

화산쇄설암 구간에서 터널 공사 중 장기변형거동 특성 연구

The Characteristics of Long-term Deformation Behavior During Tunnel Excavation in the Pyroclastic Rock

장 석 명[†] · 한 희 수¹⁾

Sukmyung Jang · Heuisoo Han

Received: June 28th, 2022; Revised: July 1st, 2022; Accepted: July 22nd, 2022

ABSTRACT : In Korea, 70% of the land is mountainous and structures occupy a high proportion in railway and road construction. In particular, in recent years, the construction of high-speed railways and highways for high-speed driving is rapidly increasing. At the same time, the construction of tunnels is also increasing. The number of tunnel construction cases in which long-term deformation occurs after tunnel excavation is completed is increasing. The stability of these tunnel structures depends entirely on the characteristics of the rock surrounding the tunnel excavation. In the case of pyroclastic rock, which is the subject of this study, it is generally vulnerable to weathering and has a characteristic that its strength decreases over a long period of time. Tunnel design and construction planning considering the strength characteristics of pyroclastic rocks are essential. This study analyzed the cases of over-deformation that occurred at the tunnel site in the pyroclastic section. Based on this study, a plan for tunnel design and construction management in an area where pyroclastic rock exist in the future is presented.

Keywords : Pyroclastic rock, Long-term deformation characteristics, Tunnel construction management plan

요 지 : 우리나라 지형조건은 산악이 70%를 차지하고 있어 철도 및 도로공사 시 구조물이 차지하는 비중이 높다. 특히, 최근 들어 고속주행을 위한 고속철도와 고속도로 건설이 급증하고 있고 이와 더불어 터널 건설도 증가하고 있고 터널 굴착 완료 후 장기변형이 발생하는 터널 시공사례가 증가하는 추세이다. 이러한 터널 구조물의 안정성은 터널 굴착 주변 암반특성에 전적으로 좌우된다. 본 연구에서 대상인 화산쇄설암의 경우, 전반적으로 풍화에 취약하고 장기간에 걸쳐 강도가 저하되는 특성이 있어서 이를 고려한 터널 설계 및 시공계획 수립이 반드시 필요하다. 본 연구는 화산쇄설암 구간에서 터널 현장에서 발생된 과다변형 사례를 분석하여 향후 화산쇄설암 구간에서는 인버트 설치 및 하부보강을 고려한 방안을 제시하였다.

주요어 : 화산쇄설암, 장기변형 특성, 터널시공관리 방안

1. 서 론

최근 들어 고속주행 개념의 고속철도와 고속도로 건설이 급증하는 추세로 인하여 터널 굴착 중 과다변위 또는 붕락 발생 사례가 급증하고 있다. 이와같이 터널 굴착 중 과다변형과 붕락은 주로 단층파쇄대와 같이 국부적으로 불량한 강도조건과 이에 상응하지 못하는 지보재 및 보강방법 적용 외에 갑작스런 지하수 유입, 불균질성 및 이방성 지반과 터널 직상부에 예측하지 못한 파쇄대 발생 등의 취약한 지반특성에서 그 원인을 추정할 수 있다. 이와 같이 터널 굴착 중 터널 붕괴사례들을 분석해 보면 붕괴 전에 나타나는 일반적인 현상은 균열, 과대한 박리 현상, 측벽부의 침하, 막장면으로의 토사유입과 지하수 용출량 급증 등이 있다(Jang et al.,

2014). 이와같이 터널 굴착 중 터널 막장면 또는 굴착 직후에 발생하는 과다변위 및 붕락사례에 대한 연구는 다수 진행되었으나 본 연구에서는 터널 굴착이 완료된 후 장기간의 시간 경과 후, 즉 계측수렴 여부를 확인하여 다음 공정이 진행된 후 막장면 후방에서 과다변위 발생에 대한 현장사례를 분석하였다. 일반적으로 터널 굴착에 대한 안정성은 굴착 완료 후, 터널 내 계측을 수행하여 변위 등에 대한 수렴여부를 확인하고 나서 다음 굴착공정을 진행하게 된다. 따라서, 터널 굴착 후 일정시간이 경과 후 막장면에서 이격되어 있는 후방부에서 추가적인 변형이 발생하는 것은 터널 굴착 후 안정성 평가라는 측면에서 특이한 사항으로 평가된다. 일반적으로 터널 설계 및 시공 특성은 전적으로 터널 굴착 주변 지반조건, 즉 지반특성에 전적을 좌우되는 경험적인 설계 및 시공

