

潜堤による非線形不規則波列の局所スペクトル変形

大 山 巧*・灘 岡 和 夫**

1. はじめに

潜堤や砂州などの水深急変部における波の分裂現象は、局所的なスペクトル特性の変化を意味し、沿岸域の海浜流場や漂砂量に大きな影響を及ぼすことから（例えば、Hulsbergen, 1974）、海岸工学上、非常に重要な現象と言える。この現象を理論的あるいは数値的に予測するためには、任意の非線形分散波動場が取り扱えるモデルを用いる必要がある。しかし、KdV 方程式 (Seabra-Santos et al., 1987) やストークス波の第 2 次解 (Massel, 1983) を対象とした既存の数値モデルでは、いずれも弱非線形を仮定しており、さらに長波から深海波までの広い周期帯域の波動場を同時に取り扱うことができなかったため、適用範囲がかなり限られていた。

これに対して著者らは、任意の非線形波動場を取り扱うことができる数値波動水槽を開発し (大山・灘岡, 1991a)、潜堤による規則波列の分裂現象の解析に応用することにより、その具体的なメカニズムを解明するとともに (大山・灘岡, 1991b)、分裂特性に及ぼす入射波および堤体諸元の影響を明らかにした (大山・灘岡, 1992)。この数値波動水槽では、任意の非線形波を入射させつつ解析領域内で発生する反射・散乱波を領域外に透過・吸収させることが可能であるため、従来のモデルでは解析が不可能であった強非線形・強分散不規則波動場を取り扱うことができる。そこで本研究では、これまでの一連の研究に引き続き、実際問題として重要になる不規則波列を対象とした場合の、潜堤による局所スペクトル変形を解析することを試みた。

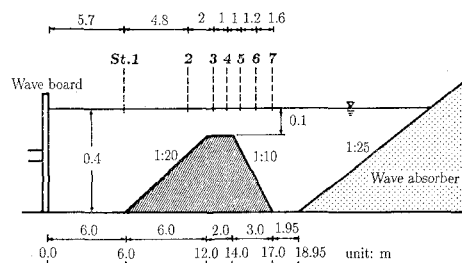
本論文では、まず台形潜堤に対する模型実験との比較から数値モデルの妥当性を示した後、2 成分波および 3 成分波が矩形潜堤に入射する場合を対象とした計算により、入射成分波間の相互干渉効果を調べ、さらに多成分不規則波のスペクトル変形を検討する。なお、数値モデルについては前報 (大山・灘岡, 1991a) に詳しいので、本論文では省略する。

2. 模型実験による数値モデルの検証

ここでは、図—1 に示すような台形潜堤を対象とした Beji et al. (1992) の 2 次元模型実験との比較を行った。実験では、ピストンタイプの造波機により規則波と不規則波を発生させており、図に示す合計 7 地点での水面波形と造波板の水平変位を測定している。不規則波の発生に際しては、JONSWAP 型のスペクトルを用いており、 $f_p=0.5$ Hz, $H_{1/3}=1.8$ cm (f_p : ピーク周波数, $H_{1/3}$: 有義波高) および $f_p=0.8$ Hz, $H_{1/3}=2.3$ cm の 2 ケースを入射波条件としている。なお、潜堤からの波の反射の影響は非常に小さいことが、規則波の実験により確かめられている。

数値波動水槽による解析では無反射造波を行うことが可能であるが、ここでは模型実験と条件を等しくする意味から、実験における造波板の変位波形から求められた水平速度を解析領域の片側の鉛直境界に与えることにより波を発生させた。また、実験の消波装置と同じ位置には、有義波の波長と等しい幅を持つ数値消波フィルター (大山・灘岡, 1991a) を設けた。

図—2 は、 $f_p=0.5$ Hz, $H_{1/3}=1.8$ cm の場合における各地点での波形の比較を示したものである。堤体上では波の非線形性の影響を強く受けるため、St. 3, 4 における実験波形は非常に先鋭的になっている。また、透過側の St. 7 の実験波形を入射側の St. 1 の波形と比べてみると、短周期成分がより顕著に現れている。そして、計算波形はこれら実験波形と良好な一致を示していることがわかる。



