

軸方向引張力と曲げモーメントとを受ける
鉄筋コンクリート部材の設計DESIGN OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECT
TO COMBINED AXIAL TENSION AND BENDING

平 嶋 政 治*・川 口 直 能**

By Masaharu HIRASHIMA and Naotaka KAWAGUCHI

1. ま え が き

一般に構造物は単独の荷重を受けることはまれで、多種類の組合せ荷重を受けている。組合せ荷重、とくに軸力と曲げを受ける場合の研究の歴史は古いが、その多くは軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける場合を取扱ったものである。軸方向引張力（以下軸引張と記す）と曲げモーメント（以下曲げと記す）を受ける部材については、たとえば水平力が作用するラーメンの柱材など実際には存在しているにもかかわらず、これに関する研究はきわめて少ない。

本研究は、組合せ荷重を受ける構造物または部材の解析および設計に関する基礎資料を得ることを目的とし、従来あまり研究されていなかった軸引張と曲げを受ける部材の強度と変形を理論と実験の両面から検討し、その設計法を提案したものである。

理論解析では、部材の降伏と破壊とをひずみの条件によって区別し、強度と変形(曲率)を算定する一般式を誘導した。このとき、鉄筋の応力とひずみの関係はひずみ硬化領域まで含めて仮定し、コンクリートの応力とひずみの関係はとくに最大応力近傍に重点をおいて定めた。

さらに鉄筋量または荷重偏心量を変化させた偏心引張試験体を用いて実験を行った。実験結果と理論解析とを総合した結果、設計の際には部材の降伏時を基準とするのが適当であるとの結論が得られたので、部材の降伏強度をもとにして断面を設計する方法を提案した。

2. 従来の研究と各国設計基準の概要

(1) 従来の研究

軸引張と曲げを受ける鉄筋コンクリート部材のひびわれ発生後の応力状態の算定には、応力の分布を直線と仮定する方法が用いられてきた。これは許容応力度設計に適用する場合を想定したものである。

軸引張と曲げが作用する部材について理論または実験に重点を置いた研究に関しては、著者らの調査した範囲では次の 4 編が発表されている。以下に発表年代順にその要約を列記する。

a) Whitney, Cohen の研究¹⁾

曲げ、または軸力と曲げを受ける部材の設計法を検討するとともに、鉄筋の降伏応力度とコンクリートの圧縮強度をもとにして破壊時の軸方向引張力を求めている。

Whitney らの提案式は部材破壊時の偏心軸方向引張力を近似的に推定できる式であると思われる。著者らの後述の実験結果と比較すると測定値は計算値より約 15% 大きい値となる。

b) Dunham の研究²⁾

温度降下が生じた固定はりなど実際に軸引張と曲げを受ける部材を例示し、ひびわれ発生前後のつり合いを検討した。さらに具体的に寸法を与えた断面について弾性論で縁応力度を求めている。また Dunham は鉄筋の降伏応力度をもとにして算定した部材の破壊強度は、軸方向引張力の大きい部材においては不正確なることを指摘したが、その根拠は明示されていない。

c) 望月, 宮沢の研究^{3), 4)}

鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす軸力の影響を検討した研究の一部で、ACI 規準で不明確になっている軸方向引張力の影響を理論と実験の両面から検討したものである。定性的結果として M/Qd (moment-shear span depth ratio) が大きい場合は ACI 規準は妥当であるとし、 M/Qd が小さい場合は検討を要するとしている。また軸方向圧縮力と軸方向引張力が交互に作用するときのせん断耐力について e 関数法を用いた数値計算を行うとともに、せん断ひびわれ発生強度が大きい

* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

** 学生会員 早稲田大学院理工学研究科

部材では軸方向引張力の存在により、せん断耐力が低くなるものもあることを報告している。

d) Harris の研究⁵⁾

軸引張と曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の設計法について提案したものである。ACI 規準 (ACI Code 318-71) の曲げ部材の設計法の考え方を軸引張と曲げを受ける部材にも拡張し、偏心引張力の作用位置を5つの場合に分け、部材が破壊するときを基準にしてそれぞれの場合の必要鉄筋断面積を求める式を提案している。また Harris は破壊時の軸引張と曲げとの相関曲線が軸圧縮と曲げの場合の単純な延長ではないことを指摘した。

(2) 軸引張と曲げに関する各国設計基準

軸引張と曲げを受ける部材の設計に関しては条項を設けては規定されていないようであるが^{注1)}、関連項目として記されている。以下にその要約を記す。

a) ACI Standard, Building Code Requirements for Reinforced Concrete⁹⁾

軸方向引張力が作用するときの公称許容せん断応力度として次の式を与えている。

$$v_c = 2(1 + 0.002 N_u / A_g) \sqrt{f'_c}$$

ここで、

N_u : 乾燥収縮およびクリープの影響を考慮した設計軸方向力・引張に対しては負で、 N_u / A_g は psi で表わす。

A_g : 全断面積

f'_c : コンクリートの特性圧縮強度

なお、ACI では軸方向引張力が作用するときのいわゆる耐荷力低減係数 (capacity reduction factor) として $\phi = 0.90$ を用いることを提案している。

b) コンクリート構造物設計施工国際指針¹⁾

偏心引張力によるひびわれ発生モーメント M_I を次のように与え、短期荷重によるたわみの計算に用いることを提案している。

$$M_I = M_f / (1 + W_1 / B_1 e)$$

ここで、

M_f : 単純曲げの場合のひびわれ発生モーメント

W_1 : 換算断面係数

B_1 : 換算断面積

e : コンクリートのみの断面図心軸からの偏心量

c) 日本建築学会構造計算規準^{8),9)}

「鉄骨鉄筋 コンクリート 構造計算規準同解説」の柱の解説の項で累加強さ式を用いて許容耐力の計算を行うことを提案している。これによれば、曲げが軸引張に比べて大きい場合には軸圧縮と曲げの場合の設計式の軸力の項の符号を変えて設計し、軸引張が大きい場合は式を交

えて設計するとし、変更すべき式を示している。

また「鉄筋コンクリート構造計算規準同解説」には、柱の解説の項に長方形、円形断面の軸引張の範囲までを含めた軸力と曲げの設計計算図が掲げられている。

3. 理論解析

(1) 適用範囲

軸引張と曲げが同時に作用する場合を対象とし、軸引張と曲げとの作用を偏心引張力に置き換えた。

また偏心引張力の作用位置は引張側鉄筋の外側である場合に限定した。すなわち、偏心引張力の引張側鉄筋図心からの偏心量を e_t 、有効高さを d とすると、

$$\alpha = e_t / d \geq 0 \dots \dots \dots (1)$$

また本研究では部材がひびわれ発生、引張側鉄筋の降伏を経て、コンクリートの圧縮破壊によって破壊する場合を扱った。したがって、鉄筋量はつり合い鉄筋比以下を適用範囲とする。なお、つり合い鉄筋比は後述の記号に従えば、式 (9) を用いて次のように表わせる。

$$p\beta_y = [(a+1-r')p'\beta' + C_{fu}(a+1) \cdot \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}) - (C_{fu} - C_{mu}) \{ \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}) \}^2] / \alpha \dots \dots (2)$$

(2) 材料の応力とひずみの関係

a) コンクリートの応力-ひずみ曲線

曲げ圧縮を受けるコンクリートの応力とひずみの関係式については従来より多くの式が提案されている。ひずみ勾配、ひずみ速度、補強の程度などによって応力とひずみの関係や破壊するときのひずみに差異があることが報告されている。本研究では、最大応力近傍に注目し¹⁰⁾、図-1 に示すように指数関数で応力とひずみの関係を表わした¹¹⁾。

