

粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響

Influence of coarse aggregate materials on deterioration evaluation of fire damaged concrete surface

春畑 仁一*1、新井 真*2

1. はじめに

近年、大規模な火災が発生し続けている。国内では、2016年12月に発生した新潟県糸魚川市大規模火災や、2017年2月に埼玉県三芳町で発生した大型物流倉庫火災である。また海外では2017年6月、ロンドンの高層住宅で発生した建物火災が記憶に新しい。総務省消防庁が毎年発表している消防白書の平成28年版によれば、平成27年中の火災件数は39,111件に上り、そのうち建物火災は全火災件数の56.8%で最も高い比率を占めている¹⁾。

これらの建物火災のうち鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造（以下、本稿では両者を合わせて「RC造」と記す）の建物は、火災後に調査・診断を実施し、火害を受けた部材の補修や補強を実施して再利用されることが多い。そのため、RC造の火害診断では、コンクリート部材が受けた火害劣化の範囲（広がりや深さ）を明確にすることが、その後の補修範囲を決定する際に重要となる。

筆者らは、火害を受けたコンクリート表面の火害劣化範囲を推定するために、反発度測定や表面引っかき試験などの非破壊試験の適用性について検討し、その火害劣化範囲の評価方法の提案を目的とした研究を重ねている^{例えば2)}。

一方、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事2015」では、石灰岩を使用したコンクリートのヤング係数や乾燥収縮については、他の粗骨材を使用したコンクリートと比較して優れていることが解説されている。しかしながら、高温加熱を受けた高強度コンクリートでは、石灰岩は硬質砂岩と比較して耐火性が異なること^{例えば3)}が報告されており、石灰岩を使用した

コンクリートの火災加熱などの高温環境下における物性値を明らかにしている研究は多く見られるが、高温履歴後の同コンクリートの火害劣化について検討された研究は少ない。

そこで本稿では、粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響を確認することを目的として、粗骨材が異なる2種類のコンクリート試験体について加熱実験を行った後、3種類の非破壊試験を実施し、それぞれを比較検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、粗骨材の種類が異なる2種類（石灰岩および硬質砂岩）のレディーミクストコンクリートを用いて、図-1のように加熱面からのかぶり厚さが50mmの位置に鉄筋（呼び名：D10）を埋設した長さ400mm×幅400mm×厚さ150mmの直方体とし、各種類5体ずつ計10体作製した。

コンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの計画調合とフレッシュ性状での物性値を表-2に示す。試験体は打設から7日後に脱型し、その後、材齢91日および95日まで室内にて静置した。また、加熱実験においてコンクリート加熱面および内部の温度を測定するために、コンクリート打設時に試験体中央にK熱電対を埋設した。埋設位置はコンクリート表面から0mm（表面）、25mm、50mmおよび100mmとした（図-1参照）。

2.2 加熱実験

加熱実験では火災を受けた天井スラブを想定し、試験体の長さ400mm×幅400mmの面（有効加熱寸法：長さ

*1 HARUHATA Masakazu：（一財）日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 耐震耐久性調査室 主査

*2 ARAI Makoto：（一財）日本建築総合試験所 試験研究センター 環境部 耐火防火試験室

表-1 コンクリートの使用材料

材 料	物 性	
	石灰岩	硬質砂岩
水 W	上水道水・上澄水	
セメント C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)	
細骨材 S ₁ ,S ₂	S ₁ :北九州市若松区岩屋沖産海砂(表乾密度:2.56g/cm ³), S ₂ :大分県津久見産砕砂(表乾密度:2.67g/cm ³) 【混合比 50:50】	S ₁ :佐賀県小川島産海砂(表乾密度:2.56g/cm ³), S ₂ :京都府亀岡市産砕砂(表乾密度:2.56g/cm ³) 【混合比 70:30】
粗骨材 G	大分県津久見産砕石(表乾密度:2.70g/cm ³ , 実積率:58.0%)	京都府亀岡市産砕石(表乾密度:2.67g/cm ³ , 実積率:58.0%)
混和剤 Ad.	AE 減水剤 標準形 I 種	

表-2 コンクリートの計画調合とフレッシュ性状

粗骨材の 種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)						実測値		
			セメント C	水 W	細骨材		粗骨材 G	混和剤 Ad.	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注)} (N/mm ²)
					S ₁	S ₂					
石灰岩	63.0	45.4	292	184	404	403	1002	2.920	20.0	6.0	26.7
硬質砂岩	63.0	45.4	292	184	560	240	991	2.920	15.0	3.9	29.7

