

論文 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

鉄羅 健太*1・小澤 満津雄*2・竹渕 貴博*3・谷辺 徹*4

要旨: 本研究では、著者らのグループで提案している高温環境下におけるコンクリートの爆裂評価手法について解析的検討を行った。すなわち、拘束リングにコンクリートを充填した供試体のモデルを対象として一面加熱した際の挙動を検討した。コンクリートの爆裂判定には引張ひずみ破壊モデルを適用した。その結果、爆裂初期の挙動を評価可能であることが明らかになった。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂, 熱応力解析, 拘束リング, RABT 曲線, 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、表層部が爆裂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)が、未だに確たる結論が得られていないのが現状である。水蒸気圧説については、コンクリート内部の水蒸気圧計測を実施し爆裂との関係を検討している例がある。例えば、Kalifa らの報告²⁾では、2~3.7MPaの範囲であるとしている。一方、水蒸気圧が上昇しても爆裂が生じない場合もあり、熱応力との複合作用を検討する必要があることを示している。一方、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^{3),4),5)}。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するものである。検討の結果、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。更には、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^{6),7)}。最近の検討では、吉田らが剛体バネモデル(RBSM)を用いてコンクリートの爆裂を検討している⁸⁾。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表現している。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

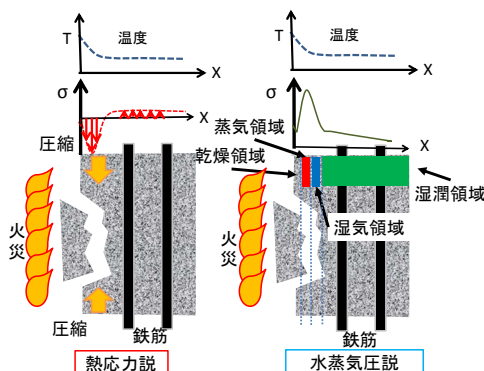


図-1 爆裂メカニズム

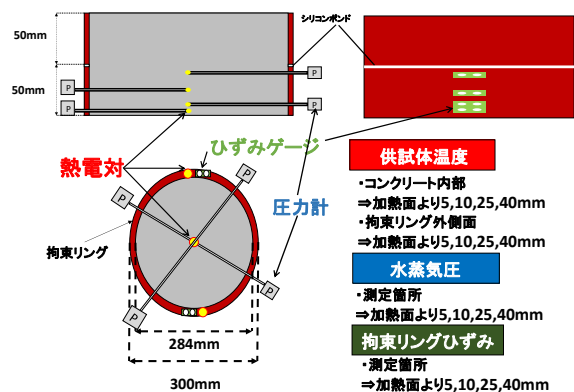


図-2 供試体概要

表-1 コンクリートの配合

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

*1 群馬大学 工学部 社会環境デザイン工学科 (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 群馬大学 工学部 社会環境デザイン工学科

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火建築材料グループ グループリーダー 博士(工学) (正会員)

ど全体的な挙動を把握するには有効な手法であると考えられる。本研究グループでも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⁹⁾。すなわち、コンクリートの爆裂を圧縮破壊と仮定し評価を試みている。一方で、引張ひずみ破壊モデルを解析に適用した例は少ないのが現状である。そこで本研究では、谷辺ら³⁾が提案した引張ひずみ破壊モデルを用いて、2次元FEM解析を実施した。すなわち、拘束リングにコンクリートを充填した供試体の加熱時の爆裂挙動の実験と解析から引張ひずみ破壊モデルの適用性を検討した。

2. リング拘束試験

2.1 コンクリートの配合

充填したコンクリートの配合を表-1に示す。W/Cは0.3とし、セメント(C)の種類は早強ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)とした。細骨材は佐野市細目砕石砕砂(S1)(絶対密度2.60g/cm³)と大間々小平産砕砂(S2)(絶対密度2.68g/cm³)を使用した。粗骨材(G)は輝緑凝灰岩(絶対密度2.83g/cm³)を使用した。粗骨材の最大寸法は25mmとした。混和剤はポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。供試体は打設後1日で脱枠し2か月間湿布養生を行った。表-2に力学特性(材齢62日)および含水率を示す。

