

現地観測による越波飛沫特性について

山城 賢¹・吉田明德²・西井康浩³
橋本裕樹⁴・石堂 濯⁵・加嶋武志⁶

暴浪時に防波堤や護岸に作用した波が水煙状に高く打上がり、それが強風によって背後地に飛散する越波飛沫について現地観測が行われた例は少なく未解明な部分が多い。本研究では山口県下関市にある和久漁港地区を観測フィールドとし、直立防波堤で生じる越波飛沫について 2005 年 12 月から 2006 年 2 月にかけて計 3 回の現地観測を行った。観測項目は波浪、風向風速、飛沫量、飛来塩分量、打上げ高および飛沫輸送距離で、これらの観測結果から、直立防波堤での打上げ高は来襲波浪の波高の 2 乗に比例して増大し、打上げの規模が大きくなるに従って飛沫の輸送距離が増大することなど、越波飛沫の特性について幾つかの重要な知見を得た。

1. はじめに

従来の防波堤等の設計においては、飛沫の発生や飛来塩分による周辺地域への影響が考慮されることは少ない。その理由としては、飛沫が構造物の破損等重大な損害を生じないことや飛沫の発生および輸送過程が複雑であることなどが挙げられる。しかし、実際には沿岸部で生じる飛沫により、海岸道路の交通障害や塩害等の被害が全国各地で生じていることが加藤ら (1999) により報告されている。海面で波が碎波することにより発生する飛沫や飛来塩分の輸送特性については、例えば、村上ら (1995) の植栽による飛沫低減効果に関する研究や、松永ら (1995, 1996) の風洞水路実験による飛沫の発生と輸送過程における飛沫量の低減率に関する研究、山田ら (2003, 2004a) の現地観測と数値計算による飛来塩分の輸送に関する研究などがあり、飛来塩分の輸送過程について解明されつつある。一方で、防波堤や護岸に着目し、特に堤体に衝突した波が水煙状に高く打上がり、強風によって背後地に飛散する越波飛沫に関する研究としては、松永ら (1994) による消波護岸での飛沫の発生と輸送に関する実験、樋田ら (1999) による消波護岸で生じる飛沫の現地観測、木村ら (1998, 2001, 2002, 2003) による道路護岸や埋立地の護岸を対象とした打上げと飛沫の飛散特性に関する一連の研究、山田ら (2004b) の構造物で生じた飛沫による飛来塩分の輸送に関する現地観測と数値計算などがある。しかしながら、越波飛沫の現象は構造物の緒元や海底および周辺の地形条件等が強く影響するため、防波堤や護岸等の構造物における飛沫の発生と輸送過程に関する知見は未だに十分とはいえない。

本研究では、山口県下関市にある和久漁港地区を観測フィールドとし、暴浪時に直立防波堤で生じる大規模な打上げとそれに伴う越波飛沫について観測を行った。なお、観測では波浪、風向風速、飛沫量、飛来塩分量、打上げ高および飛沫輸送距離について計測したが、本論文では特に直立堤での打上げと越波飛沫の輸送について検討し、背後地における飛来塩分量については議論しない。

2. 観測内容

(1) 対象地区の概略

対象地域である和久漁港地区は山口県下関市にあり、日本海に面している。図-1 に当該地区の位置および概略を示す。和久漁港は北西方向に港口を有しており、特に冬季風浪時には暴風暴浪に晒される。そのため、港口から約 70 m 沖に図-2 に示す直立防波堤 (天端高 7.1 m, 堤体幅 13.1 m, 延長 140 m) が設置され、これにより暴浪を防ぎ港内の静穏度が確保されている。しかしながら、暴浪時には直立堤で図-3 に示すような大規模な打上げが頻繁に生じ、発生した飛沫や海塩粒子が強風で陸域に運ばれ、地区全体で窓枠の錆などの家屋被害、植木の枯死、洗濯物が干せないなどの塩害が生じている。地



図-1 和久漁港地区の位置および概略

1 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門
2 正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院環境都市部門
3 正会員 柳三洋コンサルタント
4 正会員 国土技術政策総合研究所
5 若葉建設㈱
6 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

