

強風作用下における護岸越波量の飛散距離分布特性

池野正明* ・阿部宣行** ・鹿島遼一***
溝辺 哲**** ・岡部成光*****

1. はじめに

日本全国各地に数々の被害を与えた台風 9119 号の来襲時のような強風作用下では、無風時に高波浪が来襲する場合よりも越波後の水塊が陸上へ打ち込まれる飛散距離が増大する可能性があるため、護岸背後用地への浸水防止に有効な越波排水路壁の設計等の際には、この風の効果を十分考慮にいれる必要がある。風速と越波の飛散分布の関係については、高田 (1969, 1976) が規則波を対象として系統的に研究している。また、西村・入江 (1972) や福田ら (1973) は現地観測により飛散分布を検討している。しかし、不規則波を対象とした飛散分布については定量的に十分に検討されていない (井上ら, 1992)。

本研究は、風洞付 2 次元造波水路を用いた各種護岸の越波実験を実施し、風速と越波量の飛散距離分布との関係を詳細に検討するとともに、強風時の越波に対して護岸背後用地への浸水防止に有効な越波排水路の規模について考察したものである。ただし、本研究では越波の飛散現象を巨視的に取扱い、水量として集水可能な越波水塊のみを対象としており、石田ら (1982) のように飛沫は対象としていない。

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

図-1 に示す風洞付 2 次元水路を用いて水理模型実験を実施した。この水路の岸側床の高さを変化させることにより、護岸模型前面の海底勾配は 1/50 とした。模型縮尺はフルードの相似則に従い 1/35 とした。ただし、本実験では、風速が護岸背後への越波の飛散距離に及ぼす影響を検討するため、風の有無によって護岸構造物設置地点の波浪諸元に差が生じないように、水路と風洞との間に仕切り板を設置し、風が越波水のみに作用するように努めた。本研究では、水量として集水可能な越波水塊の

飛散現象を対象としているため、風速に対してもフルードの相似則が準用できると仮定しその縮尺を $1/\sqrt{35}$ とした。風速の測定はトランジスタ熱センサー式微風速計を用いた。また、入射波の検定および護岸による反射率の推定には容量式波高計を用いた。

越波水は、図-2 に示す越波水採水升により測定した。採水升は、護岸前面壁から背後へ実スケール換算で 120 m (このうち護岸の幅 15 m) に相当する地点まで 5.25 m 毎に 20 区間に仕切られて設置されている。このうち、護岸背後付近の 3 区間は、越波水が集中して飛び込むため、採水升から溢れないように、随時ポンプアップした。

なお、本研究では、護岸背後の越波量に対し排水機能上最も厳しい状態を想定し、護岸上の排水路をあらかじめ満水状態にして実験を実施した。越波水の測定時間は、入射波を 100 波以上作用させることを考慮して 300 秒間とし各区間の採水升の採水量とその総和を測定時間と採水升奥行幅 30 cm で除して時間平均越波流量を算出した。また、ガラス張りの水路側面外側にビデオカメラを設置し護岸上の越波水のはね上がり高さの頻度分布を測定した。

(2) 実験条件

以下では模型値の実スケール換算値を () 内で記述する。護岸の設置水深 h は 32 cm (11.24 m, H.H.W.L. + 3.84 m に相当) とした。実験に用いる風速 U は定常風速とし護岸付近の海上 31 cm (10 m) の位置で 4.2 m/s (25 m/s) および 8.5 m/s (50 m/s) の値になるように設定し

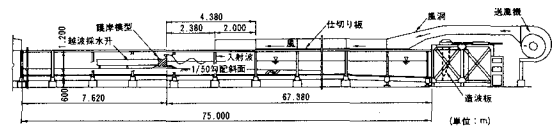


図-1 風洞付き 2 次元造波水路

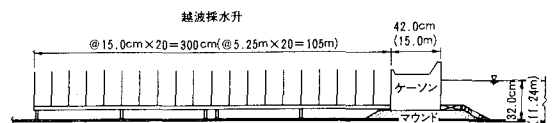


図-2 越波水採水升

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
** 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 参事
**** 正会員 九州電力株式会社 若北発電所建設所
***** 正会員 工修 九州電力株式会社 土木部

