

ホタテ貝殻の含有率とケーソン移動限界波高に関する実験的研究

STUDY ON WEIGHT CONTENT OF SCALLOP SHELL AND MOVEMENT LIMIT WAVE HEIGHT OF CAISSON

河村 昌益¹・南 将人²

Shoeki KAWAMURA, Masato MINAMI

¹ 学生会員 八戸高専 専攻科 建設環境工学専攻 (〒039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1)

² 正会員 八戸高専 建設環境工学科 助教授 (〒039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1)

The scallop shells have continued to stack in the open. And Scallop shells are going to increase every year. The purpose of this research is considering recycling use of scallop shells. It considered mingling and using scallop shells for friction-increasing mat. It examined for the relation ship between the weight content of crashed scallop shells, and a movement limit wave height of caisson by model experiment. Using this wave height, it found a frictional resistance coefficient by the GODA formula. It turned out that a friction coefficient exceeded 0.7 by the size of crushed shell 2~5mm for the case of 50 or less % of weight content.

Key Words: Friction increasing mat, Scallop shell, Friction coefficient

1. はじめに

循環型社会を実現する為に、各種廃棄物のリサイクル利用が数多く行われている。その中で、ホタテに関しては次の通りである。図-1 に示す通り青森県では、1年間に約10万トンの養殖ホタテが水揚げされる。この半分の約5万トンが貝殻として処理される。しかし、1972年のロンドン条約によって貝殻の海洋投棄が禁止されている為に陸上に野積み処理しなければならない。野積み処理は悪臭を発生し近隣住民へ被害を及ぼすとともに、2001年7月に旧厚生省からリサイクルの為に保管できない貝殻について野積み状態での保管は禁止となり、その結果として行き先のないホタテの貝殻は産業廃棄物として年々増え続けているのが現状である。

このような状況の元、近年、ホタテ貝殻を用いた多くのリサイクル方法や製品及び工法等が開発され、野積み処理されているホタテ貝殻が様々な分野で用いられている。事例として、小早川ら¹⁾による路盤材料への利用、中島ら²⁾による土壌改良材への適用等の研究やコンクリートの骨材への適用、小山³⁾らの未来材料としてのホタテ貝殻セラミックスの実用化などが挙げられる。このようなホタテ貝殻を用いた研究事例の多くから、ホタテ貝殻の多様な長所を知る事が出来た。

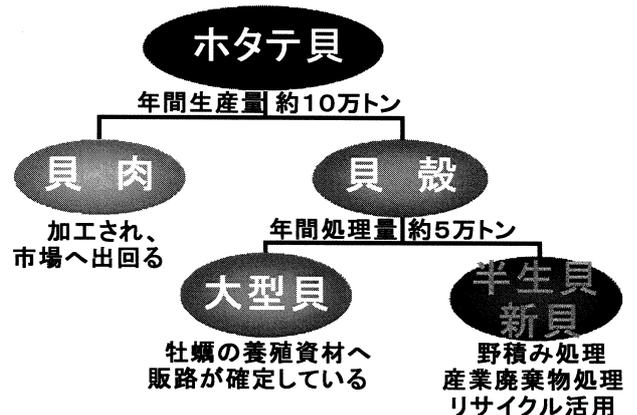


図-1 青森県における水揚げ後のホタテ貝の現状

しかし、粉末状に粉砕する工程、加熱処理を行う工程においてコストがかかる為、ホタテを用いた製品は広く流通していないのが現状である。また、ホタテをリサイクルする場合においてコスト面を考慮すると、ホタテ貝殻をそのまま利用する事が最も望ましいが、細工や利用時をみると破砕して用いリサイクルする事が利用促進に繋がる場合もある。

本研究は、ホタテ貝殻のリサイクル活用の場を海に求める事を目的とした実験結果である。

破碎状態でケーソン用の摩擦増大用マットとして再利用する為、その効果について河村ら⁴⁾の研究から得られた静止状態における貝殻の含有率と「摩擦係数」の効果について、さらに動的に水理模型実験によってケーソンの移動開始時の波高(移動限界波高と定義)を実験的に検討したものである。

