

橋梁復元設計に着目した 3D 計測および 数値解析の利活用について

山口浩平*・鈴木航作**・松田浩*・伊勢田幹太**

Utilization of 3D measurement and numerical analysis focusing on bridge restoration design

by

Kohei YAMAGUTI*, Kosaku SUZUKI**, Hiroshi MATSUDA* and Mikihiro ISEDA**

Recently, deterioration of infrastructure structures has become a serious problem, and it is required to efficiently maintain and renew them. However, in Japan, there are many bridges whose design documents are not available and their construction concepts are unknown. So, in this paper, the 3D measurement is carried out for the existing bridge, and the dimensional measurement is carried out using the obtained data, and cost and manpower in the drawing in the restoration design are reduced. And, three-dimensional Finite Element Method (FEM) model is made from the obtained data, and examination to the numerical simulation and numerical analysis are carried out.

Key words : 3D Measurement, Restoration Design, Bridge Maintainance

1. はじめに

1.1 研究背景

我が国では、インフラ構造物の老朽化が社会問題となっており、それらを戦略的に維持管理・更新することが求められている¹⁾。また、日本国内には設計図書もなく架設年も不明な橋梁が多数存在する。

そこで本研究では、既設橋梁において 3D 計測から得られる点群データを用いて寸法計測を行い、復元設計を行う際の図面化におけるコストや労働力の削減、数値解析の利活用を目指す。

1.2 関連研究と本研究

関連研究²⁾では、石造アーチ橋を対象として、3D レーザスキャナで計測したデータから、解析モデルを作成し、2次元 FEM が行われている。モデル作成方法は、点群データから手動で石材の境界線を定義し、モデル作

成を行っている。今後、実橋梁に対して効率的に数値解析を行うためには、解析モデル作成の効率の向上の必要がある。

そこで、本研究では、点群データを用いて 3次元 FEM モデルを作成する際に、手動による操作数を少なくして、簡易的にモデル作成を行う方法を検討する。さらに、3D 計測では鉄筋露出や剥離といった劣化および損傷を含めて橋梁を計測することが可能であるため、劣化および損傷を反映させた解析モデルより数値解析を行うことで、橋梁の劣化および損傷を含んだ残存耐力などを評価することを目的とする。

2. 3D 計測の概要

2.1 手計測と 3D 計測の比較

現在、復元設計を行う際に設計図が存在しない場合は、橋梁の写真や人手による各部位の寸法の計測(手計

平成**年**月**日受理

* 大学院システム科学部門 (Division of System Science)

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

測)により一般図を復元している。今回、実際に復元設計業務を行っている3名の方にヒアリングを行った。その結果を踏まえ、手計測による問題点とその問題点に対する3D計測の利点をTable 1に示す。ここに、同表の「寸法差を用いる計測」とは、床版厚などの直接計測できない部位の計測のことである。

2.2 3D計測システムの概要

橋梁の点群データの計測には、Photo 1に示したFARO 3Dレーザスキャナ「Focus3D X330 HDR」を用いた。3Dレーザスキャナは地理空間、大型構造物など広範囲をスキャンし、3次元座標(点群)として記録を行う非接触式計測システムである。FAROでは、位相シフト法を利用して、波長の異なる赤外線の間定常波をスキャナから外部に向けて放射し、赤外線の位相のずれを測定することによりスキャナとオブジェクトの距離を求めている。スキャナの視野は、機器本体のミラー水平方向に360°、垂直方向に300°である。

計測機器の性能は、測定範囲0.6m-330m、範囲誤差±2mm、解像度最大70メガピクセルカラーである。

3Dレーザスキャナを用いた測定の際には、計測の品質として、倍率と分解能の設定を行うことができる。倍率は、設定を大きくすることによりノイズの低減を図ることができる。分解能(データ間隔)は設定を大きくすることにより、計測点の数が増加し、点群データの密度を大きくすることができる。倍率、分解能ともに設定を大きくすると、計測時間は増加する。

3D画像の作成にはソフトウェアSCENE2018を用いた。SCENE2018は、3D点群を総合的に処理および管理するソフトウェアツールである。SCENE2018において、対象構造物に対して行った複数のスキャンを登録し、各スキャンに対して正しく配置させることで、単一の座標に複数のスキャンが整列され、3D画像を作成する。単一の座標に複数のスキャンが表示されているものをプロジェクト点群および点群データと呼ぶ。なお本稿では、これ以降、点群データと呼称する。点群データから人影や対象構造物周辺の不要な情報を削除したものを点群モデルと呼称する。

