

矩形断面における粒子の付着機構と付着分布推定モデルに関する研究

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 橋梁の鋼材が海塩粒子によって腐食され、橋梁の老朽化を促進することが考えられる。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するかを検討することは、橋梁設計や効率的な維持管理において重要である。したがって本研究では、構造基本断面である矩形断面を対象に、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ができれば、実務的なコストを抑えることができると考え、壁面圧力特性に注目し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 矩形断面における剥離流れの再付着特性が異なれば、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しない断面辺長比 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は $D/10$ 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性の大きさを示す。 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。

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

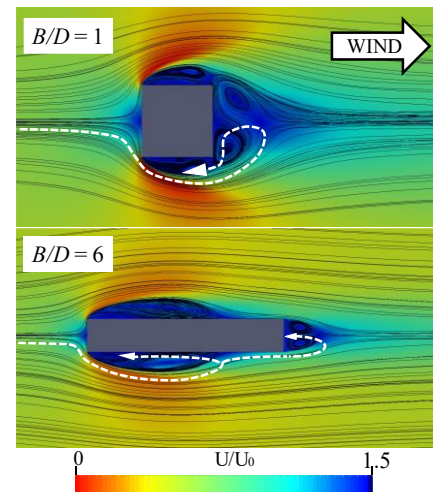


図1 平均流速コンターと流線及び粒子の輸送経路

3. 矩形断面における飛散粒子の付着特性¹⁾ 図1に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、さらに背面でも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。そして側面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 $B/D=1$ について、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からと考えられる。図4に示す通り、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

キーワード CFD 矩形断面 飛来塩分

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学工学部地球工学科 TEL 075-383-3170

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くなると考えられる。 Stk が最も大きい場合は、慣性力の効果が大きく粒子は背面や側面付近に輸送されず流下するため、前面のみに付着する。図3に $B/D = 6$ の部位別付着割合を示す。 Stk が大きくなるにつれて、角部以外にも付着するようになる点は $B/D = 1$ と同様である。一方 $B/D = 6$ では、側面中央後方寄りに付着の極大が存在する。これは剥離流れが側面に再付着することに伴うものと考えられる。また Stk が大きくなるに従い、慣性力の効果が大きくなり、粒子が気流へ追従しにくくなることで、側面で付着の極大を示す位置は後流側へ移動することが分かる。

4. 付着分布推定モデル

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明らかになった。同様に、壁面圧力も流れ場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 ($Stk = 0.0822$ の粒子) 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。 $B/D = 1$ では、角部で値が卓越している点や側面後方部で値が大きくなる点で一致しており、 $B/D = 6$ では、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。一方、 $B/D = 6$ の側面において圧力特性の極大値を示す位置と付着が極大となる位置に差があることが分かる。これは先述の通り、 Stk が大きくなるに従って粒子の付着が極大となる位置が、後方へ移動することに関係すると考えられる。

5. まとめ ストークス数 Stk の大小によって、粒子が輸送され付着に至る機構は異なり、その多くが粒子の「慣性力の効果」と「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、矩形断面の形状によって断面周囲の流れ場構造は異なるため、粒子の付着機構・付着分布にも差が生じることが明らかになった。加えて「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判明した。

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。

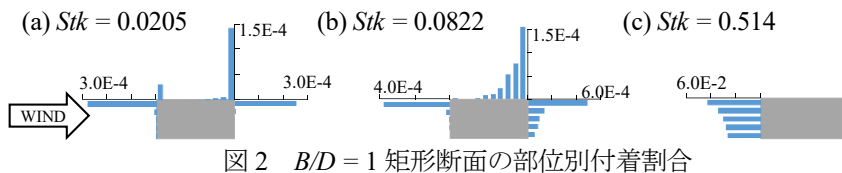


図2 $B/D = 1$ 矩形断面の部位別付着割合

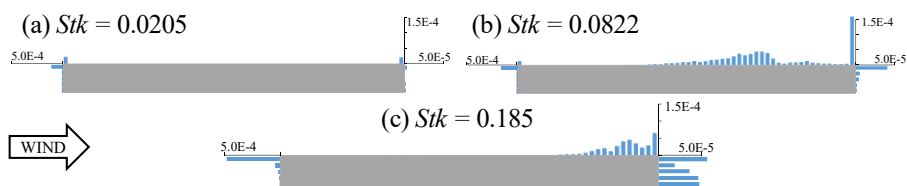


図3 $B/D = 6$ 矩形断面の部位別付着割合

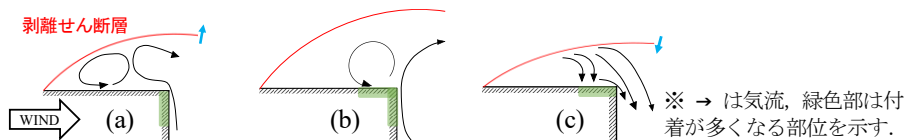


図4 剥離せん断層の運動に伴う後縁部周りの瞬間的な流れの変動の模式図

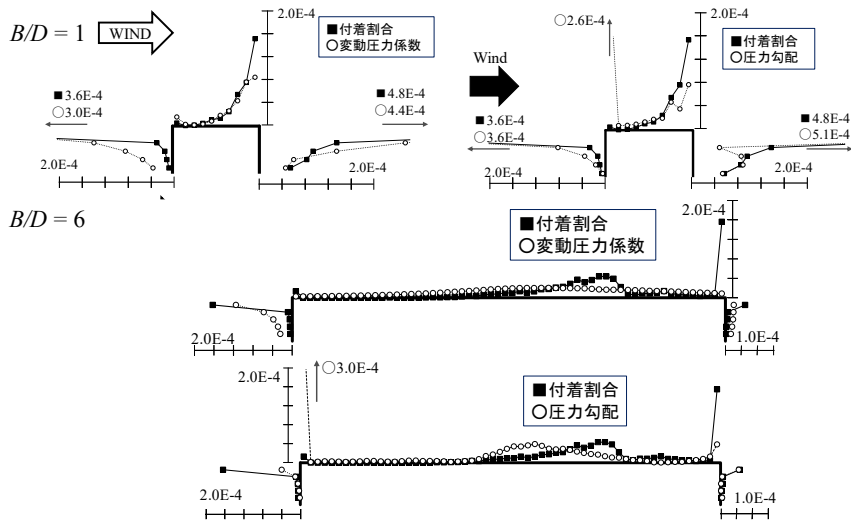


図5 粒子付着分布と壁面圧力特性を示す物理量との比較