HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	PRC桁の曲げ性状および断面設計法について
Author(s)	横道, 英雄; 角田, 与史雄; 高田, 宣之
Citation	北海道大學工學部研究報告, 68(1), 65-77
Issue Date	1973-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41139
Type	departmental bulletin paper
File Information	68(1)_65-78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

PRC 桁の曲げ性状および断面設計法について

横道英雄* 角田与史雄* 高田宣之*

(昭和48年3月23日受理)

Flexural Properties and Section Determination of Prestressed Reinforced Concrete Beams

Hideo YOKOMICHI Yoshio KAKUTA Nobuyuki TAKADA

Abstract

The term "Prestressed Reinforced Concrete (PRC)" as used by the authors may be defined as reinforced concrete into which limited prestressing forces are introduced in order to improve its limit-state properties under working loads. In the present study the flexural characteristics of PRC beams are investigated and the method of section determination of the beams is proposed. The important points of this paper are as follows.

The stresses and deflection of PRC beams can be calculated by the elastic theory in so-called State 1 or State 11, as seen in Fig. 1-3.

The plastic theories for prestressed concrete beams developed by Fujita are also applicable to PRC beams for the prediction of cracking and ultimate moments. Tab. 3 shows the comparison of the observed values of ultimate moment in PRC test beams with the calculated ones.

The formulas for the calculation of maximum crack widths in reinforced concrete beams, proposed by the authors, are also valid for PRC beams, as may be seen in Tab. 1.

Theoretical decompression in PRC beams is found to be effective as a limit of closing of crack widths under static loads as well as repeated loads. Tab. 2 shows the maximum residual crack widths observed in the static tests of PRC beams. Fig. 4-8 shows the cracking behavior of PRC beams subjected to high repeated loads.

The calculation of the safety factor of PRC beams against fatigue failure can be made in the same manner as that of RC beams, by using the values of stresses of reinforcing bars calculated in so-called State II. Fig. 9 shows the comparison of Wöhler's curve for fatigue failure of reinforcing bars in PRC beams with that in RC beams. Fig. 11-13 show the effectiveness of prestressing in improving the serviceability limit states of PRC beams such as decompression, cracking, crack widths and fatigue strength.

The methods of the section determination of PRC beams under the requirement of safety against various limit states, are proposed. The effective depth of the section is determined by eq. (5). The total area of reinforcing and prestressing bars is to be determined by eq. (10). The ratio of the area of prestressing bars to that of reinforcing bars is to be determined by eq. (13) from the requirement for decompression limit state, by eq.

* 土木工学科 コンクリート工学講座

(13) or (17) from cracking requirement, or by eq. (19) from the requirement for maximum crack widths or safety against fatigue failure of reinforcing bars. In the case of considering safety against fatigue failure of prestressing bars, the areas of steels and initial tensioning stresses of prestressing bars are to be determined by eq. (10), (19) and (12).

1. 序　　言

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) は，鉄筋コンクリート (RC) にプレストレスを与える構造型式で，一般的に言えば，緊張された鋼材 (PC 鋼) と非緊張の鋼材 (鉄筋) とを合わせもつ構造用コンクリート複合体を総称する。従って PRC は，鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリート (PC) の中間領域に属するが，広義に解釈すれば RC および PC も両極端の型式としてこれに加えることができる。

PRC の実用化は，著者の一人である横道が 1964 年にこれを提唱[1),2)] したのに始まり，以来わが国では著者らの研究[3)~8)] をはじめ，小寺ら[9),10)] 中川ら[11)] によって研究が行なわれ，上姫川橋[12)] ほか 2, 3 の施工例が生まれている。

一方，海外では PRC そのものではないが，これに関係する研究として古くに Abeles の提案がある[13),14)]。それは，PC の設計条件としてひびわれ発生を完全に防止するのは不経済であり，有害にならない範囲でこれを許すべきであるというものである。しかし当時はまだコンクリートのひびわれ幅制御に関する研究が著しく立ち遅れていたことや，PC は RC に比べてひびわれ分散性が悪いことなどのために，Abeles の提案は一般の同意を得るに至らなかった。しかし約 10 年前にコンクリート構造物の設計施工基準の国際的統一を目指してヨーロッパコンクリート委員会が提案した基準案[15)] において，PC の設計条件として従来から用いられてきた I 種 (フルプレストレッシング) および II 種 (パーシャルプレストレッシング) のほかに，一時的な変動荷重下におけるひびわれ発生を認める III 種条件が新たに加えられたことから，その実用性の問題が興味をよぶようになり，広義のパーシャリィプレストレストコンクリートとして最近活発な研究が行なわれるようになった[16)~21)]。これらの大部分は PC を母体と考えている点で著者らと方向が異なるが，PC 桁のひびわれ発生を許すためにはひびわれ分散性を良くするために RC と同様な配筋を必要とすることになると思われるので，結果的には著者らの方向と一致してくるものと考えられる。

PRC はこのように最近ようやく活発な研究が行なわれるようになったが，まだその歴史は浅く，今後の研究に期待しなければならない点も多い。本文は，曲げを受けるときの PRC 桁のひびわれ，疲労および終局限界状態の性状について幅広く論ずるとともに，それに基づく断面設計法を与えたものである。

