

(32) UFC床版合成桁における床版と鋼桁接合部の耐火性能に関する実験的検討

辻 悠弥¹・大山 理²・今川 雄亮³
足達 頼人⁴・丹波 寛夫⁵・小林 周平⁶

¹正会員 阪神高速道路（株）神戸建設部（〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-2-10 読売神戸ビル）
E-mail: yuya-tsuji@hanshin-exp.co.jp

²正会員 大阪工業大学教授 工学部都市デザイン工学科（〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1）
E-mail: osamu.oyama@oit.ac.jp

³正会員 大阪工業大学准教授 工学部都市デザイン工学科（〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1）
E-mail: yusuke.imagawa@oit.ac.jp

⁴学生会員 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科（〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1）
E-mail: m1m22102@st.oit.ac.jp

⁵正会員 阪神高速道路（株）神戸建設部（〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-2-10 読売神戸ビル）
E-mail: yoshio-tamba@hanshin-exp.co.jp

⁶非会員 阪神高速道路（株）神戸建設部（〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-2-10 読売神戸ビル）
E-mail: shuhei-kobayashi@hanshin-exp.co.jp

軽量かつ耐久性の高い床版を開発することを目的に、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。阪神高速道路では、入路橋の床版取替えや改築事業における入路橋の新設橋において、実構造物に UFC 床版を適用している。適用した橋梁はいずれも鋼単純合成桁であり、UFC 床版と鋼桁はスタッドを用いて接合している。しかし合成桁が熱作用を受けると、スタッドの接合度合い（ずれ定数）が大幅に低下し、それによって疲労耐久性に影響を及ぼすことが推測される。そのため、桁下で火災があった場合に、橋面上の交通の供用再開判断時には、床版本体の状態のみならず、接合部の状態にも留意する必要がある。そこで、本研究では UFC 床版と鋼桁の接合部を模擬した供試体を用いた加熱炉実験を実施し、加熱後の接合部の押し抜きせん断試験により、UFC 床版合成桁における接合部の耐火性能について検討を行ったものである。

Key Words: joining slab , bridge fire, Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete

1. はじめに

近年、道路橋では老朽化や交通荷重の繰返し作用による鋼床版の疲労き裂、鉄筋コンクリート床版（以降、RC 床版と略称）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、図-1 に示すエトリングایت生成系の超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下、UFC と略記)を用いた UFC 床版が開発された。UFC 床版は 2019 年に実構造物へも適用されており、今後、鋼床版やプレストレス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、車両事故や失火など様々な要因による橋梁の火災事例が国外のみならず国内でも報告されている¹⁾。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においても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⁾。それらの特性を有する



図-1 UFC床版

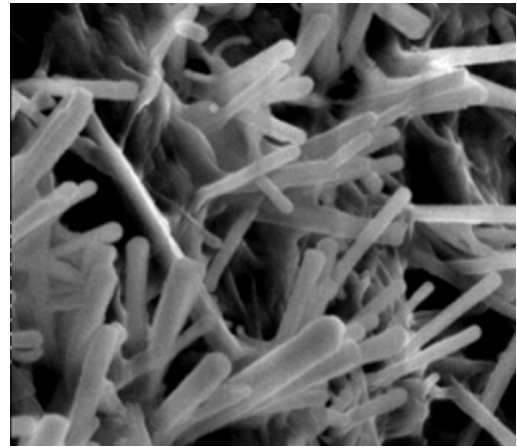


図-2 空隙を充填するエトリンサイト

UFC床版を用いた橋梁において火災が発生した場合、鎮火後における構造材料および部材の熱影響などについて検討されていないのが現状である。また、トンネル構造では火災による熱影響が大きいと、的確な診断手法など統一された基準が定められている²⁾。しかし、橋梁構造を対象としたものは統一化されておらず、安全確認のための調査や点検に時間を要するといった、供用再開の判断に対する課題も挙げられる。そこで本稿では、UFC床版を用いた合成げたにおいて、鋼桁とのスタッド接合部の耐火性能を評価するため、合成げたの下面から加熱した場合の爆裂現象による損傷の有無や、加熱冷却後のUFC床版と鋼桁のずれ挙動を把握することを目的に行った実験結果について報告する。