Table 1 手計測と3D計測の比較

	手計測	3D計測
高所の計測について	高所作業車が必要な場合あり	高所作業車などは不要
寸法差を用いる計測について	あり	隠れていない範囲で計測可能
記録漏れについて	記録漏れが生じる可能性あり	なし

3. 3D計測を用いた図面化

3.1 点群のトレースによる3D図面の作成方法

点群のトレースによる3D図面の作成手法(以下、作成手法A)では、点群データを背景に橋梁断面のトレースを行い、断面を押し出すことにより、3D図面を作成する。

3.2 点群を用いたサーフェス化による3D図面の作成手法

点群を用いたサーフェス化による3D図面の作成手法(以下、作成手法B)では、点群データからサーフェスの作成、メッシュ化を行い、3D図面をほぼ全自動で作成する。

4. 3D計測を用いたFEMモデル化

3D計測から得られる点群データを用いて、効率的なFEMモデル作成の可能性を検討する。

点群のトレースによる作成手法と、点群のソリッド化を利用した作成手法の2種類の作成手法を用いて、FEMモデル作成を行った。

4.1 点群のトレースによるFEMモデル作成手法

点群のトレースによるFEMモデル作成手法(以下、作成手法C)では、点群データを背景にトレースを行い、ソリッドモデルを作成する。その後、ソリッドモデルから要素を作成しFEMモデル作成を行う。

4.2 点群のソリッド化を利用したFEMモデル作成手法

点群のソリッド化を利用したFEMモデル作成手法(以下、作成手法D)では、点群データをソリッドモデルに変換し、ソリッドモデルから要素を作成し、ほぼ全自動でFEMモデルの作成を行う。

5. 橋梁および模擬試験体を対象とした計測試験概要



Photo 1 3Dレーザスキャナ

5.1 供用後 52 年経過した 2 径間単純 RCT 桁橋

5.1.1 橋梁概要

対象橋梁は、福岡県内の単純 2 径間 RCT 桁橋(以下、橋梁 A)である。橋梁 A の概要を Table 2 に示す。

5.1.2 3D 計測概要

橋梁 A において 3D 計測位置を Fig. 1 に示す。1 回約 11 分の計測を橋面上から 7 回、桁下から 7 回、合計 14 回の計測を行った。計測時間は合計約 2 時間 34 分である。3D 計測時の計測パラメータは、分解能を 1/4、倍率を×4 とした。

計測から得られた点群データを用いて、点群モデルの作成を行った。点群モデルを Fig. 2 に示す。

5.2 供用後 84 年経過した損傷の著しい 6 径間単純 RCT 桁橋

Table 2 橋梁 A の概要

架設年	1966 年	斜角	—
橋長	17.70m	支承	鋼製支承
桁下高	2.3m	総幅員	3.32m



Fig. 1 3D 計測位置



Fig. 2 橋梁 A の点群モデル

5.2.1 橋梁概要

対象橋梁は、熊本県内の損傷の著しい 6 径間単純 RCT 桁形式の歩道橋(以下、橋梁 B)である。橋梁 B の概要を Table 3 に示す。本計測では第 6 径間を対象に計測を行った。

5.2.2 3D 計測概要

橋梁 B において 3D 計測位置を Fig. 3 に示す。1 回約 5 分の計測を橋面上から 5 回、桁下から 11 回、合計 16 回の計測を行った。計測時間は合計約 1 時間 30 分である。3D 計測時の計測パラメータは、分解能を 1/8、倍率を×4 とした。

計測から得られた点群データを用いて、点群モデルの作成を行った。点群モデルを Fig. 4 に示す。

Table 3 橋梁 B の概要

架設年	1934 年	斜角	73° 14' 24"
橋長	63.60m	全幅員	8.3m
桁下高	1.8~5.8m		



Fig. 3 3D 計測位置



Fig. 4 橋梁 B の点群モデル

5.2.3 現場载荷試験概要

第6径間を対象として、現場载荷試験を行った。荷重は車両重量10tonのトラックとし、Fig. 5に示す箇所各点3回载荷し、その平均値を用いた。载荷順序は、0-D, 0-A, 0-B, 0-Cと载荷し、第5径間までトラックを移動し、除荷後、D-0, C-0, B-0, A-0と载荷した。各点3回計測後は、除荷後、1-D, 1-A, 1-B, 1-Cと载荷し、残りの箇所も同様に载荷を行った。

