

4. 建設現場における光学的全視野計測技術の実際と将来展望

4. 1 概要

3章では、実験室レベルのコンクリート構造や鋼構造の実験において、ホログラフィ干渉計測法、電子スペックルパターン干渉計測、デジタル画像相関法などの光計測技術を基本とした測定法を用いて、変位量やひずみ量を計測し、その有用性について述べた。一方、以下に一例を示すが、現在供用されている構造物の健全度を把握するために、あるいは、建設コスト縮減を図るために、現在の計測技術を駆使して多くの計測法の提案・改良が進められている。

(1) 計測技術の活用方法（意思決定システム）

土木工学分野において計測が必要とされるのは、「長大」、「特殊」、「監視」が共通キーワードである。「長大」は長大橋、大規模構造物、大深度工事のような過去に経験がない大きさの工事の場合、「特殊」は軟弱地盤等の土構造のように理論通りにいかない、予測が困難な場合、「監視」は危険な作業環境、近接施工のように、安全と機能確保が必要な場合などに計測が必要とされる。建設構造物の施工のフローは、情報取得→情報処理→解析・評価→意思決定から構成され、建設事業における計測技術を活用した合理的な“意思決定システム”と考えられる。そのため多種多様な問題に対して、それに応じた計測技術が活用されている。

(2) 3D 測量

土木分野では必須である測量学は、近年、空間情報学へと変わりつつある。この背景には測量界における技術革新があり、3D レーザスキャナはその代表的なものである。また、最近の高解像度・低価格のデジタルカメラの普及は、各種のデジタルアーカイブ化と相互に関係し、デジタルカメラによる3D計測という分野を活性化させている。3D レーザスキャナは、レーザ光を用いて計測対象点までの距離を測距し、同時に照射角度（水平、垂直）を制御しながら計測対象点の3次元位置情報を取得するものである。構造物をスキャニングすることにより3次元デジタル座標情報を短時間で得ることができる。計測対象物の点群データを取得すれば、任意の2点間距離や面積、体積などを計算したり、任意の断面図や任意の方向からの立体画像、アニメーション画像の作成も可能である。さらに、点群データを処理してCADデータに変換し、FEM解析用のメッシュデータを作成することによって、静的・動的な応答解析も行うことができる。

(3) 鋼橋仮組立工程の3Dシミュレーション

鋼橋には、プレートガーダー橋、トラス橋、アーチ系橋、斜張橋、吊橋など様々な構造形式があり、複雑な構造への対応性、適応範囲の広さ、施工の迅速性、施工管理の容易さ、補修補強の容易さ、品質に対する信頼性などの優れた特長を有する。鋼橋の製作は、設計から加工・仮組立に至るまで、工場において製作されている。さらなる建設コスト縮減を図るために、三次元計測と3D数値シミュレーションを行うことにより、現場架設前に行われている工場での仮組立工程を省略し、省力化、工期短縮が図られている。

本章では、現在実用化されている光学的計測法の例として、橋梁やトンネルなどの道路構造物に実際に用いられているコンクリートのひび割れ検出システム、3Dレーザスキャナを用いた形状計測・維持管理システムと歴史的構造物の保存と活用への適用、3次元計測による鋼橋数値仮組立シミュレーション技術、既設コンクリート橋のメンテナンスへの適用性などについての実施事例について述べるとともに、光学的全視野計測技術についての将来展望について述べる。

(松田 浩)

4. 2 コンクリート構造物のひび割れ検出システム

4. 2. 1 概要

現在、トンネル構造物の日常点検および定期点検において、劣化状況を判断する点検方法は主に目視調査である。しかし、目視調査では測定精度、膨大な作業時間、作業コスト等多くの問題がある。そこで、現状の劣化の進行状況を正確かつ迅速に把握する手法が求められている。近年、デジタルカメラや赤外線カメラ、およびレーザー等を用いた新技術の開発が多く行われている [1]。そこで、CCD ビデオカメラを複数台用いて撮影し、展開図を作成することにより、その画像からひび割れの長さ、幅および分布状況を定量的かつ高精度に検出する方法を開発し実用化したので、そのシステムを紹介する。

4. 2. 2 事前調査

システムの流れを図-4.2.1 に示す。打ち合わせで必要なひび割れ検出幅を決定する。その検出幅の最小値から、カメラ 1 台あたりの撮影範囲（以後画角）を決め、トンネル覆工の周長に応じて、必要なカメラ台数を算出する。照明等の付帯設備がある箇所は、後の画像合成に配慮しカメラ台数を増やす等適切な対策を行う。

また、最低ひび割れ検出幅は撮影速度と関係があり、本システムの場合、0.3mm 幅を検出するためには時速 10~20km での撮影、0.5mm 幅では時速 50km と高速撮影も可能である。なお、条件が揃えば時速 5km で 0.1mm 幅のひび割れ検出も可能である。

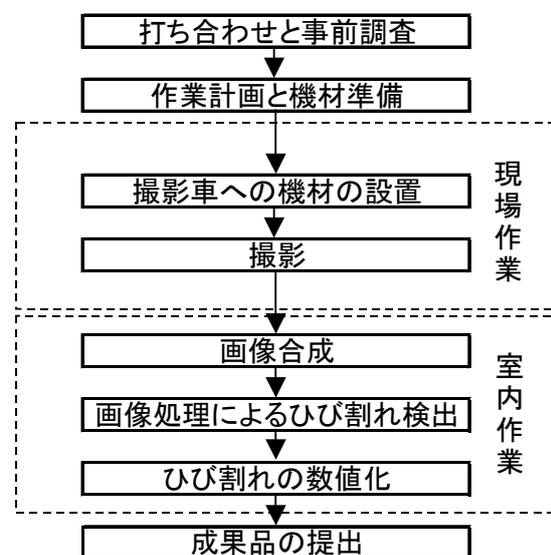


図-4. 2. 1 システムの流れ

4. 2. 3 現場作業

(1) 撮影車の機材配置

撮影は、軌道上のトンネルと自動車道上のトンネルとで使用車両が変わる。軌道上の場合は点検用トロック等に機材を設置するが、自動車道の場合は、使用機材を撮影車（4t 車）に搭載する。ここでは、自動車道の場合を説明する。搭載するものは、表-4.2.1 に示すように 3CCD デジタルビデオカメラ・照明器取り付け架台、録画装置

等の撮影に必要な機材および電源装置（発電器、電圧変換器等）である。機材の搭載状況を図-4.2.2、図-4.2.3 にカメラの撮影範囲を示す。なお、この図は 2 車線の場合である。

表-4. 2. 1 主要機材の仕様

| 名称 | 仕様(単位:mm) |
|------------|--|
| デジタルビデオカメラ | 画素数:3CCD 34万画素(有効画素) 寸法:93×112×193 重量:900g |
| 照明器 | 消費電力:1kW 寸法:290×213×195 定格電圧:100V 重量:2.3kg |
| デジタル録画装置 | 記録方式:DV-CAM 寸法:221×44×250 記録時間:3時間(max) 重量:5.8kg |
| 発電器 | 出力:20kVA/台 寸法:600×600×700 重量:580kg/台 |

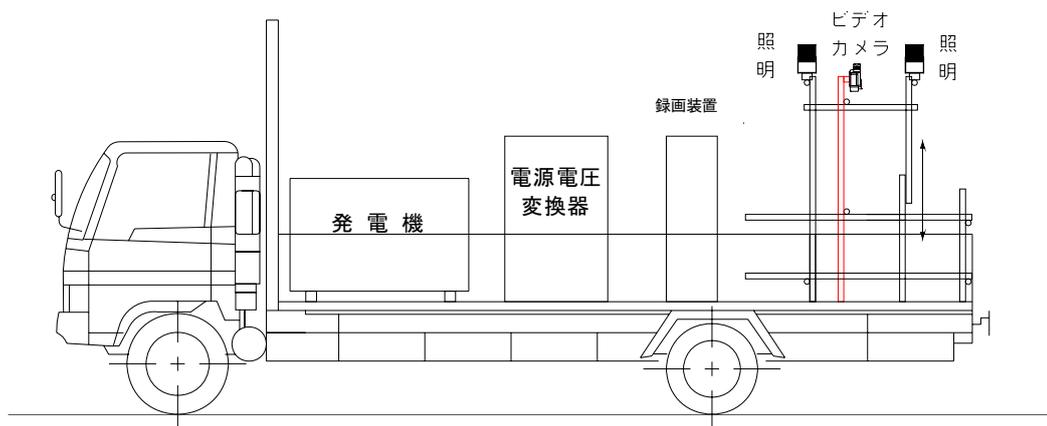


図-4.2.2 撮影車の機材搭載状況

(2) 撮影

① 道路規制

撮影は、道路規制との兼ね合いで、その速度とトンネル内でのキャリブレーションの有無が決まる。

車線規制の場合、トンネル内で停止可能であるため、高所作業車による画角・焦点調整用寸法テープの貼り付けを行う。その後、撮影車をテープの下に移動させ画角・焦点の調整、および、ひび割れ幅検出のためのキャリブレーションを行う。撮影速度は時速5～10kmと低速で行う。

移動規制の場合、撮影車の他に後尾警戒車を伴い停止せずに走行する。この場合、トンネル内での画角・焦点調整が出来ないことから、インター等の安全な場所で画角・焦点の調整を独自の方法を用いて行う。写真-2.1.1に撮影状況を示す。

② 車線変更に伴う装置の回転

車線が2車線の場合、全断面の覆工面を2回に分けて撮影を行う。1回目の走行で半断面を撮影し、2回目で残りの半断面を撮影する。対面式通行の場合は、撮影架台は移動させずにそのまま使用できるが、2車線通行の場合、架台の向きを変更する必要がある。従来、この変更には2時間以上必要であったが、図-4.2.3に示すような回転可能な架台を使用することで、変更に伴う時間が1時間程度と大幅に時間短縮となった。

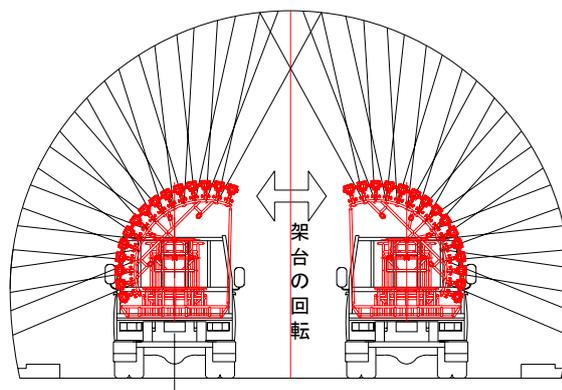


図-4.2.3 カメラの撮影範囲



写真-2.1.1 撮影状況

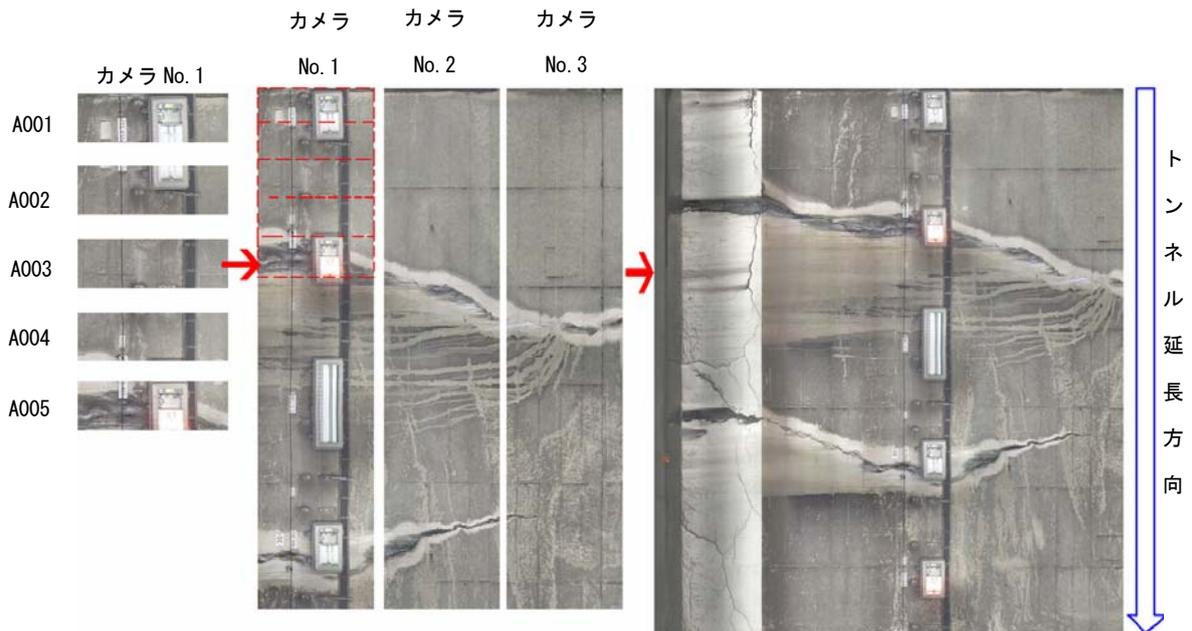


図-4.2.4 画像合成のイメージ図

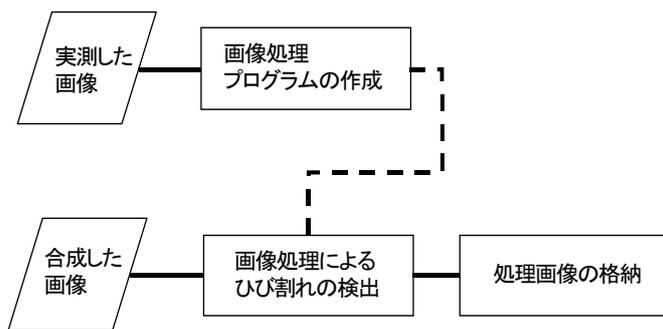


図-4.2.5 ひび割れの検出過程

4.2.3 室内作業

(1) 画像合成

展開画像の作成方法を以下に示す。

- ①現地で撮影した動画を静止画像へ変換する。
- ②カメラと被写体との角度により生じる静止画像のあおりの補正を行う。
- ③静止画像を合成し、トンネル延長方向の画像を作成する。図-4.2.4 に画像合成のイメージ図を示す。

4.2.4 画像処理によるひび割れ検出

ひび割れの検出過程を図-4.2.5 に示す。実測したひび割れの画像をもとに、画像処理プログラムを作成し、ひび割れ検出用のパラメーターを作成する。これを展開画像に適用し、ひび割れを幅毎に自動で色分けする。ひび割れ検出した画像を図-4.2.6 に示す。この画像処理を行うことで、個人差の生じやすいひび割れ幅の判定を、一律の基準で判定することが可能となった。

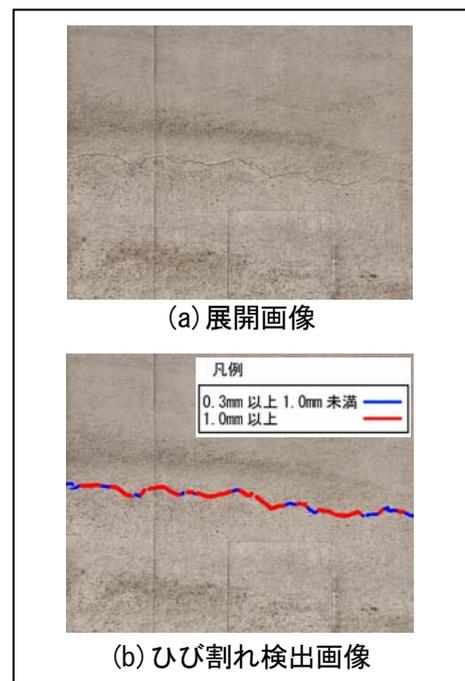


図-4.2.6 ひび割れ検出

4.2.5 ひび割れの数値化

検出したひび割れ情報は座標値を持つため、この値を Excel シートに出力することができる。また、近年では Crack Draw21 (変状展開図支援ソフト) [2]を用いることで、図-4.2.7、図-4.2.8 に示すように、展開画像を連続で閲覧でき、ひび割れ情報も表で管理することができる。

4.2.6 目視点検とひび割れ検出システムとの比較

図-4.2.9 に目視点検とひび割れ検出システムとの比較を示す。従来の点検方法である目視点検と比較すると、およそトンネル延長が 500m 以上の場合に経済的にも有効であり [3]、点検期間においても展開図の作成まで含めると、当システムの方が有効であることがわかる。また、費用以外の面でも以下に示すような利点がある。

- ・ 高速撮影と画像処理の高速化により、省人化、省力化等が図られる。
- ・ 鮮明で詳細なカラー画像が記録されるので、ひび割れを含む各種の外観変状や覆工面の付帯設備の腐食、ボルト欠損等が確認できる。
- ・ ひび割れの幅、長さおよび密度等が定量的に把握でき、ひび割れの経年変化が比較できる。

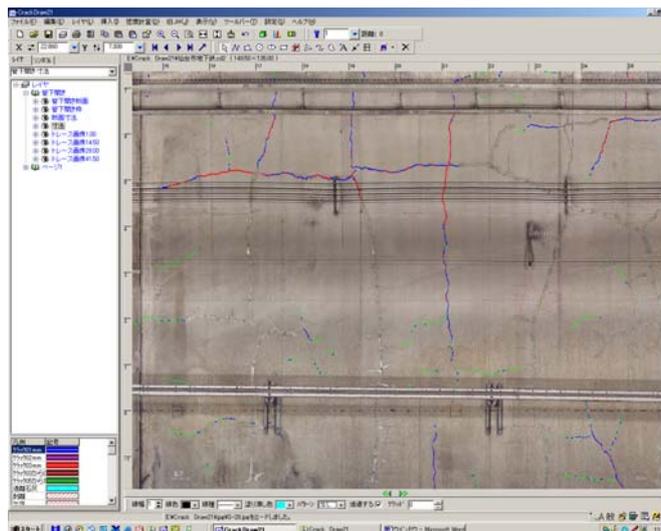


図-4.2.7 Crack Draw21 に入力した展開画像

| 番号 | 調査日 | 凡例 | 始点距離 | 終点距離 | 延長 | 面積 |
|------|------------|-----------|-------|-------|------|------|
| A003 | 2003/11/20 | クラック3mm未満 | 36.66 | 40.97 | 5.19 | 0.00 |
| A004 | 2003/11/20 | クラック3mm未満 | 44.52 | 49.87 | 5.35 | 0.00 |

