

論文 UAV を用いた RC 造庁舎の被災調査に関する実験研究

毎田 悠承*1・向井 智久*2・宮内 博之*3・雨谷 周也*4

要旨: 建築物の被災調査にドローンを活用することを目的として、地震で被災した RC 造庁舎を対象にドローンを用いて被災調査に関する検証実験を行った。まず、人間による被災度区分判定と、ドローンを用いた被災度区分判定の結果の比較を行った。その結果、ドローンを用いた被災度区分判定の有効性は確認できたが、建物の構造形式を考慮して使用する必要があることが分かった。次いで、ドローンを用いたひび割れ幅評価を行った結果、1億画素カメラを搭載し、撮影距離 5m 程度までドローンを飛行させることができる建物であれば、ひび割れ幅を精度良く評価できることが分かった。

キーワード: UAV, ドローン, 被災度区分判定, 耐震性能残存率, 損傷度, ひび割れ

1. 序

近年, UAV (Unmanned Aerial Vehicle, 以下, ドローン) の平常時の建築物の点検調査・診断への活用が注目されている¹⁾。文献²⁾ではドローンによる実建物の点検調査に関する実証実験を行い, 調査者の目が届かないような場所にドローンを飛行させることで, 建物全体の劣化状況を大まかに観察できたと報告されている。ドローンは地震などの災害時に被災した建築物の迅速な被害調査にも有効と考えられるが, 実際にドローンを用いて被災調査した研究事例はほとんどないのが現状である。

本論文では, ドローンを用いた被災調査の有効性を確認することを目的として, 地震で被災した鉄筋コンクリート (以下, RC) 造庁舎を対象に, 人間による調査と, ドローンを用いた調査の結果の比較を行い, 被災度区分判定への有効性や, ひび割れ幅や, 建物の傾斜角の評価精度を確認した結果を報告する。



写真-1 対象建物外観



写真-2 せん断破壊した短手方向の梁

2. 研究対象建物

2.1 建物概要

研究対象とした建物の外観を写真-1 に示す。研究対象としたのは, 2016 年 4 月に熊本県にて発生した地震により被災した, 熊本県上益城郡に位置する庁舎建物である。1974 年に建設された地上 3 階, 地下 1 階, 塔屋 1 階 (1 階寸法: 約 46.8m×約 20.5m) の RC 造である。長手方向は 9 スパンの純ラーメン構造, 短手方向は 3 スパンで耐震壁付きラーメン構造, 基礎は直接基礎である。2010 年に枠付き鉄骨ブレース設置による耐震補強が施されている。

2.2 被害状況

長手方向は, 柱の軽微な曲げひび割れや, 耐震補強で

設置された枠付き鉄骨ブレースの塗装の剥離, 鉄骨柱と柱との目地モルタルの剥落などが確認された。

短手方向は耐震壁のせん断破壊, 梁のせん断破壊など, 脆性破壊した部材が多数確認された。短手方向の梁の破壊状況を写真-2 に示す。

3. 実験概要

3.1 使用機材

調査に使用した機材 (カメラ, ドローン, VR ゴーグル) の諸元を表-1 に示す。表の最上段にカメラの撮影機能を示しており, 1 億画素画像を撮影するもの, 2000 万画素画像を撮影するもの, 赤外線サーモグラフィー撮影するもの, FPV (First Person View) 撮影するものの計

*1 国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ 研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 株式会社 WorldLink & Company, SkyLink Japan 技術統合化グループリーダー

表-1 使用機材の諸元

(a) 1億画素, 2000万画素, 赤外線サーモグラフィ撮影

	1億画素撮影	2000万画素撮影	赤外線サーモグラフィ撮影
ドローン	名称(型番)	Matrice 600 Pro	Inspire 2
	製造メーカー	DJI	DJI
	サイズ[mm]	1668×1518×759	880×790×250*
	重量[kg]	9.1	3.4
	ペイロード[kg]	6	1.2
	最大風圧抵抗[m/s]	8	10
カメラ	外観		
	名称(型番)	iXU1000	Zenmuse X5S
	製造メーカー	PhaseOne	DJI
カメラ	画素数[pixel]	11608×8708	5280×3956
	色深度[bit]	16	14 (Raw撮影時)
	外観		
	外観		