変位計測には、接触式変位計を使用し、ひずみ計測には、ひずみゲージを用いて計測を行った。変位、ひずみそれぞれの計測位置をFig. 6, Fig. 7に示す。

Fig. 5における3-B点に载荷したときのFig. 6における横桁の変位計の値とFig. 7における鉄筋のひずみゲージの3回の計測値をそれぞれTable 4, Table 5

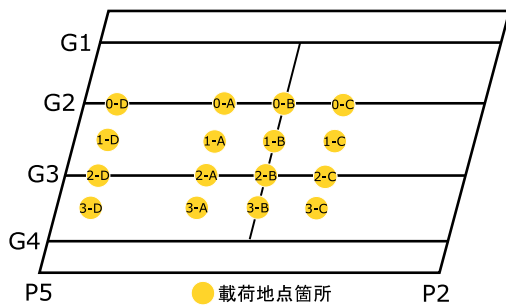


Fig. 5 現場载荷試験载荷地点箇所を示す。

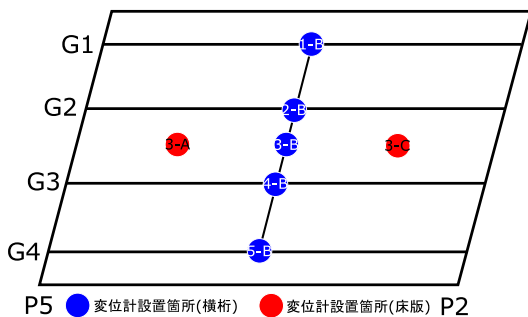


Fig. 6 変位計測位置図

Table 4 現場载荷試験での変位計の計測値

(mm)	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B
1回目	-0.06	-0.14	-0.18	-0.21	-0.27
2回目	-0.06	-0.14	-0.19	-0.23	-0.29
3回目	-0.06	-0.14	-0.19	-0.22	-0.29
平均値	-0.06	-0.14	-0.19	-0.22	-0.28

5.3 模擬試験体

計測を行った橋梁A, 橋梁Bにおいては、橋梁全体を3D点群モデル化した際に、死角となる場所をつくらぬことに十分注意して計測を行った。そのため、計測箇所が増えたことで計測時間も増加した。また、3D計測時の計測パラメータが、計測した点群の数に影響し、データ量が大きくなってしまう。本研究では、計測時間と点群の数を考慮した適切な測定距離および計測パラメータの検討を行う。

今回、模擬試験体を用いて、距離や計測パラメータが異なる3D点群モデルを作成し、模擬試験体の実寸法との比較を行った。

5.3.1 試験体概要

計測で使用した模擬試験体をPhoto 2に示す。

3辺それぞれの寸法は、縦450mm, 横128mm, 高さ325mmであり、これらの値を真値とする。模擬試験体の底面部分の3D計測は不可能であるため、高さ方向の3D計測寸法を求めることができない。したがって、今回は、縦と横における寸法比較を行う。

5.3.2 3D計測概要

計測は模擬試験体から等間隔で3か所に3Dレーザス

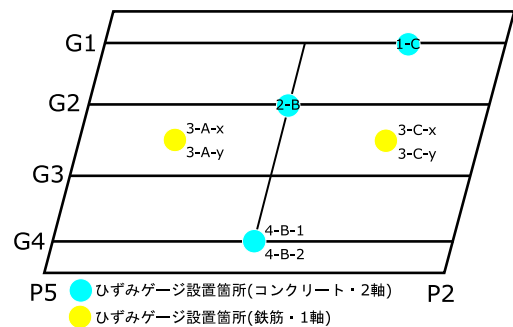


Fig. 7 ひずみゲージ貼付位置

Table 5 現場载荷試験のひずみゲージの計測値

	1-C(μ)	2-B(μ)	4-B-1(μ)	4-B-2(μ)
1回目	5	8	20	17
2回目	4	8	20	17
3回目	4	8	20	18
平均値	4	8	20	17

キャナを設置して計測を行い、測定距離を5m, 10m, 分解能を1/4, 1/5, 1/8, 1/10とする、8パターンとした。一か所あたりの計測時間は、分解能の設定

