

直立有孔壁護岸の越波特性とその越波量の推算

井上 雅夫* ・ 島田 広昭** ・ 野村 義一***
渡 会 英明**** ・ 上山 美登里****

1. 緒 言

近年、関西国際空港などのビッグプロジェクトを含め、さまざまな人工島が建設されているが、海岸災害の多いわが国においては、その防災機能の検討はきわめて重要である。特に、大水深域に建設される防波護岸に関しては、波高が水深によって限定されないため、その越波特性を十分に把握していなければならない。これまで、水深・波高比が10までの大水深域に設置される直立および消波護岸については、越波流量の推算図表(合田ら, 1975)が提案され、実務面でもそれが利用されている。しかしながら、越波現象は、潮位や波浪などの自然条件が同じでも、護岸の構造によって著しく異なることが多い。この研究では、大水深域に建設される鉛直消波護岸の代表的なものとして直立有孔壁護岸(以下、有孔壁護岸という)を対象とし、その越波特性を直立護岸のものと比較しながら実験的に検討するとともに、こうした護岸の越波量を簡単な計算によって求める方法を提案した。

2. 有孔壁護岸の越波特性

2.1 実験条件および方法

二次元不規則波造波水槽中に勾配が1/50の模型海浜を設け、その上に図-1に示すような有孔壁護岸と直立護岸の模型を設置して、それらを越波する不規則波群の1波ごとの越波量を詳細に測定した。その結果から、越波率(越波した波の数と全波数の比)、越波流量、代表波法と同様な定義による代表越波量、越波量の出現頻度分布を求め、これらに及ぼす波高、潮位および風の影響について検討した。また、不規則波群のなかで最大越波量を示す波については、越波量の水平および鉛直方向の飛散分布を測定した。この場合、水量としては少量のため計測できないような飛沫の水平および鉛直方向の最大飛散距離も計測した。実験波は不規則波であり、その期待スペクトルは有義波周期が1.0sのBretschneider・光易型である。また、有義波の波形勾配 H/L は0.02、0.03、

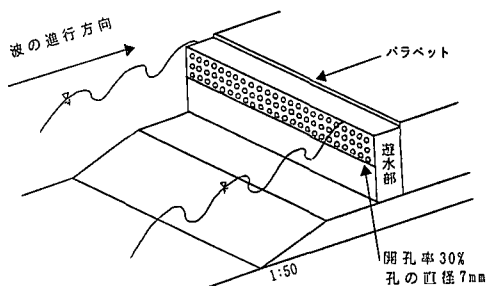


図-1 直立有孔壁護岸

0.04 および 0.05、のり先水深・波長比 h/L は 0.096、0.103、0.109 および 0.115 のいずれも4種類とし、無次元風速 $V/\sqrt{gH}$ は 0、3 および 6 の3種類に変化させた。なお、直立護岸の形状は、波高と潮位の影響を検討した場合で若干異なり、後者の場合には、パラペットの位置を後退させ、有孔壁護岸のものと一致させた。

2.2 波高、潮位および風の影響

図-2は、越波率と波高との関係であり、縦軸は越波率 r_0 、横軸は波形勾配 H/L である。これによると、 r_0 はいずれの護岸でも、 H/L が大きくなるにつれてほぼ一様に増大し、その割合は有孔壁護岸のものより直立護岸のもののほうが大きい。 H/L が大きくなるにつれて r_0 が増大するのは、波高の増大によって相対天端高が小さくなるためである。また、いずれの H/L でも、有孔壁護岸の r_0 のほうが直立護岸のものより小さい。さらに、いずれの護岸でも、無風時より有風時のほうが r_0 は若干大きい、その差も有孔壁護岸のほうがやや小さい。

図-3は、越波率と潮位との関係であり、横軸はのり先水深・波長比 h/L である。これによると、いずれの護岸についても、また風速の大小にかかわらず、 h/L が0.096から0.109までは r_0 は一様に増大するが、 h/L が0.109と0.115とでは r_0 はほぼ同じ値になる。また、有孔壁護岸の r_0 は、潮位が高くなると、直立護岸のものと差が小さくなる。これは、潮位が高くなると、有孔壁護岸の有孔壁と遊水部の効果が小さくなるためである。

