

論文

[2102] パーシャル PC 桁橋の応力におよぼすコンクリートの収縮の影響について

正会員○猪又 稔 (北海道工業大学土木工学科)

正会員 堀口 敬 (北海道工業大学土木工学科)

1. まえがき

使用状態において、ひびわれ発生を認めないフル PC 桁橋では、使用鋼材量が少なくコンクリートの収縮およびクリープ変形に対する拘束の影響が小さいので、通常これを無視して応力の算定を行っているが、ひびわれ発生を認めるパーシャル PC 桁橋においては、使用鋼材量が多くなるため拘束の影響が無視できなくなることが考えられる。本研究はこれら拘束応力に関する資料を得ることを目的として、数値計算によりパーシャル PC 桁橋のプレストレス度と鋼材の拘束による二次応力との関係について検討を行ったものである。

2. プレストレス度と鋼材量

プレストレスレベルを表現する方法として2~3の提案がなされているが、ここではBachmannによって提示され、次のように定義されているプレストレス度 λ を用いることにする(図-1) [1]。

$$\lambda = M_{D.ec} / (M_D + M_L) \quad (1)$$

ここに

$M_{D.ec}$: デコンプレッションモーメントであり、有効プレストレスが作用する状態で引張縁コンクリート応力度が0となるための曲げモーメント

M_D, M_L : 死荷重および活荷重による曲げモーメント
本研究において対象とするプレストレス度の範囲は、活荷重除荷時にひびわれが閉じる状態を最大とし、また施工時にひびわれの発生を許容しない状態を最小とした。その理由は施工時にひびわれを発生させると、その幅を制御することが困難であることや、ひびわれの発生したコンクリートの収縮およびクリープの挙動が不明確等によるものである [2]。これらの状態に対するプレストレス度 λ は次のようになる。

1) 活荷重除荷時にひびわれが閉じる状態

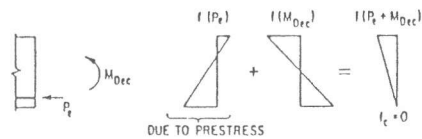
$M_{D.ec} \geq M_D$ であればひびわれが閉じることになるからプレストレス度は次式から求められる。

$$\lambda \geq M_D / (M_D + M_L) \quad (2)$$

2) 施工時にひびわれの発生を許容しない状態

ひびわれ発生曲げモーメント $M_{c,r} > M_D$ であれば施工時

(1) 静定構造



(2) 不静定構造

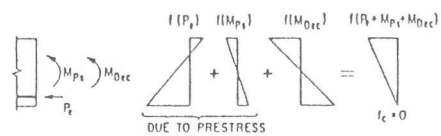
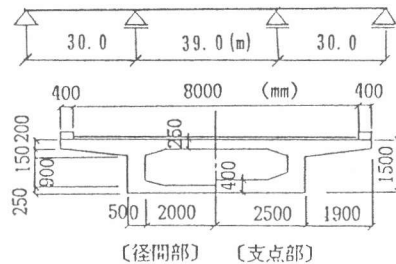


図-1 デコンプレッションモーメント



コンクリートの設計基準強度	$f_{c,k} = 35.0 \text{ kg/cm}^2$
コンクリートの設計曲げ強度	$f_{b,d} = 25 \text{ kg/cm}^2$
PC鋼材の引張強度	$f_{p,u} = 155 \text{ kg/mm}^2$
鉄筋の引張降伏強度	$f_v = 35 \text{ kg/mm}^2$
コンクリートのヤング係数	$E = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
鋼材とコンクリートとのヤング係数比	$n = 7$
コンクリートの乾燥収縮ひずみ	$\epsilon (s) = 200 \times 10^{-6}$
コンクリートのクリープ係数	$\psi_1 = 4.0, \psi_2 = 2.0$
中央径間	断面積 $A_c = 4.695 \text{ m}^2$
	断面2次モーメント $I_c = 1.412 \text{ m}^4$
	断面有効高 $d = 135 \text{ cm}$
	P C鋼材偏心量 $e = 63.6 \text{ cm}$
	曲げモーメント $M_D = 906 \text{ t}\cdot\text{m}$
	$M_{D-L} = 144 \text{ t}\cdot\text{m}$
内部支点	断面積 $A_c = 5.295 \text{ m}^2$
	断面2次モーメント $I_c = 1.571 \text{ m}^4$
	断面有効高 $d = 135 \text{ cm}$
	P C鋼材偏心量 $e = 52.6 \text{ cm}$
	曲げモーメント $M_D = 1737 \text{ t}\cdot\text{m}$
	$M_{D-L} = 2265 \text{ t}\cdot\text{m}$

