

消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験

——マウンドとブロック下部の洗掘——

鈴木 高二朗*・高橋 重雄**

1. まえがき

写真-1 は台風によりブロックが大きく沈下した消波ブロック被覆堤の例である。このような消波ブロックの沈下災害は全国各地で見られるが、通常はブロックの重量不足による散乱とみなされて復旧がなされている。しかし五明ら (1997) の現地調査で明らかにされているように、来襲波浪の波高が設計波高より小さくとも被災している例が多くあり、ブロックの重量不足だけでは説明がつかない。写真-1 の例でも、来襲波は波高 6.3 m、周期 10.4 s であり、設計波の波高 11 m、周期 16 s よりずっと小さい。従って、消波ブロック下部での砂地盤の洗掘等、他の原因によってブロックが沈下しているものと考えられる。

砂地盤の洗掘については今までにも多くの実験が重ねられ、捨石やアスファルトマット等の洗掘防止工についての比較検討もなされている (尾崎ら (1987), 木原ら (1988))。しかし、波による流速と圧力がブロック下部の砂地盤にどのように作用し、洗掘を発生させているかについての検討は未だに少なく、消波ブロック被覆堤の洗掘防止工については設計も経験的で、曖昧な点が多いのが現状である。

本研究では、波による洗掘がブロックの沈下を引き起こす過程を移動床実験で確かめるとともに、固定床実験でブロック、捨石工内部の流速、圧力を計測し、より定量的な洗掘メカニズムの解明を試みた。

2. 実験方法

(1) 移動床実験 (被災再現実験)

実験は比較的大型の造波水路で行った。図-1(a) は実験断面の一例であり、水深 1.0 m の条件で周期 1.5~5.0 s、波高 10~55 cm の規則波を作用させて行った。消波工には 4.3 kg の消波ブロック、砂地盤には中央粒径 0.08, 0.15, 0.3 mm の相馬砂砂、捨石マウンドには中央粒径 7.2 mm, 23 mm の碎石、そして洗掘防止マットには厚さ 0.2 mm のビニールシートを用いている。水深 16 m の消



写真-1 消波ブロック被覆堤の被災例

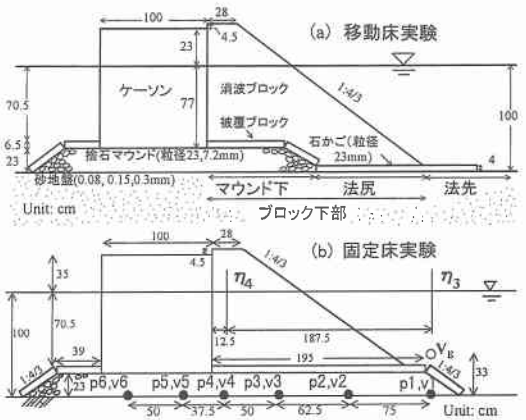


図-1 実験断面

波ブロック被覆堤を考えると、作用させる波の波高は 1.6~8.8 m、周期は 6~20 s に相当する。

(2) 固定床実験 (マウンド内の圧力と流速)

固定床実験では砂地盤上にアクリル板を設置して固定床とし、図-1(b) に示すようにプロペラ流速計と間隙水圧計を 5 cm 離して取り付け、流速と圧力を計測した。流速計は捨石工内の断面平均流速 $u(=u_s * \lambda)$ 、 u_s : 実流速、 λ : 空隙率) を計測することとし、受感部を長さ 5 cm、高さ 1.3 cm、幅 2.5 cm の矩形管の中央部に設置した。さらに、水面変位を計る目的で波高計が取り付けられている。

3. 移動床実験 (被災再現実験)

(1) 波浪条件と洗掘沈下

図-2(a)~(c) は、消波ブロックを砂地盤の上に直接置いた断面 (直置き断面) における砂地盤の洗掘と消波ブロックの沈下状況である。砂地盤は中央粒径 0.08 mm の砂であり、周期 3 s の規則波を小さい波高 (10 cm) か

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
 ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長

