

論文

FRP ロッドを接着補強した RC 梁の曲げ挙動に関する解析的研究

佐藤 大地^{*1}， 岩下 健太郎^{*2}， 八木 洋介^{*3}， 吉田 光秀^{*3}

Analytical Study on Flexural Behavior for RC Beams with Externally Bonded FRP Rod

Daichi SATO^{*1}， Kentaro IWASHITA^{*2}， Yosuke YAGI^{*3} and Mitsuhide YOSHIDA^{*3}

要旨： RC 構造物の表面にかぶり深さ以内の溝を掘り，補強材を埋め込むことで高度な耐腐食性を有する RC 補修技術における研究が実施されている．著者らは構造物の表面に溝を掘ることなくコンクリート表面に FRP 棒材を直接接着する補強技術に関する研究を行ってきた．本研究では FRP 棒材を表面接着した RC 梁について有限要素解析モデルを構築し，4 点曲げ載荷試験の検証を行ったところ概ね破壊挙動を評価することができた．

キーワード： FRP ロッド，表面接着，曲げ補強，RC 梁

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強技術などが広く用いられている．現在，RC 構造物の表面にかぶり深さ以内の溝を掘り，鉄筋や FRP 製のロッドや板，より線などを埋め込むことで高度な耐腐食性を有する RC 補強技術における，補強材の補強効果に関する研究¹⁾が実施され，実用化されているものもある．しかし，構造物の表面に溝を掘ることには鉄筋の切断の恐れ等から抵抗があり，技術の適用に対する障

壁の一つとなっている．そこで，著者らは FRP 棒材をコンクリート表面に接着する補強技術に関する研究²⁾を実施した．本研究では比較的安価で 2.5% を超える伸度と， 1kN/mm^2 の引張強度を有する玄武岩（Basalt）繊維を用いた FRP の棒材（以降 BFRP ロッドと呼称）をコンクリート表面に接着補強した RC 梁を対象に，有限要素解析モデルを構築し，先に実施した試験結果の検証を行った．BFRP 補強 RC 梁のコンクリート-BFRP ロッド間の界面挙動を適切に評価するために既往の連続繊維グリッド複合材の定着性能に関する実験的研究³⁾を参照した．

