

斜面遡上波の運動機構に関する実験的研究

郷 農 一 之*・服部昌太郎**・杉 本 直 人***

1. 研究の目的

一様斜面への波の遡上に関する理論研究では、入射波として段波あるいは段波形成条件を適用した浅水長波を対象に解析を行っている (Mayer・Taylor, 1972; Freeman・LeMéhauté, 1988). Keller ら (1960) は、静水汀線に接近すると段波波高は増大した後減衰し、波速が急激に加速される bore collapse (Ho et al., 1963) が発生することを示した。遡上波は、bore collapse で段波波速 U_* とその直背後の内部流速 u とが一致し、遡上波モードとなって遡上最高点に到達する。静水面からの遡上高さ R は式 (1) で与えられ、斜面勾配に無関係である (Shen・Meyer, 1963)。

$$R = U_*^2 / 2g \dots\dots\dots (1)$$

一方、遡上波機構の実験的研究では実験波として段波を、また最大遡上高さの検討には周期波が使用されている。Miller (1970) と Yeh ら (1989) は、段波実験により bore collapse の発生過程を確認し、式 (1) の U_* に静水汀線での段波波速を採用することを提案した。また、遡上高さの実験値が式 (1) を下まわる原因として、実験段波背後部での水面低下に加えて、斜面摩擦の効果が指摘されているが、抵抗を考慮しても両者の不一致は説明できない (Hibberd・Peregrine, 1979)。Yeh・Ghazli (1988) は、段波前面の静止流体の起動に伴う運動量交換と波面での乱れの先行移流、および遡上波先端面の巻き込みなどによる圧力効果が遡上機構に影響することを指摘した。周期波では、砕波による急激な運動量逸散も遡上波の運動性状に大きな影響をもたらす (Svendsen・Madsen, 1984)。

一様斜面と複合勾配斜面上の遡上高さに着目して、数多くの実験 (例えば、Van Dorn, 1976; 豊島ら, 1965; Meyer・Kriebe, 1995) がなされ、相対遡上高さは Hunt (1959) の式 (2) で算定されることが報告されている。

$$R/H_i = s / (H_i/L_0)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 H_i : 入射波高、 L_0 : 沖波波長、 s : 斜面勾配。複

合斜面の遡上高さに関しては、Saville (1977) が換算勾配法を実験結果に基づいて提案して以来、その適用性と修正に対して実験的検討がなされている。また Ogawa・Shuto (1984) は、複合斜面上への遡上高さに対する理論的考察を行い、その算定式を提案した。

波動場の水面変動と内部流速との関連での、遡上機構に関する実験的研究は非常に少ない (Kemp・Princeton, 1974; Roose・Battjes, 1976)。そこで本研究では、入射波の砕波位置以浅での遡上波の水面形状と内部流速の時空間変動測定結果に基づき、wave set-up を考慮した平均汀線付近で、遡上波が段波モードから遡上波モードへ遷移する過程を、一様斜面と複合斜面との比較の下に検討し、遡上運動機構の解明を行う。

2. 実験装置と測定方法

2.1 実験装置

図-1 に示す両面ガラス張り二次元波動水槽 (0.3 m × 0.5 m × 20 m) 内に不透過性滑斜面を設置し、反射吸収式造波機で規則波を造波して実験を行った。実験に使用した斜面は、勾配 s が 1/5, 1/10 および 1/20 の一様斜面と、これらを組み合わせた複合斜面である。

実験条件 (表-1) は、斜面上の波数 l/L [l : 静水汀線から斜面法先までの水平距離] が同一で、砕波モードが巻き砕波と崩れ砕波となるように、Similarity パラメータ ξ (S パラメータと略記) を設定して決定した。

2.2 測定方法

水面形状測定は、水深 2 cm 以深の外浜・砕波帯域では波高計アレーを移動して、またそれより岸側では、高速ビデオ (200 コマ/s) 撮影により行った。水面画像の読み取りには、水槽側壁に設置した 1 cm 正方格子を使用した。遡上波先端位置と速度測定には、遡上計記録を補助

