

## [2124] ポリマー含浸鉄筋コンクリート部材の曲げ性状

正会員 ○来海 豊 (秩父セメント関連製品本部)

正会員 鈴木 脩 (秩父セメント関連製品本部)

奥山 康夫 (秩父セメント関連製品本部)

村上 和幸 (秩父セメント関連製品本部)

## 1. まえがき

放射性廃棄物処分用容器を設計する際、最終耐力よりも鉄筋が降伏するまでの性状が問題となる。そこで、容器の開発に当り、大きな伸び能力とテンションスティフニング効果が期待できる鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの適用を試みた。しかし、この種の材料に対しては、設計方法が確立されていないだけでなく、参考となる解析結果も見当らない。

一方、ポリマー含浸コンクリートは、一般に、養生後、乾燥→脱気→含浸→重合という工程で製造される。この製造過程において、乾燥収縮が生じることは当然であるが、含浸モノマーが重合する際にも収縮変形が起こる。したがって、ポリマー含浸鉄筋コンクリート部材を設計する場合、内部応力が無視できないため、製造時の長さ変化量を推定することも重要となる。

本研究は、鉄筋降伏までの性状を精度よく把握できる解析方法確立のための基礎資料を得ることを目的として行ったものである。そこで、まず膨張材と鋼繊維を混入したポリマー含浸鉄筋コンクリート製のビーム供試体とスラブ供試体を作成し、長さ変化量を測定した。次に、仕事量の概念<sup>1)</sup>を適用して各工程での長さ変化量を推定し、その推定方法の妥当性を検討した。さらに、上記の内部応力と鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートのひびわれ後の優れた性状を考慮できる有限要素法による非線形三次元解析を行うとともに、曲げ載荷試験を実施し、ポリマー含浸鉄筋コンクリート部材の解析に用いる引張応力-ひずみ関係の表示方法について検討した。

## 2. 実験の概要

基材コンクリートは、普通ポルトランドセメント ( $405\text{kg/m}^3$ )、エトリンガイト系膨張材 ( $57\text{kg/m}^3$ )、粗粒率2.92の砕砂、2.5 ~ 5 mmの単粒度碎石を用い、水セメント比43.3%、細骨材率60%として、直径0.38 mm、長さ15mmで引張強度 $26000\text{kgf/cm}^2$ の鋼繊維を容積百分率で3%混入したものである。また、鉄筋は、断面積 $0.69\text{cm}^2$ 、弾性係数 $1.85 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、降伏点強度 $3700\text{kgf/cm}^2$ の異形鉄筋D10を、含浸モノマーはメチルメタクリレート (MMA) を使用した。

供試体の種類は、表1のように軸方向鉄筋量を変えた高さ10cm×幅20cm×長さ120cmのビーム4種と高さ9cmで辺長75cmの正方形スラブ3種である。いずれの供試体も上下対称配筋で、スラブ供試体は図1のような等量の直交配筋とした。このため、表1では鉄筋の有効高さと鉄筋比 (全高に対する値) は下端筋についてのみ示し、スラブ供試体の場合は直交する鉄筋の中間の高さを有効高さ、直交する片方の鉄筋量を鉄筋比として表示した。なお、鉄筋端部は、上端筋と下端筋を連結する別の鉄筋を溶接して定着した。

供試体は、蒸気養生 (最高温度 $70^\circ\text{C}$ を4時間保持) →  $150^\circ\text{C}$  で24時間乾燥 → 5mm Hgで1.5時間脱気 → 圧力 $3\text{kgf/cm}^2$ で3時間加圧含浸 →  $85^\circ\text{C}$ の蒸気で2時間加熱重合という工程で製造した。各工程での長さ変化量は、鉄筋に貼付した長さ5mmの抵抗線ひずみゲージ (供試体に応じて10~24点) またはホイットモアひずみゲージ (250mm) により測定した。図1に、ホイットモアひずみゲージ用の標点プラグの位置を示す。

