礫海岸における摩耗作用を再現する 摩耗促進試験方法の開発

渡辺 国広¹・諏訪 義雄¹・関口 陽高²・野口 賢二¹・
伊藤 幸義³・高田 保彦⁴・岩佐 隆広³・二階堂 竜司⁵

¹正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)
E-mail:watanabe-k92tc@nilim.go.jp, suwa-y22aa@nilim.go.jp, noguchi-k92fu@nilim.go.jp

²正会員 元国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室 (前田工織株式会社)
(〒103-0005 東京都中央区久松町9番9号SCI日本橋ビル5F)
E-mail:sekiguchi@mdk.co.jp

³正会員 株式会社建設技術研究所 水理センター (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)
E-mail:y-ito@ctie.co.jp, iwasa@ctie.co.jp

⁴正会員 株式会社新土木開発 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)
E-mail:y-takada@ctie.co.jp

⁵正会員 株式会社建設技術研究所 河川部海岸海洋室 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)
E-mail:nikaidou@ctie.co.jp

静岡県の駿河・富士海岸と富山県の下新川海岸に設置されたコンクリートブロックの摩耗量を調査した結果、設置後の経過年数に応じた摩耗量の増加が確認された。多変量解析によって、波高、標高も摩耗速度に対して有意な影響を及ぼしていることがわかり、現地海岸における摩耗量を推定するモデル式を提示した。回転ドラム型試験機を用いてコンクリート供試体を摩耗させたところ、現地海岸と同様の摩耗作用を再現できることが確認され、現地における摩耗と摩耗促進試験の対応関係を導き出した。この手法を用いて摩耗させた繊維シートは、駿河海岸における現地曝露で得られた繊維シートよりも、やや劣化が大きくなる傾向にあったが、本手法によって礫海岸における摩耗耐久性の照査が可能であることが示された。

Key Words : *geosynthetics, gravel, sand pack, multivariate statistics, test method*

1. 研究の背景と目的

日本の海岸事業では最近、海岸保全事業におけるコスト削減や景観の向上に対する要求から、サンドバックや袋詰め玉石等のコンクリート以外の素材も利用されるようになってきた¹⁾。しかし、海岸における耐久性に対する不安も根強いいため、短期的な使用や試験施工に留まっているのが現状である。より長期間の活用や本施工にまで用途を広げるため、さらには今後の性能向上のためには、現地海岸における耐久性能の評価方法が確立されることが必要である。特に日本では礫海岸における使用も想定され、その場合には礫による摩耗劣化への耐久性を確保することが課題となる。海外では落石による損傷に耐えるために必要な袋材の単位面積重量や、波浪による丸石の衝突で損傷しないために必要な袋材の引張強度についての知見はあるものの²⁾、いずれも想定されているのは瞬間的な作用である。日本の海岸で使用する場合に

は、それらの作用を継続的に受け続けた場合にどれだけの期間、要求性能を発揮できるかを示すことが求められるので、これらの照査方法では不十分である。そこで本研究では、礫海岸における礫による摩耗に起因するサンドバック袋材の経年劣化の照査方法を開発することを目的とし、現地海岸における摩耗作用の調査および現地における摩耗作用を再現するための室内実験を実施した。

2. 研究方法

(1) 研究全体の構成

現地海岸における摩耗に対するサンドバック袋材の耐久性を評価するためにはまず、現地海岸における摩耗作用の強さを把握し、次にその作用を室内実験で再現することが必要となる。しかし、海岸における摩耗作用の強さの評価方法として確立されたものは存在しないので、

図-1 摩耗量調査を実施した海岸

図-2 回転ドラム型試験機(a)および供試体の設置方法(b)

図-3 繊維シートの現地曝露状況

本研究では現地海岸におけるコンクリート構造物の摩耗量をもって摩耗作用の大きさを表現することにした。

そのためまず、海岸におけるコンクリートの摩耗量調査を実施した、続いて同じ摩耗作用を室内で時間を短縮させて再現できる摩耗促進試験方法を開発し、現地におけるコンクリートの設置期間と室内試験における試験時間の対応関係を調べた。こうして作成された試験方法がサンドバック袋材の耐久性評価にも適用できることを確認するために、繊維シートの現地曝露試験と室内における摩耗促進試験を実施した。

