

論文 桁拘束を受ける橋脚の地震時破壊性状と補強効果に関する研究

畑山 朗^{*1}・佐藤 昌志^{*2}・岸 徳光^{*3}・村田 良英^{*4}

要旨：地震時に RC 橋脚が上部工による拘束を受け軸荷重が変化することを想定し、この時の破壊性状と補強効果を検討するために拘束の最も厳しい条件として橋脚天端の鉛直方向変位を固定した状態で無補強及び AFRP シートで補強した段落しを有する RC 橋脚模型の水平交番載荷実験を行った。この結果、1) 無補強、補強いずれの場合も変位拘束により軸荷重が増加し、降伏荷重や最大荷重が増加すること、2) 軸荷重を受ける場合も補強効果は段落し部のみと橋脚全体のせん断補強する場合では大差はないが、3) 橋脚全体の曲げ及びせん断補強の場合、終局変位が大きくなること等が明らかとなった。

キーワード：耐震補強, RC 橋脚, 桁拘束, アラミド繊維シート, 水平交番載荷

1. はじめに

平成 7 年に発生した兵庫県南部地震によって多くの構造物が倒壊し、これを契機に既存の RC 橋脚や RC 建物の柱部の耐震補強に関する実験的研究が盛んに行われている。RC 橋脚の地震時破壊性状や補強法の実験的研究は通常上部工の重量を考慮するため、橋脚天端に荷重を載荷させた状態で水平交番載荷実験を行っている。

また、著者らは、より実橋に近い状態を再現するために実規模の 2 径間連続桁模型を製作して、RC 橋脚の実験を行ってきた¹⁾。

しかしながら、過大な水平荷重を受けて発生した橋脚のひび割れが、繰返し水平交番荷重を受けることで鉄筋の伸びとともにその開口度が増し、橋脚が延びることとなる。この伸びが桁の剛性によって拘束される場合には軸荷重の増加が生ずる。合理的な補強設計法を確立するためには、このような拘束によって発生する軸荷重増分が耐力や靱性に与える影響などを明らかにすることが肝要であるものと判断される。このような観点から著者らは、橋脚天端に作用す

る軸荷重や軸方向変位を任意に制御可能な実験装置を開発し、段落しを有する RC 橋脚模型に関する実験を行った²⁾。

本研究では桁拘束が最も厳しい状態を想定し、橋脚天端の鉛直変位を完全固定した状態で、段落しを有する RC 橋脚に関して、無補強とアラミド繊維シートにより段落し部のみあるいは橋脚全体を補強した場合についての実験を行い、地震時破壊性状と補強効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置概要

図-1 に実験装置概要を示す。本装置は、連続桁の中間支点で支承を介して連結された RC 橋脚を想定し、上部工による死荷重及び鉛直変位拘束を任意に制御可能とするためにスクリージャッキを用い、橋脚天端部に軸力を作用させている。また、ジャッキと橋脚天端部はピン結合としている。一方、水平方向加力は載荷を容易にするために橋脚基部にリニアウエー上の

*1 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室 研究員 (正会員)

*2 北海道開発局 旭川開発建設部 次長 工博 (正会員)

*3 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)

*4 (株)土木技術コンサルタント

台車を介して油圧ジャッキにて行っている。

本実験では、初期に軸荷重 88.2 kN をスクリージャッキにて戴荷した後に、ジャッキストロークを固定し鉛直方向変位を拘束した状態で水平交番戴荷を行った。

戴荷荷重はロードセルで計測し、水平方向及び鉛直方向変位はワイヤー式変位計にて計測を行った。交番戴荷は、水平荷重の戴荷速度 0.5mm/sec で、基部もしくは段落し部の主鉄筋歪が 1700 μ に達した時を降伏と設定し、その時点での戴荷点変位を降伏変位 δ_y 、水平荷重を降伏荷重 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戴荷する方法により実施した。各変位振幅における繰り返し回数は 3 回とし、正負いずれかの戴荷荷重が P_y を下回った時を終局と定義している。