注) 材齢 28 日 (標準養生) の圧縮強度を示す。

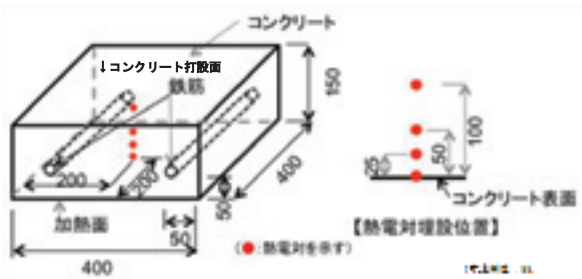


図-1 試験体の形状と寸法

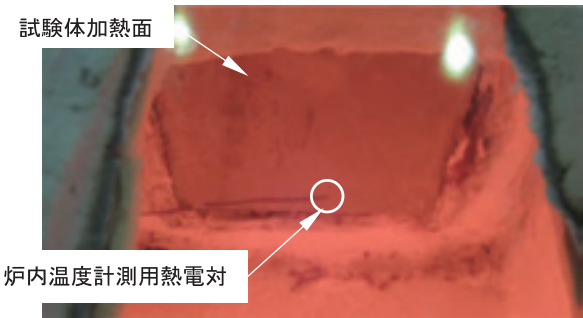


写真-1 加熱実験中の炉内状況の一例

400mm×幅400mm) が下向きになるようにガス加熱炉に設置した。加熱はISO834に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、試験体の加熱面(図-1参照)の表面温度が300℃、500℃、750℃および950℃に達した直後に終了した。炉内温度は加熱面中央部から100mm離れた位置に設置したK熱電対を用いて計測した。ガス加熱炉内の状況を写真-1に示す。加熱後はガス加熱炉の側面の炉蓋を開放し、試験体を室温まで冷却した。粗骨材の種類と加熱条件を付した試験体記号を表-3に示す。

2.3 非破壊試験方法

加熱後の試験体加熱面の火害劣化範囲を推定するために用いた非破壊試験方法は、①色彩測定に基づく方法、②反発度に基づく方法、③引っかき傷幅測定に基づく方法とした。また、加熱後のコンクリートの物性を把握するために、コンクリートコア(以下、「コア」と記す)を用いて圧縮強度試験を実施した。コアの採取および圧縮強度試験は、JIS A 1107:2012「コンクリートから

表-3 試験体記号

コンクリート加熱面の 目標温度	コンクリートに使用した粗骨材の種類	
	石灰岩	硬質砂岩
300℃	GL-300	GS-300
500℃	GL-500	GS-500
750℃	GL-750	GS-750
950℃	GL-950	GS-950
未加熱の試験体	GL-N	GS-N

のコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に基づいて行い、各試験体の加熱面から直径75mm、長さ150mmのコアを2本ずつ採取して試験に供した。併せて、圧縮強度試験の際にJIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」により、静弾性係数を求めた。

2.3.1 色彩測定に基づく方法

コンクリートは火災などの高温環境下に曝されている

場合、その温度によって表面の色彩が変化することが日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説」⁴⁾（以下、「指針」と記す）に示されており、火害調査では受熱温度を推定する有用な手段とされている。しかしながら、その色彩の判別は調査者の主観的な判断となる。実際の火災現場では、例えば、トンネル内では照明として使用されているナトリウム灯によって色彩の判断が難しい場合や、火災後に開口部をベニヤ板などで遮い暗室となったマンションの一室など、周辺的环境条件によってはコンクリート表面の色彩を判別することすら難しいことがある。

ここでは、加熱面が受けた温度による色彩変化を定量化することを目的として、分光測色計（CM-600）を用いて試験体加熱面の色彩測定を行った。測定条件は、標準とする光源をD65（色温度：6504K）、分光感度を2度視野、拡散反射光のみを計測する正反射光成分除去（SCE）とし、 $L^*a^*b^*$ 表示系（JIS Z 8781-4：2013）により数値化した。図-2に $L^*a^*b^*$ 表示系の色空間立体イメージを示す⁵⁾。明度指数 L^* とは、明度を表すパラメータであり100が白、0が黒を表す。また、色相と彩度を示すクロマティクネスの a^* は赤をプラス、緑をマイナスで、同指数の b^* は黄をプラス、青をマイナスでそれぞれ表すパラメータである。それぞれ数値化した値から、式(1)により色差（ ΔE^*ab ）を算出した。

$$\Delta E^*ab = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

ここで、 ΔE^*ab ：色差

ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* ：加熱前と加熱後の各試験体の L^* 、 a^* 、 b^* の変化量

