

斜め入射する孤立波の変形と runup に関する実験的研究

和田 清*・Harry H. Yeh**

1. はじめに

沖合いから海岸線に津波が近づくと、汀線付近の勾配や入射角によって、edge bore が形成されたり、Mach stem が生じることなどが知られている (首藤, 1988)。防波堤に波が斜めに入射する場合の反射現象において、防波堤と垂直な方向に波峰が伸びる Mach stem が進行することが Wiegel (1964) によって紹介されている。その後、Miles (1977) は、KdV 方程式を用いて斜め入射する 2 つの孤立波の相互干渉を理論的に取り扱い、鉛直壁面での Mach stem の波高や発生限界を求めた。Miles の理論では入射角と波高水深比を変数としたときに、鉛直壁面において Mach stem の波高は極値をもち、その妥当性を検証する実験が Melville (1980) によって行われた。彼によれば、Miles の理論のような入射波の波高の 4 倍という極値は現れない。さらに、Tanaka (1993) は、孤立波における Mach stem の解析を強非線形な方程式を用いて数値計算しており、定量的な評価が試みられている。一方、一様傾斜面に波が斜めに入射する場合では、Chen (1961) による先駆的な実験が行われており、edge bore の形態や発生条件が明らかにされている。また、一様傾斜面や陸棚地形における Mach stem の理論的な解析が Carrier (1983) によって行われている。しかしながら、これらの諸形態は非線形性の強い現象であり、工学上重要な課題であるにも関わらず、理論的な取り扱いが容易ではなく、定量的に解明されている点が多くないのが現状である。

本研究では、一様勾配斜面に孤立波が斜め入射する場合を取り上げて、汀線の反射条件 (鉛直壁、一様勾配) による Mach stem の発生の変異、さらには斜面上の runup による反射波の位相遅れが Mach stem の形成に及ぼす影響などを、波高分布やトレーサーによる水粒子速度分布などから実験的に明らかにしたものである。

2. 実験の概要

実験は、米国ワシントン大学土木工学科の一部ガラス張りの鋼製水槽 (幅: 5.5 m, 長さ: 13.4 m, 斜面勾配: 15°) 内で行われた (図-1)。造波方式は油圧サーボによるピストン式である。入射角は、鉛直壁を斜面端部に設置した場合 (case-I: 一定水深) で Mach stem が発生する角度 30° (一定: 波向きが汀線に平行な場合を入射角 0°) とした。さらに、runup の影響を比較するために、その鉛直壁を斜面上の汀線位置に設置した場合 (case-II, runup を拘束した状態) および鉛直壁がない場合 (case-III: 一様勾配斜面) の 3 種類の条件を設定した。なお、鉛直壁は越波しない十分な高さとした。水深 h は一定 (6.3 cm) とし、孤立波の水深波高比 (H/h) は 0.05~0.51 の範囲で 6 種類変化させ、time duration は 0.75~2.12 s である。波高の測定位置は、造波板前面 (60 cm) の他、汀線に直角な断面を 7 測線 ($x = -36, 24 \sim 124$ cm: 20 cm 間隔)、岸沖方向に 5 cm 間隔で 12 測線 ($y = 3 \sim 68$ cm: 5 cm 間隔) の格子状を設定した。さらに、runup 領域を 5 点 ($y = -22 \sim -2$ cm: 5 cm 間隔) 計測し、総計測点数は 113 である。計測には直径 0.5 mm のタンタル線 (Ta) のセンサー部をもつ小型容量式波高 (水位) 計を用いて、サンプリング周波数 100 Hz でデジタル記録した。

