

동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성 설계

Performance Based Durability Design of Concrete Structures Considering Frost Damage



권영진*
Young-Jin Kwon



김재환**
Jae-Hwan Kim



한병찬**
Byung-Chan Han



백용관***
Yong-Kwan Baik

1. 머리말

철근콘크리트 구조물은 <그림 1>에 나타난 바와 같이 공용 기간 중 비, 바람, 눈 및 일조 등과 같은 다양한 환경작용의 영향을 받고 있어, 이로 인하여 온도변화, 건습반복 및 동결융해 작용 등에 의해 수축팽창이 발생하고 있으며, 동결융해, 염해 및 탄산화와 같은 각종 성능저하요인에 의해 최근 건축 및 토목구조물 등 콘크리트 구조물의 철근부식, 균열발생 및 구조내력 저하 등 성능저하현상이 심각한 문제점으로 대두되고 있다¹⁻⁴⁾.

이에 따라 내용연수가 극도로 저하되어 구조물의 안정성 및 거주성이 약화되고 불량해질 뿐만 아니라 디자인 어피어런스 측면에서도 도시환경파괴의 주역이 되고 있어, 성능저하된 철근콘크리트 구조물의 장수명화 및 내구성 회복이 국가·사회적으로 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다.

한편, <표 1>에서 보는 바와 같이 우리나라는 겨울철에 전국 대부분의 기온이 영하로 떨어지는 횟수가 많아 매년 동결과 융해 작용이 반복적으로 이루어져 철근콘크리트 구조물의 성능저하요인 가운데 동결융해에 의한 피해가 적지 않은 것으로 보고되고 있다^{8,9)}.

이와 같은 동결융해 작용의 경우 콘크리트는 다공질이기 때문에 습기나 수분을 흡수하며, 결빙점 이하의 온도에서는 흡수된 수분이 동결하면서 동결의 진행 및 형태로 먼저 표면의 공극수가 동결되어 체적이 약 9.1% 증대하기 때문에 팽창력이 발생하여 동결부 주위에 응력상태를 형성하게 된다. 이러한 작용이 내부로 전진되면서 철근부식 및 탄산화 등과 같은 복합적인 내구성의 저하요인이 되며, 동결 및 융해의 반복으로 콘크리트의 내구성이 저하되기 때문에, 콘크리트의 사용재료, 배합설

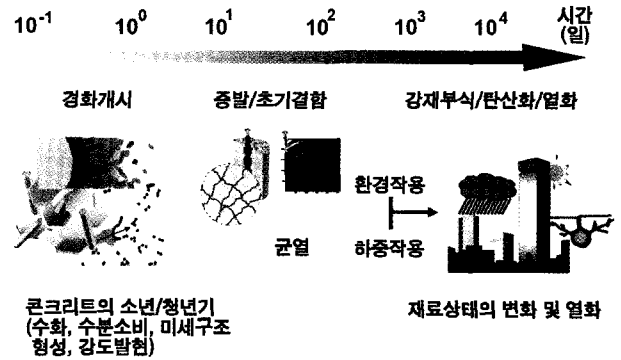


그림 1. 콘크리트 구조물의 일생

표 1. 국내 동결융해에 관한 기상 데이터

| 지역 | 연평균 동결 최저온도(°C) | 연평균 동결융해 사이클 수 |
|----|-----------------|----------------|
| 춘천 | -6.5 | 127 |
| 서울 | -5.1 | 90 |
| 대전 | -4.8 | 98 |
| 대구 | -3.7 | 80 |
| 광주 | -3.5 | 78 |
| 부산 | -3.1 | 40 |

계 등에 유의하여야 한다⁵⁻⁷⁾.

본고에서는 동해의 메커니즘과 현황, 동해에 대한 설계열화의력, 성능검증형 일반설계법 및 표준사양선택형 설계법에 의한 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성설계에 관하여 기술하고자 한다.

2. 동해의 메커니즘 및 현황

2.1 동해의 메커니즘

동결융해작용에 의한 콘크리트의 열화메커니즘은 많은 연구자에 의해 제안되어 왔지만, 아직 확실히 해명되지 않았으며,

* 정회원, 호서대학교 소방방재학과 교수

kjh0999@empal.com

** 정회원, (주)AMS엔지니어링 기술이사

*** 정회원, 한국원자력안전기술원 책임기술원

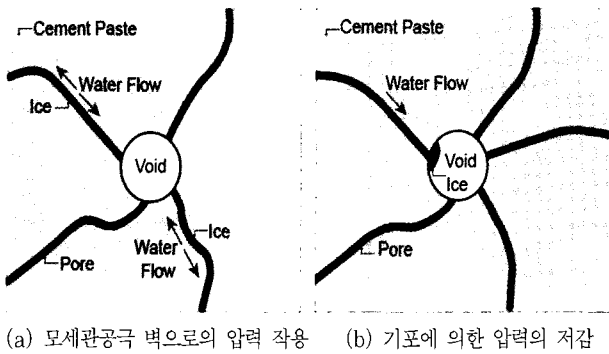


그림 2. 수압설의 개념도

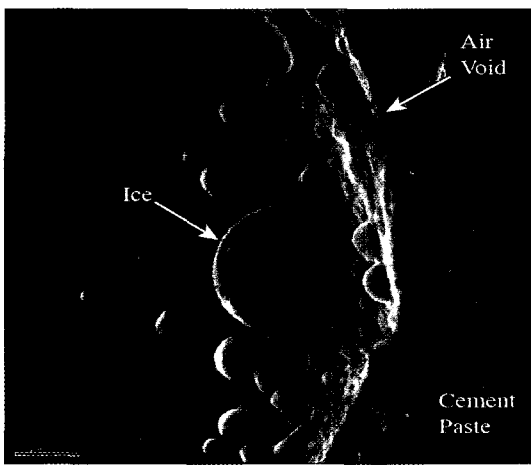


사진 1. 시멘트 경화체 내의 공극에 형성된 얼음

지금까지 연구된 동결융해작용에 의한 열화메커니즘을 정리하면 다음과 같다.

