

塑性領域を対象とした建築構造教育用ツールの開発に関する

一考察

A Study on Development of Educational Model Experiment Tool for Structural Design on Plasticity

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. So far, educational model experiment tools using mechanoluminescence material has been proposed. In this paper, I conducted an experimental study with the aim of developing tools on plasticity using digital image correlation (DIC).

Keywords：建築構造設計、教育、塑性領域、デジタル画像相関法（DIC）

1. はじめに

近年、日本の各地で地震が多発し、南海トラフ巨大地震発生
の切迫性が叫ばれている中で、建物の安全性に対する社会的な
要求が急速に高まっている。高等教育機関においては、建築を
志す学生に対し、建築構造の知識を十分に理解した多くの学生
を育成することが不可欠となっているが、全国的な学生の質的
低下や理系離れなどの影響により、建築構造を不得意とする学
生は増加する一方である。そこで本研究の目的は、これまでに
無い新たな構造教育支援ツールを開発し、地域社会の安全・安
心なまちづくりに広く貢献できる学生を多く輩出すること
にある。

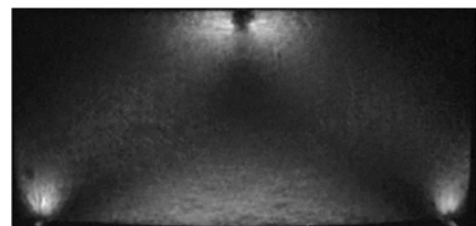
これまでの研究では、単純梁架構や門型ラーメン架構など
種々の架構を対象として、弾性領域（いわゆる中小地震による
1 次設計）の範囲では応力発光材料¹⁾（図 1(a)を参照）を用い
て、概ね視覚的に応力分布を理解することが可能なツールを制
作できることを示した^{例えば2)}。

しかしながら、建築構造教育（特に構造設計）における専門
性をさらに高めるためには、塑性領域（いわゆる大規模地震に
よる 2 次設計）の応力の理解が重要となるが、応力発光材料に
よる応力と発光量（階調値）の関係は、弾性領域では相関関係
が見られるが、塑性領域においては相関関係が見られない。ま
た、構造設計を学ぶ上では、地震による振動学（応答解析）を
理解する必要があるが、応力発光材料は比較的大きな応力に対
しては発光するが、建物模型を振動台で揺らす程度の小さな応
力に対しては発光しない。したがって、終局時の応力を扱う 2

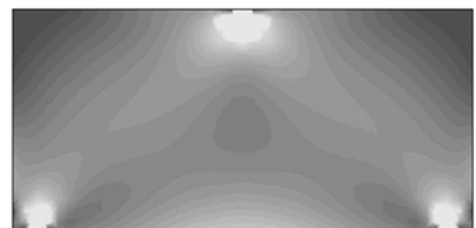
次設計や応答解析を学ぶツールとして活用できるとは言い難
い。

そこで、本研究ではこれまでの弾性領域を対象とした一連の
研究に加え、塑性領域や振動性状などの高度な構造設計の知識
を修得するためのツールを開発することを目的とする。

ここでは、本研究の目的を実現するために、応力発光材料に
代わるものとして、近年新たに開発された、デジタル画像相関
法³⁾（以下、DIC という）を用いてひずみ計測を行いその可視
化を試みる。デジタル画像相関法とは、試験体表面にランダム



(a) 実験値（発光画像）



(b) FEM 解析値（ミーゼス応力）

図 1 応力分布の比較²⁾

模様を描き、変形前後のデジタル画像を撮影し、両者を比較することによって、ひずみ量やひずみ方向の解析を行うものである。解析方法は、ランダム模様を描かれた試験体表面を高解像度のデジタルカメラで撮影し、撮影された静止画を専用のフリーソフトを用いて解析する。

2. 基礎実験

弾性体（スポンジ等）の試験体を用いて DIC による解析画像がどのように可視化され、構造教育用ツールとして適用可能かの検討を行った。ここで、画像解析ソフトは構造計画研究所所有のソフトを用いている。

