

콘크리트 균열의 발생 원인과 완화

Causes and Mitigation of Concrete Cracking



강현구*

Thomas H.-K. Kang



홍성걸**

Sung-Gul Hong

1. 서 론

철근콘크리트의 심각한 구조적 결함은 크게 정후를 보이지 않은 상태에서 갑자기 발생하는 전단파괴에 의한 파괴와 시간을 두고 장기적인 과다하게 발생하는 균열로 인한 결함으로 분류할 수 있다. 전단파괴에 의한 결정적인 파괴는 휨강도에 도달하는 하중의 주요 시나리오를 파악한 후, 같은 하중조건에서 발생하는 전단력이 전단강도보다 월등하게 작으면 설계과정에서 간단하게 방지할 수 있다. 보통 설계 전단력과 공칭전단강도와 비교하도록 여러 설계기준에서 기술하고 있지만, 실상 휨강도 도달시의 전단력($V_u @ M_u$)와도 상호비교를 통하여 전단설계가 이루어진다면 (capacity-design concept) 취성파괴는 결코 발생하지 않는 설계가 가능하다. 단, 비선형 내진하중하에서는 전단강도가 궁극적으로 감소하기 때문에 이를 고려해야 한다. 그리고 철근 정착의 중요성은 휨/전단강도를 발휘하고 최종적인 붕괴를 방지하는데 있어서 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

과다한 균열에서 진전된 구조적 결함은 과다한 처짐으로 구조적 사용성(serviceability)에 문제가 발생하는 경우와 균열로 습기가 침투하여 후속적으로 발생하는 철근부식(그로 인한 강도저하)의 결함으로 나뉜다. 내진설계에서는 과다 균열로 인하여 강성이 저하되기 때문에 고유진동주기에 의한 해석과 층간 변위비 산정에 있어 이를 반영할 필요가 있으며, 내진설계 지침상 지진 하중에 의한 균열로 야기되는 부재의 강성 감소현상은 대체적으로 잘 알려진 사실이며 기준에 따르고 있다.

앞서 기술한 콘크리트 균열은 다시 크게 세가지 유형으로 나뉜다. 1) 설계적으로 의도한 균열(이하 설계균열로 총칭); 2) 의도하지 않은, 단기적으로 발생하는 균열(이하 단기균열로 총칭); 그리고 3) 장기적으로 발생하는 균열 (이하 장기균열로 총칭)이다. 여기서 단기적이라 하면 콘크리트 재령 28일 이내에 발생하는 의

도하지 않은 모든 균열을 일컫는다. 또한, 장기적이라 하면 28일 양생기간 이후부터 길게는 5년에서 10년 정도의 기간에 점진적으로 발생하는 균열을 말한다. 여기에서는 위의 세가지 콘크리트 균열의 발생 원인과 완화를 위한 조치 방법을 논하고자 한다.

2. 균열 제어를 위한 설계

2.1 설계균열

대부분의 휨 구조부재는 휨 모멘트로 발생하는 균열을 피할 수 없으며 이를 적절하게 제어할 수 있어야 한다. 이 휨 균열은 최대 정모멘트가 작용하는 경간 중심부, 부재(보나 슬래브)의 하단부에서 주로 발생한다. 중력하중하에서 정모멘트 값의 약 1/2정도의 부모멘트가 작용하는(부정정 구조물) 보의 단부에서도 부재의 상단부에서 설계균열이 발생하기도 한다. 하중강도계수설계(LRFD)에 의하면 하중계수를 고려한 최고 설계모멘트(M_u)가 공칭모멘트강도(M_n)보다 작다면 올바른 설계이다. 이때 하중계수를 반영하지 않은 사용모멘트($M_{DL} + M_{LL}$)는 최대 설계모멘트의 약 2/3수준이며, 중력하중과 활하중이 어느 정도 크게 잡혀 있는 것을 감안하더라도 실제로 작용하는 모멘트는 공칭모멘트 강도(M_n)의 1/2수준을 넘고 이 값은 균열모멘트(M_{cr})를 대부분 상회한다. 만약 그렇지 않다면 매우 부적절하고 비경제적인 설계라 할 수 있다. 이러한 방법에 따른 설계절차상 의도된 균열은 구조적으로 아무런 하자가 없는 균열이다.

이러한 설계균열을 그대로 방지할 수 없다. 왜냐하면 습기와 염분으로 인한 철근부식이 가속화될 수 있기 때문이다. 따라서 <그림 1>에도 볼 수 있는 바 수축과 크리프(creep)에 의한 변형이 80~90% 진행되는 시점인 1.5~2년 후에 이 균열에 대한 1회의 보수작업이 필요하다.⁸⁾ 이 보수작업은 구조물의 수명을 극대화하는데 도움을 준다. 외부 환경에 노출되어 있고 프리스트레스 콘크리트(prestressed concrete) 부재를 주로 사용하는 교량구조에 있어서 균열보수 작업은 필수적이다. 이때 콘크리트 내부 습기를 흡입(vacuum) 제거하는 작업 역시 매우 중요하나 이