2.2 供試体と加熱試験

図-2に供試体概要を示す。拘束リングは外径300×高さ50×肉厚8mmの鋼製リングを2段重ねにして、外径300×高さ100×肉厚8mmの拘束リングとした。供試体中心部の加熱面から5,10,25,40mmの位置に熱電対を配置した。コンクリート内部の蒸気圧を計測する為に、加熱面から5,10,25,40mmの位置に圧力計測用パイプを設置した。圧力パイプの外径と内径はそれぞれ5mmと2mmである。拘束リングの円周方向のひずみを計測するために、リング外周の加熱面から5,10,25,40mmの位置にひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは対極に2枚ずつ合計8枚設置した。加熱条件はコンクリートの爆裂現象に大きく影響する。本研究ではRABT30加熱曲線を用いた。図-3にRABT30加熱曲線を示す。RABT30は5minで1200℃まで昇温、1200℃を25min保持、その後110minで常温まで徐冷を採用した。なお、コンクリートの爆裂規模を評価するため、加熱試験後に供試体の加熱表面からの欠損深さ(爆裂深さ)を20mm間隔で計測した。爆裂深さの計測結果から、爆裂深さ分布を求めた。

2.3 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。

$$\sigma_{r\theta} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot t/R \quad (1)$$

表-2 力学特性(材齢62日)および含水率

圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%)
80	45	5.3	4.0

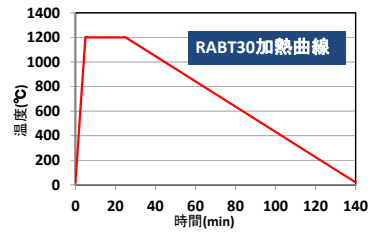


図-3 RABT30加熱曲線

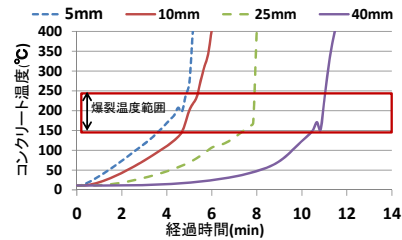


図-4 コンクリート温度

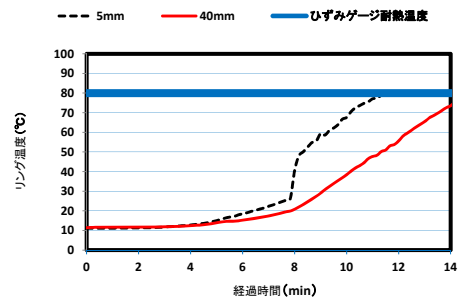


図-5 拘束リング温度

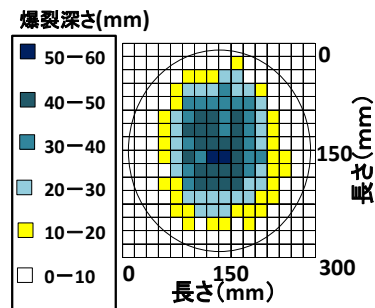


図-6 爆裂深さ分布

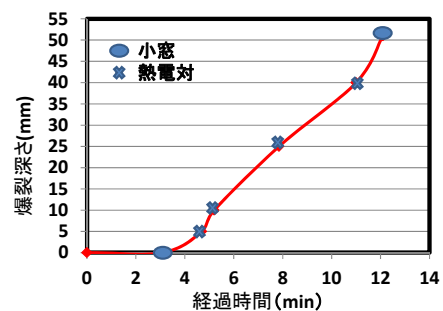


図-7 爆裂深さの経時変化

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

2.4 引張ひずみ破壊指標 ($I_{\varepsilon-f}$)

ここでは、引張ひずみ破壊指標について説明する。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 (ε_z) が生じる。この引張ひずみが引張破壊ひずみ (ε_{t-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⁾。

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_{r\theta}}{E_c} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = 2\varepsilon_x \cdot \nu_c \quad (3)$$

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

ε_x : 面内直ひずみ
 E_c : 残存弾性係数(建築学会式)
 ε_z : 面外直ひずみ
 ν_c : 見かけのポアソン比(0.15, 0.2, 0.3)
 ε_{t-f} : 引張破壊ひずみ(200, 300, 400, 500 μ)
 $I_{\varepsilon-f}$: 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)

