

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
Influence of a variation of the stress strain relationship for
the material on the compressive strength behavior of the plate

○阿部 真之介* 宮崎 靖大** 奈良 敬***
Shinnosuke ABE Yasuhiro MIYAZAKI Satoshi NARA

ABSTRACT The steels in structures ensure the standard material strength. On the other hand, the stress strain relationship of material represents a variation. This study examines the influence of the change of the stress strain relationship of the materials on the compressive strength properties of the plate by numerical analysis. Firstly, material models determined using the data of previous research. Secondly, the strength of the simply supported plate under uniaxial compression analyzed to use commercial finite element analysis program. Finally, this study revealed to small variations compressive behavior compared with material changing rate.

Keywords: 材料強度, 応力ひずみ関係, 終局圧縮強度, ひずみ硬化勾配
material strength, stress strain relationship, ultimate compressive strength, strain hardening gradient

1. はじめに

土木構造物に用いられる鋼材は, JIS 等で規定されている強度を確保している. しかし, このような鋼材の材料特性は, ばらつきを有している¹⁾²⁾. また, ステンレス鋼のように連続的にひずみ硬化域に遷移するようなラウンドハウス型の応力-ひずみ関係を示す材料も存在する. このような材料特性の変化が板の強度に及ぼす影響を詳細に調べた研究例は, ほとんどない.

そこで本研究は, 材料の応力ひずみ関係の変化が周辺単純支持板の圧縮強度特性に及ぼす影響を数値計算³⁾により調べる. ここでは, 材料強度のばらつき, 塑性化後のひずみ硬化域での勾配, および降伏棚の有無に着目する.

2. 数値計算法

2. 1 応力ひずみ関係

本研究で対象とする材料は, SM400 相当の強度を有する材料モデルを仮定する. その応力ひずみ関係は, 降伏棚を考慮するモデルを SM400, 降伏棚を考慮しないモデルを SUS304 の材料試験データ⁴⁾を基にしている. 図 1 は, 数値計算に用いる応力塑性ひずみ関係を示す. 同図(a)および(b)は材料強度のばらつきを考慮するモデルを, 同図(c)および(d)はひずみ硬化勾配の変化を考慮するモデルを示す. また, 表 1 は, 本研究で対象とする材料モデルをまとめる. これら図 1 および表 1 中のモデル名は, YP が降伏棚を考慮するモデル, RH が降伏棚を考慮しないモデルを意味する. そして, 材料強度のばらつきを考慮するモデ

*長岡工業高等専門学校専攻科 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) 準会員

***工博 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻

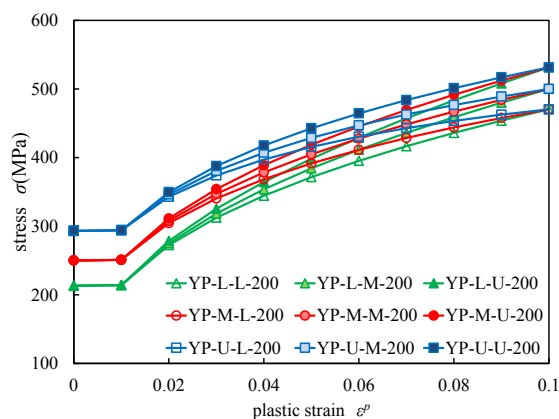
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) 第 2 種正会員

ルについては L が下限値, M が平均値, U が上限値を表し, はじめの記号が降伏応力を, 次の記号が 10%塑性ひずみ時の応力を, 数字がヤング率を示している. さらに, ひずみ硬化勾配を変化させるモデルについては, 末尾の文字がその勾配の大きさを意味し, EPL が勾配の下限値, EPM が基準値, EPU が上限値を表している. なお, 表 1 中の記号は, ν がポアソン比を, σ_y が降伏応力を, σ_{10} が 10%塑性ひずみ時の応力を示す. ここで, 降伏棚を考慮しない材料モデルは, 降伏応力として 0.2%耐力を用いる. また, 降伏棚を考慮しない材料モデルは, 塑性開始点を 0.01%耐力点とし, その値を 150MPa とする. 実際には降伏応力と 10%塑性ひずみ時の応力の間には相関があると考えられるが, 数値計算では種々の条件を考慮して下限値と上限値の組み合わせも含め

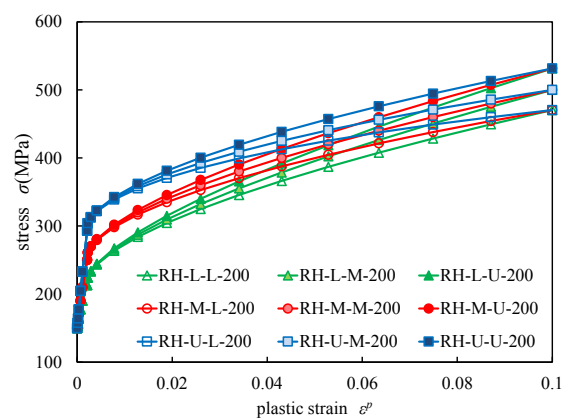
ている. そして, 材料強度のばらつきを考慮するモデルは, 文献 1)の統計データを参考にして, σ_y および σ_{10} それぞれに対数正規分布確率の 95%区間で与えている.