* 정회원, 오클라호마대 토목환경공학부 조교수
tkang@ou.edu

** 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

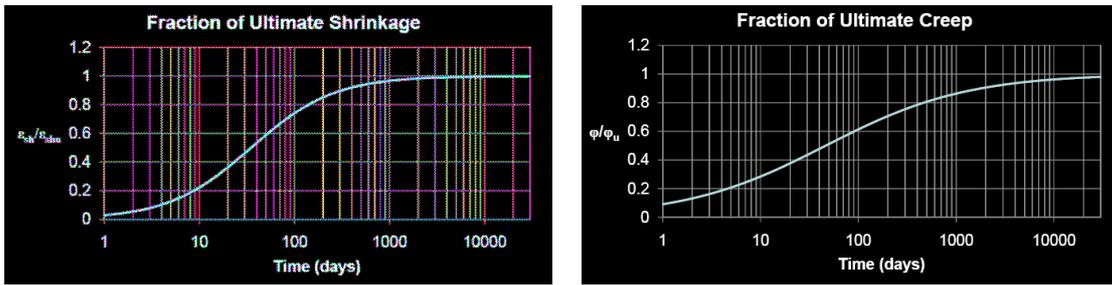


그림 1. 수축과 크리프의 시간에 따른 진행(출처: Hirsch, 2008)

는 현장의 여건에 맞고 여기서는 문헌을 소개한다.¹¹⁾ 습기 제거 작업 후 모든 균열을 에폭시 레진(epoxy resin)으로 봉합(sealing)한 후 전체적으로 표면을 마감한다. 강재는 인장응력이 작용하는 상태에서 부식작용에 매우 취약하기 때문에 프리스트레스 콘크리트의 강선은 부식작용으로부터 반드시 보호하여야 한다. 같은 이유로 현수교 또는 사장교의 강선도 지속적인 표면 처리작업을 필요로 한다. 이러한 강선들은 외부로 노출되어있기 때문에 정기적인 표면처리보수는 그다지 어려운 작업이 아니다.

실제로 부식에 의한 강선 파단의 예는 자주 보고된다. 프리캐스트-프리텐션(prestressed, pre-tensioned) 부재, 그라우트 부착-포스트텐션(grout-bonded, post-tensioned) 부재, 그리고 미부착-포스트텐션(unbonded, post-tensioned) 부재에 모두 해당된다. 강선이 콘크리트나 그라우트와 부착되어 있다면 당연히 강선 부식은 일어나지 않을 것이라는 선입견이 있으나 실제로는 그렇지 않다. 프리텐션 부재의 경우 역시 콘크리트 균열을 통해 습기가 침투할 수 있고, 무엇보다 외부와 노출되어 있는 부재 양단끝에서 부식에 의한 강선부착파괴와 그로 인한 손상의 경우는 자주 볼 수 있으며¹⁴⁾ 보통 20~30년간 진행되는 현상이다.

강선을 감싸는 관(plastic tube or sheathing)안을 그라우트로 채우는 공법도 실제로는 부식으로부터 자유로울 수 없다. 보통 그라우트로 관을 100% 채운다는 것은 쉽지 않은 일이며, 그라우트 안에 남아 있는 미세한 공기와 또 그곳까지 침투한 습기와 염분으로 인하여 부식 현상은 국부적으로 가속화된다. 하지만 강선이 콘크리트 부재안에 묻혀있기 때문에 진단의 어려움이 있을 뿐만 아니라 미부착 강선과 달리 부착 강선은 쉽게 교체할 수 없기 때문에 외부 강선을 추가해야 하는 보수상의 까다로움이 있다. 기존에 외부 강선(external tendons)이 쓰였다 하더라도 그라우트 안에서 발생하는 부식현상은 감지하기 어려워, 파괴 후에야 비로소 외형적으로 나타나게 된다. 프리캐스트 프리텐션 부재의 강선이나 일반 철근콘크리트 부재의 철근의 부식 여부는 ASTM C876에 따라 전기화학적인 방법(half cell corrosion test)으로 조사할 수 있으나, 여기에 투여되는 비용은 상당하다. 부착 포스

트텐션 부재의 경우에는 FFT 원리를 도입한 임팩트 에코 스캐너(impact echo scanner)를 이용하여 그라우트 충전 여부를 확인하여 간접적으로 부식 위험도를 판단한다.⁹⁾ 비부착 포스트텐션 부재의 경우에는 적당한 위치에서 플라스틱 관안에 공기를 주입한 후 다른 위치에서 배출되는 습도를 측정하여 윤활유 충전 여부를 확인할 수 있다.¹¹⁾

앞에서 언급한 그라우트 내 강선의 파단(fracture)파괴는 미국 Virginia에 있는 I-295, Varina-Enon 교량에서 2007년 5월에 발견되었다.⁶⁾ 더욱이 여기에 사용된 그라우트는 새로이 부식을 방지하기 위하여 개발된 고성능 그라우트(high performance grout)로서, 보다 촘촘한 그라우트를 가능케 하는 공법이었다. 그럼에도 불구하고, 고성능 그라우트마저 이 강선의 부식방지에 는 그다지 효과적이지 않았다. 이 교량에서 발생한 강선 부식과 파단에 대해서 현재 버지니아대(University of Virginia)와 버지니아 교통국(VDOT)에서 계속 연구 중에 있으며, 현재까지 밝혀진 정확한 진단은 없다. 또한, 플로리다 템파베이에 위치한 Sunshine Skyway 교각에서도 강선의 파단이 2000년에 발견되었다.¹²⁾ <그림 2>에 나타나 있듯 여러가지 요인이 복합적으로 맞물려 발생한 것으로 조사되었는데, 콘크리트의 균열도 이 원인 중의 하나였다. 이렇듯 염분이 많은 바다 위를 가로지르는 프리스트레스 교량에서 강선의 부식 문제는 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

