

熊本地震で被災した2径間連続鋼斜張橋の 復旧とモニタリングの活用

宮原 史¹・今村 隆浩²・西田 秀明³・星隈 順一⁴

¹正会員 情報科学修 国土交通省 国土技術政策総合研究所
(〒869-1604熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地)

²非会員 国土交通省 九州地方整備局 (〒869-1604熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地)

³正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所
(〒869-1604熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地)

⁴正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

橋長160mの2径間連続鋼斜張橋である桑鶴大橋は、平成28年4月の熊本地震によって、桁全体が曲線外側へ移動するとともに、桁端部の浮き上がり、斜ケーブルのよれ、主塔の傾き、主塔の基礎杭のひび割れ等の損傷が発生した。本稿では、本橋の復旧において行われた斜ケーブルの交換、主桁の横移動におけるモニタリングの活用、同様な被災が少しでも生じにくくなるようにするためのA2支承部の構造の見直し等の技術的工夫について報告する。

また、本橋の復旧プロセスにおいては、復旧後の維持管理段階において簡単な原理で容易に本橋の状態が把握できるようにするためのモニタリングを施工段階で行っている。本稿ではこれらの維持管理に向けたモニタリングの活用の取組についても紹介する。

2. 桑鶴大橋の概要

桑鶴大橋の橋梁諸元を表-1に、橋梁一般図を図-1に示す。本橋は、径間長が主塔よりA1側とA2側で40m異なる構造で、さらにA1側からA2側に向けて上り勾配を有する曲線橋という特徴がある¹⁾。このため、斜ケーブルの配置は同一面内上になく、また、A2側支点部には死荷重が作用する状況において上向きの反力が生じる特殊な構造となっている。

表-1 橋梁諸元

橋長	160m
上部構造	2径間連続鋼斜張橋
下部構造	逆T式橋台、鋼製橋脚
基礎形式	深礎杭
架設年次	平成10年（1998年）竣工
適用基準	平成5年道路橋示方書
管理者	熊本県

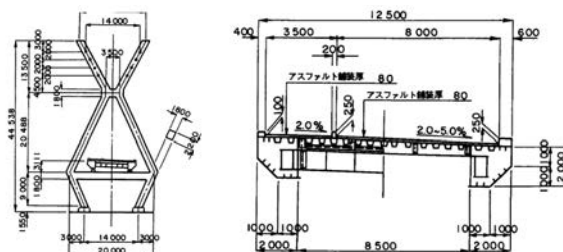
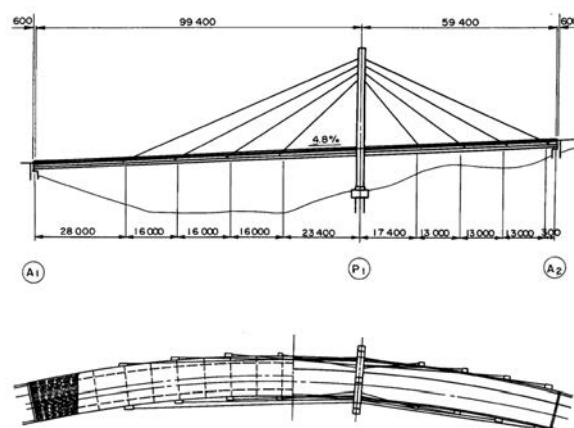


図-1 橋梁一般図

3. 被災の状況

(1) ケーブル・主桁の被災状況

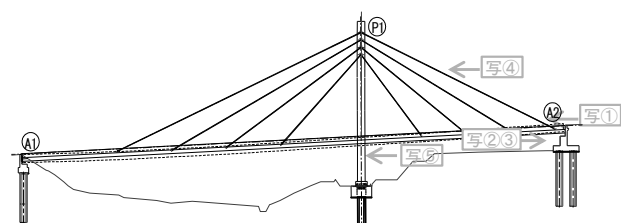
A2橋台上では、主桁と下部構造の唯一の固定支承であり、径間割りが不等径間であることから常に負反力を受けていた支承の破壊に伴い上下部構造が分離し、主桁端部が約60cm浮き上がるとともに、主桁全体が曲線外側へ約90cm移動した（写真-1①②③）。また、A1橋台上の支承も損傷した。P1橋脚上では支承が破壊して主桁が脱落した。しかし、主桁と主塔の橋軸直角方向の遊間が十分にあったため、主桁と主塔の衝突は免れた。P1橋脚上では、変位制限構造の装置本体や取り付けブラケットが損傷するとともに、支点部付近の上部構造側にも面外変形が発生していた（写真-1⑤）。

