第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

画像計測を用いた支承可動部の変位追随機能の実験的把握

浅子　卓也[1]・小林　巧[2]・菅原　達也[3]・大住　道生[4]

[1]正会員　（国研）土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　交流研究員
（〒305-8516　茨城県つくば市南原 1-6）
[2]正会員　修（工）　（国研）土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　研究員（同上）
[3]正会員　（研究当時）（国研）土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　元交流研究員
（現：株式会社ビー・ビー・エム）
[4]正会員　博（工）　（国研）土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　上席研究員
（〒305-8516　茨城県つくば市南原 1-6）

1. はじめに

支承部は，上部構造からの荷重を下部構造に確実に伝え，上部構造と下部構造の相対的な変位に追随することを目的に設置される．支承部には「1．荷重伝達機能（鉛直・水平方向）」，「2．鉛直方向の高さを保持する機能」，「3．水平変位追随機能」，「4．回転追随機能」等が要求され[1)]，供用時にはこれらを満足する必要がある．

支承部は設計上，各機能を担う部分やその機構が想定されている．その中で「1．荷重伝達機能（鉛直・水平方向）」，「2．鉛直方向の高さを保持する機能」は構成する部材や接合部の状態，鉛直遊間量を確認できれば良く，目視が容易である．

一方，「3．水平変位追随機能」，「4．回転追随機能」は目視での判断が困難であり，変位計を用いたとしても支承部のどこを計測すれば追随機能の健全性を診断できるか整理された事例はほとんどない．点検支援技術を活用することで点検の高度化が期待できる．

そのため本研究では，ピンローラー支承とBP・A支承を対象に，目視での判断が困難な「3．水平変位追随機能」，「4．回転追随機能」を対象に，喪失したものとして拘束した．その状態で荷重車を走行させ，変位計や画像計測を用いた変位の計測を行い，それらの計測結果や計測精度について比較検討を行った．また，下フランジの疲労き裂の予防保全のための指標と思われるソールプレート溶接ビード端部のひずみを計測し，支承部の変位追随機能との関連性を整理した．

2. 実験概要

(1) 試験橋梁

計測は，**図-1**に示す土木研究所内に架設された鋼単純合成桁の試験橋梁に設置された支承部の変位を計測した．試験橋梁は，橋長30.8m・支間長30.0m・有効幅員8.5m・主桁間隔2.6mである．

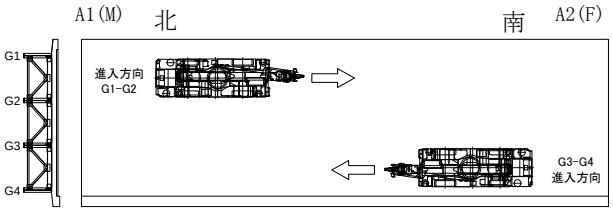


図-1　試験橋梁概要図と荷重車走行実験

(2) 支承部

試験橋梁には，A1(M)の G1，G2 に取り付けたピンローラー支承及び G3，G4 に取り付けた BP・A 支承を対象とした．

両支承ともに標準図[2)，3)]及び使用実績から，1基あたりの鉛直反力は 1000kN 以上の耐力を有する．また，どちらも鋼製可動支承であり圧縮バネを有さないことから，鉛直反力の荷重バランスに極端なばらつきは生じないと考えた[4)]．支承部は水平変位追随機能，回転追随機能喪失を模擬して，検討 CASE に合わせて石こう，ボルト，鋼板等を組合わせ固定した．

a) ピンローラー支承の構造，固定方法

ピンローラー支承は，ベースプレートと下沓の間

に挟み込まれたローラーが転がることで，水平変位追随機能を担う．水平変位追随機能の喪失を模擬するため，支承台座部に L 字型の治具を設け，アングル材を介してローラーの変位を固定した．

一方，上沓と下沓の間に挟み込まれたピンが回転し上沓が傾くことで，回転追随機能を担う．回転追随機能の喪失を模擬するため，上沓と下沓の鉛直遊間に石こうを挟み，上沓の回転を固定した．拘束概要を**図-2**(a)に，拘束状況を**写真-1** に示す．

b) BP・A 支承の構造，固定方法

BP・A 支承は，上沓と下沓の間にあるベアリングプレートに接着されたテフロン板と上沓に溶接されたステンレス板が滑ることで，水平変位追随機能を担う．水平変位追随機能の喪失を模擬するため，水平固定用ボルトを使用し，上沓と下沓サイドブロックの橋軸遊間を無くし，固定した．

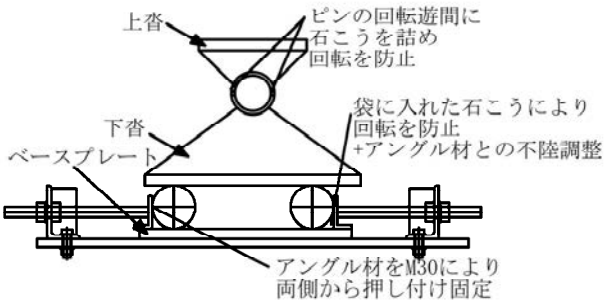
一方，下沓上面の曲面と同一の曲率の面を有するベアリングプレートが滑り上沓が傾くことで，回転追随機能を担う．回転追随機能の喪失を模擬するため，ピンローラー支承と同様に，上沓と下沓の鉛直遊間に石こうを挟み，上沓の回転を固定した．拘束概要を**図-2**(b)に，拘束状況を**写真-2** に示す．

