

제올라이트 골재를 혼입한 보도용 흡수성 콘크리트 포장의 최적 대체율 선정[†]

- 흡수성능 및 강도시험 결과를 중심으로 -

Optimum Replacement Ratio for Absorbent Paving Concrete for Sidewalks Containing Zeolite Aggregates[†]
- Absorption Performance and Strength Test Result -

이상훈*, 박세영**, 이기열***

*전남대학교 조경학과 조교수, **전남대학교 조경학과 석사, ***전남대학교 조경학과 부교수

Lee, Sang-Hoon*, Park, Se-Young**, Lee, Gi-Yeol***

*Assistance Professor, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

**Master of Science, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

***Associate Professor, Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University

Received: August 17, 2024

Revised: September 02, 2024 (1st)

Accepted: September 02, 2024

3인익명 심사필

Corresponding author :

Gi-Yeol Lee

Associate Professor, Dept. of

Landscape Architecture,

Chonnam National University,

Gwangju 61186, Korea

Tel.: +82-62-530-2108

E-mail: gylee@jnu.ac.kr

국문초록

이 논문은 보도용 포장 콘크리트에서 보통 골재의 대체재로 흡수율이 높은 제올라이트 골재를 이용하기 위한 기초 연구로서, 포장 콘크리트에 혼입하는 제올라이트 굵은골재와 잔골재의 최적 대체율을 결정하기 위하여 흡수 및 건조시험을 통한 흡수성능과 압축, 휨 및 쪼갬인장강도시험을 통한 역학적 특성을 파악하였다. 시험결과, 흡수율과 건조율의 차이로 정의할 수 있는 흡수성능은 굵은골재에서 제올라이트 골재가 보통 골재보다 약 4%가 높은 6%였고, 잔골재도 마찬가지로 제올라이트 골재가 약 11% 이상 높은 31%로 나타났다. 그리고, 제올라이트 골재를 혼입한 포장 콘크리트에서도 대체율에 따라 흡수율은 최대 4.5%, 건조율은 최소 0.72%로서, 포장 콘크리트의 단위용적중량을 고려하면 비교적 높은 흡수성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 제올라이트 골재 혼입 포장콘크리트의 압축강도는 보통 골재를 사용한 경우와 비교하여 일부 대체율에서 감소하였지만, 국가건설기준에서 규정하는 설계기준압축강도는 모두 충족하였다. 휨강도도 마찬가지로 대체율에 따라 16%까지 감소하고 배합설계 지침에서 규정하는 설계기준 휨강도보다 낮지만, 설계하중의 크기가 작은 보도용 콘크리트 포장에 적용하는데는 문제가 없을 것으로 판단된다. 균열저항성에 영향을 주는 쪼갬인장강도는 대체율에 따라 동일하거나 6%까지 감소하지만 휨강도와 마찬가지로 보도용 콘크리트 포장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 연구결과를 종합하면 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장은 흡수성능이 우수하고 보도용에 적용할 수 있는 역학적 특성을 충분히 확보하고 있으며, 보도용 흡수성 콘크리트 포장에 적용할 수 있는 최적 대체율은 총 대체율 30%를 기준으로 굵은골재 20%와 잔골재 10%로 결정되었다.

주제어: 강도, 건조, 역학적 특성, 국가건설기준, 배합설계 지침

ABSTRACT

This paper is a basic study on replacing ordinary aggregates with zeolite aggregates with high absorption rates in paving concrete for sidewalks. In order to determine the optimal replacement ratio of coarse and fine zeolite aggregates in paving concrete, absorption performance through absorption and drying tests and mechanical properties through compression, bending, and splitting tensile strength tests were investigated. As a result of the absorption tests, the absorption performance, which can be defined as the difference between absorption rate and drying rate, was 6% for coarse aggregates, which was about 4% higher than that of normal aggregates, and 31% for fine aggregates, which was about 11% higher than that of normal aggregates. In addition, in paving concrete mixed with zeolite aggregates, the absorption rate was up to 4.5% and the drying rate was at least 0.72%, which showed a relatively high absorption performance considering the unit volume weight. The compressive strength of paving concrete mixed with zeolite aggregate decreased at some replacement ratios compared to that of normal aggregate, but all satisfied the design compressive strengths specified in the Korean design standard. The flexural strength also decreased by up to 16% depending on the replacement ratio and was lower than the design flexural strength specified in the mixture design guidelines. However, it was judged that there would be no problem in applying it to concrete pavement for sidewalks with small design loads. The splitting tensile strength, which is important for crack resistance, was the same or decreased at a rate of 6% or less depending on the replacement ratio, so it is considered to be suitable for paving

[†]이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2020-2018) 자원에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

concrete for sidewalks. From the research results on absorption performance and mechanical properties, it was confirmed that zeolite aggregates can be applied to absorbent paving concrete for sidewalks, and the optimal replacement ratio for this was determined to be 20% coarse aggregate and 10% fine aggregate based on a total of 30% replacement.

Keywords: Strength, Drying, Mechanical Properties, Korea Design Standard, Mixture Design Guideline

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

최근 기후변화 등의 원인으로 여름철에 설계(재현)빈도를 초과하는 집중호우 또는 폭우가 내리는 횟수가 증가함에 따라 불투수층 노면을 많이 갖는 도심 지역에서는 강우에 의한 지표수 유출로 인하여 침수 피해가 자주 발생하고 있다. 이와 같은 지표수 유출은 대부분 불투수층을 형성하고 있는 도시의 보도와 차도를 통해서 이뤄지는데, 투수계수가 매우 작은 대표적인 불투수성 재료인 콘크리트를 포장에 사용하기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위한 대책으로 강우 시 포장용 콘크리트를 통해 빗물이 노상으로 침수되거나 노반으로 침투되도록 공극률이 크고 투수능력이 우수한 투수 또는 배수성 포장을 적용하고 있다. 그런데, 이들 포장은 단입도의 일반 굵은골재를 사용하는 투수 콘크리트 또는 아스팔트 혼합물로서, 배합 또는 타설 시 재료분리와 공용에 따른 투수성이 저하되는 문제점과 함께 초기균열 및 파손에 따른 역학적인 취약점과 내구성이 부족한 단점이 있다(Ikotun and Ekolu, 2010; Nas and Kubetci, 2018)). 이와 함께 국내 주요 도시를 중심으로 건전한 물순환 체계 구축을 목표로 강우에 따른 체류시간 확보를 통하여 도심지 홍수를 예방하기 위한 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법이 2014년부터 시범적으로 도입되고 있다. LID의 핵심은 강우에 따라 지표로 유출되는 빗물의 우수관 유입을 지연시켜 도심지 홍수 발생 가능성을 낮추는 것으로서, 조경분야에서는 옥상정원이나 저류지와 함께 도심지의 보도 또는 보행자 통로에 대한 불투수성 포장의 개선 등을 통하여 적용하고 있다.

