

フィルター層を有する人工海浜断面の可逆性に着目した 安全性に関する研究

Safety Based on Beach Profile Changes of Artificial Coast with Gravel Filter Layer

辻本剛三¹・細山田得三²・大西剛史³・柿木哲哉⁴・宇野宏司⁵

Gozo TSUJIMOTO, Tokuzo HOSOYAMADA, Takeshi OHNISHI
Tetsuya KAKINOKI and Kohji UNO

Promoting safeties on coastal beaches in Japan, an artificial beach with gravel filter layer has been constructed. After stormy weather, many types of gravel have been sometime discharged from the sea bottom, and the beach would be changed from sandy beach to mixed beach. The filter layer's types and beach profile changes are studied in an experimental flume under wave motion. Also a numerical approach by taking into account a filter layer was proposed. The filter layer would promote the formation of berm and reduce the erosion of shoreline. Though the water level has the major effect on beach profile changes, the gravels in the filter layer have never been exposed. Also from the viewpoints of power spectra on beach profile, the beach profile with a filter layer may be getting to be steady.

1. はじめに

陥没事故を契機に海浜断面に異常が発生しても、重大な事故への進展を抑制するために砂礫等を用いたフィルター層（以後、F 層）の設置が人工海浜で行われている。例えば陥没事故の発生した大蔵海岸では、裏込石と養浜の間には裏込材内に砂が流出しないように、2 段階の F 層を設置している。図-1 は F 層の設置工事が行われている人工海浜に台風が通過した翌日の画像である（2004 年 9 月）。工事中という事もあり多数の砂礫が表層に露出している事がわかる。

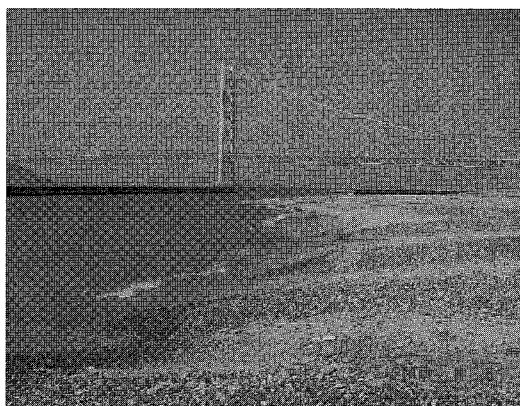


図-1 砂礫が分布する現地海岸

海岸法の改正に伴い海岸保全施設としての「砂浜」の安全性の確保が重要になっているが、「砂浜」の信頼性や安定性を評価するための指標等が提案されていないのが現状である。人工海浜を構成する底質粒径は対象海岸の中央粒径、あるいは含有率の最も高い粒径以上の大きさの粒径が必要とされているが、本研究のように F 層を有する「砂浜」の安全性（陥没に対する安全性ではない）に関してはほとんど議論されていない。

本研究では F 層の砂礫の種類やその設置位置等を変化させ、堆積型と侵食型及び水位変化を与えて実験を行い、岸沖漂砂による海浜縦断面の変化を調べ、海浜縦断面の可逆・非可逆性と砂礫の表面へ露出の観点から海浜の安全性を検討した。さらに F 層の透水性が遡上高さに及ぼす影響について、数値モデルによる検討も行った。

2. 従来の研究例

(1) 堆積型と侵食型の相互作用による海浜変形

砂村(1981)は小型水路において時間的に変化する波を用いて海浜断面の変化を調べ、入射波の特性に対応した地形変化過程が見られる事を示した。山本・鳥居(2005)は大型水路に堆積型、侵食型、中間波(うねり性波浪)を交互に作用させ、侵食型の作用で形成されたバーが岸側に移動する可逆的な変化が発生するためには、周期の長いうねり性の波浪の作用が重要であると指摘した。

(2) 透水層を有する海浜変形

地下水位を低下させることで前浜の侵食が低減できることが古くから指摘されており、そのため、揚水ポンプによる方法と透水層埋設法が検討されたが、前者は電力を必要とするために近年の研究例は少ない。一方、透水層に着目して井上ら(1989)は、防災と利用の観点から

