

동해(凍害)와 그 대책(對策)

Frost Damage of Concrete and its Protection



윤 우 현*

1. 머리말

우리나라와 같은 기후조건에서 외기에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성은 무엇보다도 동해에 대한 저항성에 의해 결정된다. 또한 동결기에 교통안전상 콘크리트 표면의 얼음이나 눈을 제거하기 위해서 용빙·제설제가 사용되는 구조물에서는 동결-융해염에 대한 냉동해성이 추가적으로 요구된다.

동결및 동결-융해염에 의해서 콘크리트 구조물에 동해가 나타날 때마다 이런종류의 손상을 사전에 예방한다는 것이 매우 어렵다는 것을 알수 있다. 그 이유로는 비등결성 조직을 가진 콘크리트에 동결및 동결-융해염으로 인해 나타나는 동해 작용과정이 매우 복잡하기 때문이다. 또한 콘크리트 구조물의 시공및 구조적인 결함은 이러한 동해현상을 더욱 심화시킨다. 따라서 동해에 의한 콘크리트의 손상을 억제·예방하기 위해서는 콘크리트에 동해를 입히는 이들의 영향을 정확히 규명해야 하며, 이를 위해서는 손상형태, 콘크리트 조직 및 물리적인 현상에 문제의 초점을 맞추어야 한다.

2. 손상형태

동결및 동결-융해염에 의한 손상은 대부분 콘크리트 표면의 미세한 모르타층이 본체로 부터 분리되므로써 시작된다. 모르타층의 공극수가 동결 하면 주변(공극벽)에 팽창력(압축력)을 가하고 이에따라 동결부 주위에 응력상태가 형성된다. 이들 응력이 접촉강도(골재와 시멘트경화체)및 시멘트 경화체의 인장강도를 넘어 서면 모르타층은 본체로 부터 떨어진다(그림 1, 그림 2). 이런 현상은 고유응력에 의해서 이미 골재표면에 발생되어있는 미세 균열(Micro Crack)에 의해서 더욱 용이하게 된다. 또한 해마다 혹한기에 융해염(제설제)이 많이 사용되는 산간지방에서는 콘크리트의 골재가 냉동해성이 약하면 이러한 동해현상이 더욱 심각하다(그림 3).

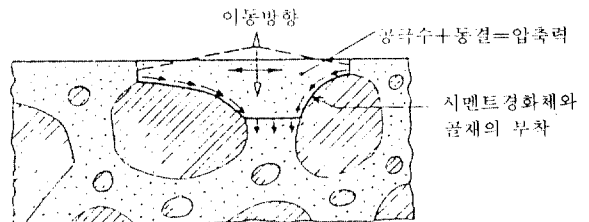


그림 1. 동결시 콘크리트 표면의 역학적인 거동

* 성희원, 대전대학교 토목공학과 교수, 공박

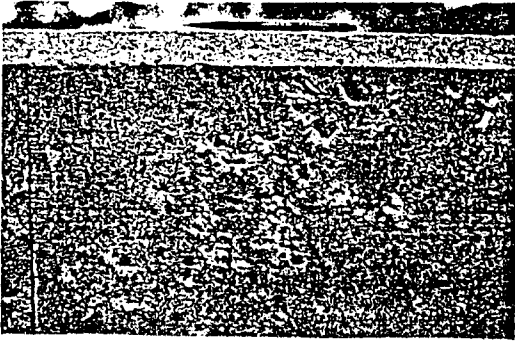


그림 2. 동결시 미세한 모르타층의 분리



그림 3. 골재의 내동해성이 약한 콘크리트의 동해

동해에 의한 손상은 콘크리트의 강도가 충분히 발현되지 않았거나 아직 습윤상태에서 맞는 최초의 동절기에 나타나기 시작한다. 시간이 지나면서 콘크리트 표면에서의 미세 모르타 층의 부분적인 분리현상은 대규모 박리 및 파열단계로 까지 진행된다.

철근 콘크리트 구조물에서는 콘크리트의 동해와 관련하여 철근의 부식현상이 나타난다. 콘크리트가 동해를 입으면 조직이 이완되거나, 표층박리 또는 균열이 형성되므로 대기로 부터 CO_2 와 SO_2 의 Diffusion이 용이 해져서 콘크리트의 중성화를 촉진시킨다. 따라서 피복층이 충분한 구조물 일지라도 콘크리트가 동해를 입으면 철근부식이 쉽게 나타날수 있다. 이런 종류의 철근부식 이외에도

염해염이 살포된 구조물에서는 염화물이온(Cl^-)이 침투하여 철근주위의 알칼리층을 파괴하면서 부식시키기도 한다. 철근부식으로 인한 체적 팽창은 피복층 콘크리트에 압축력을 가하고 결국은 동해와 비슷한 박리·파열현상으로 콘크리트에 손상을 준다.

3. 콘크리트의 조직

3.1 비등질성

콘크리트는 골재, 접합제 및 물, 공기로 이루어진 복합체이고 특히 표층부에는 비등질성이 강한 재료이다. 표층부, 즉 거푸집 부위에는 조골재와 함께 물, 시멘트 및 미세한 재료가 밀집되어 있어서 물-시멘트 비, 공극률 Shrinkage, 강도, 탄성계수, 열팽창계수 등의 특성치가 심층부와는 상이하다. 따라서 외력이나 온도·습도의 변화에 의해서 콘크리트 내부에 응력분포가 형성되어 미세균열(Micro Crack)이 발생할 수 있다. 심층부와 비등질성인 표층부의 깊이는 대체로 최대 골재 치수의 약 2/3 정도라고 볼 수 있다(그림 4).

