

I-79

アラミド繊維で補強したRC梁の曲げ拘束度に関する実験とその考察

ショーボンド建設(株)	正 会 員	近 藤 悦 郎
北海道開発局開発土木研究所	正 会 員	谷 本 俊 充
北海道開発局開発土木研究所	正 会 員	佐 藤 昌 志
北 海 道 大 学	フェロー会員	角 田 與史雄

1. はじめに

軽量かつ高強度である新素材(以降、連続繊維と称す)を、既設鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強等に利用することが注目され、種々の実験結果に基づいた設計施工に関する要領¹⁾²⁾も提案されてきている。連続繊維による既設コンクリート橋脚の耐震補強に関する設計要領においては、復旧仕様³⁾および示方書⁴⁾に準じて、主として一軸圧縮試験の結果から、連続繊維を帯鉄筋に換算する方法により応力-ひずみ関係を定式化している。

しかしながら、実橋脚設計の着目点となる曲げ圧縮力が作用した場合についての拘束効果(以降、曲げ拘束度と称す)は、一軸圧縮時とは異なる様相を示すことも考えられることから、矩形の梁供試体を用いた静的曲げ荷重実験を実施し、連続繊維により補強した場合の曲げ拘束度の検討を行うこととした。

実験では、鉄筋コンクリート橋脚にアラミド繊維を貼付けた場合の、曲げ拘束度に関する基礎的な資料を得ることを目的として、梁での単純曲げ試験により評価することとし、主として破壊性状、荷重変位特性および拘束部材のひずみ挙動に関して検討を行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 供試体形状および実験要因

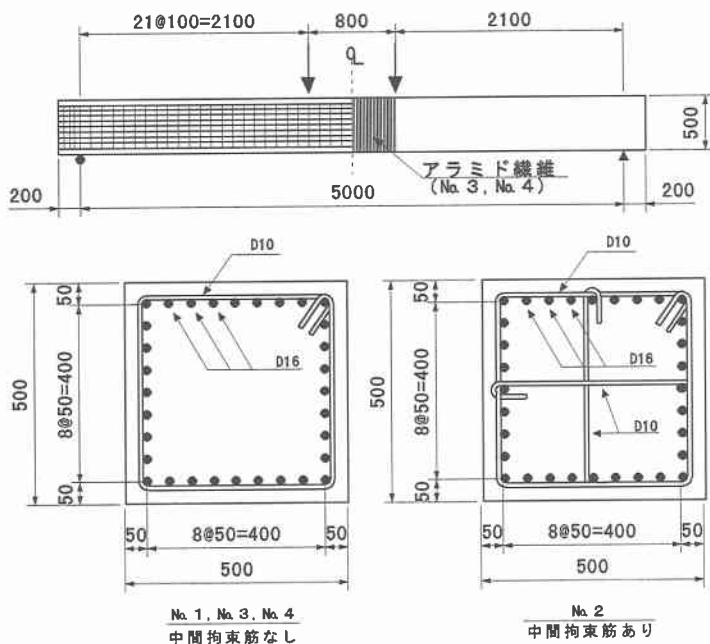
供試体は、図-1に示すような自由解放平面を有するスパン5mのRC梁である。実験の要因は表-1に示すとおりで、基準供試体(No.1)、アラミド補強供試体(No.3、4)および比較のため中間拘束筋を配したもの(No.2)についても同様の実験を行った。供試体の配筋は、文献5)の柱供試体と同様とし、軸方向鉄筋としてD16を32本、帯鉄筋としてD10の鉄筋を10cm間隔で配置した。また、曲げ破壊を生じさせるために、せん断区間に十分な帯鉄筋を配した。アラミド繊維は、等曲げモーメント区間に1層(No.3)および3層(No.4)を帯鉄筋方向に貼り付けた。なお、アラミド繊維の破断を防止する目的に、コーナ部に1.5cm程度の面取りを施した。また、アラミド繊維は各層ごとで定着せず、連続的に巻き付け供試体側面にてラップ長5cmで定着した。実験時のコンクリートの圧縮強度は、No.1およびNo.2で201kgf/cm²、No.3およびNo.4で271kgf/cm²であった。実験に用いた鋼材はすべてSD295Aであり、アラミド繊維は公称破断強度60tf/mのものをを用いた。

