

콘크리트 균열의 원인 Causes of Concrete Cracks



김진근*

1. 균열 발생의 메카니즘

콘크리트의 파괴는 항상 균열에 의해서 일어난다. 또한 콘크리트는 생겨날 때부터 균열을 갖고 있다. 즉 콘크리트는 균열을 항상 갖고 있으며 그 균열의 진전에 의해 파괴가 일어난다는 것이다. 다만 우리가 어느 관점에서 보느냐에 따라 달리 이해할 수 있을 뿐이다. Wittmann 교수는 콘크리트 재료의 균열 발생에 대하여 micro level, meso level, macro level 등으로 나누어 설명하였다. 그리고 경화 콘크리트에서 균열이 언제 진전되는가에 대한 기준(criterion)도 다양할 수 있다. 즉 우리가 흔히 알고 있는 강재의 항복기준(yield criterion)과 같이 응력, 변형도 또는 에너지에 근거하여 기준을 삼을 수 있다. 가장 간편하게 이해될 수 있는 것은 주응력이 인장강도를 초과하는 순간 균열이 야기된다고 보는 것인데, 이는 구조체 크기를 크게 보았을 때 평균적 의미에서 어느 정도 받아들여질 수 있는 것이다. 미세 균열 끝에서 실

제 균열 진전은 더 큰 응력에 이를 때까지도 저항될 수 있으며, 따라서 이 기준은 옳지 못할 수도 있다. 변위에 관계되는 COD(crack opening displacement) 또는 에너지에 관계되는 파괴에너지(fracture energy)를 기준으로 하는 것도 최근에 제시되고 있다. 그러나 이 글에서는 평균적 개념에서 콘크리트의 균열이 어떻게 진전되는가에 대하여 먼저 살펴 보고자 한다.

그림 1에서 보는 바와 같이 초기 균열이 있는 경우 콘크리트의 기동은 유리나 금속의 파괴기동과는 상당한 차이를 보인다. 초기에 응력이 가해지면 그림 1(c)와 같이 균열단에서 응력집중현상이 일어나며, 응력이 일정한 한계를 벗어나지 않으면 탄성적으로 기동하나 그 한계를 벗어나면 균열단에서 미세균열(micro crack)이 발생하여 비선형성의 변화를 보이다가 곧 그림 1(e)와 같이 콘크리트의 인장 최대응력에 도달하게 된다. 이 미세 균열이 더욱 커지고 변형도 늘어나게 되면 균열단에서는 유리나 금속재료와는 달리 변형연화(strain-softening) 현상이 일어나 변형도는 증가하나 응력은 감소하게 된다. 여기서 더욱 변형도

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

가 증가하게 되면 균열단에서는 주균열(main crack)이 발생하여 콘크리트는 더이상 연속체가 될 수 없으며, 이 때의 응력분포 및 변형도는 각각 그림 1(g), (h)와 같이 나타날 수 있다. 그러나 그림 1(h)의 k_1-k_2 구간의 실제 변형도는 나타낼 수 없으며 단지 이 구간에서의 전체변위만을 나타낼 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 콘크리트가 파괴되는데, 이 때 위에서 언급한 변형연화현상과 미세균열의 발생 등이 콘크리트 재료의 큰 특징이며 콘크리트의 비선형적 특성과 크기효과에 큰 영향을 미친다.

이와 같이 콘크리트 구조물에 어떠한 형태의 하중이 작용하더라도, 콘크리트에서의 균열은 콘크리트 부재의 인장 변형도에 의해서 일어난다. 인장력을 받으면 그 힘 방향으로의 인장 변형도가 발생하여 균열은 작용하중에 수직한 방향으로 발생되며, 반면 압축력을 받으면 작용하중에 나란한 방향으로 압축 변형도가 발생되고 포아송비의 효과에 의해 힘과 수직한 방향으로 인장 변형도가 발생되어 균열은 작용하중과 나란한 방향으로 발생된다.

또한 하중의 재하속도에 따라 콘크리트 강도,

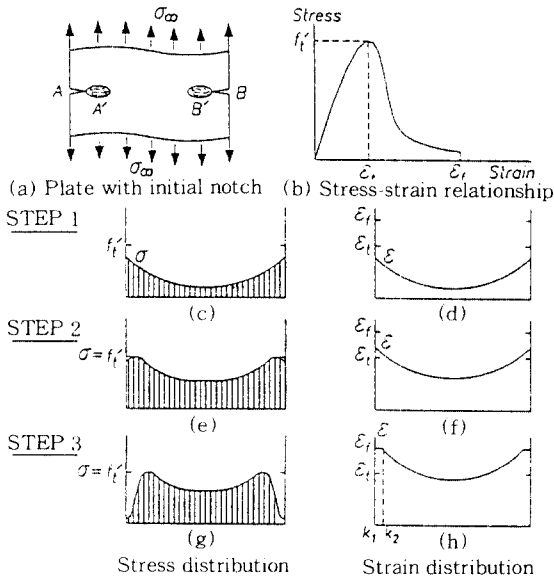


그림 1 콘크리트의 균열 진행 과정

균열의 생성과 분포, 균열 방향이 크게 바뀌게 된다. 그러나 미세하게(micro) 관찰하면 균열의 발생은 앞에서 언급한 과정에 의하여 이루어진다고 볼 수 있다.

2. 콘크리트 균열발생의 원인

콘크리트 구조물에서 발생하는 균열의 원인은 무수히 많다. 그러나 실제적인 목적에서 균열은 크게 구조적인 균열(structural crack)과 비구조적인 균열(nonstructural crack)의 두가지로 분류할 수 있다. 구조적인 균열은 구조물이나 구조부재가 사용하중을 지지하기에 안전하지 못한, 즉 구조적 기능을 발휘할 수 없는 단계로 진행되거나 도달한 균열을 의미한다. 이와 같은 균열은 설계 오류, 설계하중을 초과한 외부하중의 작용, 시공 불량, 물리적인 손상, 폭발, 충격, 철근의 부식으로 인한 심한 성능저하 등에 의하여 야기된다. 그리고 위에서 설명된 원인들을 제외한 다른 원인에 의하여 야기되는 균열을 비구조적인 균열이라 할 수 있다. 일반적으로 구조물에서 발생하는 균열의 대부분은 비구조적인 균열이다. 그러나 이를 비구조적이라고 무시하여 그대로 방치한다면 시간이 경과하여 철근의 부식이 점차로 진행되면서 구조물이 불안정한 단계에까지 이를 수 있다는 것을 유념하여야 한다. 다시 말해서 구조물에서 발생한 비구조적인 균열은 조사 당시에는 안전한 상태라 할지라도 그대로 방치한다면 구조적 재난을 초래할 수도 있다는 것이다.

