

早稲田大学理工学部

正員 神山 一

学生員 〇川口直能

1. 要旨

この報告は軸方向引張力と曲げモーメントを受ける単鉄筋長方形断面鉄筋コンクリート部材の強度および変形の計算式を誘導する仮定と吟味することを目的とした基礎的実験である。

引張鉄筋降伏後、中立軸近傍に縦われを生じ、破壊近傍ではフリ合い機構に変化が起こって、重合の法則を用いた曲げ引張理論は適用できなくなる。この報告では引張鉄筋降伏までをばりとして計算し、破壊についてはフリ合い機構の変化に注目して、強度計算の方法を検討した。

2. 記号

N : 軸方向引張力	ϵ_s : 鉄筋の引張りひずみ度
C : コンクリートにおこる全圧縮応力	ϵ_{sy} : 鉄筋の降伏点ひずみ度
T : 鉄筋におこる全引張応力	ϵ_{sh} : 鉄筋のひずみ硬化点ひずみ度
σ_c : コンクリートの圧縮応力度	E_s : 鉄筋のヤング係数
σ_{co} : コンクリートの最大圧縮応力度	M : 抵抗モーメント
σ_c : コンクリートの標準円筒供試体 による圧縮強度	K : 中立軸係数
σ_{cu} : コンクリートの引張強度	K_1 : 圧縮縁から水平ひびわれまでの高さの有効高さ に対する比
σ_{cu} : コンクリートの曲げ強度	ϕ : 断面の曲率
σ_s : 鉄筋の引張応力度	b : 断面の幅
σ_{sy} : 鉄筋の降伏点応力度	d : 有効高さ
ϵ_c : コンクリートの圧縮ひずみ度	ϵ_t : 鉄筋圆心から軸方向引張力作用点までの距離
ϵ_{co} : σ_{co} に相当するひずみ度	A_s : 鉄筋の断面積
ϵ_{cu} : コンクリートが圧縮破壊するときの ひずみ度	$\eta : \sigma_c/\sigma_{co}, \xi : \epsilon_c/\epsilon_{co}, C_f : \int_0^{\xi} \eta d\xi, C_m : \int_0^{\xi} \eta \xi d\xi$
	$\alpha : \epsilon_t/d, \rho : A_s/bd, \beta : \sigma_s/\sigma_{co}, \beta_y : \sigma_{sy}/\sigma_{co}$

3. コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線の仮定

コンクリートの応力-ひずみ曲線は指数関数を用いて表わす。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \sigma_c/\sigma_{co} = \epsilon_c/\epsilon_{co} \cdot e^{1-\epsilon_c/\epsilon_{co}} = \xi e^{1-\xi} \\ C_f &= \int_0^{\xi} \eta d\xi = \epsilon_{co}/\epsilon_c \cdot e \{ 1 - (\epsilon_c/\epsilon_{co} + 1) e^{-\epsilon_c/\epsilon_{co}} \} \\ C_m &= \int_0^{\xi} \eta \xi d\xi = (\epsilon_{co}/\epsilon_c)^2 \cdot e \{ 2 - \{ (\epsilon_c/\epsilon_{co} + 1)^2 + 1 \} e^{-\epsilon_c/\epsilon_{co}} \} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

軟鋼の応力-ひずみ曲線は次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} &: \sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \\ \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} &: \sigma_s = \sigma_{sy} \\ \epsilon_s \geq \epsilon_{sh} &: \sigma_s = \sigma_{sy} (1 + A \log_e \epsilon_s/\epsilon_{sh}), \quad SD35 \text{ 等 } A = 0.32 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