조경분야에 적용하는 포장은 보행자 및 자전거 통행과 차량 통행의 원활한 기능 유지를 목적으로 지표면과 도로의 선형을 유지하기 위한 포장 및 경계블록으로 정의한다. 조경포장의 종류에는 보행자를 대상으로 하는 보도용 포장, 최대 적재중량 4톤 이하의 차량을 대상으로 하는 차도용 포장 및 교통량이 적은 도로의 노면을 보호하거나 강화하기 위한 간이포장 등 3가지로 구분하며, 이들 포장의 대부분은 콘크리트를 주재료로 하는 강성포장에 해당한다. 국가건설기준인 조경 설계기준에서는 포장을 보도포장(KDS 34 60 10)(국토교통부, 2016a), 자전거도로포장(KDS 34 60 15)(국토교통부, 2016b), 차도 및 주차장포장(KDS 34 60 20)(국토교통부, 2016c)으로 구분하여 규정하고 있다. 이들 조경포장을 대표하는 KDS 34 60 10(보도포장)에서 규정하고 있는 포장용 콘크리트 대한 기준은 재령 28일 압축강도 17.64MPa 이상, 굵은골재 최대치수 40mm 이하 등 2가지만 규정하고 있다. 이와는 다르게, 일반 차도 및 도로 포장용 콘크리트에 대한 기준인 KDS 44 50 10(시멘트 콘크리트 포장설계)(국토교통부, 2023)에서는 굵은골재 종류에 따른 휨강도와 쪼갬인장강도를 규정하고 있으며, 압축강도와 응력에 의한 탄성계수를 규정하고 있다. 또한 국토해양부에서 발행한 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침(2011)에서는 포장용 콘크리트의 배합설계를 위하여 설계기준휨강도 4.5MPa와 굵은골재 최대치수 30mm 이상으로 규정하고 있다. 이와 같이 포장용 콘크리트와 관련된 건설기준 또는 배합설계 지침에서는 강성포장에 따른 설계 및 시공을 위한 강도 및 굵은골재 최대치수와 같은 최소한의 규정만 제시하고 있는 실정이다.

제올라이트는 다공성 구조를 특징으로 하는 대표적인 광물로서 미세한 유해성 물질의 흡착과 흡수능에 따라 환경적으로 우수한 특성을 갖고 있으며(이창용 등, 2011), 특히 우리나라 동해안 지역을 중심으로 매장량이 풍부하고 가공이 쉬운뿐만 아니라 수요처에 공급이 용이하므로 경제성을 충분히 확보할 수 있다. 제올라이트가 갖는 특성에 따라 환경, 수처리 등 다양한 산업분야에서 활용되고 있으며(최민지 등 2011), 건설산업에서는 콘크리트 재료를 중심으로 미분말 형태의 혼화재료(최재진, 1998; Sedlmajer et al., 2015; 윤창복과 이한승, 2020) 또는 시멘트와의 결합재로서 강도 증진(조병완 등, 2011; 조병완과 최지선, 2012; Reddy et al., 2018))과 알칼리-골재 반응 개선(Feng et al., 1992)을 목적으로 사용되거나 경량골재로도 일부 사용(Semsettin, 2011; Tran et al., 2019) 되고 있다. 이와 함께, 보도에 적용하는 콘크리트 또는 아스팔트 포장을 대체하는 포장용 블록을 대상으로 강도 개선 또는 도심열섬화 저감을 목적으로 제올라이트 골재를 혼입하고 있다(Girskas et al., 2016; Pancar, 2016; Wu et al., 2024). 최근, 나옥빈과 이기열(2021), Doostmohamadi et al.(2018) 및 Teymouri et al.(2023)은 제올라이트의 우수

한 흡수 특성을 포장용 콘크리트에 활용할 수 있는 가능성을 검토하기 위하여 콘크리트를 구성하는 재료 중 사용량이 가장 많은 굵은골재를 제올라이트 골재로 일부 대체하거나 제강슬래그 등과의 혼합을 통하여 전부 대체하였을 때 흡수성능 및 강도 특성을 파악하였다. 그러나, 이들 연구를 제외하고는 콘크리트 포장에서 제올라이트의 높은 흡수성능을 활용하거나 주요 재료인 잔골재와 굵은골재를 함께 대체하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 포장용 콘크리트에 사용되는 보통 골재와 비교하여 흡수특성이 상대적으로 우수한 제올라이트를 보도용 포장에 적용하기 위한 기초 연구의 일환으로서, 포장용 콘크리트를 구성하는 주재료 중 약 70%를 차지하는 잔골재와 굵은골재를 제올라이트 골재로 일부 대체하는데 따른 흡수성능 및 강도 특성을 파악하고 이로부터 제올라이트 골재의 최적 혼입량을 산정하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구 방법

현행 시멘트 콘크리트 포장에 적용하는 배합설계를 기준으로 제올라이트를 혼입하지 않은 보통 콘크리트와 굵은골재와 잔골재 사용량의 10%에서 20%까지 5% 단위로 제올라이트 굵은골재 및 잔골재로 대체한 총 4가지 배합설계에 따른 원주형 및 사각형 공시체를 제작하고 수중양생을 실시하였다. 그리고, KS 규정에 따라 흡수와 건조 및 강도 특성을 파악하기 위한 시험들을 실시하고, 이 결과로부터 흡수성능과 역학적 특성을 모두 확보할 수 있는 제올라이트 골재의 최적 대체율을 결정하였다.

2. 시험

2.1 재료

본 연구의 시험에 사용한 제올라이트 골재는 경상북도 소재의 K사에서 생산하는 비중 2.16, 단위중량 $1,390\text{kg/m}^3$ 인 그림 1과 같은 평균지름 8mm의 굵은골재와 2mm의 잔골재를 사용하였으며, 흡수 및 건조에 대한 특성은 시험을 통해 확인하였다. 포장용 콘크리트 배합에서 시멘트는 국내 S사에서 생산하는 비중 3.15의 제1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 보통 잔골재는 표면건조포화상태 비중이 2.56이고 조립율 2.78인 국내산 강모래를 사용하였고, 보통 굵은골재는 제올라이트와 동일하게 굵은골재 최대치수 8mm, 조립율 2.35, 표면건조포화상태 비중이 2.96인 쇄석골재를 사용하였다. 배합설계 시 적용한 잔골재율은 45%, 목표 슬럼프는 포장용 콘크리트에 요구되는 최댓값인 60mm로 하였다. 그리고, 제올라이트 골재의 영향만을 고려할 수 있도록 콘크리트의 강도와 흡수 및 작업성 등 기초 물성에 영향을 줄 수 있는 혼화재료들은 사용하지 않았다.

2.2 배합설계

나옥빈과 이기열(2021)의 연구에 따르면, 제올라이트 굵은골재를 약 10~20%까지 대체하였을 때 압축강도와 휨 강도 등의 역학적 특성이 보통 콘크리트(plain concrete)와 비슷한 수준으로 유지되고, 30% 이상의 대체율에서는 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, Doostmohamadi et al.(2018)과 Teymouri et al.(2023)이 수행한 연구에서도 제올라이트 굵은골재 대체율 25%까지 압축강도가 증가하였고, 30% 이상의 대체율에서는 압축강도가 크게 감소하

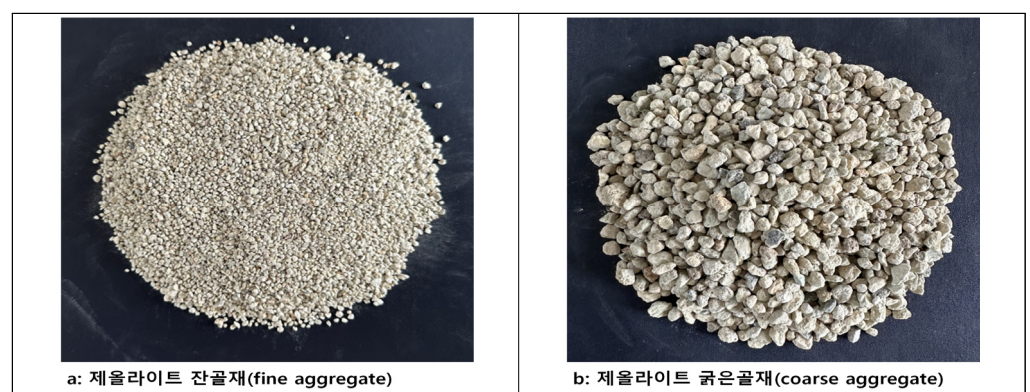


그림 1. 제올라이트 골재

는것으로 나타났다. 이에 본 연구에서도 이들 연구결과를 참고하여 제올라이트 굵은골재 대체율을 최대 20%까지로 하였다. 그리고, 흡수율이 굵은골재보다 상대적으로 큰 잔골재에 대해서도 흡수능능의 개선을 위해 동일한 대체율을 적용하였다. 이와 같이 잔골재와 굵은골재의 흡수능 차이와 콘크리트에서 서로 다른 역할을 고려하여 총 대체율을 30%로 고정한 상태에서 최소 10%에서부터 20%까지 대체율을 5%씩 서로 교차하여 증가 또는 감소되게 하였다. 이에 따른 포장용 콘크리트 배합은 굵은골재 대체율에 따라 G10에서 G20으로, 잔골재 대체율은 역순으로 S20에서 S10으로 하여 표 1에 정리한 바와 같이 각 배합별로 G10S20, G15S15, G20S10까지와 기준이 되는 보통 콘크리트(CONT)까지 총 4가지 배합설계를 하였다.

