

## 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ 拘束性能の試験方法

### STUDY ON TESTING METHOD FOR CRACK ARREST ABILITY OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

小林 一 輔\*・趙 力 采\*\*

By Kazusuke KOBAYASHI and Ryokche CHO

#### 1. はしがき

鋼繊維補強コンクリートは、普通コンクリートに比べてひびわれ発生に対する抵抗性が大きく、またいったんひびわれを生じても容易に拡大しない特性があるので、特に重交通の舗装や建築の仕上げモルタルなどに適用すると効果的である。しかし、このようなすぐれた特性もこれを定量的に評価する方法がまだ確立されていないために、有効に活用されるまでに至っていない。

本文では鋼繊維補強コンクリートの以上のような特性をひびわれ拘束性能と名づけ、これを定量的に評価する方法を提案したものである。すなわち、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験方法として、鉄筋の付着性能試験に用いられている両引き試験を応用した方法を考案し、その適用性を確かめた。さらにこの試験方法により、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能に及ぼす鋼繊維の長さや種類、繊維混入率ならびにコンクリートマトリックスの配合（細骨材率、粗骨材最大寸法および水セメント比）の影響を定量的に評価したものである。

#### 2. 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能とその試験方法について

鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能は、ひびわれ発生に対する抵抗度とひびわれの拡大に対する抵抗度によって評価することになる。このような特性の試験方法としては、直接引張試験や曲げ試験による方法が考えられるが、直接引張試験に関しては、① 特殊な形状寸法の供試体や載荷装置を要すること、② 偏心載荷の影響を除くことが非常に難しいこと<sup>1)</sup>、③ ひびわれ発

生後の挙動を求めるためには剛性試験機等を要すること<sup>2),3)</sup>、などが問題となる。一方、曲げ試験は載荷に伴う断面内の応力状態が複雑で、しかも破壊過程も特殊であるので、このような目的に対して適切な方法とはいえない。

著者らは、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生とその拡大に対する抵抗度を適切に評価するための方法を検討するにあたって次の2点を考慮した。

すなわち、ひずみ制御に近い状態で載荷できることと単軸引張応力状態のもとでひびわれの発生と拡大に対する抵抗度が簡便に測定できることである。これらの条件を満足する方法として、著者らは両引き方法による鉄筋の付着試験を応用した試験方法を考案した。この方法は図-1に示すような試験体を用いるものであるが、一般の両引き試験用供試体と異なる点は、① 鋼繊維補強コンクリート部分に単軸引張応力状態を作り出すために、試験体の中央部の一定区間は鋼棒とコンクリートとの付着を省いている点、② ひびわれの発生位置をあらかじめ決めておき、ひびわれ幅の測定を容易にするために、コンクリート角柱体の中央部の1つの相対する面に切欠きを設けている点、③ 付着を除く区間の中央部分の鋼棒とコンクリートの表面にワイヤーストレーンゲージを貼付して、引張荷重-ひずみ曲線を求めている点の3点である。両引き試験の場合、その目的は鉄筋の付着性能を調べることにあり、本方法ではコンクリートのひびわれ拘束性能を調べることを目的とし、この場合鋼棒はひずみ制御の役割を果たすと同時に、ほとんど偏心

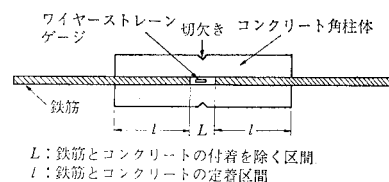


図-1 両引き試験用供試体

\* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

\*\* 正会員 東京理工専門学校教授

による曲げの影響を除いた状態で載荷するための手段となっている。

本文では、この両引き方法による鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験方法の適用性を確かめるとともに、この方法を用いて鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能を評価した結果を示したものである。

### 3. 実験方法

#### (1) 試験用供試体

コンクリート角柱体の断面は、①市販の鋼繊維を用いて3次元ランダムに近い配向状態を確保できること、②鋼棒のかぶり厚さを30mm程度にとれることを条件としさらに取り扱いの便を考慮して10×10cmとした。一方、鋼棒は直径が19mmの機械構造用棒鋼(S53C)を用い、コンクリートとの付着を断つ部分以外の部分は定着力を十分確保するために、 $W 3/4"$ (谷径:15.8mm, 有効径:17.4mm)のらせん状のねじ切り加工を行った。このような品質、寸法の鋼材を用いると、その降伏荷重がコンクリート部分(10×10cm断面)のみの直接引張によるひびわれ荷重よりも2倍程度大きくなる。

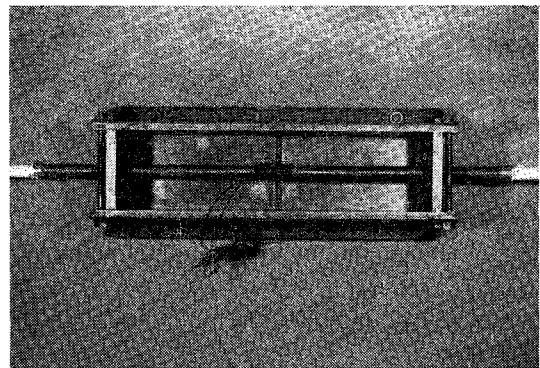
このような方法で鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験を行う場合には、まず供試体における鋼棒のコンクリートとの付着を除く区間の長さ、鋼棒のコンクリートとの定着長、コンクリート角柱体の長さならびにコンクリート断面の切欠きの深さ等を検討して、ひびわれ拘束性能の測定に適した供試体の形状寸法を決定する必要がある。表一1は上記の検討要因と水準を示したものであって、コンクリート角柱体の長さが40cmの場合はいずれも長さが100cmの鋼棒、角柱体の長さが60cmの場合は長さが120cmの鋼棒を用いた。写真一1は型枠の形状と鋼棒ならびに切欠きの設置状態を示したものであって、供試体中央部の切欠きは打込み方向の上下面に設けることとし、上面はコンクリート打込み後に設置した。一方、鋼棒のコンクリートとの付着を除く区間の中央部の表面にゲージ長5mmのワイヤーストレーンゲージを貼付した。

#### (2) 鋼繊維とコンクリートマトリックス

鋼繊維は、硬鋼線を切断して製造した3種のカットワイヤーと、冷延鋼板をせん断して製造した3種のせん断ファイバーを用いた。これらの形状寸法を表一2に示す。なお、カットワイヤーとせん断ファイバーは、それぞれ直径または断面寸法を一定として長さを変化させたもので、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能に及ぼす鋼繊維の長さの影響を検討する実験に用いた。一