洗掘防止工としてマウンドと同じ中央粒径 23 mm の碎石を詰めた石かご(長さ 24 cm, 高さ 4 cm, 幅 8 cm)を設置している。

砂地盤の粒径が 0.3 mm の場合は消波工の沈下はほとんど見られないが、粒径が小さくなると洗掘量は大きくなる。粒径 0.08 mm の砂の場合(図-3(c))はかなり洗掘が進むが、図-2 の消波ブロック直置きの実験結果と比較すると石かごを設置した法尻の部分は洗掘量は小さくなっている。ただし、消波ブロック下部のマウンド下における洗掘量は大きく、消波ブロックの沈下量も大きくなっている。これまで問題とされていなかったこのようなマウンド下の洗掘が意外にも消波ブロックの沈下に影響していることに注意すべきである。

(3) 洗掘防止工としての捨石工の効果(厚さと粒径)

図-4(a) は、中央粒径 23 mm の捨石マウンドを消波ブロック法先部まで延ばした断面で、洗掘防止工としての捨石工厚が大きい場合である。図-3 の石かごにする約 6 層分に相当し、図-3(c)と比較すると洗掘量は小さくなり、捨石工厚を大きくした効果が出ている。しかし、この場合でもマウンド下での洗掘量が大きく、消波ブロックも沈下している。

一方、図-4(b)では、捨石と砂地盤の間に細かい粒径の捨石(中央粒径 7.2 mm)を 2 cm 厚で薄くはさんでいる。この場合、砂地盤の変状は全く見られず、細かい粒径の捨石がフィルターとして機能し、砂地盤が洗掘されるのを防いでいるのが分かる。やはり“捨石工はその形状を厚くするよりも粒径を小さくすることが有効である(木原ら(1988))”ことが分かる。

(4) 帆布、マットの効果

通常の消波ブロック被覆堤では、マウンド下部に帆布が敷かれている場合が多い。図-5(a)は、そうした帆布を敷いた場合であり、マウンド下部の洗掘は防止されているが、その前の石かご下部での洗掘量は大きく、消波ブロックの沈下も大きくなっている。

逆に石かご下部に洗掘防止マットを敷き、マウンド下部に帆布等を敷かない場合は、マウンド下での洗掘量が大きくなる(図-5(b))。特に消波ブロック法尻部の洗掘防止マットの長さが短い場合(図-5(c))は、マウンド下洗掘が顕著である。洗掘防止工を防波堤下部全てに敷設すれば問題ないが、実際にはブロック法尻部、法先部にしか敷設されていない場合も多い。また、マットや帆布を使用する場合でも、施工が容易でないため、隙間ができることが考えられ、隙間部分から洗掘を受けやすい。これらの材料については、十分に強度のあるものを適切に施工することが重要である。

