

(2) プレストレストコンクリートはりのせん断耐力

鉄道総合技術研究所○鳥取 誠一
 鉄道総合技術研究所 涌井 一

1. はじめに

「コンクリート標準示方書(土木学会)」においては、プレストレストコンクリートはりのせん断耐力をデコンプレッションモーメント M_0 により評価する方法を採用している。この方法は、 M_0 と等しい大きさの曲げモーメントが作用した状態で(デコンプレッション状態)、部材内部の応力は無応力であるとして、せん断力に対するそれ以後の挙動は、軸力を受けないRCはりと同様になると考えるものである。この方法は簡易ではあるが、PCはりのせん断耐力の算定精度を向上するためには、この点を考慮する必要があるとされている¹⁾。

本論では、せん断補強のない矩形断面のPCはりのせん断耐力に関するデータを既往の文献等から収集し、プレストレスがせん断耐力に与える影響について検討した。なお、上記のデータにはPC鋼材だけでなく、筆者らが行った連続繊維補強材を緊張材として用いた結果も含まれており、ここでは両者を併せて検討する。

2. 既往のせん断耐力算定式

上記のデコンプレッションモーメントによる評価法によれば、PCはりのせん断耐力は式(1)により求まる。

$$V = V_c + V_p \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V はせん断耐力、 V_c はコンクリートの負担するせん断耐力、 V_p はプレストレスの効果を表す。 V は二羽らの提案式により、 a/d が小さい場合は式(2)²⁾、大きい場合は式(3)³⁾により求まる。

$$V_c = \frac{0.53 f'_c \cdot d^{2/3} (1 + p_w^{1/2}) \{1 + 3.33(r/d)\}}{1 + (a/d)^2} \cdot b d \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$V_c = 0.94 (f'_c p_w)^{1/3} (100/d)^{1/4} \{0.75 + 1.4(d/a)\} b d \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)、 p_w は引張鋼材比(%), d は有効高さ(cm), a はせん断スパン(cm), r は支承部における支圧板の部材軸方向の長さ(cm), b ははりの幅(cm)を表す。

プレストレスの効果 V_p は、せん断スパンの中央断面(以下、 $a/2$ 断面という)がデコンプレッション状態に達するときのせん断力と比較的良く一致することが佐藤らにより示されている⁴⁾。この場合、 V_p は式(4)のようになる。

$$V_p = 2 M_0 / a \quad \dots \dots \dots (4)$$

3. 実験データの概要

3.1 PC鋼材を用いたデータ

既往の文献⁵⁻¹¹⁾および筆者らの行った実験から収集したせん断補強のない、矩形断面のPCはりのせん断試験結果を表-1に示す。No.1~21の供試体では、緊張材にPC鋼棒、その他の供試体ではPC鋼より線をを用いている。表中のせん断耐力の計算値は、式(1)~(4)により算定したものである。

3.2 連続繊維補強材を用いたデータ

(1) 試験概要

連続繊維緊張材として、炭素繊維補強材($E_F = 1.4 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, $f_{pu} = 211 \text{ kgf/mm}^2$)、アラミド繊維補強材($E_F = 0.63 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, $f_{pu} = 140 \text{ kgf/mm}^2$)を用いた。供試体の条件を表-2に示す。

(2) 試験結果

表-1 PC鋼材を用いたデータ

i) 破壊性状

供試体には曲げひびわれから斜めひびわれが発生した。斜めひびわれ発生後も耐荷力を有し、最終的には斜めひびわれ上部のコンクリートがせん断圧縮破壊した。この破壊形式はPC鋼材を用いた場合と同一であった。

