

親水性護岸背後舗装の耐波特性と許容越波流量

遠藤 仁彦*・木村 克俊**・菊地 聡一***・須藤 賢哉**

1. ま え が き

近年、海と陸との接点を担う海岸・港湾では、人が憩えるような空間の整備がなされており、その一つの方策として護岸の親水化が進められている。それらの施設では、従来と同様背後地に対する防波機能を有しつつ、人の利用を考慮して利便・安全・景観等の観点から様々な付帯施設の整備が行われている。しかしながらこうした施設は護岸本体に比べて構造的に弱く、鈴木ら（1994）による全国的な護岸被災調査から明らかなように被災事例が少なくないために、その耐波設計法の確立が望まれている。たとえば高橋ら（1994）は、防波堤や護岸上に設置する手すりの耐波設計法を提案しており、比較的小さな構造物に作用する抗力的な波力については算定が可能となっている。

本研究では、親水性護岸の背後舗装に着目し、面的な施設の耐波特性を検討している。護岸の被災例に基づいて各種舗装工の破壊特徴を明らかにし、整備事例数が多いわりに強度的に弱いインターロッキングブロック舗装（以後、インター舗装と呼ぶ）を対象に詳細に耐波設計法を検討する。

2. 護岸背後舗装工の被災例

写真-1は、A漁港護岸パラペット（+6.95 m）背後の



写真-1 護岸背後の被災状況

被災状況を示したものであり、護岸から約60 mの広範囲で舗装工の破壊が生じている。図-1は、護岸背後の断面図を示したものであり、護岸直背後の水叩き部分がタイルをモルタルで接着した舗装、その背後が車道用のアスファルト舗装、歩道用のインター舗装、さらにその背後が作業用地用のアスファルト舗装となっている。同図の上側には、被災時の最大の波高条件を対象とした再現実験により得られた、護岸背後での越波水の打ち込み頻度を示している。これによると、越波水のほとんどが車道部分よりも護岸側に落水しており、インター舗装よりも背後は越流状況になっている。一般に越波水による鉛直力は、打ち込み範囲において越流範囲よりも大きくなると考えられ、打ち込み範囲にあったタイル舗装は接着モルタルが破壊してタイルが剥がされていたが、破壊したのはわずかであった。アスファルト舗装（車道）は、越波水が直接作用していたにも関わらず、全く被害が見られなかった。一方、越流範囲に位置するインター舗装は、全てのブロックが剥がされ、かなり洗掘を受けている。また、その背後のアスファルト舗装（作業用地）は広範囲で表層が剥がされ飛散している。

これらの被災例から推察すると、周辺が破壊されていない状況において強度的にはアスファルト舗装・タイル舗装・インター舗装の順に弱くなると考えられる。ただし、アスファルト舗装であっても、側面から流れを受けたり、路盤が吸い出しを受けた状況で極端に弱くなることが分かる。

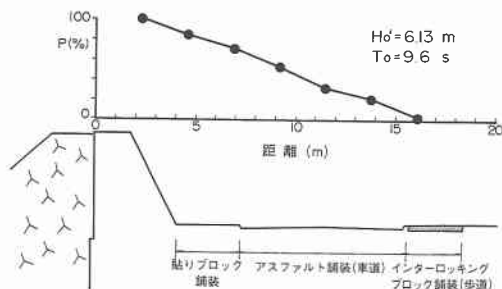


図-1 護岸背後の構造と越波状況

* 正会員 北海道開発局港湾部港湾計画課（元開発土木研究所）

** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室

*** 正会員 北海道開発局根室港湾建設事業所（元開発土木研究所）

3. 実験概要

水理実験では、長さ 27.0 m、幅 0.6 m の 2 次元環流水路を用いて、①破壊実験、②ブロック引抜実験、③目地砂洗掘実験の 3 種類を行った。

破壊実験は、インター舗装の破壊メカニズムを把握する目的で実施しているものであり、インターロッキングブロック（以後、ブロックと呼ぶ）の模型を用いて定常流中のブロックの挙動を検討した。ブロック模型は、高さ 1.1 cm、幅 1.7 cm、長さ 4.3 cm の直方体であり、凹凸のある平板の上に載せ、流れ中の挙動を観察した。なお、ブロック模型は、ブロックの破壊状況を水路内で再現するために、比重を 1.29 としている。

