

正会員 ○ 趙 力采 (東京理工専)
 正会員 小林一輔 (東大生研)
 西村次男 (東大生研)

1. はしがき

鋼繊維補強コンクリートは従来のコンクリートに比べて多くのすぐれた特性を有しているが、これらの特性を正しく評価しうる適切な試験方法は未だ確立されていない。

本研究は、鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法として、新たに両引き方法による試験方法を提案しその適用性を検討したものである。本研究では、先ず、従来のコンクリートに適用されていた引張強度試験方法である圧裂方法が鋼繊維補強コンクリートの引張特性を正しく評価する試験方法として適切でないことを明らかにした。さらに、直接引張試験もその適用に当っては試験装置面でかなりの制約を伴うこと、などから、新しく両引き方法による試験方法を考案し、この試験方法によって得られる鋼繊維補強コンクリートの引張特性を直接引張試験によるものと比較検討し、その適用性を明らかにした。

2. 鋼繊維、コンクリートマトリックス及び試験方法

表-1は本実験に用いた鋼繊維の諸元を示したものである。カットワイヤーとせん断ファイバーはそれぞれ直径と断面寸法を一定として長さを変化させたもので、鋼繊維補強コンクリートの引張強度に及ぼす鋼繊維の長さの影響を直接引張及び両引き試験方法によって評価する実験に用いた。また、鋼繊維の長さが市販のものと同程度(30mm)のせん断ファイバーと切削ファイバーは引張強度と繊維混入率との関係を圧裂試験方法、直接引張試験方法及び両引き試験方法によって評価する実験に用いた。

種別	アスペクト比 l/d	長さ: l (mm)	直径: d (mm)
カットワイヤー	40	10	0.25
	60	15	0.25
	80	20	0.25
	120	30	0.25
せん断ファイバー	36	0.5×0.5×20	
	54	0.5×0.5×30	
	71	0.5×0.5×40	
切削ファイバー	53	0.3×0.8×30	

一方、鋼繊維補強コンクリートのマトリックスとして、セメントは普通及び早強ポルトランドセメントの2種、水セメント比は $W/C = 4.0, 5.0$ 及び 6.0 の3種とし、粗骨材は最大寸法が15mmの碎石を用いた。

表-1. 使用した鋼繊維の種類と形状寸法

圧裂試験方法は $\phi 10 \times 15$ cmの円柱供試体を用い、載荷は上下の載荷板と供試体との間に幅が10mmで厚さが2mmの分布板(合板)を挿入し、毎分4~5Kg/cmとなるような載荷速度で実施した。

また、直接引張試験方法は、中央部の断面が 10×6 cmで4cmの長さの平行部を持つ供試体をブリケット試験と同様な機構を有する治具を用いて載荷する方法(Ⅰ)、及び中央部の断面が 4.4×4.4 cmで4cmの長さの平行部を持つ供試体を上下のフリクショングリップを用いて載荷する方法(Ⅱ)の2つの方法を用いた。なお、写真-1(Ⅰ)及び写真-1(Ⅱ)はそれぞれ上記の方法(Ⅰ)及び方法(Ⅱ)の供試体と載荷治具を示したものであ

り、載荷は島津製作所製のオートグラフ(容量10t)により、クロスヘッドの速度を毎分0.3mmとして行った。

3. 圧裂試験方法の適用性について

図-1は鋼繊維補強コンクリートの引張強度に関して圧裂方法で求めた値と直接引張方法(方法Ⅰ)で求めた値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、鋼繊維補強コンクリートにおける圧裂引張強度が直接引張強度よりも高くなるのみならず、繊維混入率(V_f)が大きくなるほどその差が増大する傾向を示しており、 $V_f = 2\%$ における圧裂引張強度は直接引張強度の約1.4倍に達していることである。一般に、直接引張試験による鋼繊維補強コ

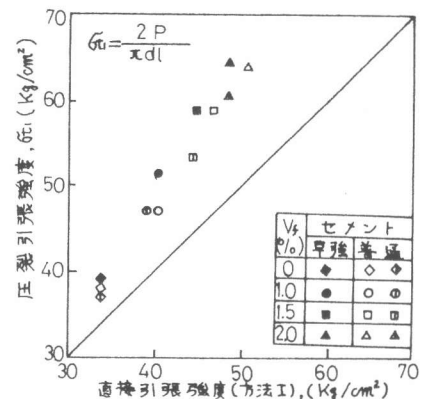
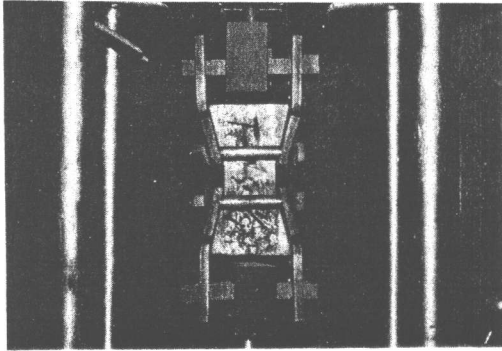


