

津波の汀線における水理特性と陸上遡上

岩 崎 敏 夫*・富 樫 宏 由**・佐 藤 栄 司***

1. 序 論

有限振幅長波としての津波は傾斜海岸上で砕ける場合が多いが、一度砕けた津波は砕け続けることによって、また底摩擦効果によってエネルギーを消散しつつ汀線に達してついには陸上に遡上する。従来、津波に限らず、波の陸上遡上は沖合いの一点における侵入波高と最大陸上遡上高を直線的に結びつける研究が主に成されてきたが、1955年に Kaplan¹⁾ は汀線波形の再現性に着目して、汀線における水理特性の重要性を指摘した。また、1958年に Witham²⁾ は bore の汀線流速を理論的に導き出して以来、それによる陸上遡上高の見積りをかなり容易にし、遡上機構を知る上での重要な糸口を与えた。もちろん、砕けない波の陸上遡上においても、汀線での水理特性は陸上遡上高を見積る上での鍵となっている。

このように、一般に波の汀線における水理特性と陸上遡上は密接な関係をもっているものと思われるが、理論的解析と測定の困難さのために、津波の陸上遡上機構は未だ十分解明されてはいない。しかし、従来上に述べた Witham²⁾, Keller, Levine & Witham³⁾ をはじめとして、福井・中村・白石および佐々木⁴⁾ の実験的研究、Freeman & Mēhauté⁵⁾ の理論的研究により、陸上遡上高は汀線流速の2乗に比例することが示され、その後の岸⁶⁾、岩垣・井上および大堀⁷⁾ らの実験によっても確認されている。したがって、bore のような強い shock front をもった部分がもっとも高く遡上するような場合の遡上機構はかなり解明されてきている。しかるに、Freeman & Mēhauté⁵⁾ の理論および岩垣・井上および大堀⁷⁾ らの実験結果からも指摘されたように、底勾配が比較的緩やかな場合は shock front の背後に続く波形の効果が遡上高に影響してくると思われるが、筆者らは津波は海上で砕けた後、汀線では波形がかなり安定することに着目して、津波の汀線での波形から陸上遡上高を見積ることの可能性を検討してみることにした。そのために、筆者らは汀線における水理量をかなり精度よく測定する方法を考案した。

この論文は、沖合いの侵入波と汀線波および陸上遡上

波の3つの間の関係の有無を調べるために、手初めにまず実験的に把握することを試みたものである。その結果、津波の汀線における水理特性と陸上遡上の間に関わり興味深い関係を見出すことができた。

2. 実験装置、方法および入力波

(1) 実験装置、器具および方法

造波および実験装置は図-1に示すように、大きく分けて低水槽（貯水用）および高水槽（実験用；写真-1）とその間を連絡する送水管に取付けられた軸流ポンプ（送水用；写真-2）および還水管に取付けられたバタフライバルブ（送水量調節用；写真-2）と帰水管に取付けられたロータバルブ（帰水量制御用；写真-3）お