降伏棚の長さについては, その長さを基本モデルの 2 倍, 3 倍とした場合, 板の降伏後の応力上昇が起こらず終局圧縮強度に至る結果が得られた. このため, これらの結果は, 弾完全塑性体の応力ひずみ関係と相違なくなることから, これらの成果を割愛する.

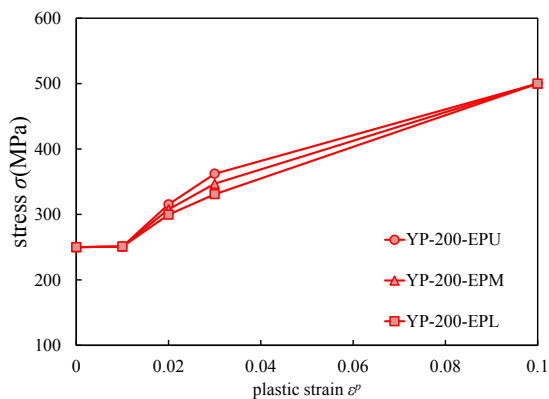
ひずみ硬化勾配を変化させるモデルは, 塑性ひずみが 3%までの勾配を材料強度のばらつきを考慮するモデルの応力ひずみ関係(図 1)に基づいて決定している. そして, 塑性ひずみが 3%以上の応力については, 10%塑性ひずみ時の応力まで直線的に増加するものと仮定する. さらに, 塑性



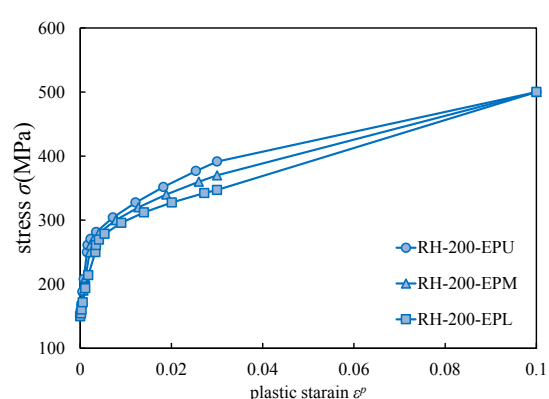
(a)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚あり)



(b)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚なし)



(c)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚あり)



(d)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚なし)

図 1 材料の応力塑性ひずみ関係

化後のひずみ硬化勾配とヤング率との勾配の差による影響を調べるため、ヤング率は、SM400および SUS304 の材料試験データ⁴⁾を参考に160GPa, 200GPa, 220GPaと変化させる。このような値を用いた理由は、ステンレス鋼のようにラ

表1 対象とする材料モデル

	モデル名	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_{10} (MPa)
材料強度のばらつきを考慮	YP-L-L-200	200	0.3	213	470
	YP-L-M-200	200	0.3	213	500
	YP-L-U-200	200	0.3	213	532
	YP-M-L-200	200	0.3	250	470
	YP-M-M-200	200	0.3	250	500
	YP-M-U-200	200	0.3	250	532
	YP-U-L-200	200	0.3	292	470
	YP-U-M-200	200	0.3	292	500
	YP-U-U-200	200	0.3	292	532
	RH-L-L-200	200	0.3	213	470
	RH-L-M-200	200	0.3	213	500
	RH-L-U-200	200	0.3	213	532
	RH-M-L-200	200	0.3	250	470
	RH-M-M-200	200	0.3	250	500
	RH-M-U-200	200	0.3	250	532
	RH-U-L-200	200	0.3	292	470
	RH-U-M-200	200	0.3	292	500
	RH-U-U-200	200	0.3	292	532
ひずみ硬化勾配の変化	YP-160-EPL	160	0.3	250	500
	YP-160-EPM	160	0.3	250	500
	YP-160-EPU	160	0.3	250	500
	YP-200-EPL	200	0.3	250	500
	YP-200-EPM	200	0.3	250	500
	YP-200-EPU	200	0.3	250	500
	YP-220-EPL	220	0.3	250	500
	YP-220-EPM	220	0.3	250	500
	YP-220-EPU	220	0.3	250	500
	RH-160-EPL	160	0.3	250	500
	RH-160-EPM	160	0.3	250	500
	RH-160-EPU	160	0.3	250	500
	RH-200-EPL	200	0.3	250	500
	RH-200-EPM	200	0.3	250	500
	RH-200-EPU	200	0.3	250	500
	RH-220-EPL	220	0.3	250	500
	RH-220-EPM	220	0.3	250	500
	RH-220-EPU	220	0.3	250	500

