

第 9 章

関連研究

9.1 国土交通省建設技術研究開発助成

1. 研究課題名：光学的計測法を用いた効率的・低コストな新しい橋梁点検手法の開発
2. 研究代表者：松田 浩
3. 所属機関・職名：長崎大学大学院工学研究科システム科学部門・教授
4. 研究期間：平成 26 年度～平成 27 年度
5. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	片峰 茂	長崎大学・学長
研究代表者	松田 浩	長崎大学・教授
共同研究者	高橋 和雄	長崎大学
〃	森田 千尋	長崎大学・准教授
〃	森山 雅雄	長崎大学・准教授
〃	奥松 俊博	長崎大学・准教授
〃	西川 貴文	長崎大学・助教
〃	出水 享	長崎大学・技術職員
〃	伊藤 幸広	佐賀大学・教授
〃	中川 雅史	芝浦工業大学・准教授
〃	西村 正三	(株)計測リサーチコンサルタント・取締役 事業推進部長 クリエイティブ事業部長
〃	原田 耕司	西松建設(株)・企画技術部 課長代理

4. 補助金交付総額：44,990 千円

5. 研究・技術開発の目的

(1) 外観劣化情報取得のための 3 次元維持管理システムの開発

◆3 次元外観劣化情報に基づく維持管理システムの開発

平成 27 年度は、前年度の結果を踏まえ、中小橋梁を対象として、3D モデルを用いた橋梁調査実施に向けて、手持ち撮影による (UAV を用いない) 橋梁撮影法を開発するとともに、マニュアル化することを目的とする。また、橋梁のリスクや安全性を評価し、適切に維持管理するために、①3D 計測に基づく構造解析モデル構築、②構造解析、③構造特性同定、④解析結果を実橋梁のたわみや振動と比較、⑤橋梁の安全性を評価する、システムの開発を目的とする。

(2) デジタル画像解析による橋梁のたわみ計測法および鋼部材き裂計測法の開発

◆橋梁のたわみ計測法

平成 26 年度は、たわみ計測システム、計測ターゲット、解析手法の開発ならびに屋内における計測精度の確認を行った。平成 27 年度は、①屋外計測による計測精度検証、②合成桁を用いたたわみ計測実験、③実橋によるフィールド試験を行いロバスト性の検証を行うことを目

的とする。

◆鋼部材のき裂計測法

平成 26 年度の結果から計測システム、解析手法はほぼ完成した。平成 27 年度は、①各種試験体によるデータ蓄積、②実物サイズの試験体での計測、③小型で携帯・操作性に優れた安価な計測装置・治具と加熱装置の試作機を製作することを目的とする。

6. 研究・技術開発の内容と成果

(1) 外観劣化情報取得のための 3 次元維持管理システムの開発

【計測概要】

平成 26 年度は、主に UAV を用いて大規模橋梁の 3D 化、損傷の抽出を実施した。平成 27 年度は、手持ちカメラによる簡易 3D 計測法の開発に主眼を置き、中小橋梁を 3D 化できるよう様々な検証を行い、推奨カメラ、推奨解析ソフト、撮影位置等について検証し、マニュアル化を図った。また、1 橋梁については損傷図を作成し、定期点検結果と比較することにより、点検調査への適用性を検証した。さらに、現有 3D レーザー計測機を用いた①3D 計測に基づく構造解析モデル構築、②構造解析、③構造特性同定、④解析結果を実橋梁のたわみや振動と比較、⑤橋梁の安全性を評価する、システムの開発を行った。

【検証結果】

《推奨カメラ》現場での作業性を考慮し、画像から 3D 化し、コンクリートのひび割れのような細かな損傷を把握するためには、ミラーレスカメラ以上の性能が適している。

《推奨解析ソフト》作業員レベル、解析のしやすさ、価格を考慮すると、基本的には、Photoscan を使用することが橋梁調査においては適している。

《撮影位置》橋梁を中心とした放射状 8 方向の撮影が最低限必要である。可能な範囲で、8 方向の間を補間する撮影も加えることで、より確実に 3D モデル化が可能となる。兩岸からの撮影も加えると、より容易に 3D 化が可能である。作成した 3D モデルよりオルソ画像（展開画像）を作成し、クラックインデックス[CI]により損傷の半自動抽出を行い、損傷区分判定が可能となる。

《自動撮影雲台の製作》

自動撮影雲台は、2 軸のモーターを搭載し、設定した撮影範囲を画角によって自動分割・撮影を行うものである。これによると合成処理された画像は球面の一部を切り出した形状となる。この合成処理された画像は、ギガピクセル画像であり、画像の構造を高解像度から低解像度の画像の集合体にする事で通常の PC でもストレスなく拡大縮小などの操作が可能である。しかし、より高精度の画像取得のために超望遠レンズを搭載する必要があり、安定した撮影が困難であった。また、撮影距離の違いによるフォーカスのズレなどが課題であった。そこで、様々な橋梁を想定し、安定した撮影の可能な自動撮影雲台の開発を行った。FLIR MCS 社製の雲台システム PTU-D48E を使用し、従来の自動撮影雲台と同等の制御プログラムを製作した(図 1.1)。図 1.2 に示す撮影方法で検証試験を実施した。その結果は以下のようにまとめられる。

- ・最大搭載重量 6.8kg のため NIKKOR800mm レンズ（約 4.6kg）も搭載可能
- ・測量三脚に取り付けるため、安定した撮影可能
- ・側面撮影、下面撮影などに対応できるよう、取り付けステイを作成
- ・制御プログラムにより、オートフォーカスのエラー時には、自動で一時停止

- ・困難な角度の撮影時にも PC でカメラを制御し、撮影可能

図 1.3 には、本手法による橋梁の側面の撮影例を示す。150m 離れた位置からコンクリート橋脚のひび割れを取得することができる。



図 1.1 改良型自動撮影雲台



(a) 側面撮影モード



(b) 下面撮影モード



図 1.2 撮影方法

橋梁の側面を 150m
離れた地点から撮影
D800+AF-S NIKKOR 800mm



従来のソフトでスティッチ



接合画像作成



(幾何補正) 展開画像作



[CI]による損傷トレース

図 1.3 橋梁の側面撮影例

《3D 計測・FEM 解析と実振動計測による橋梁振動同定》

自治体管理橋梁には建設年すら不明の橋梁が多数存在する。近接目視点検が義務化されたが、近接目視中心の定期点検では、材料劣化、外観変状が分かるのみである。老朽化橋梁の場合には、「安全性は保証できるか?」「落橋はしないだろうか?」「通行止めのタイミングは?」「補修 or 架替え、その判断基準は?」ということが問題となる。そのためには、図 1.4 に示すように、①3D 計測に基づく構造解析モデル構築 (図 1.5)、②構造解析 (図 1.6)、③構造特性同定 (図 1.4)、④解析結果を実橋梁のたわみや振動 (図 1.7) と比較、⑤橋梁の安全性を評価することができるシステムを構築する必要がある。

