

# 高温加熱を受けたコンクリートの材料特性 および新たな爆裂防止策の検討

学生氏名 羽原 和也  
指導教員 栗原 哲彦

モルタルの加熱による力学特性の変化を把握するため、高強度コンクリート、繊維混入高強度モルタルに対して、実際に高温加熱を与え、それによる劣化性状及び劣化メカニズムを検討した。また、RC構造物において、受熱が及ぼす鉄筋の力学特性への影響を確認するため、簡易な高温加熱システムを用いて火災が起きた際の鉄筋コンクリートの耐火性能を実験的に検討した。またこれらの結果から、新たな耐火工を提案するとともに効果の検討を行った。

その結果、次のことが確認された。①爆裂防止策として繊維を混入したモルタルも、500℃以上の加熱を受けると、本来必要とされる力学的性能を有しておらず、引き続き構造物中で使用するには適していない。300度以下の加熱を2回加熱を受けたモルタルは、加熱後養生により強度が回復するため、必要とされる強度を有している。②本研究室で作製した加熱システムでは、はり部材の耐力低下は起きなかった。③穴を開けた金属板設置は、爆裂を防止する効果がある。

**Key Words :** *organic fiber, strength recovery, fire curve, fire spalling, metal plate*

## 1. はじめに

コンクリートは、一般には不燃材・耐火材と認識され、広く土木/建築構造物に利用されてきた。しかし、近年の車両の大型化・交通量の増大・運搬物の多様化により、例えば交通事故により火災が発生すると、その火災は上記要因から大規模なものになる可能性が高まっている。これに加え、高強度コンクリートの実用化により、大規模火災時にはコンクリートの爆裂(加熱による剥離・飛散現象)や大幅な強度低下を含む大きな被害が出ることが容易に推察できる、このため、国内外においてコンクリートの耐火性能に関する研究が盛んに行われるようになった。

国内では、2000年には日本コンクリート工学協会に「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会」が、2002年に土木学会に「コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会」が相次いで設置され、コンクリートの耐火性能に関する議論が展開された<sup>1)</sup>。海外においては、トンネル火災を想定した、実トンネル火災実験 (EUREKA 火災実験<sup>3)</sup> およびメモリアルトンネル火災実験<sup>4)</sup> が実施され、トンネル火災時におけるコンクリートの耐火性が実験的に検討されている。

しかしながらコンクリート部材の耐火性能には材料、強度、寸法、外力、水分などの因子が複雑に関与してお

り、まだ十分解明されていない部分も多い。また、高強度コンクリート、繊維混入コンクリートなど普通コンクリートと異なる高温下での性状を持つ材料に関する知見も、まだ少ない。

そこで、本研究においては、高強度モルタル、繊維混入高強度モルタルに対して、実際に高温加熱を与え、それによる劣化性状及び劣化メカニズムを解明することを目的とした。また、従来の土木構造物では高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造物が多く実用化されている。コンクリートの耐火性能を検討する上でRC部材の加熱による影響を考慮することは必要不可欠であるといえる。そこで本研究では過去の研究でその有効性を確認されたコンクリートに急激な温度勾配を与えられる簡易な加熱システム<sup>5)</sup>を一部の実験で用いて、火災が起きた際の鉄筋コンクリートの耐火性能を実験的に検討することを目的とした。またこれらの結果から、新たな爆裂防止策を提案し、その効果の検討を行うことを目的とした。

## 2. 高温加熱された有機繊維混入高強度モルタルの力学特性の変化

爆裂に対して効果的であるとされる<sup>6)</sup>有機系短繊維を混入したコンクリートの火災後の部材性能を把握するこ

とを目的とし、高強度モルタルの高温加熱冷却後の材料特性について実験的に検討した。

(1) 実験概要

a) 供試体

実験は高強度モルタルと、比較のため普通強度モルタルに対して行った。表-1に高強度モルタルの示方配合を示す。セメントは早強セメントを使用し、さらに高強度を実現するため、シリカフュームを混入した。モルタルに混入する有機繊維は、PVA(ポリビニールアルコール)繊維と、PP(ポリプロピレン)繊維の2種類を用いた。PVA繊維は繊維径0.04mm・繊維長12mm・密度1.30g/cm<sup>3</sup>、PP繊維は繊維厚0.037mm・繊維幅0.11mm・繊維長12mm・密度0.91g/cm<sup>3</sup>のものを使用した。混入量は、爆裂防止に十分な性能を示すとされる容積比で0.2%とした<sup>7)</sup>。また、繊維を混入していないモルタルとの比較を行うため、繊維無混入のモルタルを用いた供試体も作製した。したがって、繊維無混入・PVA繊維混入・PP繊維無混入の3ケースの高強度モルタルおよび、普通強度モルタルを用いて実験を行った。

加熱に使用する電気炉の大きさ(後述)から供試体は、φ50×100mmの円柱供試体および、40×40×160(mm)の角柱供試体とした。供試体本数は円柱・角柱共に3本とした。

供試体は打設後28日間の水中養生とし、養生後ただちに加熱実験を行った。

b) 加熱実験

供試体の加熱は、プログラムによる温度制御機能を有する箱型電気炉(炉内寸法：幅200×高さ200×奥行250mm)を用いた。

加熱スケジュールは、すべてのシリーズにおいて、昇温速度を1°C/minとし、目標温度を500°C・1000°Cとした。目標温度到達後は、試験体内部温度の均一化を図るため、1時間停滞させた後、常温まで自然冷却させた。なお、爆裂による衝撃で炉が損傷するのを防ぐため金網で作製したカゴ内に供試体を入れ、電気炉内に設置した。

c) 荷重試験

加熱後の供試体を28日間気中養生した後、加熱供試体と養生条件を一致させた非加熱供試体と加熱供試体に対して、圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った。載