2. 2 荷重方法および測定項目

荷重方法は、電動油圧ジャッキによる静的2点荷重にて行い、確実に曲げ破壊を生じさせるため、せん断支間有効高さ比(a/d)を約4.7とした。また、荷重位置における局所的な圧縮力の影響を少なくする目的に等曲げモーメント区間を80cmとした。荷重手順は、各所のなじみをとることおよび測定データの確認をすることを目的に弾性範囲(主鉄筋ひずみが1000μ)での予備荷重を行った後除荷し、ジャッキストロークの最大まで荷重を実施した。ここで、供試体No.1およびNo.2については、350mmのストロークを有するもの、供試体No.3およびNo.4については、500mmのストロークを有するジャッキを使用した。

測定項目は、荷重、変位、鉄筋、アラミドひずみ、コンクリートひずみおよび埋め込みゲージを用いて内部コンクリートのひずみを計測した。破壊過程での各測定項目の挙動を連続的に得るため、測定は動的に行った。A/D変換変換時のサンプリング周波数は5Hzまたは10Hzとした。

An Experimental Study on Confined Effect of RC Beam Strengthened with Aramid Fiber
by Etsuro KONDO, Toshimitsu TANIMOTO, Masashi SATO, Yoshio KAKUTA



図－１ 供試体形状および寸法（単位：mm）

表－１ 実験要因

供試体 番 号	軸方向鉄筋	帯鉄筋	鉄筋比 (%)	帯鉄筋比 (%)	拘束方法
No. 1	3 2－D 1 6	D 1 0 @ 1 0 0	2. 5 4	0. 6 7	帯鉄筋のみ
No. 2				1. 3 4	帯鉄筋＋中間拘束筋
No. 3				0. 6 7	帯鉄筋＋アラミド１層
No. 4					帯鉄筋＋アラミド３層

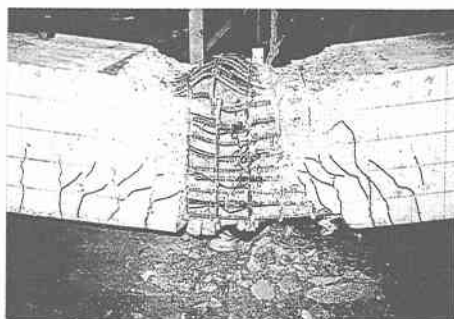
３． 実験結果

３． １ 破壊過程および破壊状況

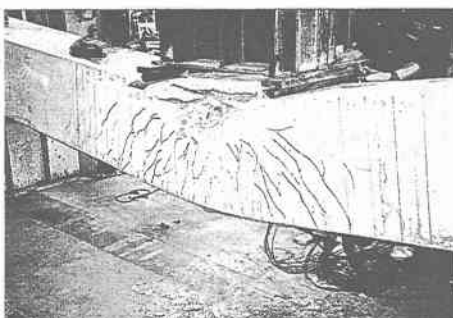
実験終了後における各供試体の破壊状況を写真－１～６に示す。いずれの供試体も主鉄筋降伏後に上縁のコンクリートが圧壊し、軸方向鉄筋の座屈を生じる破壊性状であった。No. 1 供試体では、上縁のかぶりコンクリートはく離後、帯鉄筋が供試体側面部ではらみだし、側面部のかぶりコンクリートのはく離を生じた。中間拘束筋を配したNo. 2 供試体は、No. 1 供試体で観測された上縁コンクリートはく離後の供試体側面部への、はらみだしは生じなかった。アラミド繊維によって拘束を与えたNo. 3 およびNo. 4 供試体は、ガラス繊維の破断をとまってひび割れが進展したが、かぶりコンクリートのはく離はアラミド繊維によって抑制されていた。その後、変形の進行にとまってアラミド繊維の一部に浮きが生じた。積層数が１層であるNo. 3 供試体は、その後の载荷によってコーナー部においてアラミド繊維の一部に破断を生じ、供試体上縁および側面において粉砕されたかぶりコンクリートのはく離が観察された。一方、積層数が３層の供試体No. 4 では、変形にとまらな浮き部の進行は認められたものの、アラミド繊維の破断およびはく離、供試体側面部のはらみだしは試験終了まで生じなかった。