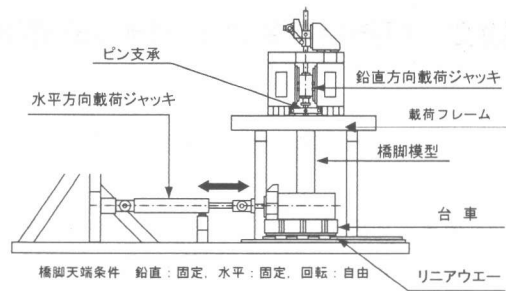


図-1 実験装置概要図

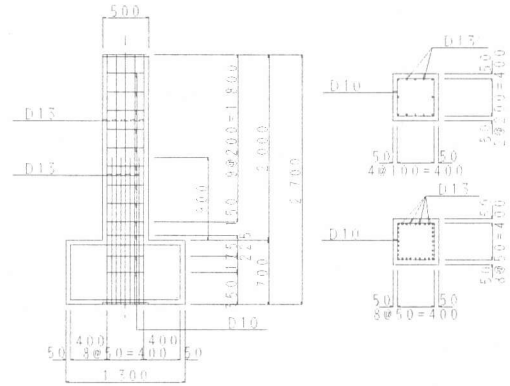


図-2 供試体の形状寸法と配筋状況

2. 2 実験供試体

表-1 に供試体一覧を示す。実験には、無補強供試体 1 体と補強供試体 4 体の計 5 体を用いた。

基本となる無補強供試体は、実構造物の 1/4 程度の規模とし、躯体高 200 cm、断面寸法 50 cm × 50 cm の正方形断面で、基部から 90 cm の位置で段落しを行っている。鉄筋径は、主鉄筋を D13、帯鉄筋を D10 とし、引張主鉄筋比を $\rho_t = 0.8\%$ 、横拘束筋の体積比を $\rho_s = 0.36\%$ とした。無補強の供試体は、断面分割法による計算結果から、静的荷重に対して段落し部の曲げ破壊が先行することを確認している。断面分割法による計算結果は、基部及び段落し部の曲げ耐力がそれぞれ 106kN、99 kN である。(初期軸荷重 88.2kN で算出)

供試体に用いたコンクリートの設計基準強度は 20.6 MPa であり、実験時の平均圧縮強度は 24.2 MPa であった。また、供試体の主鉄筋と帯鉄筋はいずれも SD295 で、降伏点強度は 351 MPa である。供試体の形状寸法と配筋状況を図-2 に示している。

補強供試体は上記の無補強供試体を基本に

AFRP シートを貼り付け製作した。

AP - S、AA - S は段落し部のせん断補強を目的に AFRP シートを横方向に巻きつけたもので、AP - S は段落し部のみ、AA - S は橋脚全体を補強したものである。

AP - S/B、AA - S/B は更に曲げ補強も考慮して AFRP シートを橋脚の前面と背面に縦方向に貼った上に横方向に巻きつけ補強した供試体である。ここで、AP - S/B は段落し部のみ、AA - S/B は橋脚全体を補強した供試体を意味して

表-1 供試体一覧

記号	補強範囲	補強方法
N	—	無補強
AP - S	段落し部	せん断補強
AA - S	橋脚全体	せん断補強
AP - S/B	段落し部	曲げ及びせん断補強
AA - S/B	橋脚全体	曲げ及びせん断補強

いる。

図-3 に補強概要図を示す。補強に用いた AFRP シートは、せん断補強のため横貼りには目付量 415g/m^2 、厚さ 0.286 mm 、弾性係数 118 GPa 、引張強度 2.06 GPa 、破断歪 1.8% である AK-60、曲げ補強のための縦貼りに目付量 280 g/m^2 、厚さ 0.193 mm 、弾性係数 118 GPa 、引張強度 2.06 GPa 、破断歪 1.8% の AK-40 をそれぞれ 1 層使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 水平荷重-変位関係