表一1 供試体の形状寸法の検討要因

繊維混入率 $V_f(\%)$	角柱体長さ (cm)	付着を除く 区間長 $L(\text{cm})$	定着長 $l(\text{cm})$	切欠き深さ $a(\text{mm})$
0	40	5	17.5	10
		7.5	16.3	
		10	15.0	
		15	12.5	
	60	5	17.5	5
		5	17.5	10
1.0	40	5	17.5	10
		7.5	16.3	
		10	15.0	
		15	12.5	
	60	5	17.5	5
		5	17.5	10
1.5	40	5	17.5	10
	60	5	17.5	10



写真一1 型枠と鋼棒および切欠きの設置状態

表一2 鋼繊維の形状特性

種類	アスペクト比 ( $l/d$ )	直径 $d(\text{mm})$	長さ $l(\text{mm})$
カット ワイヤー	60	0.25	15
	80	0.25	20
	120	0.25	30
種類	アスペクト比 ( $l/d$ )	断面 (mm)	長さ $l(\text{mm})$
せん断 ファイバー	36	0.5×0.5	20
	54	0.5×0.5	30
	71	0.5×0.5	40

方、寸法が0.5×0.5×30mmのせん断ファイバーは供試体の形状寸法の検討、ひびわれ拘束性能に及ぼすコンクリートマトリックスの水セメント比、細骨材率と粗骨材最大寸法の影響の検討に用いた。表一3は本実験でマトリックスとして用いたモルタルとコンクリートの配合を示したものであって、スランプはいずれも $12 \pm 2\text{cm}$ とした。鋼繊維補強コンクリートは、表一3のコンクリートマトリックス中にそれぞれ表一2の鋼繊維を外割りで0.5%、1.0%と1.5%(容積百分率)混入して製造した。ひびわれ拘束性能に及ぼす細骨材率の検討には

表-3 コンクリートマトリックスの配合

番号	W/C (%)	s/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				減水剤 C×0.2 (%)
				W	C	S	G	
I	50	60	10	220	440	1006	673	0.88
II	50	80	10	229	458	1307	329	0.92
III	50	100	5	288	575	1389	0	1.15
IV	40	60	10	250	625	866	580	1.25
V	60	60	10	210	350	1066	715	0.70
VI	50	60	15	220	440	1006	678	0.88
VII	50	60	20	220	440	1006	681	0.88

配合 I, II と III を用い, 試験用供試体の形状寸法の検討には配合 I を用いた. 一方, ひびわれ拘束性能に及ぼす粗骨材最大寸法の影響の検討には 配合 I, VI および VII を用い, 水セメント比の影響の検討には 配合 IV, I と V を用いた. なお, セメントは早強ポルトランドセメントを用い, 細骨材と粗骨材はそれぞれ川砂と砕石を用いた.

(3) 測定方法

試験機は容量 100 t の電子管平衡式リーレ型万能試験機(島津 REH-100)を用いた. 引張载荷はいずれもコンクリートの材令が 14 日に達した試験体の表面にゲージと, π型変位計を張りつけて試験機の上下のチャックを介して試験体の両端の鋼棒に一定の载荷速度(鋼棒の引張応力度の増加が毎分 500 kg/cm<sup>2</sup>)で引張力を与えて行った. なお, 上限荷重は鋼棒の降伏荷重の約 60% の 7 t までとした. 一方, ひびわれ発生位置の引張荷重と鋼棒のひずみならびにコンクリート表面のひずみとの関係は, 鋼棒とコンクリート表面に貼付したワイヤーストレーンゲージからのひずみを X-Y レコーダーの X 軸に試験機の荷重を, Y 軸に入力して描かせた. また, 引張荷重とひびわれ幅との関係は切欠き部分の隅角部に

4 個の π 型変位計(感度 1900×10<sup>-6</sup>/mm)を取りつけて連続的に測定した.

4. 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の評価方法とその適用性

(1) 両引き試験による引張荷重と鋼棒のひずみ, コンクリート表面のひずみおよびひびわれ幅との関係

図-2 (a), (b) および (c) は, 鋼繊維補強コンクリートおよびプレーンコンクリートについて両引き試験を実施した結果得られたもので, それぞれ引張荷重と供試体切欠き部の位置における鋼棒のひずみ ( $\epsilon_s$ ), コンクリート表面のひずみ ( $\epsilon_c$ ) およびひびわれ幅 ( $W$ ) との関係を示したものである. 図-2 (a) から明らかなようにプレーンコンクリートの場合には, 引張荷重-ひずみ曲線 OABC に示されるように, ひびわれ発生 (A 点) とともにコンクリートが分担している引張力 ( $T_1$ ) が鋼棒に移行し, その後の引張荷重-ひずみ挙動 (BC) は鋼棒のみの引張荷重-ひずみ曲線と一致する. これに対して, 鋼繊維補強コンクリートの場合 (OA'B'C') にはプレーンコンクリートに比べて, ひびわれ荷重が増大するのみならず, その時点で分担している引張力 ( $T_1'$ ) の鉄筋への移行部 ( $T_1'-T_2'$ ) が比較的小さく, その後も鋼繊維のブリッジ作用によって引張力を分担していることがわかる. また, 図-2 (b) は 図-2 (a) との対比より明らかなように, 引張荷重とコンクリート表面のひずみならびに鉄筋のひずみとの関係は, ひびわれ荷重に達するまではまったく一致し, プレーンおよび鋼繊維補強コンクリートの切欠き部分が単軸引張応力状態となっていることを示している. このことは, 図-2 (a) の A 点または A' 点に相当するひびわれ荷重の値, ならびにその点に至るまでの荷重ひずみ曲線 (OA または OA') を 図-2 (b) における a 点または a' 点ならびに Oa または Oa' として求め得ることを意味するものであって, これらの関係を用いて鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度を定量化することが可能である. 一方, 図-2 (c) は引張荷重とひびわれ幅との関係を示したものであって, 図-2 (c) より 図-2 (a) における  $T_1$  の大きさに関係した値を求め, これに

