論文　引張ひずみ破壊モデルを適用した火災時のコンクリートの爆裂解析

明石　孝太*1・小澤　満津雄*2・藤本　謙太郎*3・鎌田　亮太*4

要旨：リング拘束試験による高温環境下におけるコンクリートの爆裂試験を対象として，2 次元 FEM によるコンクリートの爆裂解析を行った。爆裂基準は熱応力に基づく引張ひずみ破壊モデルを適用し，コンクリートの剥離現象をモデル化した。その結果，爆裂深さの経時変化を推定可能であることが明らかになった。一方で，加熱を停止しても爆裂現象が進行することも確認し，爆裂解析の課題も確認できた。

キーワード：高強度コンクリート，爆裂，熱応力解析，剥離モデル，拘束リング，引張ひずみ破壊

1. はじめに

火災時における高強度コンクリートの安全性を確保する上で，コンクリートの耐火対策は必要不可欠である。コンクリートが高温加熱を受けると，表層部が爆発的に剥離する爆裂現象を生じることがある。爆裂現象により，鉄筋コンクリート部材のかぶりが減少し，内部の鉄筋が直接加熱されると，構造体として崩壊の危険性がある。爆裂のメカニズムとしては，熱応力説や水蒸気圧説が挙げられる(**図-1**)[1)]が，いまだ確たる結論が得られていないのが現状である。本研究グループでは，熱応力説に着目して鋼製拘束リングにコンクリートを充填した供試体の一面加熱を実施し，拘束応力を計測する方法を提案している[2),3),4)]。この方法は，拘束リングのひずみから拘束応力を算出し，同時にコンクリート内部の水蒸気圧も計測し，爆裂への影響を検討できる。その結果，熱応力の上昇が爆裂に寄与していることを確認している。

更に，谷辺らはコンクリートの爆裂メカニズムとして，熱応力説を考慮した引張ひずみ破壊モデルを提案し，爆裂進行深さをある程度の精度で評価できることを明らかにしている。一方，コンクリートの爆裂に関する解析的検討は，種々の検討がなされている[5),6)]。吉田らは剛体バネモデル(RBSM)を用いてコンクリートの爆裂を検討している[7)]。RBSM では，局所的な破壊を評価でき，視覚的にコンクリートが爆裂する現象を評価している。一方，FEM 解析は，RBSM のように局所的な破壊を評価することは難しいが，コンクリート部材の内部に生じる応力やひずみなど全体的な挙動を把握するには有効な手法である。本研究グループでもこれまでに，3 次元 FEM 解析により，内部の応力状態を定性的に評価することを試みている[8)]。すなわち，コンクリートの爆裂を圧縮破壊と仮定して解析を行っている。更に，引張ひずみ破壊モデルの解析的検討を行っている。しかしながら，RBSM のように剥離をモデル化するまでには至っていなかった。そこで，本研究では谷辺ら[2)]が提案した引張ひずみ破壊による爆裂モデルを適用し，2 次元 FEM 解析を実施し剥離現象を再現することを試みた。解析にはコンクリートの温度応力解析ソフト ASTEA-MACS を用いた。

