

玄武岩繊維ロッド緊張接着によるRC梁の復元力特性に対する補強効果

名城大学
名城大学
名城大学
(株)富士ピー・エス

○佐藤 大地
田中 竜蔵
正会員 工博 岩下 健太郎
正会員 八木 洋介

Abstract : Fiber reinforced polymer (FRP) composites have been widely used as externally bonded reinforcements to strengthen or rehabilitate different kinds of deteriorated concrete structures. In this paper, restoring force capacity of RC beams with prestressed basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rods are investigated. From the experimental results, it is confirmed that the capacity is increased by bonding prestressed BFRP rods. Moreover, the experimental values are performed to evaluate with fiber model analysis. The experimental values are agreed with fiber model analysis values.

Key words : Basalt fiber reinforced polymers, Prestressed , RC beam, Restoring force capacity

1. はじめに

RC 構造物に対する補強技術として、鋼板巻立てやRC 増し厚、連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, FRP) の表面接着による補修・補強技術などが広く用いられている。また、FRP に緊張力を導入し、表面接着する補強技術に関する研究^{1),2)}も実施され、一部実用化に至っている。

本研究では、玄武岩 (Basalt) 繊維を用いたFRP 棒材 (以降BFRP ロッドと呼称) に緊張力を導入した状態で、コンクリート表面に接着・補強したRC 梁を新たに作製し、段階的に荷重・除荷を繰り返す4 点曲げ試験を実施した。そして、最大変位や回復変位の関係に着目して、復元力特性に対する補強効果を検討した。また、コンクリート、鉄筋、BFRPロッド、エポキシ樹脂の材料構成則に非線形性を考慮して、分割要素法 (以降ファイバー法と呼称) によってBFRPロッドを緊張接着したRC梁をモデル化し、段階式繰り返し荷重試験における荷重-変位関係、最大変位-回復変位関係に対する算定をそれぞれ行った。そして、算定値と実験値の比較によりRC供試体の曲げ挙動、復元力特性をそれぞれ評価した。

2. BFRPロッド緊張接着RC梁の復元力特性の検討

2. 1 試験方法

まず、引張鉄筋比1.7%程度のRC 供試体を3 体作製した。これらは図-1 に示すように150mm×200mm の矩形断面で、全長は2.0m、水セメント比は50%、コンクリートの設計基準圧縮強度 f'_{cd} は 30N/mm^2

である。内1体の底面には、破断強度の25%程度の緊張力を導入したBFRP

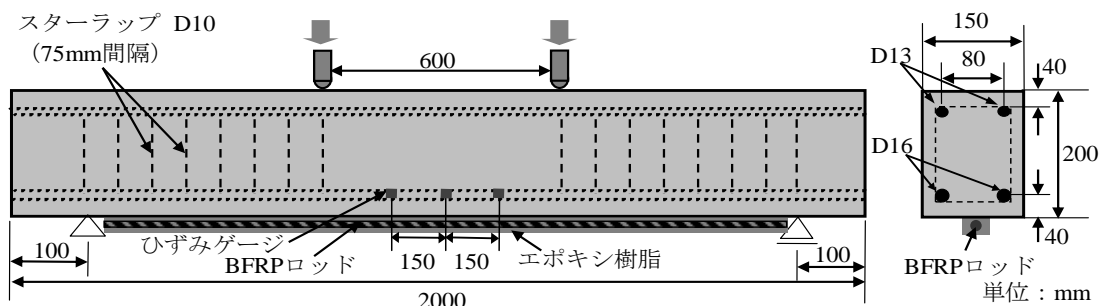


図-1 BFRP ロッド緊張接着補強供試体の詳細寸法

ロッドを接着・補強した。また、他の1体の底面には緊張力を導入しない状態のBFRPロッドを接着・補強し、さらに残りの1体は無補強のままとした。以上のRC供試体に対し、段階式繰り返し載荷試験を支点間隔 $L'=1.8\text{m}$ 、載荷点間隔 600mm として実施した。

