

[115] プレストレスト鉄筋コンクリートはり内部のひびわれ状況

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部)
 正会員 ○大野義照 (大阪大学工学部)
 ソムチェイ・
 シーソムボン (大阪大学大学院)
 横谷隆幸 (大阪大学大学院)

1. まえがき

コンクリート構造物のひびわれは、鋼材の腐食の観点からはコンクリート表面での幅だけでなく、コンクリート内部でのひびわれ形状ならびに鋼材周辺でのひびわれ状況が問題になる。またコンクリートと鋼材との付着機構を考える上でも鋼材周辺での内部ひびわれ状況は重要である。鉄筋コンクリート (以下RCと略記) 部材における異形鉄筋周辺のひびわれ状況については、曲げを受けた場合は少ないながら、内外でいくつかの研究が報告されている。一方、近年PC鋼材を有しながら常時荷重下でひびわれの発生を許す三種PCあるいはプレストレスト鉄筋コンクリート (以下PRCと略記) 構造が出現し、今後この種の構造が広く利用されるものと考えられるが、従来PC構造はひびわれが許容されていなかったこともあり、PC鋼材周辺でのひびわれ状況は全く明らかにされていない。そこで筆者らは今迄にRC、PRCおよびPCはりのひびわれにインクあるいは樹脂を注入してこれらのはりの内部ひびわれ状況を比較観察してきたが、今回、鋼材応力や粗骨材粒径等の異なる8体のPRCはりのひびわれにインクと樹脂を注入してより詳しくコンクリートおよびグラウト内部のひびわれ状況や主ひびわれの形状などを調べたのでその結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類および形状

試験体の種類を表1に示す。主な実験要因は鉄筋応力と粗骨材の粒径である。表1の鉄筋応力 $\Delta\sigma_s$ およびPC鋼材応力 $\Delta\sigma_p$ はそれぞれの鋼材位置のコンクリート応力が零の時点からの鉄筋応力 σ_s およびPC鋼材応力 σ_p の変化量であり、これらの値の算出には、型枠の取りはずし後から荷重の直前までコンタクトストレーンゲージにて測定したひずみから求めたPC鋼材の有効引張力および鉄筋の元圧縮力を考慮している。試験体の形状は図1に示すような $25 \times 25 \text{ cm}$ の長方形断面を有する長さ200 cmの単筋はりであり、異形鉄筋を一本配置した断面を標準とし、比較のため二本配置した試験体と丸鋼を用いた試験体をそれぞれ一制作した。試験体の総数は8体で、試験体の製作、荷重はPRC-1~PRC-4およびPRC-5~PRC-8と4体ずつ2回に分けて行った。

2.2 使用材料

コンクリートには早強ポルトランドセメント、川砂および砕石を用い、その水セメント比は55%である。グラウトにはボゾリス68をセメント重量の0.25%、アルミ粉末を同じく0.005%混入した水セメント比45%の早強ポルトランドセメントペーストを用いた。各試験体に用いたコンクリート (ただしPRC-8は川砂モルタル) およびグラウトのはり試験体荷重時における力学的性質をそれぞれ表2および表3に示す。鉄筋は図2に示すような横ふし異

表1 試験体の種類

Specimen	Steel	Steel stress $\Delta\sigma_s$ (kg/cm ²)	Tendon	Tendon stress $\Delta\sigma_p$ (kg/cm ²)	Prestressing force (kg)	Maximum size of aggregate (mm)
PRC-1	1-D19	1000	1- ϕ 11	590	6000	10
PRC-2	1-D19	1500	1- ϕ 11	920	6000	10
PRC-3	1-D19	2500	1- ϕ 11	1500	6000	10
PRC-4	2-D19	1500	1- ϕ 11	820	6000	10
PRC-5	1-D19	2000	1- ϕ 11	1310	6000	10
PRC-6	1-D19	2000	1- ϕ 11	1330	6000	10
PRC-7	1-D19	2000	1- ϕ 11	1310	6000	20
PRC-8	1-D19	1800	1- ϕ 11	1060	6000	5

$\Delta\sigma_s$ or $\Delta\sigma_p$: Change in stress in steel or tendon from the stage of decompression.

