

砕波帯における放水口マウンド被覆材 (シーサップブロック) の安定性について

STABILITY OF ARMOR UNITS (SEASUP CONCRETE BLOCK) OF DISCHARGE CHANNEL MOUND IN THE SURF ZONE

八木典昭¹・目見田哲²・寒沢智³・新幸弘行⁴

Noriaki YAGI, Tetsu MEMITA, Satoru SAMUSAWA and Hiroyuki NIKKOU

- ¹正会員 関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺三丁目11-20)
²正会員 工博 関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺三丁目11-20)
³ 関西電力株式会社 舞鶴火力建設所 (〒625-0135 京都府舞鶴市字千歳五百番地)
⁴正会員 株式会社日本工業試験所 (〒553-0002 大阪府大阪市福島区鷺洲2丁目12-17)

A series of hydraulic model experiments are conducted to investigate the stability of armor units using SEASUP concrete block for discharge channel mound in the surf zone. The effect of wave breakig on the stability of the block is noticeable. The stability of the block is influenced by the water velocity (V_{max} , $V_{1/10}$) on the mound.

Key Words : Discharge channel, rubble mound foundation, SEASUP concrete block, surf zone, hydraulic model experiment

1. はじめに

放水口は汽力発電所で使用した冷却水を放流するための構造物である。放水口のマウンドが波の作用に対して変形しないように、十分大きな石またはコンクリートブロックで被覆するのが通常である。

本論文ではシーサップブロックで被覆した場合を対象とする。シーサップブロックは図-1に示すようにブロック同士を噛み合わせることで、おおよび形成された開口によって、耐波安定性が高いマウンドを造ることが可能である¹⁾。

耐波設計において、被覆材が安定な質量(所要質量)の算定には、適切な算定式を用いる必要がある。

混成堤の被覆消波ブロックの所要質量は、従来は K_D 値を用いたハドソン式²⁾によって算定されていたが、より精度の高い算定法が要求されてきている。最近、安定数(N_s)を用いたハドソン式が用いられるようになってきている。例えば、被害の大きさ・波の作用時間・砕波の影響を取り込んだ N_s の算定式が提案されている(高橋ら³⁾)。

混成堤のマウンド被覆材の所要質量は、従来より、 N_s を用いたハドソン式によって算定されている(Brebnner・Donnelly⁴⁾)。

人工リーフは、天端が静水面下にあるという点では、本論文で扱う放水口マウンドと同じである。被

覆材(捨て石)の所要質量は、堤体表面の流速を用いる算定法が提案されている(宇多ら⁵⁾)。この算定法では、堤体本体の変形を許容した状態での被覆材の所要質量が算定されている。

一般に、砕波を伴う場合、流速を正確に評価することが困難な場合がある。よって、波高を用いて被覆材の所要質量を算定できるハドソン式が用いられることが多い。例えば、エックスブロック(浅川ら⁶⁾)、全断面乱積みとしたテトラポッド(半沢ら⁷⁾)を対象として N_s の評価図が作成されている。

本論文で扱うシーサップブロックについても、規則波の場合の所要質量算定式が提案されている(長谷川¹⁾)。

しかし、マウンド上で、砕波が発生する不規則波の場合の安定性は検討されていない。

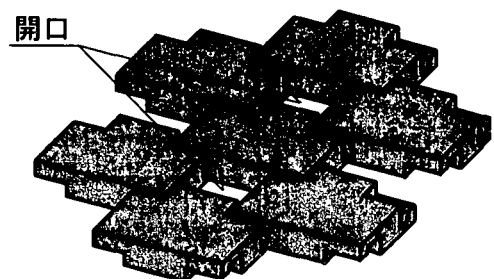


図-1 シーサップブロック

そこで、本論文では、崩れ波碎波を含む不規則波を用いて、放水口マウンドを被覆するシーサップブロックの安定性を実験的に検討する。その際に、波高分布や流速分布と、ブロックの安定性との関連性についても検討する。