図-4.2.8 Crack Draw21 でのデータ一覧

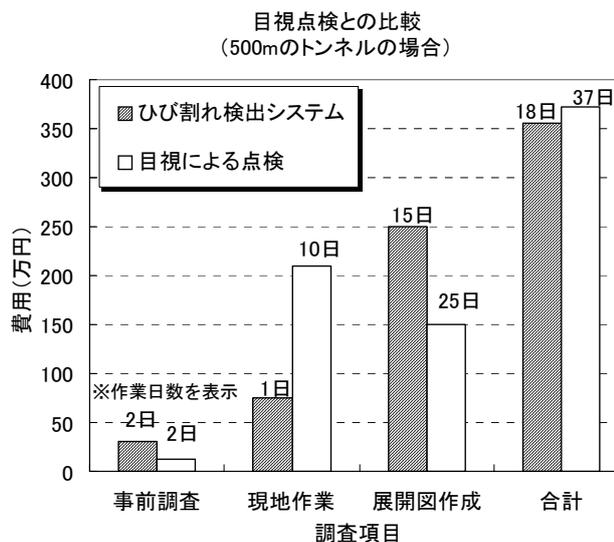


図-4.2.9 目視点検とひび割れ検出システムとの比較

<参考文献>

- [1] 猪熊明：現場技術者のためのトンネル維持管理の実際、pp14、山海堂、2004
- [2] Crack Draw21 (クラックドロー21)、NETIS新技術情報提供システム、登録No.HR-030010、<http://www.kangi.ktr.mlit.go.jp/RenewNetis/NewIndex.asp>
- [3] コンクリート構造物の損傷・劣化検出システム、NETIS新技術情報提供システム、登録No.QS-020025、<http://www.kangi.ktr.mlit.go.jp/RenewNetis/NewIndex.asp>

レーザースキャナを使用した建築物の計測例を以下に示す。
計測対象物（建築物）にデータ合成用ターゲットを設置し、3Dレーザースキャナにより複数箇所から3次元計測を行った。このとき、建築物の外観計測には長距離型（Optech社 ILRIS-3D）、室内計測には近距離型（IQvolution社 IQSun）の3Dレーザースキャナを使用した。



図-4.3.5 外観測定状況

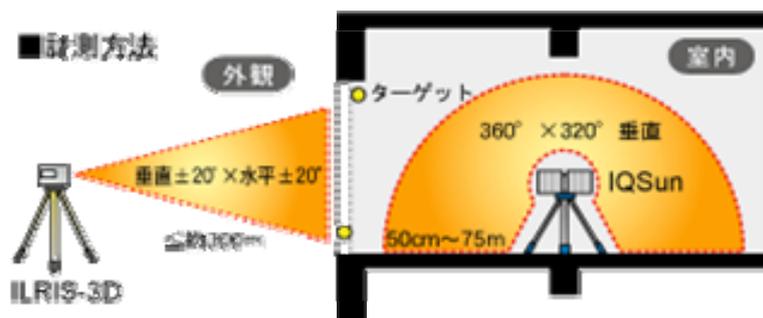


図-4.3.4 測定状況模式図



図-4.3.6 室内測定状況

外観計測、室内計測とも、現場において複数箇所から取得した3次元計測データを合成し、計測対象物（建築物）の3Dモデルを構築し、柱寸法や壁厚などを計測し、平面図、室内展開図、断面図等を作成する。

作成した図面と既存の設計図、及びメジャー実測と比較検証を行った結果、ほぼ正確な寸法値が得られ、有効性が確認された。また、これらの結果から、各種の検討が可能となる。

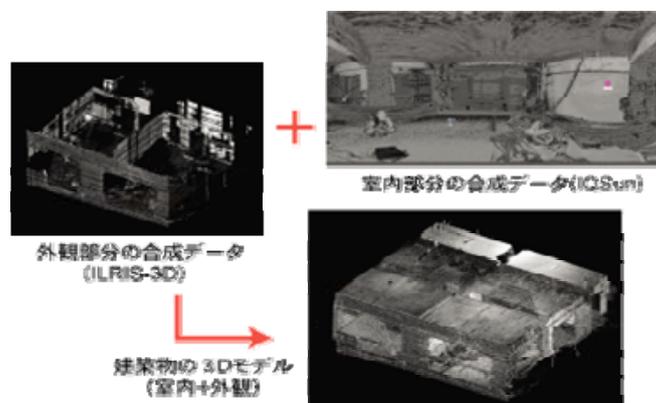


図-4.3.7 3Dモデル作成

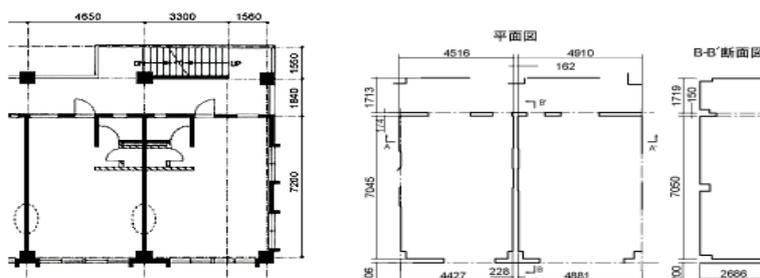


図-4.3.8 既存設計図面と計測結果比較図

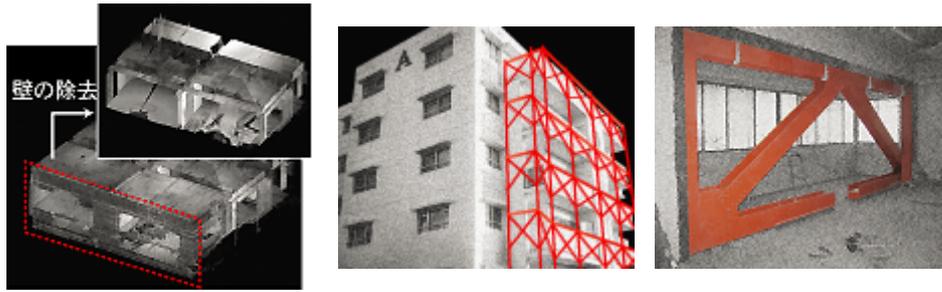


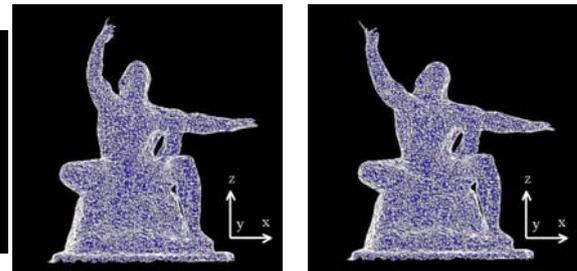
図-4.3.9 構造検討

また、3D レーザースキャナにより得られた 3D モデルを振動応答解析に使用した例を以下に示す。解析に際しては、長崎市の平和記念像をレーザースキャナにより測定し、得られた点群データから、3次元のサーフェイスモデルを構築し、固有振動解析を実施した。その結果、3D レーザースキャナによる計測は簡便にかつ短時間で行うことができること。また、これまで FE モデル化には膨大な時間と労力が必要であったが、三次元計測データから直接 FE メッシュを作成する手法を用いることにより構造物の FE モデル化が簡易化されることなどを確認した。

作成したサーフェイスデータは表面のみのデータであるため、STL ファイルへと変換することにより、有限要素汎用コード MARC のプリポストプロセッサである MENTAT を用いて容易に入力することができ、FE モデルを作成することができる。ここで、必要があれば内部にテトラ要素を構築することでソリッドデータを作成することも可能である。



(a) 点群 (b) ワイヤフレーム (c) サーフェイス
図-4.3.10 三次元幾何モデル(三次元写真)計測



1次モード 3次モード
図-4.3.11 振動モード図

STL ファイルは各点の座標と面における法線ベクトルの情報を有しているため、面の方向が確定し、点群の座標データを有し、形状データと等価な情報を有する。

作成したFEモデルを図-4.3.10示す。また、平和祈念像は青銅で建造されているため、解析には青銅の構成則（弾性係数： 1.1×10^5 MPa，ポアソン比：0.385，引張強度：130MPa）を用いた。境界条件としては、台座部分を完全固定とした。なお、3Dレーザースキャナで直接得られる計測点数は約 30 万点と膨大な点群データであるため、三次元写真計測データ数と同程度にまで低減させて固有振動解析を行い、三次元写真計測手法の計測および解析精度の検討を行った。なお、要素数を減少させたことによる解析精度についても検討を行った。解析結果を右表に示す。両者の固有振動数はよく一致していることが確認でき、三次元写真計測は高精度の計測が可能である 3Dレーザースキャナと同等の計測精度を有していることを確認できた。また、

表-4.3.1 固有振動数比較 (Hz)

| | 1次 | 2次 | 3次 | 4次 |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| レーザースキャナ (要素数：610415) | 3.60 (1.00) | 5.10 (1.00) | 9.02 (1.00) | 9.36 (1.00) |
| レーザースキャナ (要素数：17101) | 3.47 (0.96) | 5.07 (0.99) | 8.94 (0.99) | 9.34 (0.99) |
| 写真計測 (要素数：18176) | 3.35 (0.93) | 4.96 (0.97) | 8.80 (0.98) | 9.30 (0.99) |

要素数の多少に対しても同様の解析結果を得ることができた。

以上示した2例では、レーザースキャナによる3次元形状計測から、構造物の構造検討に対して有効に利用可能であることと、3次元の写真測量よりも高精度のデータが短時間に取得可能であること。また、構造物の解析に際して、FEモデル化が簡易化出来るとともに、精度よく解析できる結果が示され、3Dレーザによる形状測定の有用性を示すものと考えられる。

4.3.2 維持管理システムへの適用

3Dレーザースキャナにより得られる構造物の形状計測では、構造物の構造変更などの検討や構造解析に対して十分な精度を有していると考えられるため、維持管理システムへの適用も可能と考えられる。

下図は、3Dレーザースキャナの活用が適用可能と推定される分野を示したものであるが、構造物表面の座標を短時間に膨大な量のデータを取得可能であるという特徴から、トンネルやのり面、あるいは、土留め壁や盛土の変位を計測することにより施工中から完成後までの安定性を検証する情報化施工分野や斜面防災に関する分野においては、従来型の計測が点での計測であるのに対して、面的に管理できることから非常に有効であると考えられる。ただし、現状では、得られた膨大な量のデータを自動判別して、事前データと比較し、異常を検知するまでのシステムは構築されていないため、今後のソフト・ハード両面での発展が待たれる。

一方、構造物の座標データを定期的にチェックすることで健全性を判断し、必要な措置を検討する分野である文化財や維持管理の分野では、現状でのデータを取得し、完成時と比較することが非常に重要であり、このデータをデータベース化することで効率的な管理計画の作成に有効に利用可能と考えられる。



図-4.3.12 3Dレーザースキャナの活用分野

光学的全視野計測を用いた維持管理用データベース



図-4.3.13 維持管理システムのイメージ

維持管理システムへの具体的な適用方法としては、以下に示すような方法が考えられる。
維持管理システムは、

- 座標管理システム（任意の位置の座標、属性データベース）
- 情報管理システム（調査結果、補修履歴のデータベース）
- 文献管理システム（設計図書、位置、資料等のデータベース）
- オリジナル記録（調査段階毎のオルソ画像、素材情報等のデータベース）

により構築する。

まず、現状での座標を取得し、点群データを座標管理システムに属性のデータとともに収録する。

各種の調査結果や文献、図面、オルソ画像は情報管理システム、文献管理システムおよびオリジナル記録システムに収録しておき、座標管理システムにおいて任意の点を指定したときに必要な情報が取り出せるシステムを基本とする。これらのシステムは、それぞれが有機的に機能し、どれかのシステムの情報から、他のシステムの情報を表示させることが可能なものとし、調査年次による変化を対比できるシステムとする。

このようなシステムを構築することにより、3次元座標を基本とした維持管理システムが構築可能であると考えられる。

(高橋 洋一)

4. 4 歴史的建造物の保存と活用への適用

4. 4. 1 概要

文化庁では、平成9年度より「マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究」を実施し、文化財建造物の保存・活用について、近年急速な進展を見せているマルチメディア技術の利用方法について調査研究を行っている。平成14年度調査研究では、特に3Dレーザ技術について、文化財建造物保存修理への応用の可能性を探るものであった。調査は、重要文化財虹潤橋（大分県大野郡野津町・三重町）、重要文化財歎喜院聖天堂（埼玉県妻沼町）の彫刻、重要文化財旧熊谷家住宅（島根県大田市）の解体部材等について3Dレーザ技術による実測を行い、それぞれ、大規模石造アーチ橋の実測図面、複雑な彫刻の彩色見取図のための基礎図面、民家の復原考察をとまなう現状変更資料などを作製し、3Dレーザとその周辺技術の文化財保存分野における活用の可能性について検討した。筆者はこの調査研究に携わるとともに、現在はJST研究事業「三次元情報解析技術等の応用による文化財建造物保存・修理の高度支援システムの開発」を推進している。先ず調査研究の概要について紹介したうえで、今後の文化財建造物の保存と活用への適用・将来展望について述べる。

4. 4. 2 平成14年マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究の概要[1]

(1) 調査研究フロー

調査研究のフローを以下に示す。(図-4.4.1)

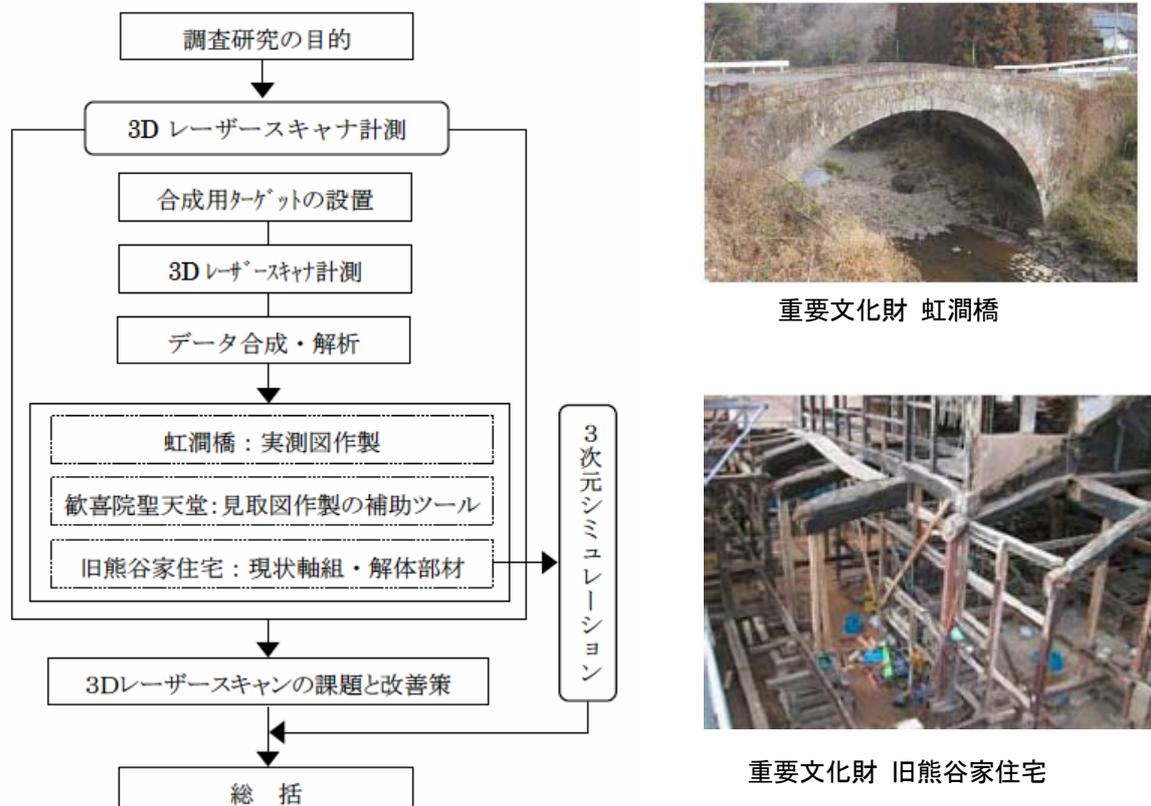


図-4.4.1 平成14年マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究のフロー

(2) 重要文化財 虹澗橋

① 調査概要

重要文化財虹澗橋は、文政7年(1824年)に架橋された大分を代表する石造アーチ橋である(橋長:31.0m、橋幅:6.5m、拱矢:11.2m、径間:25.2m、環厚80cm)。今回調査は、修理前の虹澗橋の実測図作製、及び3Dレーザースキャンによって取得可能な情報の確認を目的として実施した。調査フローを図-4.4.2に示す。

② 計測結果

合成データより、アーチ部円弧半径の推定(半径12.7m)、石材の形状・大きさ・組み方の把握、5mm程度のクラック形状や石材表面のわれの識別等が可能であることが分かった。部材表面仕上げの状況については確認できなかった。

③ 実測図の作製

3Dレーザースキャナによる解析結果を基に実測図(平面図、側面図、断面図、アーチ展開図)の作製を行った。石材形状のエッジ抽出処理を行うが、エッジが明確なものにはトレースを行い、明確でないものは、別途デジタルカメラで撮影した正射投影画像(以下オルソ画像)とポリゴン(面)化処理を行ったデータを合成し、その上からCAD上でトレースする。それら抽出した石材形状を実測図としてCAD出力した。(図-4.4.3)

