

捨石防波堤全体に作用する波力ならびに 堤体内部への波圧伝播の数値計算

NUMERICAL STUDY ON TOTAL WAVE PRESSURE EXERTED ON A RUBBLE MOUND BREAKWATER AND PORE PRESSURE ATTENUATION

合田良実¹・松本 朗²

Yoshimi GODA and Akira MATSUMOTO

¹フェロー 工博 横浜国立大学名誉教授 株式会社エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²正会員 工修 株式会社テトラ (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

A simplified theory to calculate the total wave pressure exerted on a slope of mound breakwater is proposed. Its applicability is examined by comparing the theory with the results of numerical computations. Discussion is also made on the properties of the pressure attenuation inside the core of breakwater. Throughout this study, it is clarified that the theory will assist the design of a rubble mound breakwater to be built on a soft subsoil by providing an estimate of wave force on the breakwater and the subsoil.

Key Words : *Rubble mound breakwater, total wave pressure, pore pressure, contact pressure, subsoil, slip failure, numerical wave flume*

1. まえがき

捨石式防波堤は沿岸域を波の作用から防御するための最も基本的な構造物の一つである。現在までの耐波安定性は、もっぱら被覆材の被害率あるいは所要質量の観点から議論されてきた。支持力に不安のない砂地盤などでは防波堤全体の波力を吟味する必要性は少ないけれども、防波堤を極めて軟弱な地盤に築造するときには、地盤の円形すべりに対する安全性を照査するために、自重のみならず波力を含めた地盤支持力の検討が必要になる。しかしながら防波堤全体に作用する波力や防波堤内部の間隙水圧に関する知見は数少ない。防波堤全体に働く波力については、鈴木¹⁾が満潮面から上の捨石堤上部に対して広井式を適用し、捨石層間の摩擦力で波力に抵抗するとして、堤体上部の所要幅を設定する方法を提案しているのみである。防波堤内部の間隙水圧については、Oumeraci and Partensky²⁾や Troch *et al.*³⁾がコア内部での間隙水圧の減衰に関する基礎的な知見を与えているけれども、地盤へ作用する波力に関する議論はなされていない。

防波堤全体に作用する波力や防波堤内部の間隙水圧の伝播過程は非常に複雑であるため、基本的には水理模型実験結果および現地データの詳細な解析により解明されるべき問題である。しかし、精度の高い数値計算手法が開発された現時点では、まずこの

手法を用いて波力の様相を探ってみるのが有益であり、本格的研究の必要性を判断する手がかりを与えることになる。

本論文では、防波堤全体に作用する波力と堤体内部への波圧の伝播特性について、数値計算により詳細に検討した。また、間隙水圧と捨石による接触力の、地盤に作用する鉛直力への寄与の評価を試みた。さらに、全体波力についての実用的な簡易理論を提案し、数値計算結果との比較によりその妥当性を検証した。

2. 捨石式防波堤に働く波力の考え方

今、図-1に示す捨石式防波堤の天端から任意の高さの水平面を取り、その面から上の断面(仮想上部断面と呼ぶ)に働く力の釣り合いを考える。天端が十分高く、越波が生じない状況を対象とする。波の峰が沖側斜面にあるとき、沖側斜面にはその面に垂直な波の圧力が働き、その波圧合力は水平分力と鉛直分力を持つ。岸側斜面にはそのときの透過波の水位に応じた波の圧力が作用し、その合力も水平分力と鉛直分力を持つ。仮想上部断面には沖側斜面と岸側斜面に働く水平・鉛直分力の位相を考慮した合力(位相合力と呼ぶ)が作用する。

この外力のうち、水平波力に抵抗するのが仮想水

平面の下の層との捨石間の摩擦力であり、これは仮想上部断面の捨石の重量と位相合力の鉛直分力に比例する。波力は、沖側斜面の被覆石から順に、内部の捨石を押しつけ合う形で伝えられる。鉛直波力は、上層の捨石から下層の捨石へ順に押しつける形（波峰時の下向きの力の場合）で、個々の捨石の自重に付加されて下方へ伝達される。仮想水平面を捨石堤底面の支持地盤表面に取れば、そこには捨石堤の沖側斜面全体に働く水平分力と、岸側斜面全体に働く水平分力との位相合力がせん断力として作用する。また、鉛直方向には捨石堤の自重に加えて沖側斜面全体に働く鉛直分力の位相合力が作用する。地盤の安定性の検討に際しては、これら水平・鉛直分力の双方を考慮しなければならない。

