

論文 CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性

岳尾弘洋*¹・松下博通*²・牧角龍憲*³・長島玄太郎*⁴

要旨：炭素繊維シートを接着したコンクリート試験体を両引き試験し、炭素繊維シートの剥離形態、ひずみ分布、付着応力分布を明らかにし、定着長の基本的考え方を示した。また、炭素繊維シートの付着強度を決定する因子として、炭素繊維シートの引張剛性、コンクリート表面処理方法、コンクリート強度、プライマーなどの種類を変えて両引き試験し、各パラメーターが終局荷重に与える影響を比較した。

キーワード：CFRP 接着工法、炭素繊維シート、付着応力分布、引張剛性、表面処理

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の補強として、炭素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させながら積層一体化させる CFRP 接着工法は、軽量、高強度、高耐久性、施工が容易など多くの特徴を持っており、近年実績の多くなってきた工法である。本工法は、コンクリート表面に発生する応力を面に直行する圧縮応力が存在しない状況でエポキシ樹脂を介して炭素繊維シートに伝達する面接着に耐力を依存する工法である。本工法により補強された部材の終局耐力は、炭素繊維シートとコンクリート表面の付着強度に左右されるものと考えられ、破壊状況の確認、付着性状の把握、付着強度を決定する因子の選別を目的に本研究を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に試験体形状寸法を示す。本実験で使用した両引き試験体は、10 cm × 10 cm の断面とし、長さを 70 cm から 150 cm と変化させて作製した炭素繊維シート補強コンクリート棒部材である。試験時のつかみ部として異形鉄筋 D19 を長さ 31 cm だけ埋め込み、鉄筋の抜け出しを防ぐためにらせん鉄筋を配筋する。試験体の中心部にはスリットを入れひび割れの発生を誘導する。炭素繊維シートは試験体の向かい合う二側面にエポキシ樹脂含浸剤を用いて接着し、その接着幅はどれも一様に 4 cm とするが、接着長さは試験体によって片側 10 cm から 50 cm と変化させる。

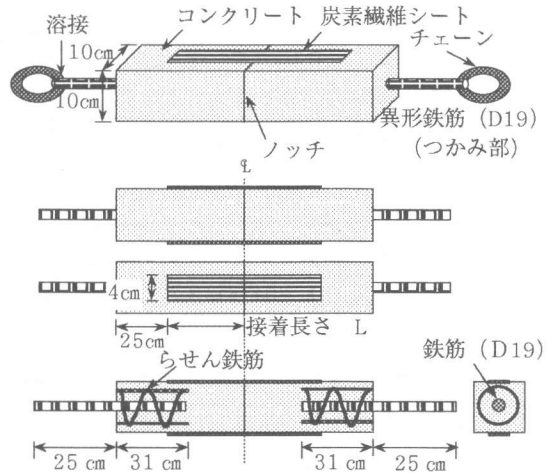


図-1 試験体形状寸法

- * 1 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- * 2 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博 (正会員)
- * 3 九州大学助教授 工学部建設都市工学科、工博 (正会員)
- * 4 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻

2.2 実験要因

表-1、表-2にシリーズ1、2の両引き試験体実験要因を示す。シリーズ1の実験要因(表-1)は炭素繊維シートの接着長さであり、片側接着長さを10、20、30、50cmと変化させた試験体を作製した。また、炭素繊維シートの付着応力分布を測定するため、炭素繊維シート表面にワイヤーストレインゲージを取り付けた片側接着長さ50cmの試験体も作製した(No.1-5)。

表-1 シリーズ1実験要因

試験体 No.	接着幅 (cm)	接着長さ (cm)
1-1	4	10
1-2		20
1-3		30
1-4		50
1-5		

表-2 シリーズ2実験要因

試験体 No.	コンクリート 目標圧縮強度 (N/mm ²)	炭素繊維シート			プライマー	表面処理方法		
		弾性係数 ×10 ⁵ (N/mm ²)	厚さ (mm)	層数				
2-1	25.0	2.30	0.167	1	標準	ディスクサンダー		
2-2			0.334	2				
2-3			0.501	3				
2-4		3.73	0.165	1			高圧水洗 (9.81×10 ⁶ Pa)	
2-5		2.30	0.167				高圧水洗 (39.2×10 ⁶ Pa)	
2-6							ドライアイスブラスト (2.25×10 ⁶ Pa)	
2-7		50.0	2.30				0.167	1
2-8	標準							
2-9				25.0				
2-10								