荷時には荷重-変位曲線を計測し、最大荷重および静弾性係数を読み取った。

(2) 実験結果

a) 加熱実験

加熱実験で計測された温度-時間曲線を図-1に示す。それぞれのケースに対して、1°C/minの昇温勾配を再現

表-1 示方配合

W/B(%) (シリーズ名)	示方配合 (kg/m <sup>3</sup> )								
	W	C	SF	S	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	Ad <sub>1</sub>	Ad <sub>2</sub>	Ad <sub>3</sub>
20(C-20)	162	804	147	1156	-	-	33.3	-	-
20(PVA-20)	162	804	147	1156	2.60	-	33.3	-	-
20(PP-20)	162	804	147	1156	-	1.82	33.3	-	-
60(C-60)	282	471	-	1356	-	-	-	1.17	0.05
60(PVA-60)	282	471	-	1356	2.60	-	-	1.17	0.05
60(PP-60)	282	471	-	1356	-	1.82	-	1.17	0.05

W:練混ぜ水 C:早強セメント SF:シリカフューム

S:細骨材 F<sub>1</sub>:PVA繊維 F<sub>2</sub>:PP繊維

Ad<sub>1</sub>:高性能 AE減水剤 Ad<sub>2</sub>:AE減水剤 Ad<sub>3</sub>:AE助剤

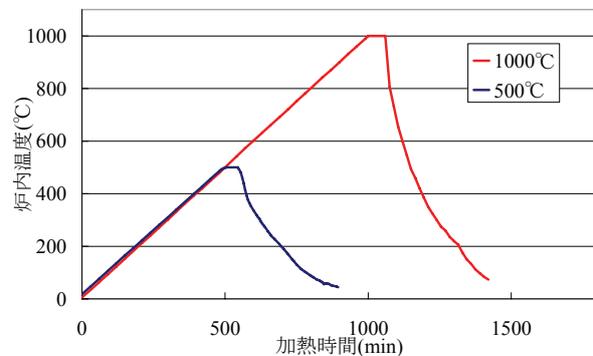


図-1 温度-加熱時間曲線



写真-1 PP-20 1000°C加熱後供試体

表-2 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果 (平均値)

加熱温度 (°C)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )			圧縮強度残存率(%)			静弾性係数残存率(%)		
	C-20	PVA-20	PP-20	C-20	PVA-20	PP-20	C-20	PVA-20	PP-20	C-20	PVA-20	PP-20
non-heated	116.7	99.2	115.0	50.8	34.6	36.4	/	/	/	/	/	/
500°C	56.4	61.4	68.5	-	8.61	8.34	48.3	61.9	59.5	-	24.9	22.9
1000°C	18.4	14.3	15.1	2.94	2.72	2.68	15.7	14.4	13.2	5.78	7.84	7.35
加熱温度 (°C)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )			圧縮強度残存率(%)			静弾性係数残存率(%)		
	C-60	PVA-60	PP-60	C-60	PVA-60	PP-60	C-60	PVA-60	PP-60	C-60	PVA-60	PP-60
non-heated	32.5	31.8	51.2	26.9	15.0	21.2	/	/	/	/	/	/
500°C	18.3	14.1	16.5	-	7.57	5.70	56.5	44.3	32.3	-	24.9	26.9
1000°C	3.10	2.86	2.29	-	0.37	0.36	9.56	8.98	4.48	-	7.84	1.70

することができ、供試体が目標とした高温履歴を受けたと考えられる。

加熱された供試体は、すべての供試体において爆裂は発生しなかった。供試体外観は、500°C加熱ではすべてのケースで亀甲状の微細なひび割れが観察できた。これは、加熱を受けたセメントペーストと骨材とが異なった膨張収縮挙動をすることによって発生したひび割れと考えられる。供試体表面の色、形状に変化は見られなかった。1000°C加熱では、500°C加熱同様に亀甲状の微細なひび割れが確認できた。また、供試体表面の色は表面全体が赤褐色に変色していた。加熱後の供試体形状に大きな変化は見られなかった。繊維混入供試体と繊維無混入供試体の外観を比較してみると、ほぼ違いは見られなかった。

### b) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験の結果を表-2に、加熱温度と圧縮強度の関係を図-2に、加熱温度と静弾性係数の関係を図-3に、圧縮強度と静弾性係数の加熱による残存率をそれぞれ図-4、図-5に示す。

図-2にみられるように、全てのシリーズにおいて加熱温度に比例して直線的に強度低下を示した。また、有機繊維混入供試体と無混入供試体では、非加熱・加熱両供試体共にほぼ同程度の強度を示した。圧縮強度の残存率は、図-4より温度に対してほぼ直線的に低下している。各シリーズを比較すると、500°C加熱の無補強高強度モルタルは、繊維補強高強度モルタルと比べて残存率が低

くなっている。これは、加熱による膨張収縮挙動によって、モルタル組織が緩み発生した内部亀裂により強度低下を引き起こしたものと考えられる。繊維補強高強度モルタルでは、加熱による有機繊維の融解により供試体内部に空隙が生まれ、内部応力が緩和されたため、強度低下を低減することが出来たと考えられる。これに対し普通強度モルタルでは、無補強モルタルよりも繊維補強モルタルの圧縮強度残存率が低くなった。これは、高強度モルタルと比較して、普通強度モルタルの組織が緻密ではないため、有機繊維の融解により空隙過多となってしまう、結果強度低下が大きくなったと考えられる。また、一般的に強度レベルが高くなるにつれて圧縮強度残存率が普通強度モルタルと比べて低くなる傾向が確認されているが<sup>8)</sup>、本実験の繊維補強を施したモルタルでは逆の傾向を示した。1000°C加熱での圧縮強度残存率は、高強度モルタルで15%程度、普通強度で10%以下まで低下した。無補強、繊維補強での違いは見られなかった。

図-3、図-5から、非加熱の供試体で、有機繊維を混入したモルタルの静弾性係数は無補強モルタルのそれより低い値を示した。1000°C加熱では、普通強度モルタルの静弾性係数はほぼゼロとなり、高強度モルタルも非常に低い値を示した。残存率は圧縮強度よりも、静弾性係数の低下の方が著しいという結果を示した。モルタルの水結合材比による違いは見られなかった。

