

論文 BFRP, AFRP シート接着補強 RC 梁の曲げ挙動に関する解析的研究

岩下 健太郎*1・張 逸馨*2

要旨: 高伸度性について優れた性能を有する BFRP および AFRP シートの RC 梁に対する曲げ補強効果が、過去の研究において実験的に検証され、FRP シートの種類によらず、また、薄目付の FRP シートでも耐荷力等に対する補強効果が得られる傾向にあった。本研究では、曲げ補強効果に及ぼす FRP シートの種類、補強量、そして凍結融解作用の影響について明らかにすることを目的として、FEM による耐荷力解析を行った。薄目付の BFRP シートでも通常目付より 16%程度低い最大荷重が高まることや、FRP シート接着前に凍結融解作用を与えた梁において、実験および FEM 解析結果から梁自体の耐荷力に影響しない傾向にあった。

キーワード: BFRP シート, AFRP シート, RC 梁, 曲げ補強, FEM, 耐荷力, 靱性, 凍結融解作用

1. はじめに

FRP シート接着補強工法に関する研究は過去 20 年以上に渡り盛んに行われ、土木学会を始めとする学会等で指針などが取り纏められ、長期供用による老朽化、損傷が生じた橋梁の床版や桁、橋脚等に対する曲げ、せん断、耐震補強を中心に、広く採用されるに至っている^{1), 2)}。採用されている FRP シートの種類としては、国内ではほとんど炭素繊維シート (CFRP シート) あるいはアラミド繊維シート (AFRP シート) であるが、最近では高伸度性に優れたバサルト繊維シート (BFRP シート) による曲げ補強効果などに関する研究も行われている。山内、著者らは高伸度性について優れた性能を有する BFRP および AFRP シートの RC 梁に対する曲げ補強効果を目付量や凍結融解作用の影響を考慮しつつ実験的に検証した³⁾。その結果、補強量が同程度であれば FRP シートの種類は曲げ補強効果に対する影響はほとんどないこと、薄目付の BFRP でも耐荷力等に対して補強効果が得られる傾向にあること、そして混和剤を使用しないコンクリートを用い、凍結融解作用により表面にスケーリングを発生させ、表面処理せずに FRP シートを接着したケースでも耐荷力等にはほぼ影響しないことが確認された。しかし、FRP シートで補強された RC 構造物の環境温度変化により生じる初期応力の影響に関する研究は、環境温度に敏感な樹脂材料を接着材として使用している観点から重要性がありこれまで研究を進めている⁴⁾が研究数は少なく、そのほとんどが界面のみに着目した部材レベルを対象とした研究⁵⁾であり、構造物を対象とした研究はかなり少ない。また、非線形有限要素法による RC 梁の 3 次元シミュレーションは車谷ら⁶⁾により行われており、初期応力と耐荷力を連成させた解析に関して、Gebreyouhannes ら⁷⁾や米田ら⁸⁾により行われているが、FRP シート接着補強後の構造物の耐荷力を評価するうえ

で、補強前に受けた初期応力を考慮した研究はほとんど見受けられない。

本研究では、BFRP, AFRP シートを接着した RC 梁の曲げ補強効果を FEM により耐荷力解析するとともに、変動温度下における RC 梁の耐荷力を実験的に検証したうえで、FEM による初期応力と耐荷力の連成解析を行い、FRP シートの種類、補強量、そして事前の凍結融解作用が FRP シート接着 RC 梁の耐荷力に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

2. FRP シート補強 RC 梁の曲げ補強効果に関する実験の概要

2.1 実験方法

山内、著者らの研究³⁾より、実験の概要について述べる。断面 100mm×100mm、全長 400mm の直方体形状の RC 梁を作製した。図-1 に示すように、引張鉄筋には D6 鉄筋 (SD295A) 1 本、圧縮鉄筋には 2 本を用いており、引張鉄筋比は 0.4%程度である。また、これらの梁には D10 帯鉄筋 (SD295A) を 50mm 間隔で配置しており、十分なせん断耐力を確保し、曲げ破壊が先行するように設計した。コンクリートの設計圧縮強度は 30N/mm²、配合強度は 36N/mm²、スランブ 8cm、空気量 4%として配合

