

(1) 鉄筋のP C緊張材としての利用に関する研究

九州工業大学 正会員 ○出光^{イデミツ タカシ} 隆 山崎竹博
九州工業大学 正会員 渡辺 明 江崎 純

1. まえがき

従来用いられてきたRC二次製品を限界状態設計法で再検討してみると、環境条件次第では、矢板・床版等のなかに使用時のひび割れ限界状態を満足しないものが見受けられる。このような場合、PC鋼材を用いる代わりに、主鉄筋を緊張すれば、終局耐力を変えることなく、ひびわれ制限をクリアーできる場合が多い。すなわち、RC部材のひびわれ抑制用としての緊張材には、鉄筋の使用も可能なのである。^{(1) (2)}

本論文は、鉄筋緊張PC部材について、導入引張応力の有効係数、鉄筋の端部定着特性およびリラクセーション率等について検討したものである。

2. 鉄筋の導入引張応力によるひびわれ抑制効果

鉄筋に導入される緊張力はPC鋼材の場合の約 $1/3 \sim 1/2$ であるから、クリープ・乾燥収縮等によって消滅してしまう場合も考えられる。そこで、実際の二次製品について、種々の条件下で鉄筋の有効引張応力の計算を行い、それによるひびわれ抑制効果を調べてみた。

対象とした製品はチャンネル型の床スラブであるが、計算は図-1に示すT型ばりに置き換えて実施した。乾燥収縮量を $\varepsilon = 100\mu, 200\mu, 300\mu, 500\mu$ 、クリープ係数を $\psi = 2, 3$ とそれぞれ変えた場合について、鉄筋の導入引張応力（弾性変形直後の応力） σ_{0i} を0から4000 kg/cm²まで変化させて有効係数（=有効引張応力／導入引張応力）を計算した。鉄

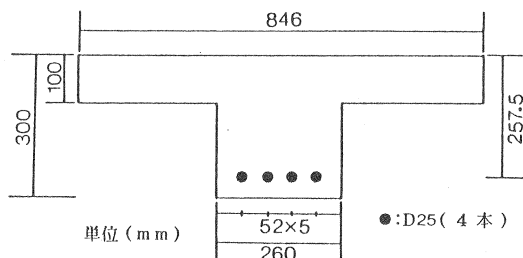


図-1 計算に用いたT型はり

筋のリラクセーション率については3. で詳しく述べるが、ここでは0とした。

鉄筋の導入引張応力と有効係数の関係を図-2に示す。二次製品のコンクリートの乾燥収縮量は $\varepsilon = 300\mu$ 以下であるから、 $\sigma_{0i} = 1500$ kg/cm²以上で緊張すれば、有効係数は $\psi = 2$ の時30～50%、 $\psi = 3$ の時20～40%となる。つまりSD30の降伏点の50%程度で緊張すれば、ひびわれ抑制に役立つ程度のプレストレスは十分に残留するのである。

次に、 $\varepsilon = 200\mu$ 、 $\psi = 2$ の場合について、導入引張応力と有効引張応力およびデコンプレッション状態・使用時の設計曲げモーメント $M = 7.8$ tf・m作用状態での鉄筋応力等との関係を図-3に示す。また、導入引張応力とひびわれ幅との関係を図-4に示す。ひびわれ幅の計算にはコンクリート標準示方書の式を用いた。なお、同式では、乾燥収縮・クリープなどによるひびわれ幅の増加を考慮して、 $\varepsilon_{cs} = 150\mu$ の推奨値を与えているが、鉄筋が

緊張されている場合はコンクリートの収縮を拘束しないと考えられるから、 $\epsilon_{cs}=0$ の場合についても計算して示した。図-3 から、鉄筋の緊張力を増加させることにより、曲げモーメントによる増加応力 $\Delta\sigma_s$ は著しく減少することが分かる。また、導入引張応力が 2500 kg/cm^2 (SD30 の降伏点の83%、SD50 の降伏点の50%) 以下であれば、曲げモーメント作用時の鉄筋応力 σ_s (デコンプレッション時の鉄筋応力 σ_{ss} + 増加応力 $\Delta\sigma_s$) は、RC の場合より1割程度しか増えないこと、導入引張応力が 4000 kg/cm^2 (SD50 の降伏点の80%) と大きくなれば、曲げモーメントによって、鉄筋位置のコンクリートには引張応力は生じないことなども分かる。ひびわれ幅は鉄筋増加応力 $\Delta\sigma_s$ の関数であるから、図-4 に見られるように、導入引張応力が増すにつれて、著しく減少している。この製品では、 1500 kg/cm^2 で緊張すれば、特に厳しい環境条件下でも、十分にひびわれ限界状態を満足することが分かる。同図には、前述したように、 $\epsilon_{cs}=0$ の場合も併記しているが、RC ($\sigma_{st}=0$) との整合性は、その方が $\epsilon_{cs}=150\mu$ の場合より良くなっている。 $\epsilon_{cs}=150\mu$ は、乾燥収縮によってコンクリートに生じる負のプレストレスのひびわれへの影響を考慮したものであり、主鉄筋を緊張するプレストレストコンクリートでは、鉄筋はコンクリートの収縮を拘束しないから $\epsilon_{cs}=0$ とするのが適当と考えられる。

