

高温負荷が連続繊維シートはく落防止工の 押抜き耐力に及ぼす影響

櫻庭 浩樹¹・古賀 裕久²・西崎 到³

¹正会員 (国研) 土木研究所先端材料資源研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: hiro-sakura@pwri.go.jp

²正会員 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター (同上)

E-mail: hkoga@pwri.go.jp

³正会員 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター (同上)

E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

連続繊維シートはく落防止工が、車両事故等による火災を受けた場合、外観が変化し、はく落防止工の重要な物性である押抜き耐力が低下することが考えられる。しかし、高温負荷が外観や押抜き耐力に与える影響は十分に明らかになっていない。そこで、連続繊維シートを接着したコンクリート試験体を、100℃～300℃の条件で60分間加熱し、常温に冷却後の外観、色差および押抜き耐力を調べた。色差については、300℃で加熱後には明確な変化があることを確認した。押抜き耐力については、200℃で加熱後には十分な耐力を保持したが、300℃では耐力をほとんど保持できないことが確認された。さらに、加熱後の押抜き耐力と色差の関係を検討し、外観から押抜き耐力の低下を確認できる可能性を示した。

Key Words : continuous fiber sheet, elevated temperature, punching load capacity, appearance

1. はじめに

連続繊維シートは、はく落防止工として、トンネル覆工コンクリート等に適用されている。はく落防止工として連続繊維シートを用いる場合、はく落抵抗性（押抜き耐力）が重要な物性となる。

道路トンネルにおいて車両火災が発生した場合、トンネル覆工コンクリートに適用された連続繊維シートが加熱を受ける可能性がある。例えば、高速道路トンネルについて、平成元年から平成23年の火災事故発生数を調査した結果、調査期間内では年平均で12件程度発生し、その原因として車両故障が多いことも報告されている¹⁾。

火災が発生して規模がある程度大きくなった場合、高温負荷を受けて連続繊維シートの押抜き耐力が低下することが考えられるので、補修の要否を判断する必要があるが、押抜き耐力と加熱条件の関係など、判断に必要な知見は十分に得られていない。

そこで、本研究では、連続繊維シートはく落防止工が火災による加熱を受けた場合の基礎的な知見を得ることを目的として、連続繊維シートを接着したコンクリート試験体を100℃～300℃の条件で60分間加熱し、常温に冷却後の、外観、色差および押抜き耐力を調べた。

2. 加熱および押抜き試験方法

(1) 試験体

図-1に試験体の概要を示す。試験体の基盤には、JIS A 5372 付属書 Eに規定する上ぶた式U形側溝（ふた）の1種呼び名300（400×600×60mm）（以下、U形ふた）を用いた。U形ふた中央部には、φ100mmの形状でコンクリートドリルによるコア抜き処理を施した。

表-1に試験に用いたはく落防止工の仕様を示す。基盤の接着面をディスクグラインダを用いて研磨した後、プライマー、パテおよび含浸樹脂を塗布し、含浸樹脂により連続繊維シート一層を基盤に接着した。各材料の施工間隔は、1日程度とし、指触により硬化していることを確認して次工程に移った。連続繊維シートには、直交二方向で、目付量200g/m²の炭素繊維シートを用いた。はく落防止工の施工は、20℃の室内で行った。

また、使用材料の熱特性を確認することを目的として、プライマー、パテ、含浸樹脂および炭素繊維シートについて、JIS K 0129（熱分析通則）に基づいて熱分析（熱重量測定）を行った。熱分析では、空気雰囲気下で、20℃/minの条件で400℃まで昇温させてTG曲線を取得した。TG曲線の一定あるいはゆるやかな減少部の直線と、

