

지반침하와 구조물 안정성 평가

조 현 / 토목기술부 과장, 조영호 / 토목기술부 사원

연재 순서

I. 지반침하

- 1) 침하의 원인
- 2) 침하 유형 및 특징
- 3) 침하의 메커니즘
- 4) 지하 굴착에 따른 지반거동

II. 구조물 안정성 평가

- 1) 지표침하의 주영향 인자
- 2) 지상 구조물의 안정성평가

터 널 등 지하구조물을 굴착하는 경우, 주변 지반의 변형 등이 뒤따르게 되고, 그 영향은 상부로 전달되어 지표에 침하를 발생시킨다. 지하 구조물 건설을 위한 굴착작업과 동시에 발생하는 지반의 변형은 건설 후에도 상당 기간 계속 진행되어 구조물의 안정성과 주변 지상 구조물의 안정성에 위협이 되는 요소이므로 구조물의 설계에 있어 신중히 검토되어야 한다.

통상 지하구조물 설계시에는 구조물 붕괴방지를 위한 대책으로 구조물 자체의 안정조건 (Stability Condition)을 고려하는 방법과 주변 지반 변위를 억제하는 대책으로 변위조건 (Displacement Condition)을 고려하는 방법 등이 있다. 주위에 건물 및 공공시설이 없는 경우에는 지하구조물 붕괴에 대한 안정조건이 설계를 지배하나 도심지 터널 굴착은 상부에 건물 및 지반내 매설관 등 지장물들이 있어 변위조건이 설계를 지배하게 된다. 최근에는 지하구조물의 수요가 급증하여 토피가 얇고 지반이 불안정한 지역이나 도심지 내의 굴착이 불가피하게 되었다. 특히, 지하구조물이 천부에 시공되고, 주위에 건물, 공공시설 등이 들어서 있는 도심지의 지하구조물 시공에는 토압에 따른 지하구조물 자체의 붕괴보다는 지하 굴착에 따른 지반의 침하로 발생하는 인접 구조물의 피해가 크므로 주로 지반거동, 특히 지표침하 거동에 중점을 둘 필요성이 있다.

따라서, 본고에서는 지하 굴착작업에 수반

되는 지반침하의 원인, 유형, 기본적인 메커니즘 및 굴착에 따른 일반적인 지반거동에 대해 논하고, 제 2편에서는 지반침하의 주영향 인자 및 건물의 안정성을 판단할 수 있는 기준 등을 제시하고자 한다.

침하의 원인

침하발생의 원인은 크게 3가지로 나눌 수 있으며, 각각을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 굴착으로 인한 응력개방과 이완대의 확대 공동을 굴착하기 이전에 평형상태에 놓인 지반에 공동을 굴착하면 응력이 교란되어 지반의 변형 및 이동이 생긴다. 이러한 현상은 공동주변에 이완대를 형성하고 이완대가 확대됨에 따라 지표침하가 발생하게 된다. 응력재분배가 어느 정도 이루어지면 침하량도 수렴하게 된다.
- 2) 지하수 유입에 의한 지반내 함수량 감소 지하수의 갭내 유입에 의한 지하수위 저하에 따라 토립자 자체가 압축되며, 지하수위가 물체력이 되어 지반의 변형을 가져오게 되어, 지하수 유출에 따른 간극수압의 감소로 지반내 유효응력이 증가하여 침하가 발생하게 된다.
- 3) 지반과 지보재의 상호작용 여굴발생에 의한 지반과 지보재와의 간극에 따른 지반의 변형, 지보의 변형과 지보재 자신의 자중에 의한 침하로 지반변형 조장.

굴착 막장의 전방 및 상부지반의 변형 등을 야기시킨다.

