

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

STRENGTH AND DEFORMATION OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE IN UNIAXIAL TENSION

小林 一 輔*・趙 力 采**

By Kazusuke KOBAYASHI and Ryokche CHO

1. はしがき

モルタルまたはコンクリート中に短い鋼繊維をランダム配向状態で分散せしめた鋼繊維補強コンクリートは、ひびわれ強度、引張強度および靱性などが従来のコンクリートに比べて著しくすぐれていることが知られており、特にこの 2, 3 年来は内外を通じて基礎研究ならびに応用研究が活発に進められているほか、米英の両国を中心として空港ならびに道路舗装などへの試験的な適用が行われている。

鋼繊維補強コンクリートの力学的諸性質に関してはすでに数多くの実験的研究の報告があるが、これらの大半は、鋼繊維補強コンクリートが在来のコンクリートに鋼繊維という特殊な物性改善用混和材料を添加した一種の特殊コンクリートであるとの前提に立って研究を行っており、これを全く新しい構造材料として認識していないために、その物性の基礎的な検討がほとんど行われていない。鋼繊維補強コンクリートを用いて曲げや引張を受ける構造物を設計しようとする場合には、まずこの材料の許容応力度や安全率を決める必要があるが、これを決めるためには鋼繊維補強コンクリートの構造材料としての基本的特性が明らかになっていなければならない。

本研究は鋼繊維補強コンクリートの引張荷重下における変形特性について詳細に検討し、その結果に基づいて許容応力度を決める場合の基準となるひびわれ強度の概念を明確にし、これと伸び能力を簡便に求める方法を提案するとともに、これらの値に及ぼす各種要因の影響を明らかにした。さらに鋼繊維補強コンクリートの強化機構について複合材料学的考察を加え、鋼繊維補強コンクリートの複合材料としての強化パターンは繊維強化系ではなく、むしろ粒子強化系とみるのが妥当であることを

立証し、従来、Romualdi らの提唱していた繊維間隔説¹⁾に対して複合材料学の立場から有力な裏付けを与えた。本文ではさらに、鋼繊維補強コンクリートの引張強度推定式を提案した。

2. 使用した鋼繊維、供試体ならびに引張試験方法

使用した鋼繊維は硬鋼線を切断して製造した 7 種のカットワイヤーと冷延鋼板をせん断して製造した 4 種のせん断ファイバーであって、これらはいずれもその容積をほぼ一定に保ちつつアスペクト比と直径を広範囲に変化させたものから成っている(表-1)。

鋼繊維補強コンクリートのマトリックスとしてはすべて水セメント比が一定(45%)のモルタルを使用した。

また、供試体は断面が 30×40 mm で平行部(断面: 30×26 mm)の長さが 60 mm の角柱状のものを用い、成形後水中養生を行い、材令 2 週で載荷試験を行った。試験機は主として島津製作所のオートグラフ(容量 5 t)を使用した。荷重-変形曲線を求める引張試験の場合のみはインストロン社のフロアー型 TT 試験機(容量 10 t)を使用した。引張試験は供試体端部の中心位置に

表-1 使用した繊維の諸元

種別	記号	アスペクト比 (l/d)	長さ: l (mm)	直径: d (mm)	容積 (mm^3)	引張強度 (kg/mm^2)
カット ワイヤー	A	1	1.0	1.00	0.79	180
	B	3	2.0	0.70	0.79	190
	C	5	3.0	0.60	0.79	150
	D	11	5.0	0.45	0.80	140
	E	23	8.0	0.35	0.79	145
	F	52	14.0	0.27	0.80	145
	G	100	22.0	0.22	0.83	145
せん断 ファイバー	D	11	0.40×0.40×5		0.79	30
	E	23	0.32×0.32×8		0.79	30
	F	52	0.24×0.24×14		0.79	30
	G	100	0.22×0.22×20		0.79	30

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 東京理工専門学校助教授

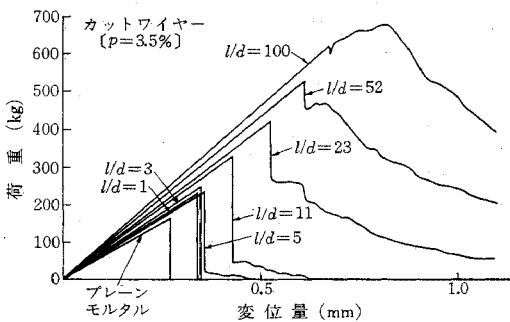
あらかじめ埋込まれた鋼棒を介して、クロスヘッドの速度を毎分 0.5 mm として行った。ただし、荷重-変形曲線を求める場合の変位にはクロスヘッドの変位を用い、クロスヘッドの速度を毎分 0.05 mm とした。

また応力-ひずみ曲線は供試体の平行部の相対する面に並列に貼りつけた抵抗線ひずみゲージからの平均ひずみを 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荷重-ひずみ曲線に基づいて求めた。

3. 鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形特性²⁾

(1) 鋼繊維の形状特性と材質の影響

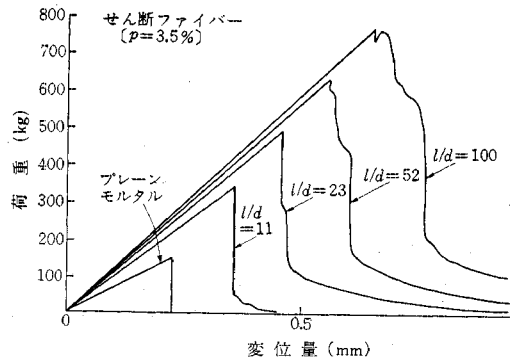
図一はアスペクト比が 1 から 100 までのカットワイヤーのそれぞれ一定量(容積百分率で 3.5%)を分散せしめた鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変位曲線を示したものである。この図より、ぜい性マトリックス中にヤング率の高いインクルージョンを分散せしめた複合材料の引張荷重-変形性状は、たとえインクルージョンの占める全容積が小さく、さらにその数ならびに 1 個の容積が等しい場合でも、その形状が粒子状から繊維状に変化するに従って著しく変化することがわかる。すなわち、1) アスペクト比が比較的小さい場合にはプレーンモルタルと類似のぜい性挙動を示し、プレーンモルタルに比べてひびわれ荷重は多少増大するものの、ひびわれ荷重と最大荷重はほとんど一致する。2) アスペクト比が 10 以上の場合には、アスペクト比の大きいものを用いた場合ほど靱性材料としての特性を示すようになり、ひびわれを生じた後もなお供試体が破断するまで繊維が引抜けつつ荷重に抵抗する。3) アスペクト比が 100 程度になるとひびわれを生じた後も繊維とモルタルマトリックスとの付着力によってさらに荷重の増加に抵抗しつつ最大値に達し、その後は次第に繊維が引抜けつつ耐荷力を減じて破断する、などがその主な傾向である。一般に補強効果ならびに施工性などから決まる実用



