特集≫≫　コンクリート工事，コンクリート構造

火災時におけるコンクリートの爆裂評価方法

小　澤　満津雄

鉄筋コンクリート構造物が火災を受けると，表層部が爆発的に剥離・剥落するいわゆる爆裂現象が生じる。爆裂は，熱応力と水蒸気圧がメカニズムとして考えられ，拘束条件下において爆裂規模が大きくなるとされている。本稿では，コンクリートの耐爆裂性評価手法について紹介する。すなわち，リング拘束供試体を作製し開口部の一面加熱を実施し，熱応力と蒸気圧を計測し対象のコンクリート配合の解析的検討についても紹介する。

キーワード：コンクリートの爆裂，拘束リング供試体，熱応力，水蒸気圧

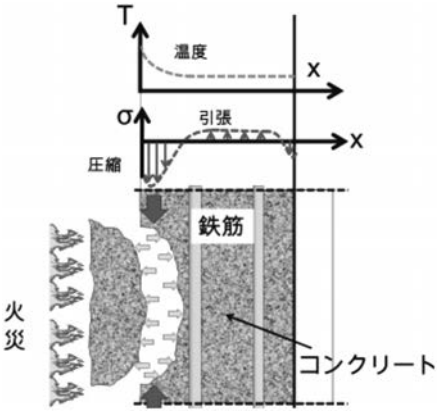
1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が火災を受けると，表層部が爆発的に剥離・剥落するいわゆる爆裂現象が生じる。コンクリートが剥落すると内部鉄筋は露出し高温により品質は大きく低下する。その結果，構造物の耐荷性能は著しく損なわれ，極めて危険な状態となる。鎮火後の構造物の復旧に際しても，費用の増大は避けることができず，社会的な損失は大きなものとなる。これらのことから，爆裂はコンクリート工学における重要な研究テーマとなっている。既往の研究により，爆裂は熱応力説[1]と蒸気圧応力説[2]によって生じるとされている（**図―1，2**）。

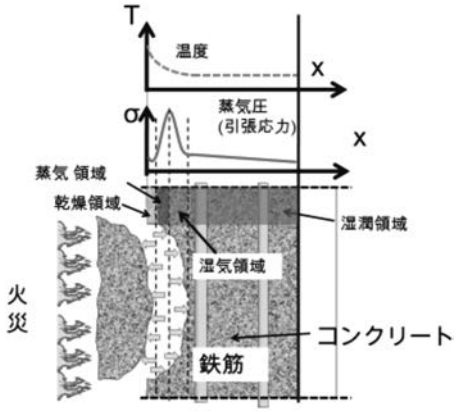
Baileyら[3]は，爆裂を分類し，それぞれの性状について説明している。**表―1**に爆裂の分類を示す。コンクリートの爆裂は，6つに分類することができる（**写真―1**）。すなわち，a）骨材の剥離，b）隅角部の剥離，c）表層の剥離，d）爆発的な剥離，e）脆弱的な剥離，f）冷却後の剥離である。それぞれを明確に区分けすることは難しいが，a）～c）は火災の初期に生じ，d）～f）は火災後しばらくしてから生じるとされている。

国内では日本コンクリート工学会が2009年に「コンクリートの高温特性とコンクリートの耐火性能研究委員会」が設置され，調査・研究がなされた[4]。

2012年10月から，土木学会においても「コンクリートトンネル構造物の耐火技術研究小委員会（207）」が設置され，トンネル耐火工の設計施工指針（案）を取りまとめた[5]。以上のように，国内外においてコンクリートの耐火性について精力的な研究がなされている。また，爆裂の抑制方法は蒸気圧低減効果を期待して合成繊維であるポリプロピレン繊維（PP繊維）を混入する方法が一般的に用いられている。しかしながら，①熱応力説と蒸気圧説のどちらが支配的であるの



