

콘크리트 構造物의 劣化現象과 耐久性を 고려한 設計技法

최 완 철* · 오 병 환**

1. 서론

최근에 들어서 내구성(durability)이 구조물 설계에 있어서 하나의 중요한 인자로 대두되고 있다. 설계에서 내구성의 중요성은 1989년 9월에 전세계로부터 약 800여명의 기술자가 Lisbon에 모여서 열린 국제 교량-구조 공학 학회(International Association for Bridge and Structural Engineering)의 심포지움에서 강조되었다. IABSE의 의장인 Hans Von Gunten교수는 심포지움의 서두에서 "구조물의 내구성-구조물이 존재하는 동안 만족할만한 수준의 신뢰성(reliability)과 사용성(serviceability)을 유지하는 능력-은 설계나 시공단계에서 너무나 적은 관심을 받아 왔다."라고 역설했다.

기술자들은 강도(strength), 안정성(stability), 사용성(serviceability), 피로(fatigue), 그리고 내구성(durability)들이 구조물 설계를 위한 주요사항이라고 배워왔다. 그러나 1950년대부터 1960년대 사이의 교육에서 강도(strength)와 안정성(stability)들이 강조되었고 이에 따라 강도 설계법(ultimate strength design)과 한계상태설계법(limit state design)이 발달되게 되었으며, 이러한 과정에서 소위 허용응력설계법에서 강도설계법으로 전이됨에 따라 여러면에서 사용성이 무시되었다. 또한 기술자들은 피로(fatigue)나 내구성(durability)에 관한 문제점의 발생빈도가 적기 때문에 이에 대해서는 관대하였으며, 당시의 시방서 규준을 따를 경우 이러한 문제를 적절히 방지할 수 있을 것으로 생각했다.

그러나 사용성의 무시와 피로 및 내구성에 대한 관심 부족은 1960년대 말부터 1970년대 초에 새로운 설계 및 시공법의 발전 변화에 따라 문제를 맞게 되었다. 한 예

로, 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 시간에 따른 변형인 크리프(creep)와 건조수축(shrinkage)에 대해 소홀함으로써 많은 사용성의 문제가 유발되었다. 또한 강구조에서 볼트접합 대신 용접접합을 함으로써 피로의 문제가 심해지고 안전이 위협받게 되었다. 제설용 염분이 사용되는 교량, 고속도로, 차고 및 외부환경에 자주 노출되는 건축물에서 콘크리트속의 철근이 부식되어 전 세계적으로 이들 구조물의 열화현상(deterioration)이 중요한 문제의 하나로 되었다.

본 소고에서는 콘크리트 구조물의 내구성에 관한 최근 동향에 관하여 기술하고자 한다. 특히, 구조물은 설계와 시공으로 끝나는 것이 아니라 그 이후 사용성에 더욱 중요한 의미를 부여해야 한다는 관점에서 볼때, 구조물의 내구성과 부식문제 및 열화문제 등은 매우 중요한 의미를 갖게된다. 본 소고에서는 이러한 콘크리트 구조물의 내구성 문제를 중심으로 기술하고자 한다.

2. 열화현상을 유발하는 기본 메카니즘

콘크리트 열화현상(deterioration)을 일으키는 원인 및 메카니즘은 여러해 동안 광범위하게 연구되어 왔으며, 최근에는 이러한 열화현상의 문제를 어느 정도 합리적으로 밝혀내고 있다. 열화현상의 주요 메카니즘은 다음과 같다.

1. 동결융해작용(freezing and thawing action)
2. 알칼리-실리카 반응(alkali-silica reaction)
3. 화학성분에서의 심한 노출(sulfate attack 등)
4. 콘크리트에 묻힌 철근의 부식

이외에도 마모(abrasion)와 고온 및 중성화 작용 등의 원인도 있지만 이것들은 위의 사항보다는 덜 중요하게

* 정희원 · 숭실대학교 건축공학과 교수
 ** 정희원 · 서울대학교 토목공학과 교수

여겨지며, 본 소고에서는 분량제한으로 이번 기회에는 생략한다. 우선, 콘크리트 구조물 수명의 예측, 유지관리 및 보수에 관련된 사항을 논의하기 위하여 상기의 메카니즘들을 간략히 고찰하고자 한다. 이러한 메카니즘에 관한 보다 상세한 내용은 ACI 201 위원회의 보고서(ACI 201.2R) “콘크리트의 내구성 확보지침(Guide to Durable Concrete)”에서 논의되고 있다.

모든 이들 메카니즘에서 수분(moisture)이 연류되어 있다는 사실은 특히 중요하다. 따라서, 구조물의 내구성에 가장 중요하게 여겨지는 것은 구조물이 수분에 노출되고 있다는 것이며 그 범위를 어떻게 관리, 통제하느냐에 있다.

2.1 동결융해작용

콘크리트가 동결융해작용을 받을 때, 시멘트 페이스트의 열화현상은 골재에서의 현상과 다르다. 시멘트 페이스트에서 수분은 약알칼리 용액 상태이며 온도가 용액의 빙점이하로 될때, 비교적 큰 모세관(capillary)사이에서 얼음 결정이 형성된다. 이에 따라 얼음 주위의 얼지 않은 용액에 대해 알칼리 농도의 증가를 초래하며, 다른 공극에 있는 수분이 부분적으로 언 공극속의 용액으로 흘러들어가는 삼투현상(osmotic)이 발생한다. 이러한 작용의 결과, 얼음에 의하여 압력이 증가되며 물이 얼음으로 변할때 9%의 체적이 증가하기 때문에 얼음의 표면에 있는 수분이 빠져나오게 된다. 또한 수화된 페이스트에 함유된 수분이 얼음으로 이동함으로써 국부적인 압력을 증가시켜 장기간의 동결 기간 동안에 파손이 생긴다.

조골재의 공극들은 일반적으로 시멘트 페이스트의 그것보다는 “가장 불리한 크기(pessimum size)”의 공극을 갖는 골재에서 얼음에 대한 수분의 이동으로 공극속의 수압이 높아지고, 이로 인해 발생하는 응력으로부터 손상을 받게 된다. 작은 공극을 갖는 작은 조골재는 표면까지 닿는 거리가 짧기 때문에, 일반적으로 동결시 발생하는 손상에 대한 저항능력이 향상된다. 다만 granite, basalt, quartzite 종류의 자갈은 일반적으로 크기에 관계없이 동결시 발생하는 손상에 저항하는 능력이 크다.

2.2 알카리-실리카 반응

알카리-실리카 반응은 골재속의 규소와 포틀랜드 시멘트속의 알카리 그리고 시멘트 공극에서의 자유수 사이에서 서서히 진행되는 화학적 반응으로, 이들은 팽창성 있는 gel을 합성한다. 팽창성 있는 또 하나의 화학적 반응은 시멘트 알카리 성분과 탄산성 암석(carbonate rock)의 사이에서 일어날 수 있으나 이러한 작용은 알카리-실리카 반응보다 훨씬 일반성이 적다.

ACI 201 위원회의 보고서가 지적하듯이, 알카리-실리카 반응의 현상은 상당히 복잡하다. 실리카 물질이 시멘트에 있는 칼륨(potassium), 탄산소오다(sodium hydroxide) 성분으로 인해서 수분을 흡수하여 팽창성 있는 알카리-실리카 복합물을 형성하도록 반응한다고 일반적으로 보고 있다. 만일 알카리의 농도가 낮을 때는 초기 반응의 생성물은 팽창성이 없지만, 알카리의 농도가 높을 때는 생성물이 팽창성을 갖게 된다. 이들에게서 전자의 경우, 안전하게 반응이 진행되기 위해서는 반응하는 물질의 양이, 알카리농도와 반응물질의 입도에 따라 일정량보다 적어야 한다. 후자의 경우는 안전한 반응(즉, 팽창력 없는 생성물의 형성)의 역현상이 바람직하며, 반응입자의 반응표면이 충분할때, 즉 반응입자가 무수히 많거나 세립자일 때 일어난다.

반응성이 큰 플라이애쉬(fly ash) 또는 실리카흄(silica fume)은 용액에서 수산화 칼슘(calcium hydroxide)을 제거하는 능력이 있기 때문에, 유익한 것으로 알려지고 있다. 즉, calcium silicate hydration을 유발하여 석회가 줄어들고, 소오다(sodium)와 칼륨(potassium)이 용해되지 않고 더이상 반응을 일으키지 않게 한다.

2.3 화학성분예의 심한 노출

콘크리트에서 화학적 피해는 일반적으로 황산염(sulfate)이나 산(acid)에 노출된 결과이다. 포틀랜드 시멘트는 산에 대한 저항력이 매우 약하다. 콘크리트가 산에 노출되는 경우로는 연료의 연소 결과 또는 산업공정에서 사용된 용액들로 부터 피해를 받는 경우이다. 산에 의한 콘크리트의 열화현상(deterioration)은 대체로 산성물질과 고갈

습 수화 생성물 사이의 반응결과이다.

나트륨(sodium), 칼륨(potassium), 칼슘(calcium), 또는 마그네슘(magnesium)의 황산염은 간혹 토질이나 지하수에 녹아있다. 201 위원회의 보고서에서 지적되었듯이, 증기가 노출된 표면에 도달할때, 용해된 황산염은 그 표면에 쌓이고 따라서 그들의 농도가 증가되어 결국 열화가 증가된다. 황산염에 의한 피해는 세계도처에서 일어나며, 특히 토지가 건조한 미국의 북부 지역, 서부 평원, 캐나다의 동쪽 해양지역과 대초원같은 지역에서는 문제가 되었다. 예를 들면, 콘크리트 냉각탑의 수분이 황산염에 의한 손상을 일으킬 수 있는데, 그 이유는 오랜동안 시스템이 작동되거나, 또는 황산이 알카리성분의 수분을 중화시키기 위해 첨가됨으로써 수분이 증기화 될때 황산염이 점차적으로 많아지기 때문이다. 일반적으로, 콘크리트에서 황산염에 의한 손상에 관계되어 다음의 두가지 화학 반응이 발생한다고 알려지고 있다.

