

## [88] 鋼纖維補強レジンコンクリートスラブの強度と韌性

正会員 ○大島光晴（岐阜大学大学院）  
 正会員 六郷恵哲（岐阜大学工学部）  
 林富士男（名阪工材）  
 正会員 小柳治（岐阜大学工学部）

### 1. まえがき

従来から、新しい構造材料の開発が新しい構造形式やその改良を可能としてきた。セメント系結合材のかわりにポリマーを用いるレジンコンクリートもその一例であり、通常のセメントコンクリートに比べ高い曲げ強度（200～300kgf/cm<sup>2</sup>）をもち、耐久性に優れる。しかしその反面、破壊時の韌性すなわちエネルギー吸収能はセメントコンクリートと大差なく、脆的に破壊する。<sup>1)</sup>

著者らは、レジンコンクリートにアスペクト比の小さい鋼纖維を多量に混入することによって、施工性をそこなうことなく高い曲げ強度（ $\sigma_b > 350 \text{ kgf/cm}^2$ ）と曲げ韌性を有する鋼纖維補強レジンコンクリートを開発した。<sup>2)</sup>

本研究では上記の研究成果にもとづき、実際の構造部材への応用として、破壊域が大きくなる点で鋼纖維混入の効果が著しいと考えられる面部材を対象とし、鋼纖維補強レジンコンクリートスラブを作成して載荷試験を行なうことによって、強度、韌性ならびに破壊性状について検討した。

### 2. 鋼纖維補強レジンコンクリート

2-1 実験概要 鋼纖維補強レジンコンクリートスラブの実験に先立ち、2種類の鋼纖維を用い、混入率を2%と4%に変化させた合計4種類の鋼纖維補強レジンコンクリートを作成し、曲げならびに圧縮試験を行ない、それぞれの強度と韌性について検討した。なお比較のため鋼纖維無混入のレジンコンクリートについても同様に試験を行なった。

各シリーズの試験条件と配合を表1に示す。使用した鋼纖維は各シリーズとも同じ寸法のもの（φ1.0×40mm、アスペクト比40）で、形状をフラット状のものとインデント加工したものに変化させた。RECの結合材には不飽和ポリエステル樹脂を使用し、硬化触媒にはメチルエチルケトンバーオキサイド（M E K P O）を、硬化促進剤にはチフテン酸コバルトを使用した。充てん材として炭酸カルシウムを、細骨材に比重2.60、最大寸法10mmの玉碎石を用いた。鋼纖維の混入率が高い場合は単位樹脂量を増やし、各シリーズとも打設時のコンクリートのやわらかさを同程度とした。鋼纖維は分散機を用い手で投入したが、鋼纖維の直徑が大きくアスペクト比が小さいためにファイバーボールは生じなかった。締固めにはテーブルバイプレーターを使用した。各シリーズごとに曲げ試験には10×10×40cmの角柱供試体を3個、圧縮試験にはφ10×20cmの円柱供試体を3個用い、それぞれの荷重変位曲線をX-Yレコーダに記録した（圧縮供試体の横長：18cm）。

2-2 結果と考察 各シリーズごとに得られた3本の曲げ荷重変位曲線をグラフ上で平均して代表荷重変位曲線を求め図1に示す。また曲げ韌性の指標として、曲げ供試体の変位が2mmまたは6mmとなる点までの荷重変位曲線下の面積で表わされる曲げタフネス $T_{b2}$ 、 $T_{b6}$ ならびにその値をそれぞれの変位で割ることによって得られる平均曲げ荷重より換算曲げ強度 $\bar{\sigma}_{b2}$ 、 $\bar{\sigma}_{b6}$ を求め、<sup>3)</sup>ひびわれ発生荷重 $P_{cr}$ 、最大曲げ荷重 $P_m$ 、曲げ強度 $\sigma_b$ 、曲げ強度比 $\bar{\sigma}_{b2}/\sigma_b$ 、 $\bar{\sigma}_{b6}/\sigma_b$ とともに表2に示す。

