

高温環境下における BFRP シート巻き立てによるコンクリートの膨張抑制に関する研究

名城大学 学生会員 ○田口 展靖
名城大学 正会員 岩下 健太郎

1. はじめに

焼却炉のような高温となる施設に、使用されるコンクリートにおいて、膨張、収縮の長期繰り返しによる損傷の蓄積を抑制するために、耐熱性に優れる BFRP シートを接着し側圧を与えて、膨張を抑えることに着想した。本研究では、酸化アルミニウムを主成分とした耐火接着剤で BFRP シートを接着したコンクリートの円柱供試体を作成し、事前加熱を行ったうえで圧縮試験を行い、その効果を検証した。また、コンクリートの高温による成分分解の影響を考慮しない FEM 解析を行い、その影響を検証した。

2. 本研究の実験方法

本研究では、普通ポルトランドセメントを使用しφ100×200mmの円柱供試体を計 13 本作製した。養生終了後にマッフル炉を用いて供試体の事前加熱を行い、圧縮試験を行った。示方配合を表 1 に示す。

供試体の事前加熱温度は 350℃、500℃ の 2 種類とし、強度変化を比較するために室温（20℃）で保管した供試体の実験も行った。供試体 No.は事前加熱時の BFRP シートの有無（bBF, bN）、事前加熱温度（350, 500）、圧縮試験時の BFRP シートの有無（aBF, aN）で表す。表 2 に示すように BFRP シート接着供試体は 4 本とし、2 本は 350℃、2 本は 500℃ の事前加熱温度とした。事前加熱を行った BFRP シート接着供試体は、加熱終了後にそれぞれ 1 本ずつ BFRP シートををはがし、損傷状態を観察した上で圧縮試験を行った。

BFRP シートは 0°と 90°の方向に各々150g/m² 目付のバサルト繊維を 2 方向に配向させたものを使用し、酸化アルミニウムを主成分とした耐火接着剤を用いて円柱供試体へ巻き立て接着を行った。表 3 に BFRP シートの物性を示す。BFRP シートの線膨張係数については、竹村らの研究¹⁾によれば玄武岩の線膨張係数は 5μ/℃ とされているため、FEM 解析の際に BFRP シートの物性値としてこの値を入力した。

供試体の事前加熱にはマッフル炉を用いた。マッフル炉の内寸は W300×D350×H250mm であり、供試体が縦に計 6 本入る。加熱は目標温度到達から 2 時間継続し、加熱終了後は炉内にて自然冷却を行った。事前加熱終了後、供試体温度を室温で安定させ、載荷速度 1mm/min の速度で圧縮試験を行った。荷重と変位は試験機の出力を採用した。

3. 実験結果と考察

図 1 に事前加熱を行った供試体の応力ひずみ曲線を示す。BFRP シート接着の有無にかかわらず、事前加熱温度が同じであった供試体の最大応力に有意差がみられなかったため、ここでは事前加熱温度の違いのみで比較を行う。BFRP シートは圧縮強度にほとんど寄与しないため妥当な結果である。bN-20-aN の平均圧縮強度が 61.4N/mm² であったのに対し、350℃ では平均 52.1N/mm²、500℃ では平均 40.8N/mm² でそれぞれ 15.1%、33.6%の低下が確認できた。吉田らの研究²⁾によると、200℃～450℃ で C-S-H の分解が、450℃～600℃ では Ca(OH)₂ の分解が発生するとされて

表 1 示方配合

設計強度 (N/mm ²)		30
水セメント比 (%)		48.0
スランプ (cm)		15
細骨材率 (%)		43.5
単位量 (kg/ mm ³)	水	165
	セメント	344
	細骨材	827
	粗骨材	987
	高性能 AE 減水剤	2.752

表 2 パラメータ内訳

事前加熱温度	bN, aN	bBF, aN	bBF, aBF
20℃	3	-	-
350℃	3	1	1
500℃	3	1	1

表 3 BFRP シートの材料物性

ヤング係数 (N/mm ²)	90000
引張強度 (N/mm ²)	1900
3 周巻き立て時の換算厚さ (mm)	0.171
線膨張係数 (μ/℃)	5

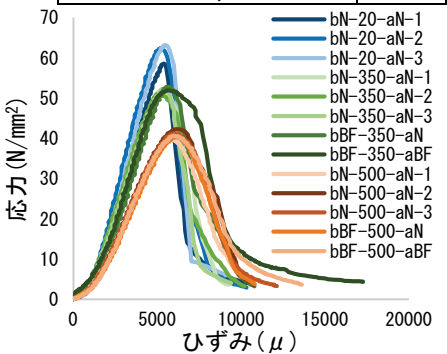


図 1 応力ひずみ曲線（実験データ）

いる。そのため、事前加熱温度 500℃ の供試体は 350℃ の供試体に比べて成分分解の量が多くなり、強度低下がより顕著に表れたのではないと思われる。これより、BFRP シート接着によって側圧を与えたとしても、加熱による強度低下を抑制できないことがわかった。

