

海岸堤防ののり面構造と波のうちあげ高さとの関係 (II)

尾 崎 晃*・佐 藤 幸 雄**・戸 沢 哲 夫**

1. ま え が き

海岸堤防あるいは捨石防波堤などの海岸構造物への波のうちあげに関する問題は堤防のり面保護、堤防の天端高算定上重要な事柄であることはいうまでもなく、今までにも多くの研究者により実験的研究がなされ、特にのり面が滑面である場合の波のうちあげ高さに関しては、かなり高い信頼度を持つ実験結果が発表されているが、のり面が砕石、玉石などの粗度を持つ材料で被覆された場合ののり面うちあげの問題に関しては R. Savage, K. N. Grantham などによる二、三の研究があるのみで、いまだ深く解明されてはいない。それゆえにわれわれは粗度を有するのり面の波のうちあげ高さの問題をあらためてその基礎的実験より特にのり面上の粗度が波のうちあげ高さにおよぼす影響ならびに関連性について調べてみた。実験についての概略はすでに第 I 報として第 18 回年次学術講演会講演集にのべてあり、今回の報告中に一部重複する部分があることをあらかじめお断りしておく。前回の報告ではのり面が粗度を有する場合は滑面にくらべて R_s/H_0 の値が 30~50% 減少する結果をのべたが、この減少の理由は被覆材料の空げき率によって波のエネルギーが減殺されると考えられる。しかし前回において使用した被覆材料は空げき率にあまり差がない種類のものではあったため空げき率の影響が波のうちあげ高さの上に明確に現われなかった。本来波のうちあげ高さはのり面上の砕波波圧と大きな関連を有し、砕波によって生ずる大きな波圧が波のうちあげに使用されと考えられる。本報では前回よりも空げき率の値の範囲を拡張して、砕波波圧のような衝撃圧の減殺効果と空げき率との関係ならびに空げき率と波のうちあげ高さとの関係を実験的に調べた結果を以下順次にのべたものである。

2. 実験装置と実験方法

(1) 衝撃圧測定

被覆材料の空げき率がどの程度砕波波圧を減殺するかを調べるためには、直接砕波波圧を測定することは砕波の現象が複雑であるためにきわめて困難である。たとえ測定したとしても測定値には非常なばらつきがあり測定値の誤差と空げき率の差との区別が判然としない。そ

れゆえに本実験では、砕波機構よりもっと条件を簡略化して、しかも砕波時の衝撃圧を想定できる装置として図-1 のような箱を作成し、この装置により水塊が垂直に落下したときの衝撃圧を測定した。この装置の大きさは縦 44 cm, 横 40 cm, 高さ 150 cm で正面と裏面は落下状態を観察しうるようにガラス張りとした。この外箱内には縦 35 cm, 横 36 cm, 深さ 30 cm の水槽が懸垂され水槽の高さは、被覆材料表面より 40~100 cm の範囲にて 5 cm ずつ変えられるよう作った。また水槽の底は中心線より左右に開く扉にしてあり、扉を閉じたときはスポンジにより水密性としてある。扉を完全に閉じた状態にして、水槽内に一定量の水を入れたのち、扉を開いて水塊を落下させる。使用した被覆材料はうちあげ高さ測定のためののり面被覆材料と同一のもので以下に示す空げき率を有する。

B; $n=40.0\%$ (直径 29 mm と 23 mm のガラス玉の体積比 1:1 の混合)

C; $n=38.5\%$ (直径 15 mm のガラス玉一種類)

E; $n=43.7\%$ (直径 20~25 mm の砕石)

F; $n=35.0\%$ (直径 29 mm と 12 mm のガラス玉の互層)

n は空げき率である。

以上の材料について材料の層厚は 10 cm とし層中に 3 本の Pressure Gauge をそれぞれ受圧面の高さを変えて表面 (層厚 1 cm), 中層 (層厚 5 cm), 底層 (層厚 10 cm) の位置に埋め込み、ひずみ計を通して電磁オシログラフに記録させた。

