トンネル工学論文集第15巻/pp. 115-124, 2005. 12

短繊維樹脂コンクリートを用いた耐火セグメントの研究

A study on Fire Resistant Segment using short fiber resin

後藤徹[1]・森田武[2]・関伸司[3]・林裕悟[3]・中川拓也[3]
Toru Goto, Takeshi Morita,Sinji Seki,Yugo Hayashi and Takuya Nakagawa

[1]フェロー会員 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館）
E-mail:t.goto@shimz.co.jp
[2]正会員 博士（工学） 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17）
[3]正会員 清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館）

A fire in the current shield tunnel on a highway or railway would cause explosive spalling of concrete lining due to high temperature that mostly result in significant damages to the tunnel structure. The conventional fire protections for the tunnel structure have utilized separate ceramic panels being attached or spraying fireproof materials on the surface of the lining. However, the ceramic panels are rather costly, and the spraying induces poor working conditions. As a substitute, the concrete segments with enhanced fireproof performance have been developed by the use of short fiber resin. A series of fire tests were conducted to verify their fireproof performance. This paper mainly reports on the results of fire tests.

***Key Words** :shield tunnel, fire resistance,segment, short fiber resin*

1．はじめに

高速道路や鉄道などのトンネル内において火災が発生すると，火災の高熱により覆工コンクリートが爆裂し，トンネル構造物に大きな損傷が生じる場合がある．シールドトンネルでの従来の耐火構造は，二次覆工コンクリートを打設するか，一次覆工後に耐火被覆材を貼るか，吹き付ける構造であり，いずれも覆工本体であるセグメントを別の材料で内面保護するものであった．しかし，これら従来の耐火構造は，施工性，経済性，工期などの面で難があり，昨今の工事に対する要求を必ずしも満足する状況になかったと言える．

一方，建築分野では，火災時における高強度コンクリートの爆裂を抑制する対策として，有機繊維混入コンクリートに関する研究が 1990 年代の前半からなされてきた [1),2)]．そして，国内では 2000 年にAFR（Advanced Fire Resistant）コンクリート工法として実用化がなされた [3)]．トンネル火災を対象とした有機繊維混入コンクリートの適用性に関しては，国内において近年多くの研究報告されるようになってきており [4),5),6),7)]，ポリプロピレン繊維（以下，PP）などによる爆裂抑制効果が確認されつつある．

そこで本研究では，セグメント本体に耐火性能を持たせるべく，超高強度コンクリート用に実用化されているAFRコンクリートを参考にして，従来検討がなされていたPPに加えてポリアセタール繊維（以下，PA）も検討対象とした．そして，RCセグメントに使用されるコンクリートをベースとして，短繊維樹脂混入コンクリートの耐火性，製造および補修に関する各種の実験検討を行った．

基礎実験では，PP，PA混入の有無による爆裂の差異および，加熱時の試験体内温度の分布を確認した．次に実用化実験では，実際の製作と使用状況を模した試験体の作成と加熱実験を行い，設計に必要な特性値および性能の確認を行った．

本論文は，これら各種の実験結果についてとりまとめ，今後のシールドトンネルの耐火構造に新たな展開を与えるものである．

2．基礎実験

表-1　使用材料

使用材料	銘柄	諸性質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3, 比表面積 3320cm^2/g
細骨材	山砂	千葉県万田野産 表乾密度 2.62g/cm^3, 吸水率 2.20%, 粗粒率 2.36
粗骨材	硬質砂岩砕石	東京都青梅産 表乾密度 2.66g/cm^3, 吸水率 0.61%, 粗粒率 6.60
混和剤	高性能減水剤標準形 I 種	エヌエムビー製　レオビルド 4000
繊維	ポリプロピレン (PP)	径 48 μm, 長さ 20mm, 密度 0.91 g/cm^3
	ポリアセタール (PA)	径 41 μm, 長さ 20mm, 密度 1.41 g/cm^3

表-2　ベースコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
					水	ｾﾒﾝﾄ	細骨材	粗骨材	混和剤
20	3±1.5	1.5±1.0	36.4	43.5	150	412	804	1059	16.9

AFRコンクリートは，建築の超高強度コンクリート（設計基準強度>80N/mm^2）では既に効果が確認されている．しかし，設計強度が低く配合の異なるセグメントコンクリートで同様の効果があるか，また，加熱曲線をRABTとした場合の爆裂の状況を確認する必要があり，基礎的な加熱実験を行った．

(1) 実験方法

a) ベースコンクリートの使用材料および配合

使用材料を**表-1**に，ベースコンクリートの配合を**表-2**に示す．

b) コンクリートおよび試験体の種類

使用したコンクリートは，繊維の種類と混入率を実験因子として，**表-3**に示す7種類とした．これらのコンクリートを用いて，加熱用試験体，圧縮試験用供試体および含水率試験用供試体を製作した．加熱用試験体は，10×10×40cmの小型試験体と，**図-1**に示すパネル型試験体の2種類とした．小型試験体は無筋としたが，パネル型試験体についてはD10@100のシングル配筋（表面から配力筋中心までの距離：50mm）とした．

c) 試験体の製作および養生

コンクリートの練混ぜには，55 リットル 2 軸強制練りミキサーを使用し，空練り（セメント，砂，砂利）10 秒→加水後 90 秒→繊維混入後 120 秒→排出の手順で練混ぜた．