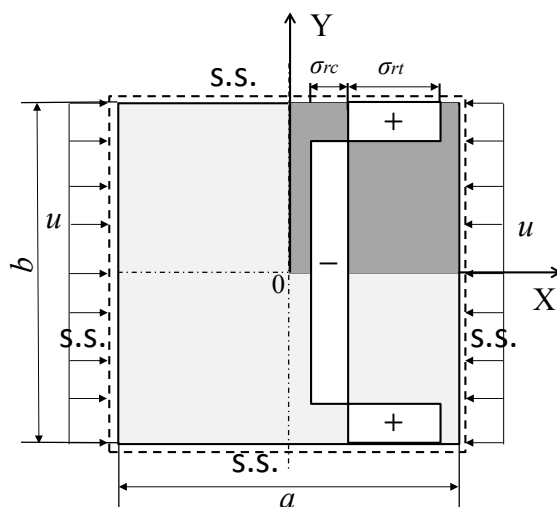


図2 周辺単純支持板

ウンドハウス型の応力ひずみ関係を有する場合、比例限界点から連続的に応力が上昇するため、引張試験等から求めるヤング率の変動が大きくなるためである。

数値計算に用いる材料モデルは、材料の降伏条件として von Mises の条件に従い、等方硬化則を仮定する。

2. 2 周辺単純支持板

図2は、本研究で対象とする面内一軸圧縮負荷を受ける周辺単純支持板を示す。周辺単純支持板の形状は、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 R を0.3から1.5まで0.1刻みで変化させる。

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

ここで、 t は板厚、 k は座屈係数(=4.0)を表す。また、幅厚比パラメータの変化は、板厚を変化させて行う。

対象とする板は、初期不整として残留応力および初期たわみを考慮する。まず、残留応力は、図2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(2)に示す大きさとする。

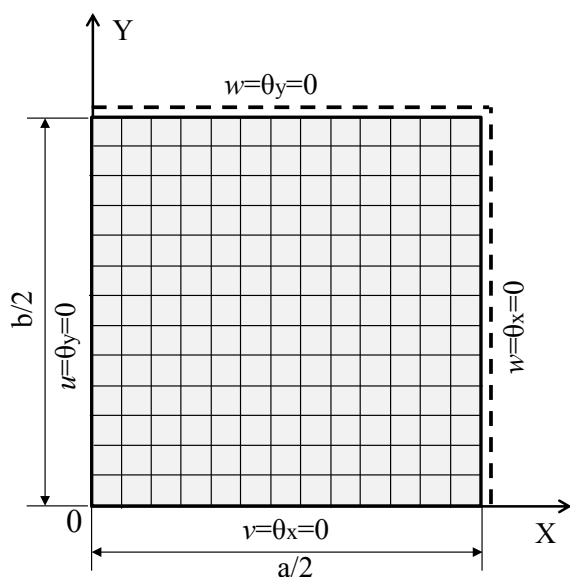


図3 周辺単純支持板の数値計算モデル

$$\sigma_{rc} = -0.3\sigma_y, \sigma_{rt} = \sigma_y \quad (2)$$

つぎに、初期たわみ W_0 は、式(3)に示す形状で与える。

$$W_0 = W_{0\max} \cos \frac{\pi X}{a} \cos \frac{\pi Y}{b} \quad (3)$$

ここで、初期たわみの最大値 $W_{0\max}$ は道路橋示方書⁵⁾で規定される設計許容値($=b/150$)とする。このような周辺単純支持板の数値計算モデルは、変形の対象性を考慮し、図2に示す板の1/4部分を対象に、13×13分割とした8節点シェル要素により有限要素離散化を行う。なお、数値計算モデルにおけるシェル要素の板厚方向に関する評価点の層分割は4層としている。そして、数値計算では、図2に示す強制変位 u を与えた変位制御により非線形計算を行う。また、数値計算モデルの境界条件は、図3に示す $X=a/2$ および $Y=b/2$ の各辺にて単純支持、 $X=0$ および $Y=0$ の各辺にて対称性を与えている。これらの数値計算は、汎用非線形有限要素解析プログラム MARC³⁾に

