

使用状態におけるパーシャル PC 桁の変形挙動把握と 連続桁橋への適用

INVESTIGATION OF FLEXURAL DEFORMATION OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS AND ITS APPLICATION TO ANALYSIS OF CONTINUOUS GIRDER BRIDGES UNDER SERVICE LOAD CONDITIONS

猪又 稔*・藤田嘉夫**

By Minoru INOMATA and Yoshio FUJITA

In designing statically indeterminate structures of partially prestressed concrete under service load conditions, it is reasonable to take into account the reduction of flexural rigidity due to cracking for computing redundant forces.

In this paper, experiments are conducted to clarify flexural deformation of partially prestressed concrete beams, and a simplified moment-curvature relationship is proposed for rapid nonlinear analysis of continuous girder bridges.

Furthermore numerical examples clarify effects of the level of prestressing and the pattern of cracking on redundant forces under service load conditions.

Keywords: partially prestressed concrete, cracking, moment-curvature relationship, continuous girder bridge

1. ま え が き

わが国における PC 橋の建設は、これまで使用状態において、ひびわれを許容しない PC (以下フル PC という) 橋によるものがほとんどであり、ひびわれを許容する PC 橋は、例外的にわずかあるにすぎないのが現状である (この PC はアプローチの方法によって PRC あるいはパーシャル PC ともいわれているが、いまだ呼称が統一されていないので本文では以下パーシャル PC ということにする)。フル PC 構造に関しては、温度あるいは支点沈下等不測の大きな引張応力によっていったんひびわれが発生すると、鉄筋量が少ないため、ひびわれ幅も大きくなり危険な状態になり得ること、また多量の PC 鋼材を必要とするのでその配置が困難となる場合があること、さらに弾性変形、クリープによる負のたわみが大きくなり過ぎる等の問題点が指摘されており、それらはフル PC に比してプレストレスレベルが低く、鉄筋の使用量が多いパーシャル PC 構造とすることによって大幅に使用性能が改善でき、さらに経済

的にもメリットのあることが明らかになってきている^{1)~3)}。このようなことから最近日本道路公団や JR においては PRC 橋に関する設計要領あるいは設計指針等が作成されており、今後パーシャル PC の使用が盛んになるものと思われる。また昭和 61 年制定の土木学会コンクリート標準示方書 (設計編) においてもパーシャル PC 構造の設計が可能なものになっている。しかしながら示方書における使用状態の断面力算定に関する取り扱いをみると、実用的な設計の観点から線形解析の適用を原則としているが、使用状態においてひびわれが発生し、ひびわれによる部材の剛性低下の影響が大きい場合には、これを考慮して断面力の算定を行うことが実際の力学的挙動を設計に反映できることになる。

パーシャル PC 静定構造の断面力は、力とモーメントのつり合い条件のみから求まるので、ひびわれによる部材の剛性低下が断面力の分布に影響を及ぼすことはないが、不静定構造では、それが直接影響を及ぼすことになる。この影響が大きい場合には、部材の曲げモーメント・曲率関係を求め、これが部材のすべての箇所でも満足するような曲げモーメントの分布を求める非線形解析が必要となる。パーシャル PC 不静定構造において、ひびわれによる剛性低下を考慮して曲げモーメントの分布を求める方法としては、Cooke らの報告⁴⁾があるが、こ

* 正会員 北海道工業大学教授 土木工学科
(〒006 札幌市西区手稲前田 419-2)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

これはモーメント・曲率曲線を逐次直線近似する反復計算法のニュートン・ラフソン法を基礎としたもので、収束するまでにはかなりの計算量が必要となる。このようなことから、部材のモーメント・曲率関係を単純化できるならば、ひびわれ発生による部材の剛性低下を考慮したパーシャルPC不静定構造の非線形解析は容易なものとなり設計の実務に寄与できることになる。

このため本論文では、使用状態におけるパーシャルPC桁の変形挙動を既往の研究および実験により検証し、その結果をふまえて直線の組合せによる単純化されたモーメント・曲率関係を提示した。さらにこれをパーシャルPC連続桁橋の非線形解析に適用し、また実橋規模を対象とした数値計算によって、プレストレスレベルおよびひびわれパターンによって不静定力がどのような挙動を示すかを、全断面を有効とした線形計算値と対比して検討したものである。

2. パーシャルPC桁のモーメント・曲率関係の検討

(1) モーメント・曲率に関する検討

ひびわれによる剛性低下を考慮して、パーシャルPC不静定構造の曲げモーメント分布を算定するには、部材の曲げモーメント・曲率 ($M-\phi$) 関係を求めておく必要がある。コンクリート部材の曲げモーメント・曲率に関して、これまで多くの研究⁵⁾がなされているがその代表的なものとしてCEBとBransonの方法がよく知られている。最近改良されたCEBマニュアル⁶⁾によれば曲げモーメント M および断面図心軸に一定の大きさの軸力 N が作用するとき、RC部材の平均曲率 ϕ_m は次のように表わされる (図-1(a))。

$$\phi_m = (1 - \zeta_0)\phi_1 + \zeta_0(\phi_0 + \phi_2) \dots \dots \dots (1)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= -\frac{N(X_1 - X_2)}{EI_{cr}} \\ \phi_1 &= \frac{M}{EI_g} \\ \phi_2 &= \frac{M}{EI_{cr}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに ϕ_1 , I_g および X_1 はそれぞれ全断面を有効とした状態Ⅰの曲げのみを受ける場合の曲率、中立軸に関する断面二次モーメントおよび断面圧縮縁から中立軸までの距離であり、同様に ϕ_2 , I_{cr} および X_2 はコンクリートの引張部を無視した状態Ⅱの値である。また式(1)の係数 ζ_0 は次のような値をとる。

