

3D計測による virtual 計測と LDV による real 計測における比較

林謙介*・松田浩**・山口浩平**・宮濱晃一*・木本啓介***

Virtual measurement by 3D measurement and LDV Comparison in real measurement

by

Kensuke HAYASHI*, Hiroshi MATSUDA**, Kohei YAMAGUCHI**,
koichi MIYAHAMA* and Keisuke KIMOTO***

In this research, we consider the possibility of restoration design by 3D measurement and the possibility of identification of structural characteristics by analytical model created with reference to 3D model, and using the latest equipment that can measure displacement and natural frequency without remote contact. We will also consider the method of measurement without using temporary scaffolding and inspection car, and in order to develop an inspection method that changes to proximity visual inspection, we will consider the possibility of identifying the location of damage using the influence line of deflection. If research is achieved, it is expected that simplification of the restoration design can be achieved in shortening the inspection time by referring to the damage status obtained by the 3D model and the influence line of the deflection even in the inspection at high places It is done.

Key words 3D laser scanner, vibration analysis, structural characteristics, structural identification, FE analysis

1. はじめに

我が国では戦後急速に道路交通網が整備され、現在では全国に約 70 万橋の橋梁が存在している。このうち、建設後 50 年を超えた橋梁の割合は 2013 年では約 20%であったが、2033 年には約 70%にも増加する見通しである¹⁾。

現在の近接目視では、損傷や腐食等の材料劣化や外觀変状が分かるのみで、「安全性」・「落橋の可能性」・「通行止めの必要性」・「補修の必要性」を明確に判断することは難しい。

また、近接目視を行う際には、足場の設置やロープ

アクセスが必要になる場合があり安全面に問題を抱えている。加えて市町村では財政難のために足場や高所作業車の手配が困難な場合がある。さらに、点検のための交通規制は経済的損失に繋がり、重要路線であれば交通規制が難しい場合もある。

このような課題に対処するために現在求められている点検・維持管理手法は、安全な作業、技量に頼らない点検及び診断法、効率的で信頼性が高く低コストな手法、リスクや必要な措置が判断できる手法、設計図書がない場合の対処法、等々である。そのための解決

平成**年**月**日受理

* 大学院工学研究科総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

** 大学院工学研究科システム科学部門 (Division of System Science)

*** 株式会社計測リサーチコンサルタント(Measurement Research Consultant Co., Ltd.)

方法として、構造特性同定を用いた性能・リスク評価が挙げられる。これは、

- ①_ 設計図書がない場合は 3D 計測、
- ②_ FEM 解析モデルの作成、
- ③_ FEM 解析、
- ④_ 実橋梁計測の実施、
- ⑤_ 解析結果と実計測結果の比較・性能評価・構造特性同定、
- ⑥_ 構造物ヘルスマonitoring、
- ⑦_ 設計荷重の載荷・照査によるリスク評価、
- ⑧_ デジタルデータベースの構築

というように図 1 に示すフローが考えられる²⁾。

ここで解析値と実測値が一致していれば、復元設計通りの構造特性であり、この場合は安全であると評価できる。一方、解析値と実測値が一致していなければ、パラメトリックな構造解析を実施し、何が原因であるかを推定する必要がある。原因追及のためにたわみの影響線の変化率を算出する。そして変化率が最大となる地点に異常があると判断できる。構造特性同定の際の固有振動数はレーザードップラー速度計(以下 LDV と略称する。図 2)を使用する。LDV は計測対象物に高反射シートを取り付け、レーザーを当てることでその入射波と反射波の波長のずれより速度を計測することができる。計測した速度を FFT 解析することで対象物の振動数を求めることができる。またたわみの影響線の算出の際の変位計測はサンプリングモアレカメラ(以下 SMC と略称する。図 3)を使用する。SMC は対象物に二次元格子シートを張り付け、カメラで撮影することで変位が生じた際に生じるモアレ縞を解析することで変位を求めることができる。以上二つの機器は構造物に直接接触ことなく遠隔非接触にて計測を行える。それに加え 3D レーザースキャナ(図 4)は、遠方からでも高精度で構造物の形状を 3 次元で計測できる。操作も単純で軽量であり、取得した 3 次元の点群データの処理についても比較的容易であることから、比較的簡便に復元設計でき、設計図書のない橋梁のリスク評価に、今後広く扱われることが予想される。

