

風洞実験による飛来塩分付着評価と橋梁断面部位別腐食予測

Evaluation of Windborne Salt Adhesion Behavior by Wind Tunnel and Corrosion Distribution around a Bridge Girder Section

中西 克佳 NAKANISHI Katsuyoshi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
鹿毛 勇 KAGE Isamu JFE スチール スチール研究所 耐食材料研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
加藤 真志 KATO Masashi JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (部長)・博士 (工学)

要旨

結露や雨滴による洗い流しの生じない橋梁部位においては、海上から風により運ばれ橋に付着する塩分が支配的な腐食要素である。本論文では、海塩を想定した微粒子を飛散させ、橋梁断面模型に付着させる風洞実験を実施し、かつ実験結果を実橋観測結果と比較することにより、実橋での塩分付着特性を風洞実験によりおおむね評価できることを示した。さらに、2主1桁橋において、断面寸法は付着塩分布に大きな影響を与えないことが分かった。

Abstract:

Windborne salt adhesion by the wind is the predominant factor to govern the corrosion distribution on the part of bridge girder where no washing by water condensation or raindrop occurs. In this paper, a wind tunnel test including small particle diffusion and adhesion to the bridge girder section model was performed, and it was proved that the windborne salt adhesion distribution on the bridge girder section can be estimated by this test based on the observation of the windborne salt adhesion on real bridge girders. Furthermore it was proved that the shape of the bridge girder section did not affect the windborne salt adhesion distribution on the two main girder bridges.

1. はじめに

川や谷で分断された日本にとって、橋梁は地域間を結び、国の経済基盤を支える重要な機能の一つである。一方、建設後 50 年を越え補修・補強が必要な橋梁が今後増大する現状において、維持管理費の低減は、恒久的な課題である。他方、耐候性鋼橋梁であれ塗装橋であれ、塩分は構造物の劣化速度を速める重要な影響因子である。そして、耐候性鋼橋梁は、メンテナンスフリーではないものの、維持管理費が抑えられることが知られている。

鋼橋における維持・管理上の重要な課題は、疲労と腐食であり、腐食の影響因子である塩分は、海からの飛来塩分が主要因であるものと、冬場の凍結防止剤の散布が主要因であるものに分けられる¹⁾。

耐候性鋼橋梁は、桁端部や漏水箇所を除いたとしても橋梁全体が必ずしも均一に腐食している訳ではなく、付着した海塩粒子が降雨により洗浄されにくい桁内側に腐食が集中しているなど、特定の断面部位が局所的に腐食している場合が認められる²⁾。この要因として、橋梁架設地点に到達した飛来塩分が、風による移流により橋梁断面周りに達した後、橋梁の断面形状と橋梁架設地点の地形に応じた風の回り込み、風速分布の影響、および桁の濡れ具合の影響を受

けて不均一に桁に付着するためであると推察できる。付着した塩分は、部位ごとに異なった雨がかり、結露、および風の影響を再び受けて一部脱落し、再分配され残留付着塩分として残る。この残留付着塩分量が鋼材腐食の促進度合いに影響を与えているものと考えられる。また、風雨にさらされない内桁においては、結露による洗い流しの他、風の巻き込み具合、季節風の風向きとの関係により、塩分が多く付着する部位とそうでない部位に分けられることが分かってきている^{3,4)}。

腐食には、塩分の影響以外に、雨がかり、温度、湿度、さらには漏水などの雨仕舞いの不備による影響が考えられる。今後、腐食に対し厳しい環境の桁端部への防食対策が執られ、雨仕舞いの備えが成された後、さらなる防食の合理化を進める方法として、一般部の部位別防食が挙げられる。

本論文では、海から橋梁架設地点に到達した飛来塩分の橋梁断面への一次付着分布を推定することを目的とし橋梁断面周りの一次付着塩分布を求める方法として、風洞実験による付着塩評価手法について紹介し、2主1桁橋における断面寸法と断面周りの付着塩分布との関係について述べる。