이와 같이 제올라이트 골재를 혼입한 포장용 콘크리트의 역학적 특성과 흡수능능을 파악하기 위한 공시체 제작을 위하여 보통 콘크리트를 기준으로 하는 설계기준 강도를 다음과 같이 압축강도와 휨강도 등 두가지로 정의하였다. 보도용 콘크리트 포장에 적용하는 압축강도에 대해서는 KDS 34 60 10(조정설계기준)에서 규정하는 17.64MPa을 설계기준 압축강도로 하였으며, 도로용 콘크리트 포장에 적용하는 휨강도에 대해서는 국토해양부의 시멘트 콘크리트 포장 배합설계지침(2011)에서 규정하는 4.5MPa을 설계기준 휨강도로 적용하였다.

2.3 공시체 제작 및 시험방법

제올라이트 골재를 혼입한 포장용 콘크리트의 기초 물성 중 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위하여 강도별 시험방법을 규정하고 있는 KS 기준에 따라 압축 및 쪼갬인장강도는 지름 100mm인 원주형 몰드, 휨강도는 100×100×400mm 각주형 몰드를 이용하여 각 배합별로 3개씩 총 36개의 공시체를 제작하였다. 흡수능능 또한 KS 기준에서 원주형 공시체로 측정하도록 규정하므로 강도시험용 원주형 공시체를 이용하였다.

시험용 공시체 제작 전에 강제식 콘크리트 믹서로 배합된 콘크리트의 작업성을 파악하기 위하여 그림 2a와 같이 KS F 2402(2022)(산업표준심의회, 2022a) 규정에 의한 슬럼프시험을 실시하였다. 슬럼프시험 결과, 각 배합별로 45~60mm의 슬럼프값이 측정되어 작업성이 확보됨을 확인한 후 공시체 제작용 몰드에 콘크리트를 타설하고 경화가 완료된 시점부터 28일 동안 수중양생을 실시하였다. 강도시험은 그림 2b에서 그림 2d에 보인 바와 같이 500kN 용량의 자동압축시험기와 100kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 KS에서 규정하는 시험방법에 따라 압축(KS F 2405)(산업표준심의회, 2022b), 휨(KS F 2408)(산업표준심의회, 2016) 및 쪼갬인장(KS F 2423)(산업표준심의회, 2021) 시험을 실시하고, 파괴 시 측정된 하중들의 평균값을 강도로 산정하였다.

3. 시험결과

3.1 골재의 흡수 성능

보도용 콘크리트 포장의 흡수능능은 사용량의 약 70%를 차지하는 골재에 의해 결정되므로, 보통 및 제올라이트 골재의 흡수와 건조 특성이 중요하다고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 콘크리트 포장에 사용되는 골재들을 대상으로 절대건조 및 표면건조포화 함수상태를 기준으로 일반적인 강우 지속시간에 해당하는 5시간 동안 흡수 및 건조시험을 실시하였다. 시험에 따른 흡수 및 건조율은 시험전 무게 500g을 기준으로 시간의 경과에 따른 골재의 무게를 정밀도 0.01g의 전자저울로 측정하여 흡수량 또는 건조량을 산정한 후, 시험전 무게로 나누어 흡수율 또는 건조율을 각각 계산하였다.

표 1. 배합설계

| 배합명 | 설계(배합) 강도 (MPa) | 제올라이트 대체율 | | 단위량 (kg/m³) | | | | | |
|--------|-----------------------|------------|-------------|-------------|-----|-------|---------|----------|-------|
| | | 잔골재 (%) | 굵은골재 (%) | 물 | 시멘트 | 보통 골재 | | 제올라이트 골재 | |
| | | | | | | 잔골재 | 굵은골재 | 잔골재 | 굵은골재 |
| CONT | 4.5(휨) 17.64(압축) | 0 | 0 | 140 | 311 | 708 | 1,122 | 0 | 0 |
| G10S20 | | 20 | 10 | | | 566.4 | 1,009.8 | 141.6 | 112.2 |
| G15S15 | | 15 | 15 | | | 601.8 | 953.7 | 106.2 | 168.3 |
| G20S10 | | 10 | 20 | | | 637.2 | 897.6 | 70.8 | 224.4 |

