

透過性潜堤内外の波動場の構造

吉田 茂*・早川典生**・細山田得三***

1. はじめに

景観の保持、渚の生態系の環境保全など、多くの利点を有する透過性潜堤は、21 世紀の海岸の多目的な利用を計画する上で欠かせない構造物となっている。しかし一方で、波の通過や透過を許容するが故に、それを取りまく波動場は極めて複雑となり、未解明な問題を多く含んでいる。近年、コンピュータの大容量化、高速化に伴い、直接数値計算によるこれら波動場の予測手法が種々開発・検討されている。その場合、計算手法や結果の妥当性を検討するに際しては、場が複雑であるが故に、一面的な検証では不十分であり、場の特性や構造について多面的に検討する必要がある。そこで本研究では、場を把握するための基本水理量である水位・流速・圧力について、同時計測を行い、スペクトル上から、また位相平均上から見た場の構造や特異性について検討した。

2. 実験概要

実験は図-1 に示す等脚台形型の透過性潜堤を 2 次元波動水槽のほぼ中央部にセットして行った。規則波を用いた実験であり、波の条件としては、設定周期 $T=0.92$ s, 設定波高 $H=0.07$ m とした。実験水深は $h=0.4$ m (底勾配は 0), 潜堤の天端水深は $d=0.1$ m とした。潜堤模型の寸法は、法面勾配 1:1 の場合、潜堤高さ 0.3 m, 天端幅 0.42 m, 底幅 1.02 m とし、法面勾配 1:2 の場合も、潜堤高さ、天端幅を等しくとり、底幅はしたがって 1.62 m である。透過性潜堤を構築する材料としては、粒径 20~25 mm の砂利を用いた。また砂利の空隙率は実測により得たが、どちらのケースも、39.4%であった。法面勾配 1:2 の場合の計測点位置を図-1 に示した。水面より深さ方向に 13 段、潜堤沖側より岸方向に 67 断面を設けた。潜堤周りの流体要素のせん断変形速さ等を詳細に調べる必要から、基本的には流速の計測点は $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ の格子点上とした。ただし潜堤より離れた水域や潜堤の内部については、 $3\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ の格子点上とし、中間

点の値はそれを取り囲む点より内挿して求めた。法面勾配 1:1 の場合についても、計測点は同様の方針で配置しているので、図は省略した。水位の計測についても、図-1 の計測断面上 (3 cm 間隔: 67 断面) で行った。水位の測定では容量式波高計を用いており、計測点の沖側及び岸側にそれぞれ一台ずつ設置固定した。また流速場の測定では、水平・鉛直 2 方向が同時に測定できる電磁流速計 (センサーの外形 4 mm) を用いて計測した。図-2 には、計測点上で諸量を計測するときの各検出器の配置を示した。図のように、電磁流速計 (UW) の検出部と圧力計 (P) の検出部を向い合わせにして両者を一体構造とし、上下可能にした。また、電磁流速計の検出部の中心の直上に波高計のセンサーがくるように容量式波高計を取り付け、単独に上下できるようにした。水位・流速・圧力のサンプリング間隔はいずれも 10 ms で、各計測点上で 1 ch 当たり 2050 個のデータを取得した。そして位相合わせの為に計測点沖側の固定波高計によって計測された水位変動の時系列に基づいて、水位及び流速データについてそれぞれ位相平均 (4 波~8 波について) をほどこし一周期間のデータを得て潜堤周辺の渦度・潜堤周りの流体要素のせん断変形速さ・エネルギー消散量について詳細に調べた。

3. 透過性潜堤周りの流速ベクトル

本実験では、法面勾配 1:1, 1:2 のいずれの場合も堤上で碎波が発生した。図-3 には法面勾配 1:2 の場合について、位相平均された流速および水位を用いて、各位相ごとの流速ベクトルおよび水位の空間分布を示した。潜堤の岸側では、潜堤による遮蔽効果とエネルギー減殺効果とにより、流速ベクトルがかなり小さくなっていることがわかる。潜堤の表法肩・裏法肩の周辺では水位波形の位相にかかわらず、流速ベクトルはかなり大きな値を示している。潜堤の沖側では水平流速の最大位置、鉛直流速の最大位置と水位波形との位置関係は、明らかに一定水深を進行する微小振幅波の場合とは著しく異なっている様子がわかる。そしてこれらは、波の進行に伴って、その位置関係がずれてくることなどがわかる。潜堤の岸側の水面付近では、上向き流速ベクトルが広い範囲