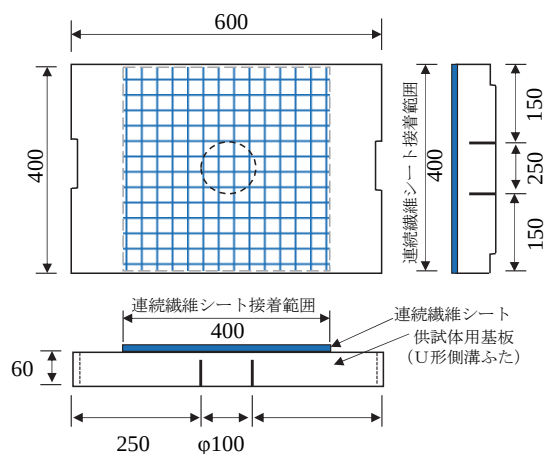
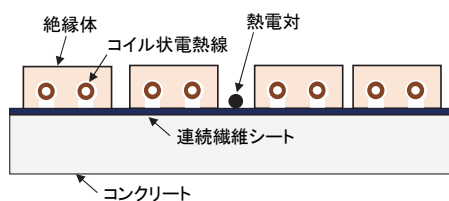


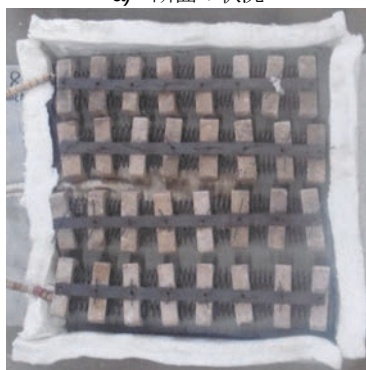
図-1 試験体の概要

表-1 はく落防止工の仕様

種類	主成分	標準塗布量 (kg/m ²)
プライマー	エポキシ系	0.2
パテ	エポキシ系	1.0
含浸樹脂	エポキシ系	0.6
種類	繊維方向	目付量
炭素繊維シート	直交二方向	200g/m ²



a) 断面の状況



b) 上面の状況

図-2 加熱方法の概要

重量が著しく減少する部分で引いた直線の交点から重量減少開始温度 T_i を求めた²⁾。

(2) 加熱試験方法

図-2に加熱方法の概要を示す。加熱は、コイル状の伝熱線への通電による発熱を利用して行った。加熱面は、連続繊維シートが接着された面とした。電熱線は絶縁体に挿入して固定し、加熱温度の制御は加熱面の中心部に熱電対を配置して行った。電熱線と熱電対の配置後、図-3のように厚さ50mmの断熱材で覆った。



図-3 断熱材の設置状況

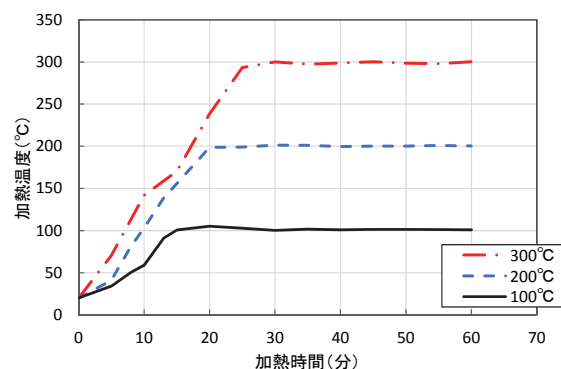


図-4 加熱温度と時間

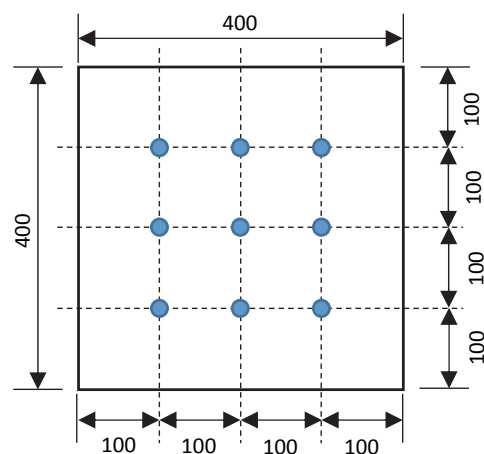


図-5 色差の測定点 (単位: mm)

