Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 27, No. 4, pp. 435~441, August, 2015
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.4.435

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

콜드조인트를 가진 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 투수성 평가

최세진 [1] · 김성준 [2] · 문진만 [3] · 권성준 [3]*

[1] 원광대학교 건축공학과 [2] 한국건설기술연구원 [3] 한남대학교 건설시스템 공학과

Permeability Evaluation of OPC and GGBFS Concrete with Cold Joint

Se-Jin, Choi,[1] Seong-Jun, Kim,[2] Jin-Man, Moon,[3] and Seung-Jun, Kwon[3]*

[1]Architecture Engineering, Wonkwang University, 460 Iksan daero, Iksan, 570-749, Korea
[2]Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 411-712, Korea
[3]Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Concrete, as a porous media, has permeability and it is considered as a major parameter for durability evaluation. Cold joint caused by delayed placing of concrete accelerates water permeation and intrusion of harmful ions. In the paper, concrete specimens containing GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) and OPC (Ordinary Portland Cement) are prepared with cold joint section, and water permeability and water flow at the age of 91 days are measured for 2 weeks. Sound concrete with GGBFS shows decreased permeability to 89% for sound concrete with OPC and 0.86 of decreasing ratio is evaluated in GGBFS concrete with cold joint. Through WPT (Water Penetration Test), the effects of mineral admixture and cold joint on water permeability are evaluated, and variation in water behavior via cold joint is analyzed through probabilistic method as well.

Keywords : permeability, cold joint, GGBFS, porous media, durability

1. 서 론

콘크리트는 경제성, 내구성, 재료 수급성 등 많은 장점이 있는 공학적 건설재료이다. 그러나 대단위 시공환경에서는 이어치기 시간이 조절되지 못하면 콜드조인트(Cold Joint)가 발생하게 된다. 콜드조인트란 이어치기 지연으로 인해 피할수 없이 발생하는 시공이음을 나타내며, 압축저항력에는 큰 영향이 없으나 전단력에 취약하고 이 면에 대해 국부적인 열화가 증가하는 것으로 알려져 있다.[1-3] 이미 일본에서는 1990년대 후반 터널구조물의 콜드조인트 콘크리트의 박락이 철로위에 발생하여 사회적으로 큰 문제가 되었다.[1,2] 콜드조인트는 면처리를 하지 않을 경우 타설부에 국부적으로 열화속도가 증가하게 된다. 콜드조인트를 가진 콘크리트는 탄산화 증가, 투수 증가 등 내구적인 문제가 발생하게 되는데,[4-6] 현재 국내외 시방서에서는 이러한 열화 가중치를 고려하고 있지 않다. 불연속면인 콜드조인트의 경우, 누수 되는 물의 상당부분이 조인트 면을 통하여 이루어지므로 부착성능과 구조형식에 따라 달라지는 누수량을 평가하기에는 어려움이 있다고 알려져 있다.[7]

콘크리트의 투수성능은 공극률과 공극구조에 기인하고 있으며, 하중상태에 따라서도 변화하게 된다. 최근 들어 대표 체적(REV: Representative Element Volume)을 고려하여 콘크리트 취약부의 투수성에 대한 연구가 진행되고 있으나,[8,9] 콜드조인트 콘크리트에서의 투수성은 대부분 실태조사 결과에 의존하고 있는 실정이다.[1-3]

건전부 콘크리트에 대해서는 콘크리트 구체를 공극을 가진 연속체로 가정하여 투수특성에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구에서는 주로 배합특성 등을 기초로 투수특성이 모델링 되었으나 최근 들어서는 공극구조 및 공극연결도를 고려하여 수분이동 및 투수특성이 고려되고 있다.[10-13] 콘크리트의 투수성은 배합특성, 국소적인 취약부(균열) 뿐 아니라 수압에도 영향을 받게 된다.[7] 또한 같은 재료라 하더라도 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 투수계수는 시간적인 감소를 가지게 되는데, 이는 공극률의 감소 및 수화물의 팽창과 밀접한 관련이 있다.[14]

혼화재료의 사용은 콘크리트에 자원의 재활용 뿐 아니라 잠재수경성 및 포졸란 반응을 통하여 많은 공학적인 장점을 유도한다. 특히 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)은 잠재수경성 반응을 통하

