

## 論文 非緊張鋼材の内部拘束力を利用した PC 部材に関する研究

宮川 邦彦<sup>\*1</sup>

要旨：本論文は、コンクリートの時間依存現象に伴う非緊張鋼材の内部拘束力を利用して、PC部材の曲げひびわれ発生モーメントや曲げ圧縮応力度に対する部材安全性を改善するための配筋法に関する基礎的研究について述べている。本論文で提案する配筋法は、従来のそれとは異なり、荷重作用時の部材圧縮縁近傍に非緊張鋼材を配置し、その内部拘束力を利用して部材断面のプレストレス分布を変化させ、使用限界状態の荷重作用に対するコンクリートの許容応力度の面でより合理的なPC部材断面を設計できるようにした点に特徴がある。

キーワード：PC部材、非緊張鋼材、内部拘束力、時間依存現象

## 1. はじめに

PC部材には通常、PC鋼材の他に組立鉄筋や用心鉄筋など緊張されていない少量の軸方向鉄筋を配置することが多い。また、土木学会コンクリート標準示方書等では、使用限界状態の荷重作用時に曲げひびわれ発生限界（Ⅱ種PC）や曲げひびわれ幅限界状態（Ⅲ種PC）に達する部材には、ひびわれ発生に伴う曲げ剛性の低下やひびわれ幅の拡大を防ぐ目的、あるいは部材断面に生じる引張力の一部を分担する目的から、非緊張鋼材を荷重作用時の部材引張縁近傍に配置して補強するように規定している[1], [2], [3]。

ところで、コンクリートは鋼材とは異なり、大きな時間依存ひずみ（乾燥収縮およびクリープ）を生じる特異な構造材料である。緊張鋼材だけで補強されたPC部材であれば、同鋼材がコンクリートの時間依存ひずみを拘束することはなく、しかも現行の設計法では、その影響をプレストレス力の減退で考慮しているため、時間依存特性の設計用値が適切であれば、特に設計上問題視することはない。しかしながら、荷重作用時の部材引張縁近傍に非緊張鋼材を配置したPC部材（以下、本論文では非緊張鋼材を配置したPC部材をPRC部材と呼ぶ）では、変動荷重作用以前の同鋼材位置におけるコンクリートは一般に圧縮応力状態にあるため、乾燥収縮と圧縮クリープにより相当大きな収縮ひずみを生じようとするが、一方でその進展を非緊張鋼材が拘束するため、同鋼材の圧縮応力度は時間の経過に伴って徐々に増大し、逆に部材下縁のプレストレスは大幅に減少することになる。このように現行の配筋法によるPRC部材では、非緊張鋼材の量やその配置状態によっては変動荷重作用時に容易に曲げひびわれが発生することになる[4]。しかも、ひびわれが発生すれば部材の耐久性や水密性の低下は勿論のこと、容積-表面積比が小さくなる関係上、コンクリート自体の時間依存ひずみが更に増大することも懸念される。したがって、PRC部材を設計する際には、特に使用限界状態の荷重作用に対する部材断面のプレストレス分布に及ぼす非緊張鋼材の影響を適確に算定しておくことが大切である。なお、部材引張縁近傍にある程度の非緊張鋼材を配置すれば、終局限界状態の断面耐力や破壊じん性の面で有利になることは当然である。

本研究の目的は、現行の配筋法の考え方とは異なり、荷重作用時の部材圧縮縁近傍にある程度の非緊張鋼材を配置することにより、同鋼材の内部拘束力を利用してPC部材断面のプレストレ

\*1 九州産業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

ス分布を変化させ、使用限界状態における曲げひびわれ発生モーメントや曲げ圧縮応力度に対する部材安全性を改善するための配筋法を提案することにある。

## 2. PRC部材の時間依存現象

PC部材にある程度非緊張鋼材を配置すると、同鋼材がコンクリートの時間依存ひずみを拘束するため、変動荷重作用以前のコンクリート断面のプレストレス分布を大幅に変化させることが可能である。すなわち、このような断面内部で生じる時間依存現象を利用すれば、より合理的なPC部材断面を設計することが可能であると考えられる。そこで本章では一例として、図-1のような配筋状態の異なる3種類の矩形断面部材（PC鋼材量 $A_p=35\text{cm}^2$ 、非緊張鋼材量 $A_s=15\text{cm}^2$ ）に初期緊張力 $P_i=400\text{tf}$ 、永久荷重による曲げモーメント $M_p=60\text{tfm}$ 、または $120\text{tfm}$ が材令3日から作用するときのプレストレス分布の経時変化を著者らの提案による力学モデル解析法から求めた計算結果に基づき、各部材のプレストレス分布や変動荷重に対する許容曲げモーメントについて比較検討する[5]。ただし、本解析では鋼材の時間依存現象を無視して計算した。表-1に計算結果の一覧を示す。なお、表中の（）内には力学モデル解析法の妥当性を確認するためにTroost-Bazant法（以下、TB法と呼ぶ）から求めた計算結果も併記している。