위 Varina-Enon 교량의 강선 파단 발견은 교량 점검 프로그램(bridge inspection program)에 의하여 다행히 붕괴등의 재난(tragedy)발생 이전에 발견될 수 있었다. 미국은 지난 미네소타 I-35W 교량의 붕괴 이후 전미의 모든 교량과 고가도로(overpass)에 대한 대대적인 교량 점검 프로그램을 시행하고 있는바, 우리나라도 하루 빨리 정부차원에서 이러한 교량 및 빌딩 점검 프로그램이 도입되기를 기대한다. 특히 철근과 강선의 부식은 쉽사리 발견되지 않고 매우 조용히 진행되다가 어느 한순간 부재의 취성파괴에 이르게 하는 매우 위험한 현상이다.¹¹⁾

반면 미부착 강선의 경우에는 윤활유(grease)의 고른 도포 후 강

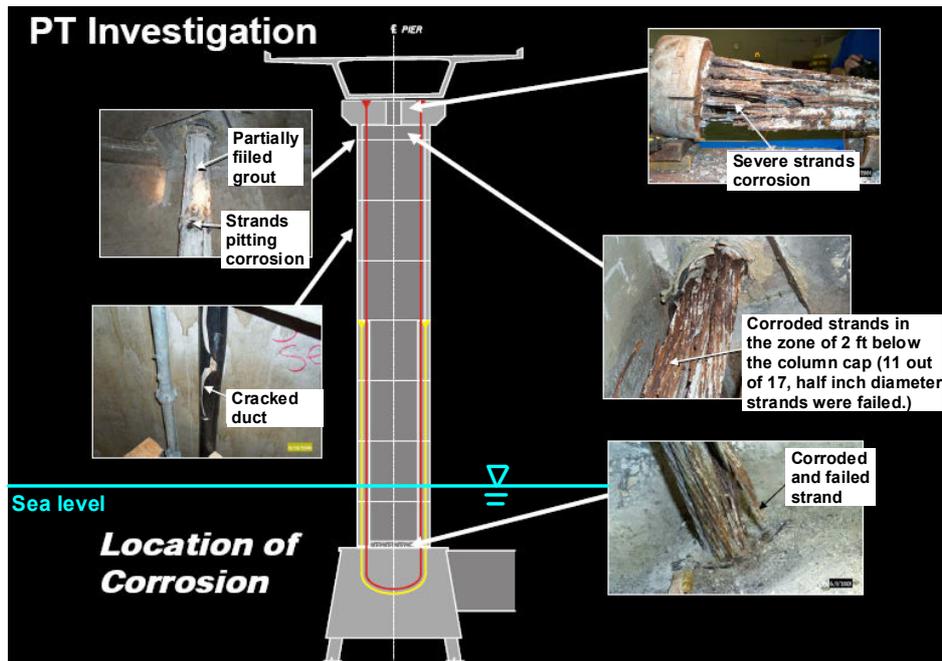


그림 2. Sunshine Skyway 교각의 강선 부식 및 파단(출처: Garcia and Theryo, 2006)

선을 플라스틱 관(plastic tube or sheathing)에 입히면서 자동 인발(extrusion)생산함으로써 강선과 관사이의 공간을 최소화 할 수 있다. 최근 10년간 이러한 기술의 급격한 발전으로 미부착 강선의 부식문제가 크게 해결되었다. 또한 미부착 강선은 문제 발생시 강선을 교체할 수 있는 장점이 있다. 그러나 부식문제는 어느 순간에도 간과해서는 안 된다. 실제로 에폭시코팅(epoxy-coating) 철근에서도 부식은 발생하는 것으로 알려져 있다.

한편 사용중인 빌딩 구조물의 보수작업은 매우 힘든 측면이 있기 때문에, 타설 후 친장덕트 작업 직전에 부가적인 콘크리트 패치나 이와 유사한 효과를 발휘하는 특수 페인트칠로써 습기를 조기에 차단하는 것이 현실적인 방법이 될 것이다. 그러나, 이러한 작업을 거처도 설계균열은 활하중과 크리프에 의하여 다시 발생할 수 있다. 그렇다 해도 타설 후 1~2개월 이내에 시행하는 표면처리 작업은 균열 정도를 크게 줄이는 효과가 있을 것이라 판단된다.

콘크리트 균열은 무엇보다 눈에 띄기 때문에 경관의 미적인 측면을 상당히 저해한다. 따라서 계약 당시 균열이 발생할 가능성과 균열 보수의 주체를 분명하게 명시하여 분쟁의 소지를 없애야 한다. 설계균열이나 구조적으로 문제가 되지 않는 단기균열만으로도 대부분의 건물주나 사용자는 이를 심각하게 받아들이는 경향이 있다. 그렇기 때문에 의도된 설계균열에 대해서 건물주에게 사전고지하고, 단기균열 역시 구조적(강도와 처짐)으로는 아무런 하자가 없다는 것을 프로젝트를 시행하기 전에 확실하게 주지시키는 것은 매우 중요하다. 또한 충분한 사전 계획을 통해 의도

하지 않은 단기/장기 균열을 제어하는 작업은 하중설계/정착설계 못지 않게 중요한 설계 목록일 것이다. 궁극적으로 단기 및 장기 균열은 철근 또는 강선의 부식으로 이어질 수 있기 때문이다.

2.2 단기균열

단기균열은 콘크리트 초기 양생과정에서 발생하고 주요원인은 콘크리트 수축(shrinkage)이다.¹⁵⁾ 이러한 수축에 의하여 발생하는 단기균열의 원인은 크게 두가지로 나뉜다. 구조적인 구속(restraint)에 의하여 발생하는 부피팽창에 대한 저항이 그 첫번째이고, 콘크리트 플라스틱 수축에 의하여 발생하는 응력의 콘크리트 인장강도 상회(overstress)가 그 두번째이다.

