

被覆工を施した捨石護岸堤に作用する波圧の計算

(株) 構造計画研究所

橋本 哲

○山口 孝

1. はじめに

護岸堤の捨石部に被覆工を施す場合、その保守性安全性について十分な検討がなされなければならない。被覆部の破壊機構に関しては、浮上り、割石の抜け落ち、亀裂と破断、沈下と盛上り等の現象が明らかにされ、被覆層の設計法も提案されている。しかし、実際の適用にあたっては、これまでの実験データの蓄積が不十分であるため、種々の制限を受けることになる。そこで、不十分なデータを数値計算で補う方法が考えられるが、数値計算を行う場合は、現象を支配するパラメータを適確に把握し、現実とかけ離れたモデルを想定することのないよう注意しなければならない。本報告では、このような目的で行った計算結果の一部について述べる。

2. 計算手法

2次元非圧縮性流体の非定常運動を解析する方法として、オイラー手法の差分を用いたMAC法(Makar & Cell)がある。本報告では、高度に簡素化されたMAC法と称されるSOLA-SURF³⁾を用いて計算を行なった。次に、その概略を述べる。

① 基礎方程式

基礎方程式は右に示す連続方程式と運動方程式である。ここで x は座標系の選取により直角座標で $x=0$ 、円筒座標で $x=1$ となる。差分式は繁雑であるので省略する。差分化の際のメッシュ構造を図1に示す。斜線部は仮想セルを意味し、境界条件の取扱いに使われるセルである。速度および圧力は図2に示すように、 U 速度、 v 速度がそれぞれ縦および横メッシュ上で定義され、圧力 P はセルの中心で定義される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \epsilon \frac{u}{x} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \epsilon \frac{u}{x} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \epsilon_x \\ + v \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \epsilon \left(\frac{1}{x} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u}{x^2} \right) \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \epsilon \frac{uv}{x} - \frac{\partial p}{\partial y} + \epsilon_y \\ + v \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \epsilon \frac{v}{x} \frac{\partial v}{\partial x} \right] \end{aligned}$$

② 計算手順

計算は次のような手順で行う。

- 流体の速度は、時間ステップ(δt)を1つ進める事により前回の時間ステップの流速と圧力から運動方程式により各セル毎に計算する。
- このように計算された流速は必ずしも連続式を満足しないので、オ2段階として、圧力項を変更して速度項の調整を行う。この時圧力は連続式を満足するように変更される。

$$\delta p = -D / \left\{ 2\delta t \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right) \right\} \quad (D \text{ は連続式左辺})$$

変更後のセルの圧力、および流速は

$$\begin{aligned} U_{i,j} &\rightarrow U_{i,j} + \frac{\delta t \cdot \delta p}{\delta x} & v_{i,j} &\rightarrow v_{i,j} + \frac{\delta t \cdot \delta p}{\delta y} \\ U_{i-1,j} &\rightarrow U_{i-1,j} + \frac{\delta t \cdot \delta p}{\delta x} & v_{i,j-1} &\rightarrow v_{i,j} + \frac{\delta t \cdot \delta p}{\delta y} \end{aligned}$$

となる。

- こうして基準値 D_0 に対して全セルで $|D/D_0| < \epsilon$ となるまで、反復計算を行う。

- 収束許容値 ϵ 以下で連続式が満足されれば、時間を1ステップ(δt)