침하 유형 및 특징

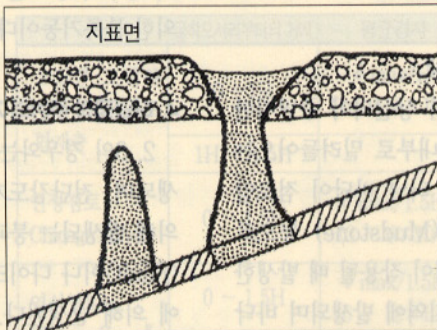
침하는 형태에 따라 연속 침하와 불연속 침하로 구별하며, 전통적인 트라프형(Trough) 침하가 연속 침하에 해당되며 불연속 침하는 함몰(Sinkhole) 침하가 대표적인 형태이다. 트라프형 침하는 넓은 지역에 걸쳐 연속적인 침하곡선을 발생시키며 그동안 영국과 미국 등의 탄광 지역에서 많이 나타난 현상이다. 반면에 함몰 침하는 좁은 구역에 국한되지만 일단 발생된 침하량은 매우 크며 침하곡선도 불연속적이 된다. 함몰 침하는 그 발생 위치와 시기, 침하량의 크기와 범위 등을 예측하기 어렵기 때문에 도로, 철도 등 지상 시설물 및 건물에 큰 피해를 줄 수 있는 침하 형태이다.

또한, 침하현상은 발생시기에 따라서 굴착 즉시 생기는 활동성 침하와 공동굴착이 완료된 후 지지력을 상실했을 때 발생함으로써 그 시기를 예측하기 어려운 잔류성 침하로 분류할 수 있다.

본고에서 침하의 유형은 잔류성 침하 또는 불연속 침하를 중심으로 설명한다.

1. Crown Hole

천부(심도 50m 이내) 터널의 천반이 붕괴되어 발생하는 Chimney Caving의 특별한 경우에 해당한다. 일반적으로 침하의 발생은



(그림 1) Crown Hole

굴착 상반의 두께에 의해서 제한을 받는다.(그림 1 참조)

영국 미드랜드의 석회암 광산에서는 30m 내의 심도에서 전체 침하발생의 2/3를 점유하였고, 또한 Gray와 Bruhn에 의하면 미국에서는 15m보다 낮은 심도에서 대부분의 침하가 이의 유형으로 발생되었다고 한다.

2. Pillar Collapse

광산의 천부에서 장기간 방치된 광주(Pillar)가 붕괴되면서 마치 (그림1)의 Crown Hole의 형태와 유사한 지표 침하 양상을 보인다. 광주가 붕괴되는 원인은 시간의 경과에 따라 광주의 변위가 진행되거나, 지표에 건설된 구조물의 하중이 광주에 부과되기 때문이며, 대규모의 광주가 붕괴되면 매우 심각한 영향을 넓은 지역에 미치게 되는 특징이 있다.

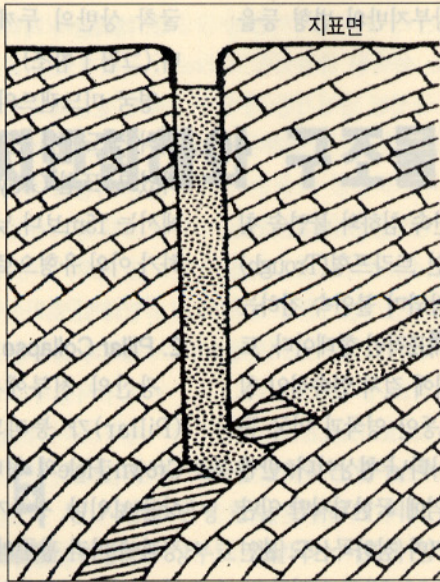
3. Chimney Caving (Sinkhole)

Piping 또는 Funnelling이라고도 하며 절리가 발달된 상반 또는 연약한 상반이 점진적으로 이완되어 공동이 발생하고 이것이 지표 쪽으로 전이되면서 나타나며, 수백 미터에 걸쳐 지표까지 전이되기도 한다.(그림 2 참조) 또한 암반내의 지하수위가 낮아져서 기존 공동의 지지력이 상실되면서 발생되기도 하며, 일반적으로 지표에 발생하는 침하의 면적은 매우 작다.

4. Plug Subsidence

다이크나 단층과 같이 거의 수직으로 서 있는 지질구조에 의해 발생하는 경우로 함몰 현상이 매우 갑작스럽게 나타난다.(그림 3 참조) 이 현상은 다른 함몰 침하의 발생 메커니즘과는 다르고 침하에 따른 암석의 체적팽창 없이 발생되므로 파단각이 90°에 가깝다. 기존의 침하가 발생되어 이미 파단면이 생긴 지역에 다시 발생되기도 한다.

침하발생의 원인은 굴착으로 인한 응력 개방과 이완대의 확대, 지하수 유입에 의한 지반내 함수량 감소, 지반과 지보재의 상호작용으로 나눌 수 있다.