이 2 가지 원인이 복합적으로 작용하여 단기균열이 발생하는 데, 예를 들면 교량구조물의 슬래브(deck)부재 표면에 횡방향으로 자주 발생하는 균열(transverse cracking)이 이에 해당된다.¹⁵⁾ 이 문제는 미국에서 매우 빈번하게 발생하였고 현재에도 그러하다. 횡균열은 미리 제작된 거더(prestressed girder)위에 슬래브 콘크리트를 후 타설함으로써 발생하는 합성(composite action)에 주로 기인한다. 즉, 슬래브 콘크리트의 수축과 프리캐스트 거더의 구속이 상충하기 때문이다. 따라서 composite action을 줄이기 위하여 거더에 삽입된 일반 철근과 새로 타설하는 슬래브 콘크리트 사이를 어느 정도 비부착(debonding) 시켜 줄 필요가 있다. 이 때 비부착 정도에 대해서는 확실한 연구 결과

가 아직 발표되지 않은 상황이다. 그러나 초기 양생시에는 비부착 조건을 이루고, 사용하중 및 설계하중 하에서는 부착조건을 만드는 일은 그리 쉬운 일은 아니며, 앞으로 심도깊은 연구가 필요한 실정이다. 또한, 거더의 강성을 줄이고(예: IPC거더 사용), 거더에 비하여 슬래브 테크의 강성(또는 두께)을 늘리는 것도 단기균열을 줄이는 하나의 구조적 해결 방법이 될 수 있다. 텍사스 교량의 경우 시공성 향상을 위해서 프리캐스트 프리텐션(precast, pre-tensioned) 슬래브 테크를 최근 사용하고 있는데,¹¹⁾ 이 시스템은 단기균열 방지에도 유리하다. 거더와 슬래브의 접합은 일정한 간격을 두고 거더의 철근과 프리캐스트 테크의 포켓(pocket)을 배치하여 이곳을 후 타설함으로써 가능하다.

건축 구조물 슬래브의 경우에도 단기균열 현상은 비일비재하며, 슬래브 수축에 대한 벽체 또는 기둥의 구속은 단기균열의 주요 원인이라 할 수 있다. 이는 역시 구조적인 문제이다. 이에 대한 설명은 추후 자세히 하기로 한다.

한편 재료적인 문제로 인하여 발생하는 단기균열(두번째 원인)의 경우는 재료 자체의 개선을 통하여 어느 정도 균열정도를 개선할 수 있다. 콘크리트의 물-시멘트비를 0.4 이상으로 유지하여 자생수축(autogeneous shrinkage)에 의한 단기균열을 최대한 제어한다. 그러나 물-시멘트비를 조절하여 소성 수축(plastic shrinkage)을 제어하기는 거의 불가능에 가깝다. 부족한 인장강도를 대체할 수 있는 첨가물을 콘크리트에 혼합하는 것만이 대안이 될 수 있고, 이에 대한 첨가물로서 폴리머 강섬유(polymer fiber)가 적절하다. 이는 최근 오클라호마대학의 실험연구를 통하여 입증되었다.¹⁵⁾ 마이크로 강섬유(micro fiber)의 일종인 Stealth와 Grace, 그리고 매크로 강섬유(macro fiber)의 일종인 Strux 90/40과 고성능 강섬유(high performance fiber) 모두 플라스틱 수축 균열에 효과적이었다. 이 4가지 강섬유는 모두 상업화된 제품으로서 미국에서 손쉽게 구할 수 있다.

재료적인 성질 개선으로 교량구조물의 슬래브 테크에서 발생하는 횡균열을 크게 억제할 수 있다. 그러나, 재료적인 성질 개선만으로 빌딩구조물의 슬래브에서 발생하는 단기균열의 억제는 한계가 있다. 무엇보다 구조적인 적절한 배치를 통해 구속균열을 억제하는 것이 가장 효과적인 방법이 될 것이다.

균열제어를 위하여 건축 구조물의 평면으로서 다음과 같은 배치를 추천한다<그림 3 참조>.^{2,8)} 콘크리트 슬래브 수축은 질량 중심을 향하는 방향으로 진행되기 때문에 벽체의 배치는 매우 중요한 사안이다. 전체적인 대칭평면과 더불어 코어 벽구조(core wall) 시스템은 슬래브 균열 방지에 매우 유리한 시스템이다. 또한 벽체-슬래브 접합부 요소는 항상 응력이 집중(stress concentration)되는 곳이기 때문에 벽체 주변의 슬래브 배근에 유의하여야 한다<그림 4>. 응력이 집중되는 모서리에서부터 주로

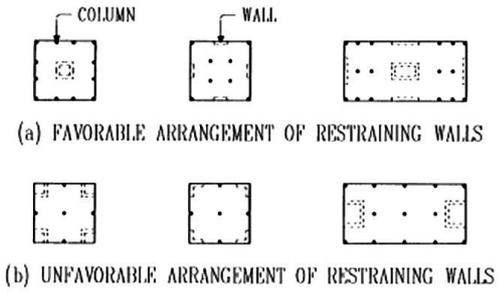
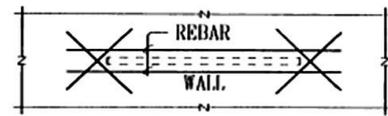


그림 3. 단기균열을 완화 혹은 심화하는 평면의 배치 (출처: Aalami and Barth, 1989)



