

論文 コンクリート面上に加圧接着した連続繊維シートの付着耐力

栗田幸治*¹・志村和紀*²・堀口敬*³・佐伯昇*⁴

要旨:連続繊維シートとコンクリートとの付着耐力の向上は、連続繊維シートを有効な補強材として活用するために重要である。付着耐力向上の一手法として、連続繊維シート表面に加圧力を与えることにより、付着耐力が向上することを述べたものである。付着耐力は連続繊維シートの目付量が大きいものほど大きく、加圧力が大きいものほど付着耐力の向上が得られた。また付着耐力は連続繊維シートの引張剛性の平方根に比例する結果が得られた。付着耐力の向上には、応力集中を低減させることと、連続繊維シートに発生する最大ひずみを低下させることが有効であることが分かった。

キーワード:連続繊維シート, アラミド繊維, 加圧力, 付着耐力, 応力集中, 最大ひずみ

1. はじめに

近年の急進的かつ大いなる技術革新の結果、種々様々な技術や材料が開発され、それらを用いた製品も数多く登場するようになってきている。そのようなものの中の一つに、繊維を強化材、樹脂を母材に用いた複合材料がある。この繊維複合材料の開発は綿麻を使用した1920年代からなされており、その後ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維などが次々と開発され実用化されるに至っている¹⁾。

現在主に使用されている繊維材料には、ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維等があり、特にコンクリート構造物の補強補修にあつては、シート形状をした炭素やアラミドの連続繊維を強化材に使用し、母材にエポキシ系の樹脂接着剤を含浸させ、コンクリート表面に貼り付け一体化を図る方法により数多く用いられている²⁾。コンクリート既設構造物の補強材料として用いられるためのこれら連続繊維は、補強材料として効果的に働くためには、コンクリート表面との付着が十分確保されている必要がある。

そこで付着耐力の向上手段として、コンクリートに接着した連続繊維シート表面上に面外方向からの等分布となる圧力(以下加圧力という)を与えることを試みた。実構造物に加圧力を与える方法として、放物線形状の部材表面、例えばコンクリート表面に連続繊維シートを接着する際、連続繊維シートに緊張力を導入することにより、等分布荷重を部材面に作用させることが可能となる。桁に適用する一例を図-1に示す。下フランジに放物線形状の、例えばコンクリート等を増し打ちし、その面上に緊張力 F により緊張力を導入した連続繊維シートを接着することにより、緊張力が桁に導入されると同時に、上向き等の分布荷重 p が増し打ちコンクリート部に作用することとなり加圧力を作用させることが可能となる。

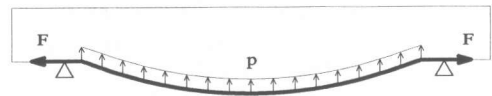


図-1 加圧力の桁への適用

*1 北海道大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻	工修 (正会員)
*2 北海道大学大学院助手	工学研究科社会基盤工学専攻	工博 (正会員)
*3 北海道大学大学院助教授	工学研究科社会基盤工学専攻	工博 (正会員)
*4 北海道大学大学院教授	工学研究科社会基盤工学専攻	工博 (正会員)

加圧力に従って付着耐力が向上することは既往の研究³⁾に述べられている。本論文では、連続繊維シートの目付量とコンクリート強度を変化させて付着耐力試験を行った結果を報告すると共に、連続繊維シートの目付量が付着耐力に及ぼす影響について考察を行う。

2. 実験概要

2.1 供試体

付着耐力試験として図-2に示す一軸引張供試体を製作した。供試体の製作に関する詳細な説明は既往の研究³⁾に述べられているため簡略に述べる。

供試体中央に埋め込み配置した D19 鉄筋を引張ることにより、コンクリートと連続繊維シートとの付着耐力を試験する構造のものである。鉄筋は定着側と試験側との間で切断されており、試験側には、非接着区間(図-2における Unbond 部分)を 100mm 程度設けた。これは試験側コンクリートの縁まで連続繊維シートを接着した場合、コンクリート隅角部が破壊してしまうことを防止するためである⁴⁾。

付着力試験に用いた連続繊維シートは、目付量および弾性係数の異なった4種類であり、全て一方向アラミド連続繊維シートである。その諸元を表-1に示す。付着耐力試験を行った連続繊維シートの幅は 80mm であり、接着長は 200mm 一定である。またコンクリートの圧縮