(b) FPV 撮影

	FPV撮影	
ドローン	名称(型番)	Mavic Pro
	製造メーカー	DJI
	サイズ[mm]	430×400×90*
	画素数[pixel]	4000×3000
	最大風圧抵抗[m/s]	10
	外観	
VRゴーグル	名称(型番)	DJI Goggles
	製造メーカー	Wi-Fi/HDMI
	入力	640×512
	解像度	1080p30
外観		

*メーカーからサイズが公表されていないため、筆者らによる実測値を示す。

4種である。表-1(a)ではそれぞれの撮影機能におけるドローン、および搭載したカメラの詳細を示している。表-1(b)ではFPV撮影を行った際に使用したカメラ搭載型ドローンと、撮影している映像を視聴するVRゴーグルの詳細を示している。ドローン4機(1機はカメラ搭載型)、カメラ3機、VRゴーグル1機を用いて調査した。

3.2 調査項目とその概要

調査項目とその調査の概要を以下に示す。

(1) 人間による被災度区分判定とドローンを用いた被災度区分判定の比較

本調査を行ったのは2018年8月であり、地震発生から2年以上経過している。まず、現在の損傷状況を把握するとともに、人間による被災度区分判定³⁾を実施する。また、実際の被災現場において、ドローンを用いて被災度区分判定を行う場合、建物内部にドローンは侵入することが難しいため、外周の部材の損傷度のみで被災度区分判定を行うことになると予想される。そこで、ドローンを用いて被災度区分判定を行った場合の結果と、人間による判定結果を比較し、差異について検討する。

(2) ドローンによる建物外部、内部の被災調査

ドローンを用いて、建物の外部、内部の状況等を撮影し、被災状況を評価するとともに、被災調査におけるドローンの有効性を検討する。

調査項目の緒元を表-2に示す。表には各項目の撮影内容、使用したカメラ、撮影距離、作業に要した時間を示している。各項目の概要を以下に示す。

1) 1-1p

iXU1000(以下、1億画素カメラ)を用いて建物全景を

遠距離から撮影し、建物の被災状況がどの程度分かるか確認する。

2) 2-1p

1階の外周面において、ドローン調査可能な柱や腰壁のひび割れを選定する。ひび割れの計測ポイント位置を図-1に示す。それぞれの位置において、人間によるひび割れ幅計測と、ドローンを用いたひび割れ幅評価を行う。2-1pでは1億画素カメラによりひび割れを撮影し、ひび割れ幅の評価精度を確認する。撮影距離をパラメータとし、5、10、15、20mの4パラメータで撮影する。

3) 2-2x

2-1pに対して、カメラをZenmuse X5S(以下、2000万画素カメラ)に変更して、ひび割れ幅の評価精度を確認する。

4) 3-1x

調査計画段階では、ドローンを用いて建物内部を外部から撮影し、内部のひび割れや内装材の被害状況を把握できるか確認する予定であったが、調査当日は快晴でガラスの反射により確認できなかった。そのため、室内でカメラを手持ちして撮影し、電灯の点灯の有無が建物内部の部材のひび割れ幅の評価精度に与える影響を検討する。その際の使用カメラは2000万画素カメラとする。

5) 4-1x

建物の傾斜角の計測が可能かどうかを把握する目的で、2機のドローンを用いて調査する。1機のドローン(Mavic Pro)に錘をつけた紐を結びつけて飛行させながら、もう1機のドローン(Inspire 2)によって、その紐と傾斜した貯水槽を2000万画素カメラにより撮影する。動画と静止画での撮影を行う。

表-2 調査項目の緒元

撮影番号	撮影内容	カメラ	撮影距離	作業時間
1)	1-1p 遠距離からの建物全景写真撮影	iXU1000	約20～60m	1h
2)	2-1p ひび割れ幅評価精度確認撮影	iXU1000	5, 10, 15, 20m	1.5h
3)	2-2x ひび割れ幅評価精度確認撮影	Zenmuse X5S	5, 10, 15, 20m	1.5h
4)	3-1x 建物内部の撮影	Zenmuse X5S	約4m	0.5h
5)	4-1x Mavic に紐を吊り下げ、傾斜撮影	Zenmuse X5S	約10m	1h
6)	5-1xt 赤外線サーモグラフィー空撮	Zenmuse XT	9m	0.5h
7)	5-2m 建物外周や梁をFPV撮影	Mavic Pro	約1～2m	0.5h

