특집기사

동절기 옥외 노출 콘크리트의 동결융해 현상과 내구성 증진방안

Freezing-Thawing Phenomenon and Durability-Improving Method of Plain Concrete Exposed to Outdoor in Winter Season

이 상 현[1)*] 김 정 진[2)] 성 천 우[3)]

Lee, Sang Hyun Kim, Jung Jin Sung, Cheon Woo

1. 개 요

최근 지구환경지속가능성에 대한 우려가 증가하면서 전 산업부문에서는 환경부하를 저감하면서도 지속가능한 개발을 위한 연구개발을 하고 있다. 건설산업에서는 이러한 친환경 건축을 위한 방법 중 하나가 건축물의 장기사용을 통한 자원소모 절감이 주요한 수단이 되겠으며, 이를 위하여는 건축구조물의 내구성 확보가 중요하다고 할 수 있다. 건축구조물에는 콘크리트가 주요한 건설재료로 건축물은 물론 도로, 교량, 항만, 철도 등 다양한 분야에 활용되고 있는 상황이며 앞으로도 이러한 추세는 지속될 전망이다. 따라서 콘크리트의 내구성 확보를 통한 장기사용은 폐기물 발생 및 재건축으로 인한 환경부하를 절감하는 측면에서 중요하다고 볼 수 있다.

그러나 Photo 1과 같이 도로의 측구 및 옥상 바닥 등 외기에 노출된 콘크리트의 경우 동절기 이후 균열 발생, 박리박락 등으로 외관손상 및 사용성의 불편을 초래함은 물론 내부 철근이 외부로 드러나는 경우도 있어 내구성 측면에서 또한 우려되며, 사용성 확보를 위하여 콘크리트의 파쇄, 재시공 등의 보수공사를 필요로 하게 된다.

이에 본 고에서는 옥외 노출 콘크리트에서 발생하는 품질저하 현상 중 특히 동절기 이후 쉽게 관찰되는 콘크리트 표면의 단면결손 및 표면박리 등에 주목하여 발생원인을 고찰하고, 이를 개선하기 위한 방안을 기존문헌조사를 통하여 제안, 각 방법에 대하여 동결융해 실험 평가 결과를 바탕으로 동결융해에 대한 저항성 정도, 즉 내구성 향상성을 평가하여 무근 콘크리트의 품질향상방안을 제안하여 유지관리비 절감방안을 모색하고자 한다.

(a) 도로 측구

(b) 옥상 누름

(c) 옥상 주차장

(d) 확대사진

Photo 1 옥외노출콘크리트의 내구성 저하

1) 롯데건설 기술연구원 건축연구팀 선임연구원, 공학박사
2) 롯데건설 기술연구원 건축연구팀 책임연구원, 공학박사
3) 롯데건설 CM사업본부 설계기술팀 팀장, 건축시공기술사
* E-mail : paulus@lottenc.com

2. 기존문헌의 고찰

2.1 무근 콘크리트 표면박리 발생원인

Photo 1~3과 같은 콘크리트 표면에서의 부수러짐 발생 및 표면 박리 현상은 전형적인 콘크리트 동해 발생(Scaling) 상황이다. 콘크리트 동해란 콘크리트 주위의 온도가 강하하여 영하로 낮아지게 되면 콘크리트 내부 수분이 동결하게 되고 이로 인해 수분의 체적 팽창(약 9%)이 발생하면 콘크리트의 인장응력을 초과하는 팽창압력이 작용하여 콘크리트가 탈락하는 현상이다. 콘크리트의 동해 발생 메커니즘은 다음과 같다.

