

高フレームレート望遠カメラを用いた橋梁欠陥同定用たわみ分布計測システム開発及び実橋梁フィールド実証試験

Development of deflection distribution measurement system for bridge defects identification using a high frame rate telephoto camera and field verification test of actual bridges

長崎大学 教授 松田 浩

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究では、橋梁の維持管理への適用を目的として、市販の低コスト高フレームレート望遠カメラをベースとした、簡易的な橋梁の静的・動的たわみ分布計測システムを用いて、橋梁模型による欠陥同定の可能性を検討するとともに、中小スパンの実橋梁への適用性を検証する。

（実験調査によって得られた新しい知見）

（1）高フレームレート望遠カメラを用いた各種橋梁模型の載荷・振動試験

コーナークューブを用いたタンデムマーカーと高フレームレート望遠カメラを使用して静的・動的変位計測システムを開発し、各種模型の載荷・振動試験を実施し、構造物の変状箇所同定法について検証した。

- (a) スパン長 3.0m のトラス模型(図 1-a)の静的載荷試験における接触式変位計と本法による計測値のたわみ曲線を図 1-b に示す。各点の平均誤差は 0.021mm (3.3%) であった。ハンマリング振動試験結果を表 1 に示す。レーザードップラ速度計 (LDV) による計測結果とよく一致している。2 次モードは橋軸直角方向の振動モードであるためだと考えられる。トラック模型を走行させた動的試験では 200 枚/秒の写真を撮影し 15 秒間計測した。計測点 3 をレーザ変位計で計測した結果、ほぼ同じ計測結果が得られた (図 1-d)。
- (b) H 型アルミ鋼はり試験体 (スパン長 3000mm) を用いて損傷箇所同定試験を行った。損傷による剛性減の代わりに、点 2 にアルミ鋼板(100mm×42mm×3mm)を接着し剛性増の変化とした (B,D 試験体)。ハンマリング試験による LDV で計測した固有振動数を表 2-a に示す。B、C 試験体の剛性変化を固有振動数の変化として取得できるが、その変化量はごくわずかである。表 2-b はハンマリング試験による試験体 C の LDV によりと本法の計測値を比較したもので、両者はほぼ一致している。

また、電動リールを用いてトラック模型 (2kg) を 30mm/sec で走行させた。スパン中央点のたわみ時刻歴応答は、本法と LDV による計測結果はよく一致している (図 2-c)。移動荷重による試験体 C と試験体 D のたわみの時刻歴応答を図 2-d に示す。試験体 C と試験体 D のたわみの時刻歴応答値に差異が確認された。

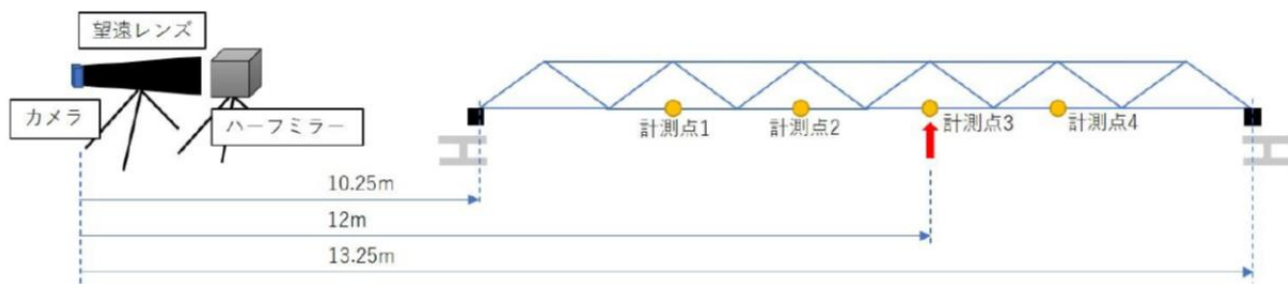


図 1-a トラス模型を用いた静的・動的実験

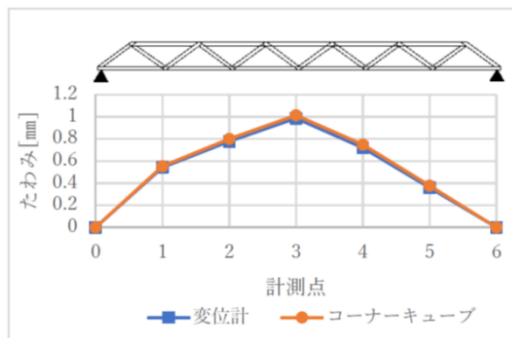


図 1-b 荷重試験によるたわみ曲線

表 1-a ハンマリング試験による固有振動数(Hz)