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \cdot \epsilon_c / \epsilon_{c0} \cdot e^{1 - \epsilon_c / \epsilon_{c0}} \dots \dots \dots (3)$$

b) 鉄筋の応力-ひずみ曲線

鉄筋は明確な降伏点を有するものを対象とし、図-2 に示すようにひずみ硬化領域をも含めた応力-ひずみ曲

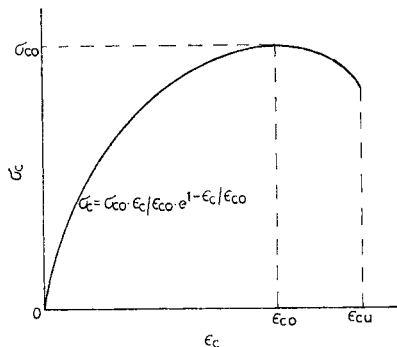


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

注 1) ソ連では規定されているようである。

表-1 C_f, C_m の値

ϵ_c/ϵ_{co}	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
C_f	0.1271	0.2382	0.3347	0.4183	0.4904	0.5523	0.6050	0.6497	0.6872	0.7183
C_m	0.0825	0.1562	0.2173	0.2693	0.3129	0.3491	0.3787	0.4028	0.4219	0.4366
ϵ_c/ϵ_{co}	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
C_f	0.7438	0.7642	0.7803	0.7925	0.8013	0.8071	0.8103	0.8112	0.8101	0.8073
C_m	0.4474	0.4550	0.4597	0.4618	0.4619	0.4600	0.4567	0.4520	0.4462	0.4394

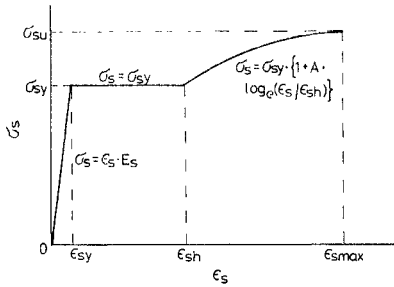


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

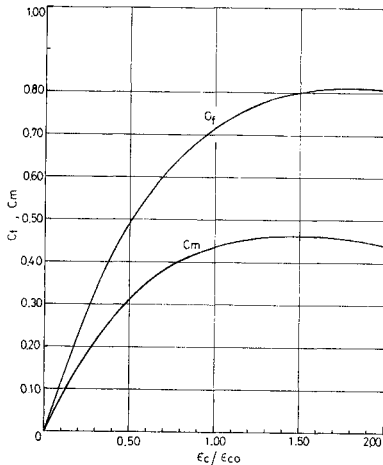


図-3 C_f, C_m の値

線を仮定した.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \epsilon_s E_s, & 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \\ \sigma_s &= \sigma_{sy}, & \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} \\ \sigma_s &= \sigma_{sy} \{1 + A \log_e(\epsilon_s / \epsilon_{sh})\}, & \epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{smax} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

(3) ひびわれ発生強度

ひびわれ発生荷重を求めるためには引張側コンクリートの応力とひずみの関係を仮定する必要がある。しかし、ひびわれ発生時点における引張ひずみ、最大引張力に対するひずみなどは十分に説明されておらず、コンクリートの引張に対する適当な応力-ひずみ曲線はない。したがって、本研究では引張側コンクリートを弾性域と塑性域とに分ける近似式²⁾を用いてひびわれ発生荷重を求めることにした。本計算における仮定は次のとおりで

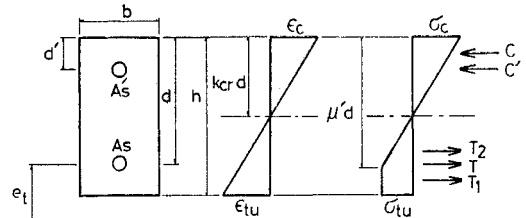


図-4 ひびわれ発生時の応力およびひずみ分布

ある。

- (i) ひずみは直線分布する。
- (ii) 応力は直線分布し、引張側は弾性域と塑性域とに分けられるものとし、引張側塑性応力を引張強度に等しくとる。

記号を 図-4 のように定めると、上記の仮定から圧縮力、引張力はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C &= b k_{cr}^2 d \sigma_{tu} / 2 (\mu' - k_{cr}) \\ C' &= A_s' \sigma_s' = n A_s' \sigma_{tu} (k_{cr} - \gamma') / (\mu' - k_{cr}) \\ T &= A_s \sigma_s = n A_s \sigma_{tu} (1 - k_{cr}) / (\mu' - k_{cr}) \\ T_1 &= b d \sigma_{tu} (\gamma - \mu') \\ T_2 &= b d \sigma_{tu} (\mu' - k_{cr}) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

軸方向引張力作用点に関するモーメントのつり合いより、中立軸の位置は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} k_{cr} &= \{ n p' \gamma' (\alpha + 1 - \gamma') + \alpha n p \\ &\quad + \mu'^2 / 6 - \mu'^2 (\alpha - \gamma' + \gamma) / 2 \\ &\quad + \gamma \mu' (\gamma / 2 + \alpha - \gamma') \} / \{ n p' (\alpha + 1 - \gamma') + \alpha n p \\ &\quad + \gamma (\gamma / 2 + \alpha - \gamma') \} \dots\dots\dots (6) \end{aligned} \right\}$$

したがって、ひびわれ発生時の偏心軸方向引張力および曲率は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} N_{cr} / (b d \sigma_{tu}) &= n p (1 - k_{cr}) / (\mu' - k_{cr}) \\ &\quad (\gamma - \mu') + (\mu' - k_{cr}) / 2 \\ &\quad - k_{cr}^2 / 2 (\mu' - k_{cr}) \\ &\quad - n p' (k_{cr} - \gamma') / (\mu' - k_{cr}) \\ \phi_{cr} \cdot d &= \epsilon_{tu} / (\gamma - k_{cr}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

(4) ひびわれ発生後のつり合い

部材の降伏および破壊強度と曲率を求めるために、ひびわれ発生後のつり合いを 図-5 のように仮定し、強度と曲率を算定する一般式を誘導する。ここで、

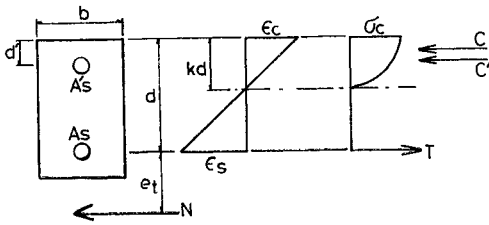


図-5 ひびわれ発生後のつり合い

- (i) ひずみは直線分布するものとする。
- (ii) コンクリートの引張力を無視する。

と仮定すれば 図-5 より圧縮力および引張力は

$$\left. \begin{aligned} C &= bkd\sigma_{c0}C_f \\ C' &= A_s'\sigma_s' \\ T &= A_s\sigma_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となり、軸方向引張力作用点に関するモーメントのつり合いより、中立軸を求める方程式は次式で表わせる。

$$(C_f - C_m)k^2 - C_f(\alpha + 1)k - (\alpha + 1 - \gamma')p'\beta' + \alpha p\beta = 0 \dots\dots\dots (9)$$