より行う。

3. 材料の応力ひずみ関係が周辺単純支持板の圧縮強度特性に及ぼす影響

3. 1 終局圧縮強度

図4は、対象とした周辺単純支持板の終局圧縮強度と幅厚比パラメータ R の関係を示す。同図の縦軸は、数値計算によって得られた終局圧縮荷重 P_u を板の降伏荷重 P_y で無次元化した値を示す。同図には、比較として、弾性座屈曲線、道路橋示方書に規定される耐荷力曲線⁵⁾、宮寄ら⁴⁾が提案したステンレス鋼製周辺単純支持板の耐荷力曲線を示す。同図より、降伏棚を考慮しないモデルでは、降伏棚を考慮するモデルに比べて対象としたすべての R において終局圧縮強度の変化が大きくなることわかる。この理由は、降伏棚を考慮しないモデルが降伏棚を考慮するモデルに比べて早期に塑性化が進行し、連続的にひずみ硬化

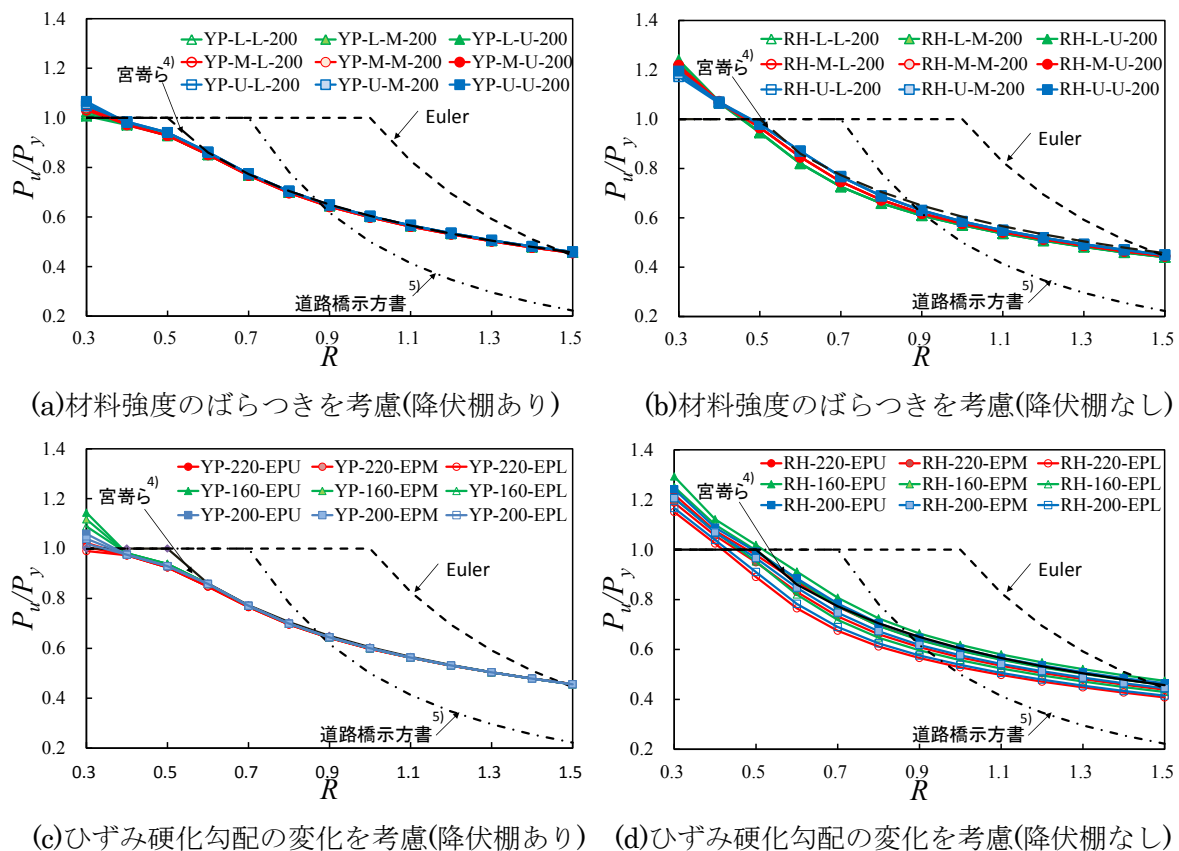


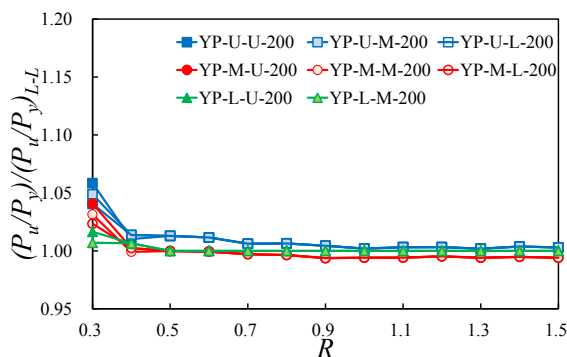
図4 終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

