

北極海における斜面保護工に関する研究

C. B. ライダスドルフ*・R. E. ポッター**・鮮 干 澈***

1. ま え が き

本研究は、北極海における採油用人工島への応用を想定して、複合断面での波の遡上特性と斜面保護工の安定性を検討するために模型実験を行ったものである。実験の特徴としては、(1) 大縮尺 1:4 の模型を用いた、(2) 規則波と不規則波を用いた、(3) 平坦部（以下ベンチと呼ぶ）の長さや水位を色々変えて遡上への影響をしらべた、(4) 特殊考案の被覆工を使用した、(5) 揚圧による被覆工の上下運動を測定した、などである。

複合断面とは、図-1 に示すように、斜面の水位附近にベンチを設け、入射波と戻り流れの相互干渉を促進させることにより入射波のエネルギーを逸散させ斜面での遡上高を低下させようとするものである。最近、Bruun¹⁾、横木ら^{2),3)}は、複合断面が入射波と Runup-Run-down 過程の共鳴を阻止する能力を有し、そのために斜面の安定性が向上すると提唱している。

また、図-2 に示すように、北極海の特長条件である

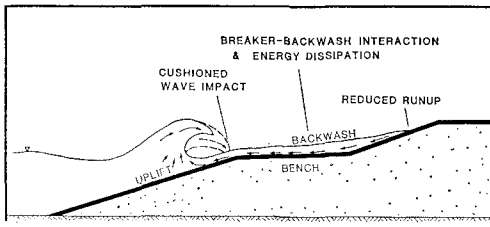


図-1 複合断面の主要特性

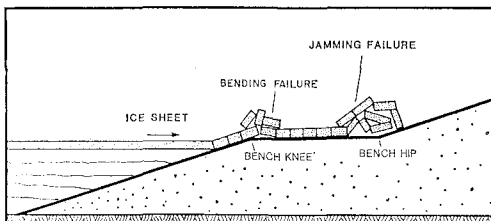


図-2 複合断面での海水の遡上機構

海水を考慮に入れた場合に、複合断面は氷板の曲げ破壊と氷塊のたい積をうながし、敷地への氷板の遡上を阻止する役割を果たす。また、越波やしづきが氷結しやすい北極地方では、砕波が敷地からはなれた沖側斜面で起こることは好ましい条件である。

2. 実験施設と方法

水槽はオレゴン州立大学 Wave Research Facility 所属の水槽（長さ 100m、深さ 4.6m、巾 3.6m）を用いた。波起し機はフラッター式で、計算機コントロールによって任意形状のスペクトルに応じた不規則波と規則波を発生出来る。縮尺は 1:4 とし、実験に用いた最大波高は 1.22m であった。

相似律はフルード則によったが、斜面上の流体運動には粘性の影響、すなわちレイノルズ数が効いている筈なので、縮尺によるレイノルズ数の歪みを小さくするという意味で大縮尺の実験にふみ切ったものである。すなわち、フルード則による縮尺を 1:λ とした場合、これに対応するレイノルズ数の歪みは、

$$(UL/\nu)_{\text{model}}/(UL/\nu)_{\text{prototype}} = 1/\lambda^{3/2}$$

となる。本実験では λ=4 であるから、レイノルズ数の歪みは 1/8 にとどめることが出来た。

水槽の他端には複合断面を設置した。図-3 に示すように、ベンチの長さを 2 種類（模型寸法で、短ベンチ 3.05m、長ベンチ 6.10m）、水位を 4 種類（下から順に第 1, 2, 3, 4 水位と呼ぶ）に変えた。各水位間の差は一律に 0.305m とした。なお、ベンチの勾配は 1/20、他の斜面は 1/3 とした。