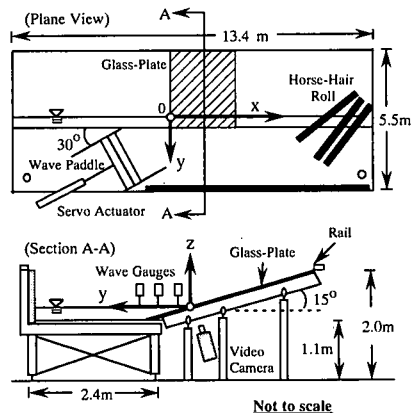


図-1 実験装置

* 正会員 工博 岐阜工業高専 助教授 環境都市工学科

** 正会員 Ph.D. University of Washington, Professor, Department of Civil Engineering

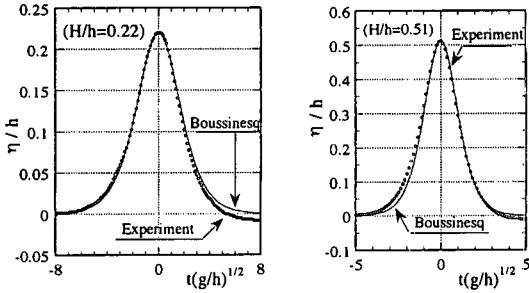


図-2 孤立波の造波波形 (理論値と実験値)

この容量式波高計の原理は Chapman and Monardo (1991) によって開発され、ワシントン大学で改良された波高計を本実験に使用した。センサー部の表面張力の影響を極力小さくして高精度で測定が可能である (Chang, 1995)。また、ガラス張りの斜面を利用してビデオカメラを水槽下部に固定し、トレーサー (polyethylene copolymer: 直径 0.5 mm, 比重 1.15) を利用した流れの可視化を行い、runup 領域を含めた汀線付近の水粒子速度や軌跡を画像解析した。

3. 結果および考察

3.1 造波波形の特性

孤立波の波形 η は次式のように表される。

$$\eta/h = (H/h) \operatorname{sech}^2\{(3H/4h)^{1/2}(x - Ct)/h\} \dots\dots (1)$$

ここで、波速 $C = (gh)^{1/2}(1 + H/2h)$, h : 水深, H : 波高, t : 時間, g : 重力加速度である。この Boussinesq によって求められた (1) 式と造波板前面から 150 cm 離れた位置において計測された波形を比較した例が図-2 である。水深波高比 H/h が約 0.5 以下の範囲では、計測された波形は理論値と比較的よく一致していることがわかる。

3.2 鉛直壁設置における Mach stem の発生

鉛直壁を傾斜面の端部に設置して一定水深とした場合 (case-I), 岸沖方向の波高の時間変化を示した一例 ($x = 24$ cm の計測断面, $H/h = 0.22$) が図-3 である。同図を見ると、鉛直壁付近では急峻な峰をもつ波動が生じており、沖側へ遠ざかるにつれて 2 つの峰をもつ双方型に変化する様子がうかがえる。この時間波形を空間波形に置き換えて真上から見た場合には、入射波、反射波、およびこの鉛直壁付近の単一波の 3 つの波が合わさって、Y 字形をなしてみえる。すなわち、この単一波が入射波、反射波によって合成された Mach stem である。鉛直壁に近いところでは入射波と反射波の峰同士の距離が短いため、Mach stem は背の高い、峰の前後幅 (実効波長) が短い波となる。鉛直壁からある程度離れると、入射波の峰の位置と反射波のそれが離れすぎていて、もはや単一

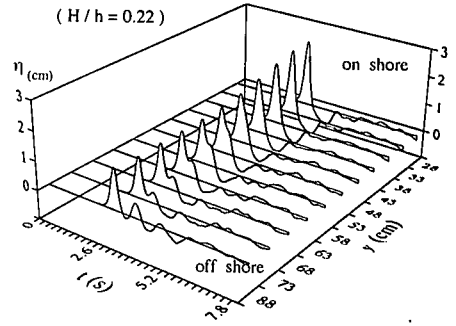


図-3 岸沖方向の波高の時間変化 (Case-I)