1. 시멘트 수화과정에서 유리된 자유수산화칼슘(free calcium hydroxides)과 황산염의 합성으로, calcium sulfate dihydrate(gypsum)이 발생되는 과정
2. gypsum과 hydrated calcium aluminate의 합성으로, calcium sulfoaluminate(ettringite)의 생성과정

이런 두가지 반응의 결과는 고체의 부피를 증가시킨다. 후자는 더 팽창성이 있으며, 황산염 용액으로 인해 심한 팽창과 콘크리트의 파괴를 초래하고 있다. 상당히 큰 단면이 강한 황산염 용액에 노출되면, 일반적으로 누수부위인 접합부나 균열부에서 대부분의 손상이 발생된다.

해수로 인한 콘크리트의 열화현상은 콘크리트 기술자들이 오랫동안 관심을 가져 왔으며, 그 자체의 메카니즘과 실용여부에 관한 논란이 계속되고 있다. 해수는 많은 황산염을 포함하고 있으며, 따라서 화학적 손상을 방지하기 위해 엄격한 품질검사가 요구되리라 예측된다. 그러나 경험을 통해서 볼때, 해수는 콘크리트에 대한 화학적 작용이 심하지는 않으며, 오히려 해수속에는 염화물(chlorides)이 존재하여 황산염의 반응을 다소 완화시키는 것으로 알려지고 있다.

2.4 콘크리트에 묻혀있는 철근의 부식

콘크리트에 묻힌 철근의 부식은 콘크리트 구조물들의 열화현상을 일으키는 주요한 원인중 하나이다. 실제적인 문제에서 1960년대 중반부터 염분이 주차 구조물의 바다에 뿌려졌던 아니든 차량하부에 의해 많은 양의 염분이 미국북부의 고속도로에 전달되어 교량이 염분을 다량 함유하게 되었고, 교량의 상판 및 하부에 심각한 파손을 초래했다. 더욱이 혼화제로서의 칼슘화합물이 광범위하게 사용되고 있어, 콘크리트 구조물이 염화물 오염에 노출되어 심한 피해를 입고 있다.

콘크리트 슬래브속에 묻힌 철근의 전기적 부식(galvanic corrosion)은 그림 1과 같은 방법으로 일어난다고 본다. 일반적으로 콘크리트속의 철근은 산화철의 미세한 표면막이 형성된 후에 비활동(passivate)적이 된다. 콘크리트 내에서 pH가 약 12 또는 그 이상일때 안정상태로 유지되지만, 만약 pH가 10-11 이하로 떨어지면 활동적(dep-assivate)으로 변하게 된다.

콘크리트는 탄산화(carbonation)로 인하여 pH가 떨어지게 되는데, 탄산화는 콘크리트의 칼슘산화물(calcium hydroxide)과 대기의 이산화탄소(carbon dioxide) 사이에서 일어나는 반응이다. 이것은 구조적으로 우수한 콘크리트에서는 매우 서서히 작용하지만 시멘트량이 적은 콘크리트는 시멘트를 많이 함유한 것보다는 투과성이 높기 때문에 탄산화의 영향을 더 받는다.

pH범위에 관계없이 "부식 임계치(corrosion threshold)"를 벗어난 염화물이온(chloride ions)은 비활동적인 철산화물(passive iron oxide film)을 뚫고 들어가 파괴할 수 있고, 수분이 있음으로 인해 철재의 부식을 일으킨다.

부식이 일어나는 이와 같은 환경에서, 전자(electron)가 방출되고 철의 양이온은 떨어져 나간다. 이와 같이 산화된 금속철은 양극(anode)을 형성하고 전자는 철근을 통하여 부식되지 않은 지역의 철근으로 흐르고 이 부분의 철근은 음극(cathode)이 된다. 그림1에서와 같이 이러한 현상은 하나의 철근과 이웃한 철근 그리고 슬래브에서 마주하는 철근 사이에서 발생한다. 다만 이러한 철근들은 한 부분에서 서로 접촉이 되어야 한다. 다른 음이온(anion)을 따라 수산화기(hydroxyl)이온이 형성되고 콘크리트

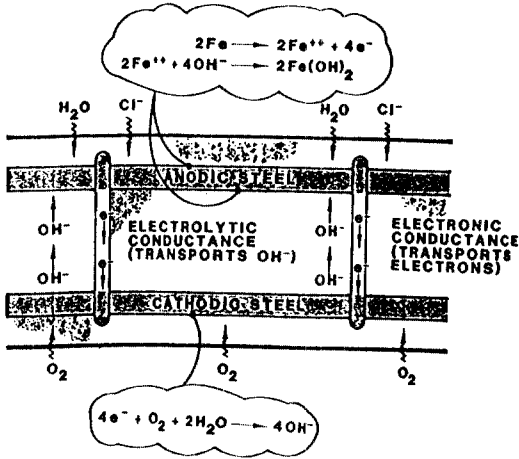


그림 1. 콘크리트 내부에 묻혀있는 철근의 전기적 부식

트를 통해 양극에 도달하여 완벽한 전기분해 전지를 형성하게 된다. 수산화 이온은 다음에 철의 양이온과 결합하여 여러가지 철의 수산화물(iron hydroxide)이나 “붉은(red)”녹을 형성한다. 철의 수산화물의 부피는 철자체의 2배지 10배이상 되고, 이에 따라 팽창력이 생성되어 콘크리트의 균열 및 다른 형태의 파손이 나타난다. 특별한 경우, 소위 “검은(black)”녹이 발생되며, 이때에는 부피팽창이 적다.

Federal Highway Administration(FHWA)에서 실시한 광범위한 실험연구에서 상부 및 하부 철근 사이의 macrocell corrosion 전류가 측정되었다.²⁾ 그림 2에 보여진 이 자료는 이전의 비교적 정밀치 못했던 야외 실험의

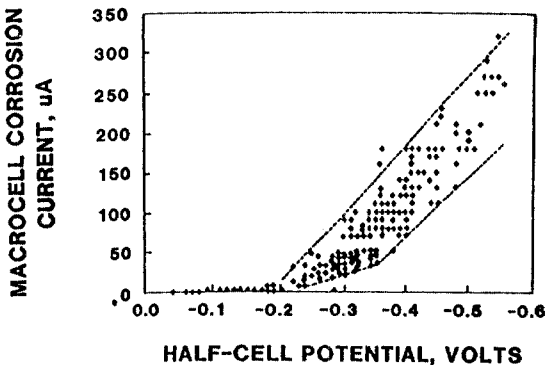


그림 2. 부식 전류와 Half-Cell Potential의 관계자료

결과에 도움이 되었다. 이 그림은 half-cell potential이 대략 -0.2 volt보다 낮을 때의 부식 전류가 측정되었다. 이 수치는 ASTM C 856 규준에서 부식활동이 확실치 않은 범위, 즉 -0.2에서 -0.35 volt 사이의 하한치였다.

3. 구조물의 수명에 대한 영향

내구성(durability)은 시간에 의해 측정되며 구조물의 수명으로 표현된다. 특히, 구조물의 내구성은 일반적으로 그림 3에서와 같이 강도(strength)와 수명(life)의 함수관계로 나타낼 수 있다.

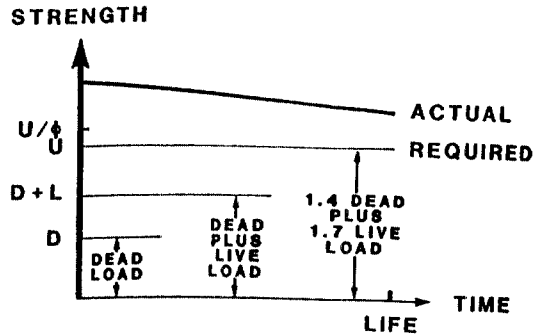


그림 3. 강도설계법에서 강도와 수명과의 관계

설계의 관점에서 보면 모든 구조물은 시방서 규정에 맞는 소요강도(U)를 지니고 있다. 콘크리트 구조물의 설계에서는 사하중과 활하중에 대해 계수(factor)를 곱해서 소요강도를 표현한다. ACI Building Code (ACI 318-89)에서 이러한 계수들은 각각 1.4와 1.7이다. 따라서 소요강도는 1.4 D+1.7 L 이다. 더우기 ACI 규준은 강도 감소계수(phi)가 설계강도에 곱해지도록 되어있다. 시방서 해설에서 보여지듯이 강도 감소계수의 사용목적은(1)재료의 강도나 치수의 편차로 인해 강도 저하의 확률을 고려하였고, (2) 설계식의 부정확성을 고려했으며, (3) 하중효과에 따라 부재의 연성(ductility)과 신뢰성(reliability)을 반영하였으며, (4) 구조물에서 각 부재의 중요성을 반영하고 있다. 실례로, 기둥이 보보다 작은 phi가 사용되고 있다. 왜냐하면 기둥은 연성이 적고, 콘크리트 강도의 편차

가 크며, 보보다 더 많은 하중면적을 감당하고 있기 때문이다. 더우기 나선철근 기둥(spiral column)은 높은 연성 때문에 띠철근 기둥(tied column)보다 큰 ϕ 를 사용한다. 따라서 실제로 설계과정에서 강도는 U보다 큰, U/ ϕ 가 된다.