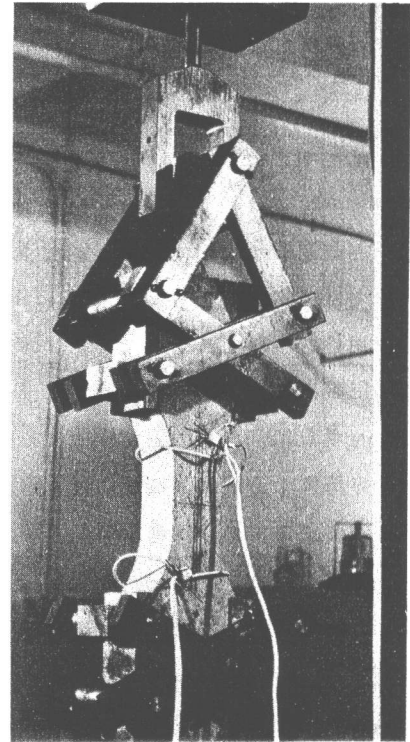
図-1. 圧裂引張強度と直接引張強度との関係

写真-1. 直接引張方法の供試体と載荷治具

方法 (I)



方法 (II)



ンクリートは、可視ひびわれ発生以降は強度が殆んど増大しないのに対して、圧裂試験の場合、可視ひびわれの発生後も強度が増大することが実験的にも確認されている。鋼繊維補強コンクリートの圧裂試験におけるこれらの結果は、ひびわれ発生以後、引張荷重ではなく、鋼繊維によってブリッジされた左右の半円柱形部分の圧縮荷重を行っているような状態となっていることを示すものである。

このことは、圧裂試験では鋼繊維補強コンクリートの引張特性を正確には評価し得ないことを示すものと考えられる。

4. 両引き試験による鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法

4. 1 両引き試験用供試体

一般の両引き試験用供試体ではひびわれ発生の位置、ひびわれ発生数が不明確であることならびにひびわれ発生のパターンも複雑であるのみならずコンクリートの分担力を測定する方法も難しい。そこで、鋼繊維補強コンクリートの引張強度と変形特性を精度よく把握するための必要条件として次の2点を考慮した。

すなわち、歪制御に近い状態で荷重できることと単軸引張応力状態の下で鋼繊維補強コンクリートの強度と変形特性が測定できることである。

この方法は図-2に示すような試験体を用いるものであるが、一般の両引き試験用供試体と異なる点は、1) コンクリート部分に単軸引張応力状態をつくり出すために試験体の中央部の一定区間は鋼棒とコンクリートとの付着を除いていること、2) その区間のコンクリートの表面にワイヤーストレインゲージを貼付して引張荷重ひずみ曲線を求めていること、3) ひびわれ発生位置を指定するためにコンクリート角柱体の中央部に一ヶ所だけ切欠きを設けていること、の3点である。

この方法では鋼棒として、直径が19mmで長さが100cmの機械構造用棒鋼(S53C)を用い、その表面はコンクリートとの付着を絶つ区間(5cm一定)を除きらせん状のネジ切りを行っている。供試体は中央部の一つの相対する面のみに深さが5mmの切欠きを持つコンクリート角柱体(断面寸法が10×10cmで長さを40cm一定とした)を用いた。

なお、荷重は島津製作所のオートグラフ(容量10t)を用いて、クロスヘッドの速度を毎分0.3mmとして行った。

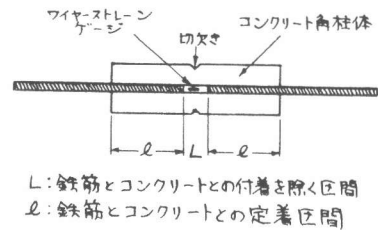


図-2. 両引き試験に用いた供試体

4.2 両引き試験による引張強度と応力ひずみ曲線の求め方

図-3 (a) は両引き試験によって得られるブレン及
び鋼繊維補強コンクリートの引張荷重と供試体切欠き部
の位置における鉄筋のひずみとの関係を示し、図-3 (b)
は同様に引張荷重とコンクリート表面のひずみとの関係
を示したものである。

この場合、コンクリートの引張強度は図-3 (a) にお
いて、ブレン又は鋼繊維補強コンクリートの引張荷重
ひずみ曲線、O A B C 又は O A' B' C' と鉄筋のみの引張荷
重ひずみ曲線 O C とを用いて求めることができる。

すなわち、この2曲線間の縦距離がコンクリートの分担力を示すのであって、ひびわれが発生した A 点又は A' 点
における引張荷重 (P_A 又は P_{A'}) から A 点又は A' 点のひずみ値と同一ひずみ値の時の鉄筋のみの引張力 (P_D 又は P_{D'})
を差引いたものがコンクリートが分担している最大引張力 T 又は T' となる。

従って、コンクリートの引張強度 (σ_t) は式 (1) より容易に求めることができる。

$$\sigma_t = \frac{\text{コンクリートの分担力}}{\text{コンクリートの断面積}} = \frac{T \text{ 又は } T'}{S} \dots\dots\dots (1)$$

一方、ブレン及び鋼繊維補強コンクリートの引張応力ひずみ曲線は以上のように各ひずみ時の引張応力度を
求めて描ける。この関係は図-3 (b) における引張荷重とコンクリート表面のひずみとの関係と鉄筋のみの引張
荷重ひずみ曲線を用いても同様に求められることになる。以上のような両引き試験の適用性について実験的に検
討した結果を次節以下に示す。

5.3 両引き試験方法の適用性

5.3.1 両引き試験による引張応力ひずみ曲線の検討

図-4 (a) と図-4 (b) はそれぞれブレン
コンクリート及び繊維混入率の異なる鋼
繊維補強コンクリートを用いた場合の引張荷重
と切欠き部位置の鉄筋ならびにコンクリート
表面のひずみとの関係と鉄筋のみの引張荷重
とひずみとの関係を示したものであって、丸
印はそれぞれコンクリートの分担力が最大と
なる時点を示している。なお、図中の表はコ
ンクリートの最大分担力と引張強度を示した
ものである。これらの図より明らかなことは

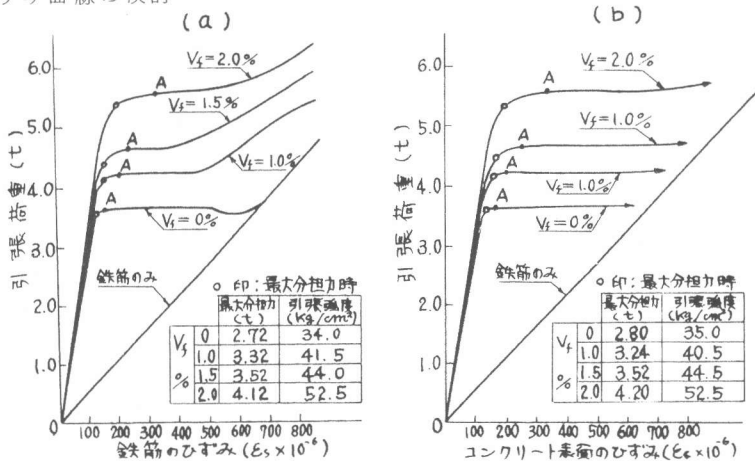


図-4. 引張荷重と鉄筋のひずみ及びコンクリート表面のひずみとの関係ならびに引張強度と最大分担力

1) 可視ひびわれ発生点 (それぞれの曲線の A 点) までは引張荷重と鉄筋及びコンクリート表面のひずみとの関係がほぼ一致し、コンクリート部分の最大分担力もほぼ一致する、2) 各曲線の A 点以降は鉄筋のひずみに比しコンクリート表面のひずみの増大が著しいことなどである、1) の結果において、コンクリート部分の分担力が最大となる時点から A 点までの荷重とひずみ値の増大は漸進的なものであって、少なくともこの試験方法を用いれば、鋼繊維補強コンクリートの引張応力ひずみ曲線の A 点のひずみ値までの下降域 (falling branch) を求め得ることを示すものである、また、2) の傾向はこの試験に特有なものであって、コンクリートのひびわれ発生によるひずみ値に鉄筋との付着を除いた区間のコンクリートの変形回復に基づくひずみ値が加算されることによるものと考えられる、なお、実験時の観察によれば、A 点以降のひずみ値の増大は繊維混

入率が大きいものほど、ゆるやかな速度で進行することが認められた、一方、図-5 (a) における実線は図-4 (a) の関係と式(1)とにより求めたプレーン及び鋼繊維補強コンクリートの引張応力ひずみ曲線を示したものである、図中の破線は同一条件のコンクリートの剛性試験機を用いない直接引張試験により求めた引張応力ひずみ曲線であるが最大強度以降の挙動はひびわれによる急激なひずみ値の増大のために正確には求められていない。この図より明らかなように、両引き試験による引張応力ひずみ曲線は直接引張試験によるものと最大強度まではほぼ一致すると見なし

