

論文 グラウト材の耐熱性能に関する実験的研究

村上 由祐^{*1}・武田 浩二^{*2}・村上 聖^{*3}

要旨：本研究では、持続的高温を受ける特殊環境下での補修・補強材料としてのグラウト材（無収縮補修モルタル）の適用を目的に、その耐熱性能を把握するために実験的検討を行った。本実験では、加熱温度範囲が 100℃～900℃、加熱温度に応じて長期持続加熱、繰返し加熱および短時間加熱等の加熱条件が異なる場合について、普通コンクリートとの比較で数種類のグラウト材の耐熱性能（外観状況、質量変化および残存圧縮強度比）を実験的に明らかにした。その結果として、本実験の加熱条件の範囲で耐熱性能が良好なグラウト材を選定することができた。

キーワード：グラウト材、耐熱性能、フロー値、圧縮強度、加熱試験、残存圧縮強度比

1. はじめに

建物の長寿命化を目的に、既存鉄筋コンクリート（RC）造建物の補修・補強の要求が高まっており、連続繊維補強材による RC 部材の曲げ・せん断補強における断面修復あるいは増厚材料としてのグラウト材の適用事例が増えている^{1),2),3),4),5)}。グラウト材は、狭い隙間を密実に充填できる高流動・無収縮性、工期短縮のために材齢 24 時間圧縮強度が 20N/mm² 以上の早強性などの特長を有している。また、グラウト材の利用状況は、現在、狭義の充填材・注入材の用途だけでなく、耐震補強工事等の構造材料として扱うべき事例も増えており、充填材としての流動性、材料分離抵抗性、無収縮性、強度発現性だけでなく、構造設計に係る力学的性能や耐火性を含む耐熱性能、耐久性等の把握が重要な課題となっている。

本研究では、市販の数種類のグラウト材に関し、各種高温加熱条件下での耐熱性能について実験的検討を行った。ここで、加熱条件は 100℃～300℃での長期持続・繰返し加熱と 600℃および 900℃での短時間加熱について、グラウト材の耐熱性能を相対的に評価することを目的としている。特に前者の加熱条件は、加熱炉等の熱源を格納するようなコンクリート構造躯体の補修・補強を想定している。

2. 実験方法

2.1 供試体作製

表-1 にグラウト材の製品一覧を示す。なお、本実験で用いた製品にはポリマーセメント系は含まれておらず、骨材に高炉スラグ水砕砂や石灰石を含むもの、セメントに相当量の石こうや有機系添加剤を含むものがあるが、市販品のため材料成分や配合を特定することはできない。なお、比較として呼び強度が 30 のレディーミクストコンクリート（粗骨材に山鹿産斑レイ岩使用）についても検討した。

耐熱性能試験には圧縮強度試験用の φ50×100mm 円柱供試体を用い、同一条件ごとに各 3 個ずつ作製した。

グラウト材の混練は、水にプレミックス材を投入しながらハンドミキサーにより規定の攪拌時間で練混ぜを行った。グラウト材のフロー試験は JIS R 5201 に準拠し、表-1 に 0 打フロー値の測定結果を併記している。なお、表中の流動性確保（土木学会規準による JP 漏斗フロータイムに基づく）と終結時間については製品カタログに記載されているものについて参考として示した。

写真-1 に供試体作製状況を示す。供試体は、φ50×100mm の円柱供試体にグラウト材を打設後、ラップで封緘し、20℃恒温室内に保存した。翌日脱型後、材齢 24 時間圧縮強度を測定し、材齢 4 日後の加熱開始時まで 20℃気中養生を継続した。また、加熱試験に供しない 20℃恒温室内気中養生のダミー供試体も各 3 個ずつ作製した。なお、比較用の普通コンクリートについては、標準養生材齢 28 日後加熱開始時まで 28 日間 20℃気中養生を行った。

2.2 耐熱性能試験

加熱試験には、**写真-2** に示すように、100℃については乾燥機、200℃以上については電気加熱炉を用い、所定の加熱材齢ごとに供試体の外観状況、質量変化および圧縮強度を測定した。

