

염해를 중심으로 한 콘크리트의 복합성능저하

Combined Deterioration of Concrete Durability with Respect to Salt-Attack



안기용*
Ki-yong Ann



김진철**
Jin-Cheol Kim



김도겸***
Do-Kyum Kim



이상호****
Sang-Ho Lee

1. 서론

동해지역에 건설된 토목구조물은 동결융해의 반복적인 환경하중에 의해 콘크리트의 균열 및 스케일링으로 인한 성능저하가 발생함은 널리 알려져 있다. 그 중 도로 구조물의 경우 강설(強雪)시 발생할 수 있는 도로에서의 안전사고 방지를 위해 용빙제(deicer)의 사용이 널리 통용되고 있다. 결과적으로 도로구조물은 동해의 피해와 용빙제의 사용에 따른 염해의 피해를 동시에 받는 위험에 노출되며 이때 발생하는 구조물의 손상 및 공용수명 단축에 대해서는 공감하고 있으나 이에 대한 대책 및 연구는 국내에서 극히 제한적으로 행해지고 있다.

염해와 동해는 콘크리트 열화에 있어 서로 다른 메커니즘에 의해 발생하나 열화속도를 상호 가속함으로써 콘크리트 구조물의 수명단축의 원인이 된다. 예를 들면 동해의 경우 콘크리트 내 외부에 균열을 발생시키고 심한 경우 스케일링이 발생하게 된다. 염해는 용빙제에서 비롯된 염소이온의 침투로 콘크리트 내부에 존재하는 철근의 부식이 발생하고 이는 다시 콘크리트의 균열을 진전시킴으로써 구조물의 열화를 가속시킨다. 그런데 동해로 인한 콘크리트의 균열은 염소이온의 침투속도를 빠르게 할 뿐만 아니라 철근부식의 인자인 물과 산소의 공급을 더욱 가속함으로써 철근부식으로 인한 피해가 더욱 심각할 수 있다. 또한 철근부식에 의해 발생된 콘크리트 내부의 팽창력(내부응력)에 의해 콘크리트의 균열이 추가적으로 발생하며 이는 동해로 인한 콘크리트 균열 및 스케일링을 더욱 빠른 속도로 진전시킨다.

이러한 동해-염해 복합열화는 용빙제의 종류, 콘크리트의 물성에 따라 열화정도가 영향을 받는다. 지금까지 용빙제는 염소이온을 바탕으로 한 화합물이 널리 사용되고 있다. 특히 염화나

트륨, 염화칼슘, 염화마그네슘을 주로 사용하고 있다. 이러한 용빙제는 <표 1>에서 보는 바와 같이 각기 어는점이 다르며 염소이온 외의 양이온의 차이로 인해 시멘트 계에서의 생성화합물이 상이할 뿐만 아니라 콘크리트 물성에 미치는 영향 또한 차이를 나타낸다. 또한 콘크리트의 배합(물-시멘트비, 결합제의 종류)에 따라 동해가 미치는 영향은 상당한 차이를 보이며 이는 염해의 진전속도에도 상당한 영향을 가진다.

2. 염해와 동해의 복합성능저하 메커니즘

콘크리트 공극수 내에 염소이온이 존재할 경우 동결융해는 시멘트계 표면에서의 염수화 된 공극수를 동결시킴으로 인한 부피 팽창으로 콘크리트 구조물에 염해스케일링(salt-scaling)을 발생시킨다. 그러나 동해-염해 복합열화는 그 이론적 배경이 매우 복잡하며 여러 종류의 열화 메커니즘과 상호복합적으로 전개되어 해석에 어려움이 있다¹⁾. 동해 과정에서 용빙제가 사용될 경우, 공극수의 동결-융해점은 용해된 알칼리나 염소이온에 의해 낮아진다. 게다가 표면 장력의 영향으로 자유수보다 동결 에너지가 낮아진다. 공극수가 동결할 때 고체-액체 경계면의 곡률은 공극의 직경에 좌우된다. 그러므로 작은 공극에서의 동결-융해 온도는 보통 물에 대한 동결-융해 온도보다 낮아진다. 1.5 nm 이하의 공극에서 동결점은 -70°C 이하가 된다. 게다가 냉각 동안에 작은 공극에서 발생하는 압축력은 작은 공극에서 큰 공극으로의 수분 확산을 야기한다. 얼음은 전선의 형태 또는 각 공극에서 결정핵생성 과정으로 형성된다. 얼음의 비부피가 액상 수분보다

표 1. 용빙제의 종류

용빙제	화학식	융빙점(°C)
염화나트륨	NaCl	-11
염화마그네슘	MgCl ₂	-24
염화칼슘	CaCl ₂	-25

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수
k.ann@yonsei.ac.kr

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원

**** 정회원, 대림건설연구소 책임연구원

크므로 결정핵생성 과정에 따라 공극 내 압력이 증가하여 결과적으로 공극 밖으로 액상 수분을 배출하게 된다. 이와 같이 배출되어 빈 공극이 주변 공극에 활용이 가능해진다면 고체 매트릭스에서는 손상이 발생하지 않을 것이다.

