

洗掘防止工の現状と海底面被覆工の波力に対する安定性

尾崎 晃*・鴻上雄三**・田崎邦男***
中野 浩****・小川明久****

1. ま え が き

捨石マウンドの法先洗掘が捨石斜面を崩壊して順次、上部に影響を及ぼす形態の防波堤の災害は、大規模港湾が出現した今日では、水深 20 m 以上の地点でも建設初期に比べて 5・6 m の洗掘深のあることが調べられているから深水域においても考えられることで、洗掘防止対策をゆるがせにすることができない。北海や北大西洋の海洋構造物においてはいろいろな種類の洗掘防止工が開発され、中でも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多数、実用化されたが、いずれも波や流れの作用によって破壊され、失敗に終わっている。

この研究は、海洋及び港湾構造物の洗掘防止工の現状と問題点を明らかにするほか、海底面被覆工として我が国の防波堤や護岸に使用されている洗掘防止用アスファルトマットをとりあげ、水理模型実験によって波による浮上り機構を解析し、波力に対する安定性を検討するものである。

2. 洗掘防止工の現状

(1) 海洋構造物の洗掘防止工

海洋構造物の洗掘問題は、1960 年代の北海における石油掘削を機に研究が活発化し、各国でいろいろなアイデアの対策工が開発され、実験室または試験工事の段階を経て実用化されたものもあるが、全般的には試行錯誤の域を出ていないと思われる。北海の対策工で注目されるのは、厳しい海象条件に対して工期を早めるためプレハブ化、軽量化が試みられていることで、特にナイロン、ポリエチレン等の合成化学材料の出現が著しい。

a) 構造物設置海域の自然条件

構造物の設置地点が北海南部、大西洋西北部に亘るので自然条件は多岐である。水深は比較的浅く 13~14 m、風速は 50 年期待値で 40 m/sec、観測値で 31.4 m/sec が最大。波高は設計値が 13~16 m、観測値が Sable Island (加：北大西洋) で 9.1 m, Nova Scotian Shelf

(加：北大西洋) で 12.8 m となっている。

潮流の流速は 0.5~1.5 kt、底質は非粘結性の細砂が多く、一部で砂利が混在する所もある。洗掘深については Sable Island で波高 3.1 m に対して 0.6~0.9 m, Nova Scotian Shelf で波高 6 m に対して深さ 0.7 m, 幅 1.5 m の記録があるだけで、暴風時における海底地形測量の困難さを物語っている。

b) AMOCO 社(英)による北海南部の洗掘防止工

AMOCO 社は 1968 年以降、北海南部において多数の洗掘防止工を施工し、潜水調査を行って各々の長短と問題点をあげている¹⁾。表-1 はその要約である。

洗掘防止工としての砂袋の海上投入は投入時の散乱、投入後の流失が、合成繊維マットは海底の固定方法が、海中である大きさをもつものは 2 次洗掘が問題となり、人工海草は設置時間・労力の割りには正常に立ち上がらないという短所が指摘されている。

総じて、据付・維持・補修の水中作業に長時間、ダイバーの手を煩わすものは問題点が多くあげられており、結局は、古タイヤ投入による潜堤と碎石敷設によるマットだけが機能を保持しているようである。

c) 海洋構造物の洗掘防止工の分類

実験室または試験工事の段階を含めて、洗掘防止工として実用化されているものを分類すれば、表-2 のとおりである。

a. 海底面被覆工：あらかじめ予想される洗掘域を透水性または不透水性の材料で覆ってしまう対策法である。透水性のものは破壊に対する補修が容易なので、最も確実な方法として古くから実績が多い。

不透水性のものの材料で剛性がよいか撓み性がよいかは論議のあるところで、結局は外力に対する被覆工の安

表-2 海洋構造物の洗掘防止工の分類

a. 海底面被覆工	透水性・フィルター材料：碎石、コンクリートブロック、砂袋、蛇籠、粗朶
	不透水性・剛性材料：PC板、水中コンクリート
	撓み性材料：アスファルトマット、合成繊維シート、コンクリート詰マット
b. 導流・減勢工	本体付設置型
	：カラー、減勢函、ASD、SDD、GFD
c. 基礎根固工	本体付設置型
	：人工海草、古タイヤ、砂袋、カラー、スカート、捨石