表-2 には実験結果の一覧を示している。表中の δy 、 P_y は降伏変位、降伏荷重を、 δu は載荷重が降伏荷重と一致する値を補間して求めた終局変位を、 P_{max} は最大荷重を表している。また P_{Nmax} は最大軸荷重を表している。なお、AA-S 供試体は計測器の不具合により終局値のデータは得られていない。

降伏は N、AP-S、AA-S 供試体では段落し部の鉄筋歪が、また AP-S/B、AA-S/B 供試体では基部の鉄筋歪が先に降伏歪に至っている。降伏変位 δy はいずれも 10 mm 前後、降伏荷重 P_y も 100 kN 程度でほぼ一定しており、この時の軸荷重 130 kN 程度の計算値とも一致している。最大荷重 P_{max} 、最大軸荷重 P_{Nmax} は補強によって大きく増加しているが、補強方法による差は小さい。なお、AA-S/B 供試体は AFRP シートがフーチングに定着されていないため基部の曲げ補強効果は期待していない。

図-4 に各供試体の水平荷重-変位関係の包

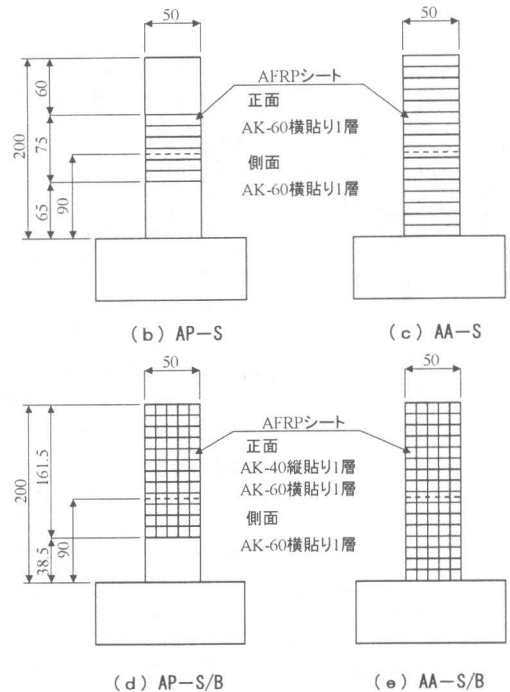


図-3 補強概要図

絡線を示している。図には、比較のため他の実験²⁾で得られた、天端の鉛直方向変位を拘束せずに軸荷重を 88.2 kN と一定にした場合の無補強供試体の包絡線についても示している。

無補強供試体で鉛直変位を拘束する場合には、降伏荷重、最大荷重とも天端鉛直変位を拘束しない場合に比べて大きい。これは、主鉄筋に発生する引張応力が軸荷重による圧縮力によって緩和されるためと考えられる。しかしながら、最大荷重に達した後は、急激に低下することが知られている。

補強供試体の降伏荷重 P_y は、いずれも 100 kN

表-2 実験結果一覧

供試体	変位 (mm)		荷重 (kN)		最大軸荷重 (kN)
	δy	δu	P_y	P_{max}	
N	11.1	55	104.2	132.4	362.0
AP-S	12.5	94	105.2	183.4	673.7
AA-S	9.2	89	103.0	191.0	647.4
AP-S/B	9.8	96	104.4	178.5	605.2
AA-S/B	7.6	122	99.8	172.1	633.4

