

# 重複波作用時における岩盤の割れ目内の 圧力上昇に関する実験的研究

山本幸次\*・砂村継夫\*\*・宇多高明\*\*\*

## 1. ま え が き

岩石海岸において岩盤の割れ目に波が作用すると、割れ目内に水が押し込まれ、あるいは空気が閉じ込められる結果、割れ目内圧力が上昇し、割れ目は徐々に押し広げられる。波が岩盤の割れ目を押し広げるこのような作用はwedge action と呼ばれる(例えば、Johnson, 1919; Thornbury, 1960; Longwell *et al.*, 1969; King, 1972)。節理や断層線等の割れ目は、地質によっては規則的に存在するが、これらの割れ目において wedge action が生じると、岩盤全体の強度が劣化し(Sunamura, 1983)、崖侵食が進むことになる。また、岩石海岸では波の侵食作用により海食洞が形成されることがあるが、海食洞の形成に関する従来の研究によると、そのほとんどが断層や節理などの弱線(割れ目)に沿って形成されると報告されている(Emery, 1960; 豊島, 1965; Zenkovich, 1967)。このように、海食洞は割れ目に沿って形成されることが多いため、wedge action は海食洞の形成にも強く関わっていると考えられる。wedge action については、定性的な議論は行われているが(例えば、Holmes, 1978; Fleming, 1965)、現地海岸はもとより実験室においてもその作用の定量的議論がなされた例はない。現象の解明を図るには現地海岸において、wedge action による岩盤の割れ目内圧力を実測することが必要であるが、それには非常に困難を伴う。そこで、本研究では重複波を用いた実験を行い、割れ目内で圧力上昇が生ずるかどうか、また圧力が上昇するとすればどの程度の上昇が見られるかについて検討した。

## 2. 実験方法

実験は長さ 33 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.8 m の諸元を有する片面強化ガラス張りの 2 次元造波水路を用いて行った。岩石海岸の模型は造波板より 25.8 m の位置に設置し、平坦床上の静水深は 50 cm に保った。岩石海岸の

模型は木製であって図-1に示す形状とし、水槽と模型の間にはシリコンを詰めて完全に密閉した。割れ目の平面形状は楔形で、楔の角度を 2 種類( $\theta=11.3^\circ, 33.8^\circ$ )、静水面から割れ目の天井までの高さを 4 種類( $h_c=5, 10, 15\text{ cm}, \infty$ )に変えた(表-1)。実験では重複波を対象とし、一様水深部における波高  $H_i$  は 2.0~10.0 cm の範囲で 5 種類、周期  $T_i$  は 0.8~1.6 s の範囲で 5 種類変化させた。

実験では入射波の諸元( $H_i, T_i$ )、模型に作用する波の諸元( $H, T$ )、模型前面の波圧  $p_1$ 、割れ目内の側壁

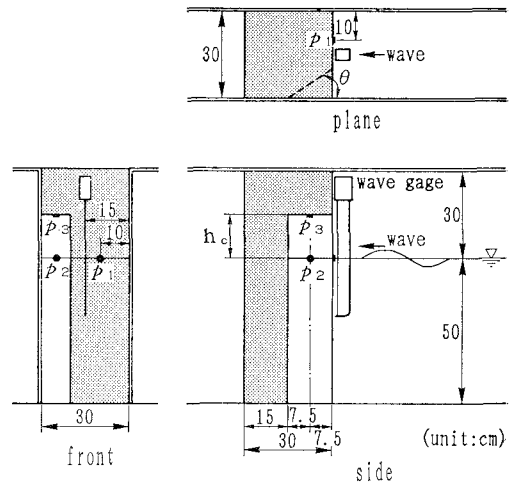


図-1 岩石海岸における岩盤の割れ目の模型諸元

表-1 実験 case の一覧

| case | $\theta(^{\circ})$ | $h_c(\text{cm})$ |
|------|--------------------|------------------|
| ①    | 33.8               | $\infty$         |
| ②    | 33.8               | 15               |
| ③    | 33.8               | 10               |
| ④    | 33.8               | 5                |
| ⑤    | 11.3               | 15               |
| ⑥    | 11.3               | 10               |
| ⑦    | 11.3               | 5                |

