

# 論文 AFRP シート巻き付けされた段落しを有する実規模 RC 橋脚の静載荷実験

吉田 紘一\*1・三田村 浩\*2・三上 浩\*3・岸 徳光\*4

要旨：昭和 55 年度改訂版道路橋示方書・同解説に準拠した実規模壁式 RC 橋脚に、段落し部の靱性能向上を目的としたアラミド繊維補強プラスチック（以下 AFRP）シート巻き付けおよび貫通ボルトを施し、静的正負交番載荷実験を行った。実験の結果、1) 提案の本補強法により、段落し部におけるせん断ひび割れを抑制し、段落し部での脆性的な破壊を防ぐことができる。2) 全面補強に比較して段落し部だけの補強が最も効率的である、等が明らかとなった。

キーワード：AFRP シート巻き付け、貫通ボルト、定着板、靱性能

## 1. はじめに

我が国では、平成 7 年に発生した阪神・淡路大地震における数多くの RC 橋脚の被害を教訓として、合理的な耐震設計法や補強法に関する研究が盛んに行われている。現在、平成 8 年度版以前の示方書に準拠して建設された橋脚を対象として鋼板巻き付けやコンクリート増厚工法による耐震補強が実施されている。しかしながら、北海道内でも施工数の多い河川内の橋脚について考えると、1) 河積阻害率から補強後の断面増加量が制約される、2) 洗掘対策として予め基礎の根入れ深さを大きくとっているため、補強工事のための仮設工が大規模となり施工が容易ではない、3) 補強によって相対的に基礎の剛性が不足する場合も想定され、結果的に効率的な補強法にならない可能性がある、等の問題点が挙げられる。また、既設橋脚の多くは主鉄筋の段落しを有しており、実験結果<sup>1)</sup>からも明らかなように段落し部が耐震上の弱点となっている。従って、1) 特に河川橋脚を対象として河積阻害率を遵守可能な補強法を採用すること、2) 段落し部の曲げ破壊を先行させつつも脆性的な破壊を回避させ、全体の靱性能を向上させること、等が肝要である。

本研究では、このような観点から段落しを有す

る壁式 RC 橋脚の耐震補強法として、AFRP シート巻き付け工法を考え、実規模静的交番載荷実験によってその妥当性を検討した。実験は、シート巻き付け範囲、シートの拘束効果を向上させるために併用した貫通ボルト定着板の大きさをパラメータとして行った。また、大変形時の実橋脚では橋脚が桁剛性によって拘束される可能性があることや、寸法効果の問題を排除して実橋への適用をすみやかに実現するために、実規模二径間連続桁橋模型を製作して実験を行うこととした。

## 2. 靱性能向上のための補強設計の概要

昭和 55 年度改訂版道路橋示方書・同解説に準拠して設計された壁式 RC 橋脚模型の静載荷実験結果<sup>1)</sup>によれば、まず、段落し部の曲げ降伏が先行し、図-1 のようなせん断ひび割れに移行することが報告されている。そこで AFRP シートを段落し部に巻き付けることによって、曲げ耐力を向上させずにせん断ひび割れの発生、かぶりコンクリートの剝離と鉄筋の座屈を阻止することにより、橋脚の脆性的な破壊を回避し、橋脚の靱性能を向上させることとした。以下に補強設計法の概要を示す。佐藤ら<sup>1)</sup>は、本研究と同様の靱性能補強設計法について検討し、シート補強量の算定式

\*1 (株) 土木技術コンサルタント 副社長 工修 (正会員)

\*2 北海道開発局開発土木研究所 研究員 構造研究室 (正会員)

