굴착시공 중 취약지반구간에서 터널변위 거동 연구

A Study on Displacement of Tunnel in the Brittle Fracture Zone under Excavation Construction

문 창 열[†]

Changyeul Moon

Received: November 4th, 2013; Revised: November 15th, 2013; Accepted: December 23rd, 2013

ABSTRACT : The tunnel construction is increasing in order to secure a good driving performance of the car and train. A cases of tunnel collapse and the tunnel excessive displacement are increasing with the increase in tunnel construction. In terms of empirical construction methods using the strength characteristics of soil, it is important for tunnel construction to analyze causes of collapse and displacement. In the paper, it was analyzed the causes of collapse and excessive displacement of tunnel in the fractured ground condition. The results of analysis is that the increase of rainfall and lasting increase of displacement and large scale fractured ground are interconnected.

Keywords : Tunnel Measurement, Collapse of tunnel, Reinforcement, Fault

요 지 : 차량의 양호한 주행성능 확보를 위한 터널공사의 증가와 더불어 터널시공 중 터널 붕락 및 과다변위 발생사례가 증가하고 있다. 터널공사의 특징이 지반의 강도특성을 최대한 이용하는 경험적인 시공방법이라는 측면에서 터널붕락 및 과다변위 발생사례에 대한 붕락 및 과다변위 발생 원인분석이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 취약지반조건에서 대표적인 붕락 및 과다변위 발생사례의 붕락 원인에 대하여 분석하였다. 분석결과, 국지성 강우량의 증가, 시공 중 계속값의 지속적인 증가, 단층파쇄대가 지표면까지 연결 되는 지반조건이 공통적으로 존재하는 경우 대규모 붕락 또는 과다변위가 발생한 것으로 분석되었다.

주요어 : 터널계측, 터널의 붕괴, 보강, 단층

1. 서 론

차량 및 철도가 고속화됨에 따라 터널공사가 급증하고 있고 이러한 터널의 연장 또한 장대화됨으로써 터널공사 중 불량한 지반조건에 접하는 경우가 증가하고 있다. 따라서 터널시공 중 국부적으로 존재하는 불량한 단층파쇄대등은 설계 등에서 조사 시 탐사가 어려우므로 시공 중 국부적으로 접하게 되는 단층파쇄대의 규모나 방향성, 지하수 발생여건에 따라서 굴착과 동시에 붕락이 발생하거나 지반강도특성에 따라 시간 경과 후 변위가 발생하는 경우가 종종 있다. 그중 특히 지표면 함몰형태의 붕락은 굴착과 동시에 붕락이 발생하므로 대비하기 어려운 특성이 있다. 이러한 지표면 함몰붕락에서 대해서는 세 가지의 뚜렷한 함몰형 붕괴 메커니즘이 연구되었는데 각각의 유형은 서로 다른 지질학적 요인에 따라 구분된다. 각각의 함몰형 붕괴 유형들은 Fig. 1의

터널 천단부상에 위치한 연약대, Fig. 2의 수압을 저항하기에 불충분한 터널 상부 투수지층 두께, Fig. 3의 사하중으로 작용하는 터널 상부 암체의 자중을 지지하기에 불충분한 지층 두께인 붕괴 유발 주요 요인으로 구분된다. 추가적으로 함몰형 붕괴는 수직 균열대, 수직 매설 파이프, 우물이나 하수구 매설공사 등과 같은 인위적인 요인으로도 발생할 수 있다(한국터널지하공간학회, 2010).