콘크리트의 내동해성에 대해 주요한 영향인자인 전체 공극률의 분포는 표층부에서는 아주 불균등하게 형성되었다(그림 5). 따라서 염화물 침투시 콘크리트의 함수량, 제설제의 반복적인 사용으로 인한 염화물농도와 온도분포가 단면의 깊이에 따라서 균등하지 않다(그림 12, 그림 13).

콘크리트의 동해 과정 과원인을 파악하기 위해서는

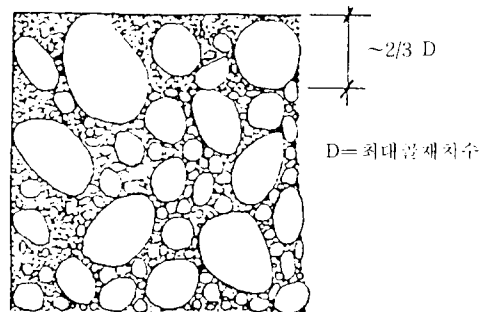


그림 4. 콘크리트 조직의 비등질성

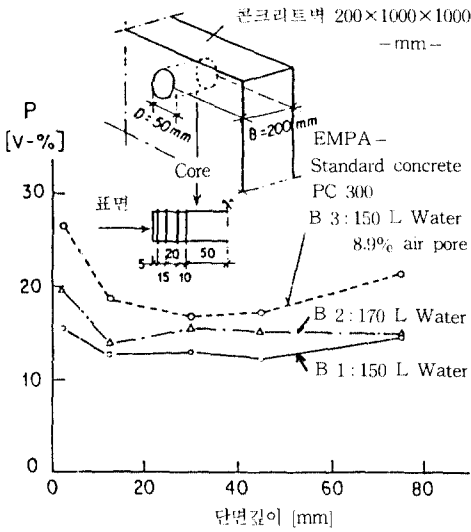


그림 5. 단면깊이에 따른 전체공극량

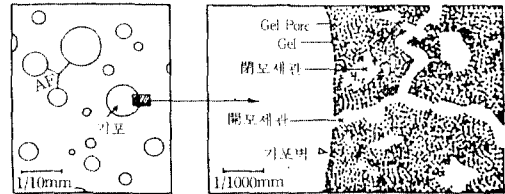
골재와 시멘트 경화체의 특성이 검토되어야 한다. 그러나 사용된 골재가 깨끗, 치밀하고 양호한 입도분포와 내동해성인 것이라고 한다면 시멘트 경화체에 대한 문제만 남게된다. 따라서 본 고에서는 이점에 대해서만 언급하려 한다.

3.2 시멘트 경화체의 조직 및 공극

시멘트 경화체의 조직은 매우 복잡하다. 시멘트 경화체 내에는 시멘트와 물이 반응해서 생긴 다량의 침상형의 수화물이 아주 치밀하게 서로 엉켜있다. 이들 수화물은 콜로이드, 비결정형의 견고한 Gel 또는 Xerogel이라 하는 것으로서 100-400m²/g의 굉장히 큰 비표면적을 갖고있다. Gel 자체내에는 물이 화학적으로 결합되어있고 Gel과 Gel 사이, 즉 Gelpore(직경=2-4·10⁻⁶mm)에서는 물리적으로 결합되어있다. 이런 Gel 공극수는 표면장력과 밀도가 대단히 크고 접착력이 강하여 쉽게 증발되지 않는다. Gel 공극수는 대체로 약 105℃에서 증발 되고, 빙점은 -25℃에서 -78℃ 이하이다.

시멘트 1g을 완전히 수화 하는데 필요한 물량은 화학적, 물리적 결합수를 합하여 대략 0.4g 정도이나 실제 현장에서는 작업성을 고려하여 이보다 많은량의 물을

사용한다. 이러한 잉여 혼합수는 콘크리트가 경화한 후에 Capillary Pore(모세관 공극)에 존재하게 된다. Capillary Pore의 직경은 10⁻³-10⁻⁵mm 정도로서 일부는 서로 연결되었고, 일부는 격리 되었다. Capillary Pore 속의 수분은 비교적 쉽게 증발되고, 또한 모세관 작용으로 쉽게 충전된다(그림 6). Capillary 공극수는 Gel공극수보다 표면장력이 낮기 때문에 빙점이 높다.



AE-시멘트 경화체의 AE-현상제인 다음 기포조직에 대한

그림 6. 시멘트 경화체 공극구조

콘크리트 배합시 특수한 혼화제(AE-제)를 사용하면 직경 10⁻³-1mm 정도의 기포가 발생하는 데 이들 기포가 충분한 량과 적당한 크기(0.05mm-0.3mm)를 가지고 아주 고르게 분포되어 있다면 콘크리트의 내동해성이 훨씬 향상된다. 이들 기포는 Capillary 공극수가 동결할 때 나타나는 체적팽창에 대한 여유공간을 제공하고, 모세관 작용을 약화시켜 지속적인 동결에 필요한 수분공급을 억제하기 때문이다. 이때 무엇보다도 중요한 것은 AE-제에 의해서 형성된 기포가 물이 아닌 공기로 채워져 있어야 하는 것이다. 정상적인 조건에서는 기포주위에 Capillary Pore가 밀집되어 있어서 기포속의 수분은 모세관 작용으로 동결 전에 이미 Capillary Pore로 배수된다. 실제 기포를 물로 채우려면 진공상태를 유지하거나 가압을 해야 가능하다.

