

論文 鋼繊維コンクリートの耐火性に及ぼす配合の影響と加熱後の劣化評価手法に関する研究

堀口 賢一^{*1}・丸屋 剛^{*2}・馬場 重彰^{*3}・水野 敬三^{*4}

要旨: 道路トンネルのセグメントコンクリートに、補強材として鋼繊維を混入することが行われている。さらに、トンネル火災時に鋼繊維コンクリートの著しい爆裂を抑止することを目的として、有機繊維も混入することがある。これらの繊維を混入したコンクリートで RABT 加熱を行ったところ、同じ水結合材比であっても打設して比較的早い時期では、単位水量に起因する含水率の違いが爆裂の程度に大きく影響することが確かめられた。また、加熱によるコンクリートの劣化範囲の定量的な評価において、有機繊維の熔融温度と熔融している範囲から受熱温度分布を推定できることもわかった。

キーワード: コンクリート, RABT 加熱曲線, 耐火性, 鋼繊維, ポリプロピレン繊維, 火災診断

1. はじめに

近年、トンネルセグメントにおいて補強材の一部として鋼繊維を混入した、鋼繊維補強鉄筋コンクリート製セグメント(以下、RSFセグメント: Reinforced concrete with Steel Fiber tunnel segment)が製造され、既に実構造物で適用されている。鋼繊維の混入は、セグメント組立て時の角欠けやひび割れ抑止などを目的としている。また、鋼繊維の補強効果により、曲げ強度、せん断強度などの強度特性やタフネスなどの変形性能が向上するため、主鉄筋量や配力鉄筋量の低減、省略も期待できる¹⁾。

RSFセグメントは、下水道などの小口径から共同溝などの中口径、さらには道路トンネルなどの大口径まで幅広く適用が可能であるが、近年、道路トンネルでは火災時の耐火性を向上させる耐火工が要求されつつある。トンネル火災に対する耐火工としては、断熱性を有する材料の吹付けや、耐火ボードを設置するなど、コンクリート表面の受熱温度を一定温度以下に制限する方法と、かぶりの熱劣化は許容するが、著しい爆裂による断面欠損を抑止することにより、鋼材の受熱温度を一定温度以下に制限する方法がある²⁾。RSFセグメントでは、どちらの耐火工の採用も可能であるが、後者の方法を採用する場合には、鋼繊維に加えて、コンクリートの著しい爆裂を抑止するために有機繊維も混入する。

本研究では、有機繊維としてポリプロピレン繊維(以下、PP繊維)を混

入した鋼繊維コンクリートに対し、配合とコンクリートの乾燥程度がその耐火性に及ぼす影響を確認することを目的として、RABT加熱曲線(加熱60分)にしたがう加熱実験を行った。また、加熱後の鋼繊維コンクリートに対し、深さ方向への劣化の程度と範囲について、いくつかの測定方法により定量的な評価を試みた。

2. 実験内容

2.1 RABT 加熱実験

表-1にコンクリートの配合を、表-2にコンクリートの使用材料を示す。コンクリートの配合は、水結合材比を26.5, 31.5, 34.8%の3水準とし、配合No.2のみ単位水量を140kg/m³とした。結合材には、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を50%ずつ使用した。また、鋼繊維(Φ0.75×L43mm)は外割り配合で0.4vol.% (31.4kg/m³)、PP繊維(Φ18μm×L10mm)は外割り配合で0.165vol.% (1.5kg/m³)混入した。供試体は打設後に35°Cで8時間の蒸気養生を行い、そのあと水中養生を1週間行った。水中養生後は加熱試験まで、雨水などが掛からないように屋内に静置して気中養生を行った。

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						鋼繊維 SF	有機繊維 PP
			水 W	セメント C	混和材 B	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP		
1	26.5	60	167	315	315	964	647	6.3	外割り 0.4 vol. %	外割り 0.165 vol. % *1
2			140	265	265	1052	709	6.1		
3	31.5		167	265	265	1010	681	3.2		
4	34.8		167	240	240	1035	690	2.2		

*1: 加熱後の劣化評価に用いた供試体では、配合1に外割り0.220vol.%とした。

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 副主任研究員 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター建築技術研究所 副主任研究員 (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター技術企画部 課長 (非会員)

