

論文

UFC 床版の耐火性能および耐火対策に関する研究

足達頼人*, 今川雄亮**, 大山 理***, 小坂 崇****, 松井章能*****, 濱崎浩太*****

* 大阪工業大学大学院 工学研究科 建築・都市デザイン工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

** 博(工) 大阪工業大学 准教授 工学部 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

*** 博(工) 大阪工業大学 教授 工学部 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

**** 博(工) 阪神高速道路㈱ 技術部 (〒530-0005 大阪市北区中之島 3-2-4)

***** 修(工) 神戸市 都市局都市計画課 (〒651-0083 神戸市中央区浜辺通 2-1-30)

***** 修(工) 阪神高速道路㈱ 管理本部 管理企画部 (〒552-0006 大阪市港区石田 3-1-25)

超高強度繊維補強コンクリートを用いた UFC 床版が開発されたが、UFC は超高強度であることから、高温に曝されると爆裂現象が懸念される。そこで、その上面や下面で火災が発生したことを想定した加熱試験を実施し、損傷発生の有無や各部材の受熱温度の把握などを行った。加えて、耐火対策として、UFC に耐火塗料を塗布し、両者の付着性や温度上昇の抑制効果を確認することを目的に実施した加熱試験結果について報告する。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、UFC 床版、橋梁火災、耐火対策

1. はじめに

近年、道路橋では老朽化や交通荷重の繰り返し作用による鋼床版の疲労き裂、鉄筋コンクリート(以降、RC 床版と略記)床版のひび割れなどが顕在化している。このような課題を解決するための一例として、エトリングイト生成系の超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete:以降、UFC と略記)を用いた 2 方向にリブを有するワッフル型 UFC 床版が開発された。同床版は、2019 年、実構造物へも適用されており、今後、鋼床版やプレレストレストコンクリート床版に代わる新たな床版として期待されている。

一方、近年では、車輛事故や失火など様々な要因による橋梁の火災事例が報告されている。火災後、供用再開に向けて的確な診断・補修を行うためには、構造材料および部材の熱影響を把握しておく必要がある。一般的にコンクリートは耐火性を有する材料であるが、高強度であるほど高温に曝された際、その表層部分が飛散・剥離する爆裂現象の発生が懸念されている。その発生メカニズムの詳細までは解明されていないが、コンクリート内部と表層部の熱膨張量の違いによる熱応力と内部水の蒸発による蒸気圧力が主要因であると考えられている。UFC においては小規模試験体を用いた加熱試験が実施され、爆裂現象の発生が確認されている¹⁾。しかし、著者らが調べた限り、実物大の UFC 床版を用いた加熱試験を実施した例なく、熱影響などについては検討されていないのが現状である。

そこで、本論文では、耐火性状が不明確であるワッフル

型 UFC 床版を対象に、その上面や下面で火災が発生した際の爆裂現象による損傷発生の有無や、各部材の受熱温度を把握することを目的として、解析および実験の両面で検討を行った。また、今後、UFC が床版のみならず様々な構造材料に適用されることを見据え、UFC の耐火対策として、耐火塗料が適用可能かを確認するために実施した加熱試験の結果について報告する。

2. UFC 床版の加熱試験

2.1. 試験概要

本試験で用いたワッフル型 UFC 床版の平面を図-1、断面を図-2、配合を表-1 に示す。本試験体は、阪神高速道路信濃橋入路で使用されたワッフル型 UFC 床版を参考に決定した。試験体数は上面加熱および下面加熱でそれぞれ 1 体とし、上面加熱では床版を反転させて加熱した。

下面加熱は欧州の設計規準である Eurocode²⁾に規定されている最高温度 680°C の外部火災曲線(以降、EX 曲線と略記)を用いることとし、上面加熱では EX 曲線の約半分の温度である 350°C を最高温度とした。これは、床版上面での火災は、アスファルト舗装や温度は熱源の上方ほど高くなることから、下面火災時よりも受熱温度が低くなると推測されるためである。実際、アスファルト舗装を設置した RC 床版を模擬した試験体を用いた予備試験において、受熱温度が低減されることも確認されている³⁾。