(2) 波のうちあげ高ならびに砕波波圧の測定

使用した水路は長さ 15.0 m, 幅 0.81 m, 深さ 0.80 m の総ガラス張りの直線水路で水路底は水平である。この水路の一端に図-2 に示すように長さ 3.60 m の傾斜板をその角度を自由に変えうるように蝶番により水路底に取り付け、傾斜板上を 10 cm に被覆した。使用した被覆材料は C, E, F の 3 種類である。傾斜板角度 ϕ は 7° , 10° , 15° , 周期 T は 0.8, 1.2, 1.8 sec, 波高 (沖波波高) は 2~15 cm の範囲に変え、水深は第 I 報でのべたように波のうちあげ高さ R_s と波高 H_0 の比 R_s/H_0 には影響がないので本実験では任意とした。被覆材料表面のうちあげ高さ測定は被覆材料上に標尺を設け水路中央のうちあげ高を目測した。一方、底面うちあげ高 (被覆材

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部

**正会員 北海道大学工学部

図-1

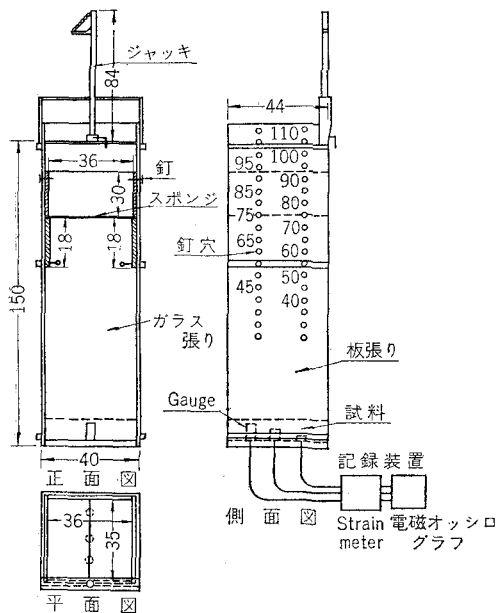


図-2

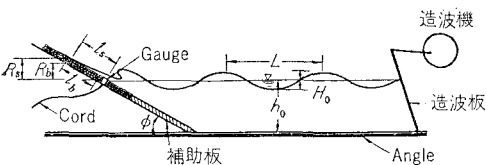
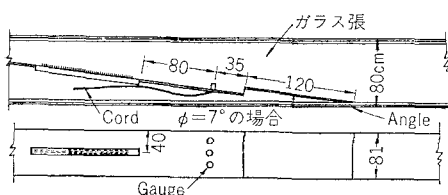


図-3



料の底面すなわち傾斜板上のうちあげ高)の測定は目測が不可能なため 図-3 のようにネオン管式ゲージを傾斜板上に埋め込みネオン管により測定した。このゲージの精度は 0.5~1.0 cm である。また砕波波圧の測定は 図-3 に示すように傾斜板に垂直に 3 本の pressure gauge を取り付け受圧面上の層厚は衝撃圧測定の場合と同様に表面 (1 cm), 中層 (5 cm), 底層 (10 cm) に埋め込み, うちあげ高さ測定と同時に砕波波圧を測定する。また衝撃圧測定時の水塊落下状態ならびに傾斜板上の砕波状態の分解写真は高速度カメラにより撮影すると同時に周期装置を用い電磁オシログラフの paper speed を 10~30 cm/sec で送り圧力の記録を行なった。記録紙には 1/50 sec の time mark が入り記録の整理には 1/200 sec まで測った。波高の測定は電気抵抗線式波高計を使用し, ペン書きオシログラフに記録させた。

3. 実験結果と考察

(1) 衝撃圧

本実験で使用した記号を一括すると

波について

H_0 ; 沖波波高 (cm)

L ; 沖波波長 (cm)

h_0 ; 水深 (cm)

