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）

UAV撮影画像から橋梁の地震時損傷を認知するための要件に関する基礎的検討

小林　巧[1]・吉谷　薫[2]・大住　道生[3]

[1]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
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
[2]非会員　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
（〒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
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

地震発生後には早急な道路啓開のため，道路橋の被害を迅速かつ的確に把握し，橋の構造安全性や使用性等について確認する必要がある．しかし，現行の道路橋の震後点検では，落橋の有無や，橋面から走行性に影響のある損傷の有無（段差等），上下部構造の異常（ずれ，沈下等）等が車上から確認されることが多い[1), 2)]．また，主に橋面からの目視や，遠望からの目視で変状が確認された道路橋に対しては，徒歩移動による橋下からの近接目視が行われる．膨大な数の道路橋に対する緊急点検を限られた時間で行うため，点検項目を絞り，人力でスクリーニングを実施していることが実情である．

しかし，構造安全性や使用性等の診断に資する情報を点検で収集するためには，本来，全ての損傷の有無と，エネルギー吸収部材の塑性化の程度に関する情報収集が望まれる．それら情報を点検で収集することで，橋の構造安全性や使用性等に関して，より的確な診断が可能となる．そのような課題に対して，移動能力に長けたUAVの活用により，点検の迅速化・高度化に貢献できる可能性がある．

一方，現在，道路橋の点検支援技術として「点検支援技術性能カタログ」[3)]に掲載されているUAVの多くは，画像撮影技術としては，ひび割れの認知に特化した性能保証が為されている．しかし，橋の変状はひび割れだけではない．それに加え，ひび割れの存在により，道路橋の構造安全性や使用性に影響を及ぼす状態に至ることは多くはない．

地震等の災害発生後の道路橋の構造安全性の診断については，特に厳格に行う必要があり，致命的な損傷の見逃しによる落橋は許容できない．ひび割れだけでなく，震後点検時には，亀裂，変形，段差，沈下，異物等の様々な変状に関する情報を，可能な限り漏れなく収集する必要がある．

そのような課題認識から，本研究では移動能力に長けたUAVを道路橋の震後点検に活用するための基礎的な検討として，被写体からの撮影距離と把握できる見込みのある地震時損傷との関係について調査を行った[4)]．

なお，ひび割れ等の一部変状の検出については，AI等を活用した方法が多く行われている[3)]が，地震後損傷については，損傷の種類や，損傷を受ける対象部材が多様であり，また，学習データとなり得る地震時損傷の画像等の蓄積も十分ではないことから，本研究では，画像から人の目で変状を識別できるか否かを論点とする．

2. 道路橋の震後点検で収集する変状の画像上の特徴についての整理

本研究では，画像の活用を前提に，画像上で人が地震時損傷の存在を識別できるか否かを検討するため，主に文献1), 2)で取り扱われている多様な地震時損傷を，2次元画像上で識別するための幾何学的特徴として単純化し，集約し，分類することを試みた．

図-1に被災事例と画像上の情報分類例を示す．画

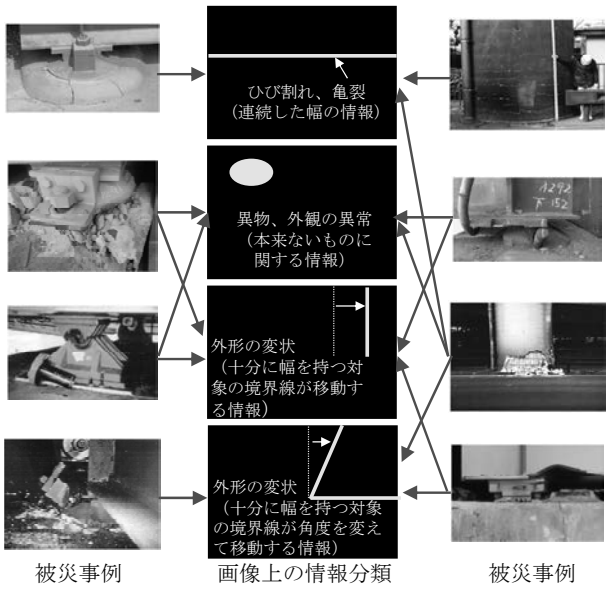


図-1　被災事例と画像上の情報分類例

像上のあらゆる地震時損傷は，部材を認識した上で，最低でもここに上げる4つの幾何学的特徴の組合せを把握することで，人は地震時損傷の有無を認識できることが可能であると考えられる．4つの幾何学的特徴は，1) 連続した幅の情報，2) 十分に幅を持つ対象の境界線が角度を変えて移動する情報，3) 十分に幅を持つ対象の境界線が平行に移動する情報，4) 本来ないものに関する情報とした．

