

# 建築構造設計を対象とした教育用模擬実験ツールの開発

## 応力発光材料を用いた基礎実験

### Development of Educational Model Experiment Tool for Structural Design Fundamental Experiment Using Mechanoluminescence Material

服部 宏己

Hiroki HATTORI

#### Abstract

Recently, the ideal way of an architectural and structural education is posing a problem. The field of structural mechanics is making the basis of structural education. On the other side there are many students with consciousness weak. Up to now, many discussions have been performed.

Main purpose of this study is to propose education method of building structures for raising special knowledge for structural design. This paper proposes educational model experiment tool using mechanoluminescence material as the new education method of building structures, and reports the result of a fundamental experiment about the applicability.

**Keywords:** 建築構造設計、教育、模擬実験ツール、応力発光材料

#### 1. はじめに

近年、大学全入時代を前に学生の質的低下の懸念や建築士法の改正による受験資格の見直しなど、建築環境が大きく変わりつつある中で、今後の建築教育のあり方が問われている。

建築士法の改正に伴い、一級建築士の受験資格がいくつかの短期大学においても取得可能となった。建築士の資質・能力の向上を図るためには、短期間に効率よく専門性の高い知識を修得できる学習法が求められる。

建築構造教育の改善については、これまで多くの議論がなされてきた。その背景として、これまでの調査研究からも明らかなように、建築構造に関する教育は、工学・理工学系の学生にとっても困難であることが挙げられ、住居系の学生にとっては、更に困難さが増すものと思われる。

本研究は、既に構造力学を修得した学生に対し、建築構造に関する専門性の高い効果的な教育方法を提示することを目的としている。

前々報<sup>1)</sup>では、建築構造に関するこれまでの研究を概括するとともに本学の学生を対象としてアンケート調査を実施した。その結果から、住居系短期

大学の学生を対象として、専門性の高い知識を効率よく修得するために重要と思われる要点を以下に列挙する。

- 1) 構造設計（特に断面算定）をキーワードとした講義を設定する。
- 2) 視覚的に理解し易いツールを利用する。
- 3) 構造設計の理論的な知識の修得を目的としたソフトウェアを利用する。
- 4) 理論的な知識の検証およびさらに理解を深めるための

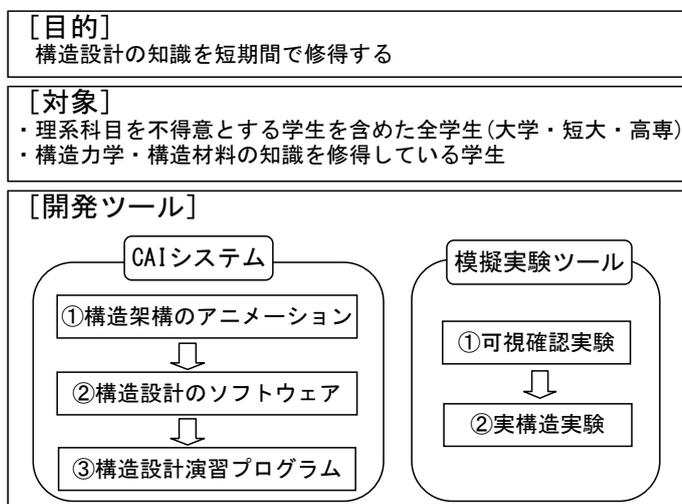


図 1 教育支援ツールの概念図

模擬実験ツールを利用する。

また、前報<sup>2)</sup>では、図1に示すように建築構造教育に関する新たな教育支援ツールを提案し、その一つである可視確認実験ツールにおいて、応力発光材料<sup>3)</sup>の適用の可能性を示した。

本報では、さらに同材料の発光の様子を定量的に把握することを目的とし、圧縮応力および引張応力が与えられたときの発光状態の測定結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因

