

## 실리카흄을 사용한透水콘크리트의 強度 및 凍結融解抵抗性<sup>†</sup>

† 洪 昌 佑

忠州大學校 建設造形大學 土木工學科

### Increase of strength and freezing-thawing resistance of porous concrete by Silica-fume<sup>†</sup>

† Chang-Woo Hong

Department of Civil Engineering, Chungju National University

#### 요 약

최근에 들어 투수콘크리트의 동결융해에 대한 저항성이 저하되는 것과 줄눈부에서의 골재박리 등의 많은 문제점들이 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 투수콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 방안으로 잔골재와 실리카흄, 고성능감수제를 사용하여 강도 및 내구성 증진 방안을 연구하였다. 주요실험인자로 실리카흄 혼입률 10%와 잔골재 혼입률(0%, 7%, 15%)을 선정하고, 압축강도와 휨강도, 투수계수 및 공극률, 동결융해시험을 수행하였다. 실험결과 강도측면에서는 잔골재 혼입률이 증가함에 따라 압축 및 휨강도는 증가하는 경향을 보였으나, 상대적으로 공극률 감소로 인한 투수성은 저하되고, 동결융해 저항성도 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 투수콘크리트에 있어서 강도증진을 위해 사용되는 잔골재는 혼입률 제한이 필요하며, 실리카흄 10% 이상을 사용하는 것이 강도 및 내구성 측면에서 효율적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 공극률, 동결융해저항성, 투수계수, 실리카흄

#### Abstract

Existing porous concrete has problems with reduction of strength due to freezing and thawing and exfoliation of aggregate at joints. In this study, a method for increasing strength and durability of porous concrete by using fine aggregate, silica-fume and high-range water-reducing agent was proposed by laboratory tests. Mixing ratio between silica-fume (10%) and fine aggregate (0%, 7%, 15%) was selected as a major test factor, and laboratory tests for compressive strength, flexural strength, permeability coefficient, porosity, freezing and thawing were conducted. Compressive strength and flexural strength were increased as the mixing ratio of fine aggregate was increased. However, permeability and freezing-thawing resistance were decreased due to reduction of porosity. Therefore, the ratio of fine aggregate should be limited to increase strength and durability of the porous concrete, while the mixing ratio of silica-fume should be over 10%.

**Key words :** Porosity, Freezing-thawing resistance, Permeability coefficient, Silica-fume

#### 1. 서 론

환경저감 콘크리트는 선진국에서는 약 20년 전부터 연구되고 있으며, 최근에는 국내에서도 환경 문제와 경

관향상을 고려해 활발한 연구를 진행하고 있다.<sup>1, 3)</sup> 하지만 지금까지는 실용적인 측면이 부각되어져 환경 친화적인 시각에서의 콘크리트에 대한 인식부족으로 친환경 콘크리트에 대한 연구는 많은 부분 부족할 실정이다.

도로포장은 투수성이 낮은 아스팔트나 콘크리트가 대부분이며, 이와같은 투수, 투기성이 적은 콘크리트나 아스팔트가 도로 포장에 사용됨으로서 지하수 고갈과 지

<sup>†</sup> 2010년 4월 23일 접수, 2010년 7월 5일 1차수정

2010년 8월 2일 수리

\* E-mail: cwhong@cjnu.ac.kr

반의 미생물이나 수목의 발육을 저하 시키는 등 도심환경 및 자연환경의 여러 가지 문제점이 대두되고 있다.<sup>2-3)</sup> 이와같은 문제점을 개선한 콘크리트가 투수 콘크리트로서, 내부에 다량의 연속 또는 독립되어 있는 9~35%의 공극을 인위적으로 형성시키기 위해 잔골재를 거의 사용하지 않고 굵은 골재에 시멘트 페이스트 또는 모르타르를 제조하여 부착시킨 콘크리트, No-Fines Concrete 라고도 한다.<sup>4-7)</sup> 그러나 이와같은 투수콘크리트는 우수를 콘크리트 포장체에 통과시켜 노상으로 전달되어 식물 및 지반의 수분 전달 등의 많은 환경적 장점이 있는 반면에 일반적으로 강도가 낮고 내구성에 문제가 있는 경우가 있다고 지적되고 있다.<sup>8)</sup> 이를 해결하기 위해 콘크리트의 다짐방법 개선과 혼화제 사용, 공극률 조절 등의 연구가 진행되고 있다.<sup>1-9)</sup>