合板型枠にコンクリートを打設後，試験体は初期養生室（温度 20℃，相対湿度 95%以上）にて 1 日間養生した後脱型して，実験日の前日まで 20℃の水中で養生した．

表-3　コンクリートの種類，加熱用試験体種類と数

配合名	仕様	加熱用試験体		
	繊維	繊維混入率*1 (%)	小型*2 試験体	パネル
N36.4	－	－	3	2
N36.4-PP0.1	PP	0.1 (1.0kg/m^3)	3	－
N36.4-PP0.3	PP	0.3 (3.0kg/m^3)	3	2
N36.4-PP0.5	PP	0.5 (5.0kg/m^3)	3	1
N36.4-PA0.1	PA	0.1 (1.5kg/m^3)	3	－
N36.4-PA0.3	PA	0.3 (4.5kg/m^3)	3	2
N36.4-PA0.5	PA	0.5 (7.5kg/m^3)	3	2

*1　() 内はコンクリート 1m^3 に対する混入量（質量）
*2　端面が 100×100mm で長さ 400mm の無筋の試験体

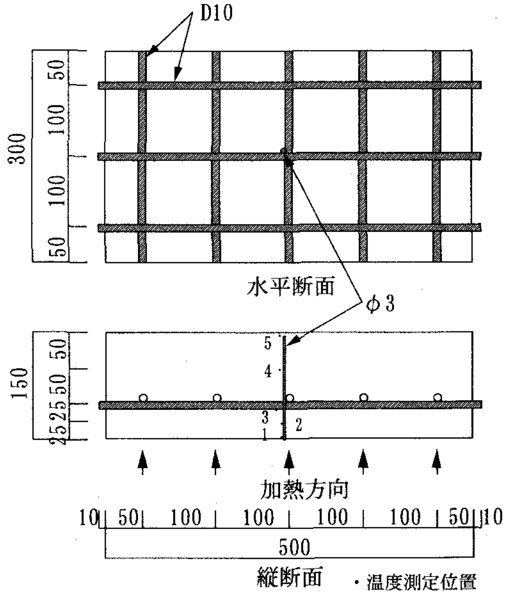


図-1　加熱用パネル型試験体

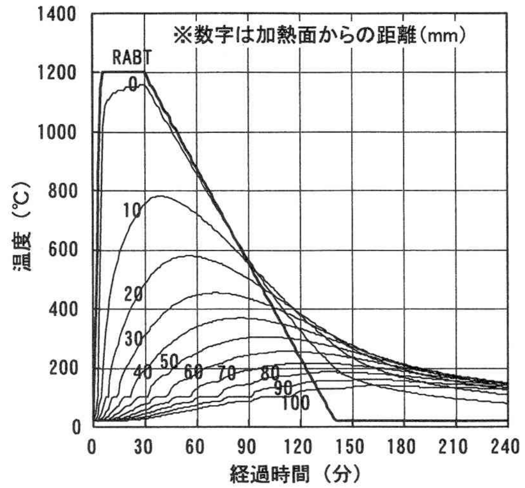


図-2 RABT温度曲線とパネル試験体の内部温度(計算値)

d) 材料試験方法

材齢 28 日および加熱実験時に，使用したコンクリートの圧縮強度試験を実施した．また，加熱実験時におけるコンクリートの含水率を把握するため，加熱試験体と同条件で養生した供試体を加熱実験実施日から質量変化が無くなるまで 105℃の乾燥炉で乾燥した．含水率は乾燥前後における質量差を乾燥質量で除して求めた．

e) 加熱試験方法

加熱実験は，加熱炉の容量の制約から，コンクリートの材齢が 36 日および 41 日の 2 回に分けて行った．加熱温度はトンネル火災試験用 RABT 温度曲線に準じた．最高温度の保持時間は，加熱実験装置の能力上 25 分としたが，事前実験で爆裂有無の判断に支障のないことを確認済みである．**図-2** に，実験に採用した RABT 曲線を示す．なお，同図には，差分法 8)により計算した部材内部温度（部材厚 40cm，爆裂無し）を参考のため併記した．試験体の長辺方向の両端部 5cm は，試験体支持フレーム上にあり，直接加熱されない．このため，10×10×40cm 試験体の加熱範囲は 10cm×30cm であり，パネル型試験体の加熱範囲は 30cm×40cm である．

加熱実験における測定項目は，加熱温度および部材内部温度（部材内部温度はパネル型試験体のみ）とした．また，加熱実験後の試験体についてノギスによって爆裂深さを測定した．10×10×40cm試験体の爆裂深さは加熱面（10cm×30cm）について縦横2cm間隔で，パネル型試験体の爆裂深さは加熱面（30cm×40cm）について縦横5cm間隔で，各々測定した．なお，パネル試験体については，実験中の爆裂の状況をビデオ撮影により観察した．

