

消波ブロック周辺の洗掘発生限界と洗掘深の発達について

小 田 晃*・粟 津 清 蔵**

1. ま え が き

消波ブロック堤の崩壊の原因には、波によるブロックの移動、砂の吸い出しによる沈下、法先部の洗掘による崩壊が考えられる。その中でも法先部の洗掘が原因と考えられる崩壊は、被災事例が多く報告されており（例えば、宇多ら、1986）、特に慎重に検討しなければならない現象である。消波ブロック堤を施工する場合、一般には水理実験によりその安全性を確認する方法が採用される。しかし、そのときに注目される点は何の程度の波浪条件のときにブロックが移動・崩壊するかであり、構造物が設置されたときに、どのような条件のもとに洗掘が発生するのかといった洗掘発生限界や洗掘深の時間的な発達についての検討を主にした研究は少ないようである。ここで、一時的に消波ブロックの前面に洗掘が発生した場合を考えると、わずかな洗掘深であっても法先部のブロックの移動・沈下の生じるケースも考えられ、やがてブロック堤の崩壊へつながる危険性のあることから洗掘発生限界時の条件を把握しておくことは重要である。また、消波ブロック堤の崩壊は、ブロック前面の洗掘部が平衡状態に到達する前に発生してしまうこともあるため、洗掘深の時間的発達についても明確にする必要があると思われる。

従来の波による砂の移動限界や洗掘現象については、佐藤ら（1966）や入江ら（1984）の研究などがあるが、それらの研究の多くは洗掘発生限界や洗掘深の発達、平衡洗掘の洗掘現象を独立に取り扱っており、これらの現象の関連性について論じた研究は少ない。

本研究は、洗掘現象全体を洗掘発生限界に関連付けて取り扱うために、まず、構造物周辺の洗掘発生限界を表す因子を明らかにした。そして洗掘発生限界と平衡洗掘状態の類似性を利用した若干の考察と実験から、洗掘深の時間的発達について検討を行ったものである。

2. 実験装置および条件

(1) 実験装置

実験は、図-1に示すように長さ15 m、幅30 cmの片面ガラス張りの水槽を使用した。造波装置は反射波吸収型造波装置である。水槽のほぼ中央に長さ2 m、厚さ13 cmの水平移動床を設け、移動床の前後には急激な流れの変化が発生しないように木製の固定床が取り付けられている。

ケーソンの模型は長さ30 cm、幅30 cmの木製の箱を使用し、移動床上に着底した状態で固定してある。消波ブロック模型は直径5 cmのガラス球（比重約2.3）を使用した。ガラス球の積み方は、図-2に示すように4種類であり、球の無い状態（Type 0）、球の天端が静水面より下になる状態（Type 1）、球の天端が静水面と等しい状態（Type 2）、球の天端が静水面より上になる状態（Type 3）とした。底面地形の変化は、今回の実験では洗掘現象が2次元的事象であることから水槽のガラス面を通して測定した。使用した砂は、中央粒径 $d_{50}=0.025$ cmのほぼ一様な砂である。

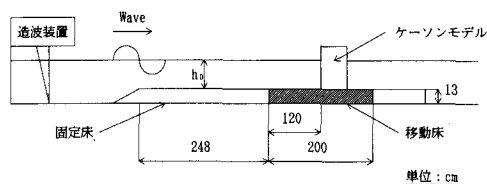


図-1 実験装置概要

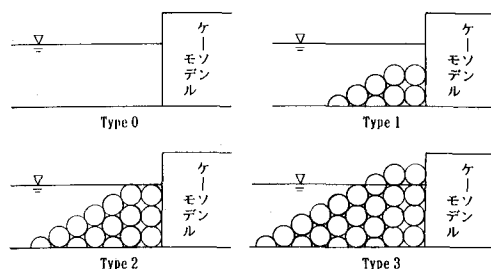


図-2 ブロック模型の積み方

* 正会員 工修 株式会社熊谷組 技術研究所

** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科

(2) 実験条件

実験は、洗掘発生限界と洗掘深の発達 の 2 種類である。

表-1 に洗掘発生限界の実験条件、表-2 に洗掘深の発達の実験条件を示す。使用した波は規則波であり、洗掘発生限界の観測領域と地形変化の測定領域は、洗掘が構造物に影響を及ぼすと考えられる範囲としてケーソン前面から1波長程度とした。洗掘発生限界の砂の移動状況は、予備実験の結果から造波開始後30分経過時の底面形状より判断した。

