

論文 車両火災によるコンクリート板の損傷に関する耐火試験

清宮 理^{*1}・安本 辰也^{*2}

要旨：道路用トンネル等においては、車両火災に対する安全性の配慮が要望されている。近年、施工期間の短縮やコスト削減の観点から、コンクリートにポリプロピレン繊維を混入させた爆裂抑制型セグメントの適用も提案されている。そこで、本研究ではトンネルの耐火設計を行う場合に広く採用される RABT 曲線に基づいた 3 種類の車両火災規模を想定し、小型試験体による耐火試験を行った。車両火災規模、コンクリート板の種類、PP 繊維混入の有無、耐火被覆板の有無の要因によって、コンクリート板が受ける損傷の程度がどのように異なるか確認した。ポリプロピレン繊維と耐火被覆板の有効性について実験結果を基に述べる。

キーワード：耐火試験，ポリプロピレン繊維，耐火被覆板，RABT 曲線，爆裂

1. はじめに

二次覆工を省略したシールドトンネルや水底トンネルの一般形式である沈埋トンネルにおいて、車両火災による鉄筋コンクリート部材の被害が甚大となることが想定され、安全性の配慮に注意する必要がある。トンネルの耐火対策としては、主に吹付け系耐火材やパネル系耐火材が挙げられるが、近年、施工期間の短縮やコスト削減の観点から、コンクリートにポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）を混入させた爆裂抑制型セグメントが提案されている¹⁾。そこで、本研究ではトンネルの耐火設計を行う場合に多く採用される RABT 曲線に基づいた車両火災規模に応じた 3 種類の加熱曲線を想定した。1200、800 および 400 加熱の耐火試験を行い、コンクリート板の種類、PP 繊維混入の有無、耐火被覆板の有無の要因に関して、コンクリート板が受ける損傷程度について比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体の種類を表 - 1 に、PP 繊維混入の場合の試験体概略図を図 - 1 に示す。

コンクリート板の種類、PP 繊維混入の有無および耐火被覆板の有無の違いによる耐火性能を検討するため、6 種類の試験体で耐火試験を行った。コンクリート板の寸法は、幅 600mm × 長さ 1300mm × 厚さ 200mm とし、鉄筋のかぶり厚は PP 繊維混入の場合で 50mm、未混入の場合で 30mm とした。一般的にこの繊維の耐熱温度は約 160 で、これ以上で溶解し約 440 で着火する性質がある。

2.2 耐火被覆板の性状

耐火被覆板は、ボルトによってコンクリート板の表面に直ばりで取付けた。耐火被覆板の性状を表 - 2 に示す。

表 - 1 試験体の種類

試験体記号	コンクリート板の種類	PP 繊維の有無	耐火被覆板の有無
a-1	高強度コンクリート板	有	無
a-2		無	
a-3			有
b-1	普通コンクリート板	有	無
b-2		無	
b-3			有

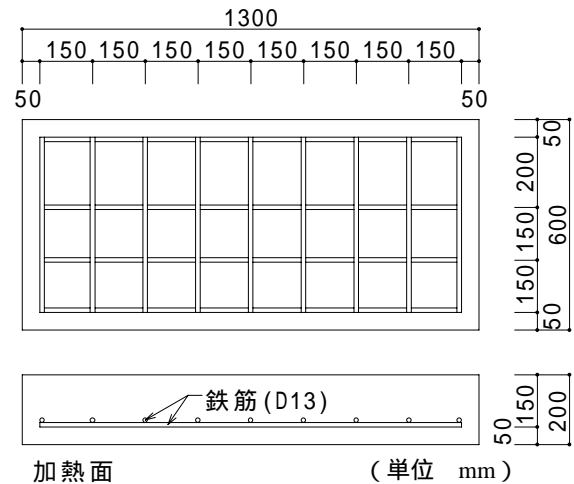


図 - 1 PP 繊維混入の試験体概要図

表 - 2 耐火被覆板の性状

種類	厚さ	密度	含水率
けい酸カルシウム系	28 mm	0.99 g/cm ³	2.2 %

*1 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科教授 工博 (正会員)

