



슬래그골재와 플라이애시를 이용한 강섬유 보강 포장용 투수콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

A Study on the Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Porous Concrete for Pavement Using Slag Aggregate and Fly Ash

박 승 범* 이 병 재** 이 준** 장 영 일**
 Park, Seung Bum Lee, Byung Jae Lee, Jun Jang Young Il

Abstract

This study evaluates the mechanical properties of steel fiber reinforced porous concrete for pavement according to content of slag aggregate and fly ash to elicit the presentation of data and the way to enhance its function for the practical field application of porous concrete as a material of pavement. As a result, void ratio and permeability coefficient of porous concrete for pavement increased a little as mixing rate of slag aggregates increased. Void ratio and permeability coefficient increased a lot as mixing rate of fly ash decreased. As fly ash was mixed, national regulation of permeable concrete for pavement(8% and 0.1 cm/sec) was met. Compressive strength and flexural strength decreased as mixing rate of slag aggregates increased, but they increased a lot as mixing rate of fly ash increased. Even when slag aggregates were mixed 50% with 5% fly ash mixed, national regulation of pavement concrete(18MPa and 4.5MPa) was met. In addition, compared to non-mixture, flexural strength increased about 22.8% when 0.75vol.% of steel fiber was added. Regarding sliding resistance, BPN increased as mixing rate of slag aggregates increased. But BPN decreased as fly ash was mixed. Compared to crushed stone aggregates, abrasion resistance and freeze-thaw resistance decreased as mixing rate of slag aggregates increased. When fly ash was mixed, abrasion resistance and freeze-thaw resistance improved remarkably. Compared to non-mixture, 10% mixture of fly ash improved abrasion resistance and freeze-thaw resistance about 5.6% and 14.3 respectively.

Keywords : porous concrete, slag aggregate, fly ash, compressive and flexural strength, pavement

요 지

본 연구는 포장재로서 투수콘크리트의 실질적인 현장적용을 위한 자료제시와 성능향상 방안을 도출하기 위하여 슬래그골재와 플라이애시의 혼입률에 따른 포장용 투수콘크리트의 역학적 특성을 평가하였다. 시험결과, 포장용 투수콘크리트의 공극률 및 투수계수는 슬래그골재의 혼입비율이 증가함에 따라 증가하고 플라이애시 혼입률 증가에 의하여 감소하는 경향을 나타내었으며 국내 포장용 투수콘크리트에 관한 규정(8% 및 0.01cm/sec)을 만족하였다. 압축강도 및 휨강도는 슬래그골재의 혼입률이 증가함에 따라 감소하였으나, 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 크게 증가하는 경향을 나타내어 플라이애시를 5% 이상 혼입하면 슬래그골재를 50% 사용한 경우에도 국내 포장콘크리트에 관한 규정(18MPa 및 4.5MPa 이상)을 만족하였다. 또한 강섬유를 0.75vol.% 혼입한 경우 사용하지 않은 경우에 비하여 휨강도가 22.8% 증가 하였다. 미끄럼저항성은 슬래그골재의 혼입률이 증가에 따라 BPN값은 증가하였고, 플라이애시의 혼입률 증가에 의해 BPN값은 감소하는 경향을 나타내었으며, 내마모성 및 동결융해저항성은 부순골재만을 사용한 경우에 비해 슬래그골재의 혼입비율이 증가함에 따라 감소하였고, 플라이애시를 10% 혼입한 경우에는 현저히 개선되어 혼입하지 않은 경우에 비하여 내마모성 및 내동해성이 각각 약 5.6% 및 14.3% 정도 개선되는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 투수콘크리트, 슬래그골재, 플라이애시, 압축 및 휨강도, 포장

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수
 ** 충남대학교 대학원 박사과정 (이병재: 교신저자)



1. 서론

국내 도로의 총 연장은 102,293km로서 포장률은 76.8%에 이르며 이중 아스팔트 콘크리트포장이 대부분인 85.5%(67,424km)를 차지하고 시멘트 콘크리트포장은 14.2%(11,162km)를 점유하고 있다(건설교통부, 2006). 이러한 도로포장은 시공성과 구조적 성능만을 중요시하여 강우시 배수기능이 부실하거나 용량이 부족할 경우 많은 양의 빗물이 배수되지 못하고 도로에 고여 교통에 장애가 될 뿐만 아니라 사고의 위험성도 높다. 또한, 빗물이 지중으로 침투하지 못하고 하수관을 통해 하천으로 흘러들어 폭우시 도시 하천범람의 원인이 되기도 한다. 이에 따라 1980년대부터 선진 외국에서는 투수성 아스팔트를 개발하여 보도를 중심으로 한 생활관련도로, 광장 및 주차장 등의 포장에 사용하고 있다. 그러나 투수성 아스팔트 포장은 여름철 온도가 상승할 때 노면이 변형되고 차량의 통행으로 인하여 투수기능이 상실되는 단점이 있으며(玉井元治, 1998) 최근, 이에 대한 대안으로 아스팔트포장에 비해 차량주행시 소음이 크지만 내구성이 우수한 시멘트 콘크리트포장의 투·배수성 및 소음저감효과를 향상시키기 위한 노력의 일환으로 포장에 투수성 및 배수성이 우수한 포러스 콘크리트를 적용하기 위한 연구가 국내·외에서 많은 관심하에 진행되고 있다(박승범, 2003; 하재담 등, 2000; 문한영 등, 1998). 이러한 포장용 포러스콘크리트는 일반 포장용 콘크리트와 동등한 휨강도 및 배수성이 아스팔트포장과 동일 수준이상의 투수성능(0.01cm/sec이상)을 가지고 있음이 확인됨에 따라 현재 일본에서는 중차량 주행도로 교차지점 및 톨게이트 등에 적용되고 있으며, 유럽에서는 고속도로의 표층에 일부 사용되고 있다.

