

GNSS 衛星測位システムに基づく 長大橋の変位計測モニタリングと AI を活用した変形予測に関する研究

山口大学院 創成科学研究科 准教授 渡邊学歩

概要：

効率的な維持管理や災害対策を行うためのモニタリングには、常時計測可能でメンテナンスフリー計測方法が求められる。このような課題に対して、近年ではGNSS(Global Navigation Satellite System)が利用されているが、変位計など、その他計測手法に比べて精度が課題である。本研究では、橋梁の効率的な維持管理や災害対策を目的とし、GNSS 観測で課題となる精度の改善の開発に向けた分析を行う。精度の改善については、既設の橋梁を対象に、状態空間モデルに基づくカルマンフィルタやGNSS 観測結果の特性を活かして処理を行う。また、有限要素解析に基づく再現解析を通じてモニタリング結果の再現を試みたので報告する。

キーワード： (GNSS 観測), RTK 計測, k-近傍法, 状態空間モデル, 有限要素解析

1. はじめに

想定外事故(タンカー接触事故)や構造部材の損傷劣化(ケーブル断絶)により、橋梁インフラ施設のサービスが長期にわたり低下する事象が相次いでいる(図-1 参照)。こうした事故を未然に防ぐためには不断の点検が重要であるが、人の手に頼った点検には限界があり、各種IoTセンサーを活用したモニタリングのサポートが必要である。

一方、干涉測位法や準天頂衛星「みちびき」の登場で、GNSS を活用した高精度な測位が可能になり、これらを活用した24時間連続計測による各種インフラのモニタリングシステムの構築が進められている。

本研究では、GNSS 衛星測位システムを活用した変位計測による長大橋の監視システムの構築に向けた取り組みを行ってきた。測位された時系列データには、大量のノイズが含まれるために、特徴量の評価を行うには、図-2 に示す各種 AI 技術を用いた時系列データに基づく予測やデータの平滑化が必要となる。ここでは、数値モデルと観測データ組み合わせ(データ同化)による橋梁構造物の変形挙動の評価および予測について研究を行った。さらに、橋梁デジタル・ツインと数値解析を連携して、GNSS 変位計測結果を数値解析により再現を行う。

