

論文 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

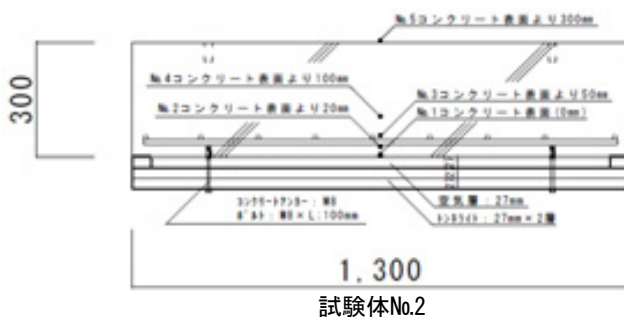
伊澤 政弘*¹ 清宮 理*²

要旨：道路用トンネル等において、車両火災に対する安全性の配慮が要望されている。構造部材を火害から守るためトンネル構造部材表面に耐火板を設置したり、コンクリートに爆裂抑制のためポリプロピレン繊維を混入させた工法も提案されている。そこで、本研究ではトンネル内の長時間にわたる車両火災規模を想定し、小型試験体による耐火試験を行い、ポリプロピレン繊維混入の有無、耐火被覆板の有無の要因によって、トンネル構造部材が受ける損傷の程度がどのように異なるか弾性波速度測定、細孔径分布測定などで確認した。耐火被覆板がないときにはコンクリートの損傷がかなり深部まで及ぶことが判明した。

キーワード：耐火試験，ポリプロピレン繊維，耐火板，加熱曲線，耐久性

1. はじめに

二次覆工を省略したシールドトンネルや鉄筋コンクリート製あるいは鋼コンクリート合成板による沈埋トンネルにおいて、車両火災による構造部材の被害が甚大となることが想定され、安全性に配慮する必要がある¹⁾²⁾。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採用されている³⁾。最近のトンネル火災では積載貨物の長時間にわたる火災が多い。トンネルの耐火設計を行う場合に多く採用される RABT 曲線では 30 分や 60 分の火災継続時間を想定しているが今回 240 分の長時間の火災時間（ハイドロカーボン曲線）を想定して検討を行うことにした。コンクリート板（普通コンクリートと高強度コンクリートにて製作）と鋼コンクリート合成板を対象に耐火試験を行い、コンクリート板の種類、PP 繊維混入の有無、けい酸カルシウム系耐火被覆板（㈱エーアンドエーマテリアル社製：商品名「トンネライト」）の有無の要因に関して、コンクリート板が受けた損傷について比較検討を行った。



※試験体中央部に熱電対を埋設した。

2. 耐火試験

2.1 試験体

試験体の種類を表-1に示す。試験体の寸法は、幅 600mm × 長さ 1300mm × 厚さ 300mm である。

表-1 試験体の種類

No.	使用コンクリート	設計基準強度	耐火仕様
1	普通コンクリート	24N/mm ²	なし
2	普通コンクリート	24N/mm ²	耐火被覆板
3	高強度コンクリート	60N/mm ²	PP 繊維混入
4	高流動コンクリート (合成構造)	30N/mm ²	耐火被覆板 +セラミック ブランケット
5	高流動コンクリート (合成構造)	30N/mm ²	耐火被覆板

