

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03769

研究課題名（和文）薄肉部材が有する塑性座屈後の極限荷重メカニズムの解明

研究課題名（英文）Research of ultimate load mechanism post plastic buckling of thin-walled members

研究代表者

増田 健一（Masuda, Kenichi）

富山大学・学術研究部工学系・准教授

研究者番号：40548153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：板の圧縮および平面曲げにおいて、臨界ひずみに関する特徴を把握することで、幾何特性・境界条件の違い・材料特性に対応する極限荷重を評価することが可能となった。  
四角筒の圧縮および曲げにおいて、種々の長さ・四角筒の幅や高さに対応した崩壊断面変形状態を一本のマスターカーブで表現することが可能となった。そこで、長さ方向の曲率と断面方向の局所的な曲率によって生じる二軸応力状態を考慮することで、崩壊メカニズムに対応した精度の良い極限荷重評価法を提案することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高伸び率を有する板材の極限荷重は塑性座屈荷重に対応せず、塑性座屈後に生じ、その値は塑性座屈荷重を大きく上回ることが報告されていて、代表的な設計基準として知られているEurocode3では不十分であることが知られている。そのような背景から、Eurocode3の代替方法として連続強度設計法などによる極限荷重の評価法に関する研究が盛んに行われている。しかし、部材崩壊メカニズムの把握、その現象に合わせた合理的な解釈、その解釈に基づく極限荷重の評価は行われていないのが現状である。本研究で得られた合理的な成果は、薄肉部材に対する正しい知識を深化させ得るため、学術的にも社会的にも大きく貢献し得る。

研究成果の概要（英文）：By understanding the characteristics of the critical strain in plate compression and plane bending, it became possible to evaluate the ultimate load corresponding to differences in geometric characteristics, boundary conditions, and material properties.  
In the compression and bending of square tubes, it is possible to express the collapse cross-sectional deformation state corresponding to various lengths, widths and heights of the square tube with a single master curve. Therefore, by considering the biaxial stress state caused by the curvature in the longitudinal direction and the local curvature in the cross-sectional direction, it is possible to propose a highly accurate method for evaluating the ultimate load corresponding to the collapse mechanism.

研究分野：材料力学

キーワード：座屈 FEM 薄肉部材 極限荷重

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高伸び率を有する板材の極限荷重は塑性座屈荷重に対応せず、塑性座屈後に生じ、その値は塑性座屈荷重を大きく上回ることが報告されていて、代表的な設計基準として知られている Eurocode3 では不十分であることが知られている。そのような背景から、Eurocode3 の代替方法として連続強度設計法などによる極限荷重の評価法に関する研究が盛んに行われている。しかし、部材崩壊メカニズムの把握、その現象に合わせた合理的な解釈、その解釈に基づく極限荷重の評価法という原理原則に基づいたアプローチは行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は圧縮や曲げを受ける高伸び率を有する薄肉部材の崩壊メカニズムを把握し、その現象に合わせた合理的な解釈、その解釈に基づく極限荷重の評価法という原理原則に基づいたアプローチによる極限荷重の評価法を確立することである。

3. 研究の方法

本研究では、基本的に有限要素法汎用コード "MSC. Marc" を用いて検討を行っており、実験との整合性検証には他の研究者のデータや富山県産業技術開発センターの試験機を用いている。図1には板の圧縮および面内曲げに関する解析モデルを示す。図に示すように幅  $b$ 、高さ  $6b$ 、板厚  $t$  の幾何条件を有する板の下端を完全固定とし、上端の  $y$  および  $z$  方向を固定した状態で、軸方向に強制変位を与えて圧縮および面内曲げ荷重を負荷している。また、上下端の回転に関して全回転  $R_x, R_y$  および  $R_z$  を拘束し、側面 ( $y=0, b$ ) の支持条件として、両側単純支持 (SS)・左側単純支持・右側自由 (SF) と左側回転固定・右側自由 (CF) について検討した。図2には四角筒の圧縮と曲げに関する解析モデルを示す。