表-2 コンクリートの使用材料

材料	品名・寸法
水	地下水
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$
混和材	高炉スラグ微粉末, 密度 $2.90\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	山砂, 密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.94%
粗骨材	硬質砂岩碎石, 密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.46%
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系 高性能減水剤
鋼繊維	両端フック付 $\phi 0.75\text{mm} \times \text{L}43\text{mm}$
有機繊維	PP繊維 $\phi 18\ \mu\text{m} \times \text{L}10\text{mm}$



写真-1 RABT 加熱供試体外観

写真-1 に供試体の外観を示す。供試体寸法は $W800 \times D800 \times H250\text{mm}$ で、供試体には鋼板と PC 鋼棒により圧縮応力を導入した。導入した圧縮応力はそれぞれの配合の設計基準強度に対する許容応力とし、配合 1, 2 で $20.3\text{N}/\text{mm}^2$, 配合 3 で $18.9\text{N}/\text{mm}^2$, 配合 4 で $18.1\text{N}/\text{mm}^2$ とした。圧縮応力を導入した供試体は、写真-1 のように耐火加熱炉の上に平置きし、 $800 \times 800\text{mm}$ のうち中央 $550 \times 550\text{mm}$ の範囲に対して、RABT 加熱曲線（加熱 60 分）にしたがう加熱を行った。

表-3 に RABT 加熱実験の測定項目を示す。加熱時には、加熱炉内の温度の経時変化を測定し、爆裂の有無を加熱炉に設けた点検口から観察した。コンクリートの圧縮強度と含水率は、加熱供試体と同時に採取し、同じ養生を行った $\phi 150 \times 300\text{mm}$ のテストピースで、加熱試験を行った時に測定した。また、加熱後の供試体は、加熱面に 50mm 間隔のメッシュを切って、その交点の位置で欠損深さを測定した。

RABT 加熱実験は、供試体の打設から材齢 12 週と 39 週で 2 回行った。これは、コンクリートの乾燥程度の違いが耐火性に及ぼす影響を確認するためである。なお、材齢 39 週では、配合 1, 3, 4 の供試体を加熱した。

2.2 加熱後の劣化評価

表-4 に加熱後の火害評価のための測定項目を示す。

表-3 RABT 加熱実験の測定項目

測定項目		測定方法
加熱時	加熱炉内温度	加熱供試体表面付近に設置した熱電対により測定する。
	爆裂の有無	加熱炉の点検口からの目視観察、および爆裂音を確認する。
	圧縮強度	加熱供試体と同時に採取し、同一養生のテストピースで測定する。圧縮強度は3本の平均、含水率は1本とする。
	含水率	
加熱後	欠損深さ	50mm 間隔のメッシュを切って交点位置で測定する。(材齢12週のみ)

表-4 火害評価のための測定項目

測定項目	コア切断長さ×点数	コア数
圧縮強度	長さ $50\text{mm} \times 6$ 点	2本
引張強度	長さ $50\text{mm} \times 6$ 点	2本
中性化深さ	長さ $50\text{mm} \times 1$ 点	2本
ビッカース硬さ	長さ $25\text{mm} \times 6$ 点	1本
密度	長さ $10\text{mm} \times 15$ 点	1本
繊維目視観察		

採取したコアは、全て $\Phi 50 \times \text{L}350\text{mm}$ の貫通コア

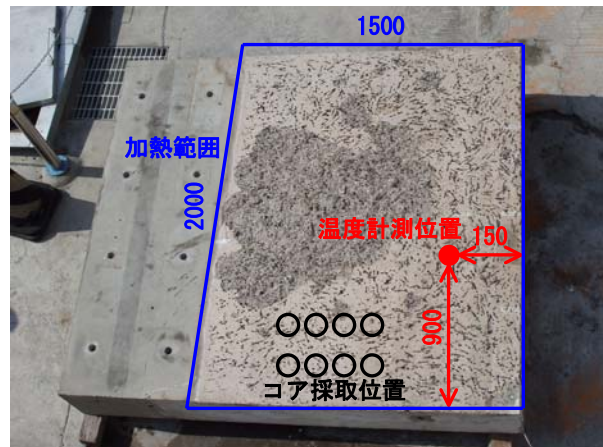









写真-2 火害評価のための供試体外観

加熱を受けた後の劣化の程度とその範囲の評価は、平面的な方向への評価と深さ方向への評価が必要であるが、前者は目視観察によるコンクリート表面の変色の程度や反発硬度の測定で比較的容易に行えるため^{2),3)}、ここでは後者の深さ方向への評価に主眼を置いて、コアを採取していくつかの測定を行い、その結果による定量的な評価を行った。

