

沿岸流速の断面分布について

水口 優*・大嶋 義隆**・堀川 清司***

1. はじめに

沿岸流は、海岸付近に到来する波のもつ周期のオーダーでは定常的な一方向流れであり、物質輸送においても定常的な効果をもつために古くから注目を集めてきた [Galvin・Eagleson(1965)]. 一方, radiation stress の概念の導入による Bowen (1969), Longuet-Higgins (1970) の理論的な扱いは、沿岸流に関する問題の焦点を明らかにしてみせた. すなわち、沿岸流の物理的な意味での問題点は、(1) 砕波後の波の特性の把握、およびそこの radiation stress の評価、(2) 砕波帯内の摩擦(底面)法則の確立、(3) 砕波帯内の乱れによる運動量交換の評価、の3点に集約されることになった. しかしながら、その理論的な扱いにも、種々の前提 [例えば、水深方向の平均量のみを扱うことや、一様勾配斜面にのみ適用可能なことなど] が置かれており実験による十分な検討を受けたとは言いがたい. さらに現地のデータとの比較は地形の非一様性に対する扱い方などにおいては、定性的にも問題がある状況である. その一方で、沿岸漂砂、砕波帯内の物質分散などを扱うに際して水深方向の流速分布の重要性も認識され始めている. 本論文では、砕波帯付近の波高および平均水位の分布と沿岸流の流速断面分布を含む詳細な実験結果を報告すると共に、それらをもとに、沿岸流のメカニズムにおける基本的な考え方について検討を加える.

2. 実験装置および方法

実験は、東京大学工学部土木工学科所在の中型平面水槽を用い、図-1に示すような条件下で行なった. 造波板は、フラップ式で、プーリーへの接続棒中のターンバックルの長さを調整することにより最大 20° まで角度を変えることができる. 両側のガイド板は、鉄板をT字型に溶接した長さ 1m のものを、波向線に沿うように設置したものである. 砕波帯付近でのガイド板の設置の仕方とその影響については、Dalrymple・Eubanks・

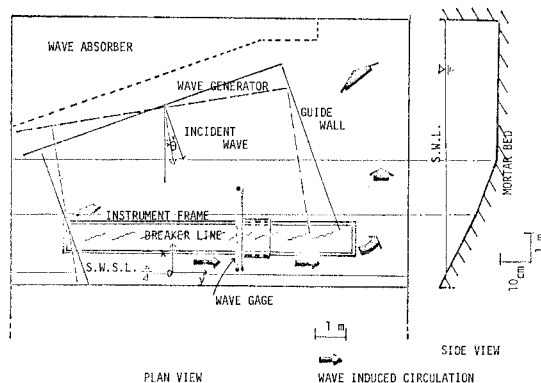


図-1 実験水槽概略図

Birkemeier (1977) による理論的な研究もあるが、ここでは、上流側は完全に閉じ、下流側は、砕波点よりやや外側まで開けるというタイプを採用した. なお以下の実験においては、各ケースとも沿岸流速の沿岸方向の変動を、岸沖方向の 5~7 点に対して、沿岸方向に 25 cm 間隔に測定し、沿岸方向にほぼ一様な部分の中で、断面分布の測線を選定した. 斜面地形は、図-1に示すような斜面 (モルタル製 1/10.4) とステップ型 (ステップ部鉄板製) の2種を用いた.

測定は、まず、沿岸流への外力となる波高 H および外力の働く場を示すことになる平均水位 $\bar{\eta}$ の分布を測定した. 波高および平均水位は、9本の容量式波高計による波形をデータレコーダに記録し、サンプリング周波数 $S.F.=100\text{ Hz}$ で AD 変換して 15 波平均の値を算出し

