

AFRP シートを用いた主鉄筋段落しを有する 壁式 RC 橋脚の曲げ補強に関する実験的研究

Effects of Flexural Enhancement of AFRP Winding for
Wall type RC-pier with Stepped-rebar Arrangement

榎長 大 札幌支店

北海道開発土木研究所 構造研究室

北海道開発土木研究所 構造研究室

室蘭工業大学 建設システム工学科

○正員 長谷川 正(Tadashi Hasegawa)

正員 池田 憲二(Kenji Ikeda)

正員 畑山 朗(Akira Hatakeyama)

正員 岸 徳光(Norimitsu Kishi)

1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震において、多くのRC橋脚が甚大なる被害を受けた。中でも、主鉄筋段落しを有するRC橋脚の被害は、曲げ損傷からせん断破壊に移行する脆性的な破壊形態を示している。

連続繊維シートを用いた段落し部曲げ補強に関しては、各研究機関等で研究がなされている。一方、縦横比の大きな壁式RC橋脚に関する実験、研究例は少ないのが現状である。¹⁾

著者らは、これまでに段落し部における曲げせん断移行型の脆性的な破壊を防止することを目的として、連続繊維シートを用いた主鉄筋段落し部せん断補強に関する検討を行っている。これまでにに行った実験結果より、AFRPシートを用いた段落し部の補強により、せん断破壊を効果的に防止し、靱性能が向上する結果が得られている。²⁾³⁾

本研究では、これらの実験結果を勘案して、段落しを有する壁式RC橋脚に対して、AFRPシートを用いる場合の曲げ補強手法を確立することを目的として、補強範囲の異なる試験体を用いた正負交番載荷実験を実施し、曲げ補強量およびシートの有効接着長に関する検証を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

図-1に実験装置の概要図を示す。本実験装置は、上部工死荷重に相当する荷重を一定荷重として載荷する鉛直方向ジャッキ、地震時慣性力に相当する水平力を交番載荷する水平方向ジャッキ、およびRC橋脚試験体、それらを支持する架台で構成されている。

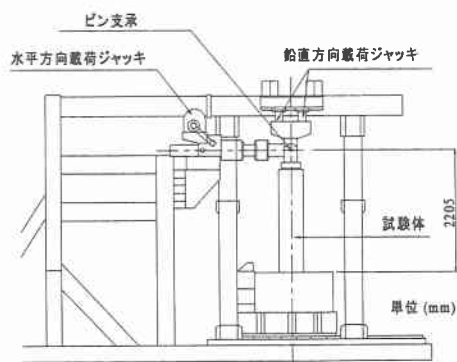


図-1 実験装置概要図

2.2 実験方法

実験は、上部工死荷重に相当する鉛直荷重 150kN を軸力として一定に保持した状態で、水平方向ジャッキにより交番載荷を行うことにより実施した。

交番載荷は、軸方向鉄筋の降伏歪を材料試験より得られた $1,700\mu$ と設定し、段落し部、橋脚基部のうちいずれかの鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の載荷点変位を降伏変位 δ_y 、その時点の荷重を降伏荷重 P_y とし、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ ・・・と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷する方法により実施した。

繰り返し載荷回数は、各変位振幅毎に3回とした。終局変位は、最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始める点(δ_{u1})、および1回目載荷時における正負いずれかの載荷荷重が降伏荷重 P_y を下回った時点(δ_{u2})の2種類を定義した。

2.3 実験試験体

試験体は、既設橋梁で一般的に見られる軸方向鉄筋の段落しを有する壁式RC橋脚を想定し、実橋脚の1/4程度の規模とした。

試験体形状は、躯体高 2.0m、断面寸法 0.38×1.14 m の長方形断面(辺長比 1:3)であり、橋脚基部より 0.75m の高さに軸方向鉄筋段落しを設けている。図-2に試験体の形状・配筋概要図を示す。