2. 対象橋梁およびGNSS 変位観測結果

2.1 観測対象橋梁の概要

著者らはこれまでに中国地方圏内にある複数の橋梁構

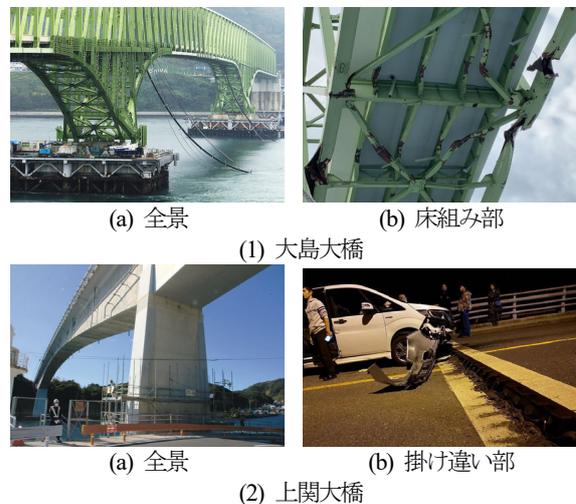


図-1 タンカー接触やケーブル断絶による橋梁インフラの事故

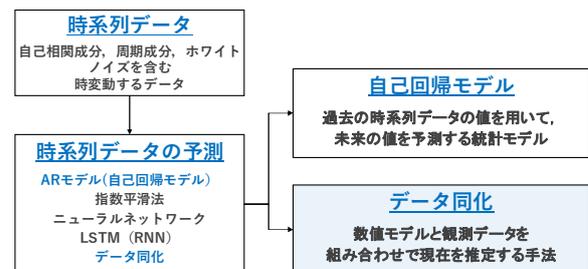


図-2 機械学習による時系列データの予測

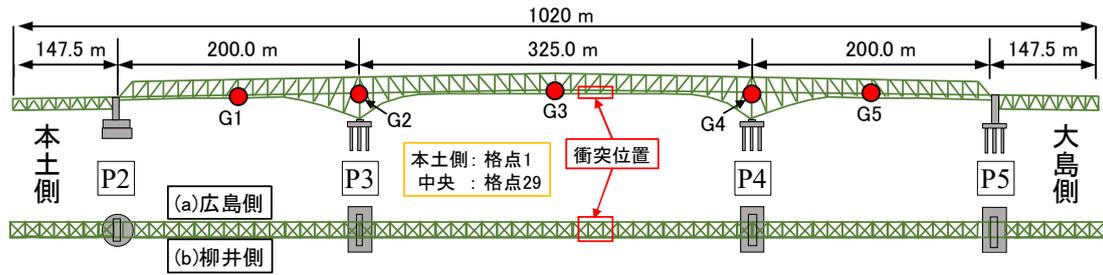


図-3 GNSS 変位計測モニタリングで対象とした橋梁



(a) 基準局 (起点側) (b) GNSS センサー (橋梁上)

写真-1 GNSS センサーの設置状況

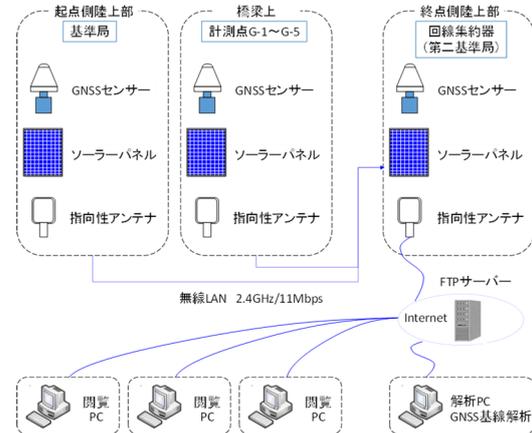


図-4 GNSS 変位計測システム

造に GNSS センサーを設置して長期連続モニタリングを実施してきたが、ここでは、長大トラス橋と曲線箱桁橋の観測結果を中心に検討を行う。同図に示したように、単純桁型式の側径間と、3 径間のプラットトラス橋の中央径間からなる橋長 1020m の橋梁 (A 橋) を対象とした。なお、橋台・橋脚が斜角を有した中間多点固定形式の橋長 282.5 m の 5 径間鋼製箱桁橋 (B 橋) でも同様な計測を行った。写真-1 には、同橋 (A 橋) を例に GNSS センサーの設置状況を示すが、起点側の橋台部に基準となる GNSS センサー (基準局) を設置し、図-3 の赤でマーキングした計測点に測位用のセンサー (移動局) を設置し基準局との相対測位により、橋軸方向、橋軸直角方向 (以後、橋直方向)、高さ方向の 3 方向の変位を測定した。

図-4 には A 橋での GNSS 変位計測システムの概要を示すが、基準局及び移動局のデータを無線 LAN で送信し、終点側陸上部にある第 2 基準局で集約、wifi ルーターで Internet を介して FTP サーバーにアップロードした。大島大橋でのモニタリングではスタティック方式による計測を行ったため、データ転送には支障は無かったものの、リアルタイムモニタリングを行う際、転送するデータが増えるとネットワーク環境をどう構築するかが課題となる。

基地局や移動局に設置された GPS センサーには、高性能汎用 GPS モジュールが内蔵されている。GPS モジュールには多様な機能が搭載されているため、消費電力が大きくなり易く、外部電源の確保が難しい橋梁や各種インフラの IoT を活用したモニタリングでは課題となる。本検討では、ソーラパネルと蓄電池を利用しているが、蓄電

容量にも限界があるため、電力消費量を抑えた市販の GNSS センサーを利用している。GNSS センサーを活用した IoT モニタリングシステムの普及には、こうした点を考慮したセンサー開発が必要となる。

2.2 GNSS センサーによるモニタリング結果

図-5 には、トラス橋の G-5 計測点の基準点に対する 3 方向相対変形量の計測結果を示す。同橋では 2018 年 11 月から 2020 年 11 月迄の 2 年間計測を行ってきたが、計測結果が非常に大きなばらつきを有していることが分かる。なお、図-5(a)に示した橋軸方向変位は、2019 年 8 月および 2020 年 9 月をピークとして、周期的な変動を示しており、トラス橋が気温変動にもなって伸縮を繰り返していることが示唆される。また、同図(b)の橋直方向変位は気温やその他の作用がないために殆ど変化していないが、同図(c)に示した高さ方向の変位計測結果は、計測開始から 2019 年 7 月の間に特異な変動を示している。同期間は、前述のタンカー衝突により損傷したトラス橋の復旧工事が行われていた時期に相当し、足場架設やその撤去によって橋が変形する様子が現れている。後述するデータ同化に基づくノイズ除去によって得られた同時期の平滑値を構造解析結果と合わせて示すが、両者は高い一致度を示しており、橋梁構造への同モニタリング手法の適用性が高いことを示している。

