

プレストレストコンクリートの種別と 所要の引張鋼材断面積との関係について

宮 崎 義 成*

1. 序 論

プレストレストコンクリート（以下PCという）の種別は従前の土木学会“プレストレストコンクリート設計施工指針”によると、フルプレストレッシングとパーシャルプレストレッシングの2種類となっていたが、昭和53年制定の“プレストレストコンクリート標準示方書”によると、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種に分類され、この内Ⅰ種は在来のフルプレストレッシングに相当し、Ⅱ種はパーシャルプレストレッシングにほぼ相当するもので、いずれも使用状態ではひびわれが発生しないことを前提としているが、Ⅲ種では使用状態でひびわれの発生を許容することになった。

これらPCの種別は、PC構造物または部材のうける荷重作用、環境状態、必要な耐用年数等によって定められるものであるが、これらの種別に従って所要の引張鋼材（緊張材および鉄筋）量も変わってくるはずである。

PCに必要な最少引張鋼材量は、各使用状態の条件を最少限に満足するものでなければならぬと同時に、所要の破壊安全度を確保しうるものでなければならぬ。このような観点から、以下PC曲げ部材について、各PC種別ごとに、所要の引張鋼材量を概括的に求める方法を述べ、なお、これら鋼材量を比較検討することにする。

2. 曲げ破壊に対する安全度を確保するために必要な引張鋼材量

破壊に対する安全度の検討に用いる安全係数としては土木学会標準示方書に準じて、次のように仮定する。

材料強度に関する部分安全係数 (r_m)	
コンクリートに対して	$r_m = 1.5$
鋼材に対して	$r_m = 1.1$
荷重作用に関する部分安全係数 (r_f)	
永久荷重作用に対して	$r_f = 1.4$
変動荷重作用に対して	$r_f = 1.6$
計算用設計曲げモーメント	M_d
永久荷重作用による曲げモーメント	M_G

変動荷重作用による曲げモーメント M_Q

全荷重作用による曲げモーメント M

$$M = M_G + M_Q$$

とすると、破壊時安全を確保するに必要な条件は、

$$M_d \geq 1.4M_G + 1.6M_Q = 1.4(M_G + M_Q) + 0.2M_Q$$

$$\therefore M_d \geq 1.4M(1 + M_Q/7M) \dots\dots\dots(2.1)$$

破壊時における内力腕長 z

部材有効高 d

とすると近似的に次式が成立する。

$$z = 0.95d \dots\dots\dots(2.2)$$

一般に破壊時の抵抗モーメントが引張鋼材によって支配されるように設計する方が有利であるから、 M_d は次のように表わすことができる。

$$M_d = (A_s \sigma_{sy} + A_p \sigma_{pu}) z / r_m$$

$$= 1.4M(1 + M_Q/7M) \dots\dots\dots(2.3)$$

ここに、

A_s : 鉄筋の断面積

A_p : PC鋼材の断面積

σ_{sy} : 鉄筋の降伏点応力度

σ_{pu} : PC鋼材の引張強度

r_m : 鋼材強度に関する部分安全係数 (=1.1)

(2.1), (2.2), (2.3) 式より次式が得られる。

$$(A_s \sigma_{sy} + A_p \sigma_{pu}) / (M/d)$$

$$= 1.62(1 + 0.143M_Q/M) \dots\dots\dots(2.4)$$

よって、曲げ破壊に対する安全度を確保するために必要最少限の引張鋼材の総量は、与えられた M, d に対し M_Q/M に比例して増加することがわかる。式(2.3)により実数計算を行うと、表-1の結果が得られる。

表-1

M_Q/M	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$(A_s \sigma_{sy} + A_p \sigma_{pu}) / (M/d)$	1.62	1.64	1.67	1.69	1.71	1.74	1.76

一方、 M_Q/M は一般にスパン (L) によって主として支配されるが、PC橋梁設計例80橋について (M_Q/M) とスパン (L) の関係を統計的に求め図-1を得た。その結果 M_Q/M の平均値は次式で表わされる。

$$M_Q/M = 0.725 - 0.29 \log L \dots\dots\dots(2.5)$$

図-1によると、 $L=10 \sim 200$ mの範囲では $M_Q/M=0.5 \sim 0.1$ の範囲にあり、これに対応する ($A_s \sigma_{sy} +$

* 極東鋼弦コンクリート(株)副社長

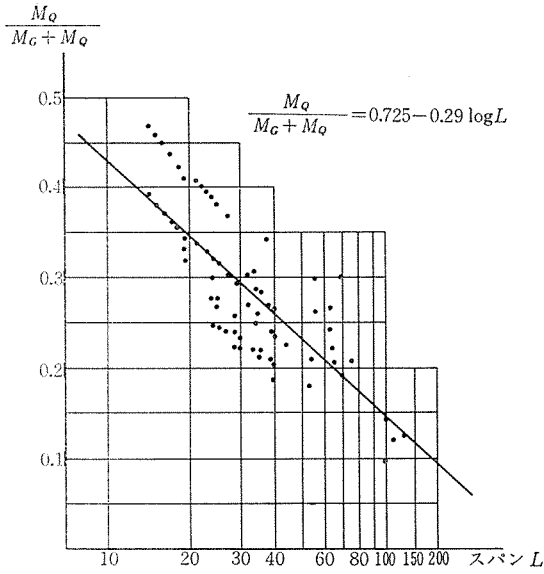


図-1 M_Q/M とスパン L との関係

$A_p\sigma_{pu}/(M/d)$ の値は、表-1 より 1.74~1.64 となる。この差は僅少であるから、その平均値をとり、1.69 としても誤差は $\pm 3\%$ にすぎない。よって所要の引張鋼材量は近似的に次式によって表わされる。

$$(A_s\sigma_{sy} + A_p\sigma_{pu})/(M/d) \approx 1.69 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

