

アスファルトマットの撓み変形の模型化と洗掘実験

尾崎 晃*・鴻上雄三**・松崎勝夫***
田崎邦男***・西川利一****

1. ま え が き

北海や北大西洋の海洋構造物では、その洗掘防止工としてコンクリート版や化学材料のマットで海底を被覆するものが出現したが、結果は失敗に終わっている。我が国の防波堤や護岸の一部でも、施工の簡易化と材料の撓み効果に着目した洗掘防止用アスファルトマットが敷設され、追跡調査によって機能の保持が認められている。しかし、問題がないとはいきれない実情である。

波や流れの作用下における被覆工の問題点を明らかにするには、水中におけるその挙動を調べる必要がある。そのためにアスファルトマットの模型化を考え、材料特性がほぼ満足できる模型の製作と、これを水理実験に適用して、撓み性の被覆工に含まれる洗掘防止機能上の問題点の抽出並びにその解決を図ることを目的とした。

2. 洗掘防止用アスファルトマットの追跡調査

我が国の防波堤や護岸に対する洗掘防止用マットの施工件数は多いが、極めて少ない事後調査例の中に、日本海に面する港湾と海岸のアスファルトマットについて調べたものがある¹⁾。

(1) F 港防波堤

調査は昭和 55 年 5 月、50～54 年度施工の防波堤の 4 地点について、根固工前面の堆砂除去後のマットの張出部、根固ブロック下部、重ね合せ部の状況を調べたほか、

1 地点についてマット片の物性試験を行った。

張出部 堆砂は凸状を示し、マットは中央が 30 cm 盛り上り、先端が 30～60 cm 砂中に撓んでいた(写真—1)。

1 地点で波に煽られたとみられる破損箇所があった。

根固ブロック下部 ブロック脚下で 2～5 cm の沈下があるが、亀裂はなかった。脚の突き抜けが 1 箇所にあったが、底質の吸出しが生じるほどの間隙はなかった。

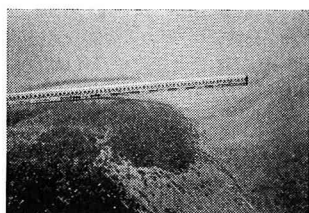
重ね合せ部 重ね幅は 50 cm であるが異常はなかった。

物性試験 比重、曲げ、圧縮、押抜、抽出の各試験値は製作時と変りなく、材料の老化も認められなかった。

(2) S 海岸の護岸と離岸堤

写真—2 は 43 年度施工の護岸、写真—3 は 52 年度施工の離岸堤について、56 年 2 月現在のマットの状況を示す。両者とも、マットは機能を保持しているが、部分的には長期安定上の問題点がみられる。すなわち 写真—2 において、手前の海岸ではマット先端が撓んで砂中に埋まり、段落ちの海浜を示しているが、奥手の海岸ではマットの撓みの部分に凸の膨らみがみられることと、段落ちが護岸に接近していることが特徴的である。

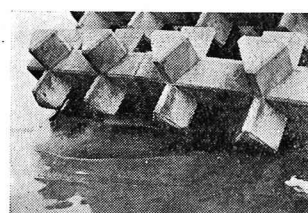
これらの特徴から推定すれば、初め砂浜に平坦に敷かれていたマットは、前面の洗掘に伴って先端が波に煽られ、浮遊砂の一部のマット下面沿いの進入によって中央部が盛り上り、したがってこの部分の位置を護岸前趾のそれより高くすることが考えられる。この現象は、異常に大きい波が来襲した場合に再発するから、段落ちは次



写真—1 マット張出部先端の撓み



写真—2 護岸の洗掘防止用マット



写真—3 離岸堤の洗掘防止用マット

* 正会員 工博 北海道工業大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 鹿島建設技術研究所 兼 日本海上工事(株) 技術研究所
*** 正会員 日本海上工事(株) 技術部
**** 日本海上工事(株) 技術研究所

