

# 鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの初期応力に関する研究

来海 豊\*

鉄筋ポリマー含浸コンクリート部材では、コンクリート部の初期応力は、一般に、引張応力となり、 $2\text{N/mm}^2$  以上となることもある。このため、鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの曲げ性状を精度よく算定する上で、初期応力を把握することが重要となる。本論文は、膨張コンクリートと鋼繊維を用いた鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりについて、各製造工程で発生するひずみ分布を調べ、実用上の範囲で適用可能な初期応力の推定方法を検討したものである。

**Key Words** : *initial stress, reinforced polymer impregnated concrete beam, expansive concrete, steel fiber*

## 1. 序 論

鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの製造工程においては、コンクリートの乾燥収縮と含浸モノマーの重合収縮が生じ、これに伴う大きな初期応力が問題となる。すなわち、はりのコンクリート部に生じる初期応力は、一般に引張応力となり、この影響が無視できなくなる。たとえば、ポリマー含浸処理を行っても、鉄筋コンクリートはりのひび割れ発生荷重に顕著な向上が認められなかったという報告<sup>1)</sup>もある。

ケミカルプレストレスを最初の養生工程において導入すると、鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの初期応力を軽減できる可能性がある。また、鋼繊維を混入した膨張コンクリートを用いると、高耐力で高靱性な鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりが得られると考えられる。しかし、膨張コンクリートと鋼繊維を併用した鉄筋ポリマー含浸コンクリート部材の性状に関しても、未だ報告されていない。

一方、初期応力に関する研究は、主に、膨張コンクリートの拘束下における膨張<sup>2)</sup>、レジンコンクリートの硬化収縮<sup>3)</sup>および熱膨張係数の差<sup>4)</sup>により、コンクリートと鉄筋に導入される初期応力について、行われてきている。鉄筋ポリマー含浸コンクリート部材に関しては、含浸モノマーの重合に伴ってコンクリートに生じる初期引張応力に対し、コンクリートの収縮変形を鉄筋が拘束とした推定方法が検討されているのみである<sup>1)</sup>。このため、最終的な初期応力や製造過程での変形状について詳細に検討した報告は、見当たらない。

本研究は、膨張コンクリートと鋼繊維を用いた鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりについて、各製造工程で発生するひずみ分布を実験により調べ、実用上対象と考え

られる範囲内において適用可能な初期応力の推定方法を検討したものである。また、拘束鉄筋比と鋼繊維混入率をパラメータとした実験結果に基づき、各製造工程で発生するひずみについて、評価検討している。なお、実験に当たっては、含浸モノマーとして一般的に用いられているメチルメタクリレート (MMA) モノマーを使用し、第2章に述べるような標準的な工程により鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体を製造している。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料および基材コンクリートの配合

基材コンクリートとしては、鋼繊維混入率が0, 1.5 および 3.0 vol. % の3種類の膨張コンクリートを対象とした。なお、一部の実験においては、プレーンコンクリートも用いている。いずれのコンクリートも、配合を表-1に示すように、単位セメント量を  $405\text{ kg/m}^3$  とし、スランブおよび空気量を、それぞれ  $1.5 \pm 1\text{ cm}$  および  $5 \pm 1\%$  としたものである。使用したセメントおよび膨張材は、それぞれ普通ポルトランドセメントとエトリンガイト系膨張材である。また、細骨材と粗骨材には、それぞれ粗粒率が 2.92 の砕砂および JIS A 5001 「道路用碎石」に規定されている単粒度碎石 S-5 (7号) の粒度範囲となるように調整した 2.5~5 mm の碎石を用いた。鋼繊維としては、直径が 0.35 mm、長さが 15 mm で、引張強度が  $2500\text{ N/mm}^2$  のカットワイヤを用いた。使用した鉄筋は、表面形状が直角ふし形の異形鉄筋 D 10 であり、断面積が  $0.69\text{ cm}^2$  のものである。鉄筋のヤング係数は  $181\text{ kN/mm}^2$  であり、降伏点強度は  $367\text{ N/mm}^2$  である。そして、含浸モノマーには、MMA モノマーを用いた。

### (2) 供試体とその製造方法

供試体は、図-1に示すように、すべて上下対称に配筋した鉄筋コンクリートはりである。これらのはり供試

\* 正会員 工博 秩父セメント (株) 中央研究所 主任研究員  
(〒360 熊谷市月見町 2-1-1)

表一 基材コンクリートの配合

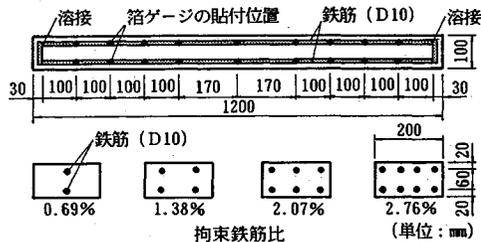
配合 No.	鋼繊維混入率 (vol.%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W (C+E) (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )	
						セメント C	膨張材 E
1	0	1.5±1	5±1	48	55	405	—
2	0	1.5±1	5±1	42	60	405	57
3	1.5	1.5±1	5±1	43	60	405	57
4	3.0	1.5±1	5±1	43	60	405	57

注) 配合No.1は、ブレンコンクリートである。  
配合No.2～配合No.4は、膨張コンクリートである。

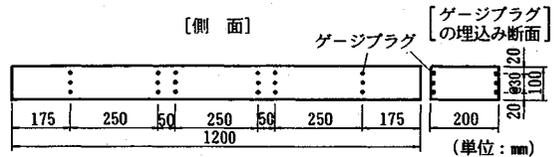
表二 コンクリートのヤング係数

配合 No.	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
	蒸気養生後 E <sub>c0</sub>	乾燥後 E <sub>c1</sub>	重合後 E <sub>c2</sub>
1	23.7	18.0	—
2	23.9	18.5	34.3
3	25.2	19.7	36.3
4	26.6	20.9	39.2

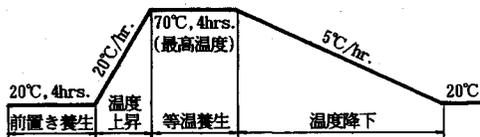
注) 配合No.1～No.4は、表一に示すものである。



図一 はり供試体の形状寸法および配筋



図三 はり供試体表面のひずみの測定位置



図二 蒸気養生の条件

体の拘束鉄筋比を、0.69、1.38、2.07および2.76%の4段階とした。また、軸方向鉄筋端部は、上側の鉄筋と下側の鉄筋とを連結する別の鉄筋を溶接することにより定着した。なお、第3章に述べる方法で鋼繊維の有効拘束筋比を実験的に求める際には、鋼繊維混入率を0、1.5および3.0 vol. %とした3種類の膨張コンクリートに対して、JIS A 6202の「コンクリート用膨張材」に示されているA法一軸拘束供試体を3体ずつ作製した。

鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体は、蒸気養生→乾燥→(脱気、含浸、重合)という標準的な工程を通して製造した。蒸気養生の条件は、図二に示す通りである。乾燥は、脱型したはり供試体を乾燥装置に入れて、150°Cの温度で24時間加熱乾燥する方法により行った。脱気および含浸については、温度が約20°Cとなるまで冷却したはり供試体を含浸装置に入れて、0.7 kPaまで減圧し、脱気を1.5時間実施した。そして、減圧した含浸装置内にMMAモノマーを供給して大気圧にした後に、0.3 MPaの圧力で3時間加圧含浸した。含浸終了後直ちに、温度を80°Cに保持した重合装置にはり供試体を入れ、2時間の加熱重合を行った。なお、作製したはり供試体のポリマー含浸率は、加熱乾燥後の重量を基準として6.1～6.7 wt. %の範囲の値となった。ま

た、本実験の製造工程において、蒸気養生後、乾燥後および重合後に測定したコンクリートのヤング係数を示すと、表二のようになる。表二に示したヤング係数は、第3章において各製造工程で発生するひずみの推定方法を検討する際に、コンクリートの剛性として用いるものである。

### (3) ひずみの測定方法

軸方向鉄筋のひずみの測定点数は、図一に示す例のように各はり供試体に応じて10～18点である。また、各はり供試体表面のひずみは、図三に示すように18点で測定した。なお、ひずみの測定には、ゲージ長が5 mmの箔ゲージ(使用温度範囲-196～+180°C)および標点間距離が250 mmのコンタクト型ひずみゲージを用いた。

コンクリート打込み後約2時間経過した時点で、各はり供試体中の軸方向鉄筋のひずみを測定し、この値を製造工程で軸方向鉄筋に発生するひずみの原点とした。また、はり供試体表面のひずみの基長は、蒸気養生直後に測定した。そして、製造工程を次のように3つに大別して、各工程において発生するひずみを測定した。

#### a) 蒸気養生工程において発生するひずみ

蒸気養生工程後におけるひずみは、脱型したはり供試体を温度が20±3°Cの恒温室内に約3時間静置してから測定した。

#### b) 乾燥工程において発生するひずみ

乾燥工程後におけるひずみは、温度が約20°Cとなるまで冷却したはり供試体を乾燥装置から取り出し、温度を20±3°Cおよび相対湿度を約20%とした鋼製の箱の中にはり供試体を入れて約4時間静置した後に測定した。

#### c) 脱気から重合までの工程において発生するひずみ

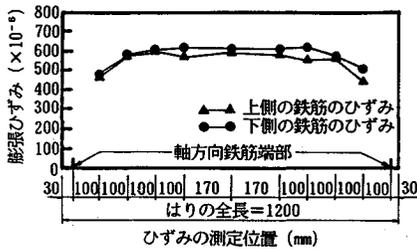


図-4 鉄筋膨張コンクリートはりに発生する膨張ひずみの分布 (拘束鉄筋比 0.69%)

MMA モノマーの重合が終了した時点からはり供試体を温度が  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  の恒温室内に約 15 時間静置した後、重合工程後におけるひずみを測定した。

### 3. 各製造工程において発生するひずみとその推定方法の検討

#### (1) 蒸気養生工程において発生する膨張ひずみ

図-4 は、拘束鉄筋比が 0.69% で、鋼繊維を混入していない鉄筋膨張コンクリートはり供試体について、蒸気養生工程後に測定した軸方向鉄筋のひずみを示したものである。この場合のひずみの測定位置は、図-1 に示してある。図-4 によると、軸方向鉄筋端部から 20 cm より内側の領域においては、ほぼ様な値となっている。なお、図-4 と本章の (2) で後述する図-10 に測定値を示すはり供試体については、供試体の作製時期および膨張材の出荷時期がその他の供試体の場合と大きく相違する。このため、膨張および収縮性状も相違することとなり、測定されるひずみの値も異なるものと思われる。

図-5 には、鋼繊維混入率別に、拘束鉄筋比が軸方向鉄筋位置に発生する膨張ひずみに及ぼす影響が示してある。この図に示す上側および下側の鉄筋のひずみの測定値は、軸方向鉄筋端部から 27 cm 以上内側の領域において 5~12 点で求めたひずみの平均値である。これは、測定位置が必ずしも上下対称でないことによる。各はり供試体ごとに上側の鉄筋および下側の鉄筋について求めた測定データの標準偏差は、 $12 \sim 40 \times 10^{-6}$  の範囲にあった。したがって、軸方向鉄筋端部から 27 cm 以上内側の領域では、ほぼ様なひずみが生じていると考えられる。

鋼繊維を混入した鉄筋膨張コンクリートはりに生じる膨張ひずみについては、その推定方法が辻らにより提案されている<sup>2)</sup>。そこで、辻らの方法に基づいて、“単位体積当たりの膨張コンクリートが鉄筋と鋼繊維に対してなす仕事量  $W_{e0}$  が一定である”と仮定し、蒸気養生工程で生じる膨張ひずみの推定を行う。その際、推定式としては、辻らの式を簡略化した式 (1) を用いる。

$$W_{e0} = (P_s + P_f) \cdot E_s \cdot \epsilon_s^2 / 2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $P_s$ : 拘束鉄筋比、 $P_f$ : 鋼繊維の有効拘束筋比、

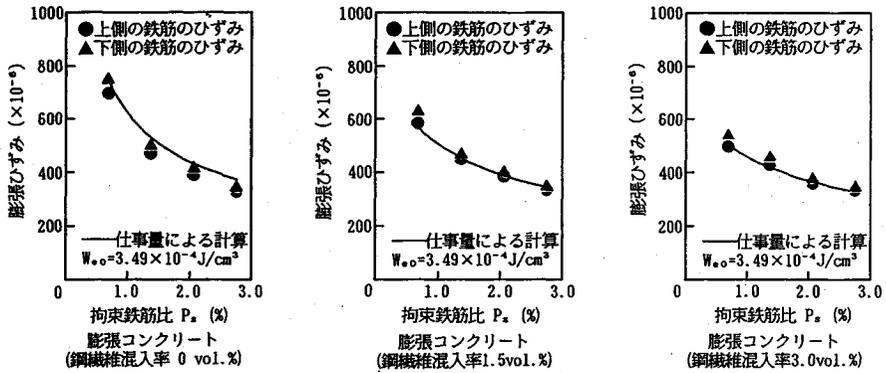
$E_s$ : 鉄筋のヤング係数、 $\epsilon_s$ : はり供試体の軸方向鉄筋に発生するひずみである。なお、鋼繊維のヤング係数は、鉄筋のヤング係数  $E_s$  に等しいと仮定している。

鋼繊維の有効拘束筋比  $P_f$  については、辻らは鋼繊維混入率に配向係数を乗じた値を用いている。そして、配向係数としては、三次元および二次元に均等に分散とした場合に、それぞれ 0.405 および 0.637 を仮定している。しかし、鋼繊維の有効拘束筋比は、鋼繊維とコンクリートマトリックスとの付着性状や鋼繊維の形状寸法等の影響を受けると考えられる。そこで、鋼繊維の有効拘束筋比は、鋼繊維混入率を 0、1.5 および 3.0 vol. % の 3 段階に変えた膨張コンクリートを用いて前述した A 法一軸拘束供試体を作製し、実験的に求めることとした。すなわち、これらの A 法一軸拘束供試体の蒸気養生後における膨張ひずみに、仕事量一定の概念を適用して求めた。この結果、鋼繊維の有効拘束筋比は、鋼繊維混入率が 1.5 および 3.0 vol. % の場合に対し、それぞれ鋼繊維混入率の 34% および 28% に相当した。したがって、鋼繊維の有効拘束筋比をこれらの値に仮定した。

