

RC 断面の軸力と曲げ耐力

武蔵工業大学 構造材料工学研究室
新田 和宏 白子 将則 吉川 弘道

RC 柱部材には一般に曲げモーメント、せん断力、軸力が作用する。また偏心軸圧縮力や地震、風などの水平力を受ける。本論では曲げ破壊型 RC 単柱を対象とし、曲げモーメントと軸力を受ける断面の相互作用について検討する。本文では曲げ終局耐力 M_u と軸力 N の数値シミュレーションを数多く実施し、図化する。

キーワード: 曲げモーメント, 軸力, 破壊モード

1. 軸力と曲げを受ける部材

まず、図1のような鉛直荷重 P を受ける単柱形式の柱部材を列にとり、作用する断面力 (N =軸力, M =曲げモーメント) を考える。

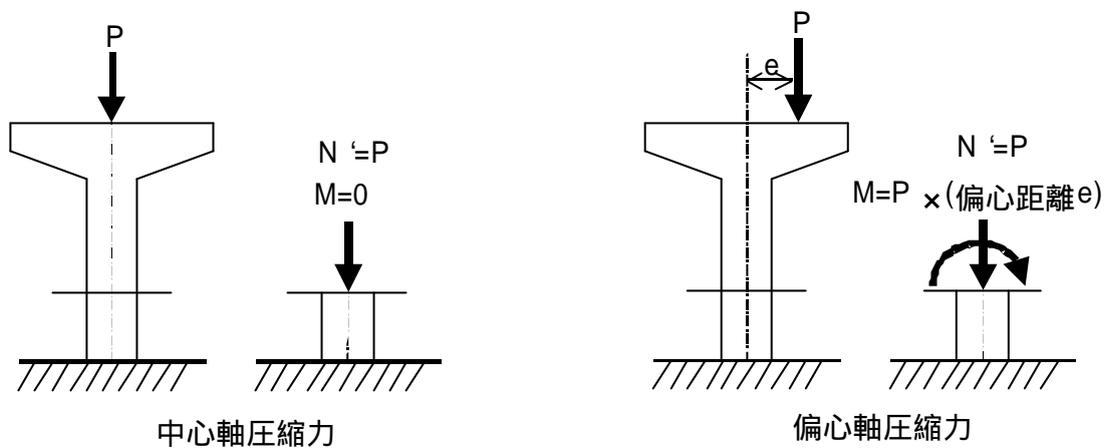


図1 柱部材における中心/偏心軸力状態 軸力と曲げモーメントを受ける部材の考え方

は中心軸圧縮状態であり断面には、軸力 N のみが作用した場合である。一方、は偏心軸圧縮状態であり軸力と曲げモーメントが作用した場合である。ここで、 e は断面図心からの偏心距離を表し、 $e = M/N$ により定義されるが、 $M = e N$ のようにも考えてよい。また一般の柱部材では、外力が中心に作用することはむしろまれで、軸力 + 曲げモーメントの組み合わせ荷重下で考えるのが普通である。

2. 終局耐力の算定方法と算定式

ここで、断面の終局耐力を M_u, N'_u のように表示し、その算定法を考える。これは、図3のような断面仮定と記号を用いる

(一例として、複鉄筋長方形断面を考える)もので、その算出法は以下のようにまとめられる。

偏心量 e に対する終局耐力を求めるが、軸方向力と曲げモーメントの釣合いが基本式となる。

ひずみ分布は断面内で線形分布と仮定し、コンクリートの応力については引張側を無視し、圧縮側は等価応力ブロックを採用する。

圧縮/引張鉄筋については、弾性状態(降伏前)か、降伏後を判定する必要がある。

断面の終局状態は、「コンクリートの圧縮縁ひずみ ϵ'_{cu} に達したとき」により定義される。

ここで、土木学会コンクリート標準示方書では、具体的な数値として次式を与えている。

- 等価応力ブロックの3係数： $b_1 = 0.52 + 80\epsilon'_{cu}$, $k_2 = b_1/2$, $k_3 = 1 - 0.003f'_c \leq 0.85$
- 終局ひずみ： $\epsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_c}{30} \cdot 10^{-3} \leq 3.5 \times 10^{-3}$

上記は最新の改訂示方書の値であるが、普通コンクリートの場合、旧示方書の値が簡便である。

- 等価応力ブロックの3係数： $b_1 = 0.80$, $k_2 = b_1/2$, $k_3 = 0.85$
- 終局ひずみ： $\epsilon'_{cu} = 0.0035$

