

光学的非接触全視野計測法によるコンクリート構造物のマルチスケール診断法の開発

研究代表者：松田 浩¹

¹長崎大学 工学部 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)

本研究は、変形・ひずみ・応力・振動の実用的計測法として、デジタル画像相関法やレーザドップラ速度計等の光学的手法を用いて、建設現場環境でのロバスト性の高い計測・解析システムを開発するとともに、これらの計測法を用いたコンクリート構造物の健全性診断法を開発することを目的とするものである。具体的には、光学的全視野ひずみ計測装置の開発および屋外現場計測への適用性の検討、応力解放法によるPC桁の現有応力測定法の開発、3D計測とFE解析と常時微動振動計測によるモニタリング法の開発と実証試験、を実施した。

キーワード 光学的計測, 全視野計測, デジタル画像相関法, レーザドップラ速度計

1. 研究・技術開発の目的

本研究・技術開発の目的は、建設現場環境での構造物の変形・ひずみ・応力・振動の実用的計測法として、デジタル画像相関法（以後、DICM：digital image correlation method）やレーザドップラ速度計（以後、LDV：laser doppler velocity meter）等の光学的手法を用いて、ロバスト性の高い計測・解析システムを開発するとともに、これらの計測法を用いたコンクリート構造物の健全性診断法を開発することである。そのため、次の3項目を開発目標として掲げて研究開発を実施した。

- 1) 光学的非接触全視野ひずみ計測装置の開発および屋外現場計測への適用性の検討
- 2) 応力解放法によるPC桁の現有応力測定法への適用
- 3) 3D計測とFE解析と常時微動振動計測によるモニタリング法の開発と実証試験およびデジタルデータベースへの活用

2. 光学的全視野ひずみ計測装置の開発

(1) 計測装置の開発

3D-DICMによる変位・ひずみ・応力計測の有効性・有用性を検討するとともに、高精度で計測できる以下の2タイプの全視野ひずみ計測装置の開発を行った。

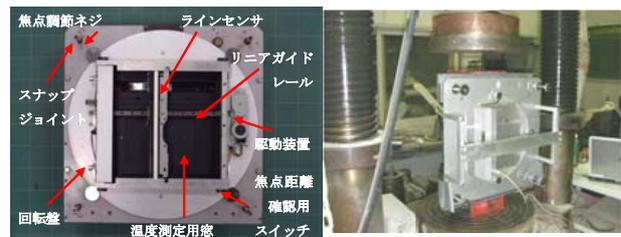
a) ラインセンサスキャナ式計測装置（装置A）

小型軽量で操作性の良いラインセンサタイプの全視野（全方向）ひずみ計測装置（図-1）の試作を行い、高精

度なひずみ解析プログラムを開発した。

b) テレセントリックレンズ式計測装置（装置B）

通常のレンズを用いた場合はレンズの偏差ひずみのため、DICMによるひずみ計測結果はひずみゲージによる計測結果とは大きな誤差が生じる。そのため、テレセントリックレンズを装着したカメラによる変位/ひずみの全視野計測装置および解析プログラムを開発した（図-2）。



(a) 計測装置

(b) 検証実験

図-1 スキャナタイプ全視野ひずみ計測装置



図-2 テレセントリックレンズカメラ

(2) 各種計測事例

a) RCはりのひび割れ発生・進展状況の可視化^{1)~3)}

これまでひずみゲージや変位計を用いて計測されてきた構造工学分野の実験に対して、DICMを用いた計測法の有用性と有効性について検討した。顕著な計測結果として、RCはりには曲げひび割れ、斜めひび割れの発生から進展に至る状況が明確に捉えられており、特に斜めひび割れの発生・進展状況を可視化した例はこれまでにない可視化事例である(図-3)。

b) 薄肉円筒シェルの分岐座屈挙動の可視化^{4)~6)}

3D-DICMを用いた薄肉円筒シェルの分岐座屈挙動の計測においては、座屈前にバルジ型の変形状態からダイヤモンド型座屈変形状態へ分岐する現象が明確に捉えられた。これは、Arbocz, Babcock⁷⁾やBatista, Croll⁸⁾が苦勞して計測した結果と極めて良く対応した軸方向半波の座屈モードが計測できており、この種の座屈問題の一番難解な座屈モードの選択性が明瞭に捉えられることができた(図-4)。