(a) INTERIOR SHEAR WALL



(b) EXTERIOR SHEAR WALL

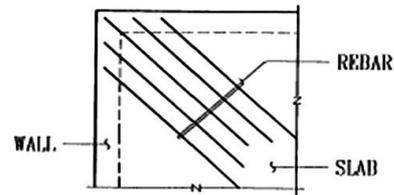


그림 4. 벽-슬래브 접합부에서의 추가 슬래브 배근 (출처: Aalami and Barth, 1989)

균열이 시작되는데, 균열에 있어서나 전단강도에 있어서나 취약한 지역이기 때문에 슬래브근을 충분히 배근하는 것이 좋다. 또한 가능하다면 직사각형 기둥은 피하는 것이 좋다. 벽구조를 1축방향으로만 적용한 경우 약축 방향으로 강성을 부여하기 위하여 장방향의 직사각형 기둥이 많이 쓰이기도 하나, 경간을 조금 줄이더라도 정사각형 기둥을 사용하는 것이 균열을 제어하고 전단 응력을 분산하는데 있어서 보다 유리하다. 경간을 오히려 늘리면서 정사각형 기둥을 사용하는 방법으로는 무량판 구조, 더 나아가 포스트텐션 무량판 구조 시스템을 채택하는 방안이 있다. 무량판 구조를 사용하면 층간 소음에 필요한 슬래브 두께 규준을 손쉽게 맞출 수 있고 평면 배치에 있어서도 유연적이다.

코어벽체가 부정형(irregular)하게 배치되었을 때는 평면의 한 쪽으로 질량(mass)의 중심이 집중되지 않게 하기 위해서 평면 바깥쪽에 위치한 벽체의 질량을 줄여야 한다. 질량의 재배치는 마치 골조(frame)와 같이 힘저항에 관여하지 않는 벽체의 중심부에 큰 입구(opening)를 두어 어렵지 않게 실현할 수 있다<그림 5>.¹⁷⁾ 특히 이 입구는 슬래브 바로 위에 두어 슬래브의 구속을 약하게 하는 동시에 건축 계획적인 면으로도 활용할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 내진하중시 우발편심을 극소화하는데에도 일조한다.

또한 구속에 의한 단기균열을 억제하기 위해서 보통 한 층에서 각 방향으로 한 두어개 정도의 타설판(pour strip)을 두는 것이 좋다<그림 6>. 이 타설판은 경간의 1/4지점에 배치하는 것이 좋으나, 경간 중심에 있어도 무방하다. 타설판의 폭은 코드(예: ACI 318)에서 지정하는 철근의 이음길이(lap splice length)가 적당하다. 타설판을 중심으로 양쪽의 슬래브근을 완전히 분리할 수 있기 때문이다. 이 타설판 부분은 1차 슬래브 콘크리트 타설 28일 후에 2차 타설한다. 만약 3~5일 만에 2차 타설하게 되면 균열 제어효과를 발휘할 수 없다.¹³⁾ 그리고, 2차 타설 이후로 타설판 주위의 부분 동바리를 최소 14일간 제거하지 않는 것이 바람직하다. 그렇지 않으면 (캔틸레버) 슬래브의 처짐에 의하여 큰 피해를 가져다 줄 수 있다.

하지만 타설판을 설치하더라도 부정형 평면이 존재하는 한 단기균열을 막을 수는 없다<그림 7>. 이와 같이 전체 질량 중심이 중앙으로 집중되는 코어 벽구조(core walls)를 사용하는 것이 균열을 제어하는데 매우 유리하다. 최근 초고층 빌딩에 자주 쓰이는

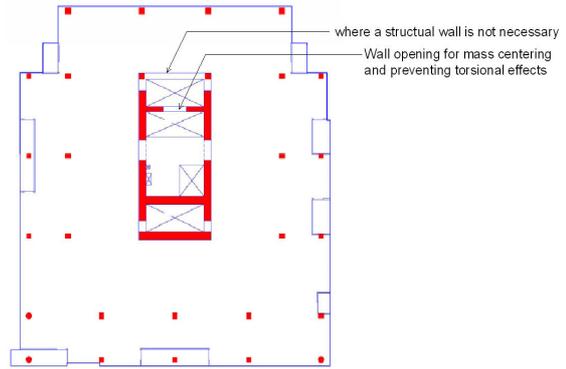


그림 5. 코어 벽구조의 질량 재분배(출처: Kopczyński, 2008b)

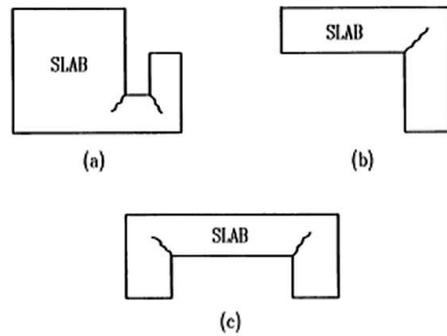


그림 7. 부정형 평면에서의 슬래브 단기균열 (출처: Aalami and Barth, 1989)