加熱方法は、**図-1** に示すように、「シリーズ 1」では、電気加熱炉により 300℃の一定温度で加熱し（昇温速度は成り行きであるが、約 30℃/分）、加熱材齢 1 日および 4 日後に供試体を各 3 個ずつ炉から取り出し、20℃恒温室内で 24 時間徐冷後、圧縮強度試験をそれぞれ行った。なお、20℃気中養生のダミー供試体の圧縮強度も同時に測定した。「シリーズ 2」では、シリーズ 1 で耐熱性能が良好と認められたグラウト材について、200℃の一定温度で加熱し、平日の 5 日間を 1 サイクルとして、各サイクルの 4 日目に

^{*1} 熊本大学大学院 自然科学研究科建築学専攻 （正会員）

^{*2} 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻准教授 工博 （正会員）

^{*3} 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻教授 工博 （正会員）

徐冷後翌日圧縮強度試験を計4サイクルまで行った。なお、20℃気中養生のダミー供試体の圧縮強度も同時に測定した。「シリーズ3」では、100℃の乾燥機内で連続的に加熱し、加熱材齢7、28、56および91日後に供試体を各3個ずつ乾燥機から取り出し、20℃恒温室内で24時間徐冷後、圧縮強度試験をそれぞれ行った。なお、20℃気中養生のダミー供試体の圧縮強度も同時に測定した。

ここで、図中には示していないが、「シリーズ4」では、シリーズ2に供した3種類のグラウト材について、電気加熱炉により600℃（水酸化カルシウム分解のほぼ上限温度）および900℃（炭酸カルシウム分解のほぼ上限温度）の一定温度で3時間加熱後に供試体を各3個ずつ炉から取り出し、20℃恒温室内で24時間徐冷後、圧縮強度試験をそれぞれ行った。なお、シリーズ4とシリーズ1～3で打設時期が異なるために、表-2にシリーズ4で使用したグラウト材と普通コンクリートの仕様を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 20℃気中養生材齢に伴う圧縮強度発現性状

図-2にグラウト材の20℃気中養生材齢に伴う圧縮強度の発現性状を示す。いずれも材齢24時間圧縮強度は20N/mm²を超え、高い早強性を有していることが分かる。また、図-3には、図-2に示す材齢と圧縮強度との関係を累乗回帰し、その累乗指数と材齢24時間圧縮強度との関係を示す。その結果から、累乗指数は強度とともにほぼ比例的に減少し、材齢24時間圧縮強度が高いものほど、長期強度の発現が相対的に小さくなることが分かる。

表-1 グラウト材の仕様(シリーズ1～3)

種類	配合(kg)		可使時間		攪拌時間(分)	フロー値(0打)
	プレミックス材	水	流動性確保(分)	終結(時間)		
A	25	4.0	30～45	1	3	311×302
B	25	3.7	20～25	—	1.5	227×219
C	25	4.2	30	6	3	225×223
D	25	4.5	—	7～9	2	294×286
E	25	4.5	20～30	7～9	2	314×306
F	レディーミクストコンクリート（普通-30-18-20-N） 標準養生材齢28日圧縮強度36.1N/mm ² * φ100×200mm 円柱供試体3個					

表-2 グラウト材の仕様(シリーズ4)

種類	配合(kg)		可使時間		攪拌時間(分)	フロー値(0打)
	プレミックス材	水	流動性確保(分)	終結(時間)		
A	25	4.0	30～45	1	3	311×308
D	25	4.5	—	7～9	2	268×266
E	25	4.5	20～30	7～9	2	322×321
F	レディーミクストコンクリート（普通-30-18-20-N） 標準養生材齢28日圧縮強度30.4N/mm ² * φ100×200mm 円柱供試体3個					



ハンドミキサーによるグラウト材混練



フロー試験(0打)



