

徐 超男

独立行政法人産業技術総合研究所生産計測技術研究センター・研究チーム長

応力発光体を用いた安全管理ネットワークシステムの創出

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、構造物全体の応力履歴・異常を独自の応力発光デバイスによって包括的に監視し、重大事故につながる破壊や劣化を早期に予知・検出する新安全管理ネットワークシステムを創出することを目的としている。具体的には、「リアルタイム応力発光検出システム」、「応力履歴記録システム」の創出を行い、これらを「ネットワークの接続・統合」によって包括的な安全管理システムとし、実構造物での「実証試験」へと繋げていくものである。

これまでに、遠隔異常検出システムのハードウェアとソフトウェアを開発し、高 S/N 比を実現し、実構造物における遠隔異常検出に成功した。さらに応力履歴記録システムの最適化を行い、使用中の建物のひび割れに伴う応力履歴の記録ができることを実証した。自動的に発光計測・データ蓄積ができ、自動グラフ化が可能な全自動応力発光評価装置を構築し、様々な計測条件での応力発光データベースを効率的に蓄積することを可能にした。

今後は開発したシステムの最適化を図り、実構造物の安全管理に役立つ実証試験を更に進める。

§ 2. 研究実施体制

(1)「AIST」グループ

① 研究分担グループ長：徐 超男（産業技術総合研究所生産計測技術センター 研究チーム長）

② 研究項目

・応力発光体を用いた安全管理ネットワークシステム

リアルタイム応力異常検出システムの開発

- ・ 発光特性データベース
- ・ 異常検出システムの構築と最適化

応力履歴記録システムの開発

- ・ 履歴記録システムの構築と最適化
- ・ 低残光応力発光センサの開発
- ・ 応力履歴の検出実証試験
- ・ 長期間積算記録に特化した塗膜センサ発光特性の解明
- ・ 長期間積算記録に特化した条件設定
- ・ 単一型応力記録センサの開発(作製、高効率化)

構造物全体の監視・診断ネットワークシステムの構築

- ・ 各システムとのインターフェイス要素技術開発
- ・ ネットワークノードの実証・改良
- ・ 異常診断ソフトウェアの開発・改良
- ・ ネットワークシステムの構築と駆動

実構造物での実証試験と最適化

- ・ 直管での実証と最適化
- ・ 溶接部、エルボー部での実証
- ・ トンネルでの試験と最適化
- ・ 橋梁での試験と最適化
- ・ 建物での試験と最適化

(2)「KYUDAI」グループ

① 研究分担グループ長: 汪 文学 (九州大学応用力学研究所、准教授)

② 研究項目

AIST グループとの連密な連携研究により主に次の研究項目を実施する。

- ・ 応力発光塗膜センサからの発光特性と負荷の周波数、歪速度依存性、相当応力との関係を整理し、応力異常検出システムのためのデータベースを構築。
- ・ き裂やノッチを有する複雑な形状な試験片の応力分布の数値解析および応力発光塗膜センサによる実験を行い、応力発光センサだけの情報から、構造物の損傷を診断する方法の開発を実施。

応力発光センサを用いた実構造物への計測実証試験を行い、応力発光センサの有効性、信頼性、耐久性を検証。

(3)「LP」グループ

① 研究分担グループ長: 辻 卓則 (㈱ロジカルプロダクト 代表取締役社長)

② 研究項目

通信ネットワークの開発

- ・ ネットワークノードのネットワークへの接続
- ・ 構造物での実証実験

(4)「TAISEI」グループ

- ① 研究分担グループ長:篠川 俊夫 (大成基礎設計㈱ エンジニアリング事業部技術第1部、技術管理グループ長)
- ② 研究項目
 - ・実構造物での実証試験と最適化

§ 3. 研究実施内容

(1)リアルタイム応力異常検出システム

本システム開発では、応力発光塗膜センサからの発光を、有線あるいは無線のセンサノードにより計測し、構造物の異常をリアルタイムに検出することを目指している。センサノードの開発およびコンクリート橋梁構造物における実証試験の結果に関する報告は後のセクションで述べるので、ここでは各種条件下における応力発光特性についてのデータベース構築の進捗について述べる。