ビーム供試体の曲げ載荷試験方法は、図1のように単純ばり形式で、スパン100cm、等モーメント区間20cmの2点載荷とした。一方、スラブ供試体の場合には、厚さ9mmで6cm×9cmの鋼板4枚を、スパンが60cm×60cmで鋼板の中心線が支承となるように図1に示す位置に貼り付け、供試体が正確な位置を確保でき

表1. 供試体の種類と鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの材料特性

| 供試体   | 有効高さ<br>(cm) | 鉄筋間隔<br>(cm) | 鉄筋比<br>(%) | 圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|--------------|--------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| ビーム 1 | 8.0          | 20.0         | 0.345      | 1681                           | 150                            | 249                            | 401000                           |
| ビーム 2 | 8.0          | 10.0         | 0.690      | 1623                           | 158                            | 244                            | 406000                           |
| ビーム 3 | 8.0          | 7.0          | 1.035      | 1623                           | 158                            | 244                            | 406000                           |
| ビーム 4 | 8.0          | 5.0          | 1.380      | 1728                           | 141                            | 259                            | 393000                           |
| スラブ 1 | 6.5          | 10.0         | 0.766      | 1668                           | 146                            | 260                            | 397000                           |
| スラブ 2 | 6.5          | 7.0          | 1.095      | 1668                           | 146                            | 260                            | 397000                           |
| スラブ 3 | 6.5          | 5.0          | 1.534      | 1728                           | 141                            | 259                            | 393000                           |

注) 引張強度(割裂)と曲げ強度はひびわれ荷重を用いて算定した。

るようにガイドを用いてセットした。その後、供試体の中央に厚さ12mmの硬質ゴム板を貼り付けた辺長9cm、厚さ5cmの正方形厚鋼板を置き、載荷試験を行った。なお、ビーム供試体およびスラブ供試体とも、支承と供試体との間にグリースを塗布したポリエチレンシート2枚を挟み、摩擦力の軽減を計った。

### 3. 長さ変化量とその推定方法

本研究では、部材の長さ変化量と鉄筋の長さ変化量は等しいという仮定を設けた。これに対応して、蒸気養生後に存在する膨張量としては抵抗線ひずみゲージによる値の平均値を、他の乾燥後とMMAの重合後の収縮量についてはホイットモアひずみゲージによる値の平均値を用いた(測定時の温度20°C)。図2に測定した結果を一括して示すが、拘束鋼材比は上下対称配筋のため表1の鉄筋比の2倍値である。

膨張量の推定値は、“辻らの方法<sup>2)</sup>を簡略化した(1)式に示す単位体積当りの膨張コンクリートが鋼繊維と拘束鋼材に対してなす仕事量 $U_0$ が一定”という仮定とJIS A 6202に示されるA法一軸拘束供試体(表1の各供試体のバッチ毎に作成)の測定値を用いて求めた。

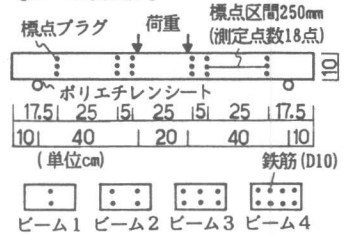
$$U_0 = (P_s + P_f) E_s \epsilon_s^2 / 2 \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $P_s$ は拘束鋼材比、 $P_f$ は鋼繊維の換算拘束鋼材比、 $E_s$ と $\epsilon_s$ は拘束鋼材の弾性係数とひずみである。

なお、A法一軸拘束供試体作成の際には、外部拘束力軽減の観点から拘束端板の外周と型枠との間に空間を開け、グリースと粘着テープを用いて水漏れを防いだ。また、鋼繊維の連続拘束鋼材としての換算比 $P_f$ は、A法一軸拘束供試体の膨張率が繊維混入率0%の場合に約 $590 \times 10^{-6}$ で繊維混入率3%の場合に約 $440 \times 10^{-6}$ であったことから、仕事量を一定として逆算し、混入率の25%とした。各バッチ毎に仕事量 $U_0$ を算定して膨張量を推定すると、ビーム供試体およびスラブ供試体とも測定値と比較的よく一致した。 $(U_0 = 0.299 \sim 0.366 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2)$

