한국도로학회 논문집
第7券3號 2005年 9月
pp. 31 ~ 42

실리카퓸 및 강섬유를 이용한 포장용 포러스콘크리트의 품질특성에 관한 연구

A Study on the Quality Properties of Porous concrete for Pavement Using Silica Fume and Steel Fiber

박 승 범* 이 준** 서 대 석** 윤 의 식***
Park, Seung-Bum Lee, Jun Seo, Dae-Seuk Yoon, Eui-Sik

Abstract

This study evaluates the physical · mechanical properties, durability and sound absorbtion of porous concrete for pavement according to content of silica fume and steel fiber 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. The results of the test indicate that in every condition, the void ratio and the coefficient of water permeability of porous concrete for pavement satisfy both the domestic standards and proposition values. Among the properties of strength, the compressive strength satisfies the standards in the specification of Korea National Housing Corporation as for every factor of mixture but in the case of the flexural strength, more than 0.6vol.% of steel fiber satisfied the Japan Concrete Institute proposition values. The mixture of silica fume and steel fiber presents the excellent intensity, though. The case when silica fume and steel fiber are used simultaneously presents the strongest durability because the durability shows the similar tendency to the dynamic characteristics. The case when 10wt.% of silica fume and 0.6vol.% of steel fiber are used at the same time shows that the loss rate of mass by Cantabro test became 27% better and freeze-thaw resistance became 60% better. As for the characteristics of sound absorption of porous concrete for pavement, Noise Reduction Coefficient is 0.48 to prove that it possesses almost 50% sound absorption.

Keywords : porous concrete, silica fume, steel fiber, compressive and flexural strength, durability, sound absorption

요 지

본 연구는 도로용 포장재로서 포러스콘크리트의 실질적인 현장적용을 위한 자료제시와 성능향상 방안을 도출하기 위하여 실리카퓸과 강섬유 혼입률에 따른 포장용 포러스콘크리트의 물리 · 역학적 특성, 내구성 및 흡음특성을 평가하였다. 시험결과, 모든 시험조건에서 포장용 포러스콘크리트의 공극률과 투수계수는 국내외 기준치 및 제안값을 만족시키는 것으로 나타났고, 강도특성의 경우 압축강도는 대한주택공사 도로기준의 기준치를 모든 배합요인에서 만족시키는 것으로 나타났으나 휨강도의 경우에는 강섬유 혼입률 0.6vol.% 이상에서 일본콘크리트공학협회 제안값을 만족시키는 것으로 나타났으며, 실리카퓸과 강섬유를 동시에 혼입한 경우가 우수한 강도특성을 나타냈다. 또한 내구성은 역학적 특성과 유사한 경향성을 나타내 실리카퓸과 강섬유를 동시에 사용한 경우가 가장 우수한 내구성능을 나타냈으며, 실리카퓸 10wt.%와 강섬유 0.6vol.%를 함께 사용한 경우 Plain의 경우에 비해 골재비산저항성은 27%정도, 동결융해저항성은 약 60%정도 개선되는 것으로 나타났다. 또한 포장용 포러스콘크리트의 흡음특성은 소음저감계수가 0.48로 나타나 50%에 가까운 흡음성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 포러스콘크리트, 실리카퓸, 강섬유, 압축 및 휨강도, 내구성, 흡음

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수
** 충남대학교 토목공학과 대학원
*** 한국원자력안전기술원

1. 서 론

현재 우리나라는 급속한 차량의 증가로 지속적인 도로의 확충이 이루어져 고속도로, 일반국도, 지방도 등을 포함한 도로의 총연장은 2004년 97,252km(건설교통부, 2004)에 이르게 되었고 이러한 도로는 시공시 기능성 및 구조적 성능만을 중요시하여 대부분 불투수성의 아스팔트 콘크리트 또는 시멘트 콘크리트 포장으로 시공되었다. 그러나 불투수성 포장재료로 시공된 도로는 강우시 원활한 배수가 이루어지지 못할 경우 수막현상의 발생으로 미끄럼저항성이 저하되어 차량운행에 상당한 위험요소를 내포할 뿐만 아니라 우수가 지중으로 침투하지 못하고 하수관을 통해 하천으로 흘러들어 폭우시 도시하천 범람의 원인이 되기도 한다. 또한 포장 하층부의 사막화, 지중생태계의 파괴 및 지하수의 고갈 등 환경보존 측면에도 악영향을 끼친다. 이에 대한 해결방안으로 건설분야에서도 기존 포장재료로서의 구조적 기능성과 투수기능을 동시에 갖는 새로운 개념의 포장재에 대한 관심이 높아지면서 1980년부터 관련 연구들이 활발히 수행되어 투수성 아스팔트 포장재가 개발되었다. 그러나 투수성 아스팔트 포장재는 아스팔트의 점탄성적 특성상 여름철 노면의 온도상승, 과다한 차량하중, 반복하중, 차량의 급제동 등에 의한 아스팔트의 점성증대 및 소성변형 등으로 연속공극이 막혀 투수기능을 상실하는 문제점을 내포하게 되었다(玉井元治, 1988). 이에 대한 대책으로 최근 콘크리트에 잔골재를 거의 사용하지 않고 불연속 입도의 굵은골재를 사용한 포러스콘크리트를 투수포장용 재료로 개발하기 위한 연구가 주목받게 되었다(박승범, 2003 ; 하재담 등, 2000 ; 문한영 등, 1998).

