

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

FEM 解析ソフトの検討

Examination of FEM analysis software 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, the author compared and examined the results of elasto-plastic analysis using FEM analysis software.

Keywords：建築構造設計、教育、塑性領域、FEM 解析、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、弾性領域（いわゆる中小地震による 1 次設計）の範囲で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 1}が、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。そこで、近年新たに開発されたデジタル画像相関法²（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た。ここで、デジタル画像相関法とは、試験体表面にランダム模様を描き、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。既報³において、図 1 に示すように FEM 解析による応力分布と DIC によるひずみ分布には強い相関がみられ、弾性領域では DIC によってひずみ分布を可視化することができるこ

とを示した。しかしながら、図 2 に示すように、弾塑性時では DIC 画像の方が赤い範囲（ひずみが大きい範囲）が広がっており両者に違いが見られることから、塑性領域を対象とした検討を行う必要があることが分かった。本報ではその前段階として、FEM 解析ソフト（ここでは、easy σ 2D Lite を使用した）について、塑性解析時の傾向を明らかにすることを目的として比較検討を行った。

2. 試験体の引張載荷実験

FEM 解析を行う上で、試験体材料の諸特性を明らかにする必要がある。そこで、載荷実験で用いた試験体の材料であるデブコン ET の引張載荷実験を行った。図 3 および表 1 にそれぞれ試験体形状および試験体寸法を示す。引張載荷時のひずみは、2 軸のひずみゲージを用いて計測し、ポアソン比も算出した。図 4 に引張載荷実験結果を示す。

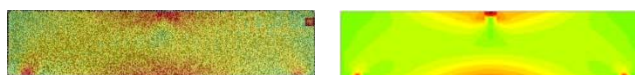


図 1 弾性時の DIC 画像（左）と FEM 画像（右）の比較³
（高さ 40mm、上下縁応力 18N/mm²）

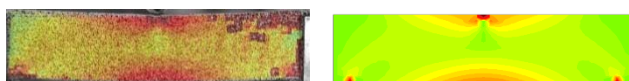


図 2 弾塑性時の DIC 画像（左）と FEM 画像（右）の比較³
（高さ 40mm、破壊直前）

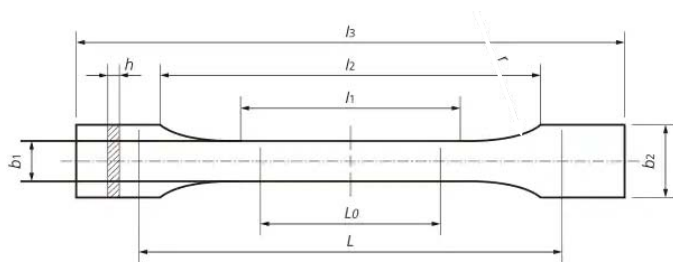


図3 引張実験用試験体形状

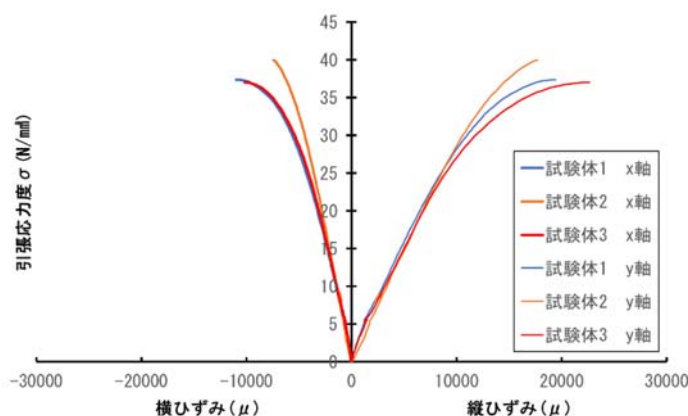


図4 引張载荷試験結果

3. FEM 解析モデル

図5に解析モデルの一例を示す。試験体サイズは、高さを20,40,80mmの3水準とし、幅は180mmとしている。支点間距離は160mmとし、中央载荷としている。FEM解析時のグリッドは4×4mmに分割している。

