

[114] プレストレスト鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗挙動に関する実験研究

正会員 六車 照 (京都大学工学部)
 正会員 渡辺 史夫 (京都大学工学部)
 正会員○藤井 正則 (京都大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりに軸方向プレストレスを導入することにより、常時荷重のもとでのひびわれ幅およびたわみを制御する事が可能であり最近注目されている。日本建築学会においてもプレストレストコンクリート構造分科会よりこの種の構造物を設計するための「プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針(案)⁽¹⁾」が提案され実用化に向けての努力がなされている。本来Ⅲ種PC構造は部材の常時荷重下での曲げ挙動を断面に少量のプレストレスを導入することにより制御するものであるが、我が国のような地震国においては地震時に大きなせん断力がはりに生じせん断破壊に至る場合がある為、せん断力に対する挙動も明らかにしておくねばならない。本研究は、プレストレスト鉄筋コンクリートはりのせん断性質を把握し、プレストレスの影響を明らかにする事を目的としており、プレストレスレベルを0~45 kgf/cm²、せん断補強筋量を0および0.419%と変えた計8本のはりに対して単純はり形式の曲げせん断実験を実施した。

2. 実験の概要

用いた供試体は表1に示した8体で、断面重心位置における公称プレストレスは0, 15, 30および45 kgf/cm²の4種、せん断補強筋(φ6mm)量は0および0.419%の2種とした。各供試体はすべて断面曲げ耐力が同一となるよう設計されており、その寸法および配筋をせん断補強筋を有するSシリーズについて図1に示した。供試体コンクリート打設後3日で脱型し材令2週のプレストレス導入時まで湿布養生した。プレストレス導入後直ちにW/C=45%のセメントペーストによりグラウチングを行なった。

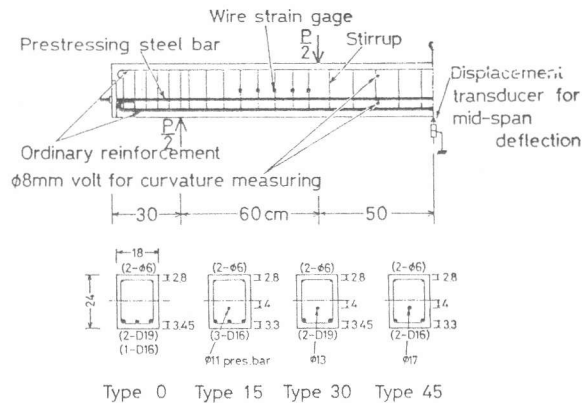


図1 実験供試体の寸法および配筋(Sシリーズ)

供試体に使用した普通鉄筋、PC鋼棒およびコンクリートのはり試験時(材令5週)における力学的性質をまとめて表2に示した。なおグラウトペーストの圧縮および引張強度は、340および14 kgf/cm²であった。

表1 供試体の詳細一覧

Beam No.	Width (cm)	Effective Depth (cm)	Ordinary Reinforcement		Pre-stressing Steel	Eccentricity of Prestressing Bar (cm)	Nominal Pre-stress at Centroidal Axis (kgf/cm ²)	Degree of Pre-stressing *	Shear Reinforcement	
			Tens. side	Comp. side					Spacing (cm)	Ratio (%)
PR-0-N	18	20.55	2-D19	2-φ6	—	—	0	0	—	—
PR-15-N	18	20.7	3-D16	2-φ6	+11	4	15	0.320	—	—
PR-30-N	18	20.55	2-D19	2-φ6	+13	4	30	0.406	—	—
PR-45-N	18	20.7	2-D16	2-φ6	+17	4	45	0.565	—	—
PR-0-S	18	20.55	2-D19	2-φ6	—	—	0	0	7.5	0.419
PR-15-S	18	20.7	3-D16	2-φ6	+11	4	15	0.320	7.5	0.419
PR-30-S	18	20.55	2-D19	2-φ6	+13	4	30	0.406	7.5	0.419
PR-45-S	18	20.7	2-D16	2-φ6	+17	4	45	0.565	7.5	0.419