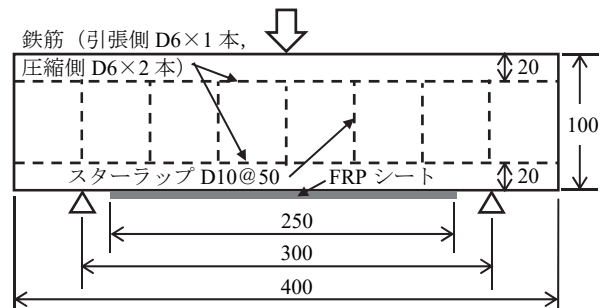


図-1 RC 梁供試体の詳細

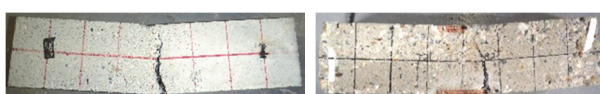
*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 工博 (正会員)

*2 名城大学 大学院理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻

表-1 物性値一覧

| 材料特性 | BFRPシート | AFRPシート | 接着材 |
|--|--------------------|---------|-----|
| 引張強度 σ_f (N/mm^2 , メーカー値) | 1,900 | 2,060 | 45 |
| ヤング係数 E_f (kN/mm^2 , メーカー値) | 90 | 118 | 1.5 |
| 破断伸度 $\varepsilon_f(=\sigma_f/E_f)$ (μ) | 21,111 | 17,458 | - |
| 目付量 (g/m^2) | 1088 (400) * | 830 | - |
| 1層あたり換算厚さ t_f (mm) | 0.414 (0.152) * | 0.576 | 0.6 |
| 補強量 $E_f t_f$ (kN/mm) | 37.3 (13.7) * | 68.0 | - |
| 線膨張係数 ($10^{-6}/\text{K}$) | 7 | -6 | 60 |

* () 内には $400\text{g}/\text{m}^2$ 目付に対応した値を示す。



(a) NF-RCN (b) NF-RCF

図-2 NF-RCN, NF-RCFの外観(載荷試験後)

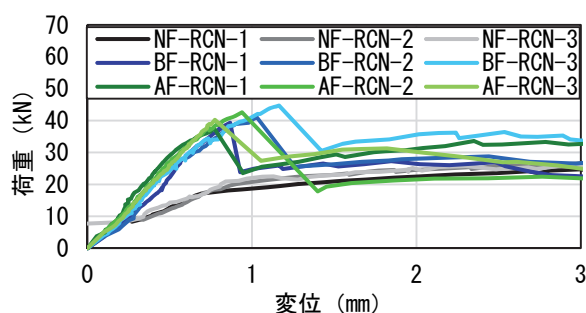


図-3 荷重-変位曲線 (FRP種類, 有無)

されたレディーミクストコンクリートを用いた。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。スケーリングを生じやすくするために混和剤を使用しなかった。載荷日における圧縮強度の測定値は $42.7\text{N}/\text{mm}^2$ であった。FRPシートと接着材の物性値一覧を表-1に示す。1ケース3体の実験を行い、1) FRPに用いた繊維材の種類、2) BFRPシートの補強量、3) 事前の凍結融解作用の有無を考慮した。なお、BFRP, AFRP, FRP補強なしの供試体を BF-RCN-1~3, AF-RCN-1~3, NF-RCN-1~3と、事前に凍結融解を行った供試体を BF-RCF-1~3, AF-RCF-1~3, NF-RCF-1~3と、そして $400\text{g}/\text{m}^2$ の BFRPシートを接着補強した供試体を BF-RCN400-1~3とそれぞれ呼称した。FRPシートは長手方向に 250mm の長さで RC梁の中央下面に接着しており、梁スパン中央から両接着端部まで 125mm である。山内、著者らの研究³⁾において、FRPシートの有効付着長は実験的に 45mm ~ 105mm の範囲に分布しており、既往の算定式によりこれは妥当な長さとの評価に至った。よって、有効付着長は

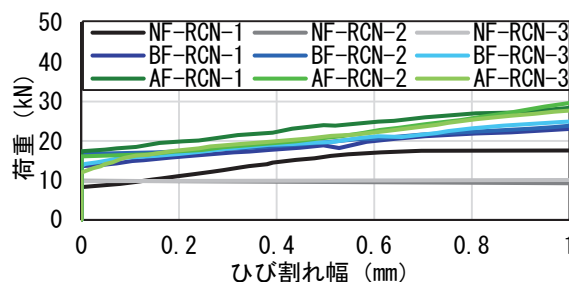


図-4 荷重-ひび割れ幅曲線 (FRP種類, 有無)

接着長さの範囲内にあるものと評価された。凍結融解手順は、JIS A 1148のA法(水中凍結融解試験方法)に準拠し、サイクル温度を -18°C ~ 5°C 、1サイクルを4時間として300サイクル実施した。なお、凍結融解試験後におけるRC梁の相対動弾性係数を測定し、耐久性指数を算出した結果 97.9% であり、鉄筋が密に配置されているためコンクリート自身の劣化が測定できていない可能性はあるものの、本研究における凍結融解作用はコンクリートの物性や鉄筋との付着力に関する劣化といった観点からはRC梁の構造性能自体に大きな影響を与えるものではないと思われる。ただし、凍結融解後の梁表面を観察すると図-2に示すように軽度のスケーリングが見られた。本来、FRPシートの接着前に表面をケレンしプライマーやパテを塗布して表面処理する必要があるが、本研究ではスケーリングがFRPシートの付着力とFRP接着補強後の耐力に及ぼす影響を評価することを目的としており、これらの表面処理を行っていない。

2.2 実験結果

NF, BF, AF-RCN供試体の荷重-変位曲線を図-3に示す。いずれの供試体においても $10\sim 12\text{kN}$ 程度でひび割れが発生しており、その後はひび割れ幅の増加と複数本のひび割れの発生が進み、NF-RCN供試体においては引張鉄筋の降伏後、荷重はほとんど増加せず、変位のみが増加していく傾向が見られた。BF, AF-RCN供試体においては、最大荷重となったところでFRPシートの剥離が梁スパン中央付近の曲げひび割れ近傍から進展して荷重が大きく低下し、全面が剥離してから以降はNF-RCN供試体と同様の挙動となる傾向が見られた。NF-RCN供試体よりBF, AF-RCN供試体では剛性が 89% 、 149% 、最大荷重が 54% 、 47% それぞれ大きく、高い曲げ補強効果が得られていることが確認された。荷重-ひび割れ幅曲線を図-4に示す。ひび割れ発生直前における弾性変形を全体から差し引くことでゼロ点補正した。NF-RCN供試体については、ひび割れ発生直後からひび割れ幅が急激に増加しているが、BF, AF-RCN供試体では、荷重-ひび割れ幅曲線における勾配がNF-RCN供試体よりひび割れが発生後のひび割れ幅増加が抑制されている傾向がみられた。

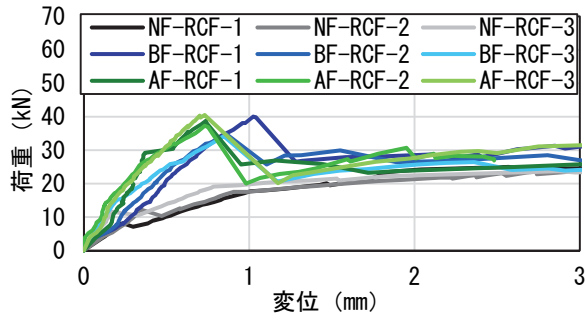


図-5 荷重-変位曲線 (凍結融解有)

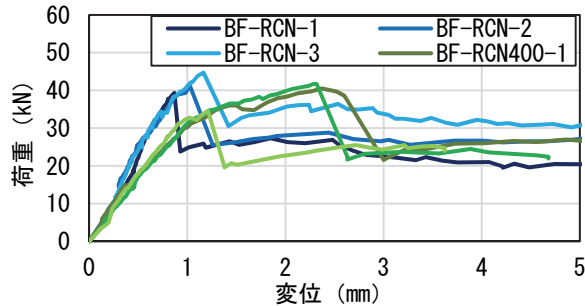


図-6 荷重-変位曲線 (FRP 補強量)