* 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)
*** 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

表—1 AMOCO 社による北海南部における洗掘防止工

防護 範囲	名 称 対策年次	機能 分類	防止工 の分類	概 要	長短又は問題点	西 暦															
						プラットフォーム 合 計	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
局 部 的	Sandbag 1963～1980	消極	築堤	洗掘孔又はその周辺に積み重ねる	投入時又は積み重ね前に流失 ダイバー時間が大 砂袋自身の洗掘 定期的維持必要		1	7	7	8	11	14	17	19	19	21	21	21	23	23	
	Anti Scour Device (ASD) 1968～1971	積極	導流 マット	ナイロン円形網をテント状に張り、ピンで固定	ダイバーの設置が容易 短期的には脚周辺に堆砂あり 網頂部の堆砂 アンカーピンの引抜 } 長期的には崩壊			6	6	6	6										1
	Sedimentary Deposition Device (SDD) 1971～1977	積極	導流 マット	10mm穴あきポリエチレン多角形網を調節支索で張り、オーガー型アンカーで固定	張り替えを要するが、ASDより耐久性あり 1977まで実施例 100以上 維持費大：200万 \$、ダイバーの検査、修理 2 回/年。1977に放棄							6	14	16	16	16	18	15			
	Glass Fibre Dome (GFD) 1974～1975	消極	導流	ガラス繊維ドームをオーガー型アンカーで固定後、中詰砂をポンプ圧入	プラットフォームから離脱、再設置費高い 2次洗掘で傾斜 1975に防止工から除外									3	3						
	Automobile Tyre 1980～	積極	築堤	洗掘孔の形の積み重ねタイヤを海上から投入後、リーフ状に設置	1 例を施工し、6 か月後調査実施 タイヤは洗掘孔に埋まり、効果良好 維持費小：SDD に替る可能性大		1														1 1
全 体 的	Artificial Seeweed 1970～1971	積極	減勢	1 m 四方ナイロンテープ枠にポリエステル細糸をつけ、ジャケット脚 1 m 海底上に 1 隅を結びつける	細糸の多くが破損、正しく吊り下らない 設計どおりのものは堆砂あり 脚内側だけに取付けに限られる 設置困難、時間大、高価、ダイバーに危険あり						1	1									
	Gravel Pad 1971～	消極	グラベル	洗掘孔周辺にグラベルマットを敷設 1960以降実績多数	永久対策工として有望							5								4	3

定の問題に帰するが、被覆工自身による2次洗掘を含めて底面変化に応じて変形する撓み性材料の方が、被覆工の重量を軽くできる長所があると思われる。

b. 導流・減勢工：構造物本体に付設するか、本体から離れた地点に設置した付帯設備によって、波や流れのエネルギーを分散または減少して洗掘力を弱めるか、本体に影響のない遠方へ誘導しようとする対策法である。

本体付設型のうち、カラーは主として橋脚の洗掘防止に用いられている。構造物前面における下向き流れによる渦の発生や剝離と馬蹄形凹みの発達を防ぐため、水面に平行に数段のカラーを構造物に付設して、洗掘の起動力となる渦の発生を初期のうちに防止する機能をもたせるものである。減勢函は、カラーを鉛直方向にも壁面で函状に囲み、各壁面に適当な間隙比の穴をあけるか、さらに内部にフィルター材料を詰めるかするものである。

本体付設型の防止工は、機能を発揮させるためにはある大きさをもつことが必要で、カラーの有効径は、径がbの円柱構造物に対しては2bといわれる²⁾。減勢函についてはやや小さめの径となるが、流れに平行な壁面沿いには減勢効果が期待できないから、2次洗掘を生じる問題点がある。

c. 基礎根固工：波や流れの影響の小さい所で用いられる小規模な対策法である。このうちスカートは、構造物の根入れを洗掘深より深く下げておくものである。

(2) 防波堤の洗掘防止工

我が国の防波堤の洗掘災害と洗掘防止工の現状を、主として過去20年間の海岸工学講演会論文集から要約した。しかし洗掘の機構・規模や洗掘防止工の挙動・効果を外力条件との関連で説明した文献は非常に少ない。

a) 防波堤の洗掘の規模

市川は、静岡・富士海岸の田子浦防波堤が昭39.9台風(波高8mが5hr、波高6mが10hr連続)により8.5m水深地点で5m、昭40.9台風(波高8mが3hr継続)により11m水深地点で6.5mの洗掘深を示したことを報告している³⁾。

