

砕波域における混成堤マウンド被覆ブロックの 安定性に関する研究

浜口 敬知*・長谷川 実**・野口 雄二***・遠藤 泰司****

1. はじめに

近年、混成堤は、港湾施設の充実・拡大および技術の向上に伴い、砕波域での適用が広がっている。また、混成堤の前面に消波ブロックを設置する場合、施工段階によっては消波ブロックが設置されていない時がある。このような混成堤に砕波が作用する場合、マウンド部は被覆材のみで保護され、砕波の作用を直接受けることとなる。その結果、被覆材の重量が不足しているとマウンドの破壊が生じ、ケーソンの倒壊を招く可能性もある。そのため、混成堤の安全性を検討する際、マウンド被覆材の安定性についても充分検討しておく必要がある。

マウンド被覆材の安定性に関する研究は、従来から行われており、Brebner-Donnelly¹⁾、鴻上・成田²⁾、鹿島³⁾、稲垣⁴⁾によって安定重量算定方法が提案されてきた。しかし、研究者によって安定性に及ぼす要因のとりえ方が異なっており、加えて、被災調査結果を基に検討した稲垣らの研究⁴⁾を除いて、いずれも規則波を用いた実験結果であり、不規則波との対応が確認されていない。そこで、谷本⁵⁾は、被覆材の安定性に及ぼすパラメータを提案し、不規則波を用いた水理模型実験により、安定性におよぼすマウンド天端の水深と天端幅、波高および周期の影響を明らかにしている。しかしながら、その結果は主に非砕波の領域であり、砕波域において被覆材がどのような安定性を示すかは明らかにされていない。

本研究は、被覆材の安定性に及ぼす要因を考察し、水理模型実験によりマウンドのり先で砕波する状況下での混成堤マウンド被覆ブロックの安定性を明らかにするものである。

2. 安定性に及ぼす要因

混成堤マウンド被覆材の安定性の検討は、谷本らのモデル⁵⁾に堤体設置水深： h の影響を加えて行なった。図

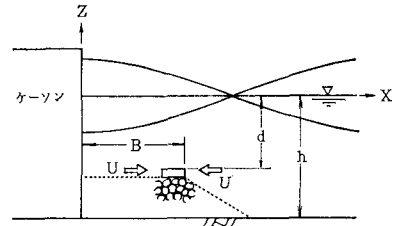


図-1 修正モデル

—1 はその修正モデルである。一定水深 h に設置されたケーソン前面から B だけ離れた深さ d の位置にある被覆材に対し、流速 U の流れが作用している状態を考える。

このモデルにおいて、被覆材に作用する流れによって生ずる抗力および揚力と安定限界重量の関係は、谷本⁵⁾が示した式を整理することにより、式(1)のように得られる。

$$W = \frac{\gamma_r U^6}{(N/g)^3 (S_r - 1)^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 W ：安定限界時の空中重量、 g ：重力加速度、 γ_r ：被覆材の単位体積重量、 S_r ：水に対する被覆材の比重である。また、 N は被覆材固有の係数であり、被覆材が相似形であれば一定の値となる。ケーソン前面では、波高： H 、周期： T の入射波がケーソンの反射によって重複波を形成するので、安定限界時の流速： U は、式(2)で表わされる微小振幅波理論における完全重複波の最大水平水粒子速度： $U_{\max}$ を適用する。

$$U_{\max} = \sqrt{gH \frac{\alpha_2 \alpha_3}{\alpha_1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α_1 、 α_2 および α_3 は次の式で与えられる。

$$\alpha_1 = h/H \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{2(2\pi h/L)}{\sinh 2(2\pi h/L)} \cosh^2 2\pi h/L(1-d/h) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha_3 = \sin^2 2\pi B/L \quad \dots\dots\dots (5)$$

L は水深 h における波長である。式(2)の $U_{\max}$ を式(1)の U に代入し整理すると、

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{Ns^3 (S_r - 1)^3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

* 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所研究開発室
 ** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所研究開発室
 室長代理
 *** 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所研究開発室
 室長
 **** 正会員 理博 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所所長

$$Ns = N \alpha_1 \frac{1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_3} \dots \dots \dots (7)$$

となる。式(6)はBrebnerらが提案した被覆材の安定限界重量算定式¹⁾に一致している。式(6)より、被覆材の安定限界重量は波高の他に安定数: Ns によって決まり、その安定性は Ns によって評価できる。

