

論文 AFRP シート巻き付けされた段落しを有する実規模 RC 橋脚の動的プッシュオーバー実験

池田憲二*1・吉田紘一*2・三上 浩*3・佐藤昌志*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て考えられたアラミド繊維強化プラスチック (以下 AFRP) シート巻き付け工法を適用し、その動的応答性状を把握するために全長 30 m の実規模二径間連続桁橋に設置して動的プッシュオーバー実験を行った。その結果、1) 本補強工法を適用することにより、段落し部での脆性的な破壊を効率的に防ぐことができる。2) 入力加速度が 0.6 G 程度で段落し部が損傷し、上部工の応答倍率が低減する、等が明らかとなった。

キーワード: 壁式 RC 橋脚, AFRP シート巻き付け, 貫通ボルト, 動的応答性状

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、旧道路橋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しを有しており、実験結果¹⁾からも明らかの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材料を用いること、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が肝要である。著者等はこのような考え方をもとに、独自に AFRP シート巻き付け法による耐震補強法を提案し、実規模壁式 RC 橋脚を用いた静的交番載荷実験を試み、その妥当性を検討している¹⁾。

本研究では、提案の補強工法の衝撃的地震動作下での適用性を検討することを目的として、全長 30 m の実規模二径間連続桁橋を用いた動的プッシュオーバー実験を実施した。実験は橋梁全体を鋼製の架台上に乗せ、エアベアリングで浮かせた状態で架台を反力壁に衝突させることにより行っている。本研究では、無補強試験体を含め、補強範囲およびシート締め付けのための貫通ボルト用定着板の形状をパラメータに取った全 4 体について実験を行った。

2. 靱性能向上のための補強設計の概要

段落し部の靱性能向上のための補強設計法の基本的な考え方、設計式の定式化は、静的交番載荷

*1 北海道開発局開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

*2 (株) 土木技術コンサルタント 副社長 工修 (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 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博 (正会員)

実験に関する報告¹⁾の中で詳細に述べていることより、ここでは考え方のみについて簡潔に述べることにする。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によれば、まず、段落し部の曲げ破壊が先行し、図-1 のようなひび割れ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て AFRP シートを段落し部に巻き付け、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、橋脚の靱性能を向上させることにする。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、斜めひび割れは断面中央部より 45 度下方に進展する。2) 斜めひび割れ発生部の設計せん断力は、全て巻き付けられた AFRP シートによって抵抗する、3) AFRP シートのせん断補強に対する有効率およびシート材料の安全係数をそれぞれ 0.6、1.15 とする、である。補強範囲は、既往の実験結果を参考に、壁厚を D として段落し部から上方には $1.0D$ 以上、下方には、 $0.6 \sim 0.7D$ 程度以上と設定する。また、中間帯鉄筋が配筋されていないことによる中央部のはらみ出し現象、局部変形を抑制するために、シート巻き付け後に貫通ボルトを配置

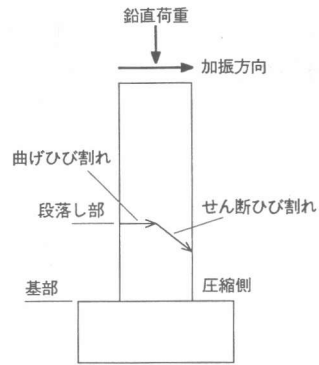


図-1 橋脚のひび割れ性状

することとする。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、高さ方向には斜めひび割れの中央部を拘束するように、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。さらに、作用せん断力に対して断面が均等に抵抗するように、貫通ボルト 1 本の断面積は、そのボルトが分担するシート幅に対して 2 倍の引張耐力を有するように決定することとする。

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衝撃的地震動に類似した加速度を入力し動的にプッシュオーバーさせる装置である。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。

