

直立壁による反射津波段波の水理と波力のメカニズム

富 樫 宏 由*・古 賀 克 志**

1. はじめに

津波によって構造物が破壊する場合、一つの原因として津波が構造物に直接的に作用する圧力による場合が考えられるが、そのような津波は相当規模の大きな津波であろう。本研究は、津波が汀線の近くで先端付近から砕けて段波となり、河川に遡上して水門、橋梁等に衝突したり、あるいは陸上に遡上して防浪堤、防潮壁または建物等に衝突する場合の津波段波を対象として、直立壁モデルから反射重複した津波段波の水理機構とそれによって直立壁モデルに作用する波力の発生機構について実験的に究明することを目的とする。

2. 実 験

装置は、気圧式造波装置とそれに接続する長さ 60 m の 2 次元波動水槽からなりそれに 図-1 に示す $S=1/50$,

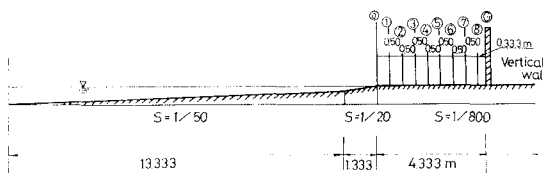


図-1

1/20 なる 2 種類の海底勾配と $S=1/800$ (図-1) または $S=1/600$ (図-6) なる 2 種類の河床または陸上勾配を組み合わせた複合型海岸の底床モデルを設置して行った。斜面法先で与えた波形は孤立波状の一山の正弦波である。斜面上に入射した波は 1/50 斜面の終端付近から 1/20 斜面上で砕けて段波となり、ほぼ水平に近い緩斜面上を激しい流勢をもって遡上して直立壁モデルに衝突する。問題は津波の非定常性の影響である。それを調べるためには直立壁前面の波高、流速および壁面波圧の同時測定記録が必要である。そのために、測点を直立壁設置地点およびその前方の数箇所にとり、また各地点ごとに流速測点は鉛直方向に高さ 5 cm ごとに数点とって断面平均流速を求めた。

(1) 完全反射重複段波の解析

津波の段波に限らず、段波に関する研究は特に新しいことではなく、従来すでに Stoker を初めいくつかの研究があるが¹⁾²⁾、これらはいずれも段波の波高増幅率の評価が主眼であって、流速の評価は実験上の難しさゆえに直かに検証した例はほとんど見あたらない。図-2 は

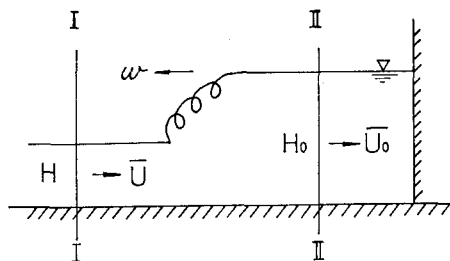


図-2

直立壁からの完全反射重複段波の模式図であり、この場合の段波の条件は

$$\rho H(\bar{U}-w)-\rho H_0(\bar{U}_0-w)=0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\rho H(\bar{U}-w)\bar{U}-\rho H_0(\bar{U}_0-w)\bar{U}_0=\frac{\rho g}{2}(H_0^2-H^2) \quad \cdots \cdots (2)$$

と表わされる。ここで、 U , U_0 は検査面 I, II の点流速, $\bar{U}$, $\bar{U}_0$ はそれらの断面平均流速を表わす。 ρ は密度, g は重力の加速度である。上式を解き、壁面波力を推算するために $\bar{U}$ と $\bar{U}_0$ の関係を見出すことが要点である。測定結果の一例が 図-3 である。 $\bar{U}_0$ は一般に測点の壁面からの距離によって多少異なっているが、この例のようにほぼ正の値であって、決して常に 0 にはならない。

従って、ここでは津波段波の流量の非定常性を考慮して、図-2 の検査面 [I~II] の間に次式のような関係

$$H_0\bar{U}_0=kH\bar{U} \quad \cdots \cdots (3)$$

を仮定し、係数 k を実験によって定めることにした。逆にこれが定まれば、式 (1)~(3) は H , $\bar{U}$ を既知として解くことができる。 $m=H_0/H$ とおけば次式が得られる。

