

緩傾斜護岸裏込め砂の吸い出し機構

前野 賀彦*・山本 方人**・遠藤 泰司***

1. 序 論

海洋空間の有効利用を図る上からも沿岸域の開発はますます重要となっている。その中で自然海浜の占める割合は減少傾向にある。一方では国民が海への関わりを希求することから、海岸構造物の設計に際して単に防災の効果だけではなく親水性・環境保全等の条件を考える必要にせまられている。このような観点に立って暴風波浪から国土や国民の財産を守るための護岸についても、直立護岸に代わって緩傾斜護岸の適用が考えられている。

この緩傾斜護岸に関する研究としては、豊島(1987)の法面勾配と波の打ち上げ高に関するものがある。それによれば、表法が5割から6割の緩勾配で法先が水面下にある護岸が波の打ち上げ高が低く飛沫の発生も抑えることができ、その効果は堤脚水深が大きい場合に顕著であるとされている。また、建設省河川局海岸課(1989)により『緩傾斜堤の設計の手引き』も発行され、緩傾斜護岸の施工が益々増えるものと考えられる。しかしながら、緩傾斜護岸に関する研究は十分に成されているとは言えず、得られた成果もその多くが波の打ち上げに関するものである。特に、護岸の裏込め工や基礎地盤に関するものは少なく、吸い出しや洗掘による護岸の被災例が多く報告されている(海野, 1988)ことを考えると、これらの問題に関する研究が待望される。

そこで、本研究では法先が水面下であり法面勾配が相当緩い緩傾斜護岸の波浪に対する安定性について、護岸ブロックの耐波安定性だけでなく、その護岸ブロック下の裏込め工や砂層基礎の安定性との関連で検討した。それは、護岸下裏込め砂層中の間隙水圧変動と土圧変動を測定することにより有効応力状態を明らかにし、それと護岸下に発生する流れによる砂の流動やブロックの継目や透過性護岸とするために設けられたブロックの隙間からのクラッシャーランや裏込め砂の吸い出しとを関連づけるものである。

2. 実験の概要

緩傾斜護岸の法先が水中にあり一定の堤脚水深を有する場合について、護岸の波浪に対する安定性の検討を行った。図-1に示す形状の緩傾斜護岸被覆ブロックの30分の1縮尺模型を用いて、図-2に示すように法面勾配1/5の緩傾斜護岸模型を長さ17m、幅1mの2次元造波水槽内の勾配1/22の砂層斜面上に作成した。

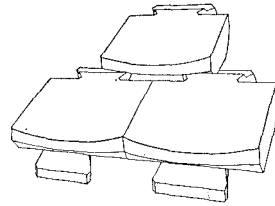


図-1 緩傾斜護岸被覆ブロックの形状

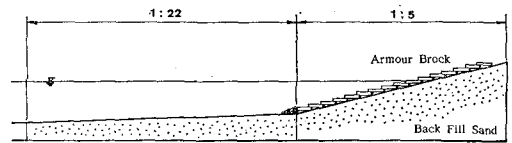


図-2 緩傾斜護岸模型の概要

模型の法止めについては、実際の施工に際して500kgから1000kgの捨て石が用いられていることから、相似律を勘案して18.5gから37.0gの碎石を用いた。これは、粒径2.6cmから3.3cmに相当する。また、裏込め工については、被覆ブロックと裏込め砂の間に粒径0.5cmから0.85cmの碎石を用いた厚さ0.8cmの栗石層を敷設した。この栗石層厚は、実際には24.0cmの厚さに相当するが一般的には薄い場合を想定するものである。通常の施工においてはさらにこの栗石層と裏込め砂の間に栗石層の厚さと同程度のクラッシャーラン層を設けて砂の吸い出しや流出を抑えている。建設省河川局海岸課による『緩傾斜堤の設計の手引き』によれば、これらの裏込め工は50cm以上の厚さが必要とされている。しかし、本実験では裏込め砂の吸い出しや護岸ブロック下で