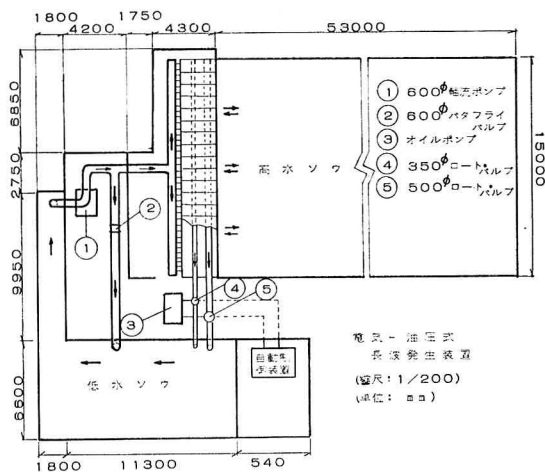


図-1 造波装置概略

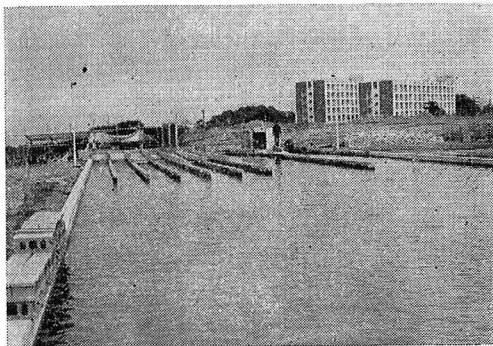


写真-1 高水槽

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東北大学助手 同

*** 正会員 東北大学工学部土木工学科

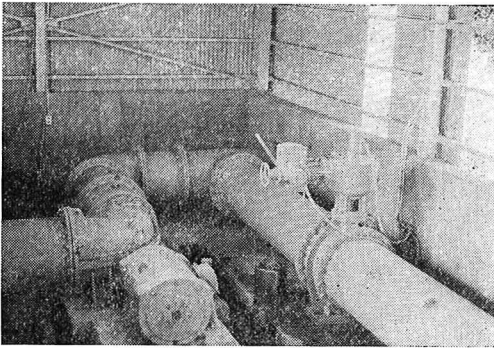


写真-2 軸流ポンプとバタフライバルブ

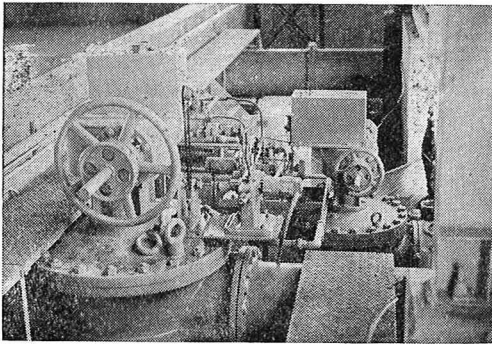


写真-3 ロートバルブ

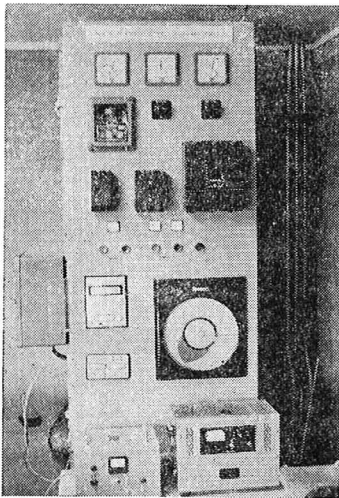


写真-4 自動制御装置

およびそのバルブ開度制御用の自動制御装置(写真-4)の6つの部分から成っており、先に発表された装置¹⁾の一部を改造したものである。図-2に示すように実験用の水路および斜面は高水槽(コンクリート製の平面水槽)の中に、斜面はコンクリート、側壁はブロックで造られている。斜面勾配は 1/50, 1/30, 1/20, 1/10, 1/5 の5種類である(図-2)。波高計は $\phi 3$ mm のステンレス製丸棒(長さ 200 mm; 写真-5)を用いた抵抗線式である。斜面のり先での測定方法(写真-6)については