*2 (株) エーアンドエーマテリアル 技術開発研究所

表 - 3 コンクリート板の配合

種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	単位量 (kg/m ³)					
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	PP 繊維
高強度コン クリート	20	8±2.5	423	150	789	1052	4.2	0
								2.0
普通コン クリート			310	153	805	1071	1.6	0
								2.0



写真 - 1 試験体設置状況

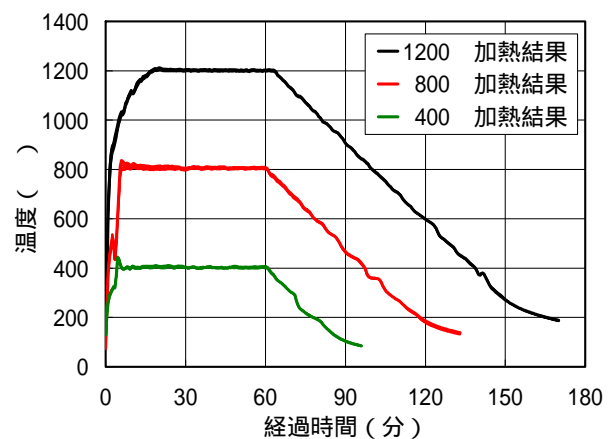


図 - 2 炉内温度測定結果 (PP 繊維混入の場合)

2.3 コンクリート板の配合

コンクリート板の配合を表 - 3 に示す。設計基準強度は、高強度コンクリートで 48N/mm²、普通コンクリートで 20N/mm² とした。細骨材、粗骨材とも硬質砂岩砕石で、コンクリート板は、蒸気養生後、約 4 週間シート掛けによる養生を行った。その後、室内にて気乾養生を行い含水率を 2.6-3.2% とし耐火試験に用いた。PP 繊維は繊度 17dtex、長さ 20mm で混入量は 2.0kg/m³ とした。

2.4 耐火試験概要

試験体設置状況を写真 - 1 に示す。耐火試験は、耐火炉の上部に試験体である高強度コンクリート板および普通コンクリート板 2 体を並べて配置し、荷重を載荷しない状態で試験体を下面から加熱した。また、炉内温度の制御は、試験体加熱面から 100mm 離れた位置に設置した 4 本の熱電対により行った。

2.5 加熱曲線

耐火試験での加熱曲線は、ドイツの基準である RABT 曲線を用いた。この曲線は、加熱開始後 5 分で 1200 に到達し、最高温度が加熱開始 60 分まで継続するが、本試験では、1200 加熱の大規模火災 (タンクローリー車など危険物積載車両)、800 加熱の中規模火災 (バスなど) および 400 加熱の小規模火災 (乗用車など) の 3 種に分類した²⁾。炉内温度測定結果の一例を図 - 2 に示す。

炉の性能と関連して 1200 加熱試験で、加熱開始後 5 分で 1200 に到達しなかったため、最高温度の継続時間を延長し、加熱面積がほぼ RABT 曲線と同様となるよう調整した。それ以外の加熱温度については、ばらつきもほとんど見られず、ほぼ加熱曲線通りの加熱を再現出来た。

2.6 測定項目

試験体中央部において、コンクリート板の表面から 20、50、100mm の位置に熱電対を埋設し、コンクリート板の内部温度を測定した。さらに、耐火被覆板を取り付けた試験体については、コンクリート板と耐火被覆板の層間に設置した熱電対により、コンクリート板の表面温度を測定した。

耐火試験後は、試験体の爆裂状況の観察と爆裂深さの計測を行い、直径 100mm のコンクリートコアを採取し、中性化深さおよび超音波を用いて弾性波速度を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 温度履歴と爆裂状況