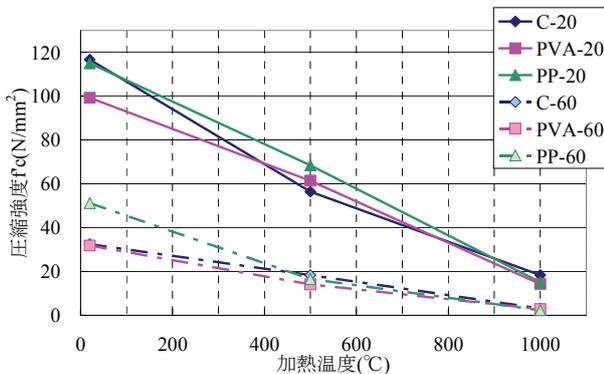


図-2 加熱温度と圧縮強度

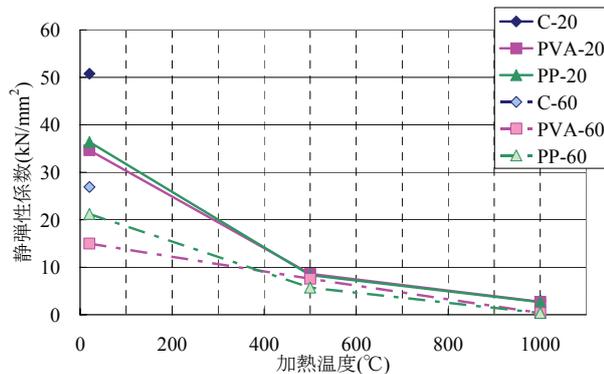


図-3 加熱温度と静弾性係数

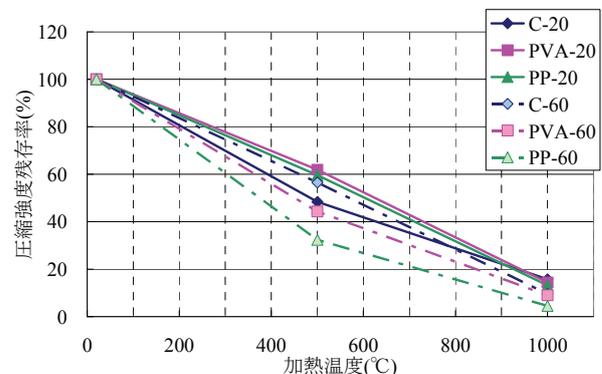


図-4 圧縮強度残存率と加熱温度

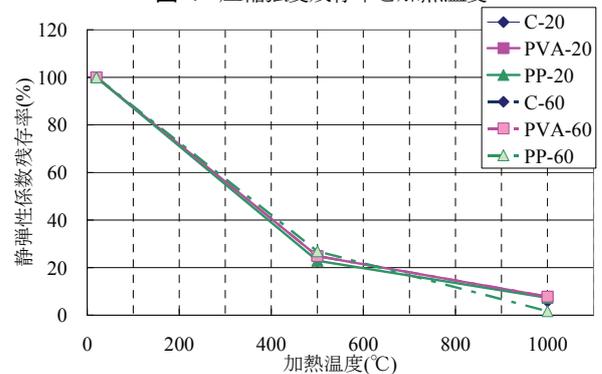


図-5 静弾性係数残存率と加熱温度

### 3. 繰返し加熱を受けたモルタルの材料特性変化

コンクリート構造物が300℃以上の加熱を受けた場合、補修として被りコンクリートをはつり落とし、現場打ちコンクリートで被覆するとしているが、300℃未満の加熱であった場合は表面の補修のみで十分とされている。しかし、交通事故は同じ場所で繰返し起こる可能性を有している。つまり、300℃未満の加熱を繰返し受ける可能性を有している。それにもかかわらず、繰返し加熱によるコンクリートの材料劣化に関するデータはほとんど存在しない。ここに着目し、繰返し加熱を受けたコンクリートの耐火性能を論じる必要があると考えた。そこで一度加熱を行った供試体に対し再度加熱を行い、その後の残存強度及び強度回復について、実験的に検討した。

#### (1) 実験概要

##### a) 供試体

実験は高強度モルタルと、比較のため普通強度モルタルに対して行った。表-3にモルタルの示方配合を示す。セメントは早強セメントを使用し、さらに高強度を実現するため、シリカフュームを混入した。モルタルに混入する有機繊維は、PP(ポリプロピレン)繊維を用いた。加熱に使用する電気炉の大きさから、供試体は、φ50×100mmの円柱供試体および、40×40×160(mm)の角柱供試体とした。供試体本数は円柱・角柱共に3本とした。

##### b) 加熱実験

供試体の加熱は、2章と同様にプログラムによる温度制御機能を有する箱型電気炉(炉内寸法：幅200×高さ200×奥行250mm)を用いた。

加熱スケジュールは、すべてのシリーズにおいて、昇温速度を1℃/minとし、目標温度を200℃・300℃とした。加熱温度到達後は、炉内温度が常温となるまで自然冷却させた。本実験では、加熱を1回行った場合と、2回行った場合の2ケースの実験を行った。加熱を1回行う供試体では、供試体を28日間の水中養生をした後、養生後表面を乾燥させ加熱実験を行った。加熱を2回行う供試体では、供試体を28日間の水中養生した後、表面を乾燥させた後に加熱実験を行った。加熱後、28日間気中養生を行った後、2回目の加熱実験を行った。

##### c) 荷重試験

加熱実験を行った供試体と、養生材齢を一致させた非加熱供試体に対し、3・7・28・56・91日間気中養生した後、圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った。

#### (2) 実験結果

##### a) 加熱実験

計測された温度-加熱時間曲線の一例を図-6に示す。

表-3 示方配合

W/B(%) (シリーズ名)	示方配合(kg/m <sup>3</sup> )							
	W	C	SF	S	F	Ad <sub>1</sub>	Ad <sub>2</sub>	Ad <sub>3</sub>
20(PP-20)	162	804	147	1156	1.82	33.3	-	-
60(PP-60)	282	471	-	1356	1.82	-	1.17	0.05

W:練混ぜ水 C:早強セメント SF:シリカフューム  
S:細骨材 F<sub>1</sub>:PVA 繊維 F<sub>2</sub>:PP 繊維  
Ad<sub>1</sub>:高性能 AE 減水剤 Ad<sub>2</sub>:AE 減水剤 Ad<sub>3</sub>:AE 助剤