3. I 種 PC の場合に必要 PC 鋼材量

I 種 PC の場合では、使用状態での全曲げモーメント (M) に対し、部材引張縁に引張応力を生じないようなプレストレス力を与えるものとする。この場合、部材圧縮側断面積は十分大きく、圧縮縁コンクリート応力度は過大な値とならないものと仮定する。

有効プレストレス力を P_{eI} 、PC 鋼材図心位置と断面引張縁に関する核点との距離を z_0 とすると、次式が成立する。

$$M/P_{eI} \leq z_0 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

P_{eI} は通常 PC 鋼材引張強度 σ_{pu} の 50~55% であるから、平均的に 52.5% とする。すなわち、

$$P_{eI} = 0.525A_p\sigma_{pu} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

(3.1)、(3.2) 式より、この場合の所要 PC 鋼材量は次式で表わされる。

$$A_p\sigma_{pu} = M/0.525z_0$$

すなわち、

$$A_p\sigma_{pu}/(M/d) = 1.90d/z_0 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

上式より、I 種 PC の場合必要 PC 鋼材最少量は与えられた M, d に対し z_0 に逆比例することがわかる。 z_0 は部材の断面形状によって異なるが、実際の橋梁設計例 104 例についてヒストグラムを作成したところ、 z_0 はほぼ正規分布をなし、表-2 に示す統計値を得た。

表-2 より z_0 は近似的に次のごとく仮定することが

表-2 z_0/d の値

断面形状	試料数	z_0/d 平均値	標準偏差	変動係数 (%)
上突縁の広い T 形	29	0.807	0.0134	1.6
上下突ほぼ対称 I 形	22	0.749	0.0286	3.8
箱形(正の曲げモーメントをうける)	34	0.828	0.0168	2.0
箱形(負の曲げモーメントをうける)	19	0.750	0.0293	3.9

できる。この場合、式 (3.3) により I 種 PC のとき使用状態を満足する最少の PC 鋼材量は次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned} & \text{矩形桁} \\ & z_0 = 0.63d, A_p\sigma_{pu}/(M/d) = 3.02 \\ & \text{I 桁, 箱桁 (負の曲げモーメント)} \\ & z_0 = 0.75d, A_p\sigma_{pu}/(M/d) = 2.53 \\ & \text{T 桁, 箱桁 (正の曲げモーメント)} \\ & z_0 = 0.82d, A_p\sigma_{pu}/(M/d) = 2.32 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.4)$$

全作用曲げモーメント (M) と有効高 (d) が与えられると、式 (3.4) により各種断面形についての PC 所要鋼材量を容易に概算することができる。これによって求まる PC 鋼材量は式 (2.6) に示される値よりはるかに大きい。このことは I 種 PC の使用状態で必要とする PC 鋼材の最少量は常に破壊に対する安全を確保するのに十分な量であることを意味する。したがって I 種 PC で設計した場合には、曲げ破壊に対する安全度を改めて検討する必要がないことになる。

4. II 種 PC の場合に必要引張鋼材量

4.1 PC 鋼材量

II 種 PC の場合には、全作用曲げモーメントに対し部材引張縁に引張応力を生じてよいが、この引張応力によってコンクリートにひびわれを生じることがないように、コンクリートの品質によって許容引張応力度 (σ_{ta}) が規定されている。

引張応力度が σ_{ta} になるような有効プレストレス力を P_{eII} とすると、I 種 PC の場合の最小限必要な有効プレストレス力 P_{eI} との間には次の関係が成立する。

$$P_{eII}/P_{eI} = (\sigma_{cs} - \sigma_{ta})/\sigma_{cs} = 1 - \sigma_{ta}/\sigma_{cs} \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

ここに、 σ_{cs} は全荷重作用によって生じる引張応力度。

永久荷重作用による曲げモーメント (M_G) は、プレストレッシング時に作用する永久荷重による曲げモーメント (M_{G1}) とプレストレッシング後に作用する永久荷重による曲げモーメント M_{G2} に分けられる。すなわち、

$$M_G = M_{G1} + M_{G2}$$

プレストレッシング後に作用する曲げモーメントを $4M$ とすると、

$$4M = M_{G2} + M_Q = M - M_{G1}$$

M_{G1} の作用でプレストレッシングにより PC 鋼材配

置側断面縁に生じる圧縮応力度の最大値は、コンクリートの許容圧縮応力度 σ_{ca} であるとする、プレストレス後作用する曲げモーメント ΔM によって生じる応力度は $(\sigma_{ca} + \sigma_{ta})$ 以内でなければならない。よって次式が成立する。

$$\sigma_{cs}/M = (\sigma_{ca} + \sigma_{ta})/\Delta M \dots\dots\dots(4.2)$$

(4.1), (4.2) 式より,

$$P_{eII}/P_{eI} = 1 - \frac{\sigma_{ta}}{\sigma_{ca} + \sigma_{ta}} \cdot \frac{\Delta M}{M} \dots\dots\dots(4.3)$$

土木学会標準設計方書によると、 σ_{ck} , σ_{ca} , σ_{ta} は次の値である。

表-3

σ_{ck} (kg/cm ²)	300	400	500	600	記 事
σ_{ca} "	120	150	170	190	長方形断面
σ_{ca} "	110	140	160	180	T形および箱形断面
σ_{ta} "	20	25	30	35	

表-3 の値を用い、 $\sigma_{ta}/(\sigma_{ca} + \sigma_{ta})$ の値を計算すると表-4 のとおりである。

表-4

σ_{ck} (kg/cm ²)		300	400	500	600
$\sigma_{ta}/(\sigma_{ca} + \sigma_{ta})$	長方形	0.143	0.143	0.150	0.156
	T形および箱形	0.154	0.152	0.158	0.163

σ_{ck} は 300 kg/cm²~500 kg/cm² の場合が多いから、 $\sigma_{ta}/(\sigma_{ca} + \sigma_{ta})$ の値は上記範囲の平均値をとり、次のごとく仮定すると、(4.3) 式は次のように表わされる。