今年度は、2 径間単純ポステン T 桁橋の 1 径間を対象として、3D レーザスキャナを用い、3D 構造モデルを作成し、構造解析を実施し、その結果を LDV による実計測データ (図 1.7) と比較し、簡便な方法で橋梁の安全性やリスクを評価できる手法を提示するとともに、その有用性について検討した。

図 1.8 には実橋梁の振動計測による固有振動数を示す。構造解析は骨組モデル（図 1.6(a)）とソリッドモデル（図 1.6(b)）を用いた。解析による振動モードを表 1.1 に、振動計測および解析結果を表 1.2 に示す。なお、同表には次に述べるたわみ計測の結果も併記している。なお、モデルの材料は鋼材、特性値はヤング係数 2.0×10^8 kN/m²、単位体積重量 77.0 kN/m³、ポアソン比 0.3 である。

表 1.2 のモデル B と計測結果がよく一致していることから、3D レーザスキャナの計測結果を図面の代用としても十分適用できると判断される。

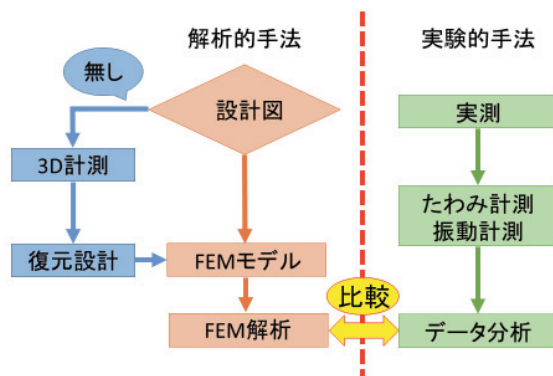


図 1.4 構造同定法

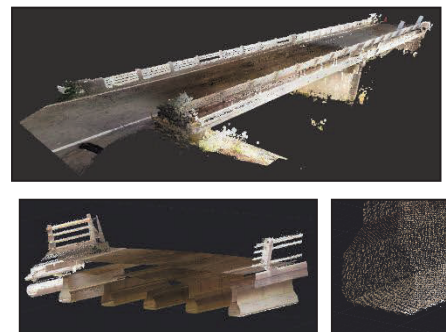
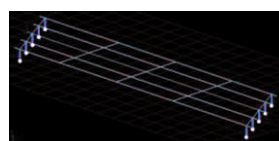
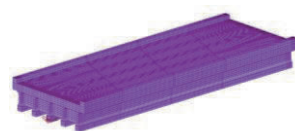


図 1.5 3D 計測デー



(a)骨組解析モデル



(b)ソリッド解析モデル

図 1.6 構造解析モデル

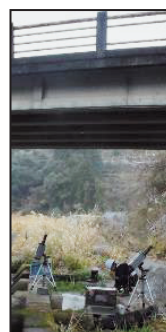


図 1.7 振動計測

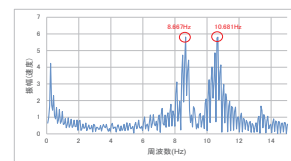


図 1.8 振動解析

表 1.1 振動モード

	1 st mode	2 nd mode
A		
B		

表 1.2 計測値および解析結果（固有振動数、たわみ）

モデル	舗装	地覆	固有振動数(Hz)						たわみ(mm)		
			1次			2次					
			計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値
A	無	無	8.67	8.665	1	10.50	9.93	0.95	2.20	1.88	0.86
	有			8.853	1.02		10.541	1		1.81	0.82
	有(コン)			9.307	1.07		10.898	1.04		1.61	0.73
	無	9.088		1.05	10.752		1.02	1.70		0.77	
	有	9.508		1.1	11.233		1.07	1.68		0.76	
	有(コン)	9.621		1.11	11.381		1.08	1.64		0.74	
B	無	無		7.59	0.88		8.861	0.84		2.54	1.15
	有			7.749	0.89		9.111	0.87		2.44	1.11
	有(コン)			8.171	0.94		9.821	0.94		2.18	0.99
	無	8.036		0.93	9.816		0.94	2.26		1.03	
	有	8.173		0.94	10.036		0.96	2.19		0.99	
	有(コン)	8.533		0.98	10.649		1.01	2.00		0.91	

（２）デジタル画像解析による橋梁のたわみ計測法および鋼部材き裂計測法の開発

◆橋梁のたわみ計測法

【計測原理】

開発技術は、橋に取り付けた特殊なマーカをデジタルカメラで撮影してその画像からたわみを計測する方法である。実験で用いた計測システムはニコン社製一眼レフカメラ D5000、ニコン社製レンズ、カメラ三脚、蝶型マーカなどである。計測方法は、最初にカメラ、蝶型マーカなど設置・調整を行う。次に変位前の画像（基準画像）と変位後の画像を撮影する。そして、変位前後の画像を画像解析により変位を算出する。変位の算出はピクセルピッチを撮影した画像をもとに算出し、基準画像と変位させた画像とのピクセル数の差を mm 単位で変位量を算出する。

【実験概要・結果】

蝶型マーカを用いた橋梁のたわみ計測法の適用範囲を拡大するために 40m 以上の長距離において変位計測を行い、精度を検討した。カメラの位置から 40m、60m、80m および 100m を撮影距離とし、計測距離ごとにデジタル変位計を用いて、ターゲットを 0mm、50mm、100mm、150mm、200mm、250mm および 300mm の 7 段階で鉛直方向に変位させた。撮影枚数については各撮影距離、変位毎に 5 枚撮影した。そして、画像から変位量を算出して、デジタル変位計の変位値と比較した。レンズはニコン社製 AF-S NIKKOR 800mm f/5.6EFL ED VR を用いた。40m、60m、80m、100m の計測距離において計測を行った結果、高い精度が得られた。計測距離が長くなるほど計測値にばらつきは生じるものの、全体としては高い精度を示した。さらに 1 回の計測ごとの計測値のばらつき比較的少なく安定していた。

蝶型マーカを用いた変位計測において、現場での実用性を検証するために、全長約 9m の合成桁を用いた変位計測実験を行った。ターゲットを桁の両支点上の 2 点および 9m スパンの 4 分の 1 にあたる 2.25m 点、2 分の 1 に当たる 4.5m 点、4 分の 3 に当たる 6.75m 点の 5 つの計測点にマグネットを使用して取り付け、荷重の大きさを 0kN、14.3kN、28.3kN、14.3kN、0kN の順に変えながら桁に載荷する。荷重毎に、それぞれのターゲットの写真を 5 枚撮影した。そして、画像から変位量を算出して、接触式変位計の変位値と比較した。ターゲット設置状況を図 2.1 に示す。レンズは、ニコン社製の AF-SNIKKOR70-200mmF2.8G ED VRⅡを用いた。



