



콘크리트의 동결융해

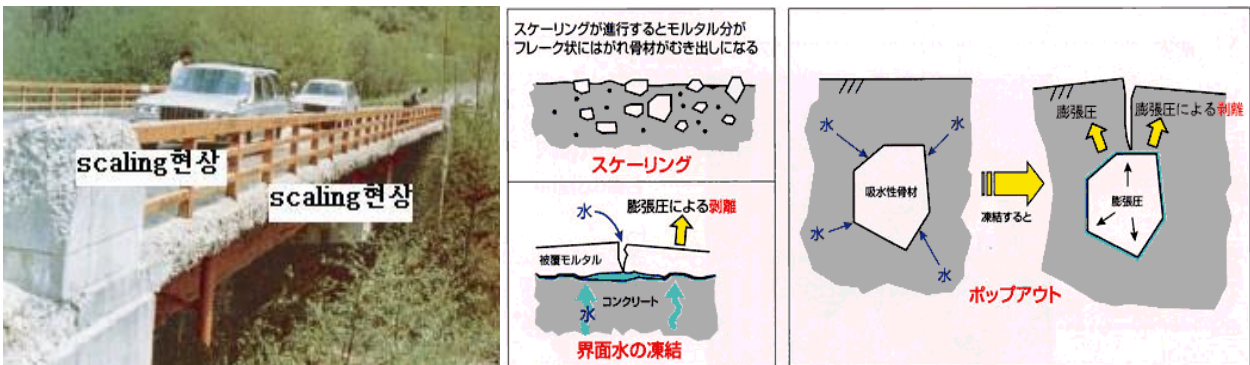
2010. 12.

콘크리트의 동결융해

1. 개요

동결융해란, 콘크리트중의 수분이 0℃ 이하로 될 때의 동결팽창에 의해 발생하는 것이며, 장기간에 걸쳐 동결과 융해의 반복에 의해 콘크리트가 서서히 열화되는 현상을 말한다. 일반적으로 동결융해는 콘크리트의 자유수나 흡수율이 큰 골재의 수분이 동결 융해 작용을 반복 받게 됨으로써 균열이 생기거나 표층 부분이 떨어지기도 한다. 일반적으로 물이 구속이 없는 자유로운 상태에서 동결하면 그 팽창량은 9%로 알려져 있습니다. 동결융해를 받은 콘크리트 구조물에서는 콘크리트 표면에 스케일링, 미세균열 및 팝아웃(pop-out) 등의 형태로 열화가 현상이 발생하게 되는 것이 일반적이다.

동결융해에 의한 손상 정도는 콘크리트 배합(단위시멘트량, 단위수량, 물시멘트비 등), 골재의 품질, 공기량 등의 콘크리트에 관한 요인, 부재의 단면 형상, 철근량 등의 콘크리트 구조체에 관한 요인 및 물의 공급 정도, 일사의 영향, 외기온(최저온도나 동결융해 횟수) 등의 콘크리트 구조물에 놓여진 환경 조건에 관한 것 등 많은 요인에 의해 결정된다. 동결융해는 AE 콘크리트를 일반적으로 사용하기 시작하면서부터 구조물의 내력에 영향을 미치는 손상은 비교적 적어졌으나 미관상, 사용상에 영향을 미치는 것이 많고, 유지관리상 큰 문제가 되고 있다.