域に遷移するような応力ひずみ関係を示すためである。また、同図(c)より、降伏棚を考慮するモデルでは、 R が 0.3 の場合、同じひずみ硬化勾配の変化の条件では、その変化が板の終局圧縮強度に与える影響は、ヤング率が 160GPa 時に最も大きくなり、ヤング率が 220GPa 時に最も小さくなることからわかる。そして、 R が 0.4 以上の場合、ひずみ硬化勾配およびヤング率の変化による終局圧縮強度への影響は、1%程度と僅かである。さらに、対象としたすべての R において同図(d)は、同図(b)に比べて終局圧縮強度の変化が平均で約 9%大きくなる。これに加えて、同図(d)では、ヤング率 E が小さくなるとともに終局圧縮強度が大きくなることからわかる。これらの結果より、ヤング率とひずみ硬化勾配の変化は、周辺単純支持板の終局圧縮強度に影響を及ぼすといえる。

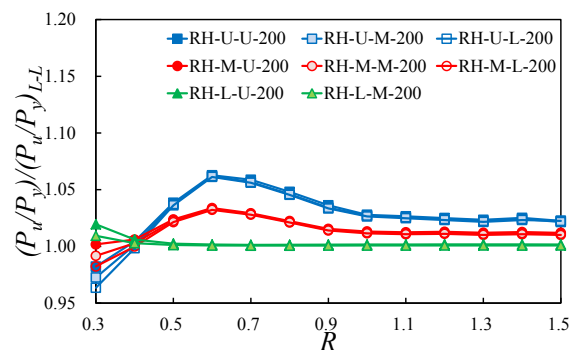
3. 2 終局圧縮強度変化の割合

図 5 は、数値計算で得られた周辺単純支持板の

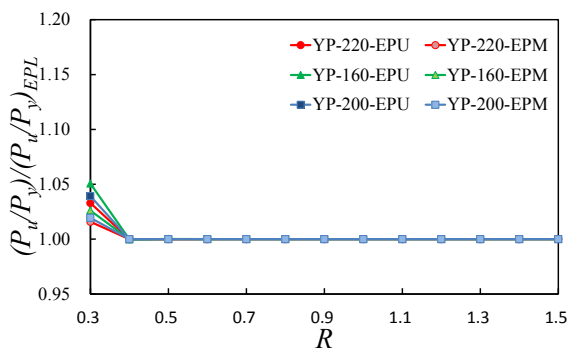
終局圧縮強度を基準とするモデルの値で無次元化した終局圧縮強度比と幅厚比パラメータ R の関係を示す。同図(a)および(b)の縦軸は、対象としたすべての R において数値計算で得られた終局圧縮強度を、その値の平均値が最も小さいモデルで無次元化した値を示す。同図(a)より、 R が 0.3 の場合、YP-U-U-200 モデルの終局圧縮強度は、YP-L-L-200 モデルに比べて最大で約 6%大きくなることからわかる。また、 R が 0.4 以上の場合、すべてのモデルの終局圧縮強度は、YP-L-L-200 モデルと同程度となり、その変化が約 1%以下となることからわかる。つぎに、同図(b)より、 R が 0.3 の場合、RH-L-U-200 モデルの終局圧縮強度は、RH-L-L-200 モデルに比べて最大で約 2%大きくなることからわかる。また、 R が 0.3 の場合、RH-U-U-200 モデルの終局圧縮強度は、RH-L-L-200 モデルに比べて最大で 4%小さくなることからわかる。そして、



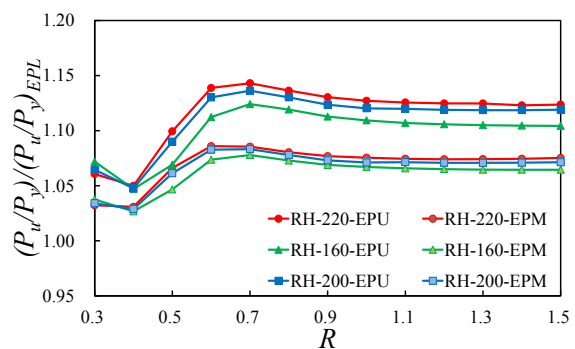
(a)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚あり)



(b)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚なし)



(c)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚あり)



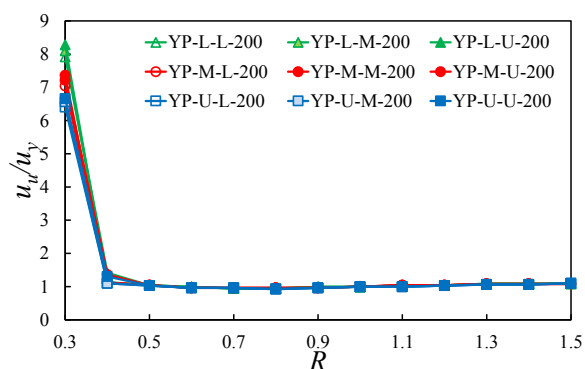
(d)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚なし)

図 5 終局圧縮強度比と幅厚比パラメータの関係

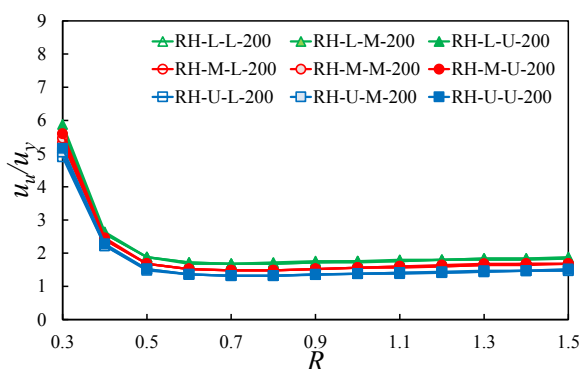
R が 0.5 以上の場合, RH-U-U-200 モデルの終局圧縮強度は, RH-L-L-200 モデルに比べて平均で約 4%, 最大で約 6% 大きくなることがわかる. 以上の結果より, 材料強度のばらつき(σ_y を 37%, σ_{10} を 13%)を考慮した場合の終局圧縮強度への影響は, 降伏棚を考慮するモデルの場合, R が 0.3 で約 1 から 6% となり, R が 0.4 以上の場合では約 1% 以下となる. また, 同様に降伏棚を考慮しないモデルの場合, 終局圧縮強度への影響は, 対象としたすべての R で約 6% 以下となる.

つぎに, 同図(c)および(d)の縦軸は, 数値計算によって得られた終局圧縮強度を, 同じヤング率ごとにひずみ硬化勾配の下限值モデルの終局圧縮強度で無次元化した値を示す. 同図(c)より, R が 0.3 の場合, YP-160-EPU モデルの終局圧縮強度は, YP-160-EPL モデルに比べて最大で約 5% 大きくなることがわかる. また, 同図(d)より, R が 0.3 の場合, 同じヤング率で, ひずみ硬化勾

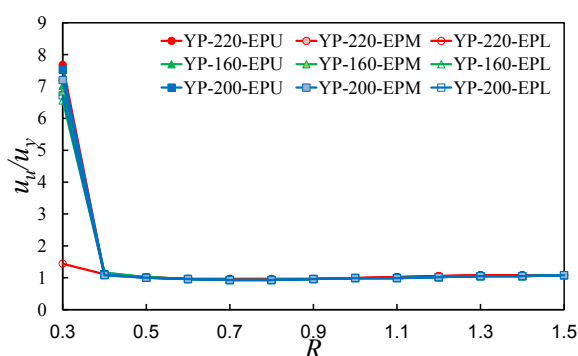
配が上限値のモデルの終局圧縮強度は, 下限値のモデルに比べて約 6 から 7% 大きくなることがわかる. また, R が 0.4 の場合, ひずみ硬化勾配の変化が終局圧縮強度の変化に及ぼす影響は, 対象としたすべての R で最小となり, ひずみ硬化勾配が上限値のモデルの終局圧縮強度が, 下限値のモデルに比べて最大で約 5% 大きくなることがわかる. そして, R が 0.5 以上の場合, RH-220-EPU モデルの終局圧縮強度は, RH-220-EPL モデルに比べて平均で約 13%, 最大で約 14% 大きくなる. これらの結果より, 塑性ひずみ 3% までのひずみ硬化勾配の変化を考慮する場合, その変化率が約 39% の降伏棚を考慮するモデルの終局圧縮強度への影響は, R が 0.3 で最大約 5% となり, R が 0.5 以上で最大約 14% となる. また, 同様にひずみ硬化勾配変化率が 23% である降伏棚を考慮しないモデルの場合, 終局圧縮強度への影響は, R が 0.3 で最大約 7% となり, R が 0.5 以