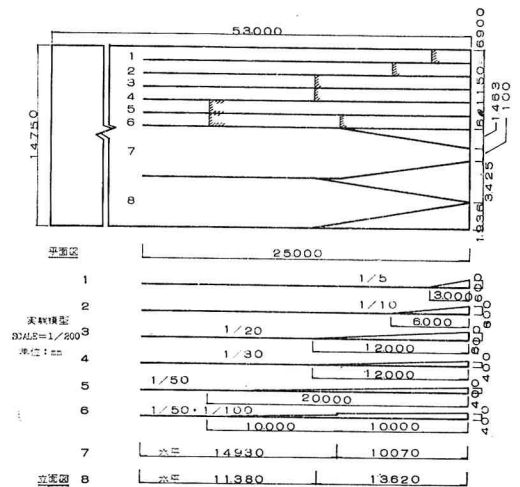


図-2 実験水路および斜面

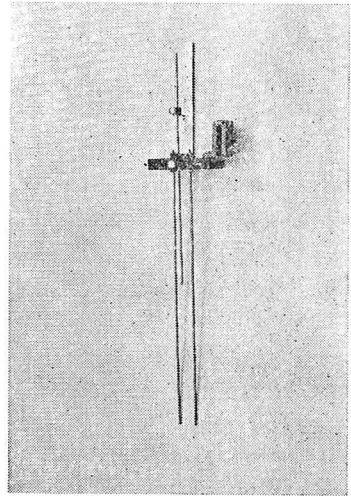


写真-5 抵抗線式波高計

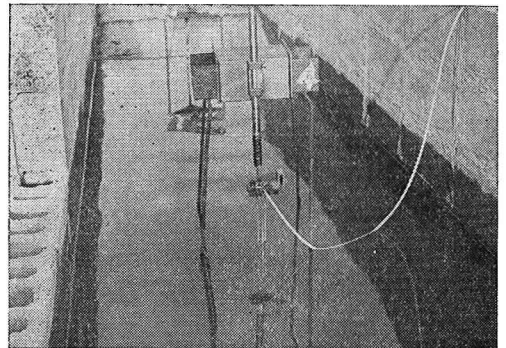


写真-6 斜面のり先での設置状況

説明するまでもないから、汀線から陸上部での測定方法について述べることにする。まず市販の登山用組合せコップ(平均径約 60 mm, 高さ約 80 mm)をコンクリート床に上蓋が斜面に沿うようにていねいに設置した。上蓋には $\phi 3$ mm で間隔が 20 mm の2本の丸棒(写真-

5) がうまく挿し込めるように、径 4 mm の 2 つの小孔を 20 mm 間隔であけてある。また上蓋はとりはずして、中の内コップをとり出すことによって中に溜ったゴミを掃除することができるようになっている。calibration は図-3 のように直径 200 mm、高さ 300 mm ほどの円筒状の容器(写真-7)の中に、斜面上と同様の状態でコップをコンクリート中に設置した状態にして、一杯の水を入るとちょうど水深が 1 cm 増すような容量のコップで 1 cm (正確には上部と下部で水深にして 0.1 mm の差がある) ずつ水位を上げることによって行なった。その模様を写真-7 に示す。次に、先端の遡上速度は 16 mm シネカメラにより 24 コマ/sec で撮影したが、これを profile projector で 10 倍に拡大して 1 コマずつ読みとった。また、陸上遡上高は目測した。

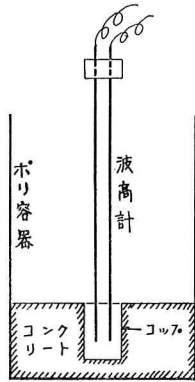


図-3 Calibration 用器具

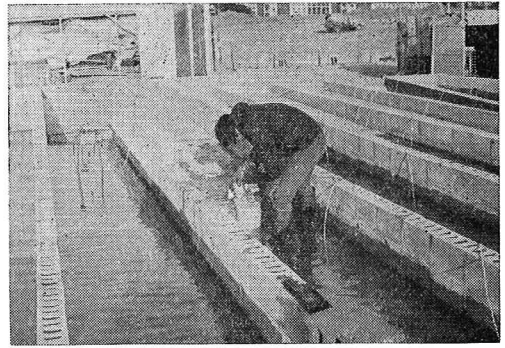


写真-7 Calibration の模様

(2) 実験波の諸元

模型縮尺は縦横ひずみなしの 1/100 程度で考えているので、水深が 20~30 cm、波高が 3~8 cm、周期が 6~20 sec (6 sec ごと)、72~120 sec (12 sec ごと)、144 sec (24 sec ごと) の正弦波状の一山の波を与えた。これは原型で水深が 20~25 m、波高が 3~8 m、周期が 1~28 min なる湾内津波を想定していることになる。波形は周期によって異なるが、斜面のり先と汀線で記録された代表的な例を 3 つ 図-4、5、6 に示す。