2.1 実験要因

本実験で使用する試験体を図2に示す。試験体は、スポンジ、ゴム、ウレタン、スチレンペーパー、スタイロホームとし、順に剛性が高くなるように設定し、その違いによる解析画像の鮮明さを比較検討する。試験体には、その表面に市販のラッカースプレーによる白黒のまだら模様を塗装した。

2.2 実験方法

単純梁架構の試験体の中央に手動で集中荷重し、試験体の変形の様子をデジタルカメラで撮影した。記録された画像を DIC により画像解析を行った。

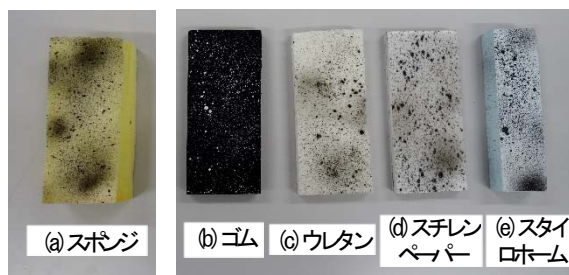
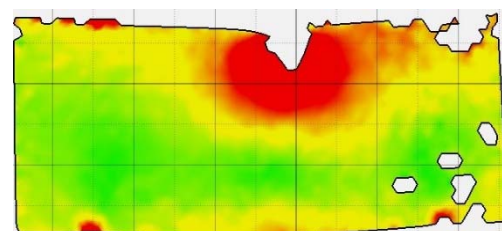
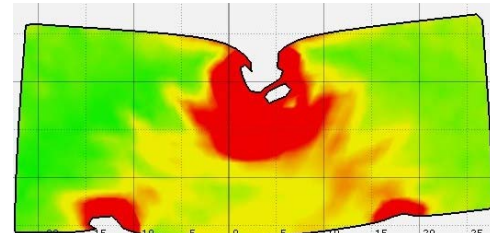


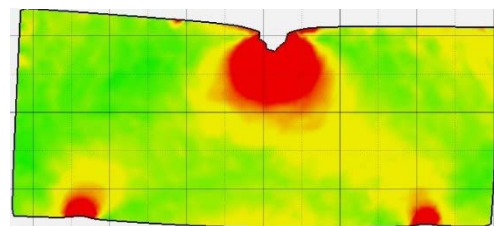
図2 基礎実験試験体



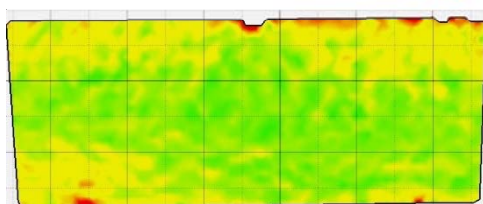
(b) ゴム



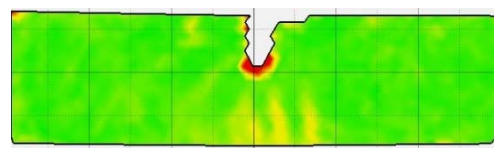
(a) スポンジ



(c) ウレタン



(d) スチレンペーパー



(e) スタイロホーム

図3 基礎実験解析画像

2.3 実験結果

図3(a)～(e)に DIC による解析画像を示す。図(a)のスポンジ試験体では、両端下部の支点および上部中央の荷重点のひずみが大きく（赤色に表示）、支点と荷重点の間もひずみが発生している（黄色表示）ことが示されている。図1(b)の FEM 解析値と比較し、似通った分布形状を示していることがわかる。このことから、構造教育用ツールに DIC を使用することが可能であると思われる。また同図より、極めて大きな変形に対してもそのひずみ分布が表示されていることがわかる。図(b)、(c)と試験体の剛性が高くなるにつれ、解析画像の分布形状が FEM 解析値に近くなっていることがわかる。一方で、図(d)スチレンペーパーおよび図(e)スタイロホームでは、その分布が FEM 解析値と異なっている。これは、試験体が板状になっていることから、面内の変形が生じにくく、荷重時の面外への傾きなどによる変形の影響が大きく、ひずみ分布が得られにくくなることが考えられる。

3. 各種比較実験

構造教育ツールを製作する上で一定の剛性が必要となり、試験体形状も自由に整形できる必要がある。そこで、これまでの実験で使用してきたエポキシ樹脂を用いて、各種条件を変えてひずみ分布の違いを比較検討する。