(1) 1200 加熱の場合

1200 加熱後の各試験体の温度測定結果を図 - 3、図 - 4 および図 - 5 に、加熱後状況を写真 - 2、写真 - 3 および写真 - 4 に、爆裂深さの分布を図 - 6 に示す。

PP 繊維混入試験体の場合、コンクリート板の種類によ

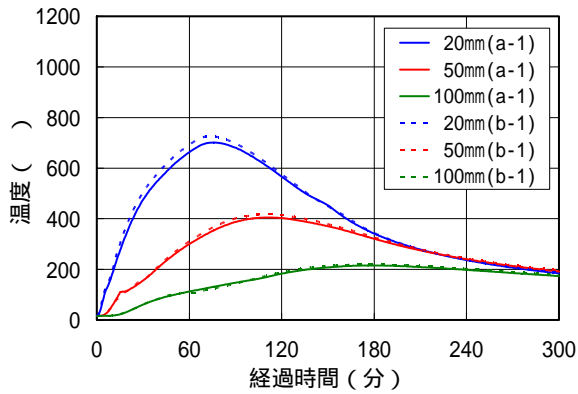


図 - 3 温度測定結果
(1200 加熱, PP 繊維混入の場合)



写真 - 2 a-1 試験体の加熱後状況
(1200 加熱, PP 繊維混入, 高強度コンクリート配合)

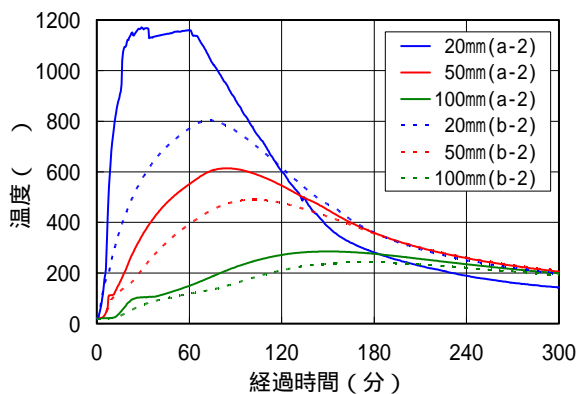


図 - 4 温度測定結果
(1200 加熱, PP 繊維未混入の場合)



写真 - 3 a-2 試験体の加熱後状況
(1200 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

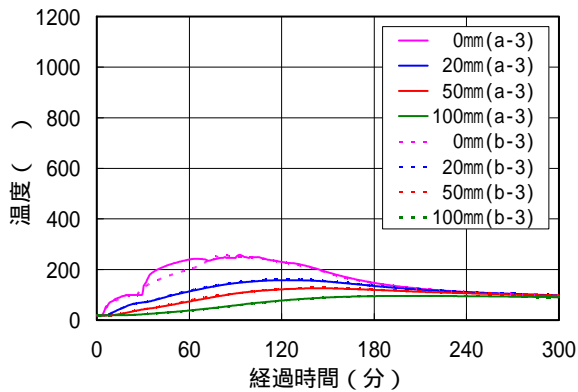


図 - 5 温度測定結果
(1200 加熱, PP 繊維未混入, 耐火被覆板有の場合)



写真 - 4 耐火被覆板を除いた a-3 試験体の加熱後状況
(1200 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

る温度への影響は殆ど認められなかった。また, 加熱表面からコンクリート内部 20mm の位置での最高温度は約 700 , 50mm の位置での最高温度は約 400 であった。PP 繊維はこの温度で溶解, 燃焼したと推定された。加熱後の状況についてコンクリート表面の爆裂は認められず, PP 繊維混入の効果が確認された。一般に, コンクリートは受熱温度が 250~380 程度であれば, コンクリートの物性に与える影響は比較的小さいことが知られており,

