

論文 炭素繊維巻立て補強橋脚の変形性能に関する検討

澤田吉孝*1・幸左賢二*2・藤井康男*3・鈴木直人*4

要旨：炭素繊維による既設 RC 橋脚への巻立て補強が多く実施されているが、具体的なじん性率の評価手法については不明確な点が多い。本論では、既往の炭素繊維巻立て補強橋脚の正負交番載荷試験データを収集し、炭素繊維の特性、塑性ヒンジ長、終局状態に着目した変形性能の評価を行った。さらに、実験で得られたじん性率と比較することにより、耐力比を用いた評価式や道路橋示方書式の炭素繊維巻立て橋脚への適用性について検討を行った。

キーワード：じん性率、炭素繊維シート、耐震補強、RC 橋脚

1. はじめに

既設 RC 橋脚の耐震性を向上させるための方策として、RC 巻立て、鋼板巻立て、炭素繊維巻立て等による補強が数多く行われている。なかでも炭素繊維による橋脚補強は用地確保が困難である場合等に有用であり、施工性にも優れているため、採用実績も増加している。炭素繊維による補強の効果については、各機関により種々の実験が行われ耐震性の向上は確認されているが、具体的なじん性率の評価手法については研究段階といえる。炭素繊維についても基本的には帯鉄筋と同様の効果があり、せん断耐力向上および内部コンクリートの拘束効果が期待できる。しかし、帯鉄筋と異なる繊維材料を躯体の外部から接着しており、通常の RC 構造に比べて炭素繊維補強橋脚の破壊メカニズムや、炭素繊維量と終局じん性率の関係など不明確な点が多い。

本論は、既往の炭素繊維巻立て補強橋脚の正負交番載荷試験事例を収集、整理し、以下の点に着目して検討を行ったものである。

- 1)炭素繊維を巻立てた RC 橋脚の終局にいたるメカニズムの評価

- 2)既往のじん性率評価式の炭素繊維巻立て補強橋脚に対する適用性

2. 既往の実験結果の整理

RC 柱に炭素繊維巻立て補強を行い実施された正負交番載荷試験についての実験データを整理することにより、炭素繊維巻立て RC 橋脚の終局挙動、変形性能を評価する。

柱に対する補強では阪神高速道路公団¹⁾²⁾、日本道路公団³⁾⁴⁾、JR⁶⁾⁷⁾等^{8)~14)}において実験が行われている。炭素繊維厚をパラメータとした実験が多く実施されており、基部の補強方法、接着方法等のディテールに着目した実験も行われている。また、梁に対する補強実験も多く行われているようであるが、ここでは橋脚を想定し柱を対象とした実験の整理を行った。

収集した供試体の諸元を図 1 に示す。せん断支間比は道路系機関による実験では $a/d=5.0$ 程度であり、鉄道系では小さくなる傾向がある。炭素繊維の巻立て比はほとんどの供試体では $p_f<0.15\%$ となっている。

変形性能を評価するために、これらの実験結果のじん性率を整理したが、各研究者により降伏点、終局点の定義が異なっている。ここでは、

*1 建設技術研究所 大阪支社 (正会員)

*2 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 Ph.D (正会員)

*3 阪神高速道路公団 工務部 (正会員)

*4 建設技術研究所 大阪支社 工修 (正会員)

各実験で得られた荷重-変位曲線をもとに、統一した基準によりじん性率を再評価した。降伏点は材料定数を補正した上で、計算上の降伏荷重 P_y を求め、曲線上で P_y に達した点を降伏変位 δy とした。終局点は最大荷重後に再び降伏荷重まで低下した点を終局変位 δu として、じん性率は $\mu = \delta u / \delta y$ により定義した。鉄筋の抜け出しによる剛体的な回転変位の影響は考慮していない。

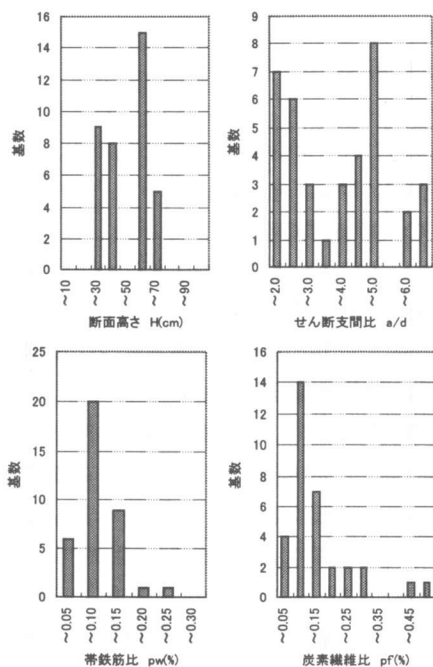


図 1 供試体諸元の分布

3. 炭素繊維巻立て補強橋脚の耐荷力特性

(1) 炭素繊維巻立て補強橋脚の破壊性状

炭素繊維により巻立てを施した供試体では、最大荷重時までは大きな変化は生じず、コンクリートの圧壊により繊維シートがはらみだし、耐力の低下が始まる。その後、主鉄筋の座屈が進行し繊維シートが角部において破断し終局状態となる。図 2 に代表的な炭素繊維巻立て補強供試体の破壊状況を示す。

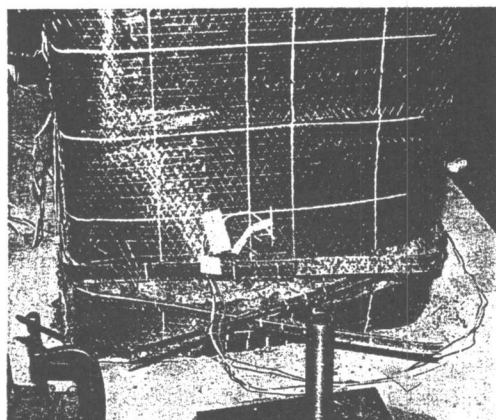


図 2 炭素繊維巻立て補強供試体の破壊状況³⁾

炭素繊維で補強された供試体は鉄筋が座屈し炭素繊維が破断するケースと、鉄筋が座屈するが炭素繊維の破断が生じず終局に至るケースが多く見られた。鋼板巻き立て補強と異なり、拘束量を増加させても、主鉄筋が破断して終局に至る破壊形態はほとんどなかった（基部リング補強等の特殊な場合を除く）。

(2) 破壊メカニズム

炭素繊維と帯鉄筋の特性を図 3 に示す。炭素繊維は鉄筋強度の約 10 倍の強度を有しているため、同じ拘束強度を目標とした場合炭素繊維の巻立て厚さは鋼板の約 10 分の 1 になる。ヤング率が同程度であるから、鋼板の 10 分の 1 の剛性で拘束していることになる。

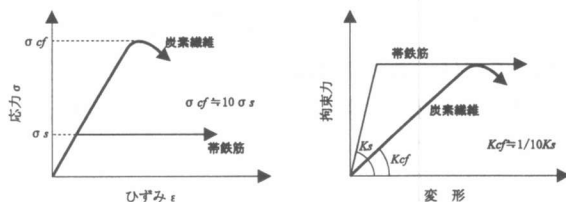


図 3 炭素繊維と帯鉄筋の特性

須田ら¹⁵⁾は軸方向鉄筋の座屈挙動を、端部で回転拘束した弾性床上の梁としてモデル化している(図4)。

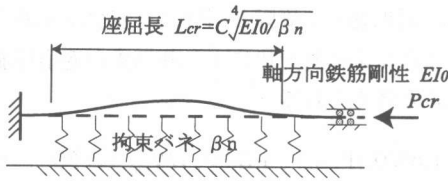


図4 柱筋の弾性座屈モデル

炭素繊維補強供試体の諸元をもとに、座屈長 L_{cr} および座屈強度 P_{cr} を算定した結果を図5に示す。図中の鋼板換算は、炭素繊維と同じ拘束力となる鋼板厚($t' = \sigma_f / \sigma_{sy} \times t_f$)を仮定して座屈長を算定した結果である。炭素繊維の剛性が小さいため、算定される座屈長は大きな数値となり、鋼板に比べ主鉄筋の座屈長が長くなる傾向にあることがわかる。逆に、座屈強度は鋼板巻き立てと異なり、炭素繊維補強量を増加させても大きくならないことがわかる。

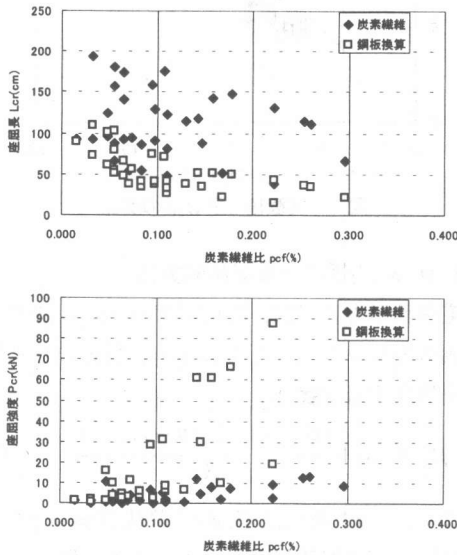


図5 炭素繊維比と鉄筋座屈の関係

このことより、炭素繊維補強は主鉄筋の座屈の開始を抑制する効果はあまりないが、拘束量を増加させても座屈長は短くならず、局所的な座屈による主鉄筋の破断に至る可能性は低いことが示唆される。

図6、図7に文献1)に示される荷重-変位曲線と、荷重前面における帯鉄筋と炭素繊維ひずみの履歴を示す。帯鉄筋ひずみから判断すると、炭素繊維補強供試体は $4\delta y$ 程度で主鉄筋が座屈しており、無補強供試体と差異はない。しかし、それ以降大きな変形性能を有している。軸方向鉄筋の座屈開始後に帯鉄筋のひずみは急増するが、炭素繊維は強度が高いため供試体の急激な耐力低下は生じず、かぶりコンクリートが圧壊したあとも、炭素繊維による拘束が有効に作用し、大きな変形性能を発揮するものと考えられる。

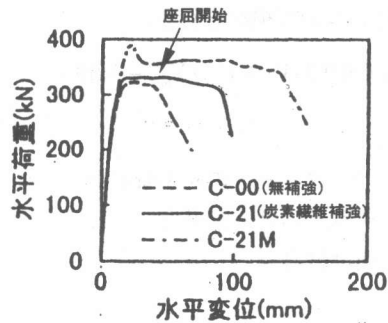


図6 炭素繊維補強の荷重-変位曲線¹⁾に加筆

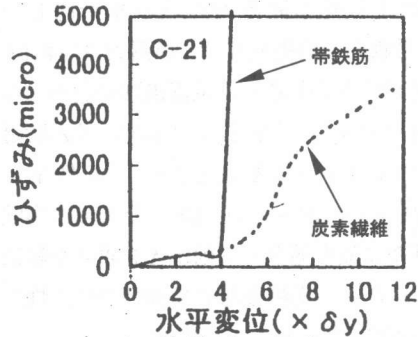


図7 炭素繊維ひずみと帯鉄筋ひずみの関係¹⁾に加筆

4. じん性率評価式の検討

RC 橋脚のじん性率評価法としては、耐力比(曲げ耐力とせん断耐力の比)を用いた実験式と、断面の $M-\phi$ 関係より解析的に求める方法があげられる。筆者らは鋼板巻立て補強橋脚に対して、これらのじん性率評価式の適用性や修正法を検討した¹⁶⁾。ここではその結果をふまえ、炭素繊維巻立て補強橋脚へのじん性率評価式の適用性を検討した。

(1) 耐力比を用いた評価法

曲げ耐力とせん断耐力の比率により、じん性率を評価する方法で、基本的には曲げせん断破壊を対象とした評価法である。しかし既往の研究成果¹⁷⁾によると、式(1)によれば曲げ破壊をする高帯鉄筋比を有する橋脚に対しても一定の有用性が示されている(49体の供試体に対して $\mu_{\text{実験値}}/\mu_{\text{計算値}}$ の平均 1.0, 変動係数 19.8%)。ここでは、炭素繊維巻立て補強橋脚に対する式(1)の適用性について検討を行う。

$$\mu = 1.63(0.3 \cdot V_c + V_s) / V_{mu} + 5.59 \quad (1)$$

ここで、

V_c : コンクリートのせん断耐力

V_s : 帯鉄筋のせん断耐力

V_{mu} : 曲げ耐力

式(1)のうち、高じん性域におけるコンクリートの負担するせん断耐力の低下を考慮した $0.3V_c$ と帯鉄筋の負担するせん断耐力 V_s は RC 橋脚と同じであると考え、炭素繊維が負担するせん断耐力を V_f 、効率を A として、せん断耐力を $0.3V_c + V_s + AV_f$ と表した(じん性率 $\mu = 1.63(0.3V_c + V_s + AV_f) / V_{mu} + 5.59$)。そこで、実験のじん性率に最も適合する効率 A を求めた結果 $A=0.3$ を得た。炭素繊維巻立て橋脚のじん性率評価式は式(2)となる。

式(2)による計算値と実験値の関係を図 8 に

示す。RC 橋脚、鋼板巻立て橋脚(効率 $A=0.8$)の関係を合わせて示す。炭素繊維巻立て橋脚の μ (実験値)/ μ (計算値)の平均は 1.0 であり変動係数は 20.5% である。ばらつきは大きいだが、RC 橋脚、鋼板巻立て橋脚と同様に、安全率を考慮することにより耐力比による評価式が適用可能であると考えられる。

$$\mu = 1.63(0.3V_c + V_s + 0.3V_f) / V_{mu} + 5.59 \quad (2)$$

ここで、 V_f : 炭素繊維の負担するせん断耐力 = $2t_f\sigma_f \cdot d/(1000 \times 1.15)$ (kN), t_f : 炭素繊維厚(mm), σ_f : 炭素繊維の降伏応力度(N/mm²), d : 有効高さ(m)

適用範囲: 炭素繊維比(%) $0.03 < p_f' < 0.7$, 軸方向応力度 $\sigma_n \leq 7.0$ Mpa, せん断支間比 $1.3 < a/d < 6.5$

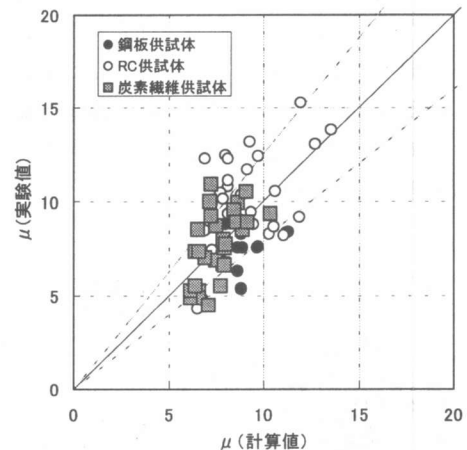


図 8 実験値と計算値の関係

(2) $M-\phi$ 関係による解析的方法

道路橋示方書では、橋脚断面の $M-\phi$ 関係と等価塑性ヒンジ長 (L_p) により、橋脚のじん性率を算定する(式(3))。

$$\mu_u = 1.0 + \frac{(\phi_u - \phi_y)L_p(h - L_p/2)}{\delta_y} \quad (3)$$

ここで、 ϕ_u : 終局曲率, ϕ_y : 降伏曲率, δ_y : 降伏変位, h : 橋脚基部より水平力作用位置までの距離

断面の $M-\phi$ 関係を算定する際に用いるコンクリートの応力-ひずみ曲線は、補強橋脚に対しては、補強材料を帯鉄筋に換算して準用される場合が多い。しかし、帯鉄筋と炭素繊維による特性が異なることから、炭素繊維により巻立てたコンクリートは帯鉄筋により拘束を受ける場合と性状が異なることが知られている。「炭素繊維を用いた耐震補強法研究会」(土木研究センター)では、炭素繊維で横拘束されたコンクリートの一軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線のモデル化を行っている¹⁸⁾。断面の $M-\phi$ 関係は炭素繊維研究会において提案された応力-ひずみ曲線を用い、炭素繊維巻立て補強供試体のじん性率を算定した。

図9に計算値と実験値の関係を示す。炭素繊維巻立て橋脚の μ (実験値)/ μ (計算値)の平均は1.3である。ばらつきは多いが概ね実験値を安全側の評価ができています。

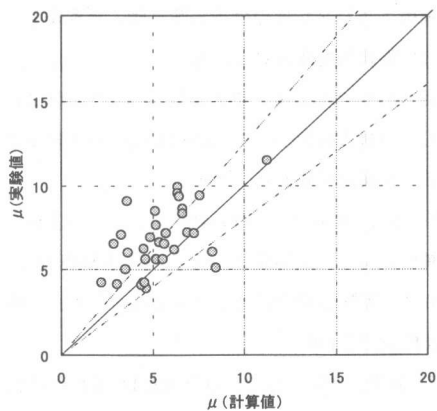


図9 提案式と実験値の関係

前節で示したように、鋼板巻立て補強橋脚のように横拘束量が多い供試体では、鉄筋の座屈が抑制されて塑性ヒンジ長が小さくなる傾向がある。ここでは、炭素繊維補強橋脚への適用性を確認するため実験のじん性率と適合するような等価塑性ヒンジ長を算定した。炭素繊維巻立て橋脚に対して、道路橋示方書に従い ϕu , ϕy ,

δy を計算し、式(3)のもとで実験のじん性率 μ_u に適合する L_p を逆算した。

炭素繊維巻立て橋脚について塑性ヒンジ長を逆算し、等価塑性ヒンジ長 L_p /断面高さ D と換算帯鉄筋比の関係を図10に示す。図中に、文献16)においてRC橋脚供試体および鋼板巻立て補強供試体について同様の検討を行った結果を示す。

RC橋脚供試体および鋼板巻立て補強供試体は帯鉄筋比が大きくなるにつれ、等価塑性ヒンジ長が減少する傾向が見られた。炭素繊維巻立て橋脚の場合も、概ね帯鉄筋比の増加に伴う塑性ヒンジ長の減少は認められるが、高帯鉄筋比にかかわらず塑性ヒンジ長が低下しない場合が多い。

3(2)節において解析的に座屈長を算定した結果、炭素繊維に拘束された橋脚は炭素繊維の剛性が小さく、主鉄筋の座屈が生じやすい特性が見られた。この結果からも炭素繊維による補強を施した橋脚では、鋼板による補強とは異なり、主鉄筋に対する座屈長の抑制効果が小さいことが確認できた。

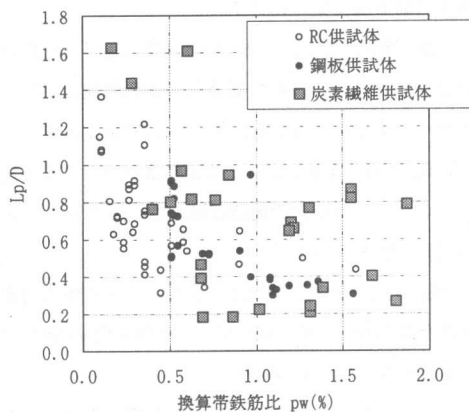


図10 帯鉄筋比と等価塑性ヒンジ長の関係

5. まとめ

炭素繊維巻立て橋脚の変形性能について検討を行った結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 炭素繊維巻立てを行った RC 橋脚はほとんどの場合、主鉄筋の座屈により終局に至る。巻立て補強繊維比が多くなっても、帯鉄筋や鋼板による補強と異なり、主鉄筋の破断に至った例は少ない。
- 2) 炭素繊維による補強の場合、帯鉄筋や鋼板による補強と異なり、主鉄筋の座屈を抑制する効果は少ないが、座屈長が長くなる傾向にある。このため、拘束量を増加させても、主鉄筋の破断に至る可能性は低い。
- 3) 耐力比を用いたじん性率評価式は、せん断耐力に関する炭素繊維の効率を 0.3 とすることにより炭素繊維巻き立て補強橋脚に対しても適用可能である。
- 4) 道路橋示方書に示されるじん性率評価式において、炭素繊維により拘束を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いて算定することで、炭素繊維巻立て補強橋脚のじん性率を安全側に推定できることがわかった。

参考文献

- 1) 佐々木, 袴田, 前川, 星隈: 炭素繊維シートを用いた RC 橋脚補強の実験的検討, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 1997.7.
- 2) 金海, 袴田, 井上, 小林: 耐力補強に着目した炭素繊維シートによる RC 橋脚補強の実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 3) 長田, 大野, 山口, 池田: 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強, コンクリート工学論文集, 第 8 巻第 1 号, 1997.1
- 4) 松田, 村山, 大野, 小島: 炭素繊維により耐震補強された既存 RC 橋脚の靱性率, 土木学会第 47 回年次学術講演会, V-354, 1992.9
- 5) 舟川, 下野, 浅井, 牛島: MMA 樹脂を用いた炭素繊維シート補強による柱部材の耐震補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998
- 6) 森山, 松本, 涌井, 岡野, 大内: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性補強に関する実験, 第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997.1
- 7) 増川, 秋山, 齋藤, 内藤: 既存 RC 橋脚の炭素繊維シートによる曲げおよびせん断補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, 1996
- 8) 小島, 勝俣, 大野: CFRP 巻付け工法で耐震補強された既存 RC 橋脚の靱性能, 土木学会第 49 回年次学術講演会, V-459, 1994.9
- 9) 大野, 大内: 炭素繊維補強による RC 橋脚の耐震補強に関する実験的検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会, V-476, 1996.9
- 10) 藤原, 嶋村, 松村: 炭素繊維シートによる既存 RC 橋脚の耐震補強, 土木学会第 51 回年次学術講演会, V-308, 1996.9
- 11) 柳瀬: 被災後に炭素繊維で補強した柱の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1996
- 12) 渡辺, 閑田, 藤村, 大村: 炭素繊維シートで曲げせん断補強された RC 柱の耐震補強実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1998
- 13) 勝倉, 今井, 竹崎ほか: 炭素繊維シートで補強された RC 柱の構造性能 (その 1 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1996
- 14) 柳下, 千葉, 鳥谷ほか: 既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する実験研究 (その 1 実験概要), (その 2 実験結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 1997
- 15) 須田, 新保, 増川, 村山: 中空断面 PC 柱部材の柱筋座屈特性と中間帯鉄筋の役割について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, 1996
- 16) 鈴木, 幸左, 藤井, 澤田: 鋼板巻立て橋脚の変形性能に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1999
- 17) 幸左, 鈴木: 耐力比を用いた RC 橋脚のじん性率評価式の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.3
- 18) 土木研究センター: 炭素繊維を用いた耐震補強法研究会報告書, 1996.9