(3) 支点条件

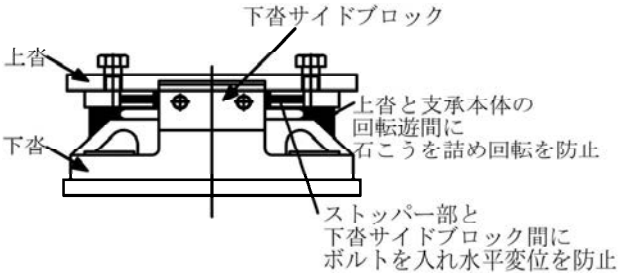
表-1 に拘束条件を示す．実際の橋梁で数十年間使用されてきた支承であるため，ベースプレート下面やローラー等の腐食が軽微であるため，機能低下には影響しないと判断した．CASE1 は拘束を行わず，機能低下をさせない．CASE2・CASE3 では，一支承線の一基のみ固着等を想定して G4 の支承の水平変位追随機能及び回転追随機能を喪失させた．CASE4・CASE5 では，複数基の固着等を考慮して BP・A 全ての支承の水平変位追随機能及び回転追随機能を喪失させた．CASE6 では，全ての支承の水平変位追随機能及び回転追随機能を喪失させた．

(4) 活荷重載荷による計測

荷重車は，重量 20t 程度のラフタークレーン（以下，「荷重車」）を**図-1** に示した A1(M)の G1-G2 間（北側進入）から進入させ，A2(F)から退出させた後，A2 の G3-G4 間（南側進入）から進入させ，A1 から退出させることで載荷した．**表-1** に示すように支承の拘束条件が変化した場合に，活荷重載荷によって各部位に生じる変位を計測した．荷重車は片側を 35～40 秒かけて，時速 3km/h 前後で徐行させた．また，計測を考慮し，変位の計測は各 CASE で荷重車を 3 往復走行させた．

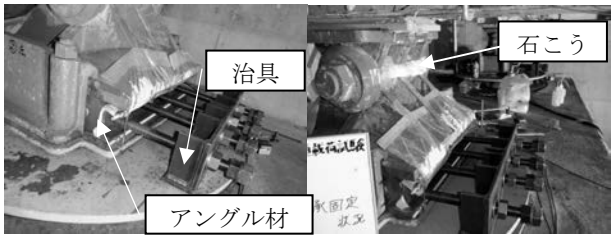


(a) ピンローラー支承拘束概要



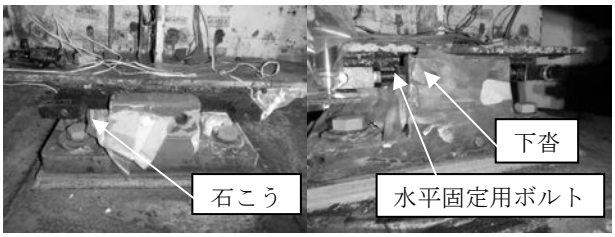
(b) BP・A 支承拘束概要

図-2 支承拘束概要



(a)水平変位拘束　　(b)回転拘束

写真-1 ピンローラー支承拘束状況



(a)水平変位拘束　　(b)回転拘束

写真-2 BP・A 支承拘束状況

表-1 支承拘束概要

桁	G1	G2	G3	G4
支承種	ピンローラー	ピンローラー	BP・A	BP・A
CASE1	○	○	○	○
CASE2	○	○	○	△
CASE3	○	○	○	×
CASE4	○	○	△	△
CASE5	○	○	×	×
CASE6	×	×	×	×

○：可動　△：回転のみ拘束　×：回転・水平変位拘束

(5) 支承の機能計測

a) 変位計による計測

図-3 に変位計の測定箇所を示す．水平変位追随機能や，回転変位追随機能を担う部材間の可動部の変位を計測できる位置に，変位計を設置した[5]．ここでの可動部の変位を計測できる位置は，設計で想定している挙動を前提に測点を決定しており，ピンローラー支承は，上沓桁中央側・下沓桁中央側・ローラー部桁中央側と，上沓下面を測点として，BP・A 支承は上沓桁中央側と，下フランジ下面を測点として，水平追随に伴う変位と，回転追随に伴う鉛直変位を計測した．鉛直変位は容量 5mm，感度 2000 $\times 10^{-6}$ ひずみ/mm，水平変位は容量 50mm，感度 200$\times 10^{-6}$ ひずみ/mm を使用した．支承可動部の固定化によるひずみ変化を明らかにするため，疲労き裂の発生しやすい支承ソールプレート溶接ビード端部から橋軸方向に 12～20mm 位置の橋軸方向応力を，下フランジ下面に 5 連のひずみゲージを貼付け計測した．

