

# [123] 高強度プレストレストコンクリート梁のせん断強さに関する基礎研究

正会員 ○船越 稔 (広島大学工学部)  
正会員 岡本享久 (同上)

## 1. 緒言

本研究は高強度コンクリートを使用したプレストレストコンクリート梁のせん断強さおよび破壊性状について実験を行ない検討を加えたもので、高強度プレストレストコンクリート部材のせん断力に対する設計方法に関連した資料を得ることを目的としている。すなわち、I形断面プレストレストコンクリート単純梁を用い、コンクリートの強度、せん断スパンと有効高さの比、せん断補強率および導入プレストレスを変えて破壊試験を行ない、せん断破壊を起こした梁の耐力、変形および破壊の性状について検討を行なったものである。近年、高性能減水剤の開発利用により  $800 \text{ kg/cm}^3 \sim 1000 \text{ kg/cm}^3$  の高強度を有するコンクリートを比較的容易に造ることが可能となり、新しい構造形式のコンクリート構造物、たとえばPCトラス橋、PC斜張橋などに適用され有利点が生かされている。しかしながら、土木学会昭和53年度制定プレストレストコンクリート示方書には設計に際し、コンクリートの圧縮強度  $600 \text{ kg/cm}^2$  までの規定しかなく、それ以上の強度を用いたPC構造物では示方書を準用した形で設計を行なっているのが現状である。従って、高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート部材のせん断力に対する性状も十分に解決されてなく、早急に設計に関する基礎資料の集積が必要とされている。本実験ではPC示方書に準じて導入プレストレスをコンクリートの圧縮強度に応じて直線的に変化させ、高強度プレストレストコンクリート梁のせん断強さに検討を加えたものである。

## 2. 使用材料および試験方法

表-1 鋼材の引張試験結果

### (1) セメント、骨材、混和剤

大部分の供試体に比重  $3.16$  の普通ポルトランドセメントを用い、一部の供試体に比重  $3.14$  の早強ポルトランドセメントを用いた。

細骨材には太田川産の川砂を用いた。細骨材の比重、吸水率および粗粒率はそれぞれ  $2.56$

$1.9\%$  および  $2.42$  であった。粗骨材には比重  $2.71$ 、最大寸法  $15 \text{ mm}$  の碎石を用いた。

混和剤には高性能減水剤(マイティ)を用い、一部の供試体に減水剤(ボゾリスNo. 5L)を用いた。

### (2) 鋼材

PC鋼材には呼び名  $23 \text{ mm}$  の丸棒C種1号(SBPR110/125)を用いた。スタールップには  $\phi 6$  あるいは  $\phi 9$  の普通丸鋼(SR-24)を用いた。これらの鋼材の引張試験結果は、表-1に示すとおりである。

### (3) 供試体の製造

図-1はPC供試体の形状寸法を示したものである。すなわち、PC梁供試体は全長  $180 \text{ cm}$ 、断面はI形でフランジ幅  $15 \text{ cm}$ 、ウェブ厚  $7 \text{ cm}$ 、高さ  $22 \text{ cm}$  で下縁より  $6 \text{ cm}$  の位置にPC鋼棒を配置した。コンクリートは載荷試験時の目標圧縮強度を  $600$ 、 $800$  および  $1000 \text{ kg/cm}^2$  の3種として配合を定めた。表-2にコンクリートの配合、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの試験結果を示す。PC梁供試体と各種強度試験用供試体は全く同じ条件で製造し、養生を行な

	断面積	降伏点	引張強度	伸び	ヤング係数
	( $\text{mm}^2$ )	( $\text{kg/mm}^2$ )	( $\text{kg/mm}^2$ )	(%)	( $\text{kg/cm}^2$ )
PC鋼棒	400.0	125	134	11	$2.0 \times 10^6$
SR-24 $\phi 6$	24.0	34.6	51.6	19	$2.1 \times 10^6$
"	24.2	32.2	47.9	"	"
SR-24 $\phi 9$	64.0	32.2	47.4	34	"

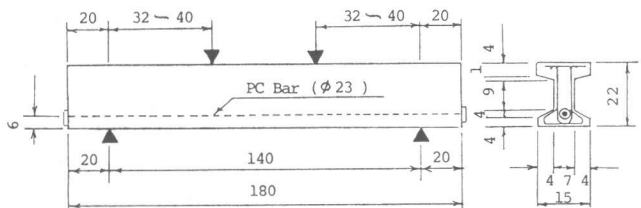


図-1 供試体寸法 (cm)