4. 손상원인

4.1 동결

동해의 주원인은 콘크리트 공극수의 동결이다. 여기서 물이 얼음으로 변할때 무엇보다도 주의할 점은 다음과 같다:

- 체적증가
- 동결 에너지

-콘크리트 공극수의 상이한 빙점

물이 얼면 9.1% 정도 체적이 증가한다. 이 증가량은 입방체의 한변길이가 약 3%($1.03^3=1.09$) 늘어나는 것과 같다. 참고로 콘크리트는 인장시에 0.01%, 압축시에 0.2% 정도의 변형성이 있다. 만일 물이 얼때 체적팽창이 구속되 있다면, 예를 들어서 100% 물로 채워진 공극이 동결할 때는 공극벽이 압축력을 받아 파열된다. 동결압의 크기는 동결속도에 좌우되나 이론적으로 200 N/mm² 까지 될수 있다. 그러나 콘크리트에서 발생하는 동결압력은 여러가지 이유로 해서 이값보다는 작다. 사실 위의 값이 유지 된다면 자연적인 동해에 대해서 구조물이 하나도 온전치 못할 것이다. 실제의 동결압력이 작은 이유는 콘크리트 속에서 얼음형성 속도가 자연조건 하에서는 제한 되었기 때문이다. 즉, 콘크리트 속의 물은 급속히 또는 전부위에서 얼지 않는데 이에 대한 원인으로는 다음과 같은 것을 들수 있다:

-1kg의 얼음을 녹이기 위해서는 약 80kcal의 에너지가 필요하다. 반대로 물을 얼리기 위해서는 이열량(응결열)이 주변으로 발산되어야 한다. 공극수의 동결 속도는 이런 응결열이 콘크리트 속에서 얼마나 쉽고 빠르게 방출되느냐에 따라서 좌우된다.

그림 7은 여러 조건의 동결·융해과정에서 시간에 따른 콘크리트 표면온도 변화를 보여준다.

- 즉, a) 융해열에 의해서 얼음이 녹을 때(Temperature Shock),
- b) 자연 상태에서 얼음이 녹을 때,
 - c) 자연 상태에서 동결된 염분용액이 녹을 때,
 - d) 자연 상태에서 물이 얼을 때,
 - e) 자연 상태에서 염분용액이 얼을 때 온도변화이다.

여기서 알 수 있는바와 같이 자연상태에서, 다시 말해서 융해열을 사용하지 않은 경우 물이 얼때(그림 7.d), 공극속의 물이 완전히 동결될 때까지는 아무리 외부 냉각상태가 지속 되더라도 온도가 0℃를 유지하게된다. 이런 제한된 동결속도에 의해서 동결 부위의 물은 주변의 물로 채워지지 않은 공극이나 콘크리트 표면으로 빠져 나가게 되어 동결시 높은 압축력 발생을 억제 시킨다.

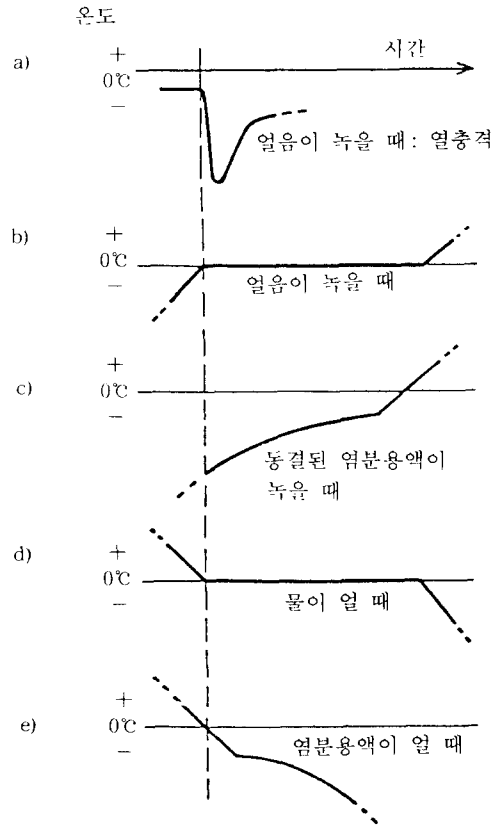


그림 7. 동결, 융해시 콘크리트표면 온도변화

-콘크리트 속의 물은 화학적으로 순도가 낮고 석회나 융해염과 같은 여러가지 수용성 물질을 함유하고 있으므로 일반적으로 빙점이 0℃ 이하이다. 그리고 빙점은 이들의 농도가 증가할수록 더욱 낮아진다.

-공극수의 빙점은 공극의 직경에 좌우된다. 즉, 공극 직경이 작을수록 빙점온도는 낮아 진다(그림 8).

-공극의 빙점이 낮아지는, 다시말해서 공극수의 동결이 늦어지는 또 다른 이유는 응결에 필요한 핵의 결핍이다. 따라서 공극수는 우선 빙점 이하로 냉각되어야 하며, 이로 인해서 응결에 필요한 핵이 서서히 형성된다. 이때 부터는 동결 에너지가 신속히 발산될 수 있기 때문에 공극수의 동결은 빨라진다.

