

論文 種々の細骨材を使用した耐熱性補修モルタルの加熱後の力学特性

富山 隆彦*1・劉 晨*2・福井 拓也*3・小澤 満津雄*4

要旨: 本研究では、加熱を受けた耐熱性補修モルタル(以下、HRM)の細骨材が異なることによる力学的性能について検討した。すなわち、細骨材が異なる5種類のHRM供試体を作製し、骨材が異なる供試体をそれぞれ100, 300, 500°Cで全面加熱をした後、超音波伝搬速度試験及び圧縮試験を行った。その結果、細骨材が高炉スラグの供試体(以下、高炉スラグ供試体)は、他と比較して力学性能の低下の程度が小さかった。反対に、石灰石供試体は力学性能が著しく低下することが分かった。最後に、超音波伝播速度比から圧縮強度を推定する方法を提案した。

キーワード: 耐熱性補修モルタル, 補修材, 細骨材, 残存強度, 加熱試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物は100°C以上の高温履歴を受けるとコンクリートの圧縮強度が低下し始め、さらに微細ひび割れの発生と水和生成物の熱分解が生じるとされている¹⁾²⁾。高温履歴を受け続けるとRC構造物の表層部は劣化し耐久性の低下が生じる。

高温環境下に曝されるRC構造物の例として、製鉄所のRC建屋がある。製鉄所構内には高炉設備や加熱炉設備および圧延工程の設備などがあり、高炉より取り出された銑鉄は1600°C程度となっている。圧延工程設備が入ったRC建屋内では高温の銑鉄を水で冷却しながら圧延処理を行うため、高温多湿の状況となる。既往の報告³⁾より、製鉄所の熱劣化したRC建屋を超音波伝搬速度試験により調査がなされ、その結果、健全部では4000m/s程度だったが熱劣化したものは3000m/s程度であるとしている。超音波速度の低下率は概略で75%となる。低下率を強度の低下率と仮定して、既往の残存圧縮強度と温

度の関係⁴⁾から、受熱温度を推定すると300°C以上であると予想できる。

一方、劣化したRC構造物を補修する方法としてポリマーセメントモルタル(以下、PCM)が一般的に使用されている。PCMは有機系のポリマーを混入した材料であり、付着性や物質移動抵抗性が高い材料である。しかし、ポリマーは200~300°Cで熱分解を生じ、状況によっては爆裂を生じる危険性がある⁵⁾⁶⁾⁷⁾。既報では、アクリル系ポリマーを5%添加したPCMにおいて、RABT加熱曲線で加熱したところ、内部温度が200°C付近で爆裂が生じた⁸⁾としている。

このような背景のもとで現在、高温環境下に曝されるコンクリート構造物の補修を目的として耐熱性補修モルタル(以下、HRM)の開発が進んでいる。HRMの検討では、これまでに残存強度と加熱後の付着性状の評価を実施したものを報告しているが、検討が十分とは言えないのが現状である。そこで、本研究では、種々の細骨材を使用したHRMの加熱後の力学性能について検討した。すなわち、高炉スラグ、石灰岩、花崗岩、泥岩および斑糲岩それぞれを使用したHRMを作製して①加熱試験を実施し、②超音波伝搬速度を計測した。その後、③圧縮強度と弾性係数の変化を評価した。

表-1 HRMの配合表

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)		
	水 (W)	結合材 (B)	細骨材 (S)
38	220	575	1425

表-2 細骨材の密度と吸水率およびF.M.と熱膨張係数

骨材の種類	密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸水率 (%)	熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)
高炉スラグ砕砂	2.79	2.59	0.49	8.0
石灰岩砂	2.68	2.34	0.09	2.2-9.5
花崗岩砂	2.57	2.3	0.85	3.6-8.1
泥岩砂	2.62	3.00	1.98	6.1-11.7
斑糲岩砂	2.66	2.42	2.00	7.4

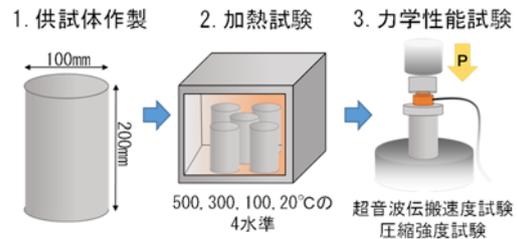


図-1 実験フロー

*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 4年生(学生会員)

