터널 굴착 중 바닥부 연약대로 인한 터널 융기 거동 사례 분석

Upheaval Behaviour of Tunnel Bottom in the Weathered Fracture Zone under Tunnel Excavation

장 용 채¹⁾ · 김 낙 영[†] · 진 규 동²⁾ · 손 용 민²⁾

Yongchai Chang · Nagyoung Kim · Kyudong Jin · Yongmin Son

Received: March 6th, 2014; Revised: March 24th, 2014; Accepted: April 25th, 2014

ABSTRACT : The stability of tunnel construction depends entirely on the characteristics of the soil strength. If the soil strength is weak, collapse of tunnel occurs frequently under construction. In general, it copes with collapse by conducting half section excavation or reinforcement in advance under these conditions. Nevertheless, it can be collapsed under upper section excavation in the weathered fracture zone and it can be recovered through the application of reinforcement. As it has a bad influence on the upper section in case of upheaval of tunnel bottom, it can be adversely affected on the overall stability of the tunnel. Thus, an in-depth review of reinforcement is needed in poor bottom ground. As the practices that has a bad affect on the stability of the tunnel due to upheaval of tunnel bottom is increasing, research is needed for applicable standards for reinforcement. In this paper, it were investigated at actual field cases of upheaval of bottom ground and characteristics of behavior and reinforcement measures were analyzed.

Keywords : Upheaval behaviour, Excessive displacement, Reinforcement

요 지 : 터널 구조물 안정성은 굴착하는 지반강도에 전적으로 좌우되는 특성이 있다. 지반강도가 약한 경우에는 터널 굴착 공사 중 붕락이 자주 발생하게 된다. 일반적으로 이러한 조건에서는 분할굴착 또는 사전 보강을 실시하여 굴착 중 붕락에 대비하게 된다. 그럼에도 불구하고 연약대에서는 상반굴착 중 천단부 붕락이 발생할 수 있는데 이러한 사례는 많고 붕락 부위에 대해서 보강공법 적용을 통해 복구가 가능하다. 터널 바닥부에서 융기가 발생하는 경우에는 상부구간까지 악영향을 미치므로 터널 구조물 전체적인 안정성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 하부구간이 불량한 경우에는 반드시 심도 있는 보강검토가 필요하다. 터널 바닥부 융기로 인해 터널 안정성에 위대한 영향을 주는 사례가 최근에 터널 장대화와 관련되어 증가하고 있으므로 보강적용 기준에 대한 연구가 필요하고 본 연구에서는 실제 현장 하부구간 융기사례들을 조사하여 거동특성과 보강방안을 분석하였다.

주요어 : 융기 거동, 과다변위, 보강

1. 서 론

터널 구조물은 굴착하는 지반강도 조건에 전적으로 터널 안정성을 좌우하는 특성이 있다. 따라서 터널 공사 중 굴착 주변 지반조건이 불량한 단층파쇄대 등은 시공 중 국부적으로 접하게 되는 단층파쇄대의 규모나 방향성, 지하수 발생 여건에 따라서 굴착과 동시에 붕락이 발생하는 경우가 종종 있다. 이러한 연약대는 설계조사 시 예측을 하지 못하는 경우에는 붕락 및 과다변위가 발생할 수 있다. 특히 지표면 함몰형태의 붕락은 굴착과 동시에 붕락이 발생하므로 대비하기 어려운 특성이 있다. 그리고 터널 굴착 시 주변 지반의 이완이 진행되면 지반의 사하중이 증가하고 더욱이 발파진동 등에 의한 지반열화 및 지하수 유출 등에 의한 절리면

전단강도의 저하 등에 의하여 터널 아치부에서 수평균열과 터널 천단부에서 붕락 등이 발생할 수 있다. 터널 굴착 시 붕괴 및 붕락이 발생하는 원인은 굴착 대상 지반의 연약한 강도, 과다한 지하수 유입, 얇은 암피복두께, 심한 파쇄절리를 통한 막장면 활동 등이 터널파괴의 원인으로 지적되고 있으나 근본적으로 터널시공 중에 발생하는 외력을 터널 지보재가 충분히 저항하지 못하게 되는 경우로 설명될 수 있다. 따라서 터널 굴착에 있어서 가장 우선시 되어야 할 조건은 터널 굴착 및 지보재를 설치하는 동안 터널을 안전하게 지지할 수 있는 충분한 지지력의 확보이며 지보력이 충분하지 못한 경우에는 지반이완이 발생하고 하중이 점진적으로 크게 작용하여 터널붕괴에까지 이를 수 있다. 지보재 폐합 전에 발생하는 붕괴유형으로는 지지력 부족에 인한 붕괴,

