

材料の応力ひずみ関係の変化に伴う面内曲げ圧縮負荷を受ける

周辺単純支持板の強度相関

Strength correlations of simply-supported plates under combined in-plane bending and compression due to variation in stress-strain relationships

高橋寛成*, 宮寄靖大†

Hironari Takahashi, Yasuhiro Miyazaki

*長岡工業高等専門学校, 環境都市工学専攻 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

†博士(工学), 長岡工業高等専門学校准教授, 環境都市工学科 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

Generally, the structural steel satisfies the material strength specified in the standards. However, there are variations in the strength and stress-strain relationship. The purpose of this paper is to clarify the influence of the stress-strain relationship of the material on the strength behavior of simply supported plate under in-plane bending and compression by numerical analysis. The numerical analysis used consideration of the following four kinds of changes of the stress-strain relationship; (a)material strength, (b)Young's modulus, (c)the gradient of strain hardening, (d)the difference of gradient between elastic and plastic areas. Finally, this paper proposed the ultimate strength evaluation method of the simply supported plate under in-plane bending and compression.

Key Words: stress-strain relationship, simply supported plate, bending and compressive loading, strength correlation

キーワード: 応力ひずみ関係, 周辺単純支持板, 曲げ圧縮負荷, 強度相関

1. はじめに

土木鋼構造物に用いる鋼材の材料特性は, JIS 等の規格類で規定される値を満たしていることが必要条件である. このような鋼材の材料特性は, さまざまな要因からばらつきを有することが知られている¹⁾. また, 近年では, 耐久性の観点から, ステンレス鋼などの高耐久性材料を土木構造物に活用する期待が高まってきた. ステンレス鋼の応力ひずみ関係は, 一般的な構造用炭素鋼に見られる降伏棚が存在せず, 連続的にひずみ硬化域に遷移するラウンドハウス型を示す. したがって, 土木鋼構造物に用いられる鋼材は, 規格基準類の材料強度を満たすものの, その応力ひずみ関係の形状が種々変化するといえる. これらの材料の中でも, 従来から用いられている炭素鋼やステンレス鋼など, 特定の鋼種で構成される鋼板の強度特性に関する研究は多く存在する²⁾⁻¹³⁾. しかし, 前述した材料の不確定要素が構造物の強度特性に及ぼす

影響を詳細に調べた研究は, 極僅かである^{14),15)}.

現在, 我が国の土木鋼構造物における設計基準類は, 許容応力度設計法から性能照査型設計法への移行が進められている. また, 性能照査型設計法においては, 各種部材の安全係数の明確化が求められている. これらのことより, 土木鋼構造物の基本要素である鋼板を対象として, 材料特性の不確定要素が強度特性に及ぼす影響は, これまでに明らかにした純圧縮荷重を受ける場合¹⁴⁾および純曲げ荷重を受ける場合¹⁵⁾に加えて, 複合荷重下での強度特性を明確にする必要がある.

本研究では, 材料の応力ひずみ関係の変化が面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響を数値計算¹⁶⁾により明らかにする. そして, これらの数値計算結果より, 面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度相関曲線に関する強度評価法を提案する. なお, 本研究で対象とする応力ひずみ関係の変化は, 大別して, a.材料強度, b.ヤング係数, c.ひずみ硬化勾配, d.弾性域と塑性域の勾配差とする.

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: y-miyazaki@nagaoka-ct.ac.jp

2. 曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の数値計算法

2.1 対象材料

本研究で対象とする材料モデルは、SM400 および SUS304 相当の強度を有するものと仮定する。また、対象とする応力ひずみ関係は、大別して、降伏棚を有するモデルおよび降伏棚が無いラウンドハウス型モデルとする。本研究では、文献 3) の材料試験結果を基に、ヤング係数 E を 200GPa、ポアソン比 ν を 0.3、降伏応力 σ_y を 250MPa、10%塑性ひずみ時の応力 σ_{10} を 500MPa とした基本材料モデルを設定し、この基本モデルに対して、材料の応力ひずみ関係を変化させる。ここで、降伏棚を有さないモデルは、比例限界点(0.01%耐力)を 150MPa にするとともに、降伏応力として 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を用いる。

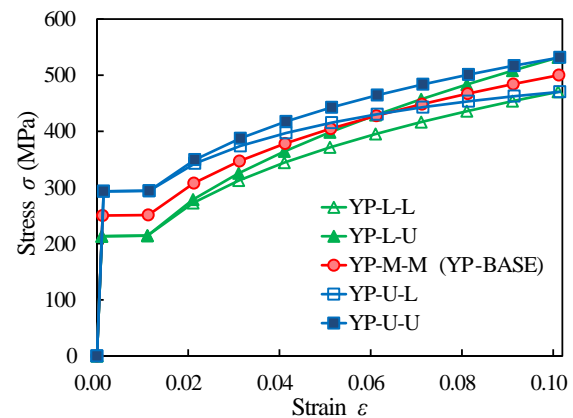
表-1 は、本研究で対象とする全材料モデルの機械的性質を示す。同表中のモデル名は、YP が降伏棚を有するモデル、RH がラウンドハウス型モデルを意味する。1 つ目に、同表中の材料強度を変化させるモデルは、降伏棚の有無を示す記号に続く記号が降伏応力または 0.2% 耐力を、次の記号が 10%塑性ひずみ時の応力を示す。これらの記号は、L が下限値、M が平均値、U が上限値を表している。また、これらのモデルは、文献 1) の統計データを参考にして、 σ_y または $\sigma_{0.2}$ および σ_{10} のそれぞれで対数正規分布確率の 95% 区間を考慮している。なお、ラウンドハウス型の材料モデルは、炭素鋼に見られる降伏棚を有する材料モデルの材料試験データに比べて少ないことから、炭素鋼と同じ確率分布に従うものと仮定して扱う。これらの結果から、各項目のばらつきは、 σ_y または $\sigma_{0.2}$ で 38%、 σ_{10} で 13% となる。図-1 は、このように決定した材料強度のばらつきを考慮するモデルの応力ひずみ関係を示している。

2 つ目に、表-1 中のヤング係数の変化を考慮するモデルは、降伏棚の有無を示す記号に続く記号がヤング係数の大きさを示す。これらのモデルは、文献 3) の材料試験データに基づき、そのばらつきを 38% として各モデルのヤング係数の値を決定する。

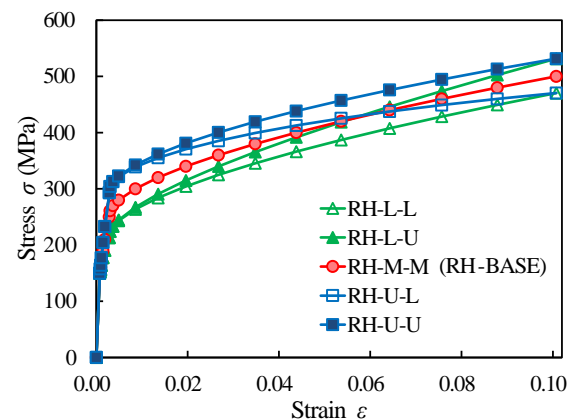
3 つ目に、表-1 中のひずみ硬化勾配を変化させるモデルは、降伏棚の有無を示す記号に続く記号がひずみ硬化勾配の大きさを意味しており、EPL が勾配の下限値、EPU が上限値を表している。図-2 は、これらモデルの応力ひずみ関係を示している。同図は、図-1 で示した材料強度を変化させるモデルの応力ひずみ関係を基本として、ひずみ硬化勾配を変化させている。したがって、これらモデルの σ_y または $\sigma_{0.2}$ から σ_{10} へのひずみ硬化勾配のばらつきは、79% となる。ここで、材料の応力ひずみ関係における塑性域の変化が周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響は、文献 15) より、降伏棚を有するモデルで塑性ひずみ 6%、ラウンドハウス型モデルで塑性ひずみ 4% までの範囲であることを確認している。そのため、ひずみ硬化勾配を変化させた領域を超える応力ひずみ関

表-1 材料モデルの機械的性質

材料変化	モデル名	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_{10} (MPa)
材料強度	YP-L-L	200	0.3	213	470
	YP-L-U	200	0.3	213	531
	YP-M-M(YP-BASE)	200	0.3	250	500
	YP-U-L	200	0.3	293	470
	YP-U-U	200	0.3	293	531
	RH-L-L	200	0.3	213	470
	RH-L-U	200	0.3	213	531
	RH-M-M(RH-BASE)	200	0.3	250	500
	RH-U-L	200	0.3	293	470
ヤング係数	RH-U-U	200	0.3	293	531
	YP-160	160	0.3	250	500
	YP-200(YP-BASE)	200	0.3	250	500
	YP-220	220	0.3	250	500
	RH-160	160	0.3	250	500
	RH-200(RH-BASE)	200	0.3	250	500
ひずみ硬化勾配	RH-220	220	0.3	250	500
	YP-EPL	200	0.3	250	500
	YP-EPM(YP-BASE)	200	0.3	250	500
	YP-EPU	200	0.3	250	500
	RH-EPL	200	0.3	250	500
	RH-EPM(RH-BASE)	200	0.3	250	500
弾性域と塑性域の勾配差	RH-EPU	200	0.3	250	500
	YP-160-EPU	160	0.3	250	500
	YP-220-EPL	220	0.3	250	500
	RH-160-EPU	160	0.3	250	500
	RH-220-EPL	220	0.3	250	500



