BFRPロッドによるRC橋脚の耐震補強効果 に関する実験的研究

呉 智深¹・林 継恩²・黄 璜³・甲斐 紳也⁴・井上 康太⁴

¹正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: zhishen.wu.prof@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)

E-mail: rin_keion@ne-con.co.jp

³学生会員 茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: hhly9527@gmail.com

⁴学生会員 茨城大学理工学研究科都市システム工学専攻 博士前期課程

(〒316-8511茨城県日立市中成沢町4-12-1) E-mail: 12nm804t@hcs.ibaraki.ac.jp

本研究では、RC橋脚の耐震補強における変形性能や復旧性の向上を主な目的とし、RC橋脚表面に掘削した溝に埋め込む工法（NSM工法）により連続バサルト繊維ロッド（BFRPロッド）を導入した合理的な耐震構造を提案する。

本論文は、RC橋脚においてBFRPロッドと埋め込み材、コンクリートとの付着剥離による降伏後の二次剛性を向上し、残留変位を低減することで、変形性能を高め、復旧性を向上したRC橋脚の補修・補強技術に関する実験的検討を行った。また、ファイバーモデルによる解析的検証も試みた。その結果、RC橋脚において、環境にやさしく、耐食性に優れ、かつ高じん性を有するBFRP材を生かした高い耐震補強効果が期待できる。

Key Words : BFRP rods, seismic design, reparability, residual displacement, post-yield stiffness

1. はじめに

1994年米国Northridge地震や1995年の阪神・淡路大震災などでは、鉄筋コンクリート橋脚（RC橋脚）に甚大、かつ多種多様な損傷や破壊が発生した¹⁾。復旧作業においては、大きく損傷した橋脚だけでなく、残留変位が大きいために、耐荷力には問題がないものの、撤去・再構築となった橋脚も数多く存在した²⁾。これを契機に、道路橋示方書³⁾には、1996年の改定以後、橋脚の残留変位に対する規定が設けられた。

この規定を受けて、残留変位を低減させるための構造を開発する研究が行われてきた。池田は、RC橋脚にPC鋼棒を挿入して緊張力を与える橋脚を提案し、静的および疑似動の実験よりその耐震性能を検証している⁴⁾。睦好らも同様な構造に対して載荷実験を行い、非線形履歴モデルを提案している⁵⁾。これらの研究の成果は、プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン⁶⁾としてまとめられている。堺らはRC橋脚にアンボンドPC鋼棒を挿入し、上部構造の死荷重による軸力程度の緊張力を与えた構造を提案し、振動台実験により評価している⁸⁾。また、家村らはアンボンド高強度芯材を有する橋

脚（UBRC 橋脚）を提案している⁹⁾。しかしながら、こうした構造では、最適な設計に関する明確な提案は提示されていない。また、震災後の残留変位の減少を目的として検討された例も少ない。

近年では、迅速な復旧性を備えた構造物の耐震補強技術の中、連続繊維複合材（Fiber reinforced polymers; FRP）の接着補強による耐震性能向上が期待されているが、耐震補強のうち、復旧性や変形制御に関する研究はまだあまり実施されていないのが現状である。

以上より、本研究では、RC橋脚の残留変位を効果的に低減する耐震構造を開発するために、正負交番載荷実験によりFRPで補強したRC橋脚の耐震補強効果の検討を行った。そこで、FRPの一種で、天然素材から作られるかつ高じん性を有する連続バサルト繊維ロッド（Basalt Fiber Reinforced Polymer Rods; BFRPロッド）をRC橋脚の表面に埋め込む（Near Surface Mounted; NSM）工法（NSM-BFRPR工法と呼ぶ）を適用し、二次剛性の向上、残留変位の低減、またBFRPロッドと埋め込み材、コンクリートとの付着剥離による変形性能を高めたRC橋脚の復旧性を考慮した補修・補強技術に関する検討を行った。本論文では、正負交番載荷実験の結果を重点的に報告する。