c) 鉄筋腐食によるコンクリート表面のひずみ分布計測

装置Aを用いて、鉄筋腐食によるコンクリート表面のひずみ分布を測定した。その際、電食により供試体中の鉄筋の腐食を促進させた。その結果、鉄筋腐食によるコンクリート表面のひずみの発生状況を測定できることを確認し、鉄筋腐食モニタリングの可能性を明らかにした(図-5)。

d) QRコードを用いたコンクリート表面のひずみ計測

装置BとQRコードを用いて、NATMトンネルの乾燥収縮ひずみの計測、プレキャスト・アーチカルバート(モジュラーチ)の盛土管理のための内空変位計測を行い、屋外現場適用性を検討し、有効性を確認した。

e) 合成桁の荷重実験での変位・ひずみ計測

DICMを用いて鋼コンクリート合成桁の曲げ挙動を測定した(図-6a)。変位については、ひずみ式の接触型計測と同等の精度が得られた(図-6b)。表面のひずみについては、接触式のゲージ値よりもばらつきが大きかったが、定性的な挙動を評価できた(図-6c)。

f) アルカリシリカ反応時の変位計測

アルカリシリカ反応を生じるコンクリートの膨張挙動を全視野的に捉えることを目的とし、DICMを用いた計測を行った。測定の結果、DICMにより変形量が大きく現れる箇所と、ひび割れ発生箇所は概ね一致した。

a/d=1.50の試験体の計測結果

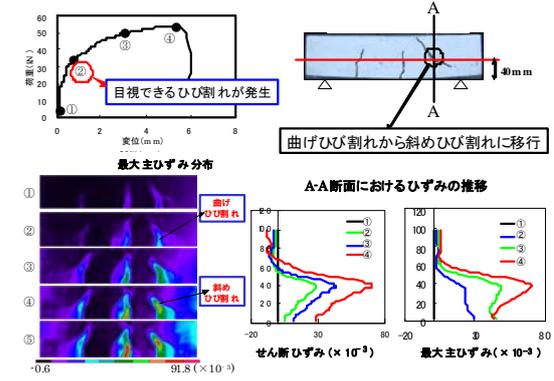


図-3 RCはりのひび割れの可視化

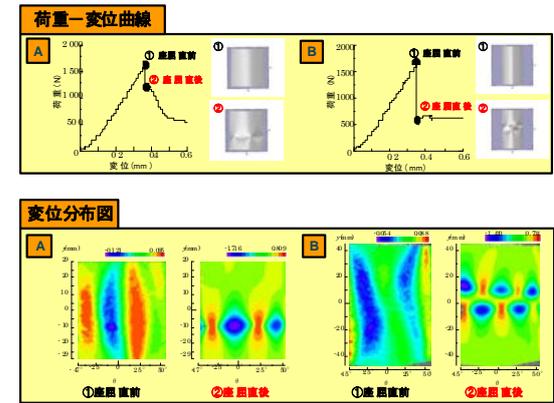


図-4 軸圧薄肉円筒シェルの座屈実験・解析

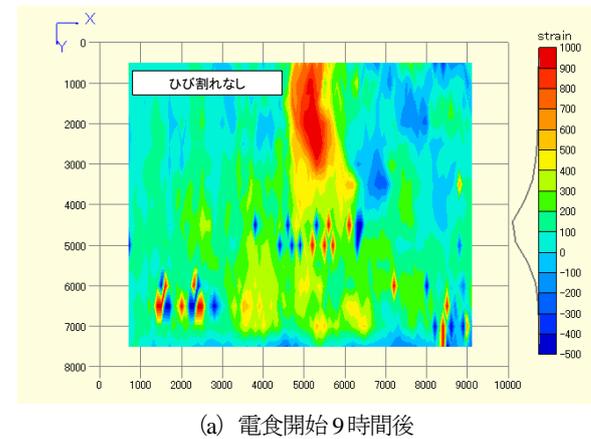
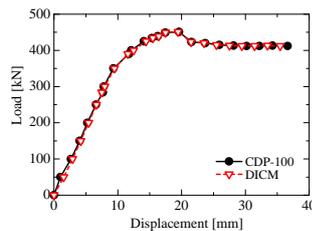