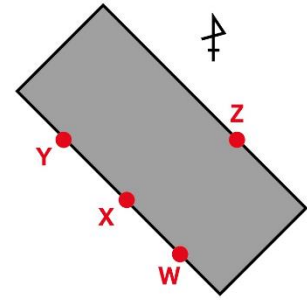


図-1 2-1p と 2-2x のひび割れ幅計測ポイント位置

6) 5-1xt

赤外線サーモグラフィー空撮により、外壁タイルの浮き上がり等が検知可能かを検討する。ドローンに Zenmuse XT (以下、赤外線カメラ) を装着し、柱や梁、壁面の撮影を行う。

7) 5-2m

Mavic Pro を用いて、FPV 撮影 (動画、および静止画) を行う。動画では、建物の外周を1周回るように撮影する。静止画では短手方向の梁の損傷を撮影する。また、これらの撮影時、調査する技術者が VR ゴグルを装着し、撮影映像を視聴しながら損傷状況の評価が可能か検討する。

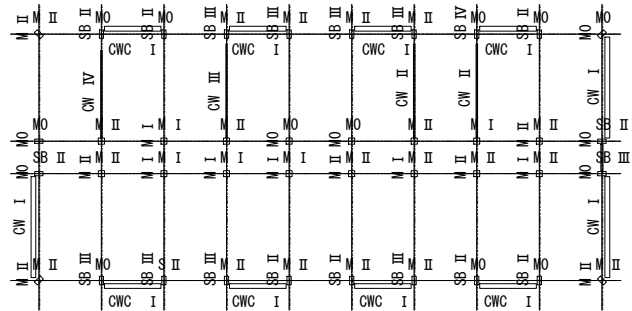
4. 調査結果、および考察

4.1 人間による被災度区分判定とドローンを用いた被災度区分判定の比較結果

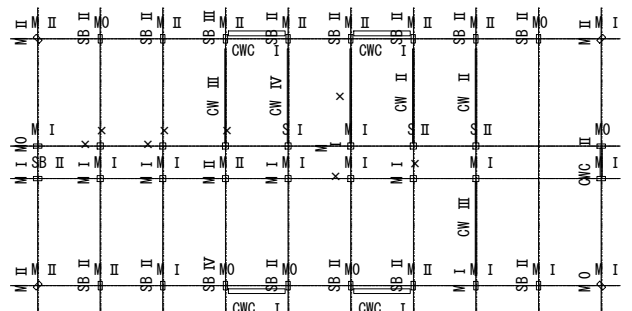
まず、1階から3階まで建物全体を見回り点検した。その結果、1階と3階の損傷が激しいと判断したため、1階と3階において、調査者2人により被災度区分判定を行った。1階および3階の損傷度の一覧を図-2に示す。また、耐震性能残存率 R、および被災度区分判定結果の一覧を表-3に示す。表には後述するドローンを用いた被災度区分判定を行ったと仮定した場合の結果も併せて示している。対象建物は枠付き鉄骨ブレースを用いた耐震補強を施しているため、補強部材を無視した場合、考慮した場合のそれぞれについて、被災度区分判定を実施した。なお、補強部材を考慮する場合、枠付き鉄骨ブレースは柱付き壁と同様に扱った。

補強部材を無視した場合、1階、3階ともに短手方向の判定により「中破」となった。補強部材を考慮した場合も1階、3階ともに被災度は「中破」のままであった。なお、3階の短手方向には枠付き鉄骨ブレースは設置されていないため、短手方向の R は補強部材無視の場合と同じである。

次いで、ドローンを用いた被災度区分判定を行ったと仮定した場合の検討をする。ドローンは建物内部に侵入することが難しいため、建物外周部の部材のみの損傷度により被災度区分判定を行った。この時、ドローンを用



(a) 1階



(b) 3階

S: せん断柱 SM: 曲げせん断柱 M: 曲げ柱
 SB: 梁支配型せん断柱 MB: 梁支配型曲げ柱 W: 柱無し壁
 CW: 片側柱付き壁 CWC: 両側柱付き壁 x: 調査不可

図-2 損傷度一覧

いた調査において部材の損傷度は、人間が目視で判定した損傷度と同じと仮定している。

本調査建物においては、いずれの階、方向、補強部材考慮の有無での比較においても、人間による被災度区分判定とドローンを用いた被災度区分判定の結果は同じであった。R を比較すると、人間とドローンで長手方向では最大 1.25、短手方向では最大 4.45 の差があった。本調査建物は、長手方向では軽微な柱の曲げひび割れが多く、外周部の部材のみで算定してもあまり差がなかった。一方、3階の短手方向は、建物内部の複数の耐震壁の損傷が大きく、ドローンを用いた被災度区分判定ではその部材が算定に含まれないため、R に大きな差が生じた。

