

耐火試験後のRCセグメントを用いた熱劣化特性 及び補修性に関する実験研究

Experimental Study on the Thermal Deterioration and Reparability
of Fire Tested RC Segment

田嶋 仁志¹・岸田 政彦²・春日 清志³・神田 亨⁴・森田 武⁵

Hitoshi Tajima, Masahiko Kishida, Kiyoshi Kasuga, Toru Kanda, Takeshi Morita

¹正会員 博（工） 首都高速道路公団 工務部設計技術課（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）

E-mail: h.tajima118@shutoko.jp

²正会員 工修 首都高速道路公団 東京建設局池袋工事事務所（〒171-0021 東京都豊島区池袋5-13-13）

³正会員 工修 首都高速道路公団 工務部設計技術課（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）

⁴正会員 日本シビックコンサルタント株式会社（〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2）

⁵正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）

In recent years there have been many cases where the secondary lining of shield tunnels has been omitted to reduce cost. However, with this type of structure the segments are directly heated in a fire, and there is concern that this will affect the structure of the tunnel. The authors have therefore carried out various fire test for RC segments without a secondary lining. This paper describes the thermal deterioration and reparability of heated specimens under RABT fire curve.

The carbonation thickness of heated surface is measured. The accelerated carbonation test is carried out for the core from the heated surface of specimen. The fire resistive repair method are developed. The repair material is the high strength cement mortar which contains polypropylene fiber. The deteriorated zone of specimen can be removed successfully by high pressure water jet system. The specimen is repaired by means of shotcreting method. The load bearing capacity of repaired specimen exceeded the design value.

Key Words : fire test , RC segment, thermal deterioration, reparability, water jet, polypropylene, RABT curve, spray mortar, carbonation

1. はじめに

近年、シールドトンネルはコスト縮減の観点から二次覆工を省略する事例が多い。しかしながらこの構造は、火災時にセグメントが直接熱を受けることになり、トンネル構造物本体に影響を与えることが懸念される。このため筆者らは、二次覆工を省略したシールドトンネルの耐火性能に着目し、種々の検討を行っている。¹⁾ここでは、火害を受けたシールドトンネルのRCセグメントの補修の要否や補修法について検討下結果について報告する。

火害を受けたセグメントのモデルとしては、文献²⁾に示す耐火実験の試験体を用いた。この耐火実験

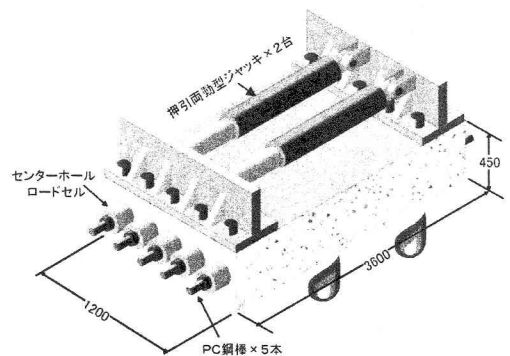


図-1.耐火試験体

は、二次覆工を省略したシールドトンネルの耐火性能を確認するために図-1に示すような方法で実施したものである。

図-2に示すようなトンネル覆工の応力状態を再現すべく、クラウン付近の正曲げ、スプリングライン付近の負曲げにおける設計断面力を作用させた状態で図-3に示すRABT曲線による加熱を行っている。表-1に試験体の配合を、表-2に試験体の種別と断面力を示す。

試験体の厚さは対象とする実トンネルのセグメントに等しくとっている。載荷方法は、P C鋼棒で軸力を、押し引き両動ジャッキで正負曲げを作用させている。実験中はジャッキ荷重を一定に制御した。

配合は普通コンクリートと爆裂の抑制効果が確認されているポリプロピレンファイバー（以下PPファイバー）を $1\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した試験体を各2体製作した。いずれも圧縮強度が実測で $72\text{N}/\text{mm}^2$ に達する高強度コンクリートである。普通コンクリートの試験体には耐火工として厚さ 15mm のセラミックファイバーを被覆したものと無被覆のものを用意した。

加熱面側のかぶりは、配力筋 40mm 、主筋 53mm となっている。

耐火被覆を施した試験体については、ほとんど損傷が見られなかった。またPPファイバーを添加した試験体では、図-4に示すように表面が変色する程度で爆裂は見られなかった。一方、無被覆の試験体は図-5に示すように、主筋の背面まで達する激しい爆裂を生じた。いずれの試験体も温度履歴や熱による変形の程度に差異はあるものの、加熱中を通して設計断面力を保持することが可能であった。