첫 번째 함몰형 붕괴 메커니즘은 풍화되었거나 연약한 암반상이나 사전에 공동이 존재하고 있는 암반체내에서 발생한다. 이것은 하나의 점진적인 파괴 메커니즘이며, 터널 막장의 천단부나 경사경의 상반에서부터 파괴가 시작된다. 만일 안정되게 자체 지지력이 발현될 수 있는 아치형 구조형성이 어려운 여건이라면 함몰형 붕괴는 점진적으로 지표면을 향해 확장되어 나갈 것이다. 국부적으로 지반매질이 터널 천정부나 점진적으로 발생한 공동으로부터 이탈되어져

[†] Deptment of Civil Engineering, Kangwon University (Corresponding Author : moonyeul@hanmail.net)

나갔을 때, 터널 천단부는 휘어지고 굴착장의 공간이 점진적으로 되메워지려는 경향을 보인다. 굴착장이 초기에 넓게 비어있지 않았거나, 충분한 암체가 점진적으로 굴착으로부터 떨어져 나오지 않는 한, 굴착장은 결과적으로 붕괴된 암체로 채워지고 이후 상부 지표를 지지함으로써 함몰형 붕괴의 진전을 저감시킬 것이다. 이러한 이유로 함몰형 붕괴의 점진적 확장은 연약대 내에서 아래로 붕괴하여 떨어지는 암체의 낙반상태와 매우 밀접하게 연계되어 있다. 이러한 점진적 파괴 메커니즘은 천층 사질토 및 점성토 터널의 파괴 유형 고찰을 위해 수행된 모델실험을 통해 잘 수립되어 있다. 모델 실험을 통해 고찰된 결과는 사질토와 유사한 지반 조건을 갖는 터널일 때 잘 반영될 수 있다. 여기서 일반적으로 함몰형 터널 붕괴가 터널 천단부에서 시작되자마자, 상부 방향으로의 함몰형 붕괴의 진행은 Fig. 4와 같이 불충

분한 토피고 영역을 거쳐 지표까지 점진적이지만 매우 빠르게 진행되어 나간다. 또한 이러한 함몰형 붕괴는 붕괴영역이 즉각적으로 지표까지 도달하며, 점진적으로 진행된 다기보다는 함몰 암체가 아래로 쏠려 나가는 인상을 준다 (한국터널지하공간학회, 2010).

2. 풍화파쇄대로 인한 지표면 함몰 붕괴사례 분석

일반적으로 터널시공 중 지표면 함몰형태의 붕락이 갑자기 발생하는 경우가 종종 발생한다. 이러한 지표면 함몰 형태의 붕락은 주로 소규모 계곡부에서 발생하는데 특징으로는 건기 시에는 수로가 형성되어 있지 않고 우기 시에는 수로가 형성되는 소규모 계곡부의 지형적인 조건에서 발생한

Fig. 1. Fractured geological condition of tunnel roof

Fig. 3. Insufficient thickness to tunnel dead load acting on the upper layer for supporting the upper ground load

Fig. 2. Insufficient to withstand the water pressure tunnel to the upperstrata thickness

Fig. 4. Shallow ground thickness

(a) Chimney collapse

(b) Collapse photo in the tunnel

Fig. 5. Chimney collapse of tunnel

다. 현실적인 측면에서 설계 시에 이러한 조건을 근거로 보강설계를 고려하기에는 기술적인 한계가 있다. 특히 국부적으로 존재하는 단층파쇄대 또는 풍화대의 경우 강도특성의 변화가 심한 경우에 강우 발생 직후에 갑자기 발생한다. 이러한 현장에서 현장 계측값들을 보면 직전 구간의 계측값들이 대부분 2 mm 이내의 안정적으로 계측되는 조건이므로 현장에서 예측이 어려운 붕락 형태이다(Fig. 5~Fig. 8 참조).

특히 석회암 구간에서 지하수위가 높은 토사가 존재하는 경우 터널 굴착 시, 과다 지하수 유출로 형성된 지반 내 유로를 통하여 액상화된 토사의 유출이 발생하는 사례가 다수 존재하는데, 이러한 토사유출은 하절기 빈번한 강우로 높은 지하수와 매우 느슨한 토사(퇴적토)가 지반보강 그라우팅을 위하여 설치한 대구경 강관을 통하여 액상화된 토사가 유출

되어 공동으로 확장되는 경우가 있다. 특히 하절기 집중호우 및 장마 기간에는 지하수 수위의 상승으로, 터널 상부 토사 및 풍화암 구간의 수리 및 지반강도특성이 불규칙하고 불량한 상태를 나타내므로, 이를 고려한 터널 전방지반 확인 및 세심한 터널굴착이 이뤄져야 할 것으로 분석되었다(한국터널지하공간학회, 2005).