† The Director of the Headquarters, Chungbuk Headquarters, Korea Expressway Corporation (Corresponding Author : smjang@ex.co.kr)

1) Professor, Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

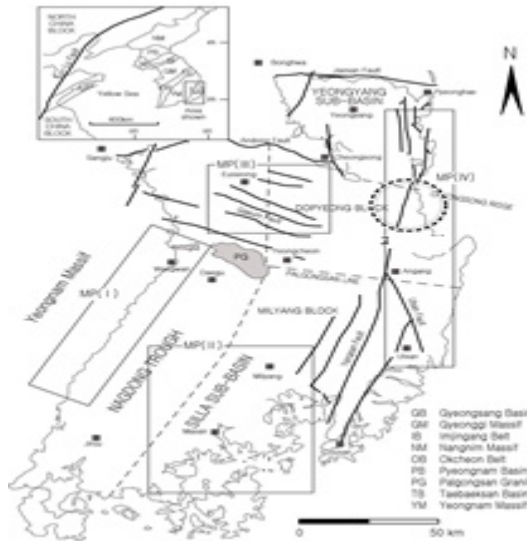


Fig. 1. Research target site

방법이므로 무엇보다도 현장 지반특성에 따른 시공사례 분석이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장에서 터널굴착 완료 후 장기 거동특성 현장사례를 조사 분석하였는데 이러한 장기변형 특성은 Fig. 1과 같이 화산 쇄설암 구간에서 주로 발생하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 화산쇄설암 구간에서 실제로 터널 굴착완료 후 일정 시간이 경과한 후, 과도한 천단침하 및 내공변위 발생을 분석하여 향후 시공방안을 제시하였다.

2. 장기변형 발생 터널 지반 특성

장기변형 발생 터널 현장에 대한 지반특성을 분석한 결과, Fig. 2와 같이 화산 쇄설암 구간에서 발생하는 것으로

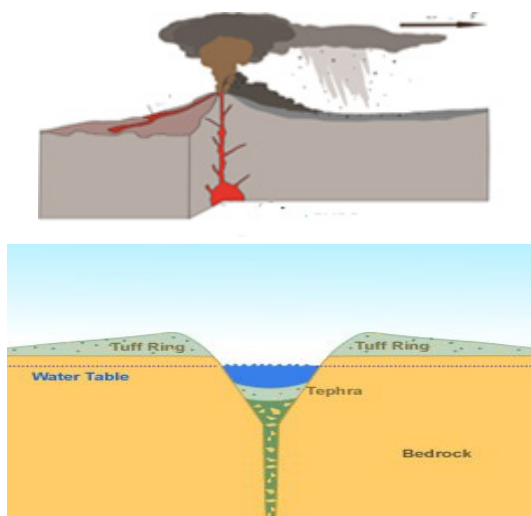


Fig. 2. Pyroclastic formation process

조사되었다. 이러한 화산쇄설암은 화산분출로 인하여 공기중으로 날아가는 고체물질을 화산쇄설물이라고 한다. 이 중 지름이 2mm 이하인 고체물질을 화산분진이라 한다. 이와같이 화산활동에 의해 방출된 이러한 작은 입자의 화산분진이 퇴적, 고화되어 생성된 화산쇄설암을 응회암이라 한다. 응회암의 광물 구성은 분출 당시의 주위 암석종류와 분출된 마그마의 암질에 따라 매우 다양하게 나타나며 퇴적과 암석화 과정이 매우 불균질하게 이루어진다.

Fig. 3과 같이 화산쇄설암에 대한 지화학적 풍화 변질특성을 분석하기 위하여 다음과 같이 X-선 회절시험을 실시하였고 분석결과, 녹니석, 일라이트, 스�멕타이트, 적철성 등이 산출되었는데 특히 스�멕타이트는 팽창성 점토광물로서 미량의 수분과 접할 시에 지반강도가 급격히 저하되는 특성이 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 4와 같이 스�멕타이트(Smectite)의 공학적 문제점은 점토 광물의 일종으로 대표적인 팽창성 점토광물로서 수분을 흡수하여 원래 부피의 7~10배로 팽윤하는 성질이 있으며, 함수량 150%에서 점착력(粘着力)이 생기고, 약 500%의 함수량에서 점착력을 잃으며, 내부 마찰저항이 작은 특수한 성질을 가지고 즉, 물을 흡수할 경우 점착력을 잃어 전단강도가 급격히 저하된다.

