

[118] 高強度コンクリートを用いた PC 梁の耐力と破壊の性状

正会員 船越 稔 (法政大学 工学部)

正会員 田中 弘 (法政大学 工学部)

正会員 〇谷 政幸 (法政大学 大学院)

1. はじめに

高強度コンクリートは、PC 部材に適用してその利点が最も発揮されるものと思われるが、この種部材の力学的性状は十分に明らかにされていない。本研究は、コンクリートの圧縮強度、腹部補強率および導入プレストレス量を変えた I 形 PC 梁において、せん断スパンと有効高さの比 (a/d) を変化させて載荷試験を行った。その結果に基づいて、主として高強度 PC 梁のせん断耐力に検討を加え、同時に曲げ耐力、じん性についても論じた。

2. 使用材料および試験方法

(1) セメント、骨材および混和剤

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、比重は 3.16 と 3.17 であった。細骨材には鬼怒川産川砂を用い、比重および吸水率はそれぞれ、2.56, 2.94 % であった。粗骨材には比重 2.63 と 2.64 の岩瀬産砕石を最大寸法 15 mm で用いた。混和剤には高性能減水剤を使用した。

(2) 鋼材

PC 鋼材には呼び名 23 mm の丸棒 C 種 1 号 (SBPR110/125) を用いた。またスターラップには $\phi 6$ mm (SR-24)、組立鉄筋には $\phi 9$ mm (SR-24) を用いた。これらの鋼材の引張試験結果を表-1 に示す。

(3) 供試体

PC 梁供試体の断面寸法は図-1 に示すとおりである。腹鉄筋には垂直スターラップを用い、その腹部補強率 ($K_r \sigma_{sy}$) は 0, 25, 50 kg/cm² の 3 種とした。コンクリートの強度は 400 から 1000 kg/cm² とした。

(4) プレストレッシングおよび載荷試験

導入プレストレス量は、部材下縁の応力がコンクリートの圧縮強度 400, 600 および 1000 kg/cm² に対してそれぞれ、180, 220, 280 kg/cm² となるように定めた。そして導入直後にグラウトを行った。梁の破壊試験は a/d を 2.0, 2.5, 3.5 の 3 種に変えて、図-2 に示すように 2 点載荷によって行った。

3. 試験の結果と考察

(1) ひびわれ耐力および終局耐力

梁の破壊試験の結果は表-2 に示すとおりである。

図-3 は腹部無補強梁における斜ひびわれ発生時およびせん断破壊時の曲げモーメントと a/d の関係を、コンクリートの圧縮強度をパラメーターとして表わしたものである。 σ_c が 1000 kg/cm² の梁の斜ひびわれ耐力は、600 kg/cm² の梁に比べて 11~20 % 増加している。これは導入プレストレスの増加によりせん断抵抗が増したことが原因であると考えられる。次に終局せん断耐力についてみると、 a/d が 2.0 の梁で 22 %, 2.5, 3.5 の梁ではそれぞれ、52, 28 % と斜ひびわれ耐力に比べてかなりコンクリート強度の影響が大きい。これ

表-1 鋼材の引張試験結果

	A_s (cm^2)	σ_{sy} (kg/cm^2)	σ_{su} (kg/cm^2)	E_s (kg/cm^2)
PC Bar	415.5	119.1	128.5	2.0×10^6
$\phi 9$ SR-24	63.6	30.5	44.5	2.1×10^6
$\phi 6$ SR-24	28.3	29.0	38.9	2.1×10^6

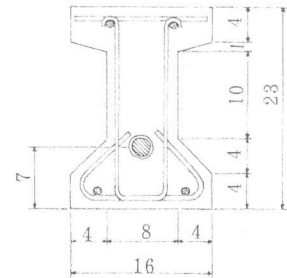


図-1 断面寸法 (cm)

