

(40) 透過性防波堤内部における物質輸送機構の実験的研究

An Experimental Studies on Mass Transfer Mechanism In Permeable Breakwater

熊倉 孝雄*, 塩澤 孝洋**, 長岡 裕***

Takao Kumakura*, Takahiro Shiozawa**, Hiroshi Nagaoka***

ABSTRACT ; Biofilms attached on permeable structures in coastal areas can purify the water. It's efficiency is dependent on mass transfer in permeable structures. Mass transfer mechanism in a permeable breakwater was studied in an experimental channel which have a permeable breakwater composed of 7.5cm-diameter - styrene-balls.

Velocity fluctuation in the permeable breakwater was measured by a Laser Doppler Velocimeter and was found to have both wave components and turbulent components. Dispersion coefficient in the breakwater was measured using a chloride-tracer method and was divided into dispersion component and diffusion component. The dispersion coefficient was expressed as the product of root-mean-square-velocity of the wave motion and the void scale while the diffusion coefficient was expressed as the product of turbulence and the void scale.

KEYWORD ; mass transfer , dispersion , turbulence , permeable breakwater , self-purification

1. はじめに

本来、透過性防波堤に要求される機能は波・流れ制御機能であり、周辺海域全般を静穏に保ち港湾の諸施設を保護し、船舶の航行、荷役の円滑化等、作業の効率化を図ることであったが、近年、水域の多目的利用、環境保全への配慮等により良好な水質環境の創出が求められ、防波堤に新たな機能として水質浄化の機能が要求されるようになった。透過性防波堤の水質浄化能とは、主に構造物の表面や内部に付着した微生物により水中の有機物を分解、浄化するものであるが、透過性防波堤を利用した水質浄化を考える上では、海洋の動的状態、付着生物の基質の除去特性の把握が必要であるのと同時に、付着微生物膜上の乱れによる生物膜深部への基質輸送¹⁾、および波動による構造物内部への基質の輸送状態を把握することも重要である。

現在、捨て石や消波ブロックで構成された捨て石堤や根固工、消波工による波力減衰効果についての研究や付着微生物（微生物膜）の浄化能力に関する研究が多く行われている。透過性防波堤内部の物質輸送速度の測定方法および流速測定についてはすでにいくつかの報告がある。塩澤、柴崎ら²⁾は堤内部における分散係数と流速の測定を行い、塩澤、久保田ら³⁾は堤内の分散係数が流速変動の2乗平均値の平方根と比例関係にあることを指摘した。本研究では、物質輸送機構と流れ構造との関係について詳細に検討し、定量化することを目的に、流速変動を波成分と乱れ成分とに分離し、分散係数を往復流による分散成分と乱れによる拡散成分とで表現することにより、透過性防波堤内部における物質輸送機構の解明を試みた。

* 武蔵工業大学大学院 (Graduate School of Civil Engineering, Musashi Institute of Technology)

** 静岡県庁 (The Shizuoka Prefectural Office)

*** 武蔵工業大学工学部土木工学科 (Department of Civil Engineering, Musashi Institute of Technology)

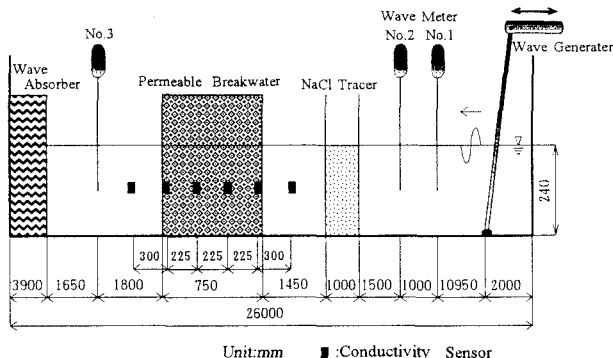


Fig.1 Schematic view of experimental setup .

