

直立護岸との比較における 緩傾斜護岸の越波量の評価と問題点

EVALUATION OF WAVE OVERTOPPING DISCHARGE AND ITS ISSUES OF
GENTLY SLOPING REVETMENT IN COMPARISON WITH SEAWALL

芹沢真澄¹・宇多高明²・小林昭男³・星上幸良⁴・三波俊郎⁵・古池 鋼⁵
Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA, Akio KOBAYASHI, Yuki Yoshi HOSHIGAMI,
Toshiro SAN-NAMI and Kou FURUIKE

¹正会員 海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208号)

²正会員 工博 (財)土木研究センター審議役なごさ総合研究室長(〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

³正会員 工博 日本大学理工学部海洋建築工学科助教授(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

⁴正会員 国際航業(株)海洋エンジニアリング部(〒191-1165 東京都日野市旭が丘3-6-1)

⁵海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208号)

Wave overtopping discharge of gently sloping revetment was evaluated in comparison with vertical-type seawall based on the experimental results given by Tamada et al. There are many cases that the gently sloping revetment is built in front of the existing seawall, because of the limitation of coastal land in Japan. However, this causes increase in wave overtopping over the revetment. This kind of application of gently sloping revetment must be avoided.

Key Words : Gently sloping revetment, seawall, wave overtopping rate, comparison

1. まえがき

緩傾斜護岸は直立護岸に対し、のり面を緩勾配とすることにより、人が水辺や海浜へ近づきやすくなるという親水性の向上を主な目的として建設が進められてきた。しかし、現実の海岸事業においては、用地の制約により既設直立護岸の前面に前出しして緩傾斜護岸が建設されることが多く、前浜が存在しない条件で緩傾斜護岸が造られた結果越波が増大した例があつたことを絶たない¹⁾²⁾。現場ではこうした状況が十分理解されず、依然として多くの海岸で誤った使い方がなされている。

一方、越波防止機能において緩傾斜護岸が直立護岸に劣ることは既に合田ら³⁾、高山ら⁴⁾の実験的研究により明らかにされている。また、玉田ら⁵⁾は緩傾斜護岸を対象として系統的な水理模型実験を行い、越波量算定図を提案している。本研究では、合田ら³⁾の直立護岸および玉田ら⁵⁾の緩傾斜護岸の越波量算定図を用い、前述のように既設直立護岸の前面に前出しして緩傾斜護岸が建設されるという特徴に注目して越波量の詳細比較を行い、越波量の観点から緩傾斜護岸の問題点を明らかにする。なお、以下の検討に用いる護岸の設置条件と記号の定義は、図-1に示す通りである。

2. 緩傾斜護岸と直立護岸の越波量の比較

(1) のり先を一致させた場合の越波量の比較

玉田ら⁵⁾は、海底勾配1/10の一樣勾配斜面上に、のり面勾配1/3と1/5の緩傾斜護岸を設置し、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ の不規則波を作用させた場合の越波量算定図を作成した。この図と合田ら³⁾の直立護岸の越波量算定図をデジタイザーで読み取り、同一条件で再整理した。ここではまず、堤脚水深(のり先)を一致させた場合の越波量を算出し、緩傾斜護岸と直立護岸の形状による比較を行った。

図-2(a)、(b)は、それぞれののり面勾配が1/3と1/5の場合における無次元越波量算定図である。玉田らも述べているように、図-2では緩傾斜護岸の越波量は相対堤脚水深 h/H_0 が大きいほど、また相対天端高 h_c/H_0 が小さいほど増大する。すなわち陸上に設置された緩傾斜護岸では越波量は小さいが、護岸を前出しするほど越波量が大きくなると言える。さらにのり面勾配が大きいほど越波量は増大する。直立護岸との比較では、のり先が汀線付近および海中になると明らかに直立護岸より越波量が増大するが、のり先を汀線より陸側にすると越波量は急激に減少し、1/3勾配の場合、 $h/H_0=-0.2$ 付近ではじめて直立護岸の越波量以下となる。つまりのり先を $h/H_0 < -0.2$

まで陸側に退いて設置しない限り直立護岸よりも越波量が大きくなる事が分かる。実際の護岸の設計では、波浪条件 H_0' には設計波高(再現期間30年,50年という高波浪)が対象となり,また潮位も朔望平均満潮位に高潮偏差を加えた高潮位となる。このような条件で $h/H_0' < -0.2$ を満足させるには,相当高い地盤高上に護岸を設置しなければならない。

