

철근콘크리트의 내구성

1. 서론



강병희*

일반적으로 철근콘크리트조 건축물은 내구성, 내화성이 뛰어나 그 수명이 반영구적이라고 알려져 있다. 실제로 철근콘크리트조는 목조와 같이 부식되거나 철갈조와 같이 방청도료를 사용하지 않으면 녹스는 일도 없고 불에 타지도 않으므로 철근콘크리트조의 내용년수는

다른 재료에 의한 구조보다 일반적으로 길 것으로 기대된다.

그러나, 1970년대 후반부터 염해나 알칼리골재반응에 의한 철근콘크리트조의 조기열화현상이 현저하게 나타나 커다란 사회문제로 대두되어 철근콘크리트의 수명은 반드시 반영구적이라고 할 수 없다는 인식이 확대되고 메인테넌스(maintenance)도 필요할 것이라는 생각이 일반화 되었다.

건축물의 설계와 시공에 있어서 요구되어지는 내용년수를 확보해야 하며 특히 철근콘크리트조 건축물의 구조체는 반영구적이지 않다는 사실이 수용됨에도 불구하고 일반적으로 긴 수명이 기대되기 때문에 고내구화를 실현해야 할 필요가 있다.

확실히 철근콘크리트조 건축물이지만 법정내용년수의 반도 채우지 못하고 각종 열화현상을 일으켜 문제가 되고 있는 건물이 다수 있으며 이러한 건물들은 콘크리트의 강도부족이나 피복두께의 부족, 염분을 포함하고 있는 등 각종 열화요인을 가지고 있다. 모든 철근콘크리트조 건축물이 20년이나 30년만에 문제를 일으킨다고 볼 수는 없으며 이러한 주장은 일반사회를 불안하게 만들 뿐이다. 현존하는 수 십년의 역사를 가진 건물의 상태, 콘크리트라고 하는 재료로부터 추측해 볼 때 품질이 좋은 재료를 사용하여 올바르게 시공한다면 100년 이상의 수명을 기대하는 것은 충분히 가능하다 할 수 있다. 단, 현재와 같이 설계 및 시공의 기준으로부터 벗어나는 저품질의 콘크리트를 사용하여 불량시공을 하고 필요한

메인테넌스도 하지 않고 방치한다면 조기에 열화가 진행될 것이다. 이러한 당연한 사실을 좀 더 널리 인식시켜야 하며 철근콘크리트조 건축물의 내구성에 대한 비관적인 견해가 일방적으로 받아들여지는 것을 우려하지 않을 수 없다.

고품질, 고내구성을 가지도록 건축물을 설계하고 시공하며 사회에 공급할 사명을 가진 설계자나 건축기술자 자신이 스스로 반성하지 않고 철근콘크리트조 건축물은 내구성이 좋지 않다고 쉽게 말한다면 일반사회가 어떻게 받아들일 것인가를 생각해야 할 때다.

2. 고내구성 콘크리트의 개념

2.1 내구성의 정의

내용년수는 내구성과 같은 개념으로 생각할 수 있다. 어떠한 환경 하에서의 내구성은 다른 환경에서 변화할 수 있으므로 내구성의 정의는 환경조건과 함께 생각하는 것이 일반적이다. ACI 위원회에서는 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 내구성은 기상작용, 화학적 작용, 마모, 기타 열화작용에 대한 저항력으로서 정의하고 있다. 즉, 고내구성 콘크리트란 주변 환경에 대해서 본래의 형상, 품질, 내용년수를 저하시키지 않는다.

2.2 철근콘크리트조의 열화현상과 원인

(1) 열화현상

1980년부터 1985년까지 시행된 일본 건설성종합기술개발 프로젝트인 「건축물의 내구성 향상기술의 개발」에서는 철근콘크리트조 건축물의 구체에 생기는 열화현상을 중성화, 철근부식, 균열, 누수, 강도저하, 처짐, 동해 및 표면열화 등 8종류로 나누고 각각의 열화원인의 조사, 열화정도의 판정, 열화진행의 예측과 함께 보수의 필요여부에 관한 판단방법을 정리하였다.

그러나, 이 8가지 열화현상들은 대부분 그 원인이 서로 독립된 것보다 밀접하게 관계되어 있는 경우가 많다. 중성화와 같이 콘크리트 자체로서는 직접적인 열화현상이 아니지만 철근부식의 원인이 되는가 하면, 균열과 같이 철근부식의 원인이 되기도 하지만 철근부식으로 인

* 동아대학교 공과대학 건축공학과 교수, 공학박사

해서 발생하기도 하는 현상도 있다. 현재에도 열화현상이라고 하면 위에서 언급한 8가지 열화현상을 들 수 있으나 좀 더 이해하기 쉽도록 정리해 볼 필요가 있으리라 생각된다.

그림1은 철근콘크리트의 열화현상을 콘크리트의 열화와 철근의 열화로 구분하여 각각 원인별로 정리한 것이다. 콘크리트의 열화로서는 강도저하, 각종 원인으로 인한 균열 및 표면열화가 있고 철근부식의 원인으로는 균열, 철근피복두께 부족, 중성화, 염화물의 존재를 들 수 있다.

(2) 철근콘크리트조 건축물의 수명

철근콘크리트조 건축물의 내구성, 오염정도를 조사 진단해 본 경험이 있는 사람은 건물의 소유자나 관리자로부터 「이 건물은 앞으로 몇 년 사용할 수 있습니까」라는 질문을 받은 적이 있으리라 생각된다. 그럴 때에 「이 건물은 앞으로 몇 년 더 사용할 수 있습니다」라고 명확하게 말할 수 있는 사람은 그리 많지 않을 것이다. 철근콘크리트조 건축물의 수명을 어떻게 정의해야 좋을지는 여러 가지로 생각할 수가 있으며 건축물의 성능과 관계지어 생각할 필요가 있다.

목조 건축물의 경우, 토대나 기둥이 부식되거나 성층에 의해 피해를 입으면 건전한 부분의 단면이 감소되고 이와 함께 구조내력이 저하된다.

그러나, 철근콘크리트조의 경우에는 알칼리골재반응으로 인한 콘크리트 자체의 열화, 하수도 시설이나 화학약품 공장과 같은 부식성 물질에 의한 열화, 화산이나 온천과 같은 산성토양 등에 의한 열화를 제외하면 수십년의 단위로 시멘트 경화체 조직이 붕괴되어 콘크리트 자체의 강도가 저하 되는 현상은 생각하기 어렵다. 콘크리트로부터 수산화칼슘의 유출됨으로써 시멘트 경화체 조직이 탄산화되어 콘크리트 자체 강도가 저하되는 현상도 있으리라 생각되지만, 이러한 현상은 100년이 넘는 긴 시간을 생각할 경우에 대상이 될 것이다. 그러므로, 철근콘크리트조의 경우, 일반적으로 열화라는 것은 철근부식에 관계되는 열화 현상을 고려하면 될 것이라 사료되어진다. 이 때에 철근이 부식되어 구조내력의 저하가 문제가 되는 것보다도 실제로는 철근이 부식되어 구조내력이 현저하게 저하되기 전에 콘크리트에 균열이나 박리가 생겨 방지할 수 없는 상태가 된다. 콘크리트에 균열이나 박리가 생기면 일상안전성이 저하되고 제 3차에 대한 2차 재해가 발생한다.

그 때문에 실제의 철근콘크리트조에서는 철근부식에 의한 구조내력의 저하가 문제되기 전에 수명이 다할

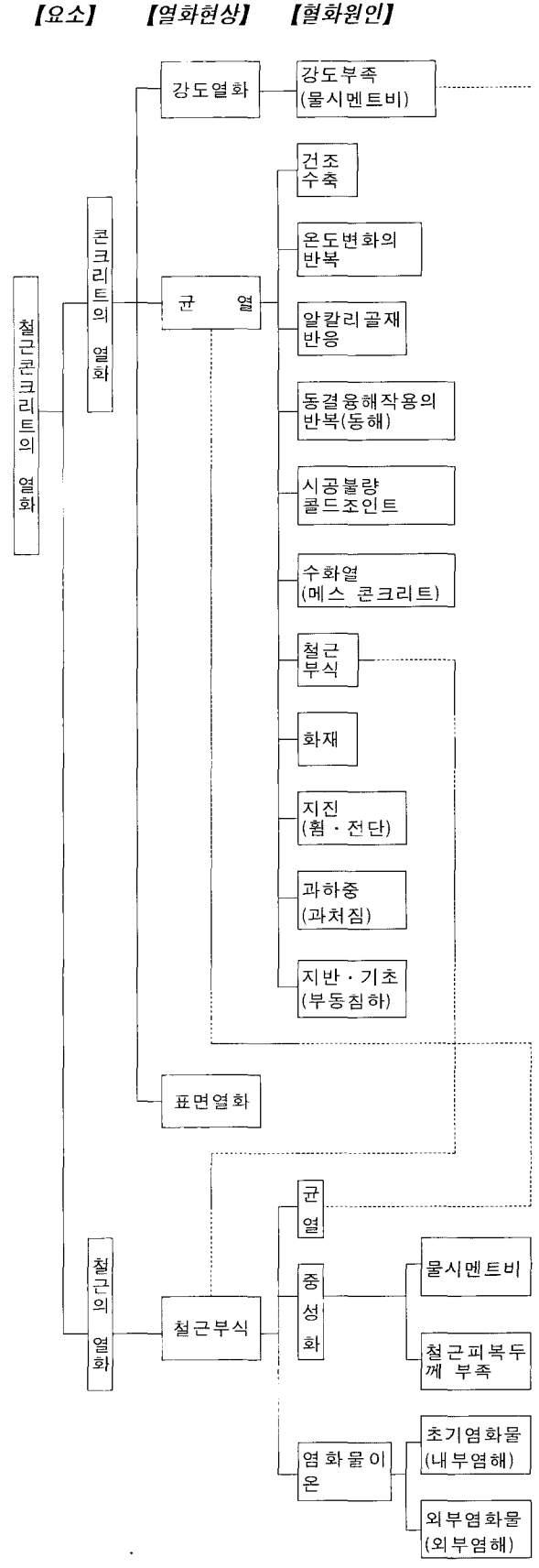


그림1 철근콘크리트의 열화현상 분류

것으로 생각된다. 열화된 부분을 보수한다 해도 다음 보수까지의 기간이 짧아져 보수하여도 보수하여도 성능회복이 되지 않는 때가 물리적인 수명이라 할 수 있다.

2.3 고내구성 콘크리트의 실현방법

(1) 콘크리트 내부로의 유해물질 침입

고내구성 철근콘크리트조를 실현하기 위해서는 콘크리트 자신의 고내구화도 중요하지만 구조물 전체로서의 내구성을 확보하는 것도 중요하다.

철근콘크리트조의 수명을 연장시켜 고내구화하기 위해서는 콘크리트 내부로의 유해물질 침입을 억제하는 것을 생각할 수 있다. 유해물질로는 철근을 부식시키는 물질, 콘크리트를 변질(중성화)시켜 철근부식억제효과를 없애는 물질, 콘크리트 자신의 조직을 변질시켜 강도를 떨어뜨리는 물질 등을 들 수 있다.

이와 같은 유해물질의 콘크리트 내부 침입을 억제하기 위해서는 물시멘트비를 작게 하여 조직을 밀실화하거나 혼화재를 적절히 이용해서 유해물질을 고정화시켜 콘크리트로의 침입 및 콘크리트 내부에서의 확산을 억제하는 것, 마감재를 사용하여 콘크리트 내부로의 침입을 방지하는 것 등을 생각할 수 있다.

(2) 균열 발생 억제

콘크리트 자신을 치밀화하여 콘크리트 내부로의 염화물 이온이나 탄산가스 등의 유해물질 침입을 억제하더라도 건조수축으로 인한 균열이나 온도변화의 반복으로 인한 균열이 발생하면, 균열로부터 콘크리트 내부에 유해물질이 침입하여 내구성에 악영향을 미칠 우려가 있다.

그러므로, 콘크리트의 건조수축을 가능한 작게 하여 수축균열, 온도균열을 억제하는 것이 무엇보다도 중요하다.

