

多目的炉における急速加熱実験

—道路トンネル火災を想定した実規模耐火実験—

水野 敬三^{*1}・馬場 重彰^{*1}・服部 佳文^{*2}・小林 裕^{*1}

Keywords : tunnel fire, heating test, RABT, multi-purpose furnace, reinforced concrete structure, concrete filled steel shell structure

トンネル火災，加熱実験，RABT，多目的炉，鉄筋コンクリート構造，コンクリート充填鋼殻構造

1. はじめに

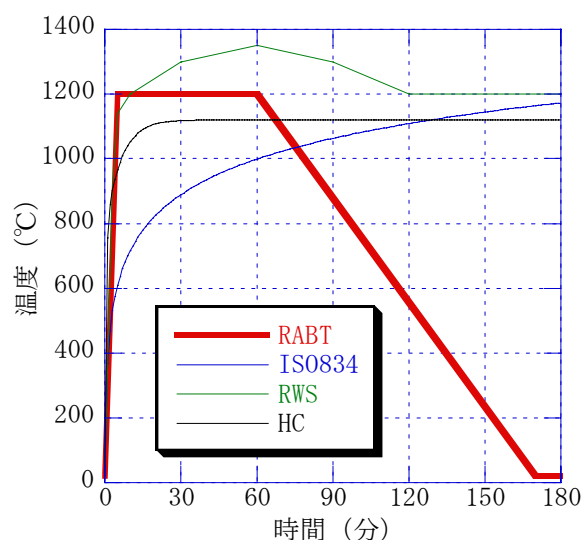
道路トンネルの危険物運搬に関する通行規制の緩和やシールドトンネル施工方法の合理化、さらにはユーロトンネル、モンブラントンネル、ゴットハルトトンネルといった欧州での大規模なトンネル火災事故の発生等を背景に、我国でもトンネルの耐火性能確保が強く要望されるようになってきた。これに伴い、トンネル構造体の耐火性能を検証するための耐火試験が行われるようになり、その際の加熱条件としてRABT（ドイツ交通省、道路トンネルの設備と運用に関する指針）で規定された加熱曲線（以降、RABT 曲線という。）が採用されるケースが多くなっている。

図-1 に各種の加熱曲線を示す。国内では建築物の耐火試験が国土交通省の指定性能評価機関等の公的研究機関やゼネコン、材料メーカー等の民間研究機関において多く実施されており、その加熱条件としては建物火災を想定した ISO 834 加熱曲線が一般的に用いられている。一方、道路トンネル火災を想定した RABT 曲線は加熱開始後 5 分で 1200℃に加熱温度を上昇させるものであり、ISO 834 より急速な温度上昇と 1200℃の炉内温度を保持する。このため、これまでは国内では実大規模試験体の耐火試験が実施できるのは独立行政法人建築研究所の水平炉しかなかった。

この度、大成建設ではトンネル耐火性能の研究開発をより推進していくために、自社試験施設である多目的炉（写真-1）で RABT 曲線に準拠した急速加熱実験ができる環境を整備した。本報は鉄筋コンクリート構造とコンクリート充填鋼殻構造の試験体の急速加熱実験を行い、多目的炉の加熱性能を検証した結果を報告する。



写真-1 多目的炉
Multi-purpose Furnace



RWS : トンネル火災加熱曲線 (オランダ基準)

HC : 炭化水素火災曲線 (ISO 規格)

図-1 各種火災の加熱曲線
Time-temperature Curves

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

*2 土木本部土木設計部

2. 試験体

表-1 に試験体一覧、表-2 にコンクリートの使用材料、表-3 に配合を示す。試験体は鉄筋コンクリート試験体(RC) 1 体とコンクリート充填鋼殻試験体(CFSS) 1 体を製作した。鉄筋コンクリート試験体のコンクリートには爆裂を抑制するためにポリプロピレン繊維を 1 kg/m^3 混入した。また、コンクリート充填鋼殻試験体には加熱時の蒸気抜きのために、加熱側鋼板に $\Phi 10\text{mm}$ の孔を 4 箇所にした。コンクリート充填鋼殻試験体では 2 回加熱実験を行った。1 回目は図-2 に示すようにヒル石モルタル系吹付耐火被覆材 30mm と 20mm を設置して加熱し、2 回目は耐火被覆材を撤去し、無被覆で加熱した。鋼殻の鋼種は SM490 とした。