例えば，ひび割れや亀裂は，画像上では連続した幅の情報である．RC橋脚基部の損傷は，ひび割れとしての連続した幅の情報に加え，橋脚の傾きは角度を変えて移動する情報である．損傷程度によっては，本来ない異物の情報として，コンクリート片や，鉄筋がはらみ出した様子がある．支承部の大移動，支承部の部品の変形，ピン等の抜け出し等もこれら4つの幾何学的特徴として分類できる．

あらゆる地震時損傷を幾何学的特徴に変換することで，画素分解能や輝度コントラスト等といった，2次元画像としてのパラメータと，幾何学的特徴の視認性の議論に変換できると考えた．そのように地震時損傷を幾何学的特徴に変換した上で，それら幾何学的特徴の画像上の視認性を論点とした検討を行う．**表-1**に幾何学的特徴の画像上の視認性に関する整理の例を示す．画像上の判断根拠として，対象の輪郭線が明確であることや，画素分解能の影響，対象物や物の位置関係がわかる必要がある．また，それら視認性を満足させる画素や輝度等のパラメータの組合せがあるはずである．これら画素や輝度等のパラメータと視認性の関係については，撮影条件により変化するため，後述の実験で確認する．

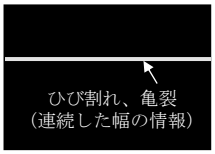
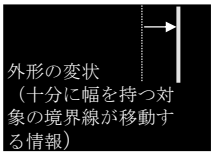
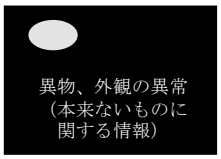
また，それに加え，画像から判読できる可能性のある物理的指標等は，その変形量や変形角，亀裂の存在が，橋梁の構造安全性の診断のための性能評価指標の閾値（許容値等）の観点で，どのような工学的な意味を有するのかを念頭に置き，検討を進める必要がある．

3. 実験概要

(1) 4つの幾何学的特徴を模擬した撮影対象の作成

2章で述べた4つの幾何学的特徴に関して，それを画像上で視認できる条件を明らかにする目的で，亀

表-1　幾何学的特徴の画像上の視認性に関する整理の例

写真から判読できる可能性のある物理的指標等	ひび割れ/亀裂の幅	変形量，変形角	変形量	異物，異常な外観（コンクリ片，塗膜割れ等）
幾何学的特徴の分類				
	1) ある程度連続した幅の情報	2) 十分に幅を持つ対象の境界線が角度を変えて移動する情報	3) 十分に幅を持つ対象の境界線が平行に移動する情報	4) 本来ないものに関する情報
画像上の判断根拠	・輝度がほぼ変わらない画素が直線状に連続している．	・輝度がほぼ変わず，画素が連続している対象が何かを認識できる． ・輪郭線が明らかである． ・周辺との位置関係がわかる． ・角度変化や変形量が認識できる．		・対象が何かを認識できる． ・周辺との位置関係がわかる．
損傷の視認時に画像に要求される要件	・直線状の1画素 ・形状が明らかとなる輝度コントラスト	・部材形状が認識可能な画素分解能 ・角度や変形の評価に必要な画素分解能 ・輪郭線が明らかとなる輝度コントラスト		・対象が認識可能な画素分解能

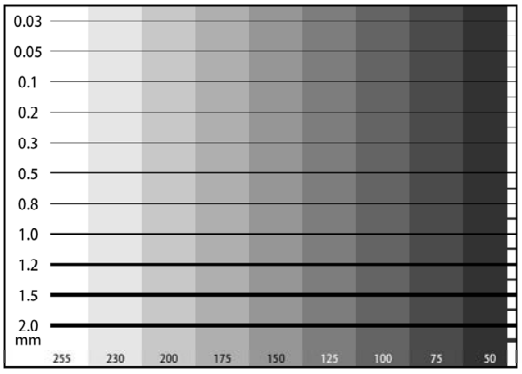
裂幅や変形量，変形角等を指標とし，画素分解能や輝度コントラストをパラメータとした撮影対象を作成する．

図-2に作成した撮影対象を示す．**図-2** (a)の亀裂等を模擬したパネルは，大本・松田[5]の検討を参考に，亀裂幅を変えた線と，亀裂幅の視認性に輝度コントラストが及ぼす影響を把握するために，グレースケールを重ね合わせた．グレースケールについては，RGB値が(255,255,255)～(50,50,50)の9段階とした．亀裂を模擬した線のRGB値は(0,0,0)である．また，設定した亀裂幅は0.03～2.0mmの11段階とした．また，画像は縦方向と横方向で画素分解能が異なるため，2方向のパネルを作成した．

