

# 고내구성 콘크리트와 고성능 콘크리트의 개발 및 적용

오 병 환

〈서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학박사〉

- |                        |               |
|------------------------|---------------|
| 1. 서론                  | 3.4 중성화       |
| 2. 콘크리트의 고내구성화의 필요성    | 3.5 동결융해 작용   |
| 3. 콘크리트의 성능저하(劣化) 메카니즘 | 3.6 건습의 반복    |
| 3.1 콘크리트의 성능저하         | 3.7 온도변화      |
| 3.2 황산염 작용             | 3.8 알칼리 골재 반응 |
| 3.3 염분피해               | 3.9 기타 성능저하유형 |

## 1. 서론

최근 고내구성 콘크리트(High Durability Concrete) 또는 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)란 용어가 자주 거론되고 있으나, 정작 고성능 콘크리트의 개념과 범주에 대해서는 명확한 정의를 내리기 어렵다. 고성능 콘크리트는 일반적으로 보통 콘크리트에 비해 높은 강도를 내면서도 유동성과 작업성이 우수할 뿐 아니라 화학적, 물리적 내구성 또한 뛰어난 콘크리트를 말한다. 미국 SHRP보고서<sup>1)</sup>에서는 고성능 콘크리트의 정량적 정의를 물-시멘트비 35%이하, ASTM C666(Method A)<sup>2)</sup>에 의한 동결융해 내구성지수 80%이하이며, 재령 28일 이내 69MPa 이상, 1일 이내 34MPa 이상, 혹은 4

시간 이내 21 MPa 이상인 세 가지 강도조건 중 하나를 만족하는 콘크리트로 규정하고 있다. 그러나, 동결융해 저항성 뿐 아니라 염해나 중성화에 의한 철근의 부식, 알칼리골재 반응에 대한 저항성 등 각 성능저하유형별 내구성을 개선한 콘크리트나 콘크리트의 인성 증대에 중점을 둔 섬유보강 콘크리트 등도 고성능 콘크리트의 범주에 포함된다. 이와 같이 고성능 콘크리트란 절대적인 개념이 아니며 각 연구성격 또는 건설환경과 상황에 맞게 합리적으로 설정되어야 한다.

본 소고에서는 고내구성의 구현을 위한 고성능 콘크리트의 개발과 적용현황을 중심으로 콘크리트의 성능저하현상의 원인과 유형별 발생메카니즘, 그리고 고내구성화 메카니즘과 고내구성 콘크리트의 제조특성 및 향후 전망

에 대해 간략히 서술하고자 한다.

## 2. 콘크리트의 고내구성화의 필요성

최근 몇 년간 국내뿐 아니라 전세계적으로 콘크리트의 성능저하문제가 매우 지대한 관심을 불러일으키고 있다. 구조물은 가설되는 순간부터 외적, 내적 환경에 의해 지속적인 성능저하과정을 겪게 되는데 이로인해 콘크리트 구조물의 사용성에 심각한 손상을 입게 될 뿐만 아니라 나아가 구조물의 붕괴를 초래할 수도 있다. 지금까지 전세계적으로 많은 성능저하사례가 보고되고 있는데, 1974년 영국의 가설 후 12년 경과된 포스트텐션 프리스트레스트 콘크리트 보의 붕괴의 직접적 원인이 부식에 의한 텐던 단면적의 감소인 것으로 보고된 바 있다. 이에 대한 조사보고서는 부식의 원인이 덕트시공에서 경화축진용 염화칼슘을 다량(시멘트 중량의 약 2-4%) 혼입한 때문임을 밝히고 있다. 또, 최근에는 미국 샌프란시스코의 San Mateo-Hayword 교량에서 다수의 spandrel beam의 철근이 부식되어 막대한 보수비용이 소요된 사례가 보고되기도 하였다. 이외에도 제설제 살포로 인한 철근의 부식과 동결융해의 복합작용으로 교량 상판의 파괴가 유발된 사례는 수차례 보고된 바 있으며, 비단 철근의 부식문제 뿐만아니라 황산염해, 알칼리-골재반응 등 다양한 성능저하에 의한 피해사례가 보고되고 있다.

이렇듯 해양 콘크리트 구조물을 비롯하여 교량, 지하구조물 등 기반시설물의 성능저하로 인한 사용성 감소와 막대한 유지보수비용의 발생은 더 이상 간과할 수 없는 실로 중대한 문제가 아닐 수 없다. 미국 FHWA의 보고서에 따르면 고속도로 구조물의 성능저하로 인한 유지보수비용이 연간 수백만달러에 이르고 있으며, 이는 계속 증가하는 추세에 있다고 한

다. 우리나라의 경우도 예외가 아니어서 최근 성수대교 붕괴이후 유지관리에 대한 관심이 높아져 유지보수비용이 크게 증가하고 있는 실정이다.

따라서, 구조물의 성능저하를 사전에 방지하는 것만이 구조물의 안전성을 높이고 막대한 유지보수비용을 절약할 수 있는 길일 것이며, 이는 콘크리트 재료의 고내구성화를 통해서만 이루어질 수 있다.

## 3. 콘크리트의 성능저하(劣化) 메카니즘

### 3.1 콘크리트의 성능저하

구조물의 성능저하(deterioration) 현상은 재료의 내부적 영향과 외부 물리적, 화학적 환경요인에 의해 재료의 품질, 기능이 시간이 지남에 따라 서서히 저하됨으로써 구조물의 내구성능이 감소하는 현상을 의미한다. 성능저하의 원인은 대부분 외부 환경요인과 재료 자체의 내적 요인이 복합되어 나타나는데, 외부 환경요인은 극단적인 온도변화와 마찰, 수분, 이산화탄소, 황산염, 염소이온의 침투 등을 들 수 있으며, 내적 요인은 주로 재료 내부의 수분분포, 조직의 치밀성 등이 주된 요소가 된다. 구조물의 성능저하는 많은 복합적인 요소가 관계되는 현상으로 이러한 여러 요인들에 대한 종합적인 검토와 함께 상호연관성에 대한 폭넓은 고찰이 필요하다.