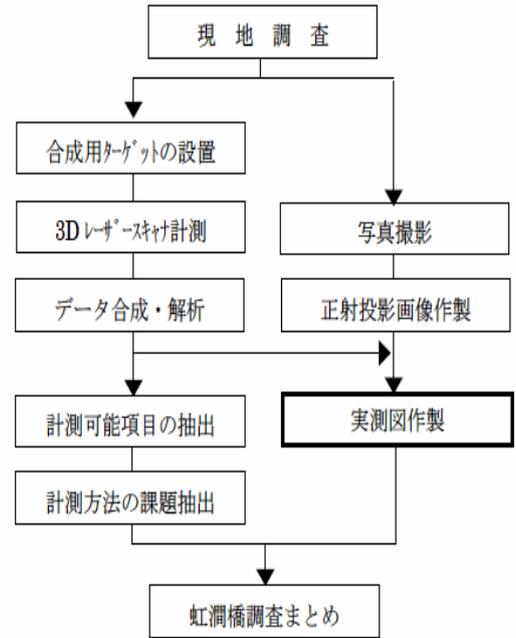
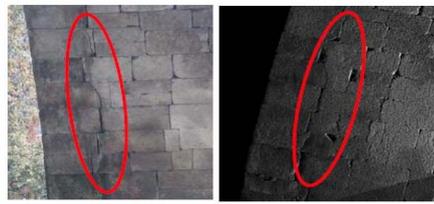
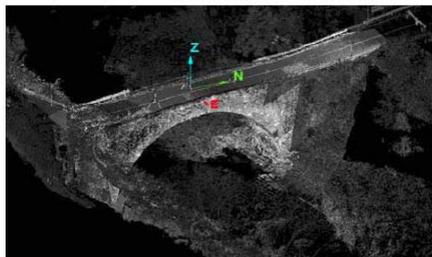


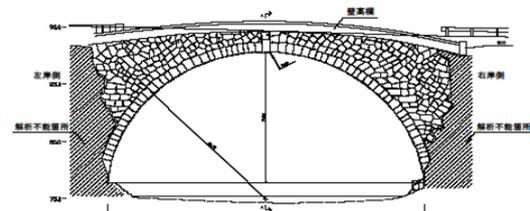
図-4.4.2 虹澗橋調査フロー



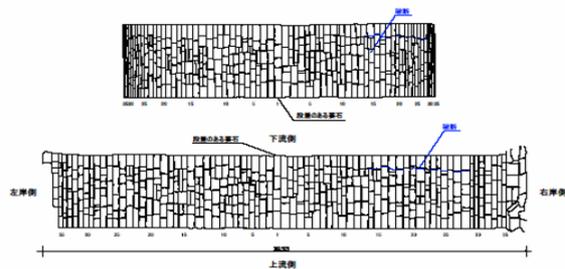
実写(写真) 3Dレーザースキャン計測結果
b)クラック形状識別の検証結果
3Dレーザースキャン計測結果の検証



3Dレーザースキャン計測結果(虹澗橋全体)



虹澗橋側面図



虹澗橋アーチ展開図
(上:見上図、下:展開図)

図-4.4.3 重要文化財 虹澗橋調査成果結果(一部)

④ 実測図作製への利用可能性の検討

・遠隔地からの計測が可能のため、足場仮設が不要となり、現地測量を大幅に簡略化・省略化できた。結果、経済性、安全性への効果が大きい。正確で客観的なデータを取得できた。

(3) 重要文化財旧熊谷家住宅

① 調査概要

旧熊谷家住宅は、島根県大田市大森銀山伝統的建造物群保存地区で、最大級の規模を誇る町家である。1998年に重要文化財に指定されたが、老朽化が著しいため、国、県、同市が修復事業に着手し、旧熊谷家住宅の最も繁栄していた時期にあたる江戸末期から明治初期の姿に復原する旨の現状変更許可申請が文化庁に提出された。今回調査では、その現状変更検討資料の一部をデジタル技術で作成することを試みた。まず現状軸組、及び転用材（形状、仕口等）について3Dレーザを用いて計測し、現状のデジタル情報取得を行う。計測結果を基に、3DCADやCG等を用いながら、現状変更申請に伴う復原考察のプレゼンテーションにいかに応用できるか検討を行う。これについて下記紹介する。（尚石見銀山遺跡は、世界遺産登録に向けて様々な活動が展開されている。）

② 3次元シミュレーションの概要

文化財建造物の現状変更を行う際の現状変更許可申請書は、文章、図面等を中心に構成されており、専門知識を持たない一般者には理解しがたい現状にある。現状変更について、その調査報告及び考察を基に、写真、3Dレーザスキャナ計測データ、3DCG等による動画等のマルチメディア技術により現状変更箇所（根拠も含む）を可視化し、初心者にも理解できる3次元シミュレーションを制作した。

③ 3次元シミュレーションの実施

3次元シミュレーションを行うにあたっては、現状変更内容が複雑であるため、現場担当者や有識者と打ち合わせを密に行い、内容を把握しながら制作を進めていった。制作フロー、及び3次元シミュレーションの画面を図-4.4.4に示す。

(4) 総括

今回調査では、3Dレーザスキャナを用いて、3次元的に形状を記録した。この方法は不整形な形状のものがあるがままに認識するためには最良のものと考えられる。またこれ以外にも、正射投影画像（オルソ画像）の貼付け、3DCADを使用したデータ欠落部分の補足等を行い、不足データの補完を施している。

これら諸技法を駆使することによってかなりの成果が得られた。現段階では、機器精度・計測方法等に課題が残るが、今後、精度が向上し、計測方法が確立すれば、この技術を用いることで、より正確な3次元データを収集することが可能になるだろう。結果、文化財建造物の保存活用において、今まで文字、図面、模型等でしか表現できなかったものが、仮想空間上に再現できるようになり、様々な活用が可能となると考えられる。

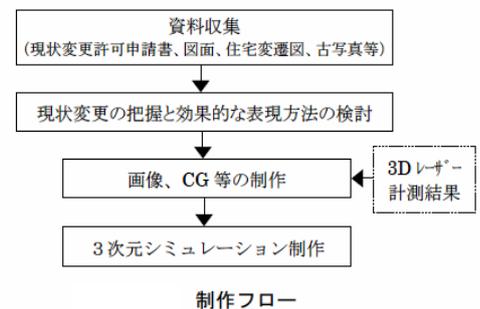


図-4.4.4 重要文化財旧熊谷家住宅
3次元シミュレーション

4.4.3 文化財保存調査におけるマルチメディア技術の可能性

マルチメディアを支える技術の柱となるのが、文字、画像、音声などを組み合わせて一元的に扱えるようにするコンピュータの技術である。とりわけ CG 関連のハードウェアやソフトウェアの急速な普及と高性能化により、高度なグラフィック処理機能が、汎用性パソコンで利用可能となり、3次元表現が試みられている。3D レーザスキャナで取得した膨大なデータの3次元可視化は、文化財関係者の判断を補助し、現場作業を大幅に省力化できる他、プレゼンテーション用などの説明補助システムとして利用できる。また、電子データ化、データベース化やコンピュータ関連技術の相乗効果から、文化財の調査から設計・施工監理等の情報の最適化が可能となる。

文化財の保存活用について、デジタル情報の利活用という観点から、3D レーザスキャナ、データベース、CG等のマルチメディア技術の現段階における技術レベルを整理し、3次元デジタル情報の将来における可能性について概観する。

4.4.4 文化財保存活用における現段階のマルチメディア技術

(1) デジタル情報取得技術 <3D レーザ><デジタル写真測量>

文化財の調査では、現状の形状データ等、情報取得の段階から測量データや画像をデジタル化することが重要である。デジタル化がもたらす効果は、作業の効率化、省力化および客観的な計測データ収集のほかに、情報の管理や公開などに展開できる点である。現在、主なデジタル情報取得技術として、デジタルカメラ、3D レーザスキャナ、デジタル写真測量がある。

(2) 情報の一元管理技術 <データベース>

調査により出土した遺物、写真、報告書などをはじめとした膨大なデータを、必要な時に利用するために、効率よく管理することが必要となっている。GIS 技術とデータベースを組み合わせることにより、情報を地図・図面上で視覚的に把握しながら、データを一元管理することが可能となる。これにより、効率化、データ管理の高度化、研究活動の強化等の効果が得られると考えられ、またこれらのデータをもとに、市民への情報公開を行うことが可能となる。また、近年では GIS の空間データと VR の表示技術を活用した 3次元 GIS が注目されている。

(3) 情報の可視化技術 <3DCG 技術>

CG 技術の近年の技術革新はめざましく、見る事のできない物を可視化して表現できるという CG の特性から、遺跡、建造物の復元等において活用されている。作成された CG は、主に関係者等に対する工事説明や、情報開示に利用されているが、今後はミュージアム展示などにも積極的に活用されると思われる。また調査で用いた 3D レーザスキャナ取得データによる CG は、現状の精密な再現が可能であるため、現場の仮設計画等に対して利用ができるものとする。

通常、このようなデータの CG 化を行っているのは、主に CG の専門家である。今後は、建築史の専門家がどのような形でこの作業に関わっていくのが課題であり、双方の分野に関する専門知識を兼ね備えた技術者の養成が必要となる。

(4) 情報開示技術 <WEB (インターネット) 技術>

現在、文化財分野をはじめ、あらゆる分野において、地域住民や関係者に対する情報開示（説明責任）や合意形成が不可欠となっている。実際に、町並みに関する審議会などで、地域住民に建造物の歴史性、地域性を説明するためには、画像情報、復元図などはすでに必要不可欠な存在となっている。インターネットによる情報開示では、専門的技術や広範・膨大な検討資料をいかにわかりやすく、正確に伝達するかが重要であり、適切な表現方法を検討していく必要がある。

4.4.4 現状情報取得におけるデータ活用の可能性[1][2]

3D レーザスキャナにより取得された建造物の精緻な 3 次元情報は、平面図、立面図、断面図等、各種実測図面（当初の寸法計画を反映した図面）作製の一助となる。また、3D レーザスキャナは現状をありのままに記録するため、実測図というより破損図面（建物の破損を表現・記録した図面）を作製することが可能となる。文化財の保存・修復工事における 3 次元情報の活用は、専門性の高い工事の理解深度を深め、効率化・省力化への効果が得られるものとする。以下に、データ活用方法として有効な項目を挙げる。

(1) 仮設計画の検討

大規模建造物の仮設計画策定において、事前に地形、建造物の形状が把握できれば、仮想空間上で仮設物の計画が立てられる。

(2) 現状変更内容の説明

詳細な説明は今まで通りの資料を使用することとなるが、マルチメディア技術を補助的に使用することで、視覚的に理解しやすくなる。変更箇所において幾通りかのシミュレーションを試みる際にはかなりの効果を発揮する。また、その後、工事内容を収集することで、マルチメディア技術を駆使した情報公開や展示が可能となり、一般の人々に修理事業の内容を知っていただくことができよう。

(3) 構造補強の検討

最近では、建造物修理と並行して耐震診断を行い、診断結果に基づいた構造補強を施すということが必須となっている。建物補強の際には、用途だけでなく建造物の持つ文化財的価値を見極めなければならず、建造物ごとに個別に補強方法を策定する必要がある。この際 3DCG によるシミュレーションを活用すれば、容易に補強内容を理解することができるようになる。また、補強検討の際に作製した 3 次元軸組図は、その後多様に活用することができる。

(4) 破損状況の検討

現状をあるがままに図面化できる特徴を利用して、破損状況の検討に活用することができる。手測りで建物の正確な不同沈下・倒れ・折れ曲がりを計測することは困難であり、その後の図化作業にも大部の時間を費やす必要があった。

(5) 3次元 GIS による工事情報管理

文化財の保存・修復工事では、書類、図面、写真などをはじめとした膨大なデータを必要な時に利用するために、効率よく管理することが必要となっている。3次元 GIS 技術とデータベースを組み合わせることにより、情報を 3D モデル上で視覚的に把握しながら、データを一元管理する。

4.4.5 情報公開・展示におけるデータ活用の可能性

文化財の情報公開にあたっては、最近ではインターネットを活用し、コンピュータを通して仮想的に文化財に触れてもらう方法が広がっているが、やはり基本は、文化財を展示会・博物館等で実際にそのままの姿で見ってもらうことである。しかし、文化財の種別や性質、また人々の興味関心や理解の度合いによっては、文化財をそのまま見せるだけでなく、必要な解説を加えるなどの配慮をきめ細かく行うことが求められる。いずれにせよ、人々が現場へ足を運びたいような仕組みが必要である。

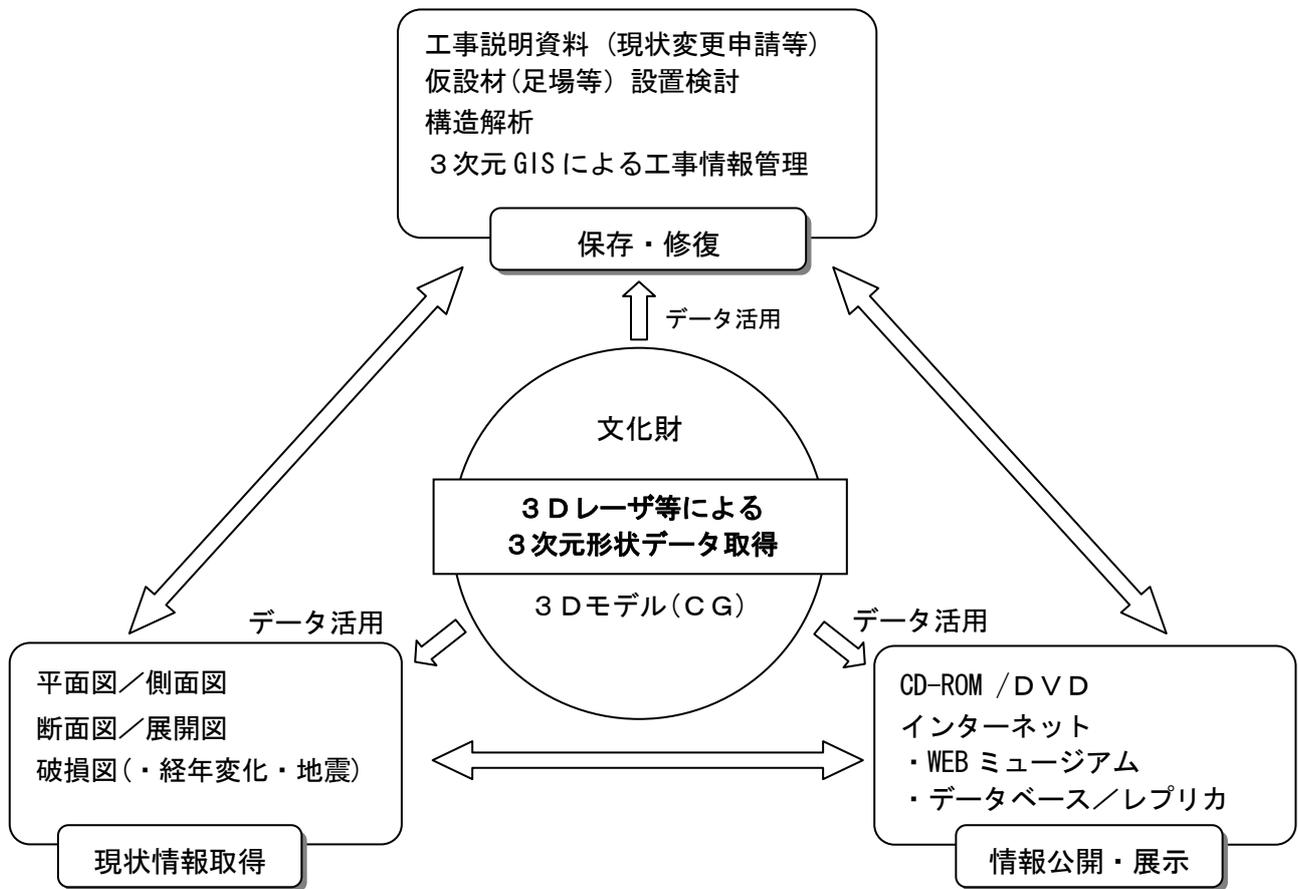


図-4.4.5 文化財保存活用における3次元デジタル情報の将来への可能性

<参考文献>

- [1]文化庁 文化財部 建造物課：マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究、2002
- [2]NISHIMURA：Digital Information Utilization on Preservation Management of Cultural Properties, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Greece, pp.434 - 439, 2002

(西村 正三)

4. 4 歴史的建造物の保存と活用への適用

4. 4. 1 概要

文化庁では、平成9年度より「マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究」を実施し、文化財建造物の保存・活用について、近年急速な進展を見せているマルチメディア技術の利用方法について調査研究を行っている。平成14年度調査研究では、特に3Dレーザ技術について、文化財建造物保存修理への応用の可能性を探るものであった。調査は、重要文化財虹潤橋（大分県大野郡野津町・三重町）、重要文化財歎喜院聖天堂（埼玉県妻沼町）の彫刻、重要文化財旧熊谷家住宅（島根県大田市）の解体部材等について3Dレーザ技術による実測を行い、それぞれ、大規模石造アーチ橋の実測図面、複雑な彫刻の彩色見取図のための基礎図面、民家の復原考察をとまなう現状変更資料などを作製し、3Dレーザとその周辺技術の文化財保存分野における活用の可能性について検討した。筆者はこの調査研究に携わるとともに、現在はJST研究事業「三次元情報解析技術等の応用による文化財建造物保存・修理の高度支援システムの開発」を推進している。先ず調査研究の概要について紹介したうえで、今後の文化財建造物の保存と活用への適用・将来展望について述べる。

4. 4. 2 平成14年マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究の概要[1]

(1) 調査研究フロー

調査研究のフローを以下に示す。(図-4.4.1)