그러면 우리나라의 콘크리트 구조물에는 왜 특히 균열이 크게 발생되고 있는가? 이에 대한 대답은 여러 복합요인에 의한 것으로 볼 수 있으나 다음 몇가지로 나누어 살펴보면,

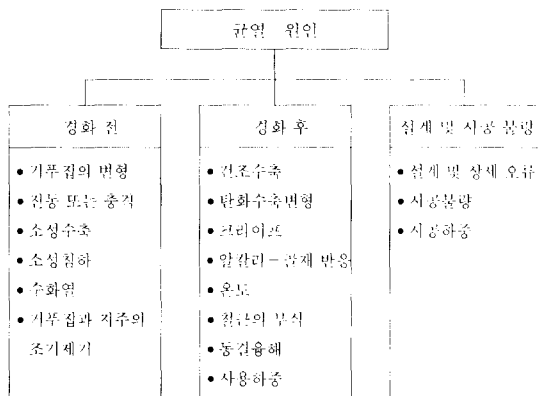
첫째, 설계, 시공, 감독자 모두가 이때까지 구조물의 강도(strength)만에 관심을 갖고 있었으며, 사용성(serviceability), 내구성(durability) 등에는 전혀 관심을 갖지 않았다는 것이다. 즉 시공시에만 문제가 일어나지 않으면 족하였고, 내구연환에는 관심이 없어 재료개발 등에는 관심이 없었다. 또 사용 재료가 저강도(콘크리트와 철근)일 때는 강도만 만족하면 대부분 사용성(처짐이나 균

열)에는 전혀 문제가 없었으나 최근에 상대적으로 고강도 재료를 사용함으로써 이러한 사용성의 문제가 대두되었다.

둘째, 콘크리트 재료성질에 대한 무지이다. 콘크리트의 재료적 특성에 대한 이해는 없이 규준(시방서)에 따라 설계하고 시공함으로써 나타났다. 시방서나 규준은 최소한의 규정이며, 모든 상세한 내용은 포함될 수 없으므로 각 경우에 따라 해당 담당기술자가 판단하여 처리할 사항이 많은데 그 판단력은 콘크리트에 대한 지식을 필요로 한다. 특히 최근에 들어와 massive한 구조물, 긴 구조물, 얇고 큰 구조물 등 다양한 구조물이 건축되고 있는데, 균열 원인들을 잘 파악하지 못하면 이러한 구조물에서는 특히 균열이 많이 발생된다.

셋째는 시공의 저급함이다. 어느 국제 학술회의에서 “The best crack control is the best construction work”이라고 어느 발표자가 말했다. 우리나라의 시공 정도는 시공자 자체만의 문제 뿐만 아니라 감리 감독 체제의 문제도 크다고 볼 수 있다. 구조적 결함을 갖는 균열의 대부분은 철근 위치의 부정확성, 철근 이음 위치 및 이음 길이의 미확보, 타설시 가수(加水)에 의한 콘크리트 강도의 저하 등이다. 이러한 문제는 물론 시공하는 사람들의 지식과 양심에 크게 좌우될 수 있으나, 일반적으로 실제 시공하는 사람들의 전문지식의 한계 등을 고려할 때 기술감독자가 철저히 도면을 이해하고 감독하는 것이 최선의 길이라고 본다.

표 1 균열 원인의 발생시기에 따른 분류



이 글에서는 표 1에 나타난 바와 같이 균열의 원인을 발생시기에 따라 콘크리트가 경화하기 전과 후, 그리고 설계 및 시공 불량 등으로 각각 분류하여 이를 분석하였다.

2.1 경화 전 원인

2.1.1 기부집의 변형

콘크리트의 응결이 시작된 후 기부집이 변형하거나 변동이 생기면 구조체에 균열을 발생시킨다. 이러한 균열은 가끔 부재의 내부에 생겨 표면검사로는 보이지 않는 경우도 있으며, 콘크리트의 내부에 물집을 형성하여 겨울에 동해의 원인이 되기도 하고 철근을 부식시키기도 한다.

2.1.2 진동 또한 충격

응결상태에 있는 콘크리트가 진동이나 충격을 받으면 균열이 발생한다. 이러한 진동이나 충격은 보행자, 차량, 말뚝박기, 발파, 다짐, 시공장비의 부주의한 사용 등에 기인한다.

2.1.3 소성수축(plastic shrinkage)

시멘트 풀이 경화할 때(plastic region) 그 체적은 건조 시멘트(dry cement)의 절대체적의 1% 정도가 감소한다. 콘크리트가 소성상태에 있을 때 발생하는 이러한 체적감소를 소성수축이라고 한다. 이론적으로 소성수축은 시멘트 풀에 다짐현상을 일으키므로 유익할 것처럼 보이나 실제적으로는 이 소성수축이 콘크리트 전반에 걸쳐 균일하게 분포하지 않으므로, 이로 인하여 서로 다른 체적변화가 유발되어 콘크리트 내에서 인장력을 발생시키는 원인이 된다.

콘크리트 표면으로부터 증발에 의한 수분의 손실이나 기부집 연결 틈 사이로의 수분의 손실은 소성수축을 더욱 심하게 하고 표면 균열을 일으키기도 한다. 콘크리트에서 소성수축에 의한 균열은 대부분 노출된 표면에서 일어나는데 바람이 강하거나, 상대습도가 낮거나, 대기온도 또는 콘크리트 내부의 온도가 높을수록 더욱 많이 발생한다. 만약 표면 증발 비율(rate of evaporation)이 0.5 kg/m²/h를 넘게 되면 블리이딩에 의하여 아래

