

論文 コンクリート構造物表面における降雨・飛沫粒子の到達量に関する実験

中村 文則*1・LUIS ARTURO GARCIA MARTINEZ*2・山口 貴幸*3・下村 匠*4

要旨：本研究では、コンクリート構造物表面に作用する降雨と飛沫粒子に関する実験を行い、コンクリート構造物表面に作用する水分と飛来塩分(飛沫)の到達量について検討を行った。その結果、模型側面に作用する降雨の到達水分量とその範囲は、風況や模型形状に応じて差があり、風速が無風に近いような気象条件では、模型側面に直接到達する降雨量(水分量)が少ないことが明らかになった。さらに、飛沫粒子(疑似的な飛来塩分)を作用させた実験結果から、模型表面における降雨と飛沫は、到達する飛沫量が大きい範囲に、降雨が到達している傾向があることが示された。

キーワード：塩害、降雨、飛来塩分、外部環境、模型実験

1. はじめに

コンクリート構造物内部の鋼材の劣化過程を予測解析するためには、その境界条件となるコンクリート表面の水分と塩分量を正確に把握することが重要である。

既往研究において、竹下ら¹⁾は、構造物表面への降雨による水分の付着および浸透に関する研究を行っている。その結果、構造物表面に到達・付着する降雨量は、局所的な風況や降雨量(降雨強度)に影響を受けていることを報告している。構造物表面の塩分量については、山下ら²⁾、富山ら³⁾が、沿岸部に設置されているコンクリート橋桁を対象に現地観測を行い、構造物の各部位で表面塩分量に差があることを報告している。著者ら⁴⁾は、構造物表面に到達する飛来塩分粒子の現地観測とその予測解析を実施し、飛来塩分の構造物表面への到達過程について明らかにしている。以上の研究成果により、構造物表面における水分および塩分量が、それぞれ各位置で差があることが明らかになっている。

しかしながら、コンクリート内部の水分と塩分(塩化物イオン)は、両者が相互に影響して移動しているため、その境界条件となる表面の水分と塩分も同時に把握することが望ましいが、表面部において両者を同時に研究した事例は少ない。構造物表面に到達・付着する水分と塩分量を同時または同様の条件下で把握することができれば、将来的にコンクリート内部の水分と塩分の浸透予測解析の高精度化につながる。

本研究では、コンクリート構造物表面に作用する降雨と飛沫粒子に関する実験を行い、コンクリート構造物表面における水分と飛来塩分(飛沫)の到達量について検討を行った。

2. 自然環境下での降雨の屋外実験

2.1 実験施設および実験方法

構造物表面における降雨の作用状況を把握するために、実構造物の一部を模擬した模型を製作し、屋外の自然環境下で実験を実施した。実験場所は、新潟県長岡市の長岡技術科学大学の構内である。模型は、縮尺 1/1 の鉄筋コンクリート製である。模型の寸法は、高さ 220cm(地表面から 250cm)、幅 160cm、奥行き 180cm であり、実橋梁を参考に図-1 のような 2 種類の形状とした。模型の製作に用いたコンクリートの配合は、水セメント比 46%、普通ポルトランドセメントである。

実験は、屋外に設置された実験模型に降雨を作用させる方法で実施し、模型側面における降雨の作用状況を確認した。さらに、模型周辺的环境条件についても測定を行った。模型表面の降雨の作用状況は、デジタルカメラを用いて 1 分間隔で撮影する方法で確認を行い、その結果を整理した。環境条件は、模型から 3.5m 程度の位置に気象ステーション(風向風速計、雨量計、日射計、温湿

