

消波ブロックの引抜き抵抗力に及ぼす被覆層厚の影響 に関する研究

久保田真一*・松本 朗*・半沢 稔*・松岡道男**

消波ブロック被覆堤において、被覆層厚の違いが消波ブロックの耐波安定性に及ぼす影響を、ブロックの引抜き抵抗力の観点から解明することを目的として研究を行った。全断面被覆形式と層被覆形式を対象とし、斜面表層ブロックの引抜き抵抗力の測定を行った。かみ合わせの状況（パターン）により引抜き抵抗力に大きな差が生じること、同一パターンであっても被覆形式（層厚）によって抵抗力に差が生じること等がわかった。更に、被覆層全体としての引抜き抵抗力を評価した結果、層厚の減少により抵抗力が減少する傾向が確認された。以上より、層厚の減少による耐波安定性の低下が、引抜き抵抗力の減少により説明できることがわかった。

1. はじめに

我が国の主要な防波堤構造のひとつである消波ブロック被覆堤は、全断面に同一のブロックを用いる形式が主流であるが、経済性他の点から、下層（あんこ）部に小さなブロックや石を使用し、表層のみに所要質量のブロックを用いる層被覆形式の採用も増えることが想定される。従って、こうした構造形式の違いが、種々の機能、とりわけ耐波安定性能に及ぼす影響を明確に把握しておくことは、今後の性能設計に向けても極めて重要である。

著者らは、こうした点に着目し、消波ブロックの被覆層厚がブロックの安定性に及ぼす影響に関する研究を進めており、被覆層厚が薄くなると、耐波安定性が低下する傾向を明らかにしている。更に、安定性の変化の要因を明らかにすべく、外力の観点から流速場の詳細な計測を行い、中詰め材の影響についても検討している（久保田ら, 2002）。

一方、外力に対する抵抗力も安定性を左右する重要なファクターである。しかしながら、消波ブロックの引抜き抵抗力を検討した例は少ない。Price (1979) や Peene (1987) が一部検討を行っているものの、検討対象が 2 層被覆に限定されており、抵抗力に及ぼす被覆層厚の影響にまで踏み込んだ検討はされていない。

本研究は、被覆層厚の違いが耐波安定性の変化に及ぼす影響を抵抗力の観点から明らかにすることを目的とし、全断面被覆形式と層被覆形式を対象とし、斜面表層ブロックに着目して消波ブロックの引抜きに対する抵抗力について詳細に検討を行ったものである。本研究では消波ブロックとしてドロス（図-1）を用いて検討を行った。本検討に先立ち、測定箱内に形成した被覆層を対象として、ブロックの引抜き試験を行い、引抜き抵抗力測定方法の確認および抵抗力の基本的特性を把握すべく予備検討を行った。引き続き、水路内に設置した消波ブロック被覆堤を対象にブロック引抜き試験を実施し、被覆層

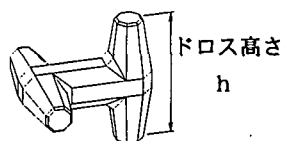


図-1 ドロス形状図

が有する抵抗力の評価を試みた。

2. 消波ブロックの引抜き抵抗力の予備検討

(1) 実験方法

a) 実験装置

図-2 に予備検討で用いた実験装置の概要を示す。測定箱（長さ 7.6 h × 幅 6.9 h × 高さ 5.6 h 、 h : ドロスの高さ）を用意し、その中にドロスの被覆層を形成した。使用したドロス模型は、質量 (M) 135.7 g 、体積 (V) 57.16 cm^3 、高さ (h) 7.2 cm である。被覆層の層厚は、ドロスの高さ h を基準として 4.0 h と 1.2 h の 2 種類とし、層厚の差異が種々の特性に与える影響を事前検討するものとした。ブロック引抜き抵抗力は図-2 に示す方法で計

