Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.18, No.2, pp.205~211, April, 2006

팽창재와 수축저감제를 사용한 고성능 콘크리트의 내구성 평가

고경택[1)*]·강수태[1)]·박정준[1)]·류금성[1)]

[1)]한국건설기술연구원

(2005년 7월 4일 원고접수, 2006년 1월 15일 심사완료)

Evaluation on Durability of High Performance Concrete with Expansive Additive and Shrinkage Reducing Admixture

Kyung-Taek Koh[1)*], Su-Tae Kang[1)], Jung-Jun Park[1)], and Gum-Sung Ryu[1)]

[1)]Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

(Received July 4, 2005, Accepted January 15, 2006)

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the durability of low shrinkage high performance concrete(LSHPC), which was combined with expansive additives and shrinkage reducing admixtures. We tested for not only LSHPC but also high performance concrete(HPC) and normal concrete(NC) to be compared with the durability of LSHPC. HPC was made in the same water-binder ratio of LSHPC without expansive additives and shrinkage reducing admixture. As a result, it was found that LSHPC had higher compressive and tensile strength than that of HPC. LSHPC showed more excellent performance than HPC and NC in the case of resistance to chloride ion penetration and resistance to carbonation and also showed nearly 100 durability factor in the freeze-thawing test with 600 cycles. From the examination about the watertightness and the pore distribution, it was found that the durability of LSHPC was improved because its hardened cement paste is organized closer. So we can conclude that when LSHPC is applied to structures in field, it is possible to reduce the shrinkage and crack in concrete and improve the durability.

Keywords : low shrinkage high performance concrete, expansive additive, shrinkage reducing agent, durability

1. 서 론

최근 고강도와 고유동성을 지닌 고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 사용 실적도 차츰 증가하는 추세에 있다. 그러나 고성능 콘크리트는 물-결합재비(이후 W/B)를 작게 하고, 단위 결합재량 및 고성능 감수제를 다량으로 사용해야 하므로 수화열, 자기수축 및 건조수축 등에 의한 균열 발생이 문제점으로 제기되고 있다[1-6]. 이렇게 발생한 균열을 통해 염소이온, CO_2 가스, 물과 같은 내구성능 저하 인자의 침투가 쉬워져 결과적으로 콘크리트 구조물의 내구성능이 저하될 우려가 높다. 따라서 고성능 콘크리트를 보다 많은 구조물에 안정적으로 적용하기 위해서는 수축에 의해 발생하는 균열문제를 해결할 필요가 있다. 이와 관련하여 기존의 선행 연구[7-10]에서 팽창재(expansive additive; 이후 EA)와 수축저감제(shrinkage reducing agent; 이후 SR)를 일정 비율로 조합하여 사용하면 고성능 콘크리트의 성능 향상 및 수축저감에 효과적인 것으로 분석된 바 있다.

따라서 본 연구에서는 선행연구를 토대로 EA와 SR를 조합 사용한 저수축 고성능 콘크리트(이후 LSHPC)를 대상으로 내구성을 평가하였다. LSHPC와 비교를 위해 동일한 W/B에서 EA와 SR를 사용하지 않은 고성능 콘크리트(이후 HSC)와 물-시멘트비 50%인 일반 콘크리트(이후 NC)에 대해서도 동일한 시험을 실시하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(OPC)이며, 혼화재는 플라이애쉬(FA)와 실리카퓸(SF)이고, 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. EA는 Table 2에 나타낸 바와 같이 CSA(calcium sulfate aluminate)계를 사용하였고, SR는 분말형 글리콜즈계를 사용하였으며 그 특성은 Table 3과 같다. 굵은골재는 최대치수 20 mm인 부순돌을

* Corresponding author
E-mail : ktgo@kict.re.kr
©2006 by Korea Concrete Institute

Table 1 Properties of cement and mineral admixtures

Item / Type	Surface area (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)					
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
OPC	3,413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.14
FA	3,850	2.13	3.82	65.3	16.6	5.58	-	0.82	0.51