구조물의 실제 강도는 차이가 있지만, 설계 강도보다는 늘 크다. 이러한 추가적인 강도는 설계 모델에서 구조물이 단순화되기 때문이다. 그밖에도 재료는 대체적으로 명시된 것보다는 강하다. 또한, 전 구조물의 모든 부재들이 각각의 강도를 모두 발휘하는 상태까지 하중이 작용되는 예는 드물다. 따라서 다른 부재들은 membrane action과 arching action, 또는 다른 구속으로 인하여 서로의 구속력을 발휘하여 강도의 증가를 가져온다. 비록 주요 구조물이 아닌 2차부재 역시 구조물의 강도 증가에 공헌하고 있다.

과거에는 관습적인 설계과정에서 다음과 같은 방법으로 시간의 요소가 고려되었다. 즉, 규정된 피복두께가 확보되어 있고, 또한 최대 물-시멘트비가 만족된다면, 구조물의 적절한 수명이 만족된다고 보아왔다. 수명은 대체로 30년, 40년, 50년도 가능하였다. 그러나 실제로 많은 구조물의 경우, 특히 주차 시설물, 교량, 제지공장같이 심한 환경에 노출된 구조물에 있어서, 설계수명에 못미치는 경우가 많았다.

최근에는 설계과정에서 구조물의 수명 즉, 그림 4의 X좌표축에 많은 관심을 두게 되었다. 실제로 50년 또는 100년, 또는 그이상의 수명이 설계에 중요한 요인이 되기도 한다. 실제로, 북유럽의 덴마크에서는 대형 교량과 대양밀의 터널로 덴마크섬을 연결하는 소위 Great Belt라 불리는 주요한 건설 프로젝트가 현재 진행되고 있다. 이 프로젝트에 대한 요구중 하나는 100년의 수명을 갖도록 설계 하는 것이다. 이러한 수명을 얻기 위하여, 설계자들은 일을 수행하는데 있어서 몇가지 사항을 명시하였다. 첫째로 특별한 그라우트층(grout layer)이 콘크리트 구조물의 요소와 흙사이에 놓이게 하였으며, 둘째로 가능한한 프리캐스트 콘크리트 제품을 사용하되 최고의 콘크리트의 품질을 유지하기로 하였다. 마지막으로 콘크리트 내부에 에폭시 피막된 철근이 사용되었으며, 만일의 철근 부식에 대비하여 음극 보호시스템(cathodic protection)

을 설치하기 위하여 모든 철근을 서로 연결시켰다. 이것은 설계 과정에서 구조물의 수명을 고려한 좋은 예가 되고 있다.

세계의 많은 기술자들은 구조물의 수명에 관하여 여러 가지 모델을 논의하였으며, 포르투갈의 Lisbon에서 열린 IABSE의 토론회에서 주된 주제중의 하나가 됐다. 콘크리트 구조물의 수명에 대한 3가지 모델은 그림 4에서 나타내어지고 있다. 과거에는 열화현상(deterioration)이 모델 A에 의하여 표현된 바와 같이 일정한 저하(steady decline)의 과정으로 생각되었으나, 최근에는 모델 B에서 나타나는 것 처럼 열화현상의 일부는 가속(accelerating) 진행되는 것으로 알려졌다. 그러나 이와 상이한 C 모델은 점진적인 초기상태(slow period of initiation)에서 breakpoint를 지나 열화현상을 일으키는 단계는 빠른 파급(rapid propagation)에 의한 메카니즘으로 구분 되었다. 실제로, 마지막의 모델 염화물이온의 농도가 “부식 임계치(corrosion threshold)” 즉, breakpoint에 도달할때 부식 메카니즘과 대체로 잘 일치한다. 그러나 동결융해에 의한 열화현상은 모델 A에 의하여 더 잘 설명이 된다.

구조물의 수명에 대한 유지관리(maintenance)와 보수(repair)의 영향에 관한 차이가 그림 5에서 잘 나타나고 있다. 유지관리는 열화율(rate of deterioration)을 감소시킴으로써 구조물의 수명을 연장할 수 있다. 심지어 설계과정에서 내구성을 충분히 고려하였고 설계 요구조건에 의해 시공되었다 하더라도, 심한 환경에 노출된 구조물은 그들의 예상된 수명을 유지하기 위하여 유지관리가 필연적이다. 주위환경에 따라서 실제강도는 줄어들어 설계강도 이하로 떨어질 수 있다. 이때, 적합한 수준으로 강도를 복귀시키기 위하여는 보수가 필요하다. 보수과정에서는 구조물의 차후 수명이 중요한 고려사항이 된다. 그림 5의 파선에 의해 나타나듯이, 보수에 의해 강도는 높아지지만 동시에 열화율이 줄어들지 않으면 효과적이지 못하다.

앞에서 기술되었듯이 내구성 확보는 첫째로 설계와 시공, 둘째로 유지관리, 셋째로 보수에 의하여 좌우된다. 뒤에 계속되는 내용은 내구성과 연관되어 건설 기술자들이 각각 중요히 여기는 사항의 일부를 서술한다.

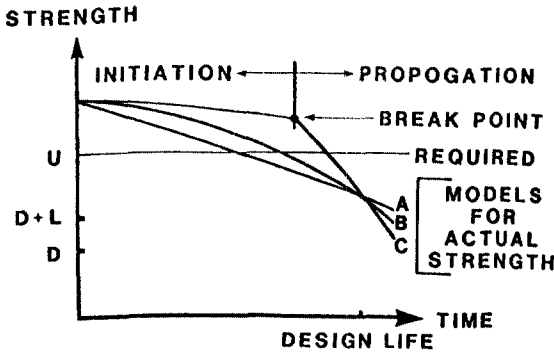


그림 4. 실제강도를 얻기 위한 모델

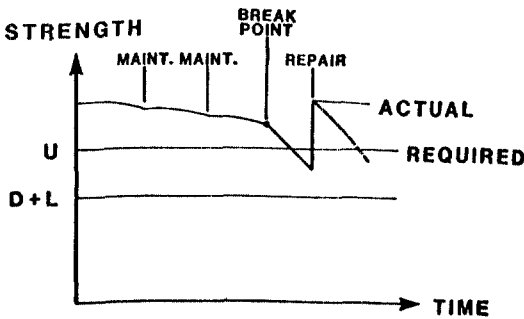


그림 5. 구조물 수명에 대한 유지관리와 보수의 효과

4. 설계와 시공

이미 지적되었듯이 과거에서 현재까지, 모호하지만 필요한 수명을 얻기 위해서 설계자들은 건물 및 교량의 설계기준과 사양서에만 의존하고 있다. 그러나 강도와는 달리 내구성을 성취하는데 있어서는, 위의 최소 요구사항 이상의 특별한 고려를 필요로 한다. 즉 설계와 시공과정에서 아래의 항목을 특별히 고려하여야 한다.

1. 공기 함유량
2. 물-시멘트비
3. 염화물이온의 농도
4. 콘크리트 피복두께
5. 혼화재료
6. 에폭시-코팅된 철근과 강성 및 장치

위의 고려사항 이외에도, 시공 과정에서 고품질 확보가 특별히 요구되며, 콘크리트의 다짐(consolidation)과 양생(curing)이 특히 중요하다. 건설에서 세부상세 즉, 배수구나 접합부의 시공에도 역시 신중해야 한다. 구조물에서 균열이 많을수록 파손이 빨라지며, 따라서 균열방지법이 중요하다. 적은 단면의 철근과 조밀한 간격의 철근 배근이 균열방지에 특히 바람직하다. 밀폐재(sealer)와 막(membrane) 및 덧씌우기(overlay)들은 새로운 공사에 응용될 수 있다. 그러나 이 방법은 일반적으로 유지관리와 관련되어 있어 본 소고의 다음 절에 서술한다.

1989년에 개정된 (ACI 318-89) ACI Building Code에서 내구성에 대한 요구사항을 별도의 장에 마련하였다. 이 장에서는 설계자가 콘크리트 강도와 철근의 피복두께를 결정하기 전에 내구성의 필요사항을 고려하도록 강조하고 있다.

4.1 공기 함유량

표1 (ACI 318-89의 표4.1.1)은 동결이나 용해에 노출된 보통 콘크리트나 경량 콘크리트의 공기 함유량에 대한 요구사항들로서 ACI 318-83과 대체로 동일하며 이러한 요구사항은 적당한 것으로 알려졌다. 표1에서 "극심하게 노출된(severe exposure)" 상태는 콘크리트가 얼기전에 수분과 계속 접촉되어 있거나, 또는 제설을 위한 염분에 노출되어 있는 상태이다. "보통으로 노출된(moderate exposure)" 상태는 콘크리트가 동결하기 전에 수분에 가끔 노출되나 제설용 염분이 사용되지 않는 환경이다. 콘크리

표1. 동결융해작용을 받는 콘크리트의 공기 함유량

골재의 공칭 최대 치수(mm)*	공기 함유량 (%)	
	극심한 노출	보통의 노출
9.5	7.5	6
12.5	7	5.5
19.0	6	5
25.0	6	4.5
37.5	5.5	4.5
50.0	5	4
75.0	4.5	3.5

* 각 공칭 최대치수에 대하여 골재치수의 허용정도는 ASTM C33을 참조

트의 압축강도가 500psi(352kg/cm²)이상인 경우, 공기 함유량은 1%이하가 허용된다. 이러한 고강도 콘크리트는 낮은 물-시멘트비와 공극을 갖게 됨으로 본래의 동결저항성이 향상되기 때문이다.

4.2 물-시멘트비

ACI 318-89에 따르면, 습윤상태에서 동결융해작용을 받거나 제설용 염분이나 염분을 함유한 수분 및 해수에 노출될 수 있는 보통중량 콘크리트는 투수성이 낮도록 하기 위해서 표2(ACI 318-89의 표4.1.2)의 수치에 의해 물-시멘트비를 제한한다. 경량 콘크리트에서는 고품질의 시멘트 페이스트를 얻기위한 최소의 압축강도를 물-시멘트비의 향으로 명시하고 있다. 이는 경량골재의 흡수도를 결정하는 방법이 불확실하고, 물-시멘트비의 계산이 비현실적이기 때문이다.

