

論文 格子状連続炭素繊維補強材の引張強度と交差部強度に関する研究

関島謙蔵*¹・新明正人*²・久原高志*³・林耕四郎*⁴

要旨：本研究では、最初に炭素繊維を使用した径の異なる4種類の太径の格子状連続繊維補強材の引張試験を行い、次にコンクリートブロックを用いた引抜き試験による交差部強度試験を行った。その結果、補強材の径が大きくなるほど引張強度は小さくなり、寸法効果の存在することが確認された。一方、交差部強度についても寸法効果は存在するが、径が小さいと交差部における繊維の積層数が少ないため、反対に強度が低下することがわかった。

キーワード：炭素繊維，格子状連続繊維補強材，引張強度，交差部強度，寸法効果

1. はじめに

格子状連続繊維補強材は交差部でコンクリートとの付着・定着を確保している特徴があり、現在色々な分野で使用されているが、その使用実施例については、トンネルやダム の法面などの吹付けコンクリート補強用のように、ガラス繊維を用いた比較的細径のものが多かった。しかし、鉄筋の代替品として格子状連続繊維補強材を使用するためには、ヤング係数の高い炭素繊維が必要であり、また断面の大きな部材に使用するためには、太径のものが必要である。従って、今後これらを使用するためには、その特性を詳しく調べ、明らかにしておく必要がある。

本研究では、最初に高強度炭素繊維を使用した径の異なる4種類の太径の格子状連続繊維補強材の引張試験を行い、引張特性を検討した。次に、コンクリートブロックを用いた引抜き試験によるこれらの補強材の交差部強度試験を行い、交差部強度について検討し、さらに引張強度との相関についても比較検討した。

2. 使用材料、供試体および試験方法

2. 1 使用材料

使用した格子状連続繊維補強材は、高強度炭素繊維をビニルエステル樹脂に含浸して、格子状に成形したものである。補強材の交差部は、縦方向の繊維と横方向

表-1 格子状連続繊維補強材の仕様

筋番	繊維	樹脂	繊維体積混入率 V_f (%)	公称径 D (mm)	公称断面 積 A (mm ²)	幅 b (mm)	高さ h (mm)	繊維束の積層数 (回)
C16	PAN系 高強度 炭素繊維	ビニル エステル	43	11.3	100	11.6	8.6	8
C25				18.2	260	17.6	14.8	20
C29				20.2	320	19.0	16.8	25
C32				22.4	395	24.0	16.5	30

1) 引張強度：4,900N/mm²，ヤング係数：230kN/mm²

*1 清水建設(株)技術研究所未来技術研究部新素材グループ主任研究員、工修(正会員)

*2 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻

*3 清水建設(株)土木本部技術第一部シールドグループ課長

*4 旭硝子マテックス(株)技術・開発部技術開発グループ係長(正会員)

の繊維が交互に積層して成形されている。試験には、C16、C25、C29およびC32の4種類の筋番（呼び名）の補強材を使用した。それらの仕様を表-1に示す。

2.2 供試体

引張試験用の供試体は、筋番1種類について5体ずつ製作した（図-1参照）。供試体は、補強材の両端に鋼管を設置し、定着用膨張材を充填したものである。補強材には定着具からの抜け出しを防止するために定着部内に交差部を2つ設け、また交差部を含んだ補強材の引張強度を調べるために、試験部中央にも交差部を1つ設けてある。供試体の全長は補強材の種類によって異なるが、使用する試験機の大きさの都合によって試験部の長さは全て600mmとした。なお、試験部の中央付近で交差部以外の所に、ひずみゲージを表裏に1枚ずつ軸方向に貼り付けた。

交差部強度試験用の供試体は、土木学会の「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」[1]を参考にしたものであり、筋番1種類について3体ずつ製作した（図-2参照）。立方体の型わくの中央に交差部を1つ設けた格子状連続繊維補強材を鉛直に配置し、コンクリートを打設した。この時、軸筋とコンクリートとの付着を切るために凹凸には油粘土を詰め、表面をラップフィルムとガムテープで覆った（写真-1参照）。また、コンクリートの割裂破壊を防止するために、らせん鉄筋φ6で補強した。コンクリートには早強ポルトランドセメントを使用し、打設後に屋外で約1週間養生した。試験時の圧縮強度は42.3~45.6N/mm²であった。なお、脱型前に、軸筋の反対側には引張力を与えるための定着具として鋼管を挿入し、膨張材を充填した。