2. 実験装置および実験方法

2. 1 実験水路

実験には、幅0.6m×高さ1.0m×長さ26.0mの造波水路を用いた。Fig.1に示すように、造波装置より15.9mの位置に直径7.5cmの発泡スチロール球を560個積み上げたものを透過性防波堤として、水深24cmのもとで測定を行った。透過性防波堤の空隙率および空隙スケール（堤内の空隙体積を堤表面積で除した値）はそれぞれ47.6%、1.07cmであった。

透過性防波堤の概要および導電率センサーの設置位置、および流速の測定位置をFig.2に示す。また図中のⅠ～Ⅴの区域は、分散係数の算出区域を示す。

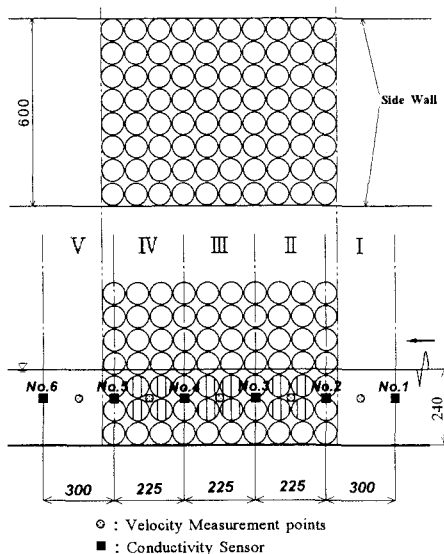


Fig.2 Schematic view of the permeable breakwater .

2. 2 実験条件

波動条件をTable1に示す。波形の測定は、容量式波高計（計測技研㈱：型式名CH-303）を通して電圧化したものをAD変換プログラム（サンプル数2000、周波数100Hz）を用いて電圧を波高に換算し、ゼロアップクロス法によりサンプリング20秒間の平均周期、平均波高を求めた。なお、波高計センサーNo.1とNo.2の水位変動のスペクトルから反射率を求め⁴⁾、入射波と反射波を算出した。波速は上流側の2つの波形の山のずれから算出し、透過率は透過波高を入射波高で除した値である。

2. 3 導電率測定装置

導電率測定用のセンサーは2枚の銅板（縦3cm×横3cm×厚さ0.1cm）と、被覆線によって自作した。

Table 1 Experimental conditions .

Case	T (s)	Hi (m)	Hr (m)	Ht (m)	C (m/s)	KT (%)	H/L	h/L
1	1.76	0.062	0.044	0.030	1.69	48.4	0.0345	0.0807
2	3.03	0.014	0.010	0.010	1.69	72.8	0.0040	0.0469
3	2.17	0.022	0.020	0.012	1.91	54.7	0.0083	0.0579
4	1.81	0.069	0.065	0.021	1.75	30.2	0.0326	0.0758
5	1.93	0.114	0.056	0.036	1.81	31.6	0.0393	0.0687
6	1.49	0.069	0.066	0.023	1.73	33.4	0.0452	0.0931
7	1.12	0.141	0.083	0.037	1.79	26.3	0.0966	0.1192
8	2.53	0.028	0.020	0.014	1.82	50.6	0.0100	0.0521
9	1.75	0.060	0.057	0.024	1.70	30.2	0.0377	0.0607
10	2.44	0.030	0.023	0.015	1.69	49.7	0.0126	0.0682

T:Period (s) Hi:Incident Wave Height (m)
Hr:Reflected Wave Height Ht:Transmitted Wave Height (m)
C:Wave Velocity (m/s) KT:Transmission Coefficient (%)
H/L:Wave Steepness h/L: Relative Water Depth

導電率測定センサーはFig.2に示すように、堤前部に2箇所、堤内2箇所、堤後部に2箇所と計6箇所設置した。

実験に使用した導電率測定装置およびシステムをFig.3に示す。導電率測定装置には導電率計

(東亜電波工業㈱：CM-8ET)を使用し、リレー回路を用い測定の自動化を行った。

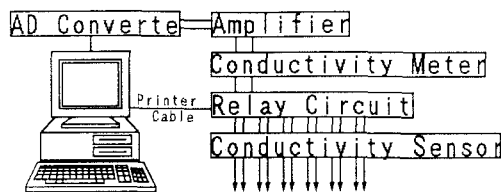


Fig.3 The system for conductivity measurement .