* 正会員 農博 舞鶴工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所

*** 正会員 理博 日本テトラポッド(株) 海外コンサルタント事業部

の流れによる砂の流動を観察するため、それを抑制するクラッシャーラン層などのフィルター層は設けなかった。さらに、裏込め砂には、福井県大飯郡高浜町難波江浜の砂を用いた。この難波江砂の物理特性は表-1に示すとおりであり、均等な細砂で液状化傾向の高いものである。

表-1 難波江砂の特性

Specific gravity	2.70
Uniformity coefficient	1.53
Effective grain size	0.114 mm
Average grain size	0.160 mm
Permeability	0.023 cm/s

また、実験条件についてであるが、周期 1.86 s・波高 0.16 m の波を作用させた。この実験波は相似律を勘案すると実際には波高 4.8 m・周期 10 s の波に対応する。ここで言う波高は、護岸法先の直上で測定したものである。堤脚水深は栗石層を敷設した場合には 22.0 cm、敷設しない場合には 21.5 cm である。

護岸裏込め砂層内の有効応力場を明らかにするため、図-3 に示すように、(1) 緩傾斜護岸ブロック法先部、(2) ランダウンの位置、(3) 平均水面の位置の3カ所に間隙水圧計と土圧計を並べて設置し、(4) ランアップの位置よりやや下に土圧計を、(5) ブロック法先部とランダウン位置の中間に間隙水圧計をそれぞれ設置した。

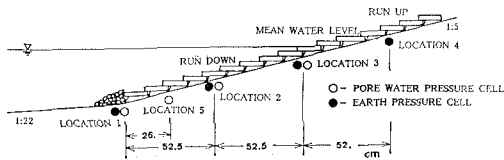


図-3 圧力変換器の設置状況

3. 裏込め砂の吸い出しと流動化

実験の観察によれば、ランダウン位置より下方で砂が堆積しており、ランダウン位置より上方で侵食しているのが確認できる。このことを時間経過を追って定量的に説明するため、図-3 に示した5地点で測定した土圧変動の残留成分の時間変化を求めた。それは、土圧が砂の侵食された地点で減少し砂が堆積した地点で増加することに着目して、護岸裏込め砂の侵食される位置と堆積する位置を明らかにし、併せてその侵食・堆積量を求めようとするものである。図-4 は、最も侵食の激しい栗石層やクラッシャーラン層などの基礎工を設けない場合について土圧の残留分を時間経過を追って示したものである。それによれば、護岸法先部では、盛んに土圧が増加しており砂が堆積していることを示している。平均水面

付近とランダウン位置では、全体的に土圧は減少傾向を示してはいるものの一時的に増加もしており大きな変動を示していない。これは、岸側の砂が吸い出されこれらの位置を通過するために流入する砂と流出する砂が釣り合っていることによるものと考えられる。平均水面からランアップにかけての位置は盛んに砂が吸い出され侵食が激しいがめくれたブロックが打ち上げられるため土圧の変動が大きく侵食量の評価には注意を要する。