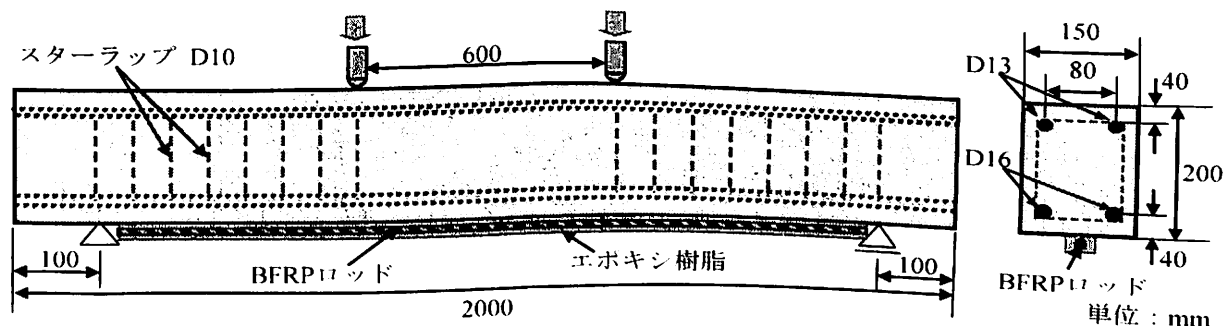


図-1 BFRP ロッド接着補強供試体の詳細寸法

*1 名城大学大学院理工学研究科建設システム工学専攻

*2 名城大学理工学部建設システム工学科 准教授

*3 (株)富士ビー・エス 技術本部

2. 試験概要

28 日後のコンクリートの設計基準圧縮強度 f'_{ck} が 20, 30, 50N/mm² の RC 供試体をそれぞれ二体ずつ作製した。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, 引張鉄筋比は健全な RC 構造物を想定して 1.7% 程度とした。内一体の底面には BFRP ロッドを接着補強した。BFRP ロッドの接着状況を図-2 に、材料の物性値一覧を表-1 に示す。残りの一体は無補強のままとした。以上の RC 梁に対し、4 点曲げ載荷試験を支点間隔 $L=1.8m$, 載荷点間隔 600mm として実施した。実験パラメータはコンクリートの設計基準圧縮強度 f'_{ck} と、BFRP ロッド接着補強の有無である。計測機器及び項目は、荷重および、RC 梁の両側面スパン中央に設置した変位計により測定した変位(平均値)とした。以上の方法で、BFRP ロッドをコンクリート表面に接着補強した RC 梁の曲げ補強効果を実験的に明確にするため、試験を実施した。 $f'_{ck} = 20, 30, 50 \text{ N/mm}^2$ について、BFRP 補強 RC 梁の引張鉄筋降伏荷重は 70.0, 71.6, 73.3kN, 最大荷重は 93.3, 93.4, 95.9kN であった。

3. 解析概要

モデルはスパンおよび断面方向に 2 等分割した 1/4 モデルである。図-3 にモデルを示す。コンクリート、主鉄筋、圧縮鉄筋、エポキシ樹脂および BFRP ロッドはソリッド要素でモデル化した。スターラップは DIANA に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化した。コンクリート、鉄筋および BFRP ロッドの材料構成則を図-4, 図-5 に示す。コンクリート要素について圧縮側は f'_{ck} を用いて圧縮ひずみ 2000μ まではコンクリート標準示方書 [設計編]⁴⁾ に基づいて定式化し、 2000μ 以後はピーク応力を保つモデルとした。コンクリートの弾性率 E_c は同示方書に規定されている弾性率を参考に、 $f'_{ck} = 20, 30, 50 \text{ N/mm}^2$ について 24, 28, 33kN/mm² をそれぞれ用いた。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いた。一方、引張上昇域

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_f (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_a (kN/mm ²)	1.5
鉄筋	鉄筋の種類	SD295A
	弾性率 E_s (kN/mm ²)	210
コンクリートの圧縮強度	$f'_{ck}=20\text{N/mm}^2$ (N/mm ²)	23.0
	$f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ (N/mm ²)	25.7
	$f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$ (N/mm ²)	40.4