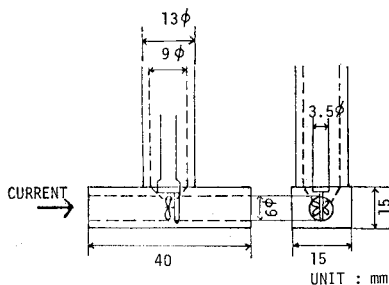


図-2 プロペラ流速計用カバー工作

* 正会員 工修 中央大学講師 理工学部土木工学科

** 前田建設工業(株)

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

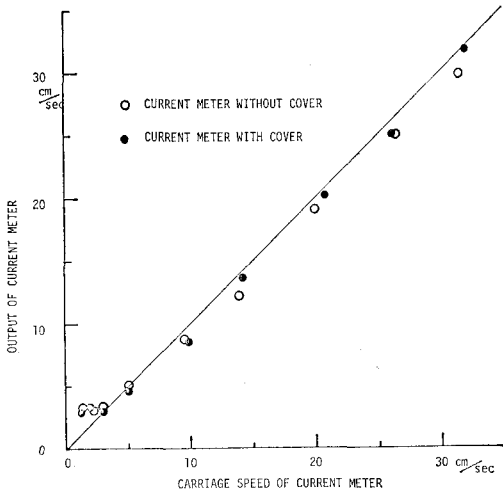


図-3 プロペラ流速計キャリブレーション

た. ついで, 流速の沿岸方向成分のみを取り出すべく
図-2に示すような工作を施したカバー付超小型プロペ

ラ式流速計(計測技研製プロペラ径5mm)を用いて, 流速の断面分布を測定した. 参考までに, 使用した流速計の較正曲線を図-3に示す. 検定は, 静水中を台車で曳航する方式により行なったもので, 定常流の場合は, カバーの存在は無視できると言える. 流速 v のデータは, 波形記録と同様な方法で入射波にして16波分処理して (S.F.=40 Hz) 平均流速 $\bar{v}$ と変動流成分 $\sqrt{\bar{v}^2}$ を求めた.

3. 実験結果

表-1に示す6ケースについて実験を行なった. その結果を, 図-4~9に示す. 断面流速の測定間隔は, 岸

表-1 実験ケース

CASE	底面形状	周期 (T)	入射角 (θ_0)	波形勾配 (H_0/L_0)
1	一様勾配	0.80 sec	10.3°	4.4%
2	"	"	10.2	2.7
3	"	"	20.5	5.2
4	"	0.81	"	3.3
5	ステップ型	"	20.4	2.2
6	"	0.80	20.5	5.1

