

応力発光体を用いたコンクリートの曲げ試験における損傷度評価

Evaluation of the damage level in concrete structures using mechanoluminescence materials under bending moment

○岩崎辰紀(産技高専・専) 鈴木拓雄(産技高専) 宮川睦巳(前橋工科大) 田宮高信(産技高専) 杉本聖一(産技高専)
Tatsunori IWASAKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Takuo SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Mutsumi MIYAGAWA, Maebashi Institute of Technology, 460-1, Kamisadori, Maebashi-City, Gunma371-0816
Takanobu TAMIYA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Seiichi SUGIMOTO, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

1. 緒言

近年頻発する大型台風などの自然災害はコンクリート構造物に重大な損傷を与える原因となる。都市機能を維持するためには災害を受けた構造物の損傷度を評価し、復旧を速やかに行う必要がある。そのためコンクリートの脆性的な損傷だけでなく累積外力を受けた損傷度の評価方法が必要と考えられる。しかし現状では、膨大な数のコンクリート構造物の局所的な損傷を迅速且つ広範囲で把握するのは困難である。そこで、本研究では応力発光体（以降、ML (Mechanoluminescence) と称す）に着目することにした。ML はエポキシ樹脂と混合することで容易に構造物に塗付することができ、外力によって生じる応力集中部において発光現象を確認することができる。この簡易性と発光効果を活かしてインフラ設備の検査への応用をすることで、従来の手法よりも簡易かつ広範囲で健全性評価が可能であると期待されている⁽¹⁾。

2. 応力発光体

ML は紫外線などの光を蓄光し、機械的外力を加えることで応力集中部が発光する性質がある。エポキシ樹脂と混合した ML を塗布した物体に蓄光後、外力を加えたときの発光は図 1 に示すように肉眼で確認できる程度の視認性がある。

本研究では人間が認識しやすい緑色の光で発光するユウロピウム賦活アルミニウム酸ストロンチウム($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$, 以下 SAOE)を使用し、ML とエポキシ樹脂の配合比を 50[wt%]とする。SAOE の発光波長帯は 520nm である。ML は外力が加わると結晶が変形し、結晶内のイオンの電位が変化して電場が発生する。その結果、発光中心の分子 Eu が励起されることで電場発光を示す。SAOE は分子間に大きな隙間を持つ構造であり結晶が変形しやすいため、より強い発光輝度を示す特徴を持っている。

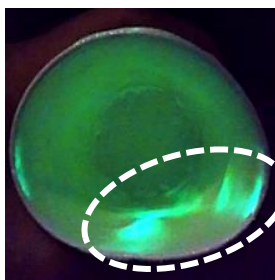


Fig.1 Stress luminescence of ML

3. 4点曲げ試験

本研究では ML を塗布した表 1 に示す角柱の鉄筋コンクリート供試体(100mm×100mm×400mm)を用いて 4 点曲げ試験

を行う。支点間で最大曲げモーメントとなり、この区間で最大曲げ応力が一様に作用するのでコンクリートのような不均質な材料には 4 点曲げ試験が適している。ML の破壊発光を視認しやすくするため夜間に試験を行い供試体から 500mm 程離れた位置で 2 方向から動画撮影する。カメラは夜間の撮影が可能な防犯カメラ(YESKAMO-JP-NK04-9604-1TB)、フレームレート 30fps とする。その後撮影した動画をフレーム毎の静止画に変換し、輝度や供試体の状態から曲げ破壊とせん断破壊による破壊発光を確認する。

Table 1 List of concrete mix ingredients and specimen size

材質	鉄筋コンクリート	
形状	角柱	
寸法[mm]	h100×b100×l400	
鉄筋	D10 2本をかぶり25mmで設置	
水セメント比	50wt%	
試験方法	4点曲げ	[mm]