만약 공극을 통과한 얼음 전선에 의해서만 동결이 좌우된다면 공극의 불연속성에 의해 과냉각된다. 이 과정에서 좋지 못하게 연결된 큰 공극은 더 낮은 온도에서 동결된다. 또한 용빙제의 사용은 동결-융해 과정에서 온도 재분배에 영향을 미친다. 용빙제를 사용할 때 콘크리트 표면에서는 더 낮은 온도에서 동결이 일어난다. 얼음에서 물로의 상변화가 일어나기 위해서는 주변으로부터 열 공급이 수반되어야 한다. 따라서 콘크리트 표면 주변에서 추가적인 냉각이 발생하게 된다. 결과적으로 더 커진 온도 경사는 추가적인 내부 응력을 야기한다. 이에 따라 콘크리트 표층에 균열 및 스케일링이 발생하게 된다<그림 1>. 동해-염해의 복합열화의 또 다른 파괴 메커니즘은 삼투효름이다. 공극수 내의 용질 이온의 농도차에 의해 삼투압이 결정된다. 콘크리트 내에서 공극을 연결하는 작은 공극을 채운 수분은 이온의 자유흐름을 방해한다. 따라서 삼투차가 필요한 반투막 역할을 하게 되는 것이다.

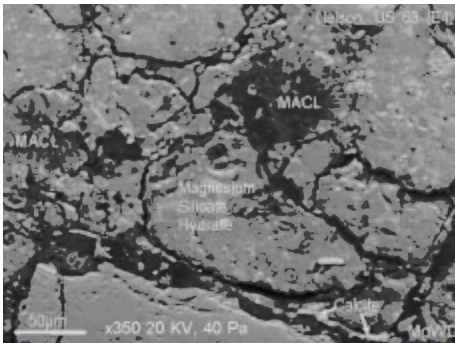


그림 1. 동해를 입은 콘크리트의 균열형상

3. 염해와 동해의 복합성능저하 영향인자

콘크리트 성능에 대한 콘크리트 구성의 영향은 잘 알려져 있다. 특히 용빙제를 사용할 때 동결-융해 조건에서 다양한 유형의 콘크리트 성능에 대해 광범위하게 연구되었다. 콘크리트의 공극구조와 수분 함유량은 표면 염분 스케일링 저항성에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는데 굳지 않은 콘크리트에 공기 연행제를 사용함으로써 공극구조 내에서 동결 동안에 배출되는 수분을 여유있게 수용할 수 있는 공간을 확보하여 저항성을 향상시킬 수 있다.

염해 스케일링 저항성을 강화하기 위해 사용되는 첨가제의 유효성에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. 열화비율(콘크리트 표면에서 박리되는 재료의 양)은 콘크리트의 구성에 의해 크게 좌우된다. 첨가제가 사용된 일부 콘크리트에 대해 초기 동결 사이클 동안에 열화속도가 빠르게 나타나기도 했다. 스케일링 과정은 절단면에 대해 거의 선형적으로 비례했다. 그러나 흠손 마무리 면에 대해서는 초기 동결 사이클 동안에 약하고 다공성의 표층이 손실되기 때문에 선형적으로 비례하지 않는다.

또한 콘크리트 배합 중 물-시멘트비 및 결합재의 종류에 따라 서로 동해-염해 복합열화에 미치는 영향이 크다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 물-시멘트비가 클 경우 동해에 따른 염소이온의 침투가 급격히 증가한다. 이는 물-시멘트비가 클 경우 잉여 배합수에 따른 공극량이 증가하고 이는 동해에 의해 발생하는 균열의 원인이 된다. 즉 물-시멘트비가 증가할수록 콘크리트의 다공질화 현상은 동해에 치명적인 균열을 발생시킴과 또한 염소이온의 침투를 가속화 시킴을 알 수 있다. 결합재 영향에 관해서는 기준의 가설과는 매우 상이한 결과가 관찰된다. <그림 2>에서 보듯이 고로슬래그미분말(GGBS; Ground Granulated Blast Furnace Slag)를 치환한 콘크리트는 지금까지 염소이온 침투에 대해 탁월한 저항성을 가지고 있음은 주지의 사실이