\*3 三井建設(株) 技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

\*4 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

を提案している。ここではこの概念を踏襲し、実状に即して若干の修正を加えることとした。すなわち、佐藤らは段落し部の破壊モードを図-1のように仮定しつつも、斜めひび割れが発生する壁厚方向の断面高さを橋脚断面の有効高  $d$  として定式化している。しかし、ここでは実状に即し、以下のような考え方をもとに定式化することとした。すなわち、1) 必ず曲げひび割れが発生し、せん断ひび割れは断面中央部より  $45^\circ$  下方に進展する、2) 設計せん断力  $S$  は、全て巻き付けられた AFRP シートによって抵抗させる、3) AFRP シートのせん断補強材としての有効率は、文献<sup>2)</sup>に従い 0.6 とし材料安全係数を 1.15 とする、である。今、段落し部断面の抵抗曲げモーメントを  $M_u$ 、加力点であるピン支承位置から段落し位置までのアーム長を  $l$  とすると、段落し部における設計せん断力  $S$  は、

$$S = M_u / l \quad (1)$$

として示される。

上述の仮定に従うと、シートによる必要有効幅は橋脚の壁厚  $D$  の  $1/2$  であることより、設計必要シート厚  $t_{ad}$  はシートの引張強度を  $f_{au}$  として、

$$t_{ad} = \frac{1.15 S}{0.6 f_m D/2} = \frac{1.15 S}{0.3 f_m D} \quad (2)$$

従って、シートの必要枚数は1枚当たりのシート厚さを  $t$  として、

$$n \geq \frac{t_{ad}}{2 t} \quad (3)$$

となる。なお、補強範囲は、補強後の段落し部を見かけ上の基部とし、その上方  $1.0 D$  程度以上を靱性補強し、段落し部下方  $0.6 \sim 0.7 D$  程度以上をせん断補強するという考えに基づいて設定した。一方、補強材の巻き付けによる横拘束効果は断面寸法比が  $1:3$  以上と扁平な場合には、その効果が期待できない<sup>2)</sup>。また、中間帯鉄筋が配筋されていないことより、中央部のはらみ出し現象、局部変形が卓越し、設計条件を満足することができないものと推察される。このような観点から、本実験では、シート巻き付け後に貫通ボルトを配置することとした。貫通ボルトは効率よく横拘束効果を発揮させ、かつ斜めひび割れ発生部のせん断

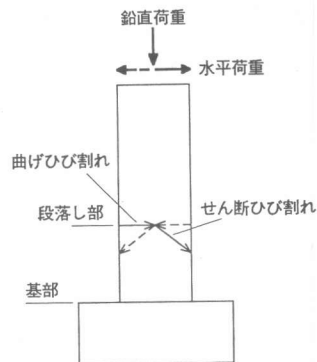


図-1 橋脚のひび割れ性状

力を伝達させるために、断面方向には断面の縦横比が  $1:1$  程度に、高さ方向には最小間隔として  $D/4$  以下になるように配置することとする。また、貫通ボルトは、作用せん断力  $S$  が断面内で均等に分担するように、貫通ボルト1本当たりの分担領域における降伏耐力を補強に用いられる AFRP シートの引張耐力の2倍以上になるように断面設計されなければならない。これより、貫通ボルト1本当たりの設計断面積  $A_{sd}$  は、AFRP シートの引張強度、貫通ボルトの降伏強度をそれぞれ  $f_{au}$ 、 $f_{py}$ 、ボルト間隔を  $s$  とし、式(2)、(3)により決定されたシート枚数を  $n_d$  とすれば、

$$A_{sd} = \frac{2 s n_d t f_m}{f_{py}} \quad (4)$$

として算定される。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験方法

図-2に実験装置の概略図を示す。実験は、実橋と同様に RC 橋脚への上部工の曲げ剛性による拘束効果を考慮するために、全長 32 m の実規模二径間連続桁橋模型の中間橋脚位置に各壁式 RC 橋脚模型を設置して実施した。上部工は RC 橋脚模型とピン接合されており、ピンの部分に油圧ジャッキを設置して正負交番載荷を実施している。従って、支承部の回転は拘束されず上部工と橋脚間には軸力のみが伝達される構造となっている。なお、RC 橋脚模型には上部工死荷重 661.5 kN が軸力として作用している。載荷荷重はロードセ

