

離岸堤背面捨石被覆の耐波安定性に関する実験的研究

佐藤道郎*・浅川 勉**・大山綱治***・塚元紀幸****

1. 序 論

離岸堤は海岸侵食対策工法の1つとして多く用いられているが、一般にはその点の理解が必ずしも十分得られているとは言えず、景観の面から好ましい存在として認識されていない場合が多い。そのような背景から、離岸堤の背面(岸側法面)を自然石で被覆し、より目に馴染むようにすることが行われてきている(石張り離岸堤)。この離岸堤背面被覆の設計指針を確立していくに当たり、石材の耐波安定性を考慮した所要重量の算定法など検討すべき課題がある。

傾斜堤の前面や捨石護岸の入射波の直接作用する被覆材の安定に関してはこれまで多くの研究が行われてきている。だが、背面では入射した波が必ずしも全て直接作用するわけではなく、不規則波の作用下では、時折越波した水塊が被覆材上を下方に滑落させるようにのみ作用し、前面の場合のように上方に押し上げるような作用は受けにくいなど、その被覆材の安定に関する物理的状況は、前面とは異なっている。この背面の捨石の安定な重量算定に関する検討は始められたばかりと言える。

本研究は、離岸堤背面の被覆工に関する設計上の目安を得るための基礎研究として、背面被覆と関連する諸因子との関係を実験的に検討したものである。

2. 背面の安定に関する既往の研究

Lording・Scott (1971) は規則波による実験から、堤体の背面の被覆材は前面よりも変位し易く、背面の最大被害は防波堤により近い所で碎波するときに生じることを示した。また、Raichlen (1972) も越波による背面の被覆材の安定について規則波の実験から、防波堤背面に越波による噴流が衝突する際の力は前面に作用する波力よりもずっと大きくなり得ること、その結果、前面の被覆材はほとんど動かないのに背面ではかなり動き得ることを示した。そして、背面の形状を少し変えることによって安定に出来ることを示している。それは、実験写真では

背面にバームを設けたようになっている。

これらの研究は背面被覆材の安定に目を向けた初期の研究と言えようが、越波が重要な役割を有することを示しており、越波を許すような防波堤の場合、背面の方が問題となりうることが示されている。

Anderson et. al. (1992) は背面被覆の安定について、越波が支配的な要因であると考え、越波に対し被覆材が安定であるための条件を検討し、安定条件として次式を示した。

$$\frac{h_c}{H_{m0}} \sqrt{S_{02}} > \tan \alpha - \left[\frac{H_{m0}}{\Delta D_{n50}} \frac{1}{\sqrt{S_{02}}} \right]^{-1} \frac{\mu \cos \beta - \sin \beta}{C_D + \mu C_L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h_c : 静水面からの天端高、 H_{m0} : 入射波高 (= $4\sqrt{m_0}$ 、 m_0 : スペクトルの0次のモーメント (van der Meer, 1992))、 α : 防波堤前面の斜面が水平と成す角度、 β : 背面の斜面が水平と成す角度、 S_{02} : 入射波の波形勾配、 μ : 摩擦係数 (= $\tan \phi$ 、 ϕ =安息角)、 C_D : 抗力係数、 C_L : 揚力係数を表す。また、 Δ と代表粒径 D_{n50} は次で与えられ、 D_{n50} を Iribarren (1965) は 'equivalent cube size'、van der Meer (1988) は 'nominal diameter' と名付けている。

$$\Delta = \rho_a / \rho - 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D_{n50} = (W_{50} / \rho_a)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W_{50} : 被覆材重量 (石材の場合は重量分布の50%の値)、 ρ_a : 被覆材の密度、 ρ : 水の密度 である。

そして、ある波浪条件に対しいくつかの方法で背面の安定を増すことが出来ることを示した。すなわち、

- 天端高 h_c を増す
- D_{n50} を大きくする (大きな材料を使う)
- Δ を大きくする (重い材料を用いる)
- β を小さくする

また、宇多 (1993) は石張り離岸堤の安定について実験的に検討した結果を示している。それによれば、安定性は離岸堤の天端上の越波状況と密接な関連を有し、離岸堤の天端高を高くして越波を生じにくくするか、あるいは捨石の重量を大きくすれば捨石の安定性を確保することが可能と指摘している。そして、実験結果を無次