콘크리트 구조물의 성능저하를 유발하는 요인은 크게 콘크리트 구조물이 노출되는 외부 환경의 물리적, 화학적, 기계적 요인, 즉, 외기에 의한 영향과 극단적인 온도변화, 마찰, 전기화학적 작용의 발생, 그리고 자연적인 혹은 공업적인 액체, 기체에 의한 영향 등 외적요인과 알칼리-골재 반응, 시멘트 경화체와 골재의 열적 특성 차이에 따른 체적변화, 콘크리트의

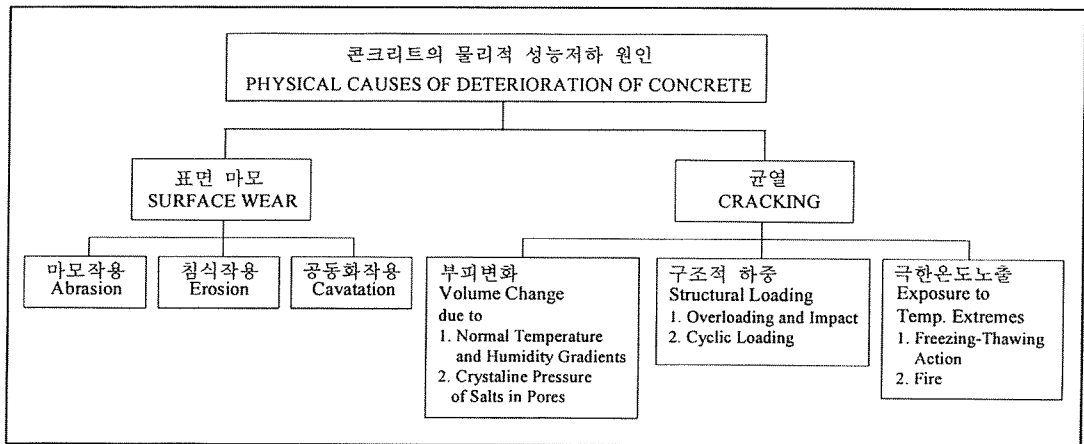
투수에 의한 손상 등과 같은 콘크리트 자체의 내적 요인이 있다. 성능저하 현상의 내적 요인은 주로 콘크리트에 작용하는 수분과 밀접한 관련이 있으므로 특히 콘크리트의 투수성이 외부 작용에 대한 콘크리트의 취약성을 결정하는 주된 요소가 된다.

콘크리트의 성능저하 현상을 그 원인에 따라 분류하면, 물리적 성능저하와 화학적 성능저하로도 구분이 가능하다. 먼저, 물리적 원인에 의한 성능저하는 표면의 마모에 의한 마모, 침식, 공동화작용과 콘크리트의 부피변화, 구조하중, 온도변화에 의한 균열의 영향 등이 있으며(그림 3.1), 콘크리트 구조물의 화학적인 성능저하는(그림 3.2)에서와 같이 세 가지의 형태로 나눌 수 있는데, 먼저 A형태는 수화된 시멘트 경화체 내부에 있는 C-S-H와 칼슘 수화물이 수분의 침투에 의하여 가수분해 및 누출되는 작용이다. 다음으로 B(I)형태의 손상은 염화 칼슘, 칼슘 황산염 등과 같은 용해성 있는 칼슘 화합물이 구성되고, 산성용액이 침투함으로써 발생하는 손상이며, B(II)형태의 손상은 칼슘 옥살라이트(calcium oxalate)를 구성하는 옥살산(oxalic acid) 및 그의 염으로 이루어진 용액에 의한 손상이다. B(III)

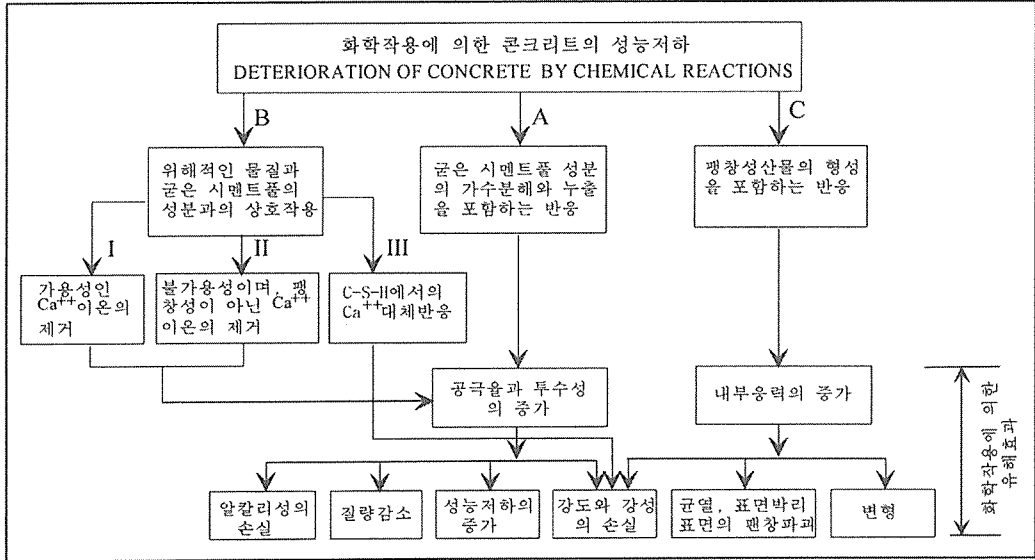
형태의 손상은 C-S-H에서의  $Ca^{++}$ 의 대체 반응을 일으키는 장기간의 해수에 의한 손상이다. 또 다른 형태의 손상으로는 C형태의 것으로서 이것은 에트링자이트(ettringite) 및 석고(gypsum)를 형성하는 황산염 반응, 알칼리 골재반응, 철근의 부식 및 MgO, CaO를 형성하는 결정화 수화작용이 이에 해당된다.

콘크리트의 성능저하 과정을 이해하기 위해서는 재료 내에 존재하는 수분에 대한 몇 가지 성질을 파악할 필요가 있다. 수분은 콘크리트 및 시멘트 경화체와 같은 공극성 재료(porous material)의 내부에서 물리적인 성능저하의 주원인이 되며 동시에 화학적인 성능저하를 유발하는 여러 유해한 물질들의 수송수단이 된다. 수분의 이동과 관련된 물리-화학적 현상은 주로 재료의 투수성에 의해 영향을 받고, 성능저하속도는 수분내의 이온의 종류와 농도, 그리고 재료의 화학조성에 의해 영향을 받는다.

대개 토목구조물은 강우나 해수와의 접촉 등에 의하여 수분에 노출되는 경우가 많기 때문에 그만큼 수분이 콘크리트의 성능저하 과정에서 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 콘크리트 구조물이 노출되는 수분의 범위를 어



(그림 3.1) 콘크리트 성능저하의 물리적 원인<sup>3)</sup>



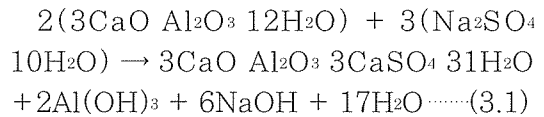
(그림 3.2) 콘크리트 성능저하에 대한 화학작용의 분류<sup>3)</sup>

떻게 관리 통제하며 콘크리트의 수밀성을 개선, 유지하느냐가 내구성에 있어 가장 중요한 요소의 하나가 된다.

