

第 5 章

コンクリート部材の変形, ひずみ, ひび割れ計測

5.1 概要

鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリート（以下 PC と呼ぶ）などのコンクリート部材の曲げ・せん断破壊機構を同定することは，耐荷力など力学的性能を把握するうえで重要である．そのためには，載荷試験においてひび割れおよび鉄筋の降伏などコンクリート部材の局所部が示す力学挙動が全体としての変形および耐力にどのように関連しているのかといったコンクリート部材の破壊過程を総合的に追跡することが必須である．しかし，コンクリートはセメントと骨材で構成される極めて不均質な複合材料であり，これらの材料構造の複雑性のみならず，荷重・拘束・配合条件や鉄筋などの異種材料の影響により破壊特性^{1)~7)}が複雑に変化する．そのため，コンクリート中にひずみの集中やひび割れの発生・進展がいつ・どこで・どのように発生するかが予測不能なことが多い．

載荷試験に用いる試験体は，研究室で行う小規模試験体，実構造物を模擬した中規模試験体^{8)~13)}さらに解体橋梁や実構造物を利用した大規模試験体^{14)~19)}と目的によりさまざまである．小規模試験体は，部材寸法が小さいため試験体の製作および破壊挙動の把握が比較的容易ため，コンクリートの配合条件，配筋条件，載荷条件などをさまざま変化させて試験を行うことができる．しかし，コンクリート特有の現象として寸法効果があり，試験結果から実際の構造物の挙動を評価するためには，寸法効果の影響^{20)~26)}を解決しなければならない．中規模試験体は寸法効果の影響が比較的少ないが，コストや試験装置の能力などの関係から実施されるケースは少ない．さらに，中規模試験体は部材寸法が大きいことから各部材の応力状態が複雑になり，破壊挙動を把握するために多点・多方向計測が必要となる．

解体橋梁や実構造物を用いた大規模試験体では，製作した試験体と異なり，ひび割れ，鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのはく離・はく落，鉄筋露出，PC 鋼材の腐食・破断やひび割れ注入，断面修復などの補修箇所，コンクリート，炭素繊維シート，鋼板などの補強箇所が存在する．そのため，部材の弱点部が複雑に変化し，ひび割れの発生や破壊挙動の把握が困難になる．変状の程度によっては，センサを容易に設置できないことも多々ある．

載荷試験における計測項目としては，荷重，ひずみ，変位，振動などがあり，その中でも変位，ひずみ計測は必ずと言っていいほど利用されている計測項目である．しかし，従来の変位計・ひずみゲージなどで得られる計測値は，センサを設置した位置の1点1方向の平均値のみである．また，ひずみゲージ内やその近傍にひび割れが発生すると周辺部とのひずみ挙動に大きな差異が生ずることやゲージが切れて計測不能となる場合もある．さらに，上述したようにコンクリートの破壊特性は複雑であり部材寸法が大きい場合は応力が複雑となり多点・多方向のセンサが必要になることから，コスト，作業面から効率的，効果的でない．

そのような中，最近では光学的計測法の一つ DICM に関する研究・開発が行われている．DICM は，目視では確認できないひずみの集中や進展状況を計測範囲全域において把握することが可能な手法である．そこで本研究ではカメラ装置ならびにスキャナ装置を用いて撤去橋梁の大規模試験体を用いた載荷試験を行い，コンクリート表面に生じる変位，ひずみ計測を行い，ひび割れ発生・進展挙動の予測・評価への有用性について検討した．さらに，スキャナ装置を実載荷計測に適用し，実現場での計測精度について検証した．

5.2 撤去 PCT 桁を用いた載荷試験時の計測

カメラ装置は、スキャナ装置と比較して広い範囲で計測できることやステレオ計測することで三次元形状やその変形、ひずみ計測が可能となる。ここではその特徴を生かし、撤去橋梁の一部を用いた載荷試験を行い、試験時のコンクリート表面に発生する変形、ひずみ、ひび割れ計測を行い、ひび割れ発生・進展挙動の予測・評価への有用性について検討を行った。

5.2.1 試験体概要

試験で使用した橋梁の概要を表 5.2.1 に示す。橋梁の形式は、2 径間単純ポストテンション T 桁橋（2 主桁）である。北陸地方で自転車道として供用（写真 5.2.1）されていたが、塩害による劣化が激しく、供用後 38 年経過後、平成 21 年に撤去された。本橋は撤去前に 2 回の調査が行われており、2 回目の調査（平成 21 年）では、塩害による鉄筋腐食によりコンクリートがはく落し、断面損傷が全体的に見られた。2 径間中、短スパンの海側の主桁では、PC 鋼材の素線破断（8 本のうち 2 本）が確認された。そして、LCC の検討にて架替えが優位と判断されたため撤去に至った。ここでは、2 径間の中で短スパンの海側の主桁（以下調査桁と呼ぶ）を用いた。

試験では写真 5.2.2 に示す土木研究所構造物試験施設内にある 30MN 大型構造部材万能試験機（以下大型載荷試験機と呼ぶ）により調査桁（写真 5.2.3）を用いて 4 点曲げ載荷試験と 3 点曲げ載荷試験を行った。調査桁の側面図および断面図を図 5.2.1 に示す。なお、図には載荷位置、支持位置、計測範囲を示し、4 点曲げ載荷試験を実線、3 点曲げ載荷試験を破線でそれぞれ示す。試験ではカメラ装置により変位・ひずみ、ひび割れ計測を行った。カメラ装置の計測精度の検証のため、4 点曲げ載荷試験では、計測範囲に設置した変位計とパイ型変位計による計測値を、3 点曲げ載荷試験では、計測範囲に設置、貼付した変位計とひずみゲージによる計測値と比較した。試験中には、近接目視によるひび割れ観察を行い、DICM により算出した最大主ひずみ分布と比較した。

表 5.2.1 橋梁概要

橋長	44.0m(支間長 19.2m+23.24m)
全幅員	2.9m (有効幅員 2.5m)
橋梁形式	2 径間単純ポストテンション T 桁橋 (2 主桁)
竣工年	昭和 47 年(1972 年)38 年経過
示方書	昭和 43 年 PC 道路橋示方書



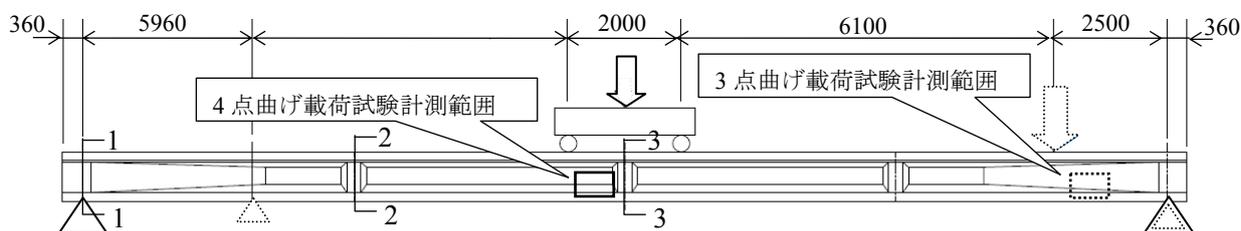
写真 5.2.1 撤去前の橋梁



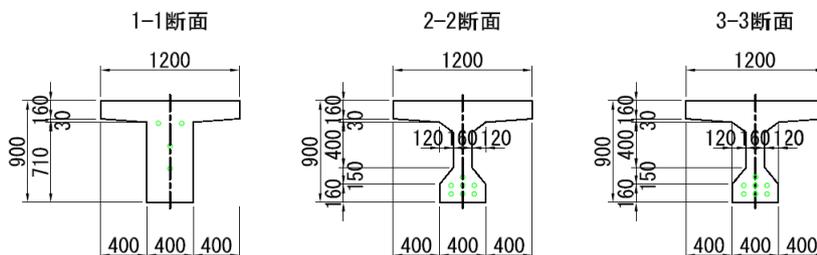
写真 5.2.2 載荷試験機



写真 5.2.3 調査桁



(a) 側面図 (mm)



(b) 断面図 (mm)

図 5.2.1 調査桁概要

5.2.2 4点曲げ載荷試験概要

載荷方法は図 5.2.1 に示す 4 点曲げ載荷とし、曲げひび割れ発生想定荷重(約 120kN)まで載荷を行った。試験では載荷－除荷を 3 サイクル行い、試験開始から終了までの荷重ステップは全部で 40 ステップとなっている。計測状況を写真 5.2.4 に示す。計測は 2 台の CCD カメラ、50mm レンズ、ノートパソコンを使用した。計測器位置関係は、カメラ間距離を約 400mm、カメラと計測面までの距離を約 4080mm とし、この条件下で計測した画像解像度は約 0.27mm/pixel となる。つまり、長手方向において 60mm ゲージは 222pixel で構成されることになる。カメラのシャッタースピードは 90ms とした。載荷前に計測面に白と黒のスプレーを用いてランダムパターンを散布し、計測画像の階調値に変化をもたせた。計測時には、白色発光ダイオード(白色 LED)ライトを 2 つ使用し、計測範囲の明るさを一定

に保つようにした。

計測範囲は図 5.2.2 および写真 5.2.5 に示すように調査桁の等モーメント区間 (Line 1'~6' の区間内) の下フランジからウェブ中央までの側面部 (横 640mm×縦 400mm) とした。なお、計測範囲には、ひび割れや浮きなどの変状がないことを事前に確認をしている。ただし、下フランジには、断面修復箇所が存在する。DICM の精度検証として、調査桁下面に設置した変位計、下フランジ側面に設置したパイ型変位計 (PI4-U~PI7-U, PI4-L~PI7-L) から得られた計測値と比較した。

計測は、無荷重時に初期画像を 50 枚計測し、各荷重ステップにおいて変形画像を 50 枚ずつ計測した。なお、DICM は全 40 ステップのうち 1 サイクル目の除荷範囲 (step13 から step17) は計測していない。DICM の解析条件は、サブセットと 50pixel とし、計測精度を向上させるために各荷重ステップにおいて 50 枚計測した画像に加算平均処理法を用い画像を結合し、その結合画像を用いて画像解析を行った。

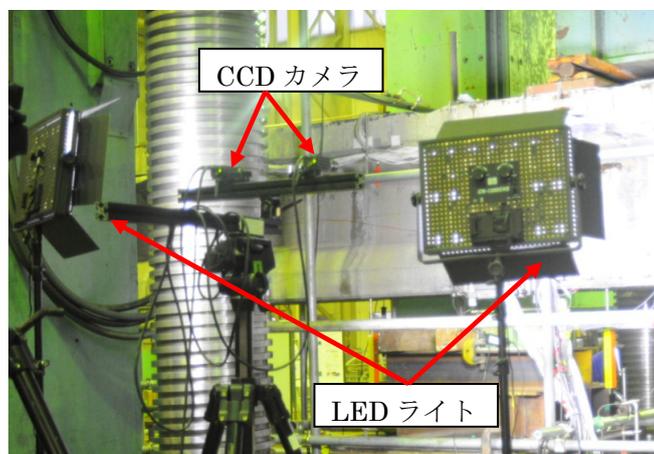


写真 5.2.4 計測状況

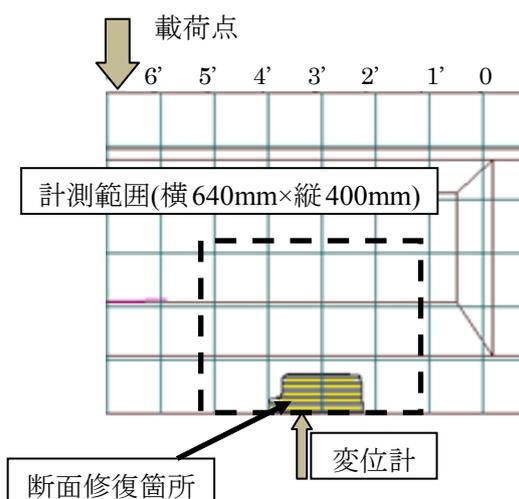


図 5.2.2 計測位置

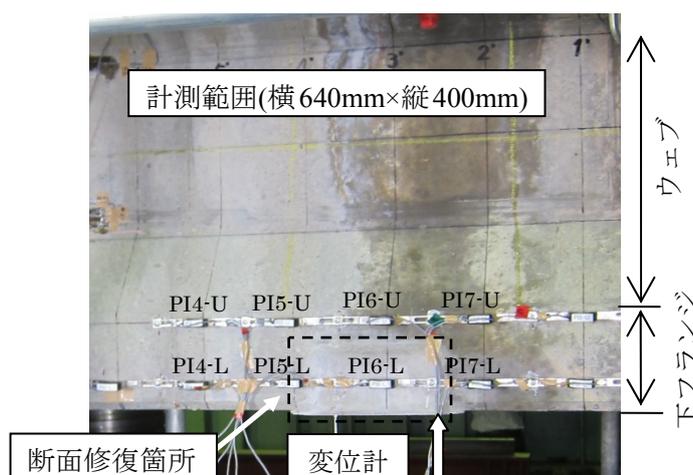


写真 5.2.5 計測位置

5.2.3 4点曲げ載荷試験結果

(1) 変位計測

DICM と変位計およびパイ型変位計 (PI4-U~PI7-U, PI 4-L~PI7-L) により得られた計測結果を図 5.2.3, 図 5.2.4 にそれぞれ示す。また, 計測値の誤差, 標準偏差を表 5.2.2 に示す。図 5.2.3 より変位計と DICM は同じ挙動を示している。また, 誤差の平均は 0.083mm, 標準偏差は約 0.07mm と高精度に計測できた。