또한, 최근 자연환경보전에 관한 법률이 강화되면서 건설재료용 골재 채취 및 석산의 신규개발이 어려워짐에 따라 산업부산물의 재활용은 환경문제와 자원의 효과적인 활용차원에서 활발한 연구활동이 이루어지고 있으며, 그 대상역시 광범위하다고 할 수

있다. 한편, 산업발전과 더불어 발전된 철강산업의 부산물인 슬래그는 고로슬래그와 제강슬래그로 분류되며 2005년도 우리나라에서 1,662만톤이 발생되어 대부분 매립이나 도로의 기층 또는 보조기층용으로 단순재활용되고 있다(한국철강신문, 2006). 이에 비해 일본 등 선진국에서는 건재용 콘크리트 골재로서의 재활용률이 상당한 수준에 이르고 있고, 천연 골재자원이 부족한 우리나라에서도 자원의 유효이용 및 환경보호 측면에서 2차제품과 도로포장 등 콘크리트용 골재로서의 활용을 위한 기술개발이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 슬래그골재 및 플라이애시의 포장용 투수콘크리트에 적용성을 검토하기 위하여 슬래그골재 및 플라이애시를 사용하고 투수콘크리트의 성능 및 내구성의 향상을 위해 고성능 AE감수제와 강섬유를 혼입한 포장용 투수콘크리트의 역학적 특성을 조사·분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

국내의 경우에는 현재 포장용 투수콘크리트에 대한 국내 시방기준은 명확하게 확립되어 있지 않은 실정이나, 대한주택공사 표준시방서에서 보도 및 자전거도로 등과 같이 교통하중을 크게 고려하지 않는 포장공사에 한하여 『투수 시멘트 콘크리트포장』(주택공사, 2000)에 대해 규정하고 있다. 선진국인 일본에서는 포장용 투수콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 일본콘크리트공학협회(JCI, Japan Concrete Institute) 『포러스콘크리트의 설계 시공법의 확립에 관한 연구위원회 보고서』에서 포장용 포러스콘크리트의 적정 품질기준들을 제안하고 있다(日本コンクリート工學協會, 2003).

따라서, 본 연구에서는 국내 및 국외의 포장용 투수콘크리트의 품질기준 및 제안값들을 만족시킬 수



있는 슬래그골재 및 플라이애시를 활용한 투수콘크리트의 성능향상 방안과 투수포장재로서의 적용성을 평가하기 위하여 실험조건 및 배합변수를 설정하여 연구를 수행하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 밀도 3.14g/cm^3 , 분말도 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$, SiO_2 21.4%, Al_2O_3 5.97%, CaO 62.72%인 국내 S사 제품의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

2.2.2 골재

본 연구에 사용된 골재는 입도가 5~13mm인 부순돌을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 부순돌의 물리적 성질

Items	Gradation (mm)	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	Absolute volume (%)	Unit weight (kg/m^3)
Crushed aggregate	5~13	2.79	1.1	60.5	1,693

2.2.3 슬래그골재

본 연구에 사용된 슬래그골재는 입도가 5~13mm인 포항 D사의 복합슬래그골재를 사용하였으며, 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 슬래그골재의 물리적 성질

Items	Gradation (mm)	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	Absolute volume (%)	Unit weight (kg/m^3)
Slag aggregate	5~13	3.25	2.4	49.6	1,611

2.2.4 플라이애시

산업부산물의 유효활용 및 포장용 투수콘크리트의

강도 및 내구성 등의 성능향상을 위하여 플라이애시 (2중)을 사용하였으며, 그 특성은 표 3과 같다.

표 3. 플라이애시의 특징

Physical properties			Chemical composition(%)			
Density (g/cm^3)	Blain's (cm^2/g)	Particle size(mm)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ig.loss
2.21	3,124	4.2×10^2	65.3	25.5	4.25	3.63

2.2.5 강섬유

포장용 투수콘크리트의 취성적 성질을 개선시키기 위하여 일본 A사 제품인 스테인리스 재질의 양단후크형 강섬유를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 4와 같다.

표 4. 강섬유의 물리적 특성

Length(mm)	Aspect ratio	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)
25	57	7.8	450

2.2.6 혼화제

시멘트의 분산작용과 미세공기의 연행으로 단위수량 감소, Workability 및 내동해성을 개선시키는 혼화제로서 리그닌 설폰산염이 주성분인 S사 제품의 고성능 AE감수제를 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 흐름시험

투수콘크리트 제조시 소요 워커빌리티의 확보와 성형시 재료분리방지 및 경화후 연속공극을 형성시키기 위하여 KS L 5111 『시멘트 시험용 플로테이블』에 준하여 목표 흐름값 180%를 얻는데 필요한 고성능 AE감수제 혼입량을 결정하였다.