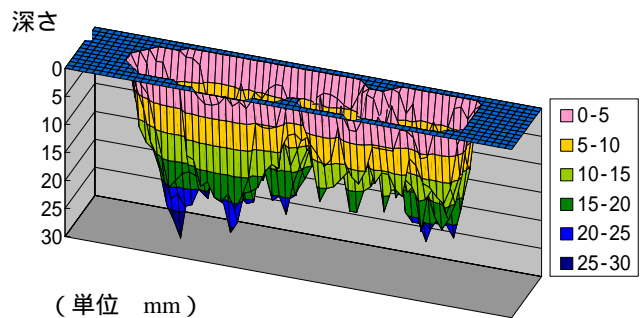


図 - 6 a-2 試験体の爆裂深さ分布図
(1200 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

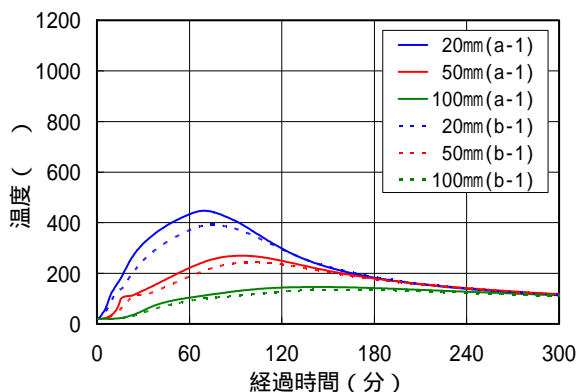


図 - 7 温度測定結果
(800 加熱, PP 繊維混入の場合)

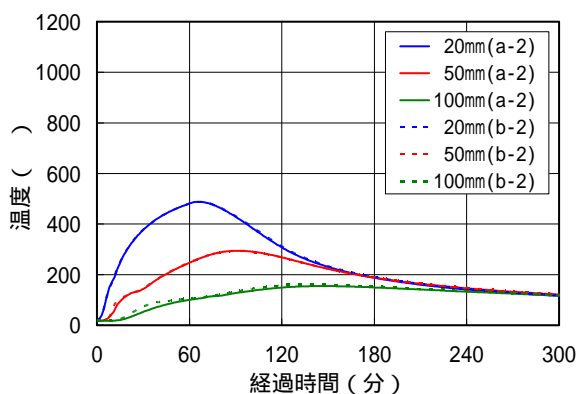


図 - 8 温度測定結果
(800 加熱, PP 繊維未混入の場合)

その火災に対する設計許容温度は 350 程度に決定されることが多い^{3) 4)}。従って, 本実験の条件において, 鉄筋までのかぶり厚さは 50mm 以上とする必要がある。

PP 繊維未混入とした試験体の場合, 高強度コンクリート板において, 加熱開始後 1 分 ~ 10 分までに加熱面全体にわたり激しい爆裂が生じた。爆裂深さは最大で 30mm, 平均で 10mm であり, その爆裂面積率は 93% であった。その影響により加熱面から 20mm の位置における最高温度は約 1200 となった。更に, 加熱面から 100mm の位置における最高温度も約 290 まで上昇し, 爆裂の影響が著しく認められる。普通コンクリート板においても, 最大深さ 4mm 程度の小範囲の爆裂が生じた。コンクリート内部の最高温度は, 加熱面から 20mm の位置で約 800, 50mm の位置で約 500 であった。

耐火被覆板を取付けた場合, PP 繊維未混入の高強度コンクリート板でも, コンクリート表面の最高温度は約 260 であった。コンクリート内部温度も 200 以下であり爆裂は認められず, 加熱後のコンクリート板表面の状態もひび割れは見られず色相の変化もなく健全であった。