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{\beta_1\beta_2} \cdot M_{cr} &\geq M_0 \text{ の場合} \\ M &\geq M_{cr} \text{ に対しては} \\ \zeta_0 &= 1 - \left(\frac{\sqrt{\beta_1\beta_2} \cdot M_{cr} - M_0}{M - M_0} \right)^2 \\ M < M_{cr} \text{ に対しては、} &\zeta_0 = 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{\beta_1\beta_2} \cdot M_{cr} &< M_0 \text{ の場合} \\ M &\geq M_{cr} \text{ に対しては、} \zeta_0 = 1 \\ M < M_{cr} \text{ に対しては、} &\zeta_0 = 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ここに β_1 は鉄筋の付着性状を考慮するための係数で異形鉄筋では1.0、普通丸鋼では0.5にとる。 β_2 は荷重の性質を考慮するための係数で初載荷に対しては1.0、持続荷重および繰り返し荷重に対しては0.5にとる。 M_{cr} はひびわれモーメントであり、また M_0 は次のように表わされる。

$$M_0 = \frac{N(X_1 - X_2)}{1 - (I_{cr}/I_g)} \dots \dots \dots (5)$$

以上の計算式はパーシャルPC (図-1(b)) にも応用できるものであるが、その場合 ϕ_m および M_0 の値は次のようにとる。

$$\phi_m = (1 - \zeta_0)(\phi_p + \phi_1) + \zeta_0(\phi_0 + \phi_2) \dots \dots \dots (6)$$

ただし

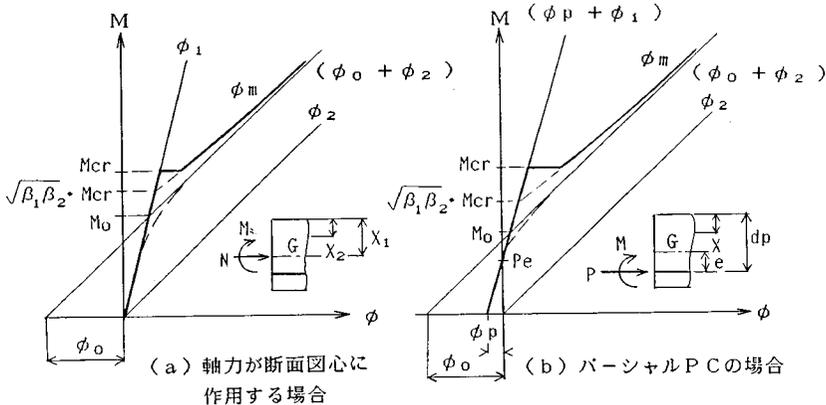


図-1 曲げと軸力が作用する部材の $M-\phi$ 図

$$\left. \begin{aligned} \phi_p &= -\frac{Pe}{EI_g} \\ \phi_1 &= \frac{M}{EI_g} \\ \phi_0 &= -\frac{P_0(d_p - X)}{EI_{cr}} \\ \phi_2 &= \frac{M}{EI_{cr}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$M_0 = \frac{P_0(d_p - X)I_g - PeI_{cr}}{I_g - I_{cr}} \dots\dots\dots (8)$$

ここに

P : プレストレス力

P_0 : 断面コンクリートの応力 0 の状態を基準としたプレストレス力

d_p : 断面圧縮縁からプレストレス力作用点までの距離

X : PC 鋼材を含めた仮想 RC 断面の曲げのみを受ける場合の断面圧縮縁から中立軸までの距離

e : 状態 I におけるプレストレス力の偏心量

I_{cr} : 曲げのみを受ける仮想 RC 断面の中立軸に関する断面二次モーメント

なお M がある程度大きくなるとパーシャル PC の状態 II における ϕ の値は、仮想 RC 断面の $(\phi_0 + \phi_2)$ とほぼ一致する性質をもっている。

一方 Branson は $M-\phi$ 曲線に対する割線剛性を与えるための有効断面二次モーメント I_e の定式化を行っている。

$$I_e = \left(\frac{M_{cr} - \bar{M}}{M - \bar{M}} \right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr} - \bar{M}}{M - \bar{M}} \right)^m \right] I_{cr} \leq I_g \dots\dots\dots (9)$$

この式を PC 部材のたわみ計算に適用する場合、仮想 RC 断面の曲げモーメントの始点 (\bar{M}) のとり方については Branson はたわみが 0 となる時の値を提案しており⁷⁾、また日本の土木学会ではデコンプレッションモーメント (M_d) にとることを認めている⁸⁾。 I_e が求まれば曲率 ϕ も算定できることになる。 図-2 に示すように ϕ の漸近線は曲げモーメントの始点の大きさによって決まるので、土木学会および Branson の漸近線の ϕ の値は状態 II の値を超過することになるが、ひびわれ後 M が小さい範囲ではいずれの計算法を用いても ϕ に大きな差はないことがわかる。