ったものである。PC梁供試体のせん断補強には垂直スターループを用い、せん断補強強度( $Kr\sigma_{sy}$ )にして0、30および、60  $kg/cm^2$ の3種に変えた。

(4) 試験の方法

i) プレストレッシングおよびグラウチング

プレストレッシングは能力35tのセンターホールジャッキを用いて行ない、導入荷重の検証はジャッキのマノメーターの読みおよびPC鋼棒に貼ったゲージの測定値により行なった。導入直後の部材引張部のプレストレスによる圧縮応力度は、図-2に示すようにPC示方書に準じてコンクリートの圧縮強度の相異により変化させた。

プレストレス導入後、直ちにグラウトを行なった。グラウトの配合は、おおむね $W/C+F=4.1\%$ 、 $F/F+C=2.5\%$ でポゾリスNo. 5Lをセメント重量の0.25%、アルミニウム粉末をCの0.01%用いた。

ii) 載荷試験

コンクリートの圧縮強度がほぼ目標値に達した時、図-1に示すように2点対称荷重により破壊試験を行なった。荷重は1~2tおきに段階的に上昇させ、各荷重段階でコンクリートおよび鉄筋のひずみ、梁のたわみを測定し、ひびわれの進展状況を観察しながら破壊まで載荷して破壊の状態を調べた。

3. 試験の結果および考察

(1) 試験の結果

表-3は試験結果の一覧であってせん断スパンと有効高さの比、腹鉄筋の配置、コンクリートの強度、導入直後のプレストレス、ウェブせん断ひびわれ発生荷重および破壊荷重などが記してある。せん断スパンと有効高さの比( $a/d$ )は2.0、2.5、3.0の3種に、また導入プレストレスは各コンクリートの圧縮強度( $\sigma_c$ )に応じて3種に変えてある。

表-2 コンクリートの配合と強度

No.	配 合				スラ ンプ	Air (%)	$\sigma_c(kg/cm^2)$		$E_c(x10^5)$		$\sigma_b$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_t$ kg/cm <sup>2</sup>
	W	W/C	s/a	Add			導入	試験	導入	試験		
1	173	23	33	MT	17	2.8	767	817	3.5	3.6	71	38
2	183	28	#	#	17	1.5	955	998	3.9	4.5	72	51
3	207	35	42	Poz	8	2.5	609	599	3.3	3.3	57	38
4	175	28	33	MT	11	1.4	836	847	3.9	3.8	60	42
5	199	28	#	#	23	1.7	930	987	4.0	3.9	62	48
6	183	28	#	#	18	2.1	764	778	3.1	3.0	63	39

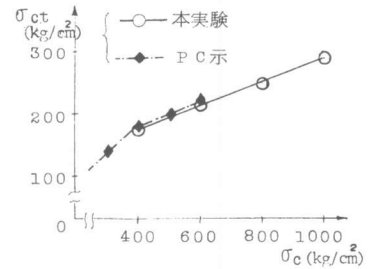


図-2 導入プレストレス

表-3 試験の結果

Beam NO.	配合 NO.	a/d	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$Kr\sigma_{sy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_{ic}$ (t)	$P_b$ (t)	$P_u$ (t)	$Z_{ic}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$Z_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$Z_u/\sigma_c$	$\sigma_{ce}/\sigma_c$
1	1	2.0	817	0	21	24	35.6	93	158	0.193	0.294
2	1	#	#	29	22	26	37.7	97	166	0.203	0.290
3	2	#	998	0	24	32	39.3	106	174	0.174	0.277
4	2	#	#	29	25	30	43.2	111	191	0.191	0.274
5	3	2.5	599	0	17	19	25.0	75	110	0.183	0.331
6	3	#	#	35	16	18	29.0	70	125	0.209	0.322
7	4	#	847	0	19	22	31.0	85	139	0.164	0.272
8	4	#	#	30	20	22	34.0	86	150	0.177	0.272
9	6	#	778	63	17	19	34.0	75	151	0.193	0.308
10	5	#	987	0	19	24	31.9	84	141	0.143	0.276
11	5	#	#	33	22	25	38.3	100	168	0.170	0.280
12	6	3.0	778	#	16	15	22.1	72	99	0.127	0.303

(2) 斜めひびわれ耐力および終局せん断耐力に及ぼす $\sigma_c$ 、 $a/d$ 、 $Kr\sigma_{sy}$ の影響

図-3はウェブせん断ひびわれ発生時のせん断応力度( $Z_{ic}$ )および終局せん断応力度( $Z_u$ )と $\sigma_c$ の関係を $a/d$ および $Kr\sigma_{sy}$ をパラメーターに示したものである。この図より、 $Z_{ic}$ は $\sigma_c$ の増大とともにほぼ直線的に増加し、 $\sigma_c$ の増加に伴う $Z_{ic}$ の増加率は $a/d$ および $Kr\sigma_{sy}$ に関係なくほぼ一定であった。これは $\sigma_c$ の大なる場合プレストレスもこれに応じて大であるので、同一荷重作用下での主引張応力が小さいことおよびコンクリートの引張強度が多少大きいことによる。また同一 $Kr\sigma_{sy}$ 、 $\sigma_c$ において $Z_{ic}$ は $a/d$ が2.5から2.0と小となると僅かではあるが増加することが認められた。一方、 $Z_u$ も $\sigma_c$ の増大とともにほぼ直線的に増加するが、各パラメーター、すなわち $a/d$ および $Kr\sigma_{sy}$ の相違が $Z_u$ と $\sigma_c$ の関係に及ぼす影響が $Z_{ic}$ と $\sigma_c$ の関係より顕著となる傾向にある。すなわち腹鉄筋の補強効果に $\sigma_c$ が貢献することが認められた。また

同一  $Kr\sigma_{sy}$  では  $a/d$  が小となると  $\sigma_c$  の増大とともに  $\tau_u$  は増加するが、その増加率は同一であった。以上の諸現象は腹部圧砕を起こす梁において特有なものである。

図-4 は  $\tau_{ic}$  および  $\tau_u$  と  $a/d$  の関係を、図-5  $\tau_u$  と  $Kr\sigma_{sy}$  の関係を示したものである。 $a/d$  が増大すると  $\tau_{ic}$  および  $\tau_u$  は減少し、 $a/d$  の増加に伴なう  $\tau_u$  の減少率は  $Kr\sigma_{sy}$  によりほとんど影響を受けず  $\sigma_c$  が大なる程小となる傾向が認められた。 $\tau_u$  と  $Kr\sigma_{sy}$  の関係では  $Kr\sigma_{sy}$  が 0 から  $30 \text{ kg/cm}^2$  と増大すると  $\tau_u$  は増加するがこの増加率は各  $\sigma_c$  によって異なり、同一  $a/d$  では  $\sigma_c$  が大なる程大きくなり、同一  $\sigma_c$  では  $a/d$  の相違にかかわらずほぼ一定であることが認められた。図中の MTF は曲げ引張破壊をした梁を示し、 $Kr\sigma_{sy}$  が  $30$  から  $60 \text{ kg/cm}^2$  と増加しても  $\tau_u$  はほとんど増加しなかった。以上より  $\tau_u$  の増加率に及ぼす主要因は  $\sigma_c$  であり、これは本実験では比較的  $a/d$  の小さな範囲で行なったこと、また導入プレストレスを  $\sigma_c$  の増大とともに増したことにより破壊性状がせん断圧縮破壊および腹部圧砕に類似し、 $\sigma_c$  に依存する性状であることが原因と思われる。したがって高強度 P C 梁では  $a/d$  が  $2.0 \sim 3.0$  と小なる範囲で導入プレストレスを P C 示方書に準じて  $\sigma_c$  の増加に応じて増加させる場合、この種の破壊形式を考慮し腹部幅の選定に安全性を持たせる必要があると思われた。

### (3) 破壊の性状

図-6 ~ 8 は本実験で得られたひびわれ伸展状況を示し、図-9 はスパン上縁、ウェブ斜方向のコンクリートのひずみおよびスパン中央引張鉄筋のひずみを各荷重段階で示したものである。図-10 ~ 12 は過去に当研究室で行なった試験後の供試体のひびわれ伸展状況を比較のため引用したもので、図-13 はこの場合のひずみを各荷重段階別に示したものである。図-10 ~ 12 は各々代表的なせん断圧縮破壊 (SCF)、腹部圧砕 (WCF) および曲げ引張破壊 (MTF) を示し、各破壊の特徴がひずみ図に明瞭に表わされている。しかし、 $\sigma_c$  が  $600 \text{ kg/cm}^2$  から  $800$  および  $1000 \text{ kg/cm}^2$  になると図-6 ~ 8 に示すように破壊形式の判別が困難となり図-9 のひずみ図を見ても明瞭な判別はできなかつた。本実験においてせん断破壊した梁は以下のような段階を経て破壊に至っている。