이상의 현상 때문에 콘크리트 공극수는 공극마다 각각 상이한 온도에서 동결한다. 따라서 콘크리트 내부에는

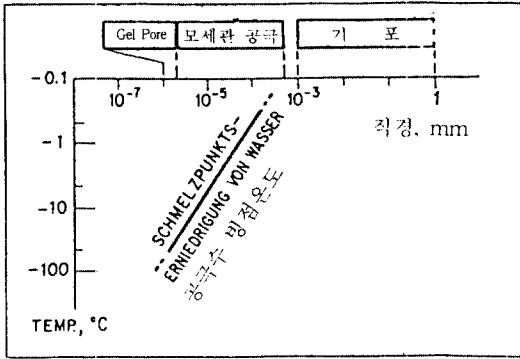


그림 8. 공극의 크기와 빙점과의 관계

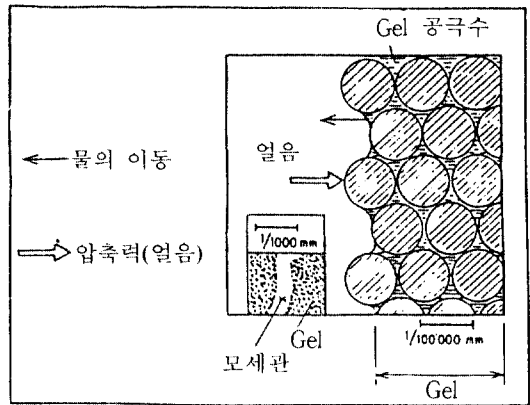


그림 9. 모세관의 동결, 팽창

비록 외부 기온이 자연 상태에서 물의 빙점 이하로 지속 되더라도 물과 얼음이 동시에 존재하게 된다. 만일 어느 한개의 공극에서 물이 언다면, 또한 이때 공극이 물로 완전히 채워지지 않았거나 동결중인 공극수의 물이 주변의 빈 공극 또는 기포 등으로 빠져 나갈수 있는 시간적 여유가 있을 때에는 얼음은 주변에 압축력을 가할 수 없다. 상기 두 경우 모두 동결에 의해 발생하는 체적증가 즉, 팽창 변형량을 주변 빈공간에서 흡수된다. 이를 위해서는 콘크리트의 함수량, 포화도가 한계치 이하이거나 또는 충분한 양의 기포(Air Pore)가 콘크리트 속에서 아주 고르게 분포 되어 있어야 한다. 동결-팽창에 대비한 여유공간 형성은 공기 연행제(AE-제)같은 혼화제를 사용하는 방법과 다공질의 미세한 플라스틱 기공을 사용하는 방법이 있는데, 후자는 AE-제 사용시의 단점, 즉 필요한 기포의 크기(0.05-0.3mm)를 정량적으로 얻을 수 없는 단점을 개선할 수 있다.

콘크리트가 동결로 인해 손상을 받는 원인으로는 위에서 기술한 바와 같이 한공극 내의 물이 얼면서 나타나는 체적팽창에 의한 것이 있고, 모세관 작용으로 인한 공극의 점진적인 동결팽창에 의한 것이 있다. 실제로 벤졸과 같이 동결시 체적이 줄어드는 액체를 이용해서 실험한 결과 모세관 작용으로 인해서 시멘트 경화체가 동해를 입는다는 것이 관찰된바 있다. 모세관 작용으로 콘크리트 속의 비교적 큰 공극에는 얼음, 작은 공극에는 물이 동시에 존재한다. 동일한 온도에서 물위의 증기압은 얼음위보다 높기 때문에 공극사이에는 열역학적으로 평형이 유지되지 않고 불안정한 상태를 가진다. 열역학적인 평형·안

정상태를 갖기 위해서 주변의 작은 공극속의 물은 모세관 작용으로 동결된 큰 공극으로 이동하여 얼기 시작한다. 따라서 외부온도가 더욱 내려가지 않더라도 큰 공극에서는 동결이 계속 진행되어 얼음체적이 커지고 이와 동시에 공극벽에 가하는 압축력이 증가하게 되어 결국은 공극이 파열되는 동해를 입게 된다(그림 9).

4.2 동결-용해염

동결및 용해염의 복합 작용으로 콘크리트는 매우 심한 동해를 받게 되는데 이것은 무엇 보다도 다음과 같은 현상에 기인한다:

- 용해염에 의한 열충격(Temperature Shock)
- 용해염의 흡습성
- 콘크리트의 총상동결
- 용해염의 결정압(結晶壓)

열충격은 용해염의 흡습성 반응으로 나타나며, 이때 얼음을 녹이는데 필요한 용해열(80kcal/kg 얼음)은 용해염 자체에서 조달되는 것이 아니고 주변, 즉 콘크리트에서 충족 된다. 콘크리트는 다공질 흡습성재료로서 열용량과 열전도율이 매우 크기 때문에 열충격시, 즉 용해염 살포시 표면부에서의 온도는 아주 빠른 속도로 급냉각 된다. 그림 10은 1mm두께, -5°C의 얼음이 덮혀있는 콘크리트 표면에 용해염을 살포했을 때 표면부 각위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. 여기서 알수있는 바와같

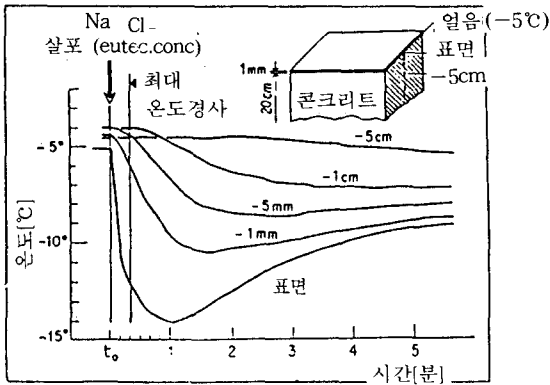


그림 10. 열충격시 콘크리트 표면부의 온도변화

이, 열충격후 1분 되는 시점에서 콘크리트 표면온도는 -14°C , 깊이 1mm에서는 -11°C , 5mm에서는 -9°C 그리고 10mm에서는 -7°C 까지 내려간다.

