

親水性護岸における越波特性

Wave Overtopping on Amenity-Oriented Seawalls

井 上 雅 夫

Masao INOUE

1. まえがき

最近のわが国における海岸堤防や護岸の越波に関する研究は必ずしも活発なものとはいえない。したがって、この研修会で取りあげられたテーマをみても、越波に関するものは、10年間でわずかに1件（水口、1992）に過ぎない。これは、伊勢湾台風や第二室戸台風などによるような大規模な高潮災害が最近ではほとんどなく、社会的な関心もうすれていることがもっとも大きな理由であろう。さらに、実務面においても合田ら（1975）の作成した越波流量についての推定図表と水理模型実験との併用によって、おおよその機能設計が可能になったことも一因であろう。しかし、これらによって問題がすべて解決したわけでは勿論ない。誰でも簡単に調べることでできる最近10年間の海岸工学講演会で発表された越波関連の論文を示すと、表-1のようになる。特に、ここ数年の発表件数の増加が目立ち、越波に関しても新しい問題がつつぎと提起され、その解決にむけての努力がなされていることがわかる。これらのうち、著者らは緩傾斜護岸で代表されるような親水性護岸の越波特性について検討を進めているが、それは次のようなことが切っ掛けであった。すなわち、豊島（1984, 1987）が緩傾斜のり面被覆工法を提唱して以来、一般社会の海岸に対する親水性の要望とあいまって、わが国では海岸堤防や護岸ののり面を緩傾斜にし、天端高はできるだけ低くおさえようとしている。このことは、万人が望むべきことであろうが、はたして高潮来襲時などのように計画外力を上まわった外力に遭遇した際の安全性に対する検討は十分であろうか。特に、緩傾斜護岸はもともと海岸侵食対策として考案されたものであるため、越波に対しては十分な防止対策がとられていない面もある。特に、緩傾斜護岸の越波形態は、従来の傾斜護岸上をしぶきとなって越波する衝突型とは異なり、波の実質部分が越波するはい上がり型であるため、現場ではよく目立ち、問題になり易いことが指摘されている（豊島、1988）。さらに、親水性護岸だけに限ったことではないが、近年、特に重要視されている地球の温暖化に伴う海面上昇に対し、こうした護岸がどのような越波特性を有しているのだろうか。これらのことを明らかにするため、緩傾斜護岸を中心とした親水性護岸について、不規則波を用いた越波に関する実験的な研究を進めてきた。ここでは、表-1に示した文献(12)、(19)、(22)、(28)および(29)の結果に新しく著者ら（1994a, 1994b）が行った実験結果を加えて、親水性護岸の越波特性をできるだけ系統的に述べていくことにしたい。なお、実験方法などについては割愛し、その詳細は原論文を参照していただきたい。また、親水性護岸の特徴や具体的な設計方法については、門司（1989）が海岸保全施設築造基準解説などを参考にして解説を行い、建設事例の紹介も行っているため、これもぜひ一読していただきたい。

2. 親水性護岸の越波特性に及ぼす諸要素の影響

2.1 のり先水深の影響

砕波点近傍での越波現象に及ぼすのり先水深の影響はきわめて大きい。ここでは、越波現象に関係する無次元量のうち、のり先水深・波長比だけを変化させて、その影響について検討してみよう。

図-1は、不規則波群の越波率 r_0 とのり先水深・波長比 h/L との関係である。なお、この場合の越波率は、

表－１ 最近の10年間に海岸工学講演会で発表された越波関連の論文

著者	論 文	年 (回)
山本ら ¹⁾	越波の少ない低天端堤の開発	1984(31)
高山ら ²⁾	斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験	〃
井上ら ³⁾	養浜による越波防止効果	1985(32)
間辺ら ⁴⁾	遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する不規則波実験	1986(33)
大木ら ⁵⁾	遊水部付緩傾斜消波工の潮風害防止効果について	1987(34)
朴ら ⁶⁾	面的防護工法による越波量低減効果及び越波量算定モデル	〃
井上ら ⁷⁾	不規則波の越波量分布	1988(35)
高山ら ⁸⁾	広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験	〃
渡辺ら ⁹⁾	消波護岸不連続部の越波特性に関する実験的研究	1989(36)
井上ら ¹⁰⁾	不規則波における越波量の出現分布特性	〃
川村ら ¹¹⁾	V字状集波堤と潜堤による越波量の増大	〃
井上ら ¹²⁾	不規則波による緩傾斜護岸の越波特性	1990(37)
平口ら ¹³⁾	防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性	1991(38)
仲座ら ¹⁴⁾	リーフ上の護岸越波特性に関する研究	〃
伊藤ら ¹⁵⁾	苫小牧西港防波護岸の越波に関する現地観測	〃
山本ら ¹⁶⁾	数値モデルによる越波量算定	〃
池野ら ¹⁷⁾	応答関数を用いた不規則波による越波伝達波の算定法	〃
平口ら ¹⁸⁾	越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法	〃
井上ら ¹⁹⁾	透水性を有する緩傾斜護岸の越波特性	〃
河野ら ²⁰⁾	横スリット型曲面護岸の越波に関する基礎的研究	1992(39)
関本ら ²¹⁾	人工島防波護岸の短時間越波特性について	〃
井上ら ²²⁾	緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響	〃
山本ら ²³⁾	地球温暖化が海岸堤防越波に及ぼす影響について	〃
横山ら ²⁴⁾	鉛直壁における越波量と反射率について	1993(40)
河野ら ²⁵⁾	曲面護岸と各種断面護岸による越波量の比較	〃
鹿島ら ²⁶⁾	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	〃
池野ら ²⁷⁾	強風作用下における護岸越波量の飛散距離分布特性	〃
井上ら ²⁸⁾	海岸護岸の越波特性に及ぼす海面上昇の影響	〃
井上ら ²⁹⁾	親水性護岸の越波防止機能	〃
萩原 ³⁰⁾	特性曲線法による傾斜式護岸の越波量算定モデル	〃

不規則波群のうち越波する波数を全入射波数で除したものである。これによると、越波率はのり面傾勾配が緩いものほど小さいことがわかる。また、3割、5割および6割勾配護岸では、 h/L の増大とともに越波率もほぼ増加する傾向がみられる。それに対し直立護岸では、 h/L が0から0.019までは、緩傾斜護岸の場合と同様に、 h/L の増大とともに越波率も増加しているが、 h/L が0.019以上になると、越波率は減少している。この原因は、直立護岸の場合には、のり先水深が大きくなると、護岸前面で重複波が形成される割合が多くなるためと考えられる。また、直立護岸と3割および5割勾配護岸では h/L の影響が顕著であるのに対し、6割勾配護岸ではその影響があまりみられない。なお、豊島(1986)は、波のうちあげ高についても同様な傾向のあることを指摘している。

図-2は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ とのり先水深・波長比 h/L との関係である。これによると、いずれののり面勾配についても、越波流量は h/L が0.006以上では、その増大とともに増加する傾向がある。また、越波流量は、 h/L が0から0.006までの場合には、のり面勾配によってほとんど変化しないが、 h/L が0.01程度以上になると、のり面勾配の影響が顕著に現れ、3割勾配護岸がもっとも大きく、ついで直立、5割勾配、6割勾配護岸の順に減少し、その減少の割合は h/L が大きいほど著しい。また、図-1からもわかるように、越波率は、直立護岸のほうが3割勾配護岸よりも大きいにもかかわらず、越波流量については、 h/L が0.006以上になると、3割勾配護岸のほうが多くなっている。このことから、3割勾配護岸のほうが直立護岸よりも越波量の大きな波が多いことがわかる。以上のように、緩傾斜護岸の越波防止機能は、のり面勾配が5割あるいは6割で、 h/L が大きい場合に優れていることがわかる。