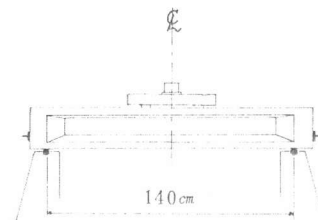


図-2 載荷試験方法

は σ_c が600 kg/cm²の梁では、 a/d が2.5、3.5の梁ともに斜引張破壊であったものが、 σ_c が1000 kg/cm²の場合にはどちらもせん断圧縮破壊になっているためと考えられる。つまり斜びわれ発生後もプレストレスが斜びわれの発達をおさえる働きをし、終局せん断耐力を増加させると考えられる。よってコンクリートを高強度にした場合、大きなプレストレスの導入が可能であるので、終局せん断耐力は著しく向上すると考えられる。

次にコンクリート強度が腹鉄筋の補強効果におよぼす影響について検討を行う。図-4は終局時の曲げモーメントと腹部補強率との関係を表わしたものである。 a/d が2.5、3.5の梁とも、600 kg/cm²の梁に比べて1000 kg/cm²の梁は補強効果が悪くなっている。これは1000 kg/cm²の無補強梁の耐力が600 kg/cm²の場合と比べて曲げ耐力に近い所まで達しているためと考えられる。

図-5は a/d が3.5、腹部補強率が50 kg/cm²の梁におけるの曲げひびわれ発生時および終局時の曲げモーメントとコンクリートの圧縮強度との関係を表わしたものである。これをみると、 M_u 、 M_b ともにコンクリート強度の増加に伴って、その増加は頭打ちになる傾向にある。曲げひびわれ耐力の増加が頭打ちになる原因としては、コンクリート強度にかかわらず同一径のP C鋼棒を用いたことによるレラクセーション率の違い、圧縮強度の増加に比べて引張強度の増加が少ないことなどが考えられる。また、曲げひびわれ発生後の耐力の増加($M_u - M_b$)は、コンクリート強度の増加に伴って、3.25、3.78、3.70、3.50 t·mと σ_c が400 kg/cm²の梁を除いては、減少する傾向にある。これはコンクリート強度が高くなる程、引張破壊に近くなり、曲げひびわれの伸展が早くなるためと考えられる。このため M_u の場合、 σ_c の増加に伴って耐力が頭打ちになる傾向が、 M_b に比べて多少大きくなると思われる。

(2) 高強度P C梁の終局曲げ耐力と応力ブロック係数

曲げ破壊モーメントを計算する場合、破壊時の圧縮応力分布の形によって計算値が異なってくる。そこで、応力分布の形を表わす応力ブロック係数 k_1 、 k_2 、 k_3 を表-3のように変えて実験値との比較を行なったものが図-6である。応力分布をCase1は矩形、Case2は放物線と直線、Case3は三角形と仮定して計算したものである。曲げ破壊モーメント(M_{cal})の計算におけるP C鋼棒の応力は、破壊時のひずみを求め、引張試験より得た応力-ひずみ曲線を用いて定めた。図-7から、Case1、Case2の場合は σ_c の増加に伴って実

表-2 試験関係

	σ_c	a/d	$Kr\sigma_{sy}$	P_b	P_i	P_u	破壊形式
1	667	2.0	0	3.24	2.94	3.92	SCF
2	1083	2.0	0	3.70	3.80	4.76	SCF
3	654	2.5	0	2.20	2.00	2.41	DTF
4	1035	2.5	0	2.50	2.40	3.67	SCF
5	644	3.3	0	1.70	1.93	2.31	DTF
6	1071	3.3	0	2.05	2.25	2.96	SCF
7	650	2.5	2.5	2.38	2.40	3.57	SCF
8	1103	2.5	2.5	2.80	2.65	4.24	SCF
9	640	3.5	2.5	1.69	2.08	3.04	SCF
10	1020	3.5	2.5	1.82	2.20	3.30	SCF
11	614	2.5	5.0	2.50	2.52	3.40	MCF
12	415	3.5	5.0	1.20	1.68	2.36	MCF
13	537	3.5	5.0	1.40	1.73	2.75	MCF
14	669	3.5	5.0	1.65	2.17	2.97	MCF
15	995	3.5	5.0	1.93	2.40	3.18	MCF
16	1027	3.5	5.0	1.97	2.35	3.22	MCF
17	1051	3.5	5.0	2.10	2.35	3.2.8	MCF

