

部材両端をオーステナイト系ステンレス鋼とした正方形断面柱の強度特性

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○堀澤 英太郎
長岡工業高等専門学校 正会員 宮寄 靖大

1.はじめに

長期間供用された鋼橋の損傷要因のひとつは、腐食である。これらの腐食損傷は、桁端部やトラス格点部の腐食¹⁾など、構造物の中でも腐食しやすい部位が存在する。このような腐食を防ぐ手段としては、耐食性に優れた材料の使用が挙げられる。ステンレス鋼は、構造用炭素鋼に比べて優れた耐食性を有するため、厳しい腐食環境下の構造物に用いることで、構造物のLCCの削減および長寿命化が期待できる。一方、ステンレス鋼の材料費用は、炭素鋼に比べて高価なため、構造物全体をステンレス鋼とした場合、初期コストが大きくなる。これらのことから、腐食環境の厳しい箇所をステンレス鋼、その他を構造用炭素鋼とした断面構成²⁾や部材配置が良策であるといえる。そこで本研究では、柱部材両端部をステンレス鋼とした正方形断面柱の圧縮強度特性を数値計算により明らかにする。

2.数値計算法

本研究で対象とするステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS304N2 および SUS316 の3鋼種である。また、対象とする炭素鋼は、SM400 および SM490Y の2鋼種である。表1は、対象とする材料の機械的性質³⁾を示す。表中の記号は E がヤング係数、 $\sigma_{0.2}$ が0.2%耐力、 σ_y が降伏応力、 $\sigma_{0.01}$ が0.01%耐力、 ν がポアソン比を意味している。同表より、SUS304, SUS316 および SM400, SUS304N2 および SM490Y は、それぞれ同程度の材料強度を有していることがわかる。

図1は、既往の材料試験結果³⁾より得られた対象材料の応力ひずみ関係を示す。同図より、ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、明確な降伏棚を持たないラウンドハウス型を示すことがわかる。なお、数値計算では、同図に基づく応力塑性ひずみ関係を使用する。ここで、ステンレス鋼の塑性開始点は、0.01%耐力とする。

図2は、本研究で対象とする中空箱形断面柱の形状を示す。まず、断面幅 b を300mmとし、部材長 L および板厚 t を式(1)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ および式(2)の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ により決定する。

表1 対象材料の機械的性質³⁾

鋼種	E(GPa)	$\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	ν
SUS304	157	261	146	0.3
SUS304N2	173	402	253	0.3
SUS316	174	254	162	0.3
SM400	200	249	—	0.3
SM490Y	200	388	—	0.3

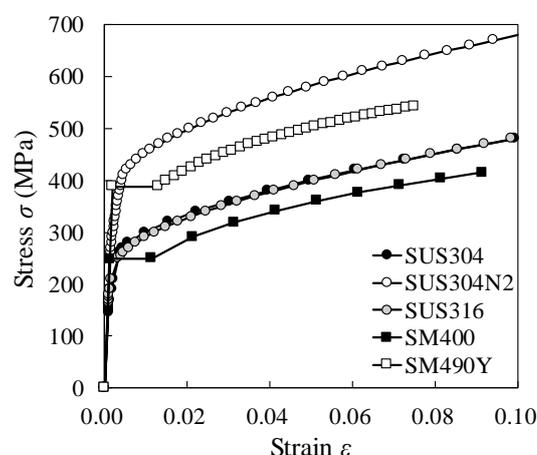
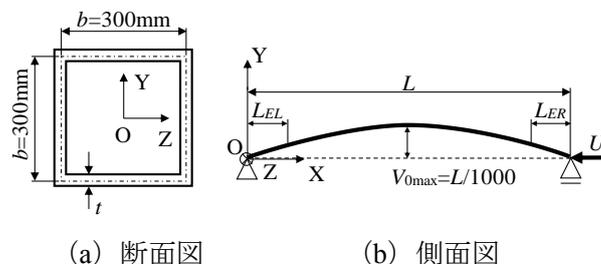
図1 対象材料の応力ひずみ関係³⁾