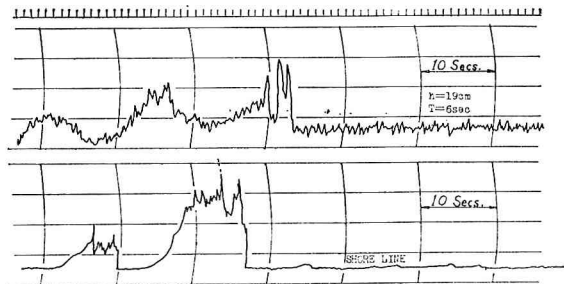


図-4

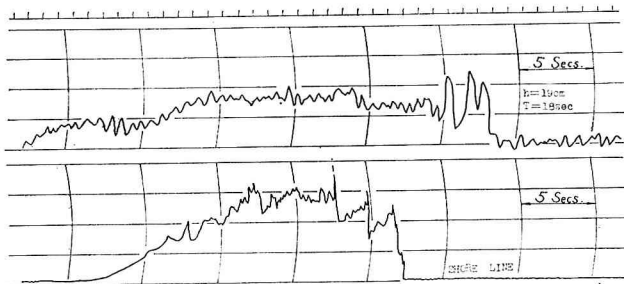


図-5

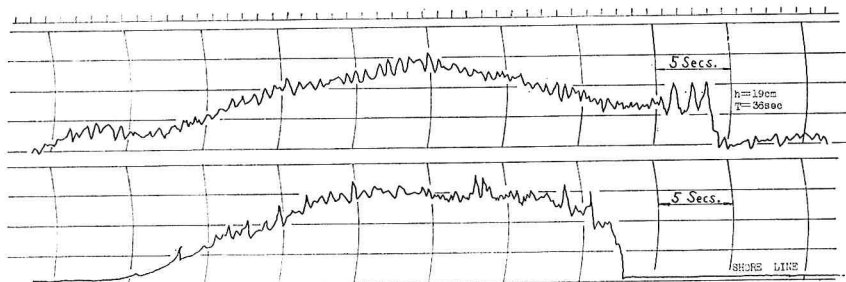


図-6

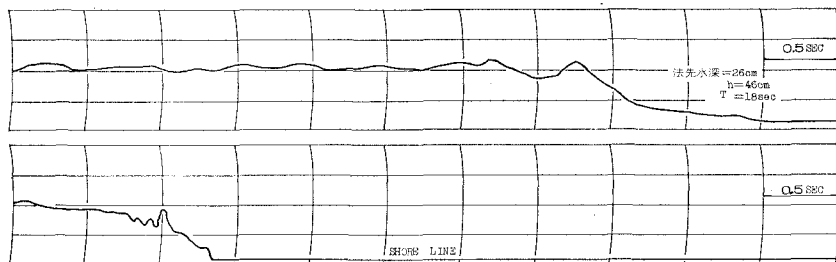


図-7

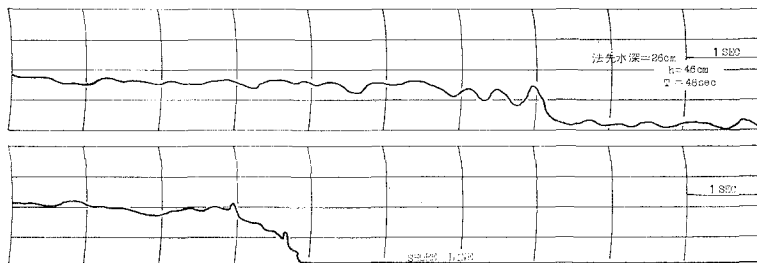


図-8

3. 測定結果とその考察

(1) 陸上遡上波の先端条件

筆者らは前報⁹⁾において陸上遡上津波の先端条件はフルード数が2であることを理論的に提案したが、今回はそれを実験的に証明することができた。まず、先端の遡上速度は目で見える程度なので通常コマ(24コマ/sec)で撮影したが、先端が波高計にかかる瞬間のコマでの位置を中心として、その前または後のコマまでの位置の差(3コマ間ではその平均差)を移動距離として、それを24倍して速度を出した。

次に、先端波速については、先端波高のとり方によって大分違った結果が出てくる可能性が大きいが、従来先端波高を波高計で直接測定した例は Kaplan¹⁾, Cross¹⁰⁾ に見られるが、他にはあまり見当たらないようである。筆者らの波高記録では、たとえば 図-7, 8 に先端部のみが示されているが、先端波高らしいものが階段状に明瞭にとらえられている。図-4, 5, 6 のように 2.5mm/sec または 5mm/sec の紙送り速度ではこのような step がかすかにしか現われないので見のがしがちであるが、10mm/sec 以上の紙送り速度であればかなりはっきりと記録される。step が現われる時間は場合によって多少異なるが、おおよそ 1/25 sec くらいで後続波に沿って減衰しているのが認められる。これは侵入波の変形によって発生したクノイド波状振動波($T \approx 1 \text{ sec}$)の砕波によって発生した更なる微小振動の波形のようである。したがって筆者らは、この step の高さが先端の波速を与えるものとみなして、上に述べた先端の遡上速度と比較したのが 図-9 である(図の中で記号 h はのり先水深、 h_f は先端波高、 U_f は先端の遡上速度、 g は重力の加速度である)。●印の BREAKING とは水上で砕波して激し

