

論文の内容の要旨

氏名：保 坂 幸 一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：平坦砂面上の飛砂量分布とその予測に関する実験的研究

我が国では、飛砂現象は多くの場合沿岸域の砂浜で生じ、古より飛砂の農地や宅地等の背後地への侵入、飛砂による港湾埋没や河口閉塞など大規模な被害（飛砂害）が生じている。海岸侵食により砂浜が狭くなった現在においても、海岸道路への飛砂の堆積による道路交通障害等の飛砂害が発生している。このような状況に加えて海岸法の改正に伴って養浜が盛んに実施されており、養浜砂が飛砂の要因となる問題も生じている。この養浜には漂砂による歩留りを考慮して粒径の粗い砂が用いられることもあり、飛砂の対策検討には、多様な粒径に対する飛砂量の知見が必要である。しかし、従来行われている飛砂の研究は、広い砂面や十分に長い砂面上での細砂（中央粒径 0.1~0.3mm）を対象とした研究がほとんどであり、限られた砂面長さや粗砂（細砂よりも粒径が粗い砂）に対する実効的な研究は見受けられない。したがって、粗砂面上の飛砂現象を定量的に把握することが必要である。

そこで本研究は、以上の背景のもとに粗砂を用いて養浜された海浜の保全と利用に有効な飛砂制御方法を検討するための基礎研究として、粗砂面上の飛砂量分布の特性とその予測法の実験的な把握を目的とする。

本論文は全 6 章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

「第 1 章 緒論」では、先に述べた本研究の背景と目的を提示した上で、粗砂と細砂の現象の違いを明らかにするための本研究での着目点について示した。

砂浜には、砂面風上始端から飛砂が発生し風下に向かうほど飛砂量が発達していく飛砂発達領域、流入する飛砂量と流出する飛砂量が近似的に等しくなる飛砂平衡領域、飛砂が砂面終端から背後地に飛び出し、空中を移動しつつ落下する飛砂減衰領域の 3 領域が存在する。本研究では、これらの領域における粗砂および細砂の飛砂現象に関して次の事項を研究項目とした。

- ① 飛砂発達領域の範囲（風上始端から飛砂量が平衡状態に達するまでの長さ；すなわち飛砂平衡距離）、飛砂量鉛直分布形の発達過程、砂面の地形変化（侵食）が生じる範囲。
- ② 飛砂平衡領域での砂面上の飛砂量鉛直分布とその予測方法。
- ③ 飛砂減衰領域の範囲（砂面終端から砂面背後に飛び出した飛砂が到達する長さ、すなわち飛砂到達距離）、飛砂量鉛直分布形の減衰過程。

「第 2 章 既往の研究」では、上記 3 つの領域に関する飛砂の量や分布に関する文献調査結果を示した。

飛砂発達領域では、飛砂の平衡距離に関して現地観測、風洞実験、数値解析による研究が行われている。河村（1951）、堀川ら（1983）、堀田ら（2004）は平衡距離を飛砂量がほぼ平衡になる条件で示した。また、岩垣（1950）は拡散理論に基づき数理的に平衡距離を示した。この平衡距離を他の研究結果を含めて整理すると、平衡距離は 1.2m~20m の範囲にあり、10m 以下としている研究成果が多い。ただし、粗砂の飛砂に言及した研究は見受けられない。

飛砂平衡領域では、広い砂浜での現地観測や飛砂が平衡状態にあることを仮定した風洞実験など多くの研究成果があり、全飛砂量や飛砂量の鉛直分布を推定する理論式や実験式が提案されている。飛砂量鉛直分布を与える式としては、風の乱れの効果を見逃し飛砂が跳躍運動すると仮定して河村（1951）が提示した式が、実験結果を良く説明するとされている（例えば、Hotta & Horikawa（1993））。しかしながら、検証実験に使用した砂の粒径が 0.3mm に限定されていたことから、粗砂を対象としてこの式を使用することの妥当性の検討や式中に含まれるパラメータの決定が課題である。

飛砂減衰領域では、砂浜風下終端から飛び出す飛砂量分布に関しては、岩垣（1950）が拡散理論に基づく数値計算の結果により、砂浜風下終端を通過する断面飛砂量の 99%が砂浜終端から 7m 地点までの範囲に落下することを示している。しかしながら、この研究は細砂を想定したものであり、他を含めて粗砂についての研究例はない。

「第 3 章 飛砂量の測定方法」では、本研究での実験による飛砂量の測定方法を示すとともに、新たに開発した圧電飛砂計についての開発経緯と測定結果の妥当性の検証結果について示した。

現地海浜では、砂の粒径の不均質、砂面の湿潤、潮汐による砂浜幅の変動、風の変動、砂面の起伏、植生状況など、条件が多岐にわたっており現象が複雑である。そこで本研究では、実規模の現象を再現することが可能な大型風洞装置を用いて、粒度の揃った砂を平坦に敷き詰めて、定常風速下での風洞実験を行った。

飛砂発達領域では飛砂の継続に伴って砂面の状態が変化するため、短時間で砂面上の飛砂量分布を測定する必要があるが、それを可能とする飛砂量測定装置は研究開始時点では存在しなかった。そこで、本研究において電氣的に短時間で飛砂量を測定できる圧電飛砂計を開発した。この飛砂計は、圧電セラミックセンサに飛砂が衝突したときの振動を電圧値に変換し、衝突電圧の発生回数から飛砂計設置点での飛砂粒子数を測定する。また、センサの直径が小さいことから飛砂や風の流れに乱れが生じにくいという特徴を有する。このセンサ 1 台で定常風の下での砂面上の 1 点での飛砂量を毎秒測定できるので、複数のセンサを用いれば鉛直方向の飛砂量分布を測定できる。改良を重ねた結果、測定可能な飛砂濃度は、粗砂（中央粒径 0.52mm）に対しては $1\text{gf/cm}^2/\text{s}$ 、細砂（中央粒径 0.25mm）に対しては $0.1\text{gf/cm}^2/\text{s}$ であり、強風時の砂面近傍での測定が可能となった。

