

論文 環境温度変化による初期応力と高温環境が FRP シート補強 RC 梁に及ぼす影響に関する研究

岩下 健太郎*1・石川 靖晃*2

要旨:本研究では、FRP シート接着により曲げ補強された RC 梁の環境温度変化に伴い発生する初期応力と、高温環境が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て、AFRP シートと BFRP シートをそれぞれ接着した RC 梁に対し環境温度変化により生じる初期応力と、高温環境下での RC 梁の耐荷力を実験的に検証するとともに、FEM による初期応力解析ならびに耐荷力解析との連成解析を行った。その結果、本研究で考慮した環境温度変化により生じる初期応力や高温環境は FRP シート接着 RC 梁の耐荷力にほとんど影響しないことが確認された。

キーワード: FRP シート, RC 梁, 曲げ補強, 初期応力, 耐荷力, 連成解析

1. はじめに

数十年来、長期供用により老朽化した構造物の補修や補強が本格化しており、対象となる構造物は今後さらに増大することが予想されている。その補強を実現する工法の一つとして、簡便な施工手順で複雑な形状にも適応性に優れ、高い補強効果が得られる炭素繊維シートやアラミド繊維シート (AFRP シート) を構造物の表面に接着する補強工法が数多く採用されるようになり、これまでに盛んに研究が行われ、指針も取り纏められている^{1), 2)}。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による影響や、高温環境下での耐荷力といった環境温度の影響に関する研究は、接着材に温度に敏感でガラス転移温度も比較的低い樹脂材料を使用している観点から高い重要性があるが数少なく、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³⁾であり、構造物を対象とした研究はほとんど行われていない。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⁴⁾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も、Gebreyouhannes ら⁵⁾や米田ら⁶⁾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、高伸度繊維材として多くの施工実績がある AFRP シートと高い伸度を有することから最近注目されているバサルト繊維シート (BFRP シート) をそれぞれ接着した RC 梁に対する変動温度下における RC 梁の耐荷力を実験的に検証するとともに、FEM による初期応力と耐荷力の連成解析を行い、変動温度下における接着材の軟化が 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 梁の環境温度変化に伴う初期応力と高温環境での耐荷力に関する実験的検証

2.1 実験方法

RC 梁は 150mm×200mm の矩形断面で全長 2m の寸法とし、5 体作製した。内 2 体の下面に AFRP シートを、内 2 体の下面に BFRP シートをそれぞれ接着し、残り 1 体は FRP 未接着の状態環境温度を変化させる実験を行った。その詳細寸法を図-1 に示す。これらの梁には D13 鉄筋を圧縮側、引張側に 2 本ずつ、40mm のかぶりを確保して配筋した。また、D10 帯鉄筋 (SD295A) を 80mm 間隔で配置しており、十分なせん断耐力を確保し、終局時には曲げ破壊が先行するように設計した。養生方法については、コンクリートの打ち込み後、湿布養生を室温 (24~28℃) 環境下で 28 日間行った後、環境温度 20℃、湿度 50% に保持した劣化環境促進装置内に静置し、後述のコンクリート表面処理と FRP シート接着を経て、環境温度変化実験を行った。

FRP シート接着前に実施するコンクリート表面の処理は、補強効果を確実に確保するために必須の施工工程である。その手順は、ディスクサンダーにより表面を削り、エタノールを含ませた布により払拭したうえで 0.5 kg/m² にあたる量のエポキシプライマーを塗布することにより行った。ディスクサンダーの研削と布による払拭作業は劣化環境促進装置に運び込む前に 12 時間程度表面を乾燥させて装置外で行い、エポキシプライマーの塗布作業

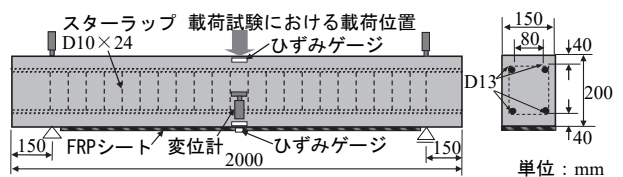


図-1 RC 梁の詳細寸法

*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 博 (工) (正会員)

