論文 段落し部を AFRP シートで曲げ補強した RC 橋脚模型のシートの上側 接着長に関する実験的研究

岸 徳光*¹·三上 浩*²·澤田 純之*³·竹田 俊明*⁴

要旨:本研究では,AFRP シートを用いて RC 橋脚段落し部を曲げ補強するためのシート接着 長の合理的な算定法を確立することを目的として,段落し部より上側のシート接着長を3種 類に変化させた AFRP シート曲げ補強 RC 橋脚模型に関する水平単調および交番載荷実験を 行った。その結果,段落し部より上側のシート接着長は,基部圧壊を想定した計算終局時の 段落し部上方領域における主鉄筋降伏長に断面高さの半分程度を加えた長さとすることで, 計算終局耐力を保証できることが明らかとなった。

キーワード: RC 橋脚, AFRP シート, 段落し部, 曲げ補強, 上側接着長

1. はじめに

近年,道路橋示方書¹⁾(以後,示方書)の改訂 に伴い,連続繊維シート(以後,FRPシート)を 用いた既設 RC 構造物の耐震補強工事が盛んに 行われている。FRPシート材料には,炭素繊維 (CFRP)シートの他,しなやかで非導電性,非磁 性のアラミド繊維(AFRP)シートも用いられる ようになってきた。これに対応して,アラミド 補強研究会では AFRPシートによる RC 橋脚 の補強設計要領²⁾(以後,要領)を発行している。 要領では,シート巻付けによるせん断補強設計 法の他,シートを部材軸方向に縦貼りする曲げ 補強設計法に関しても言及し,曲げ補強量やシ ート接着長を規定している。しかしながら,要 領に準拠して決定したシート接着長の妥当性を 実験的に検討した研究事例は見あたらない。

本研究では、AFRP シートを用いた RC 橋脚 段落し部の曲げ補強問題に着目し、要領に規定 されているシート接着長の妥当性およびシート 接着長の合理的な算定法を確立するための基礎 資料を得ることを目的に、接着長を3種類に変 化させた AFRP シート曲げ補強 RC 橋脚模型 の水平単調および交番載荷実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を 示している。試験体数は、無補強試験体の他、 段落し部より上側のシート接着長(以後,上側接 着長)を3種類に変化させた4種類全8体であ る。表中、試験体名の第一項目は上側接着長を 示しており、無補強の場合をN、補強試験体の 場合には接着長の長い順にL1,L2,L3とした。 第二項目は載荷方法を示し、単調載荷をM、交 番載荷をCとしている。

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状 況を示している。試験体の断面寸法は 25 × 25 cm で、フーチングからの柱高さは 146.5 cm で ある。段落し部は、基部より 72 cm の位置に設 定し、その位置で主鉄筋を 16 本から 8 本に減 少させている。主鉄筋には D16 (SD345) を、ス ターラップには D10 (SD295A) を用いて基部 より 10 cm 間隔で配筋した。なお、本試験体は、 旧道路橋示方書に準拠して設計された RC 橋 脚の段落し部曲げ補強を想定しているため、照 査段落し位置を考慮せず、実段落し(以下、段 落し) 位置の降伏曲げ耐力が基部の降伏曲げ耐

*1 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博(正会員)
*2 三井建設(株)主席研究員 技術研究所 博(工)(正会員)
*3 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工)(正会員)
*4 北海道開発局 部長 建設部 工修



図-1 形状寸法および配筋状況

カと同程度になるように設計している。このた め、段落し部が先行して破壊することが予想さ れ、段落し部の曲げ補強が必要となる。

一方,要領では段落し部の曲げ補強量を,照 査段落し位置で基部降伏荷重に対して 1.2 倍の 安全率を有するように算定することを規定して いる。従って,本研究では実段落し位置を照査 段落し位置と仮定して,基部降伏荷重を 1.2 倍 した際の段落し位置の作用モーメントと補強前 の段落し断面抵抗モーメントの差分を不足モー メントとして算出し,シート補強量を算定する こととした。なお,シートの許容歪は要領に準 拠して 1.0% とした。