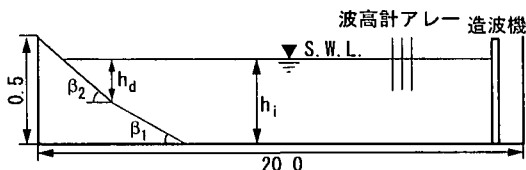


図-1 実験装置の概略図 (単位: m)

* 正会員 工修 鹿島(株)

** 正会員 工博 中央大学理工学部土木工学科 教授

*** 学生会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻

表-1 実験条件

(添字 1 と 2 は、沖・岸側斜面に対する量を示す)

実験	H_i (cm)	h_i (cm)	T (s)	H_i/L	l/L	h_d/H_i	s_1	s_2	ξ_1	ξ_2	
1	5.1	32	0.80	0.051	1.6	—	1/5	—	0.89	—	pl.
2	5.2	32	0.80	0.052	3.2	—	1/10	—	0.44	—	sp.
3	2.4	30	1.25	0.013	1.6	—	1/10	—	0.89	—	pl.
4	2.3	30	1.25	0.012	3.2	—	1/20	—	0.45	—	sp.
5	5.2	32	0.80	0.052	3.2	1.0	1/10	1/5	0.44	0.88	pl.
6	5.3	32	0.80	0.053	3.2	0.0	1/10	1/5	0.43	0.87	pl.
7	2.5	30	1.25	0.013	3.2	1.0	1/20	1/10	0.43	0.87	sp.
8	2.3	30	1.25	0.012	3.2	0.0	1/20	1/10	0.46	0.91	sp.

的に利用した。

差分化した連続式から断面平均流速を算定（郷農ら，1995）するため，入射波 5～6 波を使用した時間間隔 $\Delta t = 0.05$ s ごとの位相平均水面形の時間記録を作成した（空間間隔 $\Delta x = 0.5$ cm）。段波モードの波面速度は，Yeh・Ghazli（1988）と同様に turbulent bore 先端位置から判定した。

4. 砕波帯以浅での水面変動

図-2（実験-1）と図-3（実験-2）に，波高 H ，波頂 η_c と波底 η_t ，および平均水位 $\bar{\eta}$ の岸沖方向変化を，

静水汀線を基準とした岸沖方向距離と静水位を基準とした高さで示す（▼B.P.：砕波位置）。図中の実線は，Kobayashi・Wurjanto（1989）の数値計算モデルによる計算結果である。

巻き砕波（図-2； $x_{BP} = -2$ cm）の波頂崩落で発生する roller の形成で，激しい波高減衰と水面擾乱が認められる。一方，崩れ砕波（図-3； $x_{BP} = -60$ cm）後では，乱流段波は緩やかに減衰しながら砕波帯内を進行する（Horikawa・Kuo, 1966）。この結果，同一入射波条件でも，平均水位上昇と遡上高さに大きな差が生ずる。

図-4（実験-5）と図-5（実験-6）[入射波条件は図-2 と 3 とほぼ同一] は，沖・岸側斜面勾配が $s_1 = 1/10$ と $s_2 = 1/5$ で，斜面接合部の相対水深が $h_d/H_i = 1$ と 0 とである複合斜面の実験結果である。 $h_d/H_i = 1$ の図-4 では，沖側斜面上の砕波形式が崩れ砕波（ $\xi_1 = 0.44$ ）に変わるが，遡上高さは図-2 とほぼ同じである。一方，図-5 の砕波形式は巻き砕波（ $\xi_2 = 0.87$ ， $x_{BP} = -60$ cm）で，砕波点岸側の波高・水位の変動は，図-3 とほぼ同様の傾向を示している。この様に，複合斜面の砕波条件と遡上高さに，斜面接合部水深と岸側斜面勾配とが，大きく影響することが認められる。

