

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

■ 研究成果概要報告書

研究課題		高温環境下にさらされたポリマー補修構造物の熱分解ガス定量化に関する実験的研究	実施年度
			平成 27 年度
研究代表者	所属	韓国建設生活環境試験研究院	
	氏名	金 亨俊	
	問合せ先 メールアドレス	arc7707@kcl.re.kr	
受入担当 責任者	氏名	大宮喜文（教授）	
1. 研究の背景および目的			
(1) 研究の必要性			
<p>近年、日本国内でのコンクリートの生産量は減少傾向を示しているが、コンクリート構造物の累積量は徐々に増加しているため、既存構造物の長寿命化が要求されている。さらに、建築物の維持管理に必要な費用は膨大なものになると予想される。そこで、耐久性や経済性の面から環境および人類への負担をできるだけ最小に押さえる構造物の建設や既に劣化し始めた構造物に対する最適な補修・補強工法が必要である。ポリマーセメントモルタルはセメントモルタルの結合材の一部をポリマーで代替したもので、セメントモルタルにポリマー混和剤(セメント混和用ポリマーとも呼ぶ)を混和してつくられたもので、母材との接着性、水密・気密性の組織構造、耐薬品性、化学抵抗性等が優れ、コンクリート構造物の補修・補強には必要不可欠な材料となっている。ポリマーセメントモルタルはセメント質量比 5 乃至 10% 程度のポリマー混入によってその性質を改善させており、ポリマー混入が増えるほど接着性が向上することが確認されている。</p> <p>しかし、その構成材料に可燃性のポリマー結合材(有機物)を含むため、ポリマー混入量が増えた場合の防耐火上の問題が生じる可能性が指摘されている。すなわち、ポリマーセメントモルタルで構造物を補修し、維持管理しようとする、コンクリート構造物の防耐火性能が下がり、火災危険性が増すため、ストック管理上、脆弱性がある。</p> <p>高温時におけるポリマーセメントモルタルの物性として、接着性の実験により、常温時の付着強度は著しく改善され、高温による付着強度も加熱温度が 500℃ 程度までは、十分な付着強度が残存しているを確認し、温度によらず補修部材としての頑健性があることが検証されているが、ポリマーへの着火、爆裂現象、温度上昇による断面欠損と鉄筋温度上昇など、一般的なコンクリートやモルタルの無機質材料と異なる性質の変化および耐力低下が</p>			

予想される。平成12年の建築基準法改正では、P/Cが4%を超えるものについては、防耐火性の確認が必要であるとされているものの、これに関連する研究は大濱らによるポリマー結合材の量を必要最小限度に抑える研究や難燃剤などを添加した研究しかなく、一定の評価方法も示されていない状況にある。したがって、高温環境下におけるコンクリート補修構造物の発生燃焼ガスの定量化および発生ガス成分把握を通じ、維持補修材料の熱分解過程を理解し、火災時ポリマーの着火および爆裂により在室者の安全、避難路確保のための材料的な研究検討が必要である。

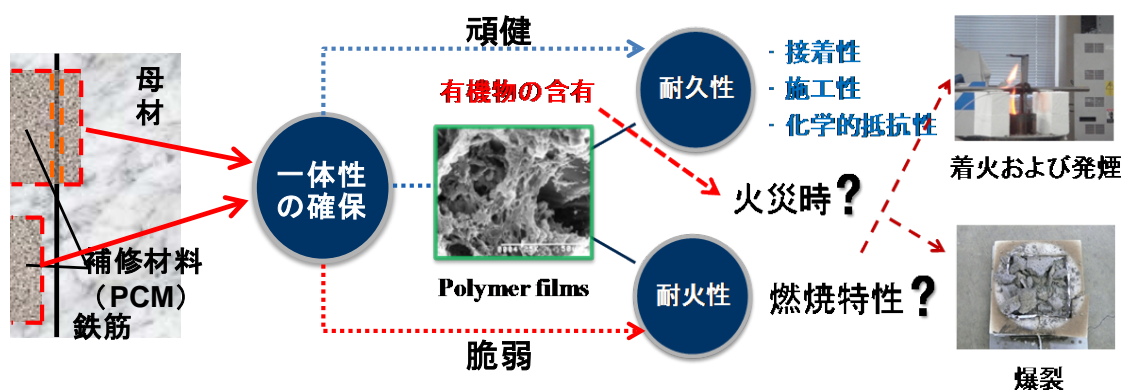


図1 建築用補修・補強材料の防耐火性上の問題(ポリマーセメントモルタル)