σ_c : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²) P_u : 破壊荷重 (t)
 a/d : せん断スパンと有効高さの比 DTF : 斜引張破壊
 $Kr\sigma_{sy}$: 腹部補強率 (kg/cm²) SCF : せん断圧縮破壊
 P_b : 曲げひびわれ発生荷重 (t) MCF : 曲げ圧縮破壊
 P_i : 斜びわれ発生荷重 (t)

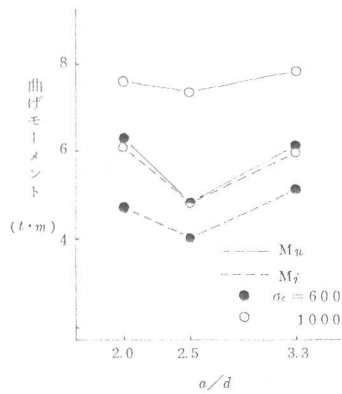


図-3 M_u 、 M_i と a/d の関係

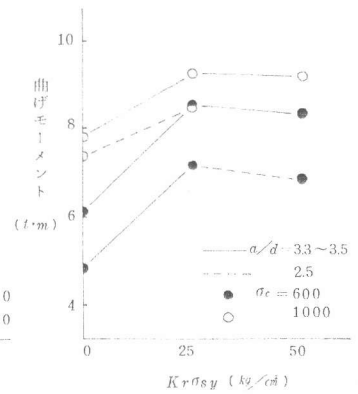


図-4 M_u と $Kr\sigma_{sy}$ の関係

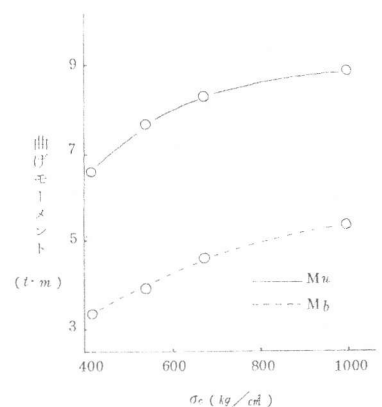


図-5 M_u 、 M_i と σ_c の関係

験値より下回っていく傾向があり、Case 3 の場合はコンクリート強度による変動が少なく、わずかながら高強度になるにしたがって実験値に近づく傾向がある。これはコンクリートが高強度になるにつれて、その応力分布が Case 1, 2 で仮定した形から、Case 3 の三角形分布に近づいていくためと考えられる。Case 1 と 3 の差をみると σ_c が 4000 kg/cm² では 30%, 6000, 8000, 10000 kg/cm² と高強度になるにしたがって 15, 8, 5% とその差は小さくなっている。本実験に用いた梁の鋼材指数 (ρ) は、 σ_c が 4000 kg/cm² で 0.50, 6000, 8000, 10000 kg/cm² でそれぞれ、0.45, 0.39, 0.33 となり、つりあい断面である $\rho_s = 0.3$ に徐々に近づいてはいるがいずれも over-reinforcement であった。このため、 Mca の値におよぼす応力ブロック係数の影響が σ_c の増加に伴い小さくなったものと思われる。本来は under-reinforcement にするのが合理的ではあるが、実験がせん断耐力を主体としたものであり、また実験上の制約などによって under-reinforcement の場合については結果が得られなかったが、その場合には応力ブロックのおよぼす影響は小さくなると思われる。

(3) 変形状

図-7 は、 a/d が 3.5、腹部補強率が 50 kg/cm² の梁の荷重-たわみ曲線である。曲げひびわれ発生時のたわみ量はコンクリートの圧縮強度によらず、どの梁も 3.5~4.0 mm となった。また図-8 の荷重-ひずみ曲線においても、曲げひびわれ発生時の梁圧縮部のひずみは、ほぼ同じ値となっている。このように、曲げひびわれ発生までは梁が弾性体としての挙動をするため、コンクリート強度の増加によるじん性の低下はみられない。しかし、終局時においては、たわみ、ひずみともにコンクリート強度の増加に伴って減少する傾向にある。特に、ひずみにおいては終局時のひずみ量、荷重の増加に伴うひずみの増加率ともに減少する傾向にあり、梁の破壊が脆性的になってくることが認められた。しかし、高強度コンクリートで問題とされている応力-ひずみ曲線のフォーリングブランチ領域での応力下降勾配が大きく脆性的であるという特性については、over-reinforcement であったためにその特性が十分には得られなかった。

