

## I-32

## AFRP シートを巻き付けた実規模壁式 RC 橋脚の静的交番載荷実験

|                |       |       |
|----------------|-------|-------|
| (社)北海道開発技術センター | ○フェロー | 吉田 紘一 |
| 北海道開発局         | 正員    | 池田 憲二 |
| 北海道開発局         | 正員    | 三田村 浩 |
| 三井建設(株)        | フェロー  | 三上 浩  |

## 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。一方、平成 8 年度に改訂された道路橋示方書・同解説の耐震設計編の基本的な考え方は、基部に塑性ヒンジを形成させることによって靱性を確保しつつ地震エネルギーを吸収させようとするものである。現在、旧示方書に準拠して建設された橋脚を対象として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おり、補強工事のための仮設工の規模が大きくなるため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としを有しており、実験結果からも明らかなように段落と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材料を用いること、2) 段落と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が肝要である。

本研究では、このような観点から段落とし部を有する壁式 RC 橋脚の耐震補強法として、AFRP シートを巻き付け工法を考え、実規模静的交番載荷実験によって妥当性を検討した。本研究では、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の貫通鉄筋に用いられる定着板の大きさをパラメーターに取って実験を行っている。また、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模型を製作して実験を行うこととした。

## 2. 段落とし部の靱性能向上のための補強設計の概要

昭和 55 年度版道路橋示方書・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によれば、まず、段落とし部の曲げ破壊が先行し、図-1 のような性状を示すことが知られている。すなわち、1) 曲げひび割れが水平方向に断面中央付近まで進展した後、2) このひび割れが斜め下方にせん断ひび割れとして逐次進展する、3) 圧縮側鉄筋位置まで到達すると、さらに鉄筋に沿って進行し、やがてかぶりコンクリートの剝離、鉄筋の座屈が発生し、4) 橋脚は脆性的な破壊に至る。このような現象に対し、AFRP シートを段落とし部に巻き付けることによって、曲げ耐力を向上させず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、橋脚の靱性を向上させることとした。以下にこのような考え方に基づいた補強設計法の概要を示す。補強設計は、図-1 に示すひび割れ発生状態に対して行うものとし、以下の仮定の下に実施する。すなわち、1) 必ず曲げひび割れが先行して発生し、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 シートの有効率は文献<sup>1)</sup>に従い 0.6 とする、である。今、段落とし部断面の抵抗曲げモーメントを  $M_u$ 、加力点から段落とし位置までのアーム長を  $l$  とすると、段落とし部における設計せん断力  $S$  は、

Static Lateral Cyclic Loading Test on Prototype Rectangular RC Pier Jacketed with AFRP Sheet  
by Koichi YOSHIDA, Kenji IKEDA, Hiroshi MITAMURA, and Hiroshi MIKAMI

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

として示される。

上述の仮定に従うと、シートの必要幅が橋脚の壁厚  $D$  の  $1/2$  であることより、シートの単位幅当たりの断面積  $A_{AF}$  はシートの耐力を  $\sigma_{AF}$  として、

$$A_{AF} = \frac{S}{0.6 \sigma_{AF} \cdot D/2} = \frac{S}{0.3 \sigma_{AF} \cdot D} \quad (2)$$