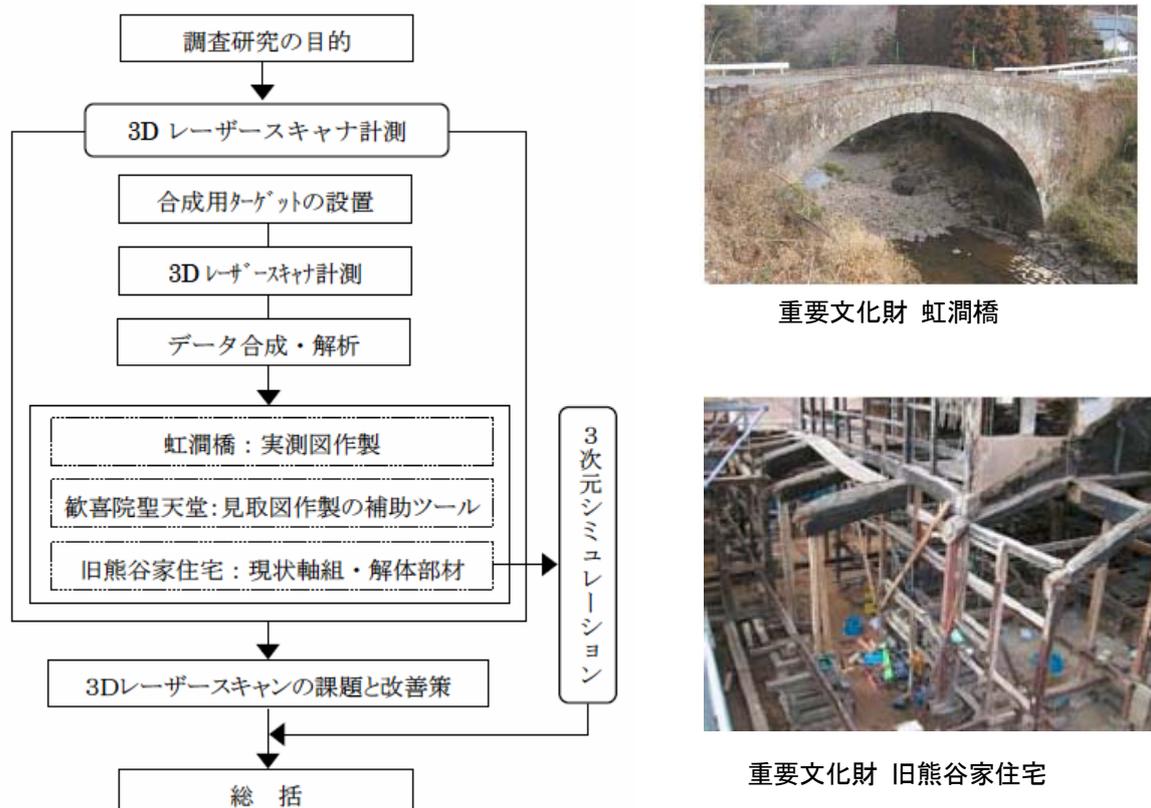


図-4.4.1 平成14年マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究のフロー

(2) 重要文化財 虹澗橋

① 調査概要

重要文化財虹澗橋は、文政7年(1824年)に架橋された大分を代表する石造アーチ橋である(橋長:31.0m、橋幅:6.5m、拱矢:11.2m、径間:25.2m、環厚80cm)。今回調査は、修理前の虹澗橋の実測図作製、及び3Dレーザースキャンによって取得可能な情報の確認を目的として実施した。調査フローを図-4.4.2に示す。

② 計測結果

合成データより、アーチ部円弧半径の推定(半径12.7m)、石材の形状・大きさ・組み方の把握、5mm程度のクラック形状や石材表面のわれの識別等が可能であることが分かった。部材表面仕上げの状況については確認できなかった。

③ 実測図の作製

3Dレーザースキャンによる解析結果を基に実測図(平面図、側面図、断面図、アーチ展開図)の作製を行った。石材形状のエッジ抽出処理を行うが、エッジが明確なものにはトレースを行い、明確でないものは、別途デジタルカメラで撮影した正射投影画像(以下オルソ画像)とポリゴン(面)化処理を行ったデータを合成し、その上からCAD上でトレースする。それら抽出した石材形状を実測図としてCAD出力した。(図-4.4.3)

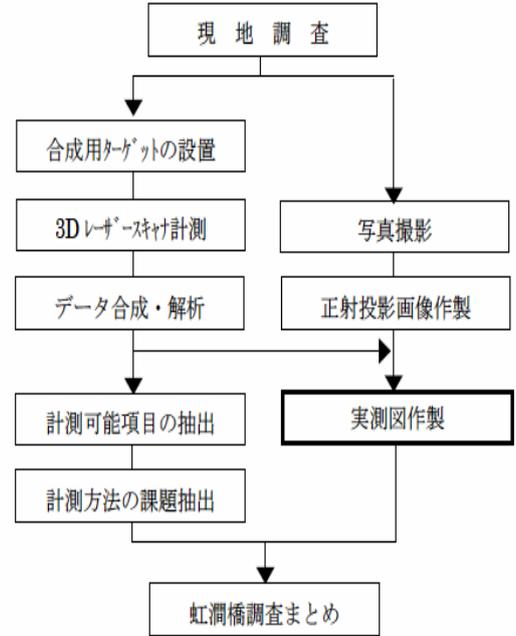
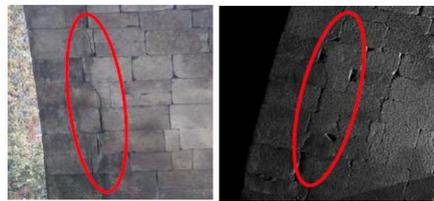
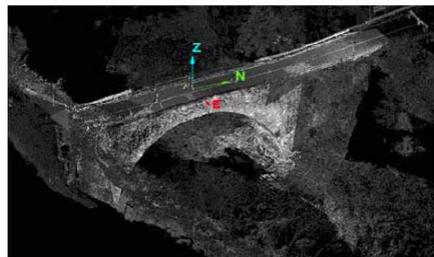


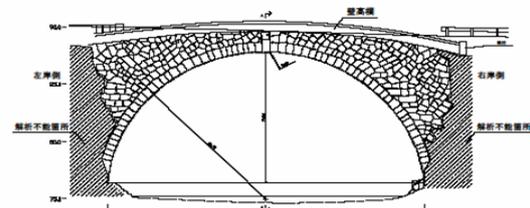
図-4.4.2 虹澗橋調査フロー



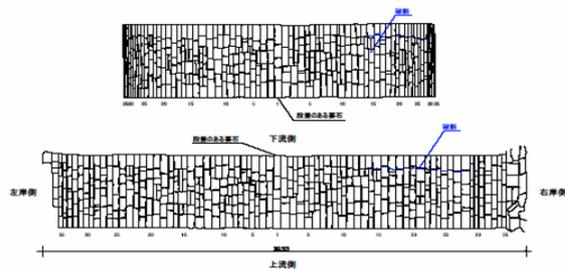
実写(写真) 3Dレーザースキャン計測結果
b)クラック形状識別の検証結果
3Dレーザースキャン計測結果の検証



3Dレーザースキャン計測結果(虹澗橋全体)



虹澗橋側面図



虹澗橋アーチ展開図
(上:見上図、下:展開図)

図-4.4.3 重要文化財 虹澗橋調査成果結果(一部)

④ 実測図作製への利用可能性の検討

・遠隔地からの計測が可能のため、足場仮設が不要となり、現地測量を大幅に簡略化・省略化できた。結果、経済性、安全性への効果が大きい。正確で客観的なデータを取得できた。

(3) 重要文化財旧熊谷家住宅

① 調査概要

旧熊谷家住宅は、島根県大田市大森銀山伝統的建造物群保存地区で、最大級の規模を誇る町家である。1998年に重要文化財に指定されたが、老朽化が著しいため、国、県、同市が修復事業に着手し、旧熊谷家住宅の最も繁栄していた時期にあたる江戸末期から明治初期の姿に復原する旨の現状変更許可申請が文化庁に提出された。今回調査では、その現状変更検討資料の一部をデジタル技術で作成することを試みた。まず現状軸組、及び転用材（形状、仕口等）について3Dレーザを用いて計測し、現状のデジタル情報取得を行う。計測結果を基に、3DCADやCG等を用いながら、現状変更申請に伴う復原考察のプレゼンテーションにいかに応用できるか検討を行う。これについて下記紹介する。（尚石見銀山遺跡は、世界遺産登録に向けて様々な活動が展開されている。）

② 3次元シミュレーションの概要

文化財建造物の現状変更を行う際の現状変更許可申請書は、文章、図面等を中心に構成されており、専門知識を持たない一般者には理解しがたい現状にある。現状変更について、その調査報告及び考察を基に、写真、3Dレーザスキャナ計測データ、3DCG等による動画等のマルチメディア技術により現状変更箇所（根拠も含む）を可視化し、初心者にも理解できる3次元シミュレーションを制作した。

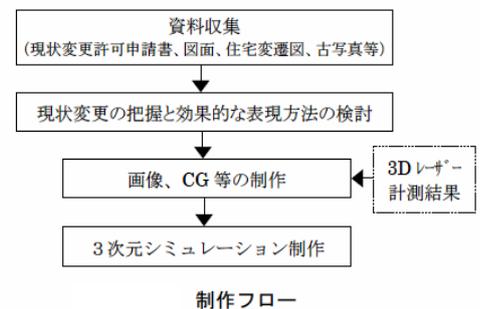
③ 3次元シミュレーションの実施

3次元シミュレーションを行うにあたっては、現状変更内容が複雑であるため、現場担当者や有識者と打ち合わせを密に行い、内容を把握しながら制作を進めていった。制作フロー、及び3次元シミュレーションの画面を図-4.4.4に示す。

(4) 総括

今回調査では、3Dレーザスキャナを用いて、3次元的に形状を記録した。この方法は不整形な形状のものがあるがままに認識するためには最良のものと考えられる。またこれ以外にも、正射投影画像（オルソ画像）の貼付け、3DCADを使用したデータ欠落部分の補足等を行い、不足データの補完を施している。

これら諸技法を駆使することによってかなりの成果が得られた。現段階では、機器精度・計測方法等に課題が残るが、今後、精度が向上し、計測方法が確立すれば、この技術を用いることで、より正確な3次元データを収集することが可能になるだろう。結果、文化財建造物の保存活用において、今まで文字、図面、模型等でしか表現できなかったものが、仮想空間上に再現できるようになり、様々な活用が可能となると考えられる。



熊谷家住宅CG(明治5年当時)

図-4.4.4 重要文化財旧熊谷家住宅
3次元シミュレーション

4.4.3 文化財保存調査におけるマルチメディア技術の可能性

マルチメディアを支える技術の柱となるのが、文字、画像、音声などを組み合わせて一元的に扱えるようにするコンピュータの技術である。とりわけ CG 関連のハードウェアやソフトウェアの急速な普及と高性能化により、高度なグラフィック処理機能が、汎用性パソコンで利用可能となり、3次元表現が試みられている。3D レーザスキャナで取得した膨大なデータの3次元可視化は、文化財関係者の判断を補助し、現場作業を大幅に省力化できる他、プレゼンテーション用などの説明補助システムとして利用できる。また、電子データ化、データベース化やコンピュータ関連技術の相乗効果から、文化財の調査から設計・施工監理等の情報の最適化が可能となる。

文化財の保存活用について、デジタル情報の利活用という観点から、3D レーザスキャナ、データベース、CG等のマルチメディア技術の現段階における技術レベルを整理し、3次元デジタル情報の将来における可能性について概観する。

4.4.4 文化財保存活用における現段階のマルチメディア技術

(1) デジタル情報取得技術 <3D レーザ><デジタル写真測量>

文化財の調査では、現状の形状データ等、情報取得の段階から測量データや画像をデジタル化することが重要である。デジタル化がもたらす効果は、作業の効率化、省力化および客観的な計測データ収集のほかに、情報の管理や公開などに展開できる点である。現在、主なデジタル情報取得技術として、デジタルカメラ、3D レーザスキャナ、デジタル写真測量がある。

(2) 情報の一元管理技術 <データベース>

調査により出土した遺物、写真、報告書などをはじめとした膨大なデータを、必要な時に利用するために、効率よく管理することが必要となっている。GIS 技術とデータベースを組み合わせることにより、情報を地図・図面上で視覚的に把握しながら、データを一元管理することが可能となる。これにより、効率化、データ管理の高度化、研究活動の強化等の効果が得られると考えられ、またこれらのデータをもとに、市民への情報公開を行うことが可能となる。また、近年では GIS の空間データと VR の表示技術を活用した3次元 GIS が注目されている。

(3) 情報の可視化技術 <3DCG 技術>

CG 技術の近年の技術革新はめざましく、見る事のできない物を可視化して表現できるという CG の特性から、遺跡、建造物の復元等において活用されている。作成された CG は、主に関係者等に対する工事説明や、情報開示に利用されているが、今後はミュージアム展示などにも積極的に活用されると思われる。また調査で用いた3D レーザスキャナ取得データによる CG は、現状の精密な再現が可能であるため、現場の仮設計画等に対して利用ができるものとする。

通常、このようなデータの CG 化を行っているのは、主に CG の専門家である。今後は、建築史の専門家がどのような形でこの作業に関わって行くのかが課題であり、双方の分野に関する専門知識を兼ね備えた技術者の養成が必要となる。

(4) 情報開示技術 <WEB (インターネット) 技術>

現在、文化財分野をはじめ、あらゆる分野において、地域住民や関係者に対する情報開示（説明責任）や合意形成が不可欠となっている。実際に、町並みに関する審議会などで、地域住民に建造物の歴史性、地域性を説明するためには、画像情報、復元図などはすでに必要不可欠な存在となっている。インターネットによる情報開示では、専門的技術や広範・膨大な検討資料をいかにわかりやすく、正確に伝達するかが重要であり、適切な表現方法を検討していく必要がある。

4.4.4 現状情報取得におけるデータ活用の可能性[1][2]

3D レーザスキャナにより取得された建造物の精緻な3次元情報は、平面図、立面図、断面図等、各種実測図面（当初の寸法計画を反映した図面）作製の一助となる。また、3D レーザスキャナは現状をありのままに記録するため、実測図というより破損図面（建物の破損を表現・記録した図面）を作製することが可能となる。文化財の保存・修復工事における3次元情報の活用は、専門性の高い工事の理解深度を深め、効率化・省力化への効果が得られるものとする。以下に、データ活用方法として有効な項目を挙げる。

(1) 仮設計画の検討

大規模建造物の仮設計画策定において、事前に地形、建造物の形状が把握できれば、仮想空間上で仮設物の計画が立てられる。

(2) 現状変更内容の説明

詳細な説明は今まで通りの資料を使用することとなるが、マルチメディア技術を補助的に使用することで、視覚的に理解しやすくなる。変更箇所において幾通りかのシミュレーションを試みる際にはかなりの効果を発揮する。また、その後、工事内容を収集することで、マルチメディア技術を駆使した情報公開や展示が可能となり、一般の人々に修理事業の内容を知っていただくことができよう。

(3) 構造補強の検討

最近では、建造物修理と並行して耐震診断を行い、診断結果に基づいた構造補強を施すということが必須となっている。建物補強の際には、用途だけでなく建造物の持つ文化財的価値を見極めなければならず、建造物ごとに個別に補強方法を策定する必要がある。この際 3DCG によるシミュレーションを活用すれば、容易に補強内容を理解することができるようになる。また、補強検討の際に作製した3次元軸組図は、その後多様に活用することができる。

(4) 破損状況の検討

現状をあるがままに図面化できる特徴を利用して、破損状況の検討に活用することができる。手測りで建物の正確な不同沈下・倒れ・折れ曲がりなどを計測することは困難であり、その後の図化作業にも大部の時間を費やす必要があった。

(5) 3次元GISによる工事情報管理

文化財の保存・修復工事では、書類、図面、写真などをはじめとした膨大なデータを必要な時に利用するために、効率よく管理することが必要となっている。3次元GIS技術とデータベースを組み合わせることにより、情報を3Dモデル上で視覚的に把握しながら、データを一元管理する。

4.4.5 情報公開・展示におけるデータ活用の可能性

文化財の情報公開にあたっては、最近ではインターネットを活用し、コンピュータを通して仮想的に文化財に触れてもらう方法が広がっているが、やはり基本は、文化財を展示会・博物館等で実際にそのままの姿で見ってもらうことである。しかし、文化財の種別や性質、また人々の興味関心や理解の度合いによっては、文化財をそのまま見せるだけでなく、必要な解説を加えるなどの配慮をきめ細かく行うことが求められる。いずれにせよ、人々が現場へ足を運びたいような仕組みが必要である。

