

3次元レーザスキャナを活用した道路橋の震後の 緊急調査の効率化に関する基礎的研究

林 祐葵¹・小林 巧²・大住 道生³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 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） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 博（工） 国立研究開発法人土木研究所 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

地震発生直後（以下、震後）には道路橋の緊急調査を実施し、できるだけ短時間で橋の健全性や供用安全性について判定する必要がある。

例えば、「首都直下地震道路啓開計画」¹⁾においては、震後に道路管理者が速やかに緊急調査を実施し、3時間程度で道路啓開候補路線の被災情報を収集・把握を行い、6時間程度で国土交通省による高速道路・国道・都道を組み合わせた優先啓開ルートを決定し、48時間以内に最低限の道路啓開ルートを確認することを目標としている。

しかし、2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では、広範囲かつ大規模な災害が発生したため、膨大な数の道路橋に対して緊急調査が必要となり、対応に時間を要した^{2), 3)}。緊急調査にかかる時間は、地震の規模や被災状況に依るので一概には言えないが、可能な限り早い健全性判定の完了が望まれることは自明である。

現行の緊急調査手段は地上巡視が基本⁴⁾であるが、調査をより効率的かつ短時間で行うためには、震後に確認する調査項目の整理等の地震発生前の対応に加え、衛星等の上空からのリモートセンシングや、橋梁の支承部等の狭隘部へ早急にアクセスできる方法（点検通路やUAV）を並行して活用する等、様々な段階で、多様な方法を組合せることが有効である。

特にUAV等の新技術活用による点検の効率化及び技術の組合せに関する方針について、国土交通省の道路技術小委員会からも提言⁵⁾が為されている。そ

れによると部材の状態把握のための点検作業効率化及び状態把握の質を向上させる技術（LEVEL1）、破壊等の状態変化を検知する技術（LEVEL2）、健全性診断のための情報を定量的に計測する技術（LEVEL3）、診断を定量化する技術（LEVEL4）の4段階で新技術導入を推進し、各段階の目的に応じた最適な技術を組合わせて効率化する方針が示されている。

しかし、緊急調査を含めた点検において、どの項目を点検する必要があるかは示されている^{4), 6)}一方、それらを計測するための、有効な技術の組合せ方については試行錯誤の段階であり、また、新技術についても点検者のニーズに最適化された技術が提案されているとは言い難い。

そのような背景を踏まえ、本研究では新技術活用の一例として、2022年福島県沖地震により被災した道路橋（形式は鋼5径間連続箱桁橋）の震後点検に3次元レーザスキャナを試用した。また、目視を基本とする従来の震後の緊急調査項目の内、代替可能性とそのために必要な条件について検討するために、点群データで把握できる損傷の種類及び検知精度を確認した。

2. 現行の震後の緊急調査

本研究では、新技術の活用により震後の緊急調査を効率化するための基礎的検討を行う。それに際して、現行の緊急調査を以下に概説^{7), 8)}する。

緊急調査は自動車の通行に支障をきたす異常の把握を目的とした往路点検と、余震発生時や通行を継続することによる二次被害の危険性の把握を目的とした復路点検に構成されることが一般的である^{7), 9)}。表-1に緊急調査における主な着目項目例⁷⁾を示す。

震後の緊急点検では、主にこれら項目について調査される。その調査にあたっては、橋台・橋脚上にアクセスして桁端部、支承部、橋台及び橋脚について近接目視による詳細目視調査を行う。また、橋台・橋脚上から目視できる範囲の上部構造について異常の有無を確認する。それらに加えて、部材の損傷以外に、橋全体の傾斜、形状不整等の異常の有無を確認する。

特に、桁端部と支承部は、地震などの大きな外力による被害が集中的にみられる箇所なので、その被災状況を把握することが、震後の橋の耐荷力に大きな影響を及ぼす可能性の高い事象を効率的かつ確実に捕捉できるために重要とされている⁷⁾。