図―1　熱応力説

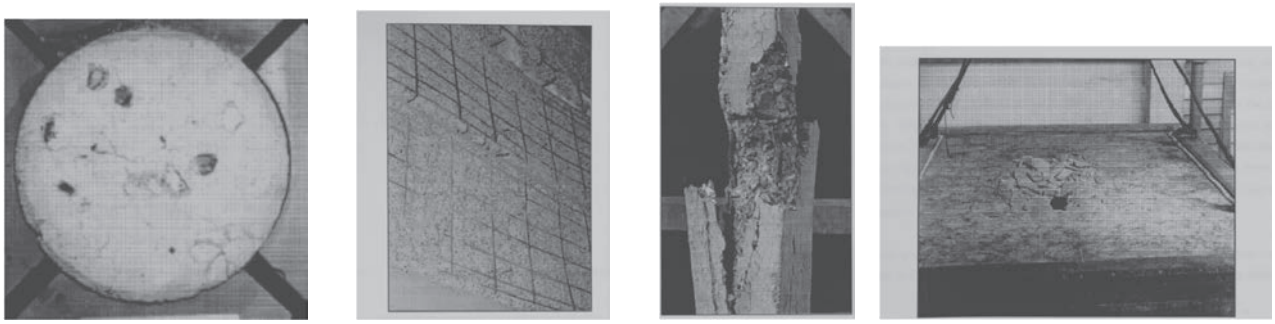


図―2　水蒸気圧説

表―1　コンクリートの爆裂の分類

現象	加熱からの時間	爆裂の性状	爆裂音	影響度合	影響因子
骨材の剥離 （Aggregate spalling）	7-30 分	骨材の割裂	ポップアウト	表面の破壊	H，A，S，D，W
隅角部の剥離 （Corner spalling）	30-90 分	激しくない	/	甚大な損傷になる可能性あり	T，A，ft，R
表層の剥離 （Surface spalling）	7-30 分	激しい	クラッキング	甚大な損傷になる可能性あり	H，W，P，ft
爆発的な剥離 （Explosive spalling）	7-30 分	激しい	大きな衝撃音	甚大な損傷	H，A，S，fs，G，L，O，P，Q，R，S，W，Z
脆弱的な剥離 （Sloughing-off spalling）	加熱後，コンクリートが脆弱化後	激しくない	/	甚大な損傷になる可能性あり	T，fs，L，Q，R
冷却後の剥離 （Post-cooling spalling）	加熱後，水分が蒸発後	激しくない	/	甚大な損傷になる可能性あり	T，fs，L，Q，R，W1，AT

影響因子：A：骨材の熱膨張，D：骨材の熱拡散，fs：コンクリートのせん断強度，ft：コンクリートの引張強度，G：コンクリートの材齢，H：加熱速度，L：荷重，拘束，O：加熱特性，AT：骨材の種類，P：通気性，Q：部材の断面形状，R：鉄筋，S：骨材の寸法，T：最高温度，W：含水率，Z：部材の断面寸法，W1：吸水特性



a) Aggregate spalling　b) Surface spalling　c) Corner spalling　d) Explosive spalling

写真―1　爆裂の分類

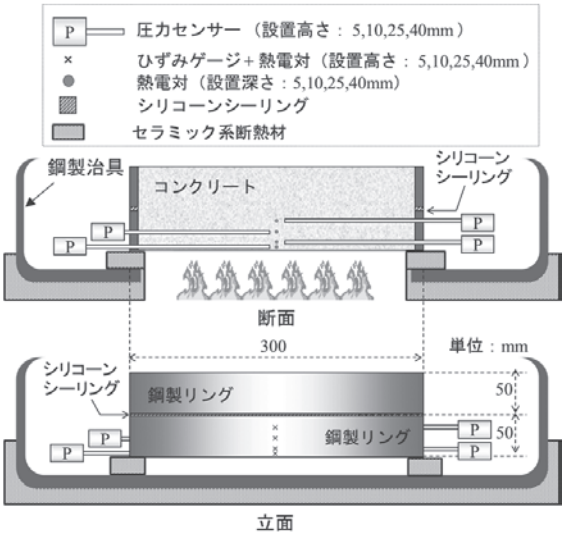
か？　② PP 繊維を混入しても爆裂が抑制できない状況ではどうするのか？　など，まだ，未解明の課題がある。