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hannam.ac.kr
Received April 1, 2015, Revised May 14, 2015,
Accepted May 26, 2015
ⓒ2015 by Korea Concrete Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

여 공극이 조밀해지고 수밀성이 향상되는 등 내구성에 뛰어난 효과를 보이고 있다.[15,16] 혼화재를 사용한 콘크리트의 수밀성 개선 및 내구성 확보에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나, 콜드조인트를 가진 혼화재 사용 콘크리트의 수밀성에 대해서는 뚜렷한 연구가 없는 실정이다. 본 연구에서는 보통 포틀랜트 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)와 GGBFS를 혼입한 콘크리트에 대하여 저압투수법을 수행하였다. 실험을 위해 물-결합재비 0.6을 갖는 건전부 및 콜드조인트 시편이 제작되었으며, 40%의 치환률을 가진 GGBFS 콘크리트가 준비되었다. 초기재령에서는 시험기간 동안 투수계수가 크게 감소하므로,[14] 이에 대한 영향을 최소화하기 위해, 91일의 양생기간을 선택하였다. 본 연구에서는 콜드조인트 및 혼화재가 투수성에 미치는 영향이 분석될 것이며, 이에 따른 투수거동의 변화가 고찰될 것이다. 콜드조인트 유무와 혼화재료 특성을 고려하였으나, 다양한 물-결합재비 및 치환률의 특성은 본 연구 이후 좀 더 다양한 시편을 대상으로 평가하도록 한다.

2. 콘크리트 투수성 실험계획

2.1 사용재료 및 배합

실험을 위하여 국내 A사의 보통포틀랜트 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)를 사용하였으며, 국내 S사의 GGBFS를 혼화재료로 사용하였다. OPC와 GGBFS의 화학조성은 Table 1에 나타내었으며, 두 배합간의 투수특성의 차이를 알기위해 40%의 치환률을 고려하였다. Table 2에 본 연구에 사용된 배합표를, Table 3에 실험 및 양생조건을 나타내었다.

2.2 콜드조인트를 가진 콘크리트 시편의 제조

콘크리트의 원통형 시편을 이용하여 건전부 및 콜드조인트를 가진 시편을 제작하였다. 건전부 시편의 투수량 측정을 위해 지름 100×200 mm의 시편이 사용되었으며, 타설 후 1일간 기건 양생을 수행하였다. 이후 탈형하여 90일 동안 수중양생 하였으며 양생과정을 거친 후 절단기를 이용하여 높이가 50 mm인 건전부 원통형 시편을 준비하였다.

콜드조인트 콘크리트 시편 제작을 위하여 동일한 크기의 시편에 절반을 타설한 이후 1일간의 기건 양생을 거친 후, 나머지 절반을 타설하여 88일간의 수중양생을 하였다. 양생과정을 거친 후 시편을 절단하여 높이가 50 mm인 콜드조인트 디스크 시편을 준비하였다. Table 4는 시편제작에 따른 양생기간 및 조건을 나타내었으며, Fig. 1은 콘크리트 투수시험을 위한 건전부 및 콜드조인트 콘크리트의 시편 형상을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of OPC and GGBFS

	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss	Specific gravity	Blaine (cm^2/g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340

Table 2 Mix proportions for this study

Case	G_{max} (mm)	Slump (mm)	S/a (%)	W/B	Unit weight: kg/m^3				
					W	Binder		S	G
						C	GGBFS		
OPC	25	180	41.4	0.6	180	300	-	735	1040
GGBFS						180	120		1020

W/B: Water to binder ratio, C: Cement, S: Sand, G: Coarse Aggregate
GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag

Table 3 Experimental conditions for this study

Factors		Levels
W/B		60 (wt.%)
Replacement ratio of GGBFS		40 (wt.%)
Curing condition (91 days)		Sound: Air dry curing(1 days), Water curing(90 days), Curing temperature(25±3℃) Cold Joint: Air dry curing(3 days), Water curing(88 days), Curing temperature(25±3℃)
Test	Fresh concrete	Slump test(180mm), Air content(4.5%)
	Hardened concrete	Compressive strength, Tensile strength