また、乾燥収縮量に対しても、膨張の場合と同様の仮定を適用して $U_0$ の値として約 $0.454 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2$ を設定してみると、推定値は図中に点線で示される曲線となる。この推定値は、測定値に比べ、拘束鋼材比の増加による収縮率の低下割合が幾分小さい傾向となっている。このことは、鋼繊維の連続拘束鋼材としての換算比が膨張の場合でも混入率の25%でしかないのに、

[ビーム供試体]



[スラブ供試体]

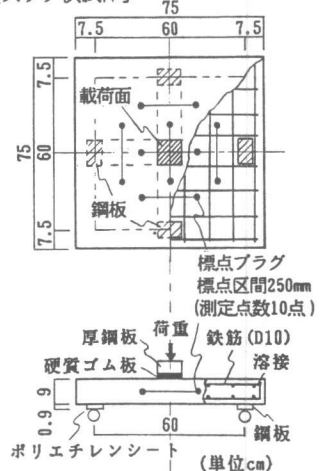


図1. 供試体の概要

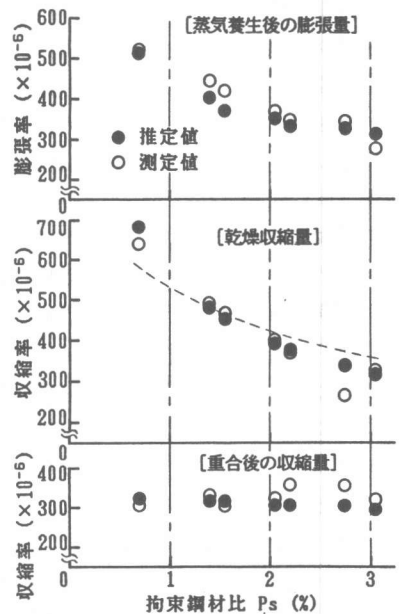


図2. 製造時の長さ変化量

乾燥収縮の場合にはさらに小さな値となることを示唆していると考えられる。この場合、長さが短く、コンクリートとの良好な付着が期待できないカットワイヤーを鋼繊維として使用していることが、鋼繊維の効率を悪くしている一因と考えられる。そこで、硬化した鋼繊維補強コンクリートに対しては、鋼繊維を骨材の一種とみなすこととした。これに伴い、乾燥収縮量の推定には、“(2)式に示す単位体積当りの鋼繊維補強コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 $U_1$ が一定”を仮定した。 $U_1$ の値として約  $0.294 \times 10^{-2}$  kgf/cm<sup>2</sup> を設定すると、全供試体の長さ変化量が点線の推定値よりも精度よく推定できた。

$$U_1 = \rho_s E_s \epsilon_s^2 / 2 \dots\dots\dots (2)$$

さらに、MMAの重合後の収縮量を推定する際にも、鋼繊維補強コンクリートを一つの拘束体と考えて“単位体積当りのMMAが乾燥後の鋼繊維補強コンクリートと拘束鋼材に対してなす仕事量が一定”を仮定した。この仮定は、含浸率が同一の場合、(3)式に示す仕事量 $U_2$ が一定ということに相当する。

$$U_2 = (E_c / E_s + \rho_s) E_s \epsilon_s^2 / 2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $E_c$ は乾燥後の鋼繊維補強コンクリートの弾性係数で  $2.1 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> とした。

この方法の場合、拘束鋼材比が0 % のときの値を定めることにより、各供試体の長さ変化量が推定できることになる。ビーム供試体と同一形状寸法の無筋供試体3体を作成して長さ変化率を測定したところ、平均値が  $335 \times 10^{-6}$  となった。そこで、これに相当する $U_2$ の値 ( $1.18 \times 10^{-2}$  kgf/cm<sup>2</sup>) を用いて推定してみると、本研究の範囲内では上記の仮定が成立するとしても支障のないことがわかった。