以上のことから、純ラーメンのような構造で柱部材の軽微な曲げひび割れが多い建物であれば人間とドローンでの比較において、R の算定結果に大きな差異はなく、ドローンを用いた被災度区分判定は有効であると言える。

表-3 耐震性能残存率 R および被災度区分判定結果一覧

		長手方向		短手方向	
		補強部材無視	補強部材考慮	補強部材無視	補強部材考慮
1階	人間	82.88 (小破)	85.88 (小破)	66.25 (中破)	67.77 (中破)
	ドローン	81.88 (小破)	86.46 (小破)	64.38 (中破)	67.22 (中破)
3階	人間	86.62 (小破)	91.00 (小破)	64.66 (中破)	
	ドローン	86.88 (小破)	92.25 (小破)	69.11 (中破)	

一方、建物内部に脆性破壊する耐震壁などが多い構造の建物では人間とドローンでの比較において、R の算定結果に大きな差異が生じることも考えられる。本調査建物では、被災度区分判定の結果は変わらなかったが、R の値が被災度区分の境界付近の建物では、結果が変わる可能性も考えられるため、ドローンを用いて被災度区分判定を行う場合は建物の構造形式を考慮する必要がある。

4.2 ドローンによる建物外部、内部の被災調査結果

3.1 節 (2) に示した項目について、ドローンを用いて調査、検討した。各項目の結果と考察を以下に述べる。

1) 1-1p

1 億画素カメラを用いて建物全景を遠距離から撮影した。西側上空から撮影した建物全景を写真-3 に示す。

建物の全体を把握することが可能であり、地震後に倒壊や外周部の部材の激しい損傷などの大きな被害が生じていれば、それらを確認できると考えられる。また、人間による調査では、建物の状況によっては内部に入らず、高層階の外周部の損傷状況を確認することが難しいが、ドローンの空撮ではそれが可能になるため、建物の応急危険度判定にも有効であると考えられる。



写真-3 建物全景

2) 2-1p

1 億画素カメラにより、部材のひび割れを撮影し、ひび割れ幅の評価精度を確認した。図-1 に示した X 位置のひび割れについて、ドローンを用いて撮影し、ひび割れ幅を評価した様子を写真-4 に示す。また、人間によるひび割れ幅計測値とドローン調査 (1 億画素カメラ) によるひび割れ幅評価値の比較を表-4 に示す。後述する 2-2x の結果も併せて示している。撮影画像からのひび割れの抽出、ひび割れ幅の評価には汎用ソフト「CFTracing」を用いており、そのソフトで使用できる jpeg 形式のデータで評価した。1 億画素カメラで撮影したものは 11608×8708Pixel の画像から読み取っている。

1 億画素カメラの撮影画像では、撮影距離 5m では良好にひび割れ幅を評価できるものと、精度が低い評価となるものがあった。撮影距離が 10m よりも大きくなると小さいひび割れでは汎用ソフトによるひび割れの自動検出が不可能となったり、評価精度が低くなった

りした。

3) 2-2x

2-1p に対して、カメラを 2000 万画素カメラに変更して撮影した。2000 万画素カメラで撮影したものは 5272×3948Pixel の画像から読み取っている。2000 万画素カメラの撮影画像では、撮影距離 5m において、ひび割れ幅が 2.5mm のものは自動検出可能であったが、幅の評価精度は低い。また、それよりも幅が小さいひび割れでは、汎用ソフトによるひび割れの自動検出が不可能であり、ひび割れ幅を評価できなかった。

以上のことから、1 億画素カメラを搭載し、撮影距離 5m 程度までドローンを飛行させることができる建物であれば、ドローンを用いた調査での損傷度と、人間が目視で判定した損傷度はほぼ同じ評価となるため、前述したように被災度区分判定に有効であると言える。

4) 3-1x

建物の内部 (室内) において、比較的大きなひび割れが生じている耐震壁を選定した。ひび割れは 4 点計測し、0.2~3.5mm の幅であった。人間によるひび割れ幅の計測状況を写真-5 に示す。次いで、2000 万画素カメラにより、電灯を点灯した場合と、消灯した場合で対象の耐震壁の撮影を行った。人間による計測値と、ドローン調査によるひび割れ幅評価値の比較を表-5 に示す。