コンクリートの爆裂のメカニズムについては、現時点においても必ずしも明らかではないが、大きく分けて次の二つの説がある[4]。ひとつは、加熱側のコンクリート表面から排水条件とコンクリート透気性から、コンクリート表面近傍の細孔に非常に大きな蒸気圧が生じ、これが爆裂を引き起こすとするものである。もう一方の考え方は、加熱による表層の熱膨張が周囲の冷たいコンクリートに拘束されることにより、加熱面と平行な圧縮熱応力を生じ、爆裂を引き起こすとするものである。一方、ポリマーセメントモルタルの爆裂性状は、ポリマーセメントモルタルに補修した部材の防耐火性能研究の一部として研究報告がなされている。岡村らは、普通セメントモルタルに合成樹脂を添加した、ポリマーセメントモルタルの防耐火性実験を行い、加熱条件、ポリマー種類、ポリマーセメント比の影響について検討した[5]。実験結果として、ポリマーセメントモルタルの爆裂は表面温度 500°C以上の温度域で発生し、EVA ポリマーセメントモルタルで爆裂現状がよく起きることを確認した。また、ポリマーの混入量が少なければ、爆裂する可能性は下がるが、混入量が多い場合、内部から爆発的に飛散するといった特徴をもっていることと、ポリマーセメントモルタルの爆裂に至らしめる要因になるのは、熱分解ガスの内圧のか、あるいはポリマー発熱による内部熱応力によるものなのかについて検討する必要があると提示した。

(2) 研究の目的

本研究では、ポリマーセメントモルタルの燃焼特性を把握する上で、生成ガスの種類および量を測定して生成ガスの定量化のための研究を目的とする。まず、ポリマーセメントモルタルが燃焼する時、生成ガスの量および種類を把握し、発生ガスの正確な測定方法構築および新しい実験方法の提案を目的とする。

2. 利用施設及び利用日

- ・ FT-IR 装置 (2016 年 1 月 11 日～1 月 15 日) : 東京理科大学
- ・ Smoke Density Chamber 装置 (2016 年 1 月 11 日～1 月 15 日) : 東京理科大学
- ・ 練り混ぜ用試験機および型枠 (2014 年 12 月 4 日) : 韓国建設生活環境試験研究院
- ・ 養生機 (2014 年 12 月 05 日～2015 年 1 月 4 日) : 韓国建設生活環境試験研究院
- ・ 常温養生 (二次) (2015 年 12 月 5 日～2016 年 1 月 5 日) : 韓国建設生活環境試験研究院



図 2 FT - IR 装置および Smoke Density Chamber 装置内部 (東京理科大学)



図 3 練り混ぜ、試験体 (KCL 製作)、養生機装置 (韓国建設生活環境試験研究院)

3. 実験方法・研究成果、および考察（申請時の計画に対する達成度合いも含む）

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

(1) 実験概要

ポリマーセメントモルタルの調合の考え方として、一般的には、結合材(セメント) に対するポリマー量の比(P/C(%)) で表現されることが多い。しかし、熱的性質の検討を行う場合には、ポリマーの絶対量が問題になると考え、相対量であるP/Cではなく、単位容積当たりのポリマー量(kg/m³) として表現することが望ましい。そこで、ポリマーの種類、ポリマーの量に関する調合条件として、単位ポリマー量とポリマーセメント比(以下、P/C) の関係を変えたポリマーセメントモルタルの発熱性試験を行い、その結果について検討する必要がある。なお、その結果を基本とし、Smoke Density 試験機に連結したFT-IR 分析を行い、二つの結果を比較・分析する必要がある。