2. NSM-BFRPR工法の基本コンセプト

現在、RC橋脚の耐震補強工法として、RC巻き立て工法や鋼板巻き立て工法が多用されている⁹⁾。しかしながら、前者は、作業が大掛かりとなり、施工性の面で補強工法の適用が限定される場合がある。また、躯体断面が増加することにより建築の限界や景観に問題となる場合がある。さらに、躯体自重が増加するため基礎の耐震性を再検討する必要がある。後者は、躯体断面および重量の増加が前者と比べて低減されることにより、建築限界や景観などの問題が少なく、基礎の再検討も一般的には不要である。しかし、鋼板の搬入や設置などの作業に重機が必要になり、長期的には腐食などに対する維持管理上の問題があることが指摘されている¹⁰⁾。そこで、炭素繊維シート（CFS）による巻き立て工法が注目され、適用事例が増加している^{11),12),13)}。この工法では、材料費は前述工法により多少割り高になるが、CFSの自重が軽いいため、補強による躯体断面および躯体重量の増加がほとんどない。また施工の際、特殊重機が不要であり、狭い空間での作業が可能のため施工性に優れている。さらに、CFSは耐食性に優れるため、補強材料の腐食の問題がない。しかしながら、CFS巻き立て工法においては、接着界面におけるせん断抵抗の限界が存在するため、FRPシートの高い引張強度が有効に活用されないうちに、早期に補強材の剥離が発生することで、終局耐力の向上効果に限界がある。さらに、火災、衝撃や環境条件など外部影響を受けやすいと指摘されている¹⁴⁾。こうした弱点を克服する目的として、著者らは、RC橋脚の表面に掘削した溝に連続バサルト繊維ロッドを埋め込む補強工法（NSM-BFRPR工法）を提案する^{14),15),16)}。1970年代には従来NSM工法の研究として鉄筋埋め込み補強の研究に取り組まれたが、鉄筋は錆びるほか、塩害や中性化による鉄筋腐食により補強効果が得られなかった¹⁷⁾。また、CFRPを用いたNSM補強では、高い剛性を示し、変形性能を抑えることが見込まれるが、CFRPはFRPの中でも低じん性を有する材料であり、FRP補強構造物が有するじん性向上等の補強効果は期待できない。そのため、本工法では、耐腐食性に優れるかつ高じん性を有するBFRPを選定した。この工法の概念図を図-1に示す。NSM-BFRPR工法では、構造物に補強棒材であるBFRPロッドを直接埋め込むため構造物間の高い付着性能を保持し、かつ耐熱性に弱いBFRPロッドを火災から保護できるなどから、FRP補強材の特徴を十分に発揮すると期待できる。

従来のRC橋脚では大地震の際、鉄筋の有する引張強度だけでは十分な耐力を持たず、鉄筋降伏へと至り大きな残留変位が生じた（図-2）。また、道路橋示方書⁴⁾ではRC橋脚の復元力特性を降伏後の二次剛性が0である

図-1 FRP ロッド埋め込み工法概念図

図-2 FRP ロッド補強橋脚の荷重-変位関係の概念図

図-3 鉄筋降伏後の二次剛性が残留変位に及ぼす影響

完全弾塑性型にモデル化されている。そこに弾性部材であるBFRPロッドを導入することで二次剛性を有する構造を得ることができる。二次剛性の出現により耐力が増

加し、BFRPロッドの弾性挙動から、従来のRC構造に比べ残留変位の低減も期待できる（図-3）。しかし、塑性化によってじん性を有する鉄筋と違い、BFRPロッドは弾性部材であるため、終局時に破断を生じ、構造物本体に急激な負荷を及ぼし、耐力に大きな影響を与える。

そこで、本研究では、BFRPロッドが終局耐力を迎える前に埋め込み材による安定した付着剥離の進展により、RC橋脚の一定の耐力を保持させ、じん性の確保および残留変位の低減を目的として実験的検討を行った。

3. BFRPロッドの付着挙動に関する実験的検討

本研究では、BFRP ロッドと埋込み材の付着性能を評価するため一軸引抜試験（図-4）を行った。用いた接着材は、従来埋込み工法の接着材として用いられているエポキシ樹脂およびパテと比べて流動性が高く短期間で強度を発揮するポリマーセメントの2種類を用いた。

(1) 試験体および試験方法

D6,D10,D12,D14の4つの径を有するロッド（長さ1000mm）の片側端部に鋼管を取り付けた。また、供試体の材料特性を表-1に示す。ロッドの表面形状は、制作時に表面を螺旋状に絞り込んで、全長にローブネジ状を加工している。ロッドを埋め込んだコンクリートは幅400×奥行300×高1800mmの寸法で打設し、中心から3等分間隔にハンマードリルで直径30mm、深さ240mmの孔を掘削した。孔部分はエタノールを用いてコンクリート表面に付着した粉末を除去し、ロッドの埋め込み部分にプライマーを塗布した。その後、接着材にエポキシパテを使用した試験体（以下、E試験体）は、掘削孔にエポキシパテを流し込みロッドを埋め込んだ。一方、接着材にポリマーセメントを用いた試験体（以下、P試験体）は、掘削後プライマーで表面処理をした後、ポリマーセメントを流し込みロッドを埋め込んだ。また、試験体は、油圧ジャッキで一軸引抜試験を行った。

表-1 使用材料

材料		詳細
BFRP ロッド	BD 6	直径：6mm, 付着面積：4580.4mm ² 引張強度：1030MPa, 弾性係数：51GPa
	BD 10	直径：10mm, 付着面積：7696.9mm ² 引張強度：1030MPa, 弾性係数：51GPa
	BD 12	直径：12mm, 付着面積：9274.0mm ² 引張強度：1030MPa, 弾性係数：51GPa
	BD 14	直径：14mm, 付着面積：10863.6mm ² 引張強度：1030MPa, 弾性係数：51GPa
接着 剤	E	引張強度：51.9MPa, 弾性係数：3.43GPa
	P	圧縮強度：30.4MPa, 曲げ強度：7.3MPa

