

論文 剥落防止機能を有する有機系短繊維補強コンクリートの耐火性能

新井 崇裕^{*1}・平石 剛紀^{*2}・宮本 圭一^{*3}・横井 伸昭^{*4}

要旨：RC セグメントを道路トンネルへ適用することを目的として、剥落防止機能も兼ね備えた耐火型有機系短繊維補強コンクリートを用いたその耐火性能について加熱実験による検討を行った。その結果、爆裂を抑制できる繊維の混入量、桁高方向の温度分布、および、加熱による中性化深さ、圧縮強度の残存率を確認した。また、熱伝導解析を行い、コンクリートの温度履歴について実験値との比較検討をした結果、今回の条件下では温度が約 250～450℃となる部位における良好な整合が見られた。

キーワード：有機系短繊維, 耐火性能, RC セグメント, 爆裂, 熱伝導解析

1. はじめに

近年、大都市地域の構造再編に伴う道路整備事業が注目を集め、シールド工法による道路トンネルが多数計画されている。ここで使用される RC セグメントには、種々の性能が要求され、複数の検討課題が顕在化している。その一つとして、セグメント組立時や供用時の割れ・欠けによるコンクリート片の剥落防止、および、供用時の火災によるコンクリートの爆裂防止が課題として挙げられる。コンクリートの剥落防止や爆裂防止には、それぞれ有機系短繊維を混入することが有効な手段として報告されており^{1),2)}、この二つを同時に満足することができれば非常に効率的であると考えられる。そこで、剥落防止機能を兼ね備えた耐火型有機系短繊維補強コンクリートを開発することを目的に、剥落防止として実績のある繊維を対象として、耐火性能に関する実験的検討を行った。また、併せて解析による温度予測の可否について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

実験ケースは表－1に示すように、有機系短

繊維の混入量が爆裂抑制に及ぼす影響を検討することを主旨とし、繊維混入量を主な実験因子とした。また、鉄筋位置（かぶり深さ）が爆裂、あるいは、加熱による剥落に及ぼす影響を検討する目的で、繊維を 0.2%混入したケースのみ、かぶり深さを実験因子として加えた。

2.2 試験体

(1) 試験体形状

試験体概要を図－1に示す。試験体の形状寸法は、幅 550mm×長さ 1,000mm×高さ 300mm とし、加熱面は幅 550mm×長さ 810mm とした。試験体には、D10 の鉄筋を格子状に 100mm ピッチで配置した。

(2) 使用材料

試験体に使用したコンクリートの材料を表－2に、配合を表－3にそれぞれ示す。

各配合は水粉体比（W/P）を一定とした。

表－1 実験ケース

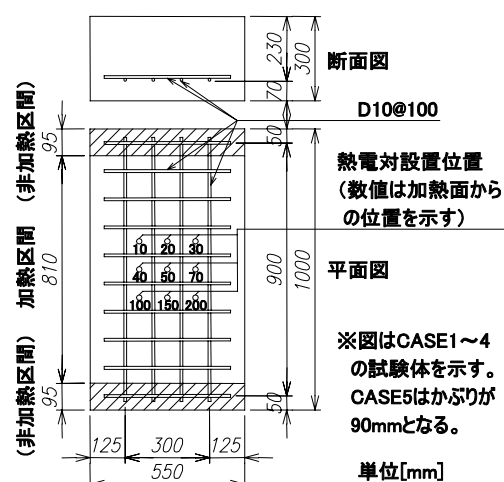
CASE	繊維混入率 (vol%)	かぶり (mm)
1	0.0	70
2	0.1	
3	0.2	
4	0.3	
5	0.2	90