2. 実験内容

(1) 静的摩擦係数実験と動的摩擦係数実験

ホタテ貝殻を混成堤の摩擦増大用マットあるいはマウンドそのものとして利用する事を想定している。これに対し、2005年に河村ら⁴⁾は摩擦増大マットの材料としてアスファルトを用いた場合に対し、貝殻含有率:Cと静止摩擦係数: μ の関係をケーソン引張り試験で、静定状態の実験で求めた。その結果、貝殻含有率が少ない程、または貝殻をより細かく砕く事で静止摩擦係数: μ が上がる、即ち波力に対する抵抗力が大きくなる事を示した。その際、貝殻含有率:Cは次式(式(1))で定義した。

$$C = \frac{W_s}{W_a + W_s} \quad (1)$$

ここで、 W_s :貝殻の重量(N)、 W_a :アスファルト混合物の重量(N)、を示す。従って、貝殻含有率:C=0とは、全く貝殻を含まない事を意味する。

本実験では、より現地に近い状態で安定性を検討する事を目的として、造波水路内にケーソン模型を設置して実際に波を作用させて、ケーソンが移動する際の移動開始時の波高を求め、動的な摩擦係数を求める事とした。

(2) 摩擦増大用マットについて

混成堤の直立部は、ケーソン底部とマウンド部間の摩擦抵抗力によって滑動及び転倒に対して安全である事が必要である。前者の滑動に対する場合、移動させようとする外力である波力に対し、抵抗力はケーソン重量と前述の摩擦抵抗力によって決定される。「施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾よりコンクリートと石との摩擦抵抗係数は0.6とされ、抵抗力を高める事を目的とする「摩擦増大用マット」は、ケーソン底部とマウンド部間の噛み合わせを増大する事によって、この抵抗係数を増大させるものである。それにより、ケーソンの重量を減らせ、ケーソン断面を小さくする事が出来る。現在、この摩擦増大用マットの材料として使用されているのは、ゴムタイプとアスファルトタイプの2種類である。

(3) ケーソン模型

実験に用いたケーソン模型は、太平洋に面したある海岸に設置されている施工済みのケーソン(実機諸元:幅18.5 m×長さ25.0m×高さ18.0m)を対象とした。

まず初めに、施工完了時のケーソン断面諸元よりケーソンの空中重量を算定した。次に、実験装置の大きさ等を考慮して、フルード相似則を用い縮尺 $\lambda=1/75$ と設定した。この結果を用いてケーソン模型をモルタルで2函製作した。その際、真水と海水の密度のずれは無視した。

製作した模型ケーソンの諸元は、幅33.3cm、長さ24.7cm、高さ23.3cm、空中重量19.164kgf(187.8N)である。床板及び側壁のモルタル厚さは15mmとして、ケーソン模型を中空とし、内部にボルト等を入れる事で目標重量となるように調整した。調整後のケーソン模型は越波を考慮し、蓋を取り付けた。

なお、ケーソン模型は2函製作して水路内に設置した。一つは、砂面上に直接ケーソンを固定し、もう一方については含有率やホタテ貝殻を砕いた時の貝殻の直径:Rを変化させた場合とした。これらを別々に作用させた場合、造波の仕方、例えば第1波が押し波か引き波によってケーソンの動きが異なる事が予想される為、ケーソンに同じ波の条件を作用させる為にケーソン模型を2函設置する事とした。図-2に設置後の製作したケーソン模型の外観を示す。ケーソン模型の底面は平面とし、摩擦増大用マットとの接着はケーソン模型の自重のみとしたが、実験中の目視観察では、ケーソンとマットとのずれはみられなかった。

