

第 I 部門 矩形断面を対象とした海塩粒子の付着特性に関する研究

京都大学 学生員 ○大森 隼汰
 京都大学 学生員 坪倉 佑太
 京都大学 正会員 八木 知己

京都大学 正会員 野口 恭平
 京都大学 非会員 宇野 将平

1. 背景 橋梁の老朽化を促進する原因として、海塩粒子による鋼材の腐食が挙げられる。海から風によって輸送された海塩粒子が橋梁のどの部位に付着しやすいかを検討することは、橋梁設計や効率的なメンテナンスを行う上で重要であるといえる。したがって、本研究では構造基本断面として矩形断面を対象に、粒子が構造物周囲に輸送され付着する機構を検討する。また金銭的・人的コストの高い現地観測や実験などを行わず、流れ場の解析のみから付着分布を推定することを目指し、壁面圧力特性を用いた付着分布推定モデルの提案・適応可能性の検討を行う。

2. 解析手法 本研究では、再付着の特性が異なれば粒子の輸送・付着過程も異なると考え、剥離流れが時間平均的に側面に再付着する断面辺長比 B/D (B : 幅, D : 高さ) = 1 の矩形断面と、時間平均的に再付着する $B/D = 6$ の矩形断面を対象とした。OpenFOAM を用いた LES による流れ場解析を実施し、乱流モデルは標準 smagorinsky モデル (定数 0.12) を採用した。解析領域は半径 $40D$ の O 型構造格子を用い、スパン方向領域長さは $3D$ とし、壁面第一格子高さは $D/1000$ 、スパン方向格子サイズを $D/10$ とした。流入風はレイノルズ数 10,000 の一様流とした。加えて、このように計算した流れ場の中で、粒子の挙動を式 (1) に従って計算した。この式は外力として抗力のみを導入し無次元化した運動方程式である。ここで ρ_p, ρ_f はそれぞれ粒子・流体の密度、 d_p は粒径、 U は流入風、 ν は動粘性係数である。 Stk はストークス数という無次元量であり、粒子の流れへの追従の大きさを示す。 Stk が小さいと粒子は気流とほぼ同一の挙動を示し、 Stk が大きくなるに従い気流の変化の影響を受けにくくなる。流れの非定常性を考慮するために、粒子はカルマン渦放出周期の 32 分の 1 ごとに、矩形断面の $10D$ 上流から 101×300 個を周期的に流下させた。

$$Stk \frac{d^2 \mathbf{r}^*}{dt^{*2}} + \frac{c_d}{24} Re_p \left(\frac{d\mathbf{r}^*}{dt^*} - \mathbf{U}_f \right) = 0, \quad Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U}{18 \rho_f \nu D} \quad (1)$$

3. 矩形断面における飛散粒子の付着特性¹⁾ 図 1 に流れ場解析の結果として、各矩形断面まわりの流速コンターと時間平均流線を示す。また、同図に比較的 Stk が小さい (径が小さい) 粒子の輸送経路を白色の矢印で示す。 $B/D = 1$ では、前面に付着しない粒子が背面付近に輸送され、さらに背面で付着しない粒子が側面に輸送される。 $B/D = 6$ では、前面に付着しない粒子は前面上下端から発生する剥離流れに乗り、最初に側面に輸送される。そしてそこで付着しなかった粒子は気流と同様に、上流側に向かうものと下流側に向かうものに分かれる。図 2 には $B/D = 1$ における粒子飛散解析の結果として、

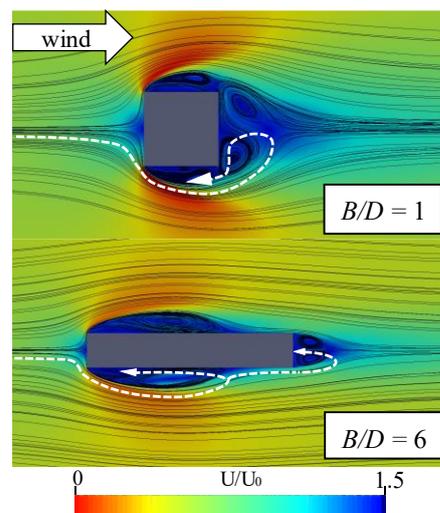


図 1 流れ場解析の結果

付着した粒子数を飛散させた粒子の数で除した部位別付着割合を Stk 別に示す。対象断面は上下に対称であり粒子も一様に発生させることから、上下の平均を示している。 Stk が小さい場合は付着が角部に集中することが分かる。粒子の気流への追従性が高く、基本的に流れと同様の挙動を示すため、壁面に向かわず基本的に付着しにくい。ただし角部では流速の変化が激しく、瞬間的に流速の大きい時刻で粒子の速度も大きくなることで、慣性力の効果が大きくなり付着が促されると考えられる。一方、ある程度 Stk が大きくなると、本研究の $Stk = 0.0822$ のように、各面角部以外、特に側面後方や背面中央付近でも付着が目立つようになる。これは粒径が大きいことで慣性力の効果が大きくなり、角部以外の気流の速度が比較的小さい部位への付着も起こりやすくなると考えられる。図 4 は剥離せん断層とそれに伴う気流の変動を示しており、緑色部は流れの変動に伴い付着が多くなる部位である。剥