(2) 海岸におけるコンクリート摩耗量調査

静岡県の駿河海岸焼津地先および富士川周辺の沼津海岸から蒲原海岸にかけての礫海岸（以降、駿河・富士海岸）と富山県の下新川海岸において、消波ブロック、緩傾斜護岸の被覆ブロック等の表面の摩耗量を計測した（図-1）。計測は摩耗量が小さい箇所については、摩耗していないブロック面からの摩耗深さを目盛間隔1mmの木製直尺によって計測し、摩耗量が大きい箇所については、原型のブロック形状を推定し、目盛間隔5mmの測量ロッドで計測した。海岸の汀線付近における海滨材料の

表-1 コンクリート供試体の種類

	水セメント比 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
標準配合	50	27.1
富配合	45	29.0
貧配合	55	24.4
標準配合+シート 1	-	-
標準配合+シート 2	-	-

粒度分析もあわせて実施し、波浪条件については2001年から2010年にかけての10年間の有義波高の平均を海象年表より集計した。駿河・富士海岸については、田子の浦、久能、駿河海洋の観測所、下新川海岸については田中観測所における観測結果を使用した。また、設置後の経過年数については海岸管理者より提供のコンクリートブロック等の設置履歴に関する資料をもとに把握した。

(3) コンクリートの摩耗促進試験

現地におけるコンクリートの摩耗を短時間で再現する室内試験方法を開発するために、回転ドラム型試験機（図-2）を用いた摩耗促進試験を試行した。5個のコンクリート供試体を図-2(b)のとおり設置した回転ドラムの中に、駿河海岸の汀線付近で採取された中央粒径(D₅₀)13mmの海滨材料10kgと水70Lを入れた状態でドラムを図-2(a)のように立てた状態で回転させることで、礫による摩耗作用を再現した。この方法では、コンクリート供試体を固定することで形成されるドラム内周の凹凸によって礫が上方に持ち上げられた後に、落下することで下部に位置する供試体への衝突が起きる。また、供試体による突起が礫を持ち上げる際にこぼれ落ちる礫による摩擦も発生する。すなわち2通りのメカニズムによる摩耗作用が働くものと想定される。

コンクリート供試体は標準的な配合（24-8-40BB）のものに加えて、富配合、貧配合の計3種類を製作し、供試体の表面に繊維シートを巻きつけた2検体とあわせて計5検体を使用した（表-1）。120,000回転させるまでの間に回転を停止させて、その都度、供試体表面の摩耗量を計測した。

(4) 繊維シートの現地曝露試験

繊維シートの現地曝露試験は、駿河海岸の焼津地先で実施した。繊維シートとして、厚さ0.90mmで紫外線劣化に対する耐性を高めた黒色ポリエステル製の汎用土木シートT-500（前田工繊株式会社）を選定して使用した。このシートはあくまでも試験用であり、実際のサンドバック袋材はこれよりはるかに強度が高いものである。これを40cm×60cmのパネル状に加工し、31枚を汀線付近の消波ブロックの表面に、ステンレス製のグリップアン

図-4 駿河海岸におけるブロックの摩耗状況

図-5 ブロックの設置後経過年数と摩耗量の関係

カーと全ネジ，ナットで8箇所固定した（図-3）。

曝露試験体は，2010年12月から2011年8月まで設置し，その期間中に5回に分けて回収した。回収された試験体から5cm幅に切り出した検体をストリップ法による引張強度試験（JIS L 1908:2000）に供して，破断した時点の荷重を計測することで引張強度を求めた。

(5) 繊維シートの摩耗促進試験

現地曝露試験で使用したのと同じ規格の繊維シートをコンクリート供試体の表面に巻いた状態で回転ドラム型試験機に設置し，上述のコンクリートの摩耗促進試験と同じ海浜材料を使用して，同じ水と海浜材料の量で摩耗促進試験をおこなった。回転数は予備実験で繊維シートの破断が確認されている40,000回転を上限とし，回転数を変えて得た試験体をストリップ法による引張強度試験に供した。なお，引張強度試験に必要な検体の長さを確保できるようにするために，ここで用いるコンクリート供試体は，表面に巻ききれずに余った部分を供試体とドラム内壁の間に収納できるように円柱の一部を切り欠いた形状とした。