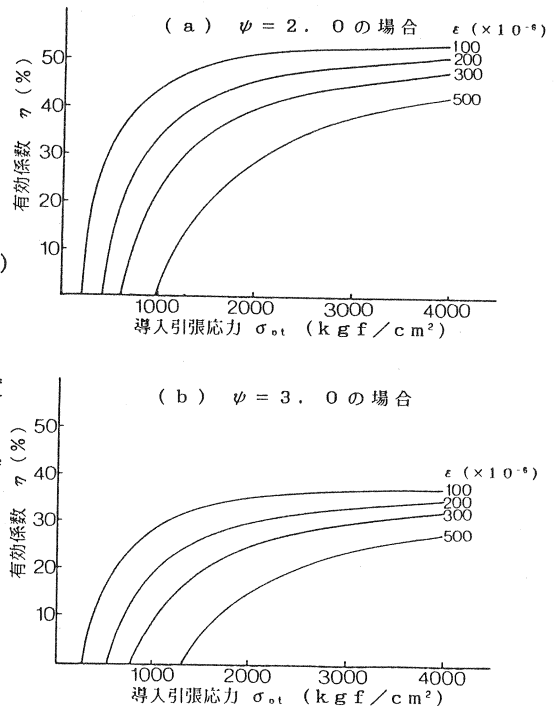


図-2 有効係数と導入引張応力との関係

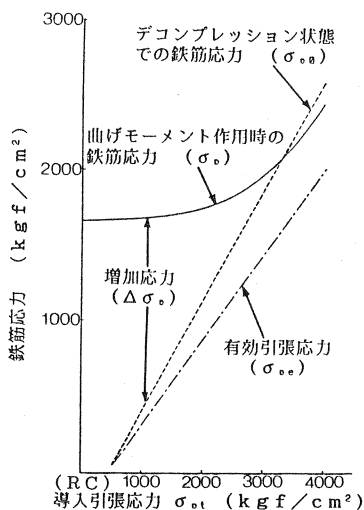


図-3 導入引張応力と鉄筋応力との関係

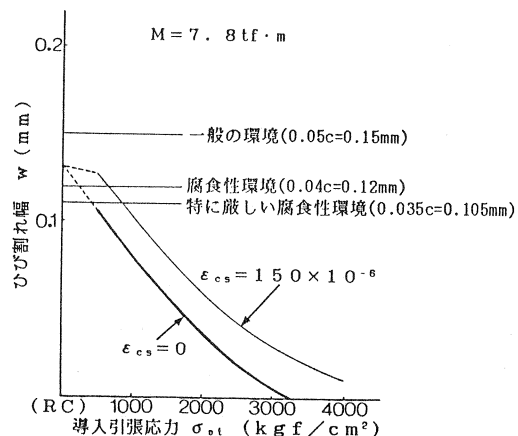


図-4 導入引張応力とひびわれ幅との関係

3. 鉄筋のリラクセーション率

JIS Z 2276に準じて、常温および高温時のリラクセーション試験を実施した。鉄筋にはSD35- ϕ 15およびSD50- ϕ 13を用いた。その性質、載荷荷重等を表-1に示す。温度条件は常温時は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、高温時は蒸気養生を考慮して、最高温度 100°C とした。試験結果を図-5に示す。高温時の場合は温度変化も併記した。

表-1 鉄筋供試体の種類

種類	直径 (ϕ)	機械的性質			載荷荷重 $\sigma_v \times 0.8$ (kgf)
		降伏点荷重 (kgf)	引張荷重 (kgf)	伸び (GL3D%)	
SD50	13	7060	9360	22.6	5310
SD35	15	6380	9740	25.8	4950