*2 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科教授 博 (工) (正会員)

表-1 物性値一覧

材料特性	物性値
コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)	42.7
コンクリート引張強度 f_t (N/mm ²)	3.4
コンクリートポアソン比	0.2
コンクリート破壊エネルギー (N/mm)	0.0877
鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	295

表-2 物性値一覧

材料特性	AFRP シート	BFRP シート	接着材
引張強度 σ_f (N/mm ² , メーカー値)	2,060	1,900	45
ヤング係数 E_f (kN/mm ² , メーカー値)	118	90	1.5
破断伸び $\epsilon_f(=\sigma_f/E_f)$ (μ)	17,458	21,111	-
目付量 (g/m ²)	280	580	-
1層あたり換算厚さ t_f (mm)	0.195	0.22	0.6
補強量 $E_f t_f$ (kN/mm)	23.0	19.8	-
線膨張係数 ($10^{-6}/K$)	-6	5	60

以降は劣化環境促進装置内で行った。エポキシプライマーの表面が紫外線や熱を受けて酸化し、劣化して再処理が必要となる前に FRP シートを接着する必要があることから、塗布から 12 時間後にエポキシ樹脂により FRP シートを含浸、接着させた。このとき、FRP シートの表面、裏面にそれぞれ 0.5 kg/m² にあたる量のエポキシ樹脂を使用した。コンクリート、鉄筋、各種 FRP シートの物性値を表-1 と表-2 に示す。コンクリートの物性値は載荷試験直後にテストピース 3 体の圧縮試験と割裂引張試験を行い得られたものである。鉄筋と FRP シートの物性値としては公称値を示す。

環境温度変化実験においては、供試体の長手方向中央部の FRP シートの表面に検長 5mm のひずみゲージを設置し、FRP シートひずみを測定し、コンクリート側面の上縁部、下縁部の表面に検長 60mm のひずみゲージをそれぞれ設置し、コンクリートの圧縮、引張りひずみを測定した。また、供試体周辺ならびに供試体表面に熱電対を設置し、環境温度と供試体表面温度を測定した。

環境温度変化実験は劣化環境促進装置内に RC 梁を支点間隔 1800mm で静置し、コンクリートの材齢 36 日目から環境温度を変化させた。具体的には 20°C、50°C、20°C を 1 サイクルとして 6 サイクル繰り返し変化させ、その後 20°C、-10°C、20°C を 1 サイクルとして 4 サイクル繰り返し変化させた。なお、各温度で 12 時間維持した。

前述の環境温度変化実験後、コンクリートの材齢 62 日目に、FRP シート補強 RC 梁の 3 点曲げ試験を室温 (20°C 程度) および 40°C 温度下で実施した。なお、FRP シート未接着の RC 梁は 40°C 程度の環境温度の影響は限定的であると思われたため、室温のみで行うこととした。載荷