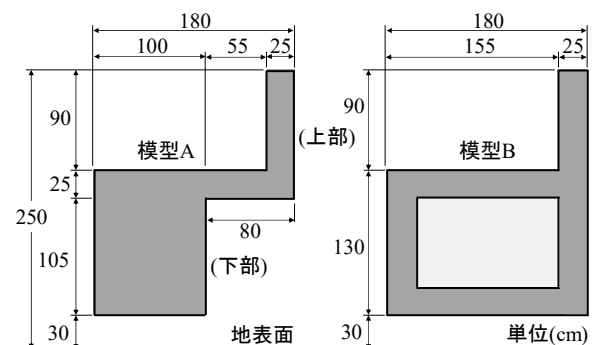


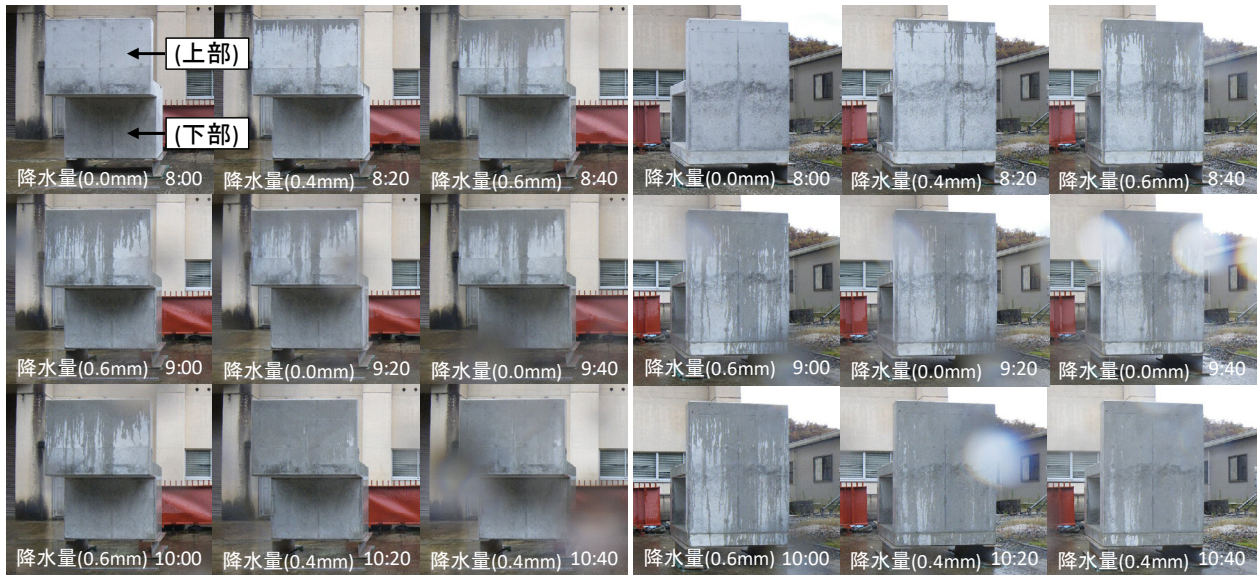
図-1 実験模型

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境社会基盤工学課程

*3 長岡技術科学大学 技術支援センター技術職員 修(工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)



(a) 模型 A(張り出し有)

(b) 模型 B(張り出しなし)

図-2 自然環境下での降雨の作用状況

度計)を設置して測定を行った。測定時間間隔は、1分間隔である。風向風速計は地表面から高さ1.5mと2.5m、雨量計は地表面から高さ1.0mに設置した。

2.2 実験日および環境条件

実験日は2019年11月6日7:00~16:00である。この日は、風速が0.6m/s程度とほぼ無風であり、湿度が92%、気温8.2度であった。降雨は、午前8:00~12:30頃まで模型に作用しており、10分間当たりの降雨量が0.0~0.6mm(3.6mm/h)程度である。

2.3 実験結果および考察

模型表面における降雨の作用状況を20分間隔で整理した結果を図-2に示す。図(a)および(b)は、形状の異なる模型Aと模型Bである。図(a)より、降雨による水分は、降雨が作用してから20分後の8:20に、模型側面の上部から下部へ少しずつ広がっていることがわかる。これは、模型の上縁部に溜まった水が側面に流出しているためである。その後、水分は、2時間後の10:20に模型Aの上部側面(張り出し部より高さが高い部分)全体に分布している状況である。実験を実施した降雨量0.0~0.6mm程度の条件では、側面全体に水分が広がるまでに数十分~数時間程度の時間が生じており、降雨水が側面に広がる速度が遅いことがわかる。また、模型Aの下部側面では、降雨による水分が全く作用していない状況であった。

