

콘크리트 균열의 발생 원인과 대책 I

9월 연재	1. 서 론 2. 콘크리트의 균열과 내구성 3. 콘크리트의 재료 조건에 의한 균열 3.1 소성수축균열 3.2 침하균열
10월 연재	3.3 건조수축균열 3.4 수화열에 의한 균열 4. 결 언

1. 서 론

최근 건설의 활성화에 따라 대량의 토목 및 건축구조물이 건설되어 있으나 부적합한 재료의 사용과 부실 시공 및 시공 후의 유지관리 미비로 인하여 구조물이 소기의 내구년수를 채우지 못하고 시공 후에 보수비가 많이 들어간다거나 균열의 발생 등 조기 열화현상이 많이 발생하고 있어 이를 우려하는 소리가 높다.

철근콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 구조물의 외관, 내력, 수밀성 등 여러 성능 저하에 원인이 된다는 이미 알려져 있는 사실이다. 이에 대한 균열대책의 필요성은 오래 전부터 문제시되어 왔으나, 그 발생 메카니즘이 매우 복잡하고 여러 성질이 다른 재료가 혼입되어 생성된 재료적 특성 등의 이유로 충분한 해결책을 얻지 못한 채 오늘에 이르게 되었다. 최근 들어서는 철근콘크리트 구조물의 설계법, 재료사정, 시공기술, 사용환경 조건의 진보 혹은 변화에 따라 더욱이 균열에 대한 관심이 고조되고 있고 그 대책이 강하게 요망되고 있다.

특히, 연이은 대형건설사고의 발생으로 인하여 과거 국가경제의 고도성장정책에 따라 지어진 구조물의 유지관리 및 보수문제가 큰 이슈화되고 있다. 우리 주위의 건축물과 토목구조물 등의 사회간접자본은 대부분이 철근콘크리트 구조물로 축조되어 있으며, 21 세기의 고도선진국가로 진입하는 데 있어서는 이와 같은 사회자본의 안정적인 축적이 필요 불가결한 것이다. 실질적으로 적절한 설계와 시공, 재료를 사용하고 적절히 유지관리를 수행한다면 콘크리트의 수명은 반영구적인 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 구조물의 현황을 살펴보면 제 외국에서는 콘크리트 구조물의 조기열화현상이 발생하여 사회적으로 문제화되고 있고 국내에서도 대형 구조물 붕괴와 외국과 유사한 문제점이 발견되고 있어 이에 대한 원인과 대책에 대해 심도있는 연구와 지식확보 및 사전대비는 절실하다고 하겠다.

국내 구조물의 대부분을 차지하고 있는 철근콘크리트 구조물에 균열발생이 많다거나 조기열화 하는데 대한 배경을 콘크리트 구성재료 및 시공적인 측면에서 살펴보면,

첫째 : 신도시 건설 등 건설 활성화에 따라 다량의 골재가 요구되고 있으나 천연골재의 고갈 또는 채취 규제로 인하여 골재의 종류가 다양화되거나 이에 따라 골재 품질이 저하되었다

둘째 : 시멘트 제조방식이 과거 습식공법에서 에너지절감 및 환경규제로 인하여 건식공법으로 전환함에 따라 시멘트의 품질 변동이 심화되었다.

셋째 : 콘크리트 기술의 분업화에 따라 품질관리가 어려워졌고 시공의 능률화에 따라 콘크리트 타설을 대부분 펌핑에 의존함으로써 콘크리트의 단위 수량이 증가하였다

넷째 : 콘크리트 강도 위주의 설계로 내구성에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않았고 콘크리트구조물에 대한 유지관리가 이루어지지 않았다.

2. 콘크리트의 균열과 내구성

유해한 균열은 부재가 과도하게 처지는 원인이 되며, 내부 철근의 부식발생을 촉진하여 철근콘크리트 구조물의 내력 또는 내구성을 저하시키고, 누수현상을 일으키거나 혹은 외관을 현저하게 손상시키게 된다. 여기에서 균열폭 (보통은 콘크리트 표면에서의 폭을 가리킴)의 대소가 문제화되는 경우가 많으며 폭이 큰 것일수록 유해성이 큰 균열이라고 할 수 있다. 철근의 부식에 의해 지배되는 내구성 관점에서 보면 유해성 판정에 이용되는 허용 균열폭은 환경조건 등에 따라 일률적으로 말할 수 없으나 대략 0.1~0.4 mm 정도이다. 여기에 비하여 방수의 관점에서 살펴보면 일반적인 두께의 지붕슬래브 콘크리트인 경우에 0.03~0.06 mm로 내구성의 경우에 비하여 비교적 엄격한 편이다.

