

I-31

AFRP シートを巻き付けた実規模壁式 RC 橋脚の動的耐荷性状

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
(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
三井建設(株)	フェロー	三 上 浩 志
室蘭工業大学	○学生員	林 雄 志

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 橋脚の耐震補強として AFRP シート巻き付け工法を考え、その動的耐荷性状を把握するために動的基部加振実験を行った。

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、曲げ体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 度下方に進展する。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する、3) AFRP シートの有効率は文献¹⁾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

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

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、シートの設計単位長さ当たりの断面積 A_{AF} はシートの耐力を σ_{AF} として、

Dynamic Resistant Behavior of Prototype Rectangular RC Pier Jacketed with AFRP Sheet
by Norimitsu KISHI, Koichi YOSHIDA, Kenji IKEDA, Hiroshi MIKAMI, and Yuji HAYASHI

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

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、横拘束効果を効率よく発揮させるために断面方向には壁の断面が $1:1$ 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) 作用せん断力を S 断面方向に均等に分散させるためには、貫通ボルトの引張剛性を AFRP シートの引張剛性の 2 倍程度として断面設計を実施するべきである。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。本装置は、実規模の橋梁模型を設置した走行架台全体をエアベアリングを利用して浮上、走行させ、反力壁への衝突による急制動によって地震動に類似した加速度を入力する装置である。架台の走行には、架台と連結された重錘 (98 kN) の自由落下エネルギーを利用している。また、実験時の入力加速度は、架台の走行距離を変化させることで調節している。

上部工は支間 30 m、重量約 1060 kN の二径間連続鋼製桁で、この中間支点に壁式 RC 橋脚である試験体を設置し、橋脚上端でピン支承により上部工を支持している。また、桁端部は水平方向の動きを妨げないようにローラー支承とした。

3.2. 実験試験体

実験は表-1 に示すように、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のみ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、座金の替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。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

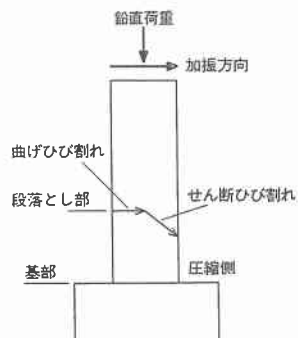


図-1 橋脚のひび割れ性状

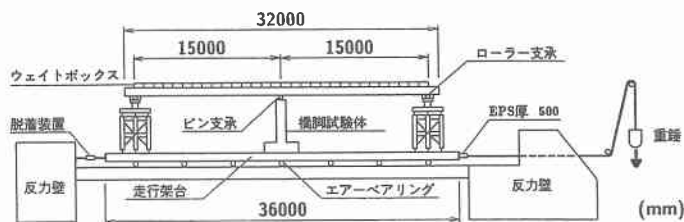


図-2 実験装置概略図

The figure contains three technical drawings of reinforcement details:

- Top Left Drawing:** A cross-section of a slab showing vertical reinforcement bars labeled D16. Dimensions include a total width of 70250=1750, with 275mm margins on each side. Vertical dimensions show a height of 200mm and a clear height of 190mm.
- Bottom Left Drawing:** A cross-section of a slab showing vertical reinforcement bars labeled D16. Dimensions include a total width of 160125=2000, with 150mm margins on each side. Vertical dimensions show a height of 200mm and a clear height of 190mm.
- Right Side Drawing:** A longitudinal section of a slab showing horizontal reinforcement bars labeled D16 and D22. It includes labels for top (A) and bottom (B) reinforcement. Dimensions include a total length of 5000mm, with segments of 30500mm, 4000mm, 1500mm, 1000mm, and 1000mm. Horizontal dimensions at the base are 3500mm and 1000mm. Vertical dimensions show a height of 800mm and a clear height of 1500mm.

(mm)

●:巻ゲージ

図-3 試験体の形状寸法と配筋状況

Figure 1 shows the dimensions of the test specimen. The specimen is a rectangular block with a total height of 1000 mm. The top section has a width of 812.5 mm and a height of 1500 mm. The middle section has a width of 812.5 mm and a height of 300 mm. The bottom section has a width of 812.5 mm and a height of 1050 mm. The specimen is composed of several layers: a top layer of 1500 mm, a middle layer of 300 mm, and a bottom layer of 1050 mm. The bottom layer is further divided into a 1500 mm section and a 1275 mm section. The specimen is labeled with dimensions in mm.