図1からわかるように曲げ供試体の荷重変位曲線はひびわれ発生点までほぼ直線状であった。ひびわれ発生荷重は各シリーズとも同程度であり、最高はA4シリーズの8.4tonfであった。鋼纖維無混入のOシリーズは、ひびわれ発生荷重がそのまま最大荷重となり、その後急激に荷重が低下したのに對し、他のシリーズは鋼纖維の効果が發揮されひびわれ発生後の急激な荷重の低下を防いでいる。特にインデント加工された鋼纖維を使用したA

シリーズではひびわれ発生後も荷重は増加し、A<sub>4</sub>シリーズの曲げ強度は362kgf/cm<sup>2</sup>であった。

表2からわかるように、曲げ供試体の変位が2mmとなる点までの荷重変位曲線下の面積で表わされる曲げタフネスT<sub>b2</sub>の値は、A、BシリーズともOシリーズに比べ飛躍的に増加した。また鋼纖維の混入率が増加するにつれて曲げタフネスが大きさを示した。

鋼纖維の形状の影響については、曲げ強度はインデント加工された鋼纖維を使用したAシリーズの方がフラット状の鋼纖維を使用したBシリーズよりも大きな値を示した。しかし、荷重変位曲線の形状はBシリーズの方が荷重低下の度合いがゆるやかであった。このことは変位が6mmまでの曲げタフネスT<sub>b6</sub>あるいは換算曲げ強度 $\bar{\sigma}_{b6}$ 、曲げ強度比 $\bar{\sigma}_{b6}/\sigma_b$ の値からもわかる。特に鋼纖維混入率2%のB<sub>2</sub>シリーズのT<sub>b6</sub>の値はA<sub>2</sub>シリーズのものより大きくなつた。

次に、各シリーズの圧縮強試体の荷重変位曲線ならびに圧縮強度をそれぞれ図2、表2に示す。鋼纖維補強レジンコンクリートの圧縮強度は鋼纖維を混入することにより低下するとともに、圧縮靭性に及ぼす鋼纖維混入の効果も曲げ靭性に比べわずかであった。

以上の結果より、本実験に採用した鋼纖維(φ1.0×40mm、アスペクト比4.0)は練り混ぜが容易で、2%以上混入することによってレジンコンクリートのひびわれ発生後の曲げ耐力の急激な低下を防ぐとともに十分な靭性の改善が可能であることを確認した。鋼纖維の形状については、レジンコンクリートのもつ付着力の大きさ、ならびにインデント加工を行なう鋼纖維の製造上の手間を考えると、レジンコンクリートに対する補強纖維として

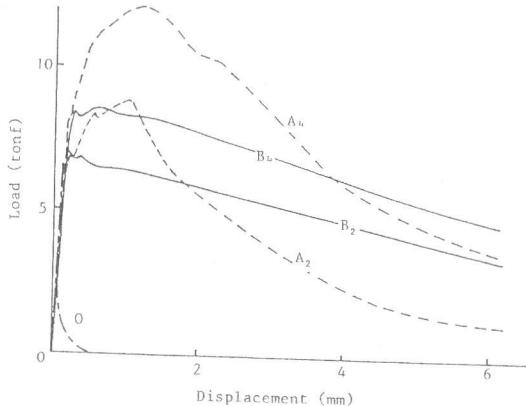


図-1 曲げ荷重変位曲線

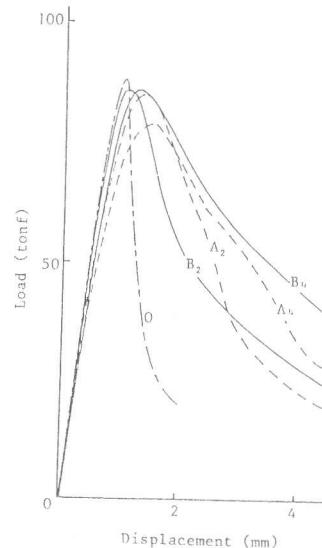


図-2 圧縮荷重変位曲線

表-2 強度試験結果

Series	Load at Cracking P <sub>cr</sub> (tonf)	Maximum Load P <sub>m</sub> (tonf)	Flexural Strength σ <sub>b</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Flexural Toughness T <sub>b2</sub> , T <sub>b6</sub> (kgf·m)	Calculated Strength σ <sub>b2</sub> , σ <sub>b6</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )		Compressive Strength σ <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
					T <sub>b2</sub>	T <sub>b6</sub>	
A <sub>2</sub>	6.58	8.97	269	14.1 25.7	212	129	0.788 0.480
B <sub>2</sub>	7.67	7.70	231	12.1 31.4	183	157	0.792 0.680
A <sub>4</sub>	8.40	12.1	362	21.1 46.4	317	232	0.876 0.641
B <sub>4</sub>	7.65	8.73	262	15.5 42.9	233	215	0.899 0.821
O	7.17	7.17	215	0.3 0.3	4.5	1.5	0.020 0.010