図-5 にも同様にして得た平滑値を示しているが、毎時刻計測されるデータの偏差がとても大きい。表-1 には、計測した各計測点の標準偏差 (ばらつき) を示すが、全期

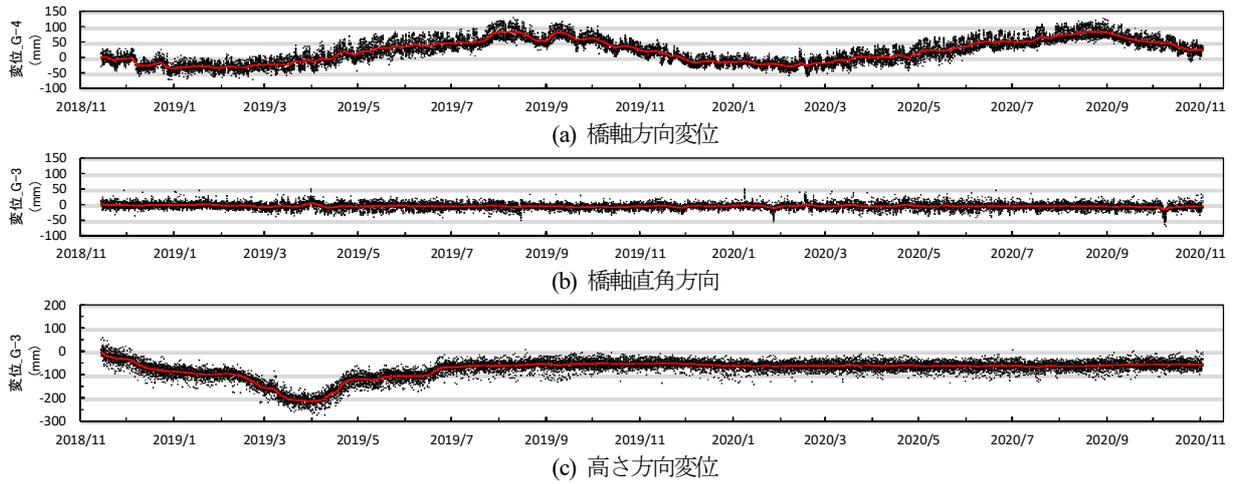


図-5 GNSS 変位モニタリングによる長期計測結果

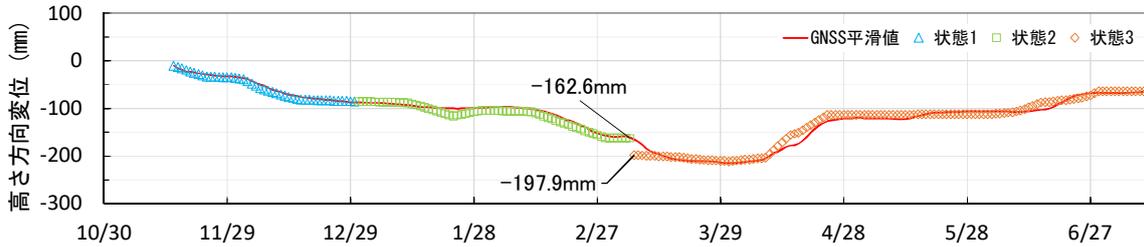


図-6 GNSS 計測結果 (平滑値) と構造解析に载荷過程に基づく再現結果の比較 (2018 年 11 月～2019 年 7 月)

表-1 GNSS 計測による変位の標準偏差 (単位: mm)

計測点	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
橋軸方向	5.9	5.0	9.7	15.2	17.3
橋直方向	5.7	6.0	9.0	8.6	10.6
高さ方向	17.7	15.1	20.4	22.2	19.4