ブロック引抜実験では、目地砂の種類や量を変えて、ブロックの四方が拘束されている状況で、ブロック 1 個の引き抜きに要する荷重を計測した。

目地砂洗掘実験では、実験水路内に長さ 1 m、幅 50 cm の検査面を設け、その間に実スケールのブロックを用いたインター舗装を再現し、流れを作用させた後に目地砂の洗掘量を測定した。ブロックは、高さ 6.0 cm、幅 9.8 cm、長さ 19.8 cm の長方形のものを用い、図-2 に示すストレート配置（図の左右が流れ方向）とした。なお、敷砂厚は 2 cm とし、目地砂は、けい砂（中央粒径 $D_{50}=0.18$ mm、均等係数 $D_{60}/D_{10}=1.8$ ）、細砂（ $D_{50}=0.21$ mm、 $D_{60}/D_{10}=2.0$ ）、粗砂（ $D_{50}=0.58$ mm、 $D_{60}/D_{10}=1.9$ ）、施工砂（ $D_{50}=0.55$ mm、 $D_{60}/D_{10}=2.3$ ）の 4 種類を用いた。

4. インター舗装の耐波特性

(1) インター舗装の破壊メカニズム

写真-2 は、流れ中におけるブロック模型の破壊する瞬間状況を連続的に写したものである。写真上段は、破壊し始めの状況であり、ブロック数個が上方に浮き上がり、その後下流（写真左側）に流されている。これからインター舗装の破壊時の特徴は、数個のブロックが流さ

れると急速に周辺のブロックが剥がれ、一気に破壊が進行することである。

ブロックの安定を力学的に考えると、以下の 2 つで力の作用状況が異なる。

① 周辺のブロックが剥がれていない状況

② 周りのブロックが一部剥がれている状況

状況①では、流れ中のブロックには以下に示すような流速の二乗に比例する揚力 F (kgf) が作用する。

$$F=(w_b/2g) \cdot C_L \cdot A_L \cdot u_{\max}^2 \cdots \cdots (1)$$

ここに、 w_b ：海水の単位体積重量、 C_L ：揚力係数、 A_L ：ブロックの流れに面する面積 (cm²)、 $u_{\max}$ ：ブロック上での最大流速 (cm/s) である。

これに対して目地砂が存在するときは、ブロックと砂との間にせん断抵抗が存在し、ブロックには抵抗力 f が生じる。ブロックが上方に剥がれて破壊するのは、抵抗力 f よりも揚力 F が大きくなったときと考えられる。

状況②では、例えば上流側のブロックが剥がれてしまうと、ブロック側面が直接流れの作用を受けるようになる。ブロックに作用する外力としては式 (1) で表される揚力の他に抗力が加わり、破壊を促進する外力が増加する。また、周辺ブロックが無くなることにより、側面でのせん断抵抗の一部が無くなり、破壊を抑制する力が減少してしまう。その結果、前掲の写真-2 で示したように一気に破壊が進行するものと考えられる。

(2) ブロックに作用する揚力

図-3 は、ブロック模型を用いた破壊実験の結果を示すものである。横軸にブロック上層の定常流速、縦軸にブロック破壊率 ε をとっている。なお、ブロック破壊率とは、剥がれたブロック数を総数 210 個で除したものである。また、図中の実線は、実験値の上限を示している。流速が 76 cm/s 以下では破壊が生じていないが、それより大きくなると破壊率が上昇し、120 cm/s 程度でほぼ 100 % のブロックが剥がれている。一方、ブロックに作用する力を考えると、目地砂が無いために抵抗力はブロッ