2. 超高強度繊維補強コンクリートの特性

本検討で用いた UFC(サクセム : SUQSEM)は、セメントと特殊混和材を含むプレミックス粉体、細骨材、特殊減水剤、水、および特殊鋼繊維で構成されている³⁾。圧縮強度を高めるために、球形に近いポゾラン材と高性能減水剤による水結合剤比の低減、エトリンサイト生成によるセメント水和組織の緻密化、適切な熱養生による細孔構造の改善がされている。養生は 5~40℃で湿潤養生を 24 時間行ったあと、85℃の蒸気養生を 20~24 時間行うことを標準としている。サクセムは水和初期段階でのエトリンサイトの生成とその後のセメントの水和ならびにポゾラン材の活性をコントロールすることによって微細空隙を埋め、図-2に示すような安定したエトリンサイトが微細な空隙を充填することにより、通常のコンクリートと比べて格段に高い圧縮強度および耐久性を得られることが特長である。表-1に標準的な配合を示す。単位水量は混和剤の水分を含んだ量を示している。また、プレミックス結合材はセメント、エトリンサイト生成系混和

表-1 標準的な配合

単位量 (kg/m ³)				
水	プレミックス 結合体	骨材	高性能 減水剤	鋼繊維
195	1287	905	32.2	137.4

剤、シリカヒュームなどのポゾラン材を示している。骨材は粒径 2.5mm 以下のものを使用し、鋼繊維はΦ0.2mm、長さ 15 mm と 20 mm を混合させたものを 1.75%の体積置換で混入させた。

3. 加熱冷却後の頭付きスタッドの静的押し抜きせん断試験概要

(1) 試験体

本検討で使用した試験体形状の断面と面を図-3に示す。床版部の厚さは 150 mm とし、径が 25 mm のスタッドを鋼桁を模擬した H 形鋼の両フランジに 2 本ずつ、中心の間隔を 50 mm として配置した。H 形鋼のフランジ幅は 200 mm、H 形鋼と床版の間詰め部の厚さは 50 mm とし、幅は H 形鋼と同じ 200 mm とした。加熱試験では 6 体の供試体を用いて試験を行い、静的押し抜きせん断試験では、加熱試験体 2 体で 1 対になるようにボルト結合した。ボルト締めについては、加熱試験後に自然冷却、常温の状態に結合した。間詰め部については、文献¹²⁾よりスタ

表-2 試験体に用いた材料の力学特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
間詰め材	148	2.9	39700
UFC	180	-	42300

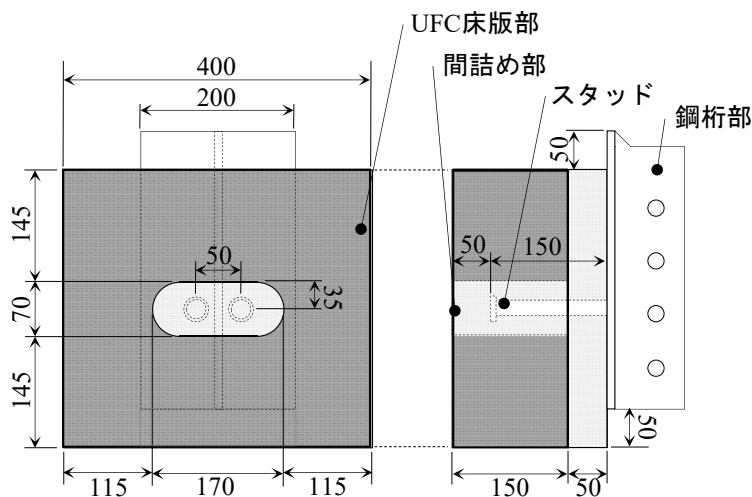
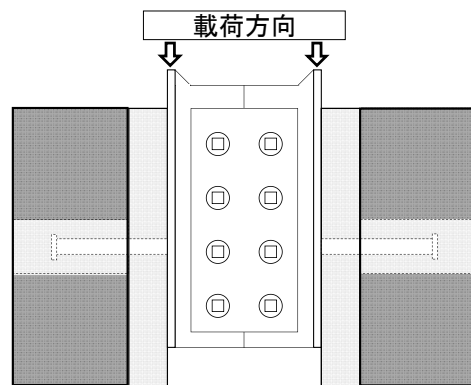