* 正会員 工博 長崎大学教授 工学部土木工学科

** 工修 (株)東京久栄 技術センター

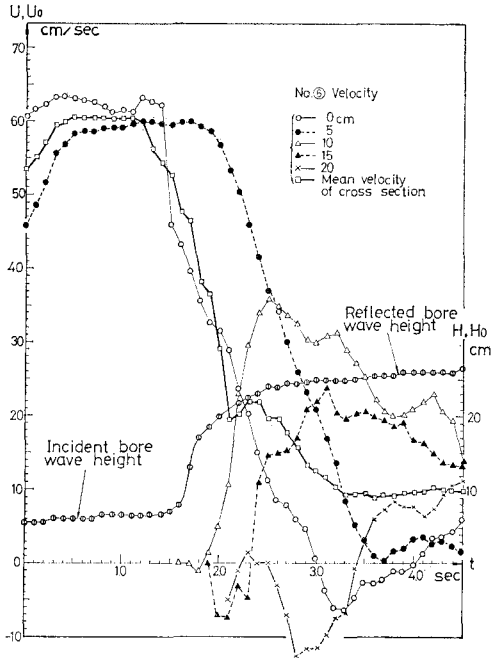


図-3

$$\frac{gH}{2\bar{U}^2} m(m+1)(m-1)^2 - (m-k)^2 = 0 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、上式の係数 $gH/2\bar{U}^2$ は入射波の Froude 数を $Fr = \bar{U}/\sqrt{gH}$ とおけば、 $gH/2\bar{U}^2 = 1/2Fr^2$ であり、 $m > 1$ であるから、 m は Fr 数の関数として容易に求められる。なお、 $k=0$ ならば、結果は Stoker の解と一致する。

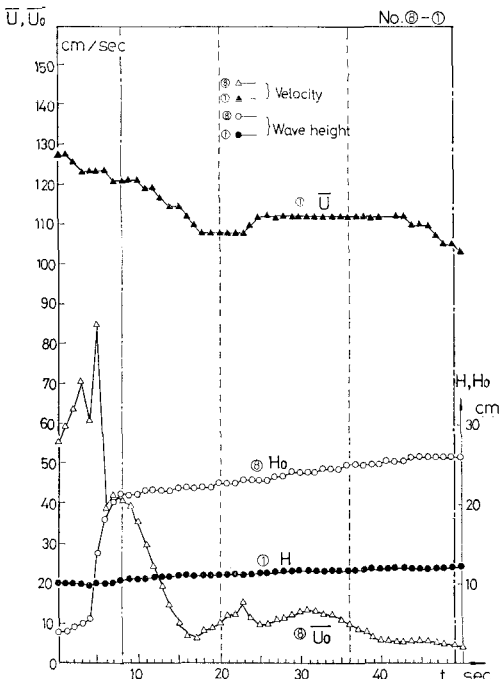


図-4

図-4 は H , $\bar{U}$, H_0 , $\bar{U}_0$ の経時変化曲線の一例である。この中で一点鎖線または破線で挟まれた区間は測点①~⑧が図-2の検査面 I~IIに相当する場合を示す。 H_0 は 0.8 sec 付近で形成されるが、 $\bar{U}_0$ はこの時点ではまだ過渡状態にあって、約 1 sec 程度の位相遅れがあった後に反射段波の流速に落ち着くようである。従って、測点①の $\bar{U}$ の変動も照合しながら、両者が比較的安定していると思われる破線で挟まれた区間で 0.1 sec 間隔に読み取って式(3)を満たす k を算出し、同様の仕方で測点その他の実験条件を変えて総合した平均的な k を求めた。その結果は、

