

鉄筋単体の座屈を考慮した構成則

渡辺 耕平

要約

RC 柱部材における耐力低下と座屈挙動に関しては密接な関係がある．そこで耐力低下を精度よく表現することが座屈挙動を再現することに繋がると考えられる．しかし，鉄筋単体の座屈モデルについては，実験的なアプローチによる比重が高く，理論および設計レベルで適用可能な解析手法が確立されたとは言い難いのが現状である．本論では鉄筋単体の座屈挙動 (buckling) を解析的なアプローチから再現することを試みる．まず，初期不整弾性座屈問題 (elastic buckling of initially bent member) および全塑性限界問題 (full-plastic ultimate) を解くことにより，鉄筋単体における弾塑性座屈モデル (elasto-plastic buckling model) の構築・定式化を行う．さらに，横方向変形と軸方向変位の幾何学的関係から，軸方向平均応力 - 平均ひずみ関係を導くことができ，最終的に座屈を考慮した鉄筋構成則の提案を行う．

1. 鉄筋単体の座屈解析手法

1.1 鉄筋単体のモデル化

軸方向鉄筋の座屈発生時点では，かぶりコンクリート (cover concrete) が大きな損傷を受けており，圧壊もしくは剥離していることから，拘束効果はないものと仮定する．軸方向鉄筋の座屈発生時には，鉄筋に曲率が生じていると考えられるため，初期不整 (initial imperfection) を考慮することが必要となる．偏心軸圧縮力と初期たわみを与えることは，解析的には同様であることが知られているため[1]，本研究では，軸方向鉄筋に初期たわみを与える．

また，座屈は帯鉄筋の間で生じるため，実構造物中の座屈区間における鉄筋両端支持条件は，図 1 に示すように両端固定支持 (Fixed-fixed) と両端ヒンジ支持 (Hinged-hinged) の間に存在するものと想定できるが，本研究では両極端として図 2 のようにモデル化を行う．

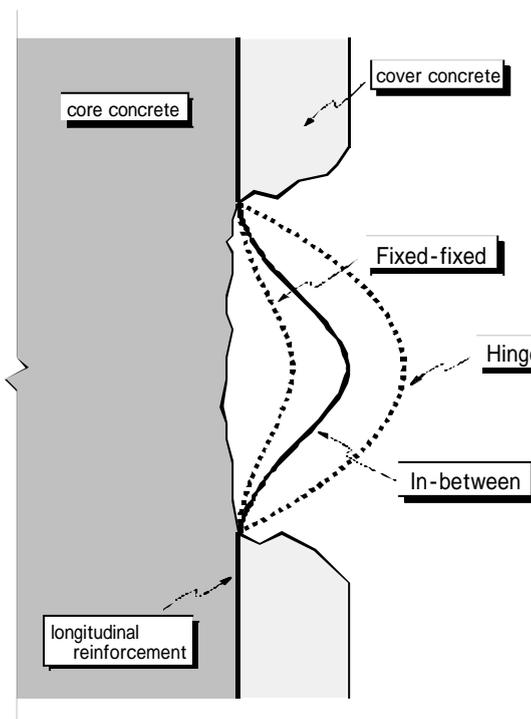
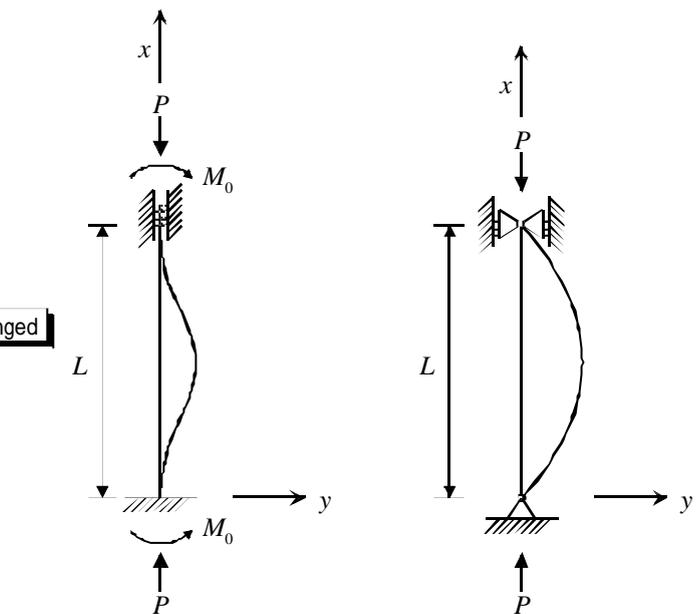


図 1 RC 柱部材の座屈挙動



(a) Fixed-fixed member (b) Hinged-hinged member

図 2 鉄筋単体におけるモデル化

1.2 弾塑性座屈モデル解析手法[2][3]

(1) 初期たわみを考慮した弾性座屈解析

本解析では座屈長 L_b に寄与する初期不整として、座屈スパン中央における初期たわみ量 a を用いて初期たわみ y_0 を式 (1) で与える。

$$y_0 = \frac{a}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2p}{L_b}x\right) \right\} \quad (\text{両端固定}), \quad y_0 = a \sin\left(\frac{px}{L_b}\right) \quad (\text{両端ヒンジ}) \quad (1)$$

軸圧縮力 P による付加たわみ y_1 が生じると、全体のたわみ量 y は $y=y_0+y_1$ となり、その時の任意点 x における曲げモーメントは式 (3.2) で与えられる (図 3 参照)。

$$M_x = Py + M_0 = P(y_0 + y_1) + M_0 \quad (\text{両端固定}), \quad M_x = Py = P(y_0 + y_1) \quad (\text{両端ヒンジ}) \quad (2)$$

式 (2) を梁部材の曲げ支配方程式に代入し、一般解を解くことにより、全体のたわみ $y=y_0+y_1$ と両端固定支持における両端部の反力モーメント M_0 を次式のように求解することができる。

$$y(x) = \frac{a}{2(1-P/P_{cr})} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2p}{L_b}x\right) \right\} \quad (\text{両端固定}), \quad y(x) = \frac{a}{1-P/P_{cr}} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{2p}{L_b}x\right) \right\} \quad (\text{両端ヒンジ}) \quad (3)$$

$$M_0 = -\frac{aP}{2} \left(\frac{1}{1-P/P_{cr}} \right) \quad (4)$$

したがって、初期たわみがある棒部材のスパン中央におけるたわみ v は、次式により得られる。

$$d_v \equiv y(L_b/2) = \frac{a}{1-P/P_{cr}} \quad (5)$$

ここで、 P_{cr} は棒部材に関するオイラー座屈荷重 (Euler's load) およびオイラー座屈応力を、棒部材の断面 2 次半径 r 、曲げ剛性 EI および断面積 A により、次式で表わせる。

$$P_{cr} = \left(\frac{p}{I}\right)^2 EI, \quad s_{cr} \equiv \frac{P_{cr}}{A} = \left(\frac{pr}{I}\right)^2 E \quad (6)$$

係数 p は両端支持によって決まり、座屈モードの 1 波長の長さを表わす。本研究では以下のように示す。

両端ヒンジ支持 : $l = L_b$, 両端固定支持 : $l = 0.5L_b$

式 (3.6) は、各両端支持条件を代入することにより、以下ようになる。

$$P_{cr} = \frac{4p^2 EI}{L_b^2} \quad (\text{両端固定}), \quad P_{cr} = \frac{p^2 EI}{L_b^2} \quad (\text{両端ヒンジ})$$

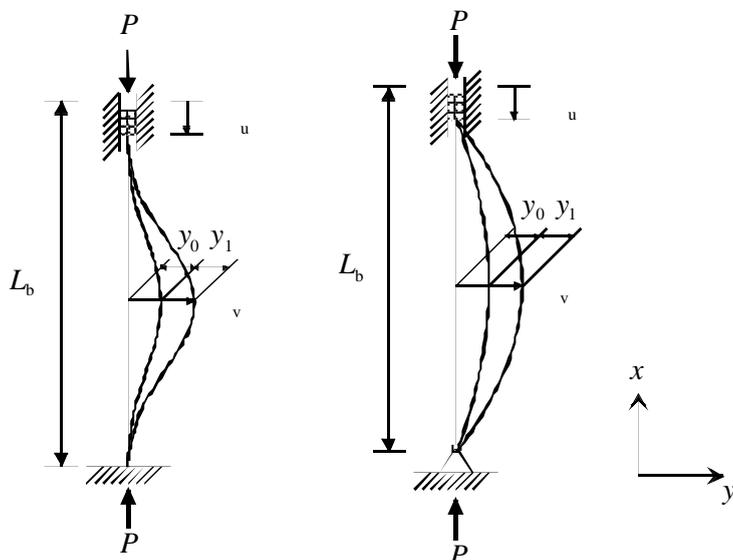


図 3 初期たわみのある鉄筋の座屈モデル化

② 初期たわみを考慮した全塑性限界解析

曲げモーメントを受ける断面は、軸力のみを受ける断面と異なり、塑性限界状態では降伏限界状態を上回る余剰強度を断面性能として受け持つ。断面についての限界強度を以下に示す。