Table 2 Properties of expansive additive

Surface area (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)					
			CaO	SiO_2	Fe_2O_3	SO_3	Al_2O_3	f-CaO
3,100	2.93	1.4	70.2	0.4	4.7	17.3	2.8	51

Table 3 Properties of shrinkage reducing agent

Main ingredient	Density (g/cm^3)	Appearance	Colour	Ash content (%)
Glycols	3.18	Powder	White	40

Table 4 Properties of aggregate

Item / Type	Density (g/cm^3)	F.M	Absorption (%)	Unit weight (kg/m^3)	Abrasion (%)
Fine agg.	2.67	2.60	1.83	1,422	-
Coarse agg.	2.63	6.87	0.63	1,429	15.9

사용하였고, 잔골재는 강모래를 사용하였으며 그 특성은 Table 4와 같다. 콘크리트의 소요 워커빌리티를 확보하기 위해 폴리칼본산계 고성능감수제를 사용하였고, 소정의 공기량을 확보하기 위해 AE제를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합

Table 5에 콘크리트 배합을 나타내었다. 저수축 고성능 콘크리트(LSHPC)는 기존의 선행연구[7-10]에서 도출된 배합으로 FA 20%와 SF 10%를 치환한 W/B 30%에 대하여 EA 5%와 SR 1%를 조합 사용하였다. 그리고 비교를 위해 LSHPC와 동일한 배합에서 EA와 SR를 사용하지 않은 고성능 콘크리트(HPC)와 결합재로서 OPC만을 사용하고 W/B 50%를 가진 일반 콘크리트(NC)에 대해서도 시험을 실시하였다. LSHPC와 HPC는 슬럼프플로우 650±5mm, 공기량 4.5±1%를 만족하도록 하였고, NC는 슬럼프 100±20 mm, 공기량 4.5±1%를 만족하도록 배합설계를 하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 강도 시험

압축강도와 인장강도의 시험은 KS F 2403에 따라 공시체를 제작·양생한 다음 계획된 재령에서 각각 KS F 2405 및 2423의 규정에 따라 실시하였다. 강도의 값은 콘크리트 공시체 3개의 평균값이다.

2.3.2 염소이온 침투 저항성

염소이온 침투 저항성 시험은 ASTM C 1202[11]에 준하여 전기적 촉진시험으로 실시하였다. 시험체는 ϕ100×200 mm 원주 몰드를 이용하여 탈형한 후 28일간 표준양생을 실시한 후 ϕ100×50mm의 크기로 중앙부위를 절단한 다음 측면을 에폭시 수지로 도포하였다. 시험 전 시험체를 18시간 이상 증류수에 침지시켜 완전히 포화가 되도록 하여 시험장치에 고정시키고 (-)극에는 3% NaCl, (+)극에는 0.3N NaOH의 용액을 주입하여 6시간 동안 60V의 직류전압을 가하면서 30분마다 전압을 Data Logger로 측정하였다.

2.3.3 탄산화

탄산화 시험에 이용한 콘크리트 시험체는 ϕ100×100 mm몰드를 이용하여 타설 1일에 탈형한 후 수중에서 28일 동안 표준양생을 실시한 다음, 7일간 항온항습실(23±2℃, 65±10% R.H)에서 3일 동안 건조시켰다. 탄산화시험은 이산화탄소 농도 10%, 온도 30℃, 습도 50%를 조건으로 실시하였다. 탄산화 촉진시험을 수행한 후 일정기간 마다 시험체를 이등분으로 할렬하고, 그 면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정하였다.

2.3.4 동결융해

동결융해 저항성 시험은 ASTM C 666에 준한 기중동결수중융해 시험으로 실시하였다. 시험체는 100×100×400mm 각주 몰드를 이용하여 탈형한 후 28일간 표준양생을 실시한 후 시험을 실시하였다. 동결융해 시험의 온도 범위는 -18 ~ +4.5℃로 하고 1사이클의 시간은 2시간 40분으로 하여, 동결융해 일정 사이클마다 가로진동에 의한 공명진동을 600사이클까지 측정하여 다음과 같이 상대동탄성계수를 계산하였다.