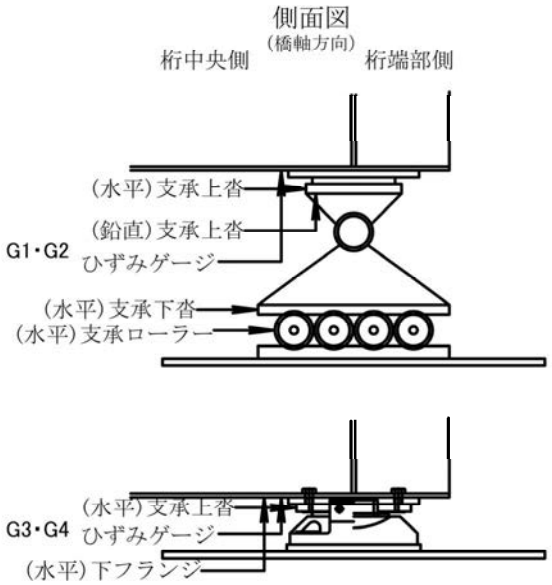


図-3 支承変位計設置位置図
(鉛直・水平)

b) 画像による計測

変位計による計測に併せて，画像計測も実施した．撮影状況を**写真-3** に示す．画像計測は，G2 のピンローラー支承，G3 の BP・A 支承を対象に，ミラーレス一眼カメラによる動画撮影データを使用した．設定環境は解像度 3840×2160・フレームレート 30・撮影距離約 2.0m・レンズは焦点距離の異なる 2 種類（G2：F 値 45，G3：F 値 42）用いて計測した．



(a) ピンローラー支承　　(b) BP・A 支承

写真-3 撮影状況

取得した動画に対して解析を行い，**写真-4 写真-5** に示した点の水平方向及び鉛直方向を撮影フレームごとの変位を取得した．連結板をアクリル板にし，ローラーを可視化させた．変位量は，下フランジ，ソールプレート，ベースプレート，サイドブロック等，BP・A 支承では計 34 箇所，ピンローラー支承では計 63 箇所に対して算出した．

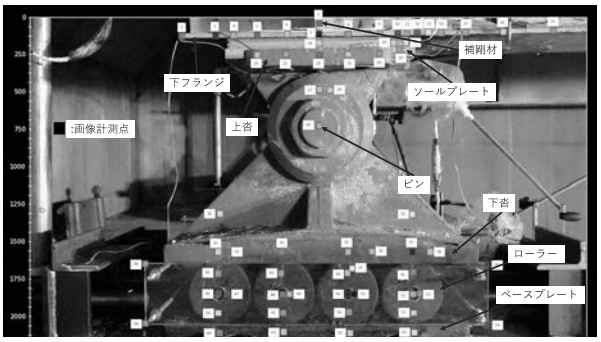


写真-4 ピンローラー測点

なお，その分析時に，画像計測により得た支承各点で取得した位置データは，ノイズが大きい点が多数確認された．そのため，ノイズの大きいデータセットの除外を行った．特徴点のない場合，ノイズが大きくなりやすいためである．支承が大きい場合，レンズの凸の影響により像の端ほど歪みが出やすいことから測定に注意しなければならない．

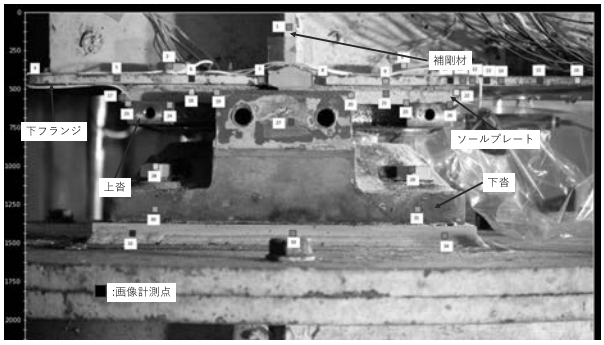


写真-5 BP・A 測点

画像計測による計測誤差[6]は平行移動の場合で 0.05 画素，30%以内のひずみが生じた場合で 0.2 画素以下の誤差と言われており，また，撮影条件や解析条件によっても計測誤差が変化することが確認されている．本研究では，データに対し周囲 3 点の移動平滑化を行い，複数回の計測波形の相関係数を計算し，図上でノイズの卓越したデータとの比較検討