### 3.2 황산염 작용

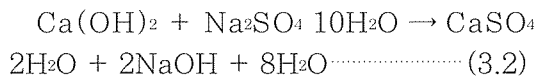
황산염해는 토양에 접해있는 콘크리트 구조물에서 흔히 나타나는 성능저하 유형이다. 황산염의 침해를 받은 콘크리트는 황산염과의 반응생성물로 인해 심각한 체적팽창과 균열을 일으키게 된다. 일반적으로 지하수나 토양, 특히 점토질 토양의 경우에 다량의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  등의 황산염성분을 함유하고 있는데, 이런 지하수나 토양에 접해있는 콘크리트가 건조-습윤작용을 지속적으로 받게 되면, 외부환경보다 오히려 높은 농도의 황산염이 콘크리트 표면을 통해 내부에 축적될 수 있으며, 이러한 과정을 통해 황산염해나 다른 유해이온에 의한 침해가 더욱 가속화된다. 황산염의 반응과정을 요약하면, 다음과 같이 몇 가지 반응으로 나눌 수 있다.

a) 에트링자이트 (Ettringite,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) 생성반응



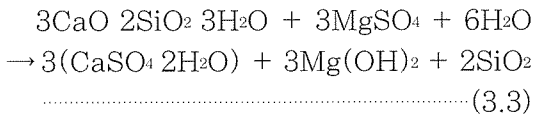
콘크리트 내부에 존재하는 황산염은 칼슘 알루미네이트 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , C<sub>3</sub>A)와 반응하여 칼슘 설포 알루미네이트 생성물 (Calcium sulfo-aluminate product), 즉, Ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ )를 생성한다. 에트링자이트의 체적은 콘크리트 수화생성물에 비해 훨씬 큰 부피를 가지고 있기 때문에 에트링자이트의 생성은 콘크리트의 체적팽창과 성능저하의 주원인이 된다.

b) 석고(gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )의 생성과정



생성된 석고는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 비해 부피가 크기 때문에 에트링자이트와 같이 팽창응력을 유발할 뿐 아니라, 석고는 콘크리트 내에서 쉽게 수분에 용출되기(leached) 때문에 결국 콘크리트의 조직을 허술하게 만드는 역할을 하게 된다.

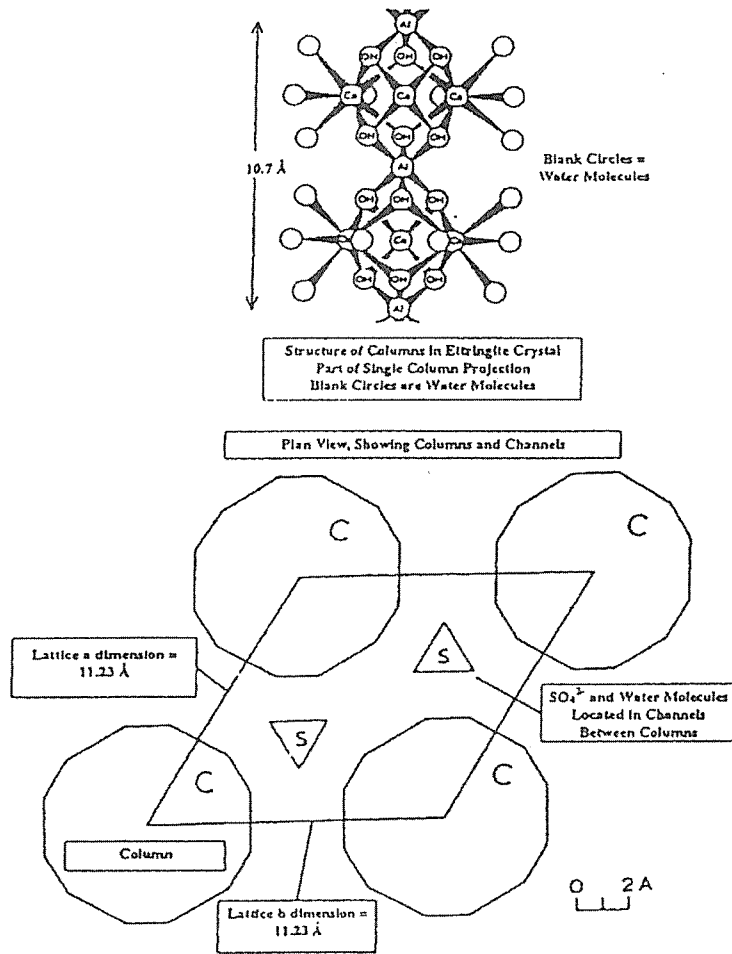
c) C-S-H와의 대체반응



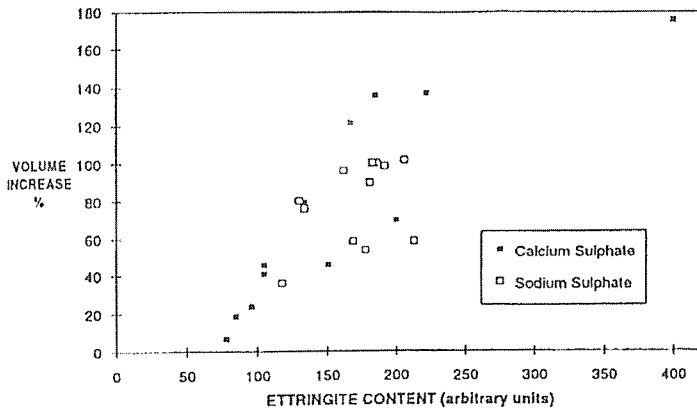
또, 다른 반응으로서 마그네슘을 포함한 황산염이 시멘트의 수화과정에서 발생하는 칼슘 실리케이트 수화물(Calcium Silicate Hydrate,  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )과 반응하게 된다. 이 반응의 속도는 느리지만 해수에 노출된 콘크리트에서는 매우 심각한 문제를 야기할 수 있다. 위의 세 가지 반응 가운데 가장 일반적이고 큰 피해를 입히는 것은 (a)반응이라 할 수 있다. 이 때문에 황산염 저항성을 높이기 위해서는 무엇보다 시멘트의 화학조성 가운데 황산염과 반응하는 성분인  $\text{C}_3\text{A}$ 의 함량을 적절히 조절해야 한다.

황산염 침해의 속도는 농도가 증가함에 따라 증가하고,  $\text{MgSO}_4$  약 0.5% 이상,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  1% 이상의 농도에 이르면 침해의 증가속도가 약화된다. 포화된  $\text{MgSO}_4$  용액의 침투는 낮은 물-시멘트비의 콘크리트에서 불과 2, 3년 만에 심각한 손상을 입힐 수 있다. 황산염의 농도는 일반적으로  $\text{SO}_4$ 중량에 대한 ppm(part per million) 단위로 표현되는데 1000ppm 정도면 보통의 침해조건이고, 2000ppm 정도면 매우 심한 침해조건이 된다. 만약 이것을  $\text{MgSO}_4$ 의 양으로 나타내면, 도양 속에 용해될 수 있는 황산염의 양이 각각 대략 0.2, 0.5% 정도가 된다.

황산염의 농도와 더불어 황산염이 용해된 침투수의 유입 또는 재충진의 속도에 따라 침해속도가 큰 영향을 받는다. 즉 황산염 침해의 정도를 파악하기 위해서는 지하수의 이동에



(그림 3.3) 에트링자이트의 결정구조<sup>3)</sup>



(그림 3.4) 에트링자이트의 함량에 따른 콘크리트의 체적팽창

따라 파악해야 된다. 콘크리트 내부로의 지하수의 흐름이 존재하거나, 계속해서 반복적인 건습조건이 조성될 때 황산염 침해는 더욱 가속화될 수 있다.

