

学 位 論 文 の 要 旨

リング拘束供試体を適用したポリマーセメントモルタルの
火災時の爆裂性状と爆裂発生メカニズムに関する研究
(Fire spalling behavior of polymer cement mortar under ring restraint condition)

氏 名 杉野 雄亮 印

RC 構造物の補修材は、ポリマーセメントモルタル (PCM) が広く用いられている。PCM のポリマーは、母材コンクリートとの付着向上を目的に混入される。一方、PCM はポリマー無添加のモルタル (NCM) に比べ、火災時に爆裂が発生しやすいことが報告されている。しかし、従来の評価は爆裂による損傷規模を目視評価するものが多く、爆裂現象の詳細は未だ不明な点が多くあった。そこで、本論文はリング拘束供試体を適用した加熱試験を行い、PCM の爆裂性状を評価し、爆裂発生メカニズムについて検討した。

ポリマーは、セメント混和用ポリマーディスパージョンおよび再乳化形粉末樹脂 (JIS A 6203 : 2015) の適合品とし、ポリアクリル酸エステル (PAE)、エチレン酢酸ビニル (EVA) および酢酸ビニル・ビニルバーサテート (VVA) の再乳化形粉末樹脂とした。PCM の配合は一般的な補修材を想定し、ポリマーセメント質量比 (P/C) 2.5~20%、砂セメント質量比 2.5、水セメント質量比 0.5 とした。また、ポリマー無添加のモルタル (NCM) を比較用とした。加熱条件は RABT30 曲線とした。爆裂による損傷規模は爆裂深さ分布に基づき評価した。さらに、爆裂発生時の内部応力状態を拘束応力および水蒸気圧により評価した。

試験の結果、各種ポリマーを混入した PCM (P/C=10%) は NCM に比べて爆裂による損傷規模が大きくなった。また、PAE を混入した PCM は P/C=5~20% のときに爆裂による損傷が大きくなり、P/C=2.5% のときは NCM と同程度であった。なお、P/C=5~20% の PCM は、加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらなかった。また、PCM の爆裂発生メカニズムを検討した結果、爆裂発生条件は、①加熱に伴う拘束応力の増加、②ポアソン効果に伴う引張ひずみ破壊、③水蒸気圧による破壊片の押し出しの複合作用であると考えられた。さらに、各種 PCM の爆裂発生温度域とポリマーの熱分析結果をあわせて考察すると、PCM の爆裂発生温度域はポリマーの燃焼温度より低く、爆裂発生時にポリマーはあまり燃焼していない状態であると考えられた。そのため、PCM は爆裂発生温度域においてポリマーが水分の移動を抑制し、水蒸気圧がかかりやすい状態であると推察された。すなわち、PCM は爆裂発生条件を満たしやすく、爆裂が繰り返し発生しやすいと考えられた。なお、水分移動を抑制するポリマー量の境界条件は、本検討では P/C=2.5~5% の間に

存在すると推定された。

次に PCM にナイロン繊維を混入したときの爆裂抑止効果を検討した。ナイロン繊維の爆裂抑止効果は、繊維混入有無の水準を比較して評価した。その結果、P/C が小さく、ナイロン繊維混入量が多いほど、爆裂が発生し難くなることを確認した。さらに、爆裂未発生時のメカニズムを拘束応力と水蒸気圧により検討した。引張ひずみ破壊検証の結果、爆裂未発生時においても引張ひずみ破壊は生じていると考えられた。一方、水蒸気圧-内部温度曲線は徐々に減少する挙動を示し、水蒸気圧が緩和されることを確認した。ナイロン繊維の水蒸気圧緩和効果は、高温下の繊維の状態変化によるものと考えられる。ナイロンのガラス転移温度は 50°C 、融点は 215°C とされる。そのため、PCM の温度上昇により混入したナイロン繊維にモルタルとの付着切れや体積減少が起き、スペースが形成されると推察される。その結果、繊維により形成されたスペースに水分が移動し水蒸気圧が緩和されると考えられる。

さらに、リング拘束供試体と RC 梁の加熱試験結果を比較し、部材レベルの試験結果との相関性を確認した。RC 梁は無補修と補修条件とした。無補修の RC 梁は $100 \times 150 \times 1500\text{mm}$ (幅×高さ×長さ) とし、主筋 2 本 (かぶり厚さ 25mm) を配置した。補修した RC 梁の条件は、かぶりを含む 50mm 厚さを PCM とし、残りをコンクリート (NSC) とした。なお、PCM (P/C=10%) は繊維無混入 (PCM) と繊維 $0.5\text{vol}\%$ 混入 (PCM-F) の 2 配合にて実施した。加熱曲線は RABT30 とした。RC 梁の加熱試験の結果、無補修の RC 梁は表層剥離程度の軽微な損傷であった。また、PCM-F で補修した RC 梁は爆裂未発生であった。一方、PCM で補修した RC 梁は、PCM の大部分が爆裂により損傷し、主筋が剥き出しの状態になった。さらに、RC 梁の加熱試験結果と NSC, PCM, PCM-F で作製したリング拘束供試体の加熱試験結果は類似することを確認した。