図-2には、AFRP シートの接着状況を示し ている。シートには目付量 200 g/m² のものを用 い、試験体の正負加力面に幅 23 cm で貼り付け ている。シート接着長は、段落し部より下側に 関しては要領に準拠して設定した長さ (38 cm) で一定とし、上側に関しては以下のように3種 類に変化させている。すなわち、1)要領に準拠 した長さ:L1、2) L_{yu} + 1.0 D:L2、3) L_{yu} + 0.5 D: L3 である。ここで、 L_{yu} は計算終局時の段落し 部より上方の主鉄筋降伏長さ、D は断面高さ (= 25 cm) である。なお、 L_{yu} を基本長さとする考 図-2 AFRP シートの接着状況

表-1 試験体の一覧

試験体名	上側接着長 (cm)	下側接着長 (cm)	載荷方法
N-M / C	-	-	
L1-M /C	52.0*		単調 / 交番
L2-M / C	38.5	38.0*	
L3-M / C	26.0		

*:設計要領²⁾に準拠した長さ

表-2 AFRP シートの力学的特性

繊維目付量	厚さ	弾性係数	引張強度	破断歪
(g/m ²)	(mm)	(GPa)	(GPa)	(%)
200	0.138	1.31	2.48	1.89

え方は, FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する実 験結果³⁾を参考にしたものである。

測定項目は,水平荷重,水平変位,主鉄筋お よび AFRP シートの軸方向歪である。なお,水 平変位は段落し部より上下方向に 20 cm 間隔 および載荷点位置で測定し,補強試験体の主鉄 筋および AFRP シートの歪は段落し部より上 下方向にそれぞれ 5,10 cm 間隔で測定してい る。実験時におけるコンクリートの材令は 135~ 169 日,平均圧縮強度は 28.5 MPa,主鉄筋の降 伏強度は 399 MPa であった。表-2には, AFRP シートの材料特性値の一覧を示している。



2.2 実験方法

本研究は、旧道路橋示方書に準拠した RC 橋 脚を対象として,段落し部 AFRP シート曲げ補 強時におけるシート接着長の合理的な算定法確 立のための基礎資料を得ることを目的の一つと している。従って、ここではまず単純な条件下 でのシートの剥離特性や RC 橋脚の耐荷性状を 把握することとし、橋梁上部工の重量を模擬し た軸力は導入しないこととした。実験は、加力 位置を基部から 165.5 cm の位置とし、ジャッキ 式水平繰り返し載荷装置を用いて行った。単調 載荷実験は、橋脚模型を正方向に加力し、コン クリートの圧壊もしくはシート剥離により荷重 が低下するまで載荷を行った。交番載荷実験は, 段落し部もしくは基部の主鉄筋歪が降伏歪に達 した時点における載荷点変位 δ, を決定し, その δ, を基準にして 2δ, 3δ,…と振幅を漸増させ て正負方向に繰り返し載荷することにより実施 している。繰り返し載荷回数は、各変位振幅毎 に3サイクルとした。また、載荷は荷重が主鉄 筋降伏時の荷重 P_v を下回るまでとしている。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重一変位関係

実験では,載荷方法に拘わらず,無補強試験 体の場合には段落し部の曲げひび割れの開口お よび圧壊,補強試験体の場合には基部圧壊後段 落し部のシート剥離により終局に至っている。

図-3には、単調載荷試験体の荷重-変位曲



線を示している。図より,補強試験体の最大荷 重は,いずれの場合も無補強試験体である N-M 試験体に比して若干大きい程度であることが分 かる。これは,N-M 試験体の実段落し部と基部 の計算曲げ耐力が同程度であるため,損傷が段 落し部から基部に移行後も,耐力は大きく変わ らないためである。ただし,損傷が基部に移行 しているため,補強試験体の終局変位は,N-M 試験体のそれに比して増加している。



図-4には、単調および交番載荷試験体の荷 重-変位曲線を断面分割法による計算結果と比 較して示している。図中には、交番載荷試験体 の P_y , δ_y も示している。なお、断面分割法の計 算はシートとコンクリートの完全付着を仮定し、 コンクリートが終局圧縮歪 3,500 μ に至るまで 実施している。また、水平変位を求めるための 高さ方向の分割数は 15 とした。