洗掘深の発達実験は、造波継続時間を1ケース20時間とし、底面変化の測定時間は造波開始から5、30、60、120、240、360、1200分とした。

表-1 洗掘発生限界の実験条件

Type	水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)
0	10~20	1.0~2.0	1.35~3.39
1	15	0.8~2.5	1.71~4.37
2	15	0.8~2.5	1.70~5.30
3	15	0.8~2.5	1.73~6.02

表-2 洗掘深の発達の実験条件

Type	水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)
0	15	0.75~1.50	4.13~6.18
1	15	0.75~1.50	3.65~5.68
2	15	1.00~1.50	4.76~5.07
3	15	1.00~1.50	4.55~4.91

3. 洗掘発生限界について

(1) 摩擦速度と洗掘発生限界

洗掘孔内の摩擦速度は、水平床上の摩擦速度とは異なり洗掘孔内の流況が非常に複雑であることから正確な評価は困難である。そこで、構造物設置前の水平床上の摩擦速度 u_{*N} を用いて構造物周辺の最大洗掘深発生点での摩擦速度 u_{*s} を式 (1) のように表す。仮定として、 u_{*s} は洗掘深 h_s を含む水深 $h=h_0+h_s$ のときの水平床上の摩擦速度 u_{*N} に比例するものとする。ここに、 h_0 は洗掘開始前の水深である (図-3 参照)。

$$u_{*s} = \alpha_s u_{*N} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α_s は比例定数である。

u_{*N} と水平床上の底流速 u_B の関係については次の指数式で表されるものとする。

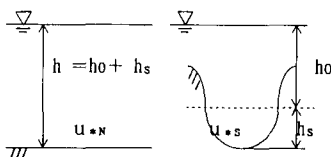


図-3 摩擦速度に関する図

$$\frac{u_B}{u_{*N}} = C \left(\frac{h}{d} \right)^m \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C 、 m は係数、 d は砂の粒径である。 u_B は、重複波作用時の水平底面上における水粒子の速度に等しいとして次式で表される。

$$u_B = \frac{2\pi H}{T} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \sin \frac{2\pi x}{L} \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H は波高、 L は波長、 T は周期、 x はケーソン前面からの距離である。ここで、洗掘が最も発生し易いと考えられる最大底流速の発生位置と経過時間毎の洗掘孔内での最大洗掘深発生点の位置について検討する。洗掘深の発達実験から、消波ブロック堤前面には幾つかの洗掘部と堆積部が発生する。それらの洗掘部におけるケーソン前面からの最大洗掘深発生位置までの距離を x_s として、 x_s を波長で無次元化した値と波形勾配 H/L の関係の1例を図-4 に示す。この図より、洗掘は重複波の節と腹の間で発生する N-タイプの洗掘 (入江ら, 1984) であり、 x_s/L は時間の経過に無関係であることが示されている。また、 x_s/L は、ほぼ $1/8$ 、 $3/8$ 、 $\dots$ (図中の破線) 付近に集中しており、最大底流速の位置である $x/L=1/4$ 、 $3/4$ 、 $\dots$ とは一致しない。なお、今回の実験条件では全ケースとも図-4 と同様な傾向を示した。洗掘実験の観察からも底質の移動状況は必ずしも最大底流速発生位置から動き始めてはいないようである。そこで、本研究では、実験結果から $x_s/L=1/8$ 、 $3/8$ 、 $\dots$ を用いて洗掘発生限界時の水深に関する検討を行う。式 (3) に $x_s/L=1/8$ 、 $3/8$ 、 $\dots$ を代入し、半周期間の時間平均流速 u_{BAV} を

