

複列潜堤背後の波動場特性

吉田 明德*・越智 宏 充**・Yan Shuguang***・入 江 功****

1. ま え が き

潜堤がより大水深域で用いられ潜堤背後の海域も汀線までの距離が従来の潜堤に比べ大きくなる傾向にある。潜堤による波浪制御効果は、一般に天端幅が広く天端水深が小さい程大きくなるが、潜堤は波との非線形干渉効果が特に大きく表れる構造物で、干渉によって励起した 2 次のオーダーの波に起因する海底地形の変動、背後域の平均水位上昇によって生じる汀線の後退や海浜流による砂移動が問題となる。しかも、潜堤は堤体断面が水深の 2 乗のオーダーに比例して増大するため、設置水深が大きくなると所要の機能を確保する事が費用の面で困難となる。

以上の問題点に対処する一方法として、潜堤幅が小さな潜堤を岸沖方向に複列設置し、前後の潜堤と潜堤間の流体域が一体となって波浪制御効果を発揮する複列潜堤が考えられる。複列潜堤の波浪制御効果の研究例は少なく、矩形潜堤を対象とした線形理論による喜岡ら (1989) の研究、Boussinesq 方程式により傾斜海浜上の 2 列潜堤の波浪制御効果を検討した喜岡・水谷 (1991) の研究、潜堤天端に凹部を設けて共振効果を検討した松見ら (1997) の研究、透過潜堤群による Bragg 共鳴反射による波浪制御効果を検討した間瀬ら (1997) の研究、複列潜堤と不規則波の弱非線形干渉効果を数値解析で検討した山城ら (2000) の研究等があげられるが、ほとんどが規則波を対象とした非碎波条件での検討で、不規則波を対象に、大きく碎波を生じる場合を含んで、複列潜堤背後の波動場を検討した例は見当たらない。

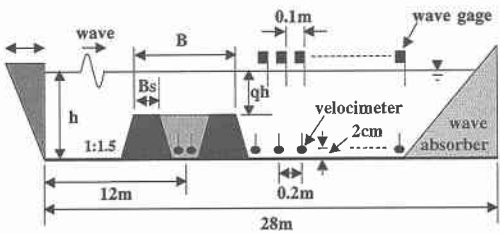
本研究は複列潜堤および単一潜堤を対象に、堤体の諸元および入射波の諸元を変化させた詳細な水槽実験をおこなって、潜堤背後の波動場特性を調べ複列潜堤の有用性について検討したものである。

2. 実験の内容

実験水槽と堤体模型の概略を図一に示す。水槽は反

射波吸収式造波装置および末端に消波装置を有し、幅 0.3 m 深さ 0.5 m 全長 28 m の 2 次元造波水路で、水深を 0.38 m にとり、不透透潜堤模型を水路の中央付近に設置した。複列潜堤に関しては前後の潜堤形状を同一で、個々の潜堤の天端幅を 19 cm ($=0.5h$) 天端水深 qh を 7.6 cm ($q=0.2$) に取り、複列潜堤と単一潜堤について天端幅 B (図一参照) が $B/h=4.0, 5.0, 6.0$ の 3 通りについておこなった。

実験で用いた入射波は Bretschneider-Mitsuyasu スペクトルを有する不規則波で、有義周期 $T_{1/3}$ が 1.43 秒 ($k_{1/3}h=1.00$; $k_{1/3}$ は有義波の波数), 1.79 秒 ($k_{1/3}h=0.75$), 2.36 秒 ($k_{1/3}h=0.55$) について、それぞれ有義波高 $H_{1/3}$ を 4, 6, 8, 10, 12 cm と変化させた組合せについ