以上より、PCM は NCM に比べて高温下で爆裂が発生しやすくなることを確認した。また、内部応力状態を拘束応力と水蒸気圧により定量的に評価し、PCM の爆裂発生条件は、拘束応力のポアソン効果による引張ひずみ破壊と水蒸気圧による破壊片の押し出しであることを実証した。また、PCM の爆裂発生温度域においてポリマーはあまり燃焼しておらず、水分移動を抑制すると考えられた。そのため、水蒸気圧がかかりやすく、爆裂が繰り返し発生し、爆裂による損傷規模が大きくなると考察された。また、リング拘束供試体と補修した RC 梁の爆裂による損傷状態は類似する傾向を示した。

学 位 論 文 の 要 旨

Fire spalling behavior of polymer cement mortar under ring restraint condition

(リング拘束供試体を適用したポリマーセメントモルタルの
火災時の爆裂性状と爆裂発生メカニズムに関する研究)

氏 名 Sugino Yusuke 印

Polymer cement mortar (PCM) is widely used as a repair material for RC structures. The polymer mixed in the PCM is used to increase the adhesion to concrete. On the other hand, PCM is more prone to spalling at high temperatures than mortar without polymer. However, the details of the spalling behavior of PCM at high temperatures are still unclear.

The authors evaluated the fire spalling properties of PCM restrained by a steel ring. We also analyzed test data on the mechanism of spalling phenomenon. The polymer is a product that conforms to JIS A 6203: 2015 (Polymer dispersions and redispersible polymer powders for cement modifiers). The types of polymers were Acryl (PAE), Ethylene/vinyl acetate (EVA), and Vinyl acetate/ vinyl versatic acid (VVA), respectively. The mass ratio of polymer to cement (P/C) was 2.5 to 20%. The mass ratio of sand to cement was 2.5, and the mass ratio of water to cement was 0.5. In addition, a normal cement mortar (NCM) was used for comparison. The heating condition was the RABT30 curve. The scale of damage caused by the spalling was evaluated based on the distribution of the spalling depth on the heated surface. In addition, the restrained stress and the water vapor pressure were measured during the heating of the specimen.

As a result of the heating test, the scale of damage caused by the spalling of PCM specimens was larger than that of NCM specimen. In addition, PCM specimens with P/C=5 to 20% was more damaged by the spalling than NCM specimen. On the other hand, PCM specimen with P/C =2.5% had the same damage as NCM specimen. During heating, PCM specimens with P/C=5 to 20% repeatedly spalling and did not stop. The conditions for PCM specimen spalling are (1) increase in restrained stress due to heating, (2) tensile strain failure due to Poisson's effect, and (3) extrusion of failure pieces due to water vapor pressure. And these conditions work in combination, causing spalling. Also, the temperature at which the spalling occurs is lower than the combustion temperature of the polymer. Therefore, it was found that the polymer was not burning when the spalling occurred. When the polymer blocked the movement of water during heating, then water vapor pressure was easy to increase, as a result, spalling occurs. The spalling occurrence condition is satisfied and the

spalling was easy to occur during heating. In addition, the boundary conditions for P/C blocking the movement of water were estimated to be between 2.5 and 5%.

Next, the effect of preventing spalling when nylon fiber was mixed in PCM was examined. The effect of preventing spalling was evaluated in comparison with PCM without fibers. As a result, the smaller the P/C and the larger the amount of nylon fibers mixed in, the less the spalling occurred. Furthermore, the mechanism when spalling does not occur was evaluated by restrained stress and water vapor pressure. Tensile strain fracture also occurred when spalling did not occur. It was also confirmed that the water vapor pressure was gradually relaxed. The relaxation of the water vapor pressure was caused by the change in the state of the nylon fiber under high temperature. Nylon has a glass transition temperature of 50°C and a melting point of 215°C. Therefore, when the temperature of the PCM specimen rises, the adhesion between the nylon fiber and the mortar is peeled off and the volume of the nylon fiber is reduced. As a result, space is formed. For that reason, water vapor moves to that space, and the water vapor pressure is relaxed.

Finally, the heating test results of the steel ring specimens and the RC beams were compared. The three types of RC beams used control RC beams and repaired RC beams with PCM, repaired RC beams with PCM added Nylon fiber, respectively. The control RC beam was 100×150×1500mm (W×H×L). Two main reinforcing bars were placed 25 mm from the heating surface. The repaired RC beam was made PCM with a thickness of 50 mm from the heating surface, and the rest was made of concrete (NSC). The RC beams were repaired with PCM without fibers and PCM mixed nylon fibers. The PCM was P/C=10% and 0.5vol% of nylon fibers was mixed. The heating condition was the RABT30 curve. As a result of heating the RC beam, the heated surface of the control RC beam was slightly damaged. In addition, the RC beam repaired with PCM mixed with nylon fibers did not spalling. On the other hand, the RC beam repaired with PCM without fibers were damaged by the spalling. As a result, the main reinforcing bar was exposed. Furthermore, a specimen was prepared by filling a steel ring with NSC, PCM without fibers, and PCM with fibers, and heated. As a result, the damage caused by the spalling of those specimens was similar to the heating test results of RC beams.