図-3は、越波した波だけを対象とした場合の平均越波量と代表波法の定義にしたがって求めた他の代表越波量との関係であり、上図と下図はそれぞれ3割および5割勾配護岸のものである。これらによると、いずれの護岸の場合も $Q_{1/3}/Q_m$ は約2~3であり、のり先水深の影響はほとんどみられない。しかし、 $Q_{1/10}/Q_m$ や Q_{max}/Q_m にはのり先水深の影響がみられ、特に Q_{max}/Q_m の場合が著しい。3割勾配護岸の場合には、 Q_{max}/Q_m が h/L の増大とともに減少しているが、これは緩傾斜護岸のもつ防災上好ましい特性といえよう。しかし、5割勾配護岸の場合には、3割のものとは逆の傾向がややみられるようである。

このように、越波特性に及ぼすのり先水深の影響はきわめて微妙であり、護岸ののり面勾配によっても変化することは、設計上特に注意すべきことである。

図-4は、3割勾配護岸における1波ごとの越波流量 q の超過発生確率 $P(q/q_m)$ を越波した波だけを対象とした場合について示した。なお、図中の曲線はWeibull分布であり、この分布の形

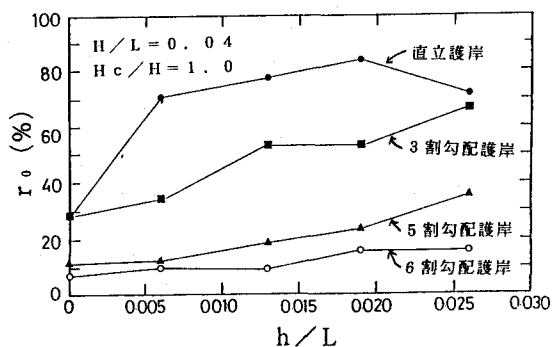


図-1 越波率とのり先水深・波長比との関係

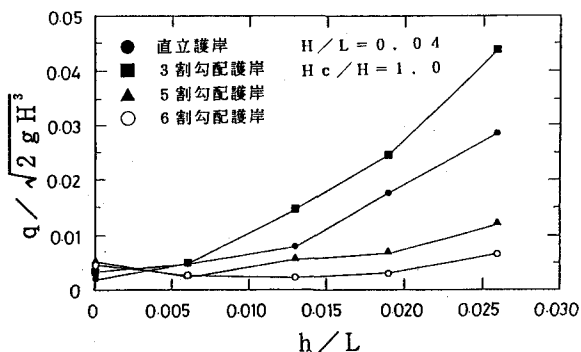


図-2 無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係

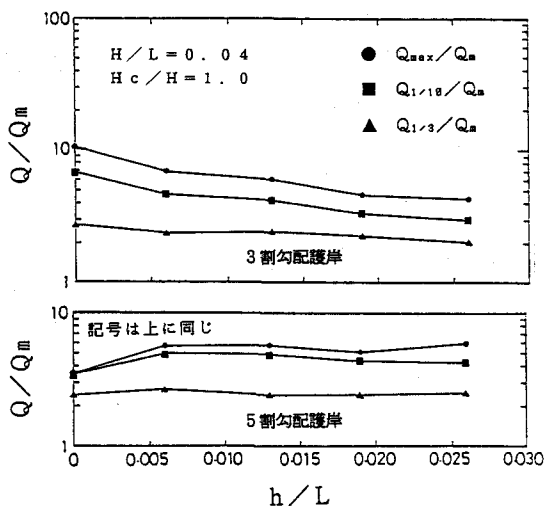


図-3 代表越波量比とのり先水深・波長比との関係

形状母数 α の決定は、確率密度を求める段階で α を 0.1 ずつ変化させて計算し、それと実験値との間で χ^2 -検定を行い、その検定値が最小になるものを採用した。これらによると、 h/L が大きいものほど Weibull 分布への適合度がよくなる傾向がみられる。図示していない直立護岸の場合には、いずれの h/L でも適合度が

よかったことから、Weibull 分布への適合度は図-1 に示した越波率に関係し、越波率が高い場合には Weibull 分布への適合度はよくなるものと考えられる。

図-5 は、Weibull 分布における形状母数 α とのり先水深・波長比 h/L との関係である。なお、図中には、3割勾配護岸の場合とともに直立護岸の場合も同時に示した。これによると、3割勾配護岸の α は直立護岸のものよりも小さい値を示し、直立護岸の場合は、 h/L が 0.019 で最大になるのに対し、3割勾配護岸の場合には、 h/L の増大とともに α も増大する傾向がある。こうした形状母数 α と h/L との関係は、図-1 に示した越波率と h/L との関係によく対応している。

2.2 のり面勾配の影響

護岸が親水性をもつためには、のり面が緩傾斜でなければならない。緩傾斜護岸の表のり勾配については、当初は3割程度のものがほとんどであったが、最近は5割、ときにはそれよりも緩やかなものが採用されているようである（豊島, 1988）。ここでは、緩傾斜護岸の越波特性に及ぼすのり面勾配の影響を検討してみよう。なお、のり面勾配は3割、5割、7割および10割とし、比較のために直立護岸についても実験を行った。また、いずれの護岸についても、風の影響を合わせて調べたが、これについては2.5で詳述しよう。

図-6 は、不規則波群の越波率 r_o とのり面勾配 $\cot \theta$ との関係であり、パラメータの $V/\sqrt{gH}$ は護岸前面の風速 V を用いた無次元風速である。なお、いずれの護岸の場合も前面の海面勾配は 1/10 である。これによると、いずれの風速につ

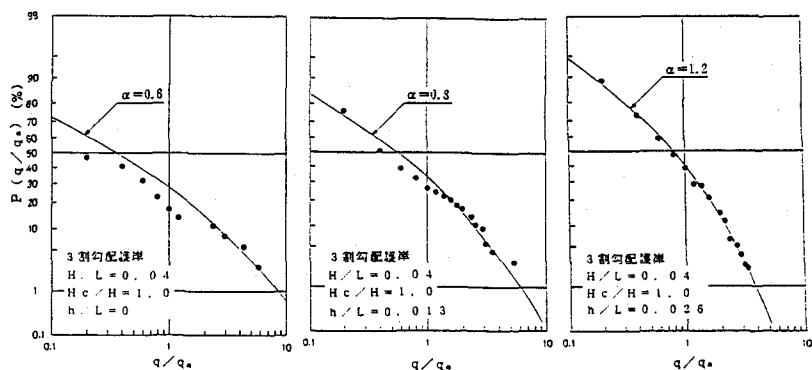


図-4 越波流量の超過発生確率

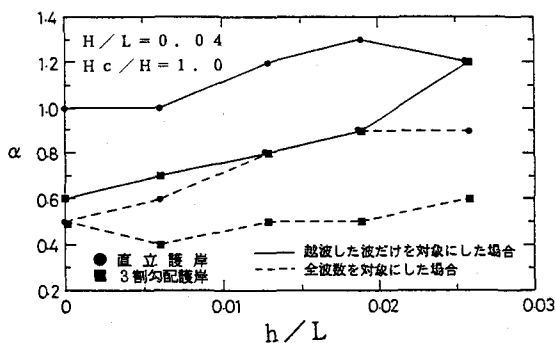


図-5 形状母数とのり先水深・波長比との関係

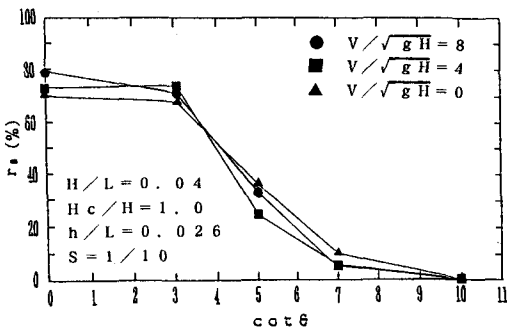


図-6 越波率とのり面勾配との関係

いても、直立と3割勾配護岸および7割と10割勾配護岸の越波率はほぼ同じか、あるいは勾配がゆるくなると若干減少する程度であり、これらの範囲では越波率に及ぼすのり面勾配の影響はほとんどみられない。しかし、のり面勾配が3割から7割に緩くなると、越波率は急減し、のり面勾配の影響が顕著である。なお、図示はしていないが、海浜勾配が1/15の場合についても、のり面勾配が5割から7割にかけて、越波率は急減している。

