

# 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

First Cracking Strength and Extensibility of  
Steel Fiber Reinforced Concrete

趙 力 采\*・小 林 一 輔\*

Ryokche CHO and Kazusuke KOBAYASHI

## 1. は し が き

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における顕著な力学的特性の一つは、従来のコンクリートに比べて、ひびわれ強度が大巾に増加することであるが、これを正確に求める方法は未だ確立されていない。一方、ひびわれ強度は鋼繊維補強コンクリートを引張または曲げを受ける構造物に適用する場合における、許容応力度決定の基準ともなる強度と考えられるものであり、鋼材では降伏点に相当する極めて重要な値である。従って、これを求める方法を確立することは鋼繊維補強コンクリートを引張応力に対して設計できる構造材料として位置づける上で必要かつ不可欠のことと考えられる。

本文では、鋼繊維補強コンクリートの単軸引張荷重-変形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の変化を示す点として捉え、その一つとしての初期ひびわれ強度を正確にしかも簡便に求める方法を提案した。さらに、この方法に基づいて求めた初期ひびわれ強度の値に対応する引張ひずみをもって鋼繊維補強コンクリートの伸び能力と定義し、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。

## 2. 鋼繊維補強コンクリートの引張荷重-変形特性

図1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-変形曲線(I', II')とを対比したものである。変形測定スケールにも関連するが、荷重-変形曲線I'とII'においては可視ひびわれを生じたB点までの詳細な変形性状は明らかでない。しかし、アスペクト比が100の繊維を用いた曲線I'を例にとると、ひびわれを生じた後もコンクリートマトリ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、その後はしだいに繊維が引抜けつつ耐荷力を減ずるといったようなマクロな変形特性をよく示してい

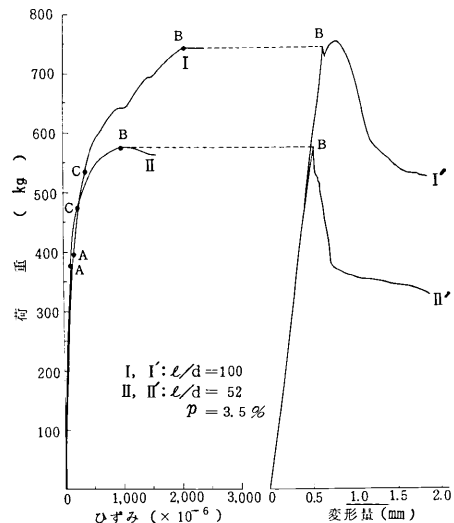


図1 鋼繊維補強コンクリートの荷重-ひずみ曲線と荷重-変形曲線

る。一方、荷重-ひずみ曲線IとII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。ここでA点は骨材とセメントマトリクス界面に生ずるbond crackが急激に発達する応力とみなせば、初期ひびわれ強度はA点とB点との中間に存在することになる。

## 3. 初期ひびわれ強度と伸び能力の求め方

鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度は、現在は荷重-変形曲線、荷重-ひずみ曲線または応力-ひずみ曲線が線形から非線形へ移行する点の応力として求める場合が一般的であるが、この点をもって初期ひびわれ強度とすることの根拠が明確でなく、また上記の荷重-変形(ひずみ曲線)は厳密には原点の立上りからわずかではあるが、弯曲しているため正確にこれを求めることは相当に困難を伴う。などの問題がある。そこで著者

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報  
 らは一般に材料が応力の増加に伴ない降伏またはひびわれを生じた場合には、当然のことながら剛性の急激な低下ならびに残留ひずみの著しい増加を生ずると考え、このような変化を生ずる応力度をもって初期ひびわれ強度と定義した。以上の考え方に基づいて初期ひびわれ強度を求める方法を実例によって以下に示す。

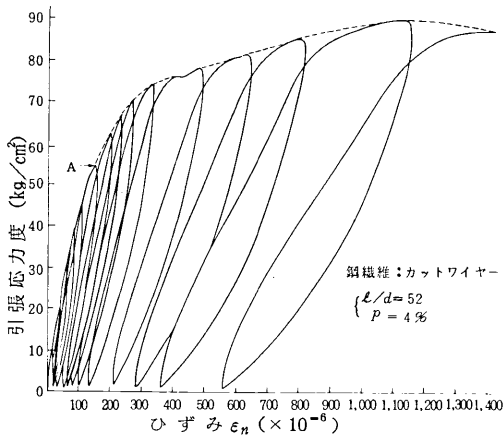


図2 くり返し漸増引張荷試験による  
 応力-ひずみ曲線

図2は鋼繊維補強コンクリートの漸増荷試験による典型的なくり返し応力-ひずみ曲線の1例である。

図中の点線は単調漸増荷による応力-ひずみ曲線にほぼ近似すると考えられる各くり返し荷における最大応力時のひずみの包絡線を示したものである。線形→非線形の移行点による判定方法を各くり返し荷曲線ごとに適用すればA点(応力: 55 kg/cm², ひずみ: 150 × 10⁻⁶)が初期ひびわれ強度となるが、包絡線で与えたような応力-ひずみ曲線からの判定は困難である。