た。実験に用いる入射波は、Bretschneider-光易型周波数スペクトルを有する不規則波とし沖波有義波高 H_0 と有義波周期 $T_{1/3}$ を 16.8 cm と 2.0 s (5.9 m と 12 s), 18.0 cm と 2.5 s (6.3 m と 15 s), 19.0 cm と 3.0 s (6.7 m と 18 s), 22.3 cm と 2.0 s (7.8 m と 12 s), 15.4 cm と 2.5 s (5.4 m と 15 s), 20.6 cm と 2.5 s (7.2 m と 15 s) の 6 種類とした。

対象とする護岸は、図-3(a) (b) (c) に示すように、直立護岸、消波ブロック前面被覆護岸および離岸堤付き直立護岸の 3 タイプとした。また、パラペット天端高の高

上げによる越波量と飛散距離の低減効果も検討するため、パラペット天端高 h_c を 3 種類変化させた。離岸堤は護岸ケーソン前面壁から 285.7 cm (100 m) 沖に設置し、天端高 h_r と天端幅 B_r の異なる 3 種類を検討対象とした。なお、消波工や離岸堤に用いる消波ブロックは乱積みとし、0.9~1.3 kg のテトラポットを使用した。

3. 各種護岸背後の地点別越波量に及ぼす風速の影響

(1) 地点別越波量の全区間積分値と既往の越波量との比較

図-4 は、本実験による無風時・有風時の地点別越波量の全区間積分値と高山ら (1982) や高山・池田 (1988) の既往の実験結果に基づく推定値を比較したものであり、図-4(a) が直立護岸の場合、図-4(b) が消波護岸の場合に対応する。図-4 になると、本実験値は高山らの推定値を若干上回る傾向にあるが、両者の差は合田ら (1975) や合田 (1990) による越波量の推定誤差の範囲内にあると判断できる。

(2) 護岸上のはね上がり高さの頻度分布

図-5 は、越波水塊の静水面上跳ね上がり高の頻度分布を示したものであり、図-5(a) が直立護岸の場合、図-5(b) が消波護岸の場合に対応する。図-5(a) によると、直立護岸の場合は、入射波が護岸前面で完全反射に