図-7は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ とのり面勾配 $\cot \theta$ との関係である。これによると、越波流量は無風時では3割勾配護岸で最大になっている。このことは、のり面勾配が $20^\circ \sim 30^\circ$ のとき越波量が最大になるという萩原(1993)の計算結果や小松ら(1992)の実験結果とほぼ同じである。また、有風時では直立護岸の場合に最大となる。いずれにしても風の有無にかかわらず、のり面勾配が3割よりも緩くなると越波流量は急減する。なお、図中 7割から10割勾配護岸にかけては実験値が破線で結ばれているが、これは、10割勾配護岸では風の有無にかかわらず越波しなかったためである。以上のように、のり面勾配が緩やかになると、傾斜護岸の越波率や越波流量が減少する原因は、のり面勾配が緩くなると、のり面の長さが長くなり、砕波した波が護岸上を遡上する際にその波のもつエネルギーが失われるためと考えられる。

図-8は、 $V/\sqrt{gH}$ が0および8で越波した波だけを対象とした場合の各代表越波量と平均越波量の比 Q/Q_m とのり面勾配 $\cot \theta$ との関係である。なお、護岸前面の海浜勾配は1/15である。

$V/\sqrt{gH}$ が0である上図の場合には、 $Q_{1/3}$ および $Q_{1/10}$ はそれぞれ Q_m の約2倍および約3倍でほぼ一定値を示し、 Q_{max} は Q_m の約3~5倍で5割勾配護岸で最大値を示しているが、いずれの Q/Q_m についてものり面勾配の影響はあまりみられない。 $V/\sqrt{gH}$ が8である下図の場合には、 $Q_{1/3}$ および $Q_{1/10}$ はそれぞれ Q_m の約2~3倍および約3~5倍で、のり面勾配が緩くなると、 Q/Q_m はやや増大する傾向を示している。また、 Q_{max} は Q_m の約4~7倍で5割勾配護岸で最大値を示している。なお、図示はしていないが、 $V/\sqrt{gH}$ が4の場合についても、 $V/\sqrt{gH}$ が8のものとはほぼ同じ傾向を示していた。さらに、全波を対象とした場合については、いずれの風速でも、 $Q_{1/3}/Q_m$ 、 $Q_{1/10}/Q_m$ および Q_{max}/Q_m は、のり面勾配が緩くなるほど増加し、それらの最大値はそれぞれ約3、10および20にも達していた。このように全波を対象とした場合には、それぞれの代表越波量比にのり面勾配の影響が顕著にみられることが特徴である。

図-9は、護岸前面の海浜勾配が1/15で、いずれも越波した波だけを対象とした場合における直立、3割、

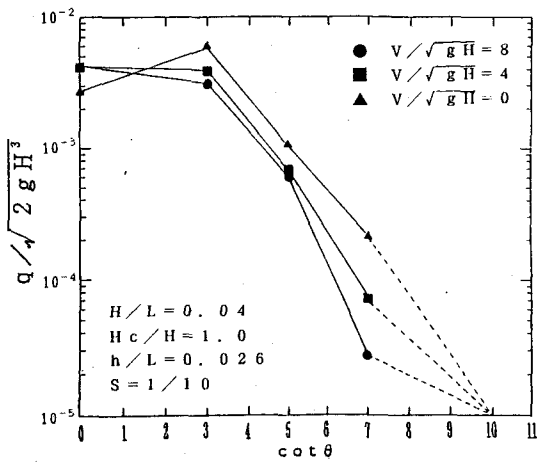


図-7 無次元越波流量とのり面勾配との関係

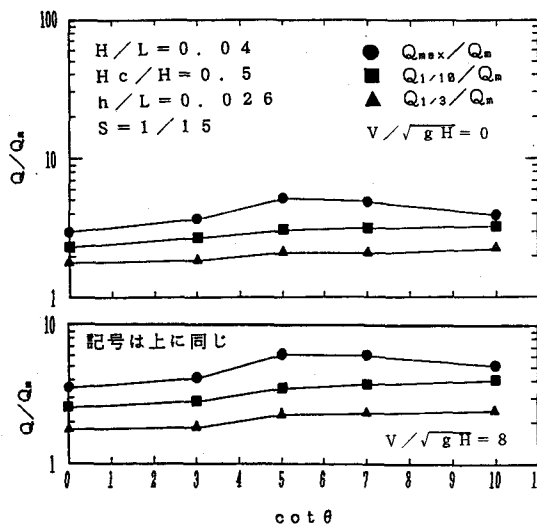


図-8 代表越波量比とのり面勾配との関係

5割、7割および10割勾配護岸の1波ごとの越波流量 q の超過発生確率 $P(q/q_m)$ を示したものである。また、いずれも図中の曲線はWeibull分布であり、この分布の形状母数 α の決定は、図-4の場合と同じようにした。これらによると、のり面勾配が10割のようにかなり緩やかにならない限り、Weibull分布に適合するといえよう。

図-10は、護岸前面の海浜勾配が1/15の場合における各護岸についてのWeibull分布の形状母数 α とのり面勾配 $\cot \theta$ との関係を無次元風速 $V/\sqrt{gH^3}$ をパラメータとして示したものである。これによると、無風時の場合には直立護岸、有風時の場合には3割勾配護岸についての形状母数が大きくなり、のり面勾配が緩くなると形状母数は小さくなる傾向がみられる。このことは、のり面勾配が緩やかになると代表越波量比が大きくなることと一致し、平均越波量で機能設計すると、最大越波量時には危険になる場合のあることを示唆しており、防災上好ましい特性ではない。

2.3 のり面の開孔率の影響

一般に、親水性護岸は表のりの勾配が緩いうえで、表のり面に透水性をもたせるため、有孔性のコンクリートブロックで被覆されている場合が多い。ここでは、のり面勾配が3割、5割、7割および10割で、中詰砂を入れた堤体を孔径が1.0cmの有孔板で被覆した護岸の越波特性を、その開孔率だけを変化させて検討してみよう。

有孔板の開孔率 K は、10、20および30%の3種類に変化させ、不透水性($K=0\%$)のものと比較した。なお、この場合の開孔率とは護岸のり面にあけた孔の総面積を護岸のり面の総面積で除したものを百分率で表したものである。

図-11には、不規則波群の越波率 r_0 と護岸のり面の開孔率 K との関係を示した。これによると、7割および10割勾配護岸では、開孔率の違いによる透水性の影響がみられるが、3割および5割勾配護岸では、透水性の影響はほとんどみられず、むしろ不透水性のものよりも大きくなる場合が多い。これは、7割や10割勾配護岸のようにのり面勾配の緩い護岸では、のり面の