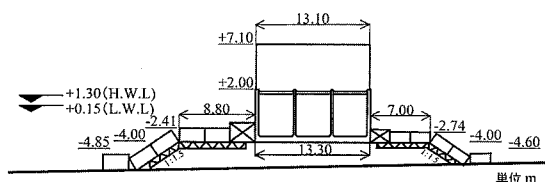


図-2 直立防波堤の断面図

域住民によれば、40 m 以上の打上げが生じ、地区の中央を通る国道付近まで飛沫が雨のように降ることもあるとのことであった。

(2) 観測項目

観測は冬季の暴浪時を対象に、2005 年 12 月 13 日と 22 日および 2006 年 2 月 8 日の計 3 回実施した。観測項目は、外力である波浪および風向風速、飛沫の供給源となる打上げ高、飛散過程を把握するための飛沫の輸送距離、越波飛沫量、飛来塩分量である。それぞれの観測位置を図-1 に示している。波浪は直立堤による反射波ができるだけ影響しない位置（水深約 13 m）の海底に設置した波高計（協和商工㈱製 DL-3 型）により 2005 年 11 月から 2006 年 3 月まで連続的にサンプリング間隔 0.5 秒で観測した。風向風速は、プロベラ式風向風速計（コーナシステム㈱製 KADEC21-KAZE）を漁港にある岩の頂上に設置し、連続的にサンプリング間隔 2 秒で計測を行った。なお、設置高は地表面からおよそ 5 m で海面からは DL+11.3 m である。越波飛沫量の測定は、多量の飛沫が落下する防波堤に比較的近い範囲に転倒杓式雨量計（Davis 社製 Model7852）を 12 台設置して行った。転倒杓式雨量計は 0.2 mm の降水量（飛沫量）毎に計量杓が転倒し、その時刻が記録される。なお、第 3 回観測では 2 つの雨量計（図中の R1-1 および R2-4）の位置を変更している。水量として計測できない飛来塩分（海塩粒子）については、樋田ら（1999）を参考に金網籠にガーゼを入れたものを地区全域に満遍なく 30 箇所程度設置し、これにより飛来塩分を採取した。設置位置は民家の間の細い路地などで、地上 1 m から 4 m 程度の高さである。観測終了後に採取したガーゼは密閉容器に保管し、RO 膜水 50 ml でガーゼを洗浄し、十分に塩分を溶出させ、電導度計（WTW 社製 Cond340i）により NaCl 換算で塩分濃度を測定した。打上げ高と飛沫輸送距離の観測は直立堤をほぼ真横に望める約 2 km 南の岬から図-4 に示すようにビデオカメラ 3 台を用いて、それぞれ防波堤近傍、漁港、全景（防波堤から漁港までを含む）を連続撮影した。打上げ高（ R ）および飛沫輸送距離（ D ）は、図-3 に示すように個々の打上げについて画像記録からピクセル単位で距離を計測し、打上げ高は防波堤上に設置されている赤灯台と白灯台の高さの

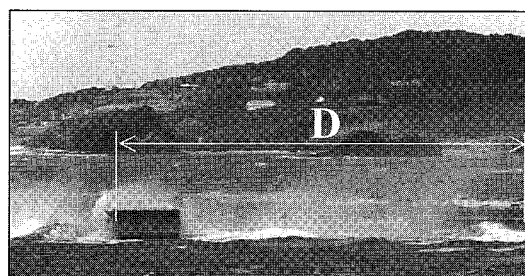
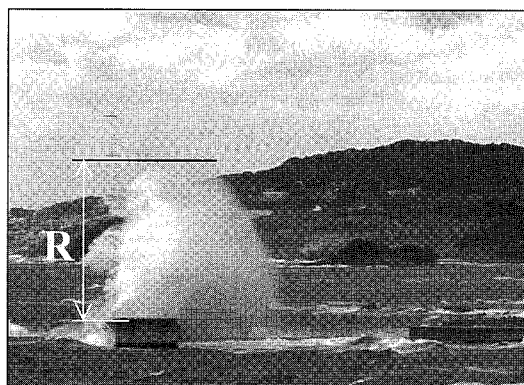