加熱時間は、阪神高速道路の路面上で発生した火災事例や、その他の橋梁火災事例⁴⁾などを参考に、上面加熱は

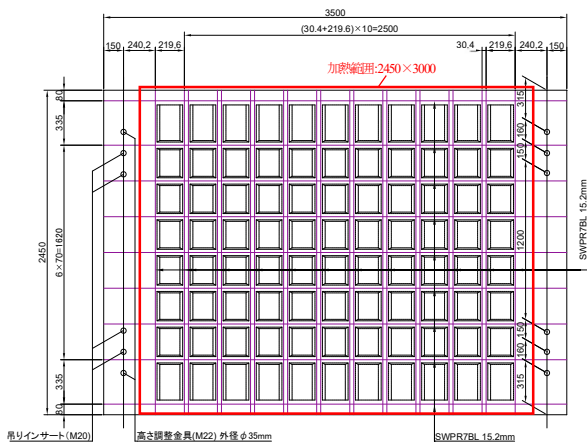


図-1 ワッフル型 UFC 床版の平面 [mm]

表-1 UFC の配合

単位量 [kg/m ³]				鋼繊維 [kg]
水	プレミックス結合剤	骨材	高性能減水剤	
195	1287	905	32.2	137.4 (1.75vol%)

30 分間、下面加熱は 60 分間とした。

両試験ともに支点条件は、両端から幅 250mm の面支点で、加熱範囲は図-1 の赤線で囲まれた 2450×3000mm とした。温度計測は、図-3 に示す通りであり、両試験ともリブ、スラブならびに PC 鋼材の 7 箇所で行った。あと、加熱試験前後の剛性変化を確認するため、静的載荷試験を実施した。

2.2. 試験結果

(1) 上面加熱

本試験で得られた受熱温度を図-4 に示す。同図より、床版上面(加熱面)から 22.5mm では最大 85°C まで、PC 鋼材 (SWPR7BL) の位置では最大 60°C まで温度上昇することが確認された。既往の研究より⁵⁾、PC 鋼材を 200°C に加熱しても、冷却後は加熱前と同等の力学特性を有することが確認されていることから、PC 鋼材の性状に殆ど影響はないと推測される。また、床版中央付近の加熱による鉛直変位量は、下側に最大 11mm 程であり、ひび割れが発生するほどの変形は生じなかった。

試験後の供試体を目視で確認したところ、加熱面に若干の変色が見られたが、PC 鋼材の引き込みやひび割れは確認されなかった。加熱試験前後の剛性の変化を確認するために実施した静的載荷試験の荷重-変位関係を図-5 に示すが、加熱前後で剛性に有意な差は見られなかった。

(2) 下面加熱

試験開始から終了までの加熱試験中に確認された変状を表-2、試験後の試験体状況を写真-1 に示す。

本試験では加熱開始後の 10~30 分より著しい表面の剥離が確認された。また、同時帯に確認された床版端部のひび割れから出現した自由水は、コンクリート中の水分が蒸発した水蒸気が非加熱面(床版上面側)で冷却されるこ

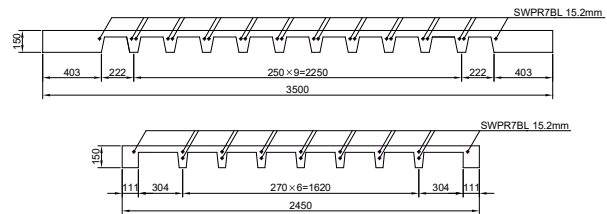


図-2 ワッフル型 UFC 床版の断面 [mm]

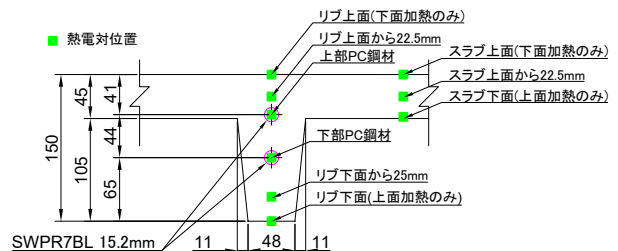


図-3 温度計測箇所 [mm]