2. コンクリートの爆裂解析

2.1　引張ひずみ破壊モデル

コンクリートの爆裂モデルとして，谷辺らが提案した引張ひずみ破壊による破壊基準を用いた。この破壊基準

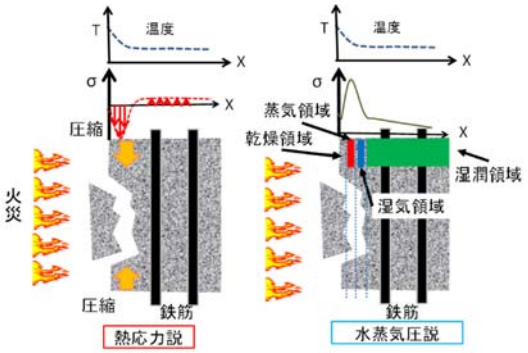

図-1　爆裂メカニズム

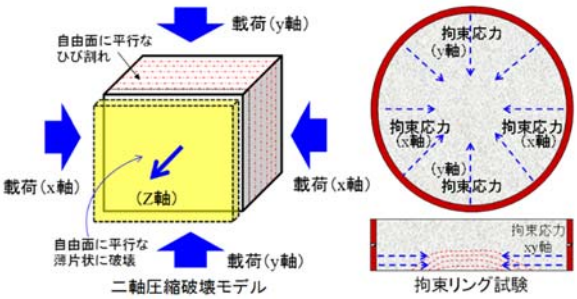

図-2　引張ひずみ破壊プロセスのイメージ

*1 群馬大学　工学部社会環境デザイン工学科　学生　(学生会員)
*2 群馬大学　理工学研究院　環境創生部門　准教授　博士(工学)　(正会員)
*3 (株)ピーエス三菱　東京土木支店土木技術部設計グループ　修士(工学)　(正会員)
*4 太平洋マテリアル(株)　開発研究所　修士(工学)　(正会員)

では，丹羽らの報告(二軸圧縮応力化では自由面に平行(xy 面)に薄片状の破壊が生じる)をもとにしている(図-2)[9]。図-3 に引張ひずみ破壊モデルの概要を示す。まず，拘束リング供試体が二軸応力状態にある時を考える。段階 1 で示すように加熱によるコンクリートの熱膨張をリングが拘束することで，コンクリートの中心に向けて外側から拘束応力($\sigma_{r\theta}$ ($=\sigma_x$)) が加熱面に平行に作用する。その時に発生する x 軸方向のひずみ(ε_x)から面外方向のひずみ(ε_z) を算出し，面外方向ひずみ(ε_z) が引張破壊ひずみ($\varepsilon_{t\text{-}f}$) を超えることで爆裂が生じると仮定するモデルである。

2.2 拘束応力の算出方法

拘束応力は，拘束リングに発生した周方向のひずみより式(1)を用いることで算出した。

$$\sigma_{r\theta} = \varepsilon_\theta \cdot E_s \cdot t / R \tag{1}$$

ここに，

$\sigma_{r\theta}$: 拘束応力
ε_θ: 円周方向ひずみ
E_s: 拘束リングの弾性係数
t : 拘束リングの厚み
R : 拘束リングの内半径

2.3 引張ひずみ破壊指数(Iε-f)

ここでは，引張ひずみ破壊指数について説明する。拘束応力は加熱面に平行に作用するが，見かけのポアソン効果により面外方向に引張ひずみ(εz)が生じる。この引張ひずみが引張破壊ひずみ(εt-f)を超えると爆裂が生じると仮定した。引張ひずみの算出式を式(2)～(4)に示す。見かけのポアソン比と引張破壊時のひずみは道越らの研究を参考にした[10]。

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_{r\theta}}{E_c} \tag{2}$$

$$\varepsilon_z = 2\varepsilon_x \cdot \nu_c \tag{3}$$

$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{t-f} \geq 1.0 \tag{4}$$

ε_x: 面内直ひずみ
E_c: 残存弾性係数(建築学会式[11])
ε_z: 面外直ひずみ
ν_c: 見かけのポアソン比(0.2)
ε_{t-f}: 引張破壊ひずみ(200,500μ)
$I_{\varepsilon-f}$: 引張ひずみ破壊指数(1.0以上で引張ひずみ破壊を生じると仮定する)