本方法を用いて、加熱面中央の100mm角内で均等に分布した9点を測定した。測定状況を写真-2に示す。

2.3.2 反発度に基づく方法

コンクリートの反発度の測定は、指針では火害の程度を推定するための方法として用いられている。本稿においてもJIS A 1155：2012「コンクリートの反発度の測定方法」により、リバウンドハンマーを用いて試験体加熱面を9箇所測定し、その平均値を求めた。測定状況を写真-3に示す。

2.3.3 引っかかり傷幅測定に基づく方法

引っかかり傷法は、日本塗床工業会の認定品である引っかかり試験器を取り付けた試験装置（機械式でハンドルを回し、秒速1～1.2cmで引っかかり傷をつける装置）を

使用して、コンクリートの表面に引っかかり傷を付けた後、光学測定器（CCDカメラで撮影し、画像処理により0.02mm単位で引っかかり傷幅を測定）を用いて測定する⁶⁾（写真-4参照）。

本方法を用いて試験体加熱面に引っかかり傷を加えた後、その幅を3箇所測定し、平均値を求めた。

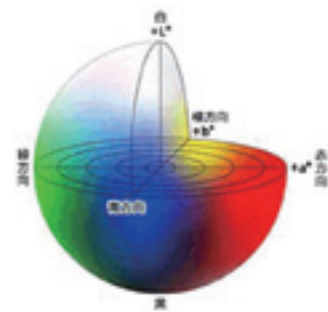


図-2 $L^*a^*b^*$ 表示系の色空間立体イメージ⁵⁾



写真-2 色彩測定に基づく方法



写真-3 反発度に基づく方法



試験装置



光学測定器

写真-4 引っかかり傷幅測定に基づく方法

3. 実験結果

3.1 試験体各部の最高温度と圧縮強度試験結果

試験体に埋設した熱電対位置での最高温度の測定結果とその到達時間を表-4に、試験体各部の最高温度の分布を図-3に示す。また、熱電対により計測した試験体加熱面の最高温度（以下、「試験体加熱面温度」と称す）と加熱後の試験体から採取したコアの圧縮強度残存比および静弾性係数残存比を図-4および図-5に示す。ここで、コンクリートの圧縮強度残存比および静弾性係数残存比は、加熱後の圧縮強度および静弾性係数を未加熱のコンクリートから採取したコアのそれぞれの結果で除して求めた。なお、試験体GL-950（石灰岩）では加熱後の加熱面の崩壊が著しく、コア採取が困難であったため、圧縮強度および静弾性係数の測定は行わなかった。

圧縮強度および静弾性係数の残存比は、試験体加熱面温度が500℃までは粗骨材の種類による影響はあまり認められず、温度の上昇に伴って低下した。試験体加熱面温度が500℃では圧縮強度が2～3割、静弾性係数が約3割低下した。試験体加熱面温度が750℃になると石灰岩粗骨材における各残存比の低下が大きくなり、圧縮強度で約4割、静弾性係数で約6割低下した。

表-4 試験体の熱電対位置の温度

試験体記号		各部の最高温度* (℃) *			
		0mm	25mm	50mm	100mm
石灰岩	GL-300	303 (12)	115 (15)	76 (29)	55 (66)
	GL-500	502 (27)	261 (32)	139 (48)	100 (67)
	GL-750	751 (66)	418 (72)	272 (87)	177 (118)
	GL-950	951 (188)	691 (190)	524 (198)	378 (221)
硬質砂岩	GS-300	306 (14)	137 (19)	98 (31)	63 (68)
	GS-500	517 (31)	282 (34)	157 (41)	92 (40)
	GS-750	755 (95)	512 (97)	348 (104)	145 (137)
	GS-950	951 (202)	742 (202)	526 (202)	287 (230)

