

高熱時におけるトンネル覆工コンクリートの 挙動に関する研究

Study on behavior of tunnel lining concrete under high
temperature condition

真下 英人¹・砂金 伸治¹・木谷 努¹・遠藤拓雄²

Hideto MASHIMO, Nobuharu ISAGO, Tsutomu KITANI and Takuo ENDOU

Tunnel lining using plain concrete is placed in road tunnel constructed by mountain tunneling method and shield tunneling method. It has the function for fire-proofing and the stability of tunnel structure for fire is confirmed. The road tunnels which use steel fiber reinforced concrete or high strength concrete for their lining by mountain tunneling method and which omit the permanent lining by shield tunneling method have been emerging recently. The characteristics of lining concrete using such materials under high temperature condition should be examined to ensure the safety of both traffic and tunnel structure in tunnel fire. Fire-proof characteristics about tunnel lining concrete was investigated by executing two kinds of experiment to grasp the behavior of lining concrete such as failure, change of temperature and strength of concrete.

Keywords: tunnel, lining, concrete, fire-proof characteristic, time-temperature curve

1. 序論

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，通常，コンクリートによる覆工が設置されており，トンネル構造の耐火の機能を有していると考えられる。

山岳トンネルの覆工に対しては，一般的に通常区間で無筋コンクリート，坑口部で鉄筋を配置したコンクリートが用いられている。しかし，近年，建設費のコスト縮減や構造の長期耐久性の向上の観点から，高強度の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る場合や，坑口部以外でも特殊な条件下では鉄筋により補強する場合が増加している。また，シールドトンネルに対しても，コスト縮減の観点から，二次覆工を省略する道路トンネルが見られつつある。さらに，海外においては，近年，道路トンネル内で火災事故が連続して発生したことを契機として，構造も含めた火災時におけるトンネルの安全性に関する検討がなされている状況にある¹⁾。

トンネルの覆工コンクリートが火災により高熱を受ける場合の研究については，主として強度の高いシールドトンネルのセグメントを対象に多数実施され，耐火材の性能等に関する成果の蓄積がなされてきている²⁻³⁾。また，海外においては，支保工を対象とした耐火実験が実施されている報告例がある⁴⁾とともに，トンネルの耐火に対して特別な配慮を必要とする場合の設計に用いる種々の温度-時間曲線が提案されている。これらの状況を踏まえ，道路トンネルの火災時における利用者の安全性やトンネル構造の一層の安定性を確保するためには，我が国の山岳工法による道路トンネルを対象に，設計基準強度が18～30N/mm²程度である覆工コンクリートが，

キーワード：トンネル，覆工，コンクリート，耐火性能，温度-時間曲線

¹正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)

²正会員 国土交通省北海道開発局

本研究では、主として我が国の道路トンネルで採用されている覆工コンクリートを対象として、コンクリートが高熱を受けた場合の挙動に関する基礎的な検討を実施した。初めに、覆工コンクリートと同様の配合を持つ供試体を用いた要素実験を実施し、覆工コンクリートの一軸圧縮強度や静弾性係数の低下の度合いを把握した。引き続き、トンネル覆工を模擬したコンクリート供試体を用いて、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、一軸圧縮強度や静弾性係数の変化に加え、供試体内部の温度変化や、爆裂等の現象の有無等に関する定性的な傾向を把握した。

表-2の結果より、円柱管理供試体と非加熱のコアリング供試体を比較すると、一軸圧縮強度は①変化率が87.3%になっており、供試体をコアリングすることだけに起因して10%程度の強度が低下する結果となった。また、②変化率の結果より、200～400℃の熱を受けた場合で、熱を受けなかった供試体に比べて70～80%の一軸圧縮強度となり、低下の度合いは20～30%程度という結果が得られた。600℃の熱を受けた場合は、一軸圧縮強度の低下の度合いは50%程度であるという結果が得られた。また、静弾性係数は、円柱管理供試体と非加熱のコアリング供試体を比較すると、①変化率が98.3%とほとんど変わらない結果であり、コアリングによることで静弾性係数が低下する度合いは極めて低い結果が得られた。また、②変化率の結果より、200℃の熱を受けた場合で約20%、400℃の場合で約50%、600℃の場合では約80%程度の静弾性係数が低下する結果が得られた。

