

IV-6 トンネル覆工コンクリートの耐火性能に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 14～平 16

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：真下 英人，砂金 伸治，
遠藤 拓雄

【要旨】

これまで山岳工法およびシールド工法により建設される道路トンネルでは、トンネル内面に耐火の役割を兼ねたプレーンコンクリートによる覆工が設置されてきた。しかし、最近ではコスト縮減の観点から、覆工に対して新たな材料の採用や覆工そのものの省略を行う道路トンネルが現れてきている。このため、トンネル火災時における利用者の安全性やトンネル構造の安定性を確保するために、覆工コンクリートの高熱時の耐火性能を明らかにする必要がある。

本研究では覆工コンクリートの材料条件や構造条件、応力条件などをパラメータとし、トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を用いて火災を模擬した高熱を加え、覆工コンクリートの高熱時の挙動を明らかにした。
キーワード：トンネル，覆工，耐火性能，温度-時間曲線

1. はじめに

これまで我が国において山岳工法およびシールド工法により建設されている道路トンネルでは原則的にプレーンコンクリートによる覆工が設置されており、覆工の役割の一つとしてトンネル構造の耐火の機能を有していると考えられることができる。

しかし、近年では建設費のコスト縮減やトンネル構造の長期耐久性向上の観点から、山岳工法によるトンネルでは覆工に高強度コンクリートや繊維補強コンクリートを採用して耐荷力等を向上させたトンネルが増加しつつあることに加え、シールド工法によるトンネルでは二次覆工を省略して高強度コンクリートのセグメントだけの構造とする道路トンネルが現れている。しかし、高熱を受けた場合の覆工コンクリートの挙動に対しては不明確な点が多く残されており、トンネル火災時における利用者の安全性やトンネル構造の安定性を確保するためには、トンネル覆工に用いられているコンクリートの高熱時の挙動を明らかにする必要があると言える。

本研究では、主として我が国の道路トンネルの覆工を模擬したコンクリート供試体に対して、トンネル火災を想定した高熱を与えることによる耐火試験を実施し、供試体の温度の変化、爆裂等の現象の有無、火災後の強度の低下等に関して検討を加えた。また、供試体の強度や配合、鋼繊維の混入といった材料条件、鉄筋の配置といった構造条件、地山から

荷重を受けた場合を想定した応力条件をパラメータとした実験を行い、トンネル覆工に用いられるコンクリートの高熱時の力学的な挙動に関して検討を行った。

2. 研究方法

図-1に本研究における耐火試験の概要を示す。供試体の加熱は加熱炉を使用することで実施した。供試体は縦540mm×横1000mm×厚さ200～300mmとし、上下に厚さ30mmの断熱材を設置し、その外側に厚さ200mmの押さえコンクリートを配置した。加熱面は断熱材の面積も含め縦600mm×横600mmとした。耐火試験時の加熱方向は、爆裂した場合にコンクリート表面のほく落片の落下が観察しやすくなるように横向きとした。

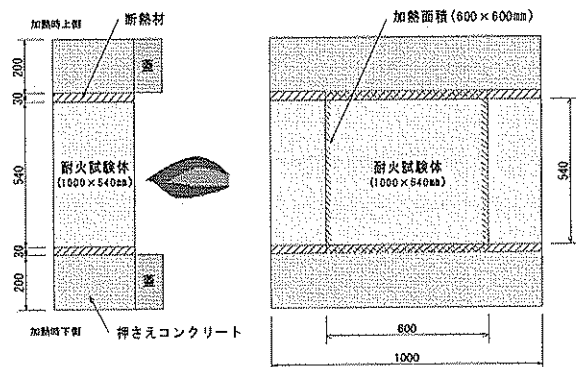


図-1 耐火試験の概要

試験ではトンネル火災を模擬するため、温度-時間曲線を用いて温度の制御を行った。採用した曲線はRABT曲線である。供試体は14体使用して実験を行った。表-1に実験ケース、表-2にコンクリートの配合を示す。なお、粗骨材と細骨材については硬質の砂岩を用いた。