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
 ** 正会員 工修 日本テトラポッド(株)
 *** 正会員 八千代エンジニアリング(株)
 **** 千代田コンサルタント(株)

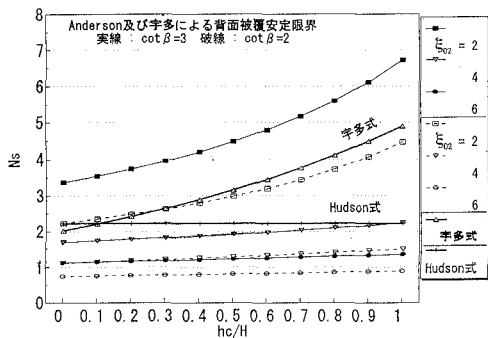


図-1 Anderson 及び宇多による背面捨石の安定限界の比較

元天端高 h_c/H_i (H_i : 入射波高) と無次元パラメーター $W(S_r - 1)^3 / (\gamma_r H_i^3)$ ($S_r = \rho_a/\rho$, $\gamma_r = \rho_a g$) の関係で示し、安定限界を求め、捨石の必要重量を次のように与えた。

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H_i^3}{(S_r - 1)^3} \exp\left[-2.12 - 2.65\left(\frac{h_c}{H_i}\right)\right] \dots\dots (4)$$

この式から天端高が低いほど捨石重量を大きくする必要があるが、例えば、離岸堤にテトラポッドを用い、 $h_c/H_i = 0.5$, $\cot \alpha = 1$ では Hudson 式によるテトラポッドの所要重量の 0.26 倍の重量の石材で良いことになる。

ところで、Anderson et. al. の安定限界を与える式を無次元表示すると次のように表される。

$$\frac{H_{m0}}{\Delta D_{n50}} = N_s = \frac{12.5(0.9 \cos \beta - \sin \beta)}{\xi_{02} - h_c/H_{m0}} \dots\dots (5)$$

ここに、 N_s : 安定数、 $\xi_{02} = \tan \alpha / \sqrt{S_{02}}$ である。また、この式を得るに当たり原論文中に与えられた値 $\mu = 0.9$, $C_D + \mu C_L = 0.08$ を (1) 式に用いている。

一方、宇多による式は次のように表される。

$$\frac{H_i}{\Delta D_{n50}} = \exp\left[0.707 + 0.883\left(\frac{h_c}{H_i}\right)\right] \dots\dots (6)$$

これらの比較を図-1 に示した。

宇多の式では無次元天端高 h/H_i で安定数が決まることになるが、Anderson の結果はさらに Iribarren 数 ξ_{02} と背面勾配 β によって変化し、 ξ_{02} の小さいときには h_c/H_i によって宇多の式と似た変化を示すものの、 ξ_{02} が大きくなると h_c/H_i にはあまり関係なくほぼ一定の値を取るようになる。そして、宇多の式より小さな N_s を与える。すなわち、前面勾配と波高が同じ場合には周期が長い程より大きな被覆材を要求する。図中には離岸堤本体の材料の所要重量算定に用いられる Hudson 式

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = N_s = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \dots\dots (7)$$

もテトラポッドの場合について示してある。 K_D は被覆材による定数である。これから ξ_{02} の大きな場合には Hudson 式によって求められる前面被覆材の所要重量より

りも背面の所要重量のほうが大きい場合がある。これは、先述の Lording・Scott (1971) や Raichlen (1972) の実験結果とも符合するものと見ることが出来る。

また、 ξ_{02} の小さい場合には背面勾配による差がかなり見られるが、 ξ_{02} が大きくなるとその差は小さくなる。これらのことを見ると Anderson らの結果によれば安定数には ξ_{02} が最も重要な要因となることが考えられる。

これらの被覆材がほとんど動かないという条件下ではかなり重い材料を必要とし、離岸堤本体の材料より重いものを使わなければならない場合もあり得ることになる。だが、離岸堤背後の捨石被覆では離岸堤本体のブロックよりかなり小さなものを用いることを想定されており、この条件で安定な重量を検討してもあまり実際でない可能性がある。例えば、後述する本研究で想定した離岸堤について背面に必要な石材の重量は宇多式では 1.2 tf で十分考えられる値であるが、Anderson 等によれば 1:2 の背面勾配で周期 8.8 秒のとき 20 tf, 12.7 秒のとき 68 tf といった値を与え、離岸堤本体の重量よりもずっと大きな値となり、張石の重量をこれで決めるのは実際的ではないように思われる。そこで、離岸堤背面の被覆石材の安定に関するこのあたりの状況を実験的に調べ、どう考えるべきか検討しようとした。

