

海岸堤防の越波防止効果に関する二、三の問題

井上 雅夫・岩垣 雄一・土屋 義人

SOME PROBLEMS ON PREVENTION OF WAVE OVERTOPPING BY SEAWALLS AND SEADIKES

By Masao INOUE, Yuichi IWAGAKI and Yoshito TSUCHIYA

Synopsis

In this paper, results of the model tests on wave overtopping for the seawalls at Port Island in Kobe Harbor, Sakai Harbor in Osaka Prefecture, Yui Coast in Shizuoka Prefecture, Sennan Coast and Nishikinohama Coast facing Osaka Bay are presented. Based on the above results, the effect of seawalls and seadikes on prevention of wave overtopping is discussed.

The main results are summarized as follows:

(1) When incident waves do not break in front of the seawall as the water depth at the toe of the seawall is large compared with the incident wave height, wave absorber works in front of the seawall are not so effective to prevent wave overtopping or, on the contrary, increase rather the quantity of wave overtopping in a certain case. Consequently, the scale of wave absorber works should be decided carefully in such a case.

(2) When the waves break just in front of the seawall as the water depth is not large compared with the wave height, shallowing the water depth at the toe of the seawall to decrease the quantity of wave overtopping is more effective than increasing the wall height from the still water level. Therefore, artificial beach nourishment is available from view point of not only enlargement of the beach but also disaster prevention.

1. 緒 言

わが国の国土は狭長で海岸線は非常に長く、その平均幅はほぼ 30 km にすぎず、国民の生活の場の多くはこの海岸地帯に集中している。さらに、近年、経済のめざましい成長は各地に広大な臨海工業地帯を生みだしてきた。こうした海岸地帯における背後地の人命や土地財産を高潮や波浪など自然の外力から防護するのが海岸堤防あるいは護岸であって、わが国の海岸防御はこうした護岸や海岸堤防に依存しているのが現状である。このことから、とくに海岸堤防の果たす社会的、経済的使命は重く、いったん海岸堤防が破堤すると、それによる被害は甚大となる。1959 年 9 月に襲った伊勢湾台風によって、伊勢湾北部一帯が目を覆わんばかりの惨状を呈したことは、いまでも記憶に生々しく残っている。

このように海岸堤防の破堤は、その機能をまったく喪失するものであり、破堤は絶対に許されない。海岸堤防の破堤の原因としては種々のものが考えられるが、なかでも越波によるものが圧倒的に多い¹⁾。こうしたことから、越波量の適確な推定方法の確立が望まれている。しかしながら、越波量は波の特性、潮位、堤防設置の水深および堤防や消波工の断面形状によって微妙に変化するため、海岸堤防の設計に際しては模型実験を行なって検討するのが現状では最も好ましい。そのため、最近、各方面において越波の模型実験が多く行なわれ、さらに、模型実験において最も重要な縮尺効果についてもある程度明らかにされてきたため²⁾、これらの結果にもとづいて実際の海岸堤防が建設されるようになってきた。

著者らも、これまで数多くの模型実験を行ってきたが、ここではそれらの実験結果を、入射波高に比べ

てのり先水深が深い埋立護岸と、のり先水深が浅い海岸堤防(護岸)の二つに分類し、越波防止の観点から、それぞれの場合における問題点について検討していきたい。

2. 埋立護岸の越波防止効果

普通、護岸とは現地盤を被覆して侵食を防ぐための施設をいい³⁾、裏側の地盤が高いかあるいは天端の高さまで埋立られ、一般に来襲波がのり先水深に比べて大きく、また、汀線より陸側に設置される場合も少なくない。しかしながら、最近の埋立地はますます海側に造成されるようになり、そののり先水深が 10 m 以上にも達するような場合もおきてきた。ここでとりあげる埋立護岸は、こうしたのり先水深が来襲波の波高に比べて、非常に深い場合のものである。

ここでは、その実例として、現在工事中の神戸港のポートアイランドの防波護岸および堺港の埋立護岸の場合について検討する。なお、実験設備および方法については割愛する。

神戸港ポートアイランドの防波護岸は防波堤を兼用した大規模のものであり、そののり先水深は過去に例を見ないほど深く、台風時における越波防止対策が問題となり、その基礎資料を得るために Fig. 1 に示すような断面について、模型縮尺を 1/25 として実験を行なった。図中、太い実線で示した断面は消波工を設置しない場合の断面である。実験で対象とした波浪は周期 4~10 sec、沖波波高 2.0~4.0 m とし、潮位は H.H.W.L. の D.L.+3.90 m であり、このときののり先水深は 16.90 m である。