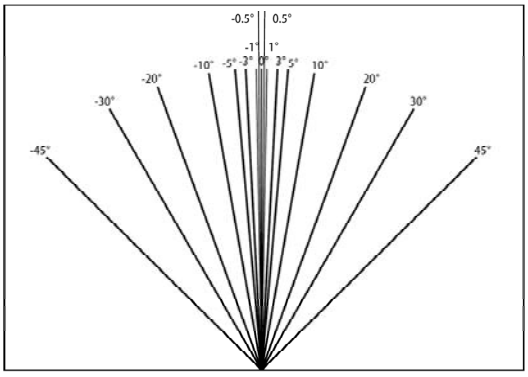
定期点検では，コンクリート部材の耐久性能を確保するための前提となる0.2mm幅のひび割れに関する情報を収集するが，コンクリート部材のせん断ひび割れや，鋼部材の亀裂等，0.2mm以下であっても耐荷性能に直結する亀裂は存在することから，このような亀裂幅の設定とした．ただし，パネル上に模擬した幅の情報であるので，本来亀裂に存在する亀裂深さに関する情報，それに起因する影の情報は検討できない．

図-2 (b)の変形角を模擬したパネルは，0.5°～45°までの8段階の角度の線を記載した．地震時には支承部の部品や橋脚等，地震力を受けた様々な部材が角度を変えて変形している，あるいは，傾斜していることがある．支承部の鋼部品については，1°よりも十分に小さい変形角が生じた時点で降伏より深刻な塑性化に至っている場合が想定される．例えば，林ほか[6]で示されている橋梁のサイドブロックで想定される変形角の計算値の0.17°は，その変化が近接目視や画像上で視認できるとは限らず，また，降伏に至った状態でも破断していなければ耐力を受け持つことは可能であるとの工学的判断に基づき，目視でも把握できる可能性がある0.5°を最小角度として設定した．

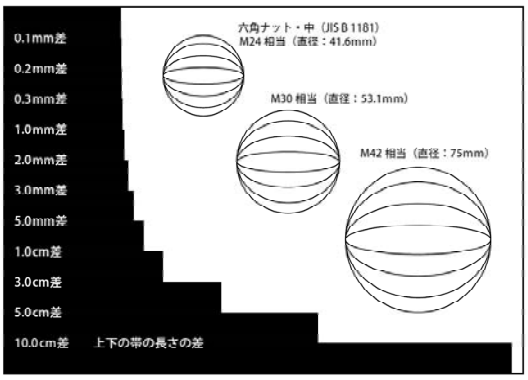
図-2 (c)は変形量および移動量および六角ナットを模擬したパネルである．変形量については，RGBが(0,0,0)の黒帯同士の差が，0.1mm～10cmまでの11段階で設定した．変形量については，地震時に様々な部材で様々な変形量が生じ得る．例えば鋼部材の降伏時の変位量は1mmに満たない．アンカーボルトの抜け出し量は数mm～数cmのオーダーである場合が多い．遊間の移動は数cmのオーダーである．段差量では，2～3cmの段差が定常走行の限界であり，10cm以上の段差は緊急車両が徐行で走行できる限界とされている[7]．このように，変形量や移動量については，点検対象とする部材に応じて様々である．



(a) 亀裂等を模擬したパネル



(b) 変形角を模擬したパネル



(c) 変形量および移動量および六角ナットを模擬したパネル

図-2 作成した撮影対象（図は縮小寸法である．）

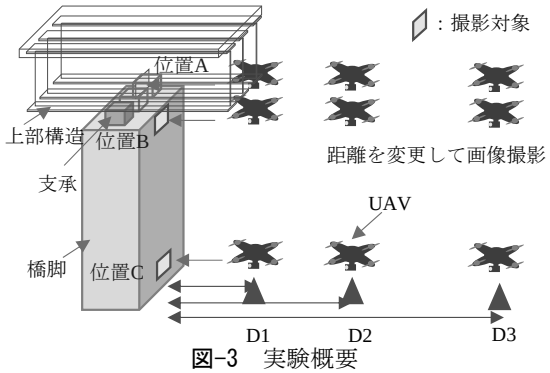


図-3 実験概要

また，六角ナットの大きさは，支承部のアンカーボルトのナットとして多く使用される寸法として，M24，M30，M42相当の3種類を記載した．ナットは

支承部の部品の中で比較的小さい部品であり，多くの支承に同じ大きさの規格品が使用される．ナットがナットとして視認できれば支承を構成する他の部品，あるいは支承より大きい部材等も視認できると考えた．

(2) 実験方法

図-3に実験概要を示す．**図-3**の撮影対象の位置に**図-2**の4種類のパネルを設置した．パネルの設置位置は，地震時には支承部や橋脚基部が損傷しやすいため，支承部の位置A，橋脚天板付近の位置B，橋脚基部周辺の位置Cの3箇所とした．なお，実験を実施した橋梁は，土木研究所構内にある鋼桁橋である．

