

# 鋼繊維補強コンクリートの荷重-変形特性

Load-Deformation Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete

趙 力采\*・小林 一 輔\*

Ryokche CHO and Kazusuke KOBAYASHI

## 1. は し が き

鋼繊維補強コンクリートの引張または曲げ載荷による破壊は一般に鋼繊維の引抜けによって進行し、このことがその靱性を著しく増大させることはよく知られている。従ってその荷重-変形性状を明確にすることは、それらの破壊過程および強化機構を検討する上で必要であるとともに、これを用いた構造物の設計の見地からも重要である。

本文では圧縮、引張および曲げ荷重下における鋼繊維補強コンクリートの荷重-変形特性（または応力-ひずみ挙動）を明らかにし、これらに及ぼす繊維の形状特性ならびに繊維量の影響を検討したものである。

## 2. 実 験 方 法

本実験では表1に示すような形状特性を有する鋼繊維を水セメント比が一定(45%)のモルタルマトリックス中

表1 鋼繊維の形状特性

アスペクト比 ( $l/d$ )	長さ: $l$ (mm)	直径: $d$ (mm)	容 積 ( $mm^3$ )
11	5.0	0.45	0.80
23	8.0	0.35	0.79
52	14.0	0.27	0.80
100	22.0	0.22	0.83

に分散させ、1)  $\phi 50 \times 100$ mmの円柱形圧縮供試体、2) 断面 $30 \times 40$ mm、平行部(断面 $30 \times 26$ mm)の長さ60mmの角柱状引張供試体ならびに3)  $30 \times 40 \times 270$ mmの曲げ供試体を作製し、それぞれ材令2週で載荷を実施した。なお、引張および曲げ試験は試験機のクロスヘッドの速度を一定として載荷した。1)、2)および3)の各供試体のひずみは電気抵抗線ひずみゲージを用いて求め、引張および曲げ供試体の荷重-変形曲線はクロスヘッドの変位により求めた。さらに、曲げ供試体のスパン中央点のたわみ量は変位計を用いて求めた。

## 3. 引張荷重-変形特性

鋼繊維補強コンクリートの引張荷重による変形特性は図1における引張荷重-変形曲線I'にみられるように織

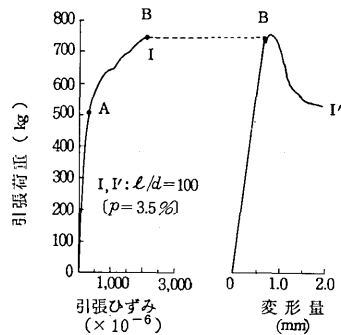


図1 鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形特性

維のアスペクト比が100程度のものを混入した場合、明確な可視ひびわれを生じた(B点)後もコンクリート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て最大値に達し、その後は次第に繊維が引抜けつつ耐力を減ずることである。一方、荷重-ひずみ曲線Iにおいては上記のB点に達するまでの変形特性が極めて詳細に示されており、例えば荷重-ひずみ関係が線形から非線形へ移行するA点などがとらえられている。図2

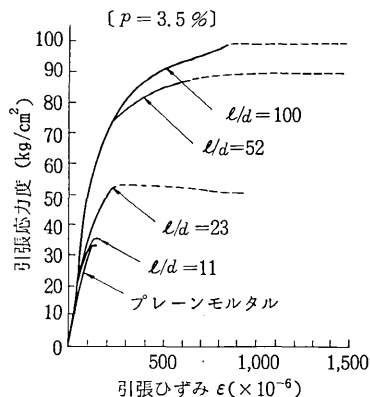


図2 鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

はアスペクト比が11から100までのカットワイヤーを一定量 ( $p=3.5\%$ ) 混入したものの引張応力-ひずみ曲線であり、図3はアスペクト比の小さいカットワイヤー

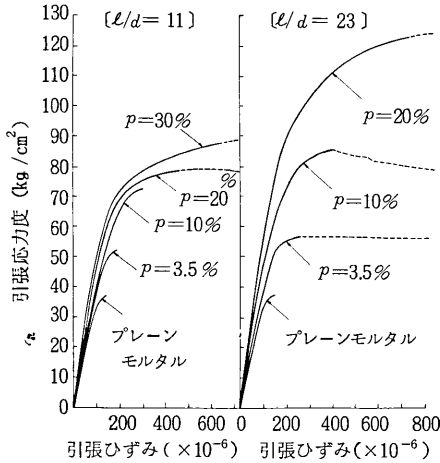


図3 繊維混入率を変化させた鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ曲線

(11と23)の繊維量を3.5%から30%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。これらの図から明らかなことは、1)鋼繊維補強コンクリートの引張荷重下における応力-ひずみ曲線の形状は、そのマトリックスであるモルタルの応力-ひずみ挙動と同様に厳密には原点の立上りからわずかではあるが弯曲している。2)ひびわれ発生時の応力度は繊維のアスペクト比または繊維量が大きくなるほど高く、それぞれ対応する引張ひずみが大きくなること、などである。図4は図2と図3の引張応力-ひずみ曲線から求めた引張ヤング係数に及ぼすアスペクト比と繊維量の影響を示したもので