2. 実験の概要

(1) 実験水槽および海底勾配

実験は、図－2に示す関西電力㈱総合技術研究所の造波水路（長さ50m×幅1.0m×高さ1.2m）において行った。模型縮尺は、一次元不規則波造波装置（幅1.0m×高さ1.2m）の造波性能と、造波水路の大きさを勘案して1/50とする。造波水路には造波板より550m離れた位置から約1400mの範囲に1/50程度の海底勾配を再現し、水深17mの位置には放水口マウンドが存在する。なお、放水口からの放流は再現していない。

(2) 放水口マウンドの形状

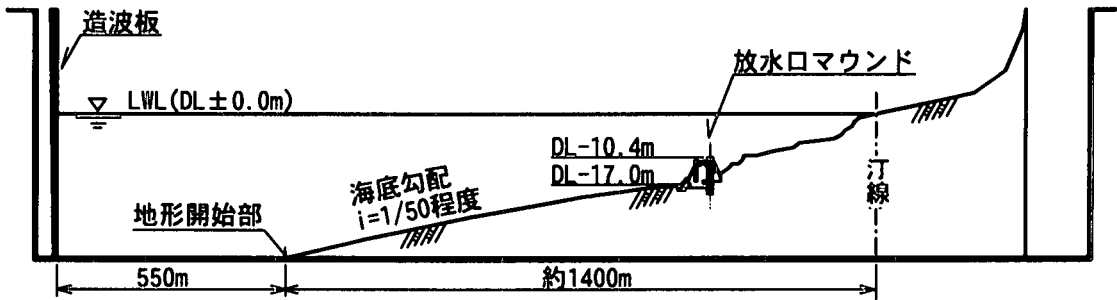
放水口マウンド（幅約110m×長さ約80m）は、シーサップブロック（5t：長さ1.5m×幅2.3m×高さ0.75m）で被覆し、図－3に平面図と断面図を

示すように、3タイプ（基本形状、A形状、B形状）について検討する。

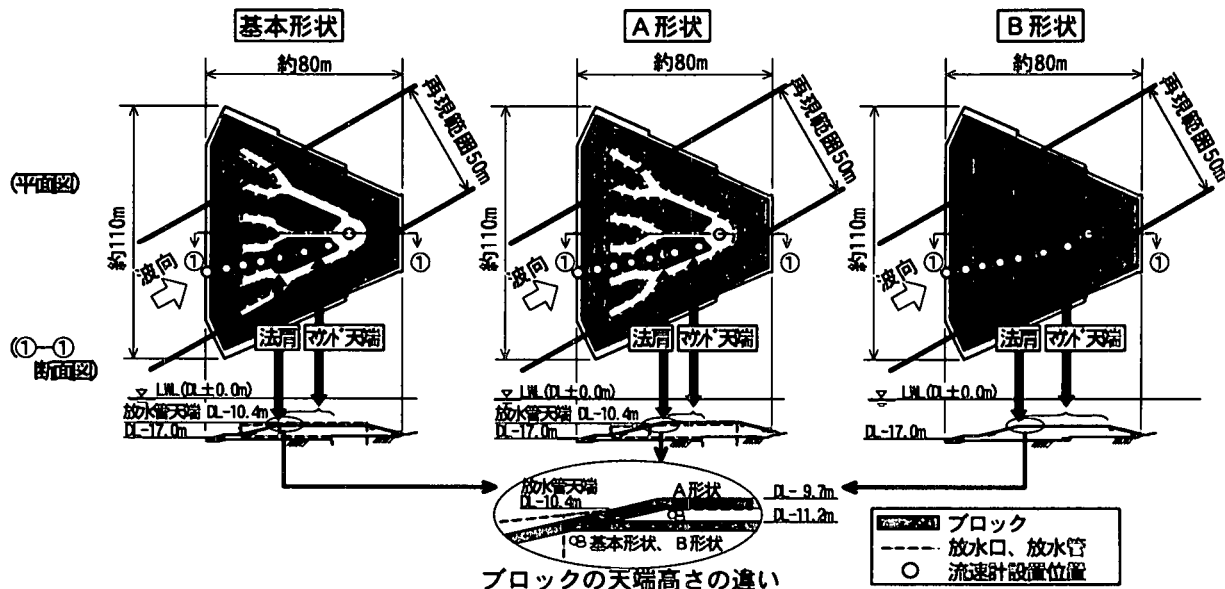
基本形状のマウンド天端のブロック（天端：DL-11.2m）は、放水管（天端：DL-10.4m）より低くなる。ここでは、ブロックに速い流れが直接には作用しにくくなるために安定性は高くなる可能性があるものの、放水管の存在によりブロックの噛み合っている範囲が狭いために安定性が低くなる可能性も考えられる。