2. 塩分付着と腐食の概念⁴⁾

風により運ばれてきた飛来塩分が鋼桁表面に付着し、鋼桁が腐食するまでのメカニズムは、概念的に図 1 に示すよ

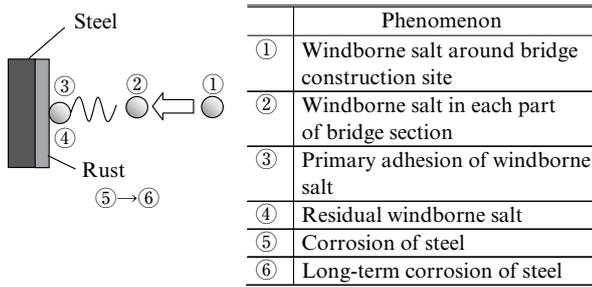


図1 鋼桁が腐食するまでのメカニズム⁴⁾
Fig. 1 Mechanism of running to corrosion⁴⁾

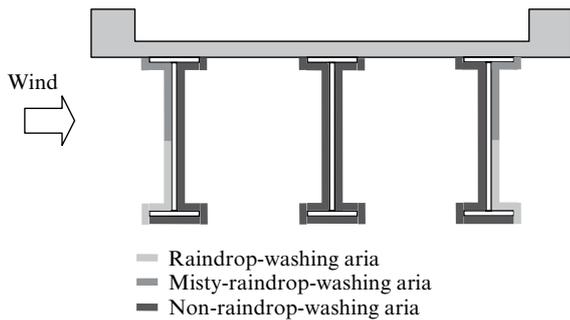


図2 雨洗いの有無
Fig. 2 Presence or absence of raindrop-washing

うに分類できる。海からの離岸距離や地形により決まる橋梁建設位置の飛来塩分(①)は、橋梁周辺の局所的な風の流に伴う移流により、橋梁周辺で分布(②)し、桁付近の風向風速、桁面の向き、粗さ、湿潤状態などの影響を受けて桁に付着(1次付着)(③)する。また、降雨、結露、堆積、風化や剥離により付着塩分は再分配(残留付着塩分)(④)され、桁は表面の付着塩分と湿潤状態の継続(ぬれ時間)により腐食(⑤)する。これらの過程は防食設計や補修要否の目安となる長期腐食(将来腐食量)(⑥)に反映される。

桁外面のウェブ下部や同下フランジ上面のように、雨滴による付着塩分の洗い流しを受ける部位や桁内部のように雨洗いを受けない部位もある。また、雨滴が直接降りかかって当たることは少ないが、霧雨のような細かな雨滴が当たる部位もある。そこで、図2のように、桁表面を、雨洗いのない無雨洗部位、雨洗部位、および半雨洗部位に区分する。

本文中の「飛来塩分」は、その名の通り、空气中を飛来している塩分を意味しているが、実体としては、塩分捕集器具の一定面積の捕集面に、一定期間に付着した塩分と定義している。また、桁や曝露試験片の表面の一定面積に付着している塩分を「付着塩分」と呼んでいる。

3. 風洞実験による付着塩評価手法⁵⁾

3.1 粒子付着実験の概要

図3には、風洞実験による粒子付着実験手法を示す。

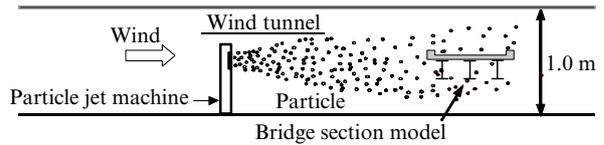


図3 風洞実験による粒子付着実験手法⁵⁾
Fig. 3 Method of particle adhesion distribution by using wind tunnel test⁵⁾

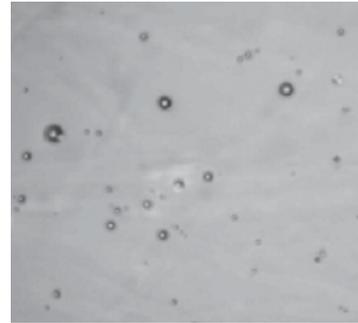


写真1 粒子の付着状況
Photo 1 State of particle adhesion

風洞内の測定洞に橋梁断面模型を設置し、風上から海塩粒子を想定した微粒子を、微粒子発生装置内で十分拡散させた後、風上側の噴出口から飛散させる。飛散粒子としては、粒子が橋梁断面周りの風の巻き込みに追従し、かつ橋桁を通過する短時間に重力沈降が起きないことを重視し、塩分粒子径⁶⁾に近く、かつ識別が容易な球状のフェノール粒子(平均粒径 $8\mu\text{m}$ 、粒径範囲 $5\sim 20\mu\text{m}$ 、比重1.25)を用いている。海塩粒子は、風、高さ方向、および離岸距離によって、空間的・時間的に非一様な分布を有すると考えられるものの、地形のスケールに比して橋梁が小さい場合、橋梁の大きさの範囲でほぼ一様に分布していると考えられる。