3.1 実験要因

表1に実験要因を示す。これまでの実験結果から、試験体厚さが厚い場合(20mm程度の場合)には、荷重時の試験体の前後方向の傾きが影響し、上部の荷重点または下部の支点の応力が小さく表示されることが考えられる。例えば荷重時に試験体上部が後方に傾いた場合、上部荷重点の表側と下部両端部支点の裏側に(試験体を横から見て対角線上に)応力が伝達されるため、試験体を正面から見たときに下部支点のひずみが小さく表示されることが考えられる。その影響を抑えるため、試験体厚さを薄くする必要がある。そこで、試験体厚さを10mmおよび20mmの2水準とし比較実験を行う。

その他のひずみ分布に影響する撮影時の要因として、連写速度(24枚/s(Hi),10枚/s(Mid), および3.5枚/s(Lo)の3水準)、

シャッター方式(メカシャッターおよび電子シャッターの2水準)、画素数(2000万画素(5472×3648),500万画素(2736×1824), 30万画素(640×480))の影響について検討する。

3.2 実験方法

表2に試験体の使用材料を示す。試験体に使用する樹脂剤は、これまで使用してきた剛性の高いエポキシ樹脂(デブコンET)とし、その表面に市販のラッカースプレーによる白黒のまだら模様を塗装した。

図4に荷重状況を、図5に実験状況を示す。実験方法は、万能試験機を用いて単純梁試験体の中央に集中荷重(縁応力:18N/mm²)した。試験体の画像はデジタルカメラで撮影し、西華デジタルイメージ(株)所有のソフト(sDIC)により画像解析を行った。

表1 実験要因

要因	水準
試験体厚さ (mm)	10, 20
連写速度 (枚/s)	24(Hi), 10(Mid), 3.5(Lo)
シャッター方式	メカ, 電子
画素数 (画像サイズ)	2000万, 500万, 30万 (5472×3648) (2736×1824) (640×480)