表-4 コンクリートの圧縮強度および加熱実験時含水率

配合名	圧縮強度 (N/mm²)		加熱実験時含水率*1 (%)
	材齢 28 日	加熱実験時（材齢 37 日）	
N36.4	65.2	73.0	4.9
N36.4-PP0.1	70.8	78.7	4.8
N36.4-PP0.3	69.1	80.2	4.8
N36.4-PP0.5	70.7	77.3	4.9
N36.4-PA0.1	71.3	77.8	4.9
N36.4-PA0.3	70.6	76.9	4.9
N36.4-PA0.5	69.2	75.5	4.8

*1 33 日間 105℃で乾燥して求めた含水率

(2) 材料試験結果および加熱実験結果と考察

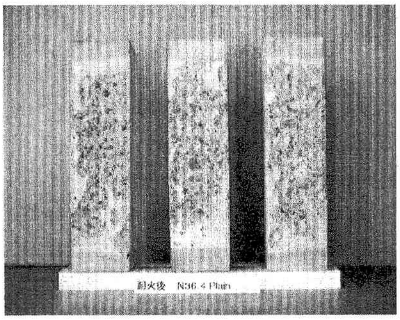
a) 材料試験結果

表-4に，使用したコンクリートの圧縮強度および加熱実験時の含水率を示す．なお，加熱実験時の圧縮強度試験は，加熱実験を行った2材齢（36日，41日）相当として，材齢37日で実施した．

b) 加熱実験結果と考察

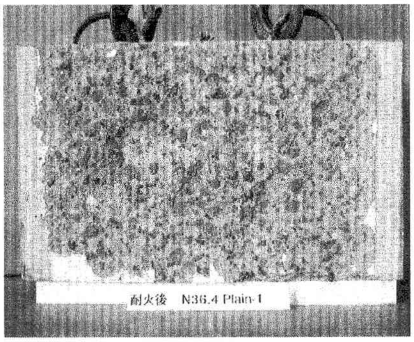
1) 繊維無混入試験体

加熱実験後の試験体の状況を**写真-1** および**写真-2**に示す．



＜繊維無混入（配合名：N36.4）＞

写真-1 小型試験体の加熱実験後の状況



＜繊維無混入（配合名：N36.4）＞

写真-2 パネル型試験体の加熱実験後の状況

表-5 N36.4 パネル型試験体の実験経過

加熱開始後の経過時間（分・秒）	状況
0分0秒	加熱開始
1分20秒	加熱試験炉の観察窓が水蒸気でくもりはじめた.
2分10秒	観察窓から加熱試験炉内の様子が見えるようになった.
3分10秒	2ー3cm 角程度の薄片が加熱面から剥離（爆裂）し始めた.
4分20秒	加熱面全面が表層剥離して粗骨材が露出した.
5分50秒	コンクリート中の水分が泡状になって加熱面の一箇所から放出し始めた. 表層剥離（爆裂）は終息している.
6分00秒	コンクリート中の水分が加熱面から滴下し始めた.
7分10秒	小片1個が飛散（爆裂）した.
8分10秒	加熱面からの水分の滴下がなくなった.
11分00秒	加熱面における水分の放出がなくなった.
40分00秒	11分経過後から変化なし.

10×10×40cm 試験体およびパネル型試験体の双方で爆裂が発生した.

表-5に実験中の爆裂の状況をビデオ撮影により観察した結果を示す. 加熱開始1分20秒後から, 試験体加熱面からの水分蒸発が観察された.

爆裂は主に加熱開始後3分10秒経過した時点から5分50秒までの2分40秒間に生じ, 加熱面の2ー3cm 角程度の範囲を単位として薄片が連続的あるいは断続的に剥離した. このことは, 爆裂現象は, コンクリート中の水分が蒸発する際の蒸気圧が一因で生じる可能性があることを示唆している [9]. また, 爆裂がほぼ終息した加熱開始後5分50秒から11分まで, コンクリート中の水分が加熱面から放出する状況が観察された. 加熱開始11分経過後からビデオに収録されていた 40 分経過時点までは, 加熱面に変化は見られなかった. これは, 加熱によって発生した微細なひび割れが, 加熱面に発生する熱応力 [10]（圧縮応力）や水分の蒸発圧を緩和したため爆裂が生じなくなったものと推測される.

爆裂深さの測定結果の一例（パネル型試験体）を**図-3**に示す. 爆裂深さについては, 10×10×40試験体3体の爆裂深さの平均値は1.7mm, 最大値は8.2mmであった. 一方, パネル型試験体2体の爆裂深さの平均値は3.4mm, 最大値は13.5mmであり, パネル型試験体の方が爆裂による欠損深さが大きくなった. これは, 試験体の形状の違いやコンクリートと鉄筋の線膨張係数の相違により, 加熱面の温度上昇によりコンクリート表層に発生する圧縮応力がパネル型試験体の方が大きくなったものと考えられる.