(2) 調合および養生

ポリマーは、JIS A 6203 に規定されるエチレン・酢酸ビニル(EVA)、スチレンブタジエンゴム(SBR)を使用した。それは EVA と SBR は現場で補修材料として良く使われているものであるため、本試験に使用した。また、使用したポリマーには、全固形分に対して消泡剤が 1%添加されている。調合の考え方は、水セメント比(W/C) 50%、セメント砂比(S/C) 3 を標準として単位ポリマー量を変化させた水準とした。なお、W/C:50%、S/C:3 の標準的な調合の場合、単位ポリマー量 10 kg/m³ は概ね P/C:2% に相当する。試験体は 75×75×20(mm) に打設した後、4 週間水中養生(20℃) し、9 週間(前年度)および 1 年間(今年度)の気中養生(20℃、60%R. H.) を行った。さらに、試験の前に、各試験体を 60℃の乾燥器内で 2 日間乾燥し、室温までデシケーターの中で徐々に冷却した。各試験体の含水率は同時に作製した別の供試体の吸水率および試験前の供試体質量より推定し、0.5~2.0%の間にあることを確認した。また、加熱強度を実験因子とし、輻射強度 25kW および 50kW とした。

表 1 使用材料特性および実験因子

セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)	
細骨材	江原道産川砂 (組粒率: 2.97, 比重: 2.63, 率: 1.81%)	
ポリマー	EVA	エチレン・酢酸ビニル(液体型)
	SBR	スチレンブタジエンゴム(液体型)
実験因子	実験範囲	
加熱強度 (輻射強度)	25, 50 (kW)	
単位ポリマー量 (質量比)	5, 10, 20 (%)	

(3) 実験方法

各数準は実験の特性のため、一つずつ実験を行った。実験方法および手順は ①試験体製作 ②脱型および養生 ③試験体調整および含水率調整 ④コーンカロリメータ試験（加熱強度調整）⑤FT-IR 装置を利用した生成ガス分析を行った。この中で、コーンカロリメータ試験は韓国での実験と分析を行った。しかし、コーンカロリメータ試験はうまくいかなかった。その原因は予想通り試験体が小さくて(100×100×10mm)コーンカロリメータ試験機の中で煙分析を担当するオピロスまで発生ガスが至ることができないと推察される。

(4) 実験結果および考察

表 2 申請当時の計画

研究内容	2015年(月)										2016年(月)		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
既存の資料調査および分析													
試験体製作および養生 (含水率調整)													
実験実施													
実験結果の整理および分析 追加実験検討													
追加実験および結果分析													
「研究成果概要」の作成													
「研究成果報告書」の作成													
「研究成果報告書」の提出													

表 2 は申請当時の計画を示す。全体的な研究進行は普通であるが、発生ガス量を測定するため、いろいろな方法を検討することが追加され、試験方法に合う実験体の作製および養生も時間的に不十分である。さらに、コーンカロリメータ試験の結果と Smoke Density Chamber 装置に FT-IR 分析装置を連結して測定した結果を比較するのが一番難しい。それは、試験体の大きさおよび厚さが違うため、熱発生ガス量も異なる測定結果が予想される。既存の金らの研究では JIS M 8841 に準拠して各試験体に含まれるポリマー量を潜在的発熱量とし、単位ポリマー量×体積×ポリマー発熱量により計算した。その発熱量をコーンカロリメータ試験(発熱性試験)によって得られたポリマーセメントモルタルの総発熱量と比較すると、試験体の内部に、燃焼したポリマーガスが残存することが分かる。このこと

より、内部に残存しているポリマーガス量は、ポリマー混入量に伴う高温環境におけるポリマーセメントモルタルの爆裂や着火の発生有無を判断する手段として利用できる。今回の研究では、それを着目して実際に試験体外部へ放出される発生ガス量及び発生ガスの種類を測定し、分析を行った。