*E：エポキシパテ，P：ポリマーセメント。

(2) 付着性能評価

埋め込み材にエポキシパテを用いたE試験体の破壊形式は、E-D6でロッドの破断、E-D10でロッドの一部が破断して引き抜け、E-D12、E-D14で引き抜けが生じた。ここに、E-D6はロッドの補強効果が表れる以前にロッドの破断が先行したと考えられる。また、E試験体では、表面のコンクリートを巻き上げて引き抜けが生じた。これはロッドが破断したあと、エポキシパテとコンクリートの付着強度が高いため、エポキシパテに表層のコンクリートが大きく付いた形での破壊によるものと考えられる。一方で、P試験体は、全ての試験体でロッドとセメント間で引き抜けが生じた。また、D12試験体の荷重－すべり量の関係を図-5に示す。エポキシパテ接着試験は高荷重で引き抜けが生じ、引き抜け後に急激な荷重低下を示した。一方、ポリマーセメントは、パテと比べて低荷重で引き抜けが生じ、引き抜け後に緩やかな荷重低下を示した。

最大軸応力 σ_{max} とロッド径および最大付着応力 τ_{max} とロッド径の関係をそれぞれ図-6、図-7に示す。また、最大軸応力および最大付着応力は式(1)、(2)でそれぞれ評価する。

図-4 引き抜き試験の概要

図-5 コンクリート埋込み引抜試験の結果(D12)

図-6 ロッド径と応力の関係

図-7 ロッド径と応力の関係

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max}}{(D/2)^2 \pi} \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{DL\pi} \quad (2)$$

ここに、

$P_{\max}$: 最大荷重 (kN)

D : ロッド径 (mm)

L : ロッドの埋込み深さ (mm)

E 試験体および P 試験体の両試験体において、ロッド径 D の増大により、最大荷重は増加し、最大軸応力は減少する傾向を示した。一方、最大付着応力は、引き抜けが生じた E 試験体および P 試験体でそれぞれ 13%、7% 以内で同程度の値を示した。

そのため、本試験で用いたロッド径 6~14mm では付着強度が一定とし、引き抜けが生じた試験体の最大付着応力の平均値を付着応力 τ_b として評価する。エポキシパテおよびポリマーセメントの付着強度は、それぞれ 10.6 MPa、3.0 MPa であり、エポキシパテはポリマーセメントに比べて 3.7 倍の付着強度が得られた。

したがって、従来の接着材であるエポキシパテでは、

本工法で期待する安定した付着剥離を生じるのは難しく、急激な剥離破壊またはロッド破断による脆性破壊が危惧される。一方、ポリマーセメントは、エポキシパテと比べて高いじん性を示すが、付着力が小さく、早期付着破壊が生じる。そのため、本工法では、まずはエポキシパテを溝の半分程度まで入れ、その後 BFRP ロッドを挟むようにポリマーセメントで定着させる（概念図は図-9）。このように両者を併用することで高付着力かつ高じん性を備えた接着工法を提案する。

(3) ロッド径と付着性能

付着破壊を生じる際のロッドの軸応力 σ_f を式(3)として評価すると、 σ_f がロッドの破断応力 1030 MPa を示すロッド径（以下、繊維径と称す。）を境として破壊形式が異なると考えられる。

$$\sigma_f = \frac{4L}{D} \tau_b \quad (3)$$

ここに、

L : ロッドの埋込み深さ (mm)

τ_b : 付着強度 (kN/mm²)

D : ロッド径 (mm)

エポキシパテおよびポリマーセメントの繊維径は、それぞれ 9.5 mm、2.9 mm であった。繊維径付近のロッド径では、ロッドの破断と引き抜けの両破壊形式を示し、ロッド径 D が繊維径より小さい場合、ロッドの破壊が先行する。一方繊維径より大きなロッド径では、付着破壊が生じると考えられる。また、付着破壊を示す場合は、ロッド径が増大するとロッドの軸応力は低い段階で付着破壊を示す。従って、BFRP ロッドの強度を十分に発揮し、かつ破断以前に引き抜けが生じる最適なロッド径は D12、D14 であると考えられる。

4. NSM-BFRPR 橋脚の正負交番実験の供試体概要

著者らの既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾を踏まえ、供試体は、現行の耐震設計基準に基づく構造を想定した曲げ破壊型 RC1 シリーズと、阪神大震災以前の耐震設計基準に基づく構造を想定した曲げせん断破壊型 RC2 シリーズの 2 種類を選定した。また、コンクリートと鉄筋の材料特性を表-2 に、供試体の諸元や配筋要領を表-3 および図-8 にそれぞれ示す。

表-2 材料特性

材料	詳細
コンクリート	圧縮強度 : 30 MPa 弾性係数 : 28 GPa
軸方向鉄筋 (SD345D13)	引張強度 : 540.7 MPa, 降伏強度 : 348.9 MPa, 弾性係数 : 202 GPa