各学会においてコンクリート構造物の耐火設計の基準がある。すなわち，日本建築学会[6]では，設計基準強度 80 MPa 以上の高強度コンクリートを対象として，爆裂対策を設計に反映するよう求めている。加えて，爆裂対策の効果を確認するために実部材レベルの耐火試験を義務付けている。土木学会[7]においても，高強度コンクリート（60 MPa 以上）において，爆裂対策が必要であるとしている。加えて，両学会ともに高温環境下におけるセメント系材料の爆裂判定手法の標準化は未だになされていない。一方，著者[8]らのグループでは，これまでに拘束リングにコンクリートを充填した供試体を作製し，下面開口部の一面加熱による耐爆裂性評価試験（以下，リング拘束試験）を考案し種々の検討を進めている。ここでは，リング拘束試験によるコンクリートの爆裂評価法について実験的・解析的検討を紹介する。

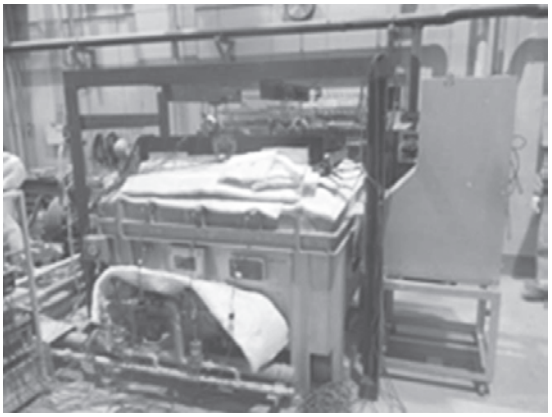
2. リング拘束試験による爆裂評価手法の実験的検討

(1) リング拘束供試体

図―3 にリング拘束試験方法の概要を示す。この方法は熱応力と蒸気圧とを合わせて考慮し，コンクリートの耐爆裂性を評価できるという特徴がある。すなわち，拘束鋼管の内部にコンクリートを打設し供試体を作製する。供試体開口部下面のコンクリート部分のみを加熱する。加熱には水平炉を用いる（**図―4**）。加熱によるコンクリートの膨張を拘束鋼管が拘束することにより，熱応力（圧縮応力）が生じる。コンクリートの膨張により生じる拘束鋼管のひずみを計測し，熱応力を算出できる。併せてコンクリート内部の蒸気圧を計測し，熱応力および蒸気圧を定量的に検討し，爆裂の有無と程度から爆裂判定が可能である。また，爆裂メカニズムとして引張ひずみ破壊モデルを提案し爆裂深さの経時変化を評価できる。



図―３　リング拘束試験方法



図―４　水平炉

(2) 拘束応力測定法

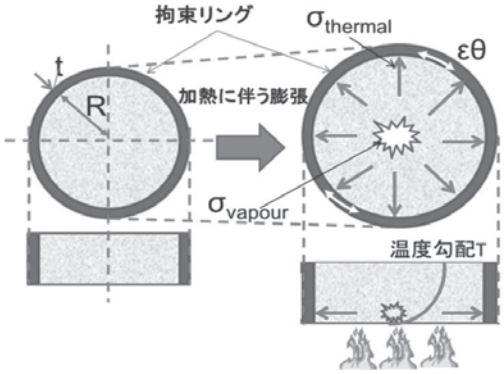
図―５に拘束応力測定方法を示す。図より，コンクリートの下面を加熱するとコンクリートは膨張する。この膨張を拘束リングが拘束するとき，拘束リングに円周方向ひずみ $\varepsilon\theta$ が生じる。このひずみより，式（1）を用いてコンクリートに生じる拘束応力を計算することができる。拘束応力に含まれる成分は式(2)のように熱応力と蒸気圧である。蒸気圧は別途，計測が可能であることから，熱応力を評価が可能である。熱応力と蒸気圧を測定できることから，爆裂時のコンクリート内部の応力状態が推定可能であり，爆裂のメカニズムの解明に寄与することができる。