実験としては，UAVと撮影対象の距離を変更させながら，それぞれの撮影対象の静止画を撮影した．距離は0.76，1.0，1.2，2.0，3.0，4.0，5.0，7.4，10.0，11.8，15.0，20.0 mの12段階を基本とし，UAVの性能により接近できない場合は撮影を行わなかった．また，特に支承部は暗い環境条件であるため，撮影の前後に輝度の指標として，ルクスメーターで位置A，B，Cの3箇所のLux値を計測した．また，UAVによる画像撮影を実施した日は，雨風の無い，快晴の日を選択した．

使用したUAVの機種は，Skydio2+（センササイズ：1/2.3型，35mm換算の焦点距離：20mm，画角：94°，画素数：4,056×3,040，以下機体aとする．）と，Phantom4 Pro（センササイズ：1型，35 mm換算の焦点距離：24 mm，画角：84°，画素数：5,472×3,648，以下機体bとする．）の2種類である．撮影は静止画で行い，カメラの条件はオートモードを使用した．機体aは衝突防止機能が優れており，撮影対象に近づける距離が近い．機体bは搭載されているカメラの性能が良い．損傷が検知可能な精度については，大まかには撮影可能距離とカメラの性能の2つに特に依存する．

分析は，撮影距離を変えて撮影した画像を，PCのディスプレイ画面上で拡大し，どこまで視認できるかを整理した．

4. 撮影距離と把握できる見込みのある変状

表-2に撮影対象位置での平均Lux値を示す．支承部の位置Aは，橋脚基部の位置Cと比較して，Lux値がおおよそ1/10の明るさであった．機種AとBの撮影を行った日は，両日とも雨風の無い，快晴の日を選択したが，Lux値に差があった．同じ快晴の日でも明るさにはばらつきがある．

表-2 撮影対象位置での平均Lux値

機種	機種A	機種B
位置A	1,305 Lux	375 Lux
位置B	2,040 Lux	1,450 Lux
位置C	3,340 Lux	2,600 Lux

図-4および**図-5**に，撮影距離と識別可能な線の幅の関係を示す．これら図は，撮影距離ごとに識別可能な線の幅を整理しており，損傷検知に関するカメラの性能曲線である．凡例の数字はRGB値である．亀裂を模擬した実線のRGB値は(0,0,0) 輝度コントラストが明瞭な条件であり，RGB値が(50,50,50)は輝度コントラストが不明瞭な条件である．特に支承部や鋼部材の塗装の色は多様であるため，同じ撮影距離でも，おおよそこの範囲で輝度コントラストに応じて，認知可能な亀裂幅がばらつくと推測される．

図-4の機体aは撮影対象から0.76 mまで近接可能であり，**図-5**の機体bは3.0mまで近接可能であった．対象に近接する能力は機種aが優れているが，RGB値が(125,125,125)の条件においては，同じ亀裂幅0.2mmを視認するために，機種aは1.0mまで近接する必要があり，機種bは機種aより少し離れた3.5mまで近接する必要があった．損傷が検知可能な精度について，撮影可能距離とカメラの性能の2つに依存していることがわかる．また，一般論として「撮影距離3mから0.2mmのひび割れ幅が視認可能」と言われることが多い[3]が，カメラの性能や輝度コントラスト等の撮影条件によって，視認可能な亀裂幅が大きくばらつき，一概には言えないことがわかった．

また，位置A，位置B，位置Cで明るさに関する環境条件が大きく異なるが，各位置における性能曲線に大きな差は無く，環境条件の影響が小さいことが明らかとなった．

図-6に撮影距離と識別可能な変形角の関係を示す．2章でも述べたが，鋼部材の変形角は僅かであっても降伏している可能性があるため，可能な限りそれを検知したい．例えば変形角1°であれば，機体Aに搭載されたカメラであれば3mまで，機体Bに搭載されたカメラであれば5mまで近接する必要がある．

変形角の視認については，亀裂幅と比べ機体差が比較的小さい．

図-7に撮影距離と識別可能な変形量や移動量の関係を示す．変形量については，他の幾何学的特徴と比べ，差がない．おおよそ5.0m離れた位置から，2mmの変形量や移動量を視認できる見込みがある．