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 主任研究員（正会員）

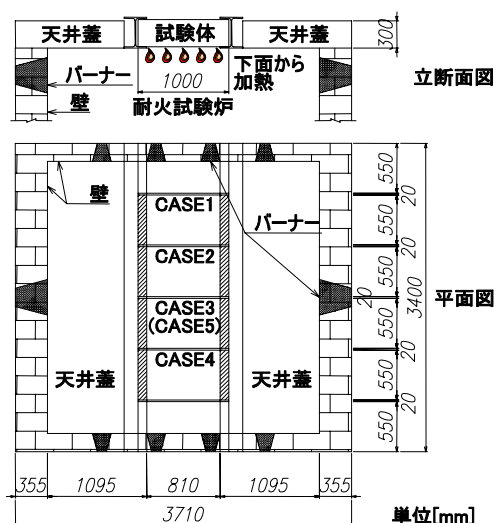
*2 鹿島建設（株） 技術研究所（正会員）

*3 鹿島建設（株） 技術研究所 上席研究員 工博（正会員）

*4 ジオスター（株） セグメント営業部



図－１ 試験体概要



図－２ 加熱実験概要

(3) 養生

試験体の養生は、実構造物の RC セグメントと同等とし、コンクリート打設 5 時間後に 40℃ で 8 時間蒸気養生を行ったあと、徐冷して 21 時間後に脱型し、7 日間水中養生を行った。その後は、加熱実験日（材齢 28 日）まで気中養生とした。

(4) 材料試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果、および、加熱実験時の圧縮強度、ならびに、含水率の測定結果を表－４に示す。

2.3 加熱実験方法

加熱実験は、試験体を耐火試験炉の天井に配置し、試験体下面（RC セグメントの内面側）に加熱を行った。加熱実験概要を図－２に示す。

加熱条件は、トンネル内の火災を想定し、加熱開始後 5 分間で 1,200℃まで温度を上昇させ、これを 55 分間保持した後、110 分間で徐冷するドイツ基準の RABT 曲線³⁾を用いた（図－３）。

2.4 計測項目

加熱実験中は、熱電対により試験体中央部（図－１）において、加熱面から 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200mm の位置でコンクリートの温度を、また、鉄筋位置で鉄筋の温度を計測した。

表－２ 使用材料

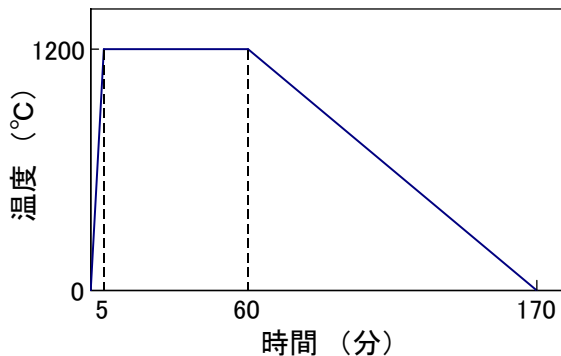
使用材料	記号	種類	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
高炉スラグ	B	高炉スラグ微粉末	比表面積4000cm ² /g
細骨材	S	硬質砂岩砕砂	表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率1.13%, 粗粒率2.71
粗骨材	G	硬質砂岩碎石	表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率0.79%, 粗粒率6.72
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
有機系短繊維	PP	ポリプロピレン繊維	繊維径64μm, 繊維長さ12mm, 密度0.91g/cm ³

表－３ コンクリートの配合

CASE	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m ³)						
						水 W	結合材P		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	有機 繊維 PP
							セメント C	高炉 B				
1	20	3.0±1.5	1.5±1.5	34	44	141	207	207	818	1061	2.69	0.00
2					46	147	216	216	840	1004	2.81	0.91
3					46	152	223	223	827	989	2.90	1.82
4					50	155	227	227	890	907	2.95	2.73
5					46	152	223	223	827	989	2.90	1.82

表－４ 品質管理試験結果

CASE	フレッシュコンクリート			硬化後	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	打設 温度 (℃)	圧縮 強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
1	2.7	2.2	21	73.7	4.5
2	4.3	1.7	21	75.8	4.6
3	3.9	1.7	21	75.6	4.9
4	3.8	2.5	21	74.9	4.3
5	3.1	1.6	23	72.5	4.9