間の計測結果の標準偏差は、計測点の位置によっても異なるが、橋軸方向で 5～17mm、橋直方向で 6mm～11mm 及び高さ方向では 20mm 程度となっている。ただし、前述してきた通り観測データ (時系列データ) の統計処理を適切に行うことで、橋梁の維持管理に活用可能なデータを提供できると考えられる。

3. データ同化に基づくデータ処理 (平滑化)

3.1 状態空間モデルに基づくデータ処理の概要

GNSS 計測データには GPS 衛星側の時計や、衛星軌道情報の誤差、マルチパスや大気遅延等による誤差などの計測上不可避な誤差が発生する。高低差が少なく、障害物が比較的少ない環境に建設される橋梁インフラの場合、マルチパスや大気遅延誤差の影響が少なく、比較的良好な条件での計測が可能である。しかし、2 章で紹介してきたとおり、決して小さくない誤差が発生しており、これらをデータ処理技術に基づいて取り除く必要がある。

本研究では状態空間モデルに基づくカルマンフィルタによるデータ処理を行った。状態空間モデルとはシステムの状態 x_t (例えば、構造物の変形量の真値) とその観測値 y_t の関係を表現する統計モデルで、状態がどのよう

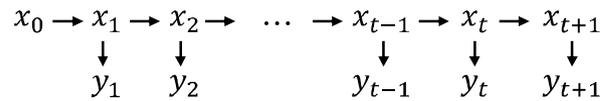


図-7 状態空間モデルの概要 (マルコフ性)

に時間的に進展するか ($x_{t-1} \rightarrow x_t$) を表す状態方程式 (式 (1)) と、システムの状態 x_t と観測値 y_t の関係を表す観測方程式 (式 (2)) からなる。また、図-7 に示す通り、未来の状態 x_{t+1} は、過去の状態に依存せず、現在の状態のみに依存するというマルコフ性を仮定している。

$$x_t = G_t x_{t-1} + w_t, \quad w_t \sim N(0, W_t) \quad (1)$$

$$y_t = F_t x_t + v_t, \quad v_t \sim N(0, V_t) \quad (2)$$

G_t, F_t は線形更新を表す行列、 w_t, v_t は平均 0、分散 W_t, V_t の正規分布に従う状態誤差、観測誤差である。これは、観測値の中に含まれるノイズには、観測誤差 v_t 以外に構造変形自体の不確定性による誤差である状態誤差 w_t があることを示しており、その配分を最適化することが重要である。ここでは、状態誤差の分散 W_t と観測誤差の分散 V_t の比を表すノイズ比 $\lambda (= W_t/V_t)$ を用いて分析した。

図-8 には、異なるノイズ比に対するカルマンフィルタの適用結果を別途計測した変位計による計測結果と比較して示す。同図 (b) に示すノイズ比を 10^{-5} としたケースでは、変位計のトレンドをよく捉えているが、構造物の 1 日内の変形が平滑化されていて、過度に平滑化されている。一方、同図 (c) に示したノイズ比を 10^{-3} としたケースでは、日中の気温変動による変形挙動を捉えられているが、スパイク状の変動が発生しており、平滑化が出来ていない。