T ; 周期 (sec)

波のうちあげについて

ϕ ; 傾斜板角度 (°)

R_s ; 被覆材料表面のうちあげ高 (cm)

R_b ; 被覆材料底面のうちあげ高 (cm)

衝撃圧について

p ; 衝撃圧の最大値 (g/cm²)

t ; 衝撃圧の継続時間 (sec)

ρ ; 水の単重 (g/cm³)

g ; 重力の加速度 (cm/sec²)

H ; 水塊落下高 (cm)

h ; 水槽内水深 (cm)

砕波波圧について

p_H ; 最大波圧の水平分力 (g/cm²)

p_V ; 最大波圧の垂直分力 (g/cm²)

2. でのべた実験方法により水塊が落下した場合に発生する衝撃圧 p には ρ, g, n, H, h, μ が関係する要素であり,

$$\phi_1 (\rho, g, p, H, h, \mu, \frac{1}{n}) = 0$$

と書ける。いま μ の項は影響が少ないとして省略すると, 次元解析により

$$\frac{p}{\rho g H} = \phi_2 \left(\frac{p}{\rho g h}, n \right)$$

となる。 H ; 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm, h ; 12, 15 cm の場合で B, C, E, F のおのおのの材料についての測定値を $p/\rho g h$ をパラメーターとして, $p/\rho g H - n$ の無次元座標系上にプロットしたものが 図-4 である。図-4 より p の値は H の増加にしたがい増加し, また h の

図-4

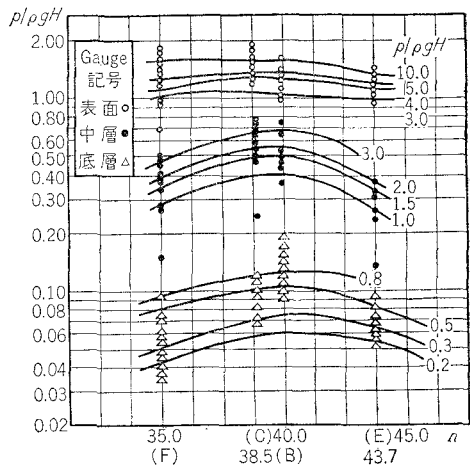
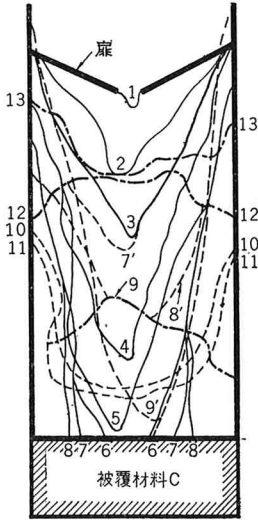
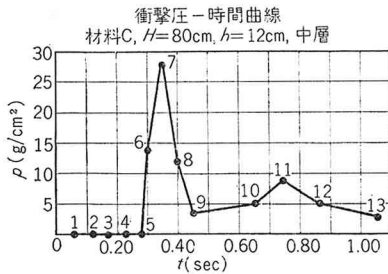


図-5
 $H=80\text{ cm}$, $h=12\text{ cm}$, Gauge 中層



増加によって増す。層厚に関しては表面では層厚が 1 cm 程度であるため水塊が直接 gauge に当たり水表面の乱れ、あるいは図-5 の分解図からわかるように水塊尖端のずれにより測定値にはかなりのばらつきがある。中層(層厚 5 cm)においては表層と異なり圧力は材料の空げき間を伝達するため測定値は非常に安定した値となり空げき率 n の影響が認められる。底層では連続して落下してくる水塊が空げき間において特に底層付近では激しい攪乱を起こし測定値には幾分ばらつきがあるが、しかし圧力の減殺は大きいといえる。図-4 より各層の圧力減殺の割合は表面にくらべ $p/\rho g H$ の値では約中層 55%, 底層で 75% くらいといえる。また同一層内では、 $n=39\sim 41\%$ くらいが最も減殺効果は小さい。図-5 と図-6 は水塊の落下状態の分解図ならびに各時間ごとの圧力強度を示したもので、この方法は永井荘七郎博士の論