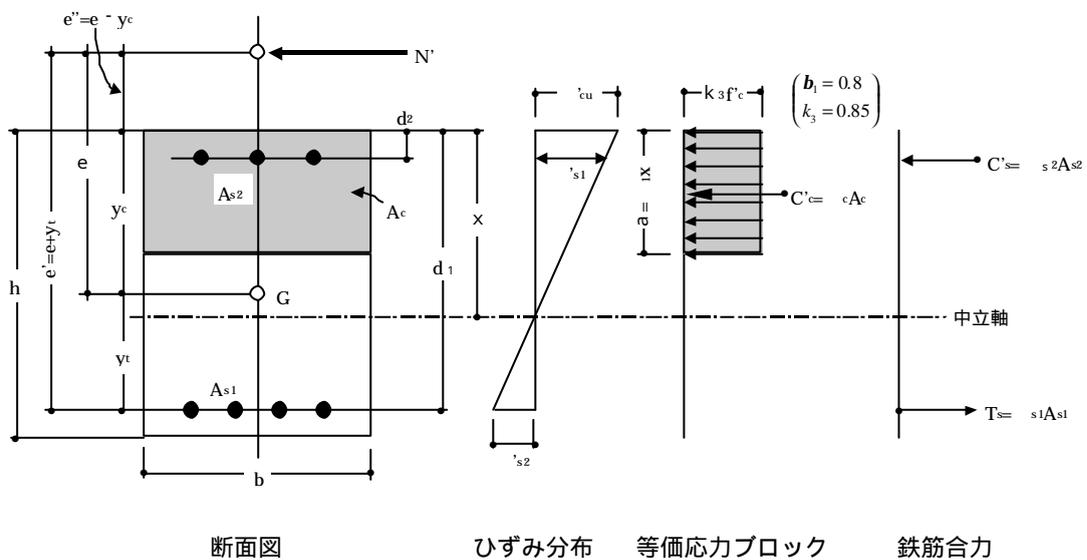


図2 終局耐力の算定に関する断面仮定と記号

このような仮定のもとに断面の終局耐力 M_u, N'_u に関する釣合い式は、以下のように整理することができる。

$$N'_u = k_3 f'_c b a + A_{s2} f_y - A_{s1} f_y \quad (1)$$

$$M_u = k_3 f'_c b a \left(d_1 - \frac{a}{2} \right) + A_{s2} f_y (d_1 - d_2) - N'_u (e' - e) \quad (2)$$

また,断面耐力に無次元表示 \overline{N}_u , \overline{M}_u を用いると,次式のようにも記述できる.

$$\overline{N}_u \equiv \frac{N_u'}{k_3 f_c b d_1} = \frac{a}{d} + y_2 - y_1 \quad (3)$$

$$\overline{M}_u \equiv \frac{M_u}{k_3 f_c' b d_1} = \frac{a}{d_1} \left(1 - \frac{a}{2d_1}\right) + y_2 \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right) - \overline{N}_u \frac{e'-e}{d_1} \quad (4)$$

ここで, 偏心率: $e' = e + y_1$, $e'' = e - y_2$

$$\text{鉄筋係数: } y_1 = \frac{A_s f_y}{k_3 f_c' b d_1} = \frac{p_1 f_y}{k_3 f_c'}, \quad y_2 = \frac{p_2 f_y'}{k_3 f_c'}$$

以上の算定式右辺のうち,コンクリー応力ブロック高さ a (図2参照)のみが未知数であり,これは,それぞれの破壊形式に対して,以下のように与えられる.ただし, $g = d_2 / d_1$ としている.

釣合い偏心率状態 (添え字 b を付している):

$$\frac{a_b}{d_1} = b_1 \frac{x_b}{d_1} = \frac{b_1 e'_{cu}}{e'_{cu} + f_y / E_s} \quad (5)$$

鉄筋降伏先行型 ($N'_u \leq N'_{ub}$, $e \geq e_b$) の場合:

$$\frac{a}{d_1} = -\frac{e''}{d_1} + \sqrt{\left(\frac{e''}{d_1}\right)^2 + 2\left\{(1-g)y_2 + \frac{e'}{d_1}(y_1 - y_2)\right\}} \quad (6)$$

・コンクリー圧縮破壊型 ($N'_u > N'_{ub}$, $e < e_b$) の場合:

$$\left(\frac{a}{d_1}\right)^3 + 2\frac{e''}{d_1}\left(\frac{a}{d_1}\right)^2 + 2\left\{\frac{e_{cu}}{e_y}y_1 + y_2\right\}\frac{e'}{d_1} - (1-g)y_2\left\{\frac{a}{d_1} - \frac{2b_1 e'}{d_1} \cdot \frac{e_{cu}}{e_y}y_1\right\} = 0 \quad (7)$$

ここで,圧縮/引張鉄筋の応力が,未降伏(弾性状態)の場合,作用している鉄筋応力を算出して,これを降伏強度の替わりに用いる必要がある.