第に護岸に接近する。このような接近は、護岸の崩壊につながる危険があり、この傾向は、護岸より離岸堤の場合に多くみられる。

3. アスファルトマットの継手部に関する実験

尾崎は、速い流れの砂質底に敷かれたマット継手部の挙動を調べるため、初め水路実験により2種の粒径の砂について継手間隙の洗掘形状を測定し、洗掘深を流速と間隙幅による Reynolds 数の関数として整理した。次に風洞実験により水の流速 5 m/sec, 間隙幅 16 cm を仮定して、前述の関係から求められる洗掘深 9 cm をもつ固定床の洗掘孔に対して風圧分布を測定し、水圧分布に換算して 図-1 を示した²⁾。ここで、実験風速 $v=50.89$, 34.85 m/sec は、水の流速 $u=5.25$, 3.59 m/sec に相当する。

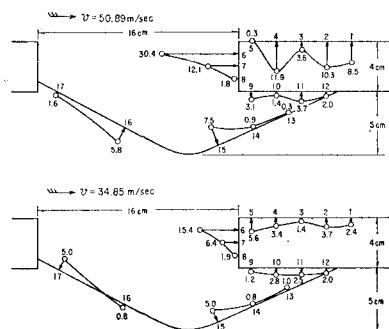


図-1 風圧換算の水圧分布図 (単位 kg/m^2)

図-1 によれば、マットの上下面には上向きの揚圧力が作用していることがわかる。継手の場合は上流側がマット面で拘束されるが、マット端の場合は拘束がないので洗掘孔がこれより大きくなり、したがって流れが洗掘孔面に沿って進み、マット下面に直接、作用するようになるから、揚圧力はより大きくなることが予想される。

4. アスファルトマットの撓み縮尺模型

(1) アスファルトマットの撓み変形の相似

マットの撓み変形を相似化する場合の基本的な考え方は、前面の洗掘孔の形成過程でマット先端が洗掘孔に張り出す状態があることに着目し、実物のマットの片持梁としての撓み形状が相似になるような模型材料を開発することである。しかし筆者らにはこれは不可能であるので、模型でも実物と同じ材料を用いるが、配合を工夫することによって適正な模型を製作する方法を開発した。

(2) 模型の製作

a) アスファルトマットの撓み

アスファルト合材は粘弾性体であり、瞬間的荷重と低温においては弾性体に近い性質をもつが、長時間の載荷によりクリープ変形を生じ、この変形は載荷重量、時間と温度の関数となる。そこで撓みの測定においては、片

持梁としてのマット片の幅・厚さ比 b/h を一定:5 に保ち、長さ・厚さ比 l/h を 7.5, 10, 20 に変えてその影響を調べた。温度 T は 10, 15, 20°C である。