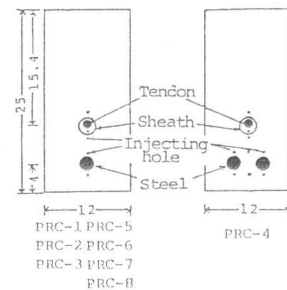


図1 試験体の断面形状

表2 コンクリートの力学的性質

Specimen	Age (day)	Compressive strength (kg/cm ²)	Modulus of elasticity (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)
PRC-1,2,3,4	18	333.82	2.63×10^5	32.14
PRC-5,6	25	317.36	2.71×10^5	37.28
PRC-7	25	303.51	2.97×10^5	30.59
PRC-8	25	287.75	1.72×10^5	29.54

表3 グラウトの力学的性質

Specimen	Age (day)	Compressive strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)
PRC-1,2,3,4	9	207.54	25.81
PRC-5,6,7,8	11	190.92	20.53

形鉄筋と $\phi 19$ の丸鋼を、P.C 鋼棒は $\phi 11$ の丸鋼を、シースは内径 23mm のスパイラルシースを用いた。注入インクには市販の赤インクを、樹脂は市販のコンクリート注入用のものに樹脂専用の緑色染料を混入して用いた。

2.3 荷重および注入方法

荷重は図3に示すように3等分点荷重とし、荷重前に鋼材あるいはシースから $6 \sim 7\text{mm}$ 離してそれらに平行に設けた注入孔(図1参照)にインクを満し、 0.2kg/cm^2 の注入圧を保ちながら所定の荷重まで荷重し、続けて樹脂を注入し(注入圧 5kg/cm^2)、初荷重時の変形を保ちながら樹脂が硬化するまで約1週間持続荷重した。なお本実験の前に今回用いた方法の他に、負圧によって樹脂が浸透し易いと考えられる方法すなわち荷重前に注入孔に樹脂を満し注入圧を保ちながら荷重する方法なども比較検討はしたが、樹脂の浸透性に差異が認められなかったため、一つの試験体で注入インクによる内部ひびわれ状況と樹脂による主ひびわれの内部形状が観察できる本注入法を用いた。

2.4 観察方法

除荷後、試験体の上下面の中央にダイヤモンドカッターにてノッチを入れ、シースおよび鉄筋を含む面を割裂し、まずこの面でひびわれパターンを観察した。次にダイヤモンドカッターを用いて図4に示すようにコンクリートを小片に切断し、その小片の一面において5ヶ所、樹脂で埋ったひびわれの幅を40倍の実体顕微鏡にて観察した。グラウト内部のひびわれ状況はシースごとダイヤモンドカッターで2ヶ所に観察した。

なお初荷重時のひびわれ幅が観察時に保持されているか、樹脂注入圧でひびわれ幅が拡大しないか等の点をチェックするために、図3に示すようにコンクリート表面にコンタクトポイントを貼り、荷重から割裂までの各段階において、表面ひびわれ幅を測定した。その結果、図5に示す測定結果の1例のように樹脂注入にともなうひびわれ幅の拡大は認められず、また観察時においてもほぼ初荷重時の幅が保持されているものと推測される。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリート表面のひびわれ状況

表4に等曲げ区間の平均ひびわれの間隔 l_{av} および初荷重時のコンクリート表面における最大ひびわれ幅 W_{max} (梗長 4cm のコンタクトゲージによる測定値)を示す。鉄筋応力が 1000kg/cm^2 と小さいPRC-1を除く他の試験体はほぼひびわれ定常状態に達しているものと見なせる。

3.2 コンクリート内部のひびわれ状況

コンクリート内部のひびわれ状況を図6に示す。同図は $a-a$ 断面(図4参照)において鉄筋を取り除き観察した状況で、ハッチで示した部分は鋼材とコンクリートとの間のはだ離れによって生じたすき間に樹脂が浸透している部分を表す。まず主ひびわれ(引張域を横断しているひびわれ)についてみると、約半数の主ひびわれがコンクリート表面から鉄筋表面に至るまでに枝分れをしている。その枝分れは鉄筋のふしから生じた内部ひびわれと連続するように分れている場合と粗骨材の表面において分れている場合がある。前者は鉄筋応力が大きくなると共に多くなる傾向にある。またひびわれは粗骨材とモルタルとの境界をつなぐような形で進展していくので骨材