図-4は、越波流量と波高との関係であり、縦軸は無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ 、横軸は波形勾配 H/L である。これ

* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 関西大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪市 建設局

**** 正会員 東急建設(株) 技術本部

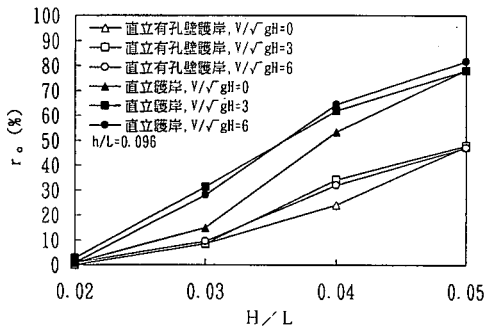


図-2 越波率と波高との関係

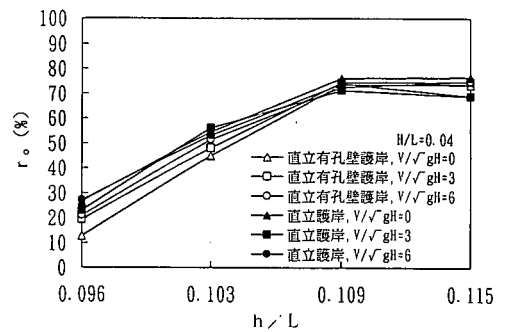


図-3 越波率と潮位との関係

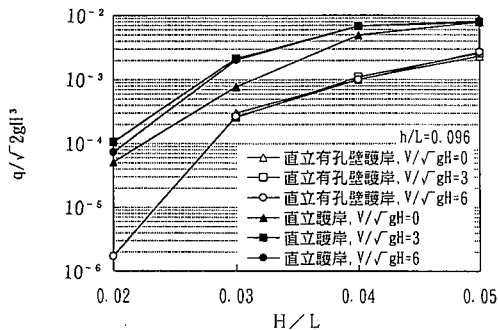


図-4 越波流量と波高との関係

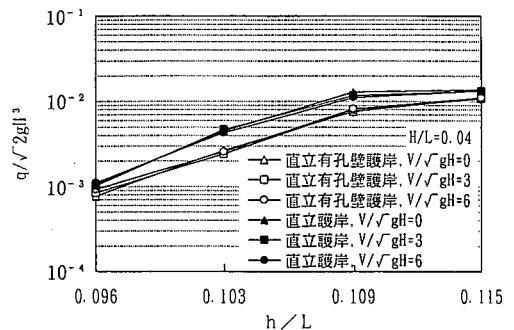


図-5 越波流量と潮位との関係

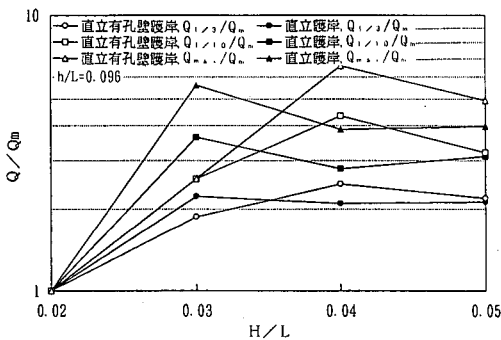


図-6 代表越波量比と波高との関係

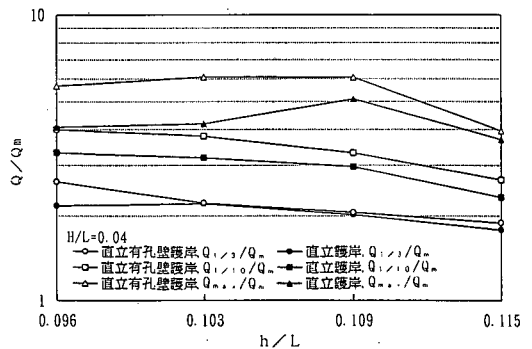


図-7 代表越波量比と潮位との関係

によると、有孔壁護岸のものは、 H/L の増大とともに $q/\sqrt{2gH^3}$ も大きくなる。しかし、直立護岸のものは、 H/L が0.02から0.04までは、 H/L が増大するにつれて $q/\sqrt{2gH^3}$ も大きくなるが、 H/L が0.04から0.05に変化しても、増加する割合はあまり増大しない。これは、波高が大きくなっても越波可能な水量には限界値が存在するためと考えられる。また、有孔壁護岸の $q/\sqrt{2gH^3}$ は、いずれの波高でも直立護岸のものより小さく、波高が大きいほどその減少比は小さくなる。なお、直立護岸では無風時より有風時のほうが $q/\sqrt{2gH^3}$ は若干大きい、有孔壁護岸では風の影響はほとんどみられない。

図-5は、越波流量と潮位との関係であり、横軸はのり先水深・波長比 h/L である。これによると、 $q/\sqrt{2gH^3}$ は、 r_o と同様に、いずれの護岸についても、また、風速の大小にかかわらず、 h/L が0.096から0.109までは一様に増大し、 h/L が0.109と0.115とでは、ほぼ同じ値を示している。こうした傾向については、合田(1975)の越波流量推算図表においてもみられる。また、有孔壁護岸の $q/\sqrt{2gH^3}$ は、いずれの潮位でも直立護岸のものより小さいが、潮位が高くなるとその減少比は小さくなる。これは、前述したように潮位が高くなると、有孔壁と遊水部の効果が小さくなるためである。