\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室  
 \*\* 正会員 工博 筑波大学教授 地球科学系  
 \*\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

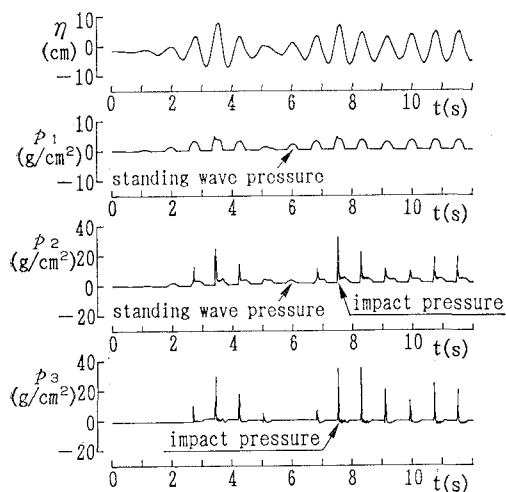
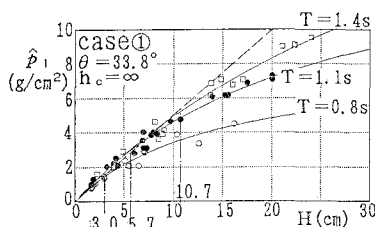


図-2 波形および波圧の記録データの1例

の波圧  $p_2$ 、天井の波圧  $p_3$  および水面形を測定した。入射波高は造波板から 2m の位置で、模型に作用する波の高さは模型前面 0.5 cm の位置で容量式波高計を用いて測定した (図-1)。 $p_2$  は割れ目の側壁中央部の静水面上で、 $p_3$  は天井の中央部で測定した (図-1)。これらの波圧の測定には厚さ 5 mm、直径 1.0 cm の波圧計を用いた。波と波圧の波形は、ペンレコーダにより記録した。模型前面に作用する波の谷から谷までを 1 周期と定義し、記録波形から 1 波ごとの  $H$ 、 $T$  と、対応する波圧のピーク値、 $\hat{p}_1$ 、 $\hat{p}_2$ 、 $\hat{p}_3$  を読み取った (図-2)。波の作用時間が長くなると造波板からの反射波が再び作用し、模型前面の波高が時間的に大きく変動するようになるので、この現象が生ずる前に実験を終了した。波の作用時間は周期によって異なるが、ほぼ 20~30 波相当であった。さらに、ビデオカメラを用い割れ目内およびその前面における水面形状を水路側面より撮影し、0.1 s 間隔で水面形をトレースして水面波形を求めた。

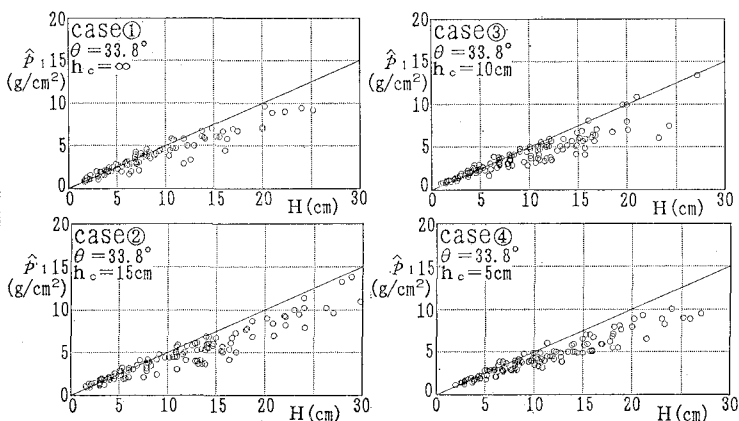
図-3  $\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