국내의 투수콘크리트 기술은 독일에서 도입하여 보도 등에 시공되고 있으나, 현재 시공되고 있는 투수콘크리트는 골재바라기, 줄눈부의 파괴, 동결융해에 의한 콘크리트의 내구성 저하 등의 많은 문제점들이 노출되고 있다. 일부에서는 강도를 높이기 위해 잔골재를 혼입하여 공극률 감소를 통한 강도를 높이는 방안이 사용되어지고 있으나 시공후 기존의 투수콘크리트에서 발생하는 문제는 그대로 노출되고 있어 강도 및 내구성이 우수한 투수콘크리트에 대한 필요성이 높아지고 있다. 더욱이 최근에 들어 4대강 살리기 사업 및 전국 자전거 도로 네트워크 구축사업에 투수콘크리트가 많이 설계 및 시공되고 있어 투수콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있으며, 내구성 저하 원인 및 향상방안에 대한 관심이 고조되고 있다. 따라서 본 연구에서는 투수콘크리트의 단점을 보완하고, 적용범위를 확대하기 위해 내구성 저하 원인을 분석하고, 성능향상의 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 재료는 시멘트는 국내 S사의 1종 시멘트로 비중 3.15 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3293 cm<sup>2</sup>/g, 굵은골재는 충북 충주시 소재의 최대치수 13 mm쇄석으로 비중 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.8%, 조립률 6.21이며, 잔골재는 비중 2.56 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.9% 및 조립률 2.80의 낙동강 강사를 사용하였다. 실리카흙은 비중 2.2 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 200,000 cm<sup>2</sup>/g, 강열감량 3.45%의 국내 A사 제품을 사용하였고, 감수제는 국내 B사의 폴리카르복산계 표준형 고성능 감수제를 사용하였다.

### 2.2. 배합설계, 공시체 제작 및 양생

포장용 투수콘크리트의 배합요인에 따른 역학적 특성을 분석하기 위해서 주요 실험인자는 단위시멘트량 350 kg/m<sup>2</sup>에 실리카흙 혼입률(0%, 10%), 잔골재 혼입률(0%, 7%, 15%)를 선정하였으며, 물-결합재비(W/B)는 25%, 소정의 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 1.5~1.7% 사용하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 투수콘크리트의 제작은 용량 100 l의 강제식 혼합믹서를 사용하여 골재, 시멘트 및 실리카흙을 투입하여 1분간 건비빔을 실시한후, 물과 고성능감수제를 첨가하여 2분간 믹싱을 수행하였다. 그리고 공시체 제작은 몰드에 1/3씩 채운후 각각 25회씩 붓다짐을 하였으며, 공시체 제작 24시간동안 212, 상대습도 60%에서 기건양생후 탈형하여 표준중양생(21±1°C)을 실시하였다.

