

Research Paper

메틸 메타크릴레이트 기반 도로 보수재 개발을 위한 기초 연구

Preliminary Investigation into the Use of Methyl Methacrylate(MMA)-Based Materials for Road Repair

지성준¹ · 편수정² · 최병철² · 김재환³ · 김도수⁴ · 남정수^{5*}

Ji, Sung-Jun¹ · Pyeon, Su-Jeong² · Choi, Byung-Cheol² · Kim, Jae-Hwan³ · Kim, Do-Su⁴ · Nam, Jeong-Soo^{5*}

¹Master Course, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

²PhD Course, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

³CEO, AMS Engineering Co., Yuseong-Gu, Daejeon, 34077, Korea

⁴CEO, E&E Chem Co., Yuseong-Gu, Daejeon, 34016, Korea

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

*Corresponding author

Nam, Jeong-Soo
Tel : 82-42-821-5629
E-mail : j.nam@cnu.ac.kr

ABSTRACT

This research explores the potential of methyl methacrylate(MMA) as a material for road repair applications. It specifically examines two MMA formulations, referred to as type A and type B, in relation to their performance on concrete substrates. The evaluation criteria included drying time, tensile bond strength, and resistance to alkali. The condition of the substrate surface was varied across three curing environments: constant temperature and humidity(R), immersion in water(W), and immersion in water with chloride ions(N). The findings indicate that type B MMA exhibits a quicker drying time and superior resistance to alkali compared to type A. While type A demonstrated greater tensile bond strength, it failed to maintain adhesion with the concrete base. Based on the parameters tested in this study, type B MMA emerges as the more favorable option for road repair contexts. Nonetheless, the study underscores the necessity for additional testing on asphalt substrates to fully assess the material's durability and applicability for long-term road maintenance.

Keywords : road repair materials, methyl methacrylate, concrete roads, surface condition

Received : December 14, 2023

Revised : December 20, 2023

Accepted : December 22, 2023

1. 서론

포장도로는 아스팔트 포장도로와 콘크리트 포장도로로 분류된다. 도로 손상 유형은 다양하지만 아스팔트 도로에서는 주로 강우, 강설 등에 의해 포장층에 수분이 침투하면 아스팔트의 접착력을 약화시키면서 균열과 포트홀이 발생한다. 콘크리트 포장도로에서는 균열과 주로 줄눈부에서 스폐링이 발생하고 염수로 인해 표면부에서 박리가 발생한다[1]. 도로의 표면 변형과 균열 및 포트홀은 사고의 주요 원인이 될 수 있다[2]. 따라서 교통사고를 사전에 방지하기 위한 도로 보수 공사는 필수적이다.

교통량 증가 및 포장의 노후화 된 포장도로는 교통량 증가와 기상이변으로 인한 열화된 표면 상태에 더 큰 피해를 입힐 수 있다[3]. 국토교통부의 통계자료에 따르면 최근 국내의 국도와 고속도로의 교통량이 증가추세를 보이고 있으며 2013년 대비 2022년에 13% 증가했다. 또한, 기후가 온대 기후에서 점차 아열대 기후로 변화하면서 하절기의 국지성 호우와 폭우가 증가하고 있다. 동절기에는 폭설로 인한 제설제의 사용이 증가하면서 더 많은 염화물에 노출되고 있다. 이에, 국내의 도로 포



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

장, 위험도로개선, 재해 및 응급복구로 사용되는 도로보수비가 2013년 2.03조원에서 2022년 4.19조원으로 점차 증가하고 있음을 국토교통부에서 2023년에 통계 자료를 공개하였다.

한편, 한국도로공사에서 발표한 ‘최근 5년간(2018~2022년) 고속도로 공사구간 교통사고 현황’에 따르면 지난 5년간 고속도로 유지·보수 공사 도중에 발생한 교통사고로 인해 사망자 50명, 부상자 179명이 발생했다고 보고하였다. 안전한 도로 환경 구축을 위해 도로의 유지·보수 공사는 필수적이다. 이에, 도로상의 작업자의 노출빈도를 최소화할 수 있도록 작업시간을 단축시키는 신기술의 접목이 대안으로 제시되고 있다.