1) 콘크리트의 미세공극 내 수분이 큰 공극으로 이동
2) 큰 공극에 모인 물의 응결 팽창
3) 콘크리트 균열 및 박리, 박락 발생

Photo 2는 콘크리트 내부 공극 균열 확대 사진을 나타낸다. 콘크리트는 기본적으로 다공(多孔)성 재료이기 때문에 강우(降雨), 강설(降雪)과 같이 습윤한 조건 하에서는 콘크리트 내부로 수분의 침투가 용이하며 그 결과 기온이 0℃ 이하로 강하하여 수분의 결빙이 발생하기 쉬운 겨울이 되면, 콘크리트 내부 공극의 수분이 응결, 수분의 체적 팽창에 의한 균열이 발생하고 이러한 균열이 열결되어 표면 콘크리트의 박리, 박락이 발생하게 되는 것이다.

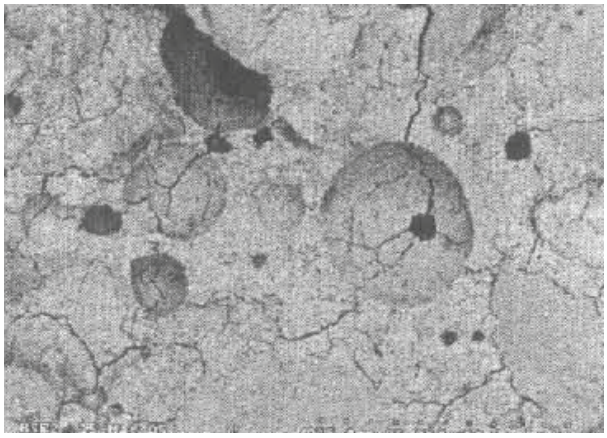


Photo 2 Larger view of pore crack in concrete

또한 국내에서는 겨울철 제빙제의 사용이 빈번한데, 이러한 제빙제가 콘크리트의 스케일링 현상에 미치는 영향을 조사한 결과 콘크리트 내 공극에 염화물이온의 공급으로 콘크리트 중의 세공용액의 이온농도가 높아지고 투수압에 의해 정수(淨水)압이 높아져 스케일링량이 증가하게 된다는 연구결과가 보고되고 있다. 따라서 동절기 무근 콘크리트의 표면박리 발생원인은 무근 콘크리트의 낮은 수밀성에 의한 외부 수분 및 염화물 이온의 침투가 용이하기 때문으로 사료된다.

2.2 무근 콘크리트 품질향상 방안 조사

기존문헌조사 결과 콘크리트의 수밀성 향상이 무근 콘크리트의 품질향상을 위한 주효한 방안으로 판단됨에 따라 수밀성 향상을 위한 방안을 조사하였으며, 본 연구에서의 실험, 평가 방법은 아래와 같다.

2.2.1 무근 콘크리트 강도 향상

콘크리트의 동결융해 현상은 콘크리트 내부의 물이 응결하여 체적 팽창이 발생한 압력에 의해 균열이 생성되는 것으로, 콘크리트의 강도를 향상시켜 콘크리트 인장강도가 팽창압력을 견딜 수 있도록 해주는 것이 동해저항성 향상을 위한 한가지 방법이다. ACI318-95와 ACI 201.2R-92의 내구성 관련 규정에서는 Table 1과 같이 노출상태 정도에 따라 물결합재비와 최소 콘크리트 강도를 명시하였으며, 노출조건이 열악할수록 물결합재비를 낮춰 강도를 향상토록 제안하고 있다. 외기에 노출된 무근콘크리트와 유사한 조건의 “습한상태에서 동결융해 혹은 제빙화학제에 노출된 콘크리트의 경우 물결합재비와 최고 콘크리트 강도

Table 1 Requirements for special exposure conditions

Exposure condition	Maximum water-cementitious materials ratio, by weight, normal weight aggregate concrete	Minimum *fc'*, normal weight and light-weight aggregate concrete, psi [MPa]
Concrete intended to have low permeability when exposed to water	0.50	4000 [28.0]
Concrete exposed to freezing and thawing in a moist condition or to deicing chemicals	0.45	4500 [31.5]
For corrosion protection of reinforcement in concrete exposed to chlorides form deicing chemicals, salt, salt water, brackish water, seawater, or spray from these sources.	0.40	5000 [35.0]