引張载荷実験から得られた材料の諸特性としてFEM解析時の材料パラメータを表2に示す。

材料の降伏値が35N/mm²であり、塑性化したときの傾向を見ることを目的としていることから、载荷荷重は各試験体高さについて弾性時の最大応力（ミーゼス応力）が40,60,80N/mm²程度となるように設定した。表3に解析要因を示す。

4. FEM 解析結果および考察

4.1 破壊領域

FEM弾塑性解析を行いその破壊領域を図6～図8に示す。高さ20mm試験体（図6）では、载荷荷重900N時（最大応力38N/mm²）では、上下の破壊領域（赤線で囲まれた範囲）の形状が異なっているが、1400N時（最大応力59N/mm²）および1900N時（最大応力79N/mm²）では上下対象となっている。最大応力が比較的小さい場合には、弾塑性解析時に収束計算をする際の誤差が生じているものと思われる。

高さ40mm試験体（図7）では、载荷荷重1600N時（最大応力39N/mm²）および载荷荷重2400N時（最大応力58N/mm²）

表1 試験体寸法

寸法	1A
全長 (\$l_3\$)	170
平行部長さ (\$l_1\$)	80
標線間距離 (\$l_0\$)	75
平行部幅 (\$b_1\$)	10
厚さ (\$h\$)	4
つかみ部幅 (\$b_2\$)	20
つかみ具感距離 (\$L\$)	115

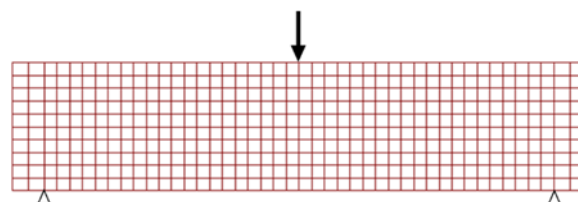


図5 解析モデル（高さ40mm）

表2 FEM解析時の材料パラメータ

ヤング率(N/mm²)		2840
ポアソン比		0.459
厚み (mm)	試験体高さ20	11.57
	試験体高さ40	11.56
	試験体高さ80	12.24
密度*1 (ton/mm³)	試験体高さ20	0.0010740
	試験体高さ40	0.0010213
	試験体高さ80	0.0010218
σ_y *2(N/mm²)		35
硬化		0.001

*1単位はFEM解析ソフトの入力値と同じとした
(1g/cm³=0.001ton/mm³)

*2降伏点は0.2%耐力とした

表3 解析要因

試験体高さH (mm)	载荷荷重p (N)	最大応力 σ_{max} (N/mm²)
20	900	38
	1400	59
	1900	79
40	1600	39
	2400	58
	3200	78
80	2100	51
	2800	67
	3500	84

において、載荷点周辺が塑性化しており、荷重の増大に伴い破壊領域も広がっていることから、想定通りの破壊領域を示しているものと思われる。一方、載荷荷重 3200N 時（最大応力 78 N/mm²）では、載荷点近傍の破壊領域の範囲は広がっているものの、ひと塊となっておらず想定される破壊領域とは異なる形状を示している。

高さ 80mm 試験体（図 8）では、載荷荷重 2800N 時（最大応力 51 N/mm²）および載荷荷重 3500N 時（最大応力 84 N/mm²）において載荷点近傍の破壊領域が分かれている。これらのことから、試験体高さが大きくなるほど弾塑性解析時において収束計算の際の誤差が生じやすくなるものと思われる。

4.2 弾性解析と弾塑性解析の関係

FEM 解析を行った際に、弾性解析と弾塑性解析では各グリッドでどのような違いが生じるかを検討するため、同じパラメータに対して横軸に弾性解析によるミーゼス応力の値を、縦軸に弾塑性解析によるミーゼス応力の値をとり両者の関係を示した。なお、パイリニアモデルの第 2 折れ線の傾き H_k は、1.0 を基準としているが、弾塑性解析時に収束計算が終了しなかった場合は、 H_k の値を以下のように大きくした。なお、一覧から分かるように試験体高さが低いほど収束計算が終了しにくい傾向が見られた。