표 2. 특별한 노출환경을 갖는 콘크리트의 요구사항

노출된 상태	보통 중량 콘크리트의 최대 물-시멘트비	경량 콘크리트의 최소 압축강도(kg/cm ²)
수분에 노출되었을 때 낮은 투수성을 갖는 콘크리트	0.50	263
습윤상태에서 동결융해작용을 받는 콘크리트	0.45	299
제설용 염분이나 염수 및 해수에 노출된 철근콘크리트	0.40*	334

* 규정에 의한 최소 피복두께를 125mm만큼 증가시킬 때에는, 물-시멘트비가 0.45로 증가하고, 압축강도는 299kg/cm²으로 감소한다.

ACI 318-89의 새로운 요구사항으로, 제설용 화학약품과 동결융해에 노출된 콘크리트에 대해서, ASTM C 150(보통 포틀랜드 시멘트)과 C 595(blended hydraulic 시멘트)의 규정에 따라 1 입방야드의 콘크리트에서 최소 시멘트량 520lb (309kg/m³)의 규정은 모순이 되고있다. 즉, 표2에서 요구된 물-시멘트 비율에 따라, ASTM C 618(플라이애쉬와 천연포졸란을 포함)에 따른 시멘트량이나 ASTM C 989에 따른 슬래그 사용시의 시멘트 함유량이 계산되었더라도, 이러한 물질이 과연 최소의 시멘트량으로 인정될 수 있는냐는 반론이 일어났다.

미국에서는 표2의 한계치에 대한 타당성 여부에 관하여 토론이 계속되고 있다. 최근의 연구에 의하면, 콘크리트에

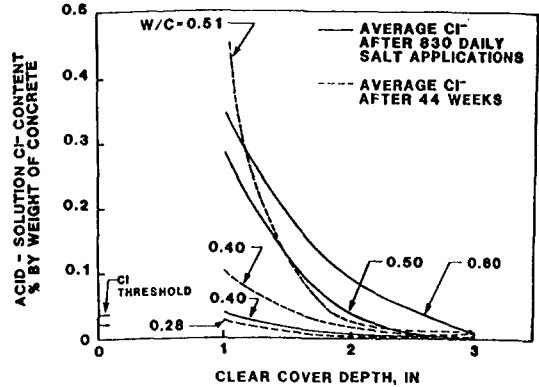


그림 6. 물-시멘트비에 따른 철근 피복 두께와 염화물 함유량의 관계

물된 철근의 보호는 콘크리트 배합에서 물-시멘트비가 줄어들 때 향상되는 것으로 나타나고 있다. 물-시멘트비가 0.3 이하일때는 ASTM C 494의 규정에 따라 F와 C형의 고성능 감수제를 사용함으로써 쉽고 경제적으로 배합할 수 있다. 그림 6의 파선은 물-시멘트비가 0.51, 0.40, 0.28인 90개의 콘크리트 슬래브 재령 44주에서 실험한 염화물 이온(Cl⁻) 함유분포 결과이다.²⁾ 그림 6은 또한, 부식을 일으키며 산에 녹는(acid-sluble) 염화물 이온 함유량의 한계치(threshold)가 콘크리트 중량에 따라 0.025-0.040%임을 보여주고 있다. 이러한 자료들은 콘크리트 슬래브를 4일동안 15%의 염화나트륨(NaCl)용액에 담근후, 소금물 용액이 제거된 채로 100F의 마른 공기에 3일 동안 노출시키는 실험을 반복한 실내 실험실 연구에 의하여 얻어졌다. 유사한 염화물 이온의 함유량을 이용하는 현장에서의 부식 연구가 1976년에 미국에서 보고되었다.⁴⁾ 이 실험에서 콘크리트 슬래브는 0.60, 0.50, 0.40의 물-시멘트비로 배합되어 830일 동안 하루를 단위로해서 3% 염화나트륨(NaCl)용액에 담구었다. 그림 6의 실선이 이 경우 염화물 이온 함유량의 분포를 보여주고 있다. 이들두가지 연구로 다음의 결과를 얻게 된다.

1. 실험의 결과로써 주어진 w/c비에 대해 염화이온량은 서로 유사하였다.
2. 두 연구 모두에서, 물-시멘트비가 0.50나 0.51인 콘크리트는 물-시멘트비가 0.40인 콘크리트 보다 약 5

표3. 황산염을 함유한 용액에 노출된 콘크리트의 요구사항

노출정도	토양 내부의 수용성 황산염의 농도 백분율	수분에 녹아있는 황산염의 농도 (ppm)	ASTM C 150 또는 C 595에 따른 시멘트의 종류	보통 중량 콘크리트 최대 물-시멘트비*	경량 콘크리트 최소 압축강도 (kg/cm ²)
무시할 수 있는 노출	0.00-0.10	0-150	-	-	-
보통의 노출**	0.10-0.20	150-1500	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	263
심한 노출	0.20-2.00	1500-10,000	V	0.45	299
극심한 노출	2.00이상	10,000이상	V + 포졸란***	0.45	334

* 등검용해작용을 받거나 낮은 부수성을 유지하고 철근의 부식을 방지하기 위해서는 더욱 낮은 물-시멘트비와 높은 압축강도가 요구된다(표2 참조).

** 해수에 해당된다.

*** Type V의 시멘트가 콘크리트 배합에 사용될 때, 황산염에 대한 저항능력을 향상시키기 위해 시공경험이나 시험결과에 의해 결정된 포졸란재료를 혼합한다.

배의 염화물을 흡수한다.

3. 철근 피복 두께 1인치(2.5cm)에서 염화물 이온은 콘크리트의 물-시멘트비가 0.51일 때가 0.28일 때보다 18배가 많다. 콘크리트의 28일 강도는 물-시멘트비가 0.28과 0.51에서 각각 7500psi(527kg/cm²), 5000psi(352kg/cm²)였다. 물-시멘트비가 0.28인 콘크리트에서는 고성능 감수제를 사용하여 제조하였으며 3-4인치(7.5~10cm)의 슬럼프를 얻었다.

이들 두 연구에서 물-시멘트비가 0.30-0.40인 콘크리트가, 물-시멘트비가 0.50인 보통 콘크리트와 비교했을 때, 철근 부식의 위험이 줄어든다고 보여졌다. 이미 언급되었듯이 부식을 유발시키는 염화물 이온의 한계는 일반적으로 콘크리트 무게에 따라 산에 녹는(acid-soluble) 염화물 이온 농도 0.025-0.040% 범위라고 여겨진다. 낮은 물-시멘트비는 미국의 프리캐스트콘크리트 생산업자에 의하여 통용적으로 사용되며, 현장타설시공(cast-in-place construction)에서도 자주 사용되고 있다.

ACI 318-89에 따르면, 콘크리트는 황산염(sulfate)을 함유한 용액이나 토양에 노출될 때, 표3(ACI 318-89의 표4.2.1)의 요구사항에 맞게 하거나, 황산염 저항력을 가진 시멘트로 배합되어야 하고 표3의 최대 물-시멘트비 또는 최소 압축강도를 만족시켜야 한다. 우수한 질의 플라이애쉬(ASTM C 618, Class F)의 사용은 콘크리트의 황산염 저항력을 개선시킨다. 최근의 연구에 의하면, Class F 포졸란을 갖는 IP 타입의 시멘트와 8%이상의 트리카알슘 알루미늄산염(tricalcium aluminat, C₃A)을 가진

포틀랜드 시멘트는 보통의 노출(moderate exposure)에서 황산염 저항력을 갖고 있는 것으로 밝혀졌다.

4.3. 염화물 이온의 제한

부식방지에 대해서, ACI 318-89는 재령 28일 부터 42일의 실험에 의하여 얻어진 표4에 의해 경화한 콘크리트의 최대 수용성(water-soluble) 염화물 이온 농도를 제한하고 있다. 이러한 염화물의 제한은 물, 골재, 시멘트 성(cementitious) 물질, 구리고 혼화제를 포함하는 콘크리트 복합체에 해당된다. 수용성 염화물 이온함유를 결정하는 실험은 AASHTO T 260에 의한다.

철근콘크리트 구조물이 사용시 건조상태일 때에는 염화물의 총량은 1%로 제한한다. 0.15%와 0.30%의 제한은 각각 철근콘크리트가 염화물이나 습기에 노출될 때의 제한치이다. 이 값들은 ACI 201의 0.10과 0.15%에 각각 비교될 수 있다. ACI 222는 시멘트 중량에 대한 염화물의 양을 프리스트레스트 콘크리트와 철근콘크리트에서 각각 0.08%와 0.20%으로 제한하고 있으며, 이들은 ACI 318-89이 수용성 염화물의 실험에 기초한 것에 비해, 산에 녹는 염화물 실험에 기초하고 있다. 수용성 염화물의 실험결과는 염화물 이온의 함유가 부식을 유발한다는 것을 더 잘 암시하고 있다. 그러나 개개의 실험의 차이는, 예를 들면 공시체의 표면조도에 따라 편차가 큰 결과를 보여주고 있다. 그러나 일반적으로는, 물에 녹는 염화물 실험에서의 염화물 이온은 산에 녹는 염화물 실험으로

부터 얻어진 양의 약 3/4이 된다.

Hanson은 보고서에서 ACI 319-89의 제한이 높다고 기술하고 있다. 물-시멘트비가 0.50, 0.40, 0.30이고 1인치 피복 두께의 7개 슬래브 실험 결과에 의하면 부식이 시작되는 산에 녹는 염화물 함유는 콘크리트 무게에 대해 평균 0.032%가 되었고 범위는 0.018-0.049%이었다. 이 평균값은 콘크리트의 입방야드에 대해 산에 녹는 염화물 이온의 1.26lb(0.75kg/m³)에 해당된다. 이들 3가지 물-시멘트비에 대한 부식이 발생하는 시점(corrosion threshold)의 평균 염화물 이온량은 각각 아래와 같다.