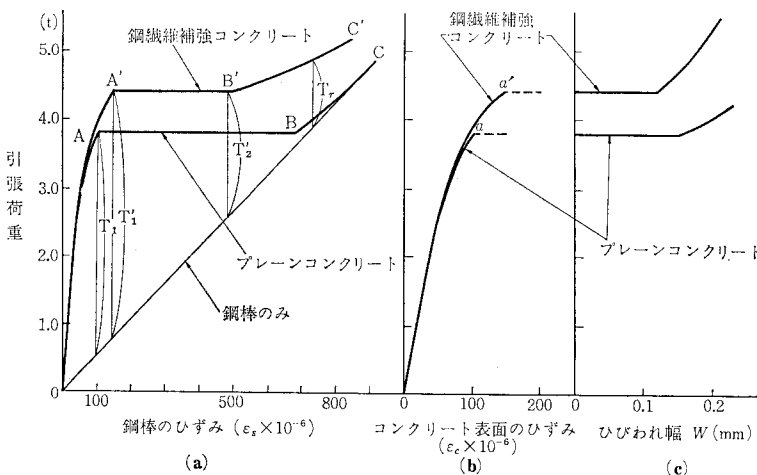


図-2 両引き方法による引張荷重と鋼棒のひずみ, 供試体表面のひずみおよびひびわれ幅との関係

に

よって鋼繊維補強コンクリートのひびわれの拡大に対する抵抗度を求めることが可能である。

(2) ひびわれ発生に対する抵抗度の評価方法

本研究では、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度を、両引き試験によるコンクリートの分担力が最大となる時点、すなわち図-2(a)のAとA'点における分担力 ( $T_1$  および  $T_1'$ ) を用いて定量化することにした。両引き試験によって求めたこのような分担力によって鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度の指標とした理由は、① この分担力から次式を用いて求めた引張強度が図-3に示すように、直接引張試験によって求めた引張強度とよく一致することが確かめられたこと<sup>4)~6)</sup>、② 直接引張試験によって求めた鋼繊維補強コンクリートの可視ひびわれ強度と引張強度との間には、ある一定の関係が存在すること<sup>7)</sup> などからこの分担力と鋼繊維補強コンクリートの可視ひびわれ強度との間には密接な関係があることが明らかになったためである。

$$\delta_f = \frac{\text{コンクリートの分担力}}{\text{コンクリートの断面積}} = \frac{T_1 \text{ または } T_1'}{S}$$

(3) ひびわれの拡大に対する抵抗度に及ぼす試験体の形状寸法の影響

a) コンクリート角柱体長さの検討

図-4は断面(10×10 cm)と切欠き深さ(1 cm)、ならびに鋼棒とコンクリートとの付着を除く区間長(5 cm)を一定とした場合のコンクリート角柱体長さ(40 cm と 60 cm)、すなわち鋼棒とコンクリートとの定着長(17.5 cm と 27.5 cm)がひびわれ発生状況に及ぼす影響を示したものである。なお、この場合プレーンコンクリートと繊維混入率が1.0%と1.5%の鋼繊維補強コンクリートを用い、いずれも7tまで引張荷重を加えた。この図から明らかなように、角柱体長さが40 cmのものは、いずれの場合も切欠き部にのみひびわれを生じたのに対して、60 cmの場合はいずれも複数のひびわれ(数字は発生順を示す)が生じ、繊維混入率が1.5%の鋼繊維補強コンクリートでは4本のひびわれが生じていることがわかる。このことは鋼棒のコンクリートとの定着長として27.5 cmは長すぎることを示しており、複数のひびわれの相互作用がひびわれ幅に影響を及ぼしたことが考えられる。

図-5は上記供試体における引張荷重と切欠き部のひびわれ幅との関係を示したものであるが、明らかに角柱体長さが60 cmの場合、プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートのいずれにおいても、切欠き部以外のひびわれの発生に起因して、ひびわれ発生時に拡大す

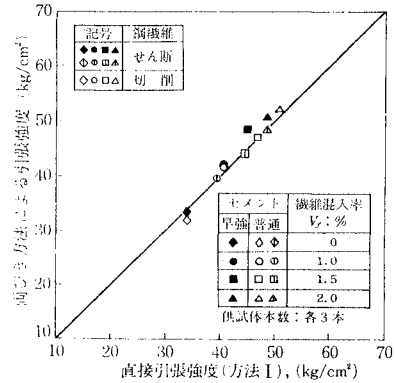


図-3 両引き方法による引張強度と直接引張強度との関係

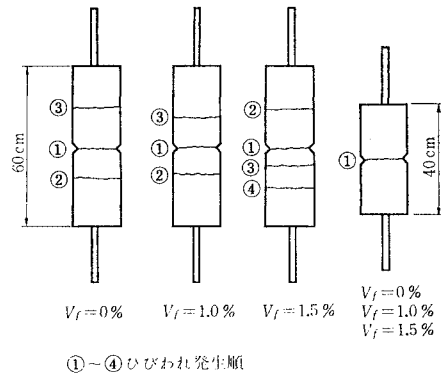


図-4 コンクリート角柱体長さの変化によるひびわれ発生状況

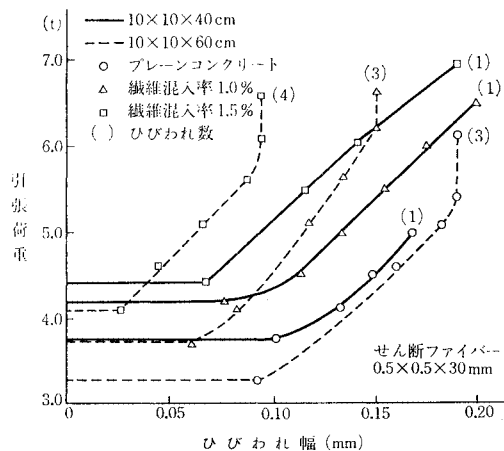


図-5 コンクリート角柱体長さが引張荷重とひびわれ幅との関係に及ぼす影響

るひびわれ幅が40 cmの場合よりも小さくなるのがわかる。これらの結果はコンクリート断面が10×10 cmの場合、本文で定義したひびわれの拡大に対する抵抗度を評価するのに適している供試体長さは、40 cmの方が60 cmよりもよいことを示している。