3. 実 験

長さ 26.7 m, 幅 14 m の 1 部を仕切って幅 1 m の水路とし、1/30 勾配のモルタル斜面を設け、テトラポッドの模型の離岸堤を設置し背面に碎石を積んだ。

離岸堤模型は既設離岸堤を改修する場合を想定して、実際に施工されている離岸堤の計画波高、水深等の計画諸元および天端幅、法面勾配等の構造諸元から出現頻度の高い値を組み合わせた仮想の断面を持つもので、その諸元と 1/43 の縮尺模型の諸元を表-1 と図-2 に示した。

計画波高 $H_{1/3} = 4.0$ m を用いてブロック重量を算定し、断面を決定しており、その場合、Hudson 式からブロック重量は 8 t 型でよいことになるが、余裕を見て 10 t 型としている。しかし、それでも実験では計画波高の倍程度の波まで作用させており、そのままでは離岸堤本体のブロックの移動も生じることが考えられる。そこで、実験に当たっては背面の被覆の安定を調べるという観点から、ブロックの移動が生じないように高比重のブロック模型を用いた。

実験に用いた波は $T_{1/3}$ が 1.4 秒 (原型 8.8 秒) と 2.0 秒 (12.7 秒) の 2 種類、 $H_{1/3}$ は 8 cm (3.4 m) から 20 cm (8.6 m) の範囲の不規則波である。波の測定には容量式波高計を用いた。

本論文で用いたデータは 2 系列の実験から得たものを

表-1 仮想断面諸数量

項目	原型	模型
設置水深 (h)	5.0 m	11.6 cm
海底勾配	1/30	1/30
ブロック重量	10 t 型	10 t 型
天端高	2.0 m	4.7 cm
天端幅	3個並び	3個並び
張石重量	3種	3種
張石天端幅	5.0 m	11.6 cm
張石法勾配	1:2, 1:3	1:2, 1:3

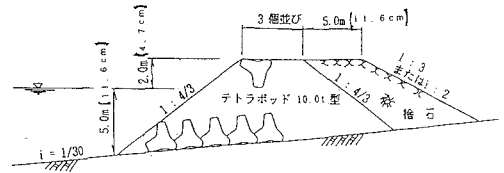


図-2 断面図

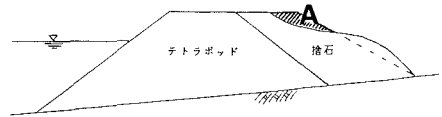


図-3 侵食面積 A の定義

基にしている。1つは、先述の波高の範囲で、小さい波高の波から30分ずつ作用させ断面を測定し、石の積み直しはせずに波高を2cm (0.86m) ずつ大きくし、変形の累積量を測定した(シリーズ1)。これは、背面石積みの安定に関する概観をつかむ為に行われた。もう一つは、各波の作用下での変形量を得るために30分の波作用後に断面測定を行った後、背面の積み直しを行った(シリーズ2)。また、波の作用時間に伴う変形量の変化をみるためにいくつかのケースでは30分の波作用後の断面測定を繰り返しながら最長150分波を作用させた。

断面測定は1m幅の水路の10cm間隔の9測線上で2cm間隔で背面石積み部分の高さを測り、9測線の平均値として断面を求めた。変形量を表すのにいくつかの表現法があるが、本研究では van der Meer による次式の無次元被害率 S で表した。

$$S = A/D_{n50} \dots\dots\dots (8)$$

A は図-3の斜線部の侵食面積である。 S が1~3のとき“被害無し”， $S > 10$ で“failure”と判定される。

用いた張石は3種類で、それぞれから500個の石を取り出して一個ずつ重量を測定し重量加積曲線を求めたのが図-4である。これから W_{50} を求めると8.8g (0.7t), 24g (1.9t), 38g (3.0t)であった。したがって、それぞれ、離岸堤本体のブロックの所要重量の9%, 24%, 38%である。また、 D_{n85}/D_{n15} は1.21, 1.11, 1.10とAndersonらの1.35に比べ散らばりは小さく、かなり均質な石材である。比重は2.65であったので(2)式の A は1.65, (3)式で与えられる代表粒径 D_{n50} はそれぞれ1.5cm (0.64m), 2.1cm (0.90m), 2.4cm (1.0m)となる。