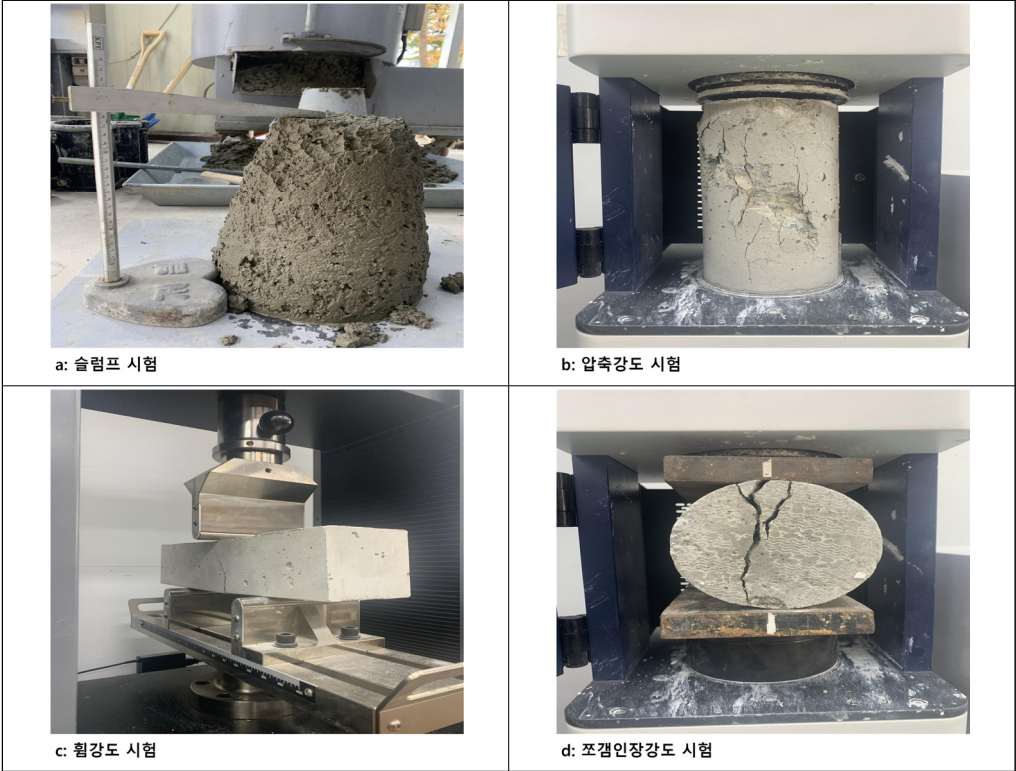


그림 2. 콘크리트의 슬럼프 및 강도시험

콘크리트 포장에 사용되는 보통 및 제올라이트 굵은골재(coarse aggregate)를 대상으로 실시한 흡수 및 건조시험 결과를 비교하여 그림 3에 각각 정리하였다. 시험 전 절대건조상태인 보통 및 제올라이트 굵은골재의 흡수율은 그림 3a에 보인 바와 같이 흡수 시작과 동시에 증가한 후 약 30-45분이 경과한 후부터 증가없이 최댓값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 보통 골재의 최대 흡수율은 흡수가 시작된 후 30분이 경과하였을 때 약 5%였으며, 이후 침수 시간부터는 골재 내부의 공극이 모두 포화되어 흡수율의 변화는 없음을 알 수 있다. 이와는 다르게 제올라이트 굵은골재의 최대 흡수율은 흡수가 시작된 후 45분이 경과하였을 때 약 14%였으며, 이후 침수 시간부터는 보통 골재와 유사하게 흡수율의 변화는 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 이러한 차이는 다공성 구조를 특징으로 하는 제올라이트 골재의 내부 공극 면적이 보통 골재보다 크기 때문에 흡수량의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 이와는 다르게 골재 내부가 모두 물로 포화된 표면건조상태로부터 실시한 건조율은 그림 3b에 보인 바와 같이 건조시간과 골재 종류에 따라 차이가 있음을 확인할 수 있다. 보통 굵은골재는 초기 15분까지 건조가 빠르게 진행되고 이후 2시

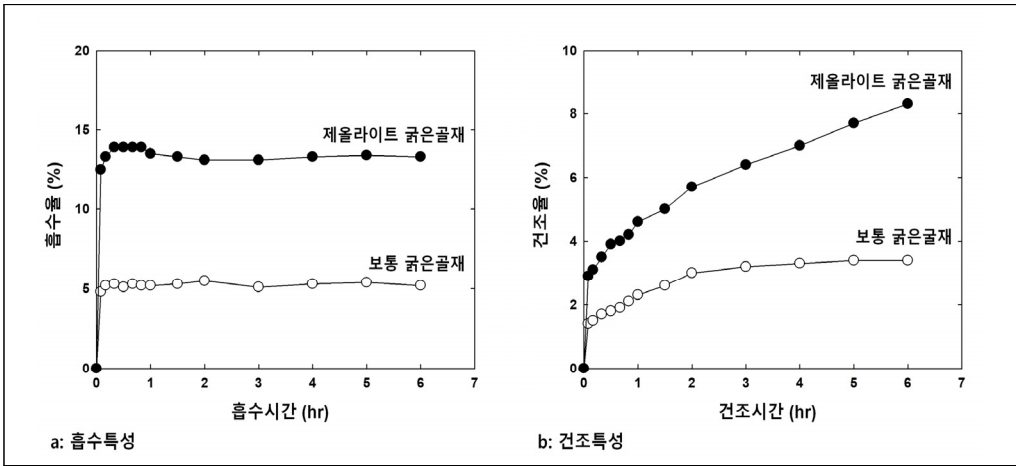


그림 3. 굵은골재의 흡수 및 건조 특성

간동안 약 3%까지 건조율이 계속 증가한 후 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 제올라이트 굵은골재는 초기 15분에 보통 골재의 최대 건조율인 3%에 도달하였으며, 이후에도 건조가 계속되어 5시간 후 건조율은 약 8%까지 증가함을 확인할 수 있다. 본 연구의 목적인 보도용 흡수성 콘크리트 포장에 사용되는 굵은골재의 흡수능은 이상의 시험결과로부터 측정된 각 골재의 5시간 최대 흡수율과 건조율의 차이로서 파악할 수 있다. 이에 따르면 보통 굵은골재는 최대 2%이지만 제올라이트 굵은골재는 최대 6%로서, 이 결과는 콘크리트 포장에 제올라이트 골재를 사용하는데 따른 흡수능이 향상될 수 있음을 확인하는 것이라고 할 수 있다.

굵은골재와 마찬가지로 콘크리트 포장에 사용되는 동일한 함수상태 조건의 보통 및 제올라이트 잔골재(fine aggregate)를 대상으로 실시한 흡수 및 건조시험 결과를 비교하여 그림 4에 각각 정리하였다. 잔골재의 흡수율은 그림 4a에 보인 바와 같이 흡수율의 차이만 있을뿐, 흡수시간의 증가에 따른 경향은 유사함을 알 수 있다. 그리고, 보통 잔골재의 최대 흡수율은 흡수 시작 후 30분에서 약 20%이고, 제올라이트 잔골재는 15분이 경과하였을 때 약 33%로 나타났다.

굵은골재와 다르게 흡수율이 높은 이유는 흡수량 측정을 위하여 표면건조포화상태가 되도록 건조시킬 때 굵은골재는 표면적이 상대적으로 크기 때문에 표면수의 제거가 용이하지만, 잔골재는 표면수의 제거가 쉽지 않기 때문에 판단된다. 이와는 다르게 대기중 건조를 통해 무게를 측정하므로 오차가 상대적으로 적은 건조율은 그림 4b에 보인 바와 같이 두 골재의 차이가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 보통 잔골재는 1시간 동안 건조가 진행된 후 이후에는 건조가 되지 않고 최대 건조율인 0.2%를 유지하고 있지만, 제올라이트 잔골재는 5시간 동안 건조가 계속 진행되어 최대 건조율은 1.7%까지 증가함을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 잔골재의 흡수능은 보통 잔골재가 약 20%이고 제올라이트 잔골재는 약 30%임을 알 수 있으며, 콘크리트 포장의 흡수능은 잔골재의 영향이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 그리고, 굵은골재와 마찬가지로 제올라이트 골재를 사용하는데 따른 흡수능이 더욱 향상될 수 있음을 확인하는 것이라고 할 수 있다,

3.2 콘크리트 포장의 흡수 성능

앞 절에서 확인한 골재의 흡수능에 기반하여 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장의 흡수능을 파악하기 위한 시험을 실시하였다. 그런데, 포장용 콘크리트의 흡수에 대한 직접적인 시험 기준이 없는 관계로 본 연구에서는 기포 콘크리트의 흡수율을 규정하고 있는 KS F 2459(2017)의 시험방법을 준용하였다. 이 기준에서는 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 이용하도록 규정하고 있으므로, 본 연구의 강도시험을 위해 제작한 원주형 공시체를 이용하여 강도시험 1일 전에 흡수 및 건조시험을 실시하였다. 공시체의 무게는 콘크리트의 불투수성을 고려하여 12시간을 기준으로 초기 1시간은 10분 간격, 이후 30분, 1시간, 3시간 간격으로 측정하였다.