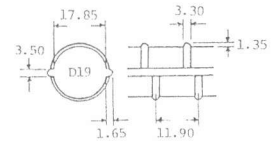


図2 异形鉄筋の形状

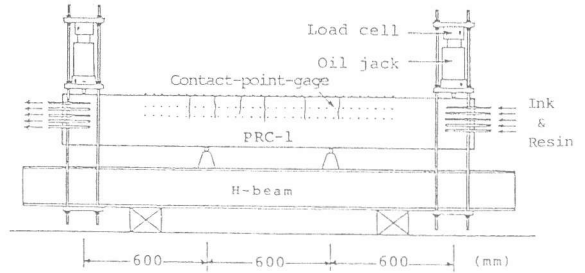


図3 荷重方法

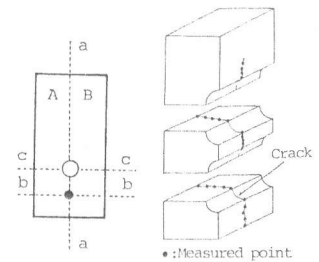


図4 試験体の切断面

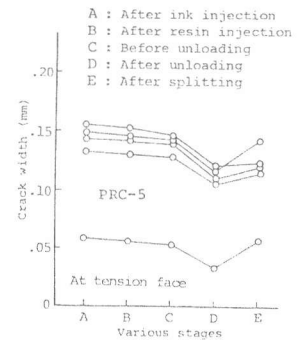


図5 コンクリート表面ひびわれ幅の変動

表4 平均ひびわれ間隔 l_{av} と最大ひびわれ幅 W_{max}

Specimen	l_{av} (cm)		W_{max} (mm)		
	Meas.	Calc.*	a**	b**	c**
PRC-1	17.8	14.3	0.077	0.060	0.022
PRC-2	13.7	14.3	0.102	0.095	0.042
PRC-3	12.6	14.3	0.207	0.166	0.115
PRC-4	10.8	9.6	0.179	0.103	0.059
PRC-5	11.3	14.3	0.152	0.138	0.068
PRC-6	23.2	—	0.470	0.392	0.210
PRC-7	16.0	14.3	0.200	0.178	0.081
PRC-8	13.4	14.3	0.187	0.162	0.076

* Calculated values by the authors' equation.

**a : Crack width at tension face.

**b : Crack width at steel level.

**c : Crack width at tendon level.

粒径が大きい程、その蛇行量も大きくなってひびわれのパターンも複雑になるようである。

次に異形鉄筋のふしから生じている内部ひびわれについてみると、後藤らが指摘しているように鉄筋応力が大きくなると共に内部ひびわれの発生領域が広がりその長さも長くなっていく傾向にある。ただし D32、D51 を用いた後藤らの実験では主ひびわれの近くの殆んどふしから内部ひびわれが観察されていたが、本実験での内部ひびわれの発生は不規則である。これは鉄筋径すなわちふし高さの違いによるものと考えられる。シースの表面にもスパイラル状のふしがあるが、そのふしからの内部ひびわれの発生は認められなかった。これは後述のようにグラウト部には数多くのひびわれが発生しているので、F C 鋼棒からグラウト、シースを介してコンクリートへ伝達される引張力が異形鉄筋の場合よりかなり小さいことによるものと考えられる。

3.3 グラウト部のひびわれ状況

F C 鋼棒を除去した後観察したグラウト部のひびわれ状況を、コンクリート部のひびわれ状況と対応させて検討するために、図6中におわせて示した。グラウト部のひびわれは、初めコンクリート部の主ひびわれの近くに発生し、その後応力が大きくなると共にその数を増していく。F C 鋼棒の応力増分 $\Delta\sigma_p$ が $1300 \sim 1500 \text{ kg/cm}^2$ になるとひびわれ間隔はほぼ等しくなり、その値は $3 \sim 4 \text{ cm}$ で、コンクリート部のひびわれ間隔より極めて狭い。したがって個々のひびわれ幅はコンクリート部の主ひびわれの幅に比べて小さく、主ひびわれ幅が最も大きい FRC-6 (F C 鋼棒高さ位置コンクリート表面ひびわれ幅: 0.21 mm) においてもグラウト部のひびわれ幅は 0.05 mm であり、他の試験体においては 0.035 mm 以下であった。グラウト部のハッチもコンクリート同様に樹脂が浸透した部分を示し、応力が大きくなると共にその部分も広がっていく。

3.4 主ひびわれの内部形状

図7に鉄筋の応力あるいは形状の異なる3つの試験体の主ひびわれの垂直断面 (a-a) および水平断面 (b-b, c-c) における形状 (幅) を示す。本試験体の部材せい程度であれば主ひびわれのコンクリート表面でのひびわれ幅は中立軸からの距離に比例して引張縁から減少するが、異形鉄筋はりのコンクリート内部 (a-a 断面) では鉄筋表面近くで急激なひびわれ幅の減少がみられる。これは前述のように主ひびわれがコンクリート内部で枝分