(3) 시공불량 발생 억제

콘크리트를 고강도화, 고내구화하기 위해서 시공이 곤란해질 정도로 굳지 않은 콘크리트의 컨시스턴스를 나쁘게하면 콘크리트의 부어넣기가 곤란해져서 곰보나 콜드조인트 등 시공불량을 일으키는 원인이 된다. 곰보나 콜드조인트 등의 시공불량 개소가 생기면 콘크리트 자체가 아무리 치밀하고 고내구적이라 할지라도 철근콘크리트조로서의 내구성은 기대할 수 없게 된다.

이상의 요점을 정리하면 그림2와 같으며, 고내구성을 위해서는 적정 물시멘트비, 적정 단위수량, 충분한 피복두께를 확보하고 시공결함 없이 염화물을 포함하지 않고, 알칼리골재반응을 일으키는 골재를 사용하지 않으며 전

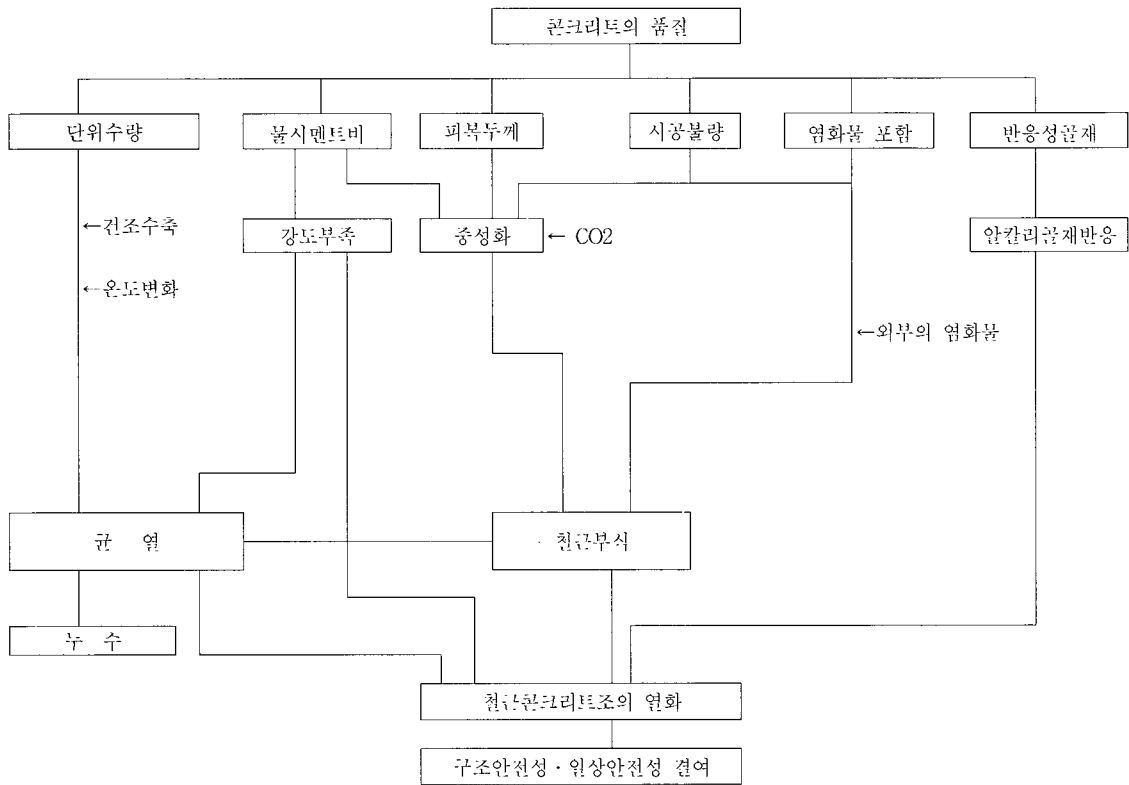


그림2 철근콘크리트의 품질과 열화현상의 상호관계

체적으로 균형이 잡힌 설계 및 시공이 요구된다 하겠다.

3. 내구성 저해요인과 예방대책

3.1 건조수축과 균열

(1) 기본적인 개념

단위수량이 많은 콘크리트는 건조수축이 증가하기 때문에 콘크리트 균열의 원인이 되기 쉽다. 또 불리딩이나 재료분리를 일으키고 내구성에 악영향을 미치게 된다.

그러므로, 단위수량, 슬럼프의 최대치나 단위시멘트의 최소치 등을 규정할 필요가 있다.

그리고, 콘크리트의 압축강도가 작으면 중성화가 진행되고 기밀성도 저하된다. 따라서, 압축강도의 확보는 내구성에 중요한 역할을 한다는 것을 고려하여 시방서 등의 규정에서 물시멘트비의 최대치를 정하고 있다. 최근에는 내구설계기준강도라고 하는 새로운 개념도 도입되고 있다.

그러나, 어떠한 방법으로는 콘크리트의 품질을 확보하기 위해서 최소한의 규정을 정하고 수축변형을 억제하도록 배려함으로써 수축변형은 약간 감소시킬 수 있으나 변형 그 자체를 완전히 없애는 것은 불가능에 가깝다.

(2) 수축과 구속

수축균열이라고 하면 현장 타설 콘크리트 외벽이 가장 현저한 부분이다. 그에 비해 프리캐스트 벽체는 마감에 관한 대책은 고려해야 하나 수축균열에 대한 위험성은 적다. 주위 구속의 강약도 역시 큰 영향을 미친다.

수축균열이 구조체의 내구성을 떨어뜨리는 것은 알고 있으나, 그렇다면 수축균열이 생기지 않았을 경우 건조수축 그 자체가 콘크리트 내구열화의 원인이 되지 않는 것인가. 물론, 콘크리트(엄밀히 말하자면 페이스트 경화체)가 구속을 받지 않고 자유로운 수축변형이 가능한 경우는 구속응력도 발생하지 않고 따라서 내구열화를 가져오는 원인으로서는 보기 힘들다. 그러나, 콘크리트의 수축변형이 어떠한 구속을 받을 경우, 눈에 보이는 수축균열까지는 발생하지 않더라도 구속응력(인장응력)을 내재하고 있는 것은 명확하므로 내부 또는 표면에 미세한 균열이라고 하는 형태로 콘크리트에 작은 손상을 다수 입힐 가능성은 있다.

