

トンネル用耐火材の性能に関する実験的研究

Experimental research into performance of fire-resistance material for tunnel

深澤邦男・黒田浩太郎^{**}・長尾之彦^{***}・有澤 誠^{****}

Kunio Fukazawa, Kotaro Kuroda, Yukihiro Nagao and Makoto Arisawa

The establishment of disaster measures of the usage for the space in the underground becomes an important problem. However, the specification concerning fire-resistance in the underground space use is not a situation in which the current state is maintained. Moreover, the research on a basic content such as how to handle the demand performance of a fire-resistance structure is also not much. Therefore, authors have done a series of research on heatproof of a fire-resistance board, concrete, and the reinforced concrete, etc. as durability and the experiment up to now. This is to propose a necessary performance and specification on the fire-resistance materials which can be applied to a tunnel fire and also as a result of a series of research and experiment.

「key word」: fire-resistance material, tunnel fire-resistance standard, and explosion phenomenon

1. まえがき

道路トンネルにおいて、自動車火災時に発生する高熱は、最近の海外における火災事例等から、トンネルの主たる構造体である覆工コンクリートに重大な影響を与えることが知られてきた。さらに、2003年2月に韓国で発生した地下鉄火災は、あらためて地下空間利用における防災対策の早期確立を喚起することとなった。

このような背景から、わが国においても、トンネル耐火基準、耐火構造に関する議論が盛んに行われている状況にあるが、地下空間利用における耐火に関する仕様は、現状十分に整備されている状況になっていない。また、耐火構造に関する要求性能をどう取り扱うかなどの基礎的内容に関する研究も少ない。

そこで、筆者らは耐火板、コンクリート、鉄筋等の耐熱性、耐久性に関する一連の研究、実験をこれまで行ってきた。本報文では、一連の研究・実験の結果およびトンネル火災へ適用可能な耐火材に必要な性能、仕様を提言するものである。

「キーワード」耐火材、トンネル耐火基準、爆裂現象

* CPL研究会 代表

** 黒崎播磨株式会社

*** 正会員 新日鐵関東エスメント株式会社 営業部

**** 正会員 株式会社 近代設計 東京支社 技術二部

2. 火災による覆工への影響

2. 1 トンネル火災

道路トンネルにおいて、自動車火災時に発生する高熱は、これまでの海外、国内での火災発生時の想定、再現実験等より、1000℃以上になることが確認されている。こうしたトンネル火災が発生した場合、トンネルの主たる構造体である覆工コンクリートに重大な影響を与える。特に鉄筋コンクリートが土圧等外荷重を直接受けているシールドトンネル(中でも二次覆工省略している場合)、沈埋トンネルでは、この影響が大きく、トンネル本体が破壊する可能性が高くなることが指摘されている。

2. 2 コンクリートの耐火性能

一般にコンクリートは、耐火構造であるとの認識があるが、高温で加熱されたコンクリートの圧縮強度は、200℃以上の温度で直線的に低下し、500℃では4～6割程度に低下する(図-1)。加熱冷却後、コンクリート強度はある程度復元するが、RCセグメントのように高強度コンクリートではその復元性も小さい。また、上記のような非常に高い温度の火災にコンクリートがさらされた場合、コンクリートは強度低下とともに、爆裂現象と呼ばれるコンクリート表層部の剥離・飛散現象が生じる。

2. 3 コンクリートの爆裂現象

コンクリートが火災に曝されると表層が剥離・飛散して断面欠損が生じる。これを爆裂現象と称し、高強度コンクリートほど火災時に爆裂を生じ易いことが研究会で実施した実験でも確認されている。コンクリート部材の鉄筋が露出するような破壊的爆裂は、部材耐力を著しく損なうことになる(図-2)。コンクリートの耐火構造を検討する上で、火災時に爆裂を防止できることが極めて重要な課題である。

爆裂現象のメカニズムは、明確に解明されていないが、コンクリート中の水分が気化することによる水蒸気説、加熱表面のコンクリートが熱膨張する熱応力説などが考えられている。