矩形断面の場合

$$P_{eII}/P_{eI} = 1 - 0.145\Delta M/M \dots\dots\dots(4.4)$$

T形および箱形断面の場合

$$P_{eII}/P_{eI} = 1 - 0.155\Delta M/M$$

(4.4) 式の計算値は表-5 に示してあるが、これによると、断面形状による P_{eII}/P_{eI} の値の差は極めて僅少であるから、以下断面形状による差を無視し、 P_{eII}/P_{eI} の値としては、表-5 の下欄にある平均値を用いて論ずることにする。

所要の PC 鋼材量は P_e に比例するから、表-5 の

表-5 P_{eII}/P_{eI}

$\Delta M/M$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
断面形状						
矩 形	0.985	0.971	0.956	0.942	0.927	0.913
T形および箱形	0.984	0.969	0.953	0.938	0.922	0.907
平均値	0.985	0.970	0.955	0.940	0.925	0.910

値はすなわち II 種 PC と I 種 PC の場合に必要な PC 鋼材量の比率を表わすものである。I 種 PC の場合必要な PC 鋼材量はすでに (3.4) 式で与えられているから、II 種 PC の場合に必要な PC 鋼材量は表-5 より

容易に算出できる。この値は表-6 および図-2 に示される。

表-6, 図-2 で明らかとなり、II 種 PC の場合の PC 鋼材所要量は、I 種 PC に比して、 $\Delta M/M$ が大きいほど多く、 $\Delta M/M$ が小さいほど少ない。 $\Delta M/M$ は図-1 の M_Q/M の関係に近く、一般にはスパンが 10~20 m 程度で 0.4, スパンが 100~200 m 程度で 0.1 である。PC 鋼材の減少量は前者の場合で 6%, 後者の場合で 1.5% となり、スパンの大きい範囲では PC 鋼材節減の意味ではあまり効果がない。また II 種 PC の場合の PC 鋼材最少必要量のみでも、式 (2.4) で示される破壊時安全を確保するために必要な最少引張鋼材量よりも常に多くなることが明白であり、I 種 PC の場合と同様、II 種 PC の場合には破壊時安全を再検討する必要のないことがわかる。

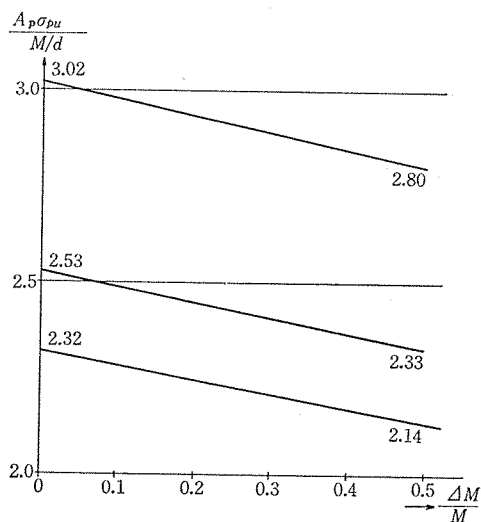


図-2 II 種 PC の場合必要な PC 鋼材量

表-6 II 種 PC の場合必要な PC 鋼材量 $A_p \sigma_{pu}/(M/d)$

部材断面形状	z_0	$\Delta M/M$					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
矩 形	0.63	3.02	2.97	2.93	2.88	2.84	2.80
I 桁および負の曲げをうける箱桁	0.75	2.53	2.49	2.45	2.41	2.37	2.33
上突縁の大きい T 形および正の曲げをうける箱形	0.82	2.32	2.28	2.25	2.21	2.18	2.14

4.2 引張鉄筋量

II 種 PC の場合には、次式で表わされる引張鉄筋量を付加する必要がある。

$$A_s = T_c / \sigma_{sa}$$

ここに、

T_c : 断面に起こっているコンクリートの全引張力

σ_{sa} : 引張鉄筋の許容応力度

$$\sigma_{sa} = r \sigma_{sy} \quad (r < 1)$$

とすると、

$$A_s \sigma_{sy} = T_c / r \dots\dots\dots(4.5)$$

T_c を求めるため、全曲げモーメント作用により部材断面に生じる応力度が図-3 に示すとき分布となるものと仮定する。すなわち、コンクリート圧縮縁では圧縮応力度が σ_{ca} 、引張縁では σ_{ta} となっているものと仮定する。

コンクリート引張縁に σ_{ta} なる応力度を生ぜしめる曲げモーメントを M' とすると、次式が成立する。

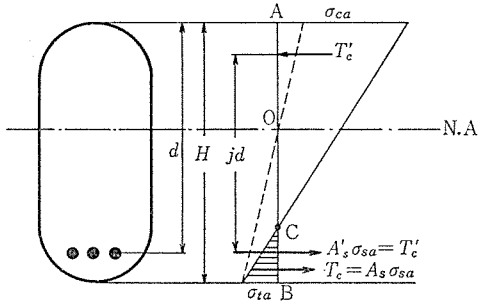


図-3

$$(M - M') / M = P_{eII} / P_{eI}$$

書き直して、

$$M' = (1 - P_{eII} / P_{eI}) \cdot M$$

(4.1) 式より、

$$M' = (\sigma_{ta} / \sigma_{cs}) \cdot M$$

矩形断面の場合を考えると、

$$M' = (\sigma_{ta} / \sigma_{ca}) \cdot M$$

$\sigma_{ta} / \sigma_{ca}$ は土木学会標準示方書に示される値より計算すると、ほぼ 1/6 とみなされる。よって、

$$M' = M / 6 \dots\dots\dots(4.6)$$

曲げモーメント M' のみが作用した場合、断面に生じる応力度は図-3 の点線で示される。この場合、断面中立軸上下のコンクリート断面に生じる全応力度は等しく T'_c で表わされる。鉄筋コンクリートとして、この場合必要な鉄筋断面積を A'_s とすると、 A'_s は近似的に次式で表わされる。

$$A'_s \sigma_{sa} = M' / jd = T'_c$$

(4.6) 式より、

$$A'_s \sigma_{sa} = M / (6jd) = T'_c \dots\dots\dots(4.7)$$

今簡単のため矩形断面を考えると、

$$A_s / A'_s = T_c / T'_c = \overline{CB} / \overline{OB} \quad \overline{OB} = 0.5H$$