表-3 供試体の諸元

供試体名	軸応力 (MPa)	帯鉄筋	軸方向鉄筋	BFRPロッド	備考
RC1	1	D6@50	6×D13	-	無補強
RC1'	1	D6@50	6×D13	-	無補強 (塑性域まで破壊)
RC1'-RE1-B1	1	D6@50	6×D13	4×D6	修復+補強 (1回目)
RC1'-RE2-B1	1	D6@50	6×D13	4×D6	修復+補強 (2回目)
RC1'-N-B1	1	D6@50	6×D13	4×D6	ウエットボンディング
RC2	1	D6@100	6×D13	-	無補強
RC2-D6-E	1	D6@100	6×D13	4×D6	パテによる全面接着
RC2-D6-E'	1	D6@100	6×D13	4×D6	パテによる部分接着
RC2-D6-EP	1	D6@100	6×D13	4×D6	パテ+セメント+巻き立て
RC2-D10-E	1	D6@100	6×D13	2×D10	パテ+巻き立て
RC2-D10-EP	1	D6@100	6×D13	2×D10	パテ+セメント+巻き立て
RC2-D12-E	1	D6@100	6×D13	2×D12	パテ+巻き立て
RC2-D12-EP	1	D6@100	6×D13	2×D12	パテ+セメント+巻き立て
RC2-D14-E	1	D6@100	6×D13	2×D14	パテ+巻き立て
RC2-D14-EP	1	D6@100	6×D13	2×D14	パテ+セメント+巻き立て

パテ：エポキシパテ セメント：ポリマーセメント

図-8 供試体の概要図

(1) 曲げ破壊型RC1シリーズ

現行の耐震設計基準に基づいた構造物を想定したRC1シリーズでは、損傷後の復旧性および、新設時の補強効果についての検討を行う。

無補強の供試体RC1での最終変形 $7\delta_y$ 「第4.(3)節で後述する軸方向鉄筋の降伏変位 δ_y (約8.5 mm) の7倍、すなわち約59.5mm」とするのに対して、RC1'はその1/3程

度、すなわち降伏変位 $2.5\delta_y$ (約21.25mm) まで繰り返し載荷まで損傷を与えた後、ひび割れの進行したかぶり部のコンクリートを除去し、ポリマーセメントで補修を施し、さらにBFRP ロッド埋め込み工法を適用した柱がRC1'-RE1-B1である。また、RC1'-RE1-B1を試験した後、コンクリートのかぶり部を除去し再度、ポリマーセメントとBFRP ロッドの埋め込み工法により補修・補強した

ものがRC1'-RE2-B1である。埋め込み材にはそれぞれエポキシパテを用いる。

また、新設構造物を想定し、コンクリート打設時にあらかじめBFRP ロッドを埋設させたものがRC1-N-B1である。これは、FRPとコンクリート間の付着を確保するために、湿潤面への接着を可能にするウェットボンディングを用いる。ウェットボンディングとは、FRPの表面に事前にエポキシパテを塗布したうえで硬化前にフレッシュコンクリートを打設する技術である。

(2) 曲げせん断破壊型RC2シリーズ

阪神大震災以前に建設され、現在も供用している曲げせん断破壊型の構造物を想定するRC2シリーズに対して埋め込み工法による補強効果の検討を行う。そのなか、RC2-D6-Eはエポキシパテによる全面接着(以下、E接着)を行う。また、RC2-D6-E'は付着長の低減により付着力の低下を期待し設定する。

RC2-D10-E, RC2-D12-E, RC2-D14-EはBFRPロッドをE接着で埋設した後、ロッドの外側に帯鉄筋配置工法のかわりにBFRPシート巻き立て工法を行う。これはせん断補強とBFRPロッドがエポキシパテとポリマーセメントの界面で剥離した場合にポリマーセメントのひび割れによりBFRPロッドの飛び出しを防ぎ、耐力低下を遅延する役割を期待して行ったものである。さらに、RC2-D10-EP, RC2-D12-EP, RC2-D14-EPでは、安定した付着剥離の進展を期待し、エポキシパテおよびポリマーセメントを併用接着する(図-9)。ここに付着強度の高いエポキシパテと、付着強度の低いポリマーセメントを併用することで、ロッドを破断させることなく、接着材の付着破壊を促すために併用接着とした。BFRPロッドを溝の半分までエポキシパテで接着した後、BFRPロッドを挟むようにポリマーセメントで定着する(以下、EP接着)。さらにBFRPロッドの定着後、BFRPシートの巻き立て工法を行う。BFRPシートの巻き立てにより、BFRPロッドの飛び出しを抑制することで、エポキシパテとポリマーセメントで定着させ、ロッド界面での付着剥離を生じさせる目的とする。

(3) 正負交番載荷実験

実験方法は、図-10に示すように、構造部材の非線形域の破壊挙動を含む挙動特性を把握するための一般的な実験方法とされる静的正負交番載荷試験¹⁹⁾を採用する。載荷方法は、軸方向鉄筋の降伏変位(約8.5mm)を基準値としてその整数倍で3回繰り返し載荷方法(図-11)であり、油圧ジャッキによる変位制御載荷を行う。軸力は、既設RC橋脚構造物が上部構造から受ける死荷重に相当する1MPaを常時載荷する。終局は最大荷重を迎えた後、最大荷重の80%以下となった時点とする。

5. 曲げ破壊型RC1シリーズの実験結果

(1) P-δ履歴特性

各供試体の載荷点位置における水平荷重-水平変位関係(P-δ関係)、鉄筋およびBFRPロッドのひずみ分布、残留変位の関係を図-12に示す。図-12(a), (b), (c)は、δの計測間隔を1/2 δ_yに、さらに(d)は二次剛性を精度よく計測するために1/4 δ_yにした。載荷点における荷重-変位関係(図-12(g))から、RC1'-RE1-B1およびRC1'-RE2-B1は、鉄筋降伏後の二次剛性が確認できる。また、RC1'-RE2-B1は二度の塑性域までの損傷に対してもRC1と比べ補強効果が確認できる。しかし、RC1-N-B1はRC1と同程度の挙動を示し、載荷点変位42.5 mm時以降に荷重の低下が見られる。