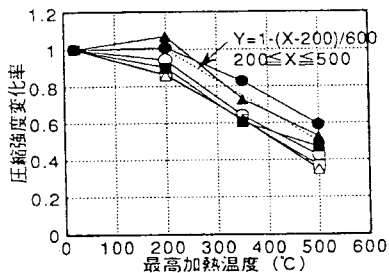


図-1 コンクリートの温度による強度低下

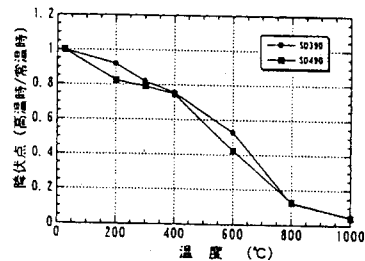


図-2 鉄筋の温度による強度低下

2. 4 火災事例と国内トンネルの耐火対策

これまで国内、海外で発生したトンネル火災事例では、そのほとんどがコンクリート躯体温度 1000℃以上(スイスのゴタール TN では 1200℃)になったと想定されている。その結果、ユーロトンネルでは、50cm 近いコンクリートの脱落が広範囲で確認されている。

また、トンネル火災による構造体の損傷により、長期間にわたる通行止めを伴う復旧工事(モンブラン TN では約 3 年間)、復旧費用(ユーロ TN460 億円)、通行止めによる物流停滞損失が発生する。

これまで国内で採用された耐火板を使用したトンネル耐火対策は、大阪港咲洲トンネル、東京港第二航路海底トンネルなどがあるが、セラミックあるいは珪酸カルシウム系のボードをアンカーなどで後付け施工したものである。海外の事例では、耐火材を吹付けた事例もある。また、国内で最初の道路シールド

トンネルである東京湾横断道路では、35cm 厚の二次覆工を施工しているが、これが防水と耐火を合わせた機能となっている。

3. 実験で基準とした耐火基準

高温度のトンネル火災に対する構造設計や安全管理の設定に際して、コンクリート躯体等を保護する耐火材の耐熱性能を照査するために、世界各国では、図-3 のような各種の「火災想定時間-温度曲線」が活用されている。国内でもこうした基準策定の必要性が広く認識されており、これまでの安全施設に係る基準に加え、耐火構造に関する基準策定の具体化に向けた検討が進められている。

本実験では、ドイツで採用されている RABT 曲線（最高温度 1,200℃、火災継続時間 60 分）を基本として行っている。一部の実験では、オランダ運輸公共事業省治水本局（RWS：最高温度 1,350℃）の曲線による耐熱性能の確認も行った。

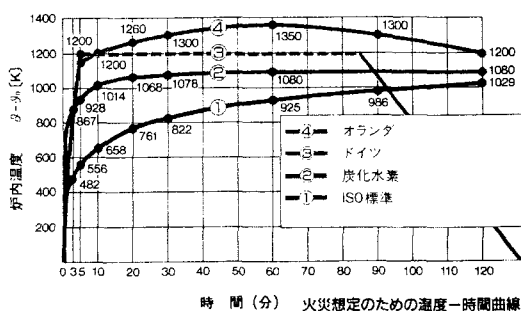


図-3 各種火災温度曲線例

4. 耐火板の耐熱実験

4. 1 トンネル耐火板に求められる基本物性と実験に使用する耐火板

トンネル構造体を高温度の火災から断熱保護するためには、以下の物性を有する耐火板が必要である。

- ・ 高温度においても熔融しないこと
- ・ 有毒ガス等が発生しないこと
- ・ 火災時の変形、膨張、収縮が小さく構造体への熱影響を軽減できる高い断熱性能を有すること

耐火板の耐熱実験を行うに先立ち、これまで建材用として使用されていた代表的な珪酸カルシウム板数種類とアルミナセメントと焼成骨材などの無機素材を主原料としたアルミナシリカ質のセラミック系耐火板（以下、CP 板と称す）を用いた耐火板表面を加熱する試験を実施した。試験は、電気炉を使用し、加熱速度 2℃/min、1,350℃で 2 時間維持した。その結果、珪酸カルシウムを素材とした耐火板は、1,000℃を超える著しい体積収縮や熔融現象が確認された。