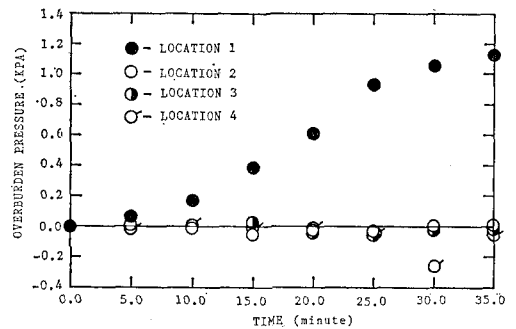


図-4 裏込め砂の侵食と堆積

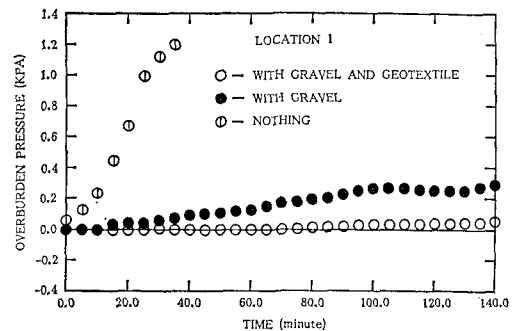
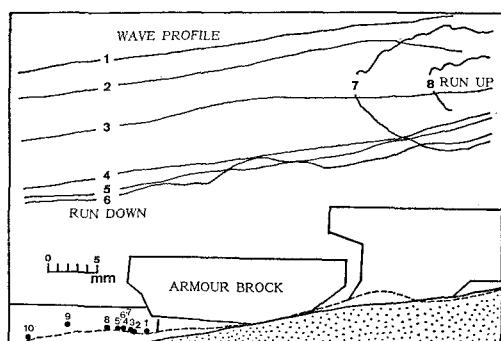
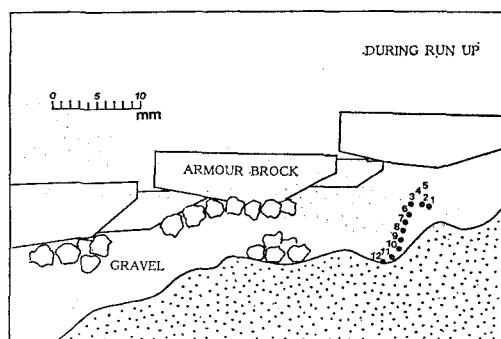


図-5 裏込め砂の侵食と堆積

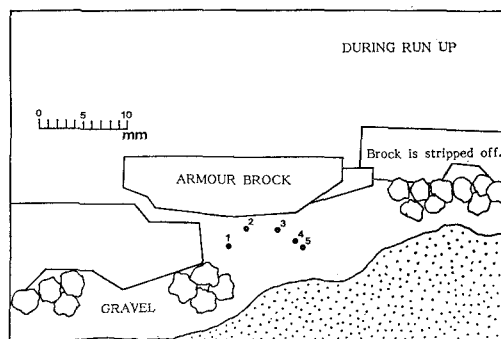
さらに、ジオテキスタイルを栗石層と裏込め砂の間に敷設して同様の実験を行うことにより、本来裏込め工として施工される栗石と裏込め砂の間のクラッシャーランなどのフィルター層の効果を確認した。図-5 は、土圧の経時変化を①栗石層およびジオテキスタイルによるフィルター層を設けるもの、②栗石層のみ設けるもの、③裏込め工を行わないものについて、それぞれ図-4 と同様に示したものである。それによれば、栗石層を設けただけで相当砂の吸い出しを抑制できるが、栗石層と裏込め砂の間の流れにより砂が流出する。栗石層と裏込め砂の間にジオテキスタイルを敷設することにより、流れによる砂の流出も抑止され、裏込め砂の侵食が防止される。このことから、栗石層と裏込め砂の間にクラッシャーランやジオテキスタイルなどの良好なフィルター層を施工することの必要性が確認された。



(a)



(b)



(c)

図-6 栗石層と裏込め砂の境界における砂移動

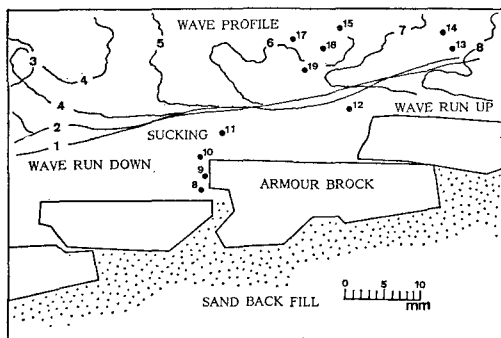
以上示した護岸ブロックの安定性に大きく影響を及ぼす裏込め砂の侵食と堆積の現象は、護岸ブロックの隙間からの吸い出しやブロックや栗石と砂の間の流れによる砂の流動によることから、護岸ブロック周辺の砂粒子の運動をビデオ撮影することにより観察した。最近の緩傾斜護岸の被災例によれば、法先部より静水面付近のブロックがはがれる傾向が認められる。著者らの実験結果においても、静水面から上2段の範囲のブロックがはがれ易いことが確認されている。そこで、静水面付近に着目してビデオ撮影を行った。