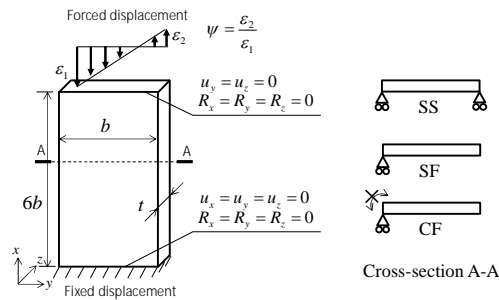


図1 板の圧縮および面内曲げに関する解析モデル

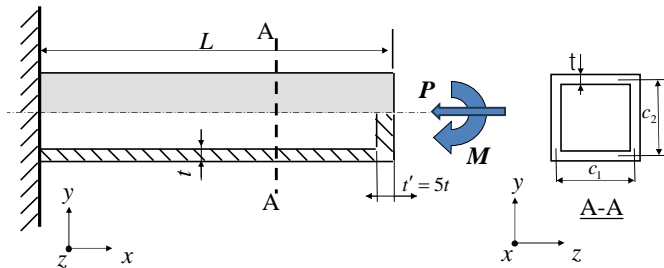


図2 四角筒の圧縮および曲げに関する解析モデル

材料特性には、ミーゼスの降伏条件に従う等方・均質な弾塑性体を想定

し、弾性特性として線形弾性、硬化特性としては基本的に一定の加工硬化係数を与える2直線硬化則、もしくは、ひずみ硬化指数で表すランベルグ・オスグッドの式を採用している。

4. 研究成果

(1) 図3には板の圧縮および平面曲げでの極限荷重時の臨界ひずみ  $\epsilon_{cri}^p$  に関する結果を示す。

図(a)は極限荷重時の幅方向位置における軸方向塑性ひずみの分布であり、その縁 ( $y/b = 0$ ) での値を臨界ひずみ  $\epsilon_{cri}^p$  と定義して、各板厚、境界条件の違い、加工硬化係数  $E_h$  の違いに

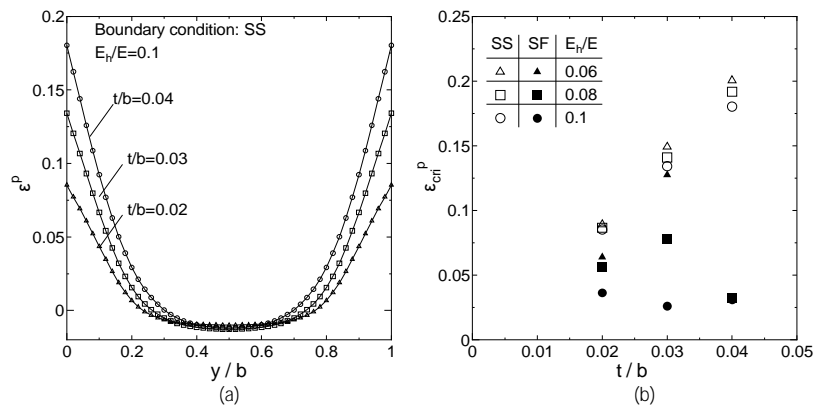


図3 板の圧縮および面内曲げの極限荷重時の臨界ひずみ

対してまとめたものを図(b)に示す。図(b)から分かるように、両側単純支持 (SS) の場合、 $\epsilon_{cri}^p$  は加工硬化係数  $E_h$  に依存せず板厚比  $y/b$  の増加に伴い線形的に増加する。この結果を利用することで両側単純支持 (SS) の場合、板の圧縮および面内曲げにおける極限荷重の予測が可能となった。これに対して、片側自由 (SF) の場合、極限荷重時の  $\epsilon_{cri}^p$  に関する特徴を把握することができなかった。片側自由 (SF) の場合の崩壊メカニズムの把握は今後の課題となる。

(2) 図4には四角筒の圧縮および曲げにおける極限荷重の検討結果を示す。図(a)は崩壊断面の変形状態を定量的に評価した図である。青色プロットは弾性材料の場合、赤色プロットは弾塑性材料の場合であり、降伏応力に対応した塑性変形挙動に関して検討している。このような検討により、種々の材料特性・幅厚比に対応する断面変形を定量的に評価することが可能となった。