2. PRC 桁の曲げ性状

2.1 PRC 桁の応力と変形

RC 桁の曲げによる変形は，ひびわれ発生前は全断面有効とする状態 I の弾性理論に一致するが，ひびわれ発生後はコンクリートの引張抵抗を無視する状態 II の弾性理論に近づくことが知られている。PRC 桁は付着性能の異なる 2 種類の鋼材が存在する点で RC 桁と異なるが，それらの間に相対的なすべりが生じなければ RC 桁と同様な性質をもつことになる。

Fig. 1~3 は，著者らの行なった PRC 桁の曲げ載荷実験において測定されたコンクリート圧

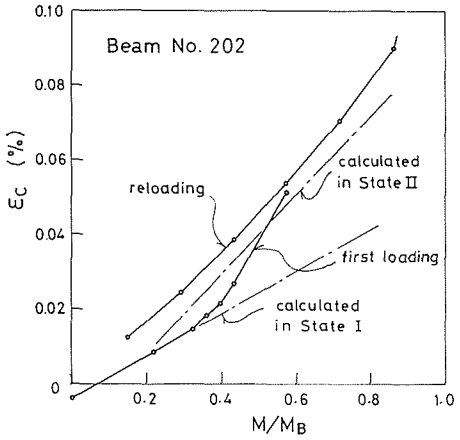

Fig. 1. Comparison of measured values of concrete strain at compression fiber with calculated ones.

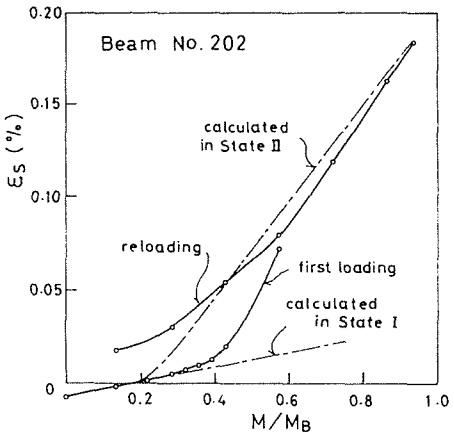

Fig. 2. Comparison of measured values of strain of reinforcing bars with calculated ones.

縮縁ひずみ，鉄筋ひずみおよびたわみ曲線の中から一例を示したものである*。これらの図に見られる傾向は RC 桁の場合[6] と全く同様であり，従って PRC 桁の応力および変形は，状態 I および状態 II の弾性理論においてプレストレスによる軸方向力を考慮することにより計算することができることがわかる。

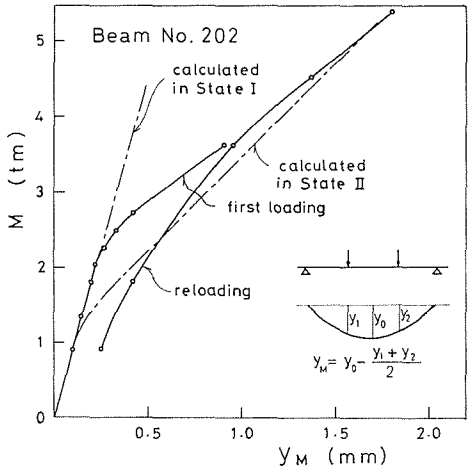

Fig. 3. Comparison of measured values of deflection with calculated ones.

2.2 PRC 桁のひびわれ発生曲げモーメント

RC 桁または PC 桁のひびわれ発生曲げモーメントを計算する方法には，コンクリートの引張塑性変形の影響を見かけ上の強度値(曲げ強度)に換算し，かつ鋼材の影響をコンクリート断面に換算することによって弾性理論を適用する方法，コンクリート断面と鋼材の抵抗を分離累加する方法，および塑性理論を用いる方法がある[23]。これらのいずれの方法も PRC 桁に対して適用することができるが，前2者は近似法であるので断面設計における概略計算には便利であるが，精密計算には塑性理論を用いなければならない。

塑性理論に基づく PRC 桁のひびわれ発生曲げモーメントの計算式は，PC 桁において普通鉄筋の影響を考慮するときと同じであり，藤田[24] によって与えられている。

2.3 PRC 桁のひびわれ幅

PRC 桁は RC 桁を本体としているので，そのひびわれ分散性は RC 桁と同等であると考えることができる。

RC 桁のひびわれ幅は，2本の隣合うひびわれ間の鉄筋の伸びとコンクリートの伸びの差として現われる；

---

* ここに引用した桁は，幅 20 cm，高さ 30 cm，スパン 3 m，鉄筋 2 D 16，PC 鋼 1 ϕ 10，有効プレストレッシング力 6,840 kg であり，実験の詳細については文献 22) を参照されたい。

$$w=(\bar{\varepsilon}_s-\bar{\varepsilon}_c)\,l \tag{1}$$

または

$$w=\left(\sigma_s-\frac{\alpha\sigma_{ct}}{p_e}-\bar{\varepsilon}_c E_s\right)l/E_s \tag{2}$$

ここに $\bar{\varepsilon}_s$ は鉄筋の平均ひずみ，$\bar{\varepsilon}_c$ はコンクリート表面の平均ひずみ，l はひびわれ間隔，σ_s はひびわれ位置の鉄筋応力度（状態 II の計算応力度），σ_{ct} はコンクリートの引張強度，E_s は鉄筋の弾性係数，p_e は鉄筋との付着作用に直接関与するコンクリート断面積（鉄筋とその重心が一致する断面をとる）に対する鉄筋比（有効鉄筋比）を表わす。