Table 4 Curing timing of specimens

Case			Dry curing	Water curing
Control	Concrete specimen without GGBFS	Sound OPC	1 day	90 days
		Cold Joint OPC-CJ	3 days	88 days
	Concrete specimen with GGBFS	Sound GGBFS	1 day	90 days
		Cold Joint GGBFS-CJ	3 days	88 days

GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag
CJ: Cold Joint

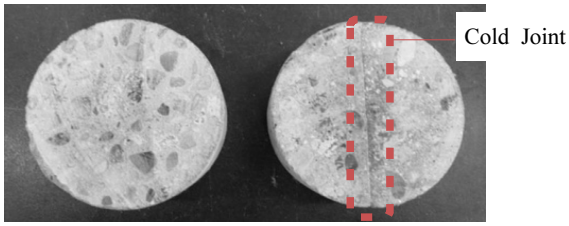

Fig. 1 Specimens for permeability evaluation

일반적으로 콘크리트 구조물 시공의 경우 고압수 살포, 샌드 블러스팅, 시멘트 풀칠 등의 면처리를 수행하지만 본 연구에서는 특별한 면처리를 수행하지 않았으며 이에 대한 투수성을 평가하였다.

2.3 저압 투수법

본 연구에서는 콜드조인트의 영향을 고려하기 위해서 기존의 연구에서 제안된 저압 투수시험을 실시하였다.[15] 이 실험방법은 많은 연구에서 이미 적용되었는데, 수압조절은 할 수 없으나 정상상태를 기본으로 한 정수두 실험에 효과적인 방법이다.[8,9,18] Fig. 2에서는 저압투수법의 실험 개요도를, Fig. 3에서는 실험사진을 나타내고 있다.

상부 공간을 물로 채운 후 측면을 에폭시로 완전 밀봉하여 상부 공간과 시편사이를 완벽하게 메움처리를 하였다. 상부 공간의 수두(H)를 1,800 mm로 조절하고 12시간 간격으로 수두 변화를 측정하였다. 또한 같은 환경에서 여분의 시편을 증발량을 고려하였다.

식 (1)에서는 Darcy's Law에 따른 정상상태의 유량률을 나타내고 있다.

$$\frac{Q_f}{dt} = -\frac{A' dH}{dt} = K_p \frac{HA}{L} \tag{1}$$

$$-\frac{dH}{H} = K_p \frac{A}{A' L} dt$$

식 (1)에서 Q_f는 침투된 총 유량(m^3)이며, dQ_f/dt는 단위면적에서의 흐름비(m^3/s), A는 콘크리트 시편의 단면적(m^2), A'은 파이프의 단면적(m^2), L은 시편의 두께(m), K_p는 콘크리트의 투수계수(m/s)이고, H는 수두(m)이다.

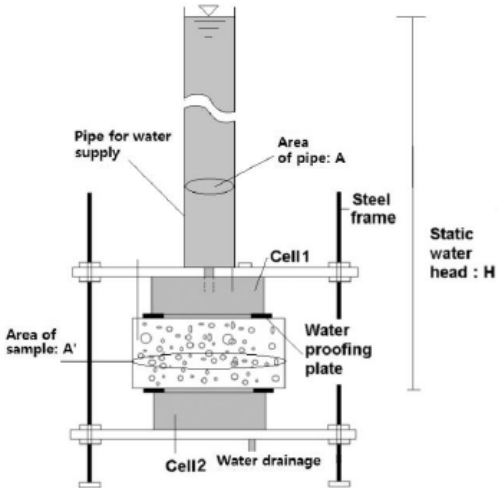

Fig. 2 Schematic diagram for water penetration test

Fig. 3 Photo for water penetration test

초기 수두 H_0에서 측정수두 H_1까지를 적분하면 식 (2)와 같고, 식 (2)를 정리하면 식 (3)과 같이 정상상태에서의 투수계수 K_p를 실험적으로 도출할 수 있다.

