

技術報文

セル型グラベルマットの技術開発と活用事例

ナカダ産業株式会社 営業部技術開発課 関谷 勇太、田代 洋一

1. はじめに

近年、地球規模の気候変動により大型台風の増加やゲリラ豪雨、海面水位の上昇が確認され、防波堤の被災や河川堤防の決壊など多数の自然災害が発生している。このような環境の中では、従来技術による対策だけではなく、新たな技術開発による課題の解決が求められる。

海岸保全施設の洗掘防止工に目を向けると、不織布シートや築堤マット、アスファルト系マットによる工法が一般的に採用されている。一方、著者らはジオシンセティックスを使用した新技術として柔軟性と透水性を兼ね備えた重量マット構造物「セル型グラベルマット」を考案し、洗掘防止工として実用化した。セル型グラベルマットとは、**図-1** および**写真-1** に示すように繊維網で構成された四角柱のセルに粒径 10mm 以上の碎石を充填し、マット構造物とした洗掘防止技術である。単位面積重量が大きく波に煽られにくい、地形の不陸に対して追従性が高い、広範囲を一度に被覆できる等の特徴を有する。

本報文では、新技術・セル型グラベルマットの技術開発状況および活用事例を報告する。

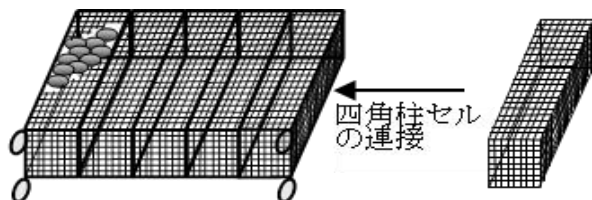


図-1 セル型グラベルマット概念図



写真-1 セル型グラベルマット外観

2. 人工リーフの洗掘防止工として技術開発

セル型グラベルマットは当初、人工リーフの沈下変形対策工として、当時の（財）土木研究センターとナカダ産業（株）により共同開発された技術である。技術の効果は水理模型実験によって検証・報告¹⁾されている。

(1) 水理模型実験による検証¹⁾

a) 実験方法

幅 0.8m×高さ 1.5m×長さ約 50m の二次元造波水路の中に、中央粒径 $D_{50}=0.08\text{mm}$ のケイ砂を用いた海底勾配 1/30 の移動床地形を作成した。実験に使用した人工リーフは現地換算で高さ 4.0m、天端長 30.1m、沖側勾配 1:3.0、岸側勾配 1:2.0 の形状である。人工リーフの被覆には質量 6.0t のブロックを使用し、堤脚水深は 5.0m に設定した。模型縮尺は 1/20 とした。

人工リーフ模型の沈下変形対策として、2種類の厚みのセル型グラベルマットを横断・縦断方向に連結して法先底面に敷設した（**図-2**）。岸側には中詰め材に粒径 0~40mm の碎石を充填した

マット、沖側には粒径 300～500mm の石材を充填したアンカーマットを使用した。それぞれ、吸出し防止と吸出し促進の役割を果たし、後者のマットが積極的に沈下することで前者のマットが法先地盤を被覆し、洗掘孔の拡大を防ぐことを期待した。

実験ケースは対策なし、およびマットによる沈下変形対策の 2 ケースとした。各ケースに対して、現地換算で沖波波高 3.0m、沖波波長 60.4m、周期 9.0s の規則波を、地形変化がほぼ安定する 7,000 波まで作用させた (表-1)。波作用後の局所洗掘の状況を確認・評価した。

b) 実験結果

対策なしのケースでは、法先部に現地換算で最大 2.5m の洗掘孔が生じた。また、人工リーフ底面の吸い出しにより、堤体の法肩近傍から法面にかけて沈下が発生し、被覆ブロックが滑落した (写真-2)。一方で、セル型グラベルマットによる対策を行ったケースでは、アンカーマットの沖側に現地換算で最大 1.8m の洗掘孔が生じたが、堤体には影響が及んでおらず、対策の効果が確認された (写真-3)。