本報告では、損傷の見られなかった耐火被覆を施



図-2 覆工の断面力

表.1 配合

	水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材	減水剤	PP繊維
普通	136	200	200	814	1095	2.6	
PP	147	216	216	789	1046	2.81	1
スランブ=1.5±1.5cm		水結合材比=34%		最大寸法=20mm			

表.2 試験体種別

対象部位	クラウン		スプリングライン	
曲げ	正曲げ	324kN・m	負曲げ	-293kN・m
軸力	圧縮	1092 kN	圧縮	1556 kN
耐火工	耐火材 15mm	PP 1kg	PP 1kg	なし
試験体名	FP-P	FC-P	FC-N	OC-N



図-3. 時間温度曲線

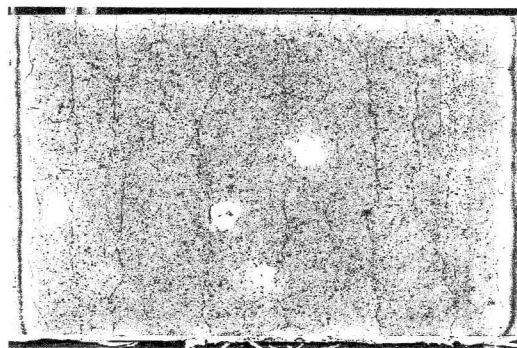


図-4 加熱後のPP試験体

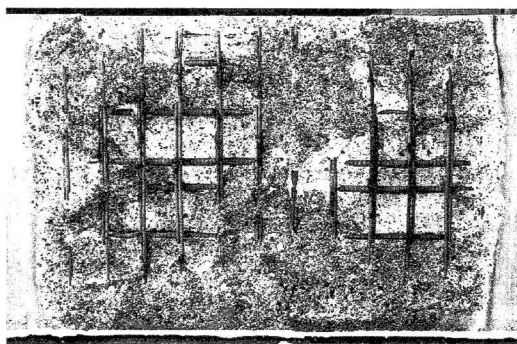


図-5. 加熱後の無被覆試験

した試験体を除き、PPファイバーを添加したセグメント試験体について熱劣化の程度、一度熱劣化を受けたコンクリートの劣化の進行性、熱劣化を受けた部分の補修性について検討を行った。

2.促進中性化試験

無被覆負曲げ試験体では、主筋背面に至るまでの深い爆裂を生じた。このような場合は補修が必要なのは論を待たない。一方、PP繊維を添加した配合では爆裂は生じなかったものの図-7に示すように、表層部の25mm程度の範囲のコンクリートは熱による中性化を生じていた。PP繊維を添加したコンクリートは、十分な火災時の安全性を有していることは確認されているが、火災後の補修の可否については報告事例は少ないようである。

熱による中性化は、常温による中性化とはメカニズムが異なり、500℃付近で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が分解することによって生じると言われている。このような履歴を受けたコンクリートが、その後の供用期間においてどのような中性化性状を示すかは補修の可否を検討する上で重要な問題である。そこでPP繊維を添加して爆裂を防止したコンクリートに関して、加熱を受けた後の中性化の進行速度を促進中性化試験によって確認することとした。

