

콘크리트구조물의 열화현상

윤 재 환 / 수원대학교 건축·도시공학부 교수

1. 서 언

최근 신도시아파트 등 건설붐에 따라 대량의 토목 및 건축구조물이 건설되고 있으나 부적합한 재료의 사용과 부실시공 및 시공 후의 유지관리 미비로 인하여 구조물이 소기의 내구년수를 채우지 못하고 시공 후에 보수비가 많이 들어간다거나 조기열화하는 현상이 많이 발생하고 있어 이를 우려하는 소리가 높다.

특히 연이은 대형건설사건의 발생으로 과거 국가경제의 고도 성장정책에 따라 지어진 구조물의 유지관리 및 보수문제가 큰 이슈로 대두되고 있다. 우리 주위의 건축물과 토목구조물 등의 사회간접자본은 대부분 철근콘크리트구조물로 구성되어 있으며 21세기의 고도선진국가로 진입하는 데 있어서 이와 같은 사회자본의 안정적인 축적이 필요불가결하다. 적절한 설계, 시공, 재료를 사용하여 적절한 유지관리를 하면 콘크리트구조물의 수명은 반영구적으로 사용할 수 있으나 최근에 제 외국에서는 콘크리트구조물의 조기열화현상이 발생하여 사회적인 문제가 되고 있으며 국내에서도 이에 대한 대비가 절실하다고 사료된다.

따라서 본고에서는 철근콘크리트구조물의 내

구성을 저해하는 주요한 열화현상에 대하여 간략히 살펴보기로 한다.

2. 좋은 콘크리트란?

그러면 좋은 콘크리트란 어떤 것을 가리키는가? 이것은 그림1에 표시한 바와 같이 콘크리트에 요구되는 기본적인 성질인 강도, 내구성, 경제성을 갖춘 콘크리트이다. 구조용 콘크리트

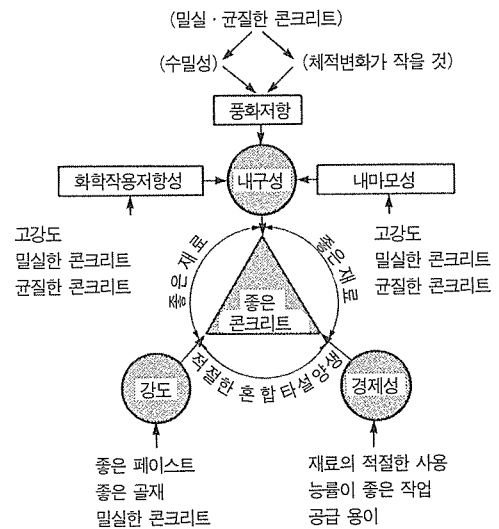


그림 1. 균일하며 좋은 콘크리트를 얻기 위한 조건

에 있어서 가장 중요한 요소는 강도와 내구성이며, 어느 경우에도 밀실한 콘크리트의 사용이 필수적인 조건이 되고 있다. 이를 위해서는 ① 가능한 한 물시멘트비를 작게 할 것 ② 타설시 충분한 다짐을 할 것 ③ 경화 후는 충분한 습윤양생을 하는 것이 필수적이다. 좋은 콘크리트를 만들기 위하여 이러한 기본적인 조건을 지키는 것이 무엇보다도 중요하다.

3. 콘크리트의 열화현상

열화현상이란 기상작용 등 외부환경의 작용에 의해 또는 내적인 열화요인에 의하여 일어나는 성능의 저하를 말한다. 구조물과 그 부위에 생기는 열화현상의 종류는 콘크리트 자체가 내포하고 있는 내적 열화요인의 종류와 구조물의 외부환경으로부터 작용하는 열화작용의 종류에 따라 다르다.