2. 4 物質輸送測定実験

実験には、エタノールで比重調整した100g/lの塩水1.5l(水1l, NaCl100g, エタノール500ml)を堤上流側に設けた柵の中に投入し、水路内の塩水濃度が粗密を生じないように柵の中でよくかき混ぜた後、波を起こし、柵に波が到達する直前に柵を開けた。その後各センサーにおける導電率を3秒間隔で測定した。また、測定前後には各センサーの位置における導電率を電導度セル(東亜電波工業㈱：CG-201PL)により測定し、各センサー出力と電導度セルの出力との関係を実験毎に確認し補正を行った。導電率は3回以上同じ条件で測定を行い、初期水路内水の導電率(C_0)を0、水路内に投入したトレーサの導電率(C_s)と初期水路内水の導電率の差を1とし無次元化した後、平均化した。各実験の無次元化の式を式(1)に示す。ただし、 $\hat{C}_n$ は無次元化後の値である。

$$\hat{C}_n = \frac{C_n - C_0}{C_s - C_0} \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots, f) \quad (1)$$

2. 5 分散係数の計算方法

堤防内の上流から下流方向への物質輸送現象は一次元フィック型分散方程式(式(2))を用いて表すことができる。

$$\frac{\partial c(t, x)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c(t, x)}{\partial x^2} \quad (2)$$

ただし、 $c(t, x)$: 濃度, x : 距離, t : 時間, K : 分散係数である。

上流側に設置されたセンサーの地点 $x=0$ における濃度変化が $f(t)$ で与えられる場合、初期条件及び境界条件は、

$$c(0, x) = 0 \quad (3)$$

$$c(t, 0) = f(t) \quad (4)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} c(t, x) = 0 \quad (5)$$

となり、この条件の下で式(2)を解くと、

$$c(t, L) = \frac{L}{2\sqrt{\pi K}} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{L^2}{4K(t-\tau)}\right] d\tau \quad (6)$$

を得る。ここで K を堤内部の分散係数、 L を上流側センサーと下流側センサー間の距離と考え、この式の $f(\tau)$ に上流側センサーの出力を与えると式(6)の左辺は下流側センサーの出力を表わすことになる。フィッティングはセンサーNo.1～No.6の出力を用い、Fig.2に示すⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの各区域における分散係数を算出した。各センサー間の距離は堤防内では22.5cm、堤防外では30cmである。なお、(6)式は分散係数の

等しい領域が無限に広がっているという条件の下でのみ成立するが、本実験条件においては、I～Vの各区域における分散係数の値がなだらかに分布していると考えられ、分散係数の値が全領域で等しいと仮定した場合と比較してそれ程誤差を生じないと考えられること、および、特に $c(t,x)$ が0から上昇する初期の時間領域においては $c(t,x)$ の上昇曲線に大きく影響を与えるのは $x=0 \sim x=L$ の全区域における分散係数の値であると考えられることから、(6)式を本実験の測定値にフィッティングして各領域の分散係数の値を求めることとした。

分散係数を算出するにあたって、導電率データのサンプリング間隔補正のために、測定時間間隔が短く、導電率がなだらかに変化していることから、データ間を100分割しデータの線形補間を行った。また、上流側と下流側の導電率の値が同値、または逆転する場合は、分散係数は算出不能とした。

