

論文 RC1層ラーメン橋脚梁部の耐震補強に関する研究

小泉 秀之^{*1}・睦好 宏史^{*2}・小西 由人^{*3}・藤田 亮一^{*4}

要旨: 既設 RC ラーメン橋脚の中には、柱部材だけでなく梁部材のせん断耐力および変形性能を向上させるために耐震補強を行う必要性が指摘されているものがある。本研究では RC1 層ラーメン橋脚の梁部に対して鋼板接着および炭素繊維シート接着によるせん断補強を施し、静的正負交番載荷実験により補強工法の違いによるせん断補強効果および RC ラーメン橋脚の耐震性状を明らかにした。その結果、梁部をせん断補強することにより、ラーメン橋脚の耐震性が向上する事が明らかとなった。

キーワード: RC ラーメン橋脚, 梁部せん断補強, 鋼板補強, 炭素繊維シート補強

1. はじめに

兵庫県南部地震によって多くの RC 構造物が多大な被害を受け、RC ラーメン橋脚も多くのせん断破壊が生じた。これを契機に道路・鉄道 RC 高架橋および RC 橋脚に耐震補強が実施されてきた。この中で高速道路用 RC1 層 2 柱式ラーメン橋脚の面内方向に対して地震時保有水平耐力法¹⁾に基づいた耐震設計検討を行った結果、柱部は耐震補強が実施されているため所要の耐震性能を有しているが、梁部のせん断耐力が相対的に不足しているため、大地震時において RC ラーメン橋脚梁部がせん断破壊する可能性が指摘されている。そこで本研究では既設高速道路用高架橋に用いられている RC1 層ラーメン橋脚のモデル供試体を用いて、梁部をせん断補強して、ラーメン構造全体の耐震性を向上させる事を目的とした。梁部材は上面に支承等が設置されており、また本研究で対象としたラーメン橋脚の梁部には、落橋防止および桁連続化のために鋼製ブラケットが既に取り付けられているため、せん断補強方法に制約が生じている。さらに現場での作業量を簡易にする補強工法が望まれている。このような事を考慮して本研究では、鋼板を梁部側面に接着させアンカーボルトで留め

たもの、炭素繊維シートを梁側面および底面の 3 面に巻き立てたものの 2 種類のせん断補強工法を用いて梁部を補強し、静的正負交番載荷実験を行ってラーメン橋脚の耐震性を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に用いた RC1 層ラーメン供試体の形状および寸法を図-1 に、実験要因を表-1 に示す。実験供試体は既設高速道路用高架橋に用いられている 1 層 2 柱式 RC ラーメン橋脚を想定したもので寸法を約 1/7 に縮小したものである。3 体とも同一寸

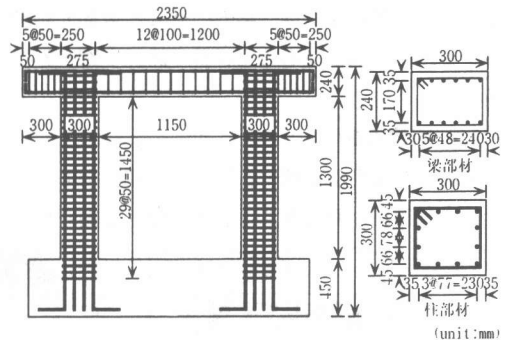


図-1 供試体の形状と寸法

*1 東日本旅客鉄道(株) [元埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻] (正会員)

*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 教授 (正会員)

*3 首都高速道路公団 東東京管理局 (正会員)

*4 日本技術開発(株) 環境防災事業部 地震防災部

表-1 実験要因

供試体名	実験要因	コンクリート 圧縮強度 (MPa)
A-1	無補強 (Control)	35.2
A-2	梁部鋼板接着補強 (アンカーボルト120mmピッチ2段)	36.1
A-3	梁部炭素繊維シート補強 (U-wrap, 1層1方向)	36.4