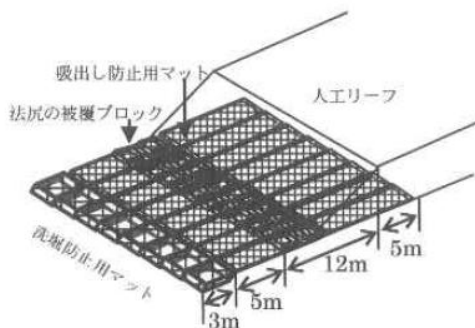


図-2 沈下変形対策の外観図

表-1 実験条件

項目	数値 (現地換算)
波浪	規則波
沖波波高	3.0m
周期	9.0s
沖波波長	60.4m
波数	7,000 波

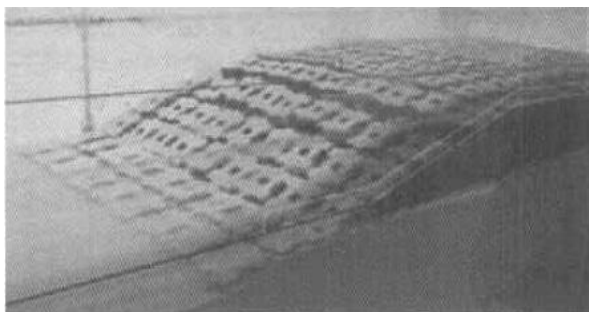


写真-2 波作用後の状況 (対策なし)

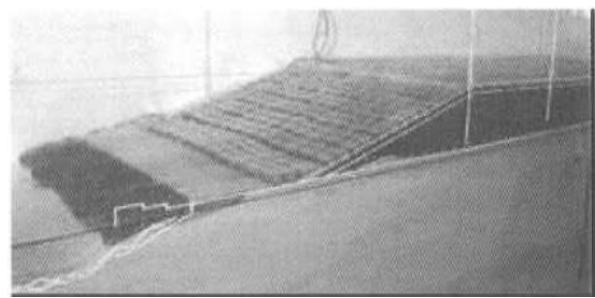


写真-3 波作用後の状況 (沈下変形対策)

3. 現地への活用事例

(1) 三重県七里御浜井田地区海岸の人工リーフ法先洗掘防止工

七里御浜井田地区海岸では高度経済成長期以降、土砂供給量の減少により海岸侵食が進行するようになった。そのため、人工リーフの設置や養浜など様々な侵食対策が行われている²⁾。特に計画延長約 1.0km の人工リーフは、複数年度に分かれて徐々に整備が進められている。この人工リーフの法先洗掘防止工を対象にセル型グラベルマットを活用した。地形変化に合わせた可撓性や、繊維素材であり漁網被害が生じにくい点にメリットがある。

人工リーフの断面を図-3 に示す。高さ約 4.5m、天端長約 62m、沖側勾配 1:3.0、岸側勾配 1:2.0 の構造である。人工リーフの被覆として沖側に 30t、岸側に 12t の平ブロックが上載される。法先

には洗掘防止工として、厚み 30cm のセル型グラベルマットと厚み 50cm のアンカーマットを岸沖方向に連結した。この連結形状は水理模型実験で検証した断面とほぼ同様である。

写真-4～写真-6 にセル型グラベルマットの製作・敷設の作業状況を示す。陸上ヤードで専用の投入装置を用いてセル型グラベルマットに中詰め材を充填し、仮置きした。仮置き場から敷設位置まで海上輸送し、現地へ敷設した。敷設時には潜水士による玉外し作業やマット同士の連結作業が必要である。マットは産業用特殊ファスナーにより相互に連結し、広範囲を被覆した。