### 2.1 プレストレス分布の経時変化

表-1のように力学モデル解析法の計算結果はTB法のそれとほぼ一致していることがわかる。

したがって、以下では力学モデル解析法の結果を基に検討する。表-1および図-1に示すように緊張鋼材だけを配置したPC部材のプレストレス分布の経時変化は、プレストレス力の減退に伴い、部材下縁の圧縮応力度だけが導入直後のそれより減少しているのに対し、現行の配筋法のように部材引張縁近傍に非緊張鋼材を配置したPRCI部材のそれは、部材上縁の圧縮応力度が導入直後のそれより若干増大し、

表-1 プレストレス分布の比較

条件	日数	PC		PRCI			PRCII		
		$\sigma'_{cu}$	$\sigma'_{cl}$	$\sigma'_{cu}$	$\sigma'_{cl}$	$\sigma'_s$	$\sigma'_{cu}$	$\sigma'_{cl}$	$\sigma'_s$
$M_p=60$ tfm	0	64.0	134	70.5	122	902	57.2	138	450
	$10^4$	64.0	91.4	83.8	55.9	2748	31.7	106	2122
	$10^4$	(64.0)	(94.2)	(84.1)	(59.1)	(2654)	(34.1)	(109)	(1967)
$M_p=120$ tfm	0	128	73.1	132	65.8	511	115	79.3	856
	$10^4$	128	35.2	140	13.2	1657	77.7	58.9	3310
	$10^4$	(128)	(37.4)	(143)	(13.4)	(1627)	(81.8)	(59.5)	(3044)

注).  $\sigma'_{cu}$ :部材上縁  $\sigma'_{cl}$ :部材下縁  $\sigma'_s$ :非緊張鋼材の応力度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$10^4$ 日後の乾燥収縮ひずみ $\epsilon'_{sh}=486 \times 10^{-6}$ 、クリープ係数 $\phi=2.11$

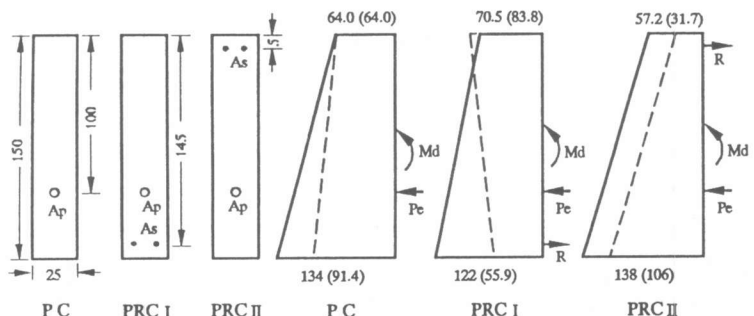


図-1 部材形状およびプレストレス分布 ( $M_p=60\text{tfm}$ )  
(図中の破線は $10^4$ 日後のプレストレス分布)

逆に下縁のそれが大幅に減少していることがわかる。一方、本論文で提案する配筋法（以下、本配筋法と呼ぶ）のように部材圧縮縁近傍に非緊張鋼材を配置した PRC II 部材のプレストレス分布の経時変化は、上縁の圧縮応力度が導入直後のそれより減少し、下縁のそれが PC 部材と比較してあまり減少していないことがわかる。これは PRC 部材の場合、コンクリート断面のプレストレスが時間の経過に伴って徐々に非緊張鋼材に移行され、その結果、コンクリート断面に図-1 に示すような非緊張鋼材の内部拘束力 R による二次モーメントが徐々に付加されるためである。なお、同図からわかるように内部拘束力が同じ場合は、桁高さが高くなるほどコンクリート断面に付加される二次モーメントが増大することになる。また、同表のように非緊張鋼材には高圧縮応力が作用することになるため、高強度の異形鋼材を使用すべきであることもわかる。

表-2 許容変動モーメントの比較

		PC	PRC I	PRC II
Mp=60	Mra	88.8	77.9	108
	比	1.00	0.88	1.21
Mp=120	Mra	34.2	29.2	59.7
	比	1.00	0.86	1.74