### 3.3 염분피해

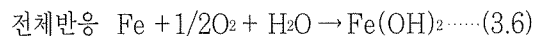
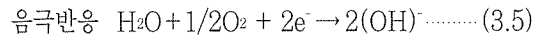
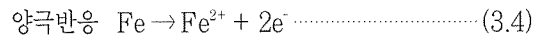
염분은 해수나 해양대기를 비롯하여 일반 환경에서도 다량 존재하여 콘크리트로 침투할 가능성이 가장 많은 유해물질이라 할 수 있다. 염분에 의한 콘크리트의 성능저하로 가장 흔히 나타나고 또, 심각한 피해를 줄 수 있는 것이 바로 철근의 부식이다.

#### (1) 철근의 부식메카니즘

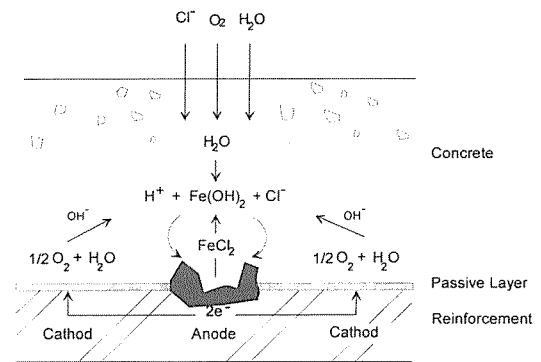
일반적인 경우의 콘크리트는 pH가 12.5~13.0에 이르는 알칼리 상태에 있기 때문에 철근주위에 부동태피막이라 불리는 보호막이 형성되어 부식을 억제한다. 그러나, 콘크리트 구조물의 외부환경으로부터 유입되거나 콘크리트 내부에 이미 존재하는 염소이온 또는 산성 음이온이 존재하게 되면, 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 철근은 부식하기 쉬운 상태가 된다.

콘크리트 내부의 철근이 부식하면, 철근자

체의 단면이 손실되어 구조물의 전체 강도가 저하될 뿐 아니라 철근의 체적이 본래의 약 2.5배로 팽창하고 그 팽창압으로 균열을 발생시키게 되고 균열이 발생하면 산소나 물의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식이 더욱 촉진되고 결국에는 피복 콘크리트가 탈락하여 구조물은 현저한 성능저하를 일으킨다. 이 부식현상은 다음과 같은 전기화학적 반응으로 설명된다.



위 식과 같이 부식반응은 양극반응(anodic reaction)과 음극반응(cathodic reaction)으로 이루어져 하나의 전지를 구성한다. 부식 전지는 양극부(anode)와 음극부(cathod)의 거리에 따라 조금 떨어진 위치에서 생기는 매크로셀(macroc cell)과 비교적 가까운 거리에서 생기는 마이크로셀(microcell)로 나누어지는데 매크로셀은 마이크로셀에 비해 전위차가 크기 때문에 부식속도가 대단히 빠르다. 해양 환경과 같이 극심한 환경에서는 양극과 음극간



(그림 3.5) 염소이온에 의해 유발되는 철근의 부식반응<sup>4)</sup>

의 거리가 약 40~100cm가 되는 경우도 보고된 바 있다. 염소이온의 존재하에서는 양극부가 음극부에 비해 상대적으로 매우 작은 경우가 많기 때문에 부식은 공식(孔蝕, pitting corrosion)의 형태가 되는 경우가 많다.

## (2) 염소이온의 침투 및 반응 메카니즘

강재의 부동태상태를 파괴하는 요인은 중성화 등 여러 가지가 있으나 그 가운데 가장 큰 역할을 하는 것이 바로 염소이온이다. 염소이온의 작용은 간접적이고, 촉매적인 것으로 생각하고 있으나, 이 문제에 대해서는 아직 해결되지 않은 점도 많다.

염소이온의 침투는 주로 농도차에 의한 확산으로 설명된다. 농도차에 의한 확산을 설명하는 Fick의 확산법칙에 의해, 염소이온의 침투방정식은 다음과 같은 확산방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots(3.7)$$

여기서, C는 염소이온의 농도, D는 확산계수, t와 x는 각각 확산시간과 확산거리를 나타낸다. 따라서, 염소이온의 확산속도는 확산계수 D에 의해 표현되며, 이 확산계수는 콘크리트의 수밀성, 온도, 습도, 재령, 표면으로부터의 깊이 등의 영향인자에 대한 함수로 주어진다. 즉, 수밀한 콘크리트일수록, 온도가 낮을수록, 재령이 커질수록, 습도가 낮을수록 확산계수는 낮아지고, 일반적으로 콘크리트 표면부(surface zone)에서의 확산계수가 내부에서보다 더 낮다.

외부로부터 침투하거나 또는 이미 배합시에 콘크리트 속에 포함되어 있는 염소이온이 모두 부식에 관여하는 것은 아니다. 콘크리트 내부에서 염소이온은 화학적 또는 물리적 구속된 상태로 존재하는 염소이온(구속염소이

온, bound chloride)과 간극용액에 녹아 있는 자유로운 상태의 염소이온(자유염소이온, free chloride) 두가지로 존재하는데, 확산과 부식반응에 관여하는 것은 자유염소이온이다. 따라서, 이러한 염소이온의 고정화는 부식에 있어 매우 중요한 문제이다. 염소이온의 고정화에 영향을 미치는 중요한 인자로는 시멘트의 화학조성, 혼화재료, pH, 염소이온과 결합된 양이온의 종류 등을 꼽을 수 있다.

시멘트의 화학조성 중 가장 중요한 것은 C<sub>3</sub>A의 함량이다. C<sub>3</sub>A는 염소이온과 반응하여 Friedel's salt를 생성함으로써 염소이온을 화학적으로 구속하는 역할을 하므로 C<sub>3</sub>A의 함량이 증가할수록 염소이온의 고정화가 높아진다. 혼화재료도 염소이온의 고정화에 큰 영향을 미치는 인자인데, 플라이애쉬는 alumina와 ironoxide를 다량 함유하고 있어서 화학적 구속력을 높이는 효과가 있으며, 반면, 슬래그는 시멘트 겔의 조직을 더욱 치밀하게 하는 작용을 하기 때문에 물리적 구속력에 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있다.

또한, 간극용액의 pH는 염소이온의 반응성에 중요한 역할을 하기 때문에 일반적으로 pH가 높을수록 고정화가 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 OH<sup>-</sup>이온이 염소이온과 경쟁관계를 갖기 때문이다. 그리고, 양이온의 종류에 따라서는 일반적으로 CaCl<sub>2</sub>의 경우가 NaCl보다 구속이 적게 일어나며, 해수의 경우는 NaCl과 비슷한 정도의 구속을 나타낸다.