図 5.2.4 より DICM にばらつきが確認された。また, 誤差の平均は 0.006mm, 標準偏差の平均は 0.0045mm となった。DICM の計測精度は, 画像解像度の約 1/20 といわれており, 本計測条件の画像解像度は約 0.27mm/pixel であるため, 計測精度は 0.015mm となる。つまり, 精度以上の計測を行っていることになり, ばらつきはその影響だと考えられる。さらに, 大型載荷試験機の振動によりカメラが微振動し, 画像のブレの影響もその原因の一つと考える。PI-6 の変位値が小さいのは, 断面修復箇所の剛性が高いこと, 既存のコンクリートと一体とならずに変形していることが原因だと考えられる。しかし, DICM は概ね変位の増加挙動を捉えていることが確認できた。

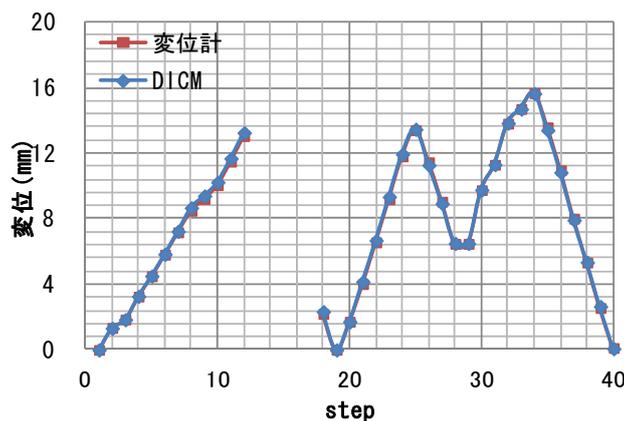
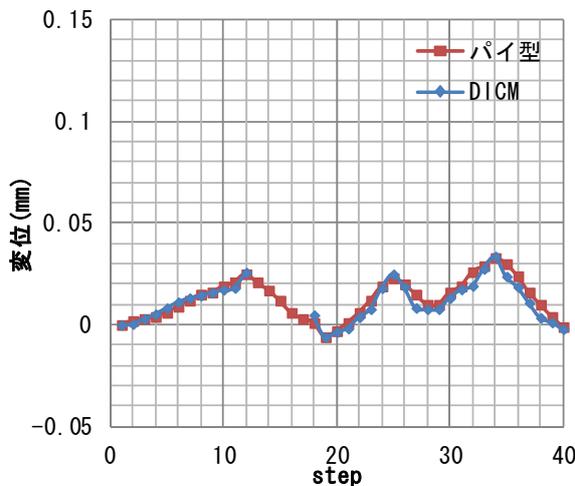
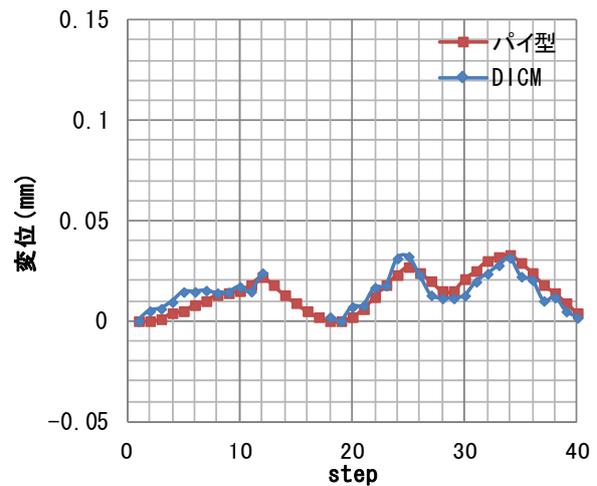


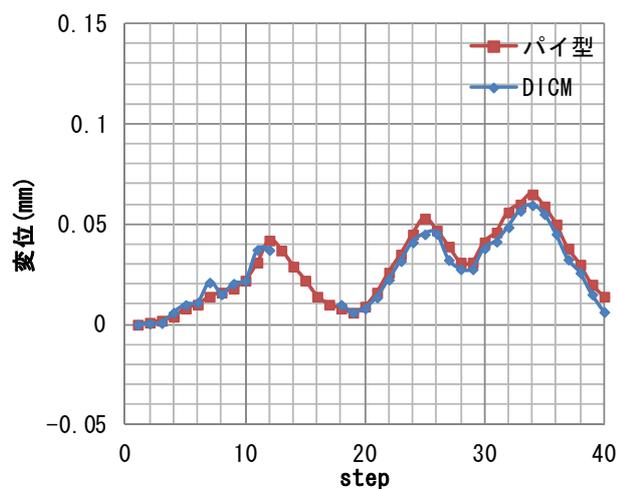
図 5.2.3 変位計測結果



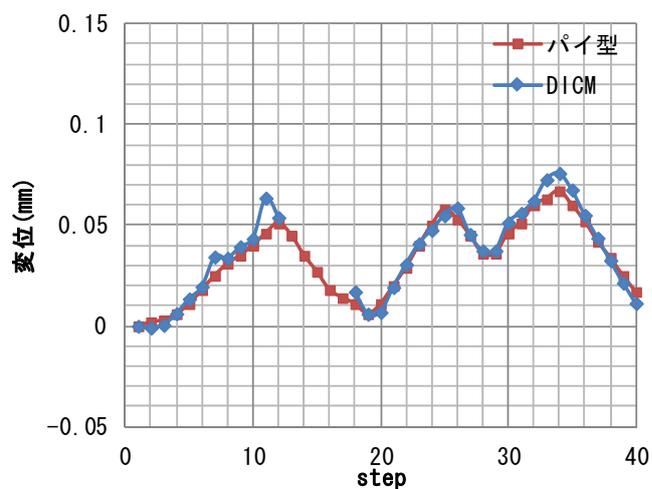
(a) PI4-U



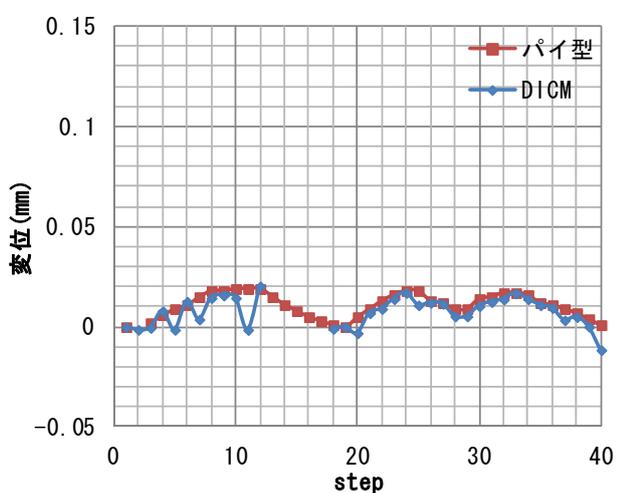
(b) PI4-L



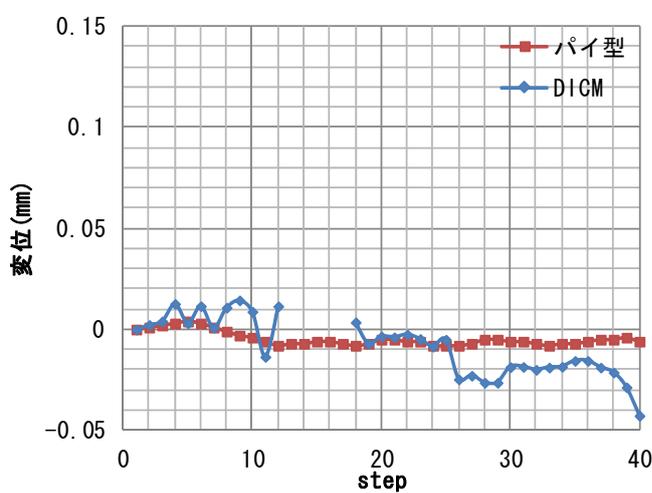
(c) PI5-U



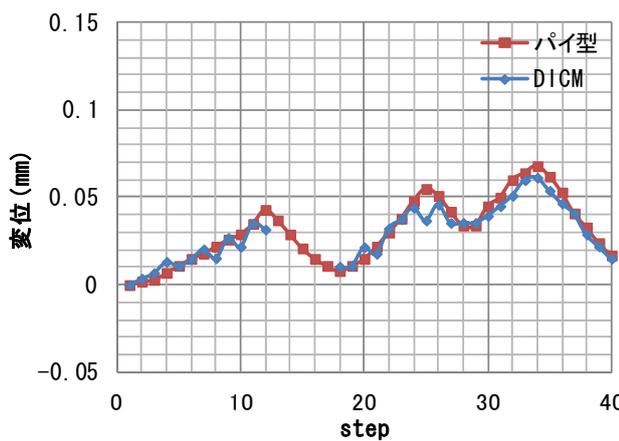
(d) PI5-L



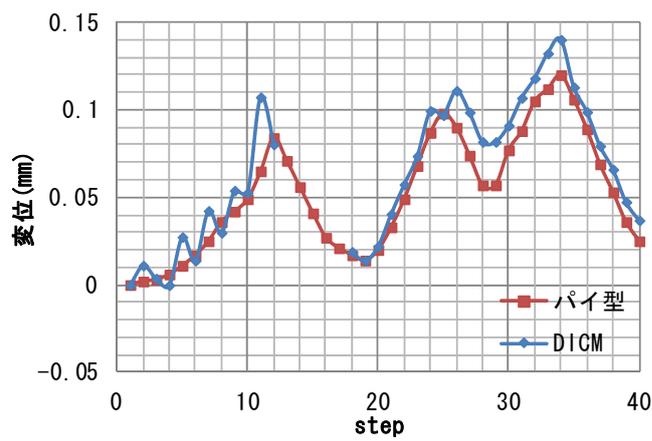
(e) PI6-U



(f) PI6-L



(g) PI7-U



(h) PI7-L

図 5.2.4 計測結果

表 5.2.2 結果一覧

		誤差 (mm)	標準偏差 (mm)	変動係数
変位計		0.083	0.070	1.17
パイ型変位計	PI4-U	0.0025	0.0020	1.24
	PI5-U	0.0036	0.0023	1.58
	PI6-U	0.0040	0.0042	0.94
	PI7-U	0.0043	0.0038	1.14
	PI4-L	0.0042	0.0026	1.63
	PI5-L	0.0039	0.0035	1.10
	PI6-L	0.015	0.0084	1.26
	PI7-L	0.012	0.0091	1.31
	平均	0.0060	0.0045	1.28

(2) 最大主ひずみ分布

試験の荷重-step 曲線を図 5.2.5 に示す. 図 5.2.5 に記載した番号の荷重段階における DICM で算出した最大主ひずみ分布を図 5.2.6 に示す. なお, 分布図中には断面修復部分を黄点線で記載している.

