바텀애시 잔골재를 활용한 빗물 침투·저류 포장 블록의 역학적 특성 및 내구성 평가

Mechanical and Durability Characteristics of Rainwater Penetration and Retention Pavement Concrete Blocks Incorporating Bottom Ash Aggregates

김황희* · 오리온** · 이재영*** · 박성기**** · 차상선***** · 박찬기*****

Kim, Hwang-Hee*, Oh, Ri-On**, Lee, Jae-Young***, Park, Sung-Ki****, Cha, Sang-Sun*****, and Park, Chan-Gi*****

Abstract

In this study, the mechanical properties and durability of rainwater penetration and retention pavement concrete blocks incorporating bottom ash fine aggregate were investigated to develop pavement concrete blocks that could reduce the rainwater leakage of impervious concrete structures. Pavement concrete blocks were prepared by replacing 0%, 10%, and 20% of the weight of natural fine aggregate with bottom ash fine aggregate for 410 and 450 kg/m³ cement contents. Experimental tests were conducted to determine the compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, slip resistance, freeze-thaw resistance, and permeability coefficient of the pavement concrete blocks. Pavement concrete blocks produced with a cement content of 450 kg/m³ and a 10% replacement ratio of bottom ash fine aggregate satisfied the target performance and exhibited the best overall performance. These optimal mix parameters were applied in this study to design and manufacture pavement concrete blocks for rainwater penetration and retention that satisfied the target performance.

Key words : Bottom Ash Aggregates, Pavement Concrete Blocks, Rainwater Penetration, Rainwater Retention

요 지

본 연구는 바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 기능이 있는 콘크리트 포장 블록의 역학적 특성 및 내구성을 평가하였다. 바텀애시 잔골재 치환율에 따른 역학적 특성 및 내구성을 평가하여, 빗물 침투·저류 포장 블록의 최적배합비를 도출하였다. 천연 잔골재의 중량에 0%, 10%, 및 20%를 바텀애시 잔골재로 대체하였으며, 단위시멘트량은 410 kg/m³와 450 kg/m³를 변수로 하였다. 역학적 특성 및 내구성 평가를 위한 시험은 압축강도, 휨강도, 마모저항성, 미끄럼저항성, 동결융해저항성 및 투수계수 시험을 실시하였으며, 시험 결과, 단위시멘트량 450 kg/m³, 바텀애시 잔골재의 천연잔골재 치환율 10%일 때, 목표 성능을 만족하고 가장 우수한 성능을 나타냈다. 또한 도출된 배합을 이용하여 빗물 침투·저류 콘크리트 블록을 설계 및 제작하였다. 제작된 바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 블록은 목표로한 성능을 모두 만족하였다.

핵심용어 : 바텀애시 잔골재, 빗물 침투, 빗물 저류, 빗물 침투 저류 블록

*정회원, (주)콘텍이엔지 기술연구소 소장(E-mail: hwang1032@contecheng.co.kr)

Member, Director of Research, Research Center, Contecheng Co., Ltd

** (주)콘텍이엔지 기술연구소 연구원(E-mail: ohrion@contecheng.co.kr)

Researcher, Research Center, Contecheng Co., Ltd

*** (주)콘텍이엔지 기술연구소 연구원(E-mail: tow893@contecheng.co.kr)

Researcher, Research Center, Contecheng Co., Ltd

**** (주)콘텍이엔지 대표이사(E-mail: skpark@contecheng.co.kr)

Director, Contecheng Co., Ltd

*****정회원, 공주대학교 산업개발연구소 연구교수(E-mail: chass@kongju.ac.kr)

Member, Research Professor, Industrial Development Research Institute, Kongju National University

*****교신저자, 정회원, 공주대학교 지역건설공학과 교수(Tel: +82-41-330-1266, Fax: +82-41-330-1269, E-mail: cgpark@kongju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

1. 서 론

최근 기후변화의 영향으로 국지성 집중호우가 빈발하고 있고 콘크리트 및 아스팔트 포장으로 인한 불투수면적의 증가로 시가지 내에 홍수 발생 및 지하수 유입의 부족으로 인한 하천 및 지하수의 수질 악화 같은 문제가 발생하고 있다(Jeon et al., 2009). 국내의 경우 1960년대 초반부터 개발이 본격적으로 진행됨에 따라 불투수 면적이 증가하였고 물환경, 기후변화 등 환경변화에 따른 다양한 문제가 발생하고 있다(Yang, 2006). 우천 시 땅 속으로 침투하던 빗물이 일시에 지표면과 배수시설을 통해 하천으로 유입되어 집중호우 시 하천변이나 저지대 침수피해가 상습적으로 발생하고 있다.