건조로에서 100℃로 24시간 건조시킨 제올라이트 혼입율에 따른 포장용 콘크리트 공시체들을 이용하여 실시한 흡수시험 결과를 그림 5에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면, 제올라이트 골재를 혼입하지 않은 보통 콘크리트(CONT)는 2시간까지 흡수율이 최대 3.5%까지 증가한 후 12시간까지 변화가 없는 것으로 나타났다. 이와는 다르게 제올라이트 골재를 혼입한 포장용 콘크리트는 12시간 동안 흡수율이 수렴하지 않고 계속 증가하는 것으로 나타났다. 제올라이트 골재 대체율에 따른 12시간 흡수율은 굵은골재보다 잔골재를 2배 더 대체한 G10S20 공시체가

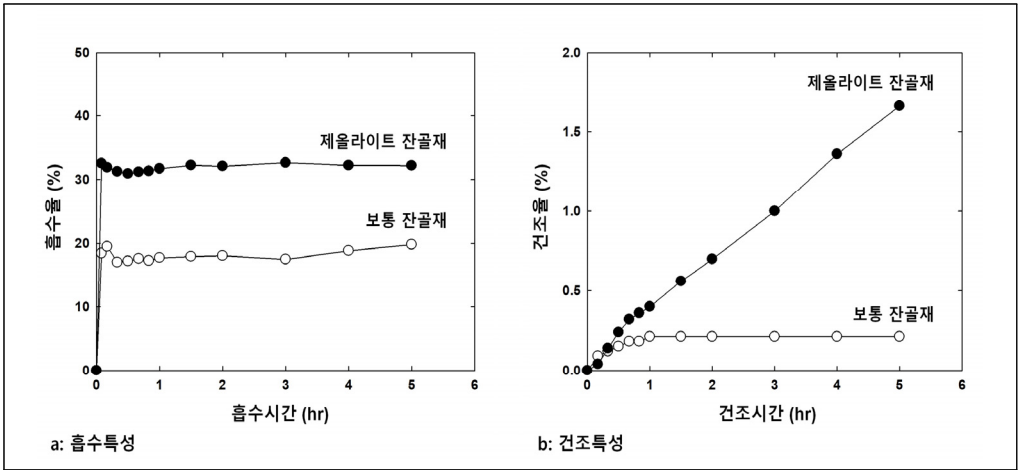


그림 4. 잔골재의 흡수 및 건조 특성

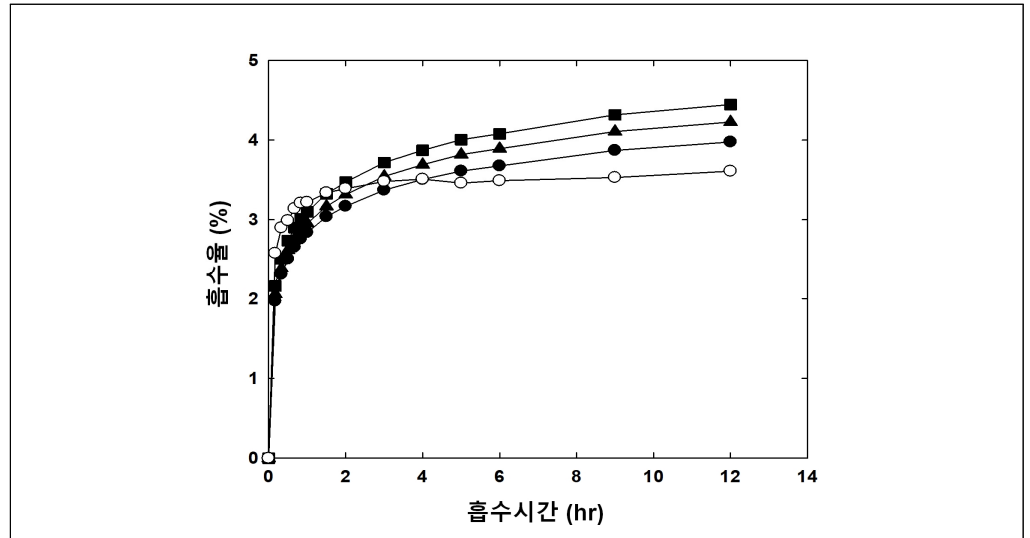


그림 5. 제올라이트 혼입에 따른 콘크리트 포장의 흡수 특성
범례: ○ CONT, ● G10S20, ■ G15S15, ▲ G20S10

약 4%이며, 다음으로 두 골재의 대체율이 동일한 G15S15 공시체가 약 4.2%이고, 굵은골재 대체율이 잔골재의 2배인 G20S10 공시체에서 가장 큰 4.5%로 나타났다.

따라서, 콘크리트 포장에 제올라이트 골재를 혼입하면 보통 골재를 사용하는 일반 콘크리트 포장과 비교하여 흡수율이 약 30% 이상 높아질뿐만 아니라, 물을 흡수할 수 있는 시간도 연장되므로 흡수능력이 향상된다고 할 수 있다.

다음으로 제올라이트를 혼입한 콘크리트 포장의 정확한 흡수능을 파악하기 위하여 수중양생된 공시체의 표면수를 제거한 후 대기중에서 건조시키면서 실시한 건조시험 결과를 그림 6에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면, 제올라이트 골재를 혼입하지 않은 보통 콘크리트(CONT)는 동일한 가울기를 보이며 12시간 동안 건조가 계속 진행되며 최대 건조율은 약 1.1%로 측정되었다. 이와는 다르게 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장은 초기 2시간 동안 보통 콘크리트 포장보다 건조가 빠르게 진행되었으나, 이후에는 건조 속도가 감소하는 것으로 나타났다. 제올라이트 골재 대체율에 따른 12시간 건조율은 G10S20 공시체가 약 0.8%, 다음으로 G15S15 공시체가 약 0.76%였으며, 잔골재보다 굵은골재를 2배 더 대체한 G20S10 공시체는 약 0.72%로 가장 낮은 것으로 나타났다. 따라서 흡수율과 마찬가지로 제올라이트 골재를 혼입하였을 때 보통 콘크리트 포장과 비교하여 최대 건조율이 약 10% 정도 감소할뿐만 아니라 건조시간에 따라서도 건조율이 감소하므로 흡수능 향상에 효과적이라고 할 수 있다.