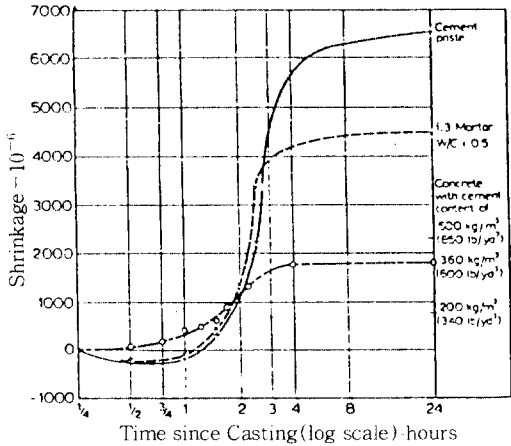


그림 2 시멘트 양과 소성수축과의 관계

층에서 위층으로 공급되는 수분보다 표면에서의 수분 증발이 빨리 일어나므로 이에 대한 조치를 취하는 것이 바람직하다. 또한 그림 2에서 보는 바와 같이 콘크리트 배합시 단위 시멘트 양이 커짐에 따라 소성수축에 의한 양도 커짐을 알 수 있다. 전형적인 소성수축 균열은 서로 평행하며, 0.3~1.0m 정도 간격으로 떨어져 있고 때로는 상당한 깊이까지 들어가기도 한다. 또한 일반적으로 균열이 자유단까지 진전하지 않는데 그 이유는 자유단에서는 체적변화가 자유롭기 때문이다.

한편, PCA(Portland Cement Association)에서 제안된 표면 증발 비율을 구하는 도표가 그림 3에 나타나 있으며, 그림으로부터 최종적으로 구하게 되는 증발 비율이 1.0kg/m²/h(0.2 lb/ft²/h)보다 클 경우에는 소성수축에 의한 영향을 신중히 고려하여야 한다.

2.1.4 소성침하(plastic settlement)

타설하고 마무리 작업까지 끝낸 후 콘크리트는 계속해서 압밀되는 경향을 보인다. 이러한 소성상태의 콘크리트는 철근이나 거푸집 등에 의하여 국부적으로 제재를 받게 되는데, 이로 인하여 그 주변에는 공극이나 균열이 발생하게 된다. 이와 같은 균열은 철근의 직경이 커질수록, 슬럼프가 커질수록, 그리고 콘크리트 덮개가 작아질수록 많이 발생하게 된다. 한편 진동이 충분하지 않거나 너

무 휘기 쉬운 거푸집을 사용하였을 경우에도 발생한다.

2.1.5 수화열

시멘트와 물이 화학반응을 일으키면 그 반응열인 수화열이 발생하게 되는데 콘크리트는 낮은 열전도율로 인하여 경화시 발생하는 이러한 내부의 수화열이 외부의 노출부위로 빠져나가는데 충분한 시간을 요하게 된다. 특히 시공 전에 수화열이 반드시 검토되어야 구조물은 댐, 교량의 하부구조, 도로포장, 옹벽, 원자력 발전소 구조물 등의 매스콘크리트 구조물과 지중에 설치되는 콘크리트와 같이 열을 발산하기 어려운 구조체이다.

일반적으로 콘크리트에서 열이 빠져나가는 시간은 구조물의 최소 치수의 제곱에 비례한다고 알려져 있다. 가령 15cm 두께의 콘크리트 벽이 열적으로 안정된 상태에 도달될 때까지 약 1.5 시간이 소요되는데 반해, 150cm 두께의 벽은 약 7일 정도가, 1500cm 두께의 벽은 약 2년이 소요된다. 또한 수화열에 의하여 콘크리트의 온도가 상승하여 온

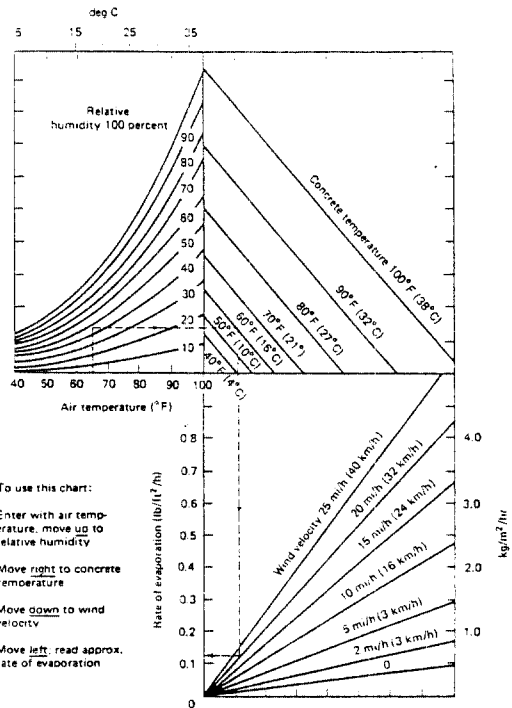


그림 3 증발 비율을 구하는 과정

도차의 최대값이 25~30℃ 정도에 이르면 열응력이 발생하고 온도 균열이 형성된다. 이러한 균열은 시멘트의 종류에 따라 각기 다른 영향을 나타내며 또한 소성수축의 중요한 원인이 되기도 한다. 또한 수화열에 의하여 발생하는 인장응력은 경화 후에도 잔류응력으로 남게 되어 콘크리트 구조물에 균열을 발생시켜 구조물의 안전성, 내구성 및 방수성 등에 영향을 미친다.

2.1.6 거푸집과 지주의 조기제거

콘크리트가 충분한 강도를 얻기전에 거푸집이나 지주를 제거하면 구조체에 균열이 생기는 경우가 있다.

2.2 경화 후 원인

2.2.1 건조 수축

건조수축은 콘크리트에서 시멘트 풀 구성요소의 수분 이동에 의하여 생기며, 이에 따른 콘크리트의 체적변화는 약 0.05%에 달한다. 건조수축에 의한 콘크리트의 체적변화는 보통 다른 구조체에 의하여 저지되기 때문에 이러한 제약에 의하여 인장응력이 발생하면서 콘크리트가 균열을 일으키게 된다.

한편 두꺼운 슬래브에서는 표면부분에서 빨리 수분이 손실되므로 수축변형도는 그 평균값에 큰 관계가 없으며, 내부에 비하여 공기의 접촉면이 상대적으로 많이 수축하게 되어 표면에 인장 변형도를 유발하게 된다. 이때 건조수축에 의하여서만 균열이 발생되면 미세균열이 골고루 퍼지는 현상을 보이거나, 힘에 의해 일단 균열이 생기면 균열이 expansion joint와 비슷한 역할을 하게 되어 건조수축에 의한 균열폭은 더욱 넓어질 수 있다.

콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 인자들은 골재, 상대습도, 부재의 크기와 형상, 혼화제 및 시멘트의 종류 등이다. 골재는 콘크리트의 수축변형에 가장 큰 영향을 미치는 것으로서 순수 시멘트 풀의 건조수축 변형을 억제시키는 역할을 한다. 억제정도는 그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같이 골재의 함유량, 압축성(이는 콘크리트 강도에 결정적인 영향을 미침), 최대골재크기 등과 밀

접한 관련을 가진다.

콘크리트의 건조수축은 외기와외의 상대적인 수분이동에 근거하고 있으므로 콘크리트 주위의 상대습도는 수축변형에 큰 영향을 미친다. 그림 6에

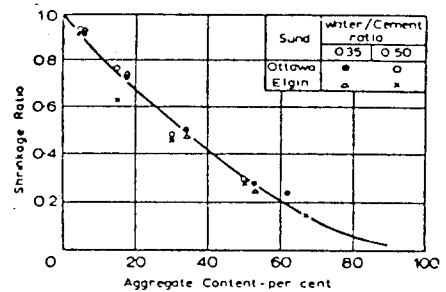


그림 4 골재 함유량의 영향

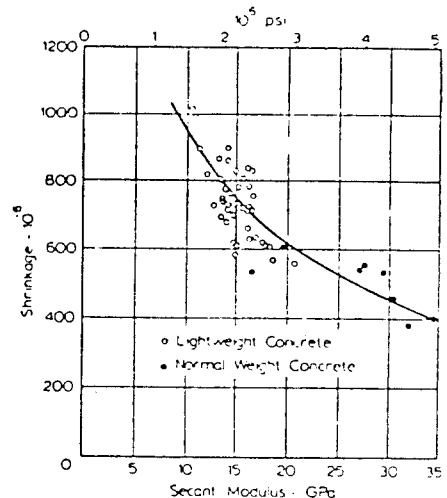


그림 5 탄성계수와 건조수축

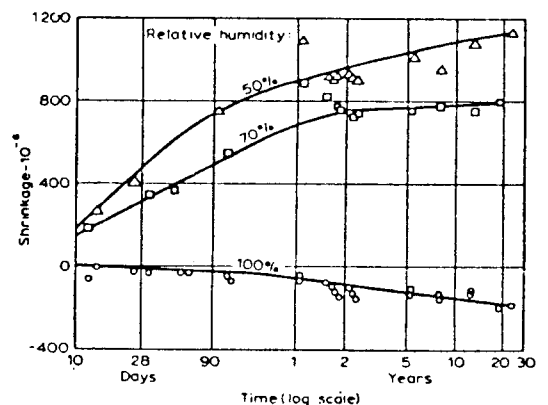


그림 6 상대습도의 영향

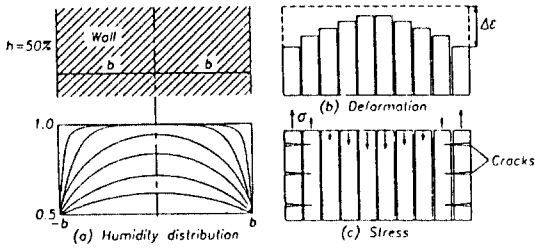


그림 7 부재의 두께에 따른 불균등 수축

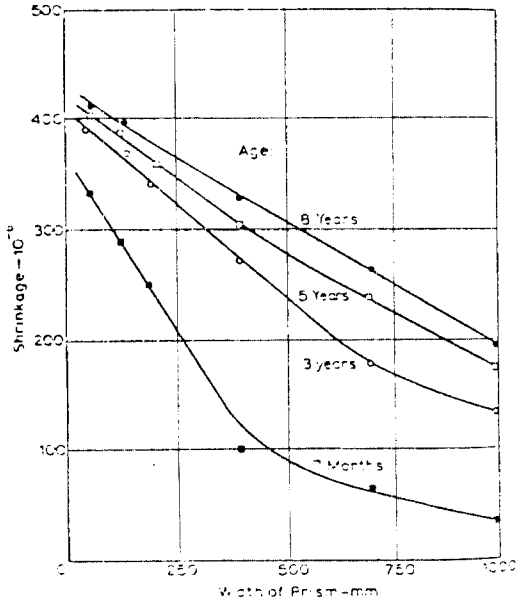


그림 8 부재 크기의 영향

나타나듯이 건조하거나 포화되지 않은 공기중에 놓인 콘크리트는 수축현상을 보이나 상대습도 100%인 물이나 공기 속에서는 팽창함을 알 수 있다.

수축변형을 일으키는 원인이 되는 구속력은 골재와 철근의 보강 등에 의한 내부의 구속뿐만 아니라 그림 7과 같이 콘크리트 부재 자체 내의 불균등 수축에 의해서도 발생한다. 수분의 손실은 표면에서 일어나므로 내부와의 수축변형에 불균형이 생기며 표면에는 인장력이, 중심부에는 압축력이 유발된다. 이러한 불균등 수축에 의해 유발되는 응력은 점차적으로 생기므로 크리이프에 의해 완화되기도 하나 심한 경우에는 표면에 균열이 발

생된다. 콘크리트의 건조는 표면에서부터 시작되므로 수축변형은 부재의 크기와 형상에 따라 상당한 차이가 있으며 그 영향은 표면 대 부피 비의 함수로 표시할 수 있다. 많은 연구자들에 의하면 그림 8과 같이 부재 크기가 커짐에 따라 수축변형은 작게 일어나며 어느 크기 이상에서는 처음에는 크기 효과가 작게 일어나다가 나중에는 현저하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

혼화제를 사용하는 경우 장기변형의 증가를 가져온다는 실험결과가 있기는 하나 그 영향에 대하여 구체적으로 정확한 판단을 내릴 수 없는 실정이며, 특히 고강도, 유동화 콘크리트등에서 혼화제를 사용할 경우 장기변형에 대한 세심한 검토가 있어야 한다. 시멘트의 성질은 수축변형에 거의 영향을 미치지 않으며 순수 시멘트 풀의 수축변형이 크다고 해서 그것으로 만들어진 콘크리트의 수축변형이 반드시 큰 것은 아니다.