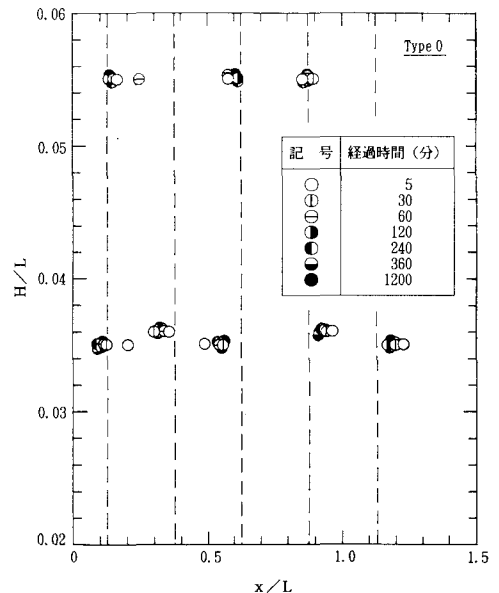


図-4 最大洗掘深の発生位置と波形勾配の関係

考える。

$$u_{BAV} = -\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_B dt$$

$$= 2.84 \frac{H}{T} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

洗掘孔内の摩擦速度 u_{*s} は式 (1), (2), (4) より次式のように表される。

$$u_{*s} = 2.84 \frac{H}{T} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \frac{a_s \left(\frac{d}{h} \right)^m}{C} \dots\dots\dots (5)$$

洗掘発生限界時において、砂の移動限界摩擦速度を u_{*c} とすれば、 $u_{*s} = u_{*c}$ であると考えられ、このときの水深を洗掘発生限界時の水深 h_* と置き式 (5) を整理する。

$$\left(\frac{h_*}{d} \right)^m \sinh \frac{2\pi h_*}{L_*} \propto 2.84 \frac{H}{Cu_{*c}T} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 L_* は水深 h_* のときの波長である。

(2) 洗掘発生限界の実験との比較

洗掘発生限界の実験では、洗掘発生状況を目視観察によって次の3段階に分けて整理した。

a) 表層の砂がわずかに動く程度で地形の変化は発生しない状態。

b) 測定領域内で部分的に洗掘・堆積が発生している状態。

c) 測定領域全体で洗掘・堆積が発生している状態。本研究では、b) の状態を洗掘発生限界と定義した。

図-5 に洗掘発生限界の実験結果を示す。図中の点は洗掘発生限界時 (b) の状態の値である。この図より式 (6) の妥当性は実験値により確認され、洗掘発生限界時の水深を表す実験式は次のようになる。なお、 C , m については今回の実験条件の範囲において対数則を近似して $C=9.93$, $m=0.123$ とした。

$$2.84 \frac{H}{Cu_{*c}T} = 0.23 \left(\frac{h_*}{d} \right)^m \sinh \frac{2\pi h_*}{L_*} \dots\dots\dots (7)$$