$H=20\text{mm}, p=1400\text{N} \cdots H_k=40\text{N/mm}^2$

$H=20\text{mm}, p=1900\text{N} \cdots H_k=50\text{N/mm}^2$

$H=40\text{mm}, p=3200\text{N} \cdots H_k=10\text{N/mm}^2$

$H=80\text{mm}, p=3200\text{N} \cdots H_k=20\text{N/mm}^2$

図 9 に高さ 20mm 試験体の弾性解析と弾塑性解析の関係を示す。図中には、45 度線を破線で示している。図 (a) の載荷荷重 900N 時（最大応力 38N/mm²）では、降伏値の 35N/mm² まで 45 度線にほぼ一致していることから両者が同値であり、降伏値に達した後の弾塑性解析値は 35N/mm² の一定値となっており、ほぼ想定通りの関係となっていることがわかる。一方、図(b)の載荷荷重 1400N（最大応力 =59N/mm²）および図(c)の載荷荷重 1900N（最大応力 79N/mm²）では、降伏値 (35N/mm²) 以下の範囲では、連続的に（曲線上に）弾塑性解析値の値が大きくなる傾向が見られる。この傾向は載荷荷重が大きくなるほど顕著であることが分かる。

図 10 に高さ 40mm 試験体の弾性解析と弾塑性解析の関係を示す。図(a)の載荷荷重 1600N（最大応力 39N/mm²）では、ほぼ 45 度線に沿っており、弾性解析と弾塑性解析の値はほぼ一致しておりばらつきが小さいことが分かる。図 (b)の載荷荷重 2400N（最大応力 58N/mm²）および図(c)の載荷荷重 3200N（最大応力 78N/mm²）では、試験体高さが