Fig. 2 (a), (b) および (c) は風速に関する Froude 数 $V/\sqrt{gH_0}$ がそれぞれ 0.5~6 および 8~9 のときの無次元越波量 $2\pi Q/H_0 L_0$ と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を消波工のある場合とない場合について示したものである。ここに、 Q は堤防単位幅 1 周期当りの越波量、 V は堤防前面の風速、 H_0 および L_0 は沖波波高および波長、 g は重力加速度である。これらによると、無風時や風速が小さい (a) および (b) の場合には、消波工をおかないとまったく越波しないのに対し、消波工をおくとかえってかなりの越波があることがわかる。さらに、風速が大きい (c) の場合については、消波工がない場合にも相当の越波があるが、消波工をおいた場合の越波量よりもいぜん少なく、いずれにしても消波工の存在が越波量をかえって増加させている。このことは、堤防前面に消波工をおいたために水深が浅くなり、砕波が助長され越波量が多くなるためである。テトラポッドの出現以来、わが国においても各種の消波ブロックが考案され、その効果が大きく取りあげられているが、この護岸のようにのり先水深が非常に深い場合に、前面に消波ブロックをおき砕波

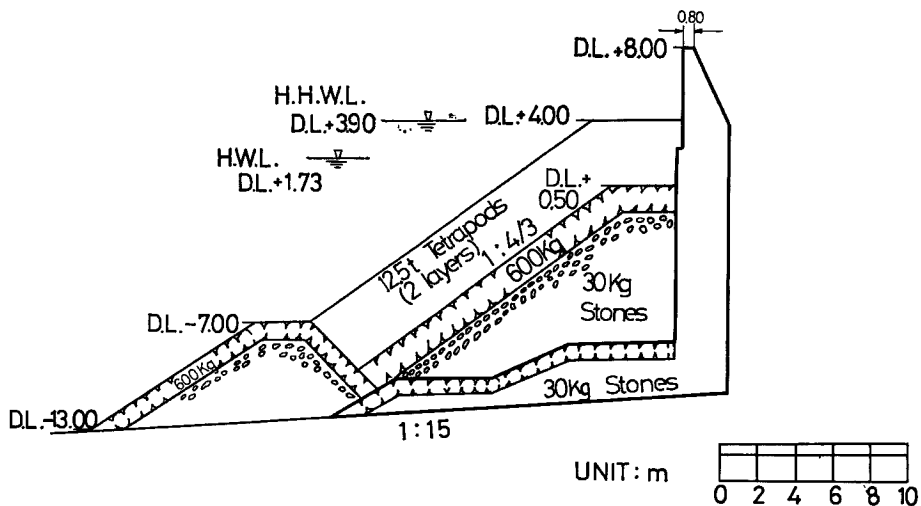


Fig. 1 Proposed cross section of a seawall at Port Island in Kobe Harbor.