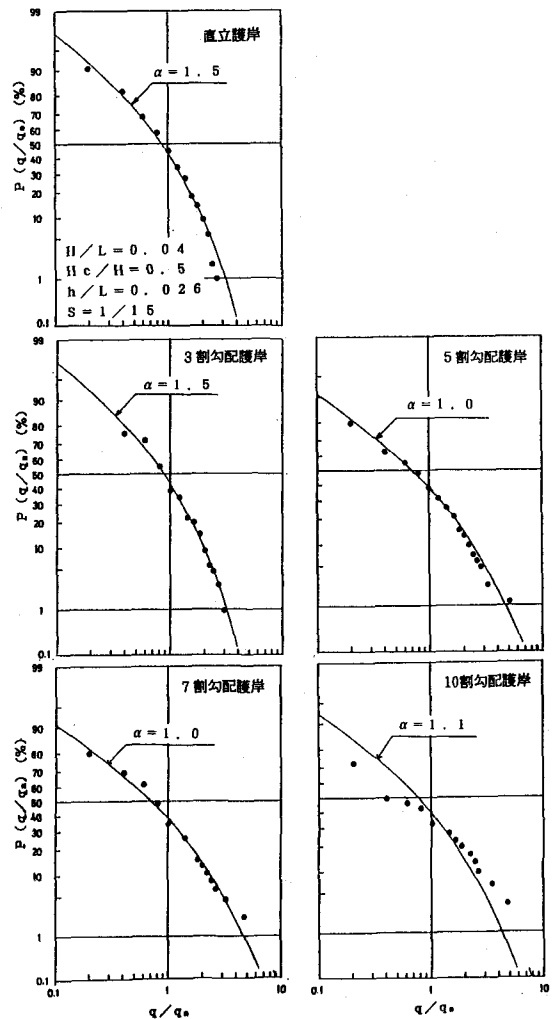


図-9 越波流量の超過発生確率

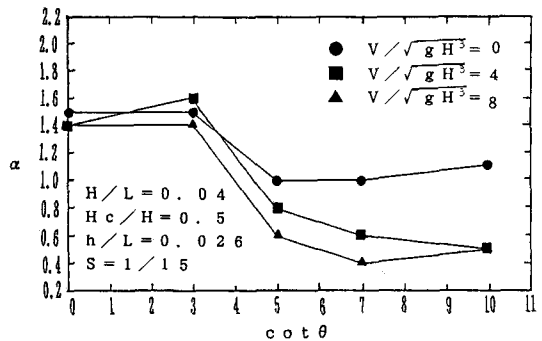


図-10 形状母数とのり面勾配との関係

長さが長いために開孔率の違いによる透水性の影響が現れるが、3割や5割勾配護岸のようにのり面勾配の比較的急なものは、のり面の長さが短いために、のり面を遡上する波がのり面の孔を通して堤体内に浸透するまえに、越波してしまうことが多いためである。

図-12には、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ と護岸ののり面の開孔率 K との関係を示した。これによると、いずれの護岸も開孔率の増大とともに無次元越波流量は減少する傾向を示しているが、その減少する割合は、3割や5割勾配護岸のようにのり面勾配が比較的急なものよりも、7割や10割勾配護岸のほうが大きい。このことから、緩傾斜護岸の越波防止機能に透水性の効果を期待するためには、現在、現場で多用されている5割勾配では不十分であるといえよう。

図-13は、3割および7割勾配護岸における風の影響を考慮した場合の無次元越波流量とのり面の開孔率との関係を示したものである。これによると、いずれの護岸についても風速の増大とともに越波流量は減少する傾向を示している。特に、7割勾配の透水性護岸でその傾向が顕著である。また、越波流量は、のり面勾配や風速にかかわらず、不透水性護岸のものより透水性護岸のものの方が小さい。さらに、のり面勾配を緩やかにして越波流量を低減させるためには、いずれの風速の場合にも透水性護岸のほうが効果的であることがわかる。

図-14は、越波した波だけを対象とした場合の平均越波量と他の代表越波量との関係であり、縦軸は各代表越波量と平均越波量との比 Q/Q_m である。なお、上図と下図はそれぞれ3割および5割勾配護岸のものである。これらによると、いずれの護岸も、 $Q_{1/3}$ は Q_m の約2倍、 $Q_{1/10}$ は Q_m の約3倍、 Q_{max} は Q_m の約4~5倍であり、開孔率の違いによる透水性の影響はみられない。しかし、図示はしていないが、7割および10割勾配護岸では、 $Q_{1/3}$ は Q_m の約2~3倍、 $Q_{1/10}$ は Q_m の約3~5倍、 Q_{max} は Q_m の約4~7倍であり、若干ではあるが透水性の影響がみられた。なお、全波を対象とした場合は Q_m が小さくなるため、越波した波だけを対象とした場合のものより透水性

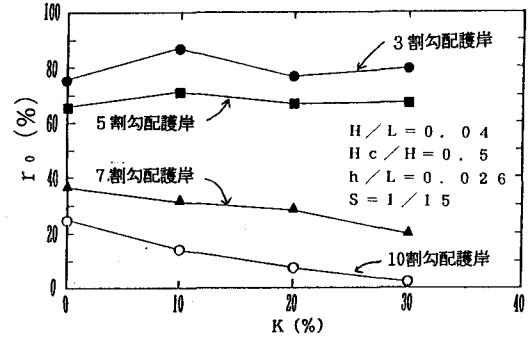


図-11 越波率とのり面開孔率との関係

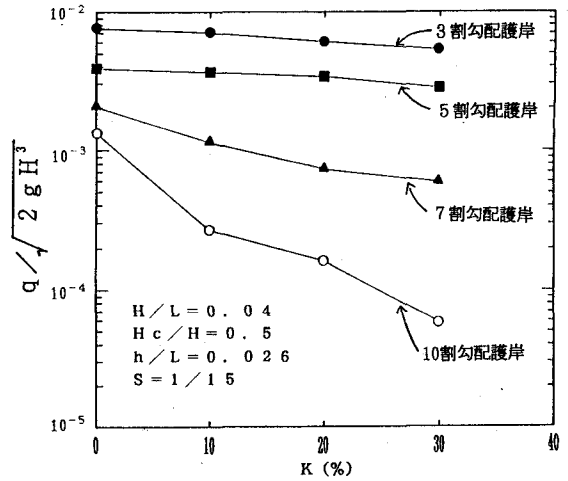


図-12 無次元越波流量とのり面開孔率との関係

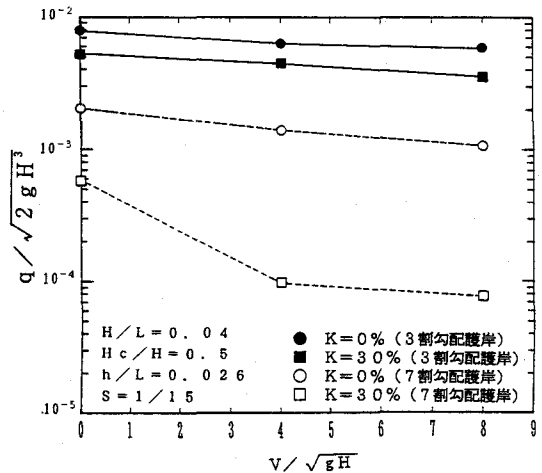


図-13 風を考慮した場合の無次元越波流量とのり面開孔率との関係

の影響は顕著であり、 Q_{max} にいたっては Q_m の約90倍にも達する場合がある。このことは護岸の機能設計上、特に注意すべきことである。

図-15は、越波した波だけを対象とした場合の5割勾配護岸における越波流量 q の超過発生確率 $P(q/q_m)$ であり、左図と右図は開孔率がそれぞれ0および30%のものである。なお、図中の曲線はWeibull分布であり、形状母数 α は図-4の場合と同様に決定した。これらによると、開孔率が0%のときはWeibull分布への適合性は良いが、開孔率が30%のときは若干悪くなるようであるが、Weibull分布の適合性に透水性の影響はあまりみられない。なお、このことは図示していない3割勾配護岸についても同様である。なお、7割や10割勾配護岸の場合には、図-16

