

## 地震下の既設鋼構造物の終局崩壊現象の 画像情報技術を用いた可視化システムの開発

橋梁工学分野 北村 匡範

### 1. まえがき

近年、既設構造物の耐震補強についての検討が活発に進められており、過去の設計基準により設計された既設構造物の耐震性能を的確に把握することが、合理的な補強方法を決定するために重要である。また、LCC、BMSの観点から、既設構造物の補修・補強を効果的かつ経済的に行うことも重要であり、点検、診断、補修技術ならびにそれらのデータの迅速かつ合理的な収集方法の確立が望まれている。さらに、昨今の住民の行政参加の流れの中で、既設構造物の耐震性の問題、老朽化に伴う補修・補強の効果などの技術的な事柄を分かり易く説明したり表現したりする工夫が求められている。

そこで、本研究では、既設構造物の位置情報を三次元画像計測より取得し、有限要素解析のための数値解析モデルを作成し、それを用いて解析を行い、得られた解析結果と撮影した既設構造物のデジタル画像情報を用いて、この画像データを変形させることで地震時の終局状態などを高い現実感を備えて再現するシステムの構築を目的とする。そして、様々な構造物に対して適用し、その適用性を検討する。なお、数値解析では、有限要素法による弾塑性有限変位解析を用いる。

### 2. 本システムの概要

本研究において開発したシステムは図1に示すように5つのサブシステムから構成されている。「形状認識サブシステム」では、デジタルカメラで撮影した2枚の画像から三次元画像計測技術を用いて対象構造物の三次元座標を認識する。「画像・形状データ作成サブシステム」では、構造物の応答性状などを可視化するための基となる画像の作成、および、それぞれの座標系で取得した三次元座標をひとつの座標系に統合し数値解析モデルを作成する。「材料情報取得サブシステム」では、認識した三次元座標と材料情報を統合させることによって、数値解析モデルを構築する。「数値解析サブシステム」では、構造物の終局状態などを評価するために解析を行う。「可視化サブシステム」では、再びマッピング技術を用いて解析結果と画像データとを統合して、構造物の地震時の挙動や終局状態を可視化する。

これらのサブシステムは、数種類のハードウェアおよびソフトウェアを用いて構成されている。「形状認識サブシステム」においては、計測対象物の画像を得るため

の市販のデジタルカメラ1機と、図2に示すデジタル画像上に、基準座標系を認識させるために必要なキャリブレーション・フレーム(以後:C.F.)1体を用いる。また、ソフトウェアの実行には、パーソナルコンピュータ(PC)1台を用いる。

ソフトウェアは、「形状認識サブシステム」における、「三次元画像計測プログラム」と「ひずみ補正プログラム」を用いる。前者は、三次元画像計測理論に基づいて、コンピュータ言語C++を用いて開発したものであり、後者も同様に、C++を用いて、カメラのレンズひずみを補正するために開発した。「数値解析サブシステム」では、有限要素解析コードのひとつであるUSSP<sup>1)</sup>およびUSSP・D<sup>2)</sup>に、後処理プログラムを付け加えたプログラムを用いる。「可視化サブシステム」では、解析結果の変形状態および応力コンターを表示するために開発した「可視化プログラム」を用いる。