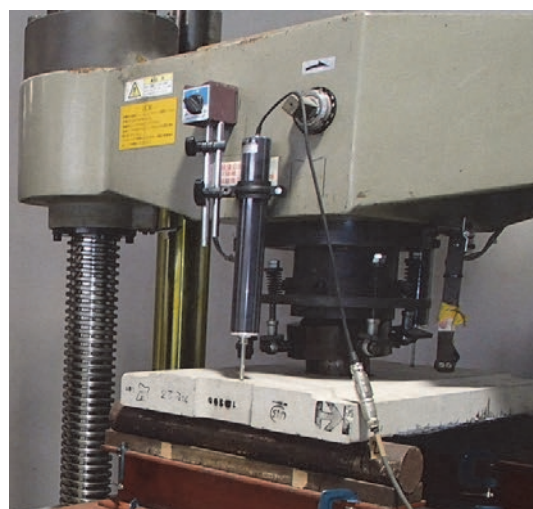


図-6 押抜き試験の実施状況

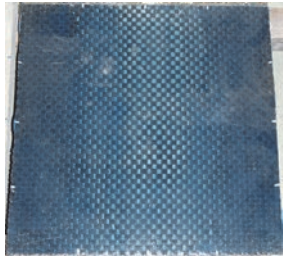
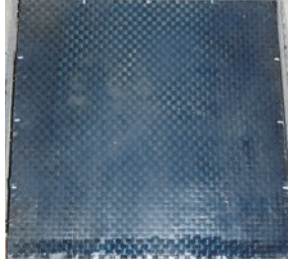
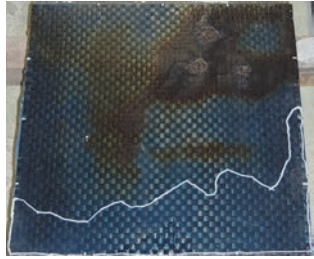
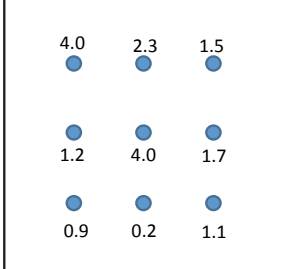
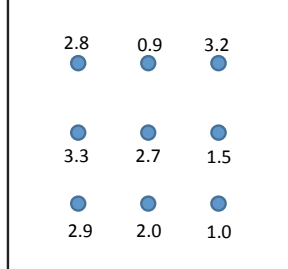
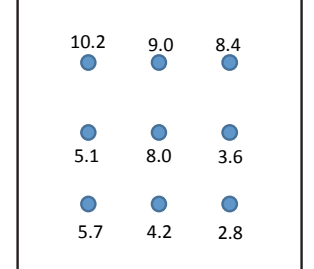
外観			
色差の分布 ※図中の数値は色差	 4.0 2.3 1.5 1.2 4.0 1.7 0.9 0.2 1.1	 2.8 0.9 3.2 3.3 2.7 1.5 2.9 2.0 1.0	 10.2 9.0 8.4 5.1 8.0 3.6 5.7 4.2 2.8
加熱条件	a) 100℃	b) 200℃	c) 300℃

図-7 加熱後の試験体表面の外観と色差 (ΔE^*_{ab}) の分布

図-4に加熱温度と時間を示す。加熱条件は、加熱無し、100℃、200℃、300℃の4水準とし、加熱時間を60分とした。試験体の数量は、各水準で1体とした。

加熱温度は、乗用車によるトンネル火災の最高温度が400℃程度であること³⁾、および、過去の研究で表-1に示すはく落防止工は360℃を超えて加熱すると炭化したこと⁴⁾を考慮して設定した。加熱時間は、”建築物の非耐力壁の延焼の恐れがある部分に求められる要求耐火時間を参考に設定した⁵⁾。60分加熱後、試験体を覆う断熱材を直に取り外し、室温まで徐冷した。

次に、試験体表面の色差を測定した。表色系は $L^*a^*b^*$ とし、JIS Z 8730 (色の表示方法-物体色の色差) に基づいて、加熱前の試験体を基準とした色差 (ΔE^*_{ab}) を求めた。加熱前後の色差の測定には色差計 (KONICA MINOLTA製CR-400) を用いて1箇所あたり3回測定し、その平均を測定値とした。測定位置は図-5に示す連続繊維シート接着面の9箇所とした。