(a) AP-SS試験体

(b) AA-SS試験体

(c) AA-SC試験体

図-4 補強概要図

試験体	補強範囲	貫通ボルト 座金	コンクリート 強度 (MPa)	走行距離 (m)	EPS厚 (m)
N	無補強	—	28.9	0.5~2.0	0.5
AP-SS	段落とし部	分割	26.0	0.5~2.875	
AA-SS	全面	分割	20.8	0.5~2.375	
AA-SC	全面	連続	26.4	0.5~3.325	

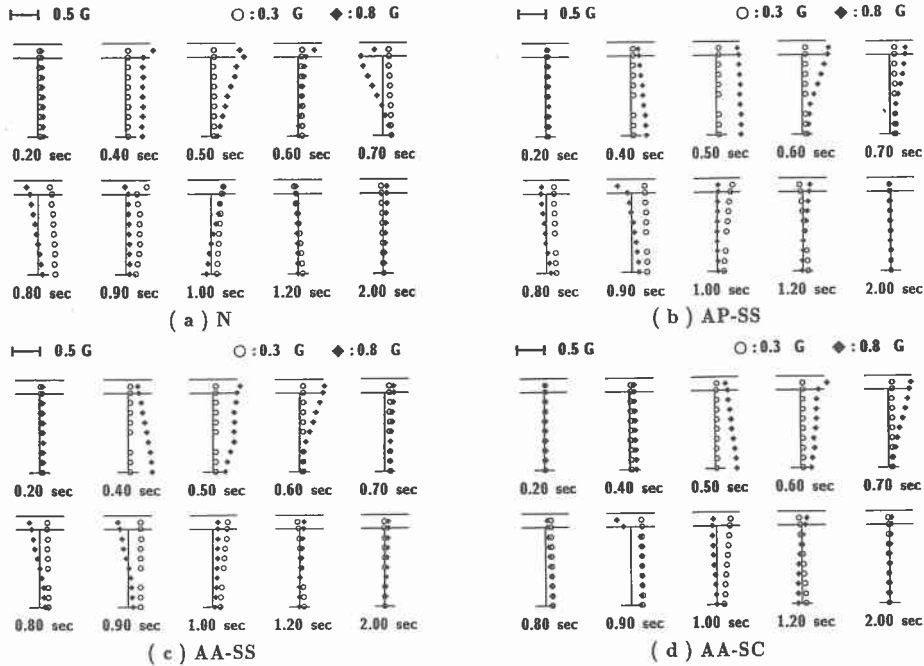


図-5 入力加速度及び応答加速度分布

ルタルにより充填している。なお、表-1には、各試験体製作に用いられたコンクリート強度の他、基部加振入力のための架台走行距離を一覧にして示している。

4. 実験結果及び考察

4.1. 入力加速度及び応答加速度

図-5には入力加速度の最大値が約 0.3 G (図中 ○ 印) , 0.8 G (図中 ◆ 印) である実験ケースの各時間における応答加速度分布を示している。なお、加速度計は、桁中央部及び橋脚には基部より 50 cm ピッチに取り付けている。図より、入力加速度の最大値が約 0.3 G の場合には、いずれの試験体も各測点の応答加速度の最大値は 0.8~0.9 sec 経過後に発生しており、それらの値はほぼ同程度であることがわかる。また、橋脚基部より上部に向かって応答が推移している状況もわかる。

入力加速度の最大値が約 0.8 G のケースの場合には、無補強試験体 N 及び AFRP シート巻き付け補強を施した AP-SS, AA-SS の場合には、0.5 sec 付近までは橋脚基部から上部に至るまで応答加速度がほぼ類似の大きさで一様に分布しているが、それ以降では、段落とし部より上側で大きな加速度が発生している。これは、段落とし部における曲げひび割れの発生により、段落とし部の下部を固定端とする片持ち梁状になって挙動していることを意味しているものと考えられる。一方、連続した貫通ボルト座金により曲げ補強された AA-SC では、第 1 波目の加振以降は橋脚基部より橋脚上部へ向かって連続的に応答が推移している状況がわかる。従って、段落とし部の不連続な応答は示されていない。また、0.70 sec 時の分布は基部を起点としてほぼ線形な加速度分布を示している。これは加振による著しい劣化損傷が橋脚本体に現れず、橋脚基礎部に進行していることを示唆している。