3. 結果

(1) 海岸におけるコンクリート摩耗量調査

現地調査では，ブロックの高い位置にも衝突痕が見られた一方で，波浪が直接作用しにくい側面でも明瞭な摩

図-6 ブロックの設置標高と摩耗量の関係

表-2 コンクリート摩耗量の計測結果概要

	駿河・富士海岸	下新川海岸
計測地点数	7	6
中央粒径(mm)	6.3 ± 5.9 (0.35 - 15)	31.5 ± 39.8 (0.5 - 115)
有義波高(m)	0.70 ± 0.06 (0.65 - 0.78)	0.62
計測ブロック数	47	35
経過年数(年)	23 ± 10 (3 - 33)	27 ± 7 (15 - 41)
最大摩耗量(mm)	180 ± 148 (0 - 500)	50 ± 58 (3 - 200)
最大摩耗箇所の 標高(T.P.+m)	0.82 ± 0.70 (-0.38 - 2.32)	1.21 ± 0.55 (0.03 - 2.36)

各地点もしくはブロックの平均値±標準偏差，括弧内は範囲（最小-最大）

耗が見られたことから（図-4），波によって跳ね上げられた礫の衝突と遡上波の戻り流れによる礫の移動に伴う摩擦の2通りの摩耗形態があることが推察された。

計測対象としたそれぞれのコンクリートブロックの中で最も摩耗している箇所における摩耗量を最大摩耗量と定義し，設置後の経過年数との関係を示したものが図-5である。個々のブロック間のばらつきは大きいものの，最大摩耗量は経過年数に応じて大きくなる傾向にあり，全体的には駿河・富士海岸のほうが下新川海岸よりも摩耗量が大きいことが確認された（表-2）。標高と摩耗量の関係については，駿河・富士海岸も下新川海岸も設置後20年以上が経過したブロックについては標高が高くなるほど摩耗量が小さくなる傾向がうかがえるものの，ばらつきが大きいため，経過年数と摩耗量の関係に比べれば明瞭ではなかった（図-6）。

(2) コンクリートの摩耗促進試験

回転ドラム型試験機内に固定されたコンクリート供試体は，ドラムが2,000回転した時点では骨材が露出し始めた状態であったが，120,000回転後の時点では一部の骨材が剥落するまで摩耗が進行した（図-7）。このような骨材が露出した摩耗状態は現地海岸のコンクリートブロックでも多数確認されたものである。120,000回転

図-7 コンクリート供試体の摩耗状況

図-8 ドラムの回転数と最大摩耗量の関係

表-3 繊維シートの曝露日数と引張強度

曝露日数	試験体数	引張強度 (kN/5cm)	
		mean $\pm$ s.d.	min - max
無処理	5	8.47 $\pm$ 0.16	8.17 - 8.63
14	5	5.38 $\pm$ 1.24	3.35 - 7.10
58	5	3.73 $\pm$ 0.92	2.20 - 4.70
94	5	3.75 $\pm$ 1.08	2.20 - 5.57
156	2	2.80 $\pm$ 0.34	2.46 - 3.14
275	4(3)*	2.49 $\pm$ 0.83	1.82 - 3.91
埋没	3	-	-
不明	7	-	-

*4枚のうち1枚は損傷が激しく強度試験できなかった

までの12段階の回転数において計測された各供試体の最大摩耗量は、40,000回転程度までは回転数にほぼ比例して急速に大きくなったものの、それ以降は回転数の増加に比べて摩耗量の増加は鈍くなっていた(図-8)。全体を通しての摩耗量は富配合の供試体で最も大きく、次いで貧配合、標準配合の順となった。

(3) 繊維シートの現地曝露試験

現地に設置した31枚の試験体のうち、埋没・不明となった10枚を除く21枚を回収することができ、うち20枚を引張強度試験に供することができた(表-3)。試験体の引張強度は曝露日数が増えるとともに低下する傾向が確認され、275日後には現地曝露に供していない無処理の試験体の29.4%の強度にまで低下した。