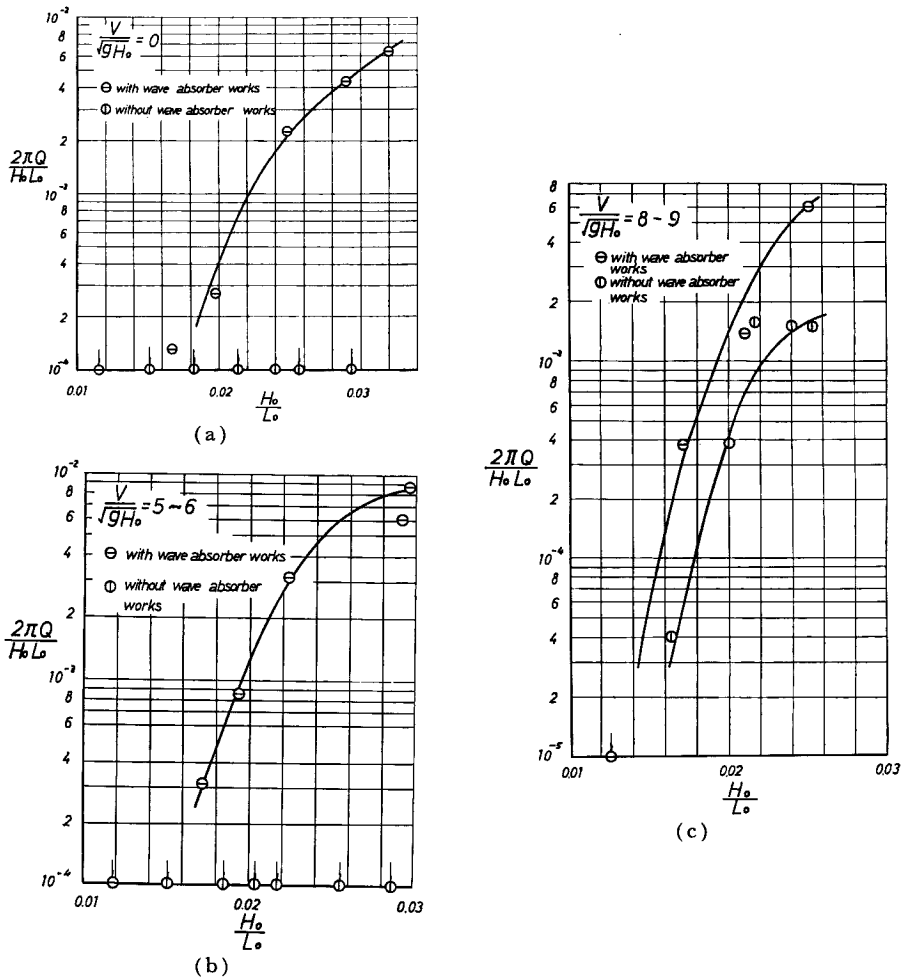


Fig. 2 Effect of wave absorber works on rate of wave overtopping in case of a seawall at Port Island in Kobe Harbor.

させる方式については、越波量を逆に増加させる可能性があり、決して望ましいものとはいえないであろう。

Fig. 3 は Fig. 2 から波形勾配が 0.02 の場合の無次元越波量と風速に関する Froude 数との関係を示し、越波に及ぼす風の影響を調べたものである。これによると、消波工がない場合には、堤防前面で重複波が発生するため、 $V/\sqrt{gH_0}$ の値が 5 ~ 6 以下では風による越波量の増加はなく、5 ~ 6 以上になると越波量は急激に増加することがわかる。一方、消波工がある場合には、前面で碎波するため、 $V/\sqrt{gH_0}$ の小さい値で越波量は一定値に近づくことがわかる。こうした傾向は、著者らがすでに行なった鉛直堤の越波に及ぼす風の影響を調べた実験結果⁴⁾と一致している。

このように、のり先水深が深い場合の埋立護岸の型式としては、計画外力を越えない範囲内に限れば、鉛直堤に近い型式のものが好ましいのであるが、港内の静穏度の問題などから消波工を設置する場合には、その天端高や天端幅などについて慎重に検討する必要がある。

Fig. 4 は大阪府堺港の埋立護岸の断面図である。当初、パラペットは図中に黒くした位置に設置される

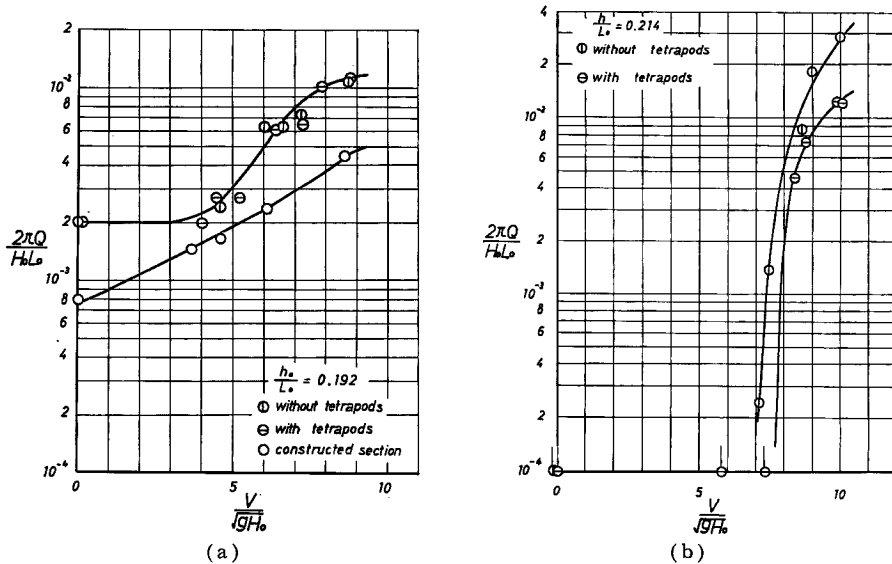


Fig. 5 Effect of tetrapods on rate of wave overtopping in case of a seawall at Sakai Harbor.

