

逆勾配のり面の水理特性について

井 上 雅 夫*

1. 緒 言

最近、港湾規模の拡大などによって、それらの用地確保のために相当沖側まで埋立られるようになり、護岸の前面水深はだんだん大きくなってきた。たとえば、いずれも高潮時ではあるが、神戸港のポートアイランドの防波護岸¹⁾の前面水深は 16.9 m、山口県下松市窓ヶ浜の埋立護岸²⁾では 17.3 m であり、水深波長比 h/L_0 がそれぞれ 0.11 および 0.17 となり、ときには 0.2 にも達する場合も現われてきた。これは、これまでの越波実験が、水深波長比が 0.1 より小さい領域で主として行なわれてきたことを比較すれば、水深が約 2 倍の位置に護岸が設置されるようになり、大水深での護岸の研究が重要になってきたことを示している。

一般に、大水深での護岸の越波特性は波高とともに越波量も増加し、また来襲波浪も水深によって限定されない。したがってこうした護岸の防災対策³⁾としては、計画外力を越えたときの異常波浪時の災害をできるだけ軽減するような配慮が必要であり、これまでのような傾斜堤方式の消波構造では費用がかさむうえに、効率も悪いように考えられる。このようなことから、最近、大水深での護岸構造がかなり多くの研究者によって考案され、その特性が検討されている。

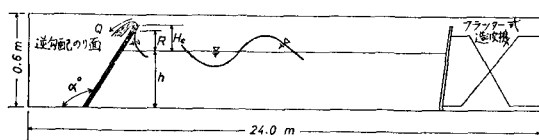
この研究の目的は、こうした大水深での護岸構造の究明であるが、ここではその一つの形式として逆勾配のり面をとりあげた。これをとりあげたのは、逆勾配のり面では wine glass effect が期待され、前述のような大水深での越波特性に対して有効な越波防止機能をもつことが予想されると同時に、従来の研究で対象としたのり面がほとんどの場合、その傾斜角が 90° よりも小さく、逆勾配の問題は水理学的にも興味深いためである。

従来、逆勾配のり面と波との相互作用の問題については、Isaacson⁴⁾が overhanging cliff として、傾斜角が 135° の場合について理論的な研究を行なっているが、わが国では、岩垣ら⁴⁾が波の遡上、反射および波圧について、また高田⁵⁾が主として波の遡上について、それぞれ限られた条件のもとで実験を行なっている程度であり、それ以外には、このような問題はあまり扱われていないようである。

この論文は、波の遡上、越波および反射に関する実験結果を示し、これらに及ぼす逆勾配のり面の傾斜角の影響を明らかにしたものである。

2. 実験設備および方法

実験に使用した水槽は 図—1 に示すように長さ 24.0 m、幅 50 cm、深さ 60 cm の片面一部ガラス張りの鋼製である。水槽の一端にはフラッター式造波機があり、他端の一樣水深部に逆勾配のり面を設置した。逆勾配のり



図—1 実験装置概略図

面の傾斜角 α は 90° (鉛直), 120° , 135° および 150° の 4 種類とし、その鉛直高さはいずれも 50 cm とした。波の遡上、越波および反射実験の条件は、表—1 に一括して示した。

表—1 実験条件

実 験	入射波周期 T (sec)	入射波高 H_0 (cm)	水 深 h (cm)
遡 上	1.20	3~8	40
越 波	1.16	4~11	45, 46
反 射	1.16	3~7	40

波の遡上高は、のり面を遡上する波の状況を 16 mm カメラで 1 sec 当り 48 コマで撮影し、それに基づいて測定した。

越波量は、のり面の背後に小容器を置き、直接測定するとともに、16 mm 撮影機によって越波時の天端直上での水位および流速を測定した。特に流速については、比重がほぼ 1 に近い直径が約 3 mm の中立粒子を波峯の水表面近くに入れ、その動きを 1 sec 当り 57 コマで撮影し、粒子の走時曲線を描いて、越波時の天端直上の流速を求めた。