(4) 繊維シートの摩耗促進試験

ドラムの回転数が8,000回転以上になった時点で繊維シートの表面に毛羽立ち(図-9 (b))が確認されるよう

図-9 コンクリート供試体の摩耗状況

表-4 ドラムの回転数と繊維シートの引張強度

回転数	試験体数	引張強度 (kN/5cm)	
		mean $\pm$ s.d.	min - max
4,000	3	2.44 $\pm$ 0.13	2.33 - 2.62
8,000	7	0.91 $\pm$ 0.45	0.10 - 1.66
9,000	1	0.70	-
12,000	2	0.58 $\pm$ 0.11	0.47 - 0.68
16,000	4	0.24 $\pm$ 0.08	0.14 - 0.37
17,000	2	0.15 $\pm$ 0.07	0.08 - 0.22
24,000	3	0.06 $\pm$ 0.02	0.04 - 0.08
25,000	2	0.06 $\pm$ 0.00	0.06 - 0.07
32,000	2	0.04 $\pm$ 0.00	0.04 - 0.04

になり、32,000回転では中央部で穴が開き始め、40,000回転で完全に破損して内部のコンクリート供試体にまで摩耗作用が及んだ(図-9 (c))。完全な破損に至る手前の32,000回転までの試験体について引張強度試験を実施したところ、4,000回転で既に引張強度の平均値は2.44 kN/5cm にまで低下しており(表-4)、これは275日間の現地曝露を経験した繊維シートの引張強度の平均値2.49 kN/5cm に相当するものであった。その後、24,000回転を過ぎると引張強度の平均値は0.1 kN/5cm 下回り、ほとんど発揮されなくなった。

4. 考察

(1) 海岸における摩耗量の決定要素

現地調査ではコンクリートブロックの摩耗量が経過年数とともに増大する傾向(図-5)、標高が高いほど摩耗量が小さい傾向が確認されたものの(図-6)、摩耗量のばらつきは大きかった。このようなばらつきは、礫による摩耗量は経過年数や標高だけでなく、波浪条件や海浜材料の粒径、その他の要素にも依存しているために生じたものと考えられる。そこで、複数の要素を考慮した重回帰モデルを構築し、それぞれの要素が摩耗量に及ぼす影響についての多変量解析を実施した。

まず、海岸における礫による摩耗量を y (mm)、経過年数を x_1 (年)として1年当たりの摩耗量(摩耗速度)を式(1)のとおりに $f(x_2, x_3, x_4)$ と定義する。

$$y = f(x_2, x_3, x_4)x_1 \quad (1)$$

ここに、 x_2 : 標高(m), x_3 : 波高(m), x_4 : 礫の粒径(mm)として、摩耗速度は礫がブロックに衝突する際のエネルギー量で決まると仮定すれば、 $f(x_2, x_3, x_4)$ は標高(x_2)の1乗、波高(x_3)の2乗、礫の粒径(x_4)の3乗にそれぞれ比例すると考えられる。これらによる効果が線形で加算されると仮定し、摩耗速度を式(2)のとおり表現する。

$$f(x_2, x_3, x_4)^{1/2} = C_2 x_2^{1/2} + C_3 x_3 + C_4 x_4^{3/2} + \varepsilon \quad (2)$$

ここに、 C_2, C_3, C_4 は各要素の影響度を定める係数、 ε はその他の考慮されていない要素による誤差項である。平方根をとったうえで結合しているのは、現地調査で得られた摩耗速度のデータ数が、小さい値に偏っていることによる解析のバイアスを低減させるためである³⁾。

なお、解析にあたっては、駿河・富士海岸と下新川海岸の双方における調査結果を用い、標高は駿河海岸における朔望平均干潮位(T.P.-1.04m)からの高さとし、波高は近傍の波浪観測所で得られた有義波高、粒径は汀線付近の海浜材料の中央粒径とした(表-2)。