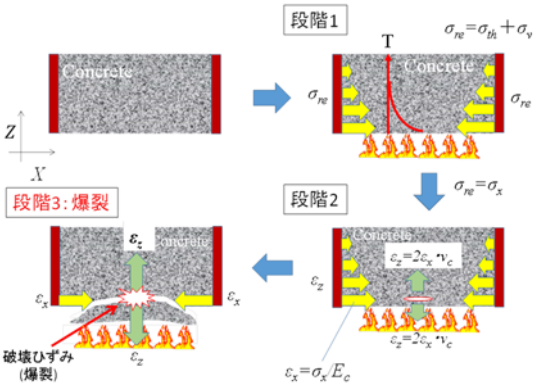

図-3　引張ひずみ破壊モデル

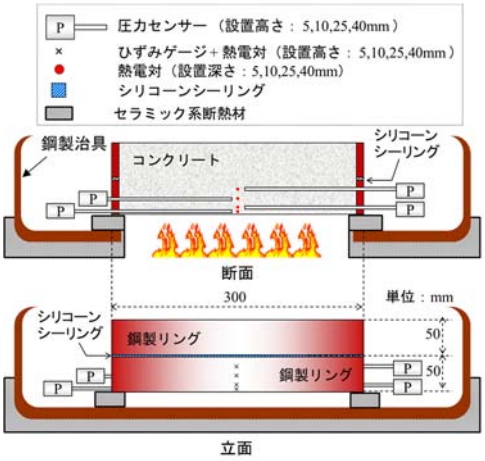

図-4　リング拘束試験の概要

表-1　コンクリートの配合

W/C	単位量(kg/m^3)					
	W	C	S1	S2	G	Ad
0.3	150	500	359	372	1169	4

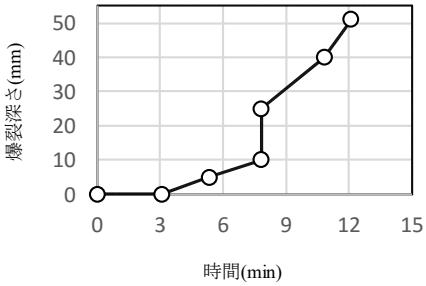

図-5　爆裂深さの経時変化

図-6　加熱面の損傷状況

2.4 リング拘束試験

解析対象は鉄羅ら[12]が報告したリング拘束供試体の加熱試験結果を用いた。**図-4** にリング拘束供試体の概要を示す。供試体は拘束鋼管内にコンクリートを充填した。加熱は下面からの一面加熱とした。すなわち，φ300mm×h50mm×t8mm の鋼管を 2 段重ねとし内部にコンクリートを充填した供試体を用いた。加熱は下面開口部の一面加熱とした。加熱には RABT30 加熱曲線を用いた。コンクリート内部の加熱面から 5，10，25，40mm の位置に熱電対を設置した。拘束リング側面部の加熱面から 5,10.35,40mm の位置にひずみゲージと熱電対を対極に設置した。**表-1** にコンクリートの配合を示す。W/C は 0.3 とし，セメントの種類は早強ポルトランドセメントとした。粗骨材は輝緑凝灰岩を使用した。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。**図-5, 6** にコンクリートの爆裂深さの経時変化と加熱後の損傷状態を示す。**図-5** より加熱後 3min で爆裂が生じ 12min まで継続した。最終的な爆裂深さは 50mm 程度であった。

2.5 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-7** に解析モデルを示す。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 1.65mm で 60 分割，径を 12 分割とし，拘束リングは厚さ 8mm 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。**図-8～12** に解析に用いた物性値を示す。ここでは，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。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[11]の高温時残存比をもとに設定した[13]。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[14]の研究をもとに考慮した。

2.6 熱伝達境界面及び加熱条件

図-13 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 12W/m²℃とし，鋼材の熱伝達率を 10W/m²℃とした。加熱面の熱伝達率は 30 W/m²℃とした。

本解析では，式(4)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。加熱の温度条件は RABT30 加熱曲線(**図-14**)を用いた。RABT30 加熱曲線は 5min で 1200℃まで昇温，1200℃