そこで、ブロックの安定性に及ぼす放水管の影響を検討するために、A形状、B形状についても対象とする（図－3参照）。A形状はブロック（天端：DL-9.7m）が放水管（天端：DL-10.4m）より高いタイプであり、ブロックの噛み合っている範囲は狭い。B形状はブロックのみで、放水口・放水管がないタイプであり、ブロックは全体的に噛み合っている。

図中の太線で囲んだ範囲をマウンド天端と呼ぶ。マウンド天端は一様水深であり、法面勾配は1：4である。なお、実験においては、3タイプとも、平面図に示すようにマウンドのうち、幅50mを再現する。



図－2 海底勾配と構造物



図－3 放水口マウンドの形状

(3) 波浪条件

周波数スペクトルは地形開始部で確認し、Bretschneider-光易型とする。表-1に示す波浪条件は、放水口（設置予定位置）中心への入射波の有義波高と有義波周期である。

砕波が発生することが、被覆材の安定性に強い影響を及ぼすものと考えられる。そこで、どの波浪条件にもマウンド上で崩れ波砕波を含む。なお、ケース1は浅いマウンド天端を中心に砕波が発生しており、有義波高が大きくなるに従って砕波の中心はマウンドの深い範囲（ケース2）、マウンドの沖（ケース3）と変化する。なお、有義波周期が長いケース3の場合は、浅いマウンド天端で、波の前面がやや切り立ったような砕波も含まれている。

表-1 波浪条件

ケース	1	2	3
有義波高(m)	4.5	6.4	7.5
有義波周期(s)	13.7	13.7	15.8

(4) 測定項目

まず、ブロックの安定性実験を行い、次にブロックを固定して、マウンド上の波高分布・流速分布の測定実験を行う。実験時間は、約50分（ケース1・2：約240波、ケース3：約210波）である。

ブロックの安定性実験では、同一のマウンド形状に対して、まず有義波高の小さいケース1から作用させ、順次、有義波高の大きいケース2、ケース3を作用させる。なお、ブロックの移動が見られた場合には、次の有義波高の大きな波は作用させない。

安定性の判定は、目視によって、移動・安定の2種類に分類する。ブロックの位置が移動する場合、および数秒間ブロックが浮き上がり元に戻る場合も移動とする。

被覆材の安定性の考え方としては、多少の変形を許容した設計も可能と考えられる。例えば、混成堤の被覆消波ブロックについては、期待被災度の計算法が提案されている（高橋ら³⁾）。

しかし、本論文で対象とするシーサップブロックは、一層被覆材であり、わずかなブロックの移動から、中詰の石材の逸散につながる可能性が高いため、ブロックが全く移動しない場合のみ安定とする。

波高分布・流速分布測定実験では、図-3に示す放水口マウンド上の測点で、波高と水平流速（ブロックの直上60cm）を同時に測定する。波浪条件は、ケース1、2、3である（表-1参照）。

3. 実験結果および考察

(1) シーサップブロックの安定性

本節では、ブロックの安定性を、特に、マウンド天端に注目して把握する。なぜなら、浅いマウンド天端は砕波の影響を強く受けること、およびブロックは沖側法肩で不連続であることから、ブロックが