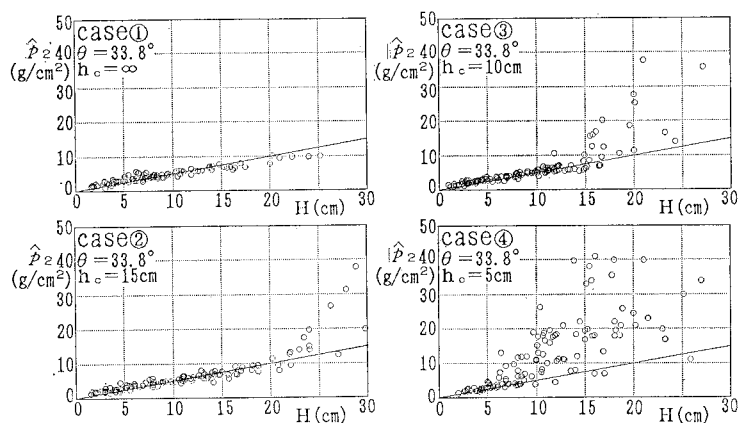
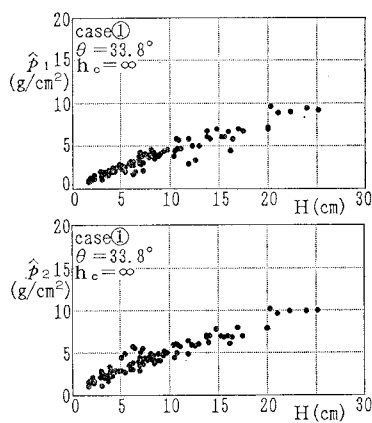
### 3. 実験結果

#### 3.1 模型前面に作用する波圧 $\hat{p}_1$ の特性

最初に、波の周期の変化が模型前面の波圧に及ぼす影響を調べるために、case ①を代表として選んで模型前面の波高  $H$ (cm) と作用波圧  $\hat{p}_1$ (g/cm²) の関係を調べた (図-3)。横軸に  $H$ 、縦軸に  $\hat{p}_1$  を取り、 $T=0.8$ , 1.1, 1.4 s のデータを示した。破線は、 $\hat{p} = w_0 H / 2$  で与えられる微小振幅波による重複波圧の理論値である。ここに、 $w_0$  は水の単位体積重量 ( $=1 \text{ g/cm}^3$ ) である。実線は各周期ごとの測定値より求めた回帰曲線である。また、微小振幅波理論の適用限界 (岸, 1964) から求めた各周期ごとの限界波高も示した。いずれの周期の場合も、波高が高くなると  $\hat{p}_1$  は増大する。微小振幅波理論の適用限界波高より  $H$  が大きいと、微小振幅波による重複波圧の理論値より  $\hat{p}_1$  は小さくなるが、適用限界波高より小さい範囲では測定値は理論値とほぼ一致している。

次に、天井高の変化が模型前面波圧に及ぼす影響を調べるために、case ①~④の  $\hat{p}_1$  と  $H$  の関係を 図-4 に示した。図には設定周期 ( $T=0.8 \sim 1.5 \text{ s}$ ) の全データを示す。 $\hat{p}_1$  は各 case とも  $H$  が大きくなるとばらつきが増大する傾向にある。この傾向は、 $H$  が適用限界波高より大きくなるためと考えられる (図-3 参照)。しかし、測定値は割れ目の天井高  $h_c$  によらず、実線 ( $\hat{p} = w_0 H / 2$ ) より下に分布している。すなわち  $\hat{p}_1$  は