海塩粒子の付着率は付着面の粗さや濡れ具合および塩分粒子自体が含んでいる湿分により時々刻々と変化すると考えられるが、本粒子付着実験では、断面部位毎の状態が同じである場合を想定し、かつ一度付着した塩分粒子は脱落しないものと仮定している。そのため、模型表面における粒子の捕獲方法としては、模型計測点に粘着テープを貼付する方法を採用している。写真1には、粒子の付着状況を例示する。微粒子発生装置の位置は、模型を設置していない状態での模型近傍位置における飛散粒子濃度分布および平均風速分布ができる限り一様になるように調整している。

ここで、フェノール粒子の沈降速度 U_{∞} を、以下の式より求めると、 $U_{\infty}=0.00366\text{ m/s}$ となり、風速毎秒数メートルに対し十分小さく、仮定どおり、重力の影響を無視できるレベルであることが分かる。

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{1}{2}\rho_{\text{air}} U_{\infty}^2 C_D \pi r^2 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \dots\dots\dots (2)$$

$$Re = U_{\infty} \frac{D}{\nu} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ :粒子の密度 (=1 250 kg/m³), ρ_{air} :空気密度, g :重力加速度, U_{∞} :粒子の速度, C_D :抗力係数, Re :レイノルズ数, ν :空気の動粘性係数, D :粒子の径, および r :粒子の半径である。

3.2 粒子付着実験手法の検証

粒子付着実験手法の妥当性を、3主I桁橋を対象にして検証する。実験模型は実橋の1/20縮尺模型とした⁵⁾。ここで、実橋（海風が橋軸直角方向から吹く凍結防止剤を散布しない新潟県の耐候性鋼橋梁）における橋梁下方の川面との空間が2 m程度と狭いため、風洞床面を便宜的に実橋における橋梁下方の川面と想定し、下フランジ下面の高さ位置が床面から100 mmとしている。また、風洞内の風速を5 m/sとし、粒子の噴霧状況や付着状況の実験ごとの再現性を確認するため、同じ実験を3回実施している。

図4には付着粒子量の断面分布を、各ケースの桁ウェブ部の最大値で無次元化して示す。図4より、桁ウェブへの付着量は、風上側桁内の方が風下側桁内よりもやや多い。また、両桁内とも、風上面の方が多い。そして、下フランジ下面への付着は、風上側桁でほとんどなく、風下側桁よりも内桁の方が多く、内桁でウェブ部の量をやや上回っている。なお、付着粒子量の断面分布に関し実験ごとの測定値のバラツキが小さいことから、本実験手法における再現性は概ね確保されていると言える。

図5には、実橋断面周りの冬期1ヶ月間飛来塩分分布を示す。まず、図4と図5との比較から、また双方が雨洗いの影響を受けにくい部位であることを考慮すれば、風洞による粒子付着実験で計測した付着粒子量の断面分布はドライガゼ法による実橋断面周りの冬期1ヶ月間飛来塩分分布に非常に近いことが分かる。

次に、内桁ウェブ風上面の付着分布と風下側桁ウェブ風上面の付着分布とを比較すると、風洞実験においても、実橋においても内桁の方がやや多いことが、図4および図5から認められる。風上側桁の下フランジ先端からの剥離流