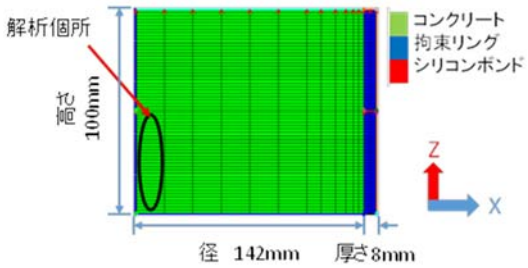

図-7 解析モデル(2 次元軸対称モデル)

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/m³)	2400	7850	5800
初期温度 (℃)	20	11.8	20
ポアソン比	0.2	0.3	0.45

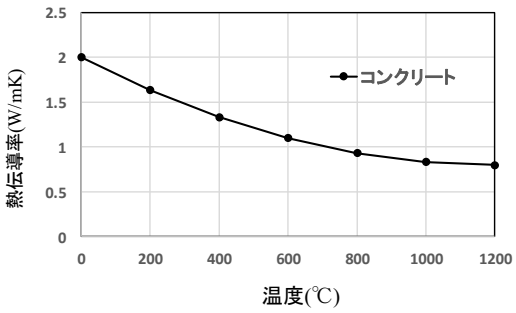

図-8a) コンクリートの熱伝導率

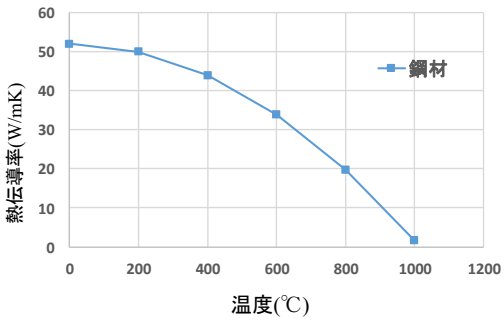

図-8b) 鋼材の熱伝導率

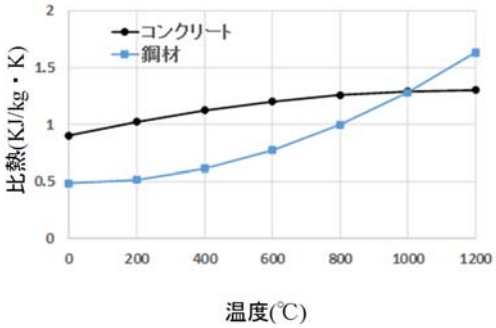

図-9 比熱

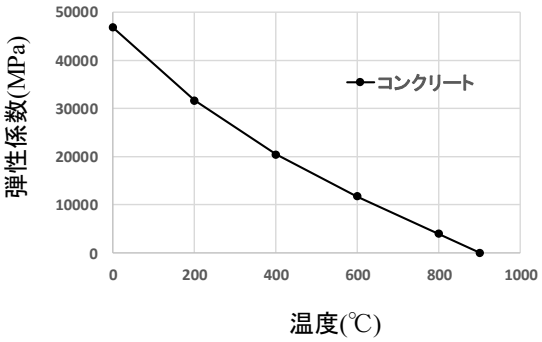

図-10a)　コンクリートの残存弾性係数

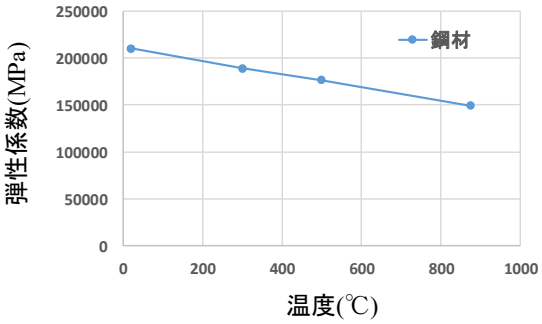

図-10b)　鋼材の残存弾性係数

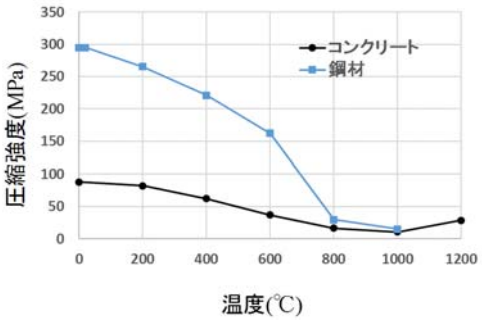

図-11　残存圧縮強度

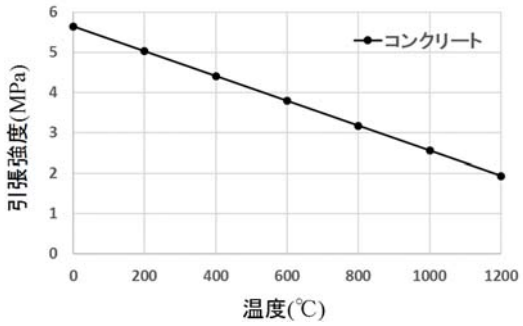

図-12a)　コンクリートの引張強度

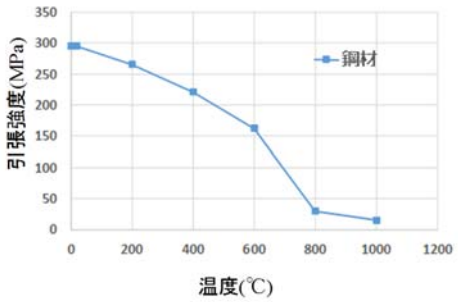

図-12b)　鋼材の引張強度

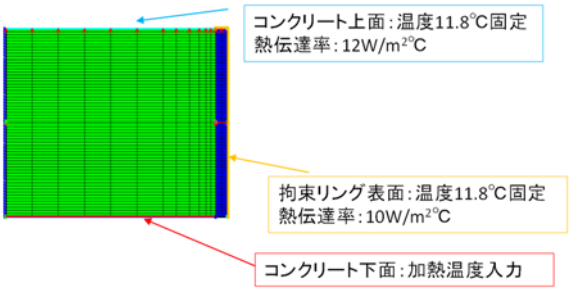

図-13　熱伝達境界条件

を 25min 保持，その後 110min で常温まで徐冷するドイツ規格の加熱曲線である。

2.7 検討項目

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。**表-3** に解析ケースを示す。引張ひずみ破壊指標による剥離モデルでは，限界引張ひずみは道越らの研究をもとに 200μ と 500μ 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 30W/m²℃とした。解析では 2 ケースを検討した。

3. 解析結果

3.1 解析ケース①

図-15～17 に解析ケース①における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，10mm と 25mm とも解析値は 3min まで実測値をよく再現できているが，それ以降は値が無い状態である。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。

拘束リングの温度は，加熱初期の 4min までは実測値と解析値はよく一致している。4min 以降は，解析値の方が大きくなる傾向となった。これは，爆裂によって要素が剥離し熱境界が新たに形成されたため，リングの温度が上昇しやすくなったものと考えられる。

爆裂深さの経時変化において，解析値は実測値よりも爆裂開始が早くなっていることがわかる。解析値では加熱後 2min で爆裂が生じ，6min で 40mm に達した。これは，引張ひずみ破壊限界値が 200μ と小さいためであると考えられる。