図-6には入力最大加速度と桁、橋脚上端、段落とし部位置での応答最大加速度との関係を示している。(a) 図は桁水平方向最大加速度との関係である。いずれの試験体も入力加速度が 0.6 G 以下では、応答加速度は入力加速度とほぼ線形的な関係となっている。0.6 G 以上の場合には、応答加速度が入力加速度より小

さくば 0.6 G 付近に漸近していることがわかる。これは、入力加速度が 0.6 G 以上の場合には、ケースによって異なるものの段落とし部あるいは橋脚基礎の塑性変形によってエネルギーが吸収され、免震的な効果が発揮されているものと推察される。

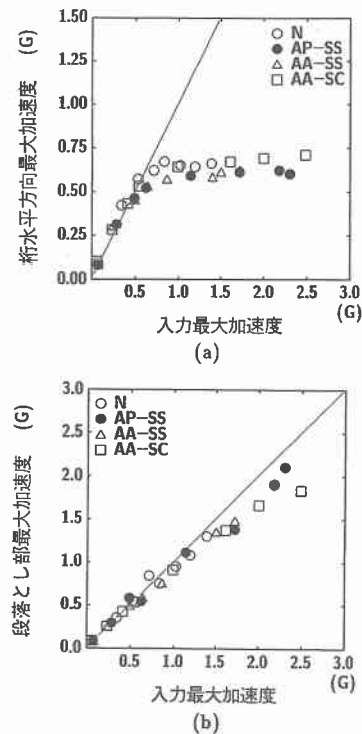
(b)図は段落とし位置での最大水平加速度との関係を示している。N、AP-SS、AA-SS 試験体は、いずれの実験ケースにおいても入力加速度と応答加速度は同程度の値を示している。これは、これらの試験体の段落とし部より下部は未だ健全であり、段落とし部より下方の部分がほぼ剛体的な挙動をしていることを示している。また、AA-SC では入力加速度が 1.5 G 近傍より段落とし部応答加速度が低下している。これは基礎部で劣化が進行してエネルギー吸収されているためと推察される。

4.2. 壁側面及び正面の AFRP シート歪

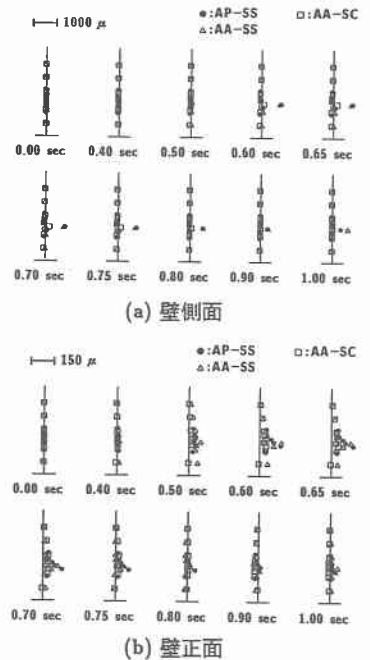
図一七に入力加速度の最大値が約 0.8 G である実験ケースにおける補強した試験体の壁側面及び壁正面の AFRP シートの周方向歪の時系列分布を示す。図中、右側を引張、左側を圧縮として表わしている。図より、いずれの試験体も壁側面及び壁正面において、段落とし部近傍で歪の分布が集中する傾向が現れている。また、歪が発生している区間は段落とし部近傍のみであることもわかる。最大値はそれぞれ AP-SS では壁側面で 881 μ 、壁正面で 150 μ 、AA-SS では壁側面で 811 μ 、壁正面で 147 μ 、AA-SC では壁側面で 195 μ 、壁正面で 50 μ となっている。