図-3(a),(b)は,同じ結果を直立護岸の越波量に対する比として整理したものである。のり先が汀線から海中となる $h/H_0' = 0 \sim 0.2$ 付近で越波量が増大しており,直立護岸の越波量に対する増大率は1/3勾配護岸で5~40倍,1/5勾配で1~4倍に達する。

図-4(a),(b)は,ある堤脚水深を与えた時同一の越波量となる緩傾斜・直立護岸の天端高の比を図-2(a),(b)より内挿・外挿して求めたものである。なお無次元越波量が 10^{-6} 以下のものは除外した。直立護岸の天端高と比較して1/3勾配では最大約2倍,1/5勾配では最大約1.6倍天端高を高めなければならず,特に相対天端高 h_c/H_0' が小さい条件,つまり高波浪になるほど天端高が不足する傾向となる。

(2) 既設直立護岸に前出しして緩傾斜護岸を設置した場合の越波量の変化

次に,図-5に示すように現地で見られる既設直立護岸に前出しして緩傾斜護岸を設置した状況について考える。なお図-5では護岸の堤脚が陸上にあるた

め,堤脚水深(水面から下向きに測った水深)にマイナスの符号を付けることで,水面から鉛直上方に測った堤脚位置の地盤高を表わすこととする。緩傾斜護岸の前出しによれば,その堤脚水深は既設直立護岸より増大する。幾何学的考察によれば,既設直立護岸の堤脚水深 h と,前出しされた緩傾斜護岸の堤脚水深 h' の関係は

$$h' = h + \Delta h = (1 + \mu)h + \mu h_c \quad (1)$$

となる。ここに係数 μ は

$$\mu = \cot \alpha / (\cot \beta - \cot \alpha) \quad (2)$$

であり, h' は, h_c ,海底勾配 $\tan \beta$,緩傾斜護岸ののり面勾配 $\tan \alpha$ より求まる。逆に次のようにして h' を与えて次式より h を逆算することもできる。

$$h = (h' - \mu h_c) / (1 + \mu) \quad (3)$$

前述の図-2~図-4は緩傾斜護岸の越波量と堤脚水深の関係であったが,以下では前出し前の既設直立護岸の堤脚水深と越波量との関係として整理し直す。このためまず図-2(a),(b)の緩傾斜護岸の越波流量算定図が前出し後の越波量 q を与えると読み替え,横軸の h を前出し後の堤脚水深 h' に読み替える。この堤脚水深 h' に対する前出し前の直立護岸の堤脚水深 h は式(3)より逆算できる。このようにして得られた h と越波量 q の関係を整理事することで,既設直立護岸の堤脚水深 h に対する前出し後の緩傾斜護岸の越波量との関係が得られる。

