海岸工学論文集，第52巻（2005）
土木学会，831-835

マット型海底面被覆工の耐波安定性能評価法

星野　太*　・田崎邦男**・福山貴子***
秋山真吾***・池谷　毅****

港湾･海岸構造物の安定性を確保するためには基礎の洗掘防止対策が重要であり，海底の被覆工法としてアスファルトマットを用いた工法が広く採用されている．現在，マットの波に対する所要安定重量（厚さ）の算定は誘導式が求められているが，誘導式に含まれる実験係数に与える構造物の形状および張出し長の影響等，未だ解明されていない点もみられる．そこで，水理模型実験によりマット厚さに応じた浮上り抵抗力を導くとともに，浮上り状況の観察及び数値計算により浮上り現象のメカニズムの推定を行った．

1. はじめに

港湾･海岸構造物の安定性を確保するためには基礎の洗掘防止対策が重要である．洗掘防止対策には，構造物の形状を改善する方法，付帯構造物を設ける方法，河床･海底の被覆を行う方法等があり，特に被覆工法については，アスファルトマットを用いた工法が多く用いられている．

マットの波に対する所要安定重量，すなわち必要マット厚さの算定は，尾崎ら(1987)により誘導式が求められており，実施工においても安定性および洗掘防止機能が確認されているが，誘導式に含まれる実験係数に与える構造物の形状および張出し長の影響等，未だ解明されていない点もみられる．ここでは，水理模型実験により様々な構造形式・波浪条件のもと，マットの浮上り限界波高に及ぼす影響について確認を行い，マット厚さに応じた浮上り抵抗力を導くとともに，浮上り状況の観察及び数値計算により浮上り現象のメカニズムの推定を行った．

2. 実験概要

マット型洗掘防止被覆工の浮上り限界波高を確認するため，各構造形式，波浪条件にアスファルトマットを設置して規則波を作用させ，マット先端が目視にて2～3 mm浮上った時の最大の入射波高を浮上り限界波高とした．造波後1～5波目は波が安定しないため，6～20波の間で判断した．実験は固定床，模型縮尺は1/50で実施した．

（1）実験装置

実験に使用した長さ60×幅0.7×高さ1.5 mの二次元水路内に勾配1/50の斜面を設けた．マット設置部分の側面は観察用にガラス張りになっており，造波装置前面に波高計2基，マット先端に波高計と電磁流速計を設置した．実験模型のセットアップを図-1に示す．

（2）構造形式

各構造形式の断面図を図-2に示す．混成堤は高基・低基の2種類，消波ブロック被覆堤は捨石マウンドの形状違い2種類（Ⅰ･Ⅱ），捨石堤は法面勾配違いの2種類（Ⅰ･Ⅱ），計6種類を実施した．

（3）実験条件

実験では，マットの厚さ，張出し長，開口率，および水深，周期をパラメータとして変化させ，各条件における浮上り限界波高を確認した．ここで，マットの張出し長とは構造物の法尻からマット先端までの長さ（図-2

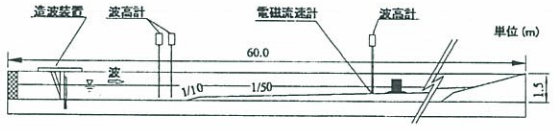

図-1　実験模型概略図

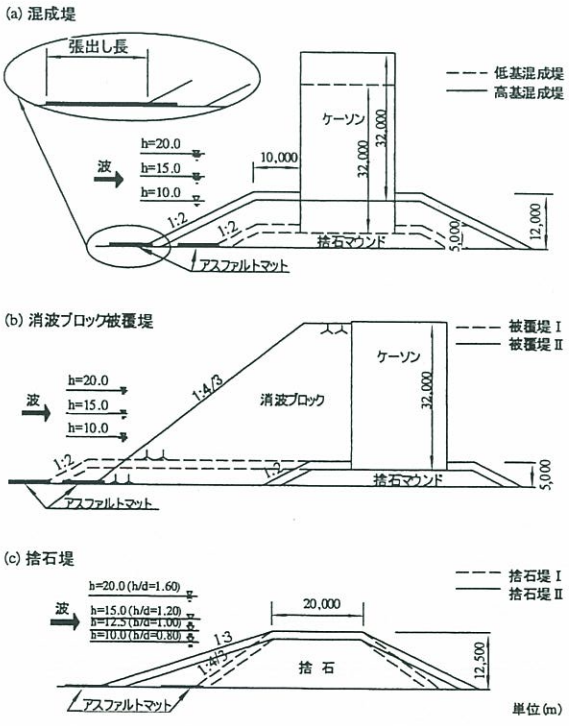

図-2　構造形式断面図

*　日本海上工事（株）　水工事業部
**　正会員　日本海上工事（株）　水工事業部
***　正会員　工修　鹿島建設（株）　技術研究所
****　フェロー　工博　鹿島建設（株）　技術研究所