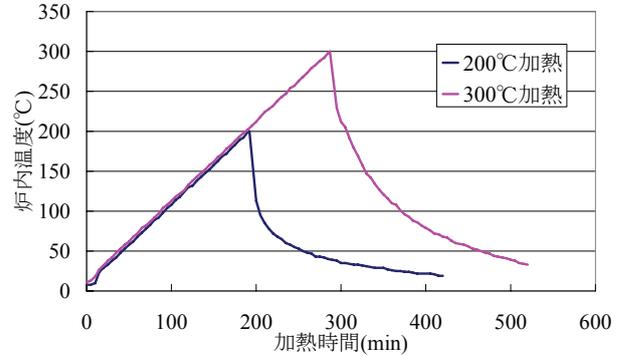


図-6 温度-加熱時間曲線

多少の誤差は生じたが、すべての供試体において、ほぼ同様な1℃/minの昇温勾配の火災曲線を計測できた。

加熱された供試体は、200℃加熱・300℃加熱のいずれにおいても形状に大きな変化や、表面のひび割れも見られなかった。しかし、300℃加熱された供試体の表面はわずかに淡黄色に変化していた。1回加熱と2回加熱による外観の違いおよび繊維混入による違いは、300℃以下の加熱では見られなかった。

##### b) 圧縮強度および静弾性係数

加熱後の養生材齢と圧縮強度残存率の関係を図-7に、加熱後の養生材齢と静弾性係数残存率の関係を図-8に示す。なお、図中の残存率は、加熱を受けた供試体と材齢を一致させた非加熱供試体との比である。

200℃、300℃の加熱を受けた供試体は共に強度が低下した。図-7からと高強度モルタルに対する200℃の加熱では、加熱後の養生材齢が56日までは強度残存率が緩やかに低下したが、以降は回復傾向が見られ、91日になると9割程度まで回復した。2回加熱では、56日以降は1回加熱と同様の挙動を示したが、加熱直後からの低下が1回加熱より緩やかになった。300℃の加熱では、1回加熱においては、200℃の加熱と同様に、加熱後養生材齢56日までは緩やかに低下し、91日になると9割程度まで回復した。2回加熱では養生材齢28日で最も下がり、8割程度となっているが、91日になるとほぼ元の強度まで回復している。

図-8から普通強度モルタルに対する200℃の加熱では、加熱後養生材齢3日で8割近くまで残存圧縮強度が低下した。その後、緩やかに低下し、養生材齢56日以降から緩やかな回復傾向にあった。2回加熱では、養生材齢3日で

は1回加熱をわずかに下回り、養生材齢28日では7割程度まで低下した。しかしそれ以降は回復傾向が見られ、養生材齢56日以降では1回加熱とはほぼ同じ圧縮強度残存率となった。300℃の加熱では、1回加熱、2回加熱共に、200℃加熱と同様な挙動を示した。200℃加熱を2回受けるより、300℃加熱を2回受ける方が養生初期の低下率が大きくなる傾向が見られた。

強度回復が起こる要因としては、供試体内部に含まれる未水和セメントが反応を起こすことにより、強度が回復すると考えられる。しかし、コンクリート内部の余剰水は120℃程度で蒸発してしまう<sup>1)</sup>ため、本実験では、水和反応を起こすための水分は空気中の水分であると考えられる。よって強度回復は緩やかなものになったと考えられる。

静弾性係数に着目すると、高強度モルタルでは2回加熱受けても回復傾向をしめした。しかし、普通強度モルタルでは2回加熱を受けると、養生材齢91日でも回復傾向は示さず、静弾性係数は低下し続け、300℃加熱では5割を下回った。

#### 4. 高温加熱を受けたRCはりの破壊性状

爆裂防止に効果がある<sup>9)</sup>とされる有機系短繊維を混入したRCはりの加熱実験を行い、鉄筋の受熱温度に着目しながら加熱後のRCはりの破壊性状を検討した。

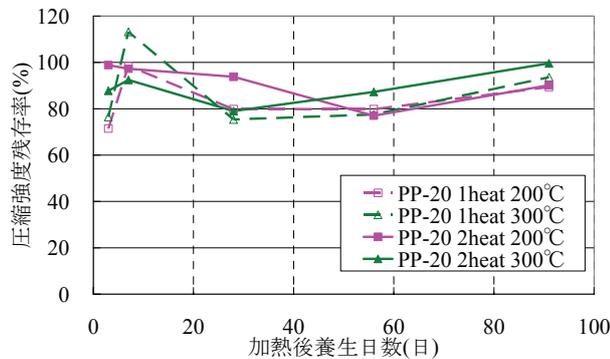


図-7 加熱後の養生材齢と圧縮強度残存率(PP-20)

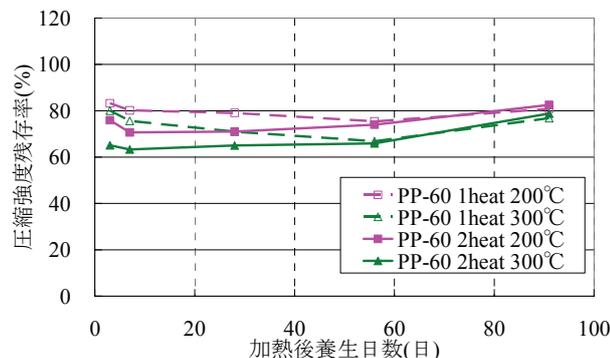


図-8 加熱後養生材齢と圧縮強度残存率(PP-60)

#### (1) 実験概要

##### a) 供試体

表-4および5に示すコンクリートにより幅100×高さ100×長さ1200 (mm)の曲げ破壊型RCはりを作製した(図-11参照)。有機繊維混入率は0.2vol%とした。鉄筋の受熱温度を測定するため、RCはり中心付近の鉄筋近傍にK型熱電対を設置した。設置位置を図-12に示す。また、内部温度分布を測定するため、最も受熱温度が高くなる箇所を中心に、長手方向に6断面、1断面につき高さ方向に2点(限りなく供試体下面に近い位置、下面より20mm上方の位置)の計12点にK型熱電対を埋め込んだ。