4. 曲げ試験における破壊発光の評価方法についての検討

一般的に鉄筋の入っていない無筋コンクリートはりでは、図 2(a)に示すように曲げモーメントによって引張側に曲げひび割れが急激に成長し破壊に至る⁽³⁾。本研究では表 1 に示したように引張側のみ鉄筋を配置する鉄筋コンクリートはりとする。これに荷重を加えると無筋同様に曲げひび割れが生じるが、曲げひび割れによって破壊することなく鉄筋によって荷重は受け持たれ、はりには荷重に耐えることができる。さらに荷重を加え続けると図 2(b)に示すようにせん断ひび割れが発生し破壊に至る。図 3(a),(b)はそれぞれ曲げひび割れ、せん断ひび割れを生じた際の破壊発光の様子を示す。

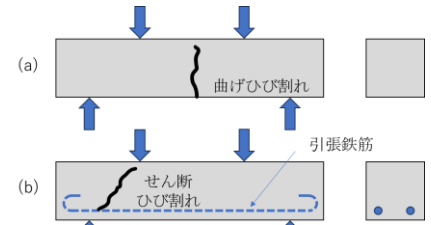


Fig.2 Types of fracture

5. 輝度値ヒストグラムを用いた破壊発光エネルギーの産出方法

本研究では定量的な評価を行うため、累積外力を受けた損傷度の評価を行うために無荷重から破壊に至るまで連続的に画像の解析を行う⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

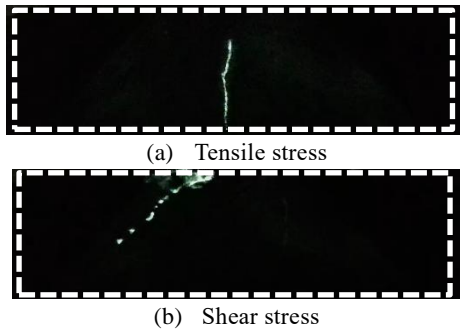


Fig.3 Crack propagation luminescence

輝度値ヒストグラム輝度値とピクセル数の積の和を求め、これを発光エネルギー E_i と称することとする。

時刻 $t_i(i = 0, 1, 2 \dots \text{end})$ における発光エネルギーは輝度値 $G_j(j = 0 \sim 255)$ とそれぞれの輝度値に相当する総ピクセル数 P_{ij} の積から総和規約を用いて求められる。

$$E_i = G_j \times P_{ij} \quad (1)$$

また、次式で表す無損傷状態である E_0 との差を瞬間破壊発光エネルギー ΔE_i と称することとする。

$$\Delta E_i = E_i - E_0 \quad (2)$$

さらに、蓄光量による誤差、カメラによる機械誤差など環境による誤差を考慮するため、 E_0 と ΔE_i の比を取る。その比を瞬間破壊発光エネルギー比 e_i とする。

$$e_i = \frac{\Delta E_i}{E_0} = \frac{E_i - E_0}{E_0} \quad (3)$$

また、式(2)で得られる瞬間破壊発光エネルギー ΔE_i と撮影間隔 $\Delta t_i(\Delta t_i = t_{i+1} - t_i)$ との積を累計することで累積破壊発光エネルギー比が求められる。すなわち、時刻 t までの累積破壊発光エネルギー比 Σe は次式で示すように瞬間破壊発光エネルギー比の和を取ることで求められる。

$$\Sigma e = \Sigma (e_i - e_{(i-1)}) \quad (4)$$

ここで、式(3)で瞬間破壊発光エネルギー比を算出すると負の値をとる場合がある。これは燐光による残光 E_0 の低下が主な原因に挙げられる。燐光とは ML の性質の 1 つであり、蓄光後にしばらく発光が残存する現象のことである。そこで、燐光について検討する。時間経過とともに発光エネルギーは一定値に収束すると考えると、次式の微分方程式が成り立つと考えられる。

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\alpha}{t} + \beta \quad (5)$$

式(5)の解を推定 E_0^* 関数と称することとし、次式で表す。

$$E_0^* = \alpha \ln(t) + \beta t + \gamma \quad (6)$$

ここに α, β, γ は定数である。この推定 E_0^* 関数が燐光による残光(E_0)の低下を表すものであると仮定して破壊発光エネルギー比を算出すると図 4 を得る。

