

材料の応力ひずみ関係が板の圧縮強度特性に及ぼす影響

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○阿部 真之介
長岡工業高等専門学校 正会員 宮寄 靖大

1. はじめに

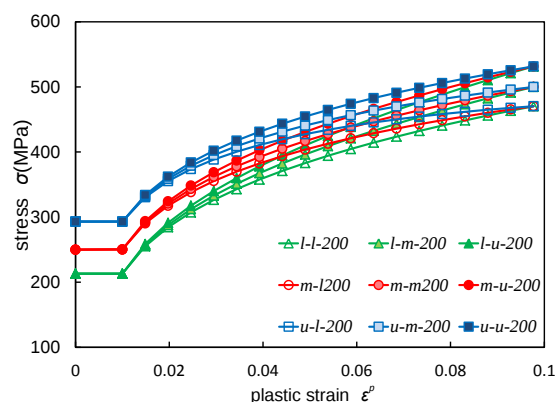
土木構造物に用いられる鋼材は、JIS等で規定される強度を確保している。しかし、このような鋼材の材料特性は、ばらつきを有する。また、ステンレス鋼のようなラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示す材料は、明確な降伏点を示さない。そこで本研究は、鋼材のヤング率や材料強度のばらつきを考慮した、面内純圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度特性の変化を数値計算¹⁾により明らかにする。

2. 数値計算法

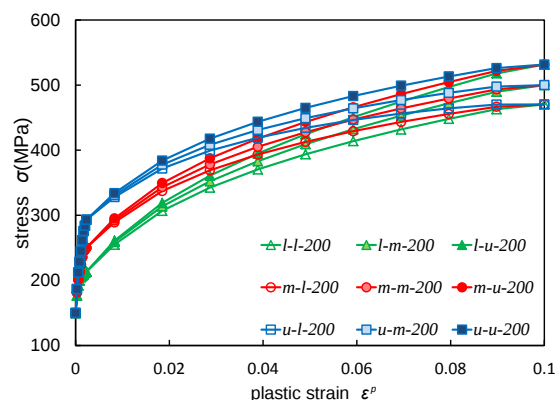
2.1 応力ひずみ関係

本研究で用いる応力ひずみ関係は、SM400相当の材料モデル²⁾を基本とする。図1は、数値計算で用いる応力塑性ひずみ関係を示す。同図(a)は降伏棚を考慮するモデルを示し、同図(b)は降伏棚を考慮しないモデルを示している。また、表1は、本研究で対象とする材料モデルを表す。これら図表中のモデル名は、 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、最後の数字はヤング率 E (GPa)を示している。また、同表中の記号は、 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。なお、降伏棚を考慮しない材料モデルは、降伏応力として、0.2%耐力を用いることとする。さらに、降伏棚を考慮しない材料モデルは、塑性開始点を0.01%耐力時とし、その値を150MPaとした。また、 $m-m$ モデルのヤング率 E は、160GPa、200GPaおよび230GPaに変化させる。これらの材料強度のばらつきは、文献3)で明らかにされている鋼材の統計データに基づき、対数正規分布の95%区間で与えている。表2は、本研究で参考とした既往の統計データ³⁾を示している。なお、本研究では、10%塑性ひずみ時の応力 σ_{10} が引張強度 σ_u の分布に等しくなると仮定している。表2中の $\mu_{\ln(x)}$ 、 $\sigma_{\ln(x)}$ は $\ln(x)$ の平均値および標準偏差を意味している。ここで、既往の解析データは次式に示す対数正規分布に従うものと仮定している。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x} \sigma_{\ln(x)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}} \right)^2 \right] \quad (1)$$



(a) 降伏棚を考慮するモデル



(b) 降伏棚を考慮しないモデル

図1 材料の応力塑性ひずみ関係

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)
$l-l-200$	200	0.3	213	470
$l-m-200$	200	0.3	213	500
$l-u-200$	200	0.3	213	532
$m-l-200$	200	0.3	250	470
$m-m-160$	160	0.3	250	500
$m-m-200$	200	0.3	250	500
$m-m-230$	230	0.3	250	500
$m-u-200$	200	0.3	250	532
$h-l-200$	200	0.3	292	470
$u-m-200$	200	0.3	292	500
$u-u-200$	200	0.3	292	532