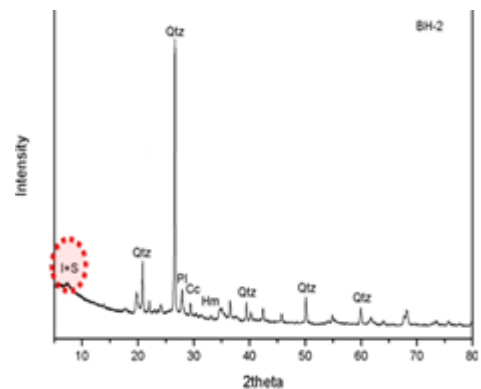


Fig. 3. The result of X-Ray diffraction, XRD

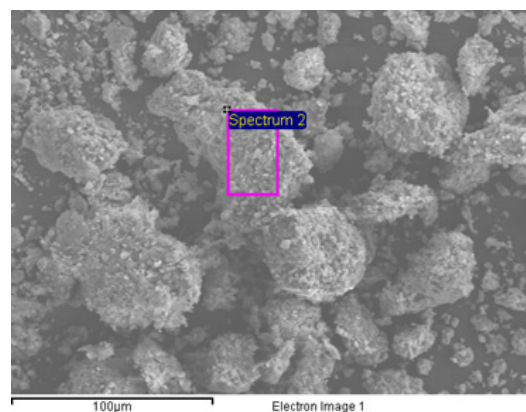


Fig. 4. The Result of Scanning electron Microscope (SEM)

3. 장기 변형 특성

본 연구대상 터널 시공 중 계측자료 분석결과, 경시변화 그래프 상 천단침하 및 내공변위의 변위속도가 변동이 없어 수렴상태인 것으로 분석되었다. Fig. 5와 같이 변형이 확인된 것은 굴착 완료 기간이 9개월 지나고 배수 콘크리트 타설을 위한 준비단계로서 공동구 기초부 청소작업 중에 추가적인 변위가 발생한 것이 확인되었는데 발생한 변위량은 우측부 내공변위가 149mm, 좌측 천단부 161mm 발생한 것으로 계측되었다. 현장에서는 공동구 기초부 폐합 및 강제배수를 조치한 이후 변위가 수렴상태를 확인한 상태였고 추가적인 변형을 억제하기 위하여 Fig. 6과 같이 전 구간 압성토를 시행하였다. 이와같이 과다변형이 발생한 경우 가장 큰 문제점은 콘크리트 라이닝 설계단면 300mm를 확보하지 못하는 내공부족 구간이 발생한다는 것이다(Kim & Lee, 2019).

본 현장에 지반특성을 분석한 결과, Fig. 7과 같이 전형적인 화산쇄설암을 기반으로 하는데, 구성되는 화산재의 주요 원소성분의 화학조성에 따라 유문암질 응회암, 안산암질 응회암, 현무암질 응회암 등으로 분류한다. 유문암질 응회암은 유문암으로 덮인 화산이 폭발하여 분출된 화산재가 퇴적된 후, 단단한 암석으로 다져지는 고화작용으로 생성된다. 이들은 결합 정도가 매우 낮아 일반토사보다는 우세하지만