係数 α はひびわれの成長度と関係するが，通常の使用応力レベルにおいては，一時的荷重に対して 0.4，長期荷重に対して 0，大きな変動荷重を受けるときにはその平均荷重に対して 0，持続荷重に対して -0.2 の値をとることができる[25]。

$\bar{\varepsilon}_c$ は通常の場合 0 にとってよいが，コンクリートのクリープおよび収縮の影響または鉄筋のプレストレンがあるときには，それらによる鉄筋とコンクリートとの間の弾性ひずみ差を $\bar{\varepsilon}_c$ として考慮すればよいことが明らかにされている[6]。

ひびわれ間隔として設計上重要なのはその最大値 $l_{\max}$ である。$l_{\max}$ の値は鉄筋として異形棒鋼を用いるとき，次式によって与えられる[26]；

$$l_{\max}=5.4\,t \tag{3 a}$$

または

$$l_{\max}=3.72\,t\,(1+0.18\,e/t) \tag{3 b}$$

ここに t はコンクリート純かぶり厚，e は棒鋼の水平純間隔を表わす。

PRC 桁のひびわれ幅も上の各式を用いて計算することができるが，その際，プレストレスの効果は (2) 式中の σ_s の低減として現われる。

Tab. 1 は異形棒鋼を鉄筋として用いた PRC 桁の実験において測定された，破壊荷重の約 60% の荷重における最大ひびわれ幅を上記の計算値と比較したものであり，両者の良い一致が見られる。

Table 1. Maximum crack widths in PRC beams at 60% of the ultimate load

Beam No.	observed values of $w_{\max}$ (mm)	calculated values of $w_{\max}$ (mm)	calc./obs.
201	0.147	0.128	0.87
202	0.132	0.136	1.03
203	0.042	0.048	1.09
204	0.174	0.209	1.20

2.4 PRC 桁の非引張限界

従来，フルプレストレッシングの PC において，使用荷重下においてコンクリートに引張応力が生じない（以下ではこれを“非引張”と呼ぶ）という設計条件が用いられている。その目的は，ひびわれの発生を確実に防止することにあるが，さらに，万一過大な荷重が一時的に作用してひびわれが生じたとしても，除荷後には再び閉合するという意味もある。後者の性質が，頻繁に作用する変動荷重下においても有効であれば，PRC 桁の設計条件として使用することが可能である。

Tab. 2 は，緊張率を種々に変えた断面 20×30 cm，スパン 3 m の PRC 桁において，破壊荷重の 60% 以上の荷重をかけてひびわれを生じさせた後に，計算上の非引張限界に相当する荷重まで除荷したときに観測された残留ひびわれ幅の最大値を示したものである。この結果に見られるように，いずれの桁も残留ひびわれ幅は 0.05 mm 程度であって，事実上の閉合が行なわれたことがわかる。

Table 2. Residual crack widths in PRC beams at theoretical decompression

Beam No.	maximum crack widths before unloading (mm)	residual crack widths at decompression (mm)	kind of reinforcing bars
201	0.127	0.033	deformed
202	0.114	0.038	〃
203	0.220	0.057	〃
204	0.062	0.025	〃
205	0.206	0.043	〃
210	0.131	0.048	round
211	0.104	0.036	〃
212	0.043	0.021	〃

Fig. 4～8 は，上記と同じ寸法の PRC 桁 2 本（鉄筋 2 D 16, PC 鋼 1 ϕ 10, 有効プレストレッシング力 6,150 kg, プレテンショニング）について 20 万回までの繰返し載荷をしたときに得られたひびわれ幅の性状を示したものである。なお，繰返し荷重の大きさは，桁 No. 26 は上限 7 t, 下限 3.5 t で，計算上の非引張限界 1.87 t を上回る応力レベルとしたのに対して，桁 No. 27 は上限 5 t, 下限 1.5 t で，非引張限界 1.84 t を跨ぐ変動荷重とした。

繰返し荷重を受けるとき，ひびわれ幅は徐々に増加するが，Fig. 4 に見られるようにその大部分は 1 万回以下の初期の繰返しにおいて生じ，その後の増加量は圧縮部コンクリートのクリープ変形による影響と思われるわずかなものに過ぎない。繰返し初期の増加は主としてひびわれの成長と鉄筋の付着応力の減少に起因するもので，鉄筋のひずみが安定した値（状態 II の計算値に相当する）に達するとともに，ひびわれ幅も安定した性状を示すことがわかる。このことは，Fig. 5 および 6 に示すように，ひびわれ幅を鉄筋の平均ひずみの測定値で除した値 $w/\bar{\varepsilon}_s$ が，繰返し回数にほとんど関係なく一定値をとることからも知ることができる。さらに，2 本の桁が異なる応力レベルの繰返し荷重を受けているにもかかわらず，$w/\bar{\varepsilon}_s$ はほぼ同じ値を示しており，PRC 桁のひびわれの定常性が，RC 桁の場合と同様に非常にすぐれたものであることがわかる。

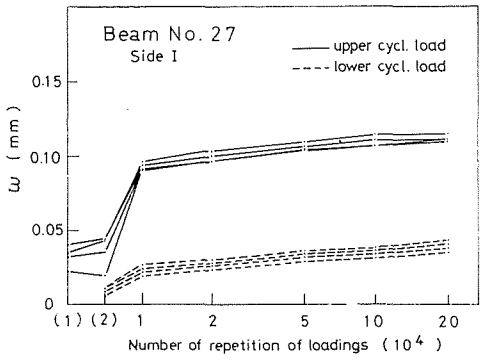

Fig. 4. Increase of crack widths under repeated loadings.