一方で、図(b)の側面部に張り出しのない形状の模型では、降雨水が模型Aと同様の傾向で模型側面に広がっている。降雨による水分は、実験開始から2時間40分後の10:40頃に、模型側面全体に広がっており、模型Aの傾向と大きな差は見られなかった。

これらの結果より、今回の環境条件のような無風に近い状態では、降雨による水滴が模型側面に直接作用する

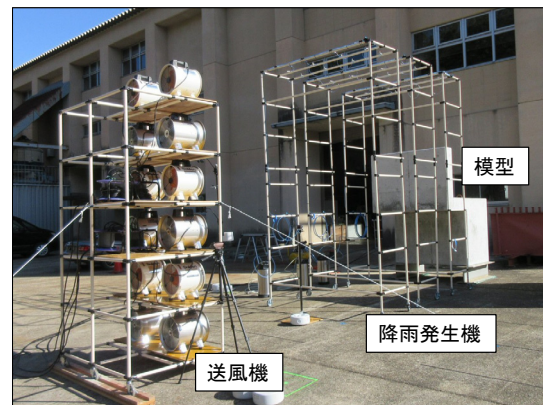


図-3 実験施設

のではなく、降雨水が一度模型の上縁部に溜まり、その水が側面に流出することで、模型側面に広がることがわかった。

3. 風況および降雨を再現した模型実験

3.1 実験施設

模型表面の降雨の作用について、より一般性のある結果を得るために、風況と降雨をコントロールできる施設を構築し、人工的に風と降雨を再現した実験を行った。図-3は、構築した実験施設全体の状況を示したものである。実験施設は、送風機、降雨発生機、実験模型が配置されており、模型に風と降雨を同時に作用できる仕組みになっている。

図-4は、実験施設内の各装置の配置を示した平面図と断面図である。上段の図は施設内の平面図である。左側に実験模型が設置されており、模型表面から0.0~2.0mの範囲に人工的に降雨を発生させる降雨発生機、5.0mの位置に風を発生させるための送風機が配置されている。

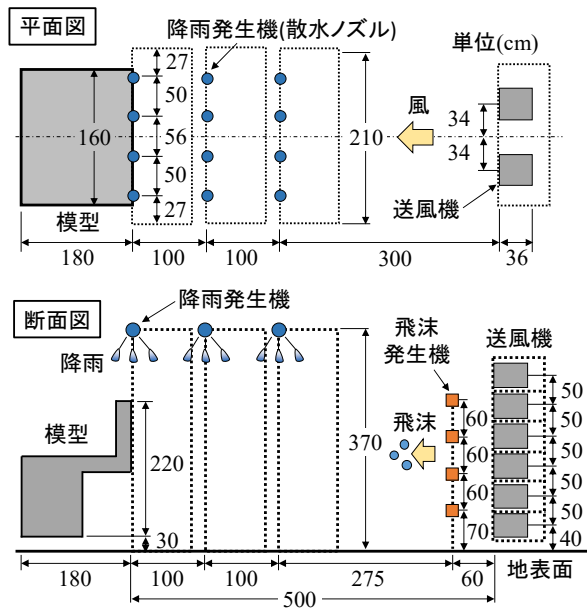


図-4 実験設備の配置図(平面図・断面図)