試験はJIS A 1153：コンクリートの促進中性化試



図-6 促進中性化試験コア供試体

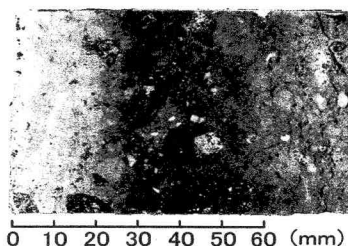


図-7 加熱直後の中性化深さ

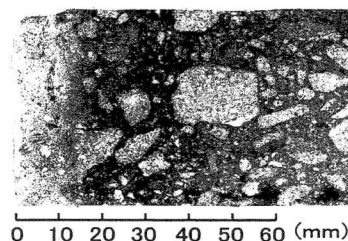


図-8 加熱1年後の中性化深さ

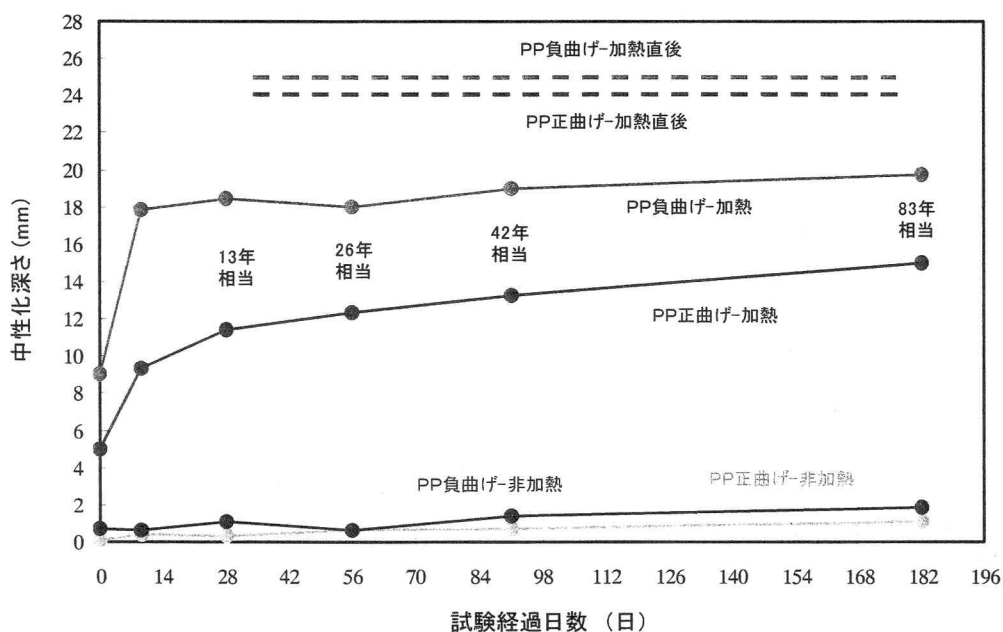


図-9 促進中性化試験結果

験方法に準じて実施したが、供試体には図-6に示すような試験体加熱面から採取したΦ60mmのコアの側面をシールしたものを採用した。各試験材齢ごとに3本のコアを用いて測定を行った。コアは加熱後1年を経た試験体から採取した。

図-8は加熱後1年を経過した状態のコアの中性化深さである。加熱直後の状態から16から20mm程度中性化深さが小さくなっていた。この原因は不明であるが、加熱劣化によりポーラスな状態になった層に深部からアルカリ分が供給されて生じたものと推察される。

図-9は促進中性化試験の結果である。比較のため、熱を受けなかった非加熱分より採取したコアの値もプロットしている。RCセグメントの配合は水結合材比が小さく密実であるため、非加熱部分は83年相当材齢経過後もほとんど中性化は進まないことが分かる。

加熱部分については試験開始直後の中性化の進行は早いがその後の進行速度は小さくなる。最終的な中性化深さは、83年相当材齢経過後においても加熱直後の、加熱劣化したコンクリートの中性化深さよりも小さく、劣化域より深い部分への中性化の進行は確認されなかった。よって、加熱劣化部分程度のかぶりを確保していれば、火害を受けた後も中性化に対して抵抗性を有していると考えられる。

3. ウォータージェット工法による劣化部分の除去

火害を受けたセグメントの補修にあたっては、鉄筋に損傷を与えることなく劣化部分のみを限定して除去する必要がある。PP繊維を添加した場合には、劣化部分のかぶりコンクリートの範囲に限られるが、無被覆の場合には鉄筋背面まで爆裂を生じるため、劣化は深部にまで及ぶ。このように深さの異なる劣化部分を的確に除去できる方法としてウォータージェット工法の適用性を検討した。

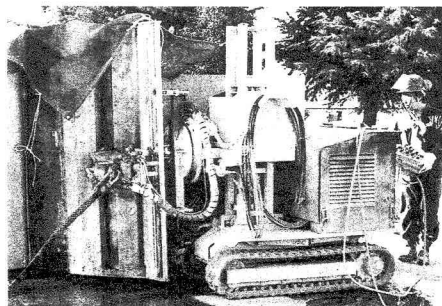


図-10 ウォータージェットマシン

使用した機器は、図-10に示すような遠隔操作の可能なロボットタイプのものである。噴射ノズルは図-11に示す単穴揺動ノズルを使用した。

実験の結果、水圧を40Mpa程度に抑えることで劣化部分に限定した良好なハツリが行えることが明らかとなった。

中性化した劣化部分を除去出来たかどうかの確認は、図-12に示すようにフェノールフタレインの噴霧が有効であった。

4. 吹付けによる補修工法の開発

トンネル内での補修性を考慮し、吹付け工法による補修工法の開発を試みた。吹付け材料は、再び火災を生じることも想定し、耐火性能を付与した。ここではプレミックスタイプの高強度モルタル材料をベースにPP繊維を添加した吹付け材料を使用した。

PP繊維を添加した配合で、所要のワーカビリティを確保できるかどうかのポイントであったため、模擬トンネルを使用した施工試験を行った。表-3に配合を示す。PP繊維の添加量は1m³に当たり2.4kgに相当する。