以上を整理すると,一連の算定手順は,

- () 与えられた材料条件と断面諸元により,諸係数を準備する. $d_1, y_1, y_2, g, e, e', e'', e_y, e'_{cu}$.
- () 釣合い破壊時における断面耐力と偏心率 ($M_{ub}, N'_{ub}, e_b = M_{ub} / N'_{ub}$ のように記す)をもとめる.
- () 与条件となる偏心率 e または軸力 N'_u から,破壊形式を識別する.
- () 該当する算定式を用い, a を算出し,終局耐力 (M_u, N'_u) を求める.

3. $M_u \sim N'_u$ 曲線 破壊包絡線 (相互作用図)

終局耐力 M_u, N_u を算出する際のパラメータを偏心量 e とすると図 3 のような破壊包絡線 (相互作用図) を形成することができる。

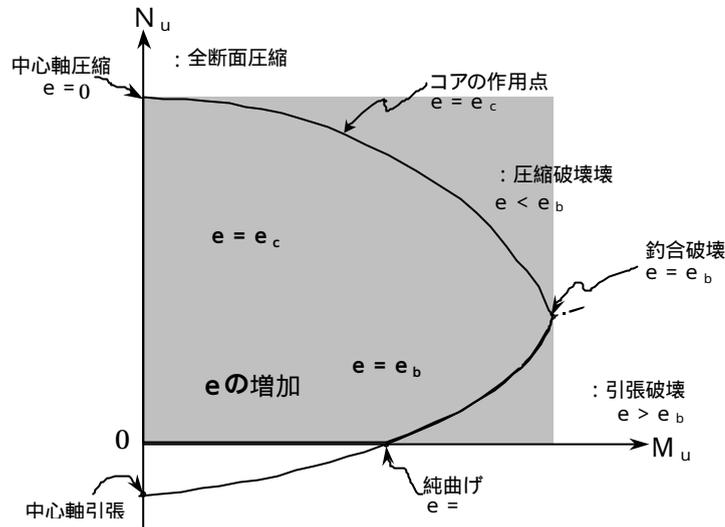


図 3 破壊包絡線 (相互作用図)

図 3 の破壊包絡線では、まず、図中に記した、 $e = 0$ 、 $e = e_c$ 、 $e = e_b$ 、 $e = \infty$ の主要点は $e = 0$ から出発して、順に、単軸圧縮破壊 ($e = 0$)、コア作用点 ($e = e_c$)、釣合い破壊 ($e = e_b$)、純曲げ破壊 ($e = \infty$)、単軸引張破壊のように定義できる。

与えられた設計断面力 (M_d, N'_d) が、この破壊包絡線の線上もしくは外側にあれば破壊、内側にあれば破壊していないことを示す。

また、釣合い破壊 ($e = e_b$) を遷移点として、2つの破壊形式に分類できる。

鉄筋降伏先行型 ($N'_u \leq N'_{ub}$, $e \geq e_b$) 曲げモーメントの増大に伴い、引張りひ割れの発生/進展、中立軸の上昇、引張鉄筋の降伏、圧縮コンクリートの圧縮破壊にいたる。これは破壊の様相も延性的であり、比較的靱性に富む。

コンクリート圧縮破壊型 ($N'_u > N'_{ub}$, $e < e_b$) 曲げモーメントの増大に伴い引張りひ割れは発生するが、ほとんど進展がなく、引張鉄筋が未降伏のまま、コンクリートの圧縮破壊を迎える。これは、ひずみ分布 (図 5) から判断されるように、中立軸が図心軸より下方にあり、引張鉄筋の負荷が小さいことによる。終局時には、予兆のない脆性的な破壊となり、急激な耐力低下を呈する。

4. 数値シミュレーション

図3のような破壊包絡線はコンクリートの圧縮強度, 鉄筋比, 断面積などで線形が変化する. また実単位, 強度単位, 無次元化などをして縦軸と横軸を変化させることに形状が変化する.