2.2.2 탄화수축변형(carbonation shrinkage)

이는 건조수축의 특수한 경우로 간주할 수 있으나 수분 손실에 관한 반응 메카니즘이 상이하므로 별도의 중요성을 가진다. 탄화작용은 대기중에 이산화탄소(CO₂)가 수화된 시멘트 광물입자와 반응하는 것을 말하며, 특히 높은 물-시멘트 비에서

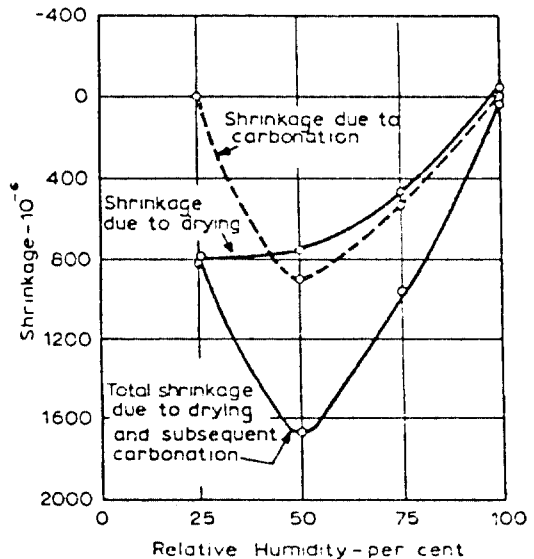


그림 9 상대습도와 탄화수축, 건조수축과의 관계

이산화탄소 농도가 증가할수록 탄화율은 높아지고 그림 9에서와 같이 상대습도의 함수로 표현된다.

높은 상대습도에서는 공극이 물로 가득차 있어 이산화탄소가 시멘트 풀로 잘 침투하지 못해 탄화작용이 느리며, 매우 낮은 상대습도에서는 수막(water film)이 없어 탄화반응율을 감소시키기 때문에 탄화작용은 느리게 된다. 탄화율은 콘크리트의 수분함량, 주위의 상대습도, 부재의 크기 등에 영향을 받으며 근사적으로 시간의 제곱근에 비례한다.

2.2.3 크리이프

크리이프는 하중에 의한 변형에 대하여 시간에 따라 증가되는 변형도로 극한 크리이프 변형도는 초기 변형도(instantaneous strain)의 2~5배 정도이나, 1년 경과후의 크리이프 변형도는 초기 변형도의 1.0~1.5배 정도이다. 그러나 부정정 구조물과 같은 경우에는 응력의 재분배가 이루어져 반드시 위와 같이 말할 수는 없다. 철, 암석, 플라스틱 등과 같은 구조 재료도 어떤 특정한 하중 상태나 환경 하에서는 크리이프 현상을 보이기도 하나 콘크리트는 비균질적인 재료 특성을 가질 뿐만 아니라 현장에서 직접 타설되는 경우가 많으므로 그 성질에 많은 변화가 뒤따를 소지가 다분히 있게 된다.

콘크리트의 크리이프에 영향을 미치는 인자들은 골재, 작용응력 및 콘크리트의 강도, 혼화제 및 시멘트의 종류, 상대습도, 부재의 크기 및 온도 등이다. 골재는 실제의 크리이프 현상을 보이는 시멘트 풀에 대하여 일차적인 구속 역할을 한다. 보통 무게의 골재는 크리이프 변형을 일으키지 않으므로 콘크리트의 크리이프는 그림 10과 같이 시멘트 풀 양의 함수로 볼 수 있다. 크리이프에 영향을 미치는 골재의 물리적 성질중 가장 중요한 것은 탄성계수이며 이것이 클수록 골재에 의한 크리이프 구속효과가 커지게 된다.

많은 실험결과, 크리이프와 응력은 타설 초기에 일찍 재하한 경우를 제외하고는 선형관계를 가지는 것으로 알려져 있었으나 최근의 연구에 의하면 그림 11과 같이 비선형 관계식으로 더욱 잘 표현

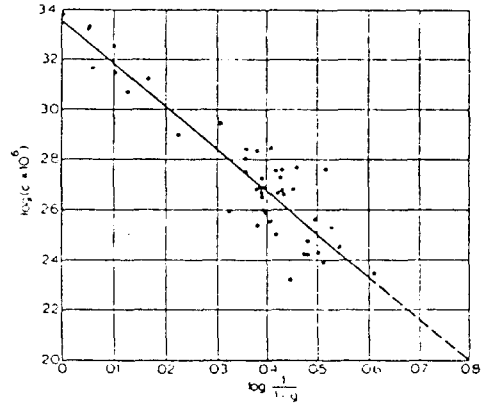


그림 10 골재 함량과 크리이프

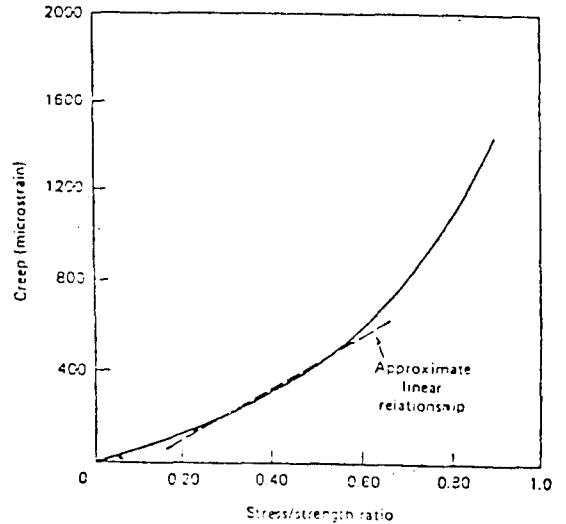


그림 11 응력-강도 비와 크리이프

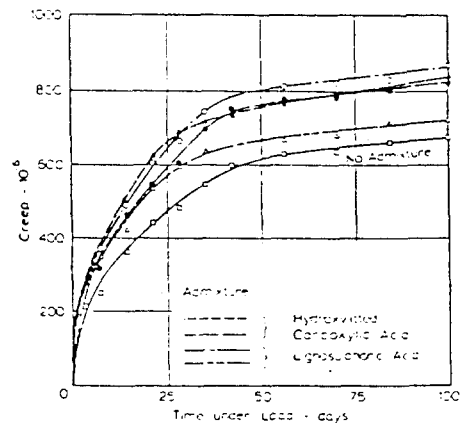


그림 12 혼화제의 영향

됨을 보이고 있다. 응력-강도 비가 0.3~0.6 정도인 압축력이 작용하는 경우 콘크리트에 미세균열이 발생하며 균열생성 정도는 콘크리트의 비균질성 정도에 좌우된다.