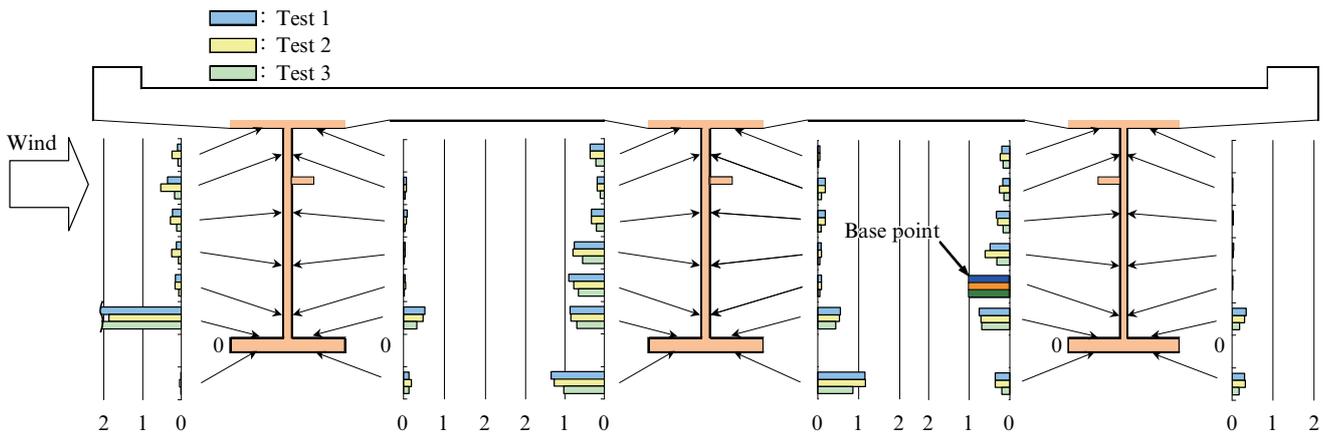


図4 付着粒子量の断面分布⁵⁾

Fig. 4 Particle adhesion distribution by using wind tunnel test⁵⁾

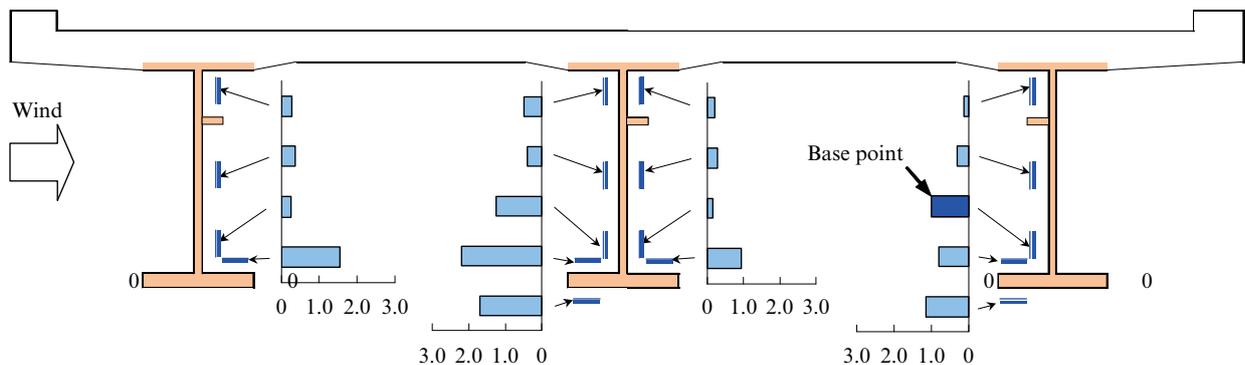


図5 実橋断面周りの冬期1ヶ月間飛来塩分分布⁵⁾

Fig. 5 Windborne salt adhesion distribution around a bridge girder section for a month in winter⁵⁾

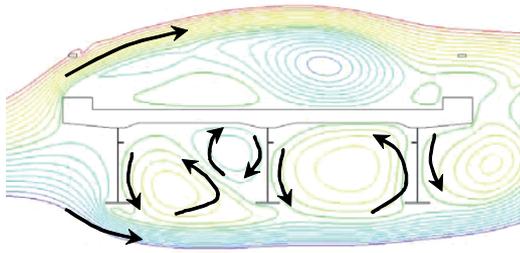


図6 数値シミュレーション結果
Fig. 6 Numerical simulation result

は、多くの粒子を乗せて流下するが、相対的に風上側である内桁の方が風下側桁よりも、ウェブの風上面に当たる流速がやや大きく、また粒子の数も多くなると考えられる。つまり、剥離流は先ず内桁の下フランジ付近に衝突し、粒子の濃度と流速を落としながら風下側桁に到達する。内桁ウェブ風上面の方が風下側桁ウェブ内面よりも粒子付着数が若干多めなのは、上記の理由によるものと考えられる。