表-2 要素実験実施による一軸圧縮強度試験結果

		一軸圧縮強度試験結果							
		一軸圧縮強度(N/mm ²)		①変化率(%)	②変化率(%)	静弾性係数(×10 ⁴ N/mm ²)		①変化率(%)	②変化率(%)
		平均値		(一軸圧縮強度)	(一軸圧縮強度)	平均値		(静弾性係数)	(静弾性係数)
円柱管理供試体	1	35.1	36.2	100	-	2.69	2.79	100	-
	2	37.2				2.80			
	3	36.3				2.89			
コアリング供試体	非加熱	1	31.6	87.3	100	2.78	2.75	98.3	100
		2				2.68			
		3				2.78			
	200℃	1	24.8	68.4	78.4	2.05	2.16	77.3	78.6
		2				2.19			
		3				2.24			
	400℃	1	22.6	62.5	71.6	1.52	1.41	50.5	51.3
		2				1.41			
		3				1.3			
	600℃	1	14.8	41.0	46.9	0.75	0.57	20.4	20.8
		2				0.51			
		3				0.45			

3. 覆工コンクリートを模擬した供試体を用いた耐火試験

(1) 耐火試験方法

前章までの結果に基づき、トンネル構造として高熱を受けた場合の挙動を検討するためにトンネル覆工を模擬した供試体(以下、耐火試験体と称する)を作製して、火災を模擬した高熱を与える耐火試験を実施し、耐火試験体内部の温度変化の測定、加熱面および背面の観察を行った。また、試験終了後において耐火試験体のひび割れ状態の観察や、耐火試験体からコアリングにより得られた供試体を用いた一軸圧縮強度試験等を行い、管理供試体との比較を行った。

写真-1に試験実施時の全景を示す。本研究では実際に耐火試験体に火を当てることが可能な加熱炉を使用して試験を実施した。図-2に試験の概要を示す。耐火試験体は縦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、例えば爆裂が発生した場合に耐火試験体のコンクリート表面の剥落片の落下等が観察しやすくなるように横向きとして実施した。

今回の耐火試験において、トンネル火災を模擬するため、温度-時間曲線を用いて制御を行った。採用した曲線はすべてのケースにおいてRABT曲線とした。

(2) 耐火試験における試験ケース

表-3に試験ケースを示す。本研究では、12体の耐火試験体を使用

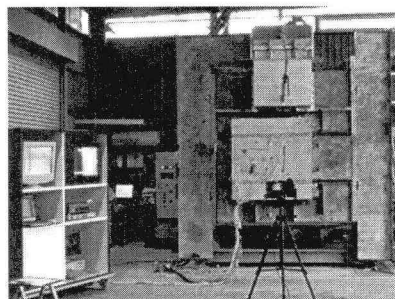


写真-1 耐火試験実施時の全景

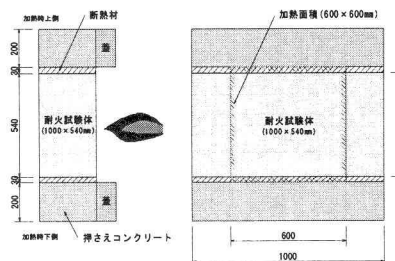


図-2 耐火試験の概要

して試験を行った。試験では、高熱時における覆工コンクリートの挙動を把握することを目的とし、主として3つのシリーズに分けて試験を実施した。第1のシリーズでは基本的なシリーズと位置づけ、耐火試験体の配合は山岳工法により建設される道路トンネルに用いられる覆工コンクリートを模擬した設計基準強度が 18N/mm^2 のコンクリートを用いた。そのうち、ケース①は養生条件を気中養生とした場合、ケース②はケース①と同様の耐火試験体を用いたが、供試体の背面に土層を配置した場合、さらにケース③は、覆工コンクリートの養生条件が湿潤養生である場合の極端なケースとして、養生を水中養生とした場合である。

第2のシリーズは、覆工コンクリートに軸応力が作用している場合を模擬したものである。ケース A-1 は耐火試験体に軸圧縮応力として 2N/mm^2 を与えた場合、ケース A-2 は 6N/mm^2 を与えた場合である。

第3のシリーズは、覆工コンクリートに採用されるコンクリート材料の差違、または構造的な差違による影響を検討するものである。ケース M-1 は鋼繊維補強コンクリートを用いた場合、ケース M-2 は鉄筋を配置した場合とした。また、ケース H-1 および H-2 は、設計基準強度が従来のトンネル覆工と比較して高強度のコンクリートを用いたケースであり、さらにケース H-3 は、高強度として、かつ、覆工厚を薄くした場合の影響を検討するためのものである。さらに、鉄筋を配置したケースで、ひび割れが鉄筋に達する程度で生じている場合(ケース C-1)や、軸圧縮応力が導入されている場合(ケース C-2)について試験を実施した。

