

海底斜面上で砕波を伴う消波護岸への越波の数値計算

榊 山 勉*・香山 真 祐**

1. 緒 論

人工島式立地原子力発電所の防波護岸の越波量ならびに消波ブロックの安定性評価を目的に研究が進められている(鹿島ら, 1993; 鹿島ら, 1994; 榊山ら, 1994a). 越波流量は合田ら(1975)や高山ら(1982)の方法により算定できるが, 重要な構造物に対しては水理実験により確認する必要がある。しかし, 小スケールの消波護岸の模型を用いた実験では越波流量を過小評価することがあるため(榊山ら, 1994b), 越波流量に関する水理実験を現地に適用するにあたっては, 越波に及ぼす実験スケール効果を解明する必要がある。このために現地観測が行われ(榊山・鹿島ら, 1996), 水理実験結果との比較検討が進められているが(榊山・鹿島, 1997), そのメカニズムを明らかにするためには実験スケール効果を支配する物理量である抗力や慣性力について検討する必要がある。

一方では, 消波構造物の効果を考慮した数値計算モデルが構築されている(榊山ら, 1990; van Gent ら, 1994). 数値計算による越波の研究としては, 一様水深での消波護岸の越波のシミュレーションが行われているが(榊山・今井, 1996), 扱われた現象は重複波動的な波動運動に近く比較的平易な現象であり, また越波量に及ぼす実験スケール効果は検討されていない。

そこで, 本研究では先ずより複雑な砕波を含む現象にも数値計算モデルを適用できるように改良し, その妥当性を検証する。また, 越波量に及ぼす実験スケール効果を数値計算により検討するために, 支配的な要因である抗力係数や慣性力係数の影響を調べる。

2. 計算方法

数値計算モデルの基本的な構成は前報(榊山・今井, 1996)とほとんど同じであるが, 砕波や越波時の複雑な水面形状が計算可能でロバスト性の高いモデルの構築を目指し, 水表面近傍や構造物の境界条件の扱い方を改良した。モデルの概要は以下の通りである。透過性構造物

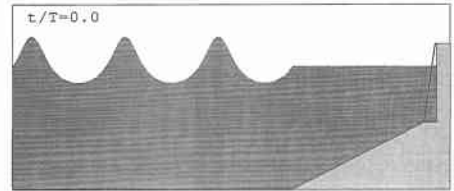


図-1 計算における初期条件

の幾何学的・物理的效果を Navier-Stokes 方程式に取り込んだポラースボディモデルの支配方程式に VOF 法(Nichols ら, 1980)を適用した。自由表面運動は流体の体積率を表す VOF 関数の移流計算で行う。造波境界条件には有限振幅波理論の摂動解(磯部ら, 1978)を適用した。初期条件として計算時間を節約するために, 図-1に示すように海底斜面沖側の一様水深部に有限振幅波の摂動解の値を空間的に与えた。流出境界はケーソンの陸側端部で, $\partial F/\partial x=0$ の境界条件を設定した(F は流速, 圧力等の変数)。ただし, この流出境界を満足するためにはケーソン天端上の越流の鉛直流速成分が小さくなる必要がある。ケーソンの天端を実際より長めに設定することによりこの境界条件を満足させることができる。

3. 実験方法

実験は長さ 20 m, 幅 0.30 m, 深さ 0.55 m の反射波吸収式 2 次元造波水路を用いて行った。造波板から約 6.5 m の位置を法先に海底勾配 1/20 の長さ 3 m の斜面を作製した。造波水深は 0.28 m, 海底斜面の岸側は水深 0.13 m の一様水深で, 天端高さ 0.05 m, 幅 0.30 m のケーソンと法面勾配 3/4, 天端幅 2 個並びの消波工(テトラポッド, 重量 160 gf)からなる消波護岸の模型を設置した。越波量はロードセル 4 台を用いて越波弁内への流入重量を測定しその経時変化から算出した。