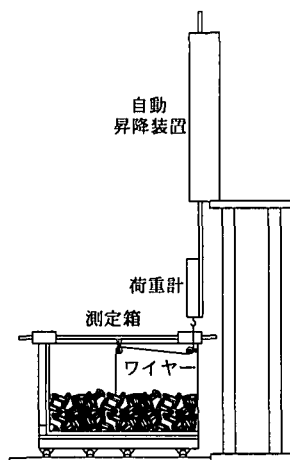


図-2 引抜き試験装置

* 正会員 工修 (株)テトラ テトラ総合技術研究所

** 正会員 工博 (株)テトラ テトラ総合技術研究所 所長

測した。すなわち、引抜き対象のブロックをワイヤーを介して荷重計に接続し、その荷重計を自動昇降装置により上昇させることによりブロックを引抜くものとした。その際、荷重計に記録される荷重データの時系列から、ピーク値をもってブロックの引抜き力と定義するものとした。

b) 実験手順

実験は以下の手順で行った。①所定個数のブロックを測定箱内に設置し、②測定箱を長さ方向に 50 回振動を加えた後、③引抜き対象ブロックのかみ合わせパターン(後述)を記録した上で、④対象ブロックの引抜き抵抗力の計測を行った。測定対象のブロックは 1 回の測定では 3 個とした。以上の測定を各層厚毎に 20 回繰り返し、層厚毎に計 60 データ (2 種類の層厚で総計 120 データ) を取得して以降の解析に用いた。

(2) 実験結果

a) かみ合わせパターンの分類

ドロスのかみ合わせ状況を詳細に観察した結果、周囲のブロックとの関係(拘束の状況)から、大きく次の 3 つのパターンに分類するものとした。1) 周囲からの拘束がみられないもの (パターン I)、2) 側方からの拘束を受けているもの (パターン II)、3) 上からの拘束を受けているもの (パターン III) の 3 パターンである。写真-1 にはこれら 3 つのパターンの代表的なかみ合わせ状況を示したものである。

各パターンの特性をまとめると以下のとおりである。パターン I は、単独で設置された状態に近く、他のブロックとのかみ合わせがほとんどない。外力に対して自重のみで抵抗すると考えられる。パターン II は、ブロックの側方が他のブロックと接触して押さえつけられている状況である。ブロック同士のかみ合いは、自重および側面の摩擦力で発揮され、局所的なかみ合いといえる。側面の摩擦力は、斜面勾配の有無で変化すると考えられ、引

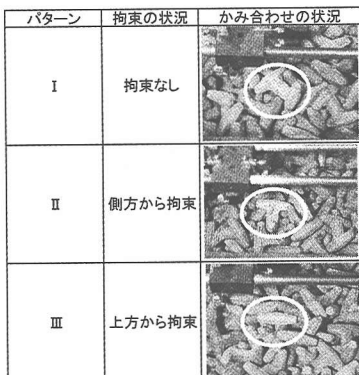


写真-1 舞ブロックのかみ合わせパターン

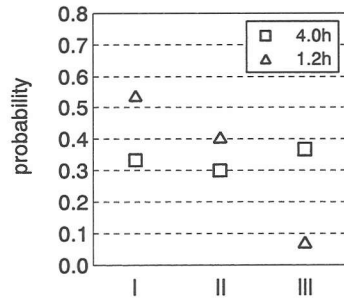


図-3 かみ合わせパターンの出現確率

抜き力は斜面勾配の影響を受けることが想定される。パターン III は、上方から他のブロックによって拘束され、周囲のブロックと相互にかみ合っている。引抜く際に、他のブロックにおよぼす影響範囲が広く、周囲のブロックを含めて抵抗するため、面的なかみ合いといえる。