表-1 実験ケース

	ケース名	設計基準強度 (N/mm ²)	配合	条件
標準ケース	①	18	1	一般的な山岳トンネルの覆工を模擬
	②	18	1	標準配合コンクリートに背面土層を模擬
	③	18	1	養生条件を気中養生から水中養生へ変更
軸圧縮応力の影響	A-1	18	1	供試体へ軸圧縮応力 2N/mm ² を導入
	A-2	18	1	供試体へ軸圧縮応力 6N/mm ² を導入
材料条件の影響	M-1	18	2	鋼繊維(60mm)を 0.5%を混入
	M-2	18	1	鉄筋を配置したコンクリートを使用
	H-1	30	3	高強度(30N/mm ²)コンクリートを使用
	H-2	48	4	高強度(48N/mm ²)コンクリートを使用
	H-3	30	3	高強度(30N/mm ²)コンクリートを使用し、部材厚を 200mm とした
構造条件の影響	C-1	24	5	鉄筋を配置した高強度(24N/mm ²)コンクリートを使用し、曲げを与え、鉄筋に達するまでひび割れを発生(幅 0.3mm)させた曲げ引張部材を想定
	C-2	24	5	鉄筋を配置した高強度(24N/mm ²)コンクリートを使用し、軸圧縮応力 6N/mm ² を導入した圧縮部材を想定
補修の効果	R-1	18	1	1度加熱し、補修後 2 度目の加熱を実施(補修厚 60mm)
	R-2	18	1	1度加熱し、補修後 2 度目の加熱を実施(補修厚 50mm)

表-2 コンクリートの配合

配合 No.	設計基準強度	粗骨材最大寸法(mm)	スランプ(cm)	W/C (%)	空気量 (%)
1	18	40	12	53.4	4.5±1.5
2	18	20	15	55.0	6.0±1.5
3	30	20	15	44.5	4.5±1.5
4	48	20	3	35.8	1.5±0.5
5	24	25	8	55.0	4.5±1.5

配合 No.	単位量(kg/m ³)				減水剤	AE 剤
	W	C	S	G		
1	158	296	735	1156	減水剤 3.05	AE 剤 0.112
2	175	318	792	994	減水剤 3.02	AE 剤 0.13
3	169	380	748	1043	減水剤 3.91	AE 剤 0.144
4	143	400	835	1090	減水剤 3.60	
5	155	282	800	1112	減水剤 4.23	AE 剤 0.124

試験では、試験中の様子をビデオ撮影し、加熱中の供試体の挙動を把握し、特に爆裂の様子を確認した。また、試験後に加熱面の観察を行い、ひび割れや爆裂などによる供試体の損傷状態を目視により調査した。また、供試体温度を深さ方向に、0(加熱面)・20・50・100・200・300(背面)mm の位置で計測した。さらに、実験に使用する供試体と同配合の管理供試

体を作成し、原則として実験を行う日と同一の日に一軸圧縮強度を算定するとともに、実験終了後の供試体において損傷の少ない部分で熱の影響を受けている部分をコアリングして、一軸圧縮強度を算定し、両者を比較した。

3. 実験結果

3. 1 標準的なトンネル覆工の高熱時の挙動

標準的な山岳トンネルの覆工コンクリートを模擬した供試体において、RABT 曲線による加熱を行った。写真-1にケース①の試験後加熱面の写真を示す。ケース①では爆裂は発生せず、有害な亀裂は発生しなかった。

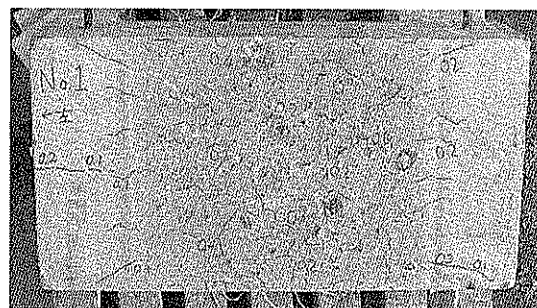


写真-1 試験後の加熱面の状態(ケース①)

また、ケース②として、供試体の背面に土層を設置し、供試体が地山に覆われている状態を模擬したケースの実験を実施したが、爆裂は観察されなかった。さらに、ケース③として、供試体コンクリートの養生条件を気中養生から水中養生に変更した場合の実験を行ったところ、爆裂は発生したが、発生面積は非常に小さく、最大深さも 15mm 程度以下の損傷であり、それ以外についてはケース①で実施した標準的な覆工コンクリートの場合と挙動に対する差異はなかった。