4. 強度および曲率の計算

中央断面でのフリ合いを Fig1 のように表わせば、圧縮力 C と引張力 T は次式で表わせる。

$$C = bkd\sigma_c C_f, \quad T = A_s \sigma_s \quad (3)$$

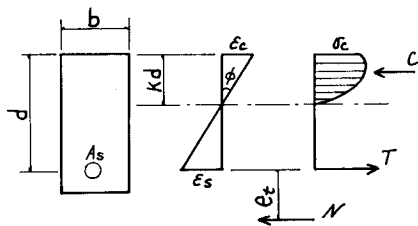


Fig1 断面のフリ合い

軸方向引張力作用点に関するモーメントの総和を 0 とおくと中立軸の位置を求める式は、

$$(C_f - C_m)K^2 - C_f(\alpha + 1)K + \alpha p \beta = 0 \quad (4)$$

となり、抵抗モーメントおよび曲率はそれぞれ次式で表わせる。

$$M/bd^2\sigma_c = C_m K^2 + p\beta(1-K), \quad \phi d = \epsilon_s + \epsilon_c \quad (5)$$

これらの式に引張鉄筋降伏時およびコンクリート圧縮破壊時のひずみ条件と適用する。

i) 引張鉄筋の降伏, ひずみの条件: $\epsilon_s = \epsilon_{sy}, \epsilon_c = \epsilon_{sy} \cdot K_{sy} / (1 - K_{sy}) < \epsilon_{cu}$ (6)

このとき, $(C_f - C_m)K_{sy}^2 - C_f(\alpha + 1)K_{sy} + \alpha p \beta_y = 0$ (7)

$$M_{sy}/bd^2\sigma_c = C_m K_{sy}^2 + p\beta_y(1 - K_{sy}), \quad \phi_{sy}d = \epsilon_{sy}/(1 - K_{sy})$$

ii) コンクリートの圧壊破壊, ひずみの条件: $\epsilon_c = \epsilon_{cu}, \epsilon_s = \epsilon_{cu} \cdot (1 - K_{cu}) / K_{cu}$ (8)

$\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$ のとき: $(C_{fu} - C_{mu})K_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1)K_{cu} + \alpha p \beta_y = 0$ (9)

$$M_{cu}/bd^2\sigma_c = C_{mu}K_{cu}^2 + p\beta_y(1 - K_{cu}), \quad \phi_{cu}d = \epsilon_{cu}/K_{cu}$$

$\epsilon_s \geq \epsilon_{sh}$ のとき: $(C_{fu} - C_{mu})K_{cu}^2 - C_{fu}(\alpha + 1)K_{cu} + \alpha p \beta_y(1 + A \log_e \epsilon_s / \epsilon_{sh})$ (10)

$$M_{cu}/bd^2\sigma_c = C_{mu}K_{cu}^2 + p\beta_y \{1 + A \log_e \epsilon_{cu}(1 - K_{cu}) / (\epsilon_{sh} \cdot K_{cu})\} \cdot (1 - K_{cu}), \quad \phi_{cu}d = \epsilon_{cu}/K_{cu}$$

ここに $C_f = C_{fu} = 2.7991, C_m = C_{mu} = 0.605$

5. 実験結果との比較

Fig2 に示す供試体を各3個作成し、偏心引張力を加えて実験を行なった。材料諸元および破壊するときの主要ひびわれ状況とそれぞれ表-1, Fig4 に示す。さらに部材中央部で破壊が生じた A, B 供試体の測定結果と計算結果との比較を表-2, 3 に示す。