1) Department of Civil Engineering, Mokpo National Maritime University

† Korea Expressway Corporation (Corresponding Author : ab6317@hanmail.net)

2) Department of Civil Engineering, Mokpo National Maritime University

측압증가에 의한 붕괴, 지지보재 파괴에 의한 붕괴가 있다. Fig. 1과 같이 지지력 부족에 의한 붕괴는 터널 하반부에 연약한 지반이 출현했을 경우에 주로 발생하며, 지지력의 부족으로 터널 상반부에 설치된 1차 지보재의 우각부 침하로 변형이 발생하는 경우에는 내공단면의 유지가 곤란하고 지보재의 균열 등을 초래하여 직접적으로 터널의 붕괴로 이어질 수 있다. 측압증가에 의한 붕괴는 일반적으로 원지반의 구속응력 중 연직응력보다 수평응력이 크게 발생하는 경우에 주로 발생하며, 측벽부에 과다한 변위발생으로 1차 지보재 천장부에 균열발생, 하부 지반의 용기 등이 발생할 수 있어서 터널의 붕괴로 이어질 수 있다(한국터널지하공간학회, 2010).

지보재 폐합 후에 발생하는 터널의 붕괴유형은 전단파괴에 의한 붕괴, 압축파괴에 의한 붕괴, 편칭파괴에 의한 붕괴, 휨압축파괴에 의한 붕괴, 밀림현상에 의한 붕괴가 있다. 전단파괴에 의한 붕괴유형은 연약대, 파쇄대, 단층대 등 국부적으로 취약한 지층조건과 터널이 간섭될 경우 취약한 부분에 집중된 지반응력 및 하중 등이 터널의 지보재에 국부적인 외력으로 작용하여 지보재의 전단파괴를 유발하여 발생한다. 압축파괴에 의한 붕괴유형은 주로 지반응력이 지보재의 저항력을 초과하는 경우에 발생하는데 터널의 계획심도가 깊어 과지압이 작용하는 경우, 터널 내부로 침투가 원활하지 않아 지보재 배면에 수압이 집중되는 경우, 함수량이 높은 팽창성 지반에 터널이 계획되는 경우 등에서

볼 수 있다.

Fig. 2, Fig. 3과 같이 압축파괴에 의한 붕괴는 전단파괴에 의한 붕괴와 마찬가지로 국부적으로 취약한 지반과 터널이 간섭할 경우 취약한 지반에 집중되는 과다변위로 인하여 발생할 수 있다. 휨압축파괴에 의한 붕괴유형은 압축파괴에 의한 붕괴유형이 발생하는 조건과 유사한 경우에 발생하며, 연속체 특성을 보이는 지보재에 압축하중이 발생할 경우 지보재의 휨저항력이 이에 대응하지 못할 경우에 발생한다. 밀림현상에 의한 붕괴유형은 다른 붕괴유형과는 다소 상이한 붕괴특성을 보이는 경우로 지보재와 원지반이 충분히 밀착되지 못한 경우 지반변위 발생에 지보재가 함께 저항하지 못하고 상대변위가 발생하는 경우에 볼 수 있다(Kim et al., 2009).

2. 터널 바닥 측벽부 과다변위로 인한 슛크리트 탈락 분석

2.1 굴착완료 후 측벽부 슛크리트 탈락 형상

일반적으로 터널시공 중 조사된 실제 붕락 사례를 근거로 분석해보면 천단부 국부적인 붕락이 가장 많이 발생하고 두 번째로 지표면 함몰형태 붕락이 발생하는 것으로 분석되었다. 최근에 터널길이가 장대화되면서 굴착완료 후 바닥부 연약한 지반조건으로 인하여 Fig. 4와 같이 터널 바닥부 용

(a) Deformation due to lack of bearing capacity at the bottom (b) Upheaval behaviour due to increased lateral pressure at the bottom (c) Deformation due to increased lateral pressure at the bottom

Fig. 1. Upheaval behaviour and deformation due to lack of bearing capacity at the bottom

Fig. 2. Collapse by compressive fracture

Fig. 3. Collapse by flexural compressive failure

기가 발생하여 터널 천단부 균열 및 붕락이 확대되는 사례가 종종 발생하므로 본 연구에서 이러한 터널 바닥 측벽부 과다변위로 인한 거동 특성을 분석하였다. 터널 바닥 측벽부 숏크리트 탈락사례는 시간적인 측면에서 과거 주로 발생