和田・西村・楡井は、新潟東港東防波堤が昭41.12低気圧(最大波高5.69m)により1m水深地点で4.8m、昭45.1低気圧により11m水深地点で4mの洗掘深を、金沢港西防波堤が昭42.12冬期波浪(波高4m)により6m水深地点で3mの洗掘深を示したことを述べている⁴⁾。

森平・神田・国田は、昭51.10低気圧による新潟・東港防波堤の蛇行災害の特徴を調べ、ケーソンの移動、傾斜は洗掘孔への滑動、回転により生じ、洗掘深が西港の15.5m水深地点で8mに達したことを述べ、大水深域での洗掘は、砂の流入による補給が少ないから浅水域でのそれをしのぐのではないかと示唆している⁵⁾。

土市・渡辺・北沢・山田は、日本海沿岸の大規模港湾の長期深淺変化図から、比較的大水深域でも3～5mの洗掘深のあることを調べている⁶⁾。

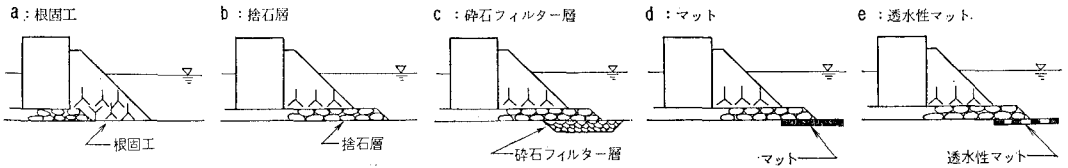


図-1 防波堤の洗掘防止工の分類

b) 防波堤の洗掘防止工の分類

図-1 は、上記の要約論文に現われる洗掘防止工を5種に分類したもので、a, bのように防止工がないものも含めてある。

a. 根固工：防波堤前面の海底に直接、異形ブロックなどを根固工として設置したもの。

b. 捨石層：根固工の基礎として防波堤の捨石マウンドを延長したもの。

c. 砕石フィルター層：捨石層の前趾付近の洗掘や底質の吸出しを防止するため、前趾の前後の海底にある距離と厚さについて砕石フィルター層で置き換えたもの。この場合、砕石層はフィルター基準に合致するよう何層かに篩分けした砕石を重ねて積むことが必要である。

d. マット：砕石フィルター層をアスファルトマット、帆布、合成繊維織りの布等で置き換えたもの。この場合マットは、マウンドや堤体斜面沿いの流れに抵抗する自重をもつか、相当重量の錘りで押さえる必要があり、さらに、海底面の変化に対応するよう撓み性をもつことが有効と思われる。

e. 透水性マット：マットに適当な大きさの穴をあけるか、Geotextile を用いるなどして透水性をもたせるもので、粗梁沈床からアイデアが出ている。

3. 砕石フィルター層の被覆石重量

砕石フィルター層は、重量 2~200 kg の石を 0.6~1 m の厚さでマウンド前後趾の前後に各々 1.5~7.5 m, 1.5~3 m の距離に敷くことが一般的であるが、上層の被覆石が波浪に対して安定でなければならない。

この問題については1981年、US Army Waterways Experiment Station が大規模な実験研究を行って次の式を提案している⁷⁾。

$$W_{UL} = \frac{\omega_r H_b^3}{23,150(S_r - 1)^3(L/\lambda)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W_{UL} ：フィルター層被覆石の重量(t)、 ω_r ：石の単位重量(t/m³)、 $S_r = \omega_r / \omega_0$ 、 ω_0 ：水の単位重量(t/m³)、 H_b ：堤体位置における最大砕波高(m)、 L ：フィルター層の長さ(m)、 λ ：波長(m)。

