

論文 FRP により補強された RC 梁の曲げ実験

松尾 庄二*¹・松岡 茂*²・益田 彰久*¹・力 健二郎*³

要旨：コンクリート構造物の補強工法としてFRP（繊維補強プラスチック）版を用いることに着目した。本論文においてはFRP版により補強されたRC梁の曲げ試験結果に基づき、機械的接合方式、吹付け方式および巻付け方式の各施工方式による補強法のせん断破壊に対する有効性を確認した。また、相互の比較により機械的接合方式に対する後二者の優位性を併せて確認した。

キーワード：FRP、せん断補強

1. はじめに

阪神・淡路大震災により多くのコンクリート構造物が大きな被害を蒙った。なかでも、鉄道や高速道路の高架橋橋脚におけるせん断破壊が多く報告されている[1]。この被害例に呼応して既存のコンクリート橋脚、特に最新の基準以前に施工された橋脚については地震時に対する安全性の見直しが行われ、補強工事が現在実施されている。代表的なコンクリート構造物補強工法としては、コンクリート巻立て工法や鋼板巻き工法[2]などがあり、また最近ではカーボン繊維等の新素材繊維を用いたFRP（繊維補強プラスチック）接着工法[3, 4]が注目されている。本研究においては、数種の施工方式によるFRP版で補強されたRC梁の曲げ実験を行い、方式の違いによるせん断補強効果の差異を確認した。

2. 実験概要

2. 1 供試体諸元

表-1に供試体の諸元、図-1に供試体の基本寸法および配筋図を示す。供試体は、断面寸法200mm×400mm、長さ2300mmのRC梁をFRP版（いずれもポリプロピレン樹脂にガラス繊維を重量比で40%混入

表-1 供試体諸元

種別	施工方式	補強厚	圧縮強度
RC	無補強	—	24.5 MPa
FRP 1	機械的接合方式	5 mm	22.1 MPa
FRP 2	吹付け方式	6 mm	19.6 MPa
FRP 3	巻付け方式	6 mm	23.9 MPa

したものである）で補強したものを用いた。FRP 1はL形のFRP版2枚を隅角部で同材質の接合材により接合したもので、本実験では型枠としてコンクリートを打設し供試体を作製した。FRP 2は樹脂とガラス繊維をノズル先端で混合しつつ試験体に吹き付ける方法で、またFRP 3は試験体に吹き付けた樹脂上から長繊維シートを巻き付けた後樹脂で表面仕上げする方法で供試体の作製を行った。本実験ではFRP 2、FRP 3ともコンクリート打設後1週間の水中養生を経たRC梁に対して上記の補強工法を施した。なお、FRP 1の内面には高さ4mm、幅10mmのリブを周方向に30mm間隔で配置しコンクリートとの付着性を高めた。図-2に供試体断面図を示す。