離せん断層は周期的に側面への接近と離反を繰り返している。剥離せん断層が側面から離れるとき (図4(a)), 背面から側面に向かう急速な気流が生じており, その流れに追従して速度が大きくなった粒子が背面角部へ付着しやすいと考えられる。その後 (図4(b)) 側面後方部には循環渦が形成され, これに巻き込まれた粒子が側面に衝突して付着する。逆に剥離せん断層が側面に接近する際 (図4(c)), 側面から背面に向かう急速な流れが生じ, その流れに追従し速度が大きくなった粒子が側面後流側端に付着しやすいと考えられる。 Stk が最も大きい場合は, 前面のみに付着するが, これは慣性力の効果が大きいため, 粒子は背面や側面付近に輸送されず流下するからである。図3に $B/D = 6$ の部位別付着割合を示す。 Stk が比較的小さい場合角部に付着が集中し, 比較的大きい場合は前面のみに付着する傾向は $B/D = 1$ と同様であるので, $Stk = 0.0822$ の場合のみ示す。 $B/D = 1$ と異なる点は, 側面中央後方に付着の極大を示す部位が存在することである。この位置は前面上下端から生じる剥離流れが再付着する位置であり, この流れにのった粒子が側面に衝突し, 付着が起りやすいと考えられる。

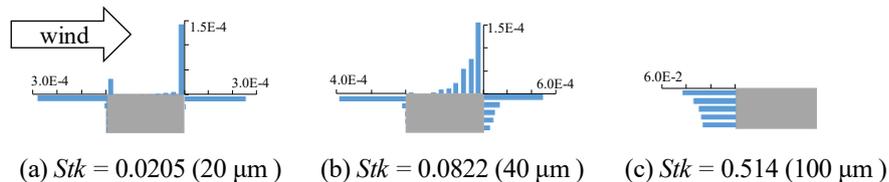


図2 $B/D = 1$ 矩形断面の部位別付着割合



図3 $B/D = 6$ 矩形断面の $Stk = 0.0822$ (40 μm) 粒子の部位別付着割合

※括弧内は断面高さ $D = 0.1$ m, 風速 $U = 1.5$ m/s とした場合に対応する粒径

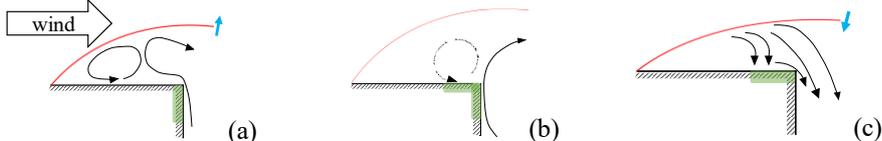


図4 剥離せん断層の運動に伴う後縁部周りの瞬間的な流れの変動の模式図

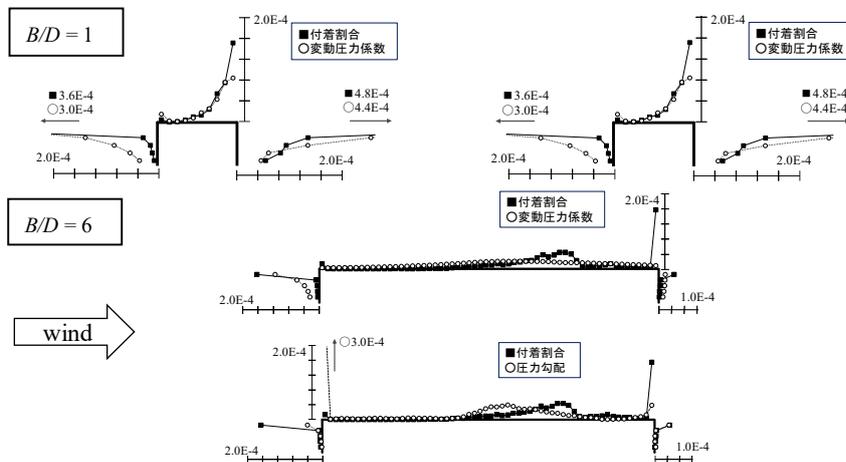


図5 粒子付着分布と壁面圧力特性を示す物理量との比較

4. 付着分布推定モデル このように, 粒子の付着は断面周囲の流れ場の影響を強く受けることが判明した。同様に, 壁面圧力も流れ場からの影響を受けるので, 壁面圧力特性から付着の多寡を推定できると考えた。壁面圧力に関する物理量のうち, 特に付着分布と良好な傾向の一致を示した, 変動圧力係数・平均圧力係数の周方向勾配の絶対値 (平均圧力勾配) を図5に示す。 $B/D = 1$ については, 角部で値が卓越している点や側面後方で値が大きくなる点で一致しており, $B/D = 6$ については, 側面中央部後方寄りで値が大きくなる点が類似している。このように傾向が類似したのは, 流れの変化の大きい部位で付着が起りやすいことに由来すると考えられる。変動圧力係数は圧力の時間的変動によって「局所的な流れの時間的変化」の大小を示し, 平均圧力勾配が圧力の空間変動によって「局所的な流れの空間的変化」の大小を示したことにより, 各物理量の分布と付着量の分布が一致したと考えられる。

5. まとめ ストークス数 Stk の大小によって, 粒子の輸送・付着挙動が異なり, その多くが粒子の「慣性力の効果」ならびに「気流への追従性の効果」の大小から説明することができた。また, 断面の形状によって矩形断面周囲の流れ場構造は異なるため, 粒子の付着機構・付着分布に差が生じることが明らかになった。「局所的な流れの変化」の大小を示す変動圧力係数と平均圧力勾配の分布が, 付着分布と良好な一致を示すことが明らかになった。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 21K14232, 一般社団法人日本鉄鋼連盟構造研究・教育助成事業の助成を受けた。本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。

参考文献 1) 津田ら: 土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集, I-361, 2020.