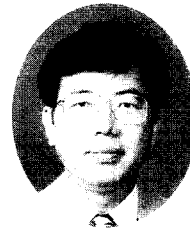
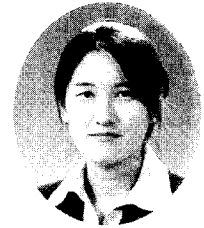


21세기의 내구성 있는 구조물 건설*

- Building Durable Structures in the 21st Century -



김진근*



박혜선**

※ 이 글의 내용은 반드시 ACI의 견해와 일치하는 것은 아니다.

우리 학회에서는 현재 「콘크리트구조설계기준」과 「콘크리트표준시방서」의 수정 작업을 진행하고 있다. 특히 이번 수정 작업에서는 “내구성” 문제가 가장 중요한 사항으로서 논의되어 결정하여야 할 시간이 다가오고 있다. 이에 ACI의 *Concrete International*의 2001년 3월호에 Berkeley 대학의 K. Mehta, R. Burrows 교수의 이와 관련된 글이 실려 있어 번역, 소개하고자 한다. <역자>

21세기의 여명에서, 우리는 지난 100년간 전례 없는 인구학적, 사회적, 기술적, 그리고 환경적 변화를 겪은 세계를 물려받게 되었다. 지난 세기의 이러한 변화들은 산업 전 분야에 걸쳐 많은 영향을 끼쳤으며 건설업도 이에 예외는 아니다. 여태까지는 콘크리트산업이 주거와 기반산업(infrastructure)의 수요를 신속하고 경제적으로 해결하였으나, 이제부터는 또 다른 문제 - 어떻게 환경적으로 보다 지속가능한(sustainable) 콘크리트 구조물을 지을 것인가 - 를 맞이하는 시대에 들어섰다. 대기 중의 온실가스의 축적으로 인한 기후의 변화는 가장 위협적인 환경 문제의 하

나로 부각되었고, 건설산업도 이러한 문제에 대해 일부 책임이 있다.^{1), 2)}

가장 주된 온실가스인 이산화탄소의 대기 중 농도는 20세기에 들어 50% 가량 증가되었는데, 이산화탄소는 건설산업에서 가장 중요한 두 가지 재료, 즉 포틀랜드 시멘트와 철강 제조의 주요한 부산물이기도 하다. 그러므로 건설업계는 미래의 기반 산업의 요구가, 더 이상의 시멘트와 철강의 생산 증가 없이 어떻게 충족될 수 있을 것인가를 생각하여야 한다. 구조물의 내구성을 높임으로써 이러한 자원을 절약하는 것은, 건설업체가 지속가능한 발전에 대한 문제에 대하여 제시할 수 있는 해결책의 하나일 것이다.

로마의 판테온이나 몇몇 유럽의 수도관

과 같이, 천천히 경화하는 석화-포졸란 시멘트를 이용한 무근 콘크리트 구조물은 2,000여 년 전에 지은 것임에도 아직도 우수한 상태인데 반해, 포틀랜드 시멘트를 이용하여 만든 20세기의 철근 콘크리트 구조물은 빠른 속도로 성능 저하가 나타나고 있다. 제빙제나 바닷물과 같은 부식성 환경에 노출된 20년도 채 되지 않은 교량 바닥판, 주차 빌딩, 해저 터널이나 다른 해양 구조물에서도 심각한 내구성의 문제가 발생하고 있다.^{3)~5)}

과거에는 내구성의 부족이 구조물의 설계나 재료의 문제에서 기인하지 않았으며, 대부분의 경우 시공상에 문제가 있었음이 밝혀졌다. 콘크리트의 적절하지 못한 양생이나 다짐, 충분하지 못한 철근의 피복, 줄눈부의 누수 등이 그러한 시공상의 문제의 예이다. 그러나, 오늘날의 심각한 문제는, 최선의 시공 기술로 지어진 최근의 구조물에서도 조기 성능 저하가 발견되는 경우가 늘어난다는 것이다. 이것은 우리가 현재의 건설에서 제반 업무를 보다 깊이 연구하여, 콘크리트의 내구성을 저해하는 주요 요인들을 발견하고 제어하지 않는 이상, 콘크리트의 조기 성능 저하는 우려해야 할 정도의 높은 비율로 계속 일어날 것

* 정회원, KAIST 토목공학과 교수

** KAIST 토목공학과 위촉연구원

이란 뜻이다. 철근의 부식이나 황산염 침식과 같은 성능 저하는 콘크리트의 내부로 물과 이온이 침투할 때 일어나는데, 미세 균열들과 가시적 균열, 공극들이 서로 연결될 때 침투가 일어난다.⁶⁾ 그러므로 성능 저하는 균열과 깊은 관계가 있다. 균열의 원인은 여러 가지이나, 콘크리트에서 초기에 발생하는 균열에 대해서는 가장 부각되는 요인이 한 가지 있는데, 현대의 빠른 시공 속도를 밀받침하기 위해 사용되는 조강 시멘트로 만든 콘크리트의 사용이 그것이다.

이 글에서 저자들은, 20세기의 콘크리트 공사가 점점 더 높은 강도를 추구하는 과정에서, 균열과 내구성과는 긴밀한 관계가 있다는 재료공학의 기본 법칙을 무의식적으로 어떻게 무시하게 되었는지에 대하여 역사적인 사례를 통해 제시하였다. 환경적으로 지속가능한 콘크리트 구조물을 추구하기 위해서는, 건설산업의 여러 통념에 대한 패러다임의 전환(paradigm shift)이 필요하다.

1930년대 이전

Burrows에 따르면, 1931년도 ACI 학술회의에서는 1930년도 이전에 지어진 포틀랜드 시멘트 콘크리트 구조물의 상태에 대한 두 개의 독립적인 조사 사진들이 제시되었다.⁷⁾ 콘크리트의 성능 저하(동결 융해에 노출된 것이 원인일 가능성이 높은) 부서짐이나, 부실한 다짐 부분 또는 줄눈부의 누수 등 두 경우 중 하나였으며, 균열과 관련된 성능 저하의 경우는 발표된 바 없었다. 1930년도 이전의 포틀랜드 시멘트는 조립질(~1,100 cm²/g, Wagner specific surface)이고, 상대적으로 적은 양(30% 이하)의 규산 삼석회 C₃S를 포함하였기 때문에, 이로 만든 콘크리트는 강도의 발현이 매우 느렸다. Burrows는 주로 부서짐과 누수로 인한 것이었던 콘크리트의 성능 저하가 균열에 의한 성능 저하로 바뀌게 된 것은, 시멘트 제조사들이 시멘트의 분말도를 높이고, C₃S의 함량을 높여 보

다 빨리 수화되는 포틀랜드 시멘트를 만들면서였다고 믿는다. 그의 생각은 다음 절에서 언급할 1944년의 조사 결과에 의해 뒷받침된다.

1930 ~ 1950년

1944년 U.S. Public Roads Administration은 캘리포니아와 오리건, 워싱턴, 와이오밍의 콘크리트 교량들에 대해 광범위한 조사를 벌였다. Jackson에 따르면 이 조사의 목표는 이 주(州)들과 그 외 서부의 주에서 놀랄만하게 빠른 속도로 일어나는 콘크리트의 붕괴 원인을 밝히기 위한 것이었다.⁸⁾ 단경간의 작은 교량에서 다경간 대형 교량, 그리고 3년에서 30년이 지난 교량 등 총 200여 개의 구조물이 조사, 검토되었다. Jackson은 1930년 이후에 지어진 콘크리트 구조물은 그 전의 구조물에 비해 내구성이 좋지 못함을 발견하였다. 즉, 1930년도 이전 교량의 67%가 양호한 상태였음에 반해, 1930년도 이후에 건설한 교량은 27%만이 상태가 양호하였다. 시공 기술은 그 기간 동안 본질적인 변화가 없었기 때문에, Jackson은 시멘트 분말도의 증가가 문제의 원인일 것이라고 판단하였다. 그는 더 높은 초기 강도를 원하는 사용자들의 요구로, 1930년 ASTM 규격이 더 세립한 포틀랜드 시멘트의 사용이 가능하도록 바뀌었다고 말하였다. Jackson은 "Wagner 분말도 1,800 cm²/g 가량을 나타내는 현재의 시멘트는, 보다 조립한 25년 전의 시멘트보다 내구성이 좋지 못한 콘크리트를 만든다"는 확설을 발표하였다. Wagner 분말도의 1,800 cm²/g은 Blaine 분말도로는 약 3,000 cm²/g에 해당하는 값이다.

U.S. Bureau of Reclamation이 실행한 일련의 현장 및 실험실의 연구는 Jackson의 확설이 타당함을 뒷받침했다. 이 중, Brewer와 Burrows가 1951년에 발표한 실험 결과와 Backstrom과 Burrows가 1955년에 발표한 실험 결과와 참고문헌 7에 나타나 있다.

1950 ~ 1980년

1950년대 이후 콘크리트 건설산업에서는 몇 가지 중요한 변화가 생겨났다. 레디믹스트 콘크리트산업의 빠른 발전, 펌프 배송을 통한 콘크리트의 타설, 진동기를 콘크리트에 묻어 다짐하는 등의 변화는, 콘크리트 혼합물의 높은 반죽 질기(consistency)를 요구하게 되었다. 이러한 반죽 질기는, 1970년대 고성능 감수제의 출현 이전에는 콘크리트의 함수량을 높임으로써 얻어졌다. 따라서 높은 초기 강도를 얻고 급한 시공 계획을 맞추기 위해서는, 일반 포틀랜드 시멘트의 분말도와 C₃S 함량을 더욱 높여야만 하였다. Price에 따르면, 1970년 미국의 ASTM Type I 포틀랜드 시멘트의 C₃S 함량은 50%까지, Blaine 분말도는 3,000 cm²/g까지 증가하였다.⁹⁾

이러한 일반 포틀랜드 시멘트의 성분과 수화 특성의 급격한 변화가 콘크리트의 내구성에 미친 영향은, 1945년도의 시멘트를 사용할 경우 물-시멘트비(w/c)가 0.47인 콘크리트의 28일 강도가 일반적으로 4,500 psi(31 MPa) 가량이었다는 점에서 알 수 있다. 1980년대의 ASTM Type I 포틀랜드 시멘트의 경우, 훨씬 적은 시멘트 함량과 0.72의 높은 물-시멘트비로 같은 강도를 얻을 수 있다. 이러한 콘크리트는 침투성이 더 크기 때문에, 부식성 있는 환경에서 일반적으로 내구성이 떨어지는 것으로 드러났다.

교량 바닥판에서의 콘크리트의 성능 검사는 내구성에 대한 현장 촉진 실험과도 같은데, 이는 교량 바닥판은 제빙제, 잦은 습윤-건조와 가열-냉각 및 동결 융해 등의 환경에 노출되기 때문이다. U.S. National Materials Advisory Board는 1987년도 보고서에서, 콘크리트 교량 바닥판은 여러가지 내구성의 문제를 갖고 있으며, 이들 중 대부분이 1940년대 이후에 지어진 것이라는 놀랄만한 내용을 발표하였다.³⁾ 20년이 채 되지 않은 것도 다수 포함한 25만 3,000개 가량의 교량 바닥

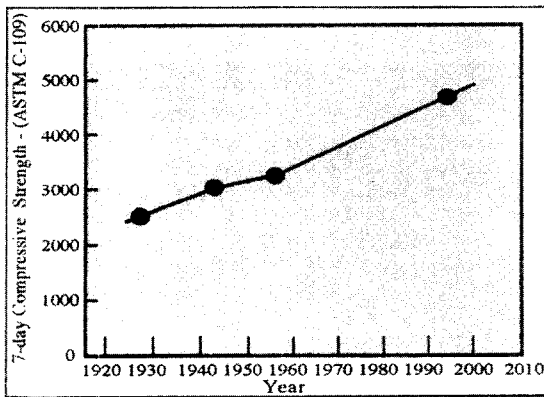


그림 1. 지난 70년간 미국에서 생산된 ASTM Type I 포틀랜드 시멘트의 7일 강도의 증가(참고문헌 11에서 발췌)

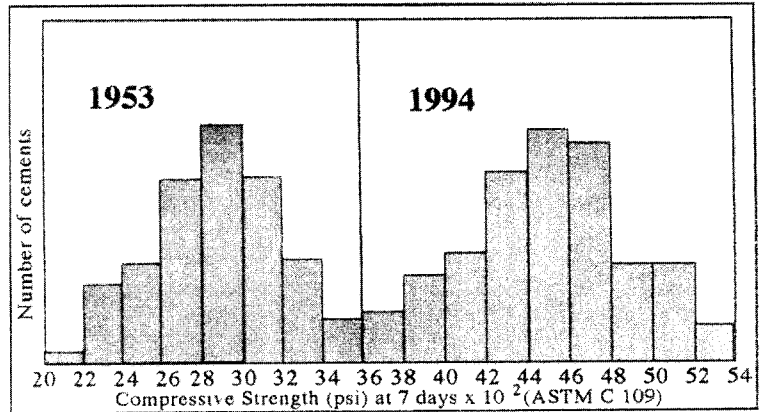


그림 2. 미국에서 생산된 ASTM Type II 포틀랜드 시멘트의 7일 강도에 따른 분포(참고문헌 11에서 발췌)

판이 다양한 성능 저하의 단계에 있는 것으로 추정되었으며, 또한 성능 저하가 발생한 교량 바닥판의 수는 연간 3만 5,000 개의 속도로 증가하고 있었다.

1974년 이후 교량 바닥판의 내구성에 대한 문제점이 점점 더 증가하는 것이, 높은 초기 강도의 시멘트와 콘크리트 혼화재료의 사용에 기인한다고 판단할 근거는 많다. Neville 역시 콘크리트의 성능 저하가 증가한 까닭은 시멘트의 규격에 분말도, C₃S, 그리고 초기 강도에 대한 제한이 없어졌기 때문이라고 말하였다.¹⁰⁾ 현재는 ASTM Type I과 II 시멘트는 60% 이상의 C₃S와 4,000 cm²/g 이상의 분말도를 갖지 못하도록 규정되었다. Gebhardt는 1994년도에 북미 지역에서 생산된 시멘트에 대해 대대적인 조사를 벌여 결과를 발표하였다.¹¹⁾ 71가지의 ASTM Type I 시멘트와 153가지의 Type II 시멘트에 대한 그의 자료 분석 결과, Type II 시멘트의 C₃S의 함량이 낮은 것을 제외하고는, 본질적으로는 이 두 시멘트 종류의 성분과 물리적 성질의 차이가 거의 없다는 것이 드러났다. 이 두 시멘트 종류의 C₃S의 평균 함량과 분말도는 각각 56%와 Blaine 분말도 3,750 cm²/g 가량이다. 두 가지 모두, ASTM C 109 모르타르 정육면체의 재령 1/3/7/28일 압축 강도는 각각 2,000/3,600/4,500/6,000 psi(14/25/31/41 MPa) 가량이다. 저자는 "Type II 시멘트의 특성은 중용열이라고 정의했으

나, 특별히 중용열 시멘트를 규정하여 생산하는 경우를 제외하고는 이러한 특성은 세월이 시남에 따라 없어진 것 같다"고 평하였다.

〈그림 1〉은 지난 70년간 ASTM Type I 포틀랜드 시멘트의 재령 7일의 압축 강도가 2,500 ~ 4,500 psi(17 ~ 31 MPa)로 두 배 가까이 증가하였음을 보여준다. 〈그림 2〉에서는 ASTM Type II 시멘트의 경우, 1953년도까지 적어도 50%의 시멘트가 재령 7일에서 3,000 psi 이하의 강도를 가진 데 반해 1994년도에는 그러한 낮은 강도의 시멘트는 전혀 없으며, 오히려 50% 가량의 시멘트가 4,500 ~ 5,400 psi(31 ~ 38 MPa) 범위의 7일 강도를 가짐을 볼 수 있다. 현재의 상업적으로 통용되는 포틀랜드 시멘트는 ASTM 28일 최소 강도 요구 조건을 3일에서 7일 만에 거뜬히 충족한다. 건설 공사의 빠른 일정에 적합한 포틀랜드 시멘트에 대한 최근의 수요는, 과거의 보다 천천히 경화하고 내구성이 큰 포틀랜드 시멘트를 시장에서 사실상 몰아내었다.

Krauss와 Rogalla는 1970년대 중반 이후, 교량 바닥판 콘크리트의 성능 저하와 균열 발생의 큰 증가에 대한 또다른 원인을 제시하였다.¹²⁾ 그들은 성능 저하 문제의 증가와 1974년도 AASHTO 시방서의 주된 개정과의 관련성을 지적한다. 1931년부터 1973년까지의 40년이 넘는 기간 동안, AASHTO 시방서는 교량 바닥

판 콘크리트의 28일 강도로 3,000 psi (20.7 MPa)를 요구하였다. 이러한 콘크리트는 낮은 탄성계수와 높은 초기 크리프를 가지므로, 열 수축이나 건조 수축에 의한 균열이 발생할 가능성이 적다. 그러나 AASHTO는, 도로와 교량의 제빙제의 사용이 늘어남에 따라 생기는 철근의 부식 증가에 대한 대책으로 콘크리트의 침투성을 줄이기 위한 방법을 강구해야 한다고 생각하였다. 그 결과, 1974년 AASHTO는 콘크리트에 대한 규정을 개정하여 최대 0.445의 물-시멘트비, 최소 362 kg/m³, 610 lb/yd³의 시멘트 함량과 최소 4,500 psi(30 MPa)의 28일 압축 강도를 요구하게 되었다. Krauss와 Rogalla는, 초기의 높은 열 수축과 건조 수축, 낮은 크리프, 그리고 높은 탄성계수로 인하여 이들 콘크리트는 균열이 발생할 경향이 크고, 따라서 부식성 환경에서의 내구성이 떨어진다고 판단했다. 더구나 AASHTO가 물-시멘트비를 0.53에서 0.445로 감소시켰으로써, 사람들이 물-시멘트비를 0.53에서 0.445로 감소하는 것이 바람직하고, 따라서 0.3 정도까지 더더욱 감소시키는 것은 더욱 바람직한 일일 것이라고 생각하게 되는 좋지 않은 결과를 역시 가져왔다. 현재에는 고성능 감수제를 사용하여 물-시멘트비를 0.3 정도까지 떨어뜨리는 것이 실제로 가능하기 때문이다. 매우 낮은 물-시멘트비의 콘크리트로 지어진 구조물에서는 몇몇 심각한 균열이 일어나고 있는 것

으로 나타난 바 있으며, 자세한 내용은 다음에 다루기로 한다.

1980년부터 현재

1980년대 초반 이후 고성능 감수제와, 실리카폼 등 반응성이 좋은 포졸란의 사용 증가로 인해 매우 낮은 물-결합재비(w/cm)에서도 높은 워커빌리티를 갖는 콘크리트를 만드는 것이 가능해졌다. 고성능 콘크리트라 불리는 이러한 제품은 28일 압축 강도가 50 ~ 80 MPa(7,500 ~ 12,000 psi) 가량이고, 실험실용 공시체에서 매우 낮은 침투율을 갖는다. 초기에 상대적으로 높은 강도와 높은 탄성계수를 갖기 때문에, 이 제품은 공기 단축을 요하는 공사에서 선호되어 고층 건물의 구조 부재 등에 널리 쓰이게 되었다. 그러나 불침투성과 내구성이 주된 고려 사항일 경우, 고성능 콘크리트의 사용은 아래에서 설명한 것과 같이 상당한 논란을 가져왔다.

미국과 캐나다에서 새로이 건설된 20만 개의 교량의 조사 결과가 Krauss와 Rogalla의 1996년도 보고서에 나와 있다.¹²⁾ 이 보고서는 10만여 개의 콘크리트 교량 바닥판이 시공 후 얼마 지나지 않아 가로 방향의 균열이 발생하였음을 보여주었다. 저자들은 이것은 주로 열 수축에 의한 것이라고 생각하였다. 일반적인 경우 균열은 교량의 길이 방향으로 1 ~ 3m(3.3 ~ 10 ft) 간격으로, 판통 균열의 형태로 나타났다. 저자들은, 악환경 하에서 균열의 발달은 콘크리트의 침투성을 감소시키며, 철근의 부식 속도 및 콘크리트의 성능 저하 속도를 증가시킨다고 결론지었다. 콘크리트 교량 바닥판의 성능 저하 문제는 1970년대 중반 AASHTO가 고강도 콘크리트의 사용을 요구한 이후 더욱 커진 것으로 생각되며, 고속도로 건설에서 이전보다도 더 큰 초기 강도를 갖는 고성능 콘크리트가 쓰인 1980년대에도 이러한 문제는 해결되지 않았다.

Krauss와 Rogalla는 아래와 같이 결

론 내렸다.

“높은 시멘트 함량에서의 HRWR 혼화제(교유동화제)와 실리카폼이 사용되면서, 27.6 ~ 55 MPa(4,000 ~ 8,000 psi)에 달하는 1일 습윤 양생 압축 강도를 얻게 되었다. 이러한 콘크리트는 1일 탄성계수가 28.8 ~ 35.8 GPa(3.6 ~ 5.2 × 10⁶ psi)에 달하며, 이는 1974년도 이전에 쓰인 공칭 강도 20.7 MPa(3,000 psi) 콘크리트의 경우의 3배에서 7배에 달하는 값이다. 이들 초고강도 콘크리트는 크리프 또한 눈에 띄게 감소시켰다. 그러나 이러한 콘크리트가 매우 취성적이라는 것은 크리프의 극적인 감소와, 전통적인 콘크리트에서는 발견할 수 없었던 초기 균열 및 다른 비정상적인 균열에 의해 알 수 있다.”¹²⁾

Burrows에 의해 버지니아, 캔자스, 텍사스, 콜로라도에서 행해진 교량 바닥판의 현장 실험은 Krauss와 Rogalla의 결론을 뒷받침한다.⁷⁾ 1974년, 버지니아의 교량 바닥판의 균열은 강도 요구 조건이 3,000에서 4,000 psi로 증가됨에 따라 늘어난 것으로 전해진다. 이와 유사하게, 1995년도의 캔자스 29개 교량의 상태에 대한 보고서는 4,500 psi(31 MPa)의 콘크리트의 경우보다 6,400 psi(44 MPa)의 경우 두 배 가량 더 많은 균열이 존재하였다고 한다. 1997년 Louetta 고가도로(텍사스의



그림 3. 콜로라도주 덴버의 23번가 육교에서 사용된 고강도 콘크리트의 초기 균열 사진

showcase 교량)의 고성능 콘크리트 바닥 판에는 기존의 콘크리트를 사용한 인근 도로보다 더 많은 균열이 발생하였다. 덴버의 23번가 육교의 고강도 콘크리트는 시공이 채 끝나기도 전에 균열이 발생하였다(그림 3)). 이러한 균열은, 높은 함량(w/c = 0.31)의 빠르게 수화하는 Type II 시멘트를 사용함으로써 일어나는, 매우 큰 열 수축과 자기 수축(autogenous shrinkage)에 의한 것이었다. 이 육교에서 사용된 분말도 3.910 cm²/g과 C₃A와 C₃S의 함량의 합 73%는 1994년도에 북미에서 생산된 대략 200가지 정도의 Type II 시멘트 중 가장 높은 것이었다. 이 콘크리트의 균열 발생 성향은 실리카폼을 사용함으로써 더 심화되었는데, 실리카폼은 콘크리트의 자기 수축을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 전통적인 콘크리트에서 백만분의 50(50 × 10⁻⁶)까지의 자기 수축은 무시할 수 있으나, 고성능 콘크리트의 경우 백만분의 수백에 달하는 자기 수축이 일어나며, 이 값은 건조 수축 값과 맞먹는 것이다.

20세기의 경험으로부터의 교훈

저자들은 20세기의 콘크리트 건설 공사로 부터 아래의 결론을 얻어내었다.

1. 20세기의 많은 현장 조사를 통해, 1930년대 이후 시멘트와 콘크리트의 강도가 증가되면서, 대부분 성능 저하 문제가 더 많이 발생하였음을 알게 되었다.

2. 일반 포틀랜드 시멘트의 C₃S의 함량과 분말도의 증가는 시멘트가 초기에 매우 높은 강도를 발현할 수 있도록 하였다. 요즘에는 높은 비율의 개량된 포틀랜드 시멘트를 사용함으로써 높은 초기 강도를 갖는 콘크리트를 생산하는 것이 일반적인 경향이다. 지난날의 콘크리트와 비교하여, 최근의 콘크리트는 낮은 크리프와 높은 열 수축, 건조 수축, 그리고 높은 탄성계수로 인해 균열이 발생하기 쉽다. 콘크리트의 강도와 초기의 균열은 긴밀한 반비례 관계

를 갖는다.

3. 콘크리트의 균열과, 유해한 환경에 노출된 콘크리트의 성능 저하는 긴밀한 관계가 있다.

4. 콘크리트 구조물의 조기 성능 저하는 최신의 시공 기술로 건설하는 경우에도 발생하였다. 이것은 아래에서 다룰 내용과 같이, 현 설계기준에서의 콘크리트의 내구성 요구 조건에 문제가 있다는 것을 나타낸다.

5. 실험실에서의 콘크리트 내구성 조사 결과를 실제 구조물의 실사용 기간 동안에 적용할 때는 주의가 필요한데, 이는 균열의 거동이 공시체의 크기, 양생 이력과 환경적 조건에 크게 좌우되기 때문이다. 실험실의 공시체는 크기가 작으며 부피 변화가 구속되어 있지 않다. 실험실의 조강 시멘트를 포함한 콘크리트 부(富)혼합물은 낮은 침투율을 보일지라도, 같은 콘크리트가 실제 구조물에 사용되어 잦은 습윤-건조, 가열-냉각 및 동결-융해 과정에 노출될 경우, 내구성이 좋지 않을 수 있음이 입증되었다. 높은 부피비의 플라이 애쉬나 슬래그를 포함하는 콘크리트의 경우에도, 제대로 양생된 실험실의 공시체는 침투율 시험 결과에서 뛰어난 성능을 보이는 반면, 적절하지 못하게 양생된 현장의 콘크리트는 비슷한 환경에서도 균열이 발생하고 성능 저하를 보이는 경우가 많다.

설계기준에서의 내구성 요구 조건

현재의 미국의 구조용 콘크리트 공사는 ACI Building Code 318 또는 이 설계 기준을 근간으로 한 다른 기준에 따라 행해진다. 1989년, 내구성이 중시되는 경우, 콘크리트의 배합비는 내구성을 우선하여 결정되어야 한다는 것을 강조하기 위해 이 설계기준을 개정하였다. 이 개정의 의도는 좋았음에도 불구하고, 그 목적을 달성하기 위해 추천되는 실제 공사 기준은, 내구성이 있고 환경적으로 지속가능한 콘크리트 구조물을 짓는다는 관점에서는 역효과를 가져왔다. 이 점을 더 구체적으로

보여주기 위해 3,000 psi (20 MPa)의 설계기준강도를 갖고 제빙제나 바닷물에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 콘크리트 배합 비율에, ACI 318-99 설계기준이 어떠한 영향을 미치는가의 분석을 아래에 제시하였다.

· 시멘트 함량 : 이 설계기준에 따르면 콘크리트 혼합물은 최대 0.40 물-결합재비와 최소 5,000 psi (35 MPa) 강도를 만족하여야 한다. 일반적으로 콘크리트의 평균 강도는, 현장에서의 강도 시험 결과가 표준편차를 구할 수 있을 정도로 충분한 지의 여부에 따라, 규정된 강도보다 700 ~ 1,400 psi (5 ~ 10 MPa) 이상 높아야 한다. 최대 골재 크기 1 in. (25 mm)와 슬럼프 값 4 in. (100 mm)의 경우, ACI 211 공기를 연행하지 않은 콘크리트에 대한 도표에서는 325 lb/yd³ (195 kg/m³)의 함수량을 추천한다. 일반적인 감수제는 필요한 물의 양을 7 ~ 8% 가량 줄여줌으로써, 필요한 물의 함량을 300 lb/yd³ (180 kg/m³)로 줄일 수 있을 것이다. 그러므로 최대 허용치인 0.40 물-결합재비에서는 750 lb/yd³ (450 kg/m³)의 시멘트 함량이 필요하다. 만약 고성능 감수제를 사용하여 감수되는 양을 두 배로 늘린다고 해도 690 lb/yd³ (410 kg/m³)의 시멘트가 필요할 것이다. 현장의 결과뿐 아니라 이론적인 계산에 의해서도 이러한 시멘트의 함량은 균열이 없고 내구성이 좋은 구조물을 만들기에는 지나치게 높다.

· 함수량 : ACI 318은 물-결합재비의 최대 값을 제시함으로써 함수량을 제한한다. 위에서 언급한 바와 같이 이러한 접근 방식은 결합재의 전부 또는 대부분이 포틀랜드 시멘트인 경우 만족스럽지 못한 결과를 가져온다. 내구성의 관점에서는, 직접 최대 함수량을 제한하는 것은 필수적이다.

· 무기질 혼화재 : 분말 상태의 고로 슬래그 또는 ASTM F등급 플라이 애

쉬와 같은 무기질 혼화재는 콘크리트의 초기의 수화열, 강도, 그리고 탄성계수를 낮추는데 매우 효과적이다. 그렇기 때문에 많은 양(결합재 질량의 50% 또는 그 이상)의 슬래그나 플라이 애쉬를 포함하는 제대로 양생된 콘크리트는 일반적으로 균열이 덜 발생하고, 사용시 침투성 또한 낮다. 이러한 특성은 철근은 부식이나, 알칼리 골재 반응, 황산염 침식과 같은 콘크리트의 성능 저하를 막는 중요한 요인이므로, 설계기준은 내구성을 중시되는 콘크리트 구조물에서 많은 양의 무기질 혼화재를 사용하도록 하는 지침을 포함하여야 할 것이다.

균열의 폭과 내구성

ACI Manual of Construction에서는 다양한 환경에 노출된 철근 콘크리트의 균열 폭과 내구성과의 관계에 대한 뚜렷한 설명이 없다. ACI 224R-98은, 제빙제 또는 바닷물에 노출된 철근 콘크리트의 인장축 표면 균열 폭의 최대 허용값을 각각 0.15와 0.18 mm로 제시하지만, 균열 폭이 철근의 부식이나 콘크리트의 성능 저하를 평가할 수 있는 신뢰성 있는 지표는 아니라는 언급 또한 서술하고 있다. 설계자가 균열 폭 제한에 대해서 공학적인 판단을 할 수 있기 위해서는, 균열과 미세 균열(0.1 mm 이하)이 콘크리트의 침투성에 미치는 영향에 대해 어느 정도 이상의 이해가 필요하다. 이에 대한 간략한 설명이 다음에 주어지고 있다.

일반적으로, 시멘트 모르타르와 굵은 골재 또는 철근 사이의 천이역(transition zone)은 물-결합재비가 평균값보다 높으며, 이로 인해 이 곳은 더 높은 공극률과 낮은 강도를 갖게 되고, 응력을 받을 때 균열이 더 쉽게 발생한다. 따라서 구조물 전체 또는 일부가 극심한 풍화와 반복 하중에 노출될 때, 내부의 미세 균열이 광범위한 균열망으로 연결될 수 있으며, 이러한 상태에서는, 겉으로 보아서는 단속적인 표면의 작은 균열들도 유해한 이온과 가스

가 콘크리트의 내부로 침투하게 하는 통로로 작용할 수 있다.

건설 공사에서의 패러다임의 전환의 필요성

현재의 시공 관행대로도 재료와 혼합물 구성비를 제대로 규정하고 시방서를 정확히 따르기만 하여도, 내구성 있고 지속가능한 콘크리트 구조물을 만들 수 있다는 생각은 근거가 없다. 빠른 공사에 대한 요구를 우선적으로 충족시키기 위해 개발된 20세기의 재료와 시공법은, 악환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성을 오히려 악화시킨다는 것이 밝혀졌기 때문이다. 우리는 이제 내구성 있고 환경적으로 지속가능한 콘크리트 구조물을 추구하기 위하여, 시공 속도를 어느 정도 희생해야 하는 시기에 도달했다. 이것을 위해서는 건축주와 시공자, 설계자의 사고 방식의 전환이 확실히 필요하다. 현재의 건설 공사에서 가장 절실한 몇몇 패러다임의 전환을 아래에 제시하였다.

1. 20세기의 여러 급격한 변화로 인하여, 이제는 빠른 시공이 사회적으로 바람직한 것이라는 통념은 재검토되어야 한다. 세계적으로 인력의 부족은 문제가 되지 않으나, 대신 인류가 초래한 기후의 변화라는 심각한 문제를 맞닥뜨리고 있기 때문에, 철강이나 콘크리트와 같은 건설 재료가 환경에 대한 커다란 대가를 치르고 생산된다는 사실이 주목받기 시작하였다. 그러므로, 시공의 속도가 아닌 자원의 절약이 21세기 콘크리트 산업의 새로운 강조점이 되어야 한다.

2. 콘크리트의 강도가 높을수록 구조물의 내구성도 좋을 것이라는 통념은 현장의 경험을 통해 뒷받침되지 않았다. 조강 콘크리트는 균열의 발생이 더 쉬우며, 부식성 환경에서의 콘크리트의 성능 저하가 더 빨리 일어난다. 여러 설계기준은 이 점을 제대로 부각할 수 있도록 개정되어야 할 것이다.

3. 과거에 많은 단순하고 편협한 해결책들이 콘크리트의 내구성 문제에 대해 제시되었으나 별다른 성공을 거두지는 못했다. 우리는 내구성이, 통합적인 접근법 없이는 얻어질 수 없다는 사실을 깨달아야 한다. ACI 위원회 201, 즉 콘크리트의 내구성 위원회는 균열은 그들의 담당 분야가 아니라는 이유로, 보고서에서 균열과 내구성과의 관계를 다루지 않는다. 반면 콘크리트의 균열 문제는 ACI 위원회 224에서 말하는데, 그들은 내구성의 문제에 대해서는 다루고 싶어하지 않는다. 내구성 문제의 많은 근원은 이러한 분할적인 접근 방법에서 찾을 수 있다. 균열과 내구성의 관계를 무시하고 강도와 내구성의 관계를 지나치게 강조하기 때문에, ACI 318은 내구성 있고 환경적으로 지속가능한 콘크리트 구조물을 건설하는데 도움을 주지 못한다. 콘크리트 구조물의 균열을 제어하기 위한 통합적인 접근으로의 패러다임의 전환이, 오늘날의 구조설계사와 재료공학자 그리고 시공업자 사이의 훨씬 더 긴밀한 업무 관계를 만들기 위해 필수적이다.

4. 콘크리트의 내구성을 물-결합재비를 조절함으로써 결정할 수 있다는 통념은 잘못된 것인데, 이는 물-결합재비가 아니라 함수량이 균열의 제어 측면에서 더 중요한 역할을 하기 때문이다. 함수량을 줄인다면 같은 일정한 강도를 얻기 위한 시멘트의 함량을 줄일 수 있고, 이것은 결과적으로 콘크리트의 열 수축과, 자기 수축, 그리고 건조 수축을 줄일 것이다. 그러므로 내구성을 얻기 위해서는 콘크리트 혼합물 비를 결정하는 방법의 기준에 기본적인 변화가 있어야 한다.

물-결합재비와 강도의 관계에서 함수량과 내구성의 관계로 관점을 전환한다면, 현재의 건설 공사에서 관행적으로 실행하던 것보다 골재의 입도에 대한 보다 정확한 제어가 가능해지는 부수적 이점도 얻을 수 있다. 요구되는 물의 양은 골재의 입도를 좋게 함으로써 크게 줄어들 수 있다. 콘크리트 혼합물에서 함수량의 감소는 보통 성능 또는 고성능 감수제나 많은 양

의 플라이 애쉬 또는 슬래그, 분말도가 낮은 포틀랜드 시멘트를 사용함으로써도 얻어질 수 있다.

5. 자원의 절약이라는 목적 달성을 위해, 재료의 시방서에 대한 패러다임 역시 규정적인 것에서 실제의 성능을 기준으로 한 것으로 바뀌어야 한다. 그 예로, ASTM 1157-98a, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement에서는 다용도 시멘트(Type GU)를 3일과 7일의 압축 강도가 각각 2,900 psi(20 MPa)과 4,350 psi(30 MPa)를 넘지 않는 시멘트로 규정하고 있다. 이 시방서에서는 또 3일과 7일의 압축 강도가 각각 2,175와 2,900 psi(15와 20 MPa)를 넘지 않는 시멘트를 중용열 시멘트(Type MH)로 표현한다. 여기에서는 성분비와 시멘트의 분말도에 대한 제한은 없으나, 최대 강도를 만족하기 위해서는 현재의 포틀랜드 시멘트의 C₃S 함량과 분말도를 조정하여야 한다. 즉 입자가 거칠며 C₃S의 함량이 낮은 포틀랜드 시멘트를 제조하거나, 일반 포틀랜드 시멘트에 많은 양의 플라이 애쉬 또는 슬래그를 혼합함으로써 이러한 특성을 얻을 수 있다. ASTM C 150의 Type I/II 시멘트와 비교할 때 ASTM C 1157-98a Type GU와 Type MH 시멘트는 균열이 덜 발생할 것으로 짐작할 수 있다.

결론

20세기의 콘크리트 건설 공사는 점점 더 빠른 속도로 이루어지는 건설 공사의 경제 논리에 따라 조강 시멘트와 콘크리트의 사용을 주로 늘려갔다. 그러나 이에 대한 대가로, 최근의 많은 콘크리트 구조물에 대한 현장 경험은 이러한 구조물들이 균열이 발생하기 더 쉬우며, 유해한 환경에 노출되었을 때 예상 사용 기간보다 훨씬 일찍 성능 저하를 일으키는 경향이 있다는 것을 보여준다. 21세기의 콘크리트 산업은, 환경적으로 지속가능한 콘크리트 구조물을 건설하기 위해 강도에 앞서 내구성을 고려해야 함이 명백하다. 이러한 변

화는 이 글에서 간략히 소개한 재료의 선택과 혼합 비율, 그리고 건설 공사 전체에 대한 패러다임의 전환을 통해 이루어질 수 있다. □

참고문헌

1. Malhotra, V. M., "Making Concrete Greener with Fly Ash", Concrete International, V.21, No.5, May 1999, pp. 61-66.
2. Mehta, P. K., "Concrete Technology for Sustainable Development", Concrete International, V.21, No.11, Nov. 1999, pp. 47-53.
3. Report of the National Materials Advisory Board, "Concrete Durability - a Mutimillion Dollar Opportunity", NMAB-37, National Academy of Sciences, 1987, p.94.
4. Litvan, G., and Bickley, J., "Durability of Parking Structures : Analysis of Field Survey", Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conference, SP-100, J. M. Scanlon, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1987, pp. 1503-1526.
5. Gerwick, B.C., "A Holistic Approach to Concrete Technology for Major Bridges", Concrete Technology - Past, Present, and Future, V. Mohan Malhotra Symposium, SP-114, P. K. Mehta, ed., American Concrete Institute, Farming Hills, Mich., 1994, pp. 41-59.
6. Mehta, P. K., "Durability - Critical Issues for the Future", Concrete International, V.19, No.7, July 1995, pp. 69-76.
7. Burrows, R. W., "The Visible and Invisible Cracking of Concrete", ACI Monograph No.11, 1998, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., p.79.
8. Jackson, F. H., "The Durability of Concrete in Service", ACI Journal, V.18, No.2, Oct. 1946, pp. 165-180.
9. Price, W. H., "The Practical Qualities of Cement", ACI Journal, V.71, No.9, Sept. 1974, pp. 165-180.
10. Neville, A., "Why We Have Concrete Durability Problems", SP 100-3, Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conferences, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1987, pp. 21-30.
11. Gebhardt, R. N., "Survey of North American Portland Cements : 1994", Cement, Concrete, and Aggregates, V.17, No.2, Dec. 1995, pp. 145-189.
12. Krauss, P. D., and Rogalla, E. A., "Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks", NCHRP Report 380, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1996, p.126.