2. 6 流速の測定および

流速の成分分離

流速の測定には、レーザードップラー流速計 (Dantec社製後方散乱型光ファイバーレーザードップラー流速計) を用い、流下方向の水平方向流速と、流速変動の2乗平均値の平方根の測定を行った。測定は周波数100Hz、サンプル数4096で、導電率測定実験と同じ波動条件の下で行い、その後パーソナルコンピュータを用いてスペクトル解析を行った。

流速の測定位置は、分散係数を算出した区域 (I, II, III, IV, V) の中央部で、Fig.4に示すように水路底面より120 mm、水路壁面より75mm (流下方向に筒抜けた疎通領域) および112.5mm (流動を阻害された遮蔽領域) の位置とした。図中の縞模様の球は測定の際にレーザーの乱反射を防ぐために黒色に着色したものである。

スペクトル解析にはFFT法を用い、流速変動を波成分と乱れ成分とに分離した。FFTをした結果、すべての実験でFig.5に示すように、堤内部で $25\text{cm}^2/\text{s}$ 、堤外部で $10\text{cm}^2/\text{s}$ のパワースペクトルを目安に、基本周波数からおおよそ4倍周波数までの成分が検出できた。よってそれ以上に卓越した周波数成分を波動によるパワースペクトル、それ以外の周波数成分を乱れによるパワースペクトルとして分離した。

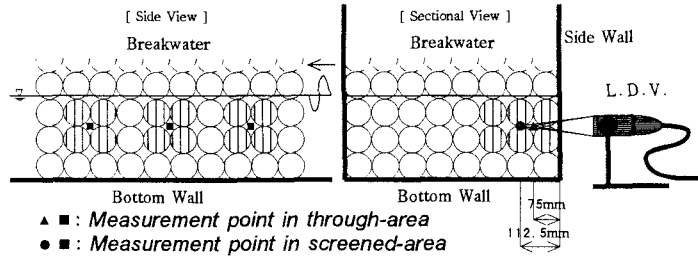


Fig.4 Measurement points of velocity

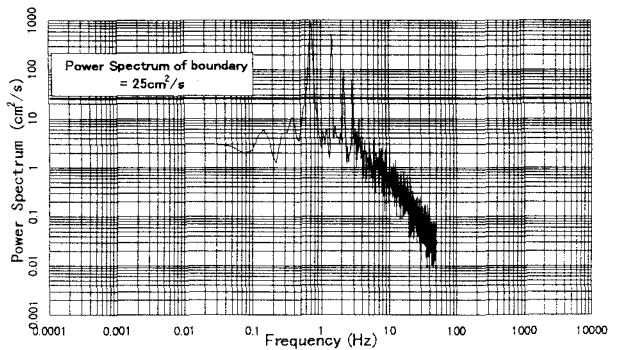


Fig.5 Power Spectrum of Velocity(Case6-Area II-Through-Area)

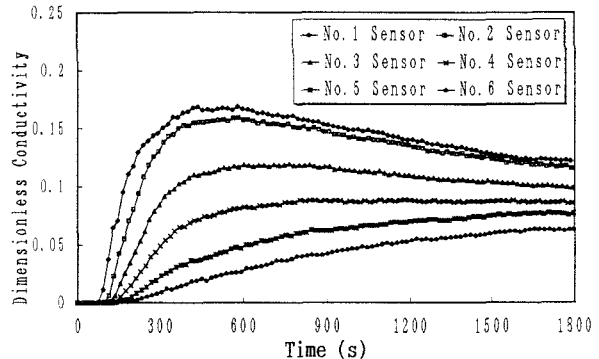


Fig.6 Conductivity variation in the permeable breakwater(Case7).