물/시멘트비	산에 녹는 염화물 이온 (콘크리트 중량에 대한 백분율)
0.51	0.023
0.40	0.038
0.28	0.030

이 3가지 염화물 이온의 함유량은 포틀랜드 시멘트의 중량에 대해 각각 0.21, 0.26, 0.17%에 해당된다. 평균 염화물이온의 값들은 다른 연구들에서 보고된 임계값들과 잘 연관된다. 보고되지 않은 연구에 의하면, 0.50 물-시멘트비의 1인치 피복두께를 가진 48개의 슬래브 실험에서는 부식 임계값이 콘크리트 중량에 대해 평균 0.024%의 염화물이온량으로 나타났다. 이것은 시멘트 중량에 대해 0.219%에 해당된다. 이들 및 그의 자료에 근거하면, 그림 6이 보여주듯이 산에 녹는 염화물의 실험에 기초되어 일반적으로 초기부식은 0.025-0.040%의 염화물 이온량으로 알려지고 있다.

물에 녹는 염화물 이온의 함유는 산에 녹는 염화물이온의 함유보다 적지만 이들은 다소 관계가 있다. 시멘트의 무게를 콘크리트 무게의 15%로 가정하고, 비율을 0.75로 하면, 표4에 있는 시멘트 중량에 대한 수용성 염화물 이온함유량에 0.20을 곱하여 콘크리트 중량에 대한 산에 녹는 염화물 함유량을 얻을 수 있다. 즉 표4로부터, 사용시 철근콘크리트가 염화물에 노출될 때의 최대 산에 녹는 염화물 이온의 함유량은 대략 $0.2 \times 0.15 = 0.03\%$ 으로, 부식이 시작되는 염화물 이온의 한계치가 된다. 철근콘크리트가 염화물에 노출될 때의 제한치는 0.15에서 부터 감소되어, 아주 심한 노출에서는 0.10으로 줄어든다. 기타

표4. 부식을 방지하기 위한 염화물 이온의 최대 함유량

부재의 형태	콘크리트 내부에 존재하는 수용성 염화이온(Cl ⁻)의 최대 함유량 (시멘트 중량에 대한 백분율)
프리스트레스트 콘크리트 사용시 염화물에 노출된 철근콘크리트	0.06
사용시 수분으로부터 보호되어 있거나 건조환경에 있는 철근콘크리트	0.15
위와 상이한 환경에 있는 철근콘크리트	1.00
	0.30

특별한 철근콘크리트 구조물에서 이러한 제한이 역시 감소된다.

4.4 피복 두께

피복 두께에 대한 요구사항에 대해서 ACI 318-83과 ACI 318-89는 기본적으로 동일하다. 피복 두께에 대한 최소 요구사항은 표5(ACI 318-89의 7.7절에서 발췌)에 나타났다. 기후 및 다른 여러가지 영향에 대하여 철근을 보호하기 위한 콘크리트 피복 두께는, 콘크리트 표면에서부터 적용될 철근 바깥표면까지로 측정된다. 즉, 구조 부재의 분류에 따른 최소 피복 두께는 주철근을 횡방향으로 감싸고 있고 스테럽이나 띠철근(ties) 및 나선철근(spirals)의 바깥 표면까지이며, 스테럽이 없이 주철근을 이단 이상으로 배근할 때는 가장 바깥 철근까지이고 포스트-텐션 P.S 부재에서는 강재의 마지막 장치(metal end fitting)나 덕트(duct)에 이르는 거리를 말한다.

“콘크리트 표면에 기후에 노출되는” 조건은 기온의 변화만이 아닌 습기의 변화에 직접 노출되는 환경을 말한다. 슬래브나 얇은 shell막의 하부(soffit)는 일반적으로 습윤과 건조상태가 번갈아 나타나는 경향이 있지 않으면, 즉 상부 표면으로부터 직접 누수 현상 및 유사한 현상으로 응집조건이 성립되는 경우가 아니면 직접 노출로 보지 않는다. 마지막으로 ACI 318-89에서 강조되는 사항으로 콘크리트 피복 두께는 부식이 발생할 수 있는 환경이나 기타 심한 노출 환경에서는 적절하게 증가되어야 하며, 다른 대책과 더불어 콘크리트 치밀성 및 저투수성이 요구된다.

표5. 철근의 피복두께에 대한 최소 규정 (ACI)*

	현장 타설 (프리스트레싱을 하지 않는 경우)	프리카스트 (엄격한 품질관리 아래에서 제조)	프리스트레스트 (프리카스트가 아닌 경우)
● 슬래브, 벽, 접합부			
ϕ 14(45mm)와 ϕ 18(55mm) 철근	40mm	30mm	20mm
ϕ 11(35mm)철근	20mm	15mm	20mm
● 보, 기둥 Primary reinforcement	40mm	철근의 직경**	40mm
	40mm	10mm	30mm

*콘크리트가 지면과 접촉되어 있거나 외부 환경에 노출되어 있지 않은 경우이다.

** 철근의 직경과 같은 두께로 시공하되, 15mm 이상이어야 하고 40mm를 초과할 필요는 없다.

4.5 혼화 재료

이미 언급되었듯이 고성능 감수제가 낮은 물/시멘트 비율의 콘크리트를 만드는데 주로 사용되었다. 이러한 콘크리트는 염화물의 침투에 대하여 큰 저항력을 갖고 있다. 부식 방지용 혼화제로 칼슘질산염을 사용하며, 투수성을 줄이고 강도를 높이기 위해 콘크리트 배합과 그라우팅시에 혼화제로서 microsilica를 사용함으로써 좋은 반응을 얻을 수 있다. Berke 등은 이 두가지 혼화제 사용에 관한 자료와 실험 결과를 발표하였으며, 이에 따르면 microsilica는 고강도와 부식방지가 함께 요구되는 곳으로 교량의 상판과 덧씌우기(overlay)에 사용되고 있다. 그러나 최근에 실리카흄을 사용한 부재에 심하게 균열이 발생하는 여러 예를 주의해야 하며, 이들 경우 특별한 양생이 요구되는 것으로 되어 있다. 미국의 혼화제 사용현황을 살펴보면 교량의 프리스트레스트 콘크리트 거터와 말뚝 및 주차장의 double tees 등에서 칼슘질산염이 250,000 입방야드(190,000m³)정도 사용되고 있다.

4.6 에폭시 피막된 철근과 P.S 강선 및 포스트 텐션 강재

내구성을 요하는 구조물들에 있어서 가장 뚜렷한 기술

의 발전은 아마도 에폭시-피막 철근의 사용과 최근의 에폭시-피막된 P.S강선(주로 seven-wire strand를 사용)의 사용이다. 현재까지 미국에서 시공한 에폭시-피막된 철근의 사용현황을 살펴보면, 1975년 펜실베이니아의 교량 상판에 이 재료가 처음 사용되었으며, 그 이후 점차적으로 늘어나 교량의 상판 뿐만 아니라 외부환경에 노출된 거의 대부분의 구조물에 대하여 사용되고 있다. 현재 1년마다 에폭시-피막된 철근은 약 270,000ton이 생산되고 있으며 이것은 미국에서 생산되는 철근총량의 약 6%이다. 또한 에폭시-피막을 철망구조(wire fabric)에 입히는 것도 시행되고 있다.

Gustafson은 피막기술을 포함한, 미국 내에서 에폭시 피막된 철근의 시공 경험을 기술하였고, 시공법과 시방규정을 제안하였으며, 피막된 철근의 부착 강도와 내화능력 뿐만 아니라 부식에 대한 저항력 향상에 관한 사항을 실험실 및 현장연구에 의하여 함께 기술하고 있다.

일반적으로 에폭시 피막은 부식에 대한 우수한 보호능력을 갖는다고 연구결과는 보여주고 있다. 1980년에서 1982년 사이에 FHWA에서 시행된 연구에서는, 철근 표면의 0.22에서 0.80%만을 에폭시 피막(0.25×0.5in, in size)하여 의도적으로 표면의 넓은 부분에서 결점이 존재하는 철근과 피막이 안된 철근을 비교하였다. 즉, 0.53의 물-시멘트비와 3/4인치 피복 두께를 갖는 대형 철근콘크리트 슬래브에 피막 안된 철근과 불완전 피막의 철근을 배근하여 시험하였다. 모두 31개의 슬래브들의 상부에 콘크리트 중량에 대한 염화물 이온의 농도를 최대 0.94%까지 첨가하고, 시멘트 중량에 대한 칼슘질산염의 농도를 2.75% 사용한 염화물 첨가제를 부식 촉진제로 사용하였다. 그 다음에 각 슬래브를 46일 동안 3% 염화나트륨용액에서 양생한 다음 수분과 염분을 제거하였다. 그 다음에 슬래브는 2년 동안 자연환경에 놔둔다. 실험 결과로부터 불완전 에폭시-피막 철근이 부식감소에 큰 효과가 있다고 결론지었다. 또한 슬래브 상부와 하부에서 전부 에폭시-피막된 철근을 사용한 경우가 상부에만 에폭시-피막된 철근을 사용하는 경우에 비해서, 부식방지 효과가 큰 것으로 관찰되었다.

에폭시-피막된 철근들은 WJE²⁾에 의한 다른 실험들에도 좋은 성능을 갖는 것으로 관찰되었다. 에폭시-피막된

철근으로 제작된 콘크리트 슬래브에 하중을 작용시켜 균열이 발생된 상태에서 부식촉진실험을 한 결과 우수한 성능을 보여 주었다. 균열이 발생한 부분에서 철근마디의 피막이 벗겨져 나간 부분에 가벼운 부식현상이 관찰되었으나, 균열 부위의 철근 피막은 손상되지 않았으므로, 부식을 진행시키는 음극선이 거의 없기 때문에 부식은 극히 부분적이라고 설명할 수 있다.