一方、内桁ウェブ風上面、および風下側桁ウェブ内面への付着数は、上から下へと次第に多くなっている。風上側桁下フランジから剥離流に乗った粒子は、風下側桁下フランジへ衝突し、その一部は風下側桁下フランジの下面に直接付着し、また別の一部は風下側桁下フランジよりも上方に曲がり、桁内で循環する。慣性力で曲がりきれなかった粒子は、ウェブ上方よりもウェブ下方に衝突して付着するため、ウェブ下方への付着数が多くなったと考えられる。

3主I桁橋を対象とした塩分粒子の流れを、実橋観測および数値シミュレーションにより確認する。ここで、数値シミュレーション (FLUENT ver. 6.3.26) は、乱流を考慮しない非定常解析とし、流入境界から高さ方向に等風速 5 m/s を与えた。図6には、数値シミュレーション結果を示す。図6に示した断面周りの風の流れは、上述の考察を裏付けるものになっていることが分かる。したがって、断面周りの風の流れが塩分の付着分布に大きく影響しており、断面周りの風の流れが再現できれば、付着塩分分布が再現できると考えられる。

以上の結果から、風洞実験により実橋の塩分付着傾向をおおむね再現できることが分かった。したがって、本節で紹介した風洞実験手法が橋梁断面各部位への塩分付着傾向を事前に評価する手法の一つとして有効であることが実証された。

4. 2主I桁橋における風の流れと付着塩分分布

4.1 風洞実験による粒子付着実験

2主I桁橋断面周りの飛来塩分量と年間の腐食減耗量とは比較的高い相関があることが分かっている⁴⁾。特に、無雨洗部位においては、1ヶ月曝露試験片の年平均付着塩分と年間

の腐食減耗量との間にも比較的高い相関が認められている。このことから、断面周辺の飛来塩分量、あるいは一次付着塩分量の推定が、断面部位毎の腐食評価に繋がられる可能性がある。ところが、剥離流の再付着などに影響を及ぼす断面寸法比が断面周りの付着塩分分布に与える影響については明らかにされていない。そこで、鋼桁橋の中で最も形状パラメータが少ない2主I桁橋に関して、断面寸法比が異なる模型を用いた粒子付着実験を実施した。

粒子付着実験には、一般的な2主I桁橋の断面諸元として、床版厚 300 mm、桁高 3 000 mm、および桁上下フランジ幅 750 mm を想定した。粒子付着実験に用いる風洞が断面の高さ 1 m で幅 0.5 m の小型風洞であるため、高さ方向の閉塞率が 1/10 以下となるように、床版厚 9 mm、桁高 80 mm、および桁上下フランジ幅 20 mm の 1/37.5 縮尺模型を用いた。高欄は橋梁用車両防護柵 (A 種) を想定した。

実験模型断面を、図7に示す。すなわち、実橋梁幅 7.5~11.25 m および実橋主桁間隔 5.25~6.75 m を想定し、模型幅 200~300 mm および模型主桁間隔 140~180 mm とした。なお、実験模型は、実験結果に一般性を持たせるために、歩道、および横断勾配がないものとした。粒子付着実験の内訳を、表1に示す。

図8 (a)~(e) には、Case 1~5 における桁への粒子付着分布を、桁ウェブ面下部への最大付着数の値で無次元化して示す。

Case 1~3 の桁への粒子付着分布比較から、 B/d の変化に

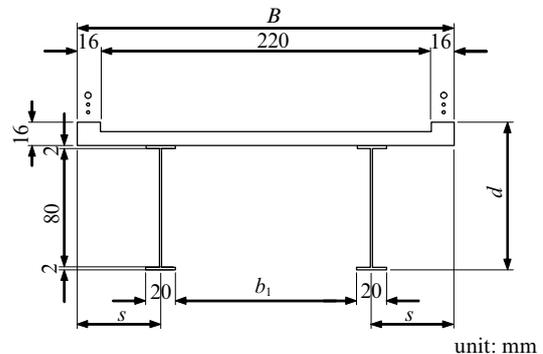


図7 実験模型断面

Fig. 7 Section of specimen

表1 粒子付着実験の内訳

Table 1 Specification of particle adhesion test

	B (mm)	b_1 (mm)	s (mm)	B/d	b_1/d
Case 1	198	140	29	2.0	1.4
Case 2	252	140	56	2.5	1.4
Case 3	300	140	80	3.0	1.4
Case 4	300	160	70	3.0	1.6
Case 5	300	180	60	3.0	1.8