図2 正方形断面柱

表2 鋼種の組み合わせ

モデル名	主柱部材	柱両端部材	両端部長さ ($L_{EL}+L_{ER}$) /柱全体長さL
304	SUS304	SUS304	—
N2	SUS304N2	SUS304N2	—
316	SUS316	SUS316	—
SM40	SM400	SM400	—
SM49Y	SM490Y	SM490Y	—
SM40-304-0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	SM400	SUS304	—
SM49Y-N2-0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	SM490Y	SUS304N2	0.1-0.5 (0.1刻み)
SM40-316-0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	SM400	SUS316	—

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

ここで、 σ_F は設計基準強度（ステンレス鋼では $\sigma_{0.2}$ ，炭素鋼では σ_y ）， L_e は有効座屈長， r は断面2次半径， k は座屈係数（=4）である．なお， $\bar{\lambda}$ は0.1から2.0まで0.1刻みで変化させて部材長 L を決定し， $\bar{\lambda}_p$ については断面の局部座屈を防ぐため0.3として t を決定する．また，数値計算では，初期不整として初期たわみのみを考慮し，その最大値 V_{0max} が $L/1000$ のsin半波形としてY軸方向のみに与える．

表2は，本研究で対象とする正方形断面柱を構成する鋼種の組み合わせを示す．同表中のモデル名の記号は，主要柱部材および柱両端部材の順に，柱部材を構成する材料を表している．両端部材をステンレス鋼としたハイブリッド柱部材は，柱全体長さ L に対する両端部の長さ（ $L_{EL}+L_{ER}$ ）の比で，0.1から0.5まで0.1刻みで変化させてモデルを決定している．以上により決定した正方形断面柱の数値計算モデルは，X軸方向に20分割した3節点梁要素により有限要素離散化を行う．そして，両端単純支持条件の下，図2で示したX軸方向に強制変位を与えることで数値計算を行う．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MARC⁴⁾を用いる．

3.数値計算結果

図3は，数値計算により得られたSM40-304の $\bar{\lambda}=0.2, 1.2$ および1.8の場合の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により得られた荷重 P を設計基準強度時の荷重 P_F で無次元化した値を，横軸は数値計算で与えた軸方向変位 U を設計基準強度時の変位 U_F で無次元化した値を表す．なお，同図中には，比較のため，SM40の結果も表している．同図より，柱部材両端部のSUS304の割合の増加に伴い，荷重変位関係の初期勾配は変化し，SM40に比べて最大で約12%小さくなるのがわかる．これは，SUS304とSM400のヤング係数の違いによる結果である．また， $\bar{\lambda}=0.2$ の場合，SUS304の割合が大きくなるに従い，荷重変位関係における初期勾配から2次勾配への変化が大きくなり，終局強度時の圧縮変位が設計基準強度時の圧縮変位の2倍程度発生することがわかる．これは，SUS304が0.01%耐力点から非線形性を示す材料特性に影響する結果である．紙面の都合上割愛するその他の鋼種の組み合わせについても同様の結果が得られた．

図4は，終局圧縮強度と細長比パラメータの関係を示す．同図の縦軸は，数値計算により得られた終局圧縮荷重 P_u を P_F で無次元化した値を表す．また，同図中の破線は，比較のため，道路橋示方書⁵⁾（溶接箱形断面柱）の耐荷力曲線を示している．同図より，柱全体に対するステンレス鋼の割合が10%および20%の場合，炭素鋼製柱の，それぞれ平均で約99.9%および約99.5%の終局圧縮強度