写真-2 に RABT 加熱後に各種の測定を行うためのコアを採取した供試体を示す。この供試体は表-1 に示した配合 1 で、PP 繊維量のみを $0.220\text{vol.}\%$ ($2.0\text{kg}/\text{m}^3$) に変えて製作したものである。養生は 2.1 に示した方法と同じで、材齢 6 週で RABT 加熱を行った。供試体寸法は

表-5 RABT 加熱実験の測定結果

材齢	配合No.	1	2	3	4
12週	加熱後 外観 爆裂位置				
	欠損深さ 圧縮強度 含水率	全面の爆裂 最大34mm, 平均13.6mm 88.3N/mm ² 4.34wt%	一部の剥離 最大3mm, 平均0.1mm 87.5N/mm ² 3.72wt%	一部の爆裂 最大14mm, 平均2mm 68.2N/mm ² 4.93wt%	一部の爆裂 最大17mm, 平均2mm 62.3N/mm ² 5.03wt%
39週	加熱後 外観 爆裂位置		測定なし		
	圧縮強度 含水率	一部の爆裂 95.1N/mm ² 4.27wt%		一部の爆裂 78.6N/mm ² 4.54wt%	一部の剥離 68.3N/mm ² 4.45wt%

W2240×D2000×H350mm で、加熱範囲はこの供試体 2 体を突き合わせて、一体あたり写真-2 に示す W1500×D2000mm の範囲とした。また、写真-2 に示す温度計測位置の深さ方向 9 深度 (0,20,40,60,82,120,170,253,350mm) に熱電対を設置して温度を計測した。加熱後に φ50mm、長さ L350mm の貫通コアを採取して、表-4 に示した各種の測定を行った。貫通コアは供試体表面に爆裂や剥離が生じてない位置で採取した。

圧縮強度と引張強度は、φ50×L350mm のコアをそれぞれ 2 本ずつ、深さ方向に 50mm ごとに切断して 6 深度で測定した。中性化深さは、コア 2 本に対して、JIS A 1152 「コンクリートの中性化深さの測定方法」にしたがい、コアの割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、その非発色域の深さで測定した。また、ビッカース硬さは、コア 1 本に対して深さ 150mm までの範囲で 25mm ごとに切断して、6 深度の切断面で測定した。さらに、密度と繊維観察は同じコア 2 本を使用して、深さ 150mm までの範囲で 10mm ごとに切断して、15 深度で測定・観察した。

3. 実験結果

3.1 RABT 加熱実験結果

図-1 に加熱炉内温度の測定結果を示す。炉内温度は、RABT 加熱曲線 (加熱 60 分) にしたがった履歴で加熱することができた。

表-5 に RABT 加熱実験の測定結果を示す。加熱面のコンクリートの爆裂は、加熱開始後 4~11 分の間に爆裂

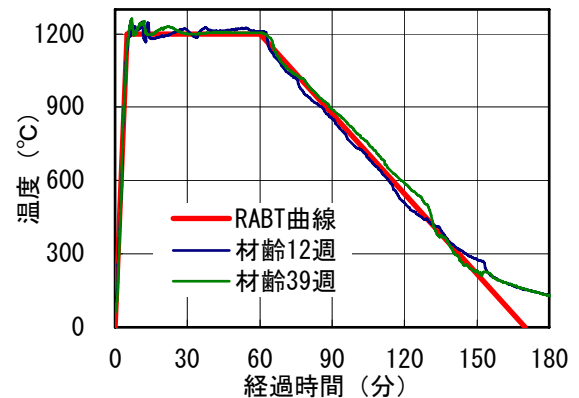


図-1 加熱時の炉内温度

音を伴って生じた。

水結合材比を要因にみると、材齢 12 週では同一の水結合材比 26.5%であるが、単位水量が異なる配合 1 (W=167kg/m³) と配合 2 (W=140kg/m³) で爆裂の程度に差が生じ、配合 1 では加熱面全面に爆裂が生じたのに対し、配合 2 では爆裂は生じず、表面の一部が薄く剥離する程度であった。加熱試験時のコンクリートの圧縮強度は、配合 1 が 88.3 N/mm²、配合 2 が 87.5N/mm² とほぼ同じだが、含水率は配合 1 が 4.34wt%、配合 2 が 3.72wt% と 0.62wt% の差があり、これが爆裂状況の違いを生じさせたものと考えられる。