図-3 打上げと飛沫の飛散



図-4 ビデオカメラ設置状況

平均を、また輸送距離は直立堤の天端幅を、それぞれ基準として換算した。したがって、打上げ高は天端からの高さで、飛沫輸送距離は防波堤前面からの飛距離として整理している。なお、ここでの飛沫輸送距離とは、画像記録から目視で判別できる飛沫の最大飛距離を意味しており、海塩粒子を含め目視で判別できないほど細かい飛沫は考慮していない。

3. 観測結果

(1) 観測結果の概略

観測記録（風速、風速ベクトル、平均水位、有義波高、打上げ高、飛沫輸送距離、飛沫量）の時系列を図-5 に示す。平均水位は波高計設置位置における 20 分間毎の

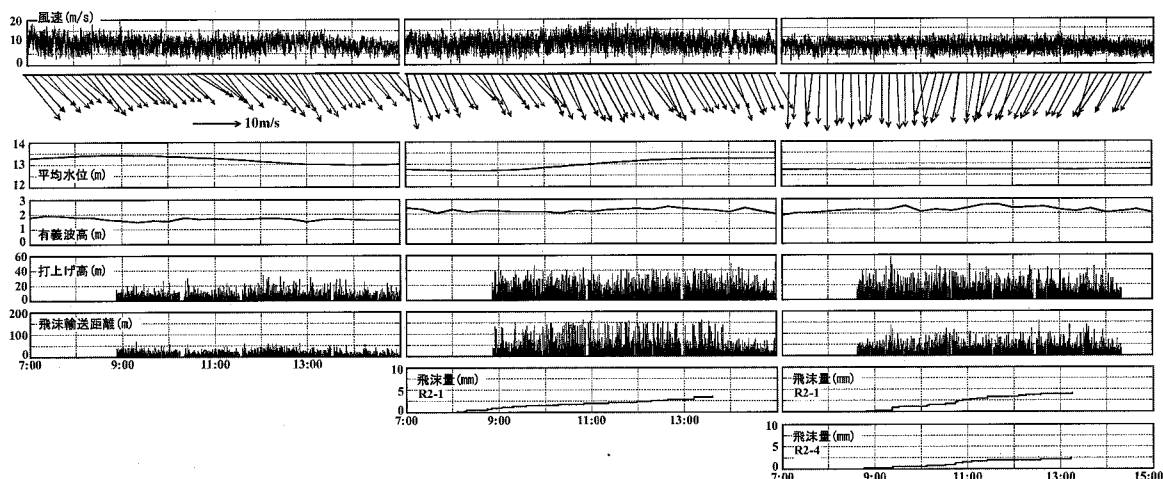


図-5 観測記録(左図:第1回観測(2005年12月13日),中図:第2回観測(2005年12月22日),右図:第3回観測(2006年2月8日))

平均水深であり、有義波高も同じく20分間毎に算出したものである。飛沫量は雨量計の記録をそのまま示しており、雨量計の設置位置は図-1に示している。3回の観測ともに風速は瞬間的に大きく変動しているものの、平均的には10 m/s程度で安定していた。10分間平均の風速ベクトルをみると、風向は第1回観測(2005/12/13)ではNW、第2回観測(2005/12/22)ではNNWで比較的安定しているが、第3回観測(2006/2/8)では観測中にNからNEに変化している。潮位変動は日本海側であることから小さく、最大で50 cm程度の変動であった。有義波高は第1回観測に比べ第2回および第3回の観測時が大きく、打上げ高と飛沫輸送距離についても、同様に第2回および第3回観測の方が大きい。また、全3回の観測において打上げ高と飛沫輸送距離の時系列はよく似ており、両者に強い相関があることが伺える。飛沫量については時間とともに徐々に増加していることがわかる。なお、飛沫量は実際には多くの地点で計測されたが、沖の直立防波堤による飛沫のみを計測できたと思われる記録だけを示し、沖の直立堤以外の防波堤で生じた飛沫が大きく影響していると思われるものは示していない。表-1に各観測値の時系列記録から算出した統計量を示す。第2回および第3回観測時の波高・周期、打上げ高、飛沫輸送距離は同程度であり、第1回観測時に比べていずれも大きい。平均風速については、全3回の観測において同程度であり、卓越風向はNWからNNEである。平均風速の差が小さいことから、飛沫輸送距離の違いは、来襲波浪の大きさによる打上げ高の規模の違いが原因と考えられる。なお、第2回および第3回観測における最大の飛沫輸送距離は、設定したビデオカメラの撮影範囲を越えていたため、実際の飛距離は表中の値よりも大きい。