$$-\int_{H_0}^{H_1} \frac{dH}{H} = \int_0^t K_p \frac{A}{A' L} dt \tag{2}$$

$$K_p = \frac{A' L}{At} ln \frac{H_0}{H_1} \tag{3}$$

수두가 일정 수준이하로 떨어질 경우 계속 물을 투입해 정수압 상태를 유지하여야 하며, 증발에 의해 감소되는 수두높이를 감안해 수두차를 측정해야 한다. 또한 콜드조인트를 고려한 투수량을 측정할 때는 수두의 하강이 증가할 수 있으므로 측정에 유의해야 한다. 일반적으로 실험초기에는 유량의 흐름이 비정상상태이지만 시간 경과 후에 정상상태로 변하여 일정한 기울기를 나타낸다.[8,18]

3. 콜드조인트 콘크리트 강도특성 평가

콜드조인트 및 GGBFS의 강도에 대한 영향을 고려하기 위해 압축 및 쪼갬인장강도 시험을 수행하였다. KS 기준에 따라 150×300 실린터 시편을 사용하여야 하지만 본 시편과의 크기와 형상이 다르므로 본 절에서는 직접 투수계수측정 시편의 강도를 평가하였다. 압축강도 시편은 75×75×50 mm 육면체 시편을 준비하여 압축강도 시험을 수행하였으며, 인장강도 시편은 100×50 mm 원통형 시편을 준비하여 쪼갬인장강도 시험을 수행하였다. 투수실험과 마찬가지로 재령 91일 대상으로 실험을 수행하였다. Fig. 4는 재령 91일 콘크리트의 압축강도 시험과 쪼갬인장강도 시험의 사진을 나타내었으며, Table 5에서는 재령 91일 콘크리트의 배합별 강도시험결과를 정리하였다.

재령 28일 압축강도는 OPC 콘크리트에서 20.8 MPa을 GGBFS 콘크리트에서 21.5 MPa을 나타내었는데, 장기강도 발현이 충분하지 않은 것으로 판단된다.

Table 5에서 알 수 있듯이 GGBFS를 치환한 배합에서 강도가 OPC 배합보다 약간 증가하였으나, 큰 수준은 아니었다. 또한 콜드조인트 콘크리트에서 쪼갬 인장강도는 박리현상으로 인해 0.8~1.0MPa 수준의 낮은 강도가 측정되었다. 실제 구조물은 모사하기에는 너무 시편의 부착면이 작고 면처리가 되어 있지 않으므로 30° 기울여 상대적인 강도를 비교하였다. 인장강도는 OPC 콘크리트에서는 압축강도 대비 50.0% 수준으로, GGBFS 콘크리트에서는 38.4% 수준으로 평가되었다.

Fig. 4 Compressive and tensile strength test (91 days)

Table 5 Results of compressive and tensile strength test (91 days)

Case		Strength (MPa)
Compressive strength	O-C	23.0
	S-C	24.6
	OJ-C	23.2
	SJ-C	24.6
Tensile strength	O-T	2.9
	S-T	3.5
	OJ-T	1.4
	SJ-T	1.3

O: OPC, S: GGBFS, J: Joint C: Compressive stress, T: Tensile stress

4. 콘크리트 투수성 평가

4.1 콘크리트 투수성 평가 개요

본 장에서는 저압투수시험을 통하여 OPC 콘크리트 및 GGBFS 콘크리트의 투수거동을 평가하였다. 91일 양생된 콘크리트를 2주간의 저압투수시험을 통하여 건전부 및 콜드조인트 콘크리트의 유출량을 측정하였으며, 그에 따른 누적유출량과 평균 투수계수를 도출하였다.

4.2 건전부 콘크리트 투수성 평가

2주 동안 하루 2회에 걸쳐 유출량을 시간에 따라 평가하였고 배합에 따라 존치시간에 따른 투수계수를 평균하여 비교하였다. Fig. 5는 건전부 콘크리트의 시간에 따른 누적유출량을 나타내었다. OPC 배합과 GGBFS를 치환한 배합의 누적 투수량을 분석하면 OPC 배합이 GGBFS를 치환한 배합보다 높게 평가되었다. 이는 장기재령에서 GGBFS 콘크리트의 특성인 잠재수경성에 의한 공극률 감소와 이에 따른 수밀성개선이 주된 원인이다.