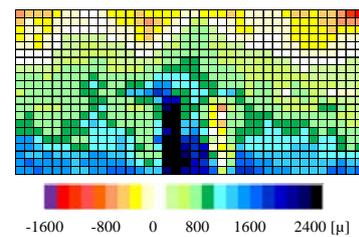
図-5 コンクリート表面のひずみ分布



(a) 計測状況



(b) たわみにおける比較



(c) 合成桁のひずみ分布

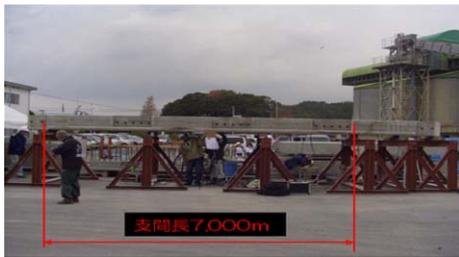
図-6 コンクリート表面のひずみ分布

3. 応力解放法によるPC桁の現有応力測定

前記2(1)で開発した全視野ひずみ計測装置を用いて、プレテンション桁（図-7a）の現有応力状態を把握するために、コア応力解放法およびスリット応力解放法による全視野ひずみ計測（図-7b）を実施した。

(1) スリット応力解放法による全視野計測⁹⁾

スリット解放による応力の計測結果を図-8aに示す。スリット30mm切削時のスキャナ計測で得られた画像をデジタル画像相関法による解析を行った解放ひずみ分布である。実験試験体をモデル化し、スリット切削によって変化するスリット周辺部の変位量及び応力をFE解析により求めた。解放ひずみの解析結果を図-8bに示す。本装置による解放ひずみの計測結果はFE解析結果と同様なひずみ分布を示している。図-8cはスリット30mm切削時の作用応力の推定値を対称点間距離変化率分布と解析値とを示したものである。スキャナによる全視野ひずみ計測値と解析値はほぼ一致しており、本計測が作用応力の解放ひずみを精度良く計測していることが検証された。

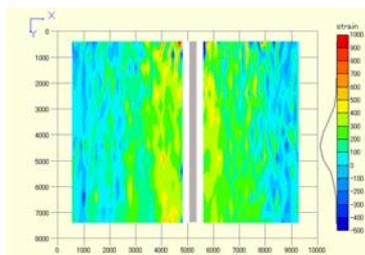


(a) PC 実験桁全景

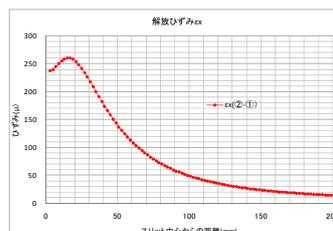


(b) スキャナ計測状況

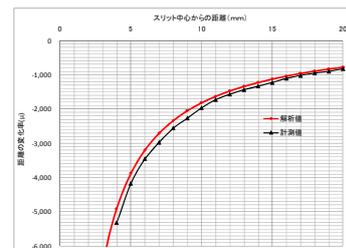
図-7 PC 桁の現有応力測定



(a) 全視野ひずみ計測



(b) FE 解析結果



(c) 作用応力推定値

図-8 スリット削孔による解放ひずみの計測・解析結果

(2) マルチロゼット解析¹⁰⁾¹¹⁾

PC桁の現有応力を評価することを目的として、コア抜きによる応力解放法にDICMを適用した計測法の検討を行った。DICMとマルチロゼット解析（図-9）を組み合わせ、カメラを移動させた場合においても移動による誤差を補正し、精度良く計測することが可能な手法を確立した。

(3) 変位計測

PC桁のたわみ計測を目的として、DICMを利用した計測手法の検討を行った。DICMは、デジタル画像のみで対象物表面の変位分布を計測することが可能な簡便な計測法であり、载荷実験時のたわみ計測を行い、その有効性を確かめた（図-10）。