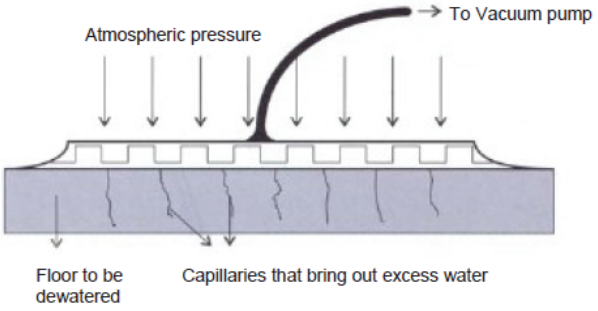
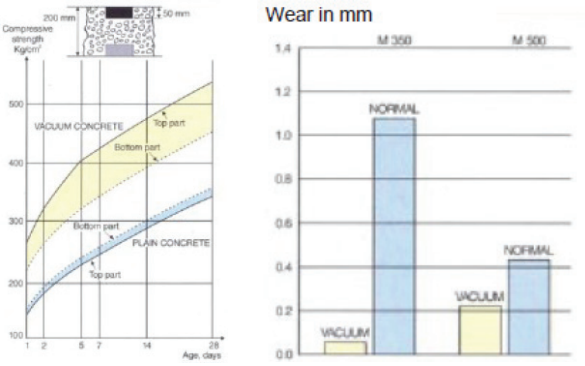


Fig. 1 Principle of vacuum drainage method



(a) 재령별 압축강도 (b) 마모깊이 평가

Fig. 2 Features of vacuum drainage method

는 45%, 콘크리트 최소강도 31.5MPa"로 콘크리트 요구사항을 명시하고 있다. 이에 따라 물결합재비 45% 이하, 강도 30MPa 이상 콘크리트를 내구성 향상 방안 중 하나로 설정하였다.

2.2.2 진공배수공법 적용

진공배수공법은 Fig. 1과 같이 타설된 레미콘 상부에 진공매트(suction mat + cover mat)를 덮어 배수펌프를 이용하여 콘크리트 내부 잉여수를 강제로 뽑아내는 공법이다. Fig. 2는 진공 배수공법 적용 여부(Vacuum : 진공배수, Normal, Plan : 일반)에 따른 압축강도 및 마모량을 평가한 것으로 공법 적용 시 상부 콘크리트 압축강도의 경우 약 20%(37.5MPa→45MPa) 향상되었으며, 마모저항성은 35MPa의 경우 약 90%, 50MPa의 경우 약 50% 정도 향상된다고 소개하고 있다.

진공배수공법은 무근 콘크리트 타설 후 콘크리트 내부의 잉여수를 강제배수함으로써 콘크리트 경화 시 내부 공극을 줄여주고 표면강도를 향상시킬 수 있다는 연구결과에 따라 내구성 향상 방안 중 하나로 설정하였다.

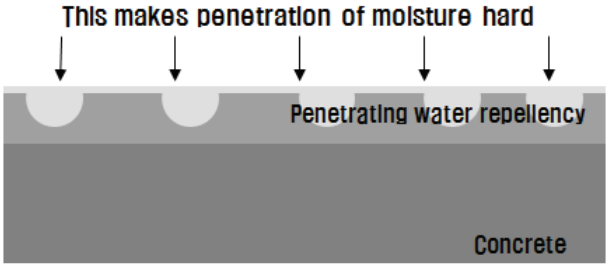


Fig. 3 Action principle of water repellency

2.2.3 콘크리트 표면 도포용 액상형 흡수방지재 시공

콘크리트는 다공성 재료로써 콘크리트 표면을 통하여 수분 및 외부 열화인자 침투가 용이하다. 표면 도포용 액상형 흡수방지재는 콘크리트 표면에 시공함으로써 콘크리트 내부로의 수분 및 염분의 침투를 억제하고 콘크리트 표면의 동해, 침식 및 철근 부식을 방지하고자 하는 목적으로 사용하는 재료로 KS F 4930(콘크리트 표면 도포용 액상형 흡수방지재)에서 자재의 요구성능을 규정하고 있다. 이에 액상형 흡수방지재를 콘크리트 표면에 도포하여 수밀성을 부여함으로써 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되어 내구성 향상 방안 중 하나로 설정하였다.

