

論文 金属板設置によるコンクリートの爆裂防止策の有効性に関する研究

千葉 俊二^{*1}・栗原 哲彦^{*2}

要旨：コンクリートの爆裂現象を防止、抑制する工法は数多く研究されているが、それらの工法の点検や設置作業などにおける欠点を補うため、穴を開けた金属板を使用し、爆裂を防止、抑制することを目的として実験を行なった。高強度コンクリートに大、中、小様々な穴を開けた金属板を取り付け、高温加熱を行なった。その結果、金属板に開けた穴の形状によって、爆裂を防止できることがわかった。しかも、たとえ爆裂が発生したパターンであっても断続的な爆裂を抑えることが判明した。この結果より、穴を開けた金属板を設置することで爆裂を防止、抑制する効果があることが確認された。

キーワード：爆裂、金属板、高温加熱、昇温勾配、内部温度

1. はじめに

コンクリートが火災を受け、爆裂が発生した例は数多い。最近では2008年9月に発生したユーロトンネルの火災事故でコンクリートに爆裂が発生したと報告されている¹⁾。コンクリート構造物に爆裂が発生すると崩壊の危険性があり、また補修に時間がかかるため、爆裂防止策の検討は多くなされている。

爆裂防止策として、大きく分けコンクリート自体に耐火性を持たせるか、コンクリートに熱を与えない方法がある。そこで本研究では既造のコンクリート構造物にも適用可能な後者を採用することとした。現在使用されている方法として、コンクリート表面に耐火板を設置しコンクリートの温度上昇速度を抑制する方法²⁾がある。しかし、この方法は、耐火板を取り外さなければコンクリート表面を目視不可能なことや、耐火板自体が重いという欠点がある。そこで、それらの欠点を耐火板に穴を開けることで補うことができるのではないかと考えている。また、コンクリート表面に設置する方法で用いられる耐火板は熱伝導率の低いものが一般的で、熱を遮断する目的で使用されている。しかし、熱を遮断するという事は火災現場内部により熱が充満するため、被害を拡大しかねない。そこで、耐火板の材料を熱伝導率の高いものにし、適度にコンクリートに熱を与えながら、耐火板を通して熱を分散させ、爆裂を抑制することができれば被害を最小限に抑えることができる。

これらの点に着目した研究にA. Haackの研究³⁾がある。A. Haackは有孔耐火板を使用し、爆裂防止効果を検証している。それらのことを踏まえ、本研究では、設置する耐火板を入手しやすい鋼板にし、開ける穴の形状を変化させることで爆裂を防止できるかを確認することを目的とした。

なお、本報告は著者らが過去に行なった実験^{4),5)}に新たに実験ケースを加え、考察をより深めたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では、高強度コンクリートにより、幅100×高さ100×長さ1200(mm)のはり型試験体を作製して実験を行った。打設の際に、試験体に金属板を設置するためのナットを図-1の位置に埋め込んだ。使用したコンクリートの示方配合を表-1に、試験体諸元を表-2に示す。また加熱時の試験体内部温度分布を測定するために、長手方向に6断面、1断面につき高さ方向に3点(限りなく供試体下面に近い位置、下面より10mm・30mmの位置)の計18点にK型熱電対を埋め込んだ(図-2参照)。

また、空気層を取り込むため、写真-1に示すように、ボルトを用い金属板を試験体から10mm離して固定し、設置した。使用する金属板は、幅60×厚さ2.2×長さ1200(mm)のSS400の鉄板を用い、写真-2に示すようなφ3mm、φ8mm、φ17mmの穴を開けたものと、穴のない無垢のものを使用する。また穴を開ける際、穴の総面積を金属板全体の25%に統一とした。

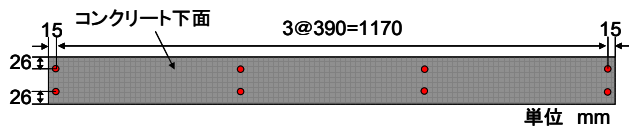


図-1 ナット設置位置

表-1 示方配合

W/(C+SF) (%)	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	SF	S	G	Ad
20	108	533	97.6	767	855	21.8