2.3 試験方法

引張試験は、膨張材の充填完了後、3~4日後に行った。試験機はアムスラー型1960kN万能試験機を使用した。供試体の両端の鋼管をチャックで直接つかみ、供試体に引張力を加えた。試験中は、供試体が破断するまで荷重を連続的に増加させ、荷重とひずみを測定した。

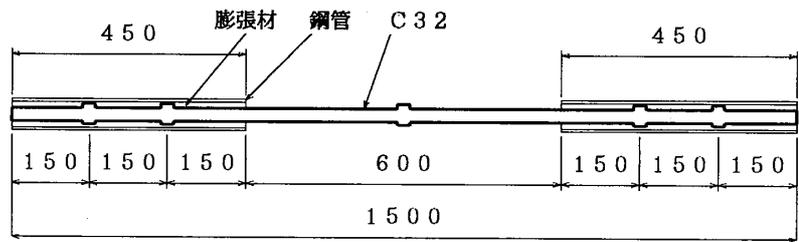


図-1 引張試験用供試体の寸法 (C32)

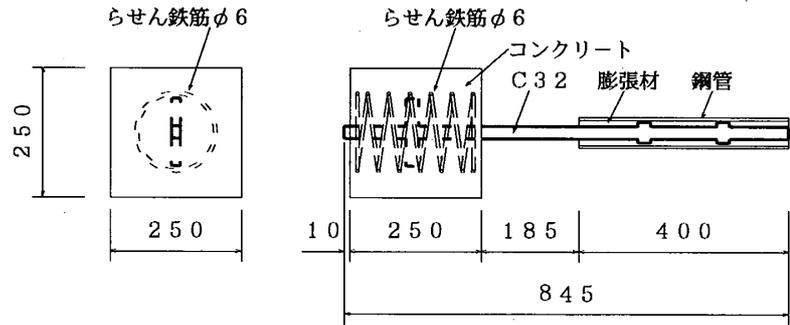


図-2 交差部強度試験用供試体の寸法 (C32)

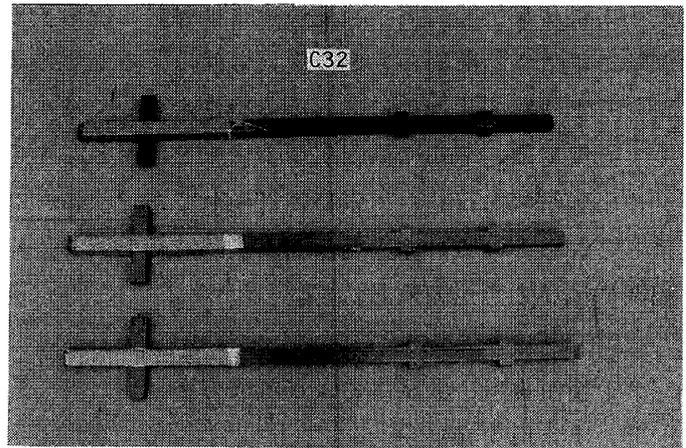


写真-1 交差部強度試験用の補強材 (C32)

交差部強度試験の状況を写真-2に示す。試験装置として、2本のH形鋼-300×300の上に反力台としての金物をボルトで締め付け、センターホールジャッキとロードセルを水平に取り付けた。次に、供試体を水平に設置し、鋼管をPC鋼棒の先端に接続されている受け具の中にセットした。こうして、ジャッキを用いてPC鋼棒を緊張することによって、軸筋に引張力が伝達される。なお、試験中は荷重を段階的に増加させ、交差部が破壊するまで荷重、自由端の変位および軸筋のひずみを測定した。