1 フェロー 工博 神戸市立高専都市工学科教授
2 正会員 工博 長岡技術科学大学環境建設系准教授
3 学生会員 神戸市立高専都市工学専攻科
4 正会員 博(工) 神戸市立高専都市工学科准教授
5 正会員 博(工) 神戸市立高専都市工学科講師

細砂と粗砂を併用した人工海浜を考案し、2層構造に侵食や汀線後退を防止する機能があること示している。柳嶋ら（2003）は運転コストを必要としない透水層を用いた手法を検討し、透水層の設計の基礎資料を与えている。

F層は安全対策上、砂浜全体に設置されるものであり、侵食対策のために部分的に設置される前述の透水層とは異なる。図-1に示すように波浪条件によっては混合砂礫海岸に類似することもある。吉田ら（2002）は混合砂礫海岸における海浜断面変化の調査や細粗2粒径の混合砂の篩い分け実験を行っている。また、欧州では砂利を積極的に用いた養浜事業が行われており、Blanco・Holmes（2002）は砂利のみと砂利+砂の混合砂を用いた実スケールの移動床実験を行い、海浜断面形状において両者には明確な違いあることを示した。

F層は透水性を有するが、あくまでも安全対策上に設置されたものであり、積極的に侵食対策を検討するものではない。しかし、F層の設置は結果的に従来の透水層に類似した機能を有することになる。

3. 実験方法

(1) 実験装置

長さ18m、高さ0.8m、幅0.6mの2次元造波水路に、透水係数0.136cm/秒、中央粒径0.5mmの均一砂を使用し、長さ5m、1/10の勾配の初期地形を作成した。F層は2種類の砂礫を用いて長さ1m、幅0.6m、高さ0.1mとし、条件を表-1に示す。通常F層は砂浜全体に設置されるが、設置方法等は海浜断面によって異なり、さらに通常の波浪条件下でF層が海浜変形及ぼす範囲は汀線近傍と考えられるので、設置長さ1mをとした。設置深は底面からの距離であり、F層の透水係数は定水位法を用いた。

(2) 方法

水深は汀線がF層の岸端、中間、沖端となるように $h=40\text{ cm}$ 、 35 cm 、 30 cm とし、各々高潮位、平均潮位、低潮位とした。また堀川ら（1976）の汀線の前進・後退を示す指標より定めた堆積型、侵食型の規則波を単独もしくはこれらを組み合わせたものを数時間作用させ、2cm間隔で地形をレーザー距離計で（誤差は $\pm 1.5\text{ mm}$ ）で計測した。表-2に規則波の条件を示す。

4. 単一波による実験結果

(1) 地形変化

図-2, 3, 4は一樣勾配から堆積型、侵食型の規則波を高潮位、平均潮位、低潮位の各水深に90分作用させた結果である。

図-2の高潮位の堆積型ではF層の種類に関係無く、バームが形成されて、その規模も大きくなる。F層Aを除いて汀線の前進が見られており、従来の知見と一致

表-1 フィルター層の砂礫の条件

フィルター	粒径(mm)	空隙率	設置深(m)	透水係数 (cm/秒)
A	3.4	0.38	0.1	0.266
B	3.4	0.38	0.05	0.15
C	16.5	0.4	0.05	0.101
D	16.5	0.4	0	0.126

表-2 規則波の条件

ケース	波高(cm)	周期(秒)	水深(cm)	係数C
1(堆・高)	3.8	1.1	40	2.5
2(侵・高)	13.3	1.23	40	8.1
3(堆・平)	2.6	1.1	35	1.7
4(侵・平)	12.4	1.23	35	7.6
5(堆・低)	3.1	1.1	30	2
6(侵・低)	11.3	1.23	30	6.9

している。侵食型の場合は沖側のバーの形成位置がやや岸側であり、トロフの規模はF層の種類による差はない。汀線付近は何れも侵食されているが、F層無しの場合と比較して、その範囲や規模は抑制されている。

図-3の平均潮位では、堆積型によりバームの形成、汀線の伸長が見られる。バーム高さはやや小さくなっている。一方、侵食型ではF層Cを除いて、バームの位置やその規模は類似している。それに伴いトロフの規模