図一 実験水槽と堤体の諸元

表一 実験条件

單一潛堤										
$q=2.0$		$B/h=4.0$			$B/h=5.0$			$B/h=6.0$		
		波數 kh								
		0.55	0.75	1.00	0.55	0.75	1.00	0.55	0.75	1.00
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	4	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	6	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	8	○	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	12	○	●	○	○	○	○	○	○	○
複列潛堤										
$q=2.0$		$B/h=4.0$			$B/h=5.0$			$B/h=6.0$		
		波數 kh								
		0.55	0.75	1.00	0.55	0.75	1.00	0.55	0.75	1.00
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	4	○	●	●	○	◎	◎	○	○	○
	6	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	8	○	◎	●	◎	◎	◎	○	○	○
	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	12	○	◎	○	○	◎	○	○	○	○

○ 平均水位 ● 平均水位、水面振動の空間分布
◎ 平均水位、水面振動と底面流速の空間分布

* 正 会 員 工 博 九州大学助教授 大学院工学研究院環境都市部門
** 正 会 員 五洋建設(株)
*** 学生会員 工 修 九州大学工学府博士課程
**** 正 会 員 工 博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門

て、潜堤背後4mの位置より1mを10cm間隔で容量式波高計によりサンプリング周波数10Hzで水面変動を測定し、さらに、いくつかの堤体条件と波の条件(有義周期, 有義波高)の組については、堤体背後の水域における水面変動を10cm間隔でおおよそ9mにわたって容量式波高計を用い、また、水底から2cmの高さでの水平流速を超音波流速計を用いて潜堤背後から20cm間隔でおおよそ5mについて、いずれもサンプリング周波数10Hzで15分間測定した。これらの実験ケースについて表一1にまとめている。

各測点での水面変動と流速変動の時系列データをFFT解析(データ個数8192)および波別解析し、パワースペクトル, 平均水位上昇率, 定常流速, 有義波高, 有義周期を算定した。また, 下記の式で定義される, 波形の上下非対称性を示す指標である Skewness (Sk), 前後非対称性を示す指標である Atiltness (At)を算定し, それらの空間分布を求めた。

$$Sk = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 / \eta_0^3$$

$$At = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\dot{\eta}_i - \bar{\dot{\eta}})^3 / \dot{\eta}_0^3$$

ただし上式中

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2}$$

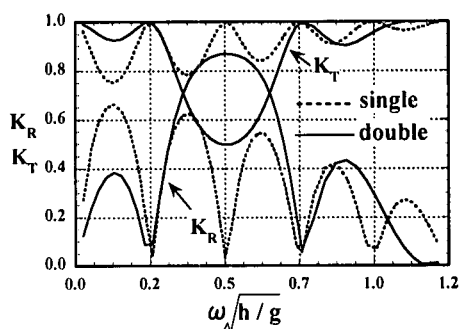
$$\dot{\eta}_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\dot{\eta}_i - \bar{\dot{\eta}})^2}$$

で, $\dot{\eta}$ は各サンプリング点の増分 $\Delta\eta$ をサンプリング時間 Δt で割ったもので, サンプリング間隔ごとの波形の傾きを表わし, $\bar{\eta}$, $\bar{\dot{\eta}}$ は η , $\dot{\eta}$ の平均値である。

3. 結果と考察

(1) 数値解析による反射率と通過率の特性

図一2に境界要素法(土木学会編, 1994)による線形計算で求めた通過率 K_T と反射率 K_R の周波数特性を示している。横軸 $\omega\sqrt{h/g}$ 中の ω は角周波数で, h は水深, g は重力加速度である。線形現象の範囲では潜堤の通過率 K_T , 反射率 K_R は入射波周期の変化に対応して周期的に変化する事が知られており(井島・佐々木, 1971), これは潜堤天端上の水域で生じる波の共振モードに対応している。複列潜堤の特徴は, 複列潜堤の天端幅 B や個々の堤体の天端幅などの条件によって, 単一潜堤では $K_R=0$ となる特定の周波数が複列潜堤では無くなり(図一2の場合では $\omega\sqrt{h/g}=0.5$ 近傍), 広い周波数範囲で有意な反射効果を有するようになることである。いま仮に水深7~10mの海域で周期10秒の波を対象とすると $\omega\sqrt{h/g}$ が0.53~0.63程度で, 図一2の結果は線形現象としての波の反射・通過を考える限りでは複列潜堤の方が単一潜