したがって、偏心軸方向引張力および曲率は次のようになる。

$$N/bd\sigma_{c0} = p\beta - kC_f - p'\beta' \dots\dots\dots (10)$$

$$\phi \cdot d = \epsilon_c/k = \epsilon_s/(1-k) \dots\dots\dots (11)$$

ここで圧縮側コンクリートに関する積分項 C_f , C_m は式(3)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned} C &= b \int_0^{kd} \sigma_c \cdot dy = bkd\sigma_{c0}C_f \\ C_f &= \epsilon_{c0}/\epsilon_c \cdot e \{ 1 - (\epsilon_c/\epsilon_{c0} + 1) e^{-\epsilon_c/\epsilon_{c0}} \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{y0} &= b \int_0^{kd} \sigma_c y dy = b(kd)^2 \sigma_{c0} C_m \\ C_m &= (\epsilon_{c0}/\epsilon_c)^2 \cdot e [2 - \{ (\epsilon_c/\epsilon_{c0} + 1)^2 + 1 \} e^{-\epsilon_c/\epsilon_{c0}}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

C_f , C_m の値はあらかじめ計算しておくことができる。結果を表-1, 図-3 に示した。

(5) 部材の降伏

引張側鉄筋の降伏を部材の降伏、すなわちプラスチックヒンジの形成と定義する。

ひずみの条件は

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s &= \epsilon_{sy}, \quad \epsilon_s' = (k_{sy} - \gamma')\epsilon_{sy}/(1 - k_{sy}) \\ \epsilon_c &= k_{sy} \cdot \epsilon_{sy}/(1 - k_{sy}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

これらを式(8)~(11)に代入すると、中立軸、偏心軸方向引張力、曲率は次式で表わせる。

$$(C_f - C_m)k_{sy}^2 - C_f(\alpha + 1)k_{sy} - (\alpha + 1 + \gamma')p'\beta' + \alpha p\beta_y = 0 \dots\dots\dots (15)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{sy}/bd\sigma_{c0} &= p\beta_y - k_{sy}C_f - p'\beta' \\ \phi_{sy} \cdot d &= \epsilon_{sy}/(1 - k_{sy}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

中立軸の算出は図式解法または繰返し試算法による。すなわち任意の k_{sy} を仮定し、式(14)より ϵ_s' , ϵ_c を求め、 $p'\beta'$ および式(12), (13)より C_f , C_m を算出し、式(15)に代入して k_{sy} について解くことを繰返す。

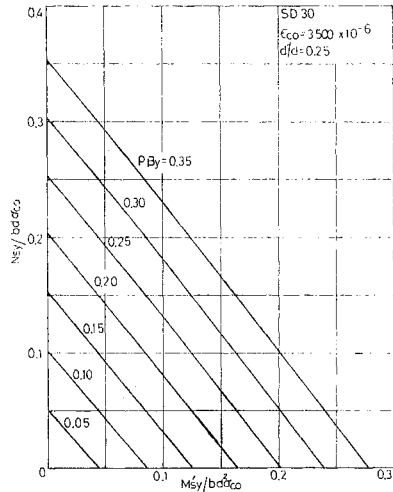


図-6 降伏時の軸方向引張力とモーメント

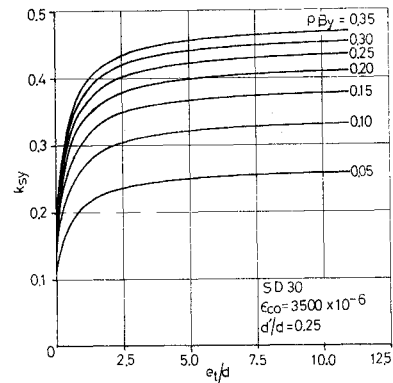


図-7 降伏時の中立軸係数

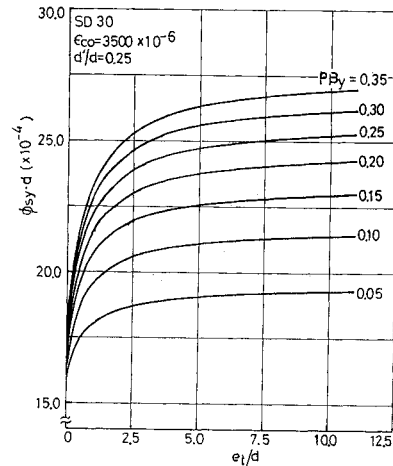


図-8 降伏時の曲率

(6) 部材の破壊

圧縮側コンクリートの破壊を部材の破壊、すなわちプラスチックヒンジの完了と定義する。

ひずみの条件は

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_{cu}, \quad \epsilon_s = (1 - k_{cu}) \epsilon_{cu} / k_{cu} \\ \epsilon_s' &= (k_{cu} - \gamma') \epsilon_{cu} / k_{cu} \end{aligned} \right\} \dots\dots (17)$$

これらを式(8)~(11)に代入すると、中立軸、偏心軸方向引張力、曲率は次式で表わせる。

(i) $\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}, 0 \leq \epsilon_s' \leq \epsilon_{sy}'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} (C_{fu} - C_{mu}) k_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1) k_{cu} \\ - (\alpha + 1 - \gamma') p' \beta_y \sigma_s' / \sigma_{sy}' + \alpha p \beta_y = 0 \\ N_{cu} / b d \sigma_{co} = p \beta_y - k_{cu} C_{fu} - p' \beta_y \sigma_s' / \sigma_{sy}' \\ \phi_{cu} \cdot d = \epsilon_{cu} / k_{cu} \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

(ii) $\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}, \epsilon_{sy}' \leq \epsilon_s' \leq \epsilon_{sh}'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} (C_{fu} - C_{mu}) k_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1) k_{cu} \\ - (\alpha + 1 - \gamma') p' \beta_y \sigma_s' + \alpha p \beta_y = 0 \\ N_{cu} / b d \sigma_{co} = p \beta_y - k_{cu} C_{fu} - p' \beta_y \sigma_s' \\ \phi_{cu} \cdot d = \epsilon_{cu} / k_{cu} \end{aligned} \right\} \dots\dots (19)$$

(iii) $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{smax}, 0 \leq \epsilon_s' \leq \epsilon_{sy}'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} (C_{fu} - C_{mu}) k_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1) k_{cu} \\ - (\alpha + 1 - \gamma') p' \beta_y \sigma_s' / \sigma_{sy}' \\ + \alpha p \beta_y \{1 + A \log_e(\epsilon_s / \epsilon_{sh})\} = 0 \\ N_{cu} / b d \sigma_{co} = p \beta_y \{1 + A \log_e(\epsilon_s / \epsilon_{sh})\} \\ - k_{cu} C_{fu} - p' \beta_y \sigma_s' / \sigma_{sy}' \\ \phi_{cu} \cdot d = \epsilon_{cu} / k_{cu} \end{aligned} \right\} \dots\dots (20)$$

(iv) $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{smax}, \epsilon_{sy}' \leq \epsilon_s' \leq \epsilon_{sh}'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} (C_{fu} - C_{mu}) k_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1) k_{cu} \\ - (\alpha + 1 - \gamma') p' \beta_y \sigma_s' \end{aligned} \right\}$$