B, b_1, s, d : Dimension in Fig. 7
 $d = 100$ mm

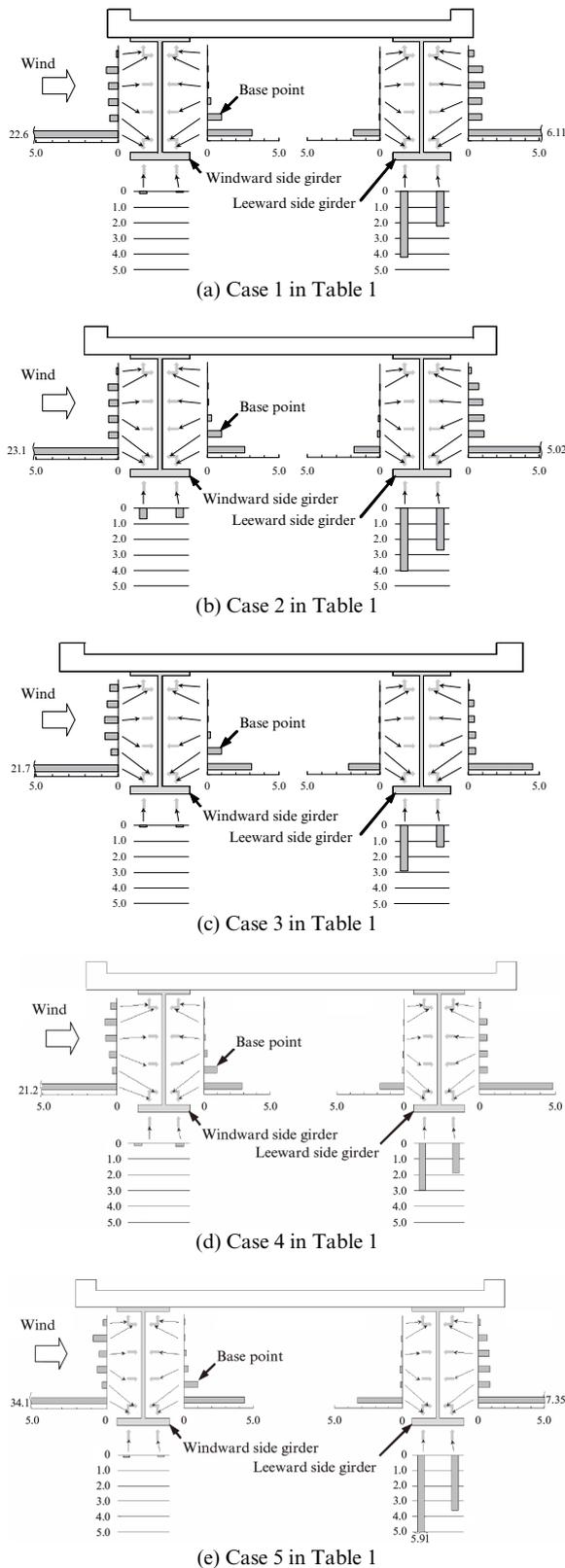


図8 桁への粒子付着分布

Fig. 8 Particulate adhesion distribution on girders of specimen (Numerals in figures are non-dimensional value)

伴う付着分布の傾向に大きな差異はない。ただし、量的な差異が桁下フランジ下面と風下側桁ウェブ外面とに認められる。このうち、風上側桁下フランジ下面は、 $B/d=2.0 \rightarrow 2.5$

で増加し、 $B/d=2.5 \rightarrow 3.0$ で減少している。風下側桁下フランジ下面は、 $B/d=2.0 \rightarrow 2.5$ で変化がなく、 $B/d=3.0$ で $B/d=2.0$ の 50~75% に減少している。風下側桁ウェブ外面は $B/d=2.0 \rightarrow 2.5$ で変化がなく、 $B/d=3.0$ で $B/d=2.0$ の 2 倍に増加している。