表-1 観測値の統計量

	観測日	観測時間	有義波高 (m)	有義周期 (sec)	平均水位 (m)	平均風速 (m/s)	最多風向 (方位)
第1回	2005年12月13日	6時間46分	1.64	6.2	13.17	9.0	NW
第2回	2005年12月22日	6時間12分	2.24	7.3	13.07	9.6	NNW
第3回	2006年2月8日	5時間42分	2.33	7.2	12.74	10.0	NNE

	打上げ					飛沫飛散距離	
	最大値 (m)	1/3最大値 (m)	平均値 (m)	総数 回	回数 (回/分)	最大値 (m)	平均値 (m)
第1回	33.6	12.1	7.2	2,177	5.4	127.8	16.8
第2回	51.4	22.4	13.4	2,330	6.3	159.8	41.3
第3回	57.1	22.3	13.8	1,911	5.6	157.2	35.7

(2) 波高と打上げ高の関係

図-6に各観測における打上げ高のヒストグラムを示す。横軸の R/R_m は打上げ高 R と平均打上げ高 R_m の比で区間幅は0.2である。図中にはレーリー分布による確率密度関数とその超過確率を併せて示している。全体的には打上げ高の頻度は比較的レーリー分布と一致し、一致の程度は有義波高が小さい第1回観測の結果が最もよい。波高が大きい第2回および第3回観測では $R/R_m=0.5\sim0.7$ 付近に頻度が集中するとともに、レーリー分布では超過確率の極めて小さい $R/R_m=2.0\sim3.0$ のあたりで頻度が増大する傾向がみられる。

図-7は有義波高と打上げ高の関係を示している。なお、有義波高は20分間毎に算出したものである。前述のとおり有義波高の大きい第2回および第3回観測結果の方が打上げ高も大きい。全体的な特徴として、有義波高が大きくなるにつれ、打上げ高の変動の幅が大きくなり平均的に打上げ高が増大していることがわかる。図-8

