

[88] 鋼繊維補強レジンコンクリートスラブの強度と靱性

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/cm²)をもち、耐久性に優れる。しかしその反面、破壊時の靱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、脆性的に破壊する。¹⁾

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繊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($\sigma_b > 350 \text{ kgf/cm}^2$)と曲げ靱性を有する鋼繊維補強レジンコンクリートを開発した。²⁾

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繊維混入の効果が著しいと考えられる面部材を対象とし、鋼繊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、靱性ならびに破壊性状について検討した。

2. 鋼繊維補強レジンコンクリート

2-1 実験概要 鋼繊維補強レジンコンクリートスラブの実験に先立ち、2種類の鋼繊維を用い、混入率を2%と4%に変化させた合計4種類の鋼繊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、それぞれの強度と靱性について検討した。なお比較のため鋼繊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。使用した鋼繊維は各シリーズとも同じ寸法のもの($\phi 1.0 \times 40 \text{ mm}$ 、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变化させた。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パーオキサイド(MEKPO)を、硬化促進剤にはナ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の玉砕石を用いた。鋼繊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。鋼繊維は分散機を用いず手で投入したが、鋼繊維の直径が大きクアスペクト比が小さいためにファイバボールは生じなかった。締固めにはテーブルバイブレーターを使用した。各シリーズごとに曲げ試験には $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の角柱供試体を3個、圧縮試験には $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 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(圧縮供試体の検長: 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。また曲げ靱性の指標として、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、³⁾ ひびわれ発生荷重 P_{cr} 、最大曲げ荷重 P_m 、曲げ強度 σ_b 、曲げ強度比 $\bar{\sigma}_{b2}/\sigma_b$ 、 $\bar{\sigma}_{b6}/\sigma_b$ とも表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。鋼繊維無混入の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対し、他のシリーズは鋼繊維の効果が発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繊維を使用したA

シリーズではひびわれ発生後も荷重は増加し、A₄シリーズの曲げ強度は362kgf/cm²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_{b2}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。また鋼繊維の混入率が増加するにつれて曲げタフネスが大き

きな値を示した。鋼繊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繊維を使用したAシリーズの方がフラット状の鋼繊維を使用した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_{b6}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。特に鋼繊維混入率2%のB₂シリーズのT_{b6}の値はA₂シリーズのものより大きくなった。

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。鋼繊維補強レジコンクリートの圧縮強度は鋼繊維を混入することにより低下するとともに、圧縮靱性に及ぼす鋼繊維混入の効果も曲げ靱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繊維(φ1.0×40mm、アスペクト比40)は練り混ぜが容易で、2%以上混入することによってレジ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靱性の改善が可能であることを確認した。鋼繊維の形状については、レジ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繊維の製造上の手間を考えると、レジコンクリートに対する補強繊維として

表-1 試験条件と配合

Series	Size (mm)	Fiber			Unit Weight (kg/m ³)				
		Aspect ratio	Shape	Content (%)	Resin	Fiber	Filler	Sand	Gravel
A ₂	φ1.0x40	40	indent	2.0	265	159	433	433	1083
B ₂	φ1.0x40	40	flat	2.0	265	159	433	433	1083
A ₄	φ1.0x40	40	indent	4.0	294	299	407	407	1018
B ₄	φ1.0x40	40	flat	4.0	294	299	407	407	1018
O,R	-	-	-	0	231	0	461	462	1154

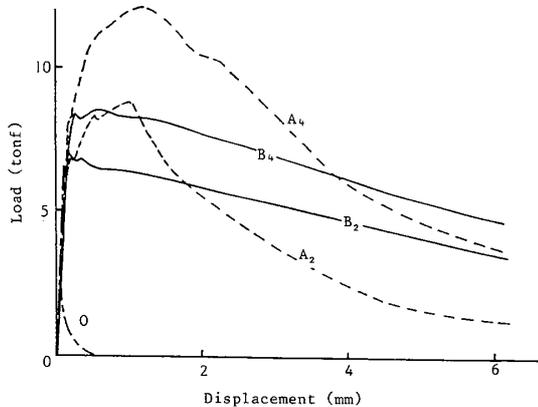


図-1 曲げ荷重変位曲線

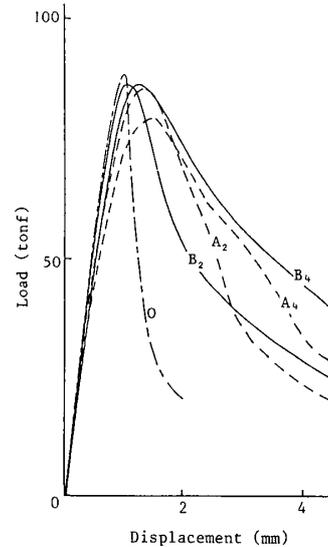


図-2 圧縮荷重変位曲線

表-2 強度試験結果

Series	Load at Cracking P _{cr} (tonf)	Maximum Load P _m (tonf)	Flexural Strength σ_b (kgf/cm ²)	Flexural Toughness T _{b2} , T _{b6} (kgf·m)		Calculated Strength $\bar{\sigma}_{b2}$, $\bar{\sigma}_{b6}$ (kgf/cm ²)		$\bar{\sigma}_{b2}/\sigma_b$, $\bar{\sigma}_{b6}/\sigma_b$		Compressive Strength σ_c (kgf/cm ²)
				T _{b2}	T _{b6}	$\bar{\sigma}_{b2}$	$\bar{\sigma}_{b6}$			
A ₂	6.58	8.97	269	14.1	25.7	212	129	0.788	0.480	1070
B ₂	7.67	7.70	231	12.1	31.4	183	157	0.792	0.680	1090
A ₄	8.40	12.1	362	21.1	46.4	317	232	0.876	0.641	960
B ₄	7.65	8.73	262	15.5	42.9	233	215	0.899	0.821	1090
O	7.17	7.17	215	0.3	0.3	4.5	1.5	0.020	0.010	1110