3. 실 험

3.1 실험개요

본 실험은 무근콘크리트의 품질향상 정도를 평가하기 위하여 내구성 저하요인은 동결융해 현상으로 가정하였다. 이는 무근 콘크리트의 품질저하가 주로 동절기 이후 콘크리트 표면의 스케일링 현상으로 조사되었기 때문이다.

본 연구에서는 무근콘크리트의 동결융해에 대한 품질향상 방법으로 기존문헌조사를 통해 결정한 1) 콘크리트 강도 상향, 2) 진공배수공법 적용, 3) 액상형 흡수방지재의 콘크리트 표면 도포로 하였으며 시험체의 개요는 Table 2와 같다. 제작된 시험체의 품질향상 정도 평가방법은 동결융해 시험을 통한 상대동탄성계수를 산정, 비교평가 하는 것으로 하였다.

3.2 사용재료

본 실험에 사용된 콘크리트는 24, 30MPa로 배합표는 Table 3과 같다. 사용한 결합재의 경우 시멘트(이하 OPC)는 국내 T사의 제품을, 슬래그시멘트(이하 SC)의 경우는

Table 2 Outline of experiment

	Concrete Strength	Vacuum drainage	water repellency	Number of specimens	
				Freezing & Thawing (300cycle)	Compressive strength (1, 3, 7, 28days)
1	24MPa	○	○	3EA	12EA
2			×	3EA	
3		×	○	3EA	12EA
4			×	3EA	
5	30MPa	×	○	3EA	12EA
6			×	3EA	

Table 3 Mixture of concrete by strength

Specification	W/B (%)	S/A (%)	단위재료량 (kg/m^3)								
			W	B	OPC	SC*	F/A	S1**	S2***	G	AD
25-24-150	48.0	48.5	170	354	177	177	-	422	437	936	2.48 (B×0.7%)
25-30-150	41.5	47.4	170	410	205	205	-	402	416	931	3.69 (B×0.9%)

SC*: Slag cement S1**: River sand S2***: Crushed sand

Table 4 Physical property of gravel

	density (g/cm^3)	absorption (%)	fineness modulus
20mm Crushed gravel	2.68	1.0	6.3

Table 5 Physical property of sand

구분	density (g/cm^3)	absorption (%)	fineness modulus
Crushed sand	2.63	1.9	3.63
river sand	2.54	1.2	1.79

국내 K사의 제품을 사용하였다. 골재는 김해석산 25mm 부순 골재를 사용하였고, 잔골재의 경우 김해석산 부순 잔골재와 경남 창녕 강사를 50:50의 비율로 섞어 사용하였고, 그 물리적 특성은 Table 5, 6과 같다. 혼화제의 경우 E사의 준 PC계 혼화제를 사용하였다.

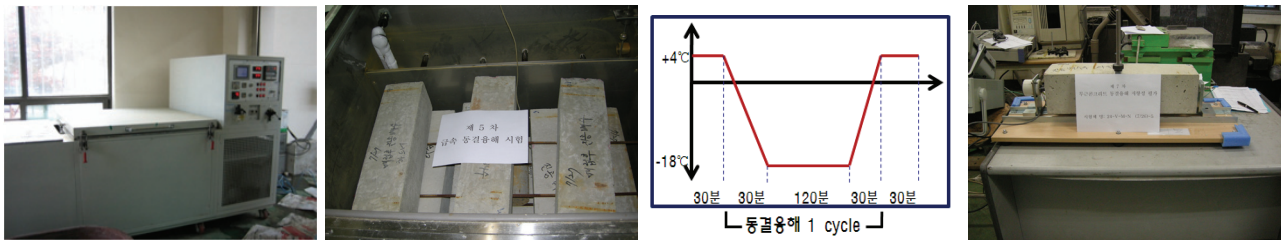
3.3 실험체 제작

동결융해 시험을 위한 시험체 제작은 가로×세로×높이 =15×15×55cm 크기의 몰드를 사용하여 실제 현장에서 타설하는 24MPa 무근 콘크리트로 제작하였으며, 30MPa 콘크리트의 경우는 실내에서 콘크리트 믹서를 이용하여 배합한 것을 사용하여 제작하였다. 굳지 않은 콘크리트의 물성은 슬럼프의 경우 150±25mm, 공기량은 4.5±1.5%로 현장 품질관리기준에 부합여부를 확인 후 시험체를 제작하였으며, 실내 배합의 경우도 상기 관리기준 만족여부를 확인하여 제작하였다. 특히, 24MPa 콘크리트의 경우 레미콘 차량을 이용한 현장 타설 콘크리트를 이용한 것으로 배합수량이 과다할 우려가 있어, 단위수량 측정기를 이용 관리하였으며 측정결과 단위수량 185kg/m^{3}를 나타냈다. 진공배수공법을 적용한 시험체의 제작은 실제 현장에서 진공배수공법을 적용하여 탈수시킨 무근 콘크리트의 상부 콘크리트를 직접 시험체 몰드에 퍼 담아 다짐을 실시하여 제작하였다.

압축강도용 시험체는 지름 10cm × 높이 20cm의 원주형 공시체 몰드를 사용하였으며, 시료는 동결융해 시험체 제작과 동일한 것을 사용, 제작하였다. 시험체의 양생방법은 현장의 무근 콘크리트 타설조건과 유사하게 하기 위하여 수중양생은 생략하고, 28일간 기건 양생만을 실시하였다. 그 후 Table 2의 액상형 흡수방지재 도포 시험체의 경우 콘크리트 표면에 액상형 흡수방지재를 도포 후 7일간 기건양생을 하였다. 사용한 재료는 미국 S사의 B제품을 시공하였다.

3.4 동결융해 실험방법

동결융해시험은 KS F 2456 (급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법) 중 B법인 기중 급속 동결 후 수중 융해 시험 방법으로 하였다. Fig. 4는 동결융해실험 진행과정을 나타낸다. 동결융해 1cycle의 시간에 따른 온도제어 곡선은 Fig. 4의 (c)와 같다. 동결융해저항성 평가는



(a) Freezing and thawing test equipment (b) Freezing and thawing specimens (c) Model of freezing and thawing cycle (d) Coefficient of elasticity measurement

Fig. 4 The progress offreezing and thawing test

Fig. 4의 (d)와 같이 동결융해 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300사이클 후 상대 동탄성계수를 측정, 그 결과를 비교하였다. 상대 동탄성 계수는 식 (1)을 이용하여 산정하였으며, 공명 진동수는 KS F 2437(공명 진동에 의한 콘크리트의 동 탄성 계수 및 동 푸아송비의 시험 방법)에 준하여 측정하였다.

$$P_c = \left(\frac{n_1^2}{n^2}\right) \times 100 \qquad (1)$$

여기에서,

P_c : 동결 융해 C사이클 후의 상대 동탄성 계수(%)

n : 동결 융해 0사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

n_1 : 동결 융해 C사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

4. 실험결과 및 결과분석

4.1 실험결과

4.1.1 진공배수공법에 따른 강도 상향 효과

진공배수공법 적용이 실제 콘크리트 강도 향상 효과가 있는지 여부를 확인하기 위하여 24MPa 레미콘에 대하여 진공배수공법을 적용하지 않은 시험체(24MPa-P)와 진공배수공법 적용 후 제작한 시험체(24MPa-V)를 대상으로 수중양생 재령 1, 3, 7, 28일 강도를 측정하여 비교하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 진공배수공법 적용 콘크리트의 강도가 적용하지 않은 콘크리트 보다 강도상향 효과가 확인(재령 1일, 16% 향상)되었으나 양생재령이 경과할수록 강도상향효과가 감소하여 재령 28일에는 유사한 강도(1% 향상)를 나타내었다.

