

長時間車両火災によるトンネル構造部材の損傷に関する耐火試験

(株) エーアンドエーマテリアル 正会員 ○伊澤 政弘
早稲田大学 フェロー会員 清宮 理

1. はじめに シールドトンネルや沈埋トンネルにおいて、車両火災により鉄筋コンクリート部材や鋼・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、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（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。昨年度は長時間の車両火災の燃焼時間を考慮して、Hydro Carbon4 時間(1100℃×4 時間) 加熱による耐火試験を行い、PP 繊維混入の有無に関して、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。今回はPP 繊維混入による火災後の劣化状況について検討した結果について主に報告する。

2. 実験方法 対象試験体は耐火被覆なしで普通コンクリート（設計基準強度 24N/mm²）と PP 繊維混入の高強度コンクリート（70N/mm²）の 2 体である。火災実験は加熱炉で行った。コンクリート板の寸法は、幅 600mm×長さ 1300mm×厚さ 300mm とした。PP 繊維は 17dtex、長さ 20mm で混入量は質量比で 0.2%とした。

耐火試験は昨年度と同様に水平加熱炉の上端に試験体を水平に設置し、加熱は無載荷による下方からの Hydro Carbon4 時間加熱を実施した。耐火試験の加熱曲線を RABT 曲線と併せて図-1 に示す。

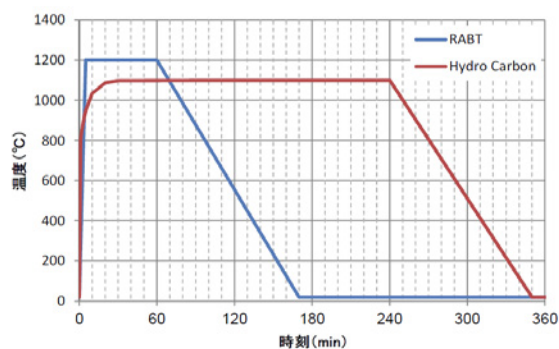


図-1 加熱曲線

試験体中央部において、コンクリート板の表面から内側 20mm, 50mm, 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。

加熱後、試験体の損傷について観察を行い、直

径 100mm のコンクリートコアを採取し、フェノールフタレインによる中性化深さ、超音波を用いて弾性波速度および細孔径分布をそれぞれ測定した。

3. 実験結果および考察 図-2 に普通コンクリート（普通コン）の試験体内部の温度履歴を示す。部材内の最高温度は 50 mm位置 627℃, 100mm 位置 347℃で共に試験開始から約 4 時間時が最高温度となり加熱終了後は温度が低下しているが、12 時間経過しても 150℃を下回る状況であった。

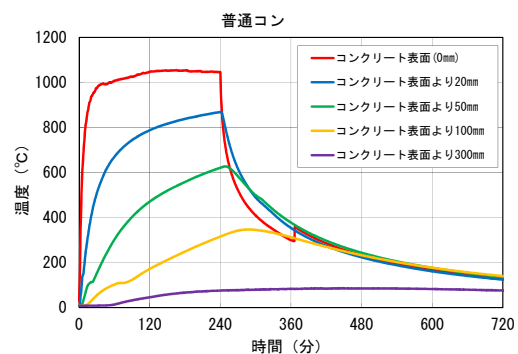
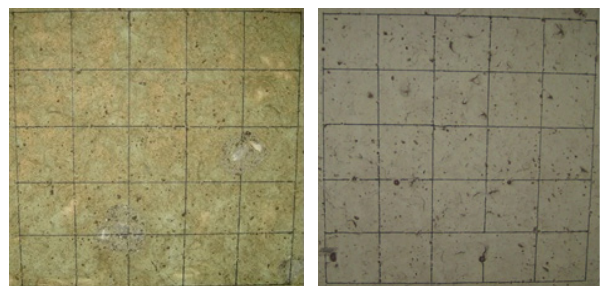


図-2 部材内の温度分布

PP 繊維混入高強度コンクリート（PP コン）の試験体について、加熱表面から内側 50mm 位置の最高温度は 581℃, 100mm 位置の最高温度は 332℃であった。この位置に混在している PP 繊維は既に融解し、一部は燃焼しているものと推測される。試験体取出し後の PP コンおよび普通コンの加熱表面状況を写真-1 に示す。試験体取出し後、PP コン加熱表面は赤褐色に変色し、表面に微少の剥離がみられた。また、時間の経過に伴い表面に多数の微細なひび割れが生じた。冷却時の温度ひび割れの影響と考えられる。



PP コン 普通コン
写真-1 加熱後の加熱面状況

キーワード 耐火試験, トンネル, 車両火災, 安全性, 耐火対策

連絡先 〒230-8511 横浜市鶴見区鶴見中央 2-5-5 (株)エーアンドエーマテリアル TEL:045-503-5771
〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学社会環境工学科 TEL:03-5286-3852