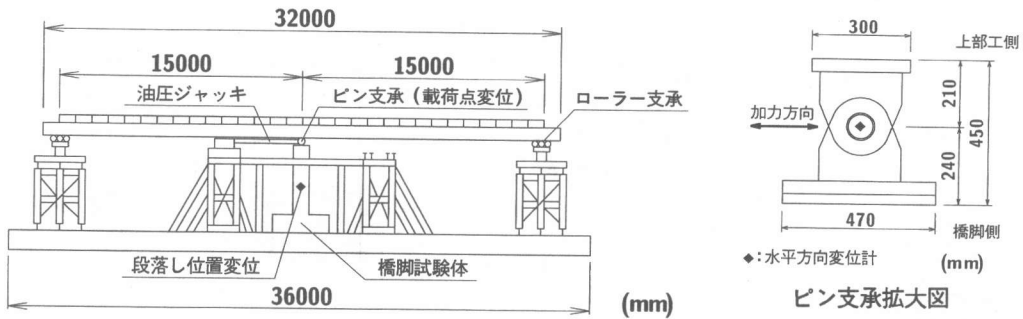


図-2 実験装置概略図

表-1 実験試験体

試験体	補強範囲	貫通ボルト定着板	コンクリート強度 (MPa)
N	無補強	—	22.9
AP-SS	段落し部	分割	21.3
AA-SS	全面	分割	20.7
AA-SC	全面	連続	27.3

で計測し、水平変位はワイヤ式変位計にて測定している。交番載荷は主鉄筋の降伏歪を  $1,700 \mu$  と設定し、橋脚断面中央部主鉄筋に貼付した歪ゲージからの出力を基本にして、基部主鉄筋が降伏歪に達した時点の載荷点変位を降伏変位  $\delta_y$ 、その時の荷重を降伏荷重  $P_y$  として、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、... 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。繰り返し回数は、各振幅毎に5回とし正・負いずれかの載荷荷重が  $P_y$  を下回った時点を終局と定義し実験を終了している。なお、 $\delta_y$  決定時における段落し部主鉄筋歪も基部同様降伏歪程度に達していることを確認している。

### 3.2 実験試験体

実験は比較のための無補強試験体の他、前述の補強法の考えに基づき、AFRP シートを段落し部のみに巻き付けた試験体、AFRP シートを橋脚全体に巻き付けた場合、および AFRP シートを橋脚全体に巻き付け、定着板の代わりに連続する鋼板を用いる場合の全4体について行った。表-1に示している試験体名のうち、第1項目は補強範囲 (N: 無補強, AP: 段落し部近傍補強, AA: 全面補強) であり、第2項目は貫通ボルトの定着板の配置 (SS: 大きさ  $100 \times 100 \times 16 \text{ mm}$  の定着板を各

貫通ボルト毎に設置する場合, SC: 大きさ  $3663 \times 100 \times 16 \text{ mm}$  の連続する鋼板を定着板として用いる場合) である。なお、AA-SC の場合は定着板が連続していることより、段落し部において曲げ補強効果が期待される構造となっている。

図-3には試験体の形状寸法と配筋状況および補強概要を示している。試験体は、昭和55年度改訂版道路橋示方書に基づき設計・製作している。形状寸法は、壁厚 80 cm、壁幅 250 cm、壁高 400 cm とした。試験体は橋脚基部より 150 cm の位置で主鉄筋の段落しを行っている。なお、主鉄筋および帯鉄筋は全て SD345 を用いている。その引張強度は 373 MPa、弾性係数は 206 GPa、降伏歪は 0.17% である。

本試験体の段落し位置の抵抗曲げモーメントは断面分割法より  $M_u = 1.29 \text{ MNm}$  であり、段落し部から加力点までのアーム長は  $l = 2.74 \text{ m}$  である。前述の補強設計に基づき、AFRP シートは目付け量  $415 \text{ g/m}^2$ 、厚さ 0.286 mm、引張強度 2.48 GPa、破断歪 1.96% のものを2層巻き付けることとした。貫通ボルトは、壁の横断方向に2列、高さ方向には段落し部を中心に 60 cm 部分を 15 cm ピッチ、その他の領域は 30 cm ピッチとし、