2.3.2 공극률시험

공극률시험은 일본콘크리트공학협회 포러스콘크



리트의 설계·시공법 확립에 관한 연구위원회 보고서의 『포러스콘크리트의 공극률시험방법(안)』(日本コンクリート工學協會, 2003)에 준하여 공극률을 측정하였으며, 식(1)에 의해 산출하였다.

$$A(\%) = \left\{ 1 - \frac{(W_2 - W_1)}{V} \right\} \times 100 \quad (1)$$

- 여기서, A : 콘크리트의 공극률
- W_1 : 공시체의 수중질량
- W_2 : 24시간 자연방치 후의 기건질량
- V : 공시체의 용적

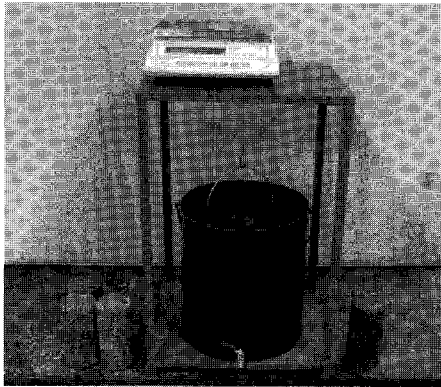


그림 1. 공극률시험

2.3.3 투수계수시험

투수계수시험은 일본콘크리트공학협회 포러스콘크리트의 설계·시공법 확립에 관한 연구위원회 보고서의 『포러스콘크리트의 투수계수 시험방법(안)』(日本コンクリート工學協會, 2003)에 준하여 그림 2와 같은 시험장치를 이용하여 투수계수를 측정하였으며, Darcy 법칙에 근거하여 식(2)에 의해 투수계수를 산출하였다.

$$K = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

- 여기서, K : 투수계수(cm/sec)
- L : 공시체의 높이(cm)
- A : 공시체의 단면적(cm²)

- $T_2 - T_1$: 측정시간(sec)
- H : 수위차(cm)
- Q : 유량(cm³)

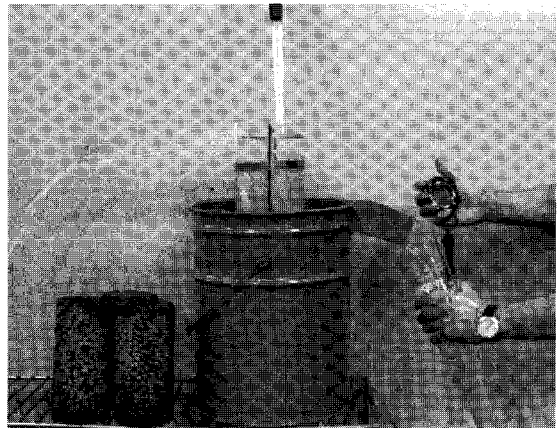
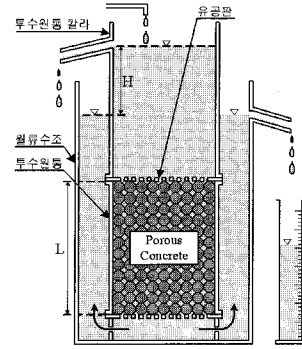


그림 2. 투수계수시험

2.3.4 슬래그골재 혼입에 따른 모르타르의 내부 조직 평가

슬래그골재 및 플라이애시를 혼입한 결합재의 내부 조직 평가를 위하여 PHILIPS사 XL30SFEG 모델의 Scanning Electron Microscope(SEM)를 이용하여 슬래그골재 및 플라이애시를 혼입한 모르타르의 미세공극구조를 분석하였다.

2.3.5 강도시험

포장용 투수콘크리트의 압축강도, 휨강도 시험은 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 및 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 공시체를



배합 및 조건별로 9개씩 제작하여 23±2℃의 수중에서 28일간 양생을 실시한 후 KS F 2405 『콘크리트의 압축강도 시험방법』, KS F 2408 『콘크리트의 휨강도 시험방법』에 준하여 측정하였다.

2.3.6 미끄럼저항성 시험

미끄럼저항성은 50cm×50cm×10cm의 크기의 시편을 제작하여 배합조건별로 휴대용 British Pendulum Tester를 사용해 ASTM E 303 『Standard Test Method for Measuring Surface Friction Properties Using the British Pendulum Tester』에 준하여 측정하였다. 이때 시험은 매시험마다 물을 뿌려 4회 시험을 반복하여 그 결과를 기록하고 BPN(British Pendulum Number) 값은 표준온도 20℃의 마찰지수로 보정하였다.

2.3.7 내마모성 시험

포장용 투수콘크리트의 내마모성능에 관한 시험방법은 아직까지 확실히 규정된 것이 없다. 이는 포장 등의 실제 구조물에서 발생하는 마모현상은 다수의 인자가 관여하여 복잡한 기구에 의해 발생되기 때문이며, 이것을 실험실에서 재현하기 위해서는 마모기구의 명확한 설명이 선행되어야 하나, 그에 대한 연구가 활발히 진행되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 포장용 투수콘크리트의 내마모성을 확인하기 위하여 골재시험용 Los Angeles 마모시험기에 지름이 47.5mm인 강구(무게 : 438g)를 6개씩 넣고 배합조건별로 15×15×15cm의 입방형 공시체를 제작해 재령 28일까지 수중양생 후 500회 회전시켜 질량을 측정하여 마모후의 질량감소율을 측정하였다.

2.3.8 동결융해저항성 시험

포장용 투수콘크리트에 대한 동결융해저항성을 측정하는 시험방법 및 기준은 아직까지 규정되어 있지 않기 때문에 실제 현장조건을 정확히 반영하지는 못

하지만 투수콘크리트에 대하여 매우 가혹한 조건의 실험인(한승환, 2006) KS F 2456 『급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법』중 A법(수중 급속 동결융해시험)을 준용하여 내동해성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 75×75×355mm의 각주 공시체를 제작하여 23±2℃의 수중에서 28일간 양생한 다음, -18~+4℃에서 1일 6사이클로 상대동탄성계수가 60% 이하가 될 때까지 소정의 사이클별로 1차 공명주파수를 측정함과 아울러 외관상태를 관찰하여 내동해성을 평가하였다. 이때 투수콘크리트는 동결융해반복에 의해 콘크리트 상하부 표면의 시멘트 페이스트 및 골재가 탈락하여 동탄성계수의 측정이 곤란할 수 있으므로 공시체의 상하부를 시멘트 페이스트로 2mm 정도 캡핑(capping)하였다.