実験に用いた波は規則波で, 周期 $T=1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ s の 4 種類, 波高は $H=4, 6, 7, 8, 9, 10, 10.5, 11, 12$ cm の 9 種類とした。実験では非砕波での越波から護岸前面で砕波した後越波する条件まで波高を増加させた。また, 高速ビデオカメラで 500 コマ/s (1 画面 572×432 ピクセル) で越波の状況を撮影した。画像データは

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 (株)開発計算センター 科学システム事業部

256階調のグレイスケールのファイルとして保存され、デジタルデータとしてPCで処理できる。実験は同一の波浪条件に対して越波量の測定を2回繰り返し、その平均値を採用した。また、ビデオ撮影は水理量(越波量, 越波水位, 反射率)の測定と分けて行った。

4. 結果の考察

4.1 実験結果

図-2は波高 $H=10.5$ cm, 周期 $T=1.4$ sの条件で, 消波護岸前面で砕波し, 越波する様子を示したものである。各画像の時間間隔は0.05秒で越波前後の0.15秒間の水面波形の変化を示している。砕波により気泡が混入し, 水面近傍に気泡を取り込んだ水塊が消波工を遡上して越波するために, 消波工による波のエネルギー減衰に起因する実験スケール効果は非常に複雑になる。

図-3に越波流量と波高の関係を周期別にまとめた。波高の増加にしたがって, 越波流量は増加するが, 護岸前面の海底斜面上で砕波が生じるようになると越波流量は減少する。実験では非砕波から砕波に至るまで測定を行った。ただし, 造波能力の制約上から周期 $T=1.6$ sの場合には越波流量が減少するまで造波できなかった。周期が長くなるにしたがって越波流量は増加するが, 周期

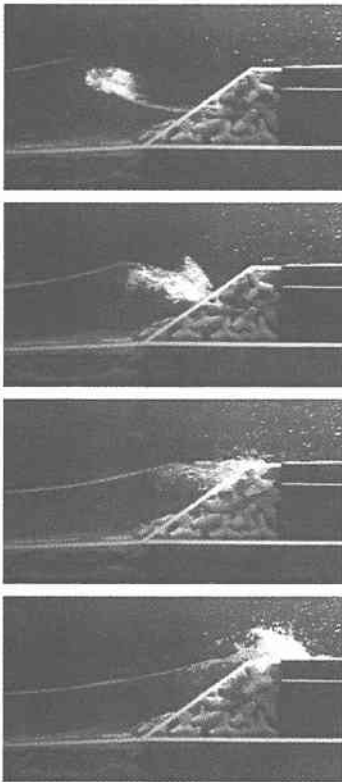


図-2 消波護岸前面での砕波と越波

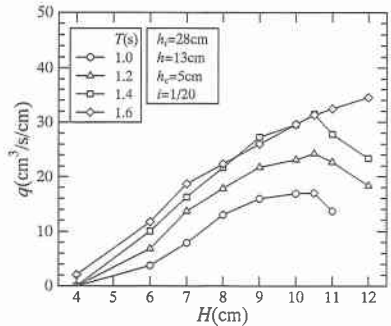


図-3 越波流量と波高, 周期との関係 (実験結果)

$T=1.4$ sと 1.6 sの越波流量の差は顕著でない。ただし, 両者では砕波条件が異なるために最大の越波流量を生じる波高が異なる。

4.2 計算結果

計算は実験条件に合わせて行った。ただし, ケーソン岸側に設定した流出境界での境界条件を満足させるために, 実際のケーソン先端幅である0.30 mを0.90 mに長くして, 計算領域を $10.96 \text{ m} \times 0.46 \text{ m}$ とした。水平, 鉛直セル間隔は $\Delta x/L=1/215$ ($\Delta x=0.01 \text{ m}$), $\Delta z/h=1/56$ ($\Delta z=0.005 \text{ m}$), 時間間隔は $\Delta t/T=1/1600$ とした (L : 波長, h : 水深, T : 周期)。時間間隔を非常に小さくしたのは, 砕波のような速い現象を対象とすることと, 2次元計算でCourant数を0.5未満に抑えることにより気体セルでのVOF関数 F の保存を満足させるためである(富士総合研究所, 1993)。