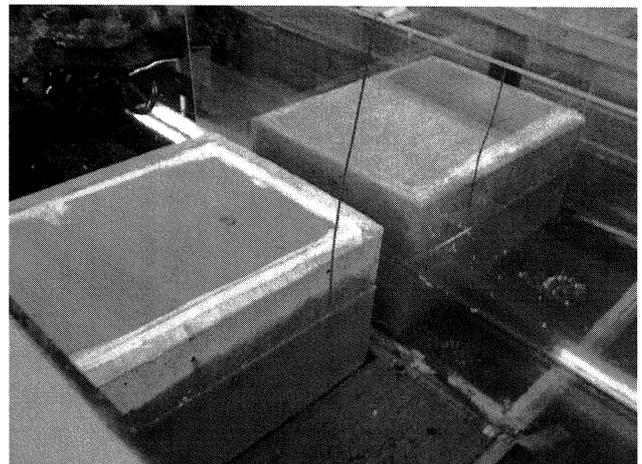


図-2 ケーソン模型

(4) マウンド用砂の粒径(D_{50})の選定

摩擦係数 μ を求める滑動模型実験を行うにあたっては、相似則によってケーソンやマウンド等を縮小している為、現地の基礎マウンド部の摩擦抵抗係数を再現する為に必要なマウンド部の砂の粒径について検討する必要がある。そこで、マウンド部を湿潤状態とし、ケーソンを設置した状態で、2005年の実験方法に習い、静止摩擦係数が(社)日本港湾協会「施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾より $\mu=0.6$ となる実験用マウンド材料となる砂粒径を試行錯誤で求めた。

実験は、3種類の粒径の川砂を用い、各々厚さ5cm程度に敷き詰め、バケツに水を徐々に注水してケーソンが10mm以上移動した時のケーソン重量と注水重量との比を求めた。この値は、マウンド粒径: D_{50} に対し静止状態で3回の引張り試験を行い、その平均値を外力として、ケーソンの滑動安全式に代入を行い、静止摩擦係数: μ を算出した。実験の詳細に関しては、浜田ら⁶⁾を参考とした河村ら⁴⁾を参照されたい。マウンド粒径に関する実験ケースを表-1に、実験結果を図-3に示す。

表-1 マウンド砂の粒径と抵抗係数の実験ケース

ケース	砂の粒径と実験ケース
1	粒径0.50mmの川砂とコンクリート
2	粒径0.65mmの川砂とコンクリート
3	粒径4.90mmの川砂とコンクリート

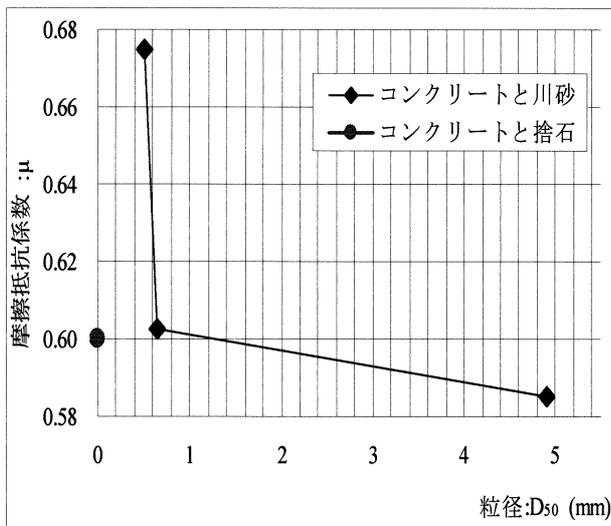


図-3 砂の粒径と静止摩擦係数の関係

実験結果より、マウンド砂の粒径: D_{50} と静止摩擦係数: μ との関係は、粒径が大きくなる程、静止摩擦係数が小さくなっている。これは、粒径が小さくなる程、ケーソン底面との接触面積が増大する為に、

水平外力に対してケーソンの自重による抵抗力が大きくなる為である。

この図-3に示す3ケースの実験結果より、静止摩擦係数: $\mu = 0.6$ に最も近い $D_{50} = 0.65\text{mm}$ (静止摩擦係数: $\mu = 0.602$)の粒径の砂をマウンドとして以下の実験で用いる事とした。

(5) 実験で用いるホタテ貝殻の大きさ (R)