W:練混ぜ水 C:セメント SF:シリカフェューム
S:細骨材 G:粗骨材 Ad:高性能AE減水剤

*1 東京都市大学大学院 工学研究科都市基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京都市大学 工学部都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 試験体諸元

試験体名	試験体寸法 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	含水率 (%)	金属板			試験体本数	良好に実験が終了した本数*
					材質	寸法 (mm)	穴の径 (mm)		
C20	100×100×1200	93.5	42.0	3.35	未設置			3	3
C20-00		111	42.9	4.05	SS400	60×1200	0	3	2
C20-03		95.8	41.6	3.50			3	2	1
C20-08		116	43.9	3.76			8	3	2
C20-17		104	42.1	3.66			17	2	1

*加熱あるいは熱電対による計測の不備によりデータから除いた試験体がある。

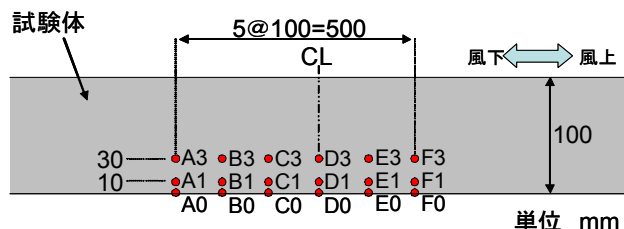


図-2 K型熱電対設置位置

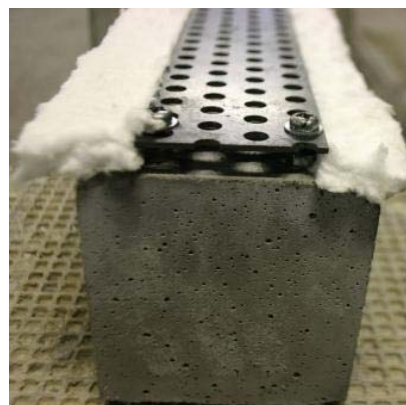


写真-1 金属板設置状況

2.2 トンネル加熱実験概要

本実験では自作した模擬トンネルによる高温加熱システムを用いてはり試験体への加熱実験を行った。加熱システムの断面図を図-3に示す。このシステムは、耐火レンガにより模擬トンネルを組み、トンネル天井部をコンクリートはりとする構造で、トンネル内空部で灯油を燃焼させることではり試験体を加熱することができる⁶⁾。このシステムでははり試験体下部の中央部が最高温度になるよう加熱を行う。加熱時には灯油の不完全燃焼を防ぐため、常時送風機による一定送風（出口風速 2.0m/s）を行った。またレンガと金属板の間から火の回りこみを防ぐため、断熱材を設置した（写真-1参照）。

また、図-4に示すようにトンネル内部の中央に、X地点が金属板の下5mm、Y地点が金属板の上5mmになるようにシーす熱電対を設置し、トンネル内部の温度を測定した。ここで、図-5にX地点で測定した本加熱システムの加熱曲線、RABT曲線、実大トンネル加熱実験で得られた Memorial Tunnel の加熱曲線⁷⁾を示す。図より、本加熱システムは、一般的な加熱実験で用いられる RABT 曲線に比べ最高温度が低いことがわかる。しかし、羽原らの研究⁶⁾より、本加熱システムにより爆裂発生の有無を十分に判定できることを確認しているため、本実験ではこのシステムを採用した。また、本加熱システムは加熱開始 2 分で 700℃に達しており、RABT 曲線や Memorial Tunnel の加熱曲線より昇温勾配が高いことが分かる。以上より、本加熱システムは、Memorial Tunnel の加熱曲線より厳しい条件で加熱実験が行える。

なお、試験体は 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。また、加熱実験は加熱開始から 1 時間～1 時間 30 分高温を保持するものとし、加熱終了後直ちに火を止め、その後の内部温度低下も測定した。