また本研究が達成されれば、高所の点検でも 3D モデルとたわみの影響線にて得られた損傷状況を参考にすることで点検の時間短縮に、復元設計の簡便化を図ることができると期待できると同時に近接目視に代わる点検手法にもなり得る可能性がある。本研究では鋼トラス橋、RC 橋の二つの橋梁にて検討を行う。

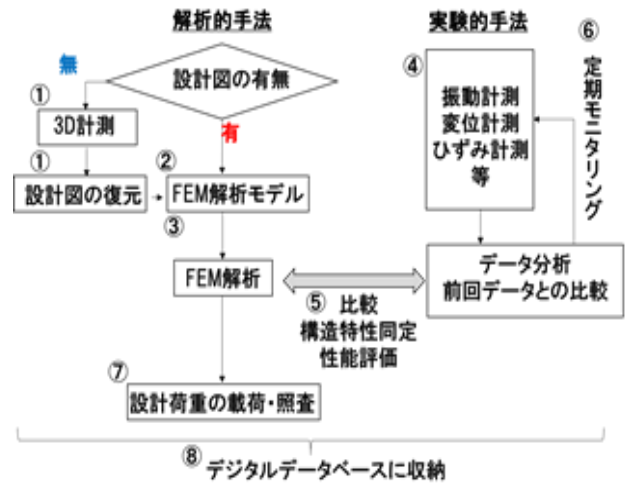


図 1 構造特性同定概要



計測可能距離	約1.0~40m
応答周波数範囲	DC~600Hz
速度出力レンジ	2×10 ⁻³ m/s/v

図2 レーザードップラー速度計



図3 サンプリングモアレカメラ



測定範囲	0.6~330m
波長	1550nm
範囲誤差	± 2mm
解像度max	70メガピクセル

図 4 3D レーザースキャナ

2. 鋼トラス橋における検討

2.1 検討概要

鋼トラス橋における検討内容を以下に示す。

- ① 3D レーザースキャナを用いて容易に復元設計が行えるか、
 - ② 振動計測を行うことで構造特性同定を行えるか、
 - ③ 解析モデルにて損傷を施し、たわみの影響線の変化率の使用し損傷個所の特定が可能であるか、
- 以上3つについて検討し、考察する。

本検討は長崎県島原市水無川に架かる旧島原鉄道の廃線区間にある単純下路トラス形式の鉄道橋を対象とする。

水無川橋の諸元および一般図を表1および図5に示す。水無川橋の設計図書は島原鉄道(株)に保管されているが、設計図書の無い橋梁の復元設計を行う場合を想定し、3D レーザースキャナを用いる。

2.2 3D計測

今回、対象橋梁のほぼすべての点群を取得できるよう、1回10分の計測を図6に示すように9回行い、全体で90分の計測を行った。

得られた点群データを図7に示す。また点群データから得られる一般図を図8に示す。計測した点群データにより、図8に示すように橋梁一般図レベルの寸法は算出することはできたが、部材厚は算出することはできなかった。したがって、本検討では島原鉄道(株)に保管されている設計図書により部材厚を決定した。なお、設計図書がない場合には、ノギス等で部材の板厚を実計測する必要がある。

2.3 振動計測

LDVは強制振動と常時微動どちらでも計測可能なため、本検討ではどちらの条件でも計測を行う。強制振動は橋中央点の横桁上面を衝撃加振し、鉛直方向の振動応答速度を計測した。サンプリング周波数は1kHzで行い固有振動数を算出する。

2.4 構造同定

(2)で得られた橋梁一般図(図8)と実計測による値から解析モデル(図9)の作成を行った。解析ソフトはEngineers Studio(forum8)、要素については弾性梁要素を使用した。本解析モデルでのFEM解析による固有振動数と実測値を、トラス橋の支持条件を固定、ピン、可動の3パターンとして、またトラス部材の部材端条件を剛結、ピンの2パターンとしてそれぞれ比較検討した。その結果を表2に示す。水平、鉛直におい

表1 水無川橋諸元

架設年	2003	斜角	無
支間長	69.2 m	支承	鋼製 (固定・可動)
主構 間隔	5.4 m	設計 活荷重	KS-12
主構高	8.5 m	形式	軌道マクラギ 直結式

