

論文

[2159] Ⅱ種・Ⅲ種PC部材の曲げひびわれ性状

坂田英一\*1・稲葉孝子\*2・角 一行\*3

1. まえがき

PRC構造は、プレストレスの導入の程度によりフルPCに近い特性を持つ構造から、RCに近いものまで同じカテゴリでの設計が可能であり、積極的なひびわれ制御を行なうことにより普及が図られつつある。一方、土木学会標準示方書 [1] においては、鋼材の防錆および施工性の向上・省力化が期待できるアンボンドPC鋼材の適用についても触れられている。本研究ではこのような現状を鑑み、PRC梁の載荷試験を行ない、プレストレス導入量およびグラウト材の有無が部材の曲げひびわれ性状に及ぼす影響を比較検討した。

2. 実験方法

2.1 供試体の種類

供試体の断面寸法および鋼材配置状態を図-1, 図-2に、使用鋼材径・鋼材総断面積と載荷時におけるコンクリート下縁圧縮応力度・PC鋼材の有効引張応力度を表-1に、コンクリートおよび鋼材の力学的性質を表-2, 表-3に示した。

実験の主なパラメータに関する説明を以下に記す。ただし、鋼材係数  $q_s (= (f_{sy} A_s + f_{py} A_p) / bdf_c)$  を0.25程度、コンクリートの圧縮強度を350kgf/cm<sup>2</sup>で一定の条件とした。

- ① 終局プレストレス率  $\lambda (= f_{py} A_p / (f_{sy} A_s + f_{py} A_p))$  は、PC鋼棒と鉄筋の組み合わせにより90%, 80%, 40%の3レベル(1, 2, 3)とする。
- ② PC鋼棒とグラウト材の付着レベルについては、通常にシース内にグラウト材を注入したものをボンド(B)と称し、市販のアンボンドPC鋼棒(特殊アスファルト系ポリマー材を一定厚被覆成形しポリエチレンシースで外周を覆ったもの)を用いたものをアンボンド(U)と称する。

また、有効率  $\eta_p$  は、Uについては材令30日で緊張後即載荷を実施するため、 $\eta_p = 1.00$ とみなし、Bにおいては、緊張翌日にグラウト注入を行ない1週経過後、載荷を実施しその間試験体

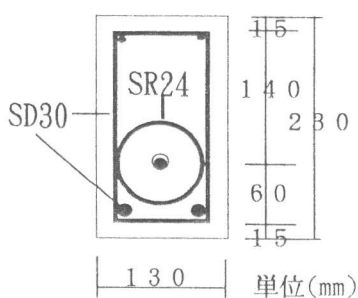


図-1 鋼材配置

表-1 試験体諸元

		主鉄筋	PC鋼材	$A_p + A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{cl}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_{pe}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\lambda$
ボ ン ド 試 験 体	B1	2-D6	φ15	2.40	99	8213	0.9
	B2	2-D10	φ13	2.75	92	10170	0.8
	B3	2-D16	φ11	4.92	44	6819	0.4
ア ン ボ ン ド 試 験 体	U1	2-D6	φ15	2.40	85	7078	0.9
	U2	2-D10	φ13	2.75	78	8603	0.8
	U3	2-D16	φ11	4.92	47	7280	0.4

\*1 (株)間組 技術研究所・技術研究部第二研究室・研究員 (正会員)

\*2 (株)間組 技術研究所・技術研究部第一研究室・研究員

\*3 (株)間組 技術研究所・技術研究部第二研究室・研究員、工博 (正会員)

表-2 コンクリートの力学的性質

	プレストレス導入時			荷重試験実施時		
	$\sigma_c$	$E_c$	$\sigma_t$	$\sigma_c$	$E_c$	$\sigma_t$
B1	341(31)	3.06	33	353(41)	3.05	34
B2	341(31)	3.06	33	353(41)	3.05	34
B3	401(103)	3.02	31	408(128)	3.06	35
U1	367(52)	3.00	34	367(52)	3.00	34
U2	341(31)	3.06	33	341(31)	3.06	33
U3	401(103)	3.02	31	401(103)	3.02	31

\*表中、圧縮・引張強度の単位は $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、弾性計数の単位は $\times 10^5 \text{kgf}/\text{cm}^2$ 、()内の数字は材令