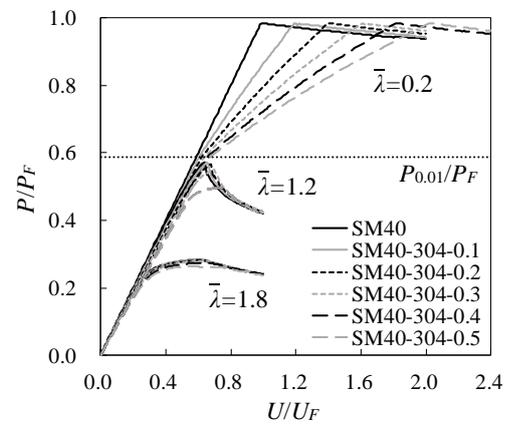


図3 圧縮荷重と圧縮変位の関係 (SM40-304)

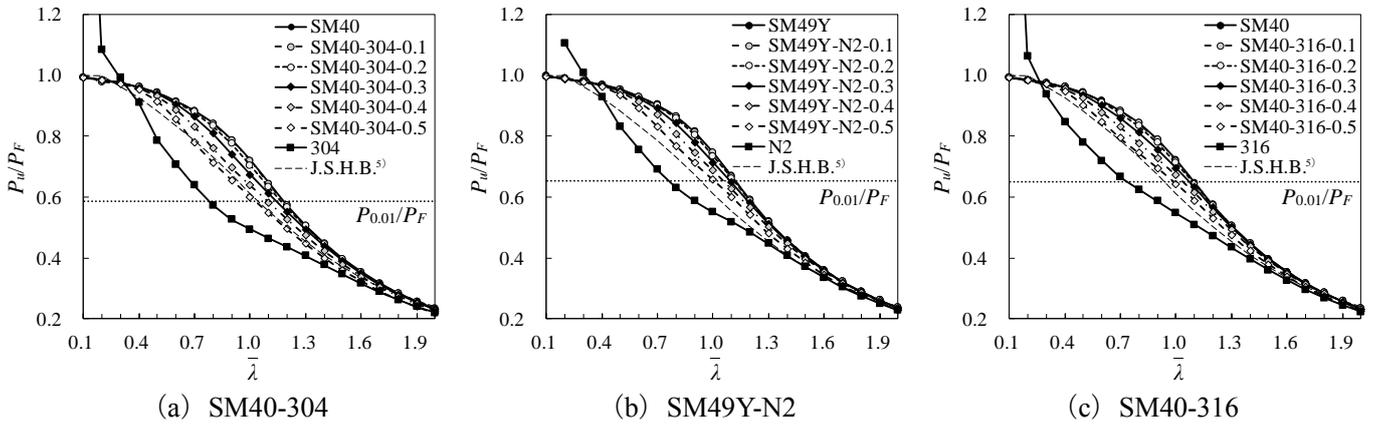


図4 終局圧縮強度時の圧縮変位と細長比パラメータの関係

となることがわかる。この結果から、これらの部材構成としたハイブリッド柱の終局圧縮強度は、炭素鋼製柱と同等に評価できる。一方、柱全体に対するステンレス鋼の割合が 30%以上の場合の終局圧縮強度は、 $\bar{\lambda}=0.5$ から 1.2 の範囲で炭素鋼製柱に比べてその差が大きくなり、 $\bar{\lambda}=0.9$ のとき、SM40-304-0.5 で SM40 の約 83%、SM49Y-N2-0.5 で SM49Y の約 87%、SM40-316-0.5 で SM40 の約 88%の大きさとなる。つぎに、道路橋示方書の耐荷力曲線と数値計算結果を比較してみると、 $\bar{\lambda}=0.3$ から 1.6 の範囲で、SM40-304-0.5 の場合を除いた数値計算結果は、道路橋示方書の耐荷力曲線による終局圧縮強度に比べて大きくなることわかる。