図-2にケース①～③における加熱面側～背面における供試体の温度変化を示す。加熱面から 100mm 離れた領域では約 100 °C 程度、背面側では 40 °C 未満となっていた。ケース②では、背面側の温度はケース①の場合とほぼ同様で、土層内で計測した温度についても、背面の温度とほぼ同一の温度変化を示すにとどまった。このことから、覆工厚として 30cm 確保すれば、地山側で高温に達する影響は少ないと考えられる。①と②では加熱面側で若干の温度差が見られるが、供試体の性状等に大きな変化はなかった。また、①～③を総じて見れば、①の温度変

化が②と③に比較して若干低い傾向があるものの、温度変化の傾向についてはほぼ同一であったと考えられる。

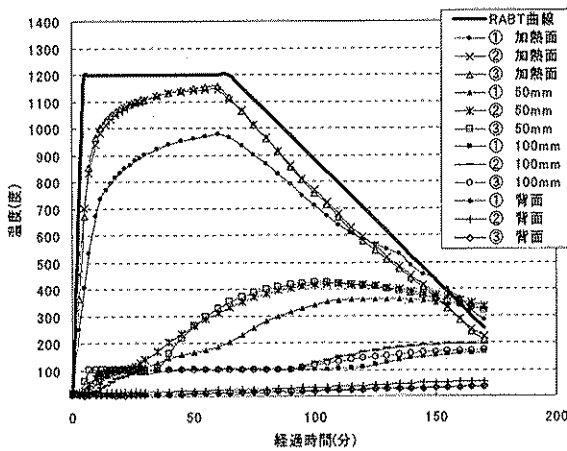


図-2 供試体の温度変化(ケース①～③)

図-3に、ケース①～③における試験前の一軸圧縮強度の平均値、および加熱面側と背面側でコアリングを実施し、一軸圧縮強度を算定した結果を示す。供試体は加熱後ひび割れが生じ、コアリングにより供試体が作成できない場合もあった。本結果より、ケース①～③については、加熱面側の強度の低下が背面側よりも大きい傾向にあると考えられるが、元々の供試体の強度が高いこともあり、加熱後で予め規定された設計基準強度を下回することはなかった。

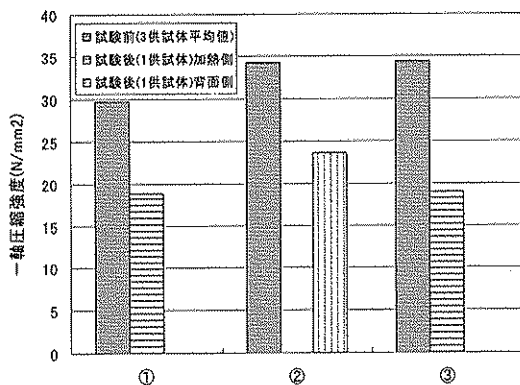


図-3 供試体の強度変化(ケース①～③)

以上のことから、山岳トンネルに採用されている標準的な覆工コンクリートに対して高熱を与えた場合、爆裂等により覆工構造に大規模な損傷が生じることはなく、厚さを30cm確保している場合は、高熱の影響が覆工の背面側に対して影響を及ぼさないことが分かった。また、一軸圧縮強度は標準的に用いられているコンクリートでは元々の強度が高めで

あることから、高熱を受けた後で覆工に対して予め規定された設計基準強度を下回することはなかった。

3.2 高熱時の挙動に及ぼす軸圧縮応力の影響

供試体コンクリートに軸圧縮応力を与えた場合として、ケース A-1(2N/mm²の軸圧縮応力を付与)、ケース A-2(同様に6N/mm²の軸圧縮応力を付与)の実験を実施した。爆裂に関してはケース A-1では非常に小さい面積で、最大深さが数mm程度のものであったが、ケース A-2ではケース A-1に比較すれば大きく、加熱面全体にわたって生じ、深さは最大で25mm程度まで損傷した。写真-2にケース A-2の試験後の加熱面の写真を示す。

