

由比海岸堤防の越波に関する模型実験

岩垣 雄一*・土屋 義人**・井上 雅夫***

1. 緒言

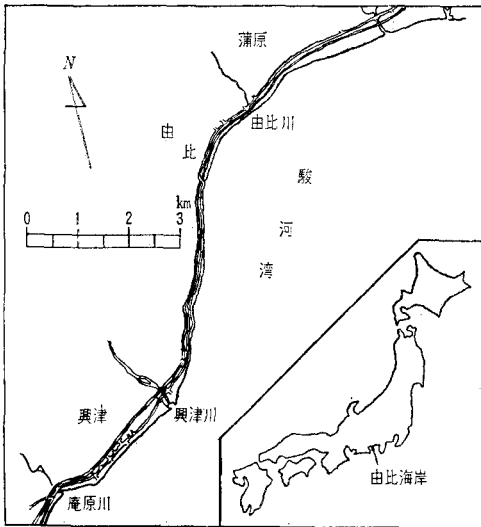
由比海岸は静岡市の東部約 30 km の駿河湾に面し、背後の山との狭長な所に国鉄東海道線、一級国道および高速道路などの幹線交通路線が通り、その新設路線は着々と工事が進められている。昭和 36 年 3 月 14 日、この背後の山腹に大規模な地すべりが発生し、この地すべり土の処理と高速道路の建設地造成をかねて、興津から蒲原に至る約 5.5 km の区間にわたり、現在の海岸堤防から 60~120 m 沖側に、新しく海岸堤防を建設することになった^{1),2)}。この海岸堤防は背後が重要な交通路線となるため、とくに越波量を適確に推定することが重要である。本文では、この海岸堤防の越波に関する模型実験の結果について述べるとともに、こうした海岸堤防の天端高算定に際しての、いくつかの問題点を明らかにしたいと思う。

2. 由比海岸の概要と計画堤防

(1) 由比海岸の概要

由比海岸は 図-1 に示すように駿河湾の西北部にあり、その海底勾配は場所によって若干異なるが、現在の汀線から沖側へ 500~600 m までは約 $1/30$ の勾配であ

図-1 由比海岸の位置図



る。

(2) 計画潮位および計画波浪

実験を始めた当時の計画潮位は T.P. +1.60 m、計画波浪は伊勢湾台風時の清水港における記録から、沖波波高 7.0 m、周期 15 sec であったが、のちに計画潮位は、T.P. +1.66 m、計画波浪は仮想台風による推算結果³⁾ から、波高 5.12 m、周期 18 sec と変更された。実験では、風を与えない場合には前者の海象条件を、風を与えた場合には後者の海象条件を採用した。

(3) 計画堤防

図-2 は実験当初の計画堤防の概略図であり、風を与えないときの実験では、この断面を採用したが、その後 図-3 のように計画が変更されたので、風を与えた場合の実験では、これにしたがって行なった。消波工は、図-2 および 図-3 に示される規模のものが用いられた。

図-2 由比海岸堤防概略図 (1)

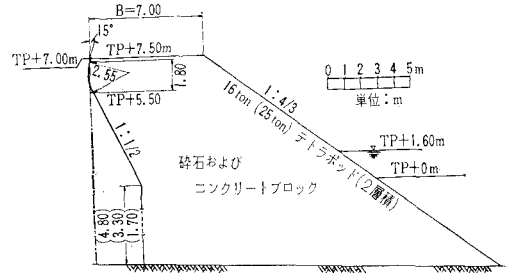
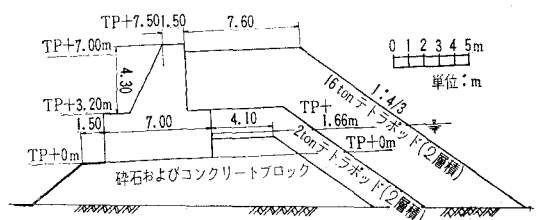


図-3 由比海岸堤防概略図 (2)