これら既往の知見に基づき、本研究においても、近接目視並びに3次元レーザスキャナによる調査を、桁端部と支承部周辺を中心に実施することとした。

3. 近接目視を基本とした地震被害調査

(1) 2022年3月の福島県沖を震源とした地震

2022年3月16日23:36に福島県沖でMj 7.4の地震が発生し、宮城県および福島県で最大震度6強を観測した。この地震の発生機構は、西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート内部で発生した地震である⁹⁾。K-NET福島 (FKS003)¹¹⁾で観測された強震記録より求めた、加速度応答スペクトルを図-1に示す。加速度応答スペクトルは、特に周期0.2秒以下、0.5~2秒において東西成分が卓越する地震動であった。

(2) 調査対象橋梁諸元

表-2に調査対象橋梁の諸元を示す。調査対象橋梁(以下、T橋)は、鋼5径間連続箱桁橋の道路橋である。架橋位置である福島県福島市では、最大震度6弱を観測した。橋軸方向は、西北西-東南東方向である。その被災状況については次節で述べる。

(3) 目視により確認された被災状況

A1橋台、A2橋台ともに近接可能であったため、橋台周辺の支承部、桁端部、上部構造、下部構造、周辺地盤状況など中心に調査を実施した。また、橋

表-1 緊急調査における主な着目項目例⁷⁾

部位・部材	対象とする損傷	着目箇所	被災度判定	
			耐荷力	走行性
鋼部材	腐食	桁端部	○	—
	き裂	桁端部	○	—
	ボルトの脱落		○	—
	破断		○	—
コンクリート部材	変形・欠損		○	—
	ひびわれ		○	—
	抜け落ち		○	—
	PC定着部の異常		○	—
その他	変形・欠損		○	—
	遊間(伸縮装置)の異常		○	○
	路面の凹凸		—	○
	支承の機能障害		○	—
	上部工の変状(沈下・傾斜・洗堀)	下部工	○	—

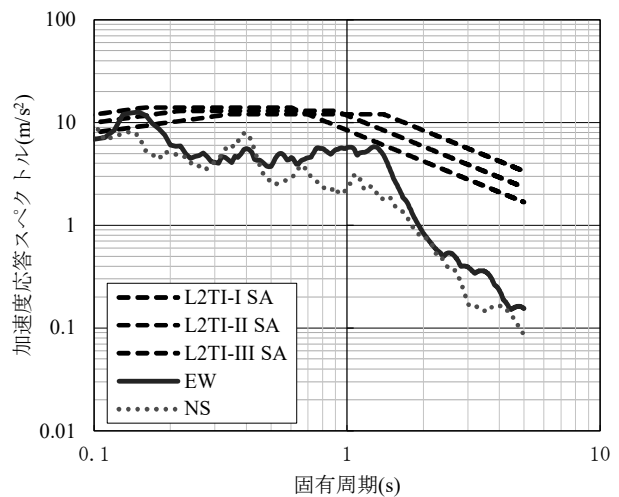


図-1 加速度応答スペクトル (K-NET 福島)

表-2 調査対象橋梁の諸元

架橋位置	福島県福島市
橋長	317.900m
支間長	57.7m+3@67.0m+57.7m
上部工形式	鋼5径間連続箱桁橋
下部工形式	逆T式橋台、張出し式橋脚
基礎形式	場所打ち杭φ1200mm
支承形式	ゴム支承
架設年次	1993年(平成5年)

脚の支承部については、近接することができなかったが、望遠カメラにより支承部の状況を確認した。P1橋脚、P2橋脚については水中部であり接近できなかったが、P3橋脚とP4橋脚については近接可能であったため、傾斜計にて角度計測を実施した。

