

緩傾斜護岸内の間隙水圧変動の測定

舞鶴工業高等専門学校	正会員	前野 賀彦
日本テトラポッド株式会社	正会員	山本 方人
同上	正会員	遠藤 泰司

1. 序 論

海岸侵食の防止は海岸工学上最も重要な問題の一つである。その対策の一つとして従来施工されてきた直立型護岸は、波の反射率が大きいことから重複波が発生し、護岸の前面が激しく侵食される問題があり、被覆工を併せて行うことにより波のエネルギーを消散させ反射率を減じたとしても、波が砕けることによる飛沫は相当遠くまで及ぶことが知られている。このことは、例えば海岸付近のコンクリート構造物に塩害をもたらすなど環境に与える影響は無視できなくなっている。このような問題を解決する方策として豊島は、法面が静水面下に達する表法が5割から6割の緩勾配のブロック被覆工法を提案している。また、豊島(1987)によれば、堤脚水深が大きいほど緩傾斜護岸が有利となり、表法5割・6割勾配の場合波の打ち上げ高は2割勾配の場合に比べて小さい等の結果が示されている。これらの成果に基づいて、今後緩傾斜護岸を実海浜に適用して行くにあたり、護岸の裏込め砂の吸い出しや流動による護岸の不安定性について検討する必要がある。それは、実際に施工された緩傾斜護岸の被災例などからも、静水面から上の被覆ブロックが波の作用により剥されたり、護岸ブロック下のクラッシャーランや裏込め砂が吸い出されブロックの安定が保てなくなることが指摘されている。そこで、本研究ではこの裏込め砂やクラッシャーランの吸い出しや護岸下の砂の流動化と流出を裏込め砂層内の有効応力場との関連で検討した。

2. 実験方法および条件

豊島(1987)によれば表法勾配5割から6割の緩傾斜護岸は堤脚水深が大きいほどその利点を発揮するとされている。そこで、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。著者らの予備実験における観察から、緩傾斜護岸の不安定性は図-1に示すように整理することができる。まず、暴風波浪を想定した波の衝撃波力により直接はぎ取られる場合が考えられる。はぎ取られるブロックの位置は多くの場合静水面から2・3段上にかけてに限定される。はぎ取られたブロックはダウンラッシュに乗って沖側に流出する場合もあれば、多くはランアップに伴い岸側

に打ち上げられる。その時のブロック同士の衝突でブロックの一部が破損する場合がある。

次に、静水面からランアップにかけてブロック間の間隙やブロックの継目の空隙から裏込め砂が吸い出される現象がある。この現象は波の遡上に伴い高速で裏込め砂を吸い出し、砂を遡上に伴い一時的に岸側に運ぶもののダウンラッシュに乗り沖側に流出しランダウン位置より沖側に堆積させる。この継続的な砂の吸い出しにより、静水面からランアップにかけて裏込め砂が侵食され、ブロックが沈み込んだりブロック同士が支え合ってアーチ作用でドームを形造る。このような状態になるとブロックの下に沖に向かう流れが益々激しくなり裏込め砂の侵食が加速される。結果的に相当広範囲の護岸の破壊をもたらすことになる。この砂の吸い出しは護岸ブロックと裏込め間に栗石層、クラッシャーランおよびフィルター層を設けない場合に顕著となる。栗石層を設けた場合でも、栗石層と砂の間にクラッシャーランなどの良好なフィルター層を設けていない場合には、この境界において沖に向かう流れが発生する。この流れは波の遡上時に激しく、多くの砂粒子を流出させる。この砂粒子はブロック間の継目など吸い出しを受ける地点にたまる傾向があり、継続的に吸い出され裏込め砂を侵食する。そこで、以上述べた現象を護岸裏込め内の土圧変動および間隙水圧変動を測定することにより有効応力場を得て、波浪による砂層の液状化現象との関連で検討することにする。

