

越波時における護岸後背地構造物に作用する 流体力に関する実験的研究

有川 太郎*・田中 信行**・黒田 豊和***・下迫 健一郎****

高潮時において護岸天端が通常に比べ相対的に低くなり、また地球温暖化による海面上昇や気象変化の影響を受け波高の大きい波の来襲頻度が増加すれば、護岸背後地への被害は今後大きくなると予想される。しかし、これまで低天端での越波量の知見や、越波した水塊の後背地構造物に作用する流体力に関する知見は少ない。そこで、それらに関する知見を得ることを目的として実験を行った。実験では護岸およびその後背地を作成し、護岸上の越波流量の測定ならびに、後背地上にある構造物に対する流体圧の測定を行った。その結果、護岸背後に作用する流体圧は、流量によっては ρQv の2～3倍の圧力になることがわかった。

1. はじめに

地球温暖化の予想される影響のうち、もっとも懸念されているものの一つが、海面上昇である。1995年12月に公表されたIPCC第2次報告書では、このまま何も対策をとらない場合、21世紀末に海面が0.15～0.95 m、概ね0.5 m上昇すると予想されている(三村・原沢, 2000)。現在、大阪湾内の護岸天端高さは、大阪湾最低潮位(O.P.)より4～6 m程度、東京湾においては東京湾最低潮位(T.P.)より2～5 m程度となっている。基本的には最高潮位および偏差に余裕高を加えたものになっており、その余裕高の高さは0.5 mとなっている場所が多い。温暖化により海面が0.5 m上昇した場合、余裕高分だけ天端が低くなることになる。また、近年の台風の大化型により波高の大きい波が護岸に襲来するようになっている。1999年に八代海や周防灘など西日本の沿岸に襲来した台風9918号は、満潮に近い時間帯に高潮が発生したこともあり、家屋の壁などの破壊、一階屋根までの浸水など多くの被害を引き起こした(例えば、河合ら, 2000)。このように、地球の温暖化などの気象の変化により、護岸が相対的に低天端になり、そこに波高の大きい波が来襲する頻度は増加すると予想される。しかし、低天端護岸に対する越波量に関する知見や、越波した水塊が後背地構造物に作用する流体力に関する知見は少ない。そこで、実験によりそれらに関する知見を得ることを目的とした。

2. 低天端護岸上での越波水塊速度・高さ

低天端護岸上での越波水塊の速度および高さを実験により検討する。

(1) 越波水塊の計測方法

越波水塊の護岸上での高さは、デジタルビデオを用いて計測することとした。通常の照明で撮影すると水表面を把握することが困難であったために、水路を暗くして

レーザーを上から照射し、水表面だけ照らすこととした。

(2) 実験方法

実験は、長さ36 m、幅0.48 m、深さ1.3 mの断面水路で行った。勾配1/10の斜面に続いて高さ0.21 mの護岸を設置し、護岸背後に越波ますを配置した(図-1)。護岸上にはプロベラ式流速計、並びに越波ますの中に波高計を設置した。そして、時々刻々越波ますに貯留される量を波高計より求め、それとビデオおよび流速計から算定される流入量とを比較する。護岸前面の水深を0.18 mとし、周期1.5 s、波高0.061 m、0.077 m、0.096 mの3種類の波を造波した。

(3) 画像解析方法

図-2は、護岸上を越波する様子を撮影し、その1コマを抜き出したものである。白く太い曲線が水表面を、細い直線が護岸の上面を表している。なお、ビデオ画像のゆがみは、あらかじめ撮影場所に配置した格子から2次射影補正式を用いて行っている(有川・鈴木, 2001)。

画像解析は次の順序で行う。

1. ビデオで撮影した動画ファイルを一枚ごとの絵に分割する(時間間隔は1/30秒となる)。
2. 各縦列におけるレーザー光の色の輝度値を取得する。
3. 各点の輝度値を、その縦列の輝度値の最大値で割り、0～1までの値に標準化する。
4. 標準化された輝度値の閾値を設定し、閾値を越え

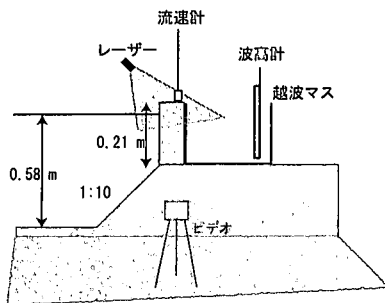


図-1 越波実験断面

* 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
** (株) シバタ工業
*** (独法) 港湾空港技術研究所
**** 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所