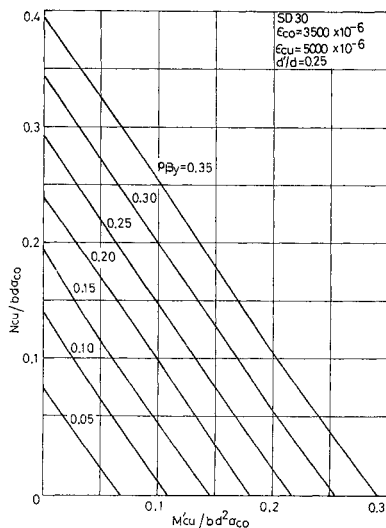


図-9 破壊時の軸方向引張力とモーメント

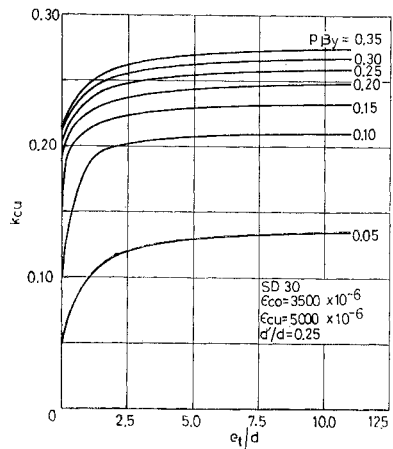


図-10 破壊時の中立軸係数

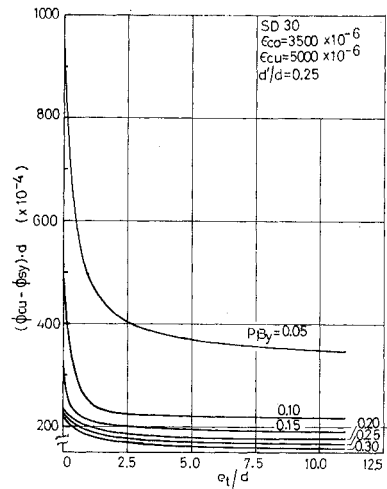


図-11 破壊時の曲率

$$\left. \begin{aligned} + \alpha p \beta_y \{1 + A \log_e(\epsilon_s / \epsilon_{sh})\} = 0 \\ N_{cu} / b d \sigma_{co} = p \beta_y \{1 + A \log_e(\epsilon_s / \epsilon_{sh})\} \\ - k_{cu} C_{fu} - p' \beta_y \sigma_s' \\ \phi_{cu} \cdot d = \epsilon_{cu} / k_{cu} \end{aligned} \right\} \dots\dots (21)$$

(7) 変形能力

変形能力については、部材破壊時の曲率、あるいは部材破壊時と降伏時との曲率比、曲率差などで表わす方法が考えられるが、本研究では部材破壊時と降伏時との曲率差で変形能力を表わすものとする。なおこのときのプラスチックヒンジの長さは4.(2).b)で述べるように有効高さに等しくとった。

(8) 数値計算

式(14)~(21)による数値計算例を図-6~14に示した。鉄筋はSD30を対象とし、用いたデータは次のとおりである。

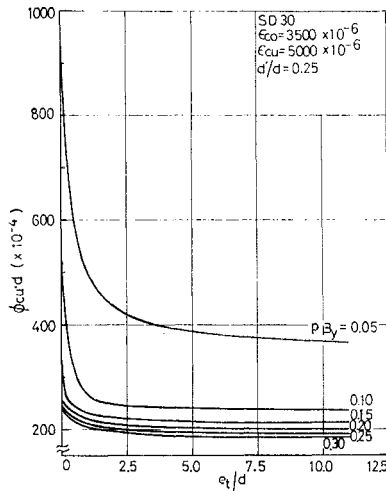


図-12 変形能力と偏心引張力偏心量の関係

$$\begin{aligned}
 p\beta_y &= p'\beta_y' \\
 \epsilon_{s_y} &= \epsilon_{s_y}' = 1\,430 \times 10^{-6} \\
 \epsilon_{s_h} &= \epsilon_{s_h}' \div 10 \quad \epsilon_{s_y} = 14\,300 \times 10^{-6} \\
 E_s &= E_s' = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \\
 \sigma_{s_y} &= \sigma_{s_y}' = 3\,000 \text{ kg/cm}^2 \\
 A &= 0.34 \\
 \epsilon_{s_{max}} &= 172\,030 \times 10^{-6} \\
 \epsilon_{c_0} &= 3\,500 \times 10^{-6} \\
 \epsilon_{c_u} &= 5\,000 \times 10^{-6} \\
 C_{f_u} &= 0.7950 \\
 C_{m_u} &= 0.4618 \\
 \gamma' &= d'/d = 0.25 \\
 \gamma &= h/d = 1.25
 \end{aligned}$$

このうち ϵ_{c_0} の値は、曲げ圧縮を受けるコンクリートの最大応力に対応するひずみが標準円柱供試体による最大応力に対応するひずみより大きい傾向にあることを考慮して定めた。

また C_f 、 C_m の値はそれぞれ $\epsilon_c/\epsilon_{c_0} \div 1.7$ 、 $\epsilon_c/\epsilon_{c_0} \div 1.4$ 近傍で最大値を示す。したがって、コンクリートの圧縮力および部材の抵抗モーメントがそれぞれ $\epsilon_c/\epsilon_{c_0} \div 1.7$ 、 $\epsilon_c/\epsilon_{c_0} \div 1.4$ で最大値になると考えられ、破壊強度を求めるには抵抗モーメントに注目するのが適当であると思われるので、 ϵ_{c_u} の値としては ϵ_{c_0} の値の約 1.4 倍の値とした。これらを用いて部材が降伏するときと破壊するときの軸方向引張力と引張側鉄筋図心軸に関するモーメントとの相関図を図-6、9 に、またおのおの場合の中立軸係数と曲率を図-7、8、10、11 に示した。

図-6、9 によると、降伏時および破壊時の軸方向引張力とモーメントとはほぼ直線の関係があることが認められる。また図-7、8、10、11 によれば、中立軸係数および曲率は e_t/d の値がおよそ 2.5~5.0 以上になる

とあまり変化がなくなること、すなわち、純曲げの状態に近づく傾向が見られる。

図-12 には破壊時と降伏時との曲率差で表わした変形能力を示した。これによると変形能力は e_t/d の増加により漸次低下し、純曲げの状態に近づき、 $p\beta_y \geq 0.2$ 、 $e_t/d \geq 2.5$ の範囲では純曲げの場合とほぼ等しくなる。また $p\beta_y \leq 0.2$ 、 $e_t/d \leq 2.5$ の範囲では変形能力の低下割合が大きくなることが認められる。

図-13、14 にはそれぞれ降伏時および破壊時の軸方向引張力が曲率に及ぼす影響（軸引張と曲げが同時に作用する場合）を示した。図-13 によると、降伏時の曲率は軸方向引張力の存在により純曲げの場合 ($N_{s_y}/bd\sigma_{c_0} = 0$) と比較してほぼ直線的に低下する傾向が認められる。

図-14 によれば、破壊時の曲率については $p\beta_y$ が約 0.2 以上であれば純曲げの場合とほとんど差がなく、0.2 より小さければ軸引張が大きくなると純曲げの場合の約

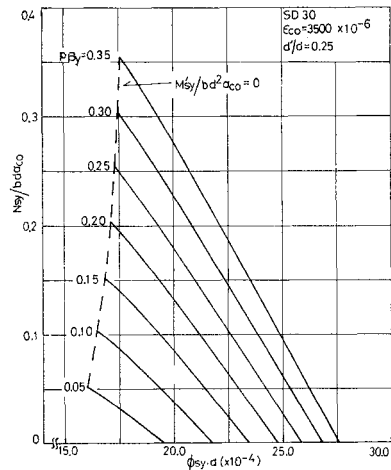


図-13 降伏時の偏心引張力と曲率の関係

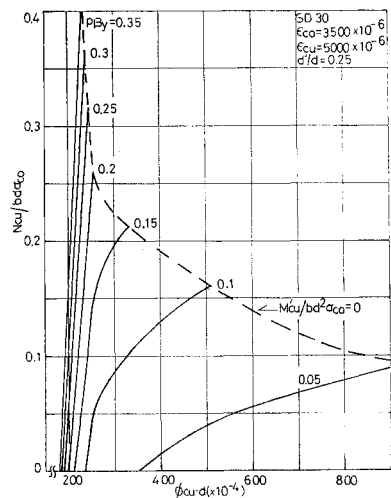


図-14 破壊時の偏心引張力と曲率の関係

1.5~2.5 倍に増加する傾向が認められる。

以上を総合すれば、荷重偏心量 e_{td} がおよそ 5 以上の範囲では、近似的に部材が純曲げの状態に近くなることが推定される。

4. 実験方法および結果

(1) 試験体

図-15 に示す試験体について実験を行った。実験は実験 I ~ III の 3 種類に分けられ、同一条件の試験体は 3 個で試験体総本数は 36 個である。以下に実験の概略を記す。