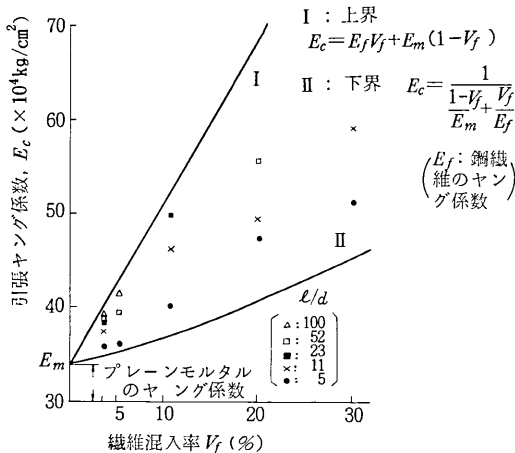


図4 引張ヤング係数に及ぼすアスペクト比と繊維混入率の影響

ある。この図から明らかなことは、3.5%程度鋼繊維を混入した鋼繊維補強コンクリートのヤング係数は、圧縮応力に対する場合と異なり引張応力に対する場合は、相当に増大し、この傾向はアスペクト比の増大とともに著しくなることである。一方、図中の直線Iと曲線IIはそれぞれインクルージョンの量 ( $V_f$ ) を変えた場合のヤング係数における理論的上界と下界を示したものであるが、繊維のアスペクト比が大きい場合のヤング係数は上界(直線I)に近づき、連続繊維を用いたものにほぼ近い値になることを示している。一方、筆者らは前報において鋼繊維補強コンクリートの単軸引張応力-ひずみ曲線上における各特異点を引張応力によって生ずる破壊過程の各段階として捉え、その一つである初期ひびわれ強度を正確に求める方法を提案し、その強度が応力-ひずみ関係の直線から曲線への移行点の応力度とひびわれ強度との間にあることを明らかにしている。図5は図2と図3の横軸を対数目盛によって表わした鋼繊維補強コ

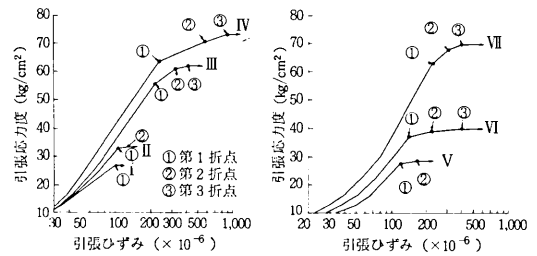


図5 引張載荷された鋼繊維補強コンクリートの特異点応力度コンクリートの応力-ひずみ関係であって、曲線II, III及びIVはアスペクト比が52の繊維をそれぞれ1.0, 2.5及び3.5%混入したもの、曲線V, VI及びVIIはアスペクト比が23の繊維を3.5, 5及び10%混入したものである。図中の数字は各折点を示したもので、第1, 第2及び第3折点はそれぞれ初期ひびわれ強度、ひびわれ強度及び引張強度に相当する。なお載荷試験と同時にを行った供試体表面の拡大鏡観察結果によれば、第1折点では可視ひびわれは認められず、ほぼ第2折点で可視ひびわれ発生が確認された。この図より明らかなように、プレーンモルタルでは各折点がほぼ一致するのに対して、鋼繊維補強コンクリートの引張載荷による破壊形態は、1)第2折点で破壊するものと、2)第3折点で破壊に至るものの二つに大別される。1)の場合、ひびわれ強度と引張強度が一致する、即ち、ひびわれ発生と同時に破壊に至るものであって、このような破壊形態としては、繊維のアスペクト比が小さい場合(曲線V)ならびにアスペクト比が大きいものでは繊維量(1%前後)が小さい場合(曲線II)が該当する。2)の場合はひびわれを生じた後も織