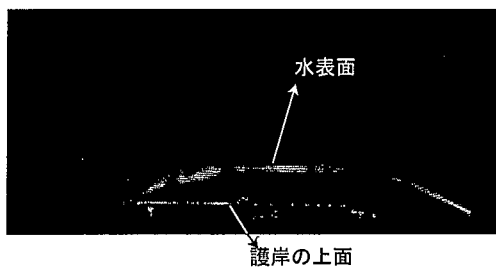


図-2 撮影画像

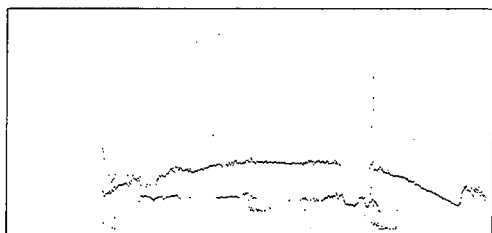


図-3 画像解析結果

た場所に水があるものと考え、越えた場所のうちもっとも高い場所を水表面とする。

ここで、閾値として0.8を基準とした。ただし、輝度値の最大値と最小値に差がない場合は、画像が暗くぼんやりしているために、閾値を0.95とした。本研究では、標準化する前の輝度値の最大値と最小値の差が20以下の場合にそれを適用した。さらに、その差が10以下の場合は判別困難であるために、その列は無視することとした。

画像を解析した結果を図-3に示す。多少うまく取れていない列があるものの、全体として水表面が正確に再現されていることがわかる。

(4) 越波流量の検討

図-4は、越波ますの中にある波高計の時系列データ η_{m-dv} (m)、および2秒間の移動平均データを示したものである。この移動平均データから1.5秒ごとの差をとり、1波の間で貯留される水の量 $\Delta\eta_{m-wg}$ (m) とした。

図-5にデジタルビデオにより計測した護岸上での水

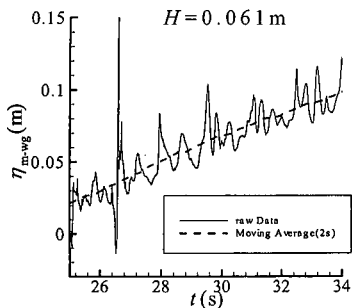


図-4 越波マスの中の水位

位 η_{dv} (m)、流速計による流速 v (m/s)、およびそれらを掛け合わせた越波量 q (m³/s/m) も同図に示す。 η_{dv} において、突然0付近になっているところが数カ所あるが、これは水面形状によってはレーザー光がうまく反射されず、そのために画像が暗くなってしまったためである。

このように算定された越波量 q (m³/s/m) を、ますの幅 B_m (m) で割ると、マスの中の水位の上昇速度 (m/s) となる (図-6上)。それを時々刻々積分するとますの中の水位 (換算水位) η_{m-dv} となり、それと波高計から測定される1波ごとの水の高さ $\Delta\eta_{m-wg}$ を時系列で比較したものが、図-6の下図である。それを見るとデジタルビデオより算定された水位 η_{m-dv} の方が1割程度大きくており、時間がたつにつれてずれが大きくなっている。

図-7は各波高での1波毎の貯留される水の量について、デジタルビデオ $\Delta\eta_{m-dv}$ と波高計 $\Delta\eta_{m-wg}$ とを比較し

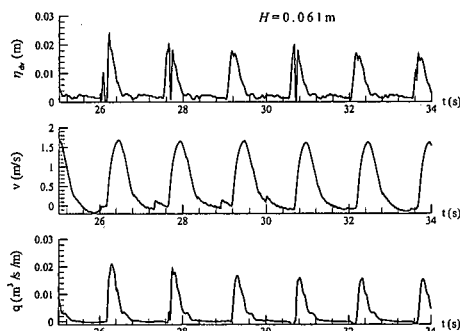


図-5 護岸上での高さ、流速、および流量

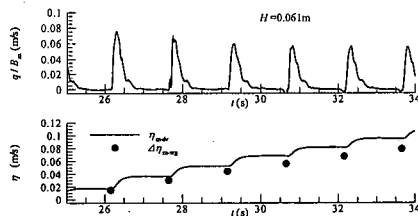


図-6 換算水位上昇速度 (上図)、換算水位と波高計水位の比較 (下図)

