

論文 3 次元仮想空間技術を利用した建造物の維持管理システムの提案とその検証

増田 健*1・中村 文則*2・山口 貴幸*3・下村 匠*4

要旨: 本研究では、仮想空間技術を利用してコンクリート建造物に作用する日射とそれに応じた温度変化を予測できる管理システムを提案し、その構築を行った。さらに、構築したシステムの妥当性について検証するために、コンクリート建造物の表面・内部の温度分布に関する屋外実験を実施した。その結果、3次元測量データと建造物図面を利用して、実空間の地形と建造物を再現した3次元仮想空間を構築できることが示された。仮想空間に日射と温度変化解析の数値シミュレーションを統合した管理システムを構築することで、日射作用に応じた建造物の表面・内部の温度分布を予測できることが明らかになった。

キーワード: 仮想空間, ICT, 維持管理, 外部環境, 温度解析

1. はじめに

コンクリート建造物の劣化現象(主に塩害)は、建造物に降雨および飛来塩分が作用し、コンクリート表面から内部に水分と塩分(塩化物イオン)が浸透することで引き起こされる。そのため、コンクリート建造物の劣化現象(主に塩害)を高精度で予測するためには、以下の1)~5)の過程を統合して予測できるようにすることが重要である。

- 1) 建造物表面の飛来塩分の作用による塩分の供給
- 2) 建造物表面の降雨作用による水分の供給と表面物質の洗い流し
- 3) 建造物表面の日射作用と温度変化による表面水分の蒸発と塩分濃縮
- 4) 建造物内部の水分・塩分の移動・浸透
- 5) 内部鉄筋の腐食

これらの過程を予測できるようにするために、これまで多くの既往研究が進められてきた。例えば、コンクリート外部から表面・内部の塩分量については、Wattanapornprom¹⁾、中村ら²⁾が、風と波浪、飛来塩分を統合した予測モデルを構築している。建造物表面の降雨作用については、Nguyenら³⁾が、降雨の到達やその洗い流し作用について報告を行っている。コンクリートに作用する日射と温度の予測については、女屋ら⁴⁾が予測モデルを開発している。コンクリート内部への水分と塩分の移動・浸透モデルは、これまで多くの研究成果が報告されており、表面境界条件を正確に設定することで、コンクリート内部の水分と塩分量を予測できるようになっている。これらの研究で開発された高度な数値シミュレーションモデルにより、外部の自然環境作用からコンクリート建造物内部の鉄筋腐食過程を予測できるようになっ

ている。

しかしながら、このような高度な数値モデルは、汎用的および高精度であるが、出力される結果が複雑であり、その結果を最大限に利用できていないのが現状である。これまで開発されてきた数値シミュレーションをインターネット上の簡易かつ幅広いアクセスが可能な仮想的空間に導入し、その結果を利用できるようにすることで、これまでの研究成果を効率的かつ幅広く利用できるようになる可能性がある。これは、将来的に建造物の劣化予測技術の高度化と維持管理を効率化するための技術の一つにつながる。

本研究では、建造物の劣化現象に関連する1)~5)の過程の中で、詳細な検証が可能な日射と温度変化予測に注目し、仮想空間技術を利用してコンクリート建造物に作用する日射とそれに応じた温度変化を予測できる管理システムを提案し、その構築を行った。さらに、構築したシステムの妥当性について検証するために、コンクリート建造物の表面・内部の温度分布に関する屋外実験を実施した。

2. 仮想空間を利用した維持管理システムの提案

2.1 維持管理システム全体の構成

構築した維持管理システム全体の構成を図-1に示す。維持管理システムは、図のような3次元仮想空間を中心に構成されており、建造物とその周辺地形を含めた空間に、自然環境作用として日射や温度変化(熱伝導)の数値シミュレーションを統合した構成になっている。システムは、Web上に構築されており、インターネットを通して、数値シミュレーションで予測した日射作用やそれに

*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 学(工) (学生会員)

*2 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)

*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)