表-4 に耐火試験に用いたコンクリートの配合を示す。配合 No.1 は前述の電気炉におけるコアリング供試体の要素実験を実施した場合の配合と同一である。なお、すべてのケースに共通して、粗骨材と細骨材については硬質の砂岩を用いた。

表-3 耐火試験ケース一覧

	ケース名	設計基準強度 (N/mm^2)	温度-時間 曲線	配合 No.	条件
第1シリーズ	①	18	RABT	1	一般的な山岳工法の道路トンネルの覆工を模擬
	②	18	RABT	1	標準配合コンクリートに背面土層を模擬
	③	18	RABT	1	養生条件を気中養生から水中養生へ変更
第2シリーズ	A-1	18	RABT	1	供試体へ軸圧縮応力 2N/mm^2 を導入
	A-2	18	RABT	1	供試体へ軸圧縮応力 6N/mm^2 を導入
第3シリーズ	M-1	18	RABT	2	鋼繊維(60mm)を0.5%混入
	M-2	18	RABT	1	鉄筋(D19)を芯かぶり10cmで配置したコンクリートを使用
	H-1	30	RABT	3	設計基準強度が 30N/mm^2 のコンクリートを使用
	H-2	48	RABT	4	設計基準強度が 48N/mm^2 のコンクリートを使用
	H-3	30	RABT	3	設計基準強度が 30N/mm^2 のコンクリートを使用し、部材厚を200mmとした
	C-1	24	RABT	5	鉄筋(D19)を芯かぶり7cmで配置した設計基準強度が 24N/mm^2 の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	RABT	5	鉄筋(D19)を芯かぶり7cmで配置した設計基準強度が 24N/mm^2 の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

表-4 耐火試験体のコンクリートの配合

配合 No.	設計基準強度 (N/mm^2)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				
						W	C	S	G	混和剤
1	18	40	12	53.4	4.5 ± 1.5	158	296	735	1156	減水剤 3.05 AE 剤 0.112
2	18	20	15	55.0	6.0 ± 1.5	175	318	792	994	減水剤 3.02 AE 剤 0.13
3	30	20	15	44.5	4.5 ± 1.5	169	380	748	1043	減水剤 3.91 AE 剤 0.144
4	48	20	3	35.8	1.5 ± 0.5	143	400	835	1090	減水剤 3.60
5	24	25	8	55.0	4.5 ± 1.5	155	282	800	1112	減水剤 4.23 AE 剤 0.124

(3) 耐火試験における測定項目

a) 耐火試験体の挙動およびひび割れの調査

加熱中に見られる爆裂などの耐火試験体の挙動を把握するために、加熱面および背面の2方向にて耐火試験体の撮影を行った。耐火試験体の背面は、写真-1に示すビデオカメラによって撮影し、加熱面は加熱炉に内蔵され

た CCD カメラにより行った。また、試験後に耐火試験体全体の観察を行い、ひび割れや爆裂などによる耐火試験体の損傷状態を目視により調査した。

b) 耐火試験体等の温度測定

耐火試験体内部の温度は K 型熱電対で測定した。測定位置は、耐火試験体中央部で、それぞれ加熱面から背面に向かって、0(加熱面)・20・50・100・200・300(背面)mm の深さでの 6 箇所を基本とした。なお、耐火試験体の温度測定以外に、加熱炉内の温度を測定した。測定は耐火試験体加熱面から 50mm 離れ、耐火試験体の中央部分から 15cm 程度上方の位置で行い、この測定温度を基に RABT 曲線に従った加熱が出来るように火力を制御した。

c) 耐火試験体の強度試験等

実験に使用する耐火試験体と同配合の管理供試体を作製し、原則として実験を行う日と同一の日に一軸圧縮強度と静弾性係数の測定を行った。また、実験終了後の耐火試験体において熱の影響を受けている部分のうち、損傷の少ない箇所でもコアリングを試み、供試体が採取できたものについて、一軸圧縮強度と静弾性係数を計測した。図-3 に基本的なコアリングの位置図を示す。また、実験に使用する耐火試験体に対して、コンクリート加熱面における含水分をモルタル水分計にて測定した。含水分の測定は加熱面において、間隔が 100mm の格子状で、36 点に対して行い、その平均値を算定した。