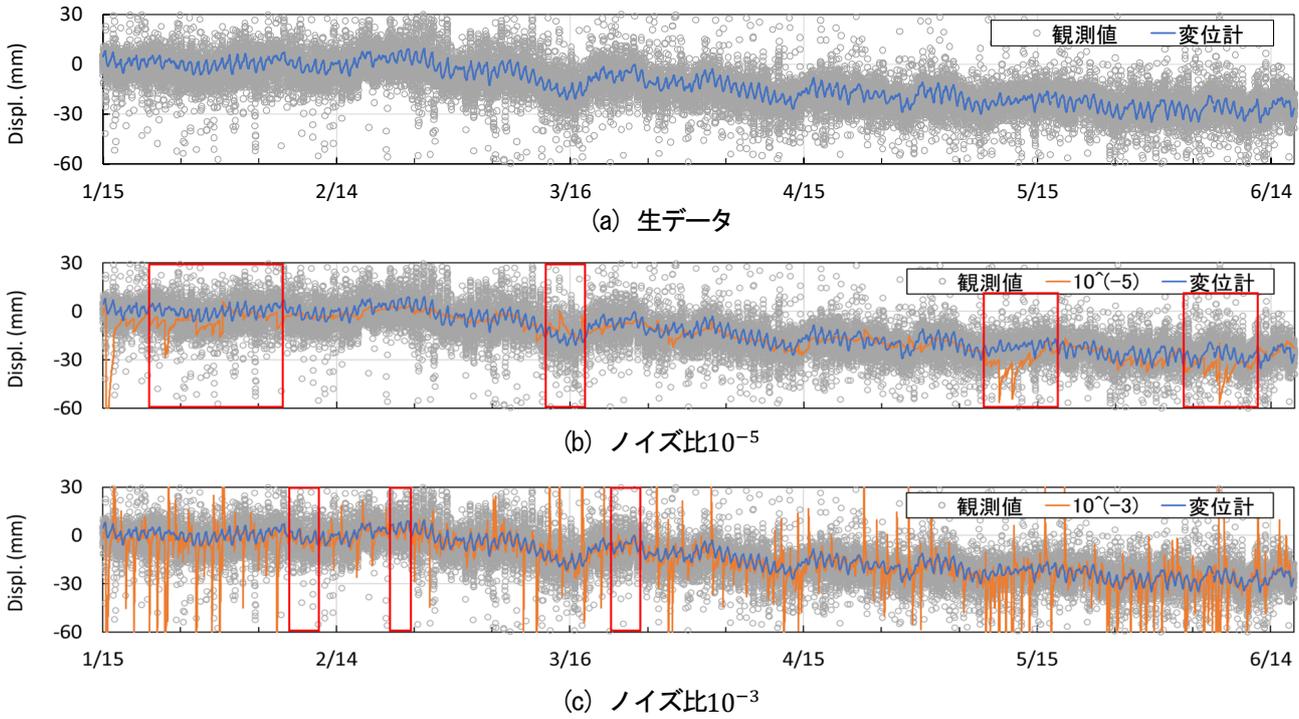


図-8 ノイズ比を考慮した処理結果

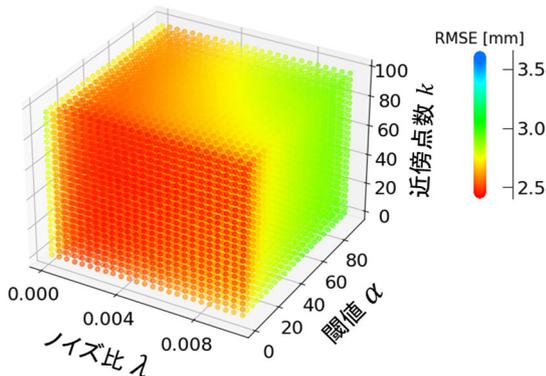


図-9 パラメータと誤差の関係(変位計基準)

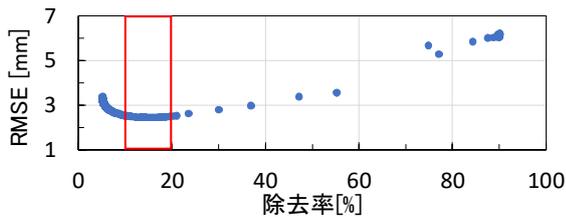


図-10 観測値除去率と誤差の関係

3.2 外れ値の除外による精度向上に関する検討

前述の検討から大きな外れ値(観測誤差を含む値)があると、平滑化が十分に行えことが示唆された。本節では、よって、外れ値検知として知られているスライド窓 k 近傍法(以下、 k 近傍法)を用いた外れ値検知により、誤差が大きく余分な計測値を判別する方法について検討する。

k 近傍法では、式(3)のように時刻 t から s 時点分前までの観測値群($y_{t-s} : y_{t-1}$)と観測値 y_t の差分 d をとり、式(4)のように小さい順に並べ、近傍点数分(k 個)の平均をとり、時刻 t の異常度 σ_t を算出する。

$$d_i = |y_t - y_i|, \quad i = (t-s) : (t-1) \quad (3)$$

$$\sigma_t = \text{mean}\{d_{\min(1)}, d_{\min(2)} \dots d_{\min(k)}\} \quad (4)$$