参照），開口率とはマットの先端の開口部における孔のあいた部分の面積比である．また，補助孔とは開口部の後方に設けた孔である．図-3 に孔あきマットの構造図を，表-1 に各パラメータを示す．

3. アスファルトマットの撓み変形の模型化

マットの模型化における配合の選定方法は，尾崎ら（1985）により導かれている．本実験においても同様の手法を用い，撓み角 ϕ ＝10～20°の範囲で撓み時間比が±10%となる材料を使用した．実物のマットと模型マットの配合を表-2 に示す．

4. 実験結果

全体的な傾向としては，水深が大きく，周期が短く，マットが厚い程浮上り限界波高が大きくなる傾向がみられた．これは，水深が大きく，周期が短い場合は水底変動圧力が小さくなるためであると考えられる．以下に，各パラメータを変化させた場合の実験結果を示す．

（1）マットの張出し長とマットの安定性

各構造形式のマットの張出し長 l と浮上り限界波高 H の関係を以下に示す．

低基混成堤；l が10 m よりも 5 m の方が，H は大きい傾向が見られる．

高基混成堤；l の違いによる H の違いに大きな差は見られない．

消波ブロック被覆堤Ⅰ・Ⅱ；l の違いによる H の差は見られるが，一定の傾向は見られない．

捨石堤Ⅰ・Ⅱ；l が 5 m のときに H が大きくなり，10 m，15 m では同程度である．

（2）マット先端の開口率の影響

a）開口率の影響

マットの先端のある範囲に適当な開口率の孔を開ける事により，マットの浮上り初期に作用する揚圧力を開放し，浮上り抑制効果が得られる事は，これまでの実験でも報告されている．本実験でも，開口率を設ける事による浮上り抑制効果は全ケースについて見られ，開口率が大きいほど浮上り限界波高が大きくなることが確認された．開口率20%の時の各構造における，孔あきの場合の浮上り限界波高 $H\phi$ と孔なしの場合の浮上り限界波高 H との比（$H\phi/H$）を表-3 に示す．

b）補助孔の効果

波が作用している時のマットの挙動を観察すると，補助孔無しの孔あきマットはマット中央部が膨らむ現象が見られたのに対し，補助孔有りのマットではこの現象が見られず，補助孔からの揚圧力の開放が確認出来た．しかしながら補助孔の有無で浮上り限界波高に大きな違いは確認出来なかった．

（3）水深・リーフ高さ比と浮上り限界波高

水深・リーフ高さ比 h/d と浮上り限界波高 H の関係を図-4，5 に示す．捨石堤Ⅰでは，各周期共 h/d＝1.2を境に勾配が急になる傾向がみられる．これは，水深が深くなり h/d が1.2以上になると，天端が水面下になるため法面の影響が小さくなったためと思われる．捨石堤Ⅱでは，長周期ではグラフの勾配は一定だが，短周期では，Ⅰと同様に h/d が1.2以上で勾配が急になっている．ⅠとⅡを比べると，h/d が1.2まではⅡの方が H は若干大きい傾向にあるが，1.2以上になると H は同程度になっている．これは，h/d が大きくなったため法面勾配の影響が小さくなったためであると考えられる．

（4）堤体からマット先端までの距離と波長の関係

混成堤の堤体からマット先端までの距離 X_l と波長 L の関係を図-6 に示す．浮上り限界波高 H が最小となる X_l/L が存在し，X_l/L＝0.25～0.35付近に集まっている（低基混成堤は0.25～0.30，高基混成堤は0.30～0.35）．若干のばらつきがみられるのは，完全重複ではなく，反射波の乱れと部分砕波の影響があるためと考えられる．

