

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

三田村 浩¹・池田 憲二²・長谷川 正³・岸 徳光⁴

¹正会員 北海道開発土木研究所 構造研究室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

²正会員 北海道開発土木研究所 構造研究室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

³正会員 (株)長大 札幌支店 技術部門（〒062-0031 札幌市中央区北1条東2丁目5番3）

⁴正会員 工博 室蘭工業大学 建設システム工学科（〒050-8585 室蘭市水元町27-1）

1. はじめに

我が国では、1995年1月に発生した兵庫県南部地震以降、数多くのRC橋脚に対する耐震補強が実施され、その対象は都市内高架橋から河川橋に移行している。

河川橋における耐震補強は、1) 河積阻害率等の河川条件による制約から補強後の断面増加量が制約される、2) 洗掘対策として基礎の根入れ深さを大きくとっているため、締切、排水工等が大規模となる、3) 縦横比の大きな壁式（小判型）橋脚が多く、中間拘束筋による拘束効果向上が困難である等、施工上の制約が多く、多大な労力と費用を要するのが現状である。

また、既設橋脚の多くは軸方向鉄筋の段落しを有しており、兵庫県南部地震における被災状況や、これまでの実験においても曲げせん断移行型の脆性破壊を示すケースが多く、段落し部が耐震上の弱点であることが知られている。¹⁾

一方、橋脚の耐震補強が基礎工へ与える影響に関する研究は数少ないが、著者らがこれまでにに行った実験の範囲内では、柱耐力を過度に向上させた場合に損傷がフーチング部に移行することが確認されている。²⁾

従って、本研究では、主鉄筋段落しを有する壁式RC橋脚の耐震補強手法として、1) 主鉄筋段落し部において曲げせん断移行型の破壊形態は、落橋に直結する危険な破壊形態であるためこれを防止する。2) 補強・補修の困難な基礎部（フーチングを含む）へ損傷が移行することを極力防止する。3) 河積阻害率等の河川条件を満足するために断面増加量を極力小さくする。という観点から、アラミド繊維シート（以下AFRPシート）巻き付け工法に着目し、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形状をパラメータとした載荷実験を行い、その妥当性を検討した。

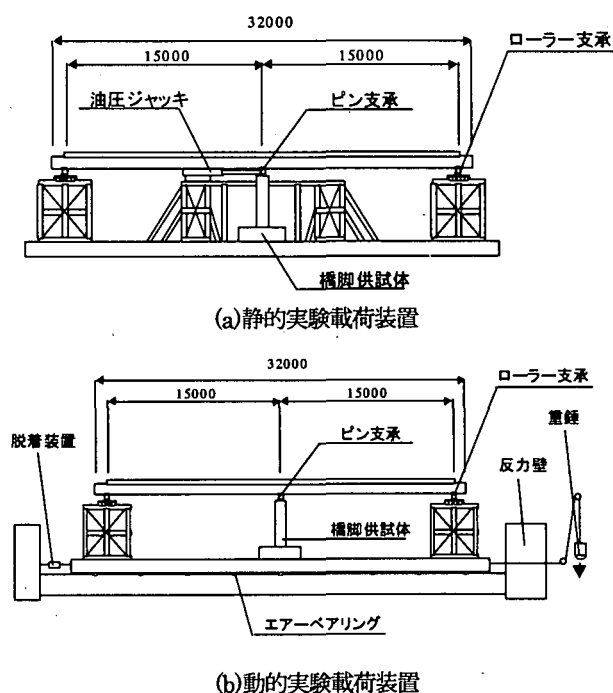


図-1 実験装置概略図

実験は、寸法効果の問題を排除して実橋への適用を速やかに実現するために、実橋梁に極力近い状態で行うものとし、実規模二径間連続桁模型を用いた正負交番載荷実験を行った。

また、段落し部のせん断補強に着目した場合、載荷速度による影響は無視できないものであるため、一般に実施されている静的載荷実験に加え、兵庫県南部地震で観測された1m/sec程度の速度を再現する動的載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験方法

図-1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

表-1 実験試験体

試験体	補強範囲	貫通ボルト 定着板
N	無補強	—
AP-SS	段落し部	分割
AA-SS	全面	分割
AA-SC	全面	連続

性による拘束効果を考慮するために、実規模二径間連続桁模型の中間橋脚位置に RC 橋脚模型を設置して実施した。

本実験装置は、橋長 32.0m、幅員 3.0m、桁高 0.8m、総重量 1058kN の H 形鋼製二径間連続桁、この桁を支持する橋台（2 基）、支承部、RC 橋脚試験体及び架台で構成されている。RC 橋脚試験体と二径間連続桁とはピン接合されており、桁両端部の橋台上は水平方向の拘束を避けるためローラー支承としている。

静的載荷実験では、架台上に設置した反力台に設置した油圧ジャッキをピン支承と接合し、正負交番載荷実験を実施している。

動的載荷実験では、静的実験に用いた試験装置全体をエアベアリングにより浮上させ、ワイヤーロープで連結された質量 980kN の鋼製重錐の自由落下により牽引し、反力壁への衝突で急速に制動することで加速度を励起する装置を用いた。反力壁への衝突部には緩衝材として発泡スチロール材を設置し、制動時間及び入力加速度の最大値を調整している。