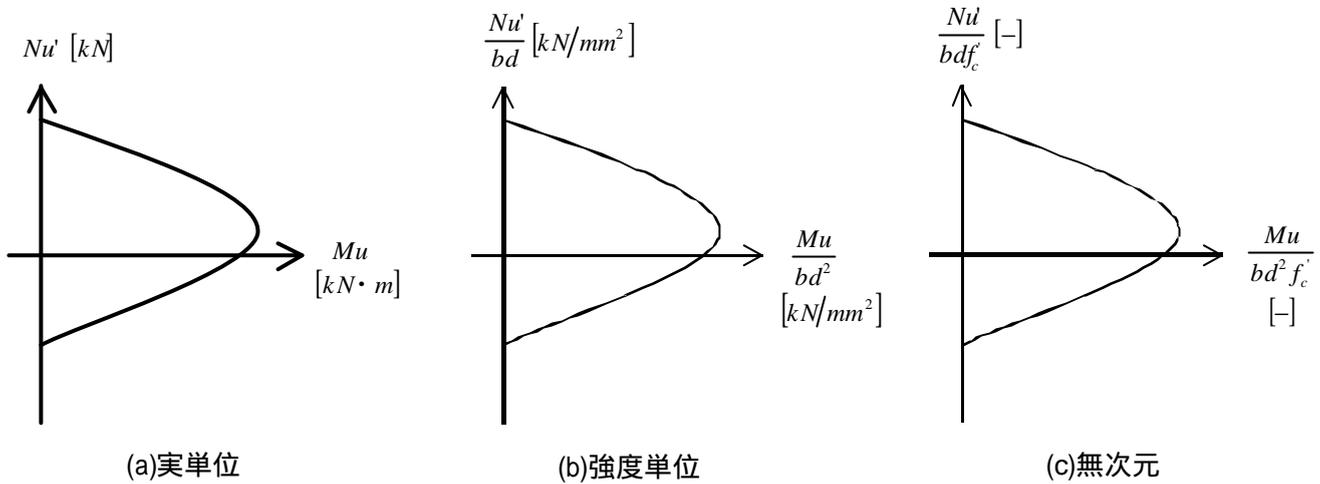
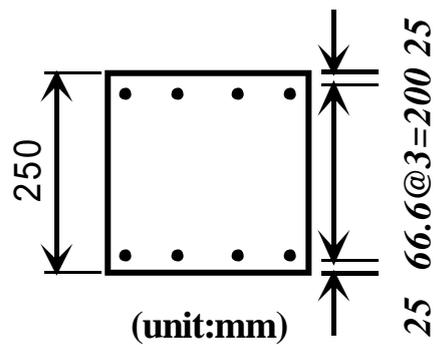


図4 Mu, Nu' に関する表示法

標準モデルを図5に示す.



主鉄筋	断面積 (mm ²)	p ₁ (引張)	p ₂ (圧縮)	f _t (N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
4D16	250X250	0.0141	0.0141	27	300

図5 標準モデル

またケース ~ として解析諸元表1と図7の標準モデルをもちいて各種パラメータを変化させた時の破壊包絡線を作成する。その時の解析パラメータを表1に示す。

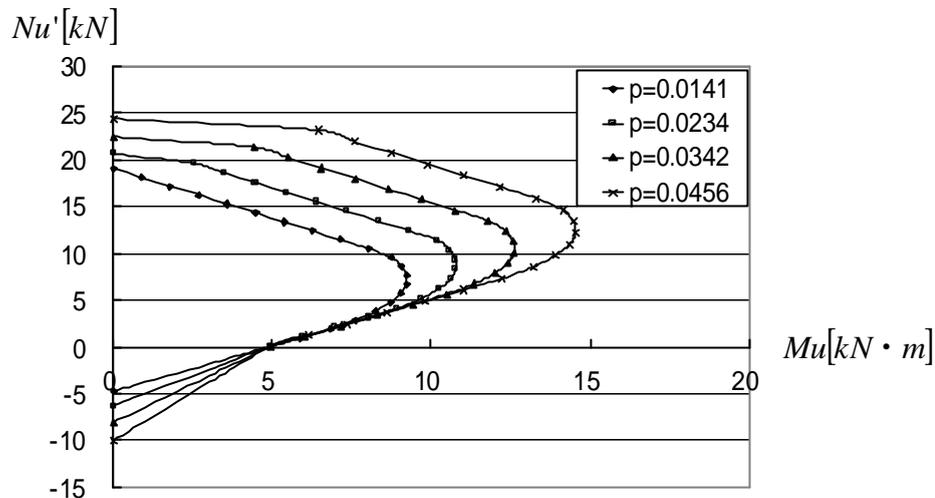
表1 解析パラメータ

ケース	パラメータ	圧縮鉄筋比 P_2	引張鉄筋比 P_1	鉄筋降伏強度 $f_y(N/mm^2)$	コンクリート強度 $f'_c(N/mm^2)$	断面積 $A(mm^2)$
標準モデル		0.0141	0.0141	300	27	250×250
	圧縮鉄筋比 P_2	0.0141 0.0234 0.0342 0.0456	↓			
	引張鉄筋比 P_1	0.0141	0.0141 0.0232 0.0332 0.0455	↓		
	鉄筋降伏強度 $f_y(N/mm^2)$		0.0141	300 350 400 450	↓	
	コンクリート強度 $f'_c(N/mm^2)$			300	27 37 47 57	↓
	断面積 $A(mm^2)$	↓	↓	↓	27	250×250 300×300 400×400 500×500