一方、同じ単位水量 167kg/m³ で水結合材比の異なる配合 1 (W/B=26.5%)、配合 3 (W/B=31.5%)、配合 4 (W/B=34.8%) では、含水率はそれぞれ 4.34、4.93、および 5.03wt% で、配合 3,4 の方が配合 1 に比べそれぞれ 0.59、

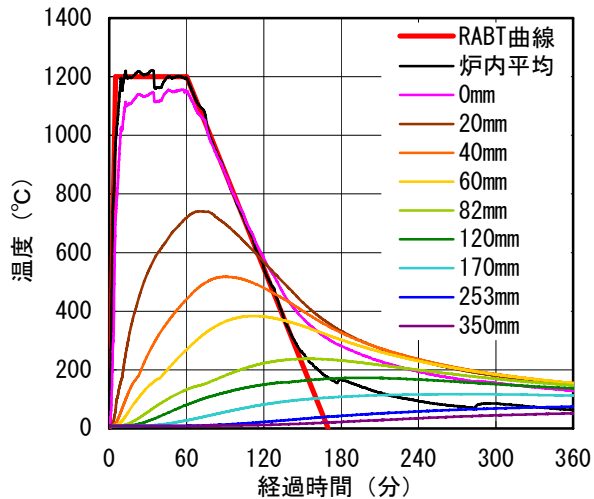


図-2 測定深さごとの受熱温度履歴

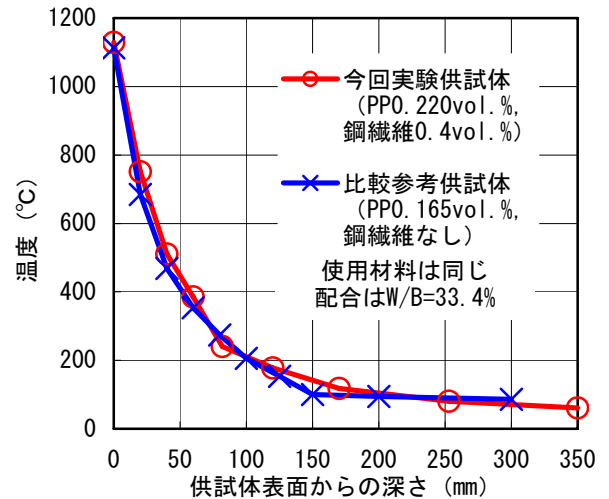


図-3 測定深さごとの最高受熱温度

0.69wt%大きいものの、配合3、4での爆裂は加熱面の一部に留まった。これは、水結合材比との相関性が考えられるコンクリートの密実さの違いが影響しているものと思われる。すなわち、配合3、4は配合1に比べて含水率は高いものの、コンクリートの密実さが相対的に低いため、加熱時にPP繊維が熔融して水蒸気が散逸しやすくなり、爆裂の程度に差が生じたと考えられる。

材齢39週では配合1、3、4の含水率が、4.27、4.54、および4.45wt%となり、それぞれ材齢13週に比べて0.07、0.39、0.58wt%低くなった。これにより加熱時の爆裂の程度も低減され、配合1では全面の爆裂から一部の爆裂、配合3では一部の爆裂は変わらないが範囲は小さくなり、配合4では一部の爆裂から一部の剥離となった。なお、配合1の39週での含水率は、12週のとくに比べて0.07wt%の低下で、配合3、4での低下量に比べて少ないが、爆裂に対する耐火性は大きく向上している。これは、加熱供試体(□800×800×250mm)と含水率測定供試体(φ150×300mm)の比表面積や厚さの違いにより、加熱供試体の表面付近の乾燥が、含水率を測定した供試体よりも進行していた可能性が考えられる。また、材齢39週では、圧縮強度も材齢12週に比べ6.0~10.4N/mm²高くなっており、コンクリートの密実さも増していたと考えられるが、それよりも含水率の低下が、爆裂に対する耐火性を向上させたことがわかる。