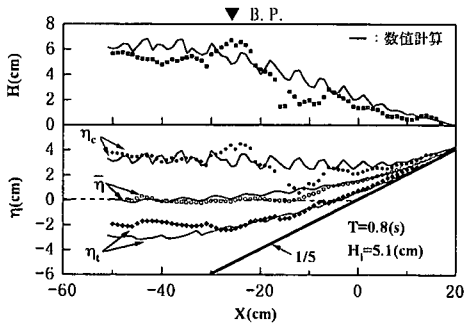


図-2 H , η_c , η_t と $\bar{\eta}$ の岸沖方向変化
(一様斜面, $s_1=1/5$, $\xi=0.89$)

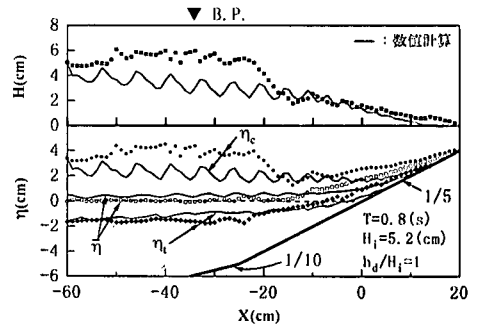


図-4 H , η_c , η_t と $\bar{\eta}$ の岸沖方向変化
(複合斜面, $\xi=0.90$, $s_1=1/10$, $s_2=1/5$)

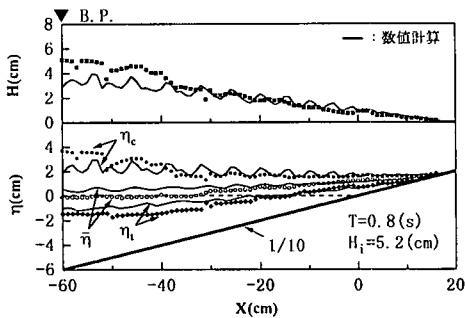


図-3 H , η_c , η_t と $\bar{\eta}$ の岸沖方向変化
(一様斜面, $s_1=1/10$, $\xi=0.44$)

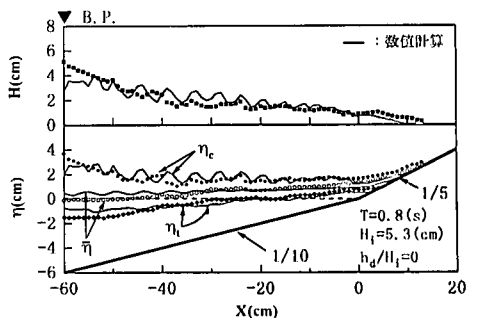


図-5 H , η_c , η_t と $\bar{\eta}$ の岸沖方向変化
(複合斜面, $\xi=0.90$, $s_1=1/10$, $s_2=1/5$)

5. 水面形と内部流速の時空間変化

最大遡上時 ($t/T=0$) を起点として、入射波の $1/5$ 周期ごとの水面形 η と平均流速 u の岸沖分布の時間変化を、図-6 (実験-1, 一様斜面) と図-7 (実験-5, 複合斜面) とに示す。

実験結果に見られるように、遡上期 ($t/T=0.5\sim 0.9$) の後半では、後続波の接近により静水汀線付近の流向は冲向きとなる。このため遡上波の水深が急速に減少するが、 $t/T=0.8$ での遡上先端流速が急増する。最大遡上時 ($t/T=0$) では遡上全域にわたり流向は冲向きとなり、流速は静水汀線に向けて増大する (Hibbert・Peregrine, 1979)。

6. Bore Collapse一段波モードから遡上モードへの遷移—

遡上波の運動挙動を検討するため、図-2~4 の静水汀線沖側の $x=-5\text{ cm}$ から岸側の領域を拡大し、波頂・波底・平均水位の相対高さ (η_c/H_i , η_b/H_i , $\bar{\eta}/H_i$) と相対波高 H/H_i , およびマッハ数 $M=(u_{\max}/(gh_c))^{1/2}$, h_c : 全水深) の静水汀線を基準とした、特徴的な岸沖方向 ($x\cdot s/H_i$) 変化

