

論文 高強度コンクリートの粗骨材岩種の違いが拘束リング爆裂評価手法の結果に与える影響

佐藤 諒一^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・谷辺 徹^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 本研究では、著者らのグループで提案した拘束リング爆裂評価手法を用いて、高強度コンクリートの爆裂に及ぼす粗骨材岩種の影響を検討した。すなわち、鋼製拘束リングにコンクリートを充填した供試体の1面加熱試験を実施し、加熱中の熱応力、水蒸気圧の測定および爆裂現象の観察を行った。粗骨材岩種は硬質砂岩と石灰岩とした。加熱曲線は RABT30 を用いた。その結果、本試験方法を適用することにより、粗骨材岩種の違いを拘束応力の差異として評価することが可能であることがわかった。粗骨材岩種の違いが爆裂深さに影響することも明らかとなった。

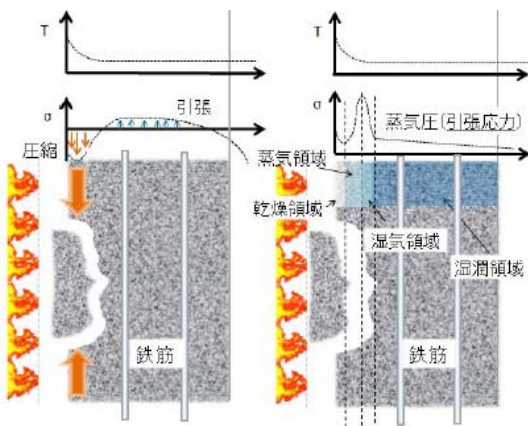
キーワード: 硬質砂岩, 石灰岩, 爆裂, RABT30 加熱曲線, 熱応力, 水蒸気圧

1. はじめに

コンクリート構造物が火害を受けると爆発的に剥離・剥落を生じる。いわゆる、爆裂現象を生じることがある。爆裂現象は、これまでに①熱応力説、②水蒸気圧説、③その複合作用によって生じるとされている(図-1)¹⁻³⁾。しかしながら、どちらが支配的な要因であるかの結論にまで至っていないのが現状である。

著者らの研究グループでは、これまでに拘束リング爆裂評価手法を提案している⁴⁾⁵⁾。すなわち、拘束リングにコンクリートを充填した供試体を対象として、開口部の一面加熱試験を実施した。加熱に伴うコンクリート

の熱膨張変形を拘束リングによって拘束し、コンクリートに熱応力が生じる(図-2)。拘束リングに貼付したひずみゲージより、拘束リングの周方向ひずみを用いて熱応力を推定した。加えて、内部に設置した小径パイプを用いて、内部の蒸気圧を計測した。その結果、熱応力と蒸気圧をある程度、推定が可能であることが明らかとなった。一方で、コンクリートの爆裂現象は、コンクリートの構成材料の影響を受けるとされている¹⁾。そこで、本研究では、粗骨材岩種の違いが拘束リング爆裂評価手法で計測する熱応力に与える影響を検討することを目的とした。粗骨材岩種は硬質砂岩と石灰岩を用いた。



a) 熱応力説 b) 水蒸気圧説

図-1 爆裂メカニズム

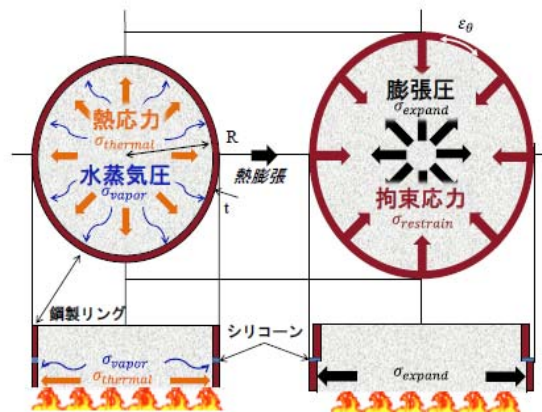


図-2 熱応力推定方法

表-1 コンクリートの配合表(kg/m³)