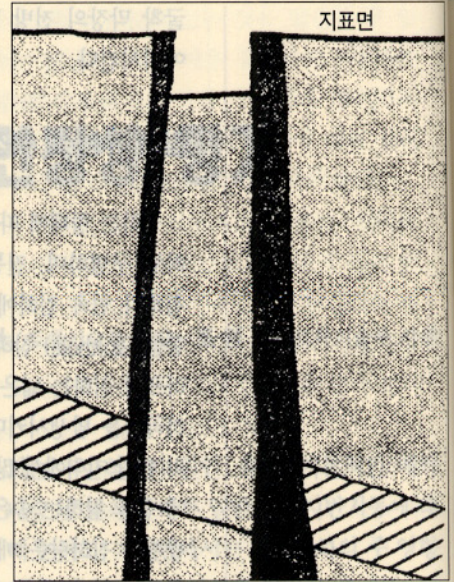
(그림 2) Chimney Caving

침하의 메커니즘

Karfakis, Brady와 Brown 등은 침하가 발생하는 메커니즘을 다음과 같이 설명하고 있으며 이 메커니즘들은 그 파괴 진행과정에서 따라 크게 점진적인 파괴와 돌발적인 파괴로 구별할 수 있다. 일반적으로 터널의 경우 파괴의 발생은 굴착터널 주위의 응력상태가 터널의 천정부, 바닥부, 측벽부 및 파쇄대의 강도를 초과하여 발생되고, 강도를 초과하지 않는 안정상태라 하더라도 장기간에 걸쳐 지반 조건이 변화하거나 지하수의 작용 등으로 강도가 열화되면서 변위가 진행되어 파괴점에 도달한다. 침하를 유발시키는 파괴 메커니즘은 다음과 같다.

1. 펀칭(Punching) 현상

터널 바닥의 지지력이 상실되어 주변지반이 터널 바닥에서부터 내부로 밀려들어오는 현상을 말하는 것으로, 터널 바닥이 점토암(Claystone)이나 이암(Mudstone) 등으로 구성되고 높은 수직응력이 작용될 때 발생한다. 이는 상당히 넓은 지역에 발생되며 바닥부의 연약정도에 따라 그 범위가 확장된다.



(그림 3) Plug Subsidence

2. 연약암에서 붕괴

터널의 천정부나 상반이 파괴됨으로써 발생되며 점진적으로 진행된다. 즉, 안정되고 자체 지지력을 갖는 아치효과가 나타날 때까지 지표면을 향해서 붕괴가 진행되어 간다. 이와 같은 파괴의 진행은 파쇄된 암석들이 굴착된 면적을 채워서 상부의 암석들을 지지하여 더 이상의 파괴와 붕괴가 일어나지 않을 때까지 진행된다.

3. 불연속 임반에서의 블록거동과 유사한 붕괴

암석 자체의 강도가 매우 커서 휨과 같은 작용에 의해서만 파괴가 생기며 암반 내에 존재하는 불연속면을 따라서 붕괴가 발생된다. 이 경우의 중요한 특징은 불연속면의 마찰에 의한 블록거동이다.

4. 터널굴착 주변의 지질 구조적 영향에 의한 붕괴

2, 3의 경우와는 달리 매우 돌발적으로 발생되며, 전단강도가 낮은 면을 따라 자중에 의해 발생하는 붕괴유형이다. 파괴면은 단층(Fault)이나 다이크(Dyke)와 같은 지질구조에 의해 발생된다. 이러한 암반은 깨짐이나 팽창현상 없이 강제거동을 하게 되며, 붕괴가

발생하였을 때 굴착면 주변에 생기는 수직변위는 결과적으로 지표면에서 비슷한 크기의 수직변위로 나타나게 된다.

5. 암반내 습윤상태와 지하수 유입작용

지하수의 유입은 암반내의 지하수위 및 공극수압을 변화시키므로 유효응력의 변화를 가져온다. 이러한 작용에 의해서 암반의 상대적 강도는 현저하게 저하되며, 소성한계를 넘게 되면 파괴가 발생된다.

6. 휨 변형과 전단파괴

다층암반과 같이 터널천반이 층상으로 구성된 경우의 붕괴형태는 휨 변형에 의한 파괴와 전단파괴로 구별될 수 있다.