### 3. 曲面を有する構造物の三次元画像計測

曲面を有する試験片の三次元座標をデジタル画像から取得するため、試験片とC.F.をそれぞれ異なった2方

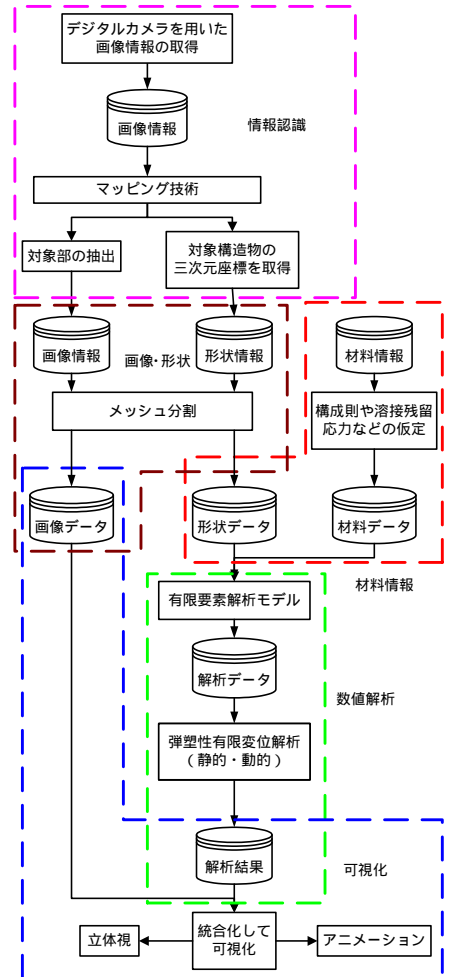


図1 本システムのフロー

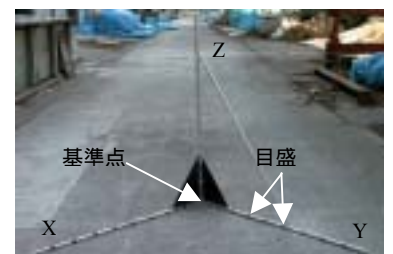


図2 キャリブレーション・フレーム



(a) 水平方向 (b) 鉛直方向

図 3 取得するデジタル画像

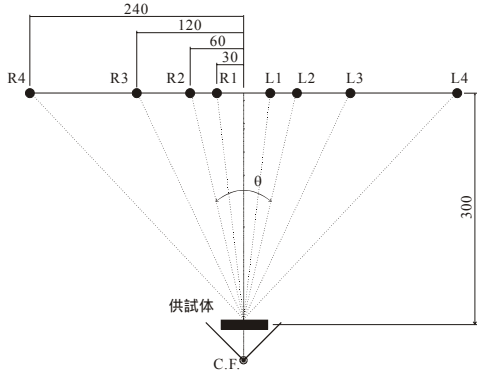


図 4 計測位置

向から撮影した。ここでは、図 3 に示すように、水平方向に曲面を有する場合と、鉛直方向に曲面を有する場合

表 1 計測位置の組み合わせ

	L1	L2	L3	L4
R1	11°	17°	28°	44°
R2	17°	23°	33°	50°
R3	28°	33°	44°	60°
R4	44°	50°	60°	77°

の 2 つの場合について計測した。計測位置は、図 4 に示す L1~L4, R1~R4 の 8 地点から撮影を行った。計測位置の組み合わせを表 1 に示す。

カメラ位置 L1R1 における水平方向に曲面を有する試験片について算出した三次元座標を図 5 に示す。ひずみ補正プログラムを検証するために、ひずみ補正を考慮したものをあわせて示す。これらの図が示すように、曲面の形状が認識できていることがわかる。さらに、計測

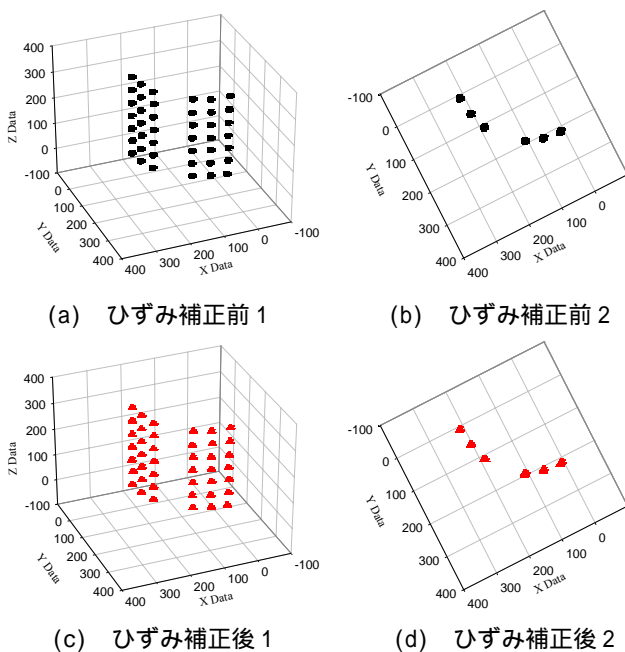


図 5 水平方向に曲面を有する試験片の三次元座標計測結果

対象点を増やすことによって、より詳細な形状の認識が可能と考えられる。

表 2 に試験片のある辺の実測値と得られた座標値との比較を示す。ここで、計測値とは得られた座標値から算出した長さを指し、誤差とは、実測値と

表 2 計測精度 (水平方向)