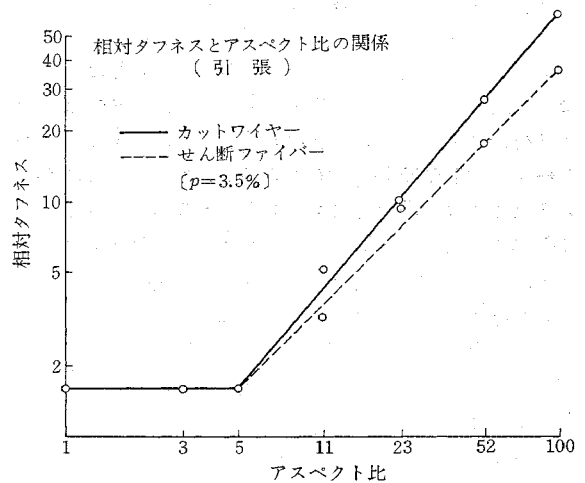
図一 直接引張試験による荷重-変位曲線

的なアスペクト比は 40~100 程度であることを考慮しつつ図一を再び検討すれば、鋼繊維補強コンクリートは全く新しい靱性材料とみなしても過言ではない。

図二はせん断ファイバーを用いた場合について、図一と同様な条件で求めた荷重-変形曲線を示したものであるが、以下の点において図一の場合とはやや異なった傾向が認められる。すなわち、ひびわれ荷重はカットワイヤーを用いた場合よりも多少大きくなるが、ひびわれ後はよりぜい性的な挙動を示し、急速に繊維が引抜けつつ破断に至る。この原因は、これら 2 種の鋼繊維のモルタルマトリックスとの付着強度の差に基づくものと考えられる。著者らが本実験で用いたマトリックス中に埋込んで求めた付着強度^{注1)}の平均的な値は、カットワイヤーの場合で 30 kg/cm²、せん断ファイバーの場合で 40 kg/cm² であって、この差は図一と図二に認められる程度の傾向の差の説明としては十分であると思わ



図二 直接引張試験による荷重-変位曲線



図三 相対タフネスとアスペクト比の関係

注 1) 付着強度の試験はモルタルの直接引張試験に用いられるブリケット供試体の最少断面部分(ここで供試体は 2 分されている)を横切って引張応力方向に鋼繊維を配置した供試体を用いて行った。

れる。

図-3 は図-1 および図-2 の結果に基づいて鋼繊維補強コンクリートの靱性を定量的に示したものである。

ただし、靱性は荷重-変形曲線と横座標軸によって囲まれた面積を以て表わし、図-3 においてはプレーンモルタルの場合に対する比、すなわち相対靱性（相対タフネス）を縦軸にとっている。この図より、鋼繊維補強コンクリートの靱性はアスペクト比が大きくなるに従って著しく改善されること、鋼繊維としてカットワイヤを用いた場合の方がせん断ファイバーを用いた場合よりも靱性が大きいこと、などがわかる。

(2) 変形のひずみ表示

図-4 は、アスペクト比が 52 と 100 の鋼繊維をそれぞれ容積百分率で 3.5% 混入した鋼繊維補強コンクリートの荷重-ひずみ曲線 (I, II) と荷重-変位曲線 (I', II') とを対比したものである。変形測定精度にも関連することであるが、荷重-変形曲線 (I', II') は複合材料が破断するまでのマクロな変形性状を把握する目的に対しては有効であるが、可視ひびわれを生じた B 点までの変形性状に関する情報はほとんど与えない。一方、荷重-ひずみ曲線 (I, II) を用いると上記の B 点までの荷重-変形性状が詳細にとらえられており、これによって比例限度応力度 (A 点)、初期ひびわれ強度または伸び能力などを求めることが可能となり、さらに鋼繊維補強コンクリートの破壊過程を考察し、強化機構を解明するさいの手がかりを得ることができる。したがって、以後本文では鋼繊維補強コンクリートの引張変形はひずみによって表示することにした。図-5 はアスペクト比が 11 から 100 前後までのカットワイヤとせん断ファイバー

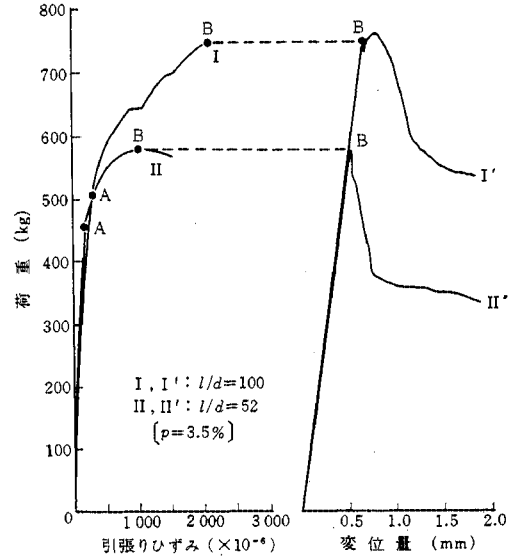


図-4 鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形特性

を一定量 (3.5%) 混入した場合の引張応力-ひずみ曲線を示し、図-6 はアスペクト比の小さいカットワイヤの繊維量を 3.5% から 20% まで大幅に増した場合の引張応力-ひずみ曲線を示したものである。なお、それぞれの応力-ひずみ曲線における点線部分は可視ひびわれを生じてその後のひずみの増加が繊維の抜け出しによるひびわれの拡大に帰因するとみなされる部分を示したものである。これらの図から明らかなことは、鋼繊維のアスペクト比が大きくなり、繊維混入率が増すとともに可視ひびわれ発生までの引張応力-ひずみ曲線の非線形部分が多くなり、みかけの塑性挙動を示すようになることである。