상기와 같은 문제를 해결하기 위하여 최근 들어 국내외에서는 빗물을 이용하여 주요 생태계를 보호하고자 하는 연구가 증가하고 있다. 이와 같은 연구는 식생재류지, 나무여과상자, 지하흐름형 인공습지, 침투도랑 및 유공포장, 잔디블록 등을 이용한 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법을 활용하여 빗물을 효율적으로 사용하는 시스템에 대한 것이다(Lee et al., 2015). 그러나 현재 빗물관리 시스템의 대부분은 집중식 빗물관리시설인 대형 저류시설이 대부분이고, 분산식 빗물저류시설은 차량하중 및 이동하중을 지지할 수 없는 보도부나 측구에 적용되는 제품으로 주차장 등의 넓은 불투수면적에 적용하기는 어려움이 있으며, 빗물 침투 능력이 작아 폭우 시 침수피해의 우려가 있다(Pyke et al., 2011). 주차장이나 광장은 비교적 불투수 면적이 넓어 물순환 체계에 미치는 영향이 크고 물고임 현상이 심각할 뿐 아니라, 현재 적용되고 있는 투수성 블록이나 배수성포장은 차량하중을 지지해야 하므로 잦은 파손으로 유지관리 비용을 증가시키고 있는 실정이다(Lee et al., 2012). 따라서, 차량하중을 직접 지지할 수 있으며, 넓은 면적에 적용이 가능하고 빗물 침투 및 저류가 동시에 이루어지도록 하여 물순환 복원 및 폭우 시 홍수예방 효과가 있는 침투 및 저류 포장블록에 대한 연구가 필요하다. 한편, 경제성장에 따른 건설물량의 급증과 치수사업 등으로 골재 부존자원이 급격히 감소되어 이미 강자갈이나 강모래는 거의 고갈되어 있는 실정이다(Han, 2000). 따라서 천연골재를 부순돌, 부순 모래, 바다모래, 수입모래 등으로 충당하고 있으나 이러한 골재자원마저도 부존량의 한계가 있을 뿐만 아니라 석산 개발에 따른 훼손 및 바다모래 채취에 따른 바다 생태계

파괴의 문제점을 노출하였다(Hong et al., 2006). 따라서 대체 골재원의 필요하다. 바텀애시는 전체 석탄재의 약 10~20%를 차지하는 재료로 해수에 의해 습식 처리됨으로서 염분 및 수분을 다량 함유하고 있다(Park and Kim, 2012). 현재 플라이애시는 콘크리트/레미콘 혼화재료, 시멘트 2차 제품 원료, 비료, 성토/복토재, 시멘트 클링커 원료 등으로 활용되고 있으며, 바텀애시의 경우 경량성 골재, 모래 대체재 채움재, 도로 기층재, 도로 미끄럼방지용, 성토/복토용, 벽돌 등에 활용되고 있으나 그 활용량이 매우 미비하다(Park et al., 2016).

본 연구에서는 바텀애시를 이용하여 불투수층 콘크리트 포장의 유출을 저감하기 위해 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록을 개발하고자 하였으며, 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성을 평가하여 침투 및 저류 특성을 평가하였다.