表2 試験体材料

材料		重量比
樹脂剤 (デブコンET)	エポキシ樹脂 (主剤)	100
	脂肪族ポリアミン (硬化剤)	50

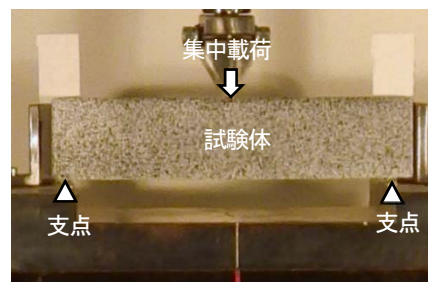


図4 荷重状況



図5 実験方法

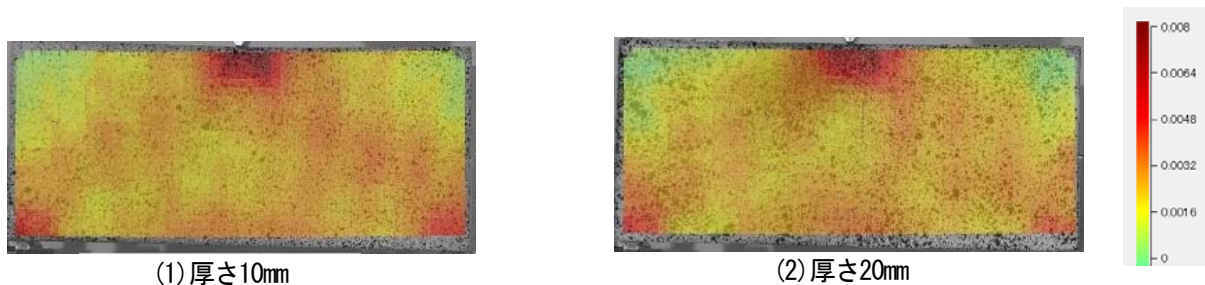


図6 試験体厚さの影響

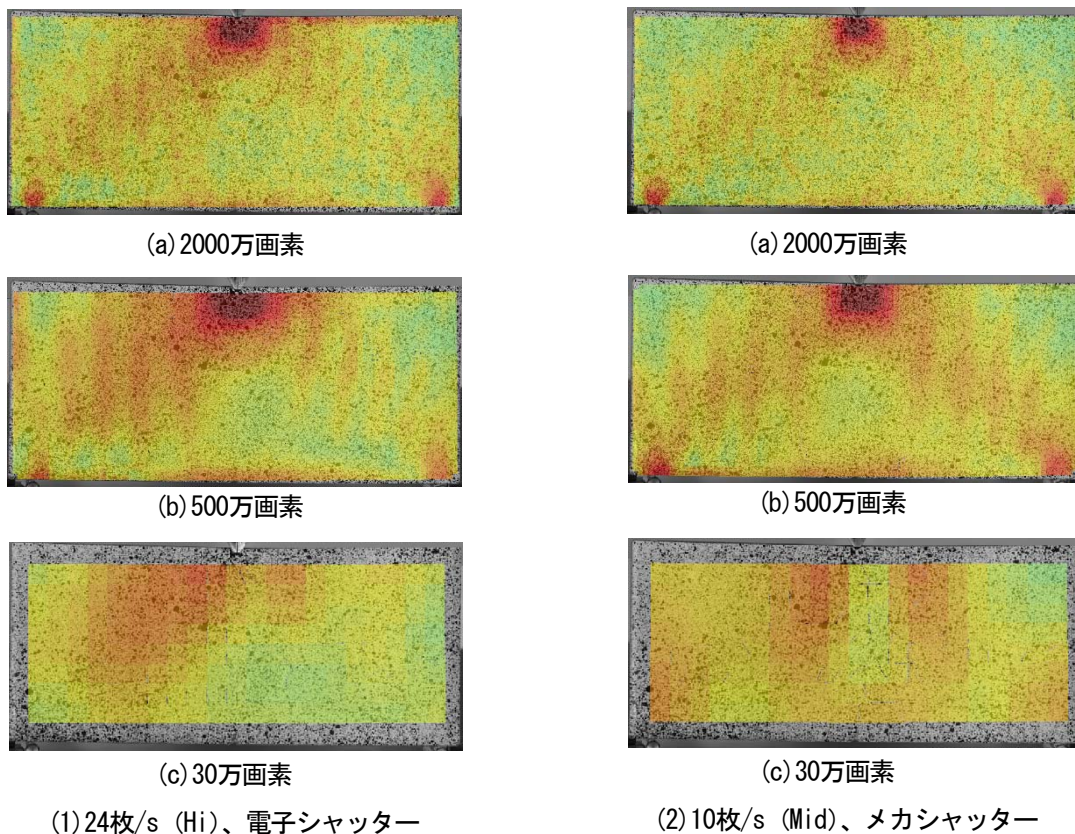


図7 連写速度の影響

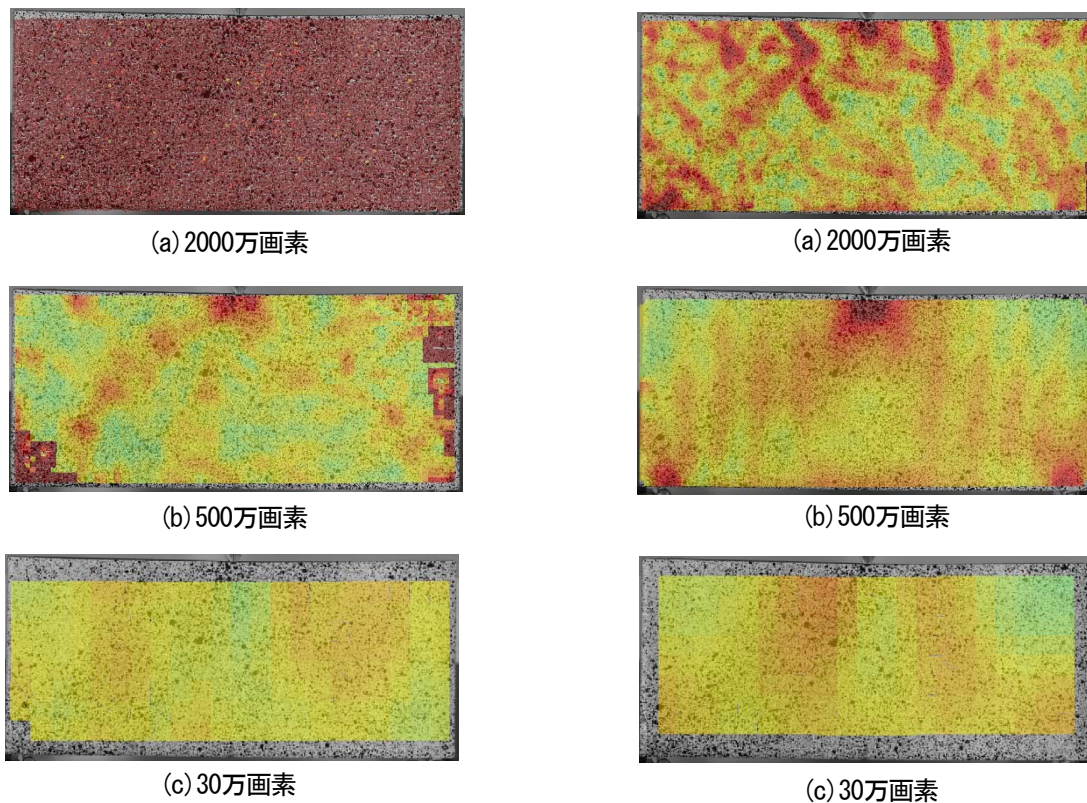


図8 シャッター方式の影響
(10枚/s (Mid)、電子シャッター)

図7 連写速度の影響

3.3 実験結果

1) 試験体厚さの影響

図 6 (2)厚さ 20mm 試験体では、試験体下部の支点のひずみが小さい（赤色が薄い）ことがわかる。それに対し、同図(1)厚さ 10mm 試験体は上部載荷点および下部支点ともにひずみが大きい（赤色が濃い）ことから、試験体厚さは 10mm 程度とした方が試験体の傾きの影響を受けにくくひずみ分布が鮮明に表示されると考えられる。

2) 連写速度の影響

図 7(1)24 枚/s (Hi) 試験体および(2) 10 枚/s (Mid) 試験体では、おおむね明瞭にひずみ分布が表示されている。それに対し、(3)3.5 枚/s (Lo) 試験体では、図(a)2000 万画素の試験体においてひずみ分布が見られず、図(b)、(c)においても鮮明な画像が得られていない。したがって、連写速度は 10~24 枚/s 程度が適していると考えられる。

3) シャッター方式の影響