지금까지 콘크리트에 관한 내구성 실험, 예를 들면 중성화축진시험이나 염분침투시험 등은 구속을 받지 않는 작은 시험체로 시험하는 것이 일반적이다. 그러나 실제의 구조물 각 부위를 본다면 어떠한 형태로든 주위의 구속을 받고 있다. 구속조건을 고려한 축진시험이라고

하는 발상이 현실을 보다 깊이 반영한다고 할 수 있을 것이다.

(3) 콘크리트 건조수축의 메카니즘

시멘트 경화체의 건조수축 메카니즘은 거의 해명되어 보고되고 있다. 건조수축이란 콘크리트 중의 잉여수(수화반응에 아직 참가하지 못한 물)가 증발할 때에 생기는 수축현상으로, 이 수축현상을 설명하는 이론으로는 모세관장력설, 표면흡착설, 중간수설 등이 있다. 이중에서도 특히 모세관장력현상은 건조수축에 크게 관련이 있다.

굳지 않은 상태의 시멘트 페이스트에서 시멘트 입자간의 간극은 모세관수라고 불리우는 연속된 물로 채워져 있다. 그 후, 시멘트 표면에는 수화생성물(시멘트 겔)이 만들어지면서 그 간극은 비연속적인 상태로 되어 경화체가 되어간다. 그리고 또 경화체로 되지 않고 남은 부분을 「모세관수 간극」이라 한다(그림3).

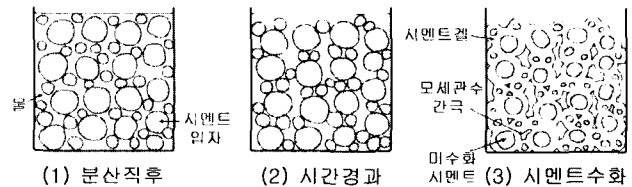


그림3 시멘트 페이스트의 구조

시멘트 경화체의 건조로 인해 모세관수 간극의 물은 빠져나가며 이 때에 모세관수 간극을 수축시키려는 모세관 장력이 작용한다. 건조수축이라고 하는 것은 이 모세관수 간극을 수축시키려는 힘의 작용으로 생기는 용적감소인 것이다. 간극경이 작을수록 장력은 커진다고 보고되어 있으며 반드시 수분건조량에 수축량이 비례하는 것은 아니다. 예를 들어 충분히 경화된 시멘트 경화체는 이 간극경이 작기 때문에 건조량은 적지만 수축량이나 수축응력은 커진다. 또, 콘크리트 중의 단위수량이 많고 물시멘트비가 커지면 모세관수 간극이 커지기 때문에 수밀성이 저하되고 내구성도 떨어진다.

(4) 수축균열의 메카니즘

콘크리트 수축변형의 발생은 주위의 구속재 존재여부에 따라 내부응력을 발생시키고 그 응력이 그 때의 콘크리트 인장강도를 상회하면 「수축균열」이 발생한다. 이 수축균열은 철근콘크리트 부재에 대해 큰 손실을 가져오며 균열로부터 철근을 부식시키며 내구성을 떨어뜨리는 원인이 된다. 한편, 일반구조체의 벽이나 바닥에

생기는 건조수축균열 발생시기는 거의 재령 3개월 이후라고 알려져 있다.

그 밖에 응력발생이라고 하는 점에서 내부철근이나 골재가 구속재가 되며 내부의 미세한 균열을 발생시키기도 한다.

(5) 유해한 균열이란

건물진단이나 보수를 할 경우, 유해한 균열이라는 표현은 흔히 들을 수 있으며, 진단하는 입장에서도 편리한 표현으로 자주 쓰고 있다. 그렇다면 유해한 균열이라고 하는 것은 어떻게 정의 할 수 있을까. 유해한 균열(허용할 수 없는 균열)인지 아닌지는 거의 균열폭의 등급으로 설정되는 경우가 많으나, 이러한 균열폭의 등급에 관해서는 구조균열과 수축균열에 따라 부착이 다르며 동일한 수축균열일지라도 관통부위에 따라 다르다. 표면균열의 경우 철근위치에 균열은 의외로 적다. 또, 옥내균열인지 옥외균열인지에 따라서도 유해한 정도도 다르다.

일본건축학회 RC조 균열대책지침에서는 일반부재의 설계시 균열폭의 목표치를 0.3mm로 정하고 있다. 고내구성 RC조 설계시공지침에서는 허용열화상태로서 건조수축균열 및 온도균열에 대해서 폭 0.3mm이상의 균열이 없도록 권고하고 있으나 설계상의 제어목표치로서는 표1에 나타내는 것과 같이 내구성상 0.2mm이하를 목표로 하고 있다.

표1. 콘크리트의 목표품질

품질항목	고내구성 RC조 설계시공지침	RC조균열대책지침
중성화	25mm 이하	
건조수축율	7×10 ⁻⁴ (6개월)	6×10 ⁻⁴ (6개월)
블리딩량	0.3cm ³ /cm ² 이하	0.3cm ³ /cm ² 이하
균열폭	0.2mm (일반부)	0.3mm
설계허용치	0.15mm (옥외)	
내구성지수	85이상(300사이클)	

(6) 건조수축 저감을 위한 재료·배합 대책

① 단위수량의 저감

콘크리트 배합의 단위수량이 증가하면 그만큼 잉여수가 증가하기 때문에 전술한 건조수축의 메카니즘과 같이 수축량이 증가하는 경향이 뚜렷해진다. 그 때문에 내구성 확보의 관점에서 단위수량을 작게 하는 것은 무엇보다도 중요하다.

② 골재·시멘트의 영향

콘크리트의 건조수축은 시멘트 경화체의 건조수축에

의해 생기지만, 콘크리트 중의 골재, 특히 굵은골재는 구속재의 역할을 하므로 그 압질(탄성계수, 외부의 구속)에 따른 신축변형)이나 계면상태 등의 영향도 받는다. 그 때문에 골재의 종류에 따라 동일한 콘크리트 배합일지라도 건조수축의 양이 달라질 수 있다.

③ 팽창재·수축저감제의 효과

경화중에 팽창하는 성질의 팽창재는 초기의 수축을 제어할 수 있으나, 경화 후에 생기는 건조수축변형에 대해서는 수축저감의 효과가 적다. 그 때문에 경화수축균열에 효과적이며 수화열 균열대책에도 유효하므로 사용실적이 많으나, 장기적인 건조수축 균열대책이라고 하는 점에서 불충분하다.