4. 実験結果

4.1 仮想離岸堤の背面被覆の安定

まず、少し实际的なイメージをつかむため本研究で想定した仮想断面の離岸堤諸元に対し、図-5に示すように波高を少しずつ大きくしながら変形量の累積値を調べ

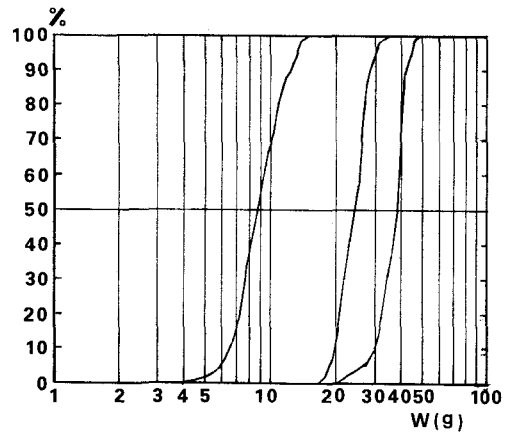


図-4 張石の重量分布

たシリーズ1の実験結果を見ていく。図-5の中で波高 H と波作用時間 t の添え字 p と m 原型と模型の諸元を示す。

図-6~8は3種類の張石の変形量 S の変化を示したものである。図-8の $D_{n50} = 2.4$ cm については周期1.4秒ではほとんど動かなかった。図-6と7から、波の周期が大きくなると変形量 S の増加が大きくなり、周期の影響が大きい。背面勾配の影響は周期の長い波では緩やかなほうが幾分変形が小さくなっているが、短い波ではあまり差異はない。図-6中には天端幅の影響を見るために5個並びのデータも示してあるが、5個並びの広い天端幅の方がいくぶん変形量が小さくなっている。

いずれの石材にしても周期が長くなると計画波高に対しても波の継続時間によっては「被害無し」と言うわけにはいかないと思われる。この実験では波高を次第に大きくしているので変形量も時間とともに大きくなっていくが、波高を変えずに波の作用時間と変形量の関係調べた図-9を見ると150分程度の作用時間では平衡に達

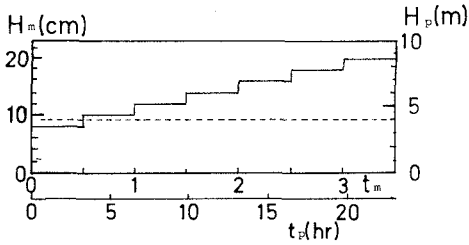


図-5 波高の変化

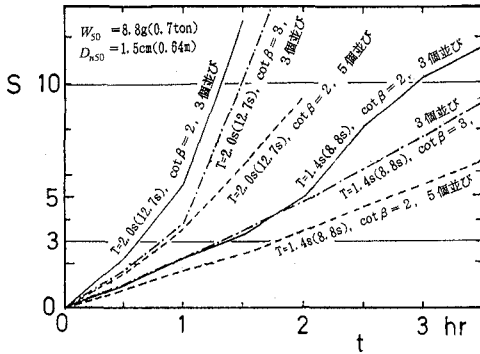


図-6 変形量Sの変化 ($D_{n50}=1.5\text{ cm (0.64 m)}$)

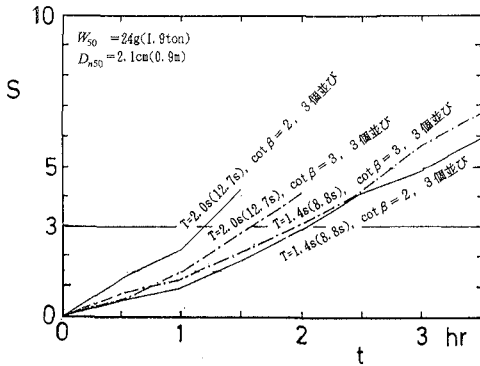


図-7 変形量Sの変化 ($D_{n50}=2.1\text{ cm (0.90 m)}$)