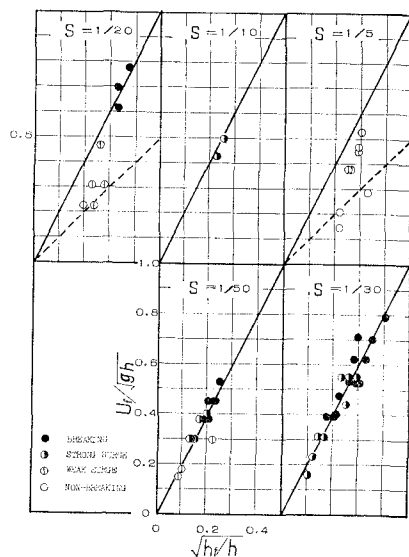


図-9 先端の遡上速度と波速の関係

く乱れて汀線に達したもの、●印の STRONG SURGE とは水上でははっきり観察されるほどの砕波は見られないが、汀線付近で底摩擦効果により明確に乱れが観察されたもの、①印の WEAK SURGE とは汀線付近での乱れは観察されないが、記録の上で SURGE と判定される乱れが見られるもの、そして○印の NON-BREAKING とは観察でも記録でも先端が切立った SURGE のような乱れが見られず、ジワジワとゆっくり遡上するもの(底勾配が比較的緩やかで周期の長いもの、または底勾配が比較的急なために周期がそれほど長くなくても重複してしまうもの)等の意味である。実線は筆者等の提案した先端条件($F_r=2$)を示しているが、実験結果と非常によく一致している。点線は先端付近の

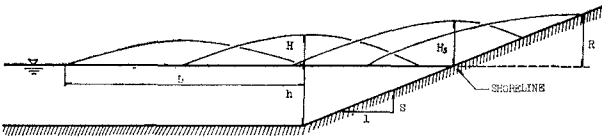


図-10 記号説明図

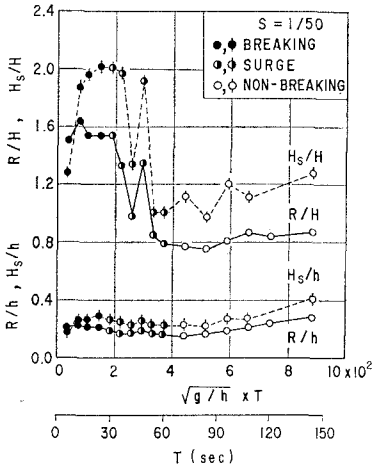


図-11

乱れが激しくない場合に成立つとして Abbott¹¹⁾ が提案した先端条件 ($F_r=1$) を示している。 $S=1/5$ の場合は $1 < F_r < 2$ となっている。しかし、この場合については深く立入らないことにするが、少なくとも砕けるか SURGE 状を呈する津波の先端条件には底勾配による変化はないといえよう。

(2) 汀線波高と陸上遡上高の関係

従来、津波が岸に押寄せた際の海岸または陸岸での dynamic effect を考えた実験では、分散波¹⁾、完全に発達した bore および孤立波^{6), 7), 12)} 等によるものが多いが、周期が数 10 秒程度での実験は岸¹³⁾ の周期波によるもの他にはあまり見あたらないようである。数分程度になると相対波高を大きくすることは分散波列を生成する可能性があってやっかいなので、縮尺を小さくとした微小振幅波動的な static な実験が多いが、その中で松村¹⁴⁾ の実験は周期が長い割に相対波高も比較的大きいので注目に値すると思われる。松村は入力した長周期波の変形によるクノイド波状振動波形についてかなり詳細に考察しており、そのような振動を含んだ津波の陸上遡上実験では注意すべきことを示唆している。

これは図-4~8 ののり先波形を見てもわかるように、筆者らの実験でも予測されたとおりであって、図-10 に示す記号のとり方に対して、たとえば図-11 で周期が 60 sec 以内の波で見られるように、のり先での水理量から陸上遡上高を見積ることは、進行波性が強いために進行するに伴う変形が場合によって著しく異なるので不可能(というよりはほとんど無意味)であるといえよ

う。しかし、同じく図-11 でいえば 60 sec 以上の波で見られるように、重複波性の強い波では、汀線水理量から陸上遡上高を見積ることの可能性が予想される。もう一つ図-11 で注目されることは、実線で結ばれた相対遡上高 (R/H , R/h) と点線で結ばれた相対汀線波高 (H_s/H , H_s/h) の間の比が 30 sec 以上ではほぼ一定であるように見えるが、これは他の $S=1/30$, $1/20$ の勾配でもほとんど同じように見られる傾向である。