図－３ 加熱温度－時間曲線（RABT 曲線³⁾）

加熱実験後は、加熱面からの爆裂深さ、コアサンプリングによる中性化深さ、および、コア供試体による圧縮強度の残存率を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 爆裂状況

CASE1～4 における加熱実験後の加熱面の状況を写真－１にそれぞれ示す（CASE5 は CASE3 と同程度であったため略す）。繊維を混入しなかった CASE1、繊維を 0.1ol%混入した CASE2 は、それぞれ爆裂が生じた。一方、繊維を 0.2vol%, 0.3vol%混入した CASE3～5 は、いずれも爆裂は生じなかった。また、鉄筋位置を実験因子とした CASE3, 5 では加熱面における顕著な差は見られなかった。これらの結果から、今回の検討条件では、爆裂を抑制するために必要な繊維混入量は 0.2vol%以上であること、鉄筋位置が 70mm～90mm であれば、鉄筋位置が要因となって爆裂、あるいは、加熱による剥落が生じないことがわかった。CASE1, 2 の爆裂深さを図－４にそれぞれ示す。

3.2 桁高方向の温度分布



(a)CASE1(なし)



(b)CASE2(0.1vol%)



(c)CASE3(0.2vol%)



(d)CASE4(0.3vol%)

写真－１ 加熱面の状況（爆裂状況）

22	36	24	28	12
16	73	86	68	32
19	75	77	61	19
22	70	72	78	24
11	60	68	68	17
12	82	76	70	24
12	72	85	83	21
18	80	83	79	21
10	22	33	16	7

☒ 熱電対を設置した範囲

(a)CASE1(なし)

0	5	4	4	0
0	17	23	12	0
0	28	23	15	0
0	5	0	0	0
11	23	24	27	8
15	22	36	21	13
13	45	33	23	13
12	35	27	17	9
0	0	0	0	0

単位[mm]

(b)CASE2(0.1vol%)

図－４ 爆裂深さ

桁高と温度の関係を図－５に示す。コンクリートの許容耐火温度の一指標として、一般的に 250～380℃という温度が設定されている⁴⁾。そこで、ここでは許容値を 350℃と設定し、これを満足する加熱面からの位置（かぶり深さ）について検討を行った。その結果、今回の条件下では、爆裂が生じていない CASE3～5 では、概ね 50mm の位置であることが明らかとなった。一方、爆

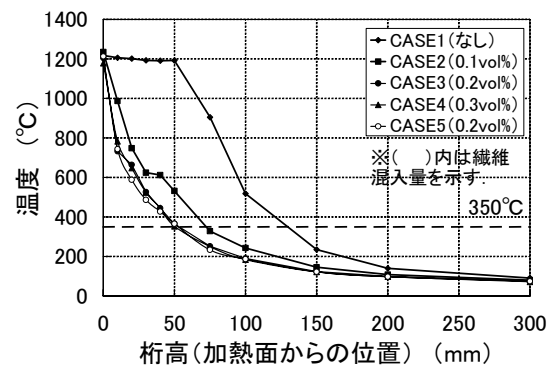
裂が生じた CASE1, 2 は、それぞれ約 130, 70mm の位置で 350℃になっているが、前項で示した爆裂深さ（図－4）を見てみると、CASE1, 2 の熱電対を設置した範囲における平均爆裂深さは、それぞれ約 70, 20mm であることから、爆裂深さ分を差し引けば CASE1, 2 は約 60, 50mm の位置で 350℃になっていることになる。これらのことから、加熱面から 50mm 程度の位置でコンクリート温度は 350℃に達するものと判断される。