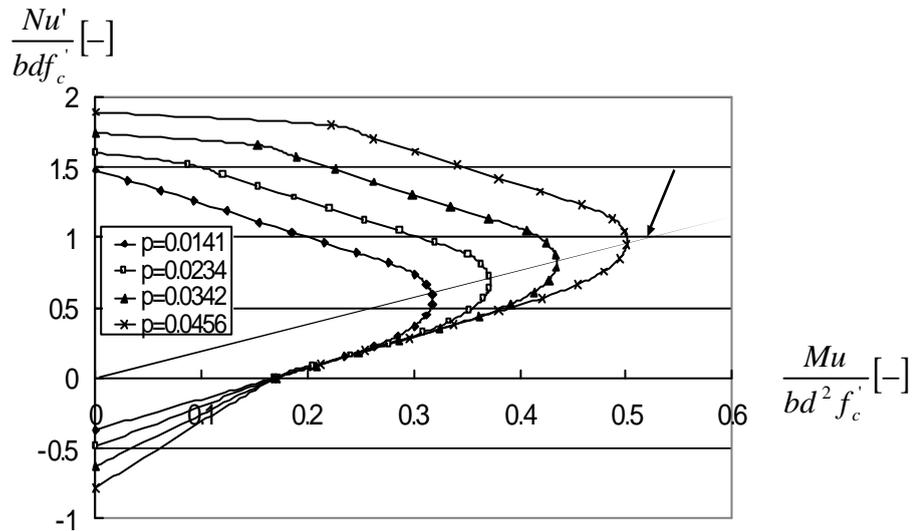
5. 解析結果および考察

ケース ~ の軸力と曲げ耐力の関係を示す。

ケース : 圧縮鉄筋を変化させた場合



(a) 実単位表示



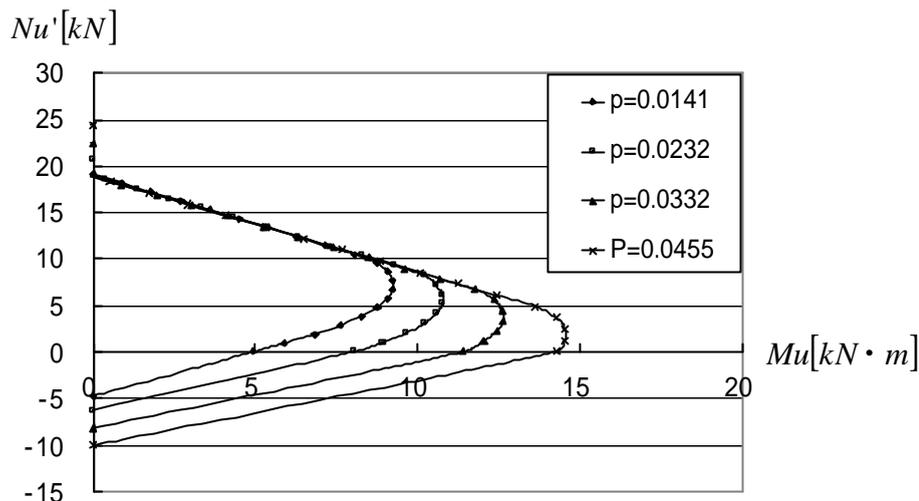
(b) 無次元表示

本解析では実単位の場合でも無次元と同様な形状が見られる。これは、圧縮鉄筋比だけを変化させているので b, d, f_c' が定数として考えられるためである。よってどこも同じ割合で変化する。

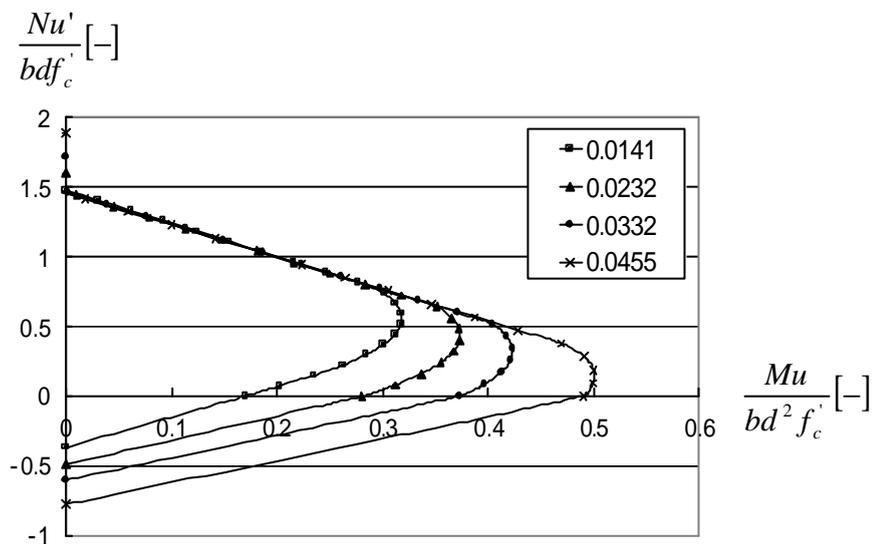
無次元では圧縮鉄筋の増加とともに、曲げ耐力が増大していることがわかる、またそれに伴い軸方向圧縮力による終局耐力も増大していることがわかる。