그림 12와 같이 감수제나 응결지연제를 사용하면 대체적으로 크리이프가 증가하는 것으로 알려져 있으며, 따라서 주어진 구조물에서 크리이프가 중요한 변수가 되는 경우에는 혼화제의 영향에 대해 주의 깊게 조사해 볼 필요가 있다. 한편, 콘크리트의 초기 및 장기강도의 발현율과 그 크기 등은 시멘트의 종류에 따라 다르므로 크리이프의 변화는 강도의 변화에 의한다고 볼 수 있고, 그림 13에서 시멘트의 분말도가 초기강도 발현에 영향을 미치는 것은 하나 그 자체가 하나의 요인은 아니고 분말도가 높을수록 콘크리트의 강도 증진이 크며 결과적으로 응력-강도 비가 떨어지기 때문인 것으로 생각된다.

상대습도는 환경에 의한 요인중 가장 중요한 것으로 상대습도가 낮을수록 크리이프 양이 커진다. 그림 14에서 보는 바와 같이 재하 초기에는 습도 변화에 따른 크리이프 율의 차이가 현저하게 나타나나 나중에는 비슷한 크리이프 율을 보이고 있다. 이처럼 하중작용시의 건조는 콘크리트의 크리이프를 증가시키게 되고 부가적인 건조 크리이프(drying creep)를 발생시킨다.

부재의 크기가 증가할수록 크리이프는 감소하는데 이는 건조수축에서와 마찬가지로 부재의 내부와의 불균등 현상에 기인하며 그림 15와 같이 표면 대 부피의 비로 표시할 수 있다. 크리이프에서 부재의 형상은 크게 중요한 요인이 아니며 건조수축의 경우와 비교하여 볼 때 훨씬 작은 변화를 보인다.

2.2.4 알칼리-골재 반응

알칼리-골재 반응이란 콘크리트 중에 존재하는 나트륨, 칼륨과 같은 알칼리 이온과 자갈, 모래 등의 골재가 수분의 공존하에 장기적으로 서서히 새로운 물질을 생성하는 반응을 말하며 반응 생성물은 수분을 흡수·팽창하여 콘크리트에 균열을 발생시키고 심한 경우에는 콘크리트를 붕괴시키기도 한다. 알칼리-골재 반응은 알칼리와 반응하

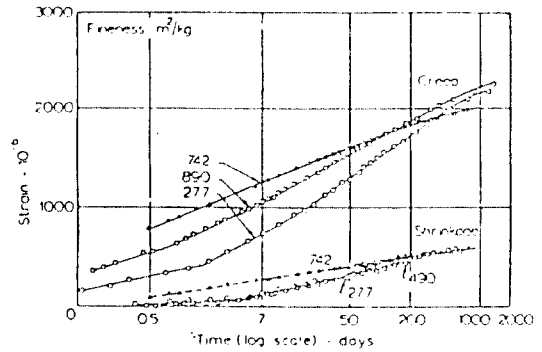


그림 13 시멘트 분말도의 영향

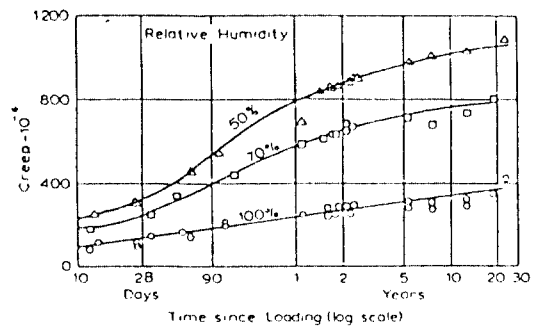


그림 14 상대습도의 영향

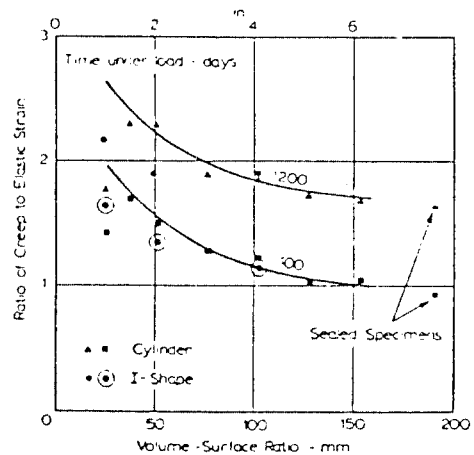


그림 15 부재의 크기 및 형상의 영향

는 골재중 광물의 종류에 따라 반응기구가 다르며, alkali-silica 반응, alkali-carbonate 반응, alkali-silicate 반응으로 대별된다. 이중 alkali-silica 반응에 의한 피해가 대부분을 차지하고 있으

며 알칼리-골재 반응이란 용어를 사용할 때는 alkali-silica 반응만을 칭할 때가 많다.

(1) Alkali-silica 반응

콘크리트 중에 존재하는 알칼리 이온 및 수산기 이온이 골재 중에 포함되어 있는 비결정질 실리카 혹은 열역학적으로 준안정인 실리카와 결합하여 생기는 화학반응으로, 이 화학반응에 의해 생성된 알칼리-실리카 겔이 주위로부터 수분을 흡수함으로써 콘크리트 내부에 팽창압을 발생시켜 콘크리트에 팽창성 균열을 일으키고 콘크리트의 강도 저하를 가져온다. 이러한 팽창에 영향을 미치는 주요한 인자로는 골재의 입경 혼입율, 시멘트의 알칼리 양, 습도, 온도 및 물시멘트 비 등이다.

(2) Alkali-carbonate 반응

이 반응은 시멘트 내의 알칼리와 limestone 골재와의 반응이며, 이 반응과정에서 $Mg(OH)_2$ 또는 콜로이드 물질을 생성하므로써, 혹은 암석중에 존재하는 점토광물의 흡수에 의해서 발생된다.

(3) Alkali-silicate 반응

예를 들어 캐나다 Nova Scotia 지방의 Greywackes, Argillites, Phyllite 등과 같은 어떤 특정한 골재를 사용하였을 때 일어나는 반응으로, 이 골재를 장기간 알칼리 용액 중에 담가두면 암석중에 존재하는 점토광물의 기저 격자면 간격이 10\AA 에서 12.6\AA 으로 늘어나는데, 이로부터 암석중에서 층상구조를 갖는 점토광물이 알칼리와 수분의 공존하에 팽창하는 현상을 말한다.