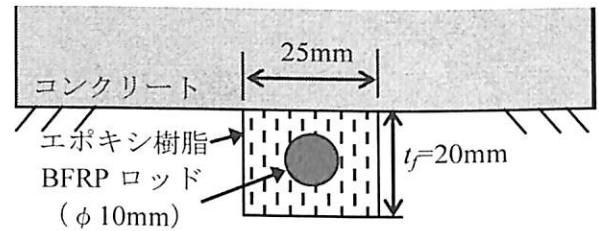


図-2 BFRP ロッドの接着状況

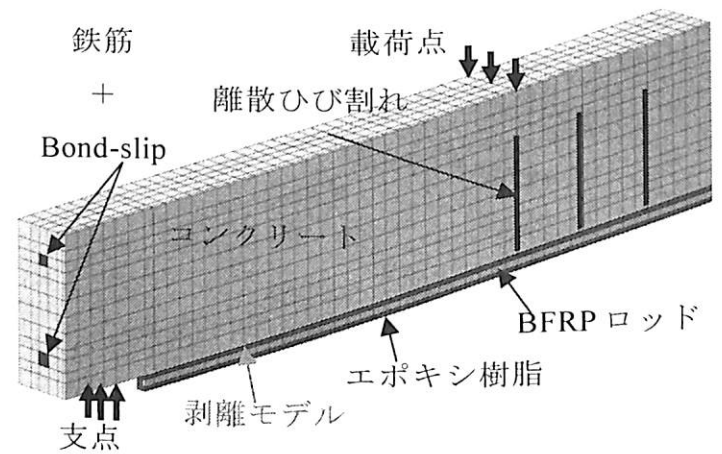


図-3 有限要素解析モデル

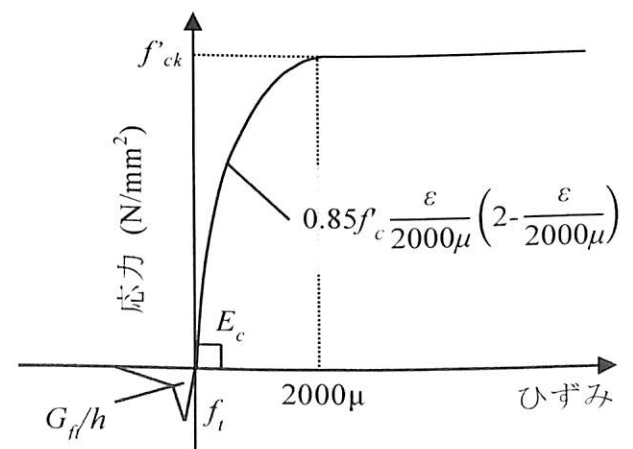


図-4 コンクリートの材料構成則

は引張強度 f_t までは初期弾性係数 E_c の弾性体とし、ピーク後は、同示方書における引張破壊エネルギーを考慮した 2 直線モデルを用いて、要

素の等価長さ h を要素の面積の平方根と仮定してひび割れ幅をひずみに変換した。引張強度 f_t は CEB-FIP Model Code⁵⁾による評価値, G_f は引張破壊エネルギーである。コンクリート部, コンクリートと鉄筋間, コンクリートとエポキシ樹脂間に界面接合要素を適用した分散ひび割れモデル, Bond-slip モデルおよび剥離モデルを配置してひび割れの開口, BFRP メッシュのすべりをモデル化した。分散ひび割れモデルは CEB-FIP Model Code を参考に界面接合要素の法線方向の開口とその方向の引張応力を図-6(a)のように定義した。Bond-slip モデルは, CEB-FIP Model Code より図-6(b)に示すせん断応力-相対変位関係を適用した。法線方向引張応力-相対変位関係には, 分散ひび割れモデルに準拠して定義した。剥離モデルは界面接合要素の法線方向の開口とその方向の引張応力は実験後の観察の結果, 剥離がコンクリートの表層部で生じていたことから分散ひび割れモデル, 接線方向のすべりについては BFRP 補強 RC 梁のコンクリート-BFRP ロッド間の界面挙動を適切に評価するために著者らの研究³⁾より, k_s は 10N/mm^3 , τ_f は 15N/mm^2 , G_f は 30N/mm とした。解析は, 荷重点の中央接合部に強制変位を与え, 収束計算に, 初期剛性法を用いることにより実施した。荷重点直下の BFRP ロッドのひずみが剥離ひずみ ε_{fu} (図-5) を超えた時点で BFRP ロッドが完全剥離したと仮定し解析を終了した。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(1)により求めた。

$$\varepsilon_{fu} = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f \cdot t_f}} + \varepsilon_{f1} \quad (1)$$

ここで, ε_{f1} は荷重点直下から, BFRP ロッドの有効付着長だけ水平方向に離れた位置での 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⁶⁾, t_f は BFRP ロッドの接着厚さを示す。有効付着長は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⁶⁾に規定されている長さ (100mm) を用いた。ここで, G_f は式(2)により求められる。