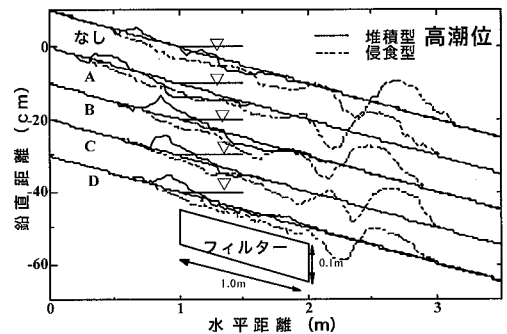


図-2 高潮位での海浜断面形状

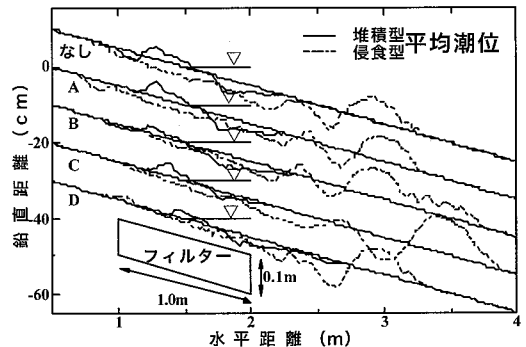


図-3 平均潮位での海浜断面形状

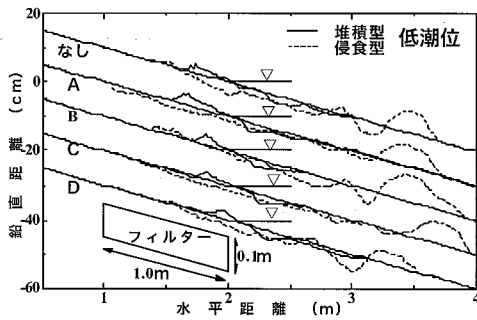


図-4 低潮位での海浜断面形状

も異なる。F層Aの陸側の侵食領域は大きく、F層が無い場合との差がない。

図-4の低潮位でも、堆積型によりバームの形成が見られ、F層Dの汀線の伸長が著しい。侵食型ではトロフの規模が異なるが、汀線の後退が減少する傾向が見られる。砂礫と砂が混合されたF層Dは、時間と共に図-1のように砂礫が表面に露出したが、汀線付近の侵食も少なく沖側にも砂の堆積が見られる。

(2) 水面形状

図-5はケース1の波がF層なし、F層Aを通過した時の水面形を0.07秒間隔で読み取ったものである。斜面上の碎波形式に違いが見られ、F層がない場合は巻き波碎波、F層A上は崩れ碎波になっている。碎波後の波の変動は小さく、水位は約半分程度になっている。

(3) バームの形状

堆積型の地形の特徴はバームの形成である。武田・砂村(1983)はバーム高さ B_b を遡上限界高さに比例するとし、碎波波高 H_b 、周期 T を用いて式(1)で算定している。