図—1 実験における台形潜堤の形状と波形測定点の位置

* 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所環境技術研究部

** 正会員 工博 東京工業大学土木工学科助教授

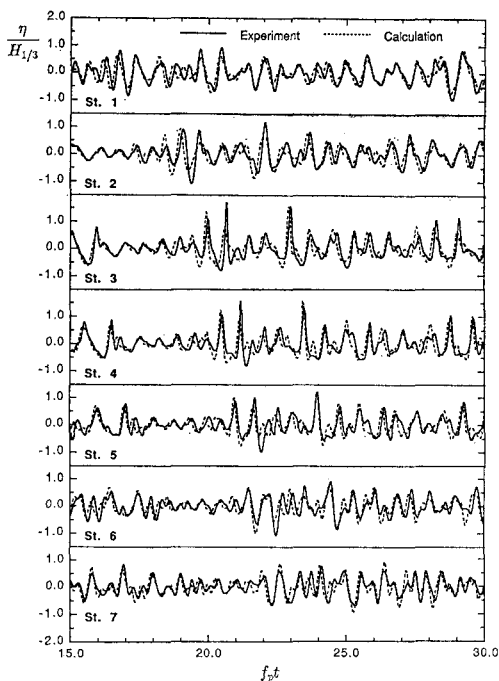


図-2 各地点における波形の比較 ($f_p=0.5$ Hz, $H_{1/3}=1.8$ cm)

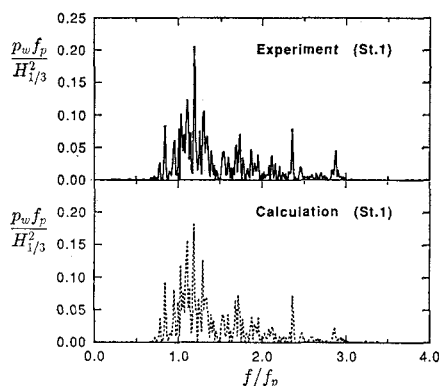
図-3 (a)~(c) は, 88 秒間 ($44/f_p$) の波形データから得られた St. 1, 4, 7 でのパワースペクトル p_w の比較を示したものである。これらの図からわかるように, 波の非線形性の影響が弱い St. 1 では計算結果と実験結果の一致は非常に良好であるのに対して, 堤体上の St. 4 と堤体背後の St. 7 ではスペクトルのピーク値を過大に見積っている。この主な理由としては, 実験における底面摩擦などによるエネルギー損失が計算では考慮されていないこと, 造波境界で与えた速度波形 (入射波条件) が実験とは完全に一致していないこと, および数値計算上の分解能の影響があげられるが, 実用的には満足できる程度の精度が得られていると思われる。以上の模型実験結果との比較から, 本数値モデルの不規則入射波に対する妥当性が確かめられた。なお, 規則波を含めた他のケースに関する比較については, Beji et al. (1992) に詳しい。

3. 2成分入射波の変形

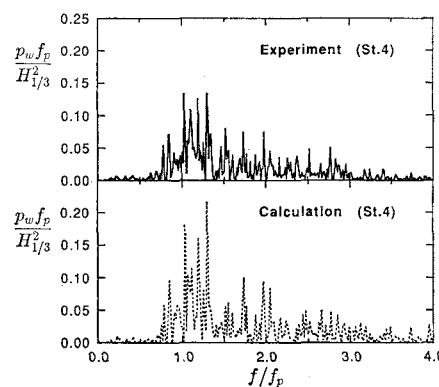
まず, 不規則波の最も極端なケースとして, 2成分入射波の変形について計算を行った。なお本論文では, 非線形性の弱い不規則波が局所的に強い非線形性の影響を受ける場合を想定することとし, 計算における入射波列は成分波の重ね合わせとして以下のように与えた。

$$\eta_{in} = \sum_n a_n \sin(k_n x - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \dots\dots\dots (1)$$

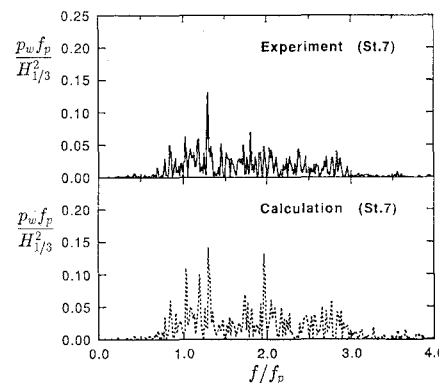
ただし, η_{in} は入射波形, a_n , k_n , f_n , ε_n はそれぞれ入