한편, 수축저감제는 모세관장력문제에 대처하기 위해 개발되어진 것으로 모세관 장력을 저감시킬 수 있기 때문에 콘크리트가 건조하여도 수축변형을 작게 할 수 있는 점에서 획기적인 재료이다. 코스트 면에서 아직 비경제적이며 일반보급까지는 이루어지지 않고 있으나 현재 특수한 건물 또는 프리캐스트재 등 부가가치가 높은 부분을 중심으로 사용실적이 늘고 있다. 급후 내구성 확보가 점차 중요해지고 수축균열방지에도 적극적으로 대처할 필요가 있으므로 시장은 크게 확대될 가능성이 있는 재료이다.

④ 그 밖의 대책

철근콘크리트 부재의 균열을 제어하는 방법으로는 철근을 할증하고 철근비를 크게 함으로써 균열폭을 제어하는 방법이 있다. 물론, 이것은 철근을 증가시킴으로써 균열발생을 막으려는 것이 아니라 균열을 분산시키는 것이 목적이다.

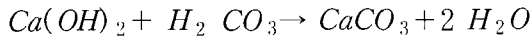
또 벽두께를 두껍게 하는 것도 효과적이다. 예를 들어, 벽두께 18cm를 25cm로 하면 수축은 감소한다. 외기 온 변동의 영향도 얇은 판과 같이 온도에 민감하지 않으므로 온도신축도 작아지는 효과가 있다. 또는 외벽재에 프리캐스트재를 사용할 수 있으면 더욱 더 효과적인 대책이 될 수 있다.

3.2 중성화

(1) 중성화의 메카니즘

시멘트의 수화반응이 종료하면 경화시멘트 페이스트의, 약 60%가 C·S·H이고, 25% 정도가 수산화칼슘으로 채워진다.³⁾ 이 수산화칼슘은 경화시멘트 페이스트 중의 결정 또는 공극중의 포화수용액의 형태로 존재한다. 수산화칼슘의 포화수용액은 pH 12.6의 강알칼리성으로 경화시멘트 페이스트의 pH를 결정한다. 콘크리트가 대기 중에 노출되어 있으면 대기중의 탄산가스(CO₂)가 콘크

리트 내부로 확산되어 이하의 탄산화 반응이 일어난다.



이 식과 같은 수산화칼슘의 탄산화는 지금까지 콘크리트의 재료분야에서 활발히 연구되어져 온 「중성화」를 말한다. 무엇보다도 일반적인 중성화는 콘크리트가 대기중에 있는 경우이다. 탄산가스가 확산되어 중성화가 콘크리트 표면에서 내부로 진행되어져 간다. 그러나, 모든 수산화칼슘이 탄산화된 영역과 탄산칼슘이 생기지 않은 영역간에 명확한 경계가 있는 것은 아니다. 이 2가지 영역 사이에는 수산화칼슘과 탄산칼슘이 혼재되어 있는 영역이 있다. 이 중간영역은 건조한 실내측에 있어서 넓고 우수에 접하기 쉬운 옥외는 좁다.

중성화가 중요시되어지는 것은 콘크리트 자체의 문제 때문이 아니라 콘크리트 중의 철근이 발청하기 때문이다. 철은 대기중에서 급속히 부식한다. 그러나, 중성화되지 않은 콘크리트 속에서는 어느 정도 이상의 염화물 이온이 존재하지 않는 한 녹슬지 않는다. 콘크리트 중의 철은 pH11 이상에서는 표면에 부동태피막을 형성하여 부식되지 않으나, 중성화에 의해 pH가 11보다 낮아지면 발청한다. 부식에 의해 철은 부식생성물을 만들고 약 2.5배로 체적이 팽창된다. 이 팽창압에 의해 피복콘크리트에 균열이 생기거나 콘크리트가 박리된다. 철근콘크리트 구조물의 내구성상 중성화가 중요한 것은 이러한 이유 때문이다.

(2) 예방대책

중성화의 예방대책으로서는 신축시의 대책과 중성화가 진행된 시점의 대책으로 나누어 생각할 수 있다.

1) 신축시의 대책

1 콘크리트의 재료·배합의 선정

양질의 골재를 사용하고 물시멘트비를 작게 한다.

2 시공과 양생

콘크리트를 충분히 다져 부어넣어 곱보가 발생하지 않도록 한다. 또, 충분한 습윤양생을 한다.

3 철근 피복두께의 확보

피복두께의 최소한도를 정하며 배근 설계시에 오차를 고려함과 동시에 철근의 조립도 고려한다. 시공시에는 철근의 가공·조립 정밀도 및 거푸집의 정밀도를 높여 피복두께의 오차를 줄인다.

4 중성화 억제효과가 큰 마감재 사용

투수성이 작은 마감재료를 사용한다. 이 때에 마감재 자체를 내구성이 뛰어난 것으로 할 필요가 있다.

5 보전계획

목표 내용년수에 달할 때까지의 보전계획을 세우고

실시한다.

2) 열화가 진행된 시점에서의 대책

① 중성화가 진행되었으나, 철근의 부식에는 다르지 않았을 경우에는 중성화를 억제하는 대책을 세운다. 중성화 억제방법으로는 기밀성이 높은 마감재료를 새로 시공하는 것이 실용적이다.

② 중성화가 철근위치까지 진행되어 철근이 부식하기 시작한 경우에는 철근의 부식을 억제하는 대책을 세운다. 철근부식의 억제방법으로는 기밀하고 투수성이 작은 마감재를 새로 시공하는 것이 실용적이다. 최근, 재알칼리화공법이 연구되어져 일부 실용화되고 있으나 코스트 면에서 문제가 남아 있다.

3.3 염해

(1) 철근부식의 메카니즘

철의 부식은 여러가지 형태가 있으며 그에 따라 부식 생성물도 각각 다르다. 예를 들면 밀스케일이 될 때의 고온산화나 산성용액중에서의 용해도 부식의 한 종류로 볼 수도 있다. 그러나, 콘크리트 중에서의 철근부식은 먼저 철이 철이온으로서 용해되어 수산화제일철을 거쳐 수산화제이철로 변화하는 현상이 일반적인 부식이다. 이 부식이 생기기 위해서는 원천적으로 물과 산소가 필요하다. 이 중 어느 한쪽이라도 부족한 조건하에서는 예를 들어 콘크리트 중에 다량의 염화물이 포함되어 있다 하더라도 철근은 부식되지 않는다.

콘크리트 중에는 자유수가 포함되어 있다. 피복콘크리트에 균열을 발생시킬 정도의 부식을 일으키기 위해서는 이 불량으로 충분하다. 즉, 부식에 필요한 물은 콘크리트 중에 충분히 포함되어 있다. 또, 콘크리트는 약간의 공기를 포함하고 있으므로 콘크리트 중에 산소도 포함되어 있다. 그러나, 위에서 서술한 정도의 부식을 일으키기 위해서는 이 산소량으로는 부족하다. 결국, 콘크리트는 외부로부터 공기(산소)가 공급되지 않는 한 그 이상의 부식이 생기지 않는다. 그러므로, 문제가 될 정도의 부식이 발생했다고 하는 것은 그 원인으로 외부로부터 공급되어진 산소에 기인한다고 할 수 있다.

철근의 위치까지 산소 공급을 지배하는 것은 본질적으로 콘크리트의 품질, 특히 기밀성을 지배하는 물시멘트비나 다짐정도, 피복두께라고 볼 수 있다. 콘크리트 표면에 기밀성이 뛰어난 마감재를 시공하는 것도 부식 방지에 효과가 큰 것은 이러한 원리로부터 명확히 알 수 있으며 역으로 곱보나 균열 등이 치명적인 결함이 되는 것은 말할 것도 없다.

(2) 염해대책의 기본방침과 수명설계

철근의 부식속도는 기본적으로 3가지 요인 즉, 피복두께, 피복두께 부분의 산소확산저항 및 염분농도에 의해 정해진다고 알려져 있다. 건축물은 내용년수를 고려하여 설계되어야 하며 소정의 내용년수까지 문제가 될 정도의 부식을 일으키지 않도록 부식속도를 제한하는 것이 염해대책의 한 방침이다. 내용년수를 먼저 정하고 그 년수를 만족시키도록 구체적인 설계조건을 선정하는 것을 수명설계라고 부른다. 다시 말해서 내용년수에 대한 부식속도를 소정의 값으로 제한하기 위한 조건을 선정하는 것을 뜻한다.

철근콘크리트에는 각각의 성능이 요구되어진다. 이러한 성능을 잃을 때까지가 수명이라 판단되어진다. 철근콘크리트의 구조적 보강을 위해서 이용되어지므로 구조적으로 요구되는 성능이 부족할 정도의 철근부식은 허용할 수 없다. 피복콘크리트가 탈락되기 시작할 정도의 부식단계에서는 구조적 성능의 열화는 아직 문제시되지 않으나 탈락의 영향을 고려하면 이 시점에서 콘크리트는 중대한 열화단계에 도달해 있다고 볼 수 있다. 말하자면 이러한 기능적 성능이 구조적 성능보다도 먼저 문제가 되는 것이다. 건축물의 경우, 건물의 소유자나 거주자로부터 클레임을 피할 수 있는 시점은 박리로 인한 탈락이 시작되기 훨씬 전의 부식단계이며, 피복콘크리트에 균열이 발생하기 시작한 시점이라 할 수 있다. 구조적 성능은 건축기술자가 아니면 이해할 수 없는 성능인 반면, 균열은 누구라도 알 수 있고 균열발생과 동시에 건물의 품질을 의심할 수 있으며, 또 불안감을 가지게 되므로 이 시점에서 클레임이 발생할 가능성이 높다. 균열발생으로부터 박리까지의 기간은 통상 수년으로, 그리 길지 않다. 이와 같이 철근부식에 기인하는 구조물의 열화를 문제시 할 경우 피복콘크리트에 균열이 발생한 시점을 수명으로 보는 것은 하나의 수명설계방법이라 할 수 있다.

(3) 수명설계는 가능한가

수명설계의 개념을 나타내기 위해서 하나의 연구 예를 소개한다. 그림4는 피복두께와 염분량에 대해 콘크리트의 수명이 어떻게 변화하는가를 나타낸 것이다. 여기서 수명이란 앞 절에서 말한 이유로부터 콘크리트에 균열이 발생할 때까지의 기간으로 정의한다. 피복두께 부분의 산화확산저항에 해당하는 성질로서는 물시멘트비를 특성으로 생각해 W/C=65%의 예를 나타내며, 또 콘크리트는 마감재가 시공되어있지 않은 노출콘크리트인 경우를 대상으로 하고 있다. 부식속도에 영향을 미치

는 요인으로는 앞에서 언급한 것과 같이 기본적으로 피복두께, 피복두께 부분의 산소확산저항 및 염분량의 3가지로 보았다(구체적으로는 철근경, 온도·습도 등의 환경조건에도 좌우되므로 각각 $\phi 9$ 의 철근, 20°C, 70RH%의 경우를 나타냄).

이 그림의 예에서도 알 수 있듯이 소정의 수명을 얻기 위한 설계방법으로는 무한의 조합이 가능하다. 예를 들어 염분농도를 일정하게 하더라도 피복두께, 물시멘트비 혹은 마감재 등을 선정하여 임의의 조합을 함에 따라 소정의 수명을 얻을 수 있을 것이다. 즉, 수명설계를 채용할 경우에는 설계의 자유도는 상당히 높아지게 된다. 어떠한 설계가 최적일지는 별도의 검토문제가 되겠지만, 각각의 설계에 대해서 라이프사이클 코스트를 비교하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