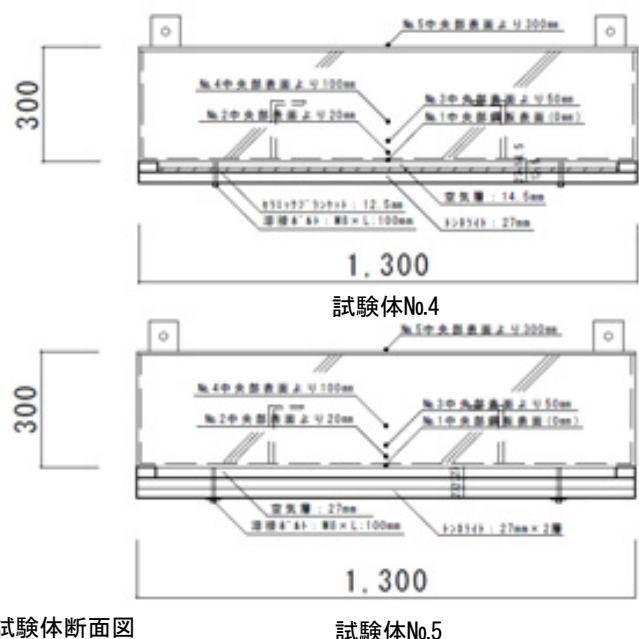


図-1 試験体断面図

*¹ ㈱エーアンドエーマテリアル （正会員）

*² 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 （正会員）

表—2 コンクリート板の配合

コンクリートの種別	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤
普通コンクリート	55.0	47.2	173	315	844	947	—	3.15
高強度コンクリート	31.0	47.5	185	597	738	822	4.93	11.94
高流動コンクリート	36.0	47.0	175	487	788	895	—	3.896

図—1 に試験体 No.2 と No.4 の概要を示す。試験体 No.1 から No.3 は鉄筋を内部に配置している。試験体 No.4、No.5 の合成構造の鋼板の板厚は 9mm、材質は SS400 である。高さ 150mm の L 形鋼で鋼板とコンクリートを一体化している。内部には鉄筋は配置されてない。試験体 No.3 の高強度コンクリートの試験体では径 17d_{tex}、長さ 20mm のポリプロピレン繊維（PP 繊維）を 0.2% 質量比で混入した。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。

耐火被覆板は板厚 27mm である。密度 0.99g/cm³、含水率 2.2% である。耐火被覆板は、ボルトによってコンクリート板の表面に取付けた。耐火被覆板と構造部材との間の空気層の厚さは 27mm で試験体 No.2 と No.5 は耐火被覆板を 2 層設置し、試験体 No.4 ではこの空気層に厚さ 12.5mm のセラミックファイバブランケットを挿入してある。この耐火被覆板などの配置、材質などは RABT 曲線による加熱を構造部材に入力した 1 次元熱伝導解析⁴⁾より、鋼材の温度を 250℃、コンクリートの表面温度を 500℃以下になるように設定した。

コンクリート板の配合を表—2 に示す。設計基準強度は、高強度コンクリートで 60N/mm²、普通コンクリートで 24N/mm²、高流動コンクリートで 30N/mm² とした。使用セメントは普通ポルトランドセメントで、細骨材、粗骨材とも硬質砂岩碎石を使用した。混和材には PP 繊維を使用した。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。

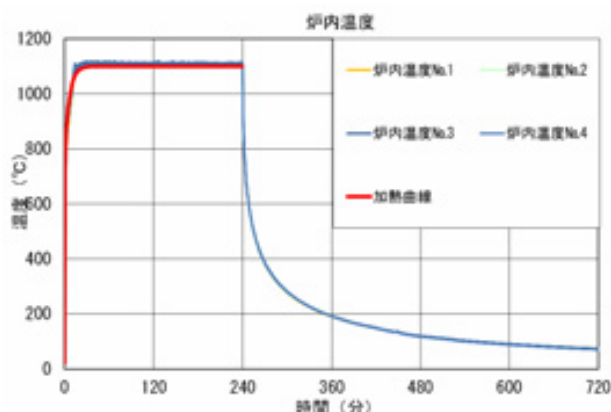
2.2 加熱方法と測定項目



写真—1 耐火試験状況

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 2 体を並べて配置し、無载荷の状態で試験体を下面から加熱した。また、炉内加熱温度の制御は、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。

ハイドロカーボンの加熱曲線と炉内温度を図—2 に示す。加熱実験ではハイドロカーボンの加熱曲線を使用し着火後 20 分で 1100℃の最高温度にし、240 分まで加熱しそれから自然冷却とした。