2.1.1 수압설

물은 동결할 때 최대 9.1%의 체적팽창이 발생하며, 시멘트 페이스트 내부에서는 공극의 벽으로 팽창이 이동된다. 이 체적 팽창률을 완화하는데 필요한 자유공극(공기로 가득찬 공극)이 존재하지 않을 경우 큰 압력이 발생하고 이것이 열화의 원인이 된다. 온도가 떨어지면 우선 큰 공극 중의 물이 동결하며, 이어서 작은 공극 중의 물이 동결된다. 작은 공극 중의 물이 동결하는 과정에서는 큰 공극 중에 생긴 얼음 결정에 의해 팽창이 구속된다(그림 2, 사진 1 참조).

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. 이 공극에 작용하는 정수압은 콘크리트가 냉각되는 속도, 함수량 및 콘크리트 중의 기포와 기포간격에 따라 다르다.

2.2.2 정수압설

콘크리트가 냉각하는 과정에서 표면부분이 앞에서 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 공극 중의 물이 동결하여 물에서 얼음으로 변화함에 따라 체적팽창분에 상당하는 미동결의 물이 포함되지 않고 아직 동결하지 않은 내부의 공극으로 이동한다.
- (3) 미동결수의 이동은 미세한 공극 내에서 발생하므로 점성저항에 의한 정수압(이동압)을 발생한다.
- (4) 정수압이 콘크리트의 파괴(인장)강도 이하로 작으면 균열(동해)은 발생하지 않는다. 그러나 보통의 냉각속도 범위 내에서 미동결수의 이동은 시멘트 경화체 조직의 파괴를 일으키는 데에 충분한 압력으로 작용한다. 이러한 수압은 콘크리트 내부조직의 투수성이 낮은 경우, 냉각속도가 빠른 경우 및 동결하는 물의 양이 많을 경우에는 더욱 커지게 된다. 이 메커니즘에 의한 열화를 막기 위해서는 공기로 가득찬 공극이 필요로 된다. 공기는 정수압이 가해졌을 때 쉽게 체적이 축소되어 팽창압이 완화되기 때문이다.

2.2.3 침투압설

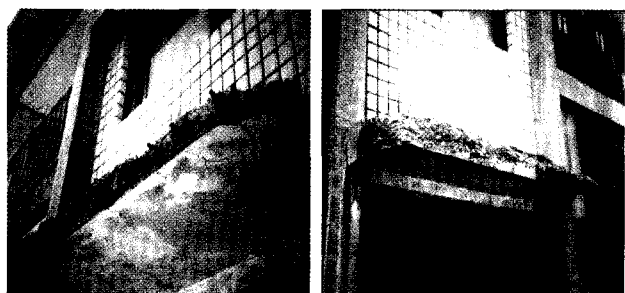
침투압은 얼음과 공극 중의 미동결수와의 사이에서 발생한다. 이것은 모세관 공극 중에 얼음결정이 형성된 후에 이 얼음결정이 보다 작은 세공에서 미동결수를 흡수함으로써 발생한다. 이러한 침투압에 의한 현상은 한계포화에 가까운 영역에 물을 이동시키는 원인이 되어 조직을 파괴하게 된다. 이것이 물-시멘트비가 작은 콘크리트에 있어서 주요한 동결융해의 메커니즘이다. 침투압은 염류의 작용을 동반한 경우에 더욱 커진다. 해수에 접촉된 AE콘크리트에서는 표면층의 스케일링(scaling)이 상당히 진행된 단계에서도 팽창열화를 볼 수 없는데 이것이 침투압의 작용에 의한 것이라고 할 수 있다.

2.2.4 골재의 팽창설

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



(a) 스케일링 (b) 팝아웃
 사진 2. 동해에 의한 콘크리트의 열화형태



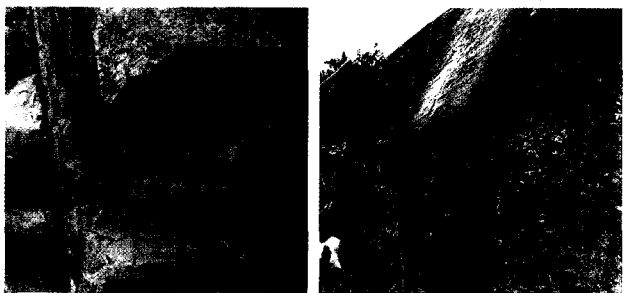
(a) 쳐마 (b) 현관차양



(c) 옥상파라펫 (d) 창대
 사진 3. 건축구조물에서의 동해 피해 사례



(a) 교량의 교각 (b) 교량의 배수구



(c) 난간 (d) 옹벽

사진 4. 토목구조물에서의 동해 피해 사례

2.2 동해의 현황

동해에 의한 손상정도는 콘크리트 배합(단위수량, 물-시멘트 비 등), 골재품질, 공기량 등의 콘크리트에 관한 요인, 부재의 단면 형상, 철근량 등 콘크리트 구조체에 관한 요인, 물의 공급 정도, 일사영향, 외기온(최저온도나 동결융해횟수) 등의 환경조건에 관한 것 등 많은 요인에 의해 결정된다.