図一2 反射率と通過率の周波数特性 ($B/h=5.0$, $q=0.2$)

堤より有効な波浪制御効果を有することを示している。

(2) 水面変動と底面流速のスペクトル分布

潜堤背後の水面変動と底面流速変動のスペクトル分布について, 単一潜堤と複列潜堤とを比較した結果を図一3と図一4に示している。水面変動および流速変動とも単一潜堤(single)は実線, 複列潜堤(double)は点線で示している。複列潜堤と単一潜堤ではパワースペクトルに大きな違いが見られ, 通過波のパワースペクトルは単一潜堤のほうが大きく減少している。これは線形現象としての波の制御効果は図一2に見られるように複列潜堤の方が良いといえるが, 潜堤上での碎波による減衰の程度が単一潜堤のほうが大きいのである。ただし, どちらも線形現象で推測される反射・通過の周波数特性の影響を大きく受けるから, 図に見られるようにスペクトルには特定の周波数で極大値をとる櫛の歯状のスペクトル形状が現れる。また, 図に見られるように, 単一潜堤, 複列潜堤とも潜堤からある程度離れると通過波のパワースペクトルの変化は小さくほぼ同じ形をとる。これは潜堤背後の擾乱域を過ぎると, 通過波のうちの拘束波成分と潜堤との干渉で励起された高次の自由波成分との位相速度の違いにより生じる空間変動以外にはスペクトルの変化が生じないことによる。

さらに複列潜堤と単一潜堤とで大きな違いが見られる点として, 単一潜堤の底面流速には潜堤背後で0Hz近傍の非常に小さな周波数でスペクトルが大きく励起し潜堤から離れるにつれて急激に減少する。水面変動にも同じ極低周波数の振動が励起しておりこれは潜堤から岸に近づくにつれて一様に大きくなる。しかし, 複列潜堤ではこの極低周波数の振動は極めて小さくしか現れない。

そこで, 各測点における水面変動と底面流速変動のパワースペクトルをこの極低周波数域(0~0.08Hz)で積分し, それと同じパワーを有する単一正弦波として流速振幅 V_L 及び水面振動の振幅 A_L を計算した結果を図一3の場合について図一5に示す。図一4の場合もほとんど同じ V_L と A_L の結果が得られている。流速振幅 V_L は潜堤

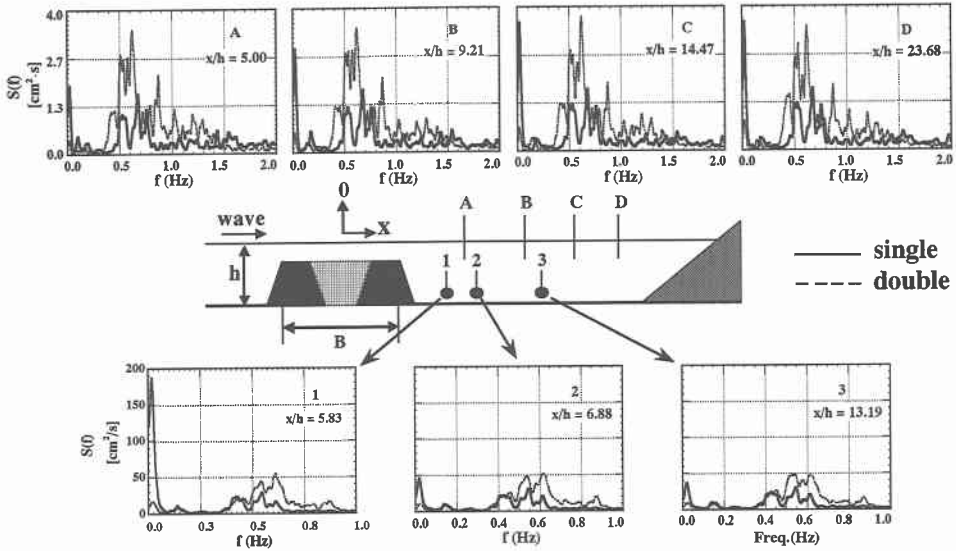


図-3 水面変動と底面流速のスペクトル ($B/h=4.0$, $k_{1/3}h=0.75$, $H_{1/3}=8$ cm)