図 2.1 ターゲット設置状況

各荷重段階の変位計測結果を表 2.1 にそれぞれ示す。画像と変位計を比較すると最大のばらつきが 0.52mm 程度であることを考えると高い精度を確保できたといえる。また、実験においてはカメラのセッティングの際にマイクロメーターを使用しなかったため、レンズと T 型ベースの水平をそろえることが出来ず、その影響を受け誤差が生じたと考えられる。

表 2.1 計測結果の比較 (mm)

荷重	0.00m	2.25 m		4.50 m		6.25 m		9.00 m
	画像	画像	変位計	画像	変位計	画像	変位計	画像
0kN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14.3kN	- 0.748	- 3.880	-3.55	- 4.981	-4.66	- 3.154	-3.51	0.114
28.5kN	- 0.663	- 6.206	-6.02	- 8.422	-8.18	- 5.561	-5.99	-0.209
14.3kN	- 0.425	- 3.461	—	- 4.875	—	- 2.933	—	0.065
0kN	0.005	- 0.255	—	0.284	—	0.701	—	0.350

蝶型マーカを用いた変位計測において、現場での実用性を検証するため、実橋梁において計測実験を行った。橋長は約 33m であり、2 径間 PC 単純桁橋である。実験では 1 径間において計測を行った。下流部の地覆部付近にターゲットを設置した。設置地点としては支点にあたる 0m 点、16m 点、4 分の 1 にあたる 4m 点、2 分の 1 にあたる 8m 点、4 分の 3 にあたる 12m 点の 5 つの計測点にターゲットを設置した。計測精度の検証のため 2 分の 1 地点のターゲットの真下に変位計を設置した。カメラの設置、セッティング後に初期画像として各ターゲットの写真をそれぞれ 5 枚撮影した。その後、橋梁にラフタークレーン (26.74t) を載荷し、変位画像として全てのターゲットの写真を撮影した。無載荷状態と載荷状態の撮影を 1 回の計測とし、同じ計測を計 3 回行った。載荷前後の画像から変位量を求めた。計測状況を図 2.2、載荷状況を図 2.3 にそれぞれ示す。レンズは、ニコン社製の AF-SNIKKOR70-200mmF2.8G ED VR II を用いた。

計測結果を表 2.2～2.4、3 回目の変位計測の推移を図 2.4 に示す。画像と変位計の計測結果

を比較すると計測結果の差の平均は 0.004mm、最大差は 0.099mm であった。よって実際の橋梁においても高い精度で計測できるといえる。また、屋外での計測であるため、誤差の生じる原因として風や照度の変化など、様々な外的要因が考えられるが今回の計測結果を踏まえると屋外計測であっても問題なく計測が行えることが確認された。



図 2.2 計測状況



図 2.3 載荷状況

表 2.2 1 回目の計測結果の変位量 (mm)

	A (0m)	B (4m)	C (8m)	D (12m)	E (16m)
載荷前	0	0	0	0	0
載荷後	0.627	-1.434	-2.120	-1.499	0.255
変位計	—	—	2.21	—	—

表 2.3 2 回目の計測結果と変位量 (mm)

	A (0m)	B (4m)	C (8m)	D (12m)	E (16m)
載荷前	0	0	0	0	0
載荷後	-0.630	-1.654	-2.220	-1.299	0.381
変位計	—	—	2.24	—	—

表 2.4 3 回目の計測結果の変位量 (mm)

	A (0m)	B (4m)	C (8m)	D (12m)	E (16m)
載荷前	0	0	0	0	0
載荷後	-0.109	-1.492	-2.289	-1.315	0.112
変位計	—	—	2.19	—	—

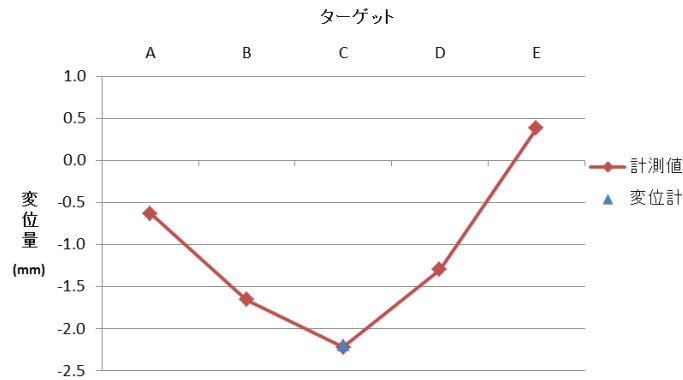


図 2.4 3回目計測時のたわみ変位曲線(mm)

◆鋼部材のき裂計測法

【計測原理】

開発した亀裂検査法(誘導加熱法)は、誘導加熱装置(IHヒーター)により塗装上から亀裂を強制的に開閉させ、加熱前後の画像を用いてデジタル画像相関法(DICM)により亀裂の開閉変位・ひずみを可視化して亀裂を検出する技術である(図3.1)。計測の手順は①ランダムパターンの塗布、②セッティング(カメラ、IHヒーター、ライト)、③計測(初期画像)、④加熱、⑤計測(変形画像)、⑥画像解析、⑦亀裂確認、⑧ランダムパターンの除去となる。

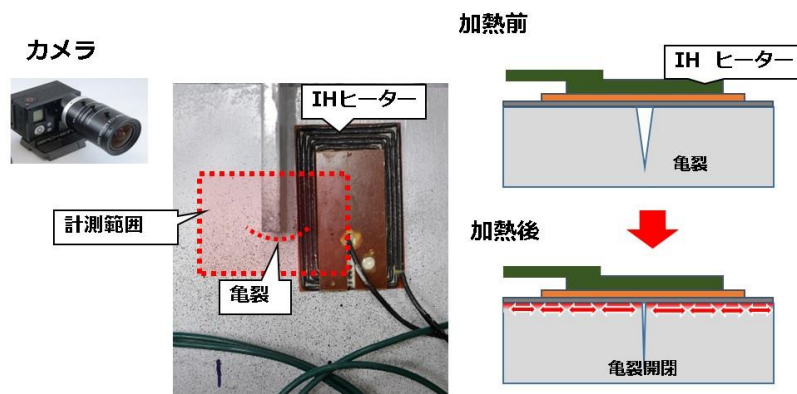


図 3.1 計測原理

【実験概要・結果】

実構造物を想定した試験体を用いて誘導加熱法の亀裂検査を行った。試験体の写真および寸法を図3.2に示す。試験体はSM400材を用いている。この試験体に塗装を施して疲労試験機により亀裂を発生させた。試験体は亀裂のない試験体1体と亀裂の長さが異なる試験体4体、合計5体を製作した(表3.1)。疲労試験後に塗装の上から誘導加熱法で亀裂検査を行った。その後、塗装を剥がして磁粉探傷試験による亀裂の有無の確認、ルーペによる亀裂長さ・亀裂幅の計測を行った。亀裂先端部分の亀裂幅はすべての試験体で0.01mm程度であった。