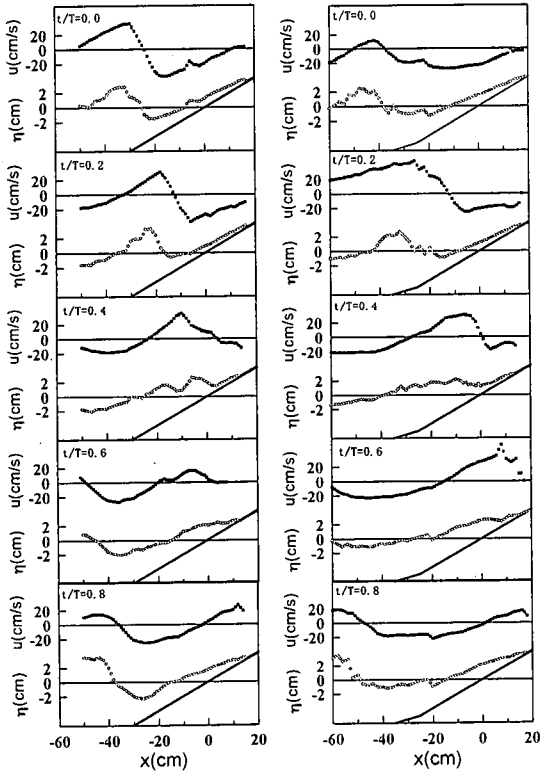


図-6 η と u の岸沖分布の時間変化 (一様斜面, $s=1/5$)
 図-7 η と u の岸沖分布の時間変化 (複合斜面, $s_1=1/10$, $s_2=1/5$)

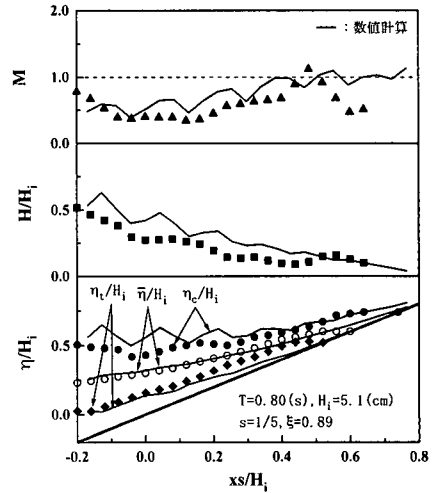


図-8 波形, 波高, マッハ数の岸沖方向変化 (図-2)

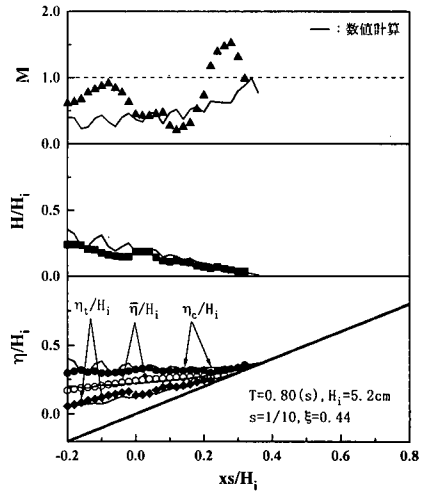


図-9 波形, 波高, マッハ数の岸沖方向変化 (図-3)

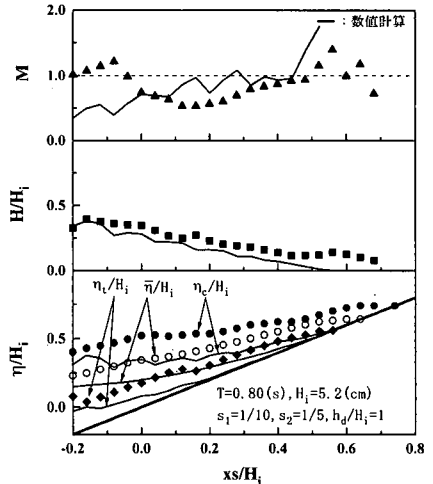


図-10 波形, 波高, マッハ数の岸沖方向変化 (図-4)