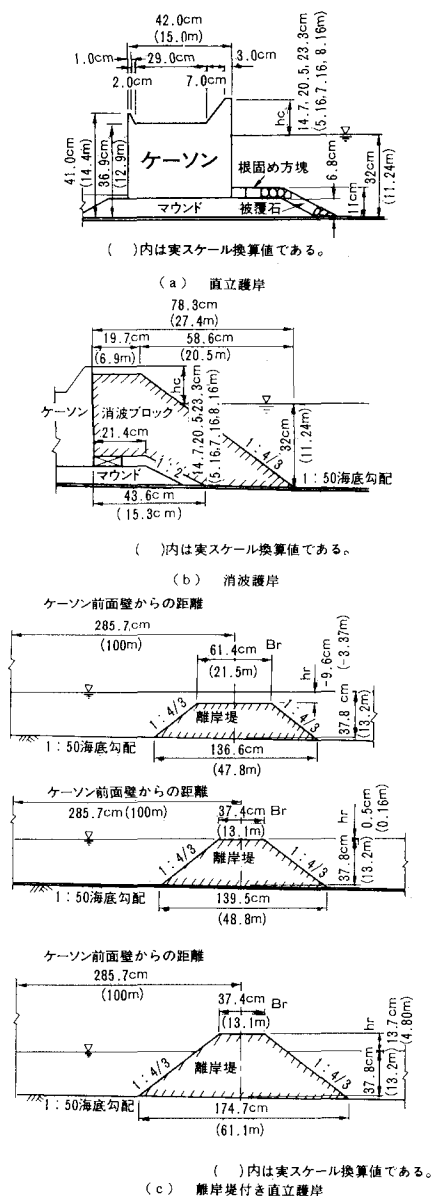


図-3 護岸模型

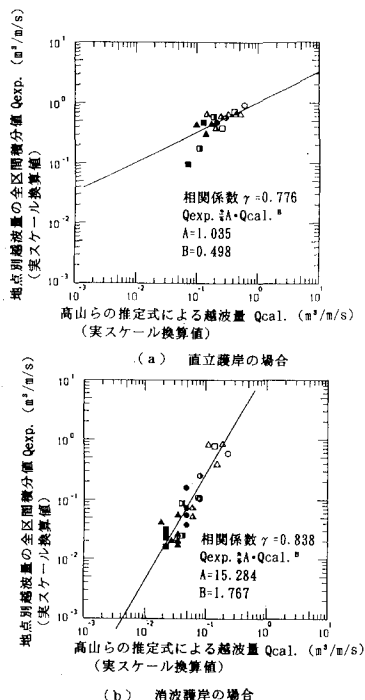


図-4 地点別越波量の全区間積分値と高山ら (1982) の推定値との比較

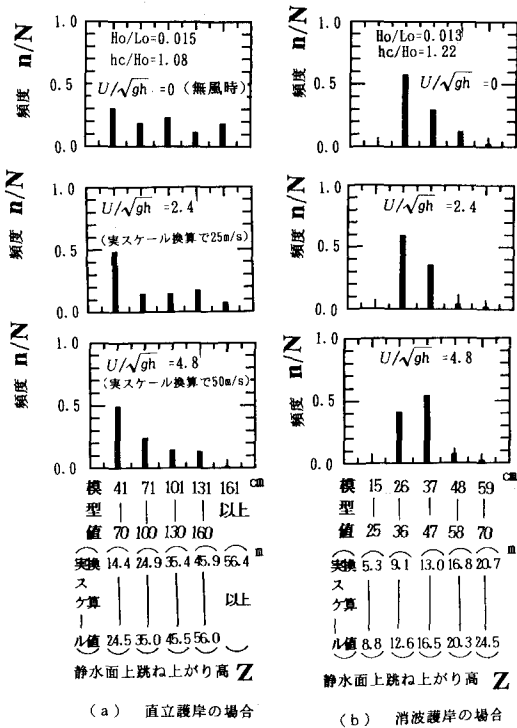


図-5 越波水塊の静水面上跳ね上がり高の頻度分布

近い状態で直立壁に激しくぶつかるため、跳ね上がり高の最大値は、実スケール換算で56 mにも達する。また、パラベットを嵩上げしても、跳ね上がり高の顕著な低下は認められない。図-5(b)によると、消波工を設置した場合の跳ね上がり高の最大値は実スケール換算で25 mとなり、直立護岸の場合の1/2以下に低下している。

(3) 風速と地点別越波量の関係

図-6は、護岸越波量の飛散距離分布を示したものである。図の横軸が護岸ケースン前面壁から背後への距離 Y と沖波波高 H_0 との比、縦軸が地点別時間平均越波量の無次元量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を表している。

図-6(a) と (b) が各々同じパラベット天端高の直立護岸と消波護岸の場合の結果であり、○印、△印、□印が、各々無風時 ($U/\sqrt{gh}=0$) で、3種類の沖波波形勾配 H_0/L_0 の場合に対応する。また、■印と*印は H_0/L_0 が最も小さいケースで、各々風速 U が実スケール換算で25 m/s ($U/\sqrt{gh}=2.4$) と50 m/s ($U/\sqrt{gh}=4.8$) の場合に対応する。図-6の(a)と(b)と比較すると、直立護岸・消波護岸の場合とも、越波水の飛散距離は風速の増加とともに長くなっている。また、無風時・有風時とも、消波護岸の場合の地点別越波量は陸上域へ進むに従い(図-6の横軸 Y/H_0 の値が大きくなるに従い)、直立護岸の場合よりも急な勾配で減少している。