3.2 解析ケース②

図-18～20 に解析ケース②のコンクリート内部温度と

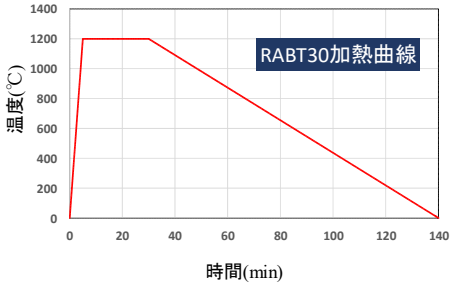

図-14　RABT30 加熱曲線

表-3　解析ケース

	ν	ε_y（μ）	hc (W/m²℃)
①	0.2	200	30
②	0.2	500	30

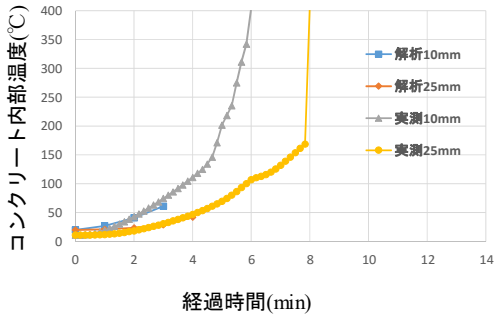

図-15　コンクリート内部温度（解析ケース①）

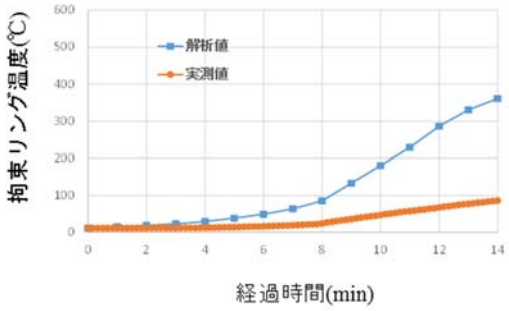

図-16　拘束リング温度（解析ケース①）

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，10mm と 25mm それぞれ解析値が 5min と 8min 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。

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 3min で爆裂が開始し 5min で 5mm，8min で 25mm，11min で 40mm と

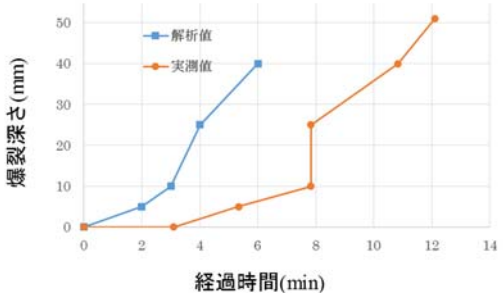

図-17　爆裂深さの経時変化（解析ケース①）

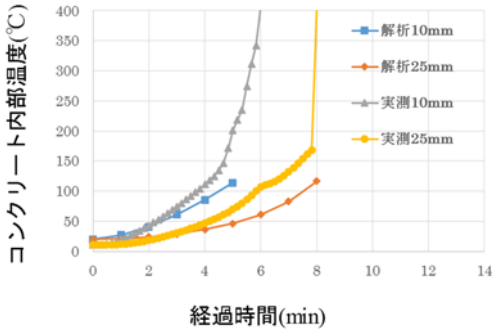

図-18　コンクリート内部温度（解析ケース②）

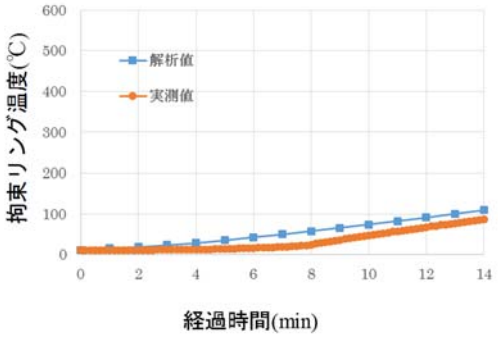

図-19　拘束リング温度（解析ケース②）

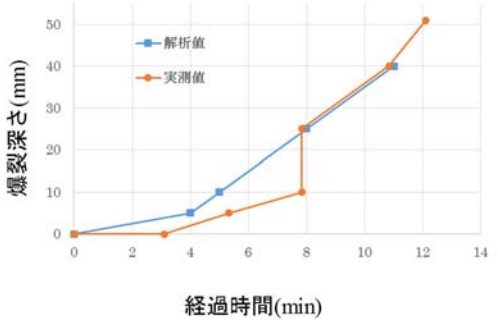

図-20　爆裂深さの経時変化（解析ケース②）

なっているが，解析値も同様な傾向を示している。

3.3　爆裂コンター図（解析ケース②）

図-21 に加熱開始から 3min と 8min および 12min の爆裂深さと温度分布を示す。図より，加熱開始から 3min 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。8min の時点では供試体中央部 25mm 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 12min で，爆裂深さは 40mm 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 30min 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。