ホタテ貝殻については、直径約12cmのホタテ貝殻を乾燥させ、ハンマーで破碎後、フルイ分けを行い $R = 1.2\text{mm}$ 以下と $R = 2 \sim 5\text{mm}$ の粒径の2種類(図-4)をマットに混入させて用いた。

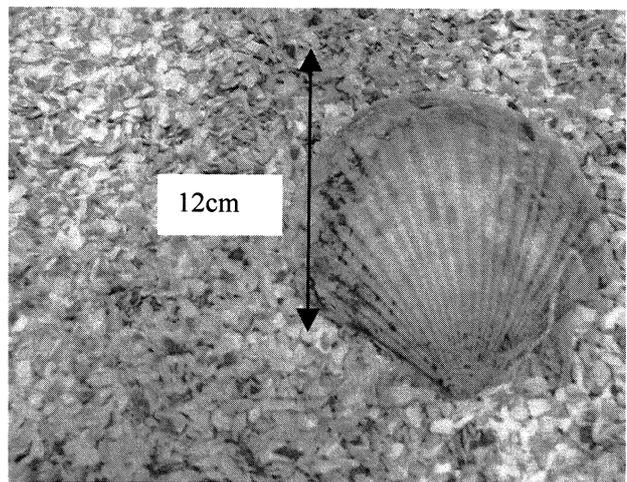


図-4 ホタテ貝殻の破碎前後の比較 (R=2~5mm破碎)

(6) 摩擦増大用マットの種類

摩擦増大用マットは、現場での材料の調達のしやすさを考慮し、瀝青材料を用いたアスファルトマットを用いた場合を想定して実験を行った。

摩擦増大用のマットとして用いる場合、破碎した2種類のホタテ貝殻を重量比でアスファルト混合物と加熱温度約130℃で混ぜ、1cmのシート状にしたものを作製した。アスファルト混合物は市販のものを用い、5mmふるいを通過する材料のみを使用した。

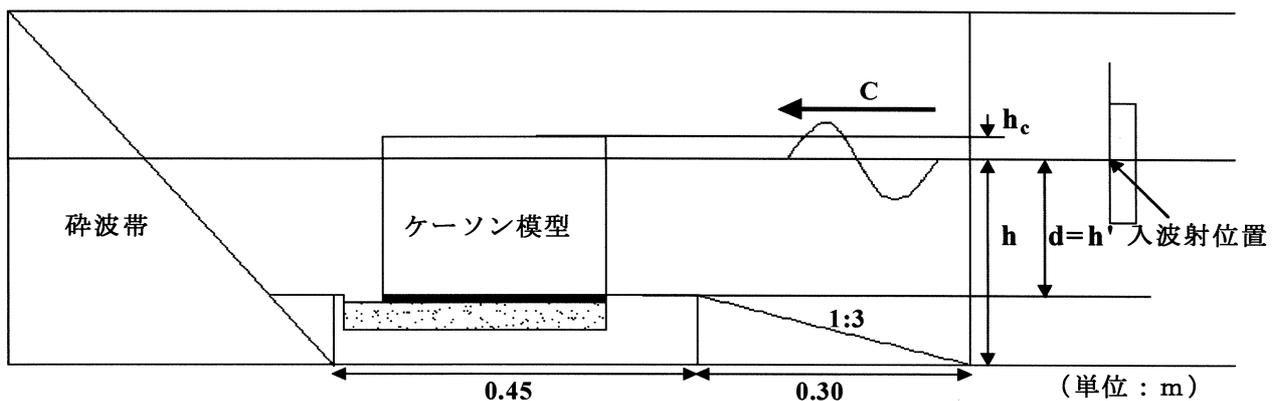


図-5 実験装置断面図

(7) 実験装置と模型配置

実験に用いた水槽は、長さ10.0m、幅0.8m、最大水深0.8mで、水路の一部はアクリル製となっており、水路側面からケーソン模型の滑動の様子が観測可能である。この一方には、プランジャー型規則波造波装置が取り付けられている。反対側の水槽端部には1:2の斜面に消波ブロックを設置した。