計算では入射波高 $H=10.5$ cm, 周期 $T=1.4$ sの波浪条件を固定し, 抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M の越波流量に及ぼす影響を調べるために $C_M=1.0, 1.2, 1.5, 2.0$ ($C_M=1.2$ 一定)の4種類と $C_D=1.0$ で $C_M=2.0$ の合計5ケースについて計算を行った。この波浪条件のもとで実験では護岸前面で砕波し, 越波流量は最大となった。消波工の空隙率は0.5である。計算にはVT Alpha 500 AXPを用い, 1ケース当たり7周期までの計算に要したCPU時間は50時間程度であった。

計算では初期条件として保存波の摂動解を波の先端が引き波から始まるように一様水深部に設定した。このような条件の場合に実験の初期の波形とは異なるが, 構造物位置で波動運動が定常状態になった計算結果を最終的に採用すれば良い。今回の初期条件の下での計算では, 第1波と第2波目以降で砕波の有無が異なった。以下では, $C_D=1.0$, $C_M=1.2$ の計算結果を示す。

図-4に第1波が消波護岸に接近し, 遡上, 越流に至る約0.5周期間の過程の水面波形と等圧線(間隔 1 gf/cm^2)を $T/16$ 間隔で示した。初期条件で空間波形を引き波から与えたことにより第1波の越波は孤立波的な波形

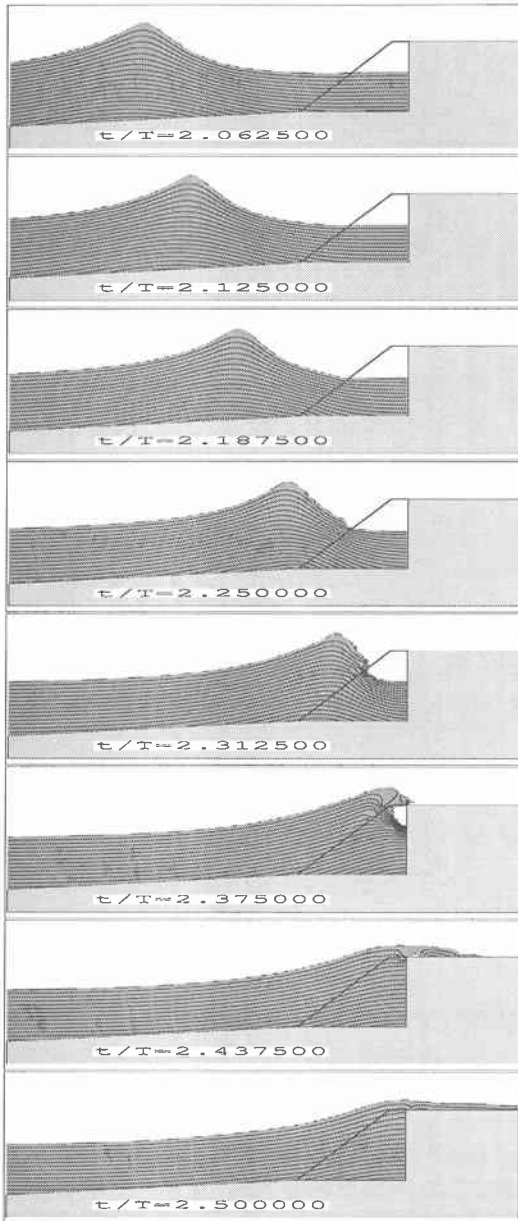


図-4 計算結果(第1波) —非碎波での越波—

を呈し、反射波の影響を受けず斜面上で碎波することなく消波工を遡上する。遡上時には消波工外部に比べて内部では流体抵抗のために水面上昇の位相が遅れる。水表面の曲率が大きくなる辺りで等圧線の密度が高くなる様子が分かる。

図-5は第2波目の波について示したものである。第1波に比べ、クレスト前面で波が崩れながら進行し、消波工法面上を遡上する様子が計算されている。第2波は消波護岸からの反射波の影響を受け、消波工の直前で碎