* 1 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所研究第二部（正会員）

* 2 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所研究第二部主任研究員（正会員）

* 3 (株)日本製鋼所研究開発本部広島研究所

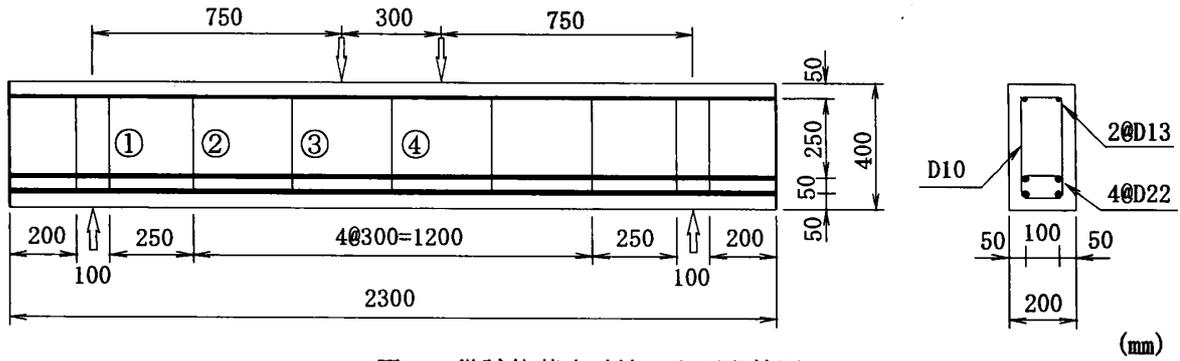


図-1 供試体基本寸法および配筋図

2. 2 使用材料

使用した鉄筋は、引張鉄筋がD22 (SD345)、圧縮鉄筋がD13 (SD295) およびせん断補強鉄筋がD10 (SD295) であり、コンクリートは24-12-20 Nのレディーミクストコンクリートを用いた。また、FRPは前記のとおりポリプロピレン樹脂にガラス繊維を重量比で40%混入したものである。複合体の物性値を表-2に示す。

2. 3 実験方法

実験方法は、荷重スパン300mm、せん断スパン750mmの2点荷重実験である。荷重方法は、変位制御による静的荷重とし、最大荷重に達するまで複数荷重-除荷を繰り返した。最大荷重到達後も荷重を続け、供試体の圧縮側コンクリートが破壊した時点で試験終了とし除荷した。

計測項目としては、図-3に示すようにひずみゲージ (RC梁:コンクリート用30mm、FRP補強梁:プラスチック用6mm) により供試体上・下面のひずみを、高感度変位計 (25mm) により供試体の垂直変位をそれぞれ計測した (いずれも左より順に1, 2, ..., 7とした)。さらに、FRP補強梁については供試体側面 (前・後面:水平位置は上下面測定箇所と同位置) のひずみをプラスチック用ひずみゲージ (5mm) により測定した。また、引張鉄筋およびせん断補強鉄筋には金属用ひずみゲージ (5mm) を貼付し、引張ひずみを測定した。

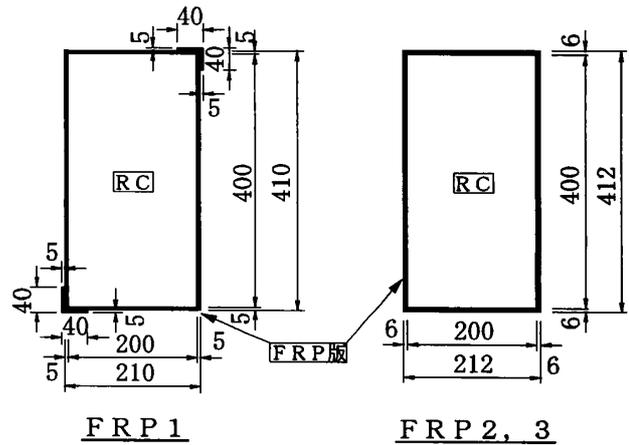


図-2 供試体断面図

表-2 FRP物性値

曲げ弾性率 (MPa)	5 5 0 0
曲げ強さ (MPa)	1 6 0
引張強さ (MPa)	9 0
比 重	1. 2

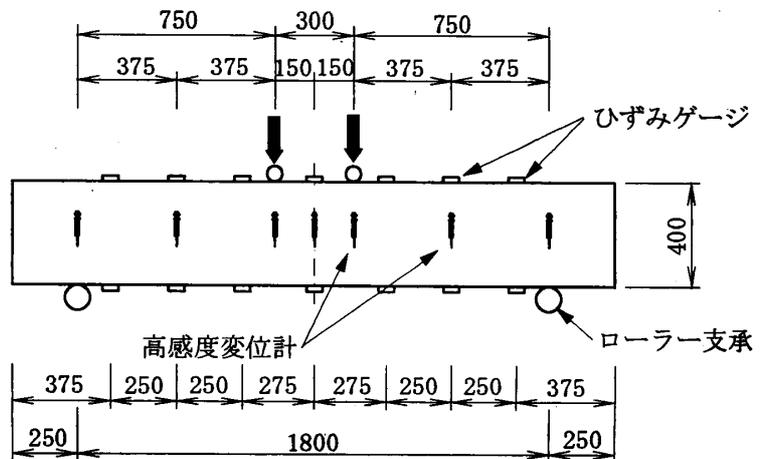


図-3 計測器取付位置図

3. 実験結果

3. 1 荷重－変位関係

図-4に荷重と供試体中央のたわみ量の関係を、表-3に各ケースにおける最大荷重および最大荷重時のたわみ量を示す。ただし、たわみ量は中央の高感度変位計の測定値から両側の支承点沈下量を差し引いた値であり、荷重曲線は包絡線で示した。