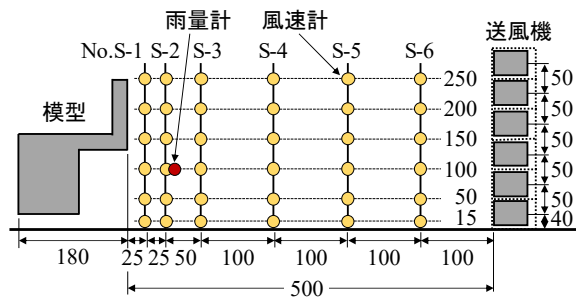


図-5 風速と降雨量の測定位置

対象とした実験模型は、張り出し部がある形状の模型 A とした。下段の図は、施設の断面図である。送風機は、地表面から高さ 3.0m の間に 6 台を 2 列で配置した。使用した送風機(TRUSCO 製)は、風量 52m³/min の性能のものである。降雨発生機は、加圧型の散水ノズルを用いることで降雨による水滴の再現を行った。設置した散水ノズル(いけうち製)は、容量 12L の圧力容器を接続し、気圧 0.2~0.3kPa を作用させた。散水ノズルの配置は、図のように地表面から高さ 3.7m の位置に 12 個を配置し、接続した圧力容器は 3 台である。

3.2 実験方法および実験条件

実験は、無風条件と風速を作用させた条件の 2 種類を実施した。Case1 が無風条件であり、Case2 が風速を作用させた条件である。自然環境下での降雨作用の実験では、気象条件が比較的に穏やかであったため、Case2 では厳しい気象条件を対象に実験を実施した。

測定項目は、模型周辺の風速、降雨量、模型表面に到達する降雨の水分量である。風速はプロペラ風速計(1 方向測定型)を用いて測定を行った。各地点での風速の測定時間は 5 分間であり、測定時間間隔は 1 秒である。測定した風速は、測定時間全体で平均し、その値を整理した。

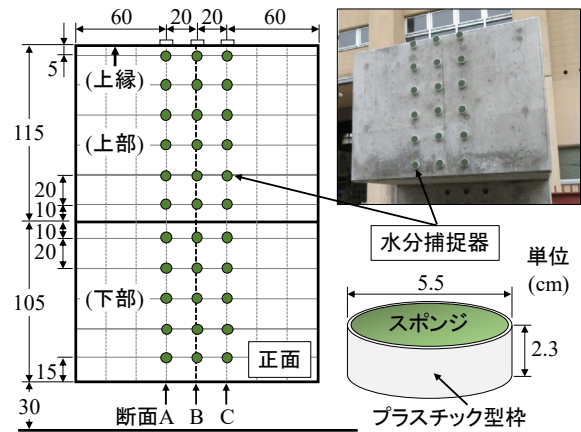


図-6 到達水分量の測定位置

風速計の配置は、図-5 の測定地点 S-1~S-6 において、地表面から高さ 2.5m の範囲にそれぞれ 6 点を配置した。降雨量は、雨量計(AINEX 製)を用いて 1 分間隔で測定を行い、単位時間当たりの値に変換した。

模型表面に到達する降雨の水分量は、図-6 のような水分捕捉器を用いて採取した。捕捉器は、プラスチック製の型枠の内部に給水スポンジが設置されており、そのスポンジ部(直径 5.5cm, 面積 23.7cm²)に触れた水分を採取できる構造になっている。実験では、水分捕捉器を一定時間暴露し、その後、スポンジに含まれた水分の重量を測定し、単位面積・時間当たりの値に変換した。

水分の測定点は、図のように模型側面の中央部を中心とした断面 A~C に合計 33 点を配置した。さらに、模型の上縁部に暴露面が上向きとなるように 3 点を設置した。風速が無風条件の Case1 では、降雨が模型側面に作用しないため、測定点は上縁部の 3 点のみとした。測定時間(降雨作用時間)は、水分がスポンジに十分に作用するように Case1 が 1 分 30 秒、Case2 が 4 分 30 秒とした。Case2 は、スポンジに到達する降雨水が風の影響で少なくなるため、測定時間を変化させている。模型表面における降雨の作用状況は、デジタルビデオで撮影を行い、その結果を整理した。

3.3 実験結果および考察

(1) 模型周辺の風速および降雨量の測定結果

模型周辺における Case2 の風速の鉛直分布を図-7 に示す。図に示すように、模型側面から 1.0m の位置では、風速は 5.3~6.2m/s 程度で鉛直方向にほぼ一定であり、断面全体を通過する平均風速は 6.0m/s である。測定地点 1.0~3.0m までは、風速分布がほぼ同様の傾向である。