동결융해작용을 받은 콘크리트의 열화형태는 주로 균열, 스케일링 및 팝아웃 등으로 분류할 수 있으며, 이러한 열화는 구조물의 미관을 해치고 부재의 내력을 저하시켜 최종적으로 구조물의 수명을 단축시킨다.

균열은 콘크리트가 동결융해작용을 받았을 때 초기 징후로 발생하며 콘크리트 표면에 나타나는 지도모양의 문상 균열(pattern cracking)과 구조물의 이음부 및 균열을 따라 나타나는 D 균열(D-line cracking) 등이 있다. 그리고 콘크리트의 스케일링(사진 2(a) 참조)은 동결융해 작용에 의한 열화형태 중에서 가장 일반적으로 발생하며, 시멘트페이스트 부분이 얇게 박리되는 단계부터 굵은골재가 보이는 단계까지 여러 형태가 있으며, 팝아웃(사진 2(b) 참조)은 콘크리트 표면 근처에서 강도가 작은 골재가 동결 팽창하여 외측의 모르타르 부분을 박리시켜 구멍에 생기는 형태로서, 미관상, 사용상에 영향을 미치는 것이 많고, 유지관리상 큰 문제로 되고 있다.

한편, 동해를 받기 쉬운 구조물은 물에 접하는 상태에서 동결융해작용을 받는 경우이며, 건축물의 경우에는 일반적으로 건물의 외부 주변 중 외벽면 등은 물에 젖는 기회가 적어 동해가 발생하기는 비교적 어렵다. 그러나 외벽면에서도 응결수에 의해 젖은 부분에서는 동해가 발생하고 있다. 건축물에서도 동해가 가장 많이 발생하고 있는 부분은 <사진 3>에 나타난 바와 같이 돌출부(난간, 베란다, 현관차양, 파라펫, 외부의 기둥·보), 외벽면의 특수부분(개구부, 파라펫 주위, 모서리부, 배기구 하부, 경사외벽 등), 바닥면(누수 방수층, 손잡이), 옥외계단 등이다. 토목 구조물은 종류가 많고, 동해를 받는 형태도 다르므로 피해실태를 정확히 판단하는 것은 어렵지만, 일반적으로 물과 직접 접하는 기회가 많고, 기상작용이 가혹한 지역에 위치되는 경우가 많으므로 건축 구조물과 비교하여 동해를 받기 쉬운 조건하에 있다고 할 수 있다. 동해는 <사진 4>와 같이 도로교(지침부분, 교대, 교각, 교량 거터), 경계블록, 옹벽, 터널 개구부, 방파제 등의 항만해안 구조물, 수로 등의 수리구조물 댐 등에 많다.

3. 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능설계

본고에서는 일본건축학회의 『철근콘크리트조 건축물의 내구

설계시공지침(안)·동해설』을 주로 참고하여 성능저하요인 중 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성설계에 대하여 기술하고자 한다.

3.1 내구성설계방침의 결정

내구설계는 성능검증형 일반설계법 또는 표준사양선택형 설계법에 의하는 것을 표준으로 한다. 다만, 건축물이 위치한 환경조건 등에 따라 성능검증형 일반설계법 또는 표준사양선택형 설계법으로는 불합리하다고 생각되는 경우에는 성능검증형 특별설계법에 의하는 것이 가능하다.

3.1.1 표준사양선택형 설계법

일본건축공사표준시방서(JASS 5-1997)에 있어서 계획공용기간의 등급에 대응한 내구설계기준강도가 표준으로서 부여된 것처럼 표준사양선택형 설계법에 있어서는 <그림 3>과 같이 미리 설정된 수준의 설계내용년수를 만족시키도록 열화현상마다 콘크리트의 사용재료, 배합과 철근의 피복두께와의 조합이 표준으로서 표현된다. 설계자는 건축물의 입지환경과 건축주의 요구내용년수에 대응하여 부여된 조합 중으로부터 적절한 사양을 선택한다.

3.1.2 성능검증형 일반설계법

성능검증형 일반설계법에 있어서는 <그림 4>와 같이 열화현상마다 입지환경이나 건축부재의 구법·마무리에 대응한 열화외력의 설정방법과 열화외력과 콘크리트의 사용재료·배합, 철근의 피복두께, 마감재의 종류 등이 파라미터로서 조합된 열화현상의 진행 예측식이 일반적으로 확립된 신뢰할 수 있는 수법으로 제시된다. 설계자는 건축물의 입지환경과 건축주의 요구내용년수에 대응하여 부여된 예측식을 이용하여 적절한 사양을 정한다.