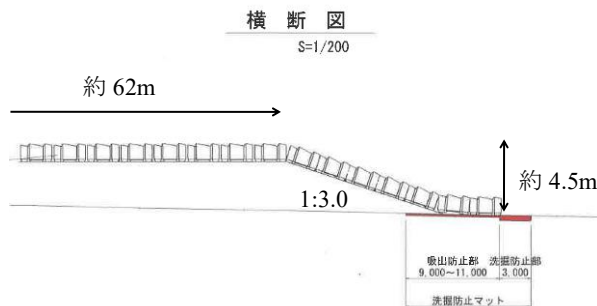


図-3 人工リーフ横断図



写真-4 中詰め材投入状況（陸上）



写真-5 敷設作業状況（水上）

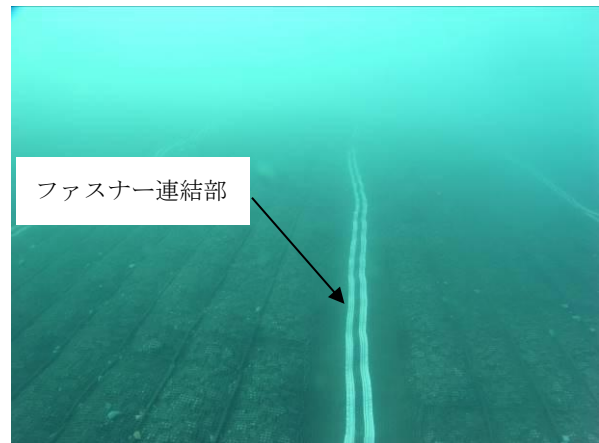


写真-6 敷設状況（水中）

(2) 宮崎県宮崎海岸の埋設護岸の洗掘防止工

海岸侵食による浜崖の後退が進む宮崎海岸では、2013年に侵食対策の一つとしてサンドパック工法による埋設護岸工を採用した。図-4に示すとおり、当初の埋設護岸は養浜により埋められたサンドパックとその底面に敷設された不透水性のアスファルト系洗掘防止マットから構成された³⁾。しかし、完成後に相次いで接近した3つの台風により、一部のサンドパックが露出・損傷し、中詰め材が流失した（写真-7）。国土交通省による事故調査では、図-5のように土砂の急激な流失により埋設護岸が沈下し、下に埋まっていたコンクリート破片によって破損したと推定している⁴⁾。また、写真-8のように洗掘防止マットが繰り返しめくられて破断したことで、サンドパックを傷つけた可能性も指摘されている。

上記のような被災を受けて、洗掘防止工の改良案としてセル型グラベルマットを用いた断面を提案した。めくれに強い透水性の重量マット構造物である点、繊維網と小粒径砕石で構成されるため、マットが万が一損傷した場合でもサンドパックを傷つけない点の2点が特徴である。マットを埋設護岸の洗掘防止工に用いた断面は、二次元の水理模型実験により検証・報告⁵⁾した後、現地での活用に至った。

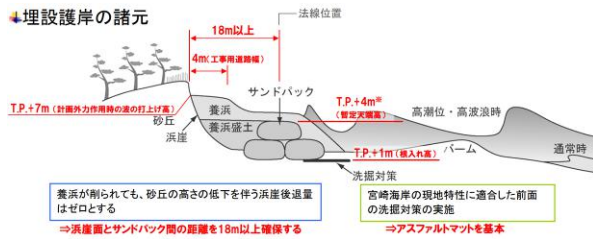


図-4 埋設護岸の諸元³⁾

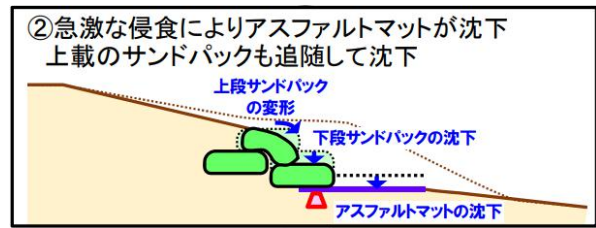


図-5 サンドバック変状の推定メカニズム⁴⁾



写真-7 サンドバックの変状⁵⁾



写真-8 洗掘防止マットの破断と流失⁵⁾

a) 水理模型実験による検証⁵⁾

長さ 52m、幅 1.0m、高さ 1.5m の二次元断面水槽の中に現地を模した移動床断面を作成し、縮尺 1/50 の模型実験を実施した。サンドバック構造物のみの無対策断面と、セル型グラベルマットによる対策断面の 2 つを比較した。対策断面の洗掘防止工はサンドバック底面全てにセル型グラベルマットを敷設し、その沖側にアンカーマットを連結している。各断面に対して現地換算で沖波波高=6.0m、周期=12.0s の不規則波を 500 波作用させ、サンドバック構造物の変化状況とセル型グラベルマットの挙動を観察した。