Fig. 6에서는 식 (3)을 통하여 12시간 간격의 투수계수를 평가하였는데, 정상상태라 하더라도 국소적인 온도,

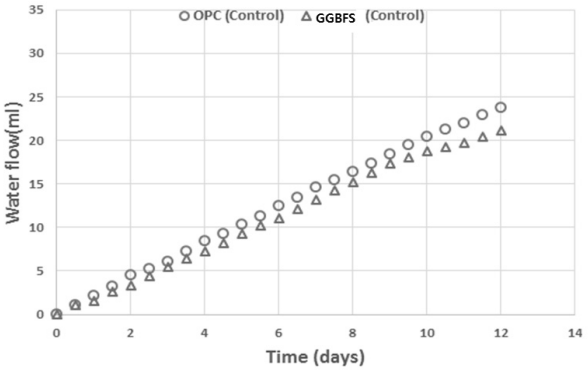

Fig. 5 Cumulative Water Flow of sound concrete

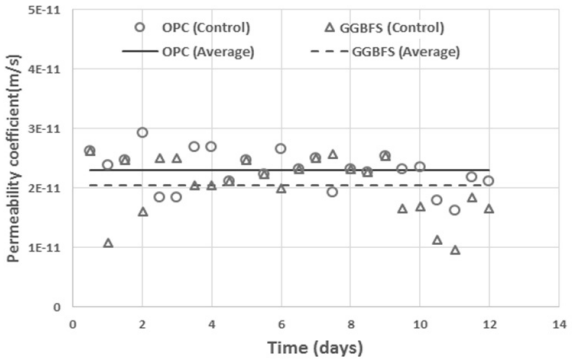

Fig. 6 Permeability coefficients of sound concrete

Table 6 Averaged permeability coefficients of sound concrete

Case	Averaged Permeability coefficient ($\times 10^{-11}$ m/s)
OPC	2.29(1.00)
GGBFS	2.04(0.89)

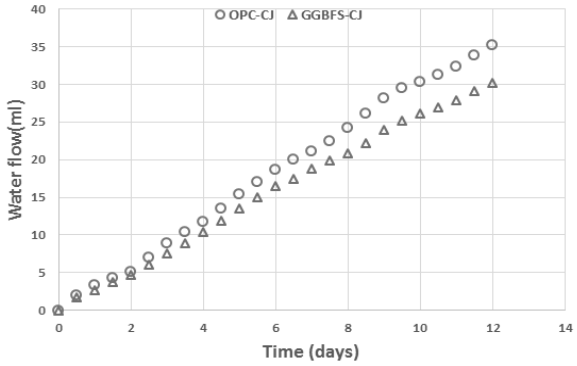

Fig. 7 Cumulative water flow of cold joint concrete

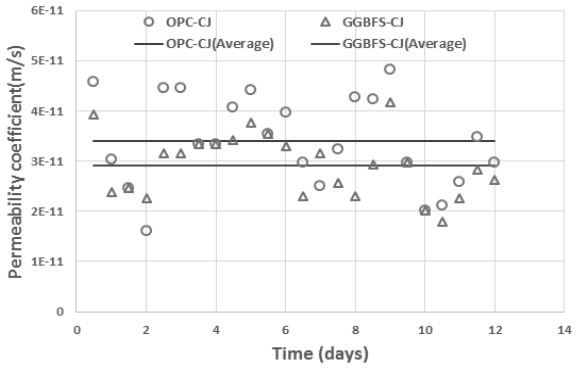

Fig. 8 Permeability coefficients of sound concrete

점도, 측정 오차 등으로 투수계수는 변화한다. 12시간 간격의 OPC 및 GGBFS의 투수계수의 평균값을 Table 6에 나타내었다. OPC의 평균 투수계수는 2.29×10^{-11} m/s, GGBFS의 평균 투수계수는 2.04×10^{-11} m/s로 GGBFS를 혼입한 콘크리트에서 11%의 투수계수가 감소하였다.