2. 2 実験試験体

実験は、比較のための無補強試験体の他、AFRP シート巻き付け範囲、シートの拘束効果を向上させる貫通ボルト定着板の形状をパラメータとし、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試験体、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た供試体の全 4 種について行った。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：段落し部補強、AA：全面補強）であり、第 2 項目は貫通ボルトの定着部形状（SS：100×100×16mm の定着板を各貫通ボルト毎に設置する場合、SC：3663×100×16mm の高さ方向に連続する鋼板を定着板として用いる場合）である。

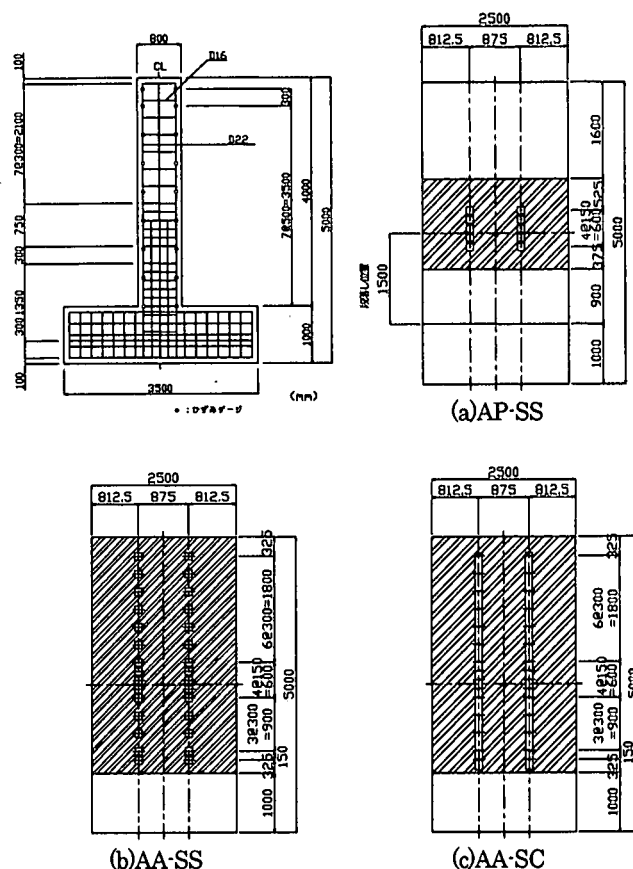


図-2 試験体概要図

図-2には試験体の形状寸法と配筋状況及び補強概要を示している。試験体は主鉄筋段落しを有する既設河川橋を想定し、昭和 55 年道路橋示方書に基づき設計・製作を行った。

形状は断面寸法 800mm×2500mm のアスペクト比がほぼ 1：3 である長方形断面とし、橋脚高 4000mm のうち橋脚基部より 1500mm の位置で主鉄筋の段落しを行っている。

本試験体の補強前における段落し部設計せん断力は 0.47MN であり、設計せん断力を AFRP シートのみで負担させるものとし、補強量は目付量 415g/m²、厚さ 0.286mm、引張強度 2.48GPa、破断歪み 1.96% のシートを 2 層とした。

なお、AFRP シートの膨み出し防止を目的として、貫通ボルトを壁の横断方向に 2 列、高さ方向には段落し部周辺を 15cm ピッチ、その他の領域は 30cm ピッチで配置した。これは、AFRP シートと貫通ボルトによって拘束されるコンクリート断面をほぼ正方形断面にすることを目的としたものである。貫通ボルトは PC 鋼棒 SBPR930/1180、定着板は SS400 の鋼板を用い、ワッシャーを介して定着している。

表-2 実験結果一覧

試験体	変位(cm)		荷重(kN)		塑性率
	δ_y	δ_u	P_y	P_u	
N	2.0	11.5	399	385	5.75
AP-SS	1.8	14.4	344	297	8.00
AA-SS	2.6	15.7	395	211	6.03
AA-SC	3.1	21.8	453	381	7.03