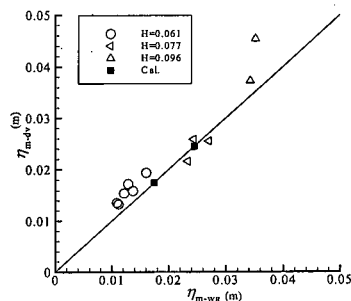


図-7 換算水位と波高計水位の1波ごとの比較

たものである。図中でCal.で示されているのは合田 (1985) の越波量算定表から求めたものである。ただし、範囲外であったために外挿している。これを見ると $\Delta\eta_{m-av}$ の方が、1 割程度大きくなっていることがわかる。その原因のひとつとして、解像度の粗さが考えられる。これらより、全体としては実験値と整合しており、本手法の妥当であることがわかった。

(5) 護岸での水塊の高さと速度

(4) において、護岸での水塊の高さと速度を用いて、越波する流量を測定することが可能であることがわかった。そこで、実験結果をもとにその高さと速度を算定する手法を検討する。図-8 に、高さなどの変数を定義した模式図を示す。

まず、長方形せきの考え方をを用いて η_c を算定することを試みた。合田ら (1975) は実験より護岸前の波峰高 η_c について、

$$\eta_c = KH \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \min \left\{ 1.0 + a \frac{H}{h} + \frac{b}{K_{sb}} \left(\frac{H}{h} \right)^2, 10 \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

としている。ここで、 $a=1.0$ 、 $b=0.8$ である。 H は護岸前面の波高で、ここでは、線形の浅水係数を用いて、 $H = k_s H_0$ とした。 H_0 は沖波換算波高である。この関係を見るために、護岸前面の波峰高を 3 つの波高のケースそれぞれについて比較したものが図-9 である。それぞれ、3 回テストを行った。これより、

$$\eta_c = \alpha_c KH \quad \dots\dots\dots (3)$$

とし、 α_c は、非線形性を表しているものと考えられるが、本実験の範囲内では 1.2 とした。

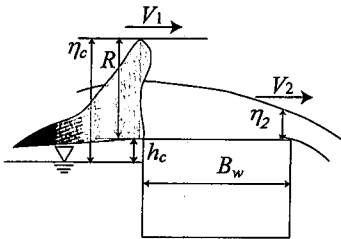


図-8 水塊の模式図

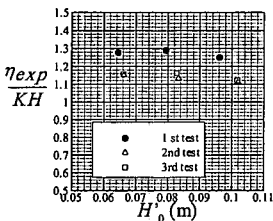


図-9 護岸前の波峰高の計算値との比較

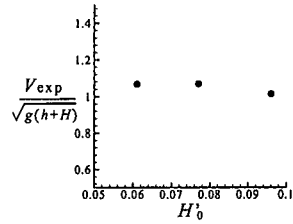


図-10 水塊最大流速の比較

長方形せきでの流量は、Beresinski 式を用いて、

$$q = C_1(R + h_a) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_1 = 1.973 - 0.222(B_w/R) \quad \dots\dots\dots (5)$$

とした。ここで、 h_a は護岸前面での速度水頭である。護岸前面での流速は波速 V_1 と関係付け、

$$h_a = \frac{v^2}{2g} = \frac{\alpha_v(g(h+H))}{2g} \quad \dots\dots\dots (6)$$

とした。ここで、護岸前面の波速を計算する代表長さを H とした。これは、 η_c を跳ね上がりの高さと考え実際に水塊として進む部分は H 程度であろうと考えた。また、護岸天端が 0 である場合、越波水塊はほぼ波速で進行すると考え、 α_v は、

$$\alpha_v = \gamma_v R/H \quad \dots\dots\dots (7)$$

とした。 γ_v は、非線形効果を表しているものと考え、本実験の範囲内では 0.8 とした。

次に、護岸終端付近の水塊の最大流速 V_2 を、護岸前面の波速 $\sqrt{g(h+H)}$ と比較した(図-10)。これより V_2 は、

$$V_2 = \sqrt{g(h+H)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で算定できることがわかる。

式 (4) を用いて越波流量を算定し、それを波速 (式 (8)) で除すると、 η_c を求めることができる。こうして求めた $\eta_{c,cal}$ と、画像解析より測定した $\eta_{c,exp}$ を比較したものが図-11 である。これより、本計算が今回の実験の範囲内では妥当であると考えられる。

3. 後背地構造物に作用する流体力

後背地に流入してくる水塊量は 2 節より求めることができる。壁面に作用する流体力は、 ρQv によって求めることが可能であると考えられ、実験を用いて検討する。

(1) 実験断面

実験断面を図-12 に示す。後背地地盤は塩化ビニルで作ったものであり不透過性であるが、後背地地盤と水路壁面の間には 1 cm 程度の隙間があり、この隙間より越波した水塊の流量は失われる。この隙間を埋めると 4 ~ 5 波程度で護岸と構造物の間の水深が 10 cm 以上となり、現実的にもあり得ないことから、隙間を埋めないこととした。図に示すような位置に波高計、流速計を配置した。また、今回の実験値では後背地は護岸よりも 10 cm