グラウト材打設およびラップ封緘

写真-1 供試体作製状況



電気加熱炉

乾燥機

写真-2 加熱試験状況

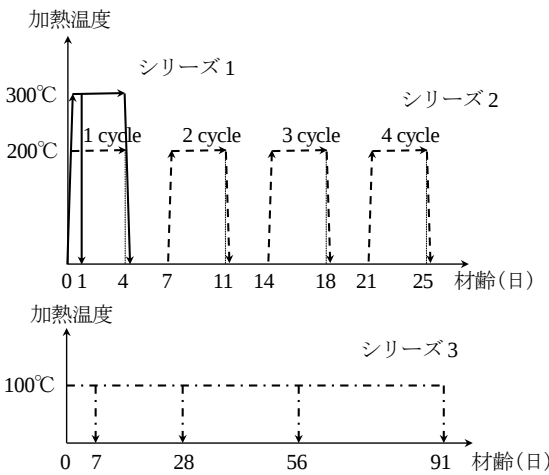


図-1 各シリーズの加熱試験条件

3.2 シリーズ1：300℃加熱試験結果

300℃加熱後の供試体の外観状況は、グラウト材 C, D, E では特に変化はなかったが、A, B においてクラックスケールで 0.05mm 程度の微細な網状クラックが散見された。図-4 および図-5 に、300℃加熱材齢 1 日および 4 日後の圧縮強度および残存圧縮強度比の変化をそれぞれ示す。その結果として、グラウト材 E は 300℃加熱後の圧縮強度が加熱前よりも高くなっているが、グラウト材 A, C, D も加熱後の残存圧縮強度比は約 90%以上と普通コンクリート F と比べて十分に大きく、耐熱性能は良好と考えられる。一方、グラウト材 B は、加熱後の残存圧縮強度比は約 50%と普通コンクリートと比べても耐熱性能は低いものであった。なお、グラウト材の材料成分が不明のため、上記の原因を特定することはできない。

以上の結果より、シリーズ2に供するグラウト材として A, D, E を選定した。なお、グラウト材 C を選定の対象外としたのは、耐摩耗性を要する特殊用途に応じるために骨材に金属片を含み、他のグラウト材の材料成分と異なるためである。

3.3 シリーズ2：200℃加熱試験結果

200℃加熱試験における供試体の外観状況については、

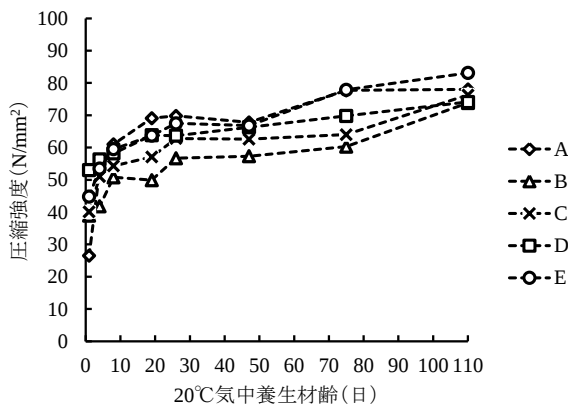


図-2 20℃気中養生材齢に伴う圧縮強度の発現性状

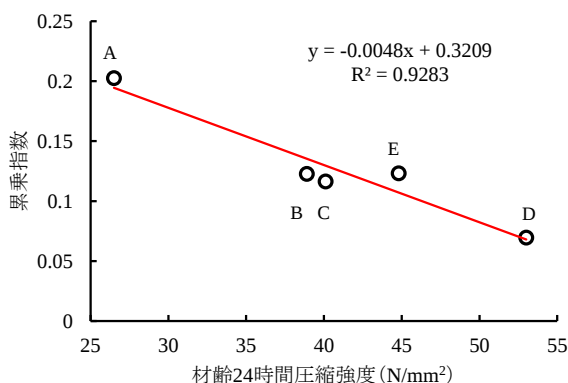


図-3 材齢 24 時間圧縮強度と圧縮強度発現性状

2 サイクル目までいずれのグラウト材も特に変化が見られなかったが、3 サイクル目以降にグラウト材 A および D では微細な網状クラックの発生が観察された。また、グラウト材 E では、4 サイクル目にわずかの網状クラックが認められた。なお、ひび割れ幅は、クラックスケールで 0.05mm 程度と微小であり、下記に示すように圧縮強度にほとんど影響していないことから、ごく表層に生じているものと想定される。

図-6 および図-7 に 200℃加熱材齢に伴う圧縮強度および残存圧縮強度比の変化をそれぞれ示す。その結果として、いずれのグラウト材も加熱後の圧縮強度は加熱前よりも大きくなり、200℃の繰返し加熱での圧縮強度の低下は見られなかった。1 サイクル 4 日目の圧縮強度の増加はグラウト材 E がもっとも大きく、グラウト材 A および D では大きな差はなかった。また、2 サイクル目以降は、いずれのグラウト材も 1 サイクル目よりも徐々に圧縮強度は低下しているが、4 サイクル目でも加熱前の圧縮強度よりも大きく、200℃繰返し加熱での耐熱性能が認められる。

