

論文 アラミド繊維シートを貼り付けて補強した RC 梁の曲げ耐荷性状

篠崎 裕生*1・三上 浩*2・加島 清一郎*3・樋口 昇*4

要旨: アラミド繊維シートを曲げ補強材として鉄筋コンクリート梁に貼り付け、曲げ載荷試験を行い、梁の耐荷挙動およびシートの付着性状を検討した。試験結果より、アラミド繊維シートによる曲げ補強の効果が確認されるとともに、梁の最大耐力はシートが破断した場合、従来の RC 部材の解析手法で推定できることが明らかとなった。また、シート貼り付け面のチッピングや、帯筋方向にコの字にシートを貼り付けた付着補強、あるいはシート端部を溝に折り込み定着することなどによりアラミド繊維シートの付着力が改善されることなどが分かった。

キーワード: アラミド繊維シート, 曲げ補強, 付着

1. はじめに

連続繊維シートを用いた既存 RC 構造物の補強工法は、その施工の容易さや作業工程が少ないことなどから柱の補強などに用いられる機会が増えている。この工法は、連続繊維シートとコンクリートの一体化が前提となるが、曲げ補強を目的とした場合には、連続繊維シートに曲げによる引張り力を負担させるため、その付着性状が特に重要となる。

本研究は、アラミド繊維シートを曲げ補強材として鉄筋コンクリート梁に貼り付け、曲げ載荷試験を行い、梁の耐荷挙動およびシートの付着性状について検討を行ったものである。本文では、シートの厚さや付着面積、貼り付け面の下地処理方法の影響の他、付着・定着補強の効果などについても考察を行った。

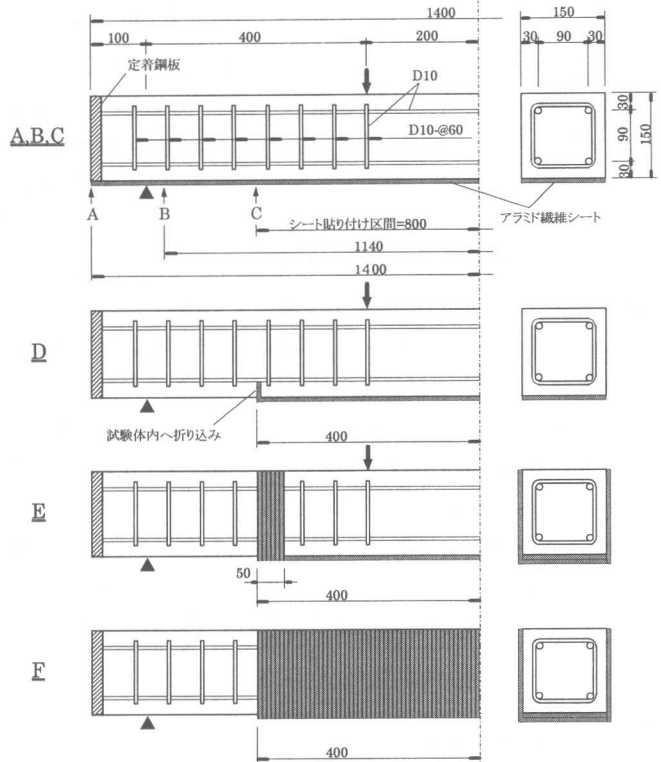


図-1 試験体形状

- *1 三井建設(株) 技術研究所土木構造グループ(正会員)
- *2 三井建設(株) 技術研究所土木構造グループ主任研究員, 工博(正会員)
- *3 三井建設(株) 土木本部土木設計部部長
- *4 三井建設(株) 土木本部土木設計部第3グループ課長

2. 実験概要

試験体は、長さ 1400×幅 150×高さ 150mm の大きさで、載荷スパンを 1200mm、載荷点間距離を 400mm とした。主鉄筋および帯鉄筋には D10 を用いた。主鉄筋は、梁端部に取り付けた鋼板に定着し、抜け出しを防止した。図-1 に試験体の形状を示す。