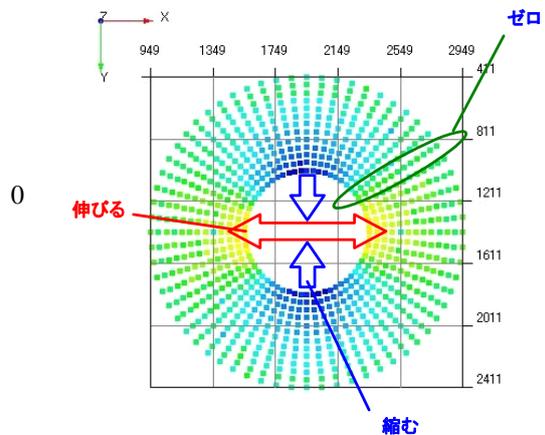


図-9 マルチロゼット解析

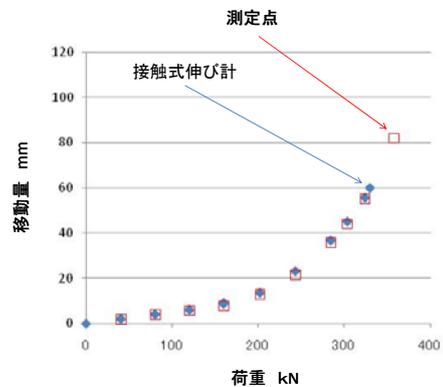


図-10 デジタル画像相関法によるたわみ計測結果

4. 振動モニタリング

(1) 3D測定データを用いたFE解析¹²⁾

平和祈念像を対象として大型建造物の3D計測を行い、計測データを用いてFEメッシュを作成し、地震応答解析するシステムを構築した(図-11)。

(2) LDVによる振動計測とデジタルデータベースの構築

屋外環境での計測に先駆け、実験室内においてレーザードップラ速度計(LDV)による振動計測を行い、部材の損傷・補修が固有振動数に与える影響を確認した(図-12)。その後、長崎県雲仙グリーンロードの実橋梁を対象として、LDVを用いた振動計測を行い、ワイヤレスLAN速度計との比較からLDVが悪環境下においても高精度の計測が可能であることを確認した(図-13)。

(3) デジタルデータベースの構築

長期モニタリングによる劣化の推定、補修・補強工事による効果の確認を目的として、固有振動数計測結果を従来のデータ管理システムと組み合わせることにより維持管理を目的としたデータベースの構築を行った(図-14,15)。