#### 4. 有限要素法による解析の概要

鉄筋コンクリートとしてのモデルは、コンクリートと鉄筋を並列に考えて合成することにより表現し、鉄筋は軸方向にのみ抵抗するせん断剛性のない板として表わすこととした。

コンクリートは、主応力方向を異方性軸とする直交異方性体と考え、その構成則として応力増分とひずみ増分との間に(4)式の関係が局所座標系において成立すると仮定する。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \\ d\tau_{12} \\ d\tau_{23} \\ d\tau_{31} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} E_1(1-\nu_{23}\nu_{32}) & E_1(\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{32}) & E_1(\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}) & 0 & 0 & 0 \\ E_2(\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32}) & E_2(1-\nu_{13}\nu_{31}) & E_2(\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}) & 0 & 0 & 0 \\ E_3(\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{32}) & E_3(\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{31}) & E_3(1-\nu_{12}\nu_{21}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta G_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\epsilon_3 \\ d\tau_{12} \\ d\tau_{23} \\ d\tau_{31} \end{Bmatrix} \dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \quad \beta &= 1 - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{13}\nu_{31} - \nu_{12}\nu_{23}\nu_{31} - \nu_{13}\nu_{21}\nu_{32}, \quad G_1 = (G_{12} + G_{21})/2, \quad G_{12} = E_1/2/(1+\nu_{12}), \\ G_{21} &= E_2/2/(1+\nu_{21}), \quad G_2 = (G_{23} + G_{32})/2, \quad G_{23} = E_2/2/(1+\nu_{23}), \quad G_{32} = E_3/2/(1+\nu_{32}), \\ G_3 &= (G_{31} + G_{13})/2, \quad G_{31} = E_3/2/(1+\nu_{31}), \quad G_{13} = E_1/2/(1+\nu_{13}) \end{aligned}$$

ただし、引張側のせん断剛性は、ひびわれが発生するまで変化しないものとした。

本研究では、等価一軸ひずみに関して一軸特性を適用する増分解析法を用いており、各ステップ終了時に主応力を計算し、次ステップの異方性軸を定めるとともに、次ステップの初めに存在する等価一軸ひずみを野口らの方法<sup>3)</sup>に基づいて算定した。すなわち、ステップの初めにおける等価一軸ひずみ $\{\epsilon_{ei}old\}$ と主ひずみ $\{\epsilon_{pi}old\}$ を座標変換して新しい異方性軸方向の成分 $\{\epsilon_{ei}old\}$ と $\{\epsilon_{pi}old\}$ を求める。次に、新しい主ひずみ $\{\epsilon_{pi}new\}$ と $\{\epsilon_{pi}old\}$ との差を主ひずみ増分 $\{d\epsilon_{pi}\}$ とし、(5)式により等価一軸ひずみ増分 $\{d\epsilon_{ei}\}$ を計算する。この $\{d\epsilon_{ei}\}$ を(6)式に代入し、次ステップの初めに存在する等価一軸ひずみ $\{\epsilon_{ei}\}$ を定めた。なお、各ステップ内では、(7)式により定義される $\{\epsilon_{ei}\}$ を等価一軸ひずみとして用いた。

$$\{d\epsilon_{ei}\} = \frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} (1-\nu_{23}\nu_{32}) & (\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{32}) & (\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}) \\ (\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{32}) & (1-\nu_{13}\nu_{31}) & (\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}) \\ (\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{32}) & (\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{31}) & (1-\nu_{12}\nu_{21}) \end{bmatrix} \{d\epsilon_{pi}\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\{\epsilon_{ei}\} = \{\epsilon_{ei}old\} + \{d\epsilon_{ei}\} \dots\dots\dots (6) \quad \{\epsilon_{ei}\} = \{\epsilon_{ei}\} + \{d\sigma_i / E_i\} \dots\dots\dots (7)$$

ひびわれは、等価一軸ひずみが伸び能力 $\epsilon_{cr}$ を越えると発生すると考え、分散ひびわれモデルにより表現した。この際、ひびわれの方向は応力が変化しても変わらないと仮定し、ひびわれ面に垂直な方向の異

方性軸を固定した。同様に、ひびわれ発生に伴い除荷に入った個所についても、その方向の異方性軸を固定した。除荷は、引張の場合、等価一軸ひずみ $\{\epsilon_i\}$ がステップ初めの値 $\{\epsilon_{ei}\}$ より小さくなった時に、圧縮の場合にはその逆となった時に生じたと判定し、除荷経路では剛性を初期剛性と同一にした。また、ポアソン比に関しては、ひびわれ面に垂直な $i$ 方向のひずみはひびわれ面上の $j$ および $k$ 方向のひずみに影響を与えないと考え、 $\nu_{ij}=\nu_{ik}=0$ とした。さらに、ひびわれ後のせん断剛性 $G_{cr}$ については、(8)式に示す出雲らの直列ばねモデル<sup>4)</sup>を用いた。

$$G_{cr}=G_0G_i/(G_0+G_i) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $G_0$ はひびわれのないコンクリートのせん断剛性を、 $G_i$ はひびわれ界面におけるせん断剛性を表わす。本研究では、 $G_i$ に対して繊維補強効果を考慮して普通コンクリートに対する値の1.2倍を仮定した。このため、 $\epsilon_t$ をひびわれ面に垂直な方向の引張ひずみとすると、 $G_i=43.2/\epsilon_t$ となる。

コンクリートのひびわれ後の引張剛性は、負の値となる。安定した収束解を得るために、各ステップで次のような方法を用いた。すなわち、1) ひびわれ面に垂直な方向の剛性 $E_i$ を初期剛性の1/100として、仮の荷重増分に対する解を求める。得られた載荷点の変位増分とひびわれ個所のひずみ増分は、実荷重の作用によりひびわれの発生や進展が起こった後の値と仮定する。2) 初期剛性の1/100に相当する応力も含めた形でひびわれによる解放応力を引張応力-ひずみ関係から計算する。この応力解放を行う際には、上記の仮定から、載荷点の変位を固定して部材が変形しないようにする必要がある。3) 載荷点をその変位増分が1)で得られた値となる拘束節点として、ひびわれによる解放力が作用する場合の解を求める。この解を用いて載荷点に生ずる反力を計算し、これを実荷重増分とした。非線形数値解析方法については、(9)式に示す換算剛性係数 $E_{eff}$ を用いて所定回数の繰り返し演算を行った後、釣合い条件を調べ、収束判定条件を満たすまで最後の剛性を用いて不釣り合い力に対して解き、ひずみ増分を補正する方法を用いた。収束判定条件は、各方向の等価節点力増分(作用外力と拘束節点の反力)の総和の絶対値を、等価節点力増分の絶対値の総和が最大となる $j$ 方向の値で除した値 $(|\sum \Delta F_i|/|\sum \Delta F_j|)$ が0.5%以下を原則とした。

$$E_{eff} = mE_n + (1-m)E_{n+1}, \quad m = \Delta \epsilon_n / \Delta \epsilon, \quad (1-m) = \Delta \epsilon_{n+1} / \Delta \epsilon \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $E_n$ と $E_{n+1}$ は折れ線表示の応力ひずみ関係における $n$ ステージと $n+1$ ステージの剛性を、 $\Delta \epsilon$ はひずみ増分を、 $\Delta \epsilon_n$ と $\Delta \epsilon_{n+1}$ は $\Delta \epsilon$ の内、 $n$ ステージと $n+1$ ステージに属する部分を表わす。

一方、鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート製の10cm×10cm×40cm供試体による3等分点曲げ載荷試験結果の一例を示すと図3のようになる。縁応力とスパン中央の変位との関係をみると、ひびわれ発生後も顕著な耐力低下は認められない。この性状から、鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートはポリマー含浸コンクリート母材と鋼繊維との間に良好な付着機構が存在するために、引張応力-ひずみ関係における負勾配部分を材料特性として有していると推察される。したがって、テンションスティフニング効果を表現す

るための見掛け上の負勾配部分はかなり大きなものになると考えられる。また、ひびわれ発生までの領域についても塑性化域が存在するとされている<sup>4)</sup>が、試験結果によれば塑性化域に達しても引張側のポアソン比はほとんど変化していない。これが、非対称剛性マトリックスを採用した理由の一つでもある。本研究では、鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの引張側の一

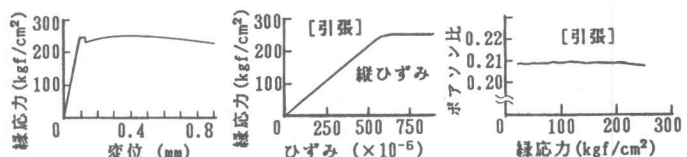
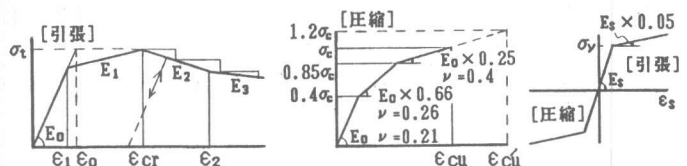


図3. 鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの曲げ載荷試験結果



(a). 鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート

(b). 鉄筋

図4. 応力-ひずみ関係

軸特性が部材の性状と照らした場合にどのような形になるかを調べることを主な目的として、図4のような応力—ひずみ関係を考えた。この場合、引張強度 $\sigma_t$ および圧縮強度 $\sigma_c$ として管理用供試体強度の85%を設定し、初期剛性 $E_0$ として曲げ弾性係数を用いることとした。部材内での材料特性の評価は、鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートおよび鉄筋を、それぞれ、20節点アイソパラメトリック六面体要素と8節点アイソパラメトリック平板要素によって表現し、積分点ごとに等価一軸ひずみに対して行った。数値積分については、それぞれの方向に3つの積分点を持つガウスの求積法を用いた。図5にビーム供試体とスラブ供試体の要素分割を示す。

また、初期応力となる内部応力の最終値は、各工程における長さ変化量の推定値の合計を求め、この値を鉄筋の初期ひずみとした時にこれに釣合うために生ずる応力として定義し、対応する初期ひずみは(10)式により定めた。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{10} \\ \varepsilon_{20} \\ \varepsilon_{30} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^{-1} & -\nu_{21}E_2^{-1} & -\nu_{31}E_3^{-1} \\ -\nu_{12}E_1^{-1} & E_2^{-1} & -\nu_{32}E_3^{-1} \\ -\nu_{13}E_1^{-1} & -\nu_{23}E_2^{-1} & E_3^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{10} \\ \sigma_{20} \\ \sigma_{30} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

## 5. 結果および考察

有限要素法による数値実験は、図4に示す鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの引張応力—ひずみ関係をパラメータとし、表2に示す解析ケースについて行った。この際、第1ステップでは初期応力と初期ひずみを導入することに加えて、第2ステップ初めの最大等価一軸ひずみが引張応力—ひずみ関係における $\varepsilon_1$ となるように自重と荷重増分を与えた。第2ステップで第3ステップ初めの最大等価一軸ひずみが伸び能力 $\varepsilon_{cr}$ となるように荷重増分を定め、第2ステップ終了時の全荷重をひびわれ荷重とした。なお、解析は、鉄筋降伏までの性状を対象としたので、鉄筋降伏後2〜4ステップで打ち切った。