図 5 は、終局圧縮強度時の圧縮変位と細長比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、終局圧縮強度時の圧縮変位 U_u を U_F で無次元化した値を表す。同図より、ステンレス鋼製柱の場合、 $\bar{\lambda}=0.7$ 付近を境に、急激に終局圧縮強度時の圧縮変位が小さくなることわかる。また、 $\bar{\lambda}=0.1$ から 1.0 の範囲で、柱全体に対するステンレス鋼の割合の増大に伴い、終局圧縮強度時の圧縮変位は大きくなり、 $\bar{\lambda}=0.1$ のとき、SM40-304-0.1 で SM40 の約 1.2 倍、SM40-304-0.2 で SM40 の約 1.4 倍、SM40-304-0.5 で SM40 の約 2.1 倍となる。つぎに、柱全体に対するステンレス鋼の割合が 50%の場合を除く全てのモデルで、 $\bar{\lambda}=1.5$ 付近から $\bar{\lambda}$ の増大に伴い、終局圧縮強度時の圧縮変位が大きくなることわかる。これは、これらの柱が終局状態で塑性ヒンジを形成することで座屈長が短くなることによるためである。

図 6 は、終局圧縮強度時の最大たわみと細長比パラメータの関係を示す。同図の縦軸は、数値計算により得られた終局圧縮強度時の Y 軸方向 (図 2 参照) の最大たわみ V_u を初期たわみの最大値 V_{0max} で無次元化した値を表す。同図より、炭素鋼製柱の終局圧縮強度時の最大たわみは、対象とした全 $\bar{\lambda}$ において、 $\bar{\lambda}$ の増大に伴い、大きくなることわかる。一方、ステンレス鋼製柱の最大たわみは、 $\bar{\lambda}=0.1$ から 1.0 の範囲で、炭素鋼製柱の

