

여굴이 큰 터널의 안전성에 관한 연구

Study on the Stability of Over Break in Tunnel

김 동 백* / 권 기 준**
Kim, Dong Baek / Kwon, Ki Jun

Abstract

When we build the tunnel, occasionally, the blasted section exceed the designed section because of geological properties and the lack of blasting technologies, and the exceed section is remained as over break after the construction of tunnel lining. When the underground water leaks with silt and clay through the cracks of rocks, the large over break cause a structural stability problem in tunnel, and the back charging of over break is very important subject, because the undoing of back charging cause the drop of crashed rocks and serious problem in the stability of tunnel lining. Therefore, the theory of blast is studied and purpose the structural analysis of back charging and propose the safe method about the drop of crashed rocks.

key words : tunnel, blasting, over break, structural stability

요 지

현재 터널을 시공할 때 발파기술의 발달로 설계단면보다 크게 단면을 발파하는 경우는 많지 않으나 지질 특성상 커다란 여굴이 발생하는 경우가 종종 있으며, 또한 발파기술이 낙후된 시기에 시공된 터널은 설계단면보다 훨씬 크게 발파단면이 형성되어 라이닝을 설치한 후에도 상당 부분이 여굴로 남는 경우가 있다. 여굴이 크게 발생한 부분은 절리를 따라 지하수가 스며들면서 점토질 성분이 혼입되어 있는 부분이 비스듬한 각을 이루면서 터널 단면을 절단하고 있는 파쇄대를 형성하고 있다. 절리면에서 썩기를 형성하고 있던 상부는 작은 진동에도 모두 낙석으로 떨어지게 되며 구조적인 안정성 문제를 야기한다. 기존터널의 여굴이 발파단면 내에 위치하지 못하여, 기존터널의 발파영향선이 확장터널의 발파영향선을 변화시키고, 아치(arch)작용이 발생하지 않아 터널의 안정성에 심각한 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한, 여굴의 규모가 커서 여굴의 뒷채움을 하지 않으면 토압의 측면에서 매우 불리하며, 안정화 되지 못한 여굴의 상부에서 낙반이 발생할 위험이 상존한다. 따라서 공사의 원만한 진행을 위해서는 여굴의 안정화를 이루고 난 후 후속공정을 진행하거나, 낙반에 대한 안전조치를 취한 후 공사를 진행해야 한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 터널의 구조적 안전성과 시공성을 검토하였다.

핵심용어 : 터널, 발파, 여굴, 구조안전성

* 정희원 · 환경대학교 토목공학과 교수 (e-mail : dbkim@hknu.ac.kr)

** 정희원 · 환경대학교 안전공학과 부교수

1. 서론

근래에는 발파기술의 발달로 터널을 시공할 때 설계 단면보다 크게 단면을 발파하는 경우는 많지 않으나 발파기술이 낙후된 시기에 시공된 터널이나 지질적 특성상 파쇄대가 있는 부분을 발파하는 경우 설계단면보다 훨씬 크게 발파단면이 형성되어 라이닝을 설치한 후에도 상당 부분이 여굴로 남는 경우가 있다. 또한 기존 터널을 확장하여 재시공하는 경우, 기존 터널의 단면이 너무 크게 발파되어 확장터널의 설계단면보다 훨씬 큰 경우가 발생하는 경우가 있다. 이러한 경우 설계 단면을 초과하는 부분은 여굴로 남게 되며, 뒷채움을 하지 않은 경우는 상당량의 낙반이 발생한 것으로 조사되었다(국립환경대학교 건설공학연구소, 2003).

발파 또는 지질적 특성으로 인하여 여굴이 크게 발생한 부분은 절리를 따라 지하수가 스며들면서 점토질 성분이 혼입되어 파쇄대를 형성하고 있으며, 절리면에서 켜기를 형성하고 있던 상부는 모두 낙석으로 떨어지게 된다. 따라서 이러한 여굴은 구조적, 안전적인 관점에서 많은 문제를 야기한다. 즉, 기존 터널의 여굴이 발파단면 내에 위치하지 못하면, 확장터널의 발파영향을 변화시키고, 아치작용이 발생하지 않아 터널의 안정성에 심각한 문제가 발생할 가능성이 있다(윤지선 등, 2001 ; 한국지반공학회, 1998 ; 박운용, 2003). 따라서 규모가 큰 여굴을 뒷채움 하지 않으면 토압의 관점에서 매우 불리하며, 안정화 되지 못한 여굴의 상부에서 낙반이 발생할 위험이 상존하므로 여굴의 안정화 및 낙반에 대한 안전조치를 취한 후 공사를 진행해야 한다.