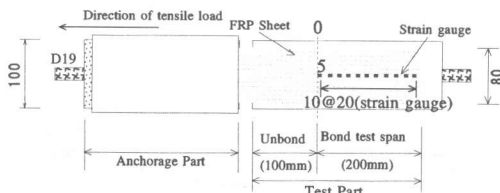


図-2 一軸引張試験供試体

表-1 アラミド連続繊維シート諸元

No.	目付量 (g/m ²)	厚さ(mm)	弾性係数 (kN/mm ²)	備考
1	243	0.175	89	高強度タイプ
2	530	0.381	82	高強度タイプ
3	726	0.522	81	高強度タイプ
4	308	0.212	107	高弾性タイプ

強度は 35N/mm² にて配合設計されている。

定着側は連続繊維シートを供試体周方向に巻き付け、破壊が試験側に限定されるよう補強を行い、エポキシ樹脂接着剤による接着後、1週間の接着養生を経た後、付着耐力試験を行った。

2.2 加圧装置

本試験に際し連続繊維シートの付着耐力試験部に加圧する装置を作製した。

装置図を図-3に示す。

図の上側の締め付け板に通したねじにバネとワッシャー、ナットを取り付け、ナットを締めることにより、上下板の間隔が狭まり、試験側の連続繊維シート部に加圧力を与える構造のものである。

上側の板と供試体の間に設けたロードセルにより、所定の加圧力が得られているかを確認している。尚試験装置の詳細は既往の研究³⁾に述べられている。

2.3 付着耐力試験

試験は図-3の様に装置を供試体に取り付け、加圧力を連続繊維シート表面に与えつつ、変位速度 0.5mm/min の変位制御方式にて引張载荷を行った。

本研究中における付着耐力試験では、連続繊維シート表面に作用させる加圧力(0,80,120,(160)kN/m²)を変化させながら連続繊維シートの種類(表-1に示す4種類)およびコンクリート圧縮強度(設計強度 10,20,25,35N/mm²)に関して付着耐力の試験を行った。

連続繊維シート貼り始め位置(図-2中の 0mm 位置)から 5mm の位置より 20mm ピッチ

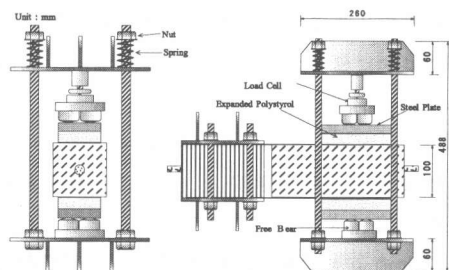


図-3 加圧装置

でひずみゲージを貼り付け、連続繊維シート表面のひずみ分布の測定も併せて行った。

3. 試験結果と考察

表-2に試験結果の一覧を示す。試験に用いたコンクリートの強度の相違は小さく、破壊荷重への影響が小さいと考え、破壊荷重の補正は行っていない。また破壊形態は全てコンクリート表層付近で剥離が生じる剥離破壊であり、加圧力の大きさ、連続繊維シートの種類、コンクリートの圧縮強度に関係なく同様の形態であった。ただし比較的強度の弱いコンクリートになるに従い、破壊面が深くなる傾向が見られたが、定量的に測定するに至っていない。写真-1に目付量 243g/m²、加圧力 120kN/m² のものの破壊状況を示す。表面のモルタル層が引き剥がされ、粗骨材が露出した、連続繊維シートの側にもモルタルが付着していることが観察される。

3.1 目付量の相違と付着耐力

図-3に目付量を変化させた場合の付着耐力試験の結果を示す。図-4は本研究における試験結果に加え、著者の既往の試験結果³⁾の試験データを補充したのも併せて図示している。

図より目付量の増加に伴い付着耐力の向上することが分かる。また本実験範囲内にある目付量に関して

は、加圧力に比例して一様に付着耐力が向上しており、その増加割合(図-4における直線の傾き)は同程度であり、目付量の大小には依存していないことが分かる。さら

表-2 試験結果

目付量 (g/m ²)	加圧力 (kN/m ²)	破壊荷重 (kN)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)
243	0	27.2	37.4
	80	32.7	37.4
	120	29.2	37.4
530	0	36	38.0
	80	35.1	38.0
	80	45.6	36.6
	120	42.1	38.0
	180	45.2	36.6
726	0	56	37.5
	0	44.7	37.5
	80	54.6	37.5
	120	57.1	37.5
308	0	26.8	36.6
	80	31.7	36.6
	120	37.5	36.6