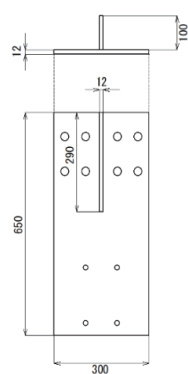


表 3.1 亀裂長さ

試 験 体	亀裂長さ (mm)
No. 1	無
No. 2	42
No. 3	47
No. 4	62
No. 5	102

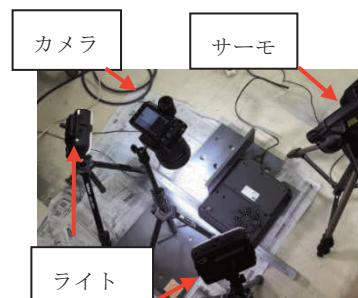
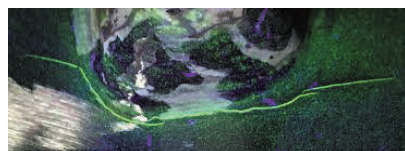


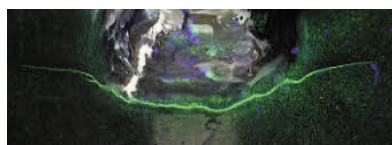
図 3.3 計測状況



(a) No.1



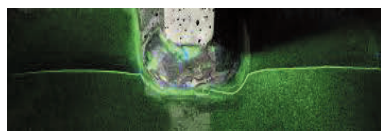
(b) No.2



(c) No.3

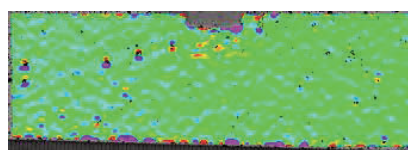


(d) No.4

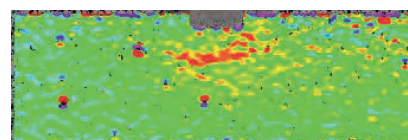


(e) No.5

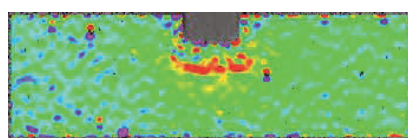
図 3.4 磁粉探傷試験結果



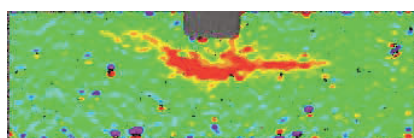
(a) No.1



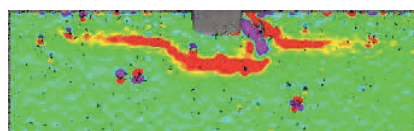
(b) No.2



(c) No.3

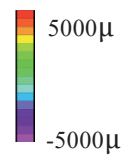
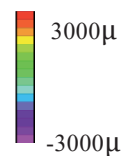
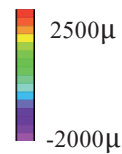
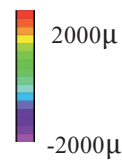
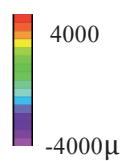


(d) No.4



(e) No.5

図 3.5 y 方向ひずみ分布図



計測には、Nikon 社製デジタルミラーレスカメラ Nikon 1 V3、Nikon 社製レンズ AF-S Micro NIKKOR 60mm f/2.8G ED を用いた。撮影距離は約 600mm とした。この条件下での撮影解像度は約 0.02mm/pixel である。誘導加熱装置は市販の IH ヒーターを用いた。加熱位置は亀裂部横とし、加熱時間は 120 秒間とした。加熱前後の画像を撮影し、DICM による変位解析を行った。計測の際には明るさを一定に保つため、2 台の LED ライトを使用した。また、試験体の表面に白黒のランダムパターンを塗布した。赤外線サーモグラフィ装置を用いて加熱温度の確認も行った。計測状況を図 3.3 に示す。

磁粉探傷試験によって得られた磁粉模様を図 3.4 に、塗膜上から DICM によって得られた y 方向ひずみ分布図を図 3.5 にそれぞれ示す。図より磁粉探傷試験で得られた欠陥模様とほぼ同様に DICM でも亀裂が確認できている。以上より、塗膜上からでも亀裂検査が可能なが確認された。

【計測装置の改良】

従来装置は、カメラ、ライト、IH ヒーターをそれぞれ個別に設置していたため作業性が悪く、設置に時間を要した。また、IH ヒーターの加熱に AC 電源が必要なためその準備が必要であった。人の手が届かない高所では、装置の設置のために別途脚立などの必要があった。実用化・商品化するためにはこれらの問題点を解決する必要があるため、小型で携帯・操作性に優れた安価な計測装置・治具と加熱装置を製作した（図 3.6）。製作した装置は、カメラ、IH ヒーター、ライトを一体化させ、設置作業の効率化を行った。カメラにはハウジングを取り付けているため、防塵、防滴性能を付与した。また、カメラ、IH ヒーター、ライトを小型化し、390 g という軽量化を図った（105×75×90mm）。さらに、伸縮できる延長棒に装置を取り付けることもでき、人の手の届かない高所でも検査ができるようにした。AC 電源が取れない場所でも検査ができるように、バッテリー、インバーター、高周波発信装置を組み合わせた可搬性のある電源装置を新たに開発した。

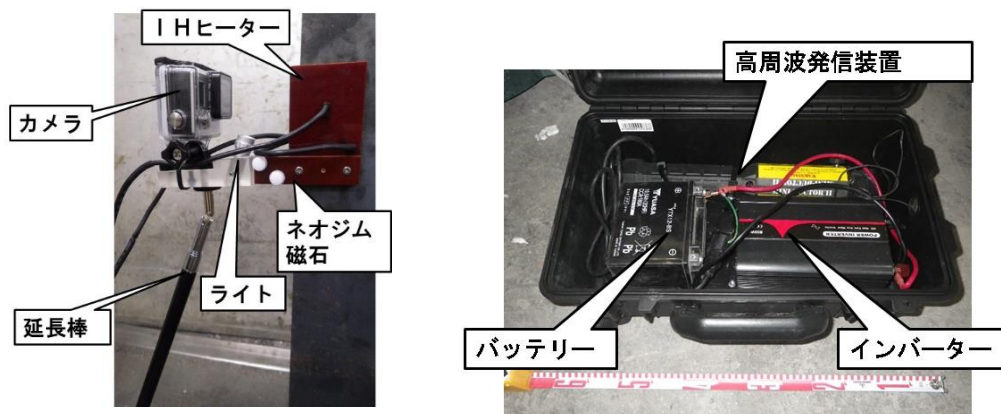


図 3.6 開発装置した装置

9. 成果の実用化の見通し

(1) 外観劣化情報取得のための3次元維持管理システムの開発

昨年度・本年度の結果より、カメラで撮影した画像によるSfM技術を用いた橋梁調査手法は、従来の点検手法と比較し、省力化・効率化が図れ、画像を点検結果の成果物とすることで、精度の向上・作業者技量によるばらつきの低減など、多くの利点が存在する。最近では、UAVが「ドローン」として認知され一般化しており、長大橋の点検・管理にも適用する動きがあり、実用化に向け、調査手法の確立が求められている。また、中小橋梁においては、最も効率化・省力化が必要な部分であり、SfM技術を用いた点検が最も効果を期待できる。今回のカメラやソフトの選定、撮影方法の検証により、特別なカメラの知識を必要とせずに、誰もがSfMに適した画像を撮影し、3Dモデルによる橋梁維持管理も期待できる。