配の値が若干異なるため、はっきりした傾向は見出せないが、パラペットの位置によって違った傾向を示しているようで、前述したように越波量が消波工の特性によって非常に異なり、その設計には十分な考慮が払われなければならないことを示している。

以上、埋立護岸の越波を二つの実例によって示したが、こうした護岸を計画外力の範囲内だけに限って考える場合には、その前面で部分的な碎波はやむを得ないとしても、できるだけ護岸前面ののり先水深を深くし、碎波させないようにすることが越波を防止するばかりでなく、波圧の軽減の意味からも重要であろう。また、何らかの理由から前面に消波工を設置する場合には、それによって起こる諸現象の特性をよく把握して設計すべきであり、消波ブロックをむやみに置くことは厳に避けなければならない。

3. 海岸堤防（護岸）の越波防止効果

ここでいう海岸堤防とは、現地盤を盛土またはコンクリートなどによってかさ上げし、高潮、津波および波浪による海水の浸入を防ぐとともに、地盤を被覆して侵食を防ぐための施設³⁾であり、多少護岸と呼ばれるものの性格をもっており、さらに、来襲波の波高がのり先水深に比べて大きいものを取りあげることにする。とくに、海岸堤防の場合には、背後地が低くて排水も悪いため、慎重に越波の問題を考慮すべき必要があろう。

ここではその実例として、由比海岸堤防⁵⁾と泉南海岸堤防の場合を取りあげて検討する。

由比海岸は静岡市の東部約 30 km の駿河湾に面した海岸である。昭和 36 年 3 月、この背後の山腹に大規模な地すべりが発生し、この地すべり土の処理と東名高速道路の建設地造成をかねて約 5.5 km の区間にわたり、既設の海岸堤防から 60~120 m 沖側に海岸堤防を新設した。この海岸堤防は背後が重要交通路線となるため、とくに越波量を適確に推定することが重要であり、Fig. 6 に示すような当初計画された断面について模型縮尺 1/25 として実験を行なった。計画波浪は周期 15.0 sec、沖波波高 7.0 m、潮位は T.P.+1.60 m とし、のり先水深としては 6.4 m、4.8 m および 3.3 m の 3 地点を選んだ。

Fig. 7 はのり先水深が 4.8 m の場合の無次元越波量と相対堤高 H_c/H_0 (H_c : 静水面からの天端高) との関係を示したものである。これによると、波形勾配が 0.01 よりも大きく、沖側で碎ける波については堤防

けるよりも後述する養浜などの方法によって堤防ののり先水深を浅くし、入射波を沖の方で碎波させるほうが少なくとも水理学的には効果があることがわかる。

Fig. 9 は大阪府泉南海岸堤防の標準断面図である。泉南海岸は侵食海岸であり、とくに、近年この傾向は著しかった。大阪府はこうした侵食防止と第2戸台風などによる高潮災害の防御のため、こうした海岸

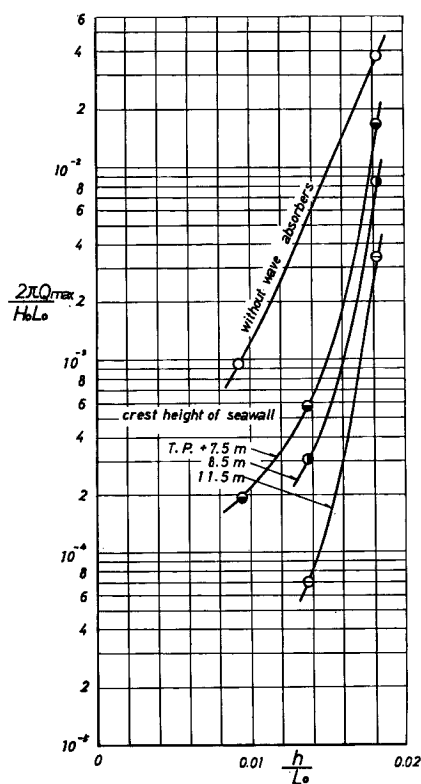


Fig. 8 Relation between the maximum rate of wave overtopping and the relative water depth in case of a seawall at Yui Coast.

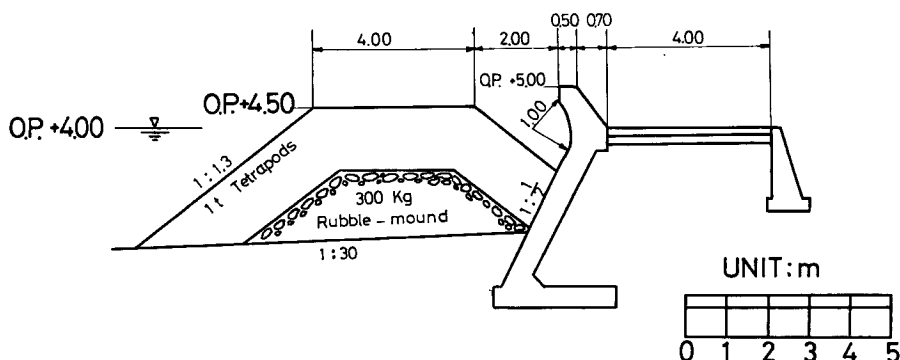


Fig. 9 Cross section of a seadike at Sennan Coast.