図3はくり返し応力-ひずみ曲線の各成分を示したものであって、 $\sigma_n$ ,  $\epsilon_n$ と $\epsilon_{nr}$ はそれぞれn回目のくり返し荷時の最大応力、ひずみ及び残留ひずみである。また(n+1)回目の応力までの応力-ひずみ曲線の傾きから求めた弾性係数( $E_n$ )がn番目の剛性となる。以上

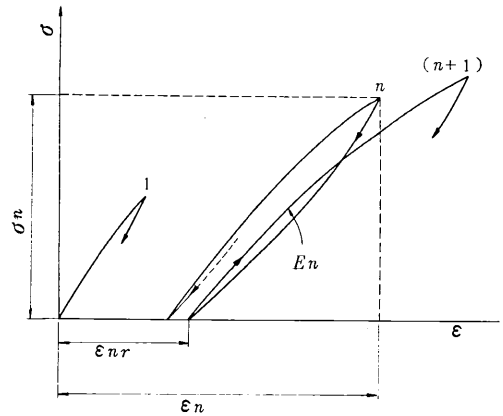


図3 くり返し漸増応力-ひずみ曲線の各成分

の方法により図2から求めたくり返し応力( $\sigma_n$ )に対応する残留ひずみ( $\epsilon_{nr}$ )、剛性( $E_n$ )ならびにひずみ( $\epsilon_n$ )の変化を、明確に表すため、縦軸に引張応力、横軸(対数目盛)に残留ひずみ、剛性ならびにひずみを片対数目盛でプロットしたものが図4(a)(b)(c)である。(a)(b)(c)はそれぞれ $\sigma_n - \epsilon_{nr}$ ,  $\sigma_n - E_n$ 及び $\sigma_n - \epsilon_n$ との関係を示したものであるが、いれの場合も一定応力(71 kg/cm²)まで直線関係が成立し、以後はそれらの直線の傾きが大となり折れ線関係となることがわかる。このことはある一定応力度に達すると残留ひずみとひずみが応力の増加率に比して急激に増加することならびに剛性が同様に低下することを意味している。すなわちこの場合には応力度71 kg/cm²が初期ひびわ