3.2 加熱後の劣化評価結果

(1) 受熱温度分布

図-2に測定深さごとの受熱温度履歴を、図-3に測定深さごとの最高受熱温度の分布を示す。図-3には比較のため、鋼繊維が混入されていない供試体のRABT加熱試験結果も示す。著しい爆裂が生じなければ、鋼繊維を混入しても受熱温度分布への影響はほとんどないことがわかる。

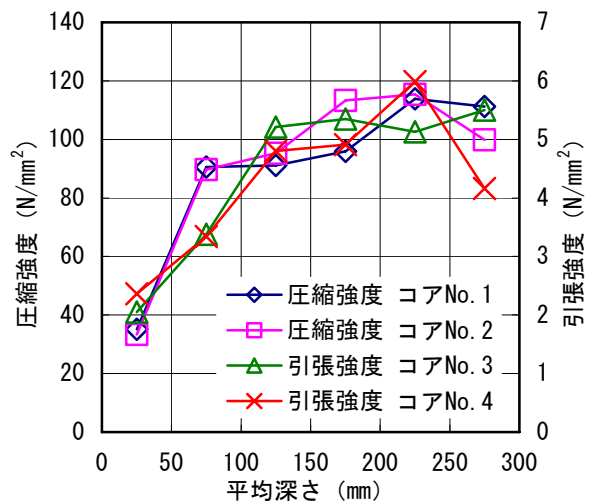


図-4 加熱後のコア圧縮強度・引張強度

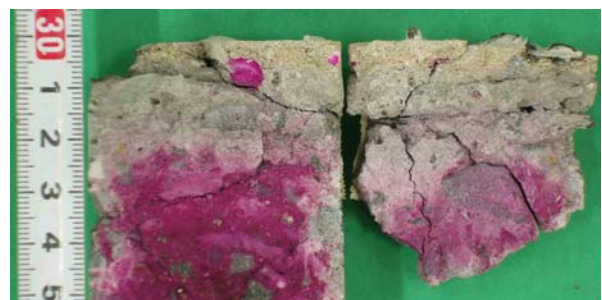


写真-3 加熱後の中性化深さ

(2) 圧縮強度・引張強度

図-4に加熱後の供試体から採取したコアを所定の深さで切断して測定した圧縮強度と引張強度を示す。それぞれ2本のコアで測定した。引張強度は、割裂引張試験により測定した。また、深さごとに測定したコアの切断後の寸法はφ50×50mmで、図-4に示す値は供試体の径や高さに対する補正を行っていない。

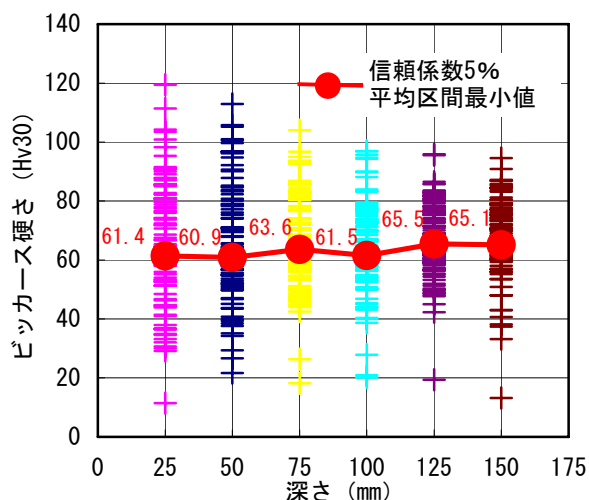


図-5 深さごとのビッカース硬さの測定結果

圧縮強度は、平均深さ 25mm（深さ 0～50mm の範囲）でそれよりも深い位置の値よりも相対的に低い。また、引張強度は、平均深さ 75mm（深さ 50～100mm の範囲）より浅い範囲で、それよりも深い位置の値よりも相対的に低い。引張強度の方が圧縮強度よりも深い位置まで低下している原因は明確ではないが、平均深さ 75mm の範囲での受熱温度は、最高でも 450℃程度であるため、冷却後の鋼繊維の引張強度に及ぼす影響は小さい²⁾が、鋼繊維とコンクリートの付着の低下がひとつの要因として考えられる。なお、耐火試験供試体と同時に製作し、同じ養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、φ150×300mm のテストピース 3本の平均で 75.3N/mm²であった。また、含水率は 4.55wt%であった。受熱による圧縮強度への影響が比較的小さいと思われる平均深さ 125mm（深さ 100～150mm までの範囲）より深い位置での圧縮強度 90～110N/mm²程度に比べて小さいが、これは供試体の寸法効果によるものと考えられる。