① コーンカロリメーター試験結果

試験体は JIS A 1171 に準拠して、100×100×400mm に成形した後、寸法 100×100×10mm に切断して、養生を行い、推定含水率を 2%以下として、試験を行った。また、K 型熱電対を用いて、試験体の温度も測定した。試験方法は、ISO 5660-1 の規定に従い、コーンカロリメーター試験装置を利用、測定を行った。ポリマーセメントモルタルが熱を受けると、内部の有機物が一定の温度領域で熱分解反応を起こすため、燃焼ガスが発生し、内部の圧力が上昇する。発生熱量の検討は先で行ったが、発生ガスの成分についても検討する必要がある。可燃性ガス(CH₄)の発生は、着火現状に関係し、CO₂およびCO ガスは、炭化反応に関係すると考えられる。そこで、本実験では、コーンカロリメーター試験を用いて、ポリマーセメントモルタルの発生ガス、すなわち、構成成分ガスを測定し、検討を行った。



図 4 コーンカロリメーター試験(左)と爆裂や着火の発生有無判定予備試験(右)

表 3 コーンカロリメーター試験における爆裂および着火結果

状況	ポリマー集類	単位ポリマー量 (kg/m ³)						
		0	10	20	30	40	50	100
爆裂	EVA							
	VVA							爆裂 (W/C:50%)
	SBR							
着火 発煙	EVA							着火
	VVA					発煙		
	SBR		発煙	発煙	発煙	着火 発煙	着火 発煙	着火 発煙

EVA ポリマー試験体では爆裂が、SBR ポリマー試験体では、着火と発煙現象が発生した。それは、補修された建物で火災事故が起きたら補修材料の燃焼特性のため、避難通路として使用は正しくないと可能性がある。

図 5 には、EVA セメント混和用ポリマーの熱分解による発生ガス量(モル量)と発熱速度との関係を示す。EVA ポリマーは、加熱 20 秒から燃焼反応し、激しい火炎が発生した。これにより、EVA ポリマーは約 80℃付近で燃焼反応をし始め、350℃付近で最大発熱速度を示した。

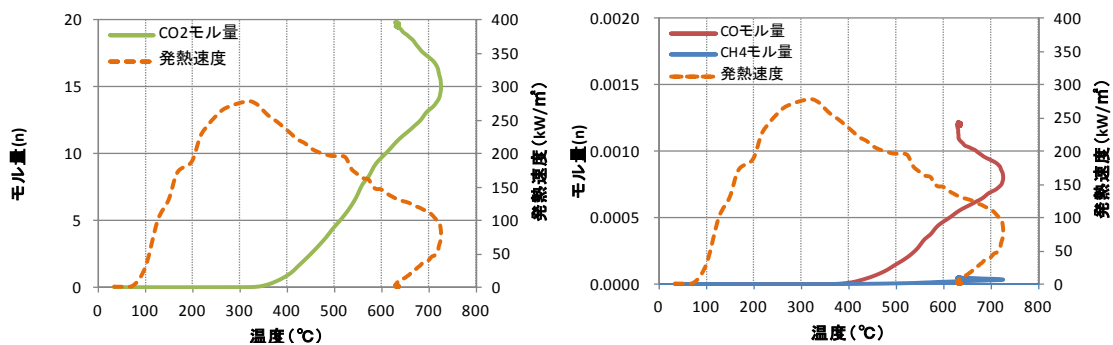


図 6 EVA ポリマーの熱分解による発生ガス量(左)と発熱速度の関係(右)

一方、図 6 に EVA セメントモルタルの熱分解時の発生ガス量および温度の関係を示す。EVA ポリマーの熱分解による発生ガス量(モル量)と発熱速度との関係を示す。加熱開始から試験体の温度は急激に上昇し、5 分経過後、300℃からガスの発生が確認された。