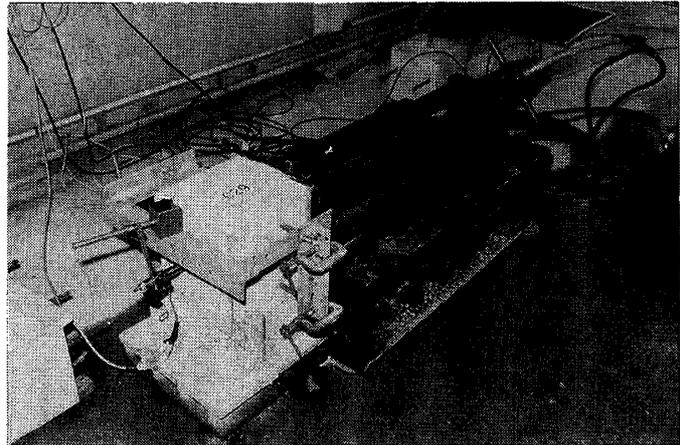


写真-2 交差部強度試験の状況

表-2 引張試験結果のまとめ

筋番	最大引張荷重 F_u (kN)	終局ひずみ ϵ_u (%)	引張剛性 ¹⁾ EA (kN)	引張強度 f_u (N/mm ²)	ヤング係数 ¹⁾ E (kN/mm ²)
C16	170	1.59	10,360	1,700	103.6
C25	355	1.48	22,580	1,370	86.9
C29	426	1.39	30,240	1,330	94.5
C32	522	1.38	37,200	1,320	94.2

3. 試験結果および考察

3.1 引張試験

試験結果のまとめ(5体の供試体の平均値)を表-2に示す。

(1) 破断状況

破断状況はどの供試体も似ており、試験部がバラバラになって竹ぼうき状を呈した(写真-3参照)。

(2) 引張強度

各供試体の試験部の長さは全て600mmであり、この値はそれぞれの公称径の53.1倍(C16)、33.0倍(C25)、29.7倍(C29)および26.8倍(C32)に相当する。土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(案)」[2]によれば、供試体の試験部の長さは公称径の40倍以上と定められているため、同試験方法(案)の規定を満たしている供試体はC16のみである。しかし、同試験方法(案)の解説によれば、各種の補強材の共通引張試験を実施したところ、試験部の長さが公称径の30倍以上あれば引張強度に差がなかったことが確認されている。C29とC32の試験部の長さはさらに短いけれども、この程度の差であれば長さの影響は無視し得るものと考えられる。

各供試体の引張強度と断面積の関係を図-3に示す。径が大きくなるに従って引張強度が低下しており、明らかに寸法効果が存在することが認められる。

(3) 終局ひずみ

ひずみゲージを用いて供試体の破断まで計測し、得られた荷重-ひずみ関係のうち、最も荷重

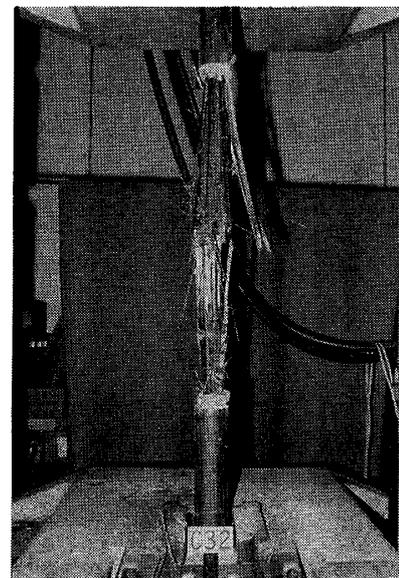


写真-3 破断状況(C32)

が高い（最大引張荷重時、またはこれに近い）時のひずみを終局ひずみとした。表-2に示すように、補強材の径が大きくなるに従って、終局ひずみも減少する。

(4) ヤング係数

代表的な（最大引張荷重が平均値に最も近い）供試体の荷重-ひずみ関係を図-4に示す。破断に至るまで若干下に凸の形を呈している。これは、成形時に炭素繊維がイーブン・テンションになりにくいことによるものである。