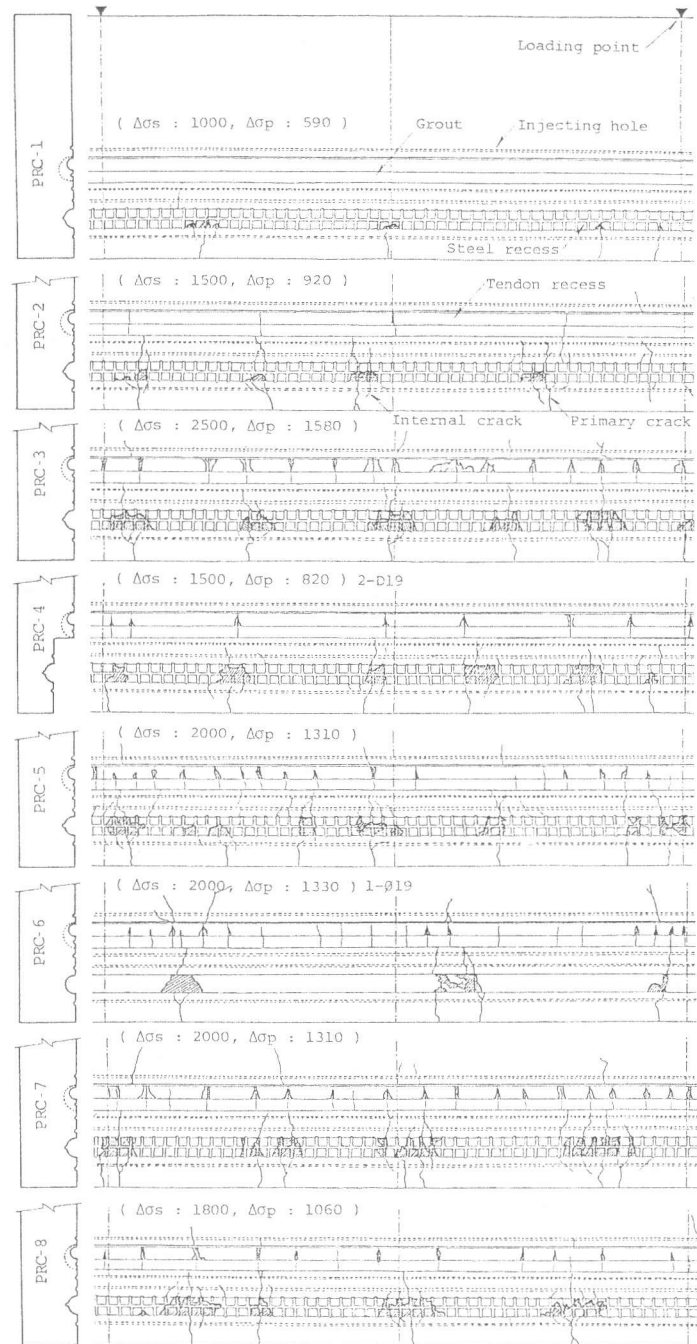


図6 コンクリートおよびグラウト内部のひびわれ状況

れをしていることや鉄筋ふしからの内部ひびわれの発生によって鉄筋とコンクリートの伸びの差が分散していることによるものであり、この影響は水平断面 (b-b) のひびわれの形状に顕著に現われている。

図8は鉄筋高さ位置におけるコンクリート表面ひびわれ幅と鉄筋表面でのひびわれ幅との関係を調べたものであるが、鉄筋応力が大きくなりコンクリート表面ひびわれ幅が大きくなっても鉄筋表面ひびわれ幅は0.1mm以下である。次にシース表面におけるひびわれ幅についてみる。異形鉄筋はりでは、シース高さ位置のコンクリート表面における値そのものが小さいことなどによりシース表面で主ひびわれの幅が狭くなるかどうか判断できないが、コンクリート表面での幅が大きい丸鋼のはりについてみると、主ひびわれはシース表面において異形鉄筋表面でのように大幅に狭まることはないようである。

3.5 はだ離れ長さ

鋼材の腐食に関して、主ひびわれが鋼材に達している個所でのコンクリートと鋼材とのはだ離れ長さも重要と考えられる。そこでコンクリートと鋼材の間に樹脂が浸透している部分 (図6のハッチ部) をはだ離れとし、その長さとしてコンクリート表面ひびわれ幅との関係を調べ図9に示した。この図からはだ離れ長さはコンクリート表面でのひびわれ幅とほぼ線形関係があると見せる。