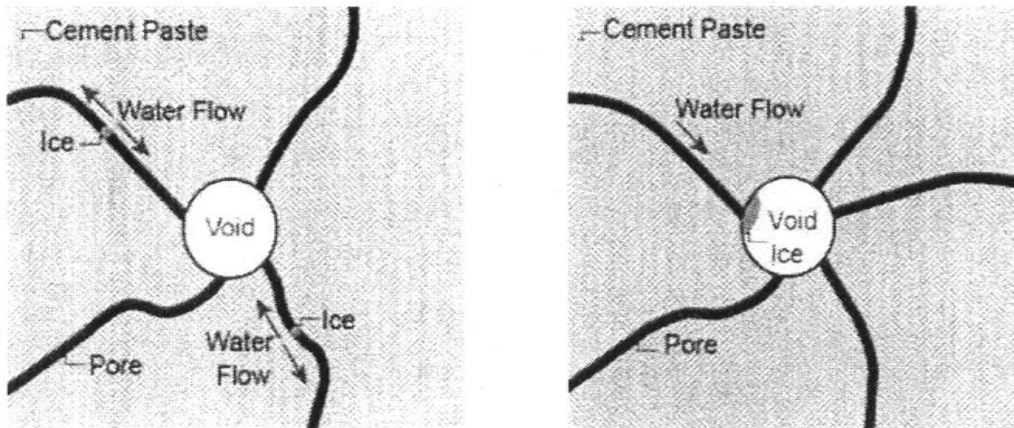
<그림 1-1> 동결융해 사진

2. 동결융해의 메커니즘

동결융해로 인한 콘크리트의 열화메커니즘을 정리하면 다음과 같다.

1) 수압설

<그림 2-1>는 수압설의 개념도를 나타낸 것이다. 물은 동결할 때 최대 9.1%의 체적 팽창이 발생하며, 시멘트 페이스트 내부에서는 공극의 벽으로 팽창이 이동된다. 이 체적 팽창률을 완화하는데 필요한 자유공극이 존재하지 않을 경우 큰 압력이 발생하고 이것이 열화의 원인이 된다. 온도가 떨어지면 우선 큰 공극중의 물이 동결하며, 이어서 작은 공극중의 물이 동결된다. 작은 공극 중의 물이 동결하는 과정에서는 큰 공극중에 생긴 얼음 결정에 의해 팽창이 구속된다. 이 팽창을 완화시킬 수 있는 만큼의 자유공극이 존재하지 않는 경우에는 큰 정수압이 공극의 벽에 작용하여 이것이 콘크리트의 인장강도에 도달했을 때에 균열이 발생한다. 이러한 팽창압의 반복 작용으로 결국 콘크리트 표면이 파괴 또는 박리·박락에 이르게 된다. 공극에 작용하는 정수압은 콘크리트가 냉각되는 속도, 함수량 및 콘크리트중의 기포와 기포간격에 따라 다르다.



(a) 모세과공극 벽으로의 압력 작용

(b) 기포에 의한 압력의 저감

<그림 2-1> 수압설의 개념도

2) 정수압설



콘크리트가 동결하는 과정에서 표면부분이 앞에서는 동결하는 온도에 도달하고, 동결층은 점차적으로 내부로 진행된다. 이 때 콘크리트 내부에서는 다음과 같은 현상이 일어난다.

- ① 처음에는 콘크리트의 표면에 접하는 물이 동결하여, 표면이 얼음으로 감싼 상태가 된다.
- ② 표면에 가까운 모세관 공극중의 물이 동결하여 물에서 얼음으로 변화함에 따라 체적 팽창분에 상당하는 미동결의 물이 포함되지 않고 아직 동결하지 않은 내부의 공극으로 이동한다.
- ③ 미동결수의 이동은 미세한 공극내에서 발생하므로 점성저항에 의한 정수압을 발생한다.
- ④ 정수압이 콘크리트의 파괴강도 이하로 작으면 균열은 발생하지 않는다. 그러나 보통의 냉각속도 범위내에서 미동결수의 이동은 경화체 조직의 파괴를 일으키는데에 충분한 압력으로 작용한다. 이러한 수압은 콘크리트 내부조직의 투수성이 낮게 발생하거나, 냉각속도가 빠르게 발생하는지 및 동결하는 물의 양이 많을 경우에는 더욱 커지게 된다. 이 메커니즘에 의한 속도를 막기 위해서는 공기로 가득찬 공극이 필요하게 된다. 공기는 정수압이 가해졌을 때 쉽게 체적이 축소되어 팽창압이 완화되기 때문이다.