移動しやすいと考えられるためである。これ以降、本論文では、沖側法肩を、単に法肩と記述する。

基本形状のブロックは安定であった。

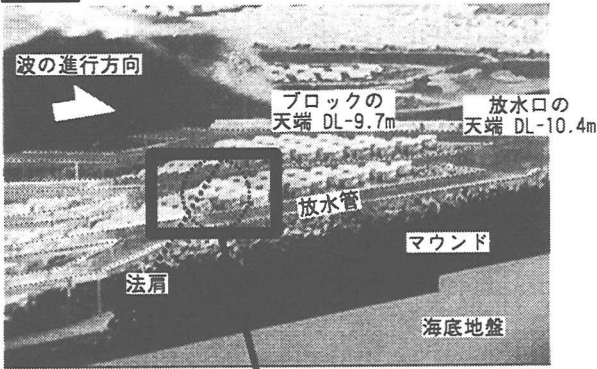
それに対して、A形状はケース2、B形状はケース3によって、ブロックの移動が見られた。

両形状における、ブロックの移動は、法肩付近で砕波が発生する1波によって見られた。また、移動するまでのブロックの挙動を観察した結果、動揺は見られなかった。

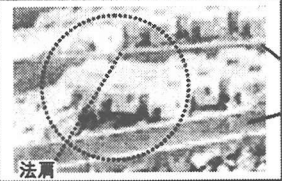
また、ブロックの安定性は、放水管の影響を強く受け、位置（高さ）関係によっては、噛み合っている範囲が狭くても安定性が高い場合もある。

なお、砕波しない規則波の場合の算定式（長谷川⁷⁾）によって、不連続部を有する場合の所要質量を算定すると1t未満となり、今回の実験結果とは大きな差が見られる。

t=0.0s (造波開始から約70波目)

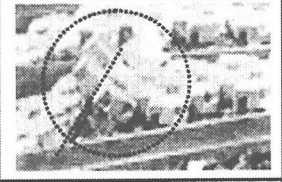


t=1.2s

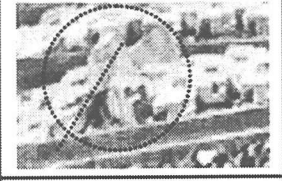


放水管

t=2.1s



t=3.0s



t=5.9s

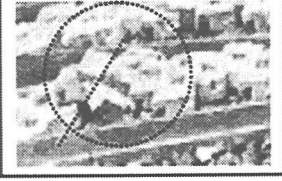


写真-1 移動する際のブロックの挙動（A形状）

写真-1に、ブロックが移動する際の挙動の一例を示す。ここでは、ブロックが高く浮き上がった、A形状の約半周期間の挙動を示す。

1枚目 ($t=0.0\text{ s}$) の写真は造波水路側面から撮影したものであり、ブロックのほかに、マウンド、放水口、放水管、海底地盤が見える。なお、2枚目 ($t=1.2\text{ s}$) 以降の写真は、ブロックが移動した法肩付近を拡大して示す。

1枚目の写真は、ブロックが移動する直前であり、造波開始から約70波目で、法肩付近を、崩れ波砕波を伴う波の峰が通過しつつある。2枚目は、マウンド天端において法肩を端部として、岸の方のブロックまで連なって浮き上がっている。3枚目では、端部のブロックが、更に高く浮き上がっている。4枚目では、端部のブロックの噛み合わせがなくなり、バラバラになっている。5枚目では、浮き上がったブロックが斜面上端に乗り上げている。

なお、写真は示していないが、B形状のブロックも同様に、法肩から岸の方のブロックまで連なって浮き上がった。

(2)マウンド上の波高分布、流速分布

本節では、ブロックの安定性と、マウンド上の波高分布や流速分布との関連性を考察する。

a) 波高分布との関連性

まず、波高分布と安定性との関連性を検討する。

図-4に、A形状・B形状でブロックが移動した際（おのおの、ケース2・ケース3）、および安定であった基本形状（ケース3）の波高分布を示す。

ブロックの移動は、前節で述べたように、不規則波群中の砕波が発生する1波によって見られた。また、ハドソン式においては、有義波高 ($H_{1/3}$) を用いて所要質量を算定される。よって、図-4では、最高波高 ($H_{\max}$) と有義波高に注目して、波高分布を示す。