これまでに構築してきている種々の条件下における応力発光塗膜センサの応答性データの蓄積を更に進め、引き続きデータベースの向上を行っている。それに応じて、全自動リアルタイム応力発光定量化システムを完成し、発光計測だけでなく、自動的にデータ蓄積とグラフ化が可能となり、省力的なデータベースを構築することが可能になっている。このシステムにより、各種歪み・歪み速度の広範囲な応力発光の定量的な評価ができています。また、実構造物への適用に応じて、集光インターフェースを最適化することにより、開発した無線通信応力異常検出システムの検出感度を大幅に向上した。さらに、照明条件を選定し、応力発光強度に影響しない照明つきカメラ応力異常検出システムを実現し、リアルタイム応力異常検出システムの最適化を実現している。また、開発されたリアルタイムカメラシステムと異常診断ソフトを用いて、健全な部材を疲労させた時の異常診断の検証を行った。システム制御、光計測、異常診断、異常画像保存などの機能が的確に作動することが確認された。発光画像のリアルタイムのモニタリングと同時に、疲労亀裂の発生・進展の自動診断に成功した。

(2)応力履歴記録システムの開発

【履歴記録システムの構築と最適化】の一環として、特徴である長期間記録に特化したシステムの最適化を行った。履歴記録システムの強みは、積算記録を行う事で、微弱な応力発光(微弱ひずみ・速度)に対応できる事である。しかし、従来の方法では、応力とは関係の無い残光記録の蓄積が、応力発光の記録(必要な情報)を埋没させ、S/N比の著しい低下を招いていた。そこで、待機時間・熱照射・光照射などの計測条件の最適化により、残光を光記録材料の閾値以下に減少させ、無記録の状態を作り出すことに成功した。更に、その状態で荷重印加を行うと、閾値以上の応力発光は記録され、応力発光の選択記録による S/N 比の著しい向上を達成した(図1a)。

更に、新規に開発した本手法を実環境での適応試験(実証)に投入し、有用性を検討した(図1b)。その結果、日中の温度変化が引き起こす構造物のひずみ・ひび割れの開口変位に由来する応力発光を、約20時間の積算画像の中で選択的に記録できた。この様に微小ひずみ速度での発光は、リアルタイムシステムでの検知が難しい。応力発光選択記録の成功により、小ひずみ・速度にも対応可能な本システムの強みが活きる様、最適化することに成功した。

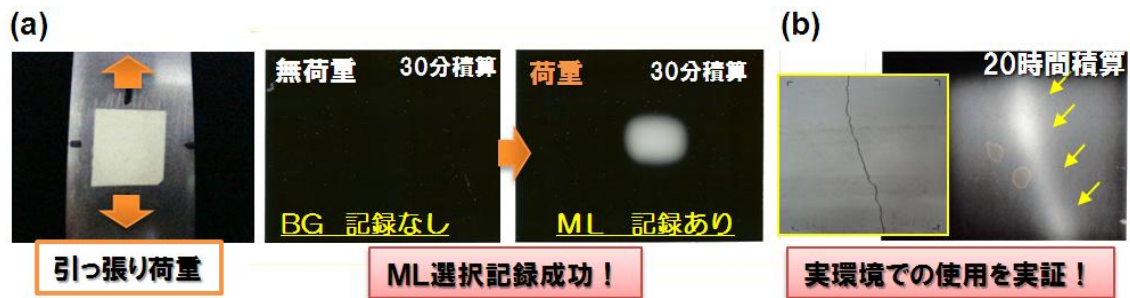


図 1 (a) 応力発光選択記録実験。積算記録時間：30 分，荷重：14 kN，(b) 選択記録処理をした応力履歴記録システムの実証試験。

(3) ネットワークの接続・統合

「ネットワークの接続・統合」については、応力発光体によって光として検出された構造体の各種異常を、ネットワークを用いて伝達し、全体の情報を統合することを目的とする。本年度は、発光パターンによる異常検出ソフトウェア開発を行い、橋梁での実証実験データを用いて画像特徴量に基づく応力発光検出に成功している。さらに USB インターフェイスの採用による有線系ネットワークノードの低コスト化に取り組んだ。また、これまでに開発した有線ネットワークノードの実証試験に基づいた改良、無線ネットワークノードの実証と改良を行った。無線通信方式には ZigBee を採用し、ネットワークとの接続部には、Linux を採用している。ネットワークシステムの構築では、遠隔地からのリアルタイムでのデータの取得、コントロールが行えるようになった。改良点は、前年度に比べ外部からのノイズを約 20db 低減、消費電流を 1/3 に低減すると共に、長期連続運転ができるように信頼性の向上を図った。実証試験では、4 台のセンサーを使って 1 ヶ月間のモニタリングを行った。最終的には約 10 日間の連続運転を行い、結果としてデータの抜けもなく、遠隔地でのデータの収集に成功した。実証試験の途中で、遠隔地からのソフトウェアバージョンアップできる機能を確認した。また、データ処理として、1 次スクリーニングができるソフトを作成して、基本機能の動作を確認した。