図-4にパネル型試験体の部材内温度の測定結果を示す. 図-4の凡例の連番は, 図-1に対応した熱電対の位置である. 図-4において, コンクリート加熱面に設置した熱電対（N36.4-1-1）による計測値は, コンクリートの爆裂により不連続な挙動を示している. なお, その後の温度計測値は, 加熱温度1200℃に至っていないが, これは試験体製作時に熱電対設置位置が移動したためである.

2) 繊維混入試験体

加熱実験後の試験体の状況の一例を**写真-3**および

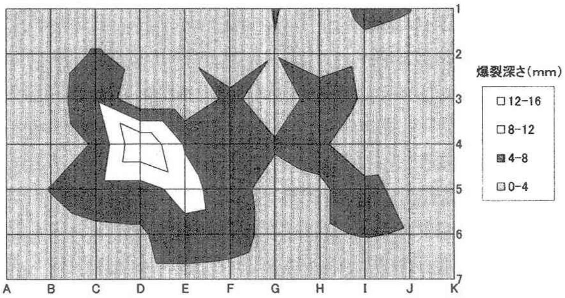
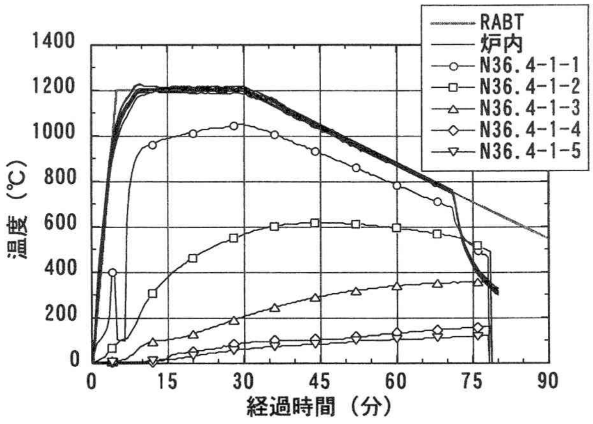


図-3 繊維無混入パネル型試験体の爆裂深さの測定結果の一例（配合名 N36.4）



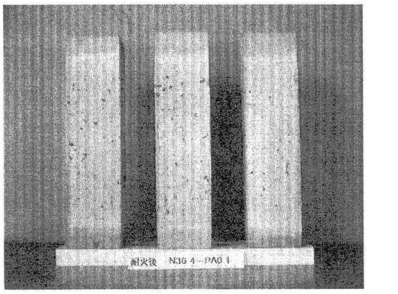
<繊維無混入（配合名：N36.4）>

図-4 パネル型試験体の温度測定結果

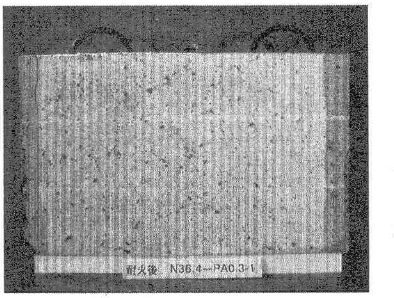
写真-4 に示す. 繊維を混入した試験体については, ポリプロピレン短繊維およびポリアセタール短繊維の双方で, 10×10×40試験体およびパネル型試験体の爆裂を完全に防止できた. 10×10×40試験体では繊維混入率0.1vol%, パネル型試験体では繊維混入率0.3vol%で完全に爆裂を防止できていることから, 爆裂防止に必要な繊維の混入率は今回実験した混入率よりも低くできる可能性がある. なお, 写真-3と写真-4において, 爆裂していない試験体表面に茶色い斑点が見られるが, これは粗骨材の膨張および変色に起因したものである.

図-5にパネル型試験体の部材内温度の測定結果の一例（PA繊維0.3vol%混入の場合）を示す. 図-6に, 加熱面からの深さに関し, それぞれ25mm, 100mmの温度測定結果と差分法を用いた熱伝導計算結果との比較を示す. この熱伝導計算では, 鉄筋は考慮していない. また, 熱伝導計算では加熱面から25mmの温度を計算していないため, ＜加熱面から25mm＞の図については, 加熱面から20mmおよび30mmの計算結果と実験結果を比較した.

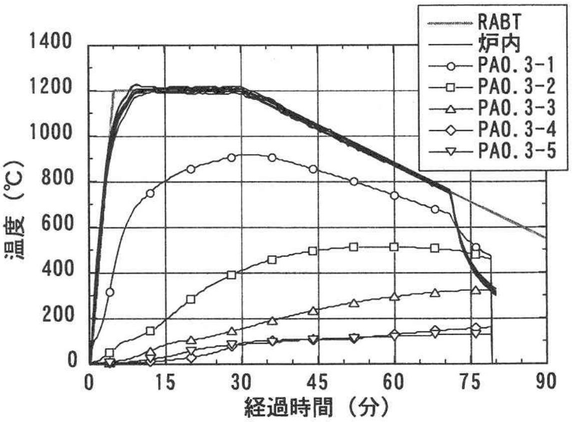
加熱面から25mmの温度については, 実験結果と計算結果が概ね一致した. 加熱面から50mmの温度についても, 図には示してないが, 実験結果と計算結果が概ね一致した. 加熱面から100mmの温度については, 実験値が計算値よりも最大で100℃ほど高くなった. これは, 試験体に熱電対を埋め込むに当って, 加熱面からの距離を正確に出すためにφ3mmの丸鋼を加熱面に対して垂直に取り付けたため, この丸鋼の熱伝導の影響で加熱面から100mmの測定温度が計算値よりも高くなった可能性がある. また, 加熱面から50mmの位置についても, この鉄筋の熱伝導の影響により, 測定温度の方が計算値よりも若干高くなった可能性があった.