Ns を与える式(7)および式(3)~(5)より、 Ns は、 h/H , h/L , d/h , B/L の4つのパラメータで表せる。これらパラメータが Ns に及ぼす影響を示すため、これらと Ns を構成する α_1 , $1/\alpha_2$, $1/\alpha_3$ との関係を示したのが図-2(a)~(c)である。 h/H は流速に与える相対的な波高の影響を示しており、小さいと安定性が低くなる。 h/L は、同様に相対的な周期の影響、 d/h は鉛直位置の影響を示している。 d/h が増すと h/L の影響が明らかとなり、 h/L の大きい方が安定となる。 B/L は重複波の節に対する被覆材の水平方向の相対位置の影響を示しており、 B/L が小さいと安定となる。

Ns は、以上のような傾向を示す各パラメータの積によって表される。しかし、波の不規則性やマウンドによる波の変形および碎波の影響等、実際の波や流速の状況は複雑となるので、 Ns に対する h/H , h/L , d/h , B/L の影響は、実験等で確認する必要がある。

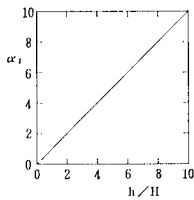


図-2(a) α_1 の変化

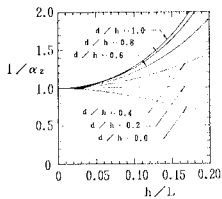


図-2(b) $1/\alpha_2$ の変化

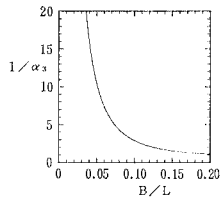


図-2(c) $1/\alpha_3$ の変化

3. 実験方法

本研究では、 d/h を 0.6 に固定して実験を行い、 $h/H_{1/3}$, B/L , h/L の影響を明らかにすることに主眼を置いた。

用いたマウンドの被覆材は、図-3に示すX型ブロックのモルタル模型である。

水路は、図-4に示す日本テトラポッド²⁾応用水理研究所所有の長さ: 49 m, 幅: 1 m, 高さ: 1 m の断面造波水路を用いた。水路内は、造波板から 1640 cm まで

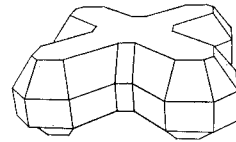


図-3 使用ブロック立体図

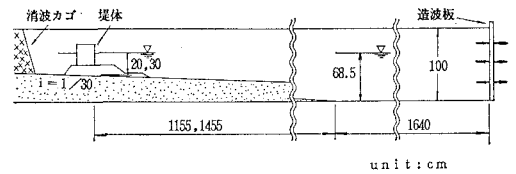


図-4 実験水路

は一定水深部、そこから水路端までは勾配 1/30 の斜面としモルタルで製作した。造波機はピストン型で、任意波形を造波することができる。波高計は、容量線式波高計を用い、波高検定時には造波板より岸側 10 m および堤体設置位置に、実験時には造波板より岸側 10 m に、いずれも 20 cm 間隔で設置した。

実験断面を図-5に、実験断面条件を表-1に示す。ブロックの据付は、ブロック間の摩擦をなくするため2~3 mm の間隔をあけ、格子状の一層積で行なった。

実験に用いた波は、Bretschneider・光易型スペクトルをもつ不規則波である。有義波周期は $T_{1/3}=1.1\sim 2.1$ 秒の5種類、堤体位置での有義波高は $H_{1/3}=4.1\sim 17.5$ cm の範囲で変化させた。

実験時の堤体設置位置での波高 $H_{1/3}$ は、あらかじめ堤体を設置しないで測定した一様水深部での波高と堤体設置位置での波高の関係が堤体設置後も成立するものと仮定し、実験時の一様水深部での波高より推定した。実

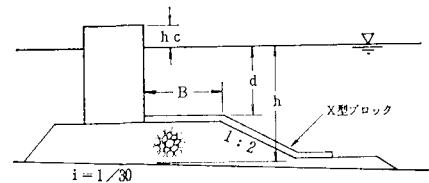


図-5 実験断面

表-1 実験断面条件

断面諸元	実験条件	
堤体設置水深 : h	20.0 cm	30.0 cm
マウンド天端水深 : d	12.0 cm	18.0 cm
マウンド天端幅 : B	12.3 cm ~ 25.4 cm	
マウンドのり勾配	1 : 2	
ケーソン天端高 : hc	$H_{1/3}$ の 0.6 倍	
X型ブロック重量 : W	32.1 g ~ 162.0 g/個	
X型ブロック比重 : γ_c	2.29	