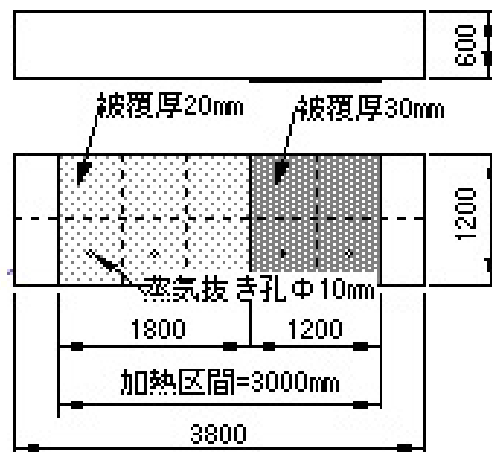


図-2 コンクリート充填鋼殻試験体の耐火被覆設置状況
Layout of fire resistant materials on concrete filled steel shell specimens

3. 実験概要

図-3 に試験体の設置概要を示す。多目的炉は、柱、梁、床、屋根の構造部材の耐火試験に対応できる大型の耐火試験装置である。今回の加熱実験ではトンネル内の頂上部分を模擬するため、図-3 に示すように、試験体を炉の上に水平に設置した。炉内温度は写真-2 に示すように試験体加熱面から 100mm 離れた位置に $\Phi 1.0\text{mm}$ の K 型シーース熱電対 4 本を設置して測定した。



図-3 試験体設置概要
Setup

表-1 試験体一覧
Specimens

試験体名	寸法(mm)	耐火被覆
RC	W3700×L3800×t300	無被覆
CFSS	W1200×L3800×t600	1 回目：耐火被覆付 2 回目：無被覆

表-2 使用材料
Combination of materials

材 料	種 類
セメント	普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm^3)
細骨材	山砂、石灰砕砂
粗骨材	安山岩砕石、石灰砕石
混和剤	A E 減水剤(ボゾリス No. 70)
有機繊維 PP	ポリプロピレン(径 $48 \mu\text{m}$ 、長さ 10mm)



写真-2 炉内温度測定用熱電対設置状況
Thermo-couples to monitor furnace temperatures

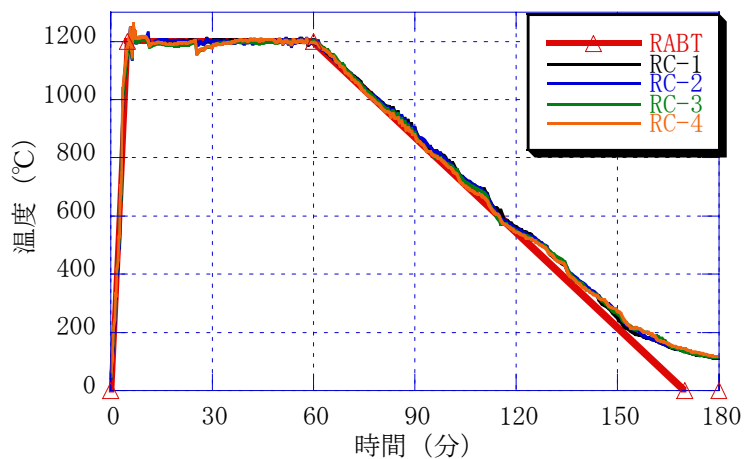
表-3 コンクリートの配合
Mix proportion of concrete

試験体名	スラブ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m^3)							
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		混和剤 No. 70	有機繊維 PP
							山砂	石灰砕砂	安山岩	石灰砕石		
RC	17.5	6.1	57.4	48.0	186	324	593	258	626	275	0.810	1.0
CFSS	18.0	5.5	49.9	45.3	180	361	555	242	655	286	0.903	0