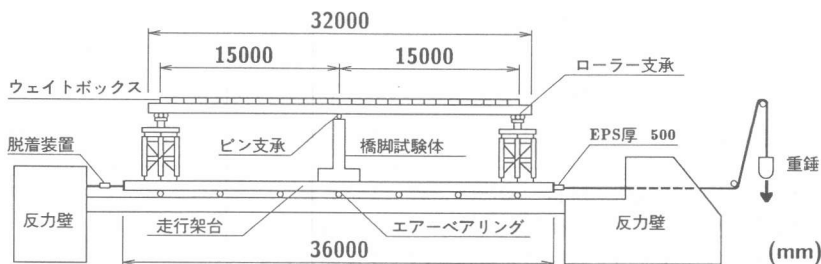


図-2 実験装置概略図

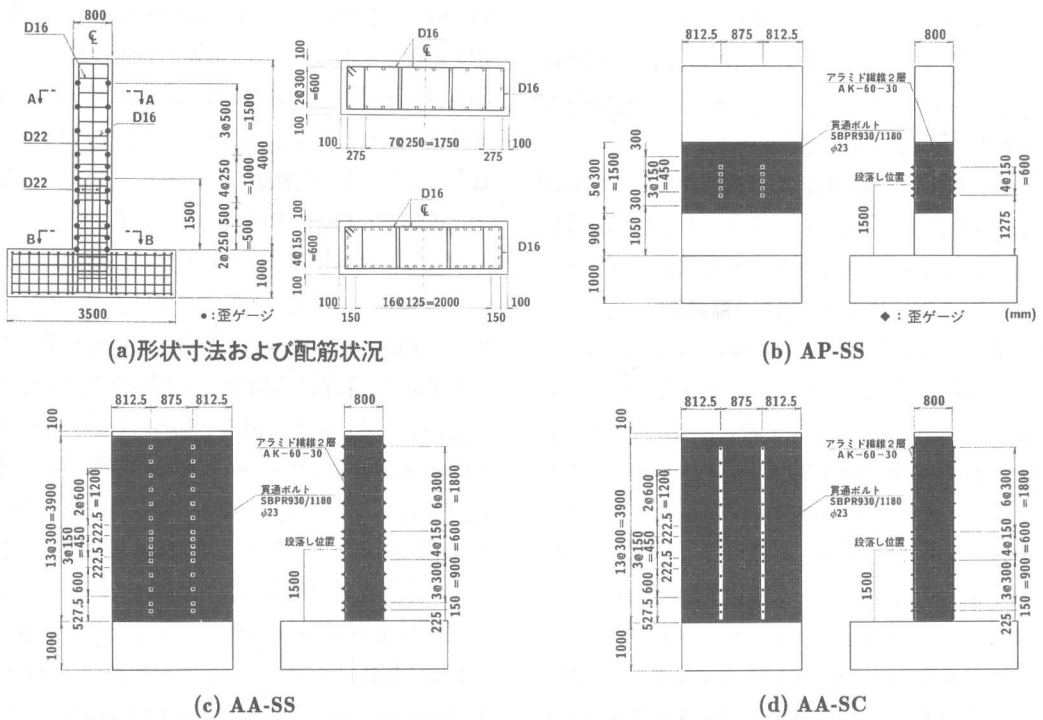


図-3 試験体の形状寸法と配筋状況および補強概要図

表-1 実験試験体

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	0.5~3.25	

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段落し部無補強試験体の他、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、および AFRPシートを橋脚全体に巻き付けた場合、AFRPシートを橋脚全体に巻き付けさらに定着板として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鋼板の配置(SS:大きさ100×100×16mmの定着板を各貫通ボルト毎に設置する場合, SC:大きさ3663×100×16mmの連続する鋼板を定着板として用いる場合)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図を示している。橋脚およびフーチングは、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。橋脚の形状寸法は、壁厚80cm、壁幅250cm、壁高400cmとした。橋脚は基

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、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である支承部ピン位置までのアーム長は $l = 2.74 \text{ m}$ である。前述の補強設計に基づき、AFRP シートは、目付け量 415 g/m^2 、厚さ 0.286 mm、弾性係数 126.5 GPa、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。各試験体の補強範囲は、図-3 に示すとおりであり、貫通ボルトは壁の横断方向に 2 列、高さ方向に段落し部 60 cm の領域を 15 cm ピッチ、他は 30 cm ピッチとし、5 段 (AP-) および 15 段 (AA-) を配置している。貫通ボルトには PC 鋼棒 SBPR930/1180 $\phi 23$ をネジ切りして使用した。貫通ボルトは SS400 の鋼板を定着板として用い、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、ボルトの腐蝕防止も考慮してボルト設置後にモ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-4 には N, AP-SS, AA-SC の 3 試験体に関する入力加速度の最大値が約 0.8 G である実

験ケースの各時間毎における橋脚の応答加速度分布を比較して示している。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。なお、AA-SS に関する実験結果は AP-SS の場合と類似していることより、ここでは煩雑さを避けるため省略している。