융해염 살포에 따른 열충격시 콘크리트에 나타나는 동해현상은 다음과 같다.:

- 급냉각 현상에 의해서 녹은물은 콘크리트 내부 깊숙히 침투하여 동결한다. 이런과정은 아주 신속히 진행되므로 얼음의 체적 증가량을 흡수할 시간적 여유가 없다. 따라서 빙압(동결압)은 더욱 강하게 공극벽에 작용한다.
- 콘크리트의 냉각현상이 진행됨에 따라 각 시점마다 단면의 온도분포가 불균등하게 되어 고유응력이 발생하고, 이들응력의 크기는 콘크리트의 인장강도를 넘어서기도 한다(그림 11). 따라서 콘크리트 표면부에서는 미세균열(Micro Crack)이 발생하고, 반복적인 동결·융해 작용으로 콘크리트의 조직이 이완되며 결국은 파괴된다.

한편 열충격시 콘크리트의 온도는 사용된 융해염의 농도(단위면적당 사용량)에 좌우된다. 즉 그림 10에서의 온도분포는 300 g/m^2 의 NaCl을 살포했을 경우인데, 이값은 -21.2°C 에서 1mm 두께의 얼음을 녹일수 있는 양이다. -5°C 에서는 최소 70 g/m^2 으로 1mm 두께의 얼음을 녹일수 있는데, 이 두 경우에서 콘크리트 표면에 나타나는 최대 인장응력은 각각 2.03N/mm^2 , 0.94N/mm^2 로서 최소값을 사용했을 때의 응력이 약 절반 이하로 줄어든다는 것을 알수있다.

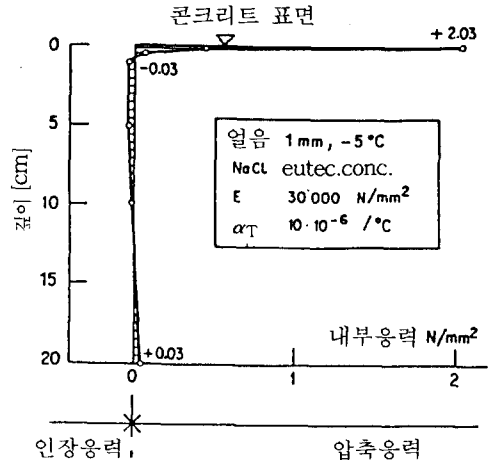


그림 11. 열충격시 콘크리트의 응력분포(그림 10의 $t=20\text{ sec}$ 의 온도분포로 계산한 값)

동결과 융해염의 복합 작용에 의한 콘크리트 손상의 또다른 원인은 융해염의 흡습성이다. 융해염용액위의 증기압은 순수한 물위 보다도 작기 때문에 모세관 영향을 받는 다공질 재료의 콘크리트는 더많은 수분을 흡수한다. 따라서 융해염이 침투된 콘크리트에서는 수분함량이 증가되어 동결시의 빙압이 매우 크게 작용한다. 실제로 제설제가 살포된 도로표면은 보통의 경우 보다 습윤상태가 더 오래 지속 되는데, 이것은 융해염의 흡습성에 기인한다.

동결과 융해염의 복합 작용으로 콘크리트는 층별동결이 되기도 한다. 콘크리트 표면에 살포된 융해염은 Fick의 제2법칙에 의해 콘크리트 내부로 침투 하면서 단면에 염화물 농도경사를 형성한다(그림 13). 이때문에 단면 깊이에 따라 각 공극수의 빙점과 함수량이 서로 다르고, 공극율이 일정치 않기 때문에 층별동결 현상이 나타날 수 있다(그림 5, 그림 12).

그림 14에서 알수 있는 바와 같이 융해염 살포시 콘크리트 단면의 온도곡선과 공극수의 빙점곡선은 동일하지 않고 교차 하게 된다. 따라서 표층부와 어느 일정한 깊이의 콘크리트가 먼저 동결(1차동결)하고, 냉각현상이 계속 되면 이 두층사이의 콘크리트가 동결(2차동결)한다. 이때 나중에 동결한 부분은 그 인접층이 이미 동결이 완료됐으므로, 팽창된 체적을 흡수할 수 있는 공간이 존재하