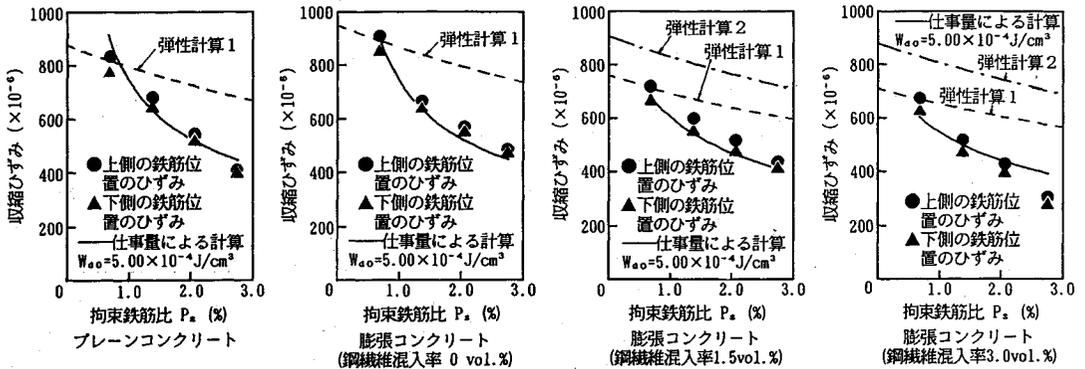
膨張ひずみの推定に当たっては、仕事量  $W_{e1}$  を各コンクリート別に最小二乗法により求め、仕事量  $W_{e1}$  の平均値  $W_{e0}$  を算定した。そして、この平均値  $W_{e0}$  を仕事量として、12 体のすべての鉄筋膨張コンクリートはり供試体に仕事量一定の概念を適用した。推定結果は、図-5 に示す実線の通りとなった。鋼繊維混入率が 0、1.5 および 3.0 vol. % のいずれの鉄筋膨張コンクリートはり供試体の場合にも、推定値は、測定値と比較的よく一致している。また、(測定値/推定値)の標準偏差は、測定値として断面高さ方向の平均値を用いた時に 0.053 となった。したがって、仕事量一定の概念に基づく既往の膨張ひずみの推定方法は、蒸気養生を行う場合にも適用できると考えられる。ただし、拘束鉄筋比が 0% で、鋼繊維混入率が 0 vol. % の時に仕事量がゼロとなることから明らかなように、仕事量一定の概念には、適用可能な拘束鉄筋比の範囲が存在するものと考えられる。

#### (2) 乾燥工程において発生する収縮ひずみ

図-6 は、各コンクリート別に、拘束鉄筋比が軸方向鉄筋位置に発生する乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を示したものである。図中に示す上側および下側の鉄筋位置でのひずみの測定値は、平面保持の仮定が成立するとして求めた値である。求め方としては、先ず軸方向鉄筋端部から 27 cm 以上内側の鉄筋およびはり供試体表面のひずみに対して、測定点の高さごとに平均値を求めた。この平均値について断面高さ方向に直線回帰し、求めた直線式より上側および下側の鉄筋高さ位置でのひずみを算出した。この直線式からのひずみの分散の平方根は、各はり供試体ごとにすべての測定データについて算出すると、 $17 \sim 39 \times 10^{-6}$  の範囲にあった。なお、はり供試体



図—5 拘束鉄筋比が軸方向鉄筋位置に発生する膨張ひずみに及ぼす影響



図—6 拘束鉄筋比が軸方向鉄筋位置に発生する乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

端部付近では、鉄筋とコンクリート間でひずみが相違し、平面保持の仮定が成立しない可能性がある。このため、今回使用したはり供試体について、確認実験を行った。そして、軸方向鉄筋端部より 10 cm および 20 cm の位置でのひずみはそれよりも内側の領域に比べて小さくなるが、軸方向鉄筋端部から 27 cm 以上内側の領域においては、おおむね平面保持の仮定が成立することを確認している。

図—6には、無筋コンクリートはり供試体の乾燥収縮ひずみをコンクリートの自由収縮ひずみとし、この自由収縮ひずみとコンクリートの加熱乾燥後における剛性を用いて、弾性計算<sup>3)</sup>により求めた乾燥収縮ひずみと拘束鉄筋比との関係を示してある。破線で示した弾性計算1は、表—1に配合を示した各コンクリートにおける自由収縮ひずみをもとに、収縮変形を拘束する鉄筋との釣合いにより求めた値である。また、一点鎖線で示した弾性計算2は、鋼繊維の有効拘束鉄筋比を本章の(1)において膨張ひずみの推定に用いた値と同一であると仮定し、鋼繊維混入率が 0 vol. % のコンクリートにおける自由収縮ひずみをもとに、鉄筋および鋼繊維との釣合いにより求めた値である。いずれの弾性計算による推定値も、乾燥収縮ひずみをかなり大きく推定する傾向にあり、こ

の傾向は、拘束鉄筋比が大きい場合に顕著となっている。そこで、次のような二つの乾燥収縮ひずみの推定方法を検討した。なお、乾燥収縮ひずみの推定に用いる鋼繊維の有効拘束鉄筋比  $P_f$  は、弾性計算2の場合と同様に、膨張ひずみの推定に用いた値と同一であると仮定した。

a) 仕事量一定の概念を適用する方法

この方法は、鉄筋と鋼繊維を拘束体と考えて、膨張ひずみの場合と同様に、式(1)を推定式とする方法である。なお、鋼繊維の拘束効果は、鋼繊維混入率に応じた前述の有効拘束鉄筋比として、各コンクリート別に考慮している。このため、先ず各コンクリート別に仕事量  $W_{d1}$  の値を最小二乗法により求め、仕事量  $W_{d1}$  の平均値  $W_{d0}$  を算定した。そして、この平均値  $W_{d0}$  を仕事量として、16体のすべてのはり供試体に対し、仕事量一定の概念を適用して乾燥収縮ひずみを推定した。推定結果は、図—6に示す実線のようなになる。拘束鉄筋比が 2.76% で鋼繊維混入率が 3.0 vol. % の鉄筋膨張コンクリートはり供試体を除く残りの 15 体のはり供試体については、推定値と測定値は、おおむね一致している。また、測定値をはり高さ方向の平均値とした時の(測定値/推定値)の標準偏差は、16体のはり供試体について 0.087 となる。