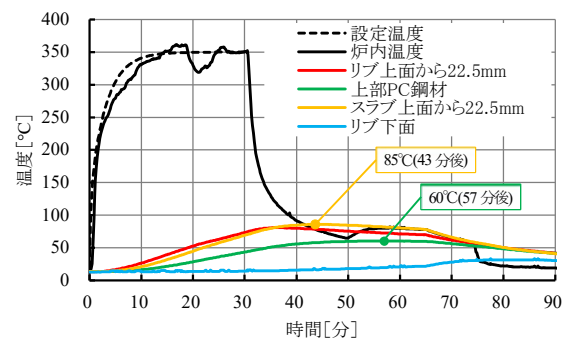


図-4 受熱温度(上面加熱)

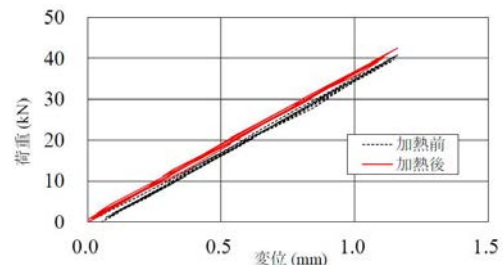


図-5 加熱前後の荷重-変位の比較

とでできたものと考えられる。この現象は、加熱開始 60 分後に発生した床版上面の爆裂が水蒸気の影響を大きく受けていることを示唆するものである。

床版中央での変位は、加熱開始から 13 分後までは床版下面方向にたわむ傾向がみられたが、その後は変位が床版上面方向に転換し、最終的には中央の変位が初期位置から最大 10mm 上昇することが確認された。この挙動は、爆裂による断面欠損および受熱温度による力学特性の低下、プレストレス力の増減、断面内の温度差による付加的な断面力など、種々の要因が複雑に影響したためだと想定される。

なお、下面加熱では爆裂による床版の断面欠損が著しいため、静的載荷試験は実施しなかった。

表一 加熱試験時の変状

5分30秒～	加熱表面で剥離の発生
10分後	剥離によりコンクリートが飛散する音が大きくなり、その傾向が20分間程継続
25分後	床版上面にひび割れが発生し、ひび割れから自由水の出現
30分後	剥離による音は小さくなったが、50分ごろまで継続
45分後	ひび割れから水蒸気の噴出音を確認
60分後	大きな音とともに床版上面で爆裂が発生



写真一 試験後の試験体状況

3. 解析によるワッフル型 UFC 床版の受熱温度の算定

本章では、汎用解析ソフトである SOFiSTiK を用いて、2次元の有限要素解析を実施し、火災時におけるワッフル型 UFC 床版の受熱温度を算定した。なお、上面加熱では熱影響が小さいことから、本解析は下面加熱に対してのみ実施し、解析値と実験値の受熱温度の比較・検討を行った。

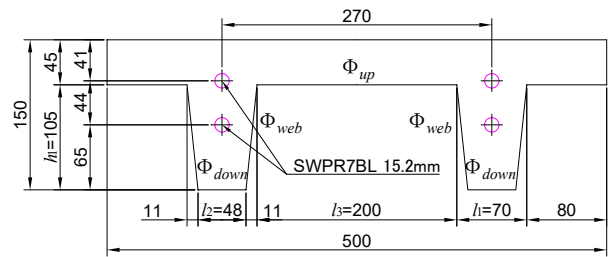
3.1. 解析モデル

本解析で定義した UFC 床版の断面および解析モデルを図一6 および図一7 に示す。なお、解析上、熱影響による剥離、剥落およびひび割れを考慮することは困難であるため、本解析ではそれらが生じない条件で行っている。