最大主ひずみ分布図より Line5', 4', 2'上に大きなひずみの集中がみられる. 特に下フランジの既存のコンクリートと断面修復部の界面 (Line4', 2') からひずみが集中し荷重の増加とともにウェブにひずみの集中が伸びることが確認された. これは PI5-U, PI5-L, PI7-L, PI7-U の変位値が大きく, 断面修復部 PI6-U, PI6-L の変位値が小さいことから説明がつく. また, ⑤からは, 荷重除荷後のひずみ分布から残留ひずみが確認された. 目視によるひび割れ観察では計測範囲内でひび割れは確認できなかった. 以上より, DICM は目視では確認できないひずみの集中を可視化することができることが確認できた.

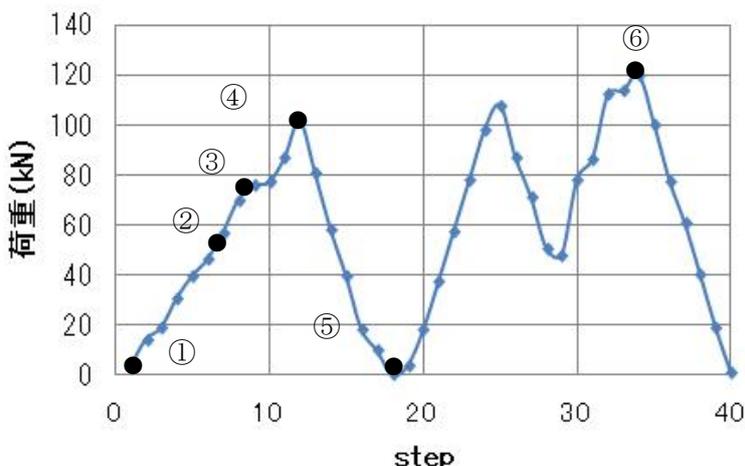


図 5.2.5 荷重-step 曲線

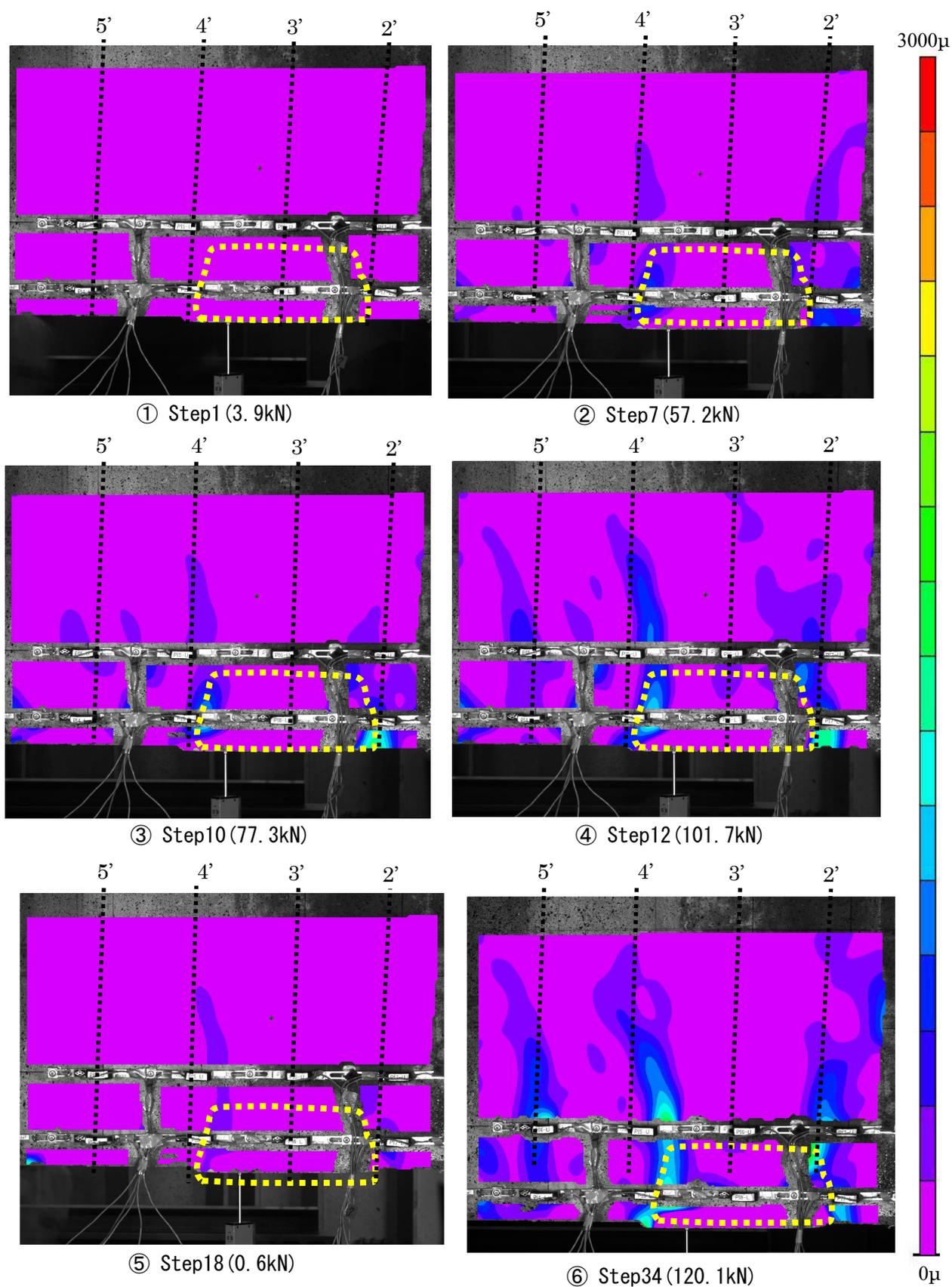


図 5.2.6 最大主ひずみ分布

5.2.4 3点曲げ載荷試験概要

4点曲げ載荷試験後に載荷点と支点を移動させて3点曲げ載荷試験を行った。載荷は調査桁が破壊に至るまで行った。計測状況を写真5.2.6に示す。計測は2台のCCDカメラ，50mmレンズ，ノートパソコンを使用した。カメラ間距離を約400mm，カメラと計測面までの距離を約4200mmとし，この条件下の画像解像度は約0.28mm/pixelとなる。つまり，60mmゲージは214pixelで構成されることになる。カメラのシャッタースピードは70msとした。載荷前に計測面に白と黒のスプレーを用いてランダムパターンを設けた。計測時には，白色発光ダイオード(白色LED)ライトを2つ使用し，計測範囲の明るさを一定に保つようにした。

計測範囲は図5.2.1に示すように載荷点外側の下フランジからウェブ中央までの(横670mm×縦480mm)とした。なお，計測範囲にはひび割れや浮きなどの変状がないことを確認している。DICMの計測精度を検証するため写真5.2.7に示す調査桁下面に設置した変位計1，下フランジに貼付した一軸のひずみゲージ1，ウェブに貼付した三軸のひずみゲージ2，3，4から得た値と比較した。なお，ひずみゲージのゲージ長は60mmである。

計測は，無載荷時に初期画像を50枚計測し，10kN毎に変形画像を50枚ずつ計測した。DICMの解析条件は，サブセットと50pixelとし，計測精度を向上させるために各荷重ステップにおいて50枚計測した画像に加算平均処理法を用い画像を結合し，その結合画像を用いて画像解析を行った。

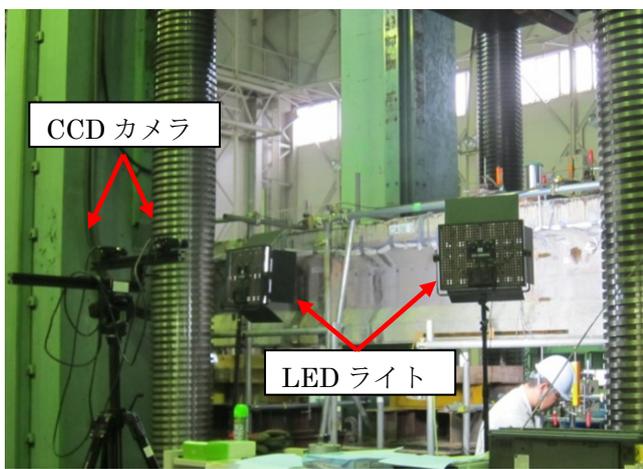


写真5.2.6 計測風景

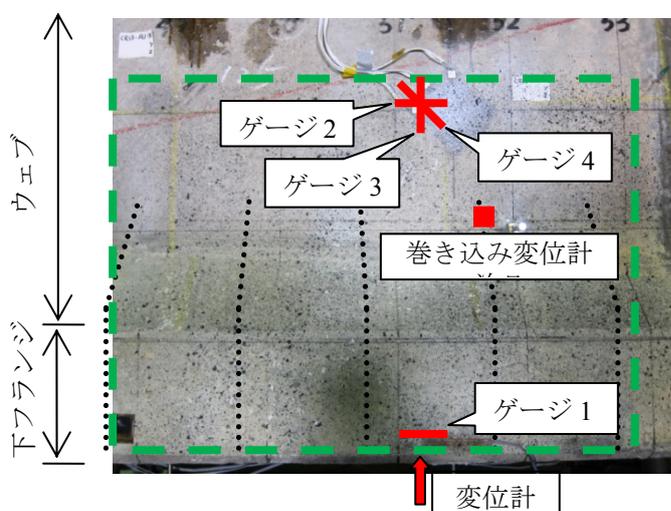


写真5.2.7 計測範囲

5.2.5 3点曲げ載荷試験結果

(1) 変位，ひずみ計測

DICMと変位計，ひずみゲージによる得られた計測値を図5.2.7に示す。また，誤差の平均，標準偏差を表5.2.3に示す。なお，最大主ひずみはゲージ2,3,4から算出した。

図5.2.7(a)より変位計とDICMは同等の挙動を示している。表より誤差の平均は0.12mm，標準偏差は約0.19mmとなり，高精度で計測できている。図5.2.7(b)(c)より，380kN付近からひずみが急激に増加したのはひび割れが生じたためである。また，図5.2.7(d)(e)はひずみの変動が確認されなかった。

DICMは多少ばらつきが確認されるがひずみゲージと同等の挙動を示している。ゲージ2, 3, 4の誤差の平均と標準偏差は、同精度で計測できていることが確認できる。最大主ひずみについても、DICMは多少ばらつきが確認されるがひずみゲージと同等の挙動を示している。