편의상 본고에서는 철근콘크리트구조물에 발생하는 대표적인 열화현상으로서 철근부식, 중성화, 알칼리·골재반응, 동해, 화학적 부식, 피로의 6종류를 들어 간략히 해설하기로 한다. 열화현상을 기온, 습도, 일사열 등의 기상작용과 CO₂의 침투에 의한 콘크리트의 중성화 현상과 같은 외부 열화작용, 염해, 동해, 산성토양과 부식성 물질에 의한 특수열화작용과 더불어서 콘크리트 자체의 재료, 시공상 내재하는 열화요인과 철근콘크리트 구조체에 발생하는 열화현상과의 상호관련을 그림2에 나타내었다.

실제의 콘크리트에서는 개개로 독립된 요인에 의하여 그 기능이 저하하는 경우는 드물며 일반적으로는 외적 요인과 내적 요인이 상호 상승적으로 작용하거나 수개의 요인이 동시에 복합적으로 작용하여 열화가 진행되는 경우가 대부분이다.

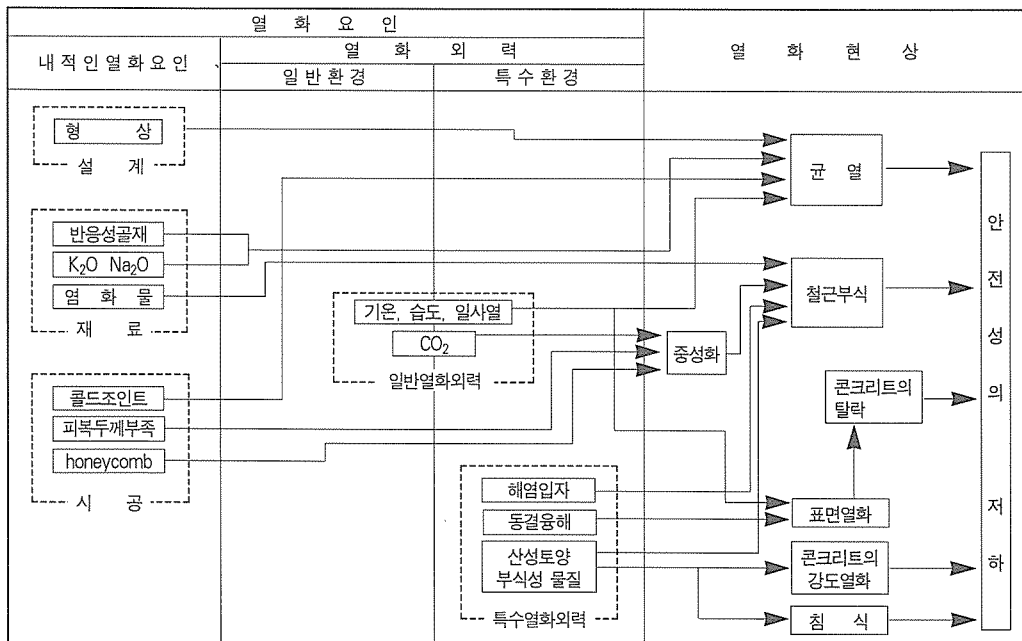
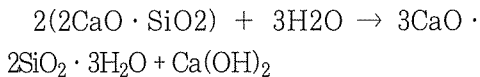


그림 2. 열화요인, 열화작용과 열화현상

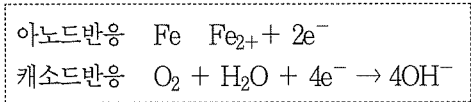
3.1 철근부식

시멘트의 주요구성성분인 $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$ 는 다음 식과 같이 물과 수화반응하여 규산칼슘 수화물과 다량의 수산화칼슘을 생성한다. 즉