(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)



(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)

図-1 材料強度の変化を考慮した材料モデルの応力ひずみ関係

係は、10%塑性ひずみまでの領域を比例関係として仮定する。

4 つ目に、表-1 中の弾性域と塑性域の勾配差を変化させるモデルは、降伏棚の有無を示す記号に続く記号がヤング係数の大きさを、次の記号がひずみ硬化勾配の大きさを示す。図-3 は、これらモデルの応力ひずみ関係を示している。これらのヤング係数およびひずみ硬化勾配の値は、前述のヤング係数およびひずみ硬化勾配の変化を考慮したモデルと同様にして変化させる。これらの各モデルの弾性域と塑性域での勾配差のばらつきは147%となる。

2.2 数値計算モデル

図-4 は、本研究で対象とする面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板を示す。板の形状は縦横比 a/b を1.0、載荷辺長 b を400mmとし、式(1)に示す幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ を0.3から1.5まで0.2刻みで変化させる。

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここで、 t は板厚、 ν はポアソン比、 k は式(2)に示す座屈係数を意味する。

$$k = \frac{8.4}{2.1-\varphi} \quad (0 \leq \varphi \leq 1) \quad (2)$$

$$= 10\varphi^2 - 13.73\varphi + 11.36 \quad (1 \leq \varphi \leq 2)$$

ここで、 φ は式(3)に示す応力勾配である。なお、 φ は0から2.0まで0.25刻みで変化させる。

$$\varphi = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1 \quad (3)$$

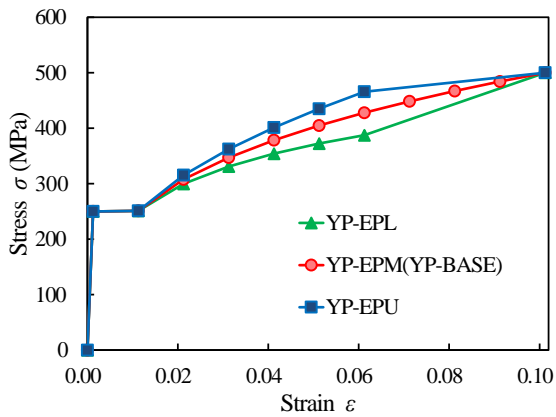
ここで、式(3)の応力 σ_1 および σ_2 は、圧縮応力を正とする。対象とする板に与える初期不整は、残留応力および初期たわみを考慮する。本研究では、材料特性の変化が周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響を調べるため、初期不整の変動を考慮しない。まず、残留応力は、文献 17) および 18) に従い、同図に示す自己平衡を保つ矩形分布で与え、圧縮残留応力 σ_{rc} および引張残留応力 σ_{rt} を式(4)に示す大きさとする。

$$\sigma_{rc} = -0.3\sigma_y, \sigma_{rt} = \sigma_y \quad (4)$$

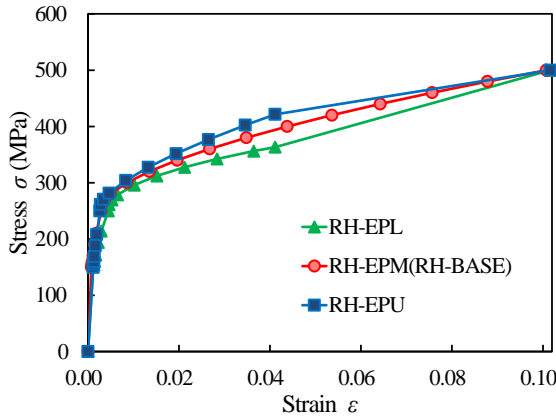
つぎに、初期たわみ W_0 は、式(5)に示す形状で与える。

$$W_0 = W_{0\max} \cos \frac{\pi X}{a} \cos \frac{\pi Y}{b} \quad (5)$$

ここで、初期たわみの最大値 $W_{0\max}$ は道路橋示方書で規定される設計許容値¹⁹⁾($=b/250$)とする。これらの周辺単純支持板は、変形の対称性を考慮し、同図の色付けした板の1/2部分を対象に、13×26分割とした8節点アイソパ

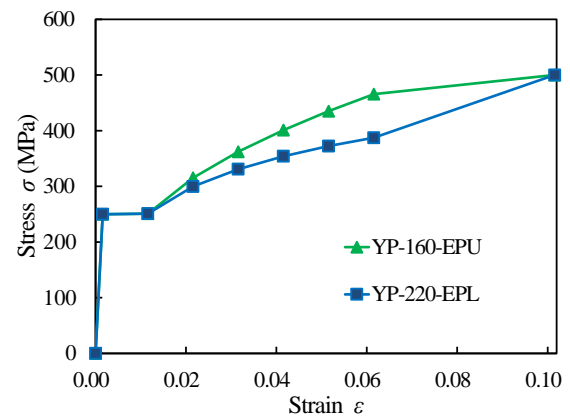


(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)

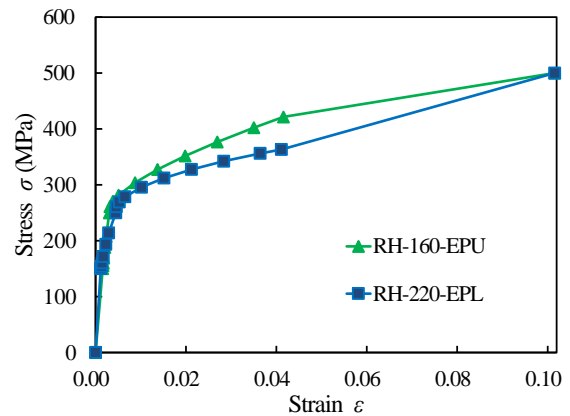


(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)

図-2 ひずみ硬化勾配の変化を考慮した材料モデルの応力ひずみ関係



(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)



(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)

図-3 ヤング係数およびひずみ硬化勾配の変化を考慮した材料モデルの応力ひずみ関係

ラメトリックシェル要素により有限要素離散化を行う。
また、数値計算では、図-5 に示すように X 軸方向に圧縮荷重、 Z 軸回りに曲げモーメントを与え、汎用非線形有限要素解析プログラム MARC¹⁰⁾を用いて行う。なお、非線形計算における解法は、弧長法を用いた経路追跡を行う。

2.3 数値計算法の妥当性

本研究に用いる数値計算法の妥当性は、面内曲げ荷重を受ける板のみの強度特性を実験により詳細に調べた研究例が存在しないため、純曲げ荷重を受ける薄板に関する既往の数値計算結果¹³⁾との比較により行う。なお、厚板を対象とした本数値計算法の妥当性は、文献 15)にて検証済みである。まず、本研究に使用する数値計算法の妥当性を検証する周辺単純支持板は、文献 13)と同様にして、ヤング係数 E を 70GPa、ポアソン比 ν を 0.3、降伏応力 σ_y を 185MPa の材料で構成されているものとする。また、材料の応力ひずみ関係は、文献 13)に従いマルチリニア型モデルとする。さらに、周辺単純支持板の形状は、図-5 で示したように変形の対称性を考慮した 1/2 モデルとし、縦横比を 1.0、座屈係数を 16、幅厚比パラメータを 2.82 として採用する。ここで、純曲げ荷重を受ける板の座屈係数を 16 とした理由は、塑性座屈を考慮するためである¹³⁾。そして、この周辺単純支持板は、初期不整として板の面外たわみを考慮する。この初期たわみは、座屈固有値解析を実施し、曲げ荷重時における板の圧縮領域部にて、最大たわみが板厚の 1%となる正弦 1 波が生じるものとする¹³⁾。以上の数値計算は、図-5 に示したように Z 軸回りに面内純曲げモーメントを与えて行う。

図-6 は、本研究で扱う数値計算により得られた面内純曲げ荷重を受ける周辺単純支持板の曲げ強度 M/M_p と回転角 θ_z の関係を示す。同図より、実線で示す本研究に用いる数値計算結果は、破線で示す既往の数値計算結果¹³⁾に比べて初期の勾配が異なるものの、最大曲げモーメントが生じる終局強度点が既往の結果とほぼ一致していることが確認できる。この最大曲げモーメントが生じる終局強度点における本数値計算結果と既往の数値計算結果との誤差は、曲げモーメントで約 2%および回転角で約 12%となる。この結果より、本研究で使用する数値計算法は妥当であると判断し、2.2 で記述した数値計算モデルを用いて曲げ圧縮荷重を受ける周辺単純支持板の強度特性を調べる。

3. 材料の応力ひずみ関係の変化が周辺単純支持板の曲げ圧縮強度特性に及ぼす影響

本章では、応力ひずみ関係の変化として、材料強度、ヤング係数、ひずみ硬化勾配、弾性域と塑性域の勾配差および降伏棚の有無の 5 つの変化について、これらが面

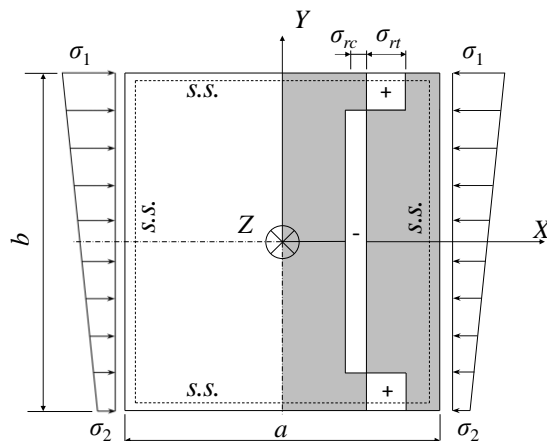


図-4 面内曲げ圧縮荷重を受ける周辺単純支持板

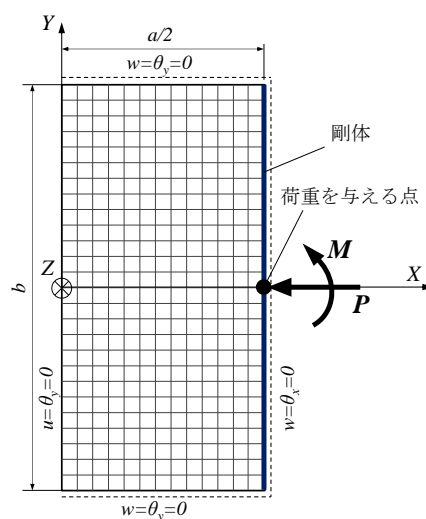


図-5 周辺単純支持板の数値計算モデル

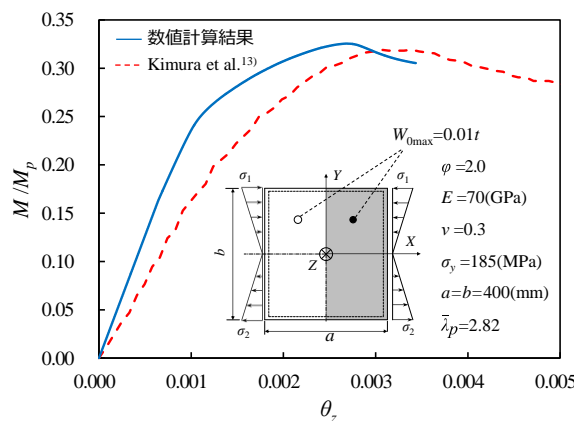


図-6 数値計算法の妥当性の検証

内曲げ圧縮荷重を受ける周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響を述べる。

3.1 材料強度の変化に着目したモデルの強度特性

図-7 は、純圧縮荷重時($\phi=0$)の λ_p が 0.3, 0.9 および 1.5 の場合の周辺単純支持板における圧縮荷重と圧縮変位の

関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で与えた荷重 N を式(6)で示す降伏荷重 N_y で無次元化した値を、横軸は数値計算で得られた変位 u を式(7)で定義する降伏変位 u_y で無次元化した値を表す。

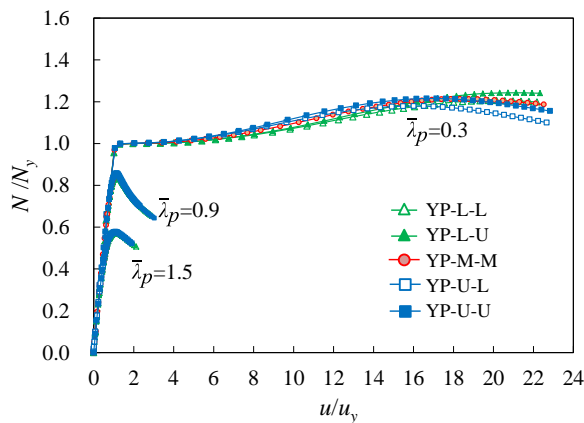
$$N_y = \sigma_y t b \quad (6)$$

$$u_y = \frac{\sigma_y a}{2E} \quad (7)$$

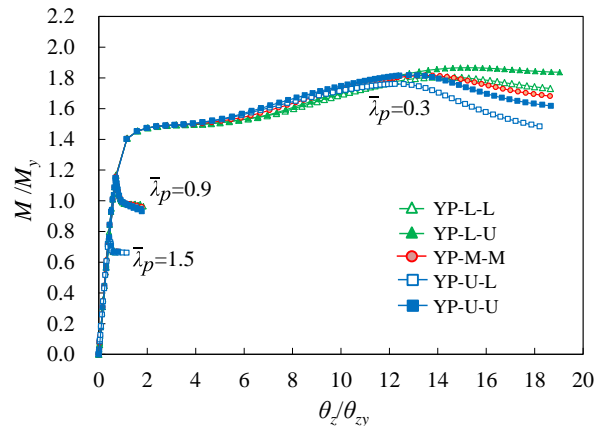
ここで、ラウンドハウス型の材料モデルの結果については、降伏応力 σ_y として 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を用いる。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、YP-L-U モデルの終局圧縮強度は、YP-U-L モデルに比べて最大で約 5% 大きくなる。また、終局強度時の圧縮変位については、YP-L-U モデルが YP-U-L モデルに比べて最大で約 31% 大きくなる。これは、降伏応力 σ_y が小さく 10% 塑性ひずみ時の応力 σ_{10} が大きいモデルにおいて、塑性化が早期に発生し、塑性化後の強度上昇によるためである。つぎに、同図(b)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、RH-L-U モデルの終局圧縮強度は、RH-U-L モデルの結果に比べて最大で約 10% 大きくなる。また、終局強度時の圧縮変位については、RH-L-U モデルが RH-U-L モデルに

比べて最大で約 20% 大きくなる。以上の結果より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、ラウンドハウス型モデルは降伏棚を有するモデルに比べて、終局強度のばらつきが大きく、終局強度時の変位のばらつきが小さいといえる。これは、RH モデルが、降伏棚を有さず、連続的に強度が上昇するような応力ひずみ関係を示すためである。つぎに、同図より、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.9 および 1.5 の場合に注目してみると、降伏棚を有する同図(a)の終局圧縮強度および終局強度時の圧縮変位は、各モデルでばらつきがほとんど発生しない結果に対して、同図(b)のラウンドハウス型モデルでは、そのばらつきが大きいことがわかる。これは、ラウンドハウス型モデルの塑性開始点を 0.01% 耐力 (150MPa) としているため、降伏棚を有する材料モデルの結果に比べて、早期の剛性低下によるものである。

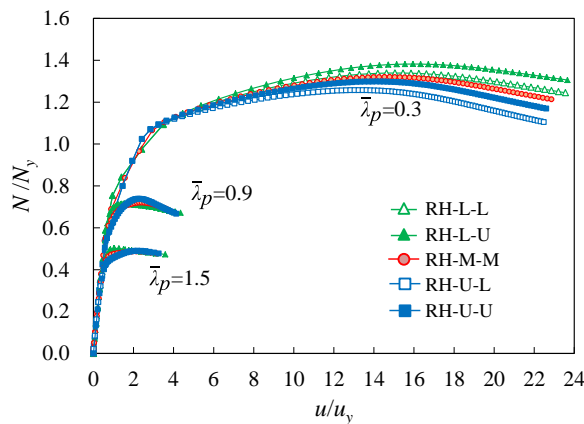
図-8 は、純曲げ負荷時($\varphi=2.0$)の $\bar{\lambda}_p$ が 0.3, 0.9 および 1.5 の場合の周辺単純支持板における曲げ強度と回転角の関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で与えた曲げモーメント M を式(8)で示す降伏曲げモーメント M_y で無次元化した値を、横軸は数値計算で得られた回転角 θ_z を式(9)で示す降伏回転角 θ_{zy} で無次元化した値を示す。



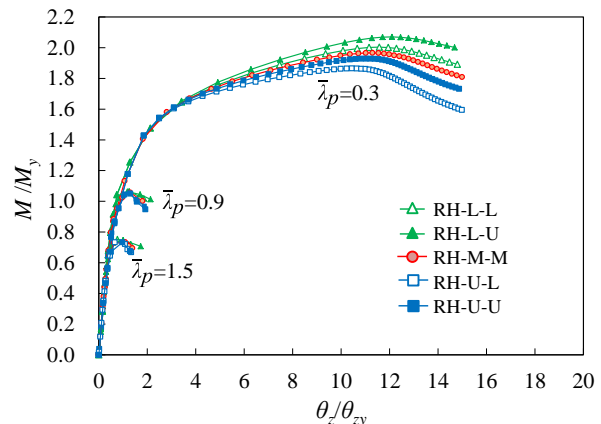
(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)



(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)



(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)



(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)