て差しつかえなく、前者はその後の下降域の傾向を捉えていることがわかる、図-5 (b) は図-5 (a) の応力ひずみ曲線を片対数グラフの対数軸にひずみ値をプロットした場合の関係を示したものであって、直接引張試験における場合と同様に明確な第1折点に対応する応力度、すなわちひびわれ開始応力度が求められていることが明らかである。以上の結果は、両引き試験が剛性試験機を用いなくともコンクリートの引張応力ひずみ曲線における下降域の傾向を捉え得ることを示すものであって、両引き試験の優れた適用性の一つと考えられる。

5. 3. 2 両引き試験による引張強度の評価の検討

図-6 はプレーン及び繊維混入率の異なる鋼繊維補強コンクリートについて両引き試験を実施して求めた引張強度と直接引張試験によるものとの相関関係を示したものである。図から明らかなように、いずれの鋼繊維補強コンクリートならびにプレーンコンクリートの場合も両引き試験による引張強度は直接引張強度とほぼ一致しており、両引き試験により鋼繊維補強コンクリートの引張強度を正確に評価し得ることを示している。

一方、図-7 は繊維混入率を一定 ($V_f = 1.5\%$) とし、直径と断面が一定で長さの異なる鋼繊維を用いた場合の引張強度に及ぼす繊維の長さ又はアスペクト比の影響を両引き試験により評価したものである。この場合、比較として試験方法 I による直接引張試験も行ない、引張強度は前者ならびに両引き試験によるものもプレーンコンクリートに対する鋼繊維補強コンクリートの引張強度比として示した。この図より明らかなように、両引き試験によって求めた鋼繊維補強コンクリートの引張強度は、直接引張強度における場合と同様に、繊維混入率が一定の場合、用いる繊維の長さ又はアスペクト比にほとんど影響されないことが示されており、しかも直接引張強度とよく一致していることがわかる。これらの結果は両引き試験が鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法として適用できることを示すものと考えられる。

6. むすび

本研究では鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法として新たに両引き試験方法を提案し、その適用性を明らかにした。本研究の結果を要約すれば次の通りである。1) 圧裂試験方法は鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法として適用することが困難であることを明らかにした。2) 著者らが提案した両引き試験方法は、特殊な形状の型枠ならびに引張装置を必要としない点、剛性試験機等を使用せずに、コンクリートの引張応力ひずみ曲線における下降域の特性を把握できるという点で直接引張試験より優れていると思われる。

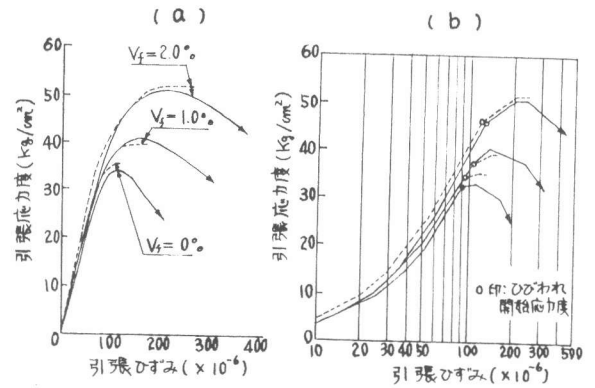


図-5. 図-4より求めた鋼繊維補強コンクリートの引張応力ひずみ曲線とひびわれ開始応力度

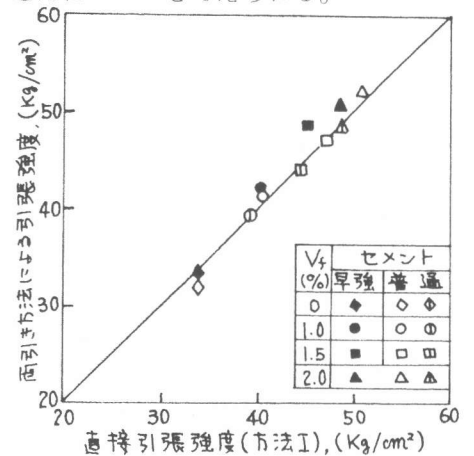


図-6. 両引き方法による引張強度と直接引張強度との関係

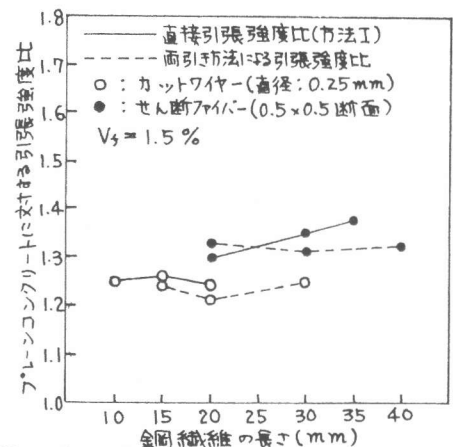


図-7. 両引き方法による引張強度に及ぼす鋼繊維の長さの影響の評価