図—2 加熱曲線

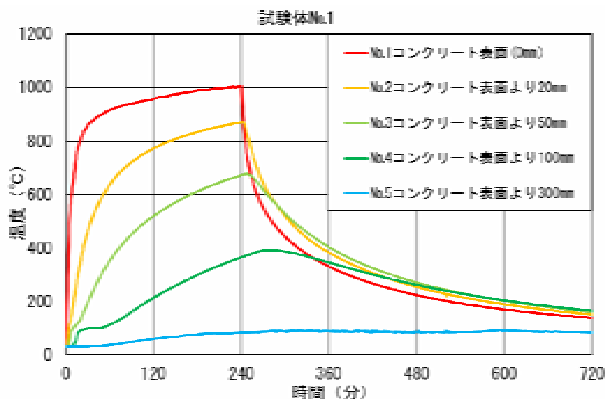
温度測定箇所は、試験体中央部において、加熱側コンクリート板の表面から 0、20、50、100mm の位置に熱電対を設置した。耐火試験後は、試験体の爆裂状況の観察を行い、直径 100mm のコンクリートコアを採取し、中性化深さ、超音波を用いた弾性波速度測定、細孔径分布測定、塩分浸透による浸透係数測定を行った⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 温度履歴とコンクリート表面の損傷の状況

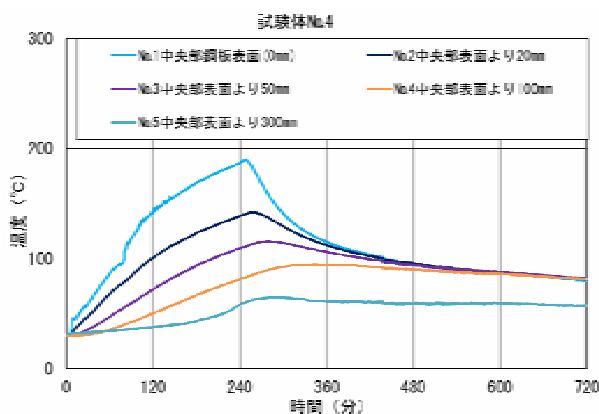
図—3 に試験体 No.1 の埋設した熱電対での温度履歴を示す。部材内の最高温度は 20 mm 位置で約 850℃、50 mm 位置で約 680℃で共に加熱開始から約 4 時間時が最高温度となり加熱終了後は温度がかなり急速に低下した。100mm 位置では最高温度が約 390℃で約 270 分時に最高温度に達した。加熱中止後 10 時間経過しても 200℃を若干下回る温度状況であった。試験体 No.3 でもほぼ普通コンクリートと同様な温度履歴となった。コンクリート表面

からの深さ方向の温度分布より、PP 繊維は深さ約 150 mm までの範囲で溶解し、深さ約 60 mm までの範囲で燃焼したと推定できる。

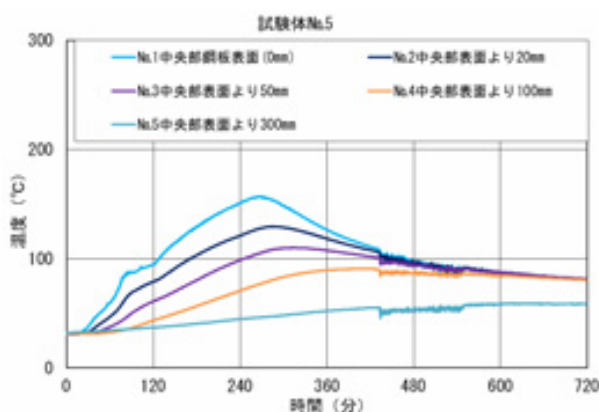


図—3 試験体No.1 温度測定結果

試験体 No.2 試験体内部の温度履歴は、普通コンクリートに耐火被覆板を覆うことで加熱側コンクリート表面の最高温度は 200℃以下に抑えることが出来た。



図—4 試験体No.4 温度測定結果

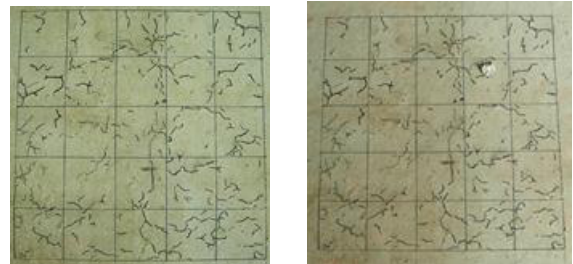


図—5 試験体No.5 の温度測定結果

合成構造部材の試験体内部の温度履歴を図—4 および図—5 に示す。耐火板を設置することで加熱側コンクリート表面の最高温度は 200℃以下に抑えることが出来た。また、試験体 No.5 でセラミックブランケットを挿入