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

Table 5 Mixture proportions of concrete

Types of concrete	W/B (%)	S/a (%)	Unit content (kg/m^3)								SP (B×wt. %)	AE (B×wt. %)	Test results		
			W	B			EA	SR	S	G			Slump (mm)	Slump flow (mm)	Air content (%)
				OPC	FA	SF									
NC	50	42	175	350	0	0	0	0	643	1118	-	0.008	110	-	4.6
HSC	30	45	175	410	113	56.7	0	0	658	810	0.5	0.004	265	643	4.8
LHPC	30	45	175	375	113	56.7	30.1	5.72	658	810	0.6	0.002	260	628	4.6

여기서, P_n : 동결융해 n 사이클 후의 상대동탄성계수(%)
f_0^2 : 동결융해 0 사이클에서의 가로진동 주파수
f_n^2 : 동결융해 n 사이클에서의 가로진동 주파수

2.3.5 투기성

투기성 시험은 200×200×100 mm의 직육면체 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고, 재령 28일까지 표준양생한 후에 단면 5개면을 에폭시로 도포한 후 항온항습실에서 7일간 건조시킨 다음 Torrent가 제안한 직접가압장치를 사용하여 실시하였다.

2.3.6 투수성

투수성 시험은 200×200×100 mm의 직육면체 콘크리트 공시체를 사용하였고, 재령 28일까지 표준양생을 실시한 다음 항온항습실에서 7일간 기건양생을 실시한 다음 직접가압장치인 GWT-4000 kit를 사용하여 실시하였다.

2.3.7 공극 분포

공극 분포는 재령 28일까지 표준양생을 실시한 ϕ100×200 mm 원주 공시체로부터 다이아몬드 절단기를 사용하여 5 mm 정도 크기로 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 1일 정도 아세톤에 넣어 수화를 정지시켜 수은압입식 포로시메터(porosimeter)를 이용하여 총공극량과 공극 분포를 측정하였다. 이 때 모세관 공극을 원통형을 가정하고 수은의 표면장력을 485 dynes/cm, 접촉각을 130°로 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 강도

Fig. 1은 재령별 콘크리트의 압축강도이고 Fig. 2는 재령 28일에서의 쪼갬인장강도 결과이다. 압축강도는 재령에 상관없이 LSHPC > HPC > NC 순으로 나타났다. LSHPC와 HPC는 재령 7일에서 40 MPa 이상, 재령 28일에서 60 MPa 이상, 재령 91일에서 70 MPa 이상의 고강도로 나타났다. 또한, LSHPC의 압축강도는 HPC와 비교하여 다소 크게 나타났는데, 이는 팽창재의 수화생성물에 의한 조직의 치밀성 증대에 기인된 것으로 사료된다. 또한, 인장강도는 압축강도와 유사한 경향으로 LSHPC가 HPC보다 다소 크게 나타났는데, 압축강도에 대한 인장강도 비율은 8%~10% 정도로 나타났다.

3.2 염소이온 침투 저항성

Fig. 3은 콘크리트 종류별 염소이온 침투 저항성 시험결과이다. LSHPC는 NC에 비해 염소이온 침투 저항성이 17배 정도 우수한 것으로 나타났다. 이처럼 LSHPC가 NC에