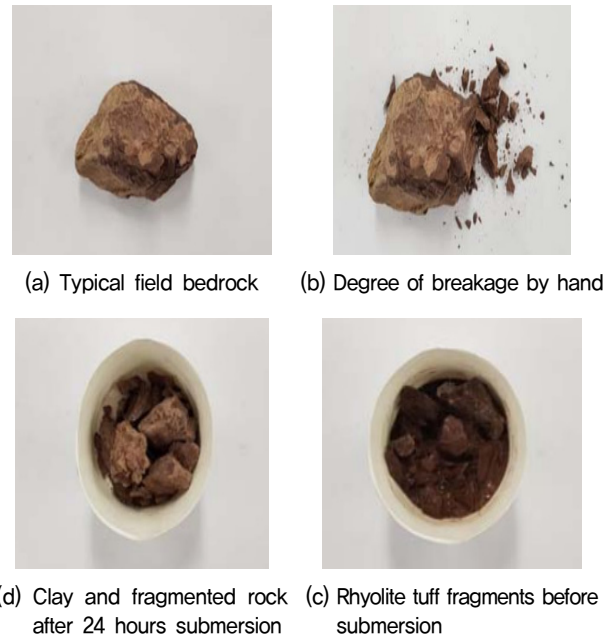


Fig. 7. Typical characteristics of bedrock

완전히 고결되어 암석화가 진행된 것들과 비교할 때, 지질해머로 쉽게 긁히는 정도로서 공학적인 측면에서 매우 취약한 강도특성을 가지는 경향이 있다.

4. 역해석을 통한 터널변위 발생 원인 분석

역해석이란 일반적인 정해석(Forward Analysis)에 반대되는 개념으로서 실제 계측된 변위 및 응력결과로부터 불확정적으로 설계 시 적용된 해석모델의 설계조건을 재산정하는 방법이다. 본 연구에서는 시공 중 계측결과를 활용하여 역해석을 수행하고 실제변위가 크게 발생한 구간의 지반조건을 재평가한 후, 시공 지보패턴의 적정성을 평가하여 터널 변위 발생에 대한 원인을 분석하였다. 역해석 방법은 시공 시 계측된 기지의 값을 기준으로 설계조건 재산정을 위한 미지의 값을 찾아가는 방법으로서 크게 직접법(Direct Method)과 역산법(Inverse Method)으로 구분된다. 또한, 계측자료의 신뢰도가 고려된 수학적 알고리즘에 대하여 결정론적 접근방법과 확률론적 접근방법을 통하여 결과를 도출하는 방법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 터널의 거동특성 및 지보재 응력변화에 관여하는 영향인자와 계측자료 등을 고려하여 계측된 변위값을 활용하여 역해석을 수행한 결과, 직접법에 의한 역해석 방법을 선정하였다. 당초 설계 시 터널 안정성 평가에 활용된 지반강도정수에 대한 적정성을 분석하였다.

본 연구대상 터널 설계 시 적용된 중요한 물성치는 지반변형계수와 점착력이다. 당초 설계 시 지반변형계수는 2,300MPa

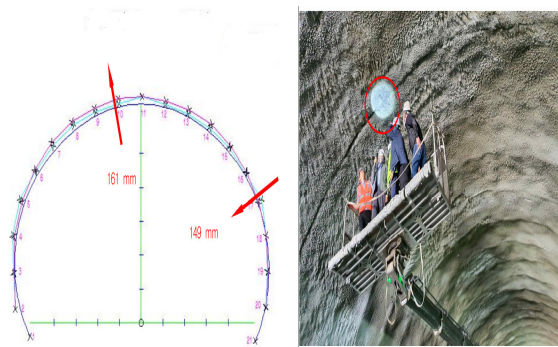


Fig. 5. Crown settlement and convergence of research tunnel



Fig. 6. Preloading of the research tunnel wall

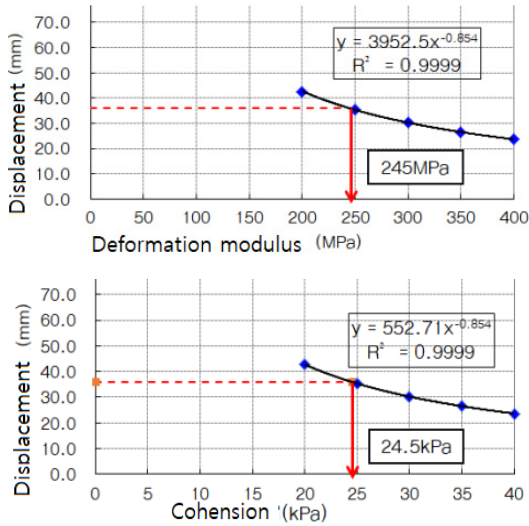


Fig. 8. Back analysis of deformation modulus and, cohesion

이고 점착력은 300kPa이며 이를 근거로 터널안정성평가를 수행한 결과를 근거로 지보패턴을 선정하였지만 실제 터널에서 발생한 변위 계측결과는 당초 설계 시 예상보다 변위량이 과다하게 발생하였다. 따라서 실제 현장에서 계측된 변형량을 분석하여 역해석한 결과, Fig. 8과 같이 지반변형계수는 245MPa이고 점착력은 24.5kPa으로 분석되었으며 당초 설계 시 적용한 지반강도 정수값은 실제 보다 10배 이상 과다한 지반정수값을 적용한 것으로 분석되었다. 본 연구대상 터널 현장과 같이 장기간에 걸쳐 지반강도 저하현상이 발생하는 지질조건에서는 이러한 장기변형 거동특성을 고려하여야 한다.