表-3 収縮率

	(x10 <sup>-3</sup> )		
	O	B <sub>2</sub>	B <sub>4</sub>
	4.77	3.79	2.44
	4.60	3.07	1.73
	4.87	2.97	2.13

は、ある程度の耐力を保ちかつ十分な変形能力を示したBシリーズに使用したフラット状の鋼纖維が適していることがわかった。

今回の実験に際し、BシリーズとOシリーズについて、硬化に伴う収縮率を測定した。測定は曲げ供試体の打設面に、レジンコンクリートがゲル化した時点で測点プラグを貼付し、その後と強度試験直前にノギスにより測点間の距離を計測する方法を用いた。結果を表3に示す。これより、鋼纖維混入の場合はばらつきが大であるが、鋼纖維無混入のOシリーズの収縮率が最大となり、鋼纖維混入の割合が増すほど収縮率が小となった。

### 3. 鋼纖維補強レジンコンクリートスラブ

3-1 実験概要 前節で得られた結果をもとに  $\phi 1.0 \times 40\text{mm}$  (フラット) の鋼纖維を 2%、4% 混入して鋼纖維補強レジンコンクリートスラブ供試体 B<sub>2</sub>、B<sub>4</sub> シリーズを各 2 体ずつ作成した。また比較のために鋼纖維無混入の O シリーズおよび鋼纖維 2% に相当する鋼材量の異形鉄筋 ( $D6, \sigma_{sy} = 42.2\text{kN/mm}^2$ ) を直交方向に等方配筋した R シリーズ (有効高さ 3.8 cm、配筋間隔 7 cm、鉄筋比 1.2%) の各レジンコンクリートスラブを作成した。各シリーズの配合はそれぞれ前節の配合を用い、R シリーズは O シリーズと同じとした。

図 3 に示すように、スラブ供試体の寸法は 55×55×5 cm であり、載荷はスパン長が 50 cm の 4 辺単純支持とし、6×6 cm の鋼板を介して中央に載荷した。変位計を載荷点中央の供試体裏側に取り付け、各シリーズ 2 体ずつの供試体の荷重と載荷点の変位との関係を X-Y レコーダに記録した。

3-2 結果と考察 載荷試験より得られた各スラブ供試体の荷重変位曲線ならびにスラブ供試体のひびわれ荷重  $P_{cr}$ 、最大荷重  $P_{max}$  をそれぞれ図 4、表 4 に示す。一方弾性解析によれば、スラブの載荷重  $P$  と曲げモーメント  $m$  との関係は  $P = 3.23 m$  で与えられる。ここで、前節の曲げ強度試験より得られた各シリーズのひびわれ荷重  $P_{cr}$ 、降伏点 (荷重変位曲線において線形性が失われる点) 荷重  $P_y$  より単位幅単りの曲げモーメント  $m_{cr}$ 、 $m_y$  を求め、前式に代入することによって各スラブのひびわれ荷重  $P_{cr}'$ 、降伏点荷重  $P_y'$  を推定した。なお R シリーズについては、 $P_{cr}$  は O シリーズの値 (表 2) を用い、 $m_y$  は鉄筋の引張強度 ( $\sigma_{su} = 55.4\text{kN/mm}^2$ ) をもとに算定した計算値を用いた。次にスラブの終局曲げ耐力を降伏線理論により  $P_u' = 8m_y$  として求めた。以上の各シリーズの  $P_{cr}'$ 、 $P_y'$ 、 $P_u'$  の値をそれぞれの耐力比  $P_{cr}/P_{cr}'$ 、 $P_{max}/P_y'$ 、 $P_{max}/P_u'$  ならびに破壊の形式とともに、表 4 に示す。

