論文 高温加熱を受けたコンクリートの内部温度分布と RC はりの爆裂・ひ び割れ性状

羽原 和也*1·長谷川 啓示*2·藤本 雄*2·栗原 哲彦*3

要旨:爆裂のメカニズムの解明に有益な基礎データを得るために,①爆裂時における内部温度分布,②鉄筋コンクリートはりの爆裂・ひび割れ性状,③昇温勾配と爆裂について実験的に検討した。その結果,①からはコンクリート中の深さ 30mm 付近が気化温度に達すると爆裂が生じた。②からは,鉄筋の加熱膨張によりコンクリートにひび割れが生じた場合,爆裂は生じず,そのひび割れから内部余剰水のしみ出しが生じた。③からは,昇温勾配を変化させても、すべての供試体が炉内温度 460℃程度で激しい爆裂を生じ,昇温勾配の違いによる爆裂性状の変化は確認できなかった。

キーワード:高強度コンクリート,高温加熱,爆裂,内部温度,昇温勾配

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年には土 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^{1,2)}。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³⁾およびメモ リアルトンネル火災実験) 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。

コンクリートの爆裂の要因は、①コンクリー ト内部の水分の気化による内圧増加によるもの、 ②熱応力の作用などであると指摘されている¹⁾。

本研究は、爆裂のメカニズムの解明に有益な 基礎データを得ることを念頭に、①爆裂時にお ける内部温度分布、②鉄筋コンクリートはりの 爆裂・ひび割れ性状、③昇温勾配と爆裂につい て実験的に検討した。

2. 爆裂時における内部温度分布(実験1)

2.1 実験概要

(1) 供試体諸元および熱電対設置位置

水結合材比 20%の高強度コンクリートにより, 100×100×1200mm のはり供試体を作製した。供 試体本数は2本とした。表-1 に高強度コンクリ ートの示方配合を示す。セメントには早強ポル トランドセメントを使用し,さらに高強度を実 現するために,シリカヒュームをセメントの一 部として使用した。コンクリートの圧縮強度は 82.6N/mm²であった。なお,加熱時における含水 率は4.7%であった。

供試体内部に設定した K 型熱電対設置位置を 図-1 に示す。後述の加熱方法により,最も受熱

- *1 武藏工業大学 工学部都市基盤工学科 (正会員)
- *2 武藏工業大学 工学部都市基盤工学科 (非会員)

*3 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科助教授 博士(工学) (正会員)

表-1

G_{max}

(mm)

W

20 10.	5 333	97.6	767	871	25.7
SF:シリ:	カヒュー	-4			
Ad:高性能 AE 減水剤					
		1/	0		
単位:mm	(\rightarrow	
c					
10					
		0 0) O		10
	\downarrow		2 8	-+-	∽¥_ •*
				.	
50					
5@100=500					
			>∟	風下	←→ 風上
ر	ວຼິວຼີ	0,0	ွင်္ဂ		_
B			20	L	火源位置
`			0	_	
600		→←	400	→	
図-1 K型熱電対設置位置					

高強度コンクリートの示方配合

単位量(kg/m³)

S

G

Ad

SF

温度が高くなる箇所を中心に,長手方向に6断面,また,その直角方向に3断面,1箇所につき 高さ方向に3点(限りなく供試体下面に近い位置,下面より10mmの位置,下面より30mmの 位置)の計54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。

(2) 加熱方法

本実験では、著者らが以前実施した模擬トン ネル内における灯油燃焼による加熱方法⁵⁾を採 用した。その際,幅 100mmの供試体が設置でき るように模擬トンネルの幅を改良した。本実験 で行った加熱実験状況を写真-1 に示す。模擬ト ンネルとは、図-2 に示すように耐火レンガでト ンネル底面および側面を作製し、トンネル天井 部に相当する部分に供試体を設置するものであ る。模擬トンネル内の温度を計測するために、 図-3 に示す位置にK型シース熱電対を3つ設置 した。なお、K型シース熱電対は天井部コンク リートより下方 10mm 付近に設置した。灯油を



写真-1 加熱実験状況 図-2 模擬トンネル断面



図-3 K型シース熱電対設置位置

完全燃焼させ高温を得るためにトンネル入り口から送風を行った。風速はトンネル出口で 2.0m/secとなるように調整した。

上記加熱方法により,模擬トンネル内温度は 加熱開始から3分ほどで約650℃に達した。その 後は,加熱開始から2時間最高温度を保持する ものとした。しかし,爆裂が生じた際は,その 時点で加熱を終了することとした。この加熱方 法による昇温勾配は,メモリアルトンネル火災 実験⁴⁾で計測されたトンネル内温度-時間曲線 の初期勾配とほぼ一致するものである。

加熱実験終了後,爆裂およびひび割れ状況を 確認し,適宜それらをスケッチした。

2.2 結果と考察

(1) 温度一時間曲線

実験は供試体 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。

加熱後約 21 分で激しい爆裂が生じ,実験を中止した。加熱実験により得られた模擬トンネル 内温度-時間曲線を図-4 に示す。供試体長手方 向中心に設置した熱電対の温度が最も高くなり, 計画通りの加熱(3分ほどで約650℃)が実施さ れたことが確認できた。最高温度を示した位置 から離れた位置では模擬トンネル内温度は低く なった。