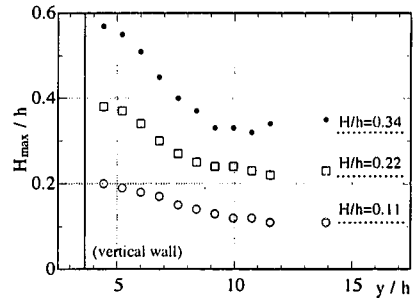


図-4 波高の増幅率 (Case-I: 鉛直壁+一定水深)

の合成した峰は形成されないことになる。図-4 は、第 1 波目の波高に着目し、その岸沖方向の変化を示したものである。沖波の水深波高比 H/h によって波高の大きさは異なるものの、鉛直壁に沿う波高と入射波高の比は 3 者とも 1.7 倍程度であり、ほぼ同様の変化をしていることがわかる。Miles はその理論解におけるパラメータ (入射角と入射波高に関係) $\kappa = 1$ のとき、入射波高の 4 倍の波高が生じるとしたが、本実験ケースの値は $\kappa = 0.91$ に相当し、それほど大きな極値は生じていない。これは Melville が検証実験データをもとに指摘したように、Miles の理論解に示されたような波高比の極大値は存在しないことと一致する。

次に、鉛直壁を斜面上の汀線位置に設置した場合 (case-II, runup を拘束した状態) について見てみよう。図-3 と同条件における岸沖方向の波高の時間変化を示せば図-5 のようである。Mach stem が顕著に発生した case-I と比較すると、その範囲はきわめて限定されるが、反射波と入射波の合成された急峻な峰をもつ波動が鉛直壁付近に生じている様子がわかる。さらに、図-4 と同じように第 1 波目の波高に着目して、その岸沖方向の変化を示せば、図-6 のようである。case-I とは異なり、一定水深の範囲では波高の増幅は見られない。傾斜面のほぼ中間点以浅で徐々に波高の増幅が現れる。case-I の場合には鉛直壁近傍で波高が平衡点に達することが容易

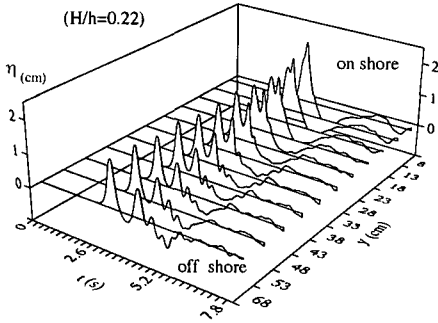


図-5 岸沖方向の波高の時間変化 (Case-II)

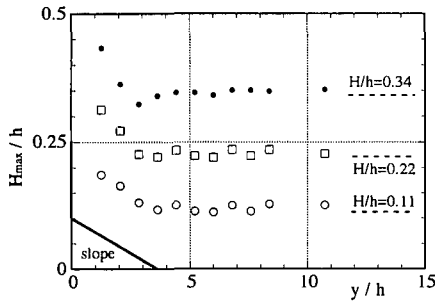
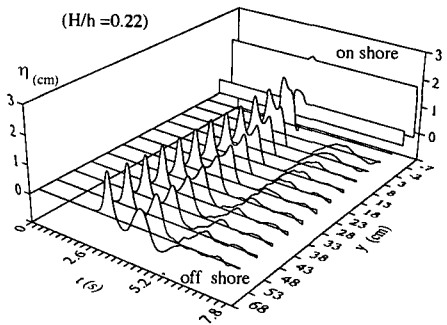
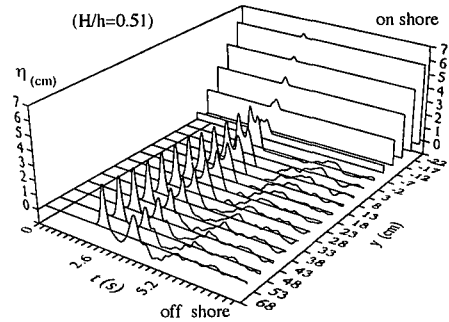


図-6 波高の増幅率 (Case-II: 鉛直壁+一様斜面)

図-7 岸沖方向の波高変化 (Case-III: runup, $H/h=0.22$)図-8 岸沖方向の波高変化 (Case-III: runup, $H/h=0.51$)

に推察されたが、case-II では鉛直壁近傍の波高データが計測されていないため、その平衡点が見い出せない。増幅率の目安を得るために、計測された最も鉛直壁面に近いデータで代用すれば、波高水深比 $H/h=0.11, 0.22, 0.34$ においてそれぞれ 1.64, 1.42, 1.28 の値が得られる。 H/h が小さく非線形性が弱い場合には、case-I の場合とほぼ同程度の増幅率が生じていると思われる。 H/h が大きくなると、鉛直壁面付近はきわめて浅いために碎波を伴った複雑な現象となる。Chen (1961) は、波の進行方向とある小さい角度で交差する斜面を設置し、その入射角 θ と斜面勾配 $\beta (\geq 20^\circ)$ を変化させて、波動の伝播特性を考察した。その結果、edge bore は θ と β によって 3 つの形態に分類できることや、edge bore の背後には幾筋もの小さい波列 (ripple) が形成されることを明らかにした。本実験ケースは、Chen が行った実験条件下で、汀線付近へ新たに鉛直壁を設置した場合に相当する。波高水深比 H/h が 0.2 を越えるようになると、波の前面は滑らかなもの、鉛直壁設置によってその付近に Mach stem が形成されて波高が増大し、ある水深以上になるとその背後では碎波して渦を形成しながら伝播する状態となっている。

3.3 一様斜面上における波の変形

鉛直壁のない一様斜面上における波の変形 (case-III) を見てみよう。図-7 は、前述と同様に、岸沖方向の波高

の時間変化を示したものである。ただし、静水面以上の runup 領域は地盤高を加えて表示している。静水面より沖側では入射波と反射波が明瞭に分離して、もはや Mach stem は形成されないことがわかる。さらに、非線形性の影響が強い $H/h=0.51$ の場合には、図-8 からわかるように、斜面上の runup 領域において、入射波と反射波が分離している様子がうかがえる。汀線に近い同じ計測点 ($y=8$ cm) において、runup を拘束した場合としない場合の波高変化を示したものが図-9 である。鉛直壁がない場合には波形は双方型となり、入射波と反射波が分離している。一方、鉛直壁を設置した場合には単一の波形であり、鉛直壁がない場合の入射波 (a) に反射波 (b) を重ね合わせた波形 ($a+b$) とほぼ類似している。このことは、反射波の位相が鉛直壁の存在によって強制的に早くなり、入射波と反射波がほぼ同位相で合成される Mach stem が形成されやすいことを示している。runup 領域における水位の時間的変化を重ねて合わせて示せば、図-10 のようである。図-9 に示した双方型の波形は runup 領域では扁平な形状もしくは単一の波形に変化し、さらに、そのピークの時間もシフトしていることがわかる。すなわち、波形の峰に着目すると、静水面以深の入射波の峰 (図中 A 点) は runup 領域の最高点付近の B 点を経て、斜面を下りながら反射波が形成されて第 2 番目の峰 (C 点) に推移する様子が明瞭に現れてい

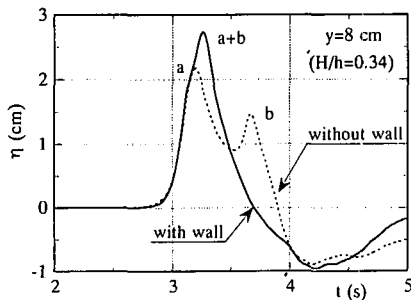


図-9 鉛直壁の有無と波高の時間変化 (Case-II, Case-III)