の線上がコンクリートの圧縮力と鉄筋の引張力が釣合っている状態になる。この線上と破壊包絡線と交わったところではコンクリートの圧縮破壊と鉄筋の引張降伏が同時に発生する。またの線上側と破壊包絡線で囲まれた領域は圧縮破壊領域である、ただし包絡線の内側であれば圧縮破壊することはない。また破壊包絡線上は鉄筋の降伏より先にコンクリートが圧壊してしまうコンクリート圧壊型となってしまう。反対にの線の下側と破壊包絡線で囲まれた領域はコンクリートの圧縮力より鉄筋の引張力の負担分が多く引張破壊領域といえる。ただしこちらの場合も破壊包絡線上でなければ鉄筋は降伏することはない。破壊包絡線上は鉄筋降伏先行型となる。

ケース : 引張鉄筋を変化させた場合



(a) 実単位表示

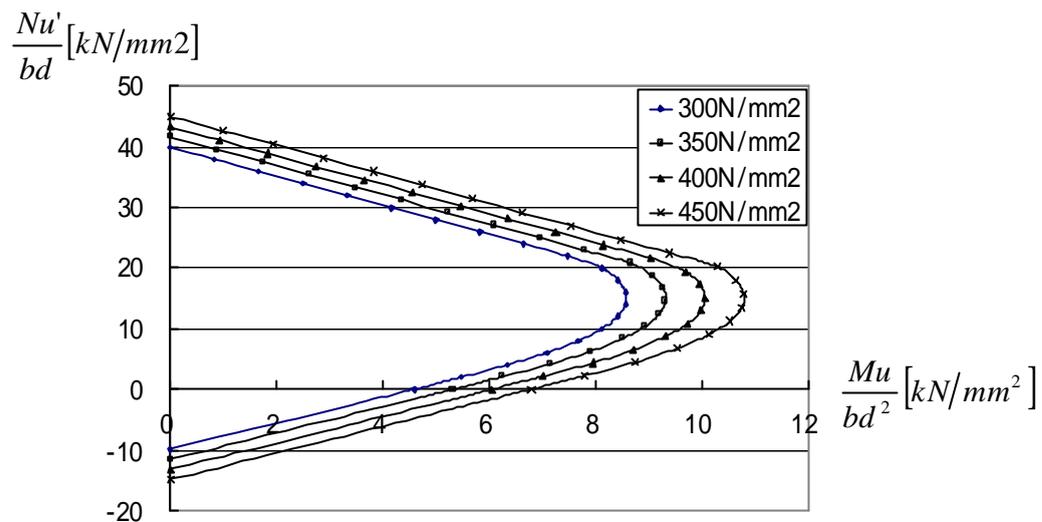


(b) 無次元表示

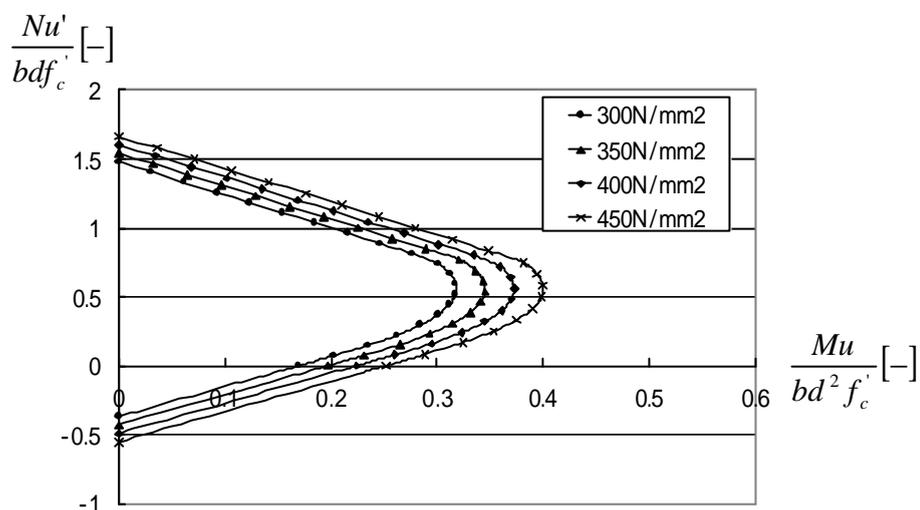
引張鉄筋比を増加させた場合も曲げ耐力は増加する,しかし圧縮破壊領域の増大が大部分であり引張破壊領域は圧縮鉄筋を増加させた時より減少してしまう,また曲げ耐力が 0.3 以下の場合には鉄筋量が増えてもコンクリート圧壊型になる場合には軸方向力による終局耐力の増加は見られない。