図-5に示すように、実際の施工済みの防波堤部を断面水槽に再現する為、施工後の完成断面図から縮尺を行い、砕波帯の前に、基礎マウンド部を設け、マウンド部をくり抜いて、先ほど選定を行った砂を敷き詰めた。その上に直接ケーソン模型を設置したもの、またホタテ貝殻を混ぜた摩擦増大用マットをマウンド部に敷いて模型ケーソンを設置したものの、併せて2函、間隔を設けて置き(図-2参照)、摩擦増大用マットの有効性を確かめた。ここで、ケーソン模型の間にアクリルで仕切り板を設けて、砂が中央を移動出来ないようにし、かつ入射波を2つに分離するために、アクリル板の設置位置はマウンドの沖側斜面部までとした。

(8) 測定方法

ケーソン模型が滑動した時の入射波高を移動開始時の波高:Hと定義し、摩擦増大用マットの効果について「移動開始時の波高:H」と「貝殻含有率:C」の関係について模型実験によって検討した。この波高を求める為、沖側にあるプランジャー型規則波造波装置によって周期一定の波を当て、斜面マウンドの付け根から1波長分沖側へ取り付けられた容量式波高計(東京計測(株))によって波高計の増幅器からの出力電圧をサーマルコーダー(RT3200N:NEC三栄(株))に記録し、別途実施した検定値を用いて、入射波高を求めた。

測定は小さい波高から徐々に大きくし、反射波の影響を考慮し、3波までの波を結果として用いた。造波開始は水槽内が静止状態となるまで待つてから、徐々に波高を増加した。ケーソン模型の滑動の判断には、仕切り板に取り付けた目印を用いて目視によって、滑動の様子を観察し、5mm以上移動した時の波高を移動開始時の波高:Hとして定義した。ケーソン模型が滑動するまで造波を繰り返した。

(9) 合田式による波圧合力の算定

測定された移動開始時の波高:Hを用いて、現地の周期: T_{max} をNOWPHASから抜き出し、Fr相似則を用いて模型周期: T_r を算出し、模型諸元と波高:H、周期: T_r を合田式に当てはめ、計算を行い波圧合力:P及び揚圧力:Uを求めた。

合田式によって求めた波圧合力:Pをケーソン底部の材料別に分け、ケーソンの底部間材料が砂の場合における単位幅当たりの波圧合力を P_0 、摩擦増大用マットの場合の波圧合力をPと定義した。

(10) 実験ケース

実験ケースは、表-2に示す全6ケースを実施した。ここで、「貝殻含有率:C」とは、前述の式(1)と同じように貝殻の重量(N): W_b 、アスファルト混合物の重量(N): W_a を用いて、貝殻と混合物の全重量に対する貝殻の重量比を示す。従って、貝殻含有率C=50%とは、貝殻重量とアスファルト混合物の重量が同じである事を意味する。

表-2 実験ケース一覧

番号	ケーソン底部間の材料	C(%)	粒径(mm)
1	砂面	0	0.65
2		0	1.2以下
3	アスファルトマット	20	1.2以下
4		50	1.2以下
5		20	2~5
6		50	2~5

3. 結果と考察

本実験から得られた実験結果で「移動開始時の波高:H」と「貝殻含有率:C」の関係として図-6に、「水平力比:P/ P_0 」と「貝殻含有率:C」の関係として図-7に示す。

図-6、図-7の貝殻含有率:C=0%とはアスファルト混合物のみのマットであり、即ち貝殻が全く含まれていないアスファルトマットである事を示す。また、砂面(図中、▲印)と書かれた結果は、マットを敷かずに砂面と模型のみで行ったケースである。