* 正会員 工修 長岡工業高等専門学校助教授 環境都市工学科

** 正会員 Ph.D. 長岡工業高等専門学校教授 環境・建設系

*** 正会員 工博 長岡工業高等専門学校助教授 環境・建設系

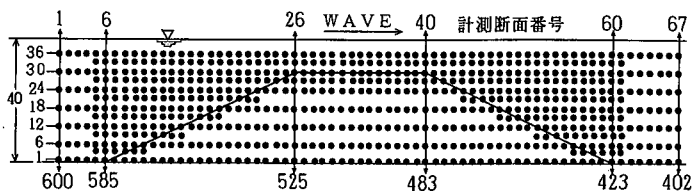


図-1 諸量計測点位置図 (法面勾配 1:2, 単位: cm)

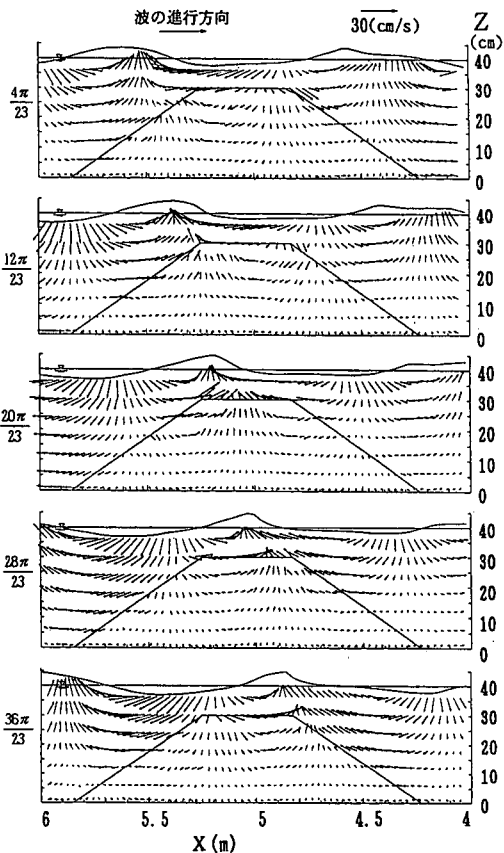
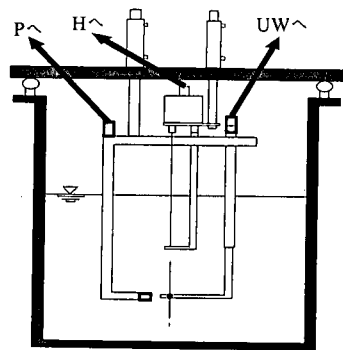


図-3 流速ベクトル (位相平均値)