BFRPロッドの緊張に際しては、反力を受け持つ鋼製フレームの両端に緊張力を導入するための油圧ジャッキ、荷重測定のためのロードセルを接続した実験用の緊張装置(図-2)を用いた。緊張BFRP補強供試体については、図-2に示す緊張装置でBFRPロッドに破断荷重の25%に相当する緊張力 P_t (19.6kN)を導入した後に、接着箇所の周囲に内面離形性のある型枠を設置し、内部に粘性 $3000\text{MPa}\cdot\text{s}$ 程度の高流動エポキシ樹脂を充填することにより、BFRPロッドをコンクリート表面に接着した。接着箇所の状況を図-3に示す。

段階式繰り返し載荷試験は載荷速度を $1\text{kN}/\text{min}$ で行い、除荷時の下限値は 1.5kN と設定した。これは、完全除荷時におけるRC供試体や載荷治具のズレ防止のためである。除荷に際しての荷重の設定は、事前に実施した静的曲げ試験におけるひび割れ発生時、その後、主鉄筋降伏前までの任意点で3回、主鉄筋降伏時、その後の任意点で3回の計8回とした。さらに、以上の実験において、ロードセル、RC供試体のスパン中央付近、両側面に設置した変位計を用いて荷重と変位をそれぞれ測定した。

2. 2 復元力特性の評価

RC供試体の段階式繰り返し載荷試験における損傷・破壊性状は、無補強供試体では荷重が $5\sim 10\text{kN}$ でスパン中央付近の梁の引張縁に曲げひび割れが生じ、荷重の増加とともに梁の長手方向 90mm 程度の間隔でひび割れが生じた後、主鉄筋が降伏し、梁の圧縮縁でコンクリート圧縮破壊が生じて、大きく変位が増加するとともに荷重が徐々に低下するものであった。緊張BFRP補強、および無緊張BFRP補強供試体では主鉄筋降伏後までの挙動は同様だが、コンクリートの圧縮破壊前にBFRPロッドの剥離が生じ、荷重が急激に低下するものであった。なお、実験後の観察の結果、剥離はコンクリートの表層部で生じていた。

図-4 (a~c) に段階式繰り返し載荷試験における荷重-変位関係、(d) に荷重-BFRPロッドのひずみ関係をそれぞれ示す。主鉄筋降伏荷重、最大荷重について、無補強供試体を比較対象として、無緊張BFRP補強供試体では13.3%、34.7%、緊張BFRP補強供試体では32.5%、62.2%、それぞれ向上しており、緊張接着による補強効果が確認された。荷重-BFRPロッドのひずみ関係によると 3500μ 付近でグラフの傾きがやや小さくなっている。これは、BFRPロッドの剥離の起点となる載荷点直下のひび割れの発生によるものと推測される。各載荷ステップでの最大変位 δ_{max} と残留変位 δ_{re} の差を算出し、それを

表-1 材料の物性値一覧

BFRP ロッド	引張強度 (N/mm^2)	1000
	引張弾性率 E_r (kN/mm^2)	45.5
	断面積 A_r (mm^2)	78.5
	玄武岩繊維含有率 V_f (%)	50.0
	エポキシ樹脂の引張弾性率 E_d (kN/mm^2)	1.5
コンクリート	材齢 28 日圧縮強度 (N/mm^2)	25.7
	引張強度 f_t (N/mm^2)	2.0
鉄筋	鉄筋の種類	SD295A
	弾性率 E_s (kN/mm^2)	210