포러스콘크리트는 내부에 형성된 연속공극과 독립공극으로 투수, 투기, 식생, 수질정화 및 흡음 등의 환경부하 저감 특성들을 갖게 된다. 그러나 포러스콘크리트는 이러한 우수한 기능과 더불어 표준 배합설계의 부족, 강도와 내구성의 저하, 백화나 재료분리 등과 같은 문제점을 내포하고 있어 이러한 문제점을 해결함과 동시에 기존의 성능을 능가하는 포장용 포러스콘크리트의 연구 · 개발이 절실한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 도로용 투수 포장재로서 포러스콘크리트의 현장적용을 위한 기초적 자료 제시 및 성능향상방안 도출을 위하여 고강도용 혼화재인 실리카퓸과 고인성 섬유소재인 양단후크형 강섬유를 사용한 포장용 포러스콘크리트의 물리 · 역학적 특성, 내구성 및 소음저감 특성을 조사 · 분석하고자 한다.

2. 포장용 포러스콘크리트의 요구성능

국내의 경우에는 대한주택공사 도로기준에 『투수시멘트 콘크리트 포장』(주택공사, 2000)에 대해 규정하고 있으나, 이는 보도 및 자전거도로 등과 같이 교통하중을 크게 고려하지 않는 포장공사에 한하여 적용하고 있을 뿐, 현재 차도용 포러스콘크리트에 대한 국내 시방 기준은 명확하게 확립되어 있지 않은 실정이다. 국제적으로는 특히 일본에서 투수 포장용 포러스콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 일본콘크리트공학협회(JCI, Japan Concrete Institute) 『포러스콘크리트의 설계 · 시공법의 확립에 관한 연구위원회 보고서』(이하 JCI 보고서로 약함)에서는 그 동안의 연구와 시공실적을 조사 · 분석하여 포장용 포러스콘크리트의 적정 품질기준들을 제안하고 있다(日本コンクリート工學協會, 2003). 대한주택공사 및 일본콘크리트공학협회에서 제시하고 있는 포장용 포러스콘크리트의 품질 기준 및 제안값들은 표 1과 같다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구에서는 표 1의 품질기준 및 제안값들을 만족시키고 실리카퓸 및 강섬유를 활용한 포러스콘크

표 1. Quality standards of porous concrete for pavement

Items	Domestic standard (Korea)	Proposed value by JCI (Japan)	
		Roadway	Sidewalk
Compressive strength	18MPa	-	-
Flexural strength	-	4.5MPa	2.5~3.5MPa
Void ratio	Over 8%	Over 10%	Over 10%
Coefficient of permeability	Over 0.01cm/sec	Over 0.01cm/sec	Over 0.1cm/sec
Max. size of coarse agg.	19mm	13mm	5 or 13mm

표 2. Conditions and variables of experiment

Conditions		Variables
W/B(%)		25
Design void ratio(%)		15
Target flow(%)		180
Aggregate		Crushed agg., 5~8mm
Content of silica fume (%)		5, 10, 20 [SF/(C+SF), wt.%]
Content of hooked end type steel fiber(%)		0.3, 0.6, 0.9 [Fiber vol./m^3, vol.%]
Test Items	Physical & mechanical properties	• Void ratio, • Coefficient of permeability • Compressive strength • Flexural strength & toughness
	Durability	• Freeze-thaw test • Cantabro test
	Sound absorption	• Method of impedance tubes

리트의 성능향상 방안과 투수 포장재로서의 적용성을 평가하기 위하여 표 2와 같이 실험조건 및 배합변수를 설정하여 연구를 수행하였다. 이때 혼화제 혼입량은 시멘트 페이스트의 일정한 유동성을 확보하기 위하여 사전에 흐름 시험을 통하여 결정하였다.

3.2 사용재료

3.2.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 밀도 3.14g/cm^3, 분말도 3,200cm^2/g인 국내 S사 제품의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 특성은 표 4와 같다.

3.2.2 골재

본 연구에 사용된 골재는 입도가 58mm인 부순돌을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 3과 같다.

3.2.3 혼화제

시멘트의 분산작용과 미세 공기의 연행으로 단위수량 감소, Workability 및 내동해성을 개선시키기 위하여 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

3.2.4 실리카퓸

포장용 포러스콘크리트의 강도 및 내구성 등의 성능향상을 위하여 고강도용 혼화재인 실리카퓸을 사용하였으며, 그 특성은 표 4와 같다.

3.2.5 강섬유

포장용 포러스콘크리트의 취성적 성질을 개선시키기 위하여 일본 A사 제품인 스테인레스 재질의 양단 후크형 강섬유를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 5와 같다.

표 3. Physical properties of aggregate

Items	Gradation (mm)	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	Absolute volume(%)	Unit weight (kg/m^3)
Crushed aggregate	5~8	2.55	1.2	55.6	1,482

표 4. Properties of cement and silica fume

Items	Physical properties		Chemical composition(%)				
	Density (g/cm^3)	Fineness (cm^2/g)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Ig.loss
Cement	3.14	3,200	21.24	5.97	3.34	62.72	1.46
Silica fume	2.21	263,000	92.50	1.68	2.51	0.56	0.31

표 5. Physical properties of steel fiber

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

3.3 실험방법

3.3.1 흐름시험

포러스콘크리트 제조시 소요 워커빌리티의 확보와 성형시 재료분리 방지 및 경화 후 연속공극을 형성시키기 위하여 KS L 5111『시멘트 시험용 플로테이블』에 규정된 흐름시험판 위에 몰드를 놓고 페이스트를 2층으로 투입하여 20회씩 다진 다음, 몰드를 들어 올리고 흐름 시험판을 15초 동안 25회의 속도로 1.27cm의 높이에서 낙하시켜 페이스트의 흘러 퍼진 지름을 측정하여 흐름값을 산출하였다.