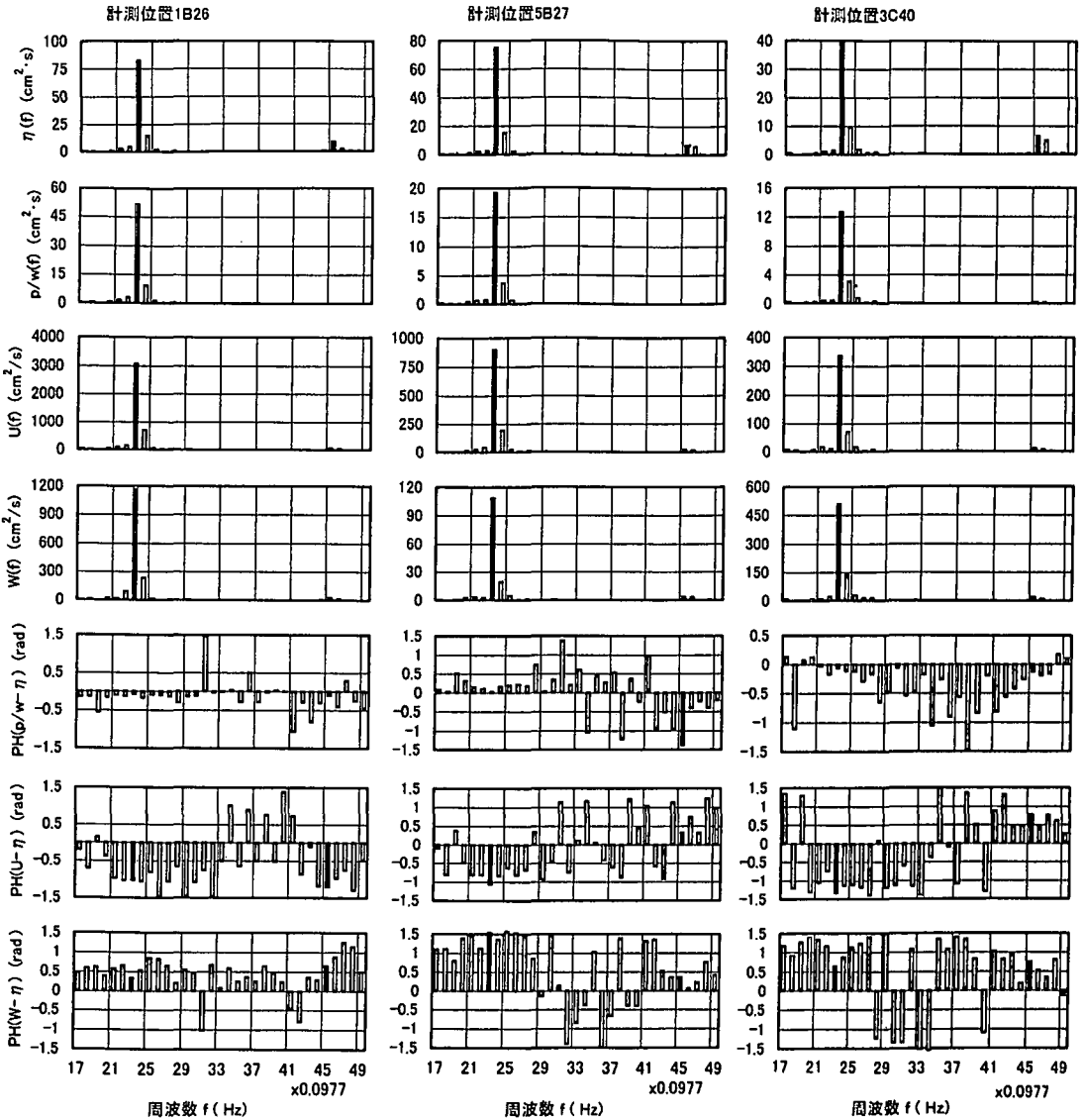
に分散することがわかる。透過性潜堤内部においても、流速ベクトルの位相は深さ方向に異なっていることがわかる。

4. 諸量のパワースペクトルおよび位相差

規則波を用いた実験であるが、予備実験の結果から波動場内の水位波形に 2 倍周波数成分の発生が確認された為、本実験では、水位波形のほか変動圧力水頭、水平流速、鉛直流速の各波形についても、パワースペクトルを算出した。また、これら 4 項目の位相スペクトルを得た後、水位波形を基準とした直下の 3 量の各波形との位相差の算出を行った。図-4 にこの結果の例を示す。図中で

図-2 各検出器の配置
(H: 容量式波高計, UW: 電磁流速計, P: 圧力計)