3. 長水槽による実験(風を与えない場合)

(1) 実験設備および実験方法

a) 実験設備 実験水槽は幅 1 m、深さ 1.5 m、長さ約 80 m の一部ガラス張りのコンクリート水槽であり、その一端には multi-purpose 型造波機があり、他端には勾配 $1/30$ の模型海浜を設けた。模型堤防は、図-2 にしたがって縮尺 $1/25$ のものを作り、堤防を設置する代表的なり先水深として 6.4, 4.8, および 3.3 m の 3 つを選

* 正員 工博 京都大学教授 防災研究所
 ** 正員 工博 京都大学助教授 防災研究所
 *** 正員 京都大学助手 防災研究所

んだ。テトラポッドの模型はモルタルで製作し、下積の碎石には2~3cmの礫を用い、またコンクリートブロックの代りに8tのテトラポッドを使用した。波高、消波工前面および堤防前面の水位変動は電気抵抗線式水位計を用いて測定した。越波量は、堤防背面に小さな水槽を設けて直接測定した。越波量の分布は金網を張ったわくに、ロート状の容器をとりつけ、これに入る水を測定した。

b) 実験方法 こうした模型実験では、とくに相似律に関する検討が必要であるが、ここではFroudeの相似則が成りたつものとして実験波を決定した。すなわち、前述したように縮尺 $1/25$ とすれば、計画波浪の沖波波高は28cm、周期は3.0secである。しかし、後述するように越波量が最大となる波高はこの計画波高よりも小さいことから、実験は周期を一定として、波高を数種変えて行なった。なお、実験は主として様な波を対象として行なったので、造波機始動後の2~3波を除いたつぎの5波の波高の平均値をその入射波高とし、その波に対応した越波量や最終砕波点を測定した。また造波機で起こした波に堤防からの反射波が加わり、入射波が不規則になると、堤防前面での現象もかなり異なるので、波の不規則性が越波量におよぼす影響を検討するため、波がかなり不規則になった場合に対しても同様な測定を行なった。

(2) 実験結果とその考察

a) のり先水深 \bar{h} が6.4mの場合の実験結果 図-4はのり先水深 \bar{h} (以後一の付いたものは原型における値

を示す)が6.4mで、消波工を設置しない場合と、消波工として16tテトラポッドを用いた場合の沖波波高と越波量との関係を示したものである。消波工を設置しない場合については、堤防の天端高さT.P.+7.5mおよびT.P.+11.6mについて実験を行なったが、最大越波量は原型に換算すると堤防単位幅あたり、1周期に6.3~12.5 m^3 となる。しかし、消波工を設置すると越波量は $1/2$ ~ $1/8$ に減少する。また図-4からわかるように、いずれの場合においても、沖波波高24cm程度で越波量が最大となる。このことは、波高の増大とともに越波量は増加するが、さらに波高が大きくなると、波は堤防ののり先よりかなり沖側で砕波するために、越波量はかえって減少するものと考えられる。こうした傾向は、消波工を設置した場合のほうがいっそう顕著である。さらに図-4には、不規則な波について、その不規則性を表わすために、それぞれの実験値に対して $(H_{34}/H_{16})^{1/2}$ および (H_{50}/H_{max}) (カッコ内に記入)の値を記入しておいた。これは堤防からの反射波によって波が不規則になってからの一連の波高記録から、波高の頻度分布曲線を描き、累加百分率が84%、50%、および16%に相当する波高を H_{34} 、 H_{50} 、 H_{16} とし、さらに最大波高を H_{max} として求めた値である。実験結果によると、不規則な波の場合には、実験値が非常にばらつき、規則波の場合のような系統的な関係は得られない。以上は消波工として16tテトラポッドを用いた結果であるが、25tテトラポッドを用いて行なった結果では、消波効果は若干前者の場合にくらべて劣るようである。図-5は図-4に対応した堤防前面における静水面から測った最高水位と沖波波高との関係であって、最高水位が最大となる波高のとき、越波量も当然最大となっている。図-6は越波量の水平方向の距離的な分布を測定した結果の一例であるが、総越波量の95%が落下する距離は沖波波高によってあまり変化せず、大体堤防前面から40~50cm以内である。しかしながら、こうした問題は越波におよぼす風の効果を考慮しなければ適確な結論は得られないので、現在、