3. 実験結果

(1) 導電率の測定結果

導電率の経時変化をFig.6に示す。導電率は上流側センサーから順に上昇し、十分な経過時間後には全センサーによる測定値が一定値に近づくことから、堤内部において物質の拡散が偏りなく行われていることがわかる。

導電率測定の際に色素（インク）を堤上流側に投入して堤付近の分散の様子を観察した結果、堤上流側、下流側共に密度流による物質輸送は存在せず、また、移流等による流れの影響はないものと考えられる。

(2) 流速の測定結果

(a) 水平流速の測定結果

流速の測定結果の一部をFig.7に示す。入射波、透過波の流速変動と堤防内部の流速変動を比較すると、堤内部では約10Hz程度の高周波成分の乱れが存在するのに対して、入射波、透過波にはこれらの乱れがあまりみられない。また堤内部では、透過距離に応じて流速が減衰していくことが確認できた。

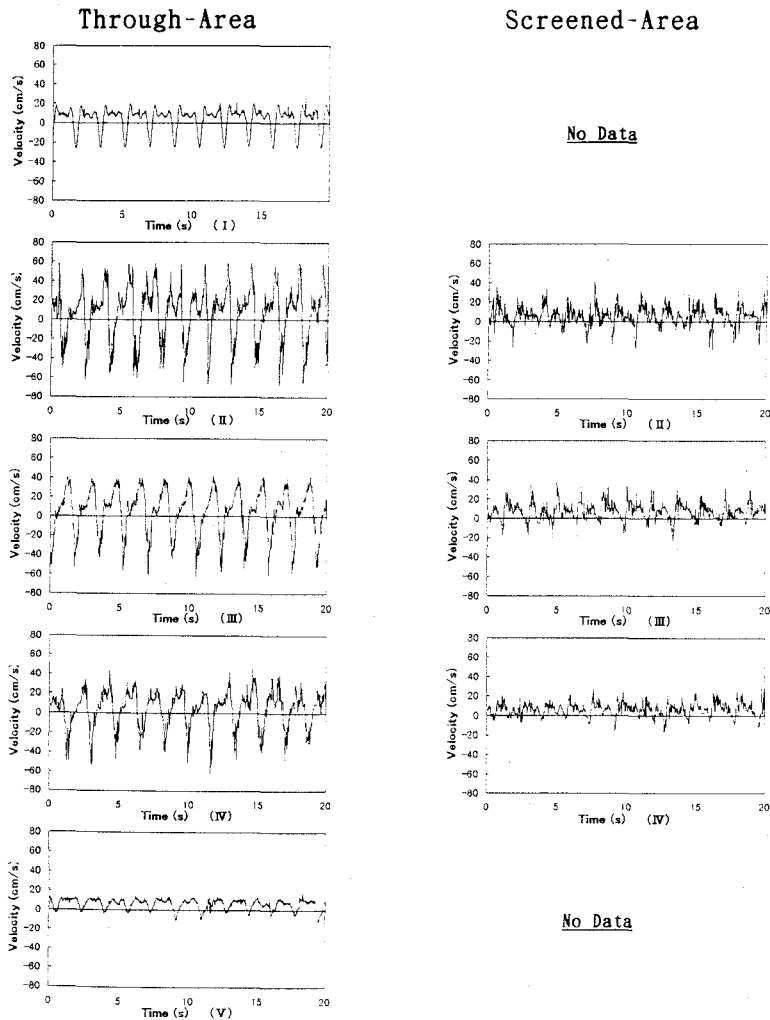
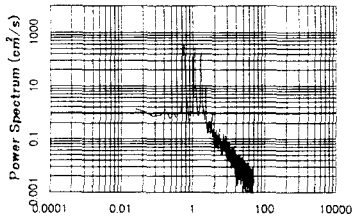
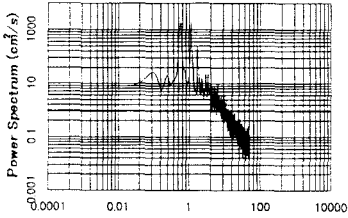


Fig.7 Data of velocity fluctuation in the permeable breakwater(Case7).