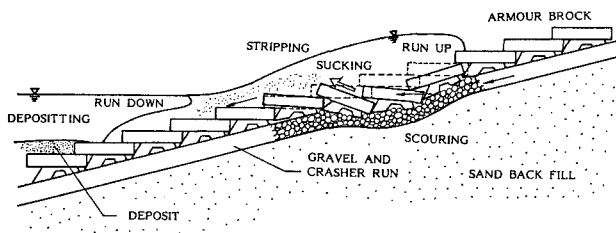


図-1 緩傾斜護岸の不安定性の概要

まず、護岸模型について説明を加える。縮尺は30分の1とした。本来移動床上での模型実験は相似則の取り扱いに注意を要し、実験結果の解釈には限界があることが知られているが、ここではフルードの相似則を用いることにした。そこで、図-2示す30分の1縮尺護岸ブロックを用いて、図-3に示すように法面勾配

1:5の緩傾斜護岸模型を、長さ17.0m、幅1.0m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。本実験で採用した法面勾配 1:5は、図-2に示したブロックとしては最も緩い傾斜である。このような形式のブロックでは勾配を緩くする方が耐波不安定性が増すことから採用した。

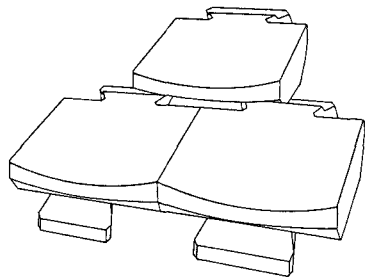


図-2 護岸ブロックの形状

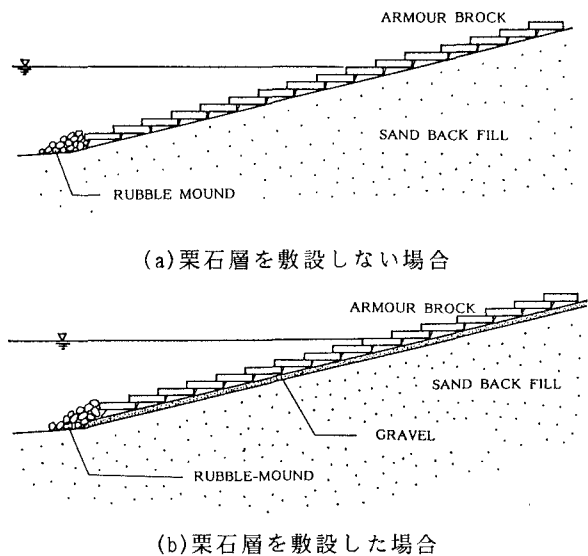


図-3 緩傾斜護岸模型の概要

また、法止めについては、実際の施工に際して前浜が広く大きな波が来ない場所では200kgから500kgの捨て石が用いられ、急傾斜海浜で前浜が狭く波浪条件が厳しい場所では 500kgから1000kgの捨て石が用いられている。そこで、暴風波浪を常に受け波浪条件が厳しい海浜への適用を考え 500kgから1000kgの捨て石を用いるものと想定し、相似律を勘案の上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。栗石層には、粒径0.5cmから0.85cmの碎石を用い厚さ 0.8cmに敷設した。これは、24.0cmの厚さに相当する。実際には、栗石層以外にも同程度の厚さのクラッシャーラン層を裏込め砂と栗石層との間に設けるが、クラッシャーラン層を設けると砂の吸い出しが抑制されるので、今回の実験ではクラッシャーラン層を設けなかった。

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

示すとおりである。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

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

また、実験条件は表-2に示すように周期 1.86s・波高 0.16m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 4.8m・周期10.2s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. cm、敷設しない場合には21.5cmである。

表-2 実験条件

	周期(s)	波高(m)	提脚水深(m)
実験条件	1.86	0.16	0.220*
			0.215**
想定条件	10.2	4.80	6.60*
			6.45**
備 考	* クラ ッ シ ャ ー ラ ン 有 り ** クラ ッ シ ャ ー ラ ン 無 し		