* Degree of Prestressing = $\frac{P}{A_p f_{ps}}$
 A_p : Area of Prestressing Steel Bar, f_{ps} : Yield Strength of Prestressing Steel Bar
 A_s : Area of Ordinary Reinforcement, f_{ys} : Yield Strength of Ordinary Reinforcement

表2 材料の力学的性質

Concrete	Compressive Strength	Tensile Splitting Strength	Modulus of Elasticity
	282.0	29.5	1.69×10^5
Ordinary Reinforcement	D16	Yield Strength	4650
		Modulus of Elasticity	2.02×10^6
	D19	Yield Strength	4530
	Modulus of Elasticity	2.09×10^6	
Prestressing Steel Bar	φ6	Yield Strength *	3360
		Modulus of Elasticity	2.04×10^6
	φ11	Yield Strength *	14670
	Modulus of Elasticity	2.05×10^6	
	Yield Strength *	14360	
	Modulus of Elasticity	2.03×10^6	
	Yield Strength *	11670	
	Modulus of Elasticity	2.20×10^6	

* The yield strength for prestressing steel bar is 0.2% off-set stress. unit: kgf/cm²

曲げせん断試験は、図1に示したように、支点間距離220 cm、せん断スパン60 cmとした3分点荷法により行ない、測定は荷重、曲げスパン中央たわみ、曲げスパン曲率およびせん断補強筋ひずみに対して実施した。

3. 実験の結果と考察

実験より得られた諸限界値を表3にまとめて示した。

3-1 荷重-たわみ曲線

図2に実験より得られた荷重-たわみ曲線を示した。同図上がせん断補強筋の無いNシリーズで、下がせん断補強されたSシリーズに対するものである。プレストレスレベルの増大にともなって曲げひびわれ荷重は増大するが、曲げひびわれの発生以後の接線剛性はプレストレスレベルの大きい供試体程、引張側全鉄筋量が少ない為小さくなる。Nシリーズ供試体はプレストレスレベルの増大にともなって耐力上昇を示すが曲げ耐力には至らず、すべてせん断破壊している。一方Sシリーズにおいては、すべての供試体が曲げ耐力に到達している。

3-2 せん断ひびわれの発生と最大耐力

せん断スパンにおけるひびわれ発生状況を図3に示した。

曲げひびわれが載荷点近傍に発生し、以後荷重の増加にともなって曲げひびわれ発生域が支点に向かって広がって行く。10~15 tonの範囲でせん断ひびわれが生じ、プレストレスの大きいものほど発生荷重が大きい。同図左側のせん断補強筋のないシリーズのひびわれ状況より明らかなように、プレストレスの増大にともなってせん断破壊の形式が斜張力破壊からせん断圧縮破壊へと変化する。それにとまってせん断ひびわれ発生以後、最大耐力に至るまでの余力も大きくなっている。一方せん断補強筋を有するシリーズにおいては、せん断ひびわれの発生は認められるもののすべての供試体が曲げ降伏している。プレストレスの影響を調査する為、断面有効プレストレスとせん断ひびわれ発生荷重の関係を図4に示した。縦軸は公称せん断応力(q/b_j)で、横軸は重心軸