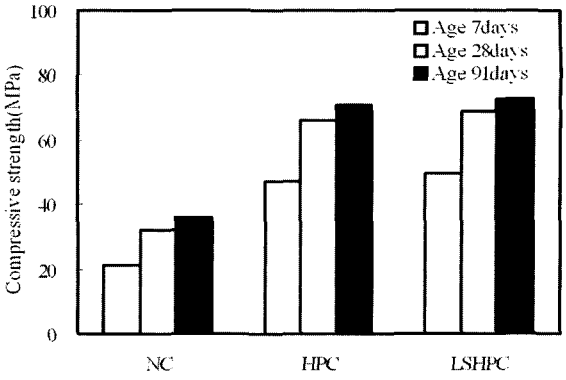

Fig. 1 Compressive strength with type of concrete

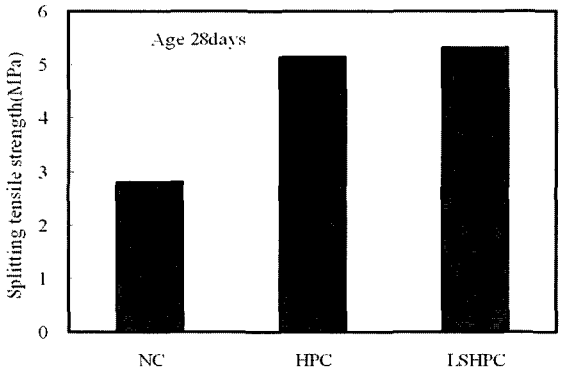

Fig. 2 Splitting tensile strength with type of concrete

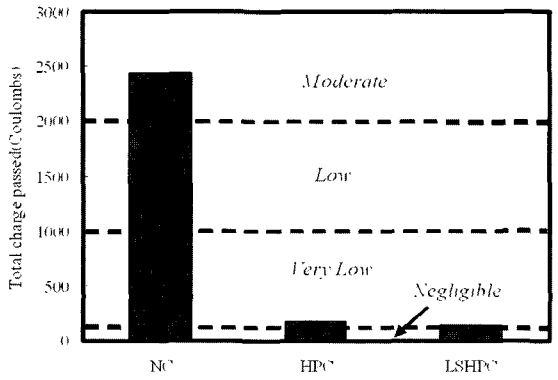

Fig. 3 Total charge passed with type of concrete

비해 염해 저항성이 탁월한 것은 시멘트 경화체의 치밀함이 반영한 결과가 기인한 것으로 분석된다. 그리고 LSHPC는 HPC에 비해도 염소이온 침투 저항성이 1.3배 정도 우수한 것으로 나타났는데, 이는 수축에 의한 균열이 저감됨으로써 LSHPC의 경화체 조직이 보다 치밀해졌기 때문으로 사료된다. Fig. 4는 전기적 촉진 시험결과로부터 다음의 Berke 식을 이용하여 콘크리트의 중의 염소이온 확산계수를 추정한 결과이다[12].