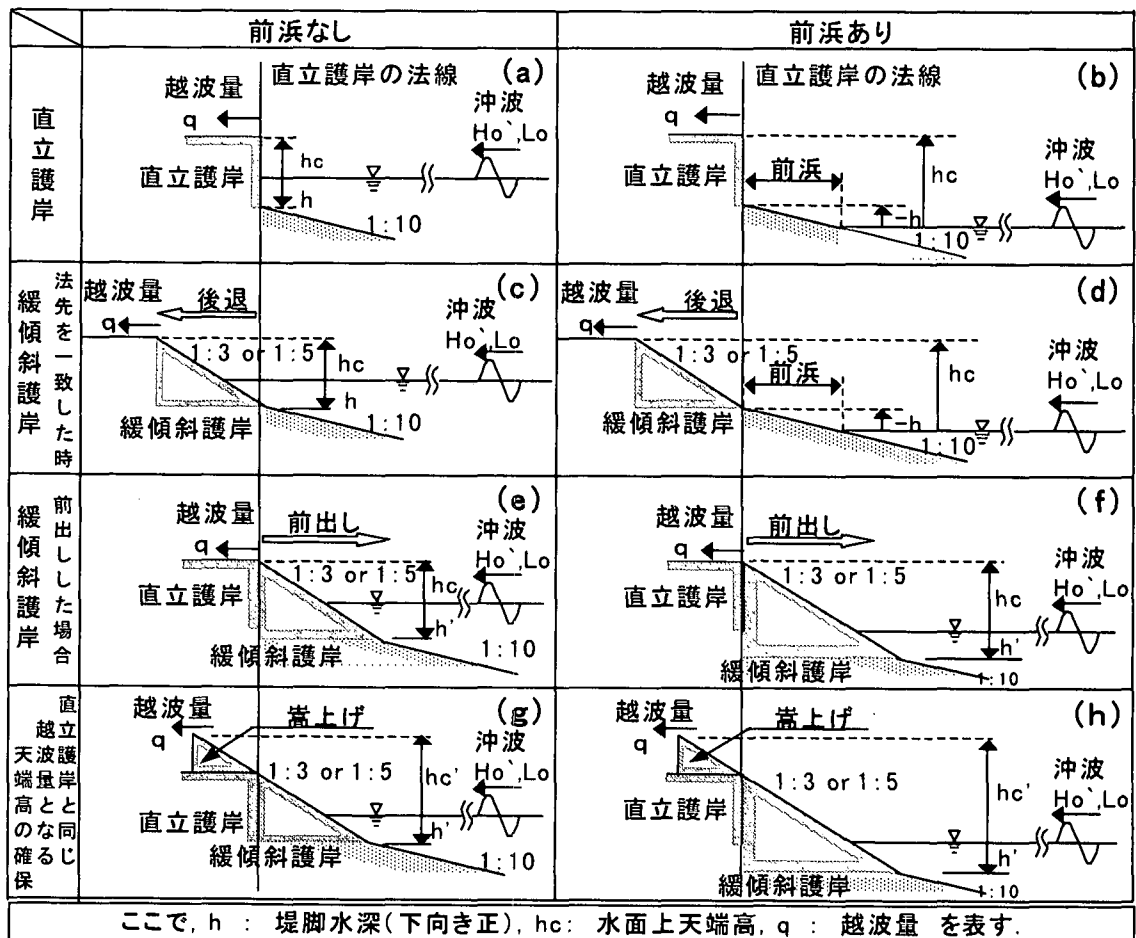
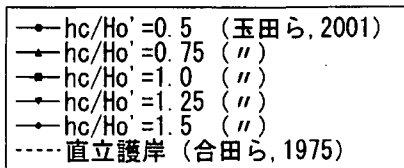
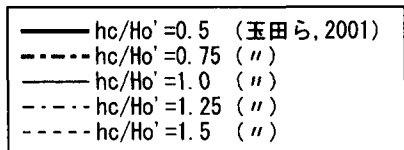


図-1 検討断面のイメージと記号の定義



(図-2 の凡例)



(図-3,4 の凡例)

具体的には図-2の各実験データ(h', q)に対して、式(3)より h を逆算し、越波量 q を一定に保ちつつ横軸の値を $h' \rightarrow h$ に変換してプロットすることで(h', q) \rightarrow (h, q)の変換ができ、既設直立護岸の堤脚水深 h に対する前出し後の緩傾斜護岸の越波量の関係が得られる。一方、既設直立護岸の越波量は図-2の横軸が既設直立護岸の堤脚水深 h として読めばよい。このようにして既設直立護岸の越波量と前出し後の緩傾斜護岸の越波量を既設直立護岸の堤脚水深との関係で整理

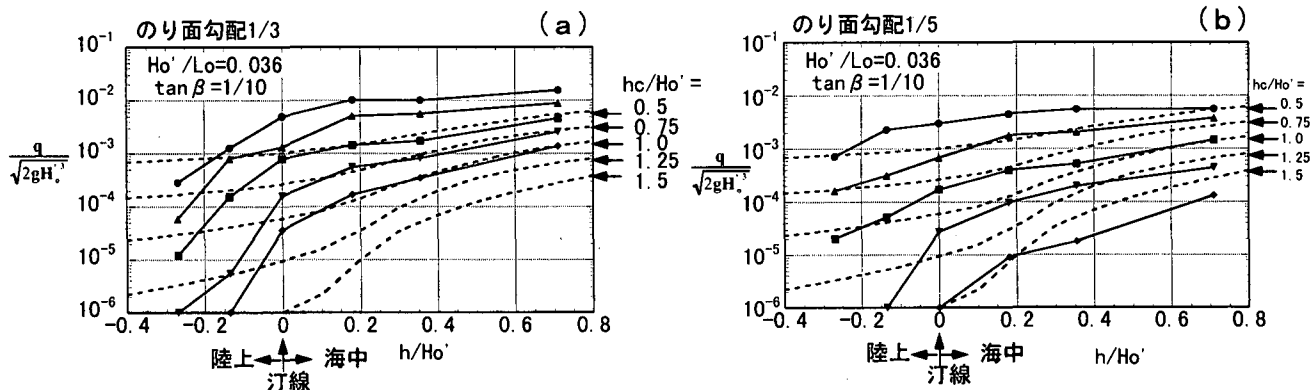


図-2 緩傾斜護岸と直立護岸の越波量の比較
(護岸のり先を一致させた場合)