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、

$$n = \frac{A_{AF}}{(2 \cdot t)} \quad (3)$$

となる。補強範囲は、既往の実験結果を参考に、段落とし部から上方には  $1.0D$  以上、下方には、 $0.6 \sim 0.7D$  程度以上と設定する。一方、AFRP シート巻き付けによる横拘束効果は断面寸法比が  $1:1 \sim 1:1.5$  程度までは確認されているが、 $1:3$  以上と扁平な場合には、単純なシート巻き付けのみではその効果が期待できない。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、局部変形が卓越することより、設計条件を満足することができない。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、横拘束効果を発揮させるために効率よく、断面方向には断面の縦横比が  $1:1$  程度に分割されるように、また高さ方向には最小間隔として  $D/2$  以下になるように配置している。また、貫通ボルトは、1) 上述で決定したシート幅と同等以上の引張剛性を有すること、2) 作用せん断力  $S$  を断面方向に均等に分散させるために、貫通ボルトの引張剛性は AFRP シートの引張剛性の 2 倍程度でなければならない、という条件のもとに断面設計されなければならない。これより、貫通ボルトの必要面積は、AFRP シート、貫通ボルトの弾性係数をそれぞれ  $E_{AF}$ 、 $E_s$  とし、貫通ボルトの断面積を  $A_s$  とすれば、

$$A_s = \frac{2 E_{AF} A_{AF}}{E_s} \quad (4)$$

として求まる。

### 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载荷を実施している。従って、支点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。载荷荷重はロードセルで計測し、水平変位はワイヤ式変位計にて測定している。交番载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り付け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载荷点変位を降伏変位  $\delta_y$ 、その時の荷重を  $P_y$  として、 $2\delta_y$ ,  $3\delta_y$ , ... と変位振幅を漸増させて繰り返し载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・負いずれかの载荷荷重が  $P_y$  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と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。

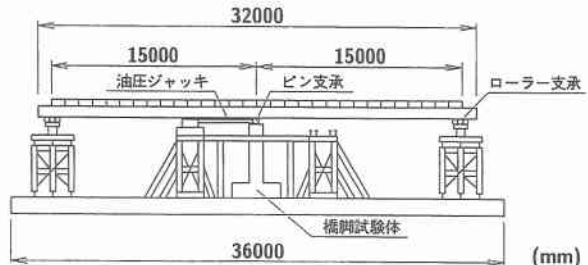


図-2 実験装置概略図

表一 実験試験体

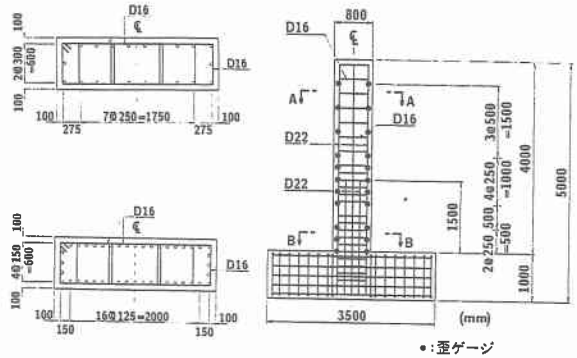
| 試験体   | 補強範囲  | 貫通ボルト<br>座金 | コンクリート<br>強度 (MPa) |
|-------|-------|-------------|--------------------|
| N     | 無補強   | —           | 22.9               |
| AP-SS | 段落とし部 | 分割          | 21.3               |
| AA-SS | 全面    | 分割          | 20.7               |
| AA-SC | 全面    | 連続          | 27.3               |

### 3.2. 実験試験体

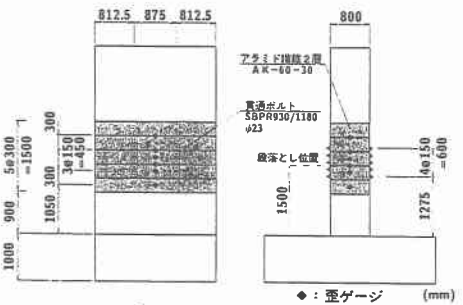
実験は比較のための無補強試験体の他、前述の補強法の考えに基づき、AFRP シートを段落とし部に巻き付けた試験体、および AFRP シートを橋脚全体に巻き付けた場合、さらに安全性を確保するため、座金の代わりに連続する鋼板を用いる場合の全 4 体について行った。表一に示している試験体名のうち、第 1 項目は補強範囲 (N: 無補強, AP: 段落とし部近傍補強, AA: 全面補強) であり、第 2 項目は貫通中間拘束ボルトの定着鋼板座金の配置 (SS: 座金分割, SC: 座金連続) である。なお、無補強試験体である N に関しては、過去の実験データを用いることとした。また、AA-SC の場合は鋼板座金が連続していることより、特に段落と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。