まず、栗石層を敷設した場合とそうでない場合につい

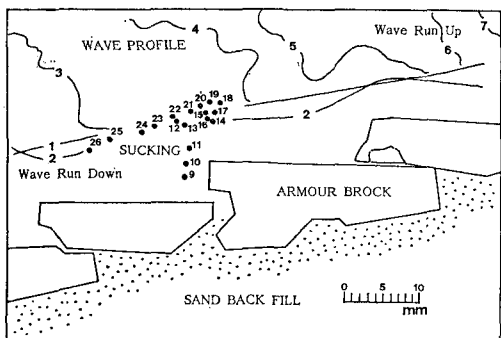
ての実験を比較し栗石層やクラッシャーランの耐侵食効果について考察した。それによれば、栗石層を敷設した場合には、護岸ブロックの隙間からの砂の吸い出しは少なく栗石層内を流されてきたものが波の遡上に伴って吸い出されるに過ぎない。しかしながら、栗石層と裏込め砂の境界に相当流速の流れが発生し砂粒子を沖側に流下していく。それは波の遡上時に顕著であり、図-6(a)、(b)に示す今回の実験のケースでは 2.0 cm/s 以上の速度で砂移動が生じている。ランダウン時には、若干移動するものの 1.0 cm/s 以下の速度である。また、ランダウンからランアップに転ずる際に速度がゼロになる瞬間がある。ここで、図-6(a)中の砂粒子の軌跡の番号1から7までは5コマずつ進んでいる。他の図の軌跡番号はすべて1コマずつ進んでいる。1コマは30分の1秒である。また、点線は実験で示した実験開始時の裏込め砂の初期縦断面輪郭が砂の移動により変化した撮影時の縦断面輪郭を示している。図-6(c)に岸側のブロックが波の作用によりはぎ取られた場合について砂粒子の軌跡を示した。それによれば、はぎ取られたブロックの下流側の砂粒子の移動はブロックで被覆されている場合と異なり、岸側に向かって移動するのが認められた。それは、ブロックの剥離により複雑な流況が生じたものと考えられる。

図-7に示すように栗石層を敷設しない場合には、波が撮影地点（平均水面付近）を通過し遡上すると、速い速度で砂はブロック間の隙間から激しく吸い出され、一時的に沖側に向かうかあるいは水中に停止するが、すぐに波の遡上に伴って岸に向かって流れ、その後ダウンラッシュに乗り沖に向かって移動する。これを繰り返すことによりランダウンからランアップにかけて砂は吸い出され、ランダウンより下方の法先部に堆積することになる。この砂の吸い出し速度は、砂の軌跡から解析するとブロック付近で 5.0 cm/s から 12.0 cm/s の範囲にある。今回のビデオ撮影による流速の解析では、追跡可能な粒子に着目して行ったもので、広い範囲の流速分布が得られていない。今後流れの可視化を図り解析を進めたい。

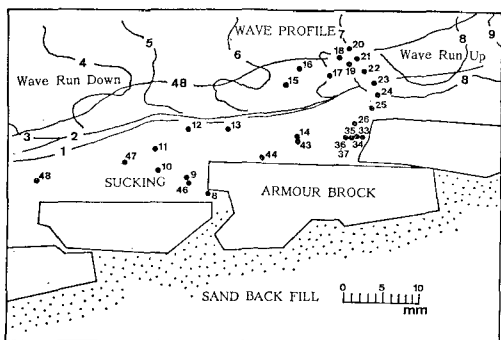
また、砂の運動の軌跡は砂が吸い出されるタイミングにより移動経路が異なる。波の遡上開始時に吸い出された砂は図-7(a)に示すように岸側に大きく移動する傾向にあり、吸い出されるタイミングが遅い場合には、図-7(b)に示すように吸い上げられた位置にしばらく留まり波が引くに伴い沖に向かって移動する。また、砂が吸い出された時、ブロック上のどの高さまで吸い上げられたかということも砂の移動経路に大きな影響を与える。ブロック上の高い位置まで吸い上げられた砂ほど移動が広範囲である。言い換えれば、吸い出し速度が大きいものほど高い位置まで吸い上げられ広範囲に移動することに



(a)



(b)



(c)