次に腹部補強のない梁に関して梁圧縮部のひずみから検討を加えてみる。図-9 は、 a/d が 2.0 と 3.5、コンクリートの圧縮強度が 6000 と 10000 kg/cm² の腹部補強のない梁の荷重-ひずみ曲線である。この場合も、10000 kg/cm² の梁の終局時のひずみは 6000 kg/cm² の場合に比べて小さくなっている。しかし、コンクリート強度のおよぼす影響を考えた場合、コンクリート強度を 6000 から 10000 kg/cm² にすることにより減少した終局時のひずみは、曲げ破壊を起こした梁では 30% 以上になるのに対し、せん断破壊の場合、 a/d が 2.0 の梁で 8%、3.5 の梁では 13% の減少にとどまっている。これはせん断破壊の場合、梁圧縮部のコンクリートが終局ひずみに達していないために高強度コンクリート特有の脆性的な性質が十分には表われなかったことが原因であると思

表-3 応力ブロック係数

	k1	k2	k3
Case 1	1.00	0.5	1.00
Case 2	1.00	0.4	0.8
Case 3	0.75	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$

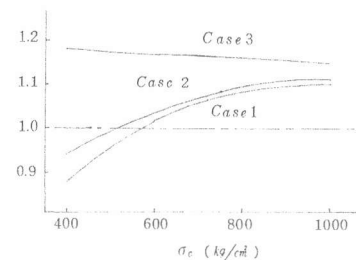


図-6 Case 1 ~ 3 による比較

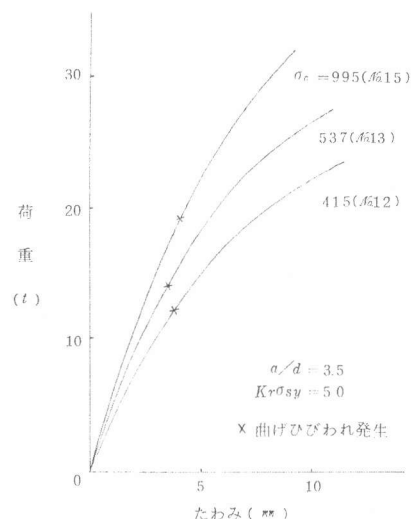


図-7 荷重とたわみの関係

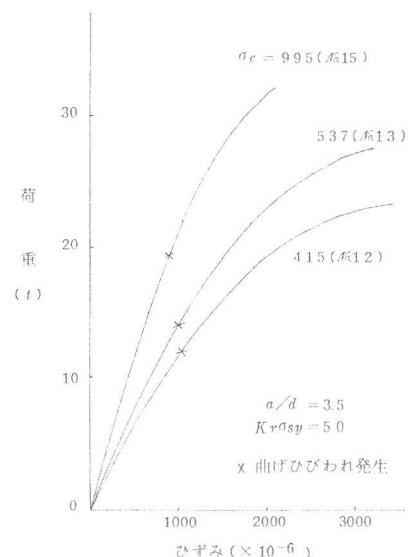


図-8 荷重とひずみの関係

われる。しかし、腹鉄筋を配置した同程度のコンクリート強度の梁と比較した場合、無補強の梁の終局時のたわみ、ひずみ量は、70%程度の値にしか達していない。このように、せん断破壊を起こした梁の場合、曲げ破壊した梁に比べてじん性は低下し、脆性的な破壊になることが認められた。

図-10は腹部補強率とコンクリート強度が異なる a/d が3.5の梁の荷重-ひずみ曲線である。コンクリートの圧縮強度600, 1000 kg/cm^2 のどちらの場合においても、腹部無補強の梁に腹鉄筋を配置することによって終局時のひずみは約1.6倍になるが、腹鉄筋の量を25 kg/cm^2 から50 kg/cm^2 と2倍にふやしても終局時のひずみはほとんど変化していない。このようにせん断破壊を起こす腹部無補強梁に少量の腹鉄筋を配置した場合には、破壊形式が曲げ破壊に近くなるためにじん性は著しく向上するが、さらに腹鉄筋をふやしても終局時のひずみには変化がなく、腹鉄筋をふやすことによるじん性の改善は認められなかった。