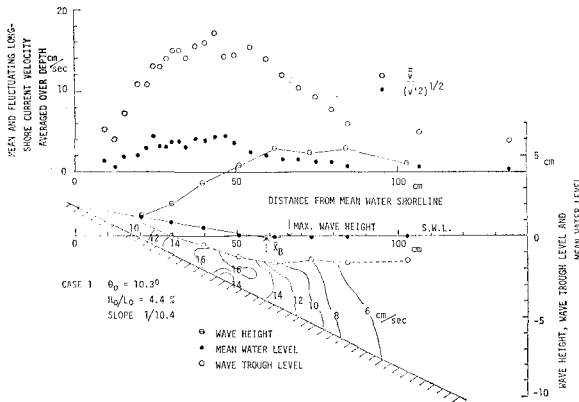


図-4

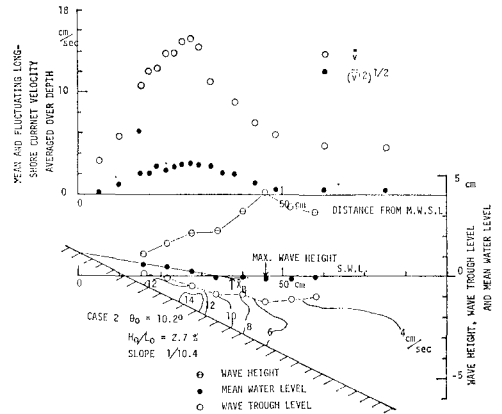


図-5

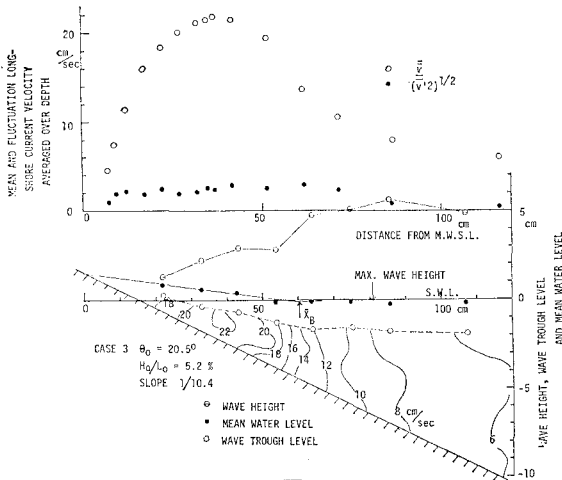


図-6

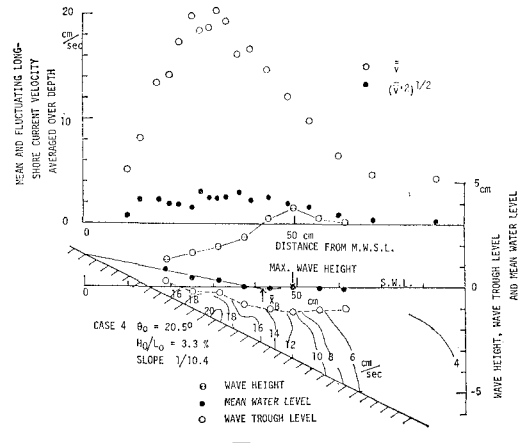


図-7

図-4~7 一様勾配斜面における実験結果

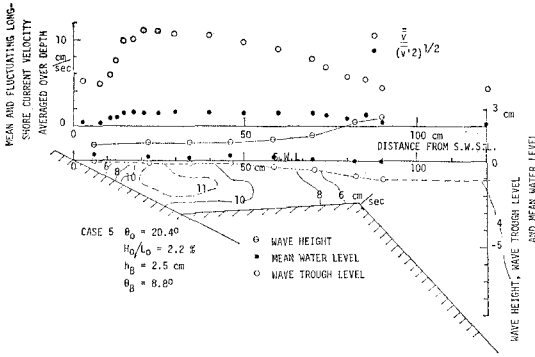


図-8

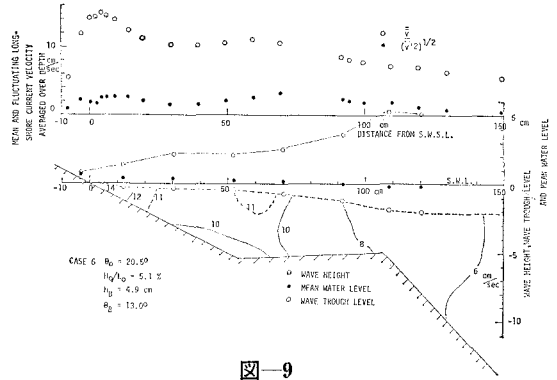


図-9

図-8~9 ステップ型斜面における実験結果

沖方向に 2~10 cm, 鉛直方向に 0.5 cm である。流速の水深平均量 $\bar{v}$, $\sqrt{\bar{v}^2}$ (cm/sec) としては, 単純な算術平均を用いた。これらの図から, ただちに読みとられる特徴を列挙すれば次の 5 項目となるであろう。なお, 水深平均の平均流速 $\bar{v}$ の岸沖方向分布に関する議論は 4. に譲る。

(1) 沿岸流 (海浜流) における砕波点の定義として, radiation stress の働き方の質的な差を示す境界線と考えれば, それは, 平均水位の上昇開始点 $\bar{x}_B$ (図中 $\bar{X}_B$) となる。今回の実験においても, Bowen・Inman・Simmons (1968) 以来言われてきたように, $\bar{x}_B$ は, 波高最大地点とほぼ一致する砕波開始点 (図中, Max. Wave Height) とは異なり, ほぼ砕波突っこみ点 (plunging point) に対応した。また, $\bar{x}_B$ は, 波の谷の包絡線である波谷線の上昇が始まる点にも対応した。

(2) 一様勾配斜面 (ケース 1~4) では, 砕波帯内の波高減衰および平均水位の上昇は, 波向きが小さいために直線的であり, 直角入射波との差異は無視できる [Jonsson・Jacobsen (1973)]. 表-2 に示すように最小 2 乗法で求めた 平均水位勾配と 水底勾配の比 K および それから換算した波高水深比 γ の値も従来の結果とほぼ一致した [佐々木・佐伯 (1974)]. ステップ型斜面におけるそれらの結果も直角入射の場合の特性 [水口・辻岡・堀川 (1978)] と変わるところはない。