2. 사용재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록을 개발하기 위하여 폐기물인 바텀애시를 잔골재로 이용하였다. 잔골재를 바텀애시로 치환하여 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록이 요구하는 성능을 만족하기 위한 배합을 선정하였다. 바텀애시는 미연탄 함량, 냉각공정에 해수를 사용하는 것에 기인한 높은 염화물 농도, 다공질 골재의 형태로 인한 높은 흡수율을 꼽을 수 있다. 또한, 미연탄 함량은 콘크리트 재료로 활용 시 강도성능 및 내구성의 저하를 불러 올 수 있으므로, 골재로의 활용하기 위해서는 검토가 충분히 이루어져야 한다(Lee, 2019). 본 연구에서 적용하고자 하는 바텀애시 골재는 0.5~6 mm로 모래내지 잔자갈 범주에 속하며, 다량의 미연탄과 구형의 플라이애시 입자가 혼입된 형태이다. 본 연구에서는 바텀애시를 잔골재로 이용할 경우 발생할 수 있는 성능저하의 문제를 해결하기 위하여 라텍스를 적용하였다. 라텍스는 콘크리트에 첨가되어 인장강도, 휨강도 등 역학적 특성과 동결융해저항성 등 내구성을 향상시키는 특성을 가지고 있다(Ohama, 1995). 적용한 시멘트, 라텍스 및 바텀애시의 특성은 Tables 1~3과 같으며, 천연잔골재는 밀도 2.62 g/mm³의 강사, 굵은 골재는 최대치수 13 mm, 밀도 2.60 g/mm³의 부순돌을 사용하였다.

Table 1. Properties of Cement

Fineness (cm ² /g)	Density (g/mm ³)	Stability (%)	Setting Time (min)		Compression Strength (MPa)		
			Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3,200	3.15	0.02	220	400	20.3	30.2	38.7

Table 2. Properties of SB Latex

Solid Material (%)	Styrene (%)	Butadiene (%)	pH	Density (g/mm ³)	Surface Tension (dyne/cm)	Particle Size (A)	Viscosity (cps)
49	34±1.5	66±1.5	11.0	1.02	30.57	1,700	42

Table 3. Properties of bottom ash.

Density (g/mm ³)	Absorption Ratio (%)	SO ₃	NaCl	Clay	Ignition Loss (%)
1.9	5.6	2.3	0.002	0.02	2.4

2.2 목표성능 배합설계

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 목표 성능은 Table 4와 같다. 목표성능을 만족하기 위하여 단위시멘트량은 450 kg/m³와 410 kg/m³, 천연 잔골재를 바텀애시 잔골재로 중량 치환하였으며, 치환율은 0%, 10% 및 20%를 변수로 하여 배합설계를 실시하였다. 상세 배합비는 Table 5와 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 역학적 특성을 평가하기 위하여 KS F 2405

(2017)에 준하여 압축강도 시험을 실시하였다.

2.3.2 휨강도

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 KS F 2408 (2016)에 준하여 휨강도 시험을 실시하였다.

2.3.3 마모저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 마모저항성을 평가하기 위하여 ASTM C944/C944M (2012)에 따른 마모시험을 실시하였다. 바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 마모시험 모습은 Fig. 1과 같다.

Table 4. Performance Objectives

Type of Test	Unit	Target
Compressive strength	MPa	≥ 40
Flexural strength	MPa	≥ 4.5
Coefficient of permeability	mm/s	≥ 0.5
Freeze-thaw resistance (B, 100 cycles)	%	≥ 80
Slip resistance	BPN	≥ 68

Table 5. Mix Proportions

Type of Mix	W/C	Unit weight (kg/m ³)					
		C	W	S	B ¹⁾	G	L ²⁾
C450-B0%	0.45	450	130	950	0	634	100
C450-B10%				855	95		
C450-B20%				760	190		
C410-B0%		410	118	998	0	666	91
C410-B10%				898	100		
C410-B20%				799	200		

1) B: Bottom Ash

2) L: Latex

Fig. 1. Abrasion Testing Apparatus

2.3.4 미끄럼저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 미끄럼저항성을 평가하기 위하여 KS F 2375 (2016)에 따른 미끄럼저항성시험을 실시하였다. 바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 미끄럼 저항성시험 모습은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Apparatus Used to Evaluate Slip Resistance

2.3.5 동결융해저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 동결융해저항성을 평가하기 위하여 KS F 2456 (2018)에 따른 동결융해 반복시험을 실시하였다.

2.3.6 투수계수

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 투수성능 시험은 KS F 4419 (2016)에 따른 투수

계수 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 빗물 침투 및 저류 콘크리트 포장블록의 침투 및 저류 능력을 최적화하기 위하여 콘크리트 시편을 제작하기 전에 아크릴 시편을 이용하여 변수를 최적화하였다. 콘크리트 시편을 직접 적용하여 투수 시험하기 어려운 이유는 콘크리트 변수에 따른 거푸집 제작에 어려움이 있어 아크릴 시편으로 빗물 침투, 저류 블록의 변수를 최적화한 후 이를 이용하여 콘크리트 블록의 거푸집 제작 및 평가하는 것이 효과적이라고 판단하였기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 빗물 침투·저류블록의 홀 직경 및 개수를 선정하기 위하여 Fig. 3과 같은 $250 \times 250 \times 100$ mm의 아크릴 시편을 제작하였으며, 홀 직경 변수는 3 mm, 5.5 mm, 7 mm, 10 mm의 4가지 변수로 하여 블록면적당 홀 비율을 약 0.12%, 0.25%, 0.49%로 하여 홀 직경별 투수성능을 비교하였다(Table 6). 또한, 홀 직경 5.5 mm에 대한 홀 개수별로 투수계수를 측정하여 빗물 침투·저류블록의 홀 개수를 결정하였다(Table 7).

Fig. 3. Acrylic Specimens for Permeability Testing

투수시험은 아크릴시편을 투수성 시험장치 내에 시험틀에 고정시킨 후 투수성 시험장치의 월류(Overflow) 수조에 물을 채운다. 그 후 급수 쪽 시험틀 내 블록을 포수한 다음, 시편 고정틀 윗부분의 월류구에서 물이 월류할 때까지 주입하여 수위를 일정하게 한다. 월류 수조에서 배수량이 일정해지는 것을 기다려서, 30초 동안의 유출수량을 메스실린더로 측정하였다(Fig. 4). 투수계수는 다음의 Eq. (1)에 따라 계산하였다.

Fig. 4. Water Permeability Test Apparatus

Table 6. Experimental Variables as a Function of Hole Diameter

No.	Diameter of hole (mm)	Area of hole (mm ² /ea)	No. of hole (ea)	Total area of hole (mm ²)	Area of blocks (mm ²)	Hole area/block area (%)
1	3.00	7.07	11	77.75	62,500	0.124
2	5.50	23.75	3	71.27		0.114
3	7.00	38.48	2	76.97		0.123
4	10.00	78.54	1	78.54		0.125
5	3.00	7.07	22	155.50		0.248
6	5.50	23.75	7	166.31		0.266
7	7.00	38.48	4	153.94		0.246
8	10.00	78.54	2	157.08		0.251
9	3.00	7.07	44	311.01		0.497
10	5.50	23.75	13	308.85		0.494
11	7.00	38.48	8	307.87		0.492
12	10.00	78.54	4	314.15		0.502

Table 7. Experimental Variables as a Function of Hole Number

No.	Diameter of hole (mm)	Area of hole (mm ² /ea)	No. of hole (ea)	Total area of hole (mm ²)	Area of blocks (mm ²)	Hole area/block area (%)
1	5.50	23.76	1	23.76	62,500	0.038
2			2	47.52		0.076
3			3	71.27		0.114
4			4	95.03		0.152
5			6	142.55		0.228
6			9	213.82		0.342
7			12	285.10		0.456

$$K = \frac{d}{h} \times \frac{Q}{A \times 30s} \quad (1)$$

K: Permeability coefficient (mm/s)

Q: Outflow water (mm³)

d: Block thickness (mm)

h: Water level difference (mm)

A: Block cross-section area (mm²)

30s: Measurement time (s)

3. 실험결과

3.1 압축강도

바텀에서 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 압축강도 시험결과는 Fig. 5와 같다. 압축강도 시험결과 목표로 한 40 MPa를 만족시키는 배합은 단위시멘트량이 450 kg/m³인 배합의 모든 바텀에서 잔골재 치환율에서 만족하였다. 바텀에서의 치환율에 따른 영향을 살펴보면 10%에서는 압축강도가 증가하였으나 20%에서는 압

축강도가 감소하는 경향을 보이지만 압축강도 변화는 크지 않았다.

단위시멘트량이 410 kg/m³인 배합에서도 동일한 경향을 나타내었으나 바텀에서 치환율이 20%에서는 목표 압축강도 40 MPa를 만족하지 못하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 바텀에서 잔골재가 천연 잔골재와 비교하여 공극이 크기 때문에 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하게 된다. 다만 상대적으로 적은 치환율에서는 바텀에서 잔골재가 포졸란성 재료로서 강도를 약간 증가 또는 유지시키는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 또한 바텀에서 잔골재 적용에 따른 문제점을 보완하기 위하여 추가적으로 라텍스를 적용하였기 때문에 바텀에서 잔골재 치환율 10%까지는 강도가 약간 증가하거나 동등한 값을 나타냈으나 20% 치환율에서는 강도가 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 단위시멘트량이 상대적으로 많은 450 kg/m³ 배합에서는 단위시멘트량이 바텀에서 잔골재 치환율 증가에 따른 강도 감소를 보완할 수 있었다. 하지만 상대적으로 단위시멘트량이 작은 410 kg/m³에서는 치환율 20%에서는 목표로 하는 강도를

만족하지 못하는 결과를 나타냈다. 따라서 빗물침투 저류 콘크리트 포장블록에서는 바텀애시 잔골재를 10% 치환하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.2 휨강도

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 휨강도 시험결과는 Fig. 6 과 같다. 휨강도 시험결과, 단위시멘트량이 450 kg/m^3 , 410 kg/m^3 인 모든 배합에서 목표 휨강도 4.5 MPa를 만족하는 결과를 나타내었다. 특히 단위시멘트량이 450 kg/m^3 인 배합의 휨강도는 모두 6 MPa 이상을 나타내었으며, 단위시멘트량이 410 kg/m^3 인 배합의 휨강도는 모두 5 MPa 이상을 나타내었다. 바텀애시 잔골재 치환율에 따른 결과를 살펴보면 바텀애시 치환율 10%에서는 강도가 약간 증가하였으나 20%에서는 휨강도가 감소하였다.

이와 같은 결과를 압축강도와 동일한 결과로 바텀애시의 치환율은 10%가 적정하다는 것을 알 수 있다. 바텀애시 골재는 공극률이 많고 흡수율이 커 경량골재로 적용되는 경우가 있다. 본 연구에서 사용한 바텀애시 골재의 밀도도 약 1.9 g/mm^3 정도이다. 따라서 바텀애시 잔골재의 치환율 증가는 강도 감소에 영향을 미친다. 이와 같은 문제점을

해결하기 위하여 본 연구에서는 단위시멘트량 증가와 라텍스를 적용하였다. 따라서 바텀애시 치환율 10%에서는 단위시멘트량과 라텍스가 부분적으로 휨강도를 보완하기 때문에 강도의 감소 발생하지 않고 오히려 바텀애시 잔골재의 포졸란 반응으로 약간 강도가 증가하였다. 바텀애시 치환율 20%에서는 휨강도가 감소하는 결과가 나타난 것으로 보인다. 또한 라텍스의 첨가는 압축강도보다는 휨강도 향상에 영향을 주는 결과를 나타내었으며, 목표 휨강도는 단위시멘트량에 관계없이 모든 배합에서 만족하는 결과를 보였다.

3.3 마모저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 마모저항성 시험결과는 Fig. 7과 같다. 마모저항성 시험결과 단위시멘트량이 450 kg/m^3 , 410 kg/m^3 인 모든 배합에서 바텀애시 잔골재 치환율 10%까지는 증가하였으나 바텀애시 치환율 20%에서는 마모저항성이 감소하는 결과를 나타냈다. 일반적으로 강도가 증가하면 마모저항성은 증가하는 것으로 나타난다. 바텀애시 잔골재 치환율 20%에서는 바텀애시를 첨가하지 않은 배합과 비교하여 마모량이 증가하여 마모저항성이 감소하는 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 바텀애시 잔골재를 적용함으로써 전체적으로 빗물

Fig. 5. Results of Compressive Strength Tests

Fig. 6. Results of Flexural Strength Tests

(a) Unit weight of cement (450 kg/m³)

(b) Unit weight of cement (410 kg/m³)

Fig. 7. Results of Abrasion Resistance Tests

침투·저류 콘크리트 포장블록의 표면강도 저하를 발생시키기 때문이다. 즉 바텀애시 잔골재가 밀도가 천연골재보다 작고 공극이 많아 마모가 발생하는 표면의 강도가 감소하여 마모저항성이 감소하는 결과를 초래하였다.

3.4 미끄럼저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 미끄럼저항성 시험결과는 Fig. 8과 같다. 미끄럼저항성 시험결과 목표로 한 68 BNP를 모두 만족하는 결과를 나타냈다. 단위시멘트량이 450 kg/m³, 410 kg/m³인 모든 배합에서 70 BNP 이상을 나타내어 미끄럼저항성에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 바텀애시 잔골재 치환율에 따른 영향을 살펴보면 바텀애시 잔골재 치환율 10%에서 미끄럼저항성이 가장 우수하였고, 20%에서는 약간 감소하는 결과를 나타내었으나, 큰 차이는 없었다. 따라서 미끄럼저항성 시험결과는 바텀애시 잔골재의 치환율에 거의 영향을 받지 않았다.

3.5 동결융해 저항성

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 동결융해저항성 시험결과는 Figs. 9 및 10과

같다. 본 연구에서는 200 cycle까지 매 20 cycle마다 상대동탄성계수를 측정하였으며, 최종적으로 200 cycle 후 압축강도 시험을 실시하였다. 동결융해 저항성 시험결과, 목표로 한 잔류압축강도 80%와 상대동탄성계수 80%를 모두 만족하는 배합은 바텀애시 치환율 10%이며, 20%에서는 동결융해 저항성을 모두 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 단위시멘트량이 450 kg/m³, 410 kg/m³인 배합에서 동일하게 나타났다. 이와 같은 결과는 바텀애시 잔골재의 첨가율 증가는 골재가 가지고 있는 내부 공극의 증가로 인하여 동결융해반복에 대한 영향을 받을 가능성이 커진다. 따라서 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성이 감소하였다. 따라서 동결융해 저항성 시험결과 바텀애시 잔골재 치환율은 10%가 적절하다고 판단된다.

3.6 투수특성

홀 직경 및 비율에 따른 투수계수 시험결과는 Fig. 11에 나타내었다. 홀 비율 0.12% 경우는 0.5~1.0 mm/sec, 홀 비율 0.25% 경우는 1.0~1.6 mm/sec, 홀 비율 경우는 1.9~3.0 mm/sec의 투수계수를 나타내어 본 연구의 목표 성능인 0.5 mm/sec를 모두 만족하였다. 직경별 투수성능을 살펴보면 3 mm 경우는 투수계수가 저하되는 경향을 보여주었으며,

(a) Unit weight of cement (450 kg/m³)

(b) Unit weight of cement (410 kg/m³)

Fig. 8. Results of Slip Resistance Tests

(a) Unit weight of cement (450 kg/m³)

(b) Unit weight of cement (410 kg/m³)

Fig. 9. Residual Compressive Strength Results of Repeated Freezing and Thawing Cycles Tests

(a) Unit weight of cement (450 kg/m³)

(b) Unit weight of cement (410 kg/m³)

Fig. 10. Relative Dynamic Modulus Results of Repeated Freezing and Thawing Cycles Tests

Fig. 11. Permeability Coefficient as a Function of Hole Diameter and Area Ratio

5.5 mm, 7 mm, 10 mm의 경우는 뚜렷한 성향은 나타나지 않았다. 다만, 최근 보도블록 틈새로 신발(여성용 구두 등) 끼임 사고가 발생하여 틈새 벌어진 보도블록을 교체하는 일이 발생하고 있다. 보통 여성용 구두(하이힐)의 굽지름이 8~13 mm인 것을 감안 할 때 빗물 침투·저류블록의 홀 직경은 7 mm 이상은 배제해야한다. 5 mm 미만의 경우는 투수성능 저하가 발생하므로 홀 직경은 5~7 mm 내외가 적당하다. 홀 직경 5.5 mm의 개수별 투수계수 시험 결과는