b) かみ合わせパターンの出現確率

層厚ごとのかみ合わせパターンの出現確率を図-3 に示す。層厚 4.0 h では、各パターンが同程度の割合で存在するが、層厚 1.2 h ではパターン I の割合が増加し、パターン III の割合が低下する。かみ合わせのパターンの特徴を考慮すると、層厚の減少に伴い、かみ合わせの効果を発揮しない、外力に対して自重のみで抵抗するブロックが増加することを示している。このことから、層厚の減少に伴う消波ブロック被覆層の抵抗力の減少が示唆される。

c) 引抜き力

図-4 は、層厚 4.0 h における引抜き力の時系列をかみ合わせパターンごとに一例ずつ示したものである。前述したように、時系列中のピーク値をその測定における引抜き力とした。なお引抜き力はブロック自重で無次元化 (F/W) してある。そうして得られた各層厚における引抜き力の全データをかみ合わせパターンごとに図-5 に示した。各測定値にばらつきはあるものの、かみ合わせパターンに応じて、引抜き力が変化する傾向が見受けられる。

図-6 は、かみ合わせパターンごとの引抜き力の平均値である。層厚 4.0 h においては、パターン I からパターン III へと次第に引抜き力が大きくなる傾向がわかる。層厚 1.2 h においては、パターン II、III の値がパターン I の値よりも大きくなっており、他のブロックによる拘束の有無で引抜き力が変化すると考えられる。このように、ブロックの拘束の度合いで規定されるかみ合わせパターンが、引抜き力の程度を示す指標と考えられ、従来から定性的に指摘されていた、かみ合いがよいほど引抜き力が大きくなるという現象が、かみ合わせパターンごとの引抜き力の変化として評価できる。パターン I は、層厚

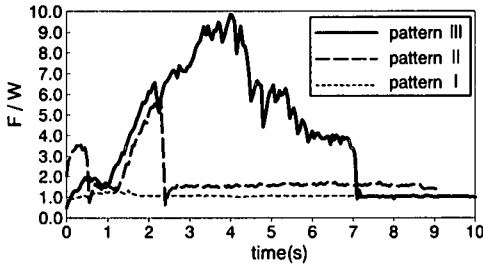


図-4 引抜き力の時系列例 (層厚 4.0 h)

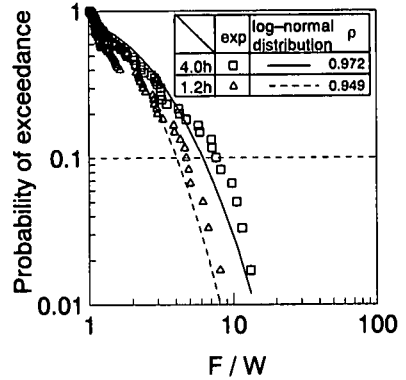


図-7 引抜き力の確率分布

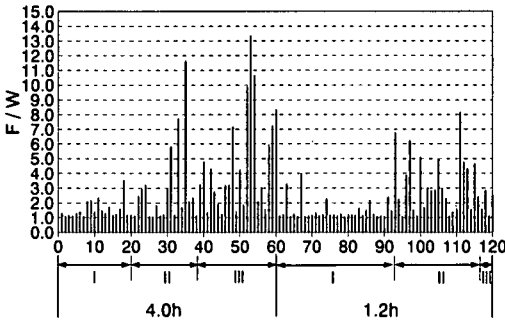


図-5 かみ合わせパターンと引抜き力

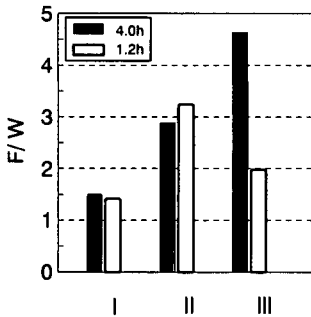


図-6 引抜き力の平均値

によらず $F/W=1.5$ 程度であり、ほぼ同一の引抜き力を有している。外力に対して、ほぼ自重のみで抵抗し、層厚の影響を受けないためと考えられる。パターンIIの引抜き力におよぼす層厚の影響は明瞭ではないが、パターンIIIの引抜き力は層厚が増すと大きくなる。この傾向は、層厚が増すとパターンIIIの面的なかみあいの度合いが強くなり、かみ合わせの影響範囲が広範囲に及ぶためと考えられる。

d) 引抜き力の確率分布

Peene(1987)は、引抜き力を確率変数 x とすると、 $\log x$ (x の自然対数) が正規分布に従うとして、引抜き力の確率分布を対数正規分布により示した。図-7に本実験により得られた引抜き力の確率分布を超過確率として示