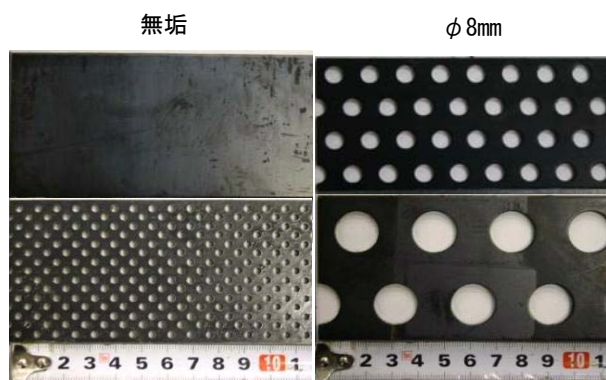


写真-2 金属板形状

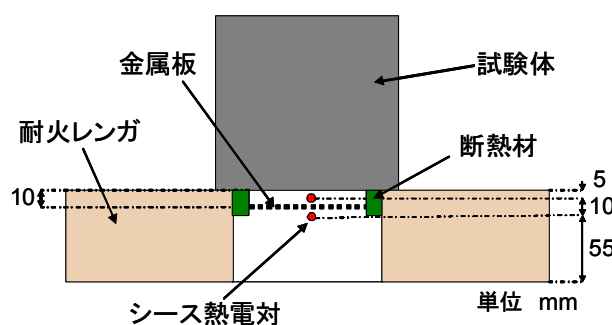


図-3 トンネル断面図

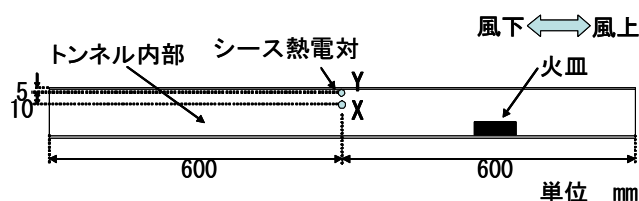


図-4 シース熱電対設置位置

また、表-2に併記したように、本研究は各シリーズ2～3本ずつ実験を行なったが、加熱が良好に行なえなかったものや、熱電対による温度計測の不備があったものは割愛している。さらに、本報告は紙面の都合上、各シリーズ1パターンずつを代表して報告する。本稿で記載する結果は、実験全体を通じて得られた結果である。

3. 実験結果および考察

3.1 爆裂抑制効果および試験体様子

表-3に各試験体の爆裂状況を示す(最大爆裂深さ位置は後述の図-9に記載)。初期爆裂発生時間を比較するとC20は、加熱開始10分で爆裂し、その後も高温加熱を継続させると、断続的に爆裂が発生した。C20-08とC20-17は、加熱開始40分前後で爆裂が発生し、その後も数回爆裂した。C20-00とC20-03は爆裂の発生は確認されなかった。なお、C20に関しては、爆裂が断続的に発生したため、シース熱電対への影響を考慮して、30分で実験を中止した。次に爆裂した試験体で最大爆裂深さを比較すると、C20は、30分加熱にもかかわらず36mmに達している。また、C20は本稿では割愛したが、3本中1本のみ1時間加熱をしており、爆裂深さが100mm(破断)との結果が出ている。金属板を設置したC20-08とC20-17を比較すると、C20-08が10mm、C20-17が35mmとなり、穴を大きく開けたC20-17の方が、爆裂深さが深くなっている。また、1回の爆裂規模は、C20よりC20-08やC20-17の方が大きく、激しい爆裂音をたてながら爆裂したが、断続的に発生することはなかった。金属板を設置することで、爆裂発生時間を遅らせることができたが、1回の爆裂の規模が大きくなることが問題である。

加熱終了時の金属板の変形を目視により調査すると、爆裂が発生した金属板は、剥離したコンクリートの影響により大きく変形していた。しかし金属板が落下することなく、またコンクリート片を金属板が受け止め、トンネル内の破片の飛び散りを防ぐことができた。爆裂しなかった金属板は、多少の変形が見られた。また埋め込んだナットは、加熱中に落下するようなことはなかった