曲げモーメントによる最外縁ひずみが弾性範囲 $e_{\max} < e_y$ にあるとき、 $e = f_y$ を用い次式が成立する。

$$s = Ee = Ef_y \quad \therefore M = \int_A s y dA = Ef_y \int_A y^2 dA = EIf \quad (7)$$

また、最外縁ひずみ e_{\max} が降伏ひずみ e_y になるときの曲率 κ_y は次式で表される。

$$e_y = f_y (h/2) \quad \therefore f_y = 2e_y / h \quad (8)$$

よって $e_{\max} = e_y$ となるときの曲げモーメント M_y は、材料の降伏強度 f_y を用い次式で与えられる。

$$M_y = EIf_y = EI(2e_y/h) = f_y I(2/h) = f_y W \quad (9)$$

ここで、 W は断面係数 (section modulus)、 M_y は降伏モーメント (yield bending moment) とする。

$f > f_y$ になると最外縁が降伏が始まるが、断面内部の応力は降伏応力より小さいため、棒部材が完全弾塑性体である場合、曲げモーメント M が M_y より大きくなると降伏域は漸増し、図 4 のような弾塑性応力状態 (elasto-plastic stress state) となる。直角保持・平面保持の仮定より、ひずみ分布は y に比例し、直線分布と仮定する。ここで、弾性域の深さを $2y_0$ とすると式 (8) より以下の 2 式が得られる。

$$e_y = f_y y_0 \quad (y_0 < h/2) \quad \therefore f = e_y / y_0 \quad (10)$$

$$s = Ee \quad (|e| \leq e_y), \quad s = \pm f_y \quad (|e| > e_y) \quad (11)$$

$f > f_y$ の曲率を生じさせる曲げモーメントは以下のように表され、

$$M = \int_A s y dA = 2 \left[\int_0^{y_0} s b y dy + \int_{y_0}^{h/2} f_y b y dy \right] = f_y \left(\frac{bh^2}{4} - \frac{by_0^2}{3} \right) \quad (12)$$

極限状態として全断面が降伏し、 $y_0 = 0$ の完全塑性応力状態 (fully plastic stress state) となる場合を考え、このときの曲げモーメント M_p は塑性断面係数 Z (plastic section modulus) を用い、次式で表せる。

$$M_p = f_y bh^2 / 4 = f_y Z \quad (13)$$

この M_p を全塑性モーメントと呼び、塑性状態を考えたときの曲げモーメントに対する限界強度となる。表 1 に長方形断面および円形断面の各種係数についてまとめる。

断面に軸力 P と曲げモーメント M が作用したとき、完全弾塑性体は $-P_y < P < P_y$ 、 $-M_p < M < M_p$ を満足しなければならない。断面には軸力 P 、曲げモーメント M 、せん断力 V が相互の組み合わせにより発生する。これらの断面力は、全断面が降伏するとき塑性条件 $f(P, M, V) = 0$ が成り立つ。軸力と曲げモーメントが同時に発生する場合の塑性条件は、断面形状により異なる。軸力と正負の曲げモーメントを受ける全塑性状態の長方形及び円形断面における応力状態を図 5 に示す。 y 軸の原点を図心に取った時、断面に発生する軸力および曲げモーメントは次式により表わされる。

$$P = \int_A s dA = \mp 2by_0 f_y \quad (14)$$

$$M = \int_A s y dA = \pm b \left\{ \left(\frac{h}{2} \right)^2 - y_0^2 \right\} f_y \quad (15)$$

ここで、 y_0 は直応力の値が正の降伏応力から負の降伏応力に変化する点の y 座標とする。さらに、 P 、 M を降伏軸力 P_y と全塑性モーメント M_p で無次元化し、 y_0 を消去すると長方形断面の塑性条件が次式により求まる。

$$f(P, M) = \left(\frac{P}{P_y} \right)^2 + \left| \frac{M}{M_p} \right| - 1 = 0 \quad (16)$$

また、円形断面についても同様に、断面に発生する軸力および曲げモーメントは次式により表される。

$$P = \int_A s dA = \mp 2 \left(\frac{d}{2} \right)^2 (q_0 + \sin q_0 \cdot \cos q_0) \quad (17)$$

$$M = \int_A \mathbf{s} y dA = \pm \frac{1}{6} d^3 \cos^3 \mathbf{q}_0 f_y \quad (18)$$

式(17),式(18)を降伏軸力 P_y と全塑性モーメント M_p で除し,係数 y, z を導入することにより,円形断面における塑性条件を次式に示す.

$$f(P, M) = \left(\frac{P}{P_y} \right)^y + \left| \frac{M}{M_p} \right|^z - 1 = 0 \quad (19)$$

最小2乗法を用い, z を1.0に固定, y を変化させることにより次式を得た.

$$f(P, M) = \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} + \left| \frac{M}{M_p} \right| - 1 = 0 \quad \left[\text{ただし, } \frac{P}{P_y} = \mp \frac{2}{p} (\mathbf{q}_0 + \sin \mathbf{q}_0 \cdot \cos \mathbf{q}_0), \frac{M}{M_p} = \pm \cos^3 \mathbf{q}_0 \right] \quad (20)$$

初期たわみのある棒部材の中央点では,軸力 P と曲げモーメント $M = P d_v + M_0$ が作用している.ここで, d_v はスパン中央点の横方向変形, M_0 は部材上下端の反力モーメントである.ただし,両端ヒンジ支持の場合は, $M_0 = 0$ である.曲げモーメント M によって,断面に生じる曲げ圧縮応力の最大値 s_{\max} は,次のように表わせる.

$$s_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{W} = \frac{P}{A} + \frac{P d_v + M_0}{W} \quad (21)$$

ここで, $s_{\max} = f_y$ に達するときの P を弾性限界荷重 P_{ep} とし,式(6)と式(21)より f_y は次式で表わせる

$$f_y = \frac{P_{ep}}{A} + \frac{P_{ep} a}{2W \left(1 - \frac{P}{P_{cr}} \right)} \quad (22)$$

初期曲がりのある棒部材の降伏が開始する荷重および応力を式(23),式(24)に示す.

$$P_{ep} = \frac{1}{2} \left[\{(1+b)P_{cr} + P_y\} - \sqrt{\{(1+b)P_{cr} + P_y\}^2 - 4P_{cr}P_y} \right] \quad (23)$$

$$s_{ep} = \frac{1}{2} \left[\{(1+b)s_{cr} + f_y\} - \sqrt{\{(1+b)s_{cr} + f_y\}^2 - 4s_{cr}f_y} \right] \quad (24)$$

ここで,各両端支持における条件を以下に示す.

$$\text{両端固定} \quad : b = aA/2W, P_{cr} = \frac{4p^2 EI}{L_b^2}$$

$$\text{両端ヒンジ} \quad : b = aA/W, P_{cr} = \frac{p^2 EI}{L_b^2}$$

初期たわみがない両端ヒンジ支持の場合, $b = 0$ となり $P_{cr} < P_y$ のとき $P_{ep} = P_{cr}$, $P_{cr} > P_y$ のとき $P_{ep} = P_y$ となる.

断面が全塑性状態となる塑性条件,式(20)と $M = P d_v + M_0$ により,軸力 P と横方向変形 d_v の関係が式(25),で得られる.また,式(20)より両端部の反力モーメント M_0 を式(26)に示す.

$$d_v = \frac{IZ}{A(P/P_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} \quad (\text{両端固定} : I = 2, \text{両端ヒンジ} : I = 1) \quad (25)$$

$$M_0 = -M_p \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} \quad (26)$$