図 8 の電子シャッター試験体は図(a)2000 万画素においてひずみ分布が鮮明に見られていない。同条件の図 7(2)メカシャッター試験体は明瞭であり、電子シャッターでは解析画像にばらつきが見られることからメカシャッターでの撮影が適していると考えられる。

4) 画素数の影響

図 7(a)~(c)試験体を比較すると、画素数が大きくなるほどひずみ分布が鮮明になることが分かる。したがって、2000 万画素 (5472×3648) での撮影が適していると考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 構造教育用ツールに DIC を使用することが可能であると思われる。
- 2) 試験体厚さは 20mm よりも 10mm の方が試験体の傾きの影響を受けにくい。
- 3) デジタルカメラの設定は、連写速度は 10~24 枚/s 程度とし、シャッターはメカシャッターで撮影し、画素数は 2000 万画素程度の高画素で撮影することにより鮮明なひずみ分布が得られると考えられる。

【謝辞】

本研究の一部は、越山科学技術振興財団助成金によった。また、金城学院大学の朴相俊准教授および近藤帆夏さん、服部真歩さんのご助力を得た。付記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 徐長男：「ハイブリッド化応力発光材料」、セラミックス、39、2004
- 2) 服部宏己・橋本さくら・犬飼利嗣・三島直生・畑中重光：「建築構造設計を対象とした構造教育に関する研究 (その 4 : 曲げ・せん断載荷時の発光状況に及ぼす試験体高さの影響)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、教育、pp.7-8、2013.8
- 3) 構造計画研究所、「デジタル画像相関法」、<<http://dic.kke.co.jp/>>

(提出日 令和 2 年 1 月 7 日)