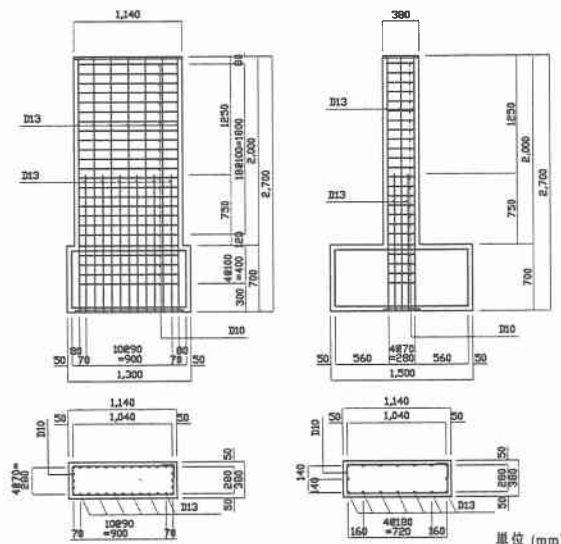


図-2 試験体概要図

柱基部における引張主鉄筋比は $P_t=0.45\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.2\%$ である。なお、本実験では段落し部の曲げ補強効果を検証するため、無補強の場合に段落し部で曲げ破壊型の破壊形態を示すように設計を行った。なお、実験時のコンクリートの平均圧縮強度は $f'_c=26.0\text{MPa}$ である。また、鉄筋は SD345 材を用い、その平均降伏点強度は 362MPa であった。

段落し部曲げ補強に関しては、「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) アラミド補強研究会」を基本とし、縦横比の大きな長方形断面を有する壁式 RC 橋脚に対する適用性の検証を行った。

段落し部曲げ補強量は、橋脚基部断面の曲げモーメントが終局モーメントに達した時点の段落し部作用曲げモーメントを基準とし、材料強度等のばらつきを考慮して、段落し部がその 1.2 倍以上の抵抗モーメントを保持するように設計を行い、AK10/10 (一方向当たり目付量 90g/m^2 、保証耐力 10tf/m) を 3 層貼り付けるものとした。なお、シートの弾性係数は 118GPa である。

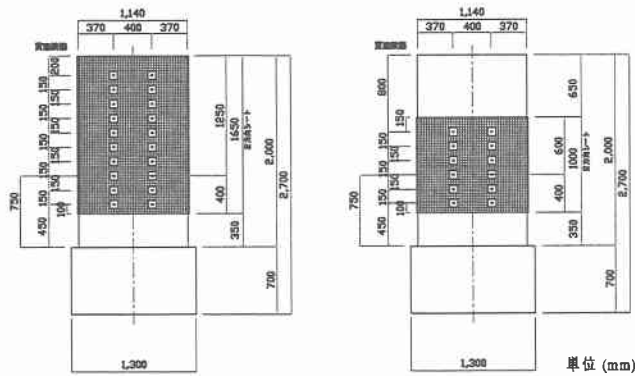
実験に用いた試験体は、表-1 に示すように、有効補強範囲を検証するために、段落し位置より上方の補強範囲を橋脚天端までとした AB-1 試験体、段落し位置より上方の補強範囲を不足曲げモーメントが 0 になる点から上方に、コンクリートと FRP シートとの付着強度を 0.45N/mm^2 として算出した定着長を確保して 600mm とした AB-2 試験体、無補強の N-1 試験体、および曲げ補強効果を確認するために、段落しを設けない無補強の N-0 試験体の計 4 体である。

なお、AB-1、AB-2 試験体の段落し位置より下方の補強範囲は、上記定着長を確保するものとし、 400mm とした。

表-1 には試験体の補強一覧、図-3 に補強概要図を示している。

表-1 試験体補強一覧

試験体	段落し	曲げ補強範囲	補強量
N-0	無し	—	—
N-1	有り	—	—
AB-1	有り	段落し上：～天端 段落し下：400mm	AK10/10 3層
AB-2	有り	段落し上：600mm 段落し下：400mm	AK10/10 3層