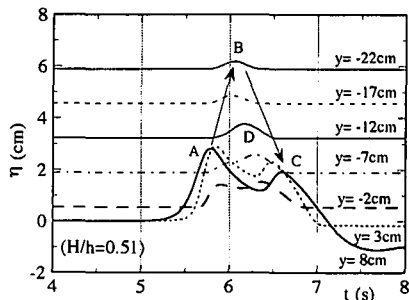
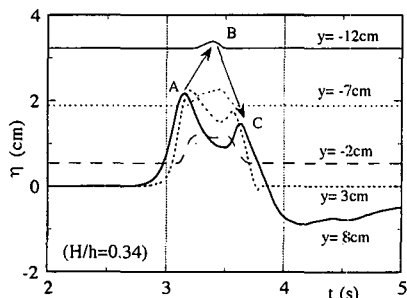
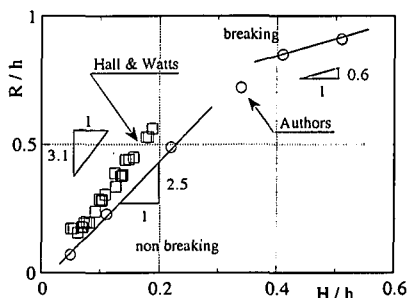
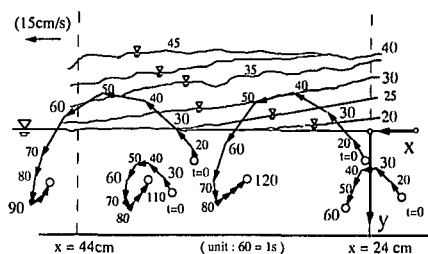
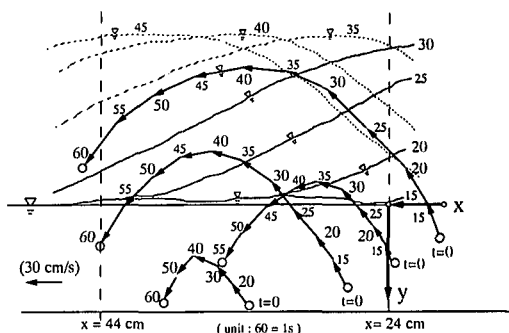
図-11 runup 遡上域の波高変化 (Case-III, $H/h=0.51$)図-10 runup 遡上域の波高の変化 (Case-III, $H/h=0.34$)

図-12 最大遡上高さと波高 (Case-III)

る。非線形性が強くなると、図-11 ($H/h=0.51$) に示したように、runup 遡上領域はさらに増大して、図中 A → B → C の順に波の峰が推移する。ただし、図中の D のように、runup の最高遡上点に達した後、ピークが出現する場所も見いだせる。非線形性が弱い場合における runup 遡上領域の浸水形状は、岸沖方向の軸に対してほぼ対称的な舌状の形をしている。非線形性が強くなると、runup の最高遡上点付近では水深がきわめて浅く、波速も遅くなるので、沖側に比べて波先線は後退する。観察によれば、ある領域 (十数 cm) までは汀線にほぼ直角で、それより沖側では前進することになる。フロントの背後は渦を巻き込んだ状態となり、浸水形状はもはや対称ではない。このような事実から、runup 遡上領域に浸水する時間はほとんど同じでも、汀線付近の波先形状やフロント背後の状態などによって、その波峰のピーク時間が逆転することは興味深い。

3.4 runup の最大遡上高さ

runup の最大遡上高さ R と水深の比 (R/h) および H/h の関係を示せば図-12 のようである。同図には、斜面勾配が同じ条件下で非砕波の Hall and Watts (1953) の直角入射 ($\theta=90^\circ$, 2次元水路) の実験結果が併記されている。両者の傾きの違いから、斜め入射による遡上高さの減少がうかがえる。また、Synolakis (1986) が 2次元水路における実験結果でも明らかにしたように、砕波時と非砕波時の R/h と H/h の傾きが異なる点も見い出せる。

図-13 runup 遡上域の水粒子軌跡 (Case-III, $H/h=0.11$)図-14 runup 遡上域の水粒子軌跡 (Case-III, $H/h=0.22$)