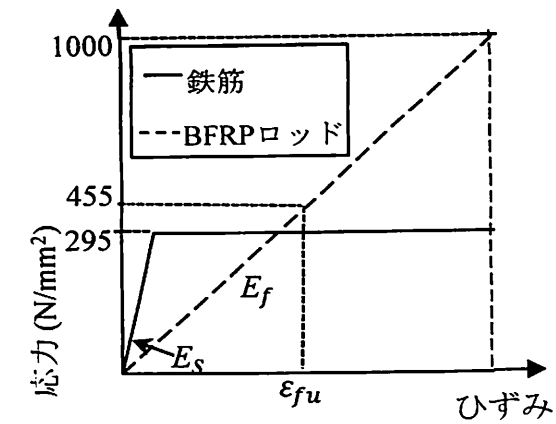
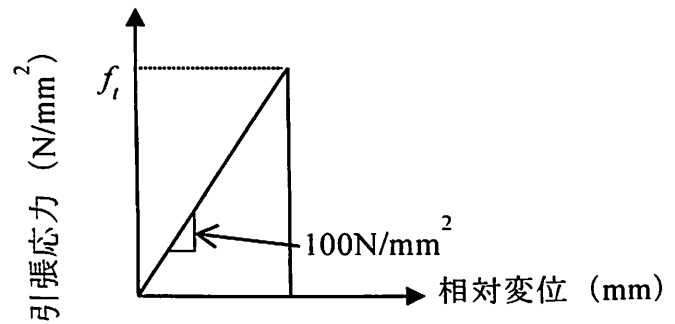
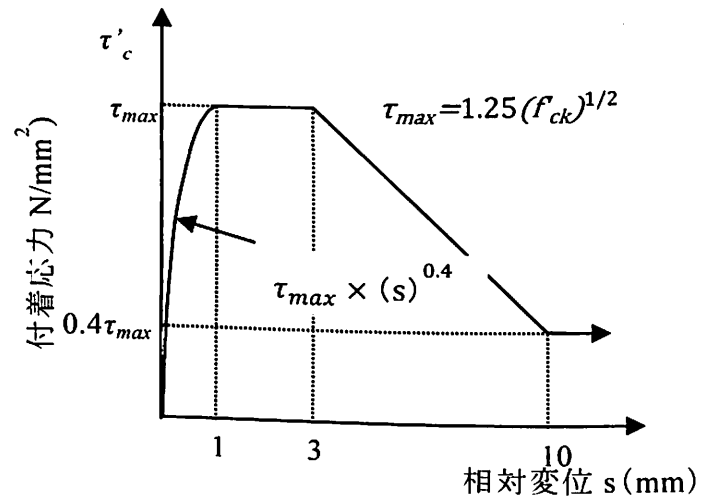


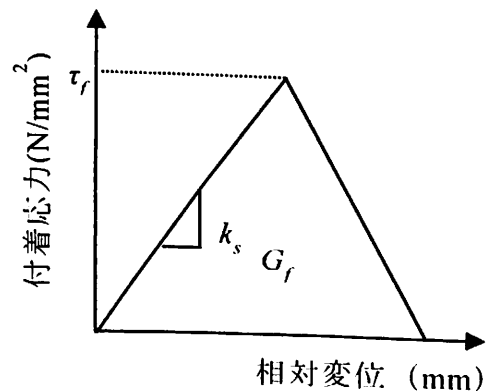
図-5 鉄筋および BFRP ロッドの材料構成則



(a) 分散ひび割れモデル



(b) bond-slip モデル



(c) 剥離モデル

図-6 界面接合要素構成則一覧

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

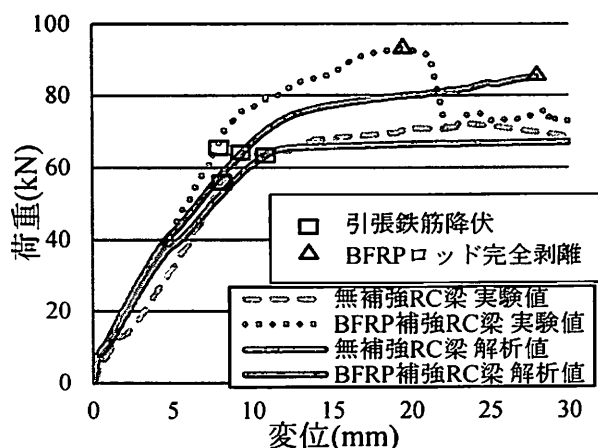


図-7 荷重-変位関係 ($f'_{ck}=20\text{N/mm}^2$)