철근콘크리트 구조물의 내구성에 관련된 성질과 콘크리트 균열과의 상관관계를 그림으로 나타내면 그림 1 과 같다. 균열은 직접적으로나 간접적으로 RC 조의 내구성에 커다란 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다.

3. 콘크리트의 재료조건에 의한 균열

일반적으로 구조물에 외력이 작용하게 되면 구조물 내부에 응력이 발생하게 되고 그 응력에 의해 변형이 발생한다. 그러나 응력이 구조물이 허용할 수 있는 강도를 초과하였을 때에는 균열이 발생하게 되며, 그 균열은 계속적으로 진행하고 폭이 커짐에 따라 최종적으로는 구조물이 파괴에 이르게 된다. 특히, 시멘트를 주성분으로 하고 있는 모르타르나 콘크리트는 유리나 석영 등의 부류에 속하는 완전취성재료는 아니지만 취성재료에 가까운 깨지기 쉬운 재료로 압축에는 매우 강하나 인장에 대해서는 매우

취약하고 여러 재료를 혼입하여 생성한 복합재료이기 때문에 균열의 발생원인도 매우 복잡하다. 콘크리트 구조물에서 발생하는 균열의 발생원인을 크게 분류하면 재료에 의한 요인, 시공에 의한 요인, 사용 환경에 따른 요인, 외력·하중에 의한 요인으로 나눌 수가 있다.

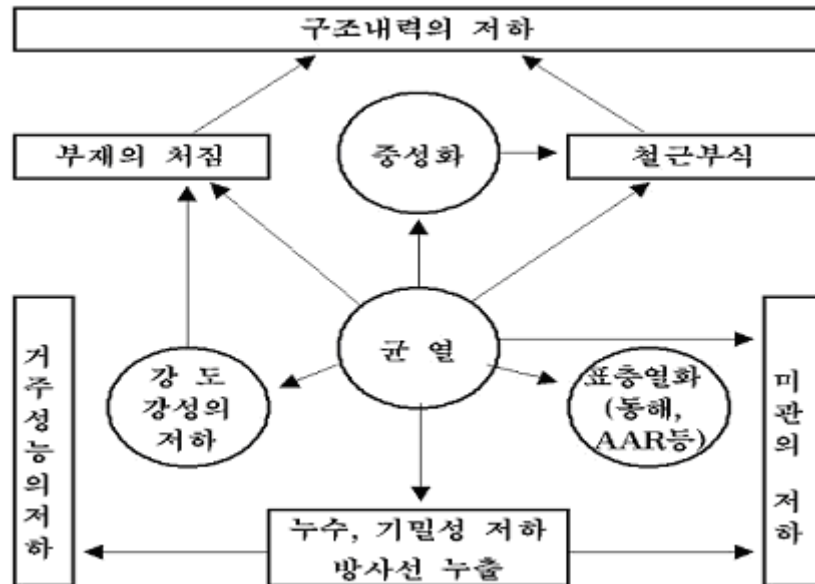


그림 1. 콘크리트 내구성 저하에 미치는 균열의 영향

콘크리트의 품질은 콘크리트가 놓여지는 환경과 외부로부터의 작용 등이 원인이 되는 외적요인과 콘크리트 자체의 물성변화가 원인이 되는 내적요인에 의해 점차적으로 열화해 간다. 실제의 콘크리트는 개개로 독립된 요인에 의하여 그 기능이 저하하는 경우는 극히 드물며 외적요인과 내적 요인이 서로 상승적으로 작용하거나 여러 개의 요인이 동시에 복합적으로 작용하여 균열발생 등 열화가 진행하게 된다. 그 일례를 살펴보면 콘크리트를 구성하는 주요 재료중의 하나인 시멘트는 물과 반응하므로써 다량의 열을 발산하게 되고 이 열이 콘크리트 내부에 내재하고 있는 상태에서는 팽창을 하게 된다. 그러나 응결, 경화과정에서 서서히 콘크리트에 있는 열은 외부로 발산하게 되고 그로 인해 콘크리트는 수축과 동시에 인장응력이 작용하게 되므로 콘크리트에는 균열이 발생하게 된다. 여기까지의 과정은 균열이 발생될 수 있는 내적요인이라 할 수 있으나 외부의 온도나 습도 변화로 인해 이러한 수축이 급속도로 이루어지거나 반복적으로 작용할 경우에는 균열발생은 가속화된다. 그 이외에도 내부 철근의 부식, 중성화, 염해의 경우는 환경적인 외적요소로 콘크리트의 열화현상이나 균열을 유발하기도 하고 내적요소에 의해 이미 균열이 존재하는 경우에는 외적요소와 상호작용하여 구조물을 최종적으로는 붕괴에 이르게 한다.