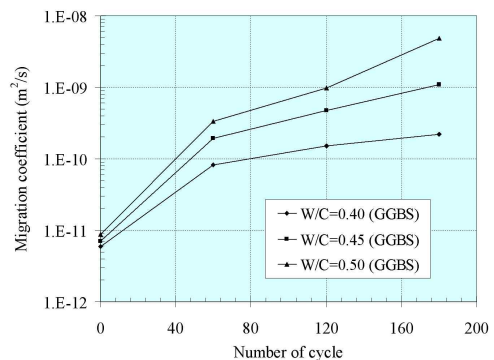
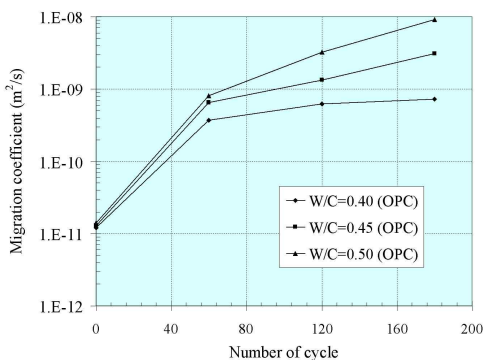
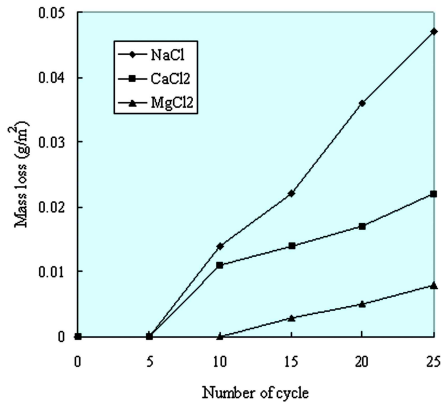
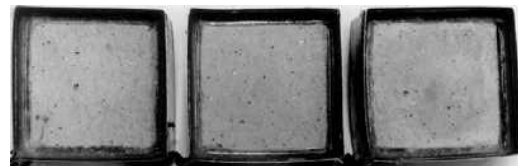


그림 2. 동결융해환경에서의 물-시멘트비 및 결합재에 따른 콘크리트 염분침투계수



(a) 동결융해에 따른 콘크리트의 중량손실



Before freeze and thaw



After freeze and thaw

MgCl₂ NaCl CaCl₂
(b) 동결융해에 따른 모르타르 시편의 손상

그림 3. 동결융해 시 용빙제의 종류에 따른 콘크리트 및 모르타르의 열화

다. 그러나 동해-염해 복합열화의 경우 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트는 물-시멘트비에 따라 복합열화에 대한 저항성이 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 물-시멘트비가 높은 경우에는 고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트가 동해 이후 발생하는 염소이온 침투에 상당한 저항성을 보이거나 물-시멘트비가 낮은 경우에는 오히려 보통포틀랜드시멘트 콘크리트보다 염소이온 침투가 활발함을 알 수 있다. 이는 물-시멘트비가 작은 경우 발생공극량 감소에 의한 것으로 판단된다. 물-시멘트비가 작은 경우 공극량의 감소는 동해가 일어날 때 발생하는 수압이 더욱 높아져 공극간의 내부압력의 증가 및 균열발생의 원인이 된다. 즉 고로슬래그미분말을 사용할 경우 물-시멘트비가 작은 콘크리트에서는 공극간 연결성이 감소함으로써 공극간 수압이 오히려 크게 증가하여 동해-염해 복합열화에 취약하게 된다.

용빙제의 종류에 따른 동해-염해 복합열화에 관해서는 위에서 언급한 염화나트륨, 염화칼슘 및 염화마그네슘의 사용에 따른 동해정도를 비교할 수 있다. 최근 연구에 따르면 <그림 3>에서 보듯이 염화나트륨을 사용할 경우 동해로 인한 스케일링의 정도가 가장 심각하며, 염화마그네슘이 동해로 인한 스케일링에 가장 저항성이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 그 원인은 불명확하며 다만 염소이온과 결합한 양이온이 시멘트계 내에서 해리되는 과정에서 발생하는 수화생성물과의 화학적 결합물이 영향을 미칠 것이라는 가설만이 존재하고 있다.

4. 맺음말

우리나라의 경우 강원도 산간지역에서 겨울철 강설로 인해 용빙제의 사용이 상례화 되어 있다. 또한 동해로 인한 콘크리트 및 도로 표면에서의 스케일링 발생이 빈번하며, 콘크리트 구조물

자체의 열화로 인해 성능저하가 보고되고 있어 동해와 염해에 의한 복합열화 사례에 대해서는 그 가능성이 매우 높을 것으로 판단되나 보고된 사례는 아직 없다. 겨울철 도로의 안전을 위한 용빙제 사용이나 동해의 가능성을 동시에 피할 수 있는 방법은 현재로서는 전무한 실정으로 이에 대한 연구가 매우 시급하다고 할 수 있다. 또한 동해-염해의 복합열화는 콘크리트의 물성 및 용빙제의 종류에도 민감히 반응하므로 이에 대한 정량적 기준의 제시와 더불어 동해를 최소화 할 수 있는 콘크리트의 개발 및 염소이온 위주의 용빙제가 아닌 다른 비염화성 용빙제의 개발 또한 대두되는 과제이다. □

참고문헌

1. H. Lee, R.D. Cody, A.M. Cody and P.G. Spry, Effects of Various Deicing Chemicals on Pavement Concrete Deterioration, Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings, 2000, pp. 151 ~ 155.
2. T.S. Kim, K.Y. Ann, S.H. Jung, J.P. Hwang, H.W. Song, An experimental study on the relation between chloride transport and microstructural characteristics under the freeze and thaw damage, ConMat 09: the 4th International Conference on Construction Materials, Nagoya, Japan, 2009, pp. 709 ~ 714.
3. J. Selih, Performance of concrete exposed to freezing and thawing in different saline environments, Journal of Civil Engineering and Management, 2010, Vol. 16, pp. 306 ~ 311.

담당 편집위원 : 권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr