# 応力発光センサーを用いた鉄筋コンクリートの破壊予測の検討

| (独)産業技術総合研究所 | 正会員 李     | シンシュ  | (独)港湾空港技術研究所      | 正会員 | 川端 | 雄一郎 |
|--------------|-----------|-------|-------------------|-----|----|-----|
| (独)産業技術総合研究所 | JST-CREST | 九州大学  | 徐 超男 <sup>*</sup> |     |    |     |
| (独)産業技術総合研究所 | 小野 大輔     | 李 承周  | (独)港湾空港技術研究所      | 正会員 | 岩波 | 光保  |
| (独)産業技術総合研究所 | 上野 直広     | 樁井 正義 | 。<br>川崎 悦子        |     |    |     |

#### 1. 緒言

鉄筋コンクリート(RC)構造物において、ひび割れは内部鉄筋の腐食の発生を促し、RC 構造物の耐久性を低 下させ、場合によっては、構造物の崩壊を招く、従来の技術であるひずみゲージ計測、近年に提案された光ファ イバセンサーを用いた手法などは何れも点もしくは線計測であるため、ひび割れ形状や進展方向などの面的情報 を得ることができない、そこで、光学的全視野計測の RC 構造物への応用が期待されている中、面的ひずみ分布を リアルタイムに可視化できる応力発光(Mechanoluminescence, ML)技術が注目されている<sup>1)</sup>.本研究は応力発光セン サーを適用した RC 試験体に四点曲げ試験を行い、応力発光センサーの発光画像によりひび割れ発生や進展状況を その場でリアルタイムに可視化できることが確認された.さらに、ひび割れの発端となるひずみの集中が検出で き、ひび割れ発生の予知及び内部鉄筋ひずみ挙動の把握が可能となり、RC部材の破壊予測に有用と考えられる.

#### 2. 応力発光センサー

3. 実験概要

4. 実験結果および考察

応力発光体(代表α-SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>)は外部から機械的な刺激により繰り返し発 光し、力学的エネルギーを直接光エネルギーに変換できる新しい機能材料であ る. さらに, 我々は微粒子応力発光体を含むシート状応力発光センサーを開発 し、全視野の応力集中(ひずみ集中)が個々の微粒子の発光により一種の画像情 報として得られる、図1に一例として、応力発光センサーを塗布した金属板に ある穴(欠陥)周囲の応力集中の可視化を示す<sup>2)</sup>.応力発光強度は変形エネルギ ーに直線比例し,発光強度からミセス応力分布を算出した結果は有限要素法で 予測される応力分布とよく一致することがわかった.本研究では、応力発光セ ンサーをRC構造物のリアルタイム計測に用いた.

表1に使用材料の物性値を示す.図2に RC 試験体の写真及び概要を示す. 試験体上面から 25mm の箇所に D6 鉄筋を2本,底面から 30mm の箇所に D16 鉄筋を2本のほか、D6スターラップも図2の通りに配置した. RC 試験体に対 し、四点曲げによる繰返し載荷試験を行った。各荷重サイクルは12kN,14kN, 114kN(最大荷重)とした. せん断スパン中央におけるスターラップにひずみゲ



発光面像(擬似カ

#### 図 1 穴周囲の応力集中の可視化

|          | 圧縮強度  | 49.7 N/mm <sup>2</sup>  |  |  |
|----------|-------|-------------------------|--|--|
| 1700-F   | ヤング係数 | 31.0 kN/mm <sup>2</sup> |  |  |
|          | 降伏強度  | 391 N/mm <sup>2</sup>   |  |  |
| 鉄筋 (D6)  | ヤング係数 | 200 kN/mm <sup>2</sup>  |  |  |
|          | 最大強度  | 524 N/mm <sup>2</sup>   |  |  |
|          | 降伏強度  | 377 N/mm <sup>2</sup>   |  |  |
| 鉄筋 (D16) | ヤング係数 | 201 kN/mm <sup>2</sup>  |  |  |
|          | 最大強度  | 566 N/mm <sup>2</sup>   |  |  |

表1 材料の物性値



図2 試験体(100×150×800 mm<sup>3</sup>)



システム<sup>3)</sup>(広角レンズ使用)で応力発光画像を撮影した.