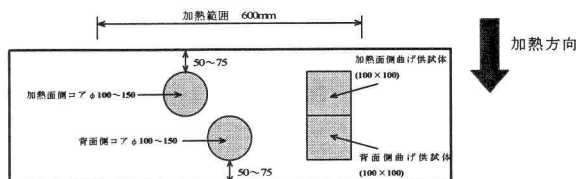


図-3 コアリング位置図

4. トンネル覆工供試体を用いた耐火試験結果

(1) 標準的な山岳トンネルの覆工の高熱時挙動

標準的な山岳トンネルの覆工コンクリートを模擬した耐火試験体において、RABT 曲線による加熱を行った結果について示す。なお、耐火試験体の加熱面における含水分の測定結果はケース①、②および③でそれぞれ、5.1%、5.5%および 6.2%であった。

写真-2 にケース①の試験後の加熱面を示す。ケース①では爆裂は発生せず、また、表面に有害と考えられる亀裂は発生しなかった。また、ケース②として、耐火試験体の背面に土層を設置し、耐火試験体が地山に覆われている状態を模擬したケースの試験を実施したが、そのケースにおいても爆裂は観察されなかった。さらに、ケース③として、耐火試験体の養生条件を気中養生から水中養生に変更した場合の試験を行ったところ、爆裂は発生したが、発生した面積は非常に小さく、最大深さも 15mm 程度以下にとどまっていた。さらに、写真-2 に見られるようにケース①～③において加熱面および側面にひび割れが発生したが、そのひび割れが耐火試験体の背面に達する状況はほとんど観察されなかった。

図-4 にケース①～③における加熱面側～背面側における耐火試験体の温度変化を示す。ケース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った。この理由として、熱電対の設置を試験体表面 0cm としたために、モルタル分の微細な付着や、RABT 曲線を用いた加熱を制御するための温度計の位置が微妙にずれた影響が考えられるが、実際の温度の変化の傾向は他のケースとほぼ同一と考えられる。ケース①では、加熱面から 100mm 離れた内部の領域では約 100～200℃程度、背面側では 40℃未満となっ

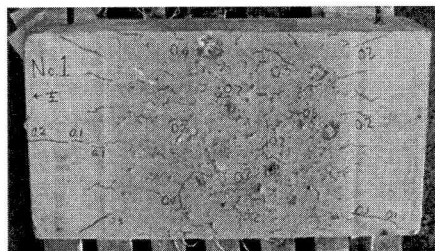


写真-2 試験後の加熱面の状態(①)

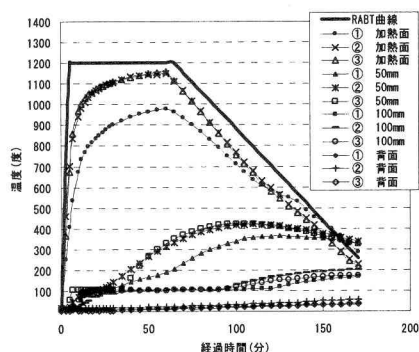


図-4 試験体の温度変化(①～③)

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、覆工の厚さを 30cm 確保すれば、地山側が高温に達することはほとんどないと考えられる。各ケースにおいて、加熱面側で若干の温度差が見られたが、耐火試験体の表面の性状等に大きな差はなかった。

図-5 に、ケース①～③における管理供試体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した供試体により算定した一軸圧縮強度を示す。コアリングした供試体は加熱後にひび割れが生じている場合があり、供試体が作製できない場合があった。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-5 より、加熱後にコアリングした供試体の強度の低下はケース①および③では、管理供試体と比較してそれぞれ 37%と 45%だけ低下した。コアリングの位置は、中心で加熱面から 50～150mm 程度のところで実施されたが、図-4 よりその付近では温度は概ね 200～400℃程度であったことが分かる。この低下の度合いを表-2 に示した「①変化率」と比較すると、これらの値は概ね合致していると言うことが出来る。

図-6 にケース①～③における管理供試体の静弾性係数の平均値、および加熱面側と背面側でコアリングした供試体による静弾性係数を示す。これより、静弾性係数は加熱面側でそれぞれ 53%と 67%だけ低下した結果が得られたが、これについても、電気炉による要素実験の結果と静弾性係数の低下度合いが比較的合致したことが分かる。

