

5. 建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

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. 研究期間：平成 26 年度～平成 27 年度
3. 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。兵史絵 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。両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[C_I]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ことで通常の 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



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 $2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、単位体積重量 77.0 kN/m^3 、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。

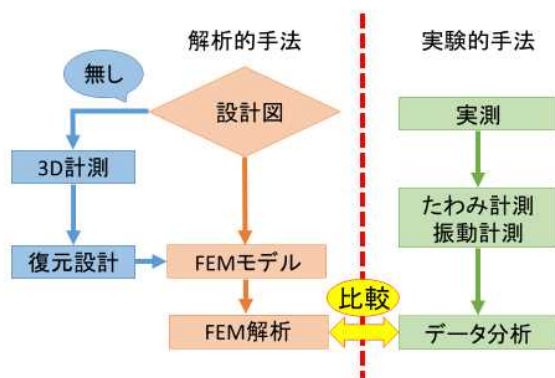


図 1.4 構造同定法

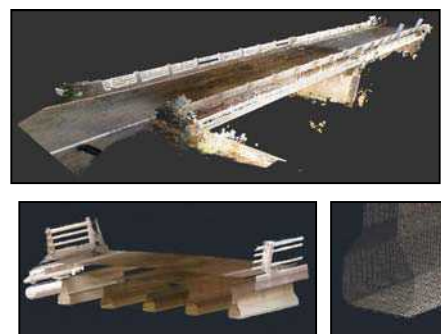


図 1.5 3D 計測データ



(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

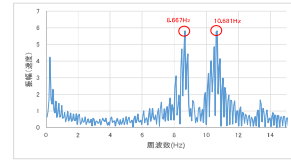


図 1.8 振動解析

表 1.1 振動モード図

	1st mode	2nd 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	8.67	7.59		0.88	10.50	8.861		0.84	2.20	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ー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、蝶型マーカーなどである。計測方法は、最初にカメラ、蝶型マーカーなど設置・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】

蝶型マーカー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 VR II 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上の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	—	—

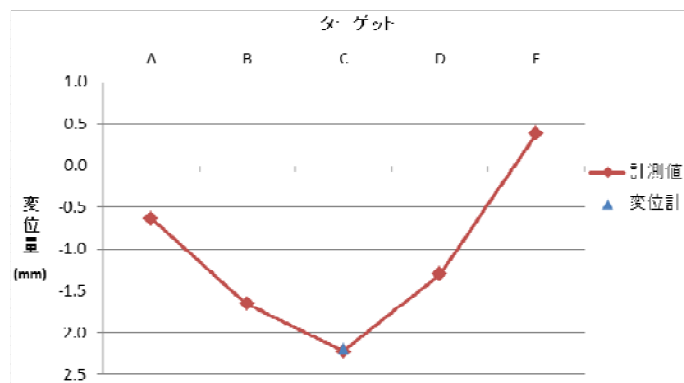


図 2.4 3 回目計測時のたわみ変位曲線(mm)

◆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。

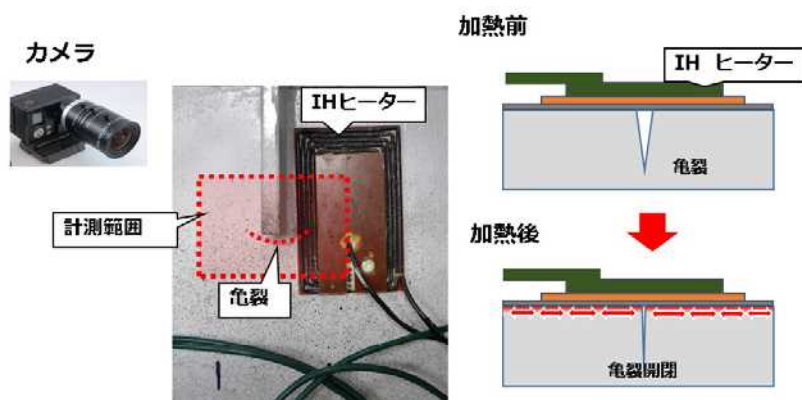


図 3.1 計測原理

【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。

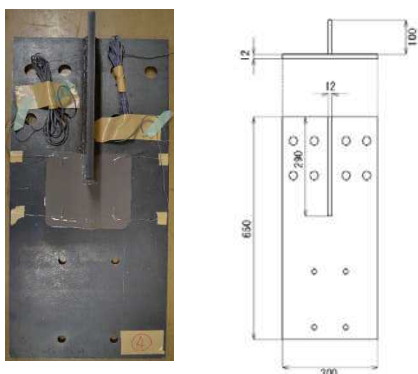


図 3.2 試験体写真・寸法

表 3.1 亀裂長さ (mm)