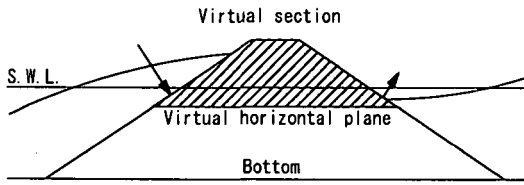


図-1 仮想上部断面に働く波力

3. 防波堤全体に作用する波力の理論式

ここで、図-2に示す防波堤斜面上の水面波形について考える。水面波形は斜面上の入射波と反射波の和で表される。ただし、厳密解は取り扱いが困難であるため、波の最大遡上点Rを通る鉛直面RQを壁面とする部分重複波の波形で近似できると仮定する。斜面上の部分重複波の波形 $\eta(x, t)$ は入射波と仮想的な反射面RQからの反射波の和で表され、微小振幅波の仮定の下で、式(1)で表現される。

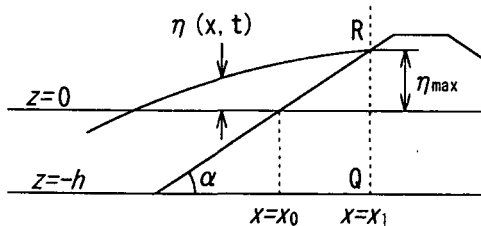


図-2 防波堤斜面上の部分重複波

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= \frac{1}{2} H \cos(\chi - \sigma t) + \frac{1}{2} K_R H \cos(\chi + \sigma t) \\ &= \frac{1}{2} H [R_1 \cos \chi \cos \sigma t + R_2 \sin \chi \sin \sigma t] \\ &= \frac{1}{2} H \Omega \cos \left[\frac{2\pi}{T} (t - \tau) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$\chi = k(x - x_1) \quad (2)$$

$$R_1 = 1 + K_R \quad (3)$$

$$R_2 = 1 - K_R \quad (4)$$

$$\Omega = \sqrt{1 + 2K_R \cos 2k(x - x_1) + K_R^2} \quad (5)$$

である。また、 τ は位相遅れ時間であり式(6)で算定する。

$$\tau = \frac{T}{2\pi} \tan^{-1} \left[\frac{(1 - K_R) \sin k'(x - x_1)}{(1 + K_R) \cos k'(x - x_1)} \right] \quad (6)$$

ここに H は入射波高、 K_R は反射率、 T は周期、 σ は角周波数、 k は防波堤法先の水深に対応した波数である。 k' は法面上での水深変化にともなう波速の減少効果を考慮するために導入した修正波数である。斜面上の圧力分布は、式(1)を式(7)に代入して算定され、得られた圧力分布を $z = -h$ から $\eta(t)$ まで積分して全体波力を得る。なお、斜面上の波動運動については幾つかの理論的研究があり、たとえば長波近似の下では理論解が求められている。しかし、実際に波形や波力を計算するにはベッセル関数その他の特殊関数を用いなければならず、計算が煩雑である。本研究では実務に供する簡便な計算手法を提案するという観点から上述した定式化を採用している。

$$p(x, z) = \begin{cases} \rho g [\eta(x) - (x - x_0) \tan \alpha] & : 0 \leq z \leq \eta_{\max} \\ \rho g \eta(x) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} & : -h \leq z < 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに p は圧力、 ρ は流体の密度、 g は重力の加速度である。

4. 数値計算結果

(1) 計算方法

計算には数値波動水路 (CADMAS-SURF)⁴⁾を用いた。基礎方程式は二次元非圧縮性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した運動方程式である。