表-3 収縮率

(x10 ⁻³)		
O	B ₂	B ₄
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繊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、その直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、鋼繊維混入の場合にはばらつきが大であるが、鋼繊維無混入のOシリーズの収縮率が最大となり、鋼繊維混入の割合が増すほど収縮率が小となった。

3. 鋼繊維補強レジ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φ1.0×40mm(フラット)の鋼繊維を2%、4%混入して鋼繊維補強レジコンクリートスラブ供試体B₂、B₄シリーズを各2体ずつ作成した。また比較のために鋼繊維無混入のOシリーズおよび鋼繊維2%に相当する鋼材量の異形鉄筋(D6,σ_{sy}=42.2kgf/mm²)を直交方向に等方配筋したRシリーズ(有効高さ3.8cm、配筋間隔7cm、鉄筋比1.2%)の各レジ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55×55×5cmであり、荷重はスパン長が50cmの4辺単純支持とし、6×6cmの鋼板を介して中央に荷重した。変位計を荷重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荷重点の変位との関係をX-Yレコーダに記録した。

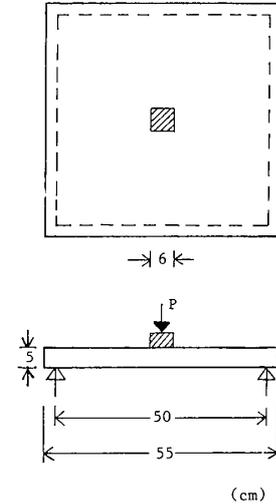


図-3 スラブの形状寸法

3-2 結果と考察 荷重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、スラブの荷重Pと曲げモーメントmとの関係はP=3.23m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(σ_{su}=55.4kgf/mm²)をもとにして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。

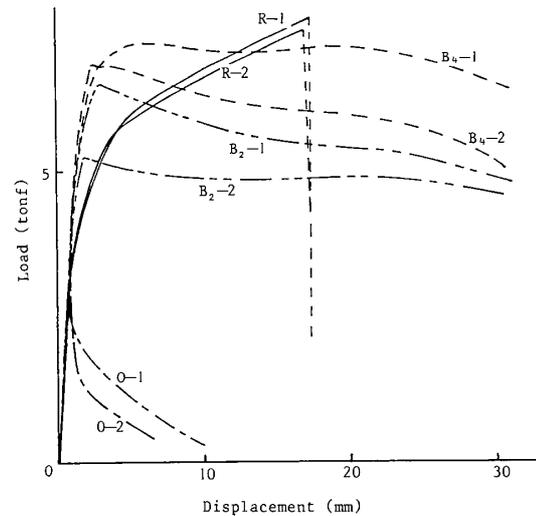


図-4 スラブの荷重変位曲線

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
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った。鋼繊維無混入のOシリーズでは、									
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	2.89	2.89	7.17	1.21	1.21	0.49	flexure
B ₂ -1	3.38	5.28	3.09	3.09	7.67	1.09	1.71	0.69	flexure
B ₂ -2	3.63	6.49	3.09	3.09	7.67	1.18	2.10	0.85	flexure
B ₄ -1	3.50	6.78	3.08	3.08	8.73	1.14	2.20	0.78	flexure
B ₄ -2	3.50	7.27	3.08	3.08	8.73	1.14	2.36	0.83	flexure
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	2.89	3.06	7.60	0.78	2.38	0.96	punching shear

変形は荷重に対して線形的に増加し、変形が約 1 mm となった時点で曲げひびわれを生じて瞬間的に曲げ破壊を起こし、耐荷力が急激に低下した。一方、鋼繊維混入率 2% の B_2 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_4 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靱性とも B_2 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。鋼繊維 2% 混入に相当する鉄筋量を異形鉄筋 $D6$ 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 2.5 tonf 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 20 mm 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、鋼繊維を混入することによって強度、靱性とも十分に改善ができ、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。

鋼繊維混入率 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、耐力および靱性の差は前節の強度試験の際に見られたような鋼繊維混入量の差ほどではなく、鋼繊維の使用量という点を考えれば、 2% ほどの鋼繊維の混入でレジンコンクリートスラブの強度と靱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_2 、 B_4 シリーズのひびわれ荷重 P_{cr} ' 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_{cr} 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_{cr} ' 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_y' の値は O シリーズについては P_{max} と P_y' すなわち P_{cr} ' はほぼ一致したが、他シリーズでは P_{max} 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_u' の値をみると、鋼繊維を混入した B_2 、 B_4 シリーズについては、 P_u' の値は P_{max} よりもやや大となった。 R シリーズの P_u' の値も載荷試験より得られた P_{max} 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。また鋼繊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

鋼繊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靱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) フラット状の鋼繊維を 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靱性をもつ鋼繊維補強レジンコンクリートが得られた。
- 2) 鋼繊維混入率 2% の鋼繊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、十分な耐力と靱性を有した。
- 3) 鋼繊維 2% 混入に相当する鋼材量の異形鉄筋 ($D6$ 、 $\sigma_{sy} = 42.2\text{ kgf/mm}^2$) 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) 鋼繊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、pp.83~89 2) 小柳治、六郷恵哲、林富士男、大島光晴：鋼繊維補強レジンコンクリートの強度と靱性、土木学会第38回年次学術講演集、1983年9月、pp.287~288 3) JCI規準：鋼繊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