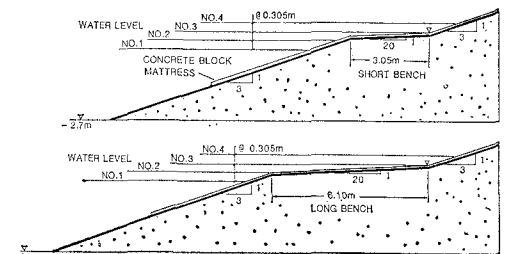


図-3 実験用の複合断面と水位の組合せ

* 工修 テクマリン(株) 副社長
** 工修 ソハイオ石油会社技術開発部
*** 正会員 工博 テクマリン(株) 社長

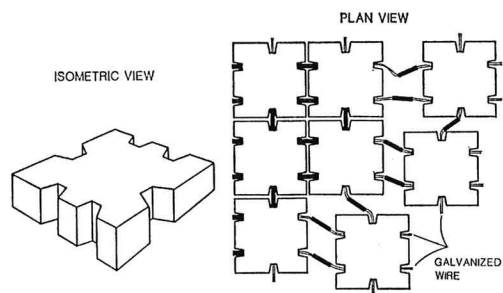


図-4 「リンクリート」式被覆工

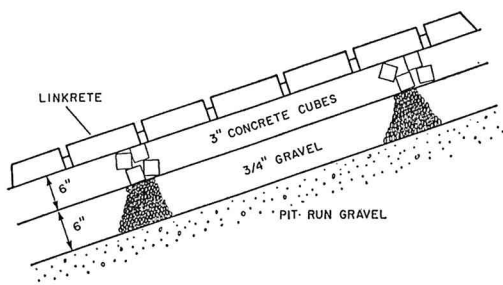


図-5 被覆工下部の透水層

被覆工としては、図-4 に示すように正方形の鉄筋コンクリートブロックを、鋼ワイヤを縦横に貫通させてつないだ、通称「リンクリート」と呼ばれるマットレスを用いた。これは北極海では低水温と短い解氷期（約3ヶ月間）のために鋼製品のふ食がおそいことに着目して、北極海最初の多年寿命島「レブリューション」に1980年以來設置され好成績を収めているものである。被覆工に対する揚圧を減らすために、図-5 に示すような透水層（模型厚さ 0.3m）を設けてある。

3. 遡上特性

(1) 観 察

図-6 の写真は、短ベンチ第3水位の場合の遡上現象を示す。写真Aは、ベンチの沖側の急斜面上で巻き波型の砕波が形成されている光景で、ベンチ上にみえる跳水現象から強い戻り流れが存在することがわかる。写真Bは、巻き波の頂部が落下した瞬間の光景で、ベンチの上には依然として跳水現象がつづいており戻り流れが卓越していることがわかる。写真Cは、砕波後の波と戻り流れの相互干渉の結果、ベンチ上に激しい Boil や乱れが発達している光景である。

(2) 水位の影響

図-7 に、短ベンチの水位を4種類変えた場合と、長ベンチの第3水位の場合の、規則波による遡上値を示す。ただし、単純斜面との対比を容易にするために、米工兵団 Shore Protection Manual⁴⁾に記載してある 1/3 の滑面勾配に対する遡上値を基準として、それに対する % で示してある。これで見ると、短ベンチの場合、遡上値が最も低いのは、図-6 に示した第3水位の場合であり、水位がこれより高くても低くても遡上値は大きくなる傾向を示す。第4水位のように水位が高くと、砕波は沖側斜面ではなくベンチの上で行なわれ、戻り流れと干渉をおこしながら走行する距離が短くなって不利である。また、第1第2水位の場合には、ベンチが露出しやすく、戻り流れは弱くなる。

すなわち、与えられた長さ勾配のベンチに対して戻り流れとの相互干渉による入射波エネルギーの逸散を最大にする最適水位なるものの存在が予想される。本実験では、第3水位が最適水位に最も近い状態であると云え