$$\sigma_{re} = \varepsilon_{\theta} \cdot E \cdot t / R \tag{1}$$

$$\sigma_{re} = \sigma_{th} + \sigma_{vap} \tag{2}$$

ここに

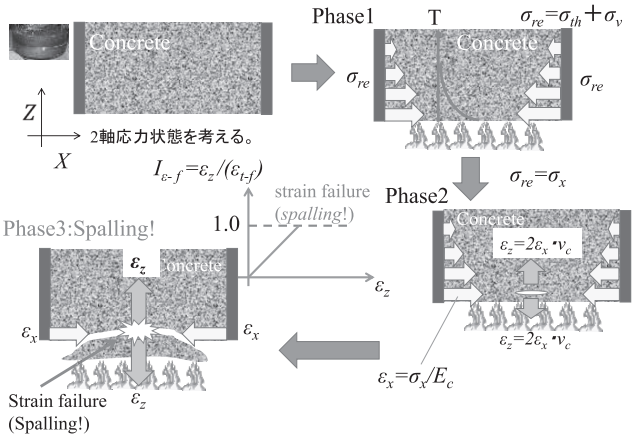
σ_{re}：拘束応力，σ_{th}：熱応力，σ_{vap}：蒸気圧，ε_{θ}：拘束リングの周方向ひずみ，E：拘束リングの弾性係数，t：拘束リングの厚み，R：拘束リングの半径



図―５　拘束応力測定方法

(3) 引張ひずみ破壊モデル

図―６に引張ひずみ破壊による爆裂モデルを示す。コンクリートの爆裂は２軸の圧縮破壊であると仮定した。加熱面に対して平行に生じる拘束応力とポアソン効果によって面外方向に生じる引張ひずみが限界値を超えると爆裂が生じると考えた。式（1）で得られた拘束応力を式（3）によってひずみに変換し，式（4）によって Z 方向にひずみに変換する。式(5)によって，引張限界ひずみと Z 方向の比をとり，引張ひずみ破壊指数が 1.0 を超える爆裂が生じるとした。ここで，弾性係数は温度依存性を考慮し，見かけのポアソン比と引張限界ひずみは既往の文献を参照した b)。



図―６　引張ひずみ破壊による爆裂モデル

$$\varepsilon_x = \sigma_{re} / E_c(T) \tag{3}$$

$$\varepsilon_z = 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon_x \tag{4}$$

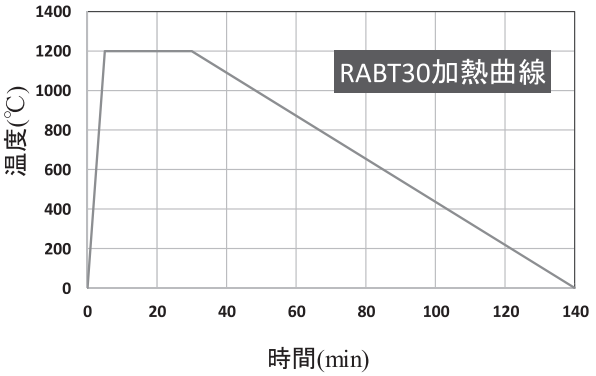
$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{t-f} \tag{5}$$

ここに

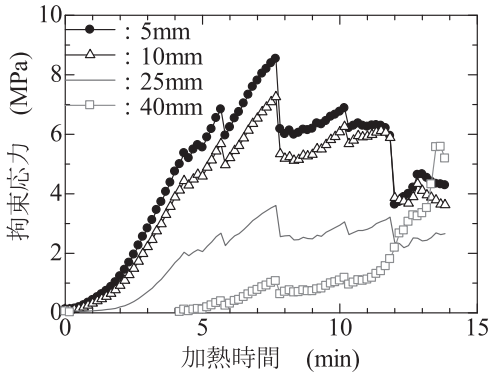
ε_x：加熱面の平行な圧縮ひずみ，$Ec(T)$：コンクリートの残存弾性係数，ε_z：供試体深さ方向の引張ひずみ，ν：見かけのポアソン比，ε_{t-f}：引張破壊限界ひずみ，$I_{\varepsilon-f}$：引張ひずみ破壊指数