また，六角ナットを模擬した円は，今回の検討条件である撮影距離20.0 m以内では，それが視認できなくなることは無いと推測された．六角ナットを模

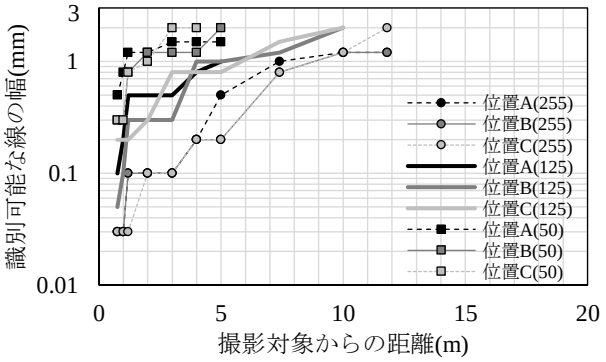


図-4 撮影距離と識別可能な線の幅の関係（機体a）

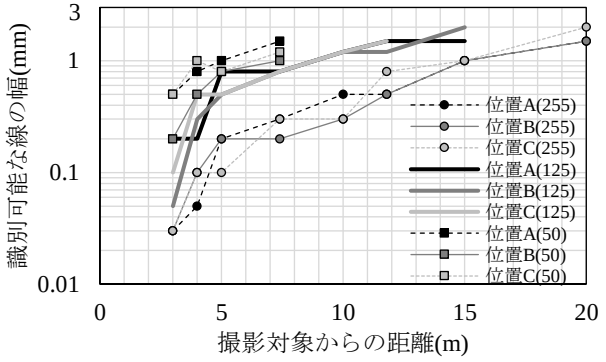


図-5 撮影距離と識別可能な線の幅の関係（機体b）

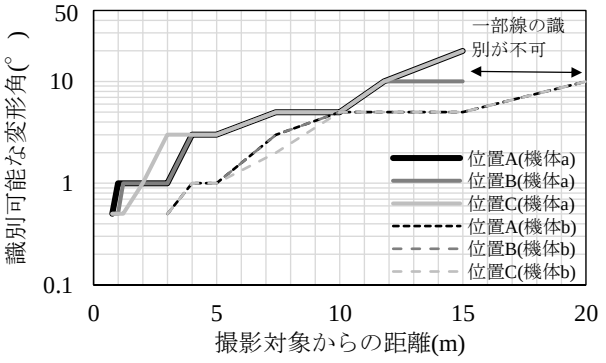


図-6 撮影距離と識別可能な変形角の関係

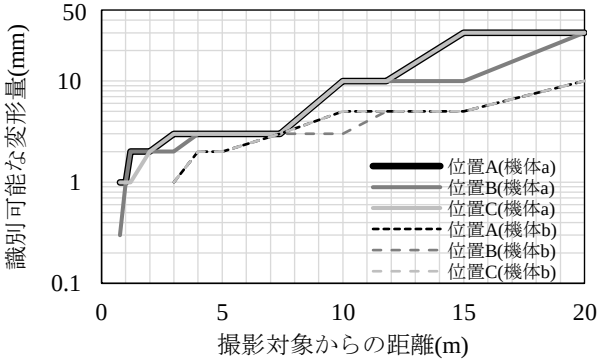


図-7 撮影距離と識別可能な変形量や移動量の関係

擬した円は，撮影距離が離れるにつれて線がぼやけて見えなくなるが，その線が描かれた領域は20.0 m離れても把握できるため，M24（直径41.6mm）が認識できなくなることは無いと考えられる．

以上の検討により，点検指標である各種幾何学的特徴と，撮影距離の性能曲線例が示せた．例えば対象から10.0 mの撮影距離では，2mm以上の亀裂幅（RGB値が(125,125,125)の場合），5°以上の変形角，10mm以上の変形量が把握できる見込みがある．点検者が把握したい損傷に応じて撮影距離を変更することが望まれる．

そこで，点検者が把握したい損傷に応じて撮影距離を変更するための目安の検討例として**表-3**を整理した．**表-3**の「地震後に点検で収集したい損傷の情報」は，文献1)と2)より，可能な限り網羅的に抽出した．また，「診断に必要な損傷検知限界の要求値」は，部材の寸法によって変形量や変形角が変化し，カメラの性能に応じて撮影距離が変化するため，あくまで目安値である．撮影距離や，損傷を把握できる見込みがある範囲は**図-4～7**の検討結果に基づいている．RGB値は(125,125,125)のデータを用いた．また，今回は実際の損傷を対象に視認性を検討した訳ではない．実際の損傷でも同様の傾向となるかは，今後の検討課題としたい．

その上で，**表-3**の「診断に必要な損傷検知限界の要求値」を設定した根拠を以下に記載する．まず，「目視でわかる程度のもの」は，便覧[1)]において「目視によってわかる程度のもの」と記載されている損傷項目であり，それが直接部材等の性能とは紐づいていないものも多いものの，少なくとも今までそれで運用されてきた実績を鑑み，それを踏襲することとした．

RC橋脚の1/100 radは，兵庫県南部地震以降，慣用的に迅速な復旧が可能な傾斜の目安値として使用されている指標である[1)]．

また，ひび割れ幅0.2mmについても，それが橋の耐荷力と直接的に結びつくとは限らないが，かぶりによる耐久性能確保の前提を脅かすひび割れ幅として，古くから利用されている[9)]．