を図-8~10に示す。図中の実線は、Kobayashi・Wurjanto (1989) の数値モデルによる計算結果である。

これらの実験結果から、以下のことが認められる。すなわち、静水汀線付近で形成された段波状遡上波の波高は、静水汀線から wave set-up を考慮した平均汀線にかけて減少し、平均汀線付近で僅に増加した後再び減少する。

しかし、遡上波面直後の最大内部流速 u_{max} は急増し、そのマッハ数は $M \approx 1.1 \sim 1.2$ に達する。この様な遡上波の運動挙動は、Yeh ら (1989) の室内実験と Suhayda・Pettigrew (1977) の現地観測でも報告されている。また、Keller ら (1960) と Ho・Meyer (1976) が理論的に示した、遡上波が段波モードから遡上モードに移行する bore collapse 過程が、本実験でも確認された。

bore collapse を経て、水深が極めて薄い遡上モードで遡上最高点到達する周期波の遡上高さに、斜面上の平均水位上昇が重要な影響を持つ (水口, 1993) だけでなく、S パラメータ ξ 値が同一である場合には、平均汀線近傍での遡上運動に類似性が認められる。

wave set-up による平均水位の上昇量は、斜面勾配に線形依存する (Longuet-Higgins・Stewart, 1970)。Van Dorn (1976) は平均水面勾配が斜面勾配の 2 乗に比例すると指摘したが、本研究では 5/3 乗に比例することが認められた (実験結果省略)。

Kobayashi・Wurjanto (1989) の数値モデルでは、 ξ によって入射波の碎波位置は変化するが、碎波後の波高減衰挙動には碎波モードの影響が認められず、また遡上機構に重要である bore collapse も十分に捉えられていない。

7. 最大遡上高さ

斜面上の碎波モード、斜面勾配に依存する wave set-up、および平均汀線での bore collapse により、遡上波の運動特性が影響されることを考慮して、最大遡上高さの算定モデルの構築を試みる。

図-11 (一様斜面) と図-12 (複合斜面) は、相対遡上高さ R/H_i と入射波波形勾配 H_i/L との関係を示し、図中の実線は Hunt 式 (2)、破線は Ogawa・Shuto の式 (1984) を示す。図-11 に見られるように、1/20 斜面に対して若干下回るが、一様斜面の実験値は Hunt 式と良好な一致を示す。Ogawa・Shuto の式は、1/5 斜面では過大評価する傾向が認められる。複合斜面 (図-12) では、斜面接合部水深 h_a が R/H_i に及ぼす効果が見られる。入射波の碎波位置は、入射波高の低下と共に汀線方向に移動するため、 H_i/L が小さい場合は岸側斜面、大きい場合は沖側斜面に相当する遡上高さに近づく。複合斜面接合部水深が $h_a = 0$ の場合には、1/20 勾配斜面での碎波帯幅が広いので、遡上域が僅しか 1/5 斜面にかからない。その

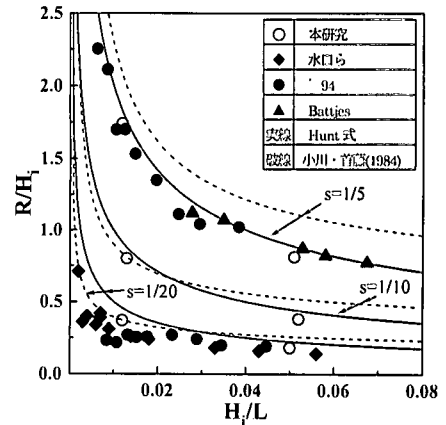


図-11 R/H_i と H_i/L との関係 (一様斜面)