### 2.3. 실험항목

#### 2.3.1. 압축강도 및 휨강도

콘크리트 압축강도는 Ø100×200 mm 원주 공시체를

Table 1. Mixing design according to test factor

Type	W/B (%)	SF <sup>1)</sup> (%)	S <sup>2)</sup> (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )					SP <sup>4)</sup> (%)
				W	B		S	G <sup>3)</sup>	
					C	SF			
SF0S0	25	0	0	87.5	350	0	0	1634	1.5
SF0S7	25	0	7	87.5	350	0	111	1520	1.6
SF0S15	25	0	15	87.5	350	0	237	1389	1.7
SF10S0	25	10	0	87.5	315	35	0	1622	1.5
SF10S7	25	10	7	87.5	315	35	109	1508	1.6

1) SF : Slica Fume, 2) S : Sand, 3) G : Crushed aggregate, 4) SP : Superplasticizer

제작하여 1일후 탈형하고 21±1°C 온도하의 수중에서 표준양생을 실시한 후 재령 7, 28일에 KS F 2405에 준하여 실시하였다. 그리고 휨강도는 100×100×460 mm의 빔 공시체를 제작하여 KS F 2408에 준하여 재령 7, 28일에 실시하였다.

2.3.2. 동결융해시험

동결융해 저항성 시험은 KS F 2456의 B방법인 공극중 급속 수중 융해의 방법으로 실시하였다. 투수콘크리트의 경우 시편 양 단부가 공극이 존재하는 관계로 시멘트 페이스트로 마감하여 동탄성계수 측정이 용이하도록 별도 제작하여 시험을 수행하였다. 이때 공시체 중심에서의 온도를 동결시 -18°C, 융해시 4°C로 상승시키는 것을 1사이클 3시간으로 하여 반복 수행하였다. 해당 사이클에서 상대동탄성계수를 측정하여 식(1)와 같은 방법으로 내구성지수를 평가하였다.

$$\text{Durability Factor(D.F)} = \text{PN} / \text{M} \tag{1}$$

여기서 P : N cycle에서 상대동탄성계수,  
 N : 상대동탄성계수 측정시 cycle,  
 M : 동결융해 노출이 끝날 때의 cycle

2.3.3. 공극률

공극률 시험은 일본콘크리트공학협회의 에코콘크리트연구위원회의포러스콘크리트의 공극률시험방법(안)중에서 용적법에 준하여 식(2)와 같은 방법으로 공극률을 계산하였다.

$$A(\%) = 1 - \left( \frac{W_2 - W_1}{V_1} \right) \times 100 \tag{2}$$

여기서 A : 콘크리트의 전공극률 및 연속공극률  
 W<sub>1</sub> : 공시체의 수중중량  
 W<sub>2</sub> : 24시간 자연방치 후의 기중중량  
 V<sub>1</sub> : 공시체의 용적

2.3.4. 투수계수

투수계수 시험은 일본콘크리트공학협회포러스콘크리트의 투수계수 시험방법(안)에 준하여 Fig. 1과 같은 장치를 사용하여 Darcy의 법칙에 근거하여 다음의 식(3)에 의해 산출하였다.

$$K = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A(T_2 - T_1)} \tag{3}$$

여기서, K : 투수계수(cm/sec)  
 L : 공시체의 높이(cm)  
 A : 공시체의 단면적(cm<sup>2</sup>)  
 T<sub>1</sub> : 측정개시시간(sec)  
 T<sub>2</sub> : 측정완료시간(sec)  
 Q : 에서 까지 흐른 유량(cm<sup>3</sup>)

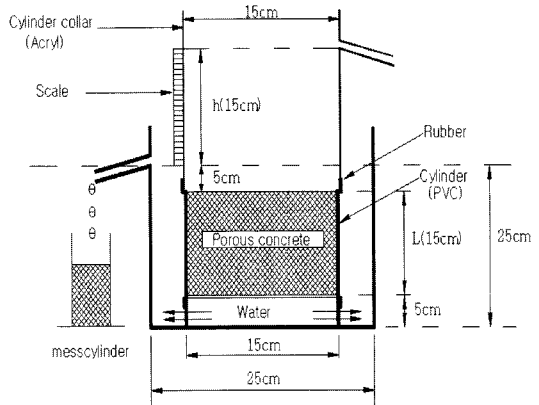


Fig. 1. Test device diagram for permeability coefficient.