これらの試験結果から、1,350℃においても著しい体積収縮が生じることがなかった CP 板を使用した耐熱実験を実施した。

4. 2 耐熱実験装置

耐熱実験装置は、下記に示す耐火試験炉（マルチ加熱炉）を用いて実施した（写真-1）。

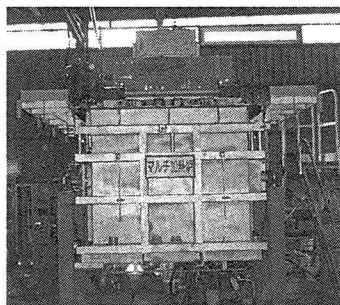


写真-1 マルチ加熱炉

マルチ加熱炉仕様	
1. 熱的性能	
試験温度	:RWS, RABT等
許容温度	:±20℃
最高使用温度	:1500℃
2. 寸法緒元	
試験体形状	:最大100×100cm
3. 熱間観察装置	
観察方式	:CCDカメラにより、常温から熱間における状況をモニターで連続観察

4. 3 耐火板を設置したコンクリート供試体による耐熱実験

今回の実験に用いたコンクリート供試体の配合を表-1に示す。この供試体の設計基準強度は 40N/mm^2 、形状は $1000 \times 1000 \times 200\text{mm}$ 、この供試体に $600 \times 600\text{mm}$ の CP 板をアンカーで固定した。CP 板の厚さは、 27.5mm である。耐熱試験は、トンネル火災が発生した場合、天井が最も高温になることから、上向き加熱で実施した。加熱時間温度曲線は RABT 曲線、火災継続時間 60 分と設定した。

以下、耐熱試験炉の概要図(図-4)、CP 板の取付構造(図-5)を示す。

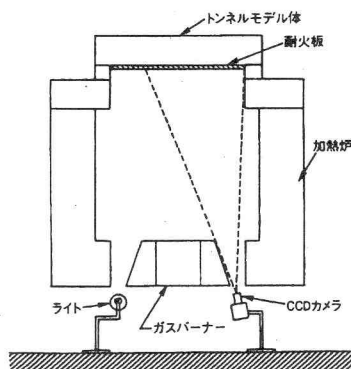


図-4 耐熱試験炉の概要図

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	混和剤
20	15	39	40.6	185	475	646	994	1.188

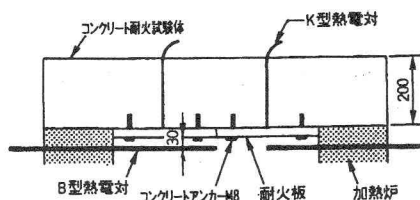


図-5 CP 板の取付構造図

4. 4 実験結果

実験中、モニターで耐火板の熱間挙動を観察した。結果、CP 板は、僅かな亀裂が認められるものの剥離等の損傷、変形等が全く発生しなかった。図-6 に実験中のコンクリート内部の温度推移を示すが、耐火板の要求性能として設定したコンクリート表面温度 350°C 以下を下回る 175°C という結果が得られた。

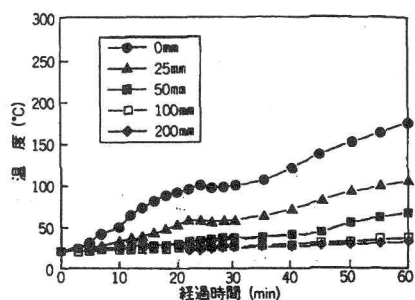


図-6 コンクリート内部の温度推移

5. コンクリートの耐熱性に関する実験

5. 1 実験概要

コンクリート爆裂現象の再現とコンクリート配合による耐熱性能の相違を確認する目的で、普通ポルトランドセメントで作成した供試体と高炉スラグ微粉末（4000）50%混入の供試体を用いた供試体による爆裂試験を実施した。この実験についても耐火板の耐熱実験同様、マルチ加熱炉にて一面加熱を実施し、爆裂状況を確認するとともに、双方の供試体について、損傷深さの測定を行った。