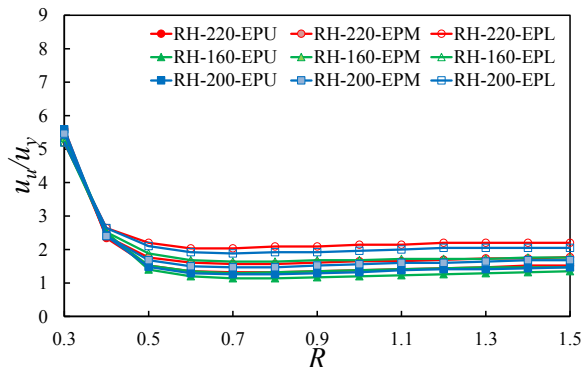
(a)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚あり)



(b)材料強度のばらつきを考慮(降伏棚なし)



(c)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚あり)



(d)ひずみ硬化勾配の変化を考慮(降伏棚なし)

図 6 終局圧縮強度時の圧縮変位と幅厚比パラメータの関係

上で最大約 14%となる。

3. 3 終局圧縮強度時の圧縮変位

図 6 は、終局圧縮強度時の圧縮変位と幅厚比パラメータ R の関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で与えた終局圧縮強度時の変位 u_u を板の降伏変位 u_y で無次元化した値を示す。同図(a)より、 R が 0.3 の場合、YP-L-U-200 モデルの終局圧縮強度時の圧縮変位は、YP-U-M-200 モデルに比べて最大で約 29%大きくなることわかる。また、 R が 0.4 以上の場合、いずれの終局圧縮強度時の変位は、全モデルでほぼ等しくなり、板の降伏変位と同等の変位で終局圧縮強度に達していることがわかる。つぎに、同図(b)より、 R が 0.7 の場合、RH-L-L-200 モデルの終局圧縮強度時の変位は、RH-U-U-200 モデルに比べて最大で約 27%大きくなることわかる。そして、同図(c)より、 R が 0.3 の場合、YP-220-EPL モデルの終局圧縮強度時の変位は、YP-220-EPU

モデルに比べて最大で約 12%大きくなることわかる。また、 R が 0.3 の場合、YP-220-EPL モデルの終局圧縮強度時の変位は、板の降伏変位の約 1.5 倍となっている。この結果は、YP-220-EPL モデルのヤング率とひずみ硬化勾配の差が大きいため板の降伏後の応力上昇が起らなかったことによる。最後に、同図(d)より、 R が 0.5 から 1.5 の板における RH-220-EPL モデルの終局圧縮強度時の変位は、RH-220-EPU モデルに比べて約 45%から 58%大きくなることわかる。これは、降伏棚を考慮しないモデルの塑性化の進行が、降伏棚を考慮するモデルに比べ早期に発生し、ひずみ硬化勾配の変化による影響が大きくなるためである。