研究速報

維とマトリックスとの付着によって若干の強度増加を伴わない引張強度に達し破壊に至るものであって、アスペクト比が大きい繊維では比較的繊維量が大きい場合（曲線Ⅲ、Ⅳ）、アスペクト比が小さい繊維では前者に対しさらに繊維が大きい場合（曲線Ⅵ、Ⅶ）に該当する。なお、初期ひびわれ強度とひびわれ強度との関係は、(1)の場合にはほぼ一致するのに対して、(2)の場合アスペクト比または繊維量が大きくなるに従ってその差が増大する傾向が認められる。一方、ひびわれ強度との差はいずれの場合もさほど大きくはなく、鋼繊維補強コンクリートにおける一般的な繊維量（1～2%）ではひびわれ強度と引張強度とが一致するとみてさしつかえないと思われる。

4. 曲げ荷重-変形特性

図6はアスペクト比が11から100までの繊維を一定量

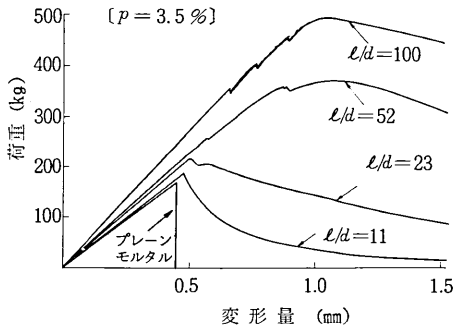


図6 鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-変形曲線

(3.5%) 混入して作った鋼繊維補強コンクリートについて曲げ試験を行い、クロスヘッドの変位量から求めた曲げ荷重-変形曲線が繊維のアスペクト比によってどのように異なるかを示したものである。この図から明らかなのは、(1)鋼繊維補強コンクリートの曲げひびわれ荷重と最大曲げ荷重は引張における場合と同様に繊維のアスペクト比が大きくなるに従って増大すること、(2)ひびわれ後の変形性状は引張における場合とややその傾向を異にすること、などである。後者に関してはアスペクト比が100の繊維を用いた場合の曲線より明らかなように、ひびわれを生じた後も鋸歯状の荷重-変形挙動を示して最大曲げ荷重に達する。このような特異な荷重-変形挙動は供試体の引張縁付近の鋼繊維がマトリックスのひびわれ後直ちにひびわれをブリッジする形でその進展を拘束し、それらの繊維とマトリックスとの付着破壊ならびにすべりが生じるある一定段階まで荷重の増加に抵抗するというパターンのくり返しによるものと考えられる。一方、図7はアスペクト比が52と100の鋼繊維を混入したものの、それぞれ同一供試体の曲げ載荷によるスパン

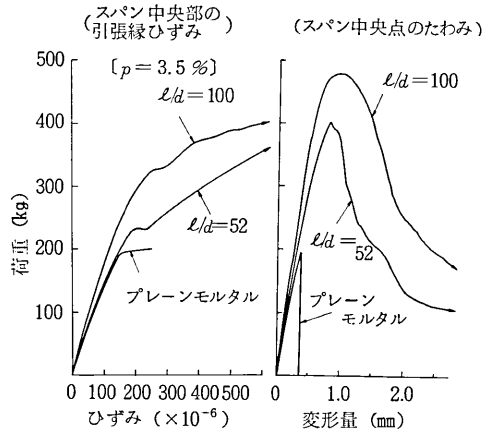


図7 鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-変形特性

中央点のたわみと中央部引張縁のひずみ量の変化を示した荷重-変形曲線と荷重-ひずみ曲線である。

一般に曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ荷重(強度)は曲げ荷重-変形曲線における荷重と変形との関係が線形から非線形へ移行する点(比例限度)に対応する荷重(強度)として求められているが、Swamy<sup>2)</sup>によって指摘されているようにこれを正確に求めることは困難である(左図)。しかるに、荷重-ひずみ曲線(右図)ではマトリックスのひびわれを明確にとらえられることがわかる。図8はアスペクト比が11から

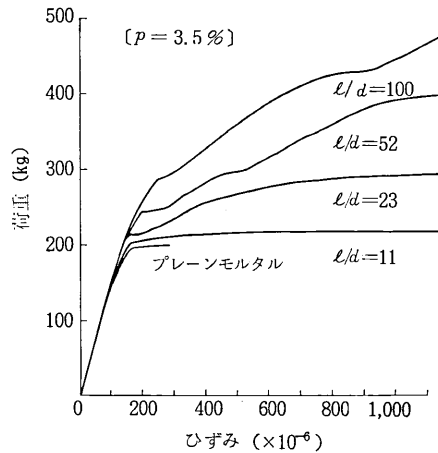


図8 鋼繊維補強コンクリートの曲げ荷重-ひずみ曲線

100までの鋼繊維を一定量 (p=3.5%) 混入した鋼繊維補強コンクリートの引張縁における曲げ荷重-ひずみ曲線を示したものである。図から明らかなのは、引張応力-ひずみ曲線(図2, 3参照)に比して明確に初期ひびわれ荷重(強度)がとらえられること、(2)曲げ載荷された鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度は引張における場合と同様に繊維のアスペクト比が大きくな