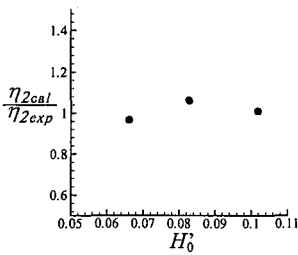
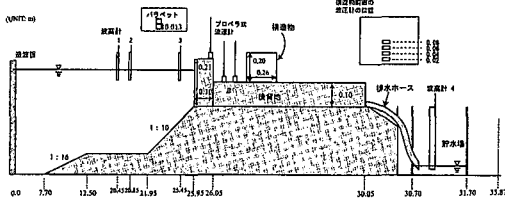
図-11 η_2 の実験値と計算値の比較

図-12 実験断面

低いとした。後背地上にある構造物は護岸より 0.3 m, 0.6 m, 0.9 m と移動させた。波浪条件は沖波で, 0.05 m~0.12 m までとし, また, 周期は, 1.5 秒である。

(2) 隙間による排水効果

地盤と壁面の隙間による越波水塊の水深減衰効果について考える。水位が H_m のときに隙間から流出する速度 V は, ベルヌイの定理より, $\sqrt{2gH_m}$ となるために, 微小時間 dt に水深の減少量 $-WdH$ との関係は,

$$-WdH = aVdt \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで, 単位幅あたりの隙間の長さを a とする。時刻 0 のときに, 水塊水位を H_{m0} とすると,

$$\int_{H_{m0}}^{H_m} -\frac{W}{a} \frac{1}{\sqrt{2gH_m}} dH = \int_0^t dt \dots\dots\dots (10)$$

となり, これより,

$$\frac{H_m}{H_{m0}} = \left(1 - \frac{a}{W} \sqrt{\frac{g}{2H_{m0}}} t\right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで水塊の先端流速を v_t とした場合, 水塊先端が護岸からの距離 B に到達するまでの時間は, $t_r = B/v_t$ であり, その地点での水塊高さ H_m は,

$$\frac{H_m}{H_{m0}} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a}{W} \sqrt{\frac{H_{m0}}{h}} \frac{B}{H_{m0}}\right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

となる。図-13 は, $h=0.18$ m としたときの距離 B と水塊高さ H_m との関係を示したものである。これより, 護岸と構造物までの距離が 90 cm では, 水塊が大きい場合は, 元の高さの 8 割程度になり, 水塊が小さい場合は, 元の 5 割程度になることがわかる。図中の黒丸は実験値より読みとったものであり, これより平均的には実験値と整合していることがわかる。

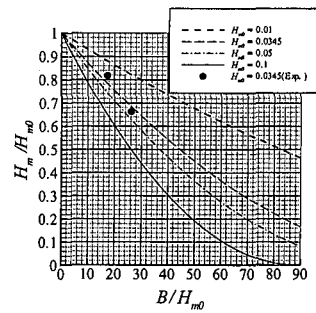


図-13 水塊高さと護岸からの距離

(3) 流体力の作用特性

ある点に作用する流体力のパターンは, 流量の大きさにより, 4 パターンに分けられた(図-14)。それぞれ護岸上での流速を用いて, 圧力を無次元化している。①は, 遅い速度で水塊が壁面に衝突したパターン, ②は水塊の速度は①より速く③より流量が少ないパターン, ③は②より流量が多いパターンというように分けられる。④は, ②と同じ流量であるが, 空気を巻き込んだ振動現象が生じているパターンである。それぞれの作用状況を模式的に示したものが図-15 である。図中の番号は水塊が作用する順番を表したものである。また, 図-14 中の②についている番号とも対応している。

図-15 を参考に, ②での 2 つの圧力の山について説明する。まず, 水塊が壁面に衝突した際に 1 つ目の山が生じ(図-15, 2), その後, 上昇した水塊が水表面に再び戻り, さらにそこで壁面方向とその反対方向に分裂し, そのうちの壁面方向に向かう水塊が壁面に衝突した際に 2 つ目の山が生じている(図-15, 4)。これは高速ビデオカメラの映像とも比較し確認した。③も同様のあたり方をしてい。ただし, ③では水塊の先端部と壁面の衝突角度が 70 度くらいとなり, いわゆる Wagner 型の衝撃圧力となるため, ②よりも一山目が大きくなっている。④では, 水塊と構造物の距離が短くかつ水塊が高い場所から地面に衝突した際に, 水塊の先端部が跳ねて壁面と衝突し, 空気を巻き込む Bagnold 型になっている(図-15, 1', 2')。