以上のことから、山岳工法により建設される道路トンネルに採用されている、厚さが 30cm の標準的な覆工コンクリートに対して高熱を与えた場合、爆裂等により覆工コンクリートに大規模な損傷が生じること可能性は極めて低いことが明らかとなった。また、覆工の厚さとして 30cm を確保している場合は、覆工の背面側が高熱に達することや、発生したひび割れの影響が及ぶ可能性が低いことが分かった。さらに、覆工コンクリートに標準的に用いられている配合を基にしたコンクリートの一軸圧縮強度は、高熱を受ける前の段階で設計基準強度より大きくなっており、高熱を受けた後でも覆工に対して予め規定された設計基準強度を下回ることにはなかった。

(2) 高熱時の挙動に及ぼす軸圧縮応力の影響

耐火試験体に軸圧縮応力を与えた場合として、 2N/mm^2 の軸圧縮応力を付与したケース A-1、 6N/mm^2 の軸圧縮応力を付与したケース A-2 の試験を実施した。なお、耐火試験体の加熱面における含水分の測定結果はケース A-1 および A-2 でそれぞれ、5.1%および 4.8%であった。写真-3 にケース A-2 の試験後の加熱面の写真を示す。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 程度のものが発生した。一方で、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 程度となった。また、ケース A-2 では供試体の表面に多数のひび割れが発生した。しかし、両ケースともにひび割れは供試体の背面に達することにはなかった。

図-7 にこれらの 2 つのケースと、比較のためにケース①の耐火試験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た。このことは、覆工が荷重による影響を受けている場合には、覆工の挙動が若干変化する可能性があると言うことができる。

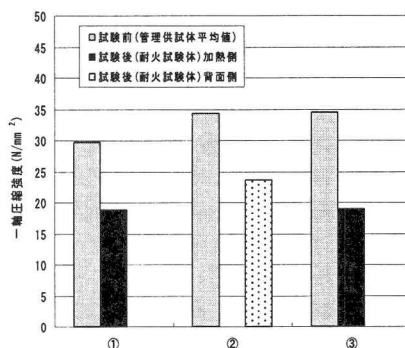


図-5 試験体の強度変化(①～③)

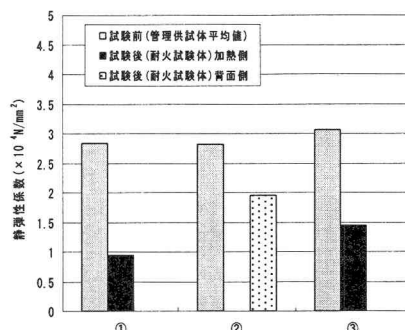


図-6 静弾性係数変化(①～③)

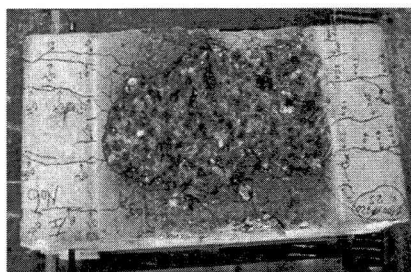


写真-3 試験後の加熱面の状態(A-2)

図-8にこれらのケースにケース①を加えた場合の耐火試験体の一軸圧縮強度の変化を示す。ケースA-1とケースA-2の加熱後の強度の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管理供試

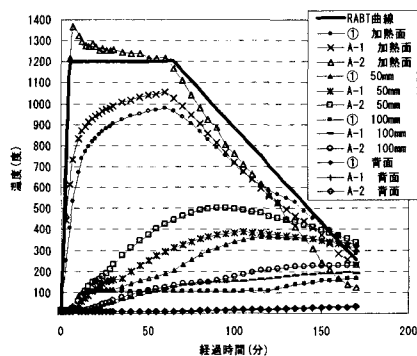


図-7 試験体の温度変化(A-1～A-2)

体に比較して各ケースとも概ね35%程度であり、軸圧縮応力の存在による強度低下に与える影響はほとんど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、爆裂の規模も大きくなるが、強度の低下は小さい傾向が認められた。

(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、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試験を行った。なお、耐火試験体の加熱面における含水分の測定結果はケースM-1およびM-2でそれぞれ、2.7%および4.8%であった。