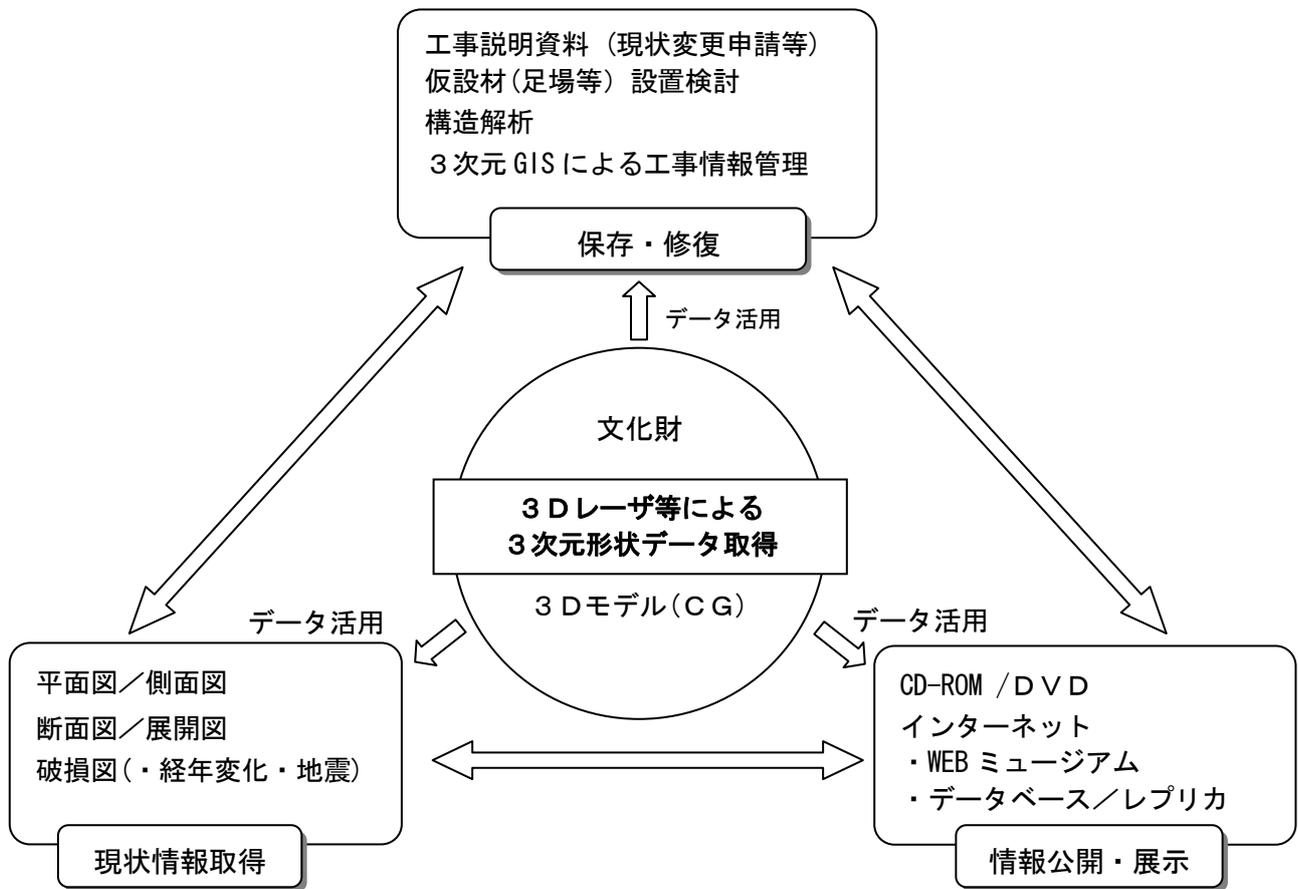


図-4.4.5 文化財保存活用における3次元デジタル情報の将来への可能性

<参考文献>

- [1]文化庁 文化財部 建造物課：マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究、2002
- [2]NISHIMURA：Digital Information Utilization on Preservation Management of Cultural Properties, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Greece, pp.434 - 439, 2002

(西村 正三)

4.5 3次元計測を用いた鋼橋数値仮組み立てシミュレーション

4.5.1 鋼橋仮組立の概要

鋼橋の製作においては、成品を架設現場に搬出する前に、品質管理の最終工程として工場ヤードで仮組立検査が実施されている。これは図-4.5.1や図-4.5.2で示すように、部材（ボルトまたは溶接により連結されるブロックユニット）を実際の橋梁形状に組み立てるもので、各部材の工作精度のチェック、部材間の接合状況の良否、橋梁全体での形状寸法のチェックなど、検査、確認による製作精度、組立形状の検証が行われている。

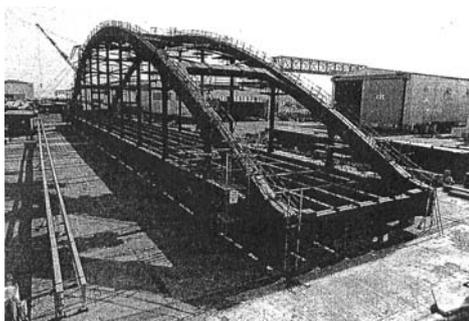


図-4.5.1 全体立体仮組立法[1]



図-4.5.2 横組仮組立法[1]

しかしながら、仮組立作業では組立工数と併せて、広大なヤードと重機設備や重量物の運搬、高所作業などの安全管理への配慮が必要であり、また屋外作業のため天候が工程進捗に与える影響も大きい。総じて、鋼橋の製作費に占める仮組立に必要な費用の割合は比較的大きなものとなっている。

一方、鋼橋製造業界では、建設費の削減という社会的要請や、ISOなどを契機とした品質管理への関心の高まりのなかで、製作工程の自動化やCIMを活用した工数低減への試み、仮組立代替工法の採用など、さまざまな努力がなされている。

そのような背景の中、現在、仮組立代替工法の一つとして数値仮組立技術が利用され、進展しつつある。これは、個々の部材の形状を3次元計測し、そのデータに基づいてコンピューター上で数値仮組立を行うもので、橋梁全体形状の諸寸法を照査しながら、それに基づく組立調整や仮組立検査における精度管理項目に沿った組立精度を確認するものである。図-4.5.3に示すように、実仮組立作業から仮組立検査、解体作業までをコンピューターで代替することになる。



図-4.5.3 仮組立手法による工程比較

4.5.2 数値仮組立の流れ

図-4.5.4は、数値仮組立シミュレーションの流れを説明したものである。数値仮組立シミュレーションは、部材計測部分とコンピュータシミュレーション部分とで構成され、部材の単体計測の結果を用いて、部材製作精度の照査やコンピュータ上で仮組立シミュレーションを実施することになる。

計測点の位置と数は、仮組立検査における精度管理項目の出力に最低限必要となるシミュレーション用の計測点と部材精度照査項目の要求度合いによって決まる。一般に、これらの項目の精度を確認するためには、部材を構成する主桁上・下フランジ、ウェブそれぞれの連結ボルト孔位置、部材端面位置およびキャンバー計測位置や、横部材連結部(仕口や垂直補剛材)のボルト孔、端面位置や、横構ガセット孔位置などの座標値を計測する必要がある。数値仮組立においては、これらの計測値と製作情報システムによるデータに基づいて各部材のモデルを作成し、そのモデルを連結して全体形状をシミュレートする。

また、数値仮組立シミュレーションの中でも、部材計測は重要な作業である。部材精度はそのまま組立精度につながる訳であり、部材計測を行う3次元計測器の選択は、品質管理上においても重要な事柄である。

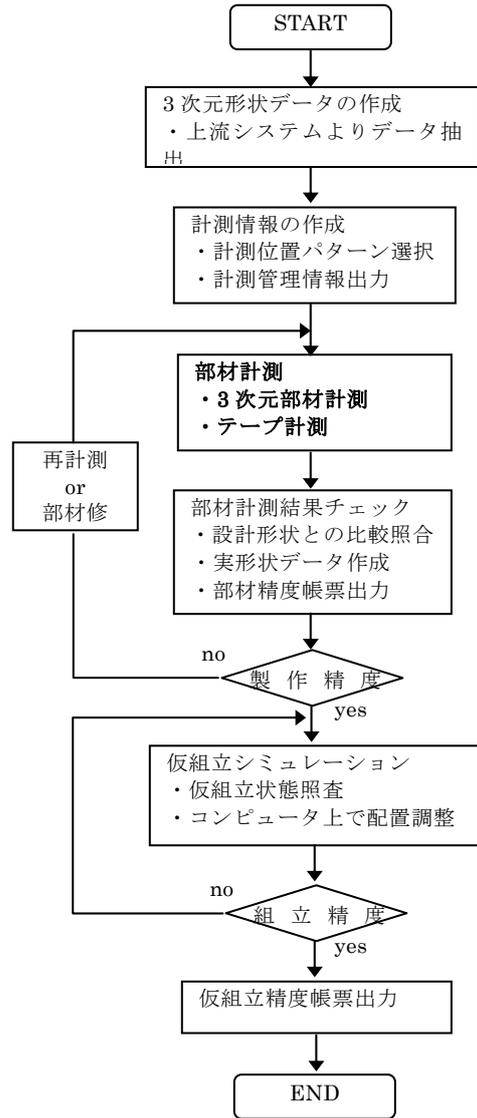


図-4.5.4 数値仮組立の処理の流れ

4.5.3 部材計測と要求される精度

表-4.5.1は、道路橋示方書[2]に定義されている部材精度の許容値である。ここに示されている部材精度が満たされているかを3次元計測によって確認する訳だが、例えばフランジ幅が500mm以下の場合、その要求される許容値は±2mmである。これは計測による誤差も含んだ値でなければならない。

表-4.5.1 部材許容値[2]

| 番号 | 項目 | 許容誤差 (mm) | 備考 | 測定方法 |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|---|-------------------|
| 1 | フランジ幅 b (mm) | ± 2 $b \leq 0.5$ | 左欄のものは、 A 及び b が代表したものである。 | |
| | 腹板高 h (mm) | ± 4 $1.0 < b \leq 2.0$ | | |
| 2 | 腹板間隔 b' (mm) | $\pm (3+b/2)$ $2.0 < b$ | | |
| | 鋼げた及びトラス等の部材の腹板 | $h/250$ | h : 腹板高 (mm) | |
| 鋼げた及びトラス等フランジ、鋼床板のデッキプレート | $w/150$ | w : 腹板又はリブの間隔 (mm) | | |
| 3 | フランジの直角度 ϕ (mm) | $b/200$ | b : フランジ幅 (mm) | |
| 4 | 部材表 (mm) | 鋼げた | ± 3 $l \leq 10$ ± 4 $l > 10$ | |
| | | トラス、アーチ等 | ± 2 $l \leq 10$ ± 3 $l > 10$ | |
| | 伸縮継手 | 0~30 | | |
| 5 | 圧縮材の曲り ϕ (mm) | $l/1,000$ | l : 部材長 (mm) | |
| 6 | 鋼 | 脚柱とベースプレートの鉛直度 ϕ (mm) | $b/500$ | b : 部材幅 (mm) |
| 7 | 製 橋 脚 ベース プレート | 孔の位置 | ± 2 | b : 孔中心間距離 (mm) |
| | | 孔の径 | 0~5 | d : 孔の直径 (mm) |

このように、品質保証につながる工程能力のチェックにも使用するためには、計測器としては少なくとも 1mm 程度かそれ以内の精度が必要になってくる。

4.5.4 3次元視覚センサを利用した自動3次元計測装置

本項では、3次元視覚センサを利用した据付型の3次元計測装置（以下 SuperBrahms と呼ぶ）を紹介する。従来の計測では土木分野で使用されていた測量機を採用していることが多かった。しかし、測量機では回転部のエンコーダによる誤差や、計測点に貼るターゲットの取り付け誤差などにより、測定距離によっては 1~2mm 程度の精度となっていた。

SuperBrahms は、NC ロボットと 3次元視覚センサを組み合わせ、両者の長所を生かし、大物部材を効率よく計測できるシステムで、20m のストロークを有する走行軸上を、直交型ロボットが移動し計測する方式である。システムの構成を図-4.5.5 に示す。

3次元測定器に相当するのが走行式直交型計測ロボットである。このロボットは、直交軸を基本に構成されているため、NC 精度で高精度に位置決めすることができる。このロボットのハンド先端には、3次元測定器のプロブにあたる 3次元視覚センサがあり、これによって、孔や端部を非接触で計測できる。3次元視覚センサ座標系とロボット座標系はあらかじめキャリブレーションされており、計測点の座標はロボット座標系に変換されて出力される。

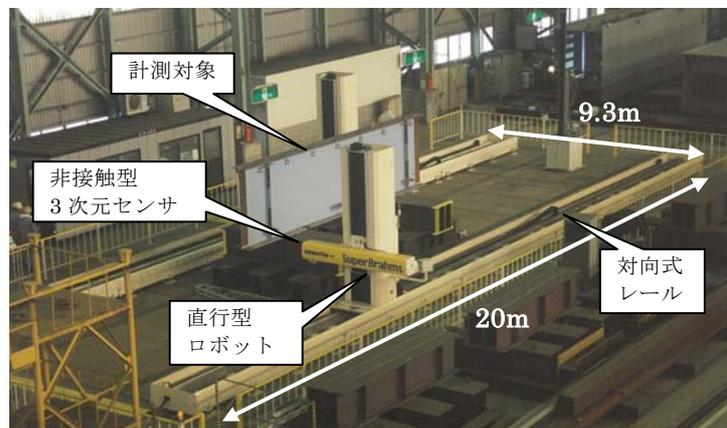


図-4.5.5 システム構成

(1) 3次元視覚センサによる非接触計測の概要

部材上の計測点を接触式のセンサで計測すると、センサの部材への衝突などを考慮してセンサのアプローチ速度を低速にし、非常に時間のかかる計測になる。このため本システムでは、非接触のセンサを用いている。センサは三角測量の原理に基づいたものであり、コード化されたパターン(縞)を投光し、その対象物からの反射光をカメラで受光し、対象物の立体形状を計測する。このパターン(縞)はレーザーで形成している。さらに、得られた立体形状からボルト締結用の孔を自動抽出し、その孔中心を算出する独自のアルゴリズムを開発した。これによって、孔の自重計測が可能となっている。



図-4.5.5 3次元センサ

(2) コード化パターン投光法の原理

視覚センサーでは、工業用として最も実用性が高いと思われる、コード化パターン投光法を用いている。本手法は空間をパターン光によってコード化し、空間内に一意的に座標系を設定する。従って、視覚センサー自体が独自の3次元座標系を持っており、例えば、ロボットの座標系との関連づけなどが容易である。これは簡単に言えば、縞(スリット)を投光して3次元座標値を求める方法で、その計測原理を図-4.5.6に示す。図-4.5.6に示すように、カメラと光源の中心角およびカメラと光源の距離が既知であるなら、三角測量の原理に基づき、物体の任意点における3次元座標値を求めることができる。このとき投光する縞のパターンの生成の方法を工夫することで、スリットの途切れなどのノイズに強く、通常の1本のスリットを走査するより高速に計測できるのが、コード化パターン投光法の特徴である。図-4.5.7に示すようなパターンを投光することで、例えば、 n 種類のパターンを使うと、 2^n 本の縞を空間に投光したことに同等となる。図-4.5.7では、3種類のパターンで、縞を $2^3=8$ 本投光していることとなる。3次元視覚センサーから取得された3次元(立体形状)情報の例を図-4.5.8に示す。図中の立体形状情報では、近いところを暗く、遠いところを明るく表示している。この図からも直感的に分かるが、2次元情報、いわゆる写真情報では、遠近感が分からず、また錆や照明の違いによる影響も受け、孔部の特定・計測に失敗することが多かった。これに対し、立体情報を用いれば錆などの影響を受けず、孔部の特定も容易で安定した計測ができる。

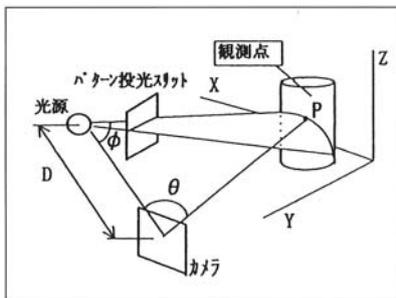


図-4.5.6 3次元座標値の計算

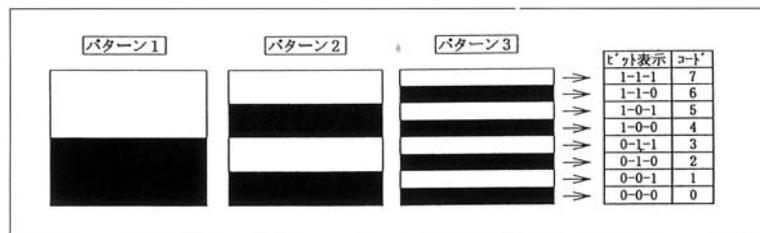


図-4.5.7 空間コードの原理

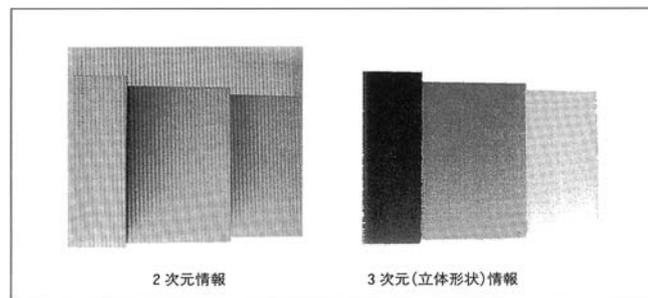


図-4.5.8 立体形状情報の取得

(3) 2次元画像との融合

3次元視覚センサーは、非常に使い勝手が良いが弱点があり、平面上にある罫書き線などの自動認識は難しい。罫書き線などは、立体情報として得られないためである。このため SuperBrahms では、このような平面的な情報も計測値に変換できるように、計測時に縞のパターンを見るカメラで同一視点から2次元情報(いわゆる写真情報)を得るようにしている。図-4.5.9で示しているように、計測者は、孔以外の計測点については会話方式で2次元情報を呼び出し、計測したい点をクリックする。システムは、クリックされた点に相当する3次元座標を抽出する。この機能によって、いろいろなパターンの計測点が計測可能となり、実用性を高めている。

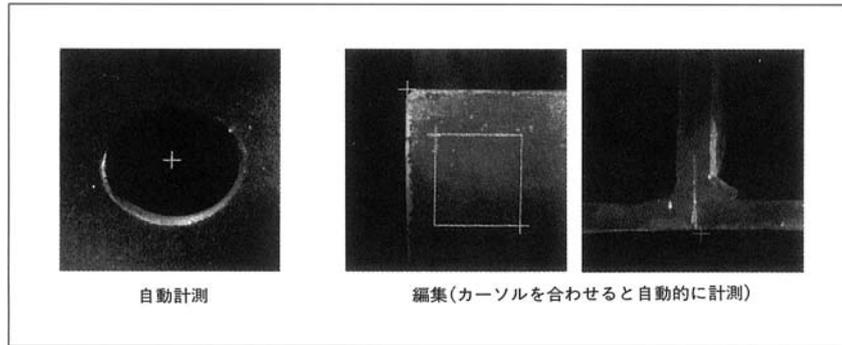


図-4.5.9 罫書き位置を指示する計測点

SuperBrahms では、このような会話形式の計測指示や、独自のボルト孔検出技術を利用することにより、橋梁部材計測の半自動化および、繰り返し計測精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内という精度を実現している。

4.5.5 デジタルカメラを用いた3次元計測装置

デジタルカメラはその利便性から、橋梁に限らず建設現場全般で状況写真や工事記録など多様な目的で使用されている。また近年のデジタルカメラの高性能化により、橋梁の部材計測でも形状復元の目的でデジタルカメラ計測システムが使用されるようになってきた。

