

論文 熱応力と水蒸気圧を考慮した高強度コンクリートの爆裂解析

村上 真聖*1・小澤 満津雄*2・明石 孝太*3・杉野 雄亮*4

要旨: 本研究では、リング拘束供試体の加熱試験を対象として軸対象モデルを用いた2次元FEMによる爆裂解析を実施した。すなわち、熱応力説は引張ひずみ破壊を考慮し、水蒸気圧説は飽和水蒸気圧(SVP)の限界水蒸気圧値を組み込んだ。加えて、加熱に伴う水分移動と潜熱の影響を考慮して比熱の変化で組み込んだ。その結果、リング拘束試験における爆裂深さの経時変化を解析で評価できる可能性があることが示唆された。

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, 水蒸気圧

1. はじめに

コンクリートが急激に高温に曝された場合、表層部が爆発的に剥離・剥落する爆裂現象が生じることがある。この現象は、高強度である場合や含水率が高いほど生じやすいと言われている。抑制方法としては、ポリプロピレン (PP) 繊維などを添加する方法と耐火性被膜を設置する方法が一般的である。爆裂メカニズムは、熱応力説と水蒸気圧説およびそれらの複合作用が挙げられる(図-1)¹⁾。しかし、どちらの説が支配的であるか確たる結論を得られていないのが現状である。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。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²⁾。RBSM は、不連続挙動を扱うのに適しているため、局所的な破壊を評価できる。一方、FEM 解析は、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、有効な手段である。これまでに本研究グループでは、リング拘束供試体加熱試験を対象として温度応力解析ソフト (ASTEA-MACS) による2次元FEM解析を実施し、爆裂解析モデルを検討してきた³⁾。すなわち、谷辺らが提案した熱応力説による引張ひずみ破壊モデル⁴⁾を適用し、爆裂によ

る要素の剥離と熱境界の考慮した熱連成解析を行った結果、剥離現象をある程度の精度で、再現できることを示した。

一方課題として、解析では爆裂による要素の剥離と熱境界の再構成が繰り返されるため、実験結果を途中までは評価できるが剥離現象が止まらない結果となっていた。加えて、水蒸気圧も考慮されていなかった。そこで、本研究では、従来の解析モデルに加えて、新たに水蒸気圧を飽和水蒸気圧曲線(SVP)で考慮したモデルを検討し、試体加熱試験の爆裂深さの経時変化と比較を行った。

2. コンクリートの爆裂解析

本研究では、リング拘束供試体の加熱試験を想定して爆裂解析を行った。熱応力説と蒸気圧説、それぞれのモデルを下記に示す。

2.1 熱応力説：引張ひずみ破壊モデル

図-2 に引張ひずみ破壊モデルの概要を示す。まず、拘束リング供試体は円筒を仮定し、任意高さの断面において平面応力状態を仮定する。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 ($\sigma_{re} = \sigma_x =$

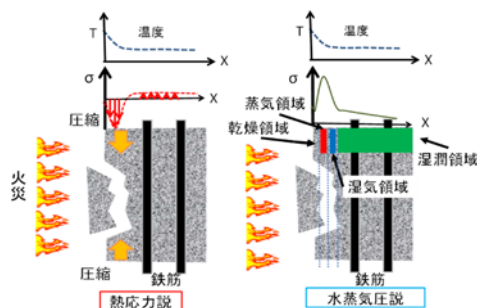


図-1 爆裂メカニズム

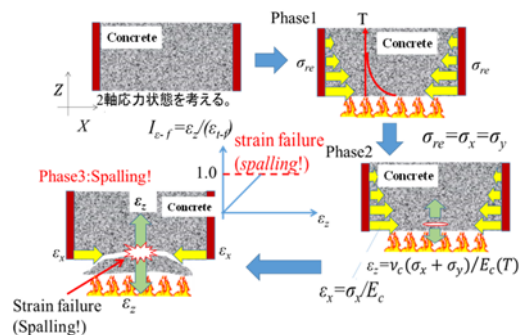


図-2 引張ひずみ破壊のプロセスのイメージ

*1 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 学生 (学生会員)
 *2 群馬大学 大学院理工学部 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 群馬大学 大学院理工学部 環境創生理工学プログラム 学生 (学生会員)
 *4 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