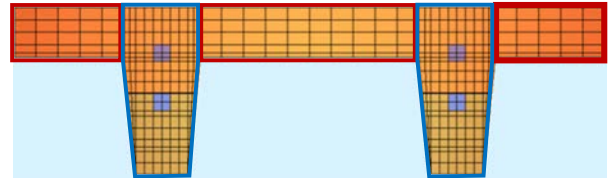
3.2. 解析条件

本解析で用いた火災温度-時間曲線は、EX 曲線である。各材料の物性値を表一3 および図一8 に示す。UFC の物性値は「サクセム設計・施工マニュアル(案)」⁶⁾を参考にし、PC 鋼材の物性値は Eurocode⁷⁾に記載されている鋼の物性値を用いている。UFC の物性値は温度依存性を考慮したデータがないため一定とし、PC 鋼材の熱伝導率および比熱は温度依存性を考慮している。Eurocode より EX 曲線の対流熱伝達係数は 25W/m^2 、外気への対流熱伝達係数は 9W/m^2 とした。コンクリートの初期温度、外気温度は常温である 20°C とし、外気温度は時間経過後も一定値とした。火災時間は60分間、熱伝導解析の間隔は1秒ピッチで行うことにした。

ここで、加熱面における熱流速は、ワッフル型 UFC 床版の形状が凹凸であることから、スラブ下面およびリブ側面では全方向からの放射熱を受けることがない。そのため、放射熱による熱流束を算定する際、形態係数について考慮する



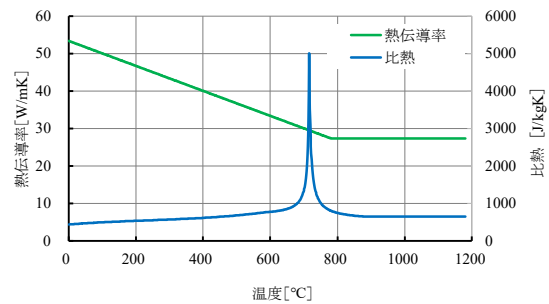
図一6 UFC 床版の断面 [mm]



図一7 解析モデル(青枠:リブ, 赤枠:スラブ)

表一3 各材料の物性値

物性値	熱伝導率 (W/mK)	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kgK)
UFC	1.77	2450	1010
PC 鋼材	—	7850	—



図一8 PC 鋼材の熱伝導率と比熱

必要がある。通常、平面形状であれば形態係数は 1.00 である。本解析においては、形状が酷似しているデッキプレートの考え方を適用して、Eurocode および既往研究⁸⁾を参考に式(1)、式(2)ならびに図一6 にて形態係数を決定した。そのため、スラブ下面の形態係数 Φ_{up} は 0.65、ウェブ側面の形態係数 Φ_{web} は 0.44 とし、全方向から放射熱を受けるリブ下面の形態係数 Φ_{down} は 1.00 とした。

$$\Phi_{up} = \frac{\sqrt{h_1 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_1 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{l_3} \quad (1)$$

$$\Phi_{web} = \frac{\sqrt{h_1 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} + (l_3 + l_1 - l_2) \sqrt{h_1 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{2 \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}} \quad (2)$$

ここに、 Φ_{up} :スラブ下面の形態係数、 Φ_{web} :リブ側面の形態係数、 h_1 :スラブ下面からリブ下面までの高さ[mm]、 l_1 :リブ幅(上面)[mm]、 l_2 :リブ幅(下面)[mm]、 l_3 :リブ間隔[mm]

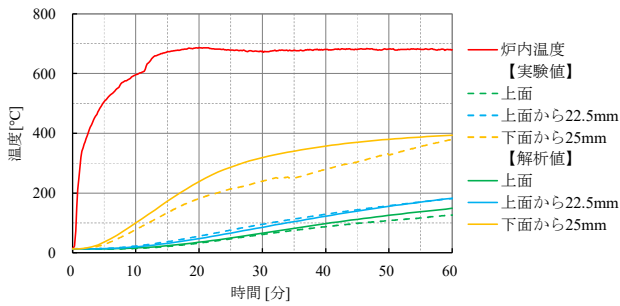


図-9 解析値と実験値の比較 (リブ)