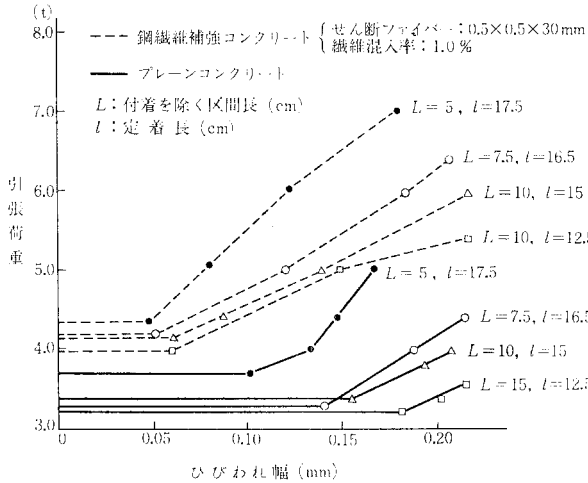


図-6 鋼棒とコンクリートとの付着を除く区間長が引張荷重とひびわれ幅との関係に及ぼす影響

b) 鋼棒の付着を除く区間長と定着長の検討

図-6 は鋼棒とコンクリートとの付着を除く区間長(5, 7.5, 10 および 15 cm) が引張荷重とひびわれ幅との関係に及ぼす影響を示したものであって、この場合のコンクリート角柱体長さは前述の結果に基づき 40 cm としてある。この図から明らかなのは、プレーンおよび鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合も、鋼棒のコンクリートとの付着を除く区間長が長いものほど、ひびわれ発生時に拡大するひびわれ幅が大きくなり、さらにその後の引張荷重の増大に際しても同一引張荷重時のひびわれ幅が大きくなる傾向が認められることである。本実験における鋼棒の役割はコンクリート角柱体の切欠き部に引張力を与えることであるが、これらの結果はコンクリート角柱体端面からの鋼棒の拔出しによる影響、およびひびわれ発生後コンクリートが分担している引張力の鋼棒への移行によるコンクリートとの付着を除いた区間の伸びの影響のいずれかに起因するものと思われる。図-7 (a) と (b) は、それぞれ鋼棒のコンクリートとの付着を除く区間長が 5 cm と 15 cm の場合の引張荷重と鋼棒の供試体端からのすべり量との関係、ならびに引張荷重と切欠き部の鋼棒およびコンクリート表面のひずみとの関係を示したものである。図-7 (a) から明らかのようにプレーンおよび鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合も、付着を除く区間長が 5 cm と 15 cm における引張荷重

すべり曲線は大差なく、しかも、図-7 (b) より切欠き部の鋼棒のひずみとコンクリート表面のひずみとがひびわれ荷重までほぼ一致していることがわかる。このことは図-6 において明らかにされた傾向が鋼棒のコンクリートとの付着を除いた区間の伸びに起因するものであることを示している。さらに同図において認められた、区間長の長いものが引張荷重の増大に伴ってよりひびわれ幅が増大する理由は、その区間の伸び量が大きいものほど急激なひびわれ幅の拡大による鋼繊維のマトリックスからの引抜けが生じて、急速に耐荷力を失うことに起因するものと考えられる。したがって、本研究における断面 (10×10 cm) においては、ひびわれに対する抵抗度に関する諸量を精度よく評価するために、鋼棒のコンクリートとの付着を断つ区間長として、ひびわれ荷重時に生ずる急激なひびわれの拡大を比較的よく制御していると思われる 5 cm を用いることにした。

一方、本両引き方法においては切欠き部のコンクリートに生ずる単軸引張応力状態が定着部分における鋼棒とコンクリートとの定着力によってもたらされるので、十分な定着長を有しなければならない。一般に、異形鉄筋とコンクリートとの付着は割裂き作用で生じる縦ひびわれの発生と同時にその付着効果が失われることになる<sup>8)</sup>。したがって本方法の場合、試験荷重以内で過度の縦ひびわれが生じた場合にはひびわれの拡大に対する抵抗度を正しく評価することができない。しかし、本実験で用いた供試体で定着長さがそれぞれ 12.5, 15, 16.3 および 17.5 cm の場合の縦ひびわれ発生荷重は 6.0 t 前後であって、ひびわれ幅が 0.2 mm 程度に達する場

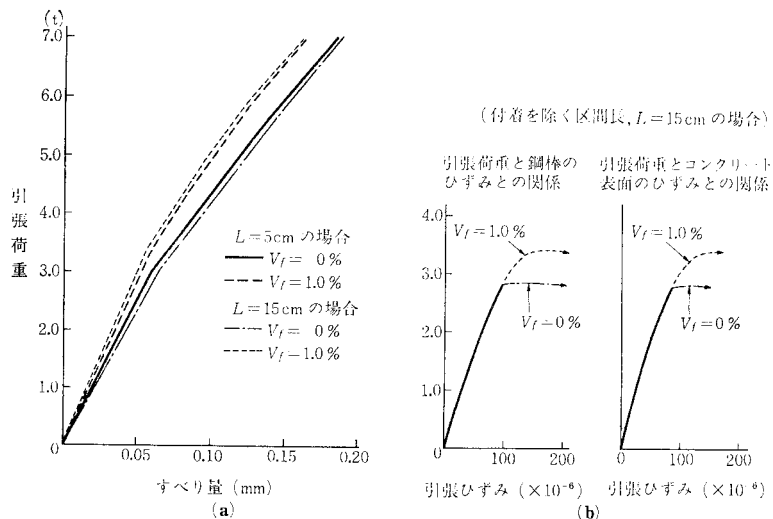


図-7 付着を除く区間長が鋼棒のすべり量と引張荷重-ひずみ曲線に及ぼす影響

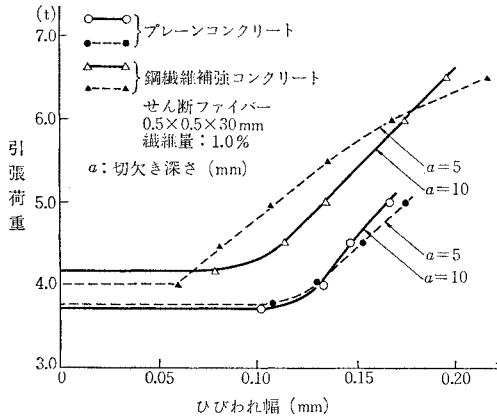


図-8 切欠き深さが引張荷重とひびわれ幅との関係に及ぼす影響

合の抵抗度を評価するにはいずれも十分な定着長であった。

c) コンクリート断面の切欠き深さの検討

図-8 はコンクリート角柱体の長さを 40 cm、鋼棒のコンクリートとの付着を除く区間長を一定 (5 cm) とした場合の中央部の切欠き深さ (5 mm と 10 mm) が、引張荷重とひびわれ幅との関係に及ぼす影響を示したものである。図から明らかなように、切欠き部深さが 5 mm と 10 mm のいずれの場合もほぼ同様な傾向を示しており、この範囲の切欠き深さの変化は、ひびわれ発生時に生ずるひびわれの拡大の程度にあまり影響を及ぼさないようである。