Case 3~5 の桁への付着粒子分布比較から、 b_1/d の変化に伴う付着分布の傾向に大きな差異はない。ただし、量的な差異が風上側桁下フランジ上面内側、風下側桁下フランジ上面内側、風下側桁下フランジ上面外側、および風下側桁下フランジ下面に認められる。このうち、風下側桁下フランジ上面外側は、 $b_1/d=1.4 \rightarrow 1.6$ で変化がなく、 $b_1/d=1.8$ で $b_1/d=1.4$ の 2 倍弱と増加している。風下側桁ウェブ外面は、 $b_1/d=1.4 \rightarrow 1.6$ で変化がなく、 $b_1/d=1.8$ で $b_1/d=1.4$ の 2 倍弱と増加している。

ちなみに、参考文献5) では、風洞実験による粒子付着実験の妥当性を、凍結防止剤を散布しない海風が橋軸直角方向から吹く 2 主 I 桁橋の塩分観測結果と照合することでも、実橋の塩分の付着傾向をおおむね再現できることを実証している。

したがって、細かく観れば、断面寸法の差異により、主桁各部位への付着量に多少の増減があるものの、2 主 I 桁橋においては、断面の寸法比が変化しても塩分の付着分布傾向として大きな変化がないことが分かった。

4.2 粒子軌道の可視化

断面周りの粒子軌道を確認するため、スモークワイヤー法による流れの可視化実験を実施した。

図9 (a)~(e) には、表1に示した Case 1~5 の可視化実験の瞬間映像を動画映像から観察した流れの概要図と併記して示す。

図9 (a)~(e) より、床版部張出し長、 B/d 、および b_1/d の変化により、巻き込み流の発生位置や渦の剥離角度が若干異なるものの、桁近傍の流れの向きは同じであることが分かる。すなわち、風上側桁ウェブの外側近傍の流れは下向き、風下側桁ウェブ外側近傍の流れは下向き、また桁内の流れは時計回りであるため、風上側桁ウェブの内側近傍の流れは上向き、風下側桁ウェブ内側近傍の流れは下向きとなる。

図9(a)~(c)の比較より、床版部張出し長が大きくなると、模型高欄部からの流れの剥離角度が小さくなり、風上側桁外面への流れの衝突位置が変わるものの、模型下方、模型内、模型後方の流れは変化しないことが分かる。

図9 (c)~(e) の比較より、桁間隔が変化すると、桁下方の巻き込み流の発生位置が若干前後に移動するものの、この発生位置の変化が流れの向きを大きく変化させるには至っていないことが分かる。

以上のことから、一般的な 2 主 I 桁橋の断面寸法比の範囲内である $B/d=2.0 \sim 3.0$ 、 $b_1/d=1.4 \sim 1.8$ の範囲において、断面周りの風の流れに大きな差異はなく、このため断面周り