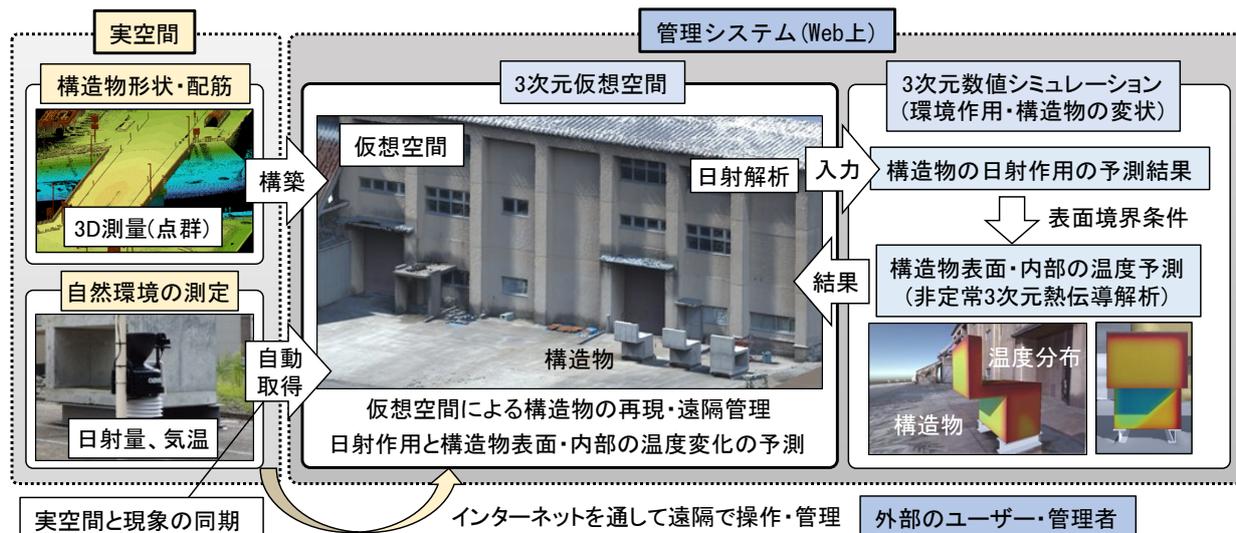


図-1 維持管理システム全体の構成

応じた構造物表面・内部の温度変化を遠隔で管理できるようになっている。また、実空間で測定した自然環境データを、インターネットを通して自動取得することで、実空間と同期した自然環境作用を仮想空間内でほぼリアルタイムで再現できるようにした。

本検討では数値シミュレーションとして、日射作用に応じた構造物表面と内部の温度変化予測を統合しているが、今後、風や降雨、波浪、飛来塩分、コンクリート中の水分・塩分の予測モデルを追加することで、構造物の劣化予測に直接適用することが可能である。

2.2 3次元仮想空間の構築方法

3次元仮想空間は、実空間を対象とした3次元測量データから周辺地形を含めた構造物モデルを作成し、それをインターネット上で遠隔管理・操作できるように構築した。具体的には、レーザープロファイラ測量と写真測量から実空間の点群データを取得し、それをメッシュ化した。点群データの編集とメッシュ化には、CloudCompare、Brender、Metashapeの点群データを処理できるソフトを利用した。対象とした構造物内部の鉄筋の配置や詳細な形状は、構造物図面を参考にモデル化を行った。

構築した3次元構造物モデルのインターネット上での遠隔管理・操作は、幅広く利用されているオープンソフトUnity(Unity Technologies 開発)を使用した。このソフトは、構造物モデルなどをインターネットに公開できるのであり、仮想空間内に構築した構造物や日射作用などの予測結果を可視化できるものである。今回は、仮想空間内において、視点を移動させる機能、日射の作用およびそれに応じた対象構造物表面の温度変化を可視化できるようにした。これらの機能は、プログラム言語C#により追加できるようになっている。

2.3 日射作用とそれに応じた温度変化の予測解析

(1) 構造物に作用する日射の予測解析

構造物に作用する日射(太陽光)は、対象とした構造物を中心に、各時間における太陽の向きを仮想空間に設定し、その太陽の向きから直線状に光を放射させる方法で計算を行った。太陽光の放射線上に障害物がある場合は、その背後が影となるようにした。このような方法で、日射が作用する範囲と作用しない影となる範囲を判定した。