3.3 中性化深さ

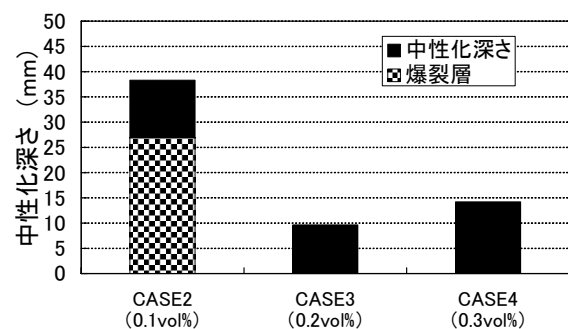
加熱後の試験体（CASE2～4）から直径 75mm のコアサンプリングを行い、加熱後の材齢 12 日のときに 10%フェノールフタレイン水溶液を噴霧して中性化深さを測定した。測定結果を図－6 に、中性化試験の一例として CASE3 の結果を写真－2 にそれぞれ示す。なお、CASE2 は爆裂が生じたため、爆裂深さと中性化深さを合わせて表示している。これらの結果から、中性化深さは 10～15mm であることが確認され、それは繊維の混入量に大きく影響されないことがわかった。なお、この中性化は、加熱によりコンクリート中の遊離アルカリ分である水酸化カルシウムが熱分解し、アルカリ性が減少したことによるものと考えられる。

3.4 圧縮強度の残存率

加熱後の試験体（CASE3, 4）から直径 75mm のコアサンプリングをそれぞれ 2 体ずつ行い、加熱後の材齢 11 日のときに、圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験に用いた供試体は、図－7 に示すように、まず加熱を受けた部分をそれぞれ 40mm、あるいは、60mm カットし、次に供試体の高さが 150mm となるように、加熱面と反対側の余長をカットすることにより作成した。これは、図－5 に示すように、かぶり深さが 40, 60mm の位置では、コンクリート温度がそれぞれ 400℃強、350℃弱であったことから、3.2 節で設定した許容耐火温度（350℃）を超えた場合の強度、および、許容耐火温度の範囲内での強度を確認することを意図したものである（40mm カッ