それぞれの供試体の配合、圧縮強度試験結果を表-2、表-3に示す。実験は、2つの供試体をマルチ加熱炉に並列に並べ、同時に加熱試験を行う方法で実施した。

表-2 供試体の配合

配合	スラグ 置換率 (%)	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						水和剤 S P
				水 W	セメント C	灰分 E s	細骨材 S	粗骨材 G		
TYPE I	0	35.5	44.0	142	400	—	829	1075		6.0
TYPE II	50	35.5	43.6	142	200	200	815	1075		4.4

表-3 圧縮強度試験結果

配 合	打込日	圧縮強度 (N/mm ²)		
		14日 ¹⁾	28日 ¹⁾	耐火試験時 ²⁾
TYPE I	9/11	57.1	66.3	69.8
(普通)	9/13	61.1	67.1	68.8
TYPE II	9/11	61.2	67.7	68.3
(スラグ 50)	9/13	59.2	65.0	69.8

5. 2 実験結果

実験結果を表-4、図-7、8に示す。この実験は無筋コンクリート供試体により行ったが、高熱を伴うトンネル火災では、コンクリートの爆裂により、鉄筋までのコンクリート破りが崩落し、構造体へ大きな損傷を与えることが推察される。また、コンクリートの爆裂に対しては、高炉スラグ使用が有効であることが確認できた。

表-4 コンクリートの爆裂状況

加熱温度 (°C)	TYPE I (普通ポルトランドセメント単味)	TYPE II (高炉スラグ50%置換)
500	・爆裂なし ・水染み：着火後45分で背面に発生 ・ひび割れ 加熱面：最大幅0.1mm (網目状) 側 面：最大幅0.1mm	・爆裂なし ・水染み：着火後55分で背面に発生 ・ひび割れ 加熱面：最大幅0.1mm (網目状) 側 面：最大幅0.08mm
800	・爆裂開始：着火後80秒 ・爆裂形態：厚さ5~10mmの小片が鱗状 (層状) に爆裂 ・爆裂終了：15~20分後、以後変化無し ・水染み：着火後20分で側面に発生 ・損傷深さ：最大34mm ・ひび割れ 加熱面：最大幅0.2mm (網目状) 側 面：最大幅0.2mm	・爆裂開始：着火後80秒 ・爆裂形態：厚さ5~10mmの小片が鱗状 (層状) に爆裂 ・爆裂終了：15~20分後、以後変化無し ・水染み：着火後25分で側面に発生 ・損傷深さ：最大22mm ・ひび割れ 加熱面：最大幅0.2mm (網目状) 側 面：最大幅0.2mm
1200	・爆裂開始：着火後70秒 ・爆裂形態：厚さ5~10mmの小片が鱗状 (層状) に爆裂 ・損傷深さ：30mm, 60mm, 90mm 5min, 10min, 14min ：最大115mm ・爆裂終了：15~20分後、以後変化無し ・水染み：着火後10分で側面に発生 ・ひび割れ 加熱面：骨材溶融し、不明 側 面：最大幅0.2mm	・爆裂開始：着火後70秒 ・爆裂形態：厚さ5~10mmの小片が鱗状 (層状) に爆裂 ・損傷深さ：30mm, 60mm, 90mm 5min, —, — ：最大42mm ・爆裂終了：15~20分後、以後変化無し ・水染み：着火後10分で側面に発生 ・ひび割れ 加熱面：骨材溶融し、不明 側 面：最大幅0.2mm

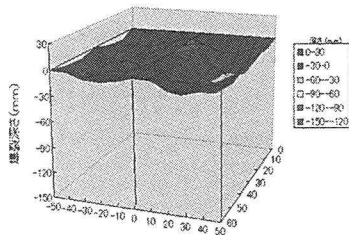


図-7 爆裂深さ測定結果 (800℃)

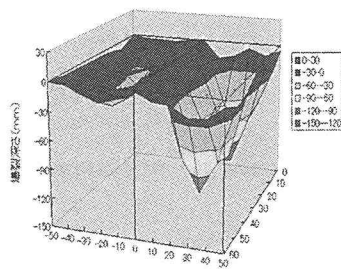


図-8 爆裂深さ測定結果 (1200℃)

6. 鉄筋の加熱（熱間）引張試験

トンネル構造体に耐火板がない場合には、高熱を伴う火災によってコンクリートが爆裂現象を起こし、鉄筋が直接高温にさらされるようになる。鋼構造協会等のこれまでのデータでは、鉄筋の温度が上昇するにつれて引張強度も低下し、600℃では常温下での強度の約40%になることが知られている。