写真 - 5 a-2 試験体の加熱後状況
(800 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

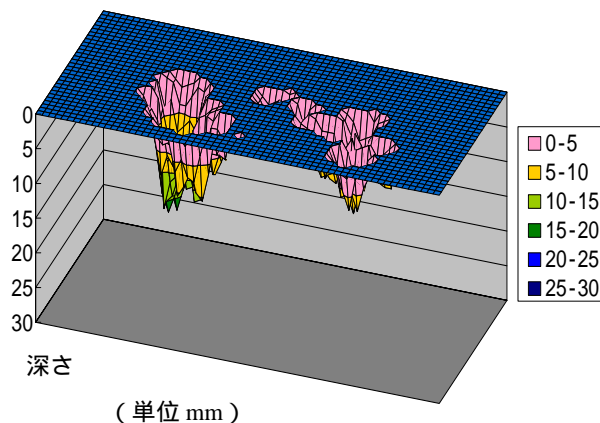


図 - 9 a-2 試験体の爆裂深さ分布図
(800 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

(2) 800 加熱の場合

800 加熱後の各試験体の温度測定結果を図 - 7 および図 - 8 に, 加熱後状況を写真 - 5 に, 爆裂深さの分布を図 - 9 に示す。PP 繊維混入した試験体の場合, コンクリート内部の最高温度は加熱表面から 20mm の位置で約 450, 50mm の位置で約 270 であったが, いずれの試験体においても爆裂は生じなかった。PP 繊維はコンクリート表面では溶解, 燃焼し, 鉄筋位置では残置していると推定された。

PP 繊維未混入とした試験体の場合, 高強度コンクリート板において, 加熱開始後 4 分 ~ 9 分で加熱面に爆裂が生じた。爆裂深さは 2cm 格子でノギスにより計測したが爆裂深さは最大で 18mm, 爆裂箇所の深さの平均が 5mm であり, その爆裂面積率(爆裂箇所面積/試験体加熱面積)は 32% であった。しかし, 爆裂が小規模であったため, コンクリート板の温度は普通コンクリート板の温度履歴とほぼ同様の値であり, コンクリート内部の最高温度は加熱表面から 20mm の位置で約 490, 50mm の位置で約 300 であった。PP 繊維は今回の高強度コンクリートに関して爆裂防止効果はあるが, 今回の普通コンクリートには爆裂防止の観点から混入の必要性はないと言える。

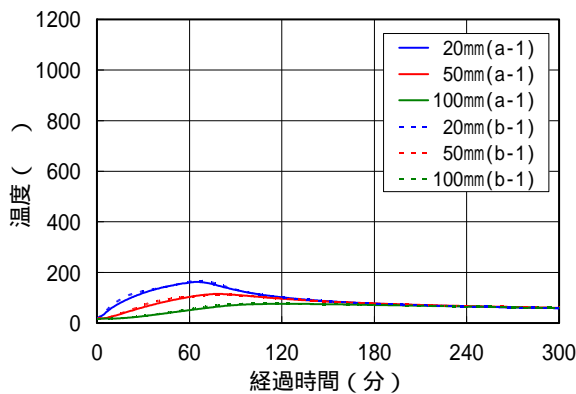


図 - 10 温度測定結果
(400 加熱, PP 繊維混入の場合)



写真 - 6 a-2 試験体の加熱後状況
(400 加熱, PP 繊維未混入, 高強度コンクリート配合)

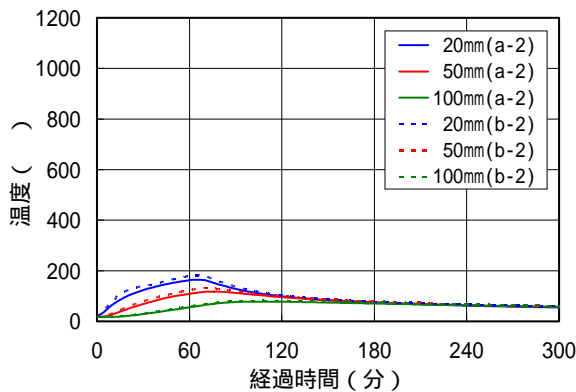


図 - 11 温度測定結果
(400 加熱, PP 繊維未混入の場合)