最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算したヤング係数と断面積の関係は、径によってばらつきがあるものも、概ね100kNといえる。

3.2 交差部強度試験

全供試体の試験結果の一覧を表-3に示す。

(1) 交差部の破壊状況

交差部の破壊状況の例を写真-4および写真-5に示す。交差部の破壊形式は以下の3種類に分類される。

- A：横筋の二面せん断破壊
- B：交差部の軸筋の破断
- C：主に交差部の軸筋の破断、一部に軸筋のすり抜けあり

径の最も小さいC16の破壊形式は全てA、C25は全てB、C29はBとC、C32はAとBであった。

(2) 交差部強度

今回の試験で求めた交差部強度とは、最大荷重を軸筋の断面積で除したものである。図-5に示すように、交差部強度は引張強度の3~5割程度の値を

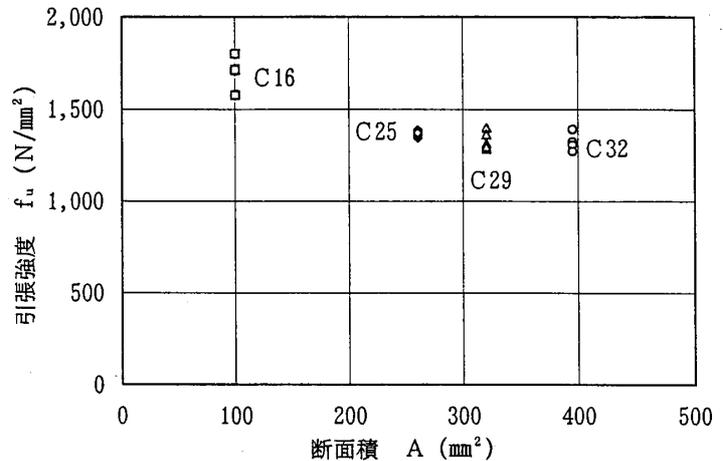


図-3 引張強度と断面積の関係

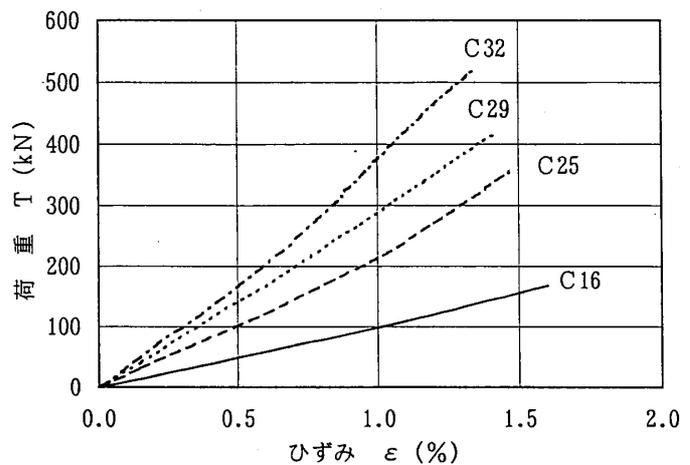


図-4 荷重とひずみの関係

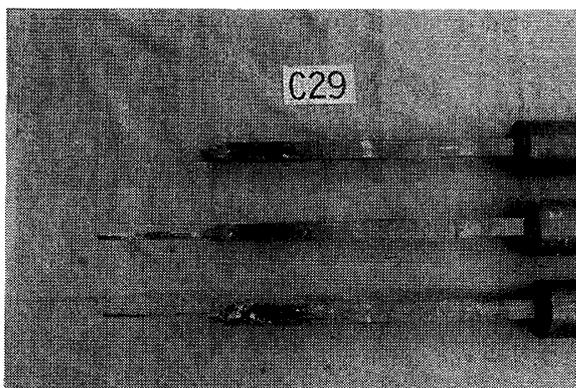


写真-4 交差部の破壊状況 (C29)

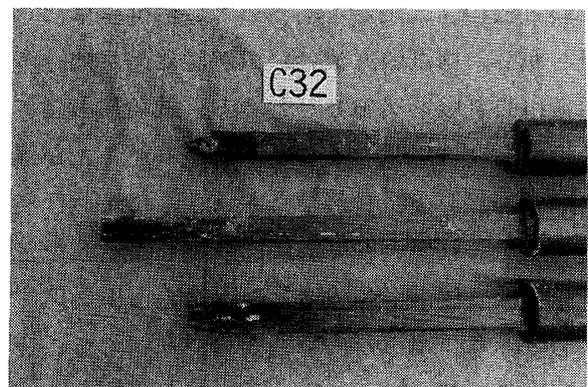


写真-5 交差部の破壊状況 (C32)

表-3 交差部強度試験結果の一覧

供試体	傾きが急変する点の荷重 P_g (kN)	傾きが急変する点の変位 δ_g (mm)	傾きが急変する点の応力 σ_g (N/mm^2)	最大荷重 P_u (kN)	最大荷重時の変位 δ_u (mm)	交差部強度 σ_u (N/mm^2)	σ_u/f_u	破壊形式 ¹⁾	
C16	No.1	17.1	0.27	171	57.2	9.87	572	0.34	A
	No.2	15.9	0.27	159	59.1	11.34	591	0.35	A
	No.3	19.4	0.35	194	68.2	10.74	682	0.40	A
	平均	17.5	0.30	175	61.5	10.65	615	0.36	——
C25	No.1	46.2	0.43	178	182.4	11.45	702	0.51	B
	No.2	47.2	0.38	182	181.1	8.21	697	0.51	B
	No.3	45.0	0.33	173	185.0	8.76	712	0.52	B
	平均	46.1	0.38	177	182.8	9.47	703	0.51	——
C29	No.1	58.2	0.41	182	202.2	8.78	632	0.48	B
	No.2	56.9	0.39	178	206.9	8.88	647	0.49	C
	No.3	58.0	0.42	181	199.5	7.26	623	0.47	C
	平均	57.7	0.41	180	202.9	8.31	634	0.48	——
C32	No.1	74.8	0.58	189	227.3	8.10	575	0.44	B
	No.2	75.3	0.53	191	216.3	9.20	548	0.41	A
	No.3	66.8	0.54	169	215.4	11.61	545	0.41	B
	平均	72.3	0.55	183	219.7	9.64	556	0.42	——

1) 破壊形式は以下のように分類した。

A: 横筋の二面せん断破壊

B: 交差部の軸筋の破断

C: 主に交差部の軸筋の破断、一部に軸筋のすり抜けあり

示している。C25以上の太径については径が大きくなるに従って交差部強度が低下しているが、引張強度とは異なり、C16の値がC25よりも小さくなっている。このことより、交差部強度に関しては、C25以上の太径の場合には寸法効果が存在するが、C16については別の原因があると考えられる。つまり、格子状連続繊維補強材の交差部は軸方向の繊維と横方向の繊維とが交互に積層されていて、樹脂の接着強度と繊維同志の拘束効果によって強度を発揮している。従って、径が小さいと炭素繊維の積層数が少なくなるので、反対に交差部強度が低下したと思われる。

なお、C25以上の太径の供試体のコンクリートには、試験中にひび割れが発生した。C32の場合、No.2の供試体は最大荷重に達した後にひび割れが発生したが、No.1およびNo.3の供試体の交差部強度とは大差なかった。これは、らせん鉄筋の拘束によるものである。従って、他の供試体についてもコンクリートのひび割れが交差部強度に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