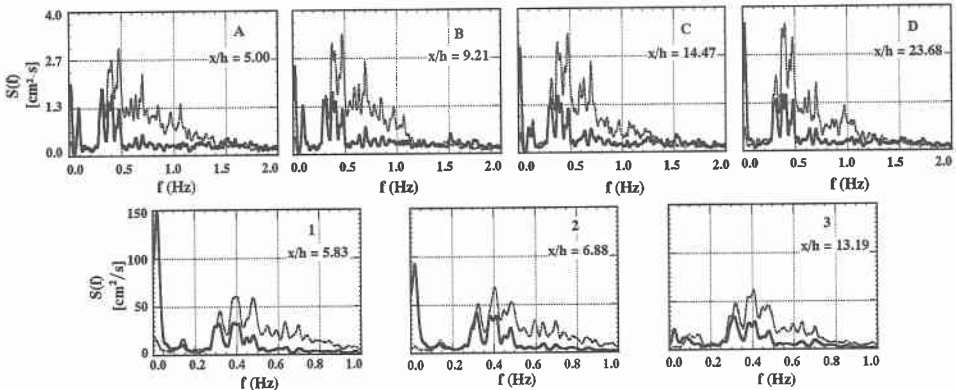


図-4 水面変動と底面流速のスペクトル ($B/h=5.0$, $k_{1/3}h=0.55$, $H_{1/3}=8$ cm)

直背後において大きなピークを取り、その後急激に減少し $x/h=7.0$ (法先から $3h$) あたりからはほぼ一定値を示すのに対し、水面振動の振幅 A_L は潜堤から岸に近づくにつれて一様に増大している。この振動の周波数はどの条件についてもほぼ 0.018 Hz (周期 55 秒) で、これは水槽内に生じる得るセイシュの基本振動周期 (全長 28 m 水深 0.38 m で約 28 秒) よりもはるかに大きく、この極低周波数の振動の原因については現時点では良くわからないが、仮に水深 10 m の現地を想定するとこの周期は 4.7 分となりサーフビートと呼ばれる長周期水面変動の周期と同程度のオーダーの周期となる。

(3) 潜堤背後の平均水位上昇

潜堤背後の平均水位は潜堤から離れると空間的にほぼ一定となることが知られており、この平均水位について単一潜堤と複列潜堤とを比較した結果を、図-6 ($T_{1/3}=2.36$ 秒) と図-7 ($T_{1/3}=1.79$ 秒) に示す。縦軸の $\bar{\eta}_0/H$

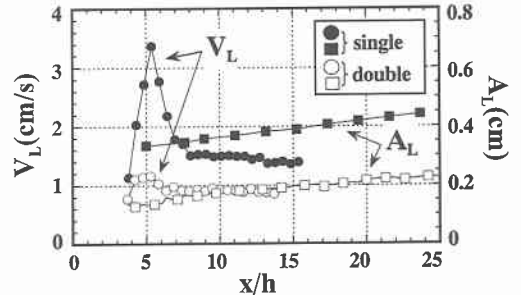


図-5 底面流速および水面変動で生じる極長周期振動の振幅の空間分布 ($B/h=4.0$, $k_{1/3}h=0.75$, $H_{1/3}=8$ cm)

は潜堤背後の平均水位 $\bar{\eta}_0$ を入射波と同じエネルギーフラックスを有する規則波 (周期は有義周期) の波高 (換算波高 H) で無次元化したもので、平均水位 $\bar{\eta}_0$ は潜堤背後 4 m の位置より 1 m を 10 cm 間隔で測定した各点の