常温時の試験結果から、10時間後のリラクセーション率は、SD35、SD50について、それぞれ $\gamma = 0.99\%$ 、 0.53% となっている。それらの結果から、1000時間後のリラクセーション率を推定すると、SD35、SD50について、それぞれ $\gamma = 3.6\%$ 、 1.3% となる。高温時については、温度変化によって複雑な曲線を描くが、20時間後のリラクセーション率はSD35、SD50について、それぞれ $\gamma = 2.0\%$ 、 4.5% と、常温時とは逆になっている。SD50の場合、温度が常温に戻ると、曲線は横ばい状態となり、 $\gamma = 4.5\%$ と一定の値を示す。SD35では、20時間後の値はSD50のそれより小さいが、曲線は一定値をとらず、常温時の結果を考えると、1000時間後にはSD50より大きくなることも予想される。今回は23時間で試験を打ち切ったが、長時間の測定が必要である。以上の結果から、直ちに定量的な値を決めることはできないが、鉄筋のリラクセーション率は普通のPC鋼材より小さくなる様である。

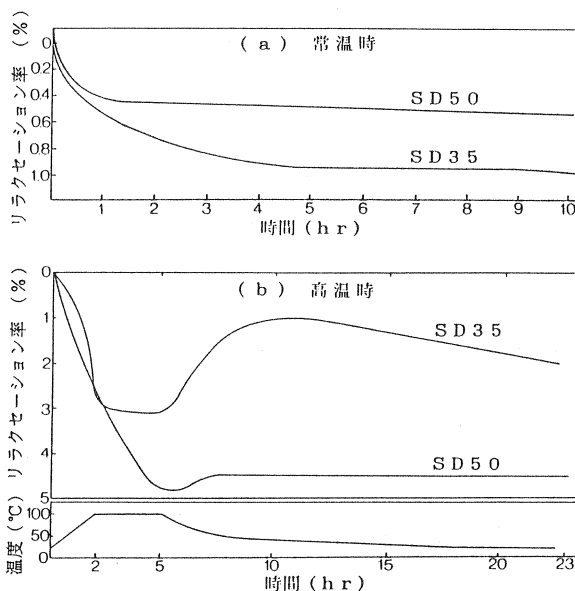


図-5 鉄筋のリラクセーション試験結果

4. 部材端部の鉄筋定着性能

プレテンションPC部材端部での鉄筋定着性能を調べるため、伝達長測定試験を実施した。

4. 1 試験方法

図-6に供試体寸法及びゲージ貼付位置を示す。供試体は長さ104cm、断面は正方形であり緊張材としてSD30-D13鉄筋を中心に配置し、降伏点の80% (2400 kgf/cm^2) で緊張した。コンクリートに導入されるプレストレス量を変えるため辺長を4種類とした。表-2に作製した供試体の種類及び導入時強度、弾性係数等を示す。

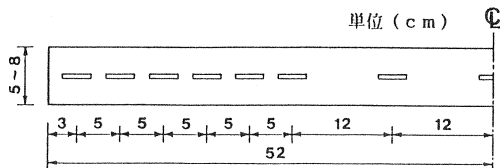


図-6 伝達長試験用供試体

表-2 供試体種類

導入時強度(kgf/cm ²)		120	160	230	断面寸法 (cm×cm)
弾性係数(×10 ⁴ kgf/cm ²)		20	23	19.5	
導入直後の プレストレス量 (kgf/cm ²)	5.4			○	5×5
	7.9		○		5×5
	6.6		○		6×6
	4.5	○			7×7
	4.2	○			8×8

4. 2 試験結果

鋼材の緊張力を段階的に解放して行った場合、導入されるプレストレスは徐々に増加していく。その様子を、導入時コンクリート強度160kgf/cm²、6×6cmの場合を例に取り図-7に示す。導入プレストレス量が増加しても鉄筋の伝達長はほとんど変わらず、応力分布曲線の勾配が増加している。

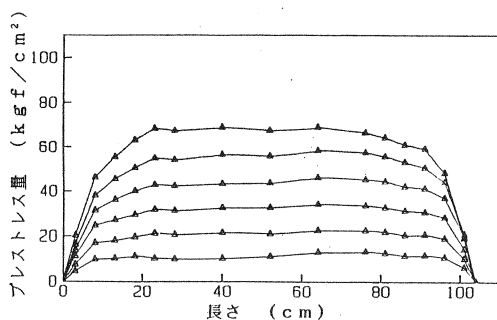
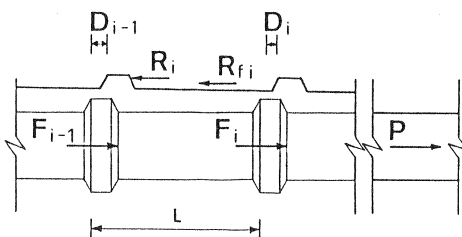