3. 풍화파쇄대로 인한 과다변위 강지보재 손상 사례 분석

Fig. 9와 같이 본 연구대상 터널은 굴착 중 강지보재(H형 강재)가 풍화파쇄대구간의 과다변위로 파단되는 상황이 되

(a) Chimney collapse

(b) Collapse photo in the tunnel

Fig. 6. Chimney collapse of tunnel

(a) Chimney collapse

(b) Collapse photo in the tunnel

Fig. 7. A case of Chimney collapse

(a) Crown settlement and convergence measurement (upper)

(b) Crown settlement and convergence measurement (lower)

Fig. 8. Crown settlement and convergence measurement (upper, lower)

Fig. 9. First shotcrete crack, secondary steel support rupture and deformation

Fig. 10. The result of crown settlement and convergence measurement

었다. 본 터널의 경우 당초 설계 지반조사에서 암반등급 4 등급(세일)으로 설계되었으나 시공 중 지반조건은 5등급 이하의 매우 불량한 지반조건으로 나타나 지보패턴 및 보강량을 변경하여 상반 굴착이 충분히 진행된 후, 하반 굴착 진행 중 상행선 방향에서 지보변상이 발생하였으며, 하행선 방향에서 강지보 파단이 발생하였다. 변상발생 후 압성토공법을 수행하여 추가변위를 억제하였으며, 시멘트 그라우팅으로 이완지반에 대한 보강을 수행하였다(한국도로공사, 2003).

3.1 시공 중 계측결과 분석

본 연구대상 터널에서 시공 중 굴착에 따른 터널 변형특성 분석을 위해서 현장에서 수행된 천단침하 및 내공변위 계측결과는 Fig. 10과 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, 하행선 방향 강지보 파단 이후 지

속적인 변위증가로 상행선 방향 구간은 부분적으로 위험레벨을 초과하는 계측값을 나타내는 것으로 기록되었다.

상행선 및 하행선 방향 대표구간에 대한 계측 분석결과 하반 굴착과 동시에 변위가 지속적으로 증가하는 경향을 나타내며, 하반 굴착이 진행되면서 부분적으로 지반불량 구간에서 변위가 급격하게 증가하는 것으로 검토되었다. 이는 지반불량 구간에서 하반 굴착으로 상반에 보강된 지보재의 지보력 저하 및 주변지반의 아칭효과 감소로 하반미굴착 구간에서도 변위가 증가하여 지보재 변상 및 파단이 발생한 것으로 분석되었다. 굴착 중 확인 결과 터널구간은 흑색 셰일 하부의 화강암 구간으로 검토되었다. 풍화에 취약한 흑운모 화강암의 영향으로 풍화심도가 전체적으로 깊게 나타나며, 차별풍화에 의해 풍화심도의 기복이 심하게 나타났다 (Fig. 11, 12 참조).

상행선 방향 막장관찰분석 결과 RMR 분류에 의한 암반 등급 평가 시 변상구간의 지하수 상태는 전체적으로 습윤상태이며, 절리방향에 따른 평가 또한 전체적으로 주향이 터널 진행방향과 평행한 매우 불리한 조건으로 동일하게 평가

되며, RMR 평가에 의한 암반등급은 전반적으로 V등급의 매우 불량한 암반조건으로 연·경암분포 구간에 풍화잔류토가 분포하는 것으로 나타났다.

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

막장면 관찰자료 분석을 통하여 파악한 연약대의 터널주변 분포현황을 파악하기 위하여 추가 시추조사를 수행하였으며, 시추조사 위치 및 시추조사 결과는 Fig. 13과 같다.