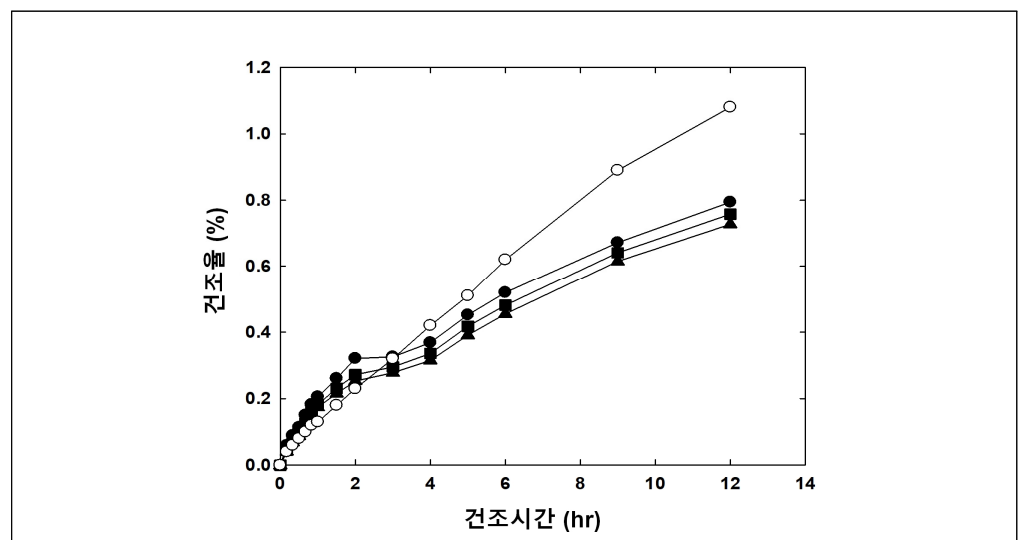


그림 6. 제올라이트 혼입에 따른 콘크리트 포장의 건조 특성
범례: ○ CONT, ● G10S20, ■ G15S15, ▲ G20S10

3.3 강도 특성

흡수능의 향상을 목적으로 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장의 역학적 특성을 파악하기 위하여 그림 2b에서 2d에 보인 바와 같이 압축, 휨 및 조깅인장강도 시험을 각각 실시하였다. 먼저 제올라이트 골재 대체율에 따른 배합별로 제작된 원주형 공시체 3개를 대상으로 그림 2b와 같은 압축시험을 통해 측정된 공시체별 압축강도와 이들 평균값 및 표준편차를 계산하여 표 2에 제시하고 대체율별로 그림 7에 정리하였다. 이 결과에 따르면, 현재 주로 사용되는 보통 콘크리트(CONT)의 평균 압축강도는 25.3MPa로서 KDS 34 60 10에서 규정하는 설계기준 압축강도인 17.64MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 그리고, 제올라이트 잔골재와 굵은골재를 혼입한 콘크리트 포장에서도 혼입율에 따른 차이는 있지만, 3가지 배합 모두 설계기준압축강도 이상의 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 그렇지만 제올라이트 골재의 종류와 대체율에 따라서 압축강도의 차이가 발생하였는데, 제올라이트 굵은골재가 가장 적고 잔골재가 가장 많이 혼입된 G10S20에서 보통 콘크리트(CONT)보다 약 4%가 증가한 최대 압축강도가 발현되었다. 다음으로 제올라이트 굵은골재가 가장 많이 혼입된 G20S10, 굵은골재와 잔골재가 동일한 비율로 혼입된 G15S15 순으로 압축강도가 발현되었다. 그리고, 이들 배합의 압축강도 크기는 보통 콘크리트(CONT)와 비교하여 약 10~13% 정도 감소하였으나, 설계기준압축강도와 비교하면 약 25~29% 이상 증가하였다. 이와 같은 압축강도 시험결과를 정리하면, 보통 골재를 사용하는 기존 콘크리트 포장에 제올라이트 골재를 10~20% 범위로 대체하여 혼입한 경우에도 KDS 34 60 10에서 규정하는 설계기준압축강도를 만족하므로 보도용 콘크리트 포장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 단, 제올라이트 대체율에 따라 압축강도의 차이가 발생하므로 흡수능 및 역학적 특성을 종합적으로 고려하여 최적의 대체율을 선정할 필요가 있다.

압축강도 시험과 동일한 배합으로 제작된 각주형 공시체 3개를 대상으로 그림 2c와 같은 휨시험을 통해 측정된 공시체별 휨강도와 이들 평균값 및 표준편차를 계산하여 표 2에 제시하고 대체율별로 그림 8에 정리하였다. 이 결과에 따르면, 보통 골재를 사용한 콘크리트 포장의 평균 휨강도는 4.53MPa로서 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침에서 규정하는 설계기준휨강도 4.5MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장에서는 대체율에 따라 설계기준휨강도를 초과하거나 작게 발현되는 것으로 나타났다. 설계기준휨강도를 초과한 배합은 제올라이트 굵은골재 대체율이 가장 낮은 G10S20으로서, 보통 콘크리트(CONT)보다 큰 4.58MPa의 휨강도가 발현되었다. 이와는 다르게 굵은골재 대체율이 증가하고 잔골재 대체율은 감소하는 배합에서는 휨강도가 낮게 발현되었는데 G15S15에서는 3.81MPa, G20S10에서는 3.88MPa로서 설계기준휨강도와 비교하여 약 14~16% 정도 감소하였다. 그러나 이 지침에서 규정하는 설계기준휨강도 4.5MPa는 도로 또는 차도용 콘크리트 포장의 설계 및 시공에 적용하는 강도로서, 본 연구에서 대상으로 하는 보도용 포장을 이용하는 주 대상인 보행자 또는 자전거에 의한 설계하중에 저항하기 위한 기준강도로 적용하기에는 상당히 큰 값이라고 할 수 있다. 따라서, 지침에서 규정하는 설계기준휨강도보다 낮지만 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장을 보도용으로 적용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다. 이와 같은 휨강도 시험결과를 정리하면, 압축강도와 마찬가지로 보통 골재를 사용하는 기존 콘크리트

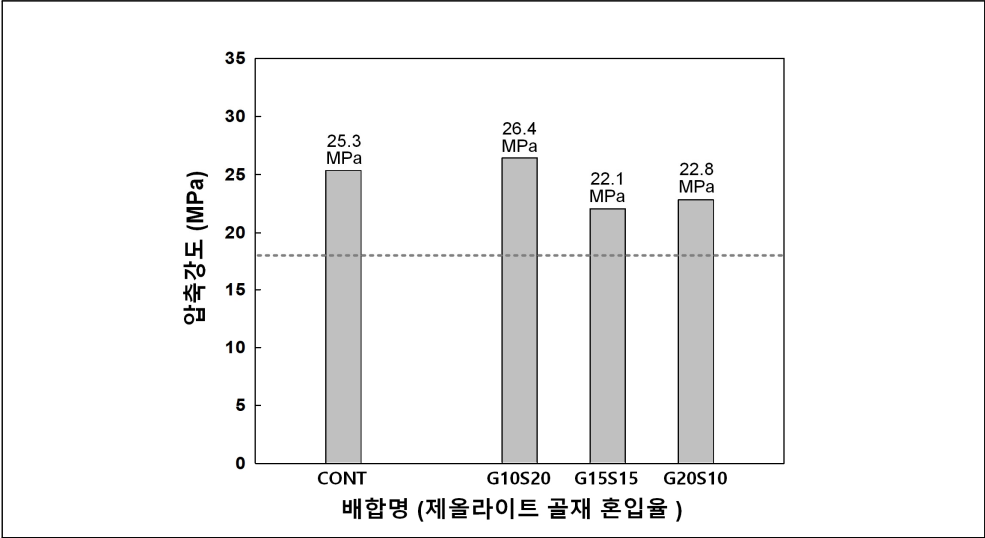


그림 7. 제올라이트 골재 혼입에 따른 콘크리트 포장의 압축강도

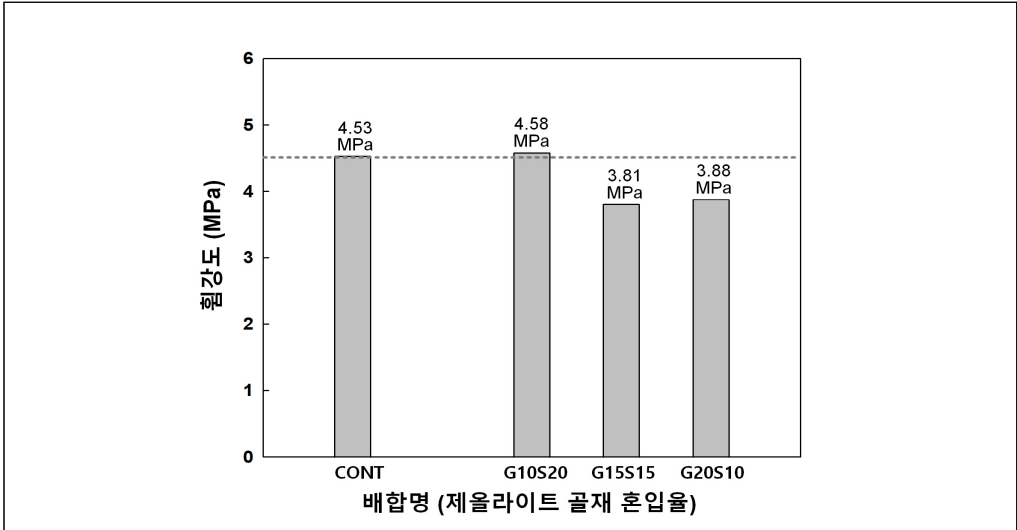


그림 8. 제올라이트 골재 혼입에 따른 콘크리트 포장의 휨강도

리트 포장에 제올라이트 골재를 10~20% 범위로 대체하여 혼입한 경우에도 국토해양부의 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침에서 규정하는 설계기준휨강도를 일부 대체율에서 만족하거나 도로 또는 차도와 비교하여 설계하중이 상대적으로 적은 보도용 콘크리트 포장에 적용할 수 있을것으로 판단된다. 단, 제올라이트 대체율에 따라 휨강도의 차이가 있고 설계기준휨강도보다 낮게 발현되는 경우도 있으므로 흡수능 및 설계하중에 따른 역학적 특성을 종합적으로 고려하여 최적의 대체율을 선정할 필요가 있다.