無対策断面では、外力の作用によりサンドバック構造物前面の地形が崩れ、下段サンドバック前面の地盤が低下していく。その後、越波した波の引き波の流れが上段と下段サンドバックの間から沖へ戻るようになり、背面や底面の砂を流失させる。陸側からの土砂供給がなくなると、下段沖側サンドバックの前面に洗掘孔が発生した(写真-9)。サンドバック構造物の天端高は現地換算で約 1.0m 沈下しており、吸出し防止・洗掘防止対策の必要性が示唆された。

対策断面では、造波初期にアンカーマットが動揺するものの、錘として抵抗する。アンカーマット底面の砂が吸い出されて屈とうすると動揺は収まる。洗掘孔はアンカーマットの沖側に発生する。アンカーマットは現地換算で約 1.35m 沈下するが、サンドバック構造物の天端高の沈下は現地換算で 0.5m 以内に収まり、無対策断面と比較して埋設護岸の変状を抑えられた(図-6)。

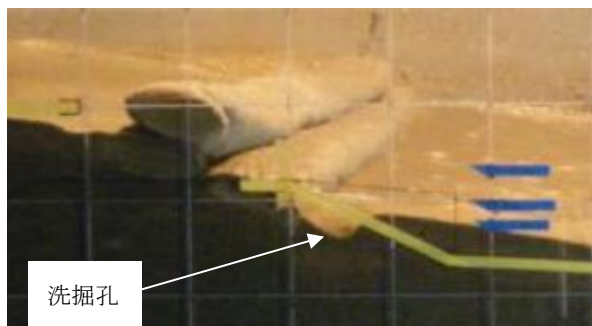


写真-9 洗掘孔発生状況(無対策断面)

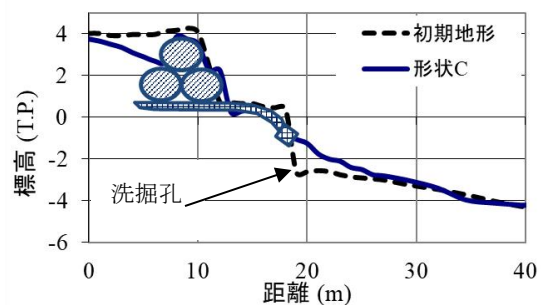


図-6 波作用後の地形形状(対策断面)

b) 現地の施工状況

セル型グラベルマットを活用した洗堀防止工は宮崎海岸動物園東地区の約 1.1km 区間に採用された (図-7)。写真-10～写真-13 に現地の施工状況を示す。セル型グラベルマットは製作ヤードで事前に中詰めを行い、敷設位置近隣に仮置きしておく。なお、マットはセルの向きをマット長手方向と垂直になる仕様とした。万が一、繊維網が損傷した場合でも中詰め材の流失範囲を最小限に抑えられる粘り強い構造である。敷設箇所の沖側に仮締切用の堰堤を築堤し、T.P.-1.0 まで床掘・整形、セル型グラベルマットおよび沖側のアンカーマットを敷設した。その後、上載のサンドパック袋材を展開し、中詰め砂をサンドポンプで注入した。サンドパック完成後、めくれ防止効果を向上させるために、アンカーマットの沖側をバックホウで掘削してマットを屈とうさせた。



図-7 セル型グラベルマット施工区間⁶⁾



写真-10 セル型グラベルマットの中詰め作業



写真-11 セル型グラベルマットの敷設作業



写真-12 敷設後の全景



写真-13 サンドパックの上載

c) 施工後の経過観察

サンドパックは施工後に養浜によって埋設されるが、波浪が高くなる夏季には養浜砂が流失し、サンドパックが露出する。2018年の台風19号接近時の現地状況を写真-14に示すが、高波浪が継

続すると養浜砂は著しく流失し、セル型グラベルマットも露出する。NOWPHAS（宮崎日向沖）のデータでは、最大で有義波高 6.8m を記録する波浪が約 4 日間作用していた（図-9）。写真-14 より、サンドパック底面から前面に張り出したセル型グラベルマットが地形に追随している様子が確認できる。一方で、サンドパックの天端高は水平が維持されている。セル型グラベルマットはめくれを生じずに、埋設護岸の沈下変形を抑止することが示唆される。その後も複数の台風が接近し、露出と埋設を繰り返しているが、施工後約 4 年が経過してもサンドパックの天端高は維持されており、洗掘防止工としての有効性が確認できた（写真-15）。



写真-14 台風 19 号接近時の覆土流失状況

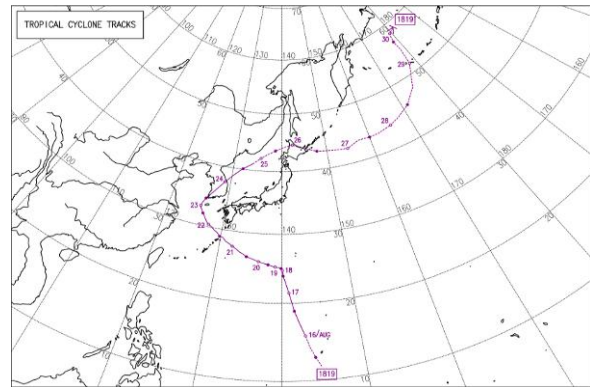


図-8 台風 19 号の通過経路⁷⁾



図-9 NOWPHAS の波浪データ



写真-15 約 4 年経過後のサンドパック天端

(3) 管理型廃棄物埋立護岸における遮水シート保護工

管理型廃棄物埋立護岸では、廃棄物埋立護岸内部の保有水等が外部に漏れださないように所要の遮水性能が求められる。特に遮水シートによる遮水工では、捨石等の不陸による遮水シートの損傷を防ぐために、砕石による間詰めが必要とされている⁸⁾。しかし、波浪が作用する箇所では、砕石のような粒径が小さく・軽い石材は波浪によって洗掘される可能性がある。

そこで、間詰用の砕石をセル型グラベルマット内に充填し、重量構造物とすることで波浪に対する安定性を確保する方法を提案した（図-10）。マットは繊維網で構成されるためクッション性が高く、10mm 四方の網目は砕石の鋭利な角を養生する。砕石で行う下地処理よりも遮水シート保護効果の向上が見込まれる。また、マットの柔軟性により法面の不陸に追随することも施工上のメリットである。

a) 実際の活用事例

セル型グラベルマットを使用した遮水シート保護工は施工延長約 400m の規模で活用された事

例がある。当時の施工断面イメージを図-11に示す。遮水シートの層数に応じて、各層の表面をセル型グラベルマットで被覆した。最表層の保護もマットによる被覆で行われた。法面全てをマットで被覆するのではなく、天端面～L.W.Lを含む範囲に限り適用する構造が、経済性の観点からも望ましい。なお、適切な滑動抵抗力を得るために、摩擦係数と被覆する法面長に応じて天端に水平部を設けることが必要である。

実際の施工状況を写真-16～写真-19に示す。施工効率を向上させるためにマット単体の幅寸法を6.0mの仕様とした。マット単体の質量は約24.0tが想定されたため、重機の旋回半径を考慮して護岸の背面スペースで中詰め作業を行った。仮置きされたマットは、海上作業船で運搬した後、法面へ据付された。玉外しは潜水士による水中作業で行われた。設置されたマット同士は連結用ロープで相互に接続し、被覆範囲全体が一体となる構造とした。