振動数	計測点 No.					平均	LDV	誤差率 (%)
	1	2	3	4	5			
1 次	7.67	7.67	7.71	7.76	7.71	7.70	7.63	1.0
2 次	12.84	12.89	12.89	12.84	12.89	12.87	13.85	7.1
3 次	17.24	17.29	17.29	17.24	17.24	17.27	17.39	0.7



図 1-c 走行荷重による実験

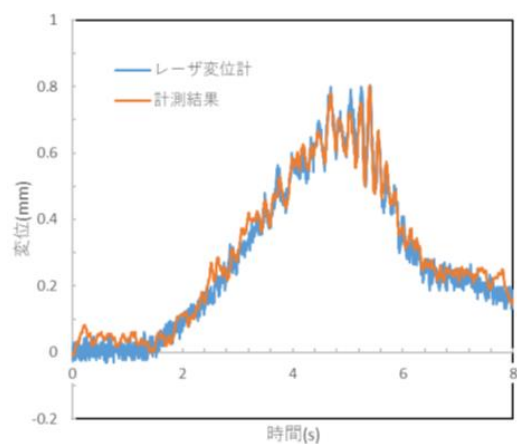
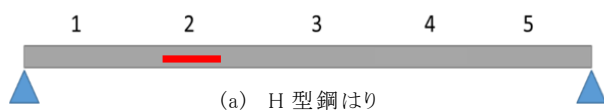


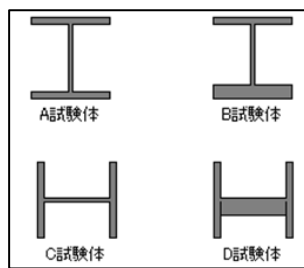
図 1-d 走行荷重による時刻歴応答のたわみ



(a) H 型鋼はり



(b) 試験概要



(c) 位置 2 の断面

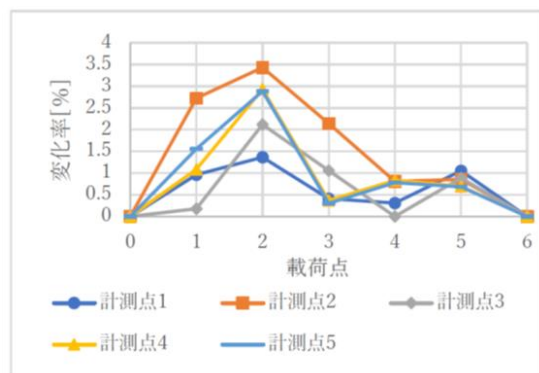


図 2-b たわみ影響線の変化率(点 1～5)

表 2-a ハンマリング振動試験 (LDV)

A	B	C	D
20.0 Hz	21.8 Hz	10.9 Hz	10.7 Hz

表 2-b ハンマリング振動試験 (C 試験体:LDV との比較)

本計測 (a)	LDV (b)	a/b
10.90 Hz	10.93 Hz	1.00

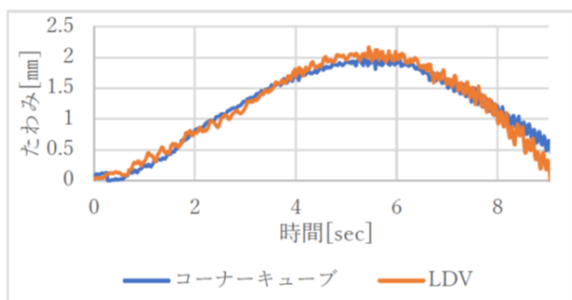


図 2-c 走行荷重によるのたわみの時刻歴応答

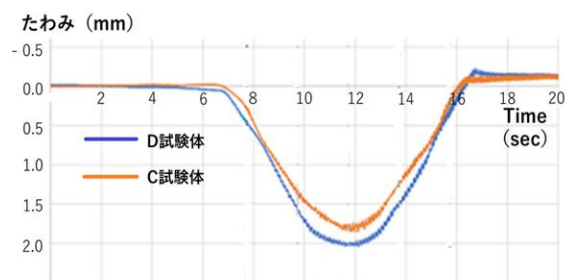


図 2-d 試験体 C,D のたわみ時刻歴応答

(c) 曲げ引張破壊をするように配筋した RC 梁の載荷試験（図 3-a）を実施した。ひび割れ発生、鉄筋降伏、終局荷重を表 3 に、載荷試験での荷重－たわみ曲線を図 3-b に示す。荷重段階ごとに除荷して、衝撃加振による振動計測を行い、ひび割れの発生・進行による固有振動数の変化を計測した。表 5 に載荷試験での各荷重段階での除荷後の固有振動数を示す。ひび割れが進行するとともに固有振動数が小さくなり、高次振動（モード 3）になるほど減少率は大きくなる（図 3-c）。