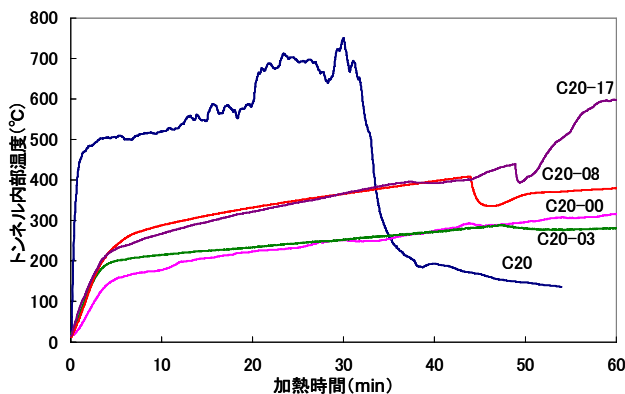


図-7 Y地点のトンネル内部温度

ため試験体に対してあまり影響はないと考えられる。

3.2 トンネル内部温度による比較

トンネル内部のX地点(試験体下方15mm地点)の温度を図-6に、Y地点(試験体下方5mm地点)の温度を図-7に示す

図-6より、X地点は多少のばらつきはあるが、いずれの試験体においても加熱開始5分で700°C程度に達し、

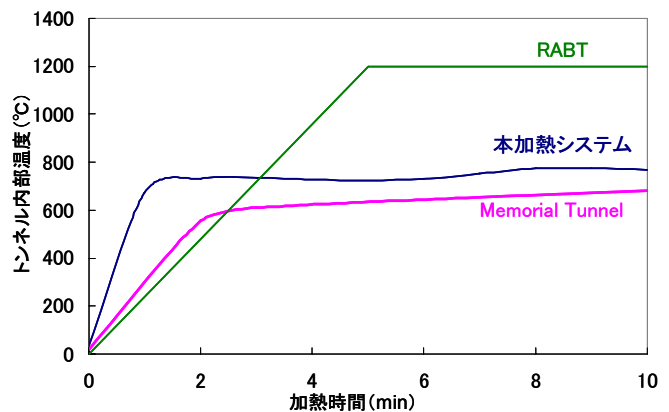


図-5 加熱曲線の比較

表-3 試験体の爆裂状況

	C20	C20-00	C20-03	C20-08	C20-17
爆裂の有無	有	無	無	有	有
爆裂発生時間	10分	-	-	43分	37分
爆裂発生温度	250°C	-	-	300°C	350°C
最大爆裂深さ	36mm	-	-	10mm	35mm
最大爆裂深さ位置	560mm	-	-	530mm	560mm

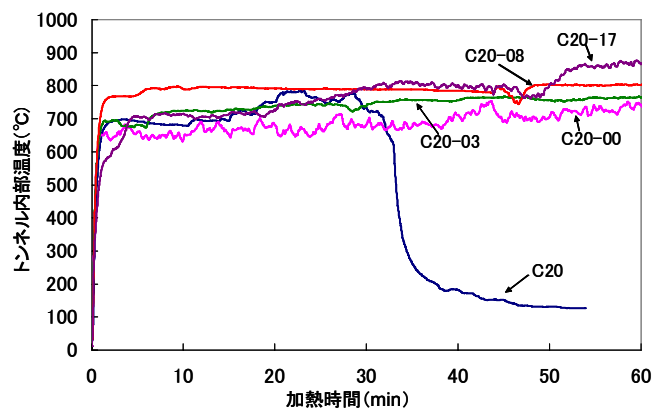


図-6 X地点のトンネル内部温度

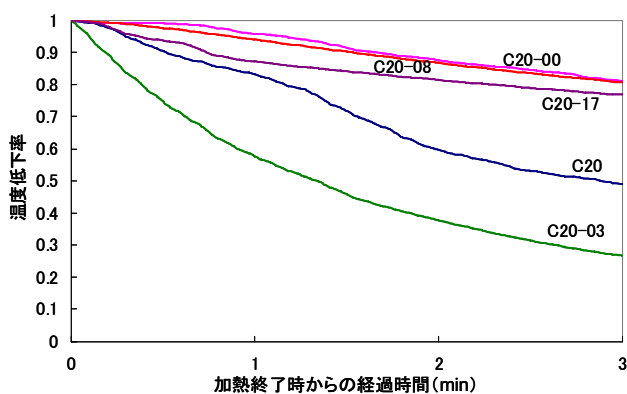


図-8 加熱終了時からの温度低下率

安定した加熱が行なえていることを確認した。

図-7より、Y地点の比較では、C20は、金属板を設置していないため、加熱開始5分で500℃以上に達し、そのため加熱開始10分で爆裂したと考えられる。穴の有無の比較をすると、穴を開けていないC20-00の方がやや加熱開始直後の昇温勾配が低くなっているが、最終的にC20-03と同様の温度となっている。また、加熱開始30分で比較をすると、C20-00とC20-03は200℃程度なのに対し、C20-08とC20-17は300℃以上に達していることがわかる。そのため、金属板に穴を開ける大きさがある一定以上になると炎で直接コンクリートを熱してしまう可能性があることがわかった。