2.4 배합 및 믹싱

포장용 투수콘크리트의 배합요인에 따른 역학적 특성을 분석하기 위하여 물-결합재비 25%, 설계공극률을 10%로 설정하고 배합을 실시하였으며, 그 결과는 표 5와 같다. 또한 믹싱은 강섬유의 분산성을 향상시키기 위해 30l의 옴니믹서를 사용하여 먼저 시멘트, 골재, 슬래그골재, 플라이애시 및 강섬유를 투입하여 1분간 건비빔을 실시한 후 혼합수(물+혼화제)를 투입하고 270초 동안 다시 혼합하는 분할투입방식을 사용하였다.

2.5 공시체의 제작

각각의 시험용 공시체는 JCI 포러스콘크리트의 설계·시공법 확립에 관한 연구위원회 보고서의 포러스콘크리트용 공시체의 제작방법을 참조하여 믹싱을 끝낸 콘크리트를 각 소요의 몰드에 1/2씩 채운 후 각 층마다 표면진동형 다짐기를 이용하여 진동가압을 실시하여 제작하였다. 투수콘크리트가 타설된 공시체는 24시간 후에 탈형하고 소요의 재령까지 23±2℃의 수중에서 표준양생을 실시하였다.



표 5. 포장용 투수콘크리트의 배합표

Mix No.	W/B (%)	Void (%)	Steel fiber (vol.%)	Slag aggregate contents(vol.%)	Fly ash (wt.%)	Unit weight (kg/m ³)						Ad ⁵⁾
						W	C	CA ¹⁾	SA ²⁾	SF ³⁾	FA ⁴⁾	
Plain-1 (SF 0%)	25	10	0	0	0	128.9	515.8	1693.0	-	-	-	2.32
Plain-2 (SF 0.5%)			0.5	0	0	128.9	515.8	1693.0	-	39.0	-	2.32
I-1			0	0	128.9	515.8	1693.0	-	58.5	-	2.32	
I-2				5	128.9	490.0	1693.0	-	58.5	25.8	2.32	
I-3				10	128.9	464.2	1693.0	-	58.5	51.6	2.32	
I-4				20	128.9	412.6	1693.0	-	58.5	103.2	2.32	
II-1			30	0	145.2	580.8	1185.1	483.3	58.5	-	2.61	
II-2				5	145.2	551.8	1185.1	483.3	58.5	29.0	2.61	
II-3				10	145.2	522.8	1185.1	483.3	58.5	58.1	2.61	
II-4				20	145.2	464.7	1185.1	483.3	58.5	116.2	2.61	
III-1			50	0	155.2	620.9	846.5	805.5	58.5	-	2.79	
III-2				5	155.2	589.9	846.5	805.5	58.5	31.0	2.79	
III-3				10	155.2	558.8	846.5	805.5	58.5	62.1	2.79	
III-4				20	155.2	496.7	846.5	805.5	58.5	124.2	2.79	
IV-1			100	0	177.8	711.2	-	1611.0	58.5	-	3.20	
IV-2				5	177.8	675.7	-	1611.0	58.5	35.6	3.20	
IV-3				10	177.8	640.1	-	1611.0	58.5	71.1	3.20	
IV-4				20	177.8	569.0	-	1611.0	58.5	142.2	3.20	

CA¹⁾: Crushed aggregate, SA²⁾: Slag aggregate, SF³⁾: Steel fiber, FA⁴⁾: Fly ash, Ad⁵⁾: AE agent

3. 시험결과 및 고찰

3.1 공극률 및 투수계수

슬래그골재 혼입률과 플라이애시의 혼입률에 따른 포장용 투수콘크리트의 공극률 측정결과는 그림 3과 같다. 이를 고찰하여 보면, 공극률은 슬래그골재의 혼입비율이 30%, 50%, 100%로 증가함에 따라 4.2~16.1% 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 슬래그의 냉각과정에서 다량의 기포가 발생되어 골재 내부에 공극을 형성하기 때문에 슬래그골재의 혼입률이 증가할수록 투수콘크리트의 공극률 역시 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 슬래그골재의 혼입률이 일정할 때 투수콘크리트의 공극률은 플라이애시의 혼입률이 5%, 10%, 20%로 증가함에 따라 0.85~8.03%로 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 시멘트의 일부를 플라이애시로 대

체 혼입하였기 때문에 시멘트에 비하여 입도가 미세한 플라이애시가 투입됨으로서 시멘트페이스트가 밀실해 지고, 시멘트 질량 대체로 플라이애시를 혼입함에 따라 결합재량이 다소 증가되어 실측공극률이 다소 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 공극률 역시 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 국내의 경우 포장용 투수콘크리트

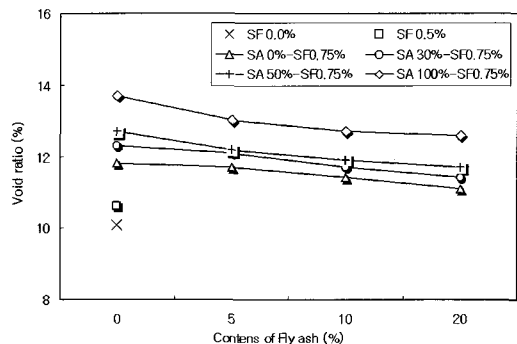


그림 3. 슬래그골재 및 플라이애시 혼입에 따른 공극률



의 공극률을 8% 이상으로 규정하고 있으며, 일본의 경우에는 일본콘크리트공학협회에서 10%이상으로 제한하고 있어, 본 연구에 사용된 투수콘크리트는 부순돌만 사용하고 강섬유를 혼입하지 않은 경우에도 투수콘크리트의 공극률은 10.1% 이상을 나타내 상기의 두 가지 조건을 동시에 만족하는 것으로 나타났다.