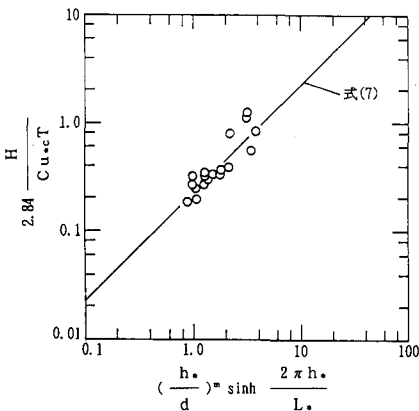


図-5 洗掘発生限界の実験結果

4. 洗掘深の発達について

(1) 流砂の連続式

波が作用しているときの底質の移動状況は、洗掘される部分では洗掘孔から流出する砂の他に洗掘孔へ流入する砂も存在することが観察される。そこで、ここでは半周期間に洗掘孔から流出した正味の単位幅当たりの流砂量 q_s に着目する。半周期間の砂の移動状況は、例えば底面上に岸向きの方向に流れが発生したときには砂は岸向きの方向に移動する。その際、前の半周期間に沖向きの流れによって移動した砂の何割かが、岸向きの方向に流れとともに洗掘孔へ戻ってくる。このような現象を繰り返すことによって洗掘深は発達するものと考えて、洗掘孔から流出する砂の量を q_{s0} 、洗掘孔に流入する砂の量を q_{s1} とし、 q_{s1} は q_{s0} に比例するとすれば、

$$q_{s1} = a_1 q_{s0}, \quad a_1 < 1.0 \dots\dots\dots (8)$$

と書ける。ここに、 a_1 比例定数である。したがって、半周期間に洗掘孔から流出する正味の流砂量 q_s は次式で表される。

$$q_s = q_{s0} - q_{s1} = (1 - a_1) q_{s0} \dots\dots\dots (9)$$

流砂の連続式は、今回の現象が2次元であることから次式で表される。

$$q_s B dt = (1 - \lambda) dV \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 B は水槽幅、 V は洗掘孔の容積、 λ は砂の空隙率である。 V は初期底面 (水平面) から洗掘された部分の容積であるので、最大洗掘深 h_s に比例すると考えて次式のように表す。

$$V = a_v B h_s^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 a_v , p は洗掘孔容積に関する係数である。

洗掘孔から砂が流出する状況は、半周期間で考えれば一方向流中での状況に類似している。そこで、流砂量式として、本研究では次式で表される Kalinske-Brown 型の流砂量式を変形して用いる。

$$\frac{q_s}{u_* d} \propto \Psi_c \left(\frac{u_*}{u_{*c}} \right)^2$$

$$\Psi_c = u_{*c}^2 / \{ (\sigma_c - 1) g d \} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 u_* は摩擦速度、 σ_c は砂の比重である。ここで流出砂量が0になる条件は、 $u_* = u_{*c}$ の場合であることを利用して式 (12) を変形する。

$$\frac{q_s}{u_* d} = a_s \Psi_c^{\beta} \left[\left(\frac{u_*}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \right] \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 a_s , β は流砂量に関する係数である。

次に洗掘孔内の摩擦速度 u_{*s} について検討する。 u_{*s} は平衡洗掘状態では u_{*c} に等しいと考えられる。したがって式 (1) 中の a_s は、水深が平衡洗掘深 h_{SE} を加えた水深 $h_E = h_0 + h_{SE}$ のときの水平面上の摩擦速度を u_{*NE} とすれば、

$$\alpha_s = u_{*c}/u_{*NE} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。 u_{*NE} は式(2), (4)を用いて次式で表される。

$$u_{*NE} = 2.84 \frac{H}{L} \left(\sinh \frac{2\pi h_E}{L_E} \right)^{-1} \frac{1}{C} \left(\frac{d}{h_E} \right)^m \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 L_E は水深 h_E のときの波長である。式(15)中の h_E を h に置き換えれば u_{*N} が表され、それらを用いて u_{*s} を求めると次式のようになる。

$$u_{*s} = \alpha_s u_{*N} = u_{*c} \frac{\sinh(2\pi h_E/L_E)}{\sinh(2\pi h/L)} \left(\frac{h_E}{h} \right)^m \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、流れ中における構造物周辺の洗掘発生限界時の水深 h_* と平衡洗掘深 h_{SE} の間には $h_* = h_0 + h_{SE}$ の成立することが栗津の研究(1991a, 1991b, 1991c)により報告されている。本研究では波による洗掘においてもこの関係が成立すると仮定して $h_E = h_*$ とすると、流砂の連続式は式(13)中の u_* を式(16)で表される u_{*s} に置き換えて式(10), (11)を用いると次式のように表される。