支承部の鋼部材については，実験に基づく値[10), 11)]（鋼部材（上沓ストッパー）の変形量，ピンやセットボルトの抜け出し）と，計算に基づく値[5)]（鋼部材（サイドブロック）の変形角）を示している．実験[10)]では，SS400の上沓の上沓ストッパー（ストッパーの寸法不明），SS400のφ24×4のセットボルト，S35CNのピン（ピンくびれ部の寸法不明）の試験結果に基づき，安全側に丸めた値を記載している．

ゴム支承の水平方向の変形量および，変形角については，安全側の検知指標として，道路橋に使用される寸法で最小に近い寸法である□400を想定し，一次形状係数6.25，二次形状係数4.17を仮定し，ゴム層厚を支承高さの57%と仮定し，常時に対するひ

表-3 損傷種類別の把握に必要な撮影距離の目安の検討例（1）

着目する部材等	地震後に点検で収集する必要のある損傷の情報[1), 2)]	診断の観点	診断に必要な損傷検知の要求値（根拠文献や根拠となる図や，補足説明）	左記の要求値の検知に必要な，機体に求められる撮影距離(m)（今回対象とした機材の安全側の目安値）	今回検討した機体で撮影距離3mから視認できる見込みがある範囲	今回検討した機体で撮影距離10mから視認できる見込みがある範囲
伸縮装置部	伸縮部の段差	B	10 mm[8)]	10	段差量3mm以上	段差量10mm以上
		A	明確にされていない（支承の破壊，下部工の沈下等，耐荷力の低下に直結する損傷に起因する段差）	不明	段差量3mm以上	段差量10mm以上
	伸縮部・遊間の開き	A,B	明確にされていない（温度変化等を見込んだ必要遊間は橋や，点検時の温度により異なる．伸縮部の堆積土砂の移動痕や，他の支承線上の伸縮部の状態からも評価可能．）	不明	遊間3mm以上	遊間10mm以上
	遊間の閉じ	A	伸縮装置が認知できる 寸法4cm（M24相当）以上	20	4cm以上の幅の伸縮装置	4cm以上の幅の伸縮装置
	縦断線形の折れ角	A,B	目視でわかる程度のもの[1)]	不明	折れ角3°以上	折れ角5°以上
高欄や地覆	ずれ	A	移動痕が視認できる 寸法4cm（M24相当）以上	20	4cm以上の移動痕	4cm以上の移動痕
照明柱	地震動が原因の亀裂	B	明確にされていない（亀裂幅や亀裂長さに依らず亀裂が検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	亀裂幅0.3～0.8mm以上	亀裂幅2mm以上
	座屈	B	明確にされていない（大きさに依らず座屈が検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	3mm以上の座屈による変形	10mm以上の座屈による変形
	ボルト・ナットの脱落	B	ボルトやナットが視認可能 直径4cm（M24相当）以上	20	直径4cm以上のボルト・ナット	直径4cm以上のボルト・ナット
	照明柱の傾き	B	目視でわかる程度のもの[1)]	不明	傾き3°以上	傾き5°以上
RC橋脚	基部の水平ひび割れ	A	人が近接目視をした場合と同等	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	斜めせん断ひび割れ	A	明確にされていない（ひび割れ幅に依らずせん断ひび割れが検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	段落とし部のひび割れ	A	明確にされていない（ひび割れ幅に依らず断落とし部にひび割れが検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	耐久性能確保の前提を脅かすひび割れ	D	0.2 mm[9)]	1～3	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	傾斜	A,C	0.57°（1/100 rad）[1)]（下げ振りを画像に写りこませれば傾斜角を検知可能）	損傷程度によっては検知困難	傾斜3°以上	傾斜5°以上
橋台	移動	A	目視でわかる程度のもの[1)]	不明	移動量3mm以上	移動量10mm以上
	傾斜	A	目視でわかる程度のもの[1)]（橋台の傾斜は支承部や伸縮部で把握できる場合もある．下げ振りを画像に写りこませれば傾斜角を検知可能）	不明	傾斜3°以上	傾斜5°以上
支承部	地震動が原因の鋼部材の亀裂	A	明確にされていない（亀裂幅や亀裂長さに依らず亀裂が検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	亀裂幅0.3～0.8mm以上	亀裂幅2mm以上
	鋼部材（サイドブロック）の変形角	A	0.17°[6)]（計算による降伏時の概算値）	損傷程度によっては検知困難	変形角3°以上	変形角5°以上
	鋼部材（上沓ストッパー）の変形量	A	破断変位（支承寸法等により変化） 30 mm[10)]	15	変位量3mm以上	変位量10mm以上
	ピンやセットボルトの抜け出し	A	降伏変位（支承寸法等により変化） 4 mm[10), 11)]	8	変位量3mm以上	変位量10mm以上
		A	破断変位（支承寸法等により変化） 8 mm[10), 11)]	9	変位量3mm以上	変位量10mm以上
	ゴム支承本体の異常な水平方向の変形	A	約37°（計算による概算値）	15	変形角3°以上	変形角5°以上
		A	67 mm（計算による概算値）	20	変形量3mm以上	変形量10mm以上
	桁の支承からの脱落	A,B	数cm（支承高さによる）	10	移動量3mm以上	移動量10mm以上
	橋座のひび割れ	A	明確にされていない（ひび割れ幅に依らずひび割れが検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上