図一3 には試験体の形状寸法と配筋状況および歪ゲージ貼付け位置を示している。試験体は、昭和 55 年度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としを行っている。なお、主鉄筋および帯鉄筋は全て SD345 を使い、その引張強度は 373 MPa、弾性係数は 219 GPa、降伏歪は 0.17 % である。

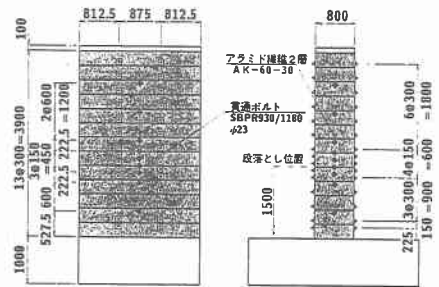
図一4 に提案した補強工法による補強の概要を示す。本試験体の段落とし位置の抵抗曲げモーメントは断面分割法より  $M_u = 1.29 \text{ MNm}$  であり、段落とし部から加力点までのアーム長は  $l = 2.74 \text{ m}$  である。前述の補強設計に基づき、AFRP シートは、目付け量  $415 \text{ g/m}^2$ 、厚さ  $0.286 \text{ mm}$ 、弾性係数  $126.5 \text{ GPa}$ 、引張強度  $2.48 \text{ GPa}$ 、破断歪  $1.96 \%$  のものを 2 層巻き付けることとした。補強範囲は、基部より  $90 \sim 240 \text{ cm}$  の区間 (AP-SS) あるいは基部より  $390 \text{ cm}$  までの区間 (AA-) とした。また、壁正面における横拘束効果を促進するためとコンクリートのはらみ出しを抑制するために、貫通中間拘束ボルトを壁の横断方向に 2 列、高さ方向に 5 (AP-SS) および 15 段 (AA-) をそれぞれ図に示す位置に配置した。貫通ボルト



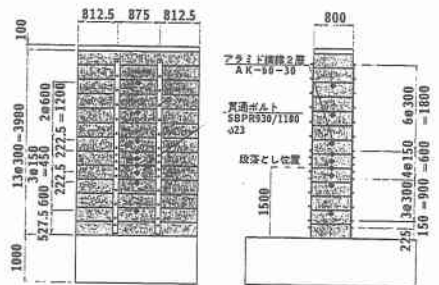
図一3 試験体の形状寸法と配筋状況



(a) AP-SS試験体



(b) AA-SS試験体



(c) AA-SC試験体

図一4 補強概要図

には PC 鋼棒 SBPR930/1180φ23 をネジ切りして使用した。貫通ボルトは定着板として厚さ 16mm の鋼板 (SS400) 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削孔部は、実構造を想定し、貫通ボルトの腐蝕防止も考慮して貫通ボルト設置後にモルタルにより充填している。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1. 荷重－変位関係