模型近傍の側面から 0.25m の地点では、模型形状に応じて風速の鉛直分布が変化していることがわかる。風速は、模型上部で 3.5~4.6m/s 程度、下部で 5.1~5.6m/s 程度であり、模型の上部より下部のほうが大きくなる傾向が見られた。これは、模型の上部では、風速の測定位置

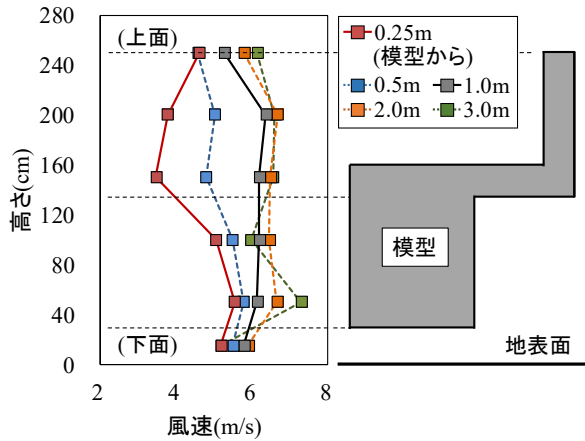


図-7 風速の測定結果

が壁面に近く、風速の減少が大きいためである。

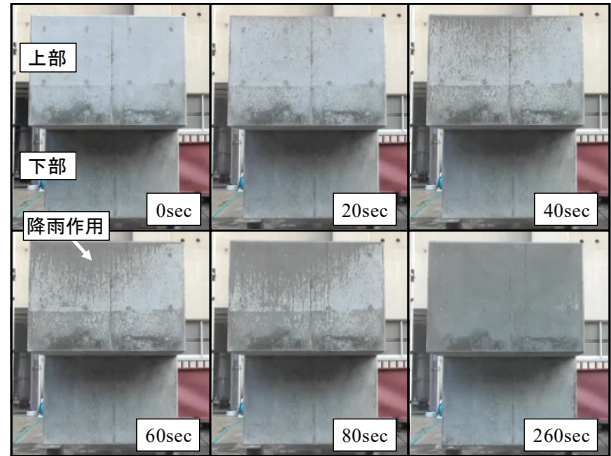
模型周辺で測定した10分当たりの降雨量は、Case1(無風)で18mm、Case2(風速6m/s)で4mmであった。Case1の降雨量は、模型から0.0mと1.0mの両方の位置から発生させた降雨水が雨量計に作用しているため、実際に模型に作用している降雨量と異なる可能性がある。

(2) 模型表面の降雨の作用状況

図-8は、模型表面における降雨の作用状況を整理した結果である。図(a)は、風が無風条件のCase1の結果である。図より、降雨の作用開始から20秒後では、模型側面に降雨による水分は見られないが、40秒後では模型上部に水分が確認できる。その後、降雨の作用開始から260秒程度で、降雨による水分が模型上部の側面全体に広がっている。これは、自然環境下で降雨を作用させた屋外実験の結果と同様の傾向であり、模型上縁部に溜まった降雨水が、模型側面を流れることで広がっていることがわかる。また、模型下部(張り出し部より下部)の側面では、降雨による水滴が到達していない状況であった。

図(b)は、風速6m/s程度の風を作用させたCase2である。図から、降雨作用の開始から4秒後に、模型上部の左側が降雨によって濡れていることがわかる。その後、模型上部の側面全体に降雨が少しずつ作用しており、10秒後には上部の側面全体に水分が広がっている。模型全体に水分が広がった後では、降雨による水分がコンクリート表面を流れ続けるような状況であった。開始から4秒後の結果で、降雨の作用状況が若干左側に偏っている要因としては、実験中では風がほぼ無風であったが、時折、微小な風が左方向に作用していたためである。

模型下部の側面では、下図に示すように降雨による水滴が、地表面から高さ80cm(模型下面から50cm)程度の範囲で作用していた。Case1の無風条件では、降雨による水滴が下部側面に到達していなかったため、降雨が作用する範囲は、周辺の風況に影響されて変化していると考えられる。