3. 실험결과

3.1. 압축강도 및 휨강도

잔골재 혼입과 실리카흙 혼입에 따른 압축강도는 Table 2와 같다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 잔골재 혼입률 0%에서 7%, 15%로 증가함에 따라 28일 압축강도가 21.14 MPa에서 27.97 MPa, 38.26 MPa로 약 24%, 45% 증가하였으며, 실리카흙을 10% 혼입함으로써 압축강도는 23.91 MPa, 31.15 MPa로 약 10%정도 증가하는 것으로 나타났다.

30MPa 이상의 압축강도를 발현하는 것은 잔골재를 15% 혼입한 경우와 실리카흙 10%와 잔골재 7%를 혼입한 경우로 나타났다. 압축강도 측면에서는 잔골재를 혼입하는 경우가 가장 우수한 강도를 보였으며, 이는 공극률 감소로 인한 결과로 판단할 수 있다. Fig. 3은 재령별 휨강도를 나타낸 것으로서 휨강도는 압축강도와 유사한 경향을 보이고 있으며, SF0S0의 경우만 제외하고는 모두 도로포장의 설계기준 4.5 MPa 이상을 보이는 것으로 나타났다.

3.2. 공극률 및 투수계수

투수계수와 공극률의 실험결과는 Table 1과 같으며,

Table 2. Result of strength, permeability coefficient, porosity tests

Type	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)		Compressive strength after freeze-thaw test (MPa)		Porosity (%)	Permeability coefficient (cm/sec)
	7day	28day (a)	7day	28day	112cycle (b)	b/a		
SF0S0	14.96	21.14	3.27	4.21	17.20	0.814	25.17	1.223
SF0S7	21.72	27.97	4.28	4.91	22.14	0.792	20.37	0.853
SF0S15	27.37	38.26	4.70	5.79	26.89	0.703	13.86	0.478
SF10S0	15.97	23.91	3.45	4.86	20.82	0.950	23.10	1.055
SF10S7	23.22	31.15	5.10	5.93	29.19	0.937	17.39	0.648

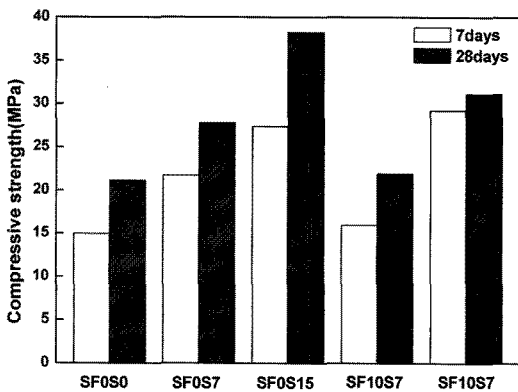


Fig. 2. Compressive strength according to age of concrete.

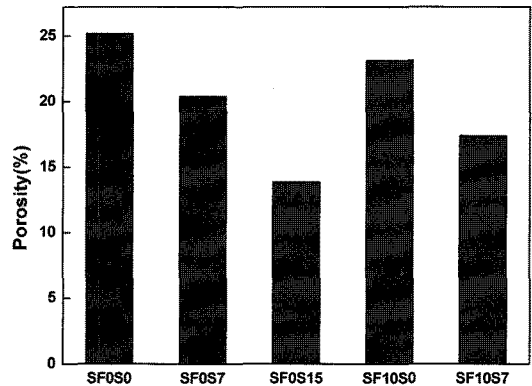


Fig. 4. Porosity according to test factor.

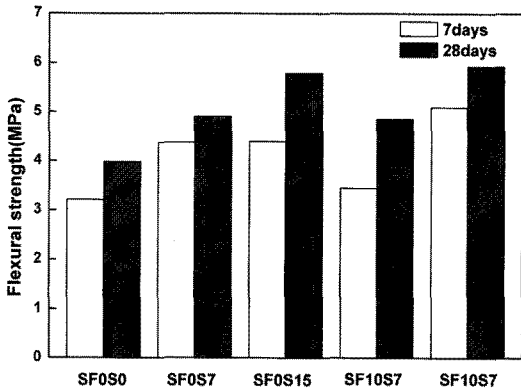


Fig. 3. Flexural strength according to age of concrete.