波する。空間波形の変化と波面近傍で等圧線が歪になっていることから碎波形態は spilling 碎波であるものと判断できる。実験での碎波形態はクレスト近傍で若干の巻き波を伴う spilling 碎波であった。実験では spilling 碎波により水面近傍に気泡が混入してながら伝播した。これに対して数値計算では気泡の存在は考慮できない。波が消波工天端に達する瞬間では消波工内の水面は低く、直立壁との間に空間が生じる。このことは実験結果でも確認されている。計算では直立壁と水面との間に封入された気体の領域の空隙の移流計算だけ行っている。

図-6は、ケーソンでの水位変動について実験結果と計算結果を比較したものである。計算結果は波動運動が定常状態になった時間を抽出して、実験結果の位相に合わせて図示した。ケーソン前面では空気塊が封入されるが、実験は容量式波高計で計測した結果であり、計算はケーソン直面での計算セル内の VOF 関数 F の鉛直方向の積分値であることから両者は同一の量を比較している。実験、計算とも一波毎に変動するが、計算結果のほうが変動が大きい。計算結果では、最高水位の変動と最高水位に達した後の水位の低下時に2段になることが1波毎に表れている。最低水位は両者とも安定しており、実験と計算でよく一致している。

抗力係数の違いによる越波量の比較を図-7に示す。図は慣性力係数 $C_M=1.2$ の一定のもとで $C_D=1.0$ から 2.0 までの比較を示す。第1波目の越波量は抗力係数に依らずほぼ一定に見えるが、後述するように抵抗が大きいほど越波量が大きくなる傾向にある。第2波目以降の碎波を伴う場合の越波量は、 $C_D=2.0$ 、1.5と $C_D=1.2$ 、1.0の2グループに分かれ、抗力係数が大きいほうが越波量が大きくなっている。同様に、慣性力係数による越波量の比較を図-8に示す。抗力係数 $C_D=1.0$ のもとで慣性力係数 $C_M=1.2$ と 2.0 について比較した。これより慣性力係数が大きいほうが越波量が大きくなることが分かる。これらはいずれも抵抗が大きくなると消波工内への波が透過し難くなり、この影響で法面上へ遡上し易くなるために越波量が増加するものと考えられる。

実験でも越波量が1波毎に変動する。そこで計算結果についても同様に1波毎の越波流量を算出し図-9に示した。横軸は計算における波の数 N で表した。まず、抗力係数の影響について比較する。第1波目 ($N=3$) の越波量は非碎波のもとで生じた。第2波目以降 ($N \geq 4$) は碎波を伴う越波である。非碎波の越波量は、碎波後の越波量より大きく、慣性力係数の影響も含め、抵抗が大きい方が越波量は大きい傾向が表れている。

碎波を伴う越波については、第2波目以降 ($N \geq 4$) の越波流量を比較すると、第2波目 ($N=4$) の越波量に顕著な差が表れているのみで、第3波目以降 ($N \geq 5$) は1