このように、有孔壁護岸の越波率や越波流量は、波高や潮位に関係なく、直立護岸のものよりも小さい。しかし、潮位が高くなると、有孔壁と遊水部の効果が小さくなるため、直立護岸のものに対する減少比は小さくなる。さらに、越波率や越波流量に及ぼす風の影響については、有孔壁護岸ではほとんどみられない。すなわち、有孔壁護岸は直立護岸に比べて、風の影響が小さい護岸形状といえる。

図-6は、越波した波だけを対象とした場合の各代表越波量比と波高との関係であり、縦軸は代表越波量比 Q/Q_m 、横軸は波形勾配 H/L である。なお、 $V/\sqrt{gH}$ は6である。これによると、有孔壁護岸については、いずれの Q/Q_m も H/L が0.02から0.04の範囲では増大しているが、 H/L が0.04から0.05に変化すると、むしろ減少している。直立護岸のものは、いずれの Q/Q_m も H/L が0.02から0.03の範囲では増大しているが、 H/L が0.03から0.04になると若干減少し、0.05でもほとんど同じ値になる。なお、無風時の場合もほぼ同様の傾向がみられた。

図-7は、図-6と同様に示した各代表越波量比と潮位との関係であり、横軸はのり先水深・波長比 h/L である。なお、 $V/\sqrt{gH}$ は6である。これによると、直立護岸についての Q_{max}/Q_m を除き、いずれも h/L が大きくなると、 Q/Q_m は全般的にやや減少する傾向を示している。なお、無風時についても、ほぼ同様な結果が得られた。

このように、越波した波だけを対象とした場合の有孔壁護岸の代表越波量比、 Q_{max}/Q_m 、 $Q_{1/10}/Q_m$ および $Q_{1/3}/Q_m$ は、波高が大きくなるとやや増大することもあるが、潮位が高くなると逆に若干減少する。なお、こうした傾向は風速によってはあまり変化しない。

2.3 越波量の出現頻度分布

図-8には、有孔壁護岸について越波した波だけを対象とした場合の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。なお、縦軸は越波流量 q の超過発生確率 $P(q/q_m)$ 、横軸は越波流量と平均越波流量との比 q/q_m である。図中の曲線はWeibull分布であり、この分布の形状母数 α は、実験値から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、(a) 図の無風時および (b) 図の強風時のいずれの場合も、Weibull分布への適合性は良好であり、適合度に風の影響はほとんどみられない。なお、図示はしていないが、直立護岸については、潮位が高いほうが低い場合よりも、また無風時より有風時のほうがWeibull分布への適合性は若干良好であった。