表1に使用材料を示す。樹脂剤は発光しやすくするため剛性の高いエポキシ樹脂を主剤とし、樹脂剤：応力発光材料の重量比を6:1としている。試験体の製作は、エポキシ樹脂（主剤）に応力発光材料を添加して約5分間よく練り混ぜた後に変性脂環式ポリアミン（硬化剤）を添加し、再び約5分間よく練り混ぜ、シリコンゴムの型枠に注入し、2日間静置した後に脱形した。樹脂と応力発光材料の密度差によって、樹脂硬化までの間に応力発光材料が沈殿して、1mm程度の応力発光材料濃度の高い層（以下、沈殿層）が形成されたため、この面を撮影面として用いた。試験体形状は、極力均等な応力が発生するようにダンベル型とし、中央部の最小断面寸法は5.3×9.5mmとした。写真1に試験体の形状および寸法を示す。なお、試験体の応力ひずみ関係を計測するため、10×10×20mmの角柱試験体も同時に製作した。

表2に実験の要因を示す。実験要因は、応力の種類、最大応力および応力速度（最大応力をそれまでの载荷時間で割った値）としている。応力の種類は、圧縮および引張の2種類としている。最大応力は、模型ツール使用時に人力での载荷や振動台での载荷を考慮し、10N/mm<sup>2</sup>および15N/mm<sup>2</sup>の2水準としている。応力速度も同様に、5N/mm<sup>2</sup>/sおよび15N/mm<sup>2</sup>/sの2水準としている。

### 2.2 実験方法

図1および写真2にそれぞれ実験方法の概要および試験体の設置状況を示す。応力発光材料は蛍光灯の光などによって蓄光するため、実験は暗室で行い、60分程度静置して光量を低減した後、試験体を沈殿層が正面に向くように設置し、圧縮側または引張側に载荷を行った。発光の状況を高感度モノクロ CCD カメラを用いて撮影し、映像をパソコンに保存した。ここで、载荷は鋼製枠に固定した鋼製ねじを手動で回転させることで行い、ロードセルによって

表1 使用材料

| 材 料        |   | 重量比 |
|------------|---|-----|
| 樹脂剤        | エポキシ樹脂(主剤)  | 100 |
|            | 変性脂環式ポリアミン(硬化剤)   | 40  |
| 応力発光材料(粉末) | 中心粒径：5~10μm<br>応力発光スペクトル：520nm付近<br>発光色：緑色<br>最大輝度：約10cd/m <sup>2</sup> （樹脂混合ペレット使用、圧縮荷重1kN時） | 23  |

表2 実験要因

| 要因                         | 水準     |
|----------------------------|--------|
| 応力の種類                      | 圧縮, 引張 |
| 最大応力(N/mm <sup>2</sup> )   | 10, 15 |
| 応力速度(N/mm <sup>2</sup> /s) | 5, 15  |

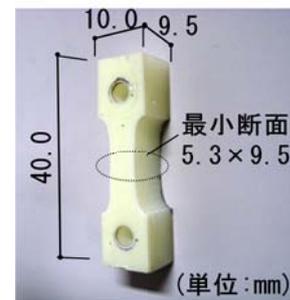


写真1 試験体

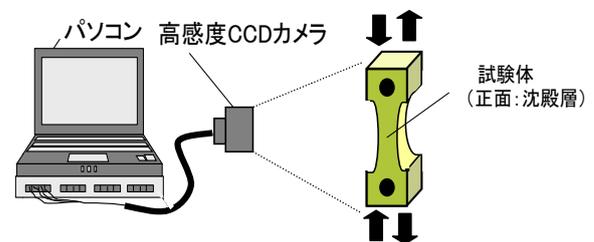


図1 実験方法



写真2 試験体設置状況

その荷重を計測した。図2に、測定された応力（断面：5.3×9.5mm）と時間の関係の例を示す。なお、圧縮荷重時には球座を用い、引張荷重時にはワイヤを用いることにより、試験体にモーメントが発生しないようにした。