また、図-8は、Y地点における加熱終了時からの温度低下率である。図の縦軸は加熱終了時の温度を1としている。図-8より、C20-03は他に比べ、短時間で大きく温度が低下している。これは、金属板に開けた穴から適度な熱の移動があり、温度低下に繋がったものだと考えられる。またC20、C20-08、C20-17は、熱の移動はあるものの、金属板が未設置であることや、金属板に開けた穴が大きすぎたため、炎で直接コンクリートが熱せられ、コンクリートに蓄えられた熱の放射により温度低下しなかったと考えられる。C20-00に関しては、コンクリートと金属板の間に熱がこもり、これが温度低下を阻害し

たものだと考えられる。このことから、金属板に穴を開けることで熱の移動を促進させる効果があることを確認できた。

3.3 コンクリート内部温度の比較

試験体下部0mm地点(C0)における温度-試験体長さの関係性を時間別に表したものと、試験体の爆裂箇所を図-9に示す。図-9より、最高温度付近で爆裂深さが最大になっている。またC20-17に関しては、全体に熱が伝わっていることが分かる。これは、金属板に開けた穴が大きく、炎が直接穴に入り込み、送風によって風下側(図の左側)へ流されたため全体的に熱が伝わったと考えられる。無垢の金属板と穴を開けた金属板とを比較すると、