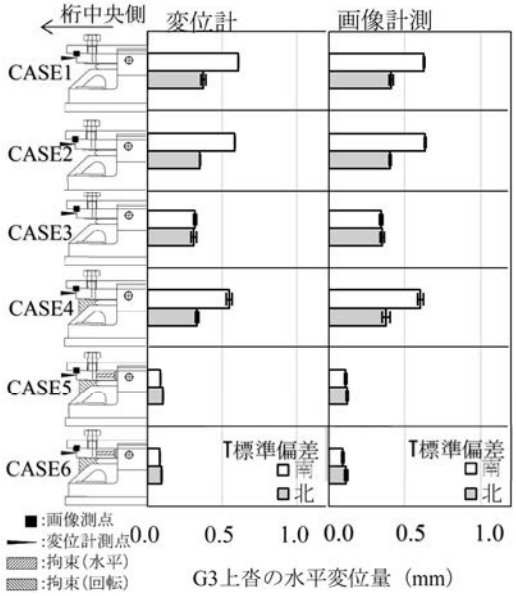


図-4　BP・A 支承水平変位

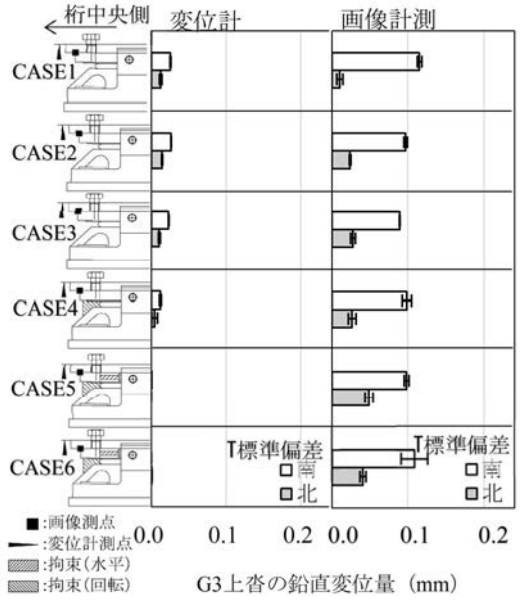


図-5　BP・A支承鉛直変位

を行い，相関係数が 0.4 以下のデータセットを計測ノイズが卓越したデータと仮定し，分析には使用しない方針とした．なお，相関分析には，同一点の水平または鉛直方向の相関を 1-2 回目および 1-3 回目の車両走行時の結果を使用した．

3. 実験結果

(1) BP・A支承画像計測との比較

図-4　**図-5**にBP・A支承の拘束の有無による変位量の変化を示す．左図の支承断面図はG3の支承の拘束状態や各測点位置を示す．変位量は1回目から3回目の各最大値を平均したものである．同図の縦軸は計測方法，車両の走行向き，BP・A支承の拘束状態，

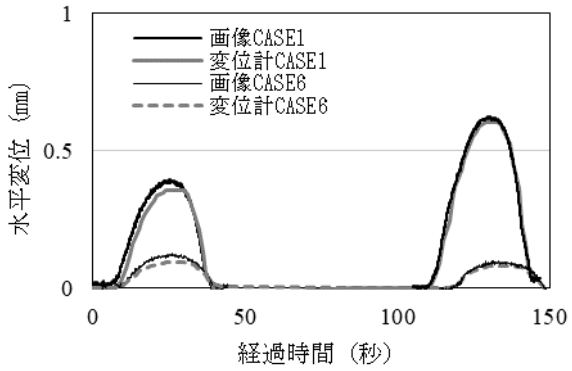


図-6　時間経過による画像計測と変位計の水平変位

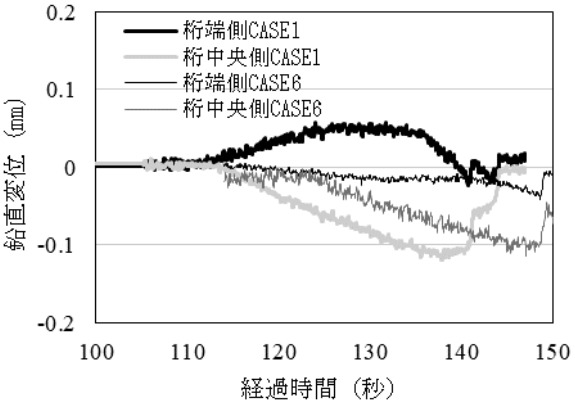


図-7　時間経過による画像計測の鉛直変位

横軸は変位量を示す．北側進入と南側進入の走行で，車線が異なるため，G3のBP・A支承の変位量が走行向きによって異なる．

図-4の水平変位は変位計と画像計測に大きな差がなく，1回目から3回目計測に大きな数値の乱れはなかった．水平変位については同図で，BP・A支承の拘束の有無による変位の変化を確認すると，今回の支承条件では，BP・A支承の変位量が1/6～1/4となることが明らかとなった．**図-6**に時間経過による画像計測と変位計の水平変位のグラフを示す．なお，画像計測では経過時間を取得していないため，撮影コマ毎の相対的な時間経過を割り当てており，画像計測および，変形計は3回目に計測した数値とする．水平変位は時間経過による画像計測と変位計は大きなずれはなく，拘束条件が変わっても大きなずれはなかった．

図-5 の鉛直変位については画像計測と変位計では大きく差があり，1回目から3回目計測でも大きな数値の乱れはあった．拘束条件が多くなるにつれ数値の乱れは大きくなる傾向となった．拘束されたことによって微小な変位となった場合はスパイク性ノイズ除去を介しても，ノイズが大きくなり，数値に影響があったと考えられる．なお，本研究では，



(a)CASE1　　(b)CASE6

写真-6　ベクトル図

鉛直変位測定位置は画像計測と変位計では違う．変位計設置箇所の方が桁中央側に近いことから，回転変位による影響が出る．しかし，画像計測の数値が大きくなっている．

図-7 に時間経過による画像計測の鉛直変位のグラフを示す．なお南側走行時の CASE1・CASE6 とし桁中央側と桁端側の関連を示す．拘束有無では変位経過に差があった．CASE1 の桁端側と桁中央側を確認すると中央側は沈みこんでおり，桁端側は浮き上がっている挙動を示した．これはベアリングプレートが滑り上沓が傾くことで，回転追随をしたものと考えられる．CASE6 では桁端側の変位が小さくなり，桁中央側の変位は CASE1 と比べ小さくなった．