図-7 裏込め砂の吸い出しとその軌跡

なる。

以上のビデオ撮影結果に基づき緩傾斜護岸の安定性について、図-8 を用いてまとめることにする。裏込め砂の吸い出しは波の遡上時に発生し、その傾向は栗石層やクラッシャーラン層を設けなかった場合に顕著である。また、栗石層のみを敷設した場合には、吸い出しは抑制されるものの栗石層と裏込め砂の境界における流れが相当ありその流れによって砂が沖に向かって流出する。その防止にはクラッシャーラン層などの良好なフィルター層の設置もしくはジオテキスタイルの利用が有効と考えられる。このような砂の吸い出しと流出により平均水面

からランアップの位置にかけての裏込め砂が侵食されブロックが沈み込むかブロック同士支え合って裏込め砂とブロック間に空間が生じる傾向にある。このことが裏込め砂の流出を益々助長し護岸全体の不安定に結びつく。さらに、波の直接作用により平均水面の位置から2・3段岸側にかけてのブロックがめくれ上がりクラッシャーランおよび裏込め砂の侵食を助長する。今回の実験で作用させた波は相当厳しい条件であるが、良好なフィルターを護岸と裏込め砂の間に設置し、潮位の変化を考慮して静水面付近から数段岸側にかけてのブロックの重量を増す等安定性を高めることにより壊滅的な全体破壊を防止することが可能と考えられる。

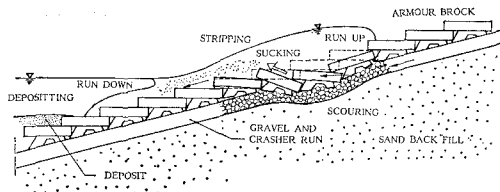


図-8 緩傾斜護岸の不安定性の模式図

4. 裏込め砂の吸い出し・流動と液状化との関連

緩傾斜護岸裏込め砂中の図-3 に示す各点で間隙水圧変動 u と土圧変動 σ を測定することにより、砂層内の有効応力変動 σ_e を得て波浪による液状化傾向と裏込め砂の吸い出しおよび流動化との関連を検討した。ここでは、波浪による砂層表層の液状化を考えることから、土圧変動（全応力変動）から間隙水圧変動を減じたものを有効鉛直応力変動と定義し、

$$\sigma_e = \sigma - u \quad \dots\dots\dots (1)$$

Mei & Foda (1981) および Okusa (1985) による波浪により引き起こされる多孔質海底地盤の液状化条件を用いた。

$$\sigma' = \gamma' z + \sigma_e \leq 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

これは、善ら(1987)による波浪による砂層表面付近の液状化条件と等価なものである。

$$\sigma' = \sigma_0 + (P_0 - P_2) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_0 = \gamma' z \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma' = (1-n)(\rho_s - \rho_w)g \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 σ' は有効鉛直応力、 σ_0 は有効土被り圧、 P_0 は砂層表面の波圧変動振幅である。 P_2 は砂層中の間隙水圧変動振幅、 γ' は砂の水中単位体積重量、 z は地盤深度、 n は間隙率、 ρ_s は砂粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