一方、温度を150°Cに24時間保持している間に、鉄筋と鋼繊維は熱膨張するのに対し、コンクリートは著しい乾燥収縮を生じる。この間の熱膨張係数を測定した結果では、コンクリートの方が鉄筋よりも約 $3.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 小さい値となった。また、鋼繊維が存在する場合には、高温下で生じた熱膨張ひずみが残留する傾向にあるとされている<sup>5)</sup>。さらに、コンクリートの温度が100°C以上になると、累積AEカウンタは急増し始めることが報告されている<sup>6)</sup>。以上のことから推測すると、温度150°Cで24時間加熱乾燥させた場合には、微細および微小ひび割れや残留変形を生じると考えられる。実際に、鋼繊維を混入していないはり供試体においては、膨張材を混和した場合でも表面に微細ひび割れが観察された。したがって、仕事量一定の概念を適用して、本研究で対象としたような加熱乾燥による収縮ひずみを精度よく推定するには、破壊に消費される仕事量を考慮する必要があると考えられる。しかし、仕事量一定の概念は、簡便であることから、便宜的な乾燥収縮ひずみの推定にはそのまま適用してもよいものと思われる。ただし、膨張ひずみの場合と同様に、仕事量一定の概念が便宜的に適用できる拘束鉄筋比の範囲が存在すると考えられる。

b) 全ひずみエネルギー量を算定する方法

ひび割れ発生に至るまでのコンクリートの応力状態等については、前述した仕事量一定の概念に基づく方法では推定が困難な場合もある。これには、コンクリートの剛性の低下等の要因が考慮されていないことが考えられる。このような要因を考慮した推定方法としては、全ひずみエネルギー量を用いるという方法が考えられる。これは、“単位体積の鉄筋コンクリートにおいて、乾燥収縮要素がコンクリート要素、鉄筋および鋼繊維に対してなす全ひずみエネルギー量”という新たな概念を仮定するものである。ここで、乾燥収縮要素とは、コンクリート中より乾燥収縮を起こす部分をすべて取り出し、取り出した部分の集合体を考えている。また、コンクリート要素は、乾燥収縮を起こすことなく、応力のみによってひずみを生じるものを想定している。そして、蒸気養生工程等で以前に発生した内部応力の影響に関係なく、次の仮定を設けて、全ひずみエネルギー量を算定する。

① コンクリートマトリックスが加熱乾燥によって収縮するのに対し、その変形を鉄筋と鋼繊維が拘束するものと仮定する。

② 加熱乾燥により、鉄筋と鋼繊維に収縮ひずみ $\epsilon_s$ 、コンクリート要素に引張ひずみ $\epsilon_c$ が生じる。そして、 $\epsilon_s$ および $\epsilon_c$ と、コンクリートの自由収縮ひずみ $\epsilon_{fs}$ は、式(2)に示す関係にあると仮定する。また、 $\epsilon_c$ および $\epsilon_s$ を所定の分割数 $n$ で除したものを、それぞれ引張ひずみ増分 $\Delta\epsilon_c$ および収縮ひずみ増分 $\Delta\epsilon_s$ とする。

$$\epsilon_s = \epsilon_{fs} + \epsilon_c \dots\dots\dots (2)$$

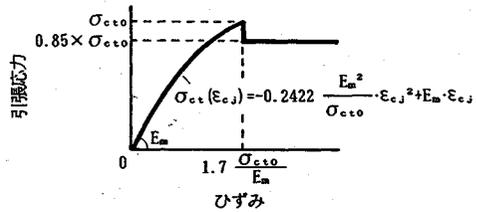


図-7 コンクリート要素を引張る際に仮定する引張応力-ひずみ関係

③ 鉄筋と鋼繊維に生じる収縮ひずみ $\epsilon_s$ は、はり供試体の収縮ひずみに等しいものとする。

④ ひずみエネルギー量増分 $\Delta U_{d1}$ は、それまでにコンクリート要素に生じた式(3)に示すひずみ $\epsilon_{c1}$ と、鉄筋および鋼繊維に生じた式(4)に示すひずみ $\epsilon_{s1}$ の関数として、式(5)のように表わされるものとする。また、コンクリート要素に生じる引張応力は、それまでに生じた引張ひずみ $\epsilon_{c1}$ の関数 $\sigma_{c1}(\epsilon_{c1})$ として、図-7に示すような非線形な引張応力-ひずみ関係により与えられるものと仮定する。さらに、コンクリートの引張強度 $\sigma_{c10}$ は、加熱乾燥後における円柱供試体(直径10cm, 高さ約15cm)の割裂引張強度の85%を仮定する。なお、図-7の引張応力-ひずみ関係におけるピークひずみを $(1.7 \cdot \sigma_{c10} / E_m)$ としたのは、 $(\sigma_{c10} / E_m)$ に曲げ強度と引張強度の比を乗じた値を引張限界ひずみと仮定した報告<sup>7)</sup>と同一の仮定に基づいている。そして、曲げ強度と引張強度の比については、加熱乾燥後のプレーンコンクリートと膨張コンクリートに対して求めた実験結果が常温下の場合と同様に1.5~2倍程度の範囲にあったことから、1.7と仮定している。

$$\epsilon_{c1} = j \cdot \Delta\epsilon_c \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_{s1} = j \cdot \Delta\epsilon_s \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta U_{d1} = \sigma_{c1}(\epsilon_{c1}) \cdot \Delta\epsilon_c + (P_s + P_r) \cdot E_s \cdot \epsilon_{s1} \cdot \Delta\epsilon_s \dots\dots\dots (5)$$

ここに、鋼繊維のヤング係数は、鉄筋のヤング係数 $E_s$ に等しいと仮定している。

⑤ 乾燥過程のコンクリートの引張応力-ひずみ関係における初期剛性 $E_m$ は、蒸気養生後の初期剛性 $E_{c0}$ およびひずみエネルギー量増分 $\Delta U_{d1}$ のそれまでの総和と式(6)に示すような関係にあるものとする。すなわち、加熱乾燥後のコンクリートの初期剛性 $E_{c1}$ と蒸気養生後の初期剛性 $E_{c0}$ との関係は、式(8)に示す全ひずみエネルギー量 $U_{d0}$ により直線的に変化するという式(7)を仮定することになる。

$$E_m = E_{c0} - K_d \cdot \sum_{j=0}^{m-1} \Delta U_{d1} \quad (1 \leq m, \Delta U_{d0} = 0) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $K_d$ : 定数である。

$$E_{c1} = E_{c0} - K_d \cdot U_{d0} \dots\dots\dots (7)$$

$$U_{d0} = \sum_{j=1}^n \Delta U_{d1} \dots\dots\dots (8)$$

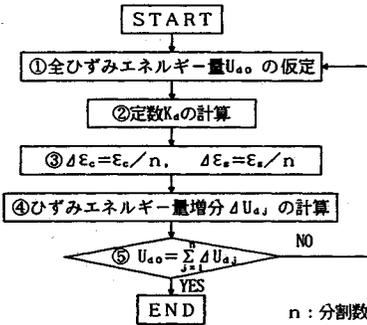


図-8 乾燥収縮要素がなす全ひずみエネルギー量を算定するフローチャート

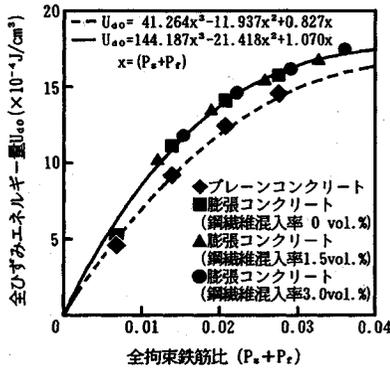


図-9 全ひずみエネルギー量と全拘束鉄筋比との関係

⑥ 鋼繊維を混入した膨張コンクリートの場合には、鋼繊維を拘束鉄筋として扱う。このため、コンクリートの自由収縮ひずみ  $\epsilon_{fs}$ 、引張強度  $\sigma_{ct0}$ 、蒸気養生後の初期剛性  $E_{c0}$  および加熱乾燥後の初期剛性  $E_{c1}$  は、鋼繊維を混入していない膨張コンクリートの値とする。