(a) St. 1



(b) St. 4

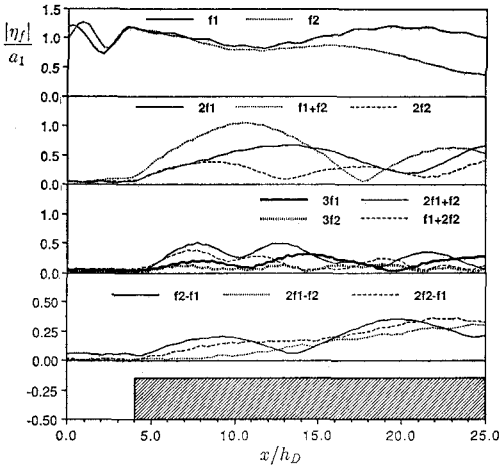


(c) St. 7

図-3 パワースペクトルの比較 ($f_p=0.5$ Hz, $H_{1/3}=1.8$ cm)

射成分波の振幅, 波数, 周波数, 位相である。具体的には, 式 (1) に対応したわき出し強度を造波ソースに与えることにより, 波を発生している。

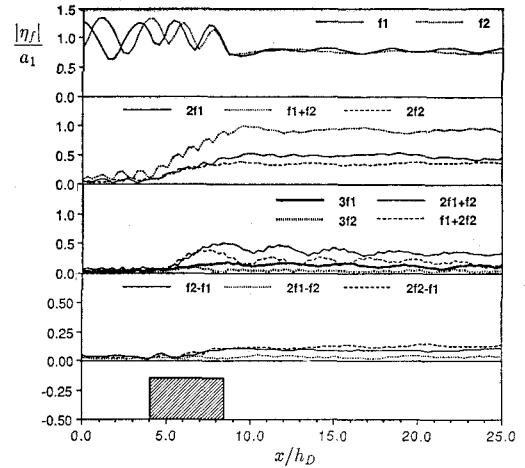
規則波入射を対象とした前報 (大山・灘岡, 1992) で述べたように, 潜堤通過に伴う波の周期特性の変化は, 堤体上での nonlinear resonant interaction (Mei and Ünlüata, 1972; Bryant, 1973) が引金となる。そこで規



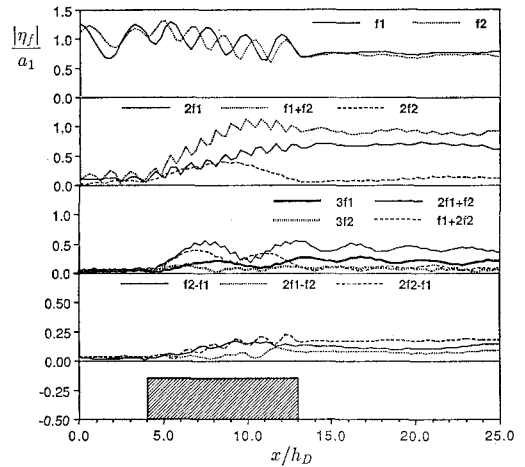
図—4 2成分入射波に対するステップ地形上の $|\eta_f|$ の分布
 $(f_1\sqrt{h_D}/g=0.125, f_2\sqrt{h_D}/g=0.148, a_1/h_D=a_2/h_D=0.025, h_s/h_D=0.3)$