また、図-12(e), (f)をみると、ひずみ分布よりBFRPロッドは性能を発揮しているものの、RC1の基部における鉄筋ひずみの差をみてもほとんど変化がない。これはコンクリートの圧縮強度の違いによるもので、RC1-N-B1の曲げ耐力の理論値が30.40kNに対して最大耐力36.9kNと確認されることからBFRPによる二次剛性による影響であるといえる。

(2) 残留変位

図-12(h)は、各供試体の載荷変位と残留変位を示したものである。ここでは、各ステップにおいて荷重除荷時の載荷点変位とする。補強供試体では、無補強の供試体RC1と比べて残留変位が低減された。これはRC構造が除荷に伴いBFRPロッドの弾性挙動が現れたためであると考えられる。

(3) エネルギー吸収能

図-12(i)は供試体の荷重-変位履歴ループの面積より求めた累積吸収エネルギーのを示したものである。無補強柱RC1と補強柱の両者にほとんど差がみられない。

図-9 併用接着の概念図

図-10 静的正負交番荷試験イメージ図

図-11 荷重サイクル

(a) 荷重-変位履歴関係

(b) 荷重-変位履歴関係

(c) 荷重-変位履歴関係

(d) 荷重-変位履歴関係

(e) BFRP ロッドひずみ

(f) RC1 と RC1-N-B1 鉄筋ひずみ比較

(g) 包絡線

(h) 残留変位と載荷点変位の関係

(i) 累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係

図-12 RC1 シリーズの実験結果

以上より、履歴面積の影響は少なく、剛性のみを変化させたと考えられる。

6. 曲げせん断破壊型RC2シリーズの実験結果

(1) 履歴特性および損傷状況

供試体の載荷点位置における水平荷重-水平変位関係（P- δ 関係）を図-13に示す。また、無補強柱試験体 RC2 は水平変位 21.25 mm で最大荷重 36.5 kN を示し、その後、最大荷重の低下がみられた。これは、せん断破壊による耐力低下であると考えられる。また、各供試体の破壊形式は、RC2-D6-E、RC2-D6-E'はともに基部から水平変位 100 mm 程度の塑性ヒンジを形成した箇所において BFRP ロッドが破断し、急激な荷重低下を示した。一方、RC2-D6-EP は基部で BFRP ロッドが破断したが、RC2-D6-E、RC2-D6-E'に比べ緩やかな荷重低下を示した。

RC2-D12-E の正側では、載荷点変位 59.5 mm で付着切

れが生じた。一方、負側では、載荷点変位 38.25 mm において柱側面部からロッドが飛び出し、21%の耐力低下を示した。その飛び出しは供試体の引張側で進行するひび割れにより、コンクリートとエポキシパテ・コンクリートとポリマーセメントの付着が切れ、引張り発生時に埋め込んだ供試体側部からロッドが飛び出すものである。よって、引張に対してコンクリートとエポキシパテ・ポリマーセメントとの付着剥離により、ロッドの性能を発揮できない状況となる。それに対して、RC2-D12-EP の正側では、急激な耐力低下が現れずに終局を向かえた。一方、負側では、載荷点水平変位 20 mm において柱側面部からロッドが飛びだし、19%の耐力低下を示した。また、RC2-D14-E の正側では、載荷点変位 21.25 mm において柱側面部からロッドが飛び出し、27.6%荷重低下を示し、試験終了時は、正負両側で、鉄筋が座屈した。RC2-D14-EP では、正負両側で安定した付着すべりを示し、試験終了時は負側で鉄筋が座屈した。

図-13 RC2シリーズの実験結果

埋込み材による補強効果の差異として、RC2-D12-E、RC2-D14-Eでは、ロッド拔出しにより急激な耐力低下を示し、一方、RC2-D12-EP、RC2-D14-EPでは、E接着試験体と比べて、先にロッドとポリマーセメント間の付着が切れ、その後、緩やかな荷重低下を示した。そこでRC2-D12-E、RC2-D12-EPを比較すると、両実験の負側で、それぞれ載荷点の水平変位が38.25 mm、20 mmで柱側面部からロッドの拔出しが生じた。これは、ポリマーセメントは、エポキシパテと比べて付着強度および材料強度が低いため、ポリマーセメントが先行して破壊したことにより、エポキシパテとコンクリートの接着面積が小さいRC2-D12-EP実験体で先に付着切れが生じてロッドが拔出したと考えられる。

ロッド径による補強効果の差異として、D12-E、D14-Eを比較すると、両実験体で、それぞれ載荷点の水平変位が38.25 mm、21.25 mmでそれぞれロッドの拔出しが生じた。これは、前章で示した通り、ロッド径が大きくなることで、低応力で付着破壊が生じるため、RC2-D14-Eで先にロッドの拔出しが生じたと考えられる。また、RC2-D12-EP、D14-EPにおいても同様にRC2-D14-EPで先に付着切れを生じたことにより、付着すべりによる荷重低下を示したと考えられる。