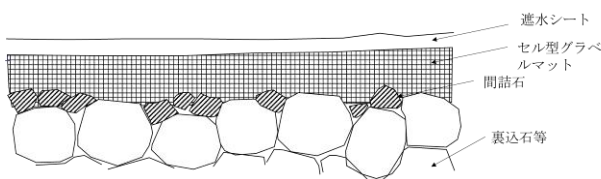


図-10 セル型グラベルマットによる下地処理

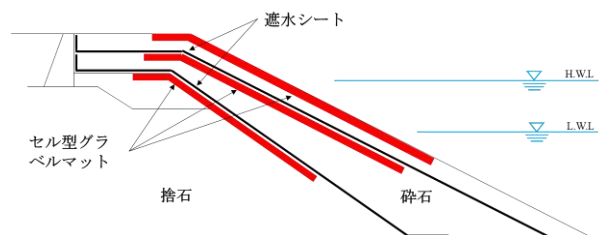


図-11 施工断面イメージ

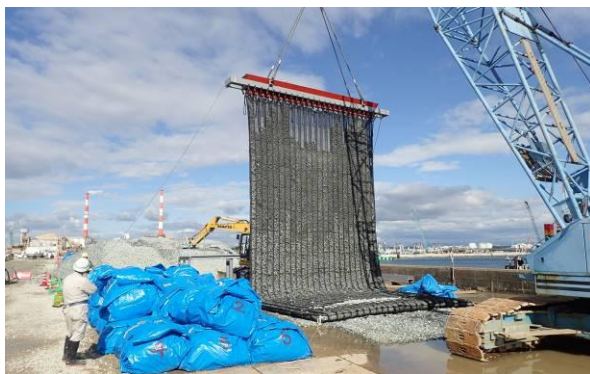


写真-16 中詰め作業状況

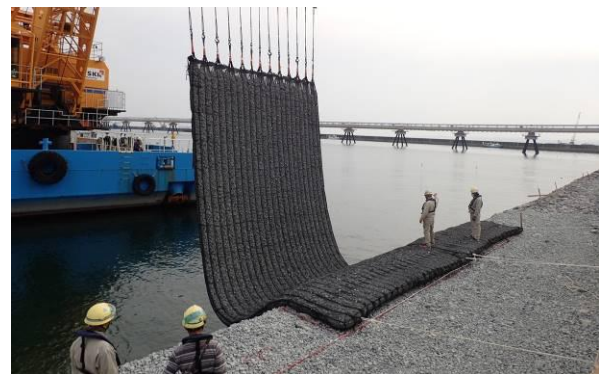


写真-17 据付作業状況



写真-18 据付完了後の状況



写真-19 遮水シート敷設状況

4. 新たな展開にむけて

(1) 堰直下の洗掘・河床低下対策

通常、堰下流側は護床ブロックにより保護されているが、護床ブロック同士の間には5cm程度の隙間が存在している。この隙間から護床ブロック底面の砂礫が吸い出され、沈下が生じる可能性がある。沈下防止工法の一つとして、護床ブロック底面にセル型グラベルマットを敷設した構

造が提案され、水理実験により検証されている⁹⁾¹⁰⁾。

a) 水理模型実験による検証⁹⁾

幅 23cm 水路内に河床勾配 1/150 の堰エプロン直下を模した移動床断面を縮尺 1/70.5 (フルード相似) で作成した。エプロン前面には方形の護床ブロック模型を護床勾配 1/12 で敷設し、その底面にセル型グラベルマットとアンカーマットを連結して設置した。模型断面に対して複数の流量と流速の条件を各 6 時間 (計 7 日) 作用させ、地形変化状況を計測した。

外力作用後の地形を図-12 に示す。護床直下では洗掘が生じるが、エプロン直下の河床は初期形状を維持した。セル型グラベルマットによる護床傾斜部の土砂吸出し防止効果、および護床傾斜部底面土砂の護床直下洗掘域への漏出防止効果のためである。護床勾配 1/12 以下まで適用可能で、購買 1/12 以下での護床形状安定化により護床ブロックの流失抑止と施設破壊を来たすパイピング現象を防止できる。