最初の s 時点分は学習期間となるため、 s 時点経過後から処理を行う。ここでは、衛星の周期が 1 日であることから、学習期間 s を 1 日分の観測値とした。

k 近傍法の適用には、近傍点数 k および閾値 α の設定が必要であるが、どのように設定すべきかが課題である。よって、パラメータを変化させて処理を行う。ここで、図-9 にノイズ比 λ を含む各パラメータと変位計を基準とした RMSE(Root Mean Squared Error)を示す。同図より、 λ によって誤差は変動するが、式(4)から、異常度 σ_t は k により平均化されるために、 α と k の関係を探するのは難しい。

そこで、図-10 に示す観測値除去率と誤差の関係から、近傍点数 k および閾値 α を決定することにした。G1 計測点における橋軸方向変位の精度向上では、10%~20%程度の計測値の除去が可能となるパラメータ設定が必要と示唆される。また、誤差が最小となる処理結果を図-11 に示すが、同図と図-7(c)との比較から、平滑化による日変動成分の推定精度が改善されたと考えられる。

4. 有限要素解析に基づく GNSS 計測変位の再現

本節では、GNSS 変位計測で対象とした既設橋梁構造物(B橋)を対象として、有限要素解析に基づく死荷重解析及び温度-応力解析を通じて、常時状態の変形特性を把握するために、後述 GNSS 計測結果を再現する為に、図-12 に示す高自由度有限要素モデルを構築した。