4. むすび

高強度コンクリートと常用強度のコンクリートを用いたプレストレストコンクリート梁の破壊試験を行い、その結果に検討を加えてきたが、本研究の範囲内で得られたことを要約すると以下のようないえた。

- (1) 高強度コンクリートを用いた腹部無補強のPC梁では導入プレストレスを大きくできるため常用強度の梁に比べて斜ひびわれの伸展は遅くなり、せん断圧縮破壊を起こしやすくなり、そのために終局せん断耐力は著しく向上した。
- (2) コンクリートが高強度になるにつれて曲げひびわれ耐力、終局曲げ耐力ともその増加は頭打ちになった。また、その傾向は、曲げひびわれ発生後の耐力の伸びがコンクリート強度の増加に伴って低下するため、終局曲げ耐力において多少大きくなった。
- (3) 曲げ破壊モーメントにおよぼす応力ブロック係数の影響は、コンクリートが高強度になるほど圧縮破壊から引張破壊に近づくために小さくなる傾向にある。
- (4) 曲げ破壊を起こす高強度PC梁では、常用強度のコンクリートを用いた場合に比べて、終局時のたわみ、梁圧縮部のコンクリートのひずみともに小さくなり、梁の破壊はコンクリート強度の増加に伴って脆性的になる傾向にあった。
- (5) 腹部無補強のPC梁の場合、曲げ破壊を起こした梁に比べて終局時のたわみ、ひずみにおよぼすコンクリート強度の影響はかなり小さかった。せん断破壊を起こした梁は曲げ破壊の梁に比べてたわみ、ひずみともに小さく、その破壊は急激であった。
- (6) 腹部無補強のPC梁に少量の腹鉄筋を配置した場合は、せん断破壊から曲げ破壊に近づくため腹鉄筋によりじん性は向上するが、曲げ破壊に近い梁では、腹鉄筋の量をふやしても終局時のたわみ、ひずみともに変化はなく、腹鉄筋によるじん性の改善は認められなかった。

本研究の実験を行うにあたり、法政大学コンクリート実験室の方々には多大な御助力をいただきました。ここにお礼申し上げます。

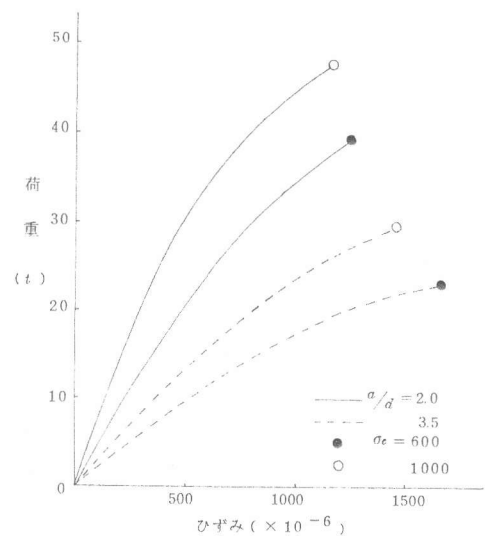


図-9 無補強梁の荷重とひずみの関係

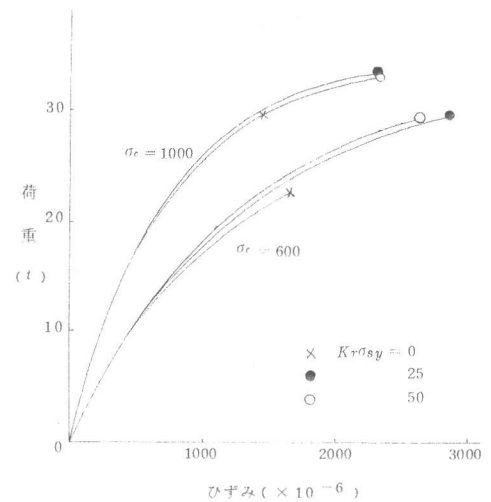


図-10 荷重とひずみの関係