カメラ位置	実測値 (mm)	計測値 (mm)		誤差	
		補正前	補正後	補正前	補正後
L1R1	289.36	288.12	288.12	0.68%	0.25%
L1R2	288.87	287.57	287.57	0.51%	0.06%
L1R3	289.12	287.87	287.87	0.60%	0.17%
L1R4	289.72	288.43	288.43	0.81%	0.36%
L2R1	288.84	287.82	287.82	0.50%	0.15%
L2R2	287.66	286.62	286.62	0.09%	0.27%
L2R3	287.86	286.64	286.64	0.16%	0.26%
L2R4	288.31	287.03	287.03	0.32%	0.13%
L3R1	289.21	288.02	288.02	0.63%	0.22%
L3R2	287.89	286.72	286.72	0.17%	0.24%
L3R3	288.30	286.73	286.73	0.31%	0.23%
L3R4	288.87	287.16	287.16	0.51%	0.08%
L4R1	289.25	288.26	288.26	0.64%	0.30%
L4R2	287.75	286.94	286.94	0.12%	0.16%
L4R3	288.23	287.03	287.03	0.29%	0.13%
L4R4	288.81	287.59	287.59	0.49%	0.06%

得られた座標値との差を定義している。表より、レンズのひずみ補正後はひずみ補正前と比較すると一様に計測値が短くなっており、なおかつ、誤差が減少している傾向から、レンズのひずみの影響を正確に除去していると述べられる。また、全体的な計測精度についても、いずれの計測対象も誤差が 1% 前後となっている。1% の誤差は実測で 3mm の誤差に相当しており、高精度な画像計測ができている。カメラの相対的な角度の相違が計測精度におよぼす影響については、顕著な傾向が現れなかった。いずれの角度においても、誤差が小さい結果となったことから、同時に撮影された C.F. の目盛を画像上から抽出できる範囲にカメラを設置できれば、高精度な三次元画像計測は可能であるといえる。

#### 4. 鋼製箱型供試体を用いた本システムの検証

「形状認識サブシステム」において、鋼製箱型供試体の三次元座標をデジタル画像から取得するため、図 6(a), (b) に示すように、供試体の角部をそれぞれ異なっ



(a) Photo 1 (b) Photo 2

図 6 取得するデジタル画像

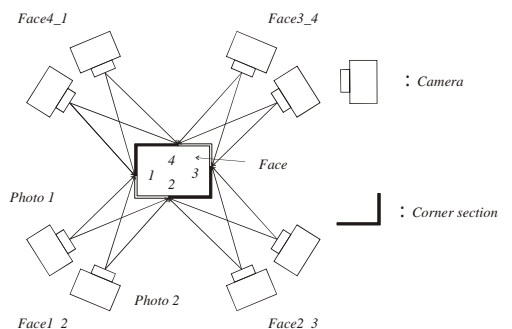


図 7 計測位置

表 3 三次元座標の計測精度

		高さ方向(mm)			幅方向(mm)		
		実寸法	平均値	誤差	実寸法	平均値	誤差
Face1	補正前	250.0	253.07	1.23%	1355.0	1357.87	0.21%
	補正後		251.35	0.54%		1351.88	0.23%
Face2	補正前	333.3	337.47	1.25%	1355.0	1367.48	0.92%
	補正後		334.37	0.32%		1356.99	0.15%
Face3	補正前	250.0	262.09	4.84%	1355.0	1372.14	1.26%
	補正後		250.98	0.39%		1357.25	0.17%
Face4	補正前	333.3	342.26	2.69%	1355.0	1361.05	0.45%
	補正後		327.51	1.74%		1350.68	0.32%

た 2 方向から供試体と C.F.を撮影した．そして図 7 に示すように供試体を周回し，Face1\_2 から Face4\_1 の全面を網羅する形で撮影を行った．表 3 に算出した三次元座標と実測値との比較を示す．上段にひずみ補正前，下段にひずみ補正後の座標値を示す．この結果から，レンズのひずみ補正前後ともに，誤差が許容範囲とされる 5%以内に収まっており，なおかつ，ひずみ補正後の計測値は 1%未満の精度が算出されていることから，高精度で計測できたと思われる．



図 8 構築した数値解析モデル

「画像・形状データ作成サブシステム」において，個々の座標系で算出された三次元座標を回転させ，閉合誤差を最小にするように合成することによって，数値解析モデルを構築した．構築した数値解析モデルを図 8 に示す．ここで，構築した数値解析モデルには若干の凹凸が見られる．これは合成による誤差が積み重なったためと思われる．高精度な数値解析モデルを必要とする場合には，より画素数の多いデジタルカメラを用いて，C.F.および計測対象点の抽出をより正確に行うことや，構造物の撮影時に，基準座標軸を数多く設けることによって，個々の座標系で算出された三次元座標の相対的な位置関係を認識したうえで，合成する必要がある．

「材料情報取得サブシステム」では，計測から得る事のできないヤング係数，ポアソン比，降伏応力などの材料情報を取得し，これらの情報を基に「数値解析サブシステム」において，弾塑性動的応答解析を行った．入力地震波には，JR 西日本鷹取駅地盤上 NS 成分を用いた．なお，本解析では，鋼製箱型供試体で運動方程式をたてているので，相似則より 1/6 加速度波形を用いている．入力地震波および解析結果を図 9，図 10 に示す．