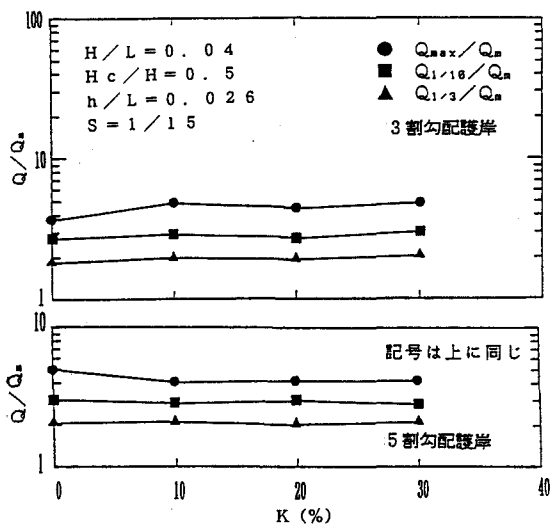


図-14 代表越波量比とのり面開孔率との関係

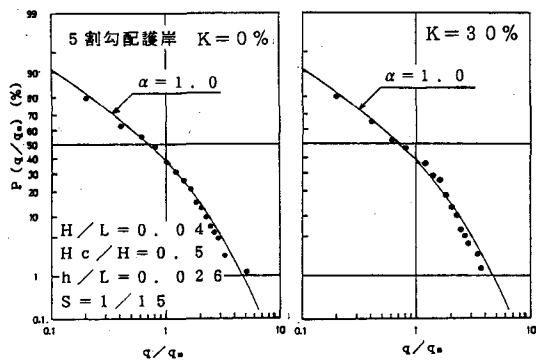


図-15 越波流量の超過発生確率

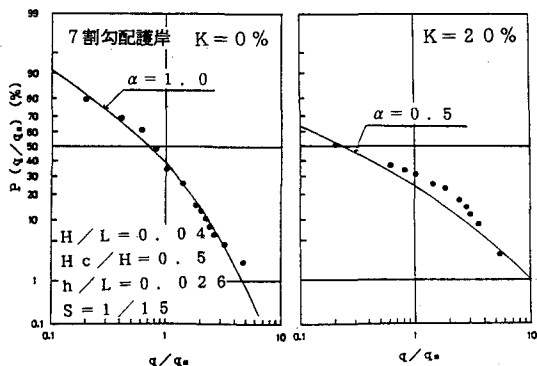


図-16 越波流量の超過発生確率

に示すように開孔率が大きくなるとWeibull分布への適合性は悪くなった。

図-17は、越波した波だけを対象とした場合のWeibull分布の形状母数 α と開孔率 K との関係である。これによると、3割および7割勾配護岸では開孔率の増大とともに α は小さくなり、透水性の影響がみられる。しかし、5割勾配護岸では α はほぼ一定であり、透水性の影響はみられない。また、10割勾配護岸については、 α のばらつきが大きく、透水性の影響は明らかでない。

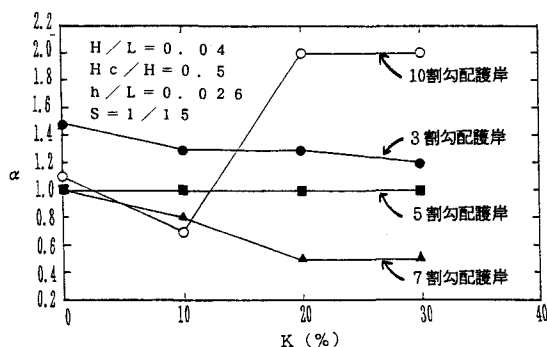


図-17 形状母数とのり面開孔率との関係

2. 4 堤体の透水性の影響

のり面を遡上した波は、のり面の孔の部分から堤体中に浸透する。ここでは、堤体内部の中詰砂の粒径だけを变化させた緩傾斜護岸の越波特性を検討してみよう。緩傾斜護岸の表のり勾配は3割および5割とし、中詰砂の中央粒径 d と有義波高 H との比 d/H を0.001、0.013、0.058および0.236の4種類に変化させた。

図-18は、不規則波群の越波率 r_o と粒径波高比 d/H との関係を示した。これによると、3割勾配護岸に対する越波率には、透水性の影響はあまりみられず、その値は60~70%程度でほぼ一定である。これに対し、5割勾配護岸に対する越波率には透水性の影響がみられる。すなわち、 d/H が0.01程度までは不透水性護岸のものよりも小さくなるが、それ以上になると、逆に不透水性護岸のものよりも大きくなる。これらの原因としては、 d/H が大きい場合には、戻り流れの影響がなくなり、越波しやすかったことのほかに、 d/H が小さい場合には、護岸前面が波によって変形し、越波しにくかったことなども考えられる。また、いずれの d/H の場合についても、5割勾配護岸の越波率は3割勾配護岸のものよりも小さい。

図-19は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ と粒径波高比 d/H との関係を示した。これによると、3割勾配護岸の場合、透水性護岸の越波流量は不透水性護岸のものに比べ約50%に減少するが、透水性護岸では d/H の影響はほとんどみられない。また、5割勾配護岸の場合は、3割勾配護岸の場合と同様に、透水性護岸の越波流量は不透水性護岸のものに比べると減少し、透水性護岸では d/H の影響が若干現れている。すなわち、透水性護岸の越波流量は d/H が0.01程度以上になると増加する傾向がみられる。この原因としては、越波率について前述したようなことが考えられる。

図-20は、平均越波量と他の代表越波量との関係であり、越波した波だけを対象とした場合のものである。なお、上図は3割勾配護岸、下図は5割勾配護岸のものであり、縦軸は各代表越波量と平均越波量との比 Q/Q_m である。これら

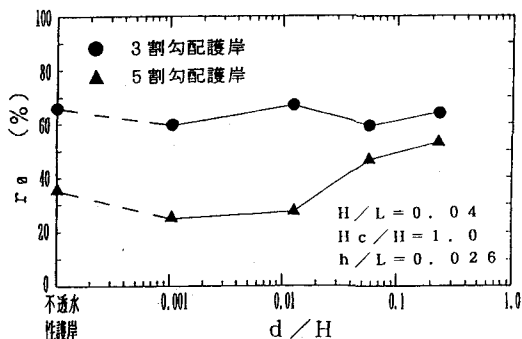


図-18 越波率と粒径波高比との関係

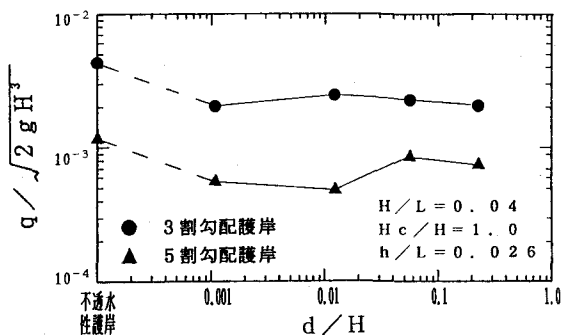


図-19 無次元越波流量と粒径波高比との関係

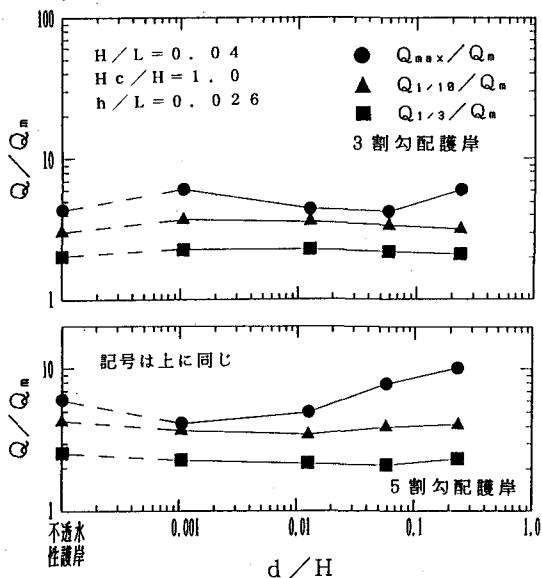


図-20 代表越波量比と粒径波高比との関係

によると、 $Q_{1/3}$ は Q_m の2～3倍で、この値はのり面勾配や d/H によってほとんど変化しない。 $Q_{1/10}$ は Q_m の3～5倍で、この値もりのり面勾配や d/H によってあまり変化しない。 Q_{max} は Q_m の4～10倍にもなり、この場合にはのり面勾配や d/H の影響が現れている。