図より,交番載荷の場合には単調載荷の場合 に比して最大荷重がほぼ同程度であるものの, 終局変位は大きく下回っていることが分かる。 これは,交番載荷の場合には,繰り返し載荷に よって段落し近傍かぶりコンクリート部の劣化 損傷によりシートの付着性能が著しく低下し, 従って剛性も低下することによるものと考えら れる。ただし,各試験体のシート剥離前の塑性 率は 6 程度であり,示方書¹⁾に基づいた許容塑 性率 μ_a =4.2 を十分上回っている。

実験結果と計算結果を比較すると,初期剛性 は計算結果が実験結果よりも大きく示されてい るものの,最大荷重は実験結果が計算結果を上 回っている。従って,本実験で設定した上側接 着長は,いずれも基部の圧壊を想定した計算耐 力を保証しているものと判断される。

以上より,本実験の範囲内では,L3-C 試験体 のように上側接着長を *L_{yu}*+0.5 D 程度とするこ とで計算耐力および許容塑性率以上の耐力,変 形能を保証できることが明らかとなった。

3.2 変位分布性状

図-5には、交番載荷試験体の高さ方向水平 変位分布の推移状況を示している。図-5(a) より、無補強試験体の変位振幅 1 δ ,の場合には 基部から載荷位置までほぼ直線状の分布を示し ているものの、2 δ ,以降で徐々に段落し部近傍で 角折れが進行してくることが分かる。これに対 し、(b)図の補強試験体の場合には、いずれの試 験体も変位振幅が 6δ ,時点で段落し部に明瞭な 角折れは見られない。これより、上側接着長が L_{yu} + 0.5 D 程度の場合でもシートは十分な曲げ 補強効果を発揮することが分かる。

3.3 破壊性状

写真-1には、各単調載荷試験体の終局時の 破壊状況写真を示している。無補強の N-M 試 験体は、段落し部において曲げひび割れが大き く開口するとともに、段落し部より上側の躯体 が加力方向にずれていることが確認できる。ま た、圧縮側の段落し部より 10 cm 程度下の位置 でコンクリートが圧壊している。

補強した3試験体はいずれも段落し近傍のか ぶり部に三角形状のコンクリートブロックが形 成され,この部分がシートを外側に押し出して 引き剥がすピーリング作用の生じていることが 分かる。なお、シートの剥離は、基部のコンク リートが圧壊した後に発生している。ここで、 L1/L3-M 試験体の場合は、形成されたコンクリ ートブロックが段落し部より上方の躯体に追随 して動き、段落し部より下方のシートをピーリ ング作用によって引き剥がしている。一方、L2-M 試験体の場合には、コンクリートブロックが段 落し部より下方の躯体に追随して挙動し、段落 し部より上方のシートをピーリング作用によっ



写真-1 単調載荷時の各試験体の破壊状況(加力は右方向)



写真-2 繰り返し載荷時のL3-C 試験体のひび割れ進展状況(加力は右方向)

て引き剥がしている。

写真-2には, L3-C 試験体に関する交番載荷 時のひび割れ進展状況を示している。写真より, 変位振幅 2*δ*,時にはほぼ等間隔に曲げひび割れ のみが発生し,4*δ*,時にはこれらの曲げひび割れ が断面中立軸近傍で斜め下方に進展しているこ とが分かる。また,引張縁では段落し近傍部の かぶりコンクリートがブロック化し,ピーリン グ作用によるシートの部分剥離が生じている。 一方, 圧縮縁の基部ではコンクリートの圧壊が 見受けられる。前述の4*δ*,以降で変位振幅の増 大に伴う荷重増加が期待できないのは,この基 部圧壊が進行しているためと推察される。