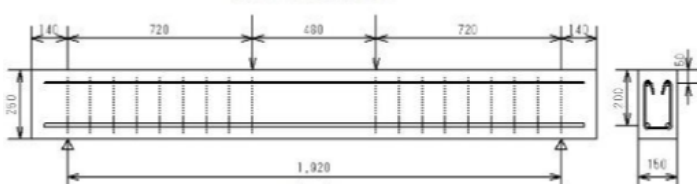


図 3-a RC 試験体

表 3-a ひび割れ発生、鉄筋降伏、終局荷重（実験と解析）

ひび割れ発生荷重 (kN)		降伏荷重* (kN)		せん断耐力 (kN)		終局荷重 (kN)	
計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
14.0	15.6	78.2	75.0	144.7	-	80.0	81.3

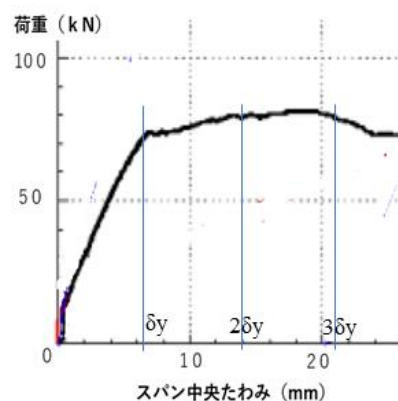


表 3-b 荷重－たわみ曲線（実験結果）

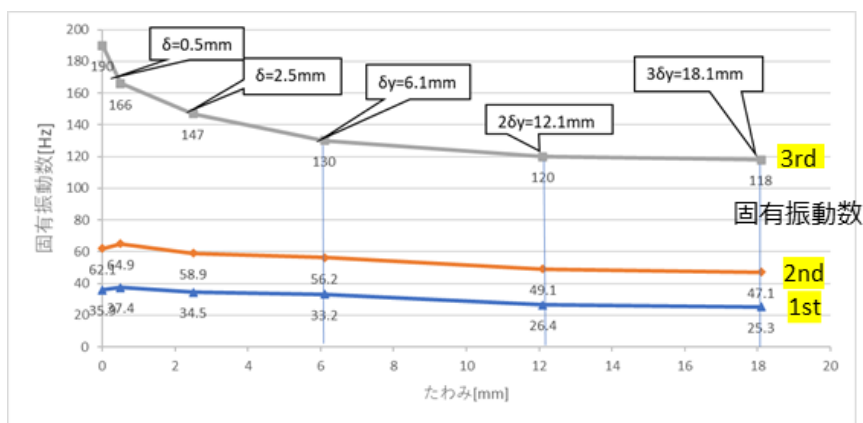


表 3-c ひび割れ発生の際の固有振動数の変化

(2) 実橋を対象としたたわみの変化率及び周波数変化率等に注目した実験及び解析

対象橋梁（A 橋）は 2 径間単純活荷重合成 H 桁橋、支間長 26.1m@2 である。まず、タンデムマーカーを使用して、1 台の高フレームレート望遠カメラを用いて橋軸方向から計測した。計測状況を図 4-a に示す。大型車両が通過した時に、大きく揺れ、実橋での動的たわみを確認できた。また、超高解像度カメラを用いることにより、より簡便に動的たわみ分布を計測できることを確認した。橋軸方向からしか計測することができない場合には、タンデム

マーカを使用した高フレームレート望遠カメラを用いた手法を、また、橋軸直角方向から橋梁全体を撮影できる場合は、超高解像度カメラを用いた計測法を使用するというように、計測環境条件に応じて使い分ける。ここでは、2 台の超高解像度カメラを用いた計測事例を示す。

図 4-b にカメラ設置位置の航空写真及び撮影環境を示す。2 台の高速高解像度カメラを橋の北川岸に

設置し同期撮影した(図 4-b)。図 4-c に撮影画像例、DIC 解析領域、 x 、 y 変位の遷移及び周波数特性を示す。大型車両通過時に約 2.92mm 変位し、面内鉛直方向において 3.02Hz 程度の振動が確認できた。