※ 要求値の検知に必要な撮影距離や，ある距離から視認できる見込みがある範囲は，**図-4～7**に基づいている．

※ 薄い灰色：3m，あるいは，10mからは要求値を検知できないが，要求値より大きな損傷をスクリーニング的に収集することができるもの．

※ 診断の観点は，「A」が橋の耐荷力の診断の観点，「B」が走行性等（車両走行，第三者被害）の診断の観点，「C」が迅速に復旧が可能な損傷程度に関する診断の観点，「D」が主に耐久性の診断の観点での分類である．

※ パネル上に描かれた幾何学模様に対して検討を実施した結果であり，実際の損傷でも同様の傾向となるかを今後検討する予定である．機体の性能も今後向上することが想定されるため，それに伴い，**図-4～7**の性能曲線は変化する．

表-3　損傷種類別の把握に必要な撮影距離の目安の検討例（2）

着目する部材等	地震後に点検で収集する必要のある損傷の情報[1), 2)]	診断の観点	診断に必要な損傷検知の要求値（根拠文献や根拠となる図や，補足説明）	左記の要求値の検知に必要な，機体に求められる撮影距離(m)（今回対象とした機材の安全側の目安値）	今回検討した機体で撮影距離3mから視認できる見込みがある範囲	今回検討した機体で撮影距離10mから視認できる見込みがある範囲
コンクリート上部構造	支点周辺のひび割れ	A	明確にされていない（ひび割れ幅に依らずひび割れが検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	せん断（ねじり）ひび割れ	A	明確にされていない（ひび割れ幅に依らずせん断やねじりひび割れが検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
	耐久性能確保の前提を脅かすひび割れ	D	0.2 mm[9)]	1～3	ひび割れ幅0.3～0.8mm以上	ひび割れ幅2mm以上
鋼上部構造	地震動が原因の亀裂	A	明確にされていない（亀裂幅や亀裂長さに依らず亀裂が検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	亀裂幅0.3～0.8mm以上	亀裂幅2mm以上
	フランジの破断，トラス部材の破断	A	明確にされていない（亀裂幅や亀裂長さに依らず破断が検知された時点で損傷）	損傷程度によっては検知困難	亀裂幅0.3～0.8mm以上	亀裂幅2mm以上
	ウェブの局部座屈	A	明確にされていない（大きさに依らず座屈が検知された時点で損傷）	座屈程度によっては検知困難	3mm以上の座屈による変形	10mm以上の座屈による変形
その他，大きさが様々なもの	異常，異物（第三者被害の懸念がある変状，コンクリート内部鉄筋が見える亀裂，塗膜割れ，桁端部の腐食，ボルトの脱落，周辺地盤の異常な盛り上がり，液状化痕等）	異常・異物の種類による	寸法4cm（M24相当）以上の大きさの異常，異物	20	寸法4cm以上の異物，異常	寸法4cm以上の異物，異常
			寸法4cm（M24相当）以下の大きさの異常，異物	不明	不明	不明

※　要求値の検知に必要な撮影距離や，ある距離から視認できる見込みがある範囲は，**図-4～7**に基づいている．

※　薄い灰色：3m，あるいは，10mからは要求値を検知できないが，要求値より大きな損傷をスクリーニング的に収集することができるもの．

※　診断の観点は，「A」が橋の耐荷力の診断の観点，「B」が走行性等（車両走行，第三者被害）の診断の観点，「C」が迅速に復旧が可能な損傷程度に関する診断の観点，「D」が主に耐久性の診断の観点での分類である．

※　パネル上に描かれた幾何学模様に対して検討を実施した結果であり，実際の損傷でも同様の傾向となるかを今後検討する予定である．機体の性能も今後向上することが想定されるため，それに伴い，**図-4～7**の性能曲線は変化する．

表-4　外観から視認が困難な場合が多い損傷の例

No.	外観から視認が困難な損傷	点検方法例
1	地震動が原因の鋼部材の亀裂	超音波探傷等の非破壊試験
2	セットボルトや高圧ボルト等の破断，ゆるみ	打音
3	補修補強材が設置された箇所の内部損傷	打音
4	橋脚の巻き立て補強部（鋼板，繊維）の内部損傷	打音
5	支承等の狭隘部の損傷	ファイバースコープ等
6	支承カバーに囲まれ，内部が確認できないものの損傷	支承カバーを外して目視
7	基礎の杭上部，頭部の変形・破損	掘削やIT法等の非破壊試験
8	橋台の沈下	測量等

