

宇都宮大学

オリエンタル建設

宇都宮大学

学生員

正会員

正会員

平野 俊一

手塚 正道

佐藤 良一

1. はじめに

曲げを受ける鉄筋コンクリート部材の変形とひび割れの解析法はこれまでいくつか行われているが、付着すべり関係を忠実に取り入れた方法はほとんどないと思われる。そこで、筆者らはコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線の非線形性と付着応力-すべり関係を考慮したはり部材の材料弾性域から終局破壊までを統一的に評価できる解析法を構築することを目標とし、その第一歩としてコンクリートと付着応力-すべり関係の非線形性を考慮した方法を示す。

2. 解析のための基本仮定

純曲げを受けるRCはり部材の解析を行うにあたって、次の仮定を設ける。

[1] ひび割れ間要素はひびわれ間中央断面に対して対称であり、かつすべてのひび割れは等間隔に発生する。[2] ひび割れ断面でコンクリートは引張応力を負担しない。[3] 圧縮応力域のコンクリートひずみと引張鉄筋ひずみとの間には平面保持の仮定が成立する。[4] ひび割れ間の引張応力域のコンクリートひずみは中立軸からの距離に比例する。[5] 引張部コンクリートは弾性で、ひび割れは引張縁のコンクリート応力が引張強度に達した時に発生する。

3. 材料特性

解析に用いた圧縮域のコンクリートの応力-ひずみ曲線を図1に示す。中立軸からの距離 z の位置におけるコンクリートの応力 $\sigma_c(z)$ は同位置のコンクリートのひずみ $\epsilon_c(z)$ により、以下の3通りに分けられる。

$$0 \leq \epsilon_c(z) \leq \epsilon_{c1} \quad \text{のとき} \quad \sigma_c(z) = E_{c1} \epsilon_c(z) \quad (1)$$

$$\epsilon_{c1} \leq \epsilon_c(z) \leq \epsilon_{c2} \quad \text{のとき} \quad \sigma_c(z) = E_{c2} \{\epsilon_c(z) - \epsilon_{c1}\} + F_{c1} \quad (2)$$

$$\epsilon_{c2} \leq \epsilon_c(z) \leq \epsilon_{cu} \quad \text{のとき} \quad \sigma_c(z) = E_{c3} \{\epsilon_c(z) - \epsilon_{c2}\} + F_{c2} \quad (3)$$

$\epsilon_{c2} \leq \epsilon_{cc} \leq \epsilon_{cu}$ のときのひずみ分布と応力の分布をを図2に示す。なお、全断面有効領域では $\epsilon_s = \epsilon_t$ となる。

4. 基礎方程式

任意断面の軸方向力と曲げモーメントの釣り合いより式(4)、(5)を得る。

$$0 = C_c - C_s - T_s \quad (4)$$

$$M = M_c + M_s + M_{ct} + M_s \quad (5)$$

C_c, C_s, T_s はそれぞれ圧縮域コンクリート、引張域コンクリート、引張鉄筋の軸方向の合力であり、 M, M_c, M_{ct}, M_s はそれぞれ外力、圧縮域コンクリート、引張域コンクリート、引張鉄筋の中立軸回りのモーメントである。

式(4)、(5)中の各合力、および各モーメントは y および ϵ_s と ϵ_t の関数として式(6)～(11)のように表せる。

$$C_c = Q_{c1}(y) + Q_{c2}(y) \epsilon_s + Q_{c3}(y) / \epsilon_s \quad (6)$$

$$C_s = Q_{cs}(y) \epsilon_t \quad (7)$$

$$T_s = Q_{ts} \epsilon_s \quad (8)$$

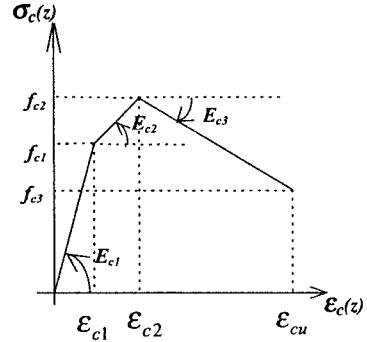


図1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

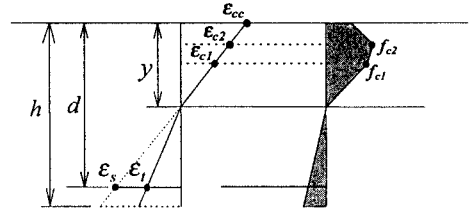


図2 ひずみと応力分布

$$M_c = P_{c1}(y) + P_{c2}(y) \epsilon_s + P_{c3}(y) / \epsilon_s^2 \quad (9)$$

$$M_{ct} = P_{ct}(y) \epsilon_t \quad (10)$$

$$M_s = P_{ts}(y) \epsilon_s \quad (11)$$

$Q_{c1}(y), Q_{c2}(y), Q_{c3}(y), Q_{cs}(y), P_{c1}(y), P_{c2}(y), P_{c3}(y), P_{ct}(y), P_{ts}(y)$ は y の関数であり、 Q_{ts} は定数である。

式(4)、(5)は未知変数 $\epsilon_s, \epsilon_t, y$ を持つので、式(4)、(5)を連立させることにより ϵ_s と ϵ_t は y の関数として $\epsilon_s = \epsilon_s(y), \epsilon_t = \epsilon_t(y)$ と表すことができる。