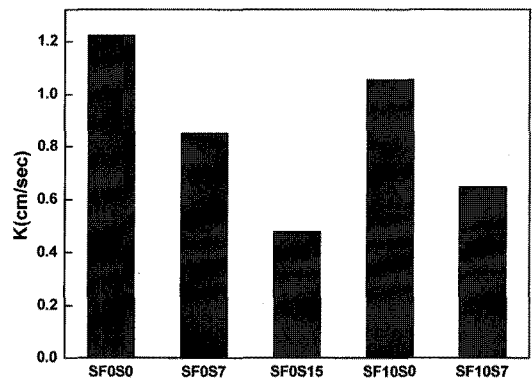


Fig. 5. Permeability coefficient according to test factor.

Fig. 4-5에 나타내었다. 잔골재 혼입률이 0%에서 7%, 15%로 증가함에 따라 공극률은 25.17%에서 20.37%, 13.86%로 20%, 45%씩 감소하는 것으로 나타났다. 또한 실리카흙을 10%혼입한 경우 실리카흙을 혼입하지 않은 경우에 비해 공극률은 약 8%정도 감소하는 것으로

나타났다. 그리고 실리카흙 10%, 잔골재 7%를 혼입한 경우는 20.37%에서 17.39%로 약 15% 공극률이 감소하여 실리카흙과 잔골재를 혼입함으로써 공극률은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 투수계수는 잔골재 혼입률이 증가함에 따라 1.223에서 0.478 cm/sec로

약 60%감소하여, 공극률이 45% 감소한 것에 비해 투수계수는 더 저하되는 경향을 보였다. 그리고 실리카흙을 혼입함으로 인해 투수계수는 1.223에서 1.055 cm/sec로 14% 감소, 0.853에서 0.648 cm/sec로 24% 감소하는 것으로 나타났다. 이결과도 역시 공극률 8%, 15% 감소에 비해 투수계수는 더 감소되는 것으로 나타났다. 이와같은 경향은 실리카흙을 혼입함으로 인해 시멘트 페이스트의 점성 증가로 인해 공극률과 투수계수에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 실리카흙과 잔골재 모두 공극률과 투수계수에 영향을 미치는 인자임을 확인할 수 있었으며, 강도증진을 위해 잔골재를 7% 혼입한 경우 공극률 15% 이상을 확보하였으며, 0.6 cm/sec 이상의 투수계수를 확보하는 것으로 나타났다.

3.3. 동결융해저항성

공극률이 높은 콘크리트의 경우 공극 내의 얼음의 팽창압력을 직접 받게 되므로 동결융해저항성이 가장 큰 문제가 되므로 동결융해에 따른 영향을 분석하였다. Fig. 6은 동결융해 사이클에 따른 동탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 잔골재를 15% 혼입한 경우는 동결융해 200사이클이 지나면서 동탄성계수가 60%이하로 떨어져 실험을 종료하였으며, 잔골재 7%를 사용한 경우는 300 사이클 동안 70%이상 유지되는 것으로 나타나, 잔골재를 혼입함으로 인해 상대동탄성계수는 다른 실험인자에 비해 취약한 것으로 나타났다. 반면에 잔골재를 7%혼입하고 실리카흙을 동시에 사용한 경우에는 상대동탄성계수가 80%이상 유지하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 내구성지수를 나타낸 것으로서 잔골재를 사용한 경우에는 내구성지수가 60%이하로 나타나며, 실리카흙을 사용한 경우에는 약 80%이상을 보였다. 이와같은 결과로부터 잔골재를 사용할 경우에는 동결융해저항성이 잔골재를 사용하지 않은 경우에 비해 저하되는 것을 알 수 있었으며, 실리카흙을 사용하였을 경우에는 잔골재를 혼입하더라도 상대적으로 동결융해에 따른 저항성은 향상되는 것으로 나타났다.