安定であった基本形状と、移動したB形状の波高分布はほぼ同じである。また、波高分布が全体的に小さい、A形状でブロックの移動が見られた。

これらより、波高分布 ($H_{\max}$, $H_{1/3}$) と、ブロックの安定性はあまり対応していないことが確認できる。

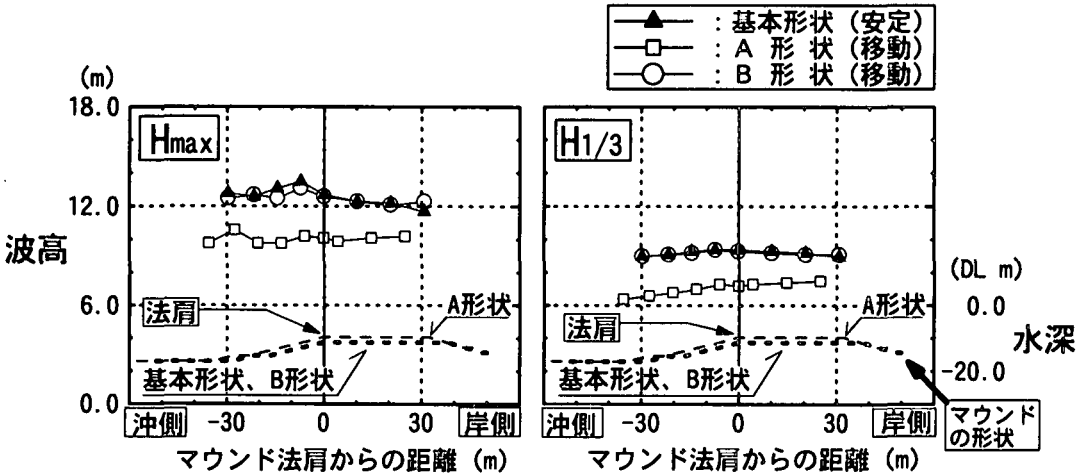


図-4 マウンド上の波高分布（基本形状、A形状、B形状）

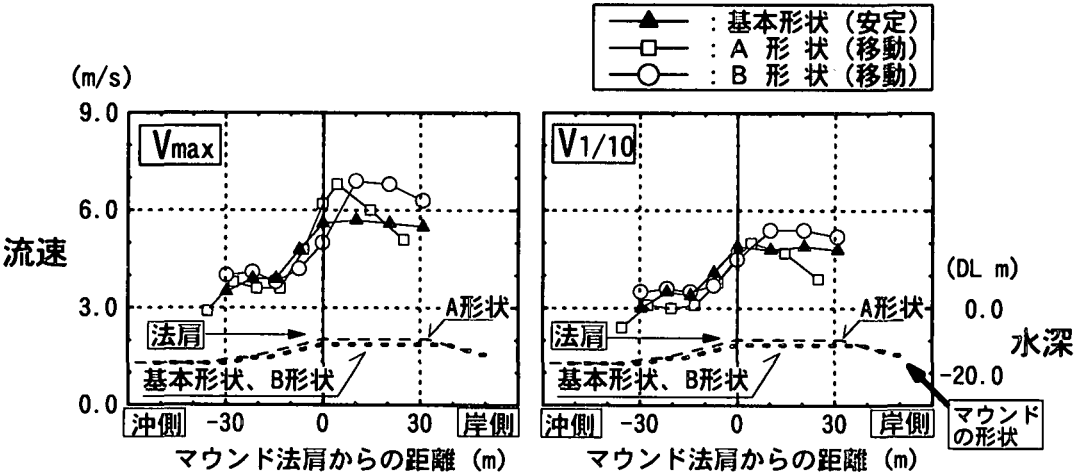


図-5 マウンド上の流速分布（基本形状、A形状、B形状）

b) 流速分布との関連性

次に、流速分布と安定性との関連性を検討する。

ブロックの移動は、前節で述べたように、法肩付近で碎波が発生する一浪によって見られており、この時、ブロックには速い流れが作用していると推定できる。ここでは、 V_{max} もしくは、 $V_{1/10}$ と安定性との関連性を検討する。