(2) 計算条件

図-3に対象とした捨石防波堤の断面図を示す。計算領域は、長さ1350m、高さ22.5mであり、全域にわたって $h = 10.906$ mの一律水深とした。水平・鉛直方向の格子間隔は、それぞれ1.0m、0.25mとした。防波堤近傍および内部において圧力と水位変動を計算するとともに、防波堤から沖側に約1.7Lの2地点における水位変動の計算結果に合田ら⁵⁾の方法を適用し反射率を求めた。ここに L は後述するCase1の周期に対応する進行波の波長である。

作用波は規則波とし表-1に示す2ケースについて検討した。防波堤各部分の空隙率 γ_v 、抵抗係数 C_D 、慣性係数 C_M は表-2に示す値を用いた。ここで、トラポッド被覆層の値は柳山・今井⁶⁾にならった。コア材(石材)の値は、防波堤の透過波高に関する予備実験の結果から決定した。フィルター層の値は、

被覆層とコア材との中間的な値を用いた。

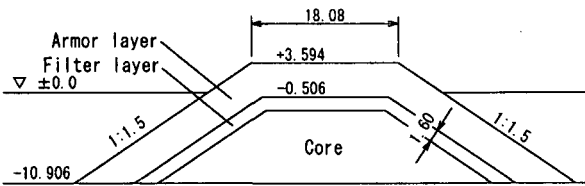


図-3 検討対象防波堤断面図 (単位: m)

表-1 計算条件

Case	h (m)	T (s)	H (m)	L (m)
1	10.906	14.0	3.0	139.3
2		10.0		95.8

表-2 空隙率, 抵抗係数および慣性係数

防波堤構成材	γ_v	C_D	C_M
テトラポッド被覆層	0.50	0.9	1.5
フィルター層	0.44	2.0	2.4
コア材	0.40	5.0	6.0

図-4 に予備実験の実験断面を示す。石材のみから構成される傾斜式防波堤に, $T=2.13s$, $H=14.0cm$ の規則波を作用させ, 透過波高を測定した。図-5 に実験および数値計算による透過波の時系列を示す。数値計算は, C_D , C_M を変化させた2ケースについて実施した。榑山・鈴木⁷⁾が比較的厚さの小さい混成堤マウンドに提案した値 ($C_D=1.0$, $C_M=1.2$) を用いた場合には透過波高は実験値よりもかなり大きくなった。しかし, $C_D=5.0$, $C_M=6.0$ とすることで計算波形は実測波形に近づいた。透過波高自体は実験値を若干上回っているが, C_D , C_M をさらに大きくした場合には, 本計算において計算が不安定となったため, 表-2 に示す値を用いることとした。

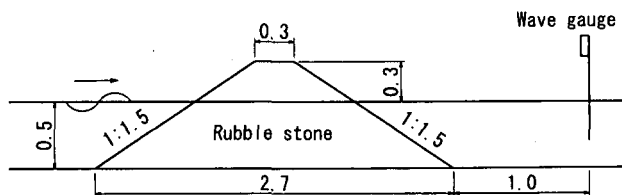


図-4 予備実験断面図 (単位: m)

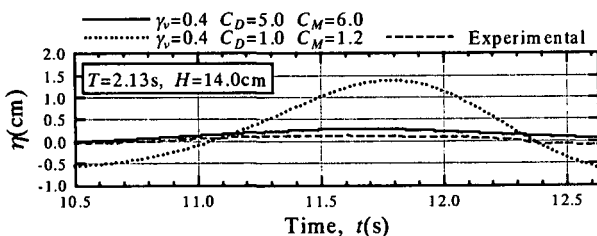


図-5 予備実験および再現計算の結果

(3) 防波堤内部の波圧の伝播状況

図-6 に $x=x_0$ ($=739.5m$) における圧力変動の計算結果の鉛直位置による差異を示す。ここで, $x=x_0$

は静水面と沖側斜面の交点の水平座標である。

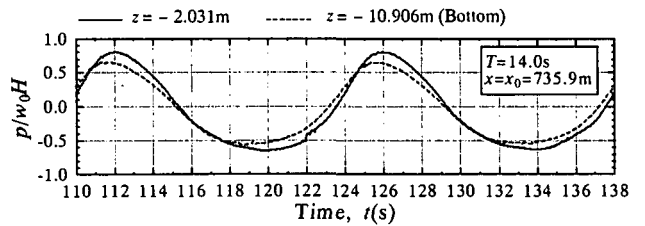


図-6 圧力変動の計算結果 (Case 1)