### 3. 実験結果と考察

図3に発光状況の画像の例を示す。発光画像は、CCDカメラで撮影された荷重時および除荷時の中で最も発光している画像を目視により抽出した。得られた画像から画像解析ソフト（Image J）を用いて、試験体中心部の4×4mmの面積の階調値（8ビット256階調）の平均値を求めた。図3の階調の画像に示すように、階調値は数値が大きくなるほど淡くなり、明るく発光したことを示している。ただし、この階調値は画像撮影時の露出の調整などにより変化するため、絶対値としての評価はできず、相対値としての評価となる。

#### 3.1 最大応力の影響

図4および図5にそれぞれ圧縮荷重時および引張荷重時の階調値を示す。また、図(a)および図(b)はそれぞれ階調値と最大応力の関係および階調値と応力速度の関係を示す。なお、便宜上圧縮応力および引張応力ともに正(+)で示し、各図には除荷時の階調値も示している。また、応力発光材料の蓄光を完全に消散するには至らなかったため、最大応力および応力速度の0点の階調値は平均値（圧縮荷重時および引張荷重時ともに階調値=21）を用いている。

図4(a)によれば、圧縮荷重時（●および▲）では応力速度に係わらず最大応力の増大に伴い階調値も増大する傾向が見られる。また、図5(a)の除荷時（○および△）すなわち応力が圧縮応力側に変化する場合にも同様な傾向が見られる。一方、図5(a)に示す引張荷重時では、応力速度の値によらず階調値の増大はあまり見られない。

これらのことから、応力速度が5~15N/mm<sup>2</sup>/s程度の範囲では、比較的遅い応力速度においても圧縮応力が大きいほど明るく発光し、引張応力時では、比較的早い応力速度であっても応力の増大による発光の差があまり見られないものと思われる。この両者の違いは、樹脂剤の剛性に起因しているものと推察される。

#### 3.2 応力速度の影響

図4(b)によれば、圧縮荷重時（●および▲）では最大応力の値に係わらず応力速度の増大に伴い階調値も増大する傾向が見られる。また、図5(b)の除荷時（○および△

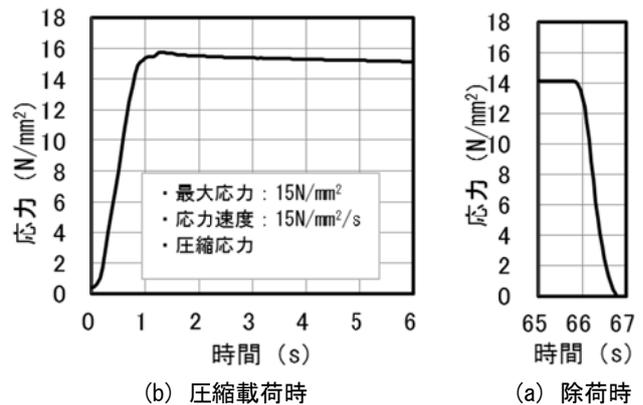


図2 荷重応力の時刻歴の例

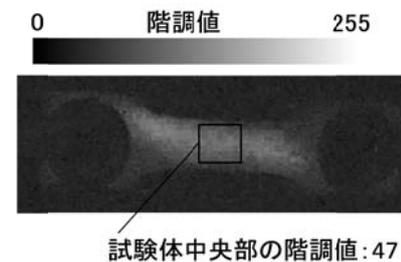
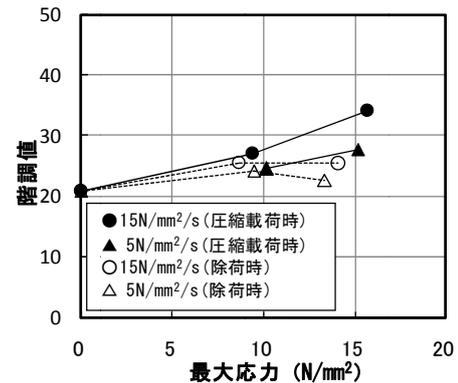
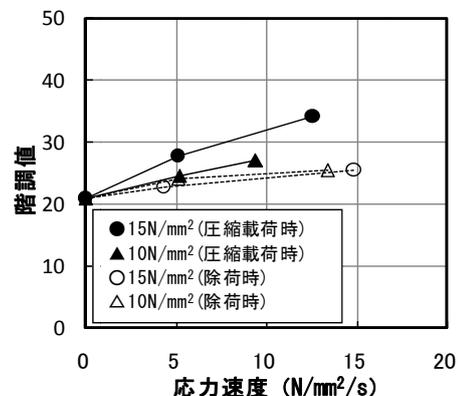