σ_y)が加熱面に平行に作用する。作用する拘束応力より、見かけのポアソン比を考慮するとし、高さ方向に引張ひずみ(ε_z)が生じる。この引張ひずみが引張破壊ひずみ(ε_{t-f})を超えることで爆裂が生じると仮定するモデルである。拘束応力は、拘束リングに発生した周方向ひずみより算出した。式(1)~(5)に引張ひずみ破壊モデルで用いた算出式を示す。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⁵⁾。

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

$$\sigma_{re} = \sigma_x = \sigma_y \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_z = \nu_c(\sigma_x + \sigma_y)/E_c(T) \quad (4)$$

$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{t-f} \geq 1.0 \quad (5)$$

ここに、

σ_{re} : 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

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$: X-Y平面における垂直応力とせん断応力

ε_z : 加熱面から深さ方向のひずみ

ν_c : 見かけのポアソン比(0.2)

ε_{t-f} : 引張破壊ひずみ(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が生じると仮定する。)

2.2 水蒸気圧モデル

図-3に、水蒸気圧と温度との関係を示す。ここでは、飽和水蒸気圧曲線(SVP)を使用し、水蒸気圧がある任意の値を超えると水蒸気圧の爆裂条件を満たすと考えた。式(6)に水蒸気圧限界指数を示す。限界水蒸気圧は、リング拘束供試体加熱試験で実測値の結果を用いた⁶⁾。水蒸気圧の実測値には幅があるが、ここでは任意に 2.0MPa を用いた。この値については、今後検討が必要であると考えられる。

$$I_{p-f} = \frac{P}{P_{lim}} \geq 1.0 \quad (6)$$

ここに、

I_{p-f} : 水蒸気圧限界指数

P : 水蒸気圧

P_{lim} : 限界水蒸気圧

本解析では、引張ひずみ破壊の条件である式(5)と水蒸気圧の破壊条件である式(6)が条件を満たす場合に、爆裂が生じると仮定した。

2.3 解析対象：リング拘束供試体加熱試験

解析対象は鎌田ら⁷⁾が報告したリング拘束供試体の加

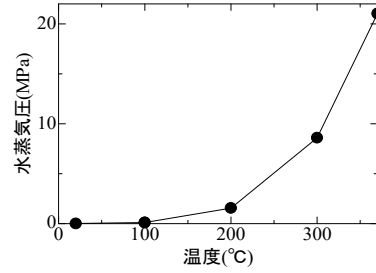


図-3 飽和水蒸気圧曲線(SVP)