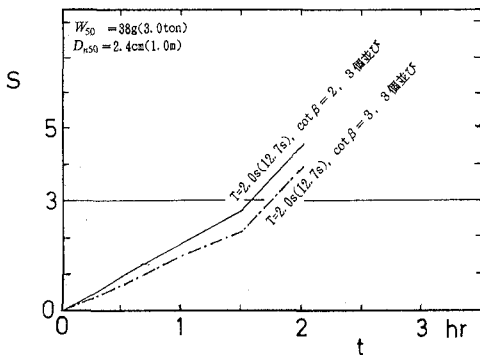


図-8 変形量Sの変化 ($D_{n50}=2.4\text{ cm (1.0 m)}$)

しておらず、波の作用とともに変形量も増大している。これらの結果を考慮すると、本研究で対象とした程度の石材では静的な安定を要求するのは無理があるように思われる。かといって、被覆材がほとんど動かないという条件下での前述のような Anderson らの算定値のように大きな重い石材を採用するのも実際的でない。むしろ、宇多の式による計画波高に対する算定値 1.2 tf は図-6 と 7 の石の間であるので数時間程度の波の継続時間に対してはあまり大きな変形も無いことが期待され、それを採用するほうが現実的である。とはいっても、継続時間が長くなると変形しないというわけではないと考えられるので、傾斜堤のより経済的な方法として小さな石材を用い断面が安定化するまでの変化を許容するという考え方や、Berm type, S-shape (Ergin et. al, 1987), D-armor (Medina, 1992) 等、最初からより安定な形状の断面に作るといった考え方のような観点に立った所要重量の算定法の検討も必要と考えられる。

4.2 背面被覆の変形量に及ぼす諸因子の影響

離岸堤石張りの変形が計画諸元ならびに構造諸元によってどの程度になりうるか推定するためには変形量とそれを支配する因子との関連を把握しておく必要がある。そこで、変形量Sが背面勾配 $\cot \beta$ 、Iribarren 数 ξ_{02} 、安定数 H/AD_{n50} 、無次元天端高 h_c/H によってどう変化するか調べた。

図-10 は背面勾配による変形量Sの差異を示すが実験に用いた $\cot \beta$ が 2 と 3 ではそれほど顕著な違いはない。

図-11 は ξ_{02} の影響が示されているが、前面勾配 $\cot \alpha$ は本実験を通じて 4/3 に固定されており、波形勾配もしくは波高が固定されている場合には波の周期の影響を示し、ある波高の波に対しては周期が長い波ほどSが大きくなることを示している。

図-12 は H/AD_{n50} とSの関係を示したもので、粒径の大きい方がSが小さくなるという一般的傾向を示しているが、破線の場合には、ある安定数に対応する粒径より小さくても大きくても変形量が大きくなるような最適な石材があり得ることを示唆しているようにも見れ、実験誤差なのかどうか今回は見極めがつかなかった。

図-13 は h_c/H によるSの変化を示したものである。天端高の大きいほどSが小さくなっている。

5. 結 語

実際に施工されている離岸堤の波高、水深等の計画諸元および天端幅、法面勾配等の構造諸元から出現頻度の高い値を組み合わせた仮定の離岸堤の背面被覆石材の安定を実験的に検討した。Anderson 等の静的な安定限界から要求される重量は離岸堤本体のブロック重量よりず