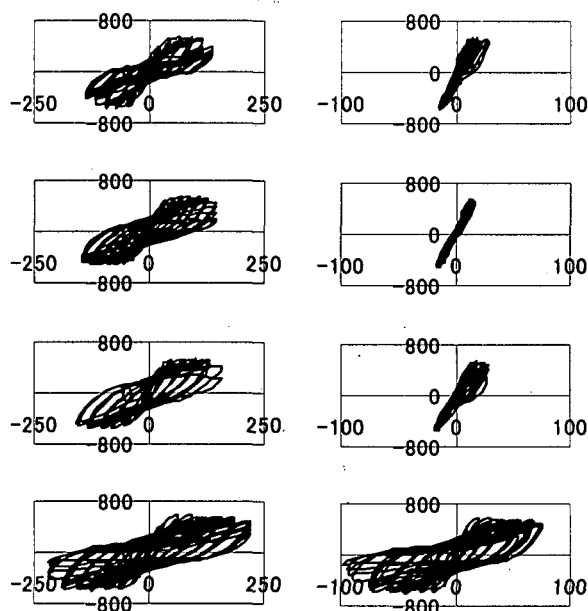


図-4 荷重-変位関係

3. 静的載荷実験結果

3. 1 荷重-変位関係

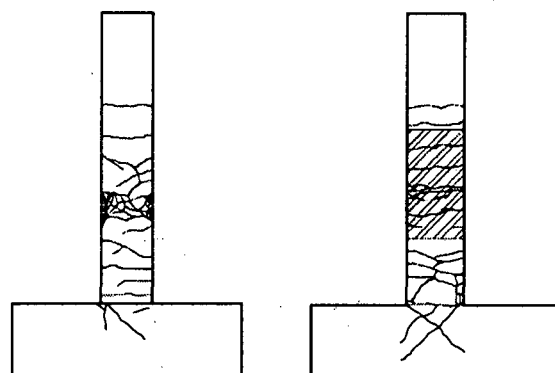
表-2には実験結果の一覧を示している。表中の δ_y 、 P_y は降伏時の載荷点変位、載荷荷重を、 δ_u 、 P_u は終局時の載荷点変位、載荷荷重を、 P_{max} は最大荷重を示す。

図-4には各試験体の載荷位置及び段落し位置における荷重-変位曲線を示す。

図より、N、AP-SS、AA-SSの各試験体では、段落し部の変位が増加せずに載荷位置変位が増加していることから、段落し部に損傷が集中し、段落し部を基点とした角折れ状の変形をしていることがわかる。

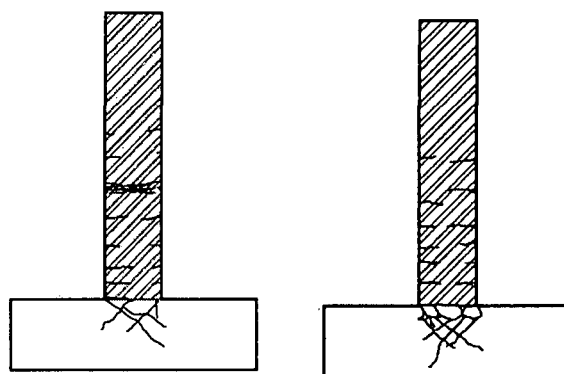
それに対して、連続プレートを用いたAA-SC試験体では段落し部変位と載荷位置変位は、ほぼ高さに比例する関係を示していることから、連続プレートが段落し部曲げ補強に寄与し、損傷部位が柱基部へ移行したことがわかる。

なお、柱全面にAFRPシートを巻き付けたAA-SS試験体は、AP-SS試験体より塑性率が低くなる結果を示した。これは、柱全体に対して拘束効果が上がった



(a) N

(b) AP-SS



(c) AA-SS

(d) AA-SC

図-5 試験体破壊性状

ため、弱点となる段落し部に損傷が集中し、軸方向主鉄筋が破断したためと考えられる。

3. 2 試験体破壊性状

図-5に実験終了後の各試験体の破壊性状を示す。

N試験体は、段落し部近傍において天端まで伸びている主鉄筋のほぼ全てが座屈し、数本が破断していた。段落し部のひび割れは水平方向から斜め下方45°の方向へ移行し、かぶりコンクリートは、段落し位置から下方に広範囲に剥落している。柱基部近傍では曲げからせん断に移行する形態のひび割れが認められた。なお、基部近傍のひび割れはいずれも1 δ_y 載荷時に発生しており、それ以降はほとんど進展が見られなかった。

AP-SS試験体は、段落し部においてコンクリートのはらみだしによってAFRPシートの破断が認められ、この位置で主鉄筋の座屈が見られる。側面のひび割れは段落し部近傍の補強区間においては水平方向の曲げひび割れのみであり、せん断に移行する形態のひび割れは認められない。また、柱基部付近ではN試験体と同様に曲げからせん断に移行する形態のひび割れが認

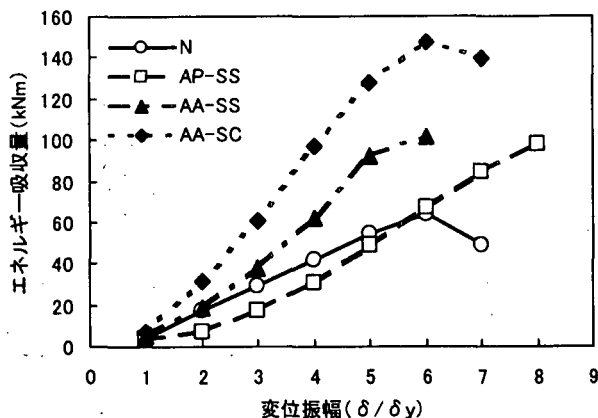


図-6 エネルギー吸収量と変位振幅との関係

められた。

AA-SS 試験体は、AP-SS 試験体と同様に損傷が段落し部に集中しており、段落し部において複数の主鉄筋が破断しており、AFRP シートの破断が認められた。しかしながら、ひびわれ形態は橋脚の全高にわたって水平方向のひび割れのみが生じており、曲げからせん断に移行する形態のひび割れは認められなかった。

AA-SC 試験体は、損傷が柱基部に集中しており、柱基部から 0.5D 程度の区間で AFRP シートのはらみだしが認められ、柱基部断面で複数の主鉄筋が破断している。また、フーチング接合部においてせん断ひび割れが生じ、かぶりコンクリートの一部が剥落した。

