

トンネル火災による高強度コンクリートのひび割れ・爆裂現象とその対策案について

学生氏名 阿部 廣二郎

指導教員 栗原 哲彦 吉川 弘道

1.はじめに

高強度コンクリートを用いて建造されたトンネル内で火災が発生し、セグメントや側壁などに爆裂を生じたという被害¹⁾が報告されている。それに伴い、高強度コンクリートの耐火性や爆裂防止対策に関して多く研究されているが、未解明な部分が多く残されているのが現状である。そこで本研究では高温加熱を受けた高強度コンクリートの爆裂やひび割れ及び爆裂対策に関して、加熱実験を行うことよりそのメカニズムや対策を検討することを目的とする。

2.実験概要

加熱実験には水結合材比 20%の供試体(以下 H20 と示す)及び、爆裂防止対策として H20 の下層 10mm を高靱性セメント複合材料である ECC(Engineered Cementitious Composites)に置き換えた供試体(以下 ECC とする)の 2 種類を 2 体ずつ(以下, No.1, No.2 と示す)作製した。また, H20 に関しては供試体内部温度測定用, ひずみ測定用にさらに 1 体ずつ作製した。なお, 供試体寸法は高さ:60mm, 幅:200mm, 長さ:1200mm とした。各供試体の作製に用いた配合を表 1 に示す。作製した供試体は模擬トンネル天井部に設置し加熱実験を行った。ここで, 加熱実験は火源の灯油を燃焼させ, 送風と給油を行いながら 30 分間加熱をし, その後トンネル内温度が 100 程度になるまで自然冷却し実験終了とした。

図 1 に火源設置位置, トンネル内温度測定位置, 供試体内部温度測定位置を示す。火災曲線は図 1 に示す位置に K 型シーす熱電対を配置し測定を行い, 供試体内部は同図に示す各 K 型熱電対埋め込み位置の模擬トンネル内部の天井部分(以下, 加熱面と示す)から 5, 15, 25, 45mm の 4 ポイント設置し計 24 ポイントで測定を行なった。図 2 に供試体上面の温度及びひずみの測定位置を示す。ひずみの測定は加熱面での測定が望ましいが, 設置が困難であったため供試体上面でのひずみと温度を併用することより加熱面での挙動を推測するものとした。以下, 各測定位置は各図中に示した呼び名を用いて示す。

3.実験結果

3.1 火災曲線測定結果

図 3 に, 供試体内部温度測定用の加熱実験より得られたトンネル内温度を示す。ここで, 図 3 の 5 分以降のトンネル内温度は, 測定の際 K 型シーす熱電対が爆裂の影響によりずれてしまったため除いて示した。しかし, 爆裂が発生した後も発生前と同様に給油や送風を行なっているため, 火源の燃焼状態は爆裂前と同等であるといえる。トンネル内温度は図 3 より, Point1 で最高温度となり, 加熱開始から 5 分で約 750 まで急上昇した。これはトンネル火災の特徴をとらえ, よく再現できているといえる。H20 では表 2 に示す時間にそれぞれ大きな爆裂音を確認することができた。そして, 爆裂音は耐火実験終了まで数十回程度確認できた。また, 表 2 よりトンネル内温度が高くなるほど爆裂開始時間が早くなる傾向がみられた。ECC においても爆裂を生じたが発生回数は少なく, ECC(No.1)では爆裂音が 3 回(4 分 20 秒, 19 分 30 秒, 30 分), ECC(No.2)では 1 回(19 分 39 秒)確認することができた。

表 1 配合表

供試体名	水結合材比 (%)	単用量(kg/m ³)										圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	C	SF	FA	S	G	V	F	Adt			
H20	20	108	553	97.6	-	767	871	-	-	-	-	-	90.0
ECC	39	330	582	-	292	487	-	191	26.0	4.52	-	36.6	

W:水, C:セメント, SF:シリカフューム, FA:フライアッシュ, S:粗骨材, G:細骨材, V:増粘剤, F:繊維, Adt:高性能AE減水剤

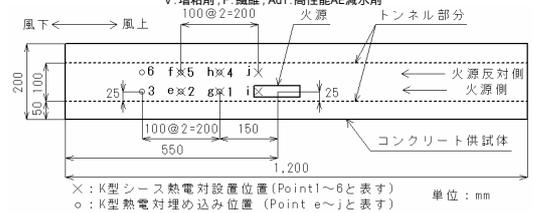


図 1 トンネル内温度・供試体内部温度測定位置

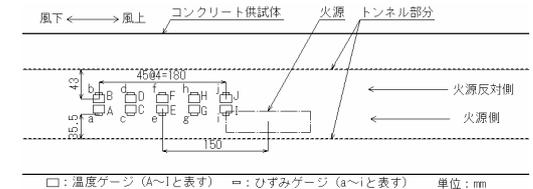


図 2 供試体上面のひずみの測定位置

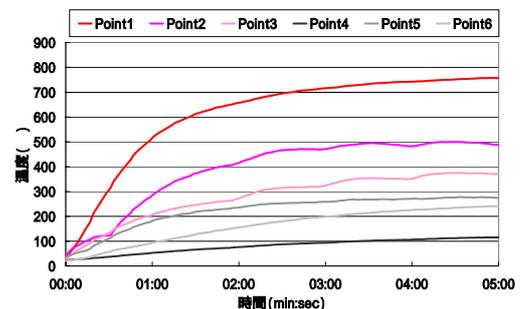


図 3 トンネル内温度(供試体内部測定用)

表 2 爆裂開始時間(H20)

H20	No.1	No.2	内部温度測定用	ひずみ測定用
Point 1 (°)	676.6	699.3	756.4	776.4
爆裂開始時間 (min:sec)	8:57	6:00	5:00	6:45