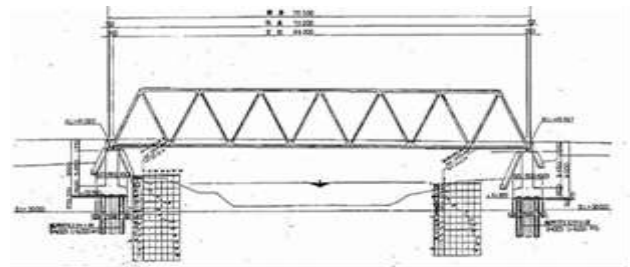


図5 水無川橋一般図

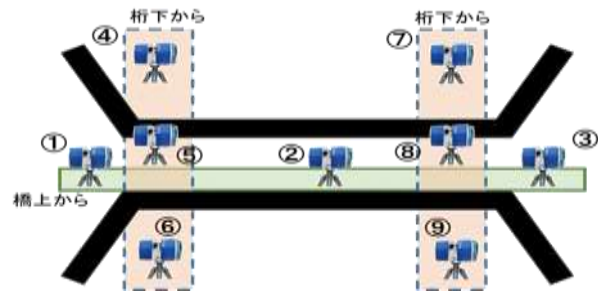


図6 3D計測概要



図7 点群データ



図8 データから得られる一般図

て固定はすべての変位と回転，可動は水平方向の変位以外を，ピンはすべての回転のみ拘束する．1～3次固有振動数では支持条件が固定/可動，部材端条件が剛結の場合が98～103%内で一致している．また支持条件がピン/可動の場合の部材端条件が剛結の場合は1次固有振動数が96%であるが，それ以外は解析値/計測値が98～101%で一致しており，支持条件が固定/可動よりも一致している．1次固有振動数は水平1次モードであり，実橋では曲げに対しても剛に拘束されているものと推測される．また，部材端条件が剛結である場合が解析値/計測値が1.00に近いのは，トラス部材の連結がボルト接合であるのでピン支持よりも剛結に近い構造となるためである．

以上の構造同定の結果から，以後の劣化評価の解析では，トラス橋の支持条件は固定/可動，部材端条件は剛結として解析を実施した．

2.5 FEM解析モデルでの損傷評価

トラス橋の部材の損傷が固有振動数に与える影響は小さいことがこれまでの研究で指摘されている²⁾．本研究では，そのことを確認するとともに，どの程度の損傷であれば固有振動数に影響を及ぼすのかを明らかにするために，損傷を有するトラス橋のFEM解析を実施した．

トラス橋の部材の損傷は，

- ①格点のボルトの破断・抜け落ち
- ②斜材連結部の破断
- ③斜材の断面欠損

を想定した．

FEM解析モデルにおいては，①では連結部を剛結合からピン結合に，②では連結部の未結合，③では部材長の5割の部分の断面積を20～80%欠損させて解析を行った．欠損率の範囲をこのように設定したのは，この範囲内であれば，固有振動数の鉛直1次モードやねじれ1次モードを0.01Hzの小さな変化値まで計測することができるからである．なお，③の損傷においては，損傷箇所は劣化が発生しやすい斜材の格点とし，断面欠損は固有振動数がより変化するトラスの両主構に設定した．