d) 両引き試験の引張荷重-すべり曲線とひびわれ幅との関係について

引張荷重に対する角柱体端面と鉄筋との相対すべり量、およびひびわれ幅との関係を示したものが図-9 である。これらの図より明らかなことは、① プレーンおよび鋼繊維補強コンクリートのいずれの場合も、ひびわれ発生以後におけるひびわれ幅と引張荷重との間には比例関係が存在するが、その直線の傾きはプレーンコンクリートに比して、鋼繊維補強コンクリートの場合、やや小さくなる傾向が認められる。② プレーンコンクリートを用いたものは、角柱体端面と鋼棒との相対すべり量がひびわれ幅のほぼ 1/2 に近い値となるが<sup>9)</sup>、鋼繊維補強コンクリートの場合にはこれよりも一般に大きい値となる。③ 鋼繊維補強コンクリートを用いた場合の相対すべり量は繊維混入率が大きくなるに従って小さくなることなどである。① の結果は一般の両引き試験における場合と同様に<sup>10)</sup>、コンクリートとの付着を除いた区間の鋼棒の伸びによってひびわれ幅が拡大することによるものであって、② の結果はひびわれをブリッジした鋼繊維の引抜け抵抗が引張荷重の増大に伴って減少する

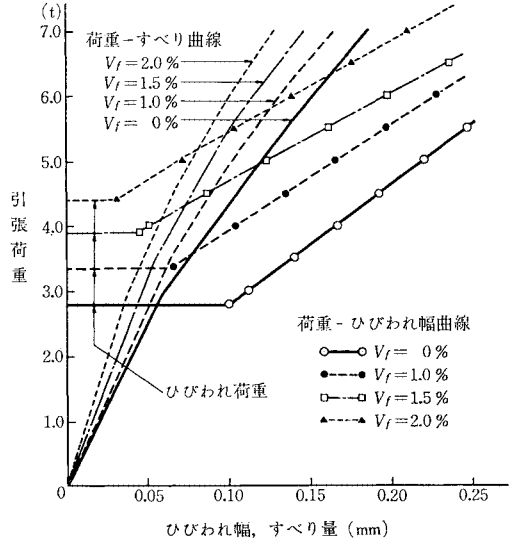


図-9 繊維混入率が引張荷重とすべり量ならびにひびわれ幅との関係に及ぼす影響

ことによるものと考えられる。一方、③ の結果は引抜き試験による鋼繊維補強コンクリートの鉄筋との付着強度が繊維混入率とともに増大するという既往の結果<sup>11)</sup>と関連するものであって、付着強度の増大に起因するものと考えられる。

(4) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の評価方法

図-10 (a) は両引き試験によって得られるプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの引張荷重と供試体切欠き部における鋼棒のひずみとの関係を示し、図-10 (b) は同様に引張荷重とひびわれ幅との関係を示したものである。著者らは、両引き試験結果を図-10 のように表示することによって、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度とひびわれの拡大に対する抵抗度を定量的に把握しようとしたものである。すなわち、ひびわれ発生に対する抵抗度に関してはプレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートのひびわれ荷重 (それぞれ  $P_p$  と  $P_s$ ) のみならず、ひび

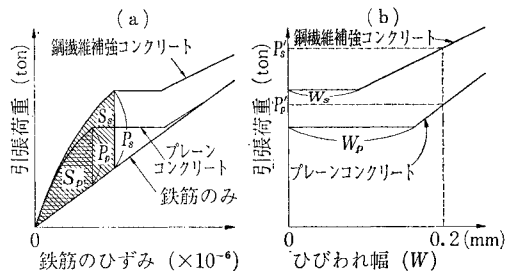


図-10 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の評価方法

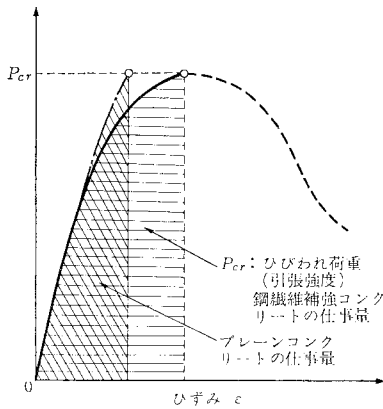


図-11 鋼繊維補強コンクリートの応力ひずみ曲線と仕事量

われ時までの引張荷重-ひずみ曲線と鋼棒のみのひずみ曲線とによって囲まれた面積，すなわちひびわれ発生時までの仕事量（それぞれ  $S_p$  と  $S_s$ ）の両者から評価することにした（図-10 (a) 参照）．ひびわれ発生に対する抵抗度を評価するために後者の量を加えた理由は次のとおりである．すなわち 図-11 に示すように鋼繊維補強コンクリートの可視ひびわれ応力度までの応力ひずみ曲線は可視ひびわれ発生直前に著しく非線形となる<sup>13)</sup>．このことは，たとえば同一ひびわれ荷重(引張強度)のプレーンコンクリートと比較した場合，ひびわれ荷重からみた抵抗度は等しいことになるが，ひびわれを発生させるのに要した仕事量は明らかに鋼繊維補強コンクリートの方が大きくなる．ひびわれ発生に要する仕事量もひびわれ発生に対する抵抗度の一面を表していると考えられるので，鋼繊維補強コンクリートのような疑似塑性領域を有するような材料のひびわれ発生に対する抵抗度の評価には，ひびわれ荷重のみでは片手落ちであり上記の仕事量もあわせて評価することにしたのである．一方，ひびわれの拡大に対する抵抗度に関しては，ひびわれ荷重時に発生するひびわれの大きさ（それぞれ  $W_p$  と  $W_s$ ），ならびにひびわれ幅が所定の値（ここでは 0.2 mm）にまで拡大したときの荷重（それぞれ  $P_p'$  と  $P_s'$ ）の両者によって評価することにした（図-10 (b) 参照）．