反射率は、のり面前面の波高を 5~10 cm 間隔で電気抵抗線式波高計で測定し、その波高分布から Healy の方法にしたがって算出した。

3. 実験結果とその考察

(1) 波の遡上

波の遡上高 R を静水面から測定した波のはい上がり高の鉛直高さとする。図-2 は、相対遡上高 R/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を示す、のり面の傾斜角 α をパ

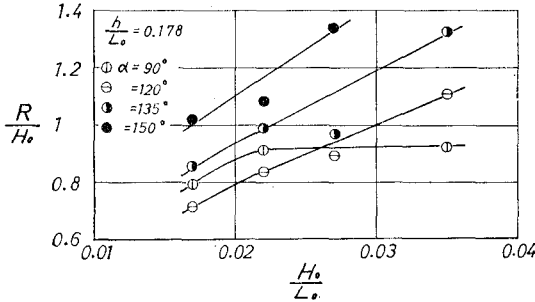


図-2 相対遡上高と波形勾配との関係

ラメーターとして示したものである。これによると、まず鉛直堤の場合には、波形勾配が約 0.02 以上になると、波形勾配が増大しても相対遡上高はあまり増加しない、ほぼ一定値に近づくようである。この傾向は、石原・岩垣らの波のうちあげに関する水深波長比が大きい 0.16 の場合の実験結果と一致している。一方、逆勾配のり面ではいずれの傾斜角についても、相対遡上高に及ぼす波形勾配の影響はかなり顕著であり、この傾向は傾斜角の大きいものほど著しいようである。この波形勾配が大きくなると相対遡上高が増大することは、逆勾配のり面の一つの特徴であり、いわゆる普通のり面への波の遡上に関する Saville⁷⁾ の実験結果で水深波高比が 3 より大きい場合のものについては、傾斜角に関係なく図-2 に示した波形勾配の範囲では、波形勾配の増大とともに相対遡上高は減少しており、普通のり面と逆勾配のり面とがまったく逆の特性を示している。

図-3 は、図-2 の結果をもとにして、相対遡上高と

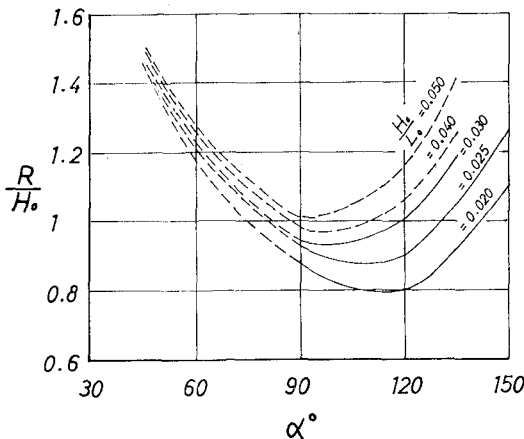


図-3 相対遡上高と傾斜角との関係

傾斜角との関係を、波形勾配をパラメーターとして示したものである。なお、図中の実線は図-2 から求めたもので水深波長比が 0.178、破線は岩垣らの実験結果で水深波長比が 0.128 である。特に、傾斜角が 90° で波形勾配が 0.020, 0.025 および 0.030 の場合の相対遡上高については、両者の結果にあまり差がみられなかったため、平均的な曲線を描き、相対遡上高に及ぼす傾斜角の影響を検討した。

これによると、傾斜角が 90° ~ 120° で相対遡上高は最小値を示し、120° 以上になると急激に増大することがわかる。また、90° と 120° との間の傾斜角についての実験結果がないため明確ではないが、相対遡上高が最小になるときの傾斜角は、波形勾配の増大とともに 90° に近づくようであり、この傾向はきわめて興味深いことである。また、もしこのことが事実であれば、前述の Saville⁷⁾ の実験結果からもわかるように、水深波高比が 3 より大きい場合の波の遡上高の最大値は、波形勾配が大きければ大きい傾斜角で現われるので、波形勾配の大きい波ほど波の遡上高に及ぼす傾斜角の影響が大きいことがわかる。

(2) 越波

のり面単位幅、1 波当りの越波量を Q とする。図-4 は、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