＜PA 繊維 0.1vol%混入＞
写真-3 試験体の加熱実験後の状況



＜PA 繊維 0.3vol%混入＞
写真-4 試験体の加熱実験後の状況



＜PA 繊維 0.3vol%混入＞
図-5 パネル型試験体の温度測定結果

(3) 基礎実験のまとめ

トンネル用AFR（Advanced Fire Resistant）コンクリートの耐火性能（耐爆裂性能）に関する基礎的データを収集するために, RCセグメントに使用されるコンクリートを想定した水セメント比36.4%のコンクリートを用いて, 繊維無混入, ポリプロピレン短繊維混入およびポリアセタール短繊維混入の各試験体を製作して加熱実験を実施した. その結果, 以下の知見が得られた.

①繊維無混入では無筋および有筋の双方の試験体で爆裂が発生し, 爆裂深さは有筋であるパネル型試験体の方が深く, 最大で 13.5mm に達した.

②繊維混入率 0.1～0.5vol%の範囲でポリプロピレン短繊維またはポリアセタール短繊維を混入した試験体では爆裂を完全に防止できた.

③本実験で確認した範囲で爆裂を完全に防止できたため, 本範囲よりも繊維混入率を低減できる可能性がある.

④加熱面から50mmまでの範囲の部材内部温度は, 熱伝導計算によって概ね予測が可能である. 加熱面から50mmを超える範囲の温度測定結果は, 埋込み治具の熱伝導の影響により, 計算温度よりも高くなったものと推察される.

3．実用化実験

シールド工事に使用するセグメントは，メーカーの保有する設備で製作する必要がある．また，地下で組み立てられた場合を想定すると，爆裂に不利な大きな軸力を受けている状態にある．

このため，本実験の目的は，実際のセグメント工場設備での製作性，軸力載荷時での最適混入率の把握が第一であった．また，実工事に適用するには，どうしても補修方法を確定する必要があり，AFRコンクリートの補修性能の確認も必要となった．

そこで，軸力を導入した試験体をセグメント工場で作成し，加熱実験を行った．また，補修および無補修試験体を再加熱したときの耐火性能の確認を行った．

加熱実験に付随して，再加熱時の爆裂状況，試験体内部温度分布，補修材料の加熱前後の圧縮・付着強度，加熱前後の中性化深さおよび促進中性化試験による中性化深さを測定した．

(1) 実験方法

a) 試験体（製作状況は，**写真-5，6**　参照）

図-7に示すような幅600×長さ900×高さ550mmの試験体を4体作成した．繊維混入率は，PA0.1・0.2・0.3%・PP0.1%の4種類とした．熱電対は各試験体の**図-8**に示す位置に設置し，合計20枚とした．最初の加熱時，試験体にはPC鋼棒により13N/mm^{2}相当の圧縮応力を導入した．加熱後はコア抜き作業の安全性よりPC鋼棒を撤去した状態で再加熱を行った．

b) 使用材料

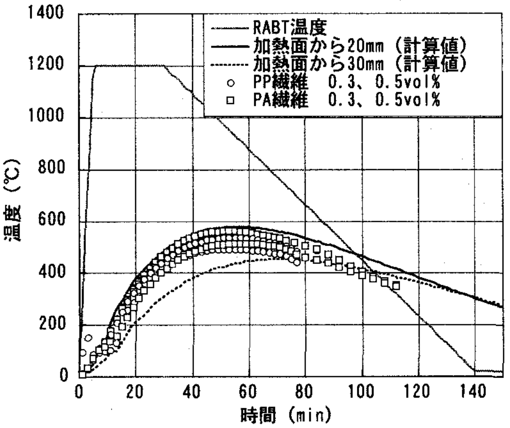
コンクリートはセグメントの設計基準強度48N/mm^{2}を想定し，普通ポルトランドセメントと骨材に硬質砂岩を使用した．加熱実験時のコンクリート強度は66.3～71.4N/mm^{2}であった．