$$k=0.23$$

となった。これを式(4)に代入して得られた理論曲線が図-5の実線であり、実験結果を比較的よく説明している。

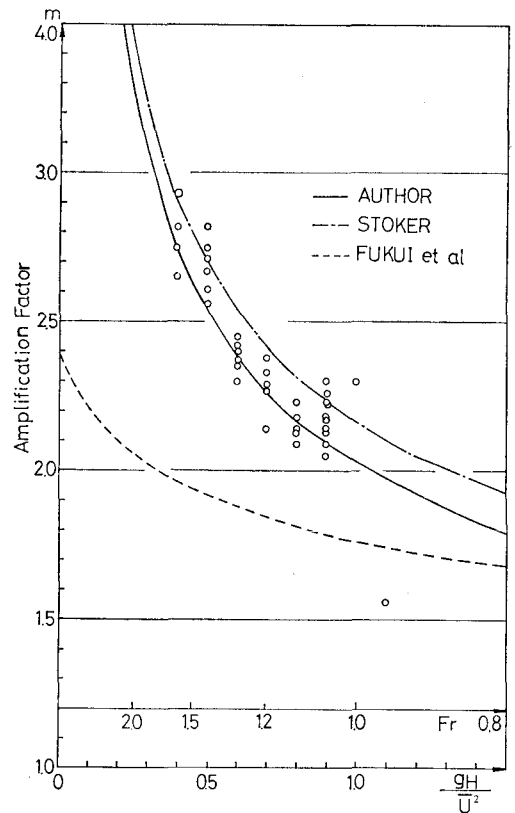


図-5

る。 $k > 0$ となるのは、津波段波の時空間的変動が大きいため、反射した流量の一部が反射段波の波高増大に寄与している時空間で測定した結果ゆえであろう。なお、この場合の $\bar{U}_0$ の大きさは、図-3, 4 からわかるように 10 cm/sec 前後かそれ以下であり、圧力水頭にして数 mm のオーダーで静水圧の 1% 程度となり、圧力測定の結果もほぼ同様で、壁面の動的波力は非常に小さく、静水圧に較べて無視できるという結果を得たが、図は省略する。

(2) 部分反射重複段波の解析

直立壁の高さが有限で、越流する場合の反射段波の波力は、静水圧に10~30%程度の動水圧が付加されることは津波防潮水門の事例研究の結果わかっていたが³⁾、その波力の発生機構は不明であった。この場合の実験斜面は、図-6に示すように変え、直立壁モデルは汀線から

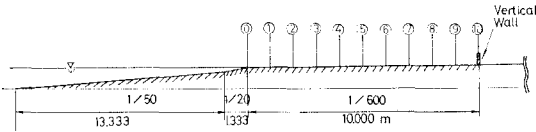


図-6

10.0 m の位置とし、壁高は壁がない場合のこの地点の最大入射波高 $H_{max}=8$ cm に対応して、 $H_a=4, 8, 12, 16$ cm の4種類とした。図-7は壁直前10 cm の位置で

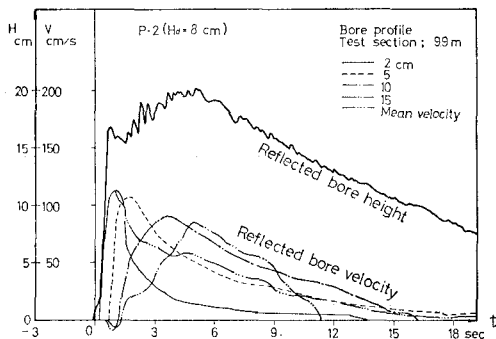


図-7

の波高と流速の時間変化曲線の一例であるが、断面平均流速は水底床面上2, 5, 10, 15 cm の高さ4点の平均をとっている。ただし、波高が小さくて流速計にかからない場合は3点以下の平均値となる。なお、以後の図においては、入射波の surge front が直立壁に衝突した瞬間を $t=0$ としてある。図-7 および 図-8 (a), (b) は $H_{max}=H_a$ という今日よく見られる標準的な壁高の例であるが、図-8の(a)は波高、(b)は断面平均流速の各測点ごとの記録を重ね合わせて示したものである。直立壁がない場合の測点⑧の波高と流速を実線で示してあるが、これを基準波形として input した場合に直立壁による反射

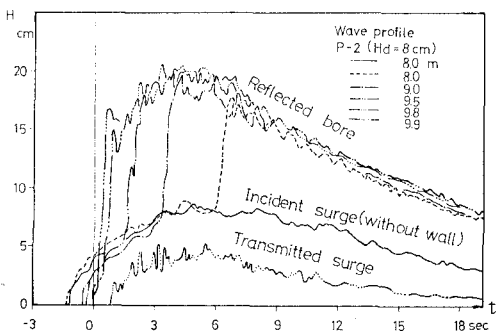


図-8 (a)

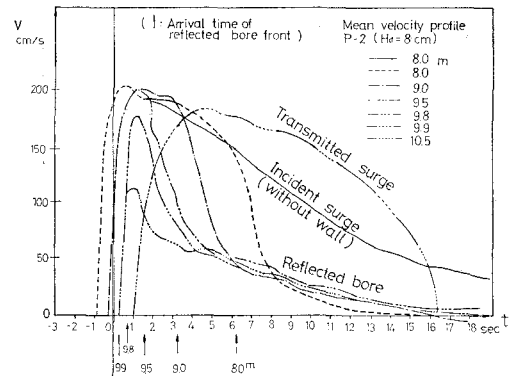


図-8 (b)