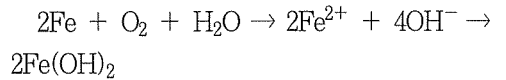
따라서 콘크리트내의 연속된 모세관 공극내에는 수산화칼슘의 포화수용액인 pH 12~13의 알칼리용액으로 충전되어 있다. 이와 같은 알칼리성 환경에서는 철근표면은 얇은 부동태피막(두께 20~60Å, $\gamma-Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)이라고 불리워지는 보호피막으로 덮여 있어 부식으로부터 보호되어 있다. 그러나 어떤 조건하에서는 철근은 콘크리트중에서도 급속히 부식한다. 그 대표적인 경우는 염화물의 침입에 의한 경우와 콘크리트의 중성화현상에 의한 알칼리성의 저하의 경우이다. 염소이온은 위에서 기술한 부동태피막을 파괴시켜 부식을 일으킨다. 콘크리트중의 철근이 부식하면 부식생성물인 녹이 발생하여 원래 체적의 2~3배에 달하게 되어 그 팽창압에 의해 피복콘크리트에 균열을 발생시키며, 표면 콘크리트의 박리, 탈락, 철근과의 부착성 저하, 강도저하를 일으키게 된다.

부식이란 일종의 전기화학적 작용으로 철이 이온화하는 아노드반응(anode, 산화반응)과 산소가 환원하는 캐소드반응(cathode, 환원반응)이 다음 식과 같이 진행하여 그림3에 나타난 바와 같은 부식전지가 형성된다.



부식의 전반응은 양반응을 합한 반응이 되며 다음 식과 같이 수산화제1철($Fe(OH)_2$)이 철

표면에 석출한다.



이 화합물은 용존산소에 의해 산화되어 수산화제2철($Fe(OH)_3$)이 된다. 더욱이 이 화합물은 물을 잃고 수산화물인 $FeOOH$ (빨간녹) 혹은 Fe_2O_3 (검은녹)가 되어 철 표면에 녹을 형성한다.

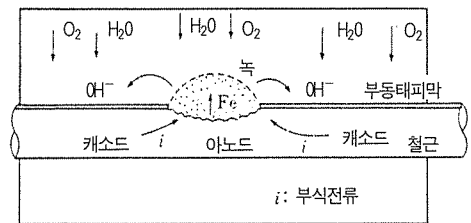
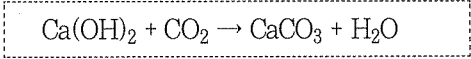


그림 3. 철근의 부식전지작용

3.2 콘크리트의 중성화

경화된 콘크리트는 전기한 바와 같이 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)에 의해 pH가 12~13의 강알칼리성을 띠며 이때문에 콘크리트중의 철근 표면에는 철의 수산화물($Fe(OH)_2$)의 보호피막으로 덮여 있기 때문에 부식하지 않는다. 그러나 장기간 콘크리트가 노출되어 있는 경우 그 표면은 공기중의 탄산가스의 작용을 받아 다음 식과 같이 수산화칼슘은 서서히 탄산칼슘으로 변하여 알칼리성을 잃게 된다.



이와 같은 반응에 의하여 콘크리트가 알칼리성을 잃게 되는 것을 중성화 또는 탄산화라고 한다. 탄산가스 이외에도 산성의 화학적 물질이 콘크리트에 침입하는 경우에는 콘크리트의 알칼리성을 중화하여 중성화시킨다. 자동차의 배기

가스, 연탄가스중의 아황산가스(SO₂) 등이 그 대표적 예이다. 더욱이 특수한 중성화 열화외력으로서 황산, 염산, 질산 등의 무기산, 유산, 석산 등의 유기산이 있다. 중성화가 중요시되는 것은 콘크리트 자체에 관한 것이 아니라 콘크리트중의 철근이 부식하기 때문이다. 그림4와 같이 철근보다 안으로 중성화한 경우를 생각하면 중성화 부분에 있는 철근은 부식하기 시작하나 알칼리 부분에 있는 철근은 아직 부식하지 않는다. 철근에 부식이 발생하면 녹의 체적은 현저하게 팽창하므로 피복콘크리트를 파괴하여 철근에 따라 균열이 발생한다. 균열로부터 부식에 필요한 수분과 산소가 공급되어 철근의 부식은 더욱더 증가하여 이것이 축적되게 되면 피복콘크리트를 박리, 탈락시켜 까만 철근이 노출되게 된다. 콘크리트면에 타설불량(honey comb)이나 콜드조인트(cold joint), 철근피복두께 부족 등 결함부가 있으면 그 부분에서 중성화 속도는 현저하게 빨라진다. 또한 균열이 있으면 균열면으로부터도 중성화가 진행된다.