4.3. 曲げモーメント波形

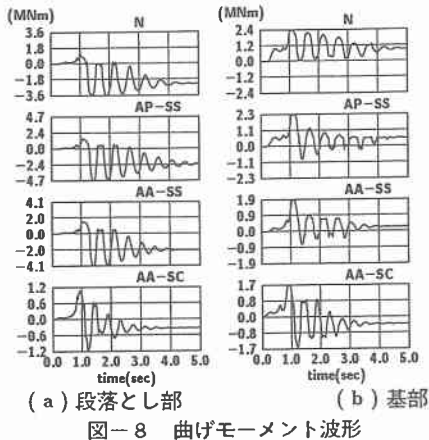
図一八にはは代表的な実験ケースとして、入力加速度の最大値がほぼ 0.8 G である実験ケースの各試験体の基部及び段落とし部位置での曲げモーメントの波形分布を示している。なお、ここに示す曲げモーメントは、橋脚の主鉄筋歪を用い、断面の平面保持を仮定して算出したものである。段落とし部の波形に着目して見ると、N、AP、AA-SS の場合には負曲げモーメント側に対しては正弦波的な分布性状を示しているが、正曲げモーメント側に対しては曲げモーメントが励起されず、橋脚が偏心状態で振動していることがわかる。また、AA-SC の場合には最終的に負方向への偏心が示されているものの、3 波目まで正負交番曲げモーメントが励起されており、連続鋼板を座金として用い、段落とし部を曲げ補強している効果が確認できる。一方、基部の曲げモーメント分布を見ると、N、AP、AA-SS の場合には正曲げモーメント側への偏心傾向を示しているものの、減衰振動的な性状を示しており、段落とし部よりも損傷の程度が小さいことがわかる。また、残留曲げモーメントの方向が段落とし部と基部で異なっていることより、最終的には



図一六 入力加速度と各応答加速度の最大値の関係



図一七 壁側面・正面の AFRP シート歪分布



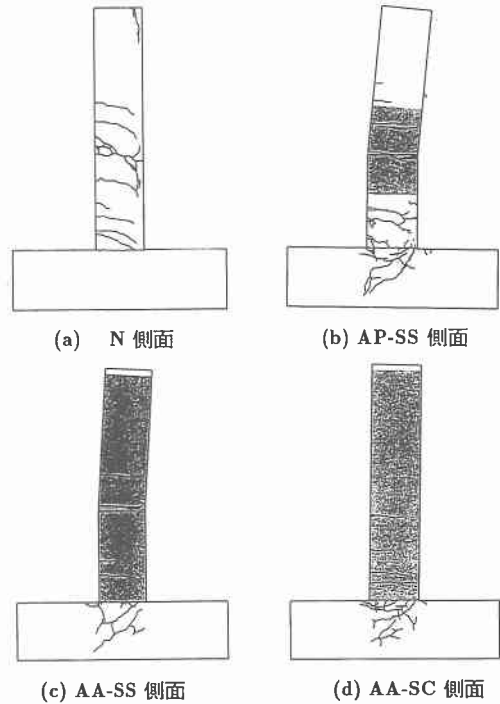
二次モード的な分布になっているものと推察される。

また、AA-SC の場合には、片側振幅が N, AP-, AA-SS の場合より大きくかつ残留偏心方向がこれらと異なり段落とし部と同一方向であることより、一次モード的に挙動していることが窺われる。

4.4. ひび割れ性状

図-9 に実験終了時の各試験体の側面におけるひび割れ状況を示す。N 試験体は段落とし近傍における曲げひび割れからせん断型へと移行するひび割れの進展により破壊した様子が示されている。

AP-SS は補強区間においては水平方向の曲げひび割れのみ出現され、段落とし位置での曲げひび割れによって終局に至った様子が示されている。また、無補強試験体で見られた段落とし位置のせん断ひび割れは本補強方法により抑制されていることがわかる。AA-SS では AP-SS 同様、全区間において水平方向の曲げひび割れのみ発生し、段落とし位置でひび割れが開口している。AA-SC では AA-SS 同様水平方向曲げひび割れのみが出現している。しかしながら、連続した鋼板を座金として用いていることより、段落とし部が曲げ補強効果によって耐力が向上し、その結果橋脚が剛的に挙動して基礎部に損傷が集中し、回転に伴うひび割れが発生しているようである。



5. まとめ

段落としを有する壁式 RC 橋脚に対し、AFRP シート巻き付けと貫通拘束ボルトを併用する補強工法を提案し、動的耐荷性状の把握を目的として動的基加振実験を行った。本実験で得られた結果を整理すると、

- 1) 橋脚が健全な状態では、橋脚はほぼ入力振動と同様の挙動をする。
- 2) 本補強により、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。
- 3) 本補強によって弱部は基部へ移行しない。ただし、貫通ボルト座金により曲げ補強効果が発揮される場合には弱部が基部あるいは基礎部に移行する。
- 4) AFRP シートの周方向歪は、壁側面・正面のいずれの面においても、段落とし部近傍で集中して発生しており、補強範囲は段落とし周辺部で十分である。

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・施工要綱（案），1998。