$$\frac{dh_s}{dt} = \frac{A_s u_{*c} \Psi \xi}{\rho a_v (1-\lambda)} \frac{d}{h_s^{p-1}} \frac{\xi_*}{\xi} \cdot \left(\frac{h_*}{h} \right)^m \left\{ \left(\frac{h_*}{h} \right)^{2m} \left(\frac{\xi_*}{\xi} \right)^2 - 1 \right\}^\beta \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $A_s = a_s/(1-a_1)$,

$$\xi = \sinh \frac{2\pi h}{L}, \quad \xi_* = \sinh \frac{2\pi h_*}{L_*}$$

である。

(2) 洗掘深の発達の実験との比較

図-6に各時間毎の地形縦断面図の1例を示す。図-4で示されたように、ガラス球を設置しても各洗掘部分での最大洗掘深の位置は時間の経過に関係なくほぼ一定である。また、底面全体には ripple の発生している様子が見られる。なお、洗掘深の発達については、ケーソン前から最も近い洗掘領域での最大洗掘深に着目した。

式(11)で仮定した V と h_s との関係を図-7に示す。 V はケーソン前から最も近い洗掘孔の容積である。この図より、 V と h_s は良い相関を示しており、各係数は $a_v = 14.8$, $p = 1.33$ となる。また、図が煩雑になるのでここでは区別して表示しなかったが、周期、波高、経過時間やガラス球の積み方による変化は認められず、洗掘孔は相似な形で発達していることが確認された。

次に、洗掘深の発達について、洗掘発生限界時との関連性を明確にするために h_* を用いた無次元量を用いて検討を行う。無次元洗掘深を Z_n 、無次元時間を T_n とし次式のように表す。

$$Z_n = \frac{h_0 + h_s}{h_*}, \quad T_n = \frac{u_{*c} t}{h_*} \quad \dots\dots\dots (18)$$

まず、数値計算から式(17)の定性的な確認を行う。パラメータは洗掘開始前の $Z_n = Z_{n0}$ を用いる。 $Z_{n0} = h_0/h_*$ を 0.5~0.9 の間で変化させた結果を図-8に示す。計算

条件は図中に記した。この図より、洗掘深の発達は時間の経過にしたがって $Z_n = 1.0$ に近づいている。 Z_{n0} の違いによる洗掘深の発達の变化については Z_{n0} が大きいほど、すなわち洗掘開始前の水深 h_0 が h_* に近いほど洗掘深の变化の小さいことが示されている。これより式(17)は定性的に洗掘深の発達を表しており、妥当性が確認された。

洗掘実験をもとにして、 Z_{n0} と流砂量に関する係数 A_s の関係を検討したところ、図-9に示す結果が得られた。この図より、Type 0 と Type 1 は Z_{n0} と A_s の相関が示されたが、Type 2 と Type 3 は明確な相関が認められなかった。これは、Type 0 と Type 1 の場合、Type 2 と Type 3 に比べて波の反射が大きいいため洗掘深が大きくなり、流砂量が多くなることから傾向が明確に現れたものと考えられる。なお、 β は全実験を通じて 5.0 とした。図-10

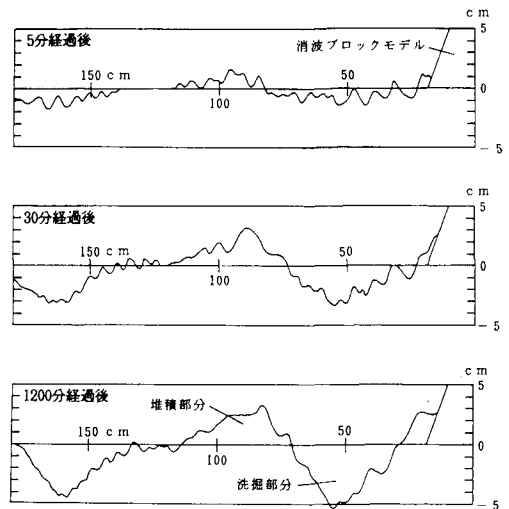


図-6 地形縦断面図 (Type 1)