圧縮鉄筋比を変化させた場合と同様に引張鉄筋を変化させた場合の無次元と実単位の形状は同じになる。

ケース 鉄筋降伏強度を変化させた場合



(a) 強度単位表示

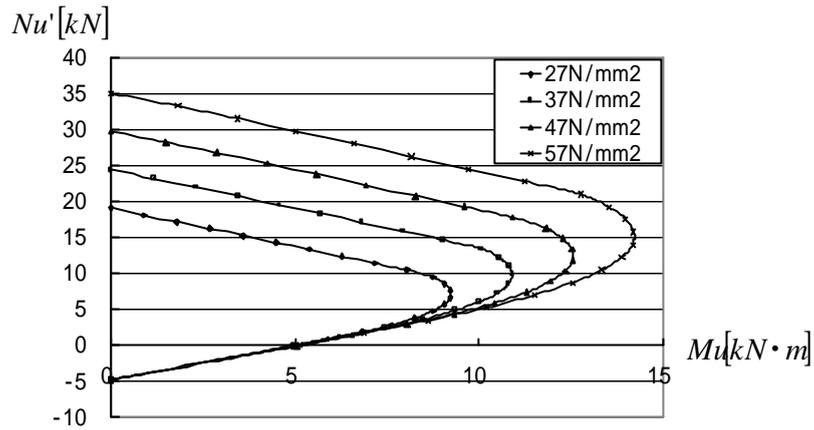


(b) 無次元表示

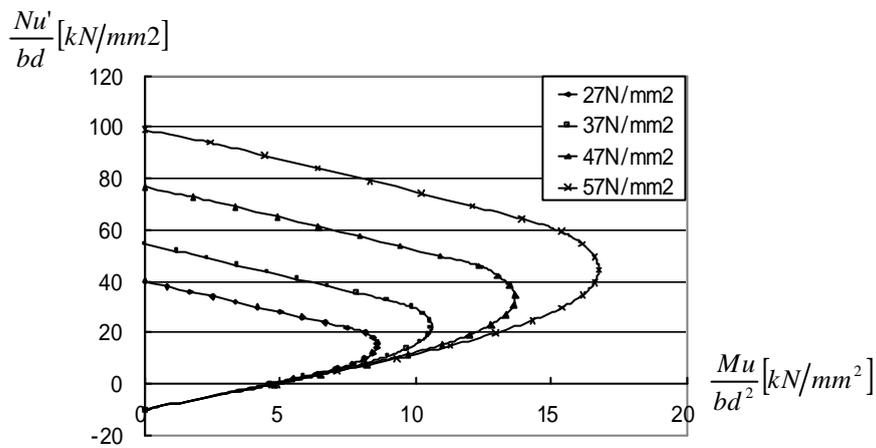
鉄筋降伏強度だけを変化させているため、無次元と強度単位の形状は変わらない。強度単位とは単位面積あたりの力で求めた値である。

無次元表示は鉄筋降伏強度の増大に伴い曲げ耐力も軸方向力の終局耐力も破壊包絡線全領域で同等に変化している。また軸力 0.5 の時は鉄筋降伏強度に関わらず破壊包絡線と交わった時点で釣合い破壊を起こす。