3.1.3 성능검증형 특별설계법

설계외력의 정도가 매우 엄한 경우, 열화외력이 복합하여 작용하는 경우, 콘크리트의 사용재료나 배합이 특수한 경우, 새롭게 개발된 특수 마감재를 적용할 예정인 경우 등 성능검증형 일반설계법에 나타난 열화외력의 설정방법이나 열화현상예측식의 적용이 곤란하다고 생각되는 경우에는 건축주, 설계자, 시공자 및 그 외의 관계자의 합의에 의해 성능평가항목 및 평가수법을 결정하여도 좋다. 또한, 일반적인 환경에서 일반적인 건축물을 설계할 경우에 있어서도 새롭게 개발된 성능평가기법을 이용하여 내구설계를 실시하고자 할 경우에는 건축주, 설계자, 시공자 및 기타 관계자와의 협의가 되면 성능검증형 특별설계법에 의할 수 있다.

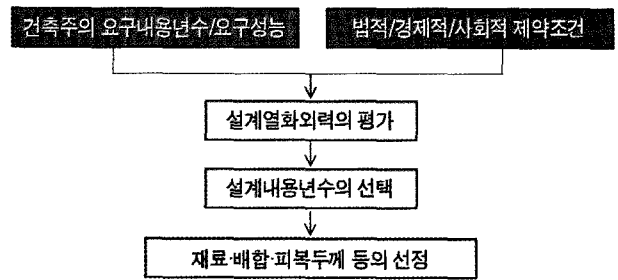


그림 3. 표준사양선택형 설계법의 흐름

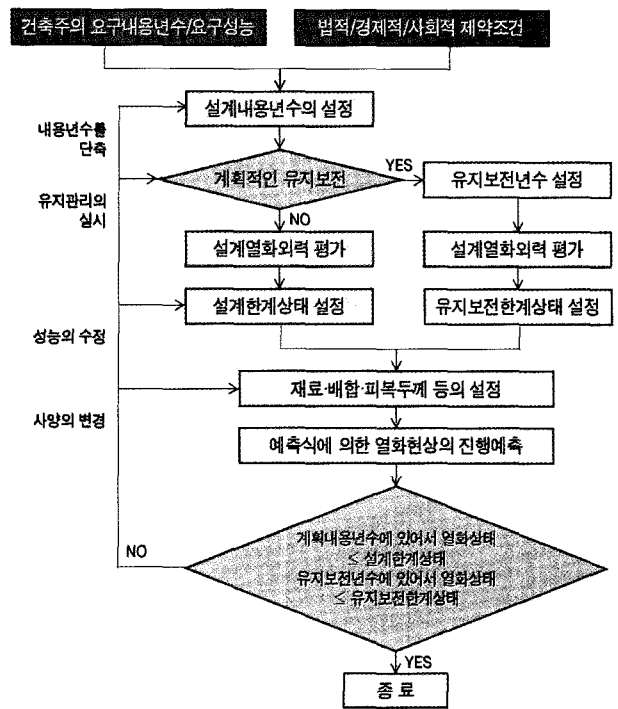


그림 4. 성능검증형 일반설계법의 흐름

3.2 동해에 대한 설계열화외력

콘크리트 구조물의 내구성 저하요인 중 동해에 대한 설계열화외력은 아래와 같이 설정하는 것을 원칙으로 한다.

(1) 동해에 대한 설계열화외력 건축물이 위치한 장소에 있어서 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 콘크리트에 작용하는 수분으로 한다. 즉, 동해는 경화된 콘크리트에 외부로부터 침입된 물이 공극내에서 얼을 때에 체적팽창에 의해서 미동결수가 세공내로 누를 때의 압력이 조직을 파괴함으로써 발생한다. 이러한 조직의 파괴는 물이 공급되기 쉬운 표면에서부터 개시되며, 동결과 융해가 반복되면 계속해서 그 부분의 피해는 크게 되고, 더욱이 물이 내부로도 이동하기 때문에 피해가 점점 내부로 진행된다. 조직의 파괴는 최초에는 국부적인 미세한 균열의 발생이지만, 진행하면 표면조직의 완화, 팽창, 박리·박락이 발생되어

내부의 철근이 노출되는 경우도 있다. 이와 같이 동해의 발생과 진행에는 다음의 열화외력이 주로 관계된다.

① 동결시의 최저온도와 동결융해 반복횟수

특히, 동결시의 최저온도가 낮을수록 동해가 크게 되며, 연간 동결융해 반복횟수가 많을수록 동해열화가 빠르게 진행된다.

② 동결융해작용을 받을 때의 콘크리트 함수정도

어느 정도 건조한 콘크리트는 동결융해가 발생할 정도의 온도 하에서도 동해는 발생하지 않지만, 외부로부터의 물(겨울철 용설수, 우수, 결로수 등)의 침입에 의해 어느 한도 이상으로 함수가 높아지면 동해가 발생하기 시작하며, 함수정도가 높을수록 피해가 크게 된다.

(2) 건축물이 위치한 장소에 있어서 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 콘크리트에 작용하는 수분은 그 위치에서 연속적으로 측정하여 구한다. 또한, 건축물이 위치한 장소에 있어서 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 콘크리트에 작용하는 수분의 측정치가 없을 경우에는 신뢰할 수 있는 자료에 의해 정한다.

즉, 동해의 발생과 진행에 관계하는 설계열화외력인 연간 동결융해횟수는 최저온도 및 콘크리트에 작용하는 수분에 따라서 다르기 때문에 건축물이 위치한 지역, 입지, 부재·부위조건을 고려하지 않으면 안 된다.