図6は、ビーム供試体およびスラブ供試体の荷重—変位性状を示したものである。(a)のビーム1供試体に対する解析ケース1〜3の結果から、引張応力—ひずみ関係におけるひびわれ以降の負勾配部分を解析ケース1や解析ケース2のような単一の剛性で表現するよりも、解析ケース3のような2つの剛性で表現した方が実験値の性状を模擬しやすいことがわかる。このため、他の供試体を解析する場合には、負勾配部分を2つの剛性で表現することにした。一方、(b)のビーム4供試体に対する解析ケース3と解析ケース5は、負勾配部分の形状がほぼ等しい場合に、ひびわれ発生条件の相違が部材の性状に及ぼす影響をみたものである。解析ケース3のひびわれ荷重が2.95 tで解析ケース5の場合2.61 tである以外は両者は類似しており、しかも実験値とよく対応している。このビーム4供試体に対するのと同様の数値実験をスラブ1供試体に対して行った結果を(c)に示したが、スラブ1供試体の場合も解析ケース3と解析ケース5は大差ない性状となった。いずれにしても実験値に比べ剛性が大き

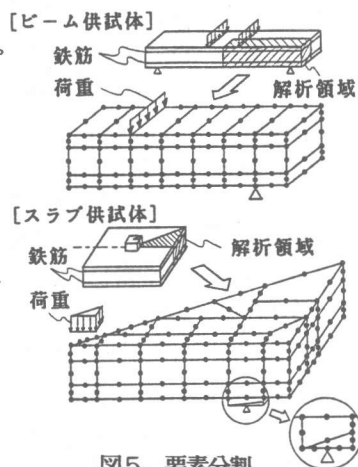


図5. 要素分割

表2. 引張応力—ひずみ関係に関する解析ケース

| 解析ケース | $E_1/E_0$ | $E_2/E_0$ | $E_3/E_0$ | $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_0$ | $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1     | 0.05      | -0.05     | -0.05     | 1.7                              | -                             |
| 2     | 0.05      | -0.03     | -0.03     | 1.7                              | -                             |
| 3     | 0.05      | -0.05     | -0.01     | 1.7                              | 3.5                           |
| 4     | 0.05      | -0.10     | -0.01     | 1.7                              | 4.0                           |
| 5     | 0.01      | -0.05     | -0.01     | 1.4                              | 3.1                           |

注) 各パラメータについては図4参照

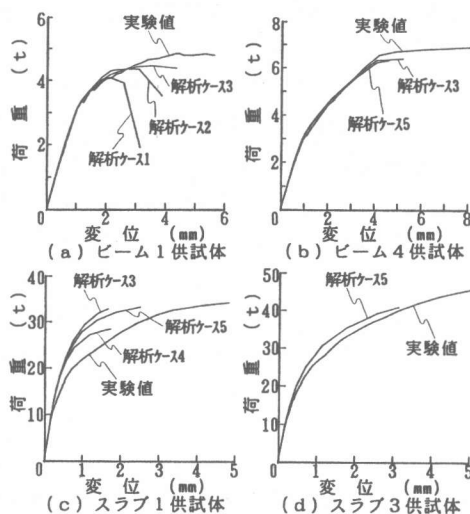


図6. 荷重—変位性状

な性状となるため、解放応力を大きくした解析ケース4の数値実験を行ったが、耐力が頭打ちとなるだけで変形状を近似できなかった。これに対し、(d)のスラブ3供試体の場合には、解析ケース5の解析値と実験値はよく似た性状となっており、図7に示す載荷面直下の鉄筋のひずみについても載荷前を0として表示すると傾向が一致している。なお、スラブ供試体の載荷面直下の領域については、二軸圧縮応力状態に比較的近い三軸圧縮応力状態となることを考慮し、本研究では、二軸圧縮強度<sup>5)</sup>を参考にして図4の点線のように最大許容値として1.2 倍の圧縮強度を仮定した。

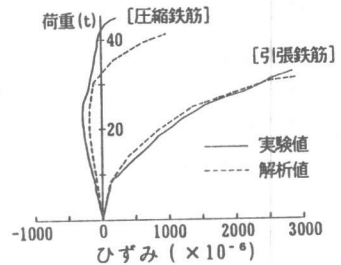


図7. 鉄筋のひずみ

また、図8は、スラブ1とスラブ3供試体のひびわれ状況を示したものである。ここでは、解析でのひびわれ状況として(c)にスラブ3供試体のみ示したが、スラブ1供試体の場合も同様の傾向となった。このひびわれ状況は、実験と比較すると(b)のスラブ3供試体とは傾向が類似しているが、表3. ひびわれ荷重