図-4 沖波波高と越波量との関係

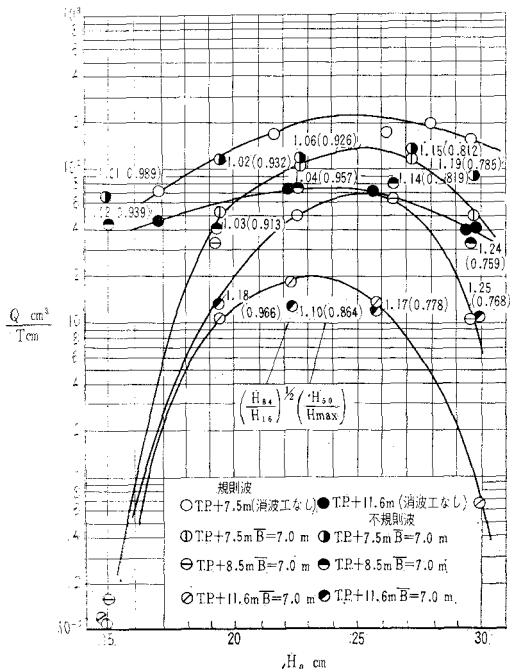


図-5 沖波波高と堤防前面での水位変動との関係

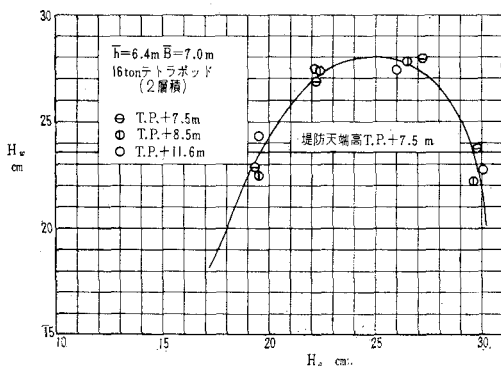
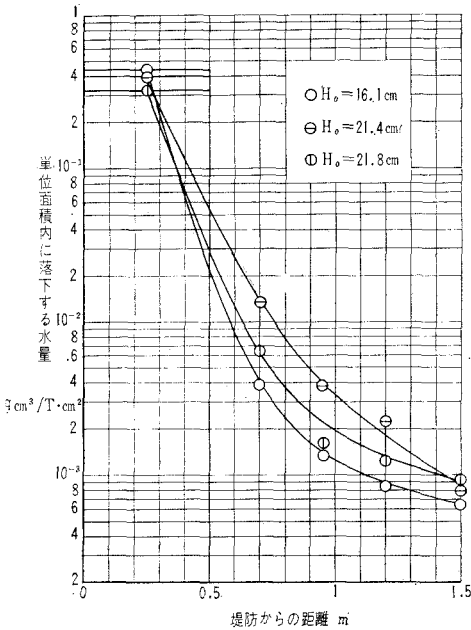