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad (2)$$

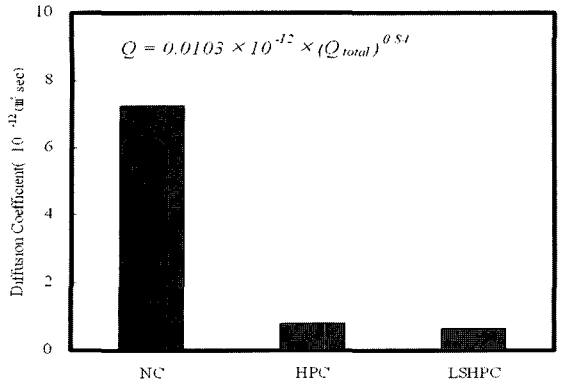

Fig. 4 Chloride diffusion coefficient with type of concrete

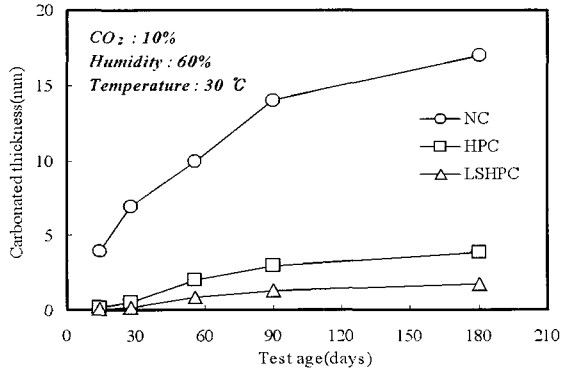

Fig. 5 Carbonated thickness with type of concrete

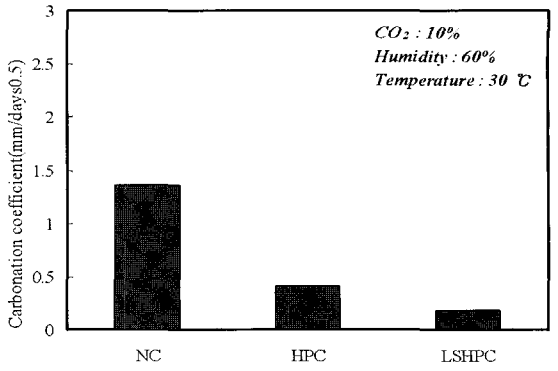

Fig. 6 Carbonation coefficient with type of concrete

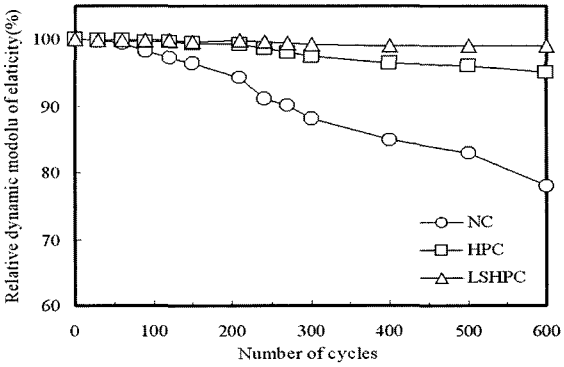

Fig. 7 Resistance to freezing-thawing with type of concrete

이 식은 시간대별 측정전류를 부분 적분법을 이용하여 총 통과전하량을 계산한 후 경험적으로 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 추정한 식이다. 이 식으로 추정된 염소이온의 확산계수 값으로부터 LSHPC > HPC > NC 순으로 염해 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이처럼 LSHPC가 HSP와 NC에 비해 염소이온 침투 저항성이 우수한 것은 고강도화와 균열 저감에 따른 시멘트 경화체 조직이 치밀하게 된 것이 원인으로 분석된다.

3.3 탄산화

Fig. 5는 콘크리트 종류별 탄산화 촉진 시험결과이다. 시험재령 180일에서 NC는 17 mm, HPC는 3.9 mm, LSHPC는 1 mm 정도의 탄산화가 진행된 것으로 나타났다. 이처럼 LSHPC가 HPC와 NC에 비해 탄산화에 대한 저항성이 뛰어난 것은 시멘트 경화체가 고강도화가 된 것과 수축에 의한 균열되어 저감됨으로써 시멘트 경화체의 조직이 치밀하게 되어 이산화탄소 가스가 콘크리트 내부로 침입하기 어려웠기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 탄산화 촉진 시험 결과를 토대로 탄산화계수를 구한 결과이다. 여기서, 탄산화계수는 탄산화 깊이와 재령의 평방근에 대한 비로 정의된 것으로 탄산화 속도를 비교하는 데 많이 사용된다. 탄산화계수의 결과에 의하면 LSHPC는 NC에 비해 7배 정도, HPC에 비해 2배 정도 탄산화에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

3.4 동결융해 저항성

Fig. 7은 콘크리트 종류별 동결융해 저항성 시험 결과이다. 일반적인 동결융해시험 종료 시점인 300 사이클에서 콘크리트 종류에 상관없이 상대동탄성계수가 90 % 이상으로 매우 우수한 것으로 나타났다. 이처럼 콘크리트 종류에 따라 동결융해 저항성이 우수한 것은 모든 콘크리트에서 AE제를 사용하여 공기량을 4.5 % 이상 연행시켰기 때문이다. 300 사이클 이후에서 NC는 상대동탄성계수가 점차 저하되어 600 사이클에서 78 %까지 저하되었으며, HPC와 LSHPC의 상대동탄성계수는 600 사이클에서 각각 95 %와 99 %인 것으로 나타났고, 특히 LSHPC의 동결융해에 대한 내구성 지수는 거의 100으로 나타나 매우 우수한 것 나타났다.