写真-6 ベクトル図を確認すると画像計測のグラフから推測通りのベクトルを示した．CASE6 は，ベアリングプレートが回転せずプレートにたわみが生じている挙動を示した．鉛直変位では詳細な数値を算出するには不向きであるが，回転追随機能の挙動を確認することができることが明らかになった．

（2）ピンローラー支承画像計測との比較

図-8　**図-9**にピンローラー支承の拘束の有無による変位量の変化を示す．左図の支承断面図はG2の支承の拘束状態や測点位置を示す．変位量は1回目から3回目の各最大値を平均したものである．同図の縦軸は計測方法，車両の走行向き，ピンローラー支承の拘束状態，横軸は変位量を示す．北側進入と南側進入の走行で，車線が異なるため，G2のピンローラー支承の変位量が走行向きによって異なる．

図-8 水平変位は変位計と画像計測に CASE1 から CASE3 に大きな差はないが CASE4 以降に徐々に差が出てきている．これは BP・A 支承の拘束箇所が多くなるにつれ，ピンローラー支承も水平変位が小さくなった結果，画像計測はノイズが大きくなり，数値に影響があったことが挙げられる．

画像計測の 1 回目から 3 回目計測では画像計測は大きな差があることが特徴である．BP・A 支承では見られなかった傾向である．BP・A 支承との違いはピンローラー支承の方が大きく，画素が疎くなった影響があったと考えられる．このことから支承種に

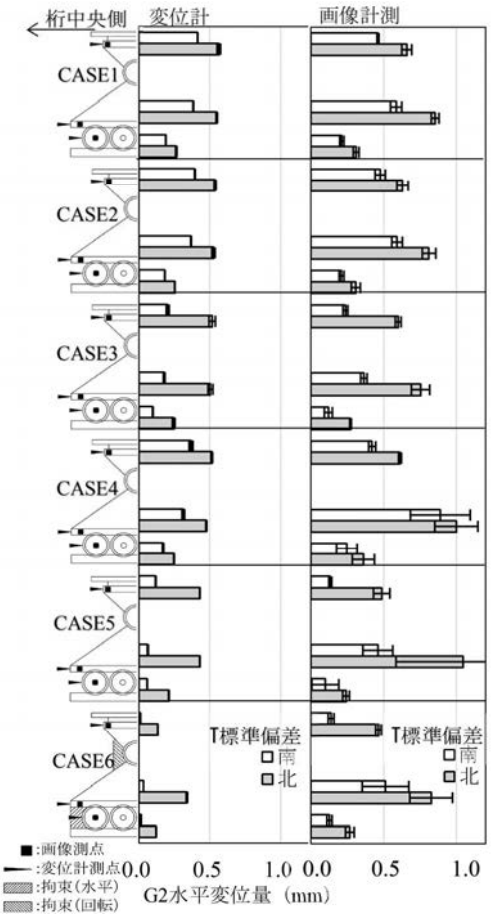


図-8　ピンローラー水平変位

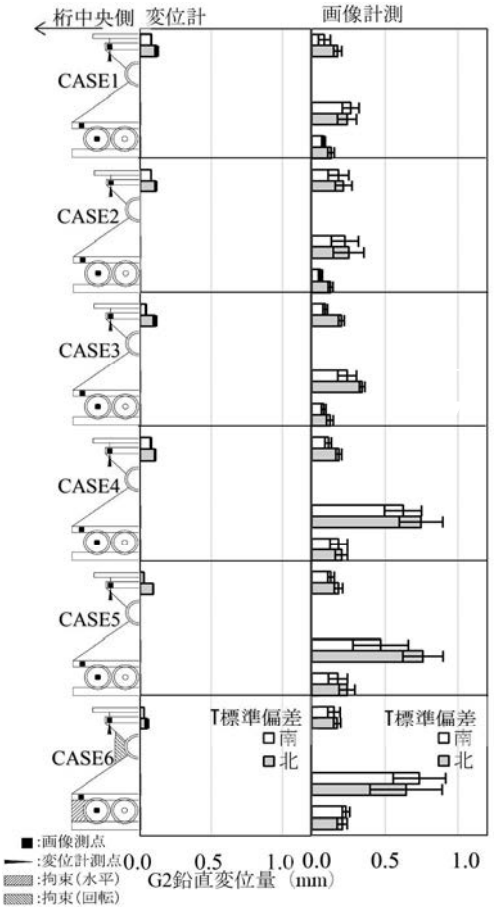


図-9　ピンローラー鉛直変位

よっては画像計測による計測数値を算出するには，測点や撮影条件に注意したほうが良い．

図-9鉛直変位は画像計測と変位計は大きな差があった．また1回目から3回目計測では画像計測は大きな差があった．水平変位同様に画素が疎くなったことが一因と考えられる．それに加え拘束されたことによって微小な変位となった場合はスパイク性ノイズ除去を介しても，ノイズが大きくなり数値に影響したと考えられる．