また図-7 は, $t=118\sim 132s$ の一周期における圧力のピーク値の空間分布を水位のピーク値とともに示したものである。図-6, 7 から, 波の作用は堤体内部にも浸透しており, 底面にもそれほど減少せずに伝わっていることがわかる。すなわち, 捨石で構成した傾斜堤であっても, 波の作用は堤体内部で十分に吸収されずに底面まで伝わり, その結果として地盤にもかなりの波圧が作用する。図-6 によれば, $x=x_0$ における無次元化された圧力のピーク値 p/w_0H は $z=-2.031m$ で 0.80 程度であるが, 底面においても 0.65 程度の値が保持されている。

防波堤内部の間隙水圧の減衰傾向をより詳細に検討するために, 式 (8) で定義される波圧減衰係数について検討した。

$$C_p = \frac{p}{\rho g \eta^*} \quad (8)$$

ここに η^* は理論による水位変動のピーク値であり, 式 (1) の時間項を省略して求められる。 η^* の算定にあたっては, 防波堤の沖側 2 地点における水位変動から求めた反射率 $K_R=0.46$ を用いた。図-8 に解析結果を示す。図には式 (9) で定義される波圧係数 K_p を併記した。

$$K_p = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (9)$$

この図-8 から, C_p の値は被覆層内では K_p の値よりも若干大きい, コア内部では波の進行にともなって, 徐々に減衰しているのがわかる。

次に図-9 に, 防波堤コア内部における間隙水圧の減少の状況を, 波圧減衰係数の水平方向分布として示す。間隙水圧の減衰状況は静水面からの鉛直距離によって異なるが, ここでは図-8 に示した 5 測線における計算結果の平均値を用いた。図中で, 水平距離は波長, 波圧減衰係数は計算値を式 (10) に示した関数形で近似した場合の $x=x_2$ における値 C_{p2} で規格化されている。

$$C_p / C_{p2} = \exp[-a(x-x_2)/L] \quad (10)$$

ここで水平座標の始点 x_2 は $x_2=745.5m$ としており, 係数 a が防波堤内部での間隙水圧の減衰の割合を表す。Case 2 では, 反射率の解析結果に基づき, $K_R=0.26$ としている。

図-9 によれば, 水平距離を波長で無次元化して

表した場合には、規格化された波圧減衰係数は波の周期にかかわらず、ほぼ1本の線で表示できることがわかる。すなわち、防波堤内部の同一距離を波が進行する場合には、短周期の波は間隙水圧の減少が、長周期の波よりも著しいことになる。

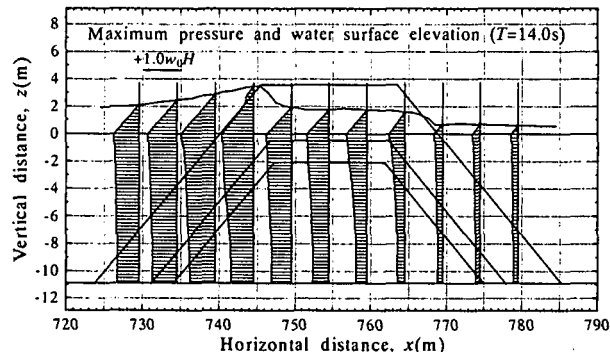


図-7 圧力および水位のピーク値の空間分布 (Case 1)