図3 発光画像の例



(a) 階調値と最大応力の関係



(b) 階調値と応力速度の関係

図4 圧縮荷重時の階調値

△) すなわち応力が圧縮応力側に変化する場合では、10N/mm<sup>2</sup> 試験体の階調値の増大が見られない。したがって、圧縮応力が 15N/mm<sup>2</sup> 程度の場合は、応力速度の増大に伴い明るく発光するが、10N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮応力では、応力速度の違いによる発光の差はあまり見られないことも考えられる。引張応力時では、図 4 (b) および図 5 (b) より、5~15N/mm<sup>2</sup> 程度の引張応力では、応力速度の違いによる発光の差があまり見られない。

3.3 ひずみと発光量の関係

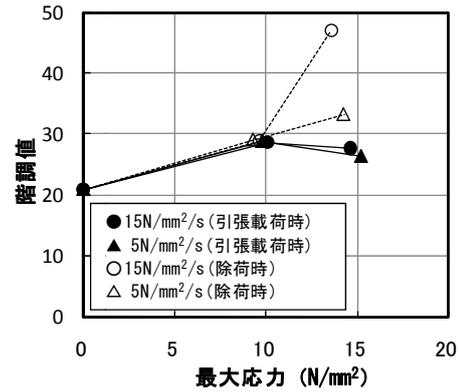
ここでは、10×10×20mm の角柱試験体の圧縮荷重試験から得られた応力-ひずみ関係の結果に基づき、ひずみと発光量 (階調値) の関係を考察する。圧縮荷重時の応力-ひずみ関係を図 6 に示す。図中の直線 (一点鎖線) は、ひずみの計測範囲内の近似直線を示す。なお、ひずみはデータロガーの性能から 9660 μ まで計測している。また、圧縮荷重は最大応力に達するまで荷重しており、その最大値は 42.2N/mm<sup>2</sup> であった。

図 6 より、応力 (σ) - ひずみ (ε) 関係はおおよそ直線的であり、その近似直線は下式で示される。

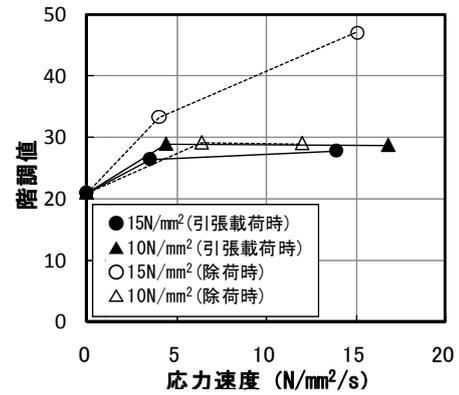
$$\epsilon = \frac{\sigma}{2500} \quad \text{----- (1)}$$

本実験による最大応力値は 15.2N/mm<sup>2</sup> であることから、本実験の範囲内では応力とひずみの関係は比例的な関係にあると見なすことができる。したがって、応力と階調値の関係または応力速度と階調値の関係は、式(1)を用いることによって、ひずみと階調値の関係またはひずみ速度と階調値の関係と置き換えることができる。

また、各試験体のひずみ、ひずみ速度および階調値の値を表 3 に示す。同表より、ひずみ、ひずみ速度および階調値の値は、圧縮荷重時では 3773~6291 μ、2060~5033 μ/s および 25~34 の範囲であり、引張荷重時では 3909~6077 μ、1413~6742 μ/s および 26~29 の範囲となる。