슬래그골재 및 플라이애시의 혼입률에 따른 투수콘크리트의 투수계수 시험결과는 그림 4에 나타내었다. 투수계수는 슬래그골재를 혼입하지 않은 경우에 비하여 슬래그골재의 혼입비율이 증가함에 따라 플라이애시 혼입여부에 관계없이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애시를 5%, 10%, 20% 혼입한 경우, 플라이애시 혼입률 증가에 따른 투수콘크리트의 투

수계수는 1.95~9.85% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 플라이애시의 혼입으로 인한 결합재의 증가로 연속공극이 감소하기 때문에 투수계수가 감소하는 것으로 판단된다.

또한 슬래그골재, 플라이애시 및 강섬유를 혼입한 투수콘크리트의 투수계수는 0.130~0.187cm/sec를 나타내어 국내·외의 투수성 시멘트 콘크리트포장에 요구되는 투수계수에 관한 규정(0.01cm/sec 이상)을 만족하고 있어 슬래그골재와 플라이애시를 이용한 포장용 투수콘크리트는 투수성 포장용 재료로의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

그림 5는 포장용 투수콘크리트의 공극률과 투수계수의 상관관계를 나타낸 것으로서 공극률이 증가함에 따라 $y=63.808x+1.4742$ 투수계수가 의 함수로 증가하는 것으로 나타났으며, 결정계수가 0.9561로 높은 상관관계를 나타내었다.

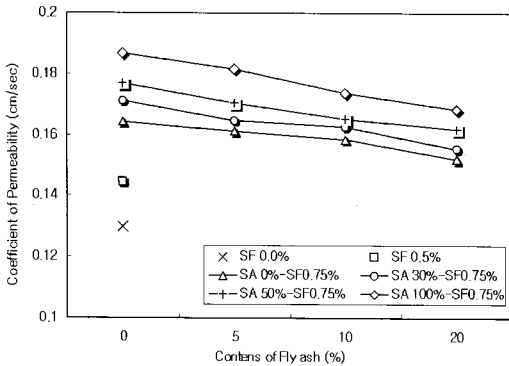


그림 4. 슬래그골재 및 플라이애시 혼입에 따른 투수계수

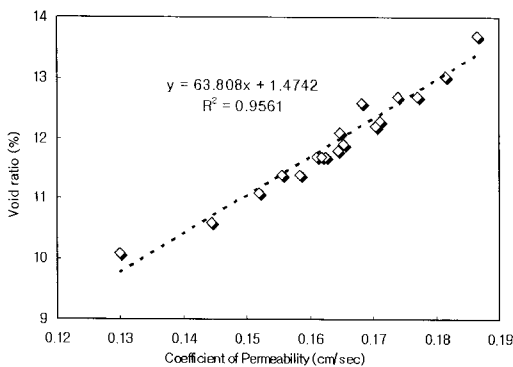
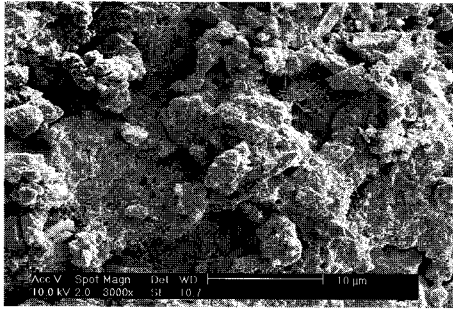


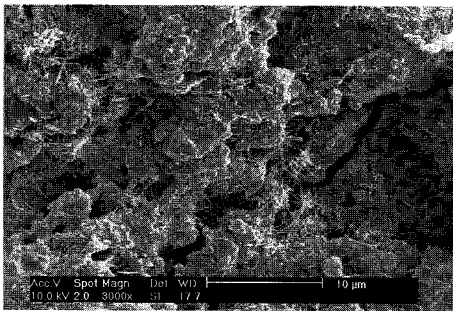
그림 5. 공극률과 투수계수의 상관관계

3.2 슬래그골재 혼입에 따른 모르타르의 내부조직 평가

그림 6은 플라이애시를 혼입한 모르타르 및 플라이애시를 혼입한 슬래그모르타르의 단면을 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 이를 분석해 보면, 플라이애시만을 혼입한 모르타르가 슬래그골재를 이용하여 제작한 모르타르보다 내부조직이 치밀하게 나타났다. 이는 슬래그골재의 입도분포 및 입형이 일반 모래의 경우보다 양호하지 못하고 표면상태에도 공극이 다수 존재하여 일반 골재를 사용한 모르타르에 비하여 수화생성물이 치밀하게 분포하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 이는 기존의 연구(이용구 등, 2001)에서 보고된 결과와 유사한 경향을 나타내는 현상이다. 그러나 전반적인 내부조직의 차이를 SEM 분석에 의존하여 판단하기 어려우므로, 강도특성을 비롯한 각종 물성을 비교하는 방법으로 콘크리트 품질에 대한 평가를 실시하였으며, 이 결과는 3.3절 이하에 상세히 기술한 바와 같다.



(a) 강모래 잔골재를 사용한 모르타르(×3,000)



(b) 슬래그 잔골재를 사용한 모르타르(×3,000)

그림 6. 파괴단면의 SEM 분석결과(플라이애시 20%, 재령 7일)

3.3 압축강도

슬래그골재 혼입률과 플라이애시의 혼입률에 따른 포장용 투수콘크리트의 압축강도 시험결과는 그림 7 과 같다. 이를 분석해 보면 플라이애시를 사용하지 않았을 때, 압축강도는 슬래그골재를 혼입하지 않은 경우에 비하여 슬래그골재를 30%, 50%, 100% 사용한 경우 각각 4.93%, 11.21%, 21.07% 정도 강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

또한, 플라이애시의 혼입률이 5, 10, 20%로 증가함에 따라 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비하여 각각 0.7~4.2%, 1.5~3.6%, 0.1~6.4% 정도 압축강도가 크게 나타났다. 이러한 경향은 플라이애시를 혼입함에 의하여 미세한 플라이애시 입자가 시멘트 입자의 분산성을 향상시키고 포졸란반응에 의해 생성된 수화물이 조직을 치밀하게 하여 매트릭스

자체가 고강도화되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 플라이애시의 혼입률에 따른 압축강도의 증가율은 플라이애시 혼입률 10% 이상에서 감소하는 것으로 나타나 과도한 플라이애시의 혼입은 압축강도 개선에 큰 효과가 없는 것으로 판단된다.

한편, 국내의 포장용 콘크리트의 압축강도는 18MPa 이상으로 규정하고 있어, 슬래그골재를 50% 까지 대체 혼입한 경우에 플라이애시를 혼입하지 않아도 18MPa 이상의 강도를 나타내었으나, 100% 대체 혼입한 경우에는 플라이애시를 10%정도 혼입하면 규정강도를 만족하여 포장용 투수콘크리트로 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

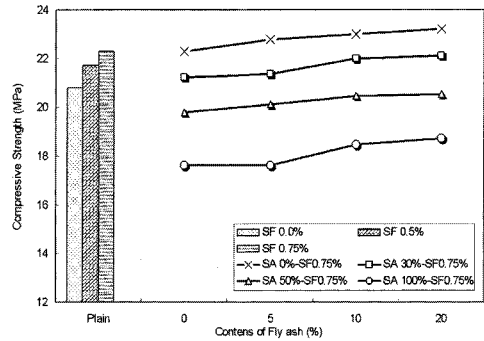


그림 7. 슬래그골재 및 플라이애시 혼입에 따른 압축강도

3.4 휨강도

포장용 투수콘크리트의 휨강도 측정결과는 그림 8 에 나타내었다. 이를 고찰하여 보면, 플라이애시를 혼입하지 않은 경우 투수콘크리트의 휨강도는 슬래그골재의 혼입률을 0%에서 30%, 50%, 100%로 증가시키기에 따라 각각 4.85, 4.62, 4.48, 4.42MPa 로 나타나 슬래그골재의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 투수콘크리트에 플라이애시를 혼입함에 따라 휨강도가 증가하는 경향을 보여 플라이애시를 5% 이상 혼입하면 슬래그골재를 50% 사용한 경우에도 4.5MPa 이상을 충족시키는 것으로 나타났다. 이는 플라이애시의 혼입으



로 인해 믹싱시 시멘트입자의 분산성을 향상시키고 경화후 매트릭스가 밀실해지고 고강도화되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 강섬유의 혼입에 따른 영향은 Plain에 비하여 강섬유를 0.5vol.%, 0.75vol.% 혼입하였을 경우 각각 17.6%, 22.8%의 성능향상 효과를 나타내었다. 이는 섬유를 혼입함에 따라 투수콘크리트 내부 매트릭스에 강섬유가 균등 분산되어 콘크리트자체 인성을 증대시켰기 때문으로 판단된다. 한편, 국내 도로교시방서에서 포장 콘크리트의 휨강도를 4.5MPa 이상으로 규정하고 있음을 고려할 때, 슬래그골재를 30% 초과 혼입할 경우 플라이애시를 혼입하지 않으면 규정 휨강도를 발현하기 어렵지만, 플라이애시를 5% 이상 혼입할 경우에는 포장용 투수콘크리트 제조시 슬래그골재를 50%정도 까지도 사용할 수 있는 것으로 확인되었다.

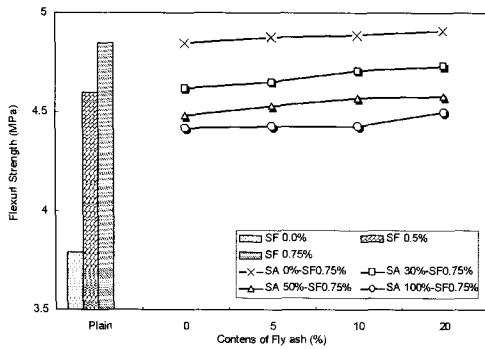


그림 8. 슬래그골재 및 플라이애시 혼입에 따른 휨강도

3.5 미끄럼저항성

포장용 투수콘크리트의 미끄럼저항성 시험결과는 그림 9와 같다. 이를 고찰하여 보면, 슬래그골재의 혼입률이 30~100%로 증가함에 따라 BPN값은 0.47~3.20% 감소하였고, 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 미소하지만 BPN값이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 슬래그골재 혼입률이 증가함에 따라 공극률이 증가하기 때문에 표면에 노출되는 공

극이 증가되고 상대적으로 BPN 시험기의 고무패드에 접하는 면적감소로 인하여 미끄럼저항성이 다소 감소된 것으로 판단된다.