試験体	亀裂長さ (mm)
No.1	無
No.2	42
No.3	47
No.4	62
No.5	102

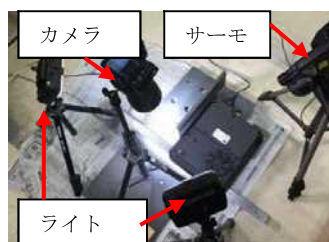
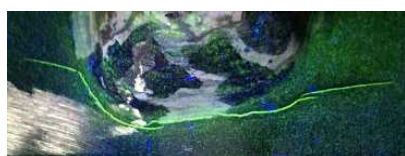


図 3.3 計測状況



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

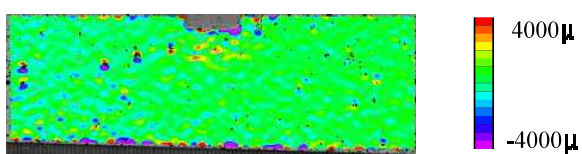


(d) No.4

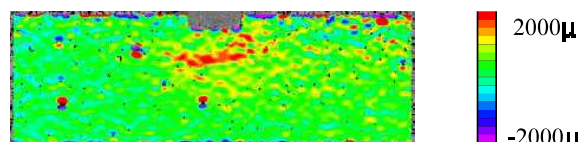


(e) No.5

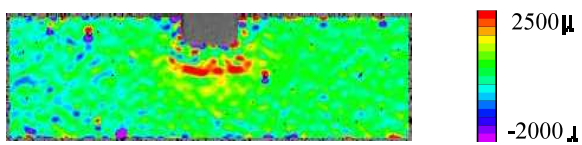
図 3.4 磁粉探傷試験結果



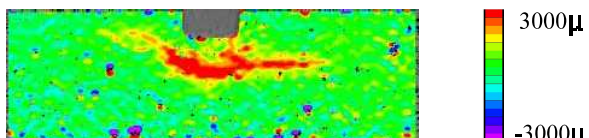
(a) No.1



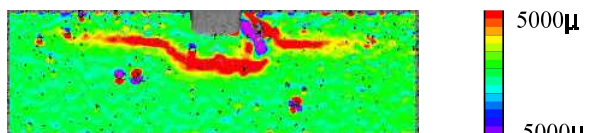
(b) No.2



(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ことが確認された。

【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。

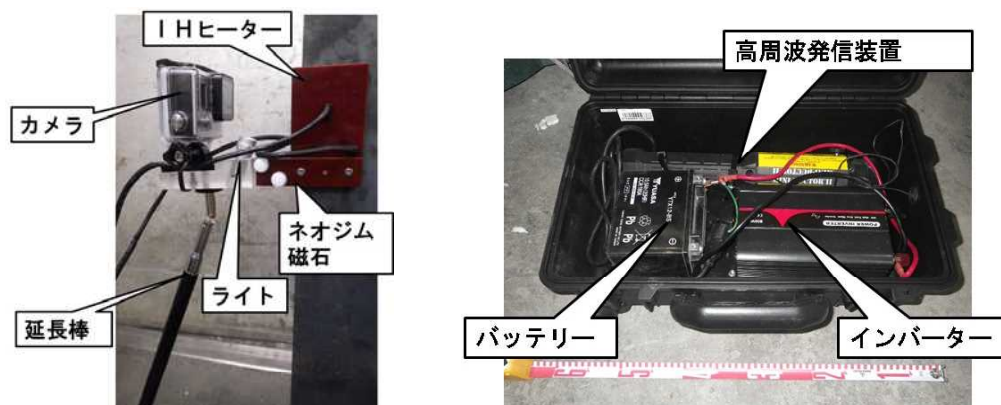


図 3.6 開発装置した装置

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
(1)Development of defect detection method of steel structures by digital image correlation method using induction heating、pp.1-2	2015.9.15-17	International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE)	AkiraDEMIZU、YukihitoITO、HiroshiMATSUDA、ChihiroMORITA、S.PaulSumiToro
(2)Experimental study on the damage and failure properties of brittle material with pre-existing double flaws under uniaxial compression、pp.1-4	2015	the International Symposium NDT-CE2015	C.Zhao、C.Bao、H.Matsuda、C.Morita
(3) インフラの長寿命化は地産地消で！～軍艦島の3Dプロジェクトで学んだこと～、pp.48-51	2016	Re	松田浩
(4)長崎県のインフラ維持管理の現状と長崎大学の道守講座、pp.41-45	2016	橋梁と基礎	松田浩、森田千尋、中村聖三、池田正樹

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、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き裂計測法の開発

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。

鋼部材のき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査が可能であることが確認できた。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、商品化を視野にいれて開発した装置の亀裂検証実験も行っていく。