則波の場合と同様に、まずステップ地形上の水深が浅い領域における各周波数成分波の発達を調べることとした。図—4は、 $h_s/h_D=0.3$ (h_s, h_D : 堤体上および水槽内の水深)のステップ地形に、 $f_1\sqrt{h_D}/g=0.125, f_2\sqrt{h_D}/g=0.148, a_1/h_D=a_2/h_D=0.025, \varepsilon_1=\varepsilon_2=0$ の2成分波が入射する場合の各周波数成分波振幅 $|\eta_f|$ の分布を示したものである。計算では、 $\Delta t\sqrt{g/h_D}=0.25, \Delta x/h_D=0.35$ (Δt : 時間増分, Δx : 節点間の x 方向距離)とし、 $|\eta_f|$ は波を発生してから $10/f_1$ 以降の512個の波形データから計算した。図—4に示されるように、堤体上では入射成分波の整数倍周波数成分 ($2f_1, 2f_2, \dots$) のほかに、和の波 ($f_1+f_2, \dots$) と差の波 ($f_2-f_1, \dots$) の周波数成分も励起されている。さらに、各周波数に対して複数の波数成分 (拘束波と自由波) が存在することから、これらの成分波振幅はいずれも空間的に変動し、複数の極大値と極小値が現れている。また、和の波 (f_1+f_2) の振幅の最大値は入射成分波の整数倍成分 ($2f_1, 2f_2$) に比べてかなり大きくなっており、差の波 (f_2-f_1) に対応した長周期波も励起されることから、入射成分波間の非線形干渉がより重要となることがわかる。

図—5(a), (b)は、堤体幅 D を $D/h_D=4.5, 9.0$ とした矩形潜堤について、図—4のステップ地形の場合と同様な入射波条件に対する $|\eta_f|$ の分布を示したものである。規則波入射の場合と同様に、波が堤体背後の非線形性の影響の弱い領域に進入する際には、大部分のエネルギーが各周波数に対応した自由波成分に移行されるため、 $|\eta_f|$ はほぼ一定となる。堤体上の $|\eta_f|$ には、潜堤の透過側端部からの反射に起因したわずかな変動が現れるが、透過波に含まれる $|\eta_f|$ は、図—4のステップ地形上における潜堤の透過側端部に対応した地点での $|\eta_f|$ の大きさにほぼ等しくなっている。従って、 $D/h_D=4.5$ (図—5



(a) $D/h_D=4.5$



(b) $D/h_D=9.0$

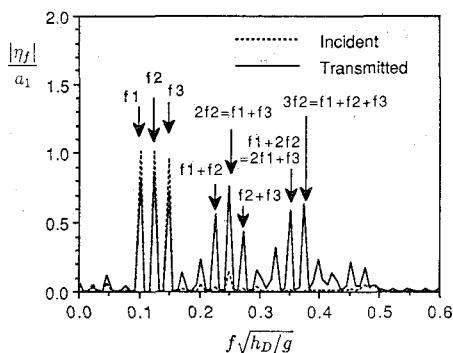
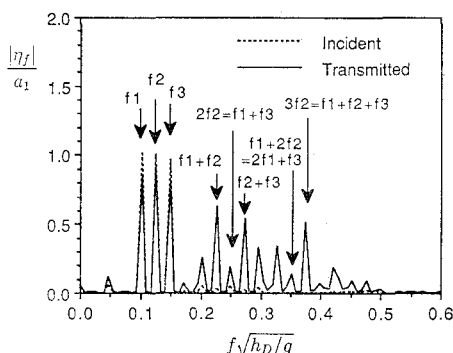
図—5 2成分入射波に対する潜堤周辺の $|\eta_f|$ の分布
 $(f_1\sqrt{h_D}/g=0.125, f_2\sqrt{h_D}/g=0.148, a_1/h_D=a_2/h_D=0.025, h_s/h_D=0.3)$

(a) では透過波に含まれる $2f_1$ と $2f_2$ の成分がほぼ同じ振幅を持つものに対して、ステップ地形上で $2f_2$ が極小になる位置に潜堤幅を設定した $D/h_D=9.0$ (図—5(b)) では、透過波における $2f_2$ 成分は非常に小さい。

以上のステップ地形と潜堤に関する計算結果から、堤体上と堤体背後での $|\eta_f|$ の変動パターンは規則波の場合と定性的に同様であるが、入射成分波が複数になると成分波間の非線形干渉により和の波と差の波が発生し、特に和の波の振幅は相対的に有意な大きさを持つことが明らかになった。

4. 3成分入射波の変形

次に、振幅が一定で周波数の差が等しい ($f_2-f_1=f_3-f_2$) 3成分波が矩形潜堤に入射する場合の透過波のスペクトル特性を計算した。

(a) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ (b) $\varepsilon_2 = 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \pi/2$

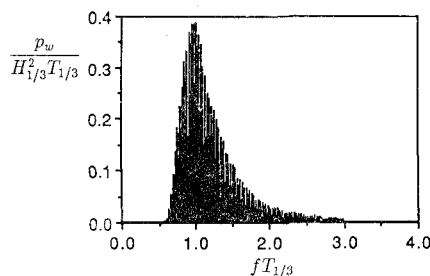
図—6 3成分入射波に対する透過波の成分波振幅

($f_1\sqrt{h_D/g}=0.102, f_2\sqrt{h_D/g}=0.125, f_3\sqrt{h_D/g}=0.148, a_1/h_D=a_2/h_D=a_3/h_D=0.017, D/h_D=4.0, h_S/h_D=0.3$)

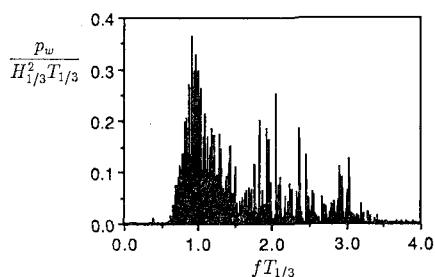
5. 多成分不規則波のスペクトル変形

最後に、有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$ がそれぞれ $T_{1/3}\sqrt{g/h_D}=8.0$ ($f_{1/3}\sqrt{h_D/g}=0.125$), $H_{1/3}/h_D=0.07$ の多成分不規則波が、 $D/h_D=4.0, h_S/h_D=0.3$ の矩形潜堤に入射する場合のスペクトル変形を計算した。計算では、ブレットシュナイダー・光易のスペクトルをもとに複数の成分波を重ね合わせた不規則波を発生させた。各成分波の位相は一樣疑似乱数から決めることにし、成分波の振幅が同じで位相特性が異なる（乱数を発生させる際のパラメータが異なる）複数の不規則波列を入射させた。計算では $\Delta t\sqrt{g/h_D}=0.25, \Delta x/h_D=0.28$ とし、透過波のパワースペクトルは潜堤の中心から約1有義波長 ($7h_D$) 離れた点 P_T での 4096 個の波形データを用いて求めた。

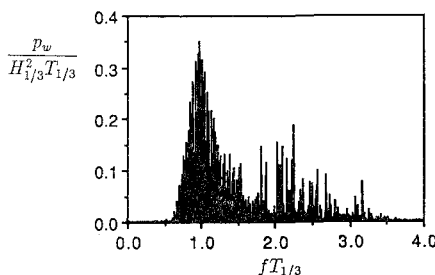
図—7 (a) は、成分波の数を 96 としたときの入射波の



(a) 入射波スペクトル



(b) 透過波スペクトル (CASE 1)



(c) 透過波スペクトル (CASE 2)

図—7 多成分不規則波のスペクトル特性

($T_{1/3}\sqrt{g/h_D}=8.0, H_{1/3}/h_D=0.07, 96$ 成分波)

図—6 (a), (b) は、 $D/h_D=4.0, h_S/h_D=0.3$ の潜堤に $f_1\sqrt{h_D/g}=0.102, f_2\sqrt{h_D/g}=0.125, f_3\sqrt{h_D/g}=0.148, a_1/h_D=a_2/h_D=a_3/h_D=0.017$ の 3 成分波が入射する場合の、透過側の点（潜堤の中心から $7h_D$ 背後の点）における各成分波振幅 $|\eta_f|$ の計算結果を示したものである。計算における離散化パラメータは 2 成分入射波の場合と同様であり、入射成分波の位相を変化させている。これらの図からわかるように、透過成分波の特性は両者でかなり異なっており、特に $2f_2(=f_1+f_3)$ の成分波は、 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3=0$ (図—6 (a)) では大きな振幅を持つものに対して、 $\varepsilon_2=0, \varepsilon_1=\varepsilon_3=\pi/2$ (図—6 (b)) ではかなり小さい。この場合、 $f_2-f_1=f_3-f_2$ と設定しているため、例えば f_2 の 2 倍周波数成分波 ($2f_2$) と、 f_1 と f_3 の和の波 (f_1+f_3) の周波数が一致する。従って、これらの波の位相干渉効果が入射成分波の位相特性により変化することになり、結果として透過成分波の振幅に差異が生じたものと考えられる。このように、3 成分以上の成分波を含む入射波の場合には、2 成分入射波の場合と異なり、入射成分波の位相特性が透過波のスペクトル特性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

スペクトル（潜堤を置かない状態での計算から得られた点 P_T でのスペクトル）を示したものである。入射波列自体の非線形性は弱く、水槽内を伝播する間の成分波間の干渉はほとんどないため、造波ソースで与えた入射波のスペクトルが再現されている。なお、成分波の位相特性を変えた場合でも、入射波のスペクトルは変化しないことを確認している。

図一7(b), (c) には、成分波の位相特性が異なる入射波列に対する透過波のスペクトルの計算例を示す。入射波スペクトルと比較してみると、いずれも高周波数側へかなりのエネルギーが移行されており、潜堤通過に伴って有義波周期が短周期側へずれることがわかる。図一7(b)の場合、さらに長周期成分 ($fT_{1/3} \approx 0.4$) も励起されているが、エネルギー的には小さい。また、いずれの透過波スペクトルにも高周波数領域でピークが現れているが、ピーク周波数は各ケースで異なっており、さらにこれらの周波数は必ずしも入射有義波周波数 ($1/T_{1/3}$) の整数倍には一致していない。入射成分波の数を変化させた計算においても、これらと同様の性質が確認された。

以上の計算結果からわかるように、多成分不規則波が潜堤を通過する際には、高周波数側への顕著なエネルギー移行が起こるとともに、堤体上での成分波間の非線形干渉の結果として透過波スペクトルには特徴的なピークが現れる。さらに、これらのピーク周波数は入射波の位相特性により全く異なり、入射波スペクトルのピーク周波数の整数倍に一致するわけではない。従って、不規則波のスペクトル変形では、入射波のスペクトル特性（振幅特性）だけでなく、その位相特性（位相スペクトル）が非常に重要になる。

6. おわりに

数値波動水槽を用いた計算により、潜堤による不規則波の変形を理論的に検討した。台形潜堤に対する模型実験結果との比較から、数値モデルの妥当性を検証すると

ともに、以下の知見を得た。

- 1) 複数の成分波を含む波が入射する場合、堤体上での入射成分波間の非線形干渉により和と差の波が新たに発生するが、特に和の波の振幅は相対的に有意な大きさを持つ。
- 2) 潜堤通過に伴い高周波数側への顕著なエネルギー移行が起こり、透過波スペクトルには特徴的なピークが現れる。ただし、ピーク周波数は入射有義波周波数の整数倍には必ずしも一致しない。
- 3) 透過波スペクトルは入射波のスペクトル特性だけでなく位相特性（位相スペクトル）の影響を強く受ける。

参 考 文 献

- 大山 巧・灘岡和夫 (1991a): 非線形不規則波動場を対象とした数値波動水槽の開発, 土木学会論文集, 第429号, pp. 77-86.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1991b): 数値波動水槽を用いた潜堤による波の分裂現象の解析, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 16-20.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1992): 潜堤を通過する非線形波列の分裂現象の解析, 土木学会論文集, No. 450, pp. 31-40.
- Beji, S., T. Ohyama, J. A. Battjes and K. Nadaoka (1992): An experimental verification of a numerical model for nonlinear random waves, Proc. 23rd Coastal Eng. Conf., (to appear).
- Bryant, P. J. (1973): Periodic waves in shallow water, J. Fluid Mech., Vol. 59, pp. 625-644.
- Hulsbergen, C. H. (1974): Origin, effect and suppression of secondary waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., Vol. 1, pp. 392-411.
- Massel, S. R. (1983): Harmonic generation by waves propagating over a submerged step, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 357-380.
- Mei, C. C. and Ü. Ünlüata (1972): Harmonic generation in shallow water waves, Waves on Beaches, edited by R. E. Meyer, Academic, New York, pp. 181-202.
- Seabra-Santos, F. J., D. P. Renouard and A. M. Temperville (1987): Numerical and experimental study of the transformation of a solitary wave over a shelf or isolated obstacle, J. Fluid Mech., Vol. 176, pp. 117-134.