ただし、この方法では、周辺の障害物や構造物の形状に応じた日射の作用範囲(影)は再現できるが、上空に雲がある場合などは再現が不可能である。そのため、実際の計算では、日射が作用している範囲に気象ステーションで実測した日射量を設定する方法とした。このような方法で、上空の雲などによる日射量の減少を仮想空間で再現できるようにした。

(2) 構造物表面・内部の温度変化の予測解析

日射によるコンクリート表面と内部の温度変化の予測解析は、式(1)の非定常3次元熱伝導方程式で行った。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 T は温度($^{\circ}\text{C}$)、 c はコンクリートの比熱($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)、 ρ はコンクリートの密度(kg/m^3)、 k はコンクリートの熱伝導率($\text{J}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{s})$)、 t は時間(s)である。

熱伝導解析の境界条件となる外気温と日射によってコンクリート表面部に供給される熱量(熱流束)は、既往研究^{4) 5)}を参考に、算定式(2)で計算を行った。

$$q_{in} = -m(T_{sur} - T_{air}) + \alpha \cdot \beta \cdot R_n \quad (2)$$

ここで、 q_{in} は構造物表層に流入する熱流束($\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$)、 m はコンクリートと大気間の熱伝達係数($\text{J}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{s})$)、 T_{sur} はコンクリート表層部の温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_{air} はコンクリート外部の大気温度($^{\circ}\text{C}$)である。

表-1 計算設定パラメータ

| 項目 | 記号 | 単位 | 設定値 | |
|---------------|------------------|----------|--------------------------|------|
| 温度解析 (熱伝達) | コンクリートの密度 | ρ | kg/m ³ | 2400 |
| | コンクリートの比熱 | c | J/(kg・°C) | 1050 |
| | コンクリートの熱伝導率 | k | J/(m・°C・s) | 2.6 |
| | 計算格子間隔 | dx | m | 0.01 |
| | | dy | | 0.01 |
| dz | | 0.01 | | |
| 計算時間間隔 | dt | s | 10 | |
| 表面境界部 | コンクリートと大気間の熱伝達係数 | m | J/(m ² ・°C・s) | 13.4 |
| | 補正係数 | α | - | 0.6 |

R_n は日射量による熱流束(J/m²/s)であり、気象ステーションで測定された日射量に補正係数 $\alpha(=0.6)$ と各壁面と日射の作用角度による減衰率(反射率) β を乗じることで算定を行った。構造物表面で日陰となっている部分は、日射量による熱流束 R_n を 0.0J/m²/s と設定した。コンクリート外部の大気温度 T_{air} は、気象ステーションで測定した値を設定した。

解析方法は差分法の陽解法であり、対象とした構造物を等間隔で離散化して計算した。計算に設定したパラメータを表-1 に整理した。コンクリートの熱伝導率および比熱は、コンクリート標準示方書⁶⁾を参考にした。コンクリートと大気間の熱伝達係数は、既往研究⁷⁾を参考に設定した。

(3) 仮想空間と実空間の自然環境作用の同期

仮想空間において、実空間で作用している自然環境作用をリアルタイムで同期できるようにするために、実空間の日射量や気温の測定結果をインターネット上に保存し、管理システムで取得できるようにした。一定時間間隔で日射量および気温データを取得し、数値シミュレーションの入力条件として利用することで、実空間と同期した自然環境作用を再現した。

3. 屋外実験による検証データの取得

3.1 実験場所および対象とした構造物

構築した管理システムの予測結果の妥当性を検証するために屋外実験を実施した。実験場所は、構造物を詳細に管理・測定できる長岡技術科学大学内の屋外実験場を利用した。

実験では、図-2 のような橋桁の側面部の形状を模擬した鉄筋コンクリート製の模型を作製し、その模型を利用して実験を行った。模型寸法は、幅 1.6m、高さ 2.2m(地表面から 2.5m)、奥行 1.8m であり、実験スケールは実寸大(1/1)である。コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメント、水セメント比 45% である。実験期間は、2020



図-2 鉄筋コンクリート製模型

年 10 月 1~31 日である。

3.2 実験方法

(1) 測定項目

実験は、製作した模型の表面・内部で温度を測定するとともに、模型周辺の自然環境作用を測定する方法で実施した。測定項目は、日射範囲、日射量、気温、降雨量、構造物表面と内部の温度であり、これらを時系列で測定した。