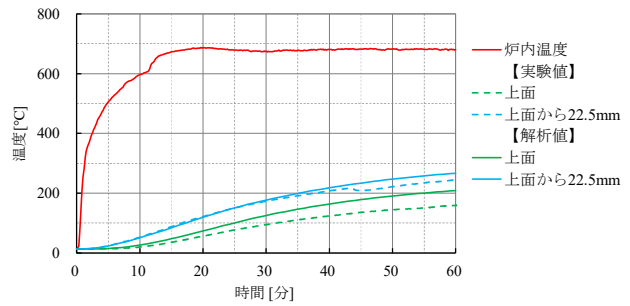


図-10 解析値と実験値の比較 (スラブ)

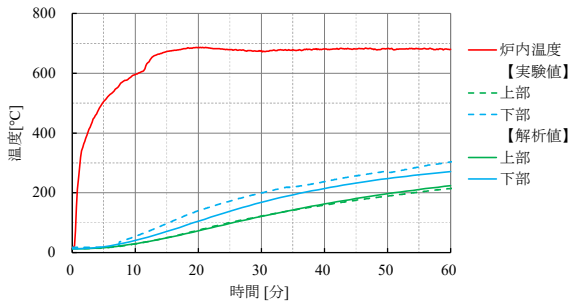


図-11 解析値と実験値の比較 (PC 鋼材)

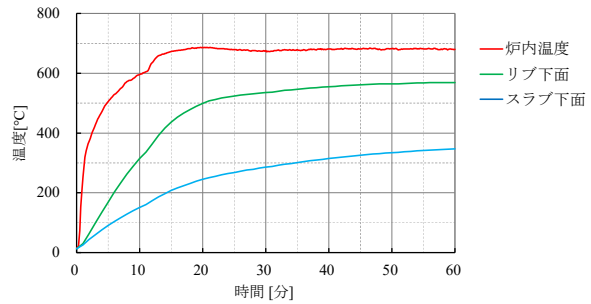


図-12 加熱面の受熱温度

表-4 受熱温度と解析値(下面加熱) [°C]

計測位置	30分		60分		
	実験値	解析値	実験値	解析値	
炉内温度	675	680	679	680	
リブ	上面	61	69	126	150
	上面から22.5mm	95	90	181	184
	下面から25mm	239	325	379	394
スラブ	上面	94	131	159	209
	上面から22.5mm	173	183	244	267
上部PC鋼材	122	126	214	225	
下部PC鋼材	199	175	303	272	

3.3. 受熱温度と熱伝導解析との比較

実験で得られた各熱電対位置での受熱温度と、解析値の比較を図-9～図-11 および表-4 に示す。ここで、同図中の実線は解析値、破線は実験値を示している。

図-9 より、リブ上面および上面から 22.5mm の解析値、図-10 より、スラブ上面から 22.5mm の解析値は、実験値と概ね同様の傾向を示していることがわかる。

一方、リブ下面から 25mm では、加熱開始から終了まで、解析値が実験値を上回る結果となった。その要因の 1 つとして、熱源に近い、つまり、受熱温度が高い一方、本解析において UFC の熱物性値が温度依存性を考慮していないことが考えられる。

スラブ上面における解析値と実験値の差異は、スラブ厚が 45mm と薄い箇所であるため、床版上面でリブ以上に熱移動による流出があったことが原因であると想定される。

図-11 より、上部 PC 鋼材では解析値と実験値が概ね同様の傾向を示し、加熱開始 60 分時ににおいて、最高でも

300°C 程度の受熱温度であり、温度上昇勾配も緩やかであることがわかった。一方、下部 PC 鋼材では、リブ同様、実験値が解析値を上回る結果となり、上述の点も踏まえ、引き続き、熱伝導解析を行う予定である。