す。図中には対数正規分布による値および実験値との相関係数 ρ を示している。いずれの層厚においても高い相関を示しており、本実験結果より得られた引抜き力も、ほぼ対数正規分布に従うと考えられる。

(3) 消波ブロック被覆層が有する抵抗力の評価手法

個々のブロックが有する引抜き力は、かみ合わせパターンによって変化し、かみ合わせパターンの出現確率は、層厚ごとに異なることが明らかとなった。ここでは、それらの関係に着目し、消波ブロック被覆層が有する抵抗力の評価を試みる。

a) かみ合わせパターンと引抜き力の関係

かみ合わせパターンと引抜き力の関係の有意性を層厚ごとに検討する。検討方法として正規母集団に対する分散分析法 (例えば和田ら, 1975) を用いた。かみ合わせパターンを引抜き力に影響を及ぼす因子として取り上げ、正規分布に従うと考えられる引抜き力の自然対数 $\log x$ に関して、かみ合わせパターン間に有意な差があるかどうかを検定した。その結果、いずれの層厚においても、有意水準 5% でかみ合わせパターン間に有意な差があることが認められた。

b) 消波ブロック被覆層が有する抵抗力の評価法

以上の結果より、各層厚におけるブロック個々の引抜き力は、そのかみ合わせパターンによって決定されるとし、ブロックのかみ合わせパターンの出現確率と引抜き力の平均値より、式 (1) で消波ブロック被覆層の抵抗力が算定されるものとした。

$$F_R = \sum_i P(i) \times f(i) \dots \dots \dots (1)$$

ここに F_R は被覆層が有する抵抗力、 $P(i)$ はかみ合わせパターン ($i = \text{I, II, III}$) の出現確率、 $f(i)$ はかみ合わせパターン ($i = \text{I, II, III}$) の引抜き力平均値である。次章においては、本評価法を用いて、現地に即した条件での消波ブロック被覆堤が有する抵抗力の評価を試み

た。

3. 消波ブロック被覆層が有する抵抗力

(1) 実験方法

二次元造波水路（長さ 30 m, 幅 0.5 m, 高さ 1.0 m）内に、ドロス被覆堤模型を設置した（図-8）。表-1 に実験条件を示す。被覆形式は、全断面被覆、層厚 1.8 h および 1.2 h の層被覆の 3 種類とした。ドロスの大きさは予備検討の時と同じである。中詰め材としてテトラポッド（質量： $M=124.9\text{ g}$, 体積： $V=52.79\text{ cm}^3$ ）を使用した。引抜き力の計測に先立ち、現地におけるかみ合わせの進行を模擬するため、ドロスに対する設計波相当（ $KD=20$ 相当）の波を 1000 波作用させた。波作用後に被覆層表層をドロスのブロック高さ h で格子状に区切り、計 48 点の格子の真下に位置するブロックを測定対象として、ブロックのかみ合わせパターンを記録し、あわせてブロック変位量（波の入射方向と同一の隣接するブロックに接するまでの距離）を測定した。その後、かみ合わせパターンごとに 1 個の引抜き対象ブロックを選定して、図-8 の方法によりその引抜き抵抗力を計測した。この手順を層厚ごとに 5 回繰り返した。