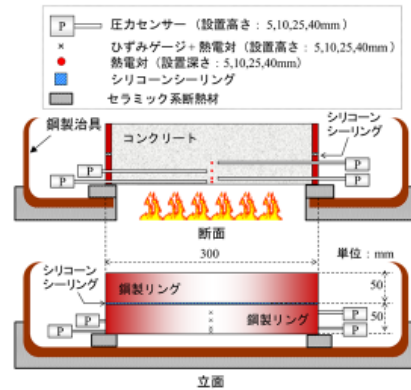


図-4 リング拘束供試体概要

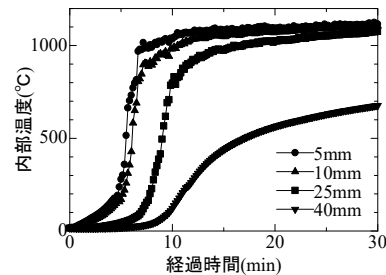


図-5 内部温度の経時変化

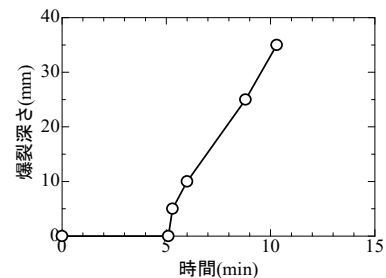


図-6 爆裂深さ

表-1 高強度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

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、 $\phi 300\text{mm} \times h 50\text{mm} \times t 8\text{mm}$ 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 5,10,25,40mm の位置にひずみゲージと熱電対を対極に設置した。さらに、水蒸気圧測定用に外径 5mm×内径 3mm×長さ 170mm のステンレスパイプを 5,10,25,40 の位置に設置した。表-1 に高強度コンクリート(HSC)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 にコンクリートの内部温度の経時変化と爆裂深さの経時変化を示す。図-5 より、内部温度は 5mm と 10mm 位置において 200°C 付近で、急激な温度上昇を示している。これは爆裂によるかぶりの剥落によるものと考えられる。図-6 より、加熱開始から 5min 後に爆裂が開始し、最終的に目視で確認した爆裂深さは 35mm 程度であった。表-2 に強度特性および含水率を示す。

2.4 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 に解析モデルとその熱伝達境界条件を示す。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。熱伝達境界条件は、コンクリート上面の熱伝達率を $12\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とし、鋼材の熱伝達率を $10\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。加熱面の熱伝達率は $40\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。剥離モデルは、①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たとき、②水蒸気圧が限界水蒸気圧を超えたときの二つの条件を満たしたとき、要素が剥離するとした。既往の知見^{8) 9)}より、爆裂現象を引き起こすメカニズムとして、水蒸気圧説と熱応力説、その複合説が挙げられているが、水蒸気圧または熱応力のどちらか一方では爆裂しないことがあるため、この二つを剥離の必要条件とした。

表-3 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。シリコンボンドの熱伝導率、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の高温時残存比をもとに設定した(図-8)¹⁰⁾。また、コンクリートおよび鋼材の熱伝導率は田嶋ら¹¹⁾の研究をもとに考慮した。比熱は Eurocode2 を考慮した(図-9)。

表-2 コンクリートの強度特性および含水率

記号	材齢 (ヶ月)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (Gpa)	含水率 (%)
HSC	2	102	55.6	3.3

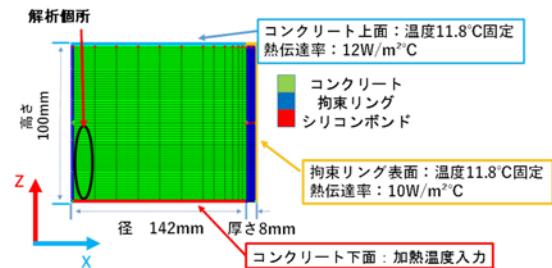


図-7 解析モデル(2次元軸対称モデル)

表-3 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 (°C)	20	11.8	20
ポアソン比	0.2	0.3	0.45

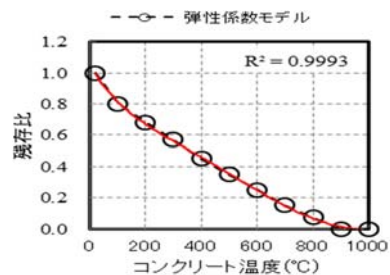


図-8 高温時残存比(弾性係数)