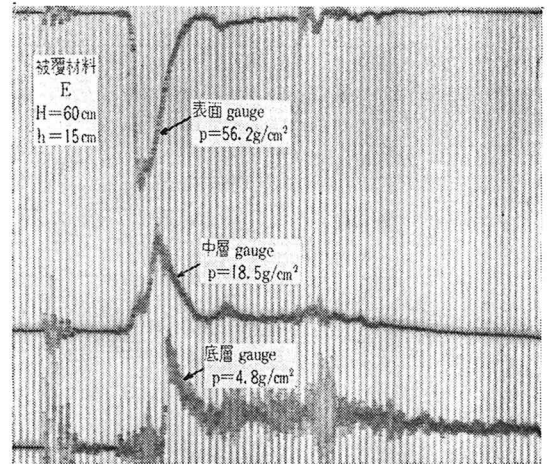
図-6



文を参考としたものである。図-5 で実線は第 1 次落下、破線は第 2 次落下で一点鎖線はね返りによる上昇過程を示した。最大圧力 p は $t=0.08\sim 0.09\text{ sec}$ で発生し、最大圧力発生ならびに水塊の衝突状態は砕波機構を想定しようと思われる。ただし $h<5\text{ cm}$, あるいは $100<H$ の場合は水塊の落下途中において飛沫が多量に発生する

ため与えられた水量が有効に使用されず落下条件は異なってくる。参考までに電磁オシログラフによる記録結果を掲げると図-7 である。

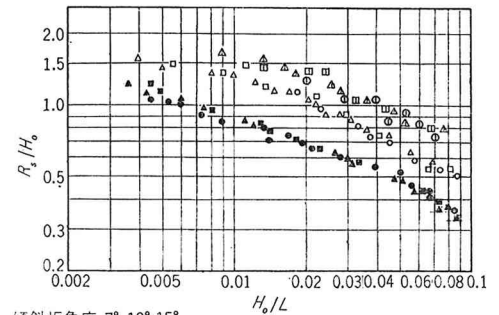
図-7



(2) 波のうちあげ高ならびに砕波波圧

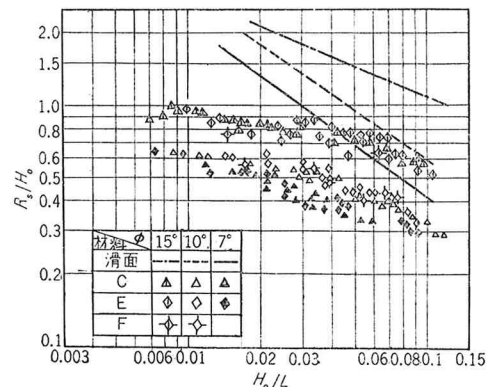
被覆材料 CEF に関して波のうちあげ高さを測定した結果は図-8, 9 で、うちあげ高の一般的表示としてグラフは両対数目盛を使用し縦軸に R_s/H_0 , 横軸に H_0/L をとり、測定値をプロットしたものである。図-8 は第

図-8



傾斜板角度 7° 10° 15°
 ● ○ ○ B, 径 29mm と 23mm の混合 ($n=40.0\%$)
 ▲ ▲ ▲ C, 径 15mm のみの混合 ($n=38.5\%$)
 ■ □ □ D, 径 12mm のみの混合 ($n=32.6\%$)
 被覆材料層厚 8.5cm.