중성화 깊이를 조사하려면 콘크리트 표면의 일부를 파쇄하여 철근을 노출시킨 다음 콘크리트면에 페놀프탈레인 1%의 에탄올 용액(95% 에탄올용액 90cc에 페놀프탈레인 1g을 용해시킨 후 순수한 물을 가하여 100cc로 한다)을 분사시

키면 중성화된 부분은 변색하지 않으나 알칼리 부분은 붉은 보라색으로 변한다. 콘크리트의 중성화깊이 및 중성화속도는 구조물의 전전도 및 잔여수명을 예측하는 데 중요한 판단요소가 된다.

3.3 알칼리·골재반응

알칼리골재반응(Alkali-Aggregate Reaction ; AAR)은 콘크리트중에 존재하는 나트륨, 칼륨과 같은 알칼리이온과 자갈, 모래 등의 골재에 포함된 특정한 성분이 수분의 존재하에 장기적으로 서서히 새로운 물질을 생성하는 반응을 말하며, 반응생성물은 수분을 흡수, 팽창함으로써 균열을 발생시키거나 심한 경우에는 콘크리트 구조물의 붕괴 등을 일으켜 콘크리트의 내구성을 크게 저하시킨다. 이 반응에는 골재내의 반응성 실리카와 콘크리트내의 알칼리가 반응하는 알칼리실리카반응, 알칼리실리케이트반응 및 골재내의 돌로마이트(dolomite)질 석회암과 콘크리트내의 알칼리가 반응하는 알칼리탄산염반응의 3종류로 분류되고 있다. 이중 알칼리실리카반응이 세계적으로 보고된 예가 가장 많으므로 현재까지 알칼리골재반응이라 하면 알칼리실리카반응을 말하고 있으며, 알칼리실리케이트반응 및 알칼리탄산염반응에 대해서는 몇 가지 예가 보고된 것에 불과하다. 여기에서는 알칼리실리카반응을 일으키는 반응성 골재의 종류, 알칼리실리카반응의 기본적인 메카니즘에 관하여 개략적으로 기술한다.

알칼리실리카반응(Alkali-Silica Reaction : ASR)은 시멘트페이스트중의 알칼리성분(수산화나트륨, 수산화칼륨)과 골재중의 반응성을 지닌 실리카(SiO₂) 성분의 사이에서 일어나고, 반응에 의해 겔상의 반응생성물(알칼리 실리카겔)

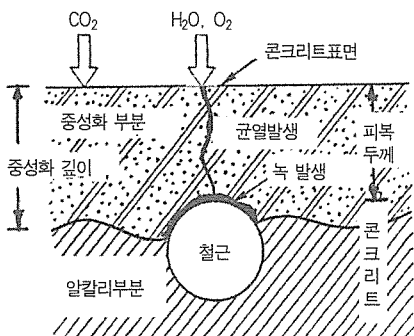


그림 4. 중성화에 의한 철근부식

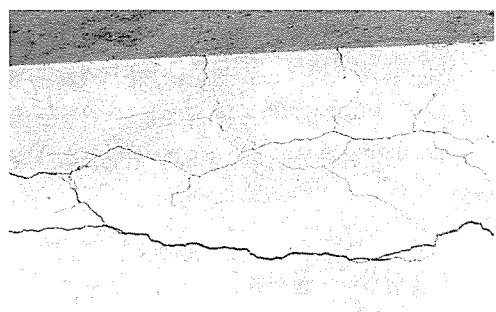


사진 1. 알칼리·골재반응에 의한 균열

이 생성되는 반응을 말한다. 이 알칼리실리카겔은 생성초기에는 점성이 낮기 때문에 콘크리트 내부를 이동할 수 있지만, 수화가 진행됨에 따라 콘크리트의 공극중에 농축되기도 하고 표면으로 흘러나오기도 한다.