3.3.2 공극률시험

공극률시험은 JCI 보고서 『포러스콘크리트의 공극률시험방법(안)』에 준하여 공극률을 측정하였으며, 식(1)에 의해 산출하였다.

$$A(\%) = \{1-(W_2-W_1)/V_1\} \times 100 \qquad (1)$$

여기서, A : 콘크리트의 공극률
W_1 : 공시체의 수중질량
W_2 : 24시간 자연방치 후의 기건질량
V_1 : 공시체의 용적

3.3.3 투수계수시험

투수계수시험은 JCI 보고서 『포러스콘크리트의 투수계수 시험방법(안)』에 준하여 그림 1과 같은 시험장치를 이용하여 투수계수를 측정하였으며, Darcy 법칙에 근거하여 식(2)에 의해 투수계수를 산출하였다.

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

여기서,

K : 투수계수(cm/sec)　　T_2-T_1 : 측정시간(sec)
L : 공시체의 높이(cm)　　H : 수위차(cm)
A : 공시체의 단면적(cm^2)　　Q : 유량(cm^3)

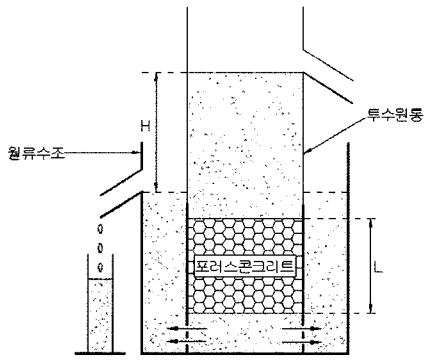


그림 1. Measurement of water permeability

3.3.4 강도시험

포장용 포러스콘크리트의 압축강도, 휨강도 및 휨인성 시험은 Φ100×200mm 및 100×100×400mm의 공시체를 제작하여 23±2℃의 수중에서 28일간 양생을 실시한 후 KS에 규정되어 있는 각각의 시험방법에 준하여 측정하였다.

3.3.5 동결융해시험

포장용 포러스콘크리트에 대한 동결융해저항성을 측정하는 시험방법 및 기준은 아직까지 규정되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 보통콘크리트의 내동해성 평가에 적용되는 KS F 2456 『급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험방법』 중 A법(수중 급속동결융해시험)을 준용하여 내동해성을 평가하였다. 즉, 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 포러스콘크리트는 동결융해반복에 의해 콘크리트 상하부 표면의 시멘트 페이스트 및 골재가 탈락하여 동탄성계수의 측정이 곤란할 수 있으므로 공시체의 상하부를 시멘트 페이스트로 2mm 정도 캡핑(Capping)하였다.

3.3.6 골재비산저항성 시험

표층재로서 포장용 포러스콘크리트의 타당성을 검증하기 위하여 골재비산저항성 시험을 실시하였으며, 시험방법은 일본도로협회 및 도로공단에서 제안한 배수성 포장기술 지침(안)의 『칸타브로(Cantabro)시험방법』((社)日本道路協會, 1998 ; 日本道路公團, 2000)에 준하여 로스앤젤리스 마모감량 시험기에 Φ100×63.5mm의 공시체를 투입하여 300회 회전시킨 후 공시체의 손실 질량비를 측정하여 골재비산저항성을 평가하였다.

3.3.7 임피던스관에 의한 흡음시험

포장용 포러스콘크리트의 특징 중 하나인 소음저감 특성을 평가하기 위하여 Φ98×100mm의 공시체를 제작하여 KS F 2814-1『임피던스 관에 의한 흡음계수와 임피던스의 결정방법, 제1부 : 정재파비법』에 준하여 그림 2와 같은 임피던스관을 이용하여 각각의 주파수에 대한 흡음계수를 측정하였으며, 250Hz, 500Hz, 1,000Hz, 2,000Hz에서의 흡음계수를 산술평균하여 소음저감계수 NRC(Noise Reduction Coefficient)를 산출하였다.

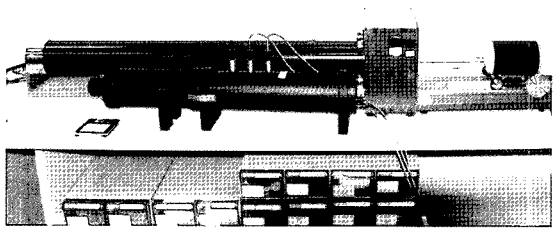


그림 2. Measurement of absorption coefficient by impedance tube

3.4 배합

포장용 포러스콘크리트의 배합요인에 따른 물리·역학적 특성, 내구성 및 흡음특성을 분석하기 위하여 물-결합재비 25%, 설계공극률을 15%로 설정하고 강도, 내구성 및 인성증대를 위하여 실리카퓸 및 강섬유 혼입에 따른 배합을 실시하였으며, 배

표 6. Mix proportions of porous concrete for pavement

Mix No.	W/B (%)	Silica fume content(wt.%)	Steel fiber content(vol.%)	Unit weight (kg/m³)					
				W	C	G	Silica fume	Steel fiber	Ad[1)]
Ⅰ-1	25	-	-	121	486	1630	-	-	2.3
Ⅰ-2			0.3	121	486	1630	-	23.4	2.3
Ⅰ-3			0.6	121	486	1630	-	46.8	2.3
Ⅰ-4			0.9	121	486	1630	-	70.2	2.3
Ⅱ-1		5	-	121	461	1630	24	-	2.7
Ⅱ-2			0.3	121	461	1630	24	23.4	2.7
Ⅱ-3			0.6	121	461	1630	24	46.8	2.7
Ⅱ-4			5	121	461	1630	24	70.2	2.7
Ⅲ-1		10	-	121	437	1630	49	-	3.9
Ⅱ-2			0.3	121	437	1630	49	23.4	3.9
Ⅱ-3			0.6	121	437	1630	49	46.8	3.9
Ⅱ-4			0.9	121	437	1630	49	70.2	3.9
Ⅳ-1		20	-	121	388	1630	97	-	6.3
Ⅳ-2			0.3	121	388	1630	97	23.4	6.3
Ⅳ-3			0.6	121	388	1630	97	46.8	6.3
Ⅳ-4			0.9	121	388	1630	97	70.2	6.3

Ad[1)]:Admixture(Air entraining and high-range water reducing agent)

합표는 표 6과 같다. 또한 믹싱은 강섬유의 분산성을 향상시키기 위해 옴니 믹서를 사용하여 먼저 시멘트, 골재, 실리카퓸 및 강섬유를 투입하여 1분간 건비빔을 실시한 후 혼합수(물+혼화제)를 투입하고 270초 동안 다시 혼합하는 분할투입방식을 사용하였다.