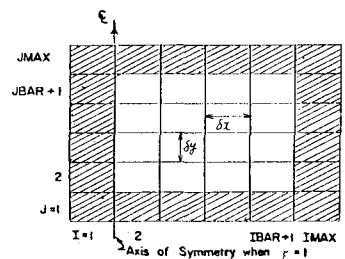


図1 セル構造

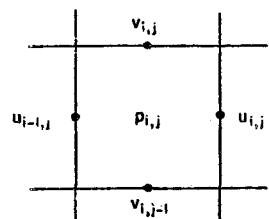


図2 速度、圧力の定義位置

進め、時間的に変化する境界条件を再定義して1)に戻り、以下所定の解析時間までこの手順を繰返す。

③ 境界条件

- i) 自由表面は計算メッシュの底部からの一価関数として水深で定義しその変動は表面近傍の局所的な流速により記述する。その方程式および差分式を右に示す。

ここで、

H : 自由表面の高さ $\eta_i = [H_i - H_{i, JT-1}] / \delta y$

JT : 自由表面が存在するセル番号 γ : 上流セルの寄与の度合いを示す定数

自由表面を含むセルの圧力は、その直下のセルと自由表面($P=0$)とで直線補間により求める。

$$P_{i, JT} = (1-\eta) P_{i, JT-1} + \eta P_s, \quad \eta = \delta y / \{ H_i - (JT-2.5)\delta y \}$$

- ii) 傾斜面での境界条件は自由すべり、即ち壁面上で法線方向の流速および法線方向の接線流速勾配がゼロとして取扱う。

$$u_n = -\frac{1}{4\delta t} (u_{i, JB} + u_{i-1, JB}) (HB_{i+1} - HB_{i-1}) + \gamma v_{i, JB} + (1-\gamma) v_{i-1, JB-1}$$

ここに、 $\gamma = (HB_i - z) / \delta y$, HB : 境界面の高さ, z : 境界面直下のセルの上端高さ

JB : 境界面が位置するセル番号(J 方向)

$P_{J, JB}$ の圧力場の調整は次式による。

$$\delta p = u_n / \frac{\partial u_n}{\partial p} \quad \text{ここに、} \frac{\partial u_n}{\partial y} = \frac{\delta t}{\delta y} \left\{ 1 + \frac{\delta y^2}{\delta x^2} (1-\gamma) \right\}$$

- iii) 傾斜面上を波が上昇、下降するに伴い、 x 方向にセル数を増減させて解析領域を逐次変更して行く。

- iv) 進行波の入力：進行波の入力は、解析領域左端の仮想セルにおいて浅水波の水面高および粒子の移動速度を次式で与える。

$$\begin{aligned} h &= h_0 + \frac{H}{2} \sin \pi \left(1 - \frac{2t}{T} \right) \\ u &= \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi(z+h_0)/L}{\sinh 2\pi h_0/L} \sin \pi \left(1 + \frac{\delta x}{L} - \frac{2t}{T} \right) \\ v &= \frac{-\pi H}{T} \frac{\sinh 2\pi(z+h_0)/L}{\sinh 2\pi h_0/L} \cos \pi \left(1 - \frac{2t}{T} \right) \end{aligned}$$

ただし初期状態($t=0$)では領域内の流体は静止しており仮想セルの中心は半波長の位置($x=L/2$)にあるとしている。

3. 検討方法

被覆部の安全性は、1に述べた各々の破壊現象に対して安全であればよいわけであるが、これらは基本的には被覆部内外の流れによって被覆部およびその内側の捨石に作用する流体圧を求める事に帰着すると考えられる。

ここでは、被覆部外側(堤外)から作用する波圧と、被覆部内側(堤内)から作用する揚圧力との差に着目し、堤外から作用する進行波の波形勾配および被覆部の斜面勾配をパラメータとして変化させる事により、検討した。堤外については、流れの方程式として2次元ナビエーストークスの方程式を用い、粘性は無視している。堤内については、捨石があるため、特別の考慮が必要である。たとえば、堤内の捨石の間隙により、浸透流として解く方法や堤外と同じくナビエーストークスの方程式を用いて、捨石の抵抗力を、流体の外力項に加える方法等が考えられる。しかし、今回は、最初のステップとして次のように考えて計算した。即ち、堤内の流れに対して堤外の流れの方が支配的である。従って、堤内の水の運動を無視し、揚圧力を平均海面からの静水圧でおきかえ、