「可視化サブシステム」では，得られた解析結果から抽出した変位のデータと「画像・形状データ作成サブシステム」で作成されたデジタル画像とを重ね合わせ，終局状態や地震動の挙動を図 11 に示すように表示させた．図 11(a)は x 方向の最大応答変位付近 (4.3 秒)，図 11(b)は -x 方向の最大応答変位付近 (11.5 秒)，図 11(c)は残留

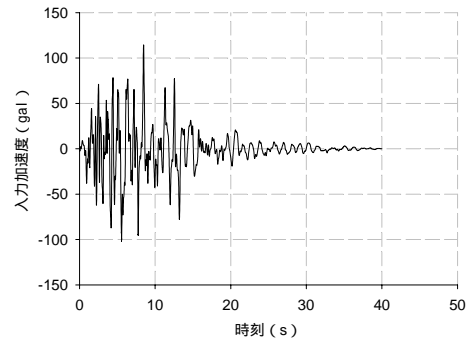
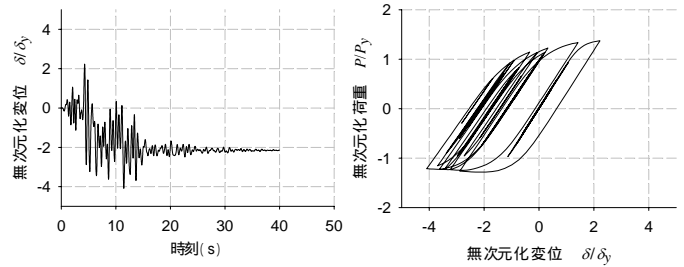


図 9 JR 西日本鷹取駅地盤上 NS 成分 (1/6 モデル)



(a) 時刻歴応答変位 (b) 荷重-変位関係

図 10 弾塑性動的応答結果

変位 (40 秒) を表示した結果である．なお，変形倍率は USSP-D の後処理プログラムで 10 倍に指定している．これらのデジタル画像と図 12 を比較すると，時刻歴応答結果および終局状態を写真上に再現できていることがわかる．さらに，図 13 (a) に示す可視化結果と，図 13 (b) に示す解析結果を比較すると，局部座屈形状の再現ができています．

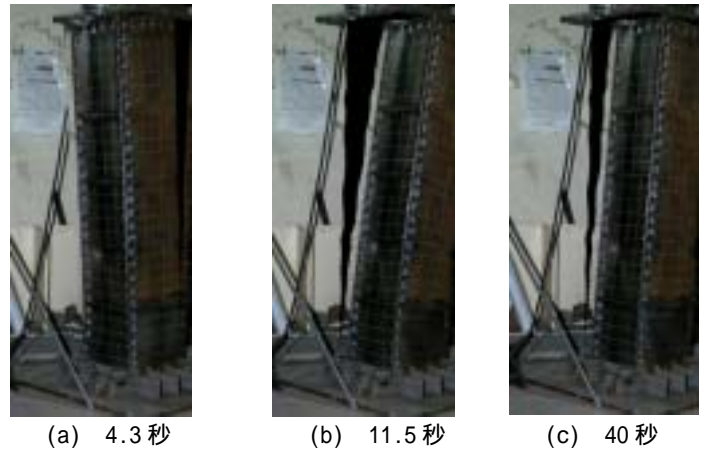


図 11 可視化された変形状態

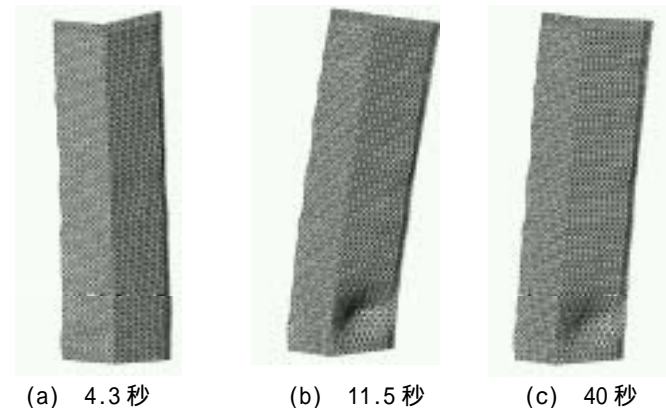
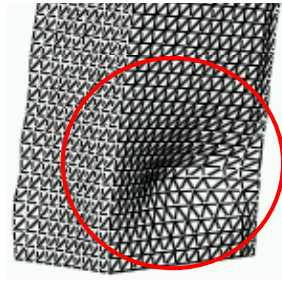