無補強であるRCの場合、最大荷重は408 kNであった。これに対して、FRP版により補強された各供試体はいずれも最大荷重の増加が見られ、その割合は30～60%に達する。最大荷重時のたわみ量に関しても同様で、RCに対する増加分は2倍を上回る。このように、最大荷重あるいは変形性能において、FRP版による補強効果が各施工形式において発揮されている。

施工形式による比較では、補強版が機械的に接合されたFRP 1においてたわみ量7mm付近から荷重の頭打ち傾向が見られ、最大荷重到達以降も荷重は漸減し、たわみ量20mmでFRP版の破断に至った。一方、吹付け等により一体的に補強されたFRP 2およびFRP 3では、たわみ量約8mm以降で荷重が漸増傾向に変化し、最大荷重到達後いったん急激に低下する。その後、500 kN程度の荷重を保持したまま変位のみが進行する状況が継続したため計測を終了した。

3. 2 荷重－鉄筋ひずみ関係

図-5および図-6に荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。ただし、主鉄筋ひずみは主鉄筋下段の載荷点位置での計測値であり、スターラップひずみは図-1中の②での計測値を示す。

主鉄筋ひずみを見ると、各供試体とも荷重100kN未満の段階で曲げひびわれが発生し主鉄筋のひずみが直線的に増大していく。一方、スターラップひずみは荷重が小さい段階では生じず、200～250kN程度に達してはじめて発生しその後急速に増加する。スターラップひずみの増加開始荷重は、各FRP補強供試体ともRC供試体よりも若干大きくなっている。

RC供試体の場合、主鉄筋の降伏前にスターラップが降伏することにより供試体の破壊が生じた。これに対して、FRP補強供試体ではスターラップの降伏が先行することはRC供試体と同様であるが直ちに破壊には至らない。それどころか主鉄筋降伏後も若干の荷重の増加と変形の進行が見られた。最終的にはFRP版の破断を確認して載荷を終了した。

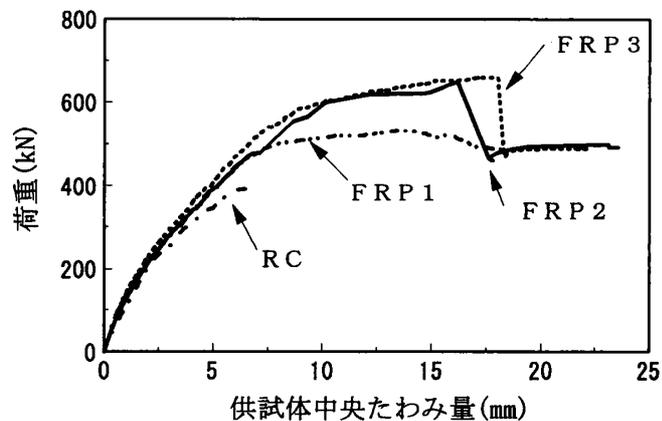


図-4 荷重－供試体中央たわみ量関係

表-3 計測結果

種別	Pmax	δ (Pmax)	ΔP	$\Delta \delta$
RC	408 kN	7.0 mm	1.00	1.00
FRP 1	531 kN	14.2 mm	1.30	2.03
FRP 2	648 kN	16.2 mm	1.59	2.31
FRP 3	659 kN	17.1 mm	1.62	2.44