表2 材料強度の統計データ

規格	引張特性				データ数
	降伏応力/規格下限値	引張強度/規格下限値	$\mu_{\ln(x)}$	$\sigma_{\ln(x)}$	
全鋼種	0.202	0.081	0.209	0.031	78901

キーワード 材料強度、応力ひずみ関係、ヤング率、周辺単純支持板、降伏棚

連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 長岡工業高等専門学校 TEL. 0258-32-6435 E-mail: y-miyazaki@nagaoka-ct.ac.jp

$$E[x] = \exp\left[\mu_{\ln(x)} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln(x)}^2\right] \quad (2)$$

$$V[x] = \sqrt{\exp[\sigma_{\ln(x)}^2] - 1} \quad (3)$$

ここで、 $f(x)$ は確率密度関数を、 $E[x]$ は期待値を、 $V[x]$ は変動係数を意味する。

2.2 数値計算モデル

図2は、対象とす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 400 mm とし、式(4)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。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4)$$

ここで t は板厚、 k は座屈係数(=4.0)を表す。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。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(5)に示す大きさとする。

$$\sigma_{rc} = -0.3\sigma_y, \quad \sigma_{rt} = \sigma_y \quad (5)$$

また、初期たわみ W_0 は、式(6)に示す形状で与える。

$$W_0 = W_{0\max} \sin \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b} \quad (6)$$

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⁴⁾である $b/150$ とする。これら周辺単純支持板は、変形の対称性を考慮し、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。また数値計算では、図2に示す強制変位 u を与えて計算を行う。

3. 圧縮強度特性

図3は、終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

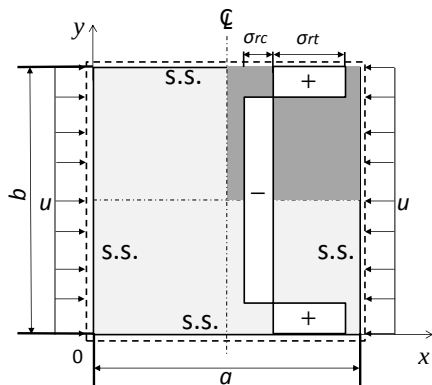
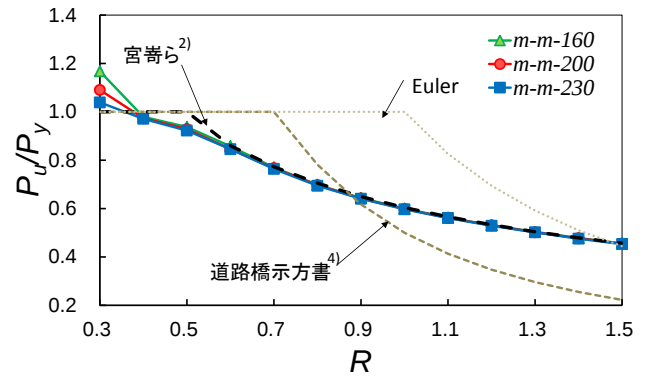
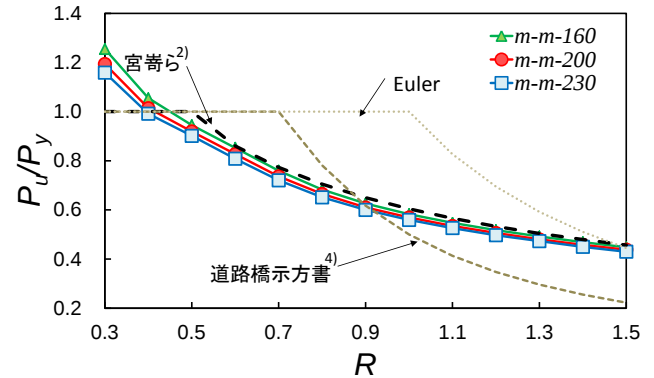