図-9



1報ですでのべたものを改めて両対数グラフにプロットしたもので被覆材料の層厚は 8.5 cm である。本実験の場合は図-9で層厚は 10.0 cm であるため、これらの図からは層厚の増加にしたがって R_s/H_0 の減少が明確である。また傾斜板角度 ϕ の増加にともない R_s/H_0 は増加し、 H_0/L の増加にしたがい R_s の値は増加するが R_s/H_0 は減少する。 $H_0/L > 0.03$ の場合は $H_0/L < 0.03$ にくらべ減少率は大きい。これらの傾向は K. N. Grantham の実験結果と同じ傾向を示しているが、図-8, 9からもわかるように空げき率 n による影響は前述した垂直落下による衝撃圧測定の場合のように明確な区別は認めにくい。これらのことを砕波機構と砕波波圧より少し詳細に調べてみる。

波のうちあげ高さには砕波波圧が最も大きく関係する要素である。実際に砕波が傾斜板上に衝突する場合は傾斜角度の変化により種類の角度で衝突し砕波の全圧のうちで波のうちあげ高さに関係するのは傾斜板に平行な分力と考えられ、一方、垂直分力は傾斜板によって反発し消滅する。傾斜板上に被覆材料がある場合は水平分力は材料の空げき間を流れる水流の運動に使われ水の粘性による摩擦により圧力は減少し、うちあげ高さを減じる。垂直分力は水塊の垂直落下と同種の圧力で空げきにより圧力は減殺され傾斜板に与える力を減じる。

測定には表面垂直 gauge に直角(傾斜板に平行)に水平 gauge を隣接させて取り付け、受圧面上でちょうど砕波させて垂直、水平分力を同時に記録した。この場合 gauge の位置は固定したため、砕波点が移動したと

図-10

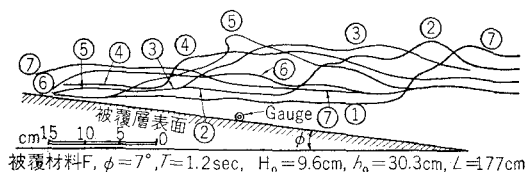


図-11

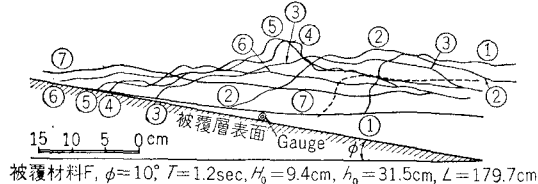


図-12

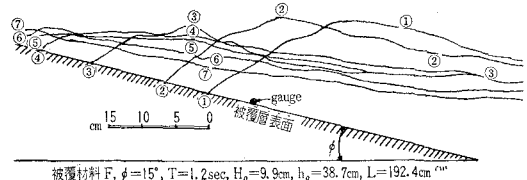


図-13

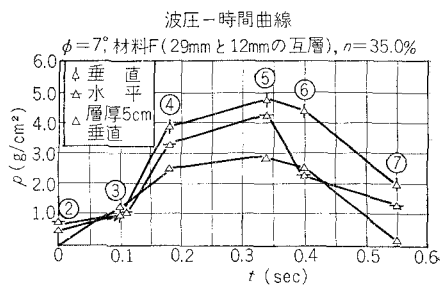


図-14

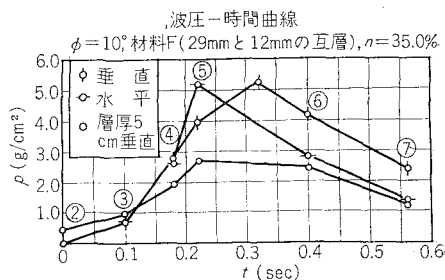
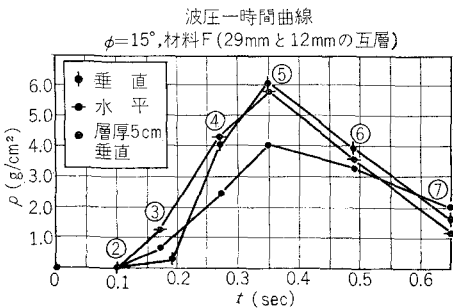