(2) 実験結果

a) かみ合わせパターンの出現確率

かみ合わせパターンの出現確率を図-9 に示す。測定箱を用いた結果（図-3）と比較すると、パターン I の出現確率が減少し、パターン III の出現確率が増加している。斜面に位置するブロックが、自重によって下方のブロックにもたれかかるため、水平に設置された測定箱の結果と比較して、パターン I のブロックが減少し、パターン

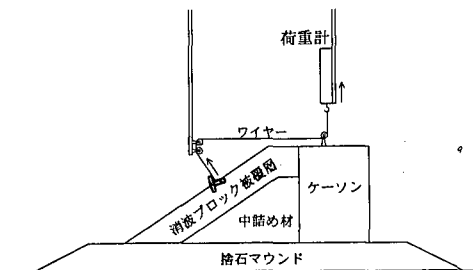


図-8 実験断面

表-1 実験条件

不規則波	修正 Bretschneider-光易型スペクトル		
波高 $H_{1/3}$	16.4 cm		
周期 $T_{1/3}$	1.76 s		
水深 h	43.0 cm		
天端高 h_c	0.6 $H_{1/3}$		
法面勾配	1 : 1.5		
層厚	全断面	1.8 h	1.2 h
被覆ブロック	ドロス	ドロス	ドロス
中詰め材	-	テトラポッド	テトラポッド

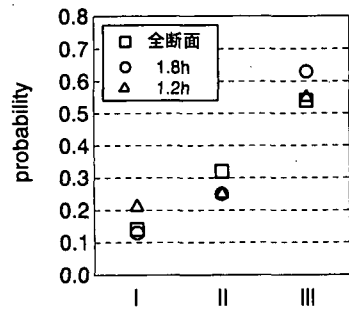


図-9 かみ合わせパターンの出現確率

III のブロックが増加したと考えられる。この傾向は、斜面勾配によってブロックの引抜き力が変化することを示すものであり、斜面勾配によりブロックの引抜き力が変化する実験結果（Price, 1979）とも合致する。

b) 変位可能量

ブロック変位量 l は、久保田ら（2002）に従い計測し、ブロック高さ h で除して整理した。以下この無次元量 l/h を変位可能量と称す。かみ合わせパターンごとの変位可能量の平均値を図-10 に示す。

パターン I の変位可能量は、他のパターンより大きな値をとる。層厚の減少に伴いパターン I のブロックが増加した場合、大きな変位可能量を有し、外力の作用に対して移動しやすいブロックが多く存在することになる。このことは、被覆層の耐波安定性を低下させる要因になると考えられる

c) 被覆層の抵抗力

かみ合わせパターンごとの引抜き力の平均値を図-11 に示す。パターン I の引抜き力は層厚によらず $F/W=1$ であり、外力に対して自重のみで抵抗していることが分かる。パターン II の引抜き力も、層厚によらずほぼ一定値をとる。側面の摩擦力で外力に抵抗する局所的なかみ合いで、層厚の影響を受けないためと考えられる。パターン III の引抜き力は層厚によって異なり、層厚が増すほど引抜き力が大きくなる。層厚の増加に伴い、かみ合わせの影響が広範囲に及ぶためと考えられる。