護岸裏込め砂層内の有効応力場を明らかにするため、図-4に示すように、(1) 緩傾斜護岸ブロック法先部 (LOCATION 1)、(2) ランダウンの位置 (LOCATION 2)、(3) 静水面の位置 (LOCATION 3)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 (LOCATION 4)に土圧計を、(5) ブロック法先部とランダウン位置の中間 (LOCATION 5)に間隙水圧計をそれぞれ設置した。

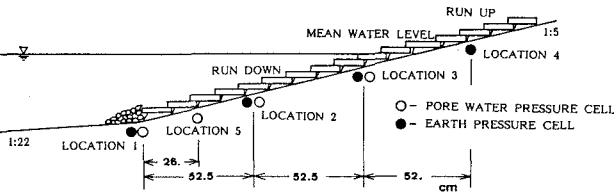


図-4 圧力変換器の設置状況

3. 裏込め砂の侵食と堆積

著者らの実験における観察によれば、静水面からランアップにかけてブロックの継目から裏込め砂が吸い出されており時間の経過に伴って裏込めは侵食され、ランダウン位置より下方でダウンラッシュにより運ば

れた砂が堆積している。この侵食と堆積を時間経過を追って定量的に説明するため、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た。

そこで、図-4に示したLOCATION 1からLOCATION 4の4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。このような測定法は、移動床などの変動現象を定量化するために有効と考えられ、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・堆積量を求めることができる。

図-5は、最も侵食の激しい栗石やクラッシャーランを敷設しない場合について土圧の平均値を時間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。静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いるが、一時的に増加しており侵食の傾向を明確に示していない。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。静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ことが目視により確認されているが、めくれたブロックが打ち上げられることにより土圧の変動にブロックの重量や衝撃圧が含まれるために侵食量の評価には注意を要する。土圧変動が砂の移動のみであれば、砂の比重と間隙率が実験的に求められているので侵食量と堆積量が容易に求められる。

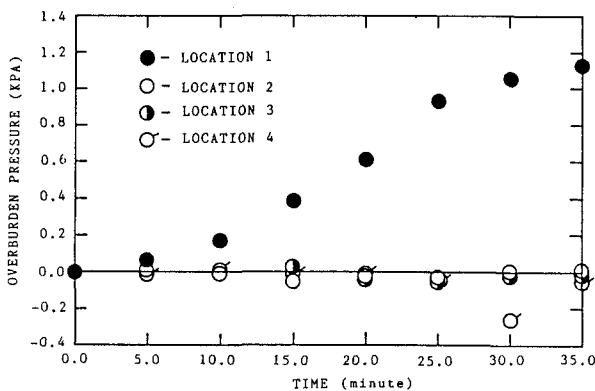


図-5 裏込め砂の侵食と堆積

また、栗石層、クラッシャーランおよびジオテキスタイルの吸い出し防止効果を確認するために、栗石層を敷設した場合とそうでない場合およびジオテキスタイルをフィルター層として用いた場合について裏込め砂の侵食と堆積の傾向を比較した。図-6に図-5と同様に土圧変動の平均値の時間的変化を示した。それによれば、栗石層を敷設した場合は敷設しない場合に比べて砂の吸い出しが抑制され、侵食と堆積の進捗は低いものとなっている。しかしながら、栗石層を敷設しても新たに栗石層と裏込め砂の間に流れが発生しそ

の流れにより砂が流出する。この砂の流出はクラッシャーランやジオテキスタイルをフィルターとして用いることにより抑制することができる。それは、今回の実験結果により確認できる。ジオテキスタイルをフィルターとして用いた場合には吸い出された砂の法先部への堆積量が少なく、吸い出しを抑制することを示している。また、図-6には140分間の堆積傾向を示したが、相似律を勘案すると実際には約13時間の暴風波浪の継続に対応し、ジオテキスタイルの吸い出し防止効果は相当なものであると言える。このように護岸裏のクラッシャーランやジオテキスタイルなどのフィルター層を良好に設計することが護岸の安定に大きな影響を及ぼすことが明かとなった。

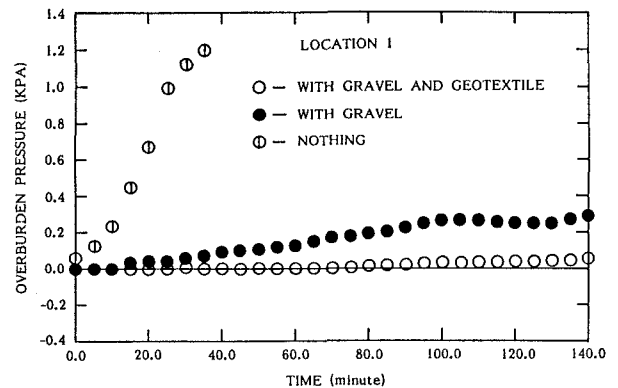


図-6 裏込め砂の侵食と堆積

4. 裏込め砂の吸い出しと有効応力状態

図-4に示す緩傾斜護岸内裏込め砂中のLOCATION 1からLOCATION 5の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_o を得て波浪による液状化傾向と護岸ブロックの継目や隙間からの裏込め砂の吸い出しおよび栗石層と裏込め砂の境界における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と、土圧変動(全応力変動)から間隙圧変動を減じたものを有効鉛直応力変動と定義し、

$$\sigma_o = \sigma - u \quad (1)$$

Mei & Poda(1981)や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。

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

これは、次式に示す善ら(1987)の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。

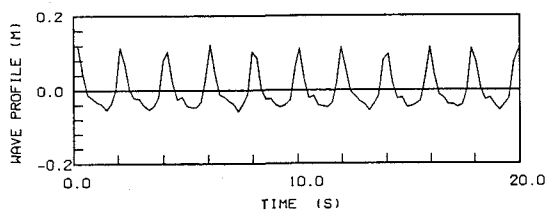
$$\sigma' = \sigma_o + (P_b - P_z) \leq 0 \quad (3)$$

$$\sigma_o = \gamma' z \quad (4)$$

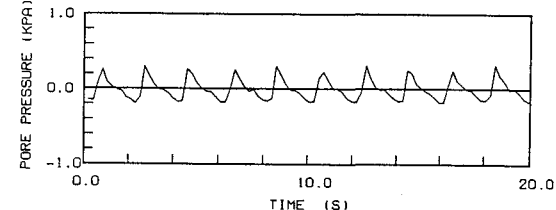
$$\gamma' = (1 - n)(\rho_s - \rho_w)g \quad (5)$$

ここで、 σ' は有効鉛直応力、 σ_v は有効土被り圧、 P_s は砂層表面の波圧変動振幅である。 P_z 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。

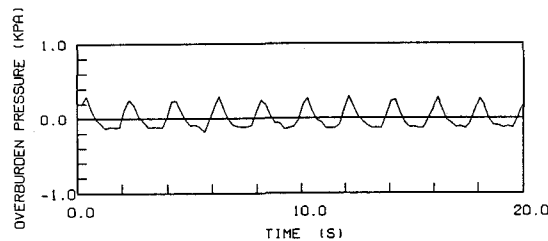
図-4に示したLOCATION 1からLOCATION 3の裏込め砂層内の深度2 cmにおいて測定した土圧変動および間隙水圧変動に加えて、(1)式により求められる有効応力変動と堤脚部で測定した水面変動を、栗石層を敷設した場合とそうでない場合について、それぞれ図-7



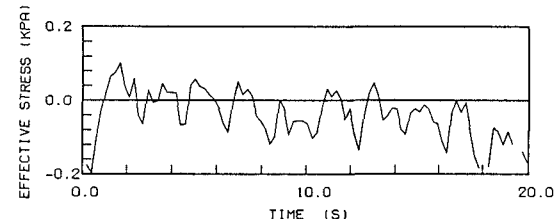
(a) 堤脚部における水面変動



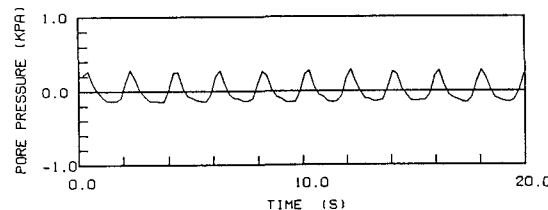
(f) ランダウン位置の間隙水圧変動 (LOCATION 2)



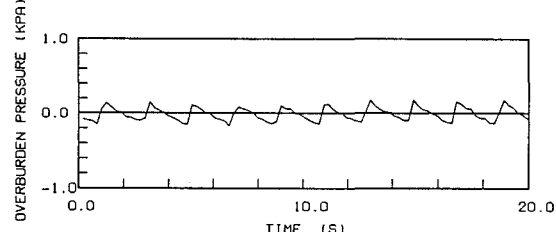
(b) 堤脚部における土圧変動 (LOCATION 1)



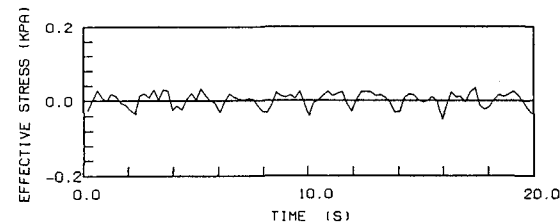
(g) ランダウン位置の有効応力変動 (LOCATION 2)



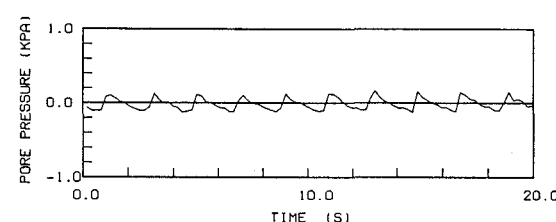
(c) 堤脚部における間隙水圧変動 (LOCATION 1)



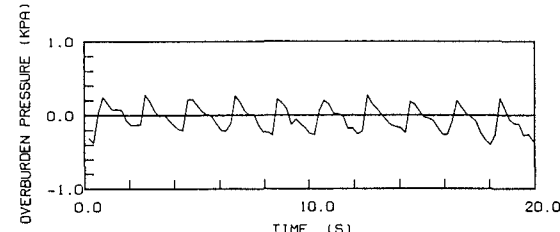
(h) 静水面における土圧変動 (LOCATION 3)



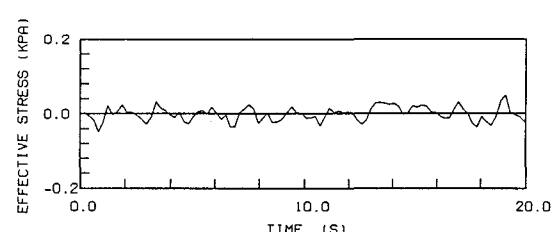
(d) 堤脚部における有効応力変動 (LOCATION 1)



(i) 静水面における間隙水圧変動 (LOCATION 3)

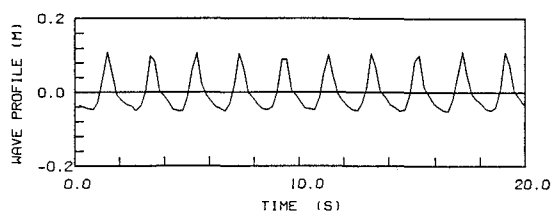


(e) ランダウン位置の土圧変動 (LOCATION 2)

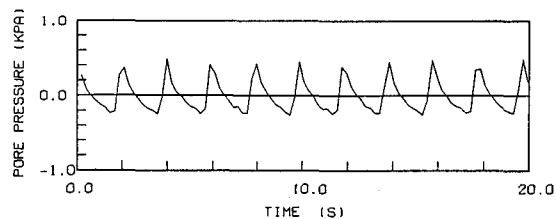


(j) 静水面における有効応力変動 (LOCATION 3)

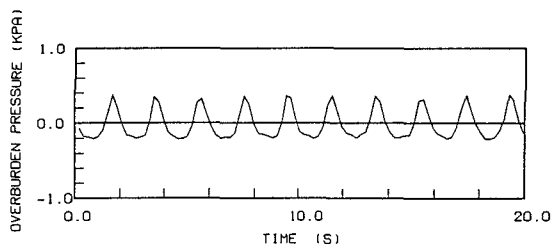
図-7 緩傾斜護岸裏込め砂内の有効応力変動 (栗石層を敷設した場合)



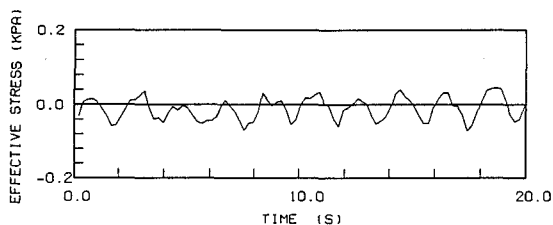
(a) 堤脚部における水面変動



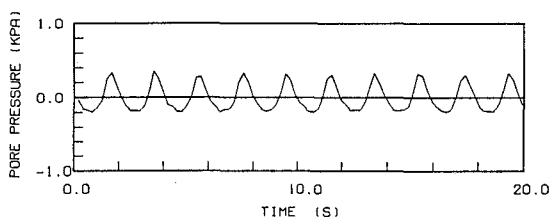
(f) ランドウン位置の間隙水圧変動 (LOCATION 2)



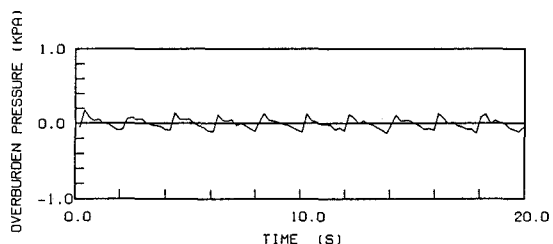
(b) 堤脚部における土圧変動 (LOCATION 1)



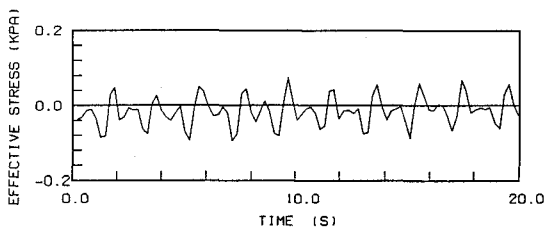
(g) ランドウン位置の有効応力変動 (LOCATION 2)



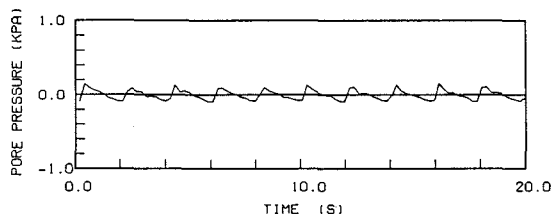
(c) 堤脚部における間隙水圧変動 (LOCATION 1)



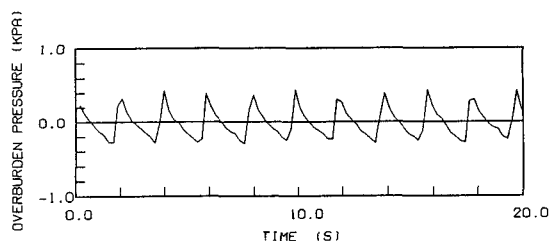
(h) 静水面における土圧変動 (LOCATION 3)