表-3 鋼材の力学的性質

	主鉄筋			P C 鋼材		
	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E_s$	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E_s$
B1	3684	5342	1.66	11714	13102	2.05
B2	3668	5140	1.67	14531	15224	2.06
B3	3659	5446	1.92	11714	13102	2.05
U1	3684	5342	1.66	11714	13102	2.05
U2	3668	5140	1.67	14531	15224	2.06
U3	3659	5446	1.92	11714	13102	2.05

\*降伏・破断強度の単位は $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、弾性計数の単位は $\times 10^6 \text{kgf}/\text{cm}^2$

を実験室内に気中保管するため $\eta_p = 0.90$ と仮定し、荷重時の有効引張応力度が実降伏点強度の60%程度となるように初期緊張力を決定している。

曲げひびわれの観察は、断面高さの約2倍の等曲げ区間において行な

うこととし、区間中央に高さ1.0cmのノッチを設け、初期ひびわれを誘引している。また、せん断スパンには試験体のせん断破壊を防止する目的でスターラップを、定着部背面にはコンクリートの支圧補強用に円形らせん筋を配した。使用材料においては、粗骨材は6号砕石、鉄筋はSD30B、P C 鋼材には、SBPR110/125(B 2, U 2のみSBPR130/145)を使用した。また、グラウト注入には高性能セメントグラウト用混和剤をプレミックスした普通ポルトランドセメントを用い、荷重時圧縮強度は $208 \text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。

### 2. 2 荷重および計測方法

試験は単純梁のアムスラー内における対称二点集中荷重とした。荷重方法は、ひびわれ発生後および鉄筋降伏後に一度ずつ繰り返しを行ない、除荷再荷重過程を含め終局までの挙動を観察した。計測は、鉄筋のひずみ、P C 鋼棒のひずみ (B) または緊張力 (U) , 圧縮域コンクリートのひずみ、ノッチ部梁下面の変形量 (ひびわれ発生後に、ひびわれ幅とみなす) および梁のたわみについて行なった。主な測定点の位置を、図-3に示す。

### 3. 試験結果および考察

#### 3. 1 試験結果

各試験体の荷重-たわみ (中央) 曲線を図-4に、ひびわれ発生時の定常状態を図-5に、荷重-ひびわれ幅曲線を図-6に示す。全試験体とも、鉄筋降伏後圧縮域のコンクリートの圧壊で実