図-7 導入時のコンクリート応力分布



R_i : ふしの機械的抵抗 R_{fi} : ポアソン効果による摩擦抵抗
 F_i : 鉄筋に生じる軸力 P : 有効プレストレス力
 D_i : ふしの相対変位量 L : ふしの間隔

図-8 鉄筋の定着機構モデル

4. 3 付着応力、伝達長等の計算

鉄筋応力のコンクリートへの伝達はふしの機械的抵抗 (R_i) と緊張開放時のポアソン効果による摩擦抵抗 (R_{fi}) の両方によってなされるから、プレテンション部材端部での鉄筋の付着機構は図-8でシミュレートできる。

同図から、 $i-1$ 番目と i 番目のふしおよびふし間に働く力の釣合は

$$F_i - F_{i-1} = R_i + R_{fi} \quad (1)$$

となる。 R_i 、 R_{fi} はそれぞれ D_i 、 F_i の関数で表すことができる。

$$R_i = D_{i-1} / (a + b \cdot D_{i-1}) \quad (2)$$

$$R_{fi} = c + d \cdot F_i \quad (3)$$

ここに、 a 、 b 、 c および d は常数である。 a 、 b はふし1個を有する鉄筋の引き抜き試験から、 c 、 d は厚肉円筒理論による計算からそれぞれ求めることができる。

式③を式①に代入して整理すると

$$F_i - F_{i-1} = R_i + (c + d \cdot F_i) \quad (4)$$

$$F_i = (F_{i-1} + R_i + c) / (1 + d)$$

また、 $i - 1$ 番目と i 番目のふし変位の差は、その間の鉄筋ののびに等しいことから

$$D_i = D_{i-1} - F_i \cdot L / (A_s \cdot E_s) \quad (5)$$

(A_s 、 E_s はそれぞれ鉄筋の断面積、弾性係数)

となる。

いま、 $i = 1$ とすれば F_{i-1} は $F_0 = 0$ 、したがって、 D_0 に適当な値を仮定すれば、式②から R_i を、式④から F_i を、式⑤から D_i を順次得ることができ、 $i = 2, 3 \dots$ と繰り返し計算を行うことにより、任意位置での鉄筋軸力を求めることができる。 D_0 の値が適切であれば $F_i \doteq P_0$ のとき $D_i \doteq 0$ となり、これが繰り返し計算の適合条件となる。

任意点でのふし 1 個に作用する抵抗力から求めた付着応力 (τ_i)、ボアソン効果による摩擦抵抗力から求めた付着応力 (τ_f)、コンクリートに導入されたプレストレス (σ_c) および鉄筋応力 (σ_s) はそれぞれ次式から求まる。

$$\tau_i = R_i / (U \cdot L)$$

$$\tau_f = R_{fi} / (U \cdot L)$$

$$\sigma_c = F_i / A_c$$

$$\sigma_s = F_i / A_s$$

(ただし U : 鉄筋の周長)

端部での τ_i が付着強度より小さければ、低強度コンクリートでも鉄筋定着に必要な付着力を有していることになる。伝達長としては、部材端から有効プレストレスの 95% が確保されるまでの距離が採られているようである。したがって、 $\sigma_c \geq 0.95\sigma_{c0}$ が満足される i の値を求め、 $i = n$ であれば、伝達長は $n \cdot L$ となる。

4. 4 計算結果および考察

式②の a、b および式③の c、d をそれぞれ実験、理論計算によって定め、前記の計算方法によって τ_i 、 τ_f 、 σ_c を求めて図-9 に示す。 σ_c については実測値も併記した。