既往の研究⁹⁾では加熱面での温度上昇勾配が表面の剥離に影響することが確認されている。そのため参考として、熱伝導解析による加熱面の受熱温度を図-12 に示す。この結果より、加熱表面での剥離が発生した加熱開始 5 分時の受熱温度が 200°C 程度であり、温度上昇勾配が最低でも 15°C/min であった。また、剥離が著しく発生した加熱開始 10 分時の受熱温度はリブ下面:300°C 程度、スラブ下面:150°C 程度であった。既往の研究では温度上昇勾配は 9.8°C/min で、剥離が発生した温度は 350°C であり、本解析はそれと比較して温度上昇勾配は急であるため、より低い温度で剥離が発生したのだと考えられる。

4. 耐火塗料を塗布した UFC の加熱試験

下面加熱の結果より、床版の下面側から継続的に 60 分間以上加熱されるような場合、爆裂の発生が懸念される。そのため、橋梁火災が想定される条件で UFC 床版を使用する場合には、耐火対策が必要であると考えられる。現在、UFC の耐火対策として、有機繊維の混入はその有効性が実証されている¹⁰⁾。耐火パネルの設置など有効な耐火対策であると考えられるが、重量の増加や、建築限界の確保が必要となる。一方、建築分野の鋼部材などで用いられている発泡して断熱層を形成する耐火塗料は、被覆厚が薄く軽量であるが、その適用性については未検討である。そこで、耐火塗料に着目し、UFC の耐火対策として有効であるかを確認する目的で、加熱試験を実施した。

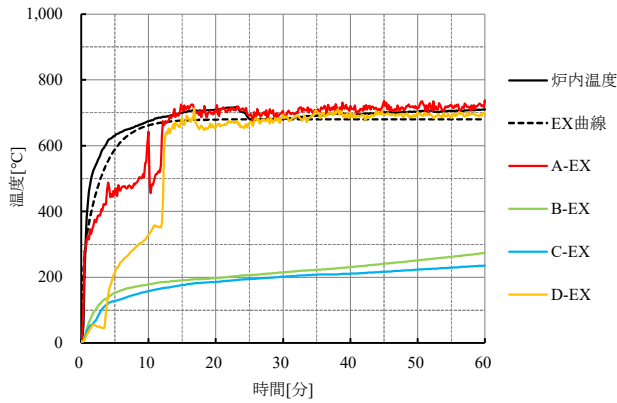


図-13 試験体下面温度(EX 曲線)

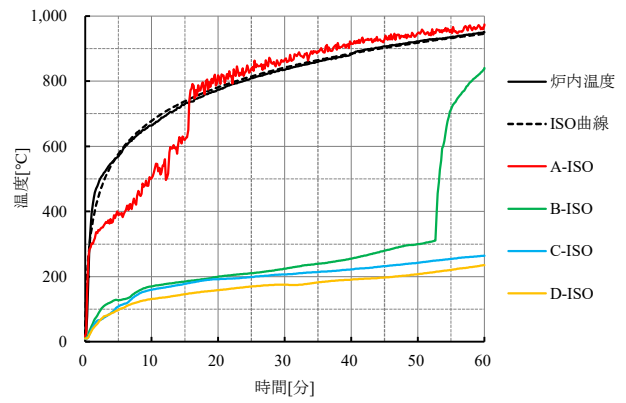


図-14 試験体下面温度(ISO 曲線)

表-5 塗装構成

構成	B	C	D
プライマー	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系
下塗り	—	エポキシ樹脂系	—
主材	ウレタン樹脂系	ポリエーテル樹脂系	ウレタン樹脂系
中塗り	フッ素樹脂系	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系
上塗り	フッ素樹脂系	フッ素樹脂系	フッ素樹脂系

表-6 主材の塗膜厚と発泡厚 [mm]

供試体	EX 曲線			ISO834		
	B-EX	C-EX	D-EX	B-ISO	C-ISO	D-ISO
加熱前	2.06	2.18	2.12	1.98	2.20	2.15
加熱後	5.80	6.31	—	—	16.02	25.80