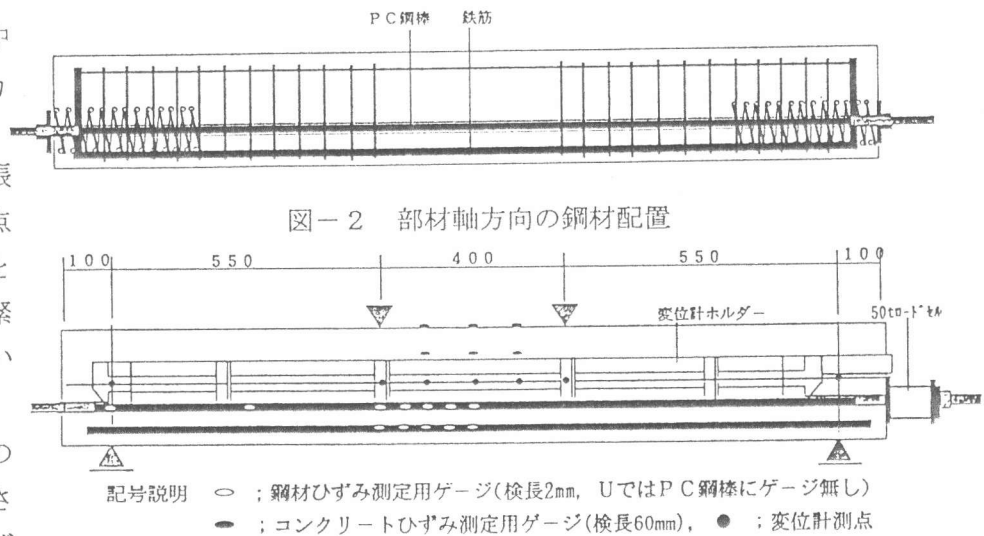


図-2 部材軸方向の鋼材配置

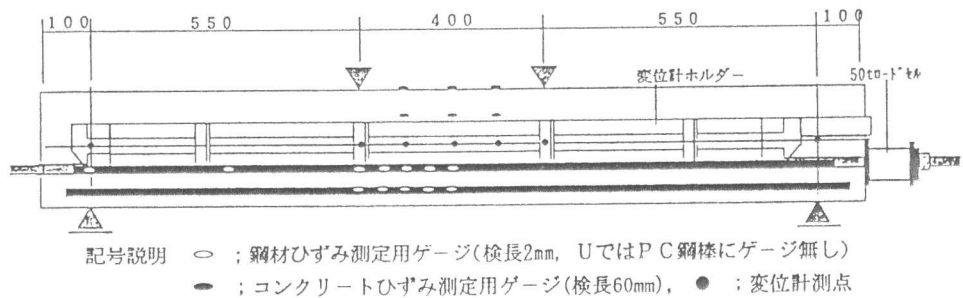
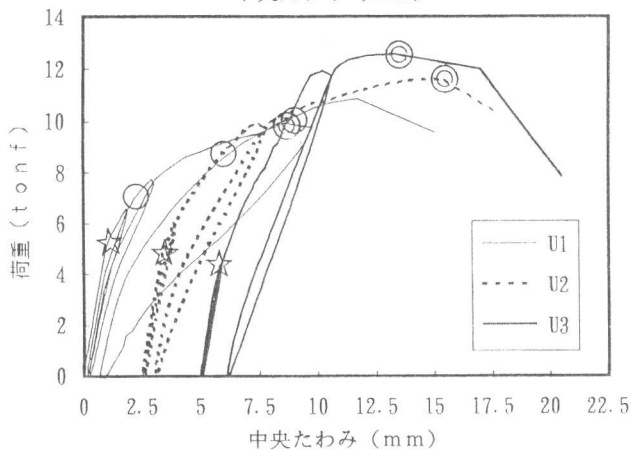
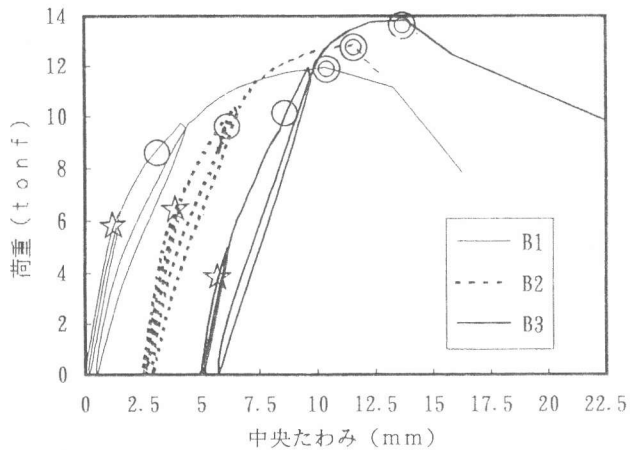


図-3 荷重・測定位置



図中記号は、☆:ひびわれ発生, ○:鉄筋降伏, ◎:最大耐力を表す

図-4 荷重たわみ曲線

験を終了しており、B試験体のみPC鋼材が降伏に達していた。本実験ではλが小さい試験体ほど鋼材総断面積が大きいため、B、Uいずれにおいても、ひびわれ発生後の剛性は大きくなっている。また、除荷過程においてはλの大きいものほど復元性が高く、鉄筋降伏後の残留ひびわれが小さく現われている。主要な結果として、曲げひびわれ発生荷重、使用荷重時における鉄筋ひずみ・ひびわれ幅および瞬時たわみ、最大荷重およびその時のPC鋼材の応力増分を、荷重については予測値と併せ表-4に示す。ただし、本研究において使用荷重とは、B3試験体で鉄筋ひずみが1000μ (SD30長期の許容応力度2000kgf/cm<sup>2</sup>に相当)となる荷重 (6.88tonf) を指すものとする。

図-5において、ひびわれ間隔 $l_1$ 、 $l_2$ は、1次ひびわれ [2] 発生時および2次ひびわれ [2] 発生時において、ノッチに発生したひびわれとその両側に発生したものとの間隔の平均の値である。また、表-4において、曲げひびわれ発生荷重の計算にはコンクリート強度から推定した曲げ引張強度 [3] を、U試験体の終局曲げモーメントの計算では、日本建築学会の式 [4] で計算される最大荷重時におけるPC鋼材の引張応力度を使用した。