表-2 材料諸元

種類	仕様	
鉄筋 D3	降伏強度	266.3MPa
鉄筋D10	降伏強度	415.6MPa
鉄筋D13	降伏強度	417.1MPa
鉄筋D16	降伏強度	413.2MPa
補強鋼板	鋼板厚さ	1.6mm
	降伏強度	326.0MPa
	弾性係数	202.5KN/mm ²
炭素繊維 シート	シート厚さ	0.167mm
	引張強度	4160MPa
	弾性率	245KN/mm ²

法・同一配筋とし、柱は 300×300mm、梁は 300×240mm の矩形断面とした。柱の主鉄筋には D16、梁の主鉄筋には D13、柱の帯鉄筋には D10、梁の帯鉄筋には D3 を使用した。梁部の帯鉄筋比は 0.05% である。これは実橋脚の中でも最も小さい鉄筋量を想定している。実構造物の柱には既に鋼板巻き立て補強が施されているので、鋼板を鉄筋量に換算して柱断面に配筋した。事前に構造解析したところ無補強供試体では、梁部のせん断破壊先行型となる。本実験に使用した材料の諸元を表-2 に示す。

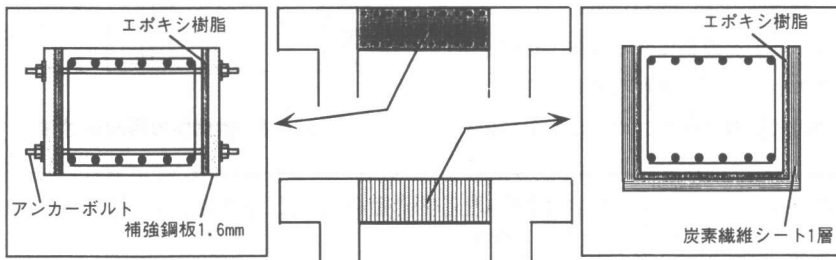
2.2 補強方法

梁部の補強方法を図-2 に示す。鋼板接着補強では梁側面部全面に厚さ 1.6mm の鋼板を貼り付け

た。この際、アンカーボルト(φ6mm 鋼棒)はコンクリート打設前に軸方向に 120mm の間隔で設置しておき、鋼板を梁側面に固定し、供試体と鋼板の間隙約 2mm にはエポキシ樹脂を充填した。炭素繊維シート補強では梁側面および底面に U 字に炭素繊維シートを 1 層巻き立てた。この際、シートの応力集中を低減させるために梁断面コーナー部には半径 10mm の面取りを施してある。一般に梁および柱部材に炭素繊維シートを全周ではなく 1 面に貼り付ける場合、シート端の定着方法が、せん断補強効果に影響を及ぼすことが知られている²⁾。今回は施工の簡易化を図る目的で、シート端を梁上面に折り返して定着せず、シートを梁側面の上端で切り落としており、炭素繊維シートを巻いた 3 面の付着のみでせん断補強効果を検討する事とした。なお補強鋼板と炭素繊維シートによるせん断補強効果はほぼ等しくなる³⁾⁴⁾と共に、梁部材のせん断耐力が曲げ耐力を上回るようにせん断補強量を決定した。

2.3 載荷方法

供試体の載荷概要を図-3 に示す。水平載荷には最大出力 500KN ジャッキを用いて、加力中心が梁の中心軸に等しくなるように載荷した。押し時には張り出し部に取り付けた載荷板をジャッキにより直接載荷、引時には載荷板を 4 本の PC 鋼棒を介してジャッキで引張る方式で水平載荷をおこなった。この際ラーメン供試体梁部には PC 鋼棒のボルトの締め付けによる軸力がかからないように注意した。水平載荷については柱基部回転角で 1/600、2/600rad と載荷した後、柱基部の軸方向鉄筋に作用している引張力の合力位置が降伏するときの計算荷重を降伏荷重 P_y と定義して⁵⁾、 P_y に対応する