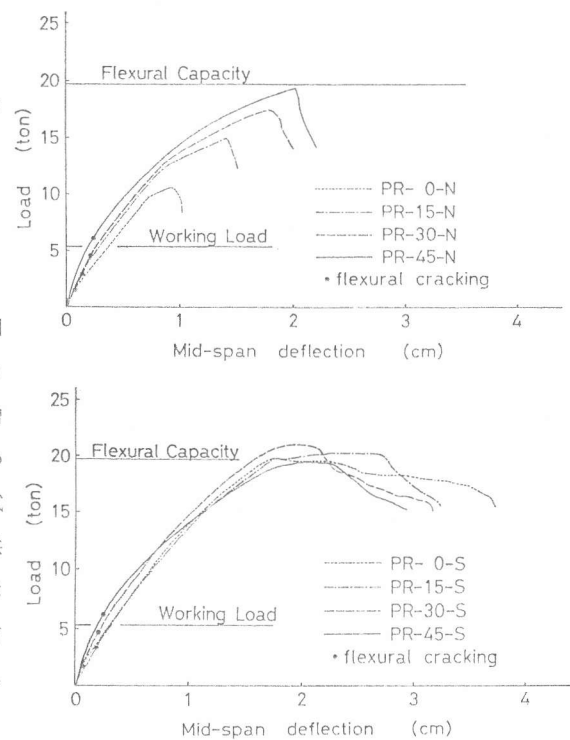


図2 荷重-曲げスパン中央たわみ曲線

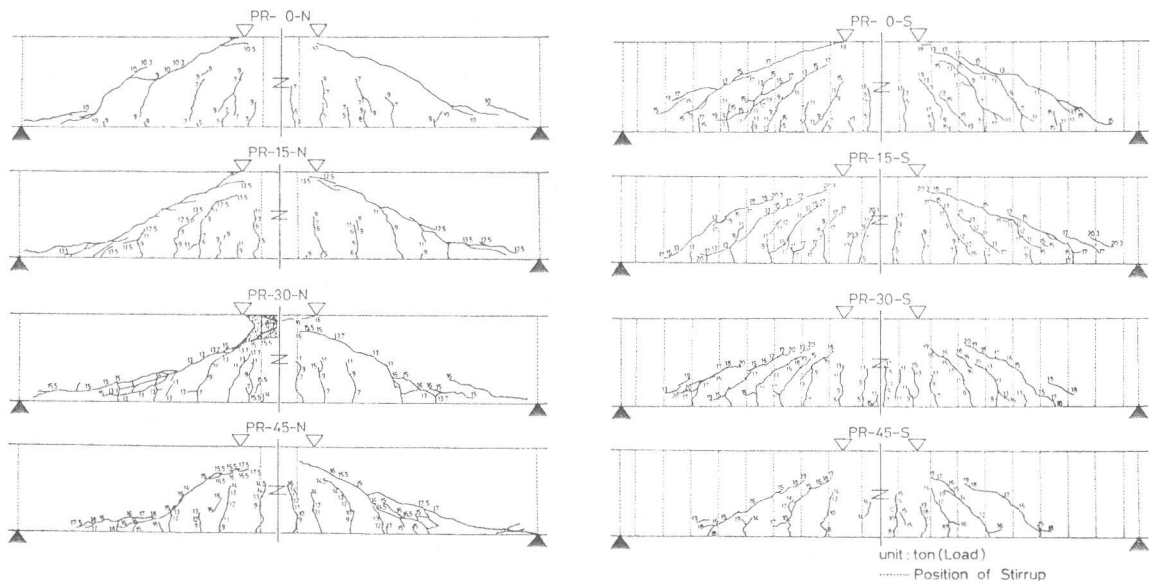


図3 供試体ひびわれ発生状況

表3 実験結果一覧表

Beam No.	Effective Prestress (kgf/cm ²)	Flexural Cracking			Flexural Shear Cracking			Shear Cracking			Yielding		Maximum Capacity		
		P_{fc} (ton)	$\bar{\epsilon}_{fc}$ (cm)	$\bar{\epsilon}'_{fc}$ (cm)	P_{fsc}^D (ton)	$\bar{\epsilon}'_{fsc}$ (kgf/cm ²)	$\bar{\epsilon}_{fsc}$ (cm)	P_{fsc} (ton)	$\bar{\epsilon}'_{fsc}$ (kgf/cm ²)	$\bar{\epsilon}_{fsc}$ (cm)	P_y (ton)	$\bar{\epsilon}_y$ (cm)	P_u (ton)	$\bar{\epsilon}'_{yu}$ (kgf/cm ²)	$\bar{\epsilon}_{yu}$ (cm)
PR-0-N	0	1.5	0.09	9	13.9	0.65	10	15.4	0.74	—	—	10.7	16.5	0.94	
PR-15-N	14.6	2.9	0.13	9	13.8	0.57	12.5	19.2	0.87	—	—	15.0	23.0	1.43	
PR-30-N	31.2	4.6	0.22	11	17.0	0.70	13	20.1	0.89	—	—	17.4	26.9	1.80	
PR-45-N	43.2	6.1	0.24	13	19.9	0.83	15	23.0	1.07	—	—	19.3	29.5	2.02	
PR-0-S	0	1.7	0.08	9	13.9	0.58	11	17.0	0.74	19.4	1.71	19.9	30.7	1.80	
PR-15-S	13.5	3.3	0.17	9	13.8	0.60	13	19.9	0.94	19.5	1.74	20.3	31.1	2.48	
PR-30-S	29.0	4.6	0.20	11	17.0	0.67	15	23.2	1.02	20.6	1.75	21.0	32.4	2.07	
PR-45-S	42.0	6.2	0.28	14	21.5	0.76	15	23.0	1.14	19.0	1.76	19.4	29.8	2.13	

P: Load
 v : Nominal Shear Stress = $\frac{0.5P}{bj}$; b : Width of Beam, $J = \frac{7}{8}d$, d : Effective Depth
 δ : Deflection at Mid-span