実験 I) 軸引張と曲げを受ける部材の挙動を調べ、端部補強法の適否の検討を目的とした。

実験 II) 荷重偏心量を一定とし、鉄筋量の相違による挙動を調べることを目的とした。

実験 III) 鉄筋量を一定とし、荷重偏心量の相違による挙動を調べることを目的とした。

コンクリートは $W:C:S=1:2:6$ (重量比) のモルタルとし、目標圧縮強度は 400 kg/cm^2 である。鉄筋

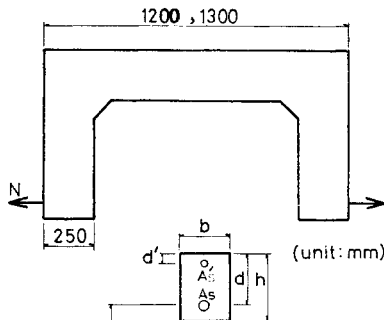


図-15 試験体の形状

は軸方向鉄筋、端部補強筋とも SD 30 を使用し、一部に SD 35, SR 30 を用いた。また、鉄筋の接点は溶接した。

ひずみの測定については、コンクリートはゲージ長さ 10 cm のコンタクトゲージを用い、鉄筋はゲージ長さ 5 mm のワイヤストレインゲージを使用した。測定箇所は実験 I の試験体では中央部に切欠きを設けたので中央断面の 1 か所とし、実験 II, III では中央断面と中央断面から両側に有効高さだけ離れた断面の計 3 か所とした。試験体の形状寸法は表-2 に示すとおりである。

(2) 実験結果

測定結果の要約と計算結果とを表-3, 4 に示した。このとき破壊時の曲率の測定値については破壊直前のひずみ測定が困難なものもあったため、最大耐力の 95% に相当する値とした。また破壊時のひびわれの発達状況を図-16 に示した。

試験体の破壊に至る挙動を記せば次のとおりであった。

(i) 部材隅角部にひびわれが発生する。隅角部の補強が十分である試験体では、この隅角部に生じたひびわれが原因となって破壊することはなかった。

(ii) 部材中央部に曲げ引張ひびわれが発生する。

(iii) ひびわれが進展し、他の部分にも曲げ引張ひびわれが発生する。

(iv) ひびわれの進展が停止する。

(v) さらに荷重を増加させると、ひびわれの先端を結ぶように部材軸方向へのひびわれの枝分かれが生ずる。この前後で曲率に大きな変化が見られ、この時点が実験における部材の降伏と考えられる。

(vi) 枝分かれしたひびわれが進展し、圧縮側コンクリートの破壊によって耐力能力を失う。

すべての試験体がほぼ上記のような挙動を示した。こ

表-2 試験体の形状

実験名	b (cm)	h (cm)	d (cm)	d' (cm)	e_t (cm)	e_t/d	A_s	A_s'	p	$p\beta_y$			
実験 I	1	12	15	12	3	28	2.33	SD 35	1 D 16 2 D 16	SR 30	2 R 9	0.0138	0.2115
	2											0.0275	0.4050
実験 II	1	15	20	16	4	24	1.50	SD 30	1 D 16 2 D 16 3 D 16 4 D 16 6 D 16	SD 30	2 D 10	0.0083	0.0769
	2											0.0165	0.1816
	3											0.0248	0.2261
	4											0.0330	0.3368
	5											0.0495	0.4737
実験 III	1	15	20	16	4	44	2.75	SD 30	2 D 16	SD 30	2 D 10	0.0165	0.2079
	2					64	4.00						0.1658
	3					84	5.25						0.2464
	4					104	6.50						0.1949

コンクリート; $W:C:S=1:2:3$ (重量比), モルタル, フロー値 195 ± 20

鉄筋; SD 35 ($\sigma_{sy}=3800 \text{ kg/cm}^2$, $A=0.32$, $\epsilon_{sy}=1800 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{sh}=19000 \times 10^{-6}$)

SD 30 ($\sigma_{sy}=3225 \text{ kg/cm}^2$, $A=0.34$, $\epsilon_{sy}=1430 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{sh}=14450 \times 10^{-6}$)

$\nu=0.85$

* R: Round Bar, D: Deformed Bar

れと測定値，計算値とを比較して次の2点を検討した．

a) 破壊時のコンクリートのひずみ (ϵ_{cu})

3.(6) で述べたように圧縮側コンクリートの上縁のひずみがある限界値 ϵ_{cu} になったとき部材が破壊するとした．実験によると最大荷重の95%に相当するひずみの測定値は荷重偏心量，鉄筋量にかかわらず，ほぼ4500

~5800 $\times 10^{-6}$ の範囲であった．この値は圧縮側に特別な補強が施されるとき，あるいは試験区間の長さ，試験体の形状などによっては変化するとも思われるが，本実験の範囲内では $\epsilon_{cu}=5000 \times 10^{-6}$ として計算することはほぼ妥当と考えられる．

b) ひずみの直線分布性

表-3 実験および計算結果 (強度)

項目	ひびわれ発生			降伏			破壊			
	$N_{cr}/bd\sigma_{tu}$			$N_{sy}/bd\sigma_{co}$			$N_{cu}/bd\sigma_{co}$			
	meas.	cal.	meas./cal.	meas.	cal.	meas./cal.	meas.	cal.	meas./cal.	
実験 I	1	0.0896	0.1753	0.51	0.0549	0.0563	0.98	0.0731	0.0603	1.21
	2	0.0351	0.2126	0.17	0.0998	0.1041	0.96	0.1327	0.1081	1.23
実験 II	1	0.1412	0.2150	0.66	0.0249	0.0289	0.86	0.0481	0.0417	1.15
	2	0.1340	0.2484	0.54	0.0550	0.0660	0.83	0.0967	0.0781	1.24
	3	0.0982	0.2687	0.37	0.0728	0.0814	0.89	0.0954	0.0929	1.03
	4	0.1640	0.3043	0.54	0.0945	0.1190	0.79	0.1330	0.1253	1.06
	5	0.0584	0.3594	0.16	0.1319	0.1640	0.80	0.1585*	0.1710	—
実験 III	1	0.1112	0.1629	0.68	0.0553	0.0486	1.14	0.0728	0.0546	1.33
	2	0.0712	0.1158	0.61	0.0312	0.0291	1.07	0.0409	0.0338	1.21
	3	0.0624	0.0976	0.64	0.0338	0.0333	1.02	0.0498	0.0358	1.39
	4	0.0376	0.0265	1.42	0.0244	0.0222	1.10	0.0310	0.0249	1.24

$\mu'=0.875$, $\nu=0.85$ * 隅角部破壊

表-4 実験および計算結果 (曲率)