*2 群馬大学 大学院理工学府 環境創生理工学プログラム 2年

*3(株)ケミカル工事 事業統括本部プロジェクト推進部

*4 群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 教授 博士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の概要

本研究で使用した HRM の配合の概要を表-1 に示す。W/B は 0.39 とし、s/c は 2.59 とした。結合材の主成分は高炉スラグ微粉末、普通セメント、シリカフェームおよび膨張材の混合型とした。表-2 に細骨材の密度、粗粒率、吸水率、および熱膨張係数⁹⁾を示す。使用した細骨材の種類は高炉スラグ、石灰岩、花崗岩、泥岩および斑糲岩の 5 種類を用いた。供試体寸法は、直径 100×高さ 200mm の円柱供試体とした。図-1 に実験フローを示す。所定の材料を計量後、モルタルをハンドミキサーで練り混ぜ、型枠に打設した。封緘状態で 1 か月間、温度 20°C の部屋に静置した後、供試体の上面を研磨した。研磨後、気中養生を 1 か月とした。細骨材毎に加熱温度(20°Cを含む)4 水準を、それぞれ強度試験用に 3 本、内部温度(加熱温度 20°Cは含水率)測定用に 1 本の 4 本ずつで 16 本を作製した。内部温度計測用の供試体には中心部の計測のため、打設時に円形の上面中心の深さ 100 mm の位置に熱電対を設置した。①加熱試験後、②超音波伝播速度試験と JIS A 1108¹⁰⁾に準拠して圧縮強度試験を実施した。

2.2 加熱試験

加熱温度の設定は、20(加熱無し)、100、300、500°C の 4 水準とした。図-2 に本研究で用いた加熱パターンを 500°C 加熱を例に示す。昇温速度は表面と中心の温度勾配が小さくなるように、RILEM の基準に準拠して、1°C/min とした。所定の温度まで上昇させた後、3 時間保

持し自然冷却した。炉内の設定温度については、予備実験の検討結果を踏まえて、最高温度より 10°C 高い温度に設定した。

2.3 超音波伝播速度試験

加熱後の損傷状況を評価するために超音波伝播速度(以下、US)試験を実施した。測定では、NDIS 2426-1¹¹⁾に準拠して実施した。すなわち、円柱供試体長手方向の上下端部の中心位置を測定端子で挟み込み、伝搬時間を測定し、その結果から US を算出した。

2.4 圧縮強度試験

加熱後のモルタルの力学性能を評価するため圧縮強度試験と弾性係数測定試験を実施した。写真-1 に圧縮強度試験の様子を示す。圧縮载荷試験中に荷重と変位を測定し、応力とひずみ関係を求めた。その後、JIS¹⁰⁾に準拠して静弾性係数を求めた。



写真-1 圧縮強度試験の様子

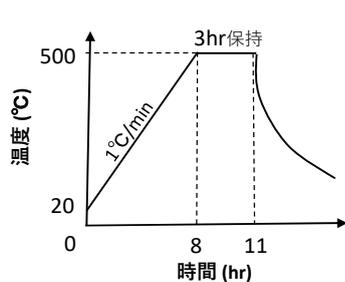


図-2 加熱パターン

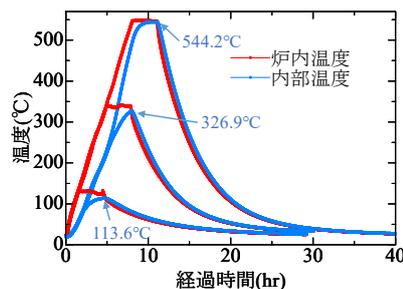


図-3 加熱温度の経時変化(高炉スラグ)

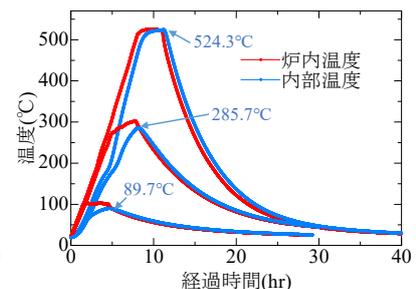


図-4 加熱温度の経時変化(石灰岩)