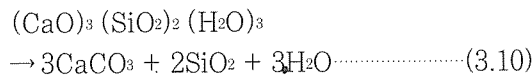
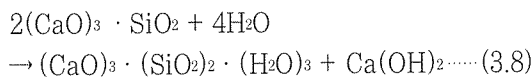
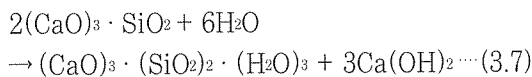
## 3.4 중성화

콘크리트는 수화생성물인 수산화칼슘(calcium hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub>)에 의해 강알칼리상태를 이루고 있지만, 대기중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 콘크리트 내부로 침투하면 콘크리트 중의 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응

하여 탄산칼슘으로 바뀌게 되어 점차 알칼리성을 잃게 된다. 그리고, 콘크리트가 물과 접촉하고 있으면 수산화칼슘이 용출될 수도 있다.

이러한 콘크리트의 pH저하 현상을 중성화(neutralization) 또는 탄화(carbonation)라 한다.

중성화의 반응과정은 다음과 같다.



중성화가 발생하면 콘크리트는 pH가 8.5~10 정도로 저하되고 반응생성물로 인해 조직이 다소 무거워지고 치밀해진다. 콘크리트가 이런 작용에 의해 중성화하면 철근의 부동태가 파괴되고 철근의 부식속도가 현저히 증가한다. 중성화의 정도는 페놀프탈레인 용액으로 쉽게 식별할 수 있는데 Ca(OH)<sub>2</sub>가 있는 부분은 분홍색을 띠지만 중성화된 부분은 무색이 된다. 중성화된 부분과 중성화되지 않은 부분의 경계는 공기간극과 골재에 따라 침투정도가 다르므로 일직선을 이루지 않고 국부적으로 심화될 수 있다.

중성화의 깊이는 물-시멘트비가 증가함에 따라 증가하고, 동일한 조건에서 대략 물-시멘트비가 0.4일 때 깊이는 0.6일 때의 반이고, 0.8일 때는 0.6일 때보다 50% 정도 증가한다. 또, 시멘트의 종류도 중성화 깊이에 영향을 미치는데, 내황산염 시멘트(sulphate-resisting cement)는 50% 정도, 고로시멘트(blast-furnace cement)는 20% 정도 일

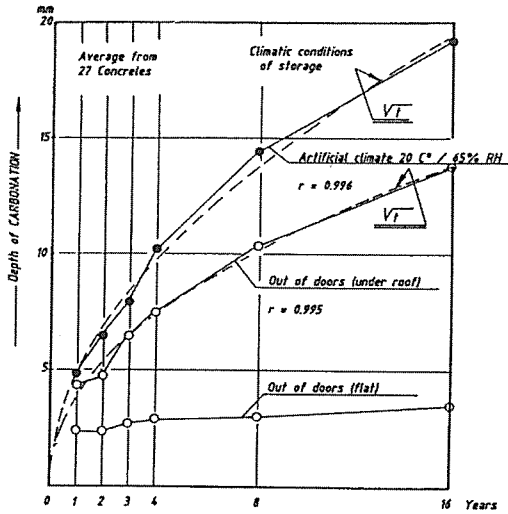
반 포틀랜드 시멘트보다 더 증가하고, 플라이 애쉬(Fly ash)가 혼화재로 사용되는 경우 더욱 증가한다. 경량 콘크리트는 일반 콘크리트보다 더 투수성이 큰 경우에만 증가하는 것으로 보인다.

중성화의 속도는 콘크리트의 수분량, 주위 액체의 상대습도에 따라 다르다. 중간정도의 습도, 수분량에서 중성화는 증가하고, 100%나 25% 이하에서는 중성화가 감소한다. 25% 이하의 습도에서는 탄산가스와 Carbonic acid를 구성하는데 필요한 시멘트 경화체 내부의 간극수가 불충분하기 때문이고 반면에 100%의 습도에서는 간극이 물로 가득 차 있어 탄산가스가 내부로 확산하는 것이 매우 느리기 때문이다. 또, 시편의 크기 또한 중요한 요인인데 이는 수산화칼슘과 탄산가스의 반응에 의한 생성수분이 시편내부와 외기에 Mygral equilibrium을 유지할 수 있을 정도만 발산되기 때문이다. 이 발산이 느리면 시편의 증기압이 포화상태에 이르고 시멘트경화체 안의 탄산가스의 확산이 실질적으로 멈추게 된다. 중성화의 속도는 어림잡아 시간의 제곱근에 비례하고, 강우 등에 의한 크리트의 주기적인 습윤상태가 상당한 정도로 중성화의 진전을 늦추게 한다. (그림 3.6)은 대기조건에 따른 중성화 정도를 나타내고 있다.

### 3.5 동결융해 작용

콘크리트 구조물은 자연적인 혹은 인위적인 온도의 상승, 강하로 인하여 콘크리트 내부의 온도가 간극수의 동결점 아래에서 그 이상으로, 동결점 이상에서 그 이하로 떨어지는 급격한 온도변화가 반복되면 구조물 성능저하의 원인이 되는 동결융해 작용(freezing and thawing)을 받게 된다. 이에 대한 피해 사례는 곳곳에서 발견되는데 구조물의 부분적인





(그림 3.6) 대기의 건조상태에 따른 중성화 깊이<sup>5)</sup>

내구성의 저하를 유발하기도 하며 그 정도가 심한 경우 구조물 전체의 사용성에 큰 타격을 주기도 한다.

동결융해 작용에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하는 크게 다음 두 가지의 가설로서 그 원인이 설명된다. 이 두 가설을 중심으로 동결융해작용의 발생기구를 살펴보면 다음과 같다.

### 1) 정수압 가설

(hydraulic pressure hypothesis)

젖어있는 상태의 굳은 콘크리트가 온도가 낮아지면 시멘트 모르타르의 모세간극 안에 있는 간극수가 얼면서 약 9.1% 정도의 체적이 증가하게 된다. 이 때, 간극크기에 따라 간극수의 어는점이 서로 다르고, 콘크리트의 열전달율이 부분적으로 차이가 나기 때문에 콘크리트 내의 간극은 동결된 부분과 동결되지 않는 부분으로 나뉘어지게 된다. 결국 동결되지 않는 부분의 간극수가 동결된 부분에서 소실된 수분을 매우기 위해 이동함으로써 간극수압이 발생하게 되고 모세관 작용으로 동결부분의 간극은 점진적 팽창을 한다. 이러한 작용은 주로 시멘트 경화

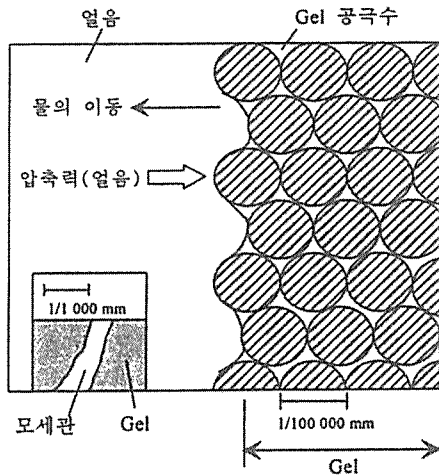
체(Cement paste)에서 일어나는데 연속적으로 간극수의 동결과 융해가 반복되면 간극의 체적변화가 심화되고 이에 따른 시멘트 경화체의 손상은 계속 누적된다.