図-3 試験体概要

2体を接合して載荷試験を実施



単位：mm

表-3 スタッドの強度

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
291	422

ッド基部の鋼繊維の配向状況は静的押抜きせん断試験の破壊モードに大きく影響する可能性があるため、実施工と同様に行うこととした。試験体の下部にキャンバーを差し込み、傾斜をつけた状態で鋼桁部と UFC の接続部から充填した。その後、キャンバーを取り外し、試験体を水平にした状態で、UFC床版部に設けた箱抜き孔から充填した。表-2 に UFC と間詰め部試験体の力学特性、表-3 にスタッドの強度を示す。

(2) 加熱試験

加熱試験では図-4、図-5、および図-6に示すように、実際の床版が下面から火災の熱影響を受ける状況を想定し、ボルト結合を行わない状態で鋼桁側を加熱面とするよう試験体を加熱炉に設置した。供試体設置後、加熱炉を閉じ、隙間がなくなるようブランケットなどを使用し、熱が漏れないように隙間を埋め、加熱した。炉内温度の計測は図-6に示す8個の熱電対を用いて計測を行った。本試験で用いた火災温度 - 時間曲線は、Eurocode⁹⁾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)を適用した。橋梁下における火災は、建築物やトンネル内部のように1000°Cを超えるような場合と異なり、火炎が外気に接するような開空間での火災であるため建築物やトンネルの場合よりも低い火災温度になると考えられる。また、過去の事例において、鋼桁やコンクリート床版などの各部材の受熱温度は最大で700°C程度であった⁹⁾。また文献³⁾では、ワッフル型UFC床版の供試体を、EX曲線を用いて加熱試験を行った際、UFC床

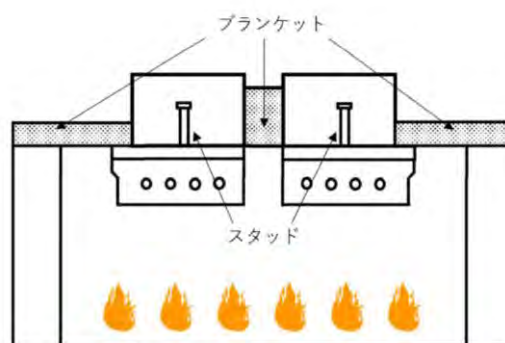


図-4 試験体の設置状況



図-5 試験体の設置状況



図-6 熱電対の様子

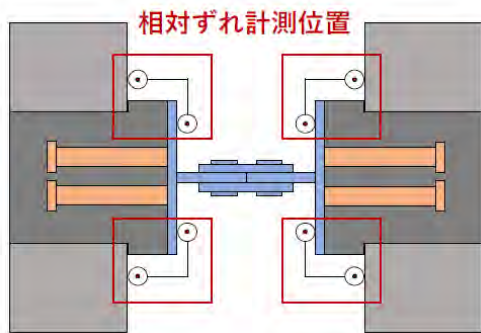


図-7 静的押抜きせん断試験時の相対ずれ計測位置

版に爆裂の発生を確認し、断面形状などに大きな影響を及ぼしていたことから、本試験においてもEX曲線を適用した。加えて、加熱温度によるずれ挙動の変化を確認するため、最高温度がEX曲線の1/2である340°Cと、3/4となる510°Cも用いることとした。各曲線と供試体の名称をEX-680：A-3，EX-510：A-2およびEX-340：A-1として、それぞれ2体ずつ30分間加熱した。

(3) 静的押し抜きせん断試験

漸増繰り返し荷重法を用いて静的押抜きせん断試験を行った。今回、荷重方法はJSSC頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)⁷⁾を参考にし、荷重と除荷を繰り返す漸増繰り返し荷重とした。漸増繰り返し荷重では、スタッド1本あたりの荷重増分を15 kN/本として、ずれ変位が約2.0 mmに達するまで荷重制御で繰り返し荷重を実施した。繰り返し荷重で除荷をする際は0 kNまで除荷する。2.0 mm以降は、破断に至るまで単調荷重にて荷重を行った。

ずれ定数を算定するため、荷重する荷重とともに、鋼桁と UFC 床版部との間に生じる相対ずれ量を計測する。測定位置は図-7に示すように、H形鋼左右のブロックの両側面のスタッドの高さ位置のL1，L2およびR1，R2の4か所にアングルを設置し、その点から測定器具を伸ばし、UFCのブロック側面位置に変位計(25 mm)を取り付けた。