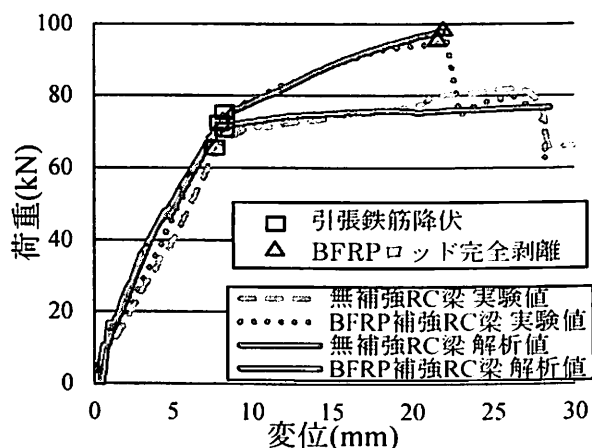


図-9 荷重-変位関係 ($f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$)

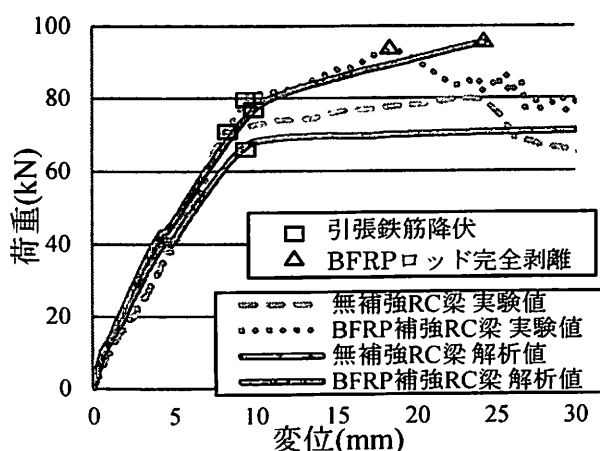


図-8 荷重-変位関係 ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)

4. 解析結果と考察

前項で構築した解析モデルを用いた解析結果より、荷重-変位曲線を図-7～図-9に示す。図-7のBFRP補強RC梁の引張鉄筋降伏以降について実験値と解析値が乖離しているが、これはコンクリート強度のばらつきにより打設したコンクリートが設計基準強度に比べ若干高い強度を発現したためと考えられる。他の解析値は各種RC梁の実験値における引張鉄筋降伏荷重および引張鉄筋降伏後の二次勾配、BFRPロッドの完全剥離を概ね評価できた。よって、本研究の解析モデルにより実験結果とほぼ同様の破壊挙動を表現可能であるものと推察される。

5. まとめ

本研究では、BFRPロッドを接着補強したRC梁を対象として、有限要素解析モデルを構築し、4点曲げ載荷試験の結果の検証を行った。その

結果、本研究で構築した解析モデルにより引張鉄筋降伏やBFRPロッドの剥離破壊といった破壊挙動をある程度評価できた。

謝辞

本研究の一部は、名城大学自然災害リスク軽減研究センター（代表者：小高 猛司）とJSPS科研費 24760352の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 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, 土木学会, Vol.56A, pp.630-643, 2010
- 2) 佐藤大地, 田中竜蔵, 岩下健太郎, 八木洋介: 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, 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, Vol.21, pp.567-572, 2012.10
- 3) 岩下健太郎, 呉智深, 坂本宏司: 水中エポキシパテによる連続繊維グリッド複合材の定着性能と向上法に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp. 214-222, 2007.4
- 4) 土木学会編, コンクリート標準示方書 [設計編], 2010
- 5) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford
- 6) 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, pp.77-81, 2000