アラミド繊維シートの貼り付けパターンは A～F の 5 通りとした。A～C はシート端部の位置を変えたもので、A と B では支点におけるシート拘束の影響を、B と C ではシートの付

着面積の影響をそれぞれ検討することとした。D は、貼り付け面に設けた深さ 25mm（主鉄筋の被り）の溝にシートを含浸樹脂とともに折り込み、定着補強した。E と F は、シート貼り付け区間を同じシートで帯筋方向にコの字型に付着補強したもので、E はシート端部から 50mm を、F は全区間を補強した。付着補強で用いたシートと曲げ補強で用いたシートの目付量は同じとした。このとき試験体隅角部の面取りは行わなかった。

アラミド繊維はケブラー49 を使用し、補強する方向のシートの目付量は 85,150,200g/m² の 3 種類とした。設計厚さ（目付量/ρ、ρ：アラミド繊維の密度(=1.45g/cm³)）はそれぞれ 0.059,0.103,0.138mm となる。鉄筋は主鉄筋および帯鉄筋ともに SD295 を用いた。表-2 にアラミド繊維シートおよび鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

アラミド繊維シートの貼り付けにおいて、貼り付け面の下地処理方法はシートとコンクリートの付着性能を高める上で重要と考えられ、本研究では 2 通りの方法を比較した。1 つはコンクリート表面の不陸および薄表層をペーパーサンダーで削り取り平滑にする方法、もう 1 つは深さ 1～2mm 程度のチップングを施し、弱層を除去するとともに粗骨材を露出させる方法とした。

これらのパラメータの組み合わせにより、表-1 に示す試験体で曲げ載荷試験を行った。加力は一方向の単調載荷とし、梁の変位および荷重、シートのひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 梁の耐荷挙動

表-3 に試験結果の一覧を示す。アラミド繊維シートを貼り付けることにより、各試験体の最大耐力は向上した。また、梁の剛性が大きくなることにより、主鉄筋降伏時の荷重も高くなった。梁の最大耐力はシートを溝へ定着した 200Dcp 試験体を除き、曲げ補強シートの破断、あるいは付着切れにより決まることが分かった。200Dcp 試験体は溝部分が被りコンクリートとともに剥離して破壊に至った。

アラミド繊維シートとコンクリートの一体化およびひずみの平面保持を仮定した計算値と

表-1 試験体種別

試験体名称	引張主鉄筋	シート貼付パターン	シート目付量 (g/m ²)	下地処理方法
無補強	D10×2 引張鉄筋比 0.8%	—	—	—
85Acp		A	85	CP
200Acp		A	200	CP
200Bcp		B	200	CP
150Bcp		B	150	CP
150Ccp		C	150	CP
150Cs		C	150	S
200Dcp		D	200	CP
150Es		E	150	S
150Fs		F	150	S

下地処理方法の CP はチップング、S はサンダー仕上げ

表-2 アラミド繊維シートおよび鉄筋の材料特性 (N/mm²)

種類	降伏強度	破断強度	弾性係数
アラミド繊維シート	—	2480	1.26×10 ⁵
鉄筋(D10, SD295)	353	495	2.06×10 ⁵

表-3 試験結果一覧

試験体名	コンクリート(N/mm ²)		降伏荷重(kN)			最大荷重(kN)			破壊形式
	圧縮強度	弾性係数	実験値	計算値	比	実験値	計算値	比	
無補強	45.5	3.21×10^4	30.7	27.5	1.12	38.2	33.0	1.16	
85Acp	45.5	3.21×10^4	35.8	29.1	1.23	49.0	46.6	1.05	シート破断
200Acp	45.5	3.21×10^4	42.3	31.4	1.35	71.5	61.8	1.17	シート破断
200Bcp	48.5	3.53×10^4	39.9	31.6	1.26	67.6	63.2	1.07	シート破断
150Bcp	48.5	3.53×10^4	37.9	30.6	1.24	60.8	56.8	1.07	シート破断
150Ccp	49.2	3.57×10^4	38.1	30.6	1.25	59.8	57.0	1.05	シート付着切れ
150Cs	49.2	3.57×10^4	38.2	30.6	1.25	54.9	57.0	0.96	シート付着切れ
200Dcp	48.5	3.53×10^4	39.0	31.6	1.23	68.6	63.2	1.09	溝部破壊
150Es	49.2	3.57×10^4	37.4	30.6	1.22	52.9	57.0	0.93	シート付着切れ
150Fs	49.2	3.57×10^4	39.2	30.6	1.28	54.9	57.0	0.96	シート破断