計測位置の 1B26 とは、1 段目と計測断面 26 との交点であり、B は法面勾配が 1:1 の場合である。3C40 も同じ表示法であるが、C は法面勾配が 1:2 の場合である。また図の棒グラフにおいて、黒地棒グラフは、波の主成分(入射波: 23×0.0977 Hz) 及び 2 倍周波数成分を示している。まず水位波形のパワースペクトル $\eta(f)$ であるが、5B27 (表法肩の下の透過層内) のパワースペクトル値は、1B26 (表法肩の直上の計測点) の値よりは小さいが、かなり大きな値を示しており、透過層内に波動が直接伝わっていることがわかる。また法面勾配は異なるが、3C40 (裏法肩の点) では、値はかなり小さくなっていることがわかる。またグラフでは、いずれも 2 倍周波数成分が存在しており、主成分に対する 2 倍周波数成分の割合が、波の進行方向に向って大きくなっている。変動圧力水頭のパワースペクトル $p/w(f)$ は、水面から水底に向って大きく低減していること、また波の進行方向への低減も大きいことがわかる。3C40 地点において、2 倍周波数成分が見られる。水平流速のパワースペクトル $U(f)$ は、表法肩直上では、かなり大きな値となっているが、透過層内ではかなり小さく、また裏法肩ではさらに小さくなっている。また $\eta(f)$ と同様に 2 倍周波数が見られる。鉛直流速のパワースペクトル $W(f)$ は、水平流速のそれに比べてかなり小さいことがわかる。これは潜堤により波の鉛直運動が拘束されていることを意味し潜堤場の特徴の一つと考えられる。本実験波の周波数は、大部分黒地棒グラフの帯域におさまっているが、その上の帯域のスペクトル成分も無視できない。次に $PH(p/w-\eta)$ は、水位波形 η の位相角に比べて、変動圧力水頭の波形 (p/w) の位相角が、どの位進んでいる (+) か、または遅れている (-) かを示すものである。同様に、 $PH(U-\eta)$ 、 $PH(W-\eta)$ はそれぞれ、水平流速波形 (U)、鉛直流速波形 (W) の進みまたは遅れを示す。まず変動圧力水頭波形の主成分については、グラフ上では 1B26 と



図—4 諸量のパワースペクトル及び位相差スペクトル

3C40 で若干の遅れが、また 5B27 (透過層内) では若干の進みが見られる。また水平流速波形の主成分はすべて遅れているが、5B27 (透過層内) や 3C40 (裏法肩) の 2 倍周波数成分は逆に進んでいる。これに対して、鉛直流速波形は主成分及び 2 倍周波数成分共に進んでいる。特に、5B27 (透過層内) では進みが大きいことがわかる。ここで位相の進み、遅れについて、潜堤場全体について外観すると次のようになる。 $PH(p/w-\eta)$ は、法面勾配 1:1 では、潜堤の沖側で $0 \sim 0.14$ (rad.)、岸側で $0.1 \sim 0.31$ (rad.) といずれも進んでいる。また、法面勾配 1:2 では、潜堤の沖側で $0.06 \sim 0.18$ (rad.)、岸側で $0.1 \sim 0.45$ (rad.) といずれもさらに進んでいることがわ

かった。一方、法面勾配 1:1 の潜堤の表法肩は -0.198 (rad.)、裏法肩は -0.15 (rad.) でそれぞれ遅れており、法面勾配 1:2 においても同様に遅れていることがわかった。その他の水域では、遅れ進みはあるもののほとんど 0 に近い位相差であった。また、 $PH(U-\eta)$ については、法面勾配 1:2 の透過層内部の深い所で、位相の進んでいる所が見られたが、それ以外のすべての点で位相の遅れが見られた。特に、位相の遅れている所は、どちらの法面勾配の場合も、潜堤の両法肩周辺であり、 -1.0 (rad.) 程度であることがわかった。また、透過層内では、深い所ほど位相差は小さくなることがわかった。 $PH(W-\eta)$ は、どちらの法面勾配の場合も、表法肩で位相が遅

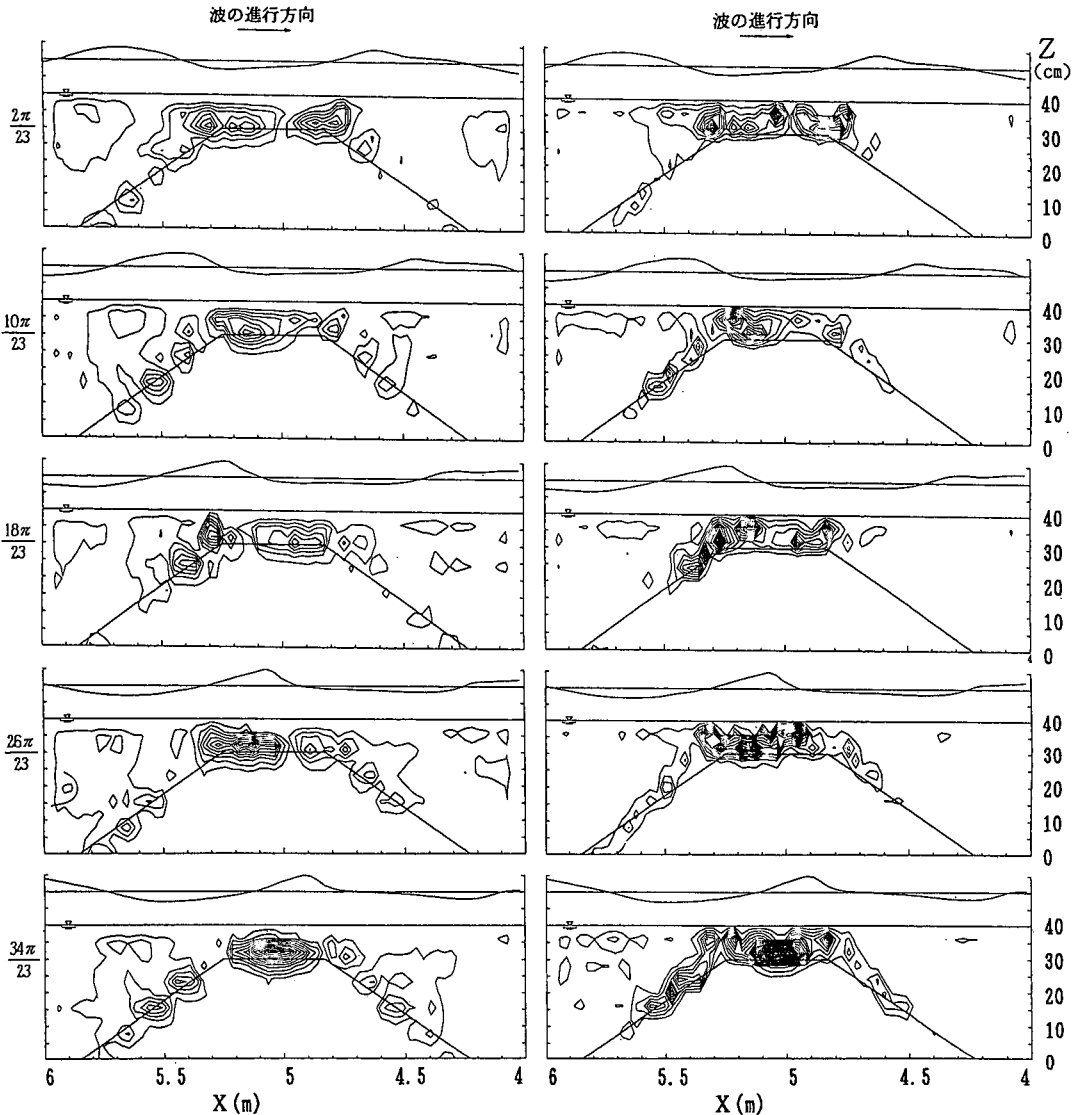


図-5 セン断変形の速さ (γ) 及びエネルギー消散量 (ϕ/ρ)

れ (-0.3 rad. 程度) ているが、その他の点においては、位相は進むという結果を得た。また透過層内部の深い所及び潜堤の岸側の深い所で位相が大きく進んでいる ($1.0 \sim 1.5$ rad. 程度) ことがわかった。

5. セン断変形の速さおよびエネルギー消散量

$$\gamma = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\phi}{\rho} = \nu \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \dots\dots (2)$$

潜堤周りの流体要素のせん断変形の速さ (γ) を (1) 式により、またエネルギー消散量 (ϕ/ρ) を (2) 式により計算した。ここに、 ϕ は単位体積の流体から単位時間

に、粘性によって失われる機械的エネルギーで、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数である。また、 u 、 w は位相平均された水平及び鉛直流速である。これは計測値から得ているため、乱流成分が含まれているが、現段階では、その成分の分離が困難であるため、計測値をそのまま位相平均した。これらの計算結果に基づき、図-5の左側に、せん断変形の速さ (γ) を、また右側にエネルギー消散量 (ϕ/ρ) をそれぞれ示した。 (γ) の等値線は、太線が+値、細線が-値であり、外周が ± 0.4 (1/s) で、間隔も同じである。また (ϕ/ρ) の等値線は、外周が 0.01 (cm^2/s^3) で、間隔も同じにしてある。まず、図-5の (γ) について、位相角 ($2\pi/23$) のように、波の谷が潜堤上にある時、表法肩を中心として負の (γ) が卓越し、一方、岸側の法肩