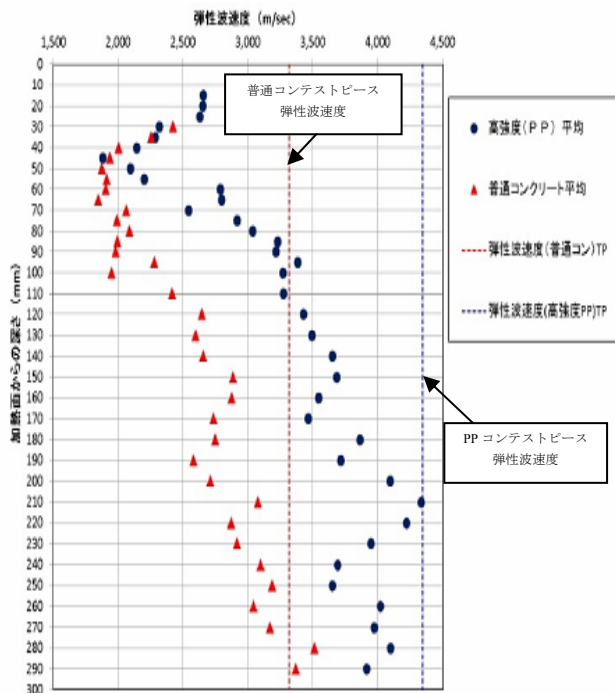


図-3 弾性波測定結果

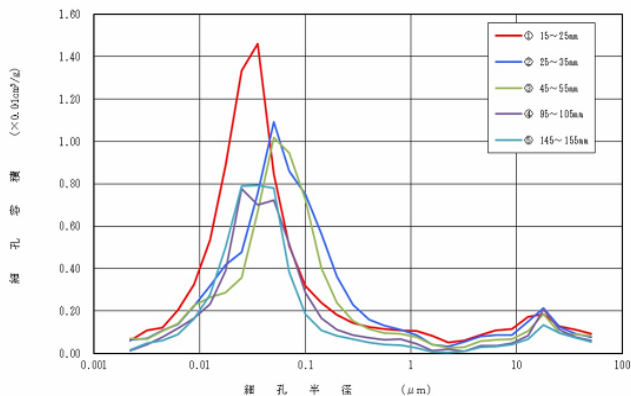


図-4 細孔径分布

中性化の深さは普通コンで 37.5 mm、PP コンで深さ 17.3mm であった。また、PP コンのコアに対して、超音波法（ASTMC597 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、加熱面から深さ 100mm までは 5mm 間隔とし、深さ 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した値をその位置での弾性波速度とした。図-4 に細孔径と細孔容積の関係を示す。弾性波速度は、加熱面に近づくに従い、低下する傾向を示し、加熱面から深さ 100mm 位までは弾性波速度が急激に低下していることからコンクリートが 100mm 程度まで損傷していたことになる。細孔径分布は PP コン試験体より水銀圧入式ポロシメーターを用いて行う。試料採取位置の 50mm 位置までは、0.01~0.1 μm の細孔径が増加しており、繊維の熔融が伺える。また、両試験

体を対象として見掛けの拡散係数を測定し、塩害抵抗性の評価を行った。試験体から採取したコア試験体を 3 ヶ月間、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に浸せきした後に、試験体の深さ方向 3 箇所（20mm、40mm、60mm）について塩化物イオン濃度の測定を電位差滴定法により行った。そして、塩化物イオン濃度の測定結果をもとに、最小自乗法により見掛けの拡散係数を算定した。図-5 に塩化物イオン濃度と表面からの深さの関係を示す。

土木学会 2012 年制定・コンクリート標準示方書〔設計編・標準〕では、普通ポルトランドセメントを用いた場合の見掛けの拡散係数 D_k の予測式として次式を与えている。

$$\log_{10} D_k = 3.0 \times (W/C) - 1.8$$

この式に $W/C = 58.5\%$ (0.585)、 26.0% (0.26) を適用した場合の見掛けの拡散係数は、普通コンが $0.902 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、PP コンが $0.095 \text{ cm}^2/\text{年}$ となる。試験では普通コンが $106 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、PP コンが $10.2 \text{ cm}^2/\text{年}$ となる。両者を比較すると約 110 倍の値となっている。この結果より長期間耐火試験後は塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を大きく喪失した状態となっていることがわかる。

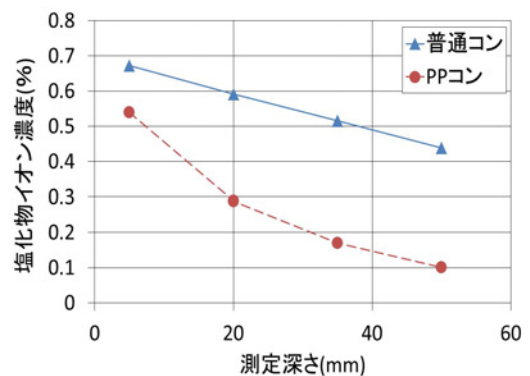


図-5 塩化物イオン濃度と表面からの深さの関係

4. まとめ 長時間の車両火災を想定した加熱試験の結果から、以下のことが明らかになった。

(1) 1100℃で4時間の長時間加熱により熱影響は 150mm 程度までの深部までに達して中性化が生じ、この範囲で弾性波速度は深さ 100mm 位まで低下しており、損傷していた事が伺え、火災履歴後の長期的劣化に対して懸念が示された。

(2) PP コンの試験体内部の温度履歴から 100mm 程度の深さまで混在している PP 繊維は融解および一部燃焼しているものと推測され、これにより爆裂が抑制出来たものと考えられる。ただ冷却時に表面に多数のひび割れが生じており、火災後の温度低下にも注意が必要である。