したがって、このような観点から整理したのが図-12, 13, 14 である。 $\sqrt{g/h} \times T > 2$ なる範囲では相対遡上高 (R/H_s) は周期が長くなるにつれてわずかに減少する傾向が見られるが、ほぼ一定でかつ 1 に等しいかそれよりも小さい。すなわち、遡上高は周期にはほぼ無関係に汀線波高に比例しかつそれ以下であるといえる。ただし、筆者らの実験ではコンクリート床なので底摩擦効果もかなり大きいと思われるので、($f=g/C^2 \approx 0.01$) 比例定数を出すほどの意味はないであろう。 $\sqrt{g/h} \times T < 2$ の範囲では周期の影響が非常に著しく、このような図では特性を見出すことができない。

図-15, 16, 17 はのり先水深 (h) から、 $L=\sqrt{g/h} \times T$ として波長を求め、相対遡上高 (R/H_s) に対する

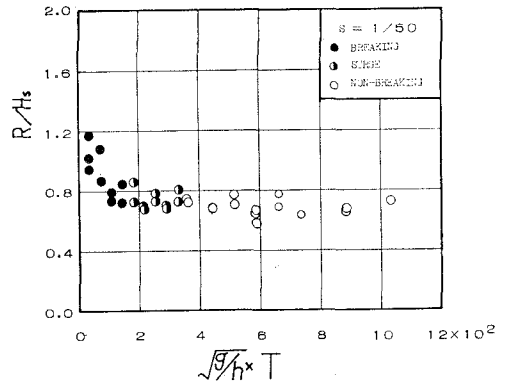


図-12

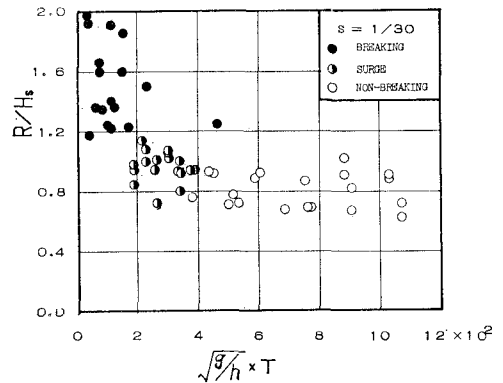


図-13

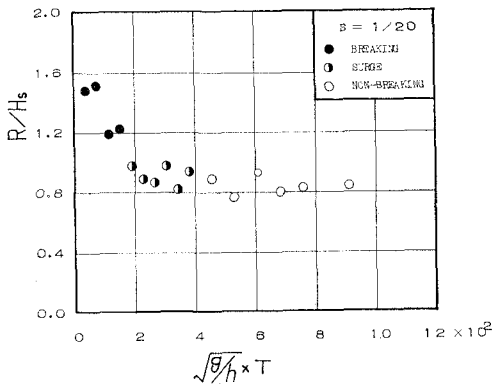


図-14

の波形勾配 (H/L) による変化はごくわずかで、ほぼ一定とみなされるようである。すなわち、 $H/L > 10^{-3}$ なる範囲の砕波進行型津波の場合の遡上高は汀線波高の2倍に等しいかそれ以下であり、また、 $H/L < 10^{-3}$ なる範囲の surge または非砕波の遡上高は波形勾配にもほぼ無関係に汀線波高に比例しかつそれに等しいかそれよりも小さいことが確かめられた。

しかし、砕波による遡上については 図-4~8 の波形を見てもわかるように、一定水深の中を進行してきたクノイド波状の分散波列が斜面上で shoaling 効果により増幅した結果、第1波目から第2波目、第3波目、…と砕けながら遡上してゆくような変形の著しい波の「波形勾配」といったものによる整理には多少疑問が残る。観