(3) 中性化深さ

写真-3 に加熱後の中性化深さを示す。中性化深さはコア 2本で測定し、それぞれ 15.0mm と 25.7mm であった。セメント水和生成物の水酸化カルシウムは、温度が 500℃程度で酸化カルシウムと水に分解するため、中性化深さにより受熱温度が 500℃程度に達した深さを知ることができる^{2)・3)}。しかし本実験では、図-3 によれば受熱温度 500℃に達した深さは 40mm 程度であり、測定された中性化深さとは一致しない。これは、RABT 加熱のような急激な温度上昇および温度低下では、最高受熱温度が 500℃を超えた位置でも、その温度が十分な時間保持されない場合、全ての水酸化カルシウムが酸化カルシウムに分解されないためではないかと考えられる。図-2 によれば深さ 40mm の位置での最高受熱温度は 518℃で、500℃を超えた時間は 34 分間であった。

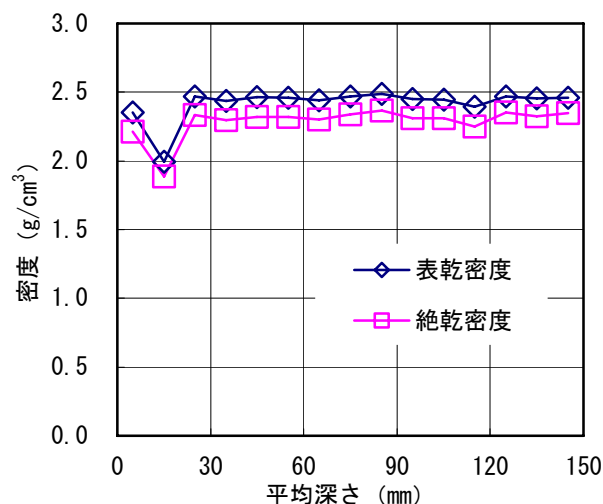


図-6 加熱後のコア密度

一方、深さ 20mm の位置での最高受熱温度は 740℃で、500℃を超えた時間は 59 分間であった。

(4) ビッカース硬さ⁴⁾

図-5 に加熱後のビッカース硬さを示す。ビッカース硬さは、採取したコアを表面から深さ 150mm までの範囲で深さ 25mm ごとに 6 個に切断し、その切断円形面でも測定した。各切断面での標本数は 92～101 点である。図-5 に赤丸で示した値は、ある切断面での測定値に対する、信頼係数 5%での平均区間の最小値である。これによれば、深さ 100mm までのビッカース硬さが相対的に低い傾向が見られ、圧縮強度や引張強度の分布の傾向と合っていると考えられる。

(5) 密度

図-6 に加熱後のコア密度を示す。コアの密度は、採取したコアを表面から深さ 150mm までの範囲で深さ 10mm ごとに 15 個に切断して測定した。また、スライス片の水中質量から算出した表乾密度と、110℃で乾燥させて測定した質量から算出した絶乾密度を測定した。どちらも深さ方向への分布の傾向は同じで、平均深さ 5 mm（深さ 0～10 mm の範囲）と、平均深さ 15mm（深さ 10～20 mm の範囲）でそれよりも深い位置の密度より低く、特に 2 層目の平均深さ 15 mm での密度が低い。加熱面付近で密度が低いのは、セメント水和生成物が加熱により分解され、水が水蒸気として失われるためと考えられる。また、1 層目よりも 2 層目の密度の方が低い原因は明確ではないが、1 層目は中性化により炭酸カルシウムが多く生成し、2 層目は炭酸カルシウムの生成が少なく酸化カルシウムが多く生成している可能性が考えられる。また、RABT 加熱によりコンクリートの密度が低下するのは、表層から 20 mm 程度までの範囲で、引張強度が低下した 100 mm 程度までの範囲より狭く、加熱により中性化した深さに近い値であることがわかる。