① 지역과의 관계

건설지역의 한랭도로부터 동결융해작용의 크기를 구한다. 구체적으로는 외기온상의 연간 동결융해횟수를 기본으로 하고, 이것에 일사에 의한 콘크리트 온도상승을 고려하여 방위, 부재, 부위에 대응한 동결융해횟수의 증가를 더하여 동결최저온도를 고려한 동결융해작용의 세기를 구한다. 또한, 동결융해작용을 받을 때의 콘크리트 함수정도를 구한다. 구체적으로는 공급원인 용설수·우수에 의한 콘크리트 표면부의 함수정도를 방위·부재·부위를 고려하여 구한다.

② 입지와와의 관계

방위는 일사에 의한 동결융해횟수의 증가와의 관계에 있어서 구한다.

③ 부재·부위와의 관계

동해발생의 유무나 정도는 온도작용과 콘크리트의 함수정도에 관계하며, 수평부재, 연직부재, 우각부, 차양부 등에 따라 각각 다르다. 따라서 동일 건축물의 경우에도 부재나 부위조건에 차이가 따라 동결융해온도나 외부로부터 작용하는 물의 정도가 다르기 때문에 동해발생에 차이가 있다. 그러나 이들의 값은 일정하지 않으며, 상화에 따라서 변화하기 때문에 대상으로 하는 각각의 위치에 있어서 이 값의 연속적인 변화를 구할 필요가 있다.

상기와 같이 건축물이 위치한 장소에 있어서 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 콘크리트에 작용하는 수분은 그 위치에 있어서 연속적으로 측정하여 구한다. 이 경우, 콘크리트 온도의 연속측정은 그 위치에 열전대를 매립하는 것에 의해 가능하다. 한편, 콘크리트에 작용하는 수분의 측정은 외부로부터 콘크리트로 침입하는 수분량이 아니라, 콘크리트 표면부의 함수정도를 측정하는 것이 간편하며, 특히 연속 측정할 경우에는 그 위치에서의 측정센서를 매립할 필요가 있다. 이들의 측정치는 일반적으로 구하지 못할 경우가 많으므로 신뢰할 수 있는 자료에 의해 정하는 것으로 한다. 신뢰할 수 있는 일반적인 자료로서 연간 동결융해횟수와 최저온도에 대해서는, 건설지의 매일의 일 최고·최저기온 데이터를 이용할 수 있지만, 대상으로 하는 부재·부위에 따라서는 전술한 바와 같이 일사에 의한 동결융해횟수의 증가를 가미하지 않으면 안 된다. 또한, 그 위치의 콘크리트 함수정도의 연속 데이터는 일반적인 자료는 없으므로 기존의 조사 데이터로부터 동일조건이라 생각되는 부재·부위에서 얻어진 값을 이용하는 것으로 되어 있지만, 사용할 수 있는 측정 사례가 거의 없는 것이 현상이다.

동해에 대한 내구설계에서는 그 지역의 가장 엄격한 방위, 부재·부위에 있어서도 안전하도록 설계하는 것이므로 동결융해작용에 의한 열화현상이 가장 심하게 나타나는 『부재의 수평에 항상 용설수로 채류하기 쉬운 외단부』의 온도조건·함수조건을 기본치로 하는 것이 바람직하다. 이 기본치에 대해서 대상으로 하는 위치의 온도조건이나 함수조건에 대응하여 열화외력을 완화시켜 동해에 대한 내구설계를 실시하는 경우가 많다.

3.3 동해에 대한 성능의 검증방법

동해에 대한 성능의 검증방법은 아래의 원칙에 준하는 것을 기본으로 한다.

(1) 구조체 및 부재는 설계내용연수의 기간 내에 동해에 의해서 설계한계상태에 도달하면 안 된다. 또한, 설계내용연수의 기간내에 유지보전을 실시할 계획일 경우에는 구조체 및 부재는 유지보전의 예정기간 내에 동해에 의해서 유지보전 한계상태에 도달하면 안 된다. 즉, 구조체 및 부재의 동해에 대한 내구설계는 겨울철 함수량이 증가하여 동해를 받을 가능성이 있는 부분을 대상으로 하며, 건물 전체의 내구설계는 아니다. 이러한 점에서 콘크리트의 탄산화나 염해에 대한 내구설계와는 다르다. 또한, 동해는 콘크리트 표면으로부터 서서히 내부로 열화(표면균열과 박리)가 진행되는 것이며, 철근부식에 도달하기 이전에도 내구성상의 대응이 필요하게 된다.

(2) 동해에 대한 설계한계상태는 동해에 의해 구조체 및 부재의 표면에 현저한 스케일링, 균열이 발생할 때로 한다. 또한, 동해에 대한 유지보전 한계상태는 동해에 의해서 구조체 및 부재의 표면에 유해한 스케일링, 균열이 발생할 때로 한다. 동해에 의해 발생한 현저한 스케일링, 균열이란 콘크리트의 탄산화나 철근의 부식진행에 큰 영향을 미치는 것이며, 표면부가 취약화 됨으로서 박리·박락이 발생한 상태를 말한다. 또한, 유해한 스케일링·균열이란 콘크리트 표면부에만 생긴 폭 0.15 mm 이하의 균열 이외의 것, 또한 깊이 5 mm 이상이라 할 수 있다.