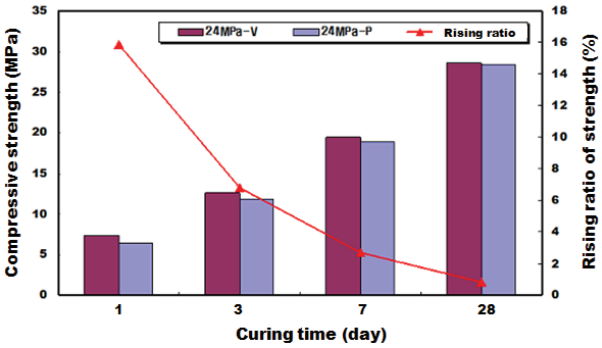


Fig. 5 Compressive strength test results of cylinders

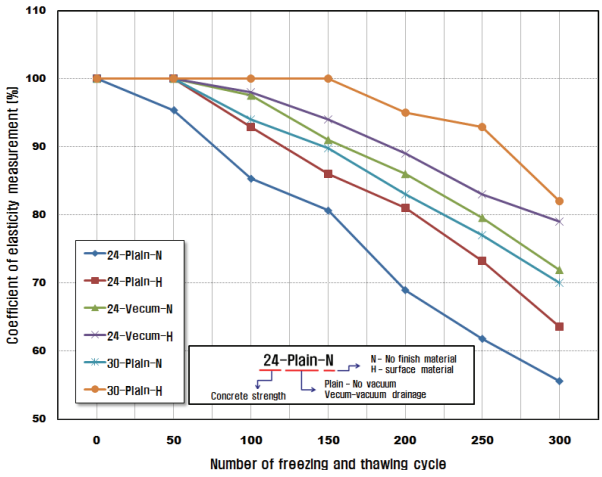


Fig. 6 Freezing and thawing test and evaluation result

실험결과를 바탕으로 진공배수공법은 초기 양생재령에서 콘크리트 강도발현을 향상시켜 겨울철 콘크리트 타설 및 양생 초기 콘크리트 동해방지에 효과가 있을 것으로 판단된다.

4.1.2 동결융해 실험결과

Fig. 6은 급속 동결 융해 300사이클 진행에 따른 콘크

Table 6 내구수명 예측결과 정리

구분	2방향 후면벽	1방향 벽체부	비고
적용 순피복 (mm)	85	85	Hyper-HD
표면염화물량 (kg/m^3)	14.43	14.43	
임계염화물량 (kg/m^3)	2.634	2.634	
철근위치에서의 염화물 이온농도 (kg/m^3)	2.63<2.64	1.34<2.64	
염해 내구수명 (years)	110.8	184.4	

리트의 상대동탄성 계수 평가결과이다. 동결융해 사이클 수가 증가할수록 전 시험체 모두 상대동탄성 계수가 감소하였는데, 이는 동결융해 진행에 따라 콘크리트 내부 공극 및 균열 증가로 공명진동수가 감소하기 때문이다. 실험결과 1) 콘크리트 강도 상향(24MPa → 30MPa)은 상대동탄성계수가 약 15% 상향되었으며, 2) 진공배수공법 의 경우는 약 15% 상향되었다. 3) 마감재인 흡수방지재 시공의 경우는 상대동탄성계수가 약 7~13% 상향되어 3가지 방법 모두 동결융해저항성능이 향상됨을 실험적으로 확인하였다.