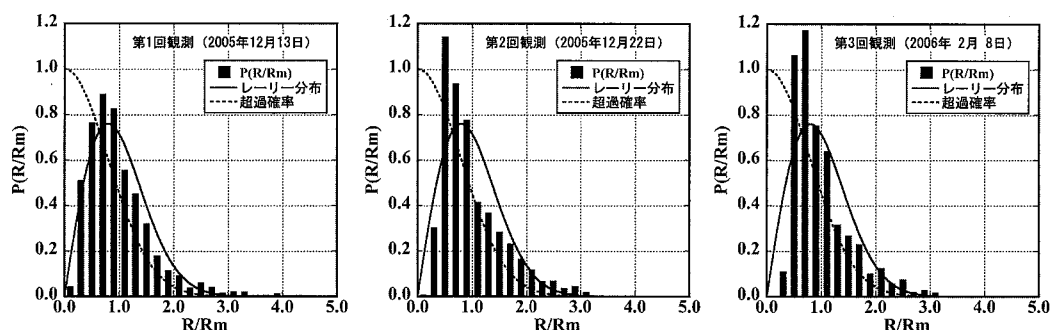


図-6 打上げ高のヒストグラム

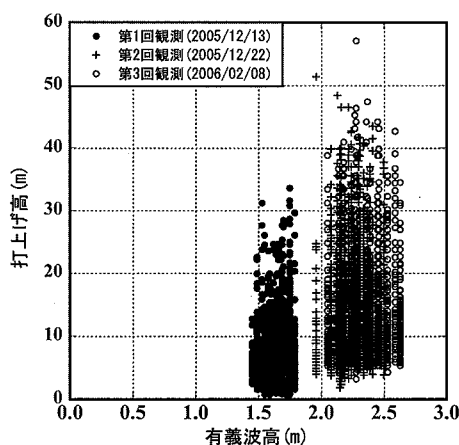


図-7 有義波高と打上げ高の関係

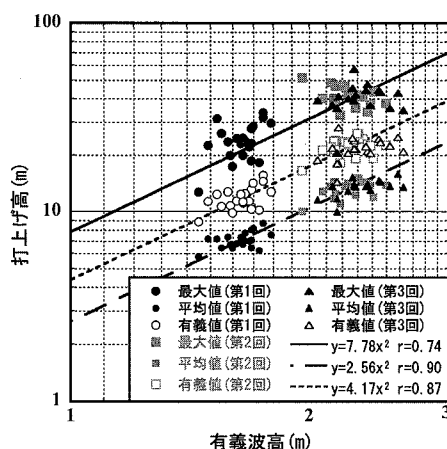


図-8 有義波高と最大打上げ高、平均打上げ高および1/3最大打上げ高との関係

に20分間毎に算定した有義波高と打上げ高の最大値、平均値および1/3最大値との関係を示す。多少のばらつきがあるものの有義波高と打上げ高には相関関係が認められる。図中には2次の回帰曲線を示しており、特に平均打上げ高と1/3最大打上げ高は有義波高の2乗との相関が非常に高いことから、観測した範囲において、平均的な打上げ高は波のエネルギーに比例するといえる。

(3) 打上げ高と飛沫輸送距離の関係

図-9に打上げ高と飛沫輸送距離の関係を示す。第1回観測時には30 m以上の打上げはほとんど生じておらず、飛沫輸送距離もほとんどが60 m以下である。一方、第2回および第3回観測時には稀に40 mを超える大規模な打上げが生じており、飛沫輸送距離も格段に大きくなっている。図中には一次の回帰式を示しており、飛沫輸送距離が小さな範囲では打上げ高とある程度の比例関係が認められる。しかし、相対的な頻度は少ないが打上げ高が小さくとも飛沫が遠くへ輸送されることも確認できる。

波の打上げに伴って発生する飛沫の粒径は様々であり、基本的には高い位置のものほど粒径は小さいと考えられ

る。これらの飛沫が風で輸送される際には、大きな飛沫ほど直立堤背後の近い位置に落下し、100 m以上も輸送される飛沫は、打上げの上部で発生する1 mm以下の小雨のような飛沫で、これが霧状に拡散しつつ輸送されていると考えられる。松永ら(1994)が消波護岸を対象に飛沫の輸送を実験的に検討した結果によると、前者が移流沈降領域、後者が移流拡散領域に対応するものと思われる。なお、ここでの飛沫輸送距離は前述したように、ビデオ画像から目視で判断したもので、霧状に輸送されながら拡散して見えなくなったものや、エロゾル状の海塩粒子はさらに遠くへ輸送されている。したがって、図-9の相関図に示す飛沫輸送距離において、大部分のプロットが集中している部分は、風に乗って漂うような非常に小さな飛沫の発生量が少ない、あるいは、発生していてもすぐに拡散して目視での判断ができないような場合であり、ある程度大きな粒径の飛沫についての輸送距離を示していると思われる。そのような飛沫の輸送距離は打上げ高との相関が高いといえる。一方、飛沫輸送距離が大きい場合については、非常に小さな粒径の飛沫が大量に発生し、ある程度まとまって輸送されるために霧