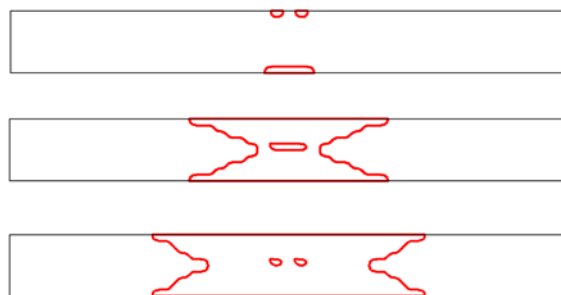


図6 破壊領域（高さ20mm、上からp=900, 1400, 1900N）

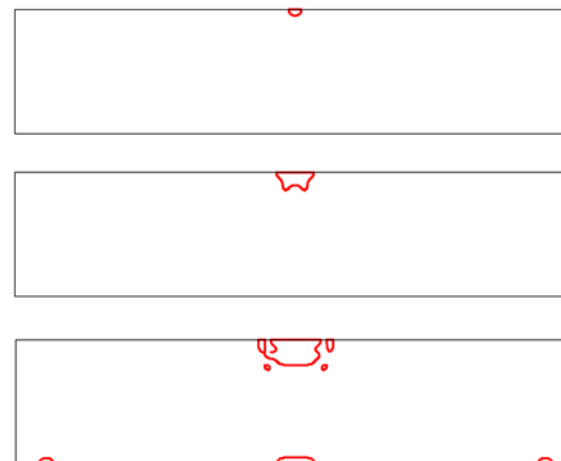


図7 破壊領域（高さ40mm、上からp=1600, 2400, 3200N）