の比較では、降伏荷重については実験値が1.1~1.3倍、最大荷重ではシート破断したものについては計算値を満足した。シートが付着切れした試験体の一部は、計算値を下回るものが見られた。以下、各要因別に考察を行った。

(1) シート目付量の影響

図-2に無補強試験体および目付量の異なる4つの試験体の荷重と変位の関係を示す。無補強試験体は、30.7kNで引張主鉄筋が降伏し、その後荷重の漸増とともに変位が急増し、変位20~30mmでコンクリートの圧縮破壊が進行した。

アラミド繊維シートで補強した試験体は、主鉄筋降伏時の荷重および最大耐力が無補強試験体よりも大きくなり、その大きさはシートの目付量に応じて変化した。表-4に各試験体のひびわれ発生から主鉄筋降伏までの曲げ剛性(剛性①)および主鉄筋降伏からシート破断、付着切れまでの曲げ剛性(剛性②)を示したが、剛性②については目付量が150g/m²で無補強の2倍以上の曲げ剛性が得られることが分かった。

梁の最大荷重はシートの破断で決まり、破断後は無補強試験体と同様の挙動を示した。シートの支点上における拘束の影響を比較した200Acp,200Bcpでは、ほぼ同様の荷重-変位関係を示し、シートが破断した場合にはその影響は及ばないことが分かった。

(2) 下地処理方法の影響

シートの目付量が150g/m²の場合につ

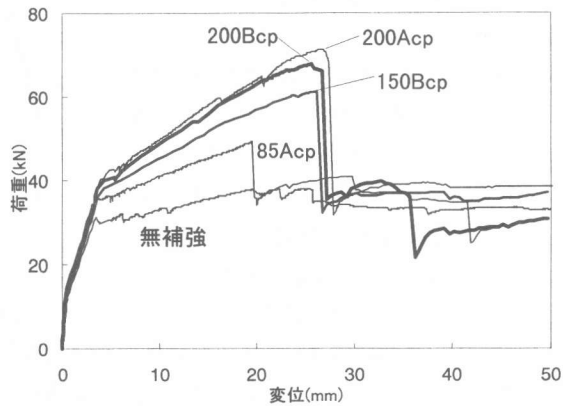


図-2 荷重-変位関係(シート目付量の影響)

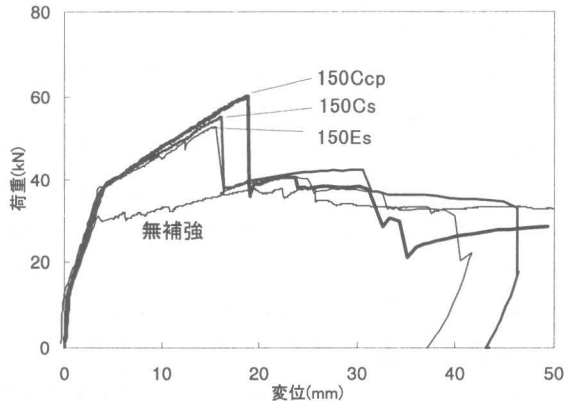


図-3 荷重-変位関係(下地処理方法の影響)