堤防を計画，施工したのである。ここでは，模型縮尺 1/20 で行なった実験結果について検討する。

実験で対象とした波浪は周期 6.0~7.0 sec，沖波波高 3.0 m，潮位は O. P.+4.00 m とし，のり先水深は 1.00 m, 1.50 m, 2.00 m, 2.50 m, 3.00 m, 3.50 m および 4.00 m の 7 種類とした。

Fig. 10 は，のり先水深が 2.50 m で消波工の天端高を O. P.+5.00 m にかさあげした場合の無次元越波量と相対堤高との関係を示したものである。これによると波形勾配によって若干相違するが，入射波が堤防前面で碎けるにもかかわらず，越波量に及ぼす堤防天端高の影響は大きい。このことは前述の由比海岸堤防の場合の結果と大きく矛盾しているように考えられる。しかしながら，これは由比海岸堤防の場合の消波工の天端幅 B と沖波波長 L_0 との比 B/L_0 は約 1/50 であり，消波工で碎けた波がまだかなりのエネルギーをもって堤体にはげしく衝突するのに対し，この場合には B/L_0 の値が約 1/16 であり，入射波のエネルギーが消波工でほとんど吸収されてしまい，堤体前面ではあまり飛沫を高く打ちあげないためである。このようなことから，堤防前面で碎波する場合に消波ブロックで越波を防止するためには，一般に相当多量のブロックを用いない限りその効果は期待できないことがわかる。

Fig. 11 は，Fig. 9 に示した断面でのり先水深だけを変化させた場合の無次元越波量と水深・波長比との関係を波形勾配をパラメーターとして示したものである。これらによると，鉛直堤の越波実験の結果⁶⁾と同様に入射波が堤防のやや沖側で碎けるような水深で越波量は最大になり，それよりも深いと越波量はかえって減少することがわかる。

Fig. 12 (a) および (b) は無次元越波量と波形勾配との関係を消波工のある場合とない場合について示したもので，潮位による消波工の効果を調べたものである。(a) は潮位が O. P.+3.50 m (のり先水深 $\bar{h}=2.00$ m)，(b) は O. P.+4.00 m ($\bar{h}=2.50$ m) の実験結果である。潮位が低く静水面上のテトラポッドが多い (a) の場合には消波工の効果は顕著に現われるのに対し，潮位が高くなり静水面上のテトラポッドが少ない (b) の場合には，消波工の効果はあまり見られない。とくに，波形勾配が 0.04 前後ではほとんどその効果は

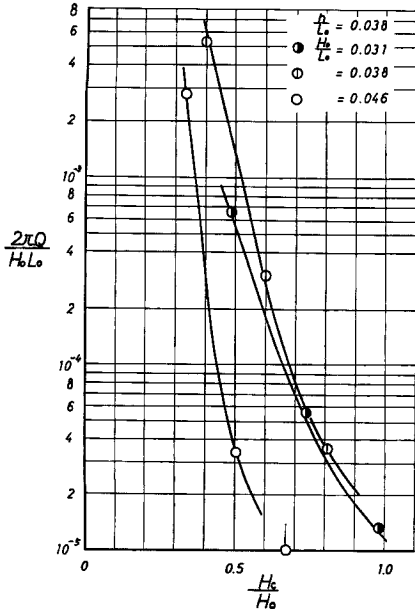


Fig. 10 Effect of wall height on rate of wave overtopping in case of a seadike at Sennan Coast.

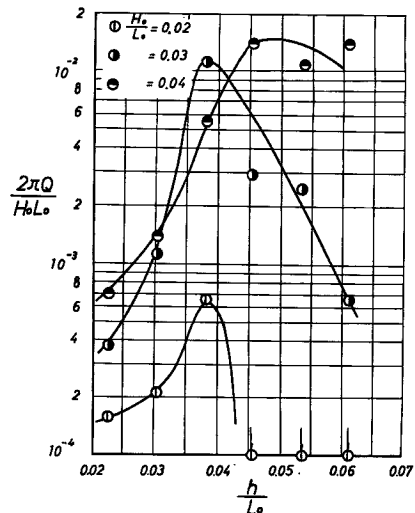


Fig. 11 Effect of relative water depth on rate of wave overtopping in case of a seadike at Sennan Coast.