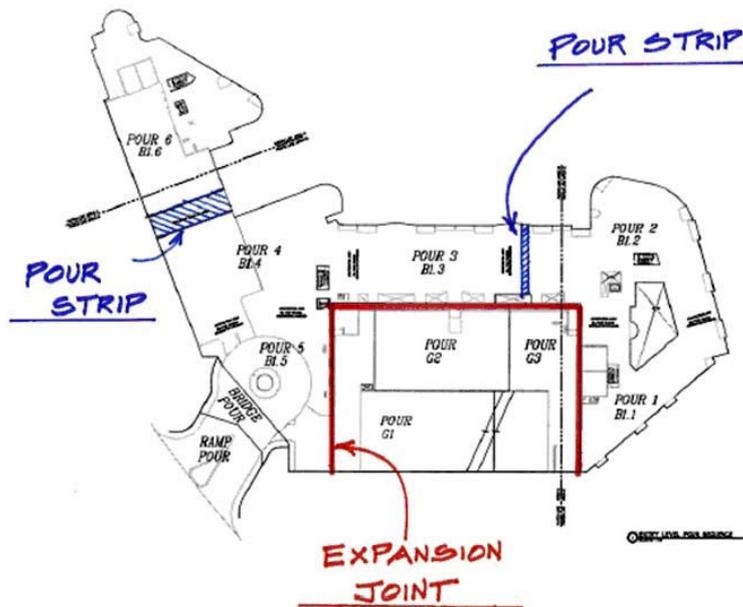


그림 6. 단기균열 완화를 위한 타설판과 익스팬션 조인트 사용의 예(출처: Baxi, 2008)

코어 벽구조는 고강도콘크리트와 플라잉 거푸집(flying form)을 이용하여 대단히 빠른 시간 내에 1차 시공이 완료된다. 그 후 각 층의 무량판 슬래브와(고강도콘크리트)기둥은 한 층씩 시공된다(이때 벽구조와 무량판 슬래브의 접합부 상세는 매우 중요하다.^{3,16)}). 슬래브 시공시 최근에는 공사비 대폭 절감의 목적으로 개발된 새로운 슬래브 거푸집 시스템이 실무에 적용되고 있다. 이는 동바리를 사용할 필요 없이 기존층 기둥에 매달리게 하는 형태의 트러스-플라잉 데크(truss-flying deck) 시스템이다(그림 8 참조).¹⁸⁾ 이 시스템은 매층의 동바리 설치 및 제거에 대한 노동력과 공기를 단축시켜 습식공사비를 최고 절반까지 경감시킨다. 어찌 보면 철골구조물의 데크플레이트나 래티스(lattice) 시스템과 비슷한 개념이다. 다만, 플라잉 데크 시스템은 매 층마다 계속 중복사용 될 수 있다는 점이 큰 장점이다. 또한 층마다 기둥 크기를 바꾸지 않는 것도 공사비 절감에 많은 도움이 된다. 즉, 상위층으로 갈수록 자주 기둥 크기를 줄이는 것보다 몇 개의 기둥 크기로 통일하는 것이 공사비 절감에 매우 유리하다.

물론 이 플라잉 데크의 사용은 수십층의 평면이 일치할 경우 효과가 극대화 된다. 그렇지 않다면 플라잉 데크의 사용 자체가 불가능하다. 여러 층 평면의 통일은 엄청난 공사비 절감을 가져올 뿐만 아니라 내진성능과 균열제어에도 유리하다. 또한 보다 견고한 거푸집의 사용은 시공시 발생할 수 있는 균열을 최소화하는 데에도 일조한다.

코어 벽구조를 사용한다고 하여도 지하에서는 평면둘레에도 벽체가 위치한다. 이 때문에 구축이 평면 둘레에 걸려 지하 구조물 슬래브에 상당한 단기균열이 발생한다. 이를 방지할 수 있는 대안으로서 지상 구조물과 같이 기둥이 모든 하중(흙하중 제외)을 받게끔 설계하고, 골조를 선시공하고 벽체는 후시공하는 방법이 있다.²⁾ 이 때 지하층에서는 지상층에 비하여 기둥의 수를 20~30% 정도 더 늘리는 것이 바람직하다. 철차를 살펴보면 다음과

같다. 보-기둥 골조와 슬래브를 선타설한다. 그 후 28일이 지나서 벽체를 쇼크리트(shotcrete)로 후타설한다. 쇼크리트 공법은 터널공사에 주로 쓰이는 공법으로서 이의 적용은 그다지 까다로운 일이 아니다.

이 때 지하 벽체는 토하중을 지지하는 시스템은 아니지만, 벽체와 다른 부재끼리 철근(dowel rebars)으로 서로 연결(tie)하는 것이 바람직하다. 이미 슬래브의 수축이 끝난 후에 벽체를 쇼크리트 후타설하기 때문에 서로의 부재가 철근으로 연결되어 있다 하여도 구속에 의한 단기균열은 상당히 완화된다고 볼 수 있다. 보통 토하중 지지의 목적으로는 시공시 사용된 토압지지 부재나 포스트텐션 앵커(post-tensioned anchor)를 영구적으로 사용한다. 단, 포스트텐션 앵커 사용시 유의할 점은 앵커의 위치를 토질 가상 파괴면 안으로 설계하는 것이다.

지하 주차장은 배기가스등으로 인해 콘크리트의 화학적/기계적 성질이 취약해지는 공간이다. 또한 토질의 팽창과 콘크리트 지하 구조의 팽창의 정도가 다르기 때문에 지하 최하층 바닥 슬래브에서는 균열이 극대화된다. 게다가 다량의 습기를 함유한 토질과 인접하고 있어 콘크리트 균열을 통하여 철근의 부식 또한 가속화될 수밖에 없다. 따라서 쇼크리트 후타설 공법은 지하 벽체 설계/시공에 있어 고려해볼만한 공법이다. 이러한 설계/시공 방법은 미 북서부의 한 구조설계 사무소에서 현장 적용하고 있는 공법이다.²⁾ 위에 기술한 바와 비슷한 이유로 원자력 발전소의 보일러 건물과 터빈 건물의 슬래브에도 상시균열(단기 및 장기균열)이 심각한바 이와 유사한 공법을 고려해볼 필요가 있다.