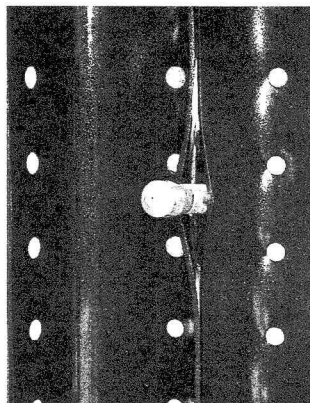


図-11 噴射ノズル

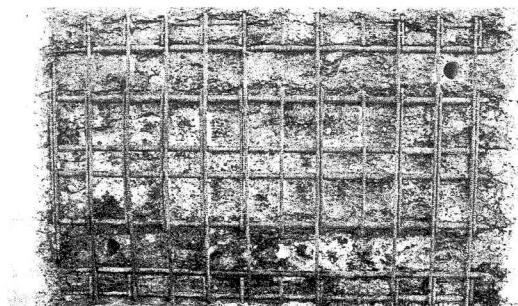


図-12 フェノールふたレインによる除去部分の確認

吹付材の材齢28日強度は77.1N/mm²で、64N/mm²を超えるセグメントと同等以上の圧縮強度が得られた。図-13に使用したPP繊維を示す。図-14に示すように微細なPP繊維が均一に分散している。

吹付けに際しては、剥落対策としてメッシュ筋を配置することも想定し、施工試験を行った。このように大量の繊維を含むにもかかわらず、図-15に示すようにトンネルクラウン部に対しても、良好な付着性と鉄筋背面への充填性を有していることが確認された。図-16に試験体への吹付状況を示す。施工後は、28日間の皮膜養生を実施し荷重試験を行った。

4. 補修効果の確認

開発した吹付補修工法の補修効果を確認するために図-17に示す方法で荷重試験を行った。PC鋼棒で軸力を導入した上で設計断面力まで曲げ荷重を行い初期剛性を測定し、その後PC鋼棒を外し、曲げのみで終局まで荷重を行った。表-4に正曲げ及び負曲げの設計断面力相当の曲げ荷重を示す。図-19は耐火被覆を施した試験体の荷重変位曲線である。図-20はPP正曲げの試験体であるが、補修部分が引張縁にあるため、初期剛性に関しても終局荷重にも関しても有意な差は見られない。図-21はPP負曲げ、図-22は無被覆負曲げ試験体の結果である。

表-3 補修材の配合

プレミックス材		PP繊維	スランプ
粉体	水		
25kg	3kg	30.1g	8cm

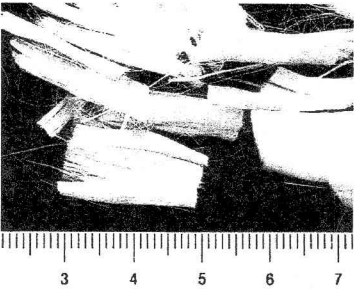


図-13 使用したPP繊維(Φ48μ,20mm)