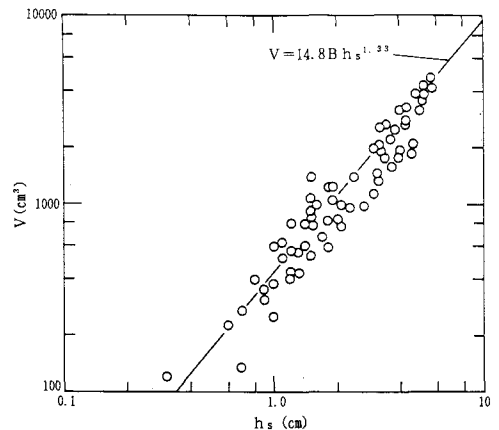


図-7 最大洗掘深と洗掘孔容積の関係

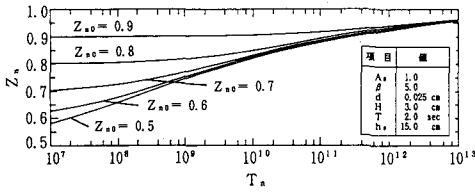
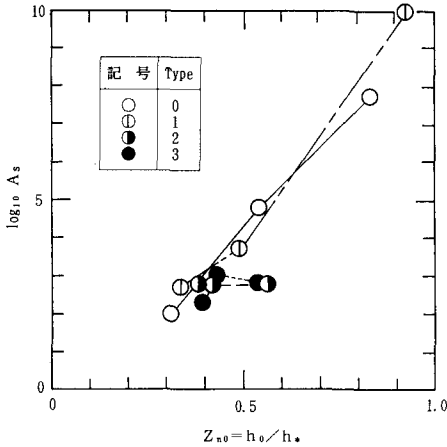


図-8 洗掘深の発達に関する数値計算例

図-9 A_s と Z_{n0} の関係

に洗掘深の発達の計算値と実験値の1例を示す。

5. あとがき

本研究より以下のことが明らかとなった。

(1) 式(6)で表される洗掘発生限界時の水深や波高、周期の関係式は、実験よりガラス球の有無や積み上げ高さに関係なく良好な相関を示すことが明らかとなった。

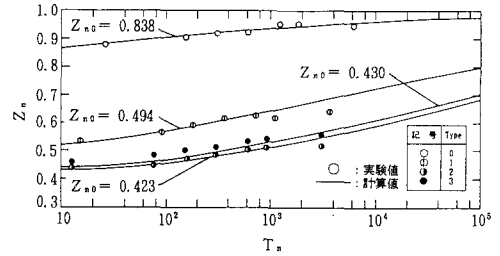


図-10 洗掘深の発達

(2) 洗掘深の時間的発達の実験から、流砂量に関する係数 A_s は洗掘発生限界時の水深と洗掘開始時の水深の比である Z_{n0} によって変化することが示された。

(3) 洗掘深の発達は、パラメータとして洗掘発生限界時の水深を用いることで良好に示されることがから洗掘深の発達と洗掘発生限界の現象の関連性が明確となった。また、洗掘発生限界時の水深をあらかじめ検討しておくことで洗掘深の発達を推測することが可能である。

参考文献

- 栗津清蔵(1991a): 橋脚周辺の洗掘について, 日本大学理工学研究報告, 第73号, pp. 27-51.
- 栗津清蔵(1991b): 狹窄部周辺の洗掘について, 日本大学理工学研究報告, 第73号, pp. 53-65.
- 栗津清蔵(1991c): 急縮部周辺の洗掘について, 日本大学理工学研究報告, 第73号, pp. 67-80.
- 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次(1984): 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, pp. 3-52.
- 宇多高明・藪崎義之・村上由高・水野益宏(1986): 離岸堤の異形ブロック散乱の全国実態, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 417-421.
- 佐藤昭二(1966): 漂砂, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集Bコース, 土木学会水理委員会, pp. 19-1-19-29.