ケースM-1では、試験後に耐火試験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-9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の場合の耐火試験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、ケース①の結果や、図-4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、耐火試験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、鉄筋の有無が耐火試験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-10にこれらのケースにケース①を加えた場合の耐火試験体の一軸圧縮強度の変化を示す。これより、管理供試体に比較して、M-1の加熱面側で圧縮強度が減少した割合は若干高めに出ていると考えられるが、背面側では30%程度となっていた。また、角柱の管理供試体と、ケースM-1の加熱後に試験体からコアリングすることで作製した供試体の両者に対して曲げ試験を実施した。角柱の管理供試体に対しては、曲げ強度および曲げタフネスがそれぞれ4.36N/mm²および3.31N/mm²として得られた。加熱後にコアリングした供試体では、加熱面側ではそれぞれ、2.13N/mm²および1.59N/mm²となり、50%程度低下する結果が得られた。

以上のことから、覆工コンクリートに対して鋼繊維補強コンクリートを採用した場合や鉄筋を配置させた場合で、高熱を受けても、コンクリートの強度の低下度合い、温度変化および爆裂の発生状況は通常の無筋コンクリートの場合と差異があまり見受けられないことが分かった。この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高

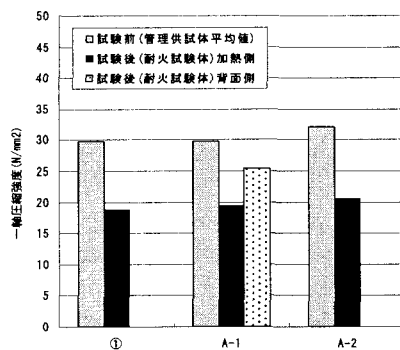


図-8 試験体の強度変化(A-1～A-2)

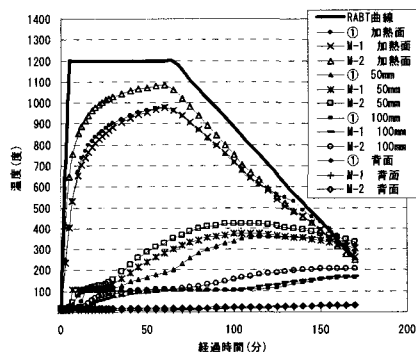


図-9 試験体の温度変化(M-1～M-2)

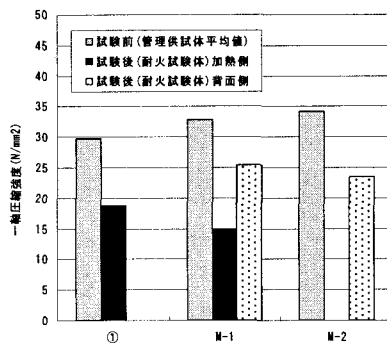


図-10 試験体の強度変化(M-1～M-2)

熱を受けた場合の挙動に対する影響は低いことが考えられる。

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試験を実施した。ケース H-1 として高強度コンクリート(設計基準強度 30N/mm^2)、ケース H-2 として高強度コンクリート(設計基準強度 48N/mm^2)、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 30N/mm^2)の場合で部材厚さを 200mm とした試験をそれぞれ行い、挙動の違いを比較した。なお、耐火試験体の加熱面における含水分の測定結果はケース H-1、H-2 および H-3 でそれぞれ、 4.3% 、 5.0% および 7.4% であった。

写真-4 に、ケース H-2 の試験後の加熱面の状態を示す。その結果、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。設計基準強度を 48N/mm^2 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。これらのケースにおいて加熱面および側面にひび割れが発生したが、ケース H-1 においては、ひび割れが耐火試験体の背面に達する状況はほとんど観察されなかった。しかし、設計基準強度が大きいケース H-2 や覆工厚が 20cm であるケース H-3 では一部のひび割れが背面までに達する場合が見受けられた。

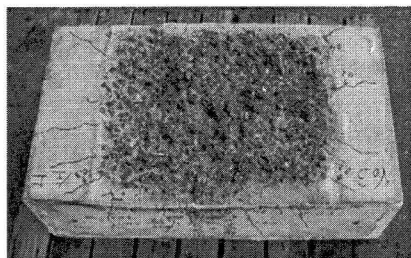


写真-4 試験後の加熱面の状態(H-2)

図-11 にケース H-1～H-3 の場合の耐火試験体内の温度変化を示す。ケース H-2 の加熱面側の熱電対の一部が経過時間が 120 分以降でエラーを生じた部分もあるが、設計基準強度がより高いケース H-2 で温度が高めに上昇していることが分かる。このことから強度が高いことなどにより、温度の上昇が異なることが推測される。また、覆工コンクリートを 20cm と薄くしたケース H-3 について、背面(深さ 200mm)の温度を検討したところ、厚さが 30cm で同じ設計基準強度の場合のケース H-1 の 200mm の地点と温度分布とほぼ同一であることが分かった。このことから、覆工コンクリートの薄肉化を行った場合でも、背面の温度が高くなるような現象は確認されず、地山側に対する温度上昇の影響は少ないことが分かった。