図-2に損傷状況概略図を、写真-1に損傷状況を示

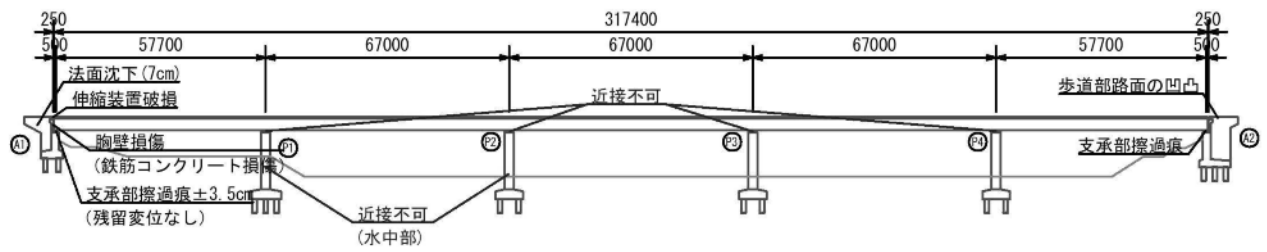
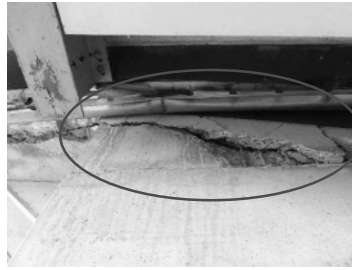


図-2 損傷状況概略



(a) T橋全景



(b) A1橋台胸壁上部剥落・鉄筋露出



(c) A1橋台遊間の異常



(d) A1橋台胸壁部添架管周辺コンクリートの剥離・ひび割れ



(e) A1橋台法面の沈下(7cm)



(f) 支承擦過痕(±3.5cm)



(g) P3橋脚傾斜(最大0.8°)



(h) P4橋脚傾斜(最大0.4°)

写真-1 T橋損傷状況写真

す。T橋は、主にA1橋台部に損傷が集中しており、胸壁上部の剥落・鉄筋露出(写真-1(b))、遊間の異常(写真-1(c))、胸壁に固定された添架物周辺コンクリートの剥離・ひび割れ(写真-1(d))、橋台法面の沈下(写真-1(e))が確認された。特に胸壁上部の剥落・鉄筋露出及び遊間の異常が著しく、これは、上部構造の橋軸方向の振動により伸縮装置を介して胸壁が押し込まれて損傷し、橋台側の伸縮装置が押し上げられたものと推定される。

橋軸方向は、西北西-東南東方向であるので、図

-1の加速度応答スペクトルより、橋軸方向の応答が卓越していたために、このような胸壁の損傷等が生じたと推測される。

上査に橋軸方向の擦過痕(写真-1(f))がA1橋台部で±3.5cm程度、A2橋台部で±4.5cm程度確認された。いずれも支承の機能が損なわれるような残留変位は生じていない。また、他のP1~P4橋脚の支承については望遠カメラを介した遠望目視を行い、大きな損傷が無いことを確認した。しかし、詳細な被災状況は不明である。その他傾斜計測により、P3橋脚で橋

軸方向A2側に最大0.8°，P4橋脚で橋軸直角方向R側に最大0.4°，躯体が傾斜していた。

なお、本橋では被災後に伸縮装置の段差のアスファルトコンクリートによる応急復旧が行われ、徐行での通行が可能な状態に措置されている。

4. 3次元レーザスキャナを活用した調査

(1) 計測機器および計測方法

3章で示した損傷発生箇所及び、全ての支承部に対して3次元レーザスキャナによる計測を行った。その計測結果より、近接目視により確認できた損傷の内、点群データを介して検知できる損傷の種類及びその検知精度について検討を実施した。なお、計測時の天候は晴れ、平均風速は4.1m/sであった。

図-3に計測器の諸元を示す。この計測器は、手に持って歩きながら周囲を計測することを標準とした機器設計が行われている。しかし、アクセスが困難な橋脚上の支承部に対して適用するために、ロープでセンサーを吊り下げた計測も試行した。

計測状況を写真-2に示す。写真-2(a)が本来の使用方法であり、センサーを手で持って計測（以下、手持計測）する。一方、写真-2(b)は今回試行した吊り下げ計測であり、角材にロープ固定金具を設置した簡易な計測補助器具（図-4）を作製し、先端にセンサーを取り付けたロープを角材に固定、ロープの長さを手動で調整しながら、センサーを吊り下げて計測（以下、吊り下げ計測）を行った。