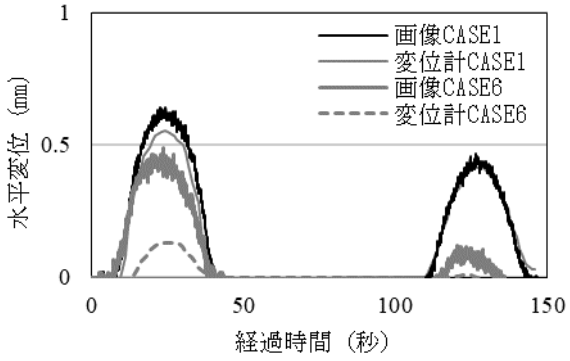


図-10　時間経過による画像計測と変位計の比較

図-10 に時間経過による画像計測と変位計のグラフを示す．なお，画像計測では経過時間を取得していないため，撮影コマ毎の相対的な時間経過を割り当てており，画像計測および，変形計は 3 回目に計測した数値とする．水平変位は時間経過による画像計測と変位計は拘束を除き大きなずれはなかった．

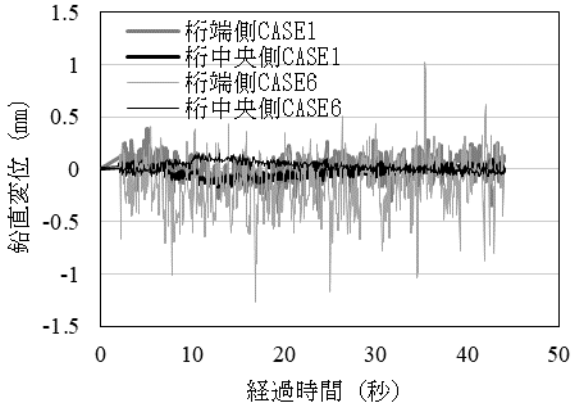


図-11　時間経過による画像計測の鉛直変位

図-11 時間経過による画像計測の鉛直変位のグラフを示す．なお北側走行時の CASE1・CASE6 とし桁中央側と桁端側の関連を示す．スパイク状のノイズの除去を実施しても，ノイズが大きくなり，数値に影響したことで，回転変位の挙動を確認することが出来なかった．画素が疎くなった影響があったことが考えられる．

(3) 変位計での各 CASE の比較

各 CASE の拘束条件を確認した．**図-4** の変位計 CASE3 の水平変位は G3 を拘束されていないにも関わらず，G4 の水平拘束の影響を受け G3 の水平変位が CASE1 と比べ数値が下がった．**図-8** の変位計 CASE3・CASE5 は G2 を拘束されていないにも関わらず， G2 の水平変位が CASE1 と比べ下がった．CASE3 は G4 の水平変位の拘束の影響を受け，CASE5 は G3・G4 の二カ所の拘束の影響を受け CASE3 よりも更に数値が小さくなったと考えられる．

図-5 の鉛直変位は CASE1・CASE2・CASE3 を比べ，変位は変わらない．**図-9** の鉛直変位は CASE1・CASE3・CASE5 を比べ，変位は拘束箇所が増えることで G2 の変位が小さくなった．しかし，活荷重載荷箇所が北側では変位に変化はなく南側で変位に変化があった．

水平変位は他支承部に水平拘束すると近接の支承部に数値として影響が出ることが明らかになった．鉛直変位は他支承部に水平・回転拘束すると活荷重載荷位置が水平・回転拘束している他支承部に作用している場合のみ，計測している近接の支承部に数値として影響が出ることが明らかになった．

(4) 変位応答値と下フランジのひずみ値の比較

図-12～20 は，上沓の水平変位，下フランジの鉛直変位と下フランジのひずみ値の関係を示し**図-20** は**図-12** の北側のみを示す．ひずみは疲労き裂の発生しやすいソールプレート溶接ビード端部から橋軸方向に 12～20mm 位置で計測した．なお，画像計測の変位の数値はノイズの大きいデータセットの除外を行ったとしてもノイズが多く含まれることから，変位計の数値を使用し，ひずみと水平変位・鉛直変位の関係を整理した．

G1G2 の水平変位は**図-12 図-16 図-20** より，水平変位とひずみの関連性は G1G2 に近い北側走行の場合，G1G2 のひずみは水平変位が小さくなると，ひずみが大きくなった．これは支承変位が拘束されたことにより，水平変位が小さくなっているため，下フランジには応力が発生しひずみが大きくなったと考えられる．しかし，G1G2 から遠い南側走行の場合，G1G2 のひずみは水平変位が小さくなると，ひずみも小さくなった．これは G3G4 の支承部の水平変位を拘束しているケースでは，G1G2 には応力が伝わっておらず，ひずみ，変位とも，小さくなったと考えられる．G3G4 を拘束していないケースでは変位ひずみとも相対的に大きくなるが，G1G2 を拘束したケースほどひずみは大きくならなかった．