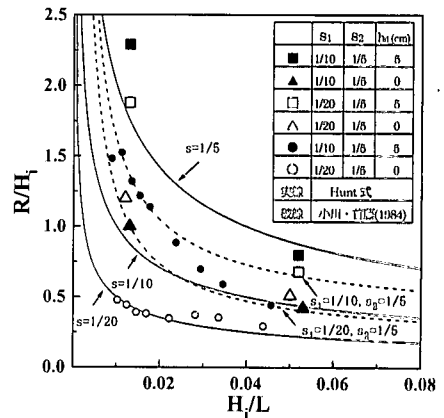


図-12 R/H_i と H_i/L との関係 (複合斜面)

結果、遡上高さは 1/20 勾配の一様斜面の場合とほぼ同程度となる。以上の結果から、碎波、wave set-up、bore collapse などの遡上波挙動に対する影響が再確認される。

そこで、碎波帯から遡上域での波諸量を以下に示す方法で算定して、遡上高さを求めることを試みる。

- (1) 碎波諸量の算定は、合田の式 (1973) により行う。
- (2) 平均水面勾配が斜面勾配の 5/3 乗に比例することから、Van Dorn (1976) と同様に Longuet-Higgins・Stewart の式を修正した式 (3) により、平均汀線における水位上昇 $\bar{\eta}_M$ を算定する。

$$\bar{\eta}_M = \bar{\eta}_0 + \{1.20s^{2/3}/(1-1.20s^{2/3})\}(\bar{\eta}_0 + h_b) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\bar{\eta}_0 = -H_b^2/16h_b$ 。

- (3) 静水汀線から岸側の遡上域では、段波性の遡上波が進行し、遡上域 dry bed 上での遡上段波波高として、静水汀線での平均水深 $\bar{\eta}_0$ を使用する (図-8~10)。

- (4) bore collapse の発生地点を平均汀線とし、 $M = 1.1 \sim 1.2$ を考慮して、bore collapse での最大内部流速を、

$$u_{max} = U_* = 1.2(g\bar{\eta}_0)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

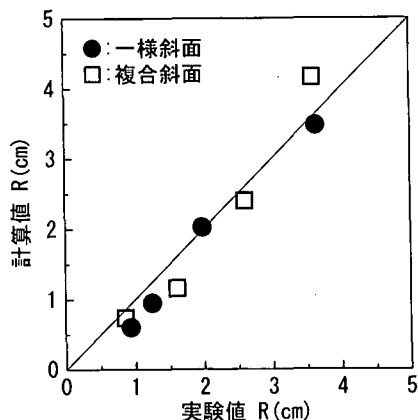


図-13 相対遡上高さの計算と実験との比較

で算定する。

(5) 式 (3) と (4) から、遡上高さ R は式 (5) となる。

$$R = \bar{\eta}_M + 0.72 \bar{\eta}_0 \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

図-13 は、入射波条件から計算した相対遡上高さを実験値とを比較したもので、両者の一致の程度は良好である。さらに、単一斜面と複合斜面の wave set-up に対する効果がほぼ妥当に評価されている。

8. 主要な結果

砕波帯と遡上域での水面と内部流速の時空間変動測定結果により、単一斜面と複合斜面上への遡上波の運動挙動を検討した。その結果、理論と段波実験で指摘されていた、bore collapse 過程が平均汀線付近に存在し、遡上特性が段波モードから遡上モードに移行することが確認された。斜面での遡上高さに、wave set-up による平均水位上昇と bore collapse 地点での遡上段波波速とが主要因であることを示し、その算定法を提案することが出来た。

しかし、bore collapse 周辺での遡上機構をより詳細に解明し、その定量化を図ることが今後の課題として残されている。

謝辞：本研究の実験に、当時中央大学学生であった中嶋剛志君 (JR 九州)、泉 洋一君 (若築建設) および長浜亘君 (飛鳥建設) の協力をえた。また、文部省科研費 (平成 8 年度基盤研究 (C) (2))、研究代表者 服部昌太郎の補助を受けて本研究の一部を行なった。ここに記して、謝意を表する。

参 考 文 献

合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 12, 3, pp. 31-69.