Fig. 7 および 8 は 20 万回の繰返し荷重を載荷した後に観測された荷重—ひびわれ幅曲線を示したものである。それらの曲線は，計算上の非引張限界曲げモーメント M_D の附近において明確な屈折点を示し，かつそれ以下の荷重におけるひびわれ幅は約 0.05 mm 以下であって，非引張限界に

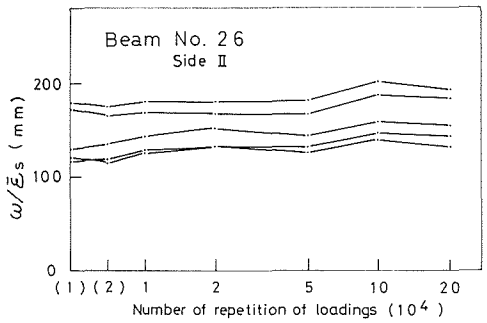

Fig. 5. Crack widths devided by average steel strain.

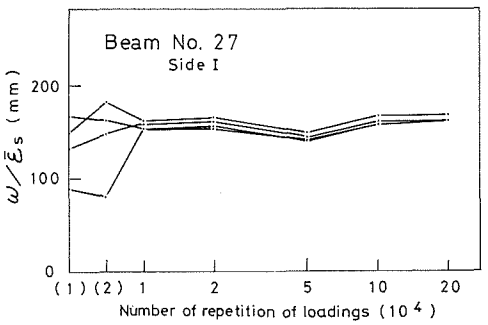

Fig. 6. Crack widths devided by average steel strain.

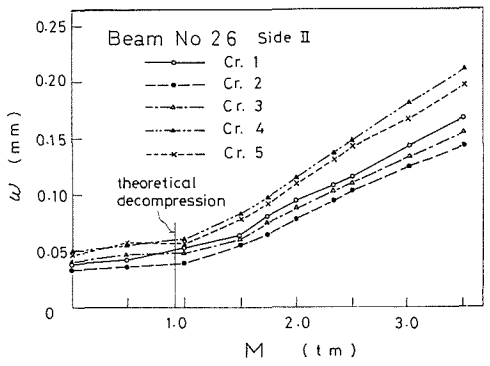

Fig. 7. Crack widths observed in static loading test after application of two hundreds thousand repetitions of loading.

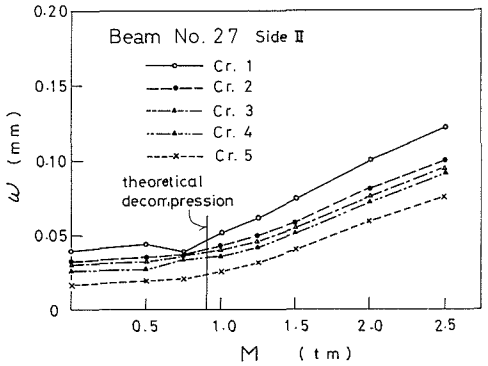

Fig. 8. Crack widths observed in static loading test after application of two hundreds thousand repetitions of loadings.

おけるひびわれ幅の閉合性が極めて良いことが示されている。

以上の結果より，PRC 桁の非引張限界は，静的載荷時だけでなく，比較的大きな繰返し荷重を受ける場合にもひびわれ閉合効果が明確に現われ，設計条件の一つとして十分に利用しうるものであることがわかる。

2.5 PRC 桁の終局曲げモーメント

RC 桁または PC 桁の終局曲げモーメントに関する研究はこれまで数多く行なわれているが，次の仮定に基づくのが実験結果と良い一致を与えるとされている[26]；

1) 平面保持の仮定が成立つ。鋼材のひずみ増分は，同じ位置のコンクリートのひずみ増分に等しい。

2) コンクリートの圧縮に対する応力—ひずみ曲線および極限圧縮ひずみ ε_c^* が与えられている。

3) 鋼材の引張および圧縮に対する応力—ひずみ曲線が与えられている。

4) コンクリートの引張抵抗は無視する。

5) 断面の破壊は，コンクリートの最大ひずみが ε_c^* に達したときに生ずる。

上の仮定に基づく PRC 桁の終局曲げモーメントの計算方法は，普通鉄筋の影響を考慮するときの PC 桁の計算と同じであり，藤田[24]によってその計算式が導かれている。

Table 3. Ultimate moments of PRC beams

Beam No.	prestressing ratio ζ	compressive strength of concrete (kg/cm²)	observed values of ultmate moment (tm)	calculated values of ultimate moment (tm)	obs./calc.
201	0.35	350	6.03	5.98	1.01
202	0.35	397	6.30	6.14	1.03
203	0.48	346	4.05	4.22	0.96
204	0.53	295	—	4.10	—
205	0.22	324	8.95	8.69	1.03
210	0.57	325	3.73	3.78	0.99
211	0.57	355	4.00	3.89	1.03
212	0.58	298	3.60	3.79	0.95

