

[117] 低引張鉄筋比 PRC 梁の曲げひびわれ幅に関する研究

正会員 ○ 六車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 渡辺史夫 (京都大学工学部)
 佐藤啓治 (京都大学大学院)

1. まえがき

鉄筋コンクリート（以下 R C と略記）部材では、引張鉄筋の最小鉄筋比および許容引張応力度によって常時使用状態における曲げひびわれ幅を制御しているが、曲げひびわれ幅は引張鉄筋径、コンクリート断面寸法、かぶり厚さなどの多くの因子によっても左右され、とくに、スパンが長くなると上記の 2 つの因子だけでは制御が困難となる。近年は、R C 部材にわずかなプレストレスを導入することにより曲げひびわれ幅やたわみが容易に制御できる、いわゆるプレストレスト鉄筋コンクリート（以下 P R C と略記）が出現し、構造物への利用が急激に増えつつある。日本建築学会ではすでに曲げひびわれ幅を指標にした P R C 部材の設計・施工指針案を作成し、設計者の便宜をはかっているが、引張鉄筋量が著しく少ない場合でも、プレストレス導入により曲げひびわれ幅（さらには、たわみ）が制御できるかどうかについては、十分な研究がなされていない。本研究は、引張側普通鉄筋比（以下引張鉄筋比と略記）が 0.220～0.672 % の範囲の 4 種類の引張鉄筋比を持つ単筋長方形 R C 梁にアンボンド P C 鋼棒を用いて 0～15 kgf/cm² の範囲の 4 レベルの一様プレストレスをコンクリート断面に導入し、かつ、これを一定に保ちながら曲げ載荷試験を行い、曲げスパン内に発生する曲げひびわれの開口幅、平均間隔を実測し、低引張鉄筋比の場合でも曲げひびわれ幅の制御が可能かどうかについて検討したものである。

2. 供試梁

供試梁は図 1 に示すように全長 4 m、断面 16×40 cm、有効高さ 36 cm の R C 単筋長方形梁に、φ 17 mm アンボンド P C 鋼棒 1 本を材軸に直線配置したものである。引張鉄筋は D 22, D 19, D 16 および D 13 mm をそれぞれ 1 本配置してある。引張鉄筋比は上記各径に対しそれぞれ 0.672, 0.498, 0.345 および 0.222 % であり、D 22 および D 19 mm を配置した梁では R C 曲げ材最小鉄筋比 0.4 % を上回り、その他の梁ではこれを下回るものとなっている。供試梁はそれぞれの引張鉄筋径に対して 4 本ずつ製作し、コンクリート断面に導入する一様プレストレスのレベルを 0 (すなわち、R C), 5, 10 および 15 kgf/cm² とした。

コンクリートは配合強度 240 kgf/cm² の生コンクリートを用いた。配合は表 1 に示すとおりである。梁は導入プレストレスレベルの同じものの 4 本を一組とし、木製形わくを用いて製作した。コンクリート打設後 3 日で脱型し、乾燥収縮ができるだけ少なくするために実験直前まで湿布養生した。表 1 には梁実験時（材令 7～8 週）におけるコンクリートの品質もあわせて示してある。また、表 2 には引張鉄筋の機械的性質を示してある。