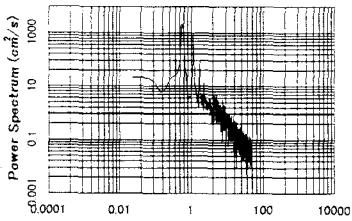
Through-Area



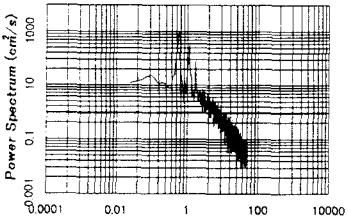
Frequency (Hz) < I >



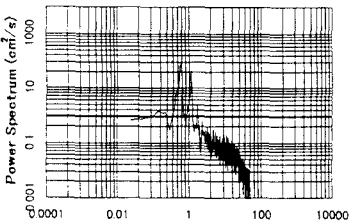
Frequency (Hz) < II >



Frequency (Hz) < III >



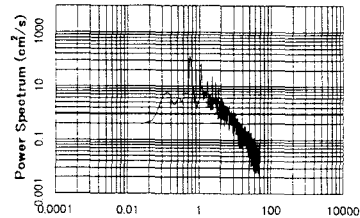
Frequency (Hz) < IV >



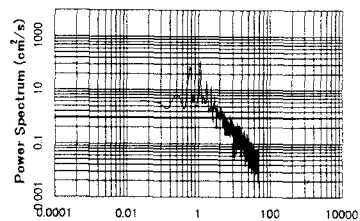
Frequency (Hz) < V >

Screened-Area

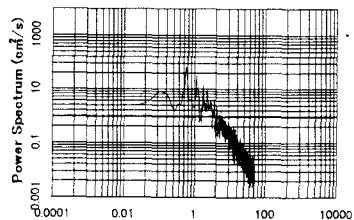
No Data



Frequency (Hz) < II >



Frequency (Hz) < III >



Frequency (Hz) < IV >

No Data

Fig.8 Spectrum of velocity fluctuation in the permeable breakwater(Case7).

(2) スペクトル解析結果

スペクトル解析結果の一部をFig.8に示す。疎通領域の位置におけるスペクトル解析結果には、0.5Hz～3Hz付近において波動成分と考えられるピークがある。Fig.9に砕波下での流速のパワースペクトルの模式図を示すが、図中のピークは波一波非線型干渉に伴うエネルギーの伝達によるピークであり、このピークより高周波域にはエネルギー平衡（飽和）域、乱れ成分による領域が順次現れる^{5) 6)}。この図と本実験におけるスペクトル解析結果が類似していることから、堤内部では砕波下における現象と同等に振動成分を有した流れがカスケード過程によりエネルギーを散逸させていると考えられる。

(3) $\sqrt{u'^2}$ の測定結果

流速変動の2乗平均値の平方根を各区域ごとに平均化した結果をFig.10に示す。ただし、透過距離は、堤後面からの距離を発泡スチロール球の直径($D=75\text{mm}$)で除して無次元化し、堤内部の領域では流速変動の2乗平均値の平方根に空隙率を乗じた。疎通領域では堤の透過距離に応じて値は徐々に減少し、遮蔽領域では堤に達すると値が低下し、堤内部では一定になる傾向がある。したがって波の進行方向に障害がある様な空隙形状をした場所は、流速の波動成分が顕著に現れない乱れの多い場所であると言える。

(4) 流速の成分分離結果

流速変動の2乗平均値の平方根を波成分と乱れ成分とに成分分離した結果をFig.11に示す。

堤内部では、疎通領域における流速の波動成分が、透過距離に応じて波動エネルギーの減衰とともに徐々に減少している。乱れ成分は疎通領域、遮蔽領域に関わらず堤内全域で均一に生じており、等方的な乱流場であるといえる。よって、堤内部では一方向の流速変動により乱れの測定をすることが妥当であることが示されている。