この実験は、1/16 縮尺模型により厳しい洗掘を生じる巻き波型砕波で行われた。手法は Hudson の実験とほとんど同じで、縮尺効果も考慮された。式(1)には周期の影響も含まれている。

4. 海底面被覆工の波力に対する安定性

(1) 洗掘防止用アスファルトマット

アスファルトマットは石油アスファルト、石粉、砂、砕石を約 200°C に加熱、混合し、補強芯材を挟んで厚さ 5~8 cm の板状に成型したものである。

洗掘防止用アスファルトマットは、砕石フィルター層に比べて初期コストは要するが適度な撓み性があり、海中での耐久性にも優れ、また、砕石を篩分けて重ねるという複雑な水中作業を伴わないので、我が国の防波堤や護岸の捨石マウンド前趾付近の海底面被覆工として古くから実績がある。

(2) 模型マットの浮上り挙動実験

筆者らは、波浪下の海底面被覆工の問題点を明らかにするためアスファルトマットの模型化技術を開発し⁸⁾、その模型を図-2 に示す混成堤に適用して水理実験を行い、波による浮上り限界波高を測定すると共に浮上り挙動を解析した。

図-3 は、縮尺 1/20 と 1/30 の実験で模型マットの先

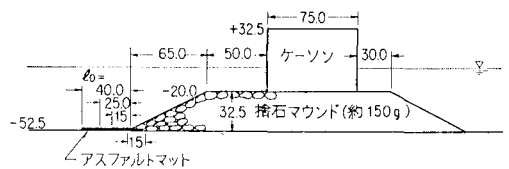


図-2 模型の堤体形状(縮尺 1/20, 単位 cm)

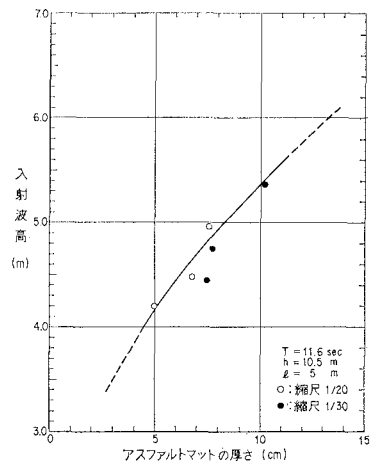


図-3 マットの浮上り限界波高

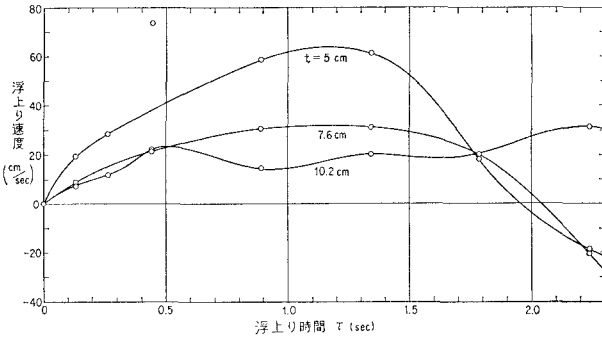


図-4 マットの浮上り速度の変化

端が数 mm 浮上ったときの入射波高を浮上り限界波高と定義し、6種類の厚さのマットについて測定した結果を示す。ただし、マットの張出し先端は、堤体前面から入射波長の約 1/4 の位置にある。

図-4 は、入射波高を限界波高よりやや大きくして浮上り高さを高くした場合のマットの挙動を VTR に収録し、先端の浮上り速度の変化として画像解析したものである。図-5 は、この場合の浮上り 0.11 sec 後の時刻（選定理由は 4.(4) 参照）の浮上り長さとし高さ、マット厚さについて示したものである。

実験は固定床で行われたが、浮上り限界波高が造波後 30 波以内の短時間で測定されたので、移動床で行われたとしても、マットの洗掘孔への撓み込みによる影響は少ないものと考えられる。

