

仮想空間技術を利用したコンクリート構造物の維持管理システムの開発

コンクリート研究室 増田 健
指導教員 中村文則
副指導教員 下村 匠

1. はじめに

近年、数値シミュレーション技術の発達とともに、コンクリート構造物の劣化現象を数値シミュレーションにより予測する研究が進んでいる。その一方で、ICT・IoT 技術やデータマイニングなどの情報工学技術が急速に発達し、その方法論が様々な分野で利用できるようになっている。土木分野で開発されてきた数値シミュレーション技術に、ICT 技術および3次元空間技術などの情報工学技術を高度に融合させることで、コンクリート構造物の劣化予測解析および維持管理を効率的に実施できる可能性がある。本研究では、コンクリート構造物の維持管理の効率化を目的として、3次元仮想空間と数値シミュレーションを融合した構造物の維持管理システムを構築した。さらに、自然環境作用およびそれによる構造物の応答に関する実験を実施し、構築したシステムの妥当性について検証した。

2. 仮想空間を利用した維持管理システムの構築

2.1 維持管理システム全体の構成

維持管理システムの全体構成の概要図を図-1に示す。図の左側が実構造物の存在している実空間である。実空間では、構造物の測量データ、気象ステーションによる自然環境作用の観測データ、既存構造物の点検データなどが保有されている。図の右側が、構築した維持管理システムであり、実空間に対応した3次元仮想空間と物理的な数値シミュレーション(自然環境作用、構造物の応答)で構成されている。維持管理システムは Web サーバー上で動作しており、インターネットを通して、実空間のデータを自動で取得することで、実空間の自然環境作用と構造物の応答をリアルタイムで再現できる仕組みとなっている。本研究では、自然環境作用として、日射、風況、降雨、構造物の応答として到達降雨、温度拡散を対象として構築した。

2.2 維持管理システムの構築

(1) 実空間を再現した仮想空間の構築

仮想空間の構築は検証のために詳細なデータを取得する必要があるため、長岡技術科学大学の一部である屋外実験場を対象とした。構築範囲は1250m²であり、構築範囲内に鉄筋コンクリート製の実験模型を作製した。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。模型表面・内部に、熱電対などのセンサーが設置されている。

(2) コンクリート構造物に作用する周辺環境の再現

仮想空間内での構造物への日射作用は、障害物による日射の遮蔽を考慮した日射の作用範囲とその日射量(日射強度)を予測する必要がある。日射の作用範囲は、現在時刻から太陽の高度角と方位角を算出するモデルを使用し、仮想空間内の光源を回転させて再現した。

仮想空間での風況解析はレイノルズ平均ナビエーストークス方程式で行った。数値解法には安定性の高いSIMPLE法を用い、乱流モデルとしては標準k-εモデルを適用した。計算領域は対象構造物を含んだ50m×25m×25mであり、約260万格子のメッシュを生成している。構造物周辺の風況をリアルタイムで再現するために、予め風況解析を行い、現在時刻に応じた風況結果を仮想空間へ反映させた。実空間の風況を再現する目的で風況の解析ケースは、風向を16方位のうち主要な6方位、風速を0.4m/s刻みで0.4~3.1m/sの範囲とした。

仮想空間での降雨解析は2流体モデルが計算可能なオイラー混相流モデルで行った。計算領域と格子間隔は風況解析と同様である。降雨解析は風況の解析結果を使用するため、解析ケースは風況解析時の風向、風速に加えて降雨強度を、1, 2, 5, 10, 30mm/hとした。降雨解析は計算量が