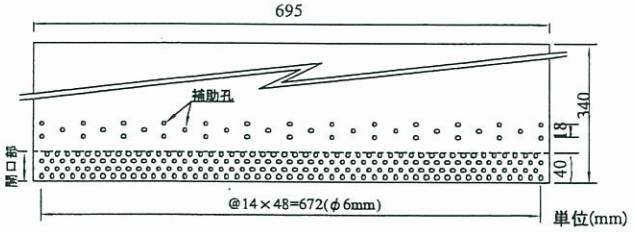

図-3　孔あきマット構造図（開口率20%）

表-1　実験条件（現地スケール）

マット厚さ t(cm)	6，8，10，15，20，30
マット張出し長 l(m)	3，5，10，15
マット開口率(%)	0，10，20，20(補助孔有)，30
水深 h(m)	10，12.5，15，20
周期 T(sec)	6，9，12，16

表-2　配合表（重量%）

種類＼材料名	アスファルト	石粉	砂	砕石	鉄粉	添加剤
実　物	12.0	26.5	26.5	35.0	—	—
模　型	18.0	18.0	22.8	—	34.7	6.5

表-3　開口率20%時の波高比（$H\phi/H$）

構造形式＼マット厚さ	6	8	10
低基混成堤	1.20～1.38	—	1.23～1.46
高基混成堤	1.33～2.00	—	1.71～2.53
消波ブロック被覆堤Ⅰ	1.35～1.80	2.15，2.17	—
消波ブロック被覆堤Ⅱ	1.31～1.40	1.67	—
捨石堤Ⅰ	1.42～2.00	浮上らず	—
捨石堤Ⅱ	1.33～2.04	1.60	—

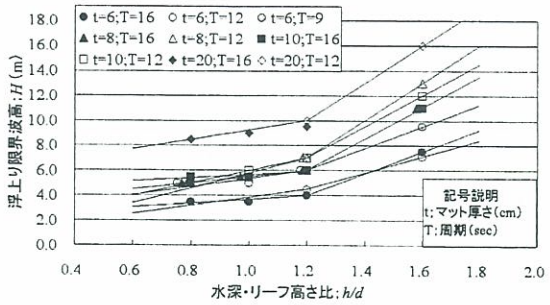

図-4　水深・リーフ高さ比と浮上り限界波高の関係（捨石堤Ⅰ）

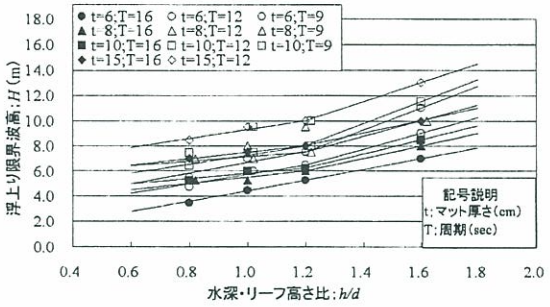

図-5　水深・リーフ高さ比と浮上り限界波高の関係（捨石堤Ⅱ）

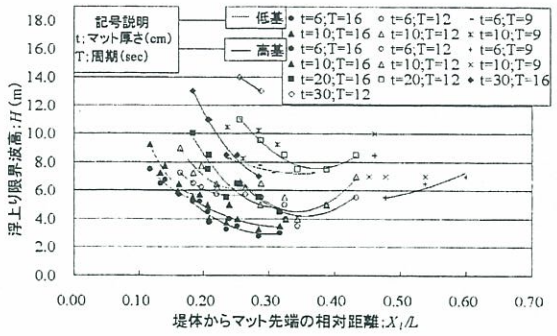

図-6　相対距離と浮上り限界波高の関係

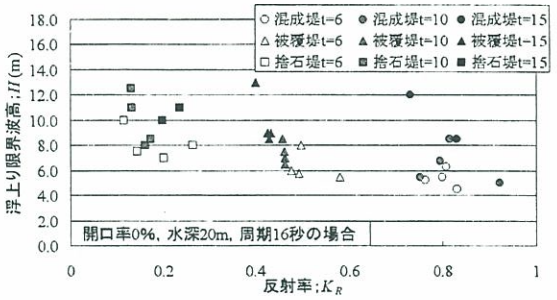

図-7　反射率と浮上り限界波高の関係

（5）反射率と浮上り限界波高

全構造形式について，開口率 0 %，水深20 m，周期16秒の場合の反射率K_Rと浮上り限界波高 H の関係を表したものを図-7 に示す．反射率は，混成堤，消波ブロック被覆堤，捨石堤の順に大きくなっている．さらに，同じマット厚さの場合における浮上り限界波高を比べると，混成堤≦消波ブロック被覆堤≦捨石堤の傾向が見られ，波浪条件が同じであれば反射率が大きい構造形式の方がマットの必要厚さは大きくなることが判った．