(3) 押抜き試験方法

押抜き試験の実施状況を図-6に示す。押抜き試験は、加熱無し、100℃、200℃および300℃加熱後の4水準であり、加熱試験後の試験体を用いて実施した。载荷条件は、JSCE-K 533 (コンクリート片の剝落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法 (案)) に準拠した。

3. 加熱および押抜き試験の結果と考察

(1) 加熱試験

加熱後の試験体表面の外観と色差 (ΔE^*_{ab}) の分布を

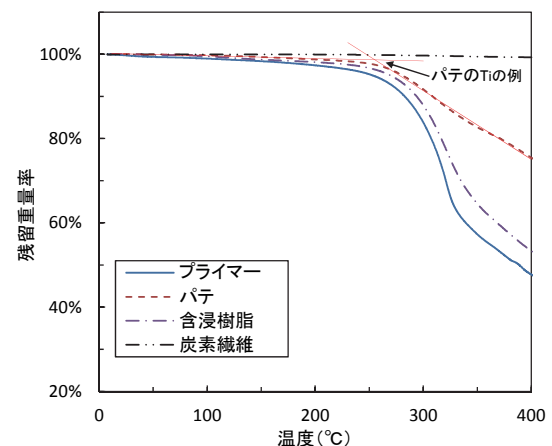


図-8 各材料のTG曲線

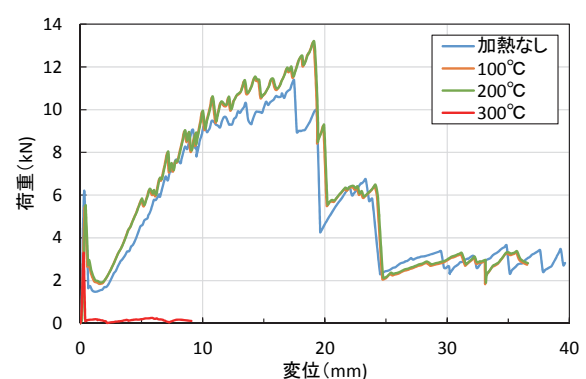


図-9 荷重-変位関係

図-7に示す。加熱後の外観については、100℃と200℃の場合、やや光沢は失われているが、顕著な変色は認められなかった。300℃の場合、部分的に濃茶色に変色した。なお、300℃の場合、図-7 c)の白線よりも上部の範囲には浮きが生じていた。

