

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

鹿島 遼一* ・ 榊山 勉* ・ 清水 琢三**
関本 恒浩*** ・ 窪 泰浩****

1. はじめに

沖合に人工島を建設するうえでの問題点のひとつに、砕波限界波高が大きくなることによって、生起確率は低くとも非常に大きな波浪が来襲する可能性があることが挙げられる。特に、原子力発電所など重要施設の建設を前提とした人工島では、設計波を越えるような波浪が来襲しても、人工島に要求される機能を失ってはならないことはいうまでもない。このような要請のなか、人工島防波護岸の設計において、通常的设计波に対しては現行的设计法を満足するとともに、設計波を越える極めて大きな外力に対しては、人工島の機能を損なわない程度の変形は許容する設計概念が提案され（鹿島ら、1988；鹿島・阿部、1992）、この概念の妥当性が確認されている（鹿島ら、1992；1993 a）。この概念を設計に反映させるためには外力の時間変化も考慮して防波護岸の変形を精度良く予測・評価する必要がある。そこで本研究ではこれらを考慮するため、まず消波ブロック被覆ケーソン式護岸を対象に鹿島ら（1993 b）が提案した、波高、周期、作用波数、堤体法面勾配等の条件から消波工の変形量を評価する実験式の妥当性を実験スケールや法面勾配、来襲波の周期を変化させた実験により検証した。また、変形量の経時的な変化についても、作用波高を時間的に変化させた実験を実施して検証した。さらに、現実的な断面における堤体の変形を考慮するため、コアの材質や高さなどを変化させたときの変形特性についての実験も行った。

2. 変形量評価式

堤体の変形量は、次式に示す van der Meer（1987）の提案した変形レベル S を用いて評価した。

$$S = A/D_n^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$D_n = (W/\gamma_s)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 A は変形により侵食した断面積、 D_n はブロックを同体積の立方体に置き換えたときの見かけの高さ、 W

はブロックの重量、 γ_s はブロックの単位体積重量である。なお、消波ブロック表層 2 層まで変形が及ぶときの変形レベル S は 20 程度である（鹿島ら、1993 b）。鹿島ら（1993 b）の提案した変形量評価式を次に示す。

$$N_s = 8.5(S/N^{1/2})^{0.16} \xi_z^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$N_s = H_{1/3}/\Delta D_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\xi_z = \tan \theta / (H_{1/3}/L_0)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 N_s は安定係数、 S は変形レベル、 N は作用波数、 ξ_z は surf similarity パラメータ、 Δ は消波工の水中比重（ $= \gamma_s/\gamma_w - 1$ 、 γ_w は水の単位体積重量）、 $\tan \theta$ は消波工の斜面勾配、 L_0 は沖波波長であり、 L_0 は van der Meer（1987）と同様、スペクトルモーメントから求めた平均周期 T_z を用いて求める。またこの式は変形すると、

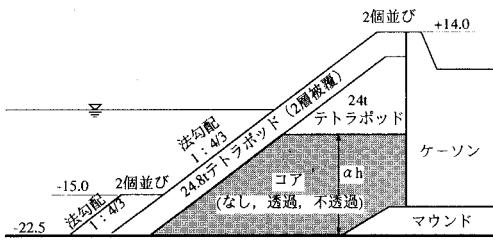
$$S = \left(\frac{\tan \theta}{8.5 \Delta D_n} \right)^{0.16} (H_{1/3}^3 L_0)^{0.64} N^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、外力項と作用波数の項の積が一定であれば、 S が一定となる。したがって、初期変形がある断面に対して波の作用後の堤体の変形レベルを求める場合、初期変形レベルに対して新たに作用する外力に対応する等価な作用波数を求め、これにその波自身の作用波数を加えたものを式（7）の計算に用いればよい。また、初期変形量を累積変形量と考えることによって波高の時系列変化を考慮した変形レベルを予測することが可能となる。