における有効プレストレスである。図中には Evans²⁾, Herzog³⁾, Mattock⁴⁾等による提案式と A C I Code (318-77)⁵⁾ および A I J 提案式¹⁾ が示されている。プレストレスが大きくなるにつれてせん断ひびわれ耐力は大きくなる。Mattock式が実験値と非常に良く一致しており、A C I 式および A I J 提案式も傾向を良く表わしている。それに対して他の2式はプレストレスの効果を過大評価しているが、その理由は本来これら2つの提案式が I および T 型断面に対して得られたものであることに依る。同図中にはせん断補強筋の無いはりの最大耐力を同時に示してあるが、注目すべきは、15 kgf/cm²程度のプレストレス導入によりせん断ひびわれ発生以後最大耐力に至るまでの耐力上昇がかなり期待出来る点である。これは先にも述べたように、プレストレスの導入によりクリティカル断面におけるコンクリート圧縮域が増大し、アーチ機構(Kamiの Remaining Arch⁶⁾) 耐力が増大した為であり軽微なプレストレスで十分な効果があり、せん断ひびわれの発生に伴ってただちに急激な破壊に至る所謂斜張力破壊を防止出来る事がわかる。

3-3 せん断補強筋の挙動(Sシリーズ)

図1中に示したせん断補強筋に貼付した抵抗線ひずみ計によるひずみ測定結果を図5にまとめて示した。ひずみの値はせん断補強筋の両側面で計測された値の平均値とした。図より明らかなように、プレストレスの大きさがせん断補強筋ひずみの材軸方向の分布と関係しており、プレストレスの大きくなるほどせん断補強筋に引張ひずみの生じる領域が狭くなりかつ荷重点に近づく。これは図3に示したひびわれ図のせん断ひびわれ発生領域の変化と対応している。このようにプレストレスはせん断補強筋の効果にも大きく影響を及ぼすわけである。次に、せん断補強筋引張応力について考察を加える。図6に荷重Pと最大せん断補強筋応力 $w_{fs,max}$ の関係を示した。なお応力は両側面での測定値の平均である。せん断ひびわれの発生により、せん断補強筋応力が増大し始めほぼ一定の割合で増加していく。プレストレスレベルが0のPR-0-Sでは $P = 18 \text{ ton}$ でせん断補強筋が降伏しているのに比べて他の3供試体では弾性範囲にとどまっている。PR-30-SとPR-45-Sでは $P - w_{fs,max}$ 曲線にはほとんど差はないが、最終的に到達する値はPR-30-Sの場合の方が大きくプレストレスレベルの違いが表われている。一方両供試体において $P = 17 \text{ ton}$ あたりから荷重の増大に対して最大せん断補強筋応力の増大が頭打ちとなる現象が観察される。これはせん断補強筋応力の軸方向分布が平均化され他の部分のせん断補強筋によるせん断力負担が増大しているためである。同図中には A C I Code による計算値を同時に示してある。A C I Code によるとPR-0-SおよびPR-15-Sに関しては長期荷重下ですでにせん断補強が必要になることがわかる。せん断補強筋が必要となつてからの A C I Code 式の傾斜は実験より得られた $w_{fs}-P$ 曲線とほぼ一致している。しかしながらこの図6では各セ