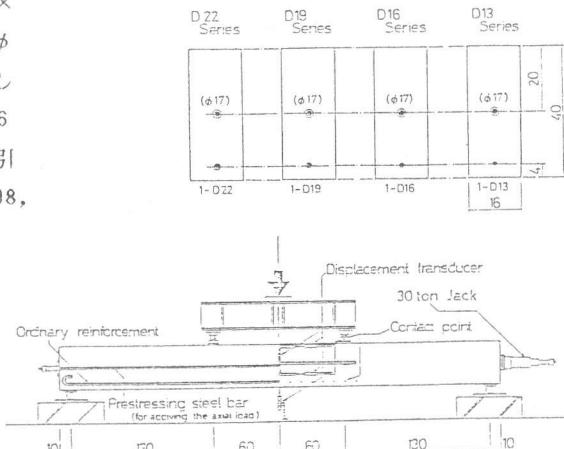


図 1 供試梁および載荷条件

表 1 コンクリートの配合および梁試験時の性質

| Test series in nominal prestress | 15 | 10 | 5 | 0 |
|---|--------------------|----------------|-------|-------|
| Mix proportion by weight | 1 : 2.05 : 3.01 | | | |
| Water-cement ratio in % | 52 | | | |
| Cube strength in kgf/cm ² | 268 | 263 | 254 | 267 |
| Tens. strength in kgf/cm ² | 25.3 | 24.4 | 24.4 | 24.6 |
| Elastic modulus in kgf/cm ² (x 10 ⁵) | 1.94 | 2.35 | 2.17 | 2.17 |
| Available flex. comp. strain in % | 0.313 | 0.318 | 0.323 | 0.329 |
| Stress block coefficient | $k_1 k_3$ 0.707 | k_2 0.403 | 0.741 | 0.758 |
| | | | 0.427 | 0.430 |
| | | | 0.444 | |

* Secant modulus at the stress of one-third the compressive strength.

3. 載荷方法と測定

各供試梁は、実験直前に $\phi 17 \text{ mm}$ アンボンド PC 鋼棒を緊張して所定のプレストレスを導入し、直ちに載荷試験を行った。載荷は図 1 に示すように支点間距離 3.8 m, 中央曲げスパン 1.2 m の 3 分点載荷とし、破壊に至るまでアンボンド PC 鋼棒の引張力を一定に保った。このようにした理由は、曲げひびわれ幅が一般に部材に作用する軸圧力の大きさに影響され、載荷に伴って PC 鋼棒引張力が増大すると、結果的には部材に作用する軸圧力が増大することになって、導入プレストレスの曲げひびわれ幅、曲げひびわれ間隔に及ぼす影響を知るうえで明解さを欠くことを恐れた為である。いずれの供試梁も破壊に至まで荷重は単調漸増載荷とし、中央たわみ、曲げスパン内に於ける中央相対たわみを各々差動変位計により、また、曲げスパン内コンクリートの上縁および下縁ひずみを梁中央よりそれぞれ 50 cm の検長をとって差動変位計により、曲げスパン内引張鉄筋位置でのコンクリート側面の伸びひずみを検長 10 cm のコンタクトゲージ（測定精度は 10^{-5} mm ）により曲げスパン全長にわたってそれぞれ測定した。また、曲げスパン内圧縮縁コンクリートひずみも検長 10 cm のコンタクトゲージにより測定した。特に、曲げスパン内引張鉄筋位置でのコンクリート側面の伸びひずみ測定結果は、曲げスパン全長にわたって平均し、引張鉄筋の平均伸びひずみとした。さらに、目視により曲げひびわれを観測し、曲げスパンの長さを曲げスパン内に発生したひびわれ本数で割ることにより平均ひびわれ間隔を求めた。曲げひびわれ幅は個々のひびわれをまたぐコンタクトゲージによるひずみ測定値に検長 10 cm を乗じたものとした。平均ひびわれ幅は上述のようにして求めた個々のひびわれ幅を平均して求めた。

4. 実験結果と考察

(1) 曲げひびわれモーメント、降伏モーメントおよび曲げ破壊モーメント：表 3 に各供試梁の曲げひびわれモーメント、降伏モーメントおよび曲げ破壊モーメント実測値を計算値とともに示す。曲げひびわれモーメントについては実測値が計算値をかなり下回っている。これは乾燥収縮による影響と考えられる。降伏モーメントおよび曲げ破壊モーメントについては比較的良い一致を示している。なお、D 2 2 シリーズの全供試梁については引張鉄筋降伏以前にせん断破壊したので、計算値との比較はできない。ただし、せん断破壊直前の引張鉄筋応力は 4000 kgf/cm^2 以上に達しており、曲げひびわれ幅および曲げひびわれ間隔を論ずるには差支えない。また、D 1 9 - 1 5 梁については、鉄筋降伏後にせん断破壊に至ったものである。