箱桁、ダイヤフラム、座屈防止リブ、横桁をシェル要素で、RC 橋脚、RC 床版部をソリッド要素で、支承部をば

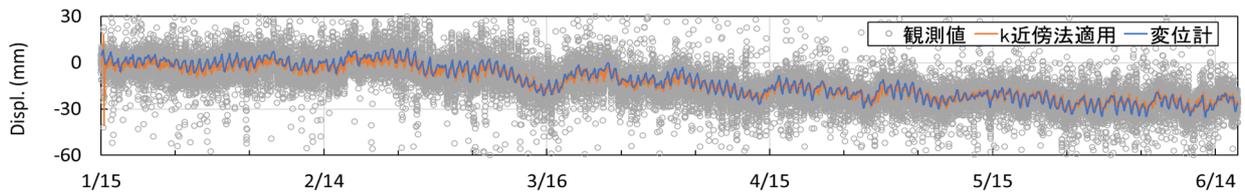


図-11 k近傍法を適用した場合のRMSEが最小となる処理結果

- 鋼箱桁, ダイヤフラム, 横桁: シェル要素
- RC橋脚, RC床版部: ソリッド要素
- 支承部: ばね要素

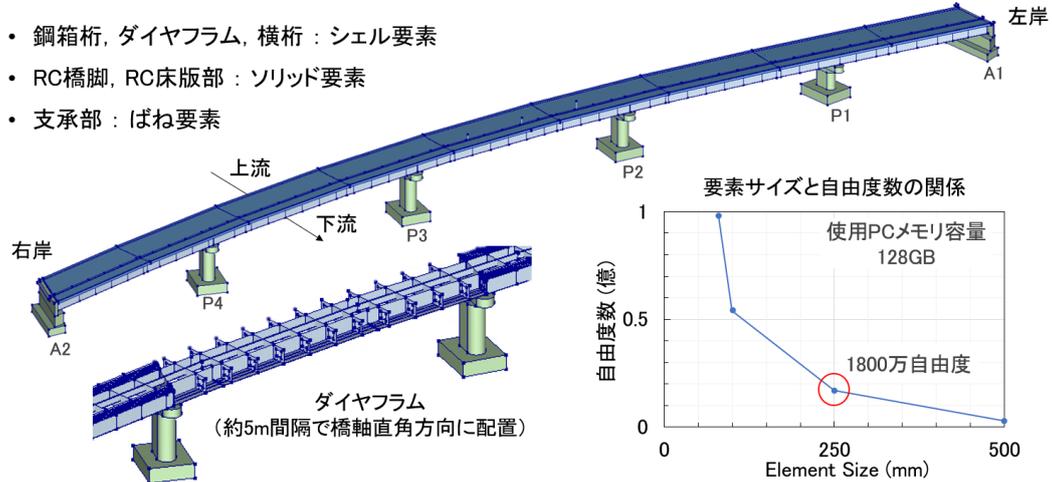


図-12 本検討で用いた構造解析モデル

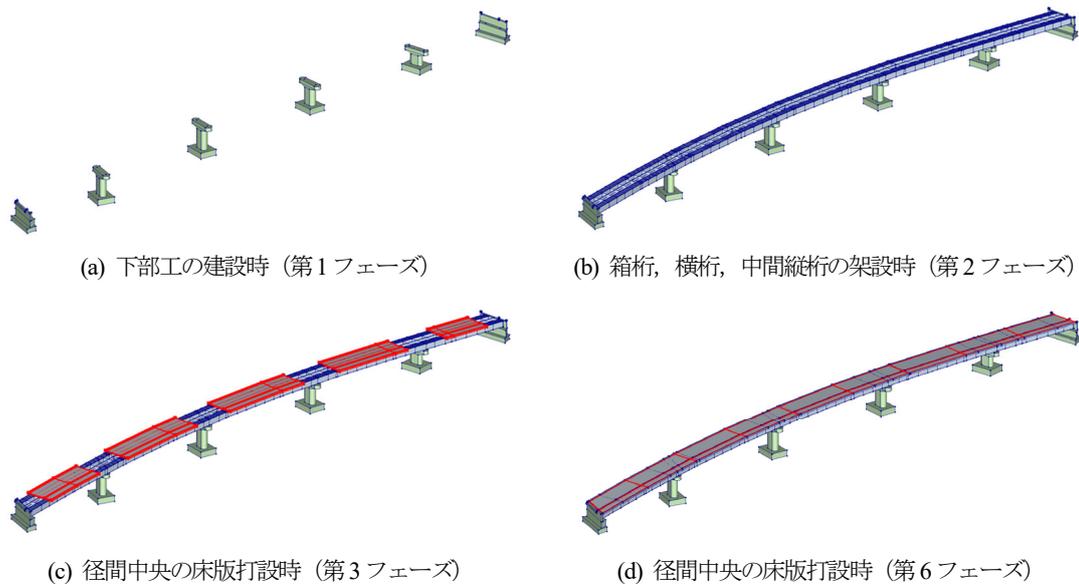


図-13 構造解析で考慮した建設過程

ね要素でそれぞれモデル化している。モデルの大きさ連立方程式のサイズを表す自由度数は要素数サイズに依存するが、箱桁側壁面やフーチング、橋脚部などの平均的な要素サイズを 250mm 程度とした場合には、1800 万自由度程度となるため、32GB 程度のメモリーを搭載した PC では計算が困難となる。

4.1 非線形性および施工過程を考慮した建設初期段階の有限要素解析に基づく再現解析

本橋は、非常に大きな構造であるためブロック毎に建設が進められている他、死荷重時に所定の縦断勾配を有

する様に死荷重時のたわみ変形を考慮したキャンバーが設けられている。これら建設過程を考慮して解析を行わないと、常時状態の応力状態やその後の温度変化に伴う変形を再現できない可能性が示唆されたことから、本検討では図-13 に示した建設過程を含む 6 つの過程を再現した後死荷重及び温度応力を与えて解析を行うことで、建設過程を考慮しなかった場合に支点部付近の床版に発生するコンクリート部のひび割れをなくすことが出来た。

4.2 GNSS 計測の結果と解析結果の比較

夏場には日照により床版表面は、図-14 に示す様に路面

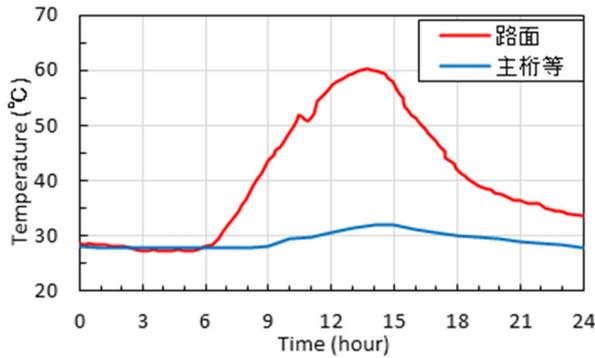
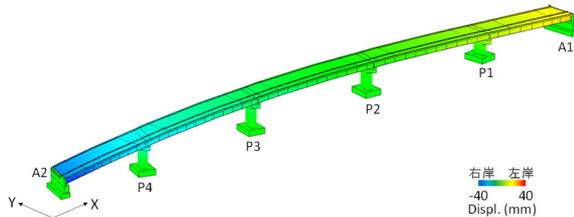
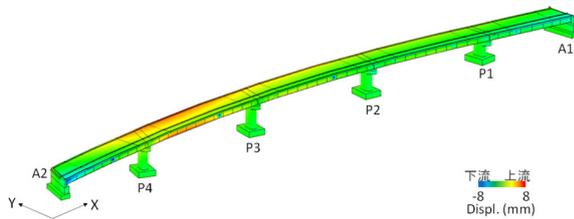