$$B_b = 0.125 H_b^{5/8} (g T^2)^{3/8} \dots\dots\dots (1)$$

図-6にバームの高さと最遡上地点までの汀線からの距離をF層の種類別に示す。また、図-6の縦軸上に式(1)によるバーム高さ、Huntによる遡上点の理論値も示す。

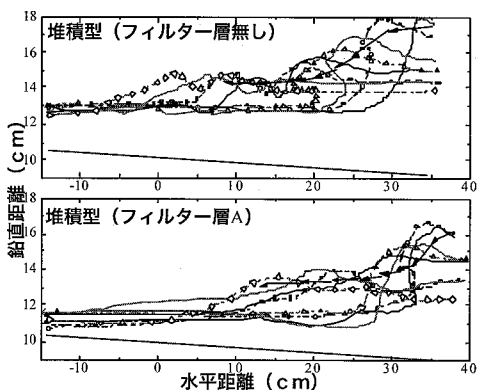


図-5 フィルター層上の水面形状

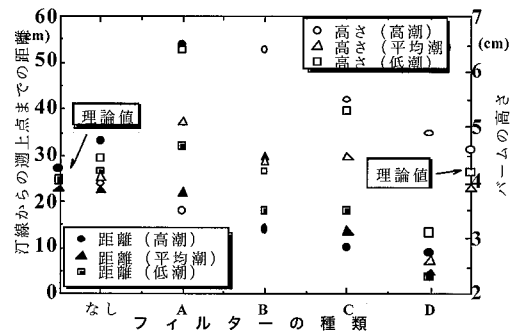


図-6 バーム高と遡上点距離

図-2, 3, 4からも明らかのようにF層Aが潮位に関係無く遡上距離が長く、一方、F層Dは最も短い。遡上に影響を及ぼすのは透水性よりも粗度の影響が大きいことが知られており、F層Dの透水係数は他のF層(F層Aを除く)や本実験の砂と大差はないが、砂と砂利が混合されているため波により粗粒化され粗度が増大したためである。一方、F層Aは透水性が高いに関らず、その値は従来の結果とは異なる。F層の位置と地下水面との関係が不明であるため、今後の検討課題である。F層なしの実験値は理論値に近い結果となっている。

(4) 波数スペクトル勾配

Hino (1968) は平衡領域における地形の形状特性を場所的(波数)スペクトルを用いてスペクトル密度の勾配が-3乗になることを示している。辻本ら(2007)も孤立波による底面地形のスペクトル密度の勾配が-3乗前後である事を示している。本研究ではバー、トラフのような地形に着目しており、また測定間隔も2cmであるため、砂連のような微地形は考慮していない。図-7はケース2の波浪による海浜断面の波数スペクトルである。図中の直線は最小自乗法により定めた。

図-8は他のケースの波数スペクトル勾配とF層の種類の間を示した図である。F層がない場合はどの波浪条件下でも-2.5以下となり、ほぼ平衡状態である事がわかる。しかし、F層Aの堆積・低潮(図-3)、F層D

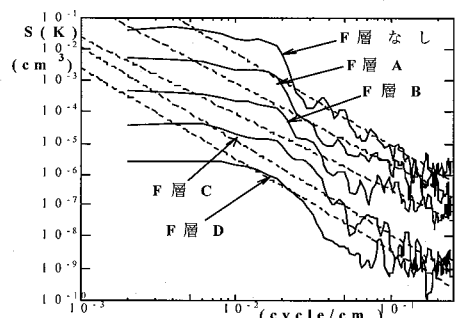


図-7 断面形状の波数スペクトル

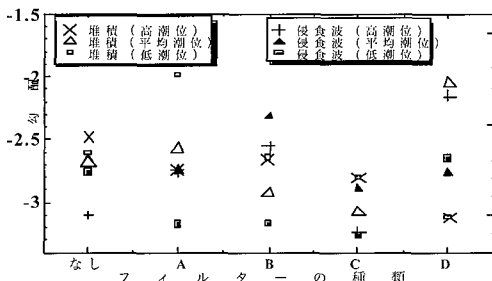


図-8 波数スペクトルとフィルター層の種類

の堆積・平均(図-2)の勾配は -1.99 , -2.05 である。これらは沖側に小さいながらもバーが見られ、波は堆積型の条件ではあるが、中間型の傾向を有しているためである。また、F層Bの侵食・平均(図-2)、F層Dの侵食・高潮(図-1)の勾配は -2.32 , -2.15 であり、前者は沖側のバーの岸側に別のバーがあり、後者は遡上域にバームが形成されており、完全な侵食型ではない。

5. 可逆性に関する実験結果

(1) 地形変化

「砂浜」の安全性の立場からは常に平衡状態(静的安定)であり続ける事が良いが、水質や生態系、海浜での利用の観点からも「砂浜」の基質が適当に更新される、動的に安定した、つまり、可逆性を有する「砂浜」が望ましい。F層が地形変化の可逆性に与える影響を調べるため、侵食型を15分作用させた後に堆積型を120分作用させた。図-9は平均潮位での結果である。可逆性の定義を山本・鳥居(2005)と同様にバーの消滅とトロフの埋め戻しの有無で判断した。本実験のような小型水路では沖側バーの一部が岸側に移動しないことがあるが、波作用時間は共通としてF層の影響に着目した。侵食型によりバーが沖側にほぼ同じ規模で形成されており、堆積型作用後はF層無しの場合にはトロフへの埋め戻しが見られ、可逆性の傾向が見られる。一方、F層有りではトロフの埋め戻しや顕著なバーの消滅はないが、陸側のバームの形成は見られた。