공극 등에 농축된 겔은 수분을 흡수함에 따라 팽창하고, 그 팽창압으로 콘크리트에 균열 등 손상의 원인을 발생시킨다.

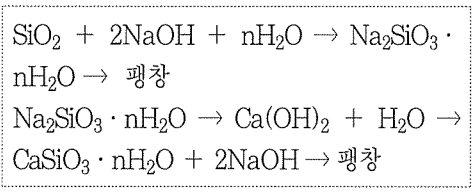
알칼리실리카반응을 일으킨 콘크리트의 특징은 다음과 같다.

- ① 이상팽창을 일으킨다.
- ② 표면에 불규칙한(귀갑상 등) 균열이 생긴다(사진1 참조).
- ③ 알칼리실리카겔(대부분 백색)이 표면으로

흘러나오기도 하고 균열 및 공극에 충전되기도 한다.

④ 골재입자의 둘레에 검은색의 반응환이 보인다.

알칼리실리카반응의 메카니즘은 아래의 반응식과 같이 진행되며 그림 5의 모델과 같이 콘크리트중의 골재와 수화조직간의 변화가 다음과 같은 단계로 일어나게 된다.



① 시멘트의 알칼리반응성 골재에의 확산(그림 5의 (a))

② 골재의 바깥 둘레부분에 림(rim)이라 불리는 알칼리실리카이트겔의 반응층이 형성되고 반응의 정도에 따라서 골재내부에도 생성물이 침입한다(그림 5의 (b)).

③ 반응층의 팽창압으로 인해 골재주변에 미세균열이 발생되고 생성물은 그 속으로 침투한다. 세공속에서도 알칼리실리카이트겔 또는 실리카겔이 침적된다. 또한 알칼리, Ca 등의 혼입

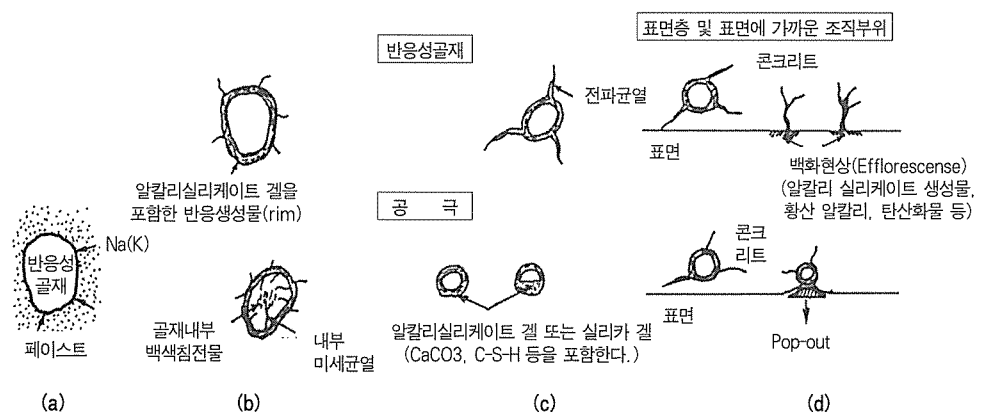


그림 5. 알칼리골재반응의 진행 모델

량에 의해 다양한 형상의 침적물이 형성되고 CaCO₃, C-S-H가 생성되는 것도 있다(그림 5의 (c)).