図-11 3D計測データを用いたFE解析

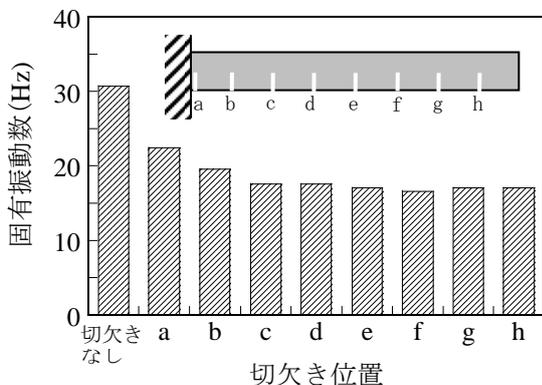


図-12 振動実験計測結果

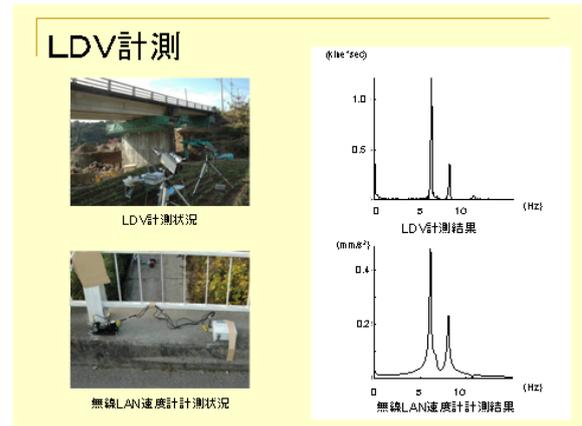


図-13 LDV計測結果

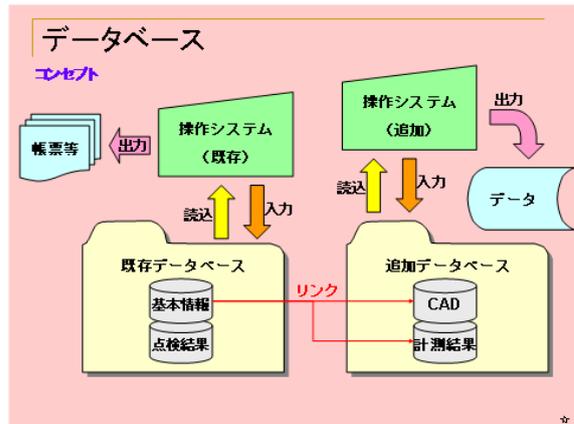


図-14 デジタルデータベース (概要)

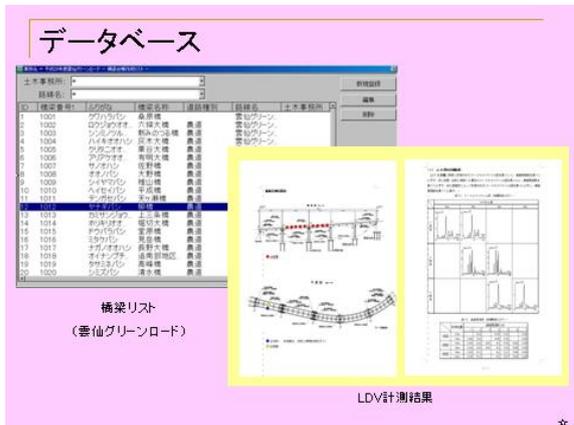


図-15 デジタルデータベース

5. 成果の実用化の見通し

本研究では、次の3項目について研究開発を行った。本研究成果の実用化の見通しは以下の通りである。

- (1) 光学的非接触全視野ひずみ計測装置の開発および屋外現場計測への適用性の検討

ラインスキャナ及びテレセントリックレンズおよびデジタルカメラを用いた全視野ひずみ計測装置を開発し、屋外現場計測への適用性を検討した。その結果、実用上十分な精度で多点のひずみ計測が可能であることを実証するとともに、多くの実証実験に本研究開発で試作開発した計測装置を適用し、その有効性と有用性は十分に確認された。本計測装置はほぼ実用化されたものと判断できる。今後、さらにハードウェアおよび計測結果の評価方法等のソフトウェアの使いやすさを追求する予定である。

(2) 応力解放法によるPC桁の現有応力測定法への適用

(1)で開発した全視野ひずみ計測装置を、応力解放法によるPC桁の現有応力測定法へ適用して実証試験を行い、その有効性と有用性を確認した。応力解放法については、コア応力解放法とスリット応力解放法を提案し、その有効性を確認するとともに、デジタル画像関連法とマルチロゼット解析を組み合わせたシステムを開発した。実物大のPC桁に対する試験結果は、ほぼ実用に供することができることが確認された。本計測法の実用化されたものと判断できる。

(3) 3D計測とFE解析と常時微動計測によるモニタリング法の開発と実証試験

レーザードップラ速度計による遠距離振動計測法の有効性を検証するとともに、3D計測、FE解析、振動計測及び耐震性評価を取り入れた解析システムを構築した。さらに、これらのインプット・アウトプットデータはデジタルデータとして保存できるので、維持管理を目的としたデータベースを試作構築した。データを蓄積してゆけばデジタルデータベースとしての価値は高まる。本項目に関しても、ほぼ実用化はできており、さらにユーザーフレンドリー、かつ、維持管理の目的にマッチングしたデータベースに仕上げることでさらにその有効性は高まっていくことが期待できる。

6. あとがき

インフラ構造物の維持管理において、今求められているのは地方の中小橋梁の点検診断であり、特にPC橋の現有応力状態は最重要情報である。本研究では一貫して光学的計測法を用いて非接触全視野計測機器を開発するとともに、コンクリート構造物の健全度・劣化診断法を開発した。また、本研究成果の技術革新性として以下の3つがあげられる。