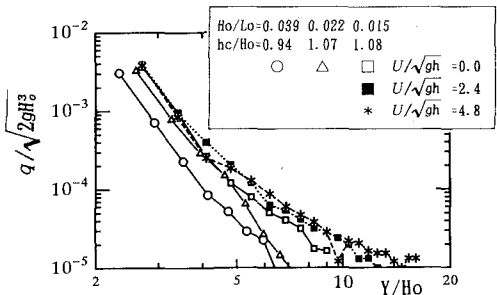
つぎに、図-6(c)は、離岸堤付き直立護岸の地点別越

波量を比較したものである。図中、白ぬき印と黒塗り印が護岸パラベットと離岸堤の天端高の異なる2種類のケースに対し、丸印、三角印、四角印が、各々無風、風速 U が実スケール換算で25 m/sの場合、 U が実スケール換算で50 m/sの場合に対応する。図-6(c)によれば、無風時・有風時とも、離岸堤の天端高が高くなると、越波量と飛散距離は著しく減少している。また、図-6の(b)と比較すると、同程度のパラベット天端高で消波工とほぼ同じ断面積となる離岸堤付き直立護岸の地点別越波量(図(c)中黒塗り印)は、陸上域へ進むに従い、消波護岸の場合と同程度の勾配で減少している。

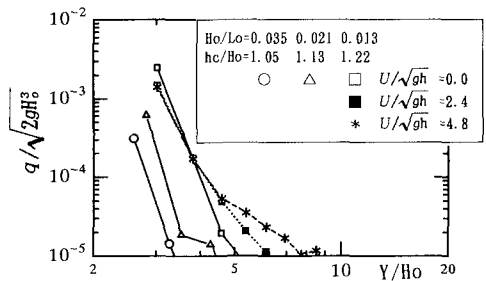
4. 各種護岸越波量の累積飛散率分布に及ぼす風速の影響

(1) 風速と越波量の累積飛散率分布との関係

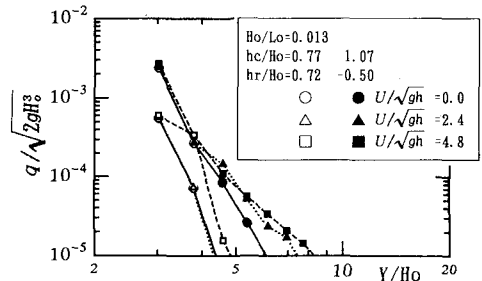
図-7は、護岸越波量の累積飛散率分布を示したもの



(a) 直立護岸の場合



(b) 消波護岸の場合



(c) 離岸堤付き直立護岸の場合

図-6 護岸越波量の飛散距離分布

である。図の横軸が図-6と同様に Y/H_0 、縦軸が地点別時間平均越波量とその全区間積分値の比の累加百分率 $q(Y)/Q$ を表している。図-7(a) (b) (c) は、各々図-6と同じ実験ケースに対応する直立護岸、消波護岸、離岸堤付き直立護岸の場合の結果である。

図-7の(a)と(b)を比較すると、風速の増加に伴い直立護岸の越波量の累加百分率曲線が横軸 Y/H_0 の右方向にシフトする傾向が、消波護岸の場合に比べて小さくなっている。これは、直立護岸の越波量は同じパラペット天端高の消波護岸の越波量よりも大きく、相対的に大きな越波水塊は風により遠くに運ばれにくくなるためであると考えられる。つぎに、図-7(c)と(b)を比較すると、同程度のパラペット天端高で消波工とほぼ同じ断面積の離岸堤付き直立護岸の場合(図(c)中黒塗り印)には、風速の増加に伴い越波量の累加百分率曲線が横軸 Y/H_0 の右方向にシフトする傾向が、消波護岸の場合に比べて小さい。