④ 콘크리트 표면층 근처에서 반응이 진행될 때는 생성된 겔이 백화되어 황산알칼리를 동반하여 침출하고 표면에서 탄산화되어 백색 생성물로 된다. 또한 표면층 부위의 콘크리트조직이 생성된 겔에 의해 밀려서 탈락되어 pop-out되는 것도 있다(그림 5의 (d)).

암석중에서 여러가지 형태로 존재하는 실리카중에서 수산화알칼리와의 사이에 화학반응을 일으키는 것은 비결정 또는 유리질이며, 결정질이어도 결정도가 작거나 또는 많은 격자결함을 가지고 있는 것이다. 더욱이 수산화 알칼리와의 반응에 의해 콘크리트가 팽창하기 위해서는 위와 같은 실리카광물의 함유량이 어느 한도량보다 많고 또한 표면적도 크지(다공질 또는 미립자) 않으면 안 된다. 이와 같은 조건을 갖춘 것으로서는 오팔, 크리스트바 라이트, 트리디마이트, 화산유리, 옥수(玉髓) 및 은미정질 석영 또는 변형된 결정격자를 가진 석영이 있다.

3.4 동결융해

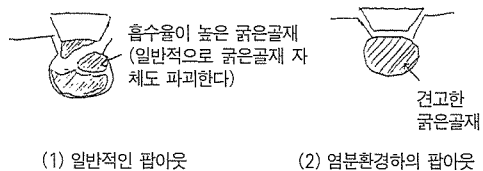
동결융해에 의한 콘크리트구조물의 열화는 겨울철에 콘크리트중의 수분이 동결과 융해를 반복함으로써 콘크리트에 균열, 스케일링(scaling), 손상 등 동해(凍害)를 일으키는 현상을 말한다. 특히 콘크리트 타설 후 응결경화의 초기에 입은 콘크리트의 동해를 초기동해라고 한다.

동해의 형태별로서는 대부분의 경우 미세한 균열의 발생으로 지도모양으로 나타나는 pattern crack이나 구조물의 이음매, 단부 혹은 구조균열에 따라 나타나는 D균열(D-line crack-

ing) 등이 있다. 동해의 가장 일반적인 형태는 표면층의 박리(스케일링(scaling))이다. 스케일링은 콘크리트 표면의 얇은 시멘트페이스트나 모르타가 벗겨지는 것으로 이것이 진행하면 골재사이의 모르타 및 굵은골재의 탈락으로 이어진다(사진2 참조). 또한 popout이라 불리워지는 것은 콘크리트 표면층 부근의 강도가 낮은 다공질골재가 동결팽창하여 외부층의 모르타 부분을 박리시켜 원추형 모양으로 움푹 패이는 것을 말한다. 그림6은 동해환경하에서 일반적으로 나타나는 보통의 popout과 염분환경하에서 동결융해작용과 염분의 복합작용으로 발생하는 popout과를 대조하여 나타낸 것이다.

경화콘크리트의 동해에 의한 균열은 시멘트페이스트나 골재내부의 공극내에 있는 공극수의 팽창에 의해 발생한다. 물이 동결하면 약 9%의 체적팽창이 생기며 이 체적팽창이 아직 동결하지 않은 물을 이동시켜 이때 발생한 압력에 의하여 동해가 발생하며 이것을 수압설(水壓說)이라 한다. 동해를 방지하기 위한 AE제에 의한 공기연행의 효과는 미세한 기포를 콘크리트내에 분산시켜 이 수압을 완화시키는 작용을 한다.