図-14 1日の路面と主桁の温度変化



(a) X方向変位



(b) Y方向変位

図-15 温度-構造解析による橋梁構造変形の再現

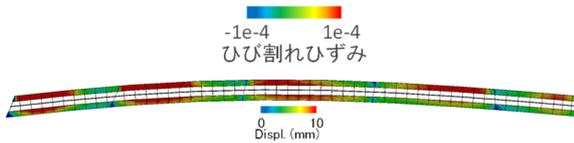
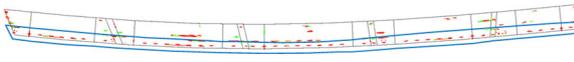


図-16 床版温度上昇後の主桁のたわみ分布



(a) 温度上昇前



(b) 温度上昇後

図-17 温度-構造解析による橋梁構造変形の再現

と主桁等の他部材で極端な温度差が生じることがある。このため、これを模擬して各部の変形および応力状態の評価を行った。

図-15には最終状態の水平方向の変形分布を示すが、X軸方向には両側に伸び、P3-P4 径間では上流側に約 8mm の変形が見られた。図-16には主桁のたわみ分布を示すが、全体的に上方向にたわみが生じた。また、図-17には、温度上昇前後でのひび割れの様子を示すが、曲率半径の大きい外側(ウェブ位置)でひび割れ箇所が増えているが、これは桁が面外方向に圧縮されるためと示唆される。点検時は床版と箱桁の接合部に着目する必要がある。

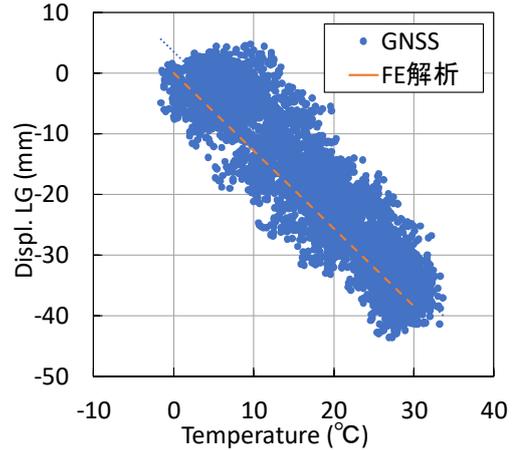


図-18 GNSS モニタリングによる橋梁構造変形の計測結果と解析結果の比較

同橋では現在、相対測位法に基づく GNSS モニタリングが実施されている。図-18には、橋軸方向の変形と温度の関係を示すが、半年間の温度変化を与えた FE 解析結果と GNSS 変位計測結果はよく一致しているといえる。ただし、橋直方向や鉛直方向については、十分な精度で一致した解析結果が得られておらず、今後の検討課題とする。

5. 結論

本研究では、橋梁の GNSS 変位計測値に状態空間モデルに基づくカルマンフィルタに基づく誤差処理をおこなった他、高自由度有限要素モデルを用いた既存橋梁構造物の構造特性並びに GNSS 変位計測の再現を試みた。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) GNSS 変位計測に基づく既設構造物のモニタリングにより橋梁構造物が気温変動とともに伸縮する様子や補強工事の進捗等を監視出来ることを実証した。
- 2) GNSS 変位計測により得られた変位計測値に、データ同化とスライド窓近傍法に基づくデータ処理技術を適用することで、橋梁構造物が毎時変形する様子を捉えることができるようになった。
- 2) 既存橋梁構造物の高自由度有限要素モデルを用いた構造解析および温度応力解析によって、GNSS 変位計測により得られた同橋梁構造物の変形挙動と整合する変形予測を行うことができた。