平均水位の平均である。横軸は入射波の有義波高 $H_{1/3}$ である。

天端幅 B/h による平均水位の違いは、複列潜堤ではほとんど見られない。単一潜堤では入射波高が小さいと天端幅の違いによる平均水位の変動が複列潜堤に比べて大きい。入射波高が大きくなると天端幅による差異は見られなくなる。天端幅によらず単一潜堤と複列潜堤とも $H_{1/3}$ が大きいほど碎波による潜堤背後への質量輸送が増大し $\bar{\eta}_0/H'$ も一様に上昇する。図中の実線は単一潜堤と複列潜堤について、天端幅 B/h の区別をせず入射有義波高に対する平均水位の変化の近似曲線を算定した結果で、単一潜堤と複列潜堤は有義波高に対してほぼ同じ傾きで増大し、単一潜堤の $\bar{\eta}_0/H'$ は複列潜堤の約 1.7 倍の値をとる。

(4) 潜堤背後の水底面での定常流速分布

図-8、図-9 は潜堤背後領域での定常流速の空間分布を表している。縦軸の $\bar{V}$ は、各測点での流速変動の時系列を算術平均して得られる定常流速を、換算波高 H' と有義周期を持つ規則波の底面流速の振幅で無次元化した値で、正が岸向き、負が沖向きの流速を表す。横軸は測定位置 x を入射波の有義波長 $L_{1/3}$ で無次元化した値で、原点は岸側潜堤の法先にとっている。

図-8 は $H_{1/3}=8$ cm で、 B/h が 4.0 と 5.0 の場合について、単一潜堤と複列潜堤の定常流速を比較した結果で

ある。定常流速は潜堤背後で沖向きの流れとなり、法先からほぼ 0.1 波長あたりで最大値を取った後急速に減少し 0.3 ないし 0.4 波長以上離れると $\bar{V}$ はほぼ 0 となる。複列潜堤の $\bar{V}$ は単一潜堤に比べて小さく 1/2~1/3 程度である。

図-9 は複列潜堤の B/h が 4.0 と 5.0 の場合について、入射波の有義波高の変化による定常流速分布の比較を示している。有義波高が大きくなると、定常流速の変動の範囲が若干広がるがそれでも 0.4 波長程度はなれると定常流速はほぼ一定値を取る。

なお、本文に示してはいないが、複列潜堤の前後の堤体間で測った定常流速の $\bar{V}$ の最大値は -0.3 程度で、単一潜堤背後での沖向き流れと同程度の流れが生じており、複列潜堤では前方の潜堤による碎波によって前後の潜堤間で大きな循環流が生じ、後方の潜堤での碎波は小さいため潜堤背後の循環流の生成が小さくなると考えられる。

(5) 潜堤背後の水底流速の Sk と At の分布

図-10 は底面流速変動の時系列より算定した Sk と At の分布を、単一潜堤と複列潜堤とを比較して示している。測点の座標 x は定常流速分布の場合と同様岸側潜堤の法先を原点に取っている。単一潜堤の Sk は $x/L_{1/3}=0.2$ あたりで最大値をとり、潜堤から遠ざかるにつれて

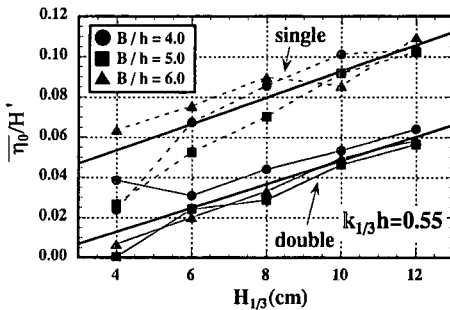


図-6 潜堤背後の平均水位 ($k_{1/3}h=0.55$)