現時点では、画像による点検は、近接目視の代替手法として認可されていないため、一時的なスクリーニングを行うための支援技術であるが、今後は、ICTを全面活用した施工管理「i-Construction」の中で、既設構造物・現況地形などを3D化する重要な要素技術であり、橋梁の維持管理においても実用化が期待される。

また、3D計測データを用いた構造解析と実橋梁の振動・たわみ計測結果との比較は、老朽化橋梁の「安全性は保証できるか?」「落橋はしないだろうか?」「通行止めのタイミングは?」「補修 or 架替え、その判断基準は?」という課題の解決策になると考える。①3D計測に基づく構造解析モデル構築、②構造解析、③構造特性同定、④解析結果を実橋梁のたわみや振動と比較、これらの要素技術は完成したと判断できるので、これらの技術を用いて橋梁の安全性を総合的に判断できる“リスクに基づいたモニタリングシステム”を構築すべく研究開発を進めていく予定である。

(2) デジタル画像解析による橋梁のたわみ計測法および鋼部材亀裂計測法の開発

橋梁のたわみ計測法に関しては、撮影距離100mでの計測ができたこと、実橋梁において変位計と同等の精度で計測できたことから実用化できたものとする。今後は、商品化を目指してマニュアル化等を行っていく。

鋼部材の亀裂計測法に関しては、塗装を施した試験体において亀裂検出が可能なのが確認できた。実橋梁部材においては亀裂が検出できない亀裂パターンが確認された。今後は、この原因を追究するとともに、他の亀裂パターンの部材を用いて亀裂検出の検証を行っていく。また、商品化を視野に置いて開発した装置の亀裂検証実験も行っていく。

9.2 ワイヤレスセンサネットワークによるモニタリングシステムの構築とその活用に関する研究

石塚，藤島，藤本，杉本，岩崎

国内では、減災を目的とした既設インフラや斜面地などの危険地域の点検や事前補修が求められている。一方で、地方行政の財源不足や人手不足により、点検業務がままならない状況に多くの自治体が直面している。さらに、点検を行う点検委員の資質により点検結果にムラが生じる事も多く発生している。

このような問題に対し、本研究グループでは、土木系、情報系、電気系の研究者で分野横断型の研究グループを結成し、コストを抑制しつつ、既設インフラや危険地域の定期的なモニタリングを可能とするシステムの開発を目指している（図 1-2）。

現在は、特に斜面地に関する地すべりなどの発生を事前に予防する予防保全を可能とするワイヤレスセンサネットワーク(WSN)システムの構築を目指している。以下、2017年度の活動をそれぞれの担当毎に報告を行う。

1 電源とセンサに関する取り組みと問題点抽出【石塚】

本研究では、特に全体の無線ネットワークシステム構成の作成と地すべりを誘発すると想定される物理量のセンシングを行うセンサ回路の開発および商用電源が利用できない地域での常時モニタリングを可能とする電源システムの開発を行った。その結果、提案する WSN により安定的にモニタリング対象地域内に分布させたセンサーノードから常時データの吸い上げを可能とし、これらの吸い上げたデータを、携帯電話通信網を利用する事で、常時遠隔よりモニタリングが可能なシステムの構築を成し遂げた(図 1-2)。今後、さらなるシステムの安定性強化、物理センサによるセンシング精度向上ならびに設置性の簡易さについて検証を引き続き行っていく予定である。



図 1-1 Web 経由で現地の遠隔モニタリングを行っている様子（PC のキャプチャ画面）

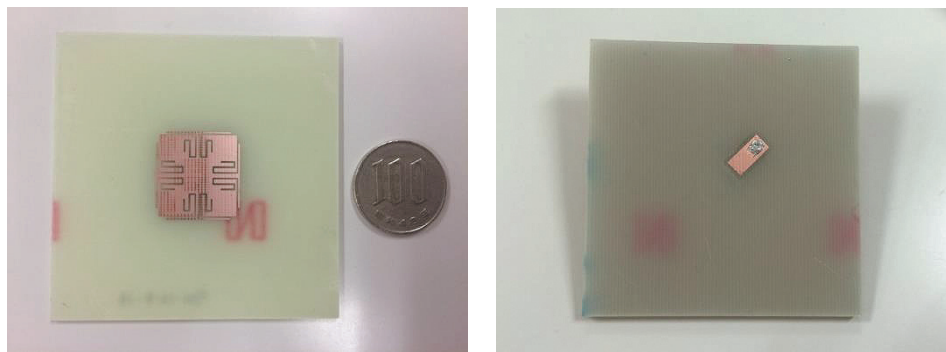


図 1-2 電源およびセンサの開発に関する現在の取り組みと明確にした問題点

2 ワイヤレスセンサネットワーク向けのモニタリング用アンテナならびにレクテナの開発【藤本】

①斜面地でのモニタリング用アンテナの開発

試作したアンテナの測定実験による評価を行った。測定結果とシミュレーション結果の差が大きかったため、給電構造をより簡単な直接同軸給電モデルに変更し、電磁界解析用シミュレーターによりアンテナの再設計を行った。



(a) Top layer (放射素子)

(b) Bottom Layer (給電部)

図 2-1 提案する円偏波用小型平面アンテナ（Lプローブ給電タイプ）の試作品

②レクテナの開発

試作したレクテナ（受信した電波を直流電圧に変換する素子）の測定実験による評価を行った。図 2-2 に試作したレクテナ（整流回路＋整合回路）を示す。最終目標は環境電磁波（575MHz 帯のTV放送波）を入力波源とするが、本年度は実験の第1段階として、研究室に所有するマイクロ波発振器を入射波源として利用した。マイクロ波発振器のレクテナへの入力電力を 10.0dBm、周波数を 575MHz として測定を行った。測定より、入力波が振幅 1.000V の交流電圧に対し、出力電圧が約 0.725V の直流電圧が得られた。試作したレクテナが高周波交流電圧を直流電圧に変換可能であることを確認した。