투수콘크리트의 동결융해후 압축강도 변화는 Fig. 8과 같으며 14일 양생후 공기중 급속 수중 용해의 방법으로 112사이클(14일)동안 동결융해 실험을 수행한 후 압축강도 시험을 수행하여 표준양생 조건과 비교하여 압축강도 변화도를 분석하였다. 표준양생시 잔골재 혼입률 0%에서 7%, 15%로 증가함에 따라 28일 압축강도가 21.14 MPa에서 27.97 MPa, 38.26 MPa인 반면에 동결융해후 압축강도는 17.20 MPa, 22.14 MPa, 26.89 MPa

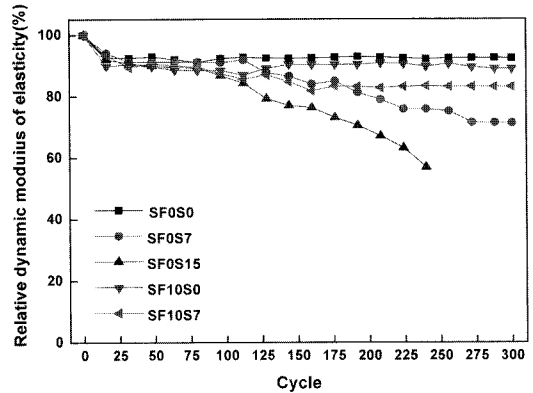


Fig. 6. Relative dynamic modulus of elasticity.

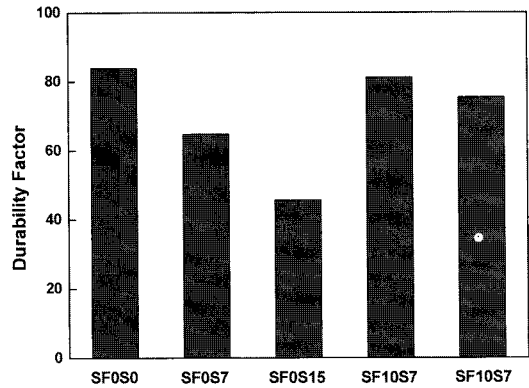


Fig. 7. Durability factor according to test factor.

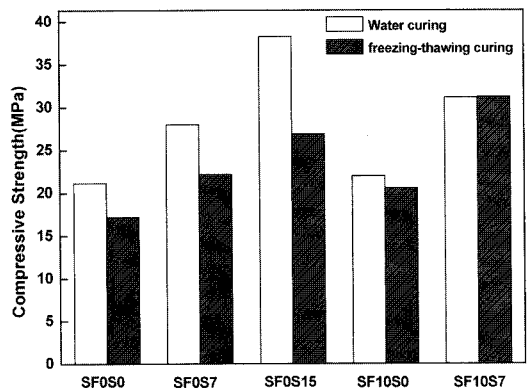


Fig. 8. Compressive strength after 112 cycle of freezing-thawing.

로 약 19%, 21%, 30% 감소하였다. 반면에 실리카흙을 10% 혼입한 경우에는 21.91 MPa, 31.15 MPa에서

20.82 MPa, 29.19 MPa로 5%, 7%정도 감소하여, 실리카흙을 사용한 경우에는 동결융해에 따른 저항성이 높은 것으로 나타났다. 이와같은 결과로부터 잔골재를 혼입함으로 인해 표준양생 조건에서는 강도 향상을 위해서 효율적인 방법이나, 동결융해에 따른 내구성 측면에서는 강도저하 현상이 뚜렷한 것을 알 수 있어, 잔골재 혼입률 제한이 필요한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

실리카흙과 잔골재를 사용한 투수콘크리트의 강도 및 동결융해저항성을 평가한 결과 다음과 같다.