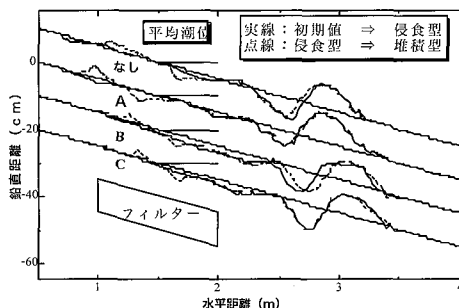


図-9 侵食波と堆積波の地形変化(潮位一定)

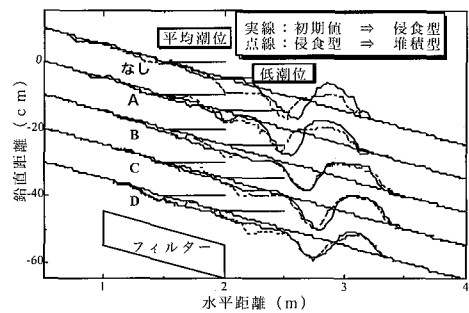


図-10 侵食波と堆積波の地形変化(潮位変化)

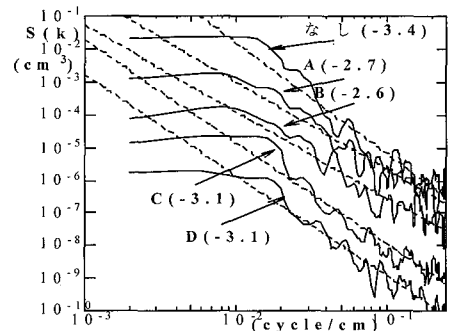


図-11 堆積波の地形変化の波数スペクトル

図-9に示したように作用時間120分では顕著な可逆性がF層有りでは見られなかった。低潮位時に堆積型を作用させた結果を図-10に示す。平均潮位時よりもバーの変形やトロフの埋め戻しがいずれのケースでも見られている。

(2) 可逆性と波数スペクトル

可逆性を検討するために図-11に図-10の波数スペクトルの結果を示す。図中の数字は最小自乗法により決定した直線の勾配である。平衡状態の目安である -3 乗に何れも近くなっているが、波作用時間によるスペクトルの時間変化を考慮する必要がある。

6. 計算

(1) 基礎方程式系・計算領域および入射波の条件

海底面下にF層を有する流れは、水面下では飽和状態、汀線から陸上に向かう領域は不飽和浸透問題となる。このような流れは前浜付近での砂地盤からの浸透・滲出と類似の現象と考え、浅野(1999)の考え方に用いて計算を行った。計算領域を水部と浸透層に分割し、それぞれの連続条件式と運動方程式を解いた。その際、2つの領域間の境界となる底面上で質量および運動量の交換を評価した。非線形の長波方程式に分散性と補正係数を考慮した修正ブシネスク方程式を用いた。

入射波高は 13.3 cmおよび 3.8 cmとし、入射波周期は 1.10 s, 1.23 sとした。水平格子数、格子サイズ、計

算ステップ数, 時間間隔はそれぞれ, 3500, 0.005 cm, 30000, 0.001 s とした. 透水層の空隙率は 0.4 であり, 透水係数は 0.15 cm/s とした. なお, 静水面よりも上側では透水係数を 0.1 ~ 0.3 cm/s に変化させた.

(2) 数値計算結果

図-12 に実験室スケールの現象に対する汀線付近での水位変動, 流速, 透水層内部の流速変動を示す. 水位変動は, 引き波時には水底が露出するため, ゼロ以上の値となっている. 水部の流速は変動が早い水面変動, 透水層の流速はほぼ位相が一致している. 流速の波形は, 非対称で斜面を遡上していく方向よりも斜面を流下していく方向の流れが卓越しており, back wash の流れを助長する事に対応している. 透水層内の流速は水部の流速の 10 % 程度である.

図-13 は計算で求めた最大遡上高と透水係数の関係を波の諸元をパラメータとして示している. 入射波高が大きい場合は, 透水係数の増加と共に最大遡上高は低減し, 実験と同様な傾向が見られたが, 入射波高が小さい場合, 最大遡上高は低減し, 透水係数への依存性は小さくなり, 一定かあるいはやや増加するような傾向が見出された.