図-4  $\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

図-5  $\hat{p}_2$  と  $H$  の関係図-6 case①の  $\hat{p}_1$  と  $\hat{p}_2$  の比較

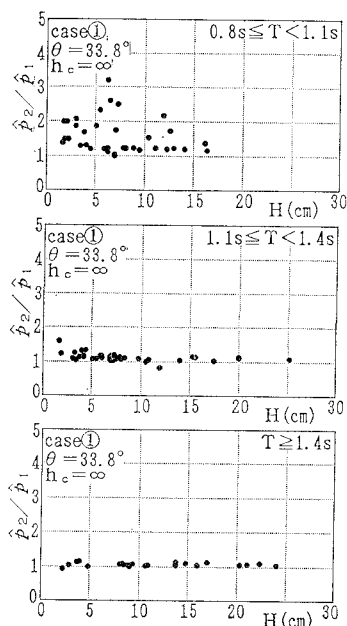
波高のみの関数で天井高  $h_c$  によらないことが分かる。そこで、 $\hat{p}_1$  の値を基準として各 case の  $\hat{p}_2$  と  $\hat{p}_3$  の大きさを調べることにする。

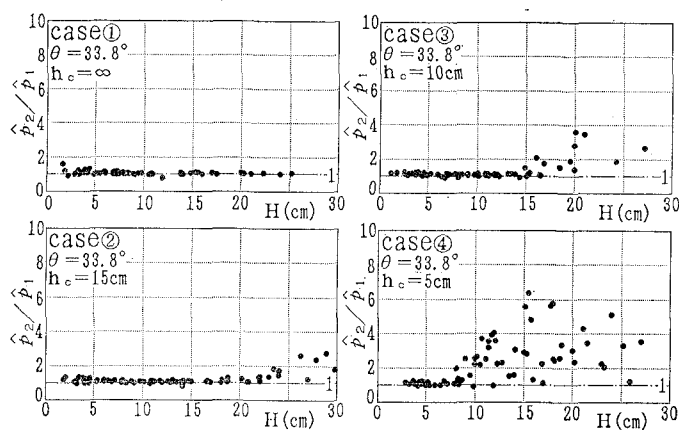
### 3.2 割れ目内の側壁に作用する波圧 $\hat{p}_2$ の特性

割れ目の楔の角度を一定 ( $33.8^\circ$ ) に保ち、天井高のみを変化させた case ①～④における全周期に対応する  $\hat{p}_2$  と  $H$  との関係を 図-5 に示す。実線は微小振幅波理論による重複波圧を示す。case ①では、全体的に理論値との良い対応が見られるが、 $H \leq 10$  cm において  $\hat{p}_2$  は理論値よりやや大きくなる。これは、割れ目断面の縮小に伴う水位上昇によって生じた圧力の上昇を表わす。また  $H > 10$  cm では理論とほぼ等しいか若干小さい値を示している。これは 図-3 の場合と同様に、微小振幅波理論の適用限界より波高が高くなったためである。case ②においては、 $H \leq 20$  cm では case ①と同様の特性を示す。しかし、 $H > 20$  cm では、 $\hat{p}_2$  は理論値よりかなり大きくなる。case ③、④についても同様な特徴が見られ、各 case において  $\hat{p}_2$  が理論値より著しく大きくなる限界波高は、10.0 cm (case ③)、5.0 cm (case ④) であって、これらの限界波高値は割れ目の天井高  $h_c$  と一致する。割れ目内の側壁に作用する  $\hat{p}_2$  には、割れ目内の水位上昇に伴う圧力と割れ目の天井があるために生じる圧力が含まれる。このことは、波と波圧の波形記録 (図-2) において、 $\hat{p}_3$  が表われた時に衝撃性の  $\hat{p}_2$  が生じていること、また  $\hat{p}_3$  が表われない場合には  $\hat{p}_2$  は重複波圧の波形を示すことから推察できる。以上のように、 $\hat{p}_2$  には重複波圧と衝撃性の波圧とがあり、それらの発生機構は異なると考えられるので、割れ目内の水位上昇と割れ目内の天井の高さ  $h_c$  に着目して検討した。