Tab. 3 は，著者らの行なった PRC 桁の実験において観測された破壊時の曲げモーメントを上記による計算値と比較したものであり，両者は非常に良い一致を示している。

2.6 PRC 桁の疲労

PRC 桁は，コンクリート，鉄筋および PC 鋼の 3 種類の素材からなり，その各々に対して疲労安全度を保証しなければならないが，コンクリートは通常十分に大きい材料係数をもって設計されるので，疲労に対する考慮は必要ない。

PRC 桁の鉄筋応力度は 2.1 節に述べたように状態 II の弾性理論によって計算することができるので，RC 桁の場合と同様に鉄筋自体の疲労耐力をもとに安全度の評価をすることができる。

Fig. 9 は，同じ鉄筋を用いた RC 桁および PRC 桁の疲労実験において得られた鉄筋の疲労破断時の状態 II の計算応力度を Wöhler 曲線によって表示したものであり，両者の良い一致が示されている。

PC 鋼は緊張応力が持続的に作用するので変動応力の影響は一般に小さいが，例えば鉄筋と PC 鋼の同時降伏を得ようとして PC 鋼に過度の緊張応力度を与えるときは，その疲労安全度を検討しなければならない。

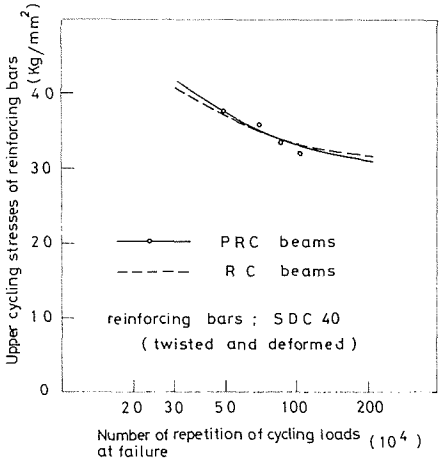

Fig. 9. Wöhler's curves for fatigne strength of reinforcing bars in RC and PRC beams.

2.7 PRC 桁の緊張率と曲げ性状

PRC 桁において鉄筋と PC 鋼の断面積比を種々に変えることにより，終局耐力を一定に保ちながら使用荷重下の性状を変えることができる。同じことは PC 桁において PC 鋼の緊張応力度/引張耐力の比を変えることによっても達せられるが，その場合には Fig. 10 に示すようにひびわれ発生後のひずみ増加率が著しく大きく，過大なひびわれが生じ易いので実用性は薄い。

Fig. 11 は PRC 桁において終局曲げモーメントを一定にして緊張率 $\zeta=A_p\sigma_p^*/(A_s\sigma_s^*+A_p\sigma_p^*)$ を 0 (RC に相当) から 1 (フルプレストレッシングの PC) まで変化させたときの鉄筋位置のひずみ曲線を示したものである。なお，図中の点線はひびわれ発生曲げモーメント M_{cr} 以下の荷重領域であるが，それを越える荷重が一度でも作用すればひびわれが生じてこの線に従うことを意味

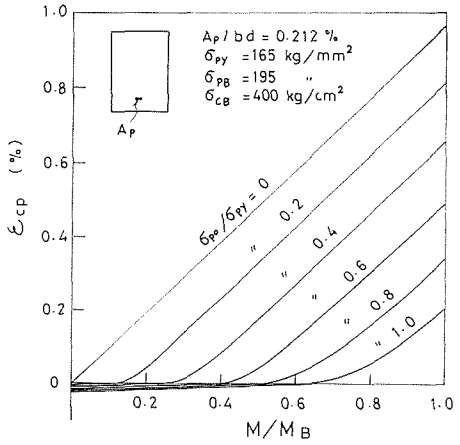

Fig. 10. Effect of σ_{p0}/σ_{py} on strain of concrete at position of prestressing bars in prestressed conerete beams.

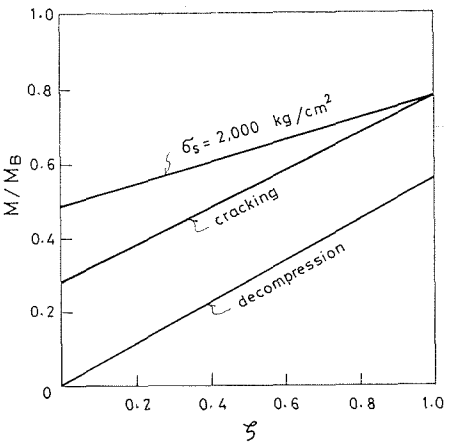

Fig. 12. Effect of prestressing on moments at decompression, cracking and steel stress of 2,000 kg/cm² in PRC beams.

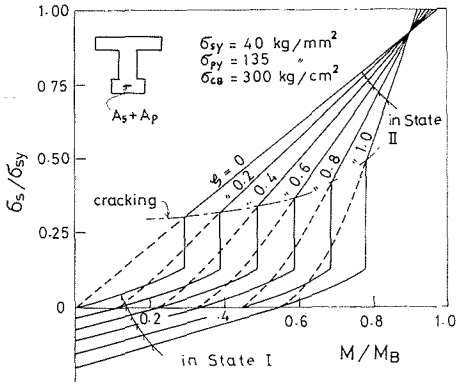

Fig. 11. Effect of prestressing ratio on flexual properties of PRC beams.