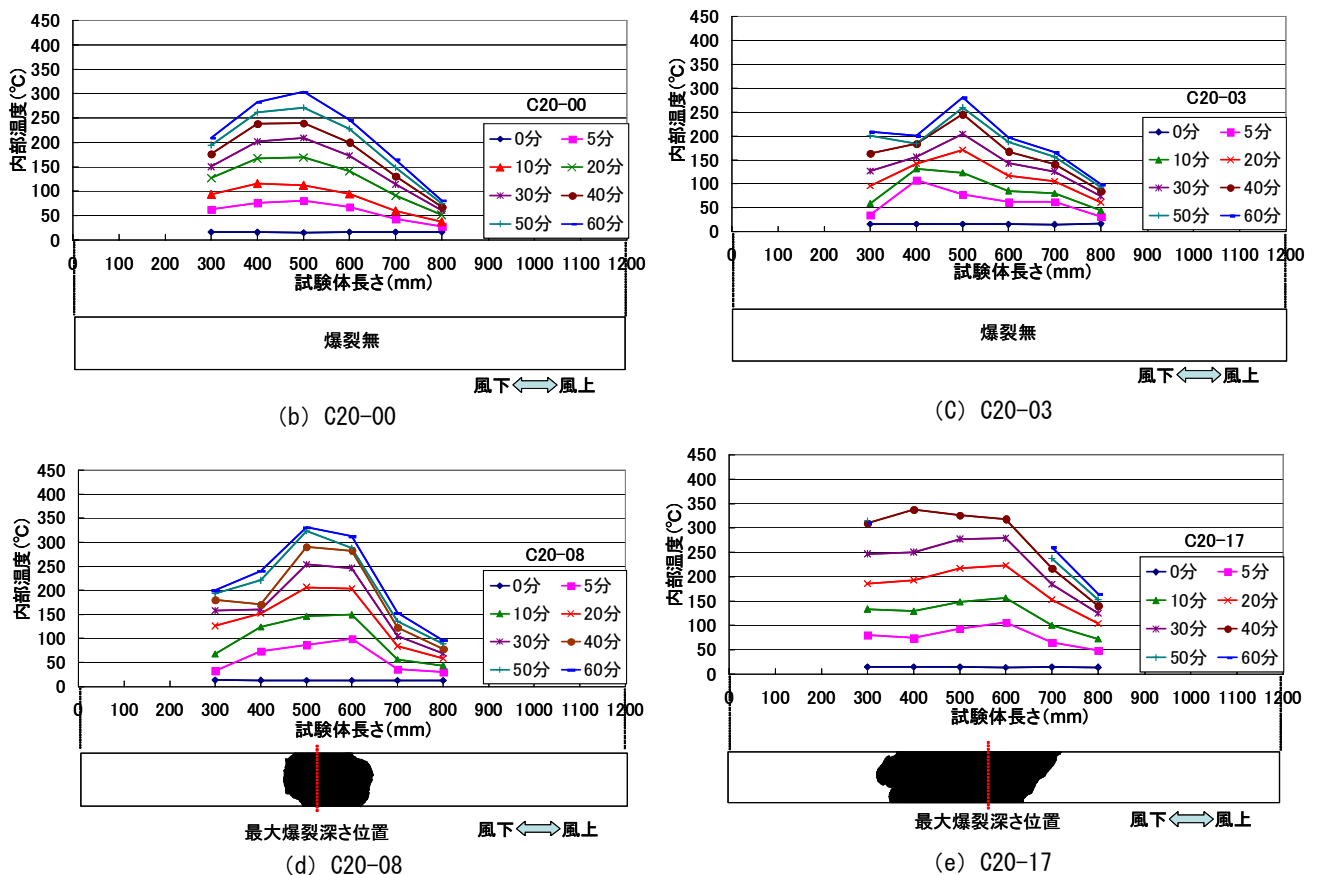


図-9 時間別温度—長さ曲線および爆裂箇所

無垢の金属板を設置したものは、長さ方向に対して緩やかに表面温度が変化しているのに対し、穴を開けた金属板は地点によって温度差が激しいため、凸凹があるグラフとなっている。これは、金属板に穴を開けたことにより、熱が伝達しやすい箇所と、そうでない箇所が生まれたためだと考えられる。

次に、試験体内部の最高温度となった C0 地点（風下方向から 500mm, 供試体下部 0mm）の温度-時間曲線を図-10 に示し、その地点（図-2 の C0, C1, C3）の各シリーズの試験体高さ-温度曲線を図-11 に示す。また、写真-3 に、C20, C20-08, C20-17 の爆裂した写真を示す。なお図-11 の C20-17 は、高さ 30mm 地点（C3）の内部温度の測定に失敗したため、今回は省略し、0mm, 10mm 地点のみのデータとした。

図-10 より、C20 は他の試験体に比べ加熱開始 5 分で 150℃と昇温勾配が高くなっていることが分かる。また、金属板を設置した試験体は、加熱開始 5 分までは 100℃程度と、どの試験体も同様の昇温勾配を示しているが、加熱開始 10 分では C20-00 と C20-03 は勾配が緩やかになり 120℃程度となり、C20-08, C20-17 は 150℃となっている。このことから、金属板を設置することで、初期の勾配を抑制することができるが、穴の形状によっては、その後の温度上昇を抑制することが難しいことがわか

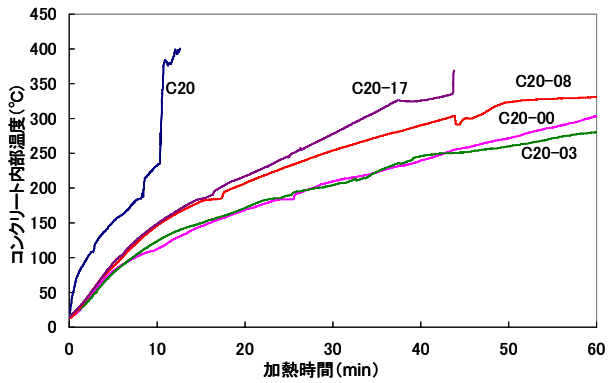
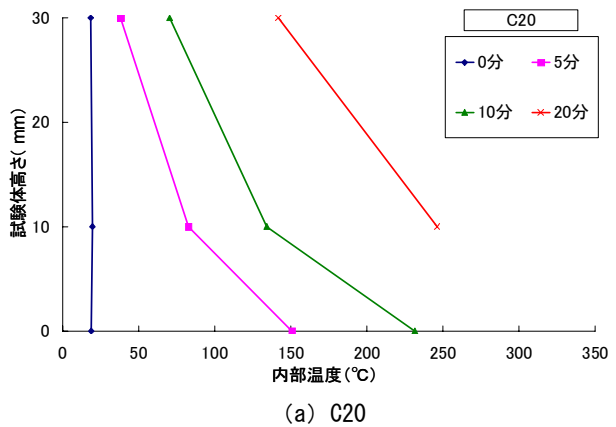
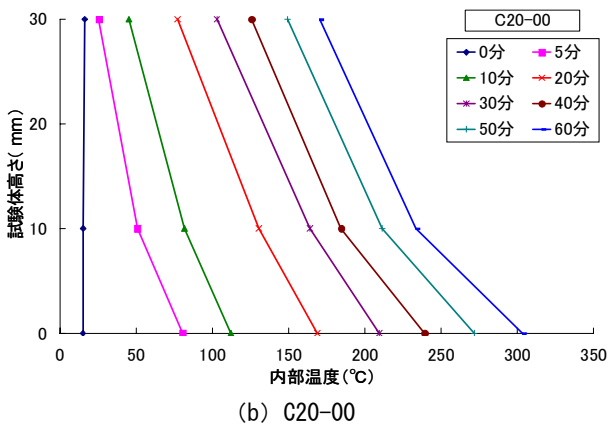