5. 必要マット厚さの選定

マットの必要安定重量（厚さ）の算定方法は，尾崎ら（1987）によりマットの浮上り抵抗力を計測することによって示されている．図-8 に尾崎らによる算定図を示す．しかし，浮上り抵抗力の計測は 3 点でしか行われておらず，また，クランクを用いて浮上りの再現を行っており，実際の浮上り挙動とは異なっている可能性もある．そこで本研究では，尾崎ら（1987）による算定図を修正し，より合理的な設計方法を提案することとした．

（1）マット厚さ算定方法

マットの浮上り抵抗力はマット厚さ t によって決まるため $R(t)$，波による作用外力は波高 H によって決まるため $F(H)$ と表すことにする．単位波高当りの海底変動圧力 q と，マット先端位置における進行波の波高 H から，外力 $F(H)$ は次のように表せる．

$$F(H)=\kappa Hq \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，κ は構造形式ごとに実験により定まる定数である．マットの浮上り限界波高の波が作用しているとき，浮上り平衡式は

$$R(t)=F(H) \quad \cdots\cdots (2)$$

と表される．

本実験結果より，尾崎ら（1987）の算定図を用いてマットの浮上り抵抗力を算出し，κ を求めたものを図-9 に示す．マット厚さによりその近似曲線が異なっており，同じ限界波高に対してマット厚さが大きいほど κ 値が大きくなっている．しかし，このままでは波高によってのみ変化するはずの外力 $F(H)$ がマット厚さにより違ってくることになり，不適当である．そこで，マット厚さ 10 cm の結果を基準とし，修正係数を掛けて各マット厚さで異なる κ 値を一致させた．各構造形式での修正 κ 値を図-10 に示す．図-11 には，マット厚さに対する浮上り抵抗力を修正したものを示す．ここで，マット厚さ 10 cm のときの浮上り抵抗力R_{10}を基準としているため，

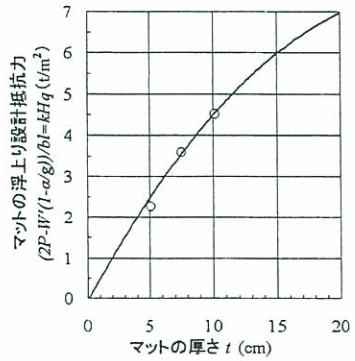

図-8　尾崎らによるマット厚さの計算図

縦軸はR_{10}で割った値とした．また，κ値は周期の影響を受けていると考えられるため，それぞれの周期毎に近似曲線を求めた．以上の結果を用いて，マット設置位置での水深および設計波高・周期からκ値，浮上り抵抗力Rを算出し，必要なマット厚さを選定することが可能となった．

（2）実験結果との比較

前節で求めたマット厚さの算定図を用いて，必要マット厚さを算出した．図-12に実験結果との比較を示す．反射率の大きい混成堤ではばらつきが大きくみられるものの，実験値に比較して±5 cmの範囲にほぼ納まっている．これより，本手法を用いてマット厚さを算定するためには，図-10および図-11から算出される必要マット厚さに，これらのばらつきを考慮して決定すれば良いと考えられる．

6. 浮上りメカニズムの推定

マットの浮上りメカニズムを推定するため，実験における浮上り現象の観察を行うとともに，マット位置における水理現象の確認を行うために数値計算を行った．数値計算には数値波動水路CADMAS-SURF（磯部ら，1999）を使用し，実験で用いた水路および構造物をモデル化して計算を行った．

（1）計算条件

図-13に計算モデルを，表-4に計算条件を示す．対象構造物は低基混成堤とした．水理実験と同様に，斜面勾配は1/50とし，砕波の影響が小さい水深から1/10勾配の斜面を設けた．斜面上に1メッシュの空隙率の小さい砂地盤を設け，その上に1メッシュのアスファルトマットをモデル化した．マットの張出し長は20 cmとし，入射波条件には，マット厚さ2 mm，水深20 cmでの浮上り限界波高を用いた．

（2）計算結果

造波は実験と同様に規則波とし，構造物地点に波が10波程度到達するまで計算を行った．

図-14にマット先端位置での水位変動およびマット上下での圧力および流速を示す．マット先端部分を波峰が通過する際にマット上下での圧力，およびマット上の水平流速が大きくなっていることが分かる．マット下での水平流速は非常に小さい値となっているが，水位変動とほぼ同位相でピークが表れている．図-15にマット先端位置での静水圧を除いたマット上下での圧力差を示す．入射波が通過し反射波が戻ってくる間に圧力差のピークが表れていることが分かる．圧力差のピークは，反射率が高いため波により値が違っているが，約100 paとなっている．マットの単位質量は2.23 t/m^{3}であるため，マットの重量のみが抵抗力として作用するとすると，マット厚さが8 mm程度までならば揚圧力でマットの先端が持ち上がることが分かる．浮上り現象の観察により，波峰通過時にマットが浮上ることが確認されていることから，