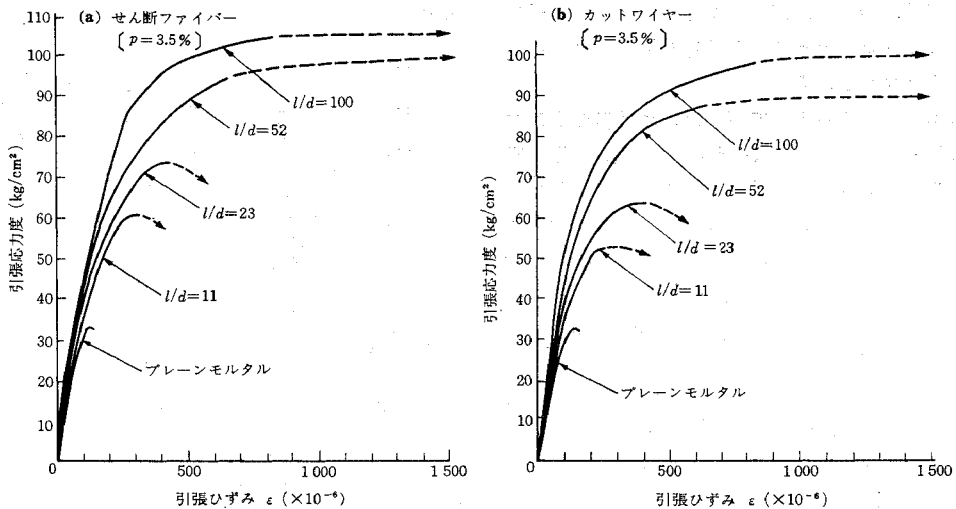


図-5 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線

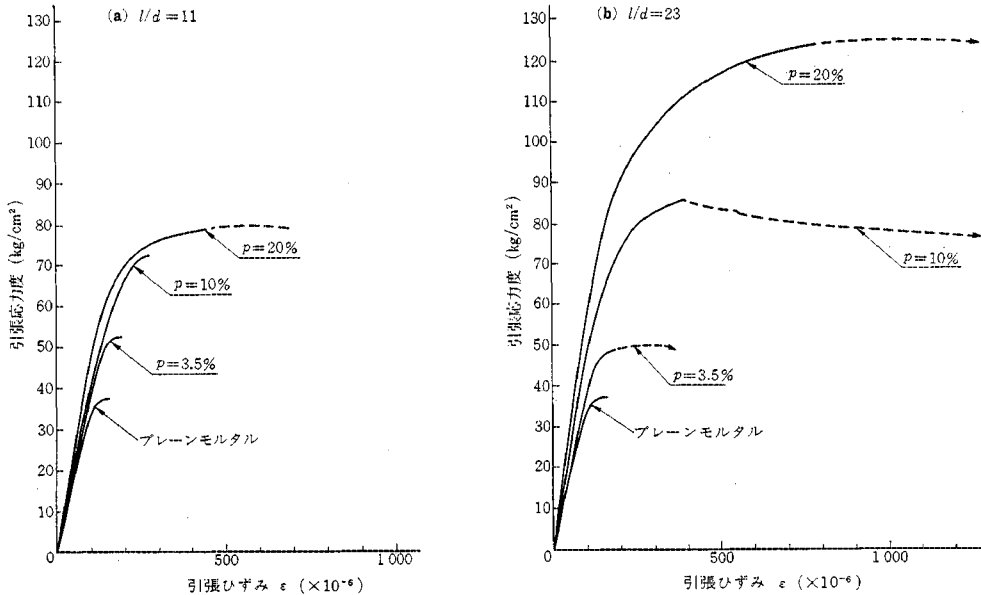


図-6 繊維混入率を変化させた鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線

4. 鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度ならびに伸び能力

鋼繊維補強コンクリートの最も顕著な特性はひびわれに対する抵抗性が高いことであるが、これを定量的に評価するための尺度としては一般に初期ひびわれ強度 (first crack strength) が用いられている。しかし、現在では未だ初期ひびわれ強度の定義が明らかでなく、したがってその測定方法も満足すべきものはない。その理由は、図-2~3 に示した引張応力-ひずみ曲線より容易に推測できるように、鋼繊維補強コンクリートの引張応力による破壊が、極めて連続的に進行するために可視ひびわれを一つの目安とすることの工学的意義が小さいことによるものと考えられる。

鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度の測定方法としては現在、応力-ひずみ曲線または荷重-変形曲線を用いて、応力 (荷重) とひずみ (変形) との関係が線形から非線形へ移行する点 (すなわち、比例限度応力度) を求め、これを初期ひびわれ強度とする方法が比較的多く用いられている^{3),4)}。しかし、単軸圧縮を受けるプレーンコンクリートの場合と同様に、鋼繊維補強コンクリートは引張荷重の初期の段階から非弾性的な応力-ひずみ挙動を示すので、応力-ひずみ曲線上で上記の点を正しく判断することは極めて困難であり、したがって上記の方法は初期ひびわれ強度の判定方法として適当でないと考えられる。

鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度を判定す

る方法としてはそのほか、超音波の伝播速度の変化をとらえる方法と acoustic emission 法、すなわちひびわれ発生時に生じる弾性波を検出する方法などが検討されているが、いまだ実用的な測定方法を確立するまでの研究は進んでいない。著者らはまず鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度を、その剛性が急激に低下し始めるときの応力度 (ひびわれ開始応力度) と定義することによって、これに軟鋼の降伏点に対応するような工学的意義を与え、さらにこれを簡便に精度よく判定する実用的な方法を提案した。さらにこの値を用いて鋼繊維補強コンクリートの伸び能力を定義し、初期ひびわれ強度ならびに伸び能力に及ぼす各種要因の影響を明らかにした。

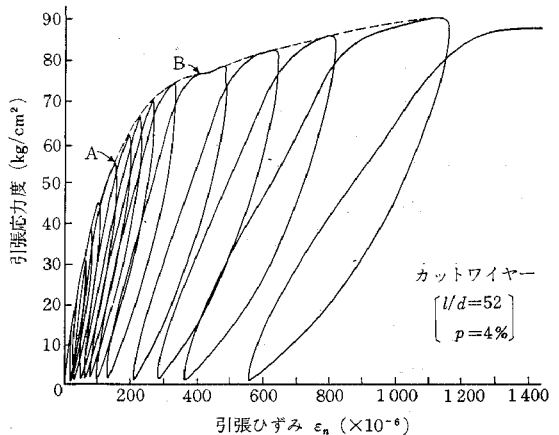
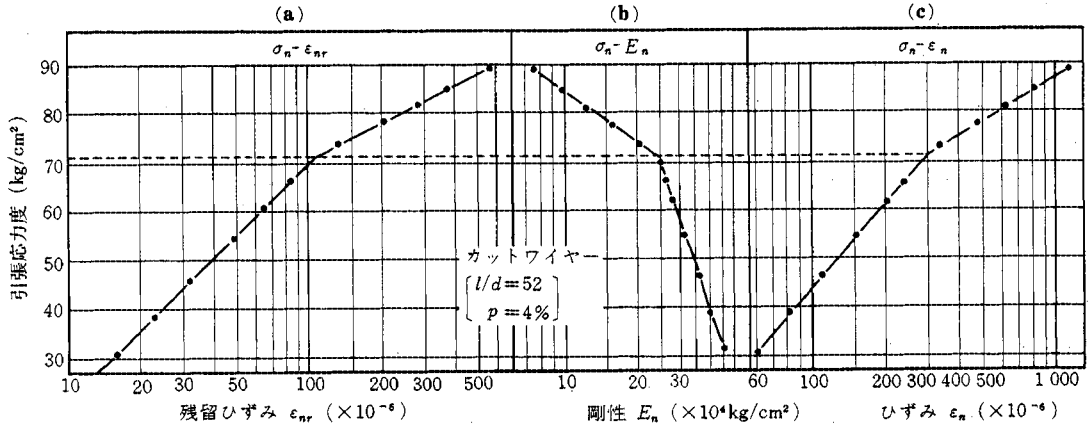


図-7 鋼繊維補強コンクリートの繰返し漸増引張応力-ひずみ曲線

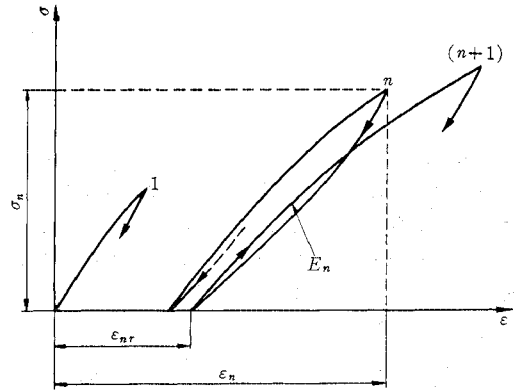


図—8 繰り返し漸増引張応力-ひずみ曲線から求めた残留ひずみ，剛性ならびにひずみの変化

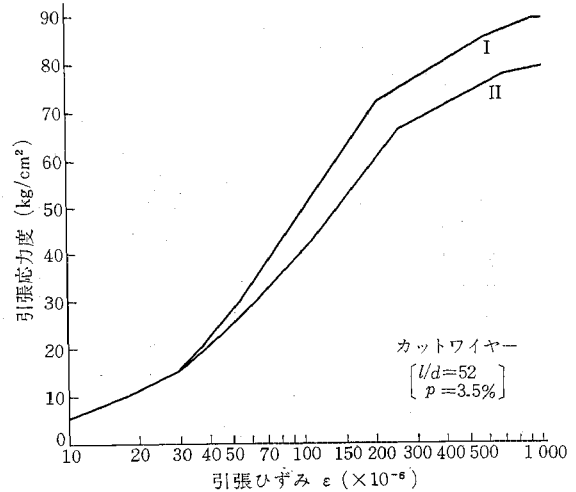
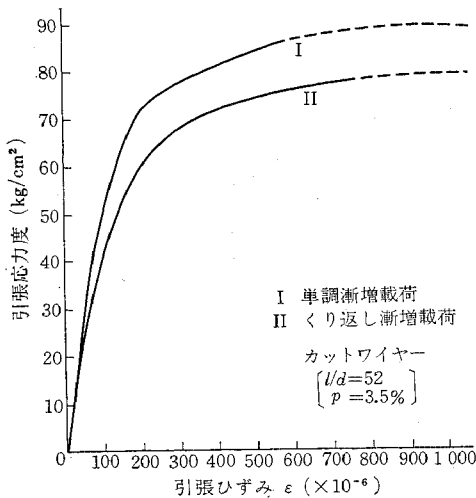
(1) ひびわれ開始応力度の判定方法