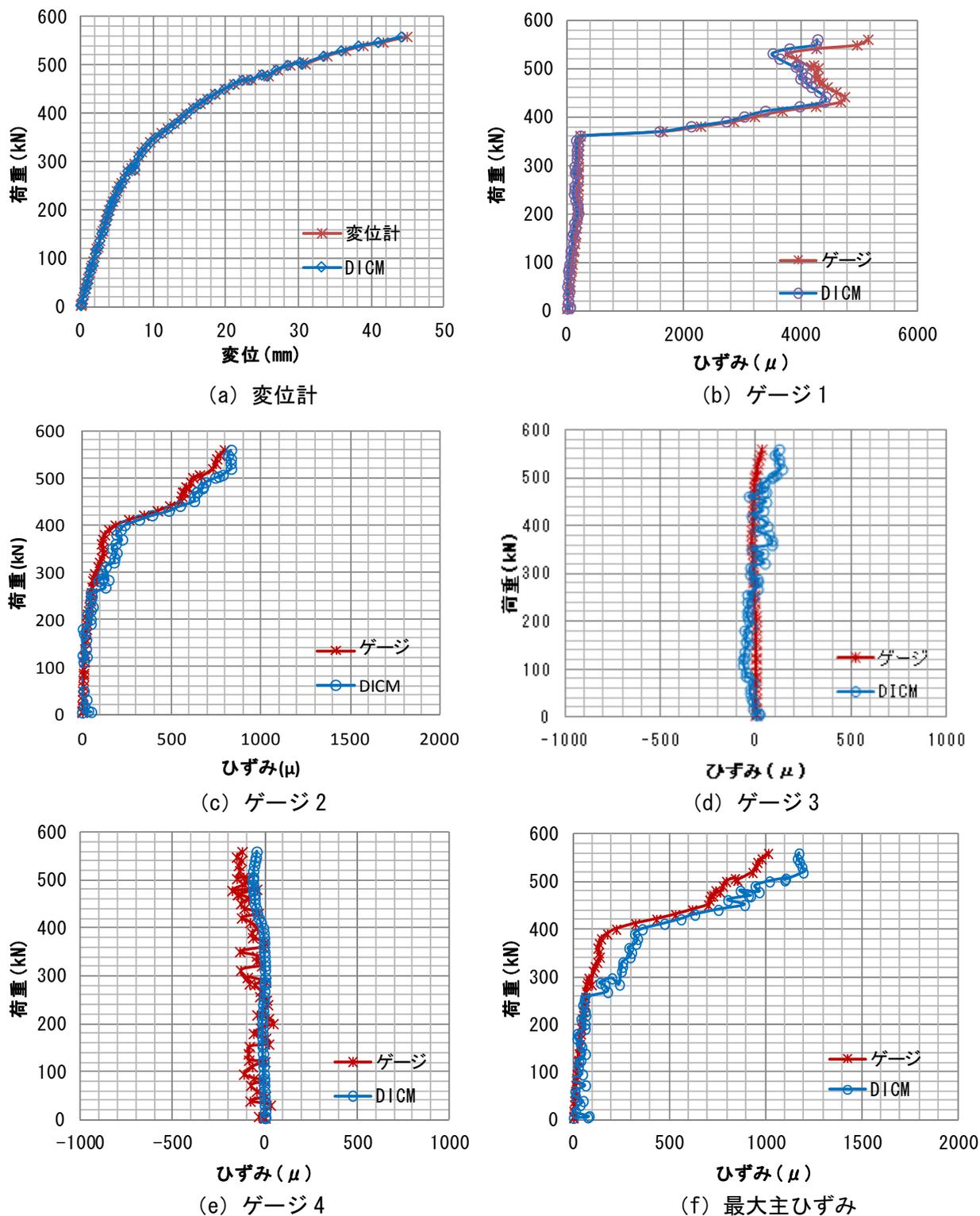


図 5.2.7 計測結果

表 5.2.3 結果一覧

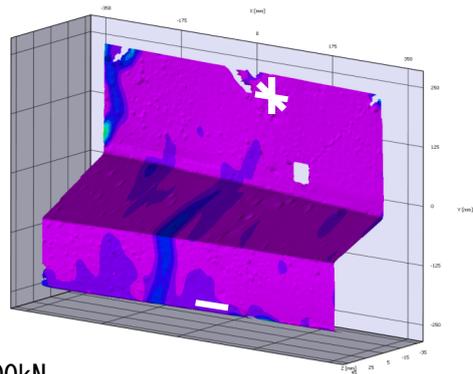
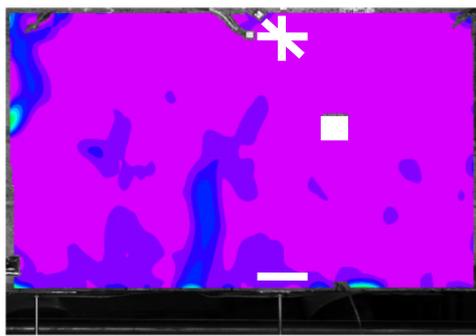
		誤差平均 (mm)	標準偏差 (mm)	変動係数
変位計		0.12	0.19	0.63
ひずみゲージ	1	129	166	0.78
	2(横)	45.3	34.3	1.32
	3(縦)	45.9	31.3	1.47
	4(斜め)	50.0	35.5	1.41
	最大主ひずみ	107	153	0.69

(2) 最大主ひずみ分布

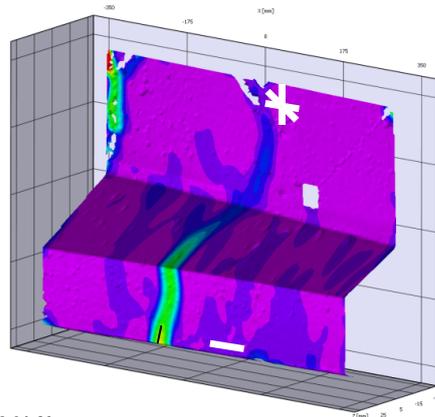
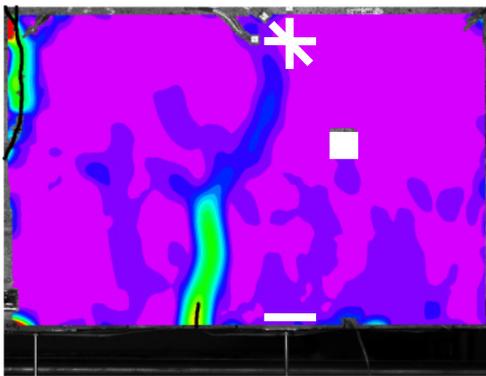
荷重段階における DICM により求めた最大主ひずみ分布（二次元・三次元表示）を図 5.2.8 に示す。なお，最大主ひずみ分布には目視観察により得られたひび割れを黒線，ひずみゲージと巻き込み変位計の治具を白色で記載している。巻き込み変位計の結果は，本研究と関連がないため割愛する。

図より 200kN 時に計測範囲の中央の下フランジ位置にひずみの集中が確認され，280kN 時にひずみの集中箇所にはひび割れが目視で確認された。ひずみの集中は，ゲージ 2 の方向に進展しているが，320kN 時では荷重点方向に新しいひずみの集中が確認された。荷重の増加にともない荷重点方向にそのひずみが進展し，ひずみの集中箇所にはひび割れが確認された。また，荷重 380kN 時ではひずみゲージ位置でひずみの集中に沿ったひび割れ発生が確認された。図 5.2.7 (b)においても，荷重 380kN 付近にひずみが増大しており，計測結果からもひび割れ発生が確認できる。載荷荷重 440kN 時には点線枠内に示すように斜めひび割れを予兆させるひずみの集中が確認でき，480kN 時にはひずみの集中に沿ったひび割れ発生が確認された。図 5.2.8 からひび割れはひずみの集中箇所に発生しており，本手法を用いることでひび割れの発生・進展を予測・追跡することができることがわかる。

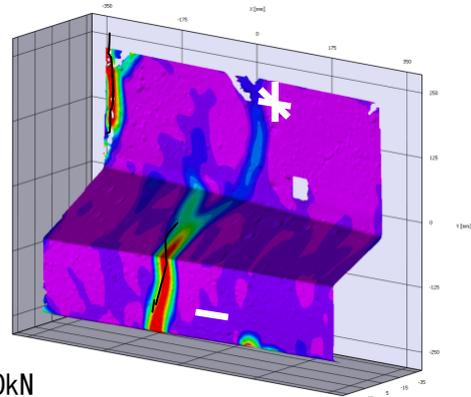
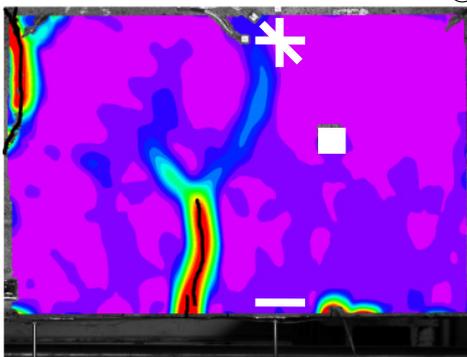
また，2 台のカメラを用いてステレオ計測することで，計測範囲の形状やそのひずみ分布の計測することができるため，ひずみの集中をより視覚的にとらえることができ，ひび割れの発生・進展の追跡観察に有効であることがわかる。



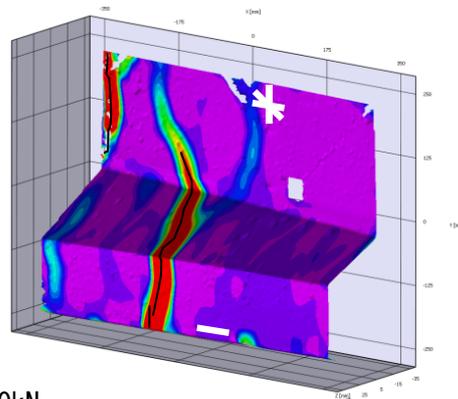
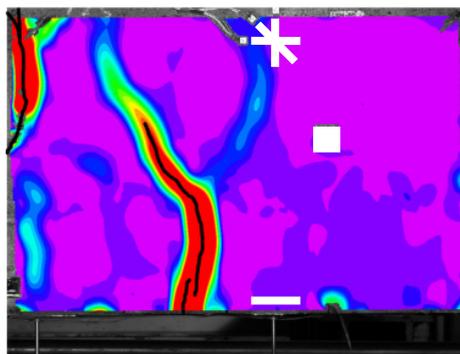
① 200kN



② 280kN



③ 320kN



④ 350kN

3000 μ



0 μ

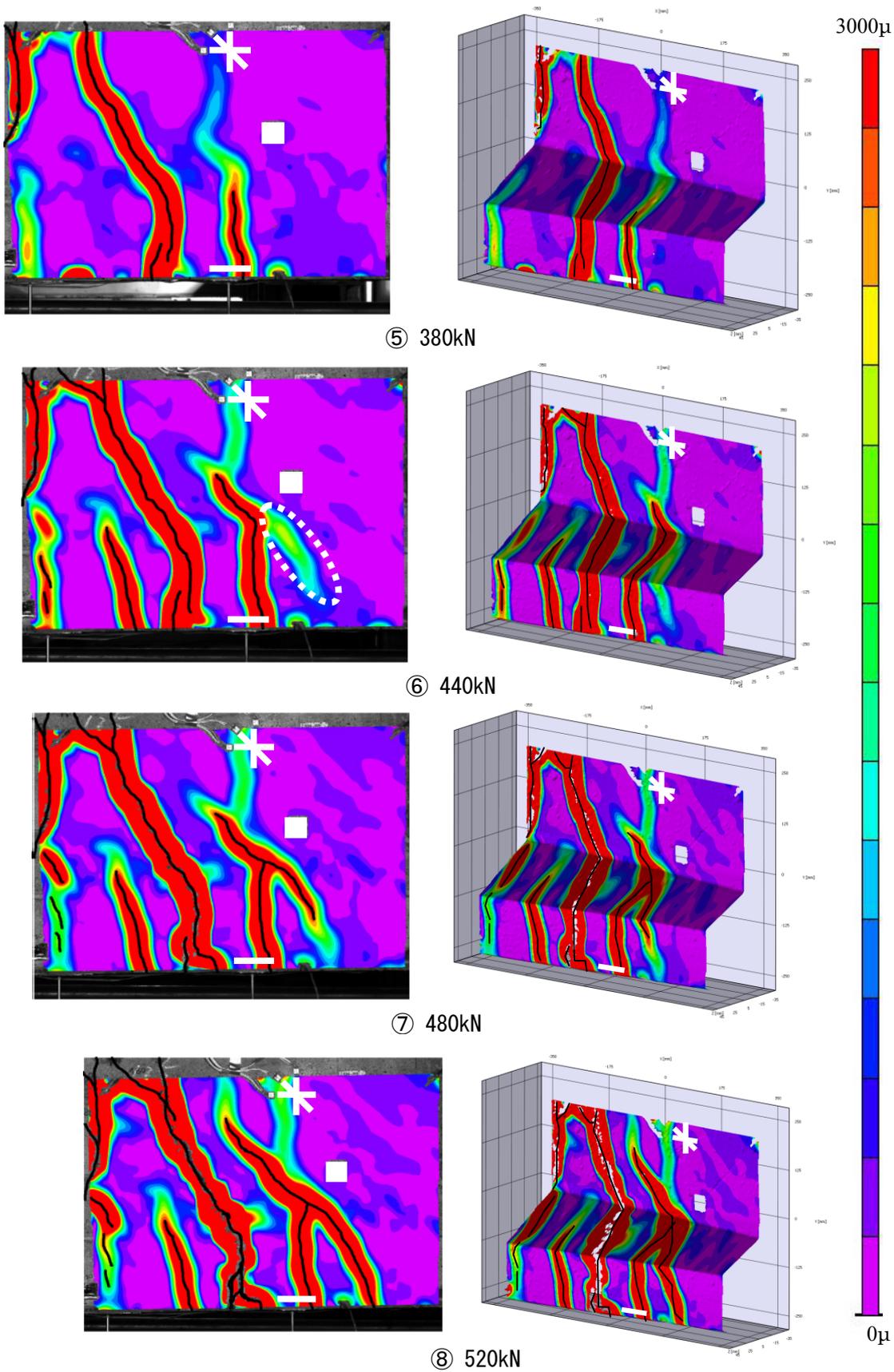


図 5.2.8 最大主ひずみ分布図

5.3 撤去 RC 桁を用いた載荷試験時の計測

スキャナ装置の計測精度は第3章で述べたように非常に高いことが確認された。ここでは、撤去橋梁の一部を用いた載荷試験時のコンクリート表面に発生するひずみを計測し、装置の有用性を検証した。ここでは、スキャナ装置 A を用いた。