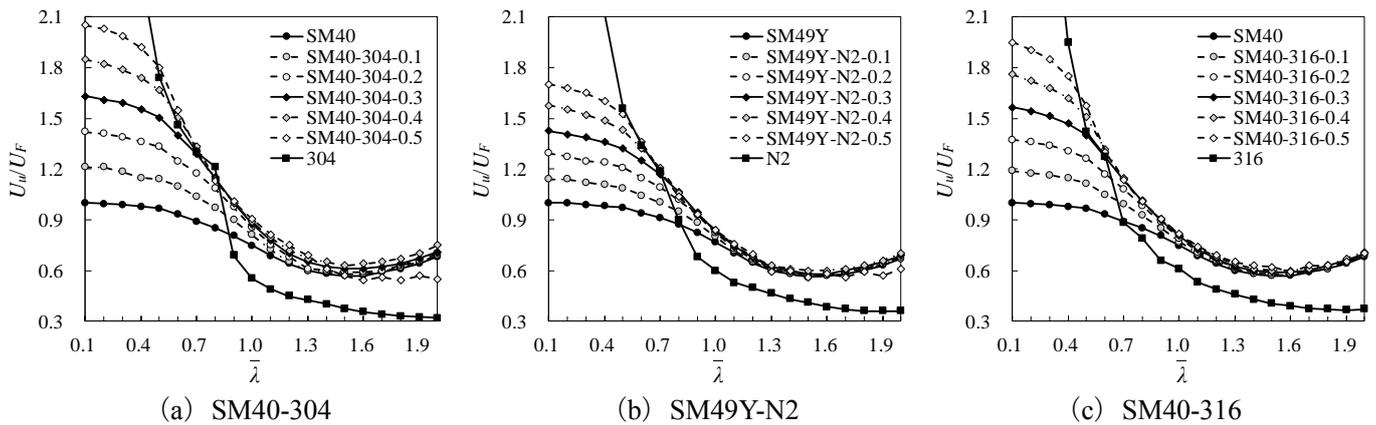


図 5 終局圧縮強度時の圧縮変位と細長比パラメータの関係

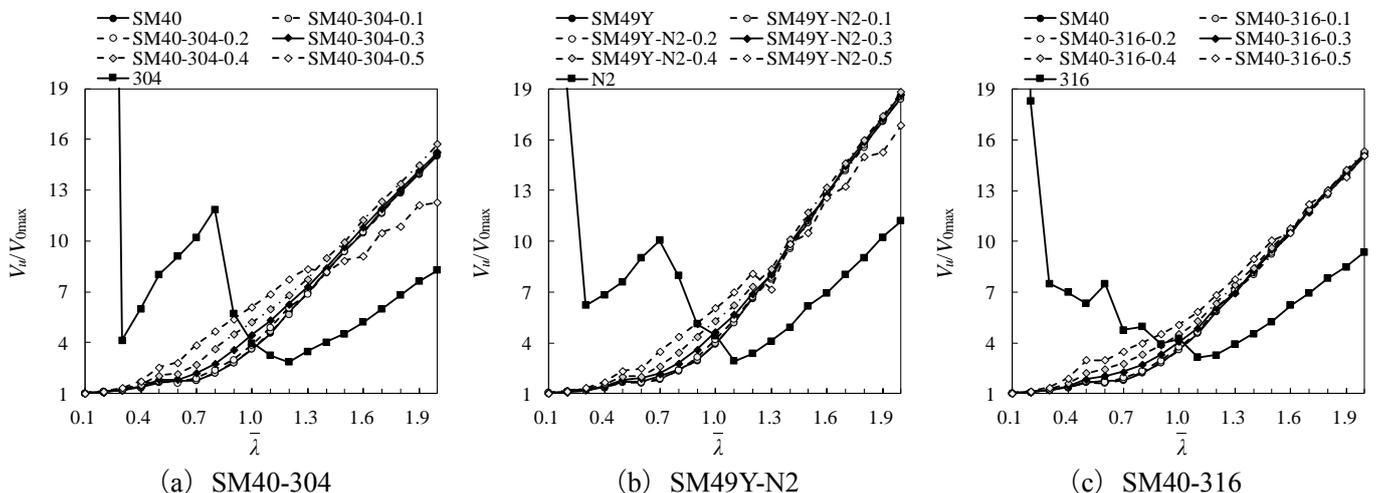


図 6 終局圧縮強度時の最大たわみと細長比パラメータの関係

最大たわみと $\bar{\lambda}$ の増大に伴う傾向が異なることがわかる。また、柱全体に対するステンレス鋼の割合が10%および20%の場合の終局圧縮強度時の最大たわみは、炭素鋼製柱の平均で約99.3%および98.6%となる。そして、柱全体に対するステンレス鋼の割合の増大に伴い、 $\bar{\lambda}=0.5$ から1.2の範囲で終局圧縮強度時の最大たわみは大きくなり、最大で炭素鋼製柱の約2.2倍となることがわかる。柱全体に対するステンレス鋼の割合が50%の場合、SM40-304-0.5の $\bar{\lambda}=1.4$ 以上、SM49Y-N2-0.5の $\bar{\lambda}=1.3$ 以上およびSM40-316-0.5の $\bar{\lambda}=1.6$ 以上で、終局圧縮強度時の最大たわみが炭素鋼製柱の結果に比べて小さくなり、 $\bar{\lambda}=2.0$ の場合、SM40-304-0.5がSM40の約81%の大きさとなる。