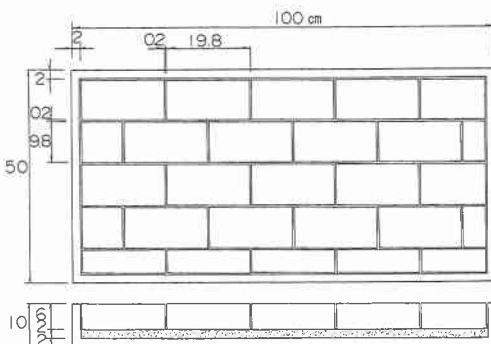


図-2 ブロックの配置

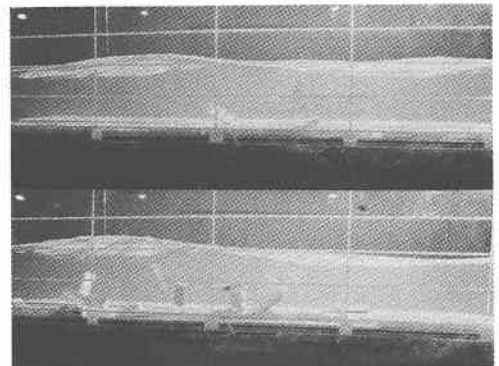


写真-2 インター舗装の破壊時の状況

クの水中重量だけになる。したがって、破壊限界を76 cm/sと考えると、式(1)を用いるとブロックの揚力係数 C_L が0.11になっていることが分かった。

(3) ブロックの引抜強度特性

図-4は、洗掘実験後のブロック抵抗力からブロック自重の影響を除いた後に、単位接触面積当たりのせん断強度を示したものであり、中央粒径0.18~0.21の目地砂を用いた場合のものである。横軸に洗掘量 d 、縦軸にせん断強度 $\tau(d)$ をとっている。実験データはばらつきが大きい、全体的に洗掘量が多いほどせん断強度が小さくなる傾向がある。これは、目地砂が洗掘されるほど砂が緩んだ状況になるためと考えられる。また、洗掘量が少ない条件において、初期強度よりも大きな値になっているものがあるが、ブロックを引き抜く際に横のブロックとの接触が原因である。したがって、これらのデータを除外して洗掘量によるせん断強度の低減係数 α を式(2)のように考え、ブロックの抵抗力 $f(\text{kgf})$ の関係を式(3)のようにモデル化した。

$$\alpha = 1 - d/d_B \quad \dots\dots\dots (2)$$

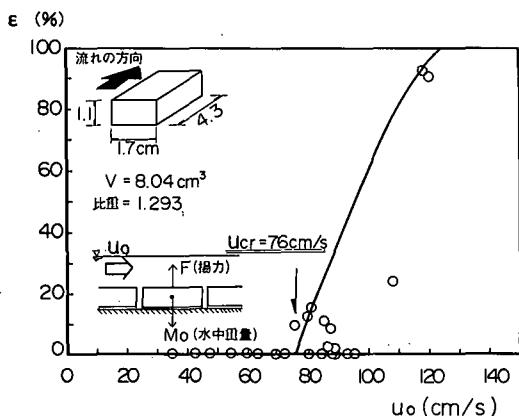


図-3 流速とインター舗装の破壊率 ϵ

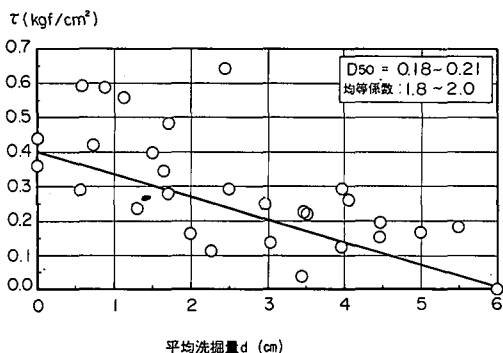


図-4 平均洗掘量とせん断強度の関係

$$f = \tau(d)A_s + W_0 = \alpha \tau_0 A_s + W_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 d :洗掘量 (cm)、 d_B :ブロック厚 (cm)、 τ_0 :初期せん断強度 (kgf/cm^2)、 A_s :ブロックと砂との接触面積 (cm^2)、 W_0 :ブロックの水中重量 (kgf) である。

