果、静水面での波圧は、ほぼ

$$\frac{p_1}{w H_0} \doteq 1.0 \dots\dots\dots (9)$$

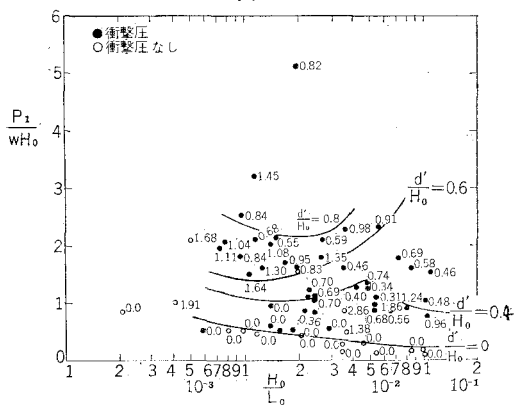
であることを知ったので、これを記入した。

さて上記のような考察と 図-6 に例示した実験結果から筆者らは式 (6) にかえるに

$$\frac{p_1}{w H_0} = F_1'\left(\frac{H_0}{L_0}, i, \frac{d'}{H_0}\right) \dots\dots\dots (10)$$

を提案しよう。この関係を定めるために、われわれが実験して求めた砕波後の波圧のほぼ 10 波の平均値 $\bar{p}_1$ をとって調べることにし、各 H_0/L_0 ごとに $\bar{p}_1/w H_0$ を図示し、おのおのの d'/H_0 を添字で示した (図-10)。この結果と先に示した 図-9 を比較してみると、砕波後の

図-10



波圧式 (5) あるいは広井式 (7) はほぼ平均的な傾向を表わしているようであるが、 d'/H_0 の影響を無視することはできないことがわかる。そこで先の 図-3 の結果も参照して $d'/H_0=0, 0.4, 0.6, 0.8$ の各値ごとの曲線を補間法により求めてそう入した。この関係ならびに 図-3 の関係を用いて具体的な事例について計算した結果が 図-6 (A), (B) に記入されており、平均値としては比較的良好に実験結果を代表しようようである。なお同図中には Beach Erosion Board の算式による値も比較のために記入した。

(2) 圧力の分布

どの高さまで波圧が作用するかを判断する資料として、護岸の前での波高計記録を使用することにした。図-11 はその結果であり、一般に h_c は $0.7 \cdot H_b$ よりも小さいようであるが、 $h_c=0.7 H_b$ としても実用上さしつかえなさそうである。図-12 はそれぞれ堤脚水深 $d'=5 \text{ cm}$, $T=2.0 \text{ sec}$ の場合について計算式 (2) よ

図-11

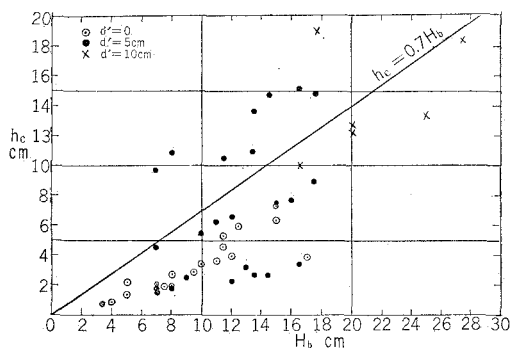
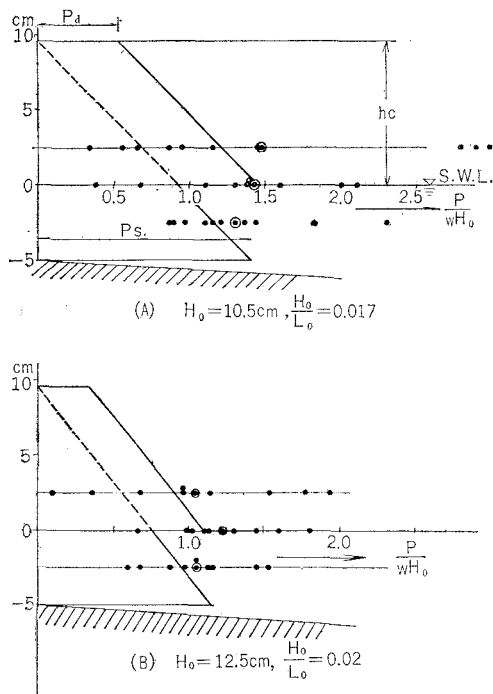


図-12



り求めた分布と実測値を比較したものである。平均波圧としてはほぼ算定式は妥当のようであるが、実際には衝撃的な圧力であり、また砕波後の波のため、きわめて不規則になっているので、個々の測定値のちらばりは大きい。B.E.B. の式では衝撃圧は静水面上のみに作用しているが、記録を見ると必ずしも正しくない。この分布について明らかにするにはさらに数多くの実験を試みる必要がある。

5. 消波ブロックによる波圧の軽減

根固工としての捨石、あるいは捨ブロックの利用から一歩前進して、護岸前面での波のエネルギーを吸収させる目的で、各地でテトラポッドなどの消波ブロックが広く使用されるに至った。筆者らの実験によれば、消波堤の天端高が低いときには、遡上高の軽減にはさして効

果がなく、かなりの効果を期待するためには、静水面上沖波波高分くらいに天端高を定める必要がある¹⁾。このことはまた波圧の軽減にも、ある程度あてはまるのではないかと考える。