최근의 문제로는 Florida Keys에 있는 교량의 말뚝에 시공한 직선 및 굽혀진 에폭시-피막된 철근이 광범위한 부식을 일으켰는데, 그 이유는 이 현장의 해수가 약 26,000ppm의 염분을 함유하고 있어 일반적인 해수의 염분량인 17,000ppm과 비교해 보았을 때 상당히 높기 때문이다. 또한 약 10년정도 된 New York주의 교량에서 에폭시-피막된 철근으로 보강된 상판이 얇은 조각으로 갈라지는, 부식에 의한 현상이 최근에 보고되어 철근에 사용된 에폭시-피막의 재료가 적합하지 않다고 여겨지기 때문에 즉시 사용이 중지되기도 했다.

두 종류의 에폭시 피막된 P.S 강선이 실용되고 있는데, 한 종류는 콘크리트 사이에 부착이 요구되지 않는 Post-tensioning에 적용되고, 다른 종류는 부착이 고려되는 경우에 사용되고 있다. 후자의 경우, 피막의 표면에 grit를 갖게 하여 피막되지 않는 강선 못지않게 좋은 부착능력을 갖게 한다. 피막된 철근이나 철망과는 달리, 피막된 강선들은 1980년대 초부터 적절한 방법에 의하여 생산되고 있다. 이 강선들을 에폭시 피막하는 과정은 철근과 유사한 전기적인 fusion-bonded process를 사용하고 있다. 강선·피막두께는 철근의 피막보다 두꺼운데 일반적으로 $0.76\text{mm} \pm 0.13\text{mm}$ 이다. 이와같이 두꺼운 두께는 강선에 밀착이 가능하게 하고 작은구멍(holiday)을 없게 한다. 강선의 에폭시 피막은 철근의 피막보다 더 유연성 있고 긴장시에 표면의 결손이 없도록 큰 신장이 허용되어야 한다. 에폭시 피막된 강선은 P.S 구조물 및 부식을 일으키는 환경에 응용(pile, fender pile, 교량상판 및 거더, 주차 구조물, 지반 anchor, 지지 cable)되고 있다.

포스트텐션 P.S 콘크리트의 부식 방지책에 관한 연구는 매우 제한적이다. NCHRP를 위해 WJE에 의하여 포괄적인 문헌조사 및 실험 연구가 실행 되어졌다. 이 조사는 P.S 콘크리트 교량의 부식방지를 개선시킬 수 있는

몇가지 새로운 재료를 추천하였으며 내용은 아래와 같다.

1. 그라우팅을 위한 응축된 실리카흄과 칼슘질산염(calcium nitrite) 혼화제
2. 포스트텐션 콘크리트 제조를 위한 플라스틱 덕트와 에폭시 피막된 덕트
3. 프리텐션 및 포스트텐션 콘크리트에 사용되는 에폭시-피막된 7가닥의 P.S 강선
4. 포스트텐션 콘크리트에 사용되는 에폭시-피막된 정착장치(anchorage hardware)

이 연구에서는 또한 에폭시-피막된 7가닥의 P.S 강선의 크리프 변형조사, 최악의 건설조건인 15ft의 곡률 반경을 갖는 경우에 대한 마찰과 마모실험들을 수행하였다. 부착실험을 위하여 corrugated 폴리에틸렌 덕트, 에폭시-피막된 덕트, 전기도금한 덕트, 그리고 처리가 안된 일반 덕트중 여러 종류가 포함되었다.

광범위한 문헌조사에 의하면, bonded post-tensioned 교량과 precast pretensioned 교량부재들이 부식방지와 사용성(serviceability)에서 좋은 것으로 알려지고 있다. 그러나 많은 기술자들은 부식방지를 위해 보다 나은 설계법과 시방규정 및 새로운 재료들이 필요하다고 주장하고 있다.

장기간의 부식촉진실험에서 실물크기의 프리텐션, bonded 포스트텐션 부재들이 이상의 사항들을 평가하기 위하여 시험되었다. Macrocell corrosion current, copper-copper sulfate half-cell potentials 및 염화이온량의 측정들이, 시험후 철근이나 덕트가 시편으로부터 분리되는 물리적 시험을 포함하여 행하여 졌다. 이들 시험으로부터의 결론은 다음과 같다.

1. 에폭시-피막된 강선은, 포스트텐션 부재의 wedge/grip 부분이나 또는 프리텐션 콘크리트 보의 휨에 의해 균열이 발생된 부분을 포함하여, 부식억제에 현저한 효과가 있다.
2. 폴리에틸렌 덕트와 에폭시-피막된 금속 덕트는 특히 염화물 이온을 막는데 뛰어나며, heat-shrink tubing 이 포스트텐션 덕트 접합부의 밀봉에 사용될때 더욱 효과적이다.
3. 에폭시-피막된 포스트텐션 정착구와 덕트는 부분적으로

로 파손과 부식이 일어나지만 일반적으로 부식에 강하다.

- 부착과 부식방지를 위해 포스트텐션 콘크리트로 펴핑하는 종래의 그라우팅 방법은 침투성이 높고, 덕트의 보호가 손상되었을때 염화이온의 함유량이 높아진다.
- 그라우팅시 칼슘질산염이나 실리카폼의 사용은 부식방지에 별로 효과가 없는 것으로 알려지고 있다. 특히 실리카폼의 그라우팅은 철의 부식을 오히려 높게 한다.
- 모든 그라우팅된 덕트에서 공극이 발견되고, 따라서 P.S 강선에 대한 일체식 부식방지책이 극히 필요하다.

그라우팅에서 부식 임계치(콘크리트 중량에 대해 약 0.15%)는 단위 시멘트량이 높기 때문에 보통콘크리트의 부식 임계치보다 높다. 따라서, 비록 부식이 덕트를 통해서 침투되더라도 그라우팅에는 부식에 대한 저항능력이 존재한다.

5. 유지관리

유지관리(maintenance)는 구조물에서 필수불가결한 요건이다. 그러나 가끔 설계시의 구조물의 수명을 달성하는데 필요한 관리가 소홀히 되고 있다. 설계와 시공이 교량과 건물설계 규정에 대한 최소한의 요구조건을 만족시키고자 할때, 이후의 강도를 유지하기 위한 노력의 정도는 계속 증가되어야 한다.

구조물 상태의 평가에서 아주 단순한 관리 조차도 구조물에 이로운 것이 될 수 있다. 예를들면, 주차장 차고의 상부 표면을 주기적으로 세척하면 세설용 염분 잔류물에 의해 슬래브안으로 침투하려는 염화이온의 양을 줄일 수 있을 것이다. 또한 규칙적인 배수관 청소는 수분에 대한 노출을 최소화할 것이다. 적절한 작업순서에 의한 접합부의 시공은 주요 부재에 수분이나 염분의 이동을 막아줄 것이다. 유지관리를 위한 일반적인 요구사항은 구조물의 형태에 따라 다양하기 때문에 유지관리를 위한 절차에 대한 규정의 확립이 필요하다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 유지관리에는 다음 3가지 종류의 방법이 있다.

- 덧대기(Patching)
- 균열 채움(Crack Filling)
- 표면 보호(Surface Protection)

상당히 많은 재료가 유지관리에 이용되고 있으나 새로운 재료와 방법이 사용될 때 상당한 주의가 필요하다. 예를 들어, 미국에서는 음극보호장치(cathod protection)가 수백개의 교량과 몇개의 구조물에서 실험목적으로 설치되었다. 이러한 시도가 교량에서는 성공적으로 나타난 반면 주차장 차고와 같은 다른 구조물에서는 많은 시행착오를 경험했다. 따라서 현재 미국에서는 특수한 경우를 제외하고 구조물을 위한 음극보호 장치의 사용에 대해서는 강한 움직임이 없다.

5.1 덧대기

덧대기(patching)는 이전 정립된 하나의 기술로서, 실제로 폭넓고 다양한 유기, 무기재료들이 이를 위해 사용된다. 재료가 적절하게 사용되기 위해서는 제조업자들의 사용법에 따르는 것이 특히 중요하다. 덧대기에 있어서, 우선 손상된 부분의 불량한 콘크리트 뿐만 아니라 녹이없는 노출 철근에 인접해 있는 양호한 재료도 모두 제거한 후, 노출된 철근은 예폭시 피막을 하고, 제거된 재료와 비슷한 포틀랜드 시멘트의 재료를 비교적 낮은 물-시멘트비로 배합하여 채우기하는 순서가 바람직하다. 덧대기 재료가 시공될 때 경계면에 물을 축이는 것이 필요하며, 보수부분의 경계면에 접합제(bonding agent)를 사용한다는 것은 제한적이지만, 경우에 따라 유리하다. 그러나 최근에는 예폭시류 접합제의 단점을 없앤 새로운 재료가 사용되고 있음은 주목할 만하다.