図-2 は $T=15^\circ\text{C}$, $l/h=10$ の場合の撓み曲線で、

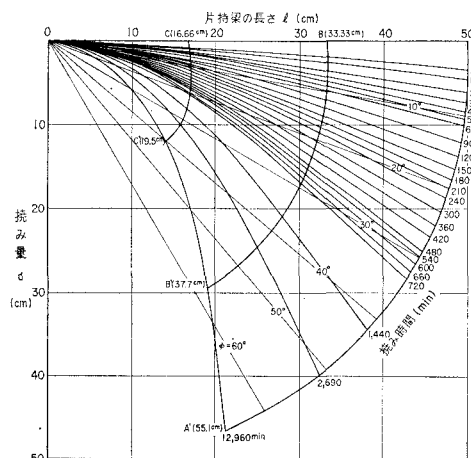


図-2 アスファルトマットの撓み曲線

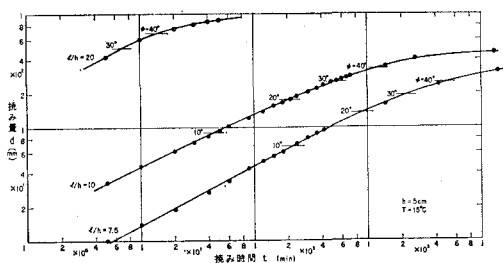


図-3 マットの撓み量と撓み時間

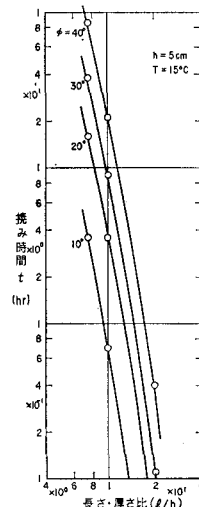


図-4 片持梁の長さとは撓み時間

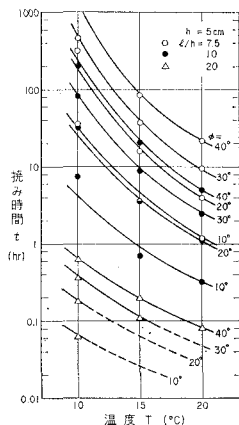


図-5 マットの温度と撓み時間

図中の太線 AA', BB', CC' は先端と3分点の軌跡を表す。初め長さが等しい OC, CB, BA が撓みの進行と共に 17, 9, 4% の伸びを示すことが特徴的である。

図-3 は撓み量 d と撓み時間 t の関係を示し、 t は撓み角 $\phi=30^\circ\sim 40^\circ$ までは $d^{1/2}$ に比例するが、 ϕ が 40° を超えると急激に増加する。図-3 を描き直すと図-4 となり、 t は $(l/h)^{-6}$ に比例することがわかる。図-5 は、撓みに与える温度の影響を示す。

b) 模型マットの配合と製作

実物と模型の配合は表-1 のとおりで、構成材料はほぼ同じであるが、①配合が異なる、②実物では砕石を用いるが、模型では鉄粉を用いて比重調整する、③模型ではアスファルトの流動性を増す添加剤を混合するなどに違いがある。製作方法は実物と同じで、所定の配合の合材を加熱して型枠に流し込む。ただし、前項で明らかにされた特性をすべて模型化することは不可能で、工学的に満足できる範囲で相似条件を緩和することが必要である。筆者らは $l/h=10$ 、 $T=15^\circ\text{C}$ に条件を緩和した。

図-6 の●印の曲線は、図-5 の $l/h=10$ について ϕ と t の関係を描き直したもので、 t は 1/30 模型での値である。○印の曲線 A~D は、表-1 の配合の模型に関するものである。添加剤の混合率を変数として目標に対する各配合の撓み時間比を示せば図-7 のとおりで、混合率 4.5% の場合、 $\phi=10^\circ\sim 30^\circ$ の範囲で撓み時間比が $\pm 15\%$ の模型マットが製作できることがわかる。

c) 模型マットの材料特性

マットの物性試験結果は、表-2 のとおりである。 λ を模型の縮率とすれば、模型の強度は実物の $1/\lambda$ である

表-1 マットの構成材料と配合

構成材料	実物	1/30 模型			
		A	B	C	D
アスファルト	12.0%	18.0%	18.0%	18.0%	18.0%
石粉	25.4	18.0	18.0	18.0	18.0
砂	27.6	38.9	37.5	35.4	28.4
砕石	35.0	—	—	—	—
鉄粉	—	22.4	23.4	25.0	30.2
添加剤	—	2.7	3.1	3.6	5.4

表-2 マットの物性試験結果

試験項目	供試体寸法	試験温度	変位速度	他の条件	試験結果	
					実物	模型
比重	4×4×16 ^{cm}	-2°C	—	容積比重	2.25	2.20
曲げ	4×4×16 ^{cm}	-2°C	20mm/min	支点間隔 10cm	強度 110.0~119.3kg/cm ² 撓み 1.0~1.2mm	強度 4.2~4.4kg/cm ² 撓み 16.8~200mm
圧縮	4×4×8 ^{cm}	-2°C	20mm/min	加圧面積 4×4cm	強度 175.0~181.3kg/cm ² 撓み 1.5~2.0mm	強度 3.9~4.1kg/cm ² 撓み 13.6~14.2mm