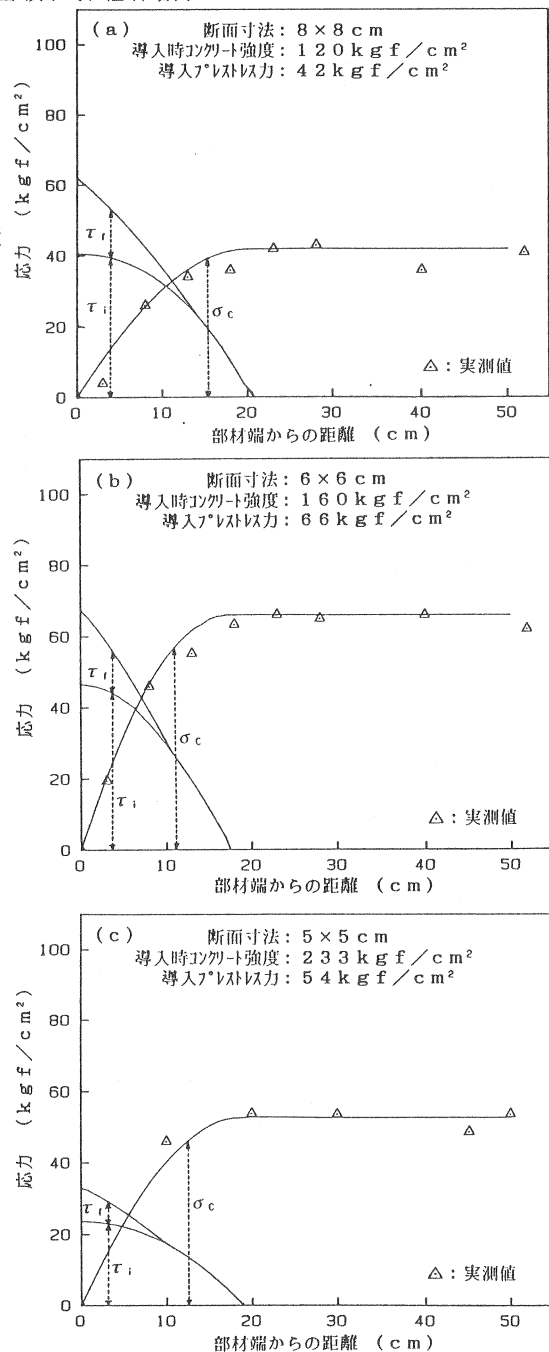


図-9 部材端部における σ_c , τ_i , τ_f の分布

端部での τ_i の最大値は τ_i のその30%程度で、伝達長の1/2付近で消滅し、残りの部分は τ_i のみで付着力を負担している。すなわち、鉄筋のボアソン効果による摩擦力で負担するのは15%以下で、残りの約85%はふしによって負担されるのである。定着部が付着破壊して、鉄筋がすべり込むのは、 τ_i の最大値が付着試験で求めた付着強度を越える場合である。計算結果は τ_i の最大値は約45kgf/cm²と、実験で求めた付着強度の1/2以下であり、鉄筋を緊張する程度のPCでは、プレストレス導入時のコンクリート強度が120～230kgf/cm²と比較的低い場合でも鉄筋の定着性能は十分であることが分かった。なお、異形丸鋼D13の伝達長は、コンクリート強度に関係なく直径の約15倍の値が得られた。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 鉄筋を緊張することにより、ひびわれ幅抑制に必要な有効プレストレス力は十分に確保できる。
- (2) 鉄筋の10時間後のリラクセーション率は、常温の場合、SD35、SD50について、それぞれ $\gamma = 0.53\%$ 、 0.99% 、高温の場合 $\gamma = 2.0\%$ 、 4.5% となり、PC鋼材のそれより小さい。
- (3) 鉄筋を緊張するPCでは、プレストレス導入時のコンクリート強度が150～200kgf/cm²程度でも鉄筋の定着性能は十分である。

(謝辞) 鉄筋のリラクセーションについて貴重なご助言を賜った九州工業大学 迎 静男学長に深謝の意を表します。また、リラクセーション試験にご協力賜った新日本製鉄株式会社 清永定光氏、伝達長試験にご助力頂いた富士ビーエスコンクリート株式会社 各位に対し深甚なる謝意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費・一般研究(C)「鉄筋緊張によるプレキャストRC部材のひびわれ防止に関する研究」(研究代表者 出光 隆)を受けて実施されたものである。

(参考文献)

- (1) 出光、渡辺、村上：鉄筋を緊張材として用いたⅢ種PCはりに関する研究、第8回コンクリート工学年次講演回論文集、1986
- (2) 出光、江崎、藤井：高張力鉄筋を用いてプレストレスを導入したプレストレストコンクリート部材に関する基礎的研究、土木学会第44回年次講演会講演概要集、1989