項目	降伏			l_2/d	破壊			変形能力			
	$\phi_{sy} \cdot d (\times 10^{-6})$				$\phi_{cu} \cdot d (\times 10^{-6})$			$(\phi_{cu} - \phi_{sy}) \cdot d (\times 10^{-6})$			
	meas.	cal.	meas./cal.		meas.	cal.	meas./cal.	meas.	cal.	meas./cal.	
実験 I	1	4000	2880	1.39	0.88	36200	23510	1.54	32200	20630	1.56
	2	4200	3540	1.19	1.21	29000	15440	1.88	24800	11900	2.08
実験 II	1	2150	1940	1.11	0.76	7110	35970	0.20	4960	34030	0.15
	2	2760	2270	1.22	0.58	14170	23970	0.59	11410	21700	0.53
	3	2850	2420	1.18	0.82	16600	22730	0.73	13750	20310	0.68
	4	2780	2750	1.01	0.73	22130	19390	1.14	19350	16640	1.16
	5	3190	3190	1.00	—*	—*	15450	—	—	12260	—
実験 III	1	3180	2460	1.29	0.61	21170	21600	0.98	17990	19140	0.94
	2	2850	2380	1.20	0.70	20510	22860	0.90	17660	20480	0.86
	3	2550	2670	0.96	0.48	19030	19520	0.97	16480	16850	0.98
	4	3140	2530	1.24	0.35	19210	21010	0.91	16070	18480	0.87

* 隅角部破壊

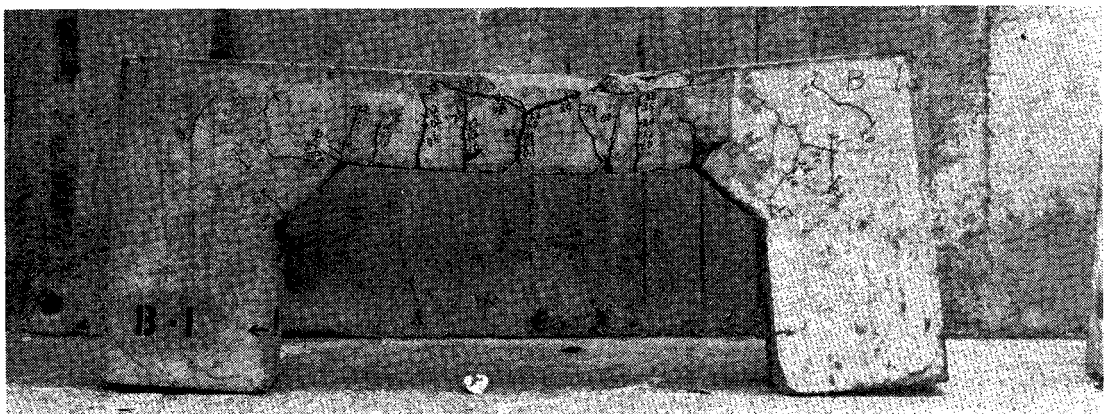


図-16 破壊時のひびわれ発達状況

破壊が生じた断面、または破壊の生じた断面にもっとも近い断面のひずみの測定結果（ゲージ長さは 10 cm）によるとほぼ直線分布することが認められた。また、圧縮破壊した部分の長さとは有効高さとの比 l_2/d は約 0.4~1.2 の範囲であった。したがって、ひずみは平均的にみれば直線分布すること、部材に形成されるプラスチックヒンジの長さを近似的に有効高さ d に等しくとることとは本実験の範囲内ではおおむね妥当であると考えられる。

ただし、平面保持則あるいは曲率の分布などを検討する際には、測定するゲージの長さ、試験体の形状、試験区間の長さ、ひびわれ間隔などがきわめて重要であると考慮される。本研究では試験体の形状、長さ、ひびわれ間隔などの変化による影響は検討できなかったが、一般性をもたせるためには、ヒンジ長さの理論的算定とともに今後補充検討すべき点である。

(3) つり合い状態のモデル化

降伏時に部材軸方向へのひびわれの枝分かれが生じ、この前後で曲率の大きな変化がみられた。また、このひびわれは鉄筋量または荷重偏心率の変化に無関係に発生し、その進展は急激であった。これは軸引張と曲げを受ける部材の特徴のひとつと考えられる。そこで、こののちのつり合いを引張側コンクリートを除去し、引張側鉄筋をタイとするタイドラーメンのようなつり合いにモデル化し、部材の破壊は圧縮側コンクリートの曲げ破壊によって起こると仮定して、式 (17)~(21) とは別に破壊強度を求める式を誘導し、その適用範囲を検討した。

図-17 の記号に従えば、引張側鉄筋の引張力 T は次式で表わせる。

$$T = \frac{\Delta N \cdot n h_1 \{ (h_1 + e_t) l / I_1 + h_1 (3 e_t + 2 h_1) / 3 I_2 \}}{2 \{ l / A_s + n h_1^2 (l / 2 I_1 + h_1 / 3 I_2) \}} \dots\dots\dots (22)$$

さらに、 $I_1 \ll I_2$ 、 $I_1/nA_s < h_1^2/2$ であるので T は近似的に、

$$T \doteq \Delta N (\alpha + 1 - k_1/2) / (1 - k_1/2) \dots\dots\dots (23)$$

と表わせる。このとき式 (23) による計算値と式 (22)

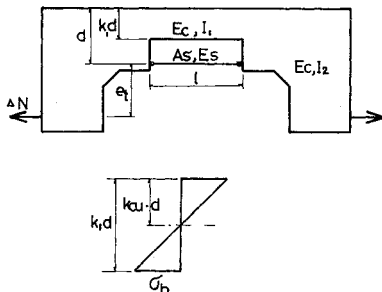


図-17 つり合い状態のモデル

による計算値との差は本試験体の形状寸法を用いた場合、約 3% であった。ここで圧縮側コンクリートは最終的に無筋部材となり、この部分の曲げ破壊によって部材の破壊が起こると仮定し、近似的に $k_{cu} \doteq k_1/2$ とすれば破壊荷重は次式で表わせる^{13),14)}。

$$\left. \begin{aligned} N_{cu} &= N_{sy} + \Delta N, \quad \phi_{cu} \cdot d = (\phi_{sy} + \Delta \phi) d \\ \text{ここで、} \\ N_{sy}, \phi_{sy} &: \text{式 (16)} \\ \Delta N &= b d \alpha_b k_1 (1 - k_1/2) / 4 \alpha \\ k_1 &= 2 \{ (4 \alpha + 3) - \sqrt{(4 \alpha + 3)^2 - 9(\alpha + 1)} \} / 3 \\ \Delta \phi \cdot d &= 2 \epsilon_b / k_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

付加強度 ΔN は偏心距離 e_t によって変化し、 e_t が大きくなると、すなわち純曲げに近づけば 0 に近づく。ここで、式 (17)~(21) と式 (24) とはいずれも破壊強度を算定する式であるが、つり合いの変化が顕著に起きているとすれば、両式から計算される破壊強度のいずれか小さい荷重で部材は破壊すると仮定して適用範囲を定めた^{13),14)}。式 (17)~(21) および式 (24) から計算される破壊強度の数値計算例を図-18 に示した。このとき $\sigma_b/\sigma_{co} = 1/6$ とした。

図-18 によれば式 (24) から計算される破壊強度が式 (17)~(21) から計算される破壊強度より小さくなる範囲は、鉄筋量によって異なる。本計算例では次の範囲であった。

$$\left. \begin{aligned} p\beta_y = 0.3 \text{ のとき} & \quad 0.12 \leq \alpha \leq 0.77 \\ p\beta_y = 0.4 \text{ のとき} & \quad 0.07 \leq \alpha \leq 0.45 \\ p\beta_y = 0.5 \text{ のとき} & \quad 0.05 \leq \alpha \leq 0.30 \\ p\beta_y = 0.6 \text{ のとき} & \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.23 \end{aligned} \right\} \dots\dots (25)$$

$p\beta_y \leq 0.3$ のときは両式の差はほとんどなく、差が比較的大きくなるのは $p\beta_y \geq 0.4$ の範囲である。ここで $p\beta_y \geq 0.4$ の鉄筋量は実際には使用されることはないと思われるので、実用上は純曲げの理論に軸方向引張力の項を考慮した式 (17)~(21) で十分であると考えられる。