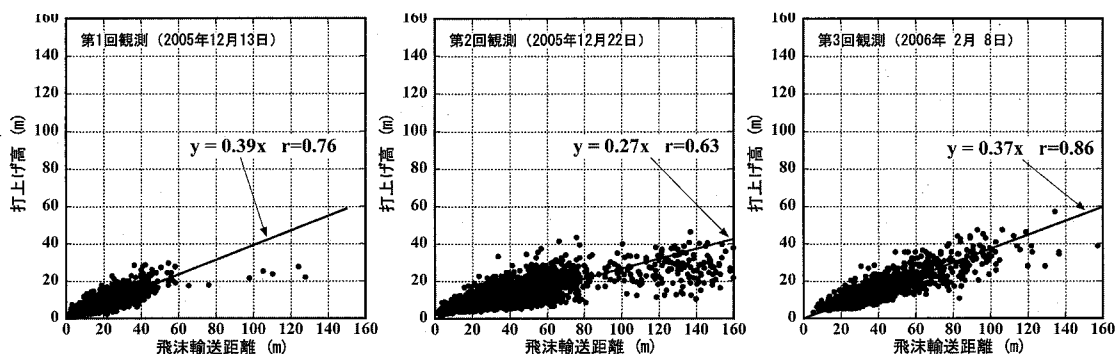


図-9 打上げ高と飛沫輸送距離の関係

状に見え、その結果大きな飛沫輸送距離を認識できたものと思われる。さらに、このような非常に小さな飛沫は、風に乗って長い距離を浮遊するため、打上げ高との相関関係から外れている。

4. おわりに

本研究では、直立堤で生じる打上げとそれに伴う飛沫輸送特性を明らかにするため、山口県下関市和久漁港地区にある直立防波堤を対象に来襲波浪、風向風速、飛沫量、塩分量、打上げ高、飛沫輸送距離について現地調査を行った。その結果、直立堤で生じる打上げ高は概ね来襲波浪の波高の2乗に比例して増大すること、粒径が大きな飛沫の輸送距離は打上げ高に概ね比例すること、さらに粒径が小さな飛沫は、打上げ高によらず風に運ばれ広い範囲に拡散することなどを明らかにした。今回は風速の影響を明確に見出すことが出来なかったため、今後も現地観測を継続し、風向風速の影響、輸送距離と飛沫量の関係、飛沫の粒径等について定量的な議論ができるよう詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、下関市豊北総合支所水産振興課より貴重な資料を提供して頂き、和久漁港漁業共同組合の方々には現地観測に御協力頂くとともに貴重な情報を頂きました。また、九州大学大学院総合理工学研究院の松永信博先生には、飛沫の観測法等について御指導頂きました。さらに、観測データの整理等においては修士課程の小野貴也君に協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 加藤史訓・笠井雅広・佐藤慎司・今村能之(1999)：越波被害の実態に関する全国調査，海洋開発論文集，第15巻，pp. 31-36.
- 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安部隆二・石本敬志(1998)：道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 676-680.
- 木村克俊・安田佳乃子・山本泰司・梅沢信敏・清水敏晶・佐藤隆(2001)：道路護岸における越波による通行障害とその対策について，海岸工学論文集，第48巻，pp. 756-760.
- 木村克俊・浜口正志・山本泰司・前田宗文・三船修司(2002)：直立消波ケーソン式護岸における越波飛沫の打ち上げ特性とその対策に関する検討，海岸工学論文集，第49巻，pp. 646-650.
- 木村克俊・浜口正志・岡田真衣子・清水敏晶(2003)：消波護岸における越波飛沫の飛散特性と背後道路への影響，海岸工学論文集，第50巻，pp. 796-800.
- 植田 操・松永信博・香月 理(1999)：冬季響灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1246-1250.
- 松永信博・植田 操・入江 功(1994)：消波護岸によるしぶきの発生と護岸背後地への輸送，海岸工学論文集，第41巻，pp. 1046-1050.
- 松永信博・植田 操・鶴崎賢一(1995)：波に作用する風応力と飛沫量の関係，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1031-1035.
- 松永信博・植田 操・鶴崎賢一・岸岡賢祐(1996)：強風によって沖合海域から浅海域へ輸送される飛沫量の低減率について，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1186-1190.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西森男雄(1995)：植栽による飛沫(海塩粒子)の軽減に関する現地実験，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1036-1040.
- 山田文則・細山田得三(2003)：海面から発生する飛沫塩分に関する実地観測とその飛沫塩分発生・輸送数値モデルの開発，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1176-1180.
- 山田文則・細山田得三(2004a)：海岸構造物への飛沫塩分の付着過程に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1126-1130.
- 山田文則・細山田得三(2004b)：海岸構造物周辺のしぶきから発生する飛沫塩分の輸送とその長期的観測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1121-1125.