前述のように著者らは鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度を，その剛性が急激に低下し始めるときの応力度と定義した．そこで，剛性の変化を調べるために鋼繊維補強コンクリートの繰り返し漸増引張荷試験を行い，図—7 に示すような繰り返し応力-ひずみ曲線を求め，これを用いて各繰り返し载荷における最大応力度とそのときの剛性，全ひずみ，残留ひずみとの関係を求めたものが図—8 である．この場合，図中の $\sigma_n, \epsilon_n, \epsilon_{nr}$ は図—9 に示すようにそれぞれ n 回目の繰り返し载荷時の最大応力度，全ひずみおよび残留ひずみであり，また $(n+1)$ 回目の負荷曲線の傾きから求めた E_n が n 回目の剛性である．図—8 から明らかなように，各繰り返し载荷における最大応力度と剛性との関係は，後者を対数目盛でプロットすることにより，2本の直線で表わされる．したがって，剛性の急激な低下を生ずる応力度はこ

れらの折れ線関係の折点として明確に把握することができる．なお，上記と同様な関係は残留ひずみと全ひずみの場合にも認められ，しかもこれらの値が急激に増加する応力度は剛性が急激に低下する応力度と一致する．以上



図—9 繰り返し漸増引張応力-ひずみ曲線の各要素



図—10 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線とひびわれ開始応力度

のような関係は使用する鋼繊維のアスペクト比、混入率ならびに材質の如何を問わず成立する。しかし、初期ひびわれ強度を求めるために繰り返し漸増载荷を実施することは相当に時間を要するので、単調漸増载荷試験によりこれを求めることができれば大変好都合である。図-10は、繰り返し漸増载荷の場合の各段階における最大応力度の包絡線と、単調漸増载荷によって求めた応力-ひずみ曲線を対比して示したものである。この図より明らかなように、繰り返し漸増载荷の場合に比べてやや高目の値となるが、単調漸増载荷の場合にもその応力-ひずみ曲線を用いて容易に初期ひびわれ強度を求めることが可能である。

一方、図-10における曲線 I より明らかなように、引張ひずみを対数目盛でプロットした場合の応力-ひずみ曲線は詳細に検討すると応力の大きい位置で3つの折点を有する。すなわち、第1の折点はこれまで本文中で初期ひびわれ強度とよんできたものであり、破壊強度近傍の第2折点を経てほぼ引張強度に一致する第3折点に達する。

ここで第1折点と第2折点との関係を明確にする必要があるが、拡大鏡(倍率40倍)による観察の結果では第1折点ではひびわれが認められず、第2折点近傍で初めて可視ひびわれを生ずることが確認できた。このことから、第1折点はモルタルマトリックス内部におけるマイクロクラックの急激な成長および繊維とマトリックス界面に生ずる局所的付着破壊の開始点と考えられるものであって、その名称も初期ひびわれ強度は適切でなく、著者らはこれをひびわれ開始応力度と称することにした。同様に第2折点も全断面にひびわれが伝播した応力度と考えられ、これを可視ひびわれ応力度とよぶことにした。

鋼繊維補強コンクリートの引張破壊の過程を示す以上の各種特異点相互の関係は鋼繊維のアスペクト比および混入率の値如何によって変化する。図-11はこれを明らかにするために、以上の要因を変化させて作った鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ曲線を求め、それぞれについて各特異点を示したものである。すなわち、曲線 II, III および IV はアスペクト比が 52 の鋼繊維をそれぞれ 1.0, 2.5 および 3.5% 混入した場合であり、曲線 V, VI および VII はアスペクト比が 23 の鋼繊維をそれぞれ 3.5%, 5% および 10% 混入した場合である。

なお、曲線 I はプレーンモルタルの応力-ひずみ曲線を示している。図中の曲線上におけるアラビア数字は各折点を示したもので、第1折点、第2折点および第3折点に対応する応力度はそれぞれひびわれ開始応力度、可視ひびわれ応力度および引張強度に対応する。この図から明らかなように、プレーンモルタルにおいては本実験の尺度ではこれら3つの特異点がすべて一致しているケースと考えられる。一方、鋼繊維補強コンクリートにおいては、1) 繊維のアスペクト比が小さい場合(曲線 V)とか、アスペクト比が大きい繊維を用いても混入率が小さい場合(曲線 II)でその力学的特性が比較的プレーンモルタルに近いものでは、可視ひびわれ応力度と引張強度がほとんど一致し、2) 繊維のアスペクト比に応じて比較的少量の鋼繊維で混入した場合(曲線 III, IV, VI および VII)で、鋼繊維補強コンクリートの力学的特性が顕著に発揮されると推測される複合体では、上記の3つの折点が明確に現われている。さらに上記の1)の場合にはひびわれ開始応力度と可視ひびわれ応力度との間に大差がないのに対して、2)の場合には繊維量が多くなるほどこれらの間の差が大きくなる傾向が認められる。

一方、可視ひびわれ応力度と引張強度との差はいずれ

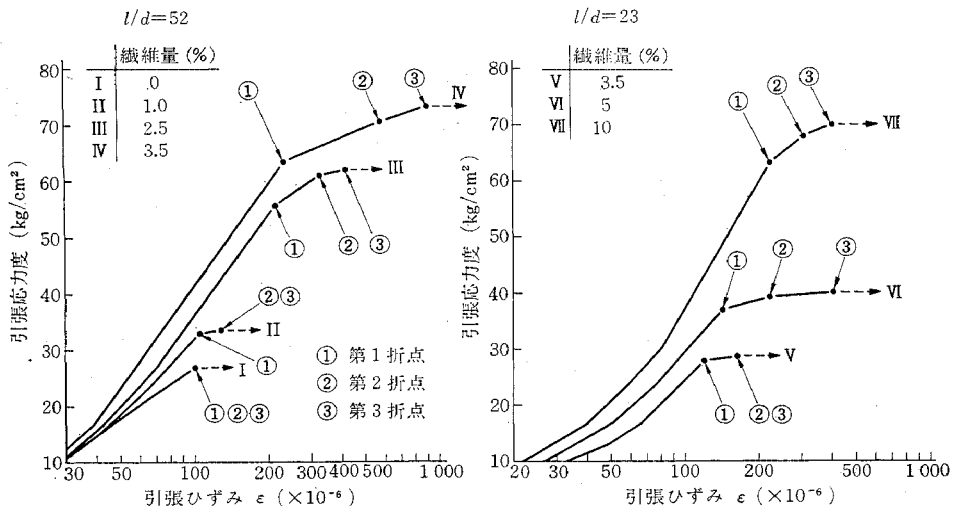


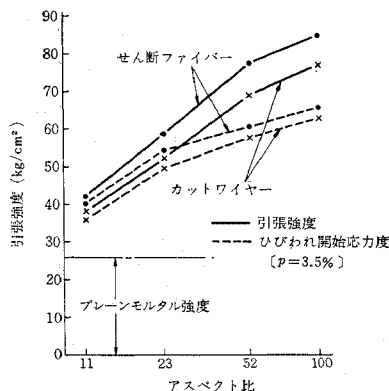
図-11 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線の特異点

の場合にも大きいものではなく、鋼繊維補強コンクリートにおける一般的な繊維量（1.0～2.0%）の範囲では、可視ひびわれ応力度と引張強度とが、ほぼ一致するものとみなして差し支えない。図—10 より明らかなように、著者らの求めたひびわれ開始応力度は従来より、いわゆる初期ひびわれ強度の目安とされていた比例限度応力度に比べて相当に高い値となっており、しかもこの時点において可視ひびわれは生じていない。このことは、ひびわれ開始応力度を用いることにより鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束能力を的確に評価できることを意味するものと考えられる。しかもその材料特性値としての位置付けも可視ひびわれ応力度との関連において比較的明らかであり、さらに単調漸増載荷試験によりこれを容易に求めることが可能である。

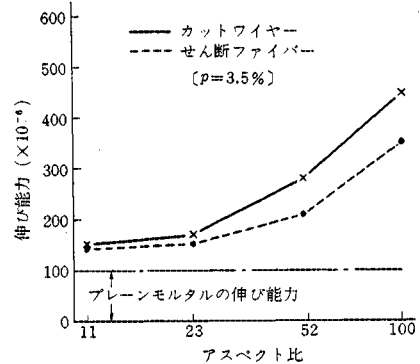
(2) ひびわれ開始応力度と伸び能力に影響を及ぼす諸要因

鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と伸び能力に影響を及ぼす主要因としては、1) 繊維の形状寸法、2) 繊維混入量、3) 繊維の種別（表面特性）、4) 繊維の分散と配向、などがあげられるが、本文では以上の諸要因のうち、1), 2) および 3) の要因をとりあげ、単調漸増引張載荷試験によって求めた引張応力-ひずみ曲線に基づいてこれらの要因と鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度ならびに伸び能力との関係を明らかにしたものである。なお、ここで伸び能力はひびわれ開始応力度に対応する引張ひずみと定義してこれを求めた。

図—12 は繊維混入率を一定（3.5%）とした場合におけるひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼす繊維のアスペクト比と種別の影響を示したものである。この図から明らかなことは、ひびわれ開始応力度、引張強度のいずれもアスペクト比が大きくなるほど増大するが、この傾

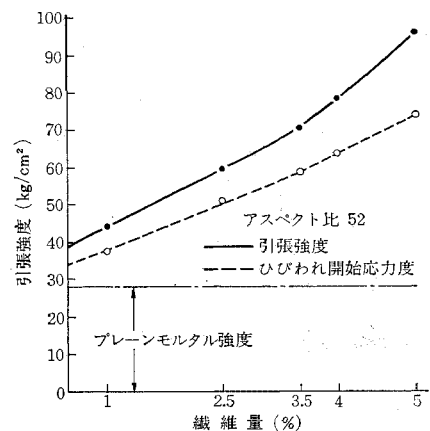


図—12 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼす繊維のアスペクト比と種別の影響



図—13 鋼繊維補強コンクリートの伸び能力に及ぼす繊維のアスペクト比と種別の影響

向は後者の場合に顕著であること、繊維の種別の影響に関しては付着強度の高いせん断ファイバーを用いた場合の方が上記の2つの特性値のいずれもより高い値を示すことなどである。図—13 は図—12 と同じ条件で行った実験結果を伸び能力によって整理したものである。この図より、伸び能力もアスペクト比が大きくなるほど増大し、アスペクト比が100のカットワイヤーを用いたものはプレーンモルタルの値の約 4.5 倍 (450×10^{-6}) に達する。また、カットワイヤーを用いたものの伸び能力は同一アスペクト比のせん断ファイバーを用いたものよりも大きく、この傾向はアスペクト比が大きくなるほど著しくなる。この理由については明快な説明を行うまでには至っていないが、おそらくはカットワイヤーの場合、せん断ファイバーに比し、モルタルマトリックスとの付着強度が低いことがひびわれ開始応力度を低めている反面、マイクロラックの発生に基づくモルタルマトリックスの変形を適度に拘束しつつ連続的に付着破壊を生ずる結果、見掛けの塑性を増すような結果になったものと推測される。



図—14 アスペクトが52のカットワイヤーを用いた場合の繊維混入率がひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼす影響

図-14 はアスペクト比が 52 のカットワイヤーを用いた場合について、ひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼす繊維量の影響を示したものである。この図によればいずれも繊維量に対してほぼ直線的に増大しており、さらに図-11 にも示されているように両者の差も繊維量とともに大きくなる。

図-15 はアスペクト比と繊維量を広範囲に変化させ、これらがひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼす影響を示したものである。これによれば、アスペクト比が 10 程度の鋼繊維でもこれを大量に添加することにより、プレーンモルタルの約 2 倍のひびわれ開始応力度が得られることがわかる。図-16 はひびわれ開始応力度と伸び能力との関係を繊維のアスペクト比と混入率をパラメーターとして示したものである。この図より明らかなこ