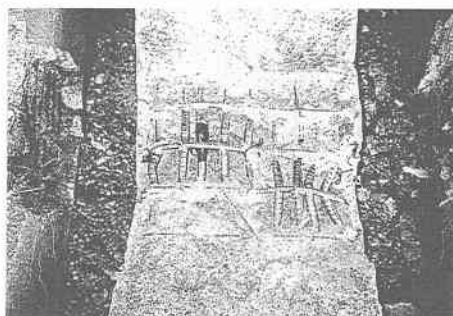
写真－1 供試体No.1



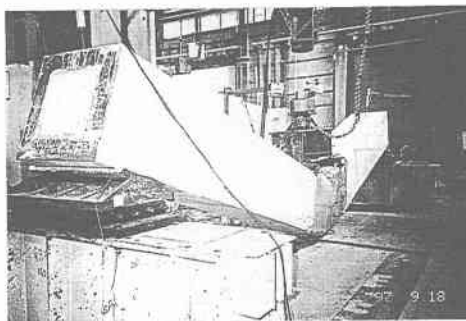
写真－2 供試体No.1



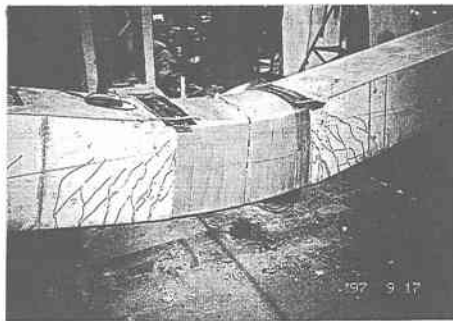
写真－3 供試体No.2



写真－4 供試体No.2



写真－5 供試体No.3



写真－6 供試体No.4

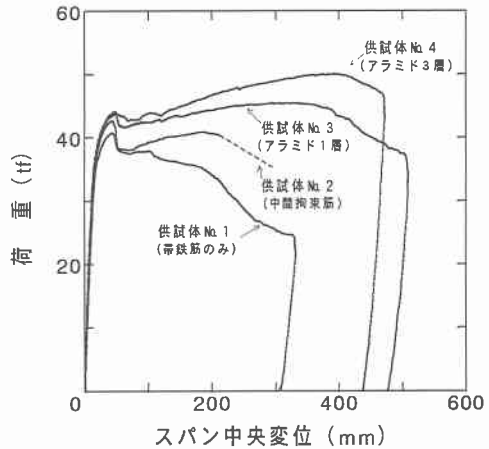
試験終了後、鉄筋の状況を観察した結果は以下のようであった。

- ① No.1 供試体は、帯鉄筋がリング状に変形し、上段から3段目までの軸方向鉄筋の座屈が生じていた。ここで、軸方向鉄筋の座屈長は30cm程度であった。また、コアコンクリートが、砂状に粉砕されていた。
- ② 中間拘束筋を配したNo.2 供試体では、帯鉄筋が中間拘束筋によってリング状の変形を拘束されるような変形を生じ、上段の軸方向鉄筋の座屈が認められたものの、コアコンクリートについては、座屈部直下で砂状に粉砕されていた程度であった。また、軸方向鉄筋の座屈長は、20cm程度であった。
- ③ アラミド繊維を1層のNo.3 供試体は、No.1 供試体と同様に帯鉄筋がリング状に変形し、上段から3段目までの鉄筋の座屈および座屈変形を生じた軸方向鉄筋では、上方への位置ずれを生じていた。コアコンクリートが座屈部直下で砂状に粉砕されていたものの、No.1と比較すれば軽微なものであった。
- ④ アラミド繊維を3層のNo.4 供試体では、载荷中浮きを生じていた直下の帯鉄筋がリング状に変形し、コーナー部以外の上段の軸方向鉄筋が座屈を生じていた。ただし、鉄筋の変形は上述の3体と比較して、最も軽微でありコアコンクリートについても健全であった。