図より、無補強試験体 N の場合は、衝突初期にほぼ線形的な加速度分布を示しているが、0.42 ~ 0.48 sec 経過後に段落し部で鋭角的に折れる分布性状を示し、段落し部が著しい損傷を受けていることがわかる。一方、段落し部のみ補強している AP-SS の場合は、0.50 sec までほぼ直線状の加速度分布を示している。0.55 sec 時には段落し部より上部に向かって緩やかに増加する加速度分布を示し、段落し部の補強によって損傷が一ヶ所に集中せず分散する傾向を示していることがわかる。0.55 sec 以降は 1 次モード的な分布性状を示しているものの、基部近傍の加速度勾配は零で、ほぼ固定条件を満たしており、基部の損傷度合いの小さいことがうかがわれる。全面補強試験体 AA-SC の場合は、全時間を通して、ほぼ線形な加速度分布を示しており、段落し部が健全であることがわかる。また、0.65 sec 経過後の加速度分布は基部を起点とした線形分布を示している。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部に進行し、塑性ヒンジ的な状態になっていることをうかがわせる。

N と AP-SS の結果を比較すると、段落し部における加速度勾配の急変時間は AP-SS が N より

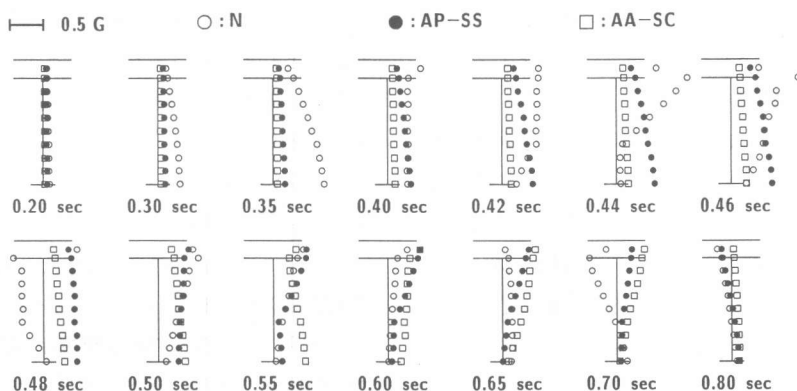
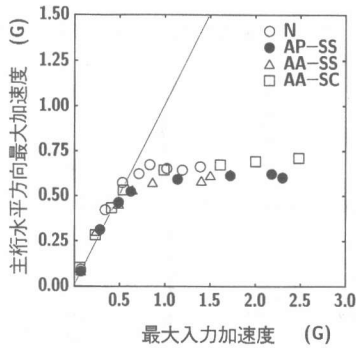
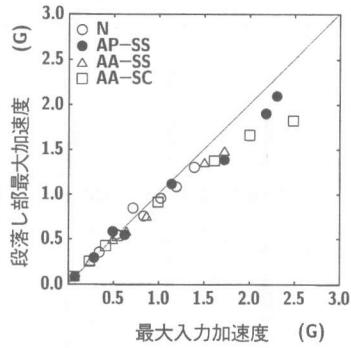


図-4 最大入力加速度 0.8 G の場合における橋脚の応答加速度分布



(a) 主桁



(b) 段落し部

図-5 最大入力加速度と各最大応答加速度の関係

0.13 sec 程度遅れており、段落し部の補強効果を確認できる。主桁の加速度分布に関して、3 試験体で比較すると、AP-SS、AA-SC の場合には主桁は橋脚とほぼ連動して挙動している。一方、N の場合には、段落し部で加速度勾配が急変する 0.44 ~ 0.48 sec 間で、主桁と橋脚天端部の分布が連続なものとなっていない。これは橋脚上部の加速度の急変により、橋脚天端部が 1.1G 以上に達したものの主桁部が追従できずゆるやかに挙動していることを示している。その結果、後述のひび割れ分布からわかるように支承アンカー部が損傷しひび割れが発生している。

図-5 には最大入力加速度と主桁、段落し部位置での最大応答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ほぼ 0.6G 付近に漸近していることがわかる。いま、0.6 G の加速度が震度法的に上部工に作用するものと仮定すれば、段落し部への作用曲げモーメントが 1.74 MNm と概算され、前述の耐力以上の値となっていることより、段落し部が終局に近い状態になっていることがわかる。