2.5 実験結果と爆裂深さの評価

図-4 にコンクリートの内部温度の経時変化を示す。供試体内部温度は、加熱面に近い位置から温度上昇が見られる。例えば、加熱面から5mm位置は4.5minまでは250℃以下を示すが、それ以降急激な温度上昇を示している。これは、5mm位置まで爆裂が生じ、炉内温度に近づいていることを示したと考えられる。以下、10,25,40mm位置の熱電対も同様な傾向を示した。図-5 に拘束リングの5mmと40mm位置の温度変化を示す。今回、拘束リングには常温用ひずみゲージを貼付した。常温用ひずみゲージの温度補正限界値は80℃であるため、拘束リングの温度を確認する必要がある。図より、5mm位置の温度は加熱後、11min程度で80℃となった。40mm位置は15minで80℃を示した。リング温度の計測結果より、5mmと40mm位置ではそれぞれ、約11minと14min程度までは計測が可能であることがわかる。図-6 に爆裂深さ分布を示す。爆裂規模を評価した結果、供試体厚み100mmに対して、最大爆裂深さが55mmとなり、全厚の約5割の断面欠損が生じた。図-7 に爆裂深さの経時変化を示す。●は小窓

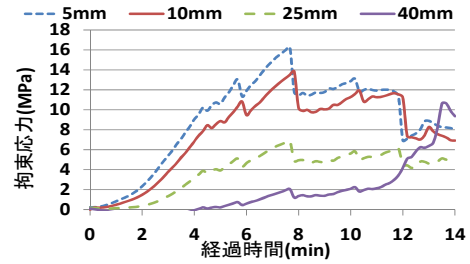


図-8 拘束応力の経時変化

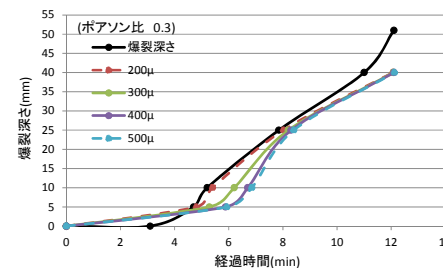
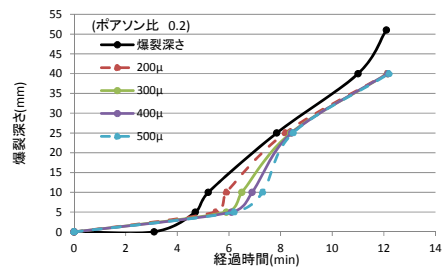
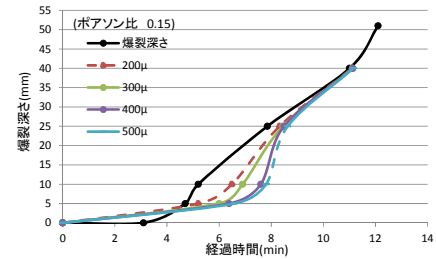


図-9 推定爆裂深さ

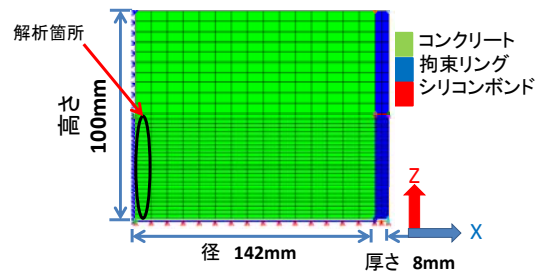


図-10 解析モデル

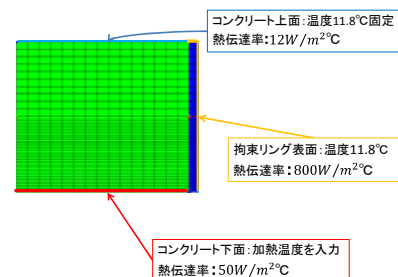


図-11 熱伝達境界条件

観察より判断した時間であり、×は熱電対の温度変化より判定しものである。爆裂深さの経時変化は、水平ガス炉の小窓より爆裂片の落下を観察すること、および、コンクリート内部の各熱電対が急激な温度上昇を示した時間の情報と併せて推定した結果を爆裂深さとした。図より、爆裂は加熱開始後 3min から開始し、12min 程度まで継続した。上記より、議論の対象は、3min から 12min までとする。図-8 に拘束リングのひずみ計測結果から式(1)を用いて算出した拘束応力と経時変化を示す。ひずみデータは、零点移動の温度補正データを用いて補正を行った。図より、5mm の拘束応力は、加熱開始 2min で拘束応力が急上昇し、加熱後 5min で 10MPa 程度となった。その後、拘束応力の最大値は 16MPa 程度となった。加熱面から 10,25,40mm の最大値はそれぞれ 14,7,11MPa 程度となった。図-8 で得られた拘束応力より、式(2)~(4)を用いて爆裂深さを評価した。図-9 に爆裂深さの推定結果を示す。