表-3 炭素繊維シート物性

弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	1層の厚さ (mm)	目付量 (g/m ²)	破断伸度 (%)
2.30×10 ⁵	3481	0.167(0.111)	300(200)	1.5
3.73×10 ⁵	2942	0.165	300	0.8

シリーズ2の実験要因(表-2)は炭素繊維シートの積層数、弾性係数、目付量、コンクリートの表面処理方法、コンクリート強度、プライマーの仕様であり、シートの接着長さは10cmで一定とし試験体を作製した。シリーズ1、2において使用したコンクリートは、粗骨材の最大寸法を20mmとし、スランプは8cm、空気量は2.5%とし、W/Cは、目標圧縮強度25.0N/mm²のものは66.7%、50.0N/mm²のものは38.4%を目標とした。使用した炭素繊維シート、含浸接着剤の物性を表-3、表-4に示す。接着手順は、ディスクサンダーによるコンクリート表面処理の後、エポキシ樹脂プライマー(0.4kg/m²)を塗布し、エポキシ樹脂含浸接着剤(0.8kg/m²)を塗布しながら炭素繊維シートを含浸接着させた。

表-4 含浸接着剤物性

曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断強度 (N/mm ²)	混合粘度 (mPa·s)
85.8	59.7	15.7	4130

2.3 荷重方法

両引き試験は図-2に示す荷重装置を用いて試験体に軸方向引張力を与えた。試験体に埋め込んだ異形鉄筋には鎖が溶接されており、試験装置の鎖と連結させ、完全に偏心をとり引張試験を行った。荷重は変位制御(0.03mm/min)により行い、引張荷重、試験体軸方

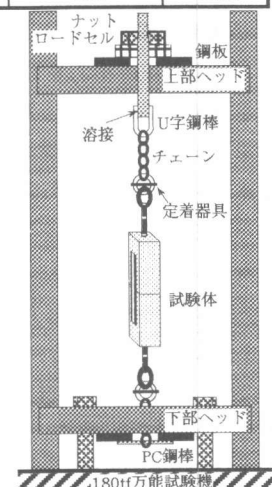


図-2 荷重装置

向の変位、炭素繊維シートのひずみを測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 シリーズ1

(1)破壊性状

a. 破壊状況

試験体中央部破壊状況の代表的例を図-3に、ひび割れ発生過程及び終局に至る破壊パターンを以下に示す。

①軸方向引張応力により、試験体中央ノッチ部にひび割れが発生した。

②ノッチ部付近に、軸に対し約45度の角度をなす斜めひび割れが発生。同時に炭素繊維シートの剥離が、破壊音と共に試験体中央部から発生した。

③発生した剥離は中央より両側に進行していき、その間荷重の伸びは見られなかった。

④四接着面のうち一接着面の剥離が接着面端部に達し、全面剥離することで終局に至った。

b. 剥離形態

試験体の破壊は、炭素繊維シートの接着面における剥離であったが、以下の2種類の形態が認められた。

- ・コンクリート表層部の凝集破壊
- ・含浸接着剤、プライマー間の界面破壊

No.1-5-①試験体の剥離スケッチを図-4に示す。コンクリート表層部の凝集破壊は、試験体によって生じた深さが違っており、同一の試験体でも、二つの接着面で異なる形態の破壊をする場合があった。

(2)接着長さ と 終局荷重の関係

表-5にシリーズ1での両引き試験体実験結果を、図-5に片側接着長さ と 各荷重の関係を示す。表-5の試験体No.①②は、同一要因の試験体番号を示す。この表より各試験体の剥離進行時最大荷重は、炭素繊維シートが全面剥離する終局荷重とほぼ同一であることがわかる。また、同一条件で作製し接着長さを変化させた試験体No.1-1からNo.1-5までの剥離発生荷重および終局荷重がほぼ同じことから、炭素繊維シートの剥離が発生し始