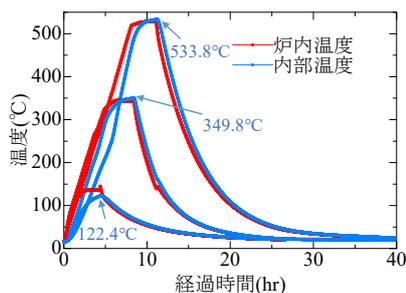


図-5 加熱温度の経時変化(花崗岩)

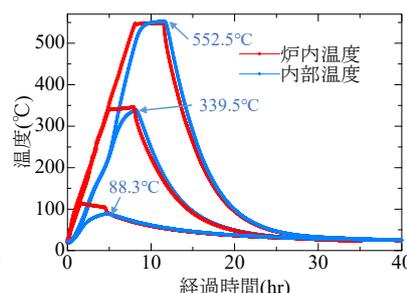


図-6 加熱温度の経時変化(泥岩)

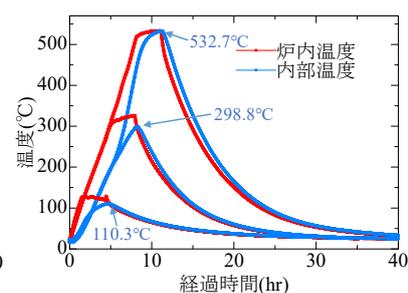


図-7 加熱温度の経時変化(斑糲岩)

3. 実験結果および考察

3.1 加熱試験

図-3~7に100℃、300℃および500℃における炉内と供試体内部温度の経時変化を示す。100℃の場合は、泥岩と石灰岩のケースで供試体内部温度がそれぞれ88.3℃と89.7℃となり100℃に達しなかったが、そのほかの骨材では内部温度が100℃以上となった。300℃の場合は、石灰岩と斑糲岩のケースでそれぞれ285.7℃と298.8℃であり、300℃に達しなかった。500℃の場合では、すべての骨材において内部温度が500℃以上となった。この原因としては、供試体の含水率と骨材の比熱が関係すると考えられるが、今後の課題としたい。本研究では、実際の内部温度を供試体の受熱温度とし、各種の計測値を用いて比較を行う。図-8に加熱後の質量減少率を示す。100℃加熱では0.7から1%の範囲であったが、300℃加熱では8%と大きく減少した。500℃加熱では斑糲岩が11%程度と最も大きく、そのほかは9%程度であった。100℃加熱では、主に自由水の蒸発が原因と考えられる。また、100℃加熱において質量減少率の差異がほとんどなかった理由として、また、100℃加熱において質量減少率の差異がほとんどなかった理由として、気中養生中に供試体内の自由水が蒸発したため、骨材毎の吸水率の違いによる影響は少なかったと考えられる。300℃加熱では、C-S-Hとエトリンガイトおよびモノサルフェートなどのセメント水和生成物が熱分解を生じたと考えられる。500℃加熱では、さらに水酸化カルシウムの熱分解⁹⁾が影響していると考えられる。

3.2 加熱後の供試体表面および内部の様子

写真-2に花崗岩と高炉スラグシリーズの加熱前後における供試体表面の状況を一例として示す。加熱温度が高くなると、表面がピンク色に変化していることがわかる。各シリーズで加熱後の変色の程度は多少差があった。500℃加熱では、全ての供試体表面に0.05~0.10mmほどの微細ひび割れが確認できた。写真-3に例として花崗岩のひび割れの様子を示す。

3.3 応力-ひずみ関係と圧縮強度と弾性係数

図-9に各細骨材別の、100℃、300℃および500℃における応力-ひずみ曲線を示す。加熱温度が高くなるほど、傾きは小さくなっていることがわかる。

また、加熱なしおよび100℃加熱は細骨材の違いで傾きに差が見られないものの、300℃加熱では、石灰岩の弾性係数が7.50GPaに対し、比較的大きな高炉スラグは16.8GPaとなった。500℃加熱では、高炉スラグ以外の供試体の弾性係数は6GPa未満であるのに対し、高炉スラグは15.9GPaを有していた。