多変量解析の結果によれば、波高が有意に影響しており($p < 0.001$)、その次に標高の影響が有意($p = 0.002$)である一方で、粒径の影響は有意でない($p = 0.353$)という結果になった(表-5)。係数を見ると、標高が低くなると摩耗速度が早くなる結果となっており、図-6で確認された標高の影響を統計的にも裏付けることができた。このことは、摩耗作用が激しい海岸でも、標高の高い場所に設置するのであれば、サンドバック工の適用が可能となる場合もあることを意味する。

粒径の違いによる影響については有意性が認められなかったが、粒径が大きくなるとコンクリートに衝突した時のエネルギーは大きくなる反面、礫自体が動きにくくなることで衝突の頻度が少なくなるため、今回のモデルで仮定しているような比例関係が成立していないことが考えられる。また、本研究では礫海岸において現地調査を実施したものの、表-2で中央粒径の最低値が駿河海岸で0.35mm、下新川海岸で0.5mmとなっており、地点によっては前面に砂が堆積していた箇所もあった。こうした礫海岸における局所的な砂の堆積は一時的なものの

表-5 多変量解析の結果

	Cn	s.e.	t	p
標高($x_2^{1/2}$)	-1.719	0.537	-3.20	0.002**
波高(x_3)	12.77	2.11	6.06	<0.001***
粒径($x_4^{3/2}$)	3.058×10^{-4}	3.276×10^{-4}	0.93	0.353
ε	-4.250	1.626	-2.61	0.011*

$R_{adj}^2 = 0.389$, ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$

であることが多いため、他の大部分の時期においては礫が主体であった可能性がある。すなわち実際には粒径の影響を検討できるほどの粒径の違いが無かったことが考えられる。そのため、本結果のみをもって粒径による影響が無いと結論付けることは早計である。

(2) 摩耗促進試験と現地における摩耗の対応

本研究では供試体の水セメント比を変えて試験を実施したが、供試体の圧縮強度と摩耗量の間には関係は見いだせなかった、試験回数が少ないため結論づけるのは早計であるが、この結果はコンクリートの摩耗耐久性には他に必要な要素があることを示唆する。以降の検討では海岸で使用されるコンクリートブロックの強度に地方によってばらつきがあることも考慮して、配合度の異なる3種の供試体の結果を分けることなく使用した。

本試験では、コンクリート供試体の摩耗量の増加が回転数の増加とともに鈍る傾向が確認された(図-8)。この原因としてはまず、投入した海浜材料も衝突によって摩耗もしくは破碎して粒径が小さくなることで衝突の際のエネルギーが小さくなることが考えられる。実際に試験後にドラム内の海浜材料を確認したところ、実験開始時よりも細かくなっていた。ただし、標準配合の供試体についての結果によると、5,000回転を過ぎてから摩耗の進行が停滞したにも関わらず、10,000回転を超えてから再び摩耗が進んでおり、海浜材料の粒径低下だけではこの結果を説明できない。そのため、摩耗が進むと図-7(b)のように骨材が露出することによって摩耗しにくくなったことも摩耗停滞の原因と考えられる。

摩耗量は本来であれば回転数に正比例するはずであるが、上記のとおり海浜材料の粒径が回転数に応じて減少する効果もあるため、最大摩耗量 y_{abr} と回転数 x_{rot} の関係は係数 a, b を用いれば次の式(3)に従い、 b が1未満となることが考えられる。

$$y_{abr} = ax_{rot}^b \quad (3)$$

3種類の供試体による実験結果を全て使って式(3)の係数を求めると、 $a = 0.0674, b = 0.418$ となり、図-8中の曲線のとおりととなった。なお、このときの R^2 は0.846であった。この式(3)を式(1)に代入すれば、回転ドラム型試験機の回転数 x_{rot} と現地における曝露期間 x_1 の対応関係は次の式(4)で表すことができ、現地における摩耗作用を短時間で再現する摩耗促進試験として利用することができるようになる。

$$x_{rot} = \left(\frac{f(x_2, x_3, x_4)}{a} \right)^{1/b} x_1^{1/b} \quad (4)$$

図-10 現地曝露試験と摩耗促進試験の結果の対応関係

(3) サンドバック袋材の摩耗耐久性の照査

繊維シートについての摩耗促進試験結果を式(4)を用いて現地における曝露日数に換算し、現地曝露試験によって得られた結果と比較した結果を図-10に示す。なお、式(2)で摩耗速度を算出するにあたっては、曝露試験を実施した駿河海岸焼津地先として、標高 0.93+T.P.m, 年平均有義波高 0.76m, 海浜材料の中央粒径 13mm とした。