(4) 最大圧力の鉛直分布

それぞれのパターンでの最大圧力の鉛直分布を示したものが図-16 である。これより, ①のように流量が少ない場合は, 作用高さも小さい三角形分布をしており, ③のように Wagner 型になる場合は, 作用高さが大きい三角形分布となる。②のような場合はある高さより下はほとんど同じ大きさになるような分布となることがわかる。④の場合は水塊が跳ねて直接作用するところが突出している。

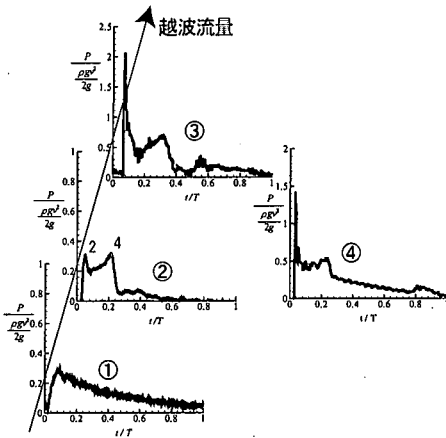


図-14 流体力の作用特性

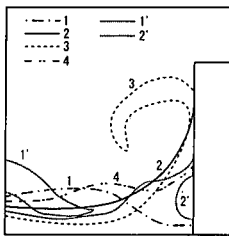


図-15 越流体の作用状況

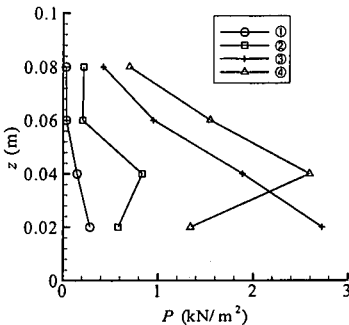


図-16 作用特性の違いによる最大作用圧力の鉛直分布の違い

(5) 最大流体力と最大流量

本実験において、構造物との距離が離れたことによる流速の軽減効果はほとんど見られなかった。そこで、流速は構造物手前まで式(8)と仮定した。図-17は、護岸上における最大流量と最大流体圧力の関係を護岸と構造物との距離に分けて示したものである。護岸上の流量はビデオで計測したものである。これを見ると構造物と

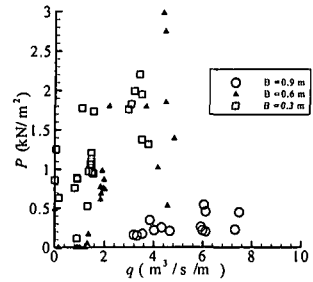


図-17 最大流量と最大流体圧力

の距離別に、流量と流体圧力は相関している。

これは、図-13からもわかるように護岸上の流量は距離に応じて少なくなるため、距離が長くなると波圧が小さくなると考えられる。一方で、図-14からわかるように、ある流量より大きくなるとWagner型の波圧となり、圧力値が2～3倍となる。しかし、護岸前面での水位をうまく取ることが出来なかったために、本研究では流量と流体圧との関係の定式化までは行わないこととした。

4. 結 論

天端が波高に比べ相対的に低くなったときの越波流量、および護岸背後の構造物に作用する流体力に関する実験を行ったところ、越波流量に関しては、いくつかの経験式を組み合わせることにより、求められることがわかった。流体力に関しては、流量により作用圧の形式が異なることから、流速が同じであっても流量の違いによっては、2～3倍もの大きさの圧力が作用する可能性があることがわかった。今後は流量と流体圧についてさらに詳しく調べる予定である。本研究の一部は、運輸施設整備事業団基礎研究制度の助力を得ており、ここに謝辞を記す。

参 考 文 献

- 有川太郎・鈴木高二朗 (2001): PIVを用いた現地海浜流の計測システムの開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 101-105.
- 河合弘泰・平石哲也・丸山昭広・田中良男 (2000): 台風9918号による高潮の現地調査と追算, 港研資料, No. 971, pp. 3-42.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, 第14巻, 4号, pp. 81-85.
- 合田良実 (1985): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版界, p. 323.
- 三村信男・原沢英夫 (2000): Data Book of Sea-Level Rise 2000, CGER-REPORT, 国立環境研究所, p. 128.