注). Mraの単位: tfm

## 2.2 本配筋法（PRC II 部材）の有利性について

表-2 に図-1 の部材断面に対する使用限界状態の荷重作用時の曲げ安全性を比較するため、コンクリートの許容曲げ圧縮応力度を  $\sigma'_{ca}=170\text{kgf/cm}^2$ 、許容曲げ引張応力度を  $\sigma_{ta}=0\text{kgf/cm}^2$ （PC 部材および PRC II 部材）、または  $18\text{kgf/cm}^2$ （PRC I 部材）と仮定して求めた変動荷重に対する許容曲げモーメント（Mra）および PC 部材を基準としたときの Mra の比を示す。同表からわかるように非緊張鋼材の内部拘束力を考慮して求めた PRC I 部材の曲げひびわれ発生限界状態（II 種 PC）に対する Mra は、引張応力発生限界状態（I 種 PC）に対する PC 部材のそれより更に小さくなっている。このように非緊張鋼材を引張縁近傍に配置した場合は、使用限界状態の変動荷重に対する許容曲げモーメントの面で逆に不利になることがわかる。一方、本配筋法のように圧縮縁近傍に非緊張鋼材を配置した PRC II 部材の Mra は、同じ限界状態の PC 部材のそれより大きくなっている。しかも、永久荷重による曲げモーメント Mp が大きくなるほど、すなわち、長大橋のように永久荷重の影響が支配的な断面に本配筋法を適用すると更に有利であることがわかる。

以下に、本配筋法の適用例とその有効性について列記する。

a). 本配筋法は使用限界状態の荷重作用時にコンクリート断面の曲げ引張り、あるいは曲げ圧縮応力度がその許容値を満足し得ないときに有効である。例えば、II 種や III 種 PC 部材を I 種 PC 部材として設計することも可能である。また、連続 T 桁橋の中間支点や下路橋などコンクリート圧縮断面の不足により曲げ圧縮応力度がその許容値を満足し得ないときにも有効である。

b). 本配筋法は終局限界状態の部材安全性に余裕がある断面であれば、部材断面を削減することも可能であるため、プレキャスト桁や長大橋の自重軽減に有効である。

ただし、本配筋を適用するためには、コンクリートの時間依存特性、施工環境、変動荷重の作用状態などを十分に検討し設計すべきである。

## 3. 検証実験

本実験では、前章で述べた PRC 部材の時間依存現象を確認するため、配筋状態を変えた PRC 部材 2 体を作製し、静置期間中のひずみ変化や載荷試験時のひびわれ荷重などを調べた。以下に実験概要および結果について述べる。

### 3. 1 実験概要

本実験では、セメントに早強ポルトランドセメント、細骨材に海砂、粗骨材に最大寸法20mmの結晶片岩砕石を用い、配合条件として、単位水量 $W=200\text{kg/m}^3$ 、単位セメント量 $C=420\text{kg/m}^3$ 、単位粗骨材容積 $g=400\text{ℓ/m}^3$ のコンクリートを打設した。また、PC鋼材にはSWPR-7A、軸方向鉄筋にはSD295AのD10とD16、帯鉄筋にはSD295AのD6を用いた。図-2に部材の断面形状および荷重試験方法を示す。部材はプレテンション方式で作製し、材令3日

でプレストレスを導入した後に、恒温室内（温度： $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度： $65\pm 5\%$ ）に移し、部材表面（上縁と中央部）および軸方向鉄筋（上部と下部）の計4箇所に貼付したひずみゲージを用いて荷重試験

までの約60日間部材各部のひずみ変化を実測した。なお、PC鋼材の緊張はロードセルを介して、中空ジャッキにより初期緊張力 $P_i=8.0\text{tf}$ を導入したが、PC鋼材のリラクセーションや実験室内の温度変化などの影響でプレストレス導入時には緊張力が $7.8\text{tf}$ まで低減した。

### 3. 2 実験結果および考察

表-3にコンクリートの力学特性を、図-3～6に静置期間中の部材の実測ひずみ-時間曲線と力学モデル解析法から求めた同部材の解析曲線を示す。図-3と図-5を比較すると、軸方向鉄筋の配置状態で部材の実測ひずみ-時間曲線が大幅に相違していることがわかる。なお、図-5に示す部材IIの上縁のひずみが上部鉄筋のそれと測定途中から逆転するような結果になっているが、これは、長期間測定の関係上、ひずみゲージを貼付した接着剤の劣化に起因するものと考えられる。このよ

表-3 コンクリートの力学特性

材令	$f'_c$	$E_c$	$f_t$
3日	313	2.35	--
試験時	443	2.96	36.6

注).  $f'_c$ :圧縮強度( $\text{kgf/cm}^2$ )

$f_t$ :引張強度( $\text{kgf/cm}^2$ )