(3) 一様勾配斜面では, 平均流速の断面分布形状も, $\bar{x}_B$ を境界としてその様相を変える。砕波帯内では, 内部に流心をもつ三角形開水路内の流れと同等であり, 砕波帯外では水深方向には一様で, 沖方向にほぼ指数関数的もしくはべき乗的に減少していくパターンを示す。前者は, 外力が働く強制型の流れ, 後者は自由型の流れとしての特徴を示していると言えよう。

(4) ステップ型斜面の流速断面分布形状は, 一様水深部が短い時には, 一様勾配の場合と同様に, 砕波帯内で開水路型 (強制型), 砕波帯外で自由型の特徴を示す (図-8)。しかし, ケース VI のように, 波長に比して一様水深部が長くなると, 波の再成域と 2 次砕波現象が生じ, 砕波帯内の流速分布構造は複雑になり, 波高が減衰する地点, すなわち外力が働く地点で空間的な加速域が存在する (図-9)。

(5) 変動流速 $\sqrt{\bar{v}^2}$ は, 測定方法からみて時間, 空間的に小さなスケールの乱れが無視された量であることおよび紙面の都合から水深平均量 $\sqrt{\bar{v}^2}$ のみを図示してある。なお, 用いた流速計の特性上, 入射波の波動運動成分はほとんどカットされるはずであり, そのことは破波帯外で変動流速がほとんど 0 になることからわかる。ただし, 変動成分の周期としては明らかに入射波周期のものが卓越していた。その岸沖方向分布の特徴は, (1) 汀線および砕波点 $\bar{x}_B$ 付近を除いてほぼ一定であること, (2) 砕波帯外ではやはり指数関数的もしくはべき乗的に減少していることである。

4. 水深平均沿岸流速の岸沖方向分布形状について

一様勾配の実験結果を整理したものが, 図-10 である。実験条件の範囲が狭いこともあって, 4 ケースともほぼ相似な分布形をなしている。

水深平均の沿岸流速に対する理論的アプローチとしては, Longuet-Higgins (1970) の有名なモデルを借用し次のような, 沿岸方向の力のバランスを考える。

$$\langle \text{外力項} \rangle + \langle \text{水平拡散項} \rangle + \langle \text{底面摩擦項} \rangle = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \langle \text{外力項} \rangle &= \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \left(= \frac{5}{4} \alpha^2 \rho (gh)^{3/2} \cdot s \cdot \frac{\sin \theta}{c} \right) \\ \langle \text{水平拡散項} \rangle &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e h \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \mu_e = \rho N h \sqrt{gh} / s \\ \langle \text{底面摩擦項} \rangle &= \frac{2}{\pi} \rho C u_b \left(= \frac{2}{\pi} \rho C \alpha \sqrt{gh} \cdot v \right), \alpha = \frac{\gamma}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