3. 3 エネルギー吸収性能

図-6 に履歴によるエネルギー吸収量と変位振幅との関係を示す。エネルギー吸収量は、各変位振幅における 1 ループ目の荷重-変位曲線より算出した。

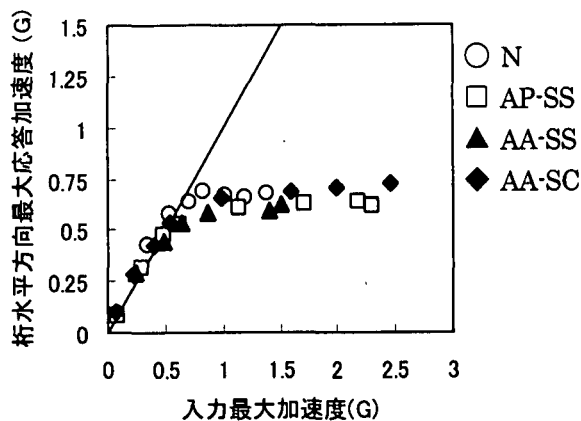
N 試験体では $6\delta y$ まではほぼ線形に増加しており、終局時のエネルギー吸収量は約 60kJ/m となっている。

AP-SS 試験体では、N 試験体と同様に $8\delta y$ の終局時までほぼ線形に増加し、終局時のエネルギー吸収量は約 100kJ/m である。

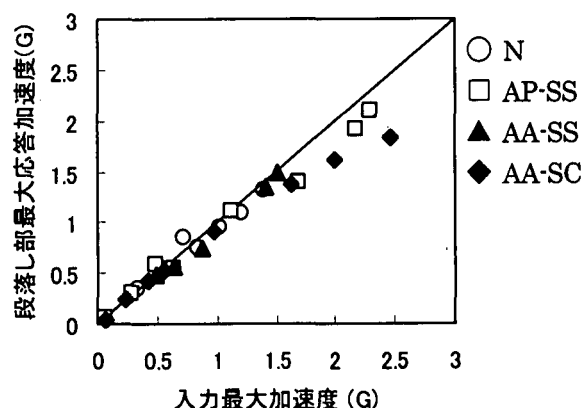
AA-SS 試験体では、 $3\delta y$ 以降のエネルギー吸収量の増加が大きく、 $6\delta y$ の終局時におけるエネルギー吸収量は約 100kJ/m である。

AA-SC 試験体では $6\delta y$ 載荷時までほぼ線形に増加し、エネルギー吸収量は約 140kJ/m と無補強の N 試験体の約 2 倍、AP-SS、AA-SS 試験体のほぼ 1.5 倍の値を示している。

以上の結果より、AFRP シート巻き付け補強により橋脚耐力が増加しないにも関わらずエネルギー吸収性能は確実に増加しており、特に損傷が段落し部から橋脚基部に移行した場合に顕著であることがわかる。



(a)



(b)

図-7 入力加速度と応答加速度の関係

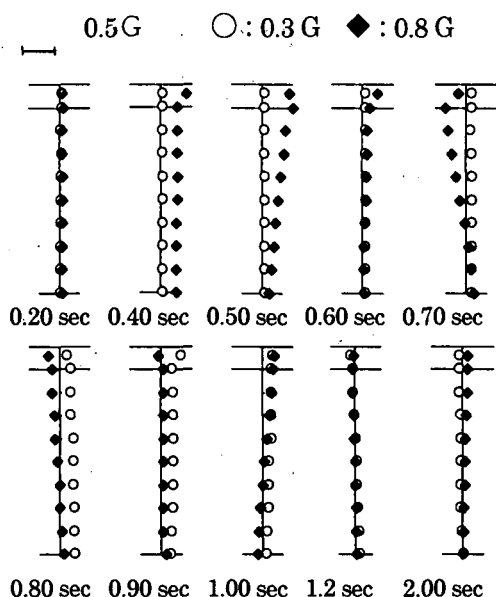
4. 動的載荷実験結果

4. 1 入力加速度と応答加速度との関係

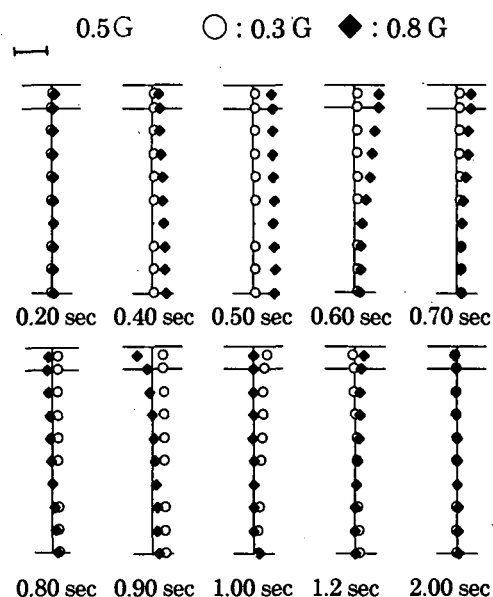
図-7 には、入力最大加速度と上部工桁、橋脚上端、段落し部位置での応答最大加速度との関係を示している。図-(a)は、桁水平方向最大加速度との関係を示すが、いずれの供試体でも入力加速度が 0.6G 以下では応答加速度と入力加速度はほぼ線形的な関係となっている。一方、 0.6G 以上の場合には、応答加速度が入力加速度より小さく、ほぼ 0.6G 付近に漸近していることがわかる。これは、入力加速度が 0.6G 以上の場合には、段落し部あるいは橋脚基礎部の塑性変形によってエネルギーが吸収されているものと推察される。