コーンカロリメーター試験結果としては、発生ガスの大部分は CO₂ ガスが占めている。CO ガスおよび CH₄ ガスは、全体発生ガス中約 1%以下を占めている。このことから、熱分解ガスで、発生ガス成分の大部分は CO₂ ガスであることが分かる。しかし、試験体の寸法は 100*100*10 mmであり、実験中に発生したガスの測定はガス採取からガス測定装置まで距離があるため、発生したガスが測定位置まで届くかが問題である。そこで、コーンカロリメーター試験を利用した発生ガスの測定及び分析より Smoke Density Chamber 装置に FT-IR 分析装置を連結して測定するのがよいと判断される。

② Smoke Density + FT-IR 分析装置の試験結果

※ 煙密度実験結果

表 4 前年度と今年度の比較-[輻射強度 25 kWの場合] (前年度)

Test items/specimen	Unit	NON	EVA 5%	EVA 10%	EVA 20%	SBR 5%	SBR 10%	SBR 20%
Maximum specific optical density	-	1.28	19.44	7.69	114.98	11.28	62.64	63.48
Time to maximum specific optical density	s	1195	1200	1200	1200	1200	1200	1198
Clear beam transmission	%	100	100	96.94	100	100	99.97	98.09
Clear beam specific optical density	-	0	0	1.78	0	0	0.01	1.1
Corrected maximum specific optical density	-	1.28	19.44	5.9	114.98	11.28	62.63	62.38

(今年度)

Test items/specimen	Unit	NON	EVA 5%	EVA 10%	EVA 20%	SBR 5%	SBR 10%	SBR 20%
Maximum specific optical density	-	55.26	12.94	31.29	156.26	76.53	148.72	378.39
Time to maximum specific optical density	s	989	1200	1198	1200	1200	1200	1195
Clear beam transmission	%	98.37	99.35	99.24	95.55	98.37	97.08	79.33
Clear beam specific optical density	-	1.00	0.37	0.44	2.61	0.94	1.7	13.28
Corrected maximum specific optical density	-	54.32	12.57	30.85	153.65	75.59	147.02	365.11

表 5 前年度と今年度の比較-[放射強度 50 kWの場合]

(前年度)

Test items/specimen	Unit	NON	EVA 5%	EVA 10%	EVA 20%	SBR 5%	SBR 10%	SBR 20%
Maximum specific optical density	-	2.89	10.86	55.23	2.32	63.63	30.06	368.54
Time to maximum specific optical density	s	803	1065	1200	286	847	1200	1200
Clear beam transmission	%	99.01	99.26	99.7	100	100	91.13	32.73
Clear beam specific optical density	-	0.57	0.43	0.17	0	0	5.33	64.03
Corrected maximum specific optical density	-	2.32	10.43	55.05	2.32	63.63	24.73	304.51

(今年度)

Test items/specimen	Unit	NON	EVA 5%	EVA 10%	EVA 20%	SBR 5%	SBR 10%	SBR 20%
Maximum specific optical density	-	35.6	51.24	-	102.52	152.05	195.66	328.27
Time to maximum specific optical density	s	631	1005	-	501	1168	674	1157
Clear beam transmission	%	98.88	98.45	-	98.21	98.74	73.68	37.94
Clear beam specific optical density	-	0.65	0.9	-	1.04	0.73	17.51	55.56
Corrected maximum specific optical density	-	34.95	50.34	-	101.48	151.32	178.15	272.72

実際火災を模写するため、加熱強度（放射強度）を 25 kW、50 kW として実験を行った。煙密度実験の結果、ポリマーの種類に関わらずポリマー量の増加によって燃焼ガスの発生量増加が分かった。さらに、一年経過後の試験体でのその結果が得られた。また、試験体の特性によって結果が違うこともあるが、おおよそ加熱強度とポリマー含有率により発生ガス量が直線的に増加する。FT - IR 装置で発生ガスを分析すると有害なガスは発生しない。しかし、可燃性ガス (CH₄) が発生すると SBR は実験体表面で着火が起きることもある。