	水セメント比	水	セメント	細骨材	粗骨材		減水剤
	W/C(%)				W	C	
硬質砂岩 (Sシリーズ)	0.30	150	500	718	417.6	626.4	5
石灰岩 (Lシリーズ)					1085		

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (学生会員)
 *2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助教 博士(工学) (正会員)
 *3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)
 *4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

2. 拘束リング爆裂評価手法

2.1 供試体

図-3 に供試体の概要を示す。供試体の寸法は、直径300mm×高さ100mmの円柱供試体とした。拘束リングは、外径300mm×高さ50mm×肉厚8mmの鋼製リングを高さ方向に2段重ねて使用した。鋼製リングを接着するためにシリコンを用いた。厚さは1mm程度である。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3本設置した。設置位置は加熱面から10, 25, 40mmとした。ステンレスパイプにシリコンオイルを充填した後、圧力センサー(許容値:10MPa)を接続して測定を行った。供試体の内部温度測定用にK熱電対を設置した。設置位置は、供試体中央の加熱面から10, 25, 40, 75mmとした。拘束応力を推定するために、拘束リング

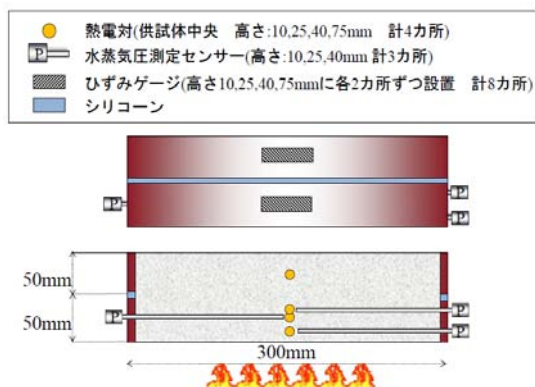


図-3 供試体概要



図-4 ガス炉

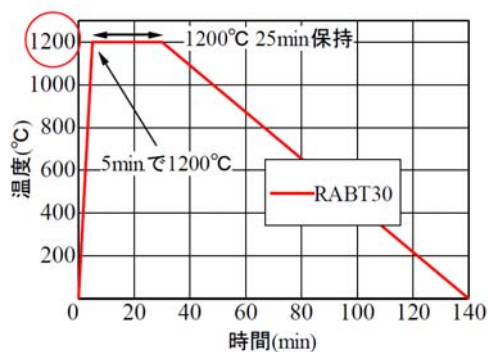


図-5 加熱曲線 (RABT30)

の円周方向にひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは常温用の温度補償型(上限温度:80°C)を用いた。位置は加熱面から10, 25, 40, 75mmとした。ひずみゲージは、2枚使用し拘束リングの対極に貼付した。表-1, 2 に使用した高強度コンクリートの配合と材料を示す。W/Cは0.30とした。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材は長良川産川砂を用いた。粗骨材は、石灰石と硬質砂岩を用いた。硬質砂岩をSシリーズとし、石灰岩をLシリーズとした。表-3 に使用した粗骨材の材料特性と熱特性^{6,9)}を示す。拘束リングにコンクリートを打設後2か月間、温度20°Cの室内で封緘養生を行った。表-4 に圧縮強度と引張強度および弾性係数と含水率を示す。強度試験の材齢は65日とした。加熱試験の供試体はそれぞれ2体ずつ作製した。

表-2 使用材料

材料名	種類	密度(kg/m ³)	吸水率(%)
セメント	早強ポルトランドセメント	3.15	-
細骨材	砕砂(長良川水系 陸砂)	2.60	1.64
粗骨材 (硬質砂岩)	5mm~15mm(大垣 上石津(硬質砂岩))	2.61	0.98
	10mm~20mm(大垣 上石津(硬質砂岩))	2.61	0.98
粗骨材 (石灰岩)	石灰石(旦島鉱山)	2.68	0.81
混和材	高性能減水剤	1.06-1.12	-
水	上水道水	1.00	-

表-3 骨材の熱特性

	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)
硬質砂岩	0.72	1.63	5.60
石灰石	1.12	2.09	11.4

表-4 強度特性および含水率

	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%)
硬質砂岩 (Sシリーズ)	46	69	6.0	3.4
石灰岩 (Lシリーズ)	50	76	5.0	3.6