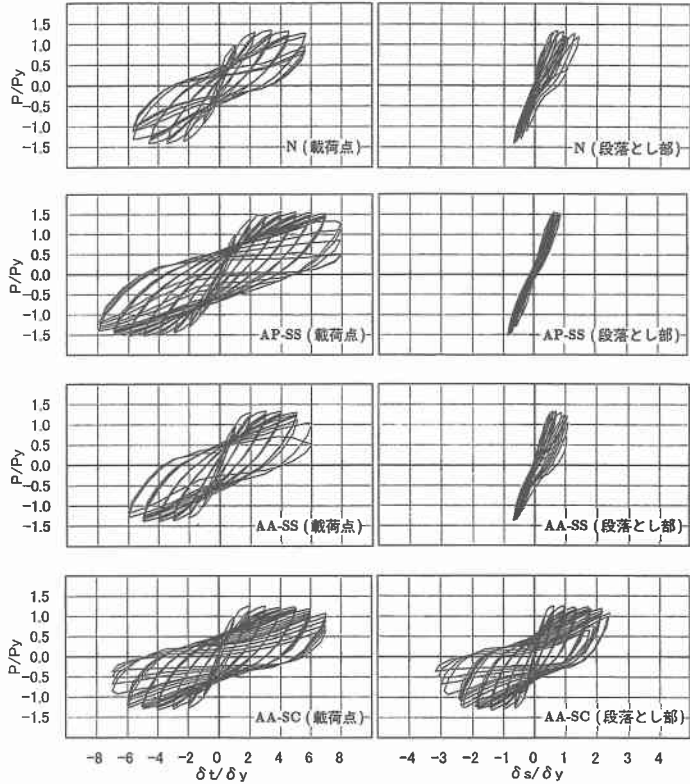
表－2 には実験結果の一覧を示している。表中  $\delta_y$ ,  $P_y$  は載荷点位置の降伏変位, 降伏荷重を,  $\delta_u$ ,  $P_u$  は終局時の載荷点変位, 載荷点荷重を意味している。図－5 に各試験体の載荷点位置および段落とし部位置での  $\delta_y$ ,  $P_y$  で無次元化した荷重－変位関係を示す。図中  $\delta_t$ ,  $\delta_s$  は、載荷点および段落とし位置での変位を意味している。

無補強試験体 N は段落とし部で破壊が進行しヒンジが形成されて終局に至ることより、載荷点変位が増加しても段落とし位置における変位が増加していないことが分かる。

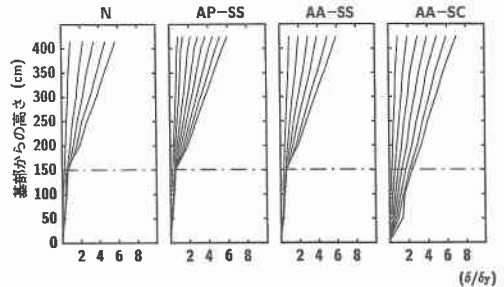
AFRP シート巻き付けの AP-SS, AA-SS 場合は N 試験体同様、載荷点変位の増大に比較して段落とし部では変位が増加せず、段落とし部にヒンジが形成されていることを暗示している。また、AP-SS の場合には交番回数が 8 回目まで到達しており、段落とし部の靱性補強効果が発揮されていることが分かる。また、AP-SS と AA-SS を比較すると AA の交番回数が 2 ステップ減少しており、AFRP シートを全巻きすることの効果の小さいことが分かる。一方、AA-SC は載荷点と段落とし部の荷重－変位曲線の形状がほぼ類似しており、段落とし部の変位量も高さにほぼ比例している。これは、本試験体が貫通ボルト座金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橋脚が基部を中心として剛体的に挙動しているためと考えられる。従って、後述のように基礎部の損傷が著しく進行していることが推察される。

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<br>( $\delta_u/\delta_y$ ) |
|--------|------------|------------|---------|-------|-----------|-------------------|----------------------------------|
|        | $\delta_y$ | $\delta_u$ | $P_y$   | $P_u$ | $P_{max}$ |                   |                                  |
| 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     | 211   | 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－5 各試験体の荷重－変位関係



図－6 変位分布

## 4.2. 変位分布

図-6 に各試験体の橋脚高さ方向の変位分布を示す。無補強試験体 N は、段落とし位置である 150 cm の位置で曲率に変化し、 $2\delta_y$  以降は段落とし部にヒンジが形成されている様子が示されている。

AP-SS、AA-SS の場合は、曲げ補強を施していないことより N 試験体の場合と類似の分布性状を示し

ているものの、シート巻き付けによる拘束効果の出現により剛性低下の度合いが小さく、各ステップの変位が小さく示されている。一方、AA-SC 試験体では、貫通ボルト座金としての連続した鋼板によって曲げ補強効果が発現するため、他の試験体とは変形モードが異なり、橋脚基部より上端までほぼ線形的に変形し、剛体変形状態になっていることが分かる。