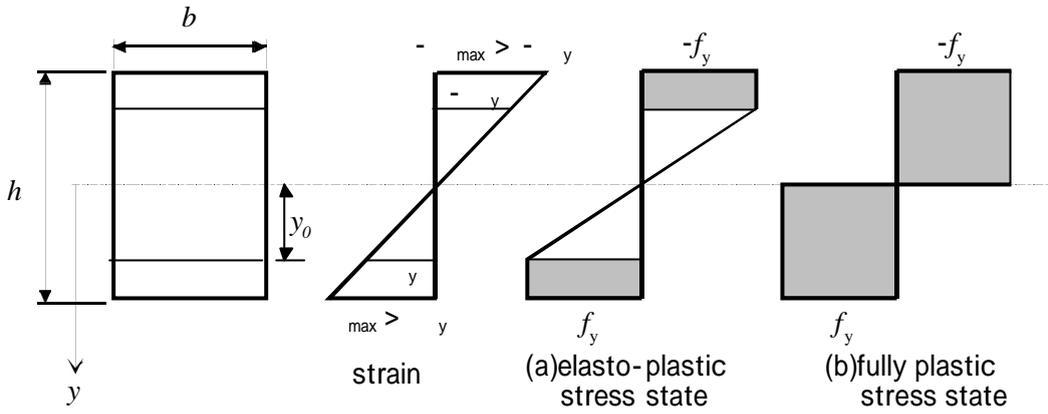


図 4 曲げモーメントによる応力分布の進行過程

表 1 長方形断面および円形断面における各種係数

	長方形断面	円形断面
断面形状		
断面係数 W	$bh^2/6$	$d^3/32$
塑性断面係数 Z	$bh^2/4$	$d^3/6$

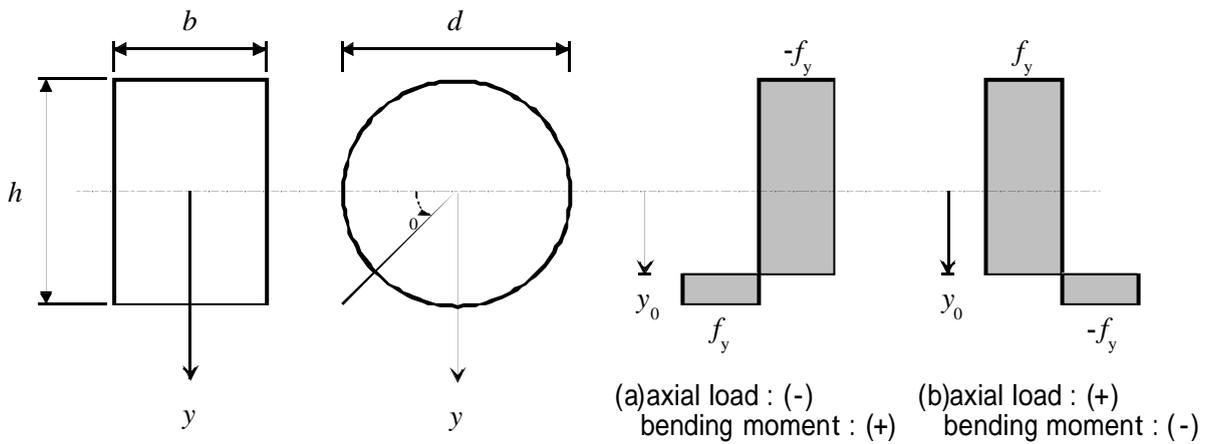


図 5 軸力と曲げモーメントを受ける断面における
全断面降伏状態の応力分布

③ 弾性/塑性領域の相互関係

弾性/塑性領域における軸力 P とスパン中央点の横方向変形 d_v 関係を図 6 に示す。また、得られた弾性座屈曲線 (load-deflection curve of initially bent member) を式 (5)、全塑性限界曲線 (full-plastic curve) を式 (25) の式を再記する。

$$d_v \equiv \frac{a}{1-P/P_{cr}} \quad (\text{両端固定} : P_{cr} = \frac{4P^2 EI}{L_b^2}, \text{両端ヒンジ} : P_{cr} = \frac{P^2 EI}{L_b^2}) \quad (5)$$

$$d_v \equiv \frac{IZ}{A(P/P_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} \quad (\text{両端固定} : I = 2, \text{両端ヒンジ} : I = 1) \quad (25)$$

両端固定支持の場合には、両端部の反力モーメント M_0 が作用するため、弾性時および全塑性時における中央点の曲げモーメント M_v を式 (4) の M_0 、式 (5) および式 (25)、式 (26) より次式となる。

$$M_v = Pd_v + M_0 = P \frac{a}{1-P/P_{cr}} - \frac{aP}{2} \left(\frac{1}{1-P/P_{cr}} \right) = \frac{aP}{2} \left(\frac{1}{1-P/P_{cr}} \right) (= -M_0) \quad (27)$$

$$M_v = Pd_v + M_0 = P \frac{2Z}{A(P/P_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} - M_p \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} = M_p \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} (= -M_0) \quad (28)$$

図 7 に軸力と曲げモーメントの相関図を示す。部材が曲がることによって凹側 (convex side) から断面の塑性化が開始するが、その塑性遷移領域は、図中の(c)領域であり、弾性曲線で近似することにより表している。これより、弾性時および塑性遷移時においては、曲げモーメントが増加するにしたがい、軸力も増加することがわかる。しかし、弾性時の $P-M$ 曲線から全塑性限界曲線に移行する点 (c) (d) を境に、曲げモーメントが増加しても軸力は減少する関係にあることが図より確認できる。

弾性曲線は曲げモーメントの増加に伴い、オイラー座屈荷重に漸近する曲線であり弾性限界直線は次式で与えられる。

$$M = M_y \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (29)$$

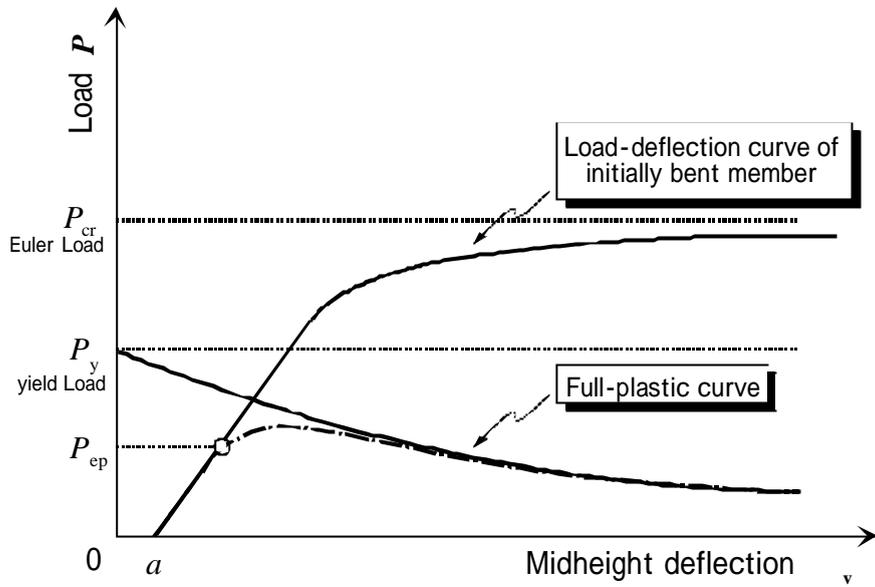


図 6 軸力とスパン中央点の横方向変形関係

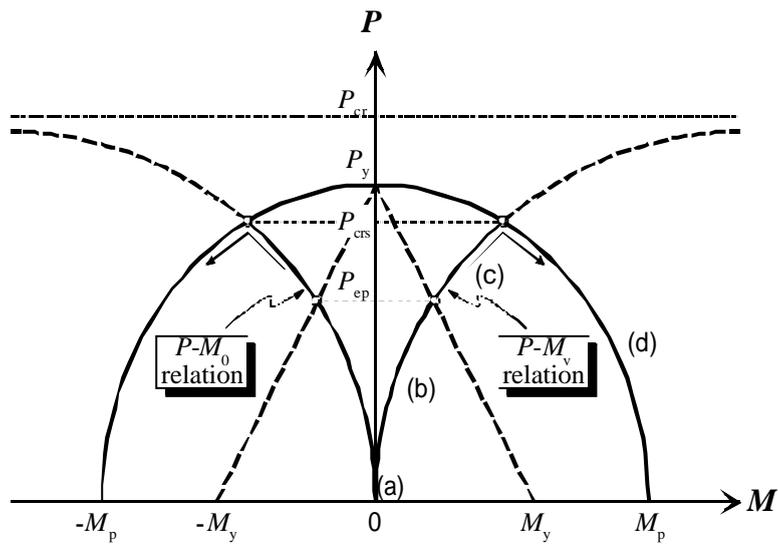
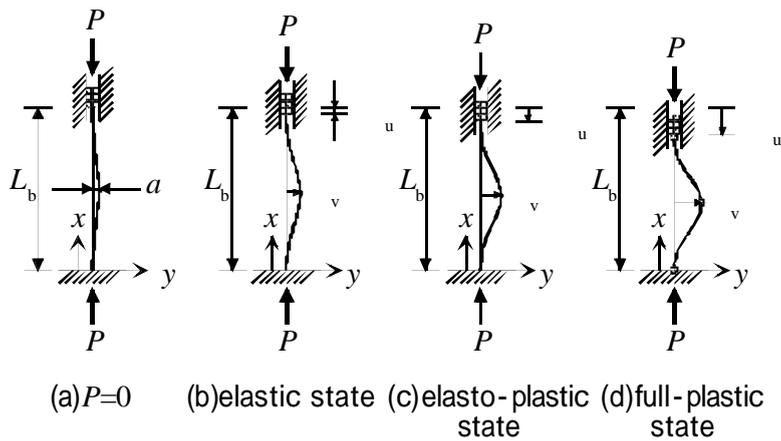


図 7 軸力と曲げモーメントの相互関係図

(4) 材料構成則への導入

軸方向変位に寄与するものとして、以下のものがあげられる。

$$\text{軸力による軸方向変位} : dd_{u,axial} = \frac{dP}{AE} \equiv e_0 dx$$

$$\text{弾性たわみ (横たわみ) による軸方向変位} : dd_{u,def} = \frac{1}{2} \left(\frac{dd_v}{dx} \right)^2 dx$$

$$\text{塑性ヒンジによる剛体回轉變位} : dd_{u,rot}$$

軸方向変位 d_u は、弾性時では $dd_u = dd_{u,axial} + dd_{u,def}$ 、全塑性時では $dd_u = dd_{u,axial} + dd_{u,def} + dd_{u,rot}$ の要素が寄与される。本研究では、 e_0 、 e_s^* による変形を考慮し、軸方向変位 d_u を以下のように算出する。軸力 P ~ 軸方向変位 d_u の関係を図 8 に示す。

$$dd_u = \left\{ e_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{dd_v}{dx} \right)^2 \right\} dx \quad \therefore d_u = \int_0^{L_b} dd_u = \frac{S}{E} L_b + \frac{P^2}{L_b} d_v^2 \quad (30)$$