3) 침투압설

침투압은 얼음과 공극중의 미동결수와 사이에서 발생한다. 이것은 모세관 공극중에 얼음결정이 형성된 후에 이 얼음결정이 보다 작은 세공에서 미동결수를 흡수함으로써 발생한다. 이러한 침투압에 의한 현상은 한계포화에 가까운 영역에 물을 이동시키는 원인이 되어 조직을 파괴하게 된다. 이것이 물시멘트비가 작은 콘크리트에 있어서 중요한 동결융해의 메커니즘이고 침투압은 염류 작용을 동반한 경우에 더욱 커진다. 해수에 접촉된 AE 콘크리트에서는 표면층의 스케일링(scaling)이 상당히 진행된 단계에서도 팽창열화를 볼 수 없는데 이것이 침투압의 작용에 의한 것이라고 할 수 있다.

4) 골재의 팽창설

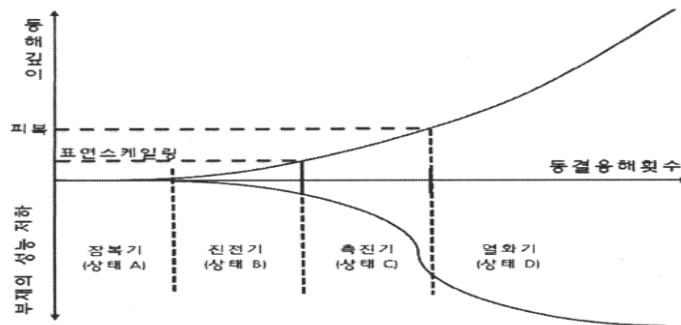
골재도 시멘트페이스트와 마찬가지로 공극중의 수분이 동결팽창하여 발생한 수압이 골재 강도보다 크게되면 파괴된다. 콘크리트 표층부에 있는 골재가 동결하여 팽창하면 팽창에 대한 저항성이 작은 외측을 향하여 골재가 파괴된다. 이 팽창압에 의해 골재 외측에 있는 모르타르가 밀려나가 팝 아웃(pop-out)이 발생하는 것이다. 팽창압은 모르타르의 인장강도, 콘크리트 표면부터 골재 윗면까지의 거리에 비례하고 골재 크기에 반비례한다.

3. 동결융해의 열화형태 및 열화과정

동결융해에 의한 콘크리트 구조물의 열화 형태는 주로 균열, 스케일링 및 팝 아웃(pop-out) 등으로 분류할 수 있으며 이러한 열화로 인하여 콘크리트 구조물의 미관을 나쁘게 하고 부재의 내력을 저하시켜 최종적으로는 구조물의 수명을 단축시킨다.

먼저 균열은 동결융해 작용을 받았을 때 초기 징후로서 발생하며 콘크리트 표면에 나타나는 지도모양의 균열과 구조물 이음부를 따라 나타나는 균열 등이 있다. 그리고 콘크리트의 스케일링은 동결융해 작용에 의한 열화 형태중에서 가장 일반적으로 발생하며, 시멘트 페이스트 부분이 얇게 박리되는 단계부터 굵은 골재가 노출되는 단계까지 여러 형태가 있다. 팝 아웃(pop-out)은 골재의 품질이 나쁜 경우에 잘 나타나고 콘크리트 표면 근처에서 강도가 낮은 골재가 동결 팽창하여 외측의 모르타 부분을 박리시켜 구멍에 생기는 형태이다. 이들 열화의 진행깊이(동결융해깊이)의 증대에 따른 성능저하는 <그림 3-1>처럼 잠복기(상태 A), 진전기(상태 B), 축진기(상태 C), 열화기(상태 D)로 분류할 수 있고, 각각의 기간에 있어서 열화현상이 구조물의 성능에 미치는 영향이 다르며 열화기마다 열화예측, 점검, 평가, 판정 및 대책이 다르다.