(5) ひびわれ拘束性能の変動について

表-4 はひびわれ拘束性能の評価に用いる値の変動をプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの両者について示したものである．なお，コンクリートの配合は水セメント比 50%，粗骨材最大寸法 15 mm，細骨材率 60%，繊維混入率 1.5% としたものである．この表より，① ひびわれ拘束性能の評価に用いる値の変動はひびわれ荷重時に発生するひびわれの大きさ（ $W$ ）を除けば，プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートとの間にほとんど差がなく，変動の程度も変動係数で 10% 以内におさまること，② 鋼繊維補強コンクリートにおけるひびわれ荷重時に発生するひびわれの大きさ（ $W$ ）の変動は非常に大きいことなどがわかる．前者の結果はひびわれ荷重（ $P$ ），ひびわれ発生時までの仕事量（ $S$ ）ならびにひびわれ幅が所定の値にまで拡大したときの荷重（ $P'$ ）などの値を用いて，鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能をかなりの精度で評価できることを示している．後者の結果に関してはその原因が明らかでないが，いずれにしてもこのような変動の大きい値をひびわれ拘束性能の評価に用いることは好ましくないで，ひびわれの拡大に対する抵抗度を表すものとしてはひびわれ幅が所定の値にまで拡大したときの荷重のみを用い，ひびわれ荷重時に発生するひびわれ幅の値は用いないことにした．

5. 鋼繊維補強 コンクリートのひびわれ拘束性能に及ぼす各種要因の影響

(1) 概要

4. で明らかにした方法を用いて，鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能と，これに及ぼす繊維混入率，繊維の長さおよび種類，コンクリートの配合などの影響を調べた結果を以下に示す．

(2) ひびわれ拘束性能に及ぼす鋼繊維の諸特性の影響

a) 繊維混入率の影響

表-4 ひびわれ拘束性能とその評価に用いる値の変動（供試体数 8 個）

諸 元	プレーンコンクリート			鋼繊維補強コンクリート		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
ひびわれ荷重 ( $P$ )	2.70 t	0.22 t	8%	3.76 t	0.26 t	7%
ひびわれ発生時までの仕事量 ( $S$ )	5.90 cm <sup>2</sup>	0.49 cm <sup>2</sup>	8%	10.10 cm <sup>2</sup>	0.81 cm <sup>2</sup>	8%
ひびわれ荷重時に拡大するひびわれ幅 ( $W$ )	0.10 mm	0.01 mm	10%	0.05 mm	0.02 mm	40%
0.2 mm のひびわれ幅時の荷重 ( $P'$ )	4.66 t	0.19 t	4%	6.62 t	0.29 t	4%

図-12 (a) と (b) は鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度，すなわちひびわれ荷重とひびわれ発生時までの仕事量に及ぼす繊維混入率の影響を示したものである。この図より ① ひびわれ発生に対する抵抗度は繊維混入率がある一定の限界値（約 0.6%）に達するまではプレーンコンクリートと大差がないが，その後は繊維混入率とともにほぼ直線的に増大すること，② ひびわれ発生時までの仕事量は図中に示したプレーンコンクリートに対する百分率（かっこ内数字）からもわかるように，ひびわれ荷重の場合に比して繊維混入率の増大に伴う増加率が大きいこと，などが明らかである。① の結果は直接引張強度と繊維混入率との関係においても認められる<sup>3)</sup> ものであって，この限界値以下の繊維混入率では，コンクリートマトリックスの変形を拘束することが困難であることを示している。

一方，繊維混入率が増すとともに，ひびわれ発生までの引張荷重ひずみ曲線の非線形部分が多くなり，プレーン

コンクリートに比べてみかけの塑性挙動が顕著となるが，このことは引張荷重ひずみ曲線によって囲まれた面積を増すことになる。② の傾向はこのような理由によるものと思われる。

図-12 (c) は，ひびわれの拡大に対する抵抗度を表す同一ひびわれ幅時の荷重に対する繊維混入率の影響を示したものである。この図から明らかなことは，① ひびわれ発生に対する抵抗度の場合と同様に，ひびわれ拘束性能を改善する 限界の繊維混入率が存在すること，② その後の同一ひびわれ幅時の荷重と繊維混入率との関係はほぼ直線関係となり， $V_f=1.5\%$  における値はプレーンコンクリートの約 1.4 倍になっていることなどである。

**b) 繊維の長さおよび種類の影響**

図-13 (a) と (b) は，ひびわれ発生に対する抵抗度に及ぼす繊維の長さの影響を，それぞれ 2 種類の繊維について示したものである。これらの図から明らかなことは，繊維混入率と繊維の直径を一定とした場合，① いずれの繊維を用いたものも，その長さはひびわれ荷重およびひびわれ発生時までの仕事量にほとんど影響を及ぼさないこと，② カットワイヤーに比しせん断ファイバーを用いた場合，ひびわれ荷重とひびわれ発生時までの仕事量が大きくなることなどである。① の結果は鋼繊維補強コンクリートの引張強度が，直径を一定とした場合，鋼繊維の長さに影響されないとする繊維間隔説の妥当性を裏づけるもの