幅 3.5mm のひび割れが点灯、消灯いずれの場合も、0.7mm と評価され、正確に評価できていないことが分かる。また、幅 1.2mm のひび割れでは、点灯の場合で 0.6mm、消灯の場合で 0.3mm と評価され、消灯した場合の方が精度が低いことが分かる。幅 0.2mm のひび割れは汎用ソフトによる自動検出が不可能であった。このことから、仮にドローンが室内に侵入でき、電灯が点灯していたとしても、外部に比較して暗いため、ドローンを用いて建物内部の部材のひび割れ幅を評価するのは難しいと考えら

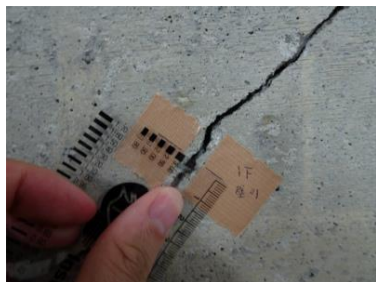


写真-4 ひび割れ幅の評価の様子 (1 階の柱, X 位置, 撮影距離 5m, 1 億画素カメラ)

表一4 人間によるひび割れ幅計測値と、ドローン調査によるひび割れ幅評価値（建物外周部）

対象部材, 位置	人間の目視調査によるひび割れ幅 [mm]	ドローン調査（1億画素）によるひび割れ幅[mm]				ドローン調査（2000万画素）によるひび割れ幅[mm]			
		5m	10m	15m	20m	5m	10m	15m	20m
1階の腰壁, W	0.7	0.6	0.6	×	×	×	×	×	×
1階の柱, X	0.4	0.3	×	×	×	×	×	×	×
1階の腰壁, Y	2.5	1.7	1.4	1	0.5	0.9	×	×	×
1階の腰壁, Z	0.65	1	0.9	×	×	×	×	×	×

×：汎用ソフトによるひび割れの自動検出不可



写真一5 人間によるひび割れ幅の計測（壁01）



写真一6 ドローンを用いた傾斜角調査の様子

表一5 人間によるひび割れ幅計測値と、ドローン調査によるひび割れ幅評価値の比較（室内）

対象のひび割れ	人間の目視調査によるひび割れ幅 [mm]	ドローン調査（2000万画素）によるひび割れ幅 [mm]	
		点灯	消灯
壁01	3.5	0.7	0.7
壁02	0.65	0.4	×
壁03	0.2	×	×
壁04	1.2	0.6	0.3

×：汎用ソフトによるひび割れの自動検出不可



写真一7 ドローンから吊り下げた紐を撮影した画像

れる。また、窓が開いていなければ、ガラスの反射により内部を撮影できないため、天候や時間帯によっては内部の被災状況も確認できないと考えられる。

5) 4-1x

対象としたのは、屋上に設置されていて、地震により傾斜した貯水槽である。まず、2人の調査者によって下げ振りを用いて傾斜角の計測を行った。1人が下げ振りを持ち、もう1人が計測を行った。所要時間は1分程度であった。人間による傾斜角の計測では、約3°（126/2030mm）となった。

ドローンを用いた傾斜角調査の様子を写真一6に、撮影した画像を写真一7に示す。貯水槽の任意の箇所の長さを計測しておき、それを基に画像から傾斜角を算出した。ドローン調査による傾斜角の計測では、約4°（116/1597mm）となり、傾斜角度の精度に関してはある程度有効であると言える。しかし、真正面から撮影できていないことや、紐が風でなびいている影響等により、画像から読み取る長さには実測と誤差があった。上述の方法を用いた場合、操縦者が2人必要となるとともに、紐が写る位置の調整や、風の影響などによって、所要時間は人間による調査より長くなる場合がある。さらに、画像に写っている任意の箇所の長さをキャリブレーション

のために計測する必要があるため、実際の調査に用いるのは現実的でないと考えられる。

一方、撮影していた動画から静止画を抽出し、傾斜角の直接測定を試みた結果、人間による傾斜角の計測（約3°）と同じ値となった。これは、ドローンに取り付けられた3軸ジンバル（3軸電動ブラシレス・ジンバル：傾きを感知すると自動的に傾きを調整する装置）によりカメラを水平に保ち続けられるため、風などの外力やドローンの飛行の動作に影響を受けることなく、撮影対象物の傾斜角を精度良く測定できたと考えられた。ドローンに搭載されているジンバルを利用することで、建物の傾斜角計測は容易にできると考えられる。