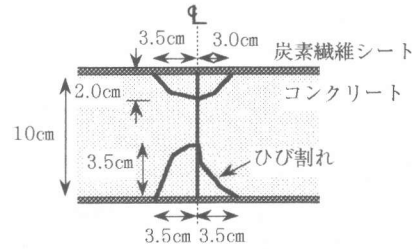


図-3 破壊状況

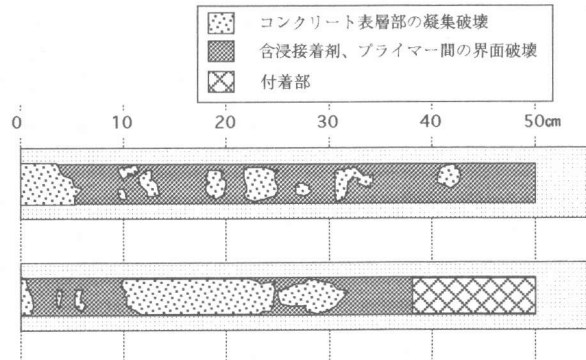


図-4 剥離状況

表-5 シリーズ1実験結果

試験体 No.	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	剥離発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)
1-1-①	23.4	17.5	17.5
1-1-②	21.6	17.7	17.7
1-2-①	23.4	18.6	18.6
1-2-②	21.6	17.2	17.0
1-3-①	23.4	18.6	18.6
1-3-②	21.6	17.2	16.6
1-4-①	23.4	17.0	16.1
1-4-②	21.6	17.0	16.1
1-5-①	26.8	15.0	16.9
1-5-②	26.8	16.9	14.6

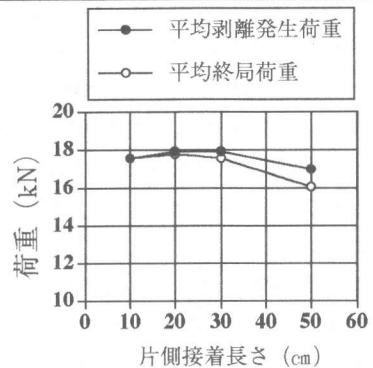


図-5 片側接着長さ と 各荷重の関係

めると、引張耐力は増加せず、片側接着長さが10 cm 以上の場合、接着長さを長くしても剥離発生荷重及び終局荷重は増大しないと言える。

(3)ひずみ分布及び付着応力分布

図-6、図-7にNo.1-5-①試験体のひずみ分布図、付着応力分布図を示す。ひずみは炭素繊維シート表面に貼付したワイヤーストレインゲージで測定し、付着応力は隣接ひずみゲージ間のひずみ差と、炭素繊維シートのメーカー公称弾性係数、公称厚さの積をゲージ間の長さで割った値とした。図-6のひずみ分布図より、

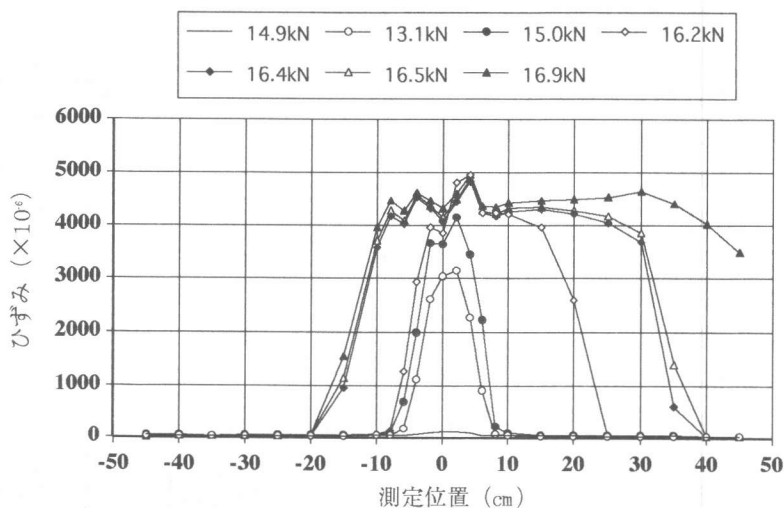


図-6 ひずみ分布 (No.1-5-①)

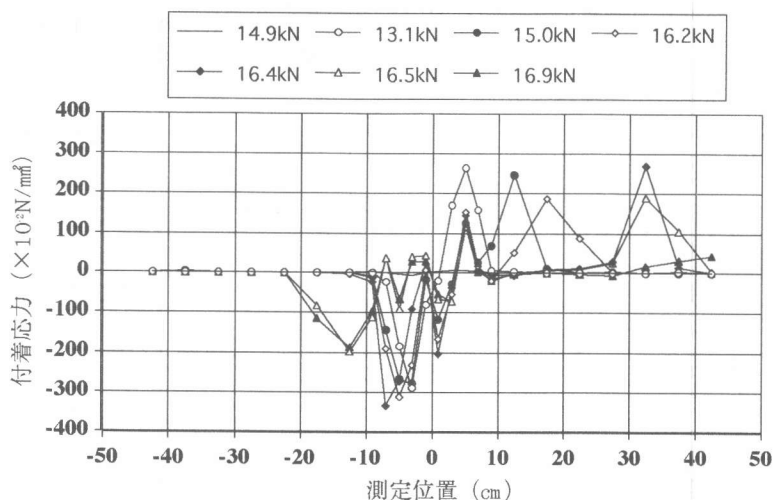


図-7 付着応力分布 (No.1-5-①)

炭素繊維シートに4500 μ 程度のひずみが発生した時点で剥離が接着面端部に進行していき、全面剥離に至ることがわかる。また図-7より、付着応力分布は底辺が10cm程度の山型の曲線となり、剥離の進行に伴って同一形状の付着応力分布が接着面端部に移動することがわかる。付着応力分布図より読みとれる剥離進行過程の付着有効長さは10 cm程度である。このことからシリーズ1の片側接着長さが10cm以上の場合、接着長さを長くしても剥離発生荷重および終局荷重は増大しないということが説明される。

3.2 シリーズ2

(1)炭素繊維シートの引張剛性と終局荷重の関係

表-6にシリーズ2での両引き試験体実験結果を示す。表-6の試験体No.①②③④⑤は、同一要因の試験体番号を示す。引張剛性は公称引張弾性係数と公称断面積の積であり、炭素繊維シートの積層数、弾性係数、目付量をパラメーターとし実験を行った。どの試験体も炭素繊維シートが接着

面で全面剥離し終局を迎えたが、高弾性シートを用いたNo.2-4-①、No.2-4-②は剥離と同時に別の接着面で炭素繊維シートの破断が生じた。

引張剛性と終局荷重の関係を図-8に示す。この図よりNo.2-1、No.2-2、No.2-3はほぼ同一直線上にあり、積層数が1層から3層の場合、終局荷重は積層数に比例して上昇すると言える。目付量の小さい炭素繊維シートを用いた試験体No.2-10も、直線の延長上にあり、引張剛性が $1.02 \times 10^3 \text{kN}$ から $4.62 \times 10^3 \text{kN}$ の範囲で弾性係数が等しい炭素繊維シートを使用した場合、終局荷重は補強量に比例していることがわかる。

高弾性シートを用いたNo.2-4は直線上になく、やや上側にある。これにより弾性係数は引張剛性の中でも特に終局荷重を向上させるパラメーターであると言える。

以上より、炭素繊維シートの引張剛性は、終局荷重と正の相関関係にあることがわかった。

(2)表面処理方法と終局荷重の関係

表面処理の方法としてディスクサンダー処理、高圧水洗 ($9.81 \times 10^6 \text{Pa}$)、高圧水洗 ($39.2 \times 10^6 \text{Pa}$)、ドライアイスブラスト ($2.25 \times 10^6 \text{Pa}$)をパラメーターとして実験を行った。試験体は全て炭素繊維シートが接着面で全面剥離し終局を迎えた。

表面処理方法による終局荷重の差異を図-9に示す。通常ディスクサンダー処理と比較して高圧水洗 ($9.81 \times 10^6 \text{Pa}$)による表面処理は終局荷重に大きな効果を持つことがわかる。またNo.2-5より水洗圧力の大きいNo.2-6のほうが、終局

表-6 シリーズ2実験結果

試験体 No.	コンクリート物性			終局荷重 (kN)
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	
2-1-①	25.3	2.57	2.62	17.5
2-1-②				17.7
2-1-③	26.5	2.72	2.63	15.5
2-1-④				15.3
2-1-⑤	24.7	2.83	2.48	18.0
2-2-①	25.3	2.57	2.62	24.0
2-2-②				21.6
2-3-①				25.3
2-3-②				28.7
2-4-①	24.7	2.83	2.48	23.1
2-4-②				22.0
2-5-①	26.5	2.72	2.63	19.7
2-5-②				19.0
2-6-①				17.6
2-6-②				18.5
2-7-①				15.3
2-7-②				13.6
2-8-①	50.6	3.99	3.63	15.5
2-8-②				16.1
2-9-①	24.7	2.83	2.48	13.5
2-9-②				13.6
2-10-①	25.3	2.57	2.62	15.4
2-10-②	26.5	2.72	2.63	13.9