験時の一様水深部の波高は、測定した波高記録を入反射波分離計算⁶⁾することにより得た。

実験は、同一の断面に対して周期ごとに、小さい波高から順次大きい波高を作用させて行なった。波の作用時間は、一つの波高に対しその有義波周期の 600 波分である。波高を変更する際、ブロックの並べ変えは行わないこととした。したがって、被害ブロック個数はそれまでの被害個数を加えた累積個数である。

被害の定義は、ブロック長の半分以上水平移動したものおよび隣接ブロックと一端でも重なったものとした。被害率は、累積被害個数/対象ブロック個数の百分率で定義し、対象ブロック個数は、水路側壁の影響を避け、被覆ブロック個数から両側壁の二列ずつを除いた個数とした。

4. 実験結果および考察

(1) 波作用状況および被覆ブロックの挙動

実験時の波作用状況および被覆ブロックの挙動について観察結果の概略を述べる。

$h/H_{1/3}$ がほぼ 2.5 の条件においては、沖では崩れ波状、マウンドののり先では巻き波状の砕波が時々発生する。ブロックは、沖で生ずる砕波に対してはほぼ安定であるものの、のり先付近で生ずる砕波に対しては不安定で、マウンド肩部のブロックが堤体側およびのり先側に転倒し被災する場合がある。さらに、のり先付近で砕波した場合、大量に越流した後、堤体前面の水位が著しく下がることがある。この場合に、次の波が再びのり先付近で砕けると、堤体に衝撃的に作用する波となり、この砕波がマウンド肩部を通過すると、肩部のブロックは堤体側を支点にして瞬時に回転し被災に至ることが多い。なお、堤体に波が作用した瞬間、マウンド全体およびブロック全体が振動し、マウンド天端上のブロックには不陸が生じ隣接ブロックとの間隔が開いたブロックは動揺しやすくなる。

さらに波高を増大し $h/H_{1/3}$ が小さくなると、堤体にはのり先およびのり先より沖側で生じた砕波が連続的に作用するようになる。のり先付近で連続的に砕波が生じる場合は、巻き波砕波となることが多く、ブロックの被災も多い。のり先よりも沖側で生じた砕波は気泡を含み流れ状となって作用する。この時には被災は少ない。

以上のことから、ブロックが最も危険となるのは、のり先付近で砕波した場合であると言える。なお、波が堤体に衝撃的に作用する場合は、被害が急激に拡がることが多い。しかし、この波は、のり先で発生する砕波の中に混在しており発生条件を明らかにするには至っていない。そこで、以降、衝撃的な砕波はのり先で生ずる砕波に含めて扱うこととする。

(2) 安定性に対する各パラメータの影響

観察結果では、のり先で砕波が発生した時にブロックが最も危険となったことから、のり先での砕波条件について検討する。図-6 は、 $h/L=0.090\sim0.119$ および $h/L=0.150\sim0.176$ の範囲で行なった実験の観察結果より、のり先での砕波の発生を $h/H_{1/3}$ と B/L との関係で示したものである。図中の点線および破線は、 h/L の範囲ごとに示した砕波の発生限界である。この図より、のり先砕波発生限界は h/L に関係なくほぼ一致している。したがって、のり先砕波の発生限界に及ぼす h/L の影響は小さいと考えられる。また、 B/L の増加に伴い砕波限界時の $h/H_{1/3}$ が大きくなっている。このことは、 B が大きくなると小さな $H_{1/3}$ でものり先での砕波が発生することを示している。このように、のり先での砕波発生はマウンド天端幅の大きい方が生じやす