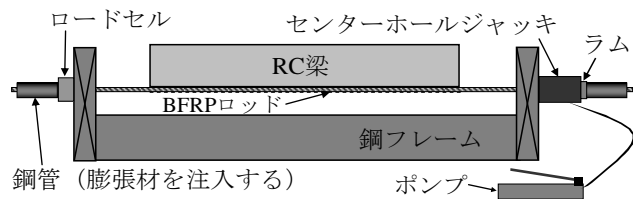


図-2 BFRP ロッド緊張装置

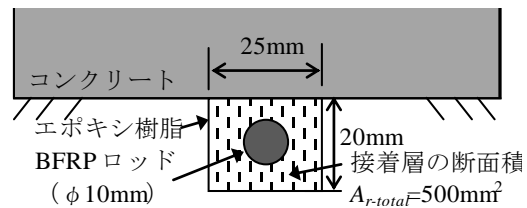


図-3 BFRP ロッドの接着状況

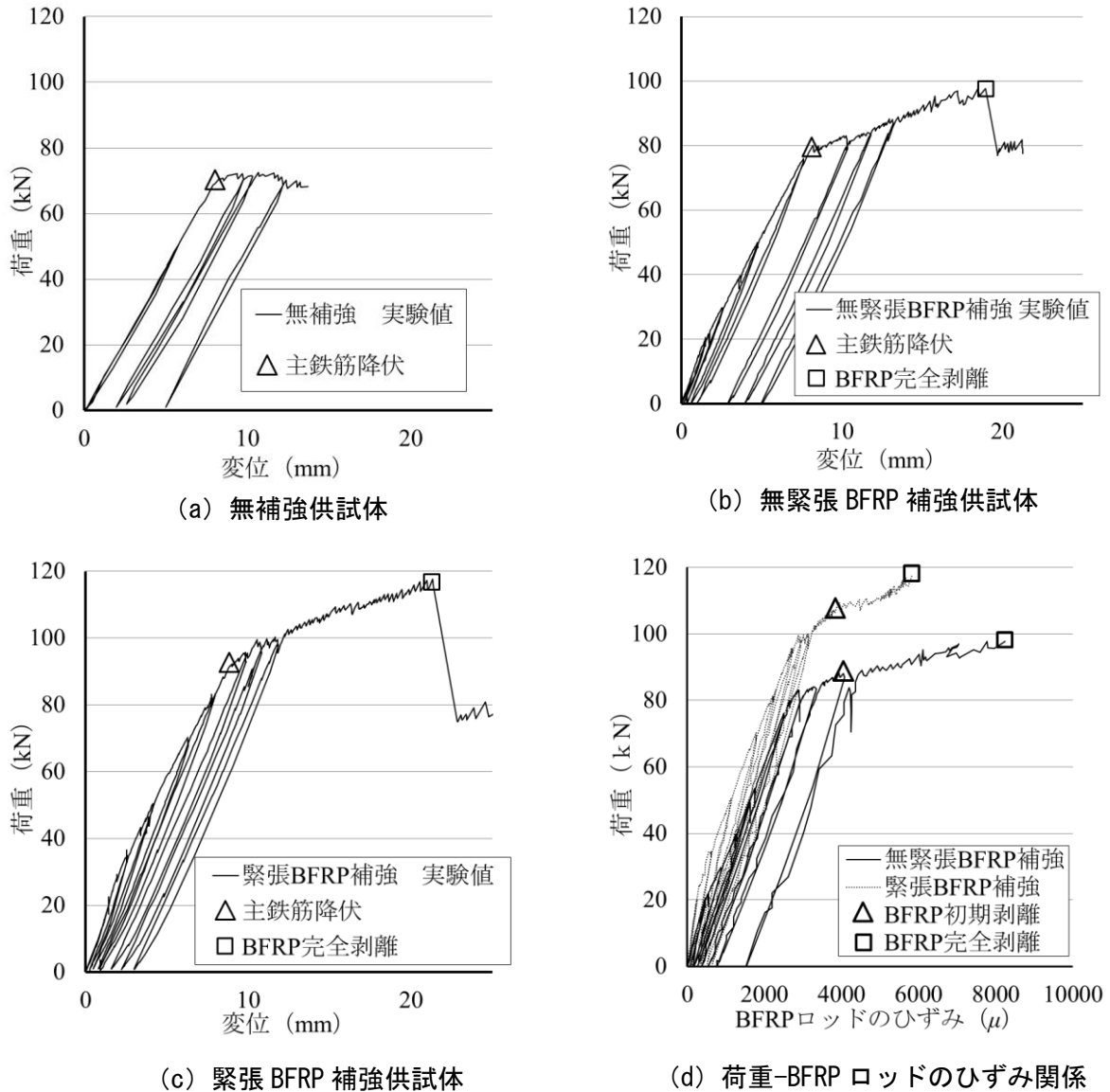


図-4 荷重-変位関係および荷重-BFRP ロッドのひずみ関係

回復変位(=δ_{max}-δ_{re})として、δ_{max}との関係図を作成した(図-5)。そして、各線の傾きを復元率(%)と呼称し、復元力特性の評価指標とした。同図には、参考として復元率100%、40%、20%にあたる直線も示した。主鉄筋降伏前までの残留変位は微小であったため、主鉄筋降伏前までの復元率を100%と仮定した。主鉄筋降伏後は残留変位に顕著な増加が確認されたため、復元率を算出し、評価を行った。最終除荷時の復元率は緊張BFRP補強供試体が無緊張BFRP補強供試体より14.8%大きく、主鉄筋降伏以降の領域で緊張BFRP補強による、より顕著な復元率の増加が確認された。よって、緊張BFRP補強による復元力特性の向上効果が、主鉄筋降伏後に得られることが実験的に明確となった。