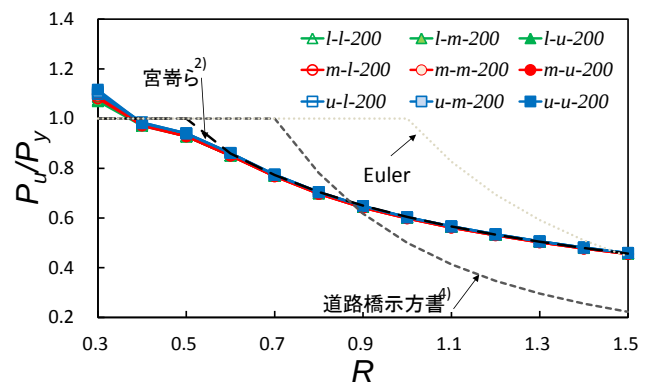
図2 周辺単純支持板



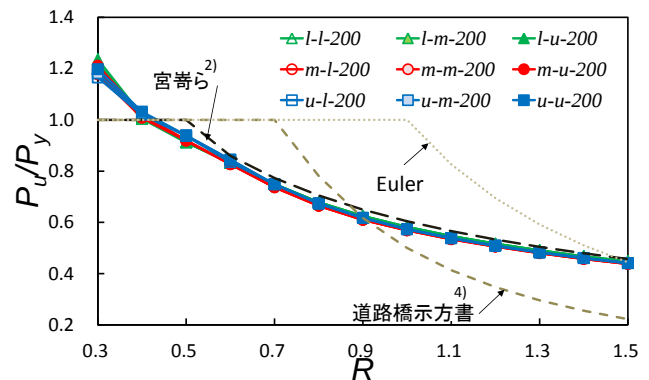
(a) ヤング率の変化(降伏棚を考慮する)



(b) ヤング率の変化(降伏棚を考慮しない)



(c) 材料強度の変化(降伏棚を考慮する)

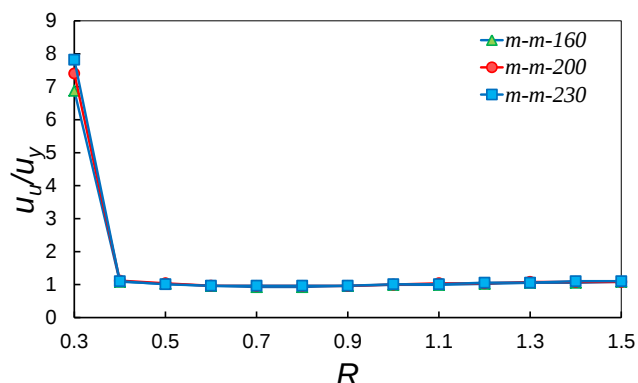


(d) 材料強度の変化(降伏棚を考慮しない)

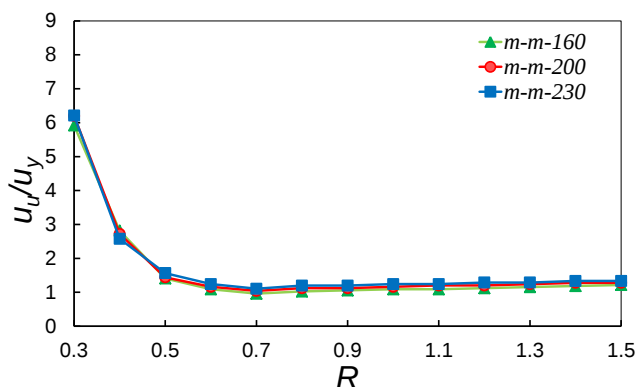
図3 終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

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 を降伏荷重 P_y で無次元化した値を表す。同図(a)および(b)より、 R が0.3の場合、ヤング率が200GPaの終局圧縮強度は、160GPaのモデルに比べて最大で約7%小さくなり、230GPaのモデルに比べて最大で約5%大きくなることからわかる。また、 R が0.4以上の場合、降伏棚を考慮するモデルに比べ降伏棚を考慮しないモデルの方が終局圧縮強度に与える影響が大きいため、これは、終局圧縮強度が板の降伏強度以下になる板について、降伏棚を考慮しないモデルの $\sigma_{0.01}$ から σ_y までの応力塑性ひずみ関係を統一しているため、その領域の傾きの差の影響が大きくなるためである。次に同図(c)より、 R が0.3の場合の $u-u-200$ モデルの終局圧縮強度は、 $l-l-200$ モデルに比べて最大で約4%大きくなることからわかる。つぎに、同図(d)より、 R が0.3の場合の $u-l-200$ モデルの終局圧縮強度は、 $l-u-200$ モデルに比べて最大で約7%大きくなることからわかる。