막장면 관찰자료 분석 및 추가지반조사 결과 상행선 방향 변상구간 주변으로 풍화토 특성의 심한 풍화파쇄대 지반

이 혼재하며, 터널진행방향으로 N60~80W/60~80SW 절리가 분포하는 것으로 검토되었다. 또한 변상구간에 분포하는 불연속면은 터널방향과 평행한 방향성을 갖는 고각의 특성을 나타내며, 불연속면의 간격이 좁고 전반적으로 불연속면 사이에 점토가 충전되어 강도특성이 매우 낮은 것으로 평가되었다. 특히 하행선 방향의 변상구간은 터널방향과 평행한 방향성을 가지는 고각의 불연속면과 함께 전반적으로 풍화암 구간에 풍화토가 혼재하고 있는 형태의 불량한 지반조건으로 평가되었다.

3.2 변상발생 원인 분석

변상구간에 분포하는 불연속면은 주향이 터널의 진행방향과

Fig. 11. The current state of fault zone in the excessive displacement station

Fig. 12. The current state of face of tunnel in the fault zone

(a) The high angle distribution of fault clay

(b) Core loss and distribution of fault clay

Fig. 13. The current state of drilling log

(a) The current state of joint distribution before excavation

(b) The current state of joint distribution after excavation

(c) First deformation of fault clay zone (shotcrete crack)

(d) Secondary deformation of fault clay zone (steel support rupture)

Fig. 14. The loose area of fault clay caused by deformation

거의 평행하며 고각의 경사를 갖고 있어 터널의 굴착에 매우 불리한 영향을 나타내고, 변상구간 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 용수증가 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(Fig. 14 참조).

변상구간은 전반적으로 잔류전단강도 상태의 이완영역이 폭넓게 분포한 상태에서 하반 굴착이 진행되는 과정에서 강지보 파단이 발생하였다. 본 변상구간에 대한 전반적인 검토결과 토피고가 약 300 m로 매우 깊고 상행선 방향 터널에 발달한 고각의 점토충전 절리들이 하반 굴착에 의해 지보력이 상실된 구간에서 하반 굴착 진행에 따른 지보력 감소 및 전방 발파진동의 영향으로 지속적인 미끄러짐으로 변상을 발생시켰으며, 이의 영향으로 절리의 방향 연장선에 위치하는 포향방향 풍화도가 혼재하는 구간에서 과대변위를 발생시킨 것으로 분석되었다.

Fig. 15. The structural geology of roof fall station

4. 단층점토로 인한 붕락 사례

본 연구대상 터널은 지보재 설치 완료구간에서 배수 공동구 시공을 위한 터파기 시행 중 1차 낙반이 발생하였으며, 60 m 이격된 구간에서 2차 낙반, 30 m 이격구간에서 3차 낙반이 연속적으로 발생한 사례이다. 본 현장은 Fig. 15와 같이 양산단층과 동래단층의 사이에 위치하여 이들 단층에 의한 2차 단열이 다수 발달한 구간으로 조사되었다. 막장관찰 결과 동래단층의 2차 단열로 예상되는 수직경사의 단층이 막장에서 관찰되었으며, 단층점토 및 단층 가우지를 확인하였다(천우기술단, 2002).

Fig. 16. The current state of roof fall in the tunnel

(a) First roof fall

(b) Second roof fall

(c) Third roof fall

Fig. 17. The photo of roof fall

Fig. 17과 같이 1차 낙반 시 좌측 상단부 깊이 5.7 m, 길이 방향 40.0 m 규모의 낙반이 발생하였으며, 2차 낙반 시 좌측 상단부 깊이 5.5 m, 길이 방향 20.0 m 규모의 낙반이 발생하였다. 그리고 3차 낙반 시 좌측 상단부 높이 최대

30.0 m, 길이 방향 35.0 m 규모의 낙반이 발생하였다.