ここに、

$$\overline{CB} / \overline{AC} = \overline{CB} / (H - \overline{CB}) = \sigma_{ta} / \sigma_{ca} = 1/6$$

$$\therefore \overline{CB} = 1/7H$$

$$\therefore A_s / A'_s = T_c / T'_c = 2/7$$

$$\therefore A_s \sigma_{sa} = M / (2jd)$$

j は矩形断面の場合約 0.8 とみてよい。

$$\therefore A_s \sigma_{sa} = T_c = 0.0595 M / d$$

すなわち、

$$A_s \sigma_{sy} / (M/d) = 0.0595 / r$$

例えば、鉄筋を SD 35 とすると、

$$\sigma_{sa} / \sigma_{sy} = r = 2000 / 3500 = 0.571$$

$$\therefore A_s \sigma_{sy} / (M/d) = 0.0595 / 0.571 = 0.104$$

が所要の付加鉄筋量となる。

矩形断面以外の I 形、T 形または箱形断面の場合には、 $j \approx 0.9$ に増大するので、所要付加鉄筋量は上記の 90% ぐらいに減少する。いずれにしても II 種 PC の場合の所要引張鋼材量としては、表-6 に示される PC 鋼材量に、上記の鉄筋量を加算したものが必要となり、I 種 PC の場合の必要最少の PC 鋼材量に近いものとなるので、引張鋼材量の点では、I 種 PC に対して II 種 PC の有利性は小さいといえる。

5. III 種 PC の場合に必要な引張鋼材量

5.1 所要 PC 鋼材量

III 種 PC では、全作用曲げモーメントに対してコンクリートにひびわれ発生を許すが、この全作用曲げモーメントのある部分に対しては、コンクリート引張縁の引張応力度が 0 になるように、すなわち I 種 PC となるように計画して設計するものとする。この I 種 PC となる部分が永久荷重のある部分、すなわち αM_G ($0 < \alpha \leq 1$) である場合と永久荷重の全部と変動荷重のある部分、すなわち $M_G + \beta M_Q$ ($0 < \beta \leq 1$) である場合との二つの場合に分けられる。

(a) αM_G に対して引張応力とならない場合

この場合に必要な有効プレストレス力を P_{eIII} とすると、 P_{eIII} は P_{eI} を求めたときと同様に次式によって求まる。

$$P_{eIII} \geq \alpha M_G / z_0 \geq \alpha M (1 - M_Q / M) / z_0$$

PC 鋼材の有効引張応力度を引張強度 σ_{su} の 52.5% とすると、

$$P_{eIII} = 0.525 A_p \sigma_{pu} \geq \alpha M (1 - M_Q / M) / z_0$$

よって、PC 鋼材の最少所要量は次式で与えられる。

$$\frac{A_p \sigma_{pu}}{M/d} = \frac{\alpha d}{0.525 z_0} \left(1 - \frac{M_Q}{M} \right) \dots\dots\dots(5.1)$$

よって、各断面形状に対し、 z_0 を (3.4) 式の場合と同様に仮定すると、所要 PC 鋼材は次式によって求められる。

矩形断面	}
$z_0 = 0.63d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) = 3.02(1 - M_Q / M) \alpha$	
I 形および負の曲げモーメントをうける箱形断面	}

$$\begin{aligned}
 z_0 &= 0.75d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) \\
 &= 2.53(1 - M_Q/M) \alpha \dots\dots\dots(5.2) \\
 \text{T形および正の曲げモーメントを} \\
 \text{うける箱形断面} \\
 z_0 &= 0.82d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) \\
 &= 2.32(1 - M_Q/M) \alpha
 \end{aligned}$$

$A_p \sigma_{pu} / (M/d)$ は M_Q/M の関数として表わされる。 α と M_Q/M の実数値に対して、 $A_p \sigma_{pu} / (M/d)$ を計算すると表-7 が得られる。

表中 $\alpha=1$ の場合は、永久荷重のみに対してはI種 PC となる場合に相当する。

表-7 αM_G に対し引張応力とならない $A_p \sigma_{pu} / (M/d)$ の値

z_0/d	α	M_Q/M					
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.63	1.0	3.02	2.52	1.81	1.20	0.60	0
	0.8	2.52	2.02	1.45	0.96	0.48	0
	0.6	1.81	1.51	1.08	0.72	0.36	0
	0.4	1.26	1.01	0.73	0.48	0.24	0
0.75	1.0	2.53	2.02	1.52	1.01	0.51	0
	0.8	2.02	1.62	1.21	0.81	0.41	0
	0.6	1.52	1.21	0.91	0.61	0.30	0
	0.4	1.01	0.81	0.61	0.41	0.20	0
0.82	1.0	2.32	1.86	1.39	0.93	0.46	0
	0.8	1.86	1.49	1.11	0.74	0.38	0
	0.6	1.39	1.12	0.83	0.56	0.28	0
	0.4	0.93	0.75	0.56	0.37	0.19	0

(b) $M_G + \beta M_Q$ に対して引張応力とならない場合

(a) の場合と同様の考え方で有効プレストレス力 P_{eIII} を求める。

$P_{eIII} \geq (M_G + \beta M_Q) / z_0 \geq M \{1 - (1 - \beta) M_Q / M\} / z_0$
 所要 PC 鋼材の最少量は次式により求まる。

$$\frac{A_p \sigma_{pu}}{M/d} = \frac{d}{0.525 z_0} \left\{ 1 - (1 - \beta) \frac{M_Q}{M} \right\} \dots(5.3)$$