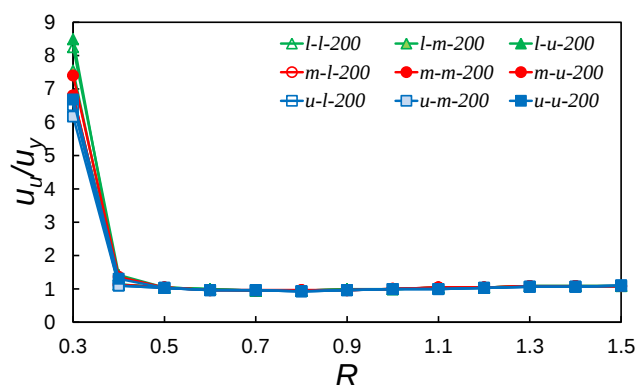
図4は、終局圧縮強度時の圧縮変位と幅厚比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、数値計算で与えた終局圧縮強度時の変位 u_u を降伏変位 u_y で無次元化した値を表す。同図(a)および(b)より、 R が0.3の場合、ヤング率が230GPaのモデルの終局圧縮強度時の変位は、160GPaのモデルに比べて最大で約14%大きくなることからわかる。また、 R が0.4以上の場合、各数値計算結果は、ほぼ等しくなることからわかる。つぎに、同図(c)より、 R が0.3の場合の $l-u-200$ モデルの終局圧縮強度時の変位は、 $u-m-200$ モデルに比べて最大で約32%大きくなることからわかる。そして、同図(d)より、 R が0.3の場合の $l-u-200$ モデルの終局圧縮強度時の変位は、 $u-m-200$ モデルに比べて最大で約13%大きくなることからわかる。また、 R が0.5以上の場合で、 σ_y が下限値であるモデルの終局圧縮強度時の変位は、その他のモデルより約10%小さいことからわかる。これは、降伏棚を考慮しないモデルでは、 $\sigma_{0.01}$ を一定としたため、図3に示した各モデルの終局圧縮強度がほぼ同等になる場合、 σ_y を下限値としたモデルが弾性限界点以下で終局強度に至るためである。また、 R が0.4以下の場合、終局圧縮応力時の変位は降伏棚を考慮するモデルと考慮しないモデルでは、材料強度の違いによる結果のばらつきが降伏



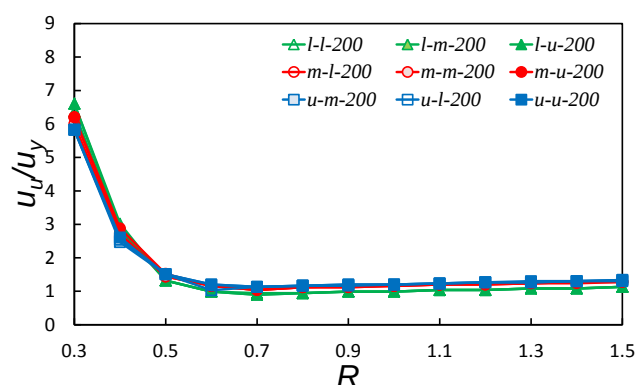
(a)ヤング率の変化(降伏棚を考慮する)



(b)ヤング率の変化(降伏棚を考慮しない)



(c)材料強度の変化(降伏棚を考慮する)



(d)材料強度の変化(降伏棚を考慮しない)

図4 終局圧縮強度時の変位と幅厚比パラメータの関係

棚を考慮するモデルで大きくなることがわかる。これは降伏棚を考慮しないモデルの応力ひずみ関係が連続的にひずみ硬化域に遷移するため、降伏棚を考慮するモデルに比べてひずみ硬化域に達するひずみ量の差による結果が小さくなることを表している。

図5は、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強度時の面外たわみ W_u に初期たわみ W_0 を加えた値を板厚 t で無次元化した値を表している。同図より、 R が 0.3 および 0.4 の場合に、降伏棚を考慮するモデルと考慮しないモデルではその傾向が異なることがわかる。これは、図4で示した結果より、降伏棚を考慮するモデルは R が 0.4 以下の板では、終局強度時の圧縮変位が降伏強度時の圧縮変位とほぼ同等以上となり、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が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をはっきりと表している。