主ケーブルには、上段1、2段目のケーブルによれが確認され（写真-1④）、照明柱と接触したケーブルでは被覆材が損傷した。また、下段3、4段目のケーブル定着部ではゴムカバーに約5cmずれと抜け出したような痕跡がみられた。これら一連の変状は、A2支承の破壊により桁端部が浮き上がり、ケーブル張力が抜けるとともに、上部構造が橋軸直角方向にも移動したことに伴って生じたものと考えられた。主ケーブル下段3、4段目の変状は、上段1、2段目のケーブル張力が抜けたことに伴い、当該ケーブルに当初よりも大きな張力が作用したのと考えられた。なお、主桁及びケーブル定着部には局部座屈等の変状は発生しておらず健全であることが確認された。また、下段3、4段目のケーブルは、被災前と比較してケーブル長に残留伸びはあるものの弾性領域内にあることが確認された。

(2) 主塔の被災状況

三次元測定の結果、塔全体の移動、傾斜が確認された。移動、傾斜が大きかった谷側の主塔頂部では、下部構造と主塔の相対変位で橋軸方向にはA1方向に247mm移動し、 0.0055rad 傾斜していた。橋軸直角方向には同様に谷側に109mm移動し、 0.0024rad 傾斜していた。しかし、塔体は、主塔横梁の支承部、変位制限構造取付け部に局部座屈に伴う塗膜割れが発生した以外は、塔柱X交差隅角部や塔基部も含め、塗膜割れや溶接部亀裂、局部座屈等の損傷は見られなかった。

P1橋脚基礎の健全性を確認するために、IT試験及びボアホールカメラによる基礎の損傷調査を実施した。IT試験の結果、中央杭、山側杭で杭に部分的なひびわれなどが生じている可能性があると判断され



①主桁端部の浮き上がり
と曲線桁の横ずれ



②主桁端部の A2 橋台
との衝突及び浮上がり



③A2橋台の支承部の破損



④ケーブルのよれ



⑤P1支承部の破損

写真-1 主な被災状況

た。ボアホールカメラによる調査を谷側杭、山側杭で実施した結果、谷側杭では最大ひび割れ幅25mm、山側杭では最大ひび割れ幅45mmが確認された。

(3) 橋台の被災状況

A1橋台では落橋防止構造が破損し、落橋防止構造から伝達された力によりパラペットが破損した。A1橋台周辺ではブロック積みの擁壁の沈下、橋台とブロック積みの擁壁の間に隙間が確認されたが、擁壁本体には損傷はなかった。

A2橋台では、パラペットの損傷と併せて変位制限構造である山側のRC壁が破損した。さらに、橋台前面の盛土地盤にひびわれが生じていた。

A1橋台基礎、A2橋台基礎の健全性を確認するために、IT試験及びボアホールカメラによる基礎の損傷調査を実施した。IT試験の結果、A1橋台谷側杭、A2橋台谷側杭、山側杭で杭に部分的なひびわれなどが生じている可能性があると判断された。A2橋台谷側杭、山側杭でボアホールカメラによる調査を実施した結果、山側杭で微細なひび割れが確認された。