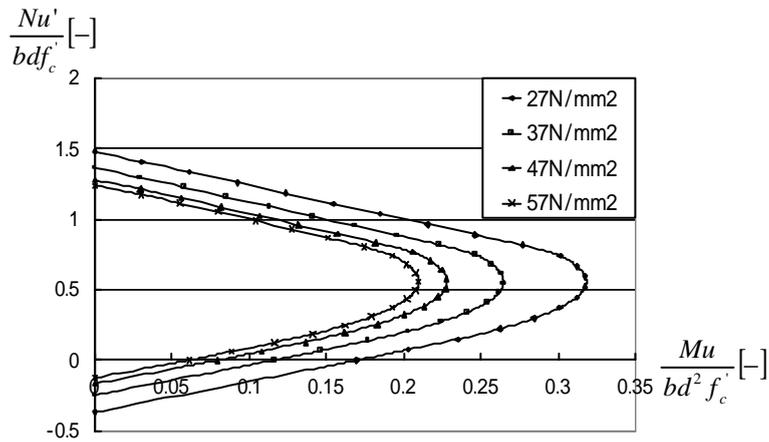
ケース : コンクリート強度を変化させた場合



(a) 実単位表示



(b) 強度単位表示

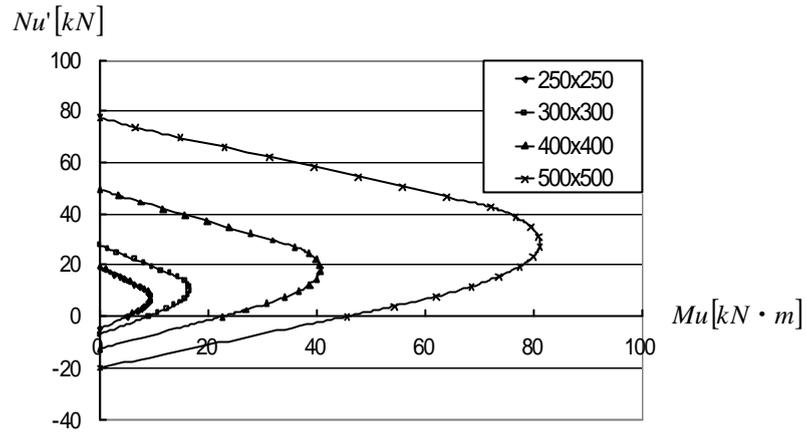


(c) 無次元表示

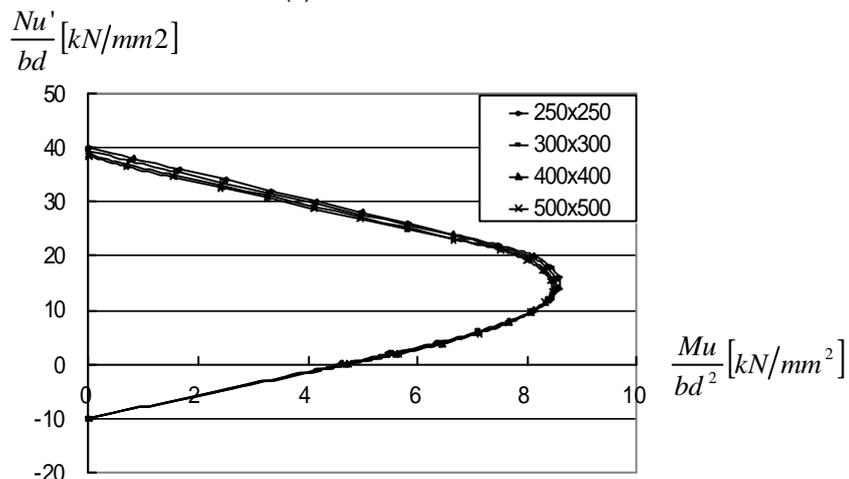
強度単位表示は式 (1), 式 (2) よりコンクリート強度を増加させることにより, 曲げ耐力も軸方向力の終局耐力も増加することが分かる.

無次元表示の場合も鉄筋降伏強度を増加させた場合と同様に伴い, 曲げ耐力も軸方向力の終局耐力も破壊包絡線全域で同等に変化している. しかし鉄筋降伏強度の時とは逆にコンクリート強度を上げると $\frac{Mu}{bd^2 f'c}$, $\frac{Nu'}{bd f'c}$ と分母に f'_c があるため, 曲げ耐力も軸方向の終局耐力も減少する.

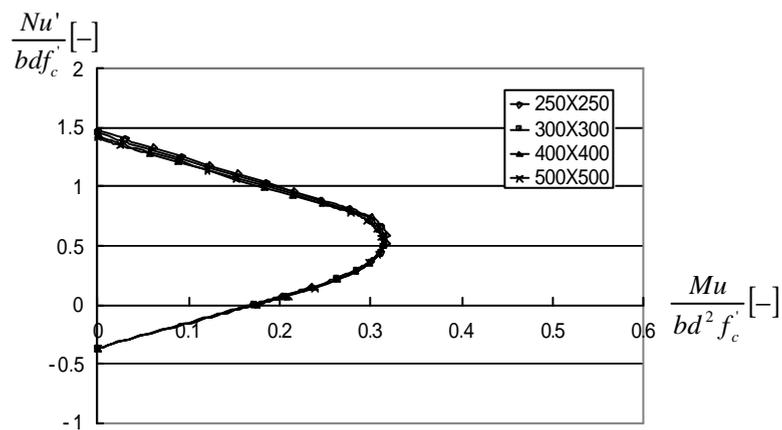
ケース 断面積を変化させた場合



(a) 実単位表示



(b) 強度単位表示



(c) 無次元表示

無次元表示、強度単位表示ともにほとんど変化が見られなかったが、実単位の場合は式(1)、式(2)より断面積が大きくなるに従い、曲げ耐力、軸方向力の終局力ともに増加することが分かる。

実単位表示では断面積の増大とともに、破壊包絡線は全領域で大きな奇跡をたどる。しかし無次元表示では断面積に関係なくほぼ同一の奇跡となる。