段波と壁頂越流後の通過伝達波の波形が各測点にどのように output されるかが一見してわかる。図-8 (a)を見ると、各測点の入射波形に反射段波の先端 (shock front) が到達した瞬間から約1 sec 後には段波の波形が形成されるが、図-8 (b)に示す流速は横軸の下に矢印で示す shock front の到達時刻から2~3 sec 後にやっと段波の流速らしい比較的安定した流速に落着くようであり、波高と流速の時間的位相のずれがここでも明瞭に現われている。これは、壁面に動的波力を与える流速の場所と時刻を的確に把握するうえで非常に大切なことである。すなわち測点⑧に shock front が到達するのは6 sec 前後であるが、壁面に動的波力を与えると思われる shock front 背後の段波の流速としては、他の測点の流速ともほぼ一致してくる8 sec 後の流速と見るべきであろう。換言すれば、測点⑧に shock front が到達した時点 ($t=6$ sec) で、壁面に動的波力を与える流速はより壁面に近い地点9.0, 9.5, 9.8, 9.9 m の6 sec 以後の流速であることが見てとれる。しかし、これは流速評価の判断基準の一応の目安ではあるが、必ずしも機械的にいつともなうとは限らない。特に測点が壁面に近くなるとガボについて複雑になるので、shock front の位置、波高、流速および空間波形の変化等を照合しながら、総合的に判断する必要がある。図-9は、例えば測点を9.0 m に

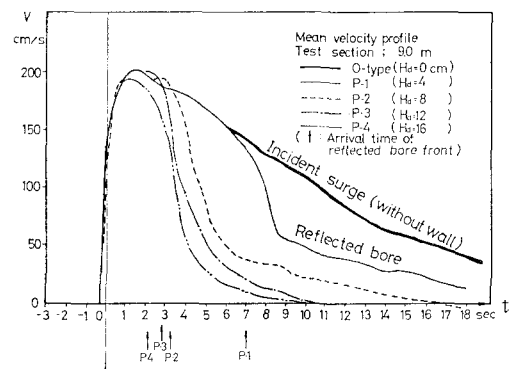


図-9

特定した場合の壁高による流速変化を示したものであるが、図は省略するが他の測点でも同様で、壁高による影響を明瞭に把握できる。図-8, 9 等によれば、直立壁の設置点（この場合は 10.0m）と壁高が与えられていれば、壁前方の適当な地点での壁がないときの入射波の波高と流速から、壁を入れたときの反射段波の波高と流速が得られるので、壁前方の適当な地点（この場合は 8.0, 9.0, 9.5m）に反射段波の shock front が到達する時点を目安として、その地点と壁との中間付近の地点（この場合は、9.0, 9.5, 9.8m または 9.9m）での流速曲線の中で shock front 到達時点前後から以後の値に着目すれば、これが壁面に動波力を与える反射段波の流速とみなしてよいように思われる。このような観点で読み取った各測点の断面平均流速と加速度から抗力と慣性力を算出し、その合力を壁面に作用する波力の計算値として、波圧計による測定値（静水圧を差引いた値）と比較したのが図-10~13 である。この中で、9.9m 地点の計算値には適用限界とみなされる時点で短い鉛直線を引いてある。妥当な推算波力はこの時点以後の値であり、以前の値は流速から機械的に算出したものを、少なくともその一部は波力の発生に寄与している筈であるという意味で参考のために画いてある。しかし、この範囲の流速をもった水粒子は、そのすべてが壁面に衝突して動波力を発生させることはなく、一部はそのまま越流するかあるいは splash up するかして、実際は反射段波が形成される前かその過程の現象によるものである。すなわち、壁高が小さいほど 9.5m 地点に shock front が到達する時間が遅く、段波の形成にそれだけ長く時間がかかっていることがそれを物語っている。ところで、非定常流の抗