(3) 구조체 및 부재의 표면에 현저한 스케일링, 균열이 발생했을 때 콘크리트의 상대동탄성계수는 시험 또는 신뢰할 수 있는 자료에 의해 정한다. 시험을 실시하지 않을 경우나 신뢰할 수 있는 자료가 없을 경우에는 상대동탄성계수가 60%에 도달할 때로 한다. 또한, 구조체 및 부재의 표면에 유해한 스케일링·균열이 발생하기 시작할 때의 상대동탄성계수는 시험 또는 신뢰할 수 있는 자료에 의해 결정한다. 시험을 실시하지 않을 경우나 신뢰할 수 있는 자료가 없을 경우에는 상대동탄성계수가 85%에 도달할 때로 한다.

본고에서는 동해에 의해 설계한계상태로 되는 현저한 스케일링·균열이 발생할 때 콘크리트의 열화지표를 상대동탄성계수로 표시하는 것으로 하였다. 동결융해에 의해 생긴 스케일링량은 동결융해시험의 경우에는 질량감소율로 표현된다. 또한, 표면 및 내부에 생긴 균열은 동결융해시험의 경우에는 직접적으로는 길이증가비로 표현된다. 시험시에 열화의 목표로서 측정된 상대동탄성계수는 시험체의 균열 정도를 나타낸 것으로 되며, 따라서 상대동탄성계수와 길이증가비와는 양호한 상관성이 있다.

실구조물의 동해에서 표면의 스케일링은 주로 표면에 발생한 미세한 균열에 의해 발생된 것이라 생각되기 때문에 동해의 정도를 표현하는 지표를 상대동탄성계수로 표현하는 것으로 하였다.

동해에 의해 설계한계상태로 되는 현저한 스케일링·균열이 발생할 때의 상대동탄성계수는 콘크리트의 재료·배합에 따라 다소 다르다고도 생각되기 때문에 시험 또는 신뢰할 수 있는 자료에 의해 정하는 것으로 하였다. 그러나 이것에 의하지 않을 경우에는 지금까지의 많은 실험결과에 기초하여 설계한계상태를 상대동탄성계수가 60%에 도달할 때로 하였다. 상대동탄성계수가 60% 정도로 저하하였을 때에는 균열에 의한 조직의 팽창도 길이증가비로 약 1×10^{-3} (0.1%)이다. 이와 같은 조직의 완화는 콘크리트 내부로 수분이나 공기의 침투를 용이하게 하며, 내구성상의 한계(특히, 표층부의 콘크리트)로 간주하여 열화상황(균열이 철근에 도달한 상태)으로 된다.

또한, 동해에 의해 유지보전 한계상태로 되는 유해한 스케일링·균열이 발생할 때의 상대동탄성계수는 시험을 실시하지 않을 경우나 신뢰할 수 있는 자료가 없을 경우에는 85%에 도달할 때로 하였지만, 이것은 지금까지의 동결융해 시험결과로부터 상대동탄성계수가 85% 전후를 지나서부터 급격히 성상이 저하하는 경우가 많기 때문이다.

(4) 콘크리트 내구설계상의 상대동탄성계수는 노출되어 있는 수평면·수직면의 콘크리트인 경우 콘크리트의 재료, 배합, 합수상태 및 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 경과년수를 근거로 아래의 식(1)에 의해 산정된 것을 이용한다.

$$E = (100 - \frac{C_{eq} \times t}{25}) \times AIR \times WC \times Q \quad (1)$$

- 여기서, E : 콘크리트의 상대동탄성계수 (%)
- C_{eq} : 연간의 ASTM 상당 사이클수 (사이클/년)
- t : 준공후의 년수 (년)
- AIR : 목표공기량에 의한 계수
- WC : 물-시멘트비에 의한 계수
- Q : 굵은골재 흡수율에 의한 계수
- C_{eq} , AIR , WC , Q 는 신뢰할 수 있는 자료에 의한다.

즉, 전술한 바와 같이 구조체 및 부재의 동해에 대한 내구설계상의 지표를 상대동탄성계수로 하고, 상기의 식(1)에 의해 산정하는 것으로 하였다.

콘크리트의 동결융해에 의한 열화에 영향을 미치는 요인은 매우 많고 복잡하지만, 여기에서는 구조체 및 부재가 위치하고 있는 지역·주변·국부환경조건으로부터 연간 동결융해횟수, 최저온도 및 콘크리트의 합수상태를 구하고, 이들로부터 열화의

표 1. 목표공기량, 물-시멘트비, 굵은골재의 흡수율에 의한 계수

| 계수 (AIR, WC, Q) | 목표공기량 (%) | 물-시멘트비 (%) | 굵은골재 흡수율*1(%) |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|
| 1.0 | 4.5 ~ 6.0 | 40 이하 | 2.0 이하 |
| 0.95 | 4.0 | 41 ~ 50 | |
| 0.9 | | 51 ~ 55 | 2.1 ~ 2.5 |
| 0.7 | (3.5) * 2 | (56 ~ 60) * 2 | 2.6 ~ 3.0 |
| 0.7 | | | |
| 0.6 | | | |
| 0.5 | (3.0) * 2 | | |
| 0.4 | | | |
| 0.3 | | | |
| 0.2 | (2.5 이하) * 2 | | |