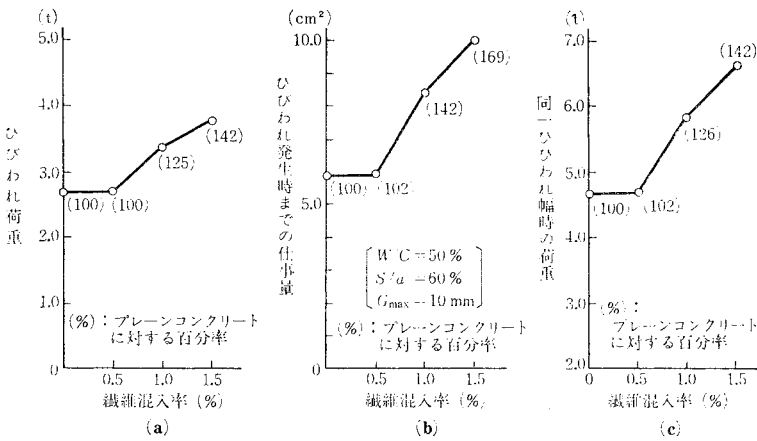


図-12 ひびわれ拘束性能と繊維混入率との関係

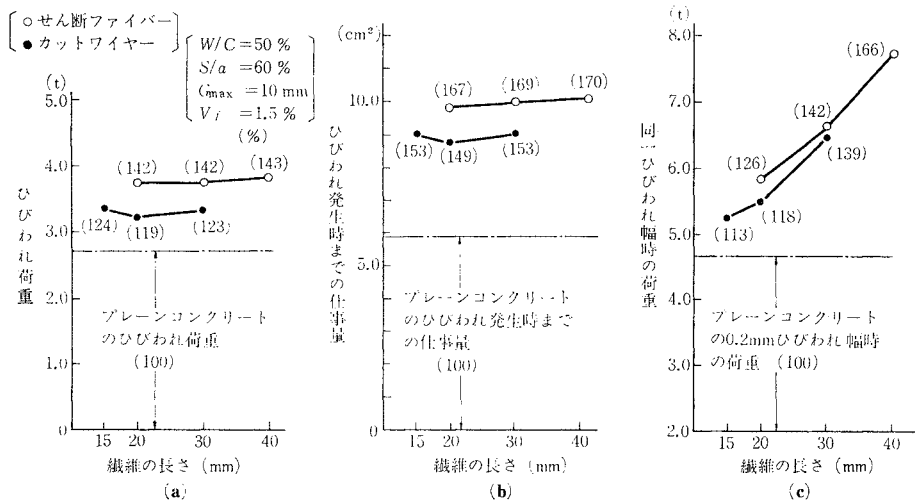


図-13 ひびわれ拘束性能と繊維の長さとの関係



である。また②の結果は繊維の表面形状の相違による鋼繊維とコンクリートとの付着強度の差に起因するものである。以上の結果は、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生に対する抵抗度に影響を及ぼす主要因は繊維混入率であって、繊維の長さはほとんど影響を及ぼさないことを示すものである。一方、図-13(c)は同一ひびわれ幅時の荷重に及ぼす繊維の長さの影響を示したものである。この図より明らかなように、同一ひびわれ幅時の荷重は繊維の長さが長くなるに従って著しく増大する。図-12(c)と図-13(c)との対比からも明らかなよう

に、ひびわれの拡大に対する抵抗度は繊維混入率および繊維の長さの両者に著しく影響されることになる。

(3) ひびわれ拘束性能に及ぼすコンクリートマトリックスの影響

a) 細骨材率の影響

図-14(a), (b) および (c) は、それぞれ前二者がひびわれ発生に対する抵抗度、後者がひびわれの拡大に対する抵抗度に及ぼす細骨材率の影響を示したものである。これらの図より明らかなことは、鋼繊維補強コン

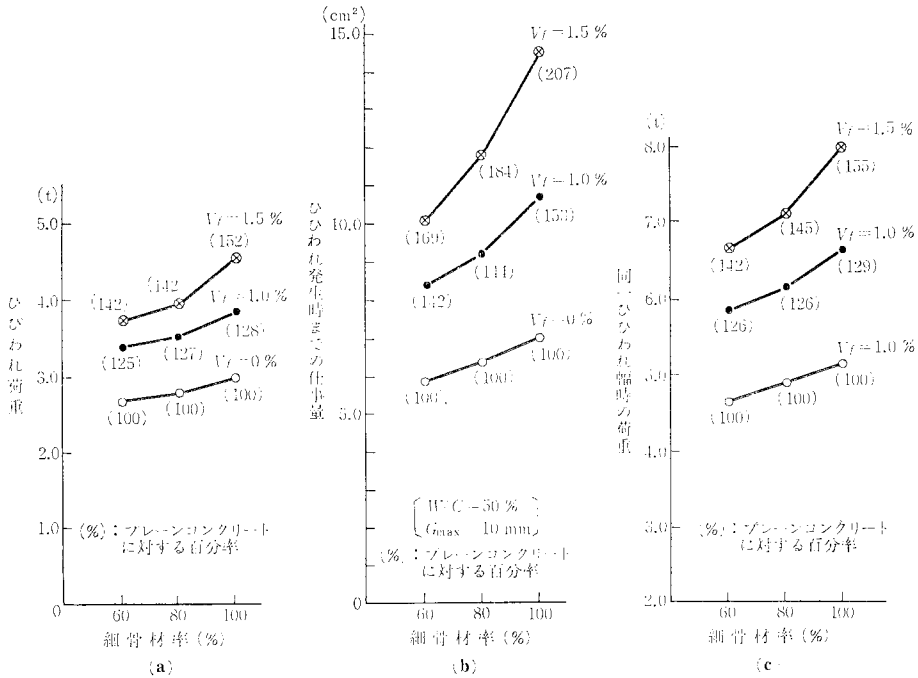


図-14 ひびわれ拘束性能と細骨材率との関係

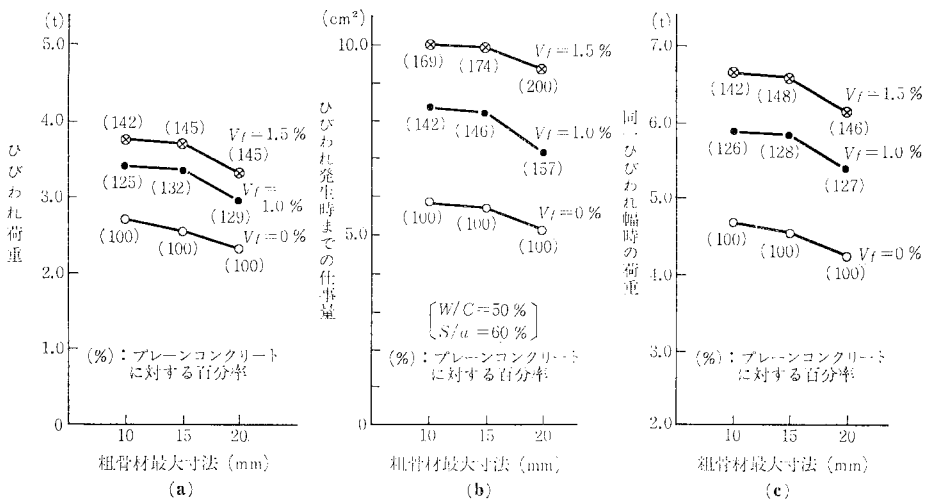
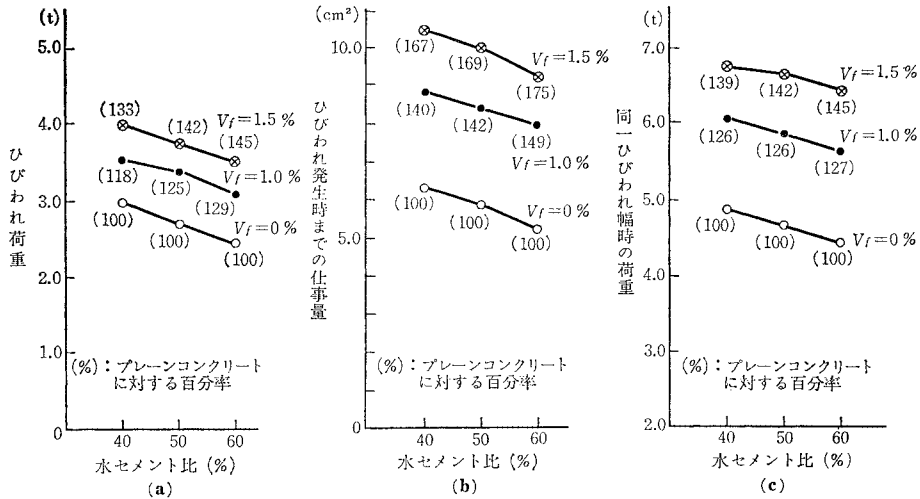