1) 잔골재 혼입률을 굵은골재대비 7%, 15% 혼입함으로 인해 압축강도는 잔골재를 혼입하지 않은 경우에 비해 24%, 45% 증가하였으며, 실리카흙을 시멘트 대비 10% 혼입함으로 인해 압축강도는 10%정도 증가하였다. 그리고 잔골재 혼입률 15%인 경우와 실리카흙 10%와 잔골재를 7% 혼입한 경우에서는 30MPa이상의 고강도를 발현하는 것으로 나타났다. 또한 휨강도의 경우도 압축강도와 유사한 경향을 보이며, SF0S0의 경우를 제외하고는 모두 도로포장 설계기준 4.5MPa 이상을 보이는 것으로 나타났다.

2) 투수콘크리트에서 잔골재 혼입률이 증가함에 따라 공극률은 20%, 45% 감소하며, 투수계수는 30%, 60% 감소되는 것으로 나타났다. 그리고 잔골재를 굵은골재 대비 15%이상 혼입시 공극률 15%이상의 조건을 만족시키지 못하는 것으로 나타났으며, 모든조건에서 투수계수는  $5 \times 10^{-1}$  cm/sec 이상을 만족시키는 것으로 나타났다.

3) 공극률이 높은 콘크리트의 경우 동결융해저항성이 가장 중요한 내구성 인자로서 잔골재를 혼입함으로 인해 상대동탄성계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 잔골재를 7%, 15% 혼입한 경우 내구성지수가 63, 45로 내동해에 취약한 것으로 나타났으며, 실리카흙을 혼입한 경우에는 80 이상을 보여 동결융해에 대한 내구성이 높은 것을 확인하였다. 그리고 동결융해 112사이클 후 압축강도는 잔골재를 혼입함으로 인해 30%까지 감소한 반면에 실리카흙을 혼입한 경우는 압축강도가 7% 정도 감소하여 내구성지수 뿐만아니라 압축강도 측면에서도 실리카흙을 10% 사용한 것이 우수한 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 투수콘크리트에 있어서

강도증진을 위해 사용되는 잔골재는 혼입률 제한이 필요하며, 실리카흙 10%이상을 사용하는 것이 강도 및 내구성 측면에서 효율적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 이승환, 김은점, 2000: *친환경 콘크리트의 현황*, 한국 콘크리트학회지, 제 12권 5호, pp. 17-20.
2. 문한영, 김성수, 정호섭, 1998: *투수성 콘크리트 포장의 실용화를 위한 실험적연구*, 콘크리트학회지, 제10권 3호, pp. 165-173.
3. 이영렬, 1999: *단입도(6~10 쇄석골재) 투수콘크리트 비차도용 포장 시공법*, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, pp. 829-836.
4. Mark, G. A., 1993: *Dissolution of No-Fines Concrete Slab Due to Soft-Water Attack*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 427-435.
5. Nader, G and Shivaji, D., 1995: *Pavement Thickness Design for No-Fines Concrete Parking Lots*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, No. 6, pp. 476-484.
6. Nader G and Shivaji D., 1995: *Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 183-191.
7. Nader G and Shivaji D., 1995: *Development of No-Fines Concrete Pavement Applications*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, No. 3, pp. 283-288.
8. 성찬용, 1996: *투수용 폴리머 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구*, 한국농공학회지, 제38권 5호, pp. 95-105.
9. 하재담, 1997: *투수성콘크리트포장의 현장적용에 관한 연구*, 한국콘크리트학회 봄학술 발표회 논문집, pp. 613-619.

#### 洪 昌 佑

- 현재 충주대학교 토목공학과 교수
- 당 학회지 제15권 2호 참조