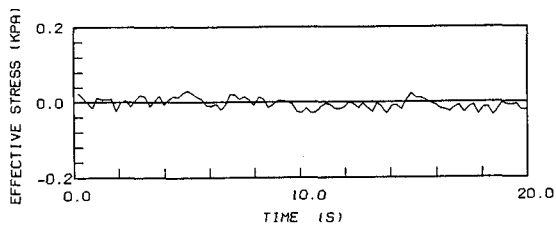
(d) 堤脚部における有効応力変動 (LOCATION 1)



(i) 静水面における間隙水圧変動 (LOCATION 3)



(e) ランドウン位置の土圧変動 (LOCATION 2)



(j) 静水面における有効応力変動 (LOCATION 3)

図-8 緩傾斜護岸裏込め砂内の有効応力変動 (栗石層を敷設しない場合)

および図-8に示した。それによれば、測定地点が岸に近づくに従って(水深が浅くなるに従って)波力の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。本来被覆ブロックの自重によりこの波浪による有効応力変動成分よりも大きい鉛直応力が発達しているべきであるが、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プロ

ックなどの上載荷重の効果が及ばず充分な鉛直応力が発達しないことが推定される。そのために、有効応力変動振幅がその地点の土かぶり圧に肉薄しさらには越える可能性がある。(2) 式の定義によれば裏込め表層が液状化したものと考えられ、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。このことは実験時の観察結果と一致するものである。また、栗石層だけを敷設しクラッシャーランなどのフィルター層を敷設しない場合には、栗石層と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。さらに、この流れにより流されてきた砂がブロックの継目の間隙付近に集まり水中に吸い出されるという観測の結果とも一致する。

先に述べたように、波が斜面を上がり水深が浅くなるに従って護岸ブロックや裏込め砂層は水平波圧変動の影響を受けることになる。そこで、参考のために静水面より2段上のブロックに据え付けた圧力変換器により水平波圧変動を測定した結果を図-9に示す。それによれば、得られた波圧変動は衝撃砕波圧の形を示しており、その形状は静水面付近に近づくに従って土圧変動および間隙水圧変動に反映している。その傾向は間隙水圧変動の方が大きい。土圧変動は栗石層を敷設しない場合にはブロックを経由した圧力変動が直接加わるなど複雑な波形を示している。栗石層のみを敷設した場合には、栗石層がブロックに作用する衝撃波圧を分散させて裏込め砂層に伝達するものと考えられ比較的相似した形を示している。

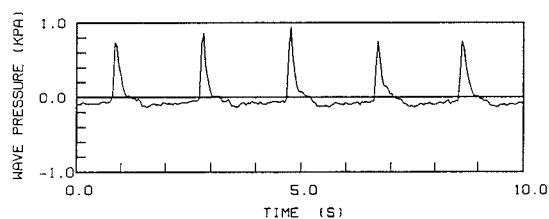


図-9 被覆ブロックに作用する波圧変動

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) 水深が深い位置では、間隙水圧変動と土圧変動は

相似した形をしているが、水深が浅い静水面付近では相違が認められる。それは、波力の水平成分が卓越するためと考えられる。

- (2) ランアップ時に裏込め砂が護岸ブロック間の隙間や継目から吸い出されるのが認められる。その傾向は護岸下に栗石層、クラッシャーラン層およびフィルター層を設けない場合に顕著である。この吸い出しは護岸内の有効応力が小さくなったときに発生している。
- (3) 土圧の経時変化によれば、ランダウン位置より上方で砂が侵食されランダウン位置より下方で砂は堆積傾向にある。特に静水面からランアップにかけては侵食量が多い。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、波の直接の効果により捲れ上がる傾向は大きい。特に、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フィルター層を設けた場合にはほぼ吸い出しが抑止される。

謝辞：本研究は文部省科学研究費国際学術研究（共同研究）N0.01044137（代表者：前野賀彦）の一環として行われたものであることを付記し深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 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、1987。
- Mei, C. C. and Foda, M. A. (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.