간극 안의 얼음체의 표면장력은 체적이 작을수록 크게 되며, 동결은 큰 간극으로부터 시작하여 작은 간극으로 전개된다. 크기가 매우 작은 겔 간극(gel pores)은  $-78^{\circ}\text{C}$  이상에서는 그 크기가 너무 작아 실제로는 얼음 결정이 형성되지 않지만 온도가 점차 낮아지면서 겔 상태의 간극수와 얼음체 간의 엔트로피(entropy) 차이로 인하여 겔 간극수(gel water)는 결국 얼음이 형성된 간극으로 이동할 수 있는 에너지 장을 받게 되고, 이는 동결된 얼음 결정을 더욱 크게 만들어 체적의 팽창을 발생시킨다.

### 2) 동결작용 가설

(frost action hypothesis)

흙의 동상(Frost action)을 설명하기 위한 가설인 Collins의 이론을 적용하면 콘크리트에는 두 가지 요인에 의한 팽창압력이 존재한다. 첫째는 간극수가 동결되면서 약 9.1%의 체적 팽창이 생기며 이로 인해 발생하는 팽창압력이다. 동결되지 않은 잉여의 수분은 간극 밖으로 밀려나가게 되는데 동결속도는 얼음체의 선단에 의해 밀려 외부로 유출되는 간극수의 속도를 결정한다. 이때 발생하는 간극수압은 이 흐름에 대한 저항, 즉 잉여의 수분을 수용할 수 있는 공기간극(air void)과 언 공동(freezing cavity) 사이의 투수성과 경로의 길이에 따라 결정된다. 두번째는 상대적으로 작은 갯수의 얼음 결정체의 성장에 따른 간극수의 확산에 의해 발생한다. 확산(diffusion)은 삼투압 작용에 의해 발생하는데 이것은 간극수 용액에서 순수한 물이 동결되면서 용질이 국부적으로 집중되기 때문에 발생한다. 콘크리트의 온도가 동결온도 이하



(그림 3.7) 모세관의 동결팽창

로 떨어졌을 때 먼저 super cooling의 초기단계가 일어나고 이후 비교적 큰 모세관에서 얼음결정을 형성하게 된다. 이러한 형상은 결국 얼지 않은 부분의 알칼리 함유분을 증가시키고, 동결된 공동의 용액으로 주위의 얼지 않은 부분의 물분자를 확산시키게 하는 삼투장(osmotic potential)을 형성한다.

얼음 결정체에 인접한 간극수의 dilution은 얼음의 크기를 더욱 크게 하고(ice accretion) 반면 얼지 않은 부분으로부터의 간극수 이동은 이 부분을 수축하게 한다.

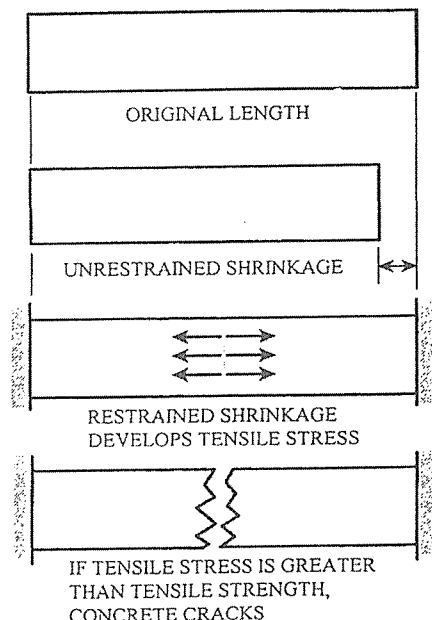
### 3.6 건습의 반복

건습에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하 현상으로 중요한 것은 콘크리트의 건조수축이다. 콘크리트의 건조수축 현상은 콘크리트가 건조되는 경우 수축을 하게 되고 콘크리트가 다시 젖게 되면 팽창하게 되는 현상인데, 이와 같은 수분의 변화로 인한 체적변화는 수경시멘트(Hydraulic cement) 콘크리트에 내재하는 특성이다.

미시적 관점에서 시멘트 페이스트는 cal-

cium silicates, calcium aluminates 등과 같은 calcium hydroxides 요소, ettringite와 간극(macro, meso, micro pores), 그리고 수화하지 않은 Silicate 입자로 구성되어 있으며 이를 둘러싼 C-S-H의 연속구조체로 이루어져 있고, 이 중 C-S-H는 큰 흡착면적을 가짐으로 해서 건조에 따른 체적수축을 유발하고, 입자의 재배열로 인해 영구간극의 붕괴를 유발하기도 한다.

현상적인 관점에서 콘크리트의 건조수축에 관해서는 모세관 장력이론(capillary tension theory), 표면흡착이론(surface absorption theory), 중간층이론(interlayer water theory) 등의 이론이 있다. 이중 모세관 장력이론이 가장 유력한 이론으로 받아들여지고 있다. 굳은 콘크리트의 내부 시멘트 경화체에 있어 간극수의 대부분은 겔에 존재하게 되고 이 겔로부터 흡수된 물의 손실로 수축이 발생하게 된다. 건조초기의 첫번째 물의 손실은 시멘트 경화체에 있는 상대적으로 큰 크기를 갖고 있는



(그림 3.8) 건조수축으로 인한 콘크리트의 균열발생과

모세관이 점유하고 있는 곳에서 일어난다. 콘크리트가 건조상태로 노출되었을 때 수분이 발산되는 지역이 콘크리트 표면에서 내부로 확산되는 반면, 콘크리트에 수분이 가해진 경우에는 역과정이 일어나게 되며 콘크리트는 팽창하게 된다. 연구자료에 의하면 겔수분의 손실에 의해 칼슘실리카 수화물(Calcium silicate hydrate)의 박판(Lattice)의 간격이 수분손실에 의해 보통 14에서 9Å으로 감소되는 것을 보여주는데 이는 건조수축에 의한 습윤에 의한 팽창이 화학적 반응에 의한 것이 아니라 물리적 변동에 의한 것이라는 증거이다.

앞서 언급된 세가지 이론에 의하여 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 건조수축을 일으키는 힘은 표면장력(PSFC), 응축응력(Pdis), 모세응력(Pcap)의 세가지로 집약할 수 있다. 이 힘들은 상대습도에 따라 그 작용범위가 어느 정도 정해져 있으나 완전히 분리되어 작용되는 것은 아니다. 이 힘들이 작용하는 공통적인 원리는 시멘트겔이 갖고 있는 기하학적인 형상에 기인하는 것으로서 시멘트겔의 높은 비표면적과 높은 겔공극률, 그리고 시멘트겔 덩어리 사이에 불규칙한 모양으로 존재하는 모세공극에 그 원인이 있다.