(2) じん性の評価

じん性の結果を図-14に示す。本実験では、供試体のじん性を最大荷重を迎えた後の最大荷重の80%の荷重を示した時点の変形を鉄筋降伏時の変形で除した値として式(4)によりそれぞれ正負の平均で評価した。

ロッド径6 mmのBFRPロッドで補強したRC2-D6-EおよびRC2-D6-EPでは、無補強供試体RC2と同等のじん性を示した。これは、補強ロッド径が小さいため、BFRPロッドの補強効果が表れる以前にロッドの破断が先行したためである。RC2-D10-E、RC2-D12-E、RC2-D14-EのE接着供試体では、ロッド径の増大でじん性は低下傾向を示した。これは、ロッド径が大きくなるにつれて引き抜けが早い段階で生じるためである。また、RC2-D10-EP、RC2-D14-EPのEP接着供試体では、ポリマーセメントとBFRPロッド間の付着切れが生じ、ロッドの応力を低減したため同補強ロッド径のE接着供試体と比べて高いじん性を発揮した。

また、RC2-D12-EPは、早期に柱側面部からロッドが飛び出したことにより、低いじん性を示した。これは、ポリマーセメントの付着切れにより、BFRPロッドと柱部の付着面積が減少したため、ロッドの飛び出しが生じたものであると考えられる。

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (4)$$

ここに、

δ_y ：鉄筋降伏時の載荷点水平変位

δ_u ：最大荷重8割を示した時点の載荷点水平変位

(3) 二次剛性の評価

二次剛性の結果を図-15に示す。二次剛性 k_2 とは、鉄筋降伏後の構造物の剛性を示すものであり、本実験では、二次剛性 k_2 を鉄筋降伏時と最大荷重時の傾きとして式(5)によりそれぞれ正負の平均で評価した。また、計算値は、BFRPロッドと柱間の付着を考慮せず、応力ブロックを用いた断面計算により算出した値である¹⁹⁾。

BFRPロッドは鉄筋の1/4倍程度の低弾性を有する材料であり、鉄筋降伏後、BFRPロッドが応力を負担するため構造物に二次剛性が出現すると考えられる。本実験では、無補強橋脚RC2に比べて本工法を適用した全て供試体で高い二次剛性が発現した。二次剛性は補強ロッド径の増大で高い効果を発揮したため、最大荷重も増加傾向を示した。また、EP接着供試体では、ポリマーセメントの付着すべりが早く生じたため、二次剛性がE実験体と比べて二次剛性が減少したと考えられる。

$$k_2 = \frac{P_m - P_y}{\delta_m - \delta_y} \quad (5)$$

ここに、

P_y ：断面計算で算出した降伏荷重 (kN)

P_m ：最大荷重 (kN)

δ_y ：鉄筋降伏時の水平変位 (mm)

δ_m ：最大荷重時の水平変位 (mm)

(4) 残留傾斜角

載荷時の傾斜角と残留傾斜角の関係を図-16 および図-17にそれぞれ示す。載荷時の傾斜角 Δ/H は、載荷変位 Δ を橋脚高さ H で除した値で評価した。

図-14 じん性

図-15 二次剛性

図-16 残留傾斜角 (E接着)

図-17 残留傾斜角 (EP接着)

また、残留傾斜角 Δ_r / H は、残留変位 Δ_r を橋脚高さ H で除した値で評価した。阪神・淡路大震災では、橋脚天端の残留傾斜角が $1/60$ を橋脚の撤去および再構築の目安となった。現在では、残留傾斜角 1% を許容残留傾斜角と定義されている⁴⁾。本工法による補強橋脚は、無補強橋脚に比べて、許容残留傾斜範囲内において E, EP 接着供試体でそれぞれ最大 26% 、 18% の残留変位の減少を示した。これは、供試体に二次剛性が出現したことにより最大荷重が増加したことで、残留変位が低減したと考えられる。さらに BFRP ロッドは低弾性補強棒材であるため、蓄積した応力が除荷されたことで残留変位低減につながったと考えられる。

接着工法の差異として、E接着供試体 RC2-D6-E, RC2-D10-E, RC2-D12-E では、ロッド径の増大に伴い、高い残留変位の低減効果を示したが、D14-E では、早期付着

切れのため許容残留傾斜角内の変形性能が低減した。それは、補強ロッドによる効果が十分に発揮する以前の段階でロッドと接着材間で付着剥離が生じてしまうと、それ以上の補強効果がえられなくなることが示唆される。

7. ファイバーモデルによる性能再現解析の検討

本章では、NSM-BFRP工法の解析的評価について示す。本論文では、非線形構造解析手法によるファイバー解析モデルを用いている。

(1) 解析概要

ファイバー解析モデルは、梁理論に基づくフレーム解析の手法である。その原理は、断面を微小要素に分割し、内力と外力のつり合い式から断面のひずみ分布を求め、断面剛性を算定するものである。このとき、断面内のひずみ分布を直線分布と仮定し、微小要素ごとの応力度は、各微小要素のコンクリート、鉄筋等の材料構成則及びその時点までの各微小要素のひずみ履歴に応じて決定される。