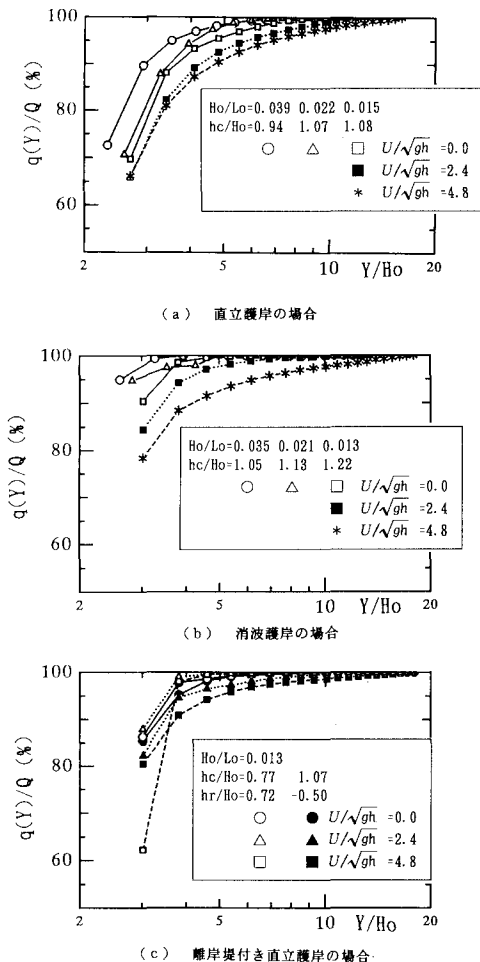


図-7 護岸越波量の累積飛散率分布

次に、図-8は、図-7に示した同程度のパラペット天端高となる3タイプの護岸越波量の累積飛散率分布の結果に基づき、同一の累加百分率を与える Y/H_0 と風速無次元量 $U/\sqrt{gh}$ との関係を整理したものである。図中の白ぬき印と黒塗り印は累加百分率が各々90%と95%に対応する。また、丸印は直立護岸、三角印は消波護岸、四角印は離岸堤付き直立護岸に対応している。ただし、離岸堤付き直立護岸は消波工とほぼ同じ断面積となる場合のものである。図-8によると、無風時 ($U/\sqrt{gh}=0$) には、累加百分率90%と95%に対応する横軸 Y/H_0 の値が直立護岸、離岸堤付き直立護岸、消波護岸の順に小さくなっている。 $U/\sqrt{gh}=2.4$ の場合には、90%と95%に対応する Y/H_0 の値は直立護岸が最も大きく、消波護岸と離岸堤付き直立護岸はほぼ同じ Y/H_0 の値となっている。さらに、 $U/\sqrt{gh}=4.8$ の場合には90%と95%に対応する Y/H_0 の値が直立護岸、消波護岸、離岸堤付き直立護岸の順に小さくなっている。

(2) 強風時の越波に対して護岸背後用地への浸水防止に有効な越波排水路の規模について

前節の図-8によれば、施工時等に離岸堤よりも経済的な消波護岸の飛散距離低減効果は十分あると判断できる。そこで、図-8と図-5に示した越波水塊の護岸上の跳ね上がり高の結果に基づき、消波護岸に有義波高8m、有義波周期18s程度の高波浪が来襲する場合を想定して、強風時に総越波量の95%までを捕捉するための越波排水路陸側壁の設置位置と高さを検討した例を図-9に示す。不規則波の跳ね上がり高は絶えず変動し現象が複雑である。しかも、護岸上で跳ね上がった水塊を質点とみなすと、水塊は風速と重力的作用により、放物曲線を描いて陸上へ落下すると考えられる。ここでは、簡単に