が1/4では約12分間、1/5では約9分間、1/8では約6分間、1/10では約4分間であった。

6. 結果および考察

6.1 3D計測結果を用いた寸法比較およびCADモデルの作成

6.1.1 橋梁Aについて

橋梁Aの点群モデルにおいて15カ所で上部工断面を作成し、Fig. 7に示す10カ所で寸法比較を行った。この計測値の平均値を3D計測寸法とした。

次に、作成手法A、作成手法Bを用いてCADモデルの作成を行った。前者をモデルA_A、後者をモデルA_Bと呼称する。作成したモデルをFig. 8, Fig. 9に示す。作成手法Aは、橋梁の点群モデルをもとに、手動での

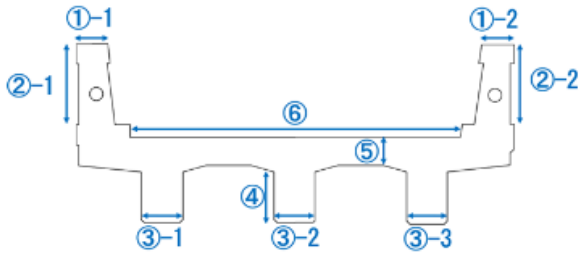


Fig. 7 上部工断面における寸法比較箇所



Photo 2 模擬試験体

トレースを行っているため、直線で構成される。一方で、作成手法Bは、点群モデルを自動でサーフェス化しているため、凹凸ができ、曲線で構成される。

CADモデルは、AutoCADを用いて断面を作成し、寸法計測が可能である。モデルA_Aは直線的であるため、寸法計測が可能であったが、モデルA_Bは曲線的であるため、断面寸法の計測は不可能であった。モデルA_Aの断面寸法を、一般図の寸法、3D計測寸法と併せて、

Table. 6に示す。

6.1.2 橋梁Bについて

橋梁Bの点群モデルにおいて9カ所で上部工断面を作成し、Fig. 10に示す10カ所で寸法比較を行った。この計測値の平均値を3D計測寸法とした。

次に、作成手法A、作成手法Bを用いてCADモデルの作成を行った。前者をモデルB_A、後者をモデルB_Bと呼称する。作成したモデルをFig. 11, Fig. 12に示

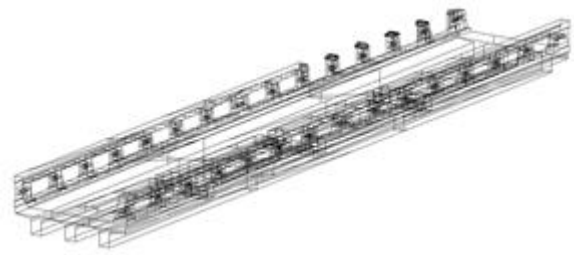


Fig. 8 モデルA_A

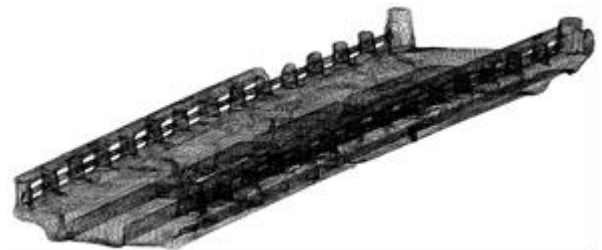


Fig. 9 モデルA_B

Table. 6 橋梁Aにおける各寸法値

計測箇所	一般図寸法 (mm)	3D計測寸法平均値 (mm)	CADモデル寸法 (mm)
①-1	250	230	2440
①-2	250	227	245
②-1	600	609	610
②-2	600	604	603
③-1	300	302	314
③-2	300	303	307
③-3	300	300	306
④	400	382	384
⑤	210	230	214
⑥	2520	2528	2500