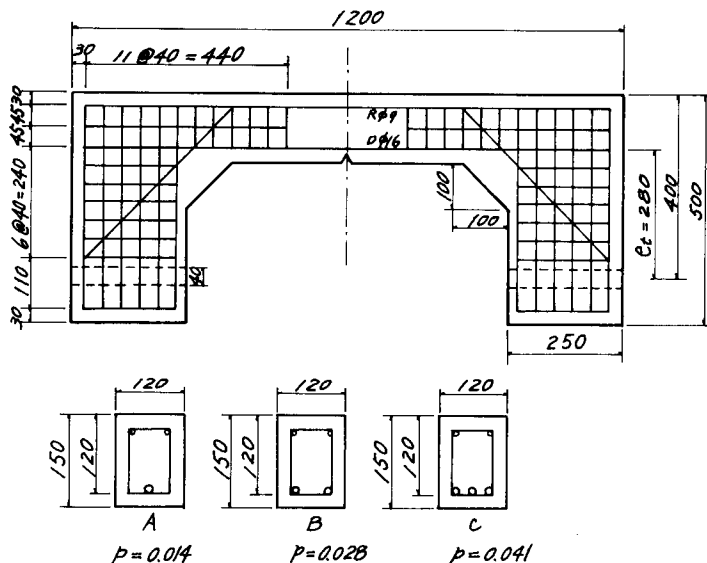


Fig2 供試体諸元

表-1 材料諸元

	σ_c' (kg/cm^2)	σ_{fu} (kg/cm^2)	σ_{bu} (kg/cm^2)
A	290	15.5	29.0
B	303	25.7	29.5
C	317	21.8	30.3

W:C:S = 1:2:6 (モルタル)

70-値 102

鉄筋 SD35

6. フリ合い機構の一モデル化

実験によれば引張鉄筋降伏後、曲げ引張ひびわれ間で部材軸方向に水平なひびわれが生じ、その先端の上方のコンクリートの圧縮破壊によって破壊が起こる。そこで水平ひびわれが生じた部分の引張側コンクリートを無視し、鉄筋をタイとしたタイドラーメンのようにフリ合い機構をモデル化して強度を求める。Fig.3のように記号を定めれば、圧縮力 C と引張力 T は次のように表わせる。

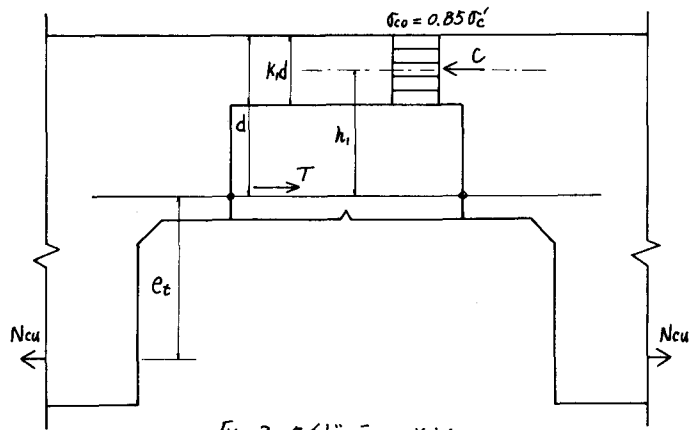


Fig.3 タイド ラーメン

$$C = N_{cu} - k_1 \cdot N_{cu}(e_t + h_1)/h_1(k_1 + k_2) \\ \approx N_{cu} \cdot e_t/h_1$$

$$T = k_1 \cdot N_{cu}(e_t + h_1)/h_1(k_1 + k_2) \\ \approx N_{cu}(e_t + h_1)/h_1 \quad (11)$$