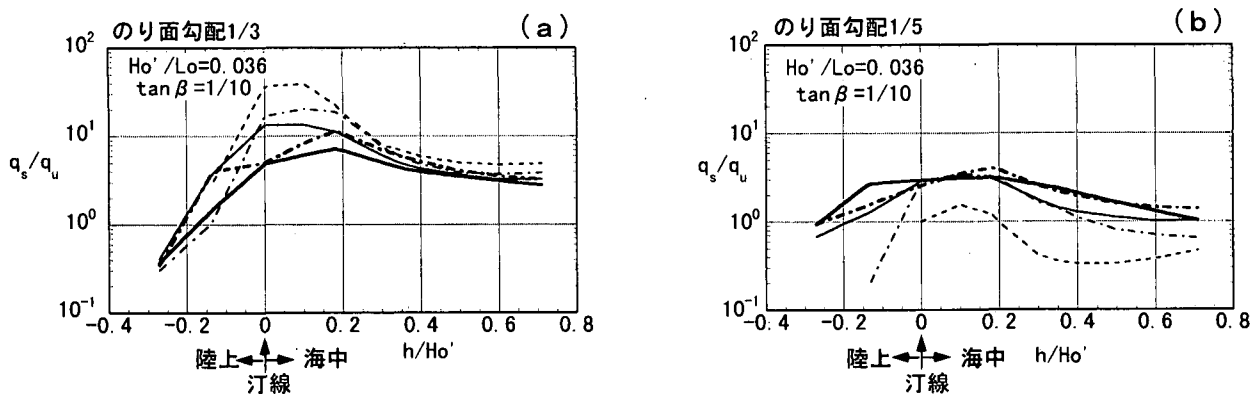


図-3 緩傾斜護岸と直立護岸の越波量の比
(護岸のり先を一致させた場合)

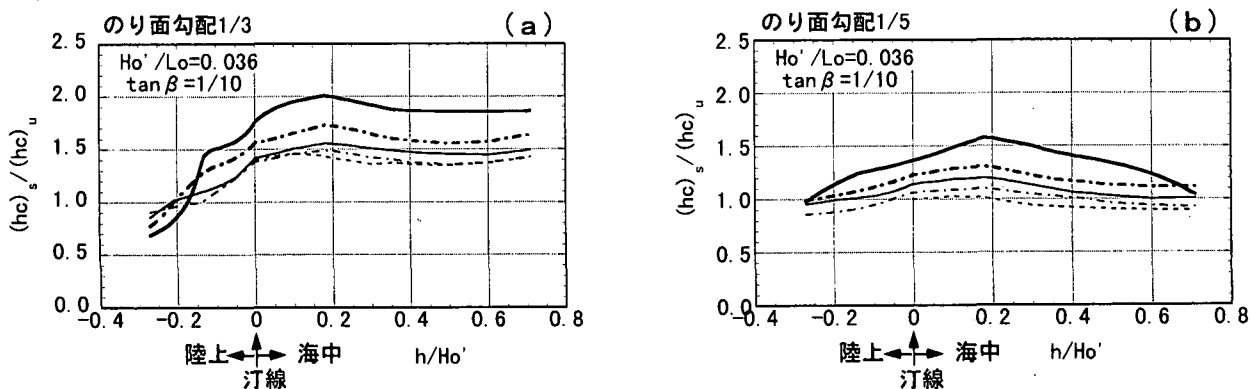
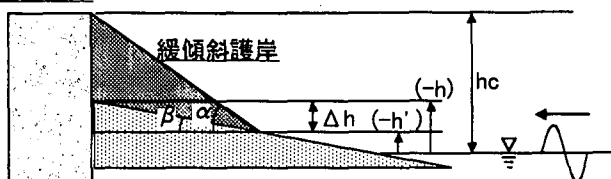


図-4 緩傾斜護岸と直立護岸の天端高の比
(護岸のり先を一致させた場合)

直立護岸



$$\mu = \cot \alpha / (\cot \beta - \cot \alpha)$$

$$h' = h + \Delta h = (1 + \mu)h + \mu h_c$$

図-5 検討断面のイメージと記号の定義

- $hc/Ho' = 0.5$ (玉田ら, 2001)
- $hc/Ho' = 0.75$ (〃)
- $hc/Ho' = 1.0$ (〃)
- ▲ $hc/Ho' = 1.25$ (〃)
- ◆ $hc/Ho' = 1.5$ (〃)
- 直立護岸 (合田ら, 1975)

(図-6 の凡例)

- $hc/Ho' = 0.5$ (玉田ら, 2001)
- - - $hc/Ho' = 0.75$ (〃)
- $hc/Ho' = 1.0$ (〃)
- - - $hc/Ho' = 1.25$ (〃)
- - - $hc/Ho' = 1.5$ (〃)

(図-7,8の凡例)

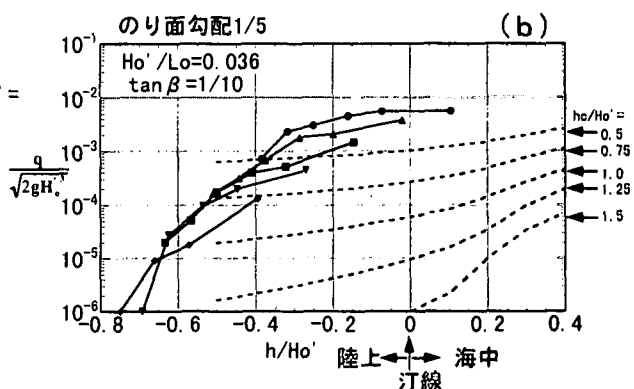
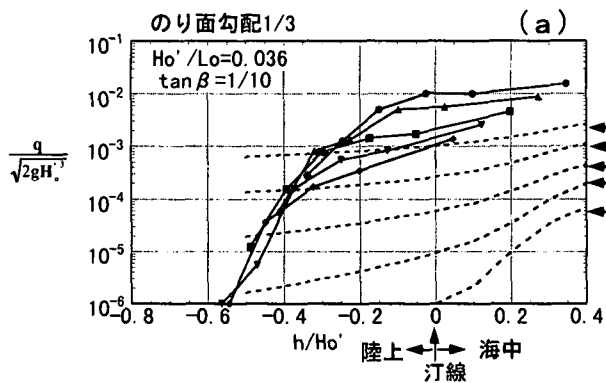


図-6 緩傾斜護岸と直立護岸の越波量の比較 (護岸を前出した場合)

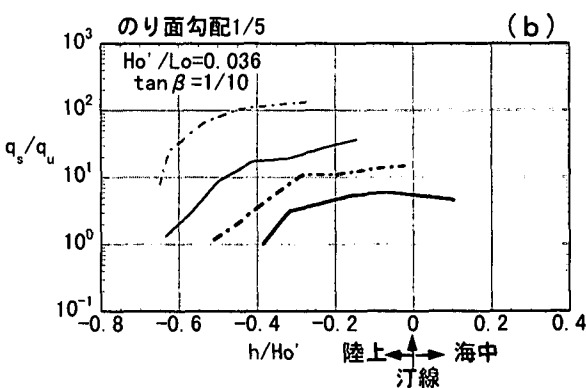
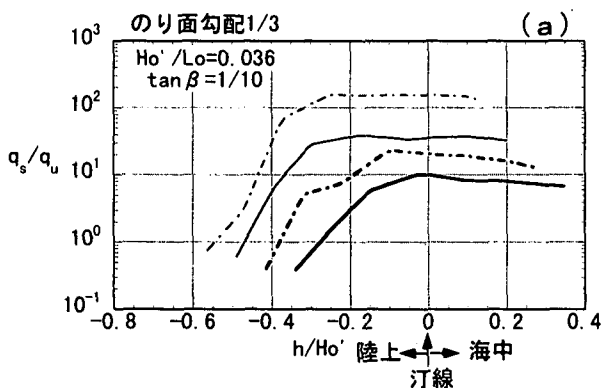


図-7 緩傾斜護岸と直立護岸の越波量の比 (護岸を前出した場合)