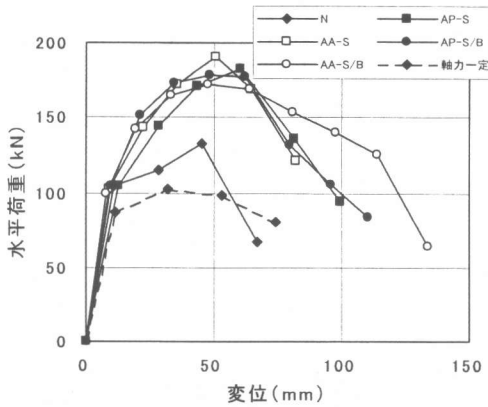


図-4 包絡線の比較

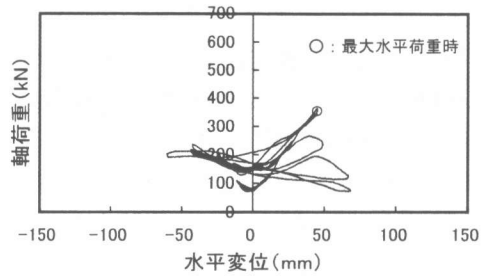
前後で無補強供試体と同程度であるが、最大荷重は170 kN~190 kNと無補強供試体の場合に比較して1.3~1.4倍程度増加している。

終局変位 δu は AA - S/B 供試体が大きく示されているが、他の3体は終局変位の差は小さく包絡線から見た荷重 - 変位関係もほぼ同じと判断できる。また、各供試体の最大荷重時の変位は後述の軸荷重が最大になった時点における変位とほぼ一致している。これはこの位置で鉄筋の座屈が生じ始めたことを意味している。最大荷重を示した後は荷重が急激に低下している。鉛直変位を拘束していない場合は降伏変位から終局変位の間はほぼ同程度の荷重が続くかな山形になっているのに対して、明確なピークを示した形をしている。ただし、AA - S/B 供試体はこの中では比較的なだらかな形をしている。

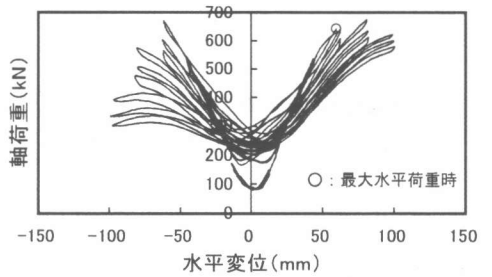
3.2 軸荷重 - 変位関係

図-5 に各供試体の軸荷重 - 変位関係の履歴を示している。既に述べたように初期軸荷重 88.2 kN で天端の鉛直方向変位を固定し実験を本研究では行っている。

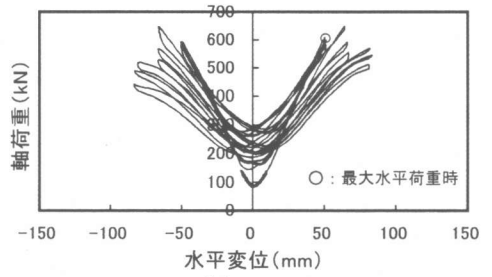
(a) 図には、N 供試体の軸荷重と変位の関係を示している。降伏変位 δy までは水平変位が増加することにより軸荷重が 126 kN まで増加しているが、水平変位を原点に戻した時の軸



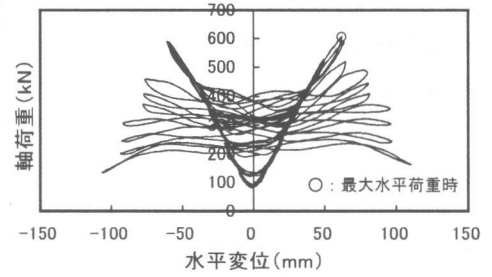
(a) N



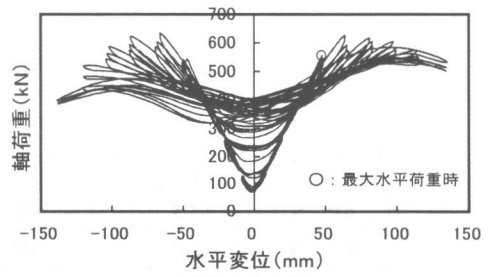
(b) AP-S



(c) AA-S



(d) AP-S/B



(e) AA-S/B

図-5 軸荷重 - 変位関係

荷重は、初期値に戻っている。しかし、降伏変位を超えて加力した場合には、軸荷重は変位を原点に戻しても初期値に戻らず2倍程度の値を示している。更に水平変位振幅を大きくすると、主鉄筋の座屈等により水平変位を大きくしても軸荷重の増加は見られない。