5.2 균열 채움

예폭시를 주입하여 균열을 채우는 기법은 대체로 잘 정립되었다. 전세계적으로 광범위하게 사용되고 있다. 예폭시 주입은 일반적으로 강도에 기여하지는 못하는 것으로 알려져 있지만, 환경으로부터 부피팽창에 의한 균열이 발생할 경우, 시공후의 강성(stiffness)과 성능(performance)은 향상되어지고 또한 강도도 높아지게

된다. 에폭시 주입 방법은 내구성이 특히 고려될 때 폭이 0.2-0.3mm 이상 발생된 균열에 주로 시공되며, 균열에 의해 누수현상이 계속될 때에는 화학적 압력에 의한 그라우팅(chemical pressure grouting)이 또한 효과적이다. 그리고 교량 상판의 균열을 채우기위해 고분자량의 메탈 크릴 단위체(high molecular weight methacrylate monmer : HMWM)를 사용하는 예가 많아지고 있다. HMWM은 중합화(polymerization)를 하기위해 금속건조기(metalic drier : 코발트)와 과산화(peroxide)에 촉매작용(catalyze)을 한다. 이때 수지(resin)는 대략 100ft²당 1 gallon의 비율로 교량노면에 흘러가게 하거나 압착 또는 뿌려지게 된다. 수지는 균열안으로 흘러들어가 중합하고, 접촉표면들을 접합하게 된다. 수지가 굳어지기 전에 균열에 스며들기 위해서, 한시간 정도 gel 상태의 유지가 필요하다. 점도(visosity)를 낮게 함으로써 모세관 현상에 의해 0.1mm보다도 작은 균열까지 채우게 된다. 분사용 마른 모래는 일반적으로 미끄러짐(skid)에 대한 저항을 향상시키기 위해 수지에 뿌려진다. 시공후 보통 2시간내에 교량의 통행이 가능해진다. 큰 균열에 대해서는 수지가 균열의 바닥에서 흘러나오음을 방지하기 위해 점도가 높은 텍스토로픽(thixotropic)제가 첨가된다.

5.3 표면 보호

(a) 밀폐재

제설용 염분이나 해수 등을 포함하여 수분이나 혹은 유해한 물질로부터 표면이 노출되어 있는 콘크리트 표면을 피막(coating)하거나 밀폐재(sealer)를 사용하는 방법이 점차로 증가되고 있다. 이는 교량 상판과 주차장 슬래브 및 표면보호를 요하는 모든 종류의 콘크리트 구조물에도 적용이 가능하다. 그러나 수분의 흡수나 염화이온의 침투를 줄이는 이러한 조치에 의한 효과는 매우 다양하며 여러가지 화합물들이 생성되어 매우 훌륭한 성과를 나타내고 있다. 이러한 혼합물들 중 어떤것은 처리가 되지 않은 표면에 비해 80-95%까지 염화이온의 침투를 줄일 수 있고, 더욱이 어떤 밀폐용 혼합물은 인접한 콘크리트에 균열이 있음에도 불구하고 철근에 추가로 부식방지의

효과를 제공하기도 한다. 한때, 끓인 아마인 기름(linseed oil)의 50%와 광물(mineral spirit) 또는 등유(kerosene)의 50% 혼합물이 교량과 주차장 표면에 사용되기도 하였다. 그러나 실험 연구와 경험을 통해 이것의 성과가 일정치 않고 가끔은 효과가 없는 것으로 나타나고 있다.

17%부터 높게는 90%까지의 범위를 갖는 고체 함유량과 함께 에폭시는 침투성 밀폐재(penetrating sealant) 또는 피막 혼합물(coating compound)로서 사용되어왔다. 실험실과 현장의 경험으로부터 이에 의한 효과가 일정치 않으나, 바늘구멍 크기의 균열까지 없애기 위해 일반적으로 2회씩 에폭시가 도포되고 있다.

아크릴(acrylic), 폴리우레탄(polyurethane), 탄화수소 수지(hydrocarbon resin) 등의 수 많은 종류의 합성수지가 사용되고 있다. 아크릴 수지는 여러가지 용매에 응용되고 보통 두 층으로 피막된다. 우레탄 피막은 습기와 기후변화 그리고 콘크리트 균열에 뛰어난 저항성을 갖고 있다. 그러나 그것들의 성능과 효과는 광범위하게 변한다. 라텍스 밀폐재 혼합물(latex sealant compound)은 안료의 유기적 막(pigmented organic film forming)재료의 유상액(emulsion)이다. 이러한 막형성 물질은 각기 스티렌 부타디엔(styrene butadiene), 폴리비닐 초산염(polyvinyl acetate), 아크릴 또는 다른 중합체들과의 조합물이다. 이것들이 물에 용해될 때 격자구조 형태로 퍼지게 된다. 피막으로서 보통 하나의 층구조는 충분하다. 그러나 그것들은 소금용액과 염화이온의 침투할 수 있는 것으로 알려졌다. 중합비닐 초산염 라텍스(polyvinyl acetate latex)는 사용시 수분에 노출된 콘크리트와 결코 사용될 수 없다. 왜냐하면, 이것은 폴리비닐 알콜(polyvinyl alcohol)로 변하게 되고 접착제와 피막제로서의 가치가 없어지기 때문이다.

실리콘 혼합물은 광범위하게 사용되어 왔던 또다른 형태의 밀폐재(sealant)이다. 기본적으로 두가지 형태가 사용되었는데 하나는 수분과 수증기가 표면으로 스며드는 것을 막아주는 방수피막(impervious coating)을 형성하는 형태이며 또다른 형태는 단지 유동성의 물을 통과하지 않게 하는 것이다. 그러나 실리콘 혼합물이 초기에는 내침투성이 강하지만, 이것들이 염분환경에 계속해서 노출됨으로써 이러한 특성을 잃으려는 경향은 나타난다.

무기 혼합물(inorganic compound)은 유기 밀폐재(organic sealant)보다 콘크리트에 더욱 적합한 것으로 알려지고 있다. 그것들은 규산(silicate) 용액으로 일반 사용조건에서는 유독하거나 가연성이 없으며 위험하지도 않다. 실란(silane)과 실록산(siloxane)은 새로운 종류의 밀폐재이다. 이러한 제품은 다른 피막 재료와는 달리 콘크리트 부재 표면에서의 화학반응으로 방수층을 만들어 수분의 침입을 방지하나, 다만 수증기의 침투는 막지 못한다.

상이한 표면 밀폐재가 서로 다른 환경상태에 처한 콘크리트에 적용될 때의 효용성을 평가하기 위해서 실시한 Hanson의 실험¹⁴⁾에서는 이러한 밀폐재료들이 24주의 촉진 시험을 포함한 서로 다른 환경을 가진 4개의 실험실 연구과정을 통하여, 콘크리트안으로 침투하는 염화이온을 포함하고 있는 수분을 방지하거나 또는 최소화 할 수 있는가를 관찰 연구하였다. 첫번째 실험은 콘크리트로 침투하는 염화이온량을 줄이기 위한 21가지 재료에 관한 능력시험(Series I)이며, 그 후에 더욱 정밀 시험을 하기 위해 성능이 좋은 5가지 재료를 선택하기 위해서이다. 후의 시험(Series II)은 염화이온의 침투시 콘크리트 내부의 수분함유량을 조사하고, 여러가지 밀폐재에 따른 콘크리트 내부에서 염화이온의 침투속도에 관한 성능 연구(Series III), 그리고 미국 북부와 남부에서 노출된 24주 동안 나타난 기후상태로 부터의 영향(Series IV)을 평가했다. 이러한 조건들은 산성, 염수, 담수, 자외선 복사(ultraviolet light radiation), 열, 동결융해, 그리고 건설조건에 노출되는 것들을 포함하며, 무근콘크리트 시편과 균열이 생긴 철근콘크리트 시편이 실험에 포함되었다. 그림 7에서 보듯이, 시리즈 I 과정에서 재료에 따라 흡수성이 현저한 차이를 나타냈으며, 비교적 불량한 성능을 보이는 재료중의 하나가 끓인 아마인 기름을 사용한 것이다. 이러한 밀폐재의 성능은 다른 연구자들에 의해 얻어진 유사한 실험 결과와 대체로 일치한다. 비록 정도의 차이는 있으나 표6에서 보여주는 것처럼 어떤 재료들은 실제로 교량표면에 사용되어 구조체의 부식가능성을 줄이고 있다.

어떤 밀폐재를 시공하기에 앞서, 이 재료를 연구하는 기관에서 재료의 효과를 평가하기 위한 시험이 선행되어

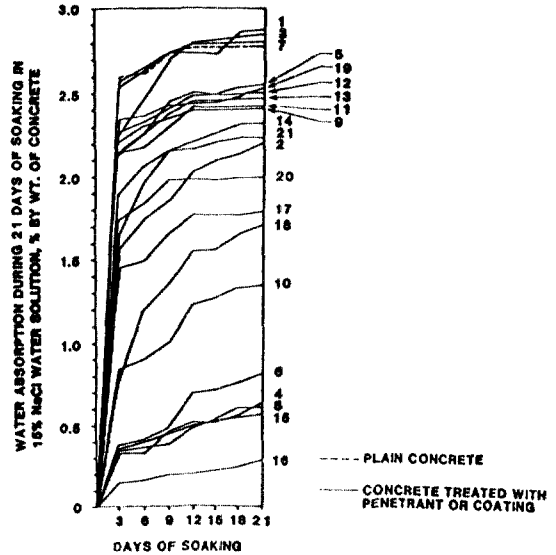


그림 7. 각 밀폐재를 사용하여 피막한 콘크리트의 흡수 특성

표6. 세가지 밀폐재에 대한 실험결과

밀폐재의 종류	콘크리트 내부의 염화물 함유량의 감소(% of Cl ⁻)				
	Series I	Series II	Series III	Series IV	Series IV
			북부지방		남부지방
16-E(에폭시)	97	94	92	97	93
8-MM(에칠 메타크릴레이트)	80	91	92	87	99
6-S(실라인)	79	87	89	76	97
	콘크리트 내부로 흡수되는 해수의 감소량(% by Wt.)				
	Series I	Series II	Series III		
16-E	98	91	91		
8-MM(에칠 메타크릴레이트)	78	82	83		
6-S(실라인)	70	74	79		

야 한다. 이러한 시험은 그 지역의 콘크리트에 적용할 때 밀폐재료의 특별한 성능평가를 말한다. 표6에서 침투성 실라인(penetrating siline)을 제외한 다른 밀폐재들은 콘크리트 표면의 침투정도가 측정되지 않고 있다. 따라서 그들의 어떤 의미있는 사용연한에 대한 기대는 평가하기 어렵다. 16-E, 8-MM, 6-S는 솔벤트 재질의 에폭시나 폴리우레탄 페인트 재료로써 가연성이나 위험성이 없는 것으로 평가되며 10여년 전에 개발되어 강 교량구조에

사용되어 오고 있다.