(3) マットの浮上り安定解析

これまでに行われた実験から、マットの浮上り挙動には次の特徴のあることが調べられている⁸⁾。

a. マットの浮上りは、その先端を寄せ波のピークが通過するときに生じる。

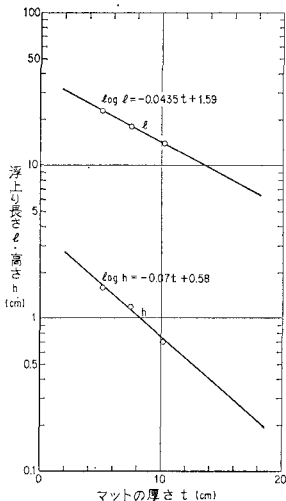


図-5 マットの浮上り長さ・高さ

b. そのとき、マット先端付近に小規模の洗掘孔が形成されている。

c. マットは先端が浮上ると、その後は受圧面積の増大により急速に浮上るが、入射波高が限界波高よりあまり大きくなければ、浮上った状態で平衡している場合がある。

以上の挙動観察結果から、マットの浮上り駆動力（揚圧力）は進行波の水底変動圧力に比例する力であり、これから浮上り時のマットの撓みによる応力と水の抵抗力を差し引いた力が、マットの慣性力に釣合うと考えて運動方程式を立てることができる。

すなわち、図-6 上段の浮上り系において、マットの浮上り末端 AA' に関する力のモーメントの釣合いは、

$$kHqbl \frac{l}{2} - \left(R_1 \frac{l}{6} + R_2 \frac{l}{2} \right) = W' \frac{\alpha}{g} \frac{l}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 κ : 実験で得られる係数、 H : 波高、 q : 進行波の単位波高当たりの水底変動圧力、 $W' = t b l (\sigma - 1)$: マットの浮上り部分の水中重量、 t, b, l : マットの厚さ、幅、浮上り長さ、 R_1 : マットの撓みによる応力、 R_2 : 水の浮上り抵抗力、 σ : マットの単位重量、 α, g : マットの浮上り、重力の加速度。ただし、 R_1 は片持梁としての撓み実験結果から図-6 の $AB \approx l/3$ の間に集中し⁸⁾、その間では均等に分布するものと仮定する。

一方、図-6 下段に示すような測定系を工夫することによってマットの浮上り全抵抗力 P を得ることができ、 P は式 (3) によって示される。

$$P = \frac{W'}{2} + \frac{R_1}{6} + \frac{R_2}{2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2)、(3) を解けば、

$$kHqbl = 2P - W' \left(1 - \frac{\alpha}{g} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4) 実物マットの浮上り全抵抗力実験

模型マットの浮上り挙動を静水中の実物のマット片で再現するため、造波機のクランク機構を利用して図-6 下段の概念図に示すような吊り上げ装置を工夫した。写真-1 はマットの吊り上げ状況で、吊り鎖の中間に張力