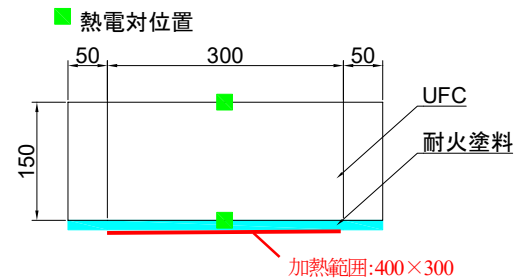


図-15 供試体熱電対位置 [mm]

4.1. 試験概要

本試験で使用した耐火塗料の塗装構成を表-5、供試体の供試体位置を図-15 に示す。本試験では、エトリンサイト生成系 UFC を用いて、寸法 400×400×150mm の平板型試験体を 8 体製作した。そのうち 2 体を無塗装、他 6 体に 3 つのメーカーの発泡性耐火塗料をそれぞれ 2 体ずつに塗布した。耐火塗料の性能は塗膜厚によって決定される¹¹⁾。ここで、その性能評価は、鋼材に耐火塗料を塗布し、国際標準規格である ISO¹²⁾に規定される標準加熱温度曲線(以降、ISO 曲線と略記)を用いた加熱試験にて行われている。そのため、コンクリートへの塗膜厚の規定は設けられていない。そこで本試験では、各メーカーで建築梁に対して 1 時間の耐火性が確認されたものを参考にし、耐火塗料(主材)の塗膜厚を 2mm(塗布時の許容誤差±10%)で統一し、各メーカーの仕様に従い塗装した。本試験は無塗装 1 体と塗装 3 体を用いて、EX 曲線と ISO 曲線に準拠した加熱試験をそれぞれ 60 分間実施した。なお、両試験とも幅 50mm の面支点で、加熱範囲は図-15 の赤線で示した、試験体下面の 400×300mm とし、UFC 表面の上下の 2 点で温度計測を行った。

4.2. 試験結果および考察

本試験で得られた UFC 下面の受熱温度を図-13 および図-14 に示す。なお、それぞれの試験体を無塗装:A、塗装:B~D とし、EX 曲線:EX、ISO 曲線:ISO と表記する。全

試験体とも上面は受熱温度が 20°C 前後と変化があまり確認されなかったため省略する。表-6 に 5 箇所計測した塗膜厚と発泡厚の平均値を示す。

(1) 無塗装試験体

無塗装の A-EX と A-ISO はともに UFC 表面に剥離が確認された。A-EX、A-ISO は 300°C 程度まで炉内温度と同等の速度で表面温度が上昇していき、A-EX:500°C、A-ISO:600°C 程度で急激に温度が上昇した後、炉内と同等の温度を呈する結果となった。

(2) 塗装試験体

塗装試験体の内、D-EX と B-ISO で UFC 表面に剥離が確認された。D-EX では温度上昇の傾向がその他の塗装試験体と異なり、加熱開始 12 分後から表面温度が炉内温度と同程度まで上昇した。B-ISO は加熱開始 53 分後、表面温度が 300°C に達するまでは、耐火塗料の性能が発揮されているが、その後、急激に表面温度の上昇がみられる。これは加熱中に耐火塗料に亀裂が生じ、そこからの熱の流入によって UFC の温度が上昇し剥離した結果、耐火塗料が脱落したためだと推定される。

写真-2 に発泡の様子、写真-3 に未発泡の耐火層を示す。その他の塗装試験体は加熱開始 60 分後の受熱温度は B-EX:275°C、C-EX:237°C、C-ISO:265°C、D-ISO:236°C と、すべて試験体で 250°C 前後に温度上昇を抑制できていた。耐火塗料の加熱前の平均塗膜厚に対する平均発泡倍率は B-EX、C-EX:3 倍程度、C-ISO:7.3 倍、D-ISO:12 倍であった。EX 曲線と ISO 曲線の試験体では発泡倍率に 2 倍以上



写真-2 発泡の様子 (D-ISO)