全ひずみエネルギー量  $U_{a0}$  と全拘束鉄筋比  $(P_s+P_f)$  との関係は、図-8 に示すフローチャートに従って求めた。すなわち、①全ひずみエネルギー量  $U_{a0}$  の値を仮定する。②蒸気養生後のコンクリートの初期剛性  $E_{c0}$  と加熱乾燥後の初期剛性  $E_{c1}$  を式 (7) に代入し、定数  $K_d$  を算定する。③鉄筋および鋼繊維に生じる収縮ひずみ  $\epsilon_s$  を各はり供試体のひずみの測定値として、これと無筋コンクリートはり供試体による自由収縮ひずみ  $\epsilon_{fs}$  との差としてコンクリート要素に生じる引張ひずみ  $\epsilon_c$  を求める。そして、この  $\epsilon_c$  と  $\epsilon_s$  を分割数  $n$  で除して、引張ひずみ増分  $\Delta\epsilon_c$  と収縮ひずみ増分  $\Delta\epsilon_s$  を定める。④  $\Delta\epsilon_c$  と  $\Delta\epsilon_s$  を与え、式 (5) によりひずみエネルギー量増分  $\Delta U_{aJ}$  を算出する。⑤  $\Delta\epsilon_c$  および  $\Delta\epsilon_s$  の総和がそれぞれ  $\epsilon_c$  および  $\epsilon_s$  となるまで、④を  $n$  回繰り返し、ひずみエネルギー量増分の合計値を式 (8) により算出する。この合計値が  $U_{a0}$  の仮定値と一致するかどうかを調べる。一致した場合には、 $U_{a0}$  を全ひずみエネルギー量とする。一致しなかった場合には、 $U_{a0}$  の値を補正して①

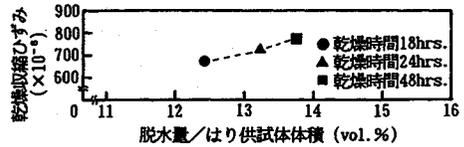


図-10 乾燥時間が乾燥収縮ひずみと脱水量との関係に及ぼす影響 (鋼繊維混入率 0 vol.%)

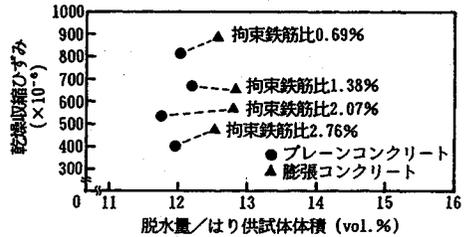


図-11 膨張材の添加が乾燥収縮ひずみと脱水量との関係に及ぼす影響 (鋼繊維混入率 0 vol.%)

に戻る。

全拘束鉄筋比が 0% の場合には、拘束力が存在しないために、式 (5) 中の引張応力の項がゼロとなり、全ひずみエネルギー量はゼロとなる。プレーンコンクリートおよび膨張コンクリートの前述した自由収縮ひずみと各はり供試体のひずみの実測値を用いて、全ひずみエネルギー量と全拘束鉄筋比との関係を求めると、図-9 のようになる。全ひずみエネルギー量は、コンクリートマトリックスがプレーンコンクリートであるか膨張コンクリートであるかにより、全拘束鉄筋比を変数とした原点を通る 2 つの 3 次関数によりほぼ表わされている。これには、プレーンコンクリートおよび膨張コンクリートの加熱乾燥後の割裂引張強度が  $3.45 \text{ N/mm}^2$  および  $3.33 \text{ N/mm}^2$  とほぼ同等の値であることから、ひずみの積分区間を与えるコンクリートの自由収縮ひずみが影響を及ぼしていると推測される。

図-10 には、拘束鉄筋比が 0.69% の鉄筋膨張コンクリートはり供試体に対し、乾燥工程における温度  $150^\circ\text{C}$  の保持時間を変えた場合の乾燥収縮ひずみと脱水量との関係を示す。温度  $150^\circ\text{C}$  の保持時間が 18~48 時間の範囲では、はり供試体の乾燥収縮ひずみは、脱水量の増加とともに大きくなる傾向を示している。また、図-11 は、膨張コンクリートとプレーンコンクリートを用いた拘束鉄筋比が 0.69~2.76% のはり供試体について、乾燥収縮ひずみと脱水量との関係を示したものである。膨張材の混和は、加熱乾燥による収縮ひずみをわずかながら大きくし、脱水量を多くする傾向にある。

一方、膨張性水和物であるエトリンガイトの結晶に結合している 31 モルの水の内 20~21 モルの水は、比較的遊離な状態にあり、温度  $60^\circ\text{C}$  付近から脱水し始める<sup>8)</sup>。また、膨張現象は、主に、硬化体内に細孔が生成される

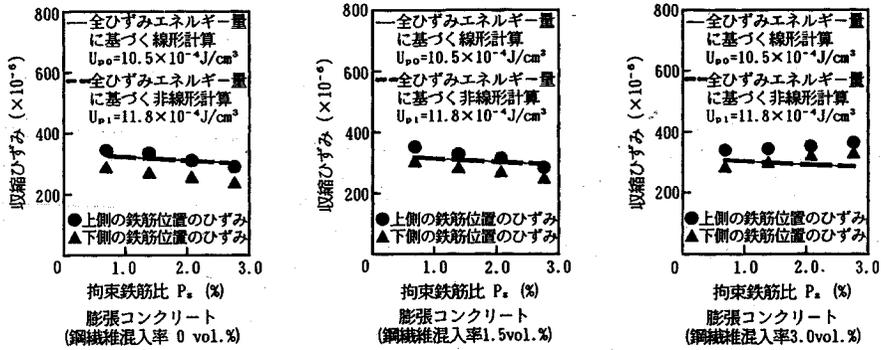


図-12 拘束鉄筋比が軸方向鉄筋位置に発生するMMAモノマーの重合に伴う収縮ひずみに及ぼす影響

ことにより生じるとされている<sup>9)</sup>。そして、加熱乾燥によって膨張コンクリートの脱水量は多くなり、常温下では小さいとされている乾燥収縮ひずみ<sup>10)</sup>も、ブレンコンクリートよりもわずかながら大きくなる傾向を示したと推察される。このため、コンクリートの自由収縮ひずみが図-6に示したように相違し、全ひずみエネルギー量も図-9のように表わされたものと思われる。