今後は、有線センサノードおよび、無線センサノードを使った実証試験等を更に行いネットワークに組み込んだソフトの改良、実証試験で得られたデータをスクリーニングするソフトの改良を実施すると共に、信頼性の向上等に取り組む予定である。

(4) 実構造物での実証試験と最適化

配管系での実証試験では、各種プラントで問題となっている溶接部に着目した。本年度は直管およびソケット(継手)溶接部に応力発光センサを適用し、配管溶接部の健全性評価に対する有効性について検証した。直管系での実証試験では、溶接部への応力集中により溶接に沿って線状に応力発光することを明らかにし、その発光強度から溶接部に生じるひずみの評価が可能であることを示した。また、ソケット溶接部を対象とした実証試験では、内部欠陥における応力集中や内部欠陥から発生し貫通した数 μm 程度の幅の疲労き裂を応力発光として捉えることに成功し、溶接部における異常検出手段として有効であることを示した。以上のように本試験では、応力発光センサをより実用的な溶接

配管に適用しその有効性を示した。

鉄筋コンクリートにおける実証試験では、切欠入りのコンクリート試験体(図 2)に応力発光センサを適用し曲げ荷重を加えた場合のひび割れの検出および評価を試みた。はじめに、荷重の増加に伴い応力発光領域が載荷点方向に分岐しながら進展することを明らかにし、この発光領域がひび割れ形状と良く一致することを示した(図 3, 4)。また、幅 $2\mu\text{m}$ 程度の非常に微細なひび割れを応力発光として検出可能であることを示した。さらに、ひび割れ領域における応力発光強度とコンクリートの損傷度との間に良い相関関係があることを示し(図 5)、応力発光センサによりコンクリートの損傷状態の評価が可能であることを明らかにした。このように、本試験では応力発光センサがコンクリートのひび割れの検出、評価に対し有用な手段であることを実証した。