図-6 越波量の距離の分布

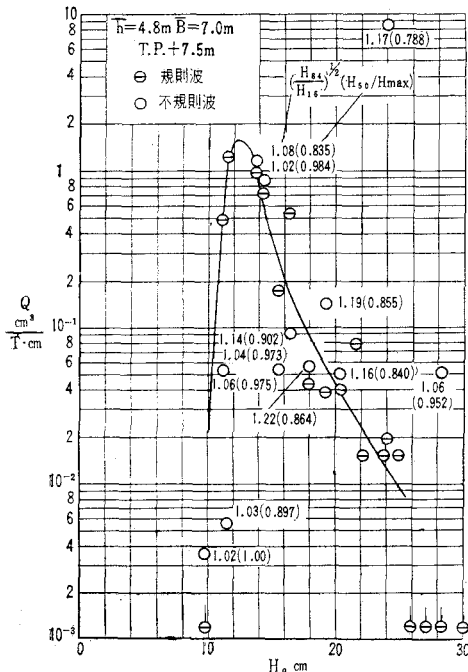


高速風洞水槽による実験を進めている。

b) のり先水深 \bar{h} が 4.8 m の場合の実験結果 図-7

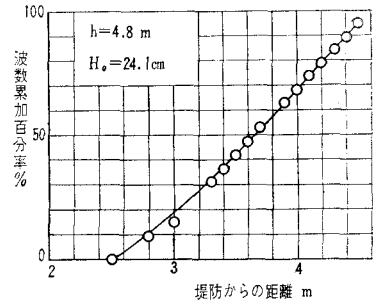
はのり先水深 \bar{h} が 4.8 m の場合の沖波波高と越波量との関係を示したもので、この場合消波工としては、16 t および 8 t のテトラポッドをおのおの二層積とした。図-4 の場合にくらべて、最大越波量が非常に小さくなって

図-7 沖波波高と越波量との関係



ること、波高変化による越波量の変化が急激であること、越波量は沖波波高 13 cm 程度で最大となることなどがわかる。図中には図-4 と同じように不規則波に対する実験結果をも図示してあるが、一般に、最大越波量を示す波高よりも小さい波高では、波の不規則性は越波量にはあまり影響をおよぼさないようであるが、波高が、最大越波量を示す波高よりも大きくなると、波の不規則性が越波量にかなり影響をおよぼすことがわかる。このことは図-8 に示すように最終砕波点の位置がおのおのの波についてかなり変動し、波高の大きな波でも沖側で砕波しないで、のり先付近で砕波する場合があるためと考えられる。

図-8 最終砕波点の位置の頻度分布



c) のり先水深 \bar{h} が 3.3 m の場合の実験結果 この場合には計画断面で沖波波高 11 cm のときわずかに越波する程度である。消波工を設置しない場合や消波工の規模を小さくすると、かなり越波する。

d) 無風時の越波防止に関する考察 以上, a), b)

および c) においては、堤防ののり先水深ごとに沖波波高と越波量との関係について述べたが、計画断面ではのり先水深が 6.4 m および 4.8 m の場合には越波することがわかったので、何らかの有効な越波防止方法を考えなければならない。図-9 は図-7 などから、のり先水深 4.8 m で、消波工として 16 t テトラポッドを用いた場合の堤防天端高さと越波量との関係を示したものである。この図によると、沖波波高によってかなりの相違はあるが、堤防天端高さ T.P.+7.5 m の場合の越波量を半減させるためには、天端高さを 1~2 m もあげる必要があることがわかる。このことはのり先水深が 6.4 m の場合についても同様である。一方、図-10 は、図-4 および図-7 などから得られる堤防ののり先水深と越波量との関係を、堤防の天端高さをパラメーターとして表わしたものである。この結果によると、越波量におよぼす堤防ののり先水深の影響はきわめて大きく、たとえばのり先水深 \bar{h} が 5 m から 6 m にかわったとすると、越波量は 10 倍以上増加することがわかる。また消波工を設置しない場合にくらべて消波工を設けた場合のほうがのり先水深の効果が非常に大きくあらわれているのは、模型実