す。橋梁Aと同様にモデルB_Bの断面は曲線的である

ため、断面寸法の計測は不可能であった。モデル B_A

の断面寸法を、一般図の寸法、3D 計測寸法と併せて、

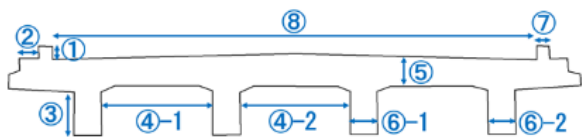


Fig. 10 上部工断面における寸法比較箇所

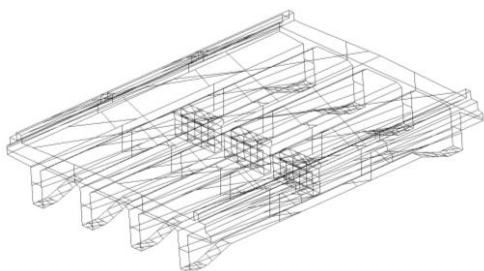


Fig. 11 モデル B_A

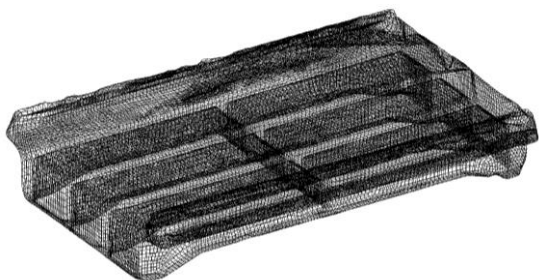


Fig. 12 モデル B_B

Table 7 橋梁 B における各寸法値

計測箇所	一般図寸法 (mm)	3D 計測寸法 平均値 (mm)	CAD モデル寸法 (mm)
①	210	168	196
②	275	233	300
③	600	631	667
④-1	1600	1598	1693
④-2	1600	1596	1673
⑤	405	442	456
⑥-1	400	410	419
⑥-2	400	398	415
⑦	200	183	190
⑧	7000	7041	7368

Table 7 に示す。

6.2 FEM モデルの作成および解析結果の一例

6.2.1 橋梁 A について

作成手法 C, および作成手法 D を用いて FEM モデル作成を行った。前者をモデル A_C, 後者をモデル A_D と呼称する。作成したモデルを Fig. 13, Fig. 14 に示す。作成したモデルは、コンクリートのみの単一材料とした。構成されている要素は 4 面体要素である。解析に用いた条件を Table 8 に示す。

これらのモデルを用いて、数値解析を行った結果の一例を Fig. 15, fig. 16 に示す。

6.2.2 橋梁 B について

橋梁 A と同様に、作成手法 C, および作成手法 D を用いて FEM モデル作成を行った。前者をモデル B_C, 後者をモデル B_D と呼称する。作成したモデルを Fig.

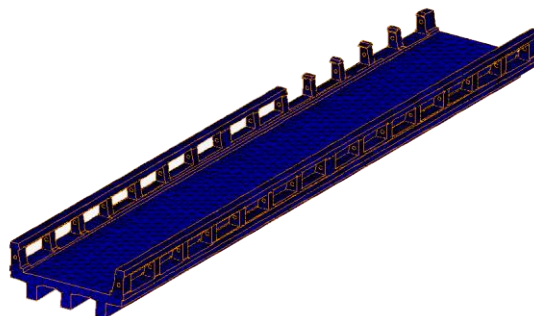


Fig. 13 モデル A_C

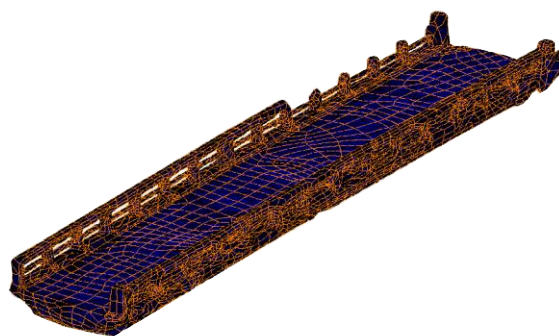


Fig. 14 モデル A_D

Table. 8 モデル作成条件

支持条件	単純支持
材料	コンクリート
ヤング率	28000 (N/mm ²)
ポアソン比	0.2

17, fig. 18 に示す. 作成したモデルは, コンクリートのみの単一材料とした. 構成されている要素は4面体要素である. 解析に用いた条件を Table 9 に示す.

数値解析を行った結果の一例を Fig. 19, Fig. 20 に示す.