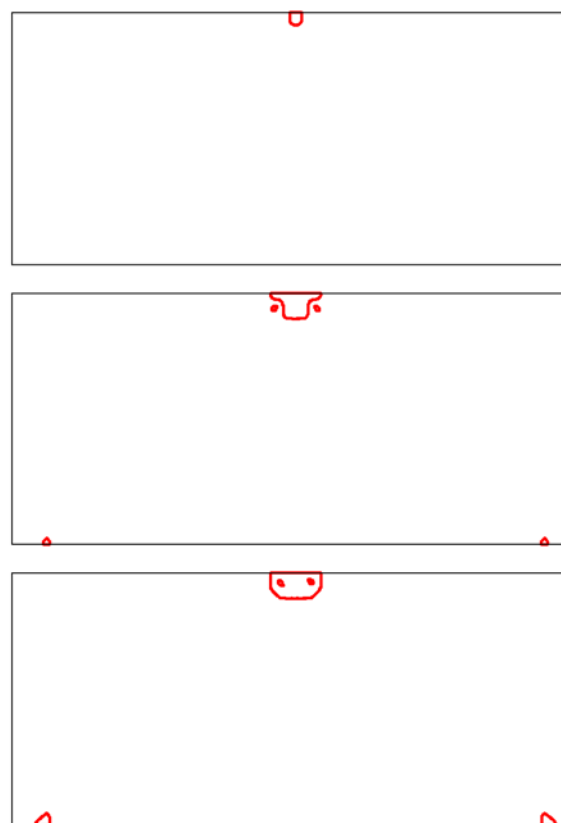


図8 破壊領域（高さ80mm、上からp=2100, 2800, 3500N）

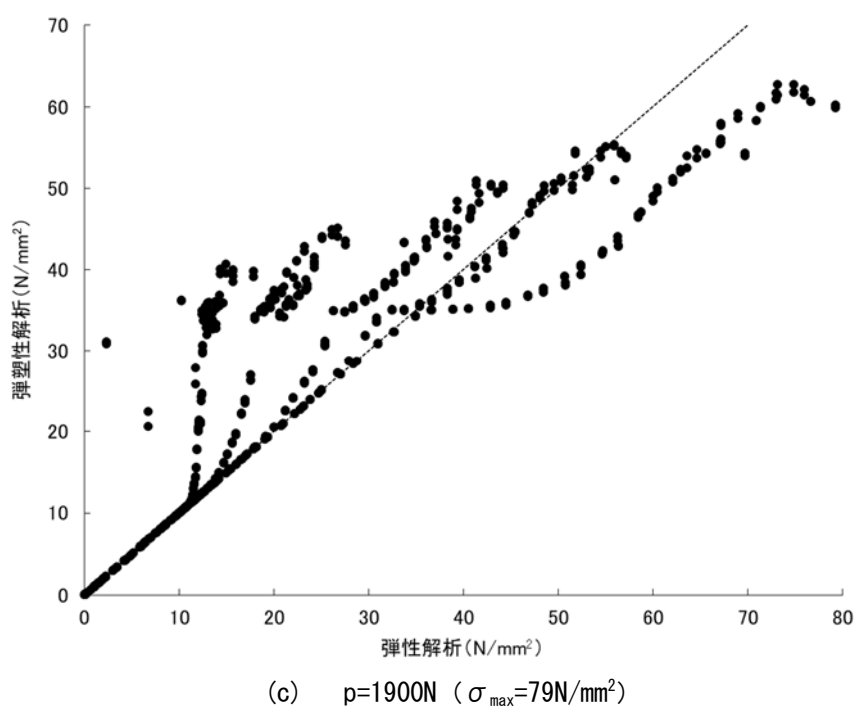
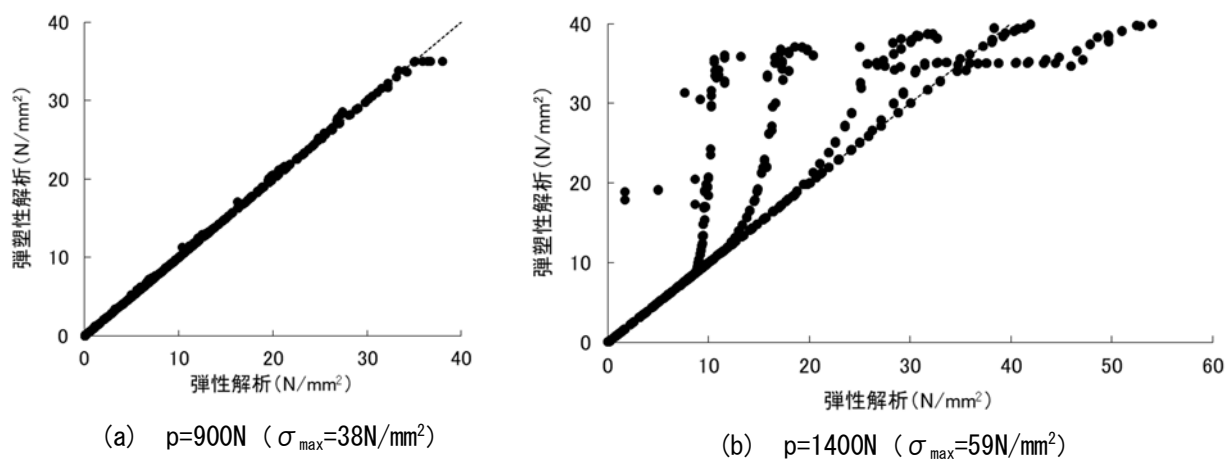