図-9 堤防天端高さとの関係

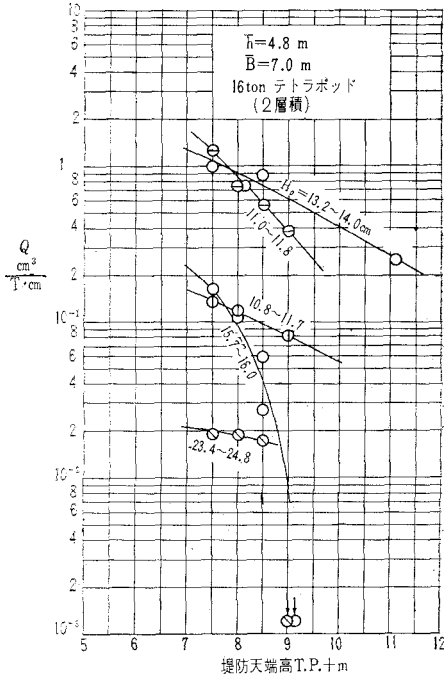
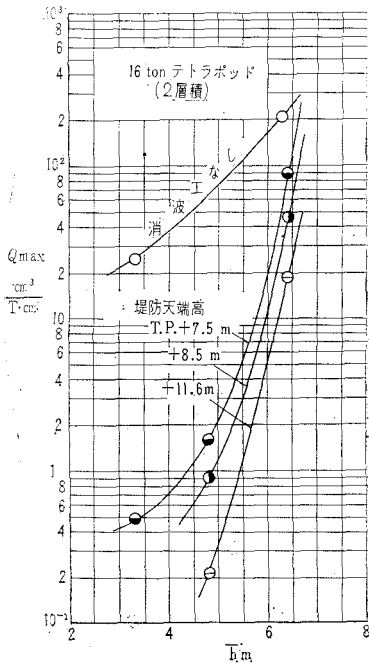


図-10 のり先水深と最大越波量との関係



験において対象とした消波工の一つの特性であると考えられる。このような事実を考えると、越波量を減少させるための一つの方法として、堤防の天端高さをあげるよりも、養浜などの方法によって堤防のり先水深を浅くするほうが少なくとも水理学的にはより効果的であると

思われる。

4. 高速風洞水槽による実験(風を与えた場合)

(1) 実験設備および実験方法

a) 実験設備 用いた実験水槽は高速風洞水槽⁴⁾であるが、ここでは主として測定装置について述べる。模型堤防は、図-3にしたがって縮尺 $1/25$ のものを作り、勾配 $1/30$ の模型海浜上に設置し、堤防のり先水深が原型で 6.40 m となるような位置に固定した。模型堤防の長さは、水槽の幅いっぱいにならず、Paape⁵⁾が行なったように風洞水槽を縦に二分して 40 cm とし、その片側に堤防を置き、他の側は入射波が堤防によって反射することなく自由に消波装置のある奥のほうまで進行できるようにした。このようにしたのは入射波高を正しく測定するためである。波高および堤体前面の水位変動は電気抵抗線式水位計を用いて測定した。越波量は、模型堤防の背後に圧力計を応用した越波量測定器をとりつけ、波高と同時に記録できるようにした。風速は風洞吹口ではピトー管とマンローメーターによって、また堤防前面ではピトー管を差圧計に連絡し、波高とともに自記させた。

b) 実験方法 前述した計画波浪は、Froude の相似則を適用して模型波に換算すると、周期 3.6 sec、沖波波高 20.5 cm となるが、造波機の性能上、3.0 sec より長い周期の波を起こすことができなかったため、実験では周期を 2.1, 2.35, 2.65 および 3.0 sec とし、それぞれについて波高を 3~5 種類変えた。まず、模型堤防を設置して、所定の波を造波機によって起こし、それに模型前面での風速が 0~14 m/sec の風を 8 段階にわけて与えた。そして越波量と堤防前面の水位変動および風速の 3 つを測定した。

(2) 実験結果とその考察

a) 無風時の実験 風洞水槽による実験においても、前述の長水槽による実験結果との比較や越波量におよぼす風の効果を検討するため、まず無風状態において実験を行なった。図-11 は波の周期をパラメーターとした、沖波波高と越波量との関係であり、図-4 と比較して、最大越波量はほぼ等しいが、そのときの沖波波高が 19 cm で、前述の 24 cm とくらべるとかなり小さい。また、波高による越波量の変化は急激であって、以上のような相違は模型前面の消波工の積み方(長水槽の場合はテトラポッドを粗く積み、風洞水槽では密に積んだ)によるものと考えられる。

b) 越波量におよぼす風の効果 図-12 および 図-13 はそれぞれ沖波波高と風速、および越波量と風速との関係を示したものである。図-13 で Case 1 は堤防前面で碎破するような波に風が作用した場合、Case 6 および 9 は堤防前面で碎けない小さい波に風が作用した場合、Case 13 および 14 は 堤防前面より沖側で碎ける