表-5 爆裂時間

水準	開始時刻 (min)	終了時刻 (min)	継続時間 (min)
硬質砂岩 (Sシリーズ)	3.67	7.17	3.50
石灰岩 (Lシリーズ)	3.75	8.33	4.58

2.2 加熱条件

加熱はガス炉を使用した。図-4 に使用したガス炉を示す。図-5 に RABT30 加熱曲線を示す。図より、5 分間で 1200℃まで昇温し、1200℃を 25 分保持し、その後 110 分間で常温まで温度を下げた。

2.3 円筒モデルによる拘束応力の算出方法

拘束応力は、拘束リングの円周方向ひずみを用いて算出した。式(1)に計算式を示す。

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

σ_{re} : 拘束応力 (N/mm²)

ϵ_{θ} : 円周方向ひずみ

E_s : 拘束リングの弾性係数 (N/mm²)

t : 拘束リングの厚み(mm)

R : 拘束リングの内半径(mm)

3. 実験結果および考察

3.1 爆裂発生状況

表-5 に S と L シリーズの爆裂開始時間と継続時間を示す。爆裂状況の確認は、ガス炉の窓より、供試体から飛散する破片の落下時間を記録することで確認した。S および L シリーズとも、加熱開始から 3.5min.程度で爆裂が開始し、8.5min.程度で終了した。これ以降の議論は、爆裂終了時間の 8.5min.までの範囲で行うものとする。

3.2 炉内温度および供試体内部温度

図-6 に炉内温度の経時変化を示す。図より、設定した RABT30 の加熱曲線をよく再現できていることがわかる。図-7 に硬質砂岩(S シリーズ)、石灰岩(L シリーズ)の供試体について、供試体中心部の温度履歴を一例として示す。図より、コンクリート内部の温度は加熱に伴い深さ方向に温度が上昇していることがわかる。両供試体とも加熱面から深さ 10mm の位置の温度が加熱から 4.5min.と 5.5min.でそれぞれ急激に上昇していることが分かる。これは 10mm 位置まで、コンクリートの爆裂深さが達したものと考えられる。また、石灰岩を使用した供試体は、爆裂開始時点で、10mm 位置の温度が 100~200℃であった。その後、約 6min.で 10mm 位置は約 800℃に達した。この時点で、石灰岩の脱炭による分解¹⁰⁾が生じたことが考えられる。

3.3 拘束応力と水蒸気圧

ここでは、加熱面から 10mm 位置の拘束応力と水蒸気圧を用いて、骨材の影響を考察する。

(1) 拘束リング温度の経時変化

図-8 に拘束リングについて加熱面から 10mm 位置の温度履歴の一例(S, L シリーズ)を示す。図より、当該位置の温度は、加熱から 10min.で 80℃に達することが分かる。