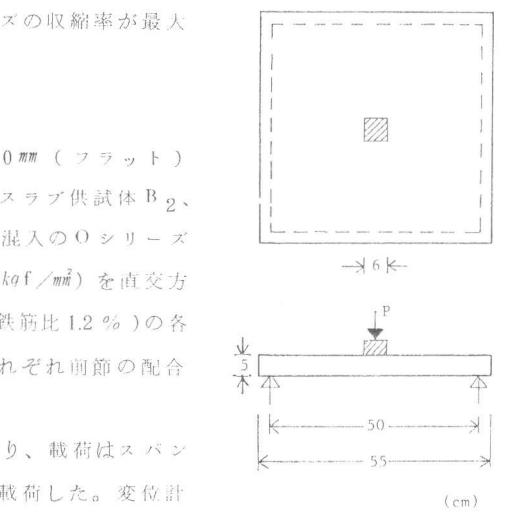


図-3 スラブの形状寸法

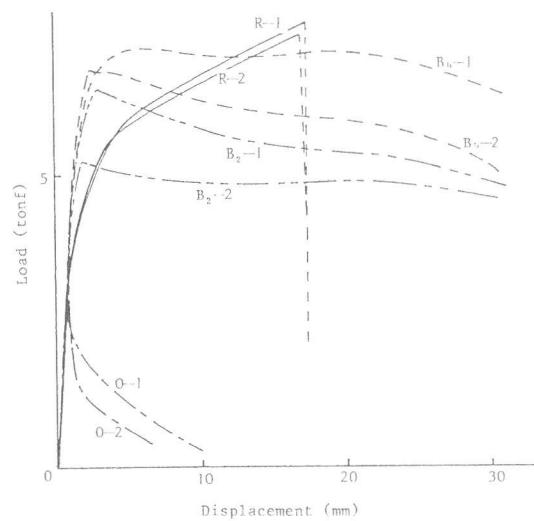


図-4 スラブの荷重変位曲線

表-4 スラブの試験結果

Series	$P_{cr}$ (tonf)	$P_{max}$ (tonf)	$P_{cr}'$ (tonf)	$P_y'$ (tonf)	$P_u'$ (tonf)	$P_{cr}/P_{cr}'$	$P_{max}/P_y'$	$P_{max}/P_u'$	Failure Mode
O-1	3.00	3.00	2.89	2.89	7.17	1.04	1.04	0.42	flexure
O-2	3.50	3.50				1.21	1.21	0.49	
B <sub>2</sub> -1	3.38	5.28	3.09	3.09	7.67	1.09	1.71	0.69	flexure
B <sub>2</sub> -2	3.63	6.49				1.18	2.10	0.85	
B <sub>4</sub> -1	3.50	6.78	3.08	3.08	8.73	1.14	2.20	0.78	flexure
B <sub>4</sub> -2	3.50	7.27				1.14	2.36	0.83	
R-1	2.75	7.61	2.89	3.06	7.60	0.95	2.49	1.00	punching shear
R-2	2.25	7.29				0.78	2.38	0.96	

図 4 より、各シリーズともひびわれ発生点までの荷重変位曲線はほぼ直線状となつた。鋼纖維無混入の O シリーズでは、

変形は荷重に対して線形的に増加し、変形が約1mmとなった時点で曲げひびわれを生じて瞬間に曲げ破壊を起こし、耐荷力が急激に低下した。一方、鋼纖維混入率2%のB<sub>2</sub>シリーズにおいては、最大荷重がOシリーズに比べ50%以上大きな値を示し、その後荷重の急激な低下もなく曲げ破壊した。B<sub>4</sub>シリーズは最大荷重ならびに荷重変位曲線下の面積で表わされる韌性ともB<sub>2</sub>シリーズの値を多少上回ったが、破壊挙動そのものは両者には大差はなかった。鋼纖維2%混入に相当する鋼材量を異形鉄筋D6にかえて2方向に等方配筋した鉄筋補強レジンコンクリートスラブ（Rシリーズ）については、荷重が約2.5tonfで曲げひびわれが発生し、その後鉄筋降伏点を経て荷重は増加していき、最大荷重は全シリーズの中で最も大きな値を示した。しかし変形が20mmとなる以前に押抜きせん断破壊が生じ、荷重は急激に低下した。