図-12 外力作用前後での地形変化状況

(2) 河川堤防の越流に対する裏法面保護工

令和元年台風第 19 号による洪水で発生した多数の堤防決壊をうけて、越水した場合にも粘り強い河川堤防が求められている。越水時は河川堤防の川裏部から侵食が始まることが分かっており、同箇所の保護工法が必要である。一方で、セル型グラベルマットは上記のように法面被覆材としての活用例があり、河川堤防においても同様の断面が提案できる (図-13)。越流水に対して、碎石層による堤体表層の流速の低減 (図-14) と、碎石層自体の耐流速の向上が期待できる。今後、マットとしての耐流速や吸出し防止効果を評価していく予定である。

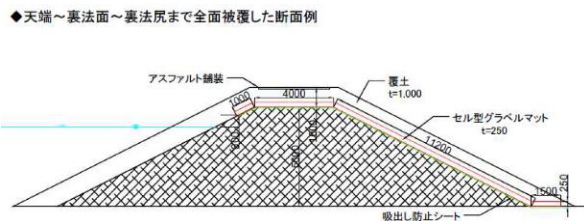


図-13 河川堤防における提案断面

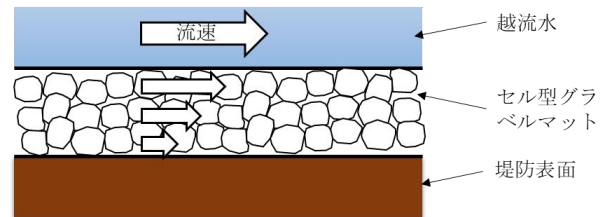


図-14 碎石層による流速低減イメージ

5. おわりに

セル型グラベルマットは碎石を充填した重量型マットであり、柔軟性、透水性、広範囲の一面被覆などに特長を持つ。人工リーフの法先洗掘防止工として技術開発された後、埋設護岸の吸出し防止・洗掘防止工や、管理型廃棄物埋立護岸の遮水シート保護として活用された。現在は取水堰における堰直下の洗掘・河床低下対策や河川堤防法面の越流対策への適用を見据えた技術開発を進めている。今後、さらにセル型グラベルマットを活用した工法の拡充・普及が期待される。

参考文献

- 1) 田代洋一・梶原幸治・宇多高明 :セル型グラベルマットを用いた人工リーフの沈下変形対策, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.239-240, 2009.
- 2) VU THI LAN HUONG ・水谷法美 : 七里御浜井田地区海岸の汀線変化に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.503-504, 2011.
- 3) 第 12 回侵食対策検討委員会 : I. 大炊田地区及び動物園東地区に整備する埋設護岸へのサンドパック適用について, 国土交通省・宮崎県, 2013.
- 4) 宮崎海岸侵食対策検討委員会 第 11 回技術分科会 : II. 埋設護岸変状原因の推定と今後の対策工 (案) , 国土交通省・宮崎県, 2014.
- 5) 関谷勇太・石川祐介・田代洋一 : 宮崎海岸に敷設されたサンドパックの損傷メカニズムとセル型グラベルマットによる洗掘防止対策, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 71, No.2, I_595-I_600, 2015.
- 6) 国土地理院ウェブサイト (<https://nlftp.mlit.go.jp/webmapc/mapmain.html#16/31.983754/131.482401/&base=ort&ls=ort&disp=1&lcd=ort&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>) をもとにナカダ産業株式会社作成.
- 7) 気象庁ホームページ (https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bstv2018.html) .
- 8) (財) 港湾空間高度化環境研究センター : 管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル (改訂版) , 2008.
- 9) 常住直人・関谷勇太 : 蜘蛛の巣状ブロック、グラベルマットによる堰直下の洗掘・河床低下対策, 農業農村工学会大会, 2022.
- 10) 常住直人 : 河床被覆材敷設護床による堰直下の河床低下・洗掘抑制効果, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp.415-420, 2022 年 6 月.