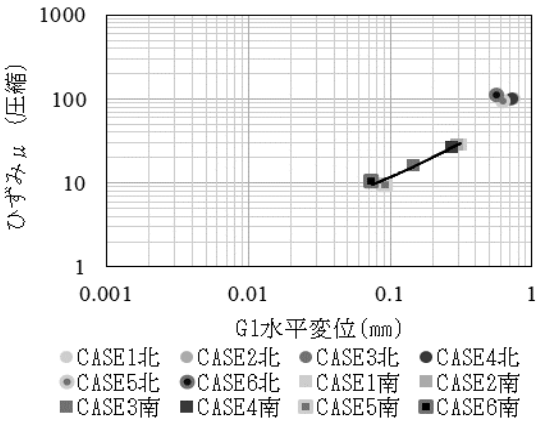


図-12　G1のひずみと水平変位

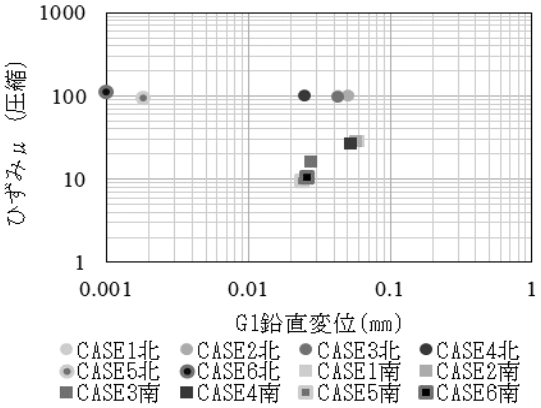


図-13　G1 のひずみと鉛直変位

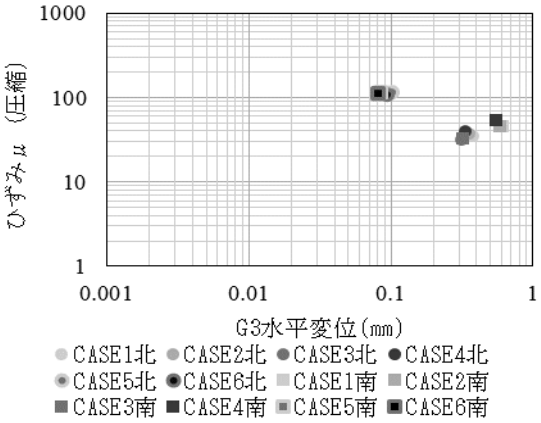


図-14　G3 のひずみと水平変位

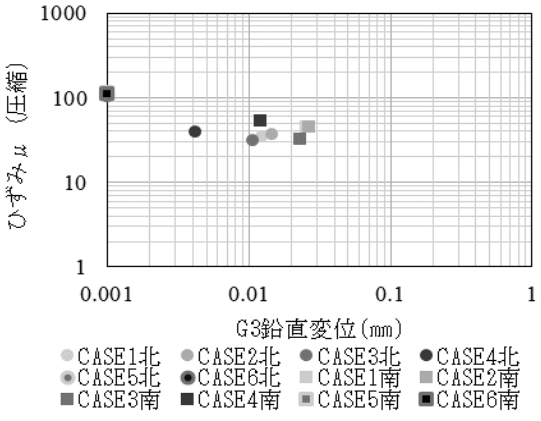


図-15　G3 のひずみと鉛直変位

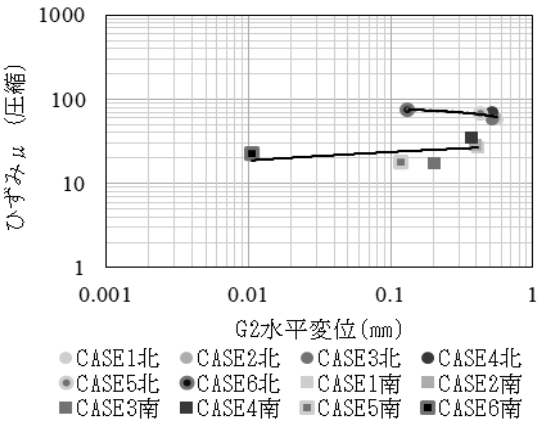


図-16　G2 のひずみと水平変位

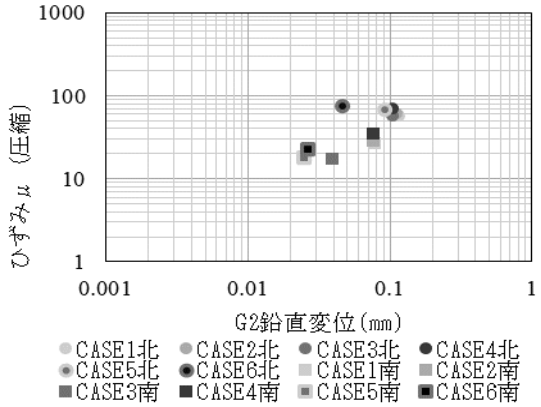


図-17　G2 のひずみと鉛直変位

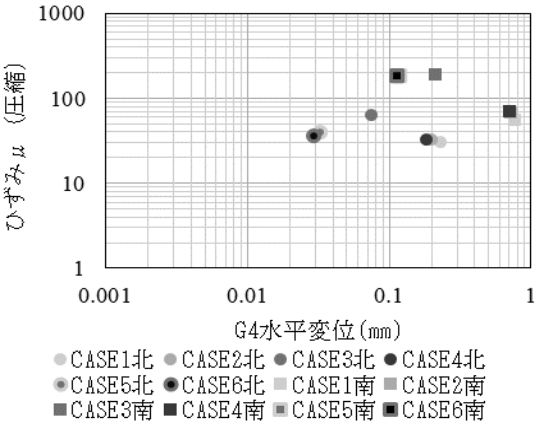


図-18　G4 のひずみと水平変位

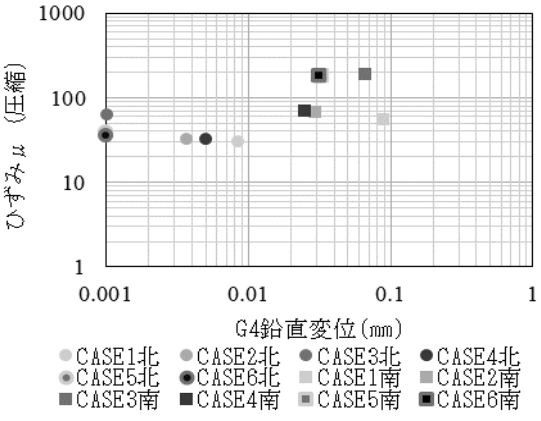


図-19　G4 のひずみと鉛直変位

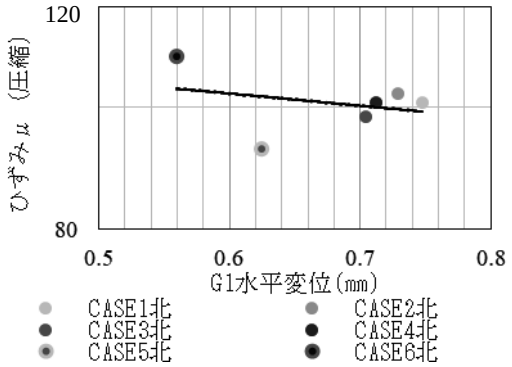


図-20　G1 のひずみと水平変位（北側走行の拡大）

G3 の水平変位は**図-14** より，走行位置に関係なく，変位が小さくなるとひずみは大きくなった．これは G3G4 の水平変位を拘束しており，ピンローラー支承の拘束が低いためである．また，南側走行の方が北側走行よりもひずみが大きくなった．これは南側走行の載荷位置は G3G4 に近いため，応力が大きくなったと考えられる．

図-13 図-17 図-15 図-19 より，鉛直変位とひずみの関連性は確認できなかった．鉛直変位は活荷重の鉛直荷重による鉛直変位と活荷重載荷による桁回転変位による鉛直変位の 2 つ混合していることで，点にばらつきが出ている．

水平変位とひずみの関係は活荷重載荷位置により，影響を受けることが明らかになった．

支承線の中で一部拘束を行うと，応力は拘束した支承部のソールプレートの溶接ビード端部にひずみとして現れる．水平変位追随機能が低下している支承の近傍の水平変位には下フランジのひずみ増大との相関がみられるがひずみ量の定量的な把握は困難であった．

4. まとめ

支承部の機能を表す状態を把握する効率的な方法について検討を行った．それにより得られた成果を以下に示す．

（1）支承部を拘束すると変位計同様に画像計測の数値が小さくなることが確認できた．また変位の数値が小さくなるとノイズが大きくなり，ノイズの影響程度も変位追随機能の健全性の診断の目安にできる．