(b), (c) 図には、それぞれ AP - S, AA - S 供試体の軸荷重と変位の関係を示している。この場合も降伏変位までの軸荷重変化は、無補強の場合と同様で変位を戻すと初期値に戻っている。また、水平変位に対する軸荷重の変化も大差はない。変位振幅を更に増加させると、水平変位を原点に戻しても初期設定値には戻らず、200 kN~400 kN の値を中心に水平変位に対応して軸荷重が増減するV字型の軌跡を描いている。最大軸荷重は、AP - S, AA - S 供試体においてそれぞれ変位が81 mm, 64 mm時に最大650 kN程度となり、それ以降は減少している。しかしながら、無補強時と同様の水平状の分布にはならない。これはAFRPシートによるせん断補強によって、鉄筋の座屈、コンクリートの剥離が抑制されているためと考えられる。

(d), (e) 図には、それぞれ AP - S/B, AA - S/B 供試体の軸荷重と変位の関係を示している。この場合も降伏変位までは無補強、せん断補強と同様の挙動を示している。しかしながら、変位振幅を増加させることによって、変位を原点に戻した時点の最小軸荷重も増加している。

最大の軸荷重は AP - S/B 供試体では水平変位が61 mm時点で最大となり、その後は減少している。一方、AA - S/B 供試体では64 mmで最大となり、その後減少しているが、AP - S/B 供試体とは多少異なり各変位振幅における減少量は少ない。これは、AP - S/B 供試体の場合には、段落し部の補強によって補強していない基部に劣化が移行し、この部分で鉄筋の座屈等が発生したためと考えられる。これに対して AA - S/B 供試体では、後述する破壊性状で示されるように基部は損傷しているが、AFRPシートによって鉄筋の座屈がかなり効果的に拘束されている

ためと考えられる。

3.3 破壊性状

図-6に各供試体の実験終了時のひび割れ図を示している。なお、シート接着部のひび割れはシートの上から観察したものである。

(a) 図より、N 供試体には降伏荷重載荷時に既に段落し部に曲げひび割れと共に斜方向のせん断ひび割れが発生している。このような早い段階でのせん断ひび割れの発生は軸荷重の影響によるものと思われる。その後はひび割れが段落し部に集中し、終局時には段落し部のコンクリートが剥落することにより鉄筋の座屈が発生している。

(b) 図より、AP - S 供試体では、まず段落し部と段落し部より下の無補強の部分に曲げひび割れが発生し、その後段落し部にひび割れが集中して終局に至っている。終局時には段落し

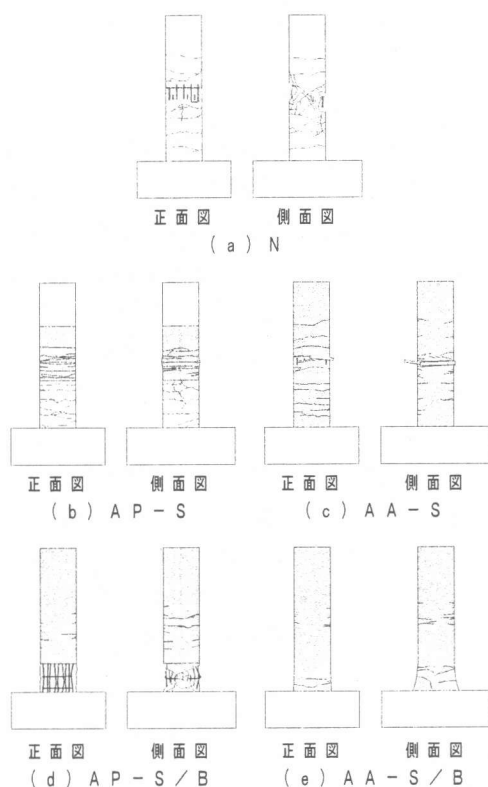


図-6 実験終了時のひび割れ図

部のシートがはらみ出し、一部コンクリートの剥落も見られた。無補強の部分には曲げひび割れから斜方向のせん断ひび割れの発生が見られるが、補強部にはせん断ひび割れの発生は認められず、補強によりせん断ひび割れが効果的に抑制されていることがわかる。

(c) 図より、AA-S 供試体では前述の AP-S 供試体と同様に段落し部より下部に曲げひび割れが発生している。終局時には段落し部のひび割れが進展し、シートの一部が隅角部から破断し、コンクリートの剥落、鉄筋の座屈が見られる。しかしながら、この場合もせん断ひび割れの発生は見られない。

(d) 図より、AP-S/B 供試体では、基部付近の補強を施していない部分に曲げひび割れが発生している、その後補強部の段落し部等にも曲げひび割れの発生が認められるが、最終的には基部近傍にひび割れが集中しコンクリートの剥離、鉄筋の座屈によって終局に至っている。なお、補強部の正面に比べて側面に発生しているひび割れが目立つのは、側面に縦貼りを行っていないことによるものと推察される。

(e) 図より、AA-S/B 供試体は初期に段落し部に曲げひび割れが発生するが、変位振幅の増加に伴って基部近傍にも曲げひび割れが発生し、最終的にはこの基部の損傷が進展して終局に至っている。終局時においてもシートの剥離破断は見られないが、はらみ出しは大きく、シート内部ではコンクリートの破壊、鉄筋の座屈が発生していることを示唆している。ただし、シートが破断していないことから鉄筋の座屈を抑制されていると推察される。この結果、荷重-変位関係からも明らかなように、最大荷重を超える変位状態においても荷重が急激に減少することなく、終局変位も大きくなったとも考えられる。

4. まとめ

地震時に上部工による拘束によって RC 橋脚が受ける軸荷重が変化することを想定し、段落

しを有する RC 橋脚の地震時破壊性状と耐震補強に対する影響を検討するために、拘束の最も厳しい条件として、橋脚天端の鉛直変位を固定した水平交番載荷実験を実施した。以下に、本実験から得られた結果を要約すると

- 1) 変位を拘束することにより、軸荷重は無補強供試体、補強供試体の何れにおいても水平変位の増加に伴って増加し、各変位振幅での最小軸荷重も同様に増加する。ただし、最大荷重を示した振幅以上では軸荷重の増加も見られず減少するが、その状況は補強法の違いによって異なる。
- 2) 降伏荷重、最大荷重は軸荷重の増加によって大きくなるが、最大荷重を示した後の荷重は急激な減少となる。
- 3) AFRP シートを巻いたせん断補強によって、最大荷重、終局変位とも大幅に増加し、橋脚の靱性は改善されている。ただし、段落し部のみの補強と全体を補強した場合には大差がなく、段落し部のせん断補強に関しては段落し部近傍のみの補強で十分な効果が得られるものと判断される。
- 4) 段落し部のみを AFRP シートで曲げとせん断補強した場合には、基部に破壊が移行するため、全体的には最大荷重、終局変位ともせん断補強のみの場合と同程度となった。
- 5) ただし、基部まで曲げとせん断補強を行った場合には、基部の鉄筋の座屈がある程度拘束されるため、他の供試体に比べて終局変位も大きくなり靱性も増加している。

参考文献

- 1) 吉田紘一、三田村浩、三上浩、岸徳光：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No3, pp1579-1584, 2000
- 2) 佐藤昌志、竹田俊明、池田憲二、高畑智考：鉛直方向変位の拘束を考慮した RC 橋脚の荷重-変位特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No3, pp1525-1530, 2000