3.5 공시체의 제작

각각의 시험용 공시체는 JCI 보고서의 공시체 제작방법을 참조하여 믹싱을 끝낸 포러스콘크리트를 각 소요의 몰드에 1/2씩 채운 후 각 층마다 표면진동형 다짐기를 이용하여 진동가압을 실시하여 제작하였다. 포러스콘크리트가 타설된 공시체는 24시간 후에 탈형하고 소요의 재령까지 23±2℃의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 공극률

포장용 포러스콘크리트의 실리카퓸 및 강섬유 혼입률에 따른 공극률 측정결과는 그림 3과 같다. 이를 고찰하여 보면 동일 섬유혼입률에서 실리카퓸의 혼입률이 증가함에 따라 공극률은 감소하는 경향을 나타냈으며, 실리카퓸을 시멘트 대체비(질량비)로 20% 혼입한 경우에는 Plain의 경우에 비해 약 10% 정도 공극률이 감소하였다. 이는 초미립의 실리카퓸을 혼입함에 따라 시멘트와의 밀도차이에 따른 상대적인 결합재량의 증가로 인해 포러스콘크리트의 내부 공극이 감소했기 때문으로 판단된다. 강섬유 혼입률에 따른 공극률 특성은 섬유 혼입률이 증가함에 따라 공극률은 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 강섬유 혼입률 0.9vol.%에서 뚜렷한 공극률 증가경향을

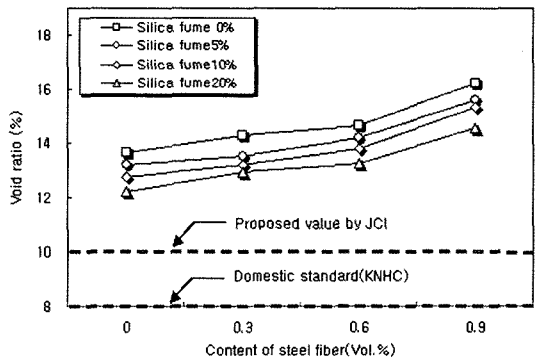


그림 3. Void ratio by silica fume contents and steel fiber contents

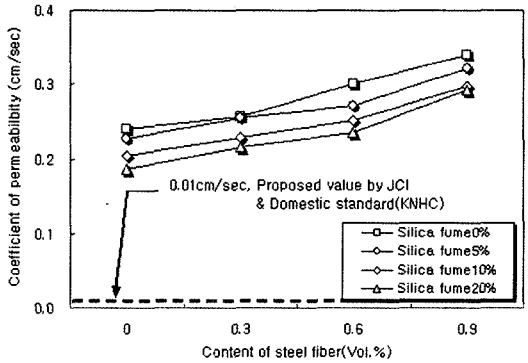


그림 4. Coefficient of permeability by silica fume contents and steel fiber contents

나타내 Plain에 비하여 약 12~17% 정도 증가하였다. 이러한 경향을 나타내는 원인은 과도한 섬유의 혼입으로 워커빌리티가 급격히 저하되어 공시체 제작시 다짐이 곤란했기 때문으로 판단된다.

또한 현재 포장용 포러스콘크리트의 공극률에 관한 국내기준은 8% 이상으로 규정하고 있고, 일본의 경우에는 일본콘크리트공학협회에서 10% 이상으로 제안하고 있어 본 연구에 의한 결과들이 상기의 두가지 기준을 동시에 만족시키는 것으로 나타났다.

4.2 투수계수

투수 및 배수를 목적으로 하는 포장용 포러스콘크리트의 물리적 성능을 대표할 수 있는 지표는 투수계수라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 배합요인에 따른 투수계수 시험을 실시하였으며 결과는 그림 4와 같다. 이를 고찰하여 보면, 포러스콘크리트의 투수계수는 실리카퓸의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났고, 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 실리카퓸 및 강섬유를 이용한 포러스콘크리트의 투수계수는 0.18~0.35cm/sec로 나타나 현재 포장용 포러스 콘크리트의 투수계수에 관한 국내 품질기준 및 일본콘크리트공학협회의 제안값인 0.01cm/sec를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.

그림 5는 포장용 포러스콘크리트의 공극률과 투수계수와의 상관관계를 나타낸 것으로서 공극률이 증가함에 따라 투수계수는 $y=0.0318 \cdot e^{0.149x}$의 함수로 증가하는 것으로 나타났으며, 결정계수가 0.94로 높은 상관성을 나타냈다.