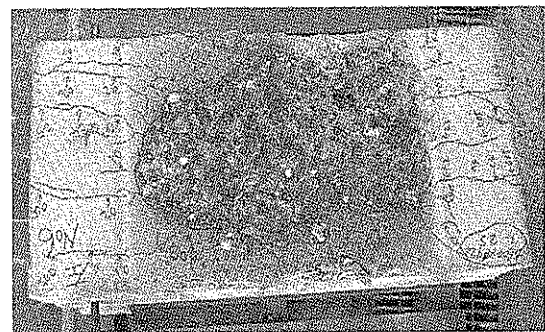


写真-2 試験後の加熱面の状態(ケース A-2)

図-4にこれらのケースと比較のためにケース①の供試体内の温度変化を示す。これより、導入されている軸圧縮応力が高いケース A-2で全体的に温度が高めに発生する傾向が認められ、このことから、温度の上昇については軸圧縮応力、すなわち覆工が受ける荷重による影響を受ける可能性があると言える。

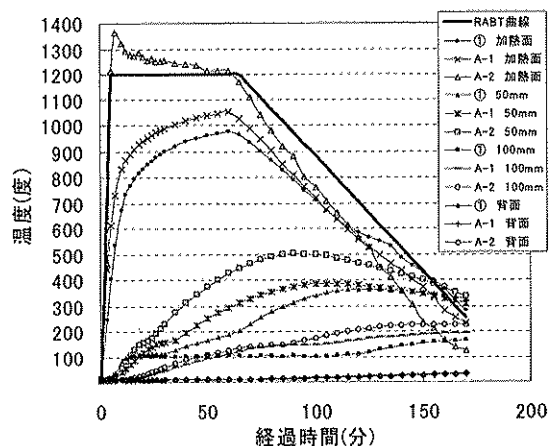


図-4 供試体の温度変化(ケース A-1～A-2)

図-5にこれらのケースにケース①を加えた場合の

供試体の強度変化を示す。ケース A-1 とケース A-2 の加熱後の強度変化の傾向に関しては、コアリングが実施できた加熱面側で比較すると、強度が減少した割合は各ケースとも概ね35%程度であり、軸圧縮応力の存在による供試体の強度低下に与える影響はほとんど受けないと考えることができる。

以上のことから、覆工が荷重を受けて軸圧縮応力が発生している場合は、高熱下では供試体の温度が上昇する傾向があり、また、爆裂の規模も大きくなるが、強度低下に及ぼす影響は小さいことが分かった。

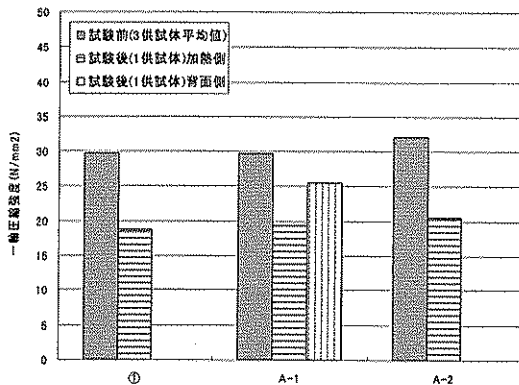


図-5 供試体の強度変化(ケース A-1~A-2)

3. 3 高熱時の挙動に及ぼす材料による影響

覆工に使用した材料に対する影響を把握するために、初めに、ケース M-1 として鋼繊維(鋼繊維長 60mm, 混入率 0.5%)を混入した場合、ケース M-2 として鉄筋を配置したコンクリートを使用した場合に関して実験を行った。

ケース M-1 では、試験後に供試体を観察したところ、爆裂痕が発見されたものの、非常に小さい規模で、面積も小さく、また、深さも数 mm 程度であった。また、ケース M-2 では爆裂は観察されなかった。

図-6 にケース M-1 とケース M-2, および比較のためにケース①の場合の供試体内の温度変化を示す。これより、鉄筋を配置した M-2 では M-1 や①よりは比較的温度が高めに出ている傾向が見られたが、図-2 に示したケース②, すなわち背面土層を模擬した場合の結果と合わせて考えると、0.5%の鋼繊維を混入しても、供試体の温度変化に大きな影響を及ぼす可能性は低いことが分かった。また、鉄筋の有無が供試体の温度変化に及ぼす影響についても、その可能性は低いことが分かった。