図 12 解析から得られた変形状態

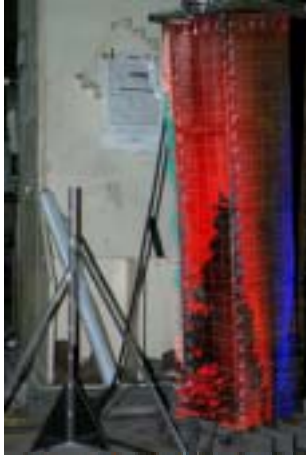


(a) 可視化結果



(b) 解析結果

図 13 変形状態を表示した画像の拡大図



(a) 4.3 秒



(b) 11.5 秒

図 14 応力コンター表示結果

また、解析結果から抽出した応力データと変形状態を表示させた画像を用いて、応力コンターを表示した。表示した応力コンターを図 14 に示す。表示する応力は、USSP・D の後処理プログラムによって、 $\sigma_x$  方向の応力を指定している。変形後の画像データに記録された対象構造物の要素内の画素の RGB 値を変換し、圧縮側に R 値（赤色）を用い、引張側に B 値（青色）を用いた応力コンター図を色の濃淡の違いによって表示させた。

変形状態と応力コンターを同時に表示させることにより、ある要素の応力下の変形状態が瞬時に判断できると考えられる。

本研究では、解析結果を 0.1 秒毎で出力しており、それに伴い、変形状態および応力コンターも 0.1 秒毎で出力している。よって、鷹取の地震波に関しては、0 秒から 40 秒までの地震時の挙動を 400 分割した 400 枚の画像を出力している。これらをアニメーションソフトを用いて時系列にリアルタイムで再生を行った。それによって、構造物の地震時の挙動を直感的に体験できることを示した。

## 5. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

1. 現場において、簡易に、実物の特徴を反映させた三次元座標値の算出が可能なサブシステムである「形状認識サブシステム」および、数値解析モデルが作成可能なサブシステムである「画像・形状データ作成サブシステム」を構築した。さらに、終局状態までの解析結

果をできる限り現実的に近い形で再現することが可能な「可視化サブシステム」を構築した。

2. 上記の「形状認識サブシステム」と、「画像・形状データ作成サブシステム」と「可視化サブシステム」、さらに、USSP および USSP・D を用いて数値解析を行うサブシステムである「解析サブシステム」とを統合した既設鋼構造物の終局状態を可視化するシステム VISUES (*The Visual System for Ultimate State of Existing Steel Structures*) を構築した。
3. 本研究で用いた鋼製箱型供試体を例にとると、約 800 点のデータに対して「形状認識サブシステム」から「画像・形状作成サブシステム」までの所用時間は 1 時間強である。「数値解析サブシステム」における数値解析の所用時間は数値解析モデルの要素分割数および計算方法に左右されるが、「可視化サブシステム」における解析結果から可視化用の画像を作成するまでの所要時間は変形状態、応力コンターのいずれも 30 分程度である。これら全てを合わせた、本システムの所要時間は 2 時間程度である。
4. 本システムは、市販のデジタルカメラと PC および基準座標軸となるキャリブレーション・フレームを使用することによって、既設構造物の三次元座標値を迅速に取得できるとともに、安価で可搬性に優れ、ユーザフレンドリーなシステムであるといえる。そのため、老朽化した鋼橋の点検および診断をする際、補修・補強箇所に関する三次元データを迅速かつ合理的に収集するのに有効であると考えられる。また、ある程度の計測精度が得られ、なおかつ、対象構造物の力学的特性を再現できることから、補修・補強時の予備検討などに本システムは有効であると考えられる。ならびに、今後の課題および検討項目を以下に示す。

1. 数値解析を行ううえで必要な材料特性、板厚および補剛材位置などの視覚から判断できない情報の取得方法を確立する必要がある。
2. 本研究で期待する精度が得られなかった大型構造物に対する画像計測方法、特に、カメラパラメータの収束方法を新たに検討および確立する必要がある。
3. 「形状認識サブシステム」における計測対象点の抽出工程に関しては、さらなるスピード化を要する必要がある。

## 参考文献

- 1) USSP 研究会：USSP ユーザーズ・マニュアル，理論編，Ver.3.0，日本構研情報(株)，1996。
- 2) 北田俊行，中井 博，狩野正人，岡田 潤：単柱形式の鋼製橋脚の局部座屈を考慮した弾塑性動的応答解析法の構築，第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会，pp. 255-262，1998。