A-2 鋼板接着補強

図-2 補強方法概要

A-3 炭素繊維シート補強

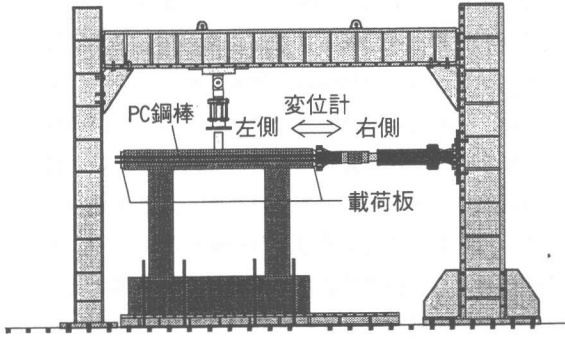


図-3 実験セットアップ図

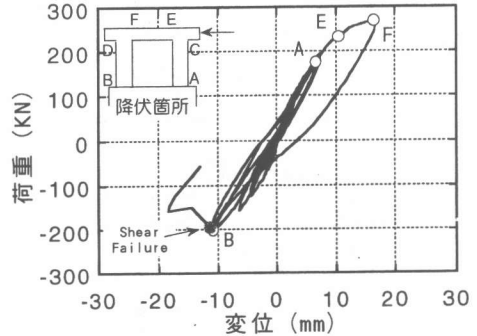
実験変位 δ_y まで載荷した。その後変位制御により δ_y の整数倍変位を漸増させ、各載荷変位毎に 3 サイクルの一定振幅載荷した。また鉛直載荷装置を用いて梁部中央部には水平載荷中、一定の軸方向圧縮力 105.8kN を幅 100mm 鋼製桁を介して載荷した。これによるラーメン供試体柱部に作用する軸方向圧縮応力は 0.6MPa である。

3. 実験結果

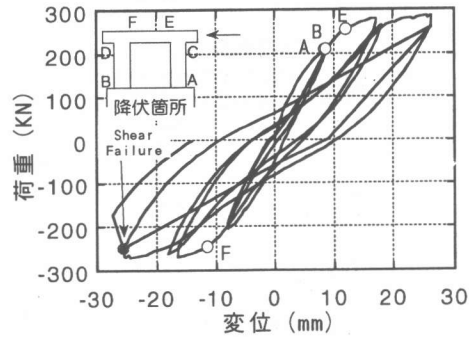
3.1 荷重-変位関係と損傷状況

図-4 に各供試体の荷重-変位関係を示す。ここで用いている変位は梁軸線上の載荷点における変位を用いている。なお各部材の軸方向鉄筋に予め貼り付けたひずみゲージから判断される降伏順序も合わせて併記している。表-3 に各供試体の破壊形式、図-5 に各供試体のひび割れ状況を合わせて示す。なお A-2, A-3 供試体においては実験後、梁部補強材をはがした後の状況である。A-1 供試体では柱基部の軸方向鉄筋降伏後、梁端部が降伏し、引側において前ステップで経験した変位を超えて、-11.4mm の時、右側梁部せん断スパン内で斜めひび割れの急激な開口によりせん断破壊が生じた。A-2 供試体では柱基部、梁端部の鉄筋降伏後、変位 16mm 付近から鋼板の剥離音が生じ、変位 -25.6mm ・繰返し 2 波目で右側梁端部付近の補強鋼板の剥離後せん断破壊が生じた。鋼板はアンカーボルトによって固定されていたが、斜めひび割れはアンカーボルトを避ける様に生じ、アンカーボルト間で鋼板の座屈も発生した。A-3 供試

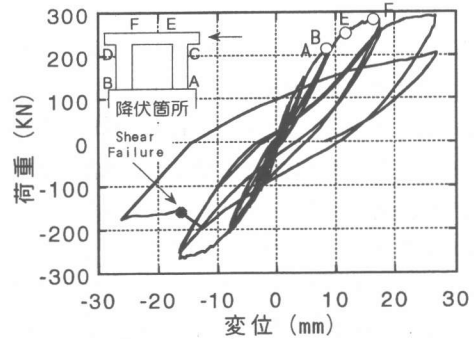
体では柱基部、梁端部鉄筋降伏後、変位 16mm 付近でシート端の剥離が生じはじめ、-16.3mm で右側



(a)A-1 供試体



(b)A-2 供試体



(c)A-3 供試体

図-4 荷重-変位関係

表-3 破壊形式

供試体	破壊形式
A-1	柱基部・梁端部降伏後 梁部せん断破壊
A-2	柱基部・梁端部降伏 補強鋼板剥離後梁部せん断破壊
A-3	柱基部・梁端部降伏 補強シート剥離後梁部せん断破壊