(4) 目地砂の洗掘特性

図-5は、ブロック近傍での水平流速の鉛直分布を示したものであり、インター舗装において流れに沿った目地位置で測定している。なお、実験では目地砂が無い状態で測定している。横軸は各位置での水平流速 $u(h)$ をブロック上での平均流速 u_0 で無次元化したもの、縦軸は鉛直位置を示している。例えば、 $h=0$ cm はブロック上端を表し、 $h=-3$ cm はブロック上端から3 cm 下がった目地内の位置を示す。流速は、ブロックより3 cm 以上の位置においてはほぼ等分布となっているが、ブロック近傍では底面摩擦の影響からブロック上であっても流速が減少している。ブロック間の目地内部では、ブロック側壁による摩擦の影響が大きく、さらに急激に流速が低減している。例えば、ブロックの内部に2 cm 入ると、上層流速に比べて流速が約20 %程度になる。また、無次元水平流速の鉛直分布は、上層流速にほとんど依存しないので、実験値を式(4)に示すように近似した。

$$u(h) = u_0 \quad : h \geq 1.65 \text{ cm} \\ = 0.537 u_0 e^{0.381 h} \quad : h < 1.65 \text{ cm} \quad \dots\dots (4)$$

洗掘現象は、流速と非常に相関が高い。これは、目地砂の洗掘が①ブロック上層の速い流れによる圧力勾配によって吸い出されることによるものと、②目地内部の流速によって掃流されるものが考えられ、いずれも流速の2乗に比例するような力によって洗掘が進行しているためと考えられる。

図-6は、流速と洗掘量の時間変化率との関係を示し

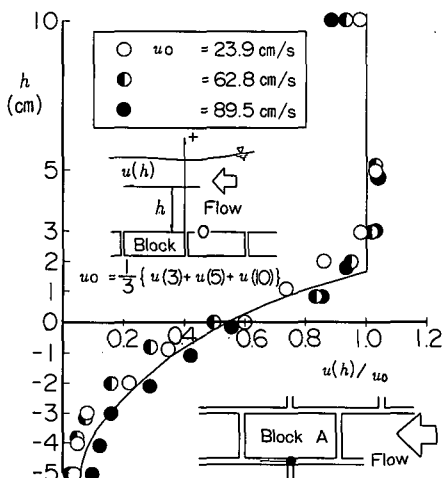


図-5 ブロック近傍の水平流速の鉛直分布

たものである。横軸には洗掘した位置における流速 $u(d)$ の二乗を、縦軸には洗掘量の時間変化率（洗掘速度）を示している。なお、 $u(d)$ は実際の洗掘位置での流速でなく、式（４）から求められる目地砂が無い状況における同位置での仮想的な流速を用いている。図中には、中央粒径 D_{50} と均等係数 D_{60}/D_{10} が異なった３種類の目地砂について、それぞれ示している。均等係数が同程度の場合、中央粒径が小さい方が同じ流速で洗掘される速度が速い。これは、粒径が小さい方が粒子の移動に必要な掃流力が小さくなるので、洗掘速度が大きくなっているものと考えられる。また、同程度の中央粒径である粗砂 ($D_{50}=0.58$, $D_{60}/D_{10}=1.9$) と施工砂 ($D_{50}=0.55$, $D_{60}/D_{10}=2.3$) を比較すると、均等係数が小さい方が洗掘速度が速くなっている。砂の移動に直接関係するのは表層部分であり、施工砂では粗砂に比べて大きな粒子が存在するために移動しにくくなっていると考えられる。