研究速報

るに従って増大するが、引張に比しその増加の程度は小さいことなどである。以上のように曲げ载荷された鋼繊維補強コンクリートは、全断面にはほぼ様な引張応力が作用する直接引張における場合と異なり、引張縁付近の鋼繊維の分散ならびに配向状態が相当に強度と変形特性に影響を及ぼすものと考えられる。

5. 圧縮応力-ひずみ挙動

図9はアスペクト比が異なる4種のカットワイヤーを

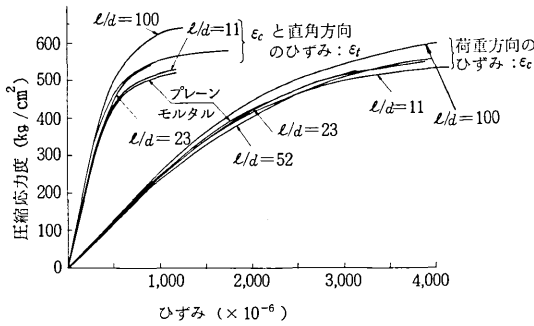


図9 鋼繊維補強コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線

それぞれ一定量 ( $p = 3.5\%$ ) 混入した鋼繊維補強コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線を示したものである。この図より、繊維のアスペクト比の如何にかかわらず荷重方向における応力-ひずみ曲線はプレーンモルタルのものほとんど一致するが、このことは鋼繊維補強コンクリートの圧縮ヤング係数がプレーンモルタルと同程度であることを示すものであり、一方供試体高さ中央部における上記と直角方向のひずみは鋼繊維補強コンクリートの方がプレーンモルタルよりも小さくなるが、この傾向は荷重の増加とともに著しくなることがわかる。図10は図9における圧縮応力度と荷重方向のひずみ ( $\epsilon_c$ )、これと直角方向のひずみ ( $\epsilon_t$ ) との関係から求めた圧縮応力度と体積ひずみ ( $\epsilon_v$ ) ならびにポアソン比との関係を示したものである。この図より明らかなことは、(1)鋼繊維補強コンクリートにおいてもプレーンモルタルと同様に限界応力度が明確に求められること、(2)鋼繊維補強コンクリートの限界応力度は繊維のアスペクト比が

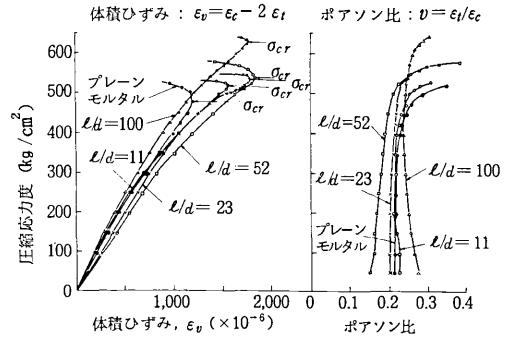


図10 鋼繊維補強コンクリートの体積ひずみ及びポアソン比に及ぼすアスペクト比の影響

大きくなるに従ってより高くなり、その応力度における体積ひずみも同様に大きくなること、(3)鋼繊維補強コンクリートのポアソン比は各応力段階を通じてプレーンモルタルよりも小さくなること、などがそのおもなものである。鋼繊維補強コンクリートの場合、各応力段階における体積ひずみがプレーンモルタルの場合よりも大きくなる理由は図9の結果より明らかなように、鋼繊維補強コンクリートにおける  $\epsilon_c$  はプレーンモルタルと大差がなく、 $\epsilon_t$  がこれよりも小さくなることによる。一方、鋼繊維補強コンクリートの場合、同一応力度でも  $\epsilon_t$  がプレーンモルタルよりも小さくなり、また限界応力度が高い値を示す原因は鋼繊維がコンクリートマトリックス内部の微小ひびわれならびに骨材界面の付着ひびわれの進展を拘束することによるものと考えられる。

最後に本研究の実施に当り、鋼繊維の試料に関して多大のご協力をいただいた東京製綱株式会社に深謝する次第である。  
(1976年7月7日受理)

参考文献

- 1) 趙力采, 小林一輔, 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, 生産研究, Vol.28, No.8, 昭和51年8月.
- 2) R.N.Swamy, Fiber reinforcement of cement and concrete, RILEM Materials and Structures, Vol 8, No.45, May-June 1975.