各種断面形式について z_0 の実数値を与えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{矩形断面} \\
 z_0 &= 0.63d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) \\
 &= 3.02 \{1 - (1 - \beta) M_Q / M\} \\
 \text{I形および負の曲げモーメント} \\
 \text{をうける箱形} \\
 z_0 &= 0.75d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) \\
 &= 2.53 \{1 - (1 - \beta) M_Q / M\} \dots\dots\dots(5.4) \\
 \text{T形および正の曲げモーメント} \\
 \text{をうける箱形} \\
 z_0 &= 0.82d : A_p \sigma_{pu} / (M/d) \\
 &= 2.32 \{1 - (1 - \beta) M_Q / M\}
 \end{aligned}$$

(5.4) 式に β および M_Q/M を与えた計算結果を表-8 に示す。表中 $\alpha=1$, $\beta=0$ の場合は永久荷重作用に対しては、I種 PC となり、 $\alpha=1$, $\beta=1$ の場合は全作用曲

げモーメントに対してI種 PC となる。

表-8 永久荷重曲げモーメントの全部と変動荷重の一部に対し、引張応力とならない $A_p \sigma_{pu} / (M/d)$ の値

z_0/d	β	$1-\beta$	M_Q/M					
			0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.63	0.0	1.0	3.02	2.52	1.81	1.20	0.60	0
	0.2	0.8	"	2.54	2.05	1.57	1.08	0.60
	0.4	0.6	"	2.66	2.28	1.94	1.57	1.21
	0.6	0.4	"	2.78	2.54	2.30	2.05	1.81
	0.8	0.2	"	2.90	2.78	2.66	2.54	2.52
	1.0	0.0	"	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02
0.75	0.0	1.0	2.53	2.02	1.52	1.01	0.51	0
	0.2	0.8	"	2.13	1.72	1.32	0.91	0.51
	0.4	0.6	"	2.23	1.93	1.62	1.32	1.01
	0.6	0.4	"	2.33	2.13	1.93	1.72	1.52
	0.8	0.2	"	2.44	2.33	2.23	2.13	2.02
	1.0	0.0	"	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53
0.82	0.0	1.0	2.32	1.86	1.39	0.93	0.46	0
	0.2	0.8	"	1.95	1.58	1.21	0.83	0.46
	0.4	0.6	"	2.04	1.76	1.48	1.21	0.93
	0.6	0.4	"	2.13	1.95	1.76	1.58	1.39
	0.8	0.2	"	2.22	2.13	2.02	1.95	1.86
	1.0	0.0	"	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32

5.2 ひびわれ制限のための付加鉄筋を考慮した場合の所要引張鋼材量

Ⅲ種 PC では全作用曲げモーメント $M = M_G + M_Q$ に対してひびわれを許容するが、引張側コンクリートに鉄筋を配置し、鉄筋に生じる引張応力のある値に制限することによってひびわれ幅をある程度に制限する。土木学会標準示方書では鋼材図心位置のコンクリート応力度が0となる状態から、コンクリート引張応力を無視して求めた鋼材引張応力度の増加量を、環境状態により、1000 kg/cm² と 2000 kg/cm² の二つの場合を規定している。これら引張応力度に対応するひびわれ最大幅は CEB-FIP 規準によると、それぞれ 0.1 mm と 0.2 mm になっている。

鉄筋および PC 鋼材とも、同一断面位置に集中配置されているものと仮定すると、ひびわれ時における鉄筋および PC 鋼材の引張応力増加量は等しく $\sigma_s = \Delta \sigma_p$ になっている。すなわちこの状態における PC 鋼材の引張力は $(P_{eIII} + A_p \sigma_s)$ となっている。圧縮応力合力の作用点と、全引張鋼材図心位置との距離、すなわち腕長を (z_{III}) で表わすと、曲げモーメントに対する釣合い方程式は次式によって示される。

$$\{A_s \sigma_s + (A_p \sigma_s + P_{eIII})\} z_{III} = M \dots\dots\dots(5.5)$$

ここに、 z_{III} はひびわれを生じる直前の腕長 z_{II} と破壊時の腕長 z との中間の値となる。すなわち、

$$z_0 < z_{II} < z_{III} < z = 0.95d$$

z_{II} の値：

$$M = P_{eI} z_0 = P_{eII} z_{II} \quad \therefore P_{eII} / P_{eI} = z_0 / z_{II}$$

報 告

であるから、(4.4)式を用い、 z_{II} は次のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{矩形断面の場合} \\ z_{II} = z_0 / (1 - 0.145 \Delta M / M) \\ \text{T形および箱形断面の場合} \\ z_{II} = z_0 / (1 - 0.155 \Delta M / M) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.6)$$

$\Delta M / M$ は前述したとおり、スパンが10mから200mの間にあつては0.5~0.1の間にあり、 $\Delta M / M$ の値の差が z_{II} に及ぼす影響は僅少であるから、ここでは平均的な値として $\Delta M / M = 0.3$ とする。この場合、0.145 $\Delta M / M$ と0.155 $\Delta M / M$ の差は0.003で z_{II} の値に及ぼす影響も小さいから、ここでは安全のため、(5.6)式の矩形断面の場合の上式をとることとする。

$$\therefore z_{II} = z_0 (1 - 0.145 \times 0.3) = 1.05 z_0 \dots\dots (5.7)$$

各断面形について z_{II} を(5.7)式より計算すると表-9を得る。

表-9 z_{II}/d の値

断面形状	z_0/d	z_{II}/d
矩形	0.63	0.66
I形および負の曲げモーメントをうける箱形	0.75	0.79
上突線の大きいT形および正の曲げモーメントをうける箱形	0.82	0.86

付加鉄筋に生じる引張応力度は、引張縁応力が0のとき0であり、これより曲げモーメントが増加して、コンクリートにひびわれを発生する直前までは腕長に比例して増加するものと仮定する。ひびわれ発生後は曲げモーメントの増加につれてひびわれ深さが増大し、コンクリート引張側断面も減少していくので、鋼材引張応力度の増加率は腕長の増加率よりも大きくなるはずである。この関係を簡単にするため次式の放物線であると仮定する。

$$(z - z_0)^2 = p(\sigma_s + a) \dots\dots\dots (5.8)$$

(5.8)式は z_0 を原点とする放物線で、常数 p および a はこの放物線が z_{II} と $z_{III} = 0.95$ を通る条件より求められる。

ひびわれ発生直前の腕長 z_{II} に対応する鉄筋引張応力度は次式で表わされる。

$$\sigma_s = \sigma_{ct} \times E_c / E_s$$

ここに、 σ_{ct} はひびわれ発生直前のコンクリート引張応力度であるが、これをコンクリート許容引張応力度 σ_{ca} とする。使用するコンクリートの圧縮強度 $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$ とすると、土木学会標準示方書に規定により、

$$\sigma_{ct} = \sigma_{ca} = 25 \text{ kg/cm}^2 \quad E_c = 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore \sigma_s = 25 \times 20 / 3.5 = 147 \text{ kg/cm}^2$$

となる。また破壊時には、鉄筋に生じている引張応力度が降伏点応力度 σ_{sy} にほぼなっているものと仮定する

と、式(5.8)の曲線は($\sigma_s = 1.47 \text{ kg/mm}^2, z = z_{II}$)および($\sigma_s = \sigma_{sy}, z = z_{III}$)の2点を通る。この条件より常数 p および a が定まる。

$$\left. \begin{array}{l} p = \frac{(0.95d - z_0)^2 - (z_{II} - z_0)^2}{\sigma_{sy} - 1.47} \\ a = \frac{(0.95d - z_0)^2}{P} - \sigma_{sy} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.9)$$

z_{III} と σ_s との関係は図-4に示される。 $\sigma_{sy} = 30 \text{ kg/mm}^2, \sigma_s = 35 \text{ kg/mm}^2$ の場合について、鉄筋引張応力度 σ_s がそれぞれ、 10 kg/mm^2 および 20 kg/mm^2 となるとき腕長 z_{III1}, z_{III2} を式(5.8), (5.9)より算出すると、表-10の値を得る。

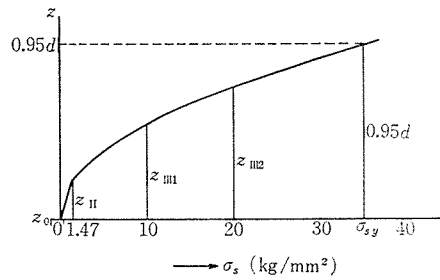


図-4 $z_{III}-\sigma_s$

表-10 ひびわれ時曲げモーメント腕長 z_{III}/d

$\sigma_{sy}(\text{kg/mm}^2)$	z_0/d	z_{II}/d	z_{III}/d	
			$\sigma_s = 10 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_s = 20 \text{ kg/mm}^2$
30	0.63	0.66	0.82	0.90
	0.75	0.79	0.87	0.92
	0.82	0.86	0.90	0.93
35	0.63	0.66	0.79	0.86
	0.75	0.79	0.86	0.90
	0.82	0.86	0.89	0.92

z_{III} が求めれば、(5.5)式より所要の引張鋼材量を求めることができる。(5.5)式においてI種PCの場合と同様に、

$$P_{eIII} = 0.525 A_p \sigma_{pu}$$

とおくと、次式のように書き直せる。

$$\sigma_s (A_s + A_p) + 0.525 A_p \sigma_p \geq M / z_{III} \dots\dots (5.10)$$

書き直して、

$$\frac{A_s \sigma_{sy}}{M/d} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_{sy}} + \frac{A_p \sigma_{pu}}{M/d} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{pu}} + 0.525 \right) \geq \frac{d}{z_{III}} \dots\dots\dots (5.11)$$

よって、必要な引張鋼材の最少量は、与えられる $\sigma_s, \sigma_{sy}, \sigma_{pu}, M/d$ および断面形状で定まる z_{III} によって求められる。ここに σ_s はひびわれ幅を規定することによって定まる値である。以下に鋼材の強度を次の値として鋼材量を算出する。

鉄筋： $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2$ (SD 30)
 $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2$ (SD 35)
 PC 鋼材： $\sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2$ (PC 鋼線)
 $\sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2$ (PC 鋼より線)

- (1) 矩形断面の場合
- (a) 鉄筋の引張応力度制限 $\sigma_s=10\text{ kg/mm}^2$
 (ひびわれ幅制限 0.1 mm)
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.82d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.746\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 3.66 \dots\dots(5.12)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.79d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 2.01\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 4.43 \dots\dots(5.12')$
- (b) 鉄筋引張応力度制限 $\sigma_s=20\text{ kg/mm}^2$
 (ひびわれ幅制限 0.2 mm)
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.90d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 0.959\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 1.667 \dots\dots(5.13)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.86d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.10\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 2.03 \dots\dots(5.13')$
- (2) I形および負の曲げモーメントをうける箱形断面
- (a) $\sigma_s=10\text{ kg/mm}^2$
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.87d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.746\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 3.45 \dots\dots(5.14)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.86d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 2.01\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 4.07 \dots\dots(5.14')$
- (b) $\sigma_s=20\text{ kg/mm}^2$
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.92d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 0.959\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 1.70 \dots\dots(5.15)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.90d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.10\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 1.94 \dots\dots(5.15')$
- (3) T形および正の曲げモーメントをうける箱形断面
- (a) $\sigma_s=10\text{ kg/mm}^2$

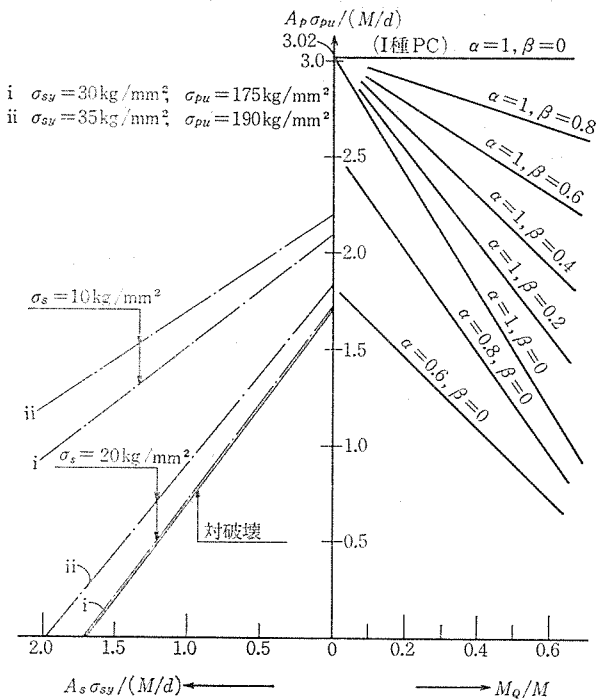
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.90d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.746\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 3.33 \dots\dots(5.16)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=190\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.89d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 2.01\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 3.93 \dots\dots(5.16')$
- (b) $\sigma_s=20\text{ kg/mm}^2$
- i) $\sigma_{sy}=30\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.93d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 0.959\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 1.61 \dots\dots(5.17)$
- ii) $\sigma_{sy}=35\text{ kg/mm}^2, \sigma_{pu}=175\text{ kg/mm}^2,$
 $z_{III}=0.92d$
 $\frac{A_s\sigma_{sy}}{M/d} + 1.10\frac{A_p\sigma_{pu}}{M/d} \geq 1.90 \dots\dots(5.17')$

図-5 (a), (b), (c) はそれぞれ、矩形断面、I形および負の曲げモーメントをうける箱形断面、T形および正の曲げモーメントをうける箱形断面の部材について、Ⅲ種 PC の場合に必要な引張鋼材の最少量を M/d の比率によって求めた図表である。すなわち縦軸に PC 鋼材量 $A_p\sigma_{pu}/(M/d)$ をとり、縦軸の右側には M_Q/M と作用曲げモーメント M の全部または一部が I 種 PC、すなわちフルプレストressingとなるために必要最少限の PC 鋼材量 (表-7 および表-8 に示される) との関係を表示する。これらの図表中、 $\alpha=1, \beta=1$ の $A_p\sigma_{pu}/(M/d)$ の値は (3.4) 式で与えられる I 種 PC の場合の必要 PC 鋼材の最少量を表わし、 $\alpha=1, \beta=0$ の直線は永久荷重のみに対してはフルプレストressingとなるために必要な PC 鋼材の最少量を表わすものである。

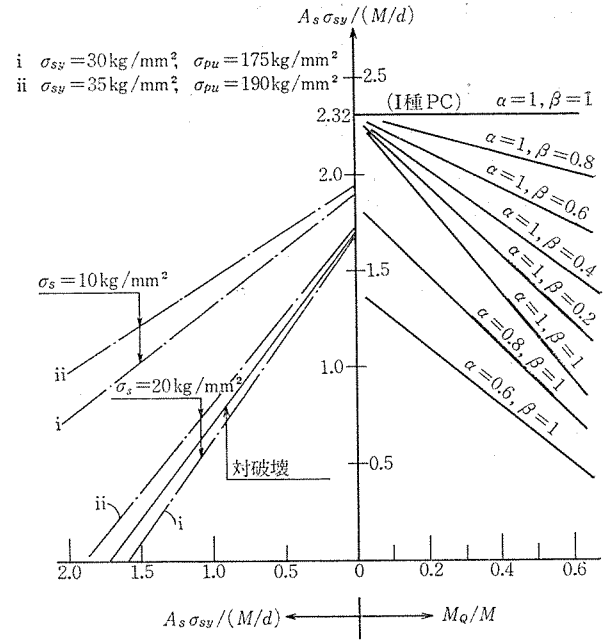
縦軸の左側は、ひびわれ幅を、0.1 mm および 0.2 mm に制限するために必要な引張鉄筋量と PC 鋼材量との関係を表わす式(5.12)~(5.17)および式(5.12')~(5.17')、さらに曲げ破壊時の安全を確保するために必要な引張鋼材最少量を与える式 (2.6) を併せて図表化してある。

これらの図表より、 M/d と M_Q/M が与えられると、Ⅲ種 PC の場合に必要な引張鋼材最少量が容易に求められ、かつ、この鋼材量と I 種 PC および破壊時安全のための引張鋼材量との関連を知ることができる。

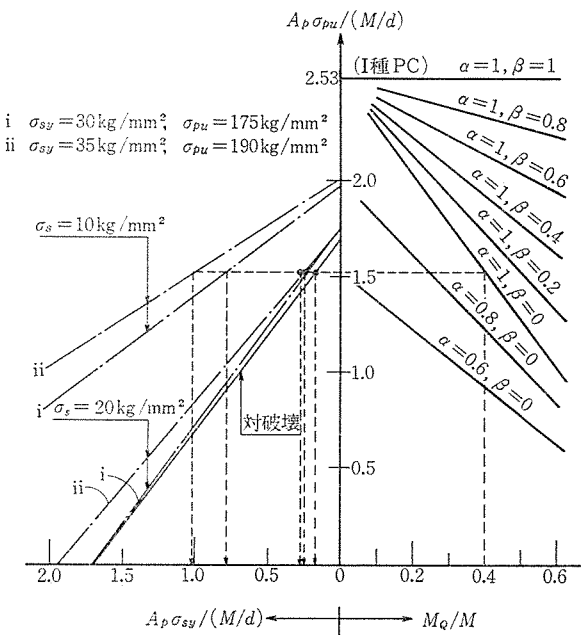
一例として図-5 (b) の場合で $M_Q/M=0.4, \alpha=1, \beta=0$ を与えて、図表の使用法を説明する。まず $M_Q/M=0.4$ に対し $\alpha=1, \beta=0$ の直線の縦距 $A_p\sigma_{pu}/(M/d)=1.5$ が、必要最少限の PC 鋼材量を示す。次に左側の直線より、縦距が 1.5 になる点を求めると、その水平座標が必要な鉄筋量を与える。この例では、付加鉄筋の引張応力度を $\sigma_s=10\text{ kg/mm}^2$ とした場合 (ひびわれ