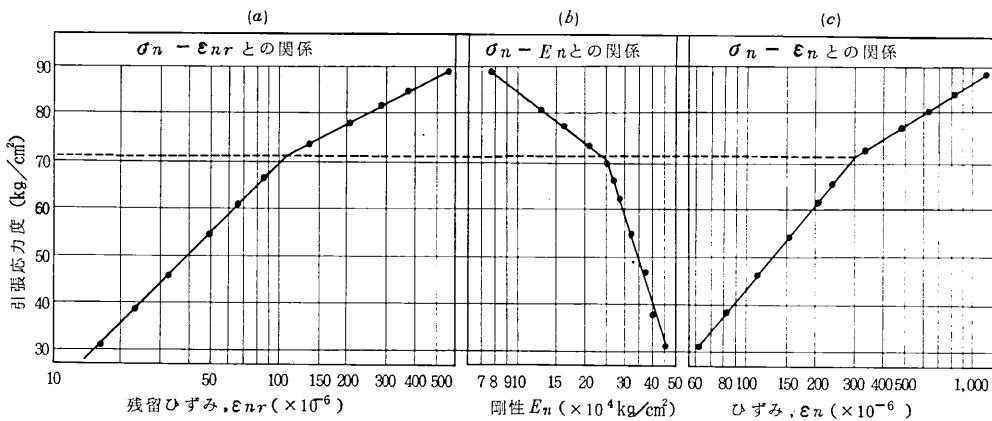


図4 (a)(b)(c) 残留ひずみ、剛性及びひずみの変化

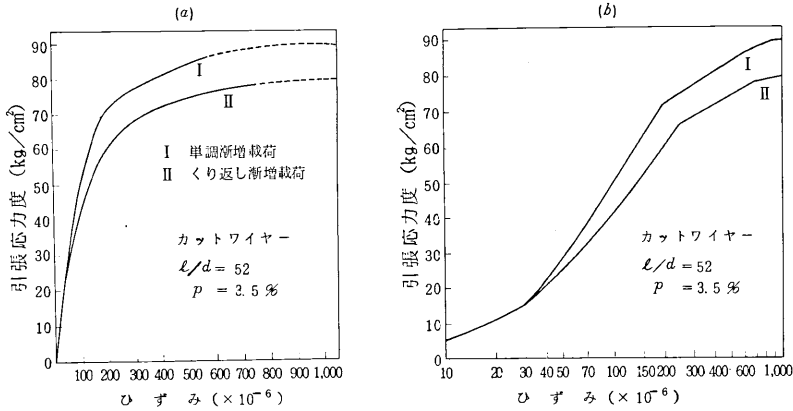


図5 単調及びくり返し漸増荷による応力-ひずみ曲線

れ強度と考えるのが妥当である。以上の関係は繊維量を一定にし繊維のアスペクト比を変化させた場合、さらにアスペクト比を一定にし繊維量を広範囲に変化させたものならびに繊維の種類を変えた鋼繊維補強コンクリートにおいても成立する。図5 (a) は単調漸増荷による応力-ひずみ曲線(I)とくり返し漸増荷による応力-ひずみ曲線の包絡線(II)を示したものであり、図5 (b) はIとIIの曲線を片対数グラフに整理したものである。単調漸増荷による応力-ひずみ曲線においても、くり返し漸増荷の場合と同様に明確な折れ線関係が得られることがわかる。くり返し漸増荷の場合に比べて、やや高目の初期ひびわれ強度を求めることになるが、実用的にはこの単調漸増荷試験による方法が便利である。この方法によって求まる初期ひびわれ強度(図1のC点)はいわゆる応力-ひずみ曲線の直線性からのずれによって求めたもの(図1のA点)より高くなる。以上のようにして鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度を求めることができれば伸び能力はそのときの引張ひずみと定義することにより容易に求めることができる。

4. 初期ひびわれ強度と伸び能力に影響を及ぼす諸要因

初期ひびわれ強度及び伸び能力に影響を及ぼす要因としては、(1)繊維の形状寸法(直径、アスペクト比)、(2)繊維混入量、(3)繊維の分散と配向状態、(4)繊維の種類などが考えられるが、ここでは単調漸増荷による応力-ひずみ曲線に前記の方法を適用して求めた初期ひびわれ強度と伸び能力に及ぼす(1)と(2)の要因の影響について検討した。図6はプレーンコンクリートの引張強度に対する鋼繊維補強コンクリートの初期ひびわれ強度ならびに引張強度比に及ぼす繊維のアスペクト比と混入量の影響を示したものである。なお、ここで用いた繊維の諸元を表1に示す。図からアスペクト比、または繊維量が増加

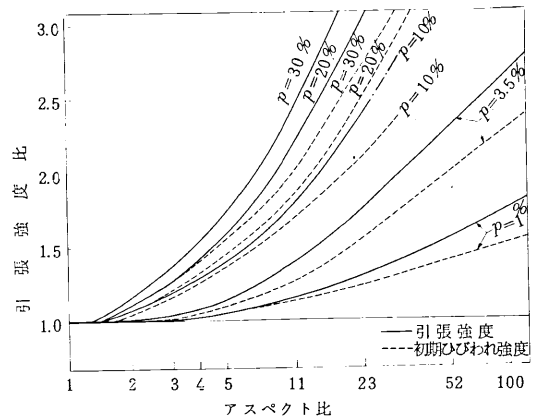


図6 初期ひびわれ強度と引張強度に及ぼすアスペクト比と混入量の影響

表1 繊維の諸元

種別	アスペクト比 (l/d)	長さ l(mm)	直径 d(mm)	容積 (mm <sup>3</sup> )
カットワイヤー	1	1.0	1.0	0.79
	3	2.0	0.7	0.79
	5	3.0	0.6	0.79
	11	5.0	0.45	0.80
	23	8.0	0.35	0.77
	52	14.0	0.27	0.80
セファレンイパ断	100	22.0	0.22	0.83
	11	0.4 × 0.4 × 5		0.79
	23	0.32 × 0.32 × 8		0.79
	52	0.24 × 0.24 × 14		0.79
	100	0.2 × 0.2 × 20		0.79

するにつれて、初期ひびわれ強度と引張強度の強度差は大きくなるのがわかる。図7は伸び能力に及ぼすアスペクト比と繊維の種類の影響を示したものであるが、図から明らかなように繊維の種類にかかわらずアスペクト比が増すにつれて伸び能力は増大し、アスペクト比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4.5倍(450 × 10<sup>-6</sup>)に達し、せん断ファイバーを用いたものは3.5倍(350 × 10<sup>-6</sup>)の伸び能力を有することがわ