以上より、コンクリートの自由収縮ひずみとコンクリート要素の非線形な引張応力-ひずみ関係を与えた時、各はり供試体のひずみの実測値から算出した全ひずみエネルギー量は、コンクリートマトリックス別に全拘束鉄筋比の3次関数によりほぼ表わされることが明らかとなった。ここでは、ひずみの実測値より全ひずみエネルギー量を算出したが、全ひずみエネルギー量の全拘束鉄筋比の関数としての推定精度が比較的良好なことから、逆に全ひずみエネルギー量からもひずみを推定できるものと思われる。しかし、この全ひずみエネルギー量を用いて加熱乾燥による収縮ひずみを推定しようとする場合、材料の非線形性を考慮するために、計算が複雑となる。したがって、実用上は、計算の容易な a) の仕事量一定の概念を用いる方法で十分であろうと思われる。

(3) 脱気から重合までの工程において発生する収縮ひずみ

MMAモノマーの重合に伴い、はり供試体に収縮ひずみが生じる。図-12には、鋼繊維混入率別に、拘束鉄筋比が脱気から重合までの工程において軸方向鉄筋位置に発生する収縮ひずみに及ぼす影響を示してある。図中に示す上側および下側の鉄筋位置でのひずみの測定値は、乾燥工程で発生するひずみの場合と同様にして、直線式から求めた値である。この直線式からのひずみの分散の平方根は、各はり供試体ごとにすべての測定データについて算出すると、 $20 \sim 41 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。また、乾燥から重合までの工程で生じる収縮ひずみについて、同様に求めた直線式からのひずみの分散の平方根も、 $28 \sim 54 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。なお、軸方向鉄筋端部から27cm以上内側の領域では、脱気から重合ま

での工程および乾燥から重合までの工程で生じる収縮ひずみのいずれに対しても、乾燥収縮ひずみの場合と同様に、平面保持の仮定がおおむね成立するものと考えている。

脱気から重合までの工程で生じる収縮ひずみの推定に当たっては、“単位体積の鉄筋コンクリートにおいて、MMAモノマーが重合する際にコンクリートと鉄筋に対してなす全ひずみエネルギー量が一定である”という新たな仮定を設ける。これは、MMAモノマーの重合収縮変形を加熱乾燥後のコンクリートと鉄筋が拘束すると仮定するものである。このため、鋼繊維の効果は、鋼繊維を混入したコンクリートという一つの拘束体を考え、その剛性として考慮する。なお、上記の仮定は、含浸モノマーの種類が同一で、各はり供試体の含浸率がほぼ同一値であるために設けた。そして、a) コンクリートの剛性を一定値とした線形計算の場合と、b) MMAモノマーの重合に伴うコンクリートの剛性の変化を考慮した非線形計算の場合について検討した。この際、全ひずみエネルギー量は、測定値と推定値の比のすべてのはり供試体に対する平均値が1.0となるように定めた。

a) 線形計算による方法

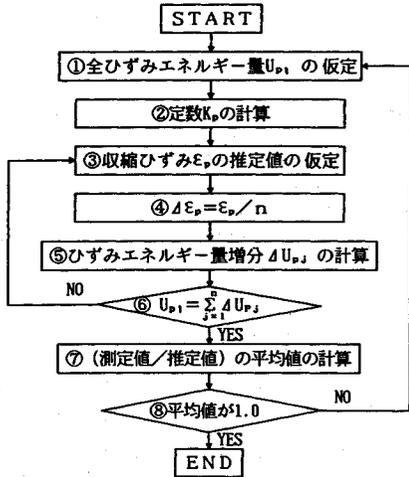
コンクリートの剛性は、加熱乾燥後の値  $E_{c1}$  とする。そして、式(9)に示す全ひずみエネルギー量  $U_{p0}$  は、すべてのはり供試体について同じ値であると仮定する。ここで、コンクリートのひずみ  $\epsilon_c$  および鉄筋のひずみ  $\epsilon_s$  のいずれも、はり供試体の収縮ひずみ  $\epsilon_p$  と一致すると仮定すると、式(9)は式(10)のようになる。

$$U_{p0} = E_{c1} \cdot \epsilon_p^2 / 2 + P_s \cdot E_s \cdot \epsilon_p^2 / 2 \dots \dots \dots (9)$$

$$U_{p0} = (E_{c1} + P_s \cdot E_s) \cdot \epsilon_p^2 / 2 \dots \dots \dots (10)$$

b) 非線形計算による方法

MMAモノマーが重合に伴ってはり供試体に発生する収縮ひずみ  $\epsilon_p$  を所定の分割数  $n$  で除したものを、収縮ひずみ増分  $\Delta \epsilon_p$  とする。そして、コンクリートの剛性は、MMAモノマーが重合する際にコンクリートと鉄筋に対してなすひずみエネルギー量増分  $\Delta U_{p1}$  のそれま



図一13 MMAの重合に伴う収縮ひずみを推定するフローチャート

での総和の関数として、式 (11) により表されると仮定する。これは、コンクリートの剛性が含浸した MMA モノマーの重合の進行度により直線的に高くなると仮定することに相当する。したがって、全ひずみエネルギー量  $U_{p1}$  および重合終了時のコンクリートの剛性  $E_{c2}$  は、それぞれ式 (13) および式 (14) により表される。

$$E_m = E_{c1} + K_p \cdot \sum_{j=0}^{m-1} \Delta U_{pj} \quad (1 \leq m, \Delta U_{p0} = 0) \dots\dots(11)$$

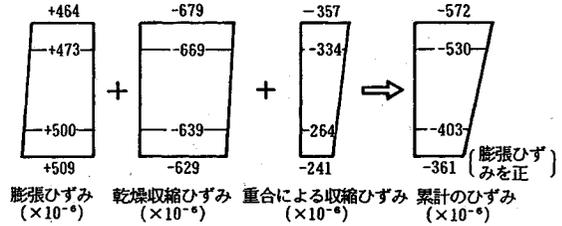
ここに、 $K_p$  : 定数、 $\Delta U_{pj}$  : 式 (12) で表されるひずみエネルギー量増分である。

$$\Delta U_{pj} = \left\{ \left( \sum_{k=1}^j E_k \cdot \Delta \epsilon_p \right) + P_s \cdot E_s \cdot j \cdot \Delta \epsilon_p \right\} \cdot \Delta \epsilon_p \dots\dots(12)$$