この実験では、1200℃のトンネル火災を想定し、コンクリート爆裂後、鉄筋の温度が1000℃以上になる状況での引張強度の確認を行った。

6. 1 試験方法

試験は高温下で鉄筋の引張強度を測定するため、図-9に示すように炉へ鉄筋をセットし、所定の温度に達した時点でセンターホールジャッキに引張力を作用させる方法により行った。

試験に使用した鉄筋は、SD345である。

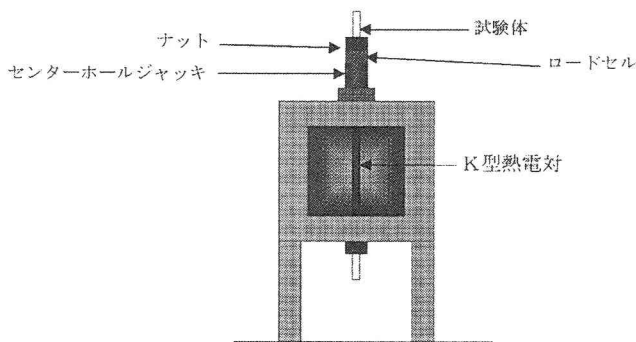
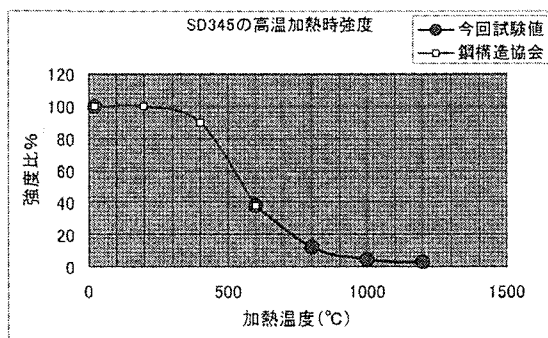


図-9 鉄筋引張試験方法

6. 2 試験結果

試験結果を図-9に示すが、600℃までは、これまでのデータと全く一致するものであった。今回の測定データから800℃では12%、1000℃では4.5%、1200℃では2.7%まで低下することが確認された。



図－10 鉄筋の加熱（熱間）引張試験

7. おわりに

トンネルを火災から保護することを目的とし、主たる構造体であるコンクリート、耐火板等に関連する各種基礎的実験を実施してきた。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (a) 耐火板の材質は、熱的安定性（有害な亀裂、変形、収縮が生じないこと）が重要であるが、これまで建材用として使用されていた珪酸カルシウムを素材とした耐火板が化学・鉱物組成上、高温時に熱収縮や溶融が生じやすいと言えるのに対し、今回実験で使用したセラミック系耐火板は、高温火災においても熱的安定性に優れていることが確認できた。
- (b) セラミック系耐火板 27.5mm を使用した耐熱実験（RABT 曲線－60 分加熱後）では、コンクリート表面最高温度が 175℃ 程度であり、トンネル構造体を火災から保護する機能を十分有することが確認できた（RWS による実験では表面温度 328℃）。
- (c) コンクリートの爆裂実験から、加熱温度 500℃ では爆裂が認められていなかったが、加熱温度 800℃、1200℃ では爆裂現象が確認されている。爆裂現象はコンクリート性状や加熱条件（例えば昇温速度など）、加熱時亀裂の進行等にも左右されると言われており、実験結果だけから結論的なことは言えないが、高熱を伴うトンネル火災により、コンクリートが爆裂を起こすと、鉄筋コンクリートの場合、被り部分が崩落して構造体強度に著しい損傷を及ぼすことは、実験結果から容易に推察できる。
- (d) コンクリートの爆裂実験では高炉スラグ微粉末添加が爆裂を軽減できたことから、コンクリートの爆裂を軽減できる有効な対策になると推察される。

8. 参考文献

- 1) 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，2002.6
- 2) 松尾幸久・黒田浩太郎・安藤秀征・豊福俊泰：道路トンネル用耐火板に関する研究，トンネルと地下，2001.5