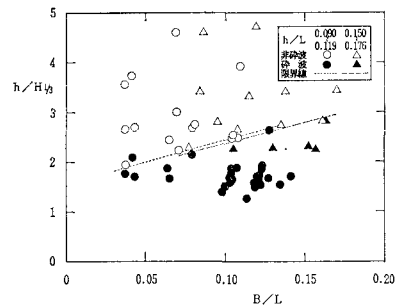


図-6 のり先での砕波発生限界

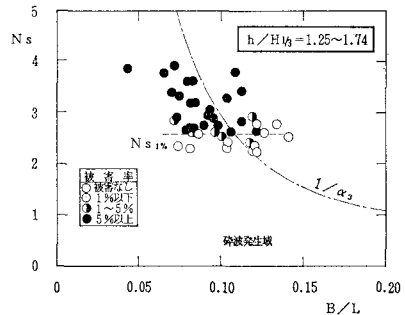


図-7 (a) $Ns_{1\%}$ に及ぼす B/L の影響

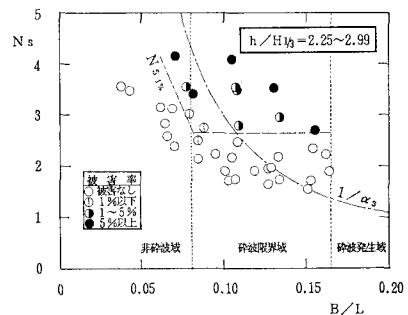


図-7 (b) $Ns_{1\%}$ に及ぼす B/L の影響

く、のり先砕波発生の限界条件は $h/H_{1/3}$ と B/L によって表すことができると考えられる。

安定性に及ぼす B/L および $h/H_{1/3}$ の影響について検討する。なお、砕波発生に及ぼす h/L の傾向は明らかとならず、安定性に対しても一定の傾向が見られなかったため、ここでは h/L の影響は考慮していない。

図-7 (a) (b) は B/L と N_s および被害率の関係を示した例で、 $h/H_{1/3}=1.25\sim 1.74, 2.25\sim 2.99$ について示したものである。ここで N_s は、実験時の堤体位置における波高を用いて式(6)より逆算した値である。図中の記号は被害率を、破線は被害率1%の境界を、一点鎖線は式(5)より得られる $1/\alpha_3$ を示したものである。被害率1%の N_s は $N_{s1\%}$ と記す。

図-7 (a) は、のり先付近で砕波が生じた結果をまとめたものである。 $N_{s1\%}$ は、 B/L に関係なくほぼ一定値となっている。一方、図-7 (b) は、のり先付近で砕波が生じていない結果を含んだものである。点線ではさまれた部分は図-6より得られるのり先砕波の発生限界域を示しており、それより右側はのり先砕波発生域、左側は非砕波域である。 $N_{s1\%}$ は、 B/L がほぼ0.08より大きい領域では一定となっており、その値は図-7 (a) の場合にほぼ等しい。しかし、 B/L がほぼ0.08より小さい領域においては、 $N_{s1\%}$ は $1/\alpha_3$ のように B/L の減少に伴い増加している。したがって、のり先で砕波が作用しない領域および砕波発生限界付近では、 $N_{s1\%}$ は B/L によって変化し、重複波での理論値の傾向と同様、 B/L の減少に伴って大きくなる。一方、砕波が作用する領域において、 $N_{s1\%}$ は B/L に関係なく一定値になる。なお、のり先での砕波発生の有無と $N_{s1\%}$ の関係は、他の $h/H_{1/3}$ の条件においても同様の傾向が認められた。

図-8 (a) (b) は、 $h/H_{1/3}$ と N_s および被害率の関係を $B/L=0.060\sim 0.089, 0.120\sim 0.176$ について示したものである。図中の破線および一点鎖線は、各々 $N_{s1\%}$ および式(4)から得られる α_1 を、点線ではさまれた部分は図-6より得られるのり先砕波の発生限界域を示しており、それより右側は非砕波域、左側はのり先砕波の発生域である。

図-8 (a) は B/L の比較的小さい条件の結果である。 $N_{s1\%}$ は、 α_1 のように $h/H_{1/3}$ にほぼ比例して大きくなっている。この傾向は、のり先砕波発生域内においても変わらない。図-8 (b) は実験範囲の中で最も B/L の大きい条件の結果である。 $N_{s1\%}$ は、 $h/H_{1/3}$ が減少してもその値は変わらずほぼ一定の値となっており、図-7 (b) の一定値の値に一致する。したがって、 $N_{s1\%}$ は、堤体に砕波が作用する場合には、 $h/H_{1/3}$ に関係なく一定値となり、いずれも同一となる。また、 $h/H_{1/3}$ が大きく、砕波が作用しない場合には、 $N_{s1\%}$ は、 α_1 のよ