7. 結 論

フィルター層を有する砂浜の安全性を動的安定性の立

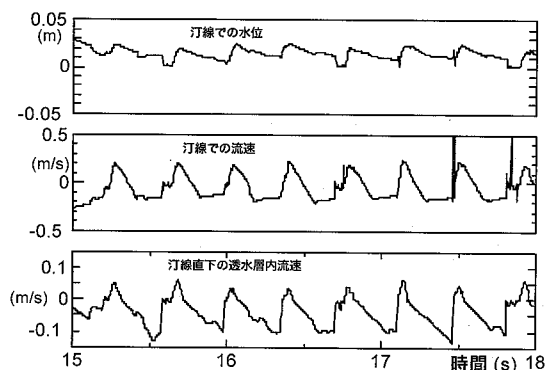


図-12 汀線付近の水位と流速値

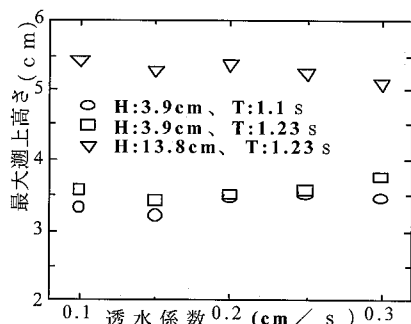


図-13 遡上高さと透水係数との関係

場から検討した. 実験水路規模や波作用時間を再検討する必要があるが, 以下のような結論を得た.

- (1) F 層は遡上域の水面変動を減少させ, 堆積波の堆積作用を促進, 侵食波の侵食作用を低減する. F 層の岸側端を高潮位時の汀線位置に設置するとより効果的になる.
- (2) 地形の可逆性は, 潮位変化の影響が大きい, F 層の設置がより可逆性を高め, 波数スペクトルからも安定性が高くなる.
- (3) F 層は汀線近傍に急激な水深変化や沖側バーの発達など, 海浜の安全性を阻害するような傾向は見られない.
- (4) F 層上の地形は変化が著しくないため, 砂礫が底面に露出することない. 仮に表面に F 層の砂礫が露出しても, 地形が非可逆性になり難い.
- (5) 透水層内の流速は表層部の流速の約 10 % 程度であり, 両者の位相は一致することを計算により示した.
- (6) 透水係数の増加が必ずしも遡上高さ (遡上距離) の低下にならないことを実験と計算により確認した.

謝辞: 本研究の一部は科学研究補助金基盤研究 (C) (代表: 辻本剛三、課題番号 18560509) により行われた. ここに記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 浅野敏之(1999): 波打ち帯における波動について, 第 35 回水工学に関する夏季研修会講義集 B コース, B-6-1 ~ B-6-17.
- 井上雅夫・島田広昭・根元淳二(1989): 新しい置砂法によって造成した海浜の波による変形過程, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 464-468.
- 砂村継夫(1981): 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, 第 23 回海講論文集, pp. 222-226.
- 武田一郎・砂村継夫(1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第 30 回海講論文集, pp. 254-258.
- 辻本剛三・山田文彦・赤田真利・柿木哲哉・宇野宏司(2007): 津波により形成される岸沖断面地形の時空間変動と波数スペクトル, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 531-535.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右(1976): 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第 23 回海講論文集, pp. 193-200.
- 柳嶋慎一・佐藤勝弘・原隆・斎藤正文・岩佐直人・堀謙吾・長谷川巖・長谷川準三(2003): 透水層埋設による海浜安定化工法の開発, 港湾空港技術研究所報告, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 1-113.
- 山本幸次・鳥居謙一(2005): 海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 491-495.
- 吉田英治・荒木進歩・出口一郎・池田智大(2002): 混合砂礫海岸における底質の分級と断面変形, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 461-465.
- Blanco, B. and P. Holmes(2002): Further insight on behavior of mixed sand and gravel beaches-large scale experiment on profile development, Proc. 28th ICCE, pp. 2651-2663.
- Hino, M. (1968): Equilibrium-range spectra of sand waves formed by flowing water, J. of Fluid Mechanics, 34, pp. 565-573.