次に $M-\phi$ 関係を検証するために実験を行った⁹⁾。 試験体には普通コンクリートを使用し、初載荷試験時の平均圧縮強度は 480 kgf/cm² であった。 また試験体の形状寸法を図-3 に、種別を表-1 に示す。 載荷方法は図-3 に示すように 2 点集中載荷とし、荷重点およびスパン中心のたわみをダイヤルゲージを用いて測定し、これより

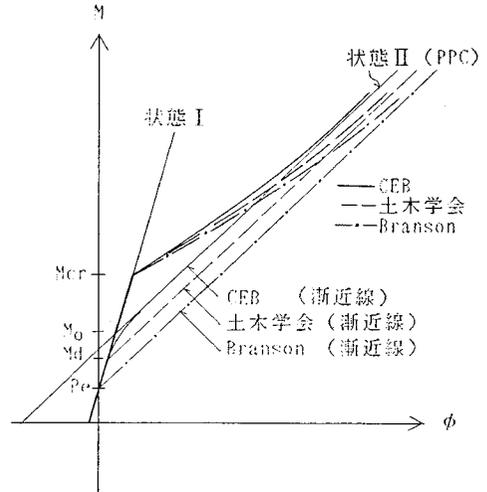


図-2 初載荷における $M-\phi$ の計算法の比較

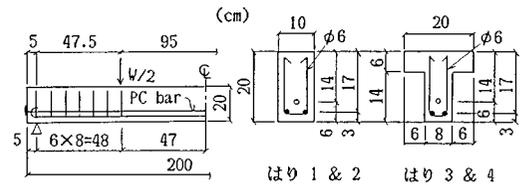


図-3 試験体寸法

表-1 試験体の種別

	鋼材断面積 (cm ²)		プレストレス力 (kgf)
	鉄筋	PC 鋼棒	
A-1	2.53(2-φ13)	0.664 (1-φ9.2)	2000
	1.43(2-φ10)	0.664 (1-φ9.2)	2000
	2.53(2-φ13)	0.664 (1-φ9.2)	2000
	1.43(2-φ10)	0.664 (1-φ9.2)	2000
B-1	2.53(2-φ13)	2.27 (1-φ17)	5000
	1.43(2-φ10)	2.27 (1-φ17)	5000
	2.53(2-φ13)	2.27 (1-φ17)	6000
	1.43(2-φ10)	2.27 (1-φ17)	6000

単純曲げによる曲率 ϕ を求めた。

実験はプレストレス力の小さい A シリーズおよび大きい B シリーズについて行った。使用状態における静的初載荷最大値 (M_s) は、はりにひびわれが生じ、かつ通常の使用状態のコンクリートおよび鉄筋の応力度の範囲内となるように、A シリーズにおいてはひびわれモーメントの約 1.5 倍、また B シリーズにおいては約 1.3 倍とした。静的載荷によりはりのたわみを測定した後ひびわれの発生した試験体を用いて、動的試験機により 7 Hz、100 万回繰り返し載荷を行った。荷重の範囲は、通常の設計におけるコンクリートの応力度および活荷重と死荷重による曲げモーメント比等の値を参考として、荷重の上限値は、スパン中央断面のコンクリートの圧縮縁応力度が約 110 kgf/cm² になるように定めたものであ

り、また荷重の下限値は上限値の70%とした。その後、破壊まで静的荷重を行ってたわみを測定した。

図-4はパーシャルPCはりの $M-\phi$ に関する実験結果および前述のCEBマニュアルと、 $m=4$ としたときのBransonおよび土木学会の計算値を示したものである。状態Ⅰおよび状態Ⅱの初載荷における曲率 ϕ の計算には実験により求めたコンクリートのヤング係数($3.41 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)を用いた。その後の100万回繰り返し後の静的荷重実験は、試験体の平均材令42日における初載荷時から約5日後に行ったものでその材令差は小さく、また上限および下限のコンクリートの応力振

幅も 40 kgf/cm^2 程度と小さいことから、それらの影響によるヤング係数の変化は小さいものと考えられる。したがって繰り返し載荷後の ϕ の計算に用いたコンクリートのヤング係数は初載荷の場合と同じ値とした。

1) 初載荷に対する $M-\phi$ 関係

初載荷に対する ϕ の実験値は、図に黒丸で示してあるが、ひびわれ発生前では全断面を有効とした状態Ⅰの計算値①にほぼ一致する。ひびわれ後では実験値はいずれの計算値よりやや小さいもののよい対応を示すことが認められ、また M が小さい範囲ではどの計算法を用いても ϕ に大きな差はない。