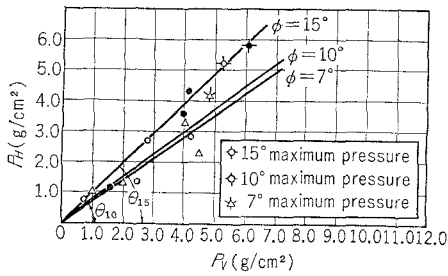
図-15



きは水深の加減により調整した。傾斜板角度を 7° , 10° , 15° に変えた場合の砕波機構を高速カメラにより撮影した分解図は図-10, 11, 12で、同時に電磁オシログラフで記録した波圧の波圧-時間曲線図は図-13, 14, 15である。図-10, 11, 12からわかるように角度 15° の場合は砕波の様子は巻き波というよりはむしろ崩れ波の様相を呈し多量の水が傾斜板上方へ押し上げられるような形となる。 7° の場合は砕波は巻波となり傾斜面上に強く砕け落ちる形となる。 10° の場合はこれらの中間的で砕波の様子が複雑である。

これらの分解図の波形の変化につれて発生する圧力と時間の関係を示したのが図-13~15である。これらの図からはいずれの傾斜角度についても衝撃を受けはじめてから、およそ $t = 0.08 \sim 0.09 \text{ sec}$ で最大圧力 p が発生している。また図-16からは水平分力 p_H と垂直分力 p_V との比は $p_H/p_V \approx 1$ で砕波の圧力は傾斜面に対し約 45° の角度で衝突しているものと思われる。図-16に示されてい

図-16



る傾向は、波のうちあげ高さが水平分力によるものとなれば R_s/H_0 の値が $\phi = 15^\circ$ より 7° へと順次減少すると、水平分力が ϕ の減少にしたがい小さくなる傾向は一致している。また垂直分力は水平分力とは逆に ϕ の値が増大すると減少する。垂直、水平圧力のいずれにしてもその値は最大圧力でも 10 g/cm^2 以下で垂直落下の場合の値の $1/10 \sim 1/15$ の小さな値であるため空げき率 n による影響も顕著でないと思われる。図-13~15より層厚 5 cm による垂直応力の減殺効果は材料 F については、垂直落下による衝撃圧では表面にくらべ 55% の減少砕波の垂直分力では $50 \sim 55\%$ の減少

であり、ほぼ同じ減殺効果を示し、このような点に関しては水塊が垂直に落下した場合と砕波機構とは大概同様の条件下にあると推定できる。

(3) 底面うちあげ高

底面うちあげ高い R_b と表面うちあげ高さ R_s の比 R_b/R_s (底面うちあげ率) と H_0/L との関係を図-17, 18, 19 に示す。底面うちあげ率 R_b/R_s の特徴としては、 H_0/L の増加にしたがい R_b/R_s は増加し、被覆材料の層厚が増すと R_b/R_s は減少する。また傾斜板角度 ϕ が増加すると R_b/R_s は増加する。これらの点は被覆材料表面におけるうちあげ高さ R_s の値と同じ傾向を示すが、異なる点は周期 T による影響が大きく T の値が減少するにつれ R_b/R_s の値が減ることである。

このことに関する問題は第1報にも若干のべたが、被覆材料表面にうちあげられた水は空げき間を浸透して底層付近では下降水流となり、後続波による上昇水流と衝突する。この現象は周期 T の値が小さくなると激し