図-(b)は、段落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 供試体は、いずれ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、段落し部より下方は未だ健全であり、ほぼ剛体的な挙動をしていることを示している。

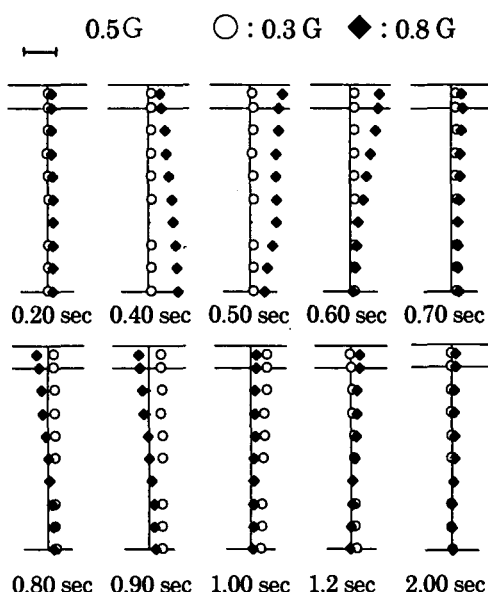
図-8 は、入力加速度の最大値が約 0.3G (図中○)、 0.8G (図中◆) である実験ケースの各時間における応答加速度分布を示している。なお、加速度計は、桁中



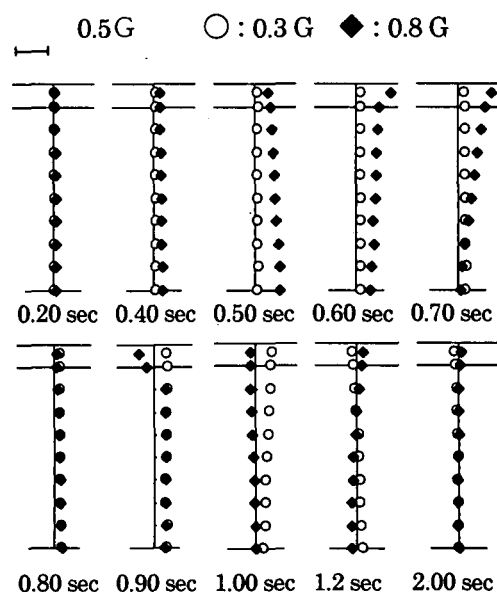
(a) N



(b) AP-SS



(c) AA-SS



(d) AA-SC

図-8 応答加速度分布

中央及び橋脚の基部より高さ方向に 50cm ピッチに取り付けている。

図-8より、入力加速度の最大値が 0.3G の場合には、いずれの供試体も各測点の最大応答加速度は 0.8～0.9sec 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、橋脚基部より上方に向かって応答が推移している状況もわかる。一方、入力加速度の最大値が 0.8G の場合には、無補強供試体 N 及び AFRP シート巻き付けを施した AP-SS、AA-SS の場合には、0.5sec 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直線的に分布しているが、それ以降では段落し部より上方で大きな加速度が発生している。これは、段落し部における曲げひび割れの発

生により、上方が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、連続プレートにより曲げ補強された AA-SC では、胸郭基部を基点としたほぼ線形な加速度分布を示しており、段落し部での不連続な応答はない。これは、橋脚本体には加振による著しい劣化現象が現れず、橋脚基礎部に損傷が進行していることを示唆している。