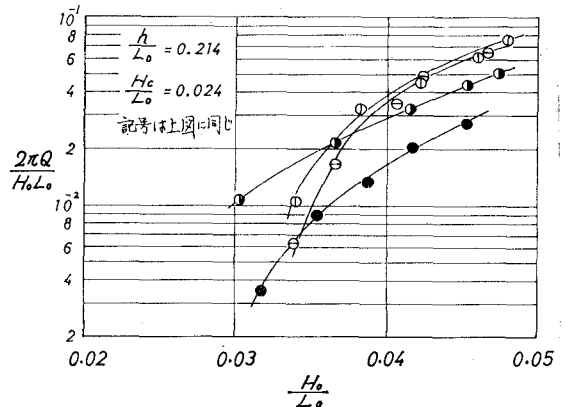
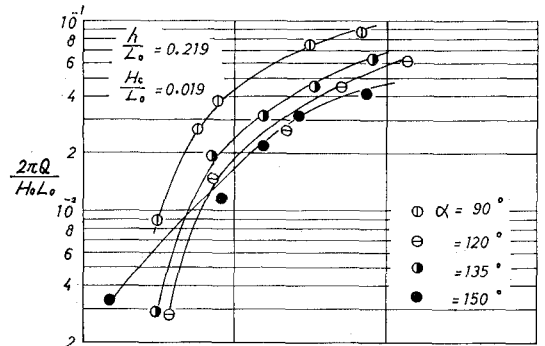


図-4 無次元越波量と波形勾配との関係

の関係を、傾斜角 α をパラメーターとして示したものである。図-4 の上および下図は、水深波長比がそれぞれ 0.219 および 0.214 である。これによると、いずれの傾斜角についても、前述の実験条件の範囲内では碎波して越波することはないので、波形勾配の増大とともに無次元越波量も単調に増大している。しかしながら、この越波量の増加の仕方は、水深波長比によって若干異なるが、一般に傾斜角が大きいとゆるやかである。こうした特性は、大水深での護岸にとっては好ましいものであり、特に 図-4 の上図の 150° 、下図の 135° および 150° の場合のように、波形勾配が小さいときには越波量は若干多いが、波形勾配が大きくなったときには、他の傾斜角よりも越波量が逆に小さくなっている。したがって、この実験結果だけに限って言えば、波高が増大しても越波量が急増しないようにするためには、逆勾配のり面の傾斜角をかなり大きくしなければ効果がないことがわかる。

図-5 は、図-4 の結果をもとにして、無次元越波量と傾斜角との関係を、波形勾配をパラメーターとして示

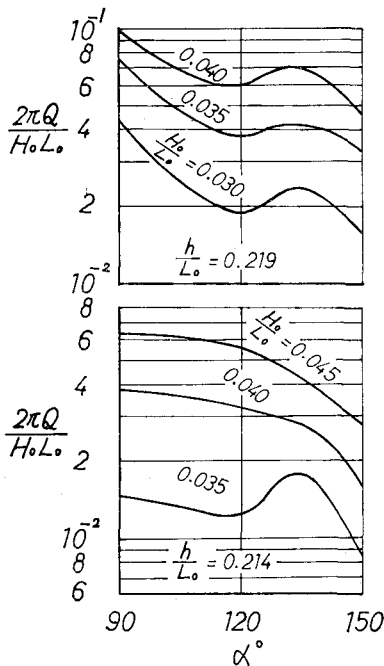


図-5 無次元越波量と傾斜角との関係

したものである。これによると、無次元越波量に及ぼす傾斜角の影響については二つの異なった傾向がある。一つは、 90° から 150° まで傾斜角の増大とともに越波量が単調に減少するものと、いま一つは、傾斜角が約 120° で極小値を示したのち、 135° で極大値を示し、ふたたび減少するものである。この複雑な変化の仕方を示す後者は、波形勾配が小さい場合にみられるようである。しかしいずれの変化の仕方にしても、越波量は傾斜角が

150° になると急減する。これは、遡上高の場合とまったく逆の傾向である。一般に普通のり面では、遡上高が大きいと越波量も多いのであるが、逆勾配の場合には必ずしもそうではなく、このことは、逆勾配のり面の大きな特徴と考えられる。

以上、逆勾配のり面の越波量に及ぼす傾斜角の影響について述べたが、その変化の仕方はきわめて複雑である。このようなことから、その越波機構を 16mm カメラで明らかにしようとした。