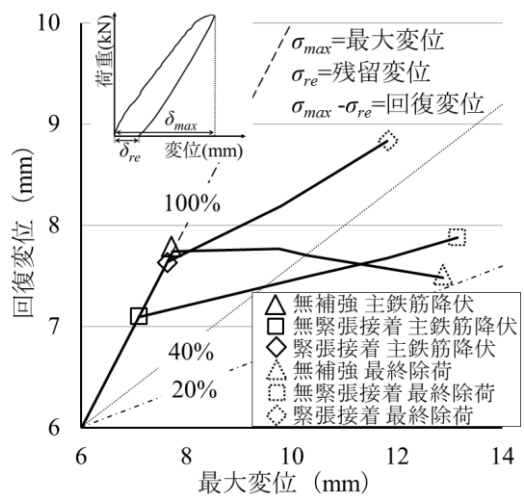


図-5 最大変位-回復変位の関係

3. ファイバー法による評価

ファイバー法により、本研究で実験を行った各種RC供試体をモデル化した。断面諸元は、図-6に示すように梁の長手方向と平行に各要素の高さを0.1mmとし2000分割した。コンクリートの圧縮側構成則は土木学会編、コンクリート標準示方書 [設計編]³⁾の「コンクリートのモデル化された応力-ひずみ曲線」を用いた。コンクリートの引張側構成則は同示方書における引張破壊エネルギーを考慮した2直線モデルを用いた。鉄筋の構成則はひずみ硬化型のBi-Linear型モデルとし、事前に実施した引張試験結果から引張弾性率を210kN/mm²、引張降伏ひずみを1800μとそれぞれ設定した。なお、引張破壊エネルギーは0.1N/mmと仮定した。BFRPロッド、エポキシ樹脂の構成則は完全弾性体とした。材料構成則一覧を図-7に示す。

また、以下の手順で各荷重における変位を算出した。まず、圧縮縁のひずみ ϵ_{co} を仮定する。次に、中立軸位置 x を仮定し、コンクリート、鉄筋、BFRP ロッドの各要素の半分高さでのひずみ $\epsilon_c(i)$, ϵ_s , ϵ_f を式 (1) からそれぞれ求めた。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c(i) &= \epsilon_{co} \cdot \frac{x - Y_c}{x} \\ \epsilon_s &= \epsilon_{co} \cdot \frac{x - Y_s}{x} \\ \epsilon_f &= \epsilon_{co} \cdot \frac{x - Y_f}{x} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 Y_c , Y_s , Y_f は圧縮縁からコンクリート、鉄筋、BFRP ロッド、各要素の半分高さまでの距離、および各要素の平均ひずみが生じる位置とした。また、コンクリート、鉄筋、BFRP ロッドの平均応力 $\sigma_c(i)$, σ_s , σ_f は式 (2) からそれぞれ求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c(i) &= 0.85 \cdot f'_{cd} \cdot \frac{\epsilon_c}{0.002} \cdot \left(2 - \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \\ \sigma_s &= E_s \cdot \epsilon_s \\ \sigma_f &= E_f \cdot \epsilon_f \end{aligned} \right\} (2)$$

コンクリート、主鉄筋、BFRP ロッドの作用力 $\Delta F_c(i)$, ΔF_s , ΔF_f は式 (3) からそれぞれ算出した。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_c(i) &= \sigma_c(i) \cdot A_c(i) \\ \Delta F_s &= \sigma_s \cdot A_s \\ \Delta F_f &= \sigma_f \cdot A_f - P_{se} \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで、 A_c , A_s , A_f はコンクリート、鉄筋、BFRP ロッド、各要素の断面積を示す。 P_{se} は有効プレストレス力を示し、事前に実施した BFRP ロッドのリラクセーション実験から、BFRP ロッドの見掛けのリラクセ