まず、割れ目に天井のない case ①の  $\hat{p}_1$  と  $\hat{p}_2$  とを比較した (図-6)。波高が低い条件 ( $H \leq 10$  cm) では  $\hat{p}_2$  の値が  $\hat{p}_1$  よりも全体的に大きい。波高が高い条件 ( $H > 10$  cm) では  $\hat{p}_2$  と  $\hat{p}_1$  の値はほぼ等しい。図には全

周期のデータを示したが、波高が低い条件で  $\hat{p}_2$  が大きくなった要因として周期の影響が考えられる。そこで、周期別に  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係を調べた (図-7)。  $0.8 \leq T < 1.1$  s の条件では  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  は 1 より大きく、その最大値は  $\hat{p}_2/\hat{p}_1 \approx 3$  である。  $1.1 \leq T < 1.4$  s、 $T \geq 1.4$  s と周期が長くなると、波高と無関係に  $\hat{p}_2/\hat{p}_1 \approx 1$  となる。また、実験中の観察によると周期の短い場合ほど、割れ目内の水位上昇は顕著であった。このことは、周期の短い波が作用すると割れ目内の水位が模型前面の水位より急激に上昇するため、割れ目内の側壁の圧力上昇が著しくなることを示している。周期の短い波が作用する時に割れ目内の水位が著しく上昇する現象は、主に割れ目の奥

図-7  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

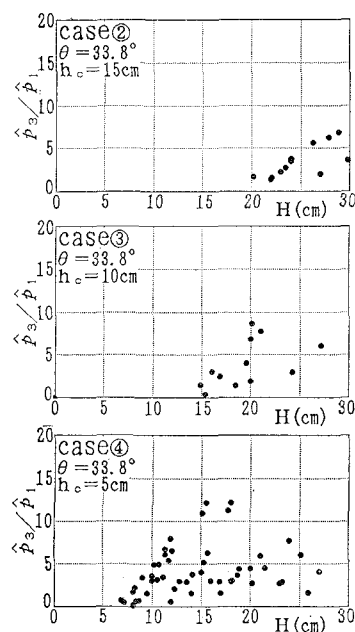
図-8  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

行きと作用する波の波長との相対関係に依存すると考えられる。この点については今後更に検討する必要がある。

次に、天井に作用する波圧が表われる場合に見られる衝撃性の波圧について検討する。短周期の波の作用時には割れ目内の水位上昇が著しいこと、またそれに伴う圧力上昇が生じることから、天井の影響による衝撃性の波圧のみを検討するためには、短周期の波のデータを除いた方がよい。そこで、図-7 において水位上昇による圧力増加の見られない  $T \geq 1.1$  s の条件で天井高を変えた時の  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係を調べた(図-8)。case ①では天井が無い場合、波高に無関係に  $\hat{p}_2/\hat{p}_1 = 1$  となる。case ②においては、 $H \leq 20$  cm のとき  $\hat{p}_2/\hat{p}_1 = 1$  であるが、 $H > 20$  cm では  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  は 1 より大きくなる。 $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  が 1 より明らかに大きくなる限界の波高は、 $H_{\min} = 20$  cm である。また  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  の最大値は、 $(\hat{p}_2/\hat{p}_1)_{\max} = 2.8$  となる。case ③、④についても同様な特徴が見られ、case ③:  $H_{\min} = 13.6$  cm,  $(\hat{p}_2/\hat{p}_1)_{\max} = 3.6$ , case ④:  $H_{\min} = 6.4$  cm,  $(\hat{p}_2/\hat{p}_1)_{\max} = 6.4$  となる。すなわち、割れ目内の側壁に作用する衝撃圧の模型前面波圧に対する比の最大値は、case ② ( $h_c = 15$  cm) では 2.8, case ③ ( $h_c = 10$  cm) では 3.6, case ④ ( $h_c = 5$  cm) では 6.4 となる。このことから、実験条件の範囲内では、天井高が低くなるとそれに伴って限界波高も低下し、また  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  の絶対値も急激に増大することが分かった。