3. 4 終局圧縮強度時の面外たわみ

図 7 は、終局圧縮強度時の面外たわみと幅厚比パラメータ R の関係を示す。同図の縦軸は、解析モデルの $(X, Y)=(0,0)$ 節点での終局圧縮強度時

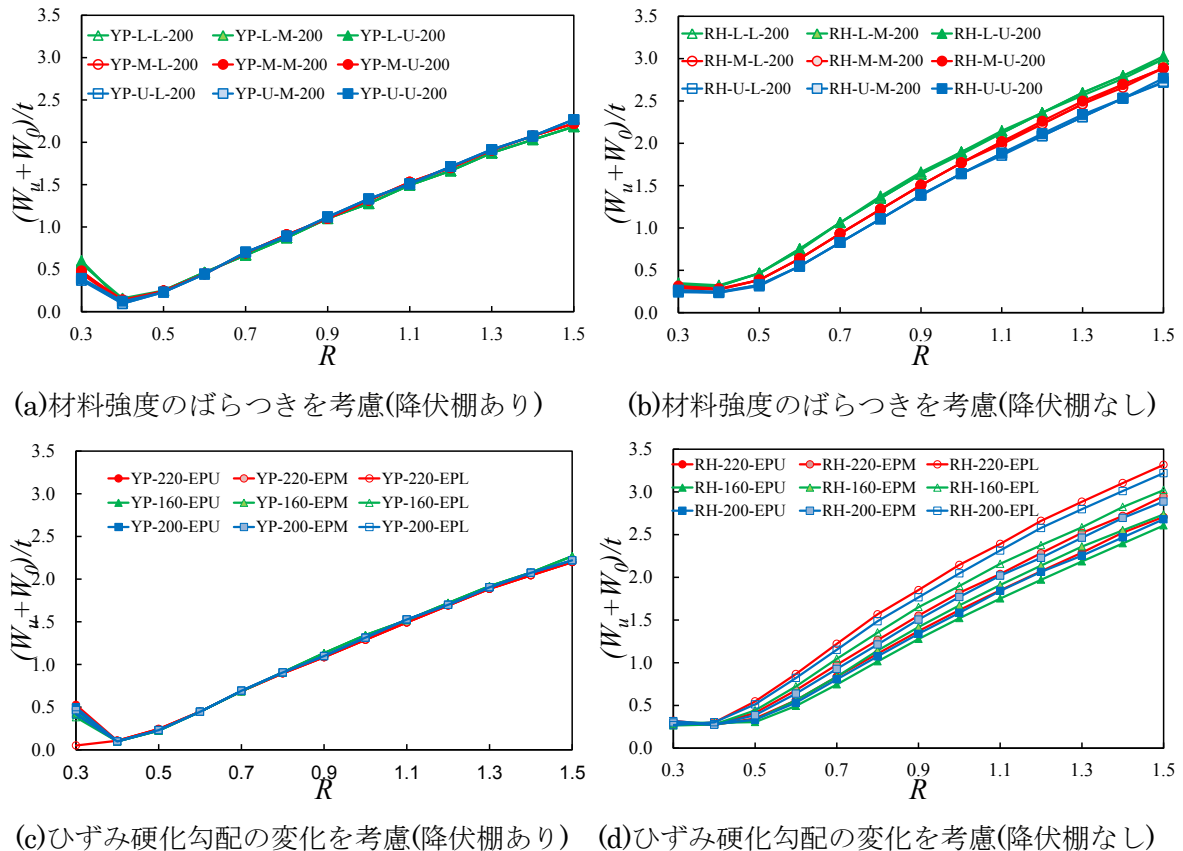


図 7 終局圧縮強度時の面外たわみと幅厚比パラメータの関係

の面外たわみ $W_u + W_0$ を板厚 t で無次元化した値を示す。同図より R が 0.3 および 0.4 の場合において、降伏棚を考慮するモデルと降伏棚を考慮しないモデルの面外たわみは、その傾向が異なることがわかる。そして、 R が 0.4 の場合、降伏棚を考慮しないモデルの終局圧縮強度時の面外たわみは、最大で降伏棚を考慮するモデルの約 2.8 倍となる。これは、図 6 で示したように、降伏棚を考慮するモデルでは、 R が 0.4 以下の板にて、終局強度時の圧縮変位が降伏強度時の圧縮変位と同等以上となり、降伏棚領域後にひずみ硬化域に達する降伏棚を考慮するモデルと初期剛性から連続的に低下する降伏棚を考慮しないモデルの違いによるものである。

4. おわりに

本研究で得られた結果は、つぎの通りである。

- (1) 本研究で対象とした降伏点のばらつきを 37% および 10% 塑性ひずみ時の応力のばらつきを 13% とした材料モデルは、周辺単純支持板に及ぼす影響が R 全体で、終局圧縮強度の変化が最大で約 6% となる。
- (2) 本研究で対象とした応力ひずみ関係における 3% 塑性ひずみまでのひずみ硬化勾配の変化率を 23% とした降伏棚を考慮しないモデルでは、周辺単純支持板の終局圧縮強度に及ぼす影響が、 R が 0.3 および 0.4 の場合、最大で約 7%、 R が 0.5 以上の場合、最大で約 14% となる。
- (3) R が 0.3 の場合、降伏棚を考慮したモデルについて、降伏棚の長さを基本モデルの 2 倍以上としたモデルおよびヤング率が 220GPa かつひずみ硬化勾配が下限値のモデルは、降伏後の応力上昇は起こらずに終局圧縮強度を向える。
- (4) 降伏棚を考慮しないモデルでは、ヤング率が大きくなるとともにひずみ硬化勾配が板の終局圧縮強度および終局圧縮強度時の変位に与

える影響が大きくなる。

- (5) 面内純圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の終局圧縮強度時の面外たわみは、 R が 0.4 以下の場合、降伏棚を考慮しないモデルは最大で降伏棚を考慮しないモデルの約 2.8 倍となる。

【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) S. Nara, Y. Miyazaki: Influence of Variation in Material Strength on Ultimate Strength of Austenitic Stainless Steel Plates under In-Plane Bending and Compression, 4th International Experts Seminar on Stainless Steel in Structures, 2012.
- 3) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2012.
- 4) 宮寄靖大, 奈良敬: 無補剛版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, 2010.3.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 丸善, 2012.