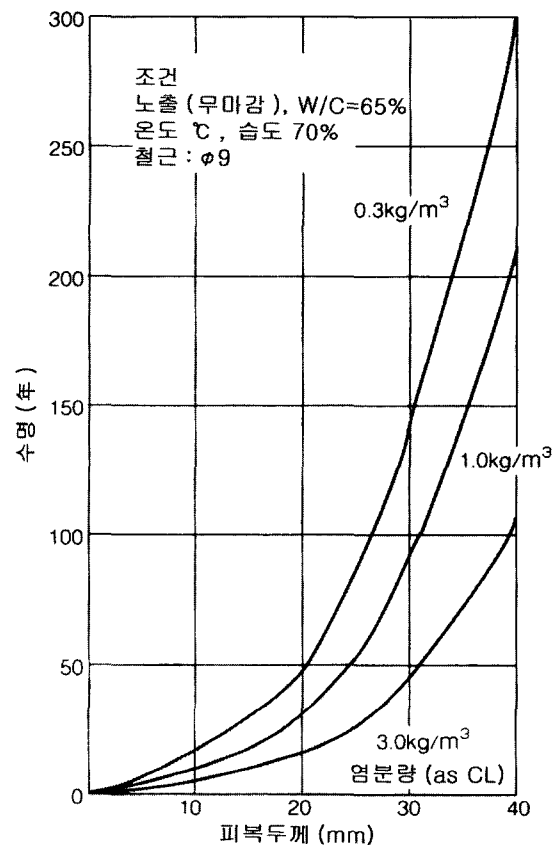


그림4 피복두께 및 염분량이 콘크리트 수명에 미치는 영향

3.4 동해

(1) 동해열화의 형태와 메카니즘

동해란 콘크리트 내부의 수분이 동결·팽창함으로써 생기며, 콘크리트의 조직을 파괴하고 균열, 붕괴, 표면층의 스케일링(scaling), 팝 아웃(pop out) 등을 가져온다.

동해현상의 이해와 그 메카니즘에 관한 고찰은 동해열화의 과정에 영향을 미치는 각종 요인의 작용을 명확히 하고 콘크리트 구조물의 동해에 대한 위험성을 올바르게 인식시킬 것이다.

실구조물에 있어서 대표적인 동해는 초기에는 균열로써 관측되고 보다 진행된 후에는 전체적인 붕괴를 가져온다. 균열은 구갑상(龜甲狀)으로 불안정한 시멘트 경화체의 균열과 유사하다. 이것은 양자 모두 팽창으로 인한 균열이기 때문으로, 동해에서는 열화의 근본 원인이 콘크리트 중의 경화시멘트 페이스트 조직의 팽창에 있는 것을 나타낸다. 콘크리트가 팽창하려고 할 때 눈에 보이지 않을 정도의 균열이 콘크리트 표면에 있었다고 하면 동해에 의한 팽창은 이 균열을 현저히 확대시킨다. 그러나, 이것은 결정이 썩기와 같이 작용하여 균열을 확대시키는 것이 아니라, 균열이 내부의 팽창에 맞추어 확대되는 것으로 생각하면 이해하기 쉽다. 이 때문에 동해에서는 대표적인 구갑상의 균열 이외에 온도응력이나 구속응력에 의한 것과 유사한 균열도 볼 수 있다.

(2) 동해열화에 영향을 미치는 요인과 대책

콘크리트 내부에 포함되어 있는 물을 어느 한계치 이하로 하면 콘크리트의 동해는 완전히 방지할 수 있다. 그러므로, 콘크리트를 어느 정도 건조한 조건으로 해 두는 것이 무엇보다 확실한 동해방지법이 된다. 이 때문에 표면마감 등으로 외부로부터 수분의 보급을 완전히 차단할 수 있다면 콘크리트를 동해로부터 보호할 수 있다. 또, 콘크리트 내부에 수분이 존재하는 경우에도 그 수분이 동결하지 않는다면 콘크리트는 동해를 입지 않는다. 그러므로, 조직을 치밀하게 하고 동결가능한 물을 감소시키는 것은 동해방지에 효과가 있다.

① 콘크리트 자체의 내동해성 향상

콘크리트 자체의 내동해성은 사용재료, 배합, 양생, 시공조건 등의 영향을 크게 받는다. 그림5에서 나타내는 바와 같이 팽창으로 생기는 일반적인 동해를 방지하기 위해서는 AE제에 의한 공기연행은 매우 유효하다. 그러나 스케일링이나 팽아웃과 같은 열화의 대응책으로서는 적합하지 않다. 또, 내동해성 향상에는 기포를 미세하게 분산시키는 것이 중요하고 내동해성에 중요한 기포특성은 공기량이 아니라 기포간격계수라는 보고도 있다. 특히 플라이 애쉬를 혼입한 콘크리트나 고유동콘크리트는 공기의 연행성과 함께, 연행되어진 기포의 안정성이나 기포경, 기포간격계수 등에도 주의할 필요하다.

스케일링에 대해서는 AE제에 의한 팽창으로써 동해를 방지함과 동시에 낮은 물시멘트비와 충분한 습윤양

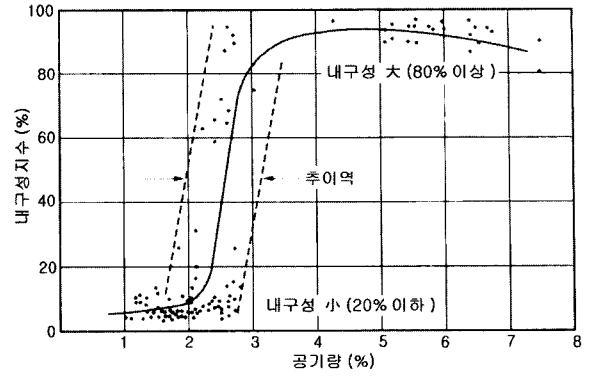


그림5 콘크리트의 동해와 공기량의 관계
(각종 골재 · 시멘트량 · W/C · 공기량에 의한 결과)

생을 통하여 콘크리트 표면의 조직을 치밀화 하는 것이 대책의 기본이다.

팽 아웃의 방지로는 다공질로 흡수율이 높은 굵은골재(연석)를 사용하지 않는 것이 좋다. 그러나, 골재 중의 연석은 편재하고 있는 경우가 많으며 보통의 골재 품질관리로 그것을 찾아내기란 쉬운 일이 아니다. 무엇보다도 확실한 방지법으로는 골재성분이 균일한 양질의 쇄석을 굵은골재로 사용하는 것을 들 수 있다.

② 동해열화에 영향을 미치는 외적요인

콘크리트의 동해에 영향을 미치는 외적 요인으로는 동결시의 온도조건, 동결융해회수 등 동결융해작용에 관련된 기상조건과 콘크리트의 함수상태에 관련된 구조물 및 부재의 조건이 있다. 동해에 의한 열화의 정도는 단순히 동결융해의 반복회수에 의존하는 것이 아니라 동결최저온도와 콘크리트의 건조정도에 관계되는 환경조건의 역할이 매우 크다.