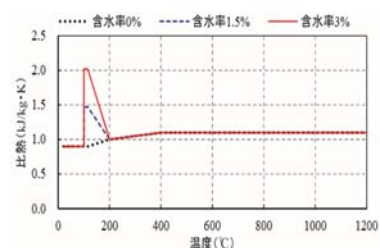


図-9 Eurocode2 の比熱モデル

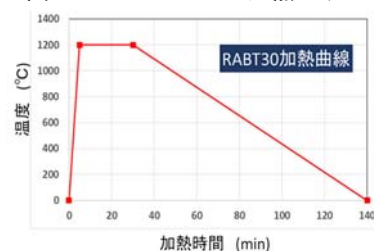


図-10 RABT30 加熱曲線

表-4 解析ケース

NO.	ϵ_{t-f} (μ)	P_{limit} (MPa)	含水率 (%)
①	300	-	0
②		20	3
③		40	3

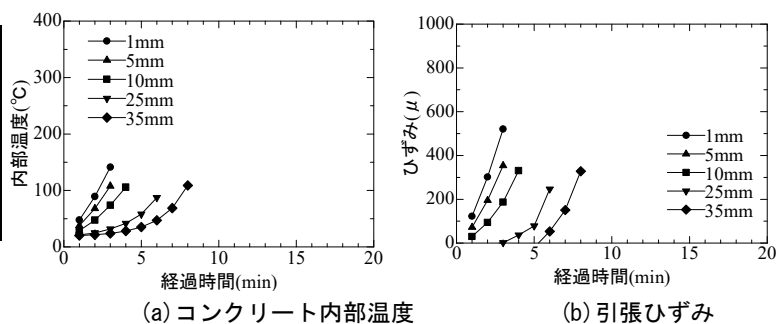


図-11 解析ケース①

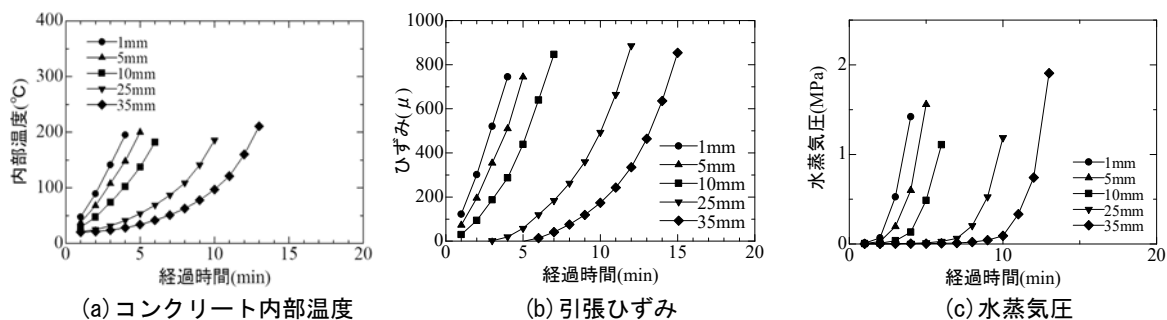


図-12 解析ケース②

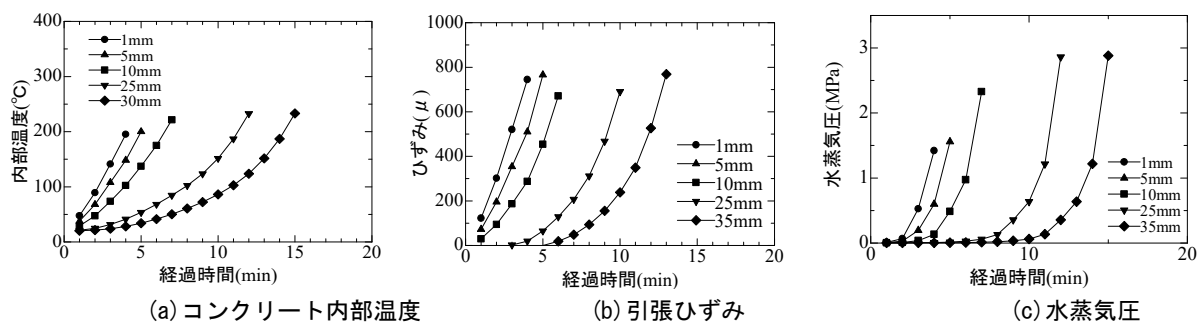


図-13 解析ケース③

2.5 加熱条件

本解析では、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-10)を用いた。

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。

2.6 解析ケース

表-4 に解析ケースを示す。使用した解析モデルは図-7 に示した。ケース①では引張ひずみ破壊モデルを考慮し、比熱は図-9 に示す含水率 0%を用いた。ケース②は引張ひずみモデルに水蒸気圧の変化を考慮し、限界水蒸気圧の値を 2.0MPa とし比熱は図-9 の含水率 3%のものを用いた。ケース③は、限界水蒸気圧を 4.0MPa とした。