선행 연구에서는 시멘트 기반의 속경성 모르타르 또는 콘크리트 배합에 대한 연구가 진행되었다. Karimi et al.[4]은 역청 및 폴리머 콘크리트를 사용하여 저온 및 중온에서의 영향을 연구하였다. 균열된 시편을 역청 및 폴리머 콘크리트로 보수하여 시편의 기계적 성능을 평가하였다. Li et al.[5]은 붕사 및 플라이애시와 인산마그네슘 시멘트(MPC) 페이스트와 모르타르를 보수재로 사용하였다. MPC 모르타르는 수축률이 낮고 콘크리트 포장과의 접착 강도가 양호하였다. Wang et al.[6]은 흑색 안료 및 폴리프로필렌 섬유와 알루미늄 시멘트를 사용하여 맨홀 주변의 아스콘 포장 수리를 위한 콘크리트 배합(BRRFC)을 조사하였다. BRRFC의 건조수축률, 내마모성, 내구성을 조사하여 아스콘 포장의 적합성을 검토하였다. Song et al.[7]은 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 왕겨 재를 사용하여 지오폐리머기반의 속경성 보수재 배합을 조사하였다. 초결시간이 35분 미만으로 나타났으며, 표면의 방수성능을 확인하였다.

메틸 메타크릴레이트(Methyl Methacrylate; MMA)는 화학식이 $CH_2=C(CH_3)COOCH_3$ 인 유기 화합물이다. 현재 국내에서는 주로 도로교면 도막방수재와 미끄럼방지포장, 차선 도색 도료로서 사용되고 있다. 분말 혹은 액상의 벤질퍼옥사이드(BPO)계 경화제와 함께 혼합하면 중합반응이 일어나면서 경화하는 특성을 가진다. MMA 중합은 라디칼 반응특성으로 중합 개시제(Initiator)에 의한 모노머간의 중합반응이 매우 빠르게 진행되며 경화되는 특성을 가진다. 따라서 영하의 온도에서도 높은 반응도가 유지된다[8]. 결과적으로 MMA는 저온에서도 빠르게 경화될 수 있다. 또한, MMA는 내열성, 내마모성, 내화학적, 방수성이 우수하다[9]. 이러한 특성을 활용하여 속경성 보수재로서 사용하기 위한 연구가 진행되었다[9-11]. 따라서 본 연구에서는 포장도로에의 보수 공사 적합성을 검토하기 위해 외관, 점도 및 경화제의 혼합비가 다른 2종류의 MMA를 사용하여 콘크리트에서의 건조시간, 인장 접착 강도, 내알칼리 시험을 통해 평가하였다. 시험 결과의 오차를 줄이기 위해 바탕면의 요철이 적은 콘크리트를 사용하여 시험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

MMA를 도장하기 위한 콘크리트 모체는 KCS 44 50 15(시멘트 콘크리트 포장공사)의 명시되어있는 배합기준 이상의 성능을 보이는 시험체를 사용하였다.

본 연구에서는 A type과 B type 2종류의 MMA를 사용하였다. Figure 1과 Table 1에 MMA계 도로보수재의 모습과 특징을 나타내었다. A type은 짙은 갈색이고 점도가 낮다. B type은 검은색이고 점도가 높으며, 특이사향으로 입상재료로 규사가 포함되어 있다. A type과 B type 모두 주제와 경화제로 구성되어 있으나 각각 중량비 100:1.8, 100:0.8로 주제와 경화제의 혼합비의 차이가 있다. A type은 분자량이 큰 PMMA(Poly(methyl methacrylate))가 다량 포함되어 있고, 반면 B type은 상대적으로 PMMA보다 모노머가 많이 포함되어 있다.

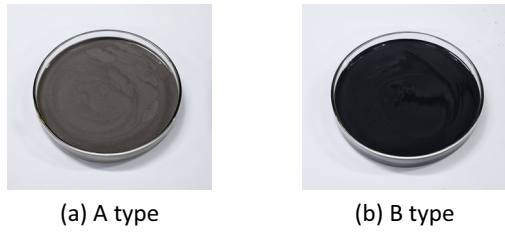


Figure 1. MMA road repair materials (a) Type A, (b) Type B

Table 1. Characteristics of MMA materials

	A type	B type
Color	Dark brown	Black
Viscosity	low	high
Granular Materials	X	O(silica sand)
Main : Hardener Mixing Ratio	100 : 1.8	100 : 0.8
PMMA Content	PMMA>monomer	PMMA<monomer