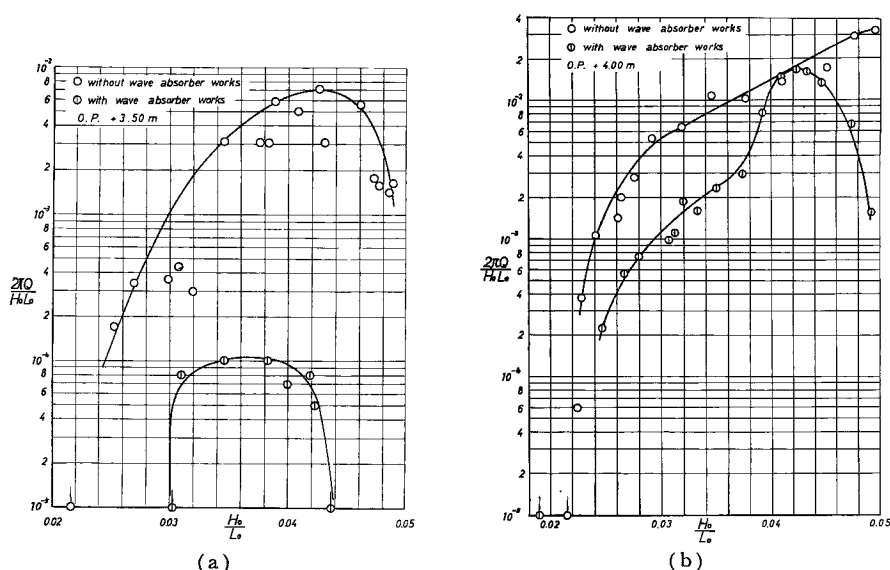


Fig. 12 Effect of wave absorber works on rate of wave overtopping in case of a seadike at Sennan Coast.

ない。これは、前述したポートアイランドの防波護岸の場合と同様にテトラポッドによる消波工が碎波を促進させるような働きをするためである。

このように、のり先水深に比べて入射波高が大きく、くどくに碎波点付近に設置する堤防や護岸の越波量は、潮位すなわち地盤高を一定とすれば、水深によって非常に敏感に変化し、消波工の効果もそれによって大きく異なる。したがって、こうした場合の越波防止対策としては、計画潮位を適確に推定するとともに、前述したように養浜などによって水深を浅くすることが望ましいものと考えられる。

4. 人工養浜の越波防止効果

人工養浜とは侵食海岸に砂を人工的に補給して砂浜を造成し、それによって海岸を高潮や波浪から防護し、さらにはこの海浜をリクリエーション施設や漁業施設として利用しようとするものである¹⁾。この工法は戦後主として米国において発展してきたものであり、わが国でも大阪府二色の浜海岸でこの工法が採用されたのを契機として、最近では神戸市の須磨海岸においても実施されている。こうした養浜工の効果については、防災上の効果だけでなく、海浜利用上や水産上の効果が当然考えられるが、ここではその防災上の効果、とくに越波防止効果について若干考察を行なう。

養浜工によって越波量が減少する原因としては、のり先水深の変化、海底地形の変化による粗度および浸透効果などが考えられよう。このうち最も重要な要素はのり先水深の変化である。海底地形の変化による粗度および浸透効果については、越波実験がほとんど滑面固定床で行なわれるため、それらの結果を現地海岸に適用する際に問題となる程度であり、本質的な事柄ではない。したがって、養浜工の越波防止効果は換言すればのり先水深の効果といえよう。

Fig. 13 は著者らが行なった勾配が 1/10 あるいは 1/15 の海浜上に設置した鉛直堤の実験結果^{1), 4)} について、入射波の波形勾配と、その波形勾配において最大越波量を示す水深・波長比との関係を示し、養浜工によって越波量を減少させることのできる限界を示したものである。養浜工によって、実験曲線の左上部は越波量を減少させることができる領域であり、右下部はかえって越波量が増加する領域である。また、図中には参考のため Munk による孤立波の碎波限界 $h/H=1.28$ を記入してあるが、養浜工による越波防止効果

の限界曲線は、Munk の碎波水深よりもやや浅い。これは、鉛直堤の越波量が、碎波点よりもやや岸側に堤防を設置した場合に最大になるためである。

Fig. 14 は前述の鉛直堤の実験結果にもとづいて、養浜と堤防のかさあげとの越波防止効果を比較したも

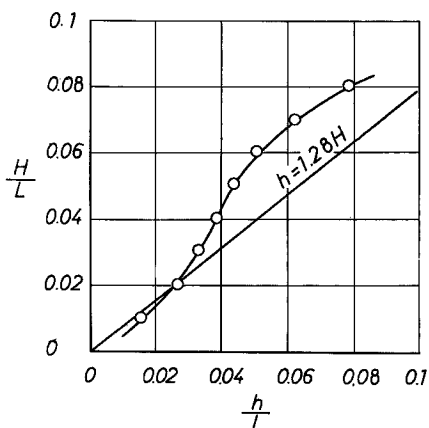


Fig. 13 Criterion for effect of artificial beach nourishment on wave overtopping.