図-9は、図-8に示した有孔壁護岸に関するWeibull分布の形状母数 α と潮位との関係であり、縦軸は形状母

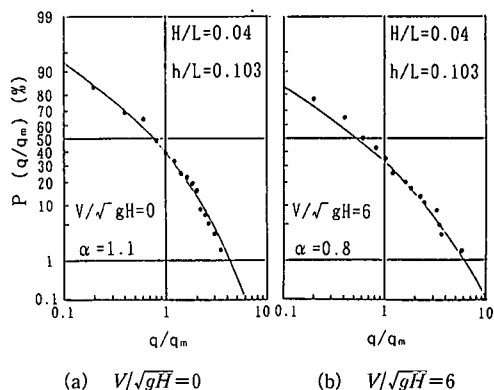


図-8 越波流量の超過発生確率
(越波した波だけを対象とした場合)

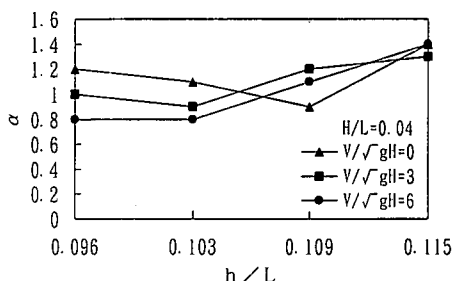


図-9 Weibull分布の形状母数 α と潮位との関係

数 α 、横軸はのり先水深・波長比 h/L である。これによると、有風時には、ほとんどの場合、 h/L の増大とともに α も増大している。また、無風時の場合については、 h/L が0.109で極小値を示している。しかし、ほとんどの場合、 h/L が0.115のとき、 α は最大値を示している。すなわち、潮位が高くなると形状母数 α も大きくなるといえる。なお、直立護岸に関しても、特に強風時の場合には、これとほぼ同様な傾向がみられた。

このように、いずれの護岸についても、越波した波だけを対象とした場合、不規則波群の1波ごとの越波流量の出現頻度分布は、Weibull分布にほぼ適合する。また、Weibull分布の形状母数は、一般に潮位が高くなると大きくなる。特に、有孔壁護岸のものは、潮位が低いと直立護岸のものより若干大きくなる場合が多く、このことは防災面からは好ましい特性である。なお、この形状母数は波高や風速によっては、あまり変化しない。

2.4 越波量の水平および鉛直方向の飛散分布

図-10には、不規則波群のなかで最大越波量を示した1波について、それぞれの護岸の水平方向の越波量飛散分布を示した。なお、縦軸は無次元越波量 Q/H^2 、横軸は護岸から背後への距離 x と有義波高 H との比 x/H である。これによると、無風時の場合、 Q/H^2 はいずれの区間

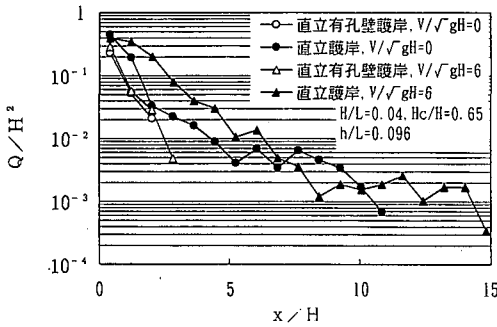


図-10 越波量の水平方向の分布

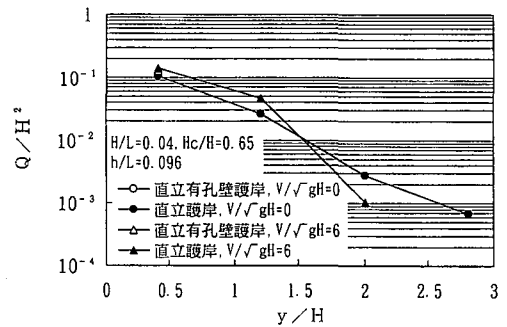


図-11 越波量の鉛直方向の分布

においても有孔壁護岸のものの方が直立護岸のものよりも小さく、飛散距離も有孔壁護岸のほうが短い。 $V/\sqrt{gH}$ が 6 の場合も、無風時のものと同様な傾向を示し、有孔壁護岸の飛散距離は直立護岸のもの約 1/5 である。このように、背後地利用の面からも、有孔壁護岸は有利であるといえよう。