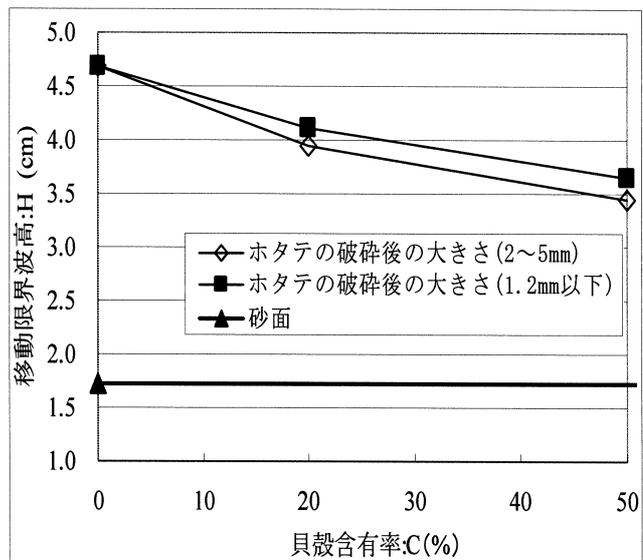


図-6 移動開始時の波高と貝殻含有率の関係

移動開始時の波高:Hは波圧合力:Pを求める際の因子であり、波圧合力は静止摩擦係数と比例関係にある為、図-6、図-7とも類似したグラフとなっている。

表-2に示した各実験ケースに対する移動開始時の波高:H及び、貝殻含有率:Cの算出結果について、(1)摩擦増大用マットの使用別、(2)貝殻含有率別、(3)貝殻の破碎後の大きさ別、(4)リサイクル量の検討、の4つに分けて考察する。

(1) 摩擦増大用マットの使用別

アスファルト混合物のみを用いたマットでは、図-6に示した移動開始時の波高:Hの結果から、ケーソンの底部間材料が砂面の場合に比べて摩擦増大用マットを用いた場合において、約2.7倍の移動開始時の波高:Hとなっている。最も移動開始時の波高:Hの小さかった貝殻の破碎後の大きさR=2~5mmのC=50%のケースと砂面では約2.0~2.1倍となっており、摩擦増大用マットの有効性が示された。

(2) 貝殻含有率別

図-6から、貝殻含有率:C=20%、50%でみると、2種類どちらの貝殻の破碎後の大きさの場合でも貝殻含有率:Cの増加と共に移動開始時の波高:Hは減少している。これは、式(1)から分かるように貝殻含有率:Cの増加する毎にアスファルト混合物量が減り、アスファルトマット特有の噛み合わせによる抵抗性の減少や、貝殻とアスファルトとの付着に対しても問題があると推測される。即ち、貝殻には裏と表があり、一方はツルツルと滑りやすい面を有している為、アスファルトとの接着力が弱い事が原因の一つと考えられる。

(3) 貝殻の破碎後の大きさ別

図-6から、貝殻の粒径と静止摩擦係数の関係は、貝殻破碎後の大きさR=1.2mm以下の細かい大きさ(図中、■印)の方がR=2~5mmの大きい粒径(図中、◇印)より摩擦抵抗が大きい事が分かる。また、貝殻の含有率が大きい程、粒径間による移動開始時の波高:Hの差が大きくなっている。即ち、粒径が細かい

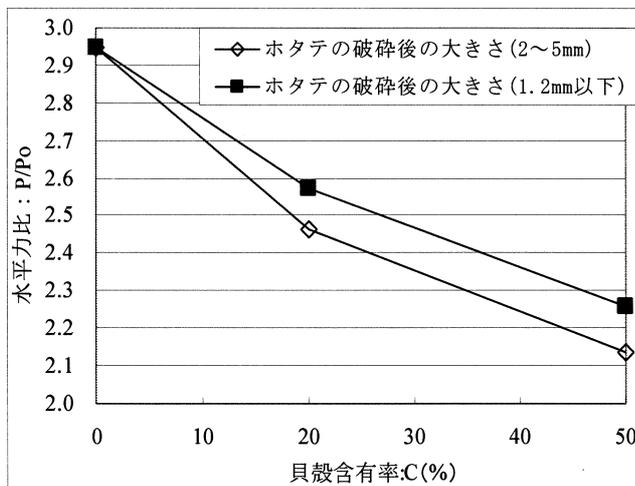


図-7 静止摩擦係数と貝殻含有率の関係

と抵抗力の減少は小さくなるのに対し、粒径が粗く含有率も大きくなると移動開始時の波高が急激に小さくなっている。これは、貝殻とケーソン底面との接触面積が異なる為と考えられる。