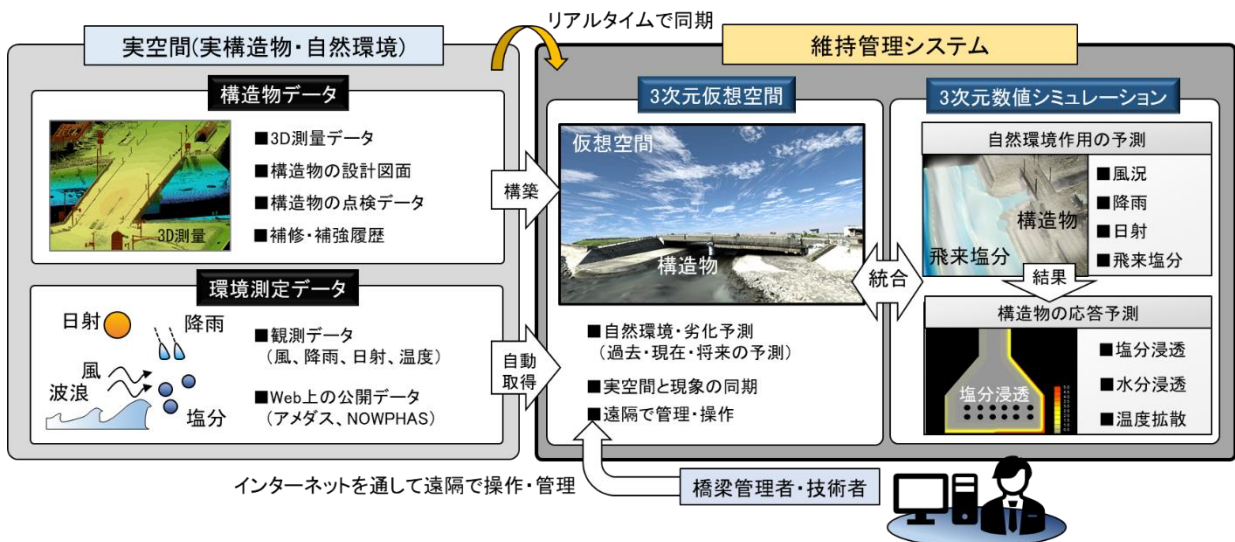


図-1 維持管理システムの全体構成

多量であるため、仮想空間には計算結果の反映は行わず、降雨の発生のみ再現した。

(3) コンクリート構造物に生ずる応答の再現

水平速度成分を持つ降雨が構造物側面に到達する降雨到達率 η は支配方程式より雨の体積比と速度場を計算した後、式(1)で求めることができる。

$$\eta(t) = \frac{R_{wdr}(t)}{R_h(t)} \quad (1)$$

ここで、 R_{wdr} は水平速度成分の降雨強度(mm/h)、 R_h は水平面を通る降雨強度(mm/h)、 t は時間(h)である。

仮想空間には予め解析した構造物の降雨到達分布を反映させ、リアルタイム化を行った。

コンクリート表面と内部の温度変化の予測解析は、非定常3次元熱伝導方程式で行った。解析方法は差分法であり、格子間隔は等間隔格子の0.01mとした。構造物表面の境界部は、気温と日射量を入力値とし、日陰になっている部分を熱流束 $0.0J/m^2/s$ として計算を行った。

3. 維持管理システムによる予測結果とその検証

3.1 コンクリート構造物に作用する周辺環境

図-2は、構造物に作用する日射範囲を比較したものである。図の左が2020年10月18日13時に実空間で撮影したもので、右が同時刻の日射を再現したものである。図より、仮想空間で再現した日射の作用範囲は実空間と陰影が端部まで一致していることが確認された。

図-3は、対象構造物周辺の風況予測結果と屋外実験における実験結果を比較したものである。図の実験結果は対象構造物周辺に設置した各風速計の実測値であり、予測結果は風速計2を入力値としたときの各風速計設置位置における解析値である。図に示すように、風速計1高さ2m地点における風速の時系列分布は予測結果と実験結果が時系列で概ね一致していることが確認された。

3.2 コンクリート構造物に生ずる応答

図-4は構造物の表面と内部の温度の予測結果と屋外実験における実験結果を比較したものである。測定位置No.S1(模型上部表面)の結果では、10月23~26日付近で予測結果の方が過大に示されている傾向が見られる。これは、降雨によって表面温度の低下が影響していると考えられる。模型内部の測定位置No.A9(模型下部)では、3℃程度過小となっている部分が見られるが、予測結果の温度が実験結果と概ね一致している。

4. 結論

3次元仮想空間を利用した構造物の維持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、仮想空間技術と数値シミュレーションを融合することにより、仮想空間内でコンクリート構造物に作用する自然環境作用と構造物の応答を時空間的に予測できることが明らかになった。さらに、予測結果と屋外実験の結果から、維持管理システムの予測結果が妥当であり、構造物の維持管理に適用できることが示された。

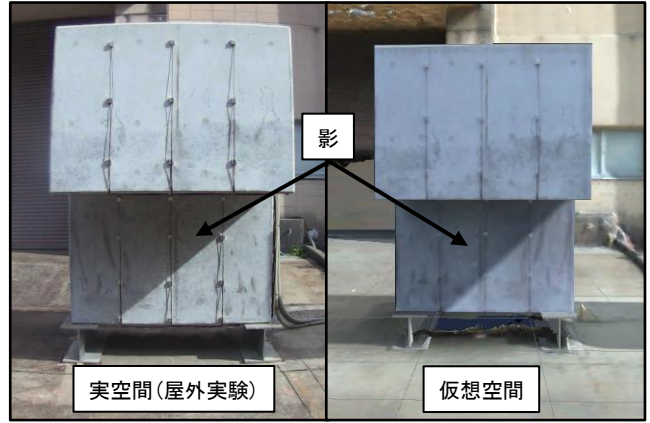


図-2 構造物の日射作用の比較



図-3 構造物周辺の風速分布の計測と時系列分布の比較

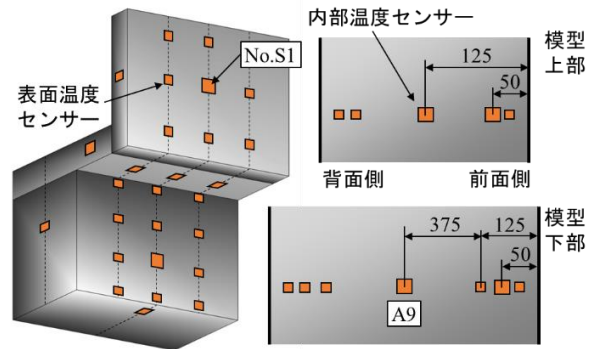


図-4 構造物表面・内部の時系列分布