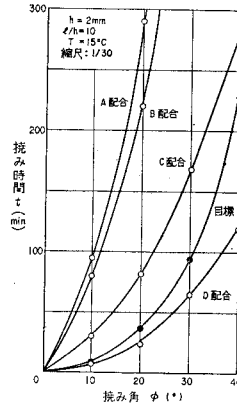


図-6 模型マットの撓み角と撓み時間

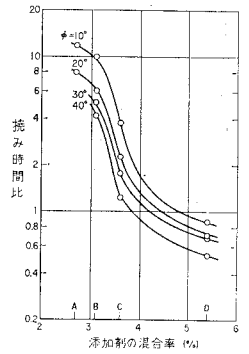


図-7 添加剤の混合率と撓み時間比

から、前項の方法で製作したマットは、曲げ強度については相似化されているが、圧縮強度については実物の 2/3 に相当することになる。

5. 撓み模型の混成堤マウンドの洗掘実験への適用

(1) 実験方法

実験は 60×0.7×1.5 m の水路により縮尺 1/30 で行った。海底勾配 1/100 の斜面上方は一樣水深の移動床とし、中央粒径 0.12 mm の砂を敷いた。混成堤は図-8 に示す高基と低基の 2 種である。波高は $H_0=15$ cm、周期は日本海沿岸の港湾の洗掘災害例から $T=2$ sec と定めた。高基堤については不規則波も与えた。

実験では、規則波の場合に 120 分、不規則波の場合に 60 分造波し、15 分毎に地形変化を観測窓から測定して変化がほとんどなくなるまでの時間を求めた。次にマウンド法先に厚さ 0.2 cm で、図-8 に示す寸法の 1/30 のマットを敷き、先に得られた地形変化がなくなるまでの時間造波し、地形と共に上部の堆砂除去後のマット形状を水路中心線に沿って測定した。

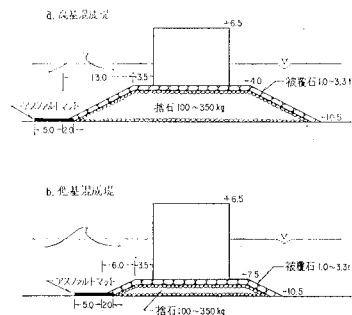


図-8 混成堤断面図(単位 m)

(2) 波の作用後の地形とマット形状

図-9 は、波の作用後の地形とマット形状の変化を示す。a, b は規則波の高基と低基, c は不規則波の高基に関するものである。洗掘深は法先が最大で、規則波の高基, 低基, 不規則波の高基の順に 4, 2.5, 1.5 cm となっている。法先から 10~15 cm 沖側で、初め堆積の地形が時間と共に上に凸であるが全般に侵食されるのは、マウンドによる地形変化が重複波による地形変化に吸収された結果と考えられる。

しかし、マットを敷くことによってこれらの侵食はなくなり、長時間後にはむしろ堆積の傾向を示している。写真-4 は、規則波の高基のマット上の堆砂除去後の断面形状を示し、マットは先端が撓んで砂中に埋まり、所定の機能を果たしていることがみられる。

入江らは、重複波による混成堤前面の底質の移動が底質の浮遊程度を示す数 u_b/w と Ursell 数 $U=HL^2/h^3$ に支配され、 $u_b/w > 10$ の場合、重複波の節で洗掘、腹で堆積の L 型移動を示している³⁾。この実験の堤体、波浪、底質の各条件を用いて移動形態を判定すると L 型となり、結果は彼らの提案に一致している。

(3) 混成堤マウンド法先の洗掘とマットの挙動

図-10 は、マウンド法先の洗掘状況を示す。平坦な砂地盤①は、波の繰り返しにより砂澁が形成される。浮遊砂は砂澁上に帯状の濃い濁りの砂雲となって寄せ波で岸側へ、引き波で沖側へ移動する。法先付近の流れは寄せ