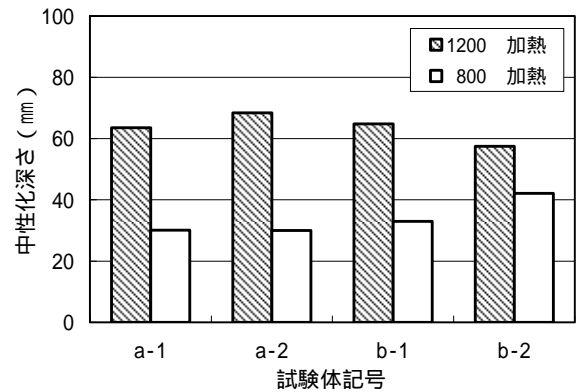


図 - 12 中性化深さ測定結果

(3) 400 加熱の場合

400 加熱後の各試験体の温度測定結果を図 - 10 および図 - 11 に、加熱後状況を写真 - 6 示す。PP 繊維混入の有無、コンクリート板の種類に関わらず、いずれもコンクリート内部の最高温度は加熱表面から 20mm の位置で約 180℃、50mm の位置で約 130℃であった。いずれの試験体においても爆裂は生じなかった。また、コンクリート表面における加熱後の状態も全く変化は認められなかった。

3.2 耐火試験後の性状確認

(1) 中性化深さ

1200℃ および 800℃ 加熱後の中性化深さ測定結果を図 - 12 に示す。採取したコンクリートコアを割裂した後、JIS A 1152 での測定方法に準拠し割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。なお、1200℃ 加熱により加熱面全体が爆裂した PP 繊維未混入の高強度コンクリート板については、爆裂面からの中性化深さを示している。

1200℃ 加熱後の中性化については、試験体の種類による影響は余り見られず、中性化深さは 60mm 程度であっ

た。また、800℃ 加熱後の中性化については、PP 繊維を混入していない普通コンクリート板の中性化深さが 40mm 程度となったが、それ以外の試験体については 30mm 程度であった。400℃ 加熱を行った全ての試験体および 1200℃ 加熱の耐火被覆板設置については、中性化はほとんど確認されなかった。これは、コンクリート中の水酸化カルシウムが熱分解される温度まで上昇していなかったためと考える。

(2) 弾性波速度

弾性波速度測定結果を図 - 13、図 - 14 および図 - 15 に示す。採取したコンクリートコアに対して、超音波法(ASTM C597 による)による弾性波速度試験を行った。このときの測定位置は、加熱面から 100mm までは 5mm 間隔とし、100mm 以降については 10mm 間隔とし、1 断面で直角二方向の測定を行い平均値をその位置での弾性波速度とした。1200℃ および 800℃ 加熱後のコンクリートコアにおける弾性波速度は、試験体の違いによるバラツキが見られるが、いずれも、加熱面に近づくに従い、弾性波速度が低下する傾向を示し、加熱による強度低下の影響が認められた。50mm 以下の加熱表面部を除いた 400℃ 加熱後および 1200℃ 加熱の耐火被覆板設置のコン

クリートコアについては、加熱面からの距離による弾性波速度の変化はほとんど認められず、加熱による強度への影響は小さいと考えている。

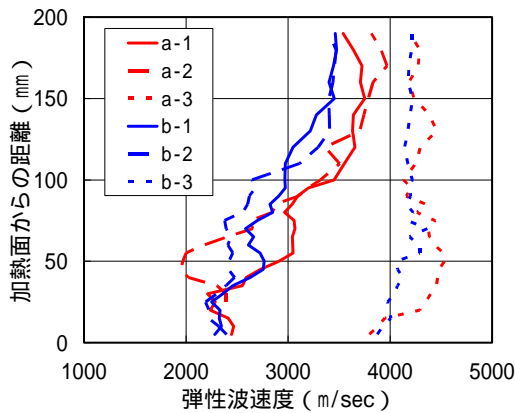


図 - 1 3 弾性波速度測定結果 (1200 加熱後)