(4) 実験結果

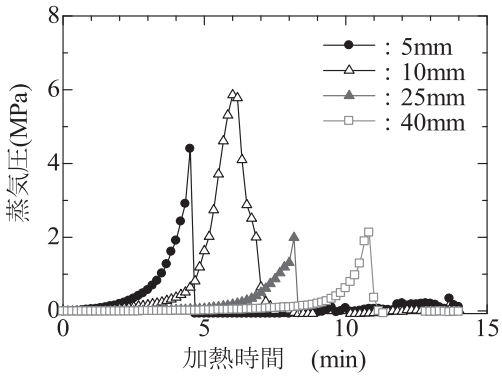
ここでは，高強度コンクリート（fc90 MPa）を対象とし，リング拘束加熱試験を実施した。加熱の温度条件は RABT30 加熱曲線（**図―7**）を用いた。RABT30 加熱曲線は 5 min で 1200 ℃まで昇温，1200 ℃を 25 min 保持，その後 110 min で常温まで除熱するドイツ規格の加熱曲線である。爆裂時間は，加熱開始 4-10 分程度であった。**図―8～11** に拘束応力 , 蒸気圧 , 爆裂状況 , 爆裂深さの推定結果を示す。拘束応力と蒸気圧の最大値は，8.6 MPa と 6.0 MPa であった。爆裂深さの最大値は 60 mm であった。引張ひずみ破壊モデルにより，爆裂深さを推定（見かけのポアソン比：0.2，引張破壊限界ひずみ：200，300 μ）した結果，実験値を精度よく推定できることがわかった。



図―7　RABT30 加熱曲線

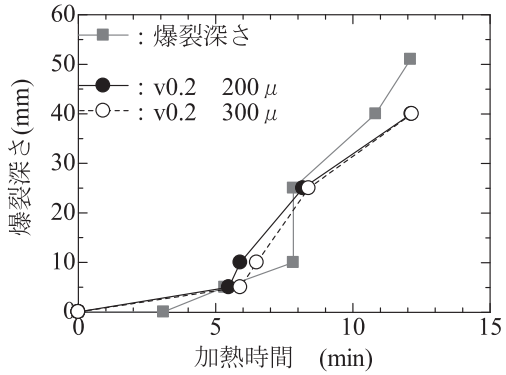


図―8　拘束応力



図―9　水蒸気圧

図―10　爆裂状況

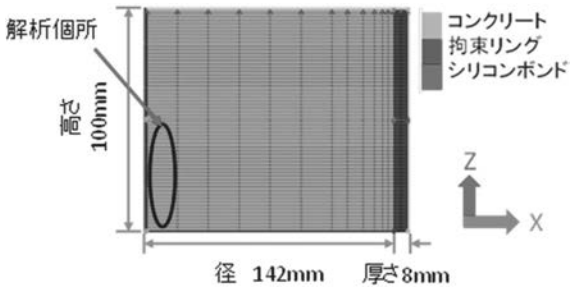


図―11　爆裂深さ（実験値と解析値の比較）

3. コンクリートの爆裂解析

(1) 解析モデル

FEM 解析にはコンクリートの温度応力解析ソフト（ASTEA-MACS）を使用した。**図―12** に解析モデルを示す。



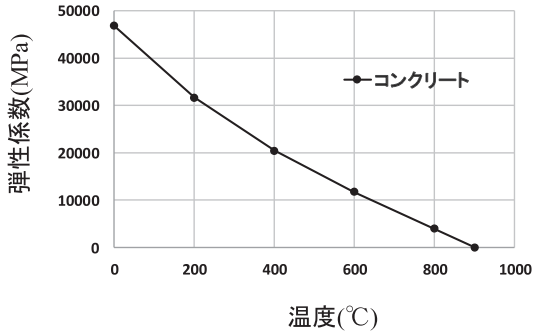
図―12　解析モデル（軸対称モデル）

解析では，拘束リング供試体の 1/2 軸対称モデルを用いた。供試体は高さ方向に 1.65 mm で 60 分割，径を 12 分割とし，拘束リングは厚さ 8 mm を 2 分割とした。本研究で使用した物性値は下記のとおりである。剥離モデルは，計算により得られた引張ひずみが引張破壊ひずみの値を超えることで要素が剥離するとした。

表―2 にコンクリートと鋼材およびシリコンの密度と初期温度および見かけのポアソン比を示す。コンクリートと鋼材の熱特性（熱伝導率，比熱）および力学特性（弾性係数, 圧縮強度, 引張強度）を組み込んだ。**図―13** にコンクリートの弾性係数と温度との関係を一例として示す。シリコンボンドの熱伝導率，比熱，弾性係数，圧縮強度，引張強度は一定とした。コンクリートおよび鋼材の弾性係数と圧縮強度および引張強度は日本建築学会[10]の高温時残存比をもとに設定した。また，コンクリートおよび鋼材の熱伝導率と比熱は田嶋ら[11]の研究をもとに考慮した。