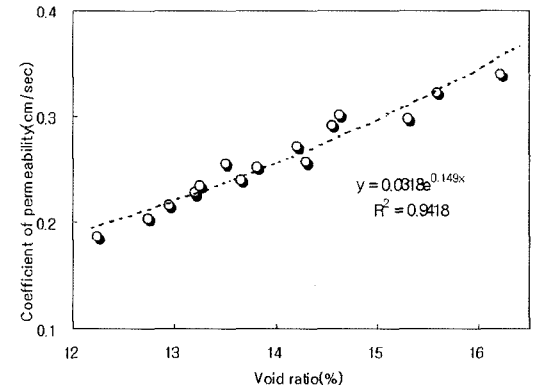


그림 5. Relationship between void ratio and coefficient of permeability

4.3 압축강도

실리카퓸 및 강섬유를 혼입한 포장용 포러스콘크리트의 압축강도 실험결과를 그림 6에 나타내었다. 이를 고찰하여 보면, 포러스콘크리트의 압축강도는 실리카퓸의 혼입률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내어 실리카퓸을 혼입하지 않은 경우에 비해

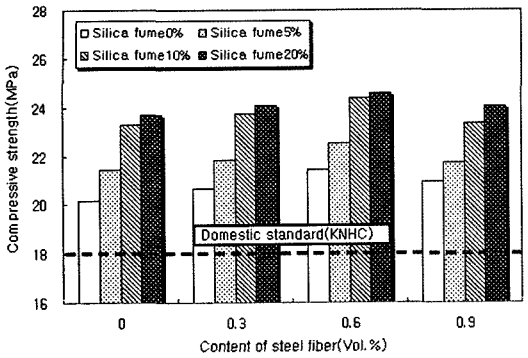


그림 6. Compressive strength by silica fume contents and steel fiber contents

실리카퓸 혼입률이 5, 10, 20 wt.%로 증가됨에 따라 6.1~17.3%의 강도 향상을 나타냈으며, 혼입률 20wt.%에서는 강도증가 경향이 둔화되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 시멘트와 실리카퓸의 밀도 차이에 따른 결합재량의 상대적 증가로 포러스콘크리트의 공극률이 감소하고, 초미분말의 실리카퓸 사용으로 시멘트 페이스트의 내부 매트릭스 구조가 치밀해져 결합재의 강도가 증진되었기 때문으로 판단된다.

강섬유 혼입에 따른 압축강도 특성은 섬유 혼입률 0.6vol.%까지는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 다소 증가하는 것으로 나타났으나 실리카퓸을 혼입한 경우에 비해서는 그 영향이 미미한 것으로 나타났으며, 강섬유 혼입률 0.9vol.%에서는 압축강도가 0.6vol.%에 비하여 저하되는 것으로 나타났다. 이는 일정한 혼입률까지는 섬유가 콘크리트 내부에 균등분산되어 결합재의 부착력 향상으로 압축강도가 증가되나, 과도한 섬유혼입률인 0.9vol.%에서는 워커빌리티의 급격한 저하 및 Fiber-ball의 생성으로 상대적으로 밀실한 공시체의 제작이 곤란하고 공극률이 증가되어 강도가 저하된 것으로 판단된다. 또한 실리카퓸과 강섬유를 동시에 사용할 경우에는 강도증진 효과가 단일 혼입의 경우에 비해 크게 개선되어 강섬유 0.6vol.% 및 실리카퓸 10wt.%를 사용한 경우 일반 포러스콘크리트에 비해 21.3%의 강도 증진을 나타냈다. 이는 적정량의 실리카퓸과 강섬유를 동시에 사용할 경우 초미립의 실리카퓸이 섬유, 결합재 및 골재 사이의 계면 부착력을 향상시켜 압축강도가 증진된 것으로 판단된다.

그리고 실리카퓸 및 강섬유를 사용한 포러스콘크리트의 압축강도는 20.2~24.5MPa를 나타내어 대한주택공사에서 제시한 포러스콘크리트의 압축강도 기준인 18MPa보다 높은 강도를 나타내었다.

4.4 휨강도 및 휨인성

포장용 포러스콘크리트의 휨강도 측정결과는 그림 7과 같다. 이를 고찰하여 보면 실리카퓸 혼입률이 증가함에 따라 휨강도는 증가하는 경향을 나타냈으며, 강섬유를 혼입한 경우에는 섬유의 혼입률이 0.3~0.9vol.%로 증가함에 따라 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 각각 6.12%, 18.90%, 16.84%의 강도증진을 나타내, 강섬유 혼입률 0.6vol.% 이상에서는 현재 JCI 보고서에서 제안하고 있는 휨강도 기준치인 4.5MPa이상을 충족시키는 것으로 나타났다. 또한 강섬유 혼입률 0.9vol.%에서는 0.6vol.%에 비해 휨강도가 다소 저하되는 것으로 나타났으며, 이는 일정량의 섬유 혼입률까지는 시멘트 페이스트 내부에 섬유가 균등 분산되어 하중 재하시 발생되는 응력을 고루 분산시켜 휨강도가 증진되나 0.9vol.%의 경우에는 믹싱시 포러스콘크리트 내부에 Fiber-

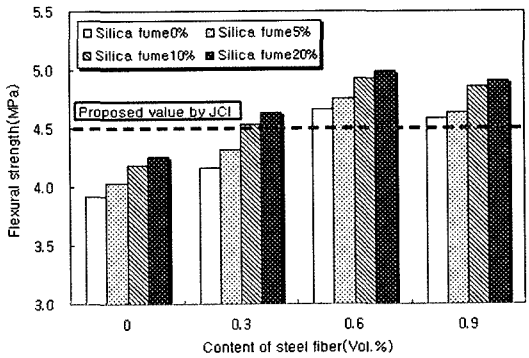


그림 7. Flexural strength by silica fume contents and steel fiber contents

ball의 생성으로 결합재의 부착력이 감소하여 휨강도가 저하된 것으로 판단된다.

휨강도의 경우에도 압축강도의 경우와 마찬가지로 실리카퓸과 강섬유를 동시에 혼입할 경우 휨강도 개선효과가 더욱 향상되어 실리카퓸 10wt.%, 강섬유 0.6vol.%를 동시에 사용한 경우 Plain의 경우에 비해 27%의 휨강도 증진을 나타냈다. 이는 초미분말의 실리카퓸의 사용으로 결합재의 내부 매트릭스 구조가 치밀해져 시멘트 페이스트의 자체 강도가 증진되고, 섬유와 결합재 사이의 부착력을 증진시켜 섬유의 응력분산 능력을 더욱 향상시켰기 때문으로 판단된다. 또한 포장용 포러스콘크리트의 휨강도는 압축강도의 약 1/5~1/6정도로 나타났으며 이는 玉井元治의 연구결과와 유사한 것으로 나타났다(玉井元治外, 1983).