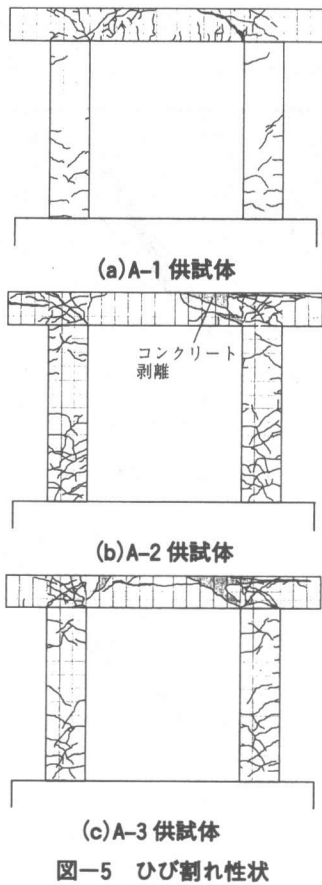


図-5 ひび割れ性状

梁端部のシート剥離後せん断破壊が生じた。なお全ての供試体で梁にせん断破壊が生じた後に急激な水平耐力の低下が生じたが、鉛直方向圧縮力は保持していた。供試体全てに関して柱基部降伏、梁端部降伏後せん断破壊を生じた。実験結果から塑性ヒンジは柱基部と梁端部に形成されたと考えられる。A-2、A-3 供試体に関しては、塑性ヒンジ位置¹⁾となる梁端部も補強したが、梁端部の降伏変位に大きな差異は確認できなかった。今回の実験に限って言えば、鋼板補強・炭素繊維シート補強が梁端部の降伏変位に与える影響あるいは塑性ヒンジ形成順序等に与える影響は小さいものと考えられる。A-2、A-3 供試体とも実験後、補強材を取り外し、梁部のひび割れ状況を確認したが、せん断破壊に至った大きなせん断ひび割れ以外は顕著なひび割れは確認できなかった。また A-1 供試体と比較すると A-2、A-3 供試体とも隅角部での損

傷が進展しているのが確認できた。図-6 に各供試体の荷重-変位関係の包絡線を示す。各供試体とも梁部せん断破壊後は、急激に耐力低下しているが、包絡線に大きな差異はない。表-4 に実験結果を示す。降伏変位は正負の平均値を用い、終局変位にはせん断破壊までに経験した最大変位を用いた。また最大荷重は正負両側を記載した。実験結果より無補強供試体である A-1 供試体では、他の2つの供試体と比較すると、はやい段階でせん断破壊が生じている事から数値が小さいが、傾向としては荷重-変位包絡線に、ほとんど変化は無いものと考えられる。変形性能については A-2、A-3 供試体ともそれぞれ 1.5 倍程度改善された事が認められる。以上から今回用いた梁部せん断補強工法は、ラーメン構造物の最大耐力にほとんど影響を与えず、変形性能を改善する事ができると考えられる。

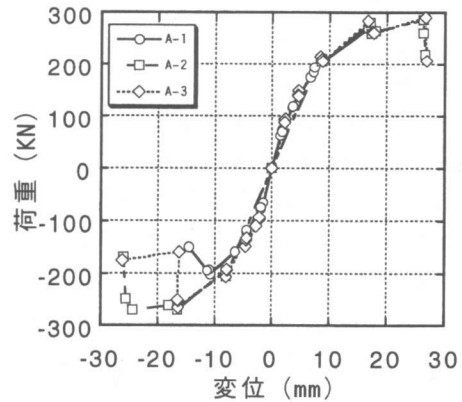


図-6 荷重-変位包絡線比較

表-4 実験結果

供試体	降伏変位 δ_v (mm)	終局変位 $\delta_{v, max}$ (mm)	降伏荷重 P_v (KN)	最大荷重 P_{max} (KN)	靱性率 $\delta_{u, max}/\delta_v$	P_{max}/P_v
A-1	9.04	16.70	220	270.0	1.85	1.23
				-200.7		
A-2	9.33	26.22	220	286.9	2.78	1.27
				-270.0		
A-3	9.50	26.62	220	291.5	2.80	1.27
				-265.7		

3.2 補強効果

A-2 供試体の各サイクル引側最大耐力時における補強鋼板に生じた鉛直方向ひずみ分布を図-7

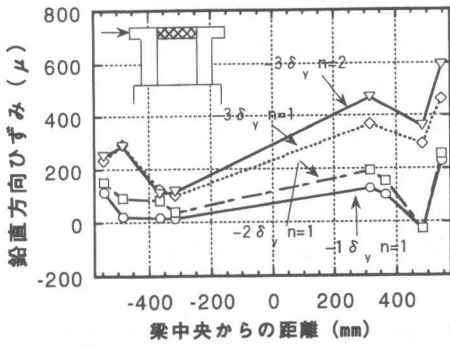


図-7 鋼板鉛直方向ひずみ分布

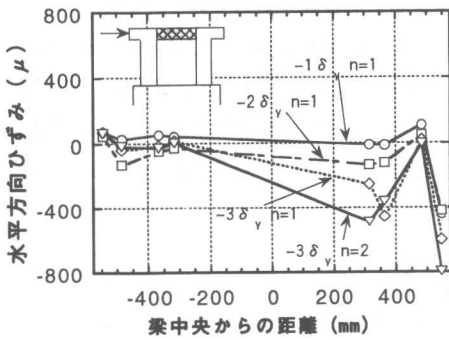
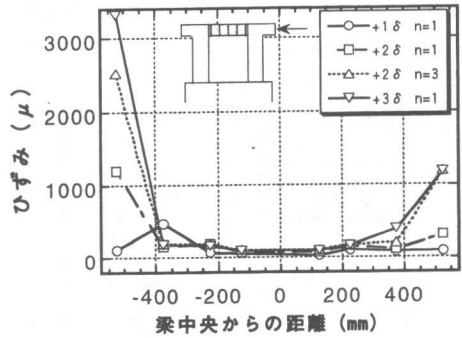


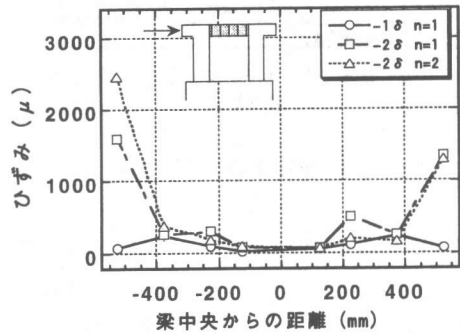
図-8 鋼板水平方向ひずみ分布

に、水平方向ひずみ分布を図-8に示す。鉛直方向ひずみ分布では塑性率の増加により梁端部で $-2\delta_y$ から $-3\delta_y$ 付近で、ひずみが急激に増加しているのが分かる。A-1 供試体が約 $2\delta_y$ でせん断破壊した事を考慮すると、この付近から補強鋼材がせん断耐力を受け持つ割合が増加する事が考えられる。また繰返し載荷により梁端部のひずみの増加も確認できる。水平方向ひずみ分布では塑性率の増加に伴い梁端部で大きな圧縮方向のひずみが発生しているのが分かる。従ってアンカーボルトで固定し、エポキシ樹脂で接着した補強鋼板に囲まれた部分では鋼板の引張力、圧縮力双方がせん断力に有効にはたらく事が確認された。図-9に各サイクル最大耐力時における補強シートに生じた鉛直方向ひずみ分布を示す。梁中央付近では塑性率の増加に伴い、ほとんどひずみが増加しないが、梁端部では $2\delta_y$ あたりから急激にひずみが増加しているのが確認できる。梁端部のひずみは最

大 3300μ に及んでいて、正負繰返しにおいても残留ひずみとして残り、低下していない。A-3 供試体では、梁側面および底面をU字に巻き立ててい



(a) 押側最大耐力時



(b) 引側最大耐力時

図-9 炭素繊維シート鉛直方向ひずみ分布

るため、図-10に示すようにせん断ひび割れが発生してもひび割れが生じた箇所以外で引張力に抵抗するため、U字に貼り付けた炭素繊維シートは、せん断補強効果が大きいと考えられる。しかしながら、A-2、A-3 供試体とも $3\delta_y$ 程度で鋼板および炭素繊維シートの剥離が生じ、梁部せん断破壊が生じている事から、特に梁端部の付着性能の更なる向上あるいは定着等を考える必要があると考えられる。

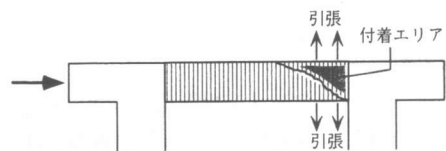


図-10 炭素繊維シートU-Wrap補強

3.3 累積吸収エネルギー

図-11にA-2、A-3供試体のサイクル毎の累積吸収エネルギー関係を示す。ここでの累積吸収エネルギーは、各サイクルにおいて耐力0の位置から囲まれるループに対し、積分して求められる面積を1サイクルの吸収エネルギーとして算出した。

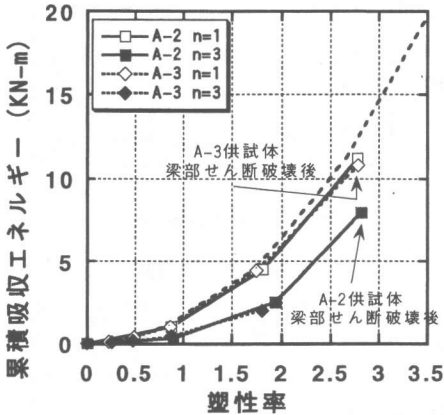


図-11 累積吸収エネルギー

なお今回の実験とは別に行ったA-1に対し梁部帯鉄筋を増加させたケースの1サイクル目の累積エネルギー関係も合わせて示す。この供試体は、 $3.5\delta_y$ 程度までは梁部せん断破壊が生じていない。これらの結果から梁部補強工法の違いによる吸収エネルギーの変化は確認できなかった。A-2、A-3供試体とも $3\delta_y$ 付近でせん断破壊が生じた。一般に1本RC柱ではせん断破壊後の累積吸収エネルギーは明らかに低下するが、今回の実験に限ってはその傾向がない。これはラーメン橋脚ではエネルギー吸収箇所は柱部・梁部であり、梁部がせん断破壊した後も柱部のエネルギー吸収能は健在であり、梁の軸方向鉄筋と骨材のかみ合わせによりある程度力が伝達されると共に柱部でエネルギーが吸収される事が考えられる。

4. まとめ

鉄筋コンクリートラーメン橋脚梁部に鋼板接着補強、炭素繊維シート接着補強を施し、補強方法の違いが補強効果、ラーメン構造物全体の耐震性

に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、以下の事項が結論付けられる。

- ①鉄筋コンクリートラーメン橋脚梁部に鋼板接着あるいは炭素繊維シート巻き立てを施す事によって、せん断耐力の向上が可能となり、ラーメン橋脚としての耐震性が向上した。
- ②鋼板補強、炭素繊維シート補強とも期待された程の靱性率の向上はなく、梁端部の付着性能の更なる向上あるいは定着法を考慮する必要であると考えられる。
- ③実験で用いた供試体は、塑性ヒンジの形成箇所が柱基部、梁端部であったが、今回の実験に限って言えば梁部の補強による塑性ヒンジ形成箇所・順序等に大きな差異がない事が確認できた。今後RCラーメン橋脚梁部の補強の影響も考慮したせん断耐力算定方法の定量化が必要であると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、埼玉大学材料研究室 牧 剛史助手より貴重なご助言を頂いた。また実験を行うにあたって山田 伝一郎君、杉田 清隆君、沖津 充紀君(現埼玉大学大学院)、山野井 毅君(現大成建設(株))には多大な協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 v. 耐震設計編, 1996.12
- 2) 鈴木 英之・西原 寛・松本 智夫・田畑 卓：炭素繊維シートで補強された T 型断面の梁および柱のせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1183-1188, 1998.6
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針(案), コンクリートライブラリー-95, pp.42-44, 1999.9
- 4) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー-101, pp23-29, 2000.7
- 5) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式, コンクリート技術シリーズ No.12.