2.2 실험 방법

2.2.1 시험체 준비

도로보수재로서 사용되는 MMA의 기초 물성을 평가하기 위해 Table 2와 같이 실험 요인 및 수준을 설정하였다. MMA의 도장을 위한 모체는 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 의 콘크리트 공시체를 높이가 40mm가 되도록 절단한 것을 건조시간과 인장 접착 강도 측정을 위해 사용하였다. 또한, $150 \times 50 \times 30 \text{mm}$ 의 콘크리트 프리즘을 제작하여 내알칼리 시험에 사용하였다. 시험체는 항온항습조건(R), 수중조건(W), 수중+염화이온조건(N)에서 각각 양생하였다. N 조건은 3.0wt.% NaCl 수용액을 사용하였다. W 조건과 N 조건은 각각의 조건에서 양생하면서 시험체의 무게가 더 이상 증가하지 않을 때 충분한 표면상태가 조성되었다고 판단하여 MMA를 도장하였다.

Table 2. Characteristics of MMA materials

Factor	Content
MMA type	A type, B type
Number of paintings	1 time, 2 times, 3 times (1 and 2 are for drying time only)
Curing condition	Room(R), Water(W), Water+Chloride ion(N)
Test contents	Drying time(set to touch, dry-hard) Tensile bond strength Alkali resistance

2.2.2 건조시간

건조시간은 KS M 5000(도료 및 관련 원료의 시험방법)에 따라 지축건조시간과 고화건조시간을 측정하였다. 측정 환경은 항온항습조건으로 온도 20°C, 습도 56%에서 진행하였다. 측정간격은 5분으로 하여 진행하였다.

2.2.3 인장 접착 강도

인장 접착 강도 시험은 KS F 4932에 따라 수행하였다. 최대 용량이 20kN인 H사의 소형 디지털 접착력 시험기를 사용하였다. 3회 도장된 $\varnothing 100 \times 40 \text{mm}$ 시험체의 중앙에 에폭시 접착제를 사용하여 $40 \times 40 \text{mm}$ 의 시험편을 부착하였다. 24시간 이상의 경화시간이 경과되었을 때 시험기를 사용하여 시험편이 탈락될 때까지 진행하여 최대 인장하중값을 기록하였다. 시험 과정을 Figure 2에 나타내었다.

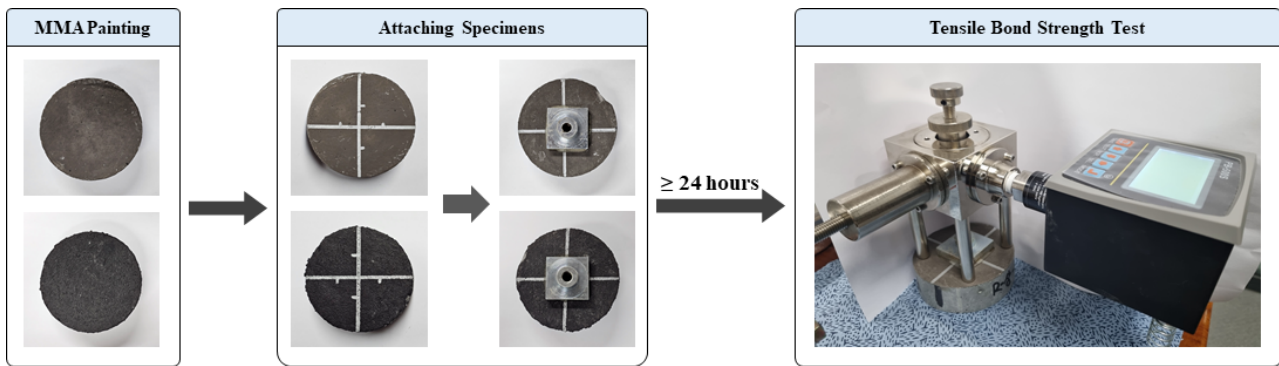


Figure 2. Procedure for tensile bond strength evaluation

2.2.4 내알칼리

내알칼리 시험은 KS F 4715를 참고하여 수행하였다. 제작한 시험체에 MMA를 3회 도장하여 완전 건조시킨 후, 나머지 5면을 에폭시를 도장하여 마무리하였다. 이후 Figure 3과 같이 석회수 90ml가 들어있는 300ml 비커에 시험체를 24시간 침지 후 꺼내어 기중에서 3시간 건조하였다.