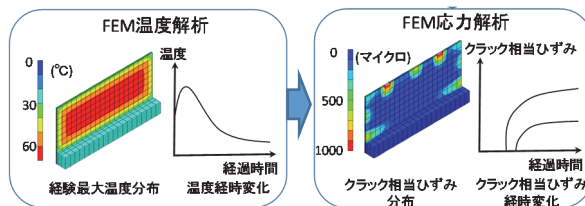
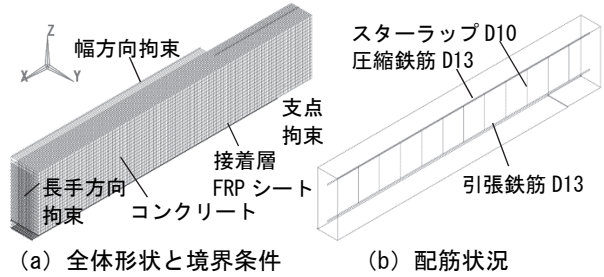


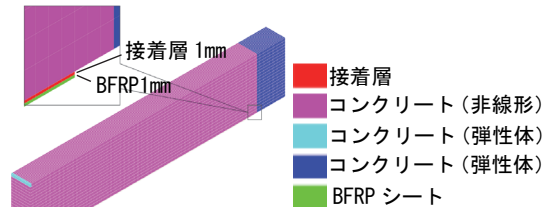
図-7 FEM 温度、応力解析の連成イメージ⁷⁾

事前の凍結融解有無に関する RC 供試体の荷重-変位曲線を図-5 に示す。FRP 補強の無い NF-RCN 供試体と NF-RCF 供試体と比較して同様の挙動であり、FRP 接着の無い RC 供試体について、コンクリートの物性や鉄筋との付着力低下といった凍結融解の影響はほぼ見られなかった。また、BF、AF-RCN 供試体と BF、AF-RCF に関しても最大荷重前の挙動は両者で同様の挙動であり、最大荷重に関しても供試体個体差の範疇でばらつく程度であることから、凍結融解によるスケーリングは FRP 接着補強後の耐荷力にほぼ影響しないことが確認された。

FRP 目付量に関する RC 供試体の荷重-変位曲線を図-6 に示す。BF-RCN400 供試体では BF-RCN 供試体に比べ 37% の補強量であり、FRP 剥離発生前の剛性は 28% 低く、最大荷重は 16% 低かった。剛性に比べて最大荷重の方が補強量の影響が小さい理由として、土木学会指針¹⁾における式を変形した式 (1) において、ひずみと補強量 ($E_f t_f$) の間に反比例関係があるため、補強量がより小さいケースで剥離ひずみが大きくなり、最大荷重が高まったと考えられる。



(a) 全体形状と境界条件 (b) 配筋状況



(c) グループ化の状況

図-8 解析モデル概要

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{8G_f}{E_f t_f}} \quad (1)$$

ここで、 G_f は界面剥離破壊エネルギー、FRP シートのヤング係数 E_f 、公称厚さ t_f である。

3. 初期応力解析ならびに耐荷力解析との連成解析による実験結果の検証

3.1 使用した解析コードの概要

前述の実験における RC 梁に関して、日本コンクリート工学会の解析プログラム JCMAC3-U を用いて 3 次元 FEM モデルを作成し、解析的検討を行った。JCMAC3-U については著者らの既報⁴⁾において参照したため、ここでは概要のみ述べる。JCMAC3-U は FEM 温度解析、FEM 湿度移動解析、FEM 応力解析コードの 3 つで構成されている⁷⁾。上記いずれの解析コードにおいても、コンクリート打込み、型枠、支保工の設置、取り外しなどが適切に数値モデル化されている。図-7 に示すように、まず、FEM 温度解析が行われ、全節点の温度履歴を算出される。温度解析は非定常熱伝導方程式理論に基づいている。本研究では実施していないが、この次に湿気移動解析が行われる。前述の解析にて計算された温度履歴や既知外力・変位履歴を基に FEM 応力解析が実施され、変位、ひずみ、応力などが計算される。本解析ツールにおける応力解析は、一般的には、温度履歴などを基に評価された初期ひずみが支配的である初期応力解析と、既知荷重・変位履歴が支配的である保有耐荷力解析に大別される⁸⁾。

3.2 実験結果に対する解析的検討

本研究で実験を行った RC 梁を模した 1/4 対称モデルを作成した。解析モデルを図-8 (a) に、配筋状況を図

表-2 物性値一覧

| 材料特性 | 解析で用いた値 |
|---------------------------------------|--|
| コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²) | 36(t-0.37)/(3.866+0.860(t-0.37)) |
| ヤング係数 (kN/mm ²) | 6300 $f_c^{0.45}$ (コンクリート) 200 (鉄筋) |
| 引張強度 f_t (N/mm ²) | 0.13 $f_c^{0.85}$ (コンクリート) |
| 鉄筋降伏強度 (N/mm ²) | 295 |
| ポアソン比 | 0.2 |
| 破壊エネルギー (N/mm) | 0.084 (コンクリート) |
| 圧縮強度時のひずみ | 0.002 (コンクリート) |
| 熱伝導率 (W/(mK)) | 2.6 (コンクリート) 80.3 (鉄筋) |
| 比熱 (kJ/(kgK)) | 1.05 (コンクリート) 0.442 (鉄筋) |
| 密度 (kg/m ³) | 2300 (コンクリート) |
| 線膨張係数 (/K) | 0.00001 (コンクリート) |

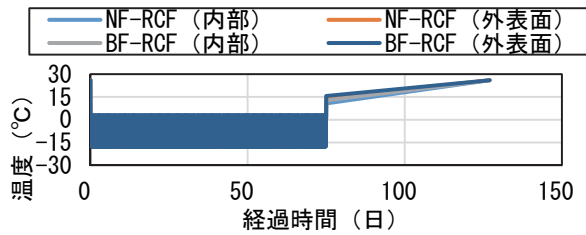
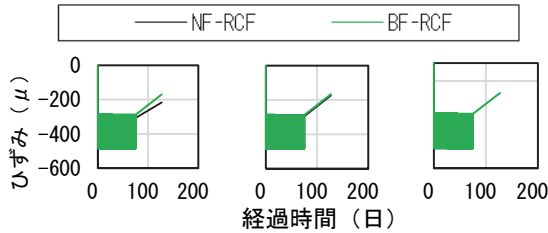


図-9 供試体の内部温度と表面温度の経時変化



(a) コンクリート下縁ひずみ (b) コンクリート上縁ひずみ (c) FRPシートひずみ

図-10 ひずみの経時変化

図-8 (b) に示す。FRPシートと接着層の厚みを図-8 (c) に示すようにそれぞれ 1mm としたため、アスペクト比を考慮して、RC梁については x, y, z 軸いずれの方向についても 5mm メッシュとした。なお、節点数は 8414 となった。なお、主鉄筋については分散鉄筋要素として、コンクリートについては支点、載荷点周辺に応力集中の可能性があるので、弾性構成則を用い、それ以外の箇所については非線形構成則を用いて、それぞれモデル化した。コンクリートの配合において設計圧縮強度 30N/mm²、割増係数 1.2 としたため配合強度は 36 N/mm² である。そこで、コンクリートの圧縮強度、引張強度およびコンクリートのヤング係数については、2012 年度制定土木学会コンクリート標準示方書 [設計編]⁹⁾ を基に表-2 に示すように設定した。なお、コンクリートには普通セメントを用いており、単位セメント量は 300kg/m³ である。熱膨張係数および破壊エネルギーについても同示方書⁹⁾ に基

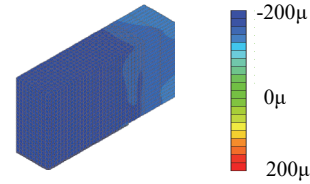


図-11 ひずみ分布 (一例として BF-RCF)

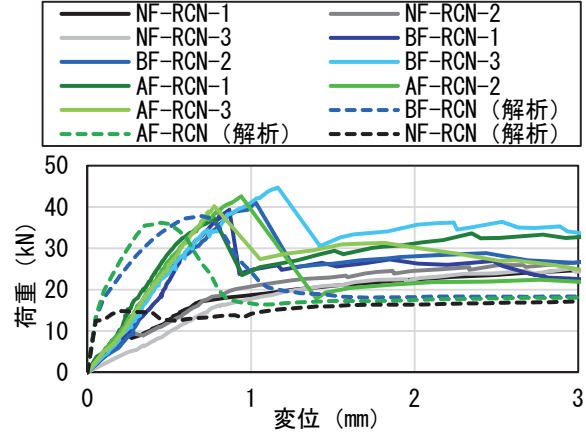


図-12 荷重-変位曲線 (凍結融解無, 実験解析比較)