図-10, 11に内部温度の実測値と残存圧縮強度の関係および圧縮強度残存比との関係を示す。加熱無しの圧縮

強度は高炉スラグ、石灰岩、花崗岩、泥岩および斑糲岩がそれぞれ53.2MPa、42.0MPa、83.0MPa、59.4MPaおよび63.3MPa、となった。強度レベルに差異が生じた原因は、細骨材の粒度が関係していると考えられるが、今後の検討課題としたい。残存圧縮強度比について、300℃加

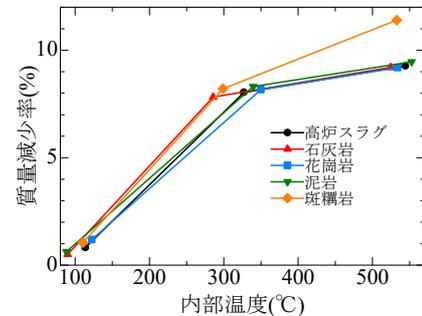


図-8 加熱後の質量減少率

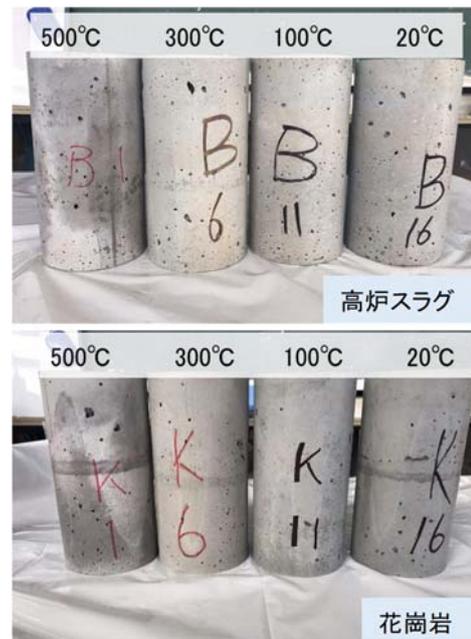


写真-2 供試体の加熱後の様子



写真-3 加熱後のひび割れの様子

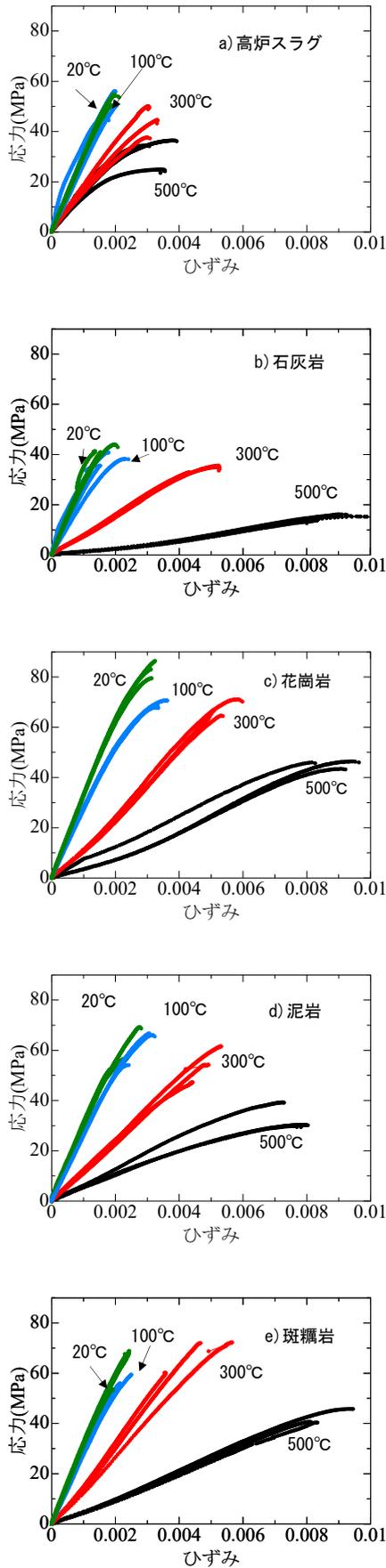


図-9 加熱後の応力-ひずみ関係

熱までは、0.8以上となっているが、500°C加熱では、急激に低下していることがわかる。残存圧縮強度比は、加熱無しを1.0とすると500°C加熱の残存比は高炉スラグが0.60、石灰岩が0.36、花崗岩が0.55、泥岩が0.56、斑禰岩が0.67となった。日本建築学会では、500°C加熱冷却後の圧縮強度残存比が0.45となっている。これと比較し、4種の供試体が提案値を上回っている一方で、石灰岩の残存比は0.36であった。細骨材の種類が異なると加熱後の圧縮強度への影響が大きいことがわかる。