図一五 (a) III 種 PC の場合必要な引張鋼材量 (矩形断面)



図一五 (c) III 種 PC の場合必要な引張鋼材量 (T 形および負の曲げモーメントをうける箱形断面)



図一五 (b) III 種 PC の場合必要な引張鋼材量 (I 形および負の曲げモーメントをうける箱形断面)

最大幅 0.1 mm とする) の鉄筋所要量 $A_s \sigma_{sy} / (M/d)$ は i) の場合 0.81, ii) の場合 1.02 となり, 鉄筋引張応力度を 20 kg/mm^2 に制限する場合 (ひびわれ最大幅 0.2 mm) には, 鉄筋所要量 $A_s \sigma_{sy} / (M/d)$ は i), ii) の場合それぞれ 0.2 と 0.3 となる。これに対し破壊時安全を確保するため必要な PC 鋼材以外の鉄筋量は $A_s \sigma_{sy} / (M/d) = 0.25$ となる。

6. 結 論

以上 I 種, II 種, III 種の PC について, その使用状態における条件を満足するために必要な引張鋼材の最少量と, 曲げ破壊時の安全を確保するために必要な引張鋼材の最少量とを種々断面の部材について求めた。この際, PC 鋼材量と鉄筋量はそれぞれ $A_p \sigma_{pu} / (M/d)$, $A_s \sigma_{sy} / (M/d)$ をもって表わし, 断面形状は, 引張側に対する核点と鋼材図心位置との距離 z_0 を統計的に求め, これをパラメーターとして表わすことにすると, 上記の所要引張鋼材量は M_Q/M または $4M/M$ の関数として表わされる。

上述の計算結果により明らかにされる事項を総括すると次のようになる。

- 1) I 種 PC の場合の所要 PC 鋼材の最少量は, 当然のことながら, II 種 PC, III 種 PC の場合よりも多く, かつ破壊時安全を確保するために必要な引張鋼材の最少量よりはるかに多いので, 改めて破壊時安全を検討する必要はない。
- 2) II 種 PC の場合の所要 PC 鋼材の最少量を I 種 PC の場合と比べると, プレストレスの後作用する曲げモーメント $4M$ と全作用曲げモーメント M との比 $4M/M$ に比例して少なくなる。例えば $4M/M=0.4$, すなわちスパンが 10~20 m のとき約 6% 減, $4M/M=0.1$, すなわちスパンが 100~200 m のときで約 1.5% 減となる。II 種 PC の場合は, コンクリート断面に生ずる全引張力に対応

する鉄筋を必要とするので、スパンが比較的短い場合をのぞいては、鋼材所要量の面ではⅠ種 PC に比して顕著な効果はない。しかしながら、PC 鋼材所要量のみでも、破壊時安全を確保するために必要な引張鋼材量よりはるかに多いので、Ⅰ種 PC と同様、破壊時安全度の検討を改めて行う必要はない。

- 3) Ⅲ種 PC のときの所要 PC 鋼材量は、与えられた変動荷重に対し、スパンが短い (M_Q/M が大きい) ほどⅠ種あるいはⅡ種 PC の場合より減少する。この減少量はスパンが短い (M_Q/M が大きい) 範囲で顕著であるがスパンが大きい (M_Q/M が小さい) 範囲ではあまり顕著でない。
- 4) Ⅲ種 PC で、ひびわれ幅は付加鉄筋および PC 鋼材に生じる応力度の増加のみに関係し、鋼材の強度に関係しないから、強度の高い鋼材を用いても無意味である。
- 5) Ⅲ種 PC の場合で、鋼材引張応力の増加を 10 kg/

mm² (ひびわれ幅を 0.1 mm) に制限する場合の所要引張鋼材の最少量は、常に破壊時安全を確保するために必要な引張鋼材の最少量よりも多くなる。したがってこの場合、破壊時安全度の検討を行ってみる必要がない。

- 6) Ⅲ種 PC で、鋼材の引張応力度の増加量を 20 kg/mm² (ひびわれ幅 0.2 mm) に制限する場合の所要引張鋼材の最少量は、ひびわれ幅を 0.1 mm に制限する場合よりも少なく、破壊時安全を確保するために必要な最少鋼材量に近い値となる。したがってこの場合に限っては、荷重作用時および、破壊時安全を確保するために必要な PC 鋼材量を算出して、その多い方を用いなければならない。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：プレストレストコンクリート標準示方書
- 2) CEB-FIP: International Recommendation for the Design and Construction of Concrete Structures 1970

【昭和 54 年 11 月 10 日受付】

転勤（または転居）ご通知のお願い

勤務場所（会誌発送、その他通信宛先）の変更のご通知をお願いいたします。

会誌発送その他の場合、連絡先が変更になっていて、お知らせがないため郵便物の差しもどしをうけることがたびたびあります。不着の場合お互いに迷惑になるばかりでなく、当協会としましても二重の手数と郵送料とを要することになりますので、変更の場合はハガキで結構ですから、ただちにご一報下さるようお願いいたします。

ご転勤前後勤務先に送ったものがそのまま転送されないでご入手になれない場合は、当方として責任を負いかねますからご了承下さい。

◀刊行物案内▶

PC くい基礎の最近の進歩

—PC くいの正しい使い方—

- 体 裁：A4判 246 ページ
 定 価：2000 円（会員特価 1800 円）送料 600 円
 内 容：1) PC くい, 2) PC くい基礎の設計, 3) PC くいの施工, 4) 超高強度コンクリートくい, 超大径くい

お申込みは代金を添え、(社)プレストレストコンクリート技術協会へ