図-17

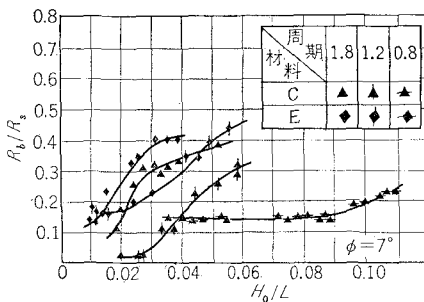


図-18

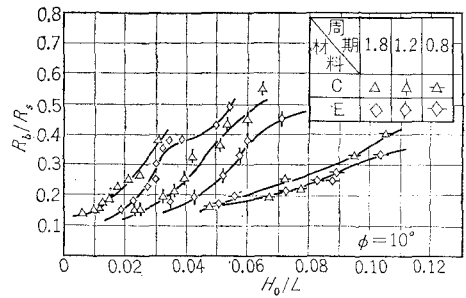
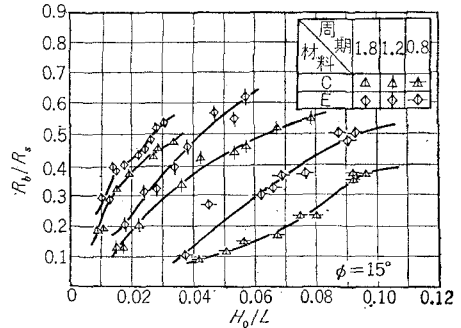


図-19



を増すのでうちあげ高さが減少するのは確かである。しかし n の影響は判然としない。

4. 結 語

(1) 水塊を垂直に落下させた場合に発生する衝撃圧 p は、空げき率 n の影響を受け (ただし層厚が 1 cm 程度では影響ない)、層厚 5 cm と 10 cm の場合はともに $n = 39 \sim 41\%$ が最も衝撃圧の減殺効果は小さい。 n がこの値より増加してもまた減少しても減殺効果は大きくなり、 $n = 35, 40, 45\%$ のときの圧力をそれぞれ p_{35}, p_{40}, p_{45} とすれば、中層、底層ともに $p_{35}/p_{40} = 0.8, p_{45}/p_{40} = 0.7$ くらいである。

(2) R_s/H_0 の値は H_0/L が増せば減少し $0.03 < H_0/L$ ではほぼ直線的となる (図-9 参照)。傾斜角度の増加にともない増加し (Granthem は $\phi = 30^\circ$ で R_s/H_0 は最大となり 30° より大きな値でも小さな値でも R_s/H_0 は減少するとのべているが、本実験では $\phi = 15^\circ$ まででそれ以上の角度については不明である)、被覆物層厚の増加にともない大きく減少する。空げき率の R_s/H_0 に与える影響は上記の落下水塊の場合のように顕著ではない。空げきによる衝撃圧減殺効果は水塊の衝突速度がある値以下に小さくなった場合には現われなくなるようである。

(3) 砕波波圧の強度は傾斜板に対して水平方向、垂直方向の分力に分けて考えると、これらの分力は傾斜板角度により異なり、傾斜角の増大にともない水平分力が増し垂直分力は減少する。傾斜角が減少する場合はこの

逆となり、したがって傾斜角度 ϕ の増加にともない R_s/H_0 が増加する。 $\phi=15^\circ$ の場合では $p_H/p_V=1$ となる。また垂直分力が層厚により減殺される割合はほぼ本実験でのべた垂直落下水塊の場合に等しくなり、砕波波圧は水塊が落下した場合の衝撃圧を想定して処理できるように思われる。

(4) 底面うちあげ高については傾斜角度、層厚、 H_0/L による影響は表面うちあげ高の場合と同じ傾向を示すが、周期 T の値より大きな影響を受ける。

H_0/L が増加すると R_b/R_s は増加するが、しかし増加の割合は漸次小さくなり $R_b/R_s < 1$ ($H_0/L < 0.10$ では) である。 n による影響は衝突速度が表面より小さくなり

明確な区別はつかない。

最後に本実験に当たっては昭和 38 年度文部省科学研究費の援助を受けて行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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)。
- 2) Kenneth N. Grantham: Wave Run-up on Sloping Structures, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 34, No. 5.
- 3) Thorndike Saville: Wave Run-up on Shore Structures, Proceeding of the ASCE, WW 2. Paper 925 April. 1956.
- 4) 本間 仁・安芸咬一：物部水理学。
- 5) 土木学会編：水理公式集。