（2）画像撮影条件によっては変位計を用いた場合と同等の精度で画像計測は変位を計測できることを確認した．撮影条件が良くない場合でも時間経過による変位挙動では画像計測と変位計は一致したことから，変位が生じていることは検知できた．

（3）鉛直変位のような微細変位の計測において，本研究に用いた画像計測では，ノイズの影響が大きく変位計ほどの精度は得られなかった．一方，時間経過による変化を確認することで支承部に変位が生じていることは確認することができた．

（4）変位計測している支承部以外で回転・水平拘束しても変位計測結果に影響が出ることを確認した．

（5）支承線の中で一部拘束を行うと，応力は拘束した支承部のソールプレートの溶接ビード端部付近にひずみとして現れる．水平変位追随機能が低下している支承の近傍の水平変位には下フランジのひずみ増大との相関がみられるがひずみ量の定量的な把握は困難であった．鉛直変位とひずみの関連性は確認できなかった．

今回の検討では，BP・A 支承及びピンローラー支承のうち拘束のない CASE での水平変位は変位計と画像計測に数値に大きな差はなかった．一方，ピンローラー支承で水平変位を拘束した CASE と鉛直変位については，画像計測と変位計とで数値が合わなかった．合わなかった理由は，ピンローラー支承のサイズが相対的に大きく画素が疎くなったこと，分解度が BP・A 支承と比べて大きくなったこと，サイズが大きくなったことによりレンズのゆがみが大きい領域まで使用したこと，輝度コントラストが低かったこと等が考えられる．そのため，撮影環境による影響の確認方法について，引き続き検討を行う予定である．

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2018
2) 日本道路協会：道路橋支承標準設計 ピン支承・ころがり支承編，1976
3) 日本道路協会：道路橋支承標準設計 ゴム支承・すべり支承編，1974
4) 菅原　達也，大住　道生，小林　巧，江口　康平：支承可動部に制約を受けた橋の変形挙動の実験的把握，第 25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.89-94，2022.
5) 柴崎奈穂，新名裕，宮原幸春，池田真理子，楠元崇志，坂野昌弘：実橋計測による支承機能評価手法の確立，土木学会第 69 回年次学術講演会，2014.
6) Ueno, K., Sreng, S., Kobayashi, K.:Surface Kinematometry by image processing for geotechnical model tests, ICPMG 2014, Vol. 1, pp. 337-343, 2014.