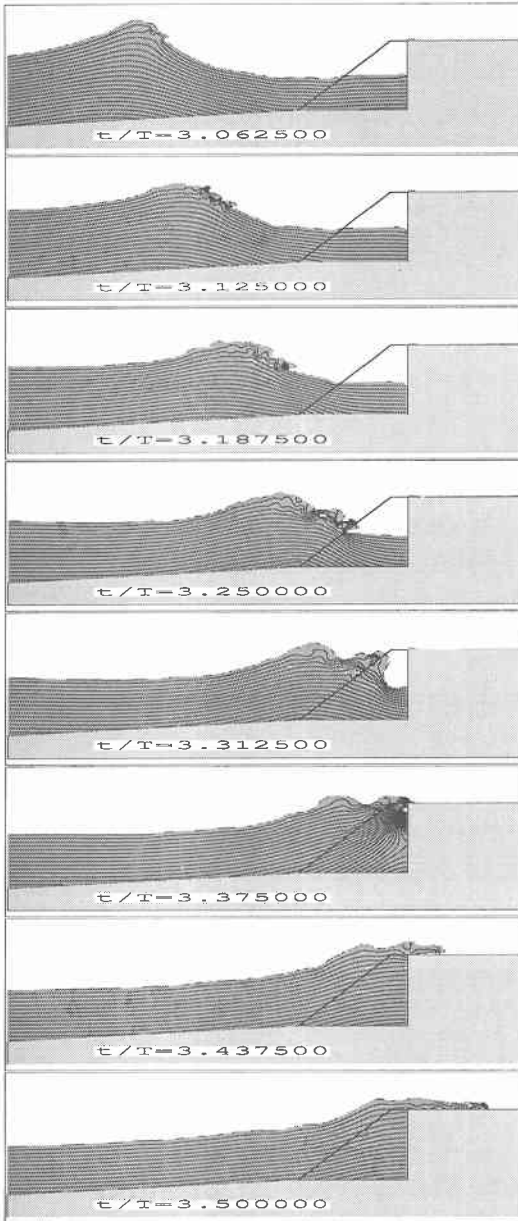


図-5 計算結果(第2波)一砕波後の越波一

波毎に変動し、抗力係数の大きさに応じた明瞭な関係はみられない。慣性力係数の越波流量への影響は、第1波目($N=3$)の越波量の違いが顕著であるだけで、第2波目以降($N \geq 4$)にはほとんど差がない。

このような第2波目以降の越波量の変動は、反射波や消波護岸の前面の擾乱の影響で越波が変動するために生じる。計算においても1波1波の越波量は実験と同様に変動する。

図-10は砕波をとまなう場合の越波流量を計算結果

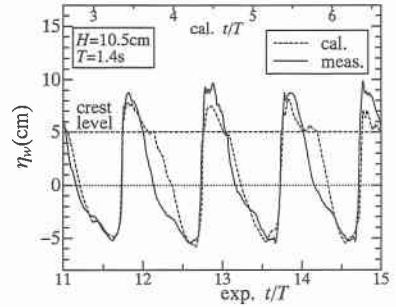


図-6 越波水位の計算結果と実験結果との比較

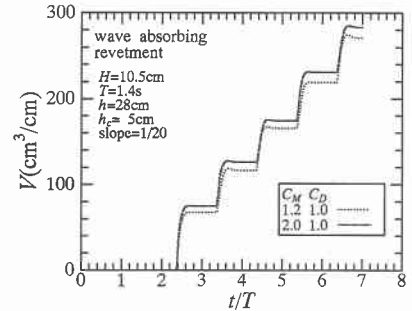


図-7 抗力係数による越波量の変化一時系列一

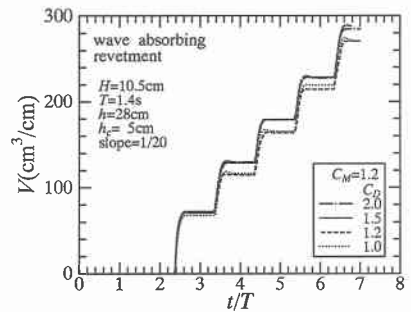


図-8 慣性力係数による越波量の変化一時系列一

と実験結果を比較したものである。計算結果は4波の越波量の平均値を採用した。同図には非砕波の越波流量も示した。実験結果は $q=32 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ で、計算結果は実験結果の1.1倍から1.2倍程度である。このように計算結果の方が大きくなることは前報の一樣水深に設置した直立護岸や消波護岸の結果と同じ傾向である。本波浪条件では砕波形態はspilling砕波であった。この砕波形態によるエネルギー減衰はplunging砕波に比べて小さい。砕波によるエネルギー減衰の越波量への影響は実験結果と計算結果の差に表れた。この影響が数値計算モデルに考慮されていないため、計算結果が大きくなることはモデルの精度と一致する。