ここに k_1, k_2 はそれぞれ垂直部材、水平部材の剛比。

ここで、コンクリートの応力度の分布を長方形とし、鉄筋は降伏領域にあるものとすれば、

$$C = b k_1 d \sigma_c, \quad T = A_s \sigma_y \quad (12)$$

(11)式に代入すると、

$$k_1 = (\alpha + 1) \pm \sqrt{(\alpha + 1)^2 - 2\alpha\rho\beta_y} \quad (13)$$

したがって、(13)式から k_1 を決定すれば(11)式より N_{cu} が求まる。このとき $h_1 = (1 - k_1/2)d$ 。

以上の計算結果と測定結果との比較を表-3に示す。

7. 結論

以上を要約すれば以下の通りである。

- 引張鉄筋が降伏するまでは曲げひびわれが発達する。したがって普通に用いられる曲げ強度および曲率の計算式が適用できる。
- 引張鉄筋降伏後には曲げひびわれ先端を結ぶように部材軸方向のひびわれが発達する。部材軸方向のひびわれは、ほぼ中立軸に沿って発達し、鉄筋コンクリートはりには見られないものである。これは軸方向引張力と曲げを受ける部材固有のひびわれと考えられる。
- 破壊は部材軸方向に発達したひびわれの圧縮側部分のコンクリートの圧縮破壊によって起こる。この時のひずみ分布は鉄筋のひずみ測定値などから判断して、平面保持の法則が成立しないことが明らかになった。そこで、フリ合い状態をタイドラーメンとするモデルを仮想して強度計算を試みた。しかし、この計算式にはひずみの適合条件が考慮されておらず、経験式の範囲にある。数少ない試験ではあるが、これによって軸方向引張力と曲げを受ける部材の破壊状態の特徴をとらえることができた。破壊に近いフリ合い状態は内部不静定となるので、ひずみ適合条件をどのように満足させるかが問題である。これを今後の課題として研究を進める。

表-2 実験結果との比較 (降伏強度)

供試体 項目	K_{sy}			$N_{sy} (t)$			$\rho_{syd} (x10^{-6})$		
	計算	測定	測定/計算	計算	測定	測定/計算	計算	測定	測定/計算
A	0.404	0.337	0.83	1.86	1.29	0.69	2800	2520	0.90
B	0.534	0.431	0.81	3.54	3.33	0.94	3580	2930	0.82

表-3 実験結果との比較 (破壊強度)

最終状態 項目	K_{cu} または K_f			$N_{cu} (t)$		
	計算	測定	測定/計算	計算	測定	測定/計算
はりの計算						
A	0.190	0.169	0.89	2.13	2.80	1.31
B	0.342	0.171	0.50	3.72	4.93	1.33
91ドレーン との計算						
A	0.152	0.267	1.76	1.81	2.80	1.55
B	0.284	0.308	1.08	3.86	4.93	1.28
実験式 (91ドレーン)						
A	—	—	—	3.52	2.80	0.80
B	—	—	—	4.15	4.93	1.19

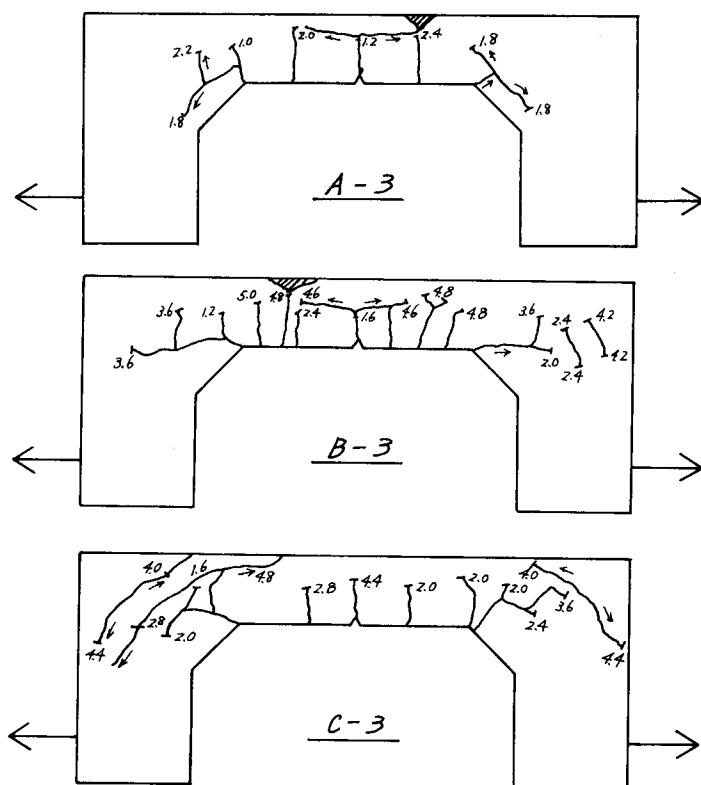


Fig.4 破壊時のびわかれ状況

参考文献

神山 一 「鉄筋コンクリートはりの7°プラスチックヒンジの特性」
土木学会年次学術講演会講演集 昭和46年10月