運輸技術研究所（現港湾技術研究所）港湾水工部防波堤研究室において鼠ヶ関港西防波堤に関連して行なわれた実験結果をここに引用させていただこう¹⁰⁾。図-13に示すような断面について水位を種々に変化させ、現地に換算して $T=12.7$ sec, $H_0=5.1\sim 5.8$ m の波について全波力を測定した結果が 図-14 である。これからテトラポッドの投入によって衝撃波圧をいちじるしく軽減しうるが、水深が深く直立壁のみのときには重複波圧が作用するときに、テトラポッドの投入により砕波を助

図-13

(運輸技研による)

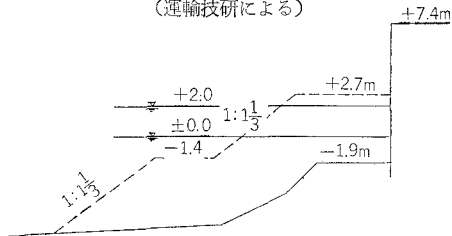


図-14 (運輸技研による)

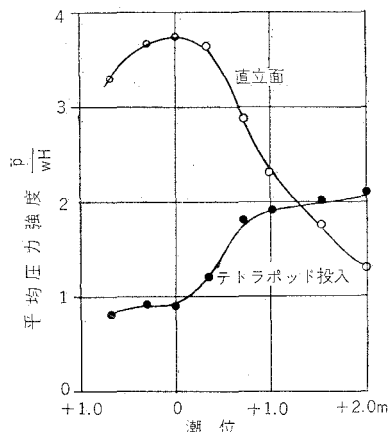
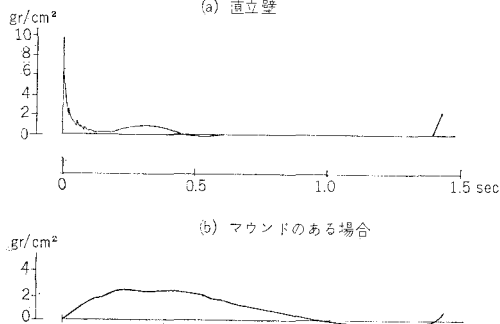


図-15

($T=1.4$ sec, $H_0=6.1$ cm)
($d'=50$ cm, $Z=2.5$ cm)



長し、かえって大きな波圧を生ずることが知れる。このことはきわめて興味ぶかく、したがって消波堤の設計にあたっては上記の点に注意せねばならない。

われわれは堤脚水深 $d'=5$ cm, $T=1.4$ sec, $H_0=2\sim 14$ cm の波について直立壁のみの場合と、静水面上 10 cm に天端高がくるように護岸の前面に消波ブロックの一種としてのテトラポッドを積み重ねた場合について、波圧の測定を行なった結果、全般的にいちじるしく波圧を軽減しえた。たとえば、砕波の衝撃波圧を受ける波の条件下では約 1/10 に、砕波後の波圧については 1/5 $\sim$ 1/2 になるが、波高が大きくなるにつれて、その軽減比は小さくなる。これは消波堤の天端高と沖波波高との比が関係してくるのであろう。図-15には圧力波形の相違を示した。これからも消波ブロックにより衝撃波圧はなくなるが、静圧の作用する時間は長くなって来る。これはブロック間に侵入した水が長時間保持されるからである。

以上、われわれは特に砕波後の波の直立護岸におよぼす波力について種々検討を試みた。今後、さらに研究を継続してゆく予定である。残された問題も多いが、護岸の波圧について考慮すべき諸点を明らかにしたつもりである。

本研究は新潟県土木部より依頼を受けて実施しているものの一部であり、東京大学工学部 土木工学科 港湾研究室員の協力により実験ならびに資料の整理が行なわれた。ここに室員の努力に謝意を表する。なお文献の参照については港湾技術研究所 光易 恒氏、ならびに第一港湾建設局 新潟調査設計事務所のお世話になった。

参考文献

- 1) 堀川清司：海岸堤防，海岸護岸に関する研究の現況，海岸第2号，全国海岸協会，(1962)。
- 2) Ross, C.W.: Laboratory Study of Shock Pressures of Breaking Waves, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 59, (1955)。
- 3) 浜田徳一・光易 恒・長谷直樹：構造物に作用する波力，第3回海岸工学講演会講演集，(1956)。
- 4) Hayashi, T. and Hattori, M.: Pressure of the Breaker against a Vertical Wall, Coastal Engineering in Japan, Vol. 1, (1958)。
- 5) Rundgren, L.: Water Wave Force, Stockholm, (1958)。
- 6) 永井莊七郎：防波堤に働く砕波の圧力に関する研究，土木学会論文集，第65号，別冊(3-3)，(1959)。
- 7) Mitsuyasu, H.: Experimental Study on Wave Force against a Wall, Report of Transp. Tech. Research Inst., Report No. 47, (1962)。
- 8) 加藤重一：海岸(干拓)堤防の断面形状と波浪エネルギーの減殺効果について一特に波のうねり高さと波圧強度一，第5回海岸工学講演会講演集，(1958)。
- 9) Beach Erosion Board: Shore Protection Planning and Design, Tech. Report No. 4, (1961)。
- 10) 運輸技術研究所 港湾水工部 防波堤研究室，鼠ヶ関港西防波堤に関する波圧実験について，(1960)。