시멘트 경화체에서 수분량의 변화는 콘크리트를 수축 또는 팽창시키는 반면 수축, 팽창량의 차이에 따른 내부적 구속과 골재와 철근의 구속 그리고 외부구조형태에 따른 구속에 의하여 내부역제력이 제공되고 응력이 발생한다. 이러한 응력에 의하여 콘크리트 구조물에 균열이 발생하게 된다(그림 3.8).

### 3.7 온도변화

비록 콘크리트의 열적 특성이 내구성에 직접적 관계가 있는 것이 아니나, 콘크리트의 열 특성은 다양한 환경조건하에서 오랜 시간동안

콘크리트 구조물의 성능에 영향을 미치고 매스 콘크리트의 건설에 있어서는 필수적 검토 사항이다. 특히 댐 구조물같이 매스 콘크리트로 구성되는 대형 토목 콘크리트 구조물에서 콘크리트 수화열에 의한 성능저하현상은 매우 중요하다. 콘크리트에서 시멘트는 물과 혼합이 되면 시멘트의 여러 성분들이 화학반응을 일으켜 새로운 물질이 생성되면서 결국에는 콘크리트가 응결됨과 동시에 경화하는데, 이러한 시멘트와 물과의 화학반응을 수화작용(hydration)이라 말한다. 결국 시멘트 경화체는 수화반응에 의해 생성된 새로운 물질로서 수화물인 것이다.

시멘트는 수화반응을 하면서 열을 발산하므로 인해 내부의 온도가 올라가게 되는데 외부의 경계조건에 의해 때로 극심한 온도차이를 보인다. 시멘트가 경화되기 시작하면서 콘크리트 구조물은 구속조건에 의해 이 온도차로 인한 응력을 받게 되는데 콘크리트의 강도발현이 완전히 이루어진 상태가 아니므로 미세균열을 유발하게 된다.

또한, 온도차이는 부등체적변화를 일으키게 되며, 이로 인해 콘크리트의 내부구속에 의한 인장변형이 유발되고, 인장변형율이 콘크리트의 인장 변형능력을 초과하게 되면 콘크리트의 균열이 발생하게 된다.

주기적인 온도변화와 상승된 온도에서의 시간의존변형은 변형의 증가와 잠재적 강도의 감소를 가져오므로써 콘크리트 구조물의 성능에 영향을 주며, 이는 시간에 따른 지속적인 하중을 받는 구조체에서 변형도가 증가하는 현상, 즉 크리프(creep)현상에 직접적인 영향을 주게 된다. 크리프는 변형도, 변위, 응력분포에 영향을 주는데, 일반적인 금속재료와 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 콘크리트의 크리프도 증가하게 된다. 105℃이상에서는 응력을 받는 콘크리트 시편에서 탈수(dehydration)작용

이 일어나 크리프 현상이 더욱 커지게 된다.

### 3.8 알칼리-골재반응

알칼리-골재반응(alkali-aggregate reaction)이란 콘크리트의 세공용액이 골재 중의 알칼리 반응성 광물과 반응하는 현상으로서, 반응생성물인 알칼리-실리카겔(alkali-silicate gel)의 생성과 흡수에 의해 발생하는 부피팽창과 균열로 콘크리트의 성능저하를 유발한다.

알칼리-골재반응은 콘크리트 내부의 성분에 의해 발생한다는 점에서 외부의 유해성분의 침투에 의해 발생하는 다른 성능저하의 경우와는 다르다고 볼 수 있다.

알칼리-골재반응은 반응기구에 따라 알칼리-실리카 반응(alkali-silica reaction), 알칼리-탄산염 반응(alkali-carbonate reaction), 그리고 알칼리-실리케이트 반응(alkali-silicate reaction)으로 나뉘어진다. 이 가운데 알칼리-실리카 반응이 가장 일반적으로 나타나는 반응이므로 보통 알칼리-골재반응은 알칼리-실리카 반응을 일컫는 경

우가 많다. 알칼리-실리카 반응이란 골재의 SiO<sub>2</sub>가 콘크리트 간극용액(pore solution)의 알칼리 금속이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)과 반응하여 알칼리-실리카겔(alkali-silicate gel)을 만들면서 물을 흡수하여 팽창하는 반응이다.

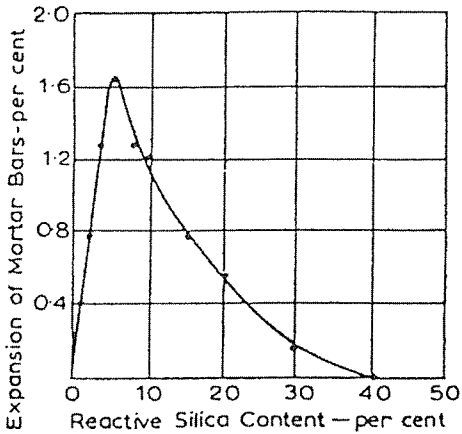
알칼리-실리카겔의 형성은 결과적으로 골재 경계의 변화를 초래하는데 이 겔은 극한팽창형태(ultimate swelling type)로 존재하여 수분을 흡수하고 체적을 증가시키는 성향을 갖기 때문에 주위의 시멘트 경화체에 내부압력을 유발하고 결국 시멘트 경화체의 팽창(expansion), 균열(crack), 탈락(pop-outs)을 초래하게 된다.

실리카의 반응성분은 오팔(opal), 옥수(chalcedony), 트리디마이트(tridymite)등이 있는데 이 성분들은 opaline, chalcedonic, cherts, siliceous-limestone, rhyolites, rhyolitic tuffs, dacite, dacite tuffs, andesite-tuffs, phyllites 등에서 생성된다. 알칼리 반응성 광물을 함유한 반응성골재(Reactive aggregate)는 [표 3.1]에 나타난 바와 같다.

