報告 RCセグメントの耐火性能に関する実験的検証

半野 久光*1・田嶋 仁志*2・川田 成彦*3・谷上 敦亨*3

要旨:二次覆工を省略したシールドトンネルの火災を想定した耐火実験を行った。大型水平 炉を用い,RABT曲線による時間温度曲線の下でのRCセグメントの耐火性能を検証するもの である。実験はまず小型試験体を用い,コンクリートの表面温度を制御することを目的に耐 火被覆材の種類や厚さをパラメータにし,爆裂等のコンクリートの損傷程度などを検証した。 そのデータをもとに,設計断面力を作用させた実物大の大型試験体に耐火被覆を施し,加熱 による損傷状況や鎮火後の残存耐力を総合的に検証した。

キーワード:シールドトンネル, RCセグメント, 耐火, RABT 曲線

1. はじめに

近年,シールドトンネルではコスト縮減の観 点から二次覆工を省略することが多い。二次覆 工省略に伴い断面が小さくなることで,セグメ ント径,シールドマシン径,プラント設備の規 模,掘削土量等も抑えることができ,大きなコ ストダウンが可能となる。その一方,大災時に は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も懸念さ れる。

ここでは、RCセグメントの耐火性状を把握 し、トンネルの維持に必要な耐火構造に関する 基礎資料を得るために実施した耐火実験の結果 について報告する。

2. 実験方法

2.1 時間温度曲線

欧米ではトンネル火災を想定した耐火実験¹⁾ が多数行われており,各種の時間温度曲線が提 案されている。しかしながら我国にはこの種の 時間温度曲線が存在しないため,ドイツの基準 である RABT 曲線を採用するものとした。図-1 に示すように加熱開始後5分で一気に 1200℃ に達し, 60 分まで継続するものである。

2.2 耐火炉

独立行政法人建築研究所の大型水平炉を使用 した。4m×8mの加熱面積を有し,RABT 曲 線に対応できるものとしては我国有数の規模を 誇る水平炉である。

- 2.3 使用材料
- (1) コンクリート

設計基準強度 48N/mm²の高強度コンクリート であり,セメント量の 50%を高炉スラグで置換 している。骨材には硬質砂岩を使用している。 配合を表-1 に示す。養生条件は実セグメントに 合わせ,30℃3時間の蒸気養生の後,4週間水 中養生を行った。



*1 首都高速道路公団 東京建設局 建設第一部 設計第一課課長 (正会員)
*2 首都高速道路公団 工務部 設計技術課 博士 (工学)
*3 首都高速道路公団 東京建設局 建設第一部 設計第一課

表-1 コンクリートの配合

Gmax	空気量 (%)	₩∕C (%)	s∕a (%)	単位量(kg/m ³)					
(mm)				W	С	S	G	高炉スラグ	高性能減水剤
20	1.8	31.9	40.0	134	210	744	1149	210	4.2

(2) 耐火被覆材

表-2に示すように、A~Eの5種類の材質か らなる耐火被覆材を用いた。

2.4 小型試験体による実験

この実験は、コンクリート表面温度が損傷の 程度に及ぼす影響を確認するためのものである。 図-2 に示すような,幅 600×長さ 900×高さ 550mm の試験体に、コンクリートと耐火被覆材 の界面の温度(以下コンクリート表面温度)が 200℃, 350℃, 425℃, 500℃の4水準となるよ うに事前に温度解析を行い、耐火被覆材厚さを 設定した。吹付け系のものは試験体に直接塗布 し、その他のものはアンカーボルトで取り付け た。加熱面は中心部の 50cm×50cm の範囲とした。 試験体にはPC鋼棒により13N/mm²相当の圧縮応 力を導入している。加熱中の応力の制御は行っ

ていない。含水率は安全側を考え湿潤状態とし、 測定の結果、約4%であった。

2.5 大型試験体による実験

図-2 に示すような実セグメントと同等の断 面寸法の大型試験体を用い,火災時のRC セグメ ントの安全性を総合的に評価する。試験体は一 体のものと継手(短ボルト継手)を設けたもの の2種類を製作し、図-4に示すようにPC鋼棒 によりトンネルクラウン部の設計断面力を作用 させて実験を行う。加熱後の試験体は、セグメ ントの継手曲げ試験に準じて載荷し,曲げ耐力 の変化を測定した。