図-6 および 7 は、越波時のり面天端から波峰までの水位 η_0 の時間的変化を示した一例である。なお、横軸の時間の基準は、水位が上昇する際に静水位を通過する時間を 0 としている。これらによると、越波時の水位そのものについては、入射波高が一定であればのり面の

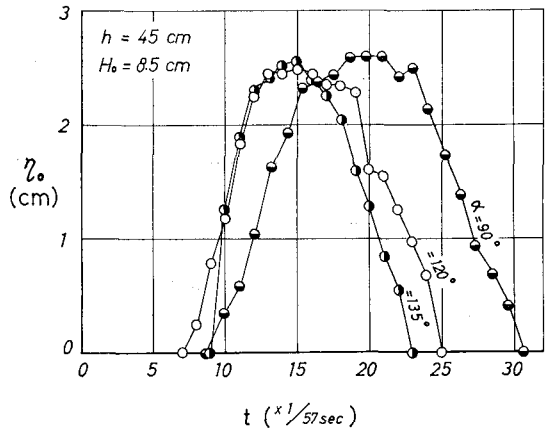


図-6 越波時のり面上での水位の時間的変化

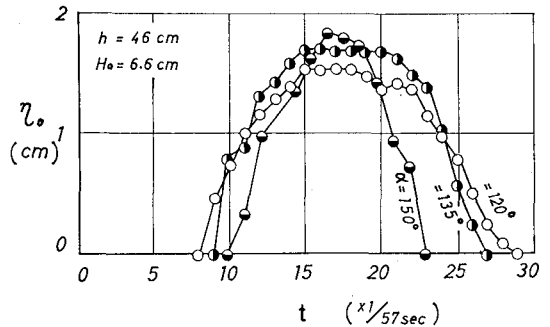
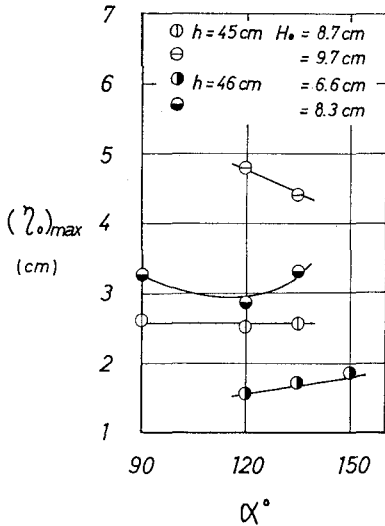
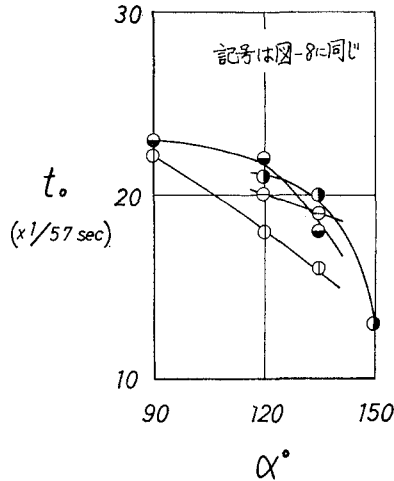