6δ, 時には, 引張縁においてコンクリートブロ ックの形成およびピーリング作用によるシート の部分剥離が一層顕在化している。また, 圧縮 縁では段落し部の下方でシートがはらみ出して 部分的に剥離している。このように, 交番載荷 の場合には,引張力作用時に部分的に剥離した シートが圧縮力作用時にはらみ出し,この作用 が変位振幅の増大とともに下方に進展して,最 終的に段落し部の下方で全面的な剥離に至るこ とが明らかとなった。なお,上記のように段落 し部の下方でシートが剥離する性状は,他の交 番載荷試験体でも同様であった。

3.4 主鉄筋およびシートの軸方向歪分布性状

前節の検討では,交番載荷時にシートが段落 し部の下方で剥離するメカニズムを明らかにし た。しかしながら,単調載荷の場合にはシート の剥離進展方向が一様ではない。ここでは,主 鉄筋およびシートの軸方向歪分布性状に基づい てシートの剥離メカニズムについて考察する。

図-6には、単調載荷時の主鉄筋およびシートの引張側軸方向歪分布を各試験体で比較して示している。図には、ピーリング作用によるシートの部分剥離が生じる変位振幅 8*δ*, 9*δ*, 時の



結果について示している。なお,シートの歪分 布に関しては、シート剥離時の結果についても 示している。図より、主鉄筋の歪は段落し近傍 および基部で大きく示されていることが分かる。 特に段落し部では上方のみならず下方の領域に おいても著しく塑性化している。段落し部の主 鉄筋歪を詳細に見ると、段落し部の下方からシ ートが剥離する L1/L3-M 試験体の場合には、段 落し部より上方の鉄筋の塑性化が下方よりも進 行している。また、段落し部の上方からシート が剥離する L2-M 試験体の場合には逆に段落し 部より下方の鉄筋の塑性化が進行している。

断面内の歪の線形変化を仮定すれば,橋脚の 鉄筋歪の大きい断面では変形曲率も大きくなる。 従って,上述の性状は変形曲率の大きい領域が コンクリートブロックのピーリング作用を促進 させていることを示唆している。理論的には鉄 筋量が減少している段落し部より上方の変形曲 率が大きくなるものと考えられるが,L2-M 試験 体の場合には段落し部より下方の変形曲率が大 きく示されている。この原因には試験体製作や 実験精度も考えられるが,詳細は不明である。 一方,変位振幅 8*δ*, 9*δ*,時のシートの歪分布性 状を見ると,段落し部を境にしてピーリング作 用を引き起こす側のシートの歪分布はシート剥 離後も剥離作用にそれ程影響されないことが分 かる。これは,ピーリング作用を引き起こす側 の躯体とコンクリートブロックが一体化し,そ れらがシート剥離の生ずる側の躯体と段落し部 に発生する曲げひび割れや圧壊によって二分さ れるためと推察される。

4. まとめ

本研究では、AFRP シートを用いた RC 橋脚 段落し部の曲げ補強問題に着目し、段落し部よ り上側シートの合理的な接着長算定法を確立す るための基礎資料を得ることを目的に、水平単 調および交番載荷実験を実施した。本実験で得 られた知見は、以下の通りである。

- 基部の圧壊を想定した計算耐力を保証する ためのシートの上側接着長は,計算終局時の 上側主鉄筋降伏長さ Lyu+0.5 D (D: 断面高 さ)で十分である。
- 2) 単調載荷時には、段落し部より上方の変形曲 率が大きく、コンクリートブロックのピーリ ング作用を促進するため、シートの剥離は段 落し部より下方から進展する傾向にある。
- 3) 交番載荷時には、引張力作用時には段落し部のピーリング作用によるシートの引き剥がれ、圧縮力作用時には段落し部の下方でシートのはらみ出しを生じるため、シートの剥離は段落し部より下方から進展する。

参考文献

- 日本道路協会:道路橋示方書(V 耐震補強 編)・同解説, 1996
- アラミド補強研究会:アラミド繊維シート による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案),1997
- 3) 栗橋祐介,岸徳光,三上浩,松岡健一:FRP シートの必要接着長に着目した曲げ補強 RC 梁の静載荷実験,コンクリート工学年次 論文報告集, Vol.23, No.01, pp.835-840, 2001