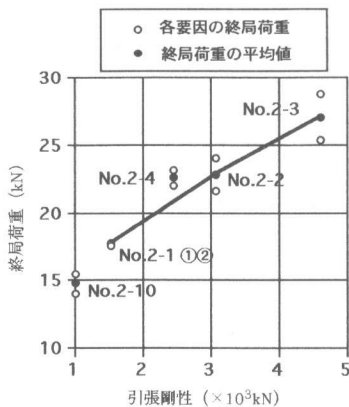


図-8 引張剛性と終局荷重の関係

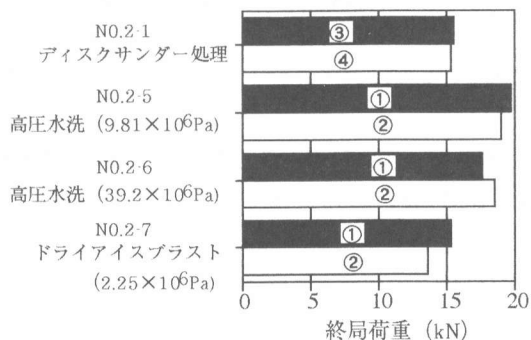


図-9 表面処理方法の差異

局荷重が小さくなった理由として、過大な水圧 ($39.2 \times 10^6 \text{Pa}$) によりコンクリート表面が脆弱化したことによると考えられる。

ドライアイスブラストとは、近年コンクリート構造物補修の下地処理方法として採用され始めている表面処理方法であり、ドライアイスの細粒を $2.25 \times 10^6 \text{Pa}$ の圧縮空気で噴出する表面処理方法である。No.2-7の終局荷重はサンダー処理の場合とはほぼ等しく同様の効果が確認された。

(3)コンクリート強度と終局荷重の関係

既往の研究では、コンクリート圧縮強度が高ければ終局荷重も高くなるという相関関係が報告されているが [1]、本実験の範囲内ではそのような関係は認められなかった。

(4)プライマーの浸透性と終局荷重の関係

浸透性の高いプライマー (粘度 $90 \text{mPa} \cdot \text{S}$) を使用した試験体 2-9 は、通常のプライマー (粘度 $2000 \text{mPa} \cdot \text{S}$) を使用した試験体と比較して低い終局荷重を示した。

4. まとめ

CFRP接着工法における炭素繊維シートの付着性状を把握するため炭素繊維シートの接着長さを変化させ両引き試験を行った。また付着強度を決定する因子として、炭素繊維の引張剛性、コンクリートの表面処理方法などを変化させ同様の試験を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- ①試験体は中央ひび割れ部より発生した炭素繊維シートの剥離により破壊し、剥離形態は、コンクリート表層部の凝集破壊と含浸接着剤、プライマー間の界面剥離である。
- ②本研究の範囲内 (炭素繊維シート1層、厚さ 0.167mm 、弾性係数 $2.30 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) では炭素繊維シートの付着有効長さは 10cm 程度である。
- ③炭素繊維シートの付着応力分布は山型の曲線となり、剥離の進行に伴って移動する。
- ④終局荷重は炭素繊維シートの引張剛性に正比例する。
- ⑤表面処理方法は、高圧水洗 ($9.81 \times 10^6 \text{Pa} \cdot \text{S}$)、高圧水洗 ($39.2 \times 10^6 \text{Pa} \cdot \text{S}$)、ディスクサンダー処理の順に終局荷重が高く、ドライアイスブラストはディスクサンダー処理と同様の効果である。

参考文献

- [1] 坂口敬、佐伯昇：コンクリートの強度が繊維シートの付着特性に与える影響、JCI、新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集、pp71-74、1996.11
- [2] 木村耕三：炭素繊維によるコンクリートの補強に関する実験的研究、大阪市立大学学位論文、1994.11
- [3] 佐野正：鋼板接着によるコンクリート構造物の補強設計法に関する研究、東北大学学位論文、1996.3
- [4] 斉藤弘志、江口和雄：最近の樹脂系材料による補修・補強工法の現状、コンクリート工学、Vol.33, No.12, pp25-32、1995