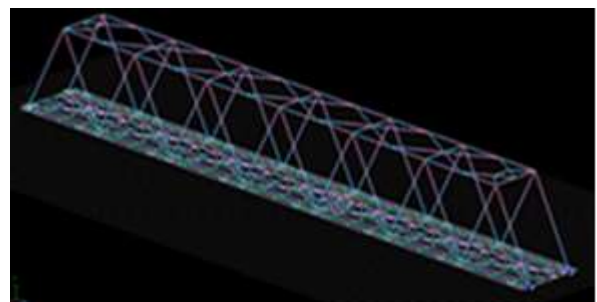


図9 解析モデル

2.6 たわみの影響線の変化率

固有振動数からは，損傷の有無を検知することが困難なことが確認できた．ここでは，たわみの影響線を利用した部材の欠損箇所の同定の可能性について検討する．

たわみの影響線を作成する過程において，載荷荷重は鉄道橋の設計荷重である180kNを，図10の節点番号1から8に，1点ずつ静的荷重を載荷して影響線を作成した．

表2 支持条件・部材端条件別固有振動数の比較

解析ケース	支持条件	主要部材	主要部材以外	1次固有振動数(Hz)			2次固有振動数(Hz)			3次固有振動数(Hz)							
				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					
1	固定/可動	剛結	剛結	2.2	2.2	100%	3.8	3.9	103%	5.7	98%						
			ピン									2.2	100%	3.9	101%	5.5	95%
		ピン	剛結									1.8	78%	3.9	102%	4.8	84%
			ピン									1.8	78%	3.8	101%	4.7	82%
2	固定/固定	剛結	剛結	2.2	2.4	107%	3.8	4.3	113%	5.7	99%						
			ピン									2.4	107%	4.2	112%	5.5	96%
		ピン	剛結									1.8	79%	4.3	113%	4.8	84%
			ピン									1.8	79%	4.2	111%	4.7	82%
3	ピン/ローラー	剛結	剛結	2.2	2.1	96%	3.8	3.9	102%	5.7	98%						
			ピン									2.1	96%	3.8	101%	5.4	95%
		ピン	剛結									1.6	73%	3.9	102%	4.8	83%
			ピン									1.6	73%	3.8	100%	4.7	81%
4	ピン/ピン	剛結	剛結	2.2	2.3	103%	4.2	111%	5.7	99%							
			ピン								2.3	103%	4.2	111%	5.5	96%	
		ピン	剛結								1.7	74%	4.3	113%	4.8	83%	
			ピン								1.7	74%	4.2	111%	4.7	82%	
		振動モード		水平1次		鉛直1次		ねじれ1次									

得られたたわみから次式(1)に基づき、断面の欠損率が20~80%の場合のたわみの変化率を算出した。

$$R_{\delta} = |(\delta_i - \delta_d) / \delta_i| \times 100 \quad (1)$$

ここに、 R_{δ} : たわみの変化率

δ_i : 健全時のたわみ

δ_d : 劣化時のたわみ

さらに、図10に示す斜材2に20%の断面欠損を想定した場合、節点2~7に荷重した場合たわみの影響線の変化率を図11に示す。図11は横軸に荷重節点、縦軸に変化率を、節点2~7の各計測点別に線を色分けして示した。例えば、一番上の青線は、荷重が2~7節点に荷重した場合の節点2のたわみの影響線の変化率を表す。同様に、次の赤線は、荷重が2~7節点に荷重した場合の節点3のたわみの影響線の変化率を表す。

この図から、斜材2に20%断面欠損がある場合には、いずれの点で計測しても、節点2のたわみの影響線の変化率がピーク値を示すことが確認できる。このことはたわみの影響線の変化率を算定することにより欠損箇所の特特定が可能であることを示唆するものである。

2.7 鋼トラス橋における検討のまとめ

本検討で得られた結論を以下にまとめて示す。

- 1) 3D レーザースキャナで取得した点群データは橋梁一般図の代用になり得る。
- 2) 振動計測を行うことで部材端条件、支承支持条件を精度よく同定できる。
- 3) 断面欠損を想定した場合、固有振動数に与える影響は小さいが、たわみの影響線の変化率に与える影響は大きいことを示した。
- 4) たわみの影響線の変化率を算定することにより、損傷の有無・程度、欠損箇所を特定することができる。

3. RC 橋における検討

3.1 検討概要

RC橋での検討内容を以下に示す。

- ① 3Dレーザースキャナにて復元設計を行い、FEM解析モデルを作成できるか。
- ② たわみの影響線の変化率を用いた損傷個所の特定方法が現場にて使用可能であるか。
- ③ SMCは現場での有効性はあるか。

以上について検討し考察する。

本検討で対象とする橋梁は桁長10600mmのRC橋ある。6径間であり第6径間のみで検討を行う。

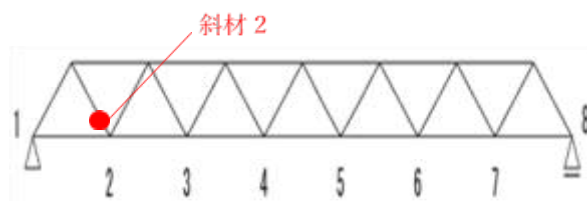


図10 損傷箇所

表3 ボルト抜け落ち・破断時の固有振動数

損傷	固有振動数(Hz)	
	鉛直1次	ねじれ1次
なし	3.90	5.64
ボルト抜け落ち	3.88	5.61
破断	2.81	3.53

表4 断面欠損による固有振動数とたわみの影響線の変化率

欠損率	鉛直1次(Hz)	ねじれ1次(Hz)	たわみの影響線の変化率(%)
健全	3.90	5.64	0
20%	3.89 (100%)	5.56 (99%)	3.8
30%	3.88 (99%)	5.55 (98%)	6.3
40%	3.87 (99%)	5.54 (98%)	9.6
50%	3.85 (99%)	5.53 (98%)	14.2
60%	3.81 (98%)	5.51 (98%)	21.1
70%	3.74 (96%)	5.48 (97%)	32.5
80%	3.63 (93%)	5.43 (96%)	55.0