5. 화산쇄설암 구간에서 터널 과다변위 발생 유형

화산쇄설암 구간에서 터널 과다발생 사례는 우리나라 뿐만 아니라 우리나라와 인접에 있는 일본에서도 종종 발생하고 있다. 변형 발생 유형 관점에서 대표적인 사례를 요약하면 다음과 같다(Song & Yun, 2016). 일본 우레시노(Ureshino) 터널은 2차로 고속도로 터널로서 평균 토피고가 70~100m 인 산지부를 관통하는데 산지부 중턱은 안산암, 산록부에서는 응회각력암, 응회질 역암이 분포하였다. 터널 시공 중 지반변위가 크게 발생하였으며 특히, Fig. 9와 같이 터널 굴착 완료 후 공영 중에는 포장용기, 라이닝 균열 등의 변상이 발생하였다. 이에 따라 변상이 현저한 구간에 측벽부 추가적인 변위발생을 억제하기 위하여 록볼트를 시공하였으며 Fig. 10과 같이 하부 바닥부를 전 구간 콘크리트 라이닝 인버트 폐합을 실시하였다.

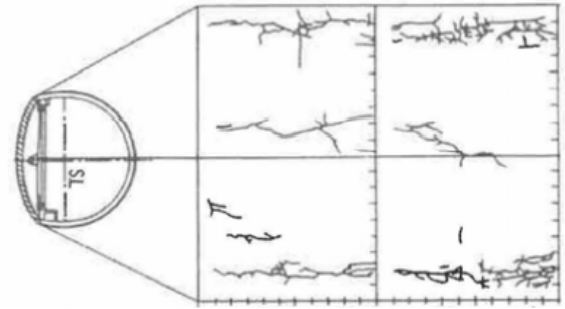


Fig. 9. Ureshino tunnel (Crack of concrete lining)

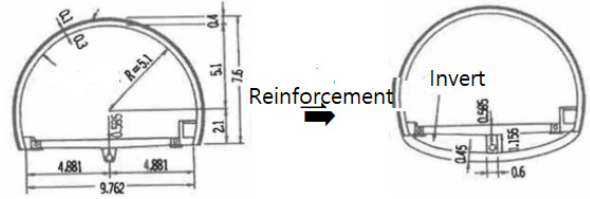


Fig. 10. Ureshino tunnel (Invert pattern)

아사마야(Asamayama) 터널은 2차로 고속도로 터널로서 최대 토피고는 약 130m지만 터널 중앙부는 계곡부가 위치하여 1.0D 정도의 저토피 구간을 관통하였다. 시공 중 막장면 관찰자료에 의하면 응회각력암, 응회암, 안산암, 이암의 복합적인 지질구조를 나타내며, 균열이 발달하였으나 유출수량은 많지 않은 것으로 조사되었다. 본 터널의 경우, Fig. 11과 같이 공용 중에 포장용기, 라이닝 균열, 내공단면 축소 등의 변상이 발생하였고 Fig. 12와 같이 전 구간 콘크리트

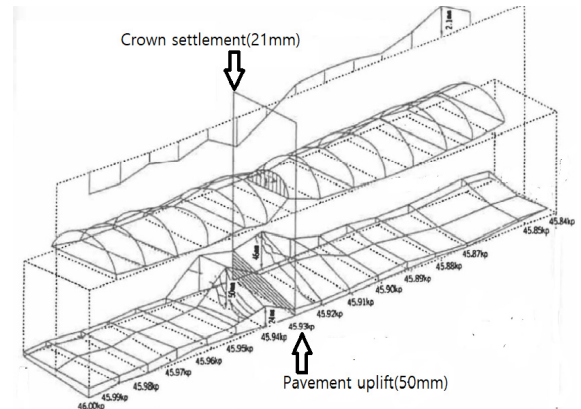


Fig. 11. Asamayama tunnel (Pavement uplift, Crown settlement)

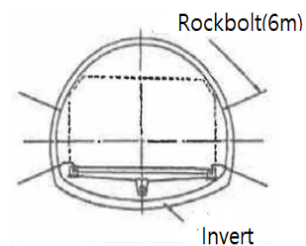


Fig. 12. Asamayama tunnel (Invert, Rockbolt)

라이닝 인버트 폐합과 추가 록볼트를 설치하였다.

상기의 해외사례와 같이 터널구간 지반조건이 장기적인 변형 특성을 보이는 경우, 터널 굴착에 의한 천단침하 및 내공변위가 크게 발생하는 동시에 터널 바닥부 과다변형에 의한 이완응력이 크게 발생하는 경향을 나타낸다. 특히, 터널 바닥부 과다변형 및 이완응력은 터널 막장면 진행에 의한 중방향 아칭효과 감소 후 추가적인 터널변형 및 지보재 부재력을 증대시켜 터널 안정성에 큰 악영향으로 작용한다. 이에 대해서 터널 인버트 및 가인버트는 바닥부를 역 아칭형상으로 굴착한 후 조기에 강지보재 및 슛크리트로 링 구조체를 형성시킴으로써 지반변형을 억제하고 터널의 안정성을 증대시키는 중요한 보강방안이다. Fig. 13은 2아치 터널 중앙벽체가 국부적인 파괴가 발생한 사례로서 굴착완료 후 후방 중앙벽체에 파손되었다. 이러한 파괴원인은 Fig. 14와 같이 변상구간 상부의 화산쇄설암 분포대와 파생단층과 평행한 단층대가 굴착 중 지하수 유출에 의한 공극확대로 상부 절리집중 구간까지 이완영역대가 일부구간에서 국한하여 확대 발생된 것으로 분석되었다. 따라서, 파괴 메커니즘은 변상구간 상부에 위치한 암반결합력이 약한 화산쇄설암 분포와 5등급 이하의 불량암질이 집중적으로 분포하는 지질조건으로 터널 굴착으로 인하여 지하수위가 굴착 면까지 저하되고 이러한 지하수 저하에 따라 장기간에 걸쳐서



Fig. 13. The case of 2 arch tunnel (Fracture of center wall)

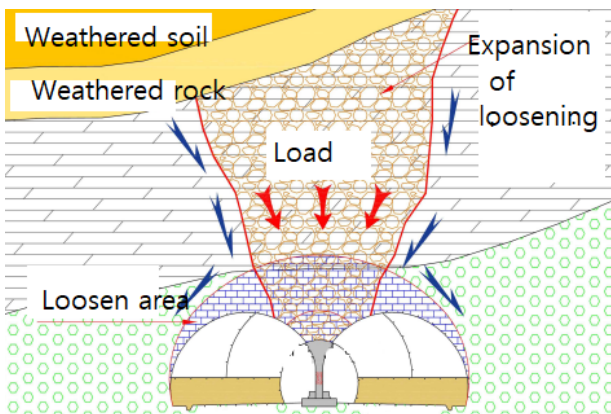


Fig. 14. 2 Fracture mechanism of 2 arch tunnel

화산쇄설암반 결합력이 약화 되면서 상부 추가하중으로 작용하였을 것으로 분석되었다.

추가적으로, 일정량의 지하수가 지속적으로 유출됨에 따라 상부 파생 단층파쇄대(절리집중구간)와 터널 천단부 절리구간이 연결되어 국부적으로 이완하중이 과대하게 집중 증가하여 중앙벽체의 압축균열을 유도하여 중앙벽체 국부적인 파손이 발생한 것으로 분석되었다.