(a) Case1(無風状態)



(b) Case2(風速6m/s)

図-8 模型表面の降雨の作用状況

(3) 降雨による到達水分量

模型表面に作用する水分量を定量的に評価するために、Case2の条件を対象に表面に到達する水分量の測定を実施した。図-9は、模型側面における降雨による到達水分量の測定結果を整理したものである。図より、模型側面の到達水分量は、模型上部と下部の側面に差があることがわかる。模型上部の側面では、到達水分量が $1.0l/m^2/min$ 程度であり、ほぼ一定の分布となっている。

模型下部の側面では水分量が $0.0\sim 0.5l/m^2/min$ であり、地表面から高さ80~130cm付近には、降雨が作用してい

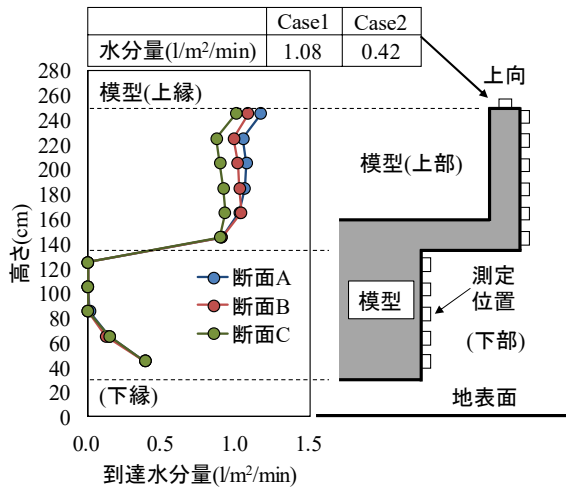


図-9 到達水分量の測定結果

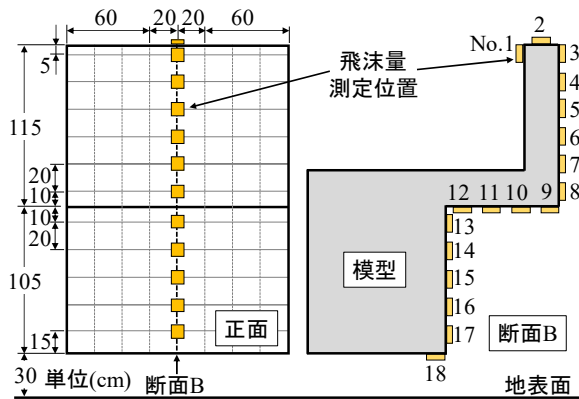


図-10 飛沫粒子および飛沫量の測定位置

ない結果であった。この結果より、模型 A のような張り出し部があるような形状では、降雨による到達水分量が表面の各位置で差があることが定量的に示された。さらに、降雨による水分が一部の範囲で作用していない状況であり、その範囲は張り出し部の長さなどの模型形状に依存して変化していると考えられる。

図中の表は、模型の上縁部に上向きに設置した水分捕捉器の測定結果である。到達水分量は、Case1 で大きい傾向にあり、Case2 の水分量 $0.42\text{l/m}^2/\text{min}$ の 2 倍程度になっている。これは、Case2 では、降雨の水滴が、水平方向からの風により、風下側に飛ばされているためである。

4. 模型表面に作用する飛来塩分量(飛沫量)の検討

4.1 飛来塩分量の表面分布

模型表面に作用する降雨量とともに、塩分量の分布を把握することができれば、実際の建造物の劣化過程の予測解析において有効な知見となる。そのため、降雨作用の実験と同様の条件で、模型表面に作用する飛来塩分量(飛沫量)について検討を行った。