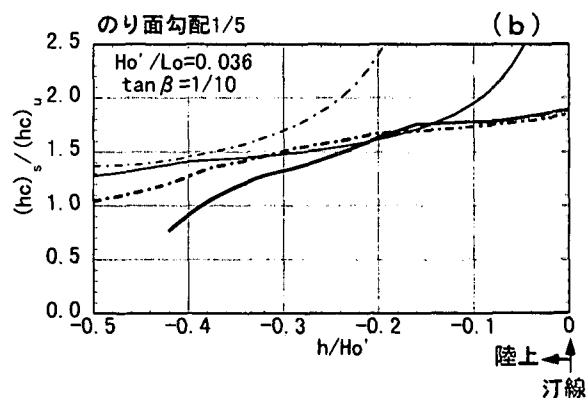
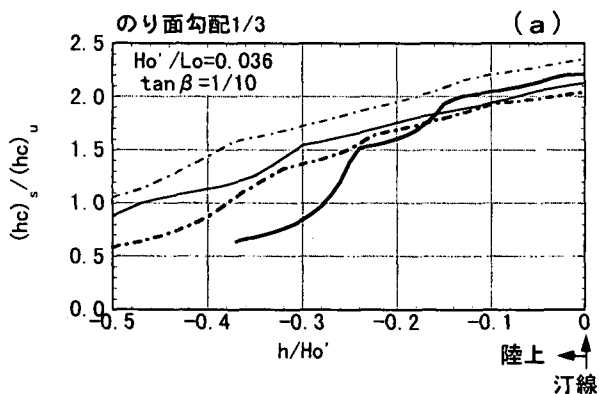


図-8 緩傾斜護岸と直立護岸の天端高の比 (護岸を前出した場合)

して比較したのが図-6(a),(b)である。図-2(a),(b)に示した、汀線にのり先がある場合と比較すると、のり先が海中になったため緩傾斜護岸の越波量が全体に増加し、直立護岸との差違が一層増大している。

図-7(a),(b)は既設直立護岸に前出しして緩傾斜護岸を設置した場合における、直立護岸の越波量に対する緩傾斜護岸の越波量の比率を示す。 $h_c/H_0=1.5$ の場合は越波量が小さく現実には問題とならないので除外し、 $h_c/H_0=0.5\sim 1.25$ の場合を対象とした。この条件では、のり先が汀線と一致した場合(図-3(a),(b))よりも越波量の増大が著しい。また、天端高を変えずに既設直立護岸と同等な越波量となるためには、既設直立護岸の地盤高が、あらかじめ $h/H_0=-0.3\sim -0.6$ (1/3勾配)、 $h/H_0'=-0.4\sim -0.7$ (1/5勾配)程度高いこと、すなわち緩傾斜護岸の前出しを計画する場所では前浜幅が十分広いことが要求される。図-8(a),(b)は、式(1)により h を h' に変換した上で図-2(a),(b)の結果を内挿・外挿し、既設直立護岸と同一の越波量となる前出し後の緩傾斜護岸の天端高の比を求めたものである。これによれば、前浜が全くない($h/H_0=0$)場合、必要天端高は1/3勾配で2倍以上、1/5勾配で1.8倍以上に達する。結局、現在各地で見られるように緩傾斜護岸を既設直立護岸の前面に前出しして設置することは十分広い砂浜が存在しない限り越波防止機能の著しい低下を招くことになる。

(3) 緩傾斜護岸を既設直立護岸に前出しして設置した場合の検討

ここで、仮想海岸に対して検討を行った。モデル海岸の前浜勾配は1/10、既設直立護岸前面の前浜をちょうど全部覆って緩傾斜護岸を設置した場合を考える。ケース1は幅15mの前浜に1/3勾配護岸を、ケース2は幅25mの前浜に1/5勾配護岸を設置したもので、既設護岸天端高は $h_c=5\text{m}$ とした。入射波条件は、1年確率波高 $H_0=3\text{m}$ 、30年確率波高 $H_0=6\text{m}$ となるワイブル分布を設定し、波形勾配が $H_0/L_0=0.036$ となる条件で周期 T を求めた。この条件で前述の方法により既設護岸と緩傾斜護岸設置後の越波量を算出した。

図-9にはケース1,2の越波量を示す。いずれも直立護岸と比較して緩傾斜護岸の越波量の増大が明らかである。図-10には越波量の増大率を示す。増大率は再現期間の長い波ほど小さいが、それでも全体的に10倍以上の越波量となっている。またケース1のほうが越波量の増大率が大きい。

次に、緩傾斜護岸と既設直立護岸が同じ越波量となる再現期間を求め、緩傾斜護岸設置前後における越波量の再現期間の変化を整理したのが図-11である。例えばケース1の場合、設置前の再現期間50年が設置後には4年と短くなっており、災害の頻度が増加することを示している。同様に、再現期間5,10,30年がそれぞれ1,2,3年に短縮している。同様にケース2では再現期間5,10,30年がそれぞれ2,3,7年に短縮している。これを避けるための必要天端高は図-12に示す通りとなり、既設護岸の天端高 $h_c=5\text{m}$ に対し、ケー