하였던 막장면 천단부 붕락, 지표면 함몰형 붕락과는 다른 거동특성을 보인다. 과거의 주요한 두 가지 붕락 사례는 주로 시간적인 측면에서 굴착과 동시에 붕락이 발생하는 거동을 보이는데 터널 바닥 측벽부 숏크리트 탈락부 사례의 경

(a) Shotcrete crack of longitudinal crown of tunnel

(b) Shotcrete debonded at tunnel bottom

Fig. 4. A case of shotcrete debonded at tunnel bottom

(a) North bound lane (Partial fractured zone)

(b) South bound lane (Faulty gouge)

Fig. 5. Face mapping log of shotcret debonded at tunnel bottom

(a) Geological plane view of crack of crown and upheaval

(b) Geological vertical cross-sectional view of crack of crown and upheaval

Fig. 6. Geological vertical cross-sectional and plane view of shotcrete debonded at the bottom of tunnel

우, 상당한 시간이 경과 후에도 지속적으로 발생하는 거동을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 현장에서 신속한 보강방안을 적용하는데 어려움이 있다. Fig. 4의 경우, 굴착완료 후 10개월 경과 후 바닥부와 측벽부에 수개소에서 발생한 것으로 계측되었다.

터널 굴착 중 봉락 및 변위는 취약지반의 규모와 방향성, 막장면에서 발생하는 용수량 급증 정도에 영향을 직접적으로 받는데 본 터널 바닥부 용수가 발생한 터널현장은 Fig. 5와 같이 상행선의 경우, 터널 막장면 굴진 방향과 평행한 방향(N45~55E)의 단층코아 및 손상대가 관찰되었고 터널 중심부 및 우아치부에 국한되어 발달하여 RMR 10 이하의 단층대가 분포하는 것으로 조사되었다. 또한 하행선은 단층코아가 좌측 측벽으로 이동하는 경향이 뚜렷이 인지되었고 단층의 방향은 N10~20E로 조사되었다. Fig. 6과 같이 터널 바닥부는 RMR 20 이하의 매우 불량한 암반으로 구성되어 단층점토로 구성된 단층대와 단층손상대가 막장면 천

단부에서 바닥부로 연장성을 가지고 있는 것으로 조사되었다(한국도로공사, 2003).

2.2 터널 바닥 측벽부 숏크리트 탈락구간 계측결과 분석

Fig. 7과 Fig. 8은 현장에서 실제 계측한 결과로서 천단침하의 경우 최대 200 mm 이상, 내공변위는 320 mm 이상 발생하는 것으로 계측되었다. 본 계측결과는 하반굴착과 더불어 지속적으로 발생한 결과이다. 조사된 지질조건을 고려할 때, 천단침하와 내공변위는 수렴되지 않고 굴착완료 후에도 장기간에 걸쳐 발생할 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

2.3 터널 바닥 측벽부 숏크리트 탈락 원인 분석

Fig. 9와 같이 단층파쇄대가 터널 바닥부까지 연장됨으로써 굴착 중 상반부 사전보강 등으로 굴착 중에는 봉락이 발

Fig. 7. Crown settlement of shotcrete debonded of tunnel bottom (Maximum 200 mm, Northbound lane)

Fig. 8. Convergence of shotcrete debonded of tunnel bottom (Maximum 320 mm, Southbound lane)

(a) The concept of tunnel crown collapse and crack

(b) The concept of tunnel shotcrete debonded

Fig. 9. The geological cross section of shotcrete debonded of tunnel bottom

(a) Upheaval section of bottom of tunnel

(b) View of upheaval section

Fig. 10. Maximum upheaval due to sidewall part (40 mm)

생하지 않았으나 굴착완료 후 바닥 측벽부 슛크리트 탈락과 국부적인 낙반과 바닥부 융기가 동시에 발생하였다.

3. 터널 바닥부 융기로 인한 인장균열 분석

3.1 터널 굴착완료 후 바닥부 융기로 인한 인장균열 형상

Fig. 10은 터널 바닥부 융기로 인하여 단부변형 및 슛크리트 균열 또는 탈락이 파쇄대구간인 STA.1+570~STA.1+662의 92 m 구간 중 STA.1+584~STA.1+653까지의 총 69 m 구간에 걸쳐 발생하였고 변위관련 내용을 살펴보면 내공 변위는 최대 28 cm가 69 m 구간 범위에서 발생하였으며 균열은 총 30개소에서 최대 40 mm가 발생하였고 슛크리트 탈락 및 파손이 69 m 구간에 걸쳐 발생하였다.

3.2 바닥부 융기구간 계측결과 분석

본 연구대상 터널에서 시공 중, 시공완료 후 터널 변형특성 분석을 위해서 현장에서 수행된 천단침하 및 내공변위 계측결과는 Fig. 11과 같다.