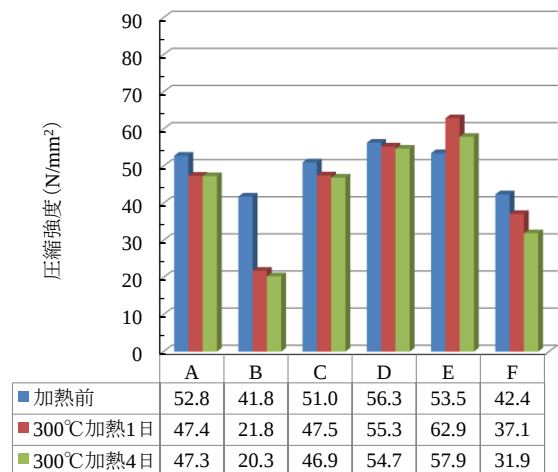


図-4 300℃加熱試験後の圧縮強度

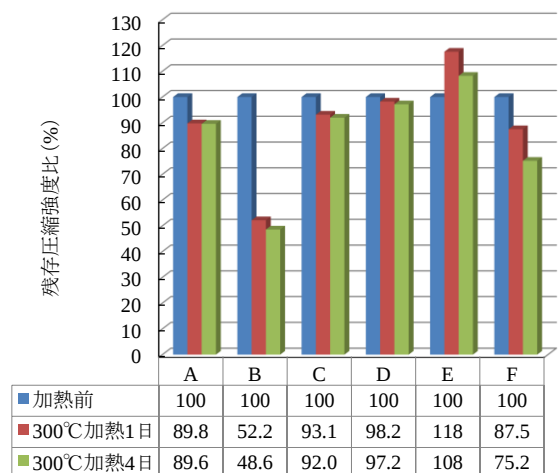


図-5 300℃加熱試験後の残存圧縮強度比

3.4 シリーズ3：100℃加熱試験結果

100℃持続加熱による供試体の外観状況については、いずれの供試体も特に変化は見られなかった。

図-8 および図-9 には 100℃加熱材齢に伴う圧縮強度および残存圧縮強度比の変化をそれぞれ示す。その結果として、グラウト材 A, C, D, E は、加熱後の圧縮強度が加熱前よりも高くなる傾向が認められた。また、普通コンクリート F の場合も、100℃加熱により圧縮強度が若干高くなる傾向が見られ、水和反応の促進によるものと思われるが、既往の研究でも同様の傾向が認められている。一方、グラウト材 B は、300℃加熱試験と同様に、100℃加熱試験でも残存圧縮強度比は約 90%前後と加熱による圧縮強度の低下が見られるが、加熱材齢 7 日後の残存圧縮強度比の低下が大きく、その後は若干の回復が認められる。