4.3 콜드조인트 콘크리트 투수성 평가

콜드조인트를 가진 콘크리트는 공극률 이외에 내부에 불연속면이 존재하게 되므로 추가적인 투수가 발생한다. Fig. 7은 OPC 및 GGBFS를 고려한 콜드조인트 콘크리트의 시간에 따른 누적유출량을 나타낸다. OPC-CJ 배합과 GGBFS-CJ에서의 누적 투수량 평가에서는 건전부와 비슷한 결과가 평가되었다. Fig. 8에서는 12시간마다 측정된 투수계수를 나타내었으며, Table 7에 평균값을 나타내었다. OPC-CJ의 평균 투수계수는 3.39×10^{-11} m/s, GGBFS-CJ의 평균 투수계수는 2.91×10^{-11} m/s로 OPC에 비하여 0.86배 낮게 평가되었다.

Table 7 Averaged permeability coefficients of cold joint concrete

Case	Averaged Permeability coefficient ($\times 10^{-11}$ m/s)
OPC-CJ	3.39(1.00)
GGBFS-CJ	2.92(0.86)

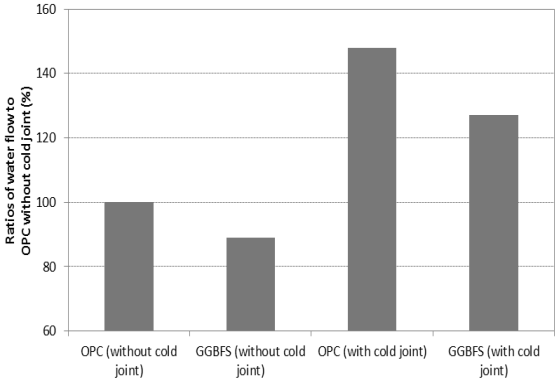

Fig. 9 Increasing ratios to control permeability

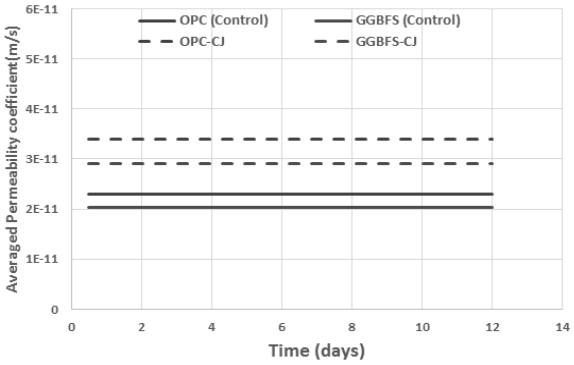

Fig. 10 Averaged permeability coefficient of sound and cold joint concrete (with/without GGBFS)

4.4 콜드조인트 및 혼화재에 따른 투수특성 비교

4.4.1 투수량 및 투수계수의 변화

GGBFS의 영향은 콜드조인트 콘크리트의 투수평가에서도 효과적으로 분석되었다. Fig. 5와 Fig. 7의 최종 누적유량 비율을 콜드조인트가 없는 OPC를 기준으로 분석하면 Fig. 10과 같다.

콜드조인트를 가진 OPC 콘크리트는 건전부에 비하여 147.9%의 유량 증가를 나타냈으며, GGBFS 콘크리트에서는 27.1% (콜드조인트) 및 -10.9% (건전부)의 변화를 나타내었다. 각 경우의 평균 투수계수는 Fig. 10에 나타내었다. GGBFS의 치환은 건전부 뿐 아니라 콜드조인트를 가진 콘크리트에도 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

기존의 연구결과에 의하면[8], w/c 0.44의 OPC 콘크리트의 경우, $1.83\sim1.99\times10^{-11}$m/s가 평가되었는데, 본 실험결과

인 2.29×10^{-11}m/s (w/c 0.60) 보다 낮게 평가되었다. 그러나 균열폭이 0.1 mm 인 경우 대략 250% 정도 투수계수가 증가하였는데, 콜드조인트가 발생하면 균열이 없더라도 투수계수가 150% 정도 증가하므로 이에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

4.4.2 투수거동의 변화

콜드조인트 콘크리트의 누적 유량과 투수계수의 변화를 보면, 측정값들이 건전부보다 상대적으로 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 2주 동안 12시간마다 측정된 투수계수를 표본집단으로 하여 투수계수의 평균과 표준편차를 도출하였다. Table 8에서는 확률변수의 결과를 나타내었으며, 정규분포를 가정하여 Fig. 11에 빈도를 도시하였다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 콜드조인트를 가진 OPC의 경우 가장 변동성이 크게 나타났는데, 이는 정상상태의 실험이라 하더라도 콜드조인트의 불연속면에서의 투수가 규칙적이지 않기 때문이다.