6.2.3 考察

Fig. 15, Fig. 16 より橋梁 A において, 変位分布は

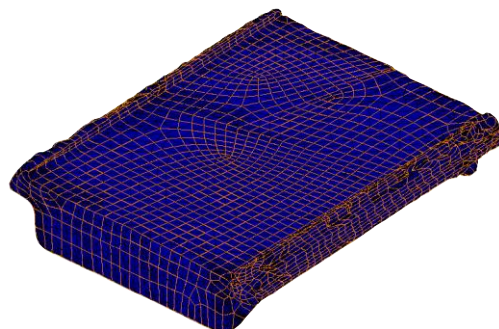


Fig. 18 モデル B_D

Table 9 モデル作成条件

支持条件	単純支持
材料	コンクリート
ヤング率	28000 (N/mm ²)
ポアソン比	0.2

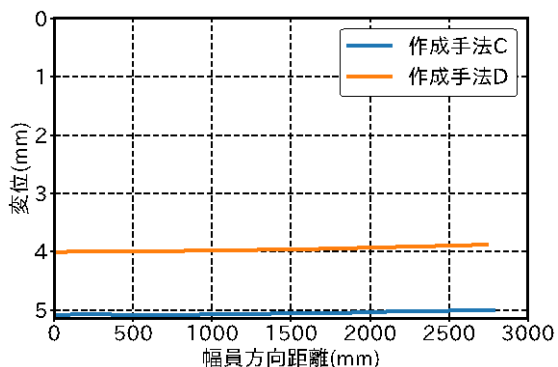


Fig. 15 橋梁 A 数値解析結果 (変位)

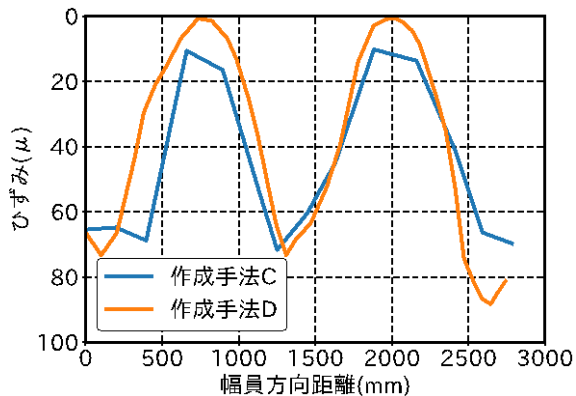


Fig. 16 橋梁 A 数値解析結果 (主桁方向ひずみ)

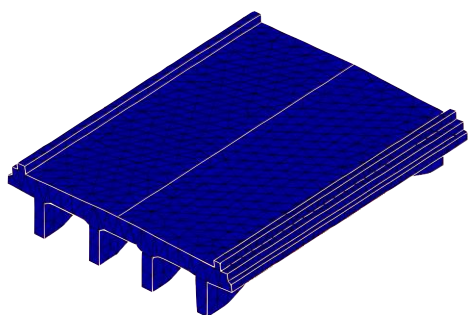


Fig. 17 モデル B_C

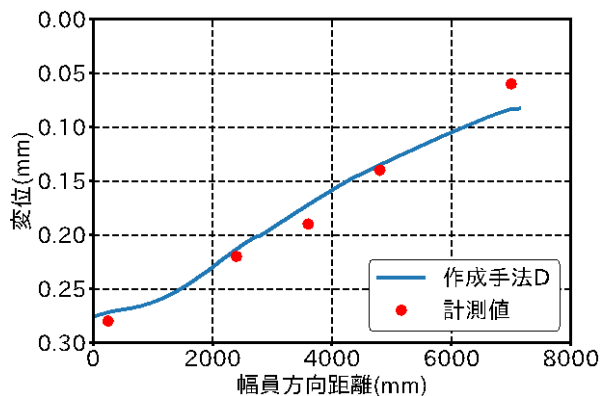


Fig. 19 橋梁 B 数値解析結果 (主桁変位)

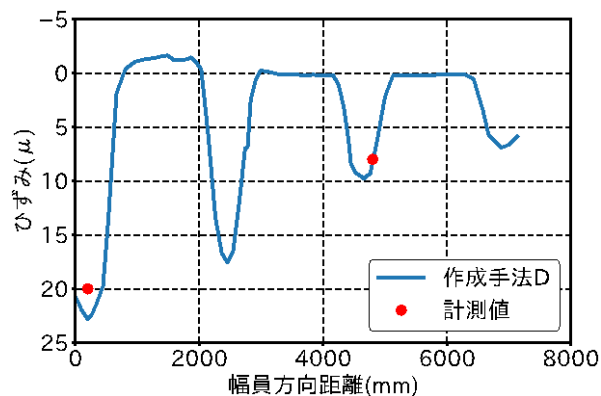


Fig. 20 橋梁 B 数値解析結果 (主桁方向ひずみ)