本試験において主な試験確認項目は、「JSSC頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)」⁷⁾を参考にし、各加熱温度に対する最大せん断耐力および、せん断力-対ずれ量の関係図を作成し、最大ずれ量およびずれ定数を求める。表-4に本試験の結果で確認する項目を示す。

4. 試験結果と考察

(1) 加熱試験

図-8にEX-680，EX-510およびEX-340の目標温度と熱電対8か所の平均値である炉内加熱温度をそれぞれ示す。A-1，A-2の両供試体とも爆裂は発生せず、試験中の変化

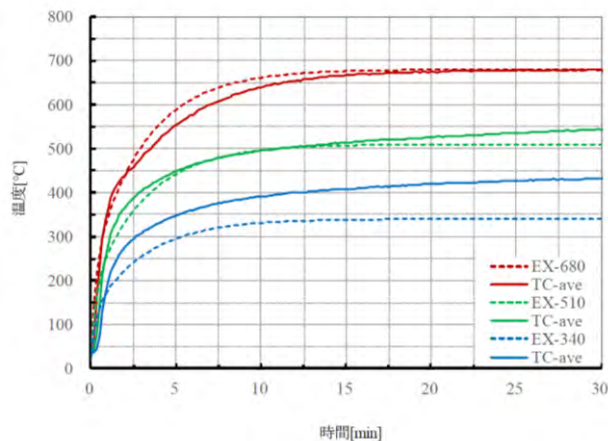


図-8 EX曲線(目標温度)と炉内加熱温度

はみられなかった。また、試験後の供試体でも今回の加熱試験によって新たに入ったひび割れは確認できなかった。しかし、図-9に示すようにA-2の供試体では左側の間詰め部とUFCの一部に隙間が若干生じていた。A-3の供試体については約12分経過時点で音が鳴り始め、後半には図-10に示すようにUFCと間詰め部の隙間から自由水の出現が確認された。試験終了後、供試体の下面を確認したところ、間詰め部分が爆裂していた。また、層状に水平ひび割れが生じ、鋼繊維が剥落を防止している箇



図-9 加熱後における間詰めと UFC 床版の接合部(A-2)



図-10 加熱後における箱抜き部で確認された自由水(A-3)



図-11 加熱後における試験体の損傷状況(A-3)

表-4 試験結果を用いた確認項目

確認項目	
せん断-相対ずれ量 の関係図	スタッド 1 本あたりのせん断耐力とずれ量の関係
最大せん断耐力 Q_{max} [kN/本]	最大載荷荷重(P_{max})およびスタッド 1 本あたりの最大載荷荷重
最大ずれ量 δ_{max} [mm]	最大荷重載荷時におけるずれ量測定定点 L1, L2, および R1, R2 の値を平均したいずれか大きい方の値
ずれ定数 K_{s0} [kN/mm]	せん断力-相対ずれ量の関係図における【 $Q_{max}/3$ 】の荷重で評価する初期割線剛性
降伏せん断耐力 Q_y [kN/本]	せん断力-相対ずれ量の関係図において初期割線合成を 0.2mm オフセットした割線とせん断耐力-相対ずれ量の曲線の交点の作用せん断力

所が見られた。

(2) 静的押し抜きせん断試験結果

スタッドに作用するせん断力-相対ずれ量の関係を図-12に示す。供試体ごとに得られた最大せん断耐力は、A-1, A-2およびA-3それぞれ、230.1 kN/本, 226.9 kN/本, 221.0 kN/本であった。また、最大ずれ量は、A-1, A-2およびA-3それぞれ、4.115 mm, 8.138 mm, 7.431 mmであった。

つぎに、文献⁷⁾に基づき、算出した降伏せん断耐力はA-1, A-2およびA-3の降伏せん断耐力はそれぞれ、178.9 kN/本, 168.4 kN/本および147.9 kN/本であった。これらのことから、今回の試験では、最大せん断耐力や降伏せん