3.5 수밀성

Figs. 8과 9는 콘크리트 종류별 투기성과 투수성을 측정한 결과이다. 콘크리트의 수밀성은 투기성과 투수성에 상

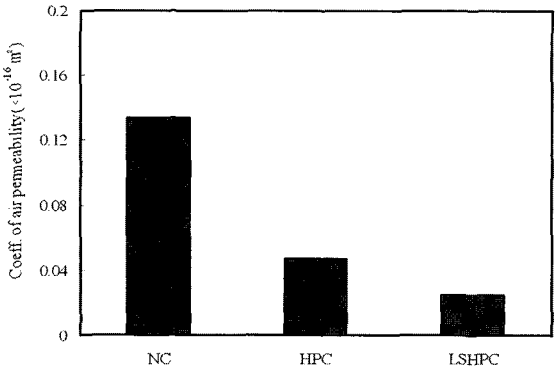

Fig. 8 Coefficient of air permeability with type of concrete

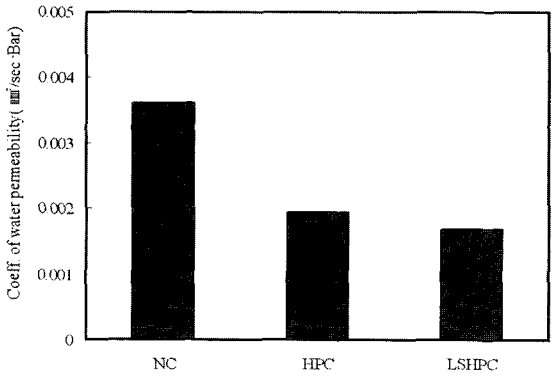

Fig. 9 Coefficient of water permeability with type of concrete

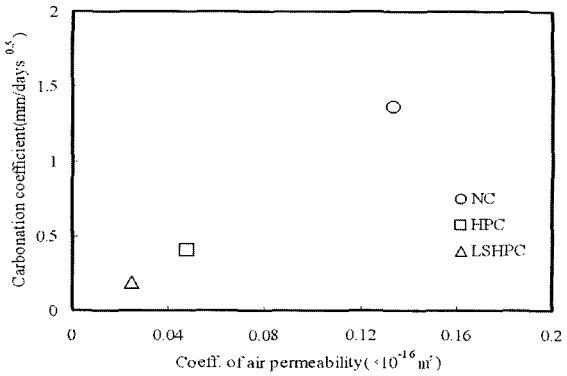

Fig. 10 Relationship between coefficient of air permeability and carbonation coefficient

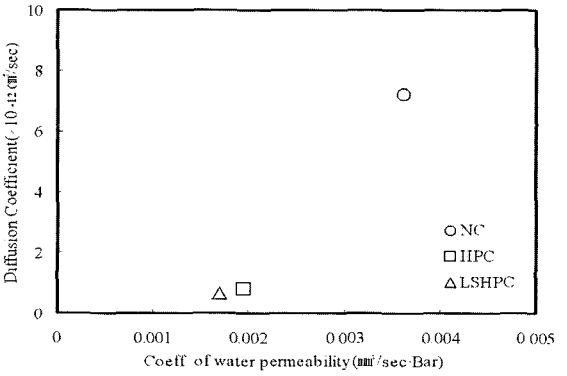

Fig. 11 Relationship between coefficient of water permeability and diffusion coefficient

관없이 LSHPC > HPC > NC 순으로 뛰어난 것으로 나타났다. LSHPC의 투기계수는 NC의 18%, HPC의 53% 정도이고, 투수계수는 NC의 47%, HPC의 86% 정도로 상당히 수밀성이 뛰어남을 알 수 있다. 투기성은 기체의 투과성능 등을 나타내는 지표로서 본 연구에서는 탄산화 저항성과 관련되어 있는데, 투기성 결과로부터 LSHPC는 탄산화에 대한 저항성이 우수할 것으로 예측된다. Fig. 10은 투기성과 탄산화계수와의 관계를 나타났는데, 데이터의 수는 적으나 이 결과로부터 투기성과 탄산화계수는 상당히 밀접한 비례적인 관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 투수성과 염소이온 확산계수와의 관계를 나타냈는데, 이들 관계도 비례적인 상관관계가 있는 것으로 추정된다.

이상과 같이, 투기성 및 투수성을 측정하여 콘크리트 종류별 수밀성을 분석한 결과, LSHPC는 HPC와 NC보다 수밀성이 뛰어난 것으로 나타났다.