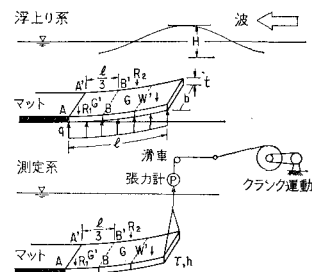


図-6 マットの波による浮上りと浮上り再現装置の概念図

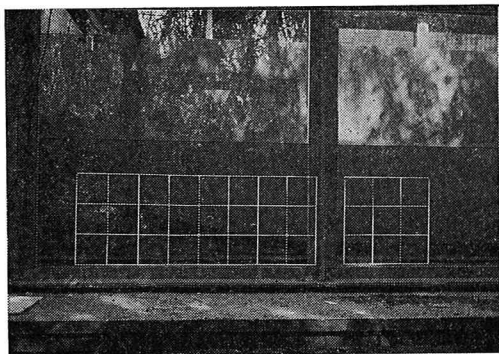


写真-1 マットの浮上り再現実験

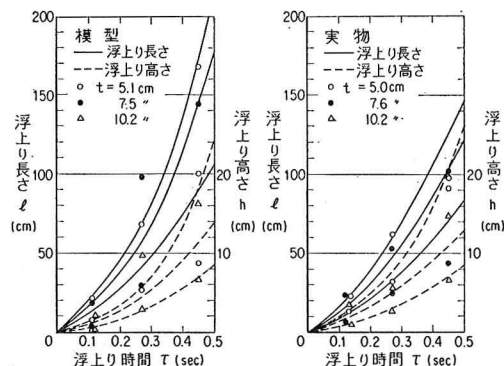


図-7 マットの浮上り挙動

計(容量 200 kg)が見られる。

図-7 は、浮上り長さ・高さを模型と実物のマットと比較したものである。浮上り 0.25 sec 以後の浮上り長さに差が認められるが、写真-1 の吊り環に見られるように初め予定した多点吊りを 2 点吊りにしたことと、マットの模型化の精度によるものと思われる。

図-8 は、張力計で得られたマットの浮上り全抵抗力の記録である。マットは浮上りのごく初期、ほぼ 0.11 sec 後に最大荷重を受けるが、その後は慣性力によって浮上りを継続することが判る。

(5) 設計波に対するマットの安定重量

以上の実験によって得られたマットの浮上り初期 0.11 sec 後の挙動値 P , l , α と浮上り限界波高 H 及びマットの物性値 t , b , σ を用いて式(4)を計算すれば κ を決めることができる ($\kappa = 1.27 \sim 1.97$)。

図-9 は、式(4)を変形して単位面積当たりのマットの浮上り設計抵抗力とマット重量(厚さ)の関係を示したものである。

5. あとがき

海洋及び港湾構造物の洗掘防止工の現状と問題点を調べ、海底面被覆工の波による浮上り安定重量の算定方法を、洗掘防止用アスファルトマットを例としてその縮尺

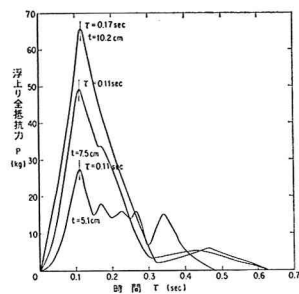


図-8 マットの浮上り全抵抗力

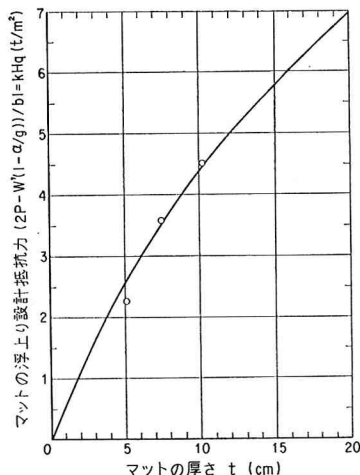


図-9 マットの安定重量(厚さ)算定図

模型化技術を開発しながら水理実験に適用して提案することができた。提案に含まれる係数 κ の値は、防波堤の断面形状によって変化するので、今後は他の形状についても検討すると共に、マットの模型化技術については粘弾性という材料の特性上、まだ多くの問題点をかかえているので、その解決の研究もすすめる予定である。

参考文献

- 1) Angus and Moore: Scour Repair Method in the Southern North Sea, OTC paper, 1982. 5.
- 2) Imberger and Jalach: Scour behind circular cylinder, Coastal Engineering, 1982.
- 3) 市川 武: 直立防波堤の洗掘災害, 第 13 回海岸工学講演会論文集, 1966. 11.
- 4) 和田・西村・楡井: 防波堤周辺の洗掘および海岸の欠損について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, 1970. 11.
- 5) 森平・神田・国田: 沖合防波堤の設計上の諸問題(新潟港防波堤災害の考察), 第 25 回海岸工学講演会論文集, 1978. 11.
- 6) 土市・渡辺・北沢・山田: 防波堤前面での海底地型変化の実態, 第 33 回海岸工学講演会論文集, 1986. 11.
- 7) Hales and Houston: Stability of Underlayer Material Placed in Advance of Construction to Prevent Scour, Technical Report HL-80-3, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1983. 6.
- 8) 尾崎・鴻上・松崎・田崎・西川: アスファルトマットの撓み変形の模型化と洗掘実験, 第 32 回海岸工学講演会論文集, 1985. 11.