일반적으로 가벼운 모래분사(light sand blasting)에 의한 콘크리트의 표면처리는, 콘크리트와 밀폐재료 사이에 좋은 침투성이나 정착을 이루는데 필요하다. 콘크리트의 초기양생후나 기존 콘크리트에서 비온 후에 실시하는 침투성 실라인이나 실록신 밀폐재료등 화학제품들의 도포는 대략 5일 정도의 건조기간이 앞서 필요한 것으로 되어 있다. 메칠 메타크릴레이트(methyl methacrylate)와 실라인 혼합물은 콘크리트 안에 균열이 있음에도 불구하고 철근에 특별한 보호를 제공한다. 또한 실라인은 방수층 경계면에 밀칠로 인해 물이 침투하는 것을 막아준다. 콘크리트 표면에 한번 도포된 에폭시 혼합물은 수증기가 어느방향으로든지 이동하여 침투하는 것을 막아준다. 그러므로 에폭시 혼합물의 도포에 앞서 적절한 건조 기간이 콘크리트 시공시 고려 되어야 한다.

실라인을 제외한 밀폐재가 아마인 기름 혼합물로 이미 처리된 표면 위에 도포 될때 일반적으로 밀폐재의 성능이 강화되는 현상을 보여준다. 즉, 이러한 상황에서 콘크리트 안으로의 염화이온 침입과 수분의 흡수를 최소화 시켜준다. 너무기 아마인 기름과 다른 밀폐재가 도포된 표면은 밀폐재가 표면에 직접 도포될 때보다 더욱 광택을 많이 낸다. 이것은 표면위의 화학 생성물들이 생기고, 피막 아래의 기포가 없어짐에 따라 공극을 줄이는 아마인 기름의 역할에 기인한 것이다.

실라인의 경우, 아마인 기름위의 도포하는 것은 성능을 향상 시키지 못한다. 왜냐하면 실라인은 스스로 잘 침투하는 밀폐재료써 아마인 기름층 존재가 이러한 성질을 방해하기 때문이다. 에폭시 피막이 윤기있는 다른 색의 표면을 얻게하는 반면, 실라인 혼합물은 색이 변하지 않고, 또한 광택있는 표면을 얻지 못한다.

(a) 덧씌우기와 막

교량상판이나 주차장 표면에 재생(rehabilitation) 작업이 수행될때, 슬래브 안에 있는 불량한 콘크리트가 제거되고 재 타설된 후에, 표면에 덧씌우거나 막을 형성시키는 것이 일반적이다. 그러나 많은 주차장 시설은 비교적 가벼운 적재하중을 위해 설계되었으며 따라서 덧씌우기에 따른 하중 증가는 문제를 초래한다. 일반적으로 사용되는

두가지 형태의 덧씌우기법은 낮은 슬럼프 콘크리트법(lowa방법)과 라텍스 콘크리트법(latex modified concrete)이다. 최소두께는 각각 3/2inch(40mm)와 9/8inch(30mm)정도이다. 최근에는 실리카흙의 사용과 더불어 고성능 감수제를 사용하여 투과성이 적은 덧씌우기를 시행하고 있으며, 이러한 덧씌우기의 성능은 매우 훌륭하다고 나타났지만, 실제 적용과정에서 접합부가 분리 이탈되는 문제가 생김으로써 시공과정에서 특별한 주의가 필요하다. 이와 같이 덧씌우기는 수분을 줄임으로써 철근의 부식 발생을 줄이는 것으로 알려졌다.

교량 상판과 주차장 표면에는 또한 많은 종류의 막(membrane)들이 사용되고 있으며, 그 종류에는 우레탄(urethane)과 복합 우레탄(composite urethane)이나 에폭시를 첨가한 네오플렌(neoplene plus epoxy wearing course), 그리고 라텍스형 아스팔트에 고무로 입힌 아스팔트(rubberized asphalt with latex-modified asphalt)나 concrete topping 등이 있으며 이들은 상당히 좋은 성능을 나타낸다. 우레탄 막은 1.2-1.5mm 범위의 두께로 시공하며, 복합장치는 0.5-1.0mm의 wearing course에 0.5-0.8mm 두께의 피막을 사용한다. 고무를 입히는 재료에서 피막의 두께는 1.5-4.0mm 정도로 하고 40-50mm의 topping 과 함께 실시한다.

막의 도포를 위해서는 좋은 표면의 준비가 중요하다. 막은 수분의 침투를 막아주고 폭 1.5mm까지의 균열을 없애는데 효과적이다. 이들의 내구성은 10-15년 정도의 수명을 기대하는 구조물에 효과적이나, 교통량이 많은 지역에는 특별한 주의가 필요하다.

6. 보수

콘크리트 구조물의 보수에는 많은 공법이 있다. 사실 콘크리트구조의 장점중에 하나는 손상된 구조물의 일부분을 제거하고 재타설하는 것이 가능하다는 것이다. 손상된 구조물에서 강도를 회복하기 위한 보수는 일반적으로 손상된 콘크리트의 제거와 철근보강을 요구한다.(만약 철근보강이 요구되지 않는다면 대부분의 경우 작업은 유지관리만으로 간주된다.) 이러한 보수법은 부적합하게 설계된 구조물이나, 하중의 증가 때문에 강도가 불충분하

게 된 구조물의 보수법과 비슷하다.

구조물의 보수는 설계수명을 확보할 수 있게 실시되어야 하기 때문에 구조물의 손상 원인이 명백히 규명되어야 한다. 예를 들어 염화이온의 침입으로 인해 묻혀진 철근이 부식한다면, 보수 과정에 있어 중요한 사항은 철근과 인접한 콘크리트에서 비교적 양호하지만 염화물에 오염된 부분의 제거 범위를 결정하는 것이다. 양호한 콘크리트를 제거하는 것은 비용이 많이 들기 때문에 인접한 콘크리트에 영향을 주지 않아야 하는 특별한 주의가 요구된다. 따라서 철근부위에서 염화이온으로 오염되었으나 비교적 양호한 콘크리트는 남겨두는 것은 이로우며, 다만 피막이나 덧씌우기를 응용한 보수작업으로 후에 철근을 수분 침투에서 막아주도록 하여야 한다.

프리스트레싱을 하지 않은 슬래브의 보수에 있어서는, 손상 단면에서 철근 단면적의 10-15%를 추가하는 것이 관례이다. 이러한 수치는 부식이 균일하게 진행되었다고 보고, 슬래브의 철근의 중량을 측정함으로써 얻어진다.

부착되지 않는 포스트텐션 슬래브의 보수는 특별히 P.S강재에 부식이 발생할때 특히 어렵다. 그러나 특별한 경우에는 긴장력을 해제하거나 강선을 교체하며, 강선을 부분적으로 연결하기도 한다. 손상된 교량의 상, 하부 구조물에 대한 보수 방법은 매우 제한적이다. 많은 경우에 있어 수분과 제설용 재료가 프리캐스트 부재들 사이의 접합부를 통하여 침투하여 긴장된 강선에 심한 부식을 발생시키는데, 이를 위한 보수로 보 아래에서 외부 포스트텐션 기법이 사용될 수 있고, 이는 바닥 플랜지까지 용접연결되어 끝부분을 정착한다. 다음으로 슛크리트에 의해서 일부 포스트텐션 부재들을 도포하여 이후의 하중 실험을 통하여 설계강도의 복구가 확인된 바 있다.

7. 결론

구조물 수명으로 표현할 수 있는 내구성(durability)에 대한 고려는 구조물의 설계나 시공시 모든 관점에서 관련되며, 나아가 유지관리를 통하여 또는 필요시 보수를 통하여 계속 적용되어야 한다. 본 소고에서는 구조물의 내구성 향상을 위하여 실제로 응용되고 있는 몇몇 주요 사항들을 기술하였으며, 이 주제에 대한 지속적인 관심이

요구된다.

본 소고에서는 콘크리트구조물의 열화를 일으키는 기본 원인과 메카니즘을 고찰하였고, 이러한 문제를 해결하기 위하여 설계및 시공시 고려해야 할 사항을 집중적으로 검토하였다. 콘크리트 구조물은 초기시공으로 모든 것이 해결되는 것이 아니라 그 이후 지속적인 열화현상에 견디어야 하므로, 최근들어 耐久性에 대한 문제가 크게 부각되고 있다. 특히, 철근의 부식, 동결융해, 골재의 알칼리-실리카 반응, 화학적 침식, 중성화등 중요한 내구성문제가 심각한 문제로 대두되고 있는 것이다. 따라서, 앞으로 이에대한 집중적인 연구와 실제 설계및 시공에 응용하기 위한 노력이 이루어져야 할것이다. 본 소고가 이러한 내구성문제의 실제응용에 조금이나마 도움이 되기를 기대하면서 글을 맺는다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete." (ACI 201.2R-77)(Reapproved 1982), American Concrete Institute, Detroit, 1977, 37 pp. Also, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part.1.
2. Pfeifer, D. W., Landgren, J. R., and Zoob, A. B., "Protective Systems for New Prestressed and Substructure Concrete," *Final Report No. FHWA/RD-86/193*, Federal Highway Administration, Apr. 1987.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89) and Commentary - ACI 318R-89," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp. Also *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 3.
4. Clear, K. C., "Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs: Vol.3, Performance After 830 Daily Salt Applications," *Report No. FHWA-RD-76/70*, Federal Highway Administration, 1976.
5. AASHTO T 260-84, "Method of Sampling and Testing for Total Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials," ASSHTO, 444 N.Capitol St. N.W., Suite 225, Washington, D.C. 20001.