### 3.3 割れ目の天井に作用する波圧 $\hat{p}_3$ の特性

$\hat{p}_3$  についても  $\hat{p}_1$  と比較して検討した。図-8 と同様に  $T \geq 1.1$  s の条件で  $\hat{p}_3/\hat{p}_1$  と  $H$  との関係を調べた(図-9)。case ② においては、波高が  $H_{\min} = 20$  cm より大きい範囲にのみデータが存在し、その最大値は  $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max} = 6.9$  である。case ③、④ についても  $H_{\min}$ ,  $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max}$  を求めると、case ③:  $H_{\min} = 13.8$  cm,  $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max} = 8.8$ , case ④:  $H_{\min} = 6.4$  cm,  $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max} =$

図-9  $\hat{p}_3/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

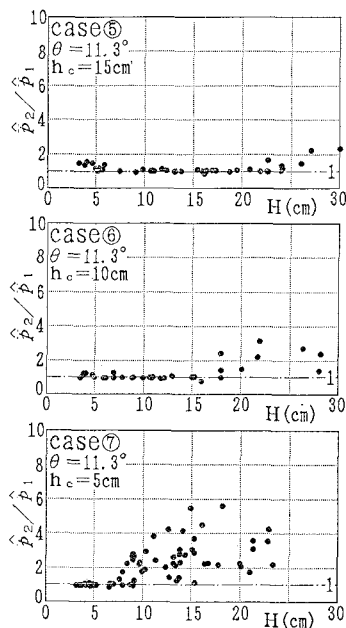
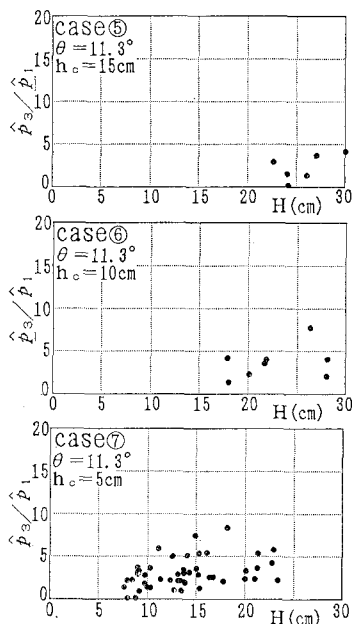
12.2 となる。すなわち、割れ目の天井に作用する衝撃圧比の最大値は、模型前面の波圧に比べて case ② ( $h_c = 15$  cm) では 6.9 倍、case ③ ( $h_c = 10$  cm) では 8.8 倍、case ④ ( $h_c = 5$  cm) では 12.2 倍となる。側壁に作用する衝撃圧と同様に、天井高が下がると天井に作用する衝撃圧は著しく増大することが分かる。

### 3.4 楔の角度の違いが $\hat{p}_2$ , $\hat{p}_3$ に及ぼす影響

楔の角度が  $\theta = 11.3^\circ$  と小さい場合の  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係を図-10 に示す。基本的な特性は楔の角度  $\theta = 33.8^\circ$  の場合(図-8)と同様である。 $(\hat{p}_2/\hat{p}_1)_{\max}$  は case ⑤ ( $h_c = 15$  cm) では 2.3, case ⑥ ( $h_c = 10$  cm) では 3.1, case ⑦ ( $h_c = 5$  cm) では 5.7 となる。楔の角度が  $\theta = 33.8^\circ$  の場合(case ②~④)と  $\theta = 11.3^\circ$  の場合(case ⑤~⑦)とで、天井の高さが等しい case ごとに  $(\hat{p}_2/\hat{p}_1)_{\max}$  の比較を行うと、 $h_c = 15$  cm では 2.8: 2.3,  $h_c = 10$  cm では 3.6: 3.1,  $h_c = 5$  cm では 6.4: 5.7 と  $\theta = 11.3^\circ$  の場合の方が若干小さくなった。