ROI 画像 (256x256) に対する DIC 計算を 64 画素おきに行うシステムを構築し、橋梁の半分を計測するカメラ 2 における大型車両通過時の橋の変位の遷移を図 4-e に示す。変位基準となる参照画像は 10 秒ごとに更新し、DIC 変位は赤色矢印で表示し、計測値を 500 倍に拡大表示している。橋全体を撮影した汎用カメラでは、通過車両を AI 検出し、通過時刻、車両長、通過速度を計測することに成功している。



図 4-a タンデムマーカを使用した高フレームレート望遠カメラを用いた手法



図 4-b カメラ設置位置の航空写真及び撮影環境



図 4-c 高速高解像度カメラ (2 台同期) の撮影画像範囲

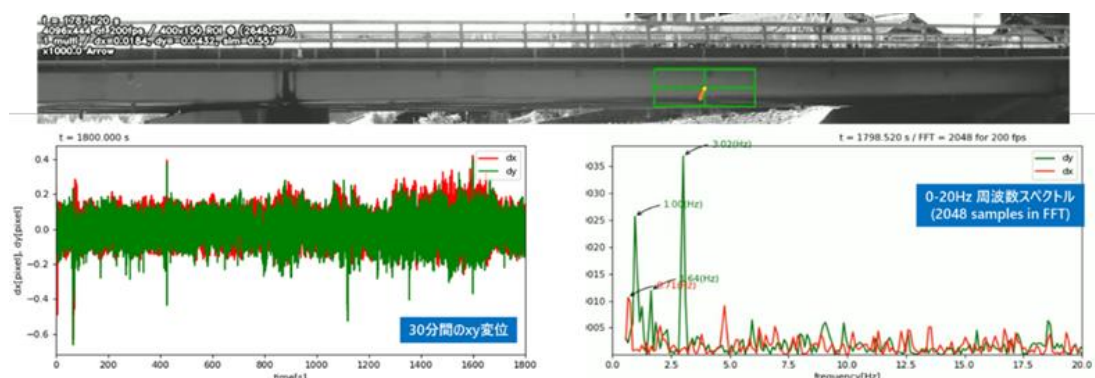


図 4-d DIC 計測による 30 分間の面内変位遷移とトラック車両通過時の周波数スペクトル

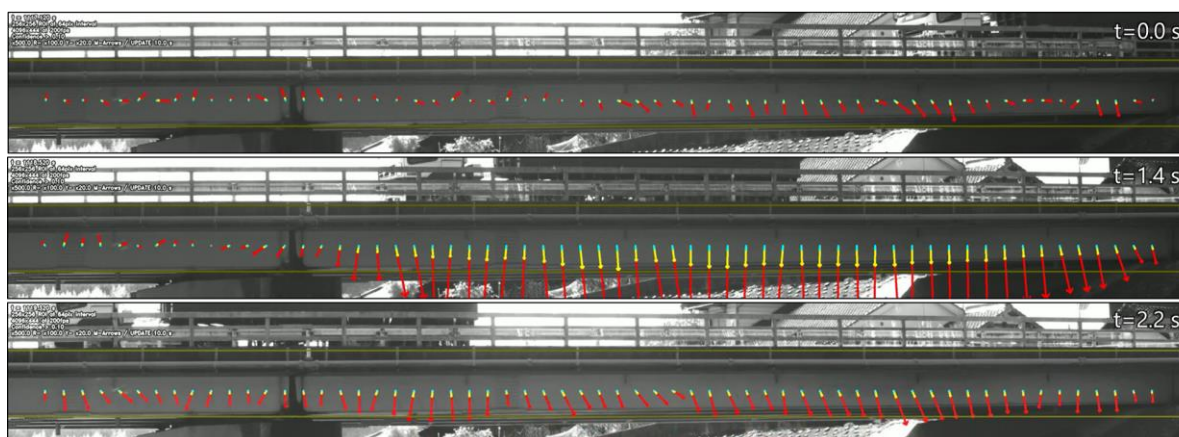


図 4 -e 複数 DIC 計測によるトラック車両通過時の面内変位の遷移（カメラ 2）

また、B 橋（図 4-f、4 径間連続非合成鋼桁橋）と C 橋（ポステン T 桁橋）を、高解像度高速カメラを用いて、DIC 振動計測を実施した。B 橋では大型車両通行時に、3.82Hz、3.90Hz とわずかなずれはあるが、橋梁の固有振動数を取得でき、C 橋では 10.43Hz を確認し、橋の構造の違いによる固有振動数変化をカメラ映像から計測することができることを確認した、