(a) 階調値と最大応力の関係



(b) 階調値と応力速度の関係

図 5 引張荷重時の階調値

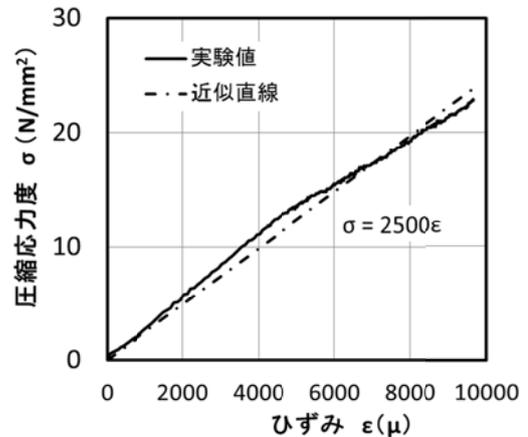


図 6 試験体の応力-ひずみ関係

表 3 ひずみ、ひずみ速度および階調値

| 荷重方向 | 試験体                       |                             | 実測値                       |                             |         |             |     |
|------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------|-------------|-----|
|      | 最大応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 応力速度 (N/mm <sup>2</sup> /s) | 最大応力 (N/mm <sup>2</sup> ) | 応力速度 (N/mm <sup>2</sup> /s) | ひずみ (μ) | ひずみ速度 (μ/s) | 階調値 |
| 圧縮   | 10                        | 5                           | 10.2                      | 5.2                         | 4079    | 2092        | 25  |
|      | 10                        | 15                          | 9.4                       | 9.4                         | 3773    | 3773        | 27  |
|      | 15                        | 5                           | 15.2                      | 5.2                         | 6077    | 2060        | 28  |
|      | 15                        | 15                          | 15.7                      | 12.6                        | 6291    | 5033        | 34  |
| 引張   | 10                        | 5                           | 9.8                       | 4.4                         | 3909    | 1777        | 29  |
|      | 10                        | 15                          | 10.1                      | 16.9                        | 4045    | 6742        | 29  |
|      | 15                        | 5                           | 15.2                      | 3.5                         | 6077    | 1413        | 26  |
|      | 15                        | 15                          | 14.6                      | 13.9                        | 5854    | 5575        | 28  |

#### 4. まとめ

本実験から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 応力速度が  $5\sim 15\text{N/mm}^2/\text{s}$  程度の範囲では、圧縮応力が大きいほど明るく発光する傾向が見られた。
- 2) 圧縮応力が  $15\text{N/mm}^2$  程度の場合、応力速度の増大に伴い明るく発光する傾向が見られた。
- 3) 引張応力時の応力が  $10\sim 15\text{N/mm}^2$  程度および応力速度が  $5\sim 15\text{N/mm}^2/\text{s}$  程度の範囲では、発光の差はあまり見られなかった。
- 4) 試験体の応力-ひずみ関係を用いて、ひずみ、ひずみ速度および階調値の範囲を示した。

本報では、与えられた応力のレベルが模型実験を想定したために比較的小さなものであったが、その分発光量が小さかったと考えられる。今後、更に大きな応力レベルでの検討を行うことにより、応力発光材料を使用する際の適正な応力レベルを明らかにする必要がある。

#### [謝辞]

本実験に際し、野田隆弘教授（岐阜市立女子短期大学）のご助力を得た。付記して、謝意を表す。

#### [参考文献]

- 1) 服部宏己：住居系短期大学を対象とした建築構造教育に関する一考察、岐阜市立女子短期大学紀要、第 58 輯、pp.129-134、2009.3
- 2) 服部宏己：住居系短期大学を対象とした建築構造の教育方法に関する一提案、岐阜市立女子短期大学紀要、第 59 輯、pp.121-125、2010.3
- 3) 除超男：ハイブリッド化応力発光材料、セラミックス、39、pp.130-133、2004.2

（提出日 平成 24 年 1 月 11 日）