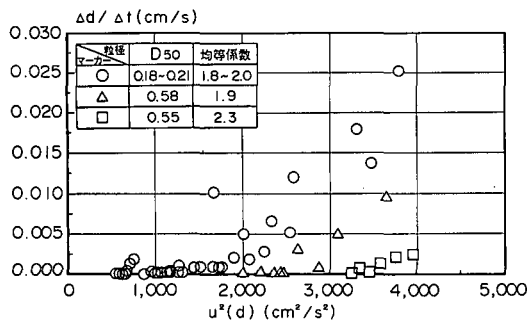
一方、洗掘位置における流速 $u(d)$ の二乗と洗掘速度は、ほぼ比例関係にあることが分かる。そこで、実際の施工に用いられる砂 ($D_{50}=0.55$, $D_{60}/D_{10}=2.3$) において、洗掘速度 $\Delta d/\Delta t$ (cm/s) は実験値から式（５）に示すように近似される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta d/\Delta t &= 0.0000036 \times u(d)^2 - 0.0117 \\ &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &: u(d) > 57.0 \text{ cm/s} \\ &: u(d) \leq 57.0 \text{ cm/s} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (5)$$

5. 越波モデルによる破壊限界時の越波流量の検討

(1) 越波モデルの考え方

既往の越波水の運動モデル OWM (高橋ら：1993) では、施設の構造条件や波浪条件が与えられると、施設天端上での越波時の流速や水位を算定できる。また、このモデルでは、１波１波の越波水の運動を個別に計算することより、波の出現確率をレーリー分布と仮定して、不規則波の平均越波流量を期待値として算定することもできる。



図－6 洗掘量の時間変化率

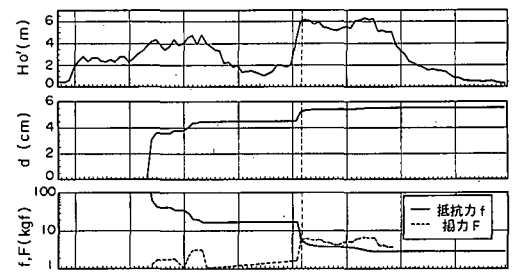
インター舗装の破壊を検討する際には、ブロックに作用する揚力 F と抵抗力 f を算定し、 $F > f$ のときに破壊すると考える。ブロックに作用する揚力は、不規則波中の最高波高における瞬間最大流速を OWM から求め、前掲式（１）から算定した。また、抵抗力を検討するために、OWM を用いて不規則波中での流速とその継続時間の期待値を求め、式（４）と（５）を用いてトータルの洗掘量を計算する。抵抗力 f は、式（２）と（３）を用いて計算できる。

(2) モデルの妥当性

図－7 は、現地被災事例を用いてモデルによる破壊の再現性を検討したものである。図の上段には 12/14～12/21 の換算沖波波高 H_0 を示しており、その間 2 回大きな時化があった。1 回目の時化は 12/16 がピークになっており、この年で 2 番目に大きい時化であった。12/18 から 12/20 の 2 回目の時化は、既往最大のものであり、その間に被災が起きている。図の中段には越波モデルによって算出された目地砂の洗掘量、下段にはブロックの抵抗力 f (実線) と揚力 F (点線) を示している。計算による破壊時は抵抗力と揚力が逆転するときであり、12/16 の時化では破壊せず、実際の被災が生じた期間で破壊しており、モデルの妥当性が検証できた。

(3) 越波モデルによる破壊限界越波流量

図－8 は、波の継続時間とブロックの抵抗力との関係を越波モデルを用いて計算したものである。計算は直立護岸を対象に行い、天端高さ 2 m、水深 10 m、マウンド上の水深 8 m、マウンド肩幅 5 m、周期 6 s とした。計算波高は、平均越波流量が 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ になるように設定した。なお、最高波高は有義波高の 1.8 倍とし、波の継続時間だけを変えて計算した。横軸には波の継続時間、縦軸にはブロックの抵抗力を示している。ブロックの初期抵抗力は約 250 kgf であるので、越波流量が大きくなると短時間の間に急激に抵抗力が低下しているのが分かる。例えば、越波流量が $10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ の場合、30 分間で抵抗力が 1/10 に減少している。一方、波の継続時間と抵抗力との関係をみると、ある程度時間が長