特に、5割勾配護岸で d/H が、0.01より大きく

なると、 d/H の増大とともに Q_{max}/Q_m の値も増加し、 d/H が0.236では Q_{max} が Q_m の10倍にも達している。これらのことは、緩傾斜護岸の機能設計において特に注意すべきことであろう。つぎに、3割と5割勾配護岸を比較してみると、全般的に3割勾配護岸より5割勾配護岸のほうが d/H の影響が顕著である。この原因は、相対護岸天端高が一定であっても、5割勾配護岸のほうが護岸ののり面の長さが長くなることから、透水効果の影響が大きくなるためと考えられる。

図-21は、3割勾配護岸における越波した波だけを対象とした場合の越波流量 q の超過発生

確率 $P(q/q_m)$ を示したものであり、左図から順番にそれぞれ不透水性護岸、 d/H が0.013および0.058の場合である。なお、図中の曲線はWeibull分布であり、形状母数 α の決定は、図-4の場合と同様にした。これらによると、全般的には実験値はWeibull分布によく一致している。また、図示していないすべての d/H の場合を含めて考察すると、不透水性護岸のほうが透水性護岸のものよりもWeibull分布によく一致する傾向がみられる。さらに、透水性護岸だけに限ってみると、 d/H が小さい場合にはWeibull分布への適合度はあまりよくないが、 d/H が大きくなるとWeibull分布への適合度がよくなる傾向がみられる。

図-22は、図-21に示した3割勾配護岸に対するWeibull分布の形状母数 α と粒径波高比 d/H との関係である。これによると、透水性に関係なく、越波した波だけを対象とした場合の形状母数が、全波を対象とした場合のものよりも大きいことがわかる。また、いずれの場合についても、透水性護岸に対する形状母数は、 d/H が非常に大きい0.236のものを除いて、不透水性護岸に対するものに比べてかなり小さくなる。また、透水性護岸に対するWeibull分布の形状母数は、 d/H が大きいのほど大きくなり、これらの傾向は越波した波だけを対象とした場合のほうが著しい。

2. 5 風の影響

一般に、越波が問題となる高潮来襲時には強風が吹いており、その防災機能、特に越波防止機能に及ぼす風の影響については、十分に検討しておかなければならない。従来、越波量に及ぼす風の影響については、Iwagakiら(1966)によって実験的な研究が行われ、波形勾配が一定であつてもりのり先水深・波長比に

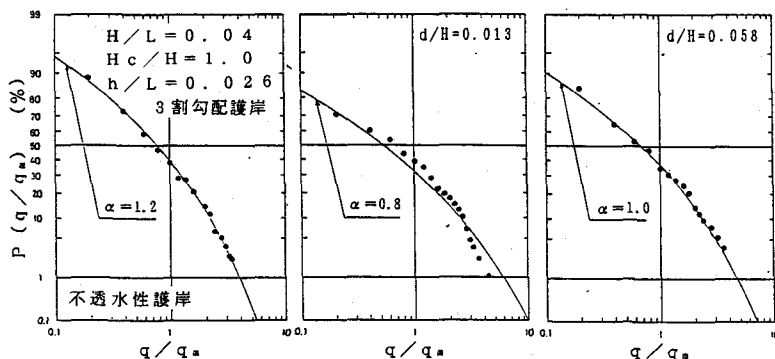


図-21 越波流量の超過発生確率

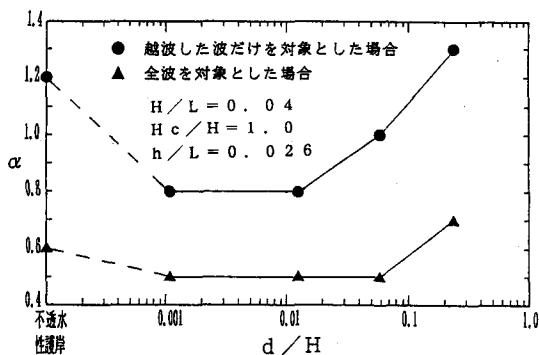


図-22 形状母数と粒径波高比との関係

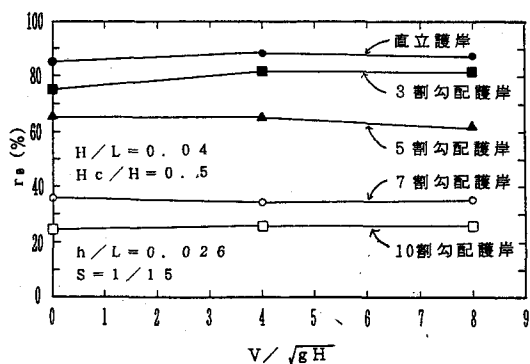


図-23 越波率と無次元風速との関係

よって、その特性が非常に異なることが明らかにされている。また、CERC(1973)や高田(1976)は、無風時の越波量から有風時の越波量を求める方法を提案している。しかしながら、これらの研究では、入射波が規則波であったり、主として護岸形状が直立護岸であるなど、実験条件がかなり限定されている。したがって、それらの成果を実際の親水性護岸の機能設計にそのまま利用することは困難である。ここでは、不規則波による緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響を検討してみよう。

図-23は、 h/L が0.026の場合における不規則波群の越波率 r_o と無次元風速 $V/\sqrt{gH}$ との関係を示した。これによると、5割、7割および10割勾配護岸の越波率は、風速が増大してもほとんど変化せず、風の影響はみられないようであるが、直立や3割勾配護岸の越波率は、風速の増大とともにいくらか増大する傾向がみられる。また、風がある場合の越波率も、のり面勾配が緩やかなほど小さく、このことは無風時の場合と同様である。なお、図示はしていないが、 h/L が0や0.013の場合については、3割および5割勾配護岸では、風速が増大しても越波率はほぼ一定値を示し、 h/L が変化しても風の影響の仕方は変わらない。しかし、直立護岸では風速の増大とともに著しく増加する傾向がみられる。したがって、越波率に及ぼす風の影響は、直立護岸で h/L が小さいときには顕著であるが、緩傾斜護岸の場合にはあまりみられないといえる。

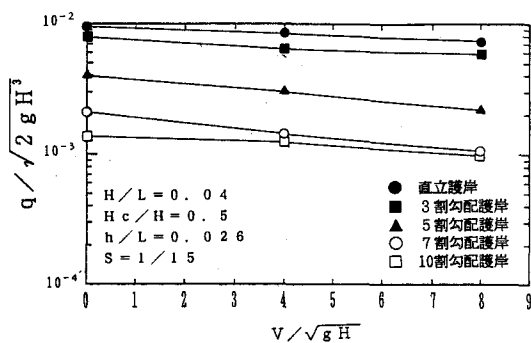


図-24 無次元越波流量と無次元風速との関係

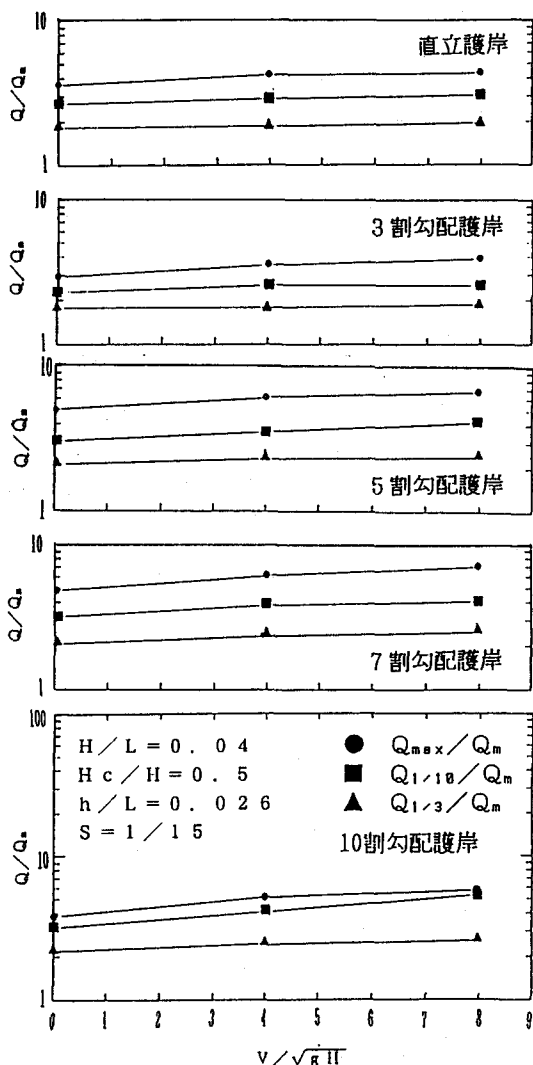


図-25 代表越波量比と無次元風速との関係

図-24は、 h/L が0.026の場合の無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ と無次元風速 $V/\sqrt{gH}$ との関係を示した。これによると、いずれの護岸の越波流量も、風速の増大とともに単調に減少する傾向を示している。このことは、直立護岸を汀線より陸側に設置した場合のIwagakiら(1966)の実験結果と同様であり、興味深い結果である。なお、こうしたことはのり先水深・波長比や護岸前面の海浜勾配によって、若干異なる場合がある。特に直立護岸では、その前面の海浜勾配が急になると、風速の増大とともに越波流量も増大するが、のり面勾配が3割よりも緩やかな護岸では、そうした傾向はほとんどみられない。