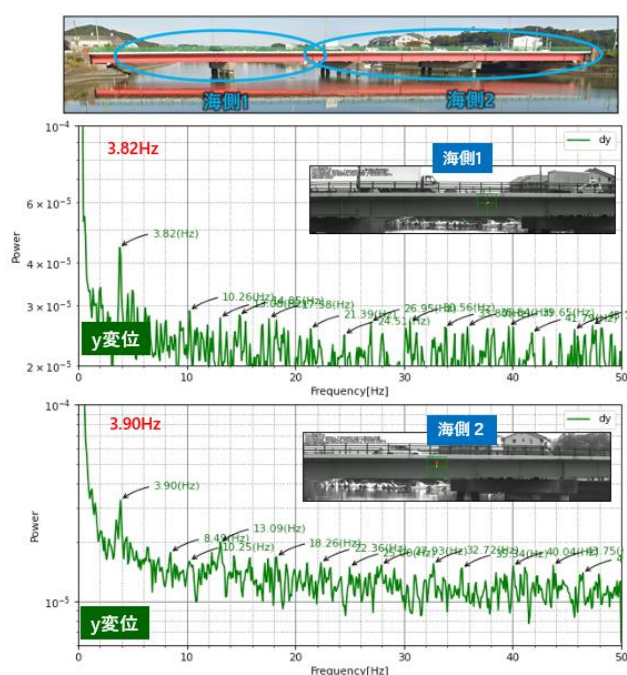


図 4 -f DIC 振動計測結果（B 橋、鋼橋）

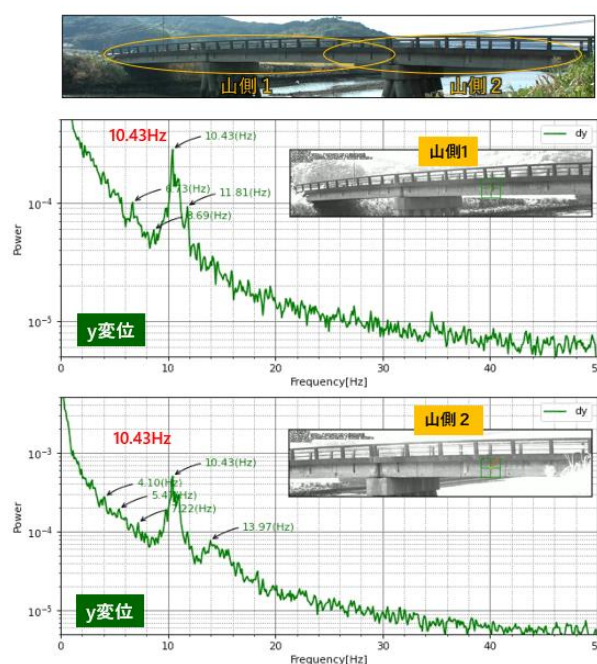


図 4 -g DIC 振動計測結果（C 橋、コンクリート橋）

（ 発 表 論 文 ）

- 1) 木本啓介，松田浩，出水享：（解説）インフラ点検の現状と新技術利用の動向-デジタル画像を用いたインフラ点検の効率化-，実験力学，Vol.21，No.2，pp.77-83，2021.6
- 2) 市川辰旺，宮濱晃一，佐々木謙二，出水享，古賀掲維，島崎航平，石井抱，松田浩：たわみ影響線及びたわみ曲線の変化率を利用した橋梁劣化箇所同定，実験力学，Vol.21，No.2，pp.97-103，2021.6
- 3) 松田浩，出水享，伊藤幸広：光学的計測法のインフラ維持管理分野への利活用，月刊ク

レーン，第 59 巻，11 号，pp.1-10，2021.11

- 4) 内田大成，松田浩，出水享，古賀掲維，石井抱，島崎航平：高フレームレートカメラを用いた橋梁のたわみ計測による劣化箇所同定に関する基礎的研究，2022 年度鋼構造年次論文報告集（投稿中）
- 5) 市川辰旺，松田浩，出水享：LDV を用いた構造物の変位・振動計測とそれによる健全度評価に関する基礎的研究，2022 年度鋼構造年次論文報告集（投稿中）