(2) 模型周辺の自然環境作用の測定

模型周辺の自然環境作用(日射量、気温、降雨量)は、複合型の気象ステーションと Web カメラ 2 台を設置して測定を行った。気象ステーションの設置位置は、模型から水平方向に 4m、地表面から高さ 1.2m の位置である。気象ステーションでは、日射量と気温、降水量のほかに、今回は使用していないが風速・風向、湿度についても測定を行っている。測定の時間間隔は 10 分間隔である。

模型表面の日射作用の範囲は、Web カメラを模型前後に設置して、画像を連続的に撮影する方法で測定した。設置位置は、模型から 4m 程度離れた正面位置と背後である。撮影した画像は、10 分間隔でインターネットを通して、Web サーバーに自動保存されるようになっている。

(3) 模型の表面と内部の温度変化の測定

模型表面と内部の温度は、温度センサーを設置して測定を行った。模型表面のセンサーは、日射が作用することでセンサー自体が温度上昇する可能性があるため、発砲スチロールでセンサー部を覆い、アルミテープで防水処理を行った。温度の測定時間間隔は、自然環境作用と同様に 10 分間である。温度センサーは、図-3 と図-4 のように模型表面に 34 個、模型内部に 16 個を配置した。本検討では使用していないが、その他に模型内部にひずみセンサー 23 個、水分センサー 24 個が埋設されている。各センサーは、設置位置を離して設置することで、各センサーが測定結果に影響しないようにしている。

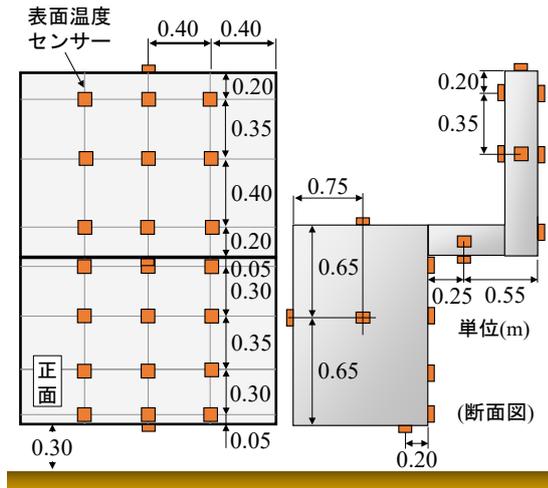


図-3 温度センサーの配置図(表面部)



図-5 構築した3次元仮想空間

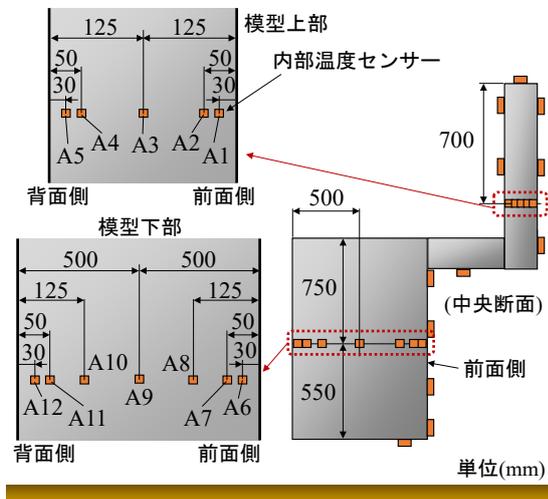


図-4 温度センサーの配置図(内部)

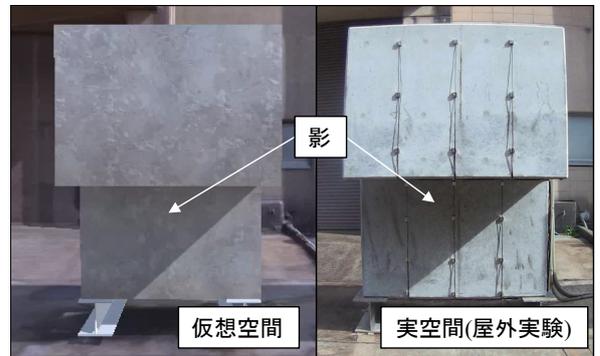


図-6 日射作用の比較(2020年10月18日13時)