注) *: 各部の最高温度に示す数値は、加熱面から熱電対設置位置までの距離を示す(図-1参照)。
() 内の数値は各部の最高温度の到達時間(分)を示す

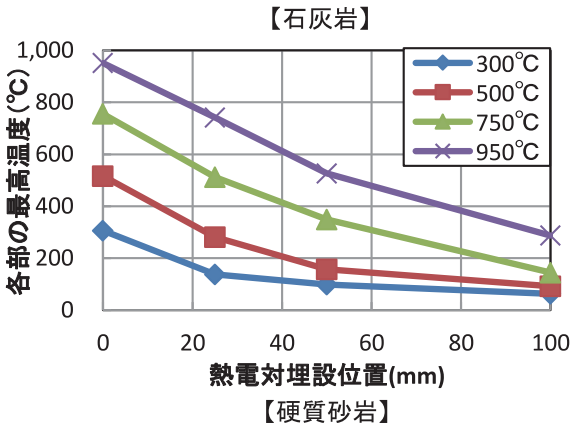
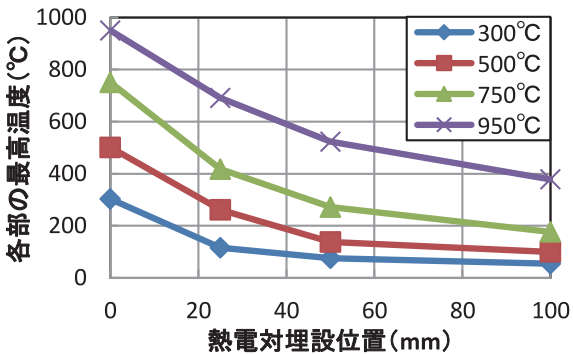


図-3 試験体各部の最高温度の分布

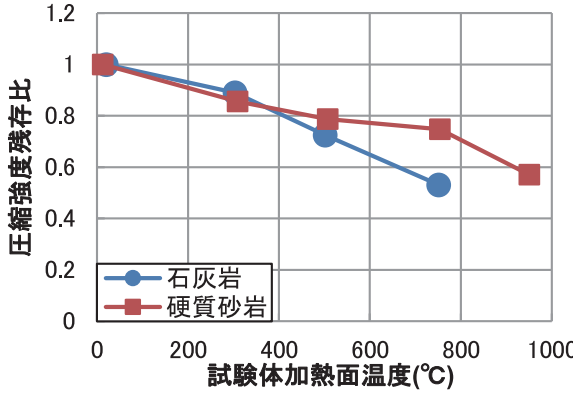


図-4 試験体加熱面温度と圧縮強度残存比との関係

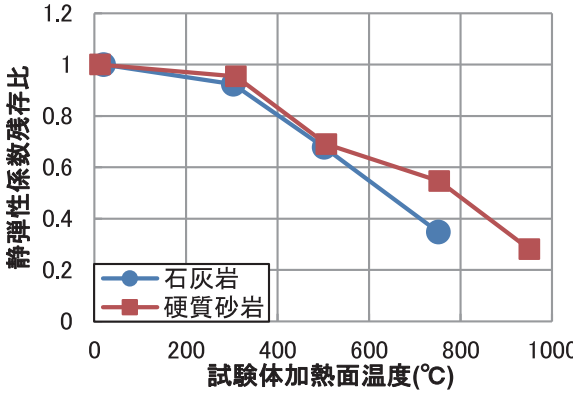


図-5 試験体加熱面温度と静弾性係数残存比との関係

3.2 加熱面の目視観察および色彩測定結果

各試験体加熱後の加熱面を表-5に示す。目視観察結果では石灰岩および硬質砂岩ともに、試験体加熱面温度が300℃（GL-300およびGS-300）からひび割れが発生していた。また、コンクリート表面の剥離は、石灰岩では750℃（GL-750）、硬質砂岩では950℃（GS-950）で顕著になった。

試験体加熱面の色彩は、粗骨材の種類によって相違があった。石灰岩では300℃（GL-300）でややピンク色に、500℃、750℃および950℃（GL-500、GL-750、GL-950）ではそれぞれ灰白色を呈した。一方、硬質砂岩では300℃（GS-300）および500℃（GS-500）でピンク色に、750℃（GS-750）で灰白色、950℃（GS-950）では淡黄色または一部灰白色をそれぞれ呈した。これは指針による色彩変化（表-6参照）と同様の傾向を示している。