c) 加熱実験

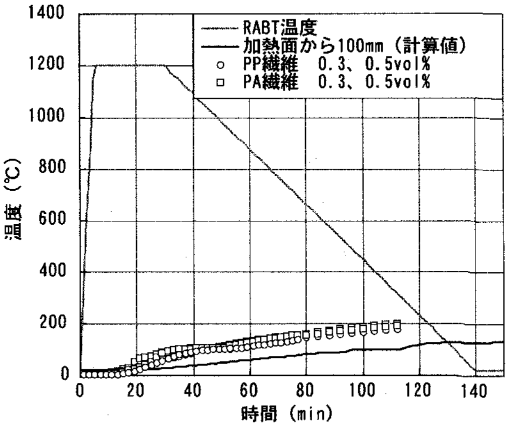
時間温度曲線は，トンネル火災試験用 RABT 曲線を採用した．加熱および再加熱は清水建設技術研究所耐火棟内の水平炉を使用し，最高温度の保持時間は 25 分とした．加熱範囲は，50cm×50cm となる．耐火実験における測定項目は，炉内温度および試験体内部温度とした．

d) 補修工

図-9 に示す通り，加熱範囲を 60mm はつり，補修を二つに分けて行った．片側は PA 繊維を 0.2%混入したモルタルのコテ塗り，反対側は市販のトンネル用湿式耐火被覆材を吹き付けた．はつり深さの 60 mmはRABT1時間加熱により350℃に達すると想定される範囲として仮決定した．補修工のフローとしては，加熱面のはつり→剥離防止用のメッシュ貼り付け→材料塗布→麻袋およびビニールラップによる湿潤養生とした．



<加熱面から 25mm>



<加熱面から 100mm>

図-6　部材内部温度に関する実験値と計算値の比較

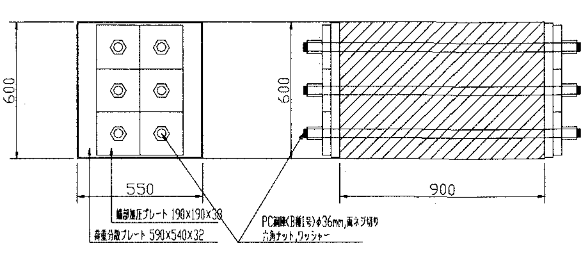


図-7 試験体寸法

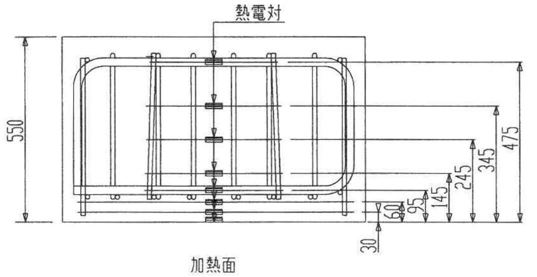


図-8 熱電対設置位置

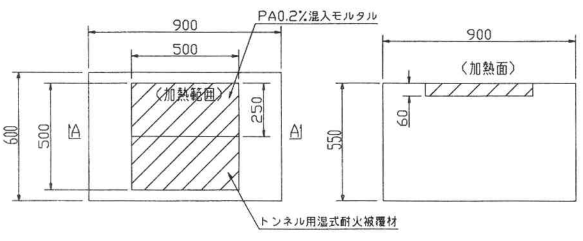


図-9 補修位置

写真-5 工場設備での短繊維投入

写真-6 工場設備での試験体締め固め

e) 再加熱実験

再加熱実験は，補修後1ヶ月半の養生を行い，爆裂無しの無補修試験体（PA0.2%混入試験体）と補修試験体の2体で行った.加熱範囲・温度曲線・計測項目等は最初の加熱と同様とした.ただし，補修試験体は加熱面をはつったため，表面から60mmまでの熱電対は撤去されている.

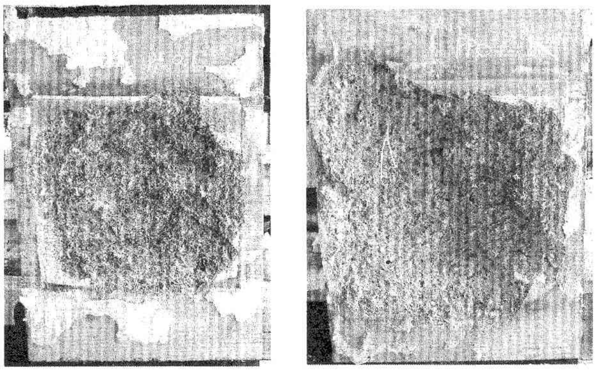
(2) 実験結果と考察

a) 軸力導入時の耐火性能

軸力を導入し，PP0.1%，PA0.1，0.2，0.3%を混入した試験体の爆裂状況を，**写真-7，8**に示す.

これによると，PP,PAともに0.1%混入では爆裂が発生したが，両者の有意差は見受けられる．これは，各々の消失温度がPPは350℃，PAは300℃であり，この差が爆裂に対し効果差を与えていると考える.