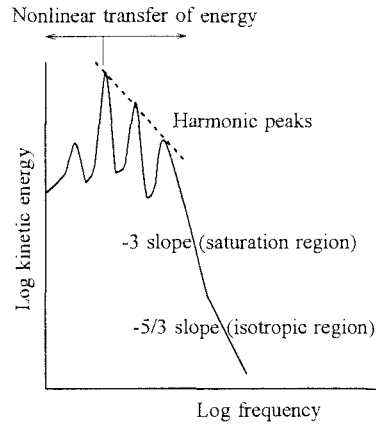


Fig.9 Power spectrum of velocity under spilling breakers⁵⁾

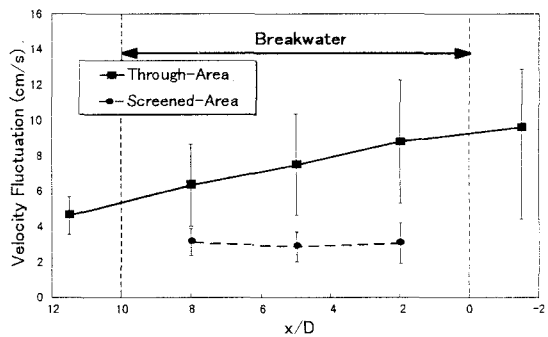


Fig.10 Relationship between dimensionless distance (x/D) and velocity fluctuation.

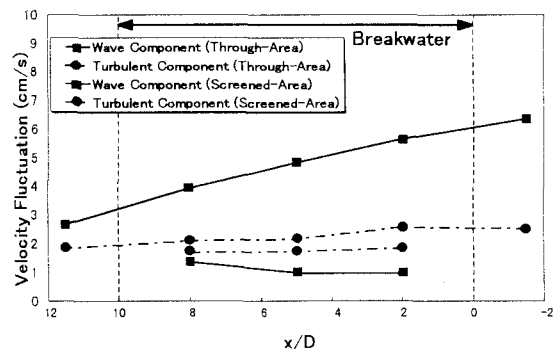


Fig.11 Variation of wave component and turbulent component in the permeable breakwater.

3.3 分散係数の算出結果

Fig.12に全条件を平均した分散係数の算出結果を示す。分散係数は防波堤に達すると急激に低下し、堤内部では大きな変化はせずに透過するにつれ徐々に低下していくことが示された。堤前面の領域で分散係数が非常に大きな値となったのは、反射波の乱れによる影響だと考えられる

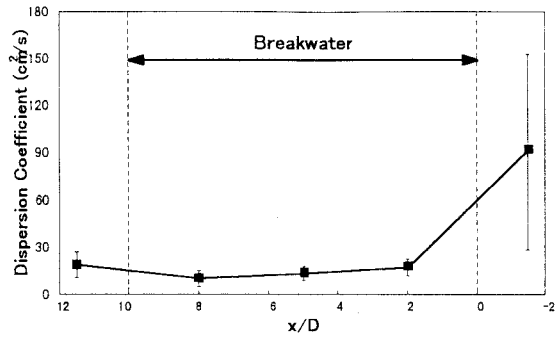


Fig.12 Variation of dispersion coefficient in the permeable breakwater.

透過性防波堤内部における分散係数は、式(7)に示すように波動による分散成分と、乱流拡散による拡散成分との和で表現され、式(8)のようにそれぞれの係数は、流速変動と混合距離との積で表せるのではないかと考えられる。

$$K = K_{disp} + K_{diff} \quad (7)$$

$$= l_{disp} \sqrt{u_{wave}^2} + l_{diff} \sqrt{u_{turb}^2} \quad (8)$$

K : 分散係数 K_{disp} : 分散係数の分散成分 K_{diff} : 分散係数の拡散成分

l_{disp} : 波動による分散の混合距離 l_{diff} : 乱れの混合距離

$\sqrt{u_{wave}^2}$ ($=F_{wave}$) : 流速変動の波成分 $\sqrt{u_{turb}^2}$ ($=F_{turb}$) : 流速変動の乱れ成分