試験体加熱面の色彩測定結果および色差を図-6に示す。各試験体加熱面の色彩測定の結果は、目視観察結果と同様に、石灰岩と硬質砂岩で異なる傾向を示した。表-6では300～600℃でピンク色となることが示されているが、石灰岩ではa*値が高い（赤色に近づいた）試験体はGL-300であり、GL-500、GL-750の順でa*値が低下した。さらに表-6では950℃以上で淡黄色となることが示されているが、b*値が高い（黄色に近づいた）試験体はGL-300およびGL-950であった。L*値はGL-750で最大値を示した。一方、硬質砂岩では、指針に示される色彩変化と同様の傾向が色彩測定結果に表れた。a*値が高い試験体はGS-500、b*値が高かった試験体はGL-950であった。受熱温度500℃においてa*値が増加したのは、コンクリートの受熱が300℃～600℃の場合、コンクリート中の骨材に含まれる鉄の化合物が、水分を失うか酸化することによりコンクリート表面がピンク色に変色すると言われており⁷⁾その現象が同値の増加となって現れたと考えられる。

筆者らのこれまでの研究において、硬質砂岩を使用したコンクリートでは、色差を求めることによりコンクリートの加熱面の温度が推定できる可能性を示唆している⁸⁾。今回の色彩測定では、硬質砂岩粗骨材は既往の成果⁸⁾とほぼ同等であったが、石灰岩粗骨材の色差を求めた結果、試験体加熱面温度との相関はみられなかった。この結果より、目視観察による色彩変化については、粗骨材の違いによる傾向を把握できる可能性が示唆されたが、得られた試験体加熱面の色彩測定結果については、粗骨材の違いによる影響を大きく受けてしまうことがわかった。今後さらなるデータの蓄積を行い、コンクリー

ト加熱面が受けた温度の推定について、慎重に検討を重ねることが必要であると考ええる。

表-5 試験体加熱面の状態

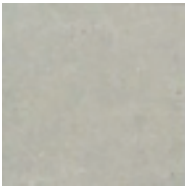
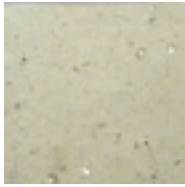
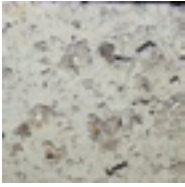
試験体加熱面の目標温度	粗骨材の種類	
	石灰岩	硬質砂岩
未加熱		
	GL-N	GS-N
300℃		
	GL-300	GS-300
500℃		
	GL-500	GS-500
750℃		
	GL-750	GS-750
950℃		
	GL-950	GS-950