2.2.5 온도

경화된 콘크리트의 열팽창계수는 평균 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이므로 대기온도의 변화에 따라 대기에 노출된 콘크리트 구조체에는 열 팽창 또는 수축에 의한 체적변화와 함께 처짐이나 변형이 생기게 된다. 이러한 외부의 열에 의한 체적변화가 건조수축의 경우와 같이 다른 구조체의 제약을 받게 되면 내부응력이 발생하게 되어 균열을 일으킨다. 고온으로 올라갈수록 콘크리트의 강도는 낮아지며 연성은 증가하고 탄성계수가 감소한다. 또한 균열에 대한 저항능력이 파괴에너지가 온도가 올라감에 따라 현저히 감소하는 경향을 보이기 때문에 고온 하에서의 콘크리트는 더욱 쉽게 균열이

유발된다.

한편 고온의 열이 집중적으로 임의의 특정 부위에 가해질 경우 그 부위의 콘크리트는 폭발적인 파쇄(spalling)가 일어날 수 있다. 이러한 현상은 슬래브와 같은 얇은 부재와 벽체와 같은 두꺼운 부재에 대하여 실험적으로도 증명되었다. 파쇄가 일어나는 이론적인 이유는 다음과 같은 두가지로 설명될 수 있다.

(1) 갑작스러운 가열로 인하여 열을 받은 부분은 팽창하나 아직 가열되지 않은 그 주위의 콘크리트는 그 팽창을 구속하므로써 표면에 나란한 방향으로 큰 압축력이 유발되고 이로 인하여 압축파쇄가 일어난다.

(2) 가열에 의하여 콘크리트는 공극 내의 수분이 증기로 변화하여 고압력을 발생시킴으로써 콘크리트 내부의 미세구조에 인장력을 일으킨다. 그러나 표면과 나란한 방향으로는 이를 상쇄할 압축력이 구속에 의하여 유발되나 표면방향으로는 이 인장력을 상쇄할 압축력이 작용하지 않으므로 파쇄가 일어난다.

2.2.6 철근의 부식

철근의 부식은 화학작용에 의한 부식과 전류의 작용에 의한 부식으로 크게 나누어진다. 화학작용에 의한 부식은 순환하는 공기나 물의 작용으로 철근을 보호하는 피복 콘크리트의 알칼리 성분이 중화될 때에 일어난다. 외부의 산성 성분이 철근과 작용하여 산화물을 만들때 그 체적은 원래보다 약 2~3배 정도 증가하기 때문에 그림 16과 같이 콘크리트의 피복이 균열되며 균열된 콘크리트 사이로 철근은 외부와 더 쉬운 접촉을 하여 부식작용이 점차 가속되게 된다. 한편, 수분을 포함한 콘

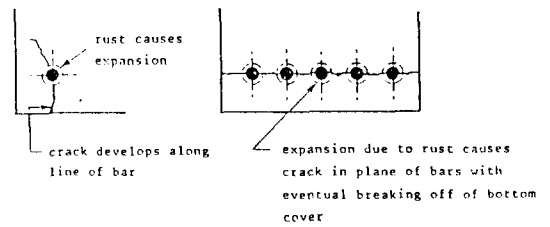


그림 16 철근의 부식에 의한 균열

크리트는 전도체가 되어 누전 등에 의하여 전류가 통하여졌을 때에 전기화학작용을 일으켜 부식하게 된다. 이러한 작용에는 황산, 염산, 탄산 등이 특히 유해하기 때문에 콘크리트 배합시 해수는 사용하지 않는 것이 바람직하다.

2.2.7 동결융해

콘크리트는 다공질이므로 습기나 수분을 흡수한다. 결빙점 이하의 온도에서는 흡수된 수분이 얼면서 팽창하기 때문에 정수압이 생기면서 콘크리트의 표면에 균열을 발생시킨다. 온도가 상승하여 얼었던 부분이 녹으면 균열된 표면이 부분적으로 떨어져 나가게 되며 이러한 현상이 수차 반복되면 콘크리트 표면이 분열하게 된다. 동해에 의한 피해 형태로는 표면의 피상 박리(spalling), 원추상의 박리(pop out), 작은 구멍 형성(pitting), 부분적 박리(scaling), 부서부서해지는 현상(degradation), 부분적 불연속상태에서의 파괴(cracking) 등이 있다. 동해에 의한 콘크리트의 열화는 기상작용의 영향에 좌우된다. 동해의 직접적인 유발원인의 하나인 수분은 겨울철의 강우 및 강설에 의하여 보급되며, 이 수분이 콘크리트 내부로 침투하였을 때 동결이 일어나고 또 낮시간의 일사에 의하여 콘크리트의 표면온도가 상승하여 동결과 융해가 반복되게 된다. 기상조건이나 구조물의 입지조건으로부터 물과의 접촉이 피할 수 없는 경우에는 이러한 물을 콘크리트 내부에 가능한 한 침투하지 못하게 하는 대책이 필요하다. 수분 침투의 정도는 콘크리트 자체의 수밀성에 의하여 정해지며 또한 이것에는 사용재료, 배합조건, 양생 등의 많은 요인이 작용한다. 양질의 골재를 사용한 보통의 콘크리트에서 동해의 원인이 되는 수분이 존재하는 공간과 이 압력을 완화하는 공기가 존재할 수 있는 공간은 주로 시멘트의 경화체 부분에 있으며, 이러한 공간의 특성, 즉 시멘트 경화체의 공극특성이 동해를 지배하게 된다.

2.2.8 사용하중(service load)