천반이 연속된 빔(Beam)과 같은 거동을 한다면 휨에 의한 파괴가 발생될 것이다. 휨 변형에 의한 파괴는 수직면으로 하중이 가해지고, 수직응력에 대한 수평응력의 비가 낮으며, 분리현상을 일으키고, 강성이 낮은 층상 암반이거나, 휨 현상에 의한 인장응력이 암석의 강도보다 크게 되면 파괴가 발생한다.

연속된 빔에 큰 수평과 수직응력이 작용하고 주변지반의 강성이 터널바닥부보다 강성이 크거나 천반의 지반이 연약한 경우와 터널 측벽의 교대(Abutments)에 발생된 전단응력이 천반의 전단강도를 초과하는 경우에 전단파괴가 발생된다.

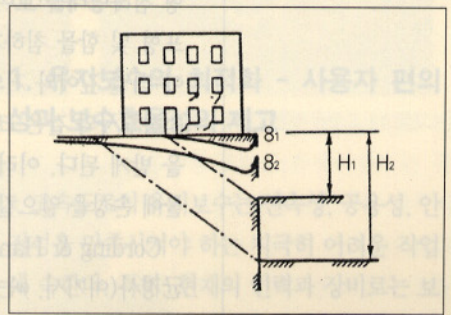
(표 1) 개착굴착시 침하경사 및 측방변형률

	굴착머리로부터의 거리	평균경사	최대경사	측방 변형률
조밀한 모래와 자갈 강성점토 협재층	0 ~ 1H	δ_{max}/H ($1.5 \sim 3 \times 10^{-3}$)	$3 \sim 5 \times 10^{-3}$	$\delta_{max}/2H$ to $\delta_{max}/1H$ ($1.0 \sim 3 \times 10^{-3}$)
	1H ~ 1.5H		$0 \sim 1 \times 10^{-3}$	
연성점토 Chicago Zone I	0 ~ 1.5H	$\delta_{max}/1.5H$ ($3 \sim 6 \times 10^{-3}$)	9×10^{-3}	$\delta_{max}/3H$ to δ_{max}/H ($3 \sim 9 \times 10^{-3}$)
연성점토 Chicago Zone II	0 ~ 1.5H	$\delta_{max}/1.5H$ ($6 \sim 12 \times 10^{-3}$)	15×10^{-3}	$6 \sim 18 \times 10^{-3}$
	1.5 ~ 2.5H		$0 \sim 3 \times 10^{-3}$	

지하 굴착에 따른 지반 거동

1. 개착식 굴착에 의한 거동

지하구조물의 시공 깊이가 비교적 얇거나 지표면에 구조물이 산재하여 있지 않는 경우에는 일반적으로 개착공법을 많이 이용하고 있다. 통상 개착식 굴착에 의해 발생하는 지반변위는 주로 굴착방향이 지표하방이기 때문에 측방으로서의 거동에 의해 지배를 받게 되며, (그림 4)와 같이 굴착심도가 깊어지면서 침하파형(Settlement Wave)이 굴착면으로 이동하는 양상을 보여준다.



(그림 4) 개착굴착에 의한 전형적인 비틀림

즉, 전통적인 트라프형 침하로 나타나며, 침하파형이 굴착면으로 확장되면서 최대 비틀림(Maximum Distortion)과 동일한 Angular Distortion을 지표구조물이 받게 된다.

그러나, 대부분의 지반변위는 굴착면 하부 주변에서 발생되며 침하곡선상에 위치한 구조물들은 침하경사보다 적은 Angular

Distortion을 일으킨다. 일례로 점토지반에서는 굴착심도와 같은 거리의 굴착벽으로부터 떨어진 지표 지점에서는 큰 변위가 발생되고, 굴착심도에 근접한 구조물

은 침하가 발생하지만 비틀림이나 손상을 입지 않는 반면 변곡위치에 있는 구조물에는 심각한 균열이 발생된다.

(표 1)은 Washington, D.C. 지역의 조밀한 모래 및 자갈, 협재된 강성점토지반과 Chicago의 연성점토지반에서 개착굴착에 의해 발생하는 대표적인 침하경사와 측방 변형률을 보여주고 있다.