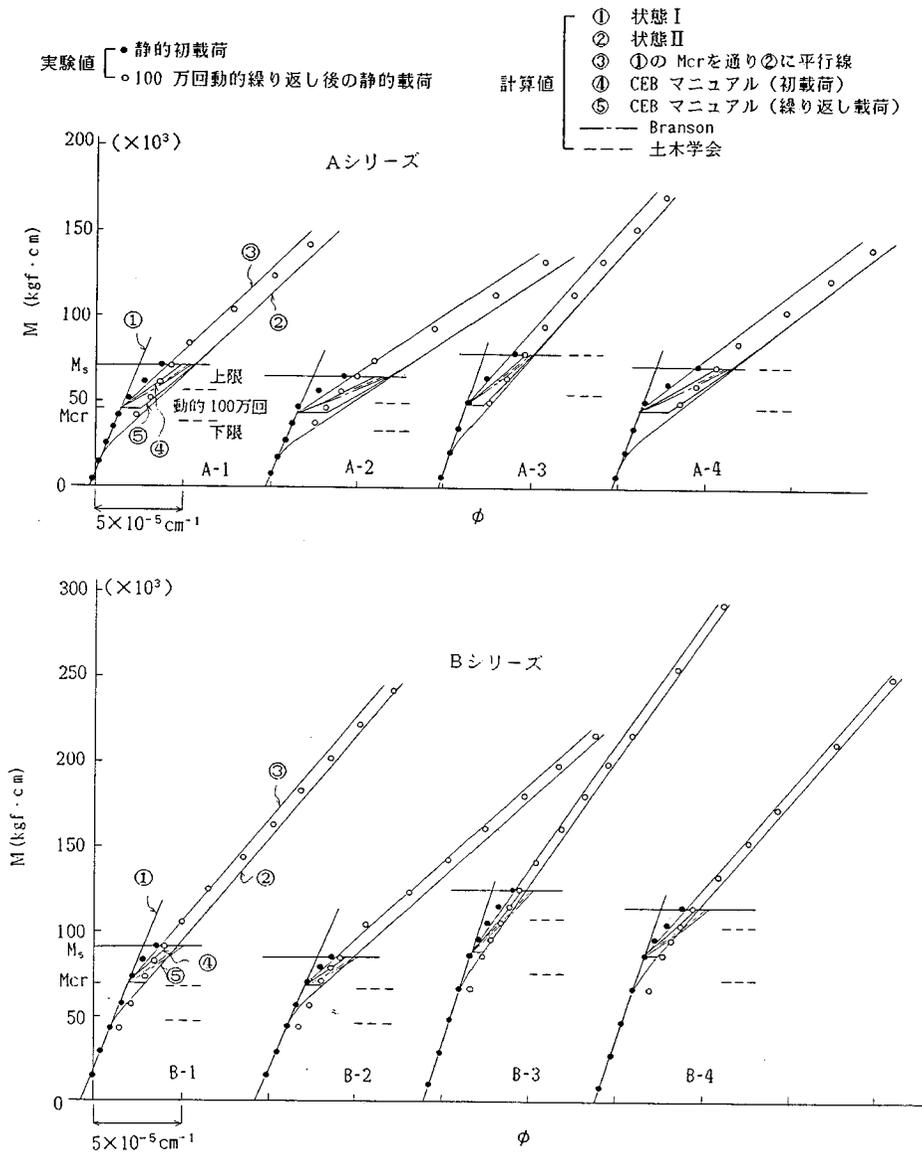


図-4 $M-\phi$ に関する実験値と計算値

2) 繰り返し载荷に対する $M-\phi$ 関係

ひびわれの生じている部材では繰り返し荷重を受ける場合、鉄筋の付着応力緩和による鉄筋ひずみの増加によって曲率が増加することになる。CEBの方法ではこの影響を式(3)および式(4)において $\beta_2=0.5$ とすることによって考慮している。図-4の白丸は100万回繰り返し後の静的载荷による ϕ の実験値を示したものである。動的繰り返し荷重の上限と下限との平均荷重における ϕ の実験値は、繰り返しの影響を考慮したCEBマニュアルによる計算値⑤に近似する傾向を示し、また動的繰り返し後の初载荷最大値 (M_s) における ϕ の実験値は②(状態II)と①のひびわれモーメントの値を通る②に平行な直線③とのほぼ平均値を示した。そのほか繰り返し载荷の場合に生ずるコンクリートのクリープ変形によっても部材の曲率は増加することになるが、実験においては载荷が短期間であり、クリープの影響は小さいのでここではこれを考慮していない。

3) 鉄筋の付着応力緩和およびその回復による $M-\phi$ 関係

ひびわれの生じている部材が繰り返し荷重を受ける場合、鉄筋の付着応力緩和によって曲率が増加することは前述のとおりであるが、さらに初载荷重の最大値を超えて静的荷重を加えると、図-5に示すように緩和した鉄筋の付着応力の回復により初载荷の $M-\phi$ 曲線に復帰することが実験結果から読み取れる。

(2) 不静定力算定用のモーメント・曲率関係の単純化

パーシャル PC 不静定構造の非線形解析による断面力の算定において、CEB マニュアルあるいはその他の $M-\phi$ 曲線を用いて逐次計算を行うにはかなりの計算量が必要となるが、 $M-\phi$ 曲線を直線の組合せによって表わすことができれば、不静定力の算定は容易なものとなる。このため、CEB マニュアルによる計算結果および実験結果をふまえて、使用状態におけるひびわれ後の繰り返し载荷に対する $M-\phi$ 値を、図-4に示してある②と③の平均値を示す直線とすれば、図-6のような単純化された $M-\phi$ 関係が得られることになる。この場合の平均曲率 ϕ は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned}
 M < M_{cr} : \text{領域 (1)} \\
 \phi_{(1)} &= \frac{M - Pe}{EI_g} \\
 M = M_{cr} : \text{領域 (2)} \\
 \phi_{(2)} &= \frac{M_{cr} - Pe}{EI_g} \sim \frac{M_{cr} - M_m}{EI_{cr}} \\
 M > M_{cr} : \text{領域 (3)} \\
 \phi_{(3)} &= \frac{M - M_m}{EI_{cr}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