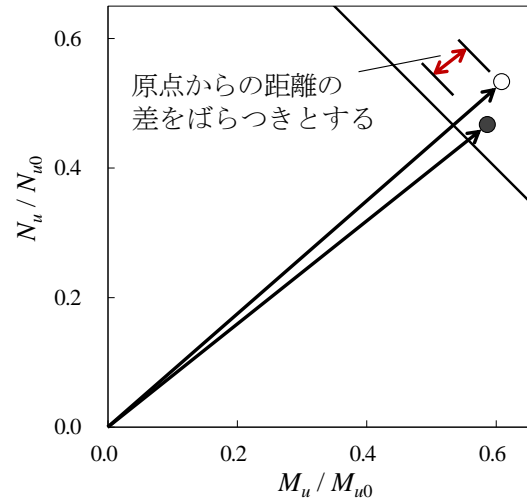
図-7 圧縮強度と圧縮変位の関係
(材料強度の変化)

図-8 曲げ強度と回転角の関係
(材料強度の変化)

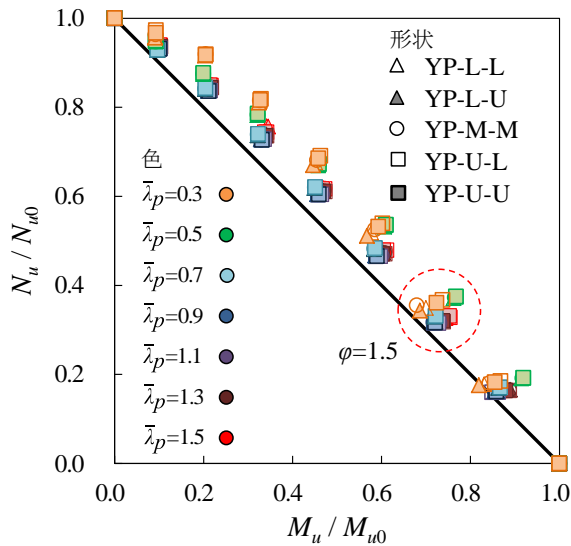
$$M_y = \frac{\sigma_y t b^2}{6} \quad (8)$$

$$\theta_{zy} = \tan^{-1} \frac{2\sigma_y a}{bE} \quad (9)$$

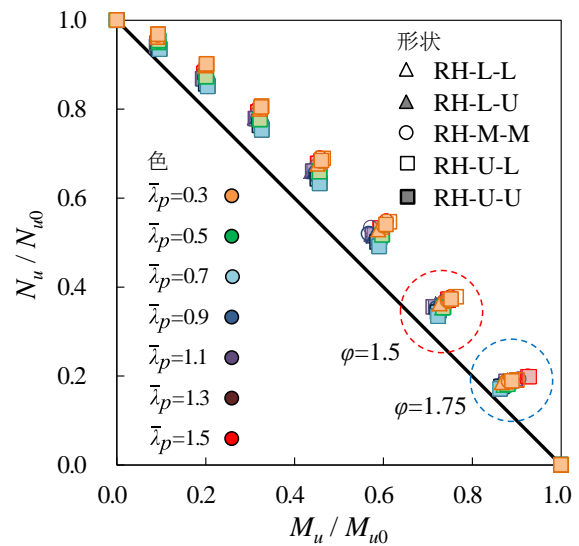
ここで、ラウンドハウス型の材料モデルの結果については、降伏応力 σ_y として0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を用いる。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、YP-L-Uモデルの終局曲げ強度は、YP-U-Lモデルの結果に比べて最大で約7%大きくなる。また、終局強度時の回転角は、YP-L-UモデルがYP-U-Lモデルに比べて最大で約23%大きくなる。つぎに、同図(b)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、RH-L-Uモデルの終局曲げ強度は、RH-U-Lモデルに比べて最大で約11%大きくなる。また、終局強度時の回転角は、RH-L-UモデルがRH-U-Lモデルに比べて最大で約15%大きくなる。上記の内容



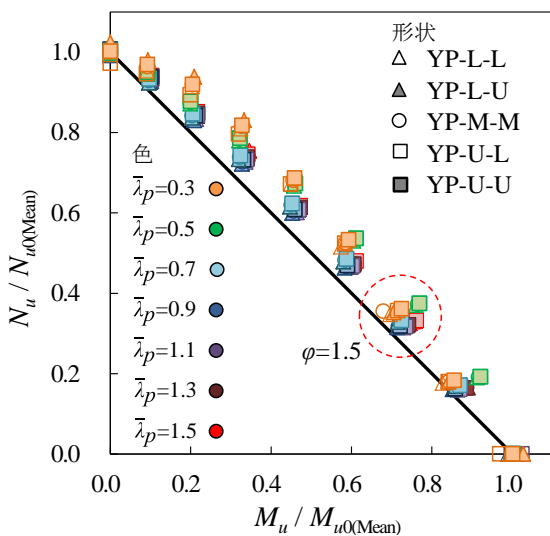
図一10 強度相関のばらつきの一例



(a) 同等モデルによる基準化

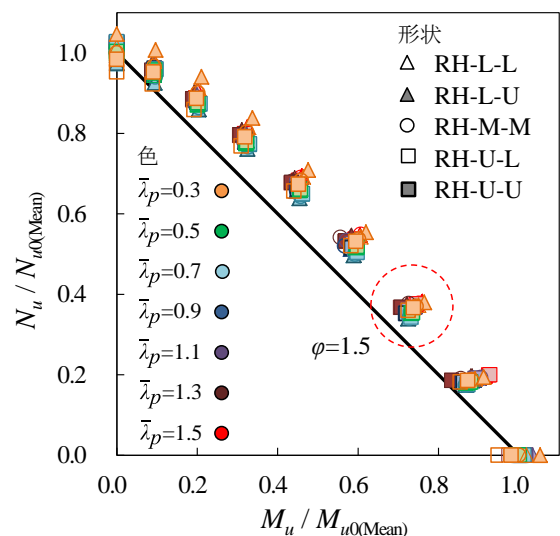


(a) 同等モデルによる基準化



(b) 基本モデルによる基準化

図一9 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(材料強度, YP モデル)



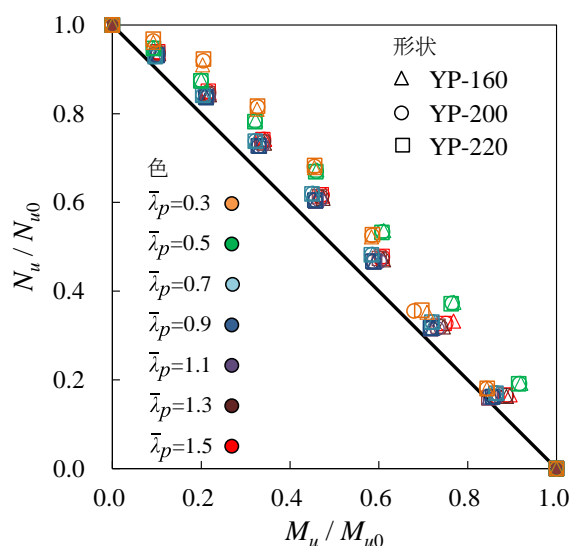
(b) 基本モデルによる基準化

図一11 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(材料強度, RH モデル)

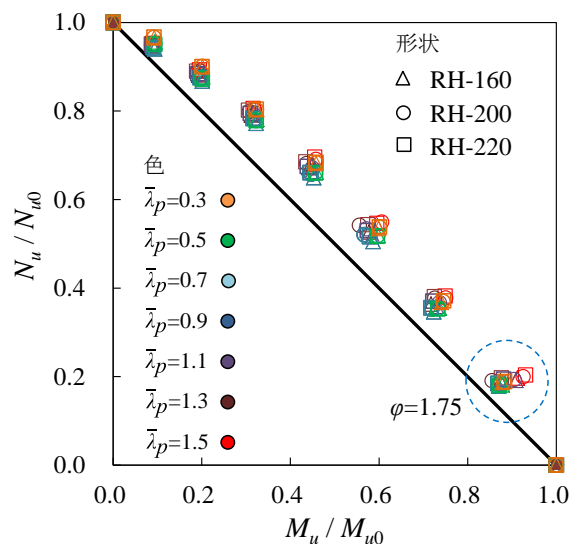
および図-7 より、周辺単純支持板の終局強度のばらつきは、面内純曲げ負荷時の結果が、面内純圧縮負荷時の結果に比べて大きくなることがわかる。これは、純曲げ負荷時の場合、周辺単純支持板の一部の領域で引張応力が発生し、そこでの塑性化の進行が板の強度特性に大きく影響していることを意味している。

図-9 は、材料強度の変化に着目した降伏棚を有するモデルの曲げ圧縮強度相関¹⁷⁾を示す。同図(a)の縦軸 N_u/N_{u0} は曲げ圧縮時の終局圧縮強度 N_u/N_y を純圧縮時の終局圧縮強度 N_{u0}/N_y で無次元化した値を、横軸 M_u/M_{u0} は曲げ圧縮時の終局曲げ強度 M_u/M_y を純曲げ時の終局曲げ強度 M_{u0}/M_y で無次元化した値を示す。また、同図(b)の縦軸 $N_u/N_{u0(Mean)}$ は曲げ圧縮時の終局圧縮強度 N_u/N_y を基本モデルの純圧縮時の終局圧縮強度 $N_{u0(Mean)}/N_y$ で無次元化した値を、横軸 $M_u/M_{u0(Mean)}$ は曲げ圧縮時の終局曲げ強