Figure 3. Alkali resistance test methodology

3. 실험 결과 및 분석

3.1 건조시간

모체의 양생 조건에 따른 건조시간 측정 결과를 Figure 4에 나타내었다. 양생조건에 관계없이 A type, B type 모두 10분 내에 지축건조가 완료되었다. A type은 35~50분 경과 후에 고화건조가 완료되었다. B type은 10~15분 경과 후에 고화건조가 완료되어 A type 대비 3배 빠르게 건조되었다. 또한, A type과 B type은 R조건에서 가장 빠르게 건조되었다. A type은 W 조건과 N 조건의 경우 지축건조 시간은 동일하지만 고화건조 시간은 N 조건에서 W 조건보다 빠르게 건조되었다.

그러나 B type은 W 조건과 N 조건에서 동일한 고화건조 시간을 보였다. R 조건에 비해 W 조건과 N 조건에서 물 분자의 간섭작용 및 양생 중에 미중합 MMA 모노머의 일부가 수중으로 확산되는 반응이 유도되어 MMA의 중합반응 속도가 늦춰져 건조시간이 길게 나타난 것으로 판단된다.

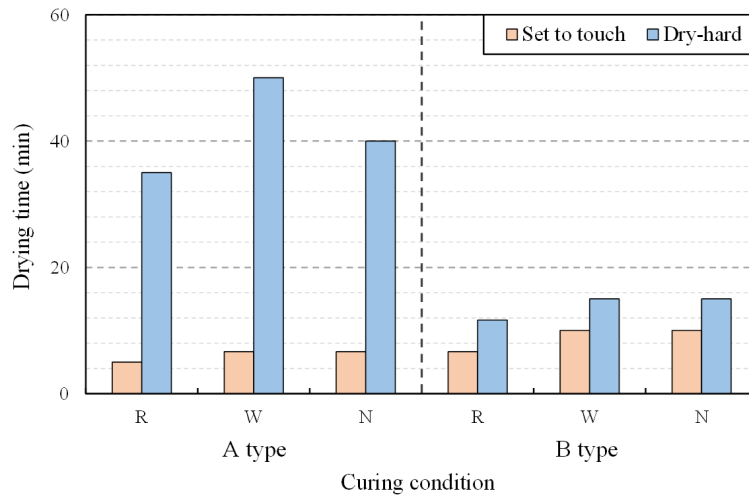


Figure 4. Drying time by curing condition

3.2 인장 접착 강도

인장 접착 강도(MPa)는 최대 인장하중(N)을 시험편의 접착 단면적(mm²)으로 나누어 소수점 이하 2자리까지 계산하여 Figure 5에 나타내었다. 시험 종료 후의 시험체와 시험편의 접착면을 Table 3에 나타내었다. 모든 시험체는 KS 표준에서 규정하는 0.6MPa 이상의 인장 접착 강도를 나타내었다. A type은 R 조건, W 조건, N 조건에서 각각 5.06MPa, 6.78MPa, 4.94MPa로 나타났으며 W 조건에서 가장 높은 인장 접착 강도를 보였다. 반면, B type은 R 조건, W 조건, N 조건에서 각각 3.81MPa, 3.09MPa, 3.94MPa로 나타났으며 W 조건에서 가장 낮은 인장 접착 강도를 보였다.

A type의 경우, 모든 조건에서 콘크리트 모체의 일부와 함께 탈락된 것을 확인하였다. 반면, B type은 A type과 비교했을 때 극히 작은 면적에서만 모체와 함께 탈락되었으며 MMA에서만 탈락된 것을 확인하였다. 이는 A type의 낮은 점도와 B type에 포함되어 있는 규사와 높은 점도로 인해, A type은 모체에 침투하기 유리하고 B type은 불리하기 때문인 것으로 사료된다.

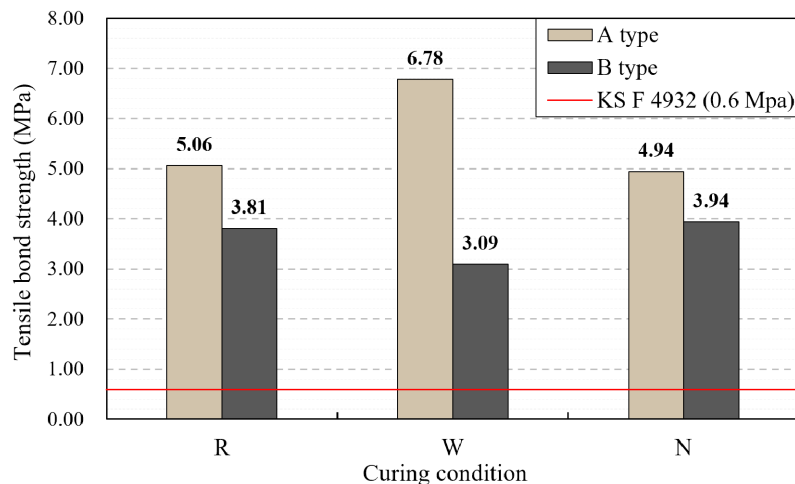
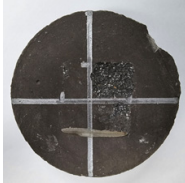