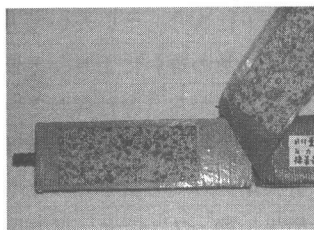


写真-1 供試体破壊状況

に加圧力を与えることによる連続繊維シートとコンクリートとの付着耐力は、接着長に関係なく加圧力により向上する³⁾ことが分かっており、目付量にもよらないことから、加圧力は連続繊維シートを目付量や接着長といった形状の大きさに関わらず、

加圧力の大きさに比例して付着耐力の向上を与えるものと言える。

付着耐力の向上の要因として、加圧力によって増加する有効接着長が考えられると伴に、後述する連続繊維シート引張端部に生じている最大ひずみが、加圧力によって低下することが要因の一端と考えられる。

図-5に引張荷重 20kN の時、加圧力 80kN/m² が連続繊維シート表面に作用している場合のひずみ分布を示す。目付量は 243g/m²、530g/m² および 726g/m² である。

同じ大きさの引張力が作用している場合、目付量に関係なく、ひずみの生じている領域の長さは同じであることが分かる。

また有効付着長を、連続繊維シートがコンクリートから剥離せず付着を保つことが可能な状態での最大の荷重時に、連続繊維シートに分布しているひずみ領域の長さで規定すると、この領域が大きいものほど荷重を分担する領域が大きいということとなり、耐力が向上するものと考えられる。試験の結果、剥離破壊を生じる限

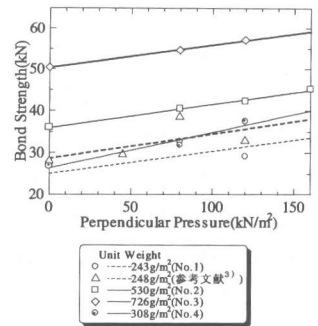


図-4 目付量および加圧力と付着耐力の関係

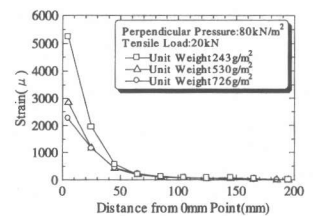


図-5 ひずみ分布 (加圧力80kN/m², 荷重20kN)

界の荷重は目付量の大きいものほど大きくなっていった。このことから目付量の大きいものほど、より大きな引張力に連続繊維シート全体で有効に抵抗することが可能であり、付着耐力が大きくなる要因と言える。

目付量の相違による付着耐力を考察する。まず第一に、**図-2**の 0mm 位置のひずみの低下があげられる。連続繊維シートは完全なる弾性体であることから、引張端である 0mm 位置にフックの法則が成立する。目付量の大きいものは、**表-1**に示す通りシート厚が厚く断面積が大きくなるため、0mm 位置のひずみは小さくなる。**図-5**にて示されるひずみは 5mm 位置でのひずみであるので、この位置では完全にはフックの法則は成り立たないが、目付量の大きいものほどひずみが小さくなっていることが分かる。

連続繊維や接着剤の種類、コンクリートや接着状態によって相違があるものの、連続繊維シートとコンクリートとの剥離破壊は、これらの条件が同一で有る時、加圧力の有無に関わらず、接着界面がせん断強度に達する応力を受けた時破壊が生じると考えられ、本試験では連続繊維シートのひずみにより把握することが可能である。最も応力を受ける位置は 0mm 位置であり、この位置のひずみの低下はより大きな荷重に抵抗できることを示しており、付着耐力が向上する要因と考えられる。

第二に、引張端部 (**図-2**の 0mm 位置) 近傍への応力集中の程度があげられる。応力集中

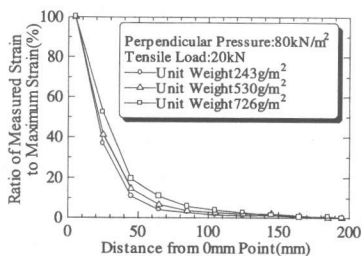


図-6 最大ひずみに対する各測定位置のひずみの割合
(加圧力 80kN/m²、引張荷重 20kN の時)

に関しては既往の研究にても、これを緩和することにより付着耐力が向上することが述べられている⁵⁾。**図-6**に最大ひずみに対する各測定位置のひずみの割合を示す。ここで述べる最大ひずみとは、付着耐力試験にて測定された各引張荷重ごとのひずみの最大値 (連続繊維シート貼り始め位置から 5mm 位置のひずみの値) のことである。