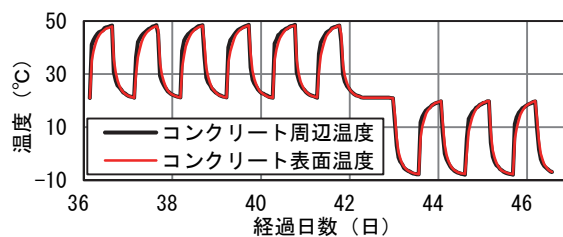


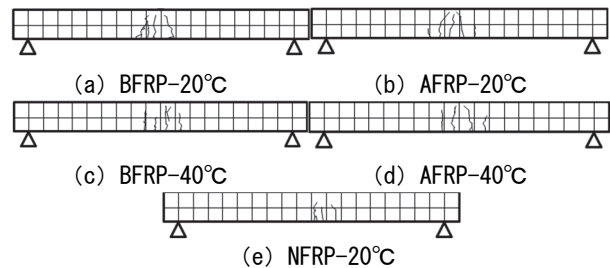
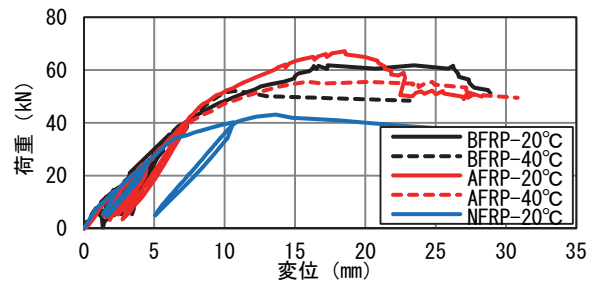
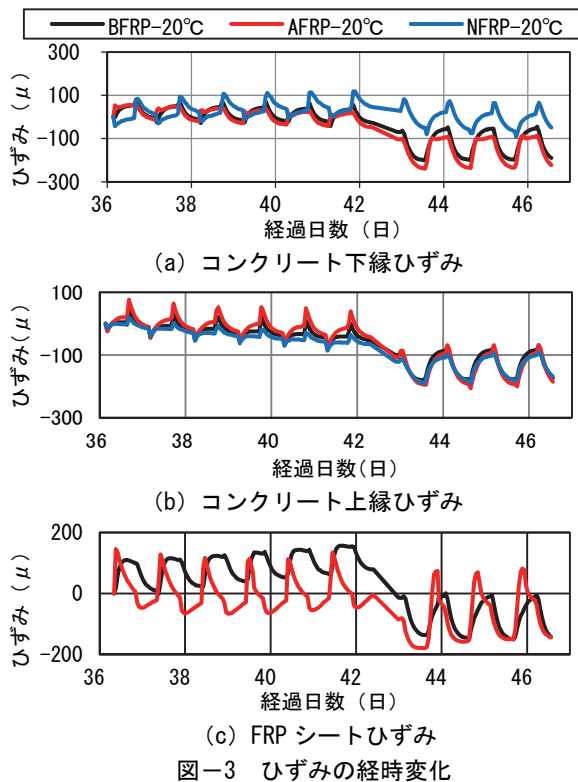
図-2 供試体周辺環境温度と表面温度の経時変化

は鋼製フレームを組み立てた載荷フレームにより行い、支点間隔 1800mm で静置し、供試体長手方向の中央部に 350kN 油圧ジャッキにより荷重を与えることで実施した。200kN ロードセルを油圧ジャッキと RC 梁の間に設置して荷重を測定した。また、環境温度変化実験時に使用した FRP シートひずみゲージとコンクリートひずみゲージを載荷実験でも使用し、供試体長手方向の中央部における FRP シートひずみとコンクリート側面における上縁、下縁ひずみを測定した。さらに、供試体長手方向の中央部、両側面にストローク 50mm の変位計を、支点部にストローク 20mm の変位計をそれぞれ設置し、たわみ量を変位として測定し、供試体長手方向の中央側面の引張鉄筋深さ位置に検長 2.5mm の π 型変位計を 100mm 間隔で設置してひび割れ幅の計測を行った。鉄筋降伏前は 10kN 毎、鉄筋降伏後は変位 2mm 毎を目安に静的に漸次荷重を増加させることで行い、複数ひび割れの発生、鉄筋の降伏、そして FRP シートの剥離といった損傷が生じた後に発生が予想されたコンクリートの圧縮破壊が発生するまで実験を継続した。今後、各供試体は補強材の種類と載荷時の環境温度で呼称する。すなわち、それぞれ AFRP-20°C、AFRP-40°C、BFRP-20°C、BFRP-40°C、NFRP-20°C に「供試体」を付けた名称で呼称する。

2.2 実験結果と考察

まず、供試体周辺環境温度ならびにコンクリート表面温度の経時変化を図-2 に示す。20°C と 50°C の繰り返しサイクルと 20°C と -10°C の繰り返しサイクルにおける温度変化の挙動は環境温度と表面温度で同様になっていることが確認された。次に、コンクリート上縁ひずみ、下縁ひずみ、そして FRP ひずみの経時変化を図-3 にそれぞれ示す。ここで、AFRP-40°C 供試体および BFRP-40°C 供試体におけるひずみ挙動はそれぞれ AFRP-20°C 供試体および BFRP-20°C 供試体における挙動と同様であったため割愛する。いずれの供試体でもひずみ変動は 300 μ ~ 100 μ 程度に留まり、変動幅の増加は見られなかった。また、外観観察の結果、ひび割れは確認されなかった。これらの結果から、この変動温度は RC 梁にマクロな損傷を生じさせていないと推測された。