GGBFS의 경우 콜드조인트가 없어도 변동계수가 비교적 크게 평가되었는데, 이는 측정기간동안 공극률의 감소로 투수계수가 지속적으로 감소하기 때문이다. Fig. 12의 그림에서 알 수 있듯이, OPC 콘크리트에서는 -0.0381의 기울기가 측정되었으나, GGBFS 콘크리트에서는 -0.0475로 상대적으로 급격한 기울기가 평가되었다. 이는 비록 장기재령에 대해 투수시험을 수행하였더라도 GGBFS 콘크리트는 지속적인 수화과정을 거치면서 투수계수가 상대적으로 크게 감소하기 때문이다.

Table 8 Probabilistic characteristics of the results

Case	Mean	Standard deviation	C.O.V.
OPC (Control)	2.29	1.00	0.142
GGBFS (Control)	2.04	0.89	0.242
OPC-CJ	3.39	1.48	0.266
GGBFS-CJ	2.92	1.28	0.214

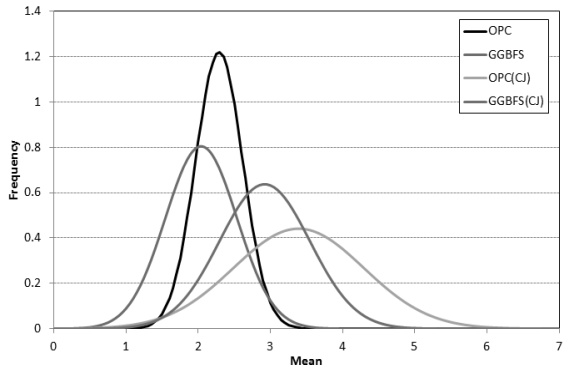

Fig. 11 Frequency distributions for the cases

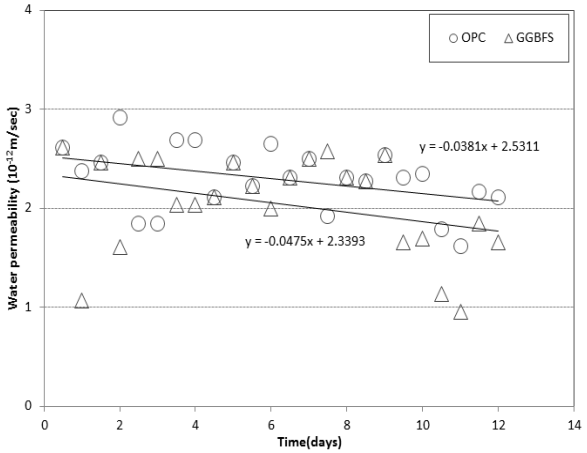

Fig. 12 Regression analysis of water permeability

5. 결 론

콜드조인트를 가진 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 투수성 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) GGBFS 혼입 유무에 따른 콜드조인트 콘크리트의 투수성을 저압투수시험을 통해 정량적으로 평가하였다. 평균 투수계수는 GGBFS 배합에서 2.04×10^{-11}m/s로 가장 낮게 나타났으며, OPC 배합에서 2.29×10^{-11}m/s, GGBFS-CJ 배합에서 2.92×10^{-11}m/s, OPC-CJ 배합에서 3.39×10^{-11}m/s로 평가되었다.
2) GGBFS를 혼입한 배합에서의 투수성이 OPC 배합에 비해 0.89배 감소하는 것을 알 수 있었으며, 콜드조인트에도 GGBFS-CJ 배합이 OPC-CJ 배합에 비해 투수계수가 0.86배 감소하는 것으로 평가되었다. GGBFS는 건전부 뿐 아니라 콜드조인트에서도 효과적으로 투수성을 저감시키고 있다.
3) 콜드조인트를 가진 OPC 콘크리트의 변동계수는 0.266으로 가장 높은 수준으로 평가되었다. 또한 GGBFS를 혼입한 경우는 콜드조인트가 없어도 0.242로 큰 변동계수가 평가되었는데, 이는 잠재수경성으로 인해 측정시간(2주)에 따라 지속적으로 투수계수가 감소하기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013 R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

1. Park, M.-S., “A study on control of carbonation at cold joint of reinforced concrete structures”, M.A.Sc Thesis, YONSEI University, 2001 (in Korean).
2. JSCE, Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures, Concrete Library, 2000, 103.