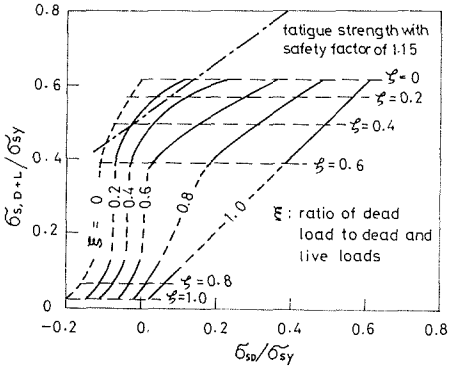

Fig. 13. Stresses of reinforcing bars in modified Goodmann coordinates.

している。この図より，非引張限界，ひびわれ発生および鉄筋応力度 2,000 kg/cm² (ひびわれ間隔 20 cm と仮定すれば，約 0.2 mm のひびわれ幅に相当する) に対する曲げモーメントの各値と ζ との関係を求めれば，Fig. 12 に示す通りであり，プレストレスによる使用性状の改善が極めて効果的に得られることがわかる。

Fig. 13 は，Fig. 10 において使用曲げモーメントが終局曲げモーメントの 60% と仮定するときの，種々の死荷重曲げモーメント/使用曲げモーメント比に対する鉄筋応力度を修正 Goodmann 座標に表わしたものである。図にはさらに RC 桁の疲労実験[27]において得られた異形棒鋼 SDC 40 に対する 200 万回疲労耐力に 1.15 の安全度をとったときの設計限界線も描いてある。この図より ζ が小さい範囲では終局耐力よりも疲労耐力が安全性を支配するが，それは RC 桁の場合と同じであって，全体的には PRC 桁は RC 桁よりも疲労安全度が高いことがわかる。

3. PRC 桁の断面設計法

3.1 概　　説

コンクリート構造部材の設計において考慮すべき限界状態は多くあるが，通常は終局耐力，ひびわれおよび疲労の3つが支配的影響をもつ。ひびわれ限界状態は前節に述べたように非引張 (D)，ひびわれ発生限界 (F) およびひびわれ幅限界 (W) の3種がある。PRC 桁の設計条件としては長期および一時的荷重の両者に対して，上記の各限界状態を組合わせて用いることができる。Tab. 4 はそれらと構造型式との間の関係を示したものである。

Table 4. *Limit states of cracking*

Limit states		type of members		
for long-term loadings	for all loadings			
D	D	full	PC	PRC
D	F	partial		
F				
D	W	RC		
F				
W				

以下において各種のひびわれ条件と終局耐力に基づく PRC 桁の断面設計法を示すが，PRC 桁は PC 桁と異なりプレストレスによるコンクリート圧縮縁応力からの PC 鋼位置の制限がほとんどなく，従って PC 鋼をできるだけ引張縁近くにとるのが望ましいので，ここでは PC 鋼と鉄筋の重心は一致すると仮定するが，一般の場合にも容易に拡張しうる性格のものである。

3.2 終局耐力に基づく鋼材量の決定

いま，断面に要求される終局曲げモーメントを M_B^*，断面の耐力を M_B とするとき，設計条件は

$$M_B \geqq M_B^* \tag{4}$$

鉄筋および PC 鋼の計算用強度を σ_s^* および σ_p^*，その各々に対するひずみを ε_s^* および ε_p^* とおけば，終局耐力時において鉄筋および PC 鋼がその強度を有効に発揮するためには，有効桁高を，次の条件を満たすように定めなければならない；

$$d \geqq \gamma^* \sqrt{\frac{M_B^*}{b\sigma_c^*}} \tag{5}$$

ここに

$$\left.\begin{aligned} &\gamma^* = 1/\sqrt{\alpha k^* j^*} \\ &k^* = k_s^* \text{ または } k_p^* \text{ のうちの小さい方} \\ &j^* = 1-\beta k^* \\ &k_s^* = \frac{\varepsilon_s^*}{\varepsilon_c^* + \varepsilon_c^*} \\ &k_p^* = \frac{\varepsilon_c^*}{\varepsilon_c^* + \varepsilon_p^* - \varepsilon_{p0}} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

ここに α および β はコンクリート圧縮部の塑性変形を考慮する係数で，矩形断面に対しては次の値をとる（藤田[24]）；

$$\alpha = 0.8, \qquad \beta = 0.412 \tag{7}$$

また，ε_{p0} は PC 鋼の緊張応力度 σ_{p0}（ポストテンション の場合には $\sigma_{p0}+n\sigma_{cp0}$ に置換わる）によるひずみを表わす。

(5) 式の条件が満たされるとき，M_B は次式により与えられる；

$$M_B = (A_s\sigma_s^* + A_p\sigma_p)(1-\beta k)\,d \tag{8}$$

ここに

$$k = \frac{A_s\sigma_s^* + A_p\sigma_p^*}{\alpha bd\sigma_c^*} \tag{9}$$

これより必要鋼材量は

$$A_s\sigma_s^* + A_p\sigma_p^* \geqq \frac{\alpha bd\sigma_c^*}{2\beta}\left[1-\sqrt{1-\frac{4M_B^*}{\alpha bd^2\sigma_c^*}}\right] \tag{10}$$