付近では、正の (γ) が卓越する。この場合、岸側法面での (γ) の絶対値は小さい。波が進行し、位相角 $(10\pi/23)$ では天端上は負の (γ) に覆われ、波の山の直下の表法面では正の (γ) が徐々に大きくなる。一方、裏法面上の正の (γ) は分断され、徐々に小さくなる。さらに波の山が天端に乗り上げる $(18\pi/23)$ では、表法肩を中心として、 (γ) は大きくなる。一方、負の (γ) はほぼ波の谷に沿って幅広く分布する。波の山が天端の中央付近に来ると、位相角 $(26\pi/23)$ のように、正の (γ) は非常に大きくなり、ほぼ天端上に乗る。一方、負の (γ) は、どんどん小さくなり、裏法面に広く分布するようになる。表法面では、負の (γ) が徐々に大きくなる。波の山が裏法肩に近い所まで来ると、正の (γ) は最大となり、天端全体を覆う。表法面では、負の (γ) が大きくなる。一方、裏法面では、これとは逆に、負の (γ) はどんどん小さくなっていく。以上のような検討結果より、まず、表法先で、正の (γ) と負の (γ) が半周期ごとに、交互に発生すること、また潜堤の境界に沿って (γ) が大きくなること、そして、透過層内から外部への影響がかなり大きいことなどがわかった。 (γ) の最大値は絶対値で見ると、正の (γ) は負の (γ) よりも大きいことや、正の (γ) の中心は波の山よりも、また、負の (γ) は谷よりも、それぞれ位相が遅れていることがわかり、これらは潜堤のある波動場の大きな特徴である。次にエネルギー消散量は、(2)式のように、流体の伸縮変形とせん断変形とから成るが、両図 (ϕ/ρ) と (γ) は空間分布が類似していることから、せん断変形の影響が大きいことがうかがわれる。また、 (ϕ/ρ) の図より次のことが言える。一般に波の位相に拘わらず、天端上でのエネルギー消散量が大きく、特に、波の山が天端上にある時、エネルギー消散量は極めて大きくなる。また表法面におけるエネルギー消散量もかなり大きく、特に、波の谷が表法面上にある時、エネルギー消散量が大きくなる。裏法面上では、一般にエネルギー消散量は小さいが、それでも波の谷が裏法面上にある時には、ある程度の消散が見られる。法先や法尻におけるエネルギー消散量は極めて小さい。

6. ま と め

本研究により得られた主な結果について以下に示す。

- a) 透過性潜堤内外について、位相ごとの流速ベクトル及び水位の空間分布を得た。そして潜堤の岸側で上向き流速が広い範囲に分散するなどの特性を把握した。
- b) 水位、変動圧力水頭、水平流速、鉛直流速の各波形について、パワースペクトルを求め、場の特性を把握した。また上記4量は2倍周波数成分が見られ、主成分との比は空間的な位置により異なることがわかった。
- c) 水位波形と他の3量の波形との位相差スペクトルを得た。主成分について、変動圧力水頭波形は一般に位相差が小さく、場所により進んでいる所と遅れている所があるのに対し、水平流速波形は一般に大きく遅れている。一方、鉛直流速波形は進んでいることがわかった。
- d) せん断変形の速さは潜堤境界で大きく、特に天端上では著しく大きい。そして潜堤天端上に波の山がある時に最も大きくなる。また、潜堤表法先で正及び負のせん断変形速さが半周期ごとに交互に発生する。
- e) エネルギー消散量は天端上で最も大きく、次いで表法肩近くの表法面、裏法肩近くの裏法面の順となった。また天端上に波の山がある場合の方が、谷のある場合に比べ消散量は著しく大きい。
- f) せん断変形の速さやエネルギー消散量の分布の中心は、一般に、波の山や谷よりずれている。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・川崎浩司・金 度三 (1995): 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 781-785.
- 榊山 勉 (1995): 透過潜堤上で碎波をとまう波の変形特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 771-775.
- 滝川 清・山田文彦・松本健作 (1995): 潜堤上碎波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 66-70.
- 細山田得三・吉田 茂・早川典生・辻本剛三 (1997): SOLA-SURF法による潜堤周辺波動場の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 86-90.
- 南 将人・梅村 彦・大向達也・鎌田 剛・稲市賀有・田中博通 (1997): 潜堤の波高減衰と背後の空気巻き込み領域に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 76-80.