す。見かけのポアソン比と引張破壊ひずみをそれぞれ、0.15~0.3 と 200~500 μ に設定して評価した。その結果、設定した範囲内では、推定値は実験値をある程度の精度で 40mm まで評価できた。

3. FEM 解析概要

3.1 解析モデルと物性値

FEM 解析にはコンクリートの温度応力解析ソフト (ASTEAMACS) を使用した。図-10 に解析モデルを示す。解析対象は拘束リング供試体の断面の 1/2 モデルとした。供試体の下半分では、高さ方向を 0.5mm 幅で分割、上半分では、高さ方向を 2mm 幅で分割、径 142mm を約 10mm 幅で 15 分割とした。拘束リングは厚さ 8mm を 2 分割とした。表-3 に解析で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

解析手順

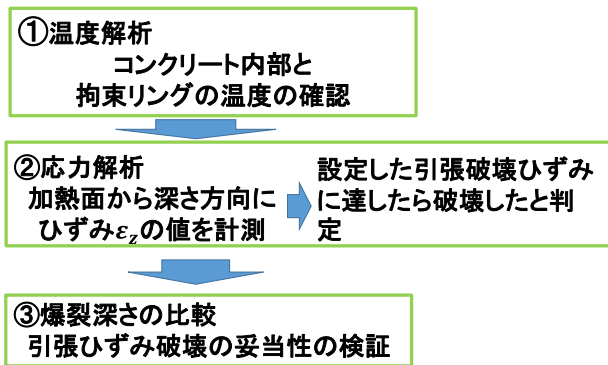


図-12 解析手順

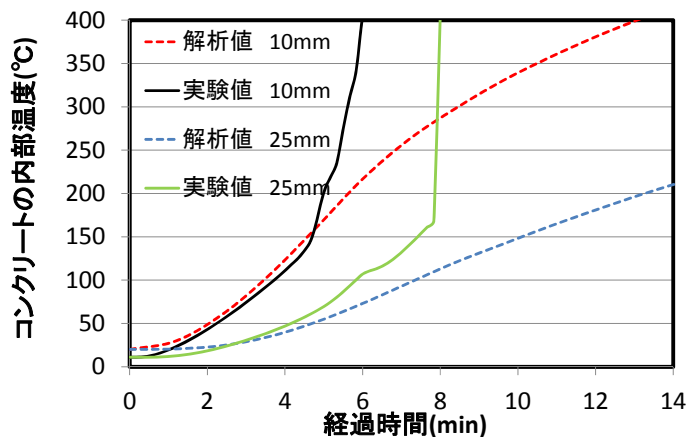


図-13 コンクリート内部温度

表-3 物性値

T=温度	コンクリート	鋼材	シリコンバンド
密度 (kg/m ³)	2400	7850	5800
初期温度	20°C	11.8°C	20°C
ポアソン比	0.15, 0.2, 0.3	0.3	0.45
熱伝導率 {W/(m·K)}	$\text{ram}_c = \begin{cases} 2.0 - 0.24(T/120) \\ +0.012(T/120)^2 \end{cases} \times 0.008598$	$\text{ram}_s = (51.91 - 5.03 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \times 0.008598$	1
比熱 (kJ/kg·K)	$\text{sp}_c = \begin{cases} 0.9 + 0.08(T/120) \\ -0.004(T/120)^2 \end{cases} \times 0.2389$	$\text{sp}_s = (0.482 + 7.995 \cdot 10^{-7} \cdot T^2) \times 0.2389$	1.7
弾性係数 (MPa)	温度0~20°C $E_c=45000$ 温度20~1200°C以上 $E_c=3.0e-5 \times T^3 + 0.0668 \times T^2 - 87.765 \times T + 46772$ 温度875°C $E_c=1.0$	温度0~20°C $E_s=40000$ 温度20~1200°C以上 $E_s=0.0225 \times T^2 - 66.155 \times T + 41653$ 温度875°C $E_s=1.0$	1
圧縮強度 (MPa)	温度0~20°C FC=80 温度20~1200°C $\text{FC}=7.0e-7 \times T^3 - 0.0002 \times T^2 + 0.046 \times T + 78.68$ 温度 1000°C FC=0.5	温度0~20°C FC=100 温度20~1200°C以上 $\text{FC}=2.0e-5 \times T^2 - 0.1094 \times T + 99.744$ 温度1000°C FC=0.5	4
引張強度 (MPa)	温度0~20°C FT=5.3 温度20~1200°C $\text{FT}=-1.0e-6 \times T^2 + 0.0031 \times T + 5.6522$ 温度800°C FT=0.1	温度0~20°C FT=3 温度20~1200°C $\text{FT}=-9.0e-7 \times T^2 + 0.0027 \times T + 2.9448$ 温度800°C FT=0.1	3