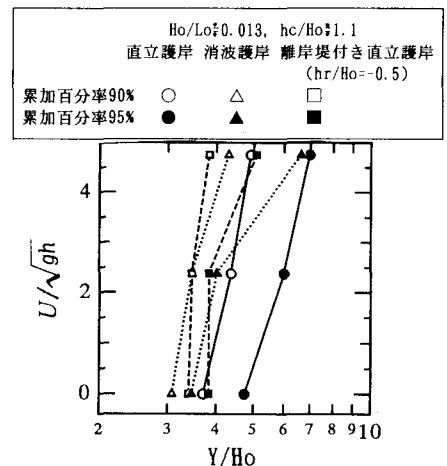
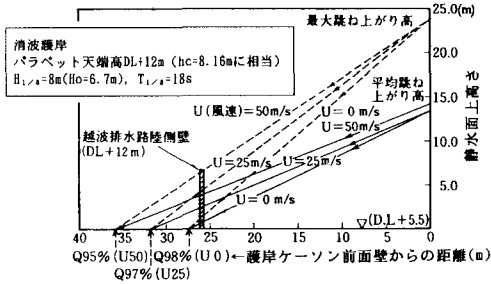
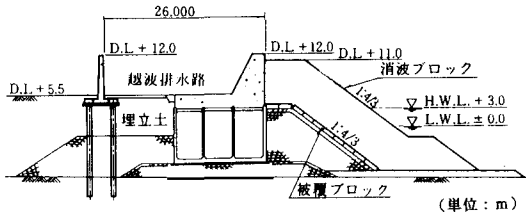


図-8 同一の越波量累加百分率を与える Y/H_0 と $U/\sqrt{gh}$ の関係



図一9 消波護岸背後の越波排水路壁の設置位置と高さの選定例



図一10 消波護岸の場合の越波排水路の試設計例

取り扱うために、越波水が、護岸上で跳ね上がり高の最大値あるいは平均値に対応する高さから、捕捉すべき越波量の累加百分率に対応する飛散地点まで直線軌道で落下すると仮定して検討した。図一9によると、風速50 m/s程度の作用下の消波護岸では、護岸のパラベット天端高をDL+12 m程度にし、護岸ケーソン前面壁から陸上へ26 m程度の地点にパラベット天端高と同程度の高さの排水路壁を設置すれば時間平均越波量を0.05 m³/m/s以下にしその95%を排水路壁により捕捉できると推定される。これを検証するため、消波護岸背後に上記の規模の排水路壁を実際に設置して模型実験を実施したところ、要求どおりの越波量捕捉機能が確認できた。

図一10に、上記の検討に基づく越波排水路の試設計例を示す。

5. おわりに

以上、本研究では、各種護岸の越波実験を実施し、風速と越波量の飛散距離分布との関係を詳細に検討した。つぎに、実験結果に基づき、強風時の越波に対して護岸背後用地への浸水防止に有効な越波排水路の規模について考察を加えた。

最後に、本研究を実施するにあたり、(株)土木技術開発、(株)CRS、五洋建設株式会社の協力を得たことを付記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 石田 昭・花田昌彦・細井正延 (1982): 飛沫の発生に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 385-388.
- 井上雅夫・島田広昭・円間弘起 (1992): 緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 586-590.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333 p.
- 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, 港湾技術研究報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 高山知司・池田直太 (1988): 広天端潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, pp. 63-92.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.
- 高田 彰 (1969): 越波の飛散分布におよぼす風の影響(1)―風速と水平飛散分布―, 第16回海岸工学講演会論文集, pp. 277-288.
- 高田 彰 (1976): 規則波の越波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.
- 西村一男・入江 功 (1972): 防波護岸の越波に関する現地観測(第1報), 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江 功 (1973): 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 113-118.