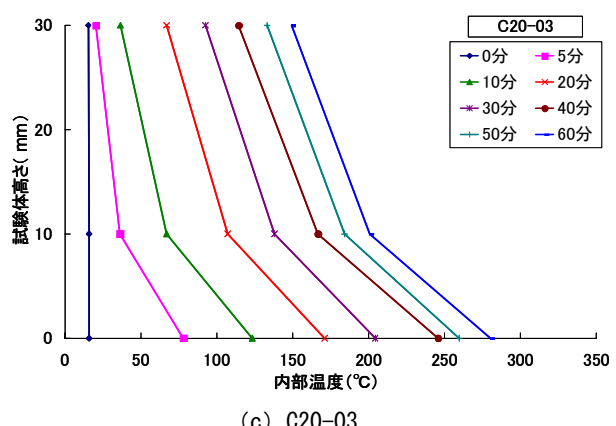
図-10 試験体内部の時間-温度曲線 (C0 地点)



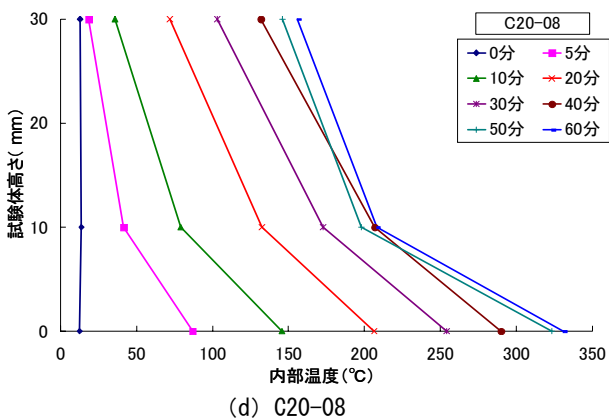
(a) C20



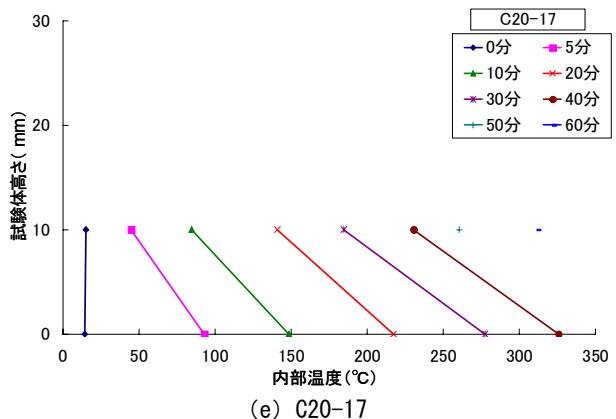
(b) C20-00



(c) C20-03



(d) C20-08



(e) C20-17

図-11 各シリーズの時間別高さ-温度曲線 (下から C0, C1, C3)