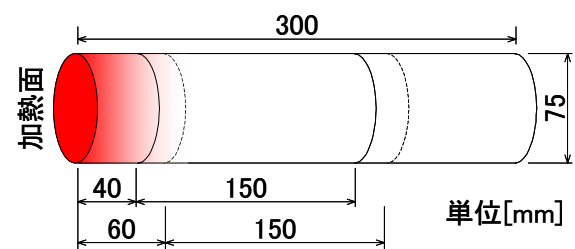
図－5 桁高と温度の関係



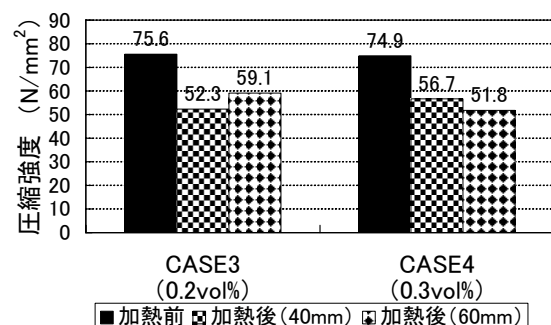
図－6 中性化深さ



写真－2 中性化深さの試験結果（CASE3）

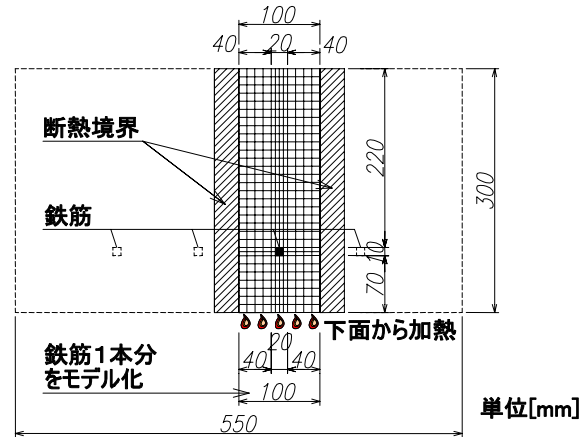


図－7 圧縮強度試験用供試体の概要

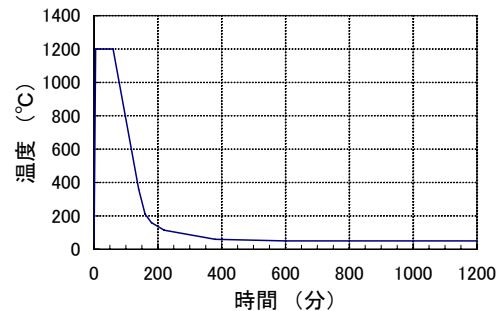


図－8 加熱前後の圧縮強度

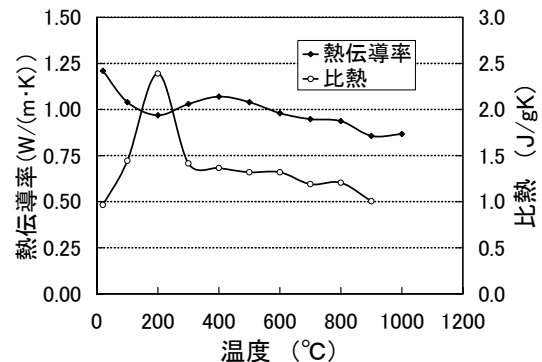
トした供試体には 350℃を超えた部位が含まれ、60mm カットした供試体にはそれが含まれない)。圧縮強度試験結果を図－8 に示す。これより、今回の試験方法によれば、試験体切断位置（受熱温度）の影響、および、繊維混入量による影響の二つの因子に対して、それぞれ定性的な傾向はみられないこと、加熱前に比べて加熱後は 22～31%の強度低下を示しており、概ね 30%程度の強度低下が生じる（70%程度の残存強度がある）ことが確認された。



図－9 熱伝導解析モデル



図－10 加熱温度－時間曲線



図－11 コンクリートの熱伝導率，比熱

4. 解析的検討

4.1 解析手法・対象

有限要素法による 2 次元非定常熱伝導解析により解析を行った。解析対象は、繊維を 0.2vol% 混入した CASE3 とし、後述するコンクリートの熱伝導率，比熱は CASE3 のものを用いた。

4.2 解析モデル

解析モデルを図－9 に示す。解析モデルは、100mm ピッチで配置される長手方向の鉄筋 1 本分をモデル化して幅 100mm とし、両側を断熱境界とした。図中のメッシュ部分がコンクリート，黒色部分が鉄筋であり，直角方向の鉄筋はモデル化を行わなかった。

4.3 解析条件

(1) 加熱温度

加熱実験の炉内温度を考慮し，図－10 に示す温度履歴を熱伝導解析モデルの下面（下側）に与えた。

(2) コンクリートの特性値

- a) 熱伝導率，比熱：CASE3 の熱伝導率，比熱を試験により測定し，これを使用した（図－11）。なお，1,000℃を超える温度における熱伝導率，880℃を超える温度における比熱は，それぞれ，1,000℃，880℃における値と同じにした。