図-12, 13に内部温度の実測値と残存弾性係数との関係および弾性係数残存比との関係を示す。加熱無しの弾性係数は高炉スラグが30.3GPa、石灰岩が30.98GPa、花崗岩が35.0GPa、泥岩が30.4GPa、斑禰岩が31.8GPaとなった。500°C加熱の供試体の弾性係数は高炉スラグが15.9GPa、石灰岩が1.32GPa、花崗岩が4.87GPa、泥岩が5.58GPa、斑禰岩が4.84GPaとなった。次に、残存弾性係数について考察する。加熱無しの供試体の弾性係数はおおよそ同程度の値となった。500°C加熱では、高炉スラグを除く供試体が大幅に低下していることが分かる。残存比において高炉スラグは、100°Cで1.2となった。高炉スラグ供試体が100°C加熱で1.2となっている点について考察する。一つ目として、細骨材とマトリックス熱膨張係数が同程度であることが考えられる。結合材に、高炉スラグ微粉末を使用していることと、高炉スラグ細骨材の熱膨張係数は $8.0 \mu / ^\circ\text{C}$ であり、マトリックスにも高炉スラグを使用しているため、加熱による熱膨張が同程度

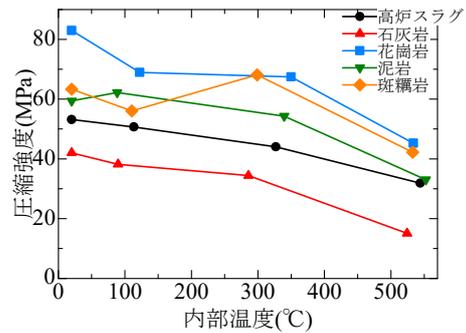


図-10 内部温度の実測値と残存圧縮強度の関係

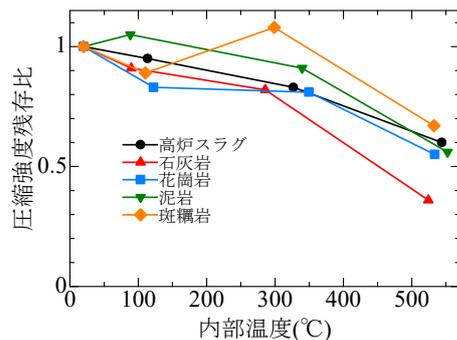


図-11 内部温度の実測値と残存圧縮強度比の関係

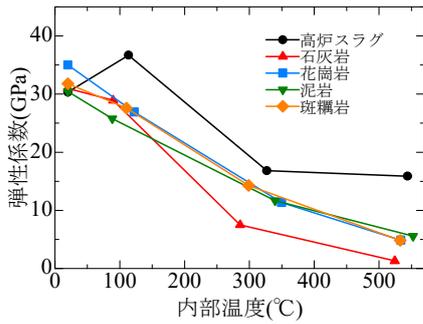


図-12 内部温度の実測値と残存弾性係数の関係

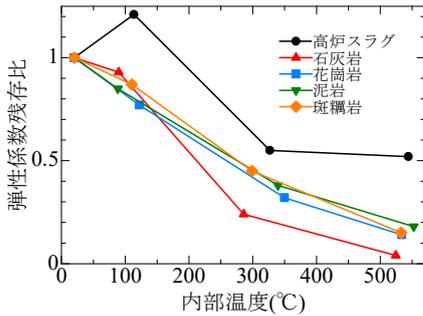


図-13 内部温度の実測値と弾性係数残存比の関係

でマイクロクラックが生じなかったことが考えられる。二つ目として、100°C加熱による熱養生効果でマトリックスの組織が密になったことが考えられる。300°Cと500°Cで0.5程度となった。その他のシリーズでは、100°Cで0.7~0.9程度となったが300°Cと500°Cで0.2~0.5および0.2以下となった。特に、石灰岩の低下率が顕著であった。