いて、下地処理方法の影響を検討した。図-3に、150Ccp および 150Cs の荷重変位関係を示す。これらの試験体は、いずれもシートが付着切れした。両者の主鉄筋降伏前後の挙動（剛性①、剛性②）はほぼ同様であり、チッピングの影響は見られない。しかし、チッピングを施した 150Ccp の方が耐力の上昇が大きいことから、チッピングによる付着強度の改善があったと考えられる。

チッピングした梁の付着切れしたシートの表面には、粗骨材を含むコンクリートが全体に付着していたのに対し、チッピングしていない場合はほとんどコンクリートが付着していなかった。

(3) 付着補強の効果

図-4に付着補強した試験体の荷重変位関係を示す。150Es 試験体は、シート両端 50mm の区間に付着補強を施したものであるが、曲げ補強用シートが付着切れすると同時に隅角部の付着補強用シートが破断し、その効果は見られなかった。

一方、全区間を付着補強した 150Fs では、変位 10.4mm で曲げ補強用シートの一部が、19.9mm で全て付着切れするものの荷重の低下は小さく、その後曲げ補強用シートの破断が徐々に進行するとともに荷重が低下した。曲げ補強区間全体を付着補強することによりシートを破断に至らしめる効果はあるものの、耐力の向上は見られなかった。

(4) 溝定着の効果

200Dcp 試験体の荷重-変位関係を図-5に示す。同試験体は、シートを折り込んだ溝部分が被りコンクリートとともに剥離し破壊した。シートは破断しなかったものの、その挙動および剛性①、剛性②は 200Bcp とほぼ同様であり破断強度近くまでシートが耐力を負担していたと考えられ、溝定着の効果が確認された。図-6に示すシート折り込み溝概念図のような破壊面を仮定したとき、コンクリートの引張強度(3.54N/mm²)から求められる溝部耐力は 37.5kN となる。これは、破断時のシート引張力の 51.4kN には及ばないが、溝部近傍のシートひずみ(12414 μ)から求められる引張力(32.5kN)とほぼ近い値が得られた。

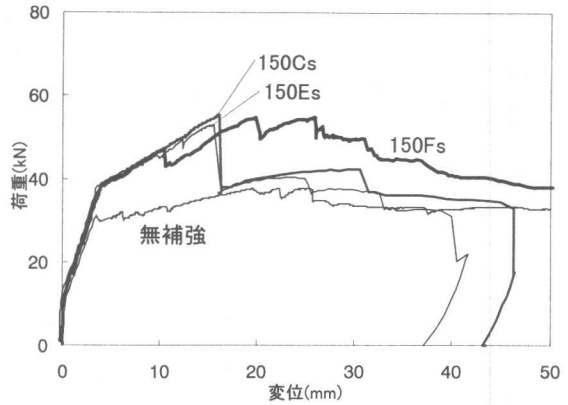


図-4 荷重-変位関係（付着補強の効果）

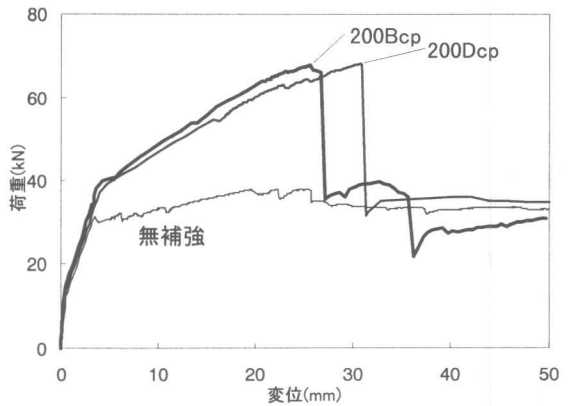


図-5 荷重-変位関係（溝定着の効果）

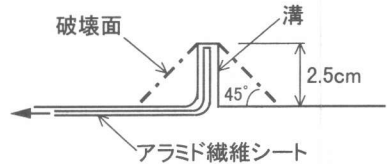


図-6 溝部概念図

表-4 曲げ剛性(kN/mm)