図 2-2 レクテナ（整流回路＋整合回路）の試作品

3 屋外設置電子機器の簡易避雷方式の検討および開発【藤島】

ワイヤレスセンサネットワークのセンサ端末の中でも、情報の中継を担う中継機（ルータ機能を持つセンサ端末など）は地表からできるだけ高い場所への設置が求められることが分かってきた。すると、平原など設置場所によっては、高い位置に配置したセンサ端末は落雷の被害を受ける可能性がでてくる。そこで、藤島のグループでは、屋外に設置するセンサ端末などの機器を雷害から守るための対策について、検討・試作・実験室における性能評価を行っている。さらに、佐世保市の斜面地においてフィールドテストを実施中である。具体的には、雷害対策法として、単体のセンサ端末の保護を目的とした避雷ケージおよび複数のセンサ端末群の保護を目的とした簡易避雷針を考案しており、性能評価やフィールドテストなどの結果を踏まえて改良中である。本報告では、今年度実施した①避雷ケージによるセンサ端末の保護と②簡易避雷針による一括保護について簡単に紹介する。

①避雷ケージによるセンサ端末の保護

センサ端末まわりを写真 3-1 に示したような、ステンレスワイヤ製のカゴで囲み、センサ端末を雷撃から守ることを目的としている。避雷ケージは、平常時はアースされておらずセンサ端末の通信性能をできるだけ落とさない様に配慮している。しかし、雷撃時には自動的にアースする機構を備えており、実験室における保護性能評価試験でその保護性能の確認を行ったものである。写真の黄色いひもの間に交流ヒューズを設置して、避雷ケージに雷撃があったかどうか確認できるように工夫している。

②簡易避雷針による一括保護

複数の保護対象を落雷から保護するためには、やはり避雷針が有効である。佐世保市の実装試験フィールドに設置した高さ 2.5m の簡易避雷針を写真 3-2 に示している。ソーラーパネル奥の茶色の棒にステンレスパイプ製の突針を設置し受雷針としており、間隙水圧計や土壌水分計を接続したセンサ端末群と電源であるソーラーパネルを保護するために設置した。この簡易避雷針にも動作確認のためにヒューズアレイが設置してある。実験室においてヒューズの耐腐食性の試験を行うとともに、交流ヒューズの雷インパルス電圧による溶断特性の測定を行って、もし簡易避雷針のヒューズアレイのヒューズの溶断が確認されたら、溶断したヒューズの容量から雷撃のエネルギーを推測できるように備えている。

また、この研究に対して（株）九電工より平成 28 年度学術研究者支援として 100 万円の支援を受けたことを記して謝意を表する。



写真 3-1 避雷ケージ付きセンサ端末



写真 3-2 簡易避雷針と保護対象

4 モニタリングデータの活用を目的とした斜面の安定性評価のためのシミュレーション【杉本】

地すべりや崩壊の危険性が懸念される斜面において、上述のモニタリングシステムの設置ならびに継続的な観測を行うことを想定し、収集される降雨データや地盤内の間隙水の浸透や地下水流の変動に関する情報を活用して、斜面の力学的安定性を評価することを目的としている。本研究では、上述の佐世保市内の試験フィールドを対象として、図 4-1 に示すような 2 次元のモデル地盤を作成し、定常状態の地下水面形成の再現、地表面からの降雨相当の水頭圧の付与とせん断強度低減法に基づく重力解析を実施した。入力する降雨条件は、現地に設置している雨量計により測定されるデータに基づいた計算も可能であるが、本報告では集中豪雨を想定した 50mm/h の降雨強度が 2 時間継続する条件と、長雨を想定した 10mm/h の降雨強度が 10 時間計測する条件を設定し、計算を行った。また、現地は過去に地すべりに伴う変状が発生した経緯から、表層部の切り返しや浸透水対策を目的とした覆土施工を行われていることから、これらの有無の比較も併せて行った。地盤定数等の諸条件について、表 4-1 に示す。

一例として、10mm/h の強度で 10 時間の降雨を与えた直後の飽和度分布と間隙水圧分布を、それぞれ図 4-2、図 4-3 に示す。結果としては地下水の供給に加え、斜面内に浸透した雨水が滞留しているため、降雨終了後全体安全率は徐々に低下する傾向にある。

また、降雨開始、終了を経てその後の斜面の力学的安定性について安全率で評価した結果、図 4-4 に示すように覆土の有無による大きな差は確認されなかった。これは、対象地盤の表層部からの雨水浸透よりも敷地外からの地下水流入の影響の方が大きいことを示唆しているものと考えられることから、次年度には地形の特徴を反映することを目的として計算領域を上流側に広げた 3 次元解析を実施する予定である。

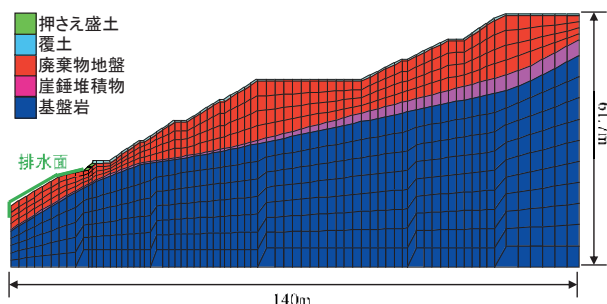


図 4-1 試験フィールドのモデル地盤

表 4-1 入力物性値

	変形係数 (MPa)	ポアソン比	乾燥密度 (kg/m ³)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg)	透水係数 (m/s)
基盤岩	300	0.15	2300	—	—	5.0×10^{-6}
崖錘堆積物	200	0.3	1700	0	35	5.0×10^{-6}
廃棄物地盤	200	0.3	1400	8	37	3.0×10^{-5}
覆土	200	0.3	1400	10	15	5.0×10^{-6}
押さえ盛土	300	0.15	2300	—	—	3.0×10^{-5}



図 4-2 降雨直後の飽和度分布

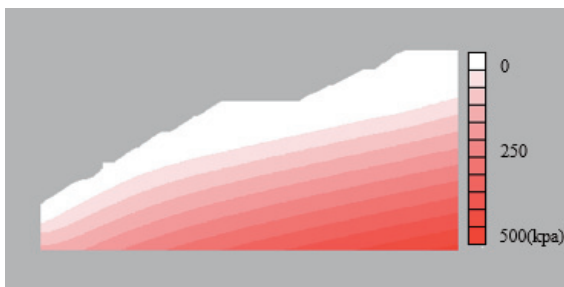


図 4-3 降雨直後の間隙水圧分布

最近の土砂災害に見る既存不適格宅地・家屋 対策の課題

高橋 和雄・田中徹政

長崎大学大学院工学研究科 インフラ長寿命化センター

1. まえがき

2014年8月に発生した広島土砂災害を契機に土砂災害防止法が改正され、基礎調査の迅速化、基礎調査結果の公表、土砂災害警戒情報の伝達の義務化等がなされ、砂防担当部署は5年間での完了を目途に基礎調査を進めている。また、国土交通省住宅局は土砂災害特別警戒区域内の既存不適格な住宅・建築物に対する土砂待受け擁壁等の設置に対して、新たに補助制度を導入した。土砂災害特別警戒区域等の設定は都道府県の砂防担当部署であるが、住宅についての建築確認等に関係して住宅部署の管轄、固定資産税については税務担当部署の管轄である。さらに、土砂災害ハザードマップの作成、避難勧告基準の作成、移転等の支援制度の設置は市町村(区を含む)の担当である。土砂災害防止法は土砂災害から生命を守るためにきわめて有効であるが、管轄部署が多岐にわたり、運用上の課題があることも事実である¹⁾。このような現状をふまえて、本稿では都道府県砂防担当部署を対象として実施した調査結果を紹介する。