3. 4 超音波伝播速度試験結果

図-14に各ケースにおける超音波伝播速度(以下、US)と加熱温度との関係を示す。加熱温度が高くなると、USの値は低下することがわかる。これは、加熱に伴い内部に微細なひび割れが生じたことが原因と考えられる。次に、図-15に加熱無しを1.0として、超音波伝播速度比と加熱温度の関係を示す。高炉スラグの低下率が、500°Cで0.7程度となった。石灰岩は500°Cでの低下率が最も大きく0.3であった。斑糲岩と花崗岩および泥岩は同程度の低下率であった。普通セメントモルタルと比較し高温履歴を受けた際の力学特性の低下が小さい場合を耐熱性があると定義すると、高炉スラグは耐熱性が高いことが指摘されている¹²⁾ため、USの低下率が小さかったと考えられる。

3. 5 加熱後のHRMの力学特性に与える細骨材の影響

細骨材の種類がHRMの力学特性に与える影響について、残存比を用いて考察する。石灰岩の500°C加熱における残存圧縮強度比と残存弾性係数比が0.36と0.04で低下率が最も大きくなった。弾性係数は、1.32GPaとなった。これについて、石灰岩自体の熱膨張係数を確認す

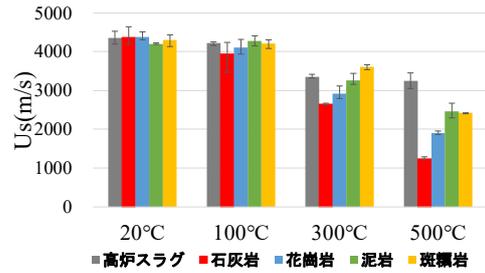


図-14 超音波伝播速度(以下、US)と加熱温度との関係

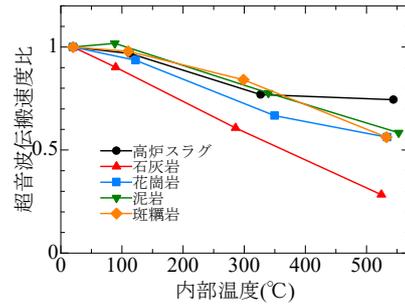


図-15 超音波伝播速度比と加熱温度との関係

ると、文献からのデータでは $2.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ でもっとも小さい。そのため、加熱時にマトリックスと骨材自体が熱膨張変形の差が大きくなり、界面の損傷が大きくなったと考えられる。次に、高炉スラグでは、500°Cでの残存比が残存圧縮強度比と残存弾性係数比でそれぞれ0.60と0.52であり、低下率が他と比べて小さかった。これについて、結合材の成分に高炉スラグ微粉末が含まれているため、加熱時の熱膨張変形も同程度であると予想され、骨材とマトリックスの界面のひび割れが抑制されたことが考えられる。また、弾性係数は100°Cで一度上昇する結果となった。花崗岩と泥岩については、500°Cまでの残存比の傾向が同等であった。斑糲岩は残存圧縮強度比が高炉スラグと同様であるが、残存弾性係数比は500°Cでの低下率が高炉スラグよりも大きかった。残存圧縮強度比が300°Cで1.2となっているが、今後検討が必要である。

以上、骨材の影響を検討したが、石灰岩を使用した際には、圧縮強度と弾性係数の低下率が大きいことがわかった。高炉スラグを使用した際は、今回使用した他の骨材と比較して圧縮強度と弾性係数の低下率が小さい結果となった。今後さらに、骨材の影響を検討する必要がある。