① Pu の 50 ~ 70 % でウェブせん断ひびわれが荷点と支点を結ぶ線上に現われる。 $a/d = 3.0$  の

場合を除きウェブせん断ひびわれが曲げひびわれに先行した。② Pu の 60 ~ 75 % で、曲げスパンに曲げひびわれが発生し、荷重の増加とともに本数が増加し、進展した。

③ Pu の約 90 % で、先に発生したウェブせん断ひびわれの上部に新たなウェブせん断ひびわれが発生し、

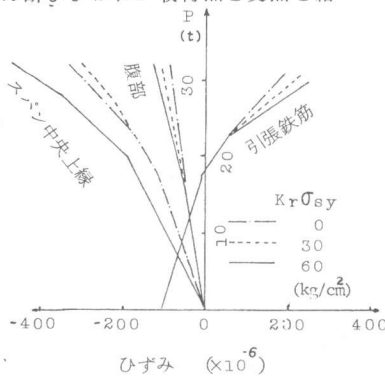


図-9 ひずみ (高強度 P C)

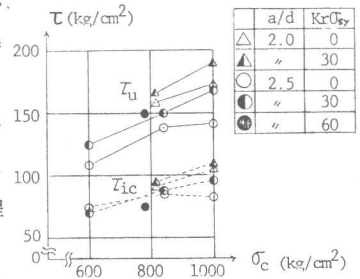


図-3  $\tau_{ic}, \tau_u \sim \sigma_c$

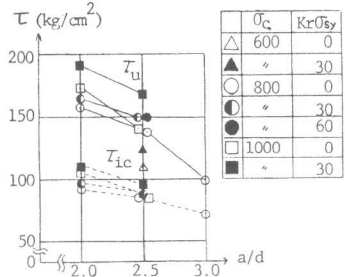


図-4  $\tau_{ic}, \tau_c \sim a/d$

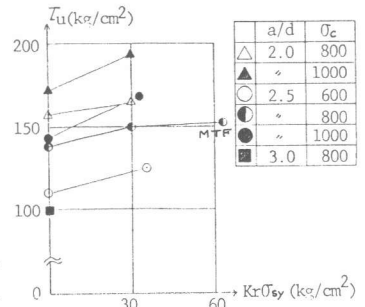


図-5  $\tau_u \sim Kr\sigma_{sy}$

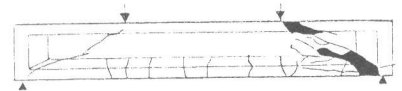


図-6  $a/d=2.5, \sigma_c=800, Kr\sigma_{sy}=0$

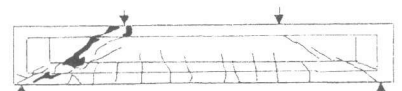


図-7  $a/d=2.5, \sigma_c=800, Kr\sigma_{sy}=30$

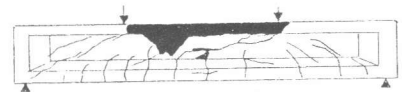


図-8  $a/d=2.5, \sigma_c=800, Kr\sigma_{sy}=60$

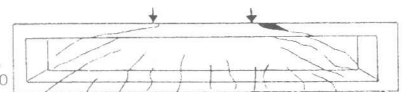


図-10 せん断圧縮破壊 (SCF)

一トストラットが圧壊すると同時に、載荷点、支点のコンクリートが崩壊し、急激に終局耐力に到達し、二次的に上、下フランジが激しく破壊した。しかし曲げ引張破壊を起こした梁を除くと破壊形式が腹部圧碎であるのか、せん断圧縮破壊なのか明瞭には識別できなかった。

図-8は $\sigma_c = 800 \text{ kg/cm}^2$ のPC梁における曲げ引張破壊のひびわれ図を示す。図-12は $\sigma_c = 600 \text{ kg/cm}^2$ の梁の曲げ引張破壊であり、破壊は延性的であったが、 $\sigma_c = 800 \text{ kg/cm}^2$ の場合は同じMTFでも爆烈的なものであり、上フランジのコンクリートが大量に飛び