(3) 自由端変位

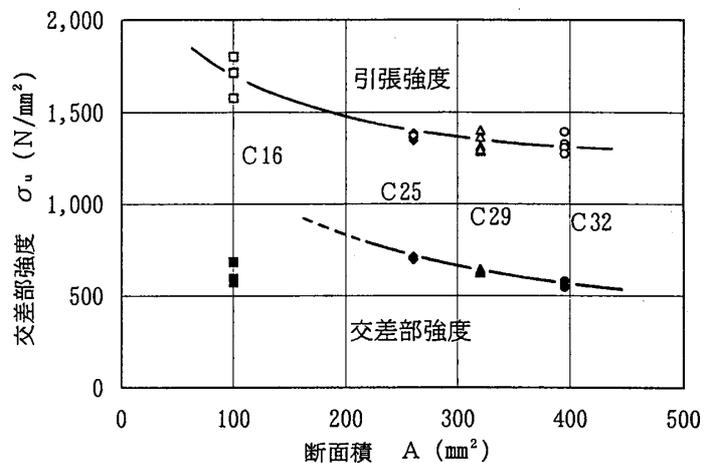


図-5 交差部強度と断面積の関係

代表的な供試体の荷重と自由端変位の関係を図-6に示す。どの供試体も、荷重を加え始めてから自由端変位が0~0.5mm程度までの傾きと、そこから交差部の破壊に至るまでの傾きとは大きく異なっている。前者は支圧応力を受ける横筋の圧縮変形、後者は交差部からの軸筋の抜け出しと考えられるが、さらに詳細な検討を必要とする。

傾きが急変する点は、土質力学の分野における圧密圧力-間隙比関係を表すグラフを参考にして求めた[3]。表

3に示すように、傾きが急変する点の自由端変位は、径が大きくなるに従って増加するが、応力はほぼ一定である。一方、最大荷重時の自由端変位は供試体によって大きなばらつきがある。

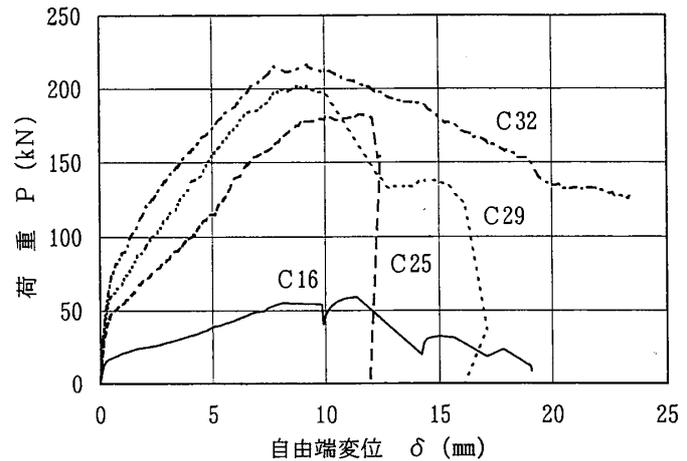


図-6 荷重と自由端変位の関係

4. まとめ

- (1) 引張強度は径が大きくなるに従って低下しており、寸法効果が存在することが認められた。
- (2) 引張試験における荷重-ひずみ関係は、破断に至るまで若干下に凸の形を呈している。
- (3) 交差部の破壊形式は、A：横筋の二面せん断破壊、B：交差部の軸筋の破断、C：主に交差部の軸筋の破断、一部に軸筋のすり抜けあり、の3種類に分類される。
- (4) 交差部強度は引張強度の3~5割程度であり、C25以上の太径の場合には寸法効果が現れている。径が小さい場合は、交差部における炭素繊維の積層数が少ないため、強度は低下する。
- (5) 交差部強度試験における荷重と自由端変位の関係に見られる傾きが急変する点の変位は、径が大きくなるほど増加する。

謝 辞

本研究を行うに当たり、日本大学理工学部土木工学科 若下藤紀先生に御助言を頂いたことに感謝します。

参考文献

- [1] 土木学会連続繊維補強材研究小委員会資料：引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)，1995
- [2] 土木学会連続繊維補強材研究小委員会資料：連続繊維補強材の引張試験方法(案)，1995
- [3] 浅川美利：土質工学演習，鹿島出版会，1993
- [4] 宇田川貴章，望月 重：二次元格子状連続繊維補強材の付着・定着について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1141~1146，1994
- [5] 宇田川貴章，望月 重，幸村憲衛：二次元格子状連続繊維補強材の格子接点強度に関する実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.1001~1006，1995
- [6] 若下藤紀，新明正人，関島謙蔵，久原高志，林耕四郎：格子状FRP筋の交差部強度に関する実験的研究，平成7年度日本大学理工学部学術講演会講演論文集，pp.531~532，1995.11