ii) せん断耐力

連続繊維補強材を用いた供試体のせん断耐力も、PC鋼材を用いた場合と同様に算定し、表-2に示した。

ただし、 V_c の算定においては、鋼材と連続繊維補強材のヤング係数の相違を考慮して、式(2)、(3)中の引張鋼材比 p_w は $p_w(E_f$

No.	b (cm)	h (cm)	d _p (cm)	d _s (cm)	a (cm)	f'c (kgf/cm ²)	A _p (cm ²)	A _s (cm ²)	有効フレストレス (tf)		V _{test} (tf)	V _{cal} (tf)	文献 No.
									P _u	P _i			
1	15	45	38.0	42.5	99	426	8.04	8.60	—	20.0	17.4	19.2	5
2	15	45	38.0	—	108	383	8.04	—	—	40.0	16.1	23.9	5
3	15	40	33.0	37.5	108	409	8.04	1.43	—	30.0	17.3	17.7	5
4	15	40	33.0	—	108	444	8.04	—	—	30.0	17.0	17.4	5
5	15	40	33.0	37.5	108	417	8.04	8.60	—	10.0	10.1	12.2	5
6	15	40	33.0	37.5	108	432	8.04	8.60	—	20.0	15.2	15.9	5
7	15	40	33.0	37.5	108	405	8.04	8.60	—	30.0	16.5	19.4	5
8	18	24	16.0	20.7	60	282	0.95	5.96	—	6.3	7.5	6.7	6
9	18	24	16.0	20.6	60	282	1.33	5.73	—	13.5	8.7	8.6	6
10	18	24	16.0	20.7	60	282	2.27	3.97	—	18.7	9.7	9.6	6
11	15	30	21.5	27.0	43	590	2.84	1.43	—	28.7	18.0	21.7	7
12	15	30	21.5	27.0	43	580	3.46	1.43	—	35.8	19.0	25.8	7
13	15	30	21.5	27.0	43	726	4.16	1.43	—	44.2	24.0	31.0	7
14	12	24	16.0	21.2	50.5	338	0.95	3.97	—	4.9	5.9	5.5	8
15	12	24	16.0	21.2	60.6	338	0.95	3.97	—	4.9	4.9	4.9	8
16	10	20	14.0	17.0	40	350	0.66	3.97	—	1.8	4.3	3.9	9
17	10	20	14.0	17.0	40	350	0.66	3.97	—	3.6	5.3	4.6	9
18	15	30	21.0	25.0	80	251	2.27	5.73	—	4.9	5.3	6.0	10
19	15	30	21.0	25.0	80	271	2.27	5.73	—	11.4	6.1	7.9	10
20	15	30	21.0	25.0	80	251	2.27	5.73	—	15.5	7.4	8.9	10
21	15	30	15.0	27.3	80	372	2.27	5.73	—	10.1	6.5	6.5	10
22	15	30	21.0	25.0	80	587	2.27	5.73	—	15.1	9.1	10.3	10
23	15	30	21.0	25.0	80	587	2.27	5.73	—	4.2	6.9	7.3	10
24	15	30	15.0	27.3	80	587	2.27	5.73	—	15.5	8.0	8.1	10
25	20	40	32.5	—	105	410	5.57	—	—	5.5	9.8	8.8	11
26	20	40	32.5	—	105	345	5.57	—	—	21.9	12.6	14.4	11
27	20	40	32.5	—	105	535	5.57	—	—	12.5	13.5	12.3	—
28	20	40	32.5	—	105	535	5.57	—	—	18.9	16.0	14.6	—
29	20	40	32.5	—	105	397	12.5	—	4.2	22.6	14.0	16.3	—
30	20	40	32.5	—	105	430	5.57	—	—	18.3	14.5	13.5	—
31	20	40	32.5	—	105	730	5.57	—	—	18.6	17.9	16.3	—
32	20	40	32.5	—	140	431	5.57	—	—	18.0	10.3	11.2	—
33	20	40	32.5	—	70	444	5.57	—	—	18.1	25.9	23.8	—

/E_s)に置換して計算した。ここに、E_s、E_fは鋼材、連続繊維補強材のヤング係数を表す。上記のようにヤング係数比を乗ずることによって、軸剛性を補正する方法はRCはりの試験結果から、妥当な結果を与えることが確認されている¹²⁾。