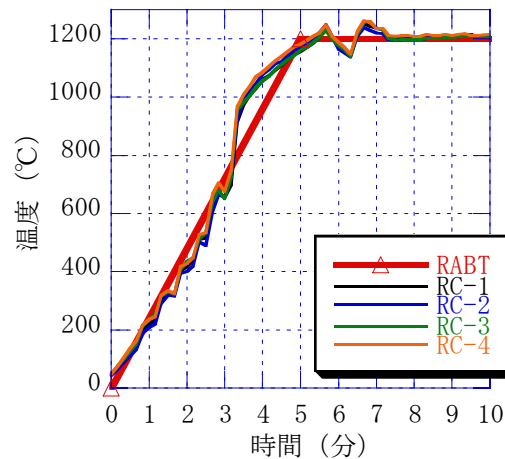
4. 実験結果

図-4 に炉内温度と時間の関係、写真-3～写真-7 に加熱実験後の試験体加熱面の状況を示す。コンクリート充填鋼殻試験体の実験結果は耐火被覆材を設置した 1

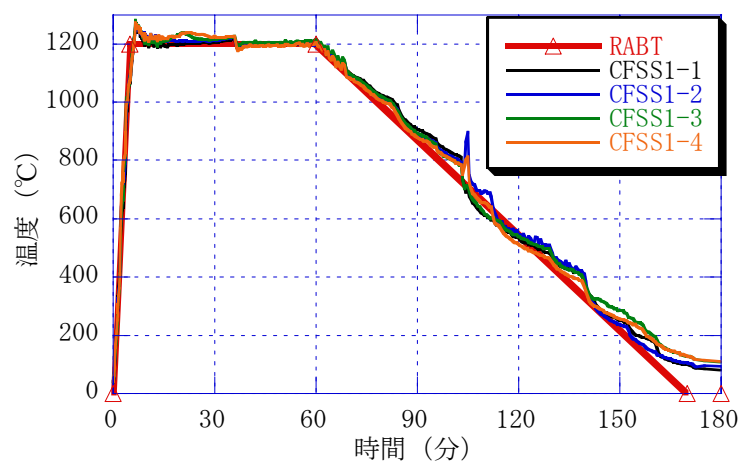
回目を CFSS1、無被覆とした 2 回目を CFSS2 で示した。炉内平均温度の 1200℃到達時間は、加熱開始から RC で 5 分 23 秒、CFSS1 で 5 分 58 秒、CFSS2 で 5 分 56 秒であった。



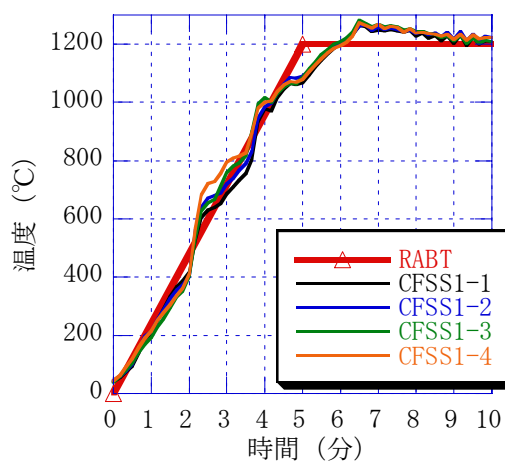
(a)加熱開始から 180 分 (RC)



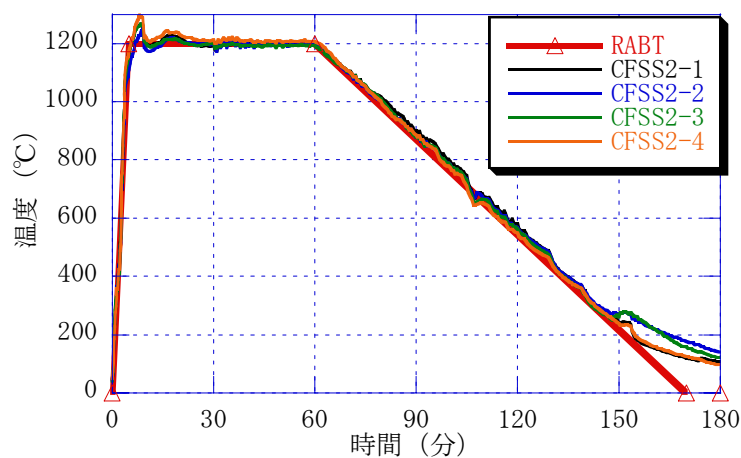
(b)加熱開始から 10 分 (RC)



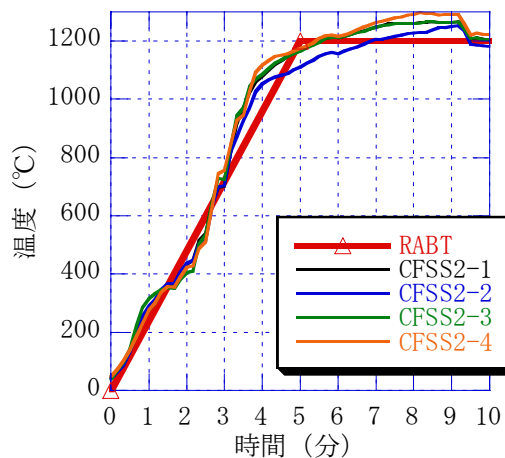
(c)加熱開始から 180 分 (CFSS1)