3.6 공극분포

Fig. 12는 콘크리트 종류별 총 공극량의 결과이다. 총 공극량은 LSHPC > HPC > NC 순으로 적은 것으로 나타났다. 콘크리트 내부에 공극량은 적다는 것은 콘크리트 내부

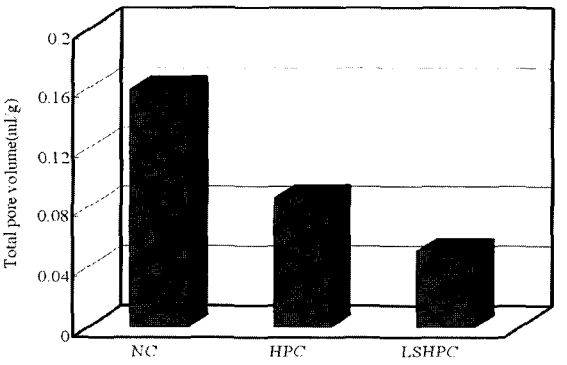

Fig. 12 Total pore volume with type of concrete

가 그만큼 치밀하다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 콘크리트 종류별 공극분포 결과이다. NC는 50 ~ 1200 nm 공극이 많고, 10 nm 이하의 공극이 적은 것으로 나타났다. 이에 비해 LSHPC와 HPC는 50 nm 이상의 공극이 거의 없고 10 ~ 50 nm의 공극과 10 nm 이하의 공극에서 피크점이 보이고 있다. 큰 공극량이 많다는 것은 시멘트 경화체의 조직이 다공질(porous) 상태에 있으며, 작은 공극량이 많다는 것은 시멘트 경화체 조직이 치밀한 상태에 있다는 것을 의미한다. 결국 공극분포를 분석

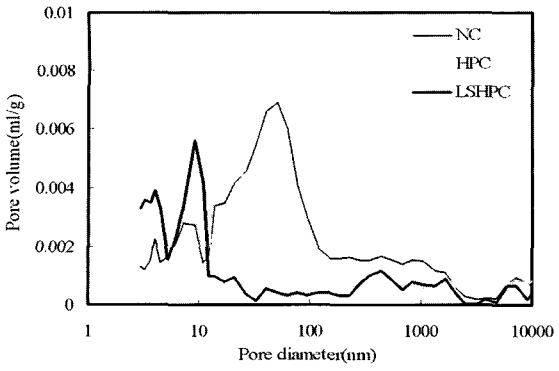

Fig. 13 Distribution of pore volume with type of concrete

한 결과에 의하면, LSHPC와 HPC는 NC에 비해 시멘트 경화체 조직이 치밀하고, 또한 HPC보다는 LSHPC가 더욱 치밀한 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 팽창재와 수축저감제를 조합 사용하여 수축변형률을 저감시킨 저수축 고성능 콘크리트에 대해 내구성을 평가하고자 실시한 실험 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압축강도는 재령 91일에 70 MPa 이상의 고강도로 나타났는데, 저수축 고성능 콘크리트는 동일한 물-결합재비를 가진 고성능 콘크리트보다 팽창재의 수화생성물에 의한 조직의 치밀성 증대에 기인하여 다소 크게 나타났다. 또한, 인장강도는 압축강도와 유사한 경향으로 저수축 고성능 콘크리트가 고성능 콘크리트보다 다소 크게 나타났다.
2) 저수축 고성능 콘크리트는 고성능 콘크리트와 일반 콘크리트에 비해 염소이온 침투 저항성이 뛰어나며, 특히 일반 콘크리트보다는 17배 정도 우수한 것으로 나타났다.
3) 탄산화에 대한 저항성은 저수축 고성능 콘크리트는 고성능 콘크리트에 비해 2배 정도, 일반 콘크리트에 비해 7배 정도 우수한 것으로 나타났다.
4) 동결융해 저항성은 동결융해시험 600사이클에서도 저수축 고성능 콘크리트의 내구성 지수가 거의 100으로 매우 우수한 것으로 나타났다.
5) 기밀성, 수밀성 및 공극분포를 검토한 결과, 저수축 고성능 콘크리트는 고성능 콘크리트 또는 일반 콘크리트에 비해 시멘트 경화체 조직이 치밀해져 내구성이 향상되는 것으로 분석되었다.