ずみ値が70%の変形量及び変形角を概算した．

その他，鋼部材の亀裂や，コンクリート部材のせん断ひび割れ，RC橋脚の断落とし部のひび割れは，そのひび割れ幅や大きさに限らず，その存在自体が耐荷力に及ぼす影響が大きいとの工学的判断から，要求値を設定していない．致命的な損傷は大きさに依らず，点検時に見つけ出す必要がある．

また，近接目視や画像撮影等の外観から損傷を検知する手法では，見つけることができない損傷も存在する．**表-4**に外観から視認できない場合が多い損傷の例を示す．これら損傷は外観目視や画像から確実に把握することは困難であるが，隣接する他の部材に変状が生じていることも多いため，現場に応じて適宜，打音等の点検を行う必要がある．

また，**表-3**で示されたが，現在のUAVを始めとした画像撮影技術の水準では，地震時のあらゆる損傷をUAVの画像撮影のみで把握することは困難であるため，スクリーニング的に大きな損傷を把握する目的での運用が現実的であると考えられる．ただし，機体や登載されるカメラの性能については，今後向上することが期待されるため，それに伴い，**図-4～7**の性能曲線は変化する．その場合でも診断に必要な損傷検知限界の要求値の目安は，基本的には変わらないため，今回検討した方法等で，点検支援技術の性能を確認することで，技術の適用範囲が明確となる．

ただし，鋼部材の亀裂等の一部の損傷については，亀裂長さや亀裂幅，亀裂内と表面の輝度コントラストが低い，亀裂内の影の影響の程度等により見え方

が異なるものも存在する．今回検討した「線の幅」は，損傷を一面的な特徴で捉えただけであることにも注意する必要がある．診断の観点から，何の損傷の，どのような特徴を，どれくらいの精度で検知する必要があるかは，引き続き検討を行う予定である．

5. まとめ

道路橋の震後点検でUAVにより撮影された画像を活用するために，その撮影距離と各種変状の認知可能性に関する検討を行った．併せて，地震時の損傷種類別の把握に必要な距離の目安を整理した．得られた成果は以下の通りである．

1) 変状種類別に撮影距離と識別精度の関係を示した．
2) 地震後に点検で収集したい損傷の種類と，診断を行う際に必要となる損傷の進展程度の閾値の対応付けについて，それらの検討例を示した．
3) 診断を行う際に必要となる損傷程度の閾値について，UAVに搭載されたカメラで把握できる見込みのある損傷程度の例を示した．

今回の検討では，パネル上に描かれた幾何学模様に対して検討を実施したが，変状種類別の撮影距離と識別精度の関係について，実際の損傷でも同様の傾向となるかを今後検討する予定である．

また，**表-3**の検討例については，整理の一例である．本来，耐荷力の観点は，耐荷力に影響を及ぼす変状が生じていない状態，耐荷力が残存しているが損傷が生じている状態，完全に耐荷力を喪失している状態等，複数の観点に分かれる．走行性や復旧性も同様である．それら全ての観点で損傷程度の域値を明確にすると同時に，UAV以外にも，あらゆる点検支援技術に対しても，点検へ適用範囲を明らかにするための検討を引き続き実施する予定である．

併せて，被災橋梁のスクリーニングを行う場合と，地震による損傷を検知する場合で，点検支援技術に要求される精度は大きく異なる．そのため，使い方に応じた精度や，技術の組合せ等の運用方法について，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：道路橋震災対策便覧，震災復旧編，令和4年度改定版，2023.
2) 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.
3) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ，https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/（最終閲覧日：2023年6月9日）
4) 小林巧，菅原達也，林祐葵，大住道生：道路橋の震後点検におけるUAV撮影画像の活用に向けた基礎的検討，第78回年次学術講演会，2023.
5) 大本啓介，松田浩：デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証，土木工学・材料工学論文集，第35号，2019.
6) 林祐葵，小林巧，大住道生：道路橋の震後調査の効率化・高度化に向けた3次元レーザスキャナの試行検討，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.2，No.1，pp.169-178，2023.3.
7) 常田賢一，小田和広，中平明憲，林健二，依藤光代：段差走行実験に基づく地震時の道路の性能評価および交通運用，土木学会地震工学論文集，pp.596-604，2007.
8) 日本道路協会：道路維持修繕要領，昭和53年7月.
9) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改定資料，コンクリート・ライブラリー，第61号，1986.
10) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三，森重行雄，鵜野禎史，宇佐美哲：金属支承の水平終局挙動，土木学会論文集，No.773，I-69，pp.63-78，2004.
11) 大塚久哲，山平喜一郎，増田耕一，栗木茂幸：兵庫県南部地震における鋼製ピン支承の破壊プロセスに関する実験的考察，鋼構造論文集，第7巻，2000.