4.2 実験方法および実験条件

実験は、飛来塩分を疑似した飛沫粒子と風を同時に作

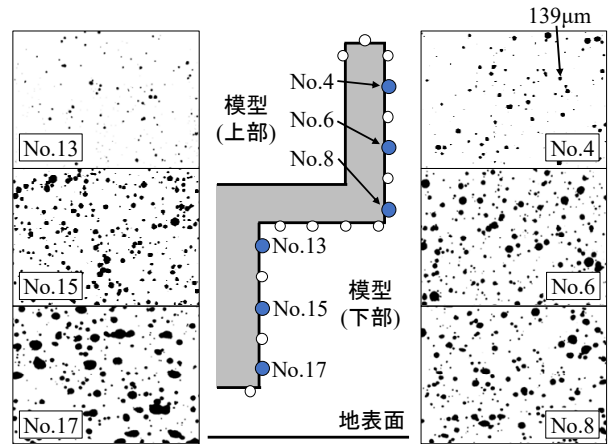


図-11 飛沫粒子の到達状況

用させる方法で実施した。風の条件は、Case2 と同様に模型から 1m の位置で風速 6m/s となるようにした。飛沫粒子の発生は、微小な水滴を噴霧できる噴霧ノズル(いけうち製)を使用した。このノズルは、空気とともに微量な飛沫を同時に噴霧する方法で、平均粒径 $100\mu\text{m}$ 程度の飛沫粒子を扇形に放出できるものである。飛沫の発生位置は、模型側面から風上側に 4.6m の位置であり、地表面から高さ 2.5m の範囲に噴霧ノズル 4 個を設置した。実験では、模型に到達する飛来塩分を飛沫の到達量で評価する方法としたため、噴霧に用いた液体は塩分を含まない水道水とした。飛沫粒子の発生時間は 3 秒間であり、この飛沫粒子の到達が終了するまで測定を行った。

模型表面に到達する飛沫量の測定は、表面に到達した飛沫の痕跡を可視化し、画像解析で算出する方法とした。痕跡の可視化は、直径 $50\mu\text{m}$ 以上の水滴を検出できる感水試験紙(寸法 $7.6\text{cm} \times 5.2\text{cm}$)を使用した。感水試験紙は、厚さ 1mm 程度のアクリル板に張り付け、それを模型表面に設置した。画像解析は、一定時間暴露した感水試験紙の表面をデジタルカメラで撮影し、その画像から飛沫粒子の痕跡の大きさと座標を測定した。測定した飛沫粒子の大きさは、角川ら⁹⁾を参考に大気中の飛沫粒子の大きさに変換して整理を行った。測定点は、図-10 のような模型中央部の鉛直方向に 18 点を配置した。

4.3 実験結果および考察

図-11 は、模型表面に到達した飛沫粒子の痕跡を示した結果である。図の黒色の部分が飛沫粒子の到達した痕跡である。図より、感水試験紙の痕跡から、飛沫が模型表面に到達していることが確認できる。模型の側面上部においては、測定点 No.4 で到達した粒子の痕跡全体の面積が小さく、測定点 No.6 と No.8 で大きくなっている。側面下部においては、測定点 No.17 で痕跡の面積が大きく、張り出し部近傍の No.13 では小さい傾向である。また、模型表面の各部分で、到達した各粒子の痕跡の大きさが異なっている傾向が見られる。

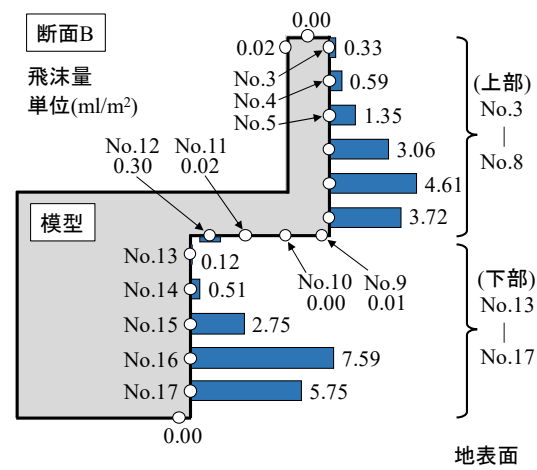


図-12 飛沫粒子の到達量の測定結果

図-12は、模型表面における飛沫粒子の到達量を画像解析から算定した結果である。図に示すように、模型表面に到達する飛沫量は、模型形状に応じて変化しており、表面の各位置で差が生じていることがわかる。模型上部の測定点 No.3~5 付近では、飛沫量が少ない傾向が見られる。既往研究^{7) 8)}では、飛沫の到達量は、橋桁高欄の上部で大きくなっており、本実験結果の傾向と異なっている。これは、今回の実験で飛沫を発生させる噴霧ノズルの高さが低かったことが影響している可能性がある。今後、飛沫の発生位置を変化させた実験を行い、再度検討を行う予定である。