3. ACI 224.3R-95, “Joints in concrete construction”, American Concrete Institute, USA, Reapproved, 2001.
4. Kwon, S.-J. and Na. Ung-Jin,, “Prediction of durability for RC columns with crack and joint under carbonation based on probabilistic approach”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.5, No.1, 2011, pp.11-18.
5. Yokozeki, K., Okada, K., Tsutsumi, T., and Watanabe, K., “Prediction of the service life of RC with crack exposed to chloride attack”, *Journal of Symposium: Rehabilitation of Concrete Structure*, Vol.10, 1998, pp.1-6.
6. Kwon, S.-J., Park, S.-S., Nam, S. H., and Cho, H. J., “A Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City”, *Journal of Korea Structure Maintenance Institute*, Vol.5, 2007, pp. 116-122 (in Korean).
7. Hyun, T. Y., “Permeability of cracked concrete as a function of hydraulic pressure and crack width”, M.A.Sc Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2008 (in Korean).
8. Park, S.-S., Kwon, S.-J., Jung, S.H., and Lee, S.-W., “Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure”, *Construction and Building Materials*, Vol.27, No.1, 2012, pp.597-604.
9. Park, S.-S., Kwon, S.-J., and Jung, S. H., “Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation”, *Construction and Building Materials*, Vol.29, 2012, pp.183-192.
10. Song, H.-W., Cho, H.-J, Park, S.-S., Byun K.-J., and Maekawa K., “Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure”, *Concrete Science and Engineering*, Vol.3, No.10, 2001, pp.62-72.
11. Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K.-J., and Park, C.-K., “Predicting carbonation in early-aged cracked concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol.36, 2006, pp.979-989.
12. Ishida, T., and Maekawa, K., “Modeling of durability performance of cementitious materials and structures basedon thermo-hygro physics”, RILEM Proc-PRO29: life prediction and aging management of concrete structures, Vol.1, 2003, pp.39-49.
13. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., “Multi-scale modeling of concrete performance”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.1, 2003, pp.91-126.
14. Ye, G., “Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of the Cementitious Materials”, Ph.D Dissertation of Delft University of Technology, The Netherlands, 2003.
15. Song, H.-W., Back, S.-J., Lee, C.-H., and Kwon, S.-J. “Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration”, *Journal of Restoration of Building and Monuments*, Vol.12, No.4, 2006, pp.265-284.
16. Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B., “Modeling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag”, *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.487-95.
17. Ludirdja, D., Berger, R. L., and Young, F., “Simple method for measuring water permeability of concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol.86, 1990, pp.433-439.
18. Song, H. W. and Kwon, S. J., Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.6, 2007, pp. 909-915.

요 약 콘크리트는 다공성 매체로 투수성을 가지고 있으며, 투수성은 내구성 평가의 중요한 인자가 된다. 콘크리트는 이어치기의 지연을 통해서 콜드조인트를 가지게 되는데, 이러한 이음은 투수와 유해물질의 유입을 가속화시킨다. 본 연구에서는 고로슬래그 미분말과 보통포틀랜트 시멘트를 사용하여 콜드조인트 콘크리트를 제조하였으며, 91일 재령 하에서 2주간 투수계수 및 유량을 측정하였다. 고로슬래그 미분말을 혼입한 배합에서는 투수성이 OPC 배합에 비해 0.89배 감소하였으며, 콜드조인트에도 보통배합에 비해 투수계수가 0.86배 감소하였다. 본 연구에서는 저압 투수법을 통하여 콜드조인트 및 혼화재가 투수성에 미치는 영향이 평가되었으며, 확률론적인 방법을 통하여 건전부와 콜드조인트부의 투수 변동성 또한 분석되었다.

핵심용어 : 투수성, 콜드조인트, 고로슬래그 미분말, 다공성 매체, 내구성