4. 2 試験体破壊性状

図-9に実験終了時の各供試体の破壊性状を示す。

N 供試体は、静的実験結果と異なり、段落し部におけるかぶりコンクリートの剥落は認められなかった。これは、動的实验では、載荷方向が一方向のみであり、

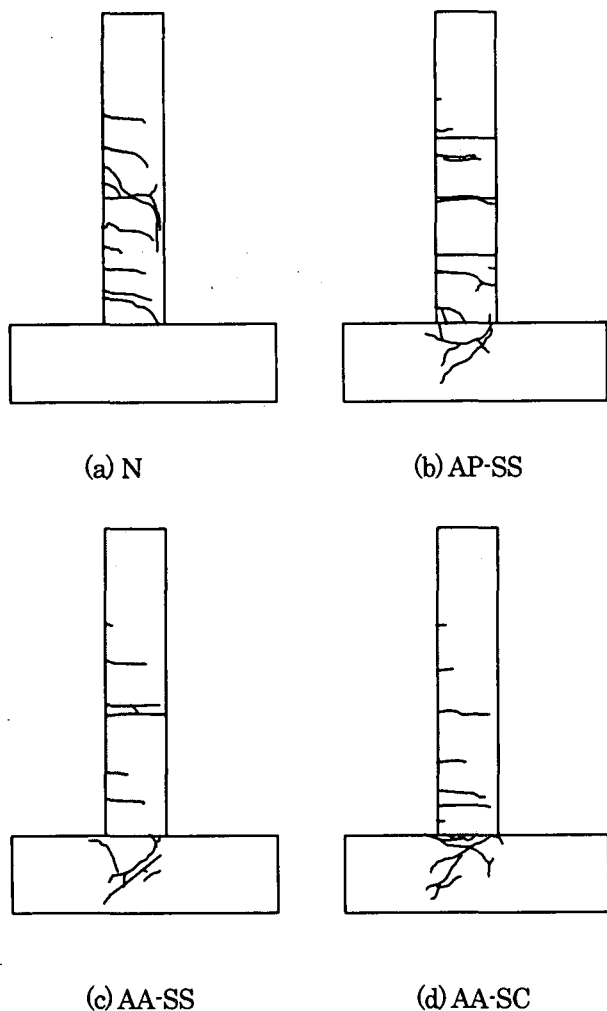


図-9 試験体破壊性状

また、静的実験と比較して載荷繰返し回数が少ないためと考えられる。しかしながら、段落し部で曲げひび割れから斜めせん断ひび割れに移行する脆性的な破壊形態を示しており、圧縮側鉄筋近傍では、ほぼ鉛直方向となっている。

AP-SS、AA-SS、AA-SC の各試験体では、損傷集中部位は静的実験結果と同様であるが、集中箇所以外の損傷は軽微であった。なお、フーチング接合部の損傷は、AA-SC 試験体では他の試験体より損傷度は大きいものの、静的実験より損傷は軽微であり、かぶりコンクリートの剥落は見られなかった。

なお、AP-SS の無補強部においてせん断ひび割れが認められたが、AFRP 補強を施した部分は各試験体共に曲げひび割れのみであった。

これらのことから、載荷速度の速い動的載荷実験では静的載荷実験と比較して、よりせん断破壊が卓越し、かつ損傷が一部分に集中し易いこと。また、AFRP シート巻き付けにより、このせん断破壊を防止できることがわかる。

表-3 段落し部曲げ補強検討試験体一覧表

試験体名	せん断補強	曲げ補強
N	—	—
A	AFRP シート (280g/m ²) 2 層	—
A-S	AFRP シート (280g/m ²) 2 層	連続プレート 80×9mm
A-A	AFRP シート (280g/m ²) 2 層	AFRP シート (280g/m ²) 1 層

5. 段落し部曲げ補強方法の検討

5. 1 概要

これまでの、実規模橋脚模型を用いた静的及び動的載荷実験の結果、AFRP シート巻き付け補強により、曲げからせん断に移行する脆性的な破壊を効果的に防止できること、連続プレートを用いた場合、曲げ補強効果を発揮し、エネルギー吸収性能が大きく向上するものの、フーチング接合部の損傷が大きくなること等が明らかとなった。

従って、より効果的な段落し部補強手法を検討するために、段落し部曲げ補強に着目した実験を行った。

なお、実験は実規模試験体のおよそ 1/2 の試験体を用いた正負交番載荷実験とした。

試験体形状は、躯体高 2.0m、断面寸法 1.14m×0.38m の長方形断面（縦横比 1:3）であり、フーチング上 0.9m で主鉄筋の段落しをしている。鉄筋径は主鉄筋 D13、帯鉄筋 D10 であり、引張主鉄筋比=0.6%、横拘束筋の体積比 $\rho_s=0.14\%$ とした。

なお、試験体は、主鉄筋段落し部において曲げ破壊先行となるように設計を行った。

試験体の補強は、AFRP シートを用いた段落し部補強を目的とし、AFRP シートの膨み出しを防止するために、貫通ボルトを配置している。貫通ボルトの配置は、AFRP シートと貫通ボルトに囲まれた断面形状が 1:1 となるように 1 断面につき 2 本の配置とした。

補強ケースは、AFRP シートを横方向のみに巻き付けた場合、AFRP シートを縦+横方向に巻き付けた場合、AFRP シートを横方向のみに巻き付け、定着板として縦方向に連続する鋼板を用いた場合の 3 ケースとした。表-3 に試験体の一覧表を示す。

試験体名のうち、第 1 項目はせん断補強の有無（N：無補強、A：AFRP シート）であり、第 2 項目は曲げ補強種別（A：AFRP シート、S：連続鋼板）である。

せん断補強に用いた AFRP シートは、段落し部に作用するせん断力を補強材のみで負担できるものとし、繊維目付量 280g/m²、厚さ 0.193mm のものを 2 層巻き付けとした。