$E_c$ :ヤング係数( $\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ )

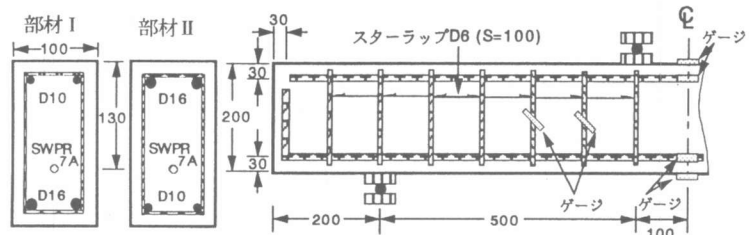


図-2 部材形状および荷重方法 (単位:mm)

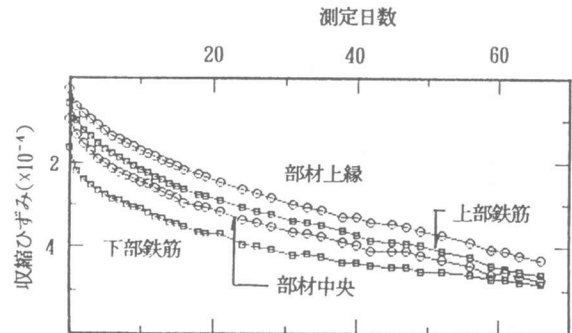


図-3 部材 I の実測ひずみ-時間曲線

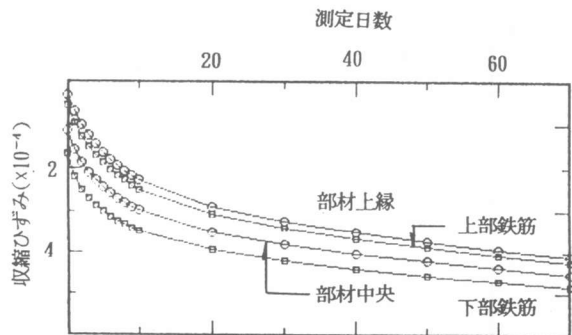


図-4 部材 I の解析ひずみ-時間曲線

うな測定不良の結果を除外すれば、図-4と図-6に示す解析曲線は実測のそれらとほぼ一致していることがわかる。したがって、以下に述べるひびわれ荷重の計算には力学モデル解析法から求めた載荷試験時の部材下縁応力度を用いて検討した。

表-4に部材の載荷試験結果および計算結果の一覧を示す。ここに、ひびわれ荷重の実測値は部材に貼付したひびわれゲージの値が急変するときの荷重から求めた。また、曲げひびわれ荷重の計算値はコンクリートの引張強度( $f_t$ )に載荷試験時の部材下縁応力度( $\sigma'_{cu}$ )を考慮して弾性式から、斜めひびわれ荷重のそれは土木学会コンクリート標準示方書の算定式から求めた。ただし、安全係数を1.0とし、PC鋼材断面が係数 $\beta_p$ に及ぼす影響を無視し、また、係数 $\beta_n$ は表-4の $\sigma'_{cu}$ の値を用いて $\beta_n = 1 + 2 M_o / M_u$ として計算した。ここに $M_o$ はデコンプレッションモーメント、 $M_u$ は部材の曲げ破壊モーメントである。同表のように曲げおよび斜めひびわれ荷重の実測結果はいずれの値も部材引張縁近傍に軸方向鉄筋を多量に配筋した部材Iより少量しか配筋しなかった部材IIの値の方が大きくなっていることがわかる。

これは明らかに非緊張鉄筋の内部拘束力の違いによるものであり、このようにひびわれ荷重に関しては、部材引張縁より圧縮縁近傍に非緊張鋼材

を多量に配置する方が有利であることを本実験の結果からも立証し得たものと考えられる。また、同表に示す実測値と計算値との比から、曲げひびわれ荷重については前述の弾性式から安全側の値としてほぼ適確に求められるが、斜めひびわれ荷重については、部材IIの比の値がかなり大きくなっている。ただし、この点については本実験の結果だけでは判断できないため、今後更に多く

