

LES による矩形断面まわりの粒子飛散解析

京都大学 学生員 ○津田 悠希
京都大学 学生員 坪倉 佑太

京都大学 正会員 野口 恭平
京都大学 正会員 八木 知己

1. はじめに 鋼橋の維持管理において、鋼材を腐食させる海塩粒子の部位別付着量の定量的評価は重要である。橋梁部位別の付着塩分量評価は主に現地観測によるが、コスト低減のために、風洞実験や数値解析による評価手法が検討されている^{1)~3)}。多数の橋梁の維持管理を考えた際、橋梁の部位別付着塩分量の評価手法はより簡便であることが望ましい。飛来粒子の任意断面における部位別付着量をモデル化するためには、飛来粒子の部材への付着メカニズムや分布性状を詳細に明らかにすることが必要である。本論では、基礎的な検討として、数値流体解析(CFD)によって矩形断面まわりの非定常流れ場を算出し、得られた流れ場に基づいて粒子飛散解析を行うことで部位別付着量を算出し、矩形側面における粒子の付着メカニズムと付着分布性状について検討する。

2. 非定常流れ場計算手法 正方形断面(断面辺長比 $B/D=1$)および $B/D=6$ の矩形断面まわりの非定常流れ場を OpenFOAM による LES で算出した。乱流モデルは Smagorinsky モデル(Smagorinsky 定数 : 0.12)を使用した。解析領域は矩形断面の上流側に $10D$ 、下流側に $20D$ 、側方に $9.5D$ 、スパン方向 $D(\Delta z=D/20)$ の直方体である。最小セル長さは矩形断面の壁面近傍で $D/200$ である。流入風は一様流とし、レイノルズ数は $Re=10^4$ (流入風速 1.5 m/s)とした。

3. 矩形断面まわりの粒子飛散解析手法 矩形断面まわりの流れ場計算と同時に粒子挙動をパッシブスカラとして解き、矩形断面への部位別付着量を算出した。矩形断面上流 $9D$ の位置に一边 D の立方体を考え、その内部に粒子を 10^6 個配置し、流入風速と等しい初速を与えた。流れの非定常性の影響を勘案するため、カルマン渦周期 T に基づき $T/4$ ごとに 8 回(計 800 万個)投入した。投入する粒子は完全な球形を仮定し、非定常流れ場中における粒子に働く力として抗力のみを考えた⁴⁾。また、壁面近傍に到達した粒子の付着は、慣性による壁面への衝突によって判断し、壁面での粒子の反発等は考慮しない。

4. 粒子飛散解析結果 上流から飛来する大部分の粒子は粒子自身に作用する慣性のはたらきによって、前面に付着することが明らかになった。一方、この他の粒子は、流れが矩形の前縁で剥離するのに従って、矩形を迂回するように流下し、矩形の側面や背面で付着することが明らかになった(図1)。ここで、断面辺長比 $B/D=1$ の場合では、前面に付着しなかった粒子が矩形を回り込み、背面で付着したのち、残りの粒子がさらに矩形側面で付着している様子が確認で

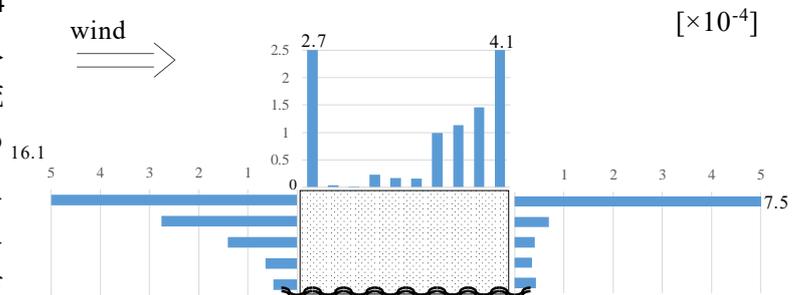


図1 粒子の部位別付着量($B/D=1$, 対称性より上半分のみ表示, 付着数を投入粒子数で正規化した)

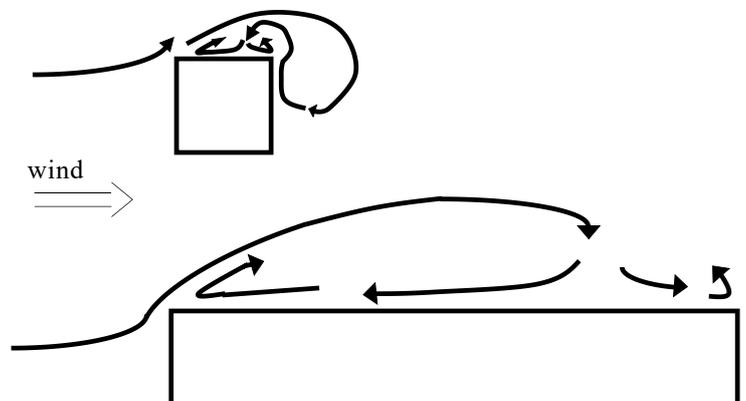


図2 粒子輸送のメカニズムの模式図(上 $B/D=1$, 下 $B/D=6$)

キーワード 飛来塩分, LES, 付着塩分量, 矩形断面, 粒子飛散解析

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-457 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3170

きた。一方、断面辺長比 $B/D=6$ の場合、前面に衝突しなかった粒子は、剥離流れに従って側面に付着する様子が見て取れた(図 2)。図 3 に各断面の側面における粒子の部位別付着量と、各部位の変動圧力係数 C_p' を示す。部位別付着量は側面を幅 $D/10$ の帯状領域に細分化し、領域内部に付着した粒子数を投入した粒子数で正規化している。横軸は前縁からの距離を表す。これらの図より、 $B/D=1$ では側面の下流側で付着量が多く、 $B/D=6$ では側面の中腹部で付着量が増大していることがわかる。これは、側面に付着する粒子の供給経路を反映したものと考えられ、 $B/D=1$ では粒子が矩形断面の背面を經由して付着するため粒子の多くが側面の下流側に付着すると考えられ、 $B/D=6$ では剥離流れの再付着に伴って粒子が付着するためだと考えられる。このように、側面における部位別付着量が断面形状によって変化することが明らかになった。また、矩形の上流端および下流端において粒子の付着量が大きく増大することが明らかになった。これは、壁面近傍の流れが角部で急激に向きを反転させることによるものと考えられる。以上より、飛来粒子が矩形断面の側面に付着するメカニズムとしては、以上 3 つの付着メカニズムが考えられる。

また、変動圧力係数を見ると、 $B/D=6$ では剥離流れの再付着に伴って、変動圧力係数が上昇しており、およそ同様の位置で粒子の付着量が多い。一方、 $B/D=1$ の変動圧力係数は部位別付着量の傾向とあまり一致しておらず、 $B/D=1$ では矩形の前縁から剥離した流れが時間平均的には再付着しないことが影響していると考えられる。このことから、粒子が矩形の前縁で剥離した流れの再付着に伴って付着する粒子付着モードでは、粒子の部位別付着量を矩形表面における表面圧力の変動圧力係数を用いて表現することが可能と考えられ、 $B/D \geq 6$ のような完全再付着断面における矩形断面の側面における粒子の付着分布の評価に寄与するものと期待できる。一方、剥離流れが側面に再付着しない断面においては、背面を經由して側面に付着するモードの寄与が大きくなることが考えられるため、これらの付着メカニズムのさらなる検討とモデル化が必要であると考えられる。また、断面の角部で付着量が増大する付着モードについても同様に検討が必要である。

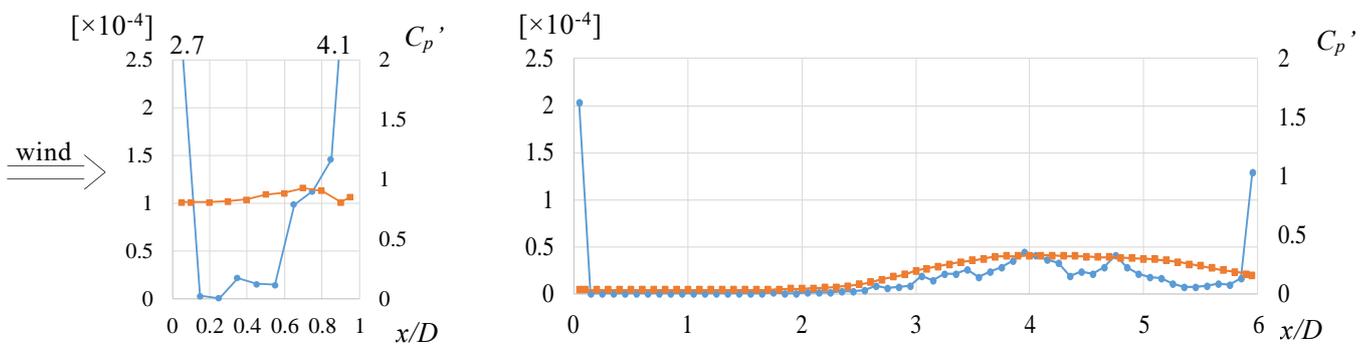


図 3 側面における粒子の部位別付着量(青)と変動圧力係数(橙)(左 $B/D=1$ 右 $B/D=6$)

5. まとめ 断面辺長比 $B/D=1$ および 6 の矩形断面まわりの粒子挙動を LES による非定常流れ場中で算出した。飛来する粒子の大部分は矩形の前面に付着するが、残りの粒子は剥離流れに従って、矩形の側背面に付着することを明らかにした。また、特に側面への付着形態として、(1)背面を回り込んで付着する、(2)剥離流れの側面での再付着に伴って付着する、(3)角部で流れの反転に伴って付着する、3 つの付着モードが存在することが判明した。特に、(2)の付着モードでは、壁面の変動圧力係数による表現の可能性が示唆された。今後、他 2 つの付着モードについてさらなる検討が必要である。

謝辞 本研究の一部は一般社団法人日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業、JSPS 科研費 18K13820 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た。

参考文献 1)長谷部ら：第 24 回風工学シンポジウム論文集，2016。2)チェンデラら：構造工学論文集 Vol.58A，2012。3)野口ら：Journal of Bridge Engineering，2017。4)坪倉ら：第 25 回風工学シンポジウム論文集，2018。