표 1. 콘크리트의 내구성에 미치는 환경조건

작용의 종류	영 향 인 자	콘크리트의 내구성
기상작용	온도 및 그 변화 건습의 반복 동결융해의 반복(동결융해 작용) 공기중의 탄산가스	내후성 중성화
물리적 작용 (기계적 작용 포함)	단기, 장기의 가열 전류의 작용 염분의 침입 마모 캐비테이션	내화성, 내열성 전식 철근의 부식, 수밀성 내마모성
화학작용	화학적약품(유기·무기산) 화학적약품(염류) 해수(염분) 가스, 유지	내화학적약품성 내황산염성 내해수성, 강제의 부식

표 2. 콘크리트의 재료조건에 의한 균열의 원인과 특징

번호	원 인	열화 내용	균열의 특징	균열대책의 구분	
				기본 대책	특수 대책
1	시멘트의 이상응결	—	폭이 크고, 길이가 짧은 균열이 비교적 빠른 시기에 불규칙적으로 발생	○	
2	시멘트의 수화열	균 열	단면이 큰 콘크리트에서는 1~2주간 지난 후 직선모양의 균열이 거의 등간격으로 규칙적으로 발생. 표면만의 것과 부재를 관통하는 것이 있다.		○
3	시멘트의 이상팽창		방사형의 그물모양 균열	○	
4	골재에 포함되는 점토분			○	
5	저품질골재	popout, 취약화		○	
6	반응성골재	균 열	거북이등모양의 그물모양 균열 발생. 다습한 곳에 많다. popout현상도 동시에 발생	○	
	염화물(내적요인)	—	39의 균열발생	○	
7	침하	균 열	타설후 1~2시간경과후 철근상부나 벽과 슬래브 경계에서 단발적으로 발생	○	
8	블리딩	물곰보		○	
9	전조수축	균 열	2~3개월 경과후 발생하며, 점진적으로 성장. 개구부나 기둥, 보에 둘러싸인 구석에는 45°로, 세장한 바닥, 벽, 보 등에서는 거의 등간격으로 수직으로 발생.	○	
10	경년 열화	외장재의 열화		○	

표 1 은 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 외적요인 중 환경조건에 대하여 정리한 것이며, 표 2 는 재료 요인들에 의해 발생된 균열의 특징들에 대해 간단히 요약한 것이다.

3.1 소성수축균열

3.1.1 소성수축균열 발생기구

소성수축은 굳지 않은 콘크리트나 모르타르에 있어서 증발이나 누수에 따른 수량감소로 인한 수축과 시멘트의 수화반응이후 체적감소로 인한 수축에 의해 발생한다. 타설된 콘크리트에 포함된 수분은 대체적으로 시멘트의 수화반응과 블리딩이나 불완전한 거꾸집작업으로 누수가 발생하게 되면 감소하게 되는데, 이 때 낮은 습도에서 바람이 불거나 고온상태에서는 수분이 급격히 증발하여 블리딩 속도를 상회할 정도의 건조를 받게 되면 콘크리트는 매우 큰 수축을 하게 된다. 소성상태에서의 콘크리트는 거의 강도를 갖지 못하기 때문에 소성수축에 의하여 인장응력이 작용하게 되면 균열이 발생하게 되는데 이를 소성수축균열(plastic shrinkage cracking)이라 한다.

소성수축균열은 포장, 슬래브, 벽체 등과 같이 표면적이 넓은 구조물이나 사질토 지반 위에 설치된 기초 등에서 발생할 가능성이 크다. 실질적으로 소성수축균열과 증발량과는 밀접한 관계가 있는데 ACI 305R에 따르면 증발량이 시간당 1kg/m^2 을 초과하는 경우에는 소성수축균열이 발생할 가능성이 매우 높다고 보고하고 있다. 또한, 콘크리트 표면에는 요철이 있기 때문에 비표면적이 넓어 동일한 면적의 자유수면상의 수분증발량과 비교하면 약 5~10 배정도 큰 것으로 알려져 있다. 온도와 풍속이 높을수록, 상대습도가 낮을수록 증발은 빠르게 일어나며 이에 따라 소성수축균열이 발생할 가능성은 매우 높게 된다.