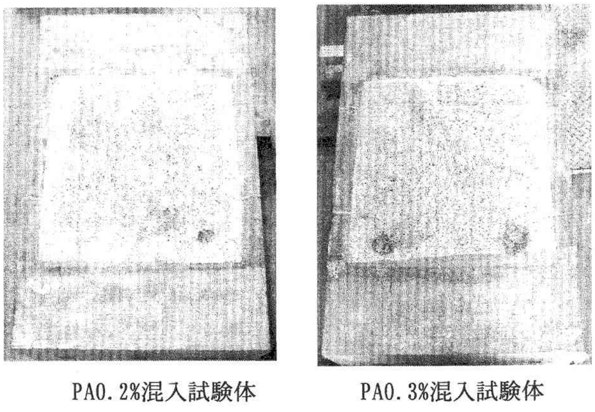
また，今回は軸力作用下においてPA0.2%で爆裂を防止できたが，既往の研究では同様な実験においてPP0.1%で爆裂を防止できている[4),5)]．実際の工場製作でのコンクリートの練混ぜにおける材料の計量誤差等によるバッチ間の強度等のバラツキ，セグメントを組み立てたトンネル構造体における火災時の応力状態が明確でないことなどを考慮すると，現状では0.2%の混入が適当であると判断する.



PA0.1%混入試験体　爆裂深さmax35mm

PP0.1%混入試験体　爆裂深さmax65mm

写真-7 軸力導入での爆裂(1)



PA0.2%混入試験体　PA0.3%混入試験体

写真-8 軸力導入での爆裂（2）

b) 再加熱後の耐火性能

再加熱実験では，**写真-9** に示すとおり補修の有無に関係なく爆裂は発生していない.

①試験体内温度（**図-10**）

無補修の場合，最初の加熱で繊維が溶けて，表面付近はポーラスな状態になっているので，鉄筋位置（95mm）での温度上昇率が早くなっている.最高温度は加熱実験では 200℃だったが再加熱実験では 260℃まで上昇した.一方，補修試験体は両補修材（PA0.2%モルタル・湿式耐火被覆材）により鉄筋位置で 150℃程度に断熱される.

②コンクリート強度

無補修の場合,加熱面に垂直に採取したコア供試体の加熱面付近の脆弱層を 25mm 取り除いて試験した結果，56.8N/mm2 となり設計基準強度の 48N/mm2 を上回った．コア供試体の縦方向に強度分布がある場合，圧縮強度は強度分布における最低強度に支配されるものと考えられ，加熱面から 25mm 以上内部に入った部分のコンクリート強度は，加熱側よりも履歴温度が低くいことから，すべて設計基準強度を上回るものと判断される．なお，今回は健全部材におけるコア強度を確認していないため,高温履歴によるコア強度の低下の有無については不明である.

③中性化深さ

無補修の場合，再加熱で5mm，中性化が進む.促進中性化試験は3ヶ月15mm・6ヶ月で32mmとなり，最初の3ヶ月より次の3ヶ月の方が中性化速度の速い事が判った.

④補修材料圧縮・付着強度（**表-6,7**）

温度抑制効果は二つの材料とも問題ない.しかし,PA0.2%モルタルの方が湿式耐火被覆材より，圧縮強度で加熱前後も含め約10～20倍，付着強度は約2倍大きい.これをふまえ，さらに材料入手の簡便性からO.2%混入モルタルの方がより汎用性に富むことが考えられる.

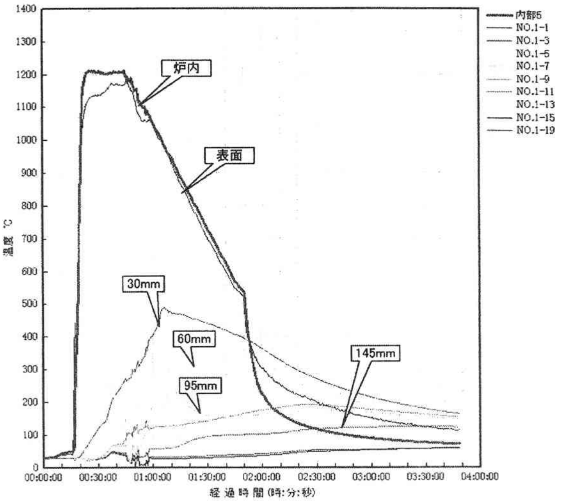
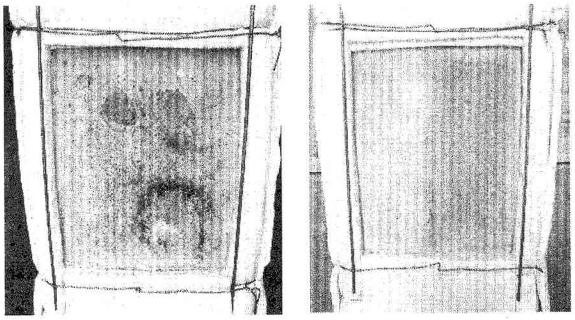


図-10 無補修試験体の再加熱時内部温度



無補修試験体　　補修試験体
左：市販品　右：AFR

写真-9 再加熱後の爆裂（なし）

表-6 加熱後のコンクリート強度と中性化深度

	PA0.2%混入試験体（無補修）	PA0.2%モルタル補修試験体	備　考
爆　裂	無　し	無　し	
試験体内温度（℃）	250	150	かぶり 80mm 位置
コンクリート平均強度（N/mm2）	60.8	61.4	加熱実験前（28 日）
	56.6	59.5	加熱実験後（28 日）
	56.8	※補修材料参照	再加熱実験後（28 日）
中性化深さ(mm)	10	10	加熱実験後
	15	—	促進中性化試験（3ヶ月）
	32	—	促進中性化試験（6ヶ月）
	15	—	再加熱実験後