摩耗促進試験の結果は現地における曝露期間 100~200 日の間に集中しているが、現地曝露開始から 100 日目までの強度低減傾向がそのまま続いたと仮定すれば、摩耗促進試験の結果はその延長上にほぼ乗ることが分かる。しかし、実際の曝露試験結果は 100 日目以降に強度低下が緩和しており、摩耗促進試験のほうが厳しい評価となっていた。

この違いの原因としては、摩耗促進試験では繊維シートが硬いコンクリート供試体にはば隙間無く固定されているため、礫の衝突が緩和されることがなく袋材に作用することが挙げられる。現地曝露した試験体は背面のブロックとの間に多少の遊びがあったうえに、表面に藻が生えた場合もあり、それらが礫の衝突の緩和に寄与したものと考えられた。サンドバックとして現地に設置する際には背面が中詰め材となるので、衝撃はさらに緩和されることになる。

なお、現地曝露試験の結果は、摩耗のような物理的損傷だけでなく、紫外線や降雨による化学的劣化も経たうえでの結果であることに留意する必要がある。筆者らが過去に実施した陸上曝露試験⁴⁾で紫外線等による劣化が 100 日間で 1 kN/5cm 程度であったこと、海水を頻繁にかぶる場所では紫外線の影響は小さくなることを考えれば今回の曝露試験結果への影響は大きくないが、設置する標高や海岸の緯度によっては無視できなくなる。

このような誤差要素はあるものの、摩耗促進試験は現地よりもやや厳し目の評価となる分には、製品の耐久性を照査するうえで問題ない。本研究で試行した方法は現地におけるサンドバック袋材の耐摩耗性を短時間で評価するのに有効と考えられた。

謝辞： 現地調査を実施するにあたっては、国土交通省北陸地方整備局黒部河川事務所、同中部地方整備局静岡河川事務所に、回転ドラム型試験機による試験の立ち上げにあたっては北陸地方整備局北陸技術事務所、長谷川産業株式会社、株式会社新土木開発の長谷川昇智朗氏にご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土橋和敬, 弘中淳市, 梶原幸治, 渡辺国広: 西湘海岸におけるサンドバックの現地試験施工, ジオシンセティック情報誌, 2012 年 3 月号, pp.20-30, 岩波書店, 2012.
- 2) Pilarczyk, K. W. : *Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering*, Taylor & Francis, 2000.
- 3) Grafen, A. and Hails, R. : *Modern Statistics for the Life Sciences*, Oxford University Press, 2002.
- 4) 関口陽高, 諏訪義雄, 野口賢二, 渡辺国広, 伊藤幸義, 岩佐隆広: サンドバック工法の設計時の耐候性能決定方法の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.4, pp.I_714-I_719, 2012.

DEVELOPMENT OF ACCELERATED TEST METHOD FOR EVALUATING THE RESISTANCE TO ABRASION STRESS ON GRAVEL COASTS

Kunihiro WATANABE, Yoshio Suwa, Yoko SEKIGUCHI, Kenji NOGUCHI, Yukiyo ITO, Yasuhiko TAKADA, Takahiro IWASA and Ryuji NIKAIIDO

The degree of abrasion caused by wave-induced gravel attack was measured for concrete blocks settled in Suruga, Fuji, and the Shimonikawa coast. The depths of erosion were greater on older blocks, and the effects of block elevation and wave height were determined by multivariate statistics. A new accelerated abrasion test was developed to evaluate the resistance to abrasion and puncturing by gravel, and the relationship between the accelerated test results and the degree of abrasion measured on the coasts was investigated. The degree of geosynthetics deterioration was slightly higher for the accelerated test results than for the results of the exposure test carried out on the gravel coast. These results indicate that the newly developed test method is sufficiently reliable for evaluating the endurance of geosynthetics on a gravel coast.