마지막으로 국가건설기준 또는 배합설계 지침에서 기준 강도에 대한 규정은 없지만, 공용중인 콘크리트 포장의 균열과 같은 사용성 및 내구성의 확보에 중요한 역할을 하는 쏘갠인장강도를 파악하기 위하여 원주형 공시체 3개를 대상으로 그림 2d와 같은 쏘갠인장 시험을 실시하고 측정된 공시체별 쏘갠인장강도와 이들 평균값 및 표준편차를 계산하여 표 2에 제시하고 대체율별로 그림 9에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면, 제올라이트 골재를 사용하지 않은 보통 콘크리트(CONT)의 쏘갠인장강도는 3.17MPa이고, 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트는 압축 또는 휨강도와 다르게 G10S20에서 약 6% 감소한 2.97MPa로 가장 작고, 굵은골재와 잔골재의 대체율이 동일한 G15S15에서 가장 큰 3.17MPa로서 보통 콘크리트와 동일하며, 굵은골재 사용량이 가장 많은 G20S10에서는 약 2% 감소한 3.12MPa의 쏘갠인장강도가 발현되었다. 이와 같은 시험결과는 콘크리트 포장의 역학적 특성을 대표하는 압축강도 및 휨강도와 비슷하게 제올라이트 골재를 혼입하여도 보통 콘크리트(CONT)와 동일하거나 94% 이상의 쏘갠인장강도가 발현되므로 균열 저항성과 그에 따른 내구성을 충분히 확보할 수 있을것으로 판단된다. 다만, 대체율에 따라 6% 정도의 강도 차이가 발생하므로 다른 강도에서 고찰한 바와 같이 흡수능 및 역학적 특성을 모두 확보할 수 있는 최적 대체율을 결정할 필요가 있다.

표 2. 강도시험 결과 및 분석

| 배합명 | 압축강도 | | | | | | 휨강도 | | | | | | 조깅인장강도 | | | | | |
|--------|--------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|------|------|-------------|-------------|-------------|--------------|------|------|-------------|-------------|--|
| | 공시체 강도 (MPa) | | | 평균 강도 (MPa) | 표준 편차 (MPa) | 강도비 (평균/기준) | 공시체 강도 (MPa) | | | 평균 강도 (MPa) | 표준 편차 (MPa) | 강도비 (평균/기준) | 공시체 강도 (MPa) | | | 평균 강도 (MPa) | 표준 편차 (MPa) | |
| | #1 | #2 | #3 | | | | #1 | #2 | #3 | | | | #1 | #2 | #3 | | | |
| CONT | 26.32 | 23.87 | 25.82 | 25.34 | 1.29 | 1.44 | 4.73 | 4.34 | 4.51 | 4.53 | 0.20 | 1.01 | 2.81 | 3.29 | 3.41 | 3.17 | 0.32 | |
| G10S20 | 25.56 | 26.05 | 28.28 | 26.43 | 1.45 | 1.51 | 4.32 | 4.81 | 4.60 | 4.58 | 0.24 | 1.02 | 2.70 | 3.25 | 2.94 | 2.97 | 0.28 | |
| G15S15 | 22.09 | 23.18 | 20.85 | 22.04 | 1.17 | 1.25 | 3.90 | 3.83 | 3.71 | 3.81 | 0.10 | 0.85 | 2.71 | 3.37 | 3.43 | 3.17 | 0.40 | |
| G20S10 | 21.63 | 22.37 | 24.46 | 22.82 | 1.47 | 1.29 | 4.05 | 3.66 | 3.92 | 3.88 | 0.20 | 0.86 | 2.55 | 3.73 | 3.07 | 3.12 | 0.60 | |

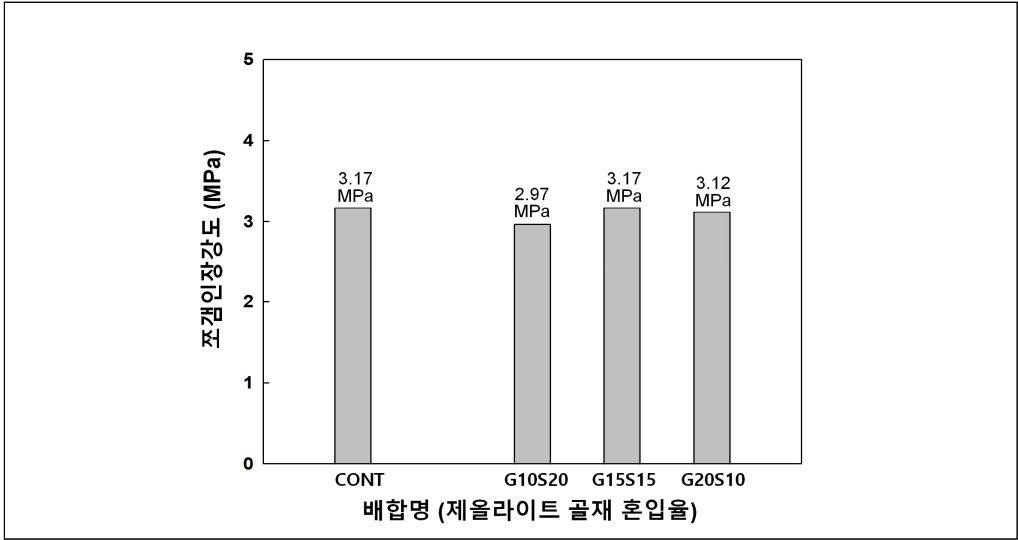


그림 9. 제올라이트 골재 혼입에 따른 콘크리트 포장의 조깅인장강도

3.4 제올라이트 골재 최적 대체율

본 연구는 기존의 보도용 콘크리트 포장에서 일반적으로 사용하는 보통 골재들을 제올라이트 골재로 대체하여 흡수능을 향상시키고 역학적 특성을 확보하기 위한 최적 대체율의 산정을 목적으로 한다. 이를 위하여 앞 절에서 수행한 흡수 및 건조시험과 강도시험 결과를 종합적으로 분석한 결과, 흡수율은 높고 건조율은 낮으며 설계기준과 지침에서 규정하는 압축강도와 휨강도를 기본적으로 확보하는 동시에 균열 저항성과 그에 따른 내구성을 위한 조깅 인장강도까지 모두 확보할 수 있는 제올라이트 골재의 대체율을 다음과 같이 결정하였다. 쇄석골재와 강모래로 대표되는 보통 골재를 기준으로 현행 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침에서 제시하는 콘크리트 포장의 골재 단위량을 기준으로 제올라이트 굵은골재는 20%, 잔골재는 10% 대체하였을 때 가장 효과적인 흡수능과 역학적 특성을 모두 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 이 값은 제올라이트 골재의 총 대체율을 30%로 고정된 경우에만 적용이 가능하며, 총 대체율의 크기와 잔골재와 굵은골재의 대체율을 다르게 할 경우에는 본 연구에서 수행한 시험을 통해 흡수능과 역학적 특성의 확보 여부를 반드시 확인하여야 한다.