表-6 コンクリートの状態と受熱温度⁴⁾

状態	温度（℃）
ピンク色	300～600
灰白色	600～950
淡黄色	950以上
溶融	1200以上

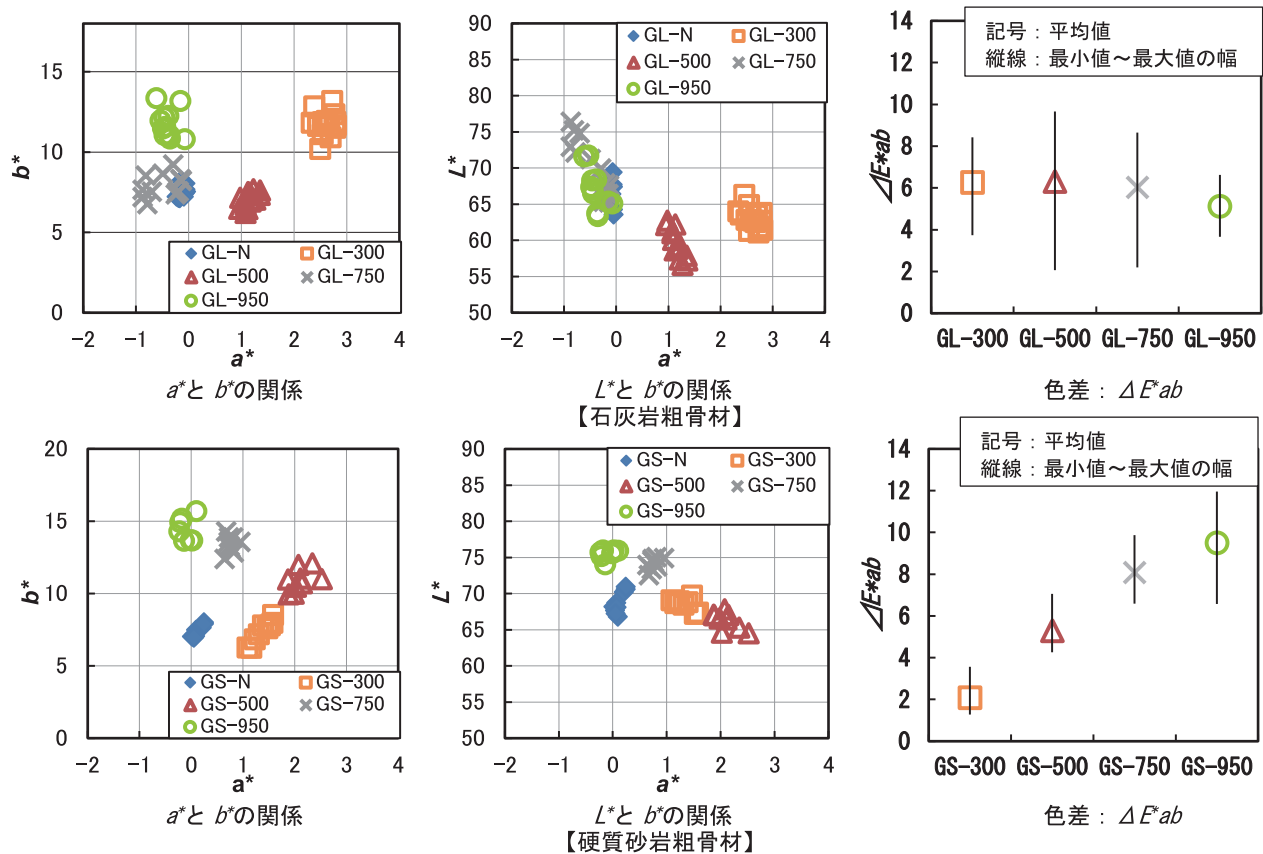


図-6 試験体加熱面の色彩測定結果 (L^* , a^* , b^*) および色差 (ΔE^*ab)

3.3 反発度測定結果

試験体加熱面温度とコンクリートの反発度との関係を図-7に示す。ここで、反発度比は、加熱した試験体の反発度を未加熱の試験体の反発度で除して求めた。なお、試験体GL-950（石灰岩）では加熱後の加熱面の崩壊が著しかったことから測定は行っていない。石灰岩を使用したコンクリートの反発度比は、300℃（GL-300）では変化はなく、500℃（GL-500）では若干上昇した。試験体加熱面温度が750℃（GL-750）では反発度比は0.6を下回った。硬質砂岩を使用したコンクリートの反発度比は、試験体加熱面温度が950℃（GS-950）では0.7程度であった。この結果より、石灰岩または硬質砂岩に関わらず、コンクリートの反発度比は、試験体加熱面温度が750℃になると顕著な低下を示すことがわかった。また、コンクリートの水セメント比が同じであっても、粗骨材の違いによって反発度比の低下量が異なる傾向がみられた。

3.4 引っかけ傷幅測定結果

試験体加熱面温度と引っかけ傷幅比との関係を図-8に示す。ここで、引っかけ傷幅比は、加熱した試験体の引

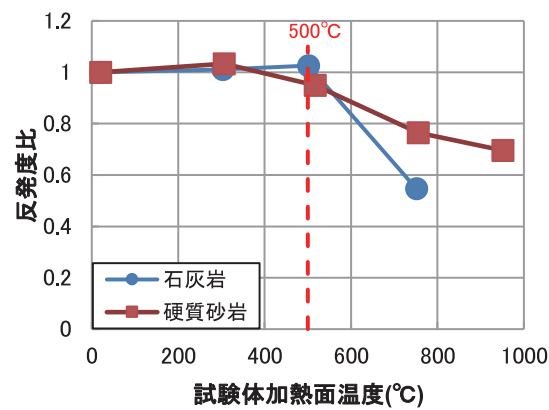


図-7 試験体加熱面温度と反発度比との関係

かき傷幅を未加熱の試験体の引っかけ傷幅で除して求めた。石灰岩を使用したコンクリートの引っかけ傷幅比は、未加熱（GL-N）、300℃（GL-300）および500℃（GL-500）では変化はなく、試験体加熱面温度が750℃（GL-750）になると急激に増大した。硬質砂岩を使用したコンクリートの引っかけ傷幅比は、受熱温度の上昇に伴って徐々に増大し、500℃（GS-500）で2.7、950℃（GS-950）では約7であった。