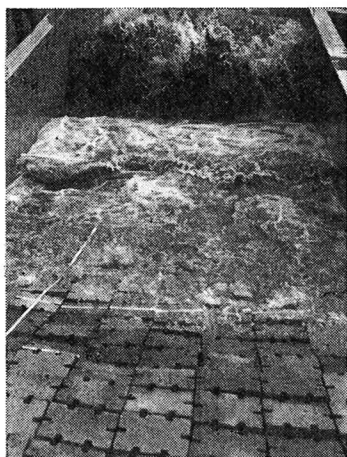


PHOTO A :
BEFORE PLUNGING



PHOTO B :
DURING PLUNGING

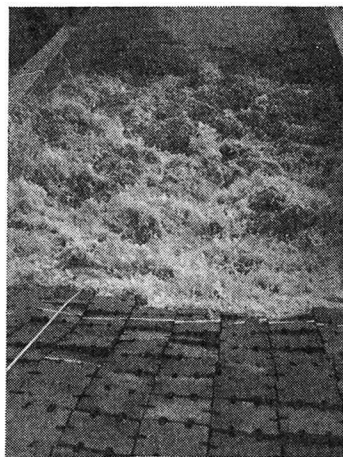


PHOTO C :
AFTER PLUNGING

図-6 短ベンチ断面の第3水位における入射波と戻り流れの相互干渉の光景

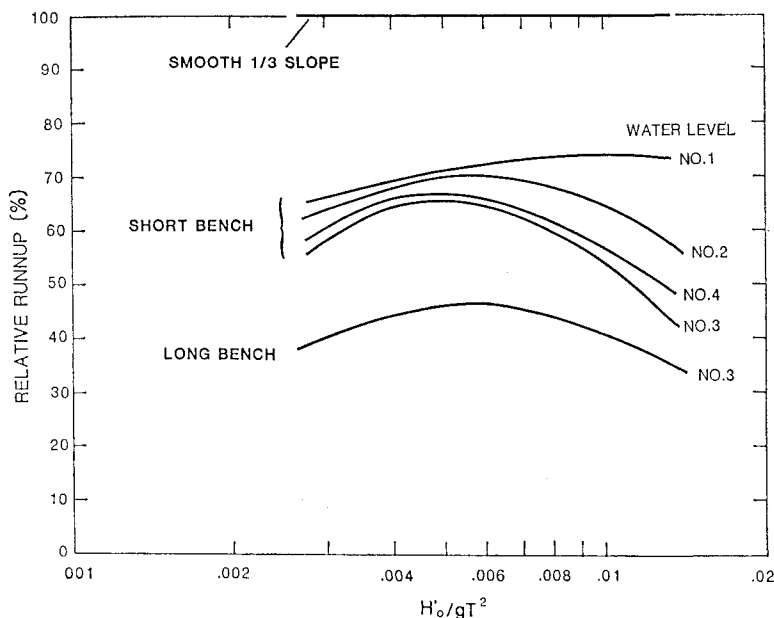


図-7 複合断面における遡上値

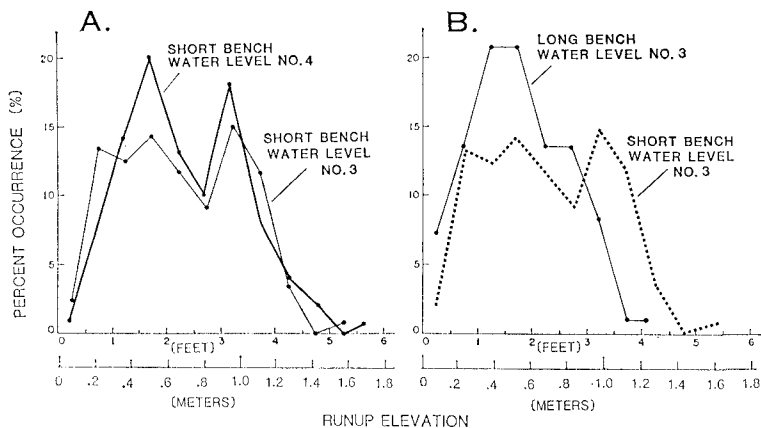


図-8 不規則波による遡上値のばらつき

る。第3水位の特徴は、砕波をベンチの沖側の斜面でおこさせる程低い水位でありながら、ベンチを静水面上に露出させない水位であったという点にある。

(3) ベンチの長さの影響

図-7で明らかのように、ベンチの長さの増大に伴う遡上高の減少は顕著である。例えば、1/3滑面勾配を基準にすると短ベンチの複合断面では遡上値は60%程度に減るが、ベンチ長を2倍にした長ベンチ複合断面では、45%ないしそれ以下に減っている。長ベンチの上では戻り流れが長く存在するため、入射波との相互干渉のチャンスが大きく、また干渉の継続時間も長いことが特徴である。