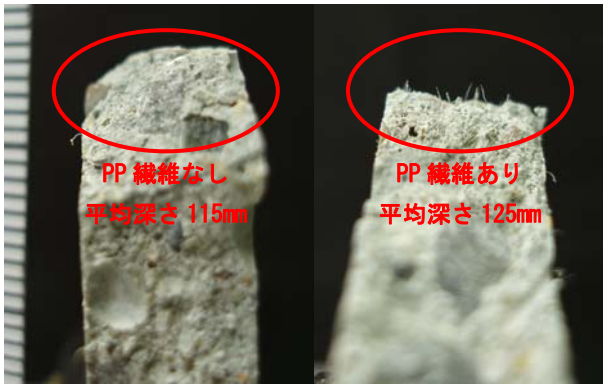


写真-4 加熱後のコア割裂面

(6) 繊維観察

写真-4 に加熱後のコアの割裂面を示す。これは、平均深さ 115 mm（深さ 110～120 mm の範囲）と平均深さ 125 mm（深さ 120～130 mm の範囲）のものである。平均深さ 115 mm では PP 繊維がほとんど見られないが、平均深さ 125mm では PP 繊維が多く残存している。平均深さ 115mm での受熱温度は、図-3 によれば 170℃程度であり、使用した PP 繊維の融点とほぼ一致する。融点に達した PP 繊維は、直ちに気化して消失するわけではないが、コンクリート中で融点に達した PP 繊維は、冷却後に混入時の繊維の状態には戻らないことが考えられる。このようなことから、火災後に PP 繊維の残存する深さを観察することは、深さ方向への受熱温度の履歴を推定するのに有効な手法であると考えられる。

写真-5 に加熱後のコアから取り出した鋼繊維を示す。平均深さ 75mm（深さ 70～80 mm の範囲）と、平均深さ 85mm（深さ 80～90 mm の範囲）で鋼繊維の色が異なり、平均深さ 75mm より浅いものはやや黒色に変色しているのに対し、平均深さ 85mm より深いものは白色で金属の光沢を有する状態である。この境界である深さ 80mm での受熱温度は、図-3 によれば 260℃程度である。このように加熱を受けた鋼繊維コンクリートでは、鋼繊維の色や光沢の状態も、深さ方向への受熱温度の履歴を推定するのに有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、PP 繊維を混入した鋼繊維コンクリートの耐火性と加熱後の劣化評価について、RABT 加熱実験を行って検証し、以下の結果が得られた。

- (1) 水結合材比一定でコンクリートの密実さが同じでも、含水率により爆裂の有無の違いを生じた。また、単位水量一定で水結合材比を大きくし、コンクリートの密実さを低くすると、含水率が大きくなっても爆裂の程度が軽減された。さらに材齢が経過し、圧縮強度が増してコンクリートの密実さが高まって



写真-5 加熱後のコアから取り出した鋼繊維

も、表面の乾燥が進んで含水率が低下すると耐火性が向上した。これらのことから、水結合材比で表されるコンクリートの密実さと加熱時の含水率が、PP 繊維を混入した鋼繊維コンクリートの耐火性に大きく影響することが確かめられた。

- (2) RABT 加熱を受けたコンクリートでは、中性化深さは受熱温度分布から考えられる深さよりも浅かった。また、密度の低下している範囲は、強度が低下している範囲の一部に限られていた。このため、この2つの指標は、加熱による強度の低下範囲を狭く評価してしまう可能性があることがわかった。一方、ビッカース硬さの低い範囲は、強度が低下している範囲と整合することが確かめられた。
- (3) RABT 加熱を受けたコンクリート中の PP 繊維の残存深さや鋼繊維の色や光沢を観察することにより、深さ方向への受熱温度の履歴を推定できることがわかった。

参考文献

- 1) 三桶達夫, 丸屋剛, 村田裕志, 西田与志雄: 鋼繊維補強コンクリートを用いた実大セグメントの構造実験および解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, PP.1261-1266, 2009
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 63, 2004
- 3) 日本建築学会: 建物の火災診断及び補修・補強方法, 2004
- 4) 大脇英司, 宇治公隆, 坂井悦郎, 大門正機: コンクリート構造物の耐久性評価へのビッカース硬さ測定法の応用, セメント・コンクリート, No.638, PP.36-41, 2000.4