式 (30) より、各両端支持条件のもと弾性座屈曲線を式 (31) に全塑性限界曲線を式 (32) に示す。

$$d_u = \frac{S}{E} L_b + \frac{P^2}{L_b} \left(\frac{a}{1 - P/P_{cr}} \right)^2 \quad (\text{両端固定} : P_{cr} = \frac{4P^2 EI}{L_b^2}, \text{両端ヒンジ} : P_{cr} = \frac{P^2 EI}{L_b^2}) \quad (31)$$

$$d_u = \frac{S}{E} L_b + \frac{P^2}{L_b} \left[\frac{IZ}{A(P/P_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{2.13} \right\} \right]^2 \quad (\text{両端固定} : I = 2, \text{両端ヒンジ} : I = 1) \quad (32)$$

また、軸方向平均応力 s_s^* (average axial stress) と平均ひずみ e_s^* (average axial strain) の関係を式(33) および式(34)に定義する。

$$s_s^* \equiv P/A \quad (33)$$

$$e_s^* \equiv \frac{1}{L_b} \int_0^{L_b} \left(\frac{dd_u}{dx} \right) dx = \frac{s_s^*}{E} + \left(\frac{P}{L_b} d_v \right)^2 \quad (34)$$

式 (33)、式 (34) より、各両端支持条件のもと弾性座屈曲線を式 (35) に全塑性限界曲線を式 (36) に示す。

$$e_s^* \equiv \frac{s_s^*}{E} + \left(\frac{P}{L_b} \cdot \frac{a}{1 - s_s^*/s_{cr}} \right)^2 \quad (\text{両端固定} : s_{cr} = \frac{4P^2 EI}{AL_b^2}, \text{両端ヒンジ} : s_{cr} = \frac{P^2 EI}{AL_b^2}) \quad (35)$$

$$e_s^* \equiv \frac{s_s^*}{E} + \left[\frac{P}{L_b} \cdot \frac{2Z}{A(s_s^*/f_y)} \left\{ 1 - \left(\frac{s_s^*}{f_y} \right)^{2.13} \right\} \right]^2 \quad (\text{両端固定} : I = 2, \text{両端ヒンジ} : I = 1) \quad (36)$$

鉄筋単体の弾塑性座屈挙動は、初めは弾性座屈曲線上を辿るが、応力が $s_{s,ep}^*$ になると断面の凹側から塑性域が発生しはじめ、弾性座屈曲線から乖離し、より大きな変形となる。さらに応力を加えると、弾塑性状態から全塑性限界曲線上に移行し、軟化挙動を示すと考えられる。ただし、実挙動は図 9 に示すような EP 点 (elasto-plastic point) 通過後、弾性座屈曲線から離脱し、CRS 点 (cross point) の下側をショートカットし、全塑性限界曲線上に合流する[4]。

そこで、EP 点から CRS 点の応力に対し、応力低減係数 h (stress reduction factor) を導入することにより、より実挙動に近い弾塑性状態を再現するものとした。応力低減係数 h は最大圧縮応力 $s_{s,max}^*$ 、塑性開始応力 $s_{s,ep}^*$ 、軟化開始応力 $s_{s,crs}^*$ を用い次式のように定義する。

$$h \equiv \frac{s_{s,max}^* - s_{s,ep}^*}{s_{s,crs}^* - s_{s,ep}^*} \quad (0 \leq h \leq 1) \quad (37)$$

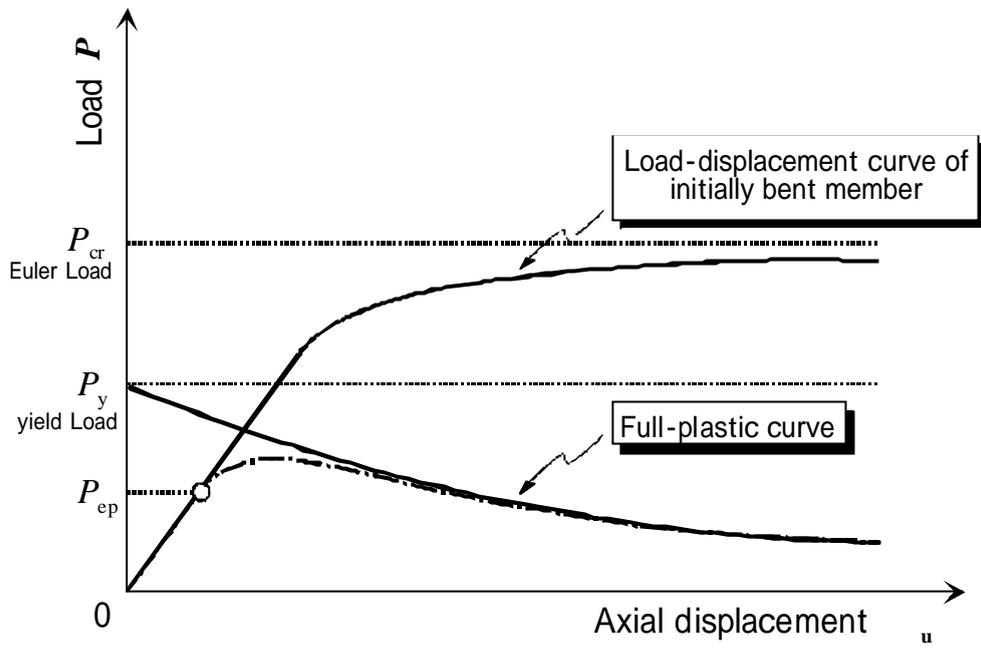


図 8 軸力と軸方向変位関係

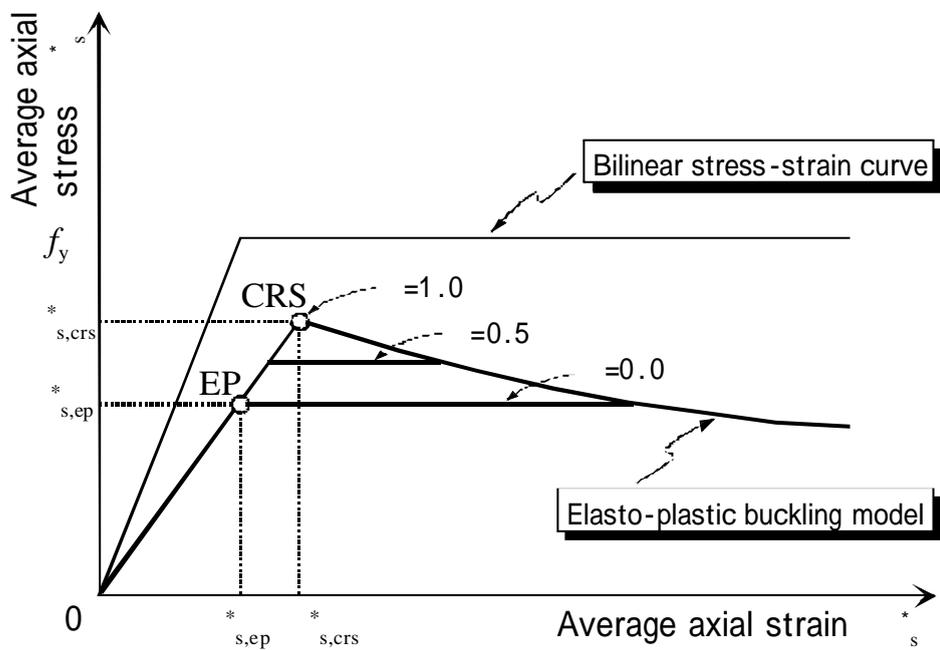


図 9 弾塑性座屈モデル

2. 鉄筋単体の数値シミュレーション

2.1 解析条件

以上算出した関係式、軸力と座屈スパン中央点の横方向変形および曲げモーメント関係、軸力と軸方向変位関係、軸方向平均応力とひずみ関係について数値シミュレーションを行なった。解析を行なうにあたって、鉄筋の座屈挙動に及ぼす影響として、構造的な条件と材料的な条件の大きく2点に分けて検討を行なった。詳細を以下に示す、材料的な条件(材料性状パラメータ)と、構造的な条件(構造条件パラメータ)によって数値シミュレーションを行った(図10参照)。表2に解析条件一覧表を示す。ただし、応力低減係数 h は全て $h=1.0$ とする。