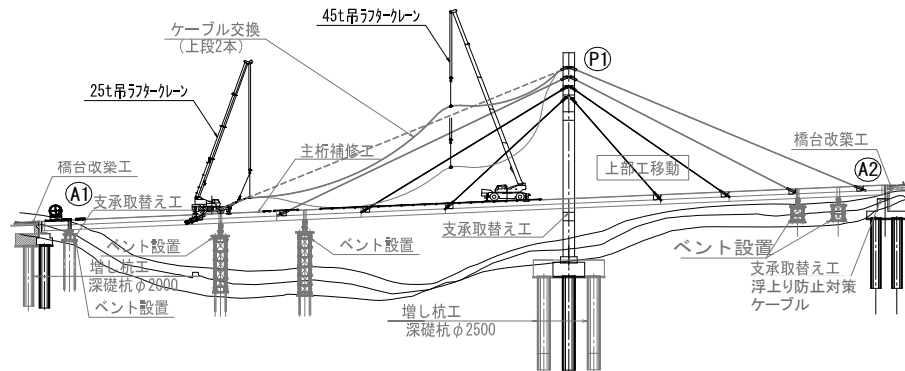


図-2 復旧工事の概要

4. 復旧における技術的工夫

以下では、桑鶴大橋の復旧（図-2）における技術的工夫について紹介する。

(1) 応力状態や形状のモニタリングに基づく

ケーブル・主桁の復旧

3. に示したとおり、上段1, 2段目の主ケーブルにはよれが生じていたことから、素線に破断などの何らかの変状が発生している可能性が否定できなかった。このため、上段1, 2段目のケーブルの取替えることとした。また、支点から脱落していた主桁を元の位置に戻すこととした。

a) 被災後の応力状態を考慮した復旧方法

ケーブルを取替えて再緊張し、主桁を元の位置に移動する方法を決めるには、被災後の応力状態が弾性域内にあるか塑性域に達しているかを見極め、復旧の際の支点部の応力解放により主桁や主塔の変形が元に戻るか否かを事前に把握する必要がある。そこで、まず被災後の形状や応力状態を解析モデル上で再現することとした。被災後の形状や応力状態は、建設当初の設計計算書や設計図面をもとに建設当初の完成系モデルを作成した上で、完成系モデルに現地計測で確認された各支点の変位を強制変位として与えることにより再現した。解析の結果、主桁に一部許容応力度を超過し降伏応力度に逼迫する引張応力度の発生が想定されるものの、被災後の状態は弾性域内にあることが想定された。このことより、支点部の応力解放により主桁、主塔の変形は元に戻ると想定した。また、本橋の元の形状への復旧は、ケーブルで吊った状態での横方向の変位の是正と、主桁のA2桁端部を下方方向に引き下げるか、もしくは主桁のA1-P1間中央付近を上方へ突き上げるることによる鉛直方向の変形の是正を行った上で、ケーブル張力を最終的に調整することで可能と判断した。

b) ステップ毎の応力状態を考慮した施工手順

より安全な施工手順を検討するため、主桁の鉛直

方向の変位を優先して是正するケースと主桁の横方向の変位を優先して是正するケースの2ケースを想定して、骨組みモデルにより施工ステップに沿って解析を実施し、主桁、主塔に発生する応力度、及びケーブル張力の変動を推定した。その結果、変形により桁に貯まっている内部応力をいち早く解放する必要があると判断し、横移動を先行して行うケースを採用した。

c) モニタリングを活用した施工管理

各施工ステップでの施工の妥当性が検証できるようにするためには、施工時の計測値と照合するための管理値を設定する必要がある。そこで、b)で採用した施工ステップ毎に具体のジャッキアップ量やケーブルへの張力導入量等を設定し、施工ステップに沿って解析を行い、各施工ステップで各部材の応力状態が弾性域内に収まっていることを確認するとともに、各施工ステップでの形状管理値を定めた。実際の施工においては、主桁や主塔の傾斜、ケーブルの張力、支点反力等をリアルタイムでモニタリングし、予め定めた形状管理値と照合することで各施工ステップの妥当性を確認しながら施工を進めた（図-3）。なお、被災後の応力状態の解析において許容応力度を超過する引張応力度の発生が想定された主桁断面については、解析と実態の乖離の可能性を考慮すると施工の過程で塑性変形する可能性も想定されたことから事前に補強を行うこととした。

d) 応力状態の変化を考慮した施工

ケーブルの交換にあたっては、安全のため、取り替える上段1, 2段目の既設ケーブルに発生してる張力を徐々に解放する必要がある。そこで、既設ケーブルの主桁側定着部のソケットにセンターホールジャッキを設置し、シムプレートとソケットの間に隙間ができるほど引込んだ上で、シムプレートおよび支圧板を少しずつ撤去してセンターホールジャッキの荷重を徐々に解放する方法を採用した。