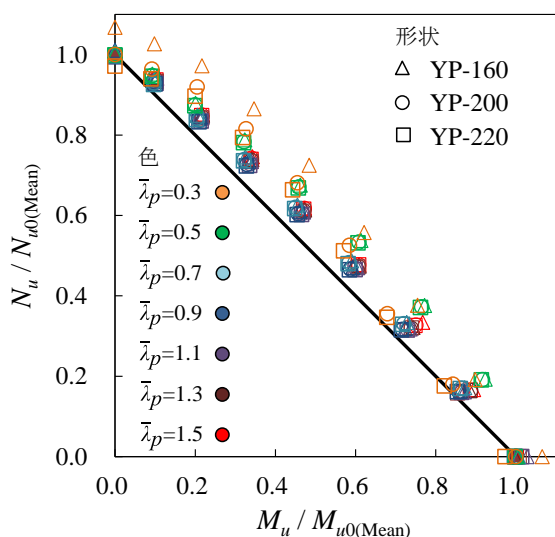
度 M_u/M_y を基本モデルの純曲げ時の終局曲げ強度 $M_{u0(Mean)}/M_y$ で無次元化した値を示す。同図(a)より、図-10に示すように原点(0,0)から各数値計算結果を示す点までの距離についてみると、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ かつ赤の破線で囲む $\phi=1.5$ の場合、YP-U-L モデルは YP-L-U モデルに比べて最大約 7%大きくなることがわかる。同じモデルについて、同図(b)を見ると、YP-U-L モデルと YP-L-U モデルのばらつきは最大約 1%であることがわかる。この結果より、同図(a)に示すばらつきが発生する理由は、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、 $\phi=0.0$ および 2.0 において材料強度の変化が終局強度に最も影響を及ぼし、純圧縮または純曲げの結果を用いて基準化することによる。つぎに、同図(a)の $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除いた強度相関のばらつきはほとんどみられないことがわかる。また、同図(b)についても、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除いた強度相関のばらつきはほとんどみられないことがわかる。こ



(a) 同等モデルによる基準化

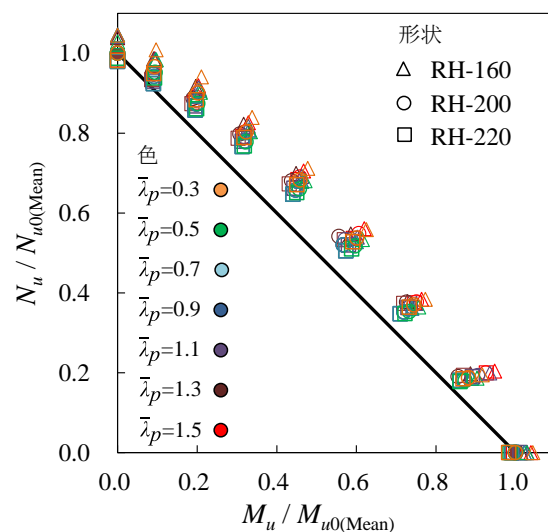


(a) 同等モデルによる基準化



(b) 基本モデルによる基準化

図-12 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(ヤング係数, YP モデル)



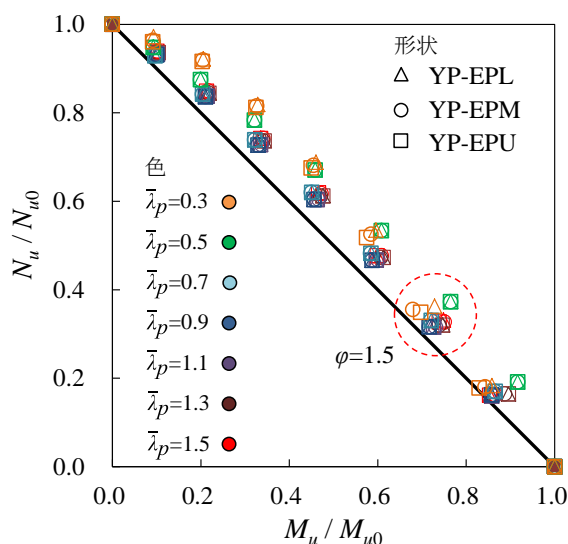
(b) 基本モデルによる基準化

図-13 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(ヤング係数, RH モデル)

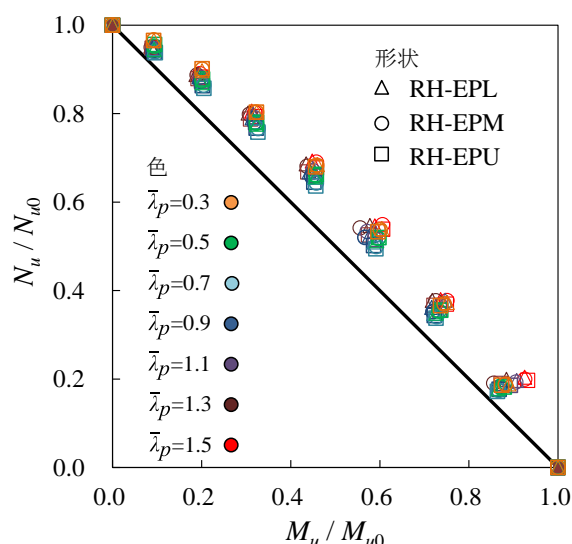
これらの結果より、同図(a)にて、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除いたばらつきは、無次元化の影響に依らないといえる。

図-11は、図-9と同様に材料強度の変化に着目したラウンドハウス型モデルにおける曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ かつ赤の破線で囲む $\varphi=1.5$ の場合、RH-U-Lモデルの原点からの距離は、RH-L-Uモデルに比べて最大約5%大きくなることわかる。つぎに、同図(b)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ において、 $\varphi=0.0$ の場合、RH-L-UモデルはRH-U-Lモデルに比べて約10%、 $\varphi=2.0$ の場合で約11%原点からの距離が大きくなることわかる。また、 $\varphi=1.5$ の場合、RH-L-UモデルはRH-U-Lモデルに比べて原点からの距離が約6%大きくなることわかる。以上の結果より、同図(a)の $\bar{\lambda}_p=0.3$ かつ $\varphi=1.5$ の場合に強度相関のばらつきが発生する理由は、図-9の結果と同様に、純曲げ時の終局強度 M_{u0} および純圧縮時の終局強度 N_{u0}

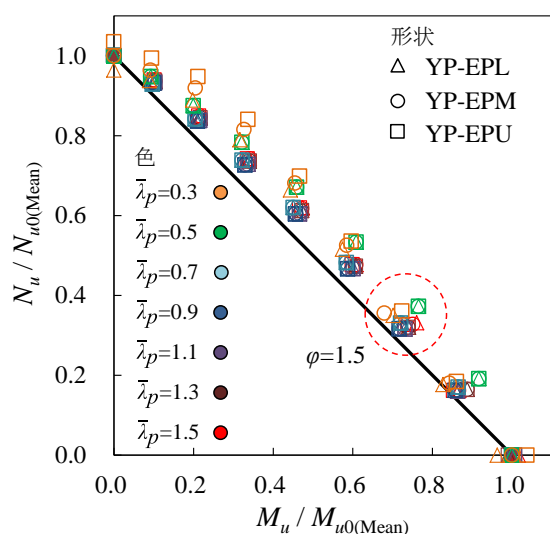
でばらつきが発生し、これらの値で除して強度相関を表しているためである。さらに、同図(a)の φ が0.25から1.0の範囲の強度相関のばらつきが小さくなる理由は、これと同様に無次元化の影響によるものである。つぎに、図-11のラウンドハウス型の結果と図-9の降伏棚有の結果を比べてみると、図-11では、 $\bar{\lambda}_p$ が大きい場合でも、材料強度の変化が強度相関に大きく影響を及ぼしていることがわかる。これは、前述したようにラウンドハウス型モデルが、降伏棚を有するモデルに比べて、早期の剛性低下が発生するためである。そして、 $\bar{\lambda}_p=1.5$ かつ青の破線で囲む $\varphi=1.75$ の場合、図-11(a)のRH-U-Uモデルの強度相関は、RH-L-Lモデルに比べて原点からの距離が最大約4%大きくなることわかる。これは、 $\bar{\lambda}_p=1.5$ かつ $\varphi=1.75$ の場合、塑性化の進展が小さく、後述する $\sigma_{0.01}$ から $\sigma_{0.2}$ までのひずみ硬化勾配が板の強度特性に大きく