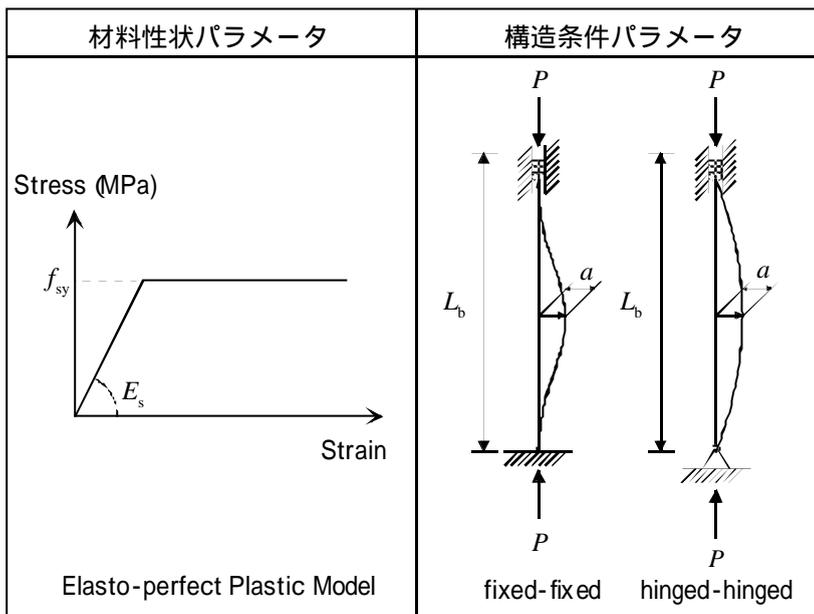


図10 解析条件

表2 解析条件一覧表

Model	鉄筋径 D	降伏強度 f_{sy} (MPa)	支持条件	座屈長 L_b (mm)	初期たわみ a (mm)		
材料性状パラメータ	A	1	fixed-fixed	500	5.0		
		2					
		3					
	B	4	235	fixed-fixed	500	5.0	
		5	295				
		6	345				
構造条件パラメータ	C	19	295	7	500	5.0	
				8			
	D	19	295	fixed-fixed	9	250	5.0
					10	500	
					11	750	
	E	19	295	fixed-fixed	500	12	2.5
						13	5.0
						14	7.5

2.2 解析結果および考察

構築した弾塑性座屈モデルについて、数値シミュレーションを行った結果をパラメータ毎に (a) 軸力-軸方向変位関係、(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ関係に着目し、図 11～図 15 に示す。

図中の塑性開始点 (elasto-plastic point) は、部材が曲がることによって凹側 (convex side) から断面が塑性する点であり、cross point は弾性座屈曲線と全塑性限界曲線が交わる荷重 (応力) 軟化開始点を示す。以下パラメータごとに、鉄筋の座屈発生に及ぼす影響の感度比較、検討を行った。

(1) 鉄筋径による影響

鉄筋径の変化に伴う挙動の感度と影響を図 11 に示す。鉄筋径が大きくなると、弾性座屈曲線の傾きが急激になり、elasto-plastic point および cross point も大きくなることが確認できる。鉄筋径が大きくなることにより、座屈が起こりにくくなると考えられる。一方、軸方向平均応力-軸方向平均ひずみに関しては、弾性座屈曲線、全塑性限界曲線ともに顕著な差がみられないことがわかる。特に、耐力低下を表す全塑性限界曲線に関しては、鉄筋径の違いによる差がみられないことが確認できる。

(2) 鉄筋降伏強度による影響

鉄筋降伏強度の変化に伴う挙動の感度と影響を図 12 に示す。降伏強度の違いによる座屈挙動の変化は、全塑性限界曲線のみに影響を与えることが確認できる。降伏強度の増加に伴い、elasto-plastic point および cross point における荷重と変位は共に大きくなる。特に、軸方向平均応力-軸方向平均ひずみに関しては、耐力低下の挙動に顕著な変化をもたらすことがわかる。これは、降伏後の全塑性限界曲線に降伏強度の値が含まれているため、顕著に影響を与えたと考えられる。

(3) 両端支持条件による影響

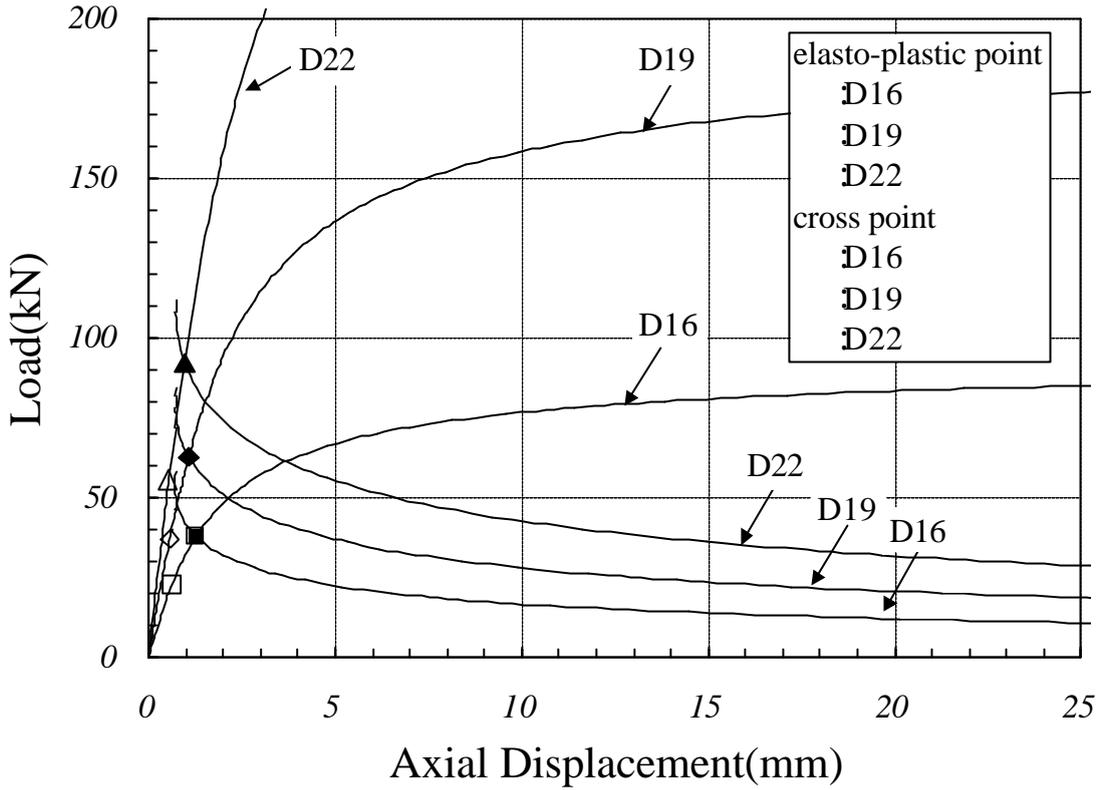
両端支持条件の変化に伴う挙動の感度と影響を図 13 に示す。支持条件の違いにより、弾性座屈曲線および全塑性限界曲線ともに変化し、両端支持条件の場合は両端固定支持の場合と比較し、elasto-plastic point および cross point に達する荷重が小さいことから、早期に耐力が低下すると考えられる。軸方向平均応力-軸方向平均ひずみに関しては、支持条件の違いが挙動に顕著な影響を与えることが確認できる。弾塑性座屈モデルでは弾性時に初期たわみ考慮しているため、支持条件の違いにも影響を及ぼすと考えられる。

(4) 座屈長による影響

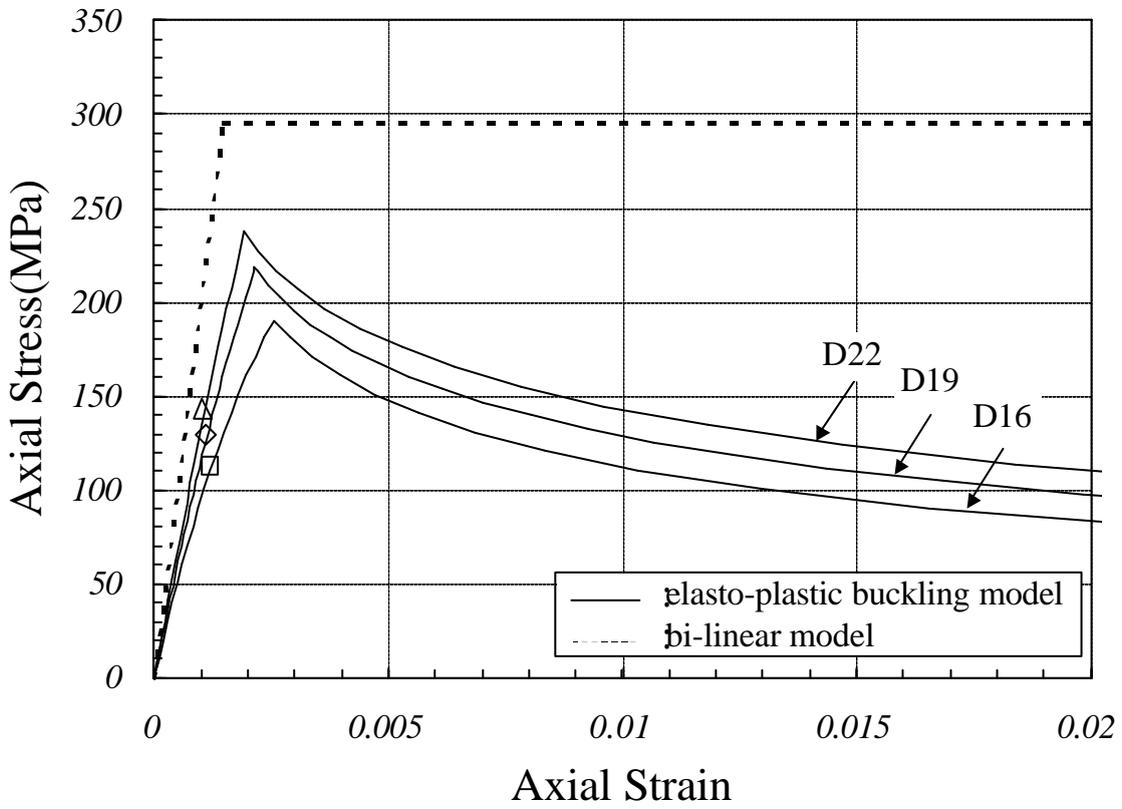
座屈長の変化に伴う挙動の感度と影響を図 14 に示す。座屈長の違いにより、弾性座屈曲線に敏感に影響を与えるが、耐力低下を表現する全塑性限界曲線には顕著な影響を与えないことがわかる。一方、軸方向平均応力-軸方向平均ひずみに関しては、ほぼ同じ挙動を示すが、弾性座屈曲線より全塑性限界曲線の応力に顕著な差が生じることが確認できる。座屈長が大きくなることにより、応力を負担できなくなる。これは、弾塑性座屈モデルでは、帯鉄筋の間で座屈が生じると仮定しているため、帯鉄筋の配置が長くなり、応力を負担できないと推察できる。