以上のように抗力係数の越波量に及ぼす影響が顕著に表れなかったのは、本条件では波高が大きく越流水深が

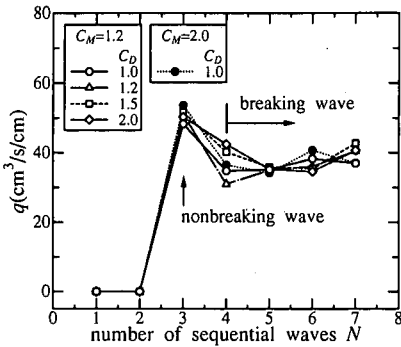
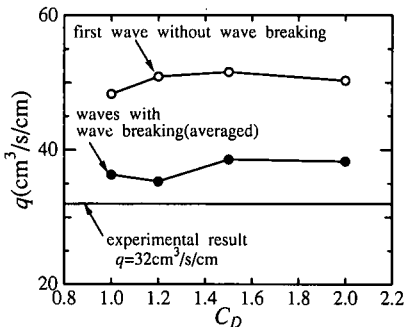
図-9 波毎の越波流量の時間変化 (計算結果, $T=1.4$ s)

図-10 平均越波量の実験結果と計算結果との比較

大きくなり越波量に対して、法面上の遡上波が支配的になったためと考えられる。現実的な許容越波流量のように越流水深が小さく消波工内を透過する成分が支配的な場合には抗力係数の増加により越波量が減少するものと考えられる。また、砕波によるエネルギー減衰は計算モデルに考慮されていないが、砕波形態に応じた流速分布が越波量を減少させることが本モデルにより再現できた。今後は数値計算モデルに適した砕波条件(灘岡ら, 1996)を導入する必要がある。

5. 結 論

本研究では、ポラスボディモデルの支配方程式をもとにVOF法を適用した数値計算モデルの改善を計り、海底斜面上の消波護岸の越波を対象に数値計算を行った。数値計算結果と水理実験結果との比較から、本研究で得られた結論を以下にまとめる。

1. 計算では第1波目は斜面上で砕波することなく越波した。このときの非砕波の越波流量は砕波を伴う第2波目以降の越波流量に比べて大きくなった。
2. 消波護岸前面でspilling砕波を生じ、反射波の影響も受け越波に至る過程が計算できた。砕波形態は実験結果と一致した。

3. 計算の越波流量は実験結果の1.1倍から1.2倍程度で若干大きくなった。

4. 今回の条件のように越波流量が大きい場合には抗力係数の影響は顕著に現れなかった。これは、消波工内の透過波ではなく法面上の遡上波が支配的になるためである。

今後は、砕波モデルならびに許容越波量に即した波浪と構造物の条件について検討していく予定である。本研究一部は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究として実施したものである。実験には(株)土木技術開発 関根 満氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司(1978): 保存波の摂動解の波高による表示, 第33回年譜概要集, II, pp. 760-761.
- 鹿島遼一・楠山 勉・清水琢三・関本恒浩・京谷 修(1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 686-690.
- 鹿島遼一・楠山 勉・清水琢三・関本恒浩・京谷 修(1994): 消波工の変形量の時間変化の予測と変形に及ぼすコアの影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 771-775.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻第4号, pp. 3-44.
- 楠山 勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990): ポラスボディモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動場解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 楠山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994a): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 656-660.
- 楠山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994b): 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 661-665.
- 楠山 勉・今井澄雄(1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 696-700.
- 楠山 勉・鹿島遼一・今井澄雄・清水琢三・片山裕之(1996): 消波護岸への越波に関する現地観測, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 291-296.
- 楠山 勉・鹿島遼一(1997): 消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験との比較, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 736-741.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.
- 灘岡和夫・大野修史・栗原 礼(1996): 波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕波条件, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 81-85.
- 富士総合研究所編(1993): 汎用流体解析システム-FUJI-RIC/ α -FLOW一, 丸善, 446 p.
- Nichols, B. D., C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss (1980): SOLA-VOF - A solution algorithm for transient fluid with multiple free boundaries, Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California.
- van Gent, M. R. A., P. Tonjes, H. A. H. Peit and van den Bosch (1994): Wave action on and in permeable structures, Proc. 24th ICCE, Vol. 2, pp. 1739-1753.