図9 弾性解析と弾塑性解析の関係（高さ20mm）

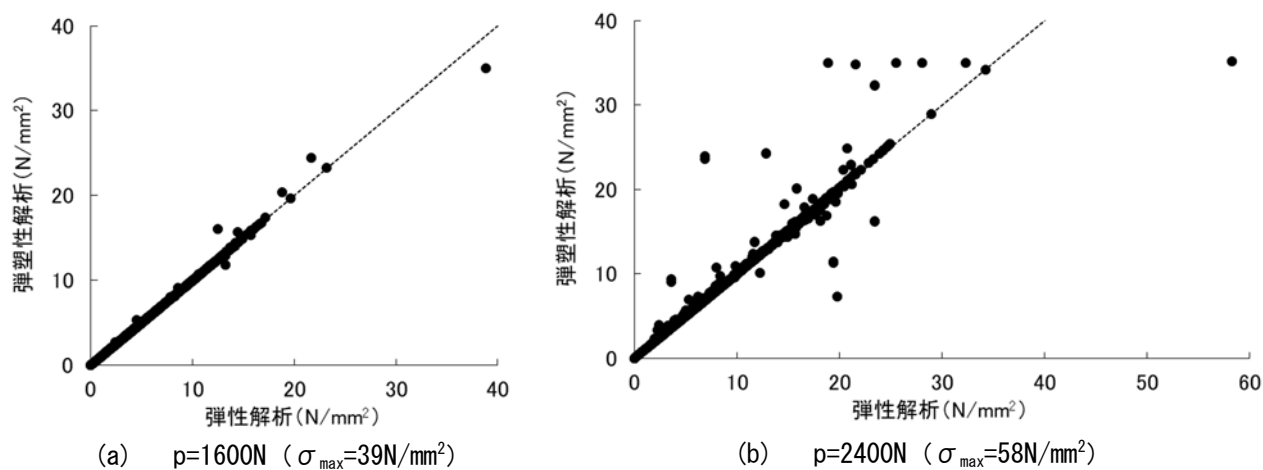


図10 弾性解析と弾塑性解析の関係（高さ40mm）

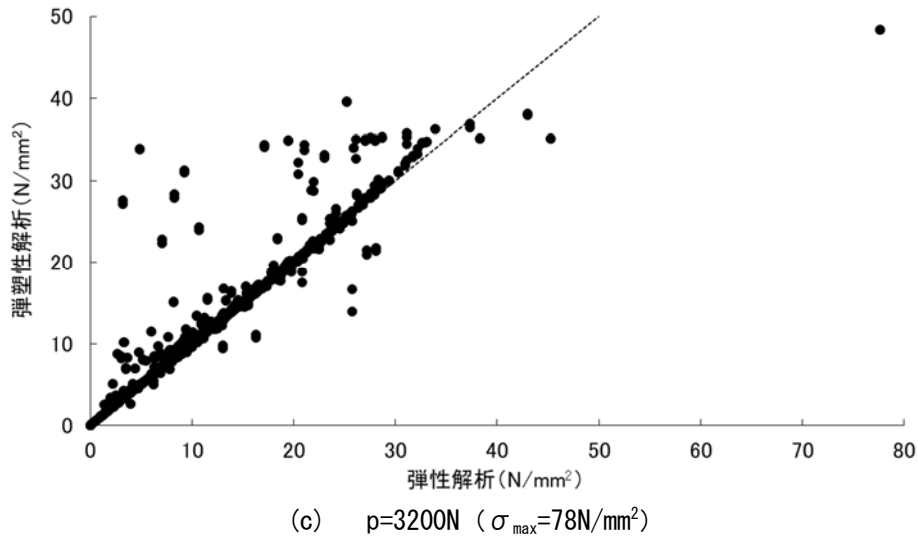


図10 弾性解析と弾塑性解析の関係 (高さ40mm)

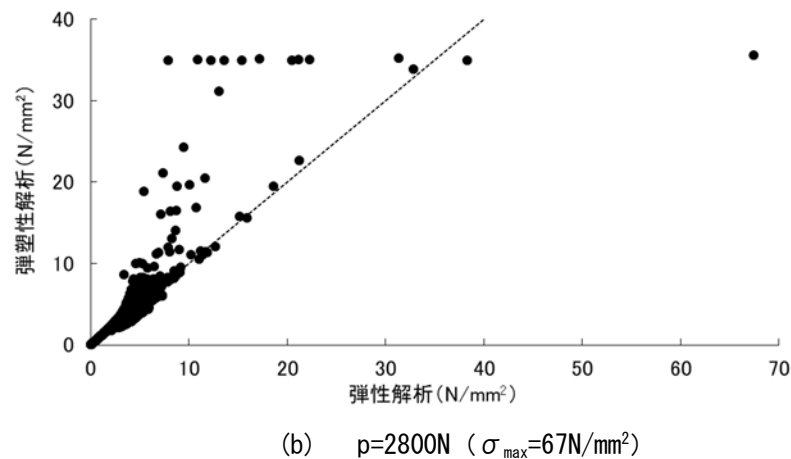
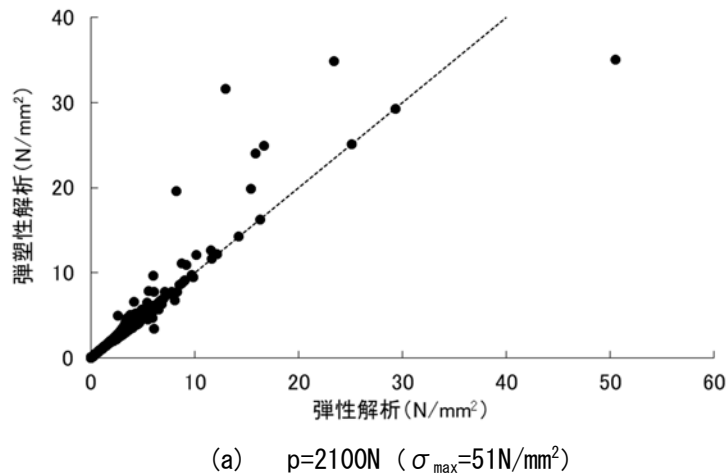


図11 弾性解析と弾塑性解析の関係 (高さ80mm)

大きくなるほど、45 度線から離れた値が多くなっており、ばらつきが大きくなっていることが分かる。高さ 20mm 試験体と異なり、降伏値 (35N/mm^2) 以下の範囲において、弾塑性解析の方が大きい値も小さい値も両方見られる。ま

た、連続的に (曲線上に) はなっていない。これらの原因として、試験体高さが大きいほどせん断成分が大きくなることが影響しているものと思われるが、詳細な検討が必要である。