(a) AB-1 (b) AB-2

図-3 試験体補強概要図

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

表-2 には実験結果の一覧を、図-4 には各試験体の荷重 1 ループ目における荷重-変位関係の包絡線を示している。表中の δ_y 、 P_y は降伏時の載荷点変位、載荷荷重を、 P_a は載荷荷重の最大値を示す。また、終局変位は、最大荷重付近で安定していた荷重が低下し始める点の変位を δ_{u1} 、載荷荷重が降伏荷重 P_y を下回る時点の変位を δ_{u2} としている。

表より、段落し部曲げ補強を施した AB-1、AB-2 試験体の最大荷重は、無補強の N-1 試験体より 3kN 程度増加し、段落しが無い場合の N-0 試験体とほぼ等しい値を示していることから、段落しは効果的に曲げ補強されていることがわかる。

また、曲げ補強により載荷初期のひび割れ発生が抑制されるため、AB-1、AB-2 試験体の降伏変位は、無補強の N-0、N-1 供試体と比較して 70% 程度と小さな値を示している。

終局変位 δ_{u1} は、N-0 試験体が 84.4mm ($6\delta_y$)、N-1 試験体が 90.4mm ($6\delta_y$) であるのに対して、AB-1 試験体が 88.4mm ($8\delta_y$)、AB-2 試験体が 80.7mm ($8\delta_y$) と小さな値を示すが、塑性率 δ_{u1}/δ_y は向上する結果となった。

また、終局変位 δ_{u2} は、N-0 試験体が 112.6mm ($8\delta_y$)、N-1 試験体が 90.4mm ($6\delta_y$) であるのに対して、AB-1 試験体が 132.3mm ($12\delta_y$)、AB-2 試験体が 110.9mm ($11\delta_y$) であり、終局変位 δ_{u2} 、塑性率 δ_{u2}/δ_y とともにする結果となった。

表-2 実験結果一覧

試験体	変位 (mm)			荷重 (kN)		終局塑性率	
	δ_y	δ_{u1}	δ_{u2}	P_y	P_a	δ_{u1}/δ_y	δ_{u2}/δ_y
N-0	14.2	84.4	112.6	88.1	123.6	6	8
N-1	14.8	90.4	90.4	82.8	103.9	6	6
AB-1	10.6	88.4	132.3	86.3	122.6	8	12
AB-2	9.9	80.7	110.9	85.5	121.5	8	11