表-7　補修材の強度

	PA0.2%混入モルタル	湿式耐火被覆材	備　考
圧縮強度 (N/mm2)	49.6	2.31	28日
	45.7	2.55	49日(再加熱実験日)
	29.9	2.29	62日(再加熱実験後)
付着強度(N/mm2)	0.40	0.22	62日(再加熱実験後)

(3)　実用化実験のまとめ

まず,第一の実験目的である工場製作と軸力導入での短繊維混入率についてまとめてみる.

混入率0.3%程度までなら,工場設備での練り混ぜには影響はなく,品質も良好である.セグメント製作に特別な設備増強の必要はない.また,混入率0.2%であれば爆裂は防止でき,セグメントの耐火性能の向上が図れる.

次に,再加熱実験では,無補修の試験体でも爆裂せず,コンクリート強度は,加熱面より25mm以深であるならば,再加熱をしても強度低下しない事が判明した.火災による構造体コンクリートの圧縮強度の低下を抑制するためには,被覆代として25mmの増し厚が必要であると判断される.この増し厚によって主鉄筋に対する被りも25mm増すこととなり,主鉄筋の温度上昇も抑制されることから,構造体としての耐火性能を向上することができる.一方,加熱により表面がポーラスになっており,温度上昇率が早く最高温度も高くなる事も判った.

補修した試験体は,両補修材料とも爆裂しなかった.試験体内部温度は,鉄筋位置で150℃程度しか上昇せず,補修材の断熱性も確認できた.両者の補修材の比較では,PA0.2%混入モルタルの方が圧縮・付着強度が大きく,供用後の交通による風圧,トンネル内面圧縮状態での構造物評価で優位と考える.

今回の研究により、

①既往の研究により爆裂抑制効果が確認されていたポリプロピレン繊維に加えポリアセタール繊維を対象として,最適な繊維混入率が提案できた.

②短繊維樹脂混入セグメントの製造が可能であることを実証した.

③火災後の補修・無補修における再使用性について実験的に明らかにした.

など,新たな成果が得られたと考えている.

4．おわりに

短繊維樹脂を混入したコンクリートを使用したセグメントは,今回の基礎実験,実用化実験を経て,その耐火性能が実証され,また,現状のセグメント工場で所定の耐火性能を有する製品が製作可能なことが明らかになった.加えて,火災後の補修材料としても有望なものと考えられる.

セグメント本体に耐火性能を持つ意味は,耐火のための後続作業省略による工期の短縮,高価な耐火パネルの代替によるコスト縮減など大きな波及効果があると考えている.実際の適用にあたっては,強度低下部分の25mmをあらかじめ鉄筋被りの増加分とすることが考えられるが,従来の耐火パネル方式が約50mmの内面厚さを必要とするのに比較しても,むしろトンネル掘削断面の縮小につながると考えられる.

今後数年間に,工事着手が予定される地下道路用のシールドトンネルは数多い.今後は,今回発表した実験結果を,これらの実施工に展開していくつもりである.

参考文献

1) Diederichs, U., Jumppannen, U.-M., Morita, T., Nause, P. and Schneider, U. : Concerning Spalling Behavior of High Strength Concrete Columns under Fire Exposure, Forschungsarbeiten 1990-1994 / IBMB and AMB, Heft 109, pp.13-24, Technical University of Braunschweig, 1994

2) 西田朗，山崎庸行，井上秀之，渡部保：爆裂防止用ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリートの性状に関する研究（その１）～（その４），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.331-338，1994.9

3) 森田　武ほか：AFR コンクリート工法，GBRC 第101号，pp.47-54，（財）日本建築総合試験所，2001年1月

4) 長沼敏彦，小林寛，吉村敏志：ファイバーコンクリートの耐火性能に関する実験検討，土木学会第58 回年次学術講演会講演概要集，pp.271-272，2003.9

5) 後藤徹，林裕吾：耐火セグメントの加熱実験報告，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，pp.637-638，2004.9

6) 中井勉，藤井康男，伊藤学，森田武：開削トンネルの耐火対策に関する実験的検討，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，pp.961-962，2004.9
7) 田嶋仁志，岸田政彦，神田亨：設計断面力を作用させたシールドセグメントの耐火実験，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，pp.965-966，2004.9
8) 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究（第一報）－算定式の誘導，算定条件および算定要素－，日本建築学会論文報告集，第 109 号，1965
9) Harmathy,T.Z.:"Fire Safety Design＆Concrete", Longman Scientific＆Technical，1993
10) 斉藤　光：プレストレストコンクリート部材の爆裂について，Bull of The Fire Prevention Society of Japan　Vol.15，No.2，March，1996