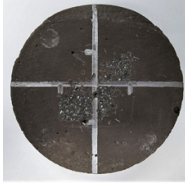



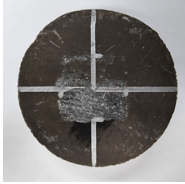


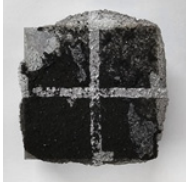


Figure 5. Tensile bond strength by curing condition







Table 3. Bonding surface condition according to curing conditions

Curing condition	A type		B type	
	Specimen	Test piece	Specimen	Test piece
R				
W				
N				

3.3 내알칼리

내알칼리 결과는 Table 4에 나타내었다. KS 표준에 따라 공기 중에서 3시간 건조시킨 후, 육안으로 도막의 잔갈림, 변형, 부풀, 벗겨짐 등의 유무를 확인하고 석회수와 접촉하지 않은 부분과 비교하였다. A type은 석회수와 접촉한 면은 그렇지 않은 면에 비해 상대적으로 변색이 발생하였고, 도장면이 일부 마모되었다. 반면, B type은 변색이 일부 관찰되었고 이외의 손상은 발생하지 않았다.

Table 4. Surface condition after alkali resistance test according to curing conditions

Curing condition	A type	B type
R		
W		
N		

4. 결론

본 연구에서는 도로보수재로 사용하기 위한 MMA의 기초 평가를 진행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 건조시간은 A type이 최대 50분, B type은 최대 15분으로 나타나 약 3배의 차이를 보였다. 기존의 도로보수재의 교통 개방시간이 최소 3시간이 소요되는 것을 고려한다면, A type과 B type 모두 성능이 우수하다고 사료된다.
- 2) 인장 접착 강도는 A type이 최소 4.94MPa, B type이 최소 3.09MPa로 나타났다. 두 타입 모두 KS 표준에서 규정하는 0.6MPa 이상으로 나타났다. 그러나 A type은 접착면에서 모체와 함께 탈락되는 것을 확인하였다. 실제 도로에의 시공을 고려했을 때, 모체와 함께 탈락되는 파괴양상을 보일 경우 포트홀과 더불어 2차 피해를 유발할 수 있다. 따라서 인장 접착 강도 관점에서는 B type이 적합하다고 판단된다.
- 3) 내알칼리 시험결과 A type은 석회수와 접촉한 면의 변색과 마모가 관찰되었다. 한편, B type은 일부 변색은 발생했지만 마모는 관찰 되지 않았다.

A type은 분자량이 큰 PMMA가 다량 포함되어 있어 경화제에 포함된 중합개시제와의 경화반응이 지연되는 특성을 가진다. 반면 B type은 상대적으로 PMMA보다 모노머가 많이 포함되어 있어 수평균 분자량이 작아 중합개시제와의 경화반응이 빠르게 촉진되는 특성을 갖는다. 경화반응이 빠르게 진행될수록 건조시간이 빠르고 이에 따라 모체에 침투하기는 어려워진다. 이러한 MMA의 특성이 건조시간 시험과 인장 접착 강도 시험의 결과로 나타난 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 진행한 건조시간, 인장 접착 강도, 내알칼리 시험 결과를 종합적으로 고려하면, B type의 MMA가 콘크리트도로보수재로서 사용하기 적합하다고 사료된다. 또한, 본 연구에서 사용한 A type과 B type을 아스팔트 시험체에 적용했을 때, 건조시간과 내알칼리의 경우에는 물질의 특성이므로 유사한 경향을 보일 것으로 예상된다. 그러나 B type은 높은 점도와 입상재료를 포함하기 때문에 아스팔트 시험체에 적용했을 때 작업성이 저하되고 내구성이 저하될 수 있다. 따라서 도로보수재로서의 적합성을 판단하기 위해서 아스팔트 도로를 고려한 시험을 진행할 필요가 있다고 사료된다.