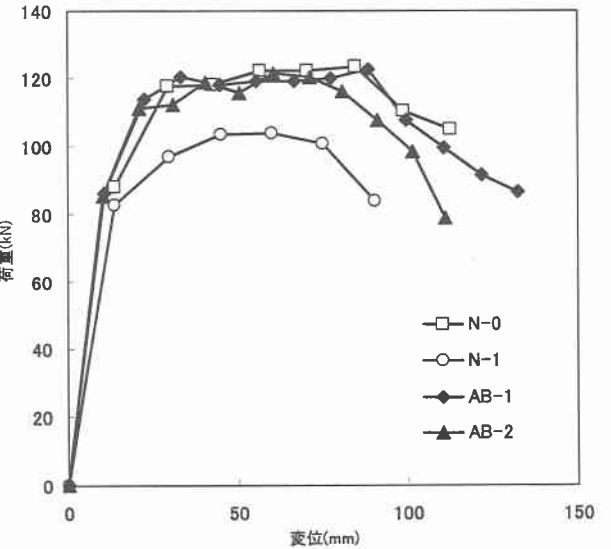


図-4 荷重-変位包絡線

3. 2 試験体損傷状況

写真－1 に各試験体の実験終了後の破壊性状（試験体側面）を示す。

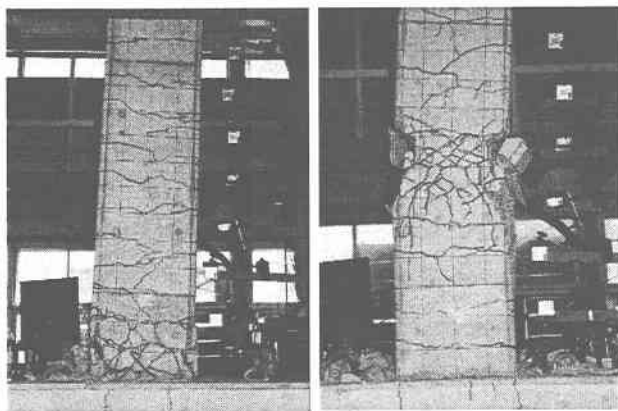
段落し無しの N-0 試験体は、1 δy 載荷時に高さ方向に 20cm 程度の間隔でひび割れが生じた。3 δy 載荷以降では柱基部のみに損傷が集中し、6 δy 載荷時にかぶりコンクリートがはらみ出し（ $\delta u1$ ）、8 δy 載荷時に主鉄筋破断により急激に荷重が低下し、終局状態（ $\delta u2$ ）に至った。

段落し有り無補強の N-1 試験体は、1 δy 載荷時に高さ方向に 20cm 程度の間隔でほぼ均等にひび割れが生じた。主鉄筋ひずみの降伏は、段落し部主鉄筋が先行したが、その時点での柱基部鉄筋ひずみも 1,600 μ 程度と大きな値を示していた。

2 δy 載荷以降は段落し部に損傷が集中し、6 δy 載荷時にかぶりコンクリートが剥落し、急激に荷重が低下し、終局状態（ $\delta u1$ ）、（ $\delta u2$ ）に至った。

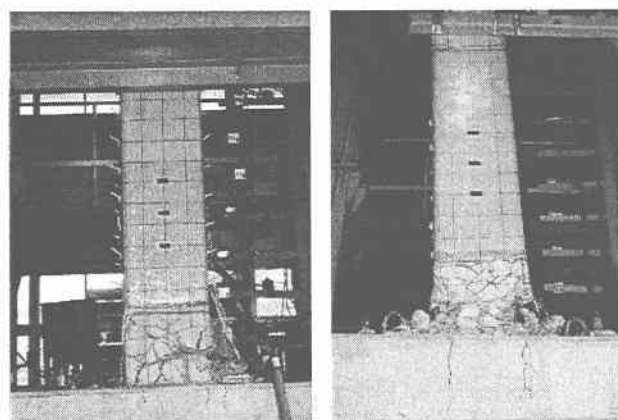
橋脚天端まで AFRP シートを用いて曲げ補強を施した AB-1 試験体は、1 δy 載荷時に柱基部付近の無補強部において高さ方向に 10cm 程度の間隔でひび割れが生じた。主鉄筋ひずみの降伏は、柱基部が先行し、その時点での段落し部鉄筋ひずみは 700 μ 程度に抑えられている。

その後、8 δy 載荷時に柱基部付近のかぶりコンクリートがはらみ出し（ $\delta u1$ ）、徐々に荷重が低下した後、12 δy 載荷時に載荷荷重が降伏荷重を下回り、終局（ $\delta u2$ ）に至った。



(a) N-0

(b) N-1



(c) AB-1

(d) AB-2

写真－1 試験体損傷状況

なお、AFRP シート補強部には、ひび割れ、およびシートの剥離等の損傷は認められない。

段落し位置の上方 600mm までの範囲に AFRP シートにより曲げ補強を施した AB-2 試験体は、AB-1 試験体と同様に、1 δy 載荷時に柱基部付近の無補強部において高さ方向に 10cm 程度の間隔でひび割れが生じた。主鉄筋ひずみの降伏は、柱基部が先行し、その時点での段落し部鉄筋ひずみは 600 μ 程度に抑えられている。