載荷試験の結果から、荷重-変位関係を図-4 に、ひび割れ分布を図-5 にそれぞれ示す。まずは、載荷時の



損傷状況を説明する。荷重を負荷し始めてから 10kN 前後でひび割れが発生し、その後は複数本のひび割れが 100mm 程度の間隔で供試体中央部付近に発生していき、引張鉄筋の降伏に至る。NFRP-20°C 供試体はその後の荷重増加はほとんどなく、供試体圧縮縁の圧縮破壊に至り、実験を終了した。FRP シート補強供試体では鉄筋降伏後、新たなひび割れ発生は無く、荷重変位曲線の勾配はやや小さくなるものの、しばらく荷重増加が続き、供試体中央部付近の曲げひび割れを起点とした FRP シートの剥離が発生し、荷重増加が無くなる。剥離が FRP シートの端部まで進展した直後に急激な荷重低下が生じ、NFRP-20°C 供試体と同レベルの荷重まで低下する。その後は NFRP-20°C 供試体と同様の挙動となる。すなわち、FRP シート完全剥離後は無補強供試体と同様の曲げ挙動となる。

次に、荷重変位曲線の各変曲点における値を比較して、FRP シートによる補強効果について考察する。FRP シートの補強量が限定的なため、従来の研究⁷⁾と同様に FRP シート補強によるひび割れ発生荷重の向上効果は表れなかった。鉄筋降伏荷重については NFRP-20°C 供試体における値を基準として FRP 補強供試体では 19%~31%、最大荷重は 21%~56% 向上しており、FRP シート補強による補強効果が確認された。環境温度 20°C と 40°C のケースで比較すると、ひび割れ発生時と鉄筋降伏時の荷重およびその間の荷重変位曲線は同様である。最大荷重については 40°C 供試体における方がやや低いが、鉄筋降伏後の荷重変位曲線の勾配は類似しており、FRP シートの

剥離発生と進展速度の時間差が起因すると考えられるため、この時間差のばらつきは範疇と思われる。

ひび割れ分布状況に関して、FRP シート補強供試体では、NFRP-20°C 供試体に比べてひび割れ本数が数本増加するとともに、ひび割れの分布範囲が 1.5 倍程度大きくなっており、ひび割れ間隔もやや狭まっている。このように、FRP シート接着によるひび割れ分散効果が見られた。また、ひび割れ分布状況に関しても、環境温度 20°C と 40°C のケースで類似した傾向が見られた。

3. 初期応力解析ならびに耐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

ここでは、本研究で実験を行った 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 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⁸⁾。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-6 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

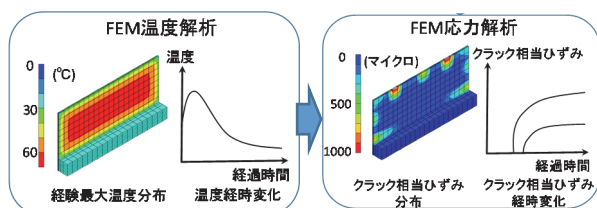
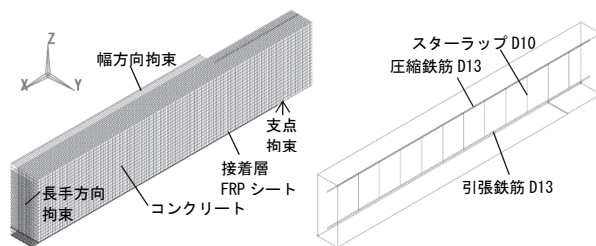
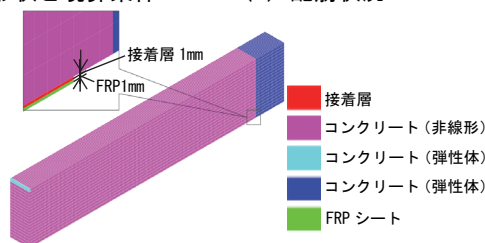