구조적으로 올바르게 설계, 시공된 구조물이라 할지라도 사용 하중이 재하함에 따라 균열이 발생하게 된다. 이는 콘크리트 구조물에서는 필수적으

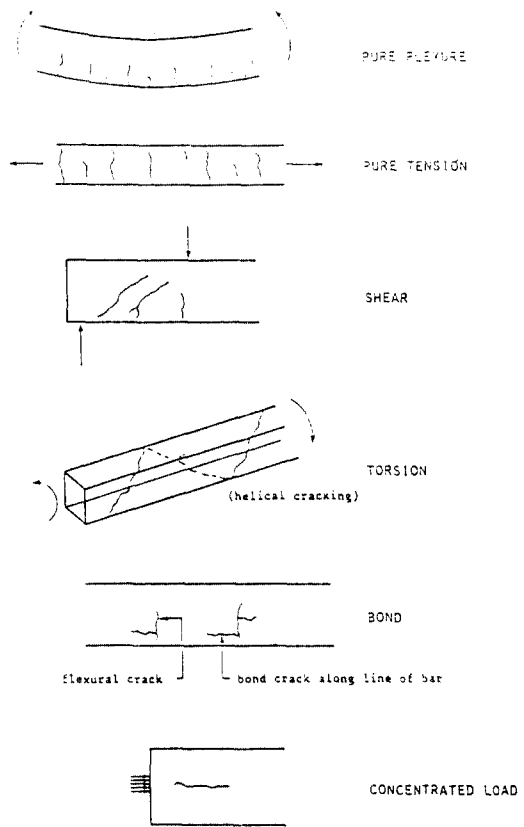


그림 17 사용하중에 따른 균열 형상

로 발생하는 것으로서, 균열이 발생한다는 그 자체에는 아무런 문제가 없으나 발생된 균열의 위치, 크기, 진전여부 등에 따라 주의깊게 살펴보고 균열을 고려한 구조해석을 실시하여 그 안전성 및 사용성, 혹은 보수여부를 결정하여야 한다. 일반적으로 구조물에서 작용하는 여러가지의 하중상태에 따라 발생하는 균열의 형태는 그림 17과 같으며, 특히 충격하중, 피로하중 등에 대한 고려가 매우 중요하다.

2.3 설계 및 시공 불량

2.3.1 설계 및 상세 오류

부재 특성과 전체 구조체의 구조 거동에 대한 완전한 이해가 되어 있지 않은 설계와 상세에서는 응력집중이나 구조 일체성의 결여 등의 바람직하

지 않은 현상으로 구조체에 균열을 가져오게 하는 일들이 있다. 특히 특수 구조체나 특수 하중이 작용하는 경우에는 이에 맞는 설계와 상세의 중요성이 한층 더 강조된다. 이러한 점들이 충분히 고려되지 않은 구조체에서는 균열이 심각한 문제로 부각될 것이다.

2.3.2 시공 불량

시공 불량 중 가장 흔한 것이 작업성을 좋게 하기 위하여 콘크리트에 물을 붓는 일이다. 최근 콘크리트 펌프의 사용이 보편화되면서 레디 믹시드 콘크리트에도 물을 더하는 경우가 있으나, 첨가된 물은 콘크리트의 강도를 저하시키고 재료 분리를 조장하며 최종적으로 건조수축을 증가시킨다. 강도저하를 줄이기 위하여 시멘트 함량을 늘릴 경우에는 수화열이 높아져 온도응력에 의한 균열을 증가시키는 결과를 초래한다. 또한 충분치 못한 양생은 시공과정에서 균열을 발생시키는 또 하나의 중요한 원인이 된다. 양생기간이 짧으면 콘크리트 강도가 낮을 때 수축을 증가시키며, 충분한 습도를 공급하지 못하면 건조에 의하여 수화작용이 원활하지 못하여 강도 저하와 내구성 부족을 초래하게 된다. 이외의 주요 시공상의 문제점들은 기포 집 지주 설치의 불량, 부적당한 다짐, 응력이 집중되는 곳에서 시공 조인트의 설치 등이며, 이러한 시공 불량은 재료 분리와 콘크리트의 균열을 발생시킨다. 모든 균열의 가장 큰 원인은 이 시공 불량이다.

2.3.3 시공하중

시공과정에서 부재가 받는 하중이 설계 하중보다 클 경우에는 이에 의한 균열이 발생한다. 이러한 일들은 현장 콘크리트의 초기 과정이나 프리캐스트 부재의 운반·조립 과정에서 생기기 쉬우며 영구적인 균열로 남는 경우도 있다. 보와 판넬과 같은 프리캐스트 부재에서는 운반 조립 작업에서 임의대로 편리하게 들어 올리는 점을 택하는 경우 부재의 자중에 의한 휨 모멘트로 심각한 손상을 받을 수 있기 때문에 주의깊게 이를 고려하여야 한다. 기중기 등으로 부재를 들어 올릴 때에도 갑자기 정지하면 그 충격 효과가 부재 자중보다 몇 배 더 큰 경우가 있기 때문에 이러한 일들을 기중

기 운전자에게 주지시켜야 한다. 프리캐스트 부재와 같은 큰 부재를 운반할 때에 예기치 않은 돌출부나 고속도로의 우각부에서 운반차량의 가속도와 부재 자중에 의한 추가 하중이 더해지므로 주의하여야 한다.

한편 프리텐션 보에서는 긴장 완화시에 균열을 유발시키는 수가 있다. 긴장용 철근이 많이 사용되는 경우에는 부재에 편심하중이 생기지 않도록 시방된 순서에 따라 인장력을 풀어야 하며, 한쪽 단부는 인장력이 완전히 풀렸는데 다른쪽 단부는 그대로 인장되고 있을 때에는 인장되는 단부에 균열이 생길 수 있으므로 이러한 점에도 주의를 기울여야 한다. 이외에도 고려되어야 할 시공 하중의 문제점들은 증기양생되는 콘크리트의 열 충격에 의한 균열, 두꺼운 프리캐스트 부재의 급격한 냉각에 의한 표면균열, 냉한기 현장 콘크리트 공사에서 난방기구 사용에 의한 열 응력, 부재의 하역 및 저장, 시공 기계의 운용중에 생기는 시공 하중 등을 들 수 있으며 이에 대하여 설계 및 상세에서 충분한 고려가 있어야 한다.

3. 결 론

이상에서 콘크리트에 발생하는 균열에 대한 각종 원인들에 대하여 살펴 보았다. 물론 위에서 언급한 내용 이외에도 여러가지의 균열발생 원인들이 있을 수 있겠으나 기본적으로 근간이 되는 것들만을 정리하였다. 실제로 구조물에 균열이 발생할 경우 어떤 임의의 한가지 원인 만에 의하여 균열이 발생하는 경우는 극히 드물며 일반적으로 몇 가지 원인들의 조합된 형태로 발생하게 된다. 그러나 실제로 이러한 모든 원인들을 고려한 해석의 수행이 거의 불가능하기 때문에 구조물에 가장 큰 피해를 주는 균열의 원인을 파악하고 이를 위주로 구조물 해석을 실시하는 것이 효과적이고 일반적인 방법이며, 이때 책임자의 적절한 판단이 필수 불가결한 요인이 된다. 끝으로 서둘러 준비하여 정리되지 못한 못한 점 독자의 이해를 구하고자 한다. □