Pmax: 最大荷重

δ (Pmax): 最大荷重時たわみ量

ΔP : RCに対する最大荷重比

$\Delta \delta$: RCに対する最大荷重時たわみ量比

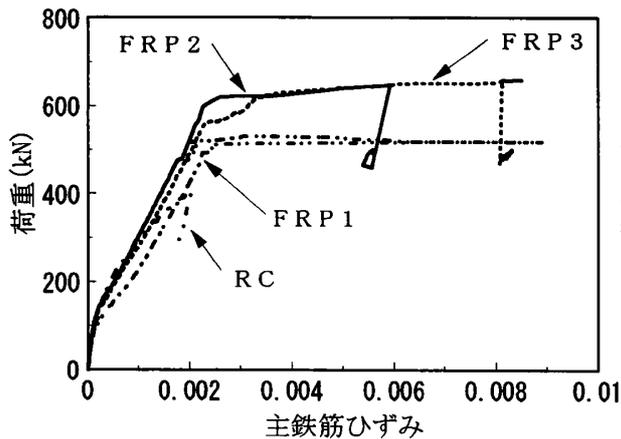


図-5 荷重-主鉄筋ひずみ関係

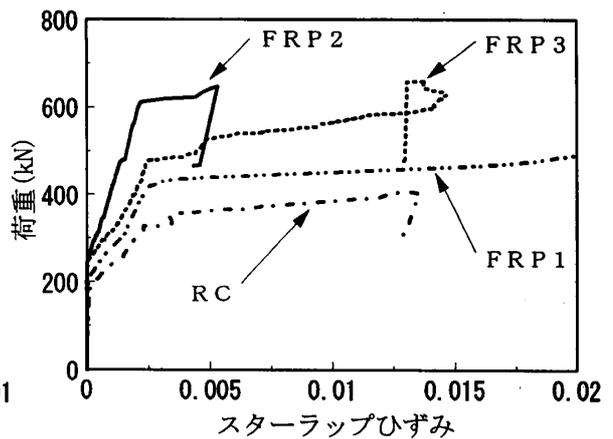


図-6 荷重-スターラップひずみ関係

3. 3 終局時ひびわれ状況

図-7に載荷実験終了後のひびわれ発生状況を示す。ただし、FRP補強供試体 (FRP 1~FRP 3) については、実験終了後FRP版を撤去した供試体表面のひびわれをスケッチしたものである。

RC供試体は当初曲げひびわれが発生し、その後斜めひびわれが発生・進展した。最終的には右側支承部より進行した斜めひびわれが荷重点付近に到達しせん断破壊を生じた。FRP補強供試体のひびわれ発生状況は概ねRC供試体と同様である。ただし、FRP 1は左側の荷重点-支承点間でFRP版が破断 (写真-1) して破壊に至ったため、供試体左側にひびわれが多発している。FRP 2およびFRP 3は曲げひびわれが供試体中央部に集中しているが、これは供試体とFRP版の密着性が高く一体として挙動するためと考えられる。最終的にはFRP補強供試体は曲げ破壊の様相を呈する。FRP 2の破壊状況は写真-2に示すとおりである。