요약

본 연구에서는 도로 보수재로서 메틸 메타크릴레이트(MMA)의 활용 적합성을 평가하였다. A type과 B type의 2가지 MMA를 콘크리트에 적용하여 건조시간, 인장 접착 강도, 내알칼리 시험을 진행하였다. 항온항습(R), 수증(W), 수증+염화이온(N)의 3가지 조건으로 양생하여 모체의 표면 상태를 설정하였다. 시험 결과, B type MMA가 A type 보다 빠른 건조시간과 우수한 내알칼리성을 나타냈다. 인장 접착 강도는 A type이 더 높게 나타났지만, 콘크리트 모체와 함께 탈락되었다. 본 연구 범위에서는 B type이 도로 보수재로 사용하기 적합하다고 판단된다. 그러나 내구성을 고려하여 아스팔트 모체에서의 추가 실험을 진행할 필요가 있다.

키워드 : 도로 보수재, 메틸 메타크릴레이트, 콘크리트 도로, 표면 상태

Funding


Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea)


Acknowledgement


This work was supported by the Collabo R&D between Industry, Academy, and Research Institute(RS-2023-00224707)


funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea).


ORCID


Sung-Jun Ji,  <https://orcid.org/0009-0001-7698-5382>

Su-Jeong Pyeon,  <https://orcid.org/0000-0001-7768-5958>

Byung-Cheol Choi,  <https://orcid.org/0000-0001-6668-5741>

Jae-Hwan Kim,  <https://orcid.org/0009-0008-8822-7766>

Do-Su Kim,  <https://orcid.org/0009-0003-1702-1844>

Jeong-Soo Nam,  <https://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

References

1. Lee CY, Han BH. Lee CY, Han BH. High speed hardening road surface reforming composition comprising methyl methacrylate resin and High speed hardening road surface reforming method using the same. South Korea patent KR 10-1556969. 2015 Sep 24.
2. Bella F, Calvi A, D'amico F. Impact of pavement defects on motorcycles' road safety. *Procedia-social and Behavioral Sciences*. 2012 Oct;53:942-51. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2012.09.943>
3. Kamal I, Bas Y. Materials and technologies in road pavements-an overview. *Materials Today: Proceedings*. 2021;42:2660-7. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.643>
4. Karimi HR, Khedri E, Aliha MRM, Shaker H, Haghightatpour PJ. Repair efficiency evaluation for cracked asphalt mixture pavement in different ambient temperatures using bitumen and polymer concrete as repair materials. *Construction and Building Materials*. 2023 Mar;369:130556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130556>
5. Li J, Zhang W, Cao Y. Laboratory evaluation of magnesium phosphate cement paste and mortar for rapid repair of cement concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2014 May;58:122-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.015>
6. Wang Y, Kong L, Chen Q, Lau B, Wang Y. Research and application of a black rapid repair concrete for municipal pavement rehabilitation around manholes. *Construction and Building Materials*. 2017 Sep;150:204-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.173>
7. Song L, Li Z, Duan P, Huang M, Hao X, Yu Y. Novel low cost and durable rapid-repair material derived from industrial and agricultural by-products. *Ceramics International*. 2017 Nov;43(16):14511-6. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.106>
8. He Y, Wang Z, Wen F, Sirotin IS, Mu J, Kireev VV. MMA-based fast-curing repair materials suitable for low-temperature application. *Journal of Polymer Engineering*. 2022 Mar;42(4):343-50. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0292>
9. Han J, Xu L, Feng T, Shi X, Zhang P. Effect of PCE on properties of MMA-based repair material for concrete. *Materials*. 2021 Feb;14(4):859. <https://doi.org/10.3390/ma14040859>
10. Li T, Xu J, Wang J. Research on application of MMA super-solid seal in preventive maintenance of bridge deck. 2021 6th International Conference on Minerals Source; 2021 Apr 9-11; Guangzhou, China. United Kingdom: IOP Publishing Ltd.; 2021. p. 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/768/1/012055>
11. Van Tittelboom K, Adesanya K, Dubruel P, Van Puyvelde P, De Belie N. Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials. *Smart Materials and Structures*. 2011 Nov;20(12):125016. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125016>