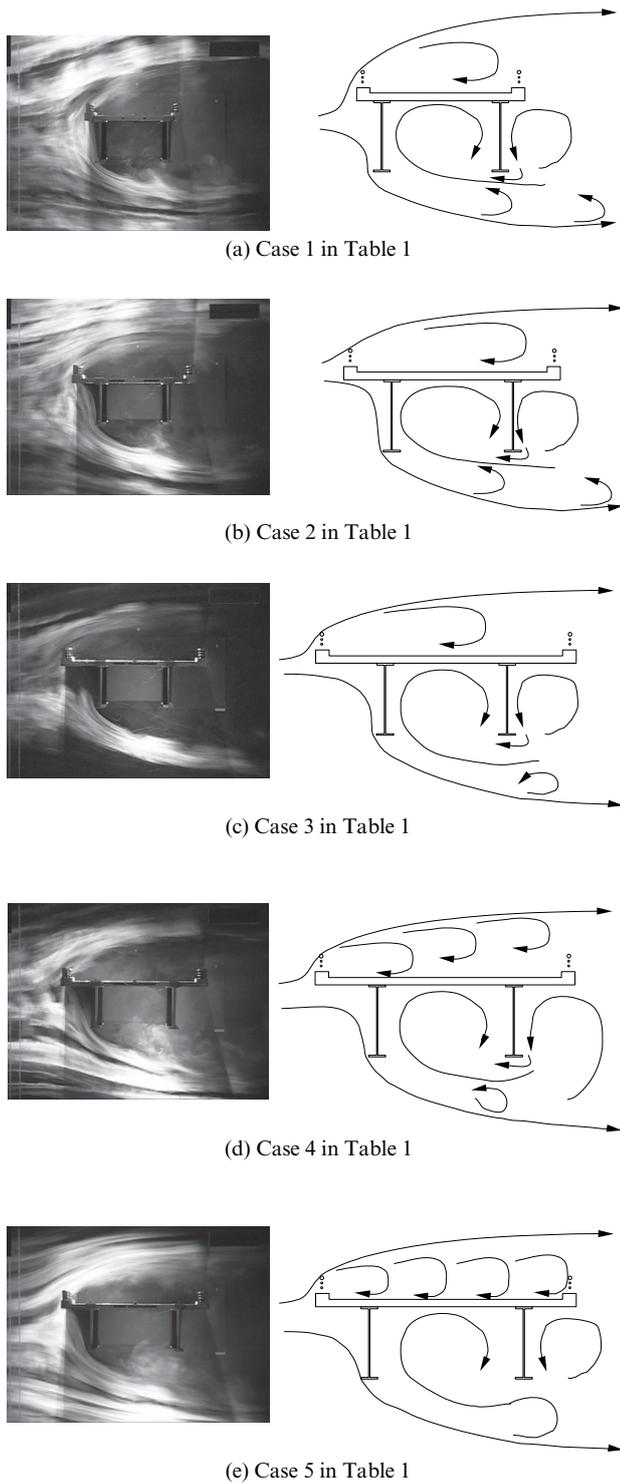


図9 可視化実験の瞬間映像と流れの概要
Fig. 9 Snapshot of visible test and schema of flow

の付着分布傾向に大きな変化はないことが分かった。

5. おわりに

本研究では、実橋が桁端部以外の一般部において、必ずしも均一に腐食していないこと、また断面内の特定の部位が腐食しやすいことに着目し、この原因が風により運ばれ桁に

付着する付着塩分布であると想定した。風洞実験により再現を試みたところ、粒子付着実験手法が橋梁断面周りの一次付着塩分布を予測する手法として有効であることが分かった。本手法の妥当性は、2主I桁橋および3主I桁橋に関して、実橋の塩分観測結果と照合することで実証している。さらに、2主I桁橋における断面寸法比と断面周りの付着塩分布との関係についても評価を試みたところ、2主I桁橋では、断面の寸法比（架橋実績の範囲内）が付着塩分布に大きな影響を与えないことが分かった。

粒子付着実験により得られた一次付着塩分布から雨がかりなどによる脱落を想定すれば、残留付着塩分布を推測することができる。そして、残留付着塩分布から、橋梁断面部位ごとに腐食する傾向が異なることを定量的に評価すれば、部位ごとにレベルの異なる防食を施すことにより、鋼橋の腐食耐久性を向上させ、鋼橋全体の長寿命化を実現できると考える。防食への活用例を挙げると、塗装橋における塗装仕様の部位別使い分け、鋼材材質の部材別使い分け、あるいは水洗い部位の選定がある。本論文の風洞実験手法が今後の橋梁の効果的な部分防食手法の根拠として活用されれば幸いである。

耐候性鋼橋梁断面周りの塩分観測では、長岡技術科学大学岩崎英治教授をはじめ研究室の皆様にご多大なるご助力を戴きました。ここに記して、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会. 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) —無塗装耐候性鋼橋梁の設計・施工要領 (改訂案)—. 1993-03.
- 2) 日本鋼構造協会鋼橋性能向上委員会・耐候性鋼橋梁部会. 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防安全. JSSC テクニカルレポート. 2009-09, no. 86.
- 3) 日本鋼構造協会鋼橋性能向上委員会・耐候性鋼橋梁部会. 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術. JSSC テクニカルレポート. 2006-10, no. 73.
- 4) 岩崎英治, 鹿毛勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀聡. 耐候性鋼橋梁の断面部位別の腐食特性とその評価に関する一考察. 土木学会論文集 A. 2010-06, vol. 66, no. 2, p. 297-311.
- 5) 中西克佳, 加藤真志, 岩崎英治. 風洞実験による橋梁断面の部位別付着塩分布評価手法に関する基礎的研究. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学). 2011-06, vol. 67, no. 2, p. 326-335.
- 6) 中村秀治, 藤井堅, 緒方琴未, 田口義隆. 地形影響を考慮した飛来塩分量の推定と構造物への塩分付着に関する検討. 鋼構造論文集. 2007-06, vol. 14, no. 55.



中西 克佳



鹿毛 勇



加藤 真志