図－7 越波モデルによる破壊の再現

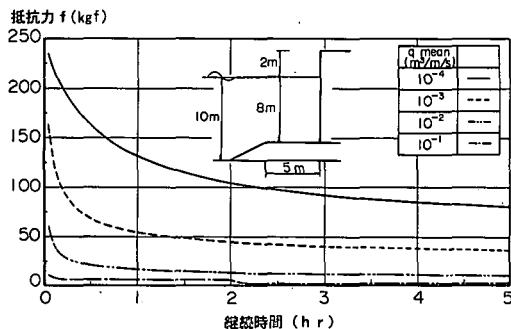


図-8 波の継続時間とブロックの抵抗力

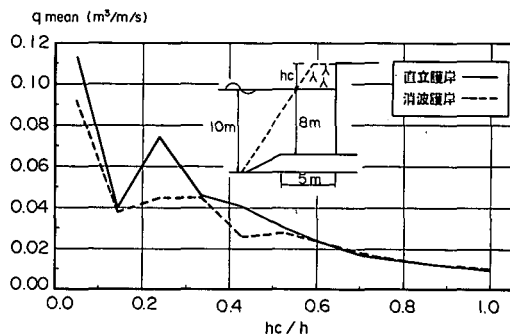


図-9 破壊限界時の越波流量

くなると抵抗力がほぼ一定値になる傾向がある。したがって、計算をする際の波の継続時間としては、3時間程度考えると継続時間の影響が少なくなることが分かった。

越波現象において基本的なパラメータの一つは天端高さであり、天端高さによって越波状況が異なってくる。図-9は、天端高さ h_c と破壊時の越波流量との関係を示したものである。計算は波の継続時間を3時間とし、天端高さ以外は前掲図-8と同様の条件で直立護岸と消波護岸を対象に行った。護岸構造による破壊限界の相違はあまり見られないが、天端高さが大きくなると破壊限界時の越波流量が小さくなる傾向がある。これは、越波モデルが天端高さによる非線形な打ち上げ現象を考慮して

いるためである。つまり、天端高さが相対的に大きくなると、同じ越波流量でも最高波高での瞬間的な最大流速が大きくなるために、ブロックの破壊に直接関係する揚力が大きくなり、破壊しやすくなっている。ただし、 h_c/h がある程度大きくなると、破壊限界時の越波流量はほぼ一定になる傾向がある。また、実際の設計条件を考えると、天端高さ和水深との比は1.0がほぼ上限となっている。したがって、インター舗装に対する許容越波流量としては、やや安全側を考慮して、 $0.01 \text{ m}^3/\text{m/s}$ が目安になると考えられる。

6. まとめ

本研究では、親水性護岸背後施設において舗装工に着目して越波による破壊限界を検討した。被災事例から各種舗装工の中でインター舗装が比較的強度的に弱いことが分かり、越波水の流れだけで破壊することが明らかになった。同舗装工の破壊限界越波流量は、越波モデルによる検討の結果、 $0.01 \text{ m}^3/\text{m/s}$ になった。

親水性護岸では、従来の護岸に見られないような施設が整備されており、しかもインター舗装のように越波に対して比較的弱い施設が多いために設計上注意を要する。設計時には、親水機能から整備される付加的な施設と本来機能からの施設に分けて考える必要があり、施設そのものの耐力を上げるような細部設計をすべきである。インター舗装の越波に対する具体的な対処方法は、目地砂の洗掘を防止すればよく、目地部分をシールドするなどの工夫をすれば強度の低下はある程度防ぐことができる。

参考文献

- 鈴木康正・平石哲也・望月徳雄・森川高徳 (1994): ヒアリングによる護岸の越波被災調査, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 681-685.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1993): 越波による人の転倒限界条件とその現地への適用, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 295-300.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・船越晴世・津田修一・斎藤辰三 (1994): 高波浪実海域での防波堤上の手すりの耐波安定試験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 686-690.