4. まとめ

プレストレスト鉄筋コンクリートはり内部のひびわれ状況をインクと樹脂を注入して直接観察した本実験結果をまとめると次のようになる。

(1) 引張域を横断する主ひびわれの異形鉄筋周辺での幅は、枝分かれや鉄筋のふしから発生した内部ひびわれによって部材表面での値よりも大幅に小さくなり、その鉄筋表面での幅は鉄筋応力や部材表面での値にかかわらず0.1mm以下であった。しかし鉄筋とコンクリートとの間のはだ離れ長さは部材表面でのひびわれ幅と関係があることが認められた (図9参照)。

(2) スパイラル状のリップの付いたシースを用いたが、シースリップからの内部ひびわれの発生は認められず、主ひびわれのシース表面での幅は、異形鉄筋の場合のように部材表面での幅より大幅に狭くなることはない (図7参照)。

(3) グラウト部にはコンクリート部の主ひびわれに比べて多くのひびわれが発生し、その幅は0.05mm以下であった (図6参照)。

参考文献

- 1) B.B.Broms "Technique for Investigation of Internal Cracks in Reinforced Concrete Members" Jour. of ACI, Vol.62, Jan., 1965
- 2) Y.Goto "Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars" Jour. of ACI, Vol.68, April, 1971
- 3) J.M.Illston and R.F.Stevens "Internal Cracking" Concrete, July 1972
- 4) A.W.Beeby "Concrete in the Oceans" Report No.1 Cement & Concrete Association, 1978
- 5) 後藤・大野「引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生する実験的研究」土木学会論文報告集 第294号 1980年2月
- 6) 鈴木・大野・S.シーソムボン「FRC部材の内部ひびわれ状況に関する実験的研究」建築学会近畿支部研究報告集 昭和57年2月
- 7) 鈴木・大野・S.シーソムボン・廣谷「R.C.FRCおよびFRCはり内部のひびわれ状況に関する実験的研究」建築学会近畿支部研究報告集 昭和58年6月
- 8) 鈴木・大野「プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究」建築学会論文報告集 303号 昭和56年5月

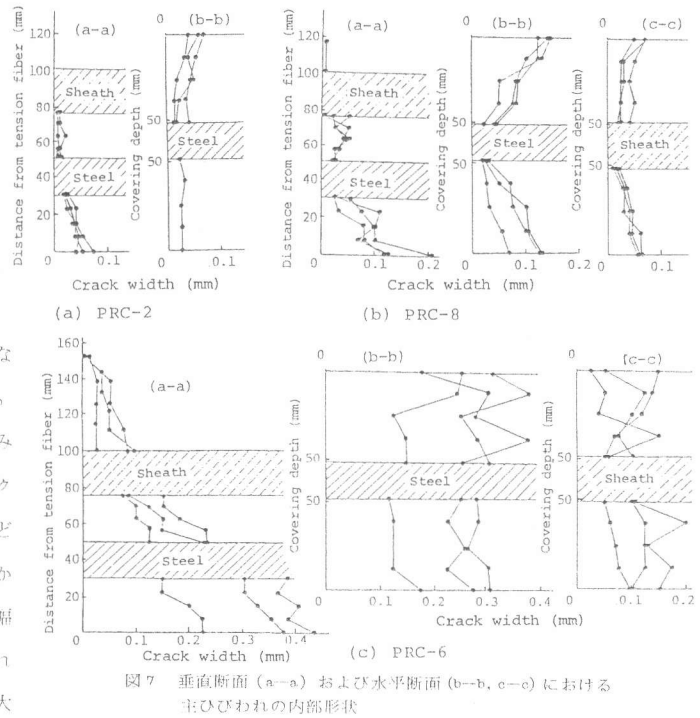


図7 垂直断面 (a-a) および水平断面 (b-b, c-c) における主ひびわれの内部形状

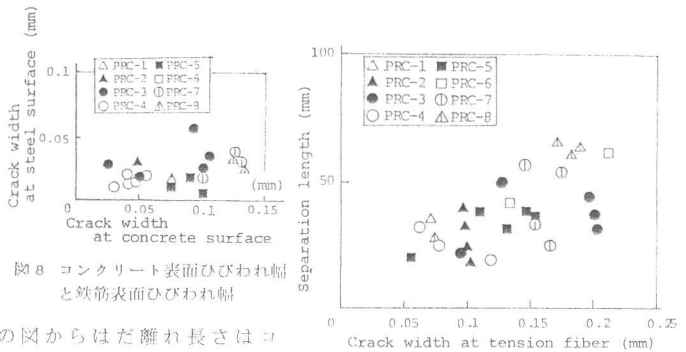


図8 コンクリート表面ひびわれ幅と鉄筋表面ひびわれ幅

図9 コンクリート表面ひびわれ幅とはだ離れ長さ