반면 완전히 구조를 분리하는 경우도 있다. <그림 9>에 나타나 있듯이 부정형 평면이나 계단 등의 독자적인 평면이 존재할 경우 구조를 분리하는 것이 좋다.⁸⁾ 이 분리된 경계면에 10mm에서 20mm 두께의 스티로폼을 삽입하고 콘크리트를 타설하는 것이 바람직하며, 콘크리트 분리 타설시 위치 선정에 있어서도 이 분



그림 8. 트러스-플라잉 데크(truss-flying deck) 시스템 (출처: Koczyński, 2008c)

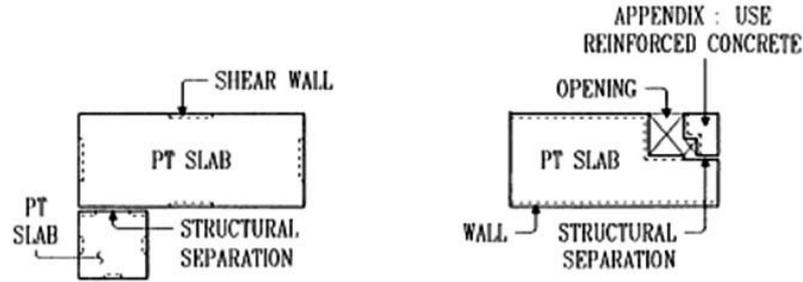


그림 9. 단기균열 완화를 위한 구조 분리(출처: Aalami and Barth, 1989)

리면은 매우 적합한 위치가 될 것이다.

한편 슬래브나 보에 구축된 기둥역시 수직 방향으로 힘이 작용하여 수축 단기균열이 발생하는 경우가 종종 있다. 기둥에 발생하는 균열을 방지하기 위하여 슬래브의 바로 위와 아래의 기둥 부근을 한꺼번에 타설하지 않고, 임시로 이 공간(void)을 비워두거나 모래주머니(sand pocket)로 채워두고, 콘크리트 28일 양생 후 기둥의 위, 아래 부분에 타설하는 방법이 있다. 미국 중동부에서는 실제로 많이 쓰이는 공법이다(기둥은 한지로 모델링한다). 미서부에서는 내진설계상 이러한 공법은 쓰이지 않고 있다.

이제까지 언급한 내용은 주로 구조적, 또는 재료적인 설계의 개선을 통하여 균열을 억제하는 방법이었다. 이와 더불어 조기에 거푸집을 제거(초기 습기의 증발)하거나 콘크리트 타설시 진동이 부족한 경우(시공적인 원인) 균열이 발생할 수 있다. 따라서, 구조물이 완성되기 전까지 설계 및 시공적으로 모든면에서 주의를 기울여야 한다. 이는 비단 콘크리트구조물만의 문제가 아니며, 철골 구조물의 슬래브 설계 및 시공에 있어서도 유의하여야 할 사항이다.

2.3 장기균열

의도된 설계균열은 크리프(creep)가 가장 활발하게 진행되는 2~3년 내에 나타난다(그림 2). 의도하지 않은 균열도 구조물 수명기간 동안 꾸준히 발생한다. 장기균열은 크리프, 건조수축(drying shrinkage), 잦은 온도변화, 피로하중, 진동하중, 그리고 외부 환경적 요인 등 여러가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타난다. 크리프에 의한 변형률이나 건조수축에 의한 변형률의 정도를 어느 정도 예측할 수는 있으나⁴⁾, 외부적인 요인에 의한 변형률은 예측할 수 없는 사안이다. 특히 터빈 등 진동 기계시설이 있는 구조물이나 차량 피로하중이 계속 존재하는 교량 구조물의 경우, 장기균열 정도가 구조물의 수명을 결정한다.

ACI 318이 규정하는 온도와 수축을 위한 슬래브 최소 철근

규정은 균열을 제어하는데 부족하다는 보고가 있다.¹³⁾ 이러한 온도와 수축철근량은 무량판에서 특히 부족할 수 있다. 정모멘트를 받는 경간 중심부(주간대와 주열대 모두)에는 모멘트 저항을 위한 하부근이 배근되지만, 휨철근이 상대적으로 적은 주간대에서는 ACI 318-08, 7.12절에서 규정하는 양만으로는 장기균열을 방지하는데 다소 부족함이 있다고 판단되어진다.

장기균열의 보수는 대개 구조물의 시공 이후 약 5~10년 사이에 시행된다. 장기 균열의 경우 온도 변화에 따라 균열의 폭이 계속 변하기 때문에 에폭시 레진 봉합은 적당하지 않다. 그보다는 유동성이 많은 봉합제(flexible sealant)가 적당하다.⁸⁾ 만약 철근의 부식이 이미 어느 정도 진행되었다면 콘크리트 안의 습기를 흡입(vacuum) 제거하는 작업은 필수적이다.¹¹⁾ 그 후 강도저하를 보강하기 위해서 파이버 폴리머(carbon or glass fiber reinforced polymers)로 부재의 밀면을 보수한다. 균열의 정도가 심하고 처짐이 크게 나타났다면 균열봉합 후 외부 텐던(external tendons)으로 슬래브를 들어올리는 보강이 필요하다.