### 3. 2 考察

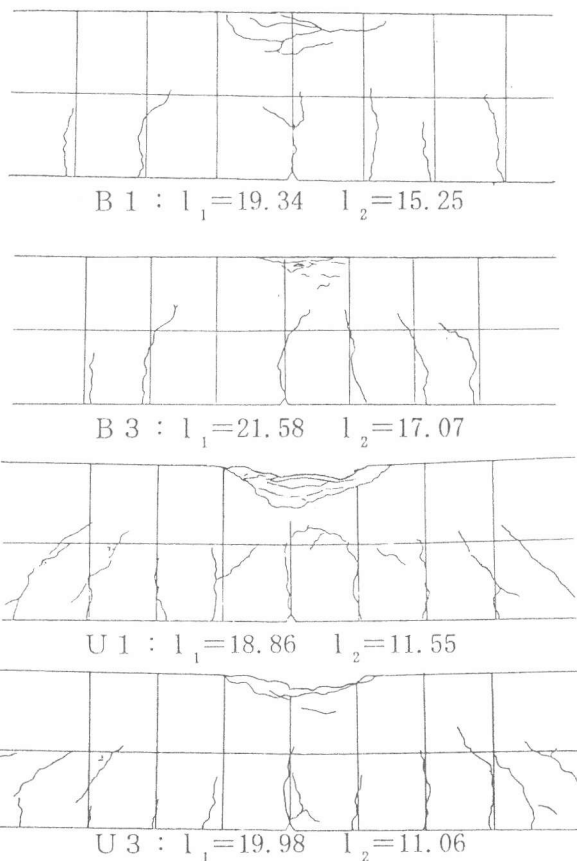


図-5 ひびわれ定常状態

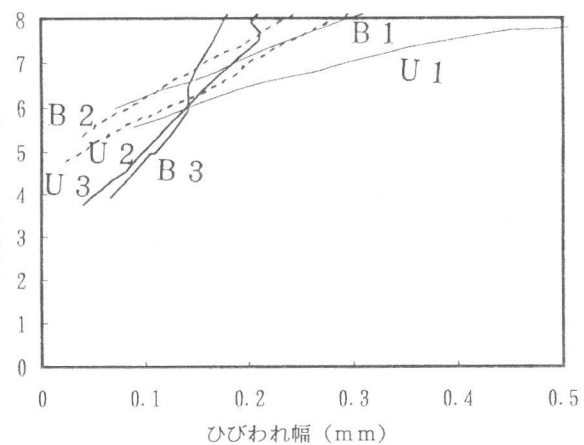


図-6 ノッチ開口幅(ひびわれ幅)の増大

(1) 曲げ変形特性

表一 4 主要実験結果

図-7に入で分類したB試験体とU試験体の荷重たわみ曲線の比較を示す。図-4および図-7から、レベル1,2のU試験体では、B試験体と比較してひびわれ発生後の剛性低下が確認される一方、レベル3では鉄筋降伏に至るまで有意な

	曲げひびわれ発生			使用荷重作用時 (P=6.88tonf)		最大荷重時	
	実験値/計算値	$\epsilon_s (\mu)$	w(mm)	$\delta$ (mm)	実験値/計算値	$\Delta\sigma_p$	
B 1	6.00/5.76	833	0.18	1.81	11.94/11.26	2847	
B 2	5.30/5.47	516	0.15	1.67	12.81/12.48	3099	
B 3	4.00/3.64	1000	0.15	1.95	13.82/14.55	4288	
U 1	5.60/5.23	1666	0.28	2.07	10.88/ 8.37	3319	
U 2	4.80/4.84	1182	0.19	1.95	11.63/ 9.70	2566	
U 3	3.80/3.74	1003	0.18	1.93	12.58/13.06	2064	

\*1曲げひびわれおよび最大荷重の実験値・計算値の単位: tonf, \*2 $\Delta\sigma_p$ の単位: kgf/cm<sup>2</sup>  
\*3計算方法は本文中に記載

剛性低下は認められなかった。具体的には、レベル1,2のU試験体では、B試験体と比較して使用荷重下においてすでに15%程度のたわみの増大がみられたが、レベル3ではUとBはほぼ同じ性状を呈している。