일반적인 터널과는 설계개념이 차이가 있는 일반적인 터널은 굴착주변 지반이 터널 굴착에 따른 이완하중을 굴착주변 지반으로 분배하여 안정성을 확보하는 개념이고 상기의 사례와 같이 2아치터널의 경우에는 터널 굴착 주변 지반에 이완하중을 분배보다는 좀 더 적극적으로 중앙벽체는 상부 하중을 직접 받아주는 역할을 수행하는 개념이다. 따라서 이러한 2아치터널은 지반조건이 불량하여 터널굴착에 따른 이완하중을 중앙벽체에서 지지하는 적극적인 설계 개념이다. 따라서, 2아치터널에서 중앙벽체는 가장 중요한 지보부재로서 철근콘크리트 구조부재로 제작이 된다. 이와같이 중앙벽체의 손상은 터널 상부 하중 상당부분이 이완하중을 작용한 것으로 예측할 수 있는데 2아치 터널설계 시 일반적으로 활용하는 이완하중 산정식을 초과하는 하중이므로 화산쇄설암 구간에서는 이를 고려한 설계하중이 적용되어야 하고 화산쇄설암 구간에 대해서는 Fig. 15와 같은 보강방안이 적용되는 것이 합리적인 것으로 분석되었다.

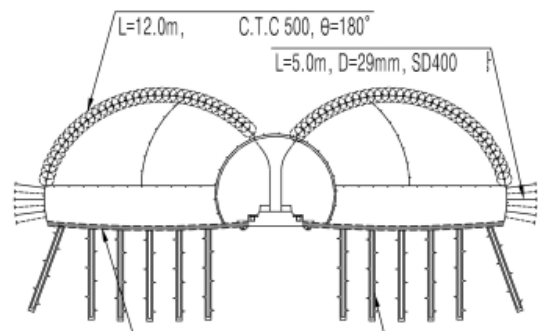


Fig. 15. Reinforcement support pattern of 2 arch tunnel

6. 결 론

터널 설계 및 시공방법은 경험적인 요소, 즉 시공사례를 고려하여야 하는 특성이 있다. 특히, 터널 굴착 주변 지반특성에 많은 영향을 받는 경향이 있다. 본 연구에서와 같이 화산쇄설암이 널리 분포하는 지역에서는 장기간 변형특성을 고려하는 것이 합리적인 것으로 분석되었다.

- (1) 본 연구대상 터널 구간의 기반암인 화산쇄설암반 구간에서는 화산쇄설암 자체의 고결도가 낮으므로 단기적으로는 터널 굴착 중 막장 붕락사태가 자주 발생하고 장기적으로는 지반이완 및 변형발생으로부터 터널의 안정성을 확보할 수 있는 터널 단면 계획이 필요한 것으로 분석되었다.
- (2) 터널 구간 지반조건이 화산쇄설암의 경우에는 터널 굴착에 의한 천단침하 및 내공변위가 크게 발생하는 동시에 터널 바닥부 과다변형에 의한 이완응력이 크게 발생하는 경향을 나타내고 특히, 터널 바닥부 과다변형 및 이완응력은 터널 막장면 진행에 의한 종방향 아칭효과 감소 후 추가적인 터널변형 및 지보재 부재력을 증대시켜 터널 안정성에 큰 악영향으로 작용하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 따라서, 화산쇄설암 구간에서는 터널 인버트는 바닥부를 역 아치형상으로 굴착한 후 조기에 강지보재 및 슛크리트 링 구조체를 형성시킴으로써 지반변형을 억제하고 터널의 안정성을 확보할 수 있다.
- (4) 화산쇄설암 구간에서 터널 굴착완료 후 변형발생 메카니즘은 강우에 의한 지하수 유입으로 터널 주변 지반 내

함수비 증가, 지반의 전단강도 저하, 소성변형 증대, 지반이완 발생 및 지반하중 증가로 인하여 장기간에 걸쳐서 추가적인 터널 변위가 발생하는 것으로 분석되었다.

이와같이 본 현장 및 유사사례 연구를 통해 화산쇄설암 구간에서는 터널 설계 및 시공계획 수립 시 장기적인 거동 특성을 고려한 계획을 수립하는데 활용할 수 있는 것으로 분석되었다.

References

1. Jang, Y.C., Kim, N.Y., Jin, K.D. and Son, Y.M. (2014), Upheaval behaviour of tunnel bottom in the weathered fracture zone under tunnel excavation, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 15, No. 6, pp. 49~56 (In Korean).
2. Kim, N.Y. and Lee, K.H. (2019), Technical Advisory Report, Korea Expressway Corporation Research Institute, pp. 21~78 (In Korean).
3. Song, G.I. and Yun, J.S. (2016), Tunnel Deformation Mechanism, pp. 79~85 (In Korean).