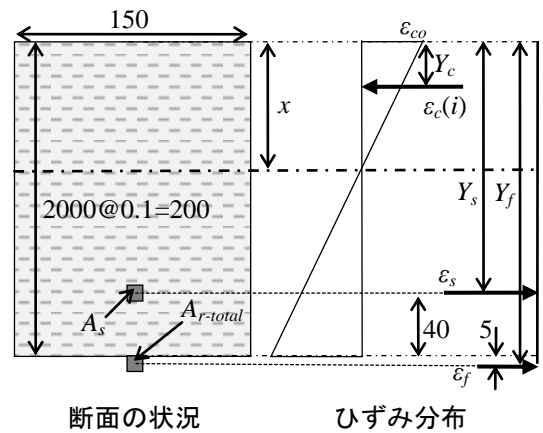


図-6 断面諸元の仮定

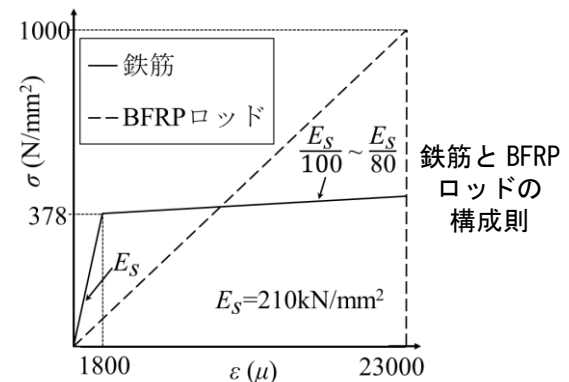
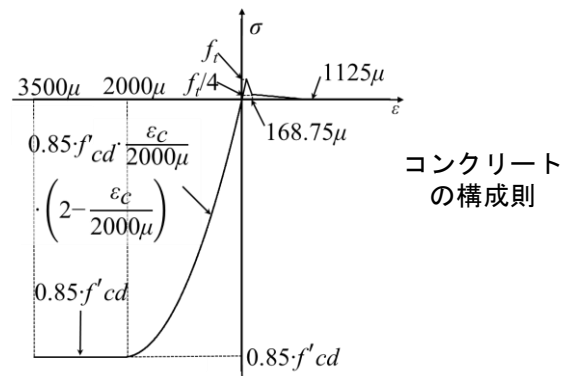


図-7 材料構成則一覧

一シオン率 γ を 5% とし, 同示方書のリラクセーションによるプレストレス力の減少量を式 (4) より算出した。

$$P_{se} = P_t - \gamma \cdot P_t \quad (4)$$

また, 作用力のつり合い値 N は式 (5) より求めた。

$$N = \sum \Delta F_c(i) + \Delta F_s + \Delta F_f \quad (5)$$

なお, 収束条件は $|N| \leq 0.01$ とした。以上の方法で載荷点付近のコンクリート圧縮ひずみが ε_{co} に達する時の最大モーメント M を式 (6) より算出した。

$$M = \sum \Delta F_c(i) \cdot (Y_c - h_g) + \Delta F_s \cdot (Y_s - h_g) + \Delta F_f \cdot (Y_f - h_g) \quad (6)$$

ここで, h_g は断面の図心軸位置を示す。さらに, 載荷点付近のコンクリート圧縮ひずみが ε_{co} に達する時の曲率 ϕ , 変位 δ はそれぞれ式 (7), 式 (8) より求めた。

$$\phi = -\frac{\varepsilon_{co}}{x} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{23}{216} \phi \cdot L^2 \quad (8)$$

BFRP ロッドの剥離ひずみ ε_{fu} は, 過去の研究¹⁾を参照して, 式 (9) により求めることとした。

$$\varepsilon_{fu} = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f \cdot t_f}} + \varepsilon_{f1} \quad (9)$$