2. アンケート調査の概要

「土砂災害に関するアンケート調査(人工斜面の防災対策、既存不適格建築物等について)」と題するアンケート調査票を47都道府県の土砂災害対策の担当に2016年10月に郵送で依頼したところ、すべての都道府県から回答を得た。アンケートの送付先は土砂災害特別警戒区域等を指定する部署で、設問には既存不適格住宅・建築物への補強支援、ハザードマップの内容、人工斜面の防災対策、固定資産税の減価補正等も含まれており、これらについては答えられる範囲で回答を依頼した。

3. 土砂災害防止法に基づく基礎調査および土砂災害特別警戒区域等の指定における人工斜面の取扱について

「土砂災害防止法に基づく基礎調査に人工斜面が含まれている」かどうかを聞いたところ、96%に当たる45都道府県が「含まれている」と回答した。自然斜面を優先して、次に人工斜面の基礎調査・区域の指定をしている可能性もあるので、「含まれていない」とする回答者に今後の予定を聞いたところ、「権利者または管理者が明確であるため、実施する予定はない」と「無回答」であった。基礎調査箇所について、「自然斜面と人工斜面に分けて集計している」かどうかを聞いたところ、「自然斜面と人工斜

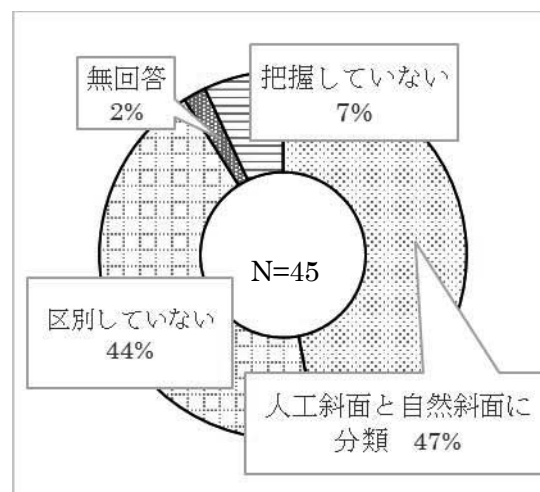


図-1 調査時の人工斜面と自然斜面の区別

面に分類」と「区別していない」がほぼ同じであった(図-1)。分類した箇所数について自然斜面の数が卓越しているが、四国地域では人工斜面の比率が高い。「人工斜面の土砂災害特別警戒区域等の指定状況」を聞いたところ、「指定済み」が49%、「指定中」が40%で「未指定」とする回答はなかった。

「人工斜面の基礎調査や土砂災害特別警戒区域を指定する場合に自然斜面と異なる点がある」かどうかについては、「ある」は27%であった(図-2)。ある場合の主な異なる点は「土砂災害特別警戒区域の範囲設定において、擁壁等の施設があり、その施設効果が見込める場合、範囲設定の計算に反映する」である。さらに「高速道路等管理者が明白で、日常的に点検がなされているような斜面は基礎調査の対象外としている」が挙げられている。「管内の市町村のハザードマップにおける人工斜面の記載状況」を確認したところ、「人工斜面と自然斜面を区別せずに記載している」が82%で、「両者の区別を明示している」はわずか2%であった。人工斜面を対象としていない場合の2都道府県の一つでは人工斜面は含まれていないと明示している。

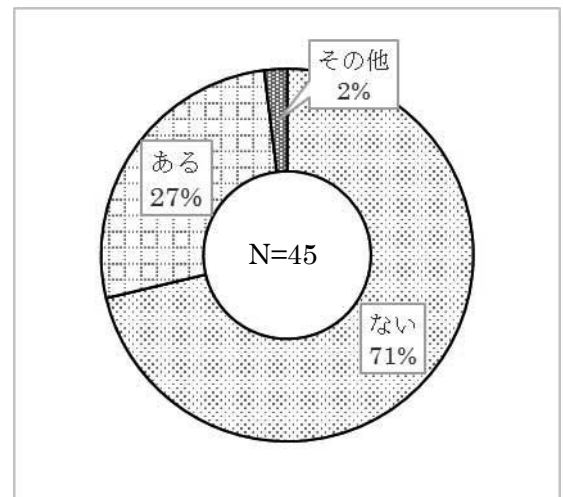


図-2 指定時の人工斜面と自然斜面の取扱の差異

4. 既存不適格な人工斜面の防災対策について

自治体によって実施の時期が異なる宅地造成等規制法(1961年施行)適用以前に造成された人工斜面は既存不適格な斜面とみなすことが出来る。住宅でいえば、1981年以前の建築基準法で建設された建築物に相当する。既存不適格な建築物については、耐震診断や耐震補強の補助制度が市町村等で実施されている。東日本大震災や熊本地震では、被災した個人の宅地の擁壁、がけの復旧工事に公的支援が特例措置として実施されている。既存不適格な人工斜面の補強や災害復旧について、「管内の市町村に補強工事の支援制度がある」が11%、「豪雨や地震で崩壊した場合の支援制度がある」が9%であった。補強については防災工事に市町村が条例を設けて補助するもので、例えば個人が所有し、高さが2mを超え、建物が近接している自然がけや擁壁等を適法な擁壁に改善する工事の費用を一部助成する制度等である。また、人工斜面であっても概ね10年以上経過したものは自然斜面と見なすとする記載も見られる。住宅の耐震補強の支援と同じ施策群にあり、人工斜面の安全対策の側面も見られる。

災害復旧についても補強と同じ取扱に加えて、災害復興住宅等資金預託貸付（銀行融資）等も導入されている。さらに、土砂除去費の支援制度、崩壊したがけの復旧工事費の1/3や1/2を補助(上限あり)する支援制度もいくつかの自治体で導入されている。人工斜面の補強や災害復旧への支援についてはアンケートの回答者が十分に把握されていない側面もあり、もっと導入実績は多いとみている。