주) *1: 보통골재의 경우, *2: JASS 5의 규정 외에서 참고치로서 계재

정도를 표현하는 지표로서 JIS A 1148-2001(콘크리트의 동결융해시험방법) 또는 ASTM C 666(동결융해시험)의 A법(수중 동결 수중융해 시험)에 있어서 상당 사이클수(C_{eq})를 구한다. 이것에 콘크리트의 내동결융해저항성에 관한 재료, 배합요인 중 영향이 큰 공기량, 물-시멘트비 및 보통 굵은골재의 흡수율을 고려한 각각의 계수를 곱하여 내구설계상의 상대동탄성계수를 산정하는 것으로 하였다. 목표공기량, 물-시멘트비, 굵은골재 흡수율에 의한 계수는 신뢰할 수 있는 자료가 없을 경우에는 <표 1>에 의한다. 또한 상기의 식(1)로부터 알 수 있듯이 내동해성에 우수한 재료·배합의 콘크리트에 있어서도 $C_{eq} \cdot t = 25$ 로 되면 상대동탄성계수가 1% 저하하는 것으로 하고 있으며, 이것은 동결융해작용 이외에 동해열화의 유인작용으로 되는 경년에 의한 표면열화(균열 등)도 고려하였기 때문이다.

(5) 콘크리트가 노출되어 있지 않은 경우 또는 수평면 이외의 경우에 있어서 상대동탄성계수는 동해억제효과를 고려하여 구한 연간 ASTM 상당 사이클수를 이용하여 상기의 식에 의해 산정한다. 콘크리트에 마감 등이 있어서 노출되지 않는 경우, 또는 수평면이나 수직면 이외의 경우에는 콘크리트의 동결융해 작용시 온도나 흡수정도가 완화되어 동해가 경감된다. 이때의 내구설계상 상대동탄성계수는 이들의 동해경감효과를 고려하여 구한 연간 ASTM 상당 사이클수를 이용하여 상기의 식에 의해 산정한다. 수분의 공급정도에 따른 동해경감효과로서는 <표 2>에 나타난 부재계수 등을 참조한다.

3.4 동해환경지역에 있어서 표준사양선택형 설계법

3.4.1 총 칙

(1) 동해지역은 동해에 대한 설계열화외력의 세기에 의해 준(準)동해지역, 일반(一般)동해지역, 중(重)동해지역으로 구분한다. 즉, 동해에 대한 설계열화외력의 세기에 의한 지역구분은 동해위험도가 4와 5의 지역을 중동해지역, 동해위험도 2와 3의 지역을 일반동해지역, 동해위험도 1 및 콘크리트의 품질이 양호하지 않은 경우에 동해가 발생할 가능성이 있는 지역을 준동해지역으로 한다.

표 2. 부재계수의 참고치

| 수분의 공급정도에 따른 부재조건 | 대상 부재 및 부위의 일례 | 부재 계수 |
|--------------------------|---|-------|
| 물과 접한 상태에서 동결융해작용을 받는 부위 | 처마끝, 베란다, 차양, 파라넷, 가로대 등의 돌출부, 옥외계단 등 | 1.0 |
| 비교적 수분공급이 많은 부위 | 일반적인 수평부재(방수누름 등), 경사외벽, 개구부 주위, 배기부 하부 등 | 0.8 |
| 수분이 적은 부위 | 일반적인 외벽면 등 | 0.3 |

(2) 건축물의 옥외면은 융설수나 우수의 체류 및 벽면상의 유수 등을 발생시키기 어려운 형상 및 디자인으로 한다. 콘크리트의 동해는 함수율이 어느 한계 이상으로 높게 될 때에 동결융해작용을 받아 발생한다. 함수율이 어느 한도 이상으로 높다는 것은 노출된 콘크리트면에 융설수나 우수가 체류·유수하고 있을 때 등이다. 수평면, 특히 외단부에 발생하기 쉽지만, 일반 수평면뿐만 아니라 벽면이나 창주위 등도 형상이나 디자인에 따라 부분적으로 물의 체류나 유수가 있기 때문에 충분한 주의가 필요하다. 그 외에 동해를 받지 쉬운 건축부위와 그 원인을 <표 3>에 나타내었다.

(3) 차양, 창틀 등의 옥외돌출부 및 융설수나 우수의 체류나 유수를 일으키기 쉬운 부분은 흡수성·투수성이 작고, 수밀성이 높은 마감재나 방수재를 이용하여 동결융해작용에 대한 저항성을 증대시킨다. 즉 옥외돌출부 및 외벽면 등에 융설수나 우수의 체류가 쉬운 콘크리트 부위에 있어서도 수밀성이 높은 마감재나 방수재를 이용하여 콘크리트 표면을 보호 피복하면 함수정도를 낮게 할 수 있으므로 동해발생의 위험성을 작게 할 수 있다. 다만, 마감재에 균열 등의 열화가 발생하면 그 부분에서의 함수에 의해 동해가 발생하게 되므로 주의해야 한다.