図-8は、文献[5]で定義されるひずみの適合条件係数F値と荷重の関係を示したものである。F値は載荷による緊張材伸びひずみと緊張材位置コンクリートひずみとの比で表され、F値が1より低下するに伴ない付着の劣化が進行していく。ここでは、荷重増加に伴ないPC鋼棒の付着性状がどのように変化したかを、ひびわれ断面における、実験で得られたコンクリート圧縮域におけるひずみなどからその経時変化を計算した。図-8より、U試験体ではプレストレス率レベルに関わらず、使用荷重時においてすでにF値は0.25程度に収束しており付着劣化の性状に関してはほとんど同じと考えられる。

以上のことより、丸鋼棒とアンボンドPC鋼棒の付着性状の相違が使用荷重下のたわみに及ぼす影響はプレストレス率により異なる結果が得られたことがわかる。

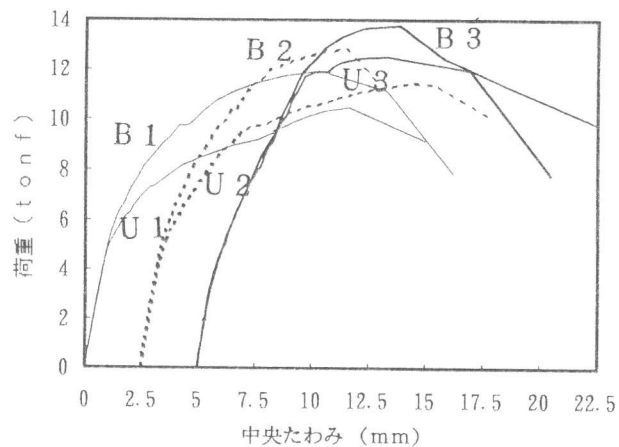


図-7 プレストレス率とたわみ特性

(2) ひびわれ性状

B3, U3では、等曲げ区間内における鉄筋

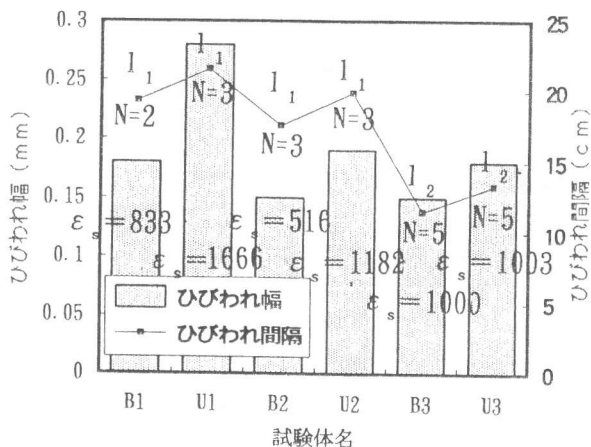


図-9 使用荷重時の曲げひびわれ

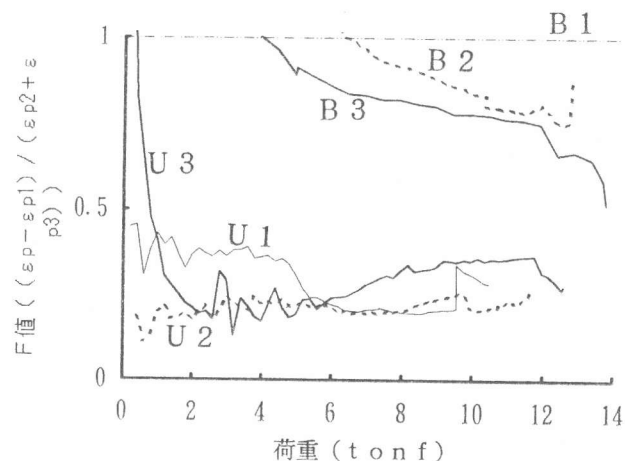


図-8 荷重レベルとF値

降伏後、せん断スパンにおいて曲げせん断ひびわれの進展がみられたが、上述のとおりせん断破壊には至らなかった。各試験体の、使用荷重下における曲げひびわれの発生本数、ひびわれ間隔 ( $l_1$  または  $l_2$ ) およびひびわれ幅を図-9に示す。ひびわれ幅は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、後者は前者に比べ無視しうるほど小さいことを考慮すれば、表-4に示した使用荷重下における鉄筋ひずみとひびわれ間隔の積は概ねひびわれ幅 (厳密には鉄筋位置における) の傾向と一致するものと思われる。実際、同一の鋼材配置では使用荷重下でのB, U試験体間におけるひびわれ間隔の差は小さく、 $\lambda$ レベル1, 2の試験体では鉄筋ひずみがB試験体の約2倍であったのに対し、 $\lambda$ レベル3ではともに1000 $\mu$ 程度であったことが、各レベルでのB, U試験体間のひびわれ幅の差に反映されていることがうかがえる。