橋梁幅員方向に変化はないことがわかった。また、ひずみ分布は、主桁下面においてひずみの値が大きくなっていることがわかった。橋梁 A においては、欠損がないとみなせるモデル A_C の解析値が、橋梁の劣化や損傷を含むモデルであるモデル A_D の解析値よりも大きい値となった。本来であれば、欠損のあるモデル A_D の解析値の方が大きい値とならなければいけない。このような結果となった原因として、作成手法 C において、点群のトレースを行い、押し出してソリッドモデルを作成したために、モデル A_C の断面がモデル A_D の断面よりも大きくなったためと考えられる。

Fig. 19, Fig. 20 より橋梁 B において、変位とひずみの解析値と現場載荷試験の値は 0.05mm 以内の差でほぼ一致していることがわかった。よって、点群データから橋梁の鉄筋露出や剥離といった劣化および損傷を含む解析モデルを作成することが可能であることがわかった。

したがって、以上のことから、3D 計測を用いた FEM モデルの作成および数値解析の妥当性が示された。

6.3 模擬試験体を用いた適切なパラメータの検討

6.3.1 3D 計測による寸法計測結果

5.3.2 より得られた点群データから模擬試験体の縦横それぞれにおいて、計測箇所を変更し 5 回寸法計測を行った。寸法計測の結果の平均値を計測値とし、真値と計測値の寸法差、分解能、測定距離の関係を fig. 21 に示す。

6.3.2 計測パラメータの違いが計測結果に及ぼす影響

5.3.1 の結果より、測定距離については、5m のとき

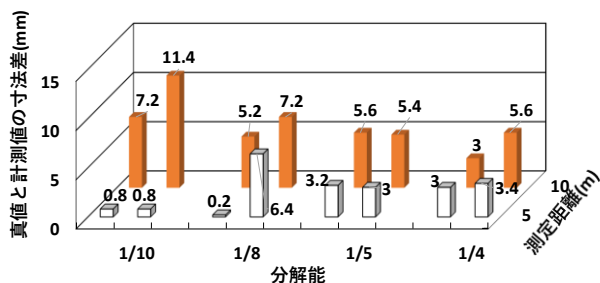


Fig. 21 分解能と計測距離が寸法差に及ぼす影響

は、分解能の違いによる寸法差が小さいことがわかった。10m のときは、分解能の違いによる寸法差が大きかった。次に分解能については、測定距離 10m では、分解能が高くなるにつれて寸法差が小さくなるという両者の相関が見られるが、測定距離 5m では、寸法差は小さいもののその相関は確認されなかった。以上より、本計測における計測時間を考慮した適切な分解能は、測定距離が 5m では、1/10 程度でも十分あるが、測定距離が 10m では 1/5 程度であることがわかった。

7. 結論と今後の展望

3D 計測寸法が、一般図の寸法と同等であることから、復元設計に用いることは妥当と考えられる。また、3D 計測により得られた点群から、CAD モデルの作成を行い、任意の平面で図面の作成が可能であることがわかった。今後、さらに効率の良い手法での図面の作成を行うために、点群から直線の抽出が可能であるか検討する。

また、点群データを用いて簡易的に FEM モデルを作成し、解析を行った。作成手法別の比較や、自動作成モデルと実験値との比較を行い、それぞれ同等の結果が得られた。現段階では、単一材料で弾性域における解析であるため、今後は鉄筋要素を含むモデルの作成方法を検討していく。

謝辞: 本研究で使用した計測機器やソフトウェアの操作に関する貴重な助言を頂いたクモノスコーポレーション株式会社の廣瀬眞理氏に心から感謝の意を表します。また、現場計測に同行、協力して頂いた株式会社コスモエンジニアリングの山根誠一氏、株式会社大進の浜田貴光氏、熊本大学の尾上幸造准教授に心から感謝いたします。

参考文献

- 国土交通省, 道路構造物の現状, 2013. 4
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
- 浅井光輝, 山下和也, 山崎礼智, 荒木和哉, 離散型有限要素モデルによる石造アーチ橋の静的・動的強度評価, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 172-180, 2009. 3