写真-4 堆砂除去後のマット（高基、規則波）

波で斜面を這い上り、底質を押し上げる。しかし、先端捨石の後方に渦を形成して底質を吸い出し、地盤に凹みをつくる②。引き波で斜面の流れは逆向きになり、法先の底質を洗掘すると共に、先端捨石の後方の凹みに再び渦を形成して凹みを更に発達させる③。このような経過の繰り返しにより、先端の捨石は洗掘孔に滑り落ちるか沈下して、すぐ隣りの捨石との噛み合せを弛めるから、地盤は法先で洗掘、その沖側で堆積の地形となるほか、マウンドの沈下と捨石の散乱がみられるようになる④。

図-11 は、マウンド法先のマットの波による挙動を示す。初め①の形状に敷かれたマットは、造波 4~5 波目の寄せ波で先端 2~3 cm が 4~5 mm 浮き上がる②。マット前面の洗掘により次の寄せ波で先端 4~5 cm が 10~20 mm 浮き上がる④。引き波時の洗掘深は 2~3 mm であるが、洗掘はマット下端にも進行する⑤。約 10 波目の寄せ波では先端が 50 mm の高さで全体に浮き上がり(写真-5)、下面沿いに輸送された底質の堆積がマットを凸に盛り上げる⑥。次の引き波で浮き上りは納まり、先端が洗

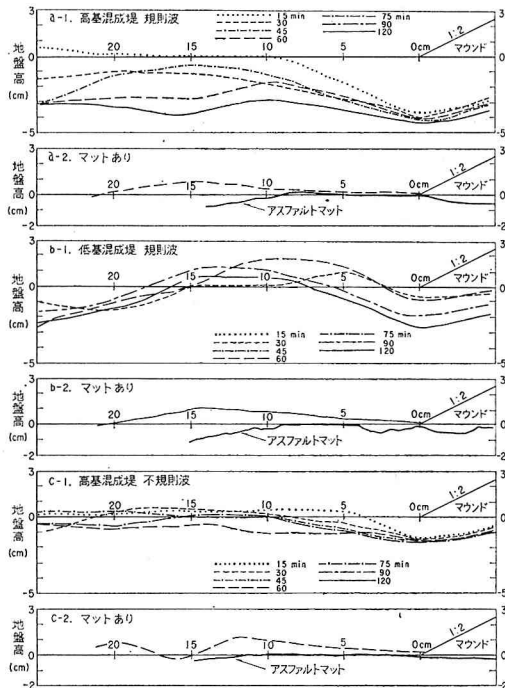


図-9 波の作用後の地形とマット形状

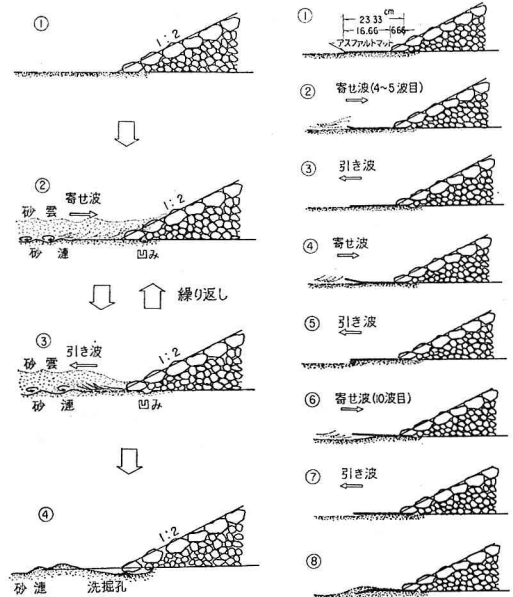


図-10 捨石マウンド法先の洗掘

図-11 マットの挙動

掘面に挟み込む⑦。先端の挟みと共にマットの浮き上りは生じなくなり、輸送された底質がマットに堆積し始める⑧。

マットは厚さ 2 mm, 重量 0.44 g/cm^2 で, 波高 15 cm, 周期 2 sec の波に対してやや軽い, その挟み性により機能を果たしていることが挙動の経過から推察できる。