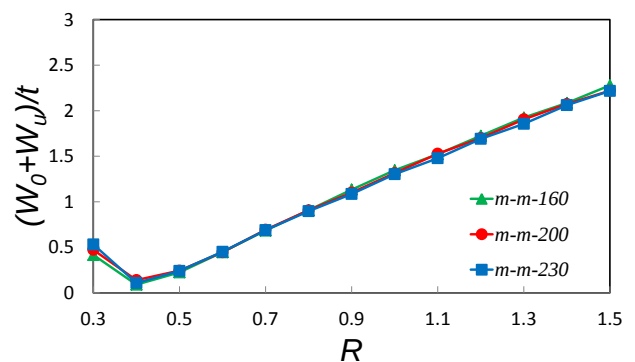
4. おわりに

本研究で得られた結果を次にまとめる。

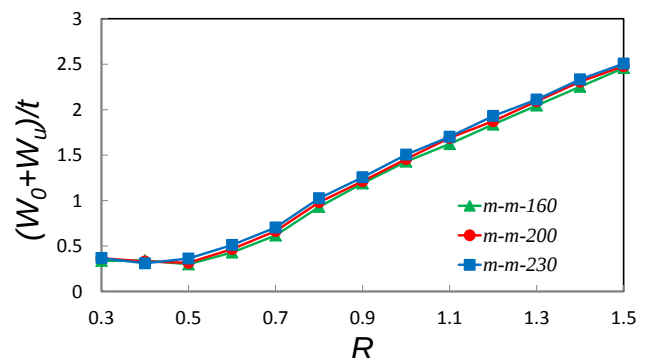
- (1) 本研究で対象としたヤング率の変化による板の終局圧縮強度への影響は、材料のヤング率の変化が約 44% に対して、最大で約 12% となる。
- (2) 本研究で対象とした降伏点のばらつきを 32% および 10% 塑性ひずみ時の応力のばらつきを 13% とした材料モデルは、周辺単純支持板に及ぼす影響が終局圧縮強度で最大約 7%、その時の変位で最大約 32% となる。

参考文献

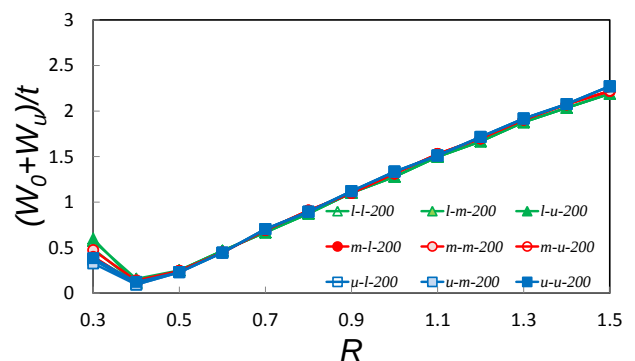
1) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2012. 2) 宮寄靖大, 奈良敬: 無補剛版ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 122-134, 2010.3. 3) 奈良敬, 中村聖三, 安波博道, 川端文丸, 塩飽豊明: 橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集 No. 752/I-66, 299-310, 2004. 4) 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 丸善, 2012.



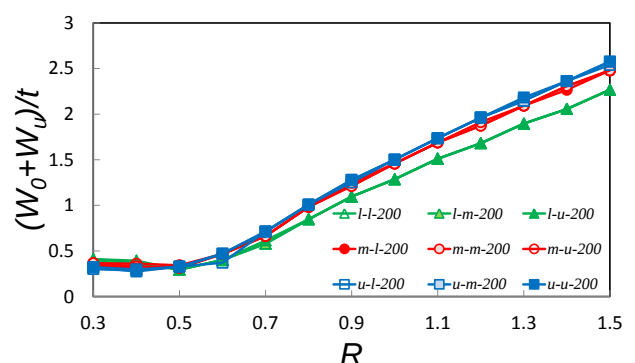
(a) ヤング率の変化(降伏棚を考慮する)



(b) ヤング率の変化(降伏棚を考慮しない)



(c) 材料強度の変化(降伏棚を考慮する)



(d) 材料強度の変化(降伏棚を考慮しない)

図5 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