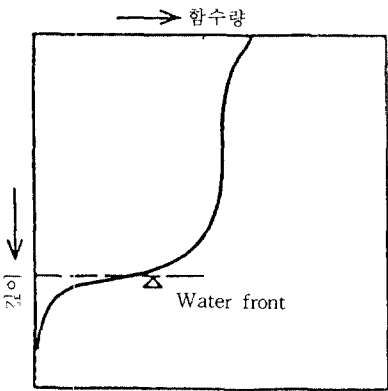


그림 12. 융해염 용액에 의한 콘크리트 함수량변화

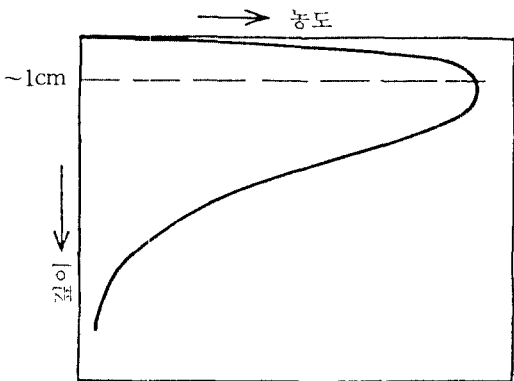


그림 13. 콘크리트의 염화물 농도분포

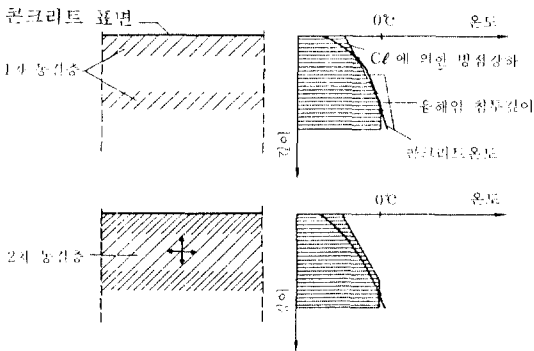


그림 14. 융해염 살포시 콘크리트 표층부의 동해과정

지 않게되어 높은 압축력을 주위에 가하면서 콘크리트를 파열 시킨다.

비교적 큰 공극, 즉 Capillary Pore의 염용액은 일부 수분이 증발하거나 동결되어 과포화 상태가 되면서 結晶化 한다. 이런 현상은 공극수가 동결하는 현상과 비슷하다. 즉 주변의 작은공극의 염이온은 큰 공극으로 이동하여 염의 결정화를 지속시킨다. 이로인해 Capillary Pore에는 결정체의 체적증가에 의한 結晶壓이 작용하는데 이것은 또다른 동결및 융해염의 복합작용에 의한 콘크리트의 손상요인이다.

5. 대책

앞절에서 기술한 바와같이 동결및 동결-융해염에 의한 콘크리트 손상과정은 매우 복잡하며, 이것은 콘크리트 자체의 품질조건과 외부환경조건이 복합적으로 작용하여 나타난다. 콘크리트의 동해에 대한 저항성은 무엇보다도 함수량, 공극율에 좌우되고 특히 미세 기포함량은 모세관수(Capillary Pore Water)동결시 팽창에 대해 여유공간을 제공하여 동해를 감소시키는 중요한 역할을 한다. 따라서 콘크리트의 동해예방및 감소를 위해 다음과 같은 대책이 필요하다:

- 동결가능한 수분함량의 최소화
- 동결시 팽창에 대한 충분한 여유공간확보
- 융해염 영향(열충격)의 최소화
- 보호피막및 덧씌우기 작업

본절에서는 콘크리트 내동해성 향상을 위한 대책을 콘크리트 품질, 구조적인 대책및 유지관리, 사후보호대책의 측면으로 나누어 검토하고자 한다.

5.1 콘크리트 품질

우선 골재는 깨끗하고, 치밀하고, 입도분포가 양호한 내동해성 골재를 사용해야한다. 또한 동결-융해염에 대해 높은 저항성을 갖기 위해서는 분말입자($\phi < 0.125\text{mm}$)함량을 다음과 같이 제한해야 한다(DIN 1045):

즉, 최대골재치수 $\text{max. } \phi = 8\text{mm}$ 에서는 $425 \sim 525\text{kg/m}^3$

max. $\phi = 16\text{mm}$ 에서는 $400 \sim 450\text{kg/m}^3$

max. $\phi = 32\text{mm}$ 에서는 $350 \sim 400\text{kg/m}^3$

max. $\phi = 63\text{mm}$ 에서는 $275 \sim 325\text{kg/m}^3$

또한 시멘트함량은 최소 300kg/m^3 이상이 되도록 SNV 640461에 규정되어 있다.

물-시멘트 비는 0.40을 넘지 않도록 하여 콘크리트 속의 Capillary Pore 발생을 최소화한다. DIN 1045에 의하면 동결작용에 의한 동해가 예상되는 구조물에서는 0.60으로 제한하고 있으나, Mass Concrete 나 AE-제에 의한 기포함량이 충분한 콘크리트(AE-제 기포 콘크리트)에서 0.70까지 높일 수 있다. 그러나 동결-동해염에 의한 동해가 예상되는 AE-제 기포 콘크리트 구조물에서는 0.50으로 제한한다.

AE-제에 의한 기포는 적당한 크기($0.05\text{mm} < \phi < 0.3\text{mm}$)를 갖고 콘크리트 속에서 균등히 분포 되어야 충분한 동해방지 기능을 가질수 있다. 기포의 균등한 분포란 시멘트 경화체의 어느 한점에서 다음 기포까지의 거리가 0.20mm를 초과하지 않아야 한다는 것이다. 이론적으로 보통 콘크리트의 공극수가 동결할 때 체적팽창을 9.1%를 손상이 감당하기 위해서는 최소 1.5%의 기포함량이면 충분하다. 그러나 미세 기포발생시 유효직경 0.05-0.3mm의 범위를 벗어나는 기포량과 다짐 결합에 의한 기공, 그리고 높은 함수량에 의한 Capillary Pore 발생량을 고려하면 필요한 기포량은 더욱 많아진다(약 2배이상). 여기에 운반, 타설, 진동다짐시의 손실량(20-25%)를 고려해야 한다. DIN 1045에 의하면 동결에 대한 내동해성이 요구되는 구조물의 필요한 최소 기포량을 사용된 최대 골재치수(max. ϕ)별로 다음과 같이 정하고 있다:
즉, 최대골재치수

max. $\phi = 8\text{mm}$ 에서는 5.0 Vol.-%

max. $\phi = 16\text{mm}$ 에서는 4.0 Vol.-%

max. $\phi = 32\text{mm}$ 에서는 3.5 Vol.-%

max. $\phi = 63\text{mm}$ 에서는 3.0 Vol.-%

한편 동결-융해염에 대해 내동해성이 요구되는 구조물에서는 상기의 값보다 약 0.5 Vol.-% 정도 높히도록 권하고 있다.

콘크리트는 충분히, 완전하게 Mixing 해야한다. AE-제를 사용할 때는 Mixing 기간과 균질성에 세심한 주의를

해야한다. 보통 콘크리트에서는 약 60초 이상, AE-제 기포 콘크리트에서는 약 90초 이상 Mixing해야한다.

가장 어려운점은 현장에서 상기의 특성을 가진 콘크리트를 장기간 균일하게 생산하고 타설하는 것이다. 이는 단지 굳지않은 콘크리트의 엄격한 품질관리, 즉 타설직전 콘크리트의 Consistency, 밀도, 기포함량을 정확히 통제하므로써 얻을수 있다. 그리고 재래식 목재 거푸집은 흡수성이 있으므로 다른 거푸집 재료보다 콘크리트의 내동해성에 좋은 영향을 준다. 콘크리트의 타설과 다짐은 시험 시공에 의해 정해진 방법으로 실시하며, 특히 진동다짐시에는 다짐기간이 너무 길면 거푸집과의 경계면에서 재료 분리현상이 나타나고 미세기포가 형성되지 않으므로 주의해야 한다. 거푸집제거 후에는 습기나 열이 외기로 방출되지 않도록 콘크리트 표면을 Sheet, 매트 등으로 덮어야 한다. 콘크리트는 동결기전에 충분히 경화되어 하고, 융해염 사용전에 가능한 한 한번은 건조상태를 가져야한다. 특히 동결-융해염에 대한 저항성을 위해서는 최소 1주일간은 양생작업이 필요하다.

5.2 구조적인 대책

구조적인 대책으로는 다음과 같은 것을 들수 있다:

- 콘크리트가 완전하고 치밀하게 타설되어 결함이 발생되지 않도록 한다.
- 가능한한 균열발생을 억제한다.
- 표면수는 신속히 배수되도록 한다.
- 철근 피복두께는 충분하게 한다.

따라서 구조물의 단면형상은 가능한한 단순하고 충분한 치수를 가져야 한다. 철근은 시방서 기준에 맞도록 배치하고, 콘크리트에 공동결함이나 불필요한 부분이 생기지 않도록 주의하여 타설해야 한다. 균열예방을 위해서 구조물 전단면을 Prestressing하거나, 신축이음을 설치하여 구속응력발생을 억제한다. 특히 중요한 것은 철근 피복 두께인데 DIN 1045에는 동결-융해염에 대해 최소 40mm 이상이 되도록 규정하고 있다.

5.3 유지관리

콘크리트 내동해성을 위한 유지관리 사항은 무엇보다도 융해염 살포시 콘크리트에 작용하는 열충격을 최소화 하는데 초점이 맞추어져야 한다. 즉:

- 동절기에 콘크리트 표면수는 완전히 배수되어야 한다.
- 융해염은 기후변화와 콘크리트 온도를 고려한 최소량으로 균등히 살포되어야 한다.
- 많은 양의 융해염은 소량으로 여러번 나누어서 살포한다.
- 쌓인 눈은 신속히 제거하여 동결직전 융해염 용액이 콘크리트에 침투되지 않도록 해야한다.

5.4 사후 보호대책

세심한 주의에도 불구하고 콘크리트가 심한 동해를 입었다면 손상된 부위를 Impregnation 이나 덧씌우기를 하여 계속적인 동해에 대해서 보호할 수 있다. 물론 이런 보수작업시 중요한 것은 기층콘크리트의 양호한 품질, 즉 충분한 밀도, 강도 및 내동해성이다. 기층 콘크리트 표면은 Sand Blasting 이나 Water-Sand Blasting 방법으로 철저히 면처리를 하여 손상된 부위와 미세모르타 층을 제거해야 한다. 부식된 철근은 노출시켜 녹을 제거하고 방청도장을 해야 한다. 만일 단면재생을 위해서 모르타를 바를 경우에는 Consistency에 세심한 주의를 하여 Shrinkage 균열이 발생되지 않도록 해야한다. Impregnation 작업으로 공극은 흡습성이 약화 되어 수분이나 염용액 침투가 억제되므로 콘크리트 표면이 내동해성이 향상 될수있다. 콘크리트 표면 전체를 치밀한 재료로 덧씌우기 하면 수분이나 염용액 침투가 방지된다. 사용되는 재료는 Polymer나 Polymer-Modified Cement Mortar가 있고, 덧씌우기 전에는 항상 면처리 작업을 하여 기층과 덧씌움 재료의 접착이 양호 하도록 해야 한다.