Fig 12와 같다. 홀 개수 2개 이상 일 때 본 연구의 목표성능인 0.5 mm/sec를 만족하는 결과를 보여주었다. 홀 개수가 너무 많은 경우 홀과 홀 간의 간격을 확보하지 못하여 생산성 저하 및 품질 확보가 어려울 것이며, 너무 적은 경우는 표면유출이 쉽게 발생할 가능성이 높으므로 홀 개수의 경우는 6~9개가 적당하였다. 빗물 침투·저류 포장블록 하판(침투·저류 블록) 높이 및 두께에 따른 블록 1개당 저류용량과 1 m² 당 저류용량을 검토하였다. 하부(침투·저류 블록) 측판 2의 높이에 따른 저류용량, 하부(침투·저류 블록) 측판 2의 높이와 두께에 따른 저류용량은 Fig. 13과 같다. 빗물 침투·저류 포장블록 하부 설계 시 빗물 저류용량뿐만 아니라 차량하중 지지가 가능하도록 구조적 안정성도 고려할 필요가 있다. 하부(침투·저류 블록) 측판 2의 높이를 0.18 m, 0.23 m, 0.28 m로 하였을 경우, 높이가 높을수록 블록 내부의 저류 공간이 넓어져 더욱 많은 양의 빗물을 저류할 수 있으나, 정육면체에 가까운 형상인 H2가 구조적으로 안정하였다. 하부(침투·저류 블록)의 두께를 0.03~0.07 m까지 고려하였을 경우, 두께가 얇을수록 블록 내부의 저류 공간이 넓어져 더욱 많은 양의 빗물을 저류할 수 있으나, 두께가 50 mm 미만일 경우, 좌굴 우려와 제품 출고 시 큐빙기로 운반 및 적재가 어려워 생산상의 문제가 발생하기

때문에 블록의 두께는 50 mm 이상으로 설계하였다. 최종적으로 본 연구에서는 빗물 침투·저류 포장블록 상판(직투수 블록)의 블록 사이즈는 250 × 250 mm로 하였으며, 두께는 차량하중을 지지할 수 있도록 100 mm로 결정하였다. 또한 홀의 직경은 5 mm, 홀 개수는 9개로 설계하였다. 빗물 침투·저류 포장블록 하판(침투·저류 블록)은 1 m² 당 104 kg을 저장할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 12. Permeability Coefficient as a Function of the Number of Holes (Diameter 5 mm)

Fig. 13. Water Storage Capacity (L/m²) is Shown as a Function of Side Plate Height and Thickness

3.7 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 시제품제작 및 시제품 성능 평가

빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 시제품 배합은

단위시멘트량 450 kg/m³, 바텀애시 잔골재 치환율 10%로 하였다. 이때 단위시멘트량 450 kg/m³를 선정하 이유는 상판블록의 제조시 건식방법으로 제조하기 위하여 제조방법에 의한 강도 및 성능 감소를 예상하여 단위시멘트량이 큰 배합을 선정하였다. 또한 빗물 침투를 위한 상판블록과 저류를 위한 하판블록도 제조하였다. 이때 상판블록의 제조는 아크릴로 상판을 이용하여 결정한 최적의 홀크기(직경 5 mm), 홀 개수(9개) 등을 적용하여 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록을 제작하였으며, 형상은 상은 Fig. 14와 같다.

Fig. 14. Photographs Show Concrete Blocks Incorporating Bottom Ash Fine Aggregate for Rainwater Penetration and Storage

바텀애시 잔골재를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록 제품의 물리·역학적 특성을 평가하였다. 평가항목은 압축강도, 휨강도, 투수계수, 동결융해저항성, 미끄럼저항성을 측정하였으며 그 결과는 Table 8에 나타내었다. 압축강도 42.33 MPa, 휨강도 5.17 MPa, 투수계수 1.3 mm/sec, 동결융해저항성 87%, 미끄럼저항성 70 BPN으로 모든 시험항목에서 목표기준을 만족하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 천연 잔골재를 바텀애시 잔골재로 치환한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 성능을 평가하기 위하여 압축강도, 휨강도, 미끄럼저항성, 동결융해저항성, 마모저항성, 시험을 실시하였다. 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

Table 8. Properties of Concrete Blocks for Rainwater Penetration and Storage

Type of Test	Unit	Result of Test				Target
		No. 1	No. 2	No. 3	Average	
Compressive Strength	MPa	42.4	42.1	42.5	42.33	40
Flexural Strength	MPa	5.2	5.1	5.2	5.17	4.5
Coefficient of Permeability	mm/s	1.3	1.3	1.3	1.3	0.5
Freeze-thaw Resistance (B method, 100 cycles)	%	87	87	87	87	80
Slip Resistance	BPN	68	73	69	70	68

바텀애시를 이용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 목표 성능을 모두 만족하는 배합은 단위시멘트량에 관계 없이 바텀애시 잔골재 치환율 10%인 배합으로 나타났다. 본 연구에서는 포장블록의 상판을 건식방법으로 제조하기 때문에 상대적으로 단위시멘트량이 450 kg/m³인 배합이 단위시멘트량 410 kg/m³인 배합과 비교하여 시멘트량 증가에 따른 목표성능을 안정하게 나타낼 수 있어 최종적으로 단위시멘트량 450 kg/m³, 바텀애시 잔골재 치환율 10%인 배합을 최종배합으로 선정하였다.

바텀애시 잔골재를 사용한 빗물 침투·저류 콘크리트 포장블록의 투수 및 저류성능을 향상시킬 수 있는 투수공극의 크기 및 저류공간을 설계하여 최종 결정된 배합(단위시멘트량 450 kg/m³, 바텀애시 잔골재 치환율 10%)을 적용하여 시제품을 제작하였다. 시제품의 물리·역학적 특성을 평가한 결과 압축강도 42.33 MPa, 휨강도 5.17 MPa, 투수계수 1.3 mm/sec, 동결융해저항성 87%, 미끄럼저항성 70 BPN으로 모든 시험항목에서 목표기준을 만족하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구지원사업(과제번호: NRF-2019R1I1A3A01063048) 및 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업(과제번호: 320047-05-1-HD020)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- ASTM C944/C944M. (2012). *Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method*. American Society for Testing Materials.
- Han, S.H. (2000). Strength characteristics of concrete containing blast-furnace slag as coarse aggregate. *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 5, pp. 59-68.
- Hong, C.H., Kim, M.H., and Yang, C.S. (2006). Development of environmentally favorable porous concrete and water purification characteristics by the pavement system. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 15, No. 11, pp. 1045-1052.
- Jeon, J.H., Choi, D.H., and Kim, T.D. (2009). LIDMOD development for evaluating low impact development and its applicability to total maximum daily loads. *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 25, No. 1, pp. 58-68.
- KS F 2375. (2016). *Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2405. (2017). *Standard test method for compressive strength of concrete*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2408. (2016). *Standard test method for flexural strength of concrete*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2456. (2018). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 4419. (2016). *Concrete interlocking block for sidewalk and road*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, H.G. (2019). Research trends and applications of industrial by-product (bottom ash) for concrete materials. *Magazine of Recycled Construction Resources (RCR)*, Korean Recycled Construction Resources Institute, Vol. 14, No. 3, pp. 39-43.
- Lee, J.M., Lee, Y.S., Choi, J.S., and Kang, S.U. (2015). A study on the application and effect analysis monitoring of LID technique in new town city (I) LID technique selection and optimum size estimate. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 291-299.
- Lee, S.Y., Kim, I.T., Mun, S.H., and Kwon, S.A. (2012). Study on the functional evaluation of permeable asphalt concrete pavement in Seoul City. *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 33-39.
- Ohama, Y. (1995). *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: Properties and process technology*. Park Ride, New Jersey, USA: Noyes Publications.
- Park, S.G., and Kim, J.M. (2012). Present status and recycling technology for bottom ash in Korea. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 7, No. 1, pp. 9-12.
- Park, S.H., Lee, J.B., and Kim, S.S. (2016). The durability of the concrete using bottom ash as fine aggregate. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 4, No. 4, pp. 349-355.
- Pyke, C., Warren, M.P., Johnson, T., LaGro Jr., J., Scharfenberg, J., Groth, P., et al. (2011). Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 103, No. 2,

pp. 166-173.

Yang, H.K. (2006). Impact of climate change on hydrological disasters. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 13, No. 3, pp. 45-54.

<i>Received</i>	■	August 3, 2020
<i>Revised</i>	■	August 5, 2020
<i>Accepted</i>	■	August 18, 2020