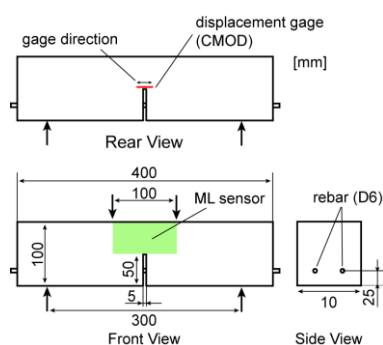


図2 コンクリート試験体

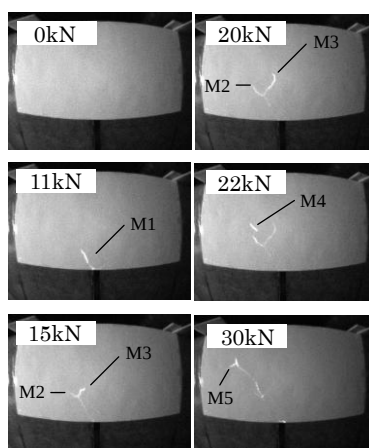


図3 応力発光画像

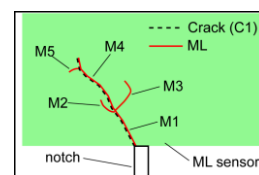


図4 発光領域とひび割れ形状

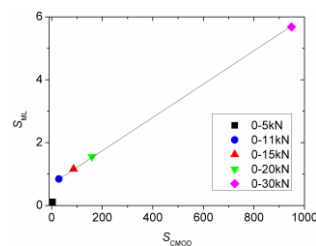


図5 発光強度と損傷度の関係

使用中実構造物の保守点検・維持管理に対する本開発システムの適応を目的として、使用中の橋梁における一カ月間の長期・遠隔モニタリング試験を行った。使用した橋梁は、東京都江東区砂潮橋(1975年施工、3径間鋼製ガーター橋、橋長 90.5 m)であり、大型重量車両通行の多さが特徴である。結果として、一カ月の間、何れの計測システムも、車両通過で生じる荷重・開口変位由来の応力発光を計測する事ができ、特に開発したネットワーク安全管理システムに関しては、応力発光の様子を遠隔地(佐賀県鳥栖市)からモニタリングし続ける事に成功した。更に、実環境使用下で応力発光シートの劣化が無いことも確認できた。以上の事から、現場に検査員が常駐しなくとも、長期間、遠隔的なモニタリングが行える事を実証した。特筆すべき事として、本システムを使用する事で、天井等コンクリート部分に無数にあるひび割れや目視が困難なマイクロクラックの中で、実際に開口変位があり、今後進展する可能性のあるひび割れを見分けることに成功した。これは橋梁の保守点検・維持管理上、最も重要な課題と位置付けられている。2次元的で動的な検査を特徴とする本開発システムの強みが活かした結果である。一方で、応力発光の積算を利用した応力履歴記録システムを用いる事で、リアルタイム計測では閾値以下に設定していた十分小さなひずみであっても、応力集中箇所の特定に成功した事は、注目に値する。月単位の定期検査への適応が期待できる。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. C.Z. Li, C.N. Xu, Y. Adachi, N. Ueno, “Real-time detection of axial force for reliable tightening control”, Proceedings of SPIE, Vol.7522, pp.75223G-1～75223G-6, 2010.05, (DOI:10.1117/12.851697)
2. 小野大輔、李周承、徐超男, “応力発光センサーを用いた配管内部の欠陥の可視化”, 可視化情報学会誌, 2010 Vol.30 Suppl.No.1, pp.341-342, 2010.07
3. 小野大輔, 川端雄一郎, 李晨姝, 李承周, 上野直広, 岩波光保、徐超男, “応力発光センサーによるコンクリートのひび割れ進展の可視化”, 可視化情報学会誌, 2010 Vol.30 Suppl.No.1, pp.343-344, 2010.07
4. D. Ono, C.Z. Li, N. Bu, C.N. Xu, “Visualization of Internal Defect of a Pipe Using Mechanoluminescent Sensor”, Journal of JSEM, 2010 Vol.10, pp. 152-156, 2010.08
5. K. Hyodo, C.N. Xu, H. Mishima, S. Miyakawa, “Optical stress imaging for orthopedic biomechanics - comparison of thermoelastic stress analysis and developed mechanoluminescent method”, IFMBE Proceedings / 6th World Congress on Biomechanics(WCB2010), Vol.31, pp.545-548, 2010.08
6. H. Zhang, N. Terasaki, H. Yamada, C.N. Xu, “Detection of stress distribution using $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7\text{:Eu,Dy}$ micro-particles”, Physica E, No.42, pp2872-2875, 2010.09, (10.1016/j.physe.2010.02.013)
7. J. C. Zhang, X.S. Wang, X. Yao, C.N. Xu, H. Yamada, “Strong Elastico-Mechanoluminescence in Diphasic $(\text{Ba,Ca})\text{TiO}_3\text{:Pr}^{3+}$ with Self-Assembled Sandwich Architectures”, Journal of the Electrochemical Society, Vol.157 No.12, G269-G273, 2010.10, (DOI:10.1149/1.3496667)
8. T. Zhan, C.N. Xu, O. Fukuda, H. Yamada, C.S. Li, “Direct Visualization of Ultrasonic Power Distribution Using Mechanoluminescent Film”, Ultrasonics Sonochemistry, Vol.18, pp.436-439, 2011.01, (DOI:10.1016/j.ultsonch.2010.07.017)
9. W.X. Wang, T. Matsubara, Y. Takao, Y. Imai, C.N. Xu, A new smart damage sensor using mechanoluminescence material, Materials Science Forum Vols. 675-677, pp 1081-1084, 2011.02, (DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.675-677.1081)
10. C.S. Li, C.N. Xu, Y. Imai, N. Bu, “Real-time visualization of the Portevin-Le Chatelier effect with mechanoluminescent sensing film”, Strain (in press)
11. L. Zhang, C.N. Xu, H. Yamada, “Strong Mechanoluminescence from Oxynitridosilicate Phosphors”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (submitted)
12. T. Zhan, C.N. Xu, O. Fukuda, H. Yamada, C.S. Li, “Mechanoluminescent Film Sensor for Visualizing Ultrasonic Power Distribution”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (submitted)

13. Y. Terasawa, C.N. Xu, H. Yamada, M. Kubo, “Near Infra-Red Mechanoluminescence from Strontium Aluminate Doped with Rare-Earth Ions”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (submitted)
14. 川端雄一郎, 小野大輔, 李晨姝, 川崎悦子, 岩波光保, 加藤絵万, 上野直広, 徐超男, “応力発光センサによる暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出に関する基礎的検討”, 土木学会論文集 (submitted)
15. 上野直広, 小野大輔, 徐超男, “構造物の応力分布に起因した応力発光のパターン検出”, 計測自動制御学会論文集 (submitted)

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 19 件)