色差の分布は、100℃の場合、0.2～4.0の範囲で、9箇

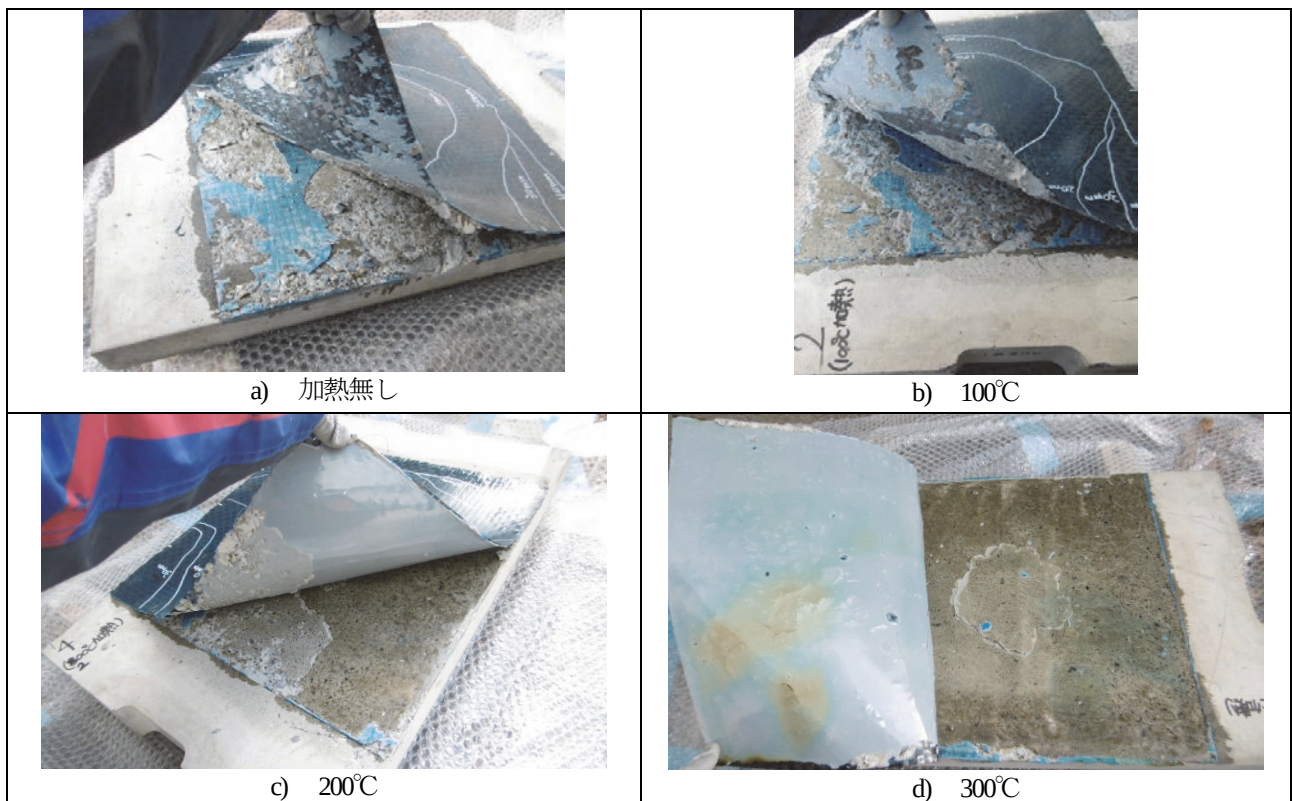


図-10 押抜き試験後の破壊形態

所の平均は1.9であった。200℃の場合、0.9～3.3の範囲で、9箇所の平均は2.3であった。これらの温度では、色差に大きな違いは認められなかった。

一方、300℃の場合、色差の分布は2.8～10.2の範囲で、9箇所の平均は6.3となった。濃茶色に変色した部分もあることから、100℃および200℃の場合よりも大きくなったものと考えられる。よって、本研究で用いたはく落防止工については、色差の平均が6程度になった場合、外観の変化が明確に表れるものと推察される。

各材料のTG曲線を図-8に示す。重量減少開始温度 T_i を算定した結果、プライマー、パテおよび含浸樹脂は、それぞれ、278℃、254℃および279℃となった。よって、250℃程度まではこれらの熱分解による劣化は小さいものと推察される。炭素繊維については、400℃までの範囲では、重量は著しく減少しなかった。

(2) 押抜き試験

荷重-変位関係を図-9に示す。加熱温度200℃までは、加熱無しと同等の荷重-変位関係を示したが、加熱温度300℃の場合、最大荷重がほぼゼロとなった。

押抜き耐力と変位を表-2に示す。変位が10mm以上の最大荷重を押抜き耐力とした。押抜き耐力は、200℃までは加熱無しと同等の値を保持できることがわかった。これは、前節で述べたように、200℃まではプライマー、パテおよび含浸樹脂の熱分解による劣化が小さかったためと考えられる。

表-2 押抜き耐力と変位

加熱条件	押抜き耐力 (kN)	押抜き耐力時の変位 (mm)
加熱なし	11.4	17.5
100℃	13.1	19.1
200℃	13.2	19.1
300℃	0.06	10.1