3. 水理模型実験

水理模型実験は模型縮尺 1/87.5 の中型模型実験を中心に、形状母数 $m=5$ の Wallops スペクトル（修正 Bretschneider-光易型スペクトル）を有する不規則波を用いて実施した。実験に用いた防波護岸の基本断面を図-1 に示す。消波工天端幅はブロック 2 個ならびとし、消波工の法面勾配は 1：4/3、消波ブロックの重量は 24.8 t を基本とした。このときのブロックの安定限界波高 H_b は 6.38 m である。また防波護岸の天端高は、現地スケールで静水面から 14 m の位置とし、堤体前面水深は 22.5 m とした。なお、後述する変形量評価式の検証実験では法面勾配 1：2 の中型模型実験（縮尺 1/87.5、ブロック安定限界波高 7.3 m）および大型模型実験（縮尺 1/22.74、消

* 正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所
** 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部
*** 正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所
**** 正会員 東京電力株式会社



図一 実験に用いた防波護岸の基本断面

波ブロック重量 80 tf, ブロック安定限界波高 10.3 m) も実施し, 鹿島ら (1993 b) の実験結果とあわせて検討した。

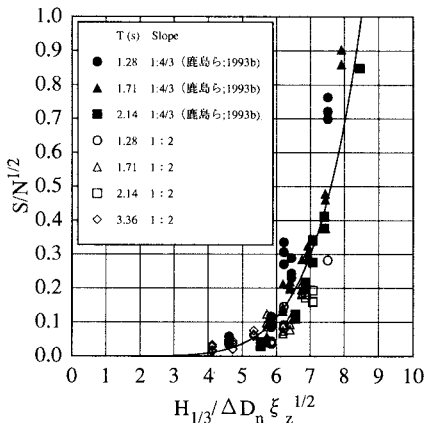
実験方法は鹿島ら (1993 a; 1993 b) と同様であるため, 詳細についてはここでは割愛する。

4. 変形量評価式の検証

4.1 各種データによる検証

鹿島ら (1993 b) によって提案された消波ブロック被覆防波護岸の消波工変形量評価式は, 波高, 周期および波の作用時間を変化させた実験結果より構築されたものであり, 斜面勾配やブロックの重量が変化した場合に対する検証は行われていない。そこで, 種々の実験データより変形量評価式の検証を行った。実験は周期を 3 種類, 法面勾配 1 : 2 の 3 ケースの中型模型実験の他に, 模型縮尺 1/22.74, 法面勾配 1 : 2 の大型模型実験 1 ケースの実験を実施した。実験波の有義波周期は現地換算値で, 中型模型実験では 12, 16 および 20 s (模型諸元 1.28, 1.71 および 2.14 s), 大型模型実験では 16 s (模型諸元 3.36 s) である。また, 波高は中型模型実験では堤体法面勾配 1 : 4/3 のとき安定限界波高の 1.0~2.0 倍, 法面勾配 1 : 2 のとき 0.8~1.8 倍, 大型実験では 1.0~1.6 倍とした。

図一は鹿島ら (1993) による変形量評価式と実験データとを比較したものである。なお, 図中には鹿島ら (1993



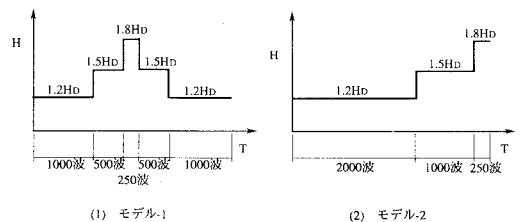
図二 変形量評価式と実験データの比較

b) の実験結果も同時に示した。この図より実験データは波の周期, 法面勾配および実験スケールによらず, 鹿島ら (1993 b) による評価式とよく一致することが確認された。なお, スケール効果の限界レイノルズ数 $R_{nc} (= D_n(gH_{1/3})^{1/2}/\nu)$, ν は動粘性係数) は中型実験では $2.5 \sim 3 \times 10^4$, 大型実験では $3 \sim 4 \times 10^5$ であったが, 不規則波を用いた堤体の変形実験の場合, 本実験のレイノルズ数の範囲では顕著なスケール効果は見られないこともあわせて確認された。