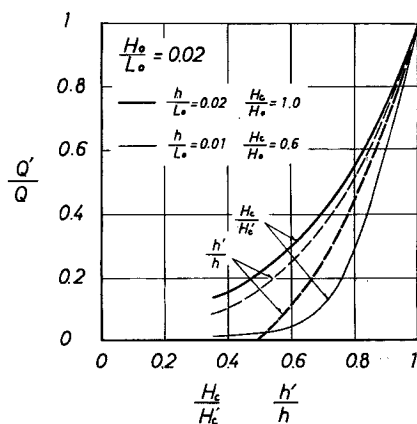


Fig. 14 Comparison of effects of water depth and wall height on rate of wave overtopping.

のである。図中、 h および H_c は基準とした堤防ののり先水深 および堤防天端高、 h' および H_c' はそれぞれ浅くした水深 およびかさあげ後の堤防天端高であり、 Q' はこのときの越波量である。これによると、水深・波長比 h/L_0 の値が 0.02 で前面で碎波する場合には、天端高のかさあげよりも養浜を行なう方が越波量を減少させる効果は大きいのにに対し、 h/L_0 が 0.01 のときには堤防のかさあげにより沖側で碎波するため、養浜よりもかさあげの効果の方が大きいことがわかる。しかしながら、こうしたことは、単に h'/h や H_c/H_c' の変動による越波量の減少の割合だけでその優劣を論じ、いずれが有効な方法であるかを判定することよりも、実際上はその施工や維持に要する経費の問題、海浜利用や景観などの問題などから決定されるべきことであり、ここではこうした一例を示すことだけにとどめておきたい。

つぎに、人工養浜による越波防止効果に関する実際例として、大阪府二色の浜海岸堤防の場合について述べよう。

二色の浜海岸は大阪府貝塚市にある府下唯一の海水浴場であり、Fig. 15 に示すような階段状の護岸がある。しかしながら、前面の海浜が侵食されるとともに台風 6420 号によってかなりの越波を生じ、背後地に浸水して被害をこうむるようになった。こうしたことから、大阪府はこの海岸に人工養浜を実施することにした。

実験は Fig. 15 に示すような 3 種類の形状について、模型縮尺 1/20 として行なった。図中、A 型海浜は養浜以前のかかり侵食されたもの、B 型海浜は A 型海浜上に 1.0 m 全面的に盛砂したもの、C 型海浜は平均潮位上の陸上部分を広くし、海水浴場に適するようにしたものである。計画波浪は周期 6.5 sec、沖波波高 3.0 m とし、潮位は O.P.+4.00 m とした。

Fig. 16 は無次元越波量と波形勾配との関係を各海浜型式ごとに示したものである。これによると、A 型海浜は波形勾配が約 0.008 で越波しはじめ、その後急激に越波量が増加したのち、若干減少する傾向を示している。B 型海浜の場合にも、A 型海浜に比べると越波量は少ないが、ほぼ同様な傾向を示している。これに対し C 型海浜の場合には波形勾配が 0.03 以上の波でわずかに越波する程度であり、非常にその効果が顕著に現われている。