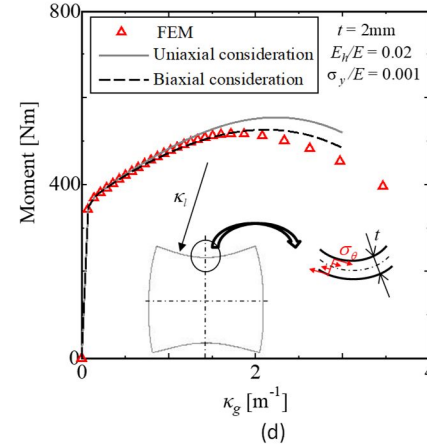
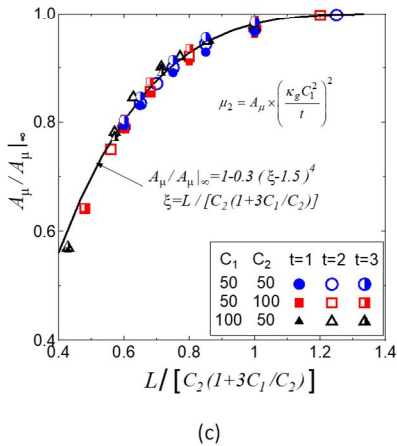
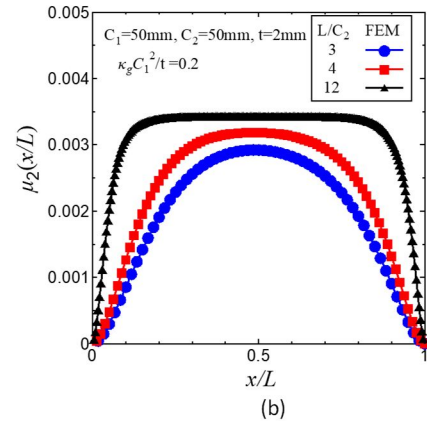
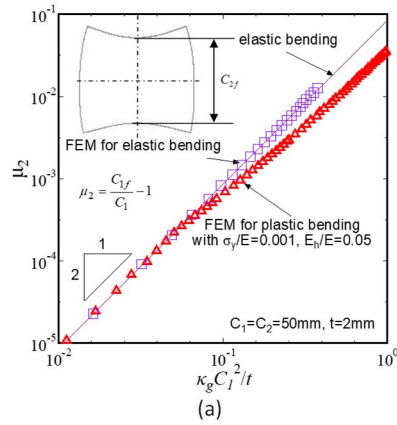


図4 四角筒の圧縮および曲げにおける極限荷重の検討

(3) 図(b)(c)は端部拘束による崩壊断面の変形状態を定量的に評価した図である。図(b)の黒プロットは端部の影響が無視できるほど十分長い ( $L/C_2 = 12$ ) 場合の長さ方向位置 ( $x/L$ ) における変形状態を示し、赤色と青色プロットは端部の影響が無視できない長さでの変形状態を示している。このような特徴を整理した結果を図(c)に示している。この図から分かるように、種々の長さ・四角筒の幅や高さに対応した変形状態を一本のマスターカーブで表現することが可能となった。

(4) 図(d)は長さ方向の曲率と曲げ荷重との関係について、FEM での結果を赤色プロットで示し、実線は図(c)で得られた変形状態マスターカーブを用いて長さ方向の曲率 ( $\kappa_g$ ) のみから得られる曲げ荷重 (軸方向応力  $\sigma_x$  だけ考慮) を示す。この図から分かるように、FEM の結果と予測結果は途中まで良い一致を示すが、極限荷重付近での誤差は大きい。この原因は図(d)中に示す断面形状変化によって生じる局所的な曲率 ( $\kappa_l$ ) によって生じる断面方向に生じる応力 ( $\sigma_\theta$ ) の影響と考え、軸方向応力  $\sigma_x$  と断面方向に生じる応力 ( $\sigma_\theta$ ) の両方を考慮した予測結果を破線で示す。この図から分かるように崩壊メカニズムに対応した二軸応力状態を考慮することで、より精度の良い極限荷重の評価をすることが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kenichi Masuda, Sotomi Ishihara, Noriyasu Oguma, Minoru Ishiguro, Yoshinori Sakamoto and Mami Iwasaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Study on the Fatigue Crack Initiation and Growth Behavior in Bismuth- and Lead-Based Free-Cutting Brasses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 materials	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma15217488	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Masuda, Sotomi Ishihara, Hiroshi Shibata and Noriyasu Oguma	4. 巻 14
2. 論文標題 Effect of Rod-like Structure on Fatigue Life, Short Surface Crack Initiation and Growth Characteristics of Extruded Aluminum Alloy A2024 (Analysis via Modified Linear Elastic Fracture Mechanics)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MDPI materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma14247538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Masuda, Sotomi Ishihara, Noriyasu Oguma, Minoru Ishiguro and Yoshinori Sakamoto	4. 巻 15
2. 論文標題 Elasto-Plastic Fatigue Crack Growth Behavior of Extruded Mg Alloy with Deformation Anisotropy Due to Stress Ratio Fluctuation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MDPI materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma15030755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Masuda, S. Ishihara, H. Shibata, Y. Sakamoto, N. Oguma, M. Iwasaki	4. 巻 183
2. 論文標題 Effect of surface coating on fatigue life and fatigue crack growth behavior of AISI D2 tool steel	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijfatigue.2024.108230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 増田健一
2. 発表標題 軸圧縮を受ける板の崩壊挙動に及ぼす境界条件の影響
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度秋季研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------