図-7 にこれらのケースにケース①を加えた場合の供試体の強度変化を示す。これより、M-1 の加熱面

側で強度が減少した割合は若干高めに出ていると考えられ、背面側では30%程度となっていた。

以上のことから、覆工が鋼繊維補強コンクリートや鉄筋を配置させた場合で高熱を受けた場合でも、母材コンクリートの強度の低下度合い、供試体の温度変化および爆裂の発生状況は通常のプレーンコンクリートの場合と差異が見受けられないことから、山岳トンネルの通常の覆工の配合の範囲内においては、鉄筋の有無や鋼繊維の混入による影響は受けにくいと言える。

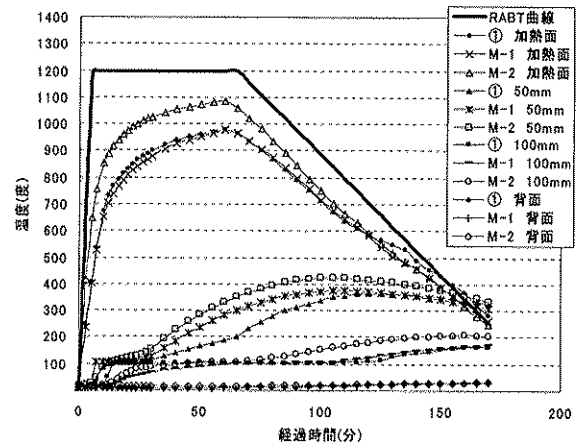


図-6 供試体の温度変化(ケース M-1~M-2)

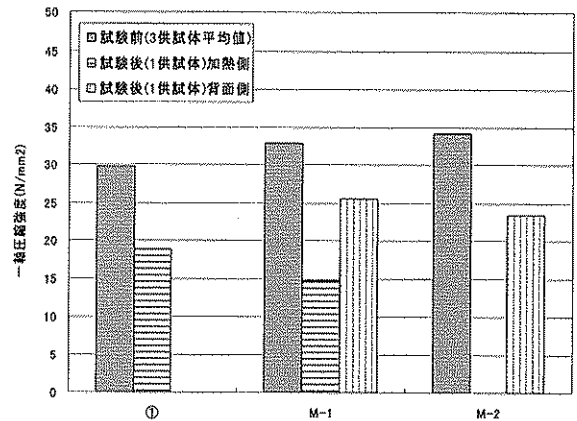


図-7 供試体の強度変化(ケース M-1~M-2)

次に、コンクリートの強度に関する影響を検討するために、配合を変え、高強度とした場合の実験を実施した。ケース H-1 として高強度コンクリート(設計基準強度 30), ケース H-2 として高強度コンクリート(設計基準強度 48), およびケース H-3 として高強度コンクリート(設計基準強度 30)の場合で部材厚さを 200mm とした実験をそれぞれ行い、挙動の違いを比較した。

その結果、設計基準強度を 30 としたケース H-1

および H-3 では、爆裂は生じたものの、加熱面側の比較的小さな面積に限られ、深さはそれぞれ 15mm 程度、22mm 程度であった。設計基準強度 48 としたケース H-2 では、全面にわたって爆裂が生じ、深さは約 40mm 程度まで達した。写真-3 にケース H-2 の試験後の加熱面の状態を示す。

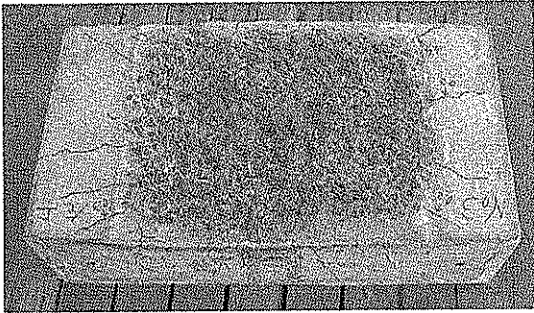


写真-3 試験後の加熱面の状態(ケース H-2)

図-8 にケース H-1~H-3 の場合の供試体内の温度変化を示す。一部、加熱面側で熱電対がエラーを生じたケースもあるが、強度がより高い方のケース H-2 で温度が高めに上昇していることが分かる。このことは、強度が高いことや、母材コンクリートの配合が異なることにより、温度の上昇が異なることが推測される。