## 4.3. AFRP シート歪分布

図-7 には補強した各試験体の壁正面・側面における AFRP シートの周方向歪分布を示す。図中には、 $\delta_y$ 、 $P_{max}$ 、 $\delta_u$  時の歪を示している。AP-SS の場合には、壁正面・側面のいずれも段落とし位置で歪が最大となっており、段落とし位置におけるコンクリートのはらみ出しを拘束している効果がでているものと考えられる。なお、段落とし近傍部以外ではほとんど歪が発生していない。AA-SS の場合の歪分布は、AP-SS と類似のものとなっており、段落とし近傍部以外ではシート巻き付け効果のないことが分かる。一方、AA-SC の場合には、壁側面において歪は全区間においてほとんど現れていない。また、壁正面においても基部近傍以外ではほとんど発生していないことが分かる。これより、AA-SC の場合にはシート巻き付けの効果より連続した鋼板を用いたことによる曲げ補強効果が卓越していることが分かる。

## 4.4. AFRP シートと貫通ボルト歪の比較

図-8(a)~(c)には、AP-SS、AA-SS は段落とし部の、AA-SC は基部近傍の AFRP シートの壁正面・側面の周方向歪と、貫通ボルト中央部の歪履歴分布を示している。

(a)より、壁側面の歪は、変位振幅の増大とともに段階的に増加し、徐々に拘束効果が現れている状況が分かる。壁正面の歪は、 $3\delta_y$  程度まではほとんど発生せず、 $4\delta_y$  以降から増加傾向を示している。これは、この時点よりコンクリートのはらみ出しが発生していることを暗示している。

(b)より、壁側面部および貫通ボルトの歪分布は、 $2\delta_y$  以降より徐々に増加しており、拘束効果を確認できる。壁正面部においては、AP-SS 同様に  $2\delta_y$  程度までは拘束効果が現れず、 $3\delta_y$  以降から出現している。また、 $5\delta_y$  においてコンクリートのはらみ出しとともに急激に増加している。

(c)より、壁側面部の歪は、最大で  $100\mu$  程度で、拘束効果がほとんど現れていないことが分かる。貫通

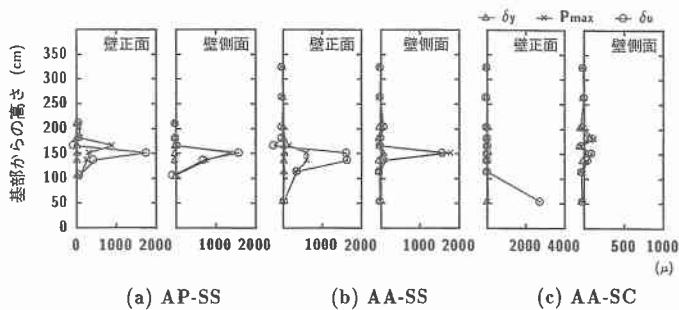
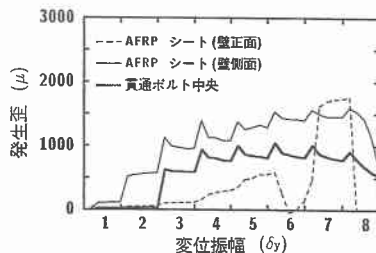
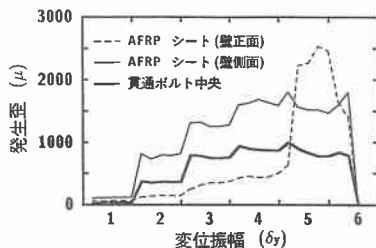