<표 3-1>는 각 열화과정의 정의와 기간을 결정하는 요인을 나타낸 것으로 잠복기의 길이는 골재의 물성과 콘크리트의 품질 및 구조물이 있는 장소의 환경 등이 결정되는 동결융해발생 가능성의 유무에 따라서, 가속기와 진전기의 길이는 동결융해 횟수와 동결수량 등으로부터 결정되는 동결융해깊이에 따라, 열화기의 길이는 강재의 부식 속도로부터 구해지는 강재의 부식량이 구조물의 내하력 등의 성능을 현저하게 저하시키는 기간에 따라서 각각 계산하는 것이 올바르다.



<그림 3-1> 동결융해깊이의 증대에 따른 성능저하

<표 3-1> 각 열화과정의 정의 와 기간을 결정하는 요인

열화 과정	정 의	기간을 결정하는 요인
잠재기(상태 A)	동결융해작용을 받는 열화가 발생하지 않는 기간	동결융해발생의 가능성 유무, 동결융해횟수
진전기(상태 B)	콘크리트 표면의 열화가 진행되지만 강재부식이 없는 기간	동결융해깊이 (동결융해횟수, 동결수량)
축전기(상태 C)	콘크리트의 열화가 심해져서 강재부식이 증대되는 기간	동결융해깊이, 강재의 부식속도
한계기(상태 D)	콘크리트의 열화 깊이가 피복이상되어 내하력의 저하가 현저한 기간	강재의 부식속도

4. 콘크리트의 동결융해 평가 방법

1) 급속동결융해시험

급속동결융해시험에서 가정 널리 이용되는 것은 ASTM C 666 Resistance of concrete rapid freezing and thawing 이다. 국내에서는 KS F 2456 급속 동결융해 시험법이 이용된다. 이 방법에는 수중동결수증융해 시험인 A 법과 기중동결수증융해시험인 B 법이 정해져 있다. 콘크리트 공시체의 중심온도가 동결시 -18°C , 융해시 $+4^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 수중 또는 기중에서 동결융해의 반복 작용을 1 사이클에 2~4 시간 정도로 300 사이클 또는 상해동탄성계수가 60% 이하가 되는 사이클까지 되풀이 한다.

2) 팽창량 시험

ASTM C 671 Critical dilation of concrete specimens subjected to freezing 은 시간당 2.8°C 라는 낮은 냉각속도로 1.7°C 부터 -9.4°C 까지 온도를 내려 이 사이의 콘크리트의 팽창량으로부터 내동결융해성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 냉각속도를 실제의 구조물의 상태에 가깝게 설정하여 동결에 의한 열화 정도를 평가하는 특징을 가지고 있다.

3) 스케일링 저항성시험



ASTM C 672 Scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals 는 융설염에 대한 콘크리트의 스케일링 저항성을 구하는 것으로 시험면을 염화칼슘 수용액, 염화나트륨 수용액 등에 침지시켜 16~18 시간 동결, 23℃에서 6~8 시간동안 용해를 반복하여 5, 10, 15, 25 사이클과 이후 25 사이클 마다 표면의 상태를 육안으로 관찰하여 0 부터 5 까지 6 단계로 분류하여 동결용해 저항성을 평가한다.

4) 기포조직시험

ASTM C 457 Microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete 는 현미경으로 콘크리트를 관찰하여 공기량, 기포의 비표면적, 기포간극계수 등의 기포조직을 구하는 시험방법이다. 동결용해 저항성에 필요한 콘크리트의 공기량은 환경조건과 굵은골재의 최대치수에 의하 다르지만 기포조직으로서 중요한 것은 아주 세밀한 기포가 분산해서 존재하므로 경화 콘크리트중의 기포화 분포를 조하하여 동결용해 저항성과 관계를 규명하는 연구가 있다.

5. 동결용해의 대책방안

동결용해 작용에 미치는 영향은 아주 크고 이러한 동결용해를 방지하기 위한 대책을 크게 분류하면 다음과 같다.

- ① 적절한 콘크리트의 재료 사용 및 배합설계
- ② 적절한 시공 및 동결용해 작용을 받기 전까지 충분한 양생
- ③ 수분 노출을 최소화할 수 있는 구조설계

이를 세부적으로 나누어 콘크리트의 배합설계를 통해 동결용해 저항성을 확보할 수 있는 일반적인 사항을 정리하면 다음과 같다.