5.3.1 試験概要

80年間供用後撤去された RC 桁の載荷試験において、スキャナ装置を用いてコンクリート表面のひずみ計測を行った。撤去された RC 桁試験体は、長さ 8400mm、フランジ幅 1000mm、ウェブ幅 470mm の T 形断面である。桁は供用中、塩害劣化により補修が繰り返されており、ウェブ部はモルタルによって断面修復がなされている。

載荷方法としては、写真 5.3.1 および図 5.3.1 に示すように単純支持状態で中央 2 点載荷とし、0kN から 900kN まで 100kN 毎に荷重を載荷した。試験に用いた RC 桁のスキャナ装置による計測位置を写真 5.3.2 に示す。スキャナ装置の計測位置は、載荷点の内側と外側の 2 箇所である。計測では、各荷重段階においてスキャナ装置を移動させて計測した。計測状況を写真 5.3.3 に示す。

以下にスキャナ装置の計測手順を示す。

- ① 計測位置を決めて、コンクリート表面の凹凸をグラインダーなどにより研磨し平面度を出す。
- ② 計測位置をアセトンなどで清掃した後、計測面にスプレーを用いてランダムパターンを設ける。
- ③ 計測面にスキャナ装置の固定金具を取り付ける。
- ④ 焦点距離調整ネジを調整して、スキャナ装置と試験体までの焦点距離を一定にする。その後、回転盤により、橋軸方向に主走査方向を一致させる。
- ⑤ 無載荷時に初期画像を計測する。
- ⑥ 載荷荷重を 0kN から 100kN 刻みで 900kN まで変化させて、100kN 毎に中央側と西側の変形画像を計測する（変形画像）。
- ⑦ 初期画像と変形後の画像を用いて DICM により解析し、各荷重段階のひずみ分布算出する。
- ⑧ スキャナ装置の計測画像を用いてひび割れ計測を行う。そして、ひずみ分布とひび割れ幅、長さを比較する。



写真 5.3.1 現場風景

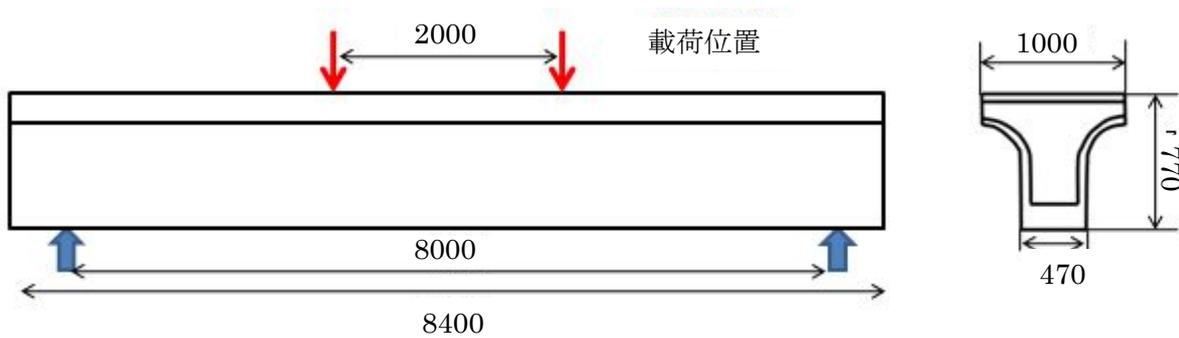


図 5.3.1 試験体概要 (mm)

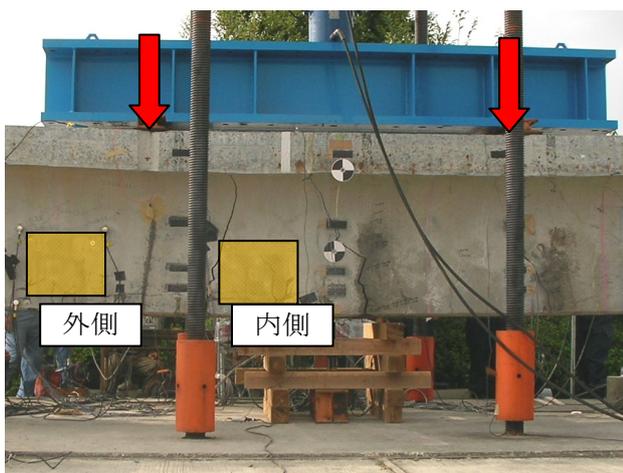


写真 5.3.2 計測位置

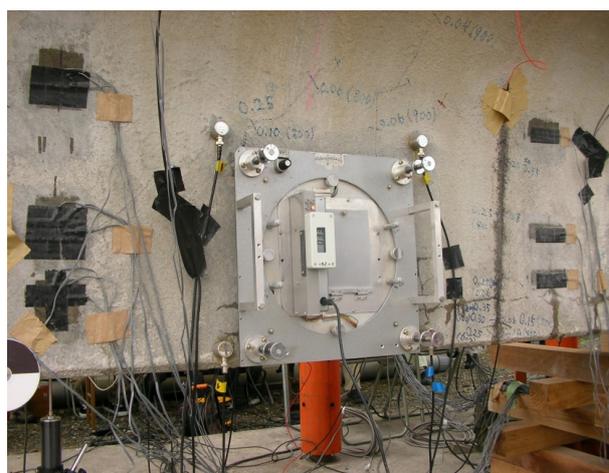


写真 5.3.3 計測状況

5.3.2 試験結果

スキャナ装置により得られた内側と外側のひずみ分布を図 5.3.2 と図 5.3.3 にそれぞれ示す。なお、ここで表示したひずみは x 方向（橋軸方向）のひずみ分布である。ひずみ分布は引張ひずみが大きくなるほど赤く、圧縮ひずみが大きくなるほど青く表している。また、破線は荷重載荷前から確認できたひび割れ、実線は載荷後のひび割れ、灰色の部分は水のしみ出しを表す。分布図には、スキャナ装置で計測したひび割れ幅を示している。

外側の計測結果では、初期の状態において計測面右側の縦方向に $0.17\text{mm}\sim 0.30\text{mm}$ のひび割れが生じていた。 0kN から 300kN までは分布図に大きな変化が確認されなかったが、 400kN 載荷時に 500μ 前後の引張ひずみが集中する領域が中央部付近に発生した。また、その領域内に一箇所微細なひび割れ（幅 0.02mm ）の発生が確認された。ちなみに、本装置の画像分解能は約 $20\mu\text{m}$ (1200dpi) であるため、画像内の微細なひび割れの確認、計測が可能である。 600kN 載荷時には中央の引張領域のひずみ値はさらに大きくなり、新たなひび割れが発生したことが分かる。さらに 900kN となるとコンター図左側に新たな引張領域とひび割れの発生が確認され、中央と右側の2本ひび割れに挟まれた区間においても応力再配分により大きな引張ひずみの領域が発生した。

内側の計測位置では、初期の状態において計測面右側の縦方向に $0.04\text{mm}\sim 0.11\text{mm}$ のひび割れが生じていた。 0kN から 300kN 載荷時までは、ひび割れに大きな変化が確認されなかったが 400kN ぐらいからひび割れ幅が大きくなり、そのひび割れに沿ってひび割れ近傍に引張ひずみ領域が確認された。 700kN 載荷時には計測面左下から新たな引張ひずみ領域が確認され、 800kN 載荷時には、その引張ひずみ領域のほぼ中央にひび割れが発生し、ひび割れ幅の増大およびひび割れの発生に伴い右側のひび割れ幅の開口の変動が小さくなったことも確認できた。

以上から、計測面内のひずみ分布を精度良く求めることができることや応力集中箇所やそれに起因するひび割れ発生を予測することできた。

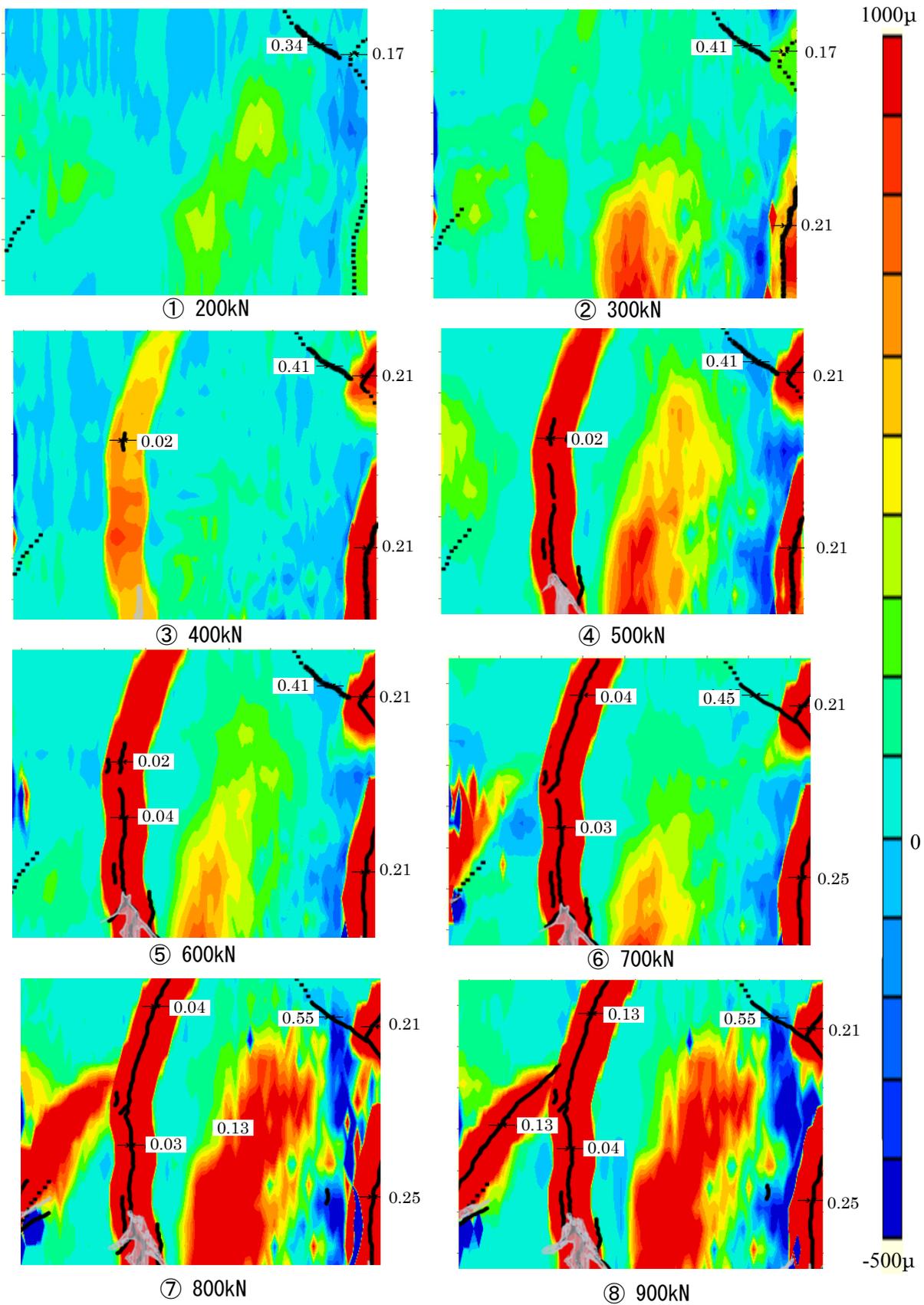


図 5.3.2 x 方向 (橋軸方向) ひずみ分布 (外側)

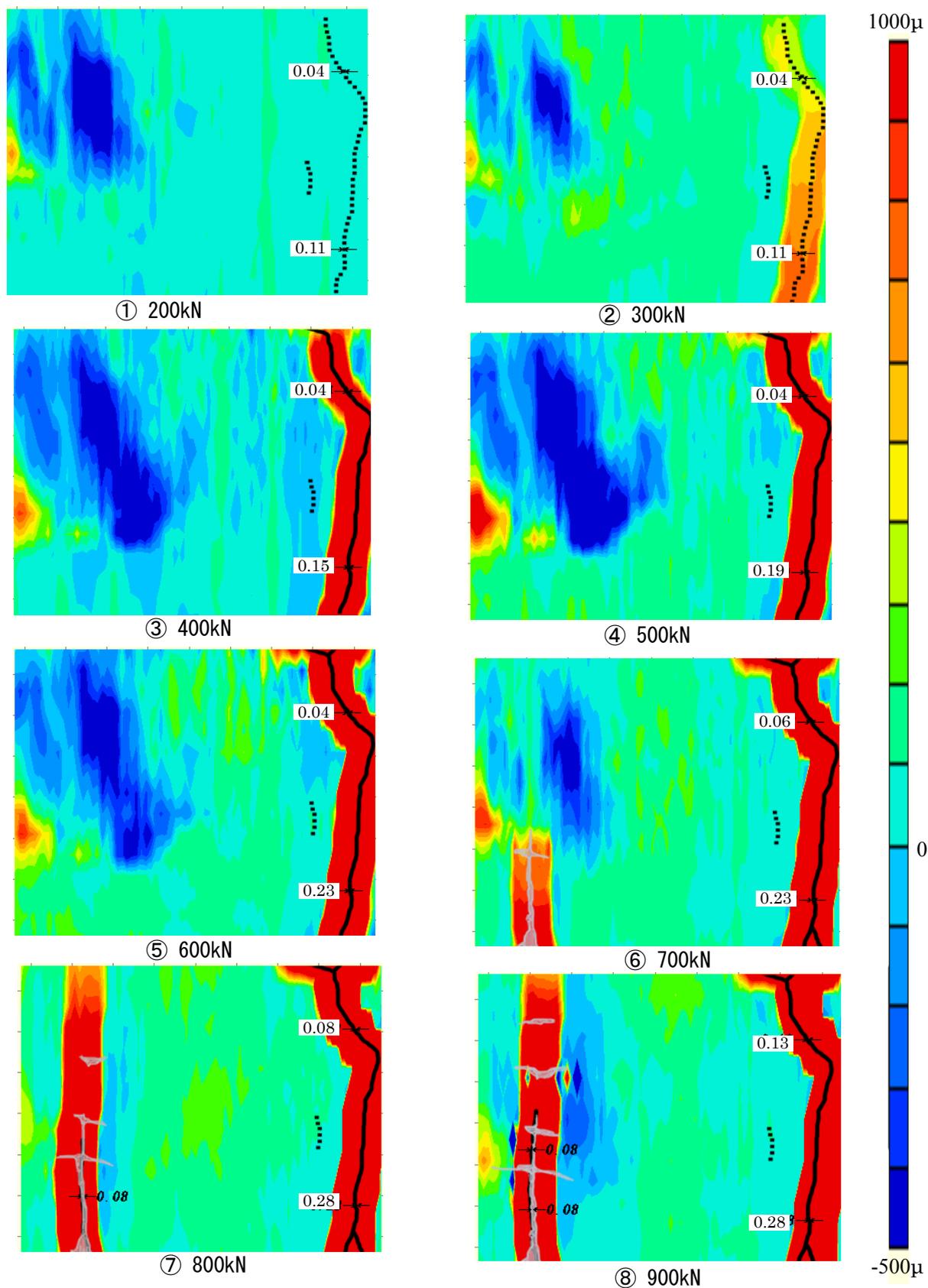


図 5.3.3 x 方向 (橋軸方向) ひずみ分布 (内側)

5.4 実橋載荷試験時の計測

スキャナ装置の計測精度は第3章で述べたように非常に高いことが確認された。しかし、第3章で行った計測は試験体レベルでの計測精度に過ぎない。そこで、実際に供用されている橋梁を用いた載荷試験時の計測を行い、装置の有用性を検証した。ここでは、スキャナ装置Aを用いた。

5.4.1 橋梁概要

橋梁の外観を写真5.4.1に示す。また、図5.4.1に一般図を示す。対象橋梁は、長崎県北松浦郡佐々町にある斜角を有する1径間単純ポストテンション方式PCT桁橋であり、橋名は富田橋である。交差物件は河川であり、海岸線約1.2kmに位置し、潮の干満がある。本橋は、市道として使用されていたが、西九州自動車道建設に伴い、河川改修で平成22年11月に解体された。本橋梁の適用示方書は、昭和36年度改訂PC設計施工指針、昭和31年鋼道路橋設計示方書/鋼道路橋製作示方書で設計荷重は、TL-20である。本橋梁の特徴としては、斜角を有しているが、横桁は橋軸方向に対して直角方向に配置されている。また、コンクリート舗装が施工されている。

主な変状としては、張出床版水切り部と上フランジの界面付近に鉄筋露出や床版横締めPC定着具のアンカープレート下端の露出(写真5.4.2(a))が海側・山側全面に確認された。また、鋼製支承の腐食(写真5.4.2(b))と横桁PC定着部の跡埋めモルタルの浮きが全箇所確認された。その他の変状としては、主桁下フランジに鉄筋露出が1ヶ所、A1、A2橋台付近のG2-G3間間詰め部床版部と主桁上フランジ界面に遊離石灰(写真5.4.2(c))がそれぞれ1ヶ所確認された。なお、主桁と間詰め床版部に関してはひび割れや浮きは確認されなかった。コンクリート舗装、地覆、高欄、排水弁、排水パイプについては、変状は確認されなかった。

本橋梁の撤去前に、耐荷力を把握するために実橋載荷試験を行った。載荷試験では、スキャナ装置、ひずみゲージ、変位計による計測を行った。

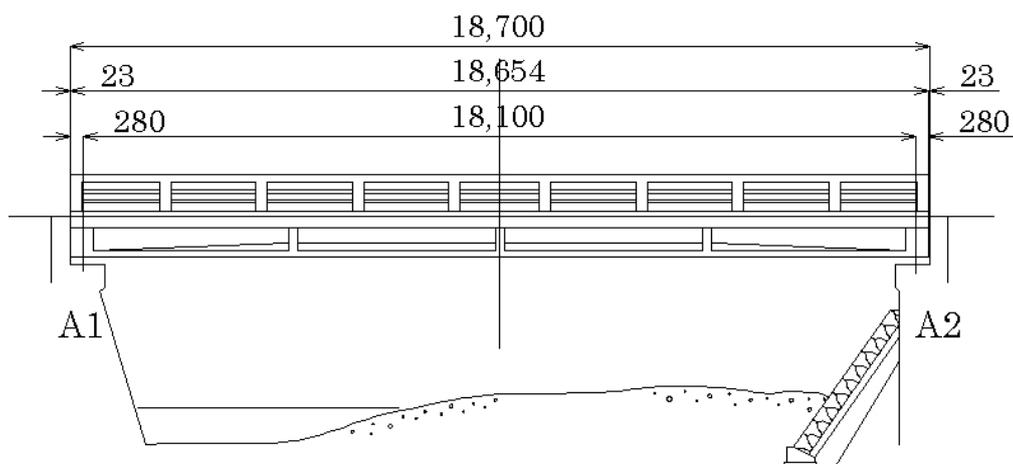


(a) 側面

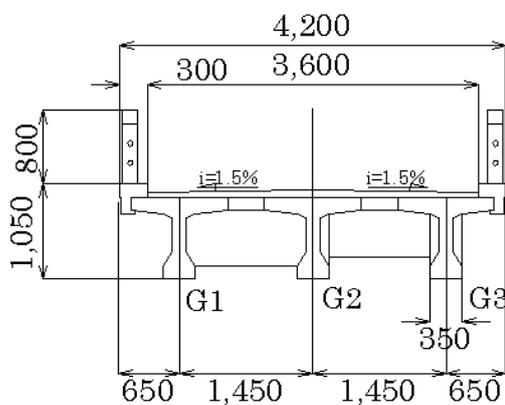


(b) 桁下

写真5.4.1 橋梁外観



(a) 側面図



(b) 断面図

図 5.4.1 一般図 (mm)



(a) 鉄筋露出



(b) 支承部の腐食



(c) 遊離石灰

写真 5.4.2 変状写真

5.4.2 載荷試験

載荷試験状況を写真 5.4.3 に，載荷位置図を図 5.4.2 にそれぞれ示す．載荷方法は，鉄板（約 9 kN）をラフタークレーンにより，舗装面に 1 枚ずつ積み上げていき，最終的に合計 35 枚（約 310kN）を載荷させた．G2 桁に集中的に載荷させるために，スパン中央部 G2 桁直上の舗装面に角木を 2 本設置し，その上に鉄板を積み上げた．

計測器設置状況を写真 5.4.3 に計測器設置位置図の断面図と平面図を図 5.4.3 にそれぞれ示す．ひずみゲージは全主桁の中央部のみ，変位計は全主桁の中央と 1/4 点に設置した．G2 桁に関しては，中央と 1/4 点に横桁が存在するため，横桁から A1 橋台方向に約 765mm の位置に設置した．変位計は，桁下の架設足場から下フランジ付近まで延長させた単管に固定したマグネットスタンドに設置した．ひずみゲージは，ゲージ長 60mm を使用し，1 ゲージ 3 線方式を採用した．これらのひずみゲージと変位計の信号線を桁下中央部付近に設置したデータログに集めて計測を行った．計測は，0 枚，5 枚，10 枚，15 枚，20 枚，25 枚，30 枚および 35 枚載荷時に行った．

スキャナ装置は，G2 桁中央部下面で計測を行った．また，スキャナ装置のひずみ計測精度の確認を行うためにコンクリート表面にゲージ長 60mm のひずみゲージを貼付した．ひずみゲージを貼付した後，ゲージ上から白と黒のスプレーを用いてランダムパターンを設けた．スキャナ装置の計測手順を以下に示す．

- ① 計測位置を決めて，コンクリート表面の凹凸をグラインダーなどにより研磨し平面度を出す．
- ② 計測位置をアセトンなどで清掃した後，計測面にスプレーを用いてランダムパターンを設ける．
- ③ 計測面にスキャナ装置の固定金具を取り付ける．
- ④ 焦点距離調整ネジを調整して，スキャナ装置と試験体までの焦点距離を一定にする．その後，回転盤により，橋軸方向に主走査方向を一致させる．
- ⑤ 無載荷時に初期画像を計測する．
- ⑥ 鉄板を 5，10，15，20，25，30 枚および 35 枚の各載荷時の変形画像を計測する．
- ⑦ 初期画像と変形後の画像を用いて DICM により解析し，各荷重段階のひずみ分布算出する．
- ⑧ スキャナ装置の計測値とひずみゲージの計測値を比較する．