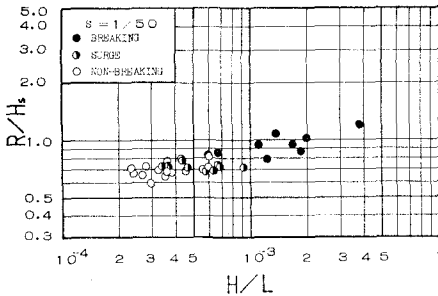


図-15

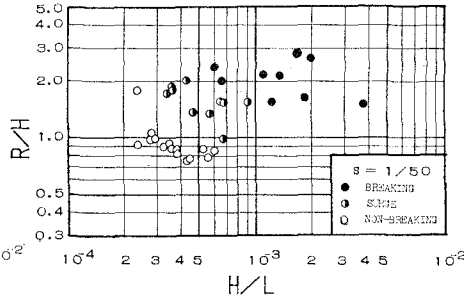


図-18

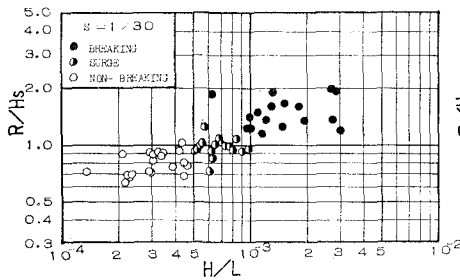


図-16

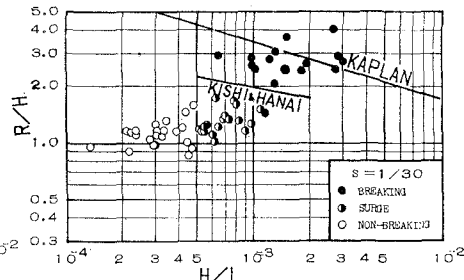


図-19

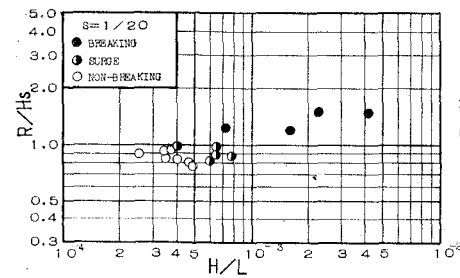


図-17

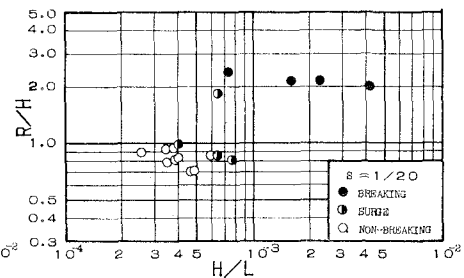


図-20

波形勾配 (H/L) の効果を見たものである。ほぼ $H/L = 10^{-3}$ を境として、 $H/L > 10^{-3}$ で砕波変形の著しい領域の波による遡上と $H/L < 10^{-3}$ で surge または非砕波でほとんど変形しない領域の波による遡上とに分けられるようであり、それぞれの領域での相対遡上高 (R/H_s)

察によれば、周期が 6~12 sec の場合は第1波目、18~24 sec の場合は第2波目または第3波目の連続的な砕波による遡上高が最大(すなわち、先端の遡上速度が成分波が砕けて先端に出る度に加速されるため)で後続波の最高点の影響はあまり受けないうであり、次いで30sec くらいで弱い砕波状態となり、後続波の最高点による遡上が最大となるような傾向が見られた。それは 図-11 の R/h , H_s/h の変化の仕方を見てもおおよそかわれるであろう。

(3) のり先波高と陸上遡上高の関係
筆者らの実験結

果を Kaplan¹⁾ や岸¹³⁾ が行なったと同様の仕方で整理してみたのが、図-18, 19, 20 である。前の 図-15~17 に比較して全体にバラツキが大きいが定性的な傾向はよく似ている。しかし、砕波による遡上の領域と surge または非砕波による遡上の領域との区別が底勾配によ

て異なっているので判別しにくいし、したがって一定の傾向が見出し難くなっている。図—19には Kaplan と岸の実験曲線を入れてあるが、砕波による遡上高はおおよそ Kaplan の実験曲線上に群がっている。Kaplan は分散波列の第1波目の先端から最高水位が現われるまでの距離の2倍を「波長」と定義しているが、波高についてはとくにふれていないので確かなことは知るべくもないが、「波長」の定義からして「波高」は第1波目の静水面上の最高水位をとっているものと解釈される。したがって、筆者らの取扱い方(図—10)と同じ考え方で1山の波を対象にしているものと推察される。また、Kaplan は第1波目の波による遡上高が最大であると述べているが、上に述べたように $H/L=1.5 \times 10^{-3}$ (たとえば $h=25\text{cm}$, $T=12\text{sec}$, $H=2.82\text{cm}$ の場合) では第1波目の砕波による遡上高が最大であるように観察された事実とよく一致している。しかし、そもそも実験波が違うので、これ以上の吟味をしても意味がないであろう。

4. 結 論

以上に、津波を正弦波状の1山の侵入波とみなして、のり先および汀線における水理量と陸上遡上高の関係を、底勾配が1/50, 1/30, 1/20の3つの場合の実験結果に基づいて定性的に考察してきたが、「津波の汀線における水理特性と陸上遡上」の関係については、少なくとも筆者らの行った実験範囲内では次のように結論できる。