2 δy 載荷時に補強範囲上端付近の無補強部にひび割れが生じたが、その後の載荷では、柱基部付近のみに損傷が集中している。

その後、8 δy 載荷時に柱基部付近のかぶりコンクリートがはらみ出し（ $\delta u1$ ）、徐々に荷重が低下した後、11 δy 載荷時に載荷荷重が降伏荷重を下回り、終局（ $\delta u2$ ）に至った。

AB-1 試験体と同様に、AFRP シート補強部には、ひび割れ、シートの剥離等の損傷は認められない。

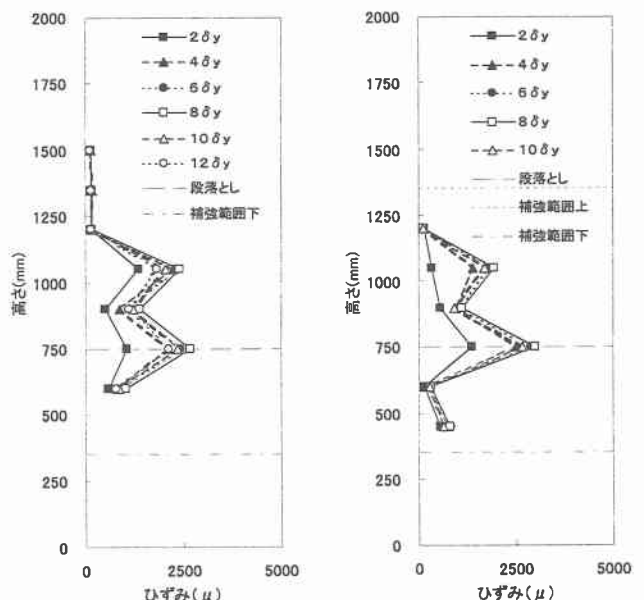
3. 3 AFRP シートひずみ分布

図－5 に、AFRP シート表面の部材軸方向ひずみ分布を示す。

図より、載荷初期段階で増加したひずみは、4 δy 載荷以降ほとんど増加を見せず、その最大値は 2,500 μ 程度の値を示している。

実験で用いた AFRP シートの破断ひずみは 20,000 μ 程度であることから、曲げ補強量に関しては、本研究で仮定した補強量で十分に余裕がある結果が得られた。

また、ひずみは、段落し部で最も大きな値を示し、補強範囲上下端付近のひずみは微小な値を示していることから、コンクリートと AFRP シートの付着は確保されており、補強範囲についても妥当であったものと考えられる。



(a) AB-1

(b) AB-2

図－5 AFRP シート縦方向ひずみ分布

3. 4 主鉄筋ひずみ分布

図-6に各試験体の1δyから5δy 載荷時における主鉄筋ひずみの高さ方向分布を示す。なお、図中のひずみ値は押し載荷、引き載荷の平均値を示している。

図より、無補強試験体の場合、柱基部に損傷が集中したN-0 試験体では柱基部より上方 30cm 程度の区間のひずみが増加した。また、段落し部に損傷が集中したN-1 試験体では段落し位置下方 10cm 付近より 30cm 程度下方の区間のひずみが増加しており、損傷状況とも一致していることがわかる。

AFRP シートによる曲げ補強を施した AB-1、AB-2 試験体の場合、段落し部周辺のひずみの最大値は 2,000 μ 程度に抑えられており、3δy 載荷以降はひずみの増加が見られないことから、AFRP シートにより段落し部の損傷が効果的に抑制されていることがわかる。また、柱基部周辺においてひずみが増加している区間は N-0 試験体と同様に 20cm 程度であり、補強範囲下端付近のひずみは増加していないことから、段落し部より下側の補強範囲に関しては、本研究で仮定した定着長を確保することで十分であるものと判断できる。