Fig.13に堤内部における分散係数を疎通領域での流速変動の波成分と乱れ成分とで重回帰した結果を示す。波動による混合距離は0.69cm、乱れによる混合距離は1.34cmとなり堤防の空隙スケール（堤内の空隙体積を堤表面積で除した値）1.07cmと同オーダーの値となった。

Fig.14に重回帰により求められた混合距離を用いて K_{disp} と K_{diff} を算出した結果を示す。両係数は、堤内透過に応じてわずかに減少し、分散成分は球一個当たり4.6%、拡散成分は3.5%の減少がみられた。

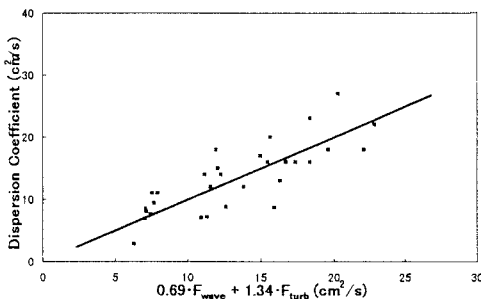


Fig.13 Regression for dispersion coefficient in the through area (in the breakwater).

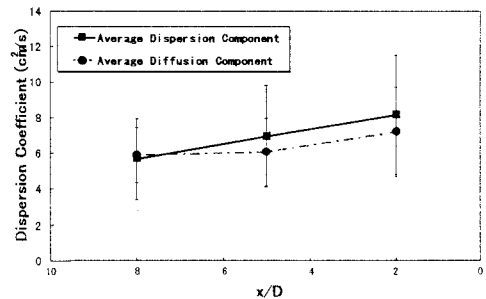


Fig.14 Dispersion coefficient of dispersion component and diffusion component (in the breakwater).

5. 結論

直径75mmの球を積み重ねた防波堤（空隙率47.6%、空隙スケール1.07cm）を使用し、入射波高が1.4cmか

ら14cm, 周期が1.12sから3.03sの波動条件の下で物質輸送速度を測定し, さらに堤内の流速変動(一方向)を測定し, 以下の結論を得た.

(1) 透過性堤内における流速変動には波動成分と乱れ成分とが存在する. 入射波の波成分に対し, 透過波の波成分は42%(球一個当たりの減少率4.5%)減少するが, 入射波の乱れ成分は堤内透過に応じて入射波の波成分の39%から30%とわずかに減少した. 堤内の遮蔽領域の乱れ成分は, 堤内透過に応じて入射波の波成分の29%から27%とほぼ一定であった.

(2) 透過性堤内における分散係数は, 流速を波動成分と乱れ成分とに分離することにより分散の成分と拡散の成分とに分解できる. 分散成分は, 流速変動の波成分に波動による混合距離を, 拡散成分は, 流速変動の乱れ成分に乱れの混合距離を掛けたもので表せられる.

(3) 本研究のもとでは, 波動による混合距離は0.69cm, 乱れによる混合距離は1.34cmとなり堤の空隙スケール1.07cmと同オーダーの値となった.

参考文献

- 1) 杉尾, 宮崎, 長岡(1993): 往復流下における流れの変化が生物膜の基質消費に与える影響, 第30回環境工学研究フォーラム講演集, pp52~pp54
- 2) 塩澤, 柴崎, 御園生, 長岡(1993): 透過性堤防内部における物質輸送機構の解明, 第30回環境工学研究フォーラム講演集, pp55~pp57
- 3) 塩澤, 久保田, 熊倉, 長岡(1994): 透過性堤防内部における物質輸送と流速変動との関係, 第31回環境工学研究フォーラム講演集, pp127~pp129
- 4) 合田良實(1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp253~pp256
- 5) 青野, 服部(1983): 崩れ砕波による乱れの構造特性に関する実験的研究, 中央大学理工学部紀要第26巻, pp77~pp127
- 6) 巽編(1986): 乱流現象の科学, 東京大学出版会, pp541~pp556