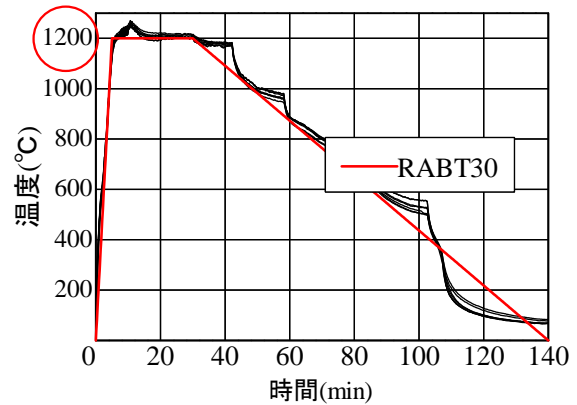


図-6 炉内温度の経時変化

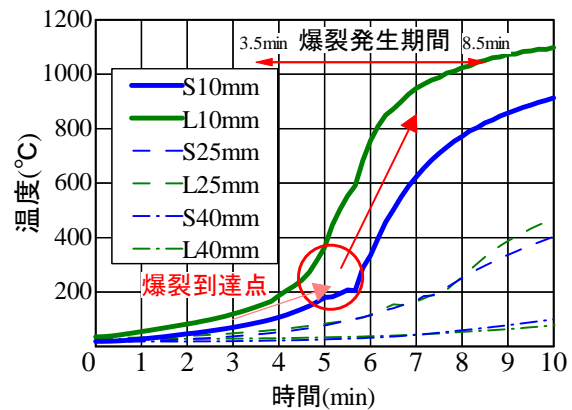


図-7 供試体中心部の温度履歴

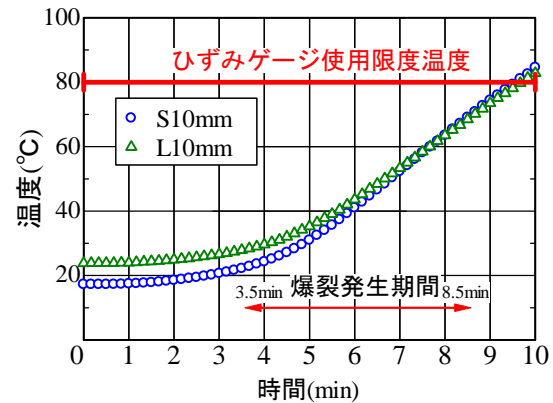


図-8 拘束リング温度の経時変化

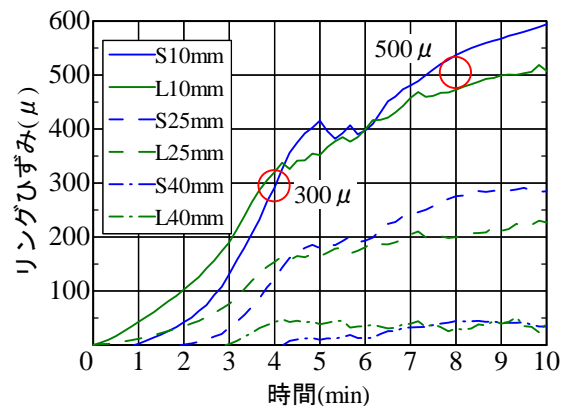


図-9 拘束リングひずみの経時変化

10min.以降は、リング温度が80℃以上となった。このことより、ひずみゲージ(常温用：上限温度 80℃)の計測値は、10min.以内であれば、適用が可能であると考えられる。

(2) 拘束応力の経時変化

図-9にS,Lシリーズの拘束リングの円周方向ひずみの経時変化を示す。拘束リングのひずみは、ひずみゲージの温度補正と拘束リングの熱膨張ひずみを補正したあとの値である。すなわち、コンクリートが加熱により膨張し、拘束リングを押し広げたときに生じるひずみである。SシリーズとLシリーズともに、爆裂開始時の4min.で300 μ を示した。その後、少し勾配は停滞し、8min.で約500 μ となった。図-9のひずみをもとに、式(1)より、拘束応力を算出した。図-10にS,Lシリーズの拘束応力の経時変化を示す。図より、Sシリーズの拘束応力は、加熱後1min.頃から生じ始め、爆裂4min.で3.00MPaを示した。爆裂開始後、拘束応力は停滞するが、爆裂終了時の8min.では、6.00MPaを示した。一方、Lシリーズの拘束応力は、加熱直後から生じ始め、爆裂4min.で3.61MPaを示した。爆裂開始後、拘束応力は停滞するが、爆裂終了時の8min.では5.26MPaを示した。SシリーズとLシリーズで拘束応力の生じ始める時間が異なった。次に、図-11に、拘束応力が生じ始めた時間から爆裂開始時間までの拘束応力の経時変化を示す。図より、爆裂直前の拘束応力はSシリーズの方が、Lシリーズよりも大きく、発現速度も速いことが分かる。これは、使用する粗骨材の熱膨張係数の差に起因すると考えられる。すなわち、表-3に示すように、硬質砂岩の熱膨張係数は11.4 μ /℃であるが、石灰岩は5.6 μ /℃である。表-1に示すように、両配合で使用した粗骨材の重量はほぼ同等である。コンクリート熱膨張係数が大きい硬質砂岩を使用したSシリーズの方が、石灰岩を使用したLシリーズよりも、加熱に伴う熱膨張ひずみが大きくなり、拘束応力が大きくなったものと考えられる。既往の研究¹¹⁾においても、石灰岩と硬質砂岩を粗骨材に使用した高強度コンクリートの熱膨張ひずみを比較した例がある。それによると、硬質砂岩を使用の方が、石灰岩を使用したものより熱膨張ひずみが大きいと報告している。一方、拘束応力には粗骨材の弾性係数も影響する。また、加熱時にコンクリートの強度と弾性係数の低下も考慮する必要があるため、今後更に検討が必要である。