2.6 温度測定

図-3に示すようにK型熱電対を配置した。 試験体中心部の2箇所に、加熱面に直交する方 向に各7点ずつ配置した。No.3 は主筋温度(表



耐火被覆材一覧 表-2

面から75mm)を測るためのものである。大型試験体 についても同じピッチで中心部に配置した。

3. 小型試験体の実験結果

3.1 炉内温度

図-5 に試験時の炉内温度の測定例を示す。加 熱面から 10cm の位置に配した 10 点の熱電対の 温度履歴をプロットしたものであるが,ばらつ きが極めて少なく, RABT 曲線をほぼ忠実に再現 している事がわかる。

3.2 温度測定結果

コンクリート表面の設定温度を4水準とし, 実験を行った。各温度水準ごとに結果を述べる。

(1)設定温度 200℃の場合

図-5 にコンクリート表面温度の履歴を示す。 耐火被覆材ごとにばらつきが見られるが,いず れの試験体においても爆裂等の損傷は見られな かった。耐火被覆材 B や C の試験体で温度が 100℃付近で一定になっている区間が見られる が,これは耐火被覆材中の水分が気化している ためである。鉄筋温度は最高でも 90℃程度であ











図-7 コンクリート表面温度





図-9 断面内温度分布



った。

(2) 設定温度 350℃の場合

図-7 に表面温度の履歴を示す。耐火被覆材ご とに若干のばらつきが存在するが,試験開始後 70 分程度で最高温度に達している。爆裂は発生 しなかったが,試験後耐火被覆材を剥がしてみ ると,小さなポップアウト状の損傷が観察され た。

図-8 に鉄筋温度の履歴を示す。いずれも 150℃以下に抑えられており鉄筋の強度低下の 始まる 300℃に対して十分低い値であった²⁾。

図-9 は耐火被覆材Dの断面内温度分布であ るが、加熱面から離れると急激に温度が低下し ている。全ての試験体で同様の傾向が見られた。

(3)設定温度 425℃の場合

425℃については 3 種類の耐火被覆材で測定 を行った。図-10 に表面温度の履歴を示す。 350℃の場合と同様の傾向がみられ試験開始後 70分で最高温度に達している。爆裂は生じなか ったが,耐火被覆材を剥がした後にひび割れと ポップアウトが観察された。鉄筋温度について は 180℃以下であった。

(4)設定温度 500℃の場合

図-11 にコンクリート表面温度の, 図-12 に鉄 筋温度の履歴を示す。設定温度 500℃の場合に は耐火被覆材 B 及び C の試験体において激しい 爆裂が生じた。爆裂した試験体についてはかぶ り部分が吹き飛ばされ,鉄筋温度が 600~800℃ に達しており強度低下が起きていると予想され







る²⁾。これら以外の試験体では最高温度が 400℃を上回っているにもかかわらず爆裂は生 じなかった。

写真-1に試験体 B の爆裂状況を示す。この試 験体は加熱開始 33 分後にボードタイプの耐火 被覆材がかぶりコンクリートとともに一気に吹 き飛んだ。爆裂による損傷は配力筋までで止ま っていた。試験体 C の耐火被覆材は吹付けタイ プであるが、350℃において局所的に発生した爆 裂が耐火被覆材に穴をあけ、そこから徐々に爆 裂が周囲に広がっていった。爆裂深さは B と同 じく配力筋までであった。

(5)爆裂と温度上昇勾配の関係

図-13 に 500℃仕様の試験体における,爆裂発 生温度付近のコンクリート表面温度の履歴を示 す。A 及びDの試験体は 400℃以上に達している にもかかわらず爆裂が生じなかったのは,爆裂 発生温度 350℃付近の温度上昇勾配が小さかっ たためと考えられる。

このように爆裂現象は表面温度だけではなく, 温度上昇勾配にも大きく影響を受けることが明 らかとなった。

3.3 耐火試験後の残存強度

試験後に採取したコンクリートコア及び鉄筋 の残存強度を試験した。コンクリートコア強度 については,最高到達温度の高いものほど強度 低下が大きくなったが,その割合は10~20%程 度であった。鉄筋は,強度,降伏点とも若干向 上したが伸びは低下した。