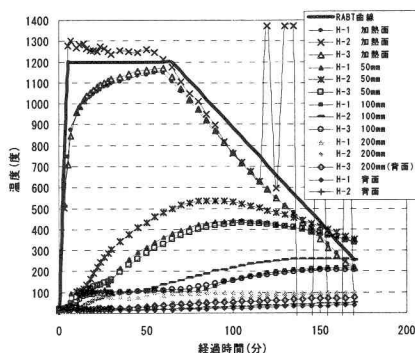


図-11 試験体の温度変化(H-1～H-3)

図-12 にケース H-1～H-3、および比較のためにケース①の場合の試験体の一軸圧縮強度の変化を示す。H-1～H-3 のそれぞれの場合で設計基準強度が異なるため、定量的に強度の減少の度合いを論じることは困難であると考えられるが、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、覆工コンクリートの設計基準強度が 30N/mm^2 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 48N/mm^2 程度になると、試験体の内部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。このことから覆工コンクリートの強度をより大きくしようとする場合には、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。また、設計基準強度が 30N/mm^2 で覆工の厚さを 20cm とした場合でも、背面側が高温に達するような現象は確認されなかった。

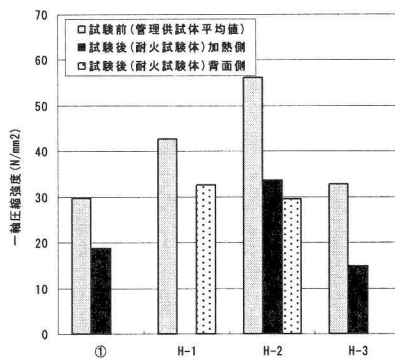


図-12 試験体の強度変化(H-1～H-3)

(4) 高熱時の挙動に及ぼす構造の影響

鉄筋が配置されている部材を想定し、設計基準強度を 24N/mm^2 とし、鉄筋を加熱面から芯かぶり 70mm で配置したケースに対して高熱時の挙動を検討した。ここではケース 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、ケース C-2 として、軸圧縮応力を 6N/mm^2 を与えて圧縮部材と想定した耐火試験体に関しての試験を行った。なお、耐火試験体の加熱面における含水分の測定結果

はケース C-1 および C-2 でそれぞれ、5.0%および5.5%であった。

ケース C-1 では爆裂は発生したもの、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、耐火試験体の表面全体にわたって、深さが約 35mm 程度の爆裂が発生し、加熱面と平行なひび割れが発生した。しかし、両ケースともに、発生したひび割れが耐火試験体の背面に達するようなことはなかった。

図-13 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～背面側における耐火試験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℃程度、100mm 離れた領域では約 100～200℃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、加熱面から 70mm にある鉄筋の温度上昇は、既往の研究結果等^{1)、6)}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℃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、圧縮応力や曲げ応力が作用しているが、高熱を与えている際に例えば耐火試験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。このことから、本研究で対象とする火災規模において、鉄筋のかぶり厚が 70mm 程度確保されていれば、高熱により鉄筋に損傷が生じ、覆工コンクリートの挙動に影響を及ぼすことは少ないと考えられる。