(3) 水蒸気圧の経時変化

図-12にS,Lシリーズの加熱面から10mm位置の水蒸気圧の経時変化を示す。図より、Sシリーズの水蒸気圧は、3min.から上昇し始め、Sシリーズの最大値は6min.で2.80MPaを示した。Lシリーズの水蒸気圧は、2min.程度から上昇し始め、Lシリーズは5.5min.で

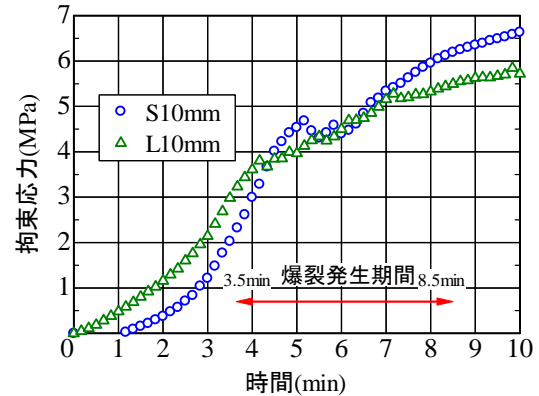


図-10 拘束応力の経時変化(10min.)

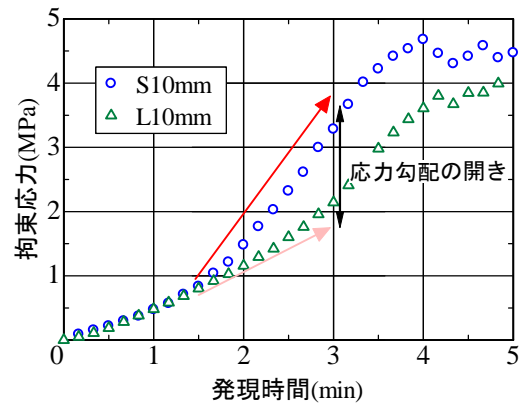


図-11 拘束応力の比較

(発現開始点から爆裂開始まで)

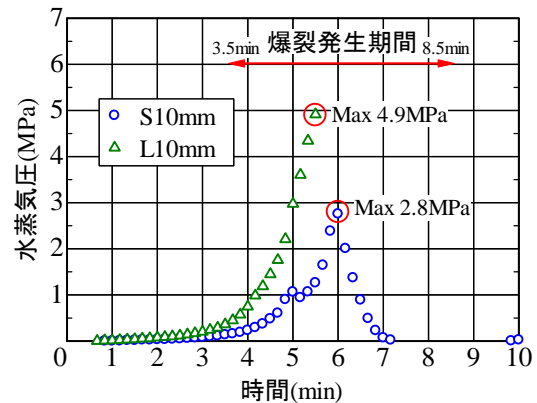


図-12 水蒸気圧の経時変化

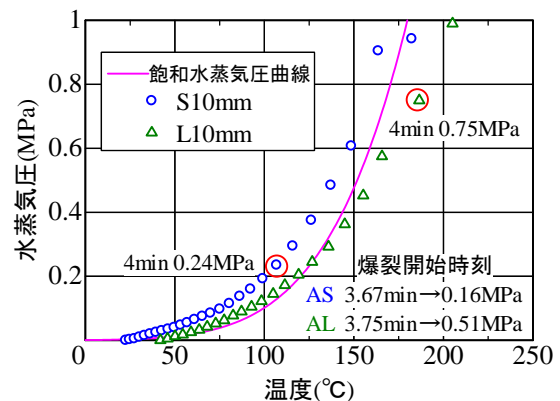


図-13 水蒸気圧と飽和水蒸気圧(SVP)の比較

4.90MPaを示した。次に、図-13に飽和水蒸気圧曲線(以下、SVP)とSシリーズおよびLシリーズの水蒸気圧の計測値を比較したものを示す。図より、Sシリーズの水蒸気圧は、加熱から4min.で0.24MPaを示した。一方、Lシリーズの水蒸気圧は加熱以後4min.で0.75MPaを示した。図より、Sシリーズの計測値とLシリーズに計測値も、途中までSVP曲線とよく一致していることがわかる。このことは、計測した値は水蒸気圧を計測していることの根拠となるものである。既報¹²⁾においても、SVPと水蒸気圧の計測値を比較した報告がある。一方、今回の計測結果からは、骨材の違いによる大きな差異はみられなかった。

(4) 拘束応力と水蒸気圧との比較

図-14にSシリーズとLシリーズについて加熱面から10mm位置の拘束応力と水蒸気圧の比較を示す。図より、Sシリーズについて爆裂開始時間(3.67min.)の拘束応力と水蒸気圧はそれぞれ、2.32MPaと0.16MPaとなった。Sシリーズについて爆裂開始時間(3.75min.)の拘束応力と水蒸気圧はそれぞれ、3.33MPaと0.51MPaであった。SシリーズとLシリーズともに、爆裂開始時には拘束応力が水蒸気圧よりも非常に大きい結果となった。以上より、爆裂時の応力状況において、熱応力による影響が大きいと考えられる。

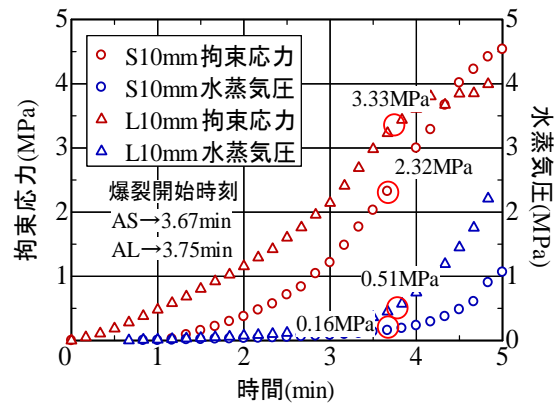
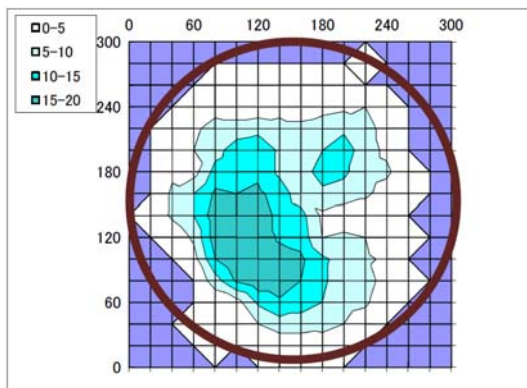


図-14 拘束応力と水蒸気圧の比較

表-6 爆裂深さ

	最大爆裂深さ (mm)	平均爆裂深さ (mm)
硬質砂岩 (Sシリーズ)	20	6
石灰岩 (Lシリーズ)	28	9

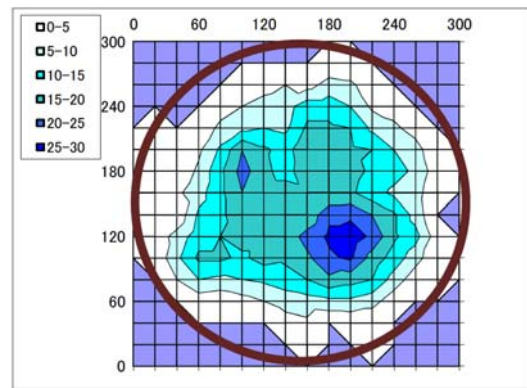


a) 爆裂深さのコンター図(単位 : mm)



b) 加熱面の状況

図-15 爆裂深さと加熱表面の状況 (Sシリーズ)



a) 爆裂深さのコンター図(単位 : mm)



b) 加熱面の状況

図-16 爆裂深さと加熱表面の状況 (Lシリーズ)