細に再現できない(角が再現できない)といった問題点が見られた。そのため、構造物の端部は、図面を参考に形状の修正を行った。

図-6 は、仮想空間内で予測計算された日射作用の予測結果である。図は2020年10月18日13時の結果である。実空間の結果は、模型から4mの位置に設置したWebカメラで撮影した画像であり、10分間隔で連続的に撮影したものである。図より、構造物表面における日射と影の分布は、仮想空間と実空間で一致していることがわかる。10月18日以外の予測結果を比較した結果では、夕方の太陽高度が低い時間帯で、周辺の植栽などの影響で、若干再現できていない結果が見られた。そのほかの時間帯では、構築した仮想空間において、日射の範囲を再現できている結果が得られた。

4.3 構造物表面・内部の温度の時系列分布

図-7 は、維持管理システムで予測した構造物の表面と内部の温度変化の予測結果と実験結果を比較したものである。図の上段の2つのグラフは、気象ステーションで測定した実験時の気温と降雨量の時系列分布である。図に示すように、構造物表面の測定位置 No.S0~S2 では、温度変化の予測結果は、実験結果をおおむね再現できていることがわかる。構造物の上端部近傍の測定位置

4. 管理システムによる予測結果とその検証

4.1 屋外実験を再現した管理システムの構築条件

屋外実験で利用した鉄筋コンクリート模型を対象に、3次元仮想空間を構築し、実験結果との比較を行った。仮想空間の地形と構造物形状は、実験模型を中心に20m×40mの範囲を対象に3次元点群測量を実施し、その結果から構築した。点群データの間隔は5mm程度である。予測期間は、実験を実施した2020年10月1~31日である。実空間と仮想空間を同期するために使用した気象ステーションの測定結果は、事前に保存しておいた31日間の10分間隔のデータを利用した。

4.2 仮想空間と構造物に作用する日射作用の予測結果

図-5 は、管理システム内に構築した3次元仮想空間を示したものである。図に示すように、3次元測量による点群データから構造物と周辺地形を形成できていることがわかる。構造物の構築は、詳細な点群データを使用して構築したが、点群データだけでは構造物の端部を詳

No.S0 では、温度の変動傾向は予測結果と実験結果で一致しているが、予測結果のほうが全体的に過大に示されている傾向が見られる。温度の絶対値で差が生じている点から、計算に設定した補正係数の値に問題があると考えられる。今回の解析では、日射量から表面に供給される熱量の補正係数 α は、構造物内部の No.A1 と A9 の実験結果に一致するように設定している。そのため、構造物壁面の中心に近い位置では、予測結果と実験結果が一致するが、構造物端部付近では再現性が低下することが考えられる。今後、構造物の端部の測定結果を含めて、係数 α の値を再設定するとともに、補正係数 α に影響を受ける熱伝導解析の熱伝達係数 m と熱伝導係率 k についても再度検討する必要がある。

測定位置 No.S1(上部表面部)の結果では、予測結果が実験結果をおおむね再現できているが、10月5~7日、13~14日、23~26日、29~31日付近で、予測結果のほうが過大になっている時間帯がある。降雨量が2mm/hを超えているような条件の後に、1~2°C程度の差が生じている傾向があり、降雨水的作用による表面温度の低下が影響している可能性がある。今回の予測解析では、日射の影響は考慮しているが、降雨水による表面温度の低下は考慮されていないため、差が生じたと考えられる。一方で、測定位置 No.S2(下部表面)では、降雨による影響がほとんど見られないが、これは構造物上部の張出部の影響で降雨が遮蔽され、この部分に降雨水がほとんど作用しないためである。

構造物内部の測定位置 No.A1(上部)では、降雨量が作用している時間で若干差が見られるが、予測結果は実験結果をおおむね再現できている。構造物中心位置(表面から50cm)の測定位置 No.A9 では、予測結果の温度は1°C程度過小となっている時間帯が見られる。これは、表面部 No.S2 付近の表面温度の予測結果が、実験値と比較して低くなっていることが関係していると考えられる。

4.4 構造物表面の温度分布の予測結果

図-8 は、構造物の表面温度の分布を予測した結果を示したものである。図の上段は、2020年10月18日14時の結果である。図に示すように、予測結果の温度分布は、構造物の端部で局所的に大きくなる傾向があり、日射が作用しているほかの時間の結果でも同様の傾向が見られた。図中の数値は、予測結果と実験結果の温度を示した値である。構造物表面の温度は、端部および側面部では予測結果のほうが過大となる傾向があり、予測結果は構造物の端部付近で、実験値と差が生じている可能性がある。