これと波圧との差を変動圧として定義した。このように考えた場合、計算としては全面を被覆された斜面上に作用する波による圧力を計算する事になる。また、砕波による衝撃力は、除外して考えた。

4. 計算結果と考察

計算は図3に示すような領域を考えて行った。進行波としては、表1-aに示す2種類を与え、また、斜面勾配は表1-bに示す3種類を与えた。上記2つのパラメータを組合わせる事により、表1-cに示すように合計6ケースが得られる。この各々に対して2周期に相当する時間ステップまでの解析を行った。

図4は、解析の一例として、RUN4の $t=10.6(1.75T)$ における流速ベクトル図、および波圧分布、変動圧分布を示したものである。波圧と変動圧とは縮尺を変えてあり、変動圧が拡大して描かれている。

図5は、数値計算結果と実験レポートを合わせてプロットしたものである。横軸Zは斜面上の水深を示し、縦軸Pは変動圧である。計算値は、実験における平均水深60cmに換算した変動圧をプロットしてある。この図によると、実験結果の方が大きな変動圧を示している。これは砕波による衝撃力によるものと考えられる。

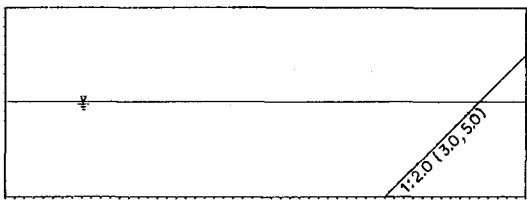


図3 モデル図

表1-a 入射波

	波高(cm)	波長(cm)	波形勾配	周期(sec)
w_1	120	270.0	0.044	1.4
w_2	240	300.0	0.080	1.5

表1-b 斜面勾配

	勾配
①	急 1:2.0
②	中 1:3.0
③	緩 1:5.0

表1-c 計算ケース

RUN	入射波		斜面勾配		
	w_1	w_2	①	②	③
1	○		○		
2	○			○	
3	○				○
4		○	○		
5		○		○	
6		○			○

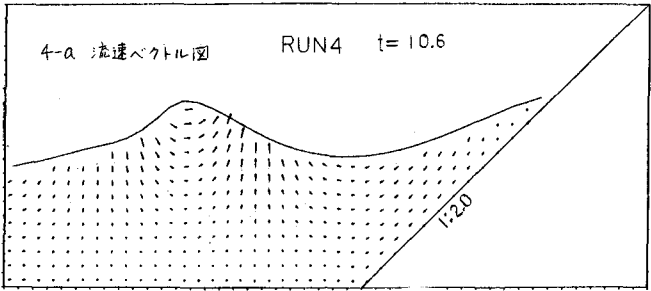


図4 計算結果の一例

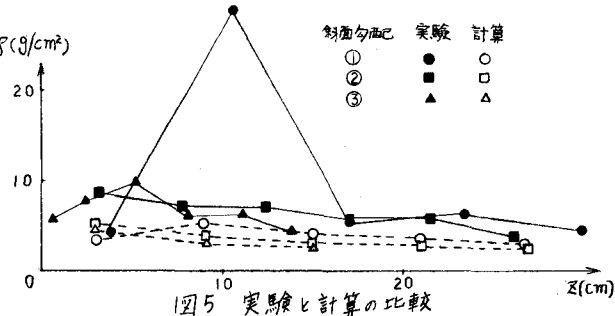
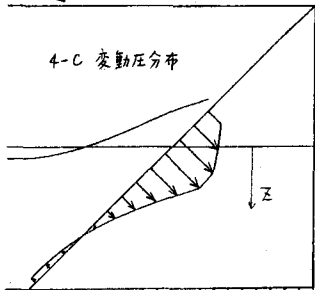
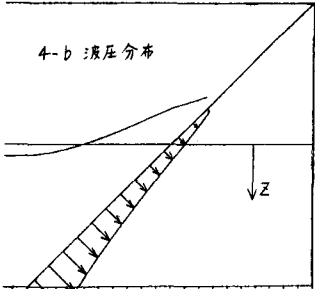
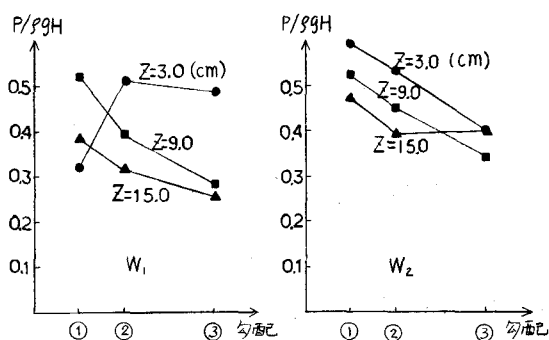