3. 6 超音波伝播速度比を用いた残存圧縮強度の推定

ここでは、US低下率と常温時(20°C)の圧縮強度を用いて、加熱後の圧縮強度を推定する可能性について、検討した。

下記に推定式(1)を示す。

$$f_c(T) = f_c(20) \times US(T) / US(20) \quad (1)$$

ここに、

$f_c(T)$: 加熱温度 $T^{\circ}\text{C}$ 後の対象モルタルの圧縮強度

$US(T)$: 加熱温度 $T^{\circ}\text{C}$ 後の対象モルタルの超音波伝搬速度

$US(20)$: 温度 20°C 時の対象モルタルの超音波伝搬速度

$f_c(20)$: 常温 (温度 20°C)の時のモルタルの圧縮強度

図-16 に圧縮強度の実測値と US の残存比から推定した圧縮強度を示す。ここでは、高炉スラグと石灰岩および花崗岩のケースについて示す。3 種類を選択した理由として、圧縮強度が最大値と最小値を示した花崗岩と石灰岩の例を用いた。高炉スラグは、図-9a)に示すように加熱による変化が小さかったため選択した。高炉スラグの評価は、推定値が実測値を 300°C まで良く出来ていると考えられる。一方、 500°C 加熱では、推定値が実測値よりも大きく危険側の評価となっている。花崗岩と石灰岩では、バラつきが生じているが、 500°C 加熱で実測値が推定値よりも大きく、安全側の評価となっていると考えられる。

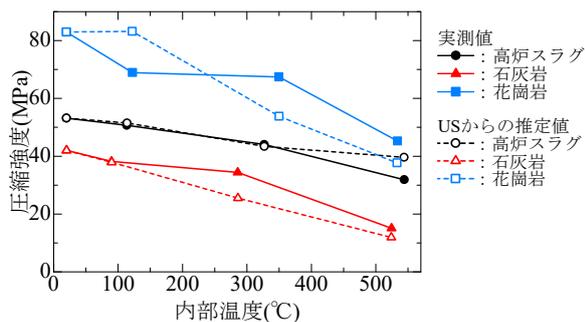


図-16 超音波伝播速度比を用いた残存圧縮強度の推定

4. まとめ

細骨材の異なる 5 種類の HRM について、 100 、 300 および 500°C 加熱後の力学特性を検討した結果、以下の結果が得られた。

- 1) 細骨材の異なる HRM 供試体を $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で各温度水準まで昇温した後 3 時間加熱保持したところ、 500°C 加熱の表面には $0.05\sim 0.10\text{mm}$ の微細ひび割れが確認できた。
- 2) 加熱試験後の供試体は、温度が高くなるにつれ変色し、加熱表面には 500 加熱で全ての供試体に微細ひび割れが確認できた。
- 3) 細骨材が異なることにより、 100°C 加熱までは力学性能の低下の程度はほとんど差異がない。しかし、 300 、 500°C 加熱では圧縮強度残存比や弾性係数残存比の差が顕著に現れた。力学性能の保持は、特に高炉スラグ供試体が良好であり、石灰岩供試体では、低下率が大きかった。
- 4) 超音波伝播速度の各加熱温度における低下率から、

常温(20°C)時の圧縮強度を用いて、圧縮強度を推定した。 500°C 加熱では、推定値が実測値よりも大きく危険側の評価となっている。花崗岩と石灰岩では、バラつきが生じているが、 500°C 加熱で実測値が推定値よりも大きく、安全側の評価となっていると考えられる。

今後の課題として、上述した供試体の含水率の関係や加熱後の強度増加の可能性の検討、さらに繰り返し加熱の影響と実部材の補修したケースについての評価が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 東京電力株式会社: コンクリート構造物の温度影響評価による関する補足説明, 2013.10
- 2) 日本建築学会: 建物の火害診断および補修・補強方法 指針・解説, 2015
- 3) 川上晋作: 超音波探査を活用した熱劣化コンクリートの劣化診断手法の考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-364, pp.727-723, 2010.9
- 4) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- 5) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁, 朴同天: 高温を受けた補修材料の残存強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.571-576, 2008
- 6) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, pp.441-456, 2017.3
- 7) 安藤祐太郎, Sanjay PAREEK: 各種コンクリートおよびポリマーセメントモルタルの燃焼特性及び熱伝導特性に関する評価検討, コンクリート工学論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 8) 祐川真紀帆, 杉野雄亮, 谷辺徹, 小澤満津雄: リング拘束供試体を用いたポリマーセメントモルタルで補修したコンクリートの火災時における爆裂性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.887-892, 2020
- 9) 徳田弘: コンクリートの熱的性質, コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp.29-37, 1984
- 10) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書[規準編] JIS 規格集, pp.565-567, 2013
- 11) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連規準, pp.581-587, 2013
- 12) R.Sarsher, G.A.Khory: Material and environment factors influencing the compressive strength of unsealed cement paate and concrete at high temperature, Magazine of Concrete Reseach, 45, No.162, 51-61, 1993.3