図-4.5.10 はデジタルカメラと計測に使用する機材一式である。

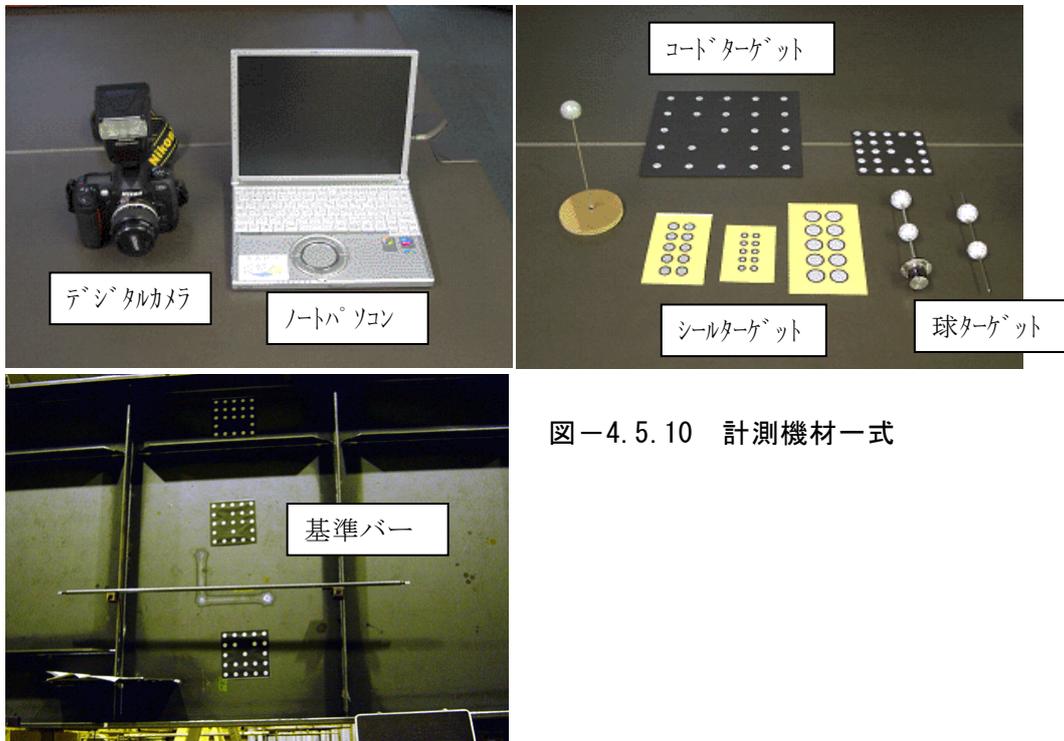


図-4.5.10 計測機材一式

コードターゲットは、カメラ画像同士をつなぐ目的で計測対象部材にランダムに 50 枚程度設置する。また基準バーは、取得座標データのスケールを決定するために対象部材に 1 箇所設置する。実際に 3 次元座標を取得したい箇所にはシールターゲットもしくは球型のターゲットを貼り付ける。(図-4.5.11)

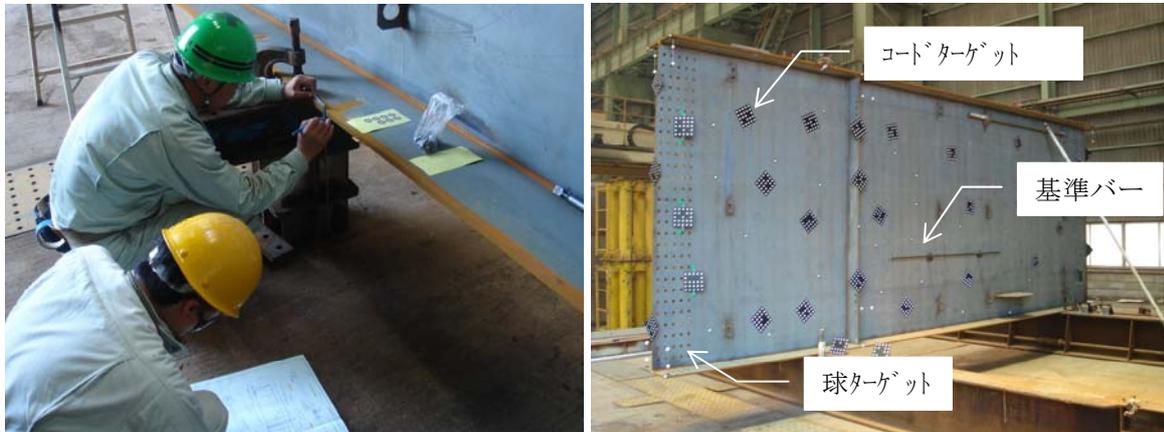


図-4.5.11 ターゲット設置風景

ターゲット設置が終了したら、デジタルカメラで全体的に 50~60 枚の撮影を行う。撮影した画像を専用の解析ソフトに読み込めば、3 次元形状を復元される。ソフトをノートパソコンにインストールしておき、現場に持ち込んでいれば、計測したその場で形状の確認が可能である。ターゲット設置から撮影、画像解析まで 1 時間程度の作業となる。(図-4.5.12)



図-4.5.12 計測風景

計測精度は最大で $1/20000$ 、10m の部材で最大 $\pm 0.5\text{mm}$ の誤差で計測可能である。可搬性、操作性、実用性の面で、橋梁部材に限らず今後の活用が期待できる分野であると考えられる。

4.5.6 橋梁部材計測の動向

昨今、橋梁部材の製作t数は減少傾向にあり、4.5.4項で紹介したような据付型の大型計測装置は今からのニーズにマッチしないかもしれない。しかし、近年になり計測技術の発展は目覚しく新しい計測装置が次々に発表されている。橋梁の現場でも4.5.5項で紹介したようにデジタルカメラによる部材計測が徐々に取り組みられており、場所を選ばず、橋梁以外でも利用できる高性能な計測装置へと移行していく可能性は大きいと考える。

<参考文献>

[1] 社団法人日本橋梁建設協会：橋梁の概要、p65、1994

[2] 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編、pp.430 - 436、2002

[3] 仲村政彦・片岡隆之・森元大樹：橋梁部材 3次元計測システム SuperBrahms、鉄構技術 (STRUTECH) 1998

(山本 晃)

4. 6 既設コンクリート橋の維持管理における光学的全視野計測技術の適用性について

4. 6. 1 維持管理現場におけるコンクリート橋の現状と問題点

コンクリート構造物は、耐久性が高く永久構造物と信じられてきた。しかし、近年、一部のコンクリート構造物では、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などの劣化により、ひび割れ、鉄筋腐食などの変状が顕著に現れてくるコンクリート構造物がある。

特に、道路橋、鉄道橋、建築物など多種に渡り建設されてきたプレストレスコンクリート構造物（以下 PC 構造物）は、高張力鋼（PC 鋼材）を緊張することにより構造物にプレストレスを導入している。通常のコンクリート構造物等と比べ、PC 鋼材の腐食等に敏感に反応し、耐久性が落ちると安全性にも直接影響する。写真-4.6.1 は、海岸近くに位置する PC 橋梁が飛沫塩分の影響を受けた塩害により PC 構造物の安全性の要である PC 鋼材が破断した事例である。このような構造物の安全性を脅かす事態を回避するために、適切な診断と維持管理の必要性が求められている。

コンクリート構造物の耐久性を低下させる劣化は、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応などがある。中性化、塩害は、コンクリート中に劣化因子が浸透しコンクリート中の鉄筋ならびに PC 鋼材の発錆、腐食、破断が発生し構造物の安全性が低下する。また、凍害、アルカリ骨材反応は、劣化因子によりコンクリートにひび割れを発生させ、コンクリート構造物の形状の保持が困難になり剛性が低下する。また、ひび割れより浸透した水分などによりコンクリート中の鉄筋ならびに PC 鋼材を発錆、腐食、破断が発生し構造物の安全性が低下する。

一方、PC 構造物のポストテンションプレストレスコンクリートでは、PC グラウトの不良による水素脆性破壊、応力腐食による破断が発生する。さらに、グラウトの不良箇所は、中性化、塩害などの劣化機構による PC 鋼材の腐食を促進し、破断に繋がる可能性が極めて高くなる。

さらに、PC 構造物では、コンクリートは打設直後からクリープ変形し、そのクリープによりプレストレスが減少する。さらに、異常なたわみの原因の 1 つとなる設計値以上のクリープ現象が生じた事例もある。そのような場合は、クリープによるプレストレスの減少量が大きくなることも考えられる。



写真-4. 6. 1 塩害により PC 鋼材が破断した PC 構造物 [1]

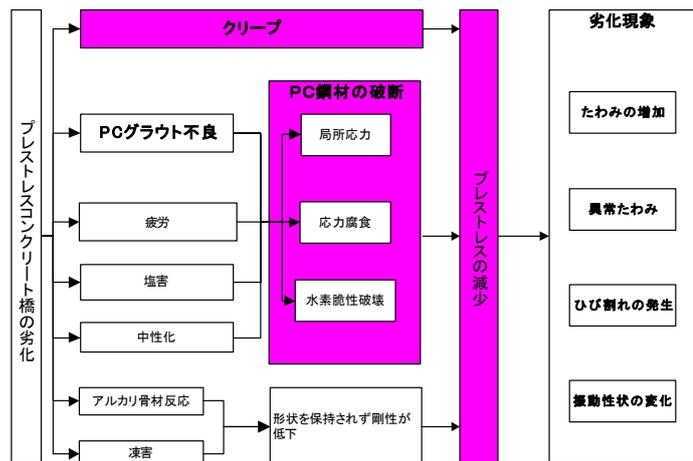


図-4. 6. 1 PC 構造物の劣化要因と劣化現象 [2]

以上のように PC 構造物の劣化は、中性化、塩害、凍害、アルカリ骨材反応およびグラウト不良による PC 鋼材の破断によるプレストレスの減少とクリープなどによるプレストレスの減少であると考えられる。プレストレスの減少により、図-4.6.1 に示すように、たわみの増加、異常たわみ、ひび割れの発生、振動特性の変化などの変状が発生する。プレストレスの減少に伴い、発生する引張応力がひび割れ発生応力以上になるとひび割れが発生する。プレストレスの減少は、耐荷力の低下と位置付けられ、プレストレスの減少が直接耐荷力に影響し安全性の低下となる。さらに、プレストレスの減少を予測することにより補強等の対処の時期等を設定することができ構造物の安全性を計画的に保持することができると考えられる。

このため、社会資本である PC 構造物は、適切な維持管理を行い安全性能を維持するためには、導入されているプレストレス量を的確に確認することが重要であると考えられる。しかし、PC 構造物に導入されているプレストレス量を的確に計測する技術は確立されていないのが現状である。

4.6.2 異常たわみを生じた PC 橋梁の死荷重 応力計測事例[3]

3 径間有ヒンジ PC 箱たラーメン橋で、中央ヒンジ部のたわみが建設後 8 年目に 200mm、16 年後に 240mm、27 年後に 300mm と異常なたわみが生じていた。

このため、異常たわみの原因を特定するために、応力開放法による死荷重時の応力状態の測定および解析を行い、プレストレスおよびクリープ係数の推定を行った。

(1) 応力開放法

応力開放法とは、元来、鉱山業界で岩盤等に作用する応力を測定する方法として開発されたものである。この方法は、金属やプラスチックにも用いられている。応力開放法の原理は単純である。測定対象物にスリットやオーバーコアなどで応力を開放し、開放されたひずみやたわみを測定することで応力開放前の初期応力を算出する方法である。代表的な測定方法を挙げると、孔径変化法、孔壁ひずみ法、円錐孔底法などがある。今回用いた応力開放法は、これらの手法をコンクリート構造物用



写真-4.6.2 鉄筋切断法

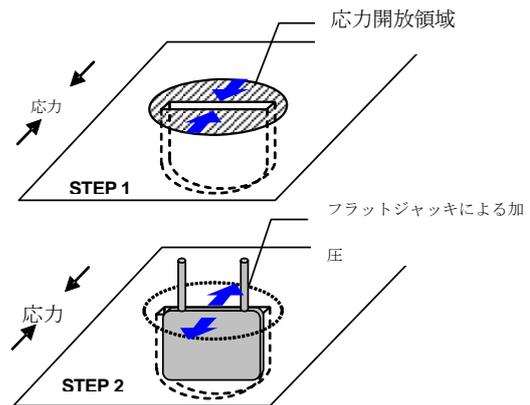


図-4.6.2 スロットストレス法による測定
原理

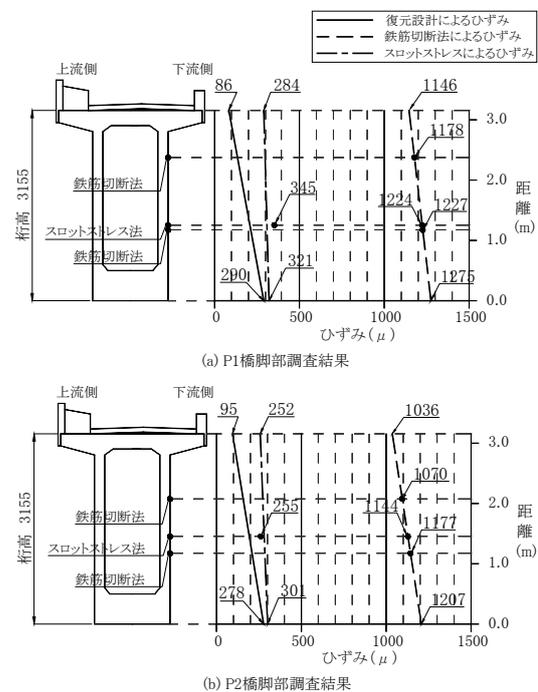


図-4.6.3 死荷重時のひずみ分布

に応用・開発したものであり、鉄筋応力は鉄筋切断法を、コンクリート応力は、スロットストレス法を用いて死荷重時の応力測定を行った。

鉄筋切断法は、写真-4.6.2のように、計測対象の鉄筋にひずみゲージを貼付し、同鉄筋を切断することにより現在作用している応力を測定する方法である[4]。

スロットストレス法は、図-4.6.2に示すように計測対象位置にフラットジャッキ挿入用のスロットを削孔し、削孔穴にフラットジャッキを挿入し、加圧することにより所定の検長区間が開放前の変位量となった時点での応力を現有応力とする方法である[5]。

(2)プレストレスとクリープ係数の推定

プレストレスとクリープ係数は、応力開放法である鉄筋切断法とスロットストレス法により推定した。鉄筋切断法による開放ひずみは、自重・プレストレスによるひずみ+クリープ・乾燥収縮によるひずみである[4]。次にスロットストレス法は、コンクリート部の現有応力を測定するものであり[5]、自重およびプレストレスからなる死荷重時の応力を測定するものである。

図-4.6.3は、応力開放法より求められる断面に作用しているひずみ分布の概念である。クリープ係数は断面で一定と仮定すれば、死荷重時の弾性ひずみの分布が求められる。この死荷重時の弾性ひずみの分布から自重応力分布を差し引くことにより表-4.6.1のようにプレストレスを把握することができる。

断面に作用するクリープ係数は一定であると仮定し、弾性ひずみであるスロットストレス法によるひずみと鉄筋切断法による開放ひずみより求められるクリープひずみより、クリープ係数を算定することができる。(表-4.6.2 参照)

応力開放法である鉄筋切断法とスロットストレス法を組み合わせることにより、PC 橋梁のプレストレス量とクリープ係数を推定することができた。しかし、鉄筋切断法は、比較的な広範囲でのコンクリートのはつりを行うため、PC 構造物を傷めると共にはつり作業が鉄筋の計測ひずみの誤差の要因ともなっている。スロットストレス法は、スロットの幅が約 20cm 深さも 15~20cm あり、PC 鋼材に加えて、鉄筋が最低 30cm 間隔で配置されている PC 構造物では計測する場所が限定されてくるなどの欠点もある。

4.6.3 PC 橋の維持管理への光学的全視野計測の適用性

(1)削孔によるコア周辺の開放応力測定法の概要

PC 橋梁のコンクリート断面には、自重、プレストレスなどにより構造物にとって微小な無垢断面では一様な応力分布が作用している。一方、穴の開いた部材に σ の応力を作用させると、開口部

表-4.6.1 プレストレスの推定値

| | | 単位 | 上縁応力 | 下縁応力 | |
|----------------|------|---|-------------------|------|------|
| 応力開放法によるプレストレス | P1橋脚 | 死荷重時のひずみ (ϵ_e) | μ | 277 | 313 |
| | | 死荷重時の応力 ($\sigma_{d+p} = \epsilon_e \cdot E_c$) | N/mm ² | 9.0 | 10.2 |
| | | 自重 (σ_d) | N/mm ² | -9.2 | 11.1 |
| | P2橋脚 | 死荷重時のひずみ (ϵ_e) | μ | 246 | 294 |
| | | 死荷重時の応力 ($\sigma_{d+p} = \epsilon_e \cdot E_c$) | N/mm ² | 8.0 | 9.5 |
| | | 自重 (σ_d) | N/mm ² | -8.9 | 10.7 |
| | | プレストレス ($\sigma_p = \sigma_{d+p} - \sigma_d$) | N/mm ² | 16.9 | -1.2 |

表-4.6.2 クリープ係数の推定値

| | | ϵ_r | ϵ_e | ϵ_s | ϵ_c | ϕ |
|----------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| スロット ストレス位置 | P1橋脚柱塔部 | 1224 | 345 | 150 | 729 | 2.11 |
| | P2橋脚柱塔部 | 1144 | 255 | 150 | 739 | 2.90 |
| | | | | | 平均 | 2.51 |

$\epsilon_r = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_s$
 ϵ_r : 鉄筋切断法による測定鉄筋ひずみ
 ϵ_e : 死荷重時の弾性ひずみ ($= \sigma_{ed} / E_c$)
 ϵ_c : クリープによるひずみ
 ϵ_s : 乾燥収縮によるひずみ
 ϕ : クリープ係数