(a) 載荷状況



(b) 35 枚載荷完了

写真 5.4.3 試験状況

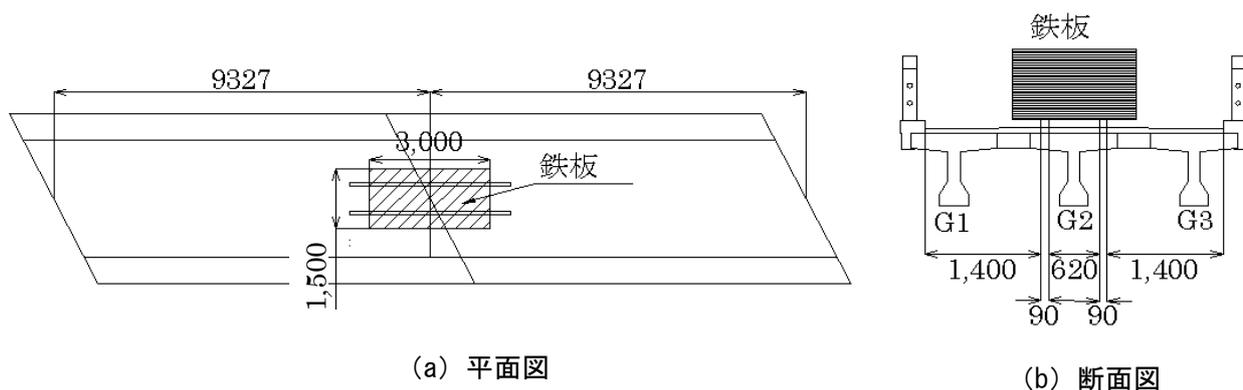


図 5.4.2 載荷位置図 (mm)

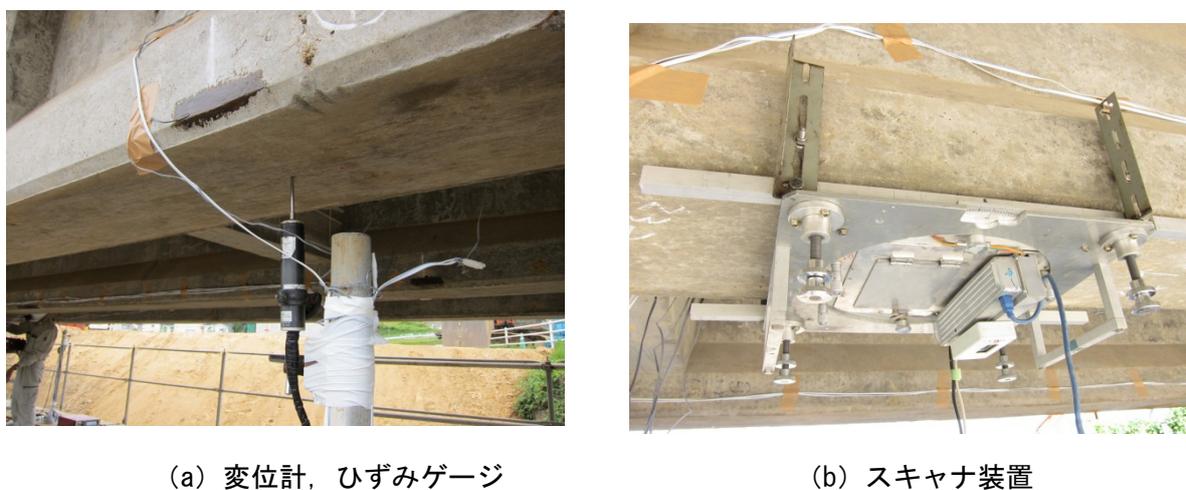


写真 5.4.3 設置状況

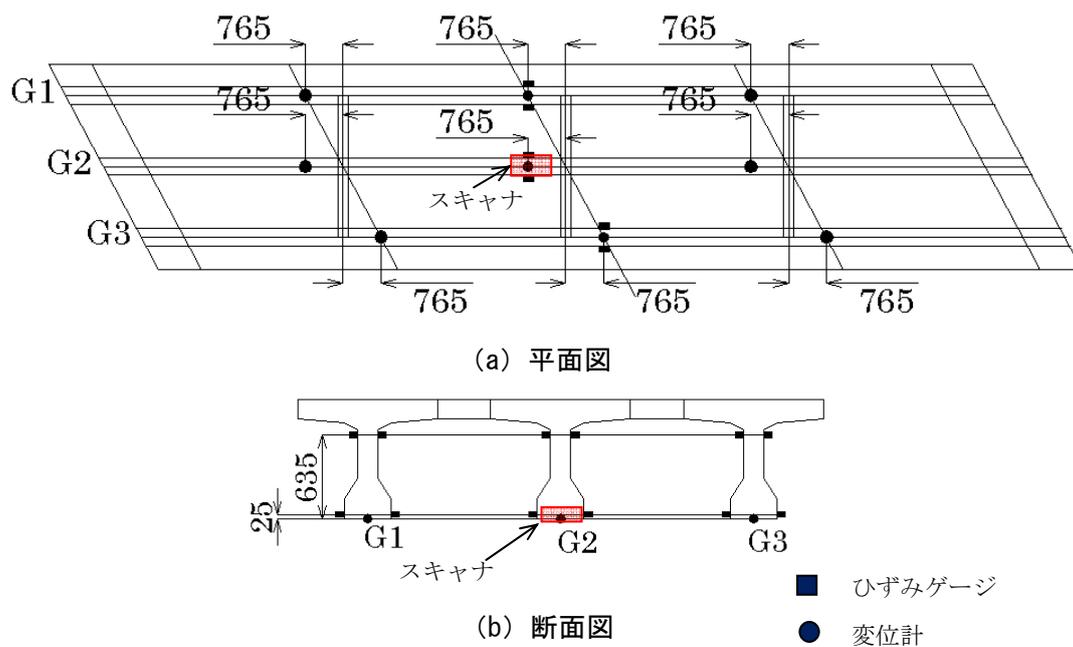


図 5.4.3 計測位置図 (mm)

5.4.2 試験結果

荷重枚数と G1, G2 および G3 桁の変位の関係と G1, G2 および G3 桁における荷重枚数毎における主桁全体の橋軸方向の変位分布を図 5.4.4 に示す。図より荷重の増加とともに変位が線形的に増加していることが確認できる。中央部の変位は、G3 主桁が若干小さい値を示したがすべての桁ではほぼ同じ挙動を示しているのが確認できた。35 枚荷重時 (315kN) には、G1 : -3.8mm, G2 : -3.8mm および G3 : -3.6mm の変位が発生していることが確認できた。また、横桁の分配効果も確認できた。

荷重枚数とひずみの関係と G1, G2 および G3 桁における荷重枚数毎における主桁断面の高さ方向のひずみ分布を図 5.4.5 に示す。なお、計測値は、同じ高さの 2 つのひずみゲージ値を平均してプロットしている。図より変位と同様、荷重の増加とともにひずみが線形的に増加しているのが確認できた。35 枚荷重時 (315kN) に下フランジ側面で G1 : 100 μ , G2 : 107 μ および G3 : 78 μ の引張ひずみが確認できた。G3 に関しては、G1, G2 と比較して約 30 μ ほど小さい値を示した。変位計測ですべての主桁ではほぼ同じ変位値を示したにもかかわらず G3 主桁のひずみ値が小さいのは、ひずみゲージ近傍のコンクリート品質の影響だと考えられる。また、主桁の中立軸は、下フランジ下面から約 660mm の位置であることが確認できた。