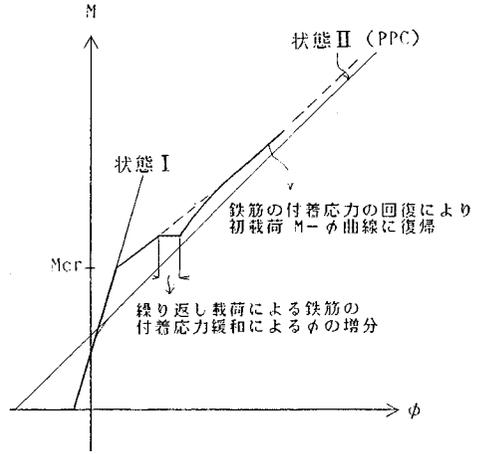


図-5 鉄筋の付着応力緩和およびその回復による $M-\phi$ 関係の模式図

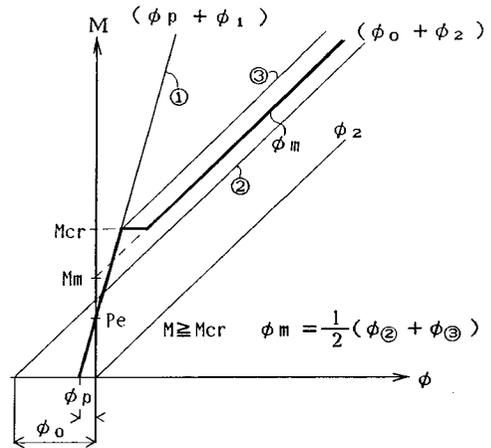


図-6 使用状態における単純化した $M-\phi$ 図

ただし

$$M_m = \frac{M_{cr}}{2} \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right) + \frac{Pe I_{cr}}{2 I_g} + \frac{P_0 (d_p - X)}{2} \dots\dots(11)$$

3. 使用状態のひびわれ発生によるパーシャル PC 連続桁橋の不静定力の検討

(1) パーシャル PC 連続桁の不静定力の計算法

対象とする連続桁橋は、その施工方法が支保工によるコンクリートの一体打ちとし、かつ施工中の構造系と施工後の構造系に変化がないものとする。また少なくとも施工時にはひびわれが生じないようにプレストレスを導入し、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮は活荷重載荷時までにほぼ終了しているものとする。なお活荷重載荷によるひびわれ発生前に生じたクリープおよび収縮

によっても、不静定力が変化することが考えられるが、ここではその影響は考慮しないことにする。

連続桁の不静定力（内部支点モーメント）は式（10）に示す曲率（弾性荷重）を用いて次のようにして容易に求めることができる。

1) 桁を適当な数に分割し、それぞれの分割点（格点）について $M-\phi$ 関係を求めておく。

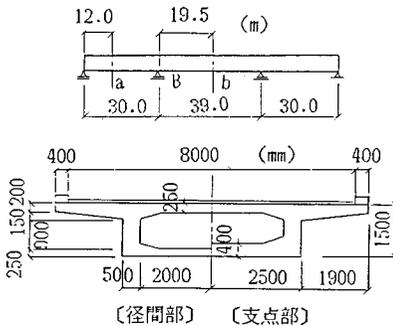
2) すべての格点のモーメントが領域（1）にあるものとして、すなわち全断面を有効とした曲げ剛性 EI_0 を用いて線形計算により内部支点モーメントを求め、これを第1近似値とする。

3) 第1近似値の算定結果により、それぞれの格点において領域の変更があれば、該当する領域の弾性荷重を用いて再計算し、領域の変更がなくなるまで繰り返し計算を行うが、通常は2~3回の繰り返しで収束する。

分割数については、一般に曲げ剛性の変化する変断面連続桁の断面力の計算では、弾性格点荷重を用いれば、スパンを10分割する程度で十分な精度が得られており、したがってひびわれによって剛性が変化する場合であっても同程度の分割数で実用的には十分である。

(2) プレストレスレベルおよびひびわれパターンによる不静定力の挙動

パーシャルPC連続桁橋の不静定力は、ひびわれの発生状況によって複雑な挙動を示すことになるが、ひびわれがどの位置に発生するかは各断面のプレストレスレベルによって決まってくる。この不静定力の挙動を検討するために、図-7に示す実橋規模の3径間連続桁橋を



- コンクリートの設計基準強度 $f_{ck} = 350 \text{ kgf/cm}^2$
- コンクリートの設計曲げ強度 $f_{bd} = 30 \text{ kgf/cm}^2$
- PC鋼材の引張強度 $f_{pu} = 155 \text{ kgf/mm}^2$
- 鉄筋の引張降伏強度 $f_y = 35 \text{ kgf/mm}^2$
- 鋼材とコンクリートのヤング係数比 $n = 7$
- 径間部 [断面積 $A_c = 4.695 \text{ m}^2$
断面2次モーメント $I_c = 1.412 \text{ m}^4$
- 支点部 [断面積 $A_c = 5.295 \text{ m}^2$
断面2次モーメント $I_c = 1.571 \text{ m}^4$