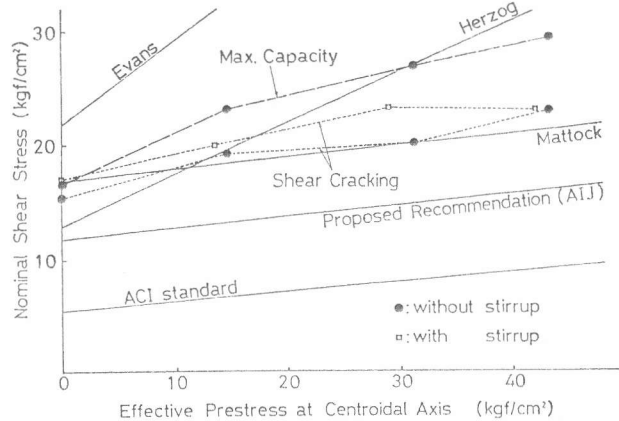


図4 せん断ひびわれ耐力およびせん断終局耐力に及ぼすプレストレスの影響

せん断補強筋応力の最大のものが縦軸にとられているが、せん断ひびわれを横切るせん断補強筋がすべて有効に働くはずである。そこでせん断ひびわれを横切るせん断補強筋応力の平均値 $w_{fs,ave}$ を縦軸にとって図6を描きなおしたのが図7である。図より明らかなようにせん断ひびわれの発生以後の $P-w_{fs,ave}$ 曲線は

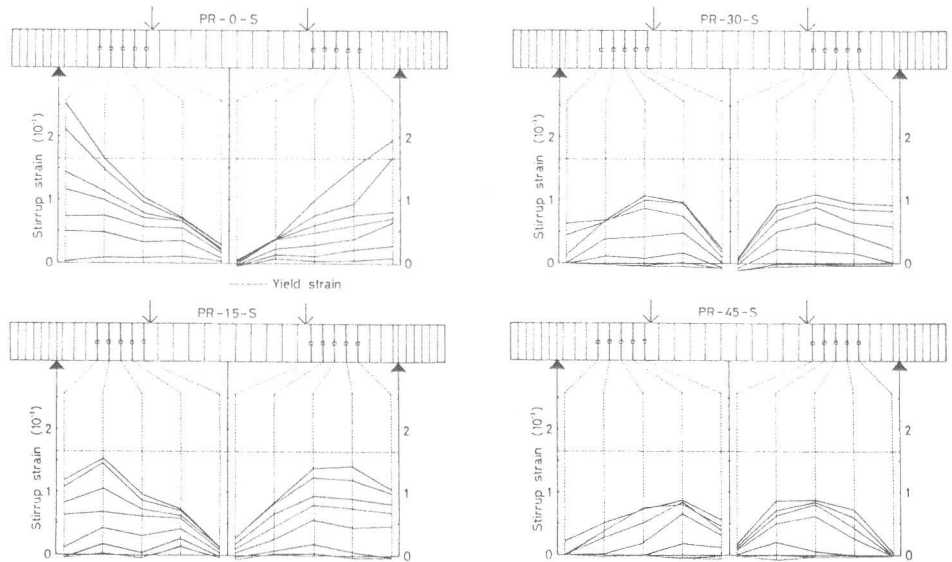


図5 せん断補強筋軸方向ひずみ分布

ほぼ同一の勾配を示している。これは、せん断補強筋の平均応力で表わせば、せん断ひびわれ発生以後のせん断補強効率はプレストレスの大きさには影響されず同じである事を意味している。なお図中にはACI Code式も示したが、実験結果に比べて極めて安全側となっている。