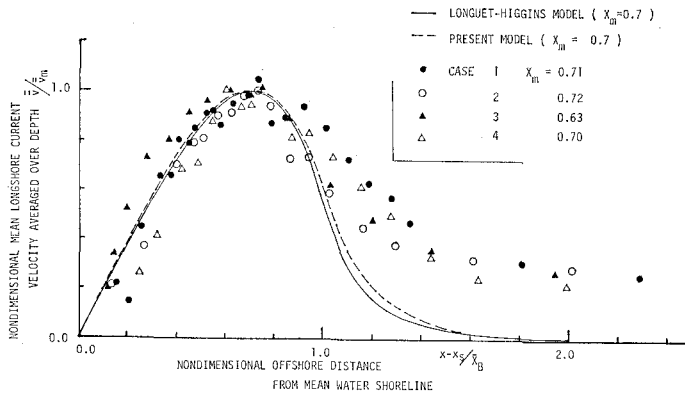


図-10 平均流速の水深平均量の岸沖方向分布

ここで, S_{xy} : radiation stress の一成分, h : 水深, ρ : 水の密度, $\hat{u}_b$: 波動運動による底面最大流速, μ_e : 水平拡散係数, s : 勾配, c : 波速, C : 摩擦係数である. 式(2)において一様勾配 $h=sd$ とおき, 一様勾配で成立する仮定 [$H=\gamma d$, H : 波高, $d(=h+\bar{\eta})$: 水深] と長波近似を導入する [式(2)における () 内の表現] と簡単に解析的な解が求まる [具体的な形は原論文を参照されたい]. ここで外力項の評価は前節の議論からもわかるように, 砕波点として $\bar{x}_B$ をとれば, 一様勾配斜面では, その妥当性が保証されていると言える. そして以下の計算に際しては, 原点としては, 図-4~7 に示したように, 平均水位汀線 (M.W.S.L.) x_s を使い, さらに砕波帯内外での水面勾配の差も一応考慮した. その結果が, 図-10 中の実線である. 理論解は, 水平拡散項と底面摩擦項の比を表すパラメータ $P(=\pi s N / 2 \alpha C)$ によって一義的な分布形状を示すことになるが, 図中の曲線は流速分布が最大値を取る点 $X_m(=x_m - x_s / \bar{x}_B) = 0.7$ を与えて求めたものである. 砕波帯内, 特に汀線から最大値をとる地点までの一致は, 当然のことながら良い. 砕波点付近から沖では, 理論解は実験値に比べてかなり急激な減少を示す. その理由の1つは, Longuet-Higgins のモデルでは, 拡散項, 摩擦項ともに砕波帯内外を通じて共通の形を仮定しており, それらの項は $x \rightarrow \infty$ (沖側) で無限大になってしまうということにあると考える. そこで, まず

$$\mu_e \propto h \sqrt{\bar{v}^2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

という関係を考慮して, 拡散係数の特性を見るために実験で得られた変動成分 $\sqrt{\bar{v}^2}$ を整理してプロットしたのが 図-11 である. 実験の精度を考えに入れた上で, James (1974) が指摘するように砕波帯外での拡散係数を, 次のようにとることが考えられる.

$$\mu_e = \mu_{eB} (h/h_B)^{-1} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで, μ_{eB} は砕波点での水平拡散係数である. さらに, 摩擦項としては, 次のような修正を考える.

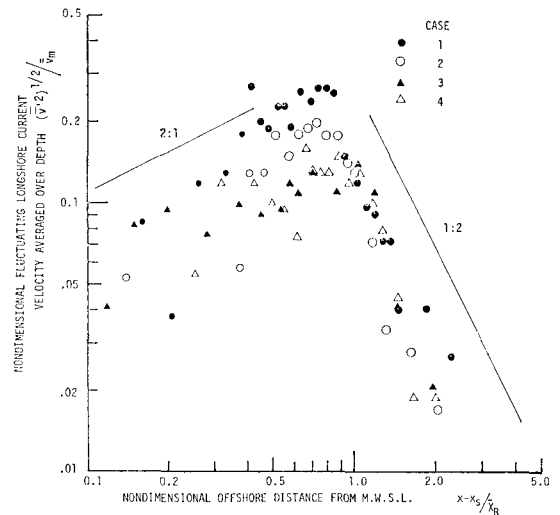


図-11 変動流速の水深平均量の岸沖方向分布

$$\frac{2}{\pi} \rho C \hat{u}_b v \doteq \frac{2}{\pi} \rho C \frac{a}{h} \sqrt{gh} \cdot v \doteq \frac{2}{\pi} \rho C a_B \sqrt{gh} \quad \dots \dots \dots (5)$$

式(5)で $h=h_B$ すなわち砕波帯外で摩擦項の係数が一定という簡略化した条件と式(4)をもとに, 新しい解 (Present Model) を構成したものが, 図-11 中の破線である.

上記2つのモデルに対して, P, C, N を算定したものが表-2 中の値である. 表中, 前の値が Longuet-Higgins のモデルによるものである. この場合, 実験と理論の対応は, 最大値を取る地点, および最大値を一致させる方法をとった.

以上のことから, 次のことが結論されよう.