(d)加熱開始から 10 分 (CFSS1)



(e)加熱開始から 180 分 (CFSS2)



(f)加熱開始から 10 分 (CFSS2)

図-4 炉内温度と時間の関係
Furnace temperature time histories

炉内温度は 1200℃到達した後、3～4 分ではほぼ 1200℃に安定した。加熱開始後 60 分から徐冷しはじめ、加熱開始後 150 分まで RABT 曲線に準拠した温度に制御できた。150 分以降はバーナーを消火し、かつ送風により冷却したが、炉内壁の耐火断熱材や試験体の蓄熱により、RABT 曲線よりも高い温度になった。

RC は加熱中に爆裂しなかったが、加熱後の観察では加熱面全体に骨材に用いた石灰の脱炭酸化現象による剥離が認められた(写真-3)。耐火被覆を設置した CFSS1 では加熱中に顕著な変化は表れず、加熱後の観察でも耐火被覆材の剥離・脱落はなかった(写真-4)。耐火被覆を剥がし鋼板面を観察すると被覆厚 20mm の範囲で煤の付着と鋼板と充填コンクリートが剥離していた。一方、被覆厚 30mm の範囲では顕著な変状はなかった(写真-5)。無被覆で加熱した CFSS2 では加熱開始 3 分 50 秒で加熱面の鋼板が膨張して変形した時の音が数回、発生し始め、加熱 7 分 30 秒で試験体裏面の熱電対取出箇所から蒸気が出てくるようになった。加熱後は鋼の腐食による黒皮が剥がれ、鋼板は太鼓状に膨らんでいた(写真-6)。試験体切断面を見ると鋼板は加熱側に膨らみ、内部コンクリートとの隙間は最大 30mm 程度となっていた(写真-7)。

5. まとめ

多目的炉に鉄筋コンクリート構造とコンクリート充填鋼殻構造の試験体を設置した急速加熱実験を行った結果、RABT 曲線に規定された加熱開始から 5 分で 1200℃という急速加熱と加熱開始後 60 分以降の徐冷過程の温度制御も概ねできることを確認した。



写真-3 鉄筋コンクリート試験体(RC)加熱面状況
Post-heating surface of reinforced concrete specimen



写真-4 耐火被覆付コンクリート充填鋼殻試験体(CFSS1)
加熱面状況
Post-heating surface of concrete filled steel shell specimen with fire resistant materials

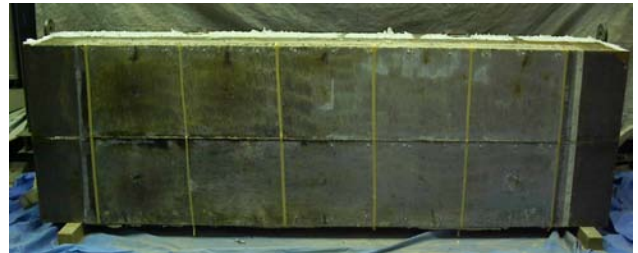


写真-5 耐火被覆撤去後のコンクリート充填鋼殻試験体(CFSS1)加熱面状況
Post-heating surface of concrete filled steel shell specimen after removing the fire resistant materials

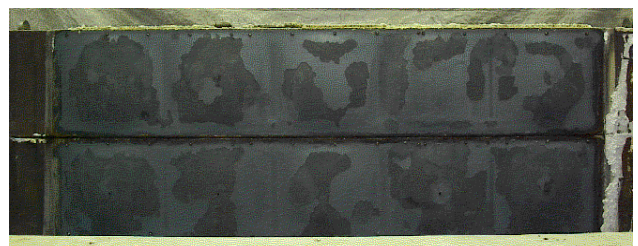


写真-6 無被覆コンクリート充填鋼殻試験体(CFSS2)加熱面状況
Post-heating surface of concrete filled steel shell specimen without fire protection



写真-7 無被覆コンクリート充填鋼殻試験体(CFSS2)切断面状況
A cross section of concrete filled steel shell specimen after heating