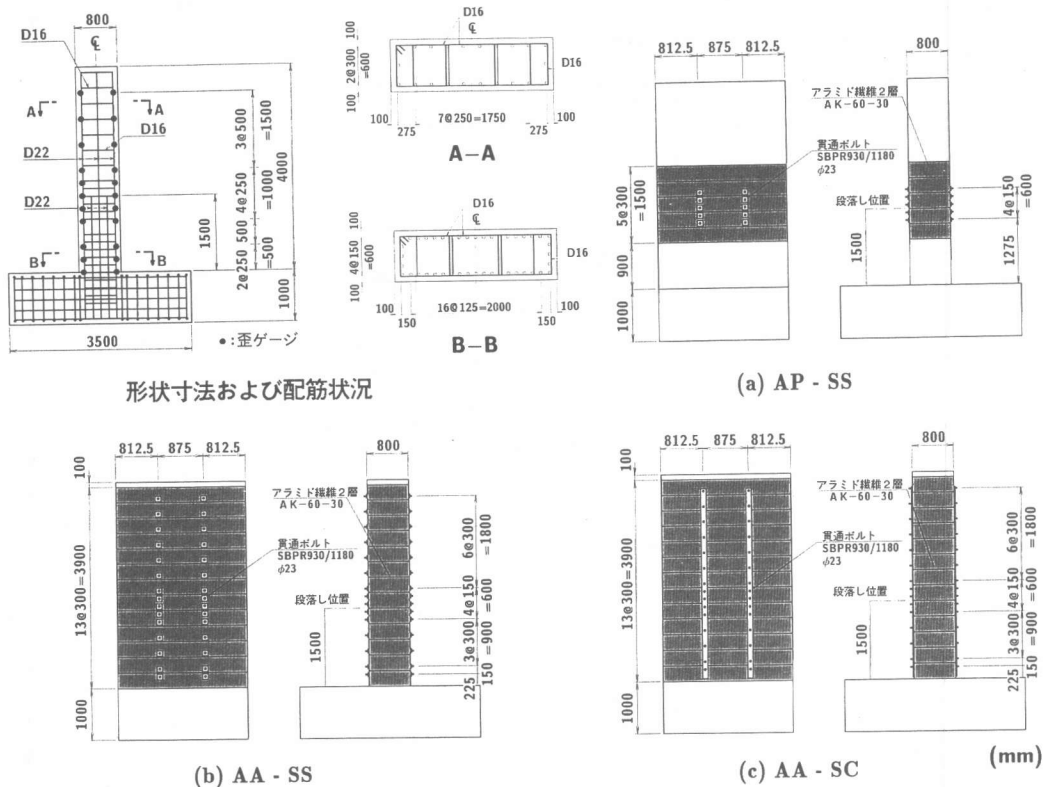


図-3 試験体の形状寸法と配筋状況および補強概要図

5 段 (AP-SS) および 15 段 (AA-) に配置している。貫通ボルトは PC 鋼棒 SBPR930/1180 を用いることとし、材料試験結果の降伏強度  $f_{py} = 1.20 \text{ GPa}$  を考慮して  $\phi 23$  をネジ切りして用いることとした。貫通ボルトは定着板として SS400 の鋼板を用い、ワッシャーを介して定着している。なお、貫通ボルトを通すための試験体削孔部は実構造を想定し、ボルトの腐蝕防止も考慮してボルト設置後、モルタルにより充填している。なお、貫通ボルトや AFRP シートには歪分布測定のために多数の歪ゲージを貼り付けているが、紙面の都合により考察できないため、ここでは省略している。なお、全ての貫通ボルトは終局時まで破断等の損傷のないことを確認している。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 荷重-変位関係

表-2 には実験結果の一覧を示している。表中

の  $\delta_y$ ,  $P_y$  は荷重点位置の降伏変位, 降伏荷重を,  $\delta_u$ ,  $P_u$  は終局時の荷重点変位, 荷重点荷重を示している。図-4 には各試験体の荷重位置および段落し位置における荷重-変位曲線を  $\delta_y$ ,  $P_y$  で無次元化して示している。図中、横軸の  $\delta_t$ ,  $\delta_s$  は荷重点および段落し位置での変位を意味している。

図より、無補強試験体 N は段落し部近傍の破壊が進行し塑性ヒンジが形成されて終局に至ることより、荷重点変位が増加しても段落し位置における変位が増加していないことが分かる。

AFRP シート巻き付けの AP-SS, AA-SS の場合は、N 試験体と同様に荷重点変位の増大に比較して段落し部では変位が増加せず、段落し部に塑性ヒンジが形成されていることを暗示している。また、AP-SS の場合には終局時変位振幅が  $8 \delta_y$  にまで到達しており、段落し部の靱性補強効果が発揮されていることが分かる。一方、AP-SS と AA-SS を比較すると、AA-SS の終局時変位振幅

表-2 実験結果一覧

実験 No.	変位 (cm)		荷重 (kN)			終局時	終局塑性率 ( $\delta_u/\delta_y$ )
	$\delta_y$	$\delta_u$	$P_y$	$P_u$	$P_{max}$		
N	2.0	11.5	399	385	561	5 $\delta_y$ 3回目	5.75
AP-SS	1.8	14.4	344	297	539	8 $\delta_y$ 3回目	8.00
AA-SS	2.6	15.7	395	543	6 $\delta_y$ 2回目	6.03	
AA-SC	3.1	21.8	453	381	598	7 $\delta_y$ 1回目	7.03

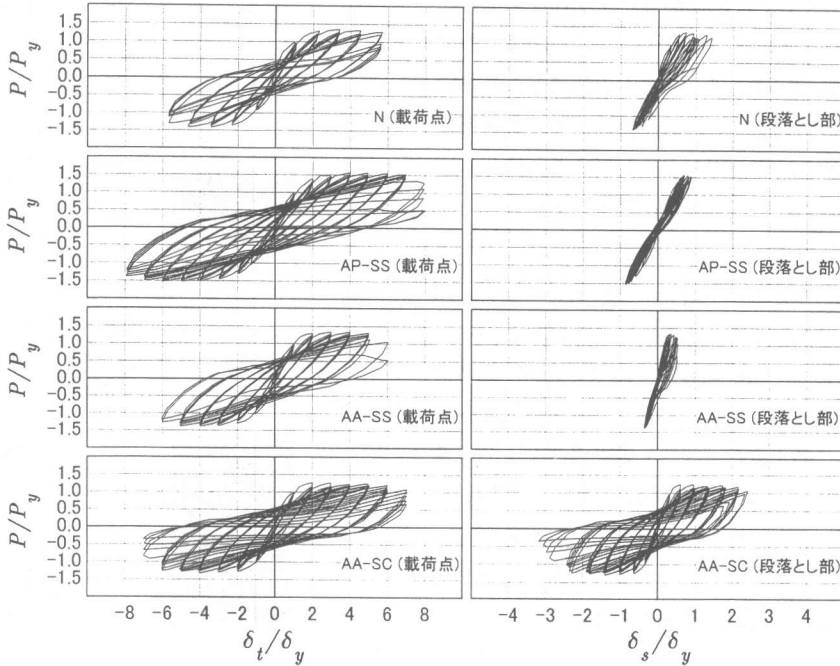


図-4 各試験体の荷重-変位関係

が  $2\delta_y$  ほど小さくなっており、AFRP シートを全巻きすることの効果は少ないことが分かる。一方、AA-SC では載荷点と段落し部の荷重-変位曲線の形状がほぼ類似しており、段落し部の変位量は高さにほぼ比例して出現している。これは、本試験体が貫通ボルトの定着板の代用として連続した鋼板を用いることにより、曲げ補強効果が出現して橋脚が基部を中心として剛体的に挙動しているためと推察される。従って、後述のように基礎部の損傷が著しく進行したものと考えられる。なお、貫通ボルトに発生した歪は最大で  $1000\mu$  程度であり、本補強設計法は十分に安全であることを確認している。

#### 4.2 破壊性状

図-5には各試験体の実験終了後の破壊性状を

示している。無補強試験体 N の場合には  $5\delta_y$  3回目で破壊したが、段落し部近傍で段落しされていない鉄筋のほぼ全てが座屈し、数本が破断していた。かぶりコンクリートは段落し部から下方に広範囲に剝落している。また、段落し部近傍では壁厚方向に水平ひび割れが中心部まで進展し、その後斜め  $45^\circ$  のひび割れに移行して塑性ヒンジ状態となっているのが分かる。なお、基部近傍でも数本の曲げひび割れが発生しているが、せん断ひび割れは生じていない。AP-SS の場合は  $8\delta_y$  3回目で破壊したが、変位振幅の増加に伴い、段落し部においてシートが上下に裂け、さらにその部分を押し広げるようにかぶりコンクリートがはらみ出し、その位置において鉄筋が座屈している。壁側面のひび割れは、補強区間においては水平方