(5) 初期たわみによる影響

初期たわみの変化に伴う挙動の感度と影響を図 15 に示す。初期たわみの違いにより、弾性座屈曲線の 2 次勾配に影響を与えるが全塑性限界曲線より前には、顕著な影響を与えていないことがわかる。また、軸方向平均応力-軸方向平均ひずみに関しては、弾性座屈曲線の傾きのみに影響を与えることが確認できる。

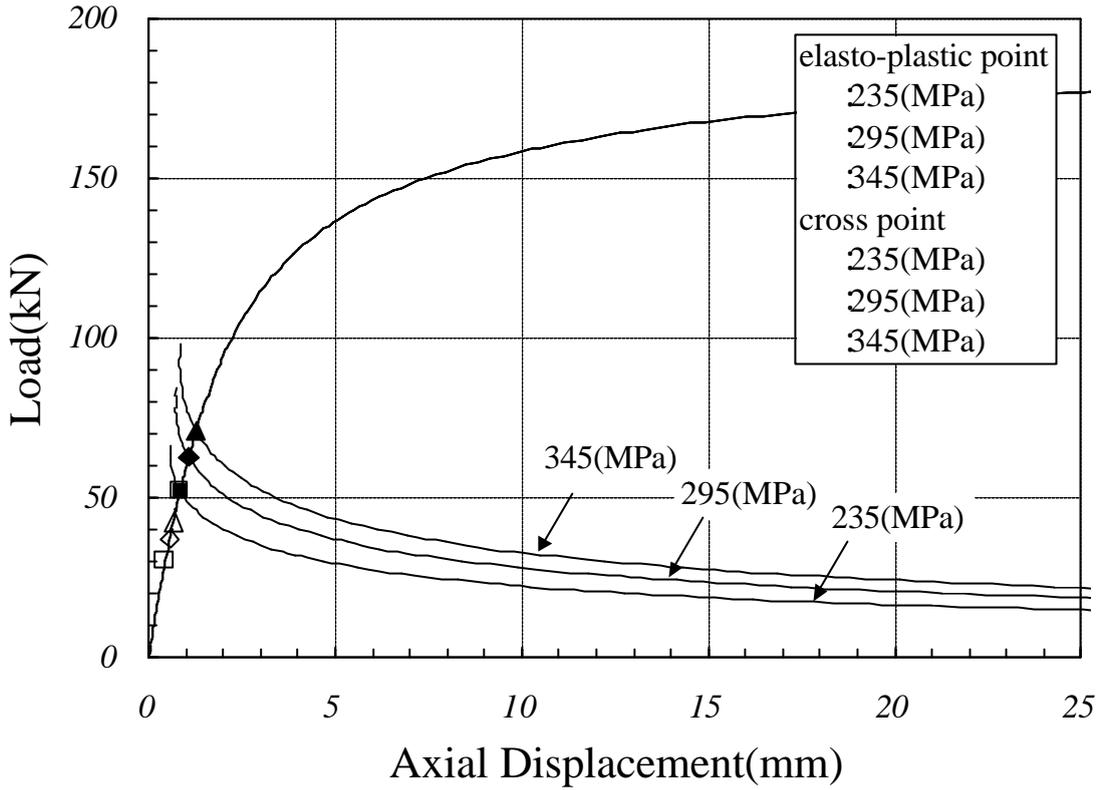


(a) 軸力-軸方向変位関係

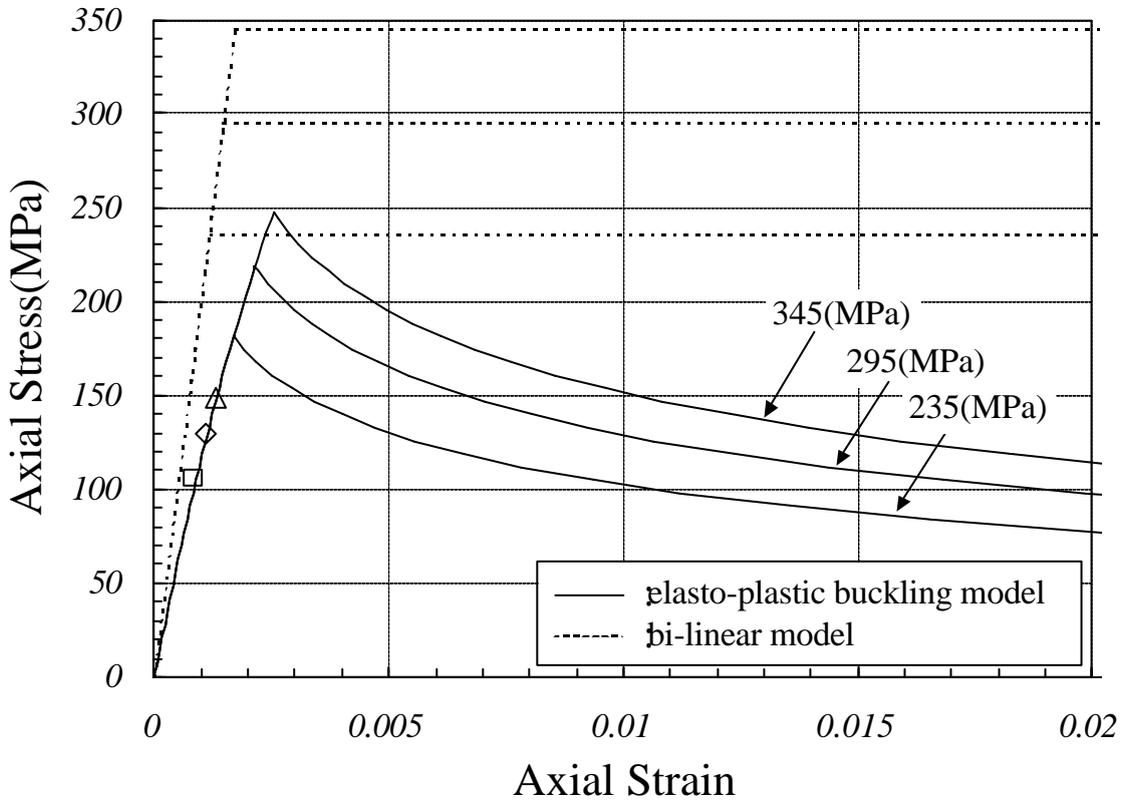


(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ

図 11 鉄筋径パラメータによる挙動評価

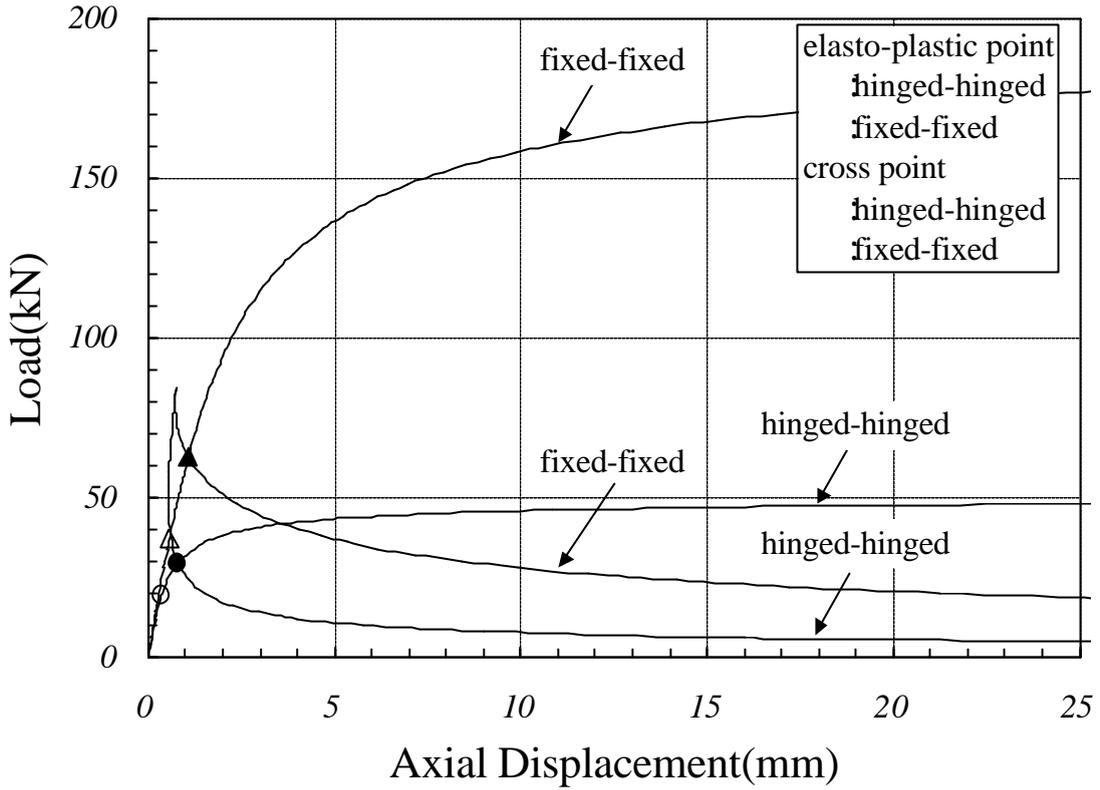


(a) 軸力-軸方向変位関係

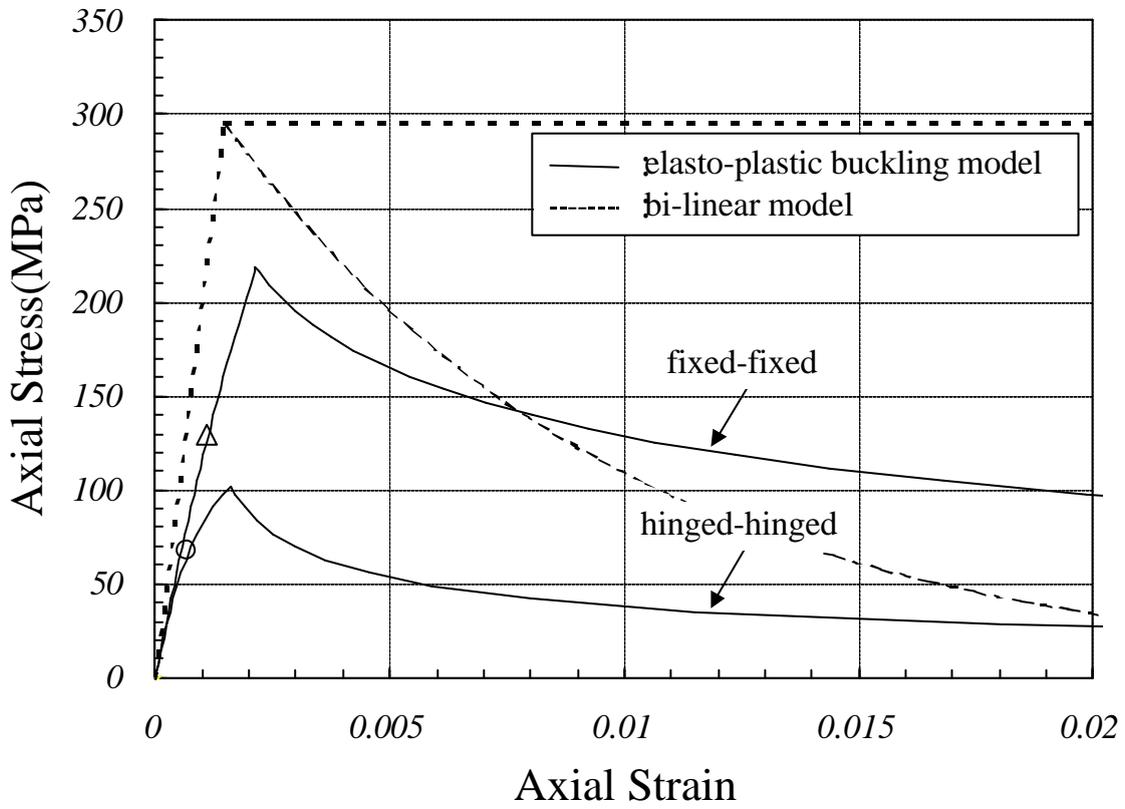


(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ

図 12 鉄筋降伏強度パラメータによる挙動評価

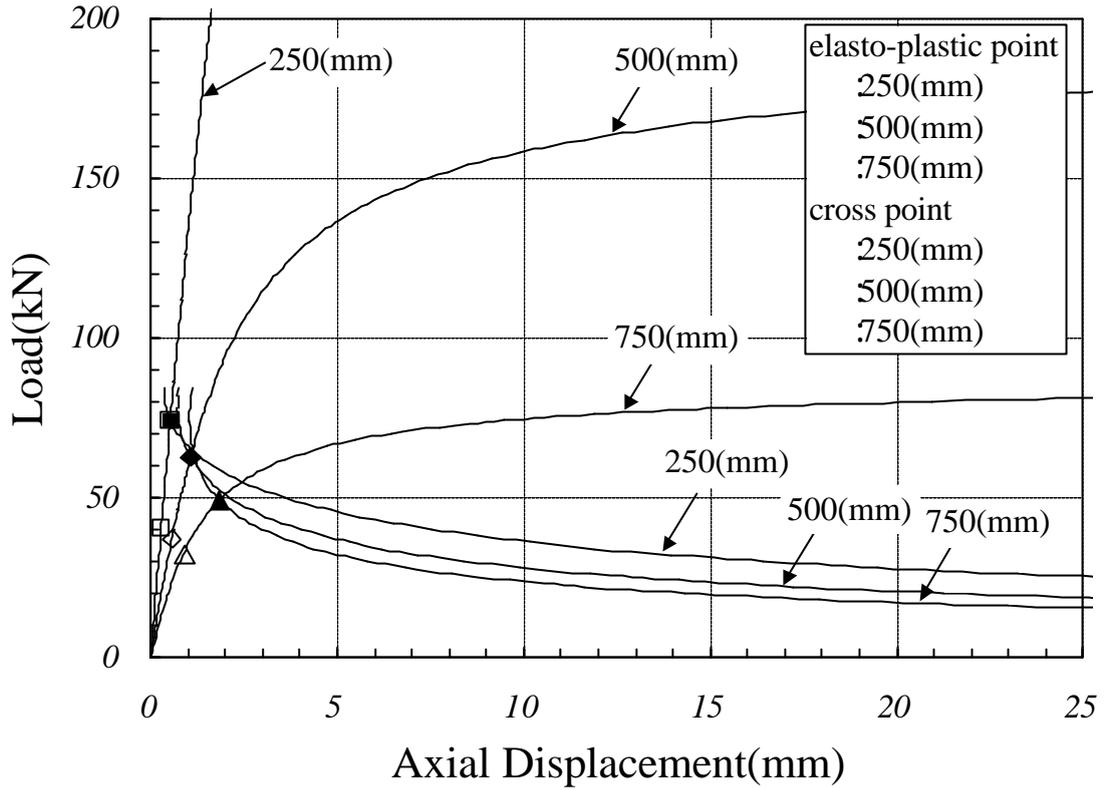