表―2　材料の物性値（初期）

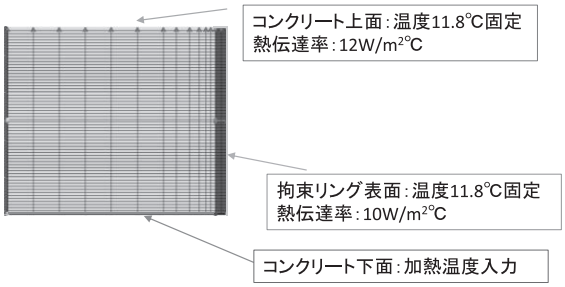
	コンクリート	鋼材	シリコンボンド
密度 (kg/m^3)	2400	7850	5800
初期温度 (℃)	20	11.8	20
ポアソン比	0.2	0.3	0.45



図―13　弾性係数と温度の関係（一例）

図―14 に熱伝達境界条件を示す。コンクリート上面の熱伝達率を 12 W/m^2 ℃とし，鋼材の熱伝達率を 10 W/m^2 ℃とした。加熱面の熱伝達率は 30 W/m^2 ℃とした。

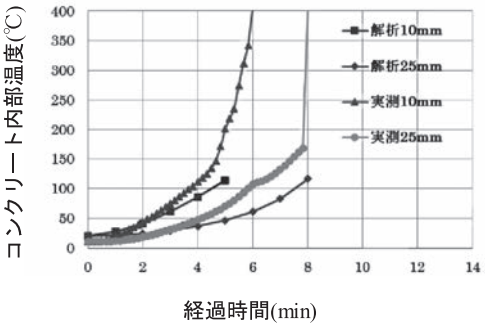
本解析では，式（5）に示す $I_{\varepsilon-f}$ が 1.0 を超えると，爆裂が生じると仮定した。爆裂が生じると，加熱面の要素が剥離し，次の要素に新しく熱伝達境界が形成されるものとした。解析で検討した項目は，コンクリート内部温度，拘束リング温度，爆裂深さとした。それぞれの項目の解析値を求め，実験値と比較した。引張ひずみ破壊指標による剥離モデルでは，限界引張ひずみは 500 μ とした。加熱に伴うみかけのポアソン比は 0.2 とした。加熱面の熱伝達率 hc は 30 W/m^2 ℃とした。



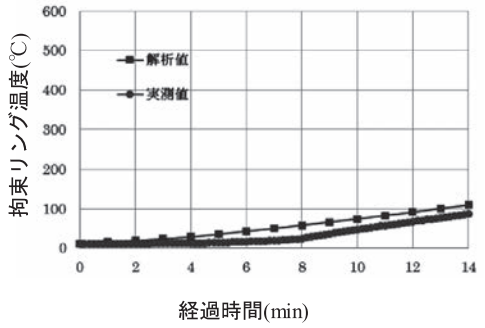
図―14　熱伝達境界

(2) 解析結果

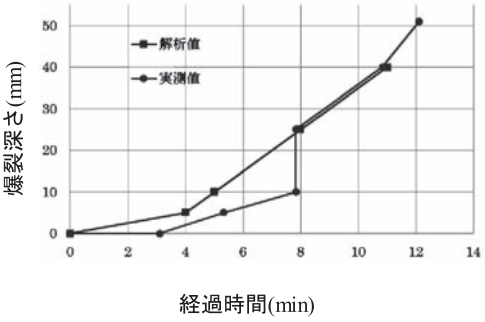
図―15 ～ 17 にコンクリート内部温度と拘束リング温度および爆裂深さの経時変化を示す。コンクリート内部温度は，10 mm と 25 mm それぞれ解析値が 5 min と 8 min まで実測値をよく再現できている。これは，爆裂が生じたため要素が剥離したことを意味している。コンクリート内部の実測値も爆裂によって，急激な温度上昇を生じていることを確認できるため，解析値は実測値をよく評価できていると考えられる。