図 2 に圧縮じん性係数を示す。圧縮じん性係数は、鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法 (JSCE-G551) に記載されている計算式によって算出した。bN-350-aN と bBF-350-aN については差がみられないが、bBF-350-aBF については bN-350-aN より 11.7%の向上がみられ、bN-20-aN と変わらない値となった。しかし、bN-500-aN と bBF-500-aBF は同様の低下量となった。これは、加熱による成分分解の量が 350℃ よりも 500℃ の方が多かったことが原因と思われる。また、コンクリートの線膨張係数が $10\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、BFRP シートの線膨張係数は $5\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ であり、加熱による膨張量に 2 倍の差があるため、より事前加熱温度の高い 500℃ では BFRP シートがコンクリートの膨張を抑制しきれず $10\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ で膨張したことで損傷した可能性がある。

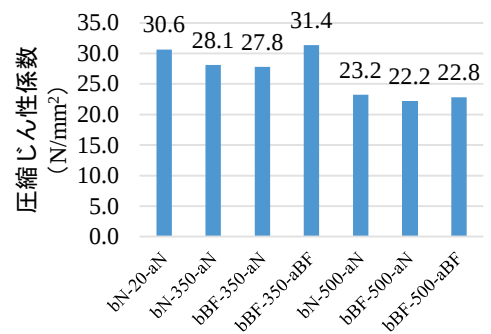


図 2 圧縮じん性係数一覧

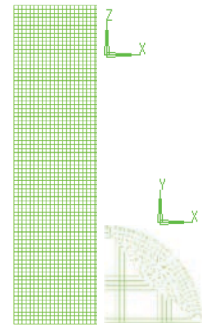


図 3 解析モデル概要

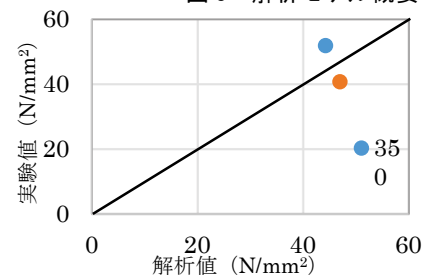


図 4 実験値と解析値の圧縮強度比較

4. FEM による解析的検証

ここまで説明してきた BFRP シート接着によるコンクリートの耐熱性向上効果に関する実験的研究について、温度と耐荷力の連成解析が行える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。

図 3 に解析モデルの全体形状を示す。モデルは X 軸方向と Y 軸方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとした。BFRP シートについては、面方向は 2.5mm メッシュ、厚さ方向は 1mm メッシュとした。なお、コンクリートの材料モデルは 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会編) のものを用いた。BFRP シートは弾性体としてモデル化し、コンクリートについては非線形構成測を用いてモデル化した。コンクリート打込みを解析開始として、加熱開始までは一定温度 (20℃) として 28 日養生後に 500℃ の温度を 2 時間与える設定とした。強制変位は 1/20mm 毎で最大 6mm まで加えることとし、ノルムの閾値は 0.001、反復回数は 100 回とした。

図 4 に、BFRP シート接着供試体の実験値と解析値の圧縮強度比較を示す。事前加熱温度が 350℃ の場合の圧縮強度は実験値の方が解析値よりも $7.6\text{N}/\text{mm}^2$ 大きく、500℃ の場合は実験値が解析値よりも $6.3\text{N}/\text{mm}^2$ 小さくなる結果となった。事前加熱温度 500℃ の結果がこのようになったのは、FEM 解析の際に加熱によるコンクリートの成分分解を考慮していないためだと思われる。事前加熱温度が 500℃ の場合、コンクリートには成分分解が発生しており、それによる強度低下も発生する。しかしながら、解析にて成分分解を考慮していないためそれによる強度低下が発生せず、むしろ養生が進む形となり強度が上がる結果となったと考えられる。

5. まとめ

実験と FEM 解析による検討を行った結果、BFRP シートの使用は 350℃ の加熱であれば圧縮じん性係数の向上がみられたものの、耐荷性能の向上には影響しないことが分かった。500℃ で加熱を行うと成分分解が顕著に表れ、それによる強度低下や圧縮じん性係数の低下が確認できた。

参考文献

1) 竹村貴人, 高橋学, 長田昌彦, 北村圭史, 精密石材の岩石学的特徴と湿潤環境下での超微小変形の発生機構に関する考察, 材料, Vol.63, No.3, pp. 227-233, 2014

以下参考文献省略