(2) 曲げモーメント-引張鉄筋ひずみ関係：図 2 は曲げスパン内引張鉄筋位置でのコンタクトゲージ実測結果から求めた引張鉄筋平均伸びひずみ ϵ_{sav} を曲げモーメントに対してプロットした一例である。図中の○印が実測値で、実線は曲げひびわれモーメントを考慮して画いた実験曲線である。また、点線は常用設計式による理論曲線で、曲げひびわれ断面における鉄筋の伸びひずみ ϵ_{smax} を表す。同図は引張鉄筋比が R C 曲げ材の最小鉄筋比規定値 0.4 % を下回る 0.345 % の鉄筋比をもつ D 1 6 シリーズを代表として示したものであるが、曲げひびわれ発生直後の引張鉄筋伸びひずみの不安定領域（作用曲げモーメントが曲げひびわれモーメントを下回る領域）の範囲が D 1 6 - 0 梁 (R C 梁) では著しく大きく、曲

表 2 鉄筋の力学的性質

| Dia. in mm | Grade | Sectional area in cm^2 | Yield strength in kgt/cm^2 | Elastic modulus in kgt/cm^2 |
|---------------|-------|---------------------------------------|---|--|
| D22 | SD40 | 3.87 | 4401 | 1.920×10^5 |
| D19 | SD35 | 2.87 | 3559 | 1.833×10^5 |
| D16 | SD40 | 1.99 | 4647 | 1.905×10^5 |
| D13 | SD40 | 1.27 | 4685 | 2.038×10^5 |

げひびわれ発生後に作用曲げモーメントが再び曲げひびわれモーメントに達したときの鉄筋伸びひずみは、
 $\epsilon_{sav} = 0.878 \times 10^{-3}$
 $\epsilon_{smax} = 1.519 \times 10^{-3}$

であり、鉄筋伸びひずみの著しいジャンピング現象が認められる。したがって、このような低引張鉄筋比のRC梁では曲げひびわれの発生直後に曲げひびわれが大きく開口することになる。これに対し導入プレストレスを大きくしていくと、このような鉄筋伸びひずみのジャンピングは少なくなり、プレストレスによる曲げひ

びわれ開口幅の制御が可能であることが理解できる。なお、表3には各供試梁についての曲げひびわれ発生ジャンピング終了時の引張鉄筋伸びひずみをまとめて示した。とくに、曲げひびわれ断面における引張鉄筋長期許容引張応力度を 2000 kgf/cm^2 とするとき、 ϵ_{smax} の値が 0.1% をこえる梁は曲げひびわれ発生と同時に引張鉄筋存在応力が許容値をこえることになるので、実用には適しないと判断される。

(3) 曲げひびわれ幅：図3は最大曲げひびわれ幅 W_{max} 、平均曲げひびわれ幅 W_{av} と曲げモーメントとの関係をD16シリーズについて示したものである。図中の○印は曲げひびわれ発生直後の不安定部分の終わる点である。導入プレストレスが大きくなると同じ曲げモーメントに対する曲げひびわれ幅は著しく小さくなること、D16シリーズのように引張鉄筋比がRC梁の最小規定値よりも少ない梁でも、プレストレス導入により健全と判断される曲げひびわれ幅（たとえば $W_{max} = 0.2 \text{ mm}$ ）以下にすることが可能であることがわかる。