3.5 알칼리골재반응

(1) 알칼리골재반응의 분류

알칼리골재반응은 골재 중의 유해광물의 종류에 따라 그 반응 메카니즘이 다르기 때문에, 보통 다음과 같은 3가지로 분류한다.

① 알칼리실리카반응

알칼리실리카반응은 1940년 미국의 Stanton에 의해 최초로 보고되었다.⁷⁾ 이것은 콘크리트 중의 수산화알칼리와 골재 중에 포함되어있는 어떤 종류의 실리카광물이나 화산재와의 사이에 생기는 반응이다. 이 반응에 의해 생성된 알칼리실리카가 주위로부터 수분을 흡수함으로써 팽창한다.

② 알칼리탄산염반응

점토 돌로마이트질 석회암 중에 주로 돌로마이트와

콘크리트중의 알칼리 성분이 반응하여 수산화마그네슘을 생성함으로써 팽창하는 것이다. 여기서 생성된 탄산알칼리는 시멘트의 수화물인 수산화칼슘과 반응하여 수산화알칼리로 변하고 골재 중의 돌로마이트와 반응을 반복하여 팽창을 촉진한다. 이 때문에 알칼리탄산염반응에 의한 팽창량은 콘크리트 중의 알칼리량에 비례한다.

③ 알칼리실리카반응

캐나다의 노버스코시아 지방의 경사암, 점토질암, 천매암 등의 층구조물이나 미세한 석영을 함유하고 있는 암석과의 반응이다. 알칼리실리카반응에 비해서 팽창은 현저히 늦지만 장기간에 걸쳐 계속된다. 그러나, 이에는 다른 이론도 있어 매우 늦게 진행되는 알칼리실리카반응 속에 포함된다고 보는 견해가 강한 지지를 얻고 있다.

(2) 알칼리골재반응에 의한 열화 메카니즘

알칼리실리카반응에 의해 콘크리트가 팽창하기 위해서는 첫째, 고농도의 알칼리, 둘째, 유해한 반응성 실리카, 셋째, 충분한 수분이 필요하고, 각각의 조합에 의해서도 팽창량에 큰 차이가 생기게 된다. 이 때문에 알칼리실리카반응에 의한 피해구조물의 열화상태도 크게 다르고 매우 복잡하다.

알칼리실리카반응의 메카니즘에 관해서는 아직까지 불명확한 점이 많이 남아있다. Diamond 등은 알칼리실리카반응에 의해 소비되어지는 모르타르 세공용액중의 알칼리량과 그 팽창량과의 관계를 구하여 ①화학반응에 의한 알칼리실리카겔의 생성이라고 하는 「화학반응」과 ②알칼리실리카겔의 흡수에 의해 「흡수팽창」이라고 하는 2가지의 과정이 존재하는 것, 그리고 이 2가지 과정은 동시에 진행되지 않고 ①의 「화학반응」이 충분히 진행되고 나서 ②의 「흡수팽창」이 진행된다는 것을 보고했다.¹⁾

(3) 알칼리골재반응의 예방대책

알칼리실리카반응에 의한 유해한 팽창이 진행되기 위해서는 유해량 이상의 반응성 골재, 일정 이상의 알칼리량, 충분한 수분의 존재가 필요조건이다. 따라서, 예방책으로는 이러한 필요조건 중 1개 이상을 제거하는 것이 기본이 된다.

① 재료·배합의 대책

알칼리실리카반응에 대한 재료·배합에 의한 구체적인 대책으로는 골재자원의 유효이용 관점에서 반응성 골재의 제거를 전제로 하지 않고 다음 4항목 중에서 선택하는 것으로 한다.

a) 알칼리골재반응에 대해서 무해하다고 판정되어지는 골재를 사용한다.

b) 저알칼리형의 포틀랜드시멘트를 사용한다.

c) 억제효과가 있는 혼합시멘트(고로시멘트, 플라이애쉬시멘트)의 B, C종을 사용한다.

d) 보통의 포틀랜드시멘트를 사용하는 경우에는 콘크리트 1m³ 중에 포함된 총알칼리량을 3.0kg이하로 한다.

② 설계대책

알칼리실리카반응에 의해 「화학반응」 과정이 진행되어도 주변에 수분이 없으면 「흡수팽창」 과정은 진행되지 않으므로 콘크리트에 유해한 팽창이 생기지 않는다. 알칼리실리카반응에 의한 혹독한 열화는 건물외부의 우수가 닿는 부분이나 지하수가 침투하는 지하구조부에서 많이 볼 수 있으므로, 설계단계에서 콘크리트 중에 수분을 가 능한 존재하지 않도록 배려하는 것이 효과적인 대책이다.

또, 해수나 해풍의 영향을 받는 환경이나 지중으로부터 알칼리이온의 진입을 막기 위한 마감을 할 필요가 있다. 알칼리이온이 고농도로 축적되면 알칼리실리카반응성시험에 의해 무해로 판정되는 골재라도 유해한 팽창을 나타내는 경우가 있으므로 주의해야 한다.

참 고 문 헌

1. 米澤敏男, 技術フォーラム-콘크리트의機能性を考える-超壽命콘크리트, 콘크리트工學, Vol.35, No.12, pp.41-43, 1997. 12
2. 柳橋邦生, 長壽命콘크리트, 콘크리트工學, Vol.36, No.1, pp.56-58, 1998. 1
3. 日本콘크리트工學協會, 炭酸化研究委員會報告書-콘크리트의炭酸化に關する研究の現狀, pp.1, 1993.3
4. 岸谷孝·外1人, 콘크리트中の鐵筋の腐食に關する研究, 日本建築學會 論文報告集, Vol.23, pp.11~15, 1979.9
5. 森永 繁, 鐵筋の腐食速度に基づいた鐵筋콘크리트建築物の壽命豫測に關する研究, 東京大學 博士學位論文, 1986. 11
6. W. A. Cordon, D. Merrill, Requirements for Freezing-and-Thawing Durability for Concrete, Proc. ACI, Vol.63, pp.1026-1036, 1963
7. T. E. Stanton, Proc. ASCE, Vol. 66, pp.1781-1811, 1940
8. S. Diamond, Proc. 5th Int. Conf. on AAR., S252 /22, 1981