図-14 に耐火試験体の一軸圧縮強度の変化を示す。ケース C-1～C-2 の圧縮強度の変化については、加熱面側および背面側ともに管理供試体に比較して 25～30%の強度が低下し、ほぼ同様の強度となっていた。これは、鉄筋が存在する部分でのコアリングが不可能であるため、加熱面側と背面側のコアリングの位置が近接した影響によるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、主として我が国の道路トンネルで採用される覆工コンクリートを対象として、コンクリートが高熱を受けた場合の挙動に関して、コアリング供試体を用いた要素実験と覆工コンクリートを模擬した耐火試験体を用いた実験を通じて、基礎的な検討を実施した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- 1) 山岳トンネルにより施工される標準的な覆工コンクリートについては、RABT 曲線に基づく高熱を受けた場合は、覆工の表面で爆裂が生じることは少なく、生じた場合でも非常に小規模にとどまっていた。また、覆工の厚さとして 20～30cm を確保すれば、地山側が高熱に達しない可能性が高いことが明らかとなった。
- 2) 高熱を受けた標準的な山岳トンネルの覆工コンクリートでは、高熱を受けた部分からのコアリングによる供試体の強度は、同配合の管理供試体に比較して 40%程度の減少にとどまり、予め設定された設計基準強度を上回っていた。また、耐火試験体の内部にひび割れが生じたため、表面からの深さが 20cm 程度の位置においてコアリングが不可能な場合があったが、設計基準強度が 48N/mm²である場合を除いた厚さ 30cm の全てのケースにおいて、加熱面側から発生したひび割れが背面側に達する現象はほとんど見られなかった。
- 3) 標準的な覆工コンクリートの耐火試験体に軸圧縮応力を与えた場合、2N/mm²程度の軸圧縮応力であれば、高熱時の挙動と大きくは変わらないが、6N/mm²程度の軸圧縮応力を与えると、最大で 25mm 程度の深さの爆裂が発生した。さらに、導入されている軸圧縮応力の存在が、試験体内部の温度変化に対して影響を与える可能性があり、また、加熱後の覆工コンクリートの強度の減少の度合いに対して影響をほとんど与えない傾向が見られた。

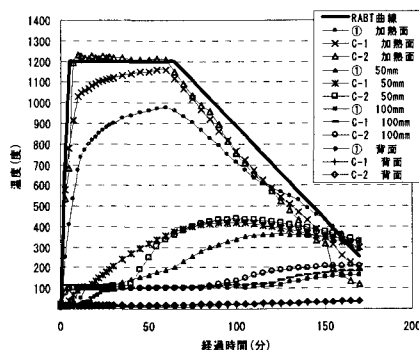


図-13 試験体の温度変化(C-1～C-2)

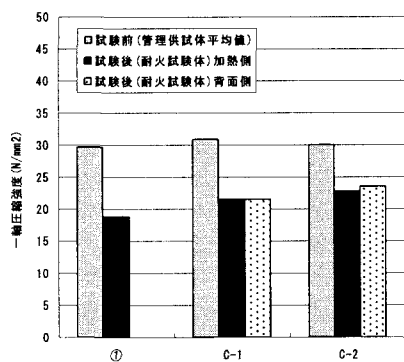


図-14 試験体の強度変化(C-1～C-2)

- 4) 従来の覆工コンクリートよりも強度が高いコンクリートを採用した場合の高熱時の挙動は、設計基準強度が 30N/mm^2 程度までであれば、標準的な覆工コンクリートを用いる場合と大きな差がないものであった。設計基準強度が 48N/mm^2 である場合の爆裂の規模は、覆工コンクリートの背面側まで影響が及ぶことはなかったが、標準的な覆工コンクリートの場合に比較して若干大きい規模となった。また、強度がより高い方が覆工コンクリートの内部の温度が高めになる傾向が見られた。
- 5) 配合が標準的である覆工コンクリートに鋼繊維を混入することや鉄筋の有無による挙動に対する影響は、爆裂や温度変化、強度の低下の度合いに対しては小さい傾向が認められた。また、鉄筋のかぶり分相当の深さまでひび割れが生じて、加熱により構造が不安定となる現象は見られなかった。

以上より、山岳工法により建設された道路トンネルで採用されている標準的な覆工コンクリートは、RABT 曲線に基づく高熱を受けた場合でも、構造安定上、直ちに問題が生じるような損傷が発生する可能性は低いことが明らかとなった。なお、本研究では厚さが 30cm 程度の標準的な道路トンネルの覆工コンクリートを対象とした要素実験および試験体を用いた試験によって基本的な特性を把握したものであるため、実際のトンネルがおかれている詳細な条件とは合致しない場合も有り得ることに注意を要する。

参考文献

- 1) 世界道路協会(PIARC)、国際トンネル協会(ITA)：雑誌Road, Fire safety in TUNNELS, 第324巻, 2004.
- 2) 半野久光, 田嶋仁志, 川田成彦, 谷上敦亨：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, pp. 1719-1724, 2002.
- 3) 深澤邦男, 黒田浩太郎, 長尾之彦, 有澤誠：トンネル用耐火材の性能に関する実験的研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第9巻, pp. 117-123, 2004.
- 4) 森田武：トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について, コンクリート工学, Vo.38, No.11, pp.61～64, 2000.
- 5) 荒井康夫：セメントの材料化学, 大日本図書, p.58, 1984.
- 6) コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, 2002.