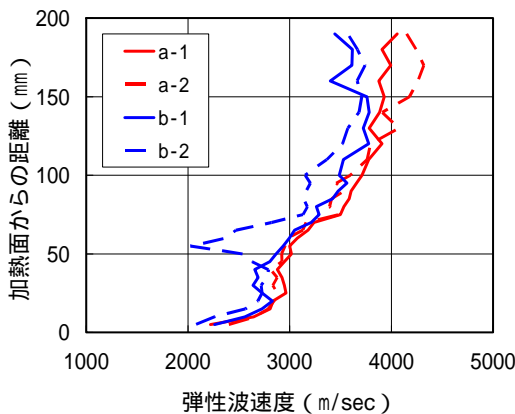


図 - 1 4 弾性波速度測定結果 (800 加熱後)

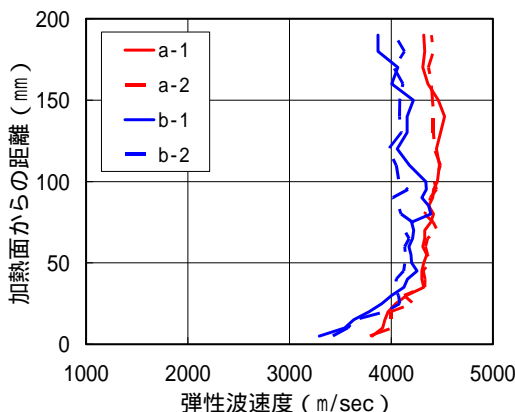


図 - 1 5 弾性波速度測定結果 (400 加熱後)

4. まとめ

本研究で、以下のことが明らかになった。

- (1) 1200 加熱の場合、PP 繊維混入試験体の加熱面から 20mm の位置での最高温度は約 700、50 mm の

位置での最高温度は約 400 であった。一方、PP 繊維未混入試験体は、高強度コンクリート板において最大深さ 30 mm 程度の著しい爆裂が生じており、PP 繊維混入による爆裂抑制の効果が確認された。

800 加熱の場合、1200 加熱と同様に PP 繊維未混入の高強度コンクリート板試験体において爆裂が生じたが、小規模であった。400 加熱の場合、コンクリートの種類、PP 繊維混入の有無に関わらず、コンクリート内部の最高温度は加熱面から 20 mm の位置で約 180 であり、車両火災の影響は小さかった。普通コンクリートでは、爆裂は生じておらず、PP 繊維混入の必要性は認められないと考える。

- (2) コンクリートの種類に関わらず、耐火被覆板をコンクリート板に取り付けることにより、1200 加熱においても、コンクリート表面の最高温度は約 260 であり、有効な耐火対策であることを再確認した。
- (3) 加熱後のコンクリート表面からの中性化深さは、受熱温度が高温になるほど、大きくなった。採取したコンクリートコアに対して弾性波速度試験を実施したところ、1200 および 800 加熱においては、加熱面近傍で弾性波速度の大きな低下が見られた。また、400 加熱および耐火被覆板を用いた試験体では、中性化と弾性波速度の低下はほとんど認められなかった。中性化試験と弾性波速度試験から PP 繊維混入による加熱後の耐久性と強度低下の程度は PP 繊維未混入と同程度であった。
- (4) PP 繊維混入による爆裂防止の効果は高強度コンクリートでは認められたが、今回の普通コンクリートでは爆裂せず混入の必要性が認められなかった。また PP 繊維混入による耐火対策では、中規模以上の車両火災では鉄筋位置までコンクリートに対して何らかの補修対策が必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 石黒義晃, 鈴木義信: 中央環状品川線耐火機能一体型 RC セグメントの適用, コンクリート工学, Vol.49, No.1, pp.85-88, 2011.1
- 2) 小野紘一, 太田義和: コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.14-17, 2002.6
- 3) 平沢甲一, 神田亨: 既設トンネルの耐火設計と施工, コンクリート工学, Vol.45, No.9, pp.79-82, 2007.9
- 4) 清宮理, 中井章裕, 工藤健一, 山本邦夫: サンドイッチ合成構造部材の車両火災への耐火設計と有限要素法解析, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム, pp.1-6, 2005.11