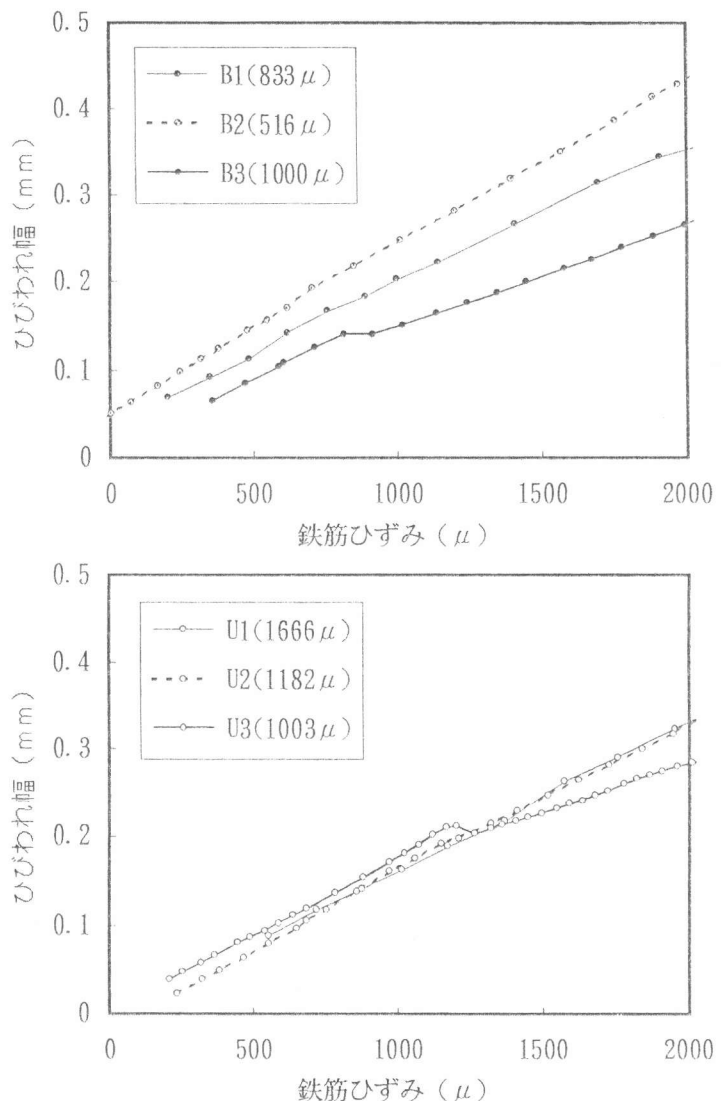
鉄筋ひずみの増加に伴うひびわれ幅の増大の様子を、図-10に示す。B試験体では $\lambda$ レベルの違いによるひびわれ幅の増加率のばらつきが大きく、 $\lambda$ 3レベルではU試験体と同程度、 $\lambda$ 1ではそれより大きな値を示している。

### (3) 耐荷力

本実験におけるU試験体の耐荷力は、いずれのプレストレス率レベルにおいてもB試験体に比べ9%程度の低下であり、B1, 2, 3およびU3試験体については予測値 (3.1, 表-4参照) は精度よくこれらを推定している。ただし、U1およびU2に対してはPC鋼材の引張応力度を過小評価している。

### (4) F値による使用時性状および耐荷力の試算

ひびわれ断面において、B試験体では平面保持が成立するものとし、U試験体ではF値=0.25と仮定することにより、使用荷重下における瞬時のたわみ、鉄筋ひずみならびに耐荷力の算定を