図3に荷重-ひずみの関係を示す. 12kN 載荷試

験におけるスターラップ鉄筋ひずみ HF-2とHF-4 の両方がほぼゼロであることが分かり、鉄筋は弾

キーワード:応力発光センサー、ひび割れ、破壊予測、リアルタイム、全視野計測

<sup>\*</sup> 連絡先:〒841-0052 佐賀県鳥栖市宿町 807-1 Tel: 0942-81-3661 E-mail: cn-xu@aist.go.jp

伏しなかったが,鉄筋 HF-2 は荷重 110kN, ひずみ 2850 µST に降伏し、HF-2側のせん断スパンが破壊した.

## 4.1ひび割れ発生の予知

図 4 (a)に 9.46kN 時の応力発光画像を示す. ひずみ異常を 示す発光が2箇所で観察された。12kN 載荷試験終了後の目 視では底面におけるひび割れが観察されなかったが(図4 (b)),発光画像からはスパンの底面へりにひずみが集中する 局部的な弱点が生じたと思われる。また、14kN 載荷試験で も同じ箇所に発光が再現された.

更に、114kN 載荷試験が終了した後に応力発光センサー を剥離し、RC部材表面のひび割れを観察したところ、初期 荷重(12kN 載荷試験)での応力発光が観察された2箇所でひ び割れが観察された(図4(c)). すなわち、12kN 載荷試験時 の発光画像から検出した局部的な弱点が最終的にひび割れ に至ることが認められた、従って、応力発光センサーを用 いることで、ひずみ集中などのひび割れの原因となる現象 を可視化し、ひび割れ発生を予知することが可能である.

# 4.2ひび割れの発生・進展のリアルタイム可視化

図5(a)の緑色線で囲まれた領域内のせん断ひび割れ発 生・進展に伴うリアルタイム応力発光画像を図5(b)~(f)に (a) 示す. 健全状態(b)をはじめ、ひずみ集中、進展、せん断ひ び割れに至るまでの状態をリアルタイムで可視化すること ができた、また、進展している箇所及びひび割れが開いて いる箇所に高い発光が確認された.従って、全視野でひび 割れの発生・進展の可視化ができ、ひび割れの進展予測が 可能と考えられる.

### 4.3表面発光から内部鉄筋ひずみ挙動の把握

図6にスターラップ鉄筋のひずみ(HF-2)挙動とその表面 にせん断ひび割れが発生したエリア(ROI)内の発光挙動の 関係を示す.図6(a) ROI内における発光の強度を時間で積 算した.これは光エネルギーに相当する.図6(b)により, 発光強度の時間積分値の挙動と内部鉄筋ひずみの挙動が一









図 6 表面発光から内部鉄筋 ひずみ挙動の把握 (114kN 載荷試験)



致していることから、発光強度から内部鉄筋ひずみ挙動を把握する可能性を示し、RC部材全体の健全性評価に有 用と考えられる.

## 5.まとめ

応力発光センサーの発光画像により RC 部材ひび割れの発端となるひずみの集中が検出でき、ひび割れ発生の 予知や進展状況をその場でリアルタイムに可視化できることを実証した.さらに、RC部材表面の発光画像解析か ら内部鉄筋のひずみ挙動を把握できることを見出した.

【謝辞】本研究の一部は(独)科学技術振興機構「戦略的創造推進事業 CREST プロジェクト」の一環として実施されている.

【参考文献】1) 徐超男:応力発光体を用いたセンシング,セラミックス, Vol. 44, No. 3, pp. 154-160, 2009. 2) C. Li, C. N. Xu, L. Zhang, H. Yamada and Y. Imai, J. Visualization, 11, 329-335, 2008. 3) <u>http://www.aist.go.jp/aist\_j/press\_release/pr2009/pr20091109/pr20091109.html</u>, 2009.22.9