注)T: 温度

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。コンクリート及び鋼材のヤング係数と圧縮強度および引張強度は日本建築学会の高温時残存比をもとに設定した¹¹⁾。また、コンクリート及び鋼材の熱伝導率と比熱は田嶋ら¹²⁾の研究をもとに考慮した。

3.2 熱伝達境界面および加熱条件

図-11に熱伝達境界条件を示す。加熱面の熱伝達率を $50 \text{ W/m}^2\text{C}$ とした。コンクリート上面の熱伝達率を $12 \text{ W/m}^2\text{C}$ とし、鋼材の熱伝達率を $800 \text{ W/m}^2\text{C}$ とした。鋼材の熱伝達率は、通常 $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ 程度だが、今回の拘束リングの温度の実測値に合うように上記の値を用いた。鋼材の熱伝達率については今後の検討課題としたい。加熱の温度条件は RABT 30 加熱曲線で与えた。

3.3 検討項目

図-12に解析手順を示す。まず、温度解析により、コンクリート内部温度と拘束リングの温度を計算した。その後、応力解析を実施した。応力解析では、加熱面から深さ方向に引張ひずみ ϵ_z を確認した。引張ひずみ ϵ_z と引張破壊ひずみ ϵ_{t-f} との比 $I_{\epsilon-t}$ より、引張ひずみ破壊が生じているかを判定した。次に、 $I_{\epsilon-t}$ から推定した深さと拘束リング試験で得られた爆裂深さの経時変化を比較した。

4. 解析結果と考察

4.1 温度解析

図-13にコンクリート内部温度（加熱面から 10mm, 25mm）の経時変化について実測値と解析値の比較を示す。加熱面から 10mm 位置では、加熱から 5min までは精度良く評価できている。5min 以降に実測値は急激な温度上昇を示し、解析値と大きく異なる傾向を示した。この点については、実験では 5min 頃から爆裂が発生し、10mm の位置までコンクリートが剥離したことにより、炉内温度に近づいたことが考えられる。加熱面から 25mm の温度も 10mm の温度と同様な傾向を示した。

図-14に 25mm 位置における拘束リング温度の実測値と解析値の比較を示す。図より、加熱から 8min の範囲では、解析値と実験値の温度差は 5°C 程度であるが、概ね評価できていると考えられる。

4.2 コンクリート内部応力と深さ方向引張ひずみの経時変化

図-15に見かけのポアソン比を 0.2 とした場合のコンクリートの応力の経時変化を示す。着目位置は、加熱面から 1,5,11,25mm とした。図より、加熱表面付近の応力は加熱後 14min で 140 MPa となった。加熱面から 5,11,25mm 位置の最大値はそれぞれ 120, 90, 35 MPa であった。