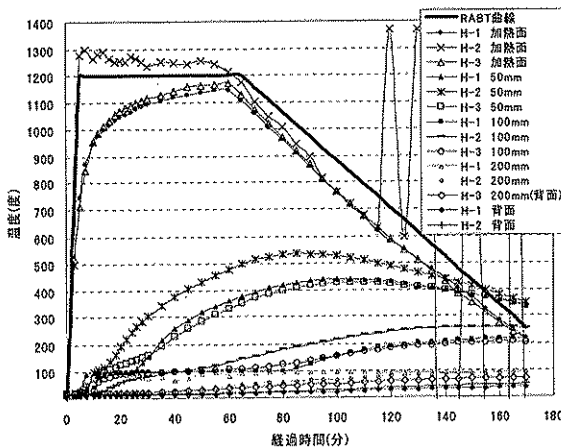


図-8 供試体の温度変化(ケース H-1~H-3)

図-9 にケース H-1~H-3, および比較のためにケース①の場合の供試体の強度変化を示す。これより、定量的な強度の減少割合を論じることは困難であるが、高強度の場合は加熱面側で最大 55%程度の強度の減少が見られることがあった。

以上のことから、覆工の設計基準強度が 30 程度であれば、標準的な覆工コンクリートの配合の場合と

挙動に関する差異はほとんどないと考えられるが、設計基準強度が 48 程度になると、供試体の温度が上昇する傾向があり、また、爆裂の規模も大きくなることが分かった。このことは覆工の強度をより大きくした場合には、爆裂の規模等がさらに大きくなり、耐火に対する配慮を要する場合があることを示していると考えられる。

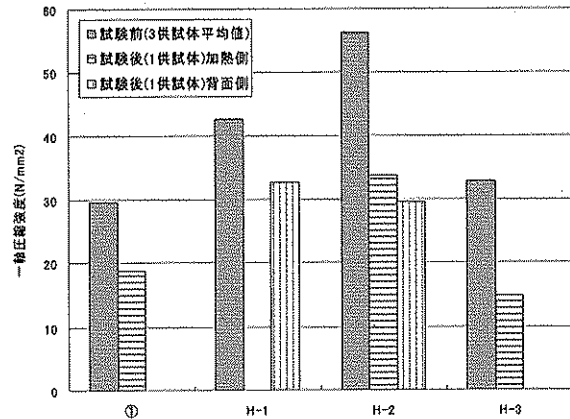


図-9 供試体の強度変化(ケース H-1~H-3)

3. 4 高熱時の挙動に及ぼす構造の影響

開削トンネルなどの RC 部材を想定して、設計基準強度を 24 とし、鉄筋をかぶり高が 70mm の箇所に配置したケースに対する高熱時の挙動を検討した。すなわち、ケース C-1 として、曲げを与え、ひび割れが幅 0.3mm で鉄筋の位置まで達している曲げ引張部材を想定した供試体、およびケース C-2 として軸圧縮応力を 6N/mm² を与えて圧縮部材と想定した供試体に関しての実験を行った。

ケース C-1 では爆裂は発生したものの、非常に小さな面積であり、深さは数 mm 程度の規模であった。ケース C-2 では、供試体表面全面にわたって、深さが約 35mm 程度の爆裂が発生し、加熱面と平行な亀裂が発生した。

図-10 にケース C-1, C-2 および比較のためにケース①における加熱面側~背面における供試体の温度変化を示す。これより、加熱面から 50mm 離れた領域では約 400°C 程度、100mm 離れた領域では約 100~200°C 程度であることが分かるが、加熱面では曲げ引張応力が作用しているケース C-1 より軸圧縮応力が作用しているケース C-2 の方が温度上昇が著しく高くなっていることが分かった。なお、70mm の地点にある鉄筋は、既往の研究結果により示されている火災時における鋼製の構造部材の温度上昇の上限であるとされている 300~550°C 程度にとどまっ

ていると考えられる。また、ケース C-1, C-2 の両ケースともに、実験中に例えば供試体が大きく変形する現象や、鉄筋が破断するような現象は生じなかったことから、鉄筋のかぶり量が 70mm 程度確保されていれば、高熱により鉄筋に損傷が生じ、覆工の挙動に影響を及ぼすことは少ないと考えられる。