図-7 越波時のり面上での水位の時間的変化

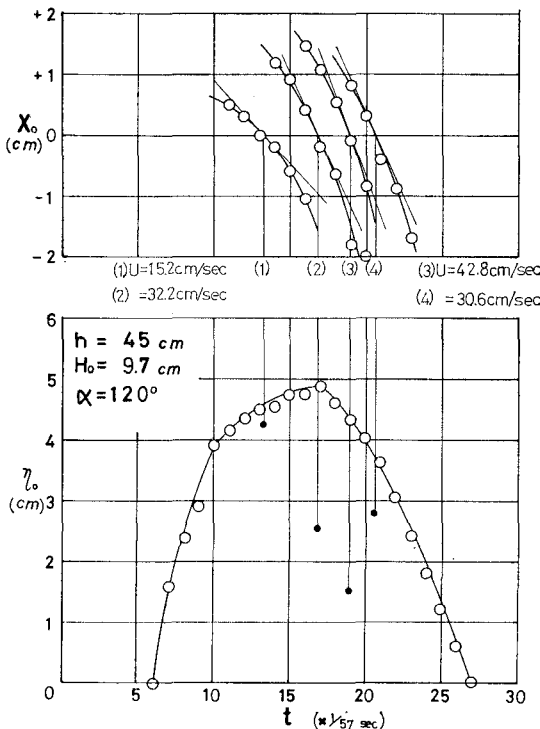
傾斜角によってあまり変化しないようである。たとえば、越波時の水位の最大値 ($\eta_{0\max}$) に及ぼす傾斜角の影響を示すと、図-8 のようである。これによると、実験結果が十分でないで明確ではないが、越波時の最高水位は 120° のときにごくわずかに低くなるような場合もみられるが、ほぼ一定値のようである。一方、図-6 および 7 などから、越波している時間 t_0 と傾斜角との関係を求めると、図-9 のようになる。これによると、



図—8 越波時のり面上での最高水位と傾斜角との関係



図—9 越波時間と傾斜角との関係



図—10 中立粒子の走時曲線と水位の時間的变化

越波時間は波高が一定であっても、傾斜角が大きくなれば急激に短くなる。なお、図—8 および 9 の実験条件は、いずれも傾斜角が大きくなるとともに越波量も単調に減少する場合である。

このように、逆勾配のり面の越波量には越波している時間が非常に重要な要素となるが、いまだ詳細な議論

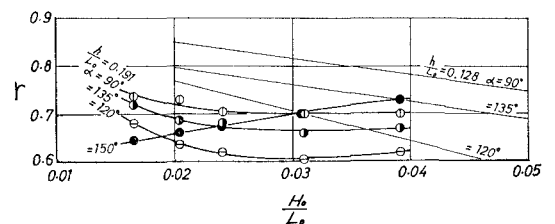
を行なうには越波時の流速を明らかにしなければならない。逆勾配のり面では、のり面を波が遡上するときには沖側方向への流速成分をもつはずであり、傾斜角が大きくなれば、常識的には沖側方向への流速成分も大きくなるものと考えられる。したがって、逆勾配のり面の越波機構を明らかにするためには、水位と流速の時間的变化を明確にする必要がある。

著者は、鉛直堤の越波機構を調べたときと同じ方法によって、越波時の天端直上での流速を求めることにした。図—10 はその結果の一例を示したものである。なお、図—10 の下図の黒い小円は、中立粒子の位置を示している。しかし、この流速測定方法では、各傾斜角について同一時刻および場所における流速を求めることはきわめて困難である。そこで、フロートが撮影されている多くのフィルムの中から、ほぼ同一条件のものを選び出して比較した結果、傾斜角がゆるいほど流速は小さくなるようであった。しかし、流速が 120° で極小値を示す場合は見出せなかった。

今後は流速測定方法をさらに改良することによって、逆勾配のり面の越波量がなぜ図—5 のような変化の仕方をするのかを明らかにしていきたい。

(3) 波の反射

反射率の測定は、他の諸量の測定に比較して困難である。ここでは波高が小さいことを考慮して Healy の方法によって反射率を求めた。図—11 は、反射率 r と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を示したものである。なお、図中の太い実線は著者の実験曲線で水深波長比が 0.191、細い実線は岩垣ら³⁾ の水深波長比が 0.128 の場合のものである。こ



図—11 反射率と波形勾配との関係

れによると、波形勾配が 0.03 より小さいときには、傾斜角が 150° の場合の著者の実験値を除いて、波形勾配の増大とともに反射率は減少している。これは普通のり面の場合と同じである。しかしながら、波形勾配が 0.03 以上になると反射率はあまり変化しないか、むしろ若干増加する傾向がある。さらに傾斜角が 150° の場合には、波形勾配の増大とともに反射率も単調に増加している。傾斜角が 150° の場合には、逆勾配のり面によって前面の波動が複雑となり、他の場合よりもり面でかなりのエネルギー損失があるはずであり、反射率がむしろ小さくなるのが予想されるが、図-11 の結果はまったく逆であり、この原因は明らかでない。