「第 4 章 大規模風洞による飛砂量分布実験」では、飛砂発達領域、飛砂平衡領域、飛砂減衰領域を対象として実施した風洞実験の結果を示した。

実験に用いたエッフェル型吐き出し風洞は、測定部断面 $1\text{m} \times 1.1\text{m}$ 、測定部長さ 20m であり、3~30m/s の風速を起こすことができる。実験砂は中央粒径が 0.15~1mm の範囲にある 6 種類とし、風条件は摩擦速度で 0.4~3.5m/s の範囲の 6 段階とした。

飛砂発達領域での飛砂は、風下に向かうにつれて、まず砂面近傍で盛んになり、次第に上方に広がり、鉛直方向の飛砂量分布は変化しなくなる。砂面始端から風下に向けて飛砂量分布が安定するまでの距離を飛砂の平衡（または飽和）距離と定義すれば、平衡距離は粗砂（中央粒径 0.52mm）の場合は約 15m、細砂（中央粒径 0.25mm）の場合は 8~10m となった。この範囲において砂面の侵食が顕著な範囲は、粗砂の場合は砂面始端から 6~8m、細砂の場合は砂面始端から 4~6m であった。粗砂は細砂に比べ飛砂発達領域および顕著な侵食範囲が広いことが明らかとなった。

飛砂平衡領域では砂の粒径と風速の違いによる飛砂量鉛直分布が得られた。全ケースで飛砂量が砂面上方に向かって減少し近傍で急激に増大する形状を示したが、砂の粒径が大きいほど高い地点まで分布した。これは粒径が大きい砂の方が高い地点まで跳躍するという既往の知見を裏付けている。

飛砂減衰領域での飛砂は、砂面終端部で平衡状態であったものが風下に向かうにつれて低い部分の飛砂量が風上砂面高さより下方に落下していくため、高さ方向に一樣な分布に近づく。また、実験結果から鉛直断面を通過する飛砂量が平衡状態に対して 1%以下に減少する地点を推算したところ、粗砂に関する結果は砂面終端風下 6~8m となった。細砂に関する結果は砂面終端風下 4m 地点であり、粗砂の到達距離は細砂に比べ長いことが明らかとなった。

「第 5 章 飛砂量鉛直分布の予測」では、Hotta & Horikawa (1993) が飛砂量鉛直分布を良く説明すると報告している河村 (1951) の飛砂量鉛直分布式（以下、河村式）を粗砂に適用できるように改良した結果について示した。

河村式を利用するためには、式に含まれる三つの未知パラメータ a （風速の鉛直分布が高さの 1/2 乗に比例すると仮定したときの比例定数）、 G_0 （砂面単位面積から単位時間で跳び出す飛砂量）、 h_0 （飛砂の跳躍高さの平均値）を決めなければならない。そこで、飛砂平衡領域における飛砂量鉛直分布の実験結果を用いて、各パラメータと砂の粒径、風の摩擦速度との関係を調べた。その結果、同一の風の摩擦速度に対して、粒径が大きいほど G_0 は小さくなり、 h_0 は大きくなる傾向が示された。河村式では、 G_0 は飛砂鉛直分布の砂面近傍の境界値の大きさを与える。また、 h_0 は分布曲線の傾きを与え、その値が大きいほど傾きは急になる。すなわち、粗砂面上での飛砂量は細砂面上に比べ砂面から高い位置での割合が大きいことを意味している。これらの考察に基づいて、河村 (1951) の飛砂量鉛直分布式の未知パラメータを実験的に決定し、粒径の効果を式中含めることで、粗砂面上の飛砂量鉛直分布の予測を可能とした。

「第 6 章 結論」では、本研究より得られた成果を総括し結論を導いている。

大型風洞装置内の定常風の下で、粗砂および細砂の平坦砂面上における飛砂発達領域、飛砂平衡領域、飛砂減衰領域での飛砂量に関する実験を行い、以下の結論を得た。

飛砂発達領域については、飛砂が砂面始端から発生して発達する過程を把握した。また飛砂平衡距離および飛砂による侵食範囲を確定した。これらの距離および範囲は、粗砂の場合の方が細砂の場合に比べて広いことが明らかとなった。

飛砂平衡領域における砂面上の飛砂量鉛直分布を求めるために、実験結果に基づいて河村式を改良した。この提案式は細砂から粗砂に至るまで適用可能であり、砂の粒径と任意高さでの風速を与えることにより、砂面上の飛砂量鉛直分布を予測できる。

飛砂減衰領域では、粗砂に関して、砂面終端からの距離に応じた飛砂の減衰過程を把握した。また、飛砂の到達距離を示し、到達距離は粗砂の場合の方が細砂の場合よりも長いことを明らかにした。

本研究の飛砂量に関する成果は、保全対象海岸における飛砂の考慮の要否の判断、飛砂防止柵の高さの決定、定期的な排砂のための飛砂捕捉溝の規模の決定等に利用することができる。また、本研究で開発した圧電飛砂計を用いれば、現地海浜における飛砂量の時間変化や場所的变化が測定可能であり、本研究の飛砂量に関する成果と合わせた分析により、現地飛砂量の実態の把握が可能となる。以上のことから、本研究は海浜の維持、管理のための対策に活用できるものと考えられる。