4. PCはりのせん断耐力に関する検討

4.1 2M_o/aとV_pの試験値の関係

表-1および表-2のデータから、2M_o/aとV_pの試験値(以下、V_{p, test}と記す)を比較した結果を図-1に示す。

ここで、2M_o/aは有効プレストレスから算出した値であり、V_{p, test}はせん断耐力の試験値から、V_cを差引いたものである。この図から、以下の点が把握される。

- ① 2M_o/aとV_{p, test}は概ね比例関係にあり、式(1)の加算則の適用可能性が示唆される。ただし、2M_o/aが大きな領域では、プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響が小さくなる場合もあるようである。
- ② 連続繊維補強材を用いた場合も、2M_o/aとV_{p, test}は概ね比例関係にある。

4.2 デコンプレッション状態の応力を考慮したせん断耐力算定手法に関する検討

前述のとおり、式(1)によりせん断耐力を算定する方法では、デコンプレッション状態における応力状態を無視している。

表-2 連続繊維補強材を用いたデータ

緊張材	No.	b (cm)	h (cm)	d _p (cm)	a (cm)	f'c (kgf/cm ²)	A _p (cm ²)	有効フレストレス (tf)		V _{test} (tf)	V _{cal} (tf)
								P _u	P _i		
炭素	1	20	40	32.5	105	443	4.56	0	12.5	11.2	10.5
	2	20	40	32.5	105	468	4.56	0	18.8	15.0	13.1
	3	20	40	32.5	105	397	4.56	5.1	29.1	13.1	15.4
	4	20	40	35	105	382	2.28	0	19.7	12.5	13.7
	5	20	40	32.5	105	397	9.29	4.8	26.2	14.3	15.9
	6	20	30	25	75	740	4.80	9.3	29.2	20.4	16.7
	7	20	30	25	50	847	4.80	12.8	34.8	32.5	30.3
	8	20	30	25	75	847	4.80	13.8	37.4	22.5	19.7
	9	20	30	25	100	864	4.80	11.4	36.2	15.9	15.7
	10	20	30	25	75	847	4.80	15.3	47.0	24.0	23.4
アラミド	1	20	40	32.5	105	508	5.56	0	11.8	11.5	10.1
	2	20	40	32.5	105	512	5.56	0	17.7	12.5	12.4
	3	20	40	32.5	105	397	6.00	4.6	26.6	13.8	13.9
	4	20	40	35	105	382	3.00	0	18.5	12.0	12.8
	5	20	40	32.5	105	397	12.0	4.5	25.2	13.5	14.2

しかし、デコンプレッション状態における斜引張応力は、デコンプレッション状態以後の斜めひびわれの発生、せん断耐力に影響を与えることが推測される。また、PCはりは一般にせん断圧縮破壊する傾向にあるため、デコンプレッション状態のコンクリートの圧縮縁応力度もせん断耐力に影響を与えることが予想される。

この点を検討するため、デコンプレッション状態における斜引張応力 σ_1 、等曲げスパン内のコンクリートの圧縮縁応力度 σ'_c とせん断耐力の試験値と計算値の比 V_{test}/V の関係を調べた。ここで、 σ_1 および σ'_c は $a/2$ 断面がデコンプレッション状態に達するときの値とし、それぞれをコンクリートの引張強度 f_{ct} 、圧縮強度 f'_c で除し、これらの影響を考慮した。結果は図-2に示すとおりであり、 σ_1/f_{ct} 、 σ'_c/f'_c が大きくなるにつれて、 V_{test}/V は1を下回るようになり、上記の推測がある程度裏付けられる。

図-1において、炭素繊維補強材を用いたデータは $2M_o/a$ が 10tf を越えた範囲においても $V_{p, test}$ との比例関係が比較的保たれているが、これは σ_1/f_{ct} 、 σ'_c/f'_c が比較的小さな値となっているためと考えられる (図-2参照)。

そこで、試験データの範囲で V_{test}/V が1に近似するように、便宜上、プレストレスの効果 V_p を σ_1/f_{ct} 、 σ'_c/f'_c を用いて、式(5)のように補正することとする。

$$V_p = (2M_o/a) \cdot (1.4 - 0.6 \sqrt{\frac{\sigma_1}{f_{ct}} + \frac{\sigma'_c}{f'_c}}) \quad \dots\dots (5)$$