図-6 FEM 温度解析と応力解析の連成イメージ⁶⁾



(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-7 解析モデル概要

表-3 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)	$41.35(t-0.37)/(4.034+0.927(t-0.37))$
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)	$0.065 f_c^{0.85}$ (コンクリート)
鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	295
ポアゾン比	0.2
破壊エネルギー (N/mm)	0.04385 (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 (1/K)	0.000007 (コンクリート)

配的である保有耐荷力解析に大別される。Input data を読み込み後、解析ステップは、解析対象の要素領域や変位固定境界の変化を表す Lift step, 解析対象の時系列挙動を解く Time step, およびある時刻での外力作用を想定する場合には、その挙動を評価する Load step にて構成される。Iteration step は、Time step, Load step に属する。非線形応力解析では、力の釣合条件が満たされるまで不平衡力を再分配する必要があるが、Iteration step とは、再分配の際の繰り返し計算のステップを意味する。なお、応力算定に使用される構成則モデル（応力ひずみ関係を表現するための数理モデル）は、Time step および Load step によらず全て同一である。前述したことを実行するためには、材齢の変化による硬化現象とひずみ軟化による材料非線形性を同時に考慮できる構成則モデルの開発が必要であり、その一手法として、伊藤ら⁹⁾は、Solidification concept¹⁰⁾の概念を格子等価連続体モデル¹¹⁾に導入することで、材齢依存型構成則モデルを構築している。JCMAC3-U ではこの構成則モデルを応力解析コードに取り入れている。Solidification Concept は、ひずみ軟化挙動と材齢に伴う硬化挙動を統一的に取り扱う概念である。格子等価連続体モデル¹¹⁾は、鉄筋コンクリートはひび割れが生じるまでは弾性連続体、ひび割れ発生後は、コンクリートの主ひずみ方向に配置された Main Lattice, せん断 Lattice および鉄筋を表す Lattice にてモデル化された構成則モデルであり、新たに節点を設けることなく鉄筋比のみで鉄筋の影響を考慮できること、基本的に一

軸の応力 - 等価一軸ひずみ関係の組み合わせで表現されるため、解の収束性が良いといった特徴がある。すなわち、材齢の影響や初期ひずみの有無、また繰返し応力場であっても、せん断剛性も含めて任意の硬化過程で3次元連続体構成モデルを記述することが可能となっている。

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-7 (a) に、配筋状況を図-7 (b) に示す。FRP シートと接着層の厚みを図-7 (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 x, y 軸方向については 5mm メッシュとした。z 軸方向については 10mm メッシュとし、結果、節点数は 74128 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ため、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〕¹²⁾を基に表-3 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 304kg/m³, 単位水量は 161kg/m³である。熱膨張係数については 7~13 μ /°C との知見があり、コンクリート単体での実測値において、乾燥収縮の影響が 7 μ /°C 程度であったことから 7 μ /°C とした。また、引張強度と破壊エネルギーについては石川らの研究⁸⁾に掲載を参照して乾燥収縮の影響を考慮することとし、実測値の 5 割の値を与えた。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、

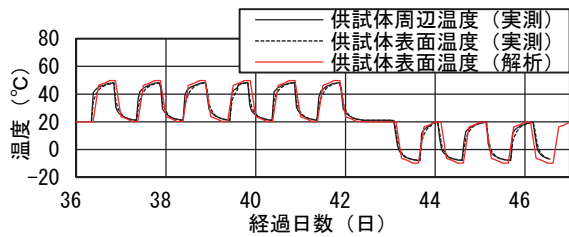


図-8 供試体表面における温度の経時変化

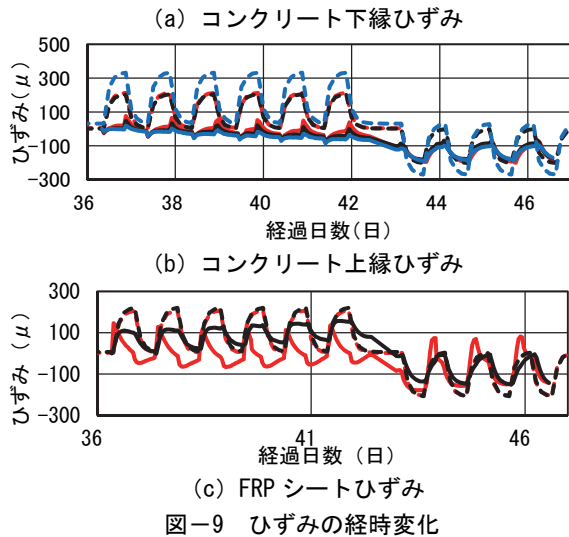
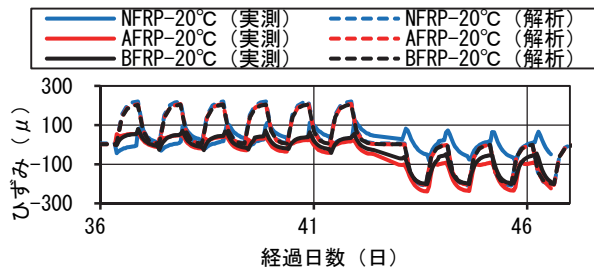


図-9 ひずみの経時変化

接着材の実際の厚さは実測した結果を基に 0.6mm とした。なお、40℃環境下では接着材が軟化する可能性があることが既存の知見³⁾において指摘されていることから、これを基に接着材のヤング係数を 1/2 に低減することで模擬した。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、36 日目から温度サイクルを与え、62 日目に強制変位を与えた。

温度解析の結果より、繰り返し温度環境下での供試体表面における温度の経時変化を図-8 に示す。実験と解析の結果は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-9 にそれぞれ示す。ひずみの経時変化挙動について概ね妥当な傾向が見られる。

耐力解析の直前におけるひずみ分布状況を図-10 に示す。いずれのケースでも同様の状況であったため、一例として、BFRP-20℃供試体についてのみ示す。同図において、-1~23 μ程度のひずみしか生じず、クラック

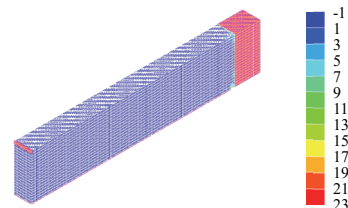


図-10 クラック相当ひずみ分布 (BFRP-20℃)

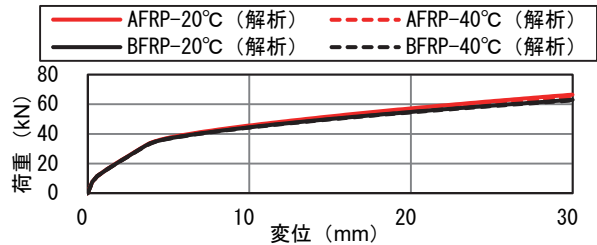


図-11 荷重変位曲線 (20℃と 40℃供試体比較)

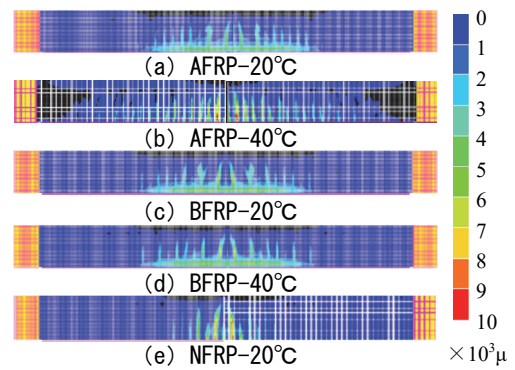


図-12 クラック相当ひずみ分布状況

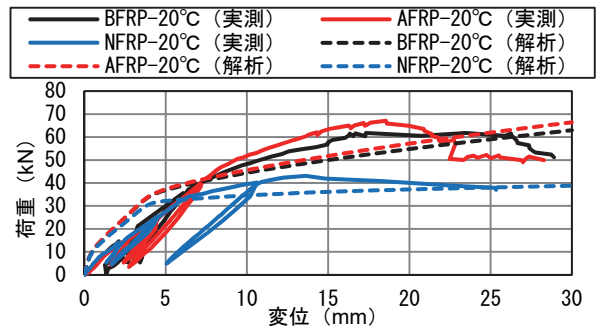


図-13 荷重変位曲線 (20℃供試体)