일반적으로 증발량을 추정하는 방법으로는 에너지보존법칙 및 공기역학 법칙을 응용한 경험 공식과 증발접시를 이용한 관측에 의한 방법 등이 사용되고 있다.

3.1.2 균열발생현상

소성수축균열은 콘크리트를 타설한지 2~4 시간 사이에 물광택이 표면에서 사라진 직후에 발생한다. 유동성을 잃어버리고 충분한 강도를 갖지 않은 상태에서 발생되므로 소성수축균열은 불규칙한 배열로 발생되며, 철근이나 골재입자를 따라 대부분이 슬래브 길이 방향에 직각으로 산재한다. 일반적으로 콘크리트 타설초기에 발생하는 균열로는 침하균열도 있으나 이 균열과의 구분은 콘크리트의 침강이 종료된 전후로 판별하며 대략 블리딩의 존재 유무로 균열의 종류를 구분한다.

소성수축균열은 발생기구 자체가 기상조건에 크게 영향을 받기 때문에 명확하게 균열크기를 규명하기 어려우나, 일반적인 경우로 폭은 헤어크랙부터 3mm 정도, 길이는 10~100cm, 깊이는 2~5cm 정도가 많다. 소성수축균열은 일단 발생하게 되면 균열을 없애는 것이 거의 불가능하며, 발생한 균열은 수분이나 염화물을 함유한 입자의 침투로 콘크리트의 열화 및 철근이 부식하게 되어 내구성의 손상을 가속화할 수 있다.

3.1.3 제어대책

소성수축균열을 방지하기 위한 방법 및 대책을 소개하면 다음과 같다.

가) 기후조건에 대한 사전대비

실질적으로 시멘트의 수화반응에 따른 수축은 기능상 불가피하나, 소성건조수축균열의 가장 큰 원인이 수분증발에 따른 수축에 기인하기 때문에 건조조건을 억제하면 어느 정도는 대비가 가능하다. 특히, 건조조건은 기상에 의해 크게 영향을 받기 때문에 전적으로 방지하기는 곤란하지만 급속 건조만이라도 방지한다면 균열발생을 크게 줄일 수 있다.

소성수축균열을 예방하기 위해서는 수분증발에 큰 영향을 주는 기온, 상대습도, 풍속을 일기예보를 통해 사전에 정기적으로 기록하는 것이 좋다. 이 요소들과 수분증발과의 상호관계를 살펴보면 다음과 같다.

- 기온 : 온도가 10℃에서 38℃로 상승하게 되면 증발속도는 약 7 배 증가한다
- 상대습도 : 상대습도가 90%에서 10%로 떨어지면 증발속도는 약 8 배 증가한다
- 풍속 : 풍속이 0 에서 11.2m/sec 로 증가하게 되면 증발속도는 약 9 배정도 증가한다

따라서 기상 데이터와 예상되는 콘크리트의 온도를 토대로 예상증발량과 콘크리트의 최대온도 제한치를 산정하고, 만약 예상증발량이 소성수축균열을 유발시킬 수 있는 임계증발량을 초과한다면 적절한 방호조치를 취한다. 그 외의 방법으로는 직접 증발접시를 사용하여 증발량을 산정한다.

나) 타설 전후 대책

증발량이 시간당 0.5kg/m^2 이상으로 소성수축균열이 발생할 가능성이 있는 조건에서 콘크리트를 타설할 경우에는 다음과 같은 조치를 취하는 것이 바람직하다.

- 사전에 높은 풍속이나 직사광선을 보호하기 위해 차양막이나 바람막이를 준비한다.
- 타설 후부터 양생을 개시하기까지의 시간을 가능한 한 단축시키도록 한다. 특히 표면마무리가 끝나면 곧바로 양생을 실시하여 수분증발을 피하도록 한다.