3.4.2 콘크리트의 품질

(1) 물-시멘트비의 최대치는 동해에 관한 열화외력의 구분에 대응하여 <표 4>에 의한다. 물-시멘트비가 높을수록 콘크리트의 내동해성은 열악하기 때문에 동해열화외력의 세기 지역구분

표 3. 동해를 받기 쉬운 건물부위와 원인

| 건물 부위 | 동해발생의 주요 원인 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 돌출부 처마끝, 베란다, 현관차양, 파라넷, 외부 기둥·보 | 동결융해가 많고, 동해온도가 낮다. 물치리불량, 재질불량 |
| 집합연통 | 온도균열, 동결융해가 많음 |
| 개구부주변(특히 하부, 창대) | 물치리불량, 결로수의 동결 |
| 파라넷 주변 | 방수층 누름의 팽창에 의한 균열, 타설이음부의 결합 |
| 외벽부 다습실의 외벽부 | 결로수의 동결 |
| 우각부 | 온도응력에 의한 균열, 동결온도가 낮음 |
| 배기구 하부 | 결로수, 동결융해가 많음 |
| 경사외벽 | 물치리불량 |
| 바닥면 방수층 누름 | 재질불량(초기동해도 많음), 함수율이 높음 |
| 옥외계단 | 재질·시공불량, 동결융해가 많음, 물치리불량 |

표 4. 동해지역에 있어서 물-시멘트비의 최대치

| 열화외력의 구분 | 물-시멘트비의 최대치 |
|----------|-------------|
| 준(準)동해지역 | 55% |
| 일반동해지역 | |
| 중(重)동해지역 | 50% |

표 5. 골재의 품질

| 열화외력의 구분 | 잔골재 | | 굵은골재 | |
|----------|---------|-------------|---------|-------------|
| | 흡수율 (%) | 안정성 손실질량(%) | 흡수율 (%) | 안정성 손실질량(%) |
| 준동해지역 | 3.5 이하 | | 3.0 이하 | |
| 일반동해지역 | | 10 이하 | | 12 이하 |
| 중동해지역 | 3.0 이하 | | 2.0 이하 | |

에 대응하여 물-시멘트비의 상한을 정하였다.

(2) 계획배합에 있어서 공기량은 5%로 한다. 콘크리트의 내동해성은 적절한 공기량에 따라 크게 개선된다. 그 공기량은 일반적으로 4~6%이지만, 계획배합에 있어서는 중심치인 5%를 표준으로 하였다. 다만, 그 공기포는 아래의 항에 기재되어 있는 것처럼 AE제, AE감수제 또는 고성능AE감수제를 사용함으로써 도입된 콘크리트 중에 균질하게 분포된 공기포(엔트레인드에어)이지 않으면 안 된다. 또한, 콘크리트 중의 공기량은 비빔 후의 운반·타설에 의해 감소하기 때문에 경화 후의 콘크리트에 있어서도 4% 이상으로 되지 않으면 안 된다. 공기량이 4%를 하회하면 내동해성이 비교적 급격히 저하하기 때문에 주의할 필요가 있다.

3.4.3 콘크리트 재료

(1) 골재는 동결융해작용에 대하여 높은 저항성을 가진 것이 확인된 것으로 하고, 그 품질은 <표 5>에 의한다. 콘크리트의 내동해성은 골재의 품질에 따라서도 차이가 있으며, 일반적으로 흡수율이 낮은 골재를 사용한 콘크리트는 내동해성이 크기 때문에 열화외력의 지역구분에 대응하여 흡수율을 규정하였다.

(2) 혼화제는 AE제, AE감수제 또는 고성능AE감수제를 이용한다. 상술한 바와 같이 콘크리트는 AE제, AE감수제 또는 고성능 AE감수제를 이용하여 AE콘크리트로 한다.

4. 맺음말

본고에서는 철근콘크리트 구조물의 주요 성능저하요인 중 동해의 메커니즘과 현황 및 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능설계 기법 등에 대하여 국외의 자료를 중심으로 기술하였다. 일부 선진국에 있어서는 최소성능을 법적으로 규정하는 표준시방서 규정에서 탈피하여 건축주의 요구사항에 따라 목표 성능이 구체적이고 다양하게 대응하는 성능설계를 중심으로 전환되고 있음을 알 수 있었다.

국내에서도 성능설계기법을 활용하여 철근콘크리트 구조물의 내구성능설계기법을 합리적으로 적용하기 위해서는 국내 실정에 적합한 설계열화외력을 설정하고, 열화현상마다 입지환경이나 건축부재의 구분·마무리에 대응한 열화외력의 설정방법과 열화외력과 콘크리트의 사용재료·배합, 철근의 피복두께, 마감재의 종류 등이 파라미터로서 조합된 열화현상의 진행예측식이 확립되어야 할 것이다. 향후 철근콘크리트 구조물의 내구성능설계기법에 관한 연구가 건축 및 토목분야에서 활발히 전개될 것으로 기대하며 본고를 마치고자 한다. □

참고문헌

1. 日本建築學會, 鐵筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 日本建築學會, 2004. 3, pp.119~122.
2. 日本建築學會, 高耐久性鐵筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 日本建築學會, 1991, pp.277~281.
3. 日本土木學會, コンクリート標準示方書, 日本土木學會, 2002, pp.34~37.
4. 建設省, 總合技術開發プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発, 昭和63年11月, pp.531~534.
5. JASS 5 解説表, “鐵筋コンクリート建築物の凍害劣化豫測と耐久設計手法に關する研究”, 北海道大學學位論文, Vol.26, No.3, 2003, 544pp.
6. 洪說郎, “コンクリートの濕潤程度と耐凍害性の關係”, セメント技術年報, 1975, pp.121~122.
7. 윤우현, “동해와 그 대책”, 콘크리트학회지, 4권 1호, 1992년 3월, pp.25~34.
8. 고경택, “국내 콘크리트 구조물의 내구성 설계-동결융해에 대한 설계 및 대책 방안”, 콘크리트학회지, 13권 6호, 2001. 11, pp.44~51.