図―15　コンクリート内部温度（解析値 VS 実測値）



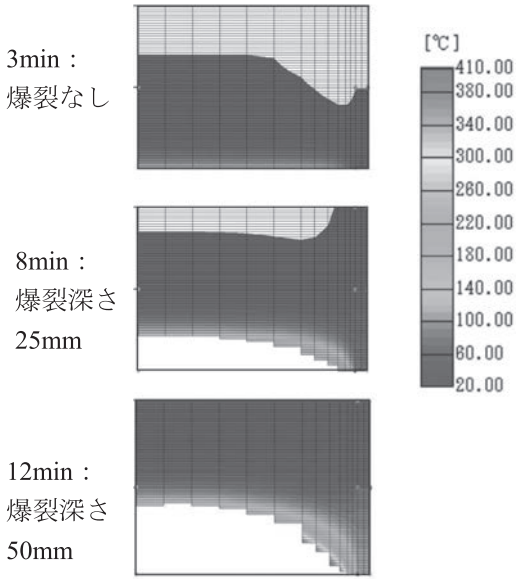
図―16　リング温度（解析値 VS 実測値）



図―17　爆裂深さ（解析値 V.S. 実測値）

拘束リングの温度の解析値は，実測値と比較してよく一致していることがわかる。これによって，加熱に伴うコンクリートの膨張を，拘束リングが拘束する現象を実験値に近い状態で再現できていることを意味している。爆裂深さの経時変化において，解析値は実測値をよく評価できている。すなわち，実測値は加熱後 3 min で爆裂が開始し 5 min で 5 mm，8 min で 25 mm，11 min で 40 mm となっているが，解析値も同様な傾向を示している。

図―18 に加熱開始から 3 min と 8 min および 12 min の爆裂深さと温度分布を示す。図より，加熱開始から 3 min では爆裂は生じていないが，コンクリート表面の温度は 120 ℃である。8 min の時点では供試体中央部が 25 mm ほど爆裂し，爆裂によって生じた加熱境界面の温度は 220 ℃である。加熱開始後 12 min で，爆裂深さは 40 mm 程度であり実験値をよく評価できていることがわかる。一方で，加熱後 30 min では，すべての要素が爆裂してなくなった。これは，爆裂によって，剥離境界面に新たに加熱境界が形成され，温度上昇から熱応力の上昇，深さ方向（Y 方向）のひずみが上昇し爆裂が進行するため，爆裂が止まらなかったと考えられる。また，本研究の解析モデルでは，水蒸気圧及び含水率，潜熱による影響が含まれていない。そのため，コンクリートの含水率に影響する比熱の値が本来の値よりも小さく設定されている。今後更に，検討を進めていく予定である。



図―18　爆裂コンター図（解析ケース②）

4. おわりに

本稿では，コンクリートの爆裂評価手法としてリング拘束供試体による加熱試験の概要と実験結果を紹介した。加えて，爆裂の剥離を模擬した解析的検討について紹介した。今後は，実 RC 部材の耐火試験結果のある配合についても検討を行いコンクリートの爆裂評価手法の確立を目指したいと考えている。

JCMA

《参考文献》

1）Bazant ZP., Proc. of the Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997, pp.155-164.
2）Anderberg Y., Proc. of the Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997, pp.69-73.
3）C. Bailey, G. A. Khoury: Performance of Concrete Structures in Fire, A cement and concrete industry publication, MPA-The Concrete Centre, 2011.
4）日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能研究委員会」報告書，2012.
5）トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針（案）土木学会，2014.
6）日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5，2009.
7）土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），2012.
8）谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕一，六郷恵哲：高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案，土木学会論文集 E2, Vol.70, No.1. pp.104-117, 2014.
9）道越真太郎，小林裕，黒岩秀介：圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp.169-174, 2007.
10）日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能の関する研究委員会，pp.105-112, 2012.5.
11）田嶋仁志，岸田政彦，神田亨，森田武：火災高温時におけるシールドトンネル RC 覆工断面の変形挙動解析，土木学会論文集 E, Vol62, No.3, pp.606-618, 2006.9.

［筆者紹介］
小澤　満津雄（おざわ　みつお）
群馬大学大学院
理工学府　環境創生部門