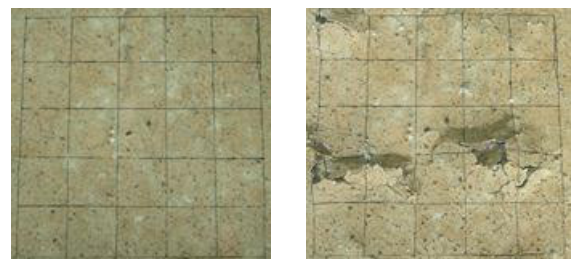
した試験体の方が 50℃程度低い結果となった。

写真—2 に耐火板なしでの普通コンクリートの加熱後の状況を示す。表面はやや褐色で特に爆裂は認められなかった。50mm 間隔の格子範囲に生じていたひび割れをマーカーでなぞった加熱終了後 24 時間後の状況を示す。写真に示すように多数の微細なひび割れが生じていた。また 4 日後の状況も併せて示すがコンクリート表面に少し浮き上がりが認められた。



写真—2 普通コンクリート表面状況
(左 24 時間後 右 4 日後)

写真—3 に試験体 No.3 での加熱後の表面の状況を示す。普通コンクリートと同様に褐色に変色しており、コンクリートの爆裂は認められず PP 繊維混入の効果が認められた。しかし 4 日後でコンクリート表面全体がかなり浮き上がった状況になっていた。



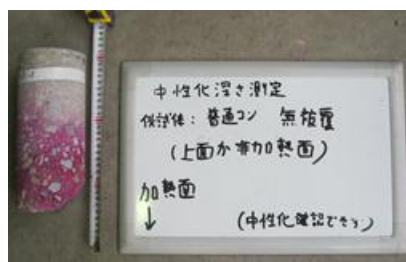
写真—3 高強度コンクリート表面状況
(左 24 時間後 右 4 日後)

コンクリート表面の浮き上がりの原因として、加熱時とは異なり徐冷時に試験体の内部温度が高温のまま表面が冷却され、見かけ上内部が膨張し表面が収縮した状況下で、コンクリート表面に外側方向に圧縮応力が生じるためと考えられる。

3.2 コンクリートコア採取と中性化試験

試験体 No.1 と No.3 では表層のコンクリート部分が脆弱で試験体厚さ方向にコアが抜き取れない状況となった。このため加熱面側表層の脆弱化した部分 (40～50mm) を除いた長さ約 150 mm のコア供試体を非加熱面側から採取した。耐火板ありの試験体では試験体厚さ方向に長さ 300mm のコアを採取できた。写真—4 に採取したコアの状況を示す。JIS A 1152 での測定方法に準拠しフェノールフタレイン溶液を噴霧してコアの中性化深さを測定

した。

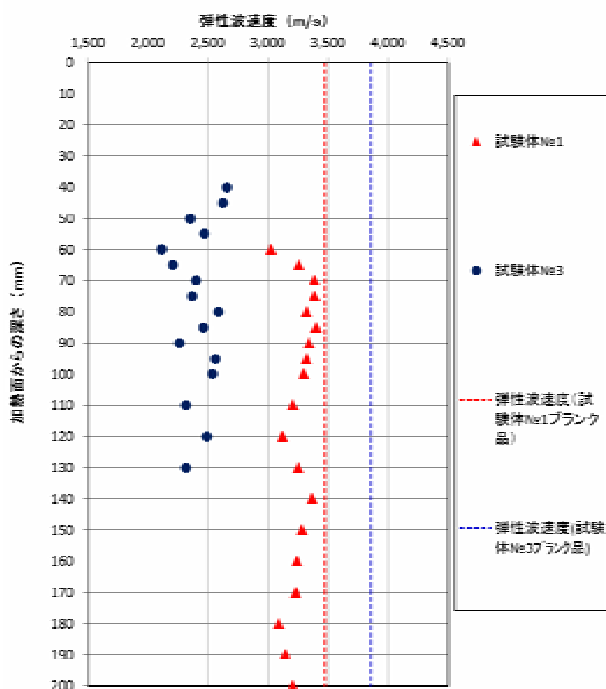


写真—4 コアの状況と中性化測定状況

この結果コアを採取した部分では中性化は見られなかったが、試験体 No.1 と No.3 ではコンクリート板表面の劣化が激しく、コア採取時に試験体 No.1 は 45mm、試験体 No.3 は 20mm 欠損した。耐火被覆板を取付けた試験体では中性化は認められなかった。

3.3 弾性波速度の測定

弾性波速度の測定は、耐火試験体から採取したコアの直径方向に対して行った。測定位置は、加熱面から深さ 20cm の位置までとし、測定の間隔は 5mm とした。ただし、試験体 No.1 と No.3 のように表層部分が欠落しているコアについては、可能な深さから測定を行った。



図—6 弾性波速度測定結果

なお、各深さにおける測定は、コアの外周部分 2 箇所（直径の対角部分）にひび割れ・音速センサをあてて 2 点間の弾性波伝播時間を測定する方法で実施した。また、加熱による劣化がない健全な試験体（耐火試験体製作時に採取したテストピース）に対しても両端から各 10cm および中央の 3 断面における弾性波を測定し、耐火試験

体の劣化状況を評価するための基準値とした。

図—6 に加熱面からの深さ方向の測定した弾性波速度を示す。試験体 No.3 では測定した範囲の深さ 150mm 位置で弾性波速度がかなり低下した。普通コンクリート（耐火板無とあり）の場合は、コアの弾性波速度がそれぞれの健全な試験体での値を若干下回っていることがわかる。表—3 に各試験体での測定範囲内での弾性波速度の深さ方向の測定値と比率を示す。とくに高強度コンクリートの弾性波速度の比率が 63% と顕著となっている。

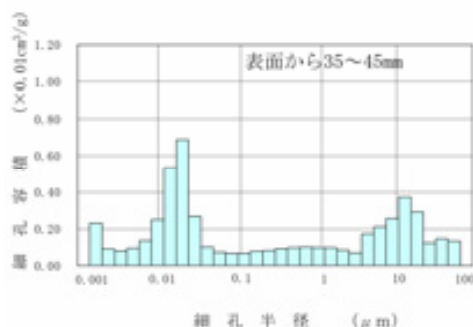
表—3 弾性波速度 (m/s) の低下率

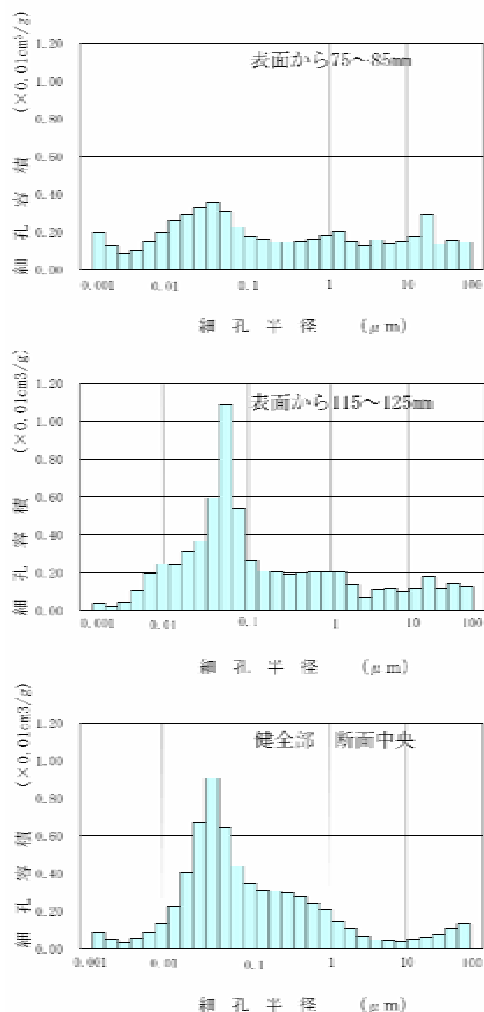
No.	試験体の種類	測定値	基準値	比率
1	普通コンクリート	3,259	3,476	0.94
2	普通コンクリート	3,331	3,476	0.96
3	高強度コンクリート	2,421	3,860	0.63
4	合成構造	3,840	3,740	1.03
5	合成構造	3,825	3,740	1.02

3.4 細孔径分布の測定

高強度コンクリート試験体を対象として水銀圧入式ポロシメータを用いた細孔径分布の測定を行い、長時間加熱による細孔構造の変化を調べた。細孔径分布の測定位置は、加熱面から 40mm（測定対象範囲 35～45mm）、80mm（同 75～85mm）、120mm（同 115～125mm）の 3 断面とした。ここで、基準としたのは耐火試験体の製作時に採取したテストピース（φ100mm×200mm）であり、細孔径分布の測定はその中央断面について実施した。

図—7 のヒストグラムより、耐火試験体から採取したコア供試体は、40mm、80mm、120mm の何れの測点においても細孔径が 10μm 付近の細孔容積が健全な供試体に対して増加していることがわかる。また、その増加の割合は加熱面に近いほど大きくなっていることもわかる。これは、PP 繊維が溶け出し一部焼失したことが増加の要因と考えられる。一方、加熱面から 40mm の測点において細孔半径が 0.01μm 付近における細孔容積の増加が見られた。このように、細孔径分布の測定結果から、微細孔の増加と PP 繊維の溶け出しによる細孔の増加が起こり、試験体の細孔構造の破壊が生じた可能性が高いことがわかる。





図ー7 各深さでの細孔半径の分布

3.5. 塩分浸せき試験による見掛けの拡散係数

試験体 No.1 と No.3 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。ここで、見かけの拡散係数は JSCE-G572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法（案）」に準拠して求めた。すなわち、まず2つの試験体から採取したコア供試体を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。次に、浸せき後の供試体の深さ方向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、最小二乗法により見掛けの拡散係数を算定した。

試験体 No.1 は表層部分が約60mm欠損していたため、供試体を加熱面から110mmの位置が露出面となるようにカットした。また、高強度コンクリート供試体は表層部分が同様に欠けた状態となっていたため、加熱面から50mmの位置が露出面となるようにカットした。コア供試体は前述した位置が露出面となるようにコンクリートカッターでカットした後、露出面以外をエポキシ樹脂で

コーティングした。また、エポキシ樹脂の表面はコーティング部分を保護するために粘着テープで覆った。供試体は濃度10%の塩化ナトリウム溶液中に3ヶ月間横置き状態で浸せきした。

塩化物イオン濃度は、供試体を切断して微粉碎した後、JIS A 1154:2012「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」「9 塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法」に準拠して測定した。測定結果を表ー4に示す。

表ー4 塩化物イオン濃度測定結果

	暴露面からの位置 (mm)	加熱面からの位置 (mm)	塩化物イオン濃度 (%)
普通コンクリート	15~25	125~135	0.468
	35~45	145~155	0.397
	55~65	165~175	0.301
高強度コンクリート	15~25	65~75	0.262
	35~45	85~95	0.138
	55~65	105~115	0.087

見掛けの拡散係数は、表ー4に示した塩化物イオン濃度の測定結果の値を用い、JSCE-G572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して求めた。

見掛けの拡散係数の算定結果を表-5に示す。なお、見掛けの拡散係数の算定にあたっては、浸せき期間を3か月、初期値塩化物イオン量を0.005%とした。

表ー5 見掛けの拡散係数

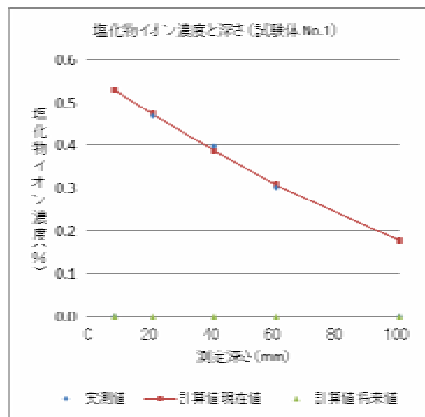
試験体	表面の塩化物イオン濃度(%)	見掛けの拡散係数(cm²/年)
普通コンクリート	0.558	193.0
高強度コンクリート	0.383	41.4

土木学会 2012 年制定・コンクリート標準示方書〔設計編・標準〕においては、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 の予測式として式(1)を与えている。ここにW/Cは普通コンクリートが55.0%、高強度コンクリートが31.0%である。

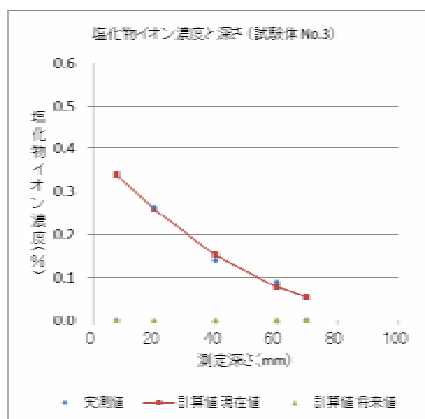
$$\text{Log}_{10}D_k = 3.0 \times (W/C) - 1.8 \quad (1)$$

式(1)にW/C=0.55と0.31を適用した場合の見掛けの拡散係数は、普通コンクリートが0.708cm²/年、高強度

コンクリートが $0.135\text{cm}^2/\text{年}$ となった。表—5 の見掛けの拡散係数とこれらの値を比較すると普通コンクリートは約 270 倍、高強度コンクリートは約 300 倍の値となっている。以上より、いずれの試験体についても、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喪失した状態となっていることがわかる。図—8 に塩化物イオン濃度の実測値と計算値（フィックスの 1 次元拡散方程式によって計算された）との比較を示す。



(試験体 No.1 普通コンクリート)



(試験体 No.3 高強度コンクリート)

図—8 深さ方向の塩化物イオン濃度の分布

4. まとめ

ハイドロカーボンの加熱曲線でコンクリート部材と合成板を対象に耐火試験を実施したところ、以下の知見が得られた。

- (1)RABT 曲線で耐火性能を満足する耐火対策で、長時間加熱のハイドロカーボン曲線で耐火試験を行ったところ沈埋トンネルの耐火設計での許容温度として鋼材の温度 250°C 以下、コンクリートの温度 500°C 以下を満足した。
- (2)長時間加熱を受けたコンクリート部材は、内部温度が高い状況が保持され冷却時にコンクリート表面に浮きが生じた。

(3)中性化深さは、普通コンクリート試験体が 45mm 、高強度コンクリート試験体が 20mm であったが、耐火被覆板を取り付けた試験体では中性化の進行は認められなかった。

(4) 弾性波速度の測定結果より、高強度コンクリート (PP 繊維) では弾性波速度が約 $2/3$ に大きく低下した。この原因として、PP 繊維の溶け出しによる空隙の増加と考えられる。普通コンクリートでは弾性波速度の低下は 5% 前後であった。

(5) 高強度コンクリート試験体に対する細孔径分布の測定結果より、全体的に PP 繊維の太さに近い領域の細孔容積が顕著に増加する傾向が見られた。また、増加の程度は加熱面に近い側ほど大きくなった。

(6) 耐火試験実施後の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、土木学会コンクリート標準示方書に示された方法にしたがって水セメント比 (W/C) から推定した値の 300 倍程度の大きな値となった。このことはコンクリート構造の試験体の表面から 100mm 程度まで、長時間加熱試験により塩分浸透に対する抵抗性がほぼ失われたことを示した。

(7) 爆裂防止対策として PP 繊維を添加した高強度コンクリートにおいては、今回のように長時間の加熱を受けた場合は PP 繊維の溶け出しに起因する耐久性性能の低下が顕著となった。

参考文献

- 1) (公法) 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. 21-37, 2012. 5
- 2) 清宮理, 神田亨：道路トンネル内の車両火災への耐火対策, コンクリート工学会 テクニカルレポート, pp. 627-634, 2013. 8
- 3) 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
- 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
- 5) 清宮理, 安本辰也, 本田陵二, 篠田佳男：トンネル内車両火災によるコンクリートの火害と劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1129-1134, 2013. 6