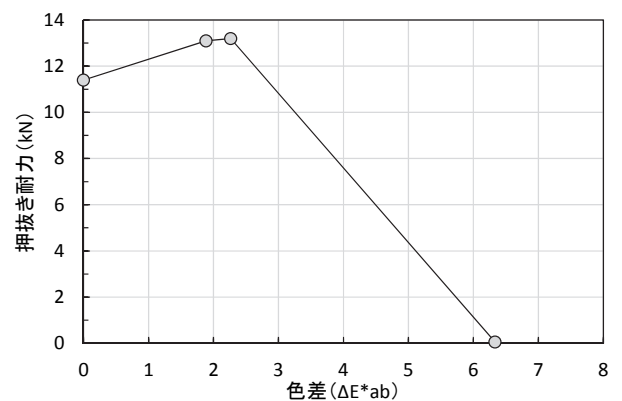


図-11 押抜き耐力と色差 (ΔE^*_{ab}) の関係

押抜き試験後の破壊形態を図-10に示す。加熱無しおよび100℃の場合は基盤破壊ならびにパテや含浸樹脂の凝集破壊、200℃の場合はそれらに加えてプライマーとパテの界面のはく離が観察された。300℃の場合、押抜き試験前から浮きが生じていた範囲では、プライマーとパテの界面のはく離が観察された。これらの結果から、

300℃の場合、プライマーとパテの界面の接着力が試験前から失われたことにより、押抜き耐力がほぼゼロになったものと推察される。

押抜き耐力と色差 (ΔE^*_{ab}) の関係を図-11に示す。色差は、測定した9箇所の平均値である。色差が2程度までは押抜き耐力は加熱無しと同等以上となり、色差が6程度の場合、押抜き耐力がほぼゼロになった。この結果は、色差がある程度大きくなった場合、加熱後の押抜き耐力の低下を推察できる可能性を示している。図-7に示したように色差6程度では外観の変化が明らかである。よって、本研究で用いたはく落防止工については、目視で判別できるほどの変化がある場合、加熱後の押抜き耐力は期待できないものと思われる。

4. まとめ

本研究では、連続繊維シートを接着したコンクリート試験体を、100℃～300℃の条件で60分間加熱し、常温に冷却後の、外観、色差、押抜き耐力を調べた。

- 1) 外観および色差については、200℃以下では明確な変化はなかったが、300℃の加熱では濃茶色への変色や比較的大きな色差が確認された。
- 2) 押抜き耐力は、200℃までの加熱では加熱無しと同等であったが、300℃の加熱ではほぼゼロであるこ

とを確認した。

- 3) 300℃の加熱では、押抜き試験前に浮きが生じ、プライマーとパテの界面がはく離していたことを確認した。
- 4) 加熱後の押抜き耐力と色差の関係を検討し、外観から押抜き耐力の低下を確認できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 山崎哲也, 横田昌弘, 川端信義: 高速道路トンネルの潜在的火災リスク評価手法の提案, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.71, No.1, pp.31-46, 2015.
- 2) 中西洋一郎, 木本正樹, 淡路敏夫: FRP の空气中熱分解と燃焼に及ぼす繊維の種類とマトリックス樹脂, 添加物の影響, 材料, Vol.45, No.10, pp.1125-1130, 1996.
- 3) 日本コンクリート工学会: コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, pp.6-9, 2012.
- 4) 櫻庭浩樹, 西崎到: 高温負荷を受けた連続繊維シート剥落防止工の付着性, 第 72 回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS05-21, pp.41-42, 2017.
- 5) 日本火災学会: 火災便覧第 3 版, pp.904-905, 共立出版, 1997.

INFULUENCE OF ELEVATED TEMPERATURE TO THE PUNCHING LOAD CAPACITY OF CONTINUOUS FIBER SHEET

Hiroki SAKURABA, Hirohisa KOGA and Itaru NISHIZAKI

This paper presents the influence of elevated temperature from 100 °C to 300 °C to the punching load capacity of continuous fiber sheet with the change of appearance. For heating until 100 °C and 200 °C, punching load capacity showed almost the same as the one without heating, while for heating until 300 °C, it became almost zero. It is confirmed that the reduction of puching load capacity may be found if a clear change of appearace by heating is visually observed.