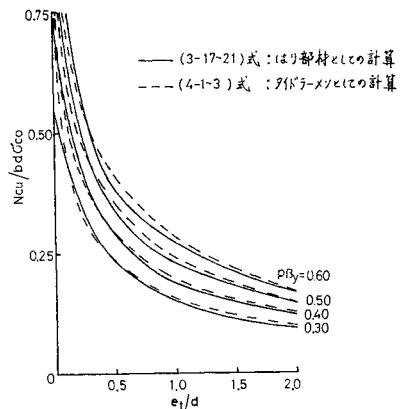


図-18 破壊強度の比較

5. 設計方法

(1) 設計の方針

理論解析, 実験結果などを総合して次の点を設計方針とする。

- (i) 断面は部材の降伏強度を基準に設計するものとする。
- (ii) 断面は複鉄筋断面を原則とする。
- (iii) 鉄筋量はつり合い鉄筋比以下とする。

降伏から破壊までは強度上, 若干の余裕があるが, この余裕は一般に小さく, 降伏時には曲げ引張りひびわれが部材軸方向へ枝分かれし, この後のひびわれの進展は急激であるため, 降伏強度を基準にとるのが適当と思われる。

さらに構造部材で, 軸引張と曲げを受ける部材は地震時のラーメン柱材のように交互に水平力を受け, 曲げは正負に作用する場合が多いと考えられる。また軸力が引張であることから部材は複鉄筋断面にするのが適当であり, 引張側, 圧縮側等量配筋が望ましいと思われる。

また, 鉄筋量はつり合い鉄筋比以下を原則とするが, 実験において $p\beta_y \approx 0.47$ とした 3 個の試験体はつり合い鉄筋比以下であったが, いずれの試験体もプラスチックヒンジが十分な変形能力を示すことがなく, 隅角部から発達したひびわれが原因となって破壊した。これについては, 隅角部の補強法にも問題があったとも思われるが, つり合い鉄筋比以下であっても過大な鉄筋量は望ましくないと考えられる。ここで, 鉄筋量の制限に関する一例を示せば, たとえば 4.(3) で述べたように, 近似的に $p\beta_y \geq 0.4$ の鉄筋量では強度と変形能力が, はり部材として予想される強度と変形能力よりも低下する偏心引張力の偏心量の範囲が存在する。したがって, 使用する鉄筋およびコンクリートの品質にもよるが, 鉄筋量は本研究の例では $p\beta_y=0.40$ 程度以下にするのが適当と思われる。

また本研究の部材降伏時の式を用いて断面計算を行う場合, 最も時間を費すのは中立軸の算定であるが, これは図表化しておくことができる。図-19 および図-20 は $e_t/d=0 \sim 10.0$ の場合について, $p\beta_y$ と k_{sy} および $p\beta_y$ と $N_{sy}/bd\sigma_{co}$ の関係を図示したものである。このとき鉄筋は SD30 を対象とし, $\epsilon_{sy}=\epsilon_{sy}'=1.430 \times 10^{-6}$, $E_s=E_s'=2.1 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$, コンクリートは $\epsilon_{co}=3.500 \times 10^{-6}$ また $r'=0.25$, $r=1.25$ とした。

降伏強度計算式 (16) の信頼性は実験結果をもとに検討し, これにもとづいて強度を低減する係数を定めることで評価するものとする。すなわち, 降伏強度について

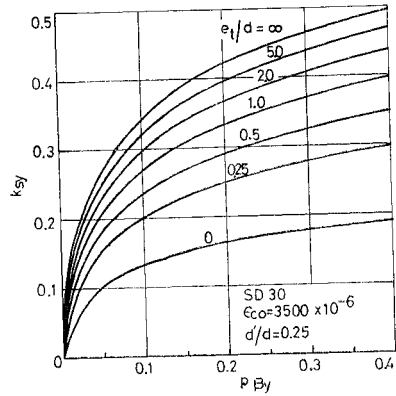


図-19 $k_{sy}-p\beta_y$

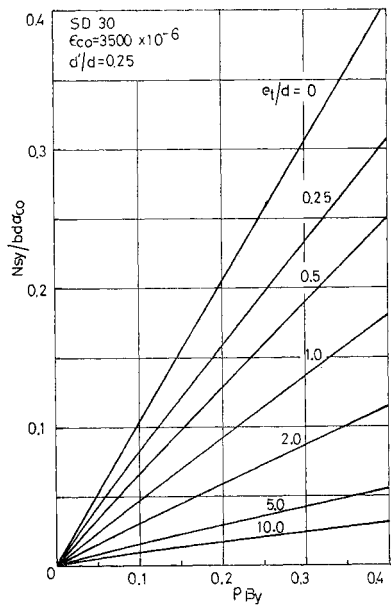


図-20 $N_{sy}/bd\sigma_{co}-p\beta_y$

の測定値と計算値との比をとり, 任意の危険率のもとでの計算値の信頼区間を求め, 信頼区間の下限値を強度低減係数と定義するものとする。測定値と計算値との比を m とすると, 表-3 より得られる降伏強度計算値の信頼区間は以下のとおりである。

危険率 1% : $0.83 < m < 1.07$

危険率 2% : $0.85 < m < 1.05$

危険率 5% : $0.87 < m < 1.03$

ただし, この値は試験体形状が変化した場合, あるいは試験体の本数など実験条件によって変わることには注意する必要がある。ここで危険率 2% を採用すれば, その信頼区間の下限値 $\eta=0.85$ が強度低減係数となる。設計に際しては荷重をこの係数で除して式 (14)~(16) または図-19, 20 を用いればよい。

(2) 設計方法

(1) で述べた方針に従い設計手順を記せば、次のとおりである。荷重 N, M が作用するとき、材料について σ_{co}, σ_{sy} が既知であるか仮定できる場合に、部材断面を仮定して、必要鉄筋量を求める。

(i) M/N を計算し、 d, d' を仮定して次式により α を求める。

$$\alpha = [M/N - \{(d-d')/2\}] / d \dots \dots \dots (26)$$

(ii) $N_{sy} = N/\eta$ として、これを設計に用いる荷重とする。

(iii) b を仮定し、 $N_{sy}/bd\sigma_{co}$ を計算する。

(iv) たとえば図—19, 20 より $k_{sy}, p\beta_y$ を求める。計算による場合は $N_{sy}/bd\sigma_{co}$ を計算したのち、 $p\beta_y$ を仮定し、 $p\beta_y = p'\beta_y'$ として式 (14)~(16) の演算を繰返す。このとき鉄筋量は次のようになる。

$$A_s = A_s' = p\beta_y bd\sigma_{co}/\sigma_{sy} \dots \dots \dots (27)$$

なお、破壊に対する強度上の余裕を確認するとき、あるいは変形量の検討が必要などについては、式 (14)~(16) とともに式 (17)~(21) を用いることができる。

6. 結 論

軸方向引張力と曲げモーメントとを受ける鉄筋コンクリート部材について理論および実験の両面から解析し、これにもとづいてひとつの設計法を提案した。対象としたのは明確な降伏点をもつ鉄筋を用い、つり合い鉄筋比以下の配筋をした長方形断面部材であり、偏心引張力(軸引張と曲げとは同時に作用)は引張側鉄筋の外側に作用する場合である。結果を要約すれば次のとおりであった。

(1) ひびわれ発生強度については引張側コンクリートの塑性を考慮し、式 (5), (7) のような近似式を導いた。

(2) ひびわれ発生後については材料の応力とひずみの関係を式 (3), (4) のように仮定し、強度と曲率を求めるための一般式が式 (8)~(13) のように導かれた。