づき 10 μ/°C および 0.084N/mm とした。FRPシートと接着材については弾性体としてモデル化し、それらの厚みについては実際の厚さを解析モデルにおける厚さ (1mm) で除した値をヤング係数に乘じ、低減することとした。FRPシートの実際の厚さは前掲の公称厚さとし、接着材の実際の厚さは使用した接着材量と比重から算出した値 (0.926mm) とした。コンクリート打設時を解析開始時間とし、実験と同じ環境温度条件で、凍結融解は 28 日目、強制変位は 78 日目にそれぞれ与えた。応力解析および耐力解析の収束判定におけるノルムの閾値は 0.001、反復回数は 1000 回とした。

温度解析の結果より、凍結融解を与えた供試体表面と内部における温度の経時変化を図-9 に示す。実験において想定した挙動と概ね同様の挙動となっていることが確認された。次に、繰り返し温度環境下でのコンクリート下縁ひずみ、上縁ひずみ、そして FRP ひずみの経時変化を図-10 にそれぞれ示す。また、NF, BF, AF-RCF 供試体の耐力解析の直前におけるひずみ分布状況を図-11 に示す。凍結融解時には -490 μ ~ -290 μ の圧縮ひずみしか生じず、また、耐力解析直前もクラック相当ひずみは発生していないことが確認された。よって、実験と解析の両面から本研究で実施した温度変化ではクラック相当ひずみが発生しない傾向にあった。

耐力解析における誤差、すなわち全等価節点力のノルムに対する不平衡力のノルムの割合を検討したところ、2%以内程度であることがわかった。紙面の都合上、誤差状況を示す図は割愛する。

表-3 実験値**, 解析値の一覧

| 供試体 No. | NF-RCN | | BF-RCN | | AF-RCN | |
|-------------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 実験 or 解析 | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 |
| ひび割れ発生荷重 | 12.0 | 12.5 | 12.7 | 13.1 | 13.1 | 13.5 |
| 剛性* (kN/mm) | 22.2 | 21.4 | 42.0 | 49.3 | 55.3 | 63.2 |
| 鉄筋降伏荷重(kN) | 16.8 | 14.8 | 38.9 | 37.3 | 37.0 | 35.5 |
| 最大荷重(kN) | 27.2 | 14.8 | 42.0 | 37.8 | 40.0 | 36.2 |

*剛性はひび割れ発生から鉄筋降伏における荷重-変位曲線の傾きを表す。

**実験値には3体の平均値を示す。

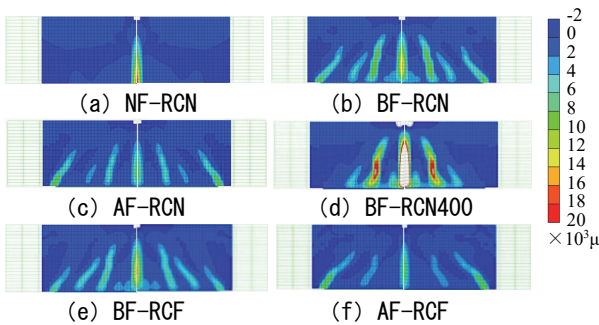
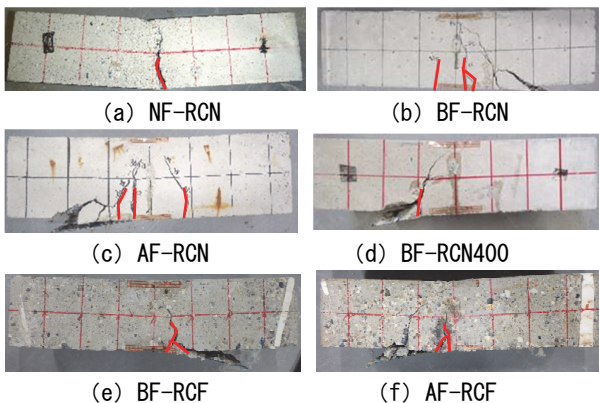