(a) 軸力-軸方向変位関係

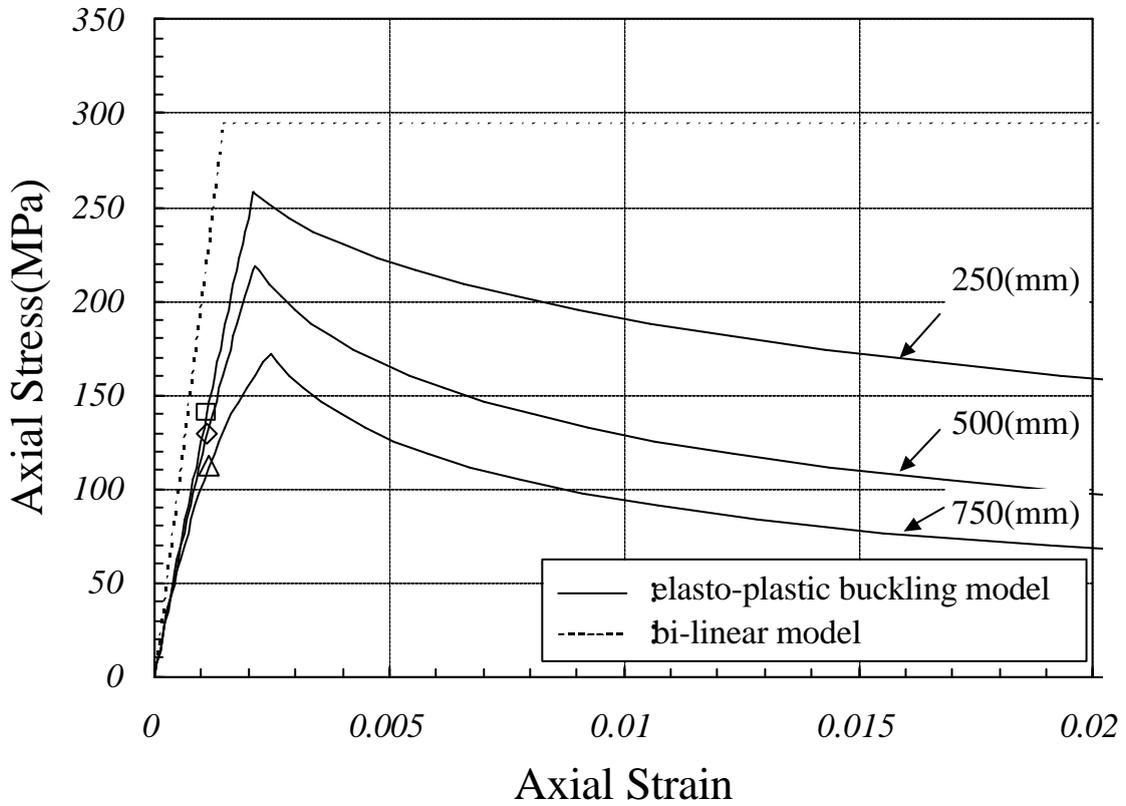


(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ

図 13 両端支持条件パラメータによる挙動評価

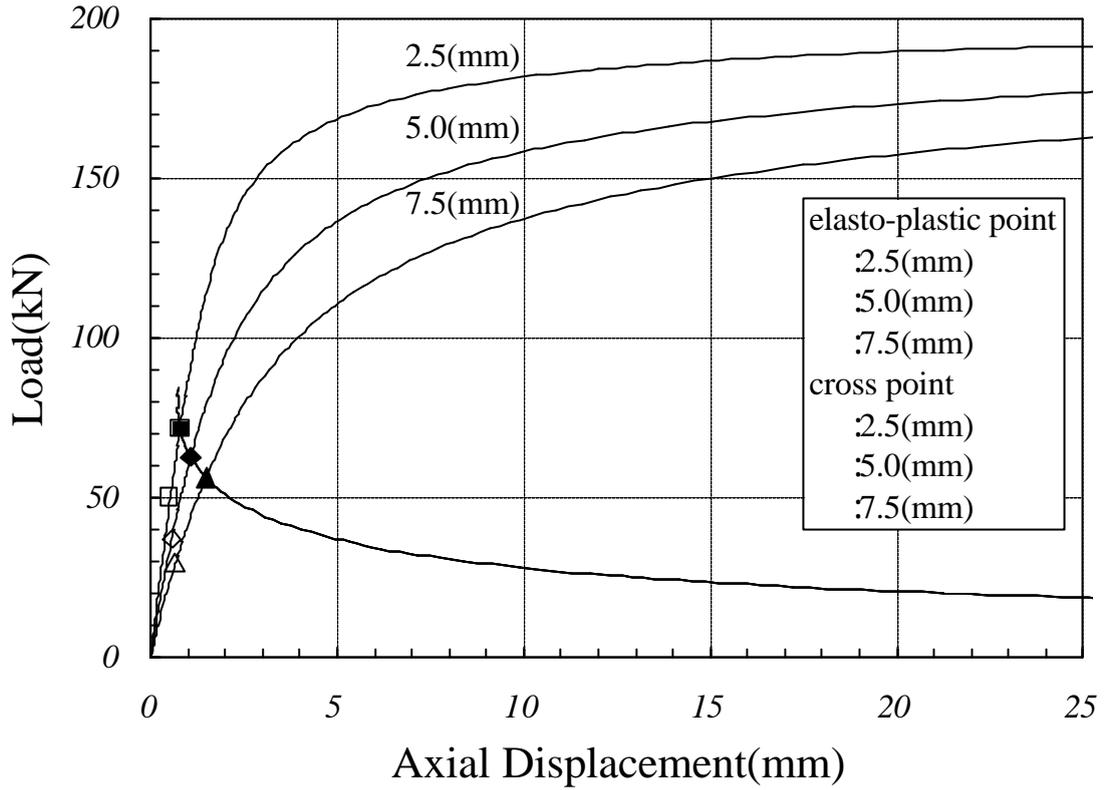


(a) 軸力-軸方向変位関係

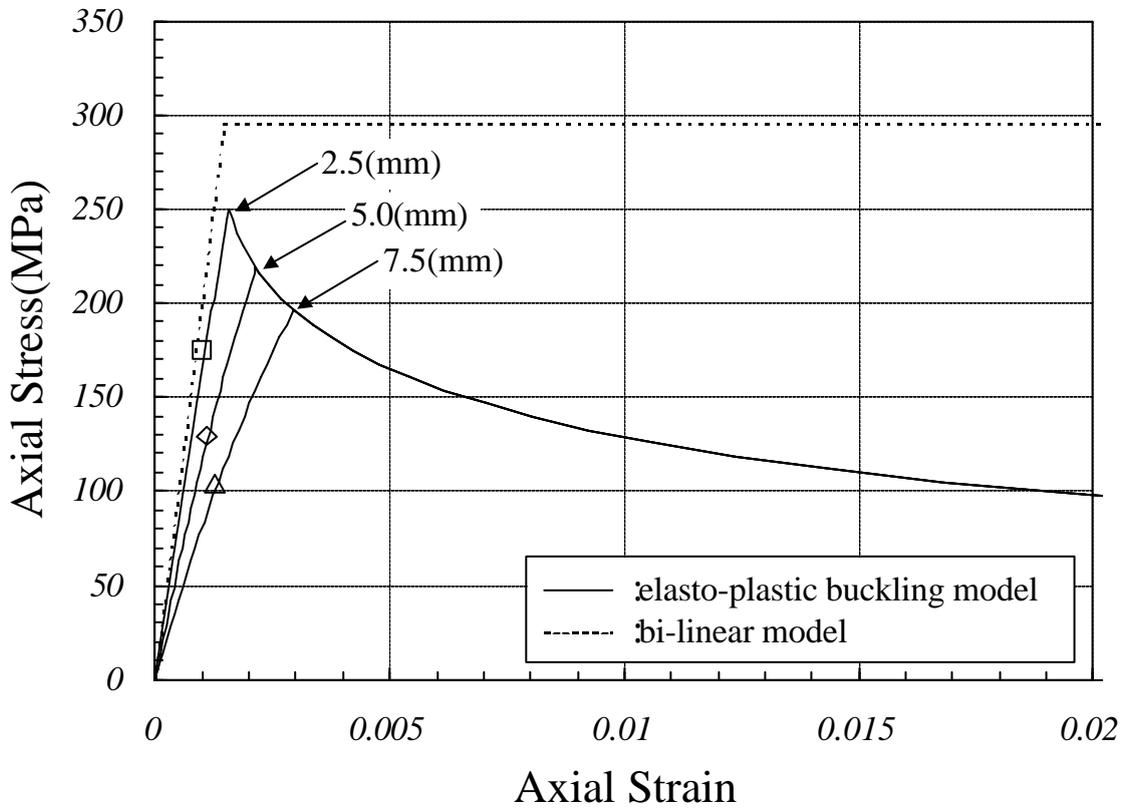


(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ

図 14 座屈長パラメータによる挙動評価



(a) 軸力-軸方向変位関係



(b) 軸方向平均応力-軸方向平均ひずみ

図 15 初期たわみパラメータによる挙動評価

3. 結論

本論では座屈挙動を解析的にアプローチするために、鉄筋単体に着目し鉄筋構成則である応力-ひずみ関係を提案した。以下に本論をまとめる。

鉄筋単体の座屈挙動について、弾性座屈曲線および全塑性限界曲線を導入し、初期不整を考慮した弾塑性座屈モデルの定式化を試みた。さらに、応力低減係数を定義することにより塑性遷移領域を設け、横方向変形と軸方向変位の幾何学的関係から、軸方向平均応力と平均ひずみ関係を導き、鉄筋構成則としての提案を行った。これにより、複雑な座屈挙動を簡易的な手法により取り扱うことが可能となった。

また、座屈挙動に影響を及ぼす因子（鉄筋径、鉄筋降伏強度、両端支持条件、座屈長、初期たわみ）に関して数値シミュレーションを行った結果、弾性座屈曲線に影響を与える因子が、鉄筋降伏強度、初期たわみであることが確認できた。一方、鉄筋径、座屈長は全塑性限界曲線に顕著な影響を及ぼすことがわかる。両端支持条件に関しては、弾性座屈曲線および全塑性限界曲線の両者に顕著な影響を及ぼすことが確認できた。鉄筋構成則の応力とひずみ挙動の荷重および応力に敏感な影響を及ぼす要因には、鉄筋径、両端支持条件、座屈長が挙げられる。

参考文献

- [1] 須田久美子, 村山八洲雄, 一宮利通, 新保弘: 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会 pp. 33-40, 1990.5
- [2] 西野文雄, 長谷川彰夫: 新体系土木工学 7 構造物の弾性解析, 第 9 章, 土木学会編, 技報堂出版, 1983
- [3] 福本: 新体系土木工学 9 構造物の座屈安定解析, 第 3 章, 土木学会編, 技報堂出版, 1983