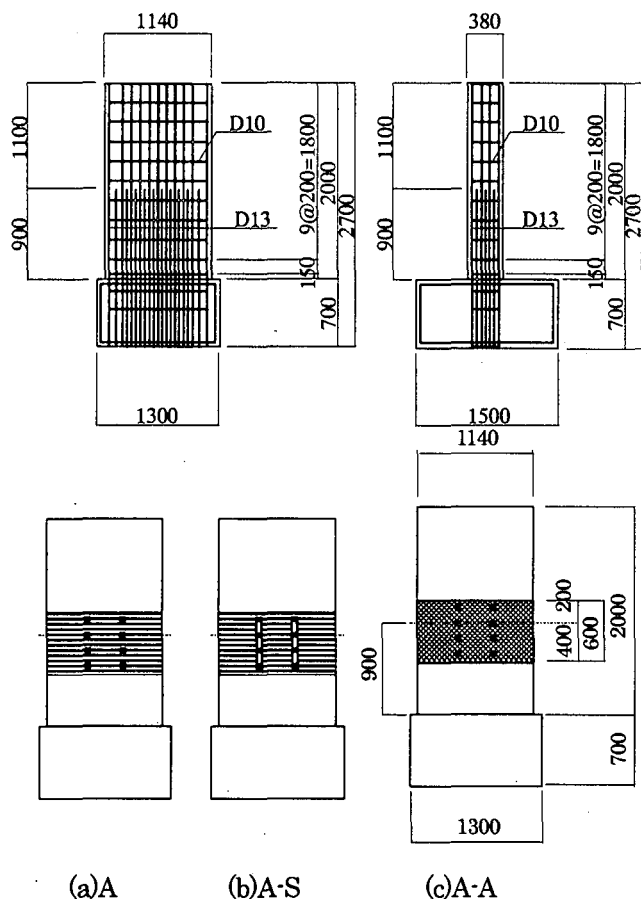


図-10 試験体の形状寸法及び補強概要図

曲げ補強に用いた補強材は、柱基部が終局曲げモーメントの 1.1 倍に達したときの段落し部の作用曲げモーメントに対して補強量を決定し、A-A 試験体では繊維目付量 280g/m^2 、厚さ 0.193mm の AFRP シートを 1 層縦貼りとし、A1-S 試験体では、 $80 \times 9\text{mm}$ 断面の鋼材 2 枚を用いた。なお、曲げ補強に用いた AFRP シートと鋼材は引張強度換算で同程度の性能を有するものとしている。

補強範囲は、既往の実験結果より、主鉄筋段落し部より上方に 0.5D、下方に 1.0D (D: 橋脚壁厚) とした。

図-10に試験体の形状寸法と配筋状況及び補強概要図を示す。

5. 2 荷重一変位関係

表-4に実験結果の一覧を示す. 表中の δy , P_y は降伏時の載荷点変位, 載荷荷重を, δu , P_y は終局時の載荷点変位, 載荷荷重を示す.

また、図-11に各試験体の荷重-変位関係の履歴曲線を示す。図より、無補強試験体 N は載荷点変位の増加に対して段落し位置における変位の増加が小さいことから、段落し部を支点とし、角折れ状の変形を示していることがわかる。

表-4 實驗結果一覽表

試験体	変位(cm)		荷重(kN)		終局 塑性率
	δ_y	δ_u	P_y	P_u	
N	2.73	10.20	13.73	9.53	$4\delta_y$
A	2.03	16.43	13.85	12.53	$8\delta_y$
A-S	2.10	16.95	14.18	13.93	$8\delta_y$
A-A	1.78	12.45	12.78	11.90	$7\delta_y$

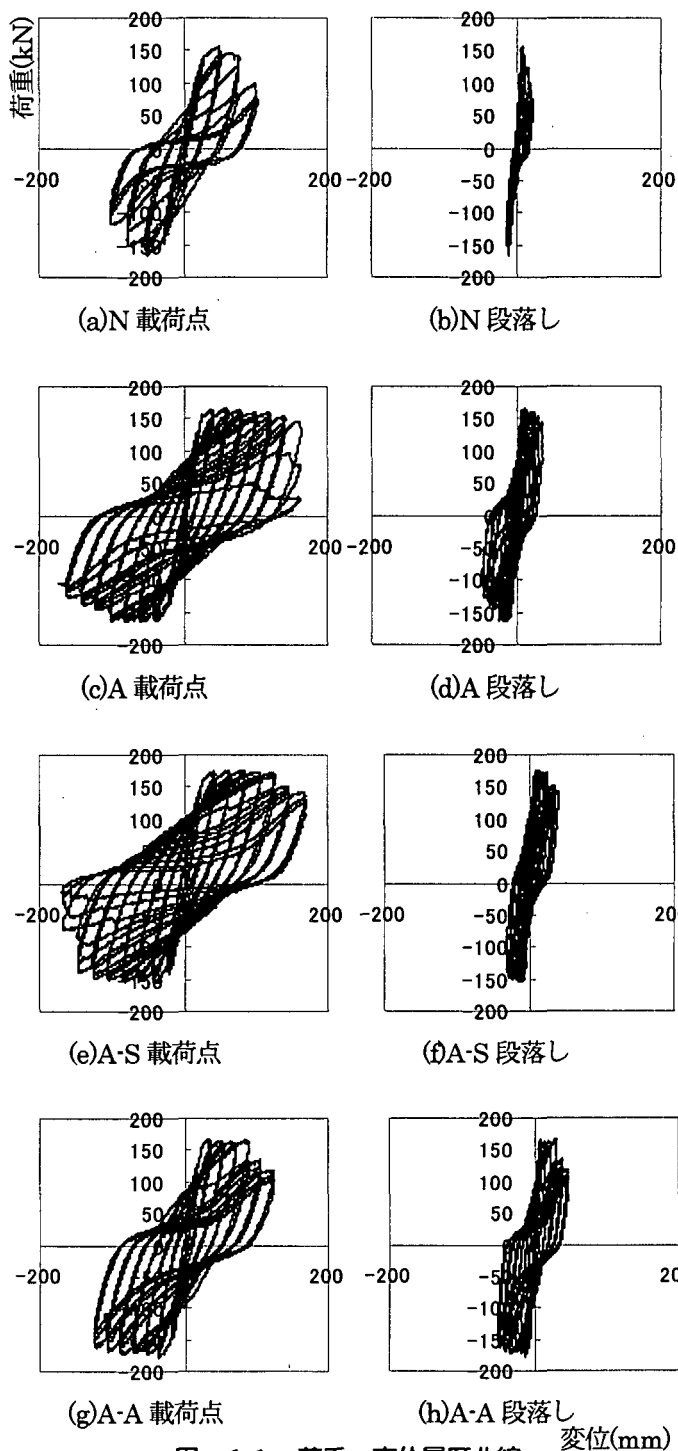


圖-11 荷重—變位履歷曲線

A-A の場合には、載荷点と段落し部の荷重－変位曲線

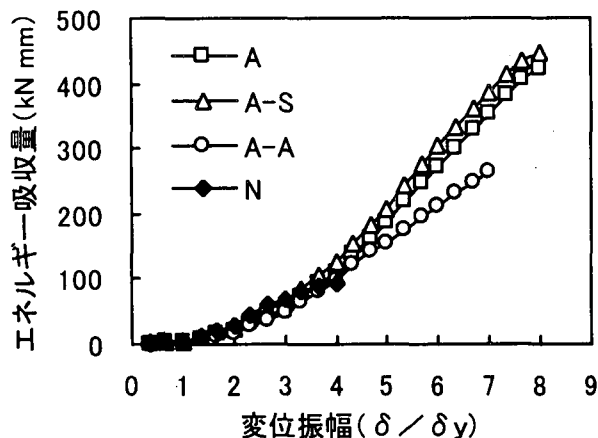


図-1 2 履歴吸収エネルギー

の形状がほぼ類似しており、段落し部の変形量は高さにはほぼ比例していることから、AFRP シートを用いた段落し部の曲げ補強により、損傷が柱基部に移行し、柱基部を支点として変形していることがわかる。

A 及び A-S の場合には両者の中間的な形状を示すことから、柱基部及び段落し部の 2 箇所を支点として変位が増加していると考えられる。また、終局時変位振幅は N が $4\delta y$ であるのに対して、A 及び A-S では $8\delta y$ 、A-A では $7\delta y$ を示し、じん性が大きく向上していることがわかる。

5. 3 履歴吸収エネルギー

図-1 2 に履歴吸収エネルギーと変位振幅の関係を示す。履歴吸収エネルギーは、各変位振幅における荷重-変位関係より算出し、累積した値を示している。

図より、N が終局となる $4\delta y$ 載荷時では、各試験体で大きな差異は認められない。その後の載荷では、A-A は終局時までほぼ線形の増加を見せるのに対して、A 及び A-S は更に大きな値を示すことがわかる。

終局時までの総吸収エネルギーは、N: 95.3kNmm, A: 424.5kNmm, A-S: 447.6kNmm, A-A: 264.7kNmm であり、段落し部の補強を施すことにより、無補強試験体に対し 2.8~4.7 倍と非常に大きなエネルギー吸収性能を示した。

なお、A-A に対して、A 及び A-S は 1.7 倍程度大きな履歴吸収エネルギーを示したが、これは、A-A では柱基部のみに損傷が集中し、柱基部のみでエネルギーを吸収しているのに対し、A 及び A-S では段落し部と柱基部の 2 箇所エネルギー吸収がなされているためであると考えられる。

6. まとめ

主鉄筋段落しを有する壁式 RC 橋脚の耐震補強手法として、AFRP シート巻き付け工法に着目し、静的及

び動的載荷実験を行った。

本実験により得られた結果を以下に示す。

(1) AFRP シートを用いた段落し部せん断補強により、段落し部における曲げからせん断に移行する破壊形態を効果的に抑制でき、また、じん性能が大きく向上する。

(2) 柱全面に AFRP シートを巻き付け、連続プレートを併用した試験体では、エネルギー吸収性能は大きく向上したものの、フーチング接合部に損傷が移行した。

(3) AFRP シート巻き付けを段落し近傍のみとし、段落し部の曲げ補強効果に関する検討を行った結果、柱基部と段落し部の 2 箇所が損傷したケースにおいてじん性及びエネルギー吸収が大きな値を示した。

本研究の範囲内では、段落し部近傍のせん断補強を行い、かつ段落し部に適度な曲げ補強を施すことによって、柱基部と段落し部の 2 箇所エネルギーを吸収させる手法が有効であると考えられる。

今後、実規模橋脚模型実験による検証実験を行い、より有効な耐震補強手法の確立に努めたい。

参考文献

- 1) 三田村, 吉田, 佐藤, 岸: 実規模二径間連続桁模型を用いた RC 橋脚の荷重-変位特性, コンクリート工学論文報告集 Vol.21, No.3, 1999.
- 2) 三田村, 池田, 竹田, 佐藤: アラミド繊維を用いた壁式橋脚の全巻き補強実験とその考察, 土木学会北海道支部論文報告集 第 56 号(A), pp132-137, 2000.