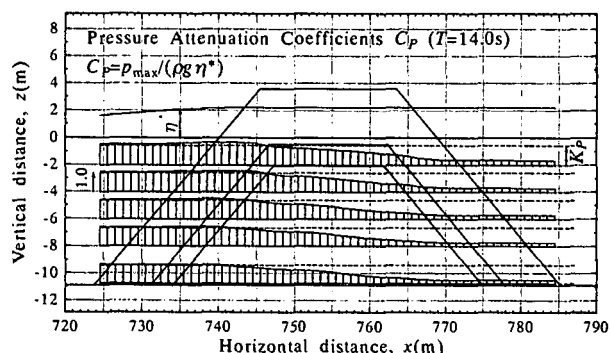


図-8 波圧減衰係数の空間分布 (Case 1)

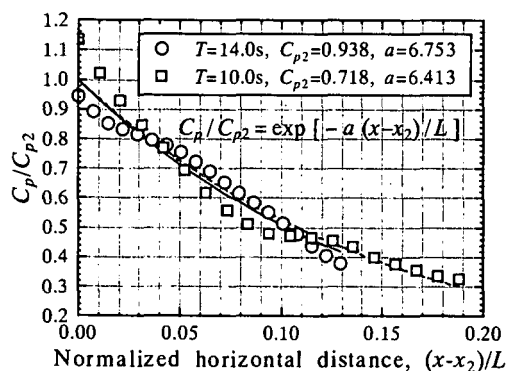


図-9 防波堤内部の間隙水圧の減少

(4) 沖側斜面上に作用する全波力

a) 防波堤沖側斜面上の水位変動

図-10は、数値計算と簡易理論による防波堤沖側斜面上の水位波形を示したものである。数値計算は非線形のNavier-Stokes方程式、理論値は線形理論に基づいているため、簡易理論による水位のピーク値は、数値計算によるものよりも若干小さくなる。

斜面上での波速の減少効果を模擬するために導入した修正波数 $k'=1.6k$ の効果により、各地点における水位のピーク出現時刻は数値計算と理論とでほぼ一致している。斜面上の波速に対する修正は不透

斜面であれば厳密解が得られるが、それでは透過性の影響が無視される。しかしこうした修正波数の導入により、本論文で提案した簡易理論でも数値計算結果にほぼ合致する全波力を得ることができる。

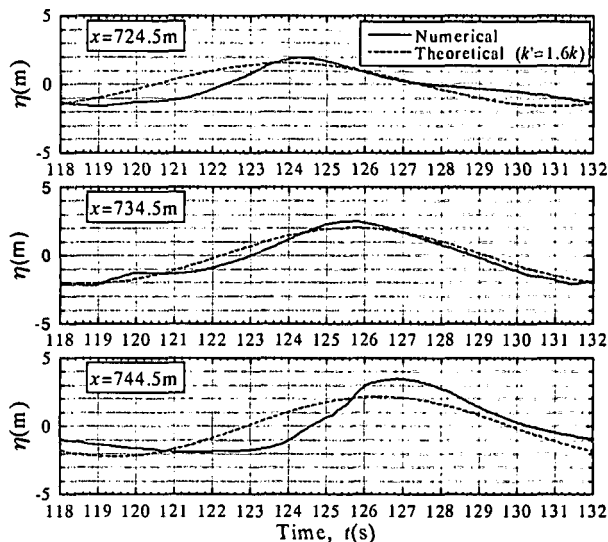


図-10 防波堤沖側斜面上の水位変動 (Case 1)

b) 防波堤沖側斜面上に作用する波圧の最大値

数値計算と簡易理論による防波堤沖側斜面上の最大波圧の分布を図-11に示す。理論式による波圧分布は、斜面上の水位変動を式(7)に適用して算定される。ここでは、図-10に示した水位変動の理論値と計算値の双方について検討した。水位変動の理論値による波圧分布は、静水面よりも下側では数値計算による波圧分布にほぼ一致しているが、静水面よりも上側では数値計算による値よりも小さい。これは、先に述べた波の非線形性の影響であると考えられる。数値計算で得られた水位変動を式(7)に適用して得られる波圧分布は、斜面全域に作用する波圧を数値計算で直接求めた結果よりも若干大きくなる。数値計算による波圧分布は被覆層の空隙率の影響が考慮されているが、波圧算定の理論式(式(7))では空隙率の影響を考慮できない。このため、こうした被覆層の空隙率の影響が出たものと考えられる。