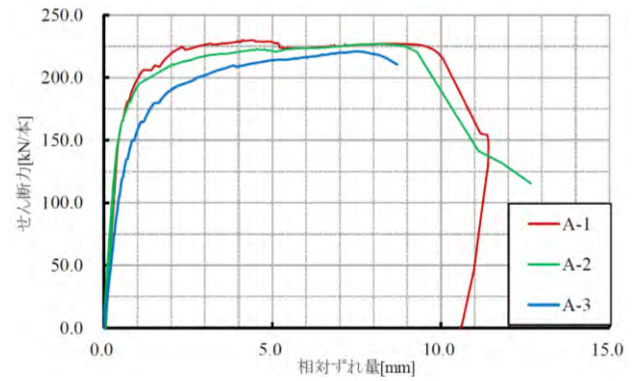
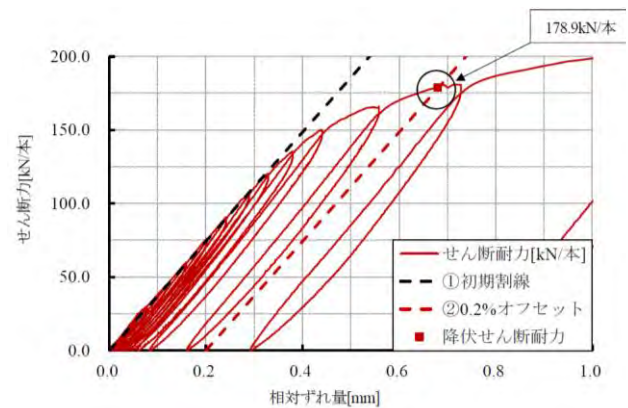
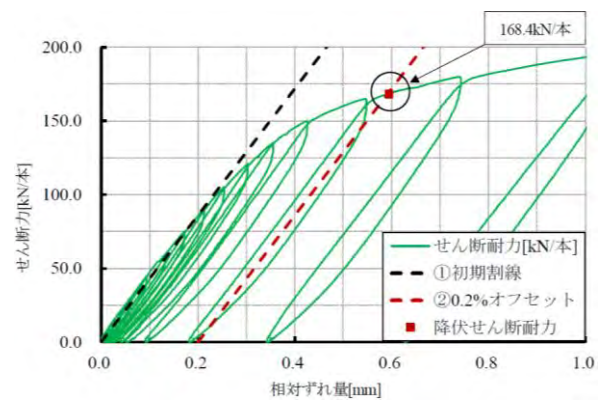


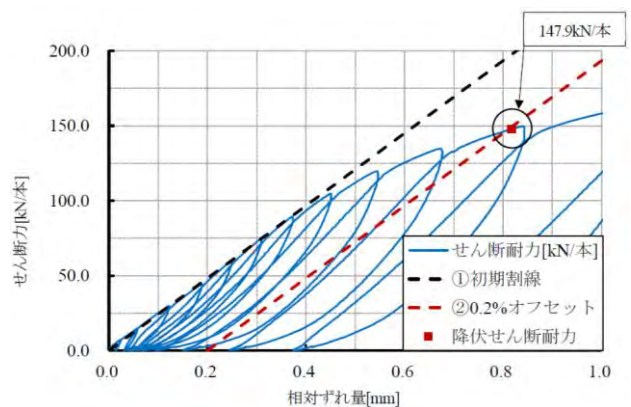
図-12 せん断力-相対ずれ量の関係



[A-1]



[A-2]



[A-3]

図-13 降伏せん断耐力 [Q_y] の算出

表-5 加熱試験後の静的押抜きせん断試験結果

	供試体		
	A-1	A-2	A-3
最大せん断耐力 Q_{max} [kN/本]	230.1	226.9	221.0
降伏せん断耐力 Q_y [kN/本]	178.9	168.4	147.9
最大ずれ量 δ_{max} [mm]	4.1	8.1	7.4
ずれ定数 K_{s0} [kN/mm]	371.4	429.7	241.8
破壊モード	間詰め部の割裂	スタッドの破断	スタッドの破断

断耐力には、加熱による大きな差は見られなかった。図-13に降伏せん断耐力を求める際に使用したせん断力-相対ずれ量の関係図を示す。また、同図に示す初期割線の傾きが各供試体のずれ定数であり、A-1、A-2およびA-3のずれ定数は、371.4 kN/mm、429.7 kN/mmおよび241.8 kN/mmであることが示された。