鉄筋および PC 鋼の個々の断面積は，3.3 以下に述べるひびわれまたは疲労限界状態により定められる。

3.3 非引張限界に基づく緊張率の決定

設計条件は

$$M_D \geqq M_D^* \tag{11}$$

ここに

$$\left.\begin{aligned} M_D &= W_i A_p\sigma_{p0}/A_e' \\ A_e' &= A_e/(1+e_e y_e A_e/I_e) \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

ここに W_i は PRC 換算断面としての引張縁に対する断面係数，A_e, I_e, e_e および y_e は RC 換算断面としての断面係数，断面 2 次モーメント，重心から PC 鋼までの距離および重心から引張縁までの距離を表わす。これらの値は正確には試算的に定めるのがよいが，近似的にはコンクリート断面としての値を用いてもよい。(11) 式より PC 鋼の必要断面積は

$$A_p \geqq \frac{M_D^* A_e'}{W_i\sigma_{p0}} \tag{13}$$

3.3 ひびわれ発生条件に基づく緊張率の決定

設計条件は

$$M_{cr} \geqq M_{cr}^* \tag{14}$$

ここに M_{cr} の計算は塑性理論によるのが正確であるが，ここでは近似計算法を用いることにする。まず，弾性理論に基づく近似法によれば

$$M_{cr} = W_p(\sigma_{cb} + A_p\sigma_{p0}/A_e') \tag{15}$$

ここに σ_{cb} はコンクリートの曲げ強度を表わす。このとき PC 鋼の必要断面積は (14) 式より

$$A_p \geqq \frac{A_e'}{\sigma_{p0}}\left(\frac{M_{cr}^*}{W_p} - \sigma_{cb}\right) \tag{16}$$

もう一つの M_{cr} の近似計算法として累加耐力式を用いれば

$$M_{cr} = M_{cr,pl} + \varphi_z\left\{(A_sE_s + A_pE_p)\frac{e}{y}\varepsilon_{ct} + A_p\sigma_{p0}\right\} \tag{17}$$

ここに $M_{cr,pl}$ は無筋コンクリート断面としてのひびわれ発生曲げモーメント，z はそのときの圧縮合力位置から鋼材までの距離，e および y は中立軸から鋼材および引張縁までの距離，ε_{ct} はコンクリートの極限引張ひずみ（その大きさは藤田[24]により与えられている）を表わす。また，係数 φ は無筋コンクリート断面と PRC 断面との z 値の相違を補正するもので，Fig. 14 に示すように断面形状や鋼材量によって値は異なるが，実用的には矩形断面に対して 0.8，T 形断面に対して 0.9 をとればよい。このとき，鉄筋および PC 鋼の断面積は (10) 式および (17) 式より得られる。

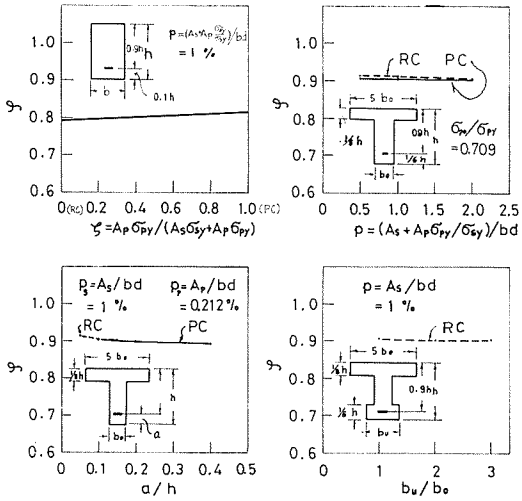

Fig. 14.

3.4　ひびわれ幅限界に基づく緊張率の決定

このときの設計条件は

$$M_W \geqq M_W^* \tag{18}$$

ここに M_W は，許容ひびわれ幅 w^* に達するときの曲げモーメントを表わし，(2) 式より

$$\left.\begin{aligned} M_W &= \left\{A_s\sigma_s^{**}+A_p(\sigma_{p0}+E_p/E_s\cdot\sigma_s^{**})\right\}z \\ \sigma_s^{**} &= \frac{w^*E_s}{l}+\frac{\alpha\sigma_{ct}}{p_e} \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

ここに z は状態 II における圧縮合力位置と鋼材位置との距離を表わし，近似的に (10) 式において $A_p=0$ (RC) としたときの値を用いても十分な精度が得られる。各鋼材量は (10) および (19) 式より求められる。

3.5　疲労限界に基づく緊張率の決定

鉄筋の疲労限界に基づく場合は，鉄筋の疲労強度を σ_s^{**} にとるとき，(19) 式に準じて設計することができる。

ひびわれ幅限界または鉄筋疲労とともに PC 鋼の疲労も安全度を支配するときには，設計条件は

$$M_B \geqq M_B^*, \qquad M_W \geqq M_W^*, \qquad M_p \geqq M_p^* \tag{20}$$

PC 鋼の疲労強度を σ_p^{**} とおけば

$$M_p = \left\{A_sE_s/E_p\cdot(\sigma_p^{**}-\sigma_{p0})+A_p\sigma_p^{**}\right\}z \tag{21}$$