なお、供試体は2週間水中養生とし、養生後ただちに加熱実験を行った。

##### b) 加熱実験

本実験では本研究室で作製した模擬トンネルによる簡易な高温加熱システム<sup>9)</sup>を用いてRCはりへの加熱試験を行った。このシステムは模擬トンネル天井部をRCはりとする構造で、トンネル内で灯油を燃焼させることでRCはりを加熱することができる。火皿およびトンネル内温度計測用シース熱電対を図-13に示す位置に設置した。各シリーズに対して、非加熱(0hr)と加熱時間を3hrとした計2ケース設置し、1ケース2体ずつ実験を行った。加熱終了後は常温まで自然冷却させ、目視によりひび割れの確認を行った。

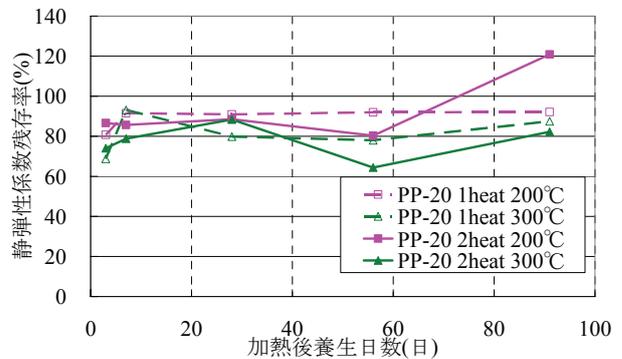


図-9 加熱後の養生材齢と静弾性係数残存率(PP-20)

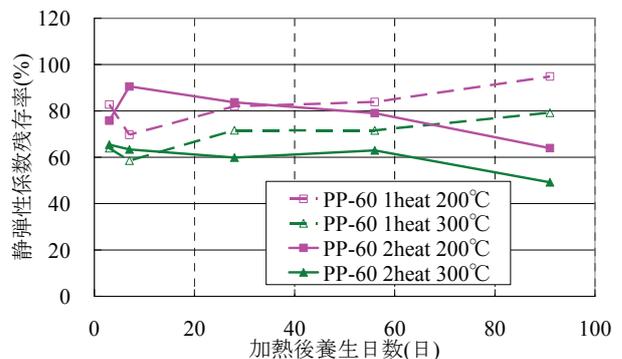


図-10 加熱後の養生材齢と静弾性係数残存率(PP-60)

**c) 載荷試験**

加熱試験より30日後に、RCはりの2点曲げ載荷試験(載荷スパン700mm, 純曲げスパン100mm)を行い、荷重-変位曲線を計測した。また載荷後はひび割れの確認を行った。

**(2) 実験結果**

**a) 温度-時間曲線と内部温度分布および鉄筋の受熱温度**

実験は各シリーズ供試体2体に対して行ったが、ほぼ同様の結果が得られたため、ここではうち1体の結果を示す。各シリーズを高温加熱した際の温度-時間曲線を図-14に、加熱時の内部温度分布を図-15および図-16に、加熱終了時の鉄筋受熱温度分布を図-17に示す。なお、内部温度分布は熱電対が、熱による不具合・焼失のため、計測できていない点がある。図-14より、両シリーズに対して同様の初期勾配の高温加熱を得ることができた。C-20ではトンネル内空部の高温保持に乱れが生じた。また図-15および図-16より、両シリーズの20mm上方地点における内部温度分布を比較すると、C-20の温度が高くなっている。これらは、C-20でのみ爆裂が発生し(後述)、断面欠損が生じ、これにより断面形状が変化したためと考えられる。また、両シリーズの温度上昇を、爆裂が発生していない加熱開始から10分までで比較した。20mm上方d2地点において、繊維無混入コンクリートでは5分で100°C程度、10分で160°C程度であった。これに対し繊維混入コンクリートでは、5分で70°C程度、10分で110°C程度であった。これは、繊維が融解する際に熱を奪った、もしくは繊維を混入することで供試体の見かけの熱伝導率が変化したなどの理由から、内部温度の上昇速度が抑えられ、内部温度が低くなったと考えられる。しかし、今回の計測では、炎のゆらぎ等の影響も多少あると考えられる。

加熱終了時点での鉄筋受熱温度は、C-20で約580°C、PP-20で約400°Cとなった。C-20がPP-20と比較して受熱温度が高くなった。これも、C-20でのみ爆裂が生じ、断面形状が変化したため、鉄筋位置に熱が伝わりやすくなったためと考えられる。一般に鉄筋600°C以下の受熱なら材料特性の変化はないと言われている<sup>10)</sup>。本実験では、鉄筋の受熱温度が600°Cを超えることがなかったため、鉄筋の性能低下はないものと考えられる。

**b) 爆裂とひび割れ性状**

高温加熱により、C-20のみ爆裂が発生した。図-19、写真-2および3に加熱による加熱表面のひび割れ性状を示す。加熱開始10分ほど(トンネル内温度735°C)で大きな破裂音が発生した。その後も加熱を継続すると、破裂音は断続的に発生した。加熱開始30分ほどで破裂音は終息し、その後の継続加熱で破裂音が発生することはなかつ

表-4 示方配合

W/B(%) (シリーズ名)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	SF	S	G	F	Ad
C-20	108	533	97.6	767	871	-	21.8
PP-20	108	533	97.6	767	871	1.82	21.8

W:練混ぜ水 C:早強セメント SF:シリカフェューム  
S:細骨材 F:PP 繊維 Ad:高性能 AE 減水剤

表-5 コンクリート圧縮強度および静弾性係数

シリーズ名		圧縮強度	静弾性係数	繊維混入率	含水率
		(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(vol%)	(%)
C-20	(i)	87.9	39.8	0	4.9
	(ii)	110	42.6		
PP-20	(i)	85.9	40.7	0.2	4.7
	(ii)	85.9	41.3		

(i)加熱実験時 (ii)載荷試験時

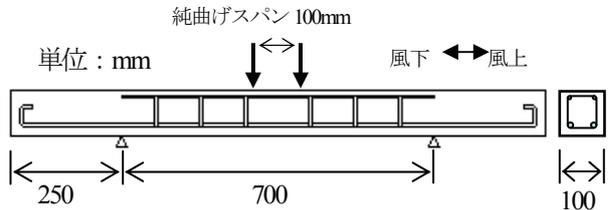


図-11 鉄筋配筋図

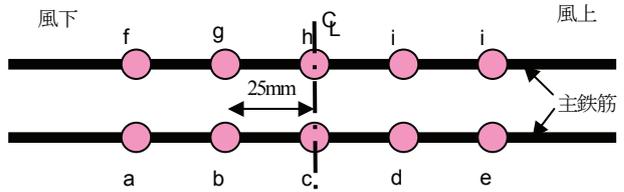


図-12 鉄筋近傍熱電対設置位置

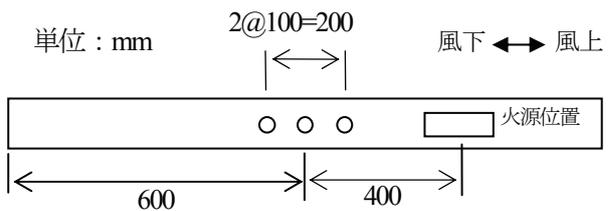


図-13 シース熱電対設置位置

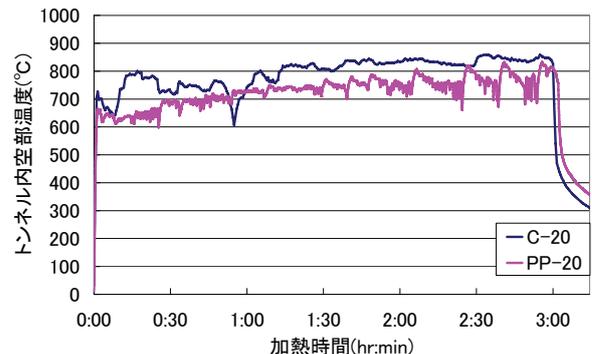


図-14 温度-時間曲線

た。爆裂深さは最大20mm程度(かぶり厚程度)で、鉄筋が一部露出した。有機繊維を混入したPP-20供試体では破壊音は発生しなかった。加熱中の外観観察では、供試体側面中央および、スターラップ位置に垂直ひび割れを確認するに止まった。このひび割れは、急激な加熱による熱応力が原因であると考えられる。C-20では爆裂により欠損部位があったが、これ以外のひび割れは少なかった。PP-20では目立った剥離・剥落は確認されず、炎が当たったと思われる箇所全体に微細なひび割れが確認できた。中心位置では加熱表面が淡黄色に変色していた。

### c) 荷重-変位曲線

図-18に載荷試験により得られた荷重-変位曲線を示す。いずれの供試体も鉄筋降伏後は同様の挙動を示した。最大荷重も大きな差は認められなかった。これは前述したように、加熱による鉄筋の材料特性の変化がなかったためと考えられる。また、C-20に関しては、爆裂による断面欠損があったものの、最大爆裂深さがかぶりまでであったため、耐力に影響がなかったと考えられる。

## 5. 規則的に穴を開けた金属板設置によるコンクリートの爆裂防止策の検討

### (1) 実験概要

#### a) 供試体

表-6および7に示すコンクリートにより幅100×高さ100×長さ1200(mm)のはり型供試体を作製した。打設の際に

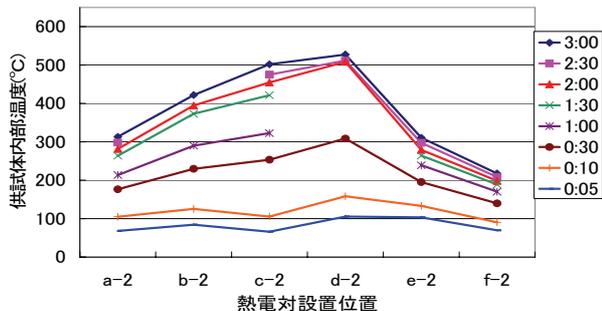


図-15 供試体内部温度分布  
C-20 下面より20mm上方

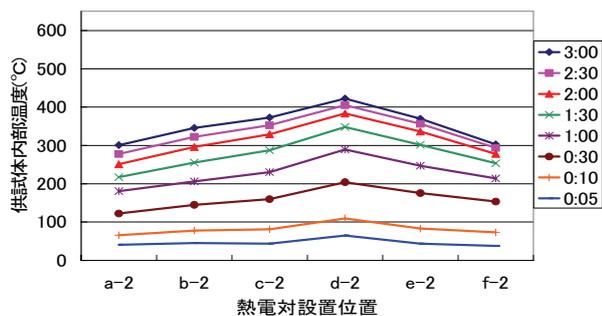


図-16 供試体内部温度分布  
PP-20 下面より20mm上方

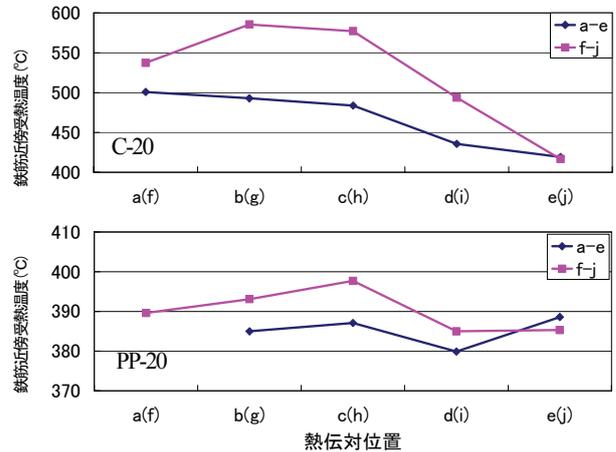


図-17 鉄筋近傍の受熱温度

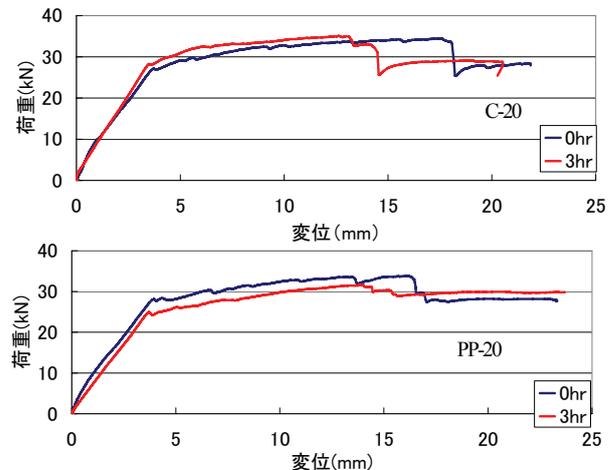


図-18 荷重-変位曲線



図-19 加熱によるひび割れ



写真-2 加熱表面 C-20



写真-3 加熱表面 PP-20

は、金属板を設置するため供試体にナットを埋め込んだ。また、内部温度分布を測定するため、最も受熱温度が高くなる箇所を中心に、長手方向に6断面、1断面につき高さ方向に2点(限りなく供試体下面に近い位置、下面より20mm上方の位置)の計12点にK型熱電対を埋め込んだ(図-2参照)。

供試体に設置する金属板は、厚さ2.2mmのSS400とし、寸法はトンネル形状から幅60mm×長さ1200mmとした。金属板は、φ3mmの穴を千鳥に開けた金属板、φ17mmの穴を千鳥に開けた金属板の2種類を用いた(写真-4および5参照)。

なお、供試体は2週間水中養生とし、養生後ただちに金属板を設置し、加熱実験を行った。

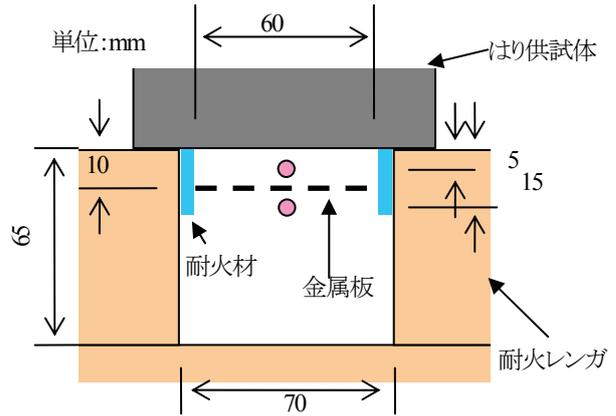


図-20 シース熱電対設置位置(トンネル断面)

表-6 示方配合

W/(C+SF) (%)	示方配合 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C	SF	S	G	Ad
20	108	533	97.6	767	871	21.8

W:練混ぜ水 C:早強セメント SF:シリカフューム  
S:細骨材 Ad:高性能 AE 減水剤

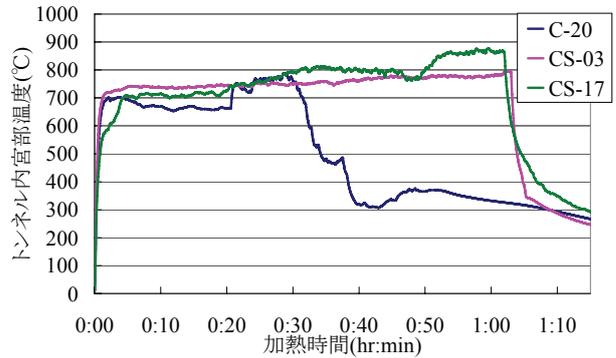


図-21 温度-時間曲線

表-7 強度試験結果および含水率

シリーズ名	金属板	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
C-20	金属板ナシ	93.5	42.0	3.26
CS-03	φ3mm	95.8	41.6	3.34
CS-17	φ17mm	103.5	42.1	3.58



写真-4 金属板 φ3mm

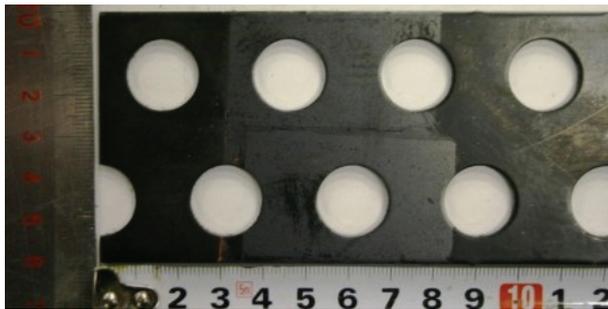


写真-5 金属板 φ17mm

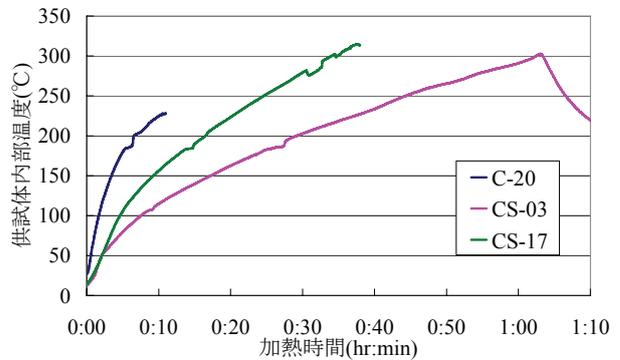


図-22 供試体内部温度最高点における内部温度-時間曲線

表-8 爆裂性状

シリーズ名	爆裂の有無	爆裂発生時間 (min)	最大爆裂深さ (mm)
C-20	○	10	100(破断)
CS-03	×	-	-
CS-17	○	37	35



図-23 加熱によるひび割れ

## b) 加熱実験

本実験では、4章で用いた高温加熱システム<sup>5)</sup>を用いて金属板を配置したはり供試体への加熱試験を行った。供試体に金属板を設置した状態で加熱を行うため、トンネル内空部温度を計測するシース熱電対の高さ方向の位置を変更した。変更後の、K型シース熱電対設置位置を図-20に示す。供試体への加熱は、各シリーズに対して1hr加熱を行い、加熱終了後は常温まで自然冷却させ、目視によりひび割れの確認を行った。

### (2) 実験結果

#### a) 火災曲線および内部温度分布の測定

実験は各シリーズ供試体2体に対して行ったが、ほぼ同様の結果が得られたため、ここではうち1体の結果を示す。各シリーズを高温加熱した際の温度-時間曲線を図-21に、加熱時の供試体内部最高温度点における温度-時間曲線を図-22に示す。本実験では各供試体に多少のばらつきはみられるものの、全ての供試体においてほぼ同じ初期勾配が得られた。加熱開始よりおよそ5分で700°C程度まで上昇している。その後も高温加熱を維持することができ、加熱終了時にはトンネル内空部温度は800~900°C程度まで上昇している。また、C-20では爆裂現象が発生した。爆裂の影響からトンネル内空部の高温保持に乱れが生じた。

金属板を設置したシリーズでは、加熱開始直後の温度上昇が抑えられた。これは、金属板を設置したことにより、炎が供試体に直接あたらず、加熱を受けた金属板からの放射熱により、供試体が加熱されたためであると考えられる。しかし、CS-17では、昇温勾配を緩やかにすることが出来たが、穴が大きかったため、コンクリートが直接炎に曝され、結果爆裂してしまった。

#### b) 爆裂とひび割れ性状

各供試体の爆裂性状を表-8に、各供試体の加熱後の加熱表面を写真-6, 7, 8に示す。高温加熱により、C-20では爆裂が発生した。CS-03では破裂音は発生しなかった。CS-17では、加熱開始37分程で破裂音が発生した。しかし、C-20と比較すると、破裂音の頻度は少なくなった。加熱による供試体表面のひび割れ性状を図-23に示す。C-20では、爆裂深さは100mm(破断)となった。加熱後の目視調査では爆裂箇所の風下側に微細なひび割れが見られた。CS-03では、供試体表面にひび割れは見られず、表面が淡黄色に変色していた。金属板は、加熱による変形は見られなかった。CS-17では、最大爆裂深さは35mmとなった。加熱後の目視調査では、爆裂による欠損箇所以外にひび割れなどは見られなかった。金属板は爆裂現象により飛散したコンクリート片により、変形していた。

## 6. 結論

2章から次のことが確認された。

- ・ 繊維混入、無混入に関わらず、500°C加熱を受けた高強度モルタルは圧縮強度残存率が6割程度となり、1000°C加熱を受けた高強度モルタルは1割程度となる。
- ・ 500°C加熱を受けた普通強度モルタルは、圧縮強度残存率が、繊維無混入モルタルで6割程度となる。繊維混入モルタルで4割程度となる。1000°C加熱を受けた普通強度モルタルは、繊維混入・無混入にかかわらず、圧縮強度残存率が1割程度となる。



写真-6 加熱表面 C-20



写真-7 加熱表面 CS-03



写真-8 加熱表面 CS-17

- ・ 静弾性係数は、水結合材比の違いにかかわらず、500°Cの加熱を受けると2割程度まで低下する。1000°Cの加熱を受けると1割を下回る。3章から次のことが確認された。
- ・ 1回加熱、2回加熱共に、加熱を受けた普通強度モルタル、高強度モルタルは共に、300°Cまでであれば加熱後気中養生91日で圧縮強度が8割程度まで回復する。
- ・ 2回加熱を受けたモルタルは、加熱後養生初期において、1回加熱を受けたモルタルよりも強度が下回る傾向にある。
- ・ 静弾性係数は、高強度モルタルでは2回加熱受けても回復傾向を示したが、普通強度モルタルでは2回加熱を受けると、養生材齢91日でも回復傾向は示さず、静弾性係数は低下し続け、300°C加熱では5割を下回った。4章から次のことが確認された。
- ・ 有機繊維混入高強度コンクリートでは、加熱により微細なひび割れが発生する。
- ・ 有機繊維混入コンクリートでは、無混入コンクリートより内部温度の上昇速度が遅くなり、温度上昇を抑えることができる。
- ・ 鉄筋の受熱温度が最大で580°C程度であったため、はりの載荷試験では最大荷重に大きな差はなかった。5章から次のことが確認された。
- ・ 穴ナシ、φ13mmの穴を開けた金属板設置により昇温勾配を緩やかにし、供試体受熱温度を抑えることができた。結果、爆裂現象を防止することができた。
- ・ φ17mmの穴を開けた金属板設置では、昇温勾配を緩やかにし、爆裂発生を遅延することができた。

謝辞：本論を作成するにあたり、栗原哲彦准教授、吉川弘道教授、齋藤秀夫技士青戸拓起客員研究員には、数多くの助言およびご指導をいただきました。また、研究室の先輩、後輩の多くの支えなくしては実験を行うことはできませんでした。この場を借りまして厚く御礼いたします。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会 報告書, 2002.6
- 2) 社団法人 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 63, 2004.10
- 3) EUREKA-PROJECT EU 499 : FIRES IN TRANSPORT TUNNELS REPORT ON FULL-SCALE TESTS, Editor : Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1995.11
- 4) Massachusetts Highway Department, Bechtel/Parsons Brinckerhoff : Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Test Report, Central Artery/Tunnel Project, 1995.11
- 5) 新名正英：急激な温度上昇履歴を受けたコンクリートの劣化性状, 武蔵工業大学大学院 修士学位論文, 2006
- 6) 社団法人 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, 2004.10, p3
- 7) 新井崇裕ほか：剥落防止機能を有する有機系短繊維補強コンクリートの耐火性能, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.1, pp.381-386, 2007.7
- 8) 西垣太郎ほか：超高強度コンクリート(Fc100N/mm<sup>2</sup>クラス)を用いたRC構造の耐火性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.209-210, 1997.9
- 9) 社団法人 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, p.7, 1999.11
- 10) 日本鋼構造協会：鉄筋コンクリート用棒鋼・鋼線の高温時ならびに加熱後の機械的性質, JSSC Vol.5 No.45, 1969.9

## THE MECHANICAL PROPERTIES OF EXPOSED TO ELEVATED TEMPERATURES AND CONSIDERATION OF THE PREVENTION MEASURE TO FIRE SPALLING

Kazuya HABARA

The high temperature heating was actually given to the high-strength concrete and the fiber mixing high-strength concrete to understand the change in the mechanics characteristic by the heating of concrete, and the deterioration properties and the deterioration mechanism by it were examined. In a reinforced concrete structure, reinforced concrete when a fire broke out by using a simple heating system to confirm the influence of the reinforced concrete on the mechanics characteristic by the receiving heat fireproof performance was experimentally examined. It was examined that it proposed and the effect of a new fireproof worker from these results moreover.

As a result, the following was confirmed. I : The dynamic performance originally needed is not possessed when mortar that mixes the fiber as an explosion prevention plan also receives the heating of 500°C or more, and it is not suitable for continuation and use to the structure. It is thought that needed strength is possessed so that strength may recover twice as well as mortar that receives heating. II : In the heating system that made it in this laboratory, the power decrease of the beam material did not occur. III : The punctured metallic board installation has the effect of preventing the fire spalling.