なお、支承部にアクセス可能な橋台部は、手持計測と吊り下げ計測の2パターン実施した。

アクセスが困難な橋脚上の支承部については、吊り下げ計測のみ実施した。なお、計測は片側に設置されている歩道部からのみ実施した。また、センサーの照射角度は270°であることを考慮し、できる限りデータの取得漏れを防ぐため、図-5のようにセンサーを上下左右方向へ移動させながら計測を行った。図-5の固定箇所での固定時間は1分と30秒の2パターンの計測を行い、計測時間の違いによる点密度が計測精度に与える影響を確認した。

(2) 形状計測の精度検証

A1橋台のG2桁の支承を対象に、メジャーによる実測値と手持計測、吊り下げ計測の3つの計測方法で形状寸法を比較し、計測精度を検証した。また、固定時間の違いによる計測精度等の違いについても、併せて検証した。



計測器	: Leica BLK2GO
スキャンタイプ	: 点群スキャン
重量	: 775g
連続使用時間	: 45～50分
視野	: 360° (水平) 270° (垂直)
測定範囲	: 0.5m～25m
面精度	: ±3mm
計測精度	: ±10mm (室内)

図-3 計測器の諸元



(a) 手持計測状況 (本来の計測方法) (b) 吊り下げ計測状況

写真-2 計測状況

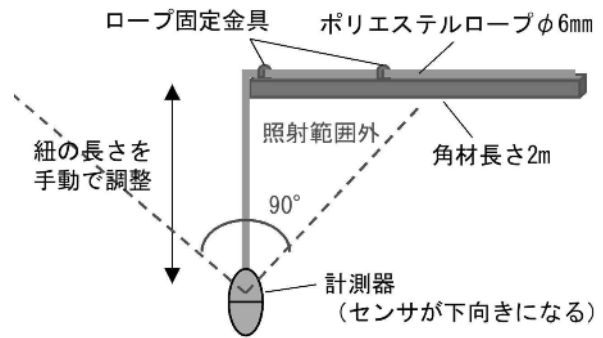


図-4 吊り下げ計測用に作成した器具

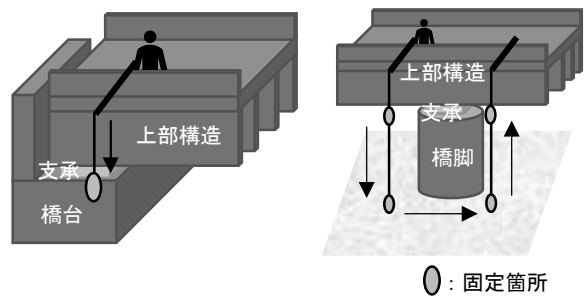


図-5 吊り下げ計測の方法

図-6にA1橋台G2桁支承部の寸法計測精度の検証及び点群の形状線を示す。なお、メジャーによる実測値は任意の2点間の平行寸法を表示している。

同図では、沓座モルタル端の点群の分布形状を併せて示している。これによると、手持計測と吊り下げ計測において点密度やその分布が明らかに異なる

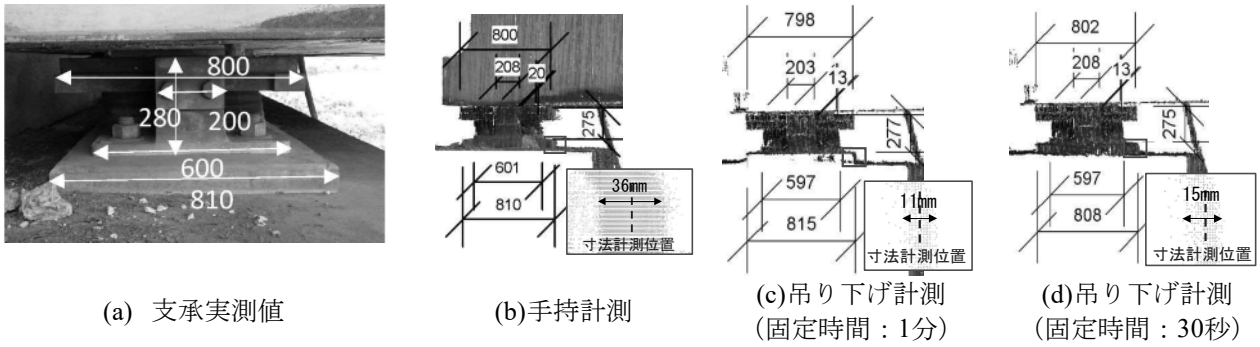


図-6 A1橋台G2桁支承部の寸法計測精度の検証及び点群の形状線

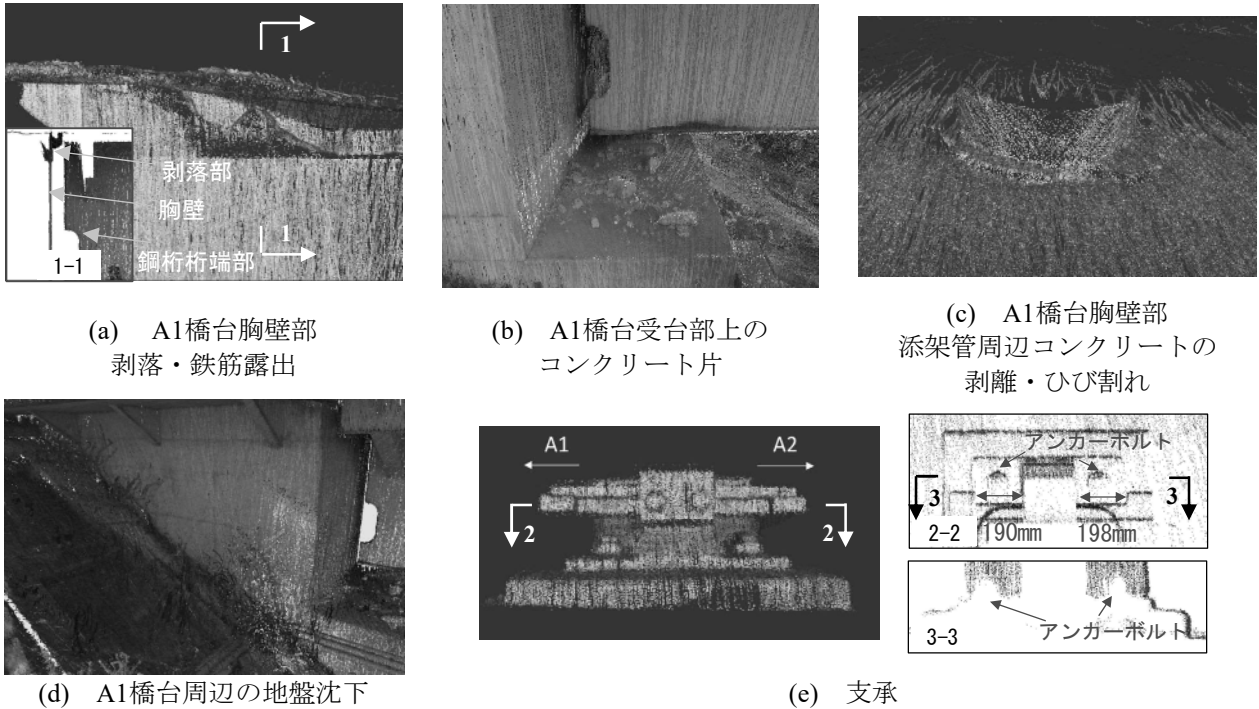


図-7 点群データにより確認されたA1橋台の損傷状況

ことがわかる。手持計測の点群の形状線はある一定の幅を持ち、点密度が高い。一方、吊り下げ計測では手持計測と比べ、点密度が低い。定性的には分布の中央部で最も点密度が高く、中央部から離れるほど点密度が低下する様子が観察できる。

補正等の処理を行っていない点群のばらつき幅については、手持計測で29～36mm程度、吊り下げ計測において固定時間1分の場合で11～12mm程度、30秒の場合で10～15mm程度である。固定時間の違いによる明確な差は見受けられないが、計測方法の違いによる差が確認できた。

また、図-6の寸法の計測は、これら点群の形状線の中央を任意で2点選択し、その2点間の距離を計測した。実測値と比較した点群データの寸法計測誤差は、手持計測も吊り下げ計測も最大で8mmであった。選択する点に依るところもあるが、形状線の中央点を用いて寸法計測を実施すれば、計測誤差にはほぼ差がないことが確認できた。

(3) 点群データによる損傷検知精度の検証

本節では、2章(3)で示した被災状況に対して、点群データの損傷検知精度の検証を行う。

図-7にA1橋台の点群データを示す。下部構造、上部構造、支承、地形状況の概況が点群データを介して把握できた。以下に、損傷の種類および部材毎の損傷検知の可能性について検討した結果を示す。

図-7(a)の胸壁部の剥落・鉄筋露出について、剥落している状況は写真-1(b)の写真との比較により確認できたが、鉄筋露出までは認知できない。また、剥落箇所の断面図を作製し剥落深さの計測を試みた。図-7(a)に胸壁断面(断面1)も併せて示す。これによると、胸壁の被災によるコンクリートの剥落等が点群形状として現れている様子がわかる。しかし、凹部の深さについては点密度不足により、計測できなかった。このことから、胸壁等の狭隘部については点密度を高く計測することが難しいこと、その状況であっても形状認知は可能な場合があること、点

密度によっては距離計測できないことが明らかとなった。さらに、**図-7(b)**より支承周辺に胸壁部の剥落コンクリート片が確認できた。このような本来あるはずのない異物の映り込みは、その周辺に異変が生じている可能性を示唆する指標のひとつと推察できる。

図-7(c)の添架管周辺コンクリートの損傷について、**写真-1 (d)**との比較により、剥離のような損傷は認知できるが、ひび割れは点群のみでは把握することが難しいと言える。

図-7(d)の橋台法面の沈下痕は、点群データでは把握することができなかった。点群データの色情報はスキャナに搭載されたカメラを介して反映されるため、データ取得時の日照状況に左右される。本調査時は、橋台法面周辺が暗部であったため、沈下痕のような軽微な痕が反映されていなかった。さらに、橋台法面周辺の点密度が低いことも確認された。点群自体は写真と比べ暗部でも計測可能であるが、色による反射強度の違いや暗部での計測精度の低下が原因であると推測される¹²⁾。暗部での計測には工夫が必要であることが確認できた。

図-8にゴム支承の構造の例¹³⁾を示す。支承部の震後調査においては、上沓及び下沓の変形、上沓や下沓ストッパーの亀裂及び破断、サイドブロックの亀裂・破断・変形、アンカーボルトの抜け出し及び破断、沓座モルタルの破壊、ゴム支承本体の残留変形や亀裂・破断等を確認する必要がある^{4) 7)}。

図-7(e)の支承の点群計測状況を確認すると、認知できる形状の範囲においては、ゴム本体の変形等は生じていない。支承部は暗部であるため、**写真-1(f)**で確認された擦過痕は点群では確認できなかった。また、橋軸直角方向断面（断面2）では、上沓ストッパーの形状が把握でき、変形していないことが確認できる。断面3にアンカーボルトの断面図を示す。アンカーボルトの形状は認知でき、抜け出しは生じていないように見られる。しかし、下沓の点密度が少なく形状線が明確ではないため、軽微な抜け出し量を判断することは難しいと言える。**図-7(e)**の点群データ及び断面2より、サイドブロックの変形や沓座モルタルの破壊は生じていないことが確認できる。

(4) 橋脚傾斜量の確認

点群には基準断面からの相対的な角度を計測する機能が存在する。その機能を利用し、橋脚の傾き計測を試行した。震後点検において橋脚の傾斜を計測する意図は、橋脚や基礎の損傷有無を判断する目的で行われる⁴⁾。