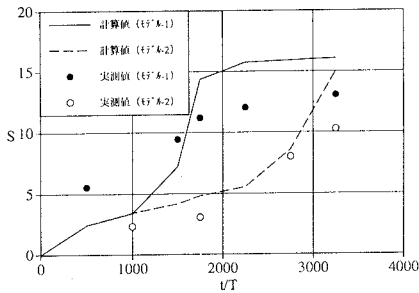
4.2 外力が経時的に変化する場合の変形量の検証

堤体の変形量を正確に予測するためには, 高波の経時変化をも考慮できなければならない。そこで, 基本堤体断面に対して周期を 16 s と 20 s (模型スケール: 1.71 s と 2.14 s) の 2 種類, 波高の時系列として 2 種類のモデル時系列を用いた実験により検証した。モデル時系列は図一3 に示すように, 波高レベルとしてブロックの安定限界波高 H_b の 1.2 倍, 1.5 倍および 1.8 倍の 3 種類について, それぞれの波高の作用時間は変えずに出現する順番だけを変えたものとした。

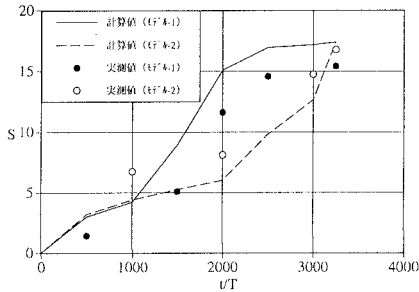
図一4 はそれぞれ波高のモデル時系列がモデル-1 (中間に波高のピークがあるもの) とモデル-2 (波高が順次大きくなるもの) について, それぞれ周期を 16 s と 20 s (模型スケール: 1.71 s と 2.14 s) の 2 種類に対して変形レベルの実測値と変形量評価式による予測値を示したものである。一部傾向の若干異なるケースもあるが, 全体的に見れば変形量の予測値と実測値は良くあっていると考えられる。傾向が若干異なるように見えるモデル-1 の周期 16 s (模型スケール: 1.71 s) のケースでも, $1.8H_b$ の波が作用したとき ($t/T=1500 \sim 2000$) の変形量が小さいが, それ以外の変形量の変化の割合については予測値と実測値の変化の傾向は一致している。なお, 実験値と予測値の差異は概ね 3 程度, 大きいところで 5~7 程度の範囲となっている。また, 実験値と予測値の差異は初期段階で相対的に大きく, 継続時間が長くなるとその差異は相対的に小さくなっていくようである。ブロックの変形量はブロックの噛み合せの強さなどのため, 必ずしも実験再現性が十分でないことを考えあわせれば, 本変形量評価式はよい精度をもっているものと考えられる。



図三 モデル時系列の模式図



(a) $T=16\text{sec}$ (1.71sec)



(b) $T=20\text{sec}$ (2.14sec)

図-4 変形レベルの実測値と計算値の比較

5. コアを有する断面についての検討

5.1 変形レベルに及ぼすコアの影響

実際の施工では経済性や施行性の観点から、コアを有する断面とすることが多い。そこで、変形レベルに及ぼ

すコアの影響について調べた。コア材料およびコア高さを変化させた実験では、コアとして捨石を用いた場合と比較のため完全に不透過とした場合の2種類について検討した。捨石コアは重さ1.3~2tf(模型スケール; 2~3g)の砕石を用い、不透過コアは耐水ベニヤ製としブロックが滑ることを防ぐため表面にラバーを貼ったものを用いた。コアの高さは不透過の場合で水深の0.2~1.0倍の範囲、透過(捨石)の場合で水深の0.2~1.4倍の範囲としている。また作用波高は消波ブロックの安定限界波高の1.5倍とした。

代表的な捨石コアの天端高に対して変形レベルSの時間変化を示したのが図-5である。この図では各時刻毎の変形レベルの平均値と上限、下限値を示している。また、図中の点線は、次の時刻までに一部でも被覆2層が移動し、コアが見える状態になったことを示している。

コアなし(全断面消波ブロック)の場合、データのばらつきが比較的小さく、2000波以上作用させても、侵食域は被覆2層の厚さ以下に納まっている。一方、捨石コアの高さを変えた実験結果は、ケースによるばらつきが大きく、コア天端高 $0.2h$ (h は堤脚水深)のケースでも捨石コアが見えるまで急激に変形が進行する場合がある。これは、捨石コアの締め固め具合ならびに捨石コアと被覆ブロックの噛み合わせ具合によるものと考えられる。捨石コアが水面より上に出て、変形量は同程度であり、むしろコア高 $1.2h$ のケースが最もばらつきが少なく安定な結果が得られた。

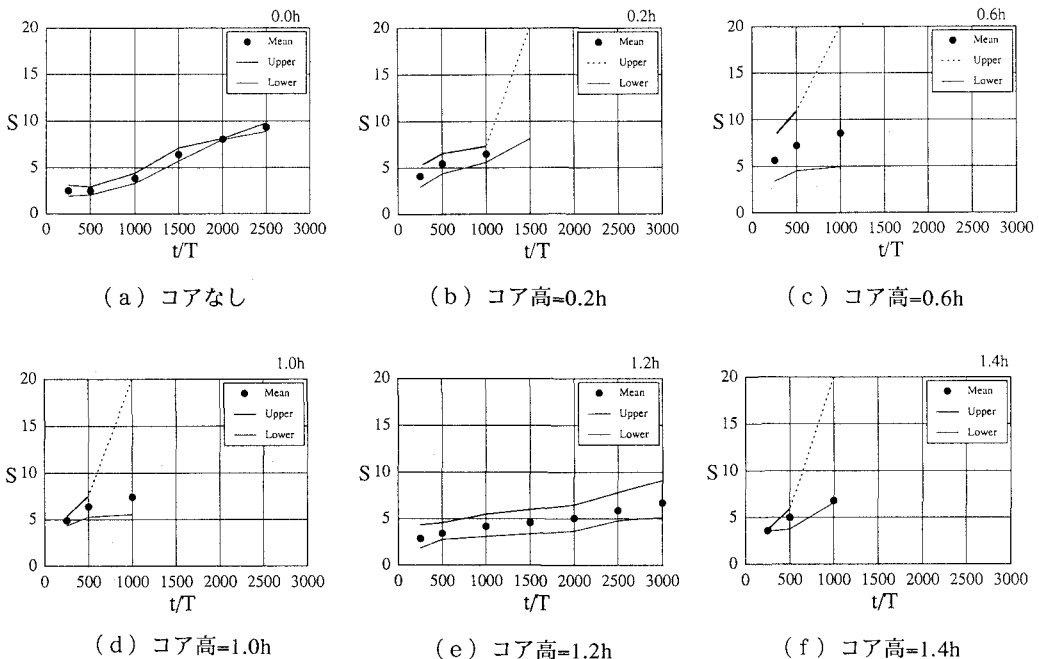


図-5 代表的なコア高さに対する変形レベルSの経時変化 (h は堤脚水深)

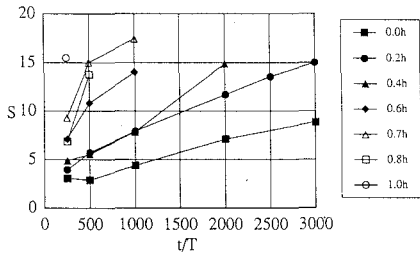


図-6 不透過コアに対する変形レベルSの経時変化

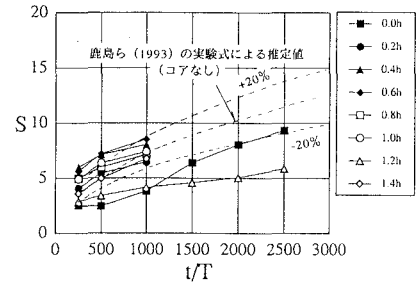


図-7 透過コアに対する変形レベルSの経時変化

図-6に示すように不透過コアの天端高を変えた実験では、コア天端高が高くなるほど変形が大きくなる傾向を示したが、図-7に示すように捨石コアを用いると、コア天端高を1.4hまで上げててもコア天端高の影響は小さいことがわかった。このようにコアを有する実験では、van der Meer (1987)が指摘しているように、コア材の透水性が変形量に寄与しており、一般的にコアの透水性が小さいほど変形が進みやすいことが確認された。

図-7には、捨石コアのない全断面消波ブロックの中型模型実験結果に基づき得られた鹿島ら(1993b)の消波工の変形量評価式による推定値を示した。今回の実験結果は、250波作用後の場合を除いて、概ね、捨石コアなしに対する推定結果の±20%の誤差範囲内に収まっており、コア高さの影響は明瞭に現れていない。

以上のように、コアの高さの影響は必ずしも明瞭ではないが、変形特性に少なからず影響を与えていることは明らかである。そこで、堤体前面水位とコア高や変形レベルとの関係について検討してみた。

図-8はパラベット前面の水位とコア高さの関係を示したものである。不透過コアの場合には、コア高が高くなると平均水位が上昇するとともに、越流量が多くなるため、パラベット前面の水位変動は小さくなる。これに対して、捨石コアの場合にはコア高が水深の0.8倍のとき平均水位上昇量はピークとなり、それ以上高くしても上昇しないこと、また、前面水位変動の減衰が不透過コアのケースに比べて緩やかであることから、コアの透水性が影響しているものと判断される。また、コア高さが

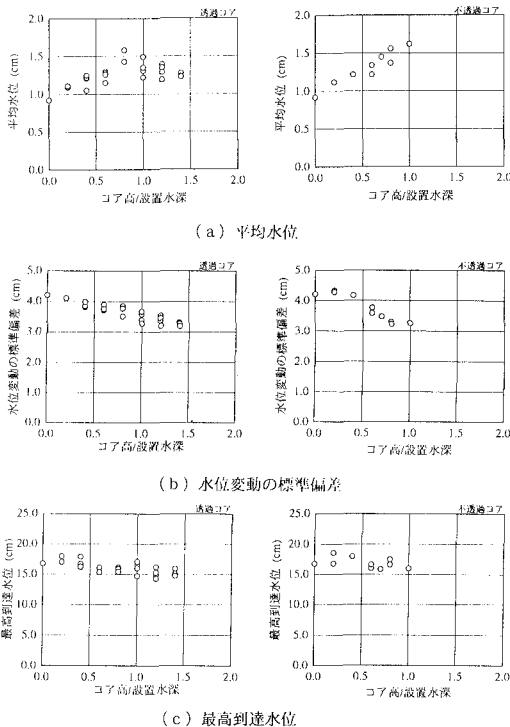


図-8 パラベット前面水位とコア高さとの関係

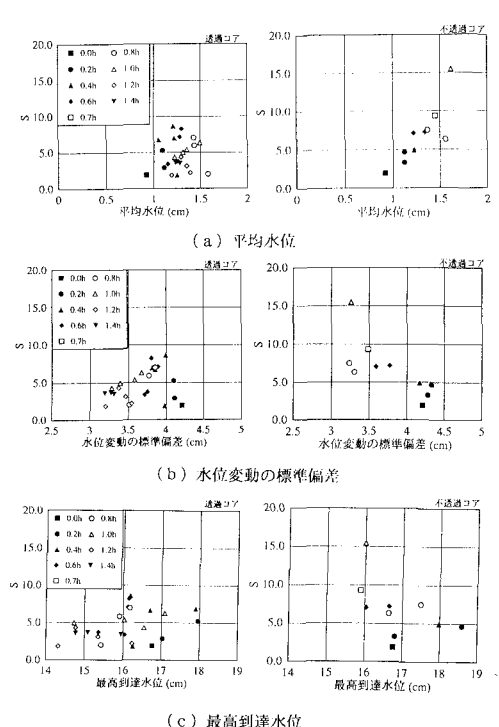


図-9 パラベット前面水位と変形レベルとの関係

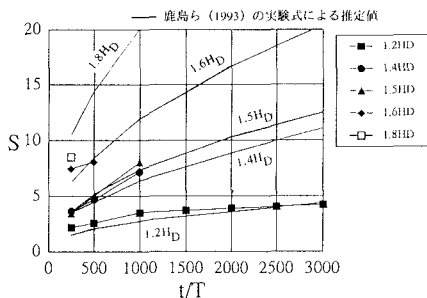


図-10 フィルター層を有する断面に対する変形レベルの経時変化

同一であっても堤体前面水位がばらついていることがこの図からわかる。確認のため沖波波高と堤体前面水位の関係を調べたが、沖波波高はばらついていないにもかかわらず、堤体前面水位にはばらつきが見られた。この原因として消波ブロック上における波の変形のばらつきが考えられる。また、コアのある場合の実験において変形量にばらつきが見られるが、このばらつきの原因は堤体前面水位のばらつきに起因するものと考えられる。

図-9はパラベット前面水位と変形レベルの関係を調べたものである。不透過コアの場合には、平均水位が上昇するほど、また越波量が増加するほど変形が進む傾向が明瞭にみられるが、捨石コアの場合には、透水性の影響によりある程度以上コアを高くしても平均水位は上昇せず、しかも摩擦による波高減衰により越波も低減するので、平均水位あるいは前面水位変動と変形レベルに明瞭な関係はみられない。

全断面消波ブロックの場合には、コアとの噛み合わせも当然良いことから、平均的にみれば、捨石コアの場合に比べて安定性はよいと判断される。しかしながら、コアなしの実験結果に基づく変形量評価式と捨石コアの天端高を変えた実験結果がほぼ対応していることから、ブロックの積み方などによるばらつきなどを考慮すると、捨石コアの影響は比較的小さいと判断することができる。したがって、鹿島らの評価式でコアがある場合の変形量の評価を行っても、実用上問題は無いと考えられる。

5.2 フィルター層を設けた断面に対する検討

これまで、基本断面を中心に検討を実施してきたが、実際の施工ではコア部分と被覆層部分の間にフィルター層を設けることが多い。そこで、現実的な断面として被覆層は消波ブロック4層被覆の下にフィルター層として根固めブロック2層を設けた断面について検討を実施した。

図-10はフィルター層を有する断面に対する消波工の変形レベルの経時変化を示したものである。図中には

鹿島ら(1993)の変形量評価式による推定結果も同時に示してある。変形レベルの経時変化は、全断面消波ブロックの実験結果に対して得られた変形量評価式による推定結果に概ね一致することが確認され、4層程度の被覆厚があれば全断面消波ブロックに対する評価式を用いれば非常に精度で消波工の変形量を評価することが可能である。これは、被覆層が4層と厚くなっていることにより、フィルター層や捨石の影響が顕著に現れないことによると考えられる。また、変形形状について確認したところ、全断面消波ブロックのみの場合と同様、S字型の変形断面となっており、上述した理由を裏付ける結果となった。

6. おわりに

本研究によって、鹿島らが提案した消波工の変形量評価式が、波の周期、法面勾配および実験スケールによらず、実験データを良く説明し、さらには外力が時間的に変動する場合にも、消波工の変形量を精度良く評価できることが確認された。また、変形量評価式は全断面消波ブロックを用いた実験結果をもとに構築されたものであるが、実用的には被覆層が厚い堤体に対しても精度良く堤体の変形量を評価できることがわかった。

最後に、本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものである。本研究を進めるに当たり、土木学会原子力土木委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授)、同耐波浪設計WG(主査 西村仁嗣筑波大学教授)の主査ならびに委員、メンバーの各位には数多くの貴重な助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 鹿島遼一・高階實雄・島田真行・今泉正次・植田和哉(1988): 沖合人工島外郭施設の設計の考え方について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 602-606.
- 鹿島遼一・阿部宣行(1992): 沖合人工島外郭施設の耐波設計について, ウォーターフロント開発シンポジウム講演論文集, pp. 251-256.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1992): 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 671-675.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1993a): 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・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修(1993b): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 795-799.
- van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layers design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.