図-6 は、写真-1 と同じ断面の防波堤で発生したマウンドの変状を示すもので、防波堤延長の際、消波ブロッ

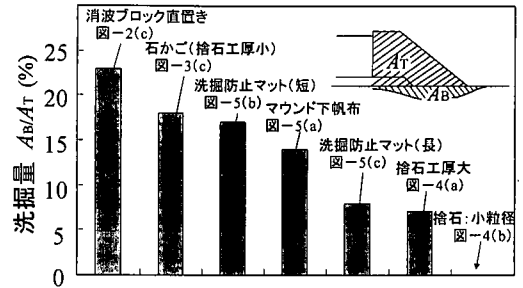


図-7 各断面の洗掘量

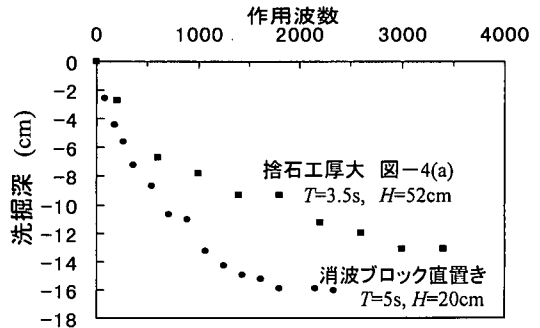


図-8 波の作用回数と洗掘深

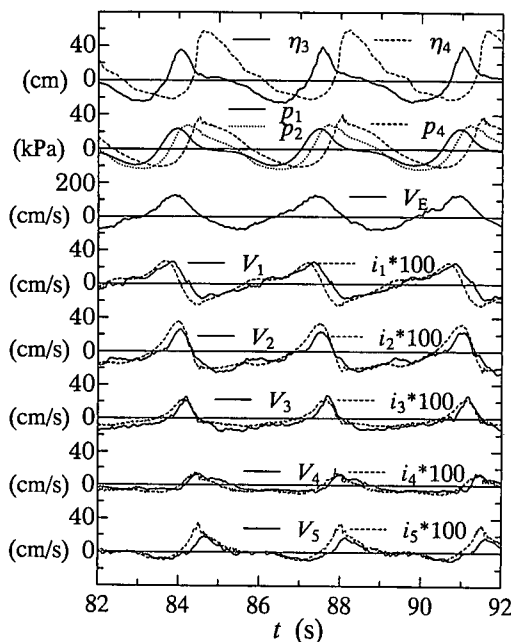
クを撤去した時にたまたま発見されたものである。消波ブロックの下のマウンドが大きく沈下しており、図-5(b), (c)の結果とよく似ている。洗掘防止マットがある部分も沈下しており、すきま、あるいは施工時の破損があったのではないかと考えられる。このようなマウンド下洗掘は通常の調査では発見されることは無く、問題視されにくくなっているものと考えられる。

(5) 各断面の洗掘量

図-7 は各断面の洗掘量を比較したもので、洗掘された砂地盤の面積 A_B をケーソン前面のマウンドと消波ブロックの面積 A_T で割った値を示している。消波ブロック直置きの場合と比較すれば、石かごなどの洗掘防止工を用いた場合はそれなりに洗掘量は小さくなっており、捨石マウンド厚が大きい場合やマットを引いた場合とともに洗掘量は落ちて約 8% までになっている。しかし、洗掘によってブロックが沈下すると、ブロックのかみ合わせが悪くなり、散乱や折損を引き起こすことを考えると約 8% は小さくないものと考えられる。

(6) 洗掘深の時系列変化

図-8 は、波の作用回数と洗掘量の関係であり、最も大きい箇所での洗掘深を示している。波の作用回数が増えるにつれて洗掘はある程度収まるようであり、図-4(a)のケースでは約 3000 波で洗掘は収まっている。波や断面の違いで安定するまでの波数は異なるが、おおよそ 2000~3000 波で安定していた。消波ブロックの沈下被災

図-9 流速、圧力の時系列波形 ($T=3.5$ s, $H=52$ cm)

を受けた現地の防波堤では、ブロックを補充して復旧した後はあまり沈下が見られない。これは洗掘をかなり受け、安定した状態まで達しているためであると考えられる。しかし、洗掘がまだ安定に達していない場合や、さらに大きな波が来襲する場合には洗掘が進み、ブロックの沈下に到る可能性がある。

4. 固定床実験 (捨石工内部の流速と圧力)

(1) 流速と圧力の測定値

図-9は水面変位とマウンド内の間隙水圧、流速、間隙水圧の動水勾配(圧力差をセンサーの距離で割ったもの)の時系列波形である。堤体断面はマウンドを法尻部まで延ばした断面で、周期 3.5 s、波高 52 cm の規則波を作用させた場合で、造波開始から 82 s 後のデータである。

マウンド内の間隙水圧 p_1, p_4 とその直上の水面変位 η_3, η_4 から、圧力は水面変位に対応して発生しているのが分かる。一方、流速は $v_1 \sim v_6$ にかけて波形が変わり、マウンド法尻部 v_1 では岸向き、沖向きの流速の継続時間がほぼ等しいのに対し、マウンド内部 $v_2 \sim v_4$ では沖向き流速の継続時間が長い。 v_5, v_6 では再び岸向き、沖向きの継続時間が等しくなっている。これと同じ断面の移動床実験(図-4(a))では、 v_1, v_5, v_6 の位置で洗掘量が小さく、 $v_2 \sim v_4$ の位置で大きく洗掘されており、図-9に見られる $v_2 \sim v_4$ での平均的な沖向きの流れが洗掘を発生させているものと考えられる。