- ・光学的計測法は研究初期段階にあり、目標とした装置・システムの開発により多くの知的所有権を取得できる。
- ・建設作業の安全性、構造物の品質の向上に繋がり、維持管理費用の削減、インフラ構造物の長寿命化が図れる。

る。

- ・3D計測、実振動計測、地震応答解析の統合システムは、健全度診断や耐震補強法に有効となる。デジタルデータベースによりハザードマップを作成でき、社会の安全・安心システムの構築に貢献できる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、出光隆先生（九州工業大学名誉教授）、岩屋信一郎氏（国土交通省九州地方整備局九州技術事務所長）、上半文昭氏（(財)鉄道総合研究所鉄道力学研究部構造力学研究室主任研究員）、谷倉泉氏（(社)日本建設機械会協会施工技術総合研究所研究第二部・部長）、福永靖男氏（西日本高速道路(株)保全サービス事業部改良グループ長）には本研究の外部評価委員として参画いただき貴重なご助言とご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

本研究の研究代表者および分担研究者は以下の通りである。

松田 浩（長崎大学）：研究代表者
森田千尋（長崎大学）
一宮一夫（大分工業高等専門学校）
佐川康貴（九州大学）
山根誠一（日本工営(株)）
伊藤幸広（佐賀大学）
合田寛基（九州工業大学）
出水 享（長崎大学）
内野正和（福岡県工業技術センター）
岡本卓慈（(株)計測リサーチコンサルタント）
宮本則幸（(株)計測リサーチコンサルタント）
高橋洋一（(株)計測リサーチコンサルタント）
肥田研一（(株)K&T こんさるたん）
原田耕司（西松建設(株)）
川村淳一（日本コンクリート工業(株)）

参考文献

- 1) Nyomboi, T. et-al : Observation of Cracking Development in Steel Fibre RC Beams under Bending and Shear by Optical Full-Field Measurement, EASEC, No.11, 2008
- 2) Nyomboi, T, Matsuda, H. : Shear strength and deformation prediction in steel fiber reinforced concrete beams without stirrups, Proc. of the Fifth ISEC Conference, pp.119-125, 2009
- 3) Nyomboi, T, Matsuda, H., Demizu, A., Makino, K. : Experimental and Analytical Study on Shear Capacity in Steel Fiber and Stirrup RC Beam, Journal of Structural Engineering, Vol.56A, pp.13-22, 2010
- 4) Zhao, C., Matsuda, H., Morita, C., Huang, M. : Buckling and Post-buckling Phenomena of Cylindrical Shell under Axial Compression and Torsion Loading, EASEC, No.11, 2008
- 5) Zhao, C., Matsuda, H., Morita, C., Huang, M. : Visualization of buckling on thin-walled cylindrical shell by digital image correlation method, Proc. of 5th International Conference on THIN-WALLED STRUCTURES, 2008
- 6) 森田千尋, 趙程, 牧野高平, 宮崎翼, 松田浩 : 実形状初期

不整データを用いた薄肉円筒シェルの座屈解析, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp.41-48, 2009

- 7) Arbocz, J. and Babcock, C.D.: J. Applied Mech., ASME, pp.28-38., 1969
- 8) Batista, R.C. and Croll, J.G.A. : Stability Problems in Engineering Structures and Components, Applied Science, London pp.377-399, 1979
- 9) Hida, K., Ito, Y. et-al : Development of approximation process of existing action stress of pre-stressed concrete by stress relief technique, Proc. of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2010
- 10) 内野正和, 岡本卓慈, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩 : デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法による円孔周辺のひずみ解析手法の検討, 実験力学, Vol.9, No.2, pp.96-102, 2009
- 11) Uchino, M., Okamoto, T., et-al : Strain analysis method using multi-rosette analysis by digital image correlation method, Proc. of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2010
- 12) 松田浩:歴史的建造物の光学的手法による 3D形状・振動計測とその計測データを用いた FE 解析による地震応答解析, 建設の施工企画, No.699, 2008