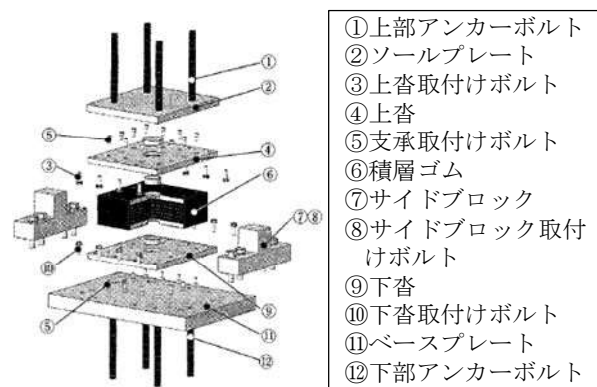


図-8 ゴム支承の構造の例¹³⁾

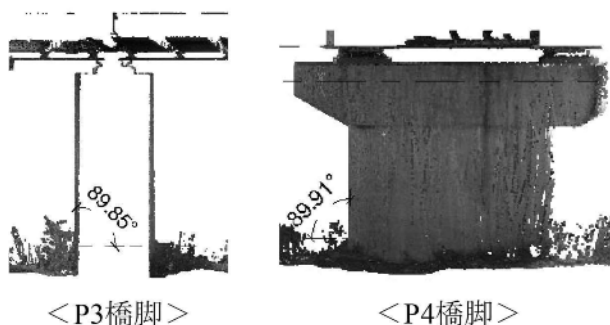


図-9 点群による橋脚傾斜の計測

図-9に点群による橋脚傾斜の計測の例を示す。同図ではモデル上の水平面からの橋脚側面の相対角度を計測している。しかし、モデル上の水平面が現地状況と一致している保証は無く、この角度の正確さについては保証できない。計測データにおいて基準となる水平面を設定するためには、水平面と定義できるものを併せて計測する必要がある。

(5) 橋脚支承部に対する3次元計測結果

前述の検討により、点群データを活用し、部材変形及びコンクリートの剥離・剥落を把握することが可能であることが明らかになった。この結果を踏まえ、点群により検知可能な範囲で、アクセスが容易では無い橋脚上の支承部の3次元計測結果を確認した。

図-10に橋脚上支承部の点群データを示す。各橋脚上には支承が2基存在するが、計測を行ったのは歩道側のみであるため、G2桁の支承部しか形状が把握できるデータは取得できていない。**図-11**にP3橋脚の点群データを示す。桁内側にある部材は点群数が少なく形状が把握できない状態であった。点群が取得できている範囲で、損傷の有無を確認した結果を以下に記す。