図-11 沖波波高と越波量との関係

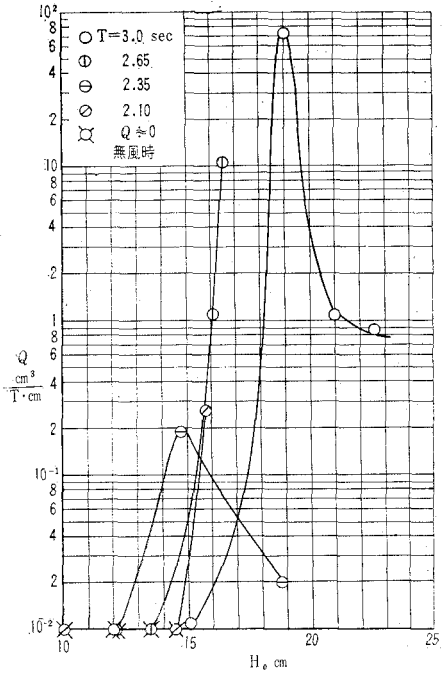
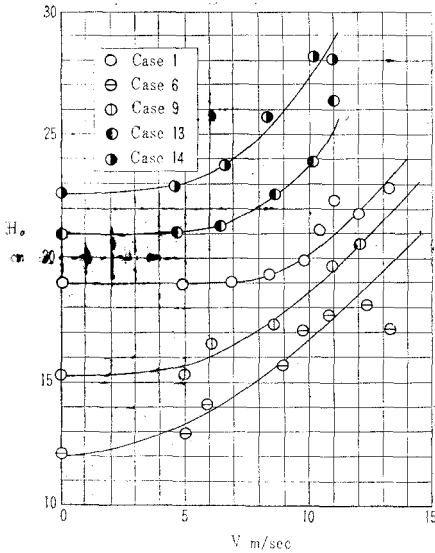


図-12 風速と沖波波高との関係



大きな波に風が作用した場合の越波量の風速による変化を示しているが、図-12でわかるように当然風速が増大すると、波高も増大するので、風速のみによる影響をこれからそのまま見出すことはできない。したがって、これらの図から波高および周期を一定とした場合の風速と越波量との関係を読みとって示したのが図-14である。図-14から、風速によって最大越波量を示す沖波波高が異なり、また波高が無風時の最大越波量を示す波高より大きいか小さいかによって越波量におよぼす風の効果が