図-7 パーシャルPC連続桁橋の諸数値

対象として数値計算を行い、全断面を有効とした線形計算値と比較してみる。プレストレスレベルは、技術的および経済的に満足するように決められるが、その最大値は活荷重除荷後にひびわれが閉じる状態を、また最小値は施工時においてひびわれが発生しない状態を1つの目安として考えてよいと思われる。

a) 活荷重除荷後にひびわれが閉じるようにプレストレスを導入した場合の不静定力

表-2は、不静定力が、全断面を有効とした線形計算値に比してどの程度変化するかを検討し、その結果をとりまとめたものである。Case (a) は図-8に示すように断面Bの曲げモーメントが最大となる活荷重の載荷状態であり、Case (b) および (c) はそれぞれ断面aおよびbにおいて最大となる載荷状態である。Case (a) では活荷重載荷時にひびわれは発生せず、Case (b) では断面aに、またCase (c) では断面bにひびわれが発生する。しかし、活荷重除荷後にひびわれが閉じるような、大きなプレストレスが導入される場合には、ひびわれによる剛性低下の不静定力に与える影響は小さく、全断面を有効とした線形計算値に比して不静定力はほとんど

表-2 曲げモーメントの対比

活荷重載荷状態		Case(a)	Case(b)	Case(c)
断面B	M / M'	1.0	1.01	1.01
	M / M_{cr}	0.96	0.83	0.90
断面a	M / M'	1.0	0.99	0.99
	M / M_{cr}	0.70	1.02	0.51
断面b	M / M'	1.0	0.99	0.99
	M / M_{cr}	0.95	0.55	1.03

M : ひびわれによる剛性低下を考慮した曲げモーメント
 M' : 全断面を有効とした線形解析による曲げモーメント
 M_{cr} : ひびわれモーメント

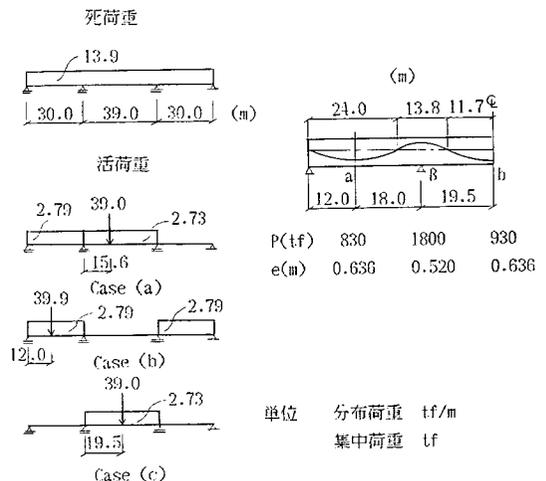


図-8 載荷状態およびプレストレス力

ど変化しないことがわかる。

b) 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た場合のひびわれパターンによる不静定力の挙動

実際の設計においては各断面におけるプレストレスレベルは一樣ではなく、したがって、ひびわれ発生状況も多様なものになってくる。そこで代表的なひびわれパターンとして図-9に示す5つのCaseを対象として考えた。緊張材は放物線状に配置し、その偏心量 e およびプレストレス力 P を加減することによって、それぞれのひびわれパターンとなるようにし、またひびわれ部のプレストレスは施工時においてひびわれが発生しないように導入するものとした。活荷重は計算の便宜上等分布荷重とし、その値は最大で 8.0 tf/m とした。これによる曲げモーメントは設計最大曲げモーメントに比して断面Bでは大きくなるが、a および b ではほぼ同じ値となる。ひびわれパターンによって断面B, a および b の曲げモーメントがどのように変化するかを、全断面を有効とした線形計算値と対比したものが図-10である。一般に連続桁の解析において、径間部より内部支点部の