(4) 規則波と不規則波の比較

遡上阻止効果はかなり出ている短ベンチの第3、第4

水位と長ベンチの第3水位について、規則波と不規則波による比較実験を行った。不規則波実験の入射波高、周期、遡上高を有義値で代表させ、図-7のようにプロットすると、規則波と不規則波による実験結果の相異はほとんどないことがわかった。しかし最大遡上値に着目すると、両者の違いは明白になってくる。すなわち、表-1に示すように、不規則による最大遡上値は有義遡上値を約50%上まわっている。このことから、一般に越波が問題になる斜面の設計は、不規則波を対象とすべきであることがわかる。

表-1 不規則波による有義遡上高と最大遡上高の比較

複合斜面	$R_{1/3}/H_{1/3}$	$R_{max}/H_{1/3}$
短ベンチ 第3水位	1.12	1.70
短ベンチ 第4水位	1.13	1.74
長ベンチ 第3水位	0.97	1.42

図-8は、短ベンチの第3、第4水位と、長ベンチの第3水位の場合について、遡上高のばらつきを示す。短ベンチの場合(図-8A)、第3、第4水位とも双頂型の頻度分布をしているが、長ベンチの場合には(図-8B)、頻度分布は単頂型になっている。両者を

比べると、長ベンチ複合断面で遡上高が低いのは、双頂のうちの右側の頂部がなくなったせいであることがわかる。このために、また、長ベンチの遡上高はばらつきが少くなっている。

上記の現象は Wave Grouping の立場からよく説明出来るようである。遡上高は個々の波の特性だけできまるのではなくて、先行波の特性、特に先行波がおこした戻り流れや水位変動などに、かえって強く依存する。不規則波群の最大波が最大遡上をおこすとは限らず、一連の低い波に後続するあまり大きくない波が、ほとんどの場合、急激な遡上増加をもたらす。短ベンチの場合は、このような Wave Grouping の影響が効いているので、急激な遡上増加が、図-8Aにみられる右側の頂部になって現れたものとみられる。しかし長ベンチでは、入射波

と戻り流れとの相互干渉が活発なため、急激な遡上増加がおこりにくくなり、単頂型の頻度分布になったものとみられる。

3. 被覆工の安定

斜面の被害は、揚圧によって被覆工が押し上げられ場所的変位をおこすことによって生じる。本実験では、ブロックに棒を直立させ、揚圧によるブロックの跳躍量を読み取った。これによると、ブロックの跳躍量はかなり大きく、実験波高 1m に対して最大 7cm を記録した。

また、ブロックの跳躍は砕波の Plunge 作用と密接な関係があることがわかった。計 95 の事例についてみると、ブロックの跳躍が Plunge 地点で同時におこった例が 75%、波頂が通過した直後 Plunge 点の沖側でおこった例が 10%、Plunge 点よりも岸側でおこった例が 5% であった。

図-9 に、砕波の Plunge 地点とブロックの跳躍地点の統計的分布を示す。これで見ると、上記の同時観測に比して、ブロックの跳躍は、Plunge 点よりもわずかに沖合に集中していることがわかる。また、進行波と戻り流れとの相互干渉によって激しい乱れのおこるベンチ上でブロックの跳躍が少いこと、またベンチの沖端部の隅角部で特に目立った被覆工の不安定がみられないことは注目値する。すなわち、ブロックに作用する揚力は、戻り流れよりも砕波自体に関係があるとみられるのである。

揚力の直接測定は至難で、本実験では行わなかった。砕波内部にかなり強力な上昇流速が生じることは、Iversen⁵⁾の実験以来よく知られている。図-10は Iversen の実験値から底面勾配 1/10 について波形勾配の異なる 2 例をえらんで、底面に直角上向きの流速成分をとり出し、その分布を図示したものである。両例とも上昇流速