図-2 パーシャル PC 連続桁橋諸数値

にひびわれは発生しないことになる。いま部材引張縁の死荷重による曲げ応力度、プレストレスおよび断面係数をそれぞれ σ_D , σ_{ce} および Z とし、また設計曲げ強度を f_{bd} とすれば

$$M_{cr} = (\sigma_{ce} + f_{bd}) Z \quad (3)$$

であるから次の式が成り立つ。

$$\sigma_{ce} + f_{bd} > \sigma_D \quad (4)$$

あるいは

$$\sigma_{ce} > \sigma_D - f_{bd} \quad (4)'$$

したがって

$$M_{De} > (\sigma_D - f_{bd}) Z = M_D - f_{bd} \cdot Z \quad (5)$$

となるから、プレストレス度は次のようになる。

$$\lambda > (M_D - f_{bd} \cdot Z) / (M_D + M_L) \quad (6)$$

次にプレストレス度と引張鋼材量 (PC 鋼材と引張鉄筋) との関係について検討する。いま図-2 に示す連続桁橋を対象として、正の曲げモーメントを受ける中央径間の中心断面および負の曲げモーメントを受ける内部支点断面について、プレストレス度に対応する引張鋼材量を求めれば、それぞれ図-3 および図-4 のようになりプレストレス度が小さいほど引張鋼材量 (率) は大きくなる。引張鋼材量算定にあたって、死活荷重に対する荷重係数は使用状態では 1.0, また終局状態では道路橋示方書 (コンクリート橋編) 等を参考として 1.3 として求めたものである。

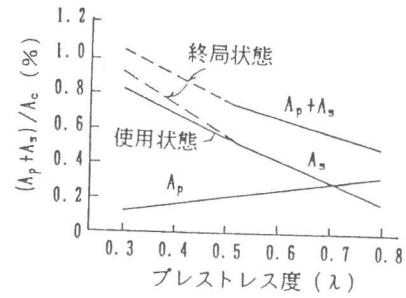


図-3 径間部のプレストレス度と引張鋼材量

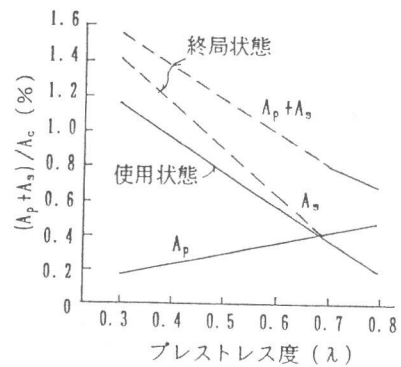


図-4 内部支点部のプレストレス度と引張鋼材量

3. コンクリートの収縮およびクリープによる応力の解析

パーシャル PC 部材では使用鋼材量が多くなるので、収縮およびクリープによる自由な変形が鋼材によって拘束され、コンクリートおよび鋼材に二次的な応力が生ずることになる。この応力はプレストレスレベルや活荷重の載荷時期等によって影響を受けるが、ここで対象としたパーシャル PC 橋は前述のように少なくとも施工時にひびわれが発生しないようにプレストレスを導入していること、また一般に活荷重載荷時までにはコンクリートの収縮およびクリープが相当進行していることから応力解析にあたっては活荷重によるひびわれの影響は考慮していない。この場合の応力算定には種々の計算法があるが、ここでは簡単かつ精度のよい道路橋示方書 [3] における合成桁のコンクリート床版の収縮およびクリープによる応力の解析法を応用するものとする。