상행선 구간은 부분적으로 위험레벨(50 mm)을 초과하는 계측값을 나타내며, 상행선 방향 변상발생일 이전까지 하반 굴착 진행에 따라 지속적으로 변위가 증가한 것으로 기록되었다. 하행선 방향은 당초 시공 시 발생한 변위량은 안전레벨 이하로 발생하였으나, 하행성 방향 강지보 파단 이후 지속적인 변위증가로 상행선 방향 구간은 부분적으로 위험레벨을 초과하는 계측값을 나타내는 것으로 기록되었다.

굴착 직후 1차 변위가 20일만에 걸쳐서 변위가 급하게

Fig. 11. The result of measurement in the deformation section

증가하였고 최대 58 mm 이상 발생하였다. 따라서 변위를 억제하기 위한 압성토 조치 이후 그라우팅 주입과 강제 보강형 보강공법을 적용하였고 지속적인 계측을 수행하여 1차 변위는 수렴된 것으로 판단하였으며 압성토 제거 후 2차 굴착작업 후 계측을 수행한 결과 2차 변위가 5 mm가 추가로 발생하였다. 2차 변위가 1차 변위에 비하여 미소한 것으로 분석되어 압성토 조치 등을 실시하지 않고 관찰한 결과, 3차 변위가 10 mm 이상 발생하였다. 일반적으로 터널 굴착 후 수렴은 2막장 굴착 이후 또는 계측 시작 1주일 이내 수렴하는 것이 일반적인 사항인데 본 연구대상 터널과 같이 하부지반조건이 불량하여 하부에서 최초 변형이 발생하는 경우에는 변위가 장기간에 걸쳐서 발생하는 것으로 분석되었다. Fig. 12와 같이 단층파쇄대가 터널 바닥부 좌우로 터널 굴착 면적보다 2배 이상 넓게 분포하고 있고 바닥 하부로 10 m 이상의 단층파쇄대가 존재하고 있는 것으로 조사되었다. 바닥 하부 깊이는 최소 1 m에서 최대 10 m 이상 분포하고 있었는데 3차 변위까지 발생한 구간은 단층파쇄대 깊이가 바닥부 기준으로 8 m 이상 단층파쇄대

가 존재하는 구간에서 발생하였고 단층파쇄대가 5 m 이하의 깊이로 존재하는 구간에서는 2차 변위 이후 수렴된 것으로 조사되었다.

따라서 바닥부 단층파쇄대와 같은 취약지반에서는 취약지반 존재 깊이에 따른 거동특성이 1차 수렴 이후 2차, 3차 변위가 장기간에 걸쳐서 추가적으로 발생할 수 있으므로 굴착 이후 수렴을 확인하였더라도 계속적으로 계속분석을 수행하여야 하는 것으로 분석되었다(한국도로공사, 2004).

Fig. 13은 상행선 방향 막장관찰분석 결과 RMR 분류에 의한 암반등급 평가 시 변상구간의 지하수 상태는 전체적으로 습윤상태이며 절리방향에 따른 평가 또한 전체적으로 주

향이 터널 진행방향과 평행한 매우 불리한 조건으로 동일하게 평가되며, RMR 평가에 의한 암반등급은 전반적으로 V 등급의 매우 불량한 암반조건으로 연·경암분포 구간에 풍화잔류토가 분포하는 것으로 나타났다.

하행선 방향은 RMR 분류에 의한 암반등급 평가 시 변상구간의 지하수 상태는 전체적으로 습윤상태이며 풍화잔류토가 광범위하게 분포하는 것으로 평가되며 지반조건이 매우 불량한 것으로 관찰되었다.

막장면 관찰자료 분석을 통하여 파악한 연약대의 터널 주변 분포현황을 파악하기 위하여 추가 시추조사를 수행하였으며 시추조사 위치 및 시추조사 결과는 Fig. 14와 같다.

Fig. 12. Distribution of fault zone in the upheaval of tunnel bottom

Fig. 13. The face mapping in the upheaval of tunnel bottom

(a) Faulty clay

(b) Core loss and clay filling

Fig. 14. Drilling core

막장면 관찰자료 분석 및 추가지반조사 결과 상행선 방향 변상구간 주변으로 풍화토 특성의 심한 풍화파쇄대 지반이 혼재하며, 불연속면의 간격이 좁고 전반적으로 불연속면 사이에 점토가 충전되어 강도특성이 매우 낮은 것으로 평가되었다. 특히 하행선 방향의 변상구간은 터널 방향과 평행한 방향성을 가지는 고각의 불연속면과 함께 전반적으로 풍화암 구간에 풍화토가 혼재하고 있는 형태의 불량한 지반 조건으로 평가되었다(청우기술, 2004).