このときは，A_s，A_p および σ_{p0} を未知量として (10)，(19) および (21) 式よりそれらの値が定められる。

4.　結　　語

以上において PRC 桁の曲げに対する各種限界状態性状および各種の設計条件に基づく断面設計法について述べたが，その主な点をまとめれば次の通りである。

1)　PRC 桁の応力および変形は，RC 桁と同様に状態 I および状態 II の弾性理論によって計算することができる。

2) PRC 桁のひびわれ分散性は RC 桁の場合と同等であり，著者らの RC 桁に対する研究成果をもとにひびわれ幅の制御を行なうことができる。

3) PRC 桁の非引張限界は，静的荷重はもち論，繰返し荷重を受ける場合にも安定した性状を示し，ひびわれ閉合の設計条件として有効に使用することができる。

4) PRC 桁の終局曲げモーメントは藤田の PC 桁に対する理論をそのまま適用することができる。

5) PRC 桁は，PC 鋼と鉄筋の断面積を適当に選ぶことにより，終局状態および使用状態の両者に対して釣合いのとれた性状を常に得ることができる。

6) 終局耐力および非引張，ひびわれ発生，ひびわれ幅または疲労の各使用限界状態に基づく PRC 桁の断面設計法が与えられた。

文　献

1) 横道英雄：鉄筋コンクリートの新発展と PRC 工法，土木学会北海道支部，昭 39. 2.
2) 横道英雄，林　正道：PRC 工法について，土木学会第 19 回年次学術講演会講演概要，昭 39. 5.
3) 横道英雄，角田与史雄：PRC はりのひずみにおよぼすクリープおよび収縮の影響について，セメント技術年報 XX，1966.
4) H. Yokomichi: Prestressed Reinforced Concrete System, Final Report of 8th Congress of I. A. B. S. E., New York, 1968.
5) 横道英雄，角田与史雄：PRC 桁の設計について，土木学会第 23 回年次学術講演会講演概要，昭 43. 10.
6) 角田与史雄：鉄筋コンクリート桁の曲げ，ひびわれおよび変形に関する基礎的研究，北大工学部研究報告第 54 号，昭 44. 10.
7) 横道英雄，角田与史雄，北村邦雄：PRC 桁の曲げ応力性状に及ぼす PC 鋼/鉄筋比の影響，土木学会第 25 回年次学術講演会講演集，昭 45. 10.
8) 角田与史雄，高田宣之，北村邦雄：PRC 桁の曲げ特性に関する実験，土木学会第 27 回年次学術講演会講演集，昭 47. 10.
9) 小寺重郎，岩城　良，太田陽一：PRC について，コンクリートジャーナル，Vol. 5, No. 5, Sept. 1965.
10) 小寺重郎，岩城　良：PRC 桁に関する実験について，プレストレストコンクリート，Vol. 7, No. 6, Dec. 1965.
11) 中川英憲，森島　務：プレストレスト鉄筋コンクリートはりに関する基礎的研究，土木学会第 25 回年次学術演演会講演集，昭 45. 11.
12) 横道英雄，外崎　忍：上姫川橋 (PRC 工法) の設計および施工について，プレストレストコンクリート，Vol. 7, No. 5, Oct. 1965.
13) P. W. Abeles: Fully and Partly Prestressed Reinforced Concrete, Journal of A. C. I., Vol. 16, No. 3, Jan. 1945.
14) P. W. Abeles, L. Czuprynski: Partial Prestressing-Its History, Research, Application and Future Developments, Annales des Travaux Publics de Belgique, No. 2, 1966.
15) Recommendations for an International Code of Practice for Reinforced Concrete, C. E. B., ACI-CCA, 1964.
16) S. C. Hutton, R. E. Loov: Flexural Behavior of Prestressed, Partially Prestressed, and Reinforced Concrete Beams, Journal of A. C. I., Vol. 63, No. 12, Des. 1966.
17) R. F. Stevens: Test on Prestressed Reinforced Concrete Beams, Concrete, Nov. 1969.
18) E. W. Bennett, N. J. Dave: Test Performances and Design of Concrete Structures with Limited Prestress, The Structural Engineer, Vol. 47, No. 12, Dec. 1969.
19) E. W. Bennett, N. Veerasubramanian: Behavior of Nonrectangular Beams with Limited Prestress after Flexural Cracking, Journal of A. C. I., Sept. 1972.
20) P. W. Abeles, E. I. Brown, J. M. Morrow: Development and Distribution of Cracks in Rectangular Prestressed Beams during Static and Fatigue Loading, Journal of P. C. I., Oct. 1968.

21) R. Caflisch: Teilweise Vorgespannter Beton, Schw. Bauz., Jun. 1971.
22) 角田与史雄: PRC 桁の曲げ特性に関する実験, プレストレストコンクリート, 15 巻 3 号, 昭 48. 5/6.
23) 角田与史雄: 鉄筋コンクリート部材の諸性状—ひびわれ, 土木学会コンクリートライブラリー第 34 号, 昭 47. 8.
24) 藤田嘉夫: 単純曲げをうける鉄筋コンクリート桁およびプレストレストコンクリート桁の極限強さ設計法に関する研究, 北大工学部研究報告第 32 号, 昭 38. 10.
25) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 9, Sept. 1970.
26) 角田与史雄: 鉄筋コンクリート部材の諸性状—曲げおよび曲げ圧縮, 土木学会コンクリートライブラリー第 34 号, 昭 47. 8.
27) 横道英雄, 藤田嘉夫: 異形鉄筋の静的および疲労強度について, 土木学会コンクリートライブラリー第 14 号, 昭 40. 12.