試験体	剛性①	剛性②
無補強	6.697	0.512
85Acp	7.317	0.882
200Acp	8.372	1.460
200Bcp	7.244	1.462
150Bcp	7.344	1.175
150Ccp	7.542	1.497
150Cs	7.815	1.368
200Dcp	7.004	1.443
150Es	7.601	1.268
150Fs	7.398	1.387

3.2 アラミド繊維シートのひずみ

目付量が 150g/m^2 のシートで、付着長さおよび下地処理方法が異なる 150Bcp, 150Ccp, 150Cs 試験体のアラミド繊維シートのひずみ分布よりシートの付着特性を考察した。

図-7～図-9 に各荷重段階におけるひずみ分布を示す。

(1) 付着長さの影響

図-7, 8 より、両試験体とも各荷重段階においてシート全体にひずみが分布しているのが分かる。150Bcp では、50kN までは等曲げ区間内のひずみを上限とした山形のひずみ分布を示すが、50kN 以降、やはり中央から -30cm の位置のひずみが急増し、そこでシートが破断した。破断直前の最大ひずみは 19302μ で計算値 (19612μ) とほぼ一致した。

一方、150Ccp は 150Bcp に比べ、等曲げ区間のひずみ分布が大きくなった。50kN における両試験体の最大ひずみはそれぞれ 12300μ 、 7929μ で大きく異なる。また、150Bcp と異なりひずみがシート端部で大きな勾配のまま収束する傾向が見られた。シートの最大ひずみは 17375μ で破断ひずみに近く、また、最大耐力は計算値 (57.0kN) 以上なので、シートが破断直前であったことが分かる。

シートの付着特性には曲げひびわれの影響も考えられ、曲げひびわれがほとんどない支点付近までシートを貼り付けた 150Bcp の方が安定的に付着を確保できると考えられる。しかし、付着長さを約半分にした 150Ccp との比較では、シートのひずみ分布に若干の差があるものの最大耐力の違いはほとんど見られなかった。

(2) チッピングの影響

図-9 より、チッピングをしていないはりでは各荷重段階において、ひずみがほぼ一定となる区間が存在しシートの付着切れが確認された。チッピングをした梁でも付着切れは目視により確認されているが、図-7, 8 ではひずみ一定の区間は見られない。これはチッピングをした場合、シートが付着切れしてもシート表面にあるコンクリートのかみ合わせで、ある程度の付着力を伝達しているためと考えられる。

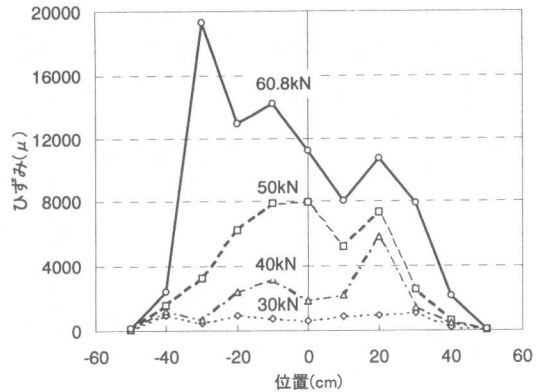


図-7 アラミド繊維シートのひずみ(150Bcp)

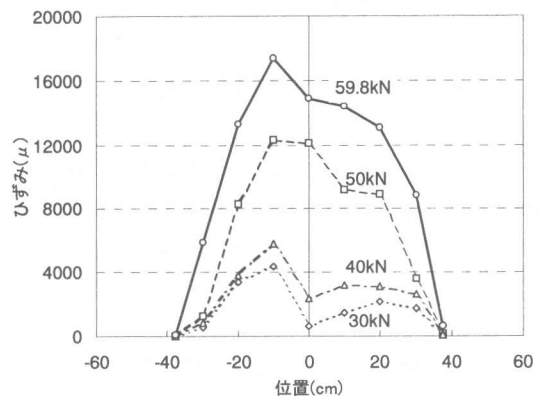


図-8 アラミド繊維シートのひずみ(150Ccp)