3.3 터널 바닥부 융기발생 원인 분석

융기발생구간에 분포하는 연약대 주향이 지표면까지 연장되는 경우 터널의 굴착에 매우 불리한 영향을 나타내며, 융기발생구간 막장관찰 결과 전반적으로 불연속면의 간격이 좁고 풍화되어 있으며, 전반적으로 단층점토가 충전된 불연속면이 발달하고 있는 것으로 조사되었다.

불연속면에 충전된 단층점토(두께 50 cm 이상)로 인해 절리면의 전단강도는 매우 낮은 상태로 굴착 중 융수증가 여부에 민감하게 반응하여 터널 굴착 시 주변에 분포한 연약한 절리의 변형이 점진적으로 증가하여 점차적으로 전단강도가 저하되는 현상이 나타났고 잔류전단강도 상태에 도달한 상태에서 터널 지보재에 과대한 부재력과 함께 터널의 과대변형을 유발한 것으로 분석되었다.

변상구간은 전반적으로 잔류전단강도 상태의 이완영역이 폭넓게 분포한 상태에서 하반굴착이 진행되는 과정에서 강지보 파단이 발생하였다. 본 융기발생구간에 고각의 점토충전 절리들이 하반 굴착에 의해 지보력이 상실된 구간에서 하반굴착 진행에 따른 지보력 감소 및 전방 발파진동의 영향으로 지속적인 미끄러짐으로 변상을 발생시켰으며, 이의 영향으로 절리의 방향 연장선에 위치하는 풍화토가 혼재하는 구간에서 과대 변위를 발생시킨 것으로 분석되었다.

4. 결 론

터널 바닥부에 존재하는 연약대로 인해 터널 굴착 후 바닥부 융기가 발생한 현장사례를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 터널 천단부에 국부적으로 연약대가 존재하는 경우에는 1차 변위 발생 후 보강공법을 적용하여 강성증가 시 변위가 수렴되는 경우가 대부분이다. 그러나 본 연구대상 터널과 같이 바닥부에 연약대가 존재하는 경우에는 1차 변위 발생 후 2차 변위가 5 mm 이상 발생하다가 수렴양상을 보이다가 6개월 이상 시간 경과 후 다시 3차 변위가 10 mm 이상 추가로 발생하는 시간 의존적 거동 특성이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 바닥부에 연약대가 존재하지 않는 터널과 굴착 후 변위 거동 특성이 다른 것으로 분석되었고 이와같이 바닥부에 연약대가 존재하는 경우에는 상부 보강공법 적용 이후, 터널 굴착 완료 이후까지 최소 6개월 이상 지속적인 계측을 실시하여야 할 것으로 분석되었다.
- (2) 현장조사 및 추가지반조사 결과와 역해석 결과 등을 이용하여 종합적으로 과대 변위 발생 원인에 대해 검토를 실시하였으며, 1차 보강구간에서 발생한 과대변위는 터널 굴착에 의한 지반이완으로 지속적인 지표수 침투에 의한 함수비 증가로 인해, 연약대 점토성분의 슬레이킹 발생으로 지반의 전단강도가 감소하였다. 결과적으로 숏크리트 및 강지보 보강량이 부족하였고, 이에 따라 지보재 침하에 의한 내공 부족 및 숏크리트에 전단파괴가 발생한 것으로 분석되었다. 이러한 특성을 분석하기 위하여 실시한 시험결과, 슬레이킹시험과 수침시험(슬레이킹 속도시험) 결과로 수침 후 6시간 경과 후 원래의 형태를 잃어버리고 붕괴되는데, 이는 이암에 준하는 속도로 슬레이킹 속도가 매우 빠르며 이러한 경우 슬레이킹에 의한 강도 감소가 발생하는 것으로 분석되었다.

References

1. 청우기술 (2004), 00터널 안정성 분석 보고서, pp. 15~52.
2. 한국도로공사 (2003), 00터널 안정성 보고서, pp. 2~81.
3. 한국도로공사 (2004), 00터널 붕락원인 및 보강대책 보고서, pp. 9~78.
4. 한국터널지하공간학회 (2010), 터널붕괴사례집, 도서출판 씨아이알, pp. 25~28.
5. Kim, N. Y., Park, Y. H., Shim, J. W. and Park, Y. S. (2009), A study on the pattern of tunnel collapse in weathered rockmass, Journal of The Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 1, pp. 55~61 (in Korean).