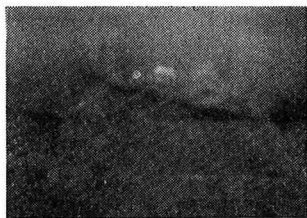


写真-5 マットの挙動 (張出部全体が浮き上る)

(4) 洗掘防止用アスファルトマットの改良

a) マットの洗掘防止機能上の問題点

2章の追跡調査, 5章の適用実験結果から, アスファルトマットを洗掘防止工として使用する場合の水理的問題点は, 次の3点に要約される。

- 流れや波の力に抵抗するマットの所要重量
- 洗掘防止に有効な被覆範囲
- 材料が挟み性であることの長所と短所

このうち a, b は今後の研究に委ねるが, c について考察すれば次のとおりである。

長所としては, マットが挟み性をもつことにより洗掘孔面に沿って初期のうちに変形するから, 洗掘孔のその後の発達を緩和できることである。短所としては, ①マットが揚力をうけて浮き上るとき, 剛な版であれば版の全重量が抵抗するのに対し, 挟み性で非均質な材料構成であるため先端から任意の位置に支点ができやすく, 重量が不足の場合に揚力に抵抗する重量が小さくなる。②揚力と重量が平衡している場合でも, 外力の不規則性により先端部はつねに振動しているから前面の洗掘が助長され, マット下面沿いに底質が移動, 堆積し, 挟み性により凸の盛り上りができ, 竈状の波打ち現象が生ずるので, その分だけ被覆面積の減小をきたすことである。

b) マットの改良実験

マットが挟み性であることの長短を確認し, その改良を図るため縮尺 1/20 の実験を行った。混成堤は低基で, 中央粒径 0.12 mm の砂地盤上のマウンド法先に, 図-12の右側に示すとおり厚さ 0.3 cm のマットを敷いた。マ

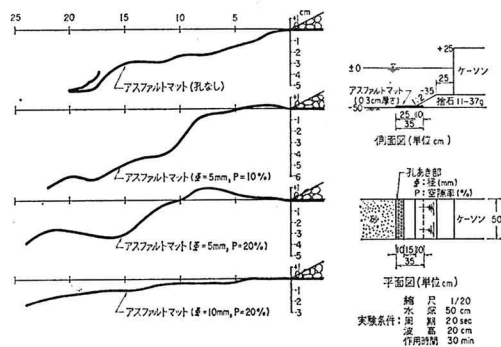


図-12 マットの波による変形の改良

ットは張出部の先端 10 cm の区間に円形の孔があるもの 3 種と, 孔なしのもの 1 種である。孔の径 ϕ と空隙率 P の組合せは異なっている。実験では, 4 種のマットについて波高 20 cm, 周期 2 sec の規則波を 30 分造波し, 地形とマット形状を測定した。

孔なしのマットは, 図-12の左側上段にみられるとおり, 先端 3 cm が折れ曲っていることと, 2 段の凸の盛り上りによって張り出しが 20 cm に短くなっていることが特徴的である。この折れ曲りは, すでに明らかにされたとおり揚力による煽りの結果であるから, その防止のため孔をあけて透水性をもたせると, ϕ と P の増加に伴って先端の洗掘が少なくなり, 張り出しの減少が小さくなる。特に $\phi=10 \text{ mm}$, $P=20\%$ の場合には挟み性の短所の改良が著しい。

6. あとがき

洗掘防止用アスファルトマットの波浪下における挙動を明らかにするため, その縮尺模型化を試み, 水理実験に適用して洗掘防止機能上の問題点の抽出と解決を行った。結果はほぼ満足できると思われるので, 今後は模型化技術の精度向上と, 洗掘防止工としての所要重量, 被覆範囲など未解決事項の研究をすすめる予定である。

参考文献

- 1) 日本海上工事(株): 洗掘および吸出し防止用アスファルトマット工調査研究報告書, 1983. 3.
- 2) 尾崎 晃: アスファルトマットによる海岸浸食防止工法に関する基礎的研究, 北海道大学工学部港湾工学研究室報告書, 1966. 3.
- 3) 入江・近藤・赤石・寺崎: 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, 1984. 11.