3.1 収縮による応力

鋼材の拘束を受けないコンクリートの自由な収縮ひずみ $\epsilon(S)$ に対応する $N(S)$ なる引張力をコンクリート断面図心に作用させて、収縮が 0 になる位置にもどした後、コンクリートと鋼材を結合させて $N(S)$ を解放すれば、PC 鋼材を鉄筋の一部とみなした仮想 RC 断面には $N(S)$ なる圧縮力と $M(S)$ なる曲げモーメントが作用することになる。この場合の $N(S)$ および $M(S)$ は次式で与えられる。

$$N(S) = E_1 \cdot A_c \cdot \epsilon(S) \quad (7)$$

$$M(S) = N(S) \cdot e_1 \quad (8)$$

ただし

$$E_1 = E / \left(1 + \frac{\psi_1}{2} \right) \quad (9)$$

ここに

A_c : コンクリート断面積 e_1 : 仮想RC断面図心とN(S)作用点間の距離

E : コンクリートのヤング係数 ψ_1 : コンクリートのクリープ係数

また連続桁の不静定曲げモーメント $\Delta M(S)$ を求めるには、次の収縮による曲率 $\phi(S)$ を用い、

$$\phi(S) = \frac{M(S) + \Delta M(S)}{E_1 I_{v1}} \quad (10)$$

支点たわみ角の連続の適合条件を満足するように $\Delta M(S)$ を算定すればよいことになる。ここに I_{v1} は全断面を有効とした断面二次モーメントであるが、鋼材とコンクリートとのヤング係数比は、 $n=E_s/E$ の代わりに $n_1=n(1+\psi_1/2)$ を用いる。

3. 2 クリープによる応力

鋼材の拘束を受けないコンクリートの自由なクリープひずみ $\varepsilon(\psi)$ に対応する軸力 $N(\psi)$ を作用させてクリープひずみが0になる位置までもどした後、コンクリートと鋼材を結合させて $N(\psi)$ を解放すれば、仮想RC断面には軸力と曲げモーメントが作用することになる(図-5)。例えば長方形断面の場合では、クリープ係数を ψ_2 、断面幅を b とすれば次の諸式が得られる。

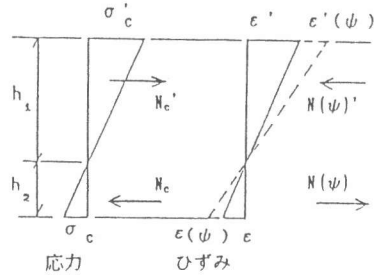


図-5 パーシャルPC桁の
応力とクリープひずみ

$$\left. \begin{aligned} N_c' &= \frac{\sigma_c'}{2} h_1 b \\ N_c &= \frac{\sigma_c}{2} h_2 b \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} N(\psi)' &= \frac{E_2 \varepsilon(\psi)'}{2} h_1 b \\ N(\psi) &= \frac{E_2 \varepsilon(\psi)}{2} h_2 b \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

しかるに

$$\varepsilon(\psi)' = \frac{\sigma_c'}{E_c} \cdot \psi_2 \quad (13)$$

$$E_2 = E / (1 + \psi_2 / 2) \quad (14)$$

であるから

$$N(\psi)' = N_c' \cdot \frac{2\psi_2}{2 + \psi_2} \quad (15) \quad N(\psi) = N_c \cdot \frac{2\psi_2}{2 + \psi_2} \quad (16)$$

となる。曲げモーメント $M(\psi)$ は

$$M(\psi) = N(\psi)' y_N' + N(\psi) y_N \quad (17)$$

となる。ここに y_N' および y_N はそれぞれ仮想RC断面の断面図心から軸力 $N(\psi)'$ および $N(\psi)$ までの距離である。また連続桁の不静定曲げモーメント $\Delta M(\psi)$ を求めるには、

$$\phi(\psi) = \frac{M(\psi) + \Delta M(\psi)}{E_2 I_{v2}} \quad (18)$$

上式の曲率による支点たわみ角が連続の適合条件を満足するように $\Delta M(\psi)$ を算定すればよいことになる。ここに I_{v2} は全断面を有効とした断面二次モーメントであるが、鋼材とコンクリートとのヤング係数比は $n=E_s/E_c$ の代わりに $n_2=n(1+\psi_2/2)$ を用いる。