\* ( ) 内の値は使用荷重時におけるひずみ

図-10 ノッチ開口幅(ひびわれ幅)と鉄筋ひずみ

表-5 F値を用いた計算結果

	使用荷重状態				終局状態	
	たわみ (mm)		鉄筋ひずみ ( $\mu$ )		最大荷重 (tonf)	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
B1	1.81	1.20	833	541	11.94	10.99
U1	2.07	1.59	1666	1284	10.88	9.98
B2	1.67	1.24	516	555	12.81	11.96
U2	1.95	1.57	1182	1006	11.63	10.34
B3	1.95	1.58	1000	777	13.82	14.25
U3	1.93	1.61	1003	811	12.58	13.56

行なった。なお、たわみについては、Bransonの等価剛性 [6] を平均的な断面剛性として計算をおこなった。結果の一覧を表-5に示す。

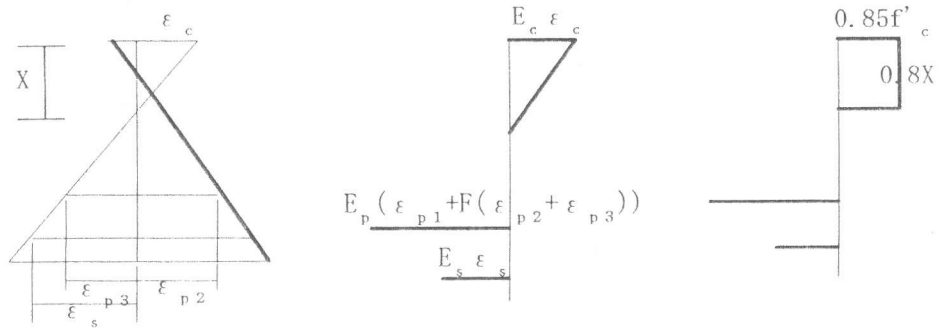


図-11 ひずみ・応力分布の仮定

計算で仮定した断面内ひずみ分布および、鋼材の材料特性を図-11, 12に示す。

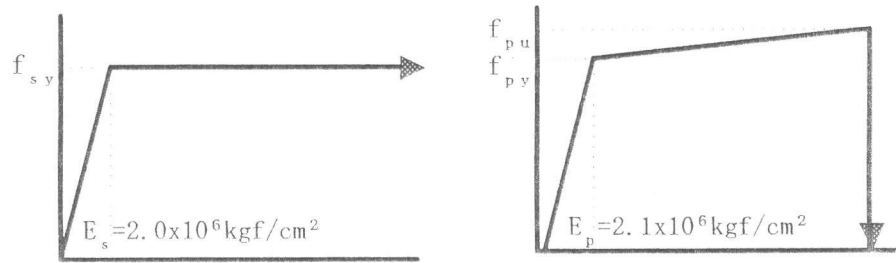


図-12 計算に使用した鋼材の材料特性

#### 4. まとめ

丸鋼棒を用いたP R C梁の曲げひびわれ性状に関する基礎実験を行ない、実験結果の検討により以下の結論を得た。

(1) アンボンドP C鋼棒を使用した試験体では、本実験における使用荷重レベルですでにF値の値は0.25程度に低下していた。

(2) アンボンドでも終局プレストレス率が40%程度の試験体では、ボンド試験体と同程度の曲げひびわれ性状を示し、鉄筋降伏までのたわみ特性もほぼ同様の様相を呈した。

(3) F値を0.25と仮定して計算した、使用荷重下におけるU試験体の変形・ひびわれ性状は実験結果の傾向と比較的よく一致した。

(4) F値を0.25と仮定して計算した、使用荷重下におけるU試験体の変形・ひびわれ性状は実験結果の傾向と比較的よく一致した。

(4) 本実験ではアンボンド試験体の終局曲げ耐力はボンド試験体の約91%程度であった。

#### 参考文献

[1] 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、1991  
 [2] 森田司朗：鉄筋コンクリート部材のひびわれに関する一連の研究（訳文）、コンクリートジャーナル Vol. 4, No. 2, Feb. 1966、pp. 64-76  
 [3] 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法（第2版）、共立出版、pp. 17-19  
 [4] 日本建築学会：プレストレス鉄筋コンクリート（Ⅲ種P C）構造設計・施工指針・同解説、1986、pp. 11  
 [5] 六車ほか：アンボンドP C部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレスコンクリート、Vol. 26, No. 1, Jan. 1984、pp. 10-16  
 [6] たとえば、R. Park and T. Paulay：Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, Inc., 1975、pp. 465-468