3. 결 론

지금까지 균열의 원인과 완화, 그리고 보수보강에 대하여 간략하게 소개하였다. 일반 콘크리트의 부재에는 균열이 존재하게끔 의도적으로 휨설계하기 때문에 균열이 항상 존재한다. 또한 콘크리트 양생 28일간 소성 수축(plastic shrinkage)이 급격히 일어나면서 단기균열이 발생한다. 특히 구조적인 구속에 의하여 단기균열이 극대화된다. 재료적으로 콘크리트의 적은 인장 강도를 보강하여 단기균열을 완화할 수는 있으나, 근본적으로 구조적인 구속을 줄여주는 것이 단기균열을 억제하는데 있어 가장 효과적인 방법이다. 설계균열과 단기균열은 시공 후 한번 보수를 하는 것이 바람직하다. 이는 크리프와 건조수축(drying shrinkage)이 80~90% 진행된 시점인 1.5~2년 후가 적당하다. 이러한 보수로 철근 및 강선의 부식을 막을 수 있다. 장기균열은 잦은 온

도변화, 반복하중 등의 외부적인 요인에 의하여 발생하는데, 역시 철근/강선의 부식과 과도한 처짐이 발생하기 전, 시공 후 약 10년 즈음에 한번 보수하는 것이 좋다.

콘크리트 균열은 심미적인 면을 크게 저해하지만, 직접적인 구조적 결함과는 거리가 멀다(전단균열 제외). 그러나 오랜기간에 걸쳐 균열을 통해 습기가 침투하면, 궁극적으로 철근 및 강선이 부식되고 끝내는 파단과괴로 발전한다. 이는 균열에 의한 2차적 결함으로서, 매우 빈번하고 심각한 문제이다. 이와 같은, 심미성과 내구성을 동시에 저해하는 콘크리트 균열을 완화하는데 있어 본고가 도움이 되기를 바란다.

감사의 글

본고는 저자의 의견과 더불어, 많은 실무자 및 학자와의 대화, 위원회 회의 및 학회 등에서 발췌한 의견, 그리고 각종 서적 및 논문의 내용을 요약 정리한 것이다. 무엇보다 출처의 저자들에게 감사를 표하며, 또한 폴리머 재료실험을 주도한 오클라호마대(University of Oklahoma)의 Chris Ramseyer 교수에게 특히 감사의 마음을 전한다. 보다 자세한 내용은 각 참고문헌을 참조하길 바라며, 더 좋은 의견이나 보다 심도깊은 논의가 필요한 사항은 저자에게 교신하기를 제안한다. ☐

참고문헌

- Ley, T., Private Communication, 2008.
- Kopczynski, C., Private Communication, 2008a.
- Hooper, J., Private Communication, 2008.
- ACI Committee 209(2008), *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures? ACI 209R-92(Reapproved 2008)*, Committee Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1992, 47 pp.
- ACI Committee 318(2008), *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-05) and Commentary (318R-08)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 456 pp.
- ASCE, "Forensic Engineering-Tendon Failure Raises Questions about Grout Posttensioned Bridges," *Civil Engineering, The Magazine of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 77, No. 11, Nov. 2007, pp. 17~18.
- ASTM(1999), *ASTM C876-91(1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, 6pp.
- Aalami, B. O. and Barth, F. G., "Cracking in Prestressed Concrete Structures," *SP 113-07, Special Publication*, Vol. 113, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Apr. 1989, pp. 157~202.
- Abraham, O. and Cote, P., "Impact-Echo Thickness Frequency Profiles for Detection of Voids in Tendon Ducts," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 3, May-June 2002, pp. 232~247.
- Baxi, A. N., "PT Design Intricacies and Challenges-Bayou on the Bend Condos & Garage Project," *Presentation, Technical Session #2-Building Design, 2008 PTI Technical Conference*, St. Louis, MO, May 2008.
- Fallis, G., Ball, J. C., and Moad, A., *Innovative Corrosion Evaluation System for Unbonded Post-Tensioned Cables*, International Concrete Repair Institute, Concrete Repair Bulletin, May-June 2007, pp. 7~11.
- Garcia, P. and Theryo, T., "Sunshine Skyway Bridge-Yesterday, Today and Tomorrow," *Presentation, FDOT Design Conference*, Orlando, FL, Aug 2006.
- Hirsch, J., "Design for Restraint in PT Slabs," *Presentation, Technical Session #2-Building Design, 2008 PTI Technical Conference*, St. Louis, MO, May 2008.
- Martin, R. D., Pei, J.-S., and Kang, T. H.-K., "Estimation of Span-varying Stiffness and Prestressing Stress of a Real-World Prestressed Concrete Bridge Girder," *Open Paper Session, ACI Spring Convention*, Los Angeles, CA, April 2008.
- Myers, D., Kang, T. H.-K., and Ramseyer, C., "Early-Age Properties of Polymer Fiber-Reinforced Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials, Korea Concrete Institute*, Vol. 2, No. 1, June 2008, pp. 9~14.
- Klemencic, R., Fry, A., Hurtado, G., and Moehle, J. P., "Performance of Post-Tensioned Slab-Core Wall Connections," *Journal of the Post-Tensioning Institute*, Vol. 4, No. 2, Pheonix, AZ, Dec. 2006, pp. 7~23.
- Kopczynski, C.(2008b), "Design of Tall Post-Tensioned Concrete Buildings," *Presentation, Opening Session, 2008 PTI Technical Conference*, St. Louis, MO, May 2008.
- Kopczynski, C.(2008c), "Formwork Efficiency-Thinking Ahead Can Result in Savings," *Concrete International*, Vol. 41, No. 43, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 41~43.