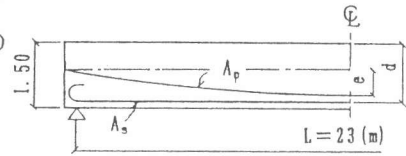
4. 数値計算

4.1 単純桁橋

図-6に示す単純桁橋のスパン中央におけるプレストレス度とコンクリートの収縮およびクリープ変形に対する鋼材の拘束によるコンクリートと鉄筋の応力度を求め、それを図-7に示した。鋼材が配置されている部材引張部においては、プレストレス度 λ が小さくなるほど鋼材の拘束が大きくなるので、収縮によるコンクリートの引張応力度 $\sigma_{c2}(s)$ は増加するが鉄筋の圧縮応力度 $\sigma_s(s)$ には大きな変化はない。次にクリープによる部材引張部の応力度 $\sigma_{c2}(\psi)$ については、 λ が小さくなるにしたがって死荷重とプレストレスとの合成応力度が圧縮から引張へと移行し、これによるクリープ変形が鋼材によって拘束されるため $\sigma_{c2}(\psi)$ は引張から圧縮へと変化し、また鉄筋の応力度 $\sigma_s(\psi)$ は圧縮から引張へと変化する。次に図-8は、収縮とクリープとの合成応力度 $\sigma_c(s+\psi)$ および死荷重とプレストレスとの合成応力度 $\sigma_c(D+P)$ を示したものである。コンクリートの応力度については、前述のようにプレストレス度 λ が小さくなるにしたがって、部材引張部の $\sigma_{c2}(\psi)$ が引張応力から圧縮応力へと移行するので $\sigma_{c2}(s)$ の相当部分が相殺されることになる。したがって、合成応力度 $\sigma_{c2}(s+\psi)$ は λ が小さいほど小さくなる傾向を示し、 λ が $0.3 \sim 0.7$ では $\sigma_{c2}(s+\psi)$ は約 $3 \sim 7 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力となった。このことは例えば活荷重除荷時にひびわれが閉じるように求めたプレストレス度であっても、 $\sigma_{c2}(s+\psi)$ の影響を考慮しないとひびわれが閉じないこともあり得ることになる。また引張鉄筋の算定に際しても $\sigma_{c2}(s+\psi)$ に対応した補強を行うことが必要となる。

4.2 連続桁橋

図-2に示す連続桁橋について、コンクリートの収縮およびクリープ変形に対する鋼材の拘束による二次応力および不静定力について検討する。プレストレス度は活荷重除荷時にひびわれが閉じる状態をCase 1とし、その80%および60%のプレストレス度をそれぞれCase 2およびCase 3とする。Case 3は、ほぼ施工時にひびわれが発生しない限界の状態に相当するものである。計算に必要な諸数値を図-9に示す。



施工時にひびわれの発生を許容しない
 プレストレス度: $\lambda > 0.3$
 活荷重除荷時にひびわれが閉じる
 プレストレス度: $\lambda \geq 0.63$
 $e=63.6 \text{ cm}$, $d=135 \text{ cm}$, $M_D=906 \text{ t}\cdot\text{m}$, $M_{D+P}=1441 \text{ t}\cdot\text{m}$
 断面形状は図-2の径間部と同じ
 A_p および A_s については図-3を参照のこと