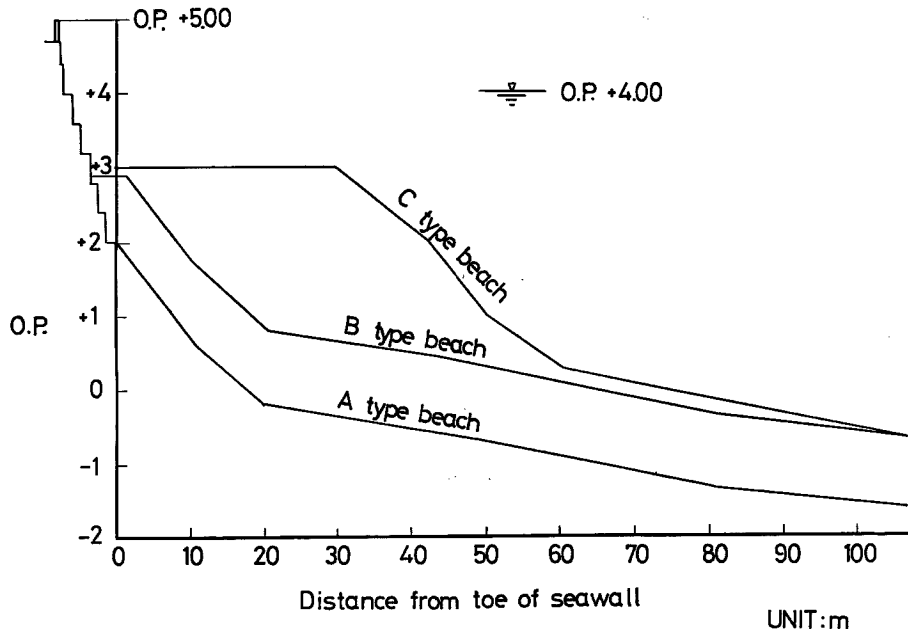


Fig. 15 Beach profiles of Nishikinohama Coast.

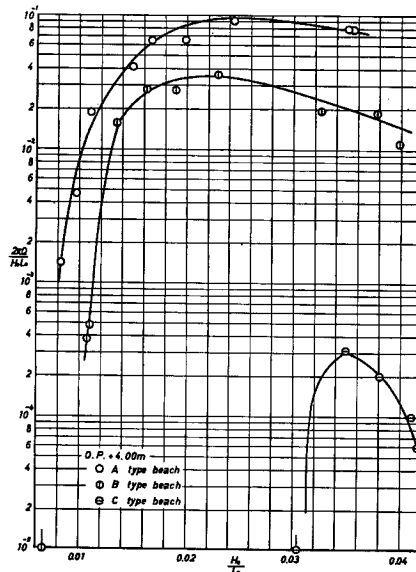


Fig. 16 Effect of artificial beach nourishment on rate of wave overtopping in case of Nishikinohama Coast.

このように、砂浜の存在は消波に対して非常に大きな効果があり、こうした養浜工によって侵食防止とともに台風時の越波を防止する効果をも期待できる。とくに、前述したように堤防前面で砕波する場合の越波防止対策としては、堤防のかさあげや消波ブロックを多量に並べる方法よりもはるかに得策であろう。

5. 結 語

以上、著者らがこれまで行なってきた海岸堤防の越波に関する模型実験のうちから、のり先水深が深い埋立護岸の代表的な例として神戸港の防波護岸および堺港の埋立護岸、のり先水深がやや浅く入射波がのり先で砕波する場合の例として、由比海岸および泉南海岸の海岸堤防をとりあげその越波防止対策上の問題点を検討した。

その結果、越波防止対策として、のり先水深が深い場合には、計画外力を越えない限り、のり先水深を深く保ち砕波させないようにすること、また砕波する場合には、のり先水深を浅くする方法がそれぞれ効果的であることを明らかにした。

また、ブロックによる消波工の効果については、潮位や消波工の規模によって、その機能が大きく左右され、すべての場合についてとくに有効な対策ではないことを示した。

さらに、養浜工の越波防止効果について若干の考察を行ない、この工法が海岸利用の面ばかりでなく防災上からも優れた工法であることを述べたが、これについてはまだ十分な資料にとぼしく、今後さらに研究を進めなければならない。

最後に、これらの模型実験は運輸省第三港湾建設局、建設省中部地方建設局、大阪府土木部および同企業局の委託による研究の一部であることを明記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一：海岸堤防論，水工学シリーズ，64-08，昭 39，pp. 26-36.
- 2) 岩垣雄一・井上雅夫・金田孝之：海岸堤防の越波実験における縮尺効果について，第 15 回海岸工学講演会講演集，昭 43，pp. 282-287.
- 3) 土木学会編：海岸保全施設設計便覧，昭 44，p. 193.
- 4) Iwagaki, Y., Y. Tsuchiya, and M. Inoue: On the Effect of Wind on Wave Overtopping on Vertical Seawalls, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 16, Part 1, No. 105, 1966, pp. 11-30.
- 5) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：由比海岸堤防の越波に関する模型実験，第 10 回海岸工学講演会講演集，昭 38，pp. 132-137.
- 6) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：海岸堤防の越波防止に関する二，三の問題，京都大学 防災研究所年報，第 7 号，昭 39，pp. 387-399.
- 7) 岩垣雄一：人工養浜，土木建設，第 18 巻，3 号，昭 45，pp. 12-19.