図4は曲げひびわれ断面の引張鉄筋存在応力（常用設計式による引張鉄筋応力）に対して曲げひびわれ幅が如何になるかを示した一例である。この図によると、同じ引張鉄筋応力に対する曲げひびわれ幅は、鉄筋径（または鉄筋比）が大きくなるほど大きくなる。これは同じ引張鉄筋応力に達するのに必要な曲げモーメントが大きくなるためと考えられる。ちなみに、 2000 kgf/cm^2 の引張鉄筋応力に対する W_{av} および W_{max} 実測値を表4に示す。また、導入プレストレスを大きくしても引張鉄筋存在応力が

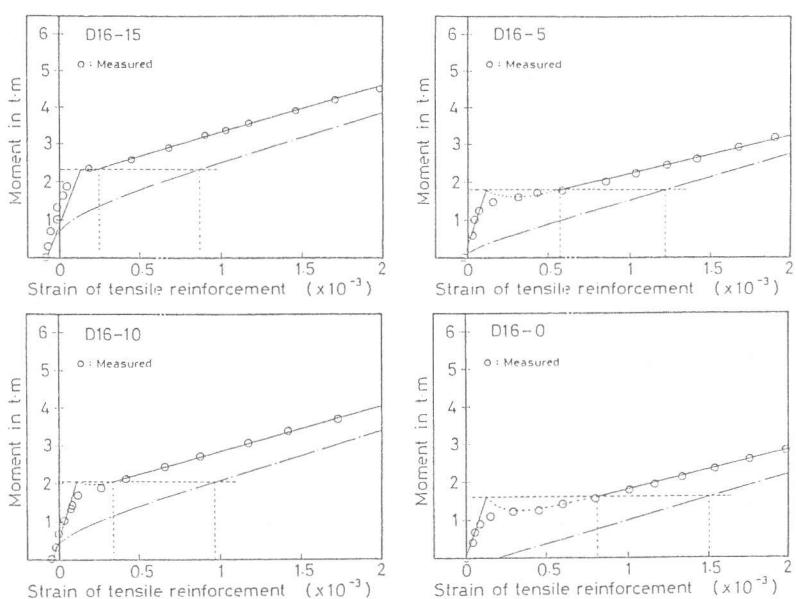


図2 曲げモーメントー引張鉄筋伸びひずみ関係の一例 (D16シリーズ)

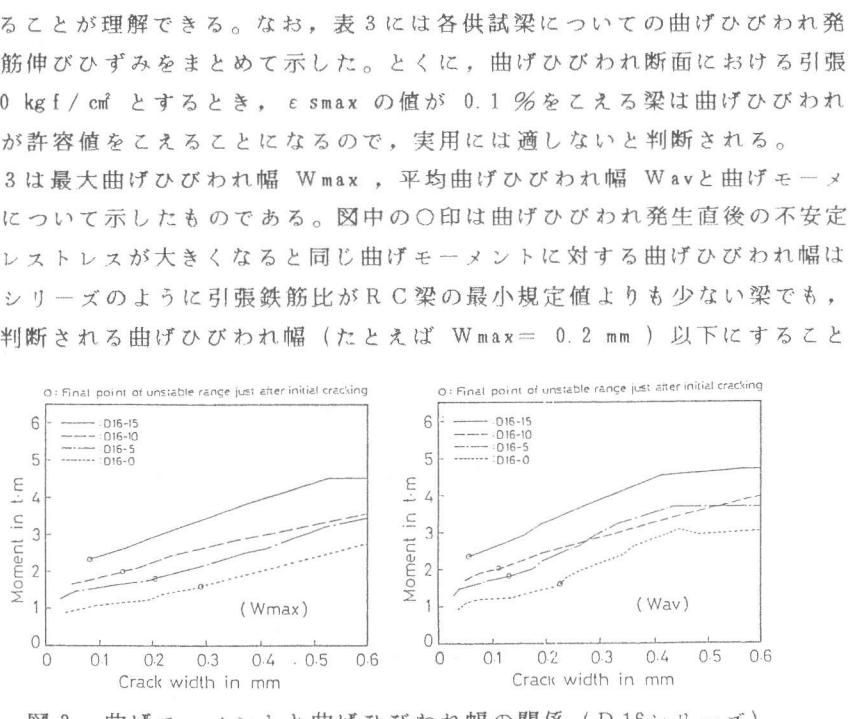


図3 曲げモーメントと曲げひびわれ幅の関係 (D16シリーズ)