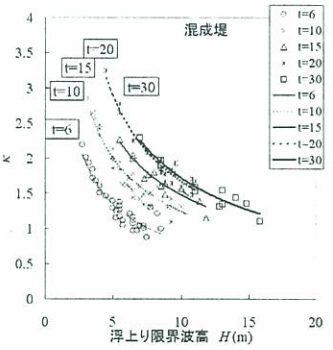

図-9　κ値と浮上り限界波高の関係

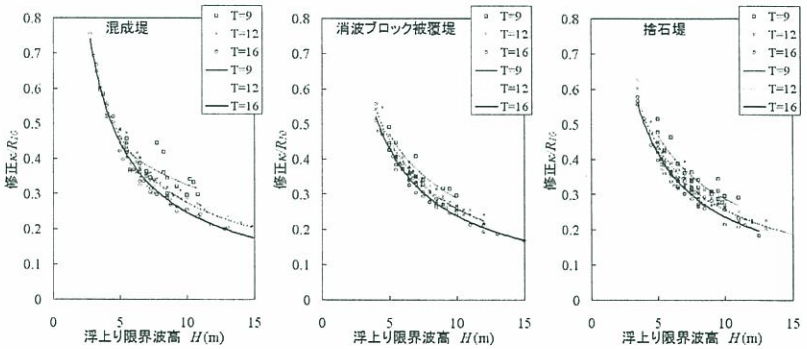

図-10　修正κ値と浮上り限界波高の関係

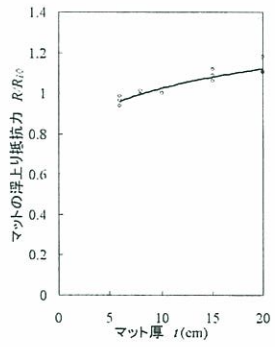

図-11　マットの浮上り抵抗力とマット厚さの関係

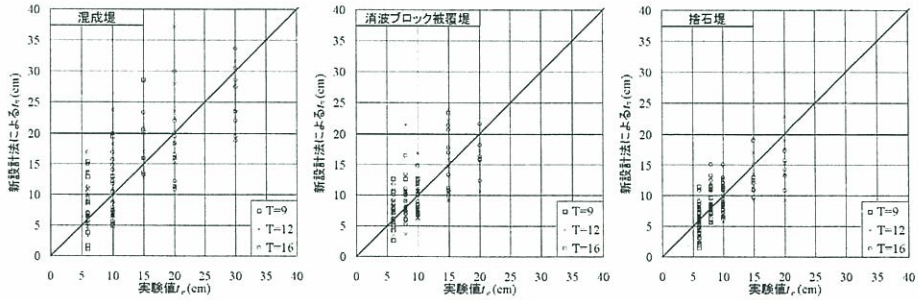

図-12　実験によるマット厚さと新設計法による必要マット厚さの比較

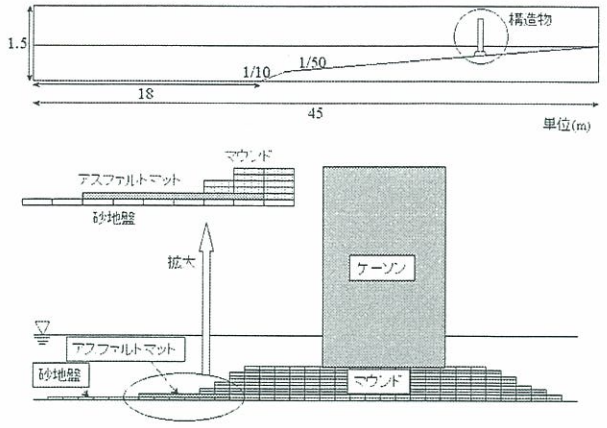

図-13　計算モデル

表-4　計算条件一覧

項　目	諸　元
計算領域	45 m×1.5 m
計算格子	Δx=0.05 m, Δz=0.01 m
波高，周期	0.115 m，2.26 sec
マット設置水深	0.2 m
空隙率	0.05（砂地盤），0.40（マウンド）
抗力係数	1.00（砂地盤），1.00（マウンド）
慣性力係数	1.20（砂地盤），1.20（マウンド）