- b) 密度：2,300 kg/m³

- c) 含水率：5%

(3) 鉄筋の特性値

- a) 熱伝導率，比熱：EC4⁵⁾において熱伝導

率，比熱とも 1200℃まで近似式で規定されているので，本解析ではこれを使用した。

- b) 密度：7,850 kg/m³

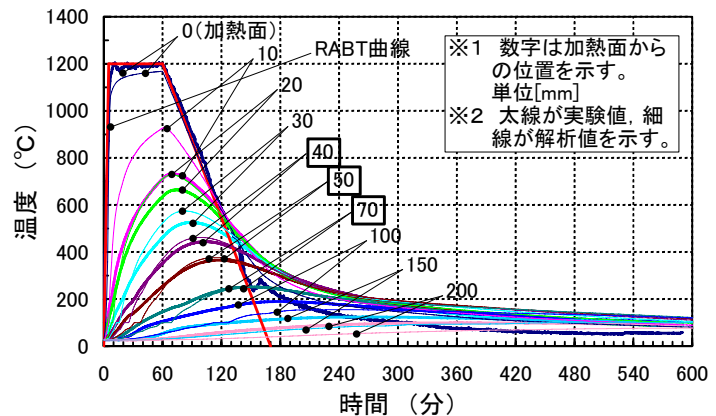
(4) その他

- a) 非加熱面側雰囲気温度：20℃，一定
- b) ステファン・ボルツマン定数： 5.67×10^{-8} W/m²K⁴
- c) 対流熱伝達率：23 W/m²K
- d) 放射率：0.9

4.4 解析結果および考察

CASE3（0.2vol%）について，実験値と解析値の温度履歴を重ね合わせたグラフを図－12 に，

実験値と解析値の最大値の比較を表－5にそれぞれ示す。図－12、表－5より、解析値はコンクリート温度が250～450℃となる加熱面からの位置70～40mmで非常に良好な整合が見られる（図、表中の太枠部）。この位置を境界として加熱面に近くなるに従って解析値は実験値よりも過大な評価、反対に加熱面から遠くなるに従って過小な評価となる傾向が見て取れる。例えば、10mmの位置では、解析値/実験値＝928.2℃/732.5℃＝1.27であり、200mmの位置のそれは0.76である（表－5）。これらのことから、今回の条件下では本解析手法により、設計に用いるコンクリートの耐火許容温度である350℃近傍（あるいは、加熱面からの距離が50mm程度）では精度よく解析が可能であること、そこから離れるに従って解析精度は低下するが、±25%程度で解析可能なことがわかった。なお、このような傾向が示される原因の考察とそれを踏まえた解析手法については、今後の検討課題と考えている。



図－12 実験値と解析値の比較（温度履歴）

表－5 実験値と解析値の比較（最大値）

加熱面からの位置 (mm)	10	20	30	40	50
実験値 (°C)	732.5	664.3	526.2	444.0	365.5
解析値 (°C)	928.2	728.0	574.6	462.2	376.7
解/実 (－)	1.27	1.10	1.09	1.04	1.03

加熱面からの位置 (mm)	70	100	150	200
実験値 (°C)	251.9	190.0	124.3	99.3
解析値 (°C)	250.8	151.7	100.0	75.0
解/実 (－)	1.00	0.80	0.80	0.76

今後の検討課題と考えている。

5. まとめ

剥落防止として実績のある有機系短繊維（ポリプロピレン繊維，繊維径 64 μm，長さ 12mm，密度 0.91g/cm³）を対象として，耐火性能に関する実験的検討，および，熱伝導解析を行った結果，今回の条件下で得られた知見を以下に示す。

- (1) 爆裂を抑制するために必要な繊維混入量は，0.2vol%以上である。また，70～90mm 鉄筋位置は爆裂，あるいは，剥落には影響がない。
- (2) 加熱面から 50mm 程度の位置でコンクリート温度は 350℃に達する。
- (3) 加熱後 12 日材齢の中性化深さは，10～15mm であり，繊維の混入量に大きく影響されない。
- (4) 加熱後 11 日材齢の圧縮強度の残存率は，70% 程度である。
- (5) 熱伝導解析により温度が約 250～450℃となる部位における良好な整合が見られた。それ以外の部位の整合が取れない点については，

参考文献

- 1) 大島章弘ほか：連糸状ポリプロピレン繊維を用いたコンクリートの剥落防止技術の開発，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，5-512，pp.1021-1022，2004.9
- 2) 百瀬晴基ほか：ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm²の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.995-1000，2003.6
- 3) ドイツの道路トンネルの装備及び稼動に対する基準（RABT），1994.
- 4) 田嶋仁志ほか：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，(社)土木学会，pp.付 15-26，2004.10
- 5) Eurocode 4, - Design of composite steel and concrete structures -, Part 1-2: General rules – Structural fire design, 2005