4 結論

本実験研究により以下の結論が得られた。

- (1) せん断ひびわれ荷重に対してプレストレスの効果を含む種々の算定式のうち、Mattockのものが極めてよい適合性を示す。またAIJの提案式およびACI Code式はともにプレストレスの効果を適確に表わしており、設計式として妥当なものと考えられる。
- (2) プレストレスは、せん断ひびわれ荷重の増大をもたらすのみでなく、ひびわれ発生と同時に生じる極めて急激な斜張力破壊を防止し、せん断圧縮破壊へと破壊形式を変える。
- (3) せん断ひびわれの発生領域がプレストレスの大きさに影響される。
- (4) せん断補強筋の平均応力で考えると、せん断ひびわれ発生以後のせん断補強効率はプレストレスに影響されないものと考えられる。

本実験は我が国で用いられている建築構造物におけるはりが、ほとんど長方形断面である事より長方形断面のはり供試体を用いたが、他の断面形のものに対しては今後の研究が必要であろう。

〔参考文献〕

- 1) プレストレスト鉄筋コンクリート構造・設計・施工(案) 建築雑誌・昭和57年6月
- 2) R.H.Evans, E.G.Schumacher "Shear strength of prestressed beams without web reinforcement", J.of A.C.I., Nov.1963
- 3) Herzog M. "Die Schubbruchlast von Spannbetonbalken nach Versuchen", Beton und Stahlbetonbau, Dec.1974
- 4) Mattock A.H. "Diagonal Tension Cracking in Concrete Beams with Axial Force", Proc. of ASCE, S.D., Sept./1969
- 5) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77)
- 6) Kani G.N. "The Riddle of Shear Failure and Its Solution", J. of A.C.I., Apr./1964

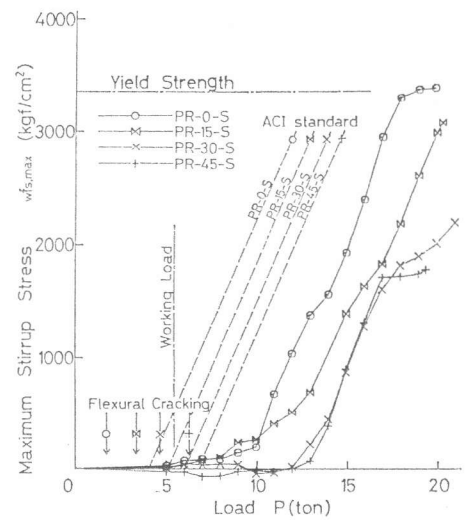


図6 $P-w_{fs,max}$ 関係

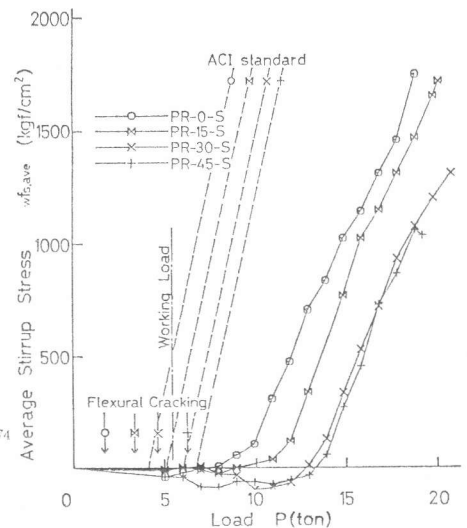


図7 $P-w_{fs,ave}$ 関係