6) 5-1xt

赤外線カメラにより撮影した柱の様子を写真一8に示す。人間による打診検査も同時に実施した。

タイルの浮き上がりが確認された箇所の温度が高くなっていった。地震による被災時にはタイルの剥離面積が大きくなっている可能性があるため、赤外線カメラでタイルが剥落するリスクのある箇所を確認する必要がある。また、タイルに近づいて打診検査するのは危険であるため、ドローンで安全な離隔距離をとることで調査者の安全を確保した調査が可能になる。

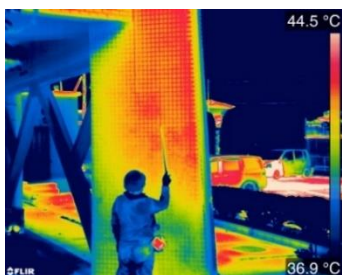


写真-8 赤外線カメラで撮影した柱

7) 5-2m

まず、1人の操縦者がドローンを目視内追従航行しながら、建物の外周を1周回るように動画撮影した。そこで撮影された動画はリアルタイムに、VRゴーグルで技術者等が見ることができる。ゴーグルを被り、頭を振ると、その動きにカメラの方向が対応するため、技術者が見たい角度に変更することが可能である。動画撮影の様子と、その動画をリアルタイムに視聴する技術者の様子を写真-9に示す。この機能を用いれば、専門的な知識のある技術者が現地に行かずとも被災調査を行うことができ、災害時の被害状況の把握に有効である。

次いで、操縦者が目視内追従航行しながら、1階の梁の静止画を撮影した。梁の損傷を写真-10に示す。ひび割れ幅の計測はできないが、応急危険度判定や被災度区分判定を行ったことのあるレベルの技術者が画像を見れば、損傷度を推定することが可能であると言える。



写真-9 FPV撮影と動画視聴検査の様子



写真-10 FPV静止画撮影による梁の損傷

5. 結

地震で被災したRC造庁舎を対象として、人間による調査とドローンを用いた調査を実施し、ドローンを用いた被災調査の有効性の確認などを行った。得られた知見を以下に示す。

- 人間による被災度区分判定結果と、ドローンを用い

て被災度区分判定を行ったと仮定して得た判定結果の比較を行ったところ、純ラーメンのような構造であれば、耐震性能残存率 R の算定結果に大きな差異はなく、ドローンを用いた被災度区分判定は有効であることが分かった。一方、建物内部に脆性破壊する耐震壁などが多い構造の建物では、 R の算定結果に大きな差異が生じることも考えられるため、ドローンを用いて被災度区分判定を行う場合は建物の構造形式を考慮する必要がある。

- 人間による調査では、高層階の損傷状況を確認することが難しいが、ドローンの空撮ではそれが可能になるため、応急危険度判定にも有効である。
- ドローンを用いたひび割れ幅評価を行った結果、1億画素カメラの撮影画像では、撮影距離5mであれば、ある程度良好にひび割れ幅を評価できた。1億画素カメラを搭載し、撮影距離5m程度までドローンを飛行させることができる建物であれば、ドローンはひび割れ幅の評価に有効である。
- 本調査は快晴で弱風の昼間という好条件下で行うことができたが、実際の被災直後の調査では降雨、降雪、強風など悪天候により、ドローンを飛行させることができなかつたり、時間帯によっては屋外でも暗いため、ひび割れ幅の評価精度が低下したりする可能性も考えられる。また、快晴で弱風の昼間であっても、本調査ではガラスの反射により建物内部を外部から撮影できなかつたり、紐を結びつけたドローンを撮影することによる傾斜角計測はできなかつたりした。これらの問題点について、今後も検討を重ねていきたい。

謝辞

本調査においては、熊本県 松川敏雄氏、株式会社 WorldLink & Company, SkyLink Japan 福元一輝氏にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮内博之, 兼松学ほか: UAVを活用した建築保全技術開発に関する研究 その1: UAVの技術動向と建築分野での活用と課題, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1279-1280, 2017.8
- 2) 石田晃啓, 宮内博之ほか: UAVを活用した建築保全技術開発に関する研究 その2: UAVによるRC造建物の劣化調査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1281-1282, 2017.8
- 3) 日本建築防災協会: 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針 2015年改訂版, 2016.3