図5 実験と計算の比較

図6は、最大変動圧を各パラメータごとに整理したものである。ここで最大変動圧は、入射波の波高が12cm 24cmと異っているため、波高差による影響が卓越してしまう。従って図では、波高による因子を取り除くため $P/\rho g H$ で割って無次元化して比較している。6-aは、斜面勾配の影響を見ようとしたものである。W1が波形勾配小、W2が波形勾配の大の場合である。

これによると、W1, W2の場合とも斜面勾配が大きくなると変動圧は大きくなる事がわかる。また、測定深度についてみると、全体的に測定深度が小さくなると、斜面勾配に対して敏感になる傾向が見られる。6-bは波形勾配の影響を見ようとしたものである。Z=3.0におけるデータが不ぞろいであるが全体的な傾向として波形勾配が大きくなると、変動圧も大きくなっていると言える。また、測定深度が大きくなると、変動圧そのものは小さくなっているが、波形勾配による変化はかえって大きくなっている傾向が見られる。

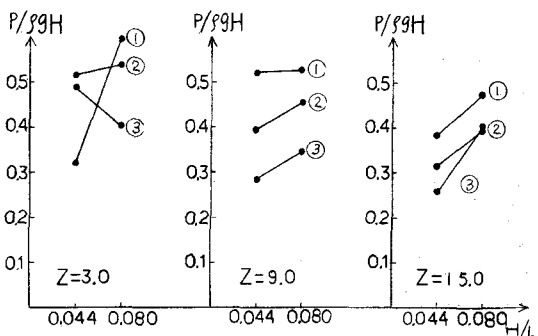


6-a 斜面勾配で整理した最大変動圧

5. あとがき

2次元ナビエストークス方程式による差分プログラムにより、進行波が斜面に与える波圧を計算し、次のような傾向を見出す事ができた。

- ① 深度が増すと変動圧は小さくなる。
- ② 斜面勾配または、波形勾配が大きくなると変動圧は大きくなる。
- ③ 変動圧は深度の小さいところでは斜面勾配に対して敏感であり、深度の大きいところでは波形勾配に対して敏感である。



6-b 波形勾配で整理した最大変動圧

図6 最大変動圧

以上の傾向は、6ケースの計算結果から得られたものであるが、ケース数としては不足であると思われるので、今後さらに計算し、広範囲にわたる波形勾配、斜面勾配に対するデータの蓄積が欲しいところである。

また、今回は堤内の流れを無視して計算した結果について発表した。堤内と堤外を斜面部を共通の境界としてもつ2つの領域に分け、各々が境界条件を介して相互に作用し合うと考える事により各領域個々の流れの方程式を導入して解析する事が可能であると考えている。

参考文献

- 1) 加川・久保：サンドマシックス注入捨石の安定に関する実験的研究，第12回 海岸工学講演会概要集，1965
- 2) 大野大明：サンドマシックス被覆工の設計に関する実験的研究，電力土木，No153，1978
- 3) C.W. Hirt, B.D. Nichols, N.C. Romero: SOLA - A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, 1975