4.2 결과분석

실험결과 강도 상향 및 진공배수공법 적용이 동결융해 저항성이 높게 나타났다. 특히 진공배수공법의 경우 28일 압축강도 시험결과 강도 상향폭이 크지 않았음에도 불구하고 동결융해저항성이 강도 상향의 경우와 유사하게 상대동탄성계수가 약 15% 정도 향상 효과가 나타났다. 이는 진공배수공법에 의해 콘크리트 표면부위가 탈수작용에 의해 잉여수가 크게 감소하여 경화 후 콘크리트의 조직이 치밀해진 결과로 판단된다. 흡수방지재 시공은 강도 및 진공배수공법 적용 여부에 상관없이 동결융해저항성 향상효과가 확인되었는데, 이는 콘크리트 표면에 흡수방지재 시공으로 수분의 침투가 어려워져 동결로 인한 동해현상이 감소하기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

무근콘크리트의 동해저항성능 향상을 위한 방안으로 1) 무근 콘크리트 강도 상향, 2) 진공배수공법 적용, 3) 표면도포용 액상형 흡수방지재 시공을 대상으로 동결융해 저항성 평가를 통한 내구성 향상정도를 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 무근 콘크리트의 강도 상향(24MPa → 30MPa)은 동결융해 시험 후 상대동탄성계수가 약 15% 상향되었다.

(2) 24MPa 무근 콘크리트에 진공배수공법을 적용한 결과 동결융해 시험 후 상대동탄성계수가 약 15% 상향되었다.

(3) 콘크리트 표면에 액상형 흡수방지재를 도포한 결과 동결융해 시험 후 상대동탄성계수가 강도에 따라 약 7~13% 상향되었다.

이상 상기 3가지 방법 모두 동결융해 시험 후 상대동탄성계수가 향상되어 동해에 대한 저항성이 향상된 것을 실험적으로 확인할 수 있었으며, 해당 방법으로 무근 콘크리트의 동해저항성이 향상될 것으로 판단된다. 다만 마감재의 경우 경시변화에 따른 자재의 성능저하가 일어날 수 있으므로 이에 대한 확인이 요구된다.

요 약

본 고는 동절기 이후 무근 콘크리트의 상부에서 쉽게 발생하는 스케일링 현상에 주목하여 무근 콘크리트의 동해 발생원인을 고찰하고, 이에 대한 내구성을 향상시키기 위한 방안을 기존문헌조사를 통하여 1) 강도향상, 2) 진공배수공법 적용, 3) 흡수방지재 시공의 방법을 선정하였다. 그 후 각 방법의 동결융해저항성 향상 평가를 정량적으로 평가하기위하여 동결융해 시험을 통한 상대동탄성계수를 측정하였다. 그 결과 1), 2)번의 경우 동탄성계수가 약 15% 향상, 3)의 경우 강도에 따라 7~13%향상됨을 실험적으로 확인하였다. 따라서 상기의 방법 모두 무근 콘크리트의 동결융해 저항성 향상에 유효한 방법으로 판단되며, 이를 통해 무근콘크리트의 빈번히 발생하는 품질저하 및 이로인한 유지보수비용 절감을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kim, G. Y., Park, C. K., Kim, H. J., Sohn, Y. S., Lee, S. H., “Scaling deterioration of concrete due to deicing salt”, Proceeding of the Korea Concrete Institute, vol. 17, No. 1, 2005, pp.177-180.
2. Kwon, Y. J., Kim, J. H., Han, B. C., Baik, Y. G., “Performance based durability design of concrete structures considering frost damage”, Magazine of the Korea Concrete Institute, vol. 18, No. 4, 2011, pp.41-48.

3. Lee, K. M., “Designing for durability of concrete structures”, Magazine of the Korea Concrete Institute, vol. 10, No. 2, 1998, pp.79−82.
4. http://www.dwgy.co.kr/vacuum_drainage.htm
5. Construction requirements, Part3, ACI 318 building code and commentary.
6. 前田哲宏, 畑中重光, 三島直生, 犬飼利嗣, “真空脱水処理を行ったコンクリートの初期の東海抑制効果について”, コンクリート工学論文集, vol. 25, No. 1, 2003, pp.383−388.

담당 편집위원: 유조형
(포스코건설 R&D Center)
johyeong@poscoenc.com