ス1では3m、ケース2では1~2mの嵩上が必要となる。

一方、緩傾斜護岸の現行の設計法では、その天端高は中村・白石の改良仮想勾配法⁶⁾でうちあげ高を求め、これに余裕高を加えて定められることが多い。そこで前述の条件で緩傾斜護岸設置によるうちあげ高の変化を計算した結果、図-12に示したように既設直立護岸に対するうちあげ高の差違は0.5m以内と小さく、また再現期間10年以上の高波浪では緩傾斜護岸の方がうちあげ高が小さくなった。これらは同図に示した越波量に対する必要天端高の結果と矛盾しているように見える。

この原因は、うちあげ高は無限長の壁面が存在したときの波のはい上がり高の評価であるので、直立護岸でも緩傾斜護岸でも著しい差違はないが、越波量はこの高さが有限な場合にそれを乗り越える水量を評価している点にある。直立護岸では鉛直上方へと波が打ち上がるので水塊の一部のみが岸側へ押し込まれるが、緩傾斜護岸では斜め岸向きに打ち上げられるため、天端を越えて打ち上がった水塊はそのまま全部岸側に越流することになる。また、現地の波は不規則波であり波高の高い成分を必ず含むため、間欠的に天端を越えて打ち上がる。その度に緩傾斜護岸の越波量は直立護岸に比べて増加していく。このような波の不規則性は前記の越波量算定図では考慮されているが、打ち上げ高の計算では考慮されていない。以上より、緩傾斜護岸の設計においては現行の打ち上げ高による評価法では、現地海岸での緩傾斜護岸の越波防止機能を正しく再現しているとは言えず、必ず越波量に基づいた検討を行う必要があることが明らかとなった。

3. 考察

既設直立護岸の前面に前出しして緩傾斜護岸が建設される例は多く見られるが、上記の検討によれば緩傾斜護岸の建設によって越波はひどくなることは間違いない。さらに、本研究により、現地で見られるような直立護岸前面への緩傾斜護岸の設置は、越波量を増大させる可能性が高いこと、また、打ち上げ高の計算のみでは緩傾斜護岸の越波防止機能を正しく評価できないことが明らかとなった。

以上より、各地の緩傾斜護岸の計画、および既に施工済護岸についても越波防止面での安全性のチェックが早急に必要であり、全施設が完成した段階のみでなく、施工の各段階に対する検討が必要である。

玉田ら⁷⁾は最近、本研究で扱ったケースに加えて、各種のり面勾配(3,5,7割)、海底勾配、波形勾配を変化させた多数の実験を行い、各種条件に対する越波算定図としてとりまとめている。各地個別の越波のチェックにはこの越波算定図を用いつつ、当研究で示した方法によって定量的検討が可能である。なお、玉田ら⁷⁾は7割勾配とすれば非常に高い越波防止効果が得られるとしているが、野口ら⁸⁾の全国実態調

査によれば実際の施工実績は3割勾配に集中し、それでも汀線付近に法先をもつものが多かったことを考慮すれば、現実の海岸施設としてはあり得ない勾配である。

既設の直立護岸が老朽化した時、同等な機能を保ち、あるいは機能の向上を目指して護岸の改築が行われることも多い。こうした場合、本研究の結果を十分に考慮することが必要であり、表面的に単に汀線へのアクセス、景観が向上すると短絡的に考えて緩傾斜護岸を造ることは避けるべきである。

参考文献

- 1) 宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・清野聡子:緩傾斜護岸に係わる様々な問題点の整理,海洋開発論文集,Vol. 15, pp. 523-528, 1999.
- 2) 宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼・清野聡子:緩傾斜護岸の望ましくない使用法とその是正法,海洋開発論文集,Vol. 17, pp. 631-636, 2001.

- 3) 合田良実・岸安良治・神山 豊: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,運輸省港湾技術研究所報告,第14巻,第4号, pp. 3-44, 1975.
- 4) 高山知司・永井紀彦・菊池 治・西田一彦・関口忠志:各種消波護岸の越波流量特性,第29回海岸工学講演会論文集, pp. 370-374, 1982.
- 5) 玉田崇・井上裕規・井上雅夫:緩傾斜護岸における越波流量算定図の提案と時間変動特性に関する考察,海洋開発論文集,Vol. 17, pp. 311-316, 2001.
- 6) 建設省河川局海岸課監修:緩傾斜堤の設計の手引き,(社)全国海岸協会, p. 48, 1989.
- 7) 玉田崇・井上雅夫・手塚崇雄:緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究,海岸工学論文集,第49巻, pp. 641-645, 2002.
- 8) 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿・笛田俊治・丸山 準・岸田弘之・山崎真嗣:人工リーフと緩傾斜堤に関する平成13年度全国実態調査,海岸工学論文集,第49巻, pp. 921-925, 2002.