ひび割れ間中央断面と任意断面との距離を x とすると、引張鉄筋と同位置のコンクリートの間のすべり量 $\delta(x)$ の勾配は式(12)で表される。

$$d\delta(x) / dx = \epsilon_s(y) - \epsilon_t(y) \quad (12)$$

また断面 $x + dx$ における軸方向と曲げモーメントの釣り合いより式(13)、(14)が得られる。

$$0 = dC_c - dC_s - dT_s \quad (13)$$

$$0 = dM_c + dM_s + dM_{ct} + dM_s \quad (14)$$

式(12)、(13)、(14)、および鉄筋ひずみと付着応力の関係を用いれば次式(15)が導かれる。

$$\frac{d^2\delta(x)}{dx^2} = \frac{U_s}{AsEs} \{1 - G(y)\} T_x \quad (15)$$

ここで、 U_s, As, Es は引張鉄筋の周長、断面積、弾性係数

であり、 τ_x は断面 x における付着応力、 $G(y)$ は y の関数である。また、付着応力—すべり量の関係として六車^[1]らの提案式を用いた。

式(12)、(15) において未知数は $\delta(x)$ と y であるのでこの2式を連立し、次の境界条件の下で数値解析を行うことができる。

全断面有効領域の有無によって境界条件は次の2種類に分類できる。

1. 全断面有効領域がある場合

$$x=0: \delta(x)=0 \text{ かつ } d\delta(x)/dx=0$$

$$x=a: d\delta(x)/dx = \epsilon_s''$$

なお a はすべりが生じ始める断面からひび割れ断面までの距離。 ϵ_s'' はひび割れ断面の引張鉄筋ひずみである。

2. 全断面有効領域がない場合

$$x=0: \delta(x)=0 \text{ かつ } d\delta(x)/dx = \{\epsilon_s\}_{x=0} - \{\epsilon_t\}_{x=0}$$

$$x=a: d\delta(x)/dx = \epsilon_s''$$

5. 数値解析例

数値解析に用いた対象部材の断面諸元および材料物性を表1に示す。ひび割れ間中央断面とひび割れ断面との間のコンクリート応力の分布を図3、4、5に示す。モーメントと曲率の関係を図6に示す。

本解析法は図3、4、5のように圧縮域コンクリートの非線形性を考慮し、図6のようにその影響を具体的に表現することができる。

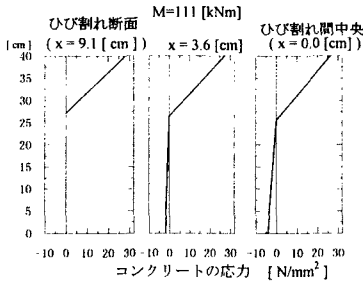


図3 応力分布

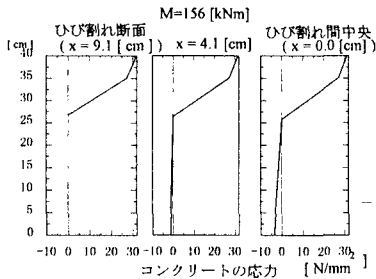


図4 応力分布

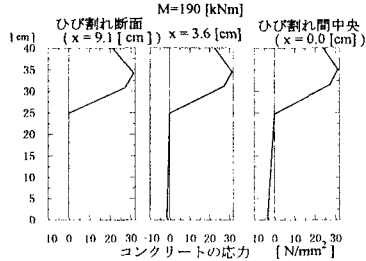


図5 応力分布

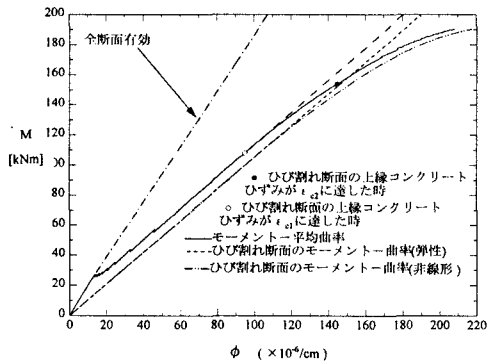


図6 モーメント—曲率

表 1

幅 b (cm)	20.0
高さ h (cm)	40.0
有効高さ d (cm)	35.0
引張鉄筋断面積 A_s (cm ²)	7.6
等曲げスパン (cm)	200
鉄筋弾性係数 E_s (kN/mm ²)	202
コンクリートの圧縮強度 f_{c2} (N/mm ²)	31.4
コンクリートの引張強度 (N/mm ²)	4.17
付着強度 (N/mm ²)	7.84 ^[2]
付着強度時のすべり量 (mm)	0.06 ^[2]
ϵ_{c1}	1300×10^{-6}
ϵ_{c2}	2000×10^{-6}
ϵ_{c3}	3200×10^{-6}
f_{c1} (N/mm ²)	27.4
f_{c2} (N/mm ²)	31.4
f_{c3} (N/mm ²)	19.6

6. まとめ

圧縮域のコンクリートの材料非線形性を考慮して付着—すべり関係に基づいてRC曲げ部材の変形解析を行った。今後は鉄筋の降伏以降の性状とそれに対応した付着—すべり関係を取り入れて終局変形解析を行いたい。

[参考文献]

- [1] 六車 熙、森田司朗、富田幸二郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、No.131, pp.1-8, 1967.1
- [2] Nilson, A.H.: Internal Measurement of Bond Slip, ACI Journal, Proceeding Vol.69, No.7, June 1972, pp.439-441