周辺に 3σ の集中応力が発生する事が知られている。その事から、無垢断面の状態に削孔などにより、部分的に応力を開放すると削孔部周辺に応力の再分配が生じ、応力状態が変化する。(図-4.6.4 参照)

コア削孔による応力開放法は、削孔によって再分配されるコア周辺部のひずみ変化量を計測する。削孔により再分配されたコア周辺部のひずみの計測値を FEM 解析 (図-4.6.5 参照) などにより逆算することから部材に作用している応力状態を推定することができる。

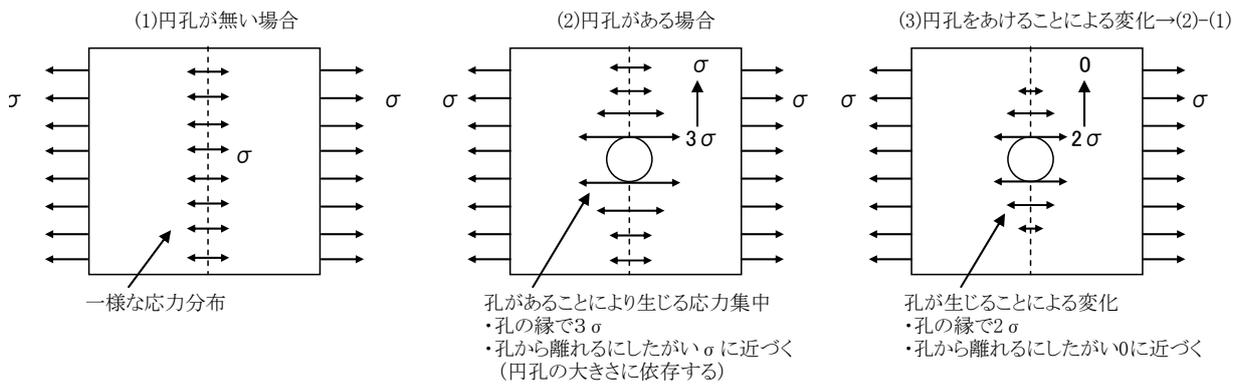


図-4.6.4 水平方向の応力度の変化

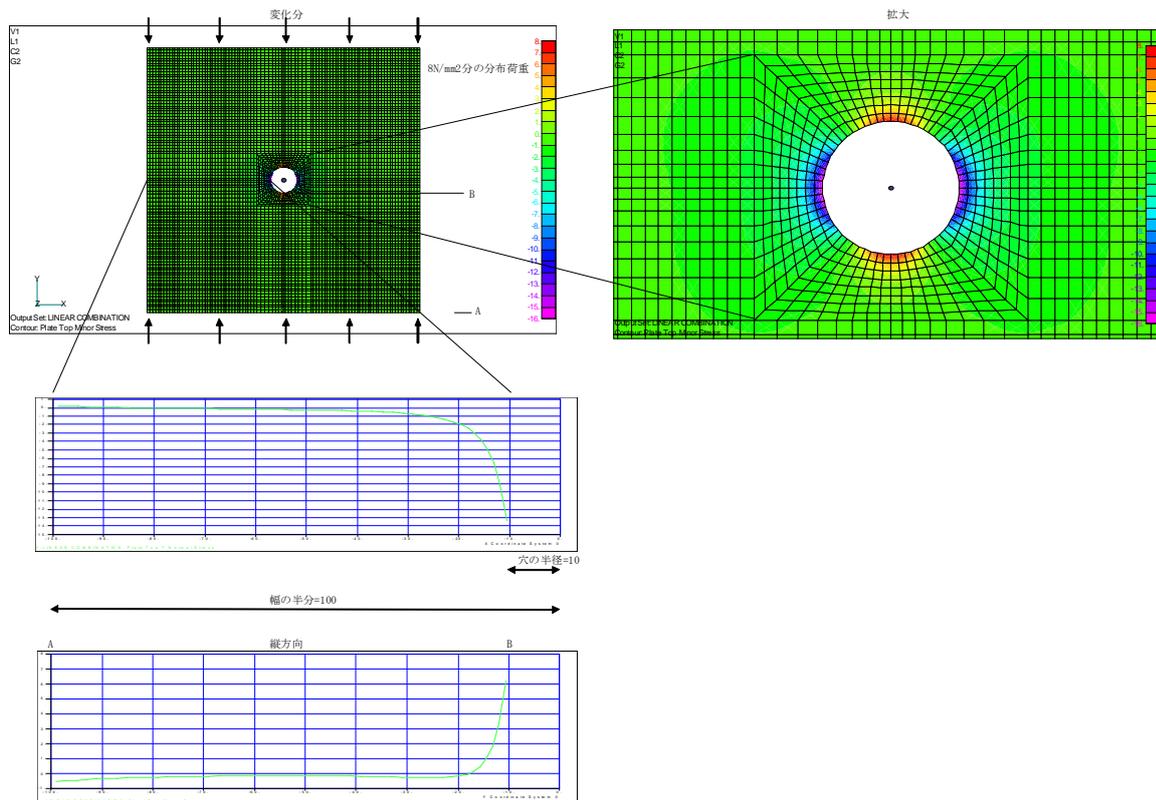


図-4.6.5 削孔による応力開放法の周辺ひずみ分布

(2) 塩害を受けた PC 橋梁のプレストレス量推定

塩害を受けた PC 橋梁を削孔によるコア周辺の開放応力測定法からプレストレス量を推定した。

応力開放法によるコア周辺ひずみは、写真-4.6.3 に示すように削孔周辺部に 3 軸ストレインゲージ (5mm) を添付して計測をした。

1) 応力開放法によるコア周辺ひずみ計測

応力開放法によるコア周辺ひずみは、以下の手順で行った。

- ① 鉄筋探査を行い、削孔位置を出す。
- ② ストレインゲージをコンクリート表面に貼付する。
- ③ 削孔前のひずみ計測する。
- ④ コア cutter で削孔する。
- ⑤ 削孔後のひずみを計測する。
- ⑥ 削孔前と削孔後のひずみより応力開放された周辺ひずみを求める。

2) 死荷重応力状態の推定

コア周辺の計測した開放ひずみを有限要素法解析 (FEM) などから逆算して現状の死荷重応力状態を求めた。図-4.6.6 は、各点のから求めた断面に作用する死荷重応力分布を示す。計測結果は、誤差を多く含んだバラつきがあるものの、計測から得られた応力分布は、設計時の応力分布と逆の勾配を示す結果となっていることが分かる。このことは、現状の PC 橋梁の死荷重応力状態が、設計の仮定した条件と違う状態になっていることを示している。

3) プレストレス量の推定

図-4.6.6 の死荷重応力状態から桁自重分等の応力を差し引き、図-4.6.7 に示すように、プレストレス量を推定した。計測から求めたプレストレス (赤の実線) は、設計時のプレストレス (赤の破線) より減少していることが分かる。この結果より、減少したプレストレスを補う補強対策及び耐久性向上策を実施することにより、PC 橋梁の安全性を継続的に維持することが可能となる。

以上のように、コア周辺の開放応力測定法により塩害を受けた PC 橋梁のプレストレスの推定が可能であることが分かる。しかし、コア周辺の開放応力は、図-4.6.5 に示すように極めて微小な範囲での応力変動である。このため、ストレインゲージではゲージ長の平均ひずみを計測していることとなり誤差が多くなる傾向にある。

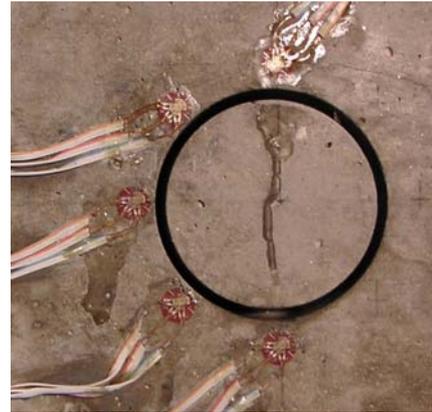


写真-4.6.3 コア削孔

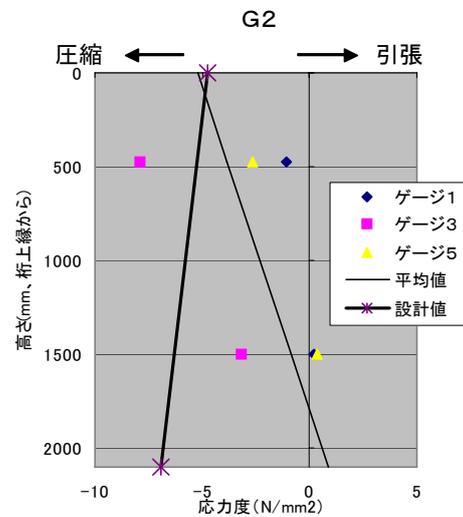


図-4.6.6 応力開放法からのひずみ分布

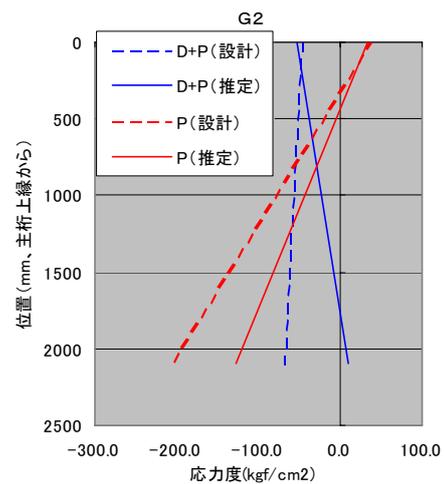


図-4.6.7 推定プレストレス分布

(3) コア削孔法による応力開放法への光学的全視野計測の適用性

鉄筋切断法、スロットストレス、削孔によるコア周辺の開放応力測定法などの応力解放法を用いることにより PC 構造物の応力状態及び無応力ひずみが把握できると考えられる。しかし、いずれの手法も誤差等が大きく実構造物への適用には多くの問題を含んでいると考えられる。特に、コア周辺の開放応力測定法では、コア周辺の微小な範囲での応力変動を把握するためストレインゲージ等の既存の計測手法では困難な問題が内包されていると考えられる。

PC 橋梁の応力状態を把握する目的で全視野ひずみ計測を用いてコア周辺の開放応力測定法を行った。写真-4.6.4 は、50mm のコア削孔後のデジタルカメラとスキャナーの画像である。デジタルカメラ、スキャナーの画像を画像相関法にて解析し図-4.6.8 に示すようにコア周辺部のひずみ分布を把握することができる。図-4.6.8 のひずみ分布は、コア周辺の微小区間のひずみ変動が得られていると思われる。

このことは、応力開放法と全視野ひずみを組み合わせることにより既設構造物の死荷重応力状態を把握できる可能性を示唆していると思われる。PC 構造物など実構造物の死荷重などの応力状態を測定するためには、建設時に事前に計測器を設置し、計測していたが、応力開放法と全視野ひずみ計測を組み合わせることで応力測定方法は、予め計測器を配置していないあらゆる既存構造物の死荷重などの応力を測定の可能性があると考えられる。

コア周辺の開放応力測定法は、削孔径は 10~50mm 程度で計測ができるため、部材に与えるダメージを極力抑えられる。また、削孔されたコア等から材料試験が行え、材料強度、弾性係数、劣化因子の浸透深さなどの情報も収集できる。

このように、応力開放法と全視野ひずみ計測を組み合わせることにより、損傷を受けた橋梁等の維持管理に有用な情報と死荷重状態が把握でき、構造物の状態に応じた適切な補修、補強対策が立



デジタルカメラ スキャナー

写真-4.6.4 全視野ひずみ計測画像

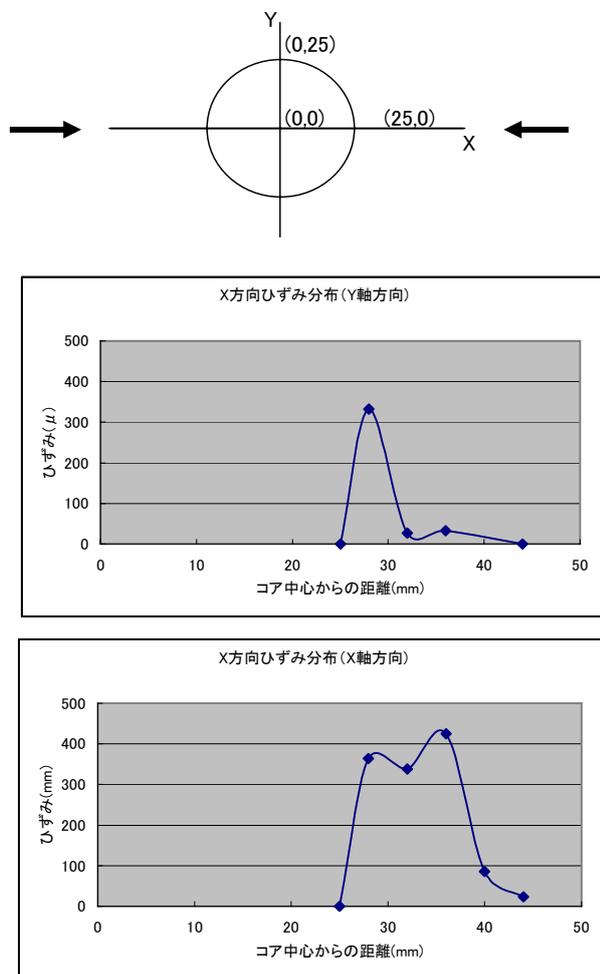


図-4.6.8 コア周辺部のひずみ分布

案でき、社会資本構造物の安全性を持続可能にする維持管理が適切に行うことにより構造物のライフサイクルコストの縮減が図れると考える。

<参考文献>

- [1] 肥田研一：よくわかる非破壊検査 第9回 鉄筋腐食、プレストレスコンクリート、Vol.48、No.3、pp.76 - 79、2006
- [2] 肥田研一：PC 橋の診断、プレストレストコンクリート、Vol.45、No.1、2003
- [3] 肥田研一・神野人志・永吉竜二・高橋洋一・出水享：有ヒンジ PC 箱けた橋の応力解放開放法によるプレストレス推定と中央ヒンジ部の異常たわみ原因の推定、土木構造・材料論文集 第 21 号、pp.119 - 128、2005
- [4] 中井督介ほか：PC 構造物のはつりおよび断面修復に関する実験的検討、第 13 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、pp.495 - 500、2004
- [5] 浅井洋ほか：フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有応力測定、コンクリート工学、Vol.42、No.4、pp.26 - 32、2004

(肥田 研一)

4. 7 建設分野における光学的全視野計測技術の将来展望

4. 7. 1 建設分野における光学的全視野計測技術の位置付け

建設分野における計測は、橋梁、トンネルなどの道路構造物、ダム、護岸などの河川構造物、港湾構造物、空港施設、上下水道施設などインフラや建築物などを対象として多岐に亘るとともに、人工の構造物に拘わらず防災や環境に関連したものもある。対象物の状態を把握するには、建設技術者の観察力を始めとした五感による方法以外では、計測対象物にセンサを設置して計測する手法、非破壊検査技術を用いて構造物の表面、内部の状況を計測する方法などが既に使用されている。センサ技術や非破壊検査技術は、人間の視力、聴力をはるかに超えた精度で数値情報を提供している。

建設分野の計測技術に対する要求性能は、他産業のそれに比べて安易なものではない。その例として図-4.7.1 に変位計測の場合に要求される精度と計測点までの距離の関係を示す。「対象物までの距離(L)が100mで必要とする分解能(S)が0.1mm」などと言う要求性能は稀な話ではない。S/Lは、 10^{-6} である。歪計測に関しても1マイクロ(= 10^{-6})の精度がしばしば必要となる。図-4.7.2 に建設分野で生じる動的な挙動の特性を模式的に示す。計測対象物の振動特性を事前に考慮し、応答周波数や感度を適当に決定して計測する必要がある。さらに、現場における温度や日射、大気の変化、降雨、落雷などの自然環境の影響を除去しながら、長期間に亘り信頼性の高い情報を得なければならない。その一方で、個々の現場の多様な要求に対してアプリケーションが求められる「多品種・小生産」の分野でもあることなどが、特徴的であることを認識しておかねばならない。

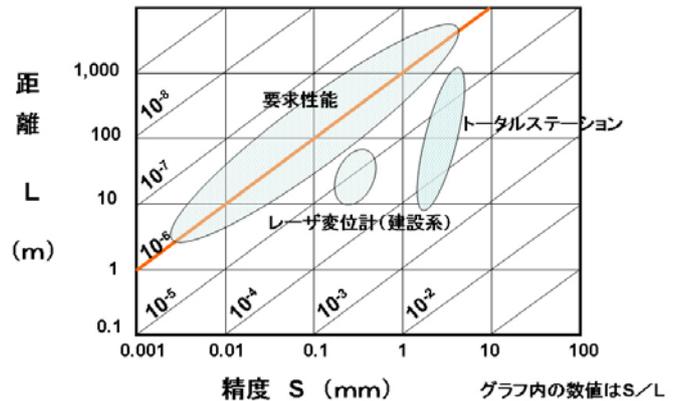


図-4.7.1 建設分野で求められる計測距離と精度

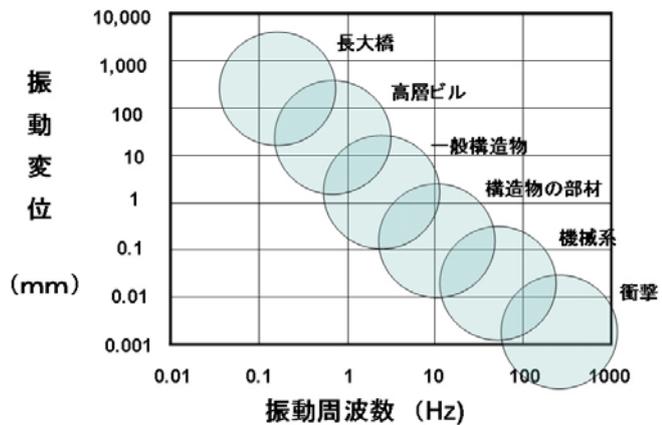


図-4.7.2 構造物の振動変位と周波数

光学的全視野計測技術が、建設分野の要求に対して、建設技術者の五感をサポートする設置型のセンサ技術や非破壊検査技術などと同様に普及するか否かは、これらの計測技術に比べて、より信頼性の高い情報を、安全でかつ安価に得る事ができるかに掛かっていると言える。