以上の加熱冷却後の静的押抜きせん断試験によって得られたA-1、A-2およびA-3の各供試体の試験結果をまとめたものを表-5に示す。破壊モードはA-1では間詰め部の割裂で破壊し、A-2、A-3がスタッドの破断により破壊した。破壊モードに差はあるが、各供試体の頭付きスタッド1本当たりの最大せん断耐力は230.1~221.0 kN/本と大きな差はなかった。図-14にA-1、A-2およびA-3の各供試体の試験後の様子およびA-1の間詰め部の割裂状況とA-2、A-3のコンクリート側のスタッド破断面を示す。

(3) 試験結果の考察

最大せん断耐力は、221.0~230.1kN/本と、加熱温度の違いによる顕著な差はみられなかった。しかし、最大ずれ量は、A-1、A-2およびA-3それぞれ、4.115 mm、8.138 mm、7.431 mmであった。また、図-15に示す試験体に設置した4点の変位計全ての最大ずれ量からもわかるとおり、加熱温度上昇に伴い変位量が増加した。

一般的にコンクリートが高温に曝された場合の変状として、主に、ひび割れや爆裂が発生することが挙げられ、力学特性が低下する。文献¹⁰⁾の試験結果からもわかるように、加熱温度の上昇に伴い、ずれ量は伸びると予想されたが、本試験では、供試体A-2の最大ずれ量が大きくなった。これは試験体の据え付け時に、敷モルタルの水分量や乾燥に要した時間が一定ではなかったため、供試体の偏り、荷重が偏ったまま載荷される偏載荷によるものと考えられる。

ずれ定数について、A-1では測定点Rの平均値を、A-2、A-3測定点Lの平均値のずれ量を使用した。各供試体のず

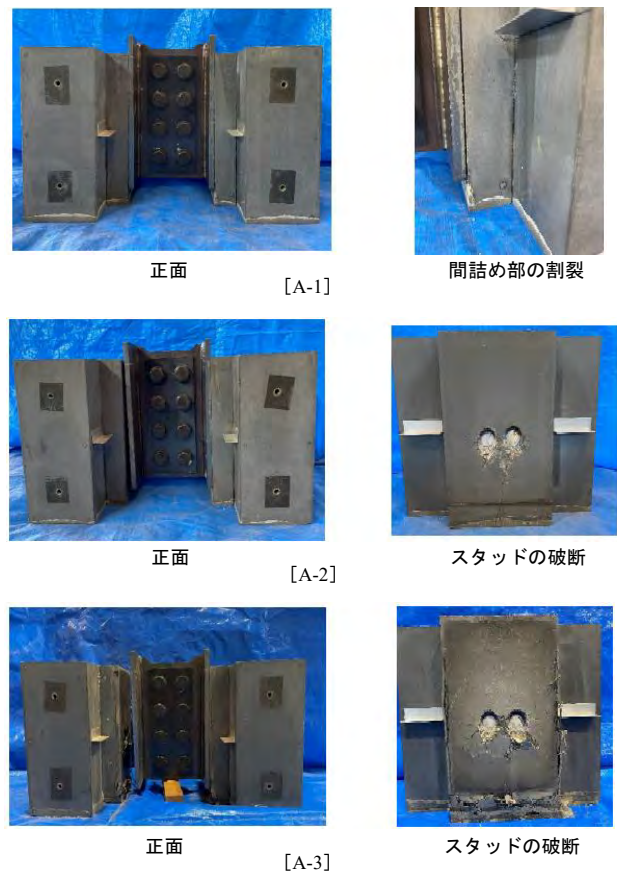


図-14 静的押抜きせん断試験後における試験体の破壊状況

れ定数はA-1、A-2およびA-3それぞれ、371.4 kN/mm、429.7 kN/mmおよび241.8 kN/mmであった。また、最大ずれ量と同様に、文献¹⁰⁾の試験結果から、加熱温度の上昇に伴い、ずれ定数が小さくなると予想されたが、A-2のずれ定数が大きくなっていった。このことに対して、静的押抜きせん断試験の開始直後の載荷初期段階にて、A-2では、左右の測点L、Rに差が生じており、このことが、ずれ定数の値の算出に影響していると考えられる。今回、A-2の試験でスタッドの破断が発生したのは、測点Lであったが、図-16に示すように、載荷初期段階では測点R側にずれ変位が多く発生していた。そのため、JSSC案に準拠しずれ量の大きい方を適用して値を算出した場合、