図7は、 $\bar{\lambda}=0.2, 0.9$ および1.6の場合の終局圧縮強度時の柱全体の柱軸方向応力を示す。同図の縦軸は数値計算により得られた柱の終局圧縮強度時の柱軸方向の応力 σ_u を設計基準強度 σ_F で無次元化した値を、横軸は無次元化柱長さを表す。同図より、 $\bar{\lambda}=0.2$ の場合、ステンレス鋼柱を除いた全ての結果において、終局圧縮強度時の柱の応力状態は、ほぼ同様になることがわかる。つぎに、 $\bar{\lambda}=0.9$ の場合、SM40-316-0.5を除いて、柱全体に対するステンレス鋼の割合が大きくなるに従い終局圧縮強度時の応力が小さくなり、SM40-304-0.5の場合、SM40に比べて最大で約45%小さくなる。一方、柱全体に対するステンレス鋼の割合が30%および40%の場合の終局強度時の柱の応力は、ステンレス鋼と炭素鋼の境界付近で不連続となることがわかる。そして、 $\bar{\lambda}=1.6$ の場合、304およびN2を除く全ての結果の終局圧縮強度時の応力は、柱長さ方向の左右対称の2点で0となることがわかる。この現象は、SUS304で $\bar{\lambda}=1.8$ 以上、SUS304N2で $\bar{\lambda}=1.7$ 以上、SUS316で $\bar{\lambda}=1.6$ 以上、SM400およびSM490Yで $\bar{\lambda}=1.4$ 以上で発現する。これらの結果は、塑性ヒンジの形成を意味している。

4.おわりに

本研究で得られた結果は、次の通りである。

- (1) 対象としたハイブリッド柱の圧縮荷重と圧縮変位の関係は、柱全体に対するステンレス鋼の割合の増大に伴い、初期勾配の大きさが小さくなる。
- (2) 柱全体に対するステンレス鋼の割合が20%以下のハイブリッド柱の終局圧縮強度および終局圧縮強度時の最大たわみは、炭素鋼のみで構成される柱とほぼ同等である。

参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文報告集, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 2) 和田勇輝, 宮寄靖大: 2種類の材料で構成されるI形断面梁の純曲げ強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第24巻, pp.313-320, 2016.
- 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) MSC. Software Co.: Marc User's Guide, MSC. Software Corporation, 2014.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 2012.

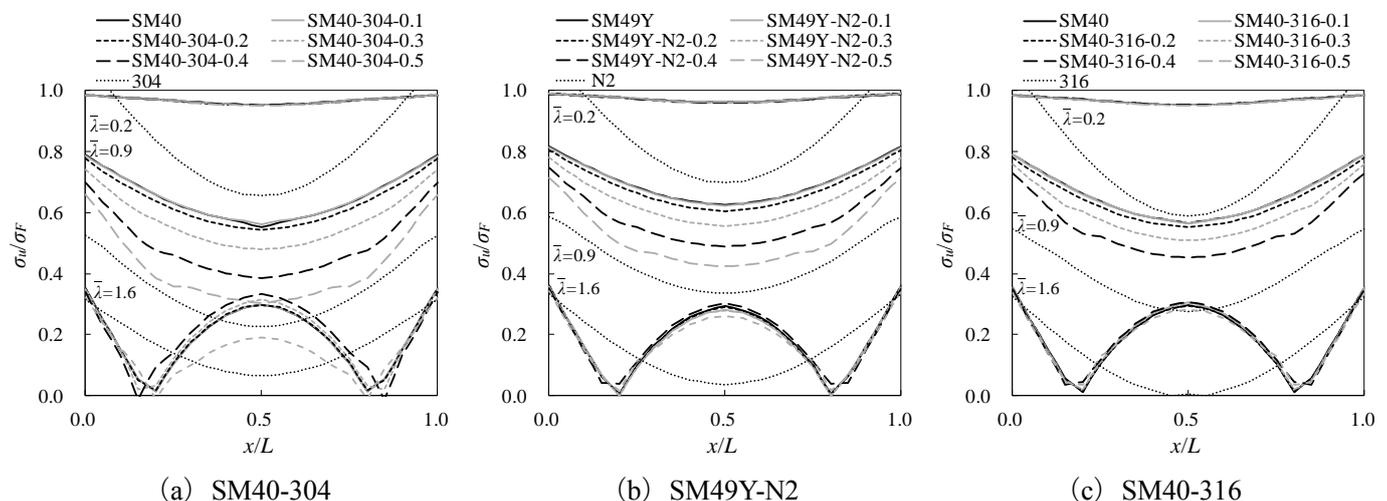


図7 終局圧縮強度時の応力状態