3. 解析結果

3.1 解析ケース①

図-11 に解析ケース①の結果を示す。(a)にコンクリート内部温度、(b)に供試体高さ方向の引張ひずみ(ϵ_s)の変化を示す。着目要素は供試体中心部の加熱面から 1~35 mm までの要素とする。まず、コンクリートの内部温度は加熱開始とともに上昇していることがわかる。各要素ともに、100℃前後で値が止まっているが、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。引張ひずみ(ϵ_s)は加熱されると増加していることが確認できる。しかしながら、実現象での剥離は 200℃前後で発生するの(図-5)に対し、解析では内部温度が 100℃前後でコンクリート要素が剥離しており、実現象と比較して低くなっている。ケース①ではコンクリート中の水分移動に伴

う比熱の影響を考慮していないためと考えられる。また、最終的に要素すべてが無くなる結果となった。

3.2 解析ケース②

図-12に解析ケース②の結果を示す。(a)にコンクリート内部温度、(b)(c)に供試体高さ方向の引張ひずみ(ϵ_z)の変化および水蒸気圧の経時変化を示す。

解析ケース①と同様に、コンクリートの内部温度は加熱開始とともに上昇していることがわかる。各要素ともに、200℃前後で値が止まっているが、これは、爆裂が生じて要素が剥離したことを意味している。引張ひずみ(ϵ_z)は内部温度の上昇とともに増加していることが確認できる。さらに、水蒸気圧は内部温度の上昇に伴い、上昇していることが確認できる。引張ひずみおよび水蒸気圧の値が途中で止まっている点について考察する。ここでは前述のとおり、引張ひずみと水蒸気圧の限界値は、500 μ と2.0MPaとしている。加熱面からの1mmの位置の要素に着目すると、引張ひずみが800 μ まで達しているが水蒸気圧が1.5MPaで止まっていることが確認できる。このことから、熱応力に伴う引張ひずみが先に限界値(500 μ)に達し、後から水蒸気圧が設定した限界値(2.0MPa)に達したことが分かる。解析ケース②では、この後も爆裂が止まらず、最終的に要素全てが無くなる結果となった。

3.3 解析ケース③

図-13に解析ケース③の結果を示す。(a)にコンクリート内部温度、(b)(c)に供試体高さ方向の引張ひずみ(ϵ_z)の変化および水蒸気圧の経時変化を示す。

内部温度はケース①、②同様、加熱開始とともに上昇していることがわかる。引張ひずみ(ϵ_z)および水蒸気圧は温度上昇に伴い、増大していることを確認できる。解析ケース②と比較すると、限界水蒸気圧を4.0MPaとしているため、爆裂の要する時間が長くなっていることがわかる。なお、解析ケース③においても、最終的に要素はすべて無くなった。

3.4 実測値との比較

図-14に爆裂深さの経時変化の実測値と解析値を示す。ケース①では解析値が実測値より早く爆裂が進んでいることがわかる。一方、ケース②と③では、比熱と水蒸気圧を考慮することで爆裂初期をよく評価できている。一方で、限界水蒸気圧が大きくなると爆裂時間が遅くなることがわかる。

3.5 爆裂コンター図(解析ケース②)

図-15にケース②における加熱開始から10minまでの爆裂深さと温度分布コンター図を示す。加熱開始から5minで爆裂が生じ、爆裂により生じた加熱境界面の温度は220℃である。加熱開始から10minで、爆裂深さは25mm程度であった。更に、実測値の最大爆裂深さは10

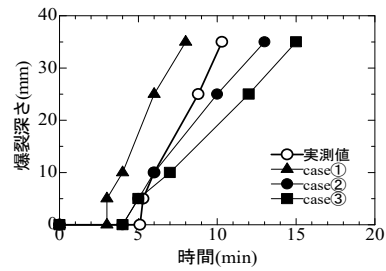


図-14 爆裂深さの経時変化(実測値と解析値)