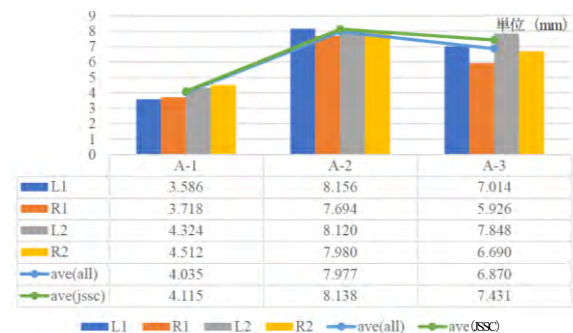


図-15 静的押抜きせん断試験における最大ずれ量

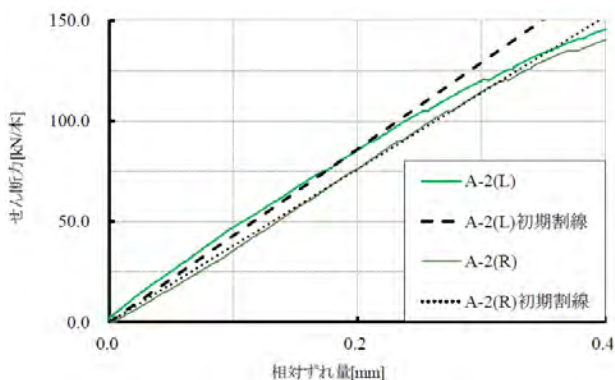


図-16 A-2試験体における載荷初期段階のせん断力と相対ずれ量の関係

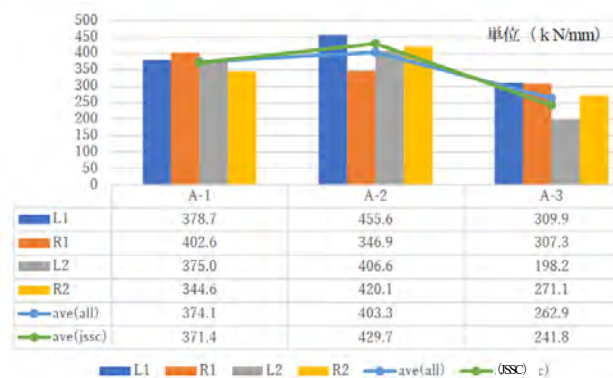


図-17 静的押抜きせん断試験で得られたずれ定数

ずれ定数の値が大きい方を採用してしまう可能性があるため、今回、ずれ定数の算出には、破断側と、載荷初期段階にずれ量の大きい方の2つの平均をとるために、図-15に示す測点L1~R2の4つの測点のずれ定数の平均値を使用し、結果の比較を行った。4つの測点すべてのずれ定数の値を図-17に示す。4つの測点の平均値では、A-1、A-2およびA-3それぞれ、374.1 kN/mm、403.3 kN/mmおよび262.9 kN/mmとなった。これは、A-1、A-2の試験結果で起きていた、A-2のずれ定数がA-1のものを大きく上回っていた原因として、載荷時の偏載荷が大きく影響している可能性が高く、加えてA-1の加熱試験で起きた加熱温度が1/2EX曲線を上回り、420°C程度まで達していたことが影響していると考えられたため、A-1、A-2のずれ定数は、大きな差はないものとした。また、A-3のずれ定数は、241.8 kN/mmと、A-1、A-2のずれ定数と比較し、小さくなっている。以上のことから、UFC部材のずれ定数は加熱温度が510°C程度までであれば、大きく変化せず、680°Cで加熱された際に、ずれ定数は大きく低下することがわかった。

ここで、既往の研究¹⁰⁾の試験結果と本研究の結果を比較する。既往の研究¹⁰⁾に用いた試験体は、本研究のUFC試験体の配合、製作工程等、同条件で作製している。既

往の研究¹⁰⁾より、最大せん断耐力はそれぞれ、224.8 kN/本、211.0 kN/本、212.6 kN/本であり、降伏せん断応力はそれぞれ、155.5 kN/本、149.4 kN/本、152.2 kN/本であるため、加熱の有無による顕著な差は認められなかった。一方、ずれ定数はそれぞれ、加熱をしない場合、528.5 kN/mm、532.6 kN/mmおよび516.8 kN/mmであることから、本試験のずれ定数において、A-1では28%低下、A-2では21%低下、A-3では53%低下していることがわかる。よって、加熱の影響を受けた場合、最大せん断耐力や降伏せん断耐力が低下していなくても、ずれ定数は低下し、すれが生じやすくなっている可能性が示唆された。これは、図-11、図-14で示したような加熱による間詰部の爆裂が原因と考えられる。また、スタッドのずれ定数は温度によって段階的に低下していくのではなく、ある一定の温度を超えるまで値は変わらず、その温度を超えると著しく低下するという可能性も示された。