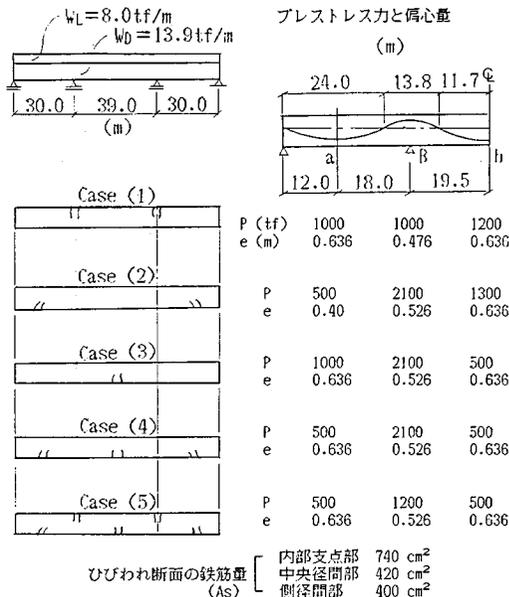


図-9 ひびわれパターンおよびプレストレス力

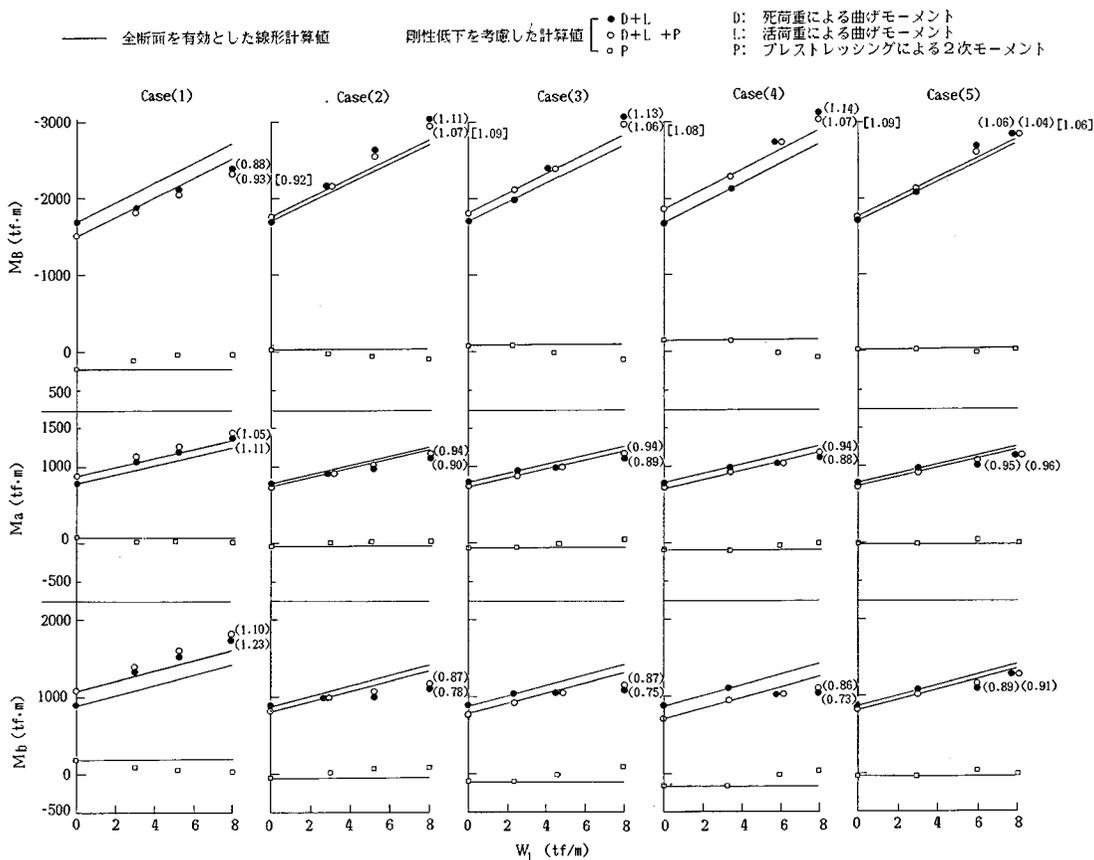


図-10 ひびわれパターンによる曲げモーメントの比較

曲げ剛性の大きい変断面の場合には荷重による支点モーメント（不静定力）が等断面の場合より大きくなることは周知のことであるがこれと同様に、ひびわれの発生によって相対的に支点部の曲げ剛性が小さくなる Case (1) では支点モーメント M_B は全断面を有効とした線形計算値に比して小さくなり、また相対的に支点部の曲げ剛性の大きくなる Case (2), (3) および (4) では M_B が大きくなるのがわかる。フル PC に比してプレストレス力の小さいパーシャル PC では、プレストレスリングによる二次曲げモーメントの、死活荷重による曲げモーメントに占める割合は小さいものであるが、この二次モーメントそれ自身は、ひびわれ発生によって、その部分の曲げ剛性が減少すること、また断面図心の移行に伴ってプレストレス力の偏心量が大きくなるために、ひびわれ前の値に比して大きく変動することになる。次に全断面を有効とした線形計算値に対する比率を図-10の () 内に示してあるがまず死活荷重による不静定力の M_B については、Case (5) のように径間部と支点部にひびわれが発生するような場合には、相対的な曲げ剛性の変化は小さいので、線形計算値に対する変動は 6% と他の Case の 11~14% に比して小さくなる。またプレストレスリングによる二次モーメントを含む場合は 4~7% となり、どの Case の場合も変動は小さくなる。側径間の M_B については、その変動が死活荷重によるものが 5~12%、二次モーメントを含む場合は 4~6% となり、中央径間の M_B についてはそれぞれ 11~27% および 9~14% となる。なお参考までに M_B に関して CEB マニュアルによる $M-\phi$ 曲線を用いて算定した値と、全断面を有効とした線形計算値との比率を [] 内に示してあるが、これより本提案の場合の方が線形計算値に対する変動はやや小さくなるものの、両者には大きな差がないこともわかる。

(3) 不静定力の変動と曲率比

前述の検討結果より、プレストレスレベルが低く、かつ内部支点部あるいは径間部のいずれか一方にひびわれが発生するような場合には、ひびわれによる剛性低下の、断面力に与える影響が比較的大きくなるのがわかる。この大きさは主として、ひびわれ部における剛性低下を考慮した曲率と全断面を有効とした曲率との比（以下曲率比という）によって支配されるものであるが前述の a) および b) の結果より、曲率比によって不静定力が線形計算値に比してどのように変動するかを検討してみる。曲率比 κ は式 (10) から次のように表わされる。

$$\kappa = \frac{M' - M_m}{M' - P_e} \cdot \frac{I_g}{I_{cr}} \quad (M' > M_{cr}) \dots\dots\dots (12)$$