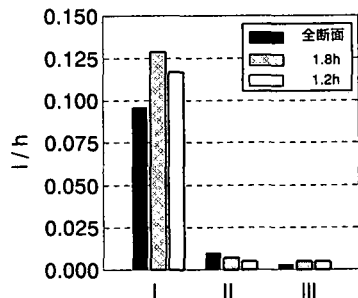


図-10 かみ合わせパターンごとの変位可能量

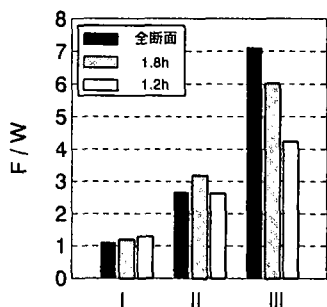


図-11 かみ合わせパターンごとの引抜き力

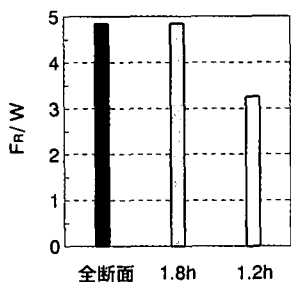


図-12 ドロス被覆層が有する抵抗力

図-9 に示したかみ合わせパターン ($i = I, II, III$) の出現確率 $P(i)$ と、図-11 に示したかみ合わせパターンの引抜き力の平均値 $f(i)$ より、式 (1) を用いてドロス被覆層が有する抵抗力を層厚ごとに算出した。得られた抵抗力を図-12 に示す。抵抗力はブロック自重で無次元化 (F_n/W) してある。算定結果より、被覆層の有する抵抗力は層厚に依存することが明らかとなった。全断面と 1.8h では同程度であるが、1.2h の抵抗力は、全断面および 1.8h と比較して 3 割程度減少する。式 (1) を用いた評価手法により、層厚の減少に伴い抵抗力が減少する特性を定量的に把握することができた。

(3) ドロス被覆層の抵抗力と耐波安定性の関係

久保田ら (2002) によるドロス被覆堤の安定実験において、被覆層厚の減少によって安定性が下がる傾向が明らかになっている。中詰め材としてテトラポッドを用いた場合、層厚 1.8h は全断面と同等の安定性であるが、層厚 1.2h では安定性が低下する結果を得ている。外力の観点から実施された流体場の計測によれば、層厚が外力

に及ぼす影響は顕著でないと考えられるため、本研究で評価された層厚の変化に伴う抵抗力の変化がドロス被覆層の安定性に大きく影響すると考えられる。

層厚の減少に伴うドロスの安定性の低下は、本研究において明らかにされた層厚の減少に伴うドロス被覆層の抵抗力の減少に起因すると考えられる。

4. 結 語

本研究により得られた結論を以下に示す。

① ドロス引抜き力は、かみ合わせのパターンごとに異なる。かみ合いがよいほど引抜き力が大きくなるという傾向が引抜き実験により確認された。

② 層厚の変化に伴い、被覆層表層におけるかみ合わせパターンの出現確率が変化する。層厚が減少すると、自重のみで外力に抵抗するブロック (かみ合わせパターン I) が増加し、かみ合わせの効果で外力に抵抗するブロック (かみ合わせパターン III) が減少する。

③ 被覆層が有する抵抗力をかみ合わせパターンの出現確率とかみ合わせパターンごとの引抜き力の平均値で評価した。その結果、ドロス被覆堤の被覆層が有する抵抗力は、全断面被覆と層厚 1.8h において同程度であり、層厚 1.2h においては減少することが明らかとなった。

④ 被覆層厚の減少に伴うドロス被覆層の耐波安定性の低下は、被覆層の有する抵抗力の低下により説明可能であることが確認された。

以上は、ドロスに対する引抜き抵抗力特性の検討結果であり、形状が変わるとその特性も変化するものと考えられる。今後は、ブロック形状の違いによる引抜き抵抗力特性への影響も明らかにしていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 久保田真一・小林茂高・松本 朗・半沢 稔・松岡道男 (2002): 消波ブロックの耐波安定性に及ぼす被覆層厚と中詰め材の影響に関する研究, 海工論文集, 第 49 巻, pp. 756-760.
- 和田秀三・御園生善尚・鈴木義也・岡安隆照・吾妻一興 (1975): 統計学大要, 資賢堂, pp. 149-156.
- Peene, S. J. and H. Wang (1987): Laboratory study on the resistance of breakwater armor units, Rep. Dep. Coastal Oceanographic Eng., Univ. of Florida, Rep. UFL/COEL-87/007.
- Price, W. A. (1979): Static stability of rubble-mound breakwaters, The Dock and Harbor Authority, Vol. 60, pp. 2-7.