図 4 は、無荷重から破壊に至るまで荷重を増加させながら載荷した際の時間経過に伴う瞬間破壊発光エネルギー比および累積破壊発光エネルギー比の関係を示したものである。横軸の標準化時間は、破壊に至った時間を 100 として無次元化したものであり、縦軸は破壊発光エネルギー比である。この図内で①と②を付した標準化時間のときに、それぞれ曲げひび割れ、せん断ひび割れにより破壊発光したため瞬間破壊発光エネルギー比 e_i が急激に上昇したと考えられる。さらに時間経過に伴い荷重も増加しているの

この図から荷重の増加に伴って累積破壊発光エネルギー比 Σe も増加していると考えられる。このことから、累積外力と発光エネルギーの関係を把握することができると考えられる。

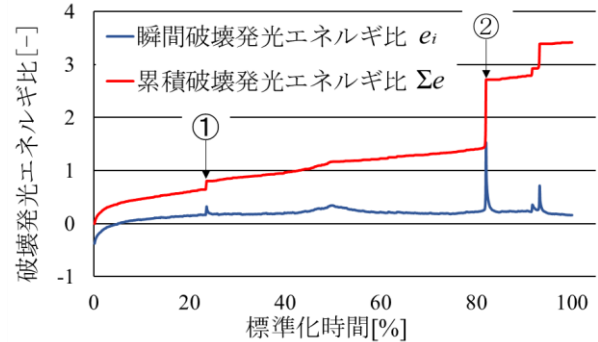


Fig.4 Standard Time - Fracture Luminescence Energy Ratio

6. 結言

本研究では自然災害等によってコンクリート構造物が受ける累積外力と累積損傷度の関係を評価することを目的とした。得られた結論は以下の通りである。

- ① ML を塗布した鉄筋コンクリート供試体に対して 4 点曲げ試験を行い、曲げひび割れや破壊につながるせん断ひび割れを破壊発光としてリアルタイムでモニタリングした。
- ② 瞬間破壊発光エネルギー比 e_i を用いて、曲げやせん断によるひび割れ現象を確認できた。
- ③ 燐光による残光の低下は時間経過とともに発光エネルギーは一定値に収束すると考え、導出した推定 E_0^* 関数を用いて e_i の計算をすることで残光の低下による影響を低減させることができるとわかった。
- ④ 推定 E_0^* 関数を用いても、累積破壊発光エネルギー比 Σe の数値が上昇することを確認した。

以上のことから、この手法による算出結果から、鉄筋コンクリートはりに作用する曲げ応力およびせん断応力を応力発光体を用いることで累積外力による累積損傷度の評価ができると考えられる。さらに、破壊時には e_i の値に急激な上昇がみられ外力と発光エネルギーの関係を把握できると考えられる。

また本研究ではせん断ひび割れにより破壊したが、鉄筋強度等の条件によっては引張鉄筋が降伏し破壊につながる場合がある。そこで今後は最終的にどのような破壊となるのか破壊の過程と発光エネルギーとの関係について評価していく必要があると考えられる。

参考文献

- (1) 徐, “応力発光によるコンクリート構造物状態の可視化”, コンクリート工学, 53 巻 5 号, pp462-467(2015)
- (2) 岩波, 伊藤, 皆川, 佐川, “コンクリート工学”, 理工図書, pp149-156(2021)
- (3) 藤原, 宮川, 長谷川, 河井“コンクリートのはなしI”, 技報堂出版, pp.130-134(1993)
- (4) 宮川, 志村, 宮下, 中村, “応力発光体を用いた累積外力による損傷評価システムに関する研究”, 日本機械学会 2021 年度年次大会 No.21-1, (2021)
- (5) 宮川, 志村, 宮下, 中村, “応力発光体を用いた破壊発光の画像解析及び CNN 技術による損傷度評価”, 日本機械学会 山梨講演会 No.210-3(2021)