図-10を確認すると、各橋脚の支承のゴム本体に大きな残留変形は生じていないことが形状から認知

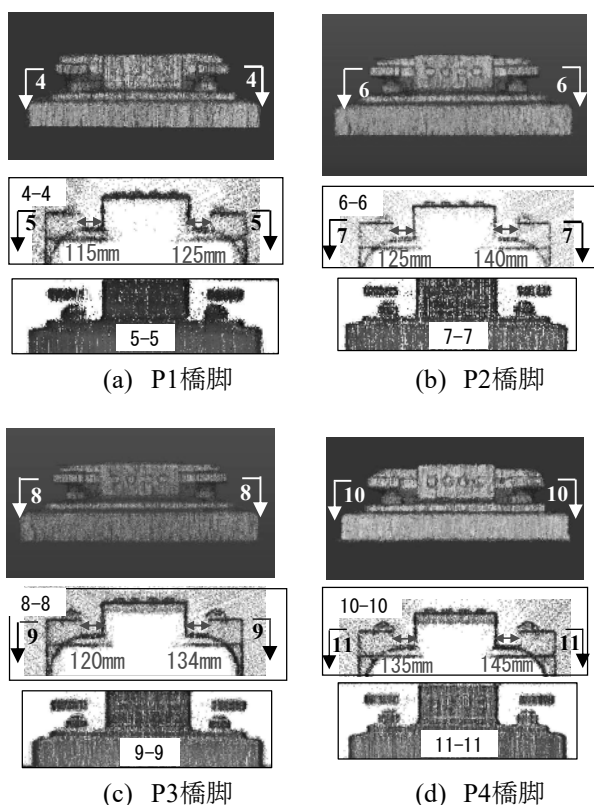


図-10 橋脚上支承部の点群計測結果

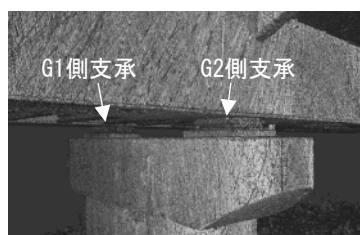


図-11 P3橋脚点群データ

できる。

断面4，断面6，断面8，断面10より，上沓ストッパーが破断していないことを確認した。しかし，き裂の有無は，点群データのみでは判断ができなかった。

断面5，断面7，断面9，断面11からは，アンカーボルトに抜け出しが生じていないことが把握できる。

その他，サイドブロックの変形や沓座モルタルの破壊は生じていないことを確認した。

ここで，構造物の死角となり点群が取得できていなかった桁内側の支承部の状況把握が課題として挙げられる。図-11に示すP3橋脚全体の点群データより，計測機器の照射範囲内であれば，点群データを取得することが可能であることから，G1桁上の支承部内側のデータが取得できていることが確認できる。本調査で試行した計測方法では，点群数が不足するため形状を把握するには至らなかったが，計測位置や計測時の固定時間を工夫すれば，レーザスキャナ

の弱点である死角を減らすことが可能であると考察する。

6. まとめ

本研究では，従来の点検では一般的ではなかった技術を活用する場合の一例として，地震により被災した道路橋の震後点検に3次元レーザスキャナを試用した。また，目視を基本とする従来の震後の緊急調査項目の内，目視以外の点検技術で代替可能性のある点検項目，及び代替するために技術側に求められる要件について検討を行い，点群データの機能により把握できる損傷の種類や，各損傷検知に有効な計測指標と必要な精度について把握を試みた。これにより得られた知見を以下に示す。

外形からは，コンクリートの剥離・剥落，部材の変形，アンカーボルトの抜け出し等，部材に変形が生じている損傷を把握することが可能である。また，支承のセットボルトの破断等，直接視認できない部材内部の損傷は，外形から部材相互にずれが生じているか否かを確認することが，被害の有無を判断する指標の一つとなる。

一方，コンクリート部材のひび割れや鋼部材のき裂，変形が生じていない部材内部の損傷，変状痕等は外形からは判別しにくく，検出が難しい結果となった。これらの損傷は，損傷箇所や程度により耐荷性能が低下している可能性もあるため，別の方法により補完する必要がある。

今後，道路橋の震後点検において検出が求められる変状とその精度を整理し，近接目視以外の方法の適用性を判別するための項目と指標を提案していく。

謝辞：福島県より調査対象橋梁の構造図，横断図，橋梁諸元を提供頂きました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 国土交通省 関東示方整備局：首都直下型地震道啓開計画，第3版，令和3年8月30日，
<https://www.ktr.mlit.go.jp/road/bousai/index00000002.htm>
1（最終閲覧日：2022年6月10日）
- 2) 佐々木一夫：東北地方太平洋沖地震による直轄道路橋の被災状況，土木技術資料，54-8，pp.30-33，2012.
- 3) 国土交通省：熊本地震による被災及び復旧状況，
<https://www.mlit.go.jp/common/001135910.pdf>（最終閲覧日：2022年6月10日）

- 4) 日本道路協会：道路震災対策便覧，震災復旧編，平成18年度改定版，平成19年3月，2007.
- 5) 国土交通省 道路技術小委員会：定期点検のさらなる効率化・合理化に向けた取組，第12回道路技術小委員会，配布資料，資料2，2020.
- 6) 国土交通省 道路局 国道・技術課：橋梁定期点検要領，平成31年3月，2019.
- 7) 東北地方整備局 道路部，国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の震災時緊急点検・応急調査の手引き（案），Ver.1.0，平成24年2月，2012.
- 8) 玉越隆史，小林寛，武田達也，平塚慶達：道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究－道路橋に関する基礎データ収集要領（案）－，国総研資料，第381号，2017.
- 9) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：2022年3月16日福島県沖の地震の評価，令和4年3月17日
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/202316_fukushima_1.pdf（最終閲覧日：2022年6月14日）
- 10) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET，KiK-net）
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>（最終閲覧日：2022年6月14日）
- 11) 日本道路協会：道路震災対策便覧，震災危機管理編，令和元年7月，2019.
- 12) 福森秀晃，佐田立典，大久保秀晃，清水哲也，村山盛行：3次元レーザスキャナの測定精度に関する基礎的実験，土木情報利用技術論文，vol.18，2009.
- 13) 日本道路協会：道路橋支承便覧，平成30年12月，2018.