4. 大型試験体の実験結果

4.1 試験体の種別

表-3に示すように,試験体 は継手を含むもの2体,一体 のもの5体の計7体よりなり, 比較用の非加熱試験体 M0 を 除き,表面温度350~500℃仕 様の耐火被覆材が施されてい る。継手試験体には,ボルト ボックス内に断熱材としてセ ラミックファイバーを詰めたものとそうでない ものの2種類がある。

4.2 加熱時の挙動

小型試験体と同様に耐火被覆材の厚さを変化 させて試験を行ったが,小型試験体の結果と有 意差が見られたものもあった。M4試験体は 500℃仕様の耐火被覆材Cが施されていたが、小 型試験体とは異なり爆裂は生じなかった。この 一因としては、設計断面力を導入したことで加 熱面側の圧縮応力が曲げ引張により低減したこ とが考えられる。なお、M3およびS1の試験体 で爆裂が生じたのは、耐火被覆材の局所的な破 損が原因で,破損部分から爆裂が進展したもの であり,耐火被覆材の温度特性に起因するもの ではない。また爆裂により全体が崩壊するよう な挙動は見られなかった。継手試験体のボルト ボックス内に詰めた断熱材の効果には特に有意 差は見られなかった。またボルト等が強度低下 を生じるほどの温度上昇も見られなかった。ボ ルト温度は、最高で約110℃程度であった。

4.3 試験後の残存耐力

(1) 一般部

耐火試験後の大型試験体の曲げ耐力を図-14 に示すように単体曲げ試験の要領で測定し,加 熱しなかったM0 試験体の値と比較した。結果 を図-15 に示す。爆裂が生じてかぶり部分の剥 落したM3 試験体を含めて,曲げ耐力は非加熱 のものとほぼ等しくなった。これは加熱された 鉄筋も常温に降下後は強度が回復するためと考 えられる。

表-3 試験体及び温度測定結果一覧

試験体	記号	継ぎ手部	耐火被覆仕様	厚さ(mm)	表面温度(℃)	鉄筋温度(℃)
単体	M0	なし	非加熱			
	M1	なし	D-350	11	384	151
	M2	なし	B-425	14	448	177
	М3	なし	B-500	10.5	1237 *	982 *
	M4	なし	C-500	10	544	191
継ぎ手	S1	詰め物あり	D-350	11	1209 *	608 *
	S2	詰め物なし	D-350	11	440	151

*耐火被覆材の局所的な破損が原因で爆裂が生じたものである。

(2) 継手部

継手部曲げ試験の状況を写真-2 に, 測定結果 を図-16 に示す。継手の残存耐力は, 非加熱の 実セグメントを用いた継手曲げ試験の半分程度 まで低下した。この原因は, 継手定着筋周辺の コンクリートにひび割れが生じ, 所要の付着強 度が得られなかったためと推察される。

(3)曲げ耐力について

ここで述べた曲げ耐力は耐火試験後に常温ま で温度降下した時点での値である。すなわち鎮 火後の残存曲げ耐力であり,火災中の値ではな いことに特に留意する必要がある。

5. まとめ

本実験により以下のことが明らかとなった。

- (1)爆裂現象は温度のみではなく温度上昇勾 配に大きく依存する。また爆裂による損傷 は配力筋付近で止まることが確認された。
- (2) 一般部の残存曲げ耐力は非加熱の試験体 と同等であった。
- (3)継手部の残存曲げ耐力は、非加熱の実セ グメントの継手曲げ耐力の半分程度に低 下する。これは、継手定着筋周辺のコンク リートにひび割れが生じ、付着強度が低下 したためと考えられる。

今後は、ここで得られたデータをもとに熱伝 導解析や熱流体解析を実施し、合理的なトンネ ル耐火構造について検討していく予定である。

末筆ながら,今回の実験を行うに当り貴重な ご助言をいただいた独立行政法人建築研究所 防火・環境研究グループ,遊佐秀逸グループ長 に深甚なる謝意を表する次第です。

参考文献

- Both,C. : Safety Aspects of Tunnels, International Tunnel Fire & Safety Conference, Dec.1999, Rotterdam
- 2) Eurocode 4 Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules
 - Structural Fire Design





写真-2 継手曲げ試験状況