図-11 には、図-10 と同様にそれぞれの護岸の鉛直方向の越波量飛散分布を示した。なお、横軸は護岸天端から鉛直上向きの高さ y と有義波高 H との比 y/H である。これによると、無風時の場合、有孔壁護岸のものは護岸天端直上にしか分布しないが、そこでの Q/H^2 は直立護岸のものとはほぼ同じである。これに対して、直立護岸のものはかなり高くまで分布している。 $V/\sqrt{gH}$ が 6 の場合も、無風時のものと同様な傾向がみられるが、直立護岸の場合には、無風時のほうが強風時よりも高くまで打ち上がって越波している。これらのことから、有孔壁護岸ではあまり高くまで打ち上がらないで、護岸天端直上を越波し、直立護岸のものは護岸に波が衝突し高くまで打ち上がって越波することがわかる。

このように、いずれの護岸の越波量も、風速にかかわらず、護岸から陸側に離れるほど減少するが、その割合は直立護岸よりも有孔壁護岸のほうが大きい。また、有孔壁護岸における越波量の飛散分布は、直立護岸のものに比べて、水平および鉛直方向のいずれについても風の影響は小さい。なお、図示はしていないが、有孔壁護岸における飛沫の水平および鉛直方向の最大飛散距離は、風速に関係なく、いずれも直立護岸に比べて約 1/3 になる。

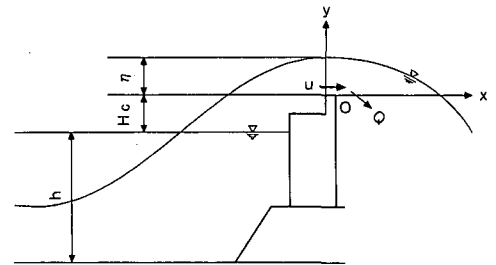


図-12 座標系

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \eta \cdot u dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t_1 および t_2 は越波開始および終了時間である。しかし、ここでは取り扱いをきわめて簡単にするため、天端上の時間波形を三角波形として、越波時の最高水位 $\eta_{\max}$ と最大流速 $u_{\max}$ を用いて、越波量 Q_c を式(2)で計算することにした。

$$Q_c = \frac{1}{2} \eta_{\max} \cdot u_{\max} \cdot (t_2 - t_1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、護岸前面の波形は、微小振幅波理論によって、直立護岸の場合には完全重複波、有孔壁護岸の場合には部分重複波とした。なお、有孔壁護岸の反射率は実験的に求めた 0.9 で一定とした。また、越波時間については、重複波の波頂が天端上を通過する時間から求めた。さらに、越波時の流速については、碎波しないで越波する場合の y 方向における平均流速の最大値 $u_{\max}$ を式(3)によって求めた(井上, 1973)。

$$u_{\max} = \frac{2}{3} \sqrt{2g\eta_{\max}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 計算値と実験値との比較

3. 越波量の推算

3.1 計算方法

図-12 に示すように、 x および y 軸をとり、越波量が天端上における越波時の水位 η と流速 u の積で表わせるものとすれば、1 周期当たりの越波量 Q は、式(1)で示される。

図-13 は、越波量の実験値 Q_e と式(2)によって求めた越波量の計算値 Q_c とを比較したもので、縦軸は実験値、横軸は計算値のそれぞれ無次元量である。なお、図中の直線はそれぞれ次式で表される回帰式である。