ここで、上式の $2M_o/a$ をコンクリート断面の定数を用いて書き直すと以下ようになる。

$$\frac{2M_o}{a} = \frac{P_o}{3bh} \cdot \frac{1+(6e/h)}{a/h} \cdot bh \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 P_o は有効プレストレス力、 h は部材の高さ、 e は偏心距離を表す。これより、 $2M_o/a$ はプレストレスによる平均圧縮応力度 P_o/bh 、 a/h 、 e/h により表されることがわかる。 σ_1 、 σ'_c もこれらのパラメータによって表すことができる。これらのパラメータと V_{test}/V (V は式(2)あるいは(3)の V_c と

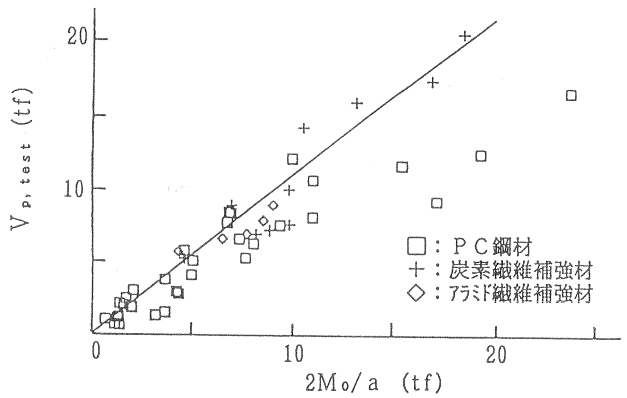
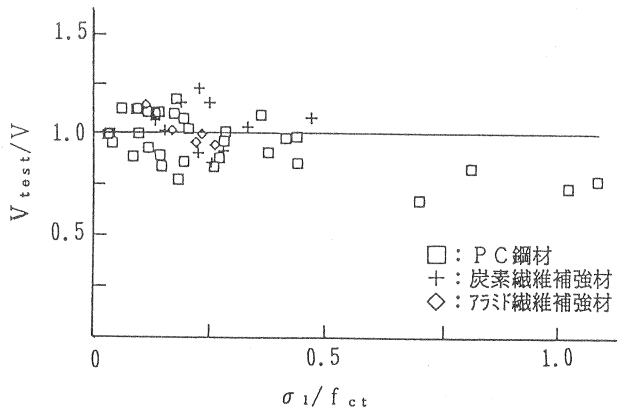
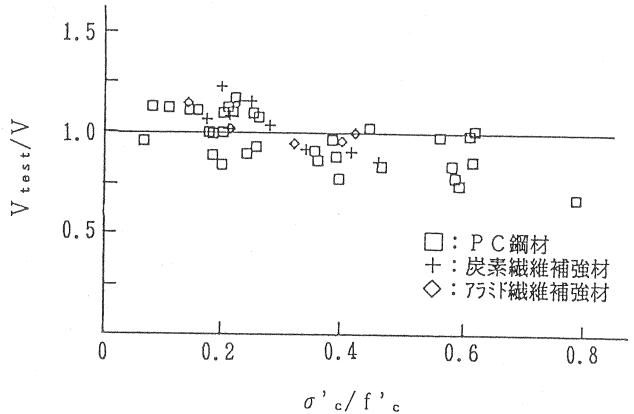