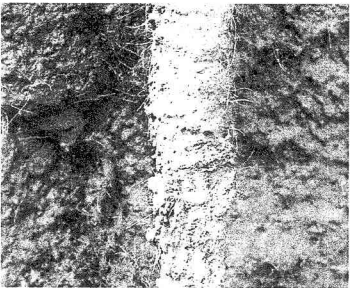


図-14 繊維の分散状況

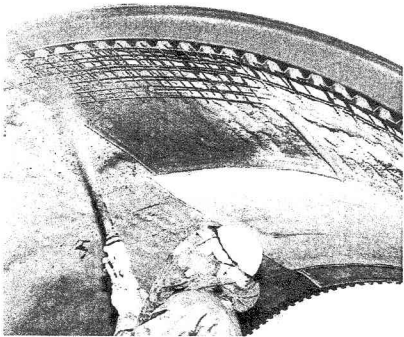


図-15 模擬トンネルを用いた試験施工

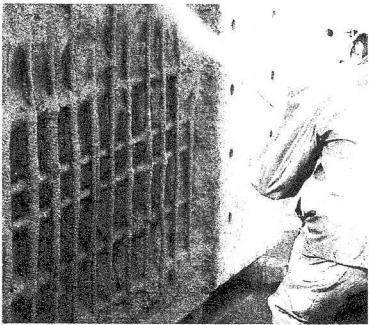


図-16 試験体の補修状況

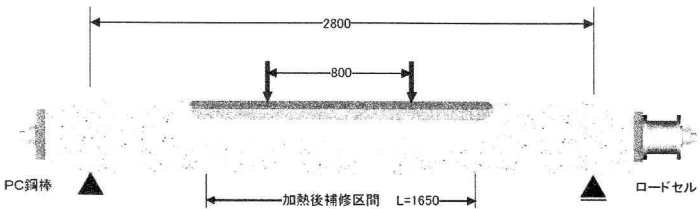


図 17 荷重要領

表4.曲げモーメントと荷重

曲げモーメント	設計断面力に相当する 曲げ荷重 (kN)
正曲げ	660
負曲げ	595

負曲げ試験体では引張鉄筋量が正曲げより少ないため終局荷重は小さくなっている。無被覆の試験体では爆裂で露出した鉄筋は長時間1200℃の雰囲気中に置かれたわけであるが、引張鉄筋は加熱面の反対側に位置しており、高温にさらされた影響は終局挙動には現れていない。また補修材料は圧縮縁に位置しているがセグメントのコンクリートと同等の強度を発揮していることが確認された。

図-18は載荷時の状況である。補修材の剥離等の現象は見られなかった。

5. おわりに

本報告の結論を以下にまとめる。

- (1)一度加熱劣化したセグメントコンクリートにおいて、加熱により生じた中性化深さは、加熱直後から回復し、小さくなることがわかった。また、その後の中性化の進行は、中性化促進試験結果では、火害を受けた後80年以上を経過しても、加熱直後の中性化領域の中に留まっていることが、確認された。
- (2)熱による中性化等の劣化した部分の除去に対しては、ウォータージェット工法が有用であることが確認された。
- (3)火害を受けたRCセグメントに対して、熱劣化部

分に対する吹付補修工法を開発した。この工法で用いた補修材料は、耐火性を有する高強度の吹付け材料で、良好な付着性と充填性を持っており、補修後のセグメントは火害を受ける前とほぼ同等の曲げ剛性と耐力が期待できることが確認された。

参考文献

- 1)半野，田嶋，川田，谷上：RCセグメントの耐火性能に関する実験的検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.24,No.1,2002
- 2)田嶋，岸田，神田：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，2004

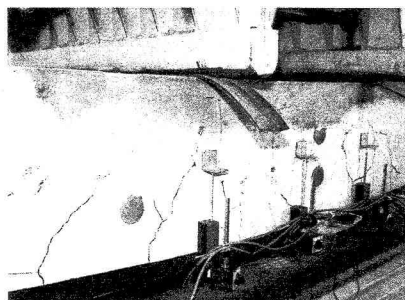


図-18 載荷状況

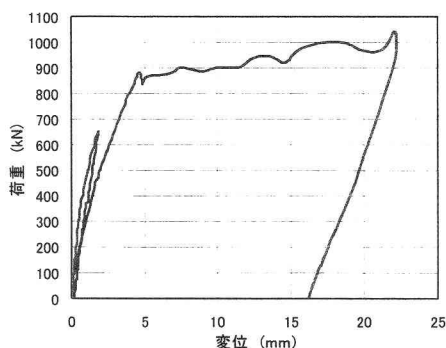


図-19 耐火材・正曲げ

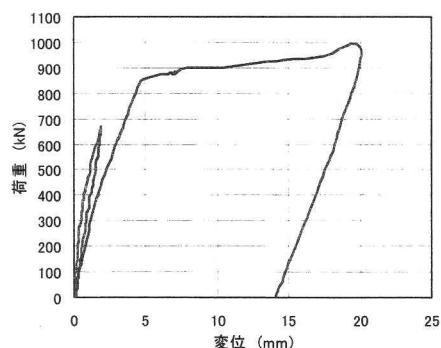


図-20 PP・正曲げ

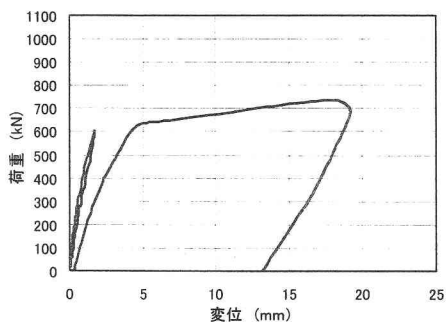


図-21 PP・負曲げ

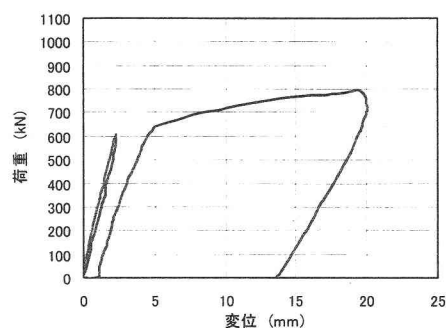


図-22 無被覆・負曲げ