(b) 図は段落し部位置での最大水平加速度との関係を示している。最大入力加速度が 1.5G 程度まで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、段落し部より下部はそれほど損傷が進行せず、最大応答時には段落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、AP-SS、AA-SC において最大入力加速度が 1.5G 以上の場合には、段落し部の最大応答加速度が入力加速度よりも小さな値を示している。その程度は、AA-SC が AP-SS より大きい。これは、基部の劣化が進行することにより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-6 には入力加速度の最大値が約 0.8G の場合における各時間毎における AFRP シートの周方向歪分布を示す。図は右側を引張、左側を圧縮としている。AP/AA-SS の場合には 0.6 sec 時より段落し近傍部において引張歪が増大している。この歪発生時刻は図-4 の応答加速度分布から見られる段落し部の損傷の進行と符合している。また、AA-SC の場合には段落し部に顕著な歪は発生していない。なお、段落し部のみを補強した場合でも、AFRP シート歪は最大で 800 μ 程度以下であり、破断歪の 4% 程度と小さく十分に許容できるレベルであることから、効率的に靱性補強されていることがわかる。

4.3 ひび割れ性状

図-7 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 は段落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

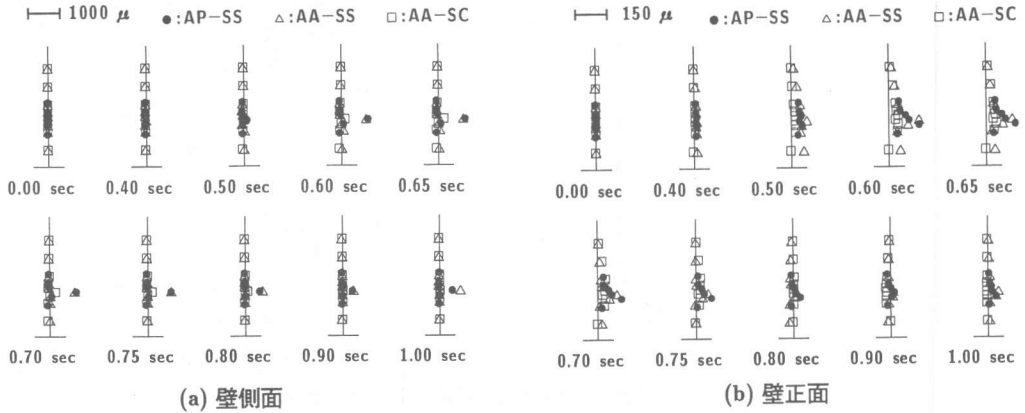


図-6 壁側面・正面のAFRPシート歪分布

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が出現し、段落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し位置のせん断ひび割れは本補強工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が発生し、段落し位置でひび割れが開口している。AA-SCでは段落し部より下方で曲げひび割れが発生している。また、基部には円弧すべりのようなひび割れが示され、回転を伴うひび割れの発生が確認できる。このように、段落し部を多少でも曲げ補強するとフーチングの損傷は顕著となるため、橋梁全体の補強の観点からは効率的とならないことがわかる。

5. まとめ

本実験で得られた結果を整理すると、

- (1) 入力加速度が小さい場合には橋脚はほぼ剛体的に挙動する。
- (2) 本補強により、動的プッシュオーバー時にも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。
- (3) 貫通ボルトの定着板として連続した鋼板を用いる場合には曲げ補強効果が発揮され、弱点が基部あるいはフーチングに移行する。

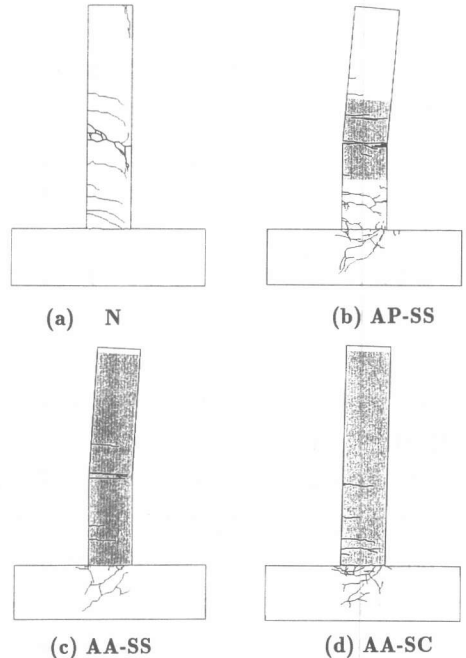


図-7 側面ひび割れ状況

- (4) AFRPシート歪は、段落し部近傍で集中しており、補強範囲は段落し周辺部で十分である。

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性能向上効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1369~1374, 1999.