3. 2 荷重と変位との関係

各供試体の荷重と変位との関係を、図－2に示す。ここで、供試体No.2において、载荷中に変位計測の治具が落下したため、終局時の変位を別途に計測したことから、図中では点線で示している。

図より、いずれの供試体も、35tf付近で内部鋼材降伏にともなう剛性の低下が認められ、スパン中央変位50mm付近で、上縁コンクリートの圧壊またははく離による荷重低下が生じた。基準供試体No.1は、上縁コンクリート圧壊後、スパン中央変位が100mm付近まで一定の荷重（38tf程度）で推移し、その後、荷重の低下とともに変形が進行した。中間拘束筋を配したNo.2供試体は、No.1供試体と同様に上縁コンクリート圧壊後、一定荷重で変形が進行したものの、スパン中央変位が80mm付近から、荷重の増加が認められた。しかしながら、上縁圧壊時の荷重まで回復することなく、スパン中央変位が180mm付近から、荷重が低下するとともに変形が進行した。一方、アラミド繊維によって拘束した供試体No.3およびNo.4においては、上縁コンクリート圧壊後の荷重低下は僅かであり、その後の変形の進行にともなって荷重が増加する傾向が認められた。特に積層数が3層である供試体No.4においては、上縁コンクリート圧壊時の荷重を15%程度上回る結果となった。両供試体ともに、変位400mm程度から荷重の低下が生じた。



図－2 荷重と変位との関係

4. 曲げ拘束度に関する考察

4. 1 破壊性状および荷重と変位関係

破壊性状および荷重と変位との関係から得られた結果について、曲げ拘束度の観点から考察を行う。

中間拘束筋による曲げ拘束度は、連続繊維により拘束した場合と大きく異なり、変形能の向上に対しては増加が認められるものの、耐力向上に対しては寄与しない結果を得た。示方書における地震時保有水平耐力の照査では、かぶりコンクリートはく落後のコアコンクリートの中間拘束筋による拘束効果を、圧縮応力および終局ひずみの増加として考慮するように規定されている。しかしながら、本実験ではコアコンクリートの性状改善ではなく、むしろ軸方向鉄筋の座屈防止により変形状の改善したのではないかと考えられる。このことは、供試体No.1とNo.2において、軸方向鉄筋の座屈長に差異を生じていたことから推察できる。

連続繊維による曲げ拘束度は、変形能の向上だけでなく、耐力向上に対しても効果が期待できる結果を得た。また、積層数の増加にともなって曲げ拘束度が向上する結果であった。このような結果を得た一因としては、上述と同様に軸方向鉄筋の座屈変形に対して、アラミド繊維の拘束力によって防止あるいは抑制したことによるものではないかと考えている。さらに、中間拘束筋による拘束では、線的に軸方向鉄筋の座屈を防止したのに対し、アラミド繊維による拘束は、かぶりコンクリートと一体となって面的に挙動したことによるものと考えられる。このことは、新設橋脚において中間拘束筋を配筋することなく、連続繊維によって所定の耐震性を満足できることを示唆しており、施工の省力化および簡略化において非常に有効な手段となるものと思われる。

以上の結果は、中間拘束筋あるいはアラミド繊維によって拘束することにより、軸方向鉄筋の圧縮降伏応力度が増加したことを示唆するものである。すなわち、既設RC橋脚の耐震性を向上させる手段として、