이상을 종합하여 볼 때, 팽창재와 수축저감제를 조합사용한 저수축 고성능 콘크리트를 구조물에 적용한 경우, 콘크리트의 수축과 균열을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 염소이온 침투 저항성, 탄산화 및 동결융해 저항성 등 내구성능이 향상되는 결과를 얻을 수 있을 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會, コンクリートの自己收縮研究委員會報告書, 日本コンクリート工學協會, 2002, pp.1~111.
2. De Larrard, F. and Le Roy, R., "The Influence of mix composition on mechanical properties of high performance silica-fume concrete", *Proceedings of the 4th CANMENT/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-132, 1992, pp.965~986.
3. 한천구, 반호용, 전병채, 홍상희, "CSA계 팽창재 및 무기질 혼화재를 이용한 고성능 콘크리트의 특성에 관한 연구", 콘크리트학회지, 11권, 1호, 1999, pp.141~148.
4. 近松龜一, 竹田宣典, 鎌田文男, 十河茂幸, "結合材の種類がコンクリートの硬化收縮に及ぼす影響", コンクリート工學年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993, pp.543~548.
5. 田中敏嗣, 杉山彰德, 小川鑑, 富田六郎, "混和材料を組合せて使用したコンクリートの諸特性",コンクリート工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995, pp.157~162.
6. Tazawa, E. and Miyazawa, M., "Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No.8, 1995, pp.1633~1638.
7. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, "팽창재 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성", 콘크리트학회논문집, 15권, 6호, 2003. 12, pp.785~793.
8. 한국건설기술연구원, 콘크리트 교량의 내구성 향상기술 개발, 2004, pp.19~246.
9. 한천구, 김성욱, 고경택, 한민철, "팽창재와 수축저감제를 조합 사용한 고성능 콘크리트의 기초물성 및 수축특성", 콘크리트학회논문집, 16권, 5호, 2004, pp.605~612.
10. 고경택, 박정준, 김성욱, 이장화, "고성능 콘크리트의 수축저감에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집 24권, 3A호, 2004, pp.501~508.
11. ASTM C 1202-97, "Standard Test Method for Electrical Indication Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM, USA, 1997.
12. N. S. Berke and M. C. Hicks, *Predicting chloride profiles in concrete*, Corrosion, 1994, pp.234~239.
13. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Longman, 1995, pp. 25~37.
14. P. Kumar Metha, Concrete Structures, Properties and Materials, Prentice-Hall, 1986, pp.17~41.
15. R. J. Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", *Materials and Structures*, No.25, 1992, pp.358~365.

요 약

본 연구는 팽창재와 수축저감제를 조합 사용하여 수축변형률이 저감된 저수축 고성능 콘크리트에 대하여 내구성을 평가하였다. 그리고 저수축 고성능 콘크리트와 비교를 위해 동일한 물-결합재비에서 팽창재와 수축저감제를 사용하지 않은 고성능 콘크리트와 일반 콘크리트에 대해서도 시험을 실시하였다. 그 결과, 저수축 고성능 콘크리트는 동일한 물-결합재비를 가진 고성능 콘크리트에 비해 압축강도와 인장강도가 다소 크게 나타났다. 염소이온 침투 저항성과 탄산화에 대한 저항성은 고성능 콘크리트와 일반 콘크리트에 비해 우수하며, 동결융해 저항성은 동결융해시험 600사이클에서도 내구성 지수가 거의 100으로 나타났다. 또한 수밀성과 공극분포를 검토한 결과, 저수축 고성능 콘크리트는 고성능 콘크리트 또는 일반 콘크리트에 비해 시멘트 경화체 조직이 치밀해져 내구성이 향상되는 것으로 분석되었다. 따라서 팽창재와 수축저감제를 조합사용한 저수축 고성능 콘크리트를 구조물에 적용한 경우, 콘크리트의 수축과 균열을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 내구성능이 향상되는 결과를 얻을 수 있을 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 저수축 고성능 콘크리트, 팽창재, 수축저감제, 내구성