Powers에 의한 수압설 이외에도 동해는 모세관수의 동결에 의한 수압의 발생과 이에 따라 발생하는 겔수의 확산에 기인한다고 하는 수분의 확산설이 있으며 시멘트페이스트중의 공극수의 알칼리농도, 염분농도 등의 차에 의해 발생한다고 하는 삼투압설 등이 있다. 특히 해수의 작용을 받는 콘크리트는 해수의 침식에 따라 표



(1) 일반적인 팝아웃 (2) 염분환경하의 팝아웃
그림 6. 일반적인 팝아웃과 염분환경하에서의 팝아웃

면근처의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 용출되어 모세관공극이 증가하며, 동결가능한 물이 증가하여 수압이 커져 스케일링이 발생하기 쉬운 구조가 된다고 한다.

콘크리트의 팽창에 의해 발생하는 콘크리트의 동해를 방지하는 데에는 AE제에 의한 기포의 연행이 극히 유효하다. 그러나 스케일링과 같은 열화에는 그다지 효과가 없으며 낮은 물시멘트비에 의해 조직을 치밀화함으로써 스케일링을 방지할 수 있다. 또한 popout과 같은 피해방지책으로는 다공질인 골재의 사용을 제한함으로써

방지할 수 있다.

사진2는 콘크리트경계석이 동해를 입은 예를 나타낸 것이나 국내에서는 이에 의한 도시미관의 저해, 국가예산의 낭비 등 많은 피해를 가져오고 있다. 콘크리트경계블록은 한국산업규격(KS F4006)에 규정하고 있으나 물시멘트비 30% 이하의 된비빔 콘크리트로서 강도만을 규정하고 있으나 일반 레미콘과 마찬가지로 AE제에 의한 AE콘크리트로 시급히 개정할 필요가 있다.



사진 2. 동해에 의한 콘크리트경계석의 손상예

3.6 화학적 침식

콘크리트구조물의 화학적 침식은 본래 화학공장이나 식품공장 등 공업시설, 해양환경, 황산염토양지역과 온천지역 등 특수한 환경하에서 문제시되며, 일반적인 환경하에 있는 콘크리트에는 그다지 중요시되지 않았다. 그러나 산성비 문제나 탄산가스에 의한 수화물의 분해, 하수처리시설이나 하수도 등에서 미생물의 작용에 의

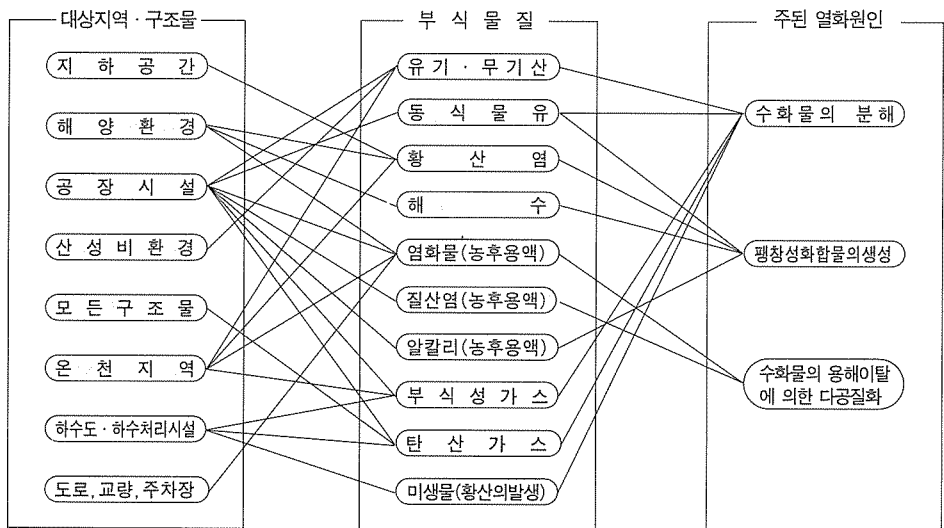


그림 7. 콘크리트구조물의 환경과 부식물질 및 열화원인

해 생성된 황산등에 의한 콘크리트구조물의 열화가 발생하여 그 중요성이 증가하고 있다.

그림7에 콘크리트구조물의 환경과 화학적부식인자 및 열화현상의 원인을 나타내었다.