4.1 시공 중 계측결과 분석

붕락지점은 굴착 직후 수렴으로 판단한 후 5개월이 경과한 구간으로 계측을 중지했다가 추가 굴착과 더불어 계측개시 후 Fig. 18과 같이 변위가 30 mm에서 지속적으로 증가하여 70 mm 이상의 내공변위가 계측되었다.

4.2 붕락 원인 분석

단층 및 절리에 의한 키블록의 하중이 배수구 추가굴착 시에 숏크리트의 강도를 초과하여 낙반이 발생하고 터널 배면의 단층대가 추가로 붕락하여 낙반의 규모가 확대된 것으로 분석된다.

1차, 3차 낙반의 경우, Fig. 19와 같이 단층가우지를 함유한 절리면을 따라 1, 2차 키블록 암괴가 붕락되었고 3차 낙반구간의 수직으로 발달한 단층대로 확대되어 파쇄대의 이완 및 점진적 파괴가 발생한 것으로 분석되었다.

2차 낙반의 경우, Fig. 20과 같이 낙반 측벽부의 단층파쇄대가 존재하고 있었고 1차 낙반 시의 숏크리트 지보력 저하 및 붕락에 의한 이완영역 확대로 단층 파쇄 영역의 추가이완이 진행된 것으로 분석되었다.

5. 결 론

취약지반조건에서 풍화파쇄대로 인한 지표면 함몰, 과다 변위로 인한 강지보재 손상, 단층점토로 인한 과다변위 사례에 대하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지하수위가 지표면에 근접한 지반조건에서 국부적인 풍화파쇄대가 막장면에 존재하는 경우, 굴착과 동시에 붕락이 막장면에서 발생하는 유형이다. 따라서 터널안정성 분석을 위한 계측을 수행할 수 없는 조건에서 발생하였고 또한 전막장면에서 계측값은 2 mm 이내로 발

Fig. 18. The result of crown settlement and convergence

Fig. 19. The concept figure of first roof fall and third roof fall

Fig. 20. The concept figure of second roof fall

생한 것으로 분석되었다.

- (2) 대규모 단층파쇄대가 터널 막장면 전반에 걸쳐 존재하는 경우, 대부분 상반 굴착을 위한 보강공법을 적용하여 상반 굴착 시에는 안정적이거나 이러한 경우, 붕락 및 과다변위는 하반 굴착 시 발생하는 것으로 분석되었고 특히 하반 굴착 시 지하수량의 증가와 더불어 변위가 55 mm 이상 급격히 증가하는 경향을 보인 후 붕락이 발생한 것으로 분석되었다.
- (3) 굴착 막장면에 단층점토가 50 cm 이상의 두께로 60° 이상의 고각 절리가 발달한 불량한 지반구간에서는 일반적인 보강범위(120°) 적용 시에는 하반 굴착 시 굴착으로 인한 변위가 수렴되지 않고 지속적으로 변위가 발생하여 최대 70 mm 이상 변위가 발생하였다. 따라서 단층점토가 고각으로 막장면에 존재하는 경우, 하부 굴착 시 추가적인 변형이 발생하므로 하부 보강이 반영되어야

안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

- (4) 국지성 강우량의 증가, 하반 굴착 시 계측값의 지속적인 증가, 단층파쇄대가 지표면까지 연결되는 지반조건이 공통적으로 존재하는 경우 대규모 붕락 또는 과다변위가 발생하므로 하부보강 및 하부굴진거리를 상부굴진거리 이내에서 시공되어야 할 것으로 분석되었다.

References

1. 천우기술단 (2002), 단경터널 안정성 분석 보고서, pp. 9~52.
2. 한국도로공사 (2003), 강장터널 붕락원인 및 보강대책 보고서, pp. 11~78.
3. 한국터널지하공간학회 (2005), 양강터널 안정성 보고서, pp. 16~81.
4. 한국터널지하공간학회 (2010), 터널붕괴사례집, pp. 31~69.