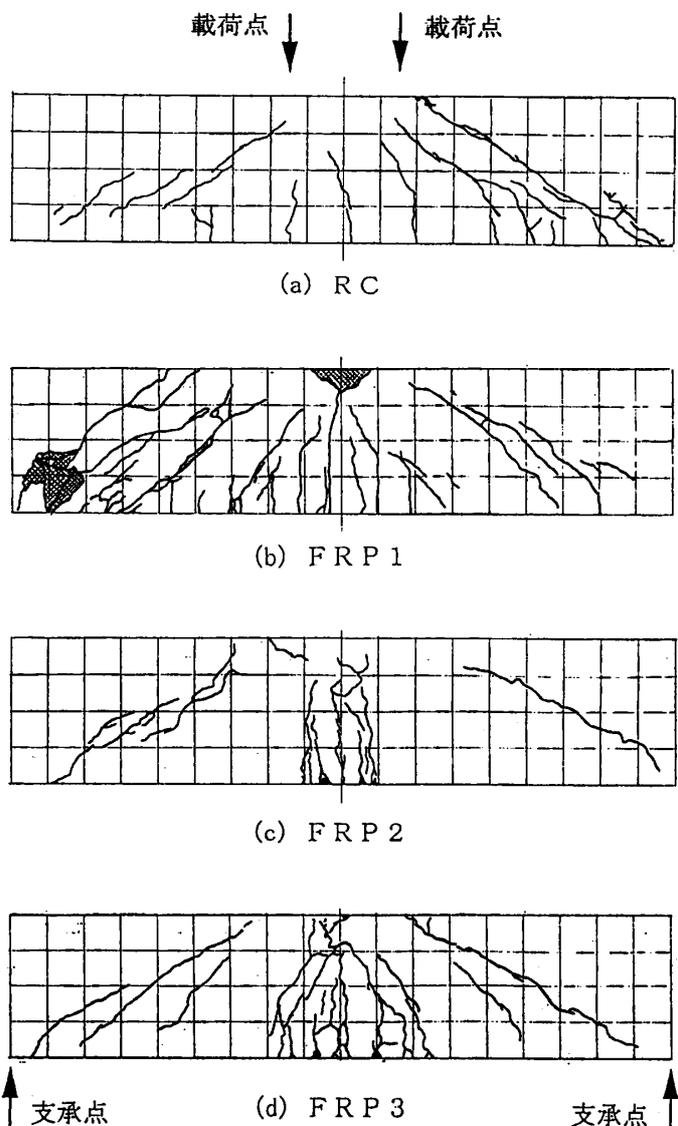


図-7 終局時ひびわれ状況

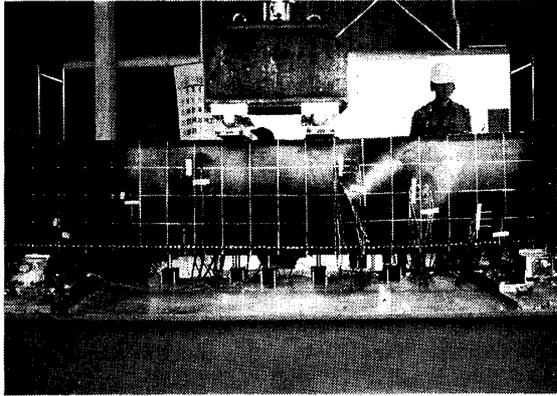


写真-1 FRP 1破壊状況

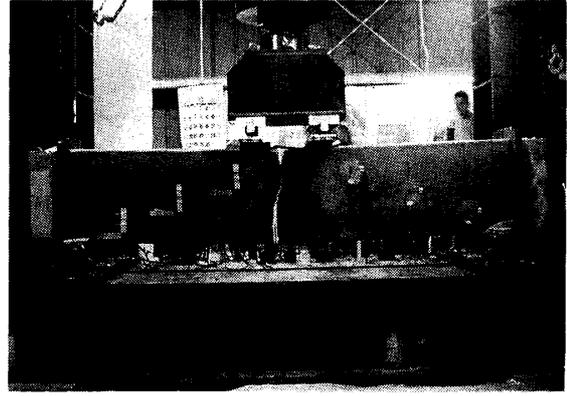


写真-2 FRP 2破壊状況

4. 補強形式の比較

今回の実験により、FRP版がRC梁のせん断破壊に対して補強効果を発揮することが明らかになった。しかし、その補強性能は施工方式により大きく異なった。すなわち、機械的接合FRP版による補強供試体は、他の方式（吹付け、巻付け）に較べると最大荷重すなわち耐荷力が小さい結果となった。その原因として考えられることは、接合部の強度がFRP版自体の強度と比較して不十分であったことであろう。実験中の目視による観察では、写真-1のFRP版破断部付近において供試体の変形にともない接合部の剥離が進行したことが確認された。FRP 1におけるFRP版底面のひずみの計測結果を図-8に示す。また、比較のためFRP 2の底面ひずみ計測結果を図-9に示す。FRP 1の場合、荷重450~500 kN程度（主鉄筋降伏荷重付近）までは、ひずみゲージ4（中央）の値が最大値を示し、他のひずみゲージの読みもほぼ左右対称に近い。しかし、500 kNを越えたあたりから急速にバランスが崩れ、供試体左側（ひずみゲージ1~3）のひずみが激増している。対照的に右側の6、7はひずみが減少していった。すなわちこの時点で変形が急速に進行し、接合部の一部が剥離しつつに破断に至ったと考えられる。これに対してFRP 2では、左右対称に変形が進行し、写真-2に見られるように下縁部中央付近からFRP版の破断が生じ荷重は急激に低下し