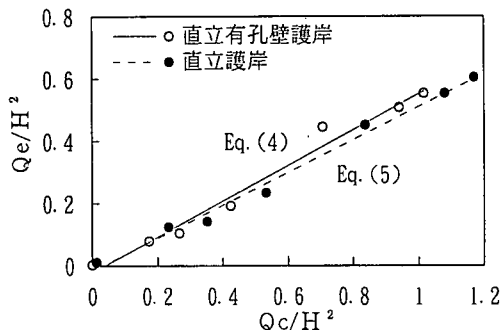


図-13 越波量の計算値と実験値の比較

有孔壁護岸

$$Q_e/H^2 = 0.574(Q_c/H^2) - 0.022 \quad (0 \leq Q_c/H^2 \leq 1.02) \quad (4)$$

直立護岸

$$Q_e/H^2 = 0.527(Q_c/H^2) - 0.017 \quad (0 \leq Q_c/H^2 \leq 1.17) \quad (5)$$

これらによると、回帰直線の傾きは、有孔壁護岸のもののほうが直立護岸のものよりも若干大きい。すなわち、同一の実験値に対し、有孔壁護岸の計算値を直立護岸のものに比べると、わずかではあるが小さく評価している。これは、有孔壁護岸の越波量の計算に際して、反射率を0.9と一定にしたが、波高や潮位が大きくなると、2.で示したように有孔壁や遊水部の効果が小さくなり、実際には反射率は大きくなる。したがって、このような場合には、反射率を大きくすると、越波量の計算値も当然増大することになる。しかし、いずれの護岸についても、越波量の計算値は実験値よりもかなり大きい。これは、越波量の計算には越波時の水位や流速に関して、それらの最大値を用いたためである。そこで、越波量の計算値と実験値とを一致させるために、越波量係数 c を式(6)のように定義した。

$$Q_e = c \cdot Q_c \quad (6)$$

図-14は、この越波量係数 c と波高・水深比 H/h との関係である。これによると、有孔壁護岸の $H/h=0.285$ のものを除くと、 c は約0.4~0.6の範囲であり、護岸の形状や H/h の影響はあまりみられない。また、 H/h が約0.45以上になると、有孔壁護岸のものの方が直立護岸

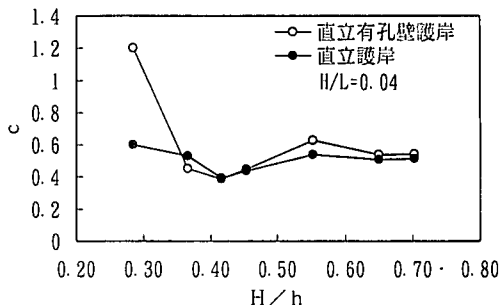


図-14 越波量係数と波高との関係

のものよりもやや大きい。これは、前述したように有孔壁護岸の越波量の計算値を小さく評価したためと考えられる。なお、有孔壁護岸の $H/h=0.285$ のものは、越波量がきわめて小さい場合のものである。

このように、いずれの護岸の場合についても、ここで提案した方法によって求めた越波量の計算値は、越波量係数を乗ずれば、実験値とよく一致する。なお、越波量係数は0.4~0.6であり、この値は潮位が一定であれば、波高にはほとんど関係しない。

4. 結 語

以上、大水深域に建設される鉛直消波護岸の代表的なものとして有孔壁護岸を取りあげ、その越波特性を直立護岸のものと比較しながら検討するとともに、その越波量を簡単な計算によって求める方法を提案した。その結果、有孔壁護岸は直立護岸に比べて、いくつかの優れた越波防止機能を持つことがわかった。また、越波量の推算は、いちおう可能になったが、その計算に際しては、反射率や越波量係数を実験的に求める必要があり、今後、越波機構を詳細に調べることによって、越波量の推算方法を改善していかなければならない。

最後に、本研究に際して大いに助力してくれた、現在、三井共同建設コンサルタント(株)の楠昌和、建設省近畿地方建設局の阪倉利彦、佐伯建設工業(株)の杉山剛史、関西大学大学院の藤野真人の諸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 井上雅夫(1973): 海岸堤防の越波機構について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 107-112.
- 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, 運輸省港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.