(2) 材料の構成則

コンクリートの構成則は道路橋示方書²⁾に準拠する(図-18)。かぶり部とコア部を別々にモデル化し、それぞれの横拘束効果に応じた構成則を定義する。鉄筋の構成則はバイリニアでモデル化し(図-19(a))、BFRP ロッドは破断に達するまで弾性部材にモデル化する(図-19(b))。なお、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度および弾性係数、BFRP ロッドの破断強度および弾性係数については材料試験の実測値を使用し、それ以外の諸元についてはコンクリート標準示方書²⁾より算出する(表-2)。

(3) 解析モデル

本解析モデルの概要を図-20に示す。載荷方法は、実験と同様のサイクルで変位制御とする。ファイバーモデルは、平面保持の仮定のもと、物性の一軸特性で評価す

図-18 コンクリートの応力-ひずみ関係

図-19 鉄筋の応力-ひずみ関係

図-20 解析モデルの概要図

図-21 トリリニア型M-θモデル

るため、材料間の付着評価は不可能である。そのため、基部に付着すべりをモデル化した非線形回転バネを直列結合で導入し、それぞれのバネ値は実験で得られたP-δ関係の初期勾配が解析結果と一致するように設定した²⁾。付着滑りモデルは、鉄筋降伏前の第1段階、二次剛性を示し付着滑りが顕著に表れない第2段階、付着すべりによる変形が著しく表れる第3段階としてトリリニア（図-21）で評価した。コンクリート標準示方書²⁰⁾では、鉄筋の抜け出し量を鉄筋径の指数関数で評価している。そのため、本試験においても回転バネのパラメータは、D10~D14の実験体（RC2-D10-E, RC2-D10-EP, RC2-D12-E, RC2-D12-EP, RC2-D14-E, RC2-D14-EP）6体の結果より指数近似で算出した。

$$K_1 = 19731e^{0.1444D} \quad (6)$$

$$K_2 = \begin{cases} 135e^{0.389D} & (\text{E 接着}) \\ 11e^{0.5443D} & (\text{EP 接着}) \end{cases} \quad (7)$$

$$K_3 = \begin{cases} 8e^{0.4005D} & (\text{E 接着}) \\ 0 & (\text{EP 接着}) \end{cases} \quad (8)$$

$$M_y = \begin{cases} 1.2431e^{-0.026D} M_{\max} \\ 1.1826e^{-0.028D} M_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

ここに、

K_1, K_2, K_3 : 図-21 に示すばね係数 (kN・mm)

$M_{\max}$: ロッド破断時の曲げモーメント (kN・m)

M_y : 鉄筋降伏時の曲げモーメント (kN・m)

(4) 比較

実測値および解析値の荷重-変位関係を図-22、図-23 にそれぞれ示す。本工法適用供試体では、D12, D14において鉄筋降伏時で天端の水平変位でそれぞれ36%, 30%が抜け出しによる変位であったことより、鉄筋およびBFRPロッドの抜け出しを十分に評価する必要がある。

実験結果より算出した抜け出し量を回転ばねで再現した解析では、D12-E, D12-EP, D14-E, D14-EP（表-1のRC2-D12-E, RC2-D12-EP, RC2-D14-E, RC2-D14-EPに相当）でそれぞれ最大荷重誤差が7.5, 7.5, 8.8, 9.9%であった。回転バネの傾きを示すばね係数 K は、各段階で増加傾向を示すことより、破壊が進むにつれ、すべり量が増加することを示している。また、すべての段階でロッド径の増大でばね係数 K が大きくなる傾向を示していることから、付着すべり量はロッド径の増大で減少傾向にあると考えられる。また、すべての解析結果で、実験の最大荷重より小さな値を示した。

本工法では、鉄筋降伏荷重および終局荷重は、補強ロッド径が大きくなるにつれ、増加傾向を示し、D14で最大鉄筋降伏荷重で4%, 終局荷重で35%の増加がみられた。本工法は、ひび割れ抑制効果は見込めず、また、BFRPは鉄筋の弾性係数の1/4倍程度と低弾性を有する材料であることから、鉄筋降伏以前の段階では構造物の剛性向上および鉄筋の応力負担効果は低く、補強効果が見込めない。一方、鉄筋降伏以降は、BFRPロッドが応力を十分に受け持つことで、二次剛性が発揮し、最大荷重およびじん性の向上につながった。

図-22 実測値と解析値の比較(D12)

図-23 実測値と解析値の比較(D14)

8. 結論

本研究では、RC橋脚の耐力およびじん性の向上を目的とし、BFRPロッド埋め込み工法（NSM-BFRPR工法）を導入した構造を提案した。また、RC橋脚の耐震補強に対して、BFRP材が高性能な新素材としての有用性は確認された。本工法を適用したRC橋脚の正負交番載荷実験により得られた知見を以下に示す。

(1) 曲げ破壊型RC1シリーズ供試体および曲げせん断破壊型RC2シリーズ供試体は、ともにBFRPロッドによる埋め込み工法（NSM-BFRPR工法）を導入することでRC橋脚に二次剛性の発揮による耐力向上を示した。