図-1 $2M_o/a$ と $V_{p, test}$ の関係

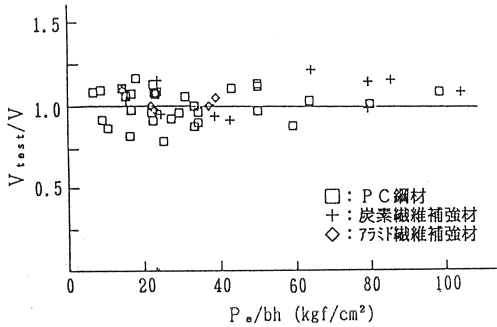


(1) f_{ct} の影響

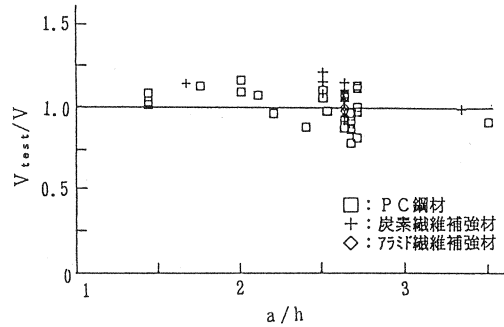


(2) f'_c の影響

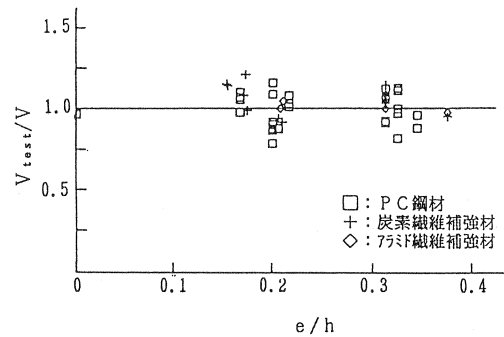
図-2 デコンプレッション状態の応力状態がせん断耐力に与える影響



(1) P_e/bh の影響



(2) a/h の影響



(3) e/h の影響

式(5)の V_p の和を調べた結果を図-3に示す。

全供試体(48体)に対する V_{test}/V の平均値は1.01, 変動係数は9.7%であり, V_{test}/V の値があるパラメータの特定の範囲で偏ることは特に認められず,本データの範囲では式(5)のように $a/2$ 断面のデコンプレッション状態における斜引張応力度 σ_1 およびコンクリートの圧縮縁応力度 σ'_c を考慮することによって,せん断耐力が比較的精度よく算定できることが確認された。

5. まとめ

以上の検討から得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) PCはりのせん断耐力は,コンクリートの負担するせん断耐力を V_c ,プレストレスの効果を V_p として加算則により算定できる。
- (2) 連続繊維補強材を用いたPCはりのせん断耐力は,PC鋼材を用いた場合と同様の方法により算定できる。
- (3) プレストレスの効果 V_p は,デコンプレッションモーメント M_0 だけでなく,デコンプレッション時の斜引張応力度,コンクリートの圧縮縁応力度等の応力状態を考慮することにより,比較的精度よく算定することが可能である。

[参考文献]

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書(平成3年版)改定資料およびコンクリート技術の今後の動向,コンクリートライブラリー第70号,1992
- 2) 二羽淳一郎:FEM解析に基づくディーブームのせん断耐力算定式,第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集,日本コンクリート工学協会,1983
- 3) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村 再:せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価,土木学会論文集第372号,1986
- 4) 佐藤 勉・山住克己・渡邊忠朋:プレストレストコンクリートはりのせん断強度,鉄道総研報告,Vol.2, No.2, 1988
- 5) 佐藤 勉・石橋忠良・山下裕章・高田三郎:プレストレストコンクリートはりのせん断耐力と破壊性状,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, 1987
- 6) 六車 照,渡辺史夫,藤井正則: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的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.5, 1983
- 7) 斎藤敦志,堺 孝司:高強度・高耐久性コンクリートを用いたPCはりの曲げ,せん断挙動,開発土木研究所月報, No.440, 1990
- 8) 岡田 清,小林和夫,豊福俊英:Ⅲ種プレストレストコンクリートはりの曲げせん断特性,セメント技術年報 34, 1987
- 9) 小林和夫:はり部材のせん断耐荷特性に対する導入プレストレスの効果,第46回セメント技術大会講演集, 1992
- 10) 上田多門,ル ルジュテ,エゴ フロ:せん断補強鉄筋の無いプレストレストコンクリート梁のせん断耐力の解析的研究,プレストレストコンクリート, Vol.33, No.2
- 11) 手塚正道,近藤 順,岡崎正樹:ビニロンFRPロッドをスターアップとして用いたはりのせん断試験,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, 1990
- 12) 土木学会:連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用,コンクリートライブラリー第72号,1992