1) 물-결합재비



동결융해를 방지하기 위해서는 모세관 공극을 줄이고 그 공극중에 포함되는 수분을 가능한 줄이는 것이 중요하다. 모세관 공극량은 물-결합재비에 의해 지배되므로 물-결합재비에 의해 지배되므로 물-결합재비를 되도록 작게하는 것이 바람직하다.

2) 공기량

공기량이 2~4%에서는 동결융해 저항성이 크게 변하고 있으며, 공기량이 4% 이상이면 우수한 동결융해 저항성을 확보할 수 있을 것이다. 다만, 공기량을 너무 연행하면 오히려 동결융해 저항성이 저하될 뿐만 아니라 압축강도도 저하된다.

따라서 동결융해 저항성을 높이기 위해서는 콘크리트를 배합설계 할때 적절한 공기량을 선정할 필요가 있다.

3) 사용재료

① 시멘트

경화된 콘크리트의 동결융해 저항성에 대해서는 규격에 만족하는 시멘트라면 통상 문제가 발생하지 않지만 혼합시멘트를 사용한 경우는 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 내구성능이 저하될 우려가 있다. 이것은 강도가 충분히 발현되기 전 동결융해 작용을 받기 때문으로 추정된다. 그 리고 강도 28MPa 이상이면 동결융해 저항성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

② 골재

콘크리트 용적에 약 70%를 차지하는 골재의 품질은 콘크리트의 동결융해 저항성에 큰 영향을 주며, 특히 굵은 골재는 팽 아아웃(pop-out)의 원인이 되기 때문에 흡수율이 낮은 것을 사용해야 한다. 그리고 모르타르와의 열팽창계수 차이가 $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 초과하는 골재는 사용하지 않는것이 좋다.

③ 혼화제

콘크리트의 동결융해 저항성을 확보하기 위해서는 양질의 기포조직을 형성할 수 있는 AE 제 사용이 무엇보다 중요하다. 그리고 감수제·고성능 감수제는 콘크리트 기포조직을 불안정하게 형성하여 동결융해 저항성이 저하되는 경우가 있으므로 사용하기 전에 품질을 확인 할



필요가 있다. 또한 증점제는 동결융해 저항성을 저하시킬 수 있으므로 주의해야 할 필요가 있고, 대책 방안으로 분말도가 높은 슬래그 미분말을 사용하는 방법 등이 있다.

④ 혼화재료

플라이애시에 포함된 미연탄소는 AE 제를 흡착하는 성질을 갖고 있기 때문에 소정의 공기량을 확보하기 위해서는 AE 제 사용량을 증가시킬 필요가 있다. 그러나 이러한 점을 유의하여 소정의 기포조직을 가진다면 플라이애시를 사용한 콘크리트라도 양호한 동결융해 저항성을 확보할 수 있다.

슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우 충분히 발현되기 전 동결융해 작용을 받기 때문에 동결융해 저항성 확보에 주의를 기울려야 한다. 따라서, 슬래그 미분말을 한중콘크리트에 사용하는 경우에는 초기양생 및 소요의 강도 보다 높게 배합설계 하는 것이 동결융해 저항성 확보에 유리하다. 실리카흄도 플라이애시와 마찬가지로 AE 제를 흡착하는 성질이 있기 때문에 주의해야 할 필요가 있다.

※ 참고문헌

1. 동의대학교대학원 건축공학과 황효재, 공학석사학위논문 2010년 2월,[동결 융해를 고려한 콘크리트의 염해 저항성 평가]
2. 이준구, 박광수, 조영권, 김명원, 김관호, 염해와 동해를 받는 콘크리트의 내구성 평가실험,한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 2005
3. 고경택, 김도경, 김성욱, 조명석, 송영철, 동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가, 한국콘크리트학회 논문집, 2001
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 2009, 제14장 한중콘크리트