그림 8은 압축강도 및 휨강도 시험에서 실리카퓸의 적정 혼입률로 판단되는 10wt.%에 대하여 강섬유의 혼입률을 변화시켜 제작한 포장용 포러스콘크리트의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 이를 고찰하여 보면 강섬유를 혼입하지 않은 경우에는 취성파괴가 일어나는 것으로 나타났으나 강섬유를 혼입한 경우에는 처짐변형 성능이 현저히 개선되는 것으로 나타났으며, 강섬유 혼입률이 0.3vol.%, 0.6vol.%, 0.9vol.%로 증가함에 따라 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 등가휨강도는 각각 4.4배, 7.5배, 6.6배 증진되는 것으로 나타났다. 이는 강섬유를 혼입함에 따라 하중재하시 발생하는 균열에 대한 구속능력이 증진되어 에너지 흡수능력이 현저히 향상됐기 때문으로 판단된다.

4.5 골재비산저항성

골재의 비산저항성이란 투수 및 배수성 포장에 있어 차량 주행시 발생할 수 있는 골재의 탈락정도를 평가하기 위한 것으로, 본 연구의 측정결과는 그림 9와 같다. 이를 고찰하여 보면 실리카퓸 혼입률이 0~20wt.%로 증가함에 따라 골재비산저항성 시험에 의한 질량 손실률은 각각 13.7%, 13.4%, 11.9%, 11.4%로 나타나 실리카퓸의 혼입률이 증가함에 따라 골재비산저항성이 향상되는 것으로 나타났으며 실리카퓸 혼입률 20wt.%에서는 질량 손실률 감소경향을 다소 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 실리카퓸이 시멘트의 수화생성물($Ca(OH)_2$)과 조기에 포졸란 반응을 일으키고 그 수화물이 시멘트 입자 사이에 겔층을 형성시켜 결합재의 내부 구조가 치밀해져 강도가 향상되었기 때문으로 판단된다.

강섬유 혼입에 따른 골재비산저항성은 역학적 특성과 유사한 경향성을 나타내 강섬유의 혼입률 0.6vol.%까지는 혼입률과 비례하여 질량 손실률이 감소하는 것으로 나타났으나 강섬유 혼입률 0.9vol.%에서는 감소경향이 둔화되거나 0.6vol.%의 경우에 비해 골재비산저항성이 저하되는 것으로

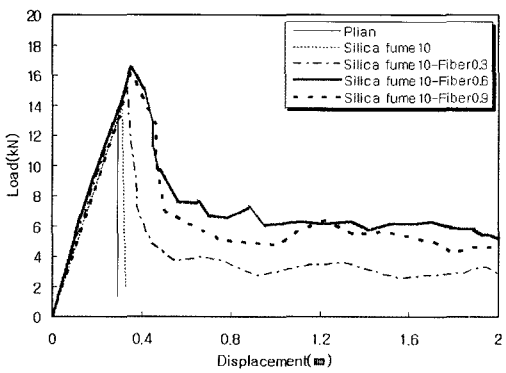


그림 8. Load-displacement curves by steel fiber contents

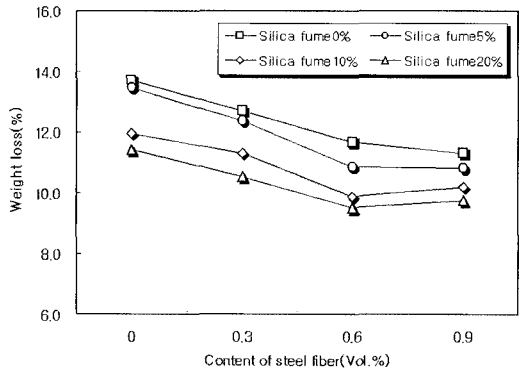
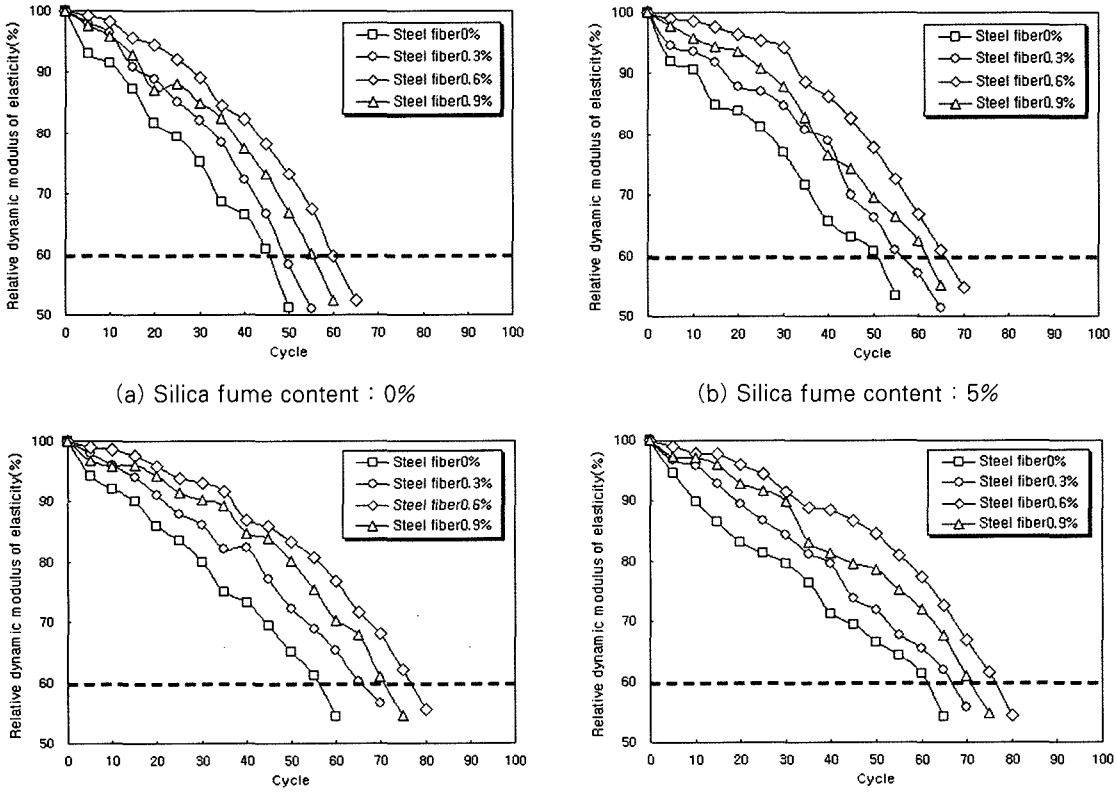