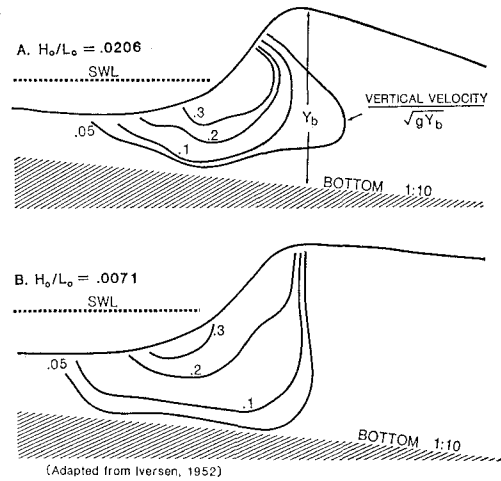


図-10 砕波内部における上昇流速の分布

の分布は酷似しており、波頂から前面にかけて極めて局所的に集中分布している。流速値もかなり大きく、かりに砕波水深を 0.5m, 1.0m と仮定すると、上昇流速の最大値は、約 0.8m/sec, 1.2m/sec となる。これらの流速は砕波初期の値であり、Plunge 完了に至るまでのような変化を遂げるかは、砕波に伴う揚圧を理解する上で、今後の研究成果が待たれる。

4. 結 語

最近、間瀬ら⁶⁾も、遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響を研究し、勾配 1/10 の単純斜面において、最大遡上量が Wave Grouping が大きくなると 10% 増加することを報告している。

本研究の結果を総括すると以下の通りである。

(1) 複合断面での遡上高は単純斜面でのそれに比して顕著に低く、水位及びベンチの長さによって異なる。

(2) 本実験では、短ベンチの場合、単純斜面のその約 60%、ベンチ長を 2 倍にした長ベンチの場合、約 45% 以下になった。

(3) ベンチの長さ勾配が与えられた場合、遡上値を最小にする最適水位がある。本実験では、ベンチを静水面上に露出させず、かつ初期砕波を沖側の急斜面でおこさせるような最低水位がこれに相当するとみられた。

(4) 不規則波による遡上値は、有義値で代表させると、対応する規則波の遡上値とほとんど相異がない。しかし最大遡上値に着目すると、複合断面上で規則波による値の約 50% 増しになることがわかった。

(5) 遡上高は、個々の波の特性よりも、先行波群の特性とそれによって起された戻り流れや水位の変動に強く依存する。不規則波群の最大波高が最大遡上を起すことは稀で、むしろ一連の低波高に後続するあまり大きくない波が遡上高の急激な上昇をもたらすことが多い。

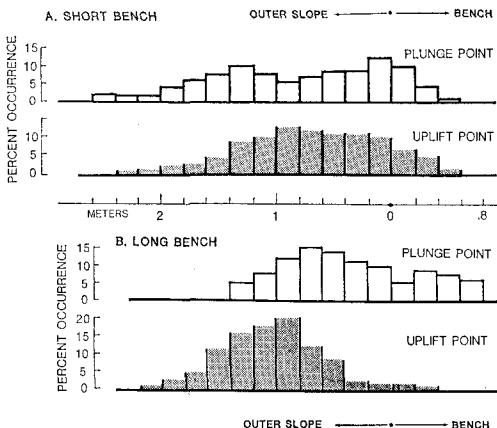


図-9 砕波の Plunge 地点とブロックの跳躍地点の統計的分布

(6) 斜面の被覆ブロックの跳躍が最もひんばんに起るのは、砕波の Plunge 地点か、あるいはそのやや沖側が卓越している。この地点は Plunge 時の砕波内部の上昇流速が局部的に集中している地点にあたり、ブロックに作用する揚力は、戻り流れよりもこのような波動による上昇流速に関係している可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Bruun, P. and A. Günbak: New design principles for rubble mound structures, Proc. 15th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 2429~2473, 1976.
 - 2) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德: 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 428~432, 1982.
 - 3) 榎木 亨・柳 青魯: 捨石防波堤の複合断面設計に関する基礎的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 361~365, 1983.
 - 4) U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, 1977.
 - 5) Iversen, H. W.: Laboratory Study of Breakers, "Gravity Waves", National Bureau of Standards Circular 521, pp. 9~32, 1952.
 - 6) 間瀬 肇・土居宏行・岩垣雄一: 不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 114~118, 1983.
-