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マクロなひび割れは発生しないことが確認された。

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、1.4%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。

BFRP-20℃供試体と BFRP-40℃供試体の荷重-変位関係を図-11 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-12 に示す。解析の荷重変位曲線とクラック相当ひずみは実験のものと同様であり、

本研究で検討した範囲の高温度環境は RC 梁の耐荷力に対する影響は小さいことが確認された。

さらに、全供試体の荷重変位曲線を図-13 に示す。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。初期勾配が実験値と解析値で異なっているが、これは載荷試験において使用している載荷フレーム中央部にあるボルト締め部の載荷当初における締め分だけ変位が増加してしまうためであると考えられる。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。

4. 結言

本研究では FRP シート補強 RC 梁の温度変化実験と載荷試験による実験的検討と、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行い、FRP シート補強 RC 梁の環境温度変化に伴い発生する初期応力と、高温度環境が耐荷力に及ぼす影響について検証した。得られた知見を以下に纏める。

- 1) FRP シート補強 RC 梁の温度変化実験による初期応力の影響を検討したところ、実験的にはコンクリート上縁、下縁ひずみと FRP ひずみの挙動と外観観察の結果、本研究で実施した温度変化では RC 梁にマクロな損傷を生じさせていないと考察された。初期応力解析を行った結果、本研究で実施した温度変化ではクラック相当ひずみは発生せず、解析的にも実験同様の結果となった。
- 2) 従来の研究と同様に FRP シート補強によるひび割れ発生荷重の向上効果は表れなかった。鉄筋降伏荷重や最大荷重が FRP シート補強により向上しており、FRP シート補強による補強効果が確認された。環境温度 20℃と 40℃のケースで比較すると、ひび割れ発生時と鉄筋降伏時の荷重およびその間の荷重変位曲線は同様であり、最大荷重についてもばらつきの範疇と思われる程度の違いしか見られなかった。ひび割れ分布状況に関しても、環境温度 20℃と 40℃のケースで類似した傾向が見られた。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、実験結果と同様の挙動が見られ、本研究で検討した範囲の高温度環境は RC 梁の耐荷力に対する影響は小さいことが確認された。
- 3) ひび割れ分布状況に関して、FRP シート補強により RC 梁に生じるひび割れの本数が数本増加するとともに、ひび割れの分布範囲が大きくなっており、間隔はやや狭まっており、FRP シート接着によるひび割れ分散効果が見られた。また、解析的に検討した

結果においても、クラック相当ひずみ分布について同様の傾向が見られた。

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：コンクリートライブラリー101 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
- 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) 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
- 4) 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
- 5) Gebreyouhannes, E., Maekawa, K.: Numerical simulation on shear capacity and post-peak ductility of reinforced high-strength concrete coupled with autogenous shrinkage, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.1, pp.73-88, 2011
- 6) 米田大樹，石田哲也，前川宏一，Gebreyouhannes, E., 三島徹也：コンクリートの微視的損傷および細孔内水分状態に着目した準微細ひび割れモデル，土木学会論文集 E2，Vol.71，No.3，pp.263-282，2015
- 7) 岩下健太郎，佐藤大地，馬場 進，松本信行：バサル繊維シートとコンクリートの付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1912-1917，2014
- 8) 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
- 9) 伊藤睦，石川靖晃，上田尚史，田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の耐荷力解析手法の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.19-24，2012
- 10) Ishikawa, Y., Kunieda, M., Srisoros, W. and Tanabe, T.: Modeling of uni-axial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, Proc. of Concreep7, pp.393-398, 2005.
- 11) 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
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2012