그림 9. Weight loss of porous concrete by cantabro test

나타났다. 또한 골재비산저항성 시험의 경우에도 강섬유와 실리카퓸을 동시에 혼입한 경우가 우수한 비산저항성을 나타내 실리카퓸 10wt.%와 강섬유 0.6vol.%를 사용한 경우 Plain의 경우에 비해 골재비산저항성이 27%정도 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 실리카퓸 및 강섬유의 동시 혼입으로 결합재의 인성 및 부착력이 증진되어 충격에너지에 대한 흡수능력이 향상되었기 때문으로 판단된다.

4.6 동결융해저항성

투수 및 배수를 목적으로 하는 포장용 포러스콘크리트에 대한 동결융해저항성을 측정하는 시험방법 및 기준은 아직까지 규정되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 콘크리트의 동결융해저항성 평가에 이용되는 시험방법으로 포장용 포러스콘크리트의 내동해성을 평가하였으며 시험결과는 그림 10과 같다. 이를 고찰하여 보면 실리카퓸 및 강섬유를 혼입하지 않은 Plain의 경우 50사이클에서 상대동탄성계수가 60% 이하로 저하되는 것으로 나타나 일반콘크리트에 비해 상대적으로 낮은 내동해 저항성을 나타났다(吉森 外, 1995). 이러한 원인은 일반콘크리트의 동결융해에 의한 열화 메커니즘은 콘크리트의 미세 공극에 침투한 수분이 동결융해시 팽창과 압축을 반복하여 표면에서부터 내부조직으로 파괴가 발생하게 되나 포장용 포러스콘크리트의 경우에는 연속공극을 통해 수분이 내부에 쉽게 침투되어 동결작용시 내부와 외부에서 동시에 팽창압이 발생되어 일반콘크리트에 비해 내동해성이 작게 나타나는 것으로 판단된다.



(a) Silica fume content : 0%

(b) Silica fume content : 5%

(c) Silica fume content : 10%

(d) Silica fume content : 20%

그림 10. Relative dynamic modulus of elasticity of porous concrete

그러나 실리카퓸 혼입률이 증가함에 따라 내동해성은 향상되는 것으로 나타나 상대동탄성계수가 60%이하로 저하되는 싸이클수가 Plian에 비해 약 5~15회 정도 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입률에 따른 동결융해저항성은 섬유혼입률 0.6vol.%까지는 상대동탄성계수가 60%로 저하되는 사이클수가 증가되어 내동해성이 향상되는 것으로 나타났으나 혼입률 0.9vol.%에서는 동결융해 저항성이 오히려 저하되는 것으로 나타났다. 이는 과도한 섬유의 혼입으로 Fiber-ball이 생성되어 시멘트 페이스트의 부착력이 감소되고 동결시 발생하는 팽창압에 대한 저항성이 저하되었기 때문으로 판단된다.

한편, 포러스콘크리트의 동결융해저항성도 실리카퓸과 강섬유를 동시에 사용한 경우가 가장 우수한 것으로 나타나, 강섬유 0.6vol.%와 실리카퓸 10wt.%를 혼입한 경우 일반 포러스콘크리트에 비해 내동해성이 약 60%정도 향상되는 것으로 나타났으며, 이는 초미분말인 실리카퓸 및 고인성의 강섬유 혼입으로 결합재의 수밀성, 강도 및 에너지 흡수능력이 증진되어 동결융해 작용시 발생되는 팽창압에 대한 저항능력이 개선되었기 때문으로 판단된다.

4.7 소음저감특성

포러스콘크리트는 내부에 형성된 다량의 연속공극 및 넓은 비표면적으로 투기성 및 투수성과 더불어 소음 흡수능력이 우수한 것으로 알려져 있다(박승범, 2000 ; 堂園昭人 外, 1997). 따라서 본 연구에서는 포장용 포러스콘크리트의 흡음성능을 규명하기 위하여 역학적 특성 및 내구성능이 우수한 것으로 나타난 실리카퓸 10wt.%와 강섬유 0.6vol.%를 혼입한 포장용 포러스콘크리트에 대하여 임피던스관법에 의해 흡음계수를 측정하였으며 시험결과는 그림 11과 같다. 포장용 포러스콘크리트의 소음저감 특성을 고찰해 보면 315Hz에서 흡음계수가 0.83으로 나타나 가장 높은 값을 나타냈으며 750Hz에서 0.169의 흡음계수를 나타내 가장 낮은 흡음 특성을 나타냈다. 또