$i_1 \sim i_5$ は間隙水圧計間 ($p_1-p_2, p_2-p_3, p_3-p_4, p_4-p_5, p_5-p_6$)

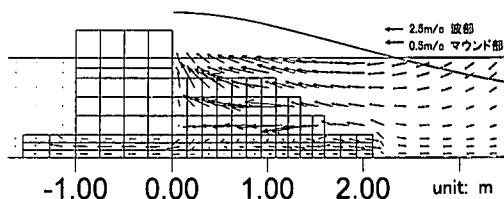


図-10 数値計算結果(消波ブロック被覆堤内の流れ)

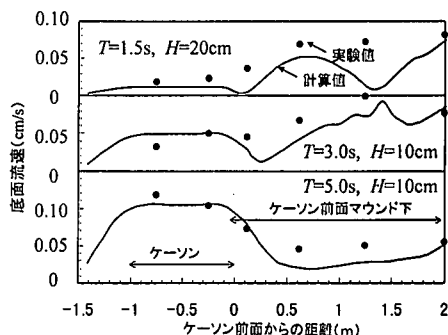


図-11 数値計算結果(底面流速に及ぼす周期の影響)

間)の動水勾配の時系列波形である。近くの流速計の波形(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)と比較すると極めてよく似ており、マウンド内の流れはこうした動水勾配によって発生していることが分かる。さらに、図には v_1 の上部に設置した電磁流速計 v_E の波形を示しているが、 v_1 の波形の方が若干位相が早い。これは捨石内部の流れが動水勾配によって発生するため、波部の流れより位相が早くなることを示している。勝井(1991)は「捨石 2~3 層以深における浸透流は、動水勾配のみによる流れとなる」と述べているが、今回のマウンド内の流れもこれにあてはまるものと考えられる。なお、この実験でのマウンド内の透水係数は 1.0 m/s 程度である。

(2) 計算との比較

図-10は、朴ら(1996)の線形 FEM 計算により上記実験条件に対してマウンド、消波ブロック内の流れを計算したものである。マウンドや消波ブロック内の流れはダルシー則で近似しており、それぞれの透水係数は 1.0, 10.0 m/s である。底面での水平流速やケーソン下部のマウンド内の流れの状況、さらには消波ブロック内での流速と、法尻のマウンドの流速との位相遅れ等が再現されている。

図-11は底面上 4 cm での水平流速であり、図-10と同じ断面で、周期 1.5 s, 3.0, 5.0 s の場合の計算結果である。マウンドの透水係数を 4 m/s とすると、計算値は実験値と比較的一致する。ケーソン前面は重複波の腹で、水平流速が小さいが、周期が長くなるとケーソン下部の流れの影響でその位置は若干沖側になる。また、周期が