ここに M' は全断面を有効とした線形解析による曲げモーメントにとる。図-11 は径間部にひびわれの発生

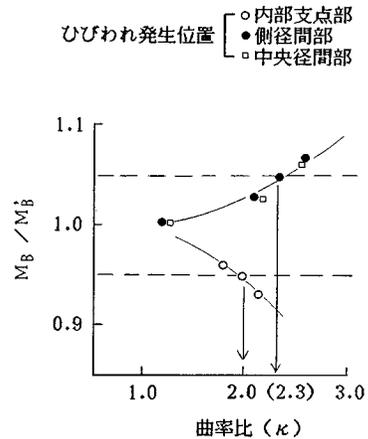


図-11 不静定力の変動と曲率比

する Case (b), Case (c), Case (2), Case (3) および内部支点部にひびわれの発生する Case (1) について、剛性低下を考慮した支点モーメント M_B と全断面を有効として求めた M_B' との比 (M_B/M_B') および曲率比 κ との関係を示したものである。 M_B と M_B' の差が小さい場合、実用的な設計の観点から線形解析を適用できるものであるが、いまその差を 5% 程度と仮定すれば図-11 より、ひびわれが径間部に発生する場合には $\kappa \approx 2.3$ また内部支点部に発生する場合には $\kappa \approx 2$ となる。したがって実設計における連続桁橋の諸元が図-7 と類似の場合には、曲率比 κ がこれらの値以下であれば線形解析を適用できる 1 つの目安になり得るものである。

4. ま と め

本研究における検討の範囲内で得られた結論をまとめると次のようである。

(1) 使用状態におけるパーシャル PC 桁のモーメント・曲率関係を検討するため実験を行い既往の計算式による値と比較した。その結果

- 1) 初載荷に対する ϕ の実験値は、ひびわれ発生前では全断面を有効とした状態 I の計算値にほぼ一致し、ひびわれ後では実験値は既往の計算式による値とよい対応を示した。
- 2) ひびわれの生じている部材が繰り返し荷重を受ける場合、鉄筋の付着応力の緩和によって曲率が増加することになるが、動的繰り返し荷重の上限と下限との平均荷重における ϕ の実験値は、鉄筋の付着応力の緩和による影響を考慮した CEB マニュアルによる計算値とよい対応を示した。
- 3) 繰り返し載荷後、さらに初載荷重の最大値を超えて静的荷重を加えると図-5 に示すように緩和した鉄筋の付着応力の回復により初載荷の $M-\phi$ 曲線に

復帰することが実験結果から読み取れた。

(2) CEB マニュアルによる計算値および実験結果をふまえて、直線の組合せによる単純化されたモーメント・曲率関係を提示した。

(3) 上記のモーメント・曲率関係によりパーシャル PC 連続桁の不静定力を簡便に計算する方法を示した。

(4) プレストレスレベルおよびひびわれパターンによって不静定力がどのような挙動を示すかを、図—7 に示す限られたパーシャル PC 連続桁橋を対象として数値計算を行い検討したが、その範囲内で次のことを明らかにした。

- 1) 活荷重除荷後に、ひびわれが閉じるような高いプレストレスレベルの場合には、ひびわれによる剛性低下の不静定力に与える影響は非常に小さい。
- 2) 施工時だけひびわれの発生を許容しない低いプレストレスレベルの場合には、使用時に内部支点部あるいは径間部のいずれか一方にひびわれが発生するような場合、ひびわれによる剛性低下の不静定力に与える影響は比較的大きい。
- 3) 図—7 と類似のパーシャル PC 連続桁橋において、使用時にひびわれが内部支点部あるいは径間部のいずれか一方に発生する場合、ひびわれ部分の剛性低下を考慮した曲率と考慮しない曲率との比が内部支点のひびわれに対しては 2 以下、径間部のひびわれに対しては 2.3 以下であれば実用的な設計の観点から線形解析を適用できる 1 つの目安になること

を示した。

参 考 文 献

- 1) Leonhardt, F. : Partial Prestressing improves Serviceability, Symposium on Partial Prestressings Part 1, FIP, Romania, 1980. 9. (和訳/成井信：パーシャルプレストレッシングは構造物の使用性能を改善させる) プレストレスト・コンクリート, Vol. 23, No. 3, 1981.
- 2) 猪股俊司：PPC (Partially Prestressed Concrete) の勧め, (社) PC 技術協会技術講習会用テキスト「最近の PC 構造物と 30 年の歩み」, 1986.
- 3) 特集・パーシャルプレストレスト・コンクリートの現状と展望, コンクリート工学, Vol. 25, No. 7, 1987. 7.
- 4) Cooke, N. et al. : Analysis and Design of Partially Prestressed Concrete Bridges Under Thermal Loading, PCI Journal, May-June, 1984.
- 5) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状, 土木学会論文集, 第 384 号/V-7, 1987. 8.
- 6) CEB Design Manual on Cracking and Deformations, 1985.
- 7) Branson, D. E. and Trost, H. : Unified Procedures for Predicting the Deflection and Centroidal Axis Location of Partially Cracked Nonprestressed and Prestressed Concrete Members, ACI Journal, 1982. 3/4.
- 8) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案), コンクリートライブラリー第 52 号, 土木学会, 1983.
- 9) 猪又 稔：パーシャル PC はりの曲げ変形に関する実験的研究, セメント技術年報 42, 1988.

(1988. 12. 19・受付)