양생방법으로는 습윤양생과 피막양생이 있는데, 습윤양생은 콘크리트의 초기 건조수축을 최대한 줄이고 강도를 발현시킬 수 있는 최선의 방법이지만 표면적이 넓은 포장이나 슬래브를 시공하는 경우는 현장에서 적용하기 어려우므로 이 경우에는 피막양생제를 살포하는 피막양생법이 가장 실용적인 방법이다. 피막양생제는 표면마무리 이후 콘크리트 표면에 물광택이 사라진 직후 바로 살포하며 양생제가 날아가는 것을 방지하기 위해 스프레이노즐은 가능한 한 콘크리트 표면 가까이에 설치한다. 또한, 주의할 사항으로 콘크리트 이어치기할 부분에는 피막양생제를 살포하여서는 않된다.

- 서중콘크리트 공사시에는 콘크리트 타설직전에 연무노즐을 사용하여 거푸집이나 철근을 사전 냉각시켜야 한다. 가열된 거푸집이나 철근은 콘크리트의 온도를 상승시킬 수 있으며 높은 콘크리트온도는 증발속도를 가속화시킨다.

다) 배합조건

- 시멘트는 가능한 한 필요로 하는 적정 사용량 이상으로 하지 않도록 한다. 시멘트의 사용량이 증가하게 되면 동일한 물-시멘트비에 대해 배합수의 사용량이 증가하게 되므로 증발량이 증가하게 되어 균열이 발생하기 쉽다. .
- 배합수량을 줄이는 대신 작업성확보를 위해 감수제나 분산제를 사용하는 것이 바람직하다.
- 골재는 워커빌리티 확보를 위해 단위수량을 많이 필요로 하는 모가 난 골재나 미분말이 과대하게 포함되어 있는 모래 등은 가급적 피한다.

라) 소성수축균열 발생 후의 대책

일단 균열이 발생하면 콘크리트가 소성상태에 있을 때 (표면을 흙손으로 깎아서 다소 수분이 나오는 상태) 흙손으로 균열 주위를 두드리는 탬핑방법을 사용하면 소성수축 균열을 제거할 수 있다. 균열제거 후에는 표면을 마무리하고 즉시 양생포를 덮어 다시 소성수축균열이 재발생되지 않도록 한다.

3.2 침하균열

3.2.1 침하균열의 발생기구

콘크리트는 마무리작업이 끝난 뒤에도 계속해서 압밀되면서 침하하게 된다. 이 때 콘크리트의 침하가 철근이나 매설물 등 장애물에 의해 저해를 받게 되면 콘크리트의 표면부로 전단 또는 인장응력이 발생하여 장애물이 위치된 상면 콘크리트 표면을 따라 비교적 넓은 폭의 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열을 침하균열 혹은 침강균열이라 한다. 침하균열은 다음의 경우에 발생할 가능성이 높아진다.

- 잔골재량이 적고 단위수량이 큰 경우, 슬럼프가 클수록 발생될 확률이 높다. 골재의 입자가 크게 되면 침강속도가 증가하게 되며 단위수량이 많을수록 묽은 콘크리트가 되므로 콘크리트의 침하는 증가된다. 예를 들면 물-시멘트비가 40%에서 60%로 증가하면 침하속도는 2 배로 증가된다.
- 시멘트의 입도가 크고 응결시간이 늦어질수록 커진다.
- 사용된 철근의 직경이 클수록 콘크리트의 침하에 장애되는 부분이 커지므로 가능성은 높게 된다.
- 콘크리트 타설시 한번에 많은 량을 타설할 경우에는 증가된다.
- 거푸집이 마찰저항이 적다거나 수분을 많이 흡수하는 재질인 경우 혹은 시공불량으로 거푸집 틈 사이로 물이 빠져나가는 경우에는 수량감소에 따른 수축으로 침하가 촉진된다
- 다짐이 충분하지 못할 경우에도 침하는 증가한다.

일반적으로 1 회 타설 높이가 약 30~100cm 일 때 최종 침하량은 일반 콘크리트의 경우 타설 높이에 대해 약 0.6%~1.0%, 유동성이 좋을 콘크리트의 경우에는 2% 정도이라고 보고된 바 있으나, 이 영역에서는 콘크리트의 변형능력도 커지게 되므로 반드시 침하균열이 발생한다고 하기는 어렵다.

3.2.2 균열발생현상

침하균열은 콘크리트의 침하로 인하여 일반적으로 철근을 따라 균열이 발생하며 철근배근 하단에는 그림 2 와 같이 공동(공극)이 발생하기도 한다.

침하균열은 콘크리트를 타설한 후 1~3 시간이 경과하였을 때 발생한다. 부재의 두께가 다르거나 콘크리트의 타설 높이에 차이가 있으면 그 차이가 클수록 침하량이 커지고 경계면에서 침하균열이 발생한다. 일반적으로 콘크리트구조물에서 침하에 장애가 되는 요소로는 철근이고 철근은 규칙적으로 배근되기 때문에 침하균열은 대개 규칙적으로 발생한다.