3.5 加熱後の供試体の質量変化

図-10 に各シリーズにおけるグラウト材 A の質量変化を一例として示す。

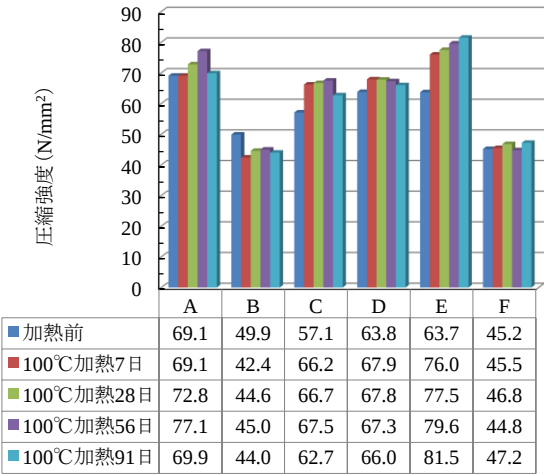


図-8 100℃加熱試験後の圧縮強度

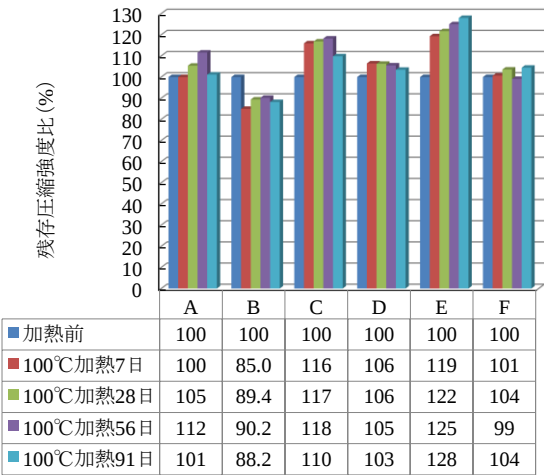


図-9 100℃加熱試験後の残存圧縮強度比

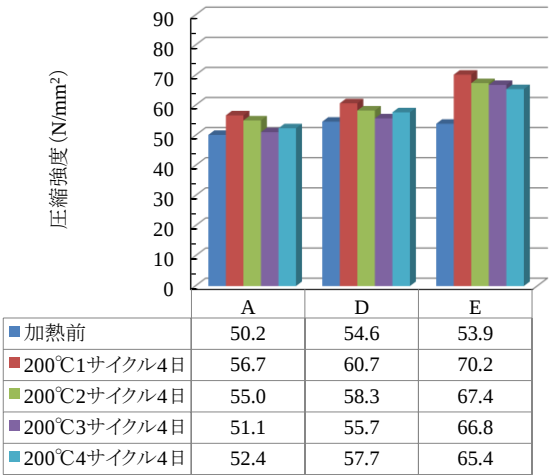


図-6 200℃加熱試験後の圧縮強度

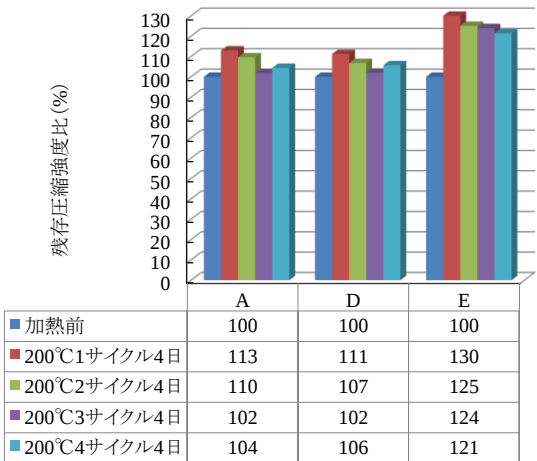


図-7 200℃加熱試験後の残存圧縮強度比

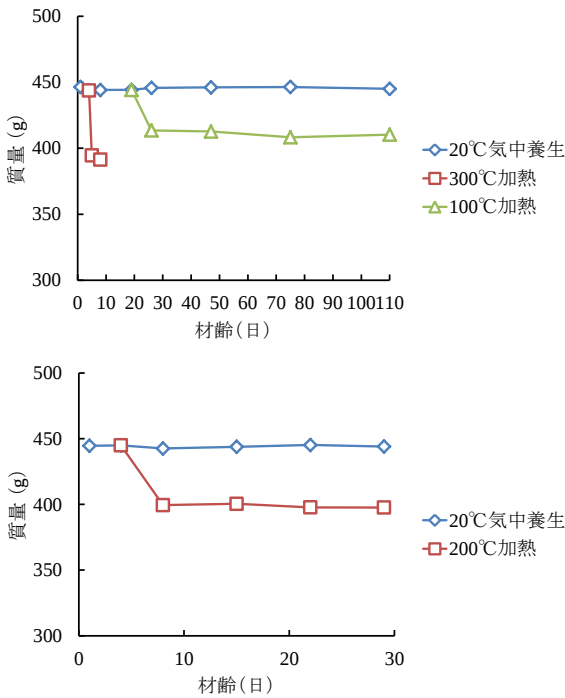


図-10 加熱試験後のグラウト材 A の質量変化

なお、20℃恒温室内養生のダミー供試体の質量変化も併記している。その結果として、いずれのグラウト材についても、20℃気中養生の場合には、材齢に伴う供試体の質量変化はほとんどないが、加熱後の質量減少率は、加熱温度にかかわらず約 90%程度であった。また、加熱材齢の初期で供試体の質量は大きく低下しているが、それ以降の質量変化はほとんどなくなることが分かる。

一般に、熱重量分析の結果では、100℃以下でのピークはセメントに吸着している水の蒸発、100～200℃でのピークはけい酸カルシウム水和物の脱水分解、400～500℃でのピークは水酸化カルシウムの脱水分解、700～800℃でのピークは炭酸カルシウムの分解とされているが、本シリーズの加熱温度の上限は 300℃であるために、供試体の質量減少がセメントに吸着している水の蒸発からけい酸カルシウム水和物の脱水分解に帰属するものと考えられる。