図-5に、図-4と同じ波浪条件での流速分布(V_{max} 、 $V_{1/10}$)を示す。

まず、 V_{max} の分布に注目する。

ブロックの移動が見られたA形状とB形状とも、流速分布のピーク値はマウンド天端で発生し、そのピーク値はほぼ同じである。

それに対して、ブロックが安定であった基本形状のマウンド天端は、3章2節でも述べたように、放水管天端より低いいため、ブロックに速い流れが直接には作用しにくいと考えられ、流速分布は全体的に遅い。これがブロックの安定につながったものと考えられる。

今回検討した波浪条件においては、A形状、B形状とも、ブロックが移動した時刻と、最大流速(V_{max})が発生した時刻はほぼ同じであった。ブロックの安定性は、ブロック直上の流速(V_{max})に大きく関連していると考えられる。

ブロックの移動が見られたのは、結果的に法肩付近であったが、法肩での流速は速い順にA形状(移動)、基本形状(安定)、B形状(移動)であり、

1点のみの流速によってブロックの安定性を述べることは困難と考えられる。なおかつ、前節で述べたように、ブロックが連なって浮き上がったことを併せて考えると、速い流速が発生したマウンド天端の広い範囲について流速分布を評価することが必要である(写真-1参照)。

次に、 $V_{1/10}$ の分布に注目すると、 V_{max} ほどではないものの、ブロックの安定性との関連が見られる。

(3) マウンド上での流速分布のピーク発生位置

前節で述べたように、ブロックの安定性は、マウンド上の流速分布(V_{max} 、 $V_{1/10}$)に大きく関連していると考えられる。マウンド上の流速分布は、碎波が発生する位置によって変化する可能性が高い。

そこで、図-6には、図-5で示した以外の波浪条件についても流速分布(V_{max} 、 $V_{1/10}$)を示し、安定性との関連性についてさらに検討を進める。

それぞれのマウンドにおける流速分布の形状は、ほとんど同じである。

また、A形状・B形状については、ブロックの移動が見られた法肩において、流速分布のピークが発生しているわけではない。このことから、法肩付近でブロックの移動が見られたのは、ブロックが不連続であることの影響を強く受けているためと考えられる。よって、部分的に法肩付近のブロック質量を増すことにより、更に高い安定性が期待できる。