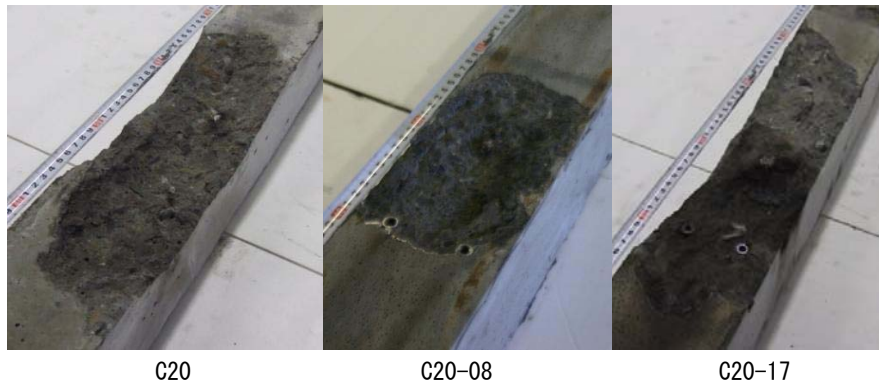


写真-3 爆裂写真

った。また、爆裂が発生した際の表面温度は、C20は250℃、C20-08は300℃、C20-17は350℃となり、単純にある温度に達したら爆裂するといった関係性は見られなかった。そのため、いかに昇温勾配を下げるができるかが金属板に求められる性能であるといえる。

図-11で注目すべき点は、試験体下部0mm地点(C0)と10mm地点(C1)との温度差である。金属板を設置していないC20は加熱開始5分で60℃、10分で100℃近くの温度差が生じている。C20-00は5分、10分ともに30℃であり、C20-03は5分で40℃、10分で50℃、C20-08とC20-17は5分で50℃、10分で60℃となっている。このことから、金属板を設置したことでその温度差を小さくしていることが分かる。また、爆裂が発生したC20-08、C20-17と爆裂が発生していないC20-00、C20-03を比べると、多少ではあるが、爆裂が発生した試験体の方が、温度差が大きい。この結果より試験体下部0mm地点と10mm地点の温度差も爆裂発生要因の1つとして検討していく必要があるといえる。

4. まとめ

本研究は、開ける穴の形状を変化させた金属板を設置することで、爆裂を防止、抑制できるかについて実験的に検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 今回の実験では無垢の金属板とφ3mmの金属板を設置することで、コンクリート表面の温度勾配を下げることができ、コンクリート表面と内部との温度差が小さくなったことが爆裂防止に繋がったと考えられる。
- 2) 例え爆裂が発生しても、φ8、17mmの穴を開けた金属板を設置することで断続的な爆裂を防ぐことができ、また爆裂発生時間も遅らせることができた。
- 3) φ8、17mmの穴を開けた金属板を設置した試験体は、未設置の試験体に比べ1回の爆裂規模がとて大きく、より激しい爆裂音を伴った。
- 4) φ3mmの穴を開けた金属板は、無垢の金属板と同様の温度抑制性能を有しており、加熱終了後の温度低

下率を比較するとφ3mmの穴を開けた金属板の方が熱を逃がしやすいという結果が得られた。

- 5) φ8、17mmの穴を開けた2つの金属板は、両者とも爆裂はしたが、爆裂範囲に違いがあり、コンクリート内部温度もφ8mmの方が低い結果となった。このため、穴を小さく開けることでより爆裂範囲を小さくできることが今回の結果より確認された。

今後は、更なる金属使用量の減少を目指し、直接熱が通らない穴の形状を検討するとともに、金属板からコンクリートへの輻射の影響を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日経BP社：英仏海峡トンネル火災で深刻な構造被害、日経コンストラクション、pp.20-21、2008.12.12
- 2) 土木学会：付録偏 コンクリート構造物の耐火設計の手順と方法(案)、コンクリート技術シリーズ63 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、pp.付49-付58、2004.10
- 3) A.Haack, Current Safety Issues in Traffic Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology 17, pp.117-127, 2002
- 4) 千葉俊二, 栗原哲彦：金属板設置によるコンクリートの爆裂防止策の検討, 土木学会関東支部, 第36回技術研究発表会講演概要集, V-41, 2009
- 5) 千葉俊二, 栗原哲彦：穴を開けた金属板設置による爆裂防止効果の確認, 土木学会, 第64回年次学術講演会講演概要集, pp.309-310, 2009
- 6) 羽原和也, 長谷川啓示, 藤本雄, 栗原哲彦：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No1, pp.825-830, 2007
- 7) Massachusetts Highway Department, Bechtel/Parsons Brinckerhoff: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Test Report, Central Artery/Tunnel Project, 1995.11