静水面の位置で砂の吸い出しおよび砂の流動化をビデオ撮影したが、同時にその直下の裏込め砂層中 2 cm の

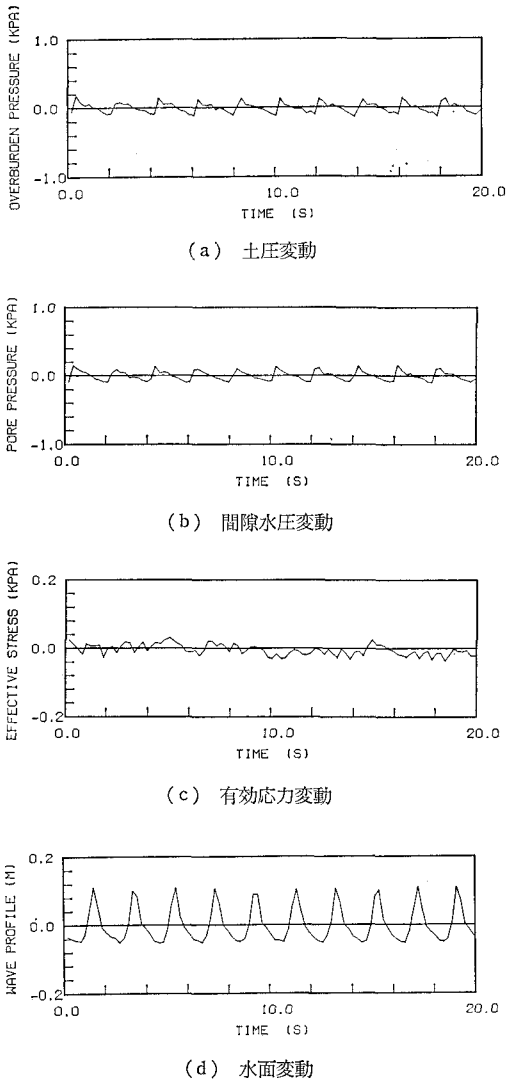


図-9 緩傾斜護岸裏込め砂内の有効応力変動

深さに埋設された土圧計と間隙水圧計により土圧変動および間隙水圧変動を測定した。それらの結果に加えて式(1)により求められる有効応力変動と堤脚部で測定した水面変動を栗石層を護岸ブロックと裏込め砂の間に敷設しない場合について図-9に示した。

図-9によれば、測定地点は水深が浅くなっているもので水平方向成分が卓越して鉛直方向成分が減少しているものの波の作用により相当の有効応力変動成分が発生している。そのために、被覆ブロック間の隙間や噛み合わせにより生ずる隙間の下の裏込め砂表層では充分な鉛直応力が発達しないことが推定されることから、有効応力変動振幅がその地点での土かぶり圧に対して相当の割合に達する可能性がある。この有効応力変動により砂粒

子間の結合が緩み、栗石層を敷設しない場合にはブロックの隙間からの砂の吸い出しが容易となる。また、栗石層のみを敷設した場合には、栗石層と裏込め砂の境界における砂の流動を容易にするものと考えられる。

5. 結 論

以上の実験と考察により次のことが確認された。

(1) 栗石層を設けない場合、水深が浅い静水面付近で間隙水圧変動と土圧変動に相違が認められる。それは、水平波力の影響によるものと考えられる。

(2) 波との関係では、ランアップ時に砂が護岸と護岸の隙間から吸い出されるのが認められ、その時の護岸内の有効応力変動と関連づけられた。

(3) 土圧変化によれば、ランダウ位置より上方で砂が侵食されランダウ位置より下方で砂は堆積傾向にある。特に平均水面からランアップにかけては侵食量が大きい。これは目視による観測結果を定量的に裏付けるものである。

(4) 栗石層を敷設しない場合には、直接的な波の効果による捲れ上がりは少ないが砂の吸い出しによる沈下と護岸全体の変形が大きい。敷設した場合には、波の直接的效果により捲れ上がる傾向は大きいが砂の吸い出しは抑制される。ブロックの捲れ上がりは重量を重くするなどして防止することが可能である。

(5) ジオテキスタイルを栗石層と裏込め砂の間にフィルターとして用いた場合にはその間の砂の流動を相当抑制し、砂の吸い出しもほぼ防止することが確認された。したがって、ジオテキスタイルやクラッシャーランなどのフィルター層を良好に設計することが吸い出し防止対策として重要である。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費国際学術研究（共同研究）No. 01044137（代表者：前野賀彦）の一環として行なわれたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 海野修司 (1988)：海岸保全工法に関する研究，海岸，No. 28，pp. 132～140.
- 建設省河川局海岸課編 (1989)：緩傾斜堤の設計の手引き，pp. 1～48.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，港湾技術研究所研究報告，第26巻，第4号，pp. 125～180.
- 豊島 修 (1987)：緩傾斜護岸工法，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 447～451.
- Mei, C. C. and M. A. Foda (1981)：Wave-induced stress around a pipe laid on a poro-elastic sea bed, Geotechnique, Vol. 31, No. 4, pp. 509～517.
- Okusa, S. (1985)：Wave-induced stress in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 517～532.