図-6 パーシャルPC単純桁橋

σ_{c1} : コンクリートの断面上縁応力度
 σ_{c2} : コンクリートの断面下縁応力度
 σ_s : 鉄筋の応力度

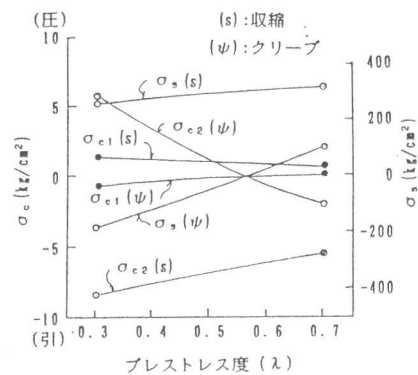


図-7 プレストレス度と収縮およびクリープによる応力

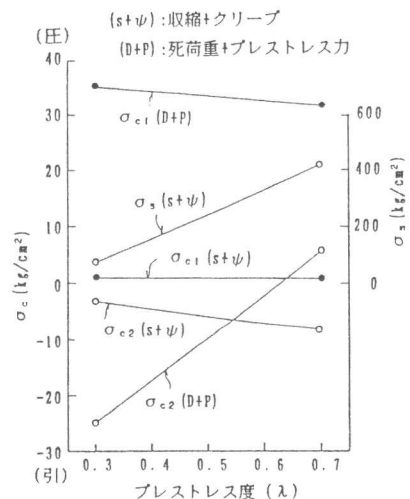
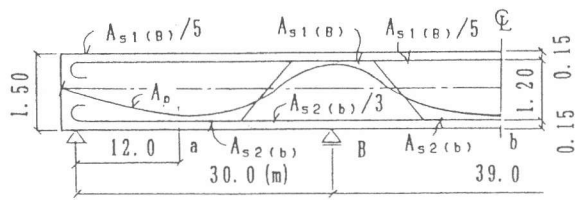


図-8 プレストレス度と合成応力



		a	B	b
	M_D (t·m)	806	-1737	906
	M_{D+L} (t·m)	1310	-2265	1441
	e (m)	-0.636	0.526	-0.636
Case 1	λ	0.62	0.77	0.63
	P (t)	830	1800	930
	A_p (cm ²)	110	240	125
	A_{s1} (cm ²)	25	125	25
	A_{s2} (cm ²)	180	60	180
Case 2	λ	0.50	0.62	0.50
	P (t)	660	1440	740
	A_p (cm ²)	90	190	100
	A_{s1} (cm ²)	65	320	65
	A_{s2} (cm ²)	260	90	260
Case 3	λ	0.37	0.46	0.38
	P (t)	500	1080	560
	A_p (cm ²)	70	145	75
	A_{s1} (cm ²)	105	530	105
	A_{s2} (cm ²)	360	120	360

図-9 連続桁橋のプレストレス度と配筋に関する諸数値

図-10は、コンクリートの収縮およびクリープ変形によって生じる内部支点の不静定曲げモーメントを示したものである。図中の点線部分は支点部の圧縮鉄筋を径間部の引張鉄筋と同量とした場合の不静定曲げモーメントを参考までに示したものであり、このように圧縮鉄筋量の大小によって、不静定曲げモーメントの値がかなり変動し、特に支点部の圧縮鉄筋が多いと負の不静定曲げモーメントが大きくなる。次に中央径間中心断面におけるコンクリートの収縮とクリープによる応力度およびそれらの合成応力度をそれぞれ図-11および図-12に示す。また内部支点断面に関するものを図-13および図-14に示す。これらについては単純桁橋の場合とはほぼ同様の傾向を示した。