4. 결론

본 연구는 현행 보도용 콘크리트 포장의 흡수성 향상을 위하여 다공성 구조에 따라 흡수율이 높은 제올라이트 골재를 적용하기 위한 기초 연구의 일환으로, 제올라이트 굵은골재와 잔골재의 대체율에 따른 보도용 콘크리트 포장의 흡수능과 역학적 특성을 파악하기 위하여 각 배합별로 흡수 및 건조시험과 설계기준 또는 지침에서 규정하는 강도에 대해서 KS 방법에 따른 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 제올라이트 굵은골재와 잔골재의 5시간 흡수율은 각각 14%와 33%로서, 동일한 평균 지름을 갖는 보통 골재의 최대 흡수율인 5% 및 20%와 비교하여 굵은골재는 2.8배, 잔골재는 1.65배 이상의 흡수능력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 골재 종류에 따른 흡수율과 건조율 차이에 의한 제올라이트 골재의 흡수능은 굵은골재 4%, 잔골재 10%로서 일반적인 콘크리트 포장에서 골재가 차지하는 용적비인 약 70%를 고려하면 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장의 단위 용적당 흡수능력은 보통 골재를 사용한 경우와 비교하여 단위용적당 약 5% 정도 향상된다고 할 수 있다.
- (3) 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장은 골재에서 확인한 흡수능력에 따라 보통 골재를 사용한 경우와 비교하여 흡수는 약 30% 향상되고 건조는 10% 이상 감소하므로 흡수능을 충분히 확보하고 있다고 할 수 있다.
- (4) 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장의 강도 특성은 대체율에 따라 차이가 있지만, 압축, 휨 및 조깅인장강도는 보통 골재로 배합된 콘크리트 포장의 강도를 기준으로 85~100% 수준으로 발현되었다.

- (5) 압축강도를 기준으로 하는 KDS 34 60 10과 휨강도를 기준으로 하는 배합설계 지침에서 규정하는 콘크리트 포장의 설계기준강도와 비교하여 제올라이트를 혼입한 콘크리트 포장의 압축강도는 모든 대체율에서 약 25% 높지만, 휨강도는 대체율에 따라 설계기준강도와 동일하거나 약 15% 감소되었으며, 설계기준강도가 없는 조깅인장강도는 보통 콘크리트와 비교하였을 때 대체율에 따라 동일하거나 약 6% 감소하였다.
- (6) 제올라이트 골재를 혼입한 콘크리트 포장의 강도시험에 따른 역학적 특성은 대체율과 시험 항목에 따라 설계 기준 또는 배합설계 지침에서 규정하는 설계기준강도보다 일부 낮은 경우도 있으나, 차도용 포장에 적용하는 설계하중과 비교하여 상대적으로 작은 설계하중이 작용하는 보도용 콘크리트 포장에는 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- (7) 흡수 및 건조시험과 강도시험 결과를 종합하면, 제올라이트 골재를 혼입한 보도용 콘크리트 포장에서 합산 대체율 30%를 기준으로 굵은골재 20%와 전골재 10%를 대체하였을 때 흡수성능과 역학적 특성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (8) 단, 본 연구에서는 제올라이트 골재의 합산 대체율을 30%로 고정하였으므로 다른 대체율을 적용할 경우에는 반드시 추가 시험을 통하여 흡수성능과 역학적 특성을 확인하여야 하며, 유지관리를 포함한 내구성 및 장기 공용성과 관련하여 제올라이트 골재의 흡수성능에 따른 콘크리트 포장의 겨울철 노면 결빙 방지, 동결융해에 따른 강도 저하 방지 등에 대한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

References

1. 국토교통부(2016a) 보도포장(KDS 34 60 10:2016), 국가건설기준센터.
2. 국토교통부(2016b) 자전거 도로포장(KDS 34 60 15:2016), 국가건설기준센터.
3. 국토교통부(2016c) 차도 및 주차장포장(KDS 34 60 20:2016), 국가건설기준센터.
4. 국토교통부(2023) 시멘트 콘크리트 포장설계(KDS 44 50 10:2023), 국가건설기준센터.
5. 국토해양부(2011) 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침.
6. 나옥빈, 이기열(2021) 제올라이트 굵은골재 대체율에 따른 조경포장 콘크리트의 흡수 및 강도 특성. 한국산학기술학회지. 22(4): 131-139.
7. 산업표준심의회(2017) 기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험방법(KS F 2459:2017): 산업통상자원부 국가기술표준원
8. 산업표준심의회(2022a) 콘크리트의 슬럼프 시험 방법(KS F 2402:2022): 산업통상자원부 국가기술표준원.
9. 산업표준심의회(2022b) 콘크리트의 압축 강도 시험방법(KS F 2405:2022): 산업통상자원부 국가기술표준원.
10. 산업표준심의회(2021) 콘크리트의 조깅 인장 강도 시험방법(KS F 2423:2021): 산업통상자원부 국가기술표준원.
11. 산업표준심의회(2016) 콘크리트의 휨 강도 시험방법(KS F 2408:2016): 산업통상자원부 국가기술표준원.
12. 윤창복, 이한승(2020) 천연 제올라이트의 분말도와 치환율이 시멘트 모르타르의 화학반응 및 물리적 특성에 미치는 영향에 관한 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 24(3): 96-103.
13. 이창용, 김연철, 이종집(2011) 제올라이트가 함유된 시멘트의 수화 특성. 공업화학. 22(4): 423-428.
14. 조병완, 강석원, 박승국, 최지선(2011) 제올라이트 시멘트 모르타르의 재료적 특성에 관한 연구. 한국콘크리트학회논문집 23(2): 203-209.
15. 조병완, 최지선(2012) 제올라이트 콘크리트의 기초 물성에 관한 실험적 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 16(1): 1-8.
16. 최민지, 성난국, 박성재, 이정아, 윤홍수, 홍인권(2011) 다공성 제올라이트 콘크리트의 수질정화 특성. 공업화학 22(3): 332-335.
17. 최재진(1998) 제올라이트를 사용한 콘크리트의 기초적 성질에 관한 연구. 한국콘크리트학회지. 10(5): 205-216.
18. Doostmohamadi, M., H. Karami., S. Farzin and S. F. Mousavi(2018) Improving the performance of porous concrete composites using zeolite as a coarse grain. Mechanics of Advanced Composite Structures 5(2): 157-163.
19. Feng, N., C. Ma and X. Ji(1992) Natural zeolite for preventing expansion due to Alkali-Aggregate reaction. Cement Concrete Aggregates. 12(2): 93-96.
20. Girskas, G., D. Nagrockienė and G. Skripkiūnas(2016) The effect of synthetic zeolite admixture on the

- durability of concrete paving blocks. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 11(3): 215–221.
21. Ikotun, B. D. and S. Erelu(2010) Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Construction and Building Materials* 24(5): 749–757.
 22. Nas, M. and S. Kurbetci(2018) Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computer and Concrete* 22(5): 449–459.
 23. Pancar, E. B.(2016) Using recycled glass and zeolite in concrete pavement to mitigate heat island and reduce thermal cracks. *Advances in Materials Science and Engineering* 2016(1): 8526354.
 24. Reddy, G. S., P. Ramu and V. A. Mohan(2018) A study on utilization of zeolite as partial replacement to cement for M40 grade concrete. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4): 6322–6326.
 25. Sedlmajer, M., J. Zach, J. Hroudová and P. Rovnaníková(2015) Possibilities of utilization zeolite in concrete. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 9(5): 525–528.
 26. Semsettin, K.(2011) The effect of zeolite amount on the physical and mechanical properties of concrete. *International Journal of the Physical Sciences* 6(13): 3041–3046.
 27. Teymouri, E., K. S. Wong, Y. Y. Tsn and N. N. M. Pauzi(2023) Mechanical behaviour of adsorbent pervious concrete using iron slag and zeolite as coarse aggregates. *Construction and Building Materials* 388: 131720.
 28. Tran, Y. T., J. C. Lee, P. Kumar, K. H. Kim and S. S. Lee(2019) Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composite Part B: Engineering* 165: 354–364.
 29. Wu, Q., S. Wu, S., R. Bu,, X. Cai, and X. Sun(2024) Purification of runoff pollution using porous asphalt concrete incorporating zeolite powder. *Construction and Building Materials* 411: 134740.