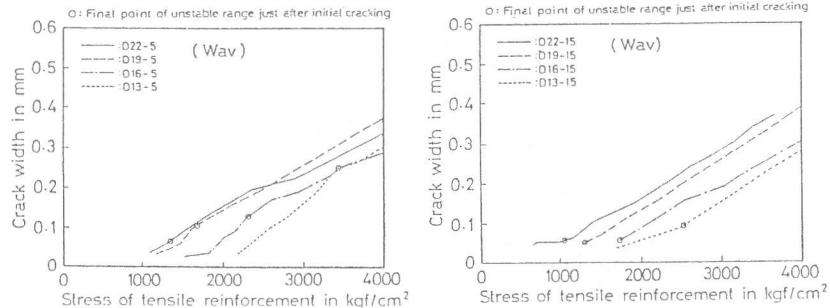


図4 平均ひびわれ幅と曲げひびわれ断面引張鉄筋応力との関係

同じ大きさの場合には曲げひびわれ幅はそれ程小さくはならないことも表4からわかる。これは、プレストレス導入によって同じ大きさの曲げモーメントに対する引張鉄筋応力が減少し、その結果として曲げひびわれ幅が制御されるという、P R C梁ひびわれ幅制御機構を裏付ける結論である。なお、 W_{max} / W_{av} については、表4に示したように本研究では 1.15 ~ 1.42 の範囲（＊印の梁を除く）にあり、R C梁に対する従来の値 1.5

~ 1.7 を下回った。

(4) 平均曲げひびわれ間隔：図5に実測結果の一例を示した。定常状態における平均曲げひびわれ間隔は、本研究では鉄筋径、プレストレスの大きさにはほとんど影響されず、ほぼ一定値となっている。なお、図6は、平均曲げひびわれ幅が $W_{av} = 1 \text{ av} \times \epsilon_{sav}$ (ただし、 1 av は平均ひびわれ間隔、 ϵ_{sav} は引張鉄筋平均ひずみ) で表されるという、従来の曲げひびわれ幅計算の基本式がP R C梁でも成り立つことを示したものである。

5. 結論

本研究から得られた結論の主なものを列記すると次のようになる。(1) 引張鉄筋比が少なくなると曲げひびわれ直後の不安定領域が大きくなるが、プレストレス導入によってこの領域を小さくできる。(2) このことは引張鉄筋比がR C梁としての最小鉄筋比を下回る場合でも、プレストレス導入によって曲げひびわれ幅を制限値以下に制御できることを意味する。(3) 曲げひびわれ幅の制御は基本的には引張鉄筋応力の大きさを制御することによって行われ、これがP R C梁におけるプレストレス導入による曲げひびわれ幅制御の原理といえる。

<文献>

- 1) 六車、森田、R C梁の変形ときれい、日本建築学会論文報告集、第90号、pp. 13~18、昭和38. 9
- 2) 鈴木、大野、P R C梁の曲げひびわれ幅に関する研究(その2)、日本建築学会論文報告集、第305号、pp. 51~57、昭和56. 7
- 3) 日本建築学会、P R C構造設計・施工指針(案)、建築雑誌、NO. 1194、昭和57. 6