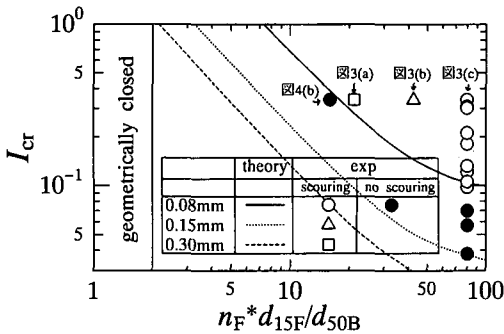


図-12 捨石下部の砂の移動限界

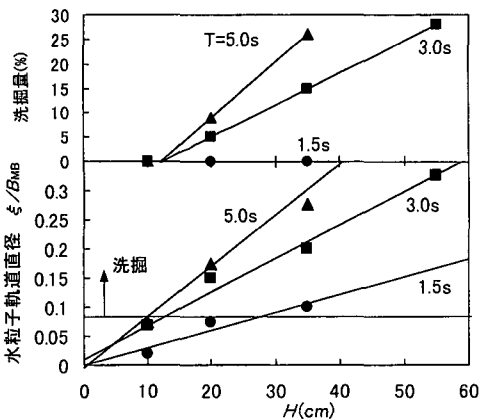


図-13 水粒子軌道直径と洗掘量

長くなるとケーソン下のマウンド流速は大きくなる一方で、消波ブロック下部のマウンド流速は小さくなる。しかし、前掲図-2 でみたように周期が長くなるにつれて洗掘量は大きくなっており、洗掘量に関しては流速だけでなく水粒子の移動距離も影響しているものと考えられる。

なお、この線形 FEM 計算は図-9 に見られるような非線形な流れを計算できない、マウンドやブロック内の流れや自由表面の影響を適切に表すことができる数値計算法の適用が必要である。

5. 初期移動限界と洗掘量

(1) 初期移動限界

図-12 は捨石工下部の砂地盤に平行な定常流が作用した時の砂の移動限界を示す De Graauw ら (1984) の実験をもとにした図である。図中の曲線より上側で砂が動き出すことを意味している。横軸は捨石の砂地盤に対する粒径の比 d_f/d_b に捨石の空隙率 n_F をかけた値 $n_F * d_f/d_b$ で、縦軸は砂地盤に平行な定常流の動水勾配である。図中の点は今回の実験結果で、白抜きは砂が動いた

場合、黒丸は動かなかった場合であり、比較的良好一致している。これを現地で使われる捨石にあてはめると、通常 $n_F * d_f/d_b$ は 400 以上であり、洗掘は免れない。従って、洗掘を防ぐには小粒径の捨石を組み合わせる使うか、あるいはマット等を適切に使用する必要があることが分かる。

(2) 水粒子移動距離と洗掘量

図-13 は洗掘量とマウンド内の水粒子軌道直径の関係で、横軸に波高をとって周期別に示している。図中、水粒子軌道直径 ξ はケーソン前面から消波工法尻までの距離 $B_{MB}=200$ cm で無次元化している。波高、周期が大きいほど、水粒子移動距離は大きくなり、これに比例するように洗掘量も大きくなる。特に水粒子軌道直径 ξ/B_{MB} が約 0.1 を越えると洗掘量が顕著になり、逆にこれ以下では洗掘は無く、周期 1.5 s では碎波波高でも洗掘は見られない。これは舞い上げられた砂が水の大きな動きに伴ってマウンド外に出されると、マウンド外のより大きな流れでマウンド内に戻れなくなるためと考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、貴重な資料の提供とご助言を頂いた北海道開発局吉本港湾建設課技術対策官、同土木研究所佐々木港湾研究室長、木村副室長、運輸省第三港湾建設局高知港湾建設事務所伊藤所長、同事務所下元係長、日本海上工事田崎邦男氏に謝意を表す。

参考文献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢治 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
- 上野成三・小山文男・石野和男・宇多高明・村井禎美 (1989): 斜板消波潜堤 (SURF) のマウンド内の浸透流場と洗掘特性について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 424-428.
- 尾崎 晃・鴻上雄三・田崎邦男・中野 浩・小川明久 (1987): 洗掘防止工の現状と海底面被覆工の波力に対する安定性, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 416-420.
- 勝井秀博 (1991): 海洋構造物周辺の洗掘と洗掘防止工に関する研究, 東京大学工学部土木工学科博士論文, 382 p.
- 木原 力・甲斐正義・鳥居雅孝・望月規行: 防波堤前面の洗掘対策について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 402-406.
- 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求 (1997): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査 (第 2 報), 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 961-965.
- 朴 佑善・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求 (1996): 波一地盤一構造物の相互作用に関する有限要素法解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1036-1040.
- A. F., De Graauw, T. van der Meulen, and M. R. van der Does de Bye (1984): Granular Filters: Design Criteria, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 110, No. 1, Feb., pp. 80-96.