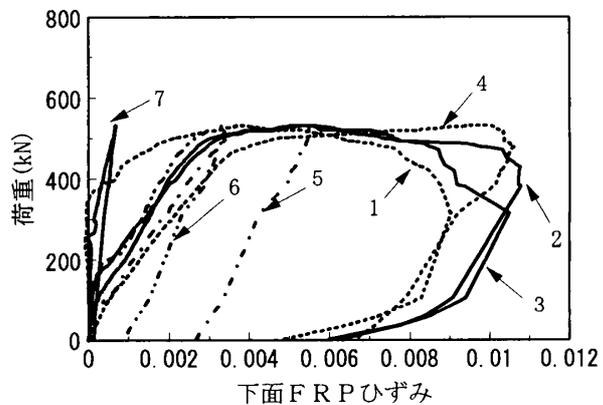


図-8 FRP 1底面ひずみ

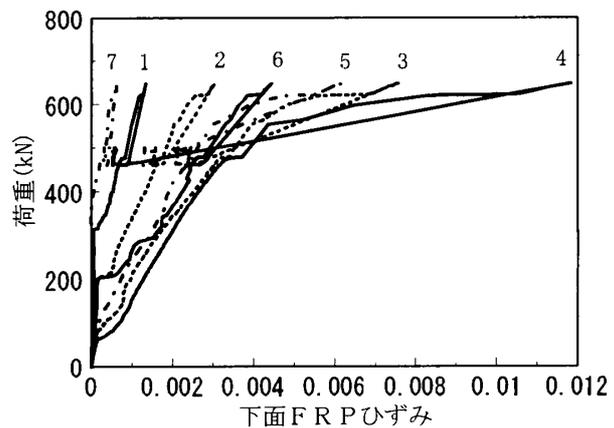


図-9 FRP 2底面ひずみ

た。この時、中央部以外のひずみ（ひずみゲージ1, 2, 3, 5, 6, 7）は急激に解放された。載荷を続行すると荷重は 500 kN付近で平衡状態を保持しながら変形のみが進行し、最終的にはFRP版上縁部が破断した。最終段階においては内部のコンクリートも圧壊に近い状態であったと推定される。FRP3についても同様な結果が得られた（写真-3に終局状態を示す）。FRP2、FRP3は吹付け等によりFRP版とRC部が一体的な構造となっており、終端部を除き特に構造的な弱点はない。したがってFRP版自体の強度を十分に発揮できる状態である。機械的接合方式の場合は、接合部に応力集中し弱点となる可能性が高いため、いかに接合部の強度を確保するかが重要な検討課題となる。



写真-3 FRP3破壊状況

5. まとめ

本研究で得られた結果ならびに今後の課題を以下に記す。

- (1) FRP版により補強されたRC梁供試体は無補強供試体と比較すると最大荷重で30～60%、最大荷重時のたわみ量で100～140%上回る。
- (2) せん断破壊する鉄筋量のRC梁をFRP版で補強することにより、スターラップおよび主鉄筋降伏後も耐力を保持し最終的な破壊形態も曲げ破壊に変化する。
- (3) 吹付け、巻付けの一体施工方式によるFRP補強RC梁供試体は密着性が高く一体的な挙動を示すため、FRP版の強度を十分に利用でき、よりせん断補強効果を発揮する。
- (4) 機械接合方式によるFRP版は接合部の強度向上が問題となる。
- (5) 小型のRC梁供試体による実験で良い結果を得られたので、今後は実構造物への適用を考えてより大型の供試体あるいは柱供試体による補強実験を行うことが課題となる。
- (6) 実験結果に基づく構造解析モデルの構築も今後の検討課題である。

参考文献

- [1] 渡辺忠朋, 佐藤 勉, 谷村幸裕: 兵庫県南部地震による鉄道橋の被害、プレストレストコンクリート、Vol. 37、No. 5, pp. 53-59、1995. 9
- [2] 鉄道総合技術研究所: 建造物保守管理の標準・同解説コンクリート構造、pp. 128-186、付属資料 pp. 24-68、1987
- [3] 斉藤弘志, 江口和雄: 最近の樹脂系材料による補修・補強工法の現状、コンクリート工学、Vol. 33、No. 12, pp. 25-32、1995. 12
- [4] 武井 昭, 松本良雄, 江上仁士, 秋山 暉: テープ状炭素繊維を用いたRC構造物補強工法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. 17、No. 2, pp. 911-916、1995. 6