5. まとめ

本研究では、UFC床版合成桁における耐火性能を明らかにすることを目的に、UFC床版と鋼桁の接合部を模擬した供試体を用いた加熱炉実験を実施し、加熱後の接合部の押し抜きせん断試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 340°C、510°Cで供試体を加熱した場合、爆裂や剥離は生じなかったが、680°Cで加熱した場合は、加熱試験中に弾けるような音がし、UFCと間詰め部の隙間から自由水の出現が確認された。また、試験後に供試体を観察すると間詰め部分が剥離していた。また、層状に水平ひび割れが生じ、鋼繊維が剥落を防止している箇所が見られた。
- 2) 680°Cまでの加熱の影響を受けた場合、熱影響を受けない場合と比較して、せん断耐力は大きくは変化しなかった。
- 3) ずれ定数は、常温時に比べて加熱した供試体の方が低下しているが340°Cと510°Cではあまり差は見られなかった。一方、680°Cでは常温の53%低下していた。低下の要因は、間詰部の爆裂が考えられる。
- 4) 普通コンクリートの場合は、510°Cで加熱した供試体のずれ定数は常温の50%程度低下していたが、UFCの場合は、510°C程度まではずれ定数の低下は小さく、680°Cで著しく低下した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 田村章一: 被火災PC桁の検査および補修(その1), プレストレストコンクリート, Vol.20, No.2, pp.10-23, 1974.
- 3) 田村章一: 被火災PC桁の検査および補修(その1), プレストレストコンクリート, Vol.20, No.3, pp.77-80, 1978.
- 4) 鹿島建設株式会社: 国内初!UFC道路橋床版を高速道路本線の床版取替工事に適用, 2021, 2023.閲覧
- 5) 一宮利通, 大野俊夫, 日紫喜剛啓: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」を用いたPC橋, 2009.
- 6) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004.
- 7) 今川雄亮, 大山理, 栗田章光: 火災時および火災後におけるスタッドの力学特性, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2, pp.384-394, 2009.
- 8) 西口純也, 野上雄暉, 山岡慎太郎: 火災による合成桁橋の合成効果に関する研究, 大阪工業大学卒業研究論文2021.
- 9) 小嶋進太郎, 小坂崇, 長澤光弥, 一宮利通: 高強度繊維補強モルタルを間詰めとしたUFC床版と鋼桁に関する検討, プレストレストコンクリート工学会, 第28回シンポジウム論文集, pp.351-356, 2019.
- 10) 高樋由美子, 羽田野英明, 石原靖弘, 大山理, 長坂悟: 火災を受けた橋梁の安全性評価, 土木学会第59回年次学術講演会1-009, pp.17-18, 2004.

(Received, August 25, 2023)

STUDY ON FIREPROOF PERFORMANCE OF JOINING STEEL GIRDER AND UFC SLAB

Yuya TSUJI, Osamu OHYAMA, Yusuke IMAGAWA
Yorito ADACHI, Yoshio TAMBA, and Shuhei KOBAYASHI

UFC deck slabs using ultra-high-strength fiber-reinforced concrete were developed for the purpose of developing lightweight and highly durable deck slabs. All of the applied bridges are steel simple composite girders, and the UFC slabs and steel girders are joined using studs. However, when the composite girder is subjected to thermal action, the joint degree (displacement constant) of the studs is greatly reduced, which is presumed to affect the fatigue durability. Therefore, it is necessary to pay attention not only to the state of the floor slab itself but also to the state of the joints when judging the reopening of traffic on the bridge surface in the event of a fire under the girder. Therefore, in this study, we conducted a heating furnace experiment using a test piece simulating the joint between the UFC deck slab and steel girder, and performed a punch shear test on the joint after heating to determine the joint strength of the UFC composite girder. We investigated the fire resistance performance