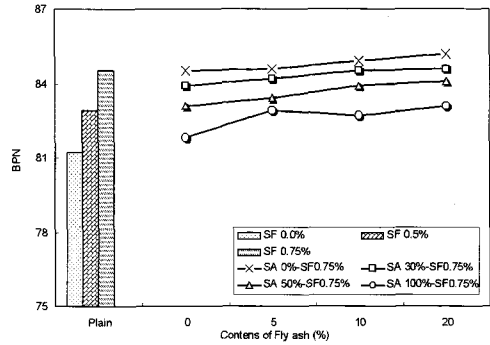


그림 9. 슬래그골재 및 플라이애시를 사용한 포장용 투수콘크리트의 미끄럼저항성

3.6 내마모성

포장용 투수콘크리트의 내마모성시험결과는 그림 10에 나타내었다. 그림에서와 같이 슬래그골재의 혼입률이 30%, 50%, 100%로 증가함에 따라 마모에 의한 질량감소율은 7.5~22.8% 증가하는 경향을 나타냈고, 플라이애시의 혼입률이 5, 10, 20%로 증가함에 따라 마모에 의한 질량감소율은 플라이애시를 혼입하지 않은 경우에 비하여 각각 1.5~2.9%, 3.8~5.6%, 6.9~12.0% 정도 감소하는 경향을 나

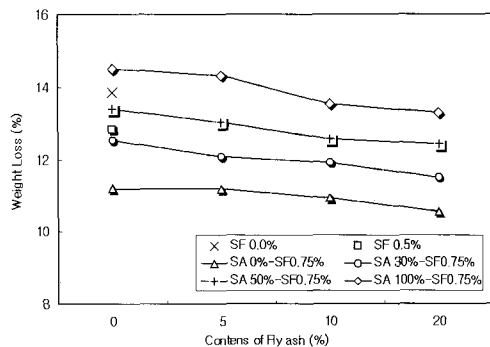


그림 10. 슬래그골재 및 플라이애시를 사용한 포장용 투수콘크리트의 질량감소율

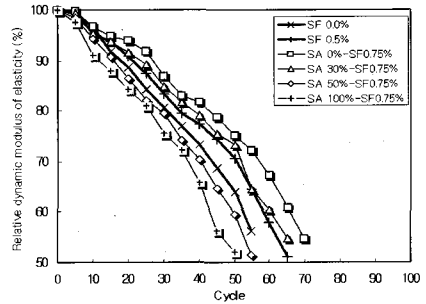


타났다. 이러한 경향은 슬래그골재의 입형이 불량하고 경도가 약하기 때문에 부순돌에 비하여 질량감소율이 증가된 것으로 판단되며, 플라이애시의 혼입에 의한 영향은 시멘트와 플라이애시의 밀도차에 의해 결합재량이 상대적으로 증가되어 결합재의 강성이 증대되고 내부구조가 치밀해져 내마모성이 향상된 것으로 판단된다.

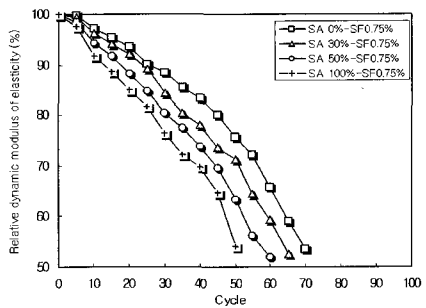
3.7 동결융해저항성

포장용 투수콘크리트의 동결융해시험결과는 그림 11과 같다. 이를 분석하면, 플라이애시를 혼입하지 않은 경우 슬래그골재의 혼입여부에 관계없이 투수콘크리트는 동결융해 사이클수가 70 이내에서 조기에 상대동탄성계수가 60% 이하로 저하되는 것으로 나타나 일반 콘크리트에 비하여 상대적으로 낮은 내동해성을 나타냈다(吉森 外, 1995). 이와 같이 투수콘크리트가 일반 콘크리트에 비하여 내동해성이 현저히 감소되는 이유는 일반 콘크리트의 경우 콘크리트의 표면에 존재하는 미세공극에 수분이 침투하여 동결되면 빙압에 의해 콘크리트 조직에 미세균열이 발생하고 동결융해 반복에 따라 콘크리트의 표면에 서부터 내부로 균열에 의한 손상이 진행되어 파괴가 일어나게 되는데 비하여, 투수콘크리트는 연속된 공극을 갖는 구조를 이루고 있기 때문에 동결과정에서는 공극중의 수분동결이 표면으로부터 중심부 쪽으로 진행되어 중앙부의 수분이 동결시 발생하는 빙압 때문에 골재간의 결합이 파괴되어 내동해성이 저하되는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 수행한 동결융해시험방법은 일반 콘크리트에 적용되는 매우 가혹한 조건의 동결융해저항성 평가시험으로서 실제 시공된 현장조사결과 실내의 시험결과와 상충되는 결과를 나타내어 실제 현장조건을 정확히 반영하지 않는다는 연구결과(吉森 外, 1995; N. Neithalath 등, 2005; Warren P. Baas, 2006)들로 미루어 본 연구에서 도출된 결과값과 유사함을 알 수 있었다.

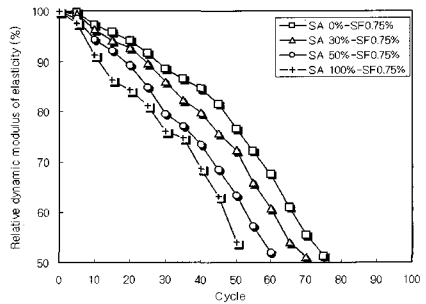
한편, 슬래그골재를 사용한 경우에는 부순골재만



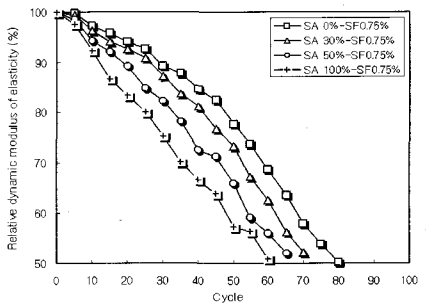
(a) 플라이애시 : 0%



(b) 플라이애시 : 5%



(c) 플라이애시 : 10%



(d) 플라이애시 : 20%

그림 11. 슬래그골재를 이용한 포장용 투수콘크리트의 상대 동탄성계수



을 사용한 경우에 비하여 내동해성이 다소 저하되는 경향을 나타내었다. 그러나 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 내동해성은 향상되는 것으로 나타나 상대동탄성계수가 60% 이하로 저하되는 동결융해 사이클 수가 5~10회 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 미세한 플라이애시 입자가 시멘트 입자의 분산성을 향상시키고 포졸란 반응에 의해 생성된 수화물이 조직을 치밀하게 하여 매트릭스 자체가 고강도화되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Plain에 비하여 강섬유를 0.5vol.%, 0.75vol.% 혼입하면 상대동탄성계수가 60%로 저하되는 사이클수가 증가되어 동결융해저항성이 향상되는 것으로 나타났다.