図-12 は、図-11 の結果をもとにして、反射率と傾斜角との関係を、波形勾配をパラメーターとして示した

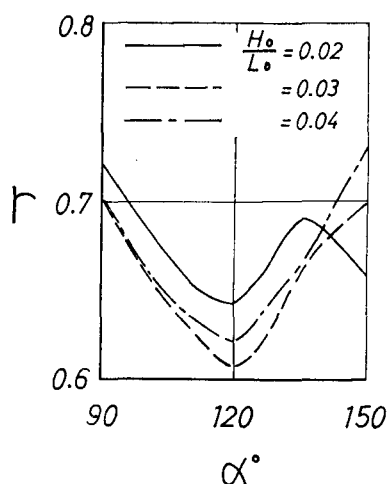


図-12 反射率と傾斜角との関係

ものである。これによると、反射率はいずれの波形勾配についても、傾斜角が 120° の場合に極小値を示したのち、波形勾配が 0.02 の場合には、越波量の変化と同じように 135° で極大値を示しふたたび減少するのに対し、0.03 および 0.04 の場合には、遡上高の変化と同じように単調に増大している。このように傾斜角が 120° で反射率が極小値をとることは、図-11 の細線で示した実験結果についても同様であり、実験での誤差とは考えられないうに、遡上高や越波量の変化とも対応しているので、何らかの本質的な現象があるはずであり、今後はその原因の究明を行なうつもりである。

4. 結 語

以上、著者は大水深に設置される護岸構造を究明する目的で、逆勾配のり面の水理特性を実験的に検討した。

その結果、逆勾配のり面への遡上高については、傾斜

角が $90^\circ \sim 120^\circ$ で極小値を示したのち、急増することがわかった。また、越波量に及ぼす傾斜角の影響については、波形勾配や水深波長比によって二つの異なる傾向があることを示したが、いずれの場合についても、傾斜角が 150° で越波量は急減し、遡上高の変化とは一致しない、逆勾配のり面の大きな特性を見出した。さらに、鉛直堤の場合の越波量を減少させるためには、傾斜角を 120° 程度にすればよいが、波高が大きくなっても越波量を急増させないためには、傾斜角を 150° 程度にしなければあまり効果的でないことを指摘した。反射率については、傾斜角が 120° で極小値を示し、 150° では増大する場合が多かったが、その理由については明らかでない。なお、波圧についても現在実験結果を得つつあるが、たとえば静水面での最大波圧と傾斜角との関係は、越波量や反射率の変化の仕方と類似の傾向を示していることを付記しておくたい。

以上、この論文では逆勾配のり面の二、三の水理特性を実験的に明らかにしたが、今後はその機構の究明とともに、実際面への適用を考慮した断面についての検討を進めていきたい。

最後に、この研究を行なうにあたり終始ご激励をいただいている京大工学部岩垣雄一教授、同防災研究所土屋義人教授に深謝の意を表するとともに、実験に大いに助力していただいた前関西大学学生赤松賢二、桜井豊二の両君に謝意を表する。なお、この研究は文部省自然災害特別研究「海岸における波の制御に関する研究」(代表者：岩垣教授)による研究の一部であることを明記する。

参 考 文 献

- 1) 井上雅夫・岩垣雄一・土屋義人：海岸堤防の越波防止効果に関する二、三の問題，京都大学防災研究所年報，第14号，B，pp. 361~372，1971。
- 2) 土屋義人・芝野照夫：恋ヶ浜の埋込に伴う波浪の変形と護岸構造に関する研究，財団法人防災研究協会，pp. 1~76，1972。
- 3) Isaacson, E.: Waves against an overhanging cliff, Comm. Pure and Appl. Math., Vol. 1, pp. 201~209, 1948。
- 4) 岩垣雄一・井上雅夫・吉川昌宏：逆勾配のり面の波の遡上，反射および波圧について，昭和40年度土木学会関西支部学術講演会講演概要，pp. 103~104，1965。
- 5) 高田 彰：海岸堤防の越波の飛散（水平）分布について，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 267~276，1968。
- 6) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，第2回海岸工学講演会講演集，pp. 57~70，1955。
- 7) Saville, T. Jr.: Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 139~150, 1958。