図-13 風速と越波量との関係

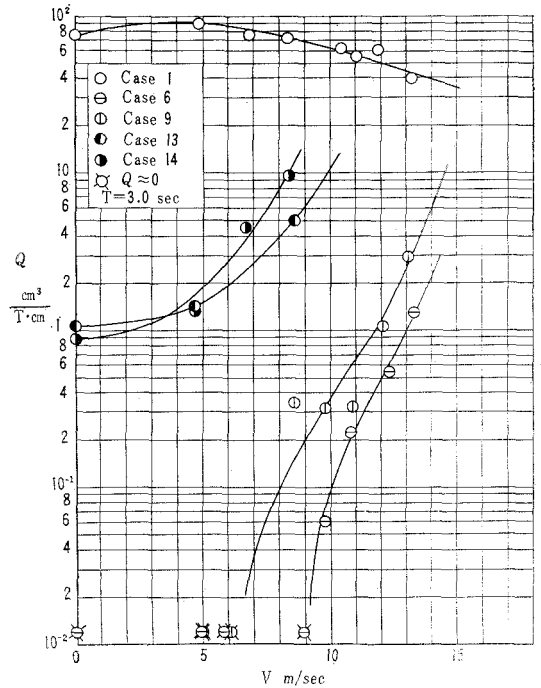
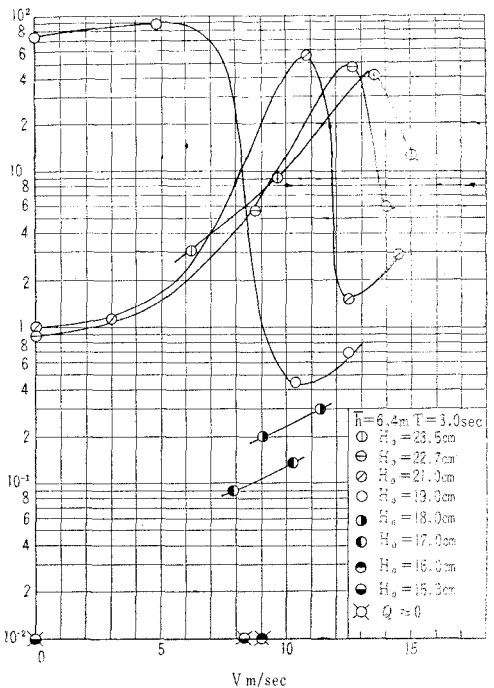


図-14 波の特性を一定としたときの風速と越波量との関係



非常に異なっているようにみえる。特に、波高が大きくなると、ある風速のところで最大の越波量を示すような変化の仕方をする。しかし、この最大越波量は実験結果の範囲内では、風速の増大とともに若干増大したのち減

少することがわかる。このことは、堤防前面で碎けるような来襲波を考えなければならぬ由比海岸の重要な特徴の一つであって、このような波を境として越波量におよぼす風の影響が異なるということは非常に興味深いことである。なお、のり先水深が4.8 mの場合の越波量や越波量の水平方向の分布については、さらに実験を行ない別の機会に報告したい。

5. 結 語

以上、著者らは由比海岸堤防の越波に関する模型実験を行ない、この堤防を設計するための基礎資料を得るとともに、つぎのような結果を得た。

(1) 従来、海岸堤防の天端高算定に際して、その多くが単に計画潮位に計画波高を加え、さらに若干の余裕高を考えるという方法がとられてきたようであるが、この海岸堤防のように来襲波の波高にくらべてのり先水深が浅い場合には、越波量が最大となるような波は計画波よりも小さく、堤防前面で碎けるような波であるという事実から、堤防の天端高さの決定を簡単に画一的に行なうことはできない。

(2) 波の不規則性が越波量にかなり影響をおよぼす場合があり、実際の海岸の波は不規則であることから、今後は不規則波に対しても、こうした研究を行なわなければならない。

(3) この海岸堤防における越波防止対策としては、堤防の高さをあげるよりも、むしろ堤防ののり先水深を浅くするほうがより効果的である。

(4) 越波量におよぼす風の影響については、無風時に堤防前面で碎波するような波高を境として、それより大きい波と小さい波とでは風速による越波量の変化の仕方が非常に異なる。

最後に本研究は建設省中部地方建設局の委託によるものであることを記するとともに、実験に熱心な協力をいただいた大学院学生 坂井順行、および井保武寿の両君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 山田専一：由比地すべり対策事業に伴う合併事業（海岸道路事業）の概要について、「海岸」, 2号, 昭37.9, pp.34~43.
- 2) 桑原治太郎：由比の地すべりに伴う総合対策について、防災講義集, 全国防災協会および全国海岸協会, 昭37.7, pp.35~45.
- 3) 日本建設コンサルタントKK：由比海岸における波浪の計算, 昭37.2.
- 4) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究 (1), 第9回海岸工学講演会講演集, 昭37.10, pp.153~158.
- 5) Paape, A. : Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. 7th Conf. Coastal Engineering, 1961, Vol.2, pp. 674~681.