4. 결론

슬래그골재 및 플라이애시의 혼입에 따른 포장용 투수콘크리트의 역학적 특성에 관한 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 포장용 투수콘크리트의 공극률 및 투수계수는 슬래그골재의 혼합비율이 30%, 50%, 100%로 증가함에 따라 4.2~16.1%로 증가하는 경향을 나타내었고, 플라이애시의 혼입률이 5%, 10%, 20%로 증가함에 따라서는 오히려 0.85~8.03% 감소하는 경향을 나타내었지만, 국내 주택공사 도로기준의 기준값 및 일본 콘크리트공학협회의 제안값을 만족하였다.
2. 포장용 투수콘크리트의 강도특성은 슬래그골재의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으나, 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라서는 미소하나마 증가하는 경향을 나타내었으며 플라이애시를 5%~20% 혼입하고, 슬래그골재를 50% 사용한 경우 투수콘크리트의 압축강도 및 휨강도는 각각 20.1MPa 및 4.53MPa 이상으로 나타나 국내 포장콘크리트에 관한 규정인

- 18MPa 및 4.5MPa를 만족하였다. 또한 강섬유를 0.5vol.%, 0.75vol.% 혼입한 경우 사용하지 않은 경우에 비하여 휨강도가 각각 17.6%, 22.8% 증가하였다.
3. 포장용 투수콘크리트의 미끄럼저항성 시험결과, 슬래그골재의 혼입률이 30%, 50%, 100%로 증가함에 따라 BPN값은 0.47~3.20% 감소하는 경향을 나타내었고, 플라이애시의 혼입률이 증가함에 따라 BPN값은 미소하지만 증가하는 경향을 나타내었다.
4. 포장용 투수콘크리트의 내마모성은 부순돌만을 사용한 경우에 비해 슬래그골재의 혼합비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 플라이애시를 혼입한 경우에는 내마모성이 개선되어 플라이애시를 20% 혼입한 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 내마모성은 최대 12.0% 정도 개선되는 것으로 확인되었다.
5. 포장용 투수콘크리트의 동결융해저항성은 부순골재만을 사용한 경우에 비하여 슬래그골재의 혼합비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 플라이애시를 혼입한 경우에는 내동해성이 현저히 개선되어 플라이애시를 10% 혼입한 경우 혼입하지 않은 경우에 비하여 상대동탄성계수가 60% 이하로 저하되는 동결융해 사이클수가 5~10회 정도 증가하는 것으로 확인되었다.
6. 이상의 시험결과로부터 포장용 투수콘크리트 제조시 플라이애시 약 10%, 슬래그골재 50% 정도 사용하여도 투수성 포장콘크리트에서 요구되는 투수성, 규정강도, 내구성을 만족하면서 경제적인 포장용 투수콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업(R01-2007-000-10692-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.



참고문헌

- 건설교통부, 2006, "건설교통부 도로현황조사"
- 玉井元治, 1998, "連續空隙を有する固化體の透水性", *セメント技術年報, Vol. 42*, pp.591~594.
- 박승범, 2003, "순환경 사회구축을 위한 환경친화 콘크리트기술의 현황과 전망", *콘크리트학회지*, 제15권, 6호, pp.14~16.
- 문한영 외, 1998, "투수성 콘크리트포장의 실용화를 위한 실험적 연구", *콘크리트학회지*, 제10권, 3호, pp.165~173.
- 하재담 외, 2000, "투수콘크리트 포장의 배합설계 및 시공사례" *도로학회지*, 제2권, 2호, pp.65~73.
- 한국철강신문, 2006, "철강연감"
- 주택공사표준시방서, 2000, "투수시멘트 콘크리트포장".
- 日本コンクリート工學協會, 2003, "ポーラスコンクリートの設計・施工法の確認に關する研究委員會報告書".
- 이용구 외, 2001, "슬래그골재를 사용한 투수성 콘크리트의 물리적 성질", *반도체장비학술심포지움*, pp.236-240.
- 玉井元治 外, 1983, "透水性コンクリートの性狀", 第15回日本道路會議論文集, pp.289~290.
- 한승환, 2006, "소음저감을 위한 투수 콘크리트 포장공법" *도로학회지*, 제8권, 4호, pp.37~41.
- 吉森 外, 1995, "ポーラスコンクリートの強度と耐久性に關する研究", *セメント・コンクリート論文集*, No.49, pp.650~655.
- N. Neithalath, R. Garcia, Jan Olek(2005), "Tire-Pavement Interaction Noise : Recent Research on Concrete Pavement Surface Type and Texture", *8th International Conference on Concrete Pavement*, ISCP, Colorado, USA.
- Warren P Baas(2006), "Pervious Concrete Pavement Surface Durability in a Freeze-Thaw Environment -where rain, snow, and ice storms are common occurrences-", *Concrete Technology Forum -Focus on Pervious Concrete*, Nashville, USA.

접 수 일: 2007. 8. 1

심 사 일: 2007. 8. 1

심사완료일: 2007. 11. 26