表4 鉄筋応力が2000kgf/cm²の時のひびわれ間隔及び幅実測値

| Beam No. | Applied moment in t.m | Average Wav | Crack width in mm Maximum W _{max} | W _{max} /Wav | Corresponding average crack spacing in cm | Average crack spacing in stable range in cm |
|----------|-----------------------|-------------|---|-----------------------|---|---|
| D22-15 | 3.67 | 0.162 | 0.210 | 1.30 | 20.2 | 20.2 |
| D22-10 | 3.25 | 0.196 | 0.244 | 1.24 | 25.6 | 25.6 |
| D22-5 | 2.75 | 0.155 | 0.199 | 1.28 | 20.4 | 17.8 |
| D22-0 | 2.24 | 0.161 | 0.227 | 1.41 | 19.6 | 18.5 |
| D19-15 | 3.07 | 0.113 | 0.168 | 1.26 | 21.2 | 21.2 |
| D19-10 | 2.64 | 0.143 | 0.172 | 1.20 | 23.5 | 23.5 |
| D19-5 | 2.14 | 0.144 | 0.166 | 1.15 | 24.7 | 21.2 |
| D19-0 | 1.63 | 0.143 | 0.177 | 1.24 | 24.0 | 24.0 |
| D16-15 | 2.51 | 0.089 | 0.122 | 1.37 | 31.8 | 20.2 |
| D16-10 | 2.09 | 0.127 | 0.168 | 1.32 | 32.7 | 29.2 |
| D16-5 | 1.58* | 0.076* | 0.108* | 1.42* | 32.4* | 18.0 |
| D16-0 | 1.06* | 0.049* | 0.089* | 1.82* | 103.4* | 21.3 |
| D13-15 | 2.03* | 0.056* | 0.069* | 1.23* | 74.2* | 23.0 |
| D13-10 | 1.63* | 0.041* | 0.049* | 1.20* | 33.1* | 26.5 |
| D13-5 | -- | -- | -- | -- | -- | 22.3 |
| D13-0 | -- | -- | -- | -- | -- | 23.8 |

* Measured value in unstable range just after initial cracking.

-- There are no effective values for the given tensile stress of reinforcement.

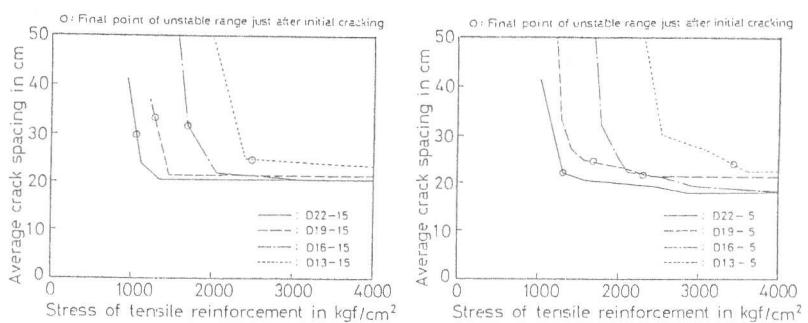


図5 平均ひびわれ間隔と曲げひびわれ断面引張鉄筋応力との関係

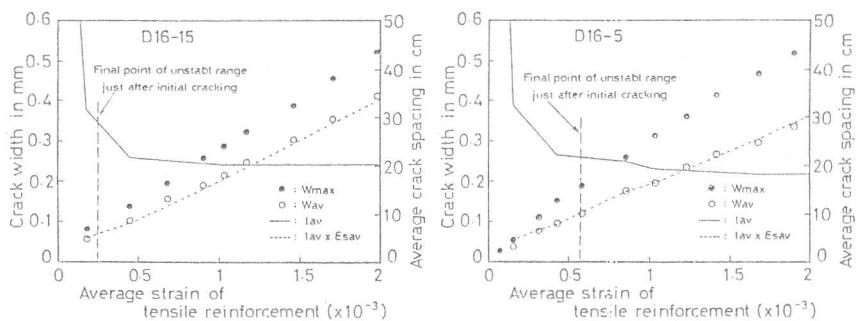


図6 引張鉄筋平均ひずみと曲げひびわれ幅の関係