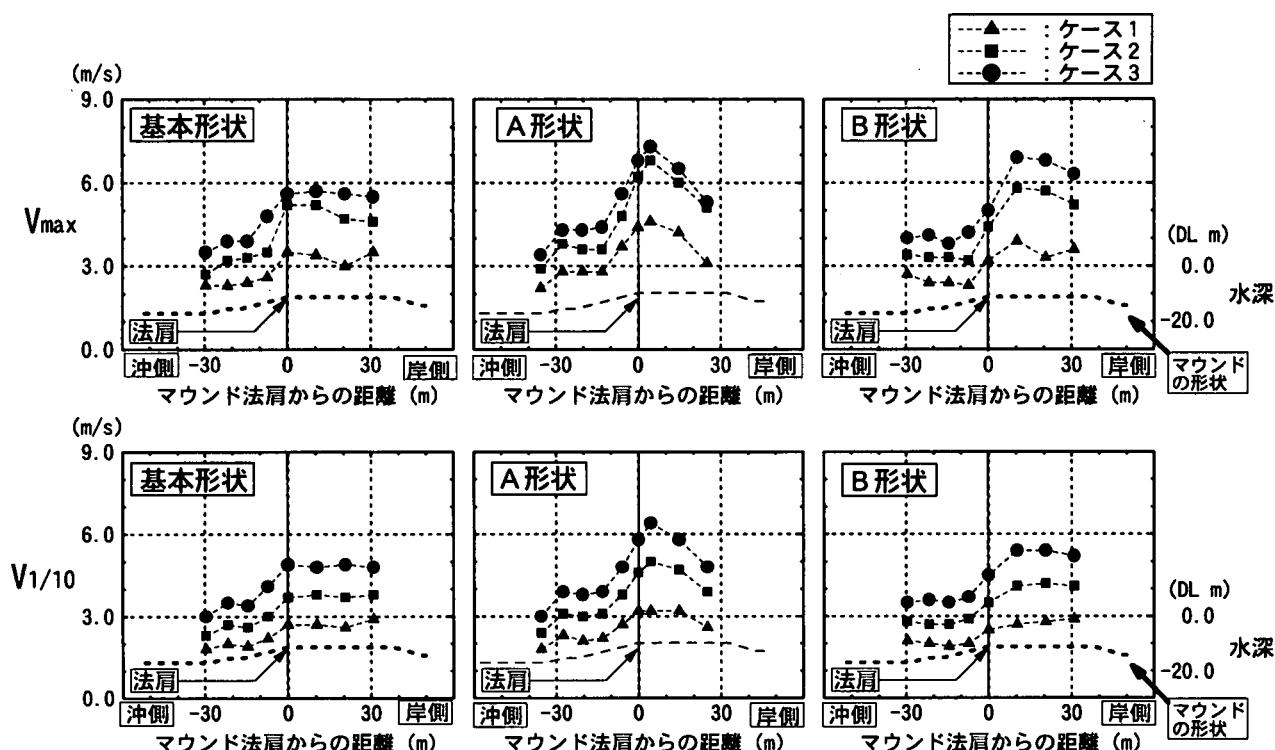


図-6 マウンド上の流速分布のピーク発生位置(ケース1、ケース2、ケース3)

4. 結 論

今回、碎波する不規則波を用いて、放水口マウンドを被覆するシーサップブロックの安定性を把握した。特に、マウンド上の波高分布や流速分布と、ブロックの安定性との関連性について考察した。

本研究による主な結論を以下に要約する。

- ① ブロックの天端が放水管よりも高いタイプ（A形状）、およびブロックのみで放水管・放水管がないタイプ（B形状）においては、ブロックの移動が見られた。
それに対して、ブロックの天端が放水管よりも低い基本形状においては、いずれの波浪条件についてもブロックは安定であった。
- ② 移動する際のブロックの挙動を詳細に観察すると、不規則波群中の、法肩付近で碎波が発生する一波によって移動し、法肩から岸の方のブロックまで連なって浮き上がった。ブロックは単体でなく、複数で噛み合って高い耐波安定性を発揮していることが確認できる。
- ③ 碎波が発生する場合のブロックの安定性は、波高（ H_{max} , $H_{1/3}$ ）ではなく、ブロック直上の流速（ V_{max} , $V_{1/10}$ ）に大きく関連している。また、②で述べたようにブロックが連なって浮き上がったことを併せて考えると、法肩だけでなく、速い流速が発生したマウンド天端の広い範囲について流速分布を評価することが必要である。
- ④ ブロックはマウンド法肩で不連続であり、②で述べたように、その部分で移動が見られた。このことから、部分的に法肩付近のブロック質量を増すことにより、更に高い安定性が期待できる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、電力中央研究所 榊山上席研究員から終始、御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長谷川寛：海底放水管の被覆工に関する設計手法の提案，電力中央研究所報告，研究報告U90014，1990。
- 2) Hudson, R.Y.: Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE. Vol.85 W.W.3., pp.93-121, 1959.
- 3) 高橋重雄，半沢稔，佐藤弘和，五明美智男，下迫健一郎，寺内潔，高山知司，谷本勝利：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討，第1報—，港湾技術研究所報告 第37巻 第1号，pp.3-32，1998。
- 4) A. Brebner, and D. Donnelly: Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters, Proc. 8th Conf. of Coastal Eng., pp.408-429, 1962.
- 5) 宇多高明，小俣篤，斎藤友信：人工リーフ被覆材の所要重量算定法，土木研究所資料，第2893号，48p.，1990。
- 6) 浅川勉，佐藤弘和，口ノ町誠，野口正昭：人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第39巻，pp.656-660，1992。
- 7) 半沢稔，周遠強，杉浦淳，佐藤弘和：消波ブロックを用いた人工リーフの機能・安定性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第43巻，pp.821-825，1996。