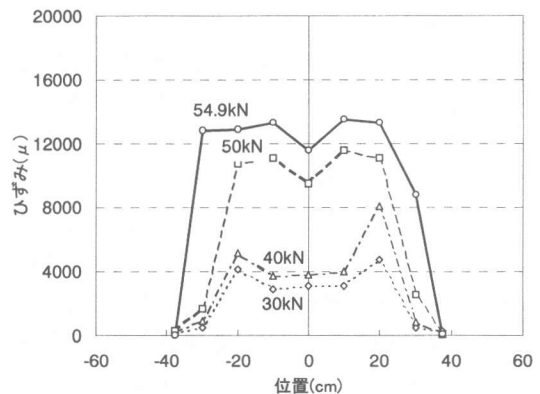


図-9 アラミド繊維シートのひずみ(150Cs)

表-5 各試験体の付着応力

試験体名	最大ひずみ (μ)	載荷点下 ひずみ(μ)	付着長さ (cm)	平均付着応力 (N/mm ²)	局部付着応力 (N/mm ²)	シート 破壊の形式
85Acp	11405	10465	40	0.20	0.53	破断
200Acp	10835	6757	40	0.29	1.76	破断
200Bcp	15268	15268	37	0.71	1.76	破断
150Bcp	19302	12931	37	0.46	2.20	破断
150Ccp	17375	13290	20	0.87	1.43	付着切れ
150Cs	13681	13283	20	0.87	2.37	付着切れ
200Dcp	17666	14692	20	1.28	2.41	溝部破壊
150Es	11718	10664	20	0.69	1.34	付着切れ
150Fs	10627	10627	20	0.69	2.82	破断

3.3 アラミド繊維シートの付着応力

表-5に各試験体の付着応力を示した。平均付着応力は載荷点位置のシートひずみから求められるシート引張力を、梁のせん断区間におけるシートの付着面積（片側）で除したものである。

局部付着応力はシートに10cm間隔で貼り付けたひずみゲージで、隣り合うゲージのひずみ値の差から求めたものである。

平均付着応力はシート破断したもので0.20~0.71N/mm²、付着切れしたもので0.69~0.87N/mm²となった。一方、局部付着応力は同様に0.53~2.82 N/mm²、1.34~2.37 N/mm²となり、局部付着応力の方が大きくなる傾向が見られた。

4. まとめ

アラミド繊維シートを曲げ補強材として鉄筋コンクリート梁に貼り付け、曲げ載荷試験を行い、梁の耐荷挙動およびシートの付着性状について検討した。シートの厚さや付着面積の違い、付着・定着補強の有無などをパラメータとした結果、以下のことが分かった。

①シートで補強することにより、主鉄筋降伏時の荷重および最大耐力が増加した。シート破断時の最大耐力は、従来のRC方式で計算できることが分かった。

②シートの目付量（繊維量）に応じて剛性①（ひびわれ発生～主鉄筋降伏）および剛性②（主鉄筋降伏～シート破壊）が変化した。本試験体では、目付量150g/m²において剛性②が無補強の場合と比較して2倍以上となった。

③シート貼り付け面をチップング処理するとシートの付着力が向上した。

④シート貼り付け区間を同じシートで帯筋方向にコの字型に付着補強することにより、シート破壊の形式を付着切れから破断に変えることができた。

⑤シート端部を溝に折り込み定着する“定着補強”により、シートの引張力負担が増加し、定着補強しない場合と比較して最大耐力が向上した。

⑥シートが付着切れした場合、平均付着強度は0.69~0.87N/mm²となった。

謝辞 本研究は、アラミド補強研究会の多大なご指導、ご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

5. 参考文献

[1]緒方紀夫、安藤博文、松田哲夫、小畠克朗、大野了：炭素繊維による段落し部を有する既存RC橋脚の耐震補強に関する研究，土木学会論文集，No.540,pp.85-104，1996