(3) 部材の降伏強度および曲率の算定には式 (8)~(13) より導かれた式 (14)~(16) を用いる。本実験の範囲内では、これらの式を用いた場合の降伏強度計算値の信頼区間は、測定値の計算値に対する比を m とすると、危険率を 2% にとった場合 $0.85 < m < 1.05$ であった。

(4) 部材の破壊強度および曲率の算定には式 (8)~(13) より導かれた式 (17)~(21) と、つり合い状態をモデル化した式 (22)~(24) とを使用する。式 (22)~(24) は、実験において部材降伏時にひびわれの部材軸方向への枝分かれが生じ、この前後で曲率に大きな変化がみら

れた事実注目して導かれたものである。両式の適用範囲は、部材が両式で計算される破壊強度のうちいずれか小さい方で破壊すると仮定して定めた。その範囲は鉄筋量によって異なり、 $p\beta_y \leq 0.3$ のときは両式の差はほとんどなく、差が比較的大きくなるのは $p\beta_y \geq 0.4$ の範囲であった。

5) したがって、降伏および破壊時の強度と曲率については、 $p\beta_y \geq 0.4$ の範囲を除き、すなわち実用範囲内では純曲げに関する理論に軸方向引張力の項を入れることで評価できると考えられる。

6) 設計方法については変形性状、ひびわれの発達性状が大きく変化する部材降伏時を対象とするのが適当であると判断されたので、部材の降伏強度をもとにして設計する方法を提案し、断面計算に用いる図の一例を図—19, 20 に示した。設計の際の強度に関する低減係数は計算値の信頼区間の下限値をとることによって定めた。本研究の場合、危険率を 2% とすると、その値は $\eta = 0.85$ であった。

謝 辞：本研究を進めるにあたっては、前早稲田大学教授 故 神山 一博士の御指導を頂いた。同博士ならびに御協力を頂いた神山研究室卒業生の方々に厚くお礼申し上げます。

記 号

- N : 軸方向引張力
- M : 曲げモーメント
- M' : 引張側鉄筋図心軸に関するモーメント
- C : コンクリートの全圧縮力
- C' : 鉄筋の全圧縮力
- T : 鉄筋の全引張力
- k : 中立軸係数
- ϕ : 断面の曲率
- A_s : 引張側鉄筋断面積
- A_s' : 圧縮側鉄筋断面積
- b : 断面の幅
- h : 断面の高さ
- d : 有効高さ
- d' : 圧縮側表面から圧縮側鉄筋図心までの距離
- e_t : 引張側鉄筋図心から外側へ測った軸方向引張力作用点までの距離
- y_0 : コンクリートの全圧縮力の作用点から中立軸までの距離
- σ_c : コンクリートの圧縮応力
- σ_c' : 標準円柱供試体によるコンクリートの圧縮強度
- σ_{co} : コンクリートの最大圧縮応力

σ_b : コンクリートの曲げ強度
 σ_{tu} : コンクリートの引張強度
 ϵ_c : コンクリートの圧縮ひずみ
 ϵ_{c0} : σ_{c0} に対するコンクリートのひずみ
 ϵ_{cu} : コンクリートが圧縮破壊するときのひずみ
 ϵ_{tu} : コンクリートの引張破壊ひずみ
 ϵ_b : コンクリートの曲げ破壊ひずみ
 σ_s : 鉄筋の引張応力
 σ_s' : 鉄筋の圧縮応力
 σ_{sy} : 鉄筋の引張降伏点応力
 σ_{sy}' : 鉄筋の圧縮降伏点応力
 σ_{su} : 鉄筋の引張強度
 σ_{su}' : 鉄筋の圧縮強度
 ϵ_s : 鉄筋の引張ひずみ
 ϵ_s' : 鉄筋の圧縮ひずみ
 ϵ_{sy} : 鉄筋の引張降伏点ひずみ
 ϵ_{sy}' : 鉄筋の圧縮降伏点ひずみ
 ϵ_{sh} : 鉄筋の引張ひずみ硬化点ひずみ
 ϵ_{sh}' : 鉄筋の圧縮ひずみ硬化点ひずみ
 ϵ_{smax} : σ_{su} に対する鉄筋の引張ひずみ
 E_s : 鉄筋の引張ヤング係数
 E_s' : 鉄筋の圧縮ヤング係数
 A : 鉄筋の品質による実験定数
 μ' : コンクリートの引張塑性域係数
 C_f : 中立軸に関するコンクリートの圧縮力係数
 C_m : 中立軸に関するコンクリートのモーメント係数
 C_{fu}, C_{mu} : 部材が破壊するときのコンクリートのそれぞれ圧縮力係数, モーメント係数
 l_2 : 圧縮破壊領域の長さ
 η : 強度低減係数
 k_1 : つり合い状態をモデル化したときの圧縮部係数
 I_1, I_2 : コンクリートの断面二次モーメント
 h_1 : つり合い状態をモデル化したときの部材の高さ
 l : つり合い状態をモデル化したときの鉄筋の長さ
 dN : つり合い状態をモデル化したときの付加強度
 n : 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

4ϕ : つり合い状態をモデル化したときの付加曲率
 cr, sy, cu : それぞれひびわれ発生, 降伏, 破壊を表わす

$$\gamma = h/d, \quad \gamma' = d'/d$$

$$p = A_s/bd, \quad p' = A_s'/bd$$

$$\beta = \sigma_s/\sigma_{c0}, \quad \beta' = \sigma_s'/\sigma_{c0}$$

$$\beta_y = \sigma_{sy}/\sigma_{c0}, \quad \beta_y' = \sigma_{sy}'/\sigma_{c0}$$

$$a = e_t/d, \quad \nu = \sigma_{c0}/\sigma_c'$$

参 考 文 献

- Whitney, C.S. and E. Cohen : Guide for ultimate strength design of reinforced concrete, Jour. of ACI., Vol. 28, No. 5, pp. 469~470, 1956.
- Dunham, C.W. : Advanced Reinforced Concrete, Mc Graw-Hill Book Co., New York, pp. 44~50, 1964.
- 望月 洵・宮沢健二 : 軸方向張力を受ける RC 部材の剪断耐力に関する研究, 建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 1391~1393, 1973.
- 望月 洵・宮沢健二 : 正負軸方向力を受ける RC 部材の曲げ剪断キレツ特性に関する研究, 建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 1333~1334, 1974.
- Harris, E.C. : Design of members subject to combined bending and tension, Jour. of ACI., Vol. 72, No. 9, pp. 491~495, 1975.
- ACI Committee 318 : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71), American Concrete Institute, Detroit, pp. 318-37, Part 2, Chapter 11, 1974.
- CEB-FIP : International recommendations for the design and construction of concrete structures, R 44. 123, 1970.
- 日本建築学会編 : 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 145, 1970.
- 日本建築学会編 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 157~163, 1971.
- 神山 一 : 鉄筋コンクリートはりのプラスチックヒンジの特性, 第 26 回土木学会年次学術講演会講演集, pp. 151~154, 1971.
- Sargin, M. : Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections, University of Waterloo, Canada, pp. 27, 1971.
- 神山 一 : プレテンションによるプレストレストコンクリートのひびわれ強度, 早稲田大学理工学研究所報告, 第 4 輯, 1956.
- 神山 一, 川口直能 : 軸方向引張力と曲げモーメントとを受ける鉄筋コンクリート部材の破壊強度について, 第 29 回土木学会年次学術講演会講演集, pp. 280~281, 1974.
- 神山 一, 川口直能 : 軸力と曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の強度と変形, 第 30 回土木学会年次学術講演会講演集, pp. 255~257, 1975.

(1978. 1. 17・受付)