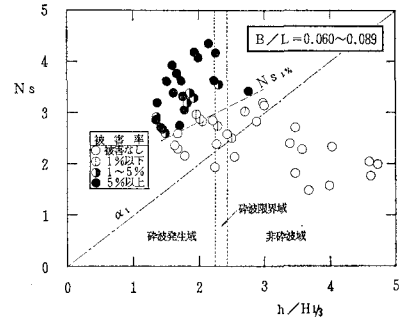


図-8 (a) $N_{s1\%}$ に及ぼす $h/H_{1/3}$ の影響

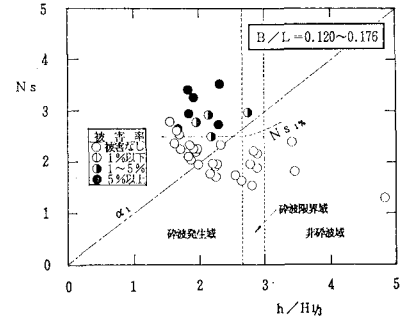


図-8 (b) $N_{s1\%}$ に及ぼす $h/H_{1/3}$ の影響

うに $h/H_{1/3}$ に比例して大きくなる。

(3) 所要重量の算定について

実験結果および考察より、ブロックの安定性に及ぼす $h/H_{1/3}$ および B/L の影響が明らかとなった。各条件での $N_{s1\%}$ の限界線をまとめ、砕波域における $N_{s1\%}$ と $h/H_{1/3}$ の関係を B/L をパラメータにして示したものが図-9である。被害率を1%まで許容した時のX型ブロックの所要重量は、この図より $N_{s1\%}$ を求め、式(6)の N_s に $N_{s1\%}$ を代入することにより求めることができる。

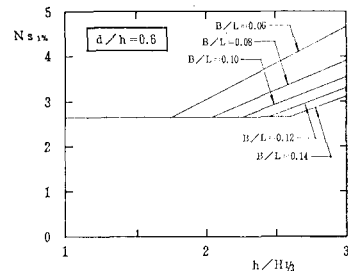


図-9 X型ブロックの $N_{s1\%}$ 算定図

5. 結 論

本実験の結果および考察より得られた主な結論を以下に示す。

- (1) ブロックの被害は、マウンドののり先付近で砕波が生ずる場合に多く見られた。

- (2) のり先砕波の発生条件は $h/H_{1/3}$ と B/L によってほぼ表すことができ、 B/L の大きい方が砕波しやすい傾向が認められた。
- (3) 非砕波域から砕波限界付近までは、 $h/H_{1/3}$ の減少および B/L の増大によって $N_{s1\%}$ が小さくなり、これらのパラメータがブロックの安定性に対して重要であることが明らかとなった。
- (4) 砕波域では、 B/L ごとの $N_{s1\%}$ はほぼ同一の値に漸近し、ブロックの所要重量は波高のみによって決まる。
- (5) X型ブロックの砕波域での所要重量は、図-9 を用いて算定することができる。

6. おわりに

本研究では、 $d/h=0.6$ の条件において、砕波域での混成堤マウンド被覆ブロックの安定性を明らかにし、有用な結果を得ることができた。しかし、相対マウンド天端水深、波の連なり等の不規則波の特性、海底勾配等が被覆材の安定性に及ぼす影響は明らかでなく、今後さら

にこれらの点に関して検討しなければならないと考えている。

参 考 文 献

- 1) Brebner, A. and P. Donnelly: Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., New Mexico City, pp. 408~429, 1962.
- 2) 鴻上雄三・成田友弥: 消波ブロックを被覆層とした混成堤マウンドの安定について, 北海道開発局土木試験所月報, 第232号, pp. 1~13, 1972.
- 3) 鹿島遼一・斉藤昭三・長谷川 寛: 混成式防波堤の基礎マウンドを被覆するコンクリート方塊の所要重量, 電研技術第2研究所報告, 研究報告 70022, pp. 1~18, 1971.
- 4) 稲垣紘史・片山盛雄: 被災例による混成堤マウンド被覆石の安定限界の検討, 港湾技研資料, No. 127, pp. 1~22, 1971.
- 5) 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良美: 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告 第21巻 第3号, pp. 3~42, 1982.
- 6) 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 24, 1976.