測定 25mm 位置のひずみの最大ひずみに対する割合は、目付量が大きいものほど大きくなっており、目付量 726g/m² のものは 52%、243g/m² のものは 37%となっている。

このことは目付量 243g/m² に比して大きい目付量 726g/m² では、接着剤であるエポキシ樹脂マトリックス中に占める繊維量が多いため応力の伝達が効率よく行われることと、接着界面のひずみはコンクリートと連続繊維シートの弾性係数の差によって生じており¹⁾、**図-5**および**図-6**に示されるコンクリートの圧縮強度は同程度であることから、コンクリートの弾性係数は同じであると仮定すると、コンクリートと弾性係数の差の大きい目付量 243g/m² のものの方が、530、726g/m² のものよりひずみが大きくなり、応力集中を受けやすい状況にあるためと考えられる。

3.2 引張剛性と付着耐力

目付量が増加することによって、付着耐力が向上することは述べた。しかしその向上分は目付量の増加割合、すなわち連続繊維シートの厚さの増加割合に比して小さいものとなっている。このことの要因として、剥離破壊は、コンクリート表層部に生じるせん断力によるため、連続繊維シートの厚さの増加分全てが直接的な耐力向上に寄与していないことによる。

弾性係数の違いにより、界面部分のひずみが生じることから、弾性係数と厚さ (断面積) を用いて付着耐力試験結果を整理した。

引張剛性の平方根をとったものと付着耐力との関係を**図-7**に示す。平方根をとることにより、引張剛性の変化率に対する付着耐力の向上

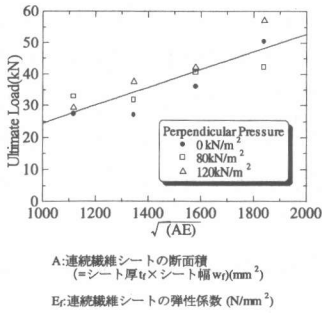


図-7 付着耐力-連続繊維シーの引張剛性

率が概ね整合することとなり、扱いの簡便性から行った。加圧力による大きな違いは見られず、引張剛性の増加に伴い、付着耐力が向上することが分かる。

3.3 加圧力による影響

連続繊維シートに加圧力を与えることにより、付着耐力が向上する理由について考察する。

第一に、コンクリートと連続繊維シートとの付着耐力が確保されている間は、加圧力を与えることにより最大ひずみの低下が見られた。この最大ひずみの低下は、加圧力により拘束力を受けた連続繊維シートの変形が小さくなることに起因しており、剥離破壊が生じるひずみに達するには、より大きな引張力を連続繊維シートに与える必要がある。

また同時に最大ひずみの低下は、応力集中を緩和させることとなり、付着耐力の向上に寄与するものとなる。

第二に、加圧により有効付着長の増大が見られ、このことは連続繊維シートが引張力を分担する領域が増すことを意味し、より大きな引張力に抵抗することが可能となる。

図-8に目付量 530g/m² の加圧力による有効付着長の増加を示す。本試験では加圧力 80kN/m² と 120kN/m² のものに明瞭な差は見られなかった。しかし剥離が生じる限界の引張力が連続繊維シートに作用している時、加圧力を与えることにより、与えていないものに比べ、有効付着長が大きくなる事が分かる。

最後に、コンクリートに対しモール・クーロンの理論が厳密には当てはまらないが、組合せ

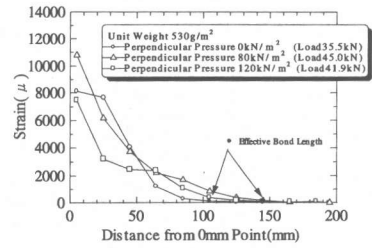


図-8 加圧力による有効付着長の増加

応力下のせん断応力が推定できることが言われている⁶⁾。この理論から加圧力により界面部分の強度は向上していると考えられる。今図-8のひずみ分布から分かる通り、せん断応力は連続繊維シートの接着面全体に均等に分布してはいない。故にせん断応力を算定した場合、接着面積が大きい程見かけ上せん断応力が低下することとなり、応力による評価は困難を要する。

そこで本論文では図-9に示す様にモール・クーロンの理論を耐力に置き換え、式(1)を用いてφを表-2の試験結果より算定した。

$$B_p = B_0 + p \cdot \tan(\phi) \quad (1)$$

ここでφ:コンクリート表層のせん断抵抗角

p:シート幅×有効付着長×加圧力(σ)