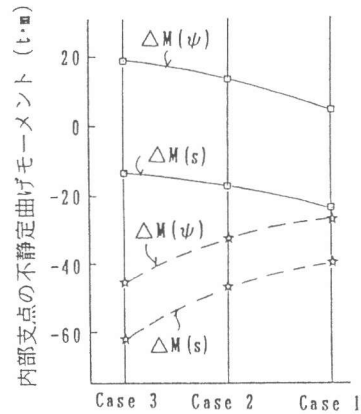


図-10 収縮およびクリープによる不静定曲げモーメント

σ_{c1} : コンクリートの断面上縁応力度
 σ_{c2} : コンクリートの断面下縁応力度

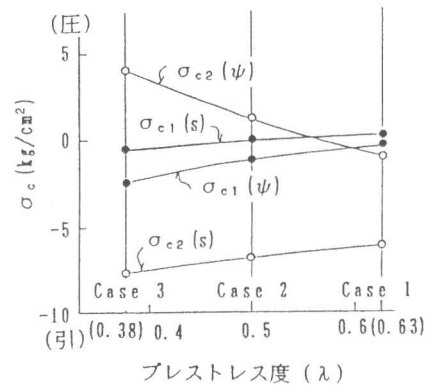


図-11 中央径間のプレストレス度と収縮およびクリープによる応力

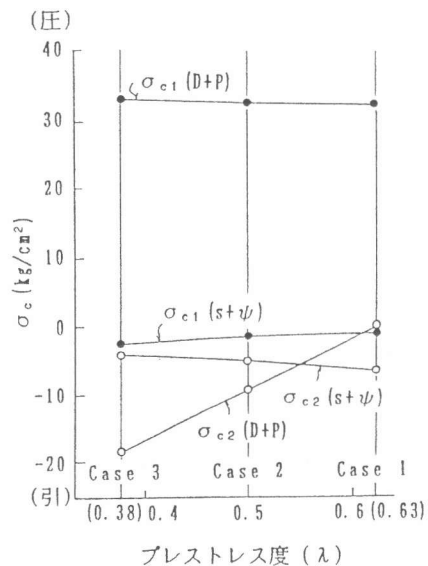
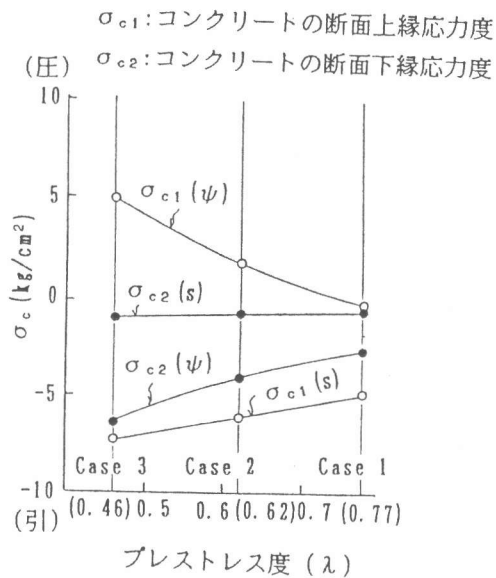
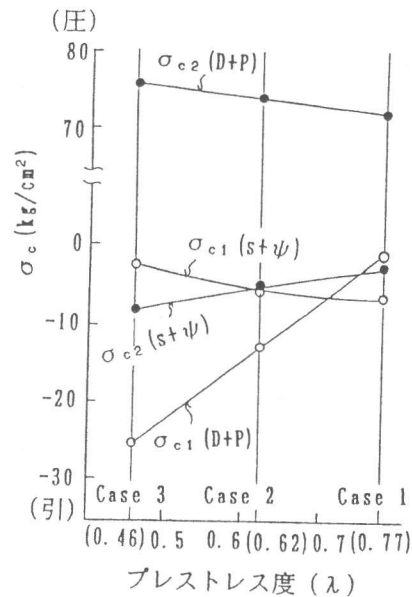


図-12 中央径間のプレストレス度と合成応力



図一13 内部支点のプレストレス度と収縮およびクリープによる応力



図一14 内部支点のプレストレス度と合成応力

5. まとめ

本研究における検討の範囲内で得られた結論は次のようである。

(1) プレストレス度が小さくなるほど（部材引張部の鋼材が多くなるほど）コンクリートの収縮に対する鋼材の拘束が大きくなるので、部材引張部におけるコンクリートの引張応力度は増加し、その大きさは 7kg/cm^2 程度となる。

(2) クリープによる部材引張部のコンクリートの応力度については、プレストレス度が小さくなるにしたがって死荷重とプレストレスとの合成応力度が圧縮から引張へと移行し、これによるクリープ変形が鋼材によって拘束されるためクリープによる応力度は引張応力から圧縮応力へと変化する。

(3) 部材引張部における収縮とクリープによるコンクリートの合成応力度については、プレストレス度 λ が小さくなるにしたがって、クリープによる応力度が引張応力から圧縮応力へと移行するので収縮による引張応力度の相当部分が相殺されることになる。したがって、合成応力度は λ が小さいほど小さくなる傾向を示し、 λ が $0.3\sim 0.8$ では約 $3\sim 7\text{kg/cm}^2$ の引張応力となった。このことは例えば活荷重除荷時にひびわれが閉じるように求めたプレストレス度であっても、収縮とクリープによる応力の影響を考慮しないとひびわれが閉じないこともあり得ることを示している。また引張鉄筋の算定に際しても収縮とクリープによる応力に対応した補強を行うことが必要となる。

(4) 連続桁橋の収縮およびクリープによる不静定曲げモーメントは、圧縮鉄筋量の大小によってかなり変動することが認められる。

参考文献

- [1] Bachmann, H.: Design of Partially Prestressed Concrete Structures Based on Swiss Experiences, PCI Journal, July/August, 1984
- [2] コンクリート標準示方書（平成3年版）、設計編、土木学会、1991
- [3] 道路橋示方書・同解説（I共通編、II鋼橋編）、日本道路協会、1990.2