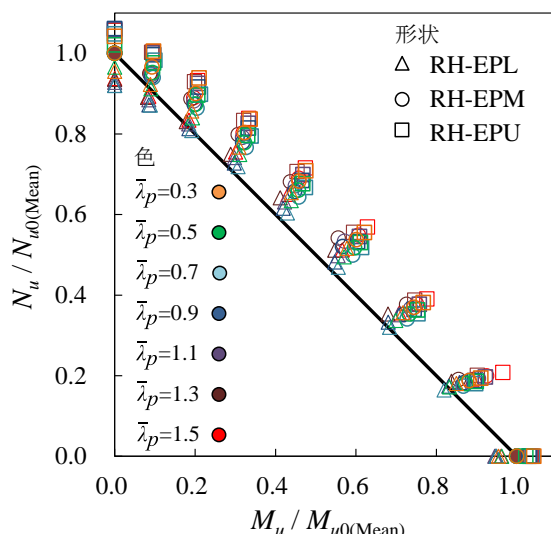
(a) 同等モデルによる基準化



(a) 同等モデルによる基準化



(b) 基本モデルによる基準化



(b) 基本モデルによる基準化

図-14 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(ひずみ硬化勾配, YP モデル)

図-15 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(ひずみ硬化勾配, RH モデル)

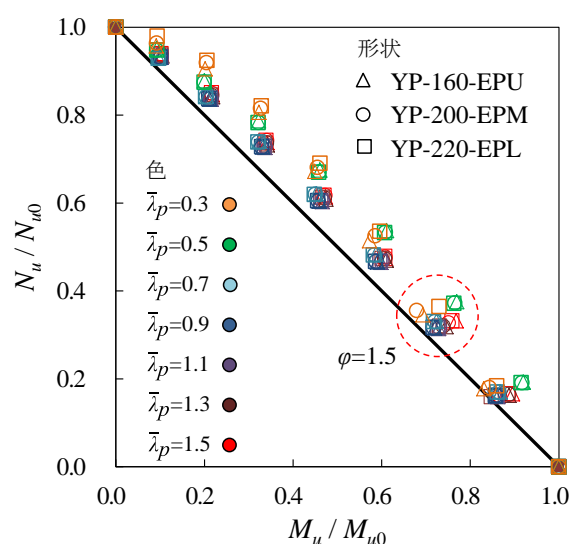
影響を及ぼすためである。

3.2 ヤング係数の変化に着目したモデルの強度特性

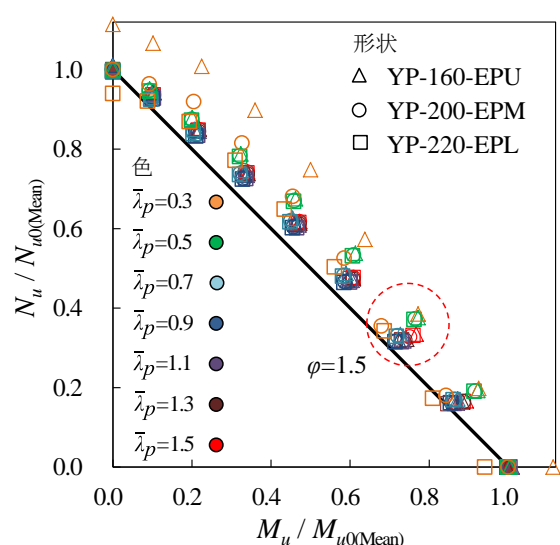
図-12は、ヤング係数の変化に着目した降伏棚を有するモデルの曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、各モデルの曲げ圧縮強度相関のばらつきは、最大で約1%となることがわかる。一方、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除く、各モデルの強度相関のばらつきはほとんどみられない。つぎに、同図(b)についてみると、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、YP-160モデルの強度相関は、YP-220モデルに比べて、原点からの距離が最大約10%、平均約9%大きくなることがわかる。これは、ヤング係数の小さい材料モデルの場合、終局強度時の板の変形が大きくなることによる塑性化の進行の結果である。

図-13は、ヤング係数の変化に着目したラウンドハウ

ス型モデルの曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、対象とした全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約3%、平均約1%となることがわかる。また、同図(b)より、対象とした全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約7%、平均約5%となることがわかる。これらの結果より、ラウンドハウス型の材料モデルについても、図-12の結果と同様に、無次元化の影響から、同図(a)に示す強度相関のばらつきはほとんど確認できない。また、青の破線で囲む $\varphi=1.75$ の場合、他の φ の結果に比べて、強度相関のばらつきは大きくなることがわかる。これは、 $\varphi=1.75$ の場合、板の引張応力が発生する領域において、剛性が小さいRH-160モデルと剛性が大きいRH-220モデルでの塑性化の進行の差によるためである。また、図-13(a)のラウンドハウス型の材料モデルの結果は、図-12(a)の降伏棚を有する材料モデルの結果

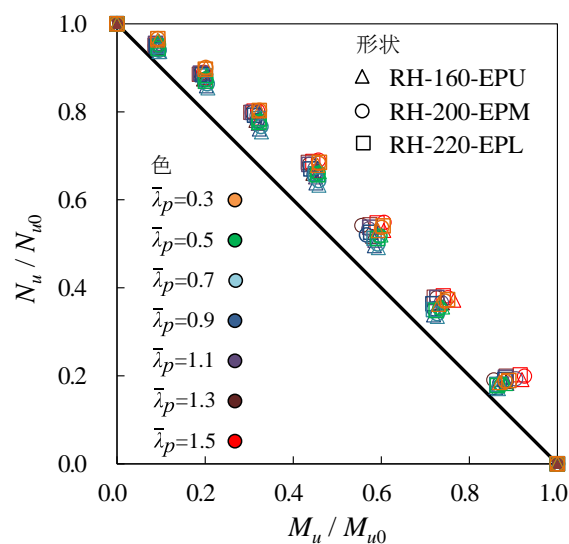


(a) 同等モデルによる基準化

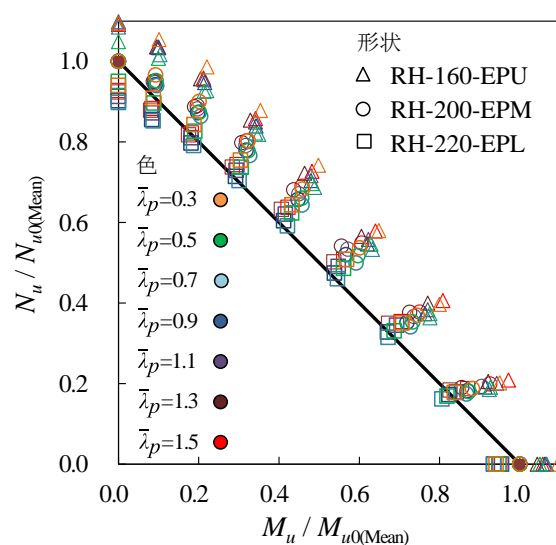


(b) 基本モデルによる基準化

図-16 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(弾性域と塑性域の勾配差, YP モデル)



(a) 同等モデルによる基準化



(b) 基本モデルによる基準化

図-17 終局圧縮強度と終局曲げ強度の相関
(弾性域と塑性域の勾配差, RH モデル)

に比べて、 $\bar{\lambda}_p$ の変化が強度相関に及ぼす影響が小さいことがわかる。これは、降伏棚を有するモデルは、連続的にひずみ硬化域に遷移せず、 $\bar{\lambda}_p$ が大きい場合、材料のひずみ硬化域が終局強度に影響を及ぼさないことを表している。

3.3 ひずみ硬化勾配の変化に着目したモデルの強度特性

図-14は、ひずみ硬化勾配の変化に着目した降伏棚を有するモデルにおける曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除く、各モデルの曲げ圧縮強度相関のばらつきはほとんどみられない。これらの結果は、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ を除いた全てのモデルにおいて、終局強度時に塑性化が発生せず、ひずみ硬化の影響を受けないためである。また、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ のYP-EPLモデルおよびYP-EPUモデルの強度相関に着目してみると、赤の破線で囲む $\varphi=1.5$ で、これらの結果の差が大きくなっていることがわかる。さらに、同図(b)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ のYP-EPLモデルおよびYP-EPUモデルの強度相関のばらつきは、赤の破線で囲む $\varphi=1.5$

で小さくなることがわかる。これらの結果は、 $\varphi=1.5$ の場合、 $\varphi=0.5$ および1.0のモデルに比べて板厚が小さく、引張応力が発生する領域での塑性化の進展がないことによる。以上より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、同図(a)の $\varphi=1.5$ での強度相関のばらつきが大きく発生する理由は、無次元化の影響のためである。すなわち、 $\varphi=1.5$ における終局強度のばらつきは、 $\varphi=0.0$ から0.75および2.0の場合に比べて、小さいことによる。

図-15は、ひずみ硬化勾配の変化に着目したラウンドハウス型モデルの曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、対象とする全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約3%、平均約1%となることがわかる。また、同図(b)より、対象とした全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約15%、平均約10%となる。これらの結果より、ヤング係数が変化する場合と同様に、無次元化による影響のため、同図(a)に示す強度相関のばらつきは打ち消されることとなる。これは、同図のラウンドハウス型の材料モデルでは、図-14の降伏棚を有するモデルと異なり、連続的にひずみ硬化域に遷移すること