とは、1) 繊維量を増大させるに従ってひびわれ開始応力度と伸び能力が増加するが、その関係はプレーンモルタルの引張強度とこれに対応する引張ひずみ、すなわち、伸び能力によって与えられる点を原点とする直線によって表わされる。2) 同一繊維量ではアスペクト比の大きい場合ほど伸び能力が大きくなる。3) アスペクト比が 5~23 の範囲ではアスペクト比の値に関係なく繊維量の変化に伴うひびわれ開始応力度と伸び能力との関係は同一直線で表される、などである。以上の結果において、同一繊維量としたときにアスペクト比を 52 から 100 に増加させても、ひびわれ開始応力度の増加が極めて少ない理由は、アスペクト比の値が 100 程度になると繊維をモルタルマトリックス中へ均等に分散させることが困難になることによるものと考えられる。

5. 鋼繊維補強コンクリートの強化機構に関する複合材料学的考察と強度推定式

鋼繊維補強コンクリートにおけるように、比較的剛性とヤング率の高い短繊維をランダム配向状態でぜい性マトリックス中に分散せしめた複合材料の強化機構に関しては、現在根本的に異なる 2 つの考え方が存在する。その一つはヤング率の高い繊維をコンクリート中に密な間隔で配置すれば、内部ひびわれ先端部 (crack tip) における応力拡大係数が減ずるのでコンクリートが強化されるとする繊維間隔説 (fiber spacing concept) であり、もう一つはこの複合材料を繊維強化系複合材料とみなしてその強化則が適用できるとする考え方⁵⁾ である。現段階ではこれらのうちのいずれの考え方が、このような複合材料の強化機構の説明として妥当であるかという点に

ついてはほとんど明らかにされていない。著者らはこの点を明らかにするために計画した実験結果に基づいて、このような複合材料の強化機構に関する複合材料学的考察を試み、この問題に対する結論を得るとともに、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度ならびに引張強度の推定式を提案した。

(1) 短い鋼繊維によるコンクリートの強化機構に関する考察

鋼繊維補強コンクリートでは、図-1 および図-2 より明らかなように、多くの場合最大

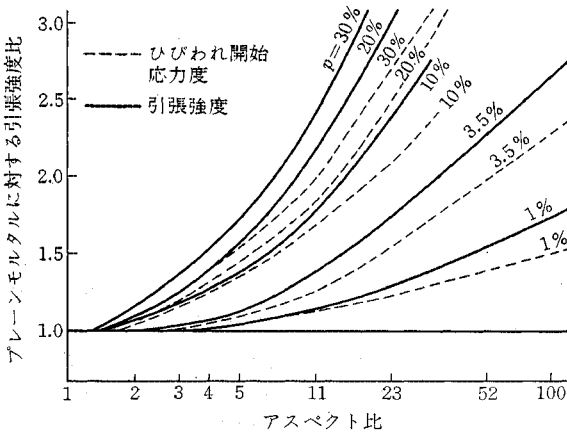


図-15 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と引張強度に及ぼすアスペクト比と繊維混入率の影響

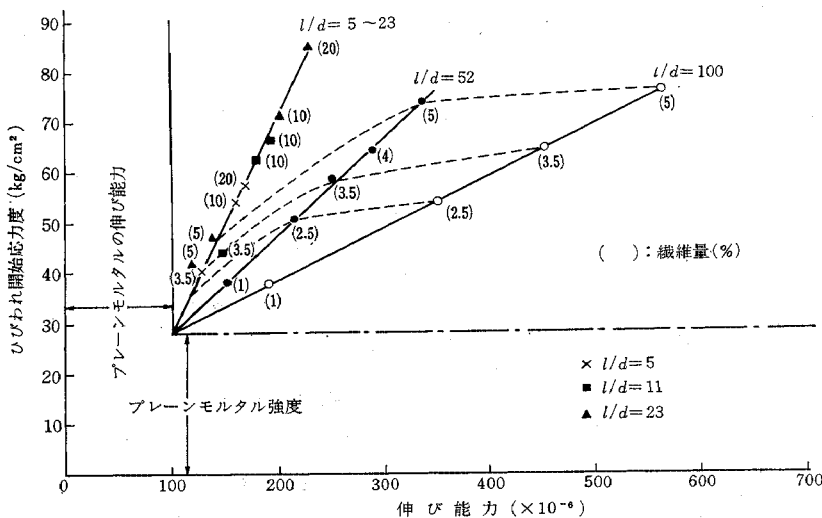
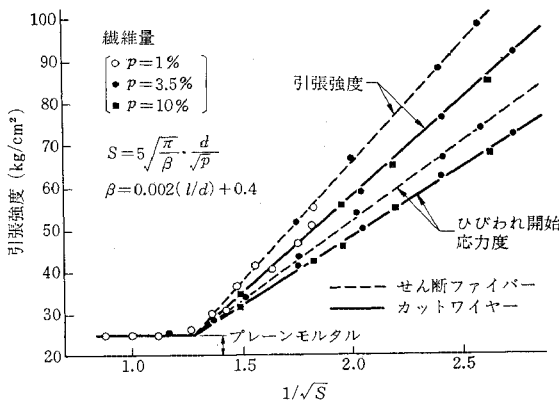


図-16 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と伸び能力に及ぼす繊維のアスペクト比と混入率の影響

荷重とひびわれ荷重がほぼ一致するとともに、図一15に示されているようにその形状が繊維というよりむしろ粒子に近いものでも、これを大量に用いることにより大きい補強効果を生ずるという事実は、このような複合材料における応力分担の主体がマトリックスであって繊維ではないことを意味する。このことはさらに、鋼繊維補強コンクリートが有する強化機構の複合材料学的パターンとしては、繊維強化系以外の強化機構—たとえば粒子強化系としての強化機構—を考える必要があることを示唆している。粒子強化系としての強化機構を考える場合、繊維はマトリックスの変化を拘束することによって複合材料の強化に寄与していることになる⁹⁾。