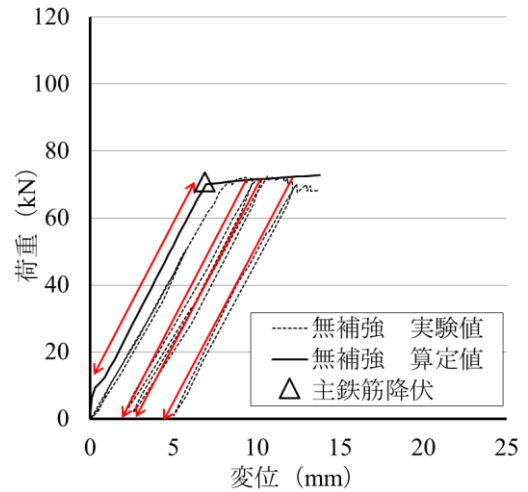
ここで, ε_{fu} は BFRP ロッドの剥離ひずみ, ε_{f1} は載荷点直下から, BFRP ロッドの有効付着長さだけ水平方向に離れた位置 (100mm) での BFRP ロッドのひずみ, G_f は BFRP ロッドの界面剥離破壊エネルギー⁴⁾, E_f は BFRP ロッドの弾性率, t_f は BFRP ロッドの接着厚さをそれぞれ示す。ここで G_f は式 (10) により, 求められる。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f \cdot t_f} \quad (10)$$

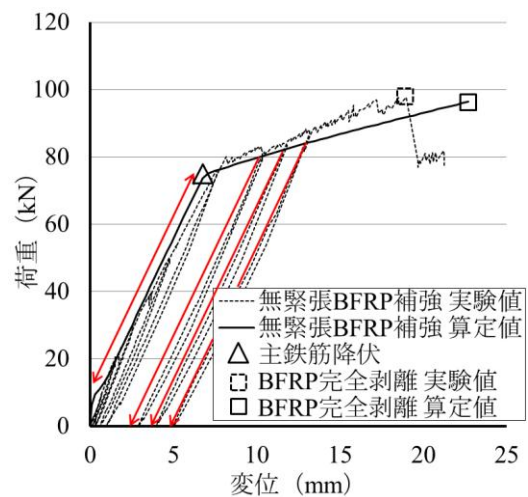
BFRP ロッドを接着するのに使用したエポキシ樹脂の弾性率を考慮した $E'_f \cdot t'_f$ を式 (11) より算出する。

$$E'_f \cdot t'_f = \frac{E_r \cdot A_r \cdot V_f + E_a \cdot A_r \cdot (100 - V_f) + E_a \cdot (A_{r-total} - A_r)}{A_{r-total}} \quad (11)$$

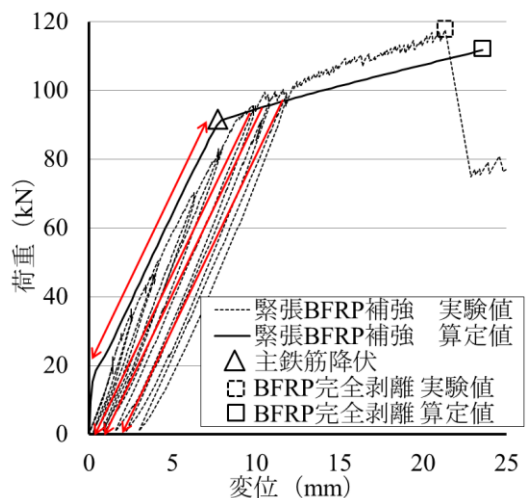
ε_f が ε_{fu} を超えた地点で BFRP ロッドが完全剥離したと仮定し算定を終了した。以上の方法で荷重-変位関係を作成した (図-8)。算定値は各種 RC 供試体の実験値



(a) 無補強供試体



(b) 無緊張 BFRP 補強供試体



(c) 緊張 BFRP 補強供試体

図-8 荷重-変位関係の実験値と算定値

と概ね近い値を示しており、ファイバー法を用いた算定により曲げ挙動をある程度表現できた。

除荷時の荷重と変位は概ね初期の曲げ剛性に近い傾きで推移するように見える。そこで、ファイバー法による算定値から主鉄筋降伏までの領域の30%、60%の荷重を通る直線に沿って除荷開始荷重から減少させることで復元率を算定する。図-8内の矢印付き線は算定値である。最大変位と回復変位の関係の実験値と算定値を図-9に示す。無緊張BFRP補強供試体は概ね近い値が算定できているのに対して緊張BFRP補強供試体を特に過剰に評価している。これは、無緊張BFRP補強供試体は接着面を上向きに、重力方向に沿う形で接着したのに対し、緊張BFRP補強供試体では接着面を下向きに接着したことによるBFRPロッドの接着強さの違いによるものと考えられる。