図-25は、上図から順番に直立、3割、5割、7割および10割勾配護岸に対する越波した波だけを対象とした場合の各代表越波量と平均越波量の比 Q/Q_m と無次元風速 $V/\sqrt{gH}$ との関係を示した。なお、 h/L はいずれも0.026である。これらによると、いずれの護岸の代表越波量比も風速によってあまり大きく変化しないようであるが、のり面勾配が5割よりも緩やかになると、いずれの代表越波量比も風速の増大とともにやや増大することは、注意すべきであろう。

図-26の左図と右図は、それぞれ $V/\sqrt{gH}$ が0および8のときの3割勾配護岸における越波した波だけを対象とした場合の越波流量 q の超過発生確率 $P(q/q_m)$ を示した。なお、 h/L はいずれも0.026である。図-27は、図-26に対応した7割勾配護岸のものである。また、それぞれの図中の曲線はWeibull分布であり、形状母数 α の決定は図-4の場合と同様にした。これらによると、いずれの護岸形状でも無風時には、実験値はWeibull分布によく一致している。しかし、7割勾配護岸については、風速が大きくなるほど実験値のWeibull分布への適合度が悪くなる傾向がみられる。なお、図示はしていないが、 h/L が0および0.013の場合のいずれの護岸に対する実験値も、風速が増大するほどWeibull分布への適合度がやや悪くなる傾向がみられたが、全般的にはWeibull分布にほぼ適合している。

図-28は、各護岸に対する越波した波だけを対象とした場合のWeibull分布の形状母数 α と無次元風速 $V/\sqrt{gH}$ との関係を示した。これによると、Weibull分布の形状母数は、いずれの護岸でもほとんどの場合、

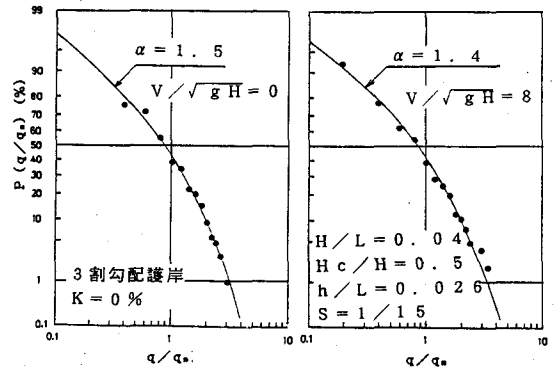


図-26 越波流量の超過発生確率

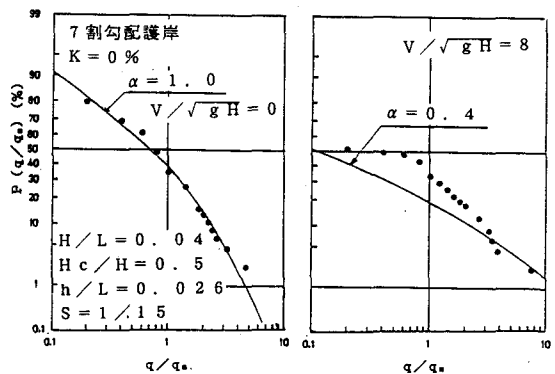


図-27 越波流量の超過発生確率

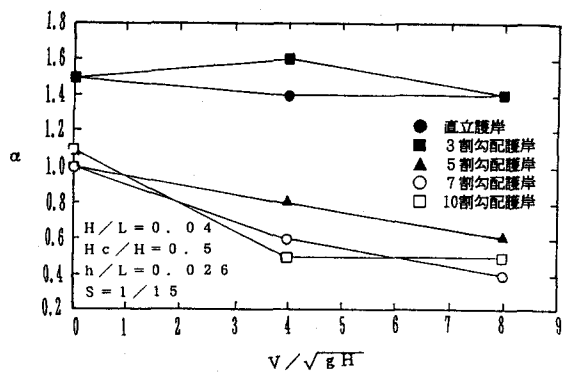


図-28 形状母数と無次元風速との関係

無風時より有風時ほうが小さい。図示はしていないが、特に h/L が大きくなると、風速の増大とともに α が小さくなる傾向が顕著であった。これは、風速が大きくなると、最大越波量と平均越波量との比が大きくなることを意味しており、このことも、緩傾斜護岸の機能設計に際して、特に注意すべきことである。

3. 海面上昇に伴う親水性護岸の越波防止機能の低下予測

近年、わが国においても、地球の温暖化によって起こる海面上昇や台風の大化はきわめて重要かつ現実的な問題として注目されてきた。こうしたことから、高潮時の越波に伴う浸水予測図（松井ら、1992）が発表されたり、また、海面上昇、台風の大化、海岸侵食などによって増大する越波量の推算（山本ら、1992）も行われている。しかしながら、これらの研究はいずれも直立護岸を対象にしたものであり、海面上昇や波浪規模の増大に対して、親水性護岸がどのような越波特性を有しているかについては明らかでない。ここでは、親水性護岸の越波特性に及ぼす海面上昇の影響について検討してみよう。

図-29は、3割勾配護岸の無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ とのり先水深・波長比 h/L との関係である。これによると、越波流量は、いずれの波形勾配 H/L の場合についても、潮位の上昇とともに増加し、特にこの傾向は H/L が小さいほど著しい。また、5割および7割勾配護岸の場合も、図-29とほとんど同じ結果が得られた。特に、潮位が上昇すると、いずれの H/L の越波流量もほとんど同じになるが、このこともり面勾配が変化してもみられることである。

図-30は、各護岸の無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ とのり先水深・波長比 h/L との関係を H/L が0.03の場合について示したものである。これによると、越波流量に及ぼす海面上昇の影響は、のり面勾配が緩やかになるほど著しく、15割勾配護岸の場合には特に著しい。

図-31は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ と波形勾配 H/L との関係を示したものであり、上図と下