3.2.3 제어대책

침하균열을 제어할 수 있는 방법을 기술하면 다음과 같다.

- 작업이 허용되는 범위에서 단위수량 및 슬럼프 크기는 가능한 한 작게 하고 다짐작업은 골고루 잘 다진다.
- 블리딩이 적은 배합이 되도록 한다.
- 가능한 한 경화속도가 빠르거나 점착력이 우수한 시멘트나 혼화제를 선정한다.
- 타설속도를 낮추고 1 회 타설높이를 낮게 한다

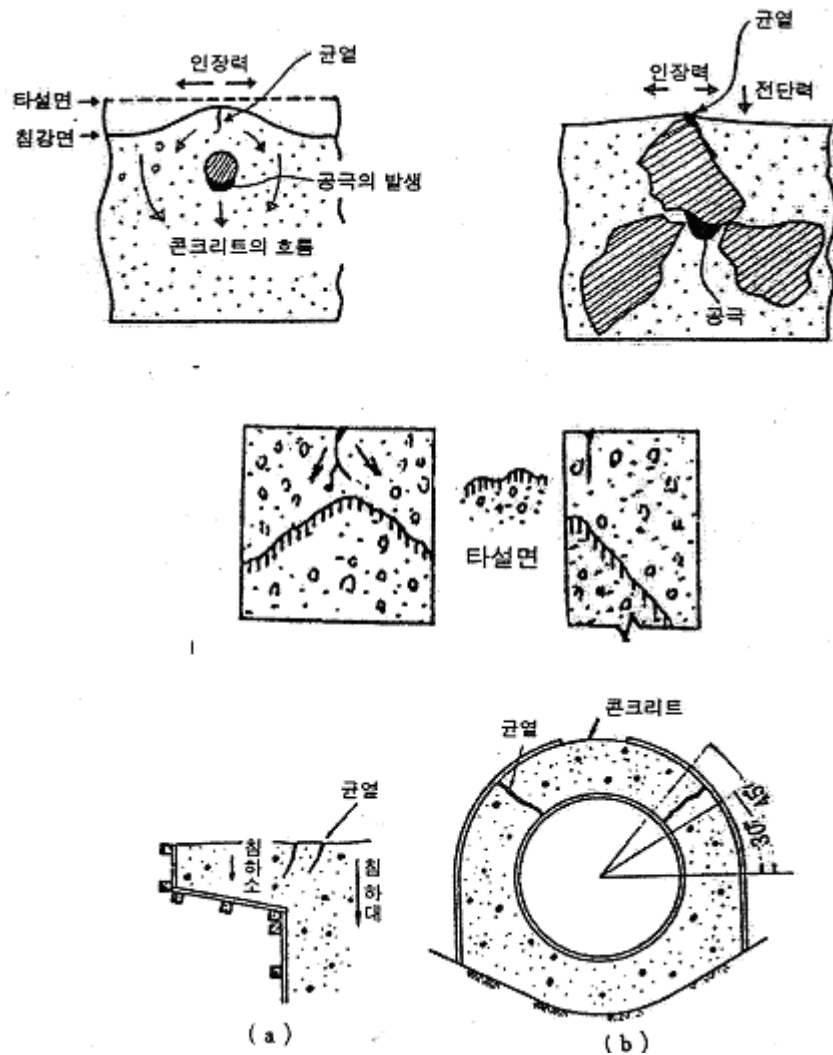


그림 2. 침하균열

- 철근의 피복 두께는 충분히 하고 배근된 철근이 헝크러지지 않도록 철근 배근시에는 충분히 결속시킨다
- 표면부는 잘 다짐하고 보의 밑 부분은 충분히 콘크리트가 압밀될 수 있도록 시간적 여유를 주는 등 시공방법에 주의를 기울인다.
- 균열이 발생하였는지는 수시로 검사하여 조기에 발견하도록 하고 균열이 발생하였을 때에는 각재 등으로 두드리거나(재타법) 흙손으로 눌러 균열을 제거한다. 재타법을 행하는 시기는 대기온도에 따라 다르나 일반적으로 하계의 경우는 타설 후 60~90 분 이내, 타계절의 경우는 90~180 분 이내에 행하는 것이 좋다.