4. まとめ

本研究では，引張ひずみ破壊モデルを用いて加熱時の爆裂解析を実施した。その結果，爆裂深さの解析値は実測値を 12min までよく評価することができた。一方で，実験では加熱後 12min 程度で爆裂は止まるが，解析では爆裂が進行し続ける結果となった。今後，蒸気圧や含水率の影響を考慮し，爆裂が止まる基準を考える必要があると考える。加えて，実部材レベルへの適用が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は，科学技術研究補助金(基盤研究(C)，課題番号:25420459，代表：小澤満津雄)および NEXCO 東日本研究助成の補助を受けて行った。ここに謝意を表する。

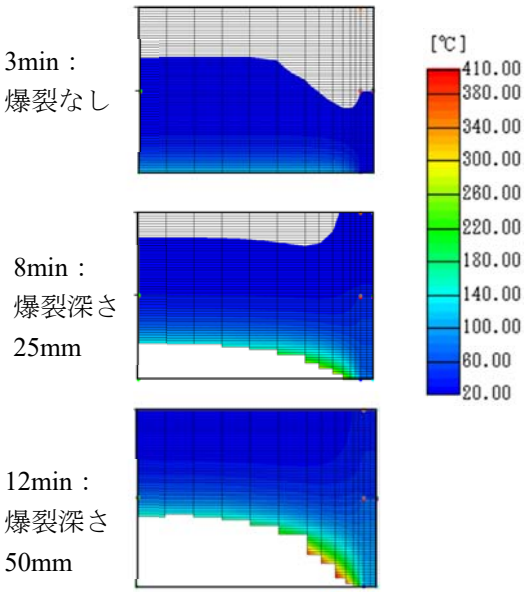

図-21　爆裂コンター図（解析ケース②）

参考文献

1) 森田武:コンクリートの爆裂とその防止策，コンクリート工学，Vol.45,No.9,pp.87-91,2007.9
2) 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
3) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲:拘束リング試験法を適用したコンクリート高温環境下における耐爆裂性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol34,No.1,pp.1138-1143,2012
4) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲:拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35,No.1,pp.1135-1140,2013
5) Ulm,F.J., Coussy,O. and Bamnt,Z.P. : The ``Chunnel`` Fire. Ⅱ Analysis of Concrete Damage, Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, No.3, pp.283-289, 1999
6) Koury.G.A, Majorane,C.E.. Pesavento, F. and Schrefler,B.A:Modeling of heated concrete,Magazine of Concrete Research, Vol.54, No.2, pp.77-1101, 2002
7) 吉田敬司，中村光，国枝稔，小澤満津雄:高温加熱環境下でのコンクリートの内部損傷および爆裂現象の評価手法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1,CD-ROM,1193-1198,2011
8) 石塚遼，小澤満津雄，谷辺徹，鎌田亮太:拘束リング試験方法によるコンクリートの爆裂性状の解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36,No.1,pp.1342-1347,2014
9) 丹羽義次，小柳洽，小林昭一:人工軽量コンクリートの三軸圧縮破壊条件，土木学会論文集，第 143 号,pp.28-35,1967.7
10) 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
11) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.63-65，2009
12) 鉄羅健太，小澤満津雄，竹渕貴博，谷辺徹:リング拘束試験方法によるコンクリートの爆裂評価と引張ひずみ破壊モデルの解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol37,No1,pp.1015-1020,2015
13) 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
14) 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