図-5 に一例として断面中心位置における供試体長手方向の内部温度分布(爆裂直前まで)を示す。模擬トンネル内温度が最も高くなった付近で,内部温度も高くなり,風上側(図中の右側)の温度は小さくなった。最高温度を示した箇所より風下側(図中の左側)においても,直接炎が当たることはないが,コンクリート中の熱伝導により温度変化が認められた。

(2) 爆裂状況

爆裂箇所は,供試体長手方向中心位置付近で あった。加熱実験後の爆裂状況を写真-2に示す。 図-4より爆裂した箇所の爆裂直前の内部温度は, 下面近傍で 360℃,それより上方 30mm の地点で



写真-2 加熱後の爆裂状況

130℃であった。130℃は水の気化温度にほぼ一 致している。つまり本実験では、加熱表面から 徐々に伝わった熱により、供試体内部の余剰水 が下面から徐々に気化していき、気化領域が下 面 30mm 程度までに達したとき、内部圧力がコ ンクリート強度を超え爆裂に至ったと推察され る。

3. 鉄筋コンクリートはりの爆裂・ひび割れ性状 (実験 2)

3.1 実験概要

(1) 供試体諸元および熱電対設置位置

実験 1 と同様の高強度コンクリート(圧縮強 度 82.6N/mm², 含水率 4.7%)により, 100×100 ×1200mm の鉄筋コンクリートはりを作製した。 供試体の概略図を図-5 に示す。断面は複鉄筋構 造とし,引張鉄筋には SD295 の D10 を 2 本, 圧 縮鉄筋には同じく SD295 の D6 を 2 本配筋した。 後述の加熱実験において鉄筋の受熱温度を高く するため,引張鉄筋のかぶりを 10mm と小さく した。なお,実験 2 では後述の加熱実験後の曲 げ載荷試験をスパン 700mm の 2 点載荷実験を行 うため,図-6 に示す位置に配筋した。また,鉄 筋コンクリートはりを曲げ破壊させるため,ス ターラップ(D6, ピッチ 100mm)を配置した。

実験2では,鉄筋の受熱温度を確認するため, 受熱温度が最も高くなると予想される供試体中 心部の鉄筋近傍にK型熱電対を25mm間隔で設 置した。引張鉄筋近傍の熱電対の設置位置を図 -7に示す。なお、この熱電対設置区間は加熱後 の載荷試験において純曲げ区間となる。



なお,供試体の養生条件および加熱実験時の 材齢は,実験1と同様である。

(2) 加熱方法

加熱に使用するシステムは、実験1と同様と した。ただし、加熱時間を1時間および2時間 の2ケースとした。加熱終了後、模擬トンネル 内部温度が100℃となるまで送風は継続したま ま冷却し、その後、載荷試験まで室内に放置し た。なお、加熱途中に爆裂が生じた際は、実験 1と同様に加熱を終了することとした。なお、 模擬トンネル内の温度計測位置は実験1と同様 である。加熱実験終了後、爆裂およびひび割れ 状況を確認し、適宜それらをスケッチした。

(3) 加熱後の曲げ載荷試験

加熱1ヶ月後に,はり供試体をスパン 700mm の2点載荷実験を実施した。支点および載荷位 置を図-6に示す。荷重,載荷点変位(2点)お よび支点沈下(2点)を計測した。さらに,載荷 試験後,載荷により新たに生じたひび割れの確 認を行った。

3.2 結果と考察

(1) 温度一時間曲線

実験1と同様,実験は各ケース供試体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。

図-8に最高温度を示した模擬トンネル内部の



図−10 加熱後のひび割れ(2 時間加熱)

温度-時間曲線を示す。多少のばらつきはある が、実験1とほぼ同様の初期勾配を持った温度 -時間曲線が得られた。後に行う曲げ載荷試験 における純曲げ区間で最も高い温度となった。

図-9 に引張鉄筋近傍に設置した熱電対により 計測された温度分布図を示す。鉄筋近傍の温度 も加熱開始から時間とともに上昇していき,加 熱時間1時間でおよそ340℃となり,加熱時間2 時間で最高437℃となった。

(2) 爆裂・ひび割れ状況

加熱時間にかかわらず,加熱後のひび割れ性 状はほぼ同一であったため,図-10に一例として 2時間加熱後のひび割れ状況を示す。実験2では, 実験1とほぼ同様のトンネル内温度-時間曲線 を得られているにもかかわらず,爆裂は生じな かった。はり供試体では,加熱から5分以内で