模型下部では、飛沫の到達量は、地表面に近い位置で大きく、測定点 No.16 で 7.59 ml/m² と No.17 で 5.75 ml/m² となっている。降雨による水分が到達していなかった測定点 No.13~14 付近にも、飛沫量 0.12~0.51 ml/m² 程度が到達している。この結果は、著者らの既往研究⁷⁾の結果と同様の傾向である。模型の張り出し部の下向面に設置した測定点 No.9~12 では、飛沫の到達量が 0.0~0.3 ml/m² と少ない結果であった。これらの結果より、模型表面に到達する飛沫量は、模型形状に応じて分布が変化しており、飛沫の到達量が大きい範囲に降雨が作用している傾向があることが明らかになった。

5. 結論

構造物表面に作用する降雨と飛来塩分を再現した実験を実施した結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 風速が無風に近いような気象条件では、模型側面に直接到達する降雨量は少なく、模型上縁部に溜まった水分が流出することで模型側面に水分が分布していること。
- (2) 模型側面に作用する降雨の到達水分量とその範囲は、模型形状に応じて差があり、一部の範囲で降雨による水分が作用していないこと。

- (3) 模型表面に到達する飛沫量は、各位置で差があり、飛沫の到達量が大きい範囲に、降雨が作用している傾向があること。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(基盤研究 B)「実空間・サイバー空間連携システムによるコンクリート構造物の環境劣化予測技術の開発」(研究代表者：中村文則、課題番号：19H02212)、科学研究費(若手研究 A)「高度な環境作用を統合したコンクリート構造物の環境劣化予測システムの構築」(研究代表者：中村文則、課題番号：17H04931)、一般財団法人上田記念財団「第 10 期研究助成」(研究代表者：中村文則)の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹下直樹, 加藤佳孝: 局所的風況・降雨量予測を基にしたコンクリート構造物への水分浸透に関する研究, 生産研究, 57 巻 4 号, pp.118-121, 2005.
- 2) 竹下直樹, 加藤佳孝: 気象条件を考慮した流体解析に基づくコンクリート構造物への水分付着に関する研究, 生産研究, 58 巻 3 号, pp.89-92, 2006.
- 3) 山下将一, 富山 潤, 阿部和久, 佐伯竜彦, 紅露一寛: 風向を考慮した 3 次元数値解析によるコンクリート橋の付着塩分量推定, 日本材料学会コンクリート構造物の補強, 補修, アップグレード論文報告集, 第 17 巻, pp.609-614, 2017.10
- 4) 富山 潤, 羽瀧貴士, 宮里心一, 中林 靖: コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015.7
- 5) 中村文則, 井野裕輝, 大原涼平, 下村 匠: 橋桁表面に到達する海水飛沫粒子の到達量および粒径分布の現地観測と数値解析, 日本材料学会コンクリート構造物の補強, 補修, アップグレード論文報告集, 第 18 巻, pp.323-328, 2018.10
- 6) 角川 修, 深山大介, 荒木琢也: 感水紙を用いた茶園における農薬散布時のドリフトの評価, 茶業研究報告, No.106, pp.21-38, 2008.
- 7) 中村文則, 山口貴幸, 井向日向, 下村 匠: コンクリート橋桁表面への飛来塩分粒子の到達過程に関する模型実験とその再現解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.761-766, 2019.7
- 8) 山田文則, 細山田得三, 下村 匠, 佐藤堅介: 構造物周辺における飛来塩分の輸送過程に関する数値解析と現地観測, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1001-1006, 2006.7