散り、圧縮鉄筋が座屈を起こした。したがって $\sigma_c = 800 \text{ kg/cm}^2$ 以上の高強度PC梁においては十分補強して腹部幅も十分とり曲げ引張破壊を起こすようにしても破壊は極めて脆性的な場合があり、破壊に延性をもたすような配筋などが必要と思われる。

#### (4) 高強度プレストレストコンクリート梁のせん断強度特性

図-14は $\tau_u / \sigma_c$ と $\sigma_{ce} / \sigma_c$ の関係を過去の研究データを含めて $a/d$  Kr $\sigma_{sy}$ をパラメーターに示したものである。図中の実線は本実験の結果を、破線および一点鎖線は同一の供試体で行なった過去の研究結果であり、破壊形式は破線では全て腹部圧碎を、一点鎖線では全てせん断圧縮破壊を起こした。なお、過去の研究では $\sigma_c$ が変わっても導入プレストレスは一定としている。図中より導入プレストレスを $\sigma_c$ の増加に応じて大とした場合は導入プレストレスを $\sigma_c$ の大小に拘らず一定とした場合とくらべて $\sigma_{ce} / \sigma_c$ の増加に伴う $\tau_u / \sigma_c$ の増加率は大きくなることが認められた。過去の研究データより腹部圧碎した梁の $\tau_u / \sigma_c$ はせん断圧縮破壊の場合より0.1ほど大となっており、腹部圧碎に対するCEB/FIPおよびPC示方書の $\tau_u$ の上限値よりかなり大きくなっている。しかし、本実験の場合、破壊形式が腹部圧碎およびせん断圧縮破壊に類似していること、PC示方書を準用し $\sigma_c$ に応じて $\sigma_{ce}$ を変えた場合、CEB/FIPの上限値を下回る場合があることより、高強度PC梁の破壊に対する安全度を考慮する場合、導入プレストレスの影響を含めて $\tau_u$ の上限値を決める必要があるように思われた。

#### 4. 結 び

高強度PC梁のせん断破壊特性を調べる目的で破壊試験を行ない結果に検討を加えた。本研究の範囲内で得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) コンクリートの強度に応じてプレストレスの値を変えたPC梁の斜ひびわれ強さは、 $\sigma_c$ の増加に伴ない大略直線的に増加する。
- (2) 腹部圧碎に近い破壊形式のPC梁供試体のせん断強さはコンクリート強度の影響を顕著に受ける。
- (3) 腹鉄筋のせん断補強効果にコンクリートの強度が影響することが認められた。
- (4)  $800 \text{ kg/cm}^2$ 程度以上の高強度PC梁の破壊は、これ以下の強度の場合にくらべて極めて激しく、破壊の形式も異なった様相を示す。
- (5)  $\sigma_c$ に応じて導入プレストレスを高めた高強度PC梁の公称せん断応力の上限值と圧縮強度の比は、コンクリート強度が大なる程低い値となった。

本研究の実験の実施に当たり、学部4年池田雅敏君より多大な援助を受けました。ここに謝意を表明します。

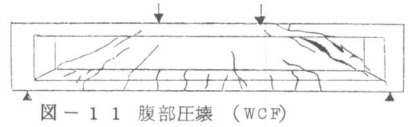


図-1 1 腹部圧壊 (WCF)

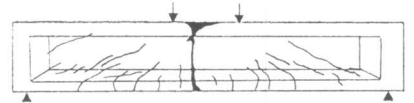


図-1 2 曲げ引張破壊 (MTF)

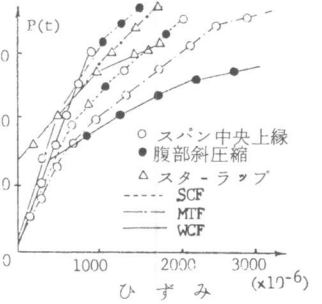


図-1 3 ひずみ

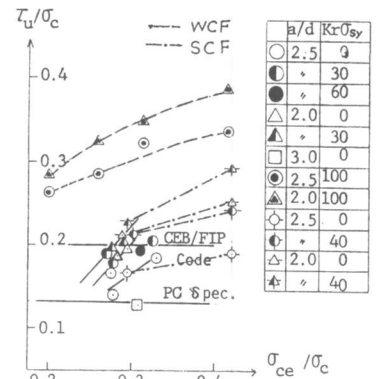


図-1 4  $\tau_u / \sigma_c \sim \sigma_{ce} / \sigma_c$