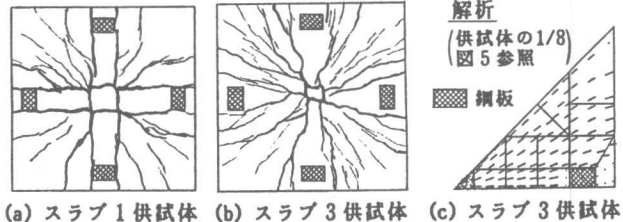


図8. ひびわれ状況

(a)のスラブ1供試体にはあまり似ていない。すなわち、スラブ1供試体の剛性が表現できなかった原因として、実験では(a)に示すような鉄筋に沿った大きなひびわれが認められているのに対し、解析ではこのひびわれをモデル化できていないことが考えられる。

ここで、全供試体のひびわれ荷重を示すと、表3のようになる。この表の実験値は、荷重と鉄筋のひずみとの関係における比例限界点として定義した値である。また、解析値はビーム供試体に対して解析ケース3、スラブ供試体に対して解析ケース5の値を用いて求めたものであるが、実験値と解析値は比較的良好一致している。

| 供試体  | 実験値<br>(t) | 解析値<br>(t) |
|------|------------|------------|
| ビーム1 | 3.20       | 3.04       |
| ビーム2 | 3.20       | 3.24       |
| ビーム3 | 3.10       | 3.31       |
| ビーム4 | 3.00       | 2.95       |
| スラブ1 | 8.50       | 9.23       |
| スラブ2 | 9.00       | 9.02       |
| スラブ3 | 8.50       | 8.63       |

## 6. まとめ

- 1) 本研究のように特定の製造条件では、長さ変化量は仕事量の概念によりほぼ推定可能と考えられる。この長さ変化量に対応する初期引張応力は、本研究の場合  $6 \sim 17 \text{ kgf/cm}^2$  程度の値となった。
- 2) 本研究の方法でポリマー含浸鉄筋コンクリート部材の曲げ性状を解析した結果、テンションスティフニング効果は非常に大きいことが明らかとなった。これには、ひびわれ後も優れた耐荷能力を有する鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートの材料特性が反映したものと考えられる。
- 3) ビームの曲げ性状にほぼ適合する引張応力-ひずみ関係を類似した高さのスラブの曲げ解析に適用する際、鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリートのひびわれ発生条件を修正した方が、変形状をより近似することができた。しかし、鉄筋を等価な直交異方性板に置換え、ひびわれを分散ひびわれモデルとして取扱うという本解析方法では、スラブ1供試体で認められたような鉄筋に沿った大きなひびわれ等が表現しがたい。したがって、ひびわれ発生条件の修正という便宜的な処置方法を今回と異なる対象条件に適用する場合には、分散ひびわれモデルや三次元構成則について、さらに検討する必要があるものと思われる。

<謝辞> 有限要素法による解析を行うに当っては、システム開発株式会社増古恒夫部長ならびに電算機室の関係諸氏に多大のご協力を賜ったことを付記し、感謝の意を表する次第である。

<参考文献> 1) 辻 幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第235号，1975年3月，pp.111～124 2) 辻 幸和・古川 茂：鋼繊維で補強した膨張コンクリート部材の膨張特性，土木学会論文報告集，第384号，1987年8月，pp.111～118 3) 野口 博・長沼一洋：繰返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，1983年10月，pp.97～104 4) 出雲淳一・島 弘・岡村 甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25, No.9, 1987年9月，pp.107～120 5) H. Kupfer, H.K. Hilsdorf and H. Rusch: Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol.66, No.8, Aug., 1969, pp.656～666