4. 加熱後の爆裂深さ

図-15, 16にSシリーズとLシリーズの爆裂深さコンタ一図および加熱面の写真を示す。表-6に最大爆裂深さと平均爆裂深さも併せて示す。Sシリーズは、最大爆裂深さが20mmであり、平均爆裂深さは6mmとなり加熱面全面が爆裂している状況であった。一方、Lシリーズは、最大爆裂深さが28mmであり、平均爆裂深さは9mmとなり加熱面全面が爆裂している状況であった。今回の結果より、石灰岩を使用した方が、爆裂深さが大きい結果となった。これは圧縮強度が、Sシリーズ(69MPa)よりもLシリーズ(76MPa)の方が高いことが原因であると考えられる。高木ら¹³⁾や鶴田¹⁴⁾の報告では、高強度コンクリートにおいて圧縮強度と粗骨材の静弾性係数に相関があるとされている。また、一般的に粗骨材の静弾性係数は、石灰岩が硬質砂岩よりも大きいとされている。本研究の範囲内でも最終的な爆裂深さは石灰岩を使用した場合、硬質砂岩よりも大きくなっており、骨材の静弾性係数は爆裂深さに影響すると考えられる。森田ら¹⁵⁾も、石灰岩を使用した方が、硬質砂岩を使用したよりも爆裂深さが大きくなることを報告している。

5. まとめ

本論文では、粗骨材岩種の違う高強度コンクリートを用いて拘束リング爆裂評価手法により、火災時の爆裂性状を評価した。本論文で得られた知見を以下に示す。

- 1) 爆裂直前の拘束応力は石灰岩を使用したものが、硬質砂岩を使用したものよりも大きい。一方で、硬質砂岩を使用した方が、拘束応力の発現速度が速いことが確認された。これは、使用する粗骨材の熱膨張係数の差に起因するものと考えられる。
- 2) コンクリートの水蒸気圧は、粗骨材岩種の違いによって、明確な差異は確認できなかった。計測した水蒸気圧は、爆裂直前に急激な上昇を示した。計測した水蒸気圧はSVPとよく一致した。
- 3) 爆裂開始時の拘束応力は水蒸気圧よりも大きい結果となった。このことは、コンクリートの爆裂が熱応力の影響により生じたことを示唆していると考えられる。
- 4) 供試体表面の爆裂深さは、硬質砂岩よりも石灰岩の方が大きいという結果が得られた。

謝辞

本研究は、平成23年度鹿島学術振興財団の研究助成を受けた。ここに謝意を表する。

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) 長尾覚博，中根淳：高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.657-662，1996
- 3) 小澤満津雄，王若平，坂昇，森本博昭：高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.753-758，2007
- 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の高温環境下における耐爆裂性評価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) Tanibe, T, et al : Explosive spalling behavior of restrained concrete in the event of fire, Proceedings of the 2nd International Rilem Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Netherlands, Delft, pp.319-326, 2011
- 6) 石灰石鉱業協会，石灰石骨材とコンクリート，p.33，2005
- 7) 国立天文台編：理科年表 第77冊，丸善，pp.402-404，2004
- 8) 小原二郎ほか：建築内装技術ハンドブック，朝倉書店，1984
- 9) 川口徹，榊田佳寛：コンクリートの熱伝導率，熱拡散率，比熱の測定方法とその応用，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.11-14，1982
- 10) 石灰石鉱業協会，石灰石骨材とコンクリート，p.44，2005
- 11) 建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2009
- 12) Kalifa, P, Menneteau, F.D, Quenard, D: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, 30, pp.1915-1927, 2000
- 13) 高木亮一，長塩靖祐，吉本稔，伊與田紀夫：石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.81-86，2008
- 14) 鶴田浩章：高強度コンクリートの圧縮強度・静弾性係数に及ぼす粗骨材物性の影響に関する最近の研究，コンクリート工学，Vol.43，No.2，pp.76-83，2005.2
- 15) 森田武，西田朗，橋田浩，山崎庸行：火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集 (544)，pp.171-178，2001