3.2 供試体内部温度測定結果

図4に火源側の加熱面より5mm地点におけるH20の供試体内部温度測定結果を示す。これよりH20で爆裂が発生した加熱開始5分時ではPoint gが最高温度となり160であった。H20の5分以降は、爆裂により加熱面が飛散し、供試体内部が直接加熱を受けたため温度が高くなったと考えられる。ここで、H20は構造を緻密にさせることで高強度化している。そのため、供試体内部の温度が高くなることで発生した水蒸気圧を外部に発散させにくい構造であると考えられる。したがって、供試体内部が160となり、上昇した水蒸気圧がコンクリートの強度を超えることで一気に外部に開放され爆裂が生じたと推測した。

3.3 供試体上面の温度及びひずみの測定結果

図5に火源側のひずみ測定結果を示す。なお、図5は引張りひずみを正、圧縮ひずみを負にとり示したものである。加熱開始5分では、供試体上面で圧縮ひずみを測定した。これは加熱面が熱膨張を生じ引張力が発生することより、供試体上面でその影響をとらえ圧縮ひずみを測定したと考えられる。また、上面温度測定結果より加熱開始5分では上面温度が変化していない。これより、上面と加熱面に大きな温度差が生じることで加熱面のみが急激に熱膨張し大きな引張力が発生する¹⁾と考えられ、その大きな引張力が爆裂発生の一要因となったと推測した。

3.4 加熱面のひび割れ・爆裂状況

H20(No.2)、ECC(No.1)の爆裂深さ測定結果を図6に示す。2体ある供試体のうち爆裂深さが深かった方を示した。これより、H20(No.2)では爆裂発生領域が火源からトンネル風下出口にかけて繋がっていることが分かる。これは、加熱初期において供試体内部温度が高くなった火源より150mm付近から風下方向が徐々に熱伝導し、温度の高くなった部分から爆裂を生じていき出口まで繋がったと考えられる。供試体内部温度が高くなり、ひずみの変化も大きくなった火源より250mm地点(図4の250mmの地点、図5のe)で爆裂深さが最も大きくなり30mmとなっていた。

爆裂防止を目的として作製したECCは爆裂を完全には防止できなかつた。しかし、図6に示すように爆裂を生じた範囲や深さに関して大幅に軽減されていることが分かる。ECCにおいて爆裂を軽減させた原因として、ECCの熱伝導率はコンクリートより低いという報告²⁾があることより、高強度コンクリートへの熱伝導を遅延させたためであると考えられる。また、ECCに混入した繊維は既往の研究³⁾より150になると収縮することが分かっており、供試体内部で発生した水蒸気

が収縮した隙間を介して発散することよりECC部分での爆裂を防止できたと推測した。今回採用した被覆厚10mmでは爆裂を完全に防止できなかったが、被覆厚を増すことで爆裂防止を講じることができる可能性が確認できた。

4.まとめ

本研究における加熱実験結果より得られた知見を以下に示す。

- ・ H20では火源からトンネル風下出口にかけて爆裂領域が広がり、爆裂深さは最大で30mmとなった。
- ・ ECCでは爆裂自体は防止できなかったがH20と比べて爆裂領域が大幅に軽減することが分かった。
- ・ 爆裂発生メカニズムとして、緻密な構造であるH20の供試体内部において水蒸気圧がコンクリート強度を上回ったためや、加熱面が熱膨張することにより加熱面にかかる引張力が高くなるため発生すると推測した。

[参考文献]

- 1) 土木学会:コンクリート構造物の対価技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集,平成16年
- 2) 社団法人 土木学会:繊維補強モルタルの評価と利用
- 3) 新名正英:温度履歴を受けたDFRCCの耐久性,平成15年度卒業論文

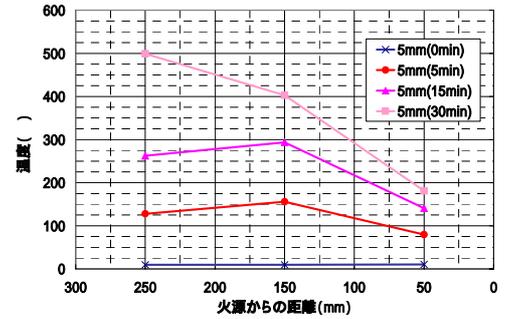


図4 供試体内部温度

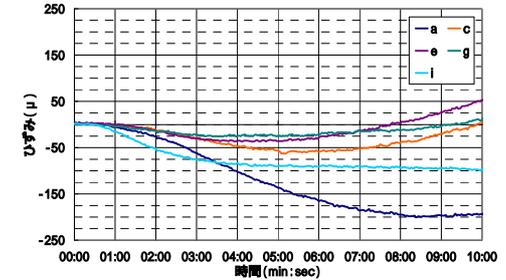


図5 供試体上面のひずみ(H20)

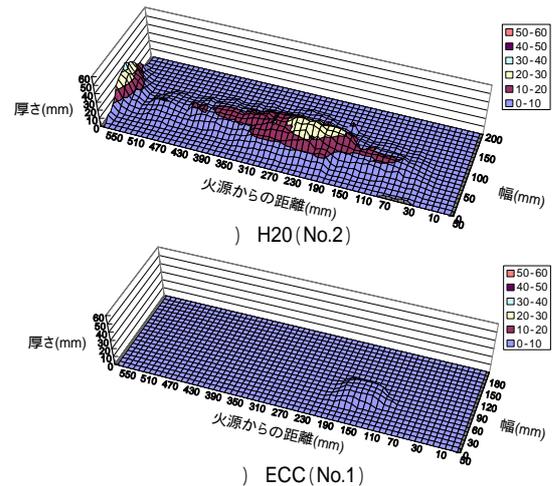


図6 爆裂深さ