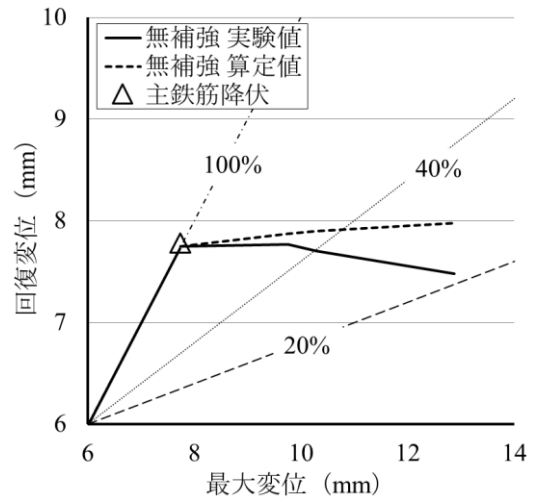
4. おわりに

本研究では、緊張力を導入したBFRPロッドを接着補強したRC梁を対象として段階式繰り返し载荷試験を行い、復元力特性に対する補強効果を検討した。また、ファイバー法を用いたモデル化手法で最大荷重、および変位を評価した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

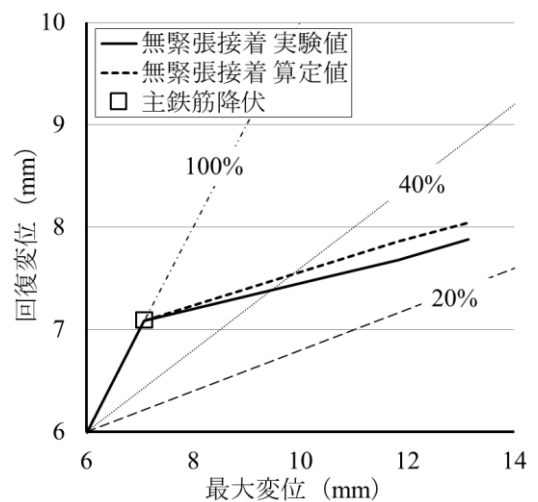
- 1) 緊張BFRP補強により主鉄筋降伏前でも復元力特性の向上効果はある程度得られるが、主鉄筋降伏後により顕著な効果が得られることが実験的に示された。
- 2) 緊張力を導入したBFRPロッドを接着補強したRC梁の曲げ挙動はファイバー法を用いたモデル化手法によりある程度評価できることがわかった。

参考文献

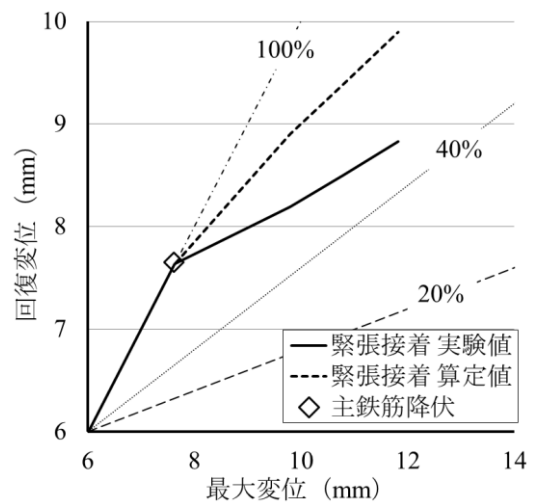
- 1) 呉 智深, 岩下健太郎, 孫 暁荷, 小林 朗: FRP ケーブルの埋め込み緊張補強技術の確立, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.630-643, 2010
- 2) 岩下健太郎, 金 光男, 佐藤大地, 八木洋介: BFRPロッド緊張接着によるRC梁の曲げ補強効果, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2011
- 3) 土木学会編, コンクリート標準示方書 [設計編], 2010
- 4) 土木学会, 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000



(a) 無補強供試体



(b) 無緊張 BFRP 補強供試体



(c) 緊張 BFRP 補強供試体

図-9 最大変位-回復変位関係の実験値と算定値