同様に  $\theta = 11.3^\circ$  の場合の  $\hat{p}_3/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係を図-11 に示す。 $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max}$  は、それぞれ case ⑤ で 4.2, case ⑥ で 7.9, case ⑦ で 8.4 となる。 $(\hat{p}_3/\hat{p}_1)_{\max}$  の場合と同様の比較を行うと、 $h_c = 15$  cm では 6.9: 4.2,  $h_c = 10$  cm では 8.8: 7.9,  $h_c = 5$  cm では 12.2: 8.4 とこの場合も  $\theta = 11.3^\circ$  の場合の方が小さくなった。

以上のことから、割れ目内に発生する衝撃圧は  $\theta = 33.8^\circ$  の方が若干大きい、楔の角度が衝撃圧の発生に及ぼす影響は、今回の実験条件の範囲内では割れ目の天井高の変化ほどは大きくないことが示された。

図-10  $\hat{p}_2/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係図-11  $\hat{p}_3/\hat{p}_1$  と  $H$  の関係

#### 4. 結 論

本研究によって得られた要点を列挙すると次のようである。

①割れ目に天井が無い条件において短周期波が作用すると、衝撃圧は生じないが、側壁に作用する波圧は模型前面波圧の約3倍まで増加する。これは割れ目内の水面の上昇が急激なためである。一方、長周期波が作用したときは、側壁への作用波圧は模型前面波圧と等しくなる。

②割れ目に天井がある場合、割れ目内の側壁に作用する波圧は水面上昇に伴う静圧と、天井に水面が衝突したときに発生する衝撃圧とから成る。これらのうち、静圧は天井が無い条件のそれと同一である。

③割れ目に天井がある場合に発生する側壁および天井に作用する衝撃圧は、模型前面波圧の3～6倍、7～12倍となり、両者とも天井の高さが低くなるほど増大する。また、これらの衝撃圧が生じ始める時の波高は等しい。

④楔の角度を変えた実験によれば、割れ目内に生ずる衝撃圧は  $\theta=11.3^\circ$  の場合よりも  $\theta=33.8^\circ$  の場合の方が若干大きい。しかし、楔の角度の相違が割れ目内に発生する衝撃圧に及ぼす影響は、天井高のそれに比較して小さい。

謝辞：本研究は、科学技術庁の国内留学制度により、筆

者の一人（山本）が筑波大学での研修で行った実験結果を取りまとめたものである。ここに記して研修の機会を与えて下さった関係各位に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 岸 力 (1964): 重複波圧式とその適用限界, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 181~183.
- 豊島吉則 (1965): 花崗岩地域の海食地形—山陰, 浦富海岸の事例, 鳥取大教育研究報, 16, pp. 1~14.
- Emery, K. O. (1960): The Sea off Southern California, John Wiley & Sons, New York, 357p.
- Flemming, N. C. (1965): Form and relation to present sea level of pleistocene marine erosion features, Journal of Geology, Vol. 73, pp. 799~811.
- Holmes, A. (1978): Principles of Physical Geology, 3rd ed., Thomas Nelson and Sons, Middlesex, 730p.
- Johnson, D. W. (1919): Shore Processes and Shoreline Development, New York, 584p.
- King, C. A. M. (1972): Beaches and Coasts, 2nd ed., Edward Arnold, London, 570p.
- Longwell, C. R., Flint, R. F., and Sanders, J. E. (1969): Physical Geology, John Wiley & Sons, New York, 685p.
- Sunamura, T. (1983): Processes of sea cliff and platform erosion, in P. D. Komar (ed.), CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 233~265.
- Thornbury, W. P. (1960): Principle of Geomorphology, John Wiley & Sons, New York, 618p.
- Zenkovich, V. P. (1967): Processes of Coastal Development, Oliver and Broyd, London, 738p.