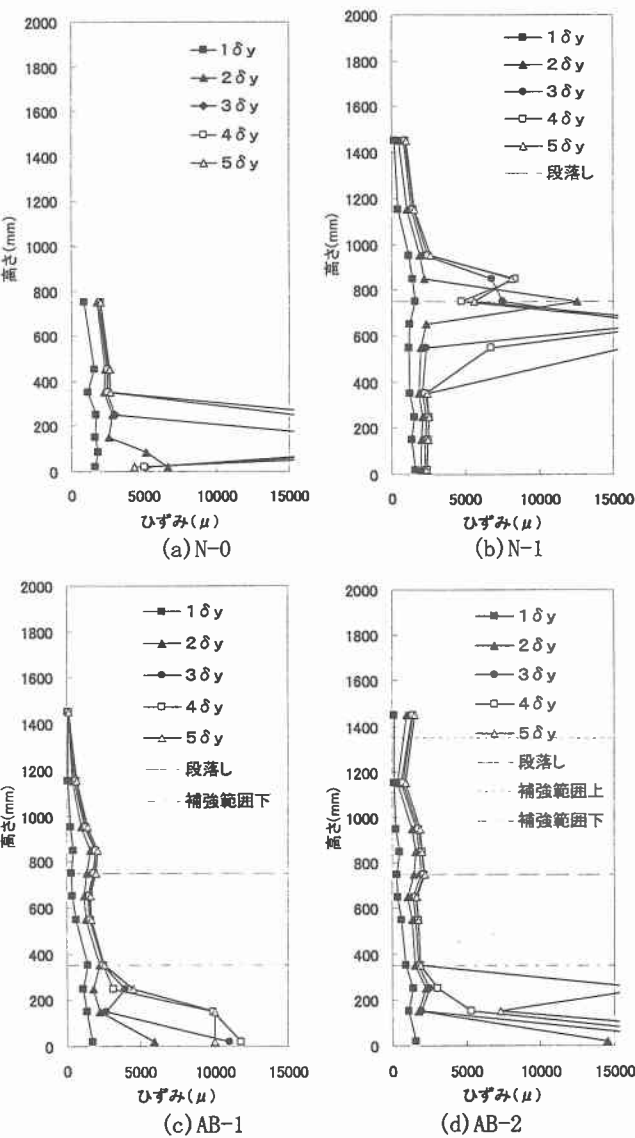


図-6 主鉄筋ひずみ高さ方向分布

段落し部より上側のひずみ分布を見ると、AB-1 試験体では上方に向かってひずみが減少しているのに対して、AB-2 試験体では、補強範囲上端部のひずみが 1,600 μ 程度生じており、2δy 載荷で補強範囲上端付近にひび割れが生じた損傷状況に対応している。

なお、3δy 載荷以降のひずみがほとんど増加していないことから、段落し部より上側の補強範囲に関しても、本研究で仮定した定着長を確保することで十分であるものと考えられる。

4. まとめ

段落しを有する壁式 RC 橋脚に対する、AFRP シートを用いた場合の補強手法を確立することを目的として、補強範囲の異なる試験体を用いた正負交番載荷実験を行い、曲げ補強効果、シート有効定着長に関する検討を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 段落し部曲げ補強量は、橋脚基部断面の曲げモーメントが終局モーメントに達した時点において、段落し部に作用する曲げモーメントを基準とし、段落し部がその 1.2 倍以上の抵抗モーメントを保持するものとして算出した補強量で十分に安全側の補強を施すことが可能である。
- (2) 補強範囲は、コンクリートと AFRP シートとの付着強度を 0.45N/mm² として算出した定着長を確保することで十分であると判断できる。
- (3) 段落し部曲げ補強を施すことにより、載荷初期のひび割れ発生が抑制され、降伏変位が小さな値を示す。また、終局時の塑性率も大きくなる傾向を示す。

参考文献

1) 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), 1998

2) 三田村, 池田, 長谷川, 岸:基礎工とのバランスに考慮した壁式橋脚の耐震補強に関する一考察, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 (2000 年 12 月), pp. 203-210.

3) 畑山ほか: AFRP シートを用いた壁式 RC 橋脚の段落し部補強に関する実験的研究, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1405-1408