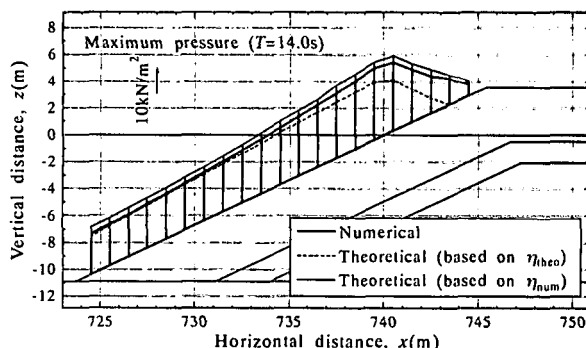


図-11 防波堤沖側斜面上の最大波圧分布 (Case 1)

c) 全体波力の推定

図-12に簡易理論と数値計算による水平力・鉛直力の時系列を示す。水平力は波進行方向、鉛直力は

は上向きを正としている。理論による波形の位相は、 $x = x_1$ 地点における水位のピーク時刻が数値計算による水位のピーク時刻に一致するようにずらしている。Case 2 では修正波数 k' として $k' = 1.2k$ を用いた。数値計算と簡易理論による波力波形はよく一致しており、水位変動の理論値を用いた場合には、波力のピーク値の数値計算による値との誤差が、Case 1, Case 2 でそれぞれ -8.2% , -0.1% となった。一方、水位変動の計算値を用いた場合には、それぞれ 11.2% , 11.0% となった。数値計算による水位変動を用いた場合には波力が若干過大評価されている。この傾向は、前項で述べた斜面上の最大波圧分布の傾向と符合するものである。

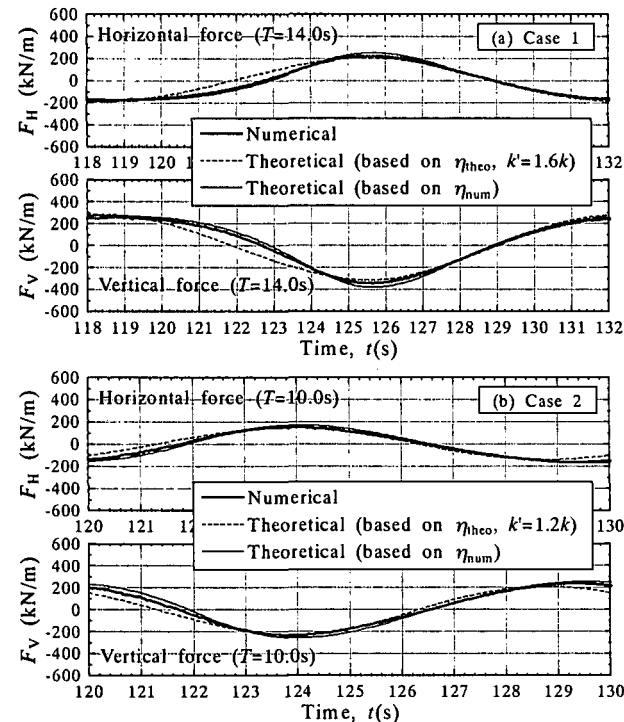


図-12 防波堤沖側斜面に作用する水平・鉛直波力

以上の結果から、提案した簡易理論によって数値計算結果にほぼ合致する全体波力を算定できることが明らかとなった。しかし上に述べた検討では、水位変動の理論値を求める際に数値計算結果に基づく防波堤の反射率を用いている。提案した理論式を実務で用いる場合には、そのような精度の高い反射率の見積りが必ずしも可能ではない。したがって、実用的な観点からは、防波堤の反射率としておおよその値が用いられた場合でも、算定される全体波力が実用に耐えうる精度を有することが要求される。

図-13 は Case 2 の条件に対して、反射率を変化させて計算した簡易理論の水位変動から得られる波力のピーク値と、数値計算による波力との誤差を示すものである。検討に用いた反射率の範囲は、合田⁹⁾が異形消波ブロック斜面に対して提案している値を参考に決定した。反射率の増加とともに算定誤差が増大しているが、反射率を 20%、50% と見積った場合でも誤差はそれぞれ -3% 、 13% 程度となっており、