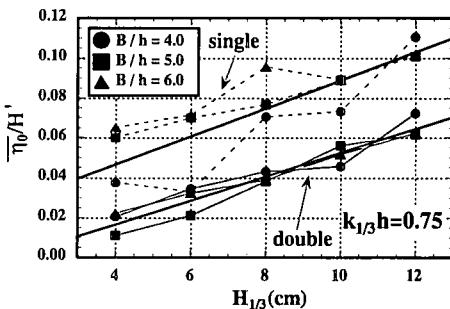


図-7 潜堤背後の平均水位 ($k_{1/3}h=0.75$)

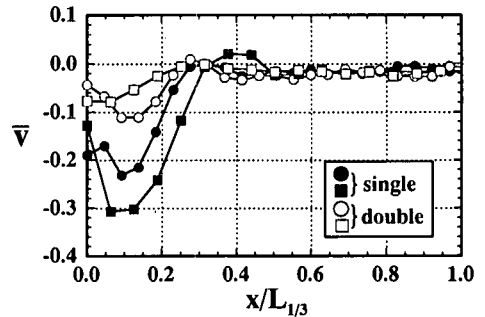


図-8 単一潜堤と複列潜堤の底面定常流速分布の比較 [$H_{1/3}=8$ cm, (● ○) $k_{1/3}h=0.75$, $B/h=4.0$; (■ □) $k_{1/3}h=0.55$, $B/h=5.0$]

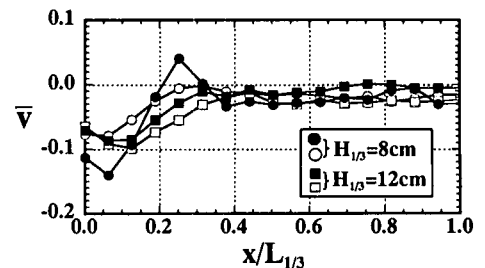


図-9 複列潜堤の底面定常流速分布 [$k_{1/3}h=0.75$, (○ □) $B/h=4.0$; (● ■) $B/h=5.0$]

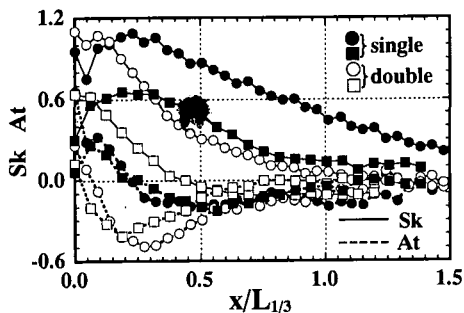


図-10 底面流速の Sk と At の分布 [$H_{1/3}=8$ cm, (● ○) $k_{1/3}h=0.55$, $B/h=5.0$; (■ □) $k_{1/3}h=0.75$, $B/h=4.0$]

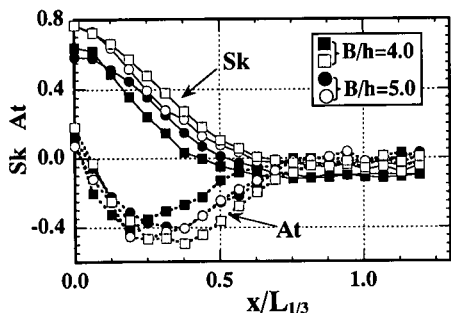


図-11 底面流速の Sk と At の分布 [$k_{1/3}h=0.75$, (● ■) $B/h=5.0$; (○ □) $B/h=4.0$]

緩やかに減少を続け潜堤からかなり離れた場所まで有意の値をとるのに対し、複列潜堤の Sk は潜堤から離れるにつれて急激に減少し、 $k_{1/3}h=0.75$ では $x/L_{1/3}=0.4$ 、 $k_{1/3}h=0.55$ では $x/L_{1/3}=0.8$ あたりでほぼ 0 に漸近する。底面流速の上下の非対称性と前後の非対称性の指標である Sk と At は、海底砂の移動と密接に関連することが知られており(小野ら, 1999)、上述の結果は波動による漂砂の現象が複列潜堤では単一潜堤に比べ潜堤背後の狭い範囲に限られることを意味し、海底砂の洗掘・堆積の問題に対処し易いと言える。有義周期 1.79 秒 ($k_{1/3}h=0.75$) と 2.36 秒 ($k_{1/3}h=0.55$) について比較すると、単一潜堤と複列潜堤ともに、有義周期が大きい方が Sk の値が大きく潜堤背後のより遠くまで有意の値をとることがわかる。一方、 At にも同様の傾向は見られるが有義周期による差異はきわめて小さい。

図-11 には天端幅 $B/h=4.0, 5.0$ の複列潜堤に、有義周期が $T_{1/3}=1.79$ 秒で、有義波高 $H_{1/3}$ が 8 cm および 12 cm の波をそれぞれ入射させた場合の Sk , At の分布を示している。

4. あとがき

本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。
(1) 単一潜堤と複列潜堤の透過波のスペクトルは大きく異なり、潜堤上での碎波による減衰が大きい単一潜堤の方が入射波のスペクトルが大きく減少する。(2) 通過波のスペクトルは線形現象で現れる反射・通過の周波数特性の影響を受けるため特定の周波数でピークが生じる櫛の歯状のスペクトル形状を成す。(3) 潜堤背後の底面流速に関して、*Skewness* と *Atiltiness* の空間分布は単一潜堤と複列潜堤とで大きく異なり、複列潜堤では砂移動に大きく寄与するとされる *Skewness* が潜堤から離れるにつれ単一潜堤に比べて急激に減少する。(4) 潜堤直背後に生じる沖向き定常流速の大きさは単一潜堤に比べ複列潜堤では半分から 1/3 程度である。(5) 平均水位の上昇は入射波の周期、波高によらず、単一潜堤に比べて複列潜堤の方が小さくほぼ半分程度で、単一潜堤と複列潜堤とも天端幅による違いは小さく、有義波高に対する平均水位の上昇量はほぼ同一の直線で表せる。(6) 単一潜堤では潜堤の直背後近傍で極大値をとり潜堤から離れると急激に減少する低周波数の大きな底面流速振動が生じ、同時に岸方向へ一様に振幅が増大する同じ低周波数の水面振動も生じる。しかし、この極低周波数の振動は複列潜堤では極めて小さくしか現れない。この振動の周波数は水槽で生じ得る静振モードの周波数や、非線形干渉で生じる 2 次のオーダーの自由波成分(差の周波数成分)よりもはるかに小さく、振動が生じる原因および単一潜堤と複列潜堤で大きく異なる理由について現時点では不明である。

参 考 文 献

- 井島武士・佐々木富雄 (1971): 潜堤の効果に関する理論的研究 一. 不透過潜堤一, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 141-147.
- 小野信幸・入江 功・西岡悟史 (1999): 砂れん上の底質移動に及ぼす海底勾配の効果と海浜の安定化機構, 海岸工学論文集 第 46 巻, pp. 591-595.
- 喜岡 渉・松野忠幸・源川秀樹 (1989): 複数列配置した潜堤による波浪制御, 海岸工学論文集 第 36 巻, pp. 549-553.
- 喜岡 渉・水谷幸平 (1991): 傾斜海浜に設置した二列潜堤による波浪制御, 海岸工学論文集 第 38 巻, pp. 566-570.
- 土木学会編 (1994): 海岸波動, 第 II 編, 第 3 章, pp. 182-185.
- 間瀬 肇・沖 和哉・榊原 弘・三島豊秋 (1997): 透過性潜堤群と表面波の Bragg 散乱に関する研究, 海岸工学論文集 第 44 巻, pp. 726-730.
- 松見吉晴・山本雄平・木村 晃・横田泰弘 (1997): 共鳴装置付潜堤の消波効果に関する研究, 海岸工学論文集 第 44 巻, pp. 731-735.
- 山城 賢・吉田明徳・入江 功 (2000): 複列潜堤の波浪制御効果と非線形干渉特性, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp. 87-92.