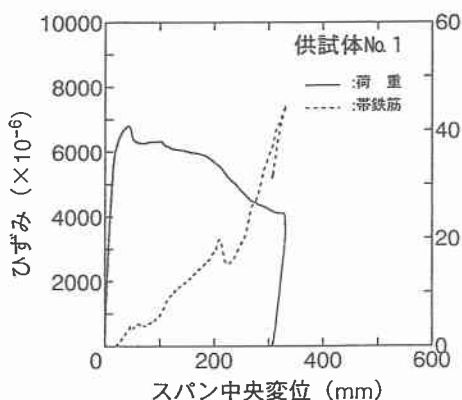


図-3 ひずみ挙動

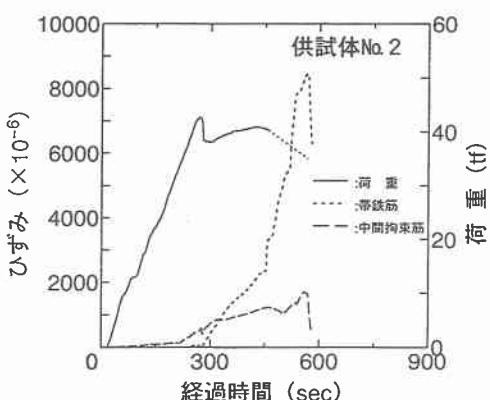


図-4 ひずみ挙動

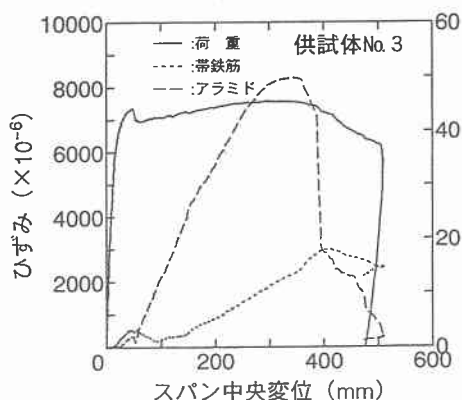


図-5 ひずみ挙動

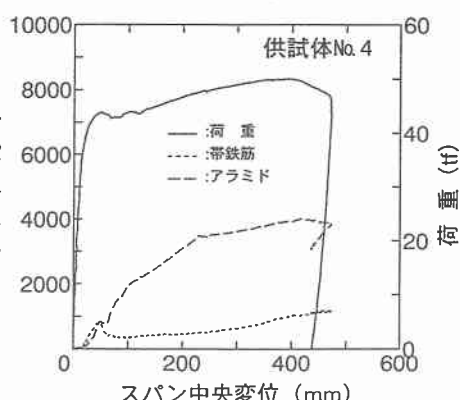


図-6 ひずみ挙動

軸方向鉄筋の座屈防止に留意する必要がある、曲げ拘束度は圧縮部コンクリートに対するよりも、むしろ圧縮鉄筋の座屈防止に大きく寄与するものと考えられる。

4. 2 内部鋼材およびアラミド繊維のひずみ挙動

上述のように拘束効果に関して、一軸圧縮試験による評価と異なる観点も考えられる結果を得た。ここでは、内部鋼材（帯鉄筋、中間拘束筋）およびアラミド繊維のひずみ挙動から実験結果を考察する。

各供試体における内部鋼材およびアラミド繊維のひずみ挙動をスパン中央変位（No. 2 供試体では経過時間）との関係で図示すると図-3～図-6のとおりである。ここで、各ひずみの測定位置はスパン中央の図-7に示す箇所であり、内部ひずみ計測の結果、維ひずみの変動が小さいと考えられることから選定した。また、破壊挙動との比較を容易にするために、荷重と変位（No. 2 供試体では経過時間）の関係についても併記している。