(2) RC1シリーズでは、鉄筋の降伏後、塑性域まで損傷を与えても、鉄筋の座屈が生じていなければ、従来のRC橋脚に比べて補強効果を得ることを示した。

(3) 本工法では、鉄筋降伏後にBFRPロッドの材料特性により二次剛性が発揮することで最大荷重が増加し、残留変位の低減を確認した。

(4) BFRPロッドの埋設にエポキシパテおよびポリマーセメントを併用することで、ロッドと柱間の付着を安定して切らせることが可能となり、構造物のじん性を向上した。

(5) 解析では、得られた実験結果より付着すべりモデルを作成し、4供試体で最大荷重誤差10%内で再現することができた。なお、本工法では、柱基部および柱側面部からの付着剥離が進展するため、今後両者の付着剥離に着目する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、茨城大学工学部都市システム工学科構造・地震工学研究室の関係各位からご協力をいただいた。また、猪股大祐君および山田優樹君より載荷実験およびデータ整理の協力を得たことをここに記して謝意を表する。

参考文献

1) (財) 阪神高速道路管理技術センター（編）：大震災から学ぶ都市高速道路における地震対策－震災復旧から耐

震補強，防災計画まで－，電気書院，2005年11月。

- 2) Kawashima, K.: Seismic design and retrofit of bridges, *Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, No.2828, Auckland, New Zealand, 2000.
- 3) 土木学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会（編）：阪神・淡路大震災調査報告土木構造物の応急復旧，補修，補強，丸善，1999.
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.
- 5) Ikeda, S.: Seismic behavior of reinforced concrete columns and improvement by vertical prestressing, *Challenges for Concrete in the Next Millennium, Proc. Of XIIIth FIP Congress*, Vol. 1, pp.879-884, Balkema Rotterdam, Netherlands, 1998.
- 6) 睦好宏史, Wael A. Zatar, 牧剛史：プレストレスを導入した鉄筋コンクリート橋脚の耐震性状，土木学会論文集，No.669/V-50, pp.27-38, 2001.
- 7) (社) プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン，1999.
- 8) 堀淳一, Stephen A. MAHIN, Hyungil JEONG：振動台加震実験による残留変位低減型RC橋脚の地震応答特性の評価，土木学会論文集A, Vol.62 No.4, pp.713-728, 2006.10.
- 9) 家村浩和, 高橋良和, 曾我部直樹：アンボンド芯材を活用した高耐震性能RC構造の開発，土木学会論文集，No.710/I-60, pp.283-296, 2002.
- 10) 細谷学：炭素繊維シートを用いた鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強設計法に関する研究，博士論文，東京工業大学，2002.
- 11) (社) 日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料，平成9年8月。
- 12) 連続繊維補強コンクリート研究委員会：既続繊維補強コンクリート研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.96-103, 1997.7.
- 13) 連続繊維補強コンクリート研究委員会：既続繊維補強コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），日本コンクリート工学協会，pp.47-51, 1998.5.
- 14) 呉智深, 岩下健太郎, 孫曉荷, 小林朗：FRP ケーブルの埋め込み緊張補強技術の確立，構造工学論文集，Vol.56A, pp.630-643, 2010.3.
- 15) Fahmy, M.F.M., Wu, Z.S., Wu, G.: Post-earthquake recoverability of existing RC bridge piers with FRP composites. *Construction and Building Material* 24, pp.980-998, 2010.
- 16) Fahmy, M.F.M.: Enhancing recoverability and controllability of reinforced concrete bridge frame columns using FRP composites, 博士論文，茨城大学，2010.
- 17) 猪八重由之, 武若耕司：各種FRPロッドの耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, 1997.7.
- 18) 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ耐震チーム：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライ

- ン（案）（橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法），土木研究所資料，第4023号，2006年8月。
- 19) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計—限界状態設計法と性能設計法—，pp.93-96，丸善株式会社，2004。
- 20) 社団法人土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp.84-85，丸善株式会社，2007。
- 21) 右近八郎，幸左賢二，井上晋，吉澤義夫：RC標準橋脚のファイバーモデルによる交番載荷実験シミュレーション解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，1995。

(2017.6.23 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIERS STRENGTHENED WITH NEAR SURFACE MOUNTED BFRP RODS

Zhishen WU, Jien LIN, Huang HUANG, Shinya KAI and Kouta INOUE

Resilience and recoverability play important roles in controlling the structural performance of reinforced concrete (RC) structures after seismic actions. The main objective of this paper was to propose a new earthquake resistant method using a near surface mounted basalt fiber reinforced polymer rods (BFRPR-NSM) to minimize residual displacements, and to execute a fiber model based simulation evaluating the structural performance of the proposed BFRPR-NSM method reinforced RC columns. Based on the experimental results on both existing RC bridge columns and newly constructed columns, the beneficial effects of the BFRPR-NSM method were discussed. Moreover, the analytical studies on post-yield stiffness and residual deformations of BFRPR-NSM reinforced columns were conducted. Finally, suitable FRP design assumptions and concepts certifying the reality of post-yield stiffness are given.