以上より、レジンコンクリートスラブは前節の強度試験で得られた結果と同様に、鋼纖維を混入することによって強度、韌性とも十分に改善ができる、高性能な部材となることが判明した。なお、補強筋を作用力方向に配置した鉄筋補強レジンコンクリートスラブの場合は、同一鋼材量のファイバーコンクリートに比して耐力は大きなものとなったが、伸び能力が小さく押抜きで急激に破壊を生じた。

鋼纖維混入率4%のレジンコンクリートスラブは混入率2%のスラブに比べ、耐力および韌性の差は前節の強度試験の際に見られたような鋼纖維混入量の差ほどではなく、鋼纖維の使用量という点を考えれば、2%ほどの鋼纖維の混入でレジンコンクリートスラブの強度と韌性の改善には十分有効であると考えられる。

表4より、弾性解析によるO、B<sub>2</sub>、B<sub>4</sub>シリーズのひびわれ荷重P<sub>cr'</sub>は、載荷試験より得られた各スラブのひびわれ発生荷重P<sub>cr</sub>より多少下回ったがほぼ同程度の値を示した。一方、Rシリーズにおいては弾性解析より求めたひびわれ発生荷重P<sub>cr'</sub>より低い荷重でひびわれが発生し、その値はOシリーズより小となった。これは鉄筋補強の場合はマトリックスのレジンコンクリートの硬化収縮を拘束するため、レジンコンクリートに引張りの内部応力が発生するためである。弾性解析より求めた降伏点荷重P<sub>y'</sub>の値はOシリーズについてはP<sub>max</sub>とP<sub>y'</sub>すなわちP<sub>cr'</sub>はほぼ一致したが、他シリーズではP<sub>max</sub>の値を大きく下回った。次に降伏線理論により推定した各シリーズの終局曲げ耐力P<sub>u'</sub>の値をみると、鋼纖維を混入したB<sub>2</sub>、B<sub>4</sub>シリーズについては、P<sub>u'</sub>の値はP<sub>max</sub>よりもやや大きくなった。RシリーズのP<sub>u'</sub>の値も載荷試験より得られたP<sub>max</sub>とほぼ一致した。

以上より、レジンコンクリートスラブのひびわれ荷重は弾性解析によって推定される。また鋼纖維補強レジンコンクリートスラブの終局曲げ耐力は、最大曲げモーメントの点が降伏モーメントの値に達したのち、かなりのモーメント再分配がなされるため、降伏線理論によって求めた値にかなり近くなることが判明した。

#### 4. 結論

鋼纖維補強レジンコンクリートならびに各種レジンコンクリートスラブの曲げ強度と曲げ韌性について検討した本研究においては、次に示す結果が得られた。

1) レジンコンクリートに通常よりもアスペクト比の小さい(40)フラット状の鋼纖維を2%以上混入することによって施工性をそこなうことなく高い曲げ強度と曲げ韌性をもつ鋼纖維補強レジンコンクリートが得られた。

2) 鋼纖維混入率2%の鋼纖維補強レジンコンクリートスラブは、押抜きせん断破壊を生じることなく曲げ破壊し、十分な耐力と韌性を有した。

3) 鋼纖維2%混入に相当する鋼材量の異形鉄筋(D6、σ<sub>sy</sub>=42.2kgf/mm<sup>2</sup>)を直交方向に配筋した鉄筋補強レジンコンクリートスラブは大きな耐力を持つが、伸び能力が小さく、急激に押抜きせん断破壊した。

4) 鋼纖維補強レジンコンクリートスラブのひびわれ荷重ならびに終局曲げ耐力は、強度試験用供試体の値からある程度推定できた。

《参考文献》 1) 小柳治、六郷恵哲、内田裕市：コンクリートの破壊現象の安定性とその計測、コンクリート工学、Vol.20、No.6、1982年6月、pp83~89 2) 小柳治、六郷恵哲、林富士男、大島光晴：鋼纖維補強レジンコンクリートの強度と韌性、土木学会第38回年次学術講演集、1983年9月、pp287~288 3) JCI規準：鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法(案)、コンクリート工学、Vol.20、No.10、1982/10、pp.4~5