写真-2 水のしみ出し

小さな破裂音を発生した。はり供試体を観察す ると、側面に鉛直方向にひび割れが発生してい ることが確認できた。このひび割れ位置はほぼ スターラップ位置に相当しており、受熱により 主鉄筋およびスターラップが膨張がしたために 生じたものと考えられる。さらに、加熱を続け ると、このはり側面に生じたひび割れから水分 がしみ出しているのが観察された。水分がしみ 出している様子を写真-2 に示す。コンクリート の爆裂性状は、コンクリート強度、含水率、供 試体寸法、内部の配筋状況、加熱状況などによ り影響を受ける。ここでは、下面近傍の内部余 剰水の気化によりコンクリート内部の圧力が上 昇し、これにより他の内部余剰水が側面に生じ たひび割れ部より押し出されたと考えられる。 結果、ひび割れからの内部余剰水のしみ出しが 内圧を低下させ爆裂を抑制する一因となったと 考えられる。これらより、これまで指摘されて いるように爆裂防止には内圧の上昇を緩和でき る圧力の逃げ道をコンクリート内部に設置して おくことも有効であるとわかる。

(3) 荷重一変位曲線とひび割れ状況

図-11 に加熱後に行った載荷試験により得ら れた荷重-変位曲線を示す。図中には比較のた めに非加熱のはり供試体の載荷結果も併記する。 加熱によりすでにひび割れが生じているため、 荷重-変位曲線の初期勾配は鉄筋が降伏するま で直線的であることがわかる。非加熱のはりの ように曲げひび割れ発生による初期勾配の変化



は認められなかった。鉄筋降伏後は、いずれの はり供試体も非加熱のはり供試体と同様の挙動 を示し、最後は、上部コンクリートの圧壊によ り終局を向えている。最大荷重も差は認められ なかった。これは鉄筋の受熱温度が最高で450℃ 程度であったため、鉄筋が自身の材料特性を変 化させるだけの十分な熱を受けなかったためで ある。はり供試体に生じたひび割れに関しては、 加熱により生じたひび割れが載荷とともに開口 幅が広がっていく過程が観察された。載荷によ り新たに生じたひび割れは少なく、モーメント スパン内で1本程度、せん断スパン内では載荷 点に向う斜めひび割れが新たなひび割れとして 観察された程度であった。

4. 昇温勾配と爆裂(実験3)

4.1 実験概要

(1) 供試体

実験1において爆裂が加熱初期で観察された ため、加熱面の温度と内部温度との差が爆裂の 発生に影響を与えているのではないと考え、昇 温勾配を制御できる電気炉を利用して、加熱実 験を試み、爆裂の発生の有無について検討した。 電気炉の大きさ(炉内寸法:幅200×高さ200× 奥行250mm)から供試体寸法はφ50×100mmと した。供試体本数は、後述の3ケースに対し、1 ケース3本とした。コンクリートには、実験1 で使用した高強度コンクリートから粗骨材を抜 いた高強度モルタルを用いた。高強度モルタル の示方配合を表-4に示す。非加熱の高強度モル タルの圧縮強度は83.6N/mm²である。



なお,供試体の養生条件および加熱実験時の 材齢は,実験1と同様である。

(2) 加熱方法

電気炉内に円柱供試体を入れ,30分で500℃ (ケース1),120分で500℃(ケース2),180分 で500℃(ケース3)の3つの昇温勾配にて加熱 実験を行い,爆裂の発生について検討した。な お,爆裂による衝撃で炉が損傷するのを防ぐた め金網内に供試体を入れ,電気炉内に設置した。

4.2 結果と考察

図-12 に電気炉内の温度-時間曲線を示す。 いずれの場合も、炉内の温度が 460℃程度で激し い爆裂を生じた。爆裂後の供試体を写真-3 に示 す。本実験の結果からは、爆裂の発生に与える 昇温勾配の影響は確認されなかった。

5. まとめ

以上より,実験1から3により得られた知見 を以下にまとめる。

- (1) 無筋の高強度コンクリートを加熱すると、加熱開始から 21 分ほどで激しい爆裂が生じた。
 爆裂直前の内部温度は、下面近傍で 350℃、
 それより上方 30mm の地点で 130℃であった。
- (2) 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリ ートはりの加熱実験では爆裂は全く生じな

かった。また、スターラップ位置にひび割れ が生じ、そこから内部余剰水のしみ出しが観 察された。このはり側面に生じたひび割れか らの内部余剰水のしみ出しがコンクリート の内圧を緩和し、爆裂を抑制する一因となっ たと考えられる。

- (3) 加熱後の鉄筋コンクリートはりの載荷試験では、最大荷重に大きな差はなかった。これは鉄筋が受けた受熱温度が最大でも450℃程度であったためである。また、載荷により新たに生じたひび割れは数本程度であり、ほとんどが加熱時に生じたひび割れが開口し、最終的には圧壊に至った。
- (4) 高強度モルタルによる昇温勾配と爆裂性状の違いに関しては、いずれの供試体においても炉内温度 460℃程度で激しい爆裂が生じ、 昇温勾配による影響を確認できなかった。

参考文献

- 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 Highwey Department, Bechtel/Parsons Brinckerhoff : Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Test Report, Central Artery/Tunnel Project, 1995.11
- 新名正英,西元守人,栗原哲彦,吉川弘道: 模擬トンネルを用いた火害によるコンクリ ートの強度特性評価,土木学会第60回年次 学術講演会講演概要集,5-419, pp.837-838, 2005.9