既往の研究では、EVA は爆裂が、SBR は着火することが多いと示しているが今回の実験でもこのことが確認された。FT-IR 分析はもっと分析する必要があるが、今回の研究では、可燃性の程度(値)や外部に出る発生ガス量の程度などを確認することができた。なお、補修材料としてポリマーセメントモルタルの調合の考え方は発生燃焼ガスの条件および暴露環境によって異なる現象が発生するため、さらに確認する必要があると判断される。

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

火災時、建築構造物は急激な熱を受けて構造的に弱体化され、断面欠損は発生して構造物の崩壊を招く。これは、非正常熱応力や水蒸気圧が原因であると既存の研究では示しているが、それに対する検討方法や水蒸気圧測定に関連して明確に提示した研究や研究報告書はない状況である。また、ポリマーセメントモルタルはポリマーという有機物が含有され、上の原因以外に熱分解生成ガスも構造的な弱体化の原因になる。したがって、コーンカロリメータ試験を行い、総発熱量および最大発熱速度を把握し、その時の発生ガスの測定も同時に行うため、FT-IR 分析実験も必要である。韓国では、構造物の材料について燃焼特性把握実験としてコーンカロリメータ試験を実施しているが、FT-IR 分析を通じたガス定量化は実施しない状況である。しかし、もっと精密なガス発生量を測定するためコーンカロリメータ試験機に FT-IR 分析装置を連結してガス量を測定より Smoke Density Chamber 装置に FT-IR 分析装置を連結して測定するのがよいと思う。それは、試験機の測定位置の特性のため、すなわち、ガスが発生したところで発生ガス量を測定するかどうかによってもっと細かい測定値が得ると考えられる。そこで、韓国でのコーンカロリメータ試験機を利用した測定方法と今回、実験した Smoke Density Chamber 装置を使用した測定方法を比較分析し、DB 蓄積するのが一番よい測定方法であると判断される。

さらに、発生ガスの毒性有無、種類、ガス生成量の定量化は構造物の安全（爆裂）、在室者の避難路確保、消防官の消防活動に多大な役割をすると予想される。また、一年経過後の試験体の発生ガス、発生量などのデータを比較分析することである程度耐火性予測が可能し、建築物の維持補修管理および非常時避難路確保などに基本的な材料として使用することができる判断される。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

- ・ 今年(2016 年度)も継続課題となっていて今回の実験結果を分析して 7 月初旬に韓国火災消防学会の学術誌への投稿予定である。
- ・ また、RILEM(材料構造物試験・研究機関国際連合)技術委員会の技術報告書あるいは技術専門委員会の会議でこの内容を反映するつもりである。(東京理科大学との協議する予定)

上記以外に、韓国防災学会あるいは韓国施工学会の学術誌への投稿も準備する予定である。

6. 経費の使用状況

ポリマー購入および試料作製は韓国の中小企業の支援を受け、研究費用が節減された。その以外に、旅費のみ研究費用となった。最初、研究計画では、韓国で材料手配し、日本へ持ってきて実験を実施するつもりだったが、税関検査が厳しく韓国で実験体を製作し、東京理科大で本実験を行った。また、今年度の研究の中で、試験体の期中養生費用およびコーンカロリメータ試験費用は本研究院の協力で試験費用の節減ができた。ここにお礼申し上げます。

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
材料購入費	50,000	往復交通費	31,286		
	(韓国企業支援 別途)	(航空料包含)			
FTIR フィルタ	240,840	東京理科大学	18,000		
一他		宿泊利用料			
小計	240,840	小計	49,286	小計	-
東京理科大学 負担分 総計 290,126 円					
韓国建設生活環境試験研究院 負担分 総計 50,000 円					

※スペースが足りない場合はページを増やしても構いません。

※上記5に記載された成果公表については、別刷1部をご提出願います。PDFファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告としてWeb等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。(フォーマットは問いません。)

※後日開催予定の成果講評会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。(学内での報告に使用)