研究速報

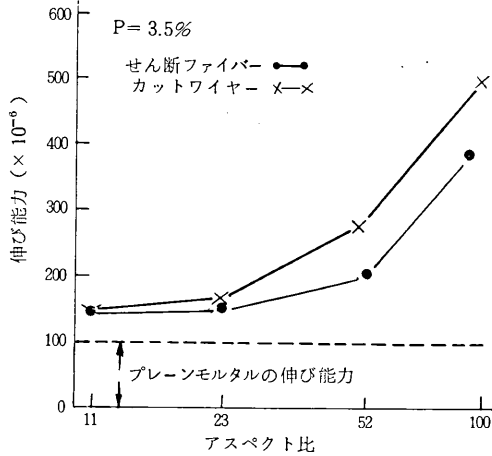


図7 伸び能力とアスペクト比との関係

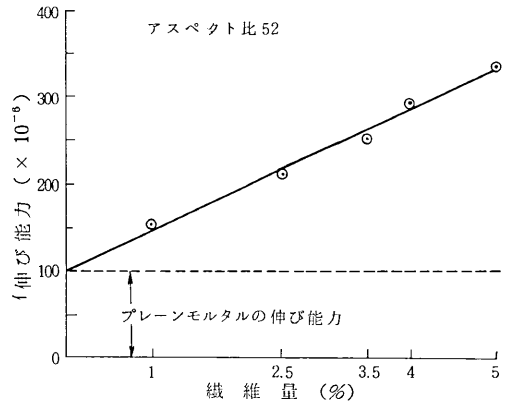


図8 伸び能力と繊維量との関係

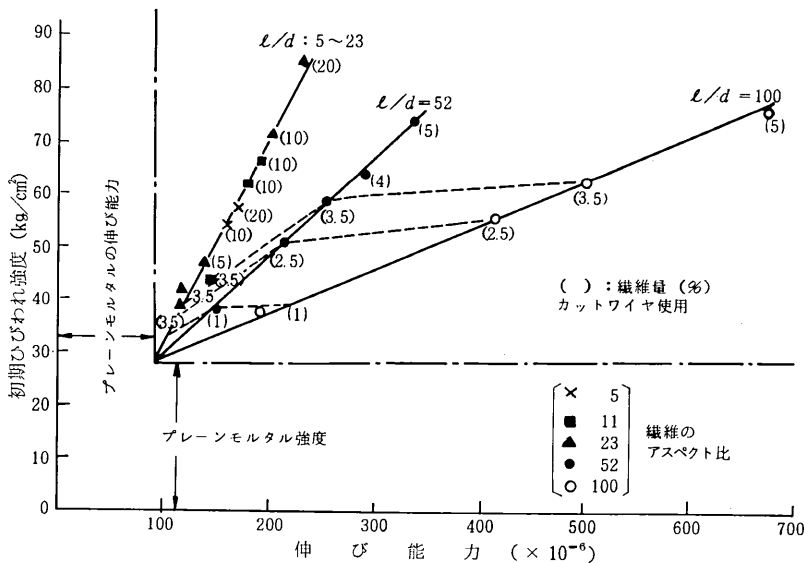


図9 初期ひびわれ強度と伸び能力に及ぼすアスペクト比と繊維量の影響

かる。また繊維表面形状の影響については、せん断ファイバーを用いたものの伸び能力は同一アスペクト比のカットワイヤーを用いたものより小さい。図8はアスペクト比が52の繊維を用いた場合の伸び能力に及ぼす繊維量の影響を示したものであるが、図より伸び能力が繊維量の増加に従ってほぼ直線的に増大し、繊維量5%ではプレーンモルタルの3倍(335×10<sup>-6</sup>)に達することがわかる。表1に示した鋼繊維を用いて、アスペクト比と繊維量が初期ひびわれ強度と伸び能力に及ぼす影響を示したものが図9である。この図から明らかなのは1) 繊維量を増すにつれて初期ひびわれ強度と伸び能力は増加するが、その関係はプレーンモルタルの強度と伸び能力を原点とした直線関係となり、その傾きは繊維形状(アスペクト比)によって異なる。2) 繊維のアスペクト比が

23程度までは同一直線となる。3) 同一繊維量では用いる繊維のアスペクト比が大きいほど伸び能力の大きい鋼繊維補強コンクリートが得られる。などである。

5. む す び

筆者らは以上の結果から鋼繊維補強コンクリートの引張における初期ひびわれ強度と伸び能力の求め方として、単調漸増荷試験による応力-ひずみ曲線を片対数グラフの対数軸にひずみを取ることにより得られる折れ線関係の折点に対応する応力度とひずみをもって初期ひびわれ強度と伸び能力とする方法を提案する。

最後に本研究の実施に当り、鋼繊維試料に関して多々のご協力を頂いた東京製鋼株式会社ならびに株式会社サングに深謝する次第である。(1976年6月1日受理)