3.6 シリーズ 4：600℃および 900℃加熱試験結果

写真-3 に 600℃加熱後の供試体の外観状況を示す。グラウト材 A、E については特に変化はないが、グラウト材 D では目視でも十分に確認できるほどの大きな亀甲状のひび割れが供試体表面全体に発生した。また、普通コンクリート F では供試体の 1 体に爆裂破壊が生じ、残りの 2 体にも比較的に大きな網状クラックが発生した。写真-4 に 900℃加熱後の供試体の外観状況を示す。なお、普通コンクリートについては 600℃加熱試験で爆裂破壊を生じたために 900℃加熱試験は行っていない。グラウト材 A ではクラックスケールで 0.1mm 程度の微細クラックが散見され、グラウト材 E では微細クラックがわずかに見られた程度であるが、グラウト材 D では 600℃加熱試験と同様に大きな亀甲状のひび割れが供試体表面全体に発生した。なお、グラウト材 D について 600℃以上の高温加熱で大きな亀甲状ひび割れを生じたのは、骨材に石灰石が使用されていることが関係している可能性はあるが（炭酸カルシウムの熱分解）、材料成分が不明のため断定できない。

図-11 に材齢 24 時間圧縮強度および 600℃加熱前後の圧縮強度の変化を示す。また、図-12 には材齢 24 時間圧縮強度および 900℃加熱前後の圧縮強度の変化を示す。その結果として、600℃加熱試験では普通コンクリート F について供試体の 1 体が爆裂破壊を生じたために加熱後の圧縮強度の平均値はかなり小さくなり、グラウト材 D についても外観状況と対応して加熱後の圧縮強度の低下がかなり大きい結果となっている。一方、グラウト材 A、E については、加熱後の残存圧縮強度比は約 50～60%と普通コンクリート F やグラウト材 D と比べて加熱後の圧縮強度の低下が抑制されている。また、900℃加熱試験では、600℃加熱試験結果と比べると、全体として加熱後の圧縮強度の低下がかなり大きくなっているが、普通コンクリートの場合と異なり、爆裂破壊を生じる供試体は見られなかった。