- 郷農一之・有村盾一・服部昌太郎 (1995): 浜崖地形の形成機構, 海岸工学論文集, 42, pp. 616-620.
- 豊島 修, 首藤伸夫, 橋本 宏 (1965): 海岸堤防への打ち上げ高, 海底勾配 1/20, 第 12 回海岸工学講演会論文集, pp. 180-185.
- 水口 優 (1993): 不規則波の遡上・越波とサーフボート, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 1-27.
- Freeman, J. C. and B. LeMéhauté (1964): Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, Proc. ASCE, 90, No. HY2, pp. 187-216.
- Hibberd, S. and D. H. Peregrine (1979): Surf and run-up on a beach: a uniform bore, JFM, 95, pp. 323-345.
- Ho, D. V., and R. E. Meyer (1966): Climb of a bore on a beach. Part 1. Uniform beach slope, JFM, 14, pp. 305-318.
- Ho, D. H., R. E. Meyer, and M. C. Shen (1963): Long surf, Jour. of Marine Research, 21, 3, pp. 219-232.
- Horikawa, K. and C. Kuo (1966): A study on wave transformation inside the surf zone, Proc. 10th ICCE, pp. 217-233.
- Hunt, I. A. (1959): Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, 85, No. WW3, pp. 123-152.
- Keller, H. B., D. A. Leven, and G. B. Whitham (1960): Motion of a bore over a sloping beach, JFM, 7, pp. 302-316.
- Kemp, P. H., and D. T. Prinston (1974): Internal velocities in the uprush and backwash zone, Proc. 14th ICCE, pp. 575-585.
- Kobayashi, M., and A. Wurjanto (1989): Numerical model for design of impermeable coastal structures, Research Rept. No. CE-89-75, Ocean Engrg. Program, Univ. of Delaware, Newark, Delaware.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964): Radiation stress in water waves; a physical discussion with applications, Deep Sea Research, 11, pp. 529-562.
- Mayer, R. E., and A. D. Taylor (1972): Run-up on beach, Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, ed. Mayer, New York, Academic Press, pp. 357-412.
- Meyer, R. H., and D. L. Kriebe (1994): Wave runup on composite slope and concave beaches, Proc. 23rd ICCE, pp. 738-751.
- Miller, R. L. (1968): Experimental determination of run-up of undular and fully developed bores, JGR, 73, pp. 4497-4510.
- Ogawa, Y., and N. Shuto (1984): Run-up of periodic waves on beaches of non-uniform slope, Proc. 19th ICCE, pp. 328-344.
- Roose, A. and J. A. Battjes (1976): Characteristics of flow in run-up of periodic waves, Proc. 15th ICCE, pp. 781-795.
- Saville, T. Jr. (1958): Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th ICCE, pp. 691-699.
- Shen, M. C., and R. E. Meyer (1963): Climb of a bore on a beach, Part 2. Non-uniform beach slope, JFM, 16, pp. 108-112.
- Suhayda, J. N., and N. R. Pettigrew (1977): Observations of wave height and wave celerity in the surf zone, JGR, 82, No. 9, pp. 1419-1424.
- Svendsen, I. A., and P. A. Madsen (1984): A turbulent bore on a beach, JFM, 148, pp. 73-96.
- Yeh, H. H., and A. Ghazali (1988): On bore collapse, JGR, 63, No. C6, pp. 6930-6936.
- Yeh, H. H., A. Ghazali, and I. Marton (1989): Experimental study of bore run-up, JFM, 105, pp. 563-578.
- Van Dorn, W. G. (1976): Set-up and run-up in shoaling breakers, Proc. 15th ICCE, pp. 738-751.