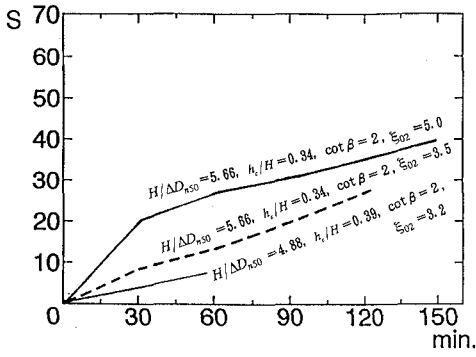


図-9 波の作用時間に伴う変形量の変化

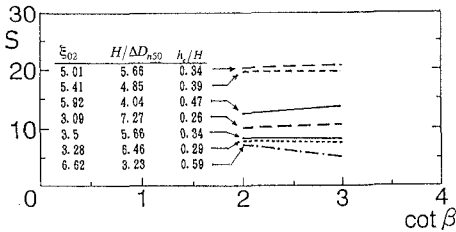


図-10 変形量に及ぼす背面勾配の影響

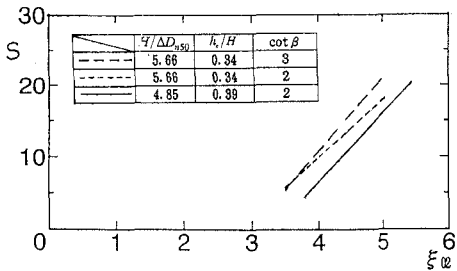


図-11 変形量に及ぼす Iribarren 数の影響

っと大きなものとなって、ブロックより小さな石材を前提とした場合、現実的ではない。宇多による算定値は波の継続時間があまり長くなければ計画波高の波については現実的な重量を与えると思われるが、しかし、周期の長い波に対してはある程度の変形を考慮しておく必要があると思われる。

離岸堤本体のブロックよりかなり小さい石材を用いようとした場合、動かないという条件で安定を論ずるのは必ずしも実際的ではなく、断面が安定するまでの変形は許容するとか、一様勾配斜面でなく最初からより安定な断面にするとといったことを検討すべきように思われた。そこで、その基礎研究として、現時点では限られたデータであるが、変形量と諸因子との関連を調べた。その結果、無次元天端高や安定数が同じでも Iribarren 数で大きく変化し、波の作用時間に伴う変形量の変化も異なってくる。Iribarren 数は支配的な因子と言える。他の因子

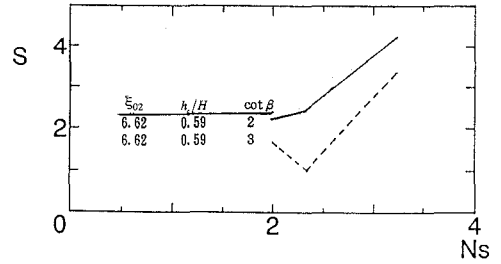


図-12 安定数と変形量

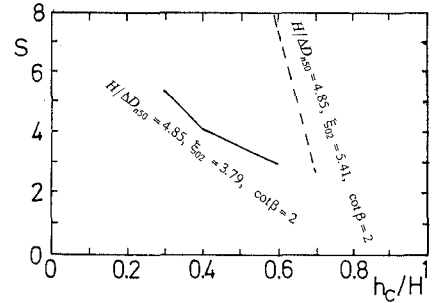


図-13 無次元天端高と変形量

が同じ場合、変形量は安定数が小さくなると、すなわち、粒径が大きくなると小さくなる一般的な傾向を示している。背面勾配の影響は $\cot \beta = 2$ と 3 では顕著な差はなかった。

今後、設計の指針の確立に資するべく、さらにデータを積み上げていきたいと考えている。

謝辞: 本研究のデータの一部は稲 卓郎, 福留健一, 三角礼彦の諸氏の卒業研究によって得られたものであることを記し、謝意を表します。

参考文献

宇多高明 (1993): 建設技術 Q & A 「石張り離岸堤の消波効果と安定性について教えて下さい」, 土木技術資料 35-6, pp. 8-9.
 Anderson, O. H., J. Juhl and P. Sloth (1992): Rear Side Stability of Berm Breakwaters, Proc. 23rd ICCE, pp. 1020-1029.
 Ergin, A., A. R. Günbak and A. M. Yammaz (1987): Rubble-Mound Breakwaters with S-shape Design, Proc. ASCE, WW, Vol. 115, No. 5, pp. 579-593.
 Lording, P. T. and J. R. Scott (1971): Armor stability of overtopped breakwater, Proc. ASCE, Vol. 97, WW2, pp. 341-354.
 Raichlen, F. (1972): Armor stability of overtopped, Discussion by F. Raichlen, Proc. ASCE, Vol. 98, WW2, pp. 273-279.
 Van Der Meer, J. W. (1992): Conceptual design of rubble mound breakwater, Design and Reliability of Coastal Structures, Proc. Short Course attached to the 23rd ICCE, pp. 447-510.