写真-3 600℃加熱試験後の供試体外観状況



写真-4 900℃加熱試験後の供試体外観状況

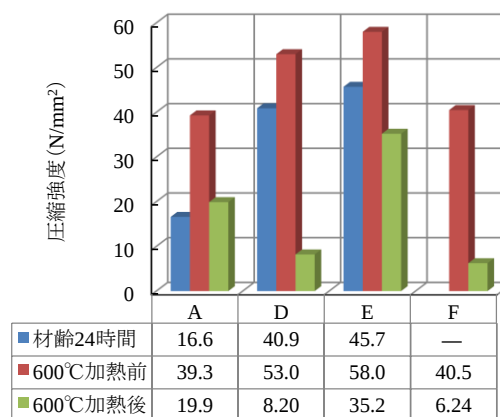


図-11 600℃加熱試験前後の圧縮強度の変化

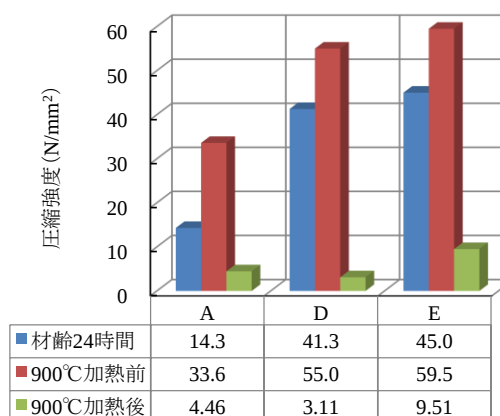


図-12 900℃加熱試験前後の圧縮強度の変化

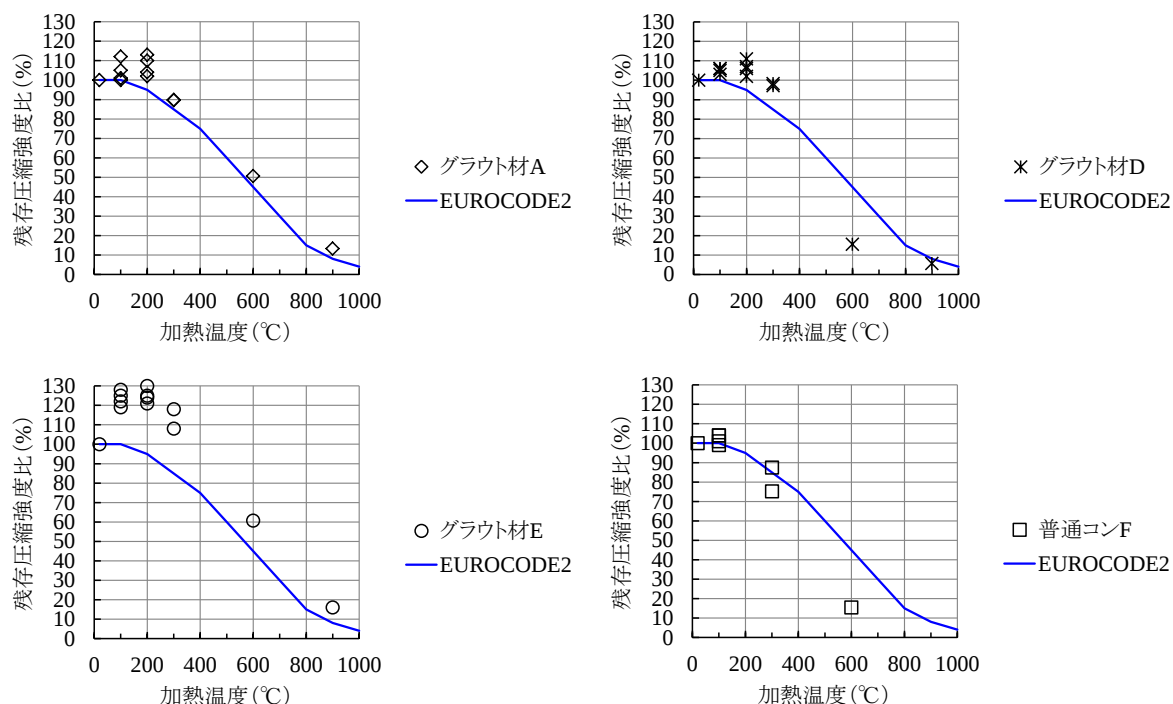


図-13 加熱温度と残存圧縮強度比との関係

3.7 加熱温度と残存圧縮強度比との関係

図-13に、グラウト材A、D、Eおよび普通コンクリートFについて、100℃から900℃の範囲の加熱温度と残存圧縮強度比との関係を示す。なお、普通コンクリートに関するEUROCODE2の規定値も併記している⁹⁾。ここで、本実験ではグラウト材を対象として圧縮強度試験用供試体に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体を用い、通常利用される $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体よりも寸法が小さく、より厳しい加熱条件と考えられ、普通コンクリートFについては、600℃以上の加熱温度でEUROCODE2の規定値よりも残存圧縮強度比はかなり小さくなっている。それを考慮した上で、グラウト材Aについてはほぼ規定値線上に、グラウト材Eについては全加熱温度において規定値をかなり上回っているが、グラウト材Dについては、普通コンクリートFと同様に600℃以上で規定値を下回っている。以上の結果より、普通コンクリートとの比較で、グラウト材AおよびEが900℃までの加熱温度に対して良好な耐熱性能を有していることが確認された。

4. まとめ

本研究では、持続的高温を受ける特殊環境下での補修・補強材料としてのグラウト材（無収縮補修モルタル）の適用を目的に、その耐熱性能を把握するために実験的検討を行った。本実験では、シリーズ1：300℃加熱試験、シリーズ2：200℃繰返し加熱試験、シリーズ3：100℃長期持続加熱試験、シリーズ4：600℃および900℃短時間加熱試験

と加熱条件が異なる場合について、普通コンクリートとの比較で数種類の市販のグラウト材の耐熱性能（外観状況、質量変化および残存圧縮強度比）を実験的に明らかにした。その結果として、本実験の加熱条件の範囲ではあるが、耐熱性能が良好なグラウト材を選定することができた。

謝辞

本研究にあたっては、熊本大学大学院自然科学研究科の山口信助教、佐藤あゆみ助教、同大学工学部の戸田善統技術専門職員、池崎智美技術職員、さらに建築材料・施工研究室の大学院生および卒研生諸氏のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 産業調査会：建物の改修補強実務要覧，2009
- 2) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'14，2014
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書，2003
- 4) 大濱嘉彦監修：鉄筋コンクリート構造物の劣化対策技術，テクノシステム，1996
- 5) 産業調査会：建築改修実務事典，1999
- 6) Eurocode2: Design of Concrete Structures, Part1-2, General rules – Structural Fire Design, The European Standard EN1992-1-2, 2004