ケース C-1~C-2 の供試体の強度変化については、加熱面側および背面側ともに 25~30% の強度の低下が見られた。

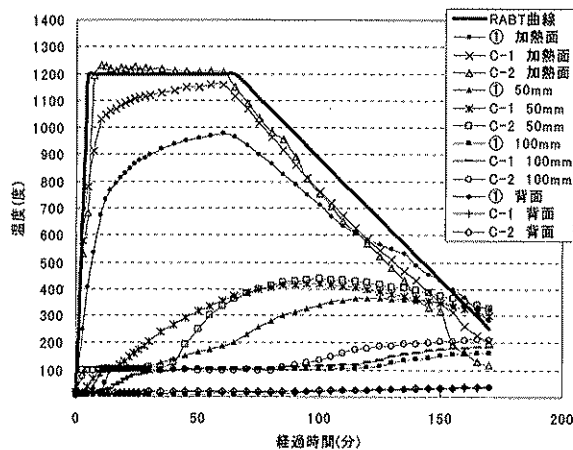


図-10 供試体の温度変化(ケース C-1~C-2)

3. 4 高熱時の挙動に及ぼす補修の影響

標準的な山岳トンネルの覆工コンクリートを 1 度加熱し、加熱後に損傷を受けたと考えられる部分を除去し、さらに同一配合のコンクリートにより覆工の内面に補修を行い、再加熱する実験を 2 つの供試体を用いて、ケース R-1 および R-2 として実験した。なお、損傷を受けたと想定した厚さは、1 度目の加熱実験時に 450°C 以上の熱負荷を受けた厚さと想定し、その厚さは 1 度目の加熱時の温度分布をもとに決定した。ケース R-1 で加熱面から 60mm までを除去し、ケース R-2 は 50mm までを除去した。

その結果、補修後に爆裂が発生することはなく、補修した層境から後から打設した補修を模擬したコンクリートが剥離するような現象も確認されなかった。また、温度変化を計測したところ、1 回目の加熱と 2 回目の加熱で温度変化に顕著な差は見受けられなかった。

さらに供試体の強度変化をコアリングの実施により検討することを試みたが、ほとんどのケースで供試体のコアリングができなかった。これは供試体自体に多くの亀裂が発生したためであり、強度が低下している可能性があると言える。

4. 本研究により得られた成果

本研究よりの以下の結果が得られた。

- 1) 標準的なトンネル覆工については、RABT 曲線を用いて火災を模擬した規模の高熱を受けた場合は、爆裂が生じることは少なく、生じた場合についても非常に小規模にとどまることが分かった。また、覆工厚として 30cm を確保すれば、地山側において高温に達する影響は少ないことが分かった。さらに、一軸圧縮強度は標準的に用いられているコンクリートでは元々の強度が高めであることから、高熱を受けた後でも構造上問題となるほどの強度低下は生じないことが分かった。
- 2) トンネル覆工に軸圧縮応力が作用している場合、軸圧縮応力が大きくなると、爆裂の規模が大きくなり、その影響が及ぶ深さも大きくなることが分かった。また、供試体内部の温度の上昇も軸圧縮応力が大きい場合は上昇の度合いが大きくなることが分かった。しかし、加熱後の強度の低下割合は、軸圧縮応力の存在による影響はほとんど受けないことが分かった。
- 3) 高強度コンクリートを採用した場合は、圧縮強度が大きくなると、爆裂の規模および供試体内部の温度の上昇が大きくなり、強度によっては耐火に対する配慮が必要となる場合があることが分かった。
- 4) 配合が標準的な覆工に用いられるコンクリートにおいては、鋼繊維の混入や鉄筋の有無が、爆裂や温度変化、強度の低下の度合いに与える影響は小さいことが分かった。
- 5) RC 部材については、覆工に引張応力が生じ、鉄筋のかぶりまでの深さでひび割れが生じていても、適切なかぶり量が確保されていれば、高熱により鉄筋が損傷を受けることはないことが分かった。しかし、軸圧縮応力が生じている場合はその大きさによっては爆裂等に対して留意する必要がある。
- 6) 1 度高熱を受けた覆工については、供試体自体に多くの亀裂が発生し、強度が低下している可能性があることが分かった。