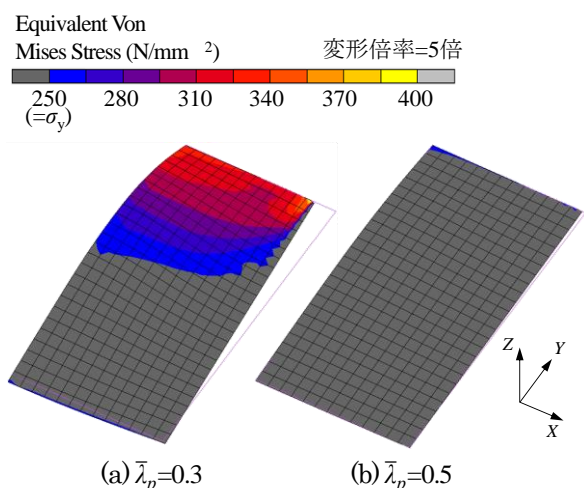


図-18 $\varphi=1.0$ における基本モデルの終局強度時の変形モードおよび応力図(YPモデル)

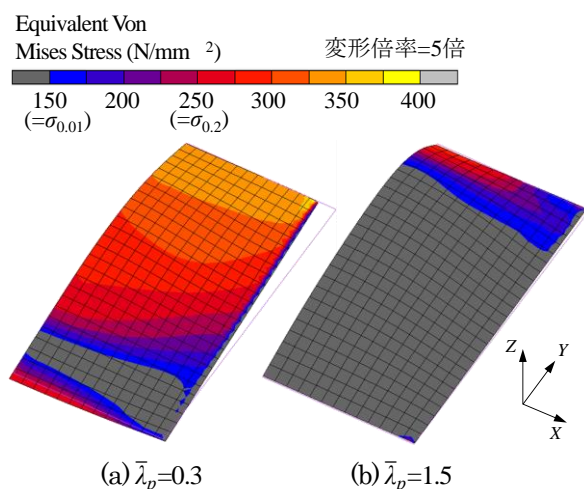


図-19 $\varphi=1.0$ における基本モデルの終局強度時の変形モードおよび応力図(RHモデル)

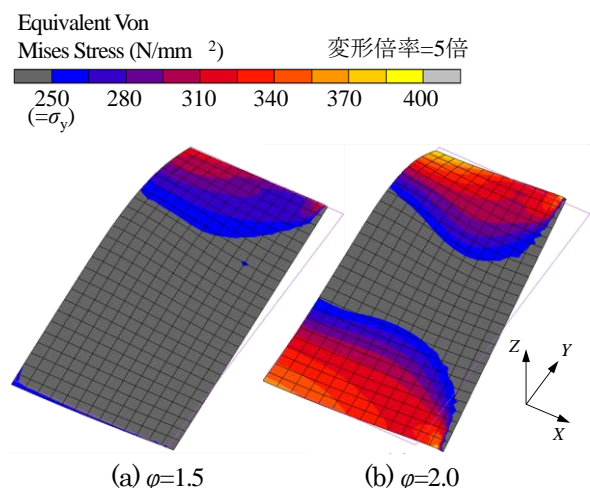


図-20 $\bar{\lambda}_p=0.3$ における基本モデルの終局強度時の変形モードおよび応力図(YPモデル)

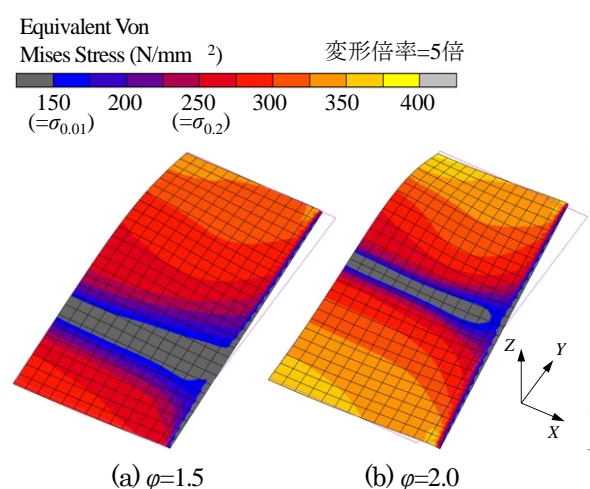


図-21 $\bar{\lambda}_p=0.3$ における基本モデルの終局強度時の変形モードおよび応力図(RHモデル)

で、どのような φ でも板の終局強度に同程度のばらつきが発生することを意味している。

3.4 弾性域と塑性域の勾配差の変化に着目したモデルの強度特性

図-16 はヤング係数およびひずみ硬化勾配の変化に着目した降伏棚を有する材料モデルの曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ かつ赤の破線で囲む $\varphi=1.5$ の場合、YP-220-EPL モデルの強度相関は、YP-160-EPU モデルに比べて、原点からの距離が約 5% 大きくなる。また、同図(b)より、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、YP-160-EPU モデルの強度相関は、YP-220-EPL モデルに比べて、 $\varphi=0.0$ および 2.0 で原点からの距離が約 16% 大きくなり、赤の破線で囲む $\varphi=1.5$ で原点からの距離が約 11% 大きくなる。これらの結果より、同図における YP-220-EPL モデルおよび YP-160-EPU モデルの強度相関は、無次元化の影響によって、大小関係が変化することがわかる。また、 $\bar{\lambda}_p=0.5$ から 1.5 の場合、同図(a)および同図(b)に示す各モデルの強度相関のばらつきは、平均で約 0.3% および平均で約 1% となる。これらの結果から、 $\bar{\lambda}_p=0.5$ から 1.5 の範囲のヤング係数の変化およびひずみ硬化勾配の変化が板の曲げ圧縮強度特性に及ぼす影響はほとんどないといえる。ここで、 $\bar{\lambda}_p=0.5$ 以上の場合、ひずみ硬化勾配の変化の影響が発生しない理由は、終局強度時の板全体の塑性化がほとんど発生しないためである。

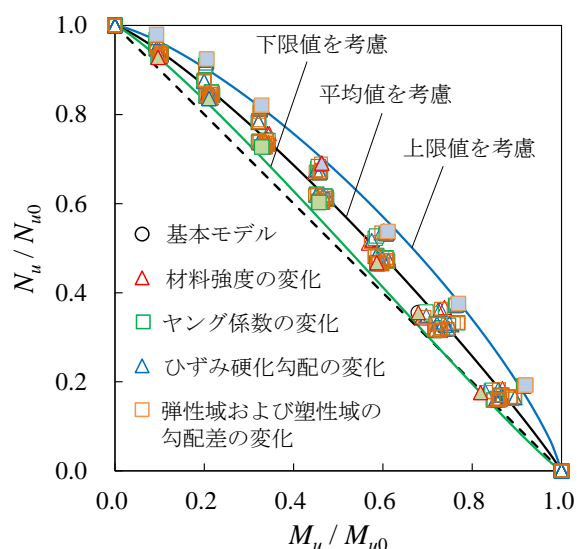
図-17 は、ヤング係数およびひずみ硬化勾配の変化に着目したラウンドハウス型モデルの曲げ圧縮強度相関を示す。同図(a)より、対象とした全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約 3%、平均約 1% となる。つぎに、同図(b)より、対象とした全ての $\bar{\lambda}_p$ で、各モデルの強度相関のばらつきは、最大約 18%、平均約 13% となる。また、RH-160-EPU モデルおよび RH-220-EPL モデルの強度相関のばらつきは、 $\bar{\lambda}_p=0.9$ の場合に大きくなることが確認できる。これは、 $\bar{\lambda}_p=0.9$ の場合、材料の 0.01% 耐力から 0.2% 耐力までのひずみ硬化勾配の差が板の終局強度に最も影響を及ぼすことを意味している。

3.5 基本モデルの終局強度時の変形モードおよび応力状態

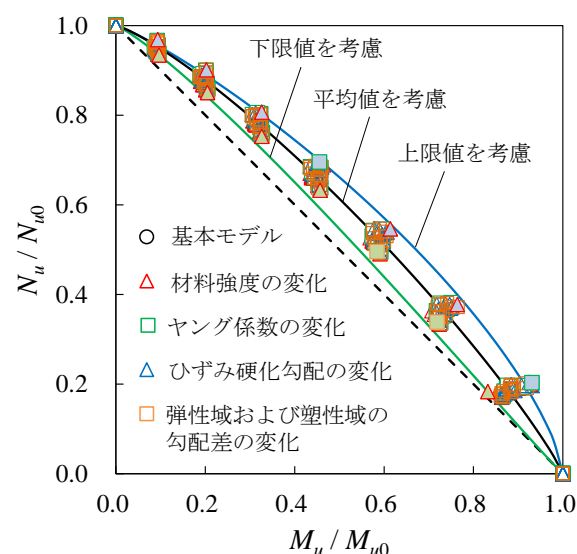
図-18 および図-19 は、 $\varphi=1.0$ の場合の基本モデルの終局強度時における変形モードおよび相当ミーゼス応力等高線図を示す。図-18 より、降伏棚を有する基本モデルでは、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合、終局強度時に板中央部圧縮側領域の要素の塑性化が進行していることが確認できる。一方、同図(b)の $\bar{\lambda}_p=0.5$ の場合についてみると、板の塑性化は、ほとんど発生していないことがわかる。つぎに、図-19 のラウンドハウス型の基本モデルについてみると、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ および 1.5 の場合、いずれの板も終局強度時の塑性化が発生していることが確認できる。これらの結果は、