また、新しいケーブルに取り替えるまでの間、上段1, 2段目の既設ケーブルに発生していた張力を、

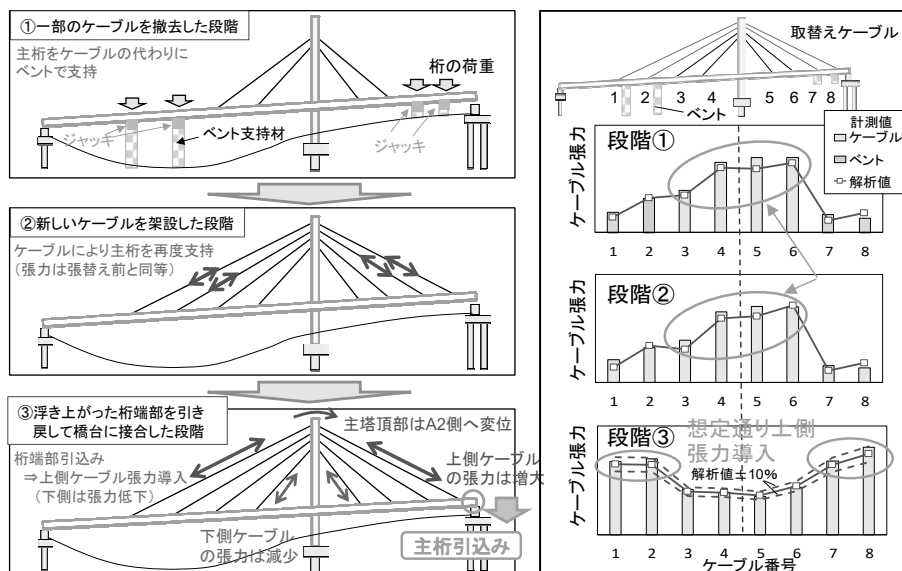


図-3 モニタリングを活用した施工管理



図-4 機能分離型支承構造と支承の破壊を想定したフェールセーフ構造

主桁の応力状態が変化しないよう分担する必要がある。そこで、取り替えるケーブルの主桁側定着部にベントを設置することで対応した。

(2) 主桁を浮き上がりにくくするための工夫

2.に示したとおり、本橋は、径間長が短いP1-A2間の端部であるA2橋台支点には死荷重が作用する状況において負反力が生じる構造となっている。また、A2支承は、鉛直正反力、負反力、さらには橋軸方向および橋軸直角方向の水平反力に対して全て1つの鋼製支承で抵抗させる構造であった。このため、A2支承の破壊に伴い連鎖的に損傷が拡大し、復旧が困難となったと想定された。

そこで、A2支承の復旧にあたっては、鉛直負反力に対する支持機能を独立して確保することができる構造とすることとした。具体的には、図-4に示すように浮上り防止対策ケーブルを新たに設置し、鉛直負反力はこのケーブルで、それ以外の反力（鉛直正反力、橋軸直角方向水平反力、および橋軸方向水平反力）は鋼製支承で抵抗させる構造とした。さらに、万一支承が破壊しても主桁端部に浮き上がりや横移

動が生じにくくするため、図-4に示すように上揚力制限構造と横変位拘束構造をフェールセーフとして別途設けることとした。上揚力制限構造は、横変位にも追従できるよう主桁とはユニバーサルピンで結合させる構造とし、また、支承が破壊していない状況においては無応力となるようにした。

浮上り防止対策ケーブルの施工は、その施工精度が主桁形状やケーブル張力にも影響する可能性がある。そこで、浮上り防止対策ケーブルの施工はケーブルの張力調整工の一環として実施することとした。施工にあたっては、上揚力制限構造の取付けブラケットを利用して、ジャッキを仕込んだ主桁引込み設備を設置し、これにより主桁を引き込みながら所定の高さに達した段階で浮上り防止対策ケーブルを取り付けた。そして、主桁引込み設備を取り外した後、最後に上揚力制限構造を取り付けた。

(3) ケーブル桁定着部への雨水浸入防止のための配慮

斜張橋のケーブルは、構造上極めて重要な役割を担っており、ケーブル本体およびその定着部での不

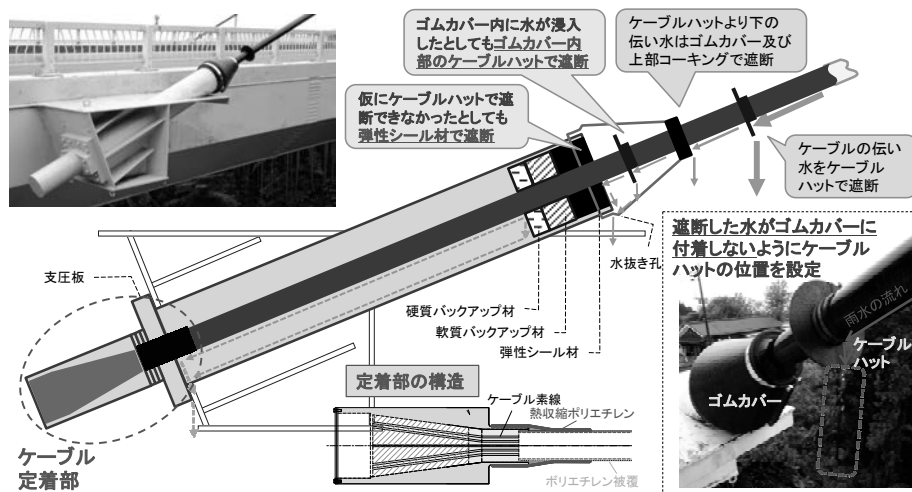


図-5 ケーブル桁定着部への雨水浸入対策の概要

具合や損傷は橋全体に致命的な悪影響を及ぼす可能性がある。過去には、エクストラードPC箱桁橋で斜材の1本が定着部近傍で判断し、防食システム内部への浸入水による鋼材の腐食が疑われた事例²⁾や、鋼吊橋で主ケーブルのロープのストランド1本が、腐食が局部的に進行したことに伴い定着部付近で破断した事例³⁾もある。

そこで、本橋の復旧にあたっては、交換しなかったケーブルも含め全てのケーブルについて、図-5に示すように、従来の弾性シール材による止水に加え、ケーブルハット（止水板）を二段配置する構造とし、さらに先端に取付けるケーブルハットは、ケーブルを伝って来た水が確実に落下するよう、ケーブルの角度に応じてケーブルゴムカバーとの間隔を変えて取り付けることとした。

(4) その他の損傷に対する復旧

a) 主塔の傾きに対する復旧

主ケーブル・主桁の復旧計画に用いた解析モデルを用いた解析の結果、被災後の塔の倒れがケーブル張力や主桁曲げモーメントに与える影響は微小と判断した。復旧にあたっては、4.(1)で示したように、主ケーブル・主桁の復旧における各施工ステップで主塔についても応力状態が弾性域内に収まっていることを確認している。また、各施工ステップでの主塔の傾斜についても形状管理値を定めた。そして、施工時には主塔の傾斜についてもモニタリングを行い、予め定めた形状管理値と照合することで各施工ステップの妥当性を確認しながら施工を進めた。

b) 主桁の損傷に対する復旧

主桁は、P1橋脚上にウェブの局所的な面外変形や主桁内補強リブの破断が見られた。また、A2側端部にはパラペットとの衝突による損傷が見られた。このうち、A2側端部の損傷部については、応力が残

留していないと想定されることから、補強は行わず変形した部位を除去し、新たに製作したものと交換した。一方、P1橋脚上はケーブルプレストレスによる最大の軸方向圧縮力が発生している部位である。ウェブの局所的な面外変形や主桁内補強リブの破断によりこの圧縮応力に対する抵抗機能や同応力による座屈を補剛するための機能が低下していると考えられたため、予めバイパス材、トラス補強材を設置した上で、当該部位を部分的に切除し、新たに製作したものと交換した。

c) P1橋脚の深礎杭の損傷に対する復旧

IT試験及びボアホールカメラによる調査の結果から、当該基礎は耐力の低下が生じている可能性がある状態であると判断したこと、また元々、本橋脚の基礎は、橋軸方向に杭を単列配置した構造であること等も考慮し、増し杭による補強対策とひび割れ補修対策を実施することとした。増し杭は、被災した既設の基礎に発生していた死荷重による鉛直荷重以外は全て新設の杭で負担できるように設計した。

5. 維持管理に向けたモニタリングの活用

2.で示した構造的特徴を有する本橋では、各々の斜ケーブルに作用する張力は異なる。さらに斜ケーブルの張力はA2支承部に設置された浮上り防止対策ケーブルの張力によっても変化する。したがって、復旧後の維持管理段階で本橋の状態を把握する上では、これらのケーブルの張力状態を把握できるようにすることが重要となる。また、橋を構成する部材の損傷・変状や斜ケーブルの張力抜けなどが生じると、橋全体の振動特性も変化する。このため、復旧の完成系において実測した橋全体の固有振動数のデータを今後の維持管理におけるリファレンスとして



写真-2 浮上り防止対策
ケーブルの加振状況



写真-3 斜ケーブル張力
の確認試験状況

活用できるようにしておくことも有用である。そこで本橋では、ケーブル張力や完成系における固有振動数の情報を取得するためのモニタリングを行った⁴⁾。なお、これらの情報の取得にあたっては、管理者が実施しやすいようにする観点から簡単な原理で容易に取得できる方法を選定し、維持管理への活用が実効性を伴うようにも配慮した⁵⁾。

(1) ケーブル張力のモニタリング

ケーブル張力が固有振動数と相関関係があることに着目し、固有振動数をモニタリングすることで復旧直後の状態からの張力変化の有無を容易に推定できるようにすることとした。

A2橋台支承部の浮上り防止対策ケーブルの固有振動数は、ケーブルの張力調整段階において、写真-2に示すように橋台天端の直上位置でケーブルをハンマーで叩いて振動させ、その時にケーブルに生じる時刻歴加速度を周波数解析して求めた。また、主桁を支持する斜ケーブルの固有振動数についても、ケーブルに人力で振動を与え、その時に計測された時刻歴加速度を周波数解析して求めた(写真-3)

以上の施工段階で得た固有振動数とケーブル張力の実測値の関係を整理することで、舗装や附属物などが設置された復旧の最終系の構造条件におけるケーブル張力と固有振動数との関係式を求めた。

(2) 橋全体の振動特性のモニタリング

橋の振動特性の変化の把握は、橋全体の固有振動数から確認する方法により行った。橋の固有振動数は、本橋の橋面上において角材でつくった段差から車両を着地させて人工的に橋に小さい振動を与え、主塔頂部や橋桁に設置した加速度計で計測された時刻歴加速度を周波数解析して求めた。加振位置は、本橋の全体系に対する固有値解析の結果を踏まえ、主桁が鉛直方向に大きく振動する1次モードを再現するように主塔とA1橋台の中間位置とした。加振位

置近傍で計測された鉛直加速度波形の周波数解析より、本橋の復旧の完成系における1次モードの固有振動数は0.92Hzであった。

6. おわりに

本稿では、熊本地震で甚大な被災が生じた桑鶴大橋を対象として、斜ケーブルの交換、主桁の横移動におけるモニタリングの活用、単に元の構造に戻すのではなく同様な被災が少しでも生じにくくなるようにするためのA2支承部の構造の見直し等の復旧における技術的工夫、及び維持管理を考慮して施工段階で行ったモニタリングの取り組みについて紹介した。本稿で紹介した復旧を経て、桑鶴大橋は平成30年7月に供用を再開している。今後本橋と類似の対応が必要となった場合において、本稿で紹介した考え方の事例が参考となれば幸いである。

謝辞：桑鶴大橋の復旧に係る検討にあたっては、国土交通省九州地方整備局及び国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所、熊本県等で構成されるプロジェクトチーム(橋梁PT)の委員から助言を頂きました。また、計測データ等は、国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所から資料の提供を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所、(国研)土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、2017。
- 2) 玉越隆史：道路橋における鋼材の損傷への対応、検査技術、Vol.19, pp.1-7, 2014。
- 3) 玉越隆史、村越潤、高橋仁：吊橋の主ケーブル一部破断時の対応事例、土木技術資料、Vol.56-3, pp.46-47, 2014。
- 4) 西田秀明、鈴木慎也、瀧本耕大、星隈順一：震災復旧工事における施工段階での情報取得と維持管理への活用、土木技術資料、Vol.60-10, pp.24-27, 2018。
- 5) 星隈順一：桑鶴大橋の復旧対策技術の現地説明会を開催-復旧プロセスで得たデータは今後の維持管理で活用-、土木技術資料、Vol.60-9, pp.42-43, 2018。