B₀:加圧力無しの時の付着耐力

B_p:加圧力を与えた時の付着耐力

算定結果を表-3に示す。少ない実験データからであるため正確とは言えないが、算定によってφは一定の値とはならなかったものの、理論上一定値であるため平均をとった。

加圧力により大きなせん断抵抗角を得ることができ、界面部の強度向上が予期されると共に、目付量に従いφが大きくなっており、付着耐力が大きいことが分かる。しかし、高弾性タイプが目付量 308g/m² のものは、他のもの(高強度

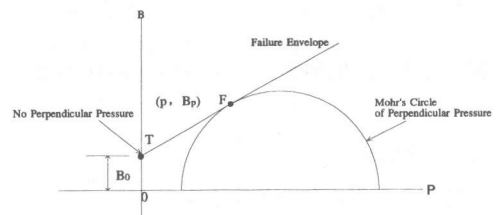


図-9 加圧力を受けた場合の耐力向上

表-3 ϕ の算定結果

目付量(g/m ²)	加圧力 σ (kN/m ²)	ϕ	平均	備考
243	80	82.8	71.2	
	120	59.5		
530	80	80.8	79.5	
	120	78.7		
	160	78.9		
726	80	80.7	80.3	
	120	79.9		
308	80	81.7	82.6	高弾性タイプ
	120	83.5		

タイプ)に比べ ϕ の値が最も大きくなっており、付着耐力が最も大きくなることが期待されるが、先に述べた応力集中により、最大の付着耐力とはなっていない。

3.4 コンクリート強度の付着耐力への影響

コンクリート強度による付着耐力への影響を試験した結果は報告⁷⁾されているが、加圧力を与えた場合の研究は散見されず、破壊がコンクリート表層であることからコンクリート強度の影響を試験するために、加圧力を与えつつコンクリート強度を変化させて試験を行った。試験に使用した連続繊維シートは、目付量 243g/m²のものであり、接着長は全て 200mm である。試験の結果を傾向線と伴に図-10に示す。

本試験にあっては、コンクリート強度による付着耐力の差は余り見られず、加圧力の有無による大きな傾向の相違は見られない。本試験結果は前出の研究結果とは傾向が異なっており、試験本数が少ないことから、試験体の数を増やすことにより、再度検討を重ねる必要がある。

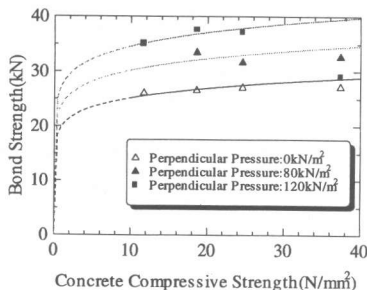


図-10 付着耐力-コンクリート圧縮強度

4. まとめ

本研究から得られた知見をまとめる。

①連続繊維シートの目付量に関係なく、加圧力

を与えることにより付着耐力は向上し、また目付量の大きいものほど、付着耐力は大きい。

②付着耐力の増加割合は、目付量の増加割合に比例したものとはなっておらず、連続繊維シートの引張剛性の平方根をとったものの増加割合に比例する。

③目付量に関係なく加圧力により有効付着長は大きくなる。

④コンクリートとの弾性係数差が大きいものは応力集中を受けやすく、また付着が確保されている場合、目付量あるいは加圧力の大きいものほど最大ひずみが低下する。よって応力集中を緩和することにより付着耐力は向上する。

謝辞：本学の岡野裕樹君および坪川祥大君、資材提供に協力して下さったショーボンド建設(株)の江口和雄氏、帝人(株)伊吹英昭氏、日本アラミド(有)高木氏に深謝します。

参考文献

- 1) 宮入裕夫：複合材料入門，裳華房，1997
- 2) 鈴木義晃：材料-補強材-連続繊維，コンクリート工学，Vol.39,No.1,pp.74-77,2001.1
- 3) 栗田幸治，志村和紀，堀口敬，佐伯昇：連続繊維シートの付着力向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22,No.3,pp.307-312,2000
- 4) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート委員会報告書(Ⅱ)，1998.5
- 5) 岳尾弘洋，松下博通，矢原輝政，佐川康貴：CFRP接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.1, pp.431-436, 1998
- 6) 田澤榮一，佐伯昇監訳：コンクリート工学，技法堂出版，1998
- 7) 佐藤靖彦，浅野靖幸，上田多門：炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究，土木学会論文集，No.648/V-47,pp.71-87,2000.5