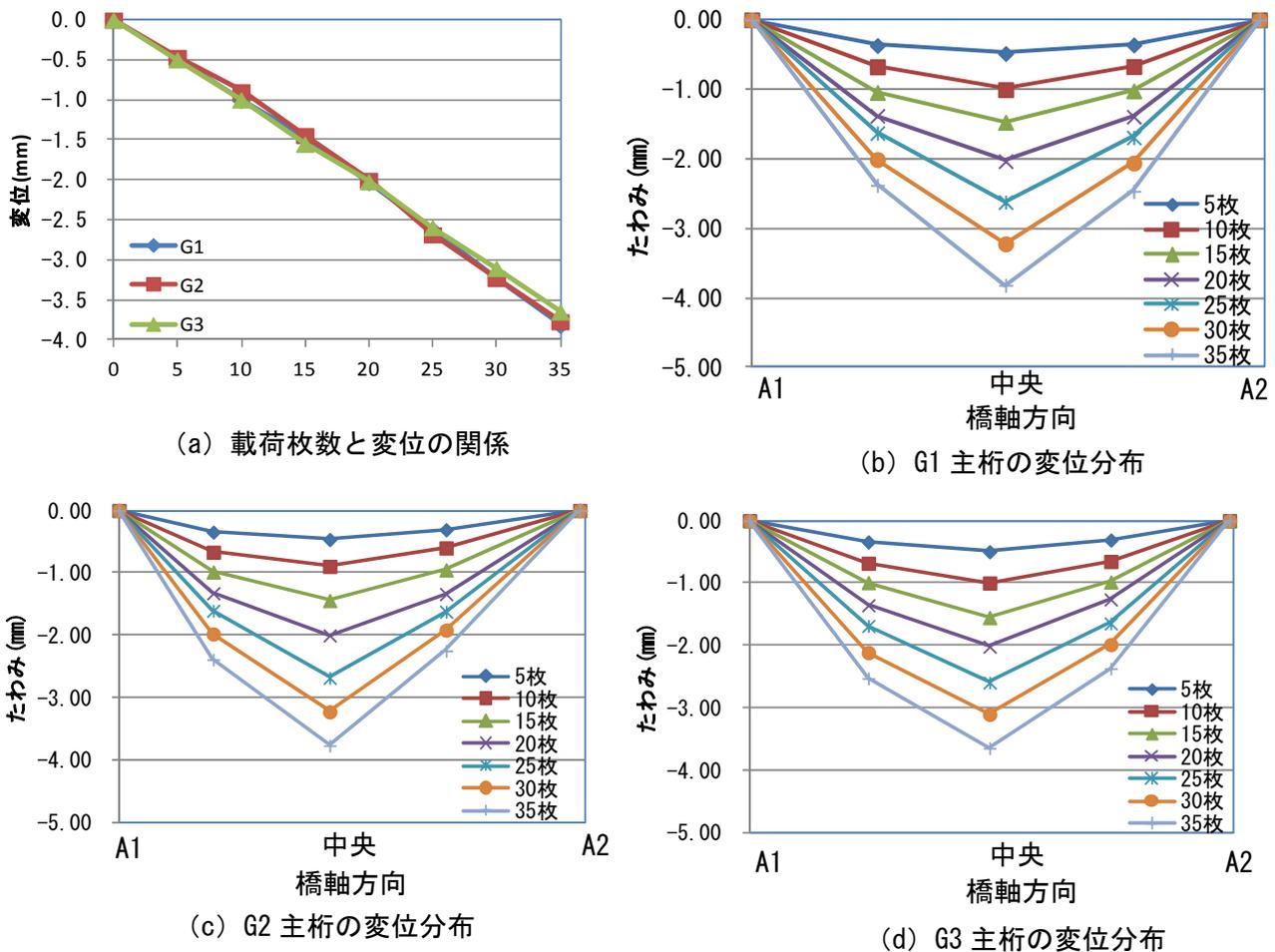


図 5.4.4 変位計測結果

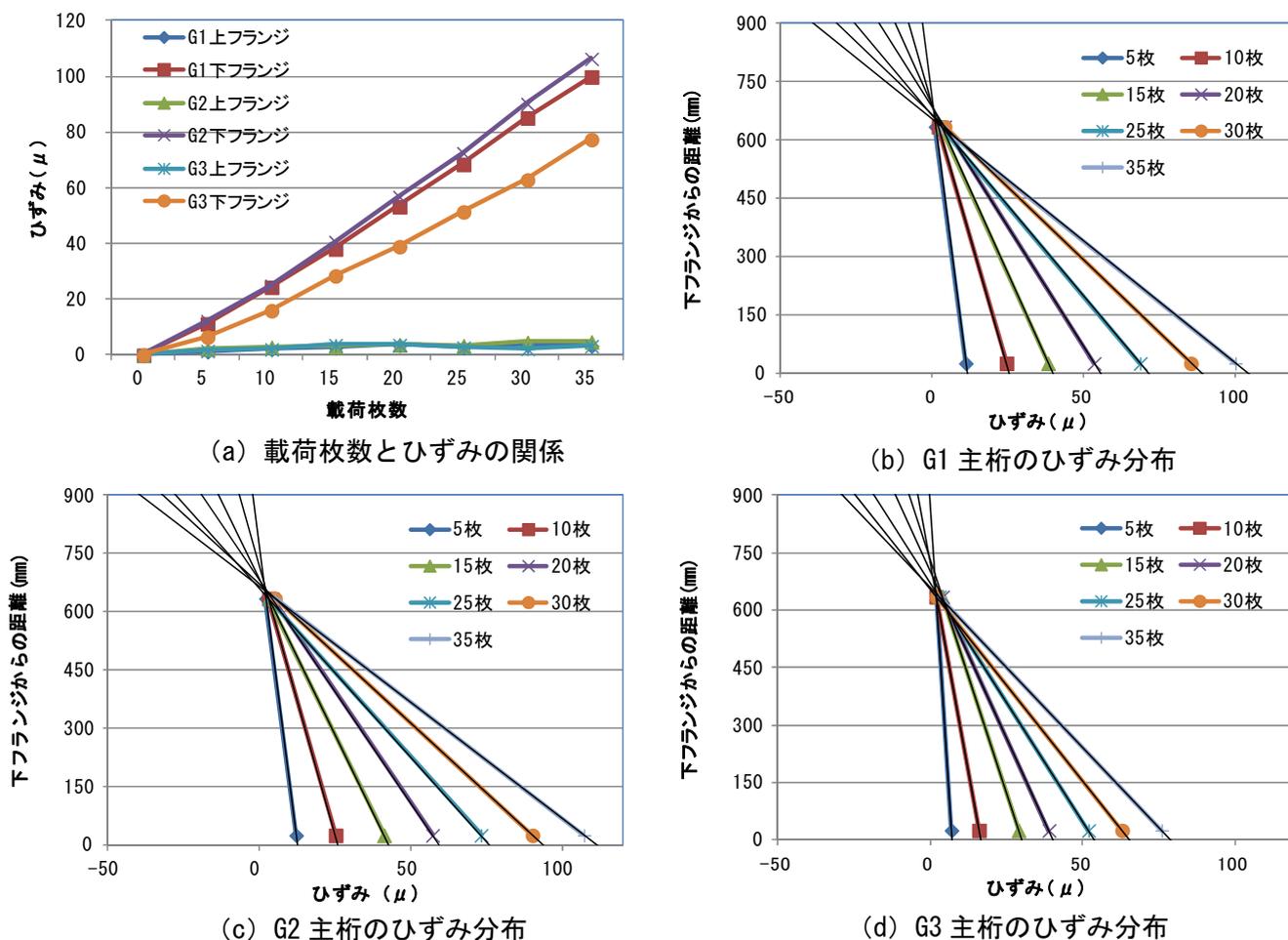


図 5.4.5 ひずみ計測結果

スキャナで計測したコンクリートの表面画像を写真 5.4.4 に示す。写真に確認できる白の斑点は、計測前にスプレーで塗布したランダムパターンを表す。ひずみゲージとスキャナ装置で得られたひずみ計測結果を図 5.4.6 と表 5.4.1 にそれぞれ示す。図、表より、载荷荷重の増加とともにひずみが線形に増加しているのが確認できた。スキャナ装置はひずみゲージのひずみ値より小さく、また、荷重の増加とともにひずみ値の差が大きくなる傾向を示した。しかし、スキャナ装置とひずみ値の誤差の平均は 15μ であり、高精度に計測できることが確認された。载荷荷重の増加とともに誤差が大きくなる原因としては、スキャナ装置とひずみゲージの計測法に違いによるものと考えられる。コンクリートの主桁は载荷荷重の増加とともに曲率形状で変形するのに対して、スキャナはその曲率形状の変形を二次元画像として計測している、そのため主桁の変形を小さく評価することになる。



写真 5.4.4 計測画像

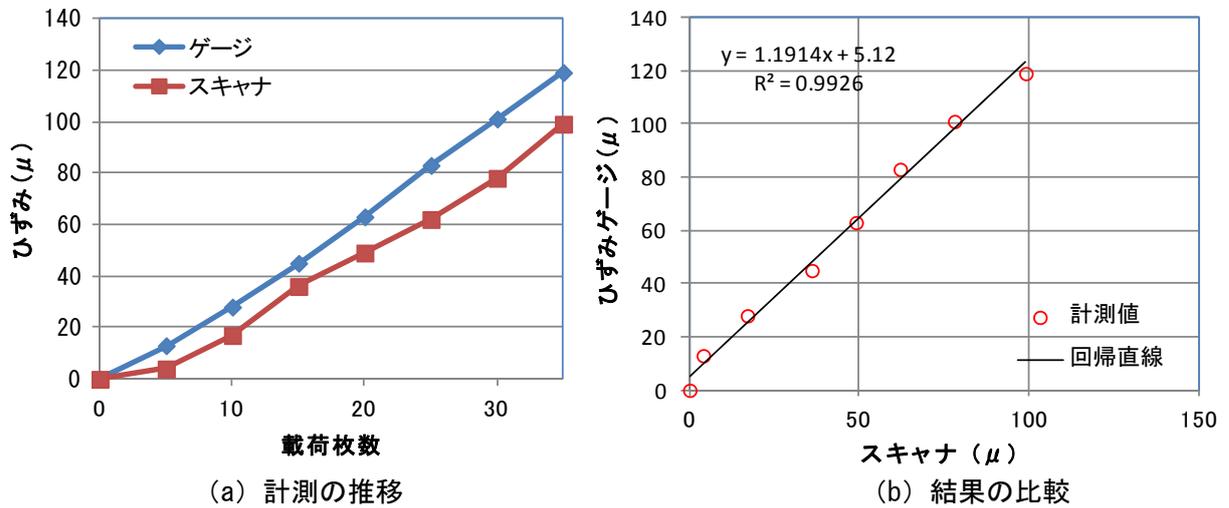


図 5.4.6 計測結果

表 5.4.1 計測結果

鉄板 (枚数)	荷重 (kN)	ひずみゲージ (μ)	スキャナ (μ)	誤差 (μ)	誤差 (%)
0	0	0	0	-	-
5	45	13	4	9	69
10	90	28	17	12	43
15	135	45	36	9	20
20	180	63	49	14	22
25	226	83	62	19	23
30	271	101	78	23	23
35	316	119	99	20	17
平均				15	31

5.5 まとめ

カメラ装置ならびにスキャナ装置を用いて大規模試験体を用いた載荷試験を行い, コンクリート表面に生じる変位, ひずみ計測を行い, ひび割れ発生・進展挙動の予測・評価への有用性について検討した. さらに, スキャナ装置の実現場での計測精度について検証した. 得られた結果を以下に示す.

・カメラ装置

- (1) 変位計やひずみゲージによる接触式計測と同様に, DICMは高精度に変位およびひずみ計測が可能ながことが確認された.
- (2) ひずみの集中を可視化することができ. また, 2台のCCDカメラを用いたステレオ計測により三次元形状やそのひずみ分布を可視化することができた.
- (3) DICMはひび割れの発生前にひずみの集中が確認され, また, DICMで計測したひずみの集中箇所と目視によるひび割れ発生箇所が一致した.

・スキャナ装置

- (1) ひずみ集中を可視化することができた.
- (2) スキャナ装置から取得した画像でひび割れを計測することができた.
- (3) DICMはひび割れの発生前にひずみの集中が確認され, また, DICMで計測したひずみの集中箇所とスキャナで計測したひび割れ発生箇所が一致した.
- (4) 実構造物を用いた載荷試験では, スキャナ装置はひずみゲージの値より小さい値を示し, 荷重の増加とともにひずみ値の差が大きくなる傾向を示した. しかし, ひずみ値の平均誤差は 15μ であり, スキャナ装置は, ひずみゲージと同精度の計測結果が確認された.

【参考文献】

- 1) 前川宏一: 3軸拘束下にあるコンクリートの非線形性に現れる破壊挙動, 土木学会論文集, NO.460, V-18, pp.113-122, 1993.
- 2) 六郷恵哲: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線, 土木学会論文集, NO.460, V-18, pp.57-64, 1993.
- 3) 上田稔: コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究, 土木学会論文集, NO.466, V-19, pp.69-78, 1993.
- 4) 上田稔: コンクリートの割裂試験における破壊メカニズムの破壊力学的研究, 土木学会論文集, NO.478, V-21, pp.61-67, 1993.
- 5) 大塚浩司, 勝部宏明: コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, NO.478, V-21, pp.109-116, 1993.
- 6) 二羽淳一郎, 松尾豊史, 岡本享久, 田邊忠顕: セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, 土木学会論文集, NO.550, V-3, pp.43-52, 1996.
- 7) 大津政康, 野崎 渉太, 川崎佑磨: AE-SiGMA 解析によるコンクリート割裂破壊の考察, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.27-34, pp.2011.
- 8) 董衛, 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木 修一, 堤知明: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力ならびに破壊性状に及ぼす定着性能の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.13-26, 2011.
- 9) 星野富夫, 魚本健人: ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.451-456, 2001.
- 10) 小門前亮一, 西垣義彦, 竹腰勇ノ介: わが国で最初の PC 橋(長生橋)の解体調査と PC 桁の載荷試験, プレストレスト・コンクリート, Vol.44, No.5, pp.39-46, 2002.
- 11) 三桶達夫, 長田光司, 小野聖久: ASR で劣化した梁部材の耐震性能に関する実験および解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.997-1002, 2007.
- 12) 葛西康幸, 北園英明, 内田裕市, 小柳洽: 繊維で補強された PC 実桁の力学的特性について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.943-948, 1999.
- 13) 北園英明, 井上浩, 西尾浩志, 添田政司: アルカリ骨材反応により被害を受けたプレテンションホロー桁の力学的特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1129-1134, 1999.
- 14) 小川篤生, 横山和昭, 松井繁之: RC 連続中空床版橋の実橋載荷試験による耐荷力評価, 橋梁と基礎, Vol.33, No.2, pp.31-40, 1999.
- 15) 河村幸夫, 長江進: 既存非合成桁橋における実耐荷力判定載荷試験, ハイウェイ技術, Vol.13, pp.186-191, 1999.
- 16) 小松正貴, 保坂勲, 岡本恒次: PC 下路桁橋の動的載荷試験, プレストレスト・コンクリート, Vol.53, No.5, pp.4-19, 2011.
- 17) 下村匠: 厳しい塩害環境下にさらされた能生川橋の載荷試験, コンクリートテクノ, Vol.28, No.11, pp.9-15, 2009.
- 18) 松尾豊史, 松村卓郎, 岩森暁如: 鉄筋腐食した RC ボックスカルバートのせん断耐荷力に関する実

- 験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1075-1080, 2008.
- 19) 樺山好幸, 宮川豊章, 野村勝義, 杉本正信: 局部的損傷を有する PC 箱桁橋の健全度評価と考察, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.3, pp.39-50, 2001.
 - 20) 高橋之軸: 圧縮力を受けるコンクリートの寸法効果に関する近年の研究事例, コンクリート工学, Vol.49, No.10, pp. 43-48, 2011.
 - 21) 坂下雅信: 寸法効果を考慮した鉄筋コンクリート梁のせん断強度の評価に関する研究事例, コンクリート工学, Vol.49, No.7, pp.41-48, 2011.
 - 22) 渡邊真史, 田中泰司, 下村匠: 斜めひび割れの進展に着目したディープビームのせん断耐力の寸法効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.763-768, 2008.
 - 23) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp101-107, 1992.
 - 24) 畑中重光: コンクリート部材の破壊と寸法効果—曲げ破壊と寸法効果, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp. 49-53, 1999.
 - 25) 二羽淳一郎: コンクリート部材の破壊と寸法効果—せん断破壊と寸法効果, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp.46-48, 1999.
 - 26) 谷川恭雄: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, 日本建築学会論文報告集, No.262, pp.13-21, 1977.