4. 7. 2 光学的全視野計測技術の特徴と現状

光学的全視野計測技術は、「光の性質を利用して対象物の情報を2次元、3次的に把握する計測手法」と定義できる。光を波長で分類して図-4.7.3に示す。人間の眼に見える可視光はおおよそ400nmから800nmの狭い範囲の領域である。光学計測技術では、可視光はもちろん電波のような長い波長のものから、赤外線、紫外線、X線、さらに短い波長であるガンマ線といった人間の目では捉えられない様々な波長の光を使用して計測が行われる。建設分野で使用されている主な光

学的全視野計測技術を列挙して表-4.7.1に示す。計測する光は、自然光の場合と一定の周波数の光で位相を合わせたレーザ光を使用する場合がある。このような計測手法を用いて、CCDカメラやフィルム、スキャナ装置によって照射（撮影）位置を同定して多点の状態を計測すれば全視野計測が可能である。光学的全視野計測は、計測対象物にセンサを取り付けて計測する方法などと比べると、

- ①遠隔・非接触な計測が可能
足場の仮設が不要。設置型センサに必要なケーブルの配線が不要。
- ②多点の情報を短時間で取得可能
計測範囲の多点の情報が取得でき一点当たりの計測コストが安価になる。
- ③高密度の計測結果を可視化情報として表現可能。
- ④計測対象物の挙動を分布系で把握しやすく、評価が行い易い。

などと言った特長がある。安全で安価に高密度の可視化情報にして、状態を視認しやすく出来ることから、光学的全視野計測が、設置型のセンサ技術や非破壊検査技術と同等以上に計測できる独特の技術分野と言えるのはこの辺りにある。今のところ、そのアプリケーションは個別的で、適応対象を徐々に広げつつある技術分野である。

4.7.3 研究開発の動向に見る期待と展望

最近の光学的全視野計測の開発動向をいくつか挙げて、近い将来の状況を考察してみる。

(1) 画像の解像度

計測対象物の変位量、歪量、ひび割れの幅などを計測する場合、画像センサの解像度が課題となる。一般に使用されるCCDカメラで画素数が1312×1312画素の場合でも、2.5m角以下の画像においてデジタル分解能は2mmだが、コンピュータモニタ上では0.2mmのひび割れを認識することが実験的にも検証されている[1]。撮影範囲における歪量に換算すれば 80×10^{-6} である。ラインセンサの場合、センサ上の素子の密度によって解像度は支配される。微破壊調査としてコンクリートを穿孔して内部の状況を調査する棒形スキャナが開発されている[2]。図-4.7.4に示す棒形スキャナの場合、300dpi（1インチ当たりの画素数）のラインセンサで、近接して撮影すれば

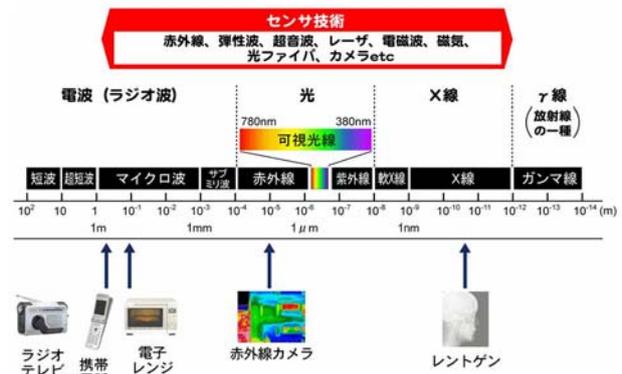


図-4.7.3 光の波長分類

表-4.7.1 光学的全視野計測手法の分類

| 種類 | 波長分類 | レーザ | スキャン | 非接触 |
|----------------|-------|-----|----------|-----|
| 3Dスキャナ | 可視・赤外 | ○ | 駆動装置 | ○ |
| LDV(レーザドップラ速度) | 可視・赤外 | ○ | 駆動装置 | ○ |
| 光波測距機 | 赤外 | ○ | 駆動装置 | ○ |
| サーモグラフィ(赤外線) | 赤外 | × | CCD | ○ |
| 棒形スキャナ(ラインセンサ) | 可視 | × | 駆動装置 | ○ |
| CCDカメラ | 可視 | × | CCD | ○ |
| 衛星画像 | 多種 | × | CCD | ○ |
| 電磁波探査 | 電磁波 | × | アンテナ | ○ |
| モアレ | 可視 | ○ | CCD | ○ |
| スプレックル干渉 | 可視 | ○ | CCD | ○ |
| X線撮影 | X線 | × | フィルム・カメラ | ○ |



図-4.7.4 棒形スキャナの外観

85 μm の分解能になる。もし、3600dpiで10インチのラインセンサ（36,000画素）を用いれば、撮影範囲の歪分解能を試算すると 28×10^{-6} になる。さらに、画像相関法を用いてサブピクセルの解像度まで解析すれば、歪量が 10×10^{-6} 未満の計測が原理的に行えることになる。光学機器の解像度は年々向上している。建設分野の厳しい要求性能を先に述べたが、計測対象物の力学的挙動を光学的全視野計測で行うことは、接近した計測であれば十分可能な段階に来ている。課題としては、遠隔から計測する際のズーム機能、撮影時の計測装置に作用する振動等のノイズの除去方法などが挙げられる。

(2) 高精度光波計測

建設分野における計測で計測頻度が高く、基本的な計測項目が距離計測であり、光波測距による方法が一般に用いられる。市販の測量用光波測距器では、ノンプリズムで250mの距離を±5mm程度の測距精度で、1200mの距離で±10mm程度の測距精度を実現している。周波数シフト帰還型レーザ（以下、FSFレーザと言う。）の開発では、近距離から100km程度の距離で100 μm 程度の高精度光計測を実現できると報告され[3]、建設分野での適応性を検証する目的で、FSFレーザを用いて500mの距離で100 μm の精度が確認されている[4]。理論的にはさらに長距離の計測が可能であり、およそ建設分野で行われる計測の距離をカバーして高精度の変位計測が可能になる。100Hz以上のサンプリングピッチを有していることから、動的な振動変位計測も行えると考えられる（図-4.7.5参照）。



図-4.7.5 FSFレーザの外観

(3) 駆動系の制御分解能

CCD 素子やラインセンサによる計測とは別に、3D レーザスキャナのようにレーザの照射方向を制御して3次元計測する方法がある。照射方向の俯角、仰角の分解能が計測位置の精度に影響する。通常の測量機器の角度の分解能1~10"（秒）に対して3Dレーザスキャナの分解能は荒いが、既に産業用の制御モータは800万分割/回転以上（0.16"以下）の高分解能を有しており、角度制御分解能の向上が期待できる。課題としては、角度制御のピッチに見合うレーザ光の径の絞り込み方法の改良や、高分解能に伴う高密度のデータ取り込み速度の高速化が同時進行で進む必要がある。

(4) 光学的計測システムの多機能化



図-4.7.6 TSに搭載したLDV

レーザドップラ速度計（以下、LDV と言う。）を自動追尾型トータルステーション（以下、TS と言う。）に搭載して計測対象の任意点の位置情報と振動状況（速度）を同時にモニタリングする装置が開発されている[5]（図-4.7.6 参照）。3Dレーザスキャナにも計測対象の3次元位置情報だけでなく、可視光の反射強度とRGB情報を同時に計測する機能を備えたもの、赤外線カメラにおいては、図-4.7.7に示すように赤外線と可視光の画像を同時に撮影できる機能を有したものが市販されている。このように異なる波長で同時に計測し、複数の情報を得る技術は、状

況を把握、評価する有効な手段と言え、ひとつの装置で複数の情報を組み合わせて評価できる計測システムの到来が期待される。

(5) 画像処理技術

光学的全視野計測を行うには、CCD 素子のように面的に計測情報を取得する場合は計測範囲が限られるため、計測対象物全体の情報を正確に繋ぎこむ画像処理技術が必要になる。重複する画像データを解析ソフトで正確に接続する技術は 3D レーザスキャナの画像処理技術で一般的に使用されている。また連続したビデオ画像を接続して長距離の対象物を連続画面として把握し、損傷箇所を抽出する技術も進歩している。先述した画像相関法は、単位となる画素を下回る分解能で変位やひずみが解析できるため、光学的計測機器の分解能の進歩を待たずして高分解能の計測を可能している。X 線撮影では、図-4.7.8 に示すように多断層画像から内部の立体画像を構築する技術が研究されている[6]。光学的全視野計測では、データ取得手法だけでなくデータを評価するための画像処理技術は不可欠であり、精密な計測、視認しやすい画像を得るための技術開発はさらに進歩すると考えられる。

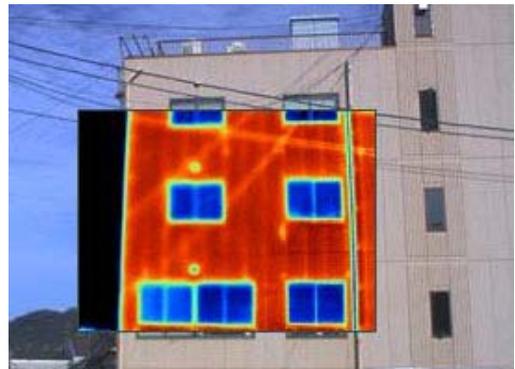


図-4.7.7 実像と合成したサーモグラフィ画像

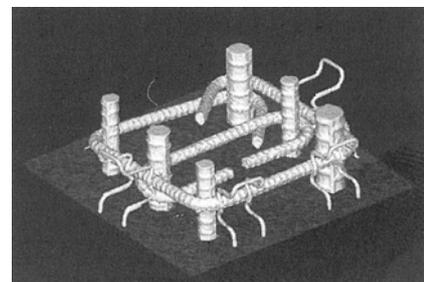


図-4.7.8 多断層画像から構築した内部画像

(6) 解析技術との連動システム

複雑なコンクリート構造物を対象に、3D レーザスキャナによって形状、寸法を計測し、点群データを CAD データに、さらに FEM 解析用のメッシュデータを作成することによって、図-4.7.9 及び図-4.7.10 に示すように構造物の静的・動的な応答解析が行われている[7]。計測データを使って一連の解析システムまで構築すれば、データ取得から評価、意思決定までの一連の手段となる。前述した LDV を搭載した TS を用いれば構造物の主要点の位置情報と振動情報が得られるので、例えば、高次不静定構造物である斜張橋などの架設時の形状管理において現状を把握し、温度や載荷荷重の影響を加味した最適なケーブル張力を逆解析するといった計測管理システムの構築も可能になる。

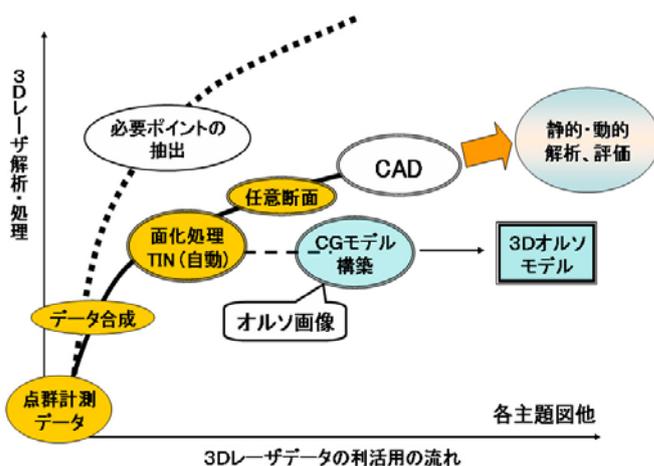


図-4.7.9 計測データから解析までのシステムの流れ

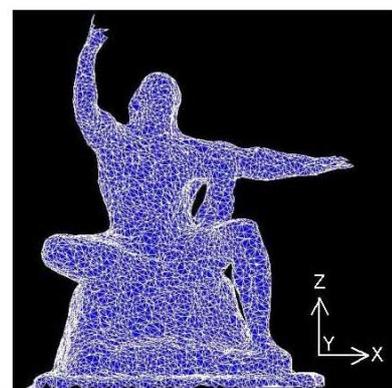


図-4.7.10 コンクリート構造物の動的応答解析例

4.7.4 維持管理社会における展望

今後、日本のインフラ整備が既存のインフラの長寿命化を目指して維持管理を行わなければならないのは言うまでもない。維持管理に関わる点検・調査・診断は、労働集約型で費用も掛かる。さらに、客観的な情報が取得しにくく、繰り返す担当者の交代と共に情報が保存、活用されにくいなどの問題を有している。図-4.7.11は、国土交通省が「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会の報告（平成15年）」で、維持管理において必要な情報と期待される診断技術を模式的に示したものである。構造物の劣化、損傷に関する情報取得のために期待されるセンサ技術の多くが光学的計測手法である。構造物の維持管理のタイムスケールが50年、100年となると、従来の設置型センサや計測機器の寿命が問題となる。これに対して、光学的全視野計測機器は、計測情報の互換性を保っておけば、機器の変更に関わらず永続的な計測が可能になる。構造物の表面

や内部の情報を遠隔・非接触で効率的に計測し、計測結果を画像情報や物理量として保存できる。計測情報をデータベースに記録しておけば、長年に亘って構造物のカルテが積み重ねられ、担当者の交代に関わらず長年得た情報を診断に活用する方法が展開できると考えられる。

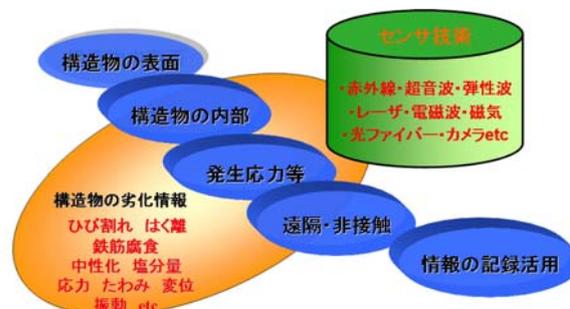


図-4.7.11 維持管理時代に期待されるセンサ技術

4.7.5 おわりに

光学的全視野計測の展望について、エンドユーザーの立場で考察した。現在の研究開発の動向は、従来のセンサ技術では困難な計測ニーズを補完するものだと言える。建設分野の計測で絶対的な計測方法はない。多様な計測方法の中から、現場の条件に対して最適な方法を選択していくことが肝要で、その中で光学的全視野方法の適応分野が、今後も徐々に広がっていくと予想される。その実現には、光学系の画像技術や IT 技術などの進歩に負う所が大きい。建設工学が総合工学たるゆえんでもある。近年、ユビキタスネットワーク社会に向けた動向、ロボット工学における画像認識や駆動制御技術、医学の診断機器などの進歩は目を見張るものがある。SHM (Structural Health Monitoring) の分野では MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によってセンサ・CPU・電源・無線が一体化したセンサを IT 技術でモニタリングしようとする研究開発が活発である。

本文は、5年、10年の先を予測して将来展望を述べたものではない。筆者は、30年建設分野の計測に携わってきた。当初は、測定器を持ち歩いて手で測定し、電卓をたたいてデータシートを整理し、報告書を青焼きにして郵送していた。瞬く間に望んでいた自動測定器も、コンピュータによるデータ処理、解析。結果を車中からモバイルでインターネットを通じて送信することも普通になった。光学的全視野計測技術の進歩は、筆者の予想よりもはるかに早く、多方面で広がっていく

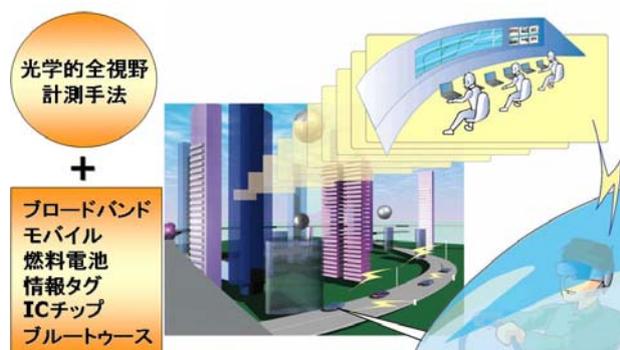


図-4.7.12 光学的全視野計測によるモニタリング社会

と考える。建設分野の計測技術に対する新たなニーズに対して図-4.7.12のような「夢」のような話でも、果敢に挑戦していけば「実現」に結びついていく時代であると考え。

<参考文献>

- [1]小出他：デジタルスチル画像によるコンクリート床版ひび割れ認識の研究、土木学会第54回年次学術講演会、p454、1999
- [2]出水享・伊藤幸広・肥田研一：小径ドリル孔を利用した棒形スキャナによるコンクリート構造物の内部検査、土木学会第61回年次学術講演会、pp.1107 - 1108、2006
- [3]原武文・Cheikh NDIAYE・伊藤弘昌：周波数シフトレーザーによる超高精度光計測技術、応用物理、第74巻第6号、pp.697 - 702、2005
- [4]㈱計測リサーチコンサルタント、超高精度光計測 FSFレーザー(1)、Webレポート、No.42、2006
- [5]久保田慶太・宮下剛・Jaime Hernandez Jr・藤野陽三・宮本則幸：レーザードップラとトータルステーションを用いた非接触かつ遠隔的なケーブル計測システムの開発、土木学会第61回年次学術講演会、pp.509 - 510、2006
- [6]魚本健人・加藤佳孝：コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブック－、p156、2003
- [7]鶴田聡・松田浩・山下務・出水享：歴史的構造物の三次元形状計測とその地震応答解析への利用に関する研究、建築土木における歴史的構造物の診断・修復に関するシンポジウム、pp.113-120、2006

(岡本 卓慈)