図-13 クラック相当ひずみ分布



*赤線はπ型変位計測定範囲内のひび割れを表す。

図-14 ひび割れ発生状況

NF, BF, AF-RCN 供試体の荷重-変位関係を図-12に、ひび割れ発生荷重、ひび割れ発生から鉄筋降伏までの剛性勾配、鉄筋降伏荷重、最大荷重の一覧を表-3に、全供試体のFRP剥離直前におけるクラック相当ひずみ分布を図-13に、実験におけるひび割れ分布を図-14に、荷重-ひび割れ幅関係を図-15(a)にそれぞれ示す。荷重変位曲線における剛性勾配や鉄筋降伏荷重、最大荷重について実測値と解析値は概ね適合している。ひび割れ発生前の勾配が実験値と解析値で異なっているが、これは載荷フレームにおける変位計が固定されている箇所とRC梁が載っている箇所を繋ぐボルトの両端部にあるナットに、載荷し始めた時に遊びがあるため、変位が増加

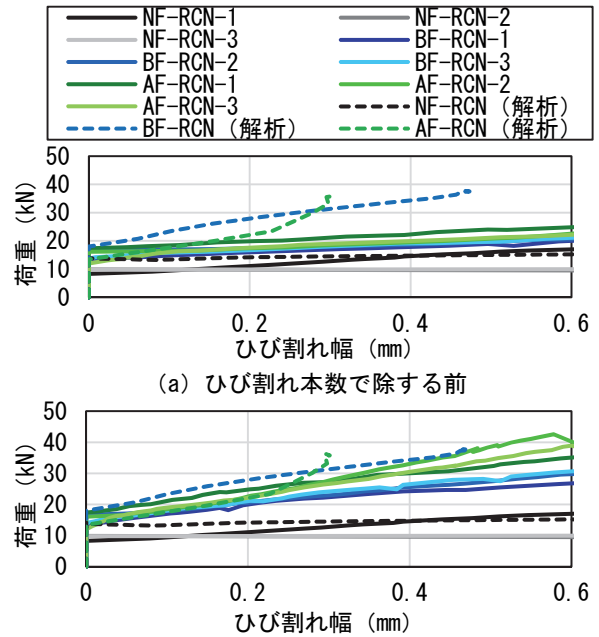
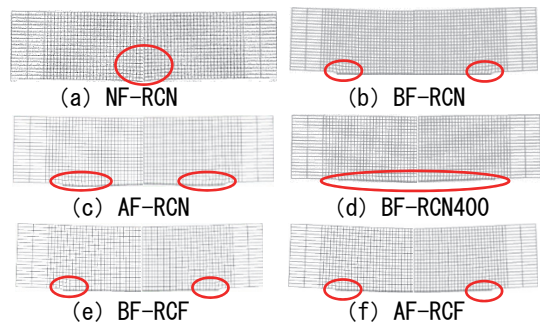


図-15 荷重-ひび割れ幅曲線 (NF-RCN)



*赤丸は比較的大きな変形箇所を示す。

図-16 変形図

してしまうと考えられる。また、クラック相当ひずみ分布に関して、実験と同様にBFRP補強量が多いほどひび割れ本数の増加とひび割れ発生範囲の拡大、そしてひび割れ間隔が短くなる傾向が確認された。さらに、荷重-ひび割れ幅関係についてBF, AF-RCNについて実測値と解析値に乖離があるのは、図-14において見られるようにBF, AF-RCN 供試体において、中央部に生じた曲げひび割れ下端付近のかぶりに複数本のひび割れが生じているが、これをひび割れ幅の実験値算出の際に考慮していなかった。そこで、ひび割れ本数で除して平均化したひび割れ幅と荷重の関係を図-15(b)に示す。同図において実測値と解析値は概ね適合している。終局状態における変形状況を図-16に示す。NF-RCNにおいては梁中央部、BF, AF-RCNにおいてはFRPの両端部近傍に比較的大きな変形が生じており、実験におけるひび割れやFRPの剥離が生じた箇所と類似した。BF-RCN400においてはFRPの接着層全体に渡って大きな変形が生じており、実