2. 터널굴착에 의한 거동

터널굴착에 의한 침하거동은 (그림 5)와 같이 대부분 종방향으로는 전통적인 트라프형 침하형태를 보여주며, 횡방향으로는 트라프형 및 함몰 침하가 나타난다. 구조물의 폭이 터널 깊이와 거의 같을 때 구조물은 대략 침하경사와 같은 크기의 Angular Distortion을 받게 된다. 이러한 경우는 침하경사가 건물에 손상을 일으킬 수 있다.

Cording & Hansmire(1975)는 침하의 평균경사(여기서, ω 는 트라프의 폭)를 터널 상부에 위치한 구조물의 손상기준으로 사용할 것을 제안했다.

일반적으로 침하곡선의 국부곡률은 Angular Distortion에 비해 구조물에 심각한

영향을 주지 않는다. 이는 구조물 자체가 어느 정도 지지할 수 있는 능력을 갖고 있으며, 미소 국부곡률을 평편하게 유지할 수 있기 때문이다.

또한, 침하곡선 모서리 근처에 위치한 구조물은 Angular Distortion 뿐만 아니라 측방 변형률도 발생된다. 최대 이격거리는 이 지역에서 발생되며 터널 상부 구조물에 일어나는 만큼의 손상이 발생할 수 있다.

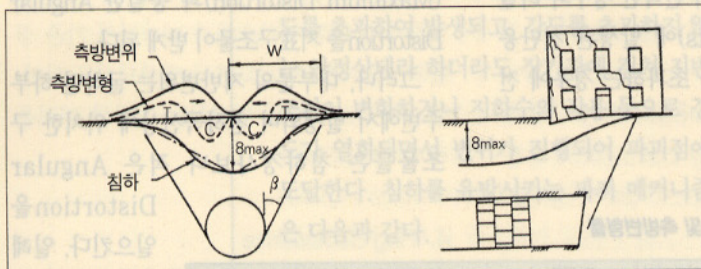
3. 광산굴착에 의한 거동

광산굴착중 트라프형 침하에 의한 비틀림은 개착굴착시 관찰되는 규모의 거동을 보이지는 않는다. 이는 굴착심도와 굴착폭이 구조물의 폭에 비해 매우 크기 때문이다. 침하는 총 수평정도 일어나며, 구조물이 기울어 지기는 하지만 구조물을 따라 발생함으로 경사변화가 매우 적다. 따라서, 미소한 Angular Distortion만을 일으킨다. 그러나, 함몰 침하에 의한 비틀림은 구조물에 손상을 입히는 중요한 요인으로 작용한다.

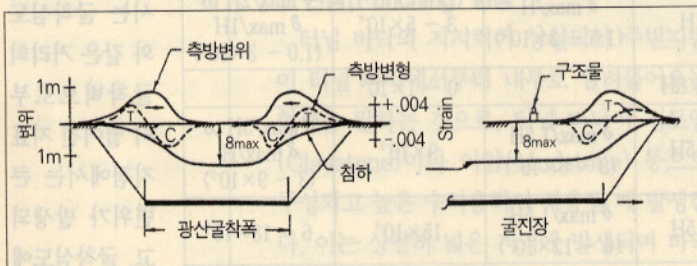
Priest & Orchard(1958)와 영국 Natural Coal Board(1975)에 의하면 구조물의 손상은 구조물의 길이와 측방변형률의 곱으로 표현된다. 큰 구조물을 따라 발생하는 변형률은 구조물의 국부 취약지역에 집중되며, 구조물의 폭이 넓어지면 넓어질수록 취약지점에서 변형률과 잠재적인 압축, 인장의 합이 커지게 된다. SS

참고 문헌

1. 지하채굴에 따른 지반안정성평가 및 대책연구, 1995, 석탄산업합리화사업단.
2. L. Obert & W. I. Duvall, 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, Inc., p. 650
3. 허도학, 1996, 폐광지역 지반침하 메커니즘에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교
4. 권익, 1995, 지하공동 굴착에 의한 지반침하 거동 연구, 석사학위논문, 한양대학교
5. 지하 생활공간 개발 요소기술 연구 - 지반굴착기술분야(IV) -, 1996, 한국건설기술연구원



(그림 5) 터널굴착에 의한 전형적인 비틀림



(그림 6) 광산굴착에 의한 전형적인 비틀림