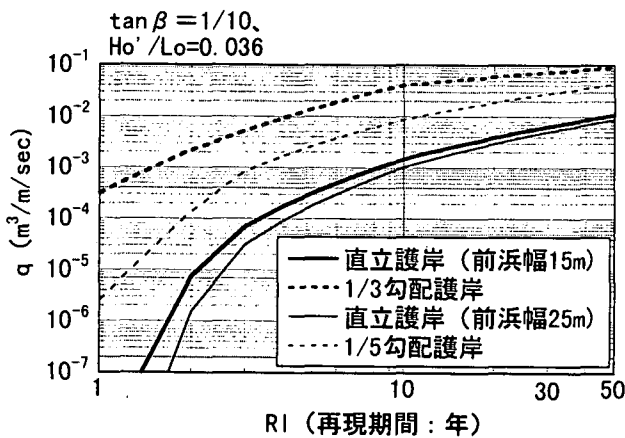


図-9 既設護岸と緩傾斜護岸設置後の越波量と再現期間

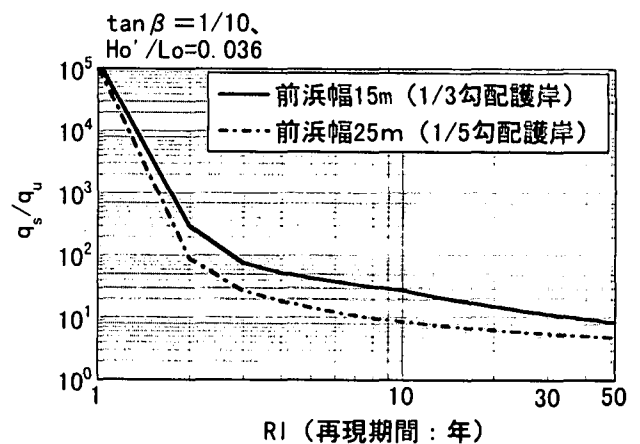


図-10 前浜を覆って緩傾斜護岸を設置した場合の越波量の変化

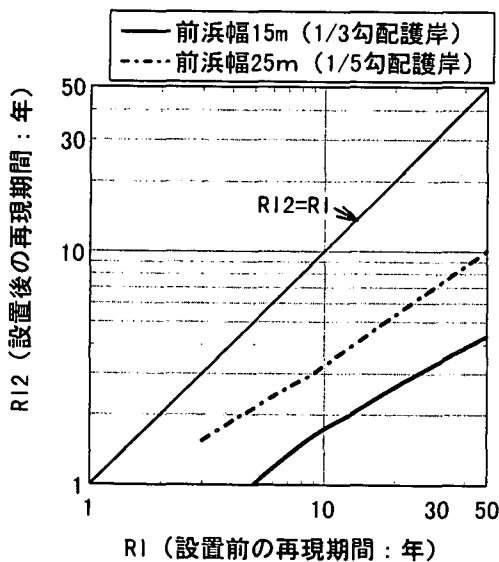


図-11 前浜を覆って緩傾斜護岸を設置した場合の越波量再現期間の変化

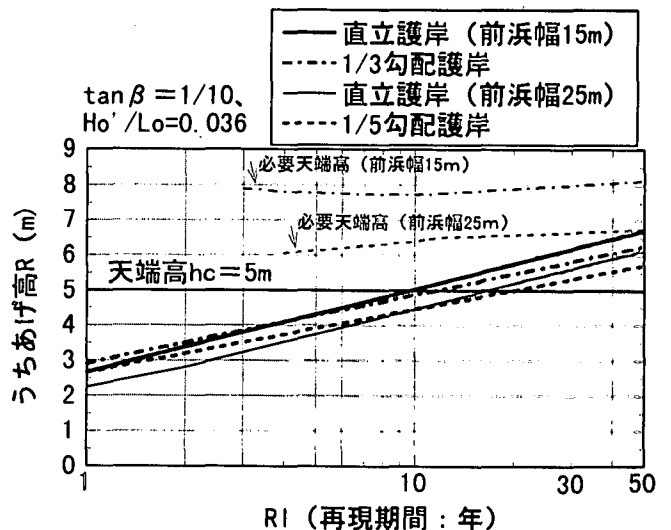


図-12 前浜を覆って緩傾斜護岸を設置した条件で越波量が同一となる必要天端高と改良仮想勾配法によるうちあげ高