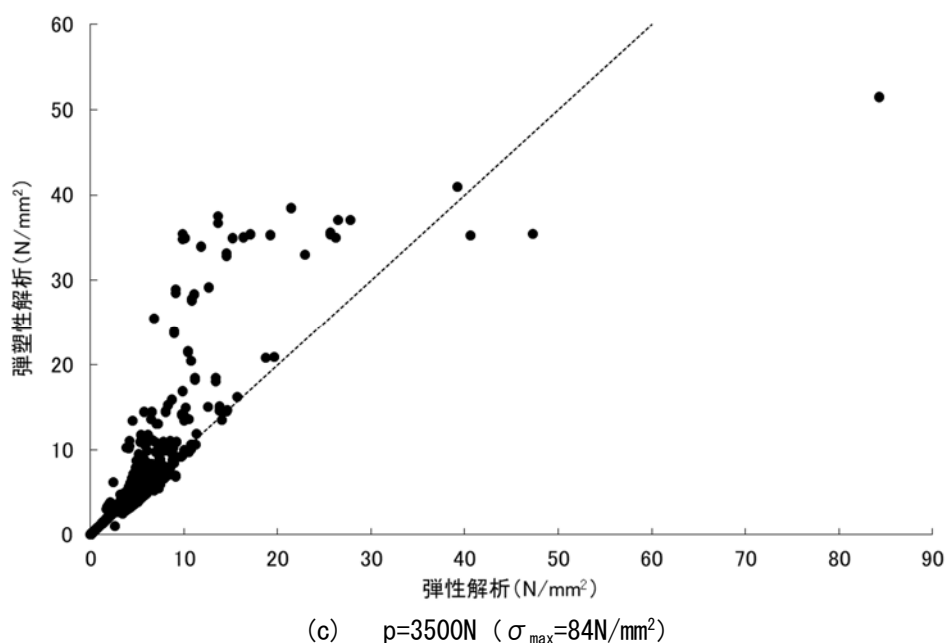


図11 弾性解析と弾塑性解析の関係（高さ80mm）

図 11 に高さ 80mm 試験体の弾性解析と弾塑性解析の関係を示す。図(a)の載荷荷重 2100N（最大応力 51N/mm^2 ）においてもばらつきが見られる。図(b) の載荷荷重 2800N（最大応力 67N/mm^2 ）および図(c)の載荷荷重 3500N（最大応力 84N/mm^2 ）においては、載荷荷重が大きくなるほどばらつきも大きくなっていることが分かる。また、高さ 40mm 試験体とは異なり、降伏値 (35N/mm^2) 以下の範囲において、弾塑性解析値が弾性解析値よりも大きな値となる傾向が見られる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 弾塑性解析による破壊領域は、試験体高さが大きくなるほど収束計算の際の誤差が生じやすくなるものと思われる。
- 2) 高さ 20mm 試験体では、降伏値 (35N/mm^2) 以下の範囲において、連続的に（曲線上に）弾塑性解析値の値が大きくなる傾向が見られる。この傾向は載荷荷重が大きくなるほど顕著である。
- 3) 高さ 40mm 試験体では、載荷荷重が大きくなるほどばらつきが大きくなり、降伏値 (35N/mm^2) 以下の範囲において、弾塑性解析の方が大きい値も小さい値も両方見られる。

- 4) 高さ 80mm 試験体では、載荷荷重が大きくなるほどばらつきも大きくなり、降伏値 (35N/mm^2) 以下の範囲において、弾塑性解析値が弾性解析値よりも大きな値となっている。

【謝辞】

本研究費の一部は、令和 2 年度科学研究費助成事業・基盤研究(C)(研究代表者：服部宏己)によった。また、金城学院大学の朴相俊准教授および宇津木香乃さん、大串都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) 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
- 2) 西華デジタルイメージ (株)、「DIC システムとは」、2016.8<https://www.seika-di.com/measurement/material/dic.html>
- 3) 服部宏己・朴相俊・畑中重光：「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研究(その 1：デジタル画像相関法 (DIC) を用いた基礎実験)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、教育、2020.8

(提出日 令和 3 年 1 月 7 日)