図の下段は、構造物表面の端部以外の温度分布を可視化した結果である。図より、仮想空間における温度分布は、影となっている部分で実験結果より若干温度が高い

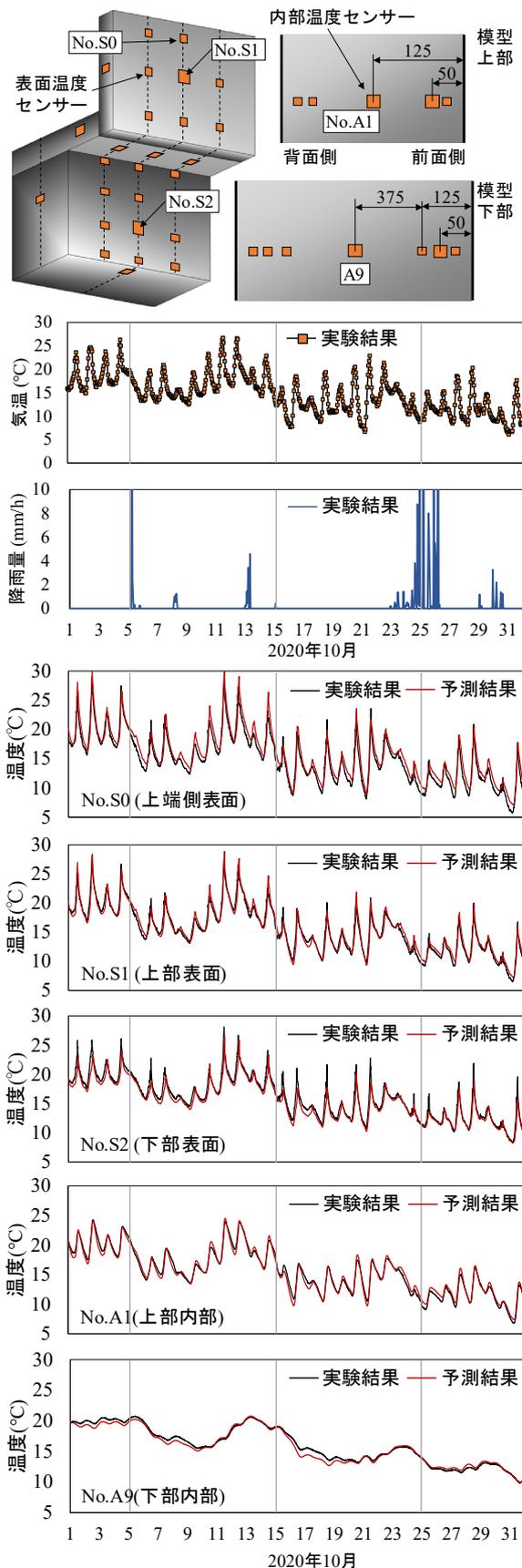


図-7 構造物表面・内部の時系列分布

値であるが、全体的な分布の傾向をおおむね再現できていることがわかる。降雨が作用していた10月24日14時

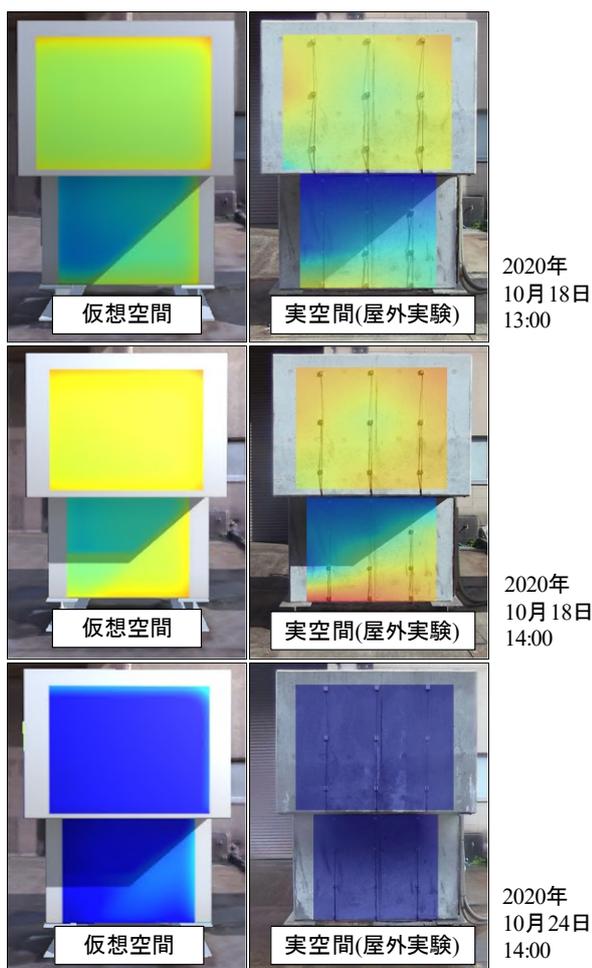
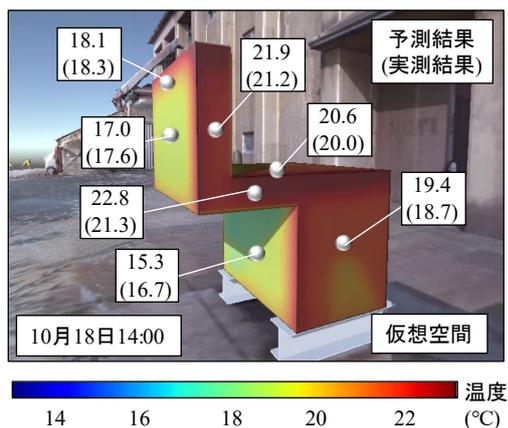


図-8 構造物表面の温度の空間分布

の結果では、予測結果が、実験結果と比較して全体的に1°C程度過大となっていた。今回の解析では降雨による影響を考慮していないために、降雨水的作用による表面温度の低下を考慮できていないことが要因である。

これらの結果から、表面温度の予測結果は、構造物の端部近傍で実験結果と差が生じる傾向があり、計算に設定した係数を再検討するとともに、端部付近の温度の測定位置を追加した実験を実施する必要があることがわかった。構造物の端部以外の部分では、温度分布をおおむね再現できることが示された。

5. 結論

3次元仮想空間を利用した構造物の管理システムの提案とその検証のための屋外実験を実施した。その結果、3次元測量データと構造物図面を利用して、実空間の地形と構造物を再現した3次元仮想空間を構築できることが示された。仮想空間に日射と温度変化解析の数値シミュレーションを統合した管理システムを構築することで、仮想空間を利用して日射作用に応じた構造物の表面・内部の温度分布を予測できることが明らかになった。

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(挑戦的研究(萌芽), 課題番号:20K21054)、一般財団法人上田記念財団「第11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) Wattanapornprom, R. and Ishida, T.: Comprehensive