許容される範囲内に収まっていると考えられる。これは提案した簡易理論の安定性を示すものである。

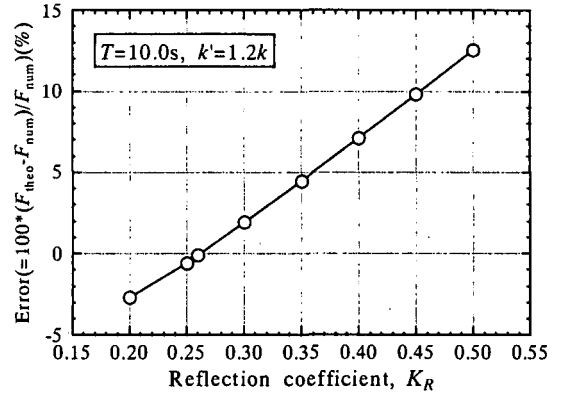


図-13 波力の算定誤差に及ぼす反射率の推定値の影響

5. 地盤に作用する鉛直力に及ぼす間隙水圧と接触圧の影響

図-14 は、地盤に作用する間隙水圧と捨石による接触圧の伝播過程を模式的に示したものである。捨石堤をさらに詳しく解析するには、個々の捨石を弾性体としてモデル化し、波力の伝達過程を陽的に取り扱うべきである。しかしここでは、前章までに得られた結果から、地盤に作用する鉛直力に対して、間隙水圧と接触圧がそれぞれ寄与する割合を概略的に考察してみる。

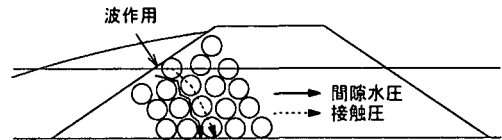


図-14 地盤に作用する間隙水圧と接触圧

接触圧による合力は、地盤に作用する鉛直力から間隙水圧による力を差し引くことによって求められる。間隙水圧による合力は、防波堤底面における間隙水圧を捨石の面的開口率を考慮して積分することにより求められる。もし捨石の形状が立方体であり、それらが整然と配置されているとすれば、防波堤底面の捨石の面的開口率 v_a は以下の式で与えられる。

$$v_a = 1 - (1 - \gamma_v)^{2/3} \quad (11)$$

ここに γ_v は空隙率である。式 (11) を表-2 に示した空隙率に適用すると、防波堤各部分の面的開口率として表-3 の値を得る。しかしながら、個々の捨石の形状は複雑であり、ばらつきも大きいことから、間隙水圧が作用する面積は表-3 による値よりもかなり大きいものと考えられる。現時点では、面的開口率に関する十分な見解が得られていないため、ここでは表-3 の値の 1.5 および 2.0 倍の値を仮定し、表-4 に示す面的開口率を用いて試算を行った。

図-15 に、Case 1 における全鉛直力 F_v 、間隙水圧

による分力 F_P および接触圧による分力 F_C の計算結果を示す。図中で v_{aA} , v_{aF} , および v_{aC} は、それぞれ被覆層、フィルター層、コア材の面的開口率を表す。面的開口率の増加に従い、間隙水圧の寄与分は大きくなり、接触圧の寄与分は小さくなる。ここで注意すべきは、間隙水圧による分力と接触圧による分力の間には位相差が存在することである。ある時間帯にはそれらは逆位相となっている。

表-3 式(11)による面的開口率

防波堤構成材	空隙率 γ_v	面的開口率 v_a
テトラポッド被覆層	0.50	0.37
フィルター層	0.44	0.32
コア材	0.40	0.29

表-4 検討に用いた面的開口率

防波堤構成材	面的開口率 v_a	
	Case A	Case B
テトラポッド被覆層	0.56	0.74
フィルター層	0.48	0.64
コア材	0.44	0.58

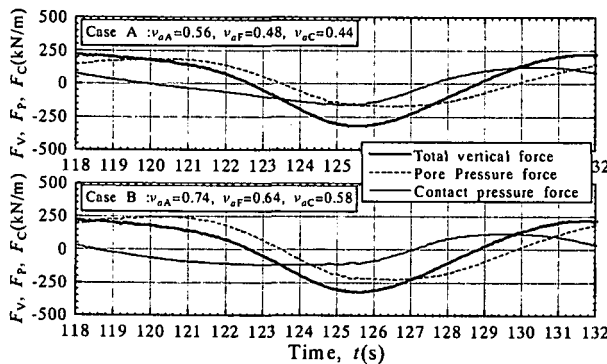


図-15 全鉛直力と間隙水圧、接触圧による分力

表-5 に全鉛直力 F_{Vmax} に対する間隙水圧による分力 F_P と接触圧による分力 F_C の割合を示す。表中で ($F_V = F_{Vmax}$) は、全鉛直力が最大値を取る時刻を示している。面的開口率として Case A の値を用いた場合には、全鉛直力に対する間隙水圧と接触圧の寄与分は等しい。Case B の値を用いた場合には、間隙水圧の寄与は接触圧の寄与の2倍となる。

表-5 全鉛直力に対する間隙水圧と接触圧の割合

Case	F_{Vmax} (kN/m)	F_P ($F_V = F_{Vmax}$) (kN/m)	F_C ($F_V = F_{Vmax}$) (kN/m)	F_P / F_{Vmax}	F_C / F_{Vmax}
A	-319.1	-160.5	-158.7	0.50	0.50
B		-212.1	-107.1	0.66	0.34

防波堤の沖側斜面に作用する波力の鉛直成分は、間隙水圧と捨石の接触圧として地盤に伝達される。一方、水平成分は接触圧のみによって伝達される。したがって、水平力の最大値 F_{Hmax} と、接触圧によ

る鉛直力の最大値 F_{Cmax} は同じオーダーとなる。図-12 に示した Case 1 の数値計算による水平力の最大値は 228.7 kN/m であった。図-15 に示した接触圧による分力の最大値は、-160.1 kN/m (Case A) および -118.7 kN/m (Case B) である。このことから、仮定した面的開口率としては、Case A の値の方が、現実の値に近いものと推定される。

6. むすび

本研究で得られた成果をまとめると以下のようになる。

1. 波の作用は堤体内部にも浸透しており、底面にもそれほど減少せずに伝播し、地盤にもかなりの波圧が作用することが明らかとなった。
2. 防波堤内部の同一距離を波が進行する場合には、短周期の波は間隙水圧の減少が、長周期の波よりも著しい。
3. 斜面上での波速の減少効果を考慮して波数を補正し全体波力を算定したところ、簡易理論による値と数値計算による結果はよく一致し、誤差は10%以内であった。また反射率として概略の値を用いた場合にも、提案した理論式は実用上問題のない精度で波力を算定できることがわかった。
4. 以上により、提案した簡易理論式は軟弱地盤上に築造される捨石防波堤の設計に有用であると結論される。また、地盤に作用する鉛直力に及ぼす間隙水圧と接触圧の影響についても知見が得られた。

参考文献

- 1) 鈴木雅次：港工学，常磐書房，pp.295-297, 1932.
- 2) Oumeraci, H. and Partenscky, H. W.: Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwaters, *Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engrg.*, ASCE, Delft, pp.1334-1347, 1990.
- 3) Troch, P., De Rouck, J. and Burcharth, H. F.: Experimental study and numerical modeling of wave induced pore pressure attenuation inside a rubble mound breakwater, *Proc. 28th Int. Conf. Coastal Engrg.*, ASCE, Cardiff, pp.1607-1619, 2002.
- 4) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12, 296p., 2001.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 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, 24p., 1976.
- 6) 榊山 勉・今井澄雄：消波護岸の越波に関する数値シミュレーション，*海岸工学論文集*，第43巻，pp.696-700, 1996.
- 7) 榊山 勉・鈴木一広：数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸出し評価，*海岸工学論文集*，第45巻，pp.566-570, 1998.
- 8) 合田良実：(増補改訂) 港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，333p., 1990.