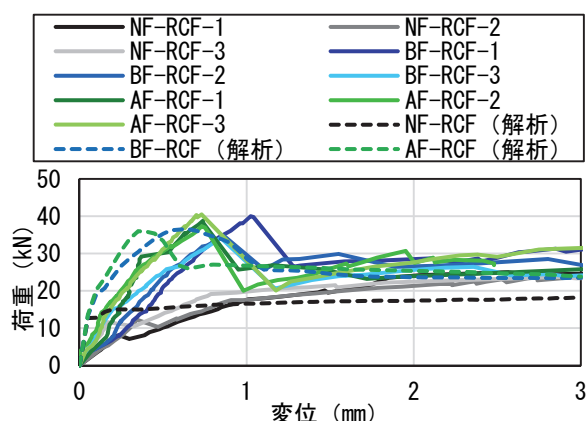


図-17 荷重-変位曲線（凍結融解有，実験解析比較）

表-4 実験値**，解析値の一覧

| 供試体 No. | BF-RCN400 | | BF-RCF | | AF-RCF | |
|-------------|-----------|------|--------|------|--------|------|
| | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 |
| ひび割れ発生荷重 | 13.7 | 12.7 | 13.1 | 13.4 | 12.8 | 13.7 |
| 剛性* (kN/mm) | 29.4 | 27.1 | 37.5 | 38.3 | 43.9 | 62.8 |
| 鉄筋降伏荷重(kN) | 31.4 | 32.0 | 36.2 | 36.3 | 37.7 | 36.0 |
| 最大荷重(kN) | 38.9 | 34.9 | 36.2 | 36.6 | 38.9 | 36.0 |

*剛性はひび割れ発生から鉄筋降伏における荷重-変位曲線の傾きを表す。

**実験値には3体の平均値を示す。

験同様にFRPにより大きなひび割れが生じている。

NF, BF, AF-RCF 供試体の荷重-変位関係を図-17に、ひび割れ発生荷重、ひび割れ発生から鉄筋降伏直前までの剛性勾配、鉄筋降伏荷重、最大荷重の一覧を表-4にそれぞれ示す。これらの値について実測値と解析値は概ね適合しており、本研究で考慮した凍結融解により生じたスケーリングが耐荷力に及ぼす影響は小さいことが確認された。なお、ひび割れ発生前の初期勾配が実験値と解析値で異なっているのは、前述のように実験装置に関する問題が考えられる。

4. 結言

本研究ではFRPシート補強RC梁に関して初期応力解析と耐荷力解析を連成させたFEM解析による解析的検討をFRPの種類や補強量、事前の凍結融解の有無を考慮して行った。得られた知見を以下に纏める。

- 1) 凍結融解作用を与えたRC梁に関して初期応力解析を行った結果、本研究で考慮した凍結融解作用ではクラック相当ひび割れは発生せず、解析的にも既報の実験と同様の結果となった。
- 2) 既報において実験的に検証されたFRPシート補強による剛性や鉄筋降伏荷重、耐荷力の向上効果が解

析的にも見られた。また、BFRPシート補強量を37%少なくした場合、FRP剥離発生前剛性の補強効果は28%低く、最大荷重の補強効果は16%低かったが、これらの補強効果についても解析結果は概ね実験結果と同様の傾向であった。

- 3) 初期応力解析と耐荷力解析を連成した解析的検討を行ったところ、既報における実験結果と概ね同様の挙動が見られ、本研究で検討した範囲の凍結融解により生じたスケーリングが耐荷力に及ぼす影響は小さいことが確認された。
- 4) クラック相当ひび割れに関する解析結果について、既報の実験と同様にBFRP補強量が多いほどひび割れ本数の増加とひび割れ発生範囲の拡大、そしてひび割れ間隔が短くなる傾向が確認された。

謝辞：本研究の一部は、平成24年度に私立大学戦略的基盤研究形成支援事業として採択、設置された「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)」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 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，2000.7
- 2) 土木学会：FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)，複合構造シリーズ09，2018
- 3) 山内 匡，岩下健太郎，高見肇，松永 秀暁：BFRP，AFRPシート接着補強RC梁の曲げ挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.351-356，2018
- 4) 岩下健太郎，石川靖晃：環境温度変化による初期応力と高温度環境がFRPシート補強RC梁に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1619-1624，2019
- 5) 呉智深，岩下健太郎，谷ヶ城俊，石川隆司，濱口泰正：FRPシートの接着界面に及ぼす温度の影響，材料，Vol.54，No.5，pp.474-480，2005
- 6) 車谷麻緒，相馬悠人，根本優輝：非線形有限要素法によるせん断補強筋の異なるRCはりの3次元破壊シミュレーション，第18回応用力学シンポジウム，金沢，2015
- 7) 土木学会：コンクリートにおける水の挙動研究小委員会(349委員会)委員会報告書，コンクリート技術シリーズ112，2017
- 8) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314，2004
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012