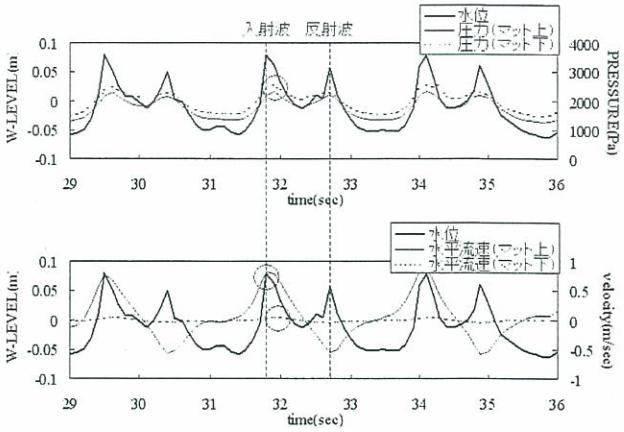

図-14　水位と圧力・流速変化

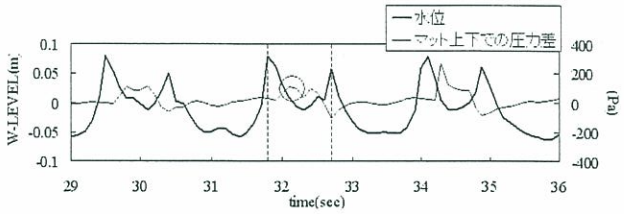

図-15　マット上下での圧力差

揚圧力により先端の持ち上がったマットが波峰通過時の岸向き流速により浮き上げられるものと考えられる．

7. ま と め

水理模型実験を行い，様々な条件下におけるアスファルトマットの安定性を検討した．本研究により得られた知見を以下にまとめる．

- 水深が大きく周期が短いほど，またマットが厚いほど，浮上り限界波高は大きくなった．
- 構造形式ごとに浮上り限界波高に対するマットの張出し長の影響が見られた．
- 開口率を大きくするほど浮上り抑制効果が見られた．
- 捨石堤の場合，水深･リーフ高さ比が1.2以上の場合に浮上り抑制効果が大きくなった．
- 波長に対するマット先端までの相対距離が1/4付近で，浮上り限界波高が小さくなる傾向が見られた．
- 反射率が高いほど，マットの必要厚さは大きくなった．
- 実験結果を整理することにより，合理的なマット厚さの選定方法を提案した．
- 数値計算によりマットの浮上りメカニズムを推定した．

今後は，本研究で対象とした条件下でのマットの浮上り抵抗力を計測し提案した算定手法の妥当性の確認を行うこと，また，マットの浮上りメカニズムの詳細な検討を行うことが必要であると考えられる．

謝辞：本研究を実施するにあたり，独立行政法人港湾空港技術研究所高橋重雄調整官，鈴木高二朗主任研究官より多くのご指導をいただきました．ここに記して深く謝意を表します．

参　考　文　献

磯部雅彦・高橋重雄・余　錫平・榊山　勉・藤間功司・川崎浩司・蒋　勤・秋山　実・大山洋志(1999)：数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究－VOF法基本プログラミングの作成－，海洋開発論文集，第15巻，PP. 321-326.

生出久也・鴻上雄三(1991)：大波浪に耐えるアスファルトマット－洗掘防止用アスファルトマットの水理機能と設計法－，電力土木 No.232，pp. 81-87.

小川明久・中野　浩・鴻上雄三(1988)：洗掘防止用マットの浮上りに及ぼすマウンドの形状効果，第43回土木学会年次学術講演会，pp. 698-699.

尾崎　晃・鴻上雄三・松崎勝夫・田崎邦男・西川利一(1985)：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，pp. 450-454.

尾崎　晃・鴻上雄三・田崎邦男・中野　浩・小川明久(1987)：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，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 416-420.

木原　力・甲斐正義・鳥居雅孝・望月規行(1988)：防波堤前面の洗掘対策について，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 402-406.

鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎(2002)：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について－現地調査と大規模実験－，港湾空港技術研究所報告第41巻，第1号，pp. 51-89.

鈴木高二朗・渡邊和重・山本　悟・梅崎康浩・小澤康彦・村上俊春(2004)：防波堤基礎工における洗掘防止工の実態調査，第51回海岸工学講演会論文集，pp. 726-730.