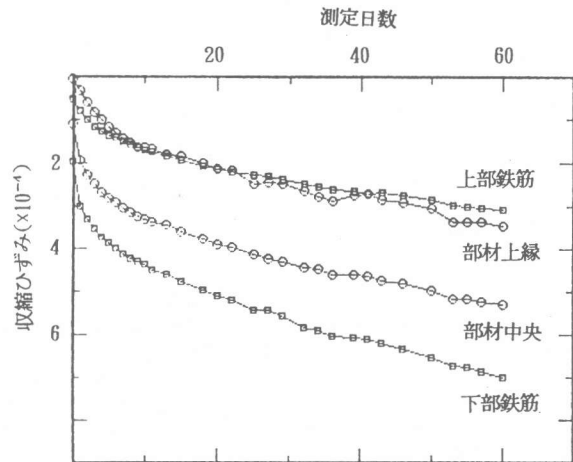


図-5 部材IIの実測ひずみ-時間曲線

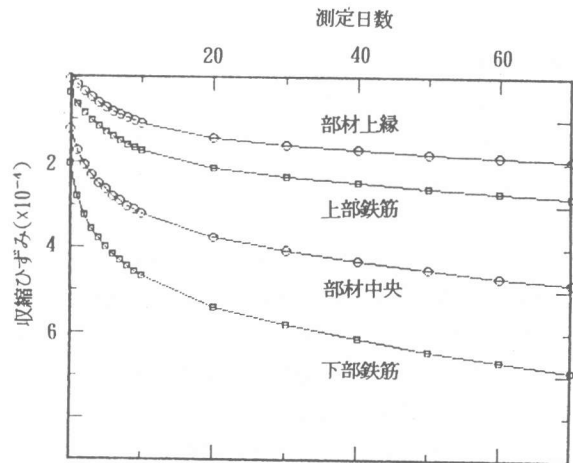


図-6 部材IIの解析ひずみ-時間曲線

表-4 部材の載荷試験結果 (tf)

部材	$\sigma'_{cu}$	曲げひびわれ			斜めひびわれ			最大荷重		
		実測	計算	比	実測	計算	比	実測	計算	比
I	12.1	2.10	1.78	1.18	5.60	5.02	1.12	13.8	13.1	1.05
II	45.8	3.00	2.72	1.10	5.80	4.34	1.34	10.4	8.90	1.17

注).  $\sigma'_{cu}$ : 載荷試験時の部材下縁応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

の実験を行い検討すべきである。

図-7に荷重試験後のひびわれ発生状況を示す。図示するようにひびわれ発生状況には両部材にあまり違いが観られず、曲げおよび斜めひびわれが発生した後、引張縁近傍に配置した軸方向鉄筋が降伏し、更に荷重点間のコンクリートが圧壊して両部材とも曲げ破壊した。表-4に示すように最大荷重は前述のひびわれ荷重とは逆に、部材Ⅰの方が部材Ⅱより3割程度大きくなってきている。なお、同表から曲げ破壊耐力については現行の終局曲げ強度式からほぼ適確に算定できることがわかる。

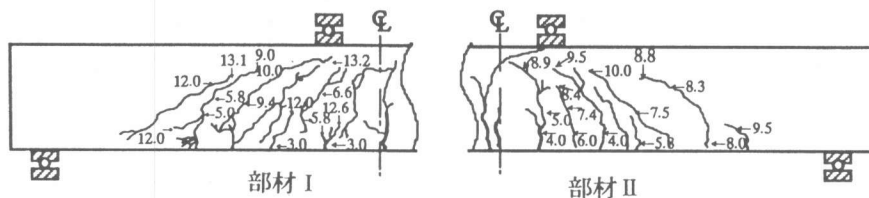


図-7 部材のひびわれ発生状況

#### 4. まとめ

本論文では、非緊張鋼材の内部拘束力を利用して使用限界状態の荷重作用時におけるP C部材の曲げひびわれ発生モーメントや曲げ圧縮応力度に対する部材安全性を改善するための配筋法について述べてきたが、以下にその結果を要約する。

1. P R C部材のひびわれ発生限界状態を検討する際には、部材断面のプレストレス分布に及ぼす非緊張鋼材の内部拘束力による影響を適確に算定しておくべきである。
2. 本論文で提案した配筋法、すなわち、荷重作用時の部材圧縮縁近傍に非緊張鋼材を配置したP R C部材を用いれば、同じ設計条件のP C部材に比べ、使用限界状態の変動荷重に対する許容曲げモーメントの面で大幅な改善が可能である。
3. 終局限界状態の部材安全性に余裕がある場合は、本論文で提案した配筋法を用いれば、部材断面を削減することも可能である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[平成3年版]設計編
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編
- 3) 日本建築学会:プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種P C)構造設計・施工指針・同解説
- 4) 鈴木計夫、大野義照、佐田裕之:プレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げ性状について、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp385-388、1980、6
- 5) 宮川邦彦、渡辺 明:軸方向鉄筋を有するP C部材のクリープ解析法、第1回コンクリート工学年次学術講演会論文集、pp493-498、1979、6