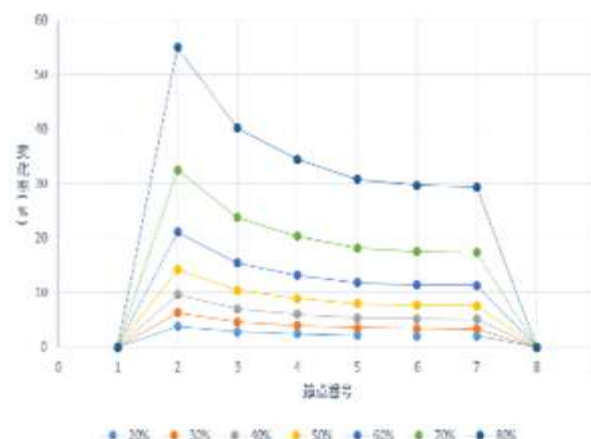


図11 節点2 荷重時たわみの影響線の変化率

3.2 変位計測

本検討ではSMCの有効性も検討するため、遠隔非接触で行えるサンプリングモアレ法と従来の変位計測法である接触式変位計を使用する。計測風景を図12に示す。今回はターゲットを約8m離れた場所からSMCにて撮影し、計測個所は第6径間中央部である。接触式変位計とSMCの計測結果を表5に示す。表5より、多少の誤差は生じたもののおおむね一致している。誤差が生じた原因として荷重し、変位が生じた際SMCを立てている堤防にも変位が生じてしまったことがSMCの計測値が、接触式のものより小さくなっていることから考えられる。しかしSMCは作業や操作性が簡易的なため、使用方法を熟考することで現場での有効性があると判断できる。



図 12 SMC 計測風景

表 5 変位計と SMC による計測値の比較

荷重位置	変位計(mm)	SMC(mm)	変位計/SMC
桁長 1/4	0.15	0.13	1.15
桁長 2/5	0.20	0.19	1.05
桁長 1/2	0.21	0.21	1
桁長 3/5	0.19	0.19	1

3.3 FEM 解析

設計図書が無い場合、解析モデルの作成は 3D 計測を行い、作成した 3D モデル(図 13)を使用し、解析モデル(図 14)を作成した。

3.4 たわみの影響線の変化率を用いた損傷検知

対象橋梁には剥離、鉄筋露出などの損傷が多々あり目視で確認すると G4、G1 桁長 1/4 に大きな鉄筋露出が見られる(図 15)。そのため、特に損傷が多い部分を特定できるか検討を行う。そして前節にて得られた解析値を損傷が生じていない状態の変位、損傷が生じた状態の変位は SMC を用いた実計測にて得られた値を使用し、たわみの影響線の変化率を算出した(図 16)。図 16 より鉄筋露出の多く存在している G4、G1 桁長 1/4 の変化率が最大となっていることがわかる。



図 13 3D モデル

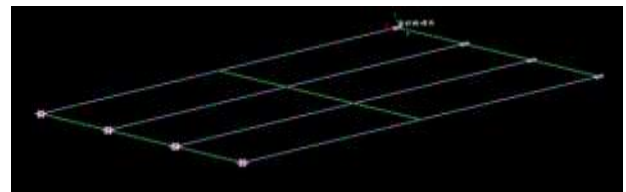


図 14 解析モデル

3.5 RC 橋における検討のまとめ

本検討で得られた結論を以下に示す。

- 1) 3D レーザースキャナで取得した点群データは橋梁一般図の代用になり得る。
- 2) たわみの影響線の変化率を算定することにより、損傷の有無・欠損箇所を特定することができる。



図 15 桁下の鉄筋露出(左 G1, 右 G4)

参考文献

- 1) 国土交通省 HP
(http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf)
- 2) たわみの影響線を利用した橋梁の劣化箇所同定の試み、武田龍國、中島章典、Nguyen Minh Hai : 土木学会平成 28 年度全国大会第 71 年次学術講演会講演概要集, I-071, 2016.9.

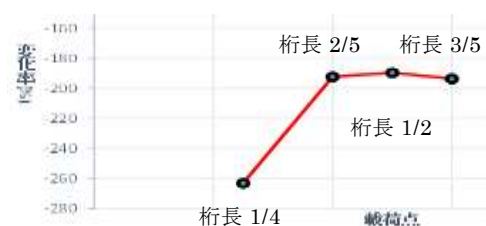


図 16 RC 橋のたわみの影響線の変化率