3.5 runup 遡上域における水粒子の軌跡

汀線付近の流況を把握するために、トレーサーを利用した流れの可視化を行った。使用したトレーサーは粒径

が小さく底部に沈殿するので、測定された結果は底面境界層内の挙動を表している。 $H/h=0.11$ および 0.22 における結果を示せば、図-13、図-14 のようである。図中には、汀線の時間変化が併記されており、数値はコマ数 ($60 \text{ コマ}=1 \text{ s}$) である。図はガラス面を下から上に見た向きで表現されており、孤立波は右下から斜めに入射する。同図から、孤立波が斜面上に進入すると弧を描くように水粒子は移動する。さらに、初期座標が静水面に近いほどrunupの遡上の影響が大きいので、その軌跡の長さは増大することになる。最大runup遡上域付近の流速は約 40 cm/s ($H/h=0.22$) に達し、大きな速度で長い距離を移動することがわかる。このようなrunup領域における大きい流速を鉛直壁で拘束した効果は、反射波の位相を早めると同時に、壁面付近の流れ場の特性を大きく変化させているものと考えられる。

4. おわりに

以上、一様勾配斜面に孤立波が斜め入射する場合を取り上げて、汀線の境界条件(鉛直壁、一様傾斜面)の違いによる波の変形を比較しながら、Mach stemの発生状況、さらには斜面上のrunupによる反射波の位相遅れがMach stemの形成に及ぼす影響などについて述べた。孤立波が一様傾斜面やステップ状の陸棚地形に斜め入射する場合の相互干渉効果については、Carrierの理論的な成果がある。両地形の場合ともに、汀線上でMach stemの形成がみられ、沖に遠ざかるにつれて入射波と反射波が分離する様子を示している。これらは、runupの効果を直接考慮しておらず、本研究で示したような鉛直壁を設置した場合に相当している。今後、Carrierの理論解と比較検討するとともに、runupの効果を直接考慮した解析を行う所存である。

本研究は、文部省在外研究員として米国 University of

Washington, Department of Civil Engineering に滞在中 (平成8年5月～平成9年3月) に行われた研究成果の一部を取りまとめたものである。

謝辞: 最後に、本研究の遂行に際して適切な助言とご協力を賜った明石高専 檀 和秀博士 (当時文部省在外研究員)、およびデータ整理にご協力頂いた岐阜高専専攻科生 谷口智紀君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 首藤伸夫 (1988): 日本海中部地震津波の発生・増幅機構と破壊力, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究成果, No. A-63-1, pp. 87-140.
- Wiegel, R. L. (1964): Water wave equivalent of Mach reflection, Proc. 9th Conf. Coastal Engrg., ASCE, pp. 82-102.
- Miles, J. W. (1977): Resonantly interacting of solitary waves, J. Fluid Mech., Vol. 79, pp. 171-179.
- Melville, W. K. (1980): On the Mach reflexion of a solitary wave, J. Fluid Mech., Vol. 98, pp. 285-297.
- Tanaka, M. (1993): Mach reflection of a large-amplitude solitary wave, J. Fluid Mech., Vol. 248, pp. 637-661.
- Chen, T. C. (1961): Experimental study on the solitary wave reflection along a straight sloped wall at oblique angle of incidence, Technical Memorandum No. 124, pp. 1-24.
- Carrier, G. F. and C. F. Noiseux (1983): The reflection of obliquely incident tsunamis, J. Fluid Mech., Vol. 133, pp. 147-160.
- Chapman, R. D. and F. M. Monardo (1991): APL wave gage system, Report No. S1R-91U-041, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 135 p.
- Chang, K.-T. (1995): Evolution of landslide-generated edge-wave packet, Ph. D thesis, University of Washington, 178 p.
- Hall, J. V. and G. M. Watts (1953): Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes, Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Tech. Memo 33, p. 14.
- Synolakis, C. E. (1986): The runup of long waves, Ph. D thesis, California Institute of Technology, 220 p.