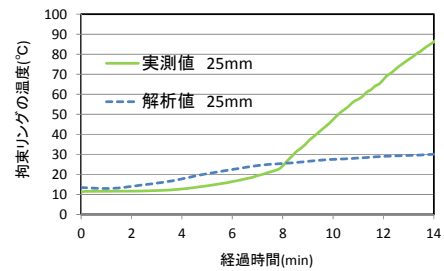


図-14 拘束リング温度

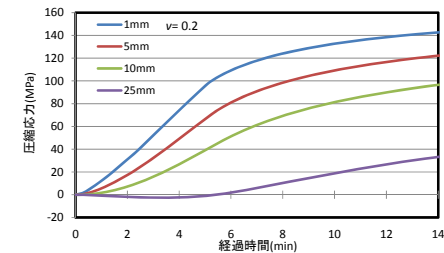


図-15 コンクリート中央部の応力

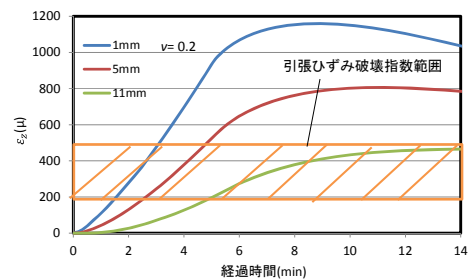


図-16 コンクリート中央部の引張ひずみ

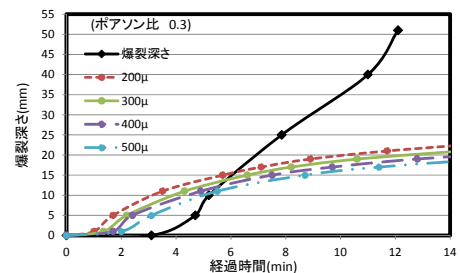
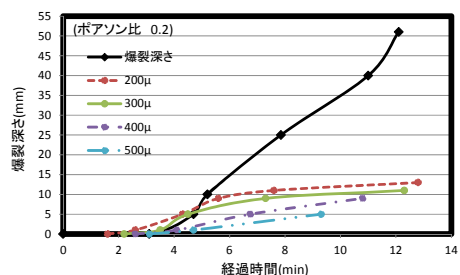
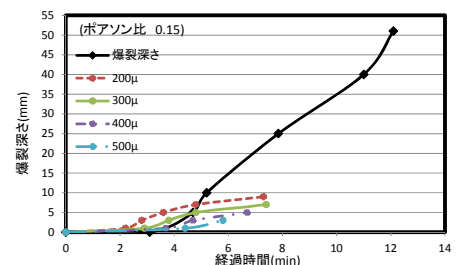


図-17 爆裂深さの比較

図-16 に見かけのポアソン比を 0.2 とした場合の加熱面から 1,5,11mm 位置の ε_z の経時変化を示す。加熱面から 1mm 位置のひずみは、加熱開始から 1.8min で 200μ となった。その後、10min で 1180μ となった。

4.3 コンクリート内部の引張ひずみと爆裂深さの比較

図-17 に、コンクリートの爆裂深さの実測値と式(4)から推定した爆裂深さの比較を示す。見かけのポアソン比は 0.15 と 0.2 および 0.3 とした。引張破壊ひずみは 200 から 500μ とした。図より、見かけのポアソン比を 0.15 とすると引張破壊ひずみを 300μ とした場合、5min で爆裂深さは 5mm 程度となり実験値を途中まで評価できることがわかる。引張破壊ひずみを 400μ 以上に設定すると、爆裂深さは実験値よりも小さくなることわかる。

次に、見かけのポアソン比が 0.2 とした場合、引張破壊ひずみが 200μ と 300μ では、5min 程度まで、推定値は実測値をある程度評価できることがわかるが、引張破壊ひずみが 400μ 以上では、爆裂深さは実験値よりも小さくなることわかる。

次に、見かけのポアソン比を 0.3 とした場合、 ε_z の値が加熱初期から大きくなるため、加熱後 2min で爆裂が開始する結果となり、実験値と大きく異なる結果となった。この傾向は、引張破壊ひずみが 200-500 μ に設定しても大きな差異はなかった。以上より今回の範囲では、見かけのポアソン比が 0.2 で、引張破壊ひずみが 200-300 μ の範囲で加熱後 5min 程度まで、爆裂深さを評価できることが分かった。しかしながら、5min 以降は爆裂深さの解析値と実測値の差が大きくなると傾向にあった。この理由として、実験ではコンクリートの爆裂が生じると剥離面が形成される。その剥離面が新たに加熱面となり、温度上昇が促進され応力が大きくなり、爆裂が進行するため、爆裂深さが大きくなったと考えられる。一方、解析においてはコンクリートの剥離はモデル化していないため、爆裂深さを過小評価する傾向となった。以上、FEM 解析により、拘束リング環境下でのコンクリートの爆裂挙動を引張ひずみ破壊モデルにより評価した。実験結果を定量評価するまでに至っていないが、引張ひずみ破壊を考慮することで爆裂の進行を定性的に評価可能であることがわかった。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの拘束リング環境下における爆裂挙動を FEM 解析により検討した。特に、引張ひずみ破壊指数とポアソン比を考慮することで、爆裂初期の挙動が定性的にある程度の精度で評価可能であることが明らかとなった。

今後の課題として、水蒸気圧やポアソン比などの検討

およびコンクリートの剥離のモデル化が挙げられる。

参考文献

- 1) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，Vol.45, No.9, pp.87-91, 2007.9
- 2) Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C. : High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31, pp. 1487-1499, 2001.
- 3) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕市，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
- 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，Vol.34, No.1, pp.1138-1143, 2012
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) 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.
- 9) 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
- 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) 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, Vol.62, No.3, pp.606-618, 2006.9