그림7과 같이 콘크리트의 화학적 부식은 어떤 화학반응에 의해 콘크리트에 변화를 가져오는 것을 말하며 수화물의 분해를 가져오는 것으로서 유기·무기산, 동식물유, 부식성가스, 탄산가스 및 황산의 생성을 동반한 미생물의 작용이 있다. 또한 팽창성 화합물을 생성하는 것으로서는 동식물유, 황산염, 해수 및 알칼리농후용액이 있으며, 수화물의 용해 이탈에 의해 경화체가 다공질화하는 것으로서는 농후한 염화물 및 질산염용액의 작용을 들 수 있다.

3.7 피로

반복하중을 받는 콘크리트구조물의 피로파괴 현상은 종래에는 단순히 반복하중에 있어서 재료강도의 관점으로부터 파악되어 내구성문제로 취급되지 아니하였다. 그러나 최근에는 피로 현상을 변동 반복하중에 의한 콘크리트구조물의 성능열화현상으로 파악되어 내구성문제로 고려되게 되었다. 콘크리트의 구성재료인 콘크리트나 철근이 반복응력을 받을 때 그 최대응력이 정적강도 이하라도 그것이 반복됨에 따라 파괴에 이르는 경우가 있으며 이러한 현상을 피로(fatigue) 또는 피로파괴(fatigue failure)라 부른다.

철근콘크리트구조물이 반복하중을 받아 그 성능이 저하하는 경우로서는 크게 나누어 철도구조물, 도로구조물, 해양구조물 등을 들 수 있다. 특히 도로교의 철근콘크리트 상판에 있어서 자동차 교통량의 증가와 차량하중의 증대에 의한 손상이 자주 발생하여 그 대책이 중요한 문

제가 되고 있다. 또한 항만과 해안구조물, 해양구조물에 있어서는 파도에 의한 반복하중을 받아 이것이 구조물을 손상시키는 원인이 될 수 있다.

4. 결 언

이상으로 철근콘크리트구조물의 수명을 현저하게 단축시키는 대표적인 열화현상에 대하여 그 개요를 살펴보았다.

철근콘크리트구조물은 마치 살아있는 생물과 같이 끊임없이 변화하며 재료 및 시공의 양부 또는 유지관리의 양부에 따라 그 내구성은 천차만별로 달라질수 있다는 것을 깨달아야 한다. 우리는 항상 기본으로 돌아가 겸허한 자세로서 콘크리트에 애정어린 손길을 보낼 때 콘크리트는 오래 지속하는 생명력 있는 재료가 될 것이다.

..... 참고문헌

- 1) 윤재환, "콘크리트의 피로, 열화(중성화, 염해, 알칼리골재반응) 평가방법", 제3회 기술강좌, 시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리, 1994. 2
- 2) 六車熙, "コンクリートと水", 콘크리트工学, Vol.33, No.7, 1995
- 3) 新井哲三, "鹽分環境下での 鐵筋の腐食機構" 콘크리트工学, Vol.25, No.11, 1987
- 4) 대한주택공사 주택연구소, "알칼리골재반응에 대한 콘크리트용 골재의 품질관리 지침(안) 작성연구", 1995. 10
- 5) 鮎田耕一, "コンクリート構造物の耐久性上の問題點とその對策, 凍害", 콘크리트工学, Vol.32, No.10, 1994. 10
- 6) 坂井悅郎, "コンクリート構造物の耐久性上の問題點とその對策, 化學的腐食", 콘크리트工学, Vol.33, No.2, 1995. 2
- 7) 松下博通, "コンクリート構造物の耐久性上の問題點とその對策, 疲勞", 콘크리트工学, Vol.33, No.4, 1995. 4
- 8) 鎌田英治, "콘크리트의 동해", 철근콘크리트구조물의 내구성 향상에 관한 심포지엄논문집, 1995. 5