콘크리트의 내동해성 향상을 위해 덧씌움 재료는

- 내구성이 있어야 하고,
- 콘크리트와 접착성이 좋아야 하고,
- 폭 0.3mm까지의 균열변형에 무리없이 견뎌야하고(높은

변형성),

- 실제 현장조건 하에서 적용가능 해야하며
- 보수·재생이 간단해야 한다.

접착성과 변형성은 서로 상반되는 특성으로서, 덧씌움 재료가 이 두가지 성질을 동시에 만족한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 아주 잘 접착된 얇은 덧씌우기 층에서 쉽게 균열이 발생하는 반면, 변형성이 큰재료로 균열표면 덧씌우기를 했을 때는 기층과의 경계면에서 접촉파괴가 쉽게 나타난다. Impregnation이나 덧씌움 재료는 먼저 시험을 거쳐서 사용가능성을 확인 해야 한다. 그리고 성공적인 보수작업을 위해서는 좋은 재료를 사용하는것 이외에도 기층 콘크리트 면처리가 잘되었어야 하고, 콘크리트의 온도, 습도가 사용되는 재료와 부합해야 한다.

6. 맺음말

본고에서는 콘크리트 구조물의 동해원인과 그 대책에 대해 조사하였다.

동결 및 동결-융해염에 의한 콘크리트의 손상과정을 정확히 규명하고, 필요한 구조적인 대책, 콘크리트의 신기술 적용 및 세밀한 시공으로서 내동해성인 콘크리트를 제작할 수 있다.

물론 공사에 수반되는 모든 과정, 즉 계획, 설계, 시공, 감리, 유지관리가 철저히 이루어져야 할 것이다. 여기서 콘크리트의 내동해성은 절대적인 것이 아니고 예정된 사용기간내에 구조물의 안전성에 해를 끼치는 손상이 나타나지 않는다는 것이다. 미관적인 손상, 즉 표층의 미세한 모르타 박리와 같은 동해는 완전한 예방이 불가능하다. 따라서 동해에 의한 손상정도의 허용여부는 철근부식과 관련하여 정해져야 한다. 다시말하면 동해로 인해 표층박리 및 균열이 발생한 콘크리트를 통해 유해물질인 CO₂, SO₂, Cl의 Diffusion이 동해를 입기전 건전한 상태의 콘크리트에서보다 얼마나 빨리 진행되는가에 따라 손상정도의 허용여부가 정해져야 한다.

참 고 문 헌

- 1) Beaudoin, J.J.; MacInnis, C: The Mechanism of

- Frost Damage in Hardened Cement Paste. Cement Concrete Research 4(1974), pp.139-148.
- 2) Bluemel, O.W.; Springenschmid, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung and Ueberwachung von Luftporenbeton. Strassen-und Tiefbau 2(1970), pp.92-98.
 - 3) Hansen, W.C.: Crystal growth as a source of expansion in Portland-Cement Concrete. Proc. ASTM 63(1963), pp.932-945.
 - 4) Harnik, A.B.; Roesli, A.: Temperaturschock und Eigenspannung in Beton unter Frost/Tausalz-Einwirkung. Professur fuer Materialwissenschaften ETH Zurich 6(1974).
 - 5) Harnik, A.B.; Roesli, A.: Temperaturschock beim Auftauen von vereistem Beton mit Tausalz. Schweizerische Bauzeitung 46(1975), pp.735-739.
 - 6) Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin (1974).
 - 7) Meier, U.G.: Die Entstehung von Oberflaechenschaden durch das Abkuehlen von schichtweise gefronemem Beton. Material+Technik 2(1979), pp.92-95.
 - 8) Meire, U.G.: Die physikalischen Ursachen der destruktiven Wirkung von Frost und Tausalz auf Beton und andere poroese Stoffe., Material+Technik 1(1979).
 - 9) Roesli, A. & his coworker: Frost- und Tausalz bestaendigkeit von Beton. Schlussbericht Forschungsprojekt 9/1978. Strassenbauforschung des Eidg. Departements des Innern.
 - 10) Roesli, A.; Harnik, A.B.: Zur Frost-Tausalz-Bestaendigkeit von Beton. Schweizerische Ingenieur und Architekt 46(1979), pp.929-934.
 - 11) Roesli, A.: Einwirkungen von Frost- und Frost-Tausalz auf Beton. Weiterbildungskurs SIA, Bern 1/2(1982).
 - 12) Roesli, A.: Frost- und Frost-Tausalz-Bestaendigkeit von Beton, Bestaendigkeit von Stahlbeton. SIA - Dokumentation 72, 4/1984, pp.21-31.
 - 13) Ruesch, H.: Stahlbeton-Spannbeton Band 1. Werner-Verlag Duesseldorf(1973).
 - 14) Studer, W.: Porositaet des Betons. EMPA - Bericht No.10'747/1.
 - 15) Wesche, K.: Baustoffe fuer tragende Bauteile Teil 2 Beton. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin (1981).

국제학술회의 개최 안내

1. 회의명 : Third International Workshop on Bridge Rehabilitation
2. 일 시 : 1992. 6. 14~6. 17
3. 주 최 : Technical University Darmstadt, Darmstadt, Germany
4. 장 소 : Maritim Konferenz - Hotel, Darmstadt