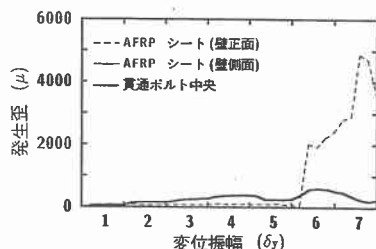
図-7 AFRP シート歪分布



(a) AP-SS (段落とし部)



(b) AA-SS (段落とし部)



(c) AA-SC (基部近傍)

図-8 AFRPシートと貫通ボルトの歪

ボルトは、 $2\delta_y$ 以降から歪が発生してきているものの、その値は小さい。壁中央部歪は、 $6\delta_y$ 目に急激に増加している。

#### 4.5. 破壊性状

図一9に各試験体の実験終了後の破壊性状を示す。無補強試験体Nは、段落とし部近傍で上端まで伸びている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とし部から下方に広範囲に剝落している。また、段落とし部近傍で壁厚方向に水平ひび割れから斜め $45^\circ$ のひび割れに移行して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、変位振幅の増加に伴い、段落とし部において、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圧壊した若干の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、曲げひび割れと斜めひび割れが発生している。AA-SSの場合には、壁正面において、AP-SS同様に段落と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、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、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、他の試験体に比べファーチング部の損傷が激しく、かぶりコンクリートの剝離が見られる。

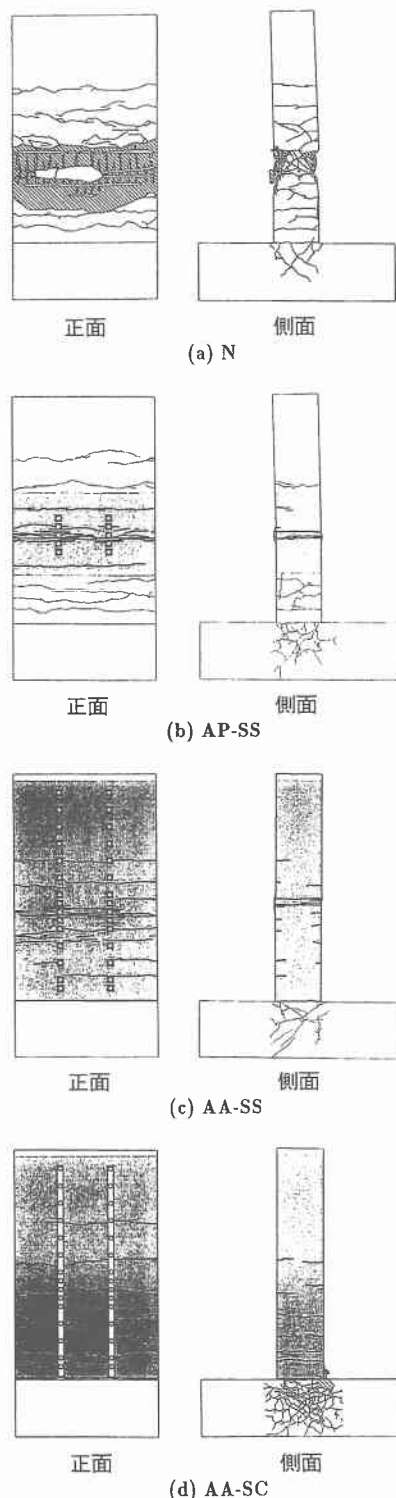
#### 5. まとめ

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、段落とし部におけるせん断ひび割れを抑制することができ、段落とし部での脆性的な破壊を防ぐことができる。
- 2) 本補強によって弱部は基部へ移行しない。ただし、貫通ボルト座金として連続的な鋼板を用いる場合には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) 貫通ボルトに対する独立した座金を用いる場合には、AFRPシートの周方向歪が、段落とし近傍部で集中して発生しており、それ以外の区間ではほとんど発生せず、シート巻き付けの効果が少ない。

#### 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.



図一9 実験終了後の破壊性状