向の曲げひび割れのみであるが、補強を施していない基部付近では、曲げと斜めひび割れが発生している。AA-SS の場合には  $6\delta_y$  2 回目と無補強と大差ない変位振幅で破壊したが、壁正面において AP-SS と同様に段落し部においてシートが上下に裂け、かぶりコンクリートがはらみ出して鉄筋が座屈している。壁側面のひび割れは水平方向の曲げひび割れのみが現れている。AA-SC の場合には  $7\delta_y$  1 回目で破壊したが、他で見られた段落し部での顕著なひび割れが見られず、定着板として連続的な鋼板を用いることにより、段落し部が曲げ補強され損傷は基部に集中している。その結果、基部付近においてシートが裂け、圧壊したコンクリートがはらみ出し破壊に至っている。壁側面においては、水平方向の曲げひび割れのみが見られ、また、他の試験体に比べてフーチング部の損傷が激しく、かぶりコンクリートの剝離も見られる。このように、段落し部を多少でも曲げ補強することで、同一の示方書に準拠して製作されたフーチングの損傷が顕在化することがわかる。この点も踏まえた合理的・効率的な橋梁システム全体の補強法の選択が重要であると考えられる。

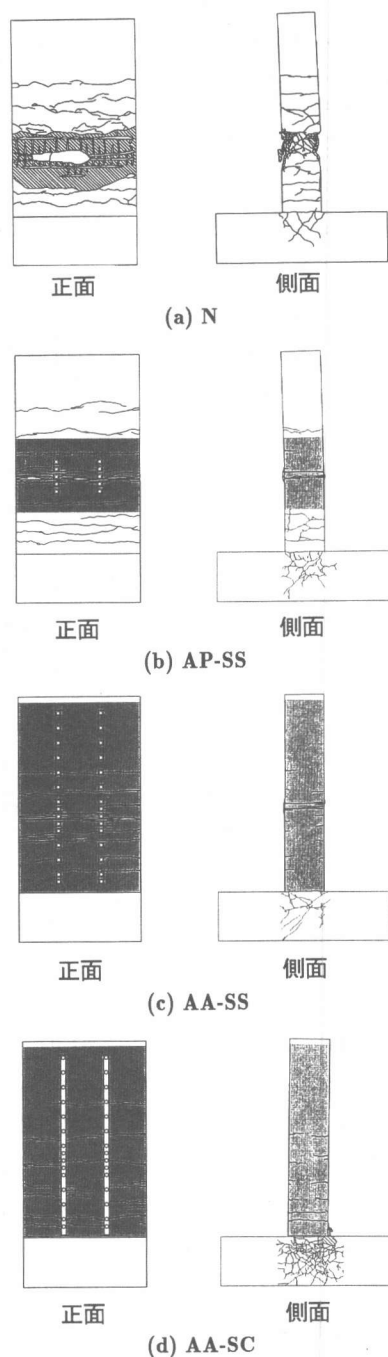
## 5. まとめ

本実験で得られた結果を整理すると、

- (1) 提案の本補強法により、段落し部におけるせん断ひび割れを抑制することができ、段落し部での脆性的な破壊を防ぐことができる。
- (2) 本補強法によって弱点は著しく基部へ移行しない。ただし、貫通ボルトの定着板として連続的な鋼板を用いる場合には段落し部の曲げ補強効果が卓越し、橋脚は剛体変形するとともに弱点が基部に移行する。
- (3) 段落し部の靱性補強を目的とする場合には、段落し部のみの補強が最も効率的である。

## 参考文献

- 1) 佐藤昌志, 三上 浩, 三田村浩, 木下昌樹: 実規模壁式 RC 橋脚の AFRP シート巻き付けによる靱性能向上効果, コンクリート工学年
- 2) 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.



図一五 実験終了後の破壊性状

次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1369~1374, 1999.