(1) 全体的な形状は, 各ケースとも類似しているが, N, C の値は, いずれのモデルにおいてもケース間で(とくに入射角により)かなり異なる. その理由としては, 摩擦項における非線形形を無視したこと $[(u+U)u$

表—2 実験結果（一様勾配斜面）

CASE	砕波角 θ_B°	汀線変化 x_s cm	砕波帯幅 x_B cm	砕波水深 h_B cm	最大流速とその地点		修正勾配 $\bar{s}$	混合摩擦比		摩擦係数		拡散係数	
					$\bar{v}_m$ cm/sec	x_m		P_L	P_M	C_L	C_M	N_L	N_M
1	4.5	-18	59	3.8	16.4	.71	.064	.040	.047	.013	.013	.0030	.0035
2	4.8	-11	37	2.4	15.2	.72	.065	.036	.041	.012	.012	.0024	.0027
3	15.4	-15	60	4.2	22.0	.63	.070	.10	.13	.027	.027	.012	.015
4	11.4	-15	42	2.5	20.0	.70	.060	.044	.052	.022	.022	.0066	.0078

$+|U| \sim |u|U$ の近似] が考えられる。また Komar (1976) の言う $C/s \sim$ 一定という関係は、今回の実験（固定床）においては成立していない。

(2) 砕波帯の境界線として平均水位の上昇開始点を採用したためあって P の値がかなり小さくなり、Longuet-Higgins (1970) の言う striking な値 0.4 よりも大きくなることはなかった。

(3) 汀線付近では、いずれのモデルに比しても実測値が小さめになる傾向がある。それは、平均汀線の不確定さという要因を考慮したとしても、式 (2) 中の摩擦係数 C が、現象のレイノルズ数に依存し、汀線付近では大きな値をとることを意味していると言えよう [Thornton (1970)]。

(4) 砕波点付近およびその外側では、Present Model の採用による改善の傾向はあるものの、定量的にはまだ問題がある。砕波帯内外を通じて、沿岸流という場における水平拡散係数、摩擦係数に対する考えをつめていく必要のある所以であろう。なお、砕波点付近の流速分布には、砕波点のとり方が、非常に大きな影響をもち、砕波点を沖側にとれば、みかけ上 X_m が小さく、すなわち P が大きくなり、砕波帯外での減少傾向も小さくなって、分布形状もみかけ上実験に一致してくる。

ステップ型底面地形における沿岸流の問題は、まず外力項すなわち砕波帯内の波高分布の評価に困難があることから、その理論的な扱いについては別の機会に譲る。1つ注意すべきことは、強引に一様勾配の理論解を適用すると、明らかに、混合摩擦比 P の値として非常に大きな値 (~ 1) を得てしまうことである。

5. あとがき

実験ケースが少なく、何ら定量的な結果を示すに至らなかったが、沿岸流の研究における現在の問題点の所在の一端を明らかにすることが出来た。本実験およびデータ処理は、当時東京大学大学院学生（修士課程）であった辻岡和男氏の助けを借りた。なお、本研究は、文部省

科学研究費（総合研究—A、代表者堀川清司）の補助を受けて行なわれたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 佐々木幹夫・佐伯 浩：砕波後の波の変形に関する研究 (2)，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 141~147, 1975.
- 2) 水口 優・辻岡和男・堀川清司：砕波後の波高変化についての一考察，第 25 回海岸工学講演会論文集，1978.
- 3) Bowen, A. J.: The generation of longshore currents on a plane beach, J. Mar. Res., Vol. 27, pp. 206~215, 1969.
- 4) Bowen, A. J., D. L. Inman & V. P. Simmons: Wave 'set-down' and 'set-up', J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 2569~2577, 1968.
- 5) Dalrymple, R. A., R. A. Eubanks and W. A. Birkemeier: Wave-induced circulation in shallow basins, Proc. A. S. C. E., Vol. 103, No. WW1, pp. 117~135, 1977.
- 6) Galvin, C. J. and P. S. Eagleson: Experimental study of longshore currents on a plane beach, U. S. Army CERC Tech. Memo. No. 10, 80 p., 1965.
- 7) James, I. D.: A non-linear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Mar. Sci., Vol. 2, pp. 207~234, 1974.
- 8) Jonsson, I. G. and T. S. Jacobsen: Set-down and set-up in a refraction zone, Prog. Rep. Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Engrg. Tech. Univ. Denmark, pp. 13~22, 1973.
- 9) Komar, P. D.: Beach Processes and Sedimentation, Chap. 7, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 429 p., 1976.
- 10) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778~6801, 1970.
- 11) Thornton, E. B.: Variation of longshore current across the surf zone, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., pp. 291~308, 1970.