一般に粒子強化系複合材料では、複合材料が降伏する前に粒子が降伏しないという前提で、その降伏強さが粒子間間隔の平方根の逆数に正比例するという関係が成立する⁷⁾。図一17は鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度ならびに引張強度と、引張断面における有効繊維間の平均間隔の平方根の逆数との関係を表わしたもので、これらの間には一次比例的な関係が存在し、もし鋼繊維の品質が同じであればその形状寸法や混入率の如何にかかわらず、これを素材とした複合材料の降伏点または引張強度が繊維の平均間隔によって支配されることを示している。なお、図一17における繊維の平均間隔 S は次節の(3)に示すような繊維補強コンクリートにおいて一般的に用いられている基本式⁹⁾に基づいて求めたものであるが、著者らはこの中の配向係数 β に対して鋼繊維のアスペクト比の影響を考慮している点が従来の基本式とやや異なる点である⁹⁾。これは、鋼繊維はそのアスペクト比が大きくなるに従って、2次元にランダム配向する傾向が著しくなるという実験結果に基づくものである。

以上の結果は少なくともアスペクト比が100以下の短い鋼繊維をコンクリートのようなぜい性材料中にランダム



図一17 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度及び引張強度と引張断面における有効繊維間の平均間隔の平方根の逆数との関係

ム配向状態で分散せしめた材料は、粒子強化系複合材料と類似の強化機構を有していることを立証したものであり、このことはさらに繊維間隔説の妥当性を複合材料学の立場から示したものと見える。

(2) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と引張強度の推定式

鋼繊維補強コンクリートのひびわれ強度や引張強度を推定する式としては、混合則を修正したものが2, 3提案されているが、粒子強化系複合材料の強化則に基づいてこれらの強度を推定する式は著者の知る限りにおいては皆無である。図一17に示した関係より、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度と引張強度の推定式は以下のように表わすことができる。

$$\sigma_t = K(1/\sqrt{S} - 1/\sqrt{S_c}) + \sigma_m$$

ここに、 σ_t : 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ開始応力度、または引張強度 (kg/cm²)

σ_m : プレーンモルタルまたはコンクリートの引張強度 (kg/cm²)

S : 引張断面における有効繊維間の平均間隔 (cm) で、次式によって計算された値

$$S = 5\sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \cdot \frac{d}{\sqrt{p}}$$

β : 鋼繊維の配向係数。アスペクト比の影響を考慮した次式によって求める^{注2)}

$$\beta = 0.002(l/d) + 0.4$$

d : 鋼繊維の直径 (cm)

p : 鋼繊維の容積混入率 (%)

S_c : 鋼繊維が補強効果を生ずる S の上限値。粗骨材の最大寸法に応じ 0.6~1.0 cm の値をとる。

K : 主として鋼繊維のモルタルまたはコンクリートとの付着強度によって決まる定数で下記の値を用いる

(i) ひびわれ開始応力度を推定する場合

<table border="0"> <tr><td>カットワイヤーに対して</td><td>: 32</td></tr> <tr><td>せん断ファイバーに対して</td><td>: 37</td></tr> </table>	カットワイヤーに対して	: 32	せん断ファイバーに対して	: 37
カットワイヤーに対して	: 32			
せん断ファイバーに対して	: 37			

(ii) 引張強度を推定する場合

<table border="0"> <tr><td>カットワイヤーに対して</td><td>: 45</td></tr> <tr><td>せん断ファイバーに対して</td><td>: 57</td></tr> </table>	カットワイヤーに対して	: 45	せん断ファイバーに対して	: 57
カットワイヤーに対して	: 45			
せん断ファイバーに対して	: 57			

6. む す び

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に関して以下のことが明らかになったと考える。

注2) 文献9)に示した方法に基づいて得られた値を参考として求めたものである。

(1) 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束能力を的確に評価することができる材料特性値として、ひびわれ開始応力度を用いることを提案し、さらにこれを容易に求める方法を示した。

(2) ひびわれ開始応力度ならびに伸び能力に及ぼす鋼繊維の形状寸法、種別および混入率の影響を明らかにした。

(3) 短い鋼繊維をモルタルまたはコンクリート中にランダム配向状態で一様に分散せしめたいわゆる鋼繊維補強コンクリートが、粒子強化系複合材料と類似の強化機構を有していることを確かめるとともに、そのひびわれ開始応力度または引張強度の推定式を提案した。

最後に本研究の実施にあたり、鋼繊維の試料作製に関して多大のご協力をいただいた東京製綱(株)ならびに(株)サンゴに深謝する。また、材料試験機に関しては当研究所第1部の田村研究室のご厄介になった。ここに記して感謝の意を表する次第である。なお、本研究は文部省科学研究費(特定研究:複合材料)の補助を得て実施したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Romualdi, J.P. and Mandel, J.A.: Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Clo-

sely Spaced Short Length of Wire Reinforcement, ACI Journal, Proc. Vol. 61, No. 6, June 1964.

- 2) 小林一輔・趙 力采: 短い鋼繊維によるコンクリートの強化機構, 生産研究, Vol. 28, No. 7 (1976年7月)
- 3) Swamy, R.N.: Fiber Reinforcement of Cement and Concrete, RILEM Materials and Structures, Vol. 8, No. 45 (May-June 1975).
- 4) Shah, S.P. and Naaman, A.E.: Mechanical Properties of Glass and Steel Fiber Reinforced Mortar, ACI Journal, Proc. Vol. 73, No. 1, Jan 1976.
- 5) たとえば Swamy, R.N. and Mangat, P.S.: A Theory for the Flexural Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete, Cement and Concrete Res. Vol. 4, pp. 313~325, 1974.
- 6) たとえば, 林 毅編: 複合材料工学, 日科技連出版, p. 389, 1971.
- 7) たとえば, Broutman, L.J. and Knock, R.H.: Modern Composite Materials, Addison-Wesley Publishing Co., pp. 13~15, 1967.
- 8) たとえば, Parimi, S.R. and Rao, J.K.S.: Effectiveness of Random Fiber in Fiber Reinforced Concrete, Proc. of International Conference on Mechanical Behavior of Materials, The Society of Materials Science, Japan 1971.
- 9) 山王博之・小林一輔・富田 強: 鋼繊維補強コンクリートの引張強度に及ぼす繊維の分散と配向の影響, 生産研究, Vol. 28, No. 7 (1976年9月).

(1976.7.30・受付)