図-15 ひびわれ拘束性能と粗骨材最大寸法との関係



図一16 ひびわれ拘束性能と水セメント比との関係

リートのひびわれ拘束性能はプレーンコンクリートと同様に、いずれも細骨材率が大きくなるに従って増大するが、繊維混入率が大きいものほどその増加率が著しいことである。特に、図中に示したプレーンコンクリートに対する百分率（かっこ内数字）からも明らかなように、ひびわれ拘束効果は細骨材率が60%と80%では大差がないのに対して、細骨材率が100%すなわちモルタルマトリックスの場合には著しく増大している。これはモルタルマトリックスの場合、鋼繊維との付着強度がコンクリートに比して大きいことに基づくものと考えられる。

**b) 粗骨材最大寸法と水セメント比の影響**

図一15(a)と(b)はひびわれ発生に対する抵抗度、図一15(c)はひびわれの拡大に対する抵抗度に及ぼす粗骨材最大寸法の影響を示したものである。これらの図より、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能は、プレーンコンクリートにおける場合と同様に、用いる粗骨材の最大寸法が大きくなるに従って低下することがわかる。

図一16(a)と(b)はひびわれ発生に対する抵抗度、図一16(c)はひびわれの拡大に対する抵抗度に及ぼす水セメント比の影響を示したものである。これらの図から明らかなことは、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能はいずれの場合も水セメント比が大きくなるに従って直線的に低下するが、この傾向はプレーンコンクリートの場合にも同様に認められる。これらの結果は、鋼繊維補強コンクリートの引張強度および曲げ強度における、マトリックスの強度が鋼繊維の補強分に対して加算的に寄与するという関係りと同様なものとなっている。

**6. 結 論**

本研究の結果を要約すれば以下のようである。

- (1) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能を、ひびわれ発生に対する抵抗度とひびわれの拡大に対する抵抗度と定義し、これを適切に評価する試験方法として中央部に切欠きを設けたコンクリート角柱体の軸心に、鋼棒（中央部の一定区間はコンクリートとの付着を除く）を埋込んだ試験体による両引き試験方法が適用できることを明らかにした。
- (2) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能をひびわれ荷重、ひびわれ発生時までの仕事量およびひびわれ幅が所定の値まで拡大したときの荷重によって評価し、それらに及ぼす各種要因の影響を明らかにした。
- (3) 本方法によって評価した一定条件（W/C: 50%、粗骨材最大寸法: 15 mm、繊維混入率: 1.5%）のもとでの鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能を定量的に示せば次のとおりである。

コンクリートマトリックスの場合、プレーンコンクリートに比してひびわれ荷重は1.4倍、ひびわれ発生時までの仕事量は1.7倍ならびに同一ひびわれ幅時の荷重は1.4倍程度である。一方、モルタルマトリックスの場合、プレーンモルタルに比してひびわれ荷重は1.5倍、ひびわれ発生時までの仕事量は2.1倍ならびに同一ひびわれ幅時の荷重は1.6倍程度である。すなわち、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能は、モルタルマトリックスを用いた場合にはコンクリートマトリックスに比して大きくなる。

**参 考 文 献**

1) Johnston, C.D. and R.J. Gray : Uniaxial tensile testing

- of steel fiber reinforced cementitious composites, International Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites, Sheffield, April, 1978.
- 2) Hughes, B.P. and N.I. Fattuhi: Fiber reinforced concrete in direct tension, paper 16, Fiber reinforced materials, Institution of Civil Engineers, London, 1977.
  - 3) Johnston, C.D. and R.A. Coleman: Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension, Proc. International Symposium, ACI, SP 44-10, 1974.
  - 4) 趙・小林・西村: 鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法 (I)—両引き試験方法について—, 生産研究, Vol. 31, No. 1, 1979.
  - 5) 趙・小林・西村: 鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法 (II)—各種引張試験の比較—, 生産研究, Vol. 31, No. 2, 1979.
  - 6) 趙・小林: 鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法に関する研究, コンクリート工学, Vol. 17, No. 9, 1979.9.
  - 7) 小林・趙: 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と強化則について, 土木学会論文報告集, ノート, No. 282, 1979.2.
  - 8) たとえば, 六車・森田・角: 異形鉄筋によるひびわれの分散について, 第2回異形鉄筋シンポジウム, コンクリート・ライブラリー. 第14号, 土木学会, 1965.12.
  - 9) 後藤・植田・満木: 鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究—両引き供試体による実験—, 第2回異形鉄筋シンポジウム, 土木学会, 1965.12.
  - 10) 樋口・音羽・西郷・岩井: 異形鉄筋の付着強度および応力集中度試験, 第2回異形鉄筋シンポジウム, 土木学会, 1965.12.
  - 11) Swamy, R.N. and K. Al-Noori: Bond strength of steel fiber reinforced concrete, concrete, Vol. 8, No. 8, 1974.
  - 12) 小林・趙: 単軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの強度と変形, 土木学会論文報告集, No. 257, 1977.1.
  - 13) Romualdi, J.P. and J.A. Mandel: Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short length of wire reinforcement, ACI Journal, Proc. Vol. 61, No. 6, 1964.

(1979.7.20・受付)