(1) 陸上遡上津波の先端条件は、先端部での乱れが大きくて明らかに surge となっている場合は $F_r \approx 2$ であり、筆者らの理論的先端条件を裏づけることがわかった。

(2) 津波の陸上遡上は、海上で激しく変形して shoaling の結果、汀線に達する前に先端部付近が海上で砕けて砕波進行型津波となって激しく乱れて遡上する場合 ($\sqrt{g/h} \times T < 2$, $H/L > 10^{-3}$) と海上での変形はそれほど激しくないが、shoaling の結果、海上では砕けなが進行波性が弱いので汀線の直前または陸上で先端部が surge 状に乱れているか、あるいはほとんど乱れないで比較的ゆっくりと波形がほとんど変形しないで重複波型津波となって遡上する場合 ($\sqrt{g/h} \times T > 2$, $H/L < 10^{-3}$) と大きく2つに分けて取扱うのが都合がよい。

(3) (2)の前者の場合、相対遡上高 (R/H_s) は無次元周期 ($\sqrt{g/h} \times T$) により著しく変化するが、のり先波形勾配 (H/L) の影響はごくわずかで、ほぼ一定でかつ2以下である。

(4) (2)の後者の場合、相対遡上高 (R/H_s) は無次元周期 ($\sqrt{g/h} \times T$) と波形勾配 (H/L) によってわずかに影響されるが、ほぼ一定でかつ1以下である。

(5) したがって、自然の湾奥の汀線付近の津波の痕跡高と湾内周期がわかれば、底勾配はわかっているから、陸上遡上高は大体推定できる見通しが得られたわけであるが、くわしくは特性曲線法等による数値計算によらざるを得ないであろう。

最後に、この研究は昭和44年度文部省奨励研究(A)の助成金の援助を受けたことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Kaplan, K. : Generalized Laboratory Study of Tsunami Run-up, B. E. B. Tech. Memo., No. 60, 1955
- 2) Witham, G. B. : On the Propagation of Shock Waves through Regions of Non-uniform Area or Flow, J. F. M., Vol. 4, 1958, pp. 337~360
- 3) Keller, H. B., D. A. Levine and G. B. Witham : Motion of a Bore over a Sloping Beach, J. F. M., Vol. 7, 1960, pp. 302~320
- 4) 福井芳朗・中村充・白石英彦・佐々木泰雄 : 津波の研究(II)一段波津波の堤防におよぼす影響—第9回海岸工学講演会講演集, 昭 37. 10, pp. 50~54
- 5) Freeman, J. C. and B. L. Mēhauté : Wave Breakers on a Beach and Surges on a Dry Bed, Proc. A. S. C. E., Vol. 90, No. HY 2, 1964, pp. 187~216
- 6) Kishi, T. and Saeki, H. : The Shoaling, Breaking and Run-up of the Solitary Wave on Impermeable Rough Slopes, Proc. 10th Conference on Coastal Eng., Tokyo, Japan, 1966, Vol. 1, pp. 322~348
- 7) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一 : のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究, 第13回海岸工学講演会講演集, 昭 41. 12, pp. 198~205
- 8) 岩崎敏夫・楊沢民 : 長波の研究用造波装置とその特性について, 第13回海岸工学講演会講演集, 昭 41. 12, pp. 230~235
- 9) 岩崎敏夫・富樫宏由 : 遡上津波先端の境界条件と計算法, 第16回海岸工学講演会講演集, 昭 44. 12, pp. 359~364
- 10) Cross, R. H. : Tsunami Surge Forces, Proc. A. S. C. E., Vol. 93, No. WW 4, November 1967, pp. 201~231
- 11) Abbott, M. B. : On the Spreading of One Fluid over Another, Grenoble, La Houille Blanche, 6, 1961, pp. 827~846
- 12) Iwasaki, T. and Togashi, H. : On the Overland Flow of Tsunami and Effectiveness of Wall as a Counter Measure, Proc. 11th Conference on Coastal Eng., London, England, 1968, Vol. II, pp. 901~919
- 13) Kishi, T. : Transformation, Breaking and Run-up of a Long Wave of Finite Height, Proc. 8th Conference on Coastal Eng., Mexico, 1962, pp. 60~76
- 14) 松村圭二 : 高潮及び津波に関する研究, 昭和38年度海岸事業調査費報告書, 建設省土木研究所