図-3より、基準供試体No. 1における帯鉄筋のひずみ挙動は、上縁コンクリートの圧壊後の荷重一定状態から減少へ転ずる付近で降伏ひずみを超えている。

中間拘束筋を配した供試体No. 2における内部鋼材のひずみ挙動をみると（図-4）、帯鉄筋のひず

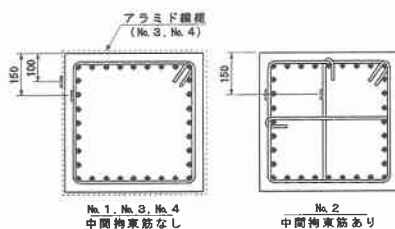


図-7 ひずみ測定位置

み挙動は、基準供試体と同様に上縁コンクリート圧壊後に増加している。一方、中間拘束筋のひずみ挙動は、実験終了直前まで弾性域であった。このことは、上述の破壊状況において、帯鉄筋が中間拘束筋によってリング状の変形を拘束されるような変形を生じていたことと符合し、中間拘束筋が曲げ拘束度に関して、帯鉄筋とは異なる挙動であったことを示唆するものであると思われる。ただし、本実験における供試体形状が正方断面を有していることに起因していることも考えられることから、中間拘束筋の拘束効果と断面形状に関する検討が必要であると思われる。

つぎに、アラミド繊維によって拘束した場合について述べる。図－3、5および図－6をみると、アラミド繊維によって帯鉄筋ひずみの増加が低減されていることが明らかである。帯鉄筋およびアラミド繊維のひずみ増加は、軸方向鉄筋の座屈変形に起因しているものと考えた場合、上述の結果は、アラミド繊維の拘束力によって、両供試体（No.3、4）の軸方向鉄筋の座屈変形に遅延が生じたことを裏付けるものと思われる。

以上の検討の結果、内部鋼材およびアラミド繊維のひずみ挙動は、軸方向鉄筋の座屈変形に起因していると考えた場合、各種拘束方法による曲げ拘束度の相違を表しているものと考えられる。このことは、現行の耐震設計手法で考慮されている拘束効果の考え方以外に、軸方向鉄筋の座屈に着目した検討が必要であることを示唆しているものと思われる。また、連続繊維により拘束する場合には、内部鋼材による曲げ拘束度とは異なる結果を得たことから、既設RC橋脚の補強設計に際しては、連続繊維を帯鉄筋に換算する方法の適用に際しては注意を要するものと思われる。

5. まとめ

橋脚モデル供試体と同様の配筋を有する梁供試体を用いた静的曲げ載荷実験を実施し、連続繊維による曲げ拘束度の検討を行った結果をまとめると以下のとおりである。

1. 中間拘束筋およびアラミド繊維による曲げ拘束度は、破壊性状および荷重変位特性から考察すれば、前者は線的に後者は面的に機能したものと推察される。
2. 中間拘束筋あるいはアラミド繊維によって拘束することにより、軸方向鉄筋の圧縮降伏応力度が増加するものと思われる。
3. 中間拘束筋およびアラミド繊維による曲げ拘束度は、コアコンクリートの性状改善ではなく、むしろ軸方向鉄筋座屈の遅延に寄与しているものと考えられる。

今回、著者らが行った実験を通じて、耐震設計上考慮すべき課題を提起する結果を得た。これらについてはより合理的な設計法確立に向け今後さらに検討を行いたいと考えており、軸方向鉄筋径と帯鉄筋量の関係や炭素繊維により拘束した場合などについて同様の実験を予定している。

最後に、本実験を行うに際して、室蘭工業大学岸徳光助教授のご助言および同研究室の大学院生、卒業研究生の皆様には実験遂行に際し多大なご協力を頂いた。また、三井建設(株)から材料を提供して頂いた。ここに記して、厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：炭素繊維シートによるRC橋脚補強に関する設計施工要領（案）、平成9年5月
- 2) 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）、平成9年8月
- 3) 日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様、平成7年
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・解説V、耐震設計編、平成8年
- 5) 蝦名、谷本、佐藤、角田：中間拘束筋を有する大型橋脚模型の荷重－変位特性、土木学会北海道支部論文報告集、1998.2（投稿中）