写真-3 未発泡の様子

の差があり、より高温の加熱である ISO 曲線の方が耐火塗料の発泡が顕著であった。なお、全ての試験体で発泡した塗膜下には未発泡の耐火層が確認された。これは UFC の熱特性(熱伝導率、比熱、密度)から鋼より温度が低くなったため、耐火塗料の発泡が加熱温度のみにしか促進されなかったためであると推測される。しかし、B-EX、C-EX、C-ISO ならびに D-ISO では、発泡した塗膜下の UFC にひび割れ等の損傷は確認されなかった。

5. おわりに

本研究ではワッフル型 UFC 床版の加熱試験と耐火塗料を塗布した UFC の加熱試験を実施し、得られた知見は、以下の通りである。

- (1) ワッフル型 UFC 床版の上面において、車輛火災が発生したことを想定して、最高温度 350℃程度で 30 分間加熱した結果、爆裂などの損傷は発生せず、加熱前後で剛性に有意な差は見られなかった。
- (2) Eurocode に規定される外部火災曲線(最高温度 680℃)を用いてワッフル型 UFC 床版の下面を 60 分間した場合、加熱開始 5 分 30 秒頃に表面が剥離する現象が確認された。この現象は、その後も継続して発生し、加熱終了直前に床版上面で爆裂が発生した。
- (3) 汎用解析ソフト SOFiSTiK を用いた熱伝導解析では、概ね、実験値と同等の受熱温度を示していた。なお、本解析による加熱面(リブ下面)の受熱温度の温度上昇勾配は最低でも 15℃/min と急激な勾配であった。
- (4) 耐火塗料を塗布した UFC を Eurocode に規定される外部火災曲線と ISO に規定される標準加熱温度曲線(最高温度 945℃)で 60 分間の加熱試験を実施した結果、耐火塗料を塗布した 6 体の内 4 体では、UFC と耐火塗料の付着性や耐火性能が確認できたが、一部は、UFC の表面が剥離するケースも見られたので、施工面も含

め、UFC と耐火塗料との付着に関して、引き続き、検討を行う必要がある。

謝辞

本研究を遂行するに際し、日本ペイント(株)、関西ペイント(株)ならびに大日本塗料(株)より試料の提供やご助言を頂きました。また、本加熱試験の実施に際し、当時、大阪工業大学橋梁工学研究室に所属していた村川友則氏および田中昭次氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、谷辺 徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 内田裕市: 拘束リング試験法を適用した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂深さの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.
- 2) CEN: Eurocode 1-Actions on structures-Part 1-2: General actions-Actions on structures exposed to fire, prEN, 1991-1-2, 2002.
- 3) 小坂 崇, 河野晴彦, 松井章能, 濱崎浩太, 村川友則, 高橋佑介, 大山 理, 今川雄亮: 路面上での火災に対するワッフル型 UFC 床版の剛性評価, 土木学会第 76 回年次学術講演会概要集, 2021.
- 4) 大山 理, 今川雄亮, 栗田章光: 火災による橋梁の損傷事例, 橋梁と基礎 2008, Vol.42, pp.35~39, 2008.10.
- 5) 山根隆志, 江良和徳, 野島昭二: 火災の影響を受けた PC 橋の安全性に関する研究(その 1)~PC 鋼材の熱特性に関する要素試験~, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-502, 2010.9.
- 6) サクセム研究会: サクセム設計・施工マニュアル(案), 2008.
- 7) CEN: Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design, prEN, 1993-1-2, 2003.
- 8) Jian Jiang, Joseph A. Main, Jonathan M. Weigand, Fahim H. Sadek: Thermal performance of composite slabs with profiled steel decking exposed to fire effects, Fire Safety Journal, Vol.95, pp.25-41, 2018.2.
- 9) 半野久光, 田嶋仁志, 川田成彦, 谷上敦亨: 報告 RC セグメントの耐火性能に関する実験的検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002.
- 10) 小澤満津雄, 俵想太郎, 内田裕市, 森本博昭: 高温環境下における各種短繊維を添加した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No.1, 2012.
- 11) 永田順一郎: 耐火塗料の現状と将来, 表面技術, Vol. 47, No.8, 1996.
- 12) ISO: ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests-Elements of building construction, 1999.9.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)