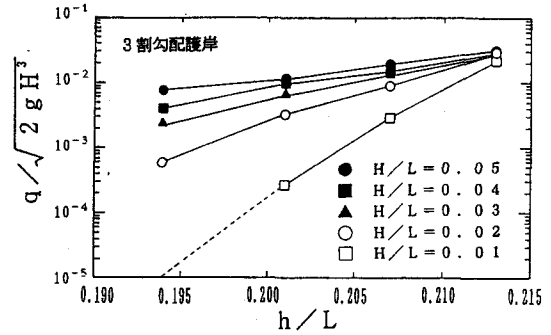


図-29 3割勾配護岸の無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係

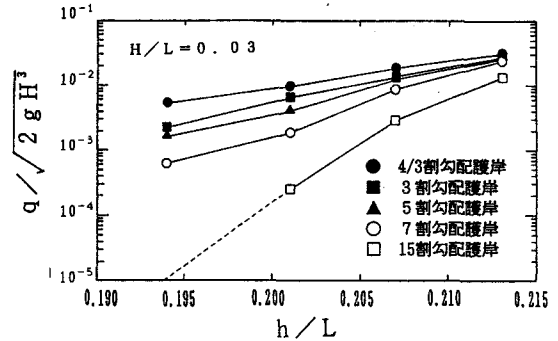


図-30 $H/L=0.03$ の場合の無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係

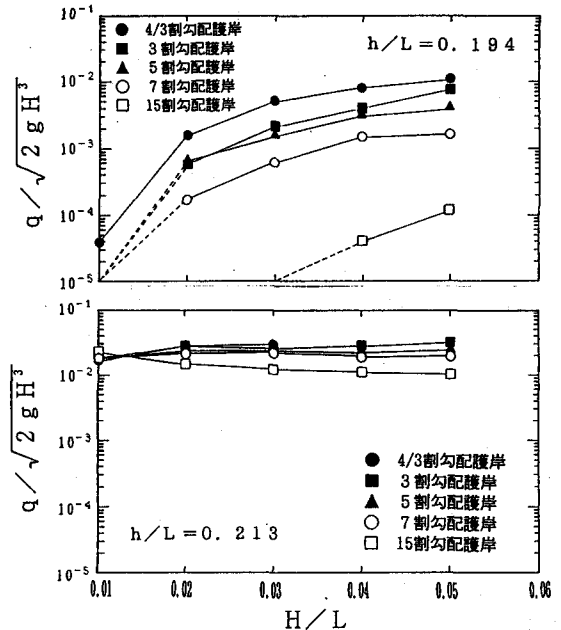


図-31 無次元越波流量と波形勾配との関係

図はそれぞれ h/L が0.194と0.213の場合である。これらによると、いずれの護岸の越波流量も潮位が低いときは H/L の増大とともに増加するが、潮位が上昇した場合には H/L が増大してもあまり変化しないか、むしろ逆に減少するような傾向がみられる。

図-32は、無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ とのり面勾配 $\cot \theta$ との関係を示したものであり、上図と下図はそれぞれ h/L が0.194と0.213の場合である。これらによると、潮位が低いときには、のり面勾配を緩くすることによって越波流量を減少させられるが、潮位が上昇すると越波流量の低減対策としての護岸のり面の緩傾斜化は、その効果がほとんど期待できなくなることがわかる。

最後に、これまでの結果を用いて親水性護岸の越波防止機能の低下予測を行ってみよう。なお、実験の模型縮尺を1/30と想定し、海面上昇については、IPCCの試算（三村ら，1991）の上限値を用い、1990年を基準とし、2030年までに30cm、2060年までに60cm、2085年までに90cm、2100年までに110cmの上昇量があるものとした。

図-33は、1990年と各年の越波流量の比 R の経年変化である。なお、 H/L は0.05である。これによると、4/3割、3割および5割勾配護岸の R はほとんど同じ経年変化を示し、2085年の越波流量は現況の5倍程度であるが、7割勾配護岸のものは2060年ごろから増大し、2085年には現況の10倍になる。一方、15割勾配護岸の R は2030年ごろから急増し、2085年には現況の90倍にも達する。これらの結果から、海面上昇に対し越波防止機能が急激に低下しない護岸のり面勾配の限界は、いちおう7割程度であるといえよう。したがって、のり面勾配が7割よりも緩やかな緩傾斜護岸については、潮位の上昇に対して有効な越波防止対策をあらかじめ講じておくことが望ましい。

4. あとがき

越波現象は海岸における水理現象のなかでもきわめて複雑なものであり、それに関わる要因は数多く、また、それらのわずかな違いによって越波量などが大幅に変化する微妙な現象でもある。このため、現在でもその現象の解明や実務設計のために水理模型実験がひろく行われている。しかし、これによっても、相似律の問題などがあって、量的なものまで精度良く推定できるとは必ずしもいえないのが現状であろう。このようなことから、これまで述べてきた親水性護岸の越波特性についても、越波量などの推定を行う場

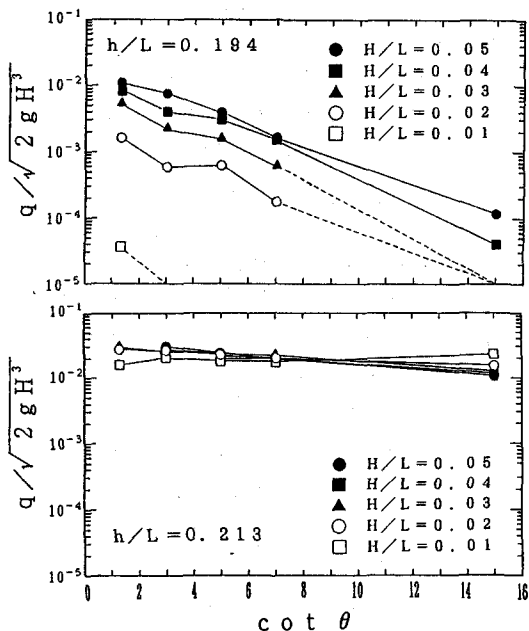


図-32 無次元越波流量とのり面勾配との関係

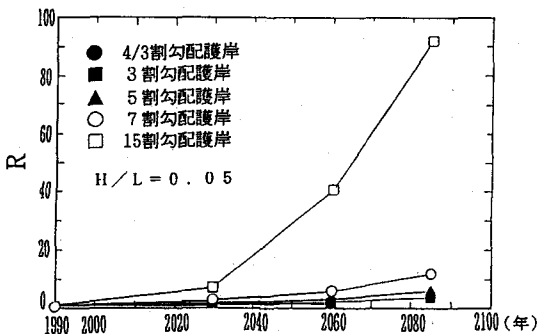


図-33 1990年を基準とした越波流量比の経年変化

合にはある程度の誤差は避けられないが、定性的な傾向は2. および3. に示した成果によってほぼ把握できたものと考えてよかろう。今後、こうした成果を活用していただき、親水性護岸の越波防止機能の向上に努めていただければ、著者の望外の喜びである。

参 考 文 献 (表-1に示したものは除く)

井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘(1994, a) : 親水性護岸の越波防止機能, 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集, (印刷中)。

井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘(1994, b) : 海面上昇に伴う海岸護岸の越波防止機能低下について, 海岸工学論文集, 第41巻, (印刷中)。

合田良実・岸良安治・神山 豊(1975) : 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, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3~44.

小松利光・松永信博・増輪一彦・橋田 操・藤田和夫(1992) : 二次元越波堤による波浪エネルギー獲得に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第8巻, pp. 105~110.

高田 彰(1976) : 規則波の越波量におよぼす風の影響, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 170~175.

豊島 修(1984) : 緩傾斜のり面被覆工法, 海岸, No. 24, pp. 133~144.

豊島 修(1986) : 緩傾斜護岸Q & A, 海岸, No. 26, pp. 95~104.

豊島 修(1987) : 緩傾斜護岸工法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 447~451.

豊島 修(1988) : 続・緩傾斜護岸Q & A, 海岸, No. 28, pp. 51~60.

松井貞二郎・立石英機・磯部雅彦・渡辺 晃・三村信男・柴崎亮介(1992) : 海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1031~1035.

水口 優(1992) : 不規則波の遡上・越波とサーフビート, 第28回水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, pp. B-7-1~B-7-23.

三村信男・磯部雅彦・細川恭史・灘岡和夫(1991) : 地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 936~940.

門司剛至(1989) : ウォーターフロント開発における技術的課題(親水護岸・人工海浜), 第25回水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, pp. B-8-1~B-8-15.

Coastal Engineering Research Center(1973) : Shore protection manual, US Army Corps of Engineers, Govt. Printing Office, Vol. 2, pp. 7-37~7-52.

Iwagaki, Y., Y. Tsuchiya and M. Inoue(1966) : On the effect of wind on wave overtopping on vertical seawalls, Bull. DPRI, Kyoto Univ., Vol. 16-1, No. 105, pp. 11~30.