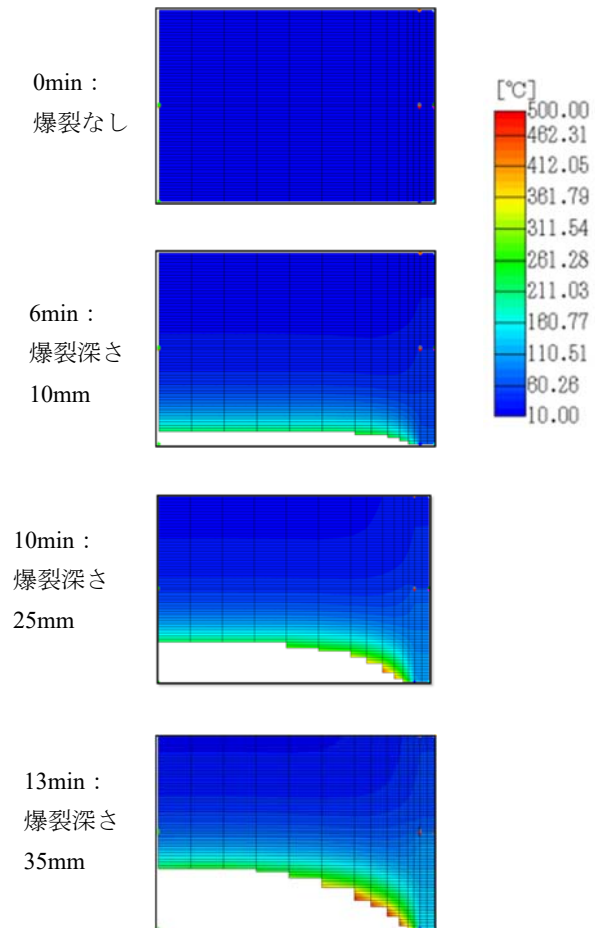


図-15 爆裂コンター図(解析ケース②)

分で35mmだったが、解析では13分で35mmに達した。しかし、この後も剥離は続き、加熱開始から36分ですべて要素が剥離した。その原因として解析では爆裂によって、剥離境界面に新たな加熱境界が形成され、温度上昇が継続し熱応力の上昇による深さ方向(Y方向)の引張ひずみの上昇および水蒸気圧の上昇によって爆裂が進行するためと考えられる。今後の課題として、加熱に伴うコンクリート中の水分移動現象と水分溜まりの影響検討がある。

4.まとめ

本研究では、熱応力に起因する引張ひずみ破壊モデル

と水蒸気圧モデルを考慮して爆裂解析を実施した。引張ひずみ、水蒸気圧の両方が限界値を超えると爆裂が発生すると仮定した結果、解析値は実測値を推定できる可能性を示した。今後、コンクリート中の含水率に着目した水分移動について検討する必要がある。加えて、実部材レベルへの適応が課題である。

謝辞

本研究は、科学技術研究補助金(基盤研究(C) 16K06437)と LIXIL 住生活財団および JCI 研究助成金の補助を受けた。ここに謝意を表す。

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) 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
- 3) 明石孝太, 小澤満津男, 藤本謙太郎, 鎌田亮太: 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, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, pp.1299-1304, 2016
- 4) 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

- 5) 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
- 6) M.Ozawa, H.Morimoto : Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, *Construction and Building Materials* 71, pp.83-92, 2014
- 7) 鎌田亮太, 小澤満津雄, 明石孝太, 谷辺徹: リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, pp.1305-1310, 2016
- 8) Bazant, Z.P., : Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete, Phan LT, Carino NJ, Duthinh D, Garboczi E (eds.), *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete*, NIST, Gaithersburg, Maryland, pp.155-164, 1997.
- 9) Anderberg, Y.: Spalling phenomena in HPC and OC, in Phan LT, Carino NJ, Duthinh D, Garboczi E (eds.), *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete*, NIST, Gaithersburg, Maryland, pp.69-73, 1997.
- 10) 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック, 2017.2
- 11) 田嶋仁, 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.606-18, 2006.9