表-2 式(10) における係数 m, n の値

(a) 降伏棚を有する材料		
	m	n
下限値	0.90	1.17
平均値	1.06	1.21
上限値	1.26	1.33
(b) ラウンドハウス型の材料		
	m	n
下限値	0.96	1.18
平均値	1.13	1.23
上限値	1.43	1.16



(a) 降伏棚を有するモデル(YP モデル)



(b) ラウンドハウス型モデル(RH モデル)

図-22 本研究で提案する曲げ圧縮強度評価式

$\bar{\lambda}_p$ が大きい場合、ラウンドハウス型の材料モデルの周辺単純支持板が、降伏棚を有する材料モデルを用いた周辺単純支持板に比べて、材料特性の変化の影響を受けやすいことを表している。したがって、材料特性の変化が周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響は、板の塑性化が密接に関係しているといえる。

図-20 および図-21 は、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ の場合の基本モデルの終局強度時における変形モードおよび相当ミーゼス応力等高線図を示す。両図より、 $\varphi=2.0$ の結果は、曲げによる引張応力の発生領域で塑性化が進行していることが確認できる。また、 $\varphi=1.5$ について、図-21 の結果は、引張側での応力の値が σ_{02} を超える結果に対して、図-20 の結果は、引張側での板の塑性化がほとんど発生していないことが確認できる。これらの結果より、ラウンドハウス型モデルの強度相関は、 $\varphi=1.5$ の場合、板の引張応力が発生する領域で、ひずみ硬化による応力上昇が十分期待できるため、降伏棚を有するモデルに比べて、原点からの距離が大きくなることで有利になる。

4. 材料の応力ひずみ関係の変化を考慮した面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度評価法

本研究では、3. で示した数値計算結果に基づき、材料の応力ひずみ関係の変化を考慮した面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度評価法を提案する。

ここでは、材料の応力ひずみ関係の変化として、材料強度、ヤング係数、ひずみ硬化勾配、弾性域と塑性域の勾配差に着目し、降伏棚を有する材料およびラウンドハウス型の材料に分け、文献 17) に従い断面力で表す式(10)の強度評価式を提案する。

$$\left(\frac{N_u}{N_y} \right)^m + \left(\frac{M_u}{M_y} \right)^n = 1.0 \quad (10)$$

N_u/N_y は曲げ圧縮時の終局圧縮強度を、 N_{u0}/N_{yc} は純圧縮時の終局圧縮強度を、 M_u/M_y は曲げ圧縮時の終局曲げ強度を、 M_{u0}/M_{yb} は純曲げ時の終局曲げ強度を示す。また、 m および n は定数であり、これらの値は 3. で示した数値計算結果との差を最小二乗法により決定している。表-2 は、このようにして決定した式(10)中の係数の値を示す。また、式(10)は、ラウンドハウス型の材料モデルの場合、早期に剛性の低下が発生するため、板の部分的な塑性化の進行が大きくなり、周辺単純支持板に発生する断面力の形で表すこととしている。さらに、前章まで記述したように本研究では、降伏棚の考慮および無考慮に大別してきたため、式(10)にて 2 パターンで分けて表現している。

図-22 は、本研究で提案する曲げ圧縮強度評価式(10)および 3. で得られた数値計算結果を示す。なお、図中の破線は $m=n=1$ のときの線形相関式を示す。また、薄い

緑で塗りつぶした点は下限値を、薄い青で塗りつぶした点は上限値を意味する。

同図(a)より、下限値の点は、材料強度を変化させた材料モデルの数値計算結果が多くを占めていることがわかる。また、同図の凡例からは判断できないが、 $\varphi=1.25$ から 1.75 の下限値の点は、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ のモデルの数値計算結果である。これは、3. で記述したように、 $\bar{\lambda}_p=0.3$ かつ $\varphi=1.25$ から 1.75 の場合にて、引張領域での応力上昇が発生しないことによる。一方、 $\varphi=1.25$ から 1.75 の上限値の点は、 $\bar{\lambda}_p=0.5$ の数値計算結果が多数を占めている。これは、 $\bar{\lambda}_p=0.5$ の降伏棚を有する材料モデルにおいて、基準となる純圧縮時および純曲げ時の終局強度が小さいためである。

つぎに、同図(b)より、下限値および上限値の点は、材料強度を変化させたモデルの数値計算結果が多くを占めることがわかる。

以上の結果より、本研究で対象とした曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度相関に対して応力ひずみ関係の変化が最も影響を及ぼす条件は、材料強度の変化であるといえる。

5. おわりに

本研究は、材料の応力ひずみ関係の変化として、降伏棚の有無、材料強度、ヤング係数、ひずみ硬化勾配、弾性域と塑性域の勾配差に着目し、これらが面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度特性に及ぼす影響を数値計算により明らかにした。また、これらの材料の変化を考慮した周辺単純支持板の曲げ圧縮強度相関に関する評価式を提案した。本研究で得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 面内純曲げ負荷を受ける周辺単純支持板の強度特性は、引張応力が発生する領域が存在するため、面内純圧縮負荷を受ける場合に比べて、材料特性の変化の影響を大きく受ける。
- (2) 降伏棚を有する材料では、幅厚比パラメータが 0.5 以上の場合、周辺単純支持板の終局強度時の塑性化がほとんど発生しないため、材料特性の変化が板の強度特性に及ぼす影響がほとんどない。
- (3) 降伏棚無しの材料では、幅厚比パラメータが 0.7 以上の場合、降伏棚を有する材料モデルに比べて、板の塑性化の進行による強度上昇が期待できる。
- (4) 本研究で考慮した材料の強度、ヤング係数、ひずみ硬化勾配および弾性域と塑性域の勾配差の変化において、曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の終局強度に最も影響を及ぼす条件は材料強度であり、考慮した変化率に対する板の終局強度のばらつきが、降伏棚を有する材料で最大 7% 程度、降伏棚無しの材料で最大 5% 程度となる。
- (5) 材料特性の変化を考慮した周辺単純支持板の曲げ圧

縮強度相関は、基準化に用いる純圧縮時および純曲げ時の終局強度が変化するため、その影響を受ける。

- (6) 本研究では、材料の応力ひずみ関係の変化を考慮した面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度評価法を式(10)の形で提案した。

参考文献

- 1) 奈良敬, 中村聖三, 安波博道, 川端文丸, 塩飽豊明: 橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集, No.752/I - 66, pp. 299 - 310, 2004.
- 2) 宮寄靖大, 奈良敬: 応力ひずみ関係に基づくステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法, 鋼構造論文集, Vol.20, No.79, pp.67-80, 2013.
- 3) 宮寄靖大, 奈良敬: 無補剛ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.122 - 134, 2010.
- 4) 宮寄靖大, 奈良敬: 面内純曲げを受けるステンレス鋼板の強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp.261-268, 2012.
- 5) 福本誘士(代表者): 鋼骨組み構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究, 平成元年度科学研究費(総合研究 A)研究成果報告書(課題番号: 62302040), 1990.
- 6) 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼板の面内純せん断強度特性および強度評価法, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.72-78, 2014.
- 7) 加藤健太郎, 宮寄靖大, 奈良敬: 単軸面内準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の圧縮強度特性および極限圧縮強度評価法, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.49-61, 2015.
- 8) 宇佐美勉, 天雲宏樹: 圧縮と曲げを受ける板要素の極限強度と有効幅公式, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.77-85, 1992.
- 9) 奈良敬, 小島治雄, 津田真, 小松定夫: 面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 386 号/I-8, pp.275-283, 1987.
- 10) 前田幸雄, 大倉一郎: 圧縮と面内曲げを受ける長方形板の面外有限変形に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 320 号, pp.15-23, 1982.
- 11) 奈良敬, 津田真, 福本誘士: 面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度の評価法に関する研究, 土木学会論文集, 第 392 号/I-9, pp.259-264, 1988.
- 12) 木村衛, 小河利行, 橋村徹: 複合荷重を受ける薄板の座屈後耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 566 号, pp.153-159, 2003.
- 13) 木村衛, 井上哲郎, 谷口元, 橋村徹, 小松健: 薄板の座屈後耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号, pp.135-140, 2001.
- 14) 阿部真之介, 宮寄靖大, 奈良敬: 材料の応力ひずみ関係の変化が板の圧縮強度特性に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.64-71, 2014.
- 15) 高橋寛成, 宮寄靖大, 奈良敬: 材料の応力ひずみ関係の変化が板の面内曲げ強度特性に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.111-118, 2016.
- 16) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2014.
- 17) 土木学会鋼構造委員会座屈設計ガイドライン改訂小委員会: 鋼構造シリーズ 12 座屈設計ガイドライン改訂第 2 版[2005 年改訂版], 土木学会, 2005.
- 18) 宮寄靖大: SUS323L および SM570 製溶接組立部材断面の残留応力分布, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.397-403, 2017.
- 19) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 2012.

(2017 年 9 月 25 日受付)

(2018 年 2 月 1 日受理)