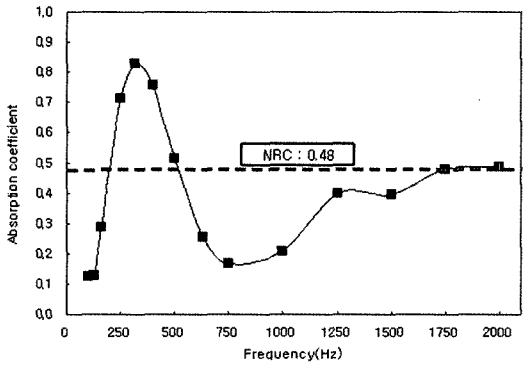


그림 11. Absorption coefficient of porous concrete for pavement

한 현재 흡음소재의 성능지표로 사용되고 있고, 음향재료나 구조물에 입사된 음향 에너지 중에서 흡음된 에너지의 비율을 의미(한국표준과학연구원, 1995)하는 소음저감계수인 NRC는 0.48로 나타났다. 이와 같이 포러스콘크리트가 50%에 가까운 흡음성능을 발휘하는 이유는 소음이 포러스콘크리트에 입사될 경우 내 · 외부의 형성된 넓은 비표면적 및 연속공극에 의해 음에너지가 진동 및 마찰작용으로 열에너지로 전환 · 소비되기 때문이다.

5. 결 론

투수 및 배수성 포장재로서의 적용성 검증과 역학적 성능향상 방안을 도출하기 위하여 실리카퓸 및 강섬유를 사용한 포러스콘크리트의 품질특성을 분석하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포장용 포러스콘크리트의 공극률과 투수계수는 실리카퓸의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라서는 증가하는 경향을 나타냈으나, 모든 배합조건에서 현재 주택공사 도로기준의 기준치 및 일본콘크리트공학협회의 제안값을 만족시키는 것으로 나타났다.
2. 포장용 포러스콘크리트의 압축강도는 모든 배합

조건에서 주택공사에서 제안한 강도기준치를 충족시키는 것으로 나타났으나, 휨강도의 경우에는 강섬유 혼입률 0.6vol.% 이상에서 일본콘크리트공학협회에서 제안하고 있는 4.5MPa을 만족시키는 것으로 나타났다. 특히 실리카퓸 및 강섬유를 각각 혼입한 것보다 동시에 사용한 경우가 더욱 우수한 압축강도 및 휨강도를 나타내어, 실리카퓸 10wt.%와 강섬유 0.6vol.%를 함께 혼입한 경우 20.8% 및 27%의 강도증진을 나타냈다. 또한 포장용 포러스콘크리트의 등가휨강도는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 강섬유를 사용하지 않은 경우에 비해 최대 7.5배 증가되어 에너지 흡수능력이 현저히 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

3. 포장용 포러스콘크리트의 내동해성 및 골재비산저항성은 실리카퓸과 강섬유를 동시에 혼입한 경우가 가장 우수한 내구성능을 나타내었으며; 실리카퓸 10wt.%와 강섬유 0.6vol.%를 함께 사용한 경우 일반 포러스콘크리트에 비해 상대동탄성계수가 60%이하로 저하되는 싸이클수가 30회 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 골재비산저항성은 27%정도의 성능향상을 나타내었다.
4. 포장용 포러스콘크리트의 소음저감 특성은 측정주파수 중 상대적으로 저주파수인 315Hz에서 가장 높은 흡음계수를 나타냈으며, NRC는 0.48로 나타나 본 연구에 의한 포장용 포러스콘크리트가 50%에 가까운 흡음성능이 있음을 확인할 수 있었다.
5. 이상의 실험결과로부터 실리카퓸 및 강섬유를 포장용 포러스콘크리트에 혼입하면 물리·역학적 특성 및 내구성능 개선에 대단히 효과적임을 확인하였으며, 포러스콘크리트에 대한 국내외 기준과 제안값을 만족시키고 물리·역학적 특성 및 내구성을 증진시키기 위한 실리카퓸 및 강섬유의 적정 혼입률은 각각 10wt.% 및 0.6vol.% 정도인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 SISTeC(R11-2002-101-01005-0)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, "건설교통부 도로현황조서 2004"
2. 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.
3. 박승범, 2003, "순환경 사회구축을 위한 환경친화 콘크리트기술의 현황과 전망", 콘크리트학회지, 제15권, 6호, pp.14~16.
4. 하재담 외, 2000, "투수콘크리트 포장의 배합설계 및 시공사례" 한국도로공학회지, 제2권, 2호, pp.65~73.
5. 문한영 외, 1998, "투수성 콘크리트포장의 실용화를 위한 실험적 연구", 콘크리트학회지, 제10권, 3호, pp.165~173.
6. 주택공사표준시방서, 2000, "투수시멘트 콘크리트 포장".
7. 日本コンクリート工學協會, 2003, "ポ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"
8. (社)日本道路協會, 1998, "排水性鋪裝技術指針(案)".
9. 日本道路公團, 2000, "鋪裝施工管理要領".
10. 玉井元治 外, 1983, "透水性コンクリトの性狀", 第15回日本道路會議論文集, pp.289~290.
11. 吉森 外, 1995, "ポーラスコンクリートの强度と耐久性に關する研究", セメント·コンクリ?ト論文集, No.49, pp.650~655.
12. 박승범, 2000, "흡음콘크리트", 콘크리트 학회지, 제12권, 5호, pp.33~37.
13. 堂園昭人, 岡本享久, 藤原浩巳, 上野雅之, 1997, "管內法によるポーラスコンクリートの吸音特性に關する基礎的研究" コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp.679~684.
14. 한국표준과학연구원, 1995, "고효율 방음벽의 설계기술 개발 및 성능평가", pp.22~32

〈접수 : 2005. 4. 6〉