$$U_{p1} = \sum_{j=1}^n \Delta U_{pj} \dots\dots(13)$$

$$E_{c2} = E_{c1} + K_p \cdot U_{p1} \dots\dots(14)$$

収縮ひずみを推定する際のフローチャートを、図一13に示す。すなわち、①全ひずみエネルギー量  $U_{p1}$  の値を仮定する。②加熱乾燥後のコンクリートの剛性  $E_{c1}$  と重合後の剛性  $E_{c2}$  を用いて、式 (14) から定数  $K_p$  を算定する。③各はり供試体に対する収縮ひずみ  $\epsilon_p$  の値を仮定する。④収縮ひずみ増分  $\Delta \epsilon_p$  を定める。⑤ひずみエネルギー量増分  $\Delta U_{pj}$  を式 (12) により求める。⑥ $\Delta \epsilon_p$  の総和が  $\epsilon_p$  となるまでのひずみエネルギー量増分の合計値を、式 (13) により求める。この合計値が  $U_{p1}$  の仮定値と一致するかどうかを調べる。一致した場合は、 $\epsilon_p$  を仮の推定値とする。一致しなかった場合には、 $\epsilon_p$  の値を補正して、③に戻る。⑦仮の推定値となった  $\epsilon_p$  を用いて、すべてのはり供試体に対する(測定値/推定値)の平均値を求める。⑧平均値が1.0となった場合は、その時の各はり供試体の  $\epsilon_p$  を最終的な推定値とする。平均値が1.0とならなかった場合は、 $U_{p1}$  の値を補正し、



図一14 製造工程で鉄筋膨張コンクリートはりに発生するひずみ勾配(拘束鉄筋比1.38%の場合)

①に戻る。

膨張コンクリートを用いた12体のすべてのはり供試体について、線形計算による全ひずみエネルギー量  $U_{p0}$  と非線形計算による全ひずみエネルギー量  $U_{p1}$  を求めた。線形計算および非線形計算による推定結果は、前述の図一12に示す。また、(測定値/推定値)の標準偏差は、測定値をはり高さ方向の平均値とした時、線形計算による場合が0.096となり、非線形計算による場合が0.097となった。したがって、前述した全ひずみエネルギー量が一定であるという仮定を用いる方法により、重合に伴って鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりに生じる収縮ひずみを比較的精度よく推定できると思われる。そして、収縮ひずみを推定する場合、MMAモノマーの重合に伴うコンクリートの剛性の変化を考慮する必要性は、小さいと考えられる。

#### 4. 初期応力の推定

上下対称に配筋した鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの製造工程における変形状態について、前述のように実験的に検討した。この結果、軸方向鉄筋端部から鉄筋径の約27倍以上離れた内側の領域においては、製造工程ではりに発生するひずみの最終値に対し、平面保持の仮定がおおむね適用できると考えられた。しかし、拘束鉄筋比が1.38%で、鋼繊維を混入していないはり供試体の場合を図一14に例示するように、①蒸気養生工程、②乾燥工程および③脱気から重合までの工程という3つに大別したいずれの工程において生じるひずみも、はりが下側にたわむ形にはり高さ方向にひずみ勾配が生じた。そして、各工程で生じるひずみが総和された時、ひずみ勾配は最大となる。このため、初期応力の算定に当たっては、ひずみ勾配を考慮する必要があると考えられる。

ひずみ勾配の原因としては、次のようなことが考えられる。まず、図一2に示す蒸気養生の最高温度以降の冷却過程では、はりの温度が周囲よりも高くなり、はり上層部は乾燥することが想定される<sup>11)</sup>。ひずみ勾配に関する確認実験を行った結果、完全な密封状態とせず、はり上層部から水分の蒸発を許容していることが、上層部

表一3 はり上縁および下縁のコンクリートに生じる初期応力と引張強度

供試体	拘束鉄筋比 (%)	初期引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )		引張強度* (N/mm <sup>2</sup> )
		上縁	下縁	
PIC-B1	0.69	0.784	0.389	12.9
PIC-B2	1.38	1.45	0.882	12.9
PIC-B3	2.07	1.99	1.28	11.6
PIC-B4	2.76	2.36	1.62	11.6
SFPIC1.5-B1	0.69	0.686	0.343	13.1
SFPIC1.5-B2	1.38	1.29	0.790	13.1
SFPIC1.5-B3	2.07	1.81	1.12	13.1
SFPIC1.5-B4	2.76	2.07	1.37	13.1
SFPIC3.0-B1	0.69	0.717	0.392	14.7
SFPIC3.0-B2	1.38	1.21	0.653	15.5
SFPIC3.0-B3	2.07	1.71	1.11	15.5
SFPIC3.0-B4	2.76	1.82	1.13	13.8
PC-B1	0.69	0.392	0.356	3.28
PC-B2	1.38	0.727	0.668	4.02
PC-B3	2.07	0.808	0.754	4.31
PC-B4	2.76	0.895	0.877	4.02

\*ひび割れ発生荷重より算出した割裂引張強度

の膨張ひずみが下層部の値よりも小さくなることの主な原因と考えられた。また、反応熱法<sup>12)</sup>でセメントペースト量を調べた結果、上層部の方が下層部に比べて、約11%大きくなる傾向となった。このため、加熱乾燥による収縮ひずみは、セメントペースト量が少なく、骨材量の多い下層部の方が、上層部よりも小さくなる傾向になったと推察される。さらに、細孔径が30~460 000 Åの範囲の細孔容積を測定した結果では、上層部の方が下層部よりも約27%多くなった。すなわち、脱気から重合までの工程においては、細孔容積の多い上層部のモノマー含浸量が下層部の含浸量よりも多くなるのが主な原因となって、MMAモノマーの重合に伴う収縮ひずみに勾配を生じたと思われる。

表一3は、ひずみの測定結果に基づいて、各はり供試体の上縁および下縁のコンクリートの初期応力を推定した結果と、強度管理用供試体の割裂引張強度を示したものである。表一3に示す供試体の記号において、PIC、SFPIC1.5、SFPIC3.0およびPCは、それぞれ鋼繊維を混入していないポリマー含浸コンクリート、鋼繊維混入率が1.5 vol. %のポリマー含浸コンクリート、鋼繊維混入率が3.0 vol. %のポリマー含浸コンクリートおよびプレーンコンクリートを表す。その後続くB1、B2、B3およびB4は、それぞれ拘束鉄筋比が0.69、1.38、2.07および2.76%のはり供試体を指す。なお、表一3には、蒸気養生後約2箇月間実験室に静置したプレーンコンクリートを用いたはり供試体の初期応力も、参考として示した。

表一3に示す初期応力の算出に当たっては、まず軸方向鉄筋とはり供試体表面のひずみの測定値に対し、測定点の高さごとの平均値を求め、これを各測定点の高さにおけるひずみの測定値と考えた。このひずみについて、第3章で述べたように、平面保持の仮定がおおむね適用できると考えられたことから、直線回帰を行ってはり高さ方向のひずみ分布に対する直線式を求めた。そして、