numerical system for predicting airborne chloride generation and its ingress in concrete under actual environmental conditions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 16, pp. 18-35, 2018.
- 2) 中村文則, 下村 匠, 大原涼平, 細山田得三: 飛来塩分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長期的な塩害環境作用の評価への適用, 土木学会論文集 E2, Vol.75, No.2, pp.60-79, 2019.4
- 3) Nguyen Ho Quang, 中村文則, 井向日向, 山口貴幸, 下村 匠: 降雨作用を受けるコンクリート構造物の表面・表層部の表面塩分量に関する実験, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第20巻, pp.215-220, 2020.10
- 4) 女屋賢人, 下村 匠, Thynn Thynn HTUT: 屋外一般環境下におけるコンクリート構造物中の含水状態の長期変動解析法の高精度単化, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.760-765, 2014.7
- 5) 渡邊一旭, 下村 匠, 藤本憲宏, 笠原久稔, 鈴木崇伸: 地盤と構造物の統合熱伝導解析による土中コンクリートマンホール内の温湿度環境の推定, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.2, pp.65-77, 2020.
- 6) 土木学会, コンクリート標準示方書(設計編)2017年制定, pp.44, 2018.3
- 7) 緒方英彦, 服部九二雄: コンクリートの熱伝達係数の評価方法に関する研究, 農業土木学会論文集, No.206, pp.109-116, 2000.4