5. 土砂災害特別警戒区域内の既存不適格住宅・建築物の補強支援について

土砂災害防止法の改正と同時期の2015年2月に、国土交通省は土砂災害特別警戒区域内の既存不適格住宅・建築物の土砂災害対策改修(外壁補強、コンクリート擁壁の設置)に対する支援(住宅・建築物安全ストック形成事業(土砂災害対策関係))を導入した。補助率は23%で、うち国費半分、都道府県と市町村で4分の1ずつを負担するもので、補助対象限度額は330万円/棟となって

いる。この制度は2010年度に島根県が独自に設けた支援制度を拡充して、国の支援制度にしたものである。島根県の制度では市町村と県で補強費の23%（上限74万円）であるが、これまで適用の実績はない。新設された支援制度を適用するには、市町村が要綱を制定して予算を確保する必要がある、適用の条件が整えば、都道府県と国が補助することになるため、市町村が主体となる事業である。都道府県の砂防担当部署の直接の管轄ではないが、制度を把握しているもしくは都道府県その他の部署と情報を共有していることを踏まえて、この支援制度について、回答者個人の判断を含めての回答を依頼した。この制度適用後1年半時点での導入実績は「導入済み」が17%、「導入を検討している」が11%で時行実績はまだ少ない(表-1)。

表-1 既存不適格住宅・建築物の土砂災害改修に対する支援制度の導入状況(N=47)

項 目	回答数	%
導入済み	8	17
導入を検討している	5	11
市町村から要望があれば今後検討する	17	36
導入の予定はない	9	19
その他	7	15
無回答	1	2

表-2 既存不適格住宅・建築物の土砂災害改修に対する支援制度の内容の妥当性(N=47)

項 目	回答数	%
現状の補助対象、補助率、補助限度額で良い	13	26
現状の補助率、補助限度額の嵩上げが必要	10	22
補助対象を新築の建築物にも適用が必要	6	13
その他	6	13
無回答・答えられない	16	34

支援内容について複数回答可で聞いたところ、「現在の補助対象、補助率、補助限度額で良い」は26%で、「補助率、補助限度額の嵩上げが必要」と「補助対象を新築の建設物にも適用が必要」の計が35%の結果となった(表-2)。鳥取県では、2014年度から土砂災害特別警戒区域内に常住する住民の定住を支援することを目的として、住宅や避難所(公共施設を除く集会所等)の立て替え等のため、建築

表-3 既存不適格住宅・建築物の土砂災害改修に対する支援制度の評価(N=47)

項 目	回答数	%
土砂災害特別警戒区域からの既存不適格な住宅の移転が「がけ地近接等危険住宅移転事業」で進まない中で安全を守るために必要な支援である	14	30
移転せずに地域に住民が定住できるので、集落の持続の観点から必要である	5	11
危険な区域に人が住まないという考え方に反するので、特殊な場合を除いて運用すべきでない	8	17
その他	6	13
無回答・答える立場にない	14	30

基準法に基づく構造方法を用いて外壁を強化した場合にその施工費用の200万円を上限として県と市町村が補助する制度を導入している。鳥取県は2009年から補強費の借入金の利子を対象としていた補助を借入の有無に関わらずに適用できるようにしたものであり、適用の実績もあると報道されている²⁾。

市町村の財源難、補強工事が可能なスペースの有無、耐震補強への支援等のバランス等で判断が分かれているようである。この制度導入の可否については、表-3のように「土砂災害特別警戒区域からの既存不適格な住宅の移転が「がけ地近接等危険住宅移転事業(住宅・建築物安全ストッ

ク形成事業)」で進まない中で、安全を守るために必要な事業である」とする回答が最も多い。また、鳥取県の独自制度の目的と同じ「移転せずに地域に住民が定住できるので、集落の持続の観点から必要である」の観点からの評価もある一方、土砂災害防止法の目的である危険な区域に人が住まないという原則を重視する意見もある。

表-4 固定資産税の減価補正の導入状況 (N=47)

項 目	回答数	%
土砂災害特別警戒区域のみに導入している	6	13
土砂災害特別警戒区域と土砂災害警戒区域の両方に導入している	1	2
土砂災害特別警戒区域と土砂災害警戒区域の両方に導入していない	2	4
市町村によって、導入の仕方が異なっている	34	72
把握していない	3	6
答える立場にない	1	2

6. 土砂災害特別警戒区域等における固定資産税の減価補正について

土砂災害に関連した固定資産税の補正については、砂防指定地に係る評価は固定資産評価基準に明記されている。これに対して、土砂災害防止法に基づく土砂災害特別警戒区域等の固定資産税の評価については明記されていない。管内の市町村の減価補正の取扱について聞いたところ、同じ都道府県内でも「市町村によって、導入の仕方が異なっている」とする回答が72%を占める(表-4)。「土砂災害特別警戒区域のみを対象」、「土砂災害特別警戒区域と土砂災害警戒区域の両方を対象」、「土砂災害特別警戒区域と土砂災害警戒区域の両方とも対象にしない」が混在している。減価補正が市町村ごとの対応のため当然の結果であるが、減価補正の割合も市町村によって異なるため、市町村間の不均衡が生じている。この問題に対して、「市町村間の評価に不均衡が生じないようにするために、全国統一基準を決めるべき」かどうかを聞いたところ、「設置すべきである」と「設置しなくてよい」とする回答が同程度であった(図-4)。

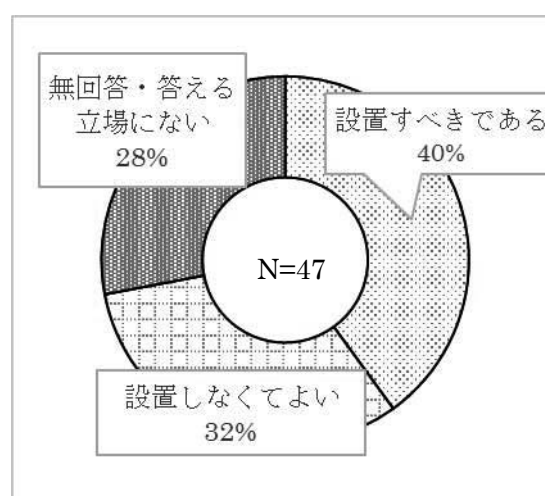


図-4 固定資産税の減価補正の全国統一基準の設定

7. まとめ

急ピッチで土砂災害防止法に基づく基礎調査が進められており、今後土砂災害特別警戒区域等の数が大幅に増えることが想定される。生命を守るために不可欠な取組であるが、土砂災害特別警戒区内の既存不適格な住宅・建築物、土地利用に所有者の不利益が生ずるのも事実であり、今後とも指定時の丁寧な説明、市町村間の不均衡の回避、定住化の観点からの支援制度の検討が必要と考えられる。アンケート調査に協力頂いた都道府県の砂防担当者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋和雄：2014年8月広島土石流災害後の土砂災害対策の見直し，自然災害研究協議会西部支部地区部会報・論文集，40号，pp.21-24，2016.2
- 2) 中国新聞：レッドゾーン指定地区の住宅補強支援，2014.9.2