各製造工程ごとに求めた鉄筋位置における直線式によるひずみの累計を軸方向鉄筋のひずみと考慮して、軸方向鉄筋に作用している力を算出した。この軸方向鉄筋に作用している力と逆向きの力をコンクリートに作用させ、線形弾性論を適用して、はり上縁とはり下縁の応力を算出した。供試体PIC-B4や供試体SFPIC1.5-B4のように、最初にケミカルプレストレスを与えているにも関わらず、2 N/mm<sup>2</sup>を超えるコンクリートの初期引張応力が生じるものもある。また、はり上縁とはり下縁の応力差についても、ひずみ勾配の影響を大きく受けるために、供試体PIC-B4のように、0.74 N/mm<sup>2</sup>と大きな値となるものもある。したがって、初期応力を精度よく推定するには、第3章で検討したひずみの推定方法の他に、製造工程に応じた型枠の性状や打込み・締固め方法に至るまでのひずみ勾配の推定方法が必要になると考えられる。

## 5. 結 論

本研究の範囲で得られた結論は、以下の通りである。

(1) 鋼繊維混入率を0~3.0 vol. %とした鉄筋膨張コンクリートはりに対し、既往の仕事量一定の概念に基づく方法を適用して蒸気養生直後の膨張ひずみを推定した。測定値と照合した結果、推定値は、測定値と比較的によく一致した。したがって、単位体積当たりの膨張コンクリートが鉄筋と鋼繊維に対してなす仕事量が一定であるとした既往の推定方法は、通常の常温養生を行う場合に適用されてきたが、蒸気養生を行う場合にも、実用上適用できると考えられる。

(2) 150°Cの温度で加熱乾燥した鉄筋コンクリートはりの乾燥収縮ひずみを、コンクリートの乾燥後の剛性と自由収縮ひずみを用いて弾性計算により推定した。この結果、推定値は、拘束鉄筋比の増大に伴い、乾燥収縮ひずみを過大評価する傾向となった。そこで、仕事量一定の概念を適用する推定方法について検討した。この方法による推定値は、測定値と比較的よい対応関係を示した。しかし、加熱乾燥により、ひび割れが発生している可能性が高い。したがって、仕事量一定の概念を適用して、加熱乾燥による収縮ひずみを推定するには、基本的に、破壊に消費される仕事量を考慮する必要があるものと考えられる。ただし、適用可能と考えられる範囲においては、仕事量一定の概念をそのまま便宜的な乾燥収縮ひずみの推定に適用してもよいものと思われる。

(3) 乾燥収縮要素がコンクリート、鋼繊維および鉄筋に対してなす全ひずみエネルギー量という概念を新たに仮定し、コンクリートの非線形性と初期剛性の変化を考慮して、加熱乾燥による収縮ひずみを推定するという方法についても検討した。この結果、全ひずみエネルギー量と全拘束鉄筋比との関係は、コンクリートマトリック

ス別に原点を通る3次関数によりほぼ表わされることが明らかとなった。したがって、全ひずみエネルギー量をコンクリートマトリックス別に全拘束鉄筋比の関数とするという乾燥収縮ひずみの推定方法が考えられる。

(4) MMAモノマーが重合する際にコンクリートと鉄筋に対してなす全ひずみエネルギー量が一定であるという仮定を新たに設け、重合によるコンクリートの剛性の変化を考慮して、鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりに生じる収縮ひずみを推定した。そして、この方法により、脱気から重合までの工程ではりに生じる収縮ひずみを比較的精度よく推定できることが明らかとなった。しかし、この推定結果とコンクリートの剛性を加熱乾燥後の値に固定した場合の結果を比較した時、ほとんど差が認められなかった。このため、収縮ひずみの推定に、MMAモノマーの重合に伴ってコンクリートの剛性が変化することを考慮する必要性は小さいと考えられる。

(5) 鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりの製造工程で生じるひずみは、はりが下側にたわむ形に生じる傾向を示した。このため、初期応力算定の際には、断面高さ方向のひずみ勾配を考慮する必要があると考えられる。一方、ひずみの測定結果によれば、軸方向鉄筋端部から鉄筋径の約27倍以上離れた領域においては、平面保持の仮定がおおむね適用できると考えられた。そこで、コンクリートの初期応力を、軸方向鉄筋位置に偏心荷重が作用する時の応力として推定した。この結果、ケミカルプレストレスを導入しているにも関わらず、 $2\text{N/mm}^2$ を超える初期引張応力が生じることが明らかとなった。

謝 辞： 本論文は、学位論文の一部を中心にとりまとめたものである。主査をして頂いた東京大学工学部土木工学科教授 岡村 甫先生には、貴重なご助言ならびにご指導を賜りました。深く感謝致します。また、研究の実施に当たっては、秩父セメント(株)の中央研究所長 鈴木 脩氏、開発部長 吉田八郎氏、関連製品本

部参事役 石崎寛治郎氏に、ご支援を賜りました。

#### 参 考 文 献

- 1) 田沢栄一・星野親房・越川勇三・小林貞雄・井福直之：樹脂含浸セメント製品に関する基礎研究，コンクリートジャーナル，Vol.9，No.1，pp.2~13，1971年1月。
- 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，土木学会論文集，第384号/V-7，pp.111~118，1987年8月。
- 3) 小柳 治・大野定俊・村井信夫・林 富士男：RECの収縮性状と補強筋による拘束応力の発現，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.241~244，1980年。
- 4) 青柳征夫・阿部博俊・金津 努：低温下における鉄筋コンクリート曲げ部材の力学的特性，電力中央研究所報告，研究報告：379015，pp.35~37，1979年12月。
- 5) Purkiss, J.A. : Thermal Expansion of Steel Fiber Reinforced Concrete up to 800°C, Composite Structures4, Vol.1, pp.1404~1415, 1987.
- 6) 南 和孝・田澤栄一・寺西修治：高温条件下のコンクリートの力学的性質に及ぼす微視的温度応力の影響，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.173~180，1990年8月。
- 7) 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，pp.107~120，1987年9月。
- 8) 坂内秀雄・中川晃次：エトリンジャイトの加熱変化，石膏と石灰，No.97，pp.253~259，1968年11月。
- 9) 山崎之典・流 洋・根本銀作・杉浦孝三：膨張セメントの初期膨張現象の観察，セメント技術年報，第28巻，pp.318~321，1974年。
- 10) 戸川一夫・中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす使用材料の影響，土木学会論文報告集，第326号，pp.129~140，1982年10月。
- 11) 森 茂二郎：新しいセメントとコンクリート，建設総合資料社，pp.239~242。
- 12) 神田 衛：まだ固まらないコンクリートの水セメント比の測定方法，土木学会論文報告集，第193号，pp.115~123，1971年9月。

(1992.6.10 受付)

## A STUDY ON INITIAL STRESS OF REINFORCED POLYMER IMPREGNATED CONCRETE BEAMS

Yutaka KIMACHI

Reinforced polymer impregnated concrete beams are manufactured by the processes of curing, drying, evacuation, impregnation, and polymerization. The initial stress of concrete in the reinforced polymer impregnated concrete beams can generally be tensile stress. Therefore, it is important to grasp the initial stress in accurately analysing the flexural behavior of reinforced polymer impregnated concrete beams. The strain generated in each manufacturing process is studied experimentally as to the reinforced polymer impregnated concrete beams using expansive concrete and steel fiber. Based on the experimental results, the methods for estimating the initial stress of the beams are proposed.