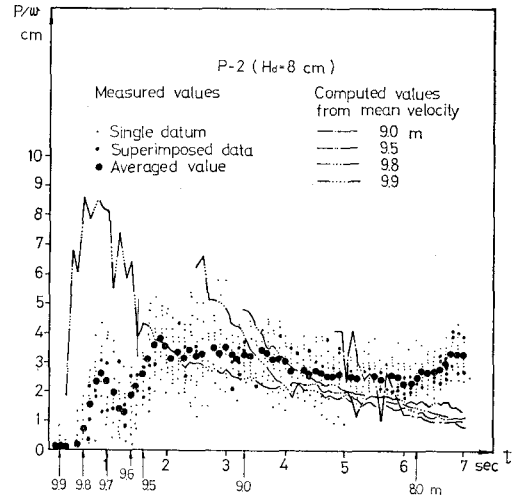


図-11

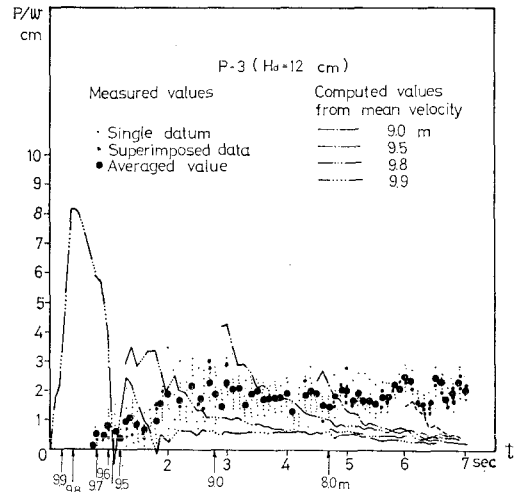


図-12

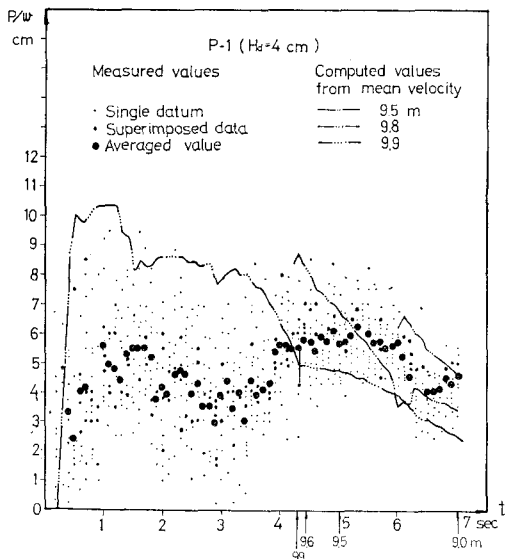


図-10

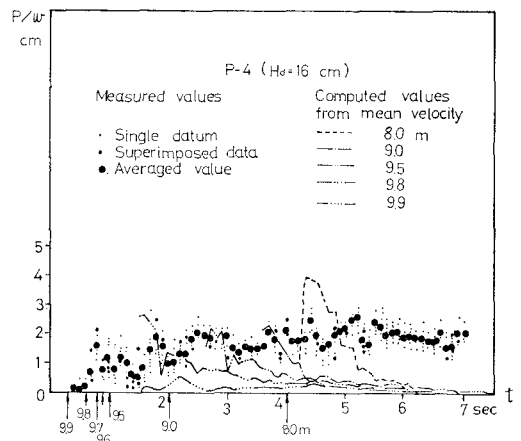


図-13

力係数と質量係数はこのような実験的解析では到底分けて追跡できないので、ここでは第1段階として定常流での値を用いることにし、特に抗力係数は定常流での類似の例から推定して一定値と仮定した。ここに最大の問題点は残るが、反射段波の断面平均流速からの壁面動波力の推算結果は、実際の壁面動波力の発生機構をほぼ説明しているように思われる。推算値は測点を増やせばこれらの線群の包絡線として得られるはずである。

3. 結 論

(1) 直立壁による完全反射重複津波段波の水理機構を実験的に詳しく調べた結果、反射段波背後の流量は断面平均すると決して常にゼロにはならないことを見出し、これによって理論解析に一つの実験係数を導入し、段波の波高増幅率についての現実的な新たな解を得た。そして、この場合の壁面動波力はほぼ無視できることを指摘した。

(2) 同様に、部分反射重複津波段波の水理機構を詳細に調べ、壁面動波力の発生機構を検討した結果、抗力と慣性力を生じさせていると思われる流速を与える

断面の位置は一定しないで、shock front の進行に伴って壁から次第に遠ざかるように移動していることがわかった。そして、この場合の壁面動波力の大勢は主として抗力によって定まり、慣性力の効果は小さいことがわかった。

謝 辞： 本研究は、文部省科学研究費補助金、自然災害特別研究(I)，計画研究(昭和55～57年度)「陸上に氾濫した津波の挙動と津波の流動による被災のメカニズムに関する研究」[研究代表者：堀川清司東京大学教授]による研究の一部であることを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 福井芳郎・中村 充・白石英彦・佐々木泰雄：津波の研究(Ⅱ)——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，pp. 50～54, 1962.
- 2) 岩崎敏夫・富樫宏由：遡上津波に対する陸堤の効果に関する研究；第14回海岸工学講演会講演集，pp. 179～181, 1967.
- 3) 富樫宏由・山口進吾・平山康志：津波防潮水門の効果と設計波圧について，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 151～155, 1973.