(4) リサイクル量の検討

図-7の実験結果より、貝殻含有率50%でアスファルトマットに混入した場合を想定し、貝殻(炭酸カルシウム:CaCO₃)の単位体積重量を考慮して、ケーソン1函当たりの使用量、即ち見込まれるリサイクル量について検討した。

まず、摩擦増大用マットに混入した場合を考える。今回の実験結果から、移動開始時の波高:Hは貝殻の重量含有率から見ると、50%でケーソン底部間の材料が砂面と比べると約2.0~2.1倍となっており、使用しても十分効果を発揮できるとして、この値を用いた。佐藤ら⁷⁾の実験結果から、ホタテ貝殻の比重を1.53として、摩擦増大用アスファルトマットを8cmの厚さとした場合を考えると、ケーソン1函(幅18.5m、長さ25.0mを想定)当りの貝殻の重量は、約28.3tf (277KN)となる。前書きに記述したように、年間の発生量が約5万トンである事より、この重量は年間の貝殻発生重量の約1/1,770に相当する。

(5) コスト面の検討

図-6及び図-7からの結果から、貝殻を含ませるとアスファルトマットは、滑動抵抗が減少する事が分かる。この事からコスト面において実現可能性を考えると、実際にマットに用いられる道路用骨材の価格は1m³当り、数千円となっている。ホタテ貝殻を用いるとすると、1m³当りのホタテ枚数は約3000枚であり、ホタテ貝殻の乾燥及び、破碎の作業工程にコストが生じる。よって、実際に用いる場合には、道路用骨材の1m³当りの価格以下に作業工程料を抑える事が出来れば、マットへのホタテ貝殻が適用できると考えられる。

4. まとめ

ホタテ貝殻の摩擦増大用マットへのリサイクルを目的として、摩擦抵抗係数に関する実験によって得られた結果を以下に列記する。

- 1) 貝殻含有率が小さい程、静止摩擦係数の値が増している。これは、貝殻には裏と表があり、一方は滑りやすい面を有している。その為、アスファルトとの接着力が弱くなる事が原因と考えられる。
- 2) 入射波高を徐々に増加させてケーソンが移動し始めるときの波高を測定した。最も移動開始時の波高:Hの小さかったケースは、貝殻の破碎後の直径R=2~5mmで含有率C=50%である。増大マ

ット無しの場合の波高の約2.0~2.1倍となっており、貝殻を混入した場合の摩擦増大用マットの有効性が示された。

3) アスファルトに用いた摩擦増大用マット(厚さ8cm)にホタテ貝殻を混入させた場合、貝殻含有率C=50%の時、1函当たり約28.3tf(277KN)、年間排出される貝殻全体の1/1,770相当のホタテ貝殻リサイクル量が見込まれる。

参考文献

- 1) 小早川正樹・張金喜・藤原忠司(2001):ホタテ貝殻のアスファルト混合物材料としての適用性, 東北支部技術研究発表会講演概要, Vol. 64, pp. 620-621.
- 2) 中島博行・井上博泰・伊藤利明(1999):牡蠣貝を用いた土壌改良材の開発, 東北支部技術研究発表会講演概要, Vol. 68, pp. 628-629.
- 3) 小山信次, 奥田慎一, 笹谷廣治「ホタテ貝殻セラミックスの機能性とその実用化」, 東北地域バイオインダストリー振興会議誌, No20, pp. 6-10.
- 4) 河村昌益・南将人(2005):ホタテ貝殻を用いた摩擦増大用マットに関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 867-872.
- 5) (社)日本港湾協会(1999):港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 310-311.
- 6) 浜田敏明・北山斉・岡良・中井章・若杉利彦(2001):海水中における摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性(30年)について, 海岸工学論文集第48巻, pp. 1001-1005.
- 7) 佐藤朱美・伊藤敏朗・森信幸:ケーソン中詰材としてのホタテ貝殻の有効性について,
http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/pdf_files/06kouwan/kou-28.pdf