この結果より、石灰岩または硬質砂岩に関わらず、コ

ンクリートの引っかけ傷幅比は、試験体加熱面温度が750℃になると増大することがわかった。これは、加熱後の加熱面のコンクリート表層組織が変化することによって脆弱化したことによるものと考えられる。このことから、750℃以上の火災加熱を受けたコンクリート表面においては、引っかけ傷幅比を求めることで火害の影響を判断することが可能であると考えられる。

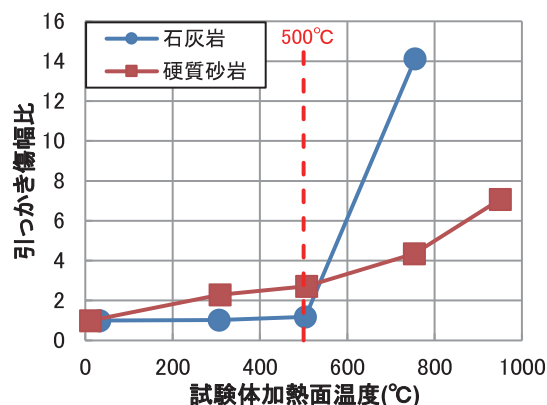


図-8 試験体加熱面温度と引っかけ傷幅比との関係

4. まとめ

本稿では、粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響を確認することを目的として、粗骨材が異なる2種類のコンクリート試験体について加熱実験を行った後、非破壊試験を実施し、それぞれの測定結果の傾向を実験的に確認した。本実験により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 圧縮強度および静弾性係数の残存比は、試験体加熱面温度が高くなるに伴い低下した。その低下量は、試験体加熱面温度が750℃になると、粗骨材の種類によって違いが生じた。
- (2) 試験体加熱面の目視観察による色彩は、粗骨材の種類によって異なり、硬質砂岩粗骨材では概ね指針に示された色彩と同様の傾向を示したが、石灰岩粗骨材ではその傾向は認められなかった。
- (3) 試験体加熱面の色彩測定結果については、粗骨材の違いによる影響を受けることがわかったが、硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートの色差については、試験体加熱面の温度を推定できる可能性が示唆された。今後さらなるデータの蓄積を行い、コンクリートの加熱面が受けた温度の推定について、慎重に検討を重ねることが必要であると考えられる。
- (4) 試験体加熱面の反発度測定によって得られた反発度比より、石灰岩および硬質砂岩粗骨材を使用したコン

クリートのいずれにおいても、コンクリート表面の温度が750℃の場合、劣化範囲を推定できる可能性を示した。

- (5) 試験体加熱面の引っかけ傷幅測定によって得られた引っかけ傷幅比より、石灰岩および硬質砂岩粗骨材を使用したコンクリートのいずれにおいても、コンクリート表面の温度が750℃の場合、劣化範囲を推定できる可能性を示した。

5. 今後の課題

本実験結果では2種類の粗骨材で比較検討を行ったが、火害を受けたコンクリート表面の色彩変化は、使用する粗骨材の種類により異なったことから、その他の岩種による傾向を調べる必要がある。加えて、火害を受けたコンクリートの劣化範囲を幅広く推定するためには、火害を受けたコンクリート表面の温度が750℃未満の劣化範囲の推定が簡便に求められる非破壊試験の選定が必要である。

謝辞

本研究における引っかけ傷幅測定については、株式会社構造総研 山根氏のご協力を得て行った。ここに記して謝辞を表する。

【参考文献】

- 1) 消防白書 平成 28 年版：総務省消防庁
- 2) 春畑仁一，松田司，阪口明弘，水野雄太，皿井剛典：非破壊試験による火害を受けたコンクリートの劣化範囲の評価に関する実験的検討，GBRC Vol.40, No.2, pp.23-31, 2015.4
- 3) 一瀬賢一，川口徹，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, pp.285-290, 2002
- 4) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説，2015 年 2 月
- 5) コニカミノルタジャパン株式会社ホームページ：<https://www.konicaminolta.jp/instruments>
- 6) 春畑仁一，阪口明弘，山根政夫，皿井剛典：火害を受けたコンクリート劣化診断手法の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.36, pp.1366-1371, 2014.7
- 7) fib, Fire design of concrete structures –structural behaviour and assessment, p104, 2008
- 8) 春畑仁一，迫井裕樹，内田慎哉，池田憲一：表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.39, pp.1075-1080, 2017.7

【執筆者】



*1 春畑 仁一
(HARUHATA Masakazu)



*2 新井 真
(ARAI Makoto)