본 논문에서는 터널의 시공시 발생한 규모가 큰 여굴의 안전한 뒷채움방법과 낙반에 대한 대책을 수립하고 이에 대한 구조적 안정성과 시공성을 검토하는데 그 목적이 있다.

2. 대상구조물 개요

2.1 대상구조물 제원

대상구조물은 강원도 내에 위치한 국도확장공사 구간의 터널로서 기존 터널의 확장을 위한 발파과정에서 커다란 여굴이 발생하였다. 조사대상 터널의 제원 및 단면도는 그림 1 및 표 1과 같다.

2.2 대상구조물의 여굴 현황

대상 터널은 조사당시 시점부터 약 150m 지점에서

매우 큰 여굴이 발견되었고, 확장 발파 후 터널의 라이닝 타설을 준비하던 중 이곳에서 많은 양의 낙반이 발생하여 공사를 중지하였다. 이 여굴은 기존 터널의 시공 시 발생한 것이며, 확장터널의 라이닝보다 훨씬 크게 존재한다. 또한 이 여굴은 좌우 60°의 기울기로 매우 긴 절리층이 형성되어 있고, 좌측의 상단부에 매우 큰 여굴이 형성되어 있는데, 이 절리층 사이에 누수로 퇴적물이 쌓여 암반간의 이격을 키웠고, 2차 발파로 인한 충격에 절리층이 분리되면서 낙반이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 기존터널의 굴진시 발파기술의 부족 또는 과장약으로 암반의 균열 및 파쇄대가 상당 부분 존재하는 것으로 추정되며, 절리층 외에 여러 종류의 강연암반이 덩어리로 형성되어있는 바 2차발파의 진동에 의해 균열이 더욱 진전되었을 것으로 판단된다.

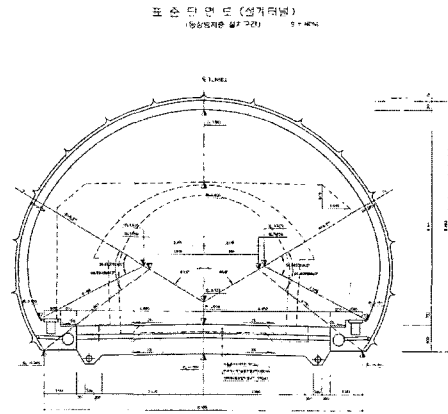


그림 1. 대상구조물의 표준단면도

표 1. 대상구조물 제원

| 구조물의 종류 | 확장 터널 | 기존 터널 |
|---------|---------------------------|--------------------------|
| 공 법 | NATM | NATM |
| 설계기준강도 | 180kgf/cm ² | |
| 연 장 | 680m | 680m |
| 구 배 | 횡 : 2%, 종 : 3% | 횡 : 2%, 종 : 3% |
| 단면 제원 | H : 646 cm B : 1120 cm | H : 480 cm B : 831 cm |
| 라이닝 두께 | 30cm | 30cm |
| 방수 형식 | 배수형 부분방수 | 배수형 부분방수 |
| 차 선 | 2방향 2차로 | 1방향 1차로 |
| 개문 형식 | 면벽식 | 면벽식 |
| 환기 방식 | 자연 환기식 | 자연 환기식 |

3. 시공시 낙반에 의한 안전성 검토

3.1 해석 개요

검토대상 터널은 입구로부터 약 150m 지점에서 커다란 여굴이 발견되며 종 방향으로 약 25m 정도 계속된다. 여굴의 형상은 설계단면과 비교하여 좌측 상부 쪽으로 치우쳐 있으며, 최고 높이는 약 7m이다. 터널의 공정에서 라이닝은 발파와 굴착 및 지보공이 끝나고 난 후에 시공하게 되므로(국립환경대토목공학과, 2003), 굴착공정과 라이닝공정 사이에 발생할 수 있는 낙반사고와 더불어 터널 자체의 구조적 안정성을 확보할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

본 검토대상 터널의 경우 강지보재가 터널의 종방향으로 1.5m의 간격을 두고 설치되어 있다. 낙반에 대한 안전조치로 각 지보재 사이를 D-19 철근으로 연결하고 그 위에 와이어메쉬를 얹은 후, 슛크리트를 타설하여 전체가 하나의 아치구조물을 형성하도록 시공한다. 이러한 시공이 이루어지고 난 다음에 뒷채움 이 되지 않은 상황에서 무게 100kgf의 암석이 떨어지는 경우를 고려하였으며, 안전의 판단은 강지보재에 발생하는 처짐의 정도를 근거로 하였다(최재진 등, 1998).

3.2 검토결과

구조해석은 범용프로그램인 SAP2000을 이용하여 수행하였으며, 해석시 지보구조물의 아치는 슛크리트가 30cm 두께로 타설되어 합성구조물로 거동을 한다고 모델링하였다. 해석방법은 정적해석을 한 다음, 정

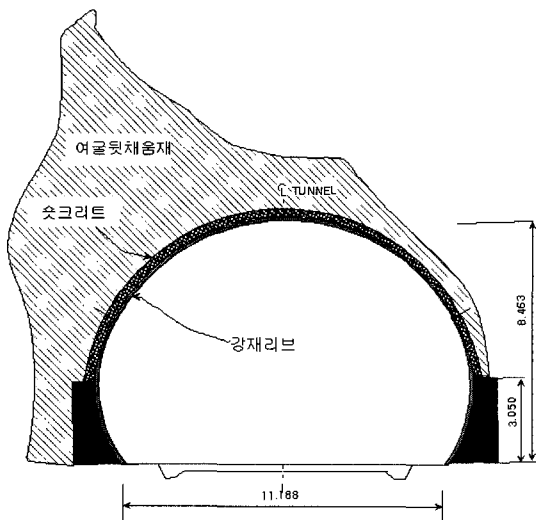


그림 2. 대상구조물의 여굴 현황

적 처짐으로부터 충격계수를 구하고, 그 충격계수를 해석결과에 곱하여 구조물의 안정성을 검토하였다(장동일 등, 2000).

충격계수는 동적하중에 의한 처짐과 정적하중에 의한 처짐의 비의 함수로 정의되며, 그 값은 에너지법으로부터 유도되는데, 낙하거리를 h , 정적 처짐을 Δ_{st} , 동적 최대 처짐을 Δ_{max} 라고 하면 충격계수 i 는 다음과 같다.

$$i = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \quad (1)$$

해석결과, 정적처짐은 $\Delta_{st} = 0.2207mm$ 이므로 충격계수는 $i = 165.9$ 가 된다. 또한, 정적하중 작용 시에 최대응력은 $f_{st} = 0.04855kg/cm^2$ 이므로 동적하중이 작용할 때의 최대응력은 $f_{max} = 8.05445kg/cm^2$ 이 된다. 그러므로 이 방법으로 낙반대책을 세운다면 최소한 100kgf의 암반이 3m에서 떨어지는 경우는 안전하다고 판단된다. 그러나 예상 외로 아주 커다란 낙반이 예상되는 경우나, 한꺼번에 많은 양이 붕괴할 가능성이 있는 경우는 미리 균열속에 고화제를 주입하여 암반의 안정을 확보하는 것이 필요하다.

4. 뒷채움 후의 안전성 검토

4.1 구조해석을 위한 모델링

터널단면의 여굴에 대한 안전성을 확보하기 위하여 일반적인 지보공으로 시공하지 않고, 터널단면 상부지

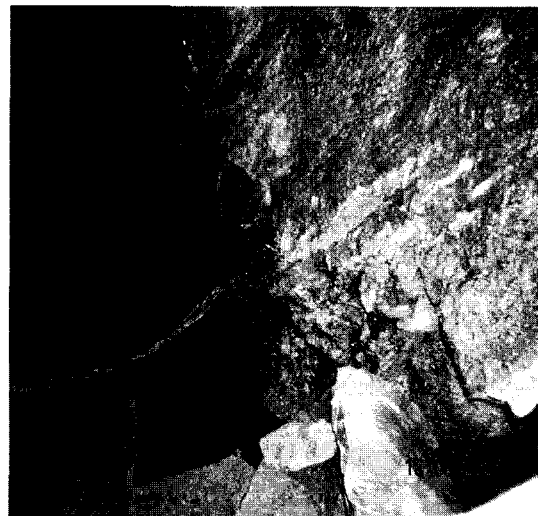


그림 3. 터널의 여굴상태