알칼리-골재반응은 우선적으로 골재의 특

[표 3.1] 세계 주요 지역별 알칼리 반응성 골재의 암석 종류

지 역	반응성 골재의 암석종류
미 국	안산암(andesite), 유문암(rhyolite), 화산유리質 모래(volcanic glass sand), 玉髓(chalcedony), 은미정質 석영(novaculite), 차트(chert), 단백석(opal), 규산질 석회석(silicious limestone), 玉髓質 차트(chalcedonic chert), 단백석質 차트(opaline chert)
캐나다	점판암(argillite), 화강암(granite), 硬砂岩(greywacke), 차트(chert), 사암(sandstone), 千枚岩(phyllite), 석회석(limestone), 도로마이트質 석회암(dolomitic limestone)
독 일	단백석質 사암(opaline sandstone), 火打石(flint)
영 국	차트(chert), 火打石(flint)
덴마크	火打石(flint), 단백석-사암(opal-sandstone)
인 도	珪石(quartzite), 珪石質 사암(quartz sandstone), 현무암(basalt), 千枚岩(phyllite), 綠泥岩質 사암(chlorite sandstone)
일 본	안산암(andesite), 차트(chert)
기 타	단백석(opal)-오스트레일리아, 玉髓(chalcedony)-중국, 차트(chert)-키프로스 및 이라크



(그림 3.9) 반응실리카량에 따른 모르타르의 영향<sup>6)</sup>

성에 따른 반응성 실리카 성분에 따라 달라지고, 또 골재입자의 크기도 반응발생속도를 좌우하는데 세립의 골재(20~30 m)는 한 두달 안에 팽창되고 좀더 큰 골재의 경우에는 수년 이후에 팽창된다. 이에 대한 자세한 연구는 S. Diamond 등에 의하여 연구, 보고되었다. 그의 연구에 의하면 알칼리 골재 반응성은 알칼리 양이온(Na+, K+)의 존재와 더불어 주로 간극용액속의 수소이온의 집중에 의해 좌우되는 것으로 보고되었는데, 이는 수소이온의 집중이 반응속도와 반응생성물의 물리적 특성에 영향을 주기 때문이다.

그리고 알칼리골재 반응에는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 존재가 필수적인 것으로 밝혀졌다. 따라서 골재의 실제반응성은 골재의 크기와 공극률(porosity)에 영향을 받고 이에 따라 반응이 일어날 수 있는 면적이 결정된다. 알칼리의 양은 시멘트에 의해 결정되기 때문에 이 면적의 크기에 의해 골재의 반응면적에서의 수소이온집중이 결정된다. 다른 영향인자로는 시멘트 경화체 내부의 비증발성 수분(nonevaporable water)의 양과 시멘트 경화체의 투수성이며, 주기적인 습윤과 건조가 반복되는 환경 하에서 반응속도는 더욱 가속된다.

### 3.9 기타 성능저하유형

이상의 성능저하유형이외에도 염의 용출에 의한 성능저하, 콘크리트의 표면마모, 충격에 의한 성능저하 등이 있다.

#### (1) 염의 용출

콘크리트 구조물이 지하수 등을 함유하고 있는 지반과 접하고 있는 경우에는 시멘트 경화체 내에 함유된 용해성 염의 석출(leaching)에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하현상이 발생할 수 있다. 보통 포틀랜드 시멘트의 조성에 있어 용해성이 큰 염으로는 알칼리 염(alkali salits)과 칼슘 수산화물(calcium hydroxide) 등을 들 수 있는데, 이 성분들은 콘크리트 내부로 침투하는 지하수 또는 수용성 용액(aqueous solutions)에 쉽게 용해되어 건습작용에 의하여 침투된 지하수가 다시 콘크리트에서 빠져나갈 때 그 흐름을 따라 외부로 석출된다.

이와 같이 알칼리 염이 용해되어 콘크리트 밖으로 석출되면, 콘크리트 내부의 pH가 감소되고 콘크리트 내에 존재하는 철근은 부식 발생이 용이한 환경에 놓이게 되며, 또한 염의 용해로 인하여 콘크리트 내부에 간극이 생기게 되어 투수성이 증가하는 등 다양한 성능저하를 일으키게 된다.

콘크리트의 투수성은 용해성 염의 석출에 매우 중요한 요소이다. 따라서 용해성 염의 석출에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하 현상을 제어하기 위해서는 다른 성능저하유형의 경우와 마찬가지로 콘크리트의 투수성(permeability)을 줄이는 것이 가장 기본적인 요소라 할 수 있다. 콘크리트의 물-시멘트비를 줄이는 것은 콘크리트의 투수성을 감소시키는 가장 효율적인 방법이다.

수화된 시멘트 경화체의 조성 중에서 용해

성 염의 석출에 가장 큰 영향을 주는 것은 칼슘 수화물이다. 일반적인 수화된 시멘트 경화체는 중량비 20-25%의 칼슘 수화물을 함유하고 있다. 따라서 포졸란을 첨가하여 칼슘 수화물의 양을 감소시키는 방법도 염의 용출에 의한 성능저하를 줄일 수 있는 효과적인 방법이다. 더불어 포졸란의 첨가는 콘크리트의 투수성을 감소시키는 효과도 얻을 수 있다.

## (2) 충격과 마모에 의한 성능저하

해안 방파제 구조물이나 배수갑문 등과 같은 구조물은 파도, 바람 등에 저항하도록 설계된 구조물이다. 이들 시설물에 파도가 부딪힐 때 파도가 가진 에너지가 방출되면서 충격하중이 작용하게 되고, 이런 충격하중에 의해 성능저하가 발생할 수 있으며, 또한 지진에 의한 충격파에 의해서도 성능저하가 발생하기도 한다.

수리구조물에서 물의 흐름과 직접적으로 접촉된 부분의 경우 물방울의 기포에 의한 에너지 방출로 인하여 콘크리트 표면에 작은 공동 및 파쇄가 생기는 마모현상이 발생하고, 해수에 인접한 방파제 구조물, 배수갑문 등의 구조물에서도 해수에 포함된 모래, 암석성분 등이 구조물의 표면에 접하면서 표면을 마찰하여 구조물의 표면이 마모된다. 또, 도로 등에서는 자동차가 직접 통과하는 부분에서 자동차륜의 마찰에 의하여 마모가 발생하여 구조물의 성능저하가 일어난다.

이상과 같은 충격 및 마모는 구조물 자체에

미치는 직접적인 영향은 크지 않지만 간접적으로 콘크리트 표면의 손상을 일으킴으로써 철근의 피복두께가 얇아져 철근부식을 발생시키는 물질이 침투하기 쉬운 환경을 만들게 되고, 기타 콘크리트에 유해한 물질의 침투를 쉽게 만드는 작용을 하게 된다.

콘크리트 구조물의 표면이 마찰, 마모 등에 의해 부서져 나가는 것에 대한 저항성을 콘크리트의 내마모성이라 한다. 콘크리트의 내마모성은 콘크리트의 품질과 밀접한 관련을 가지고 있다. 좋은 품질의 콘크리트는 마모 저항성도 우수한 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 내마모성에 영향을 주는 요소는 콘크리트의 압축강도, 사용골재의 특성, 콘크리트 표면의 마감방법 등이다.

연구결과에 따르면, 콘크리트의 압축강도는 내마모성을 결정하는 가장 중요한 요인이 밝혀졌다. 즉 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 콘크리트의 내마모성도 증가한다. 반면 콘크리트의 내마모성은 콘크리트의 공극성(porosity)에 반비례하는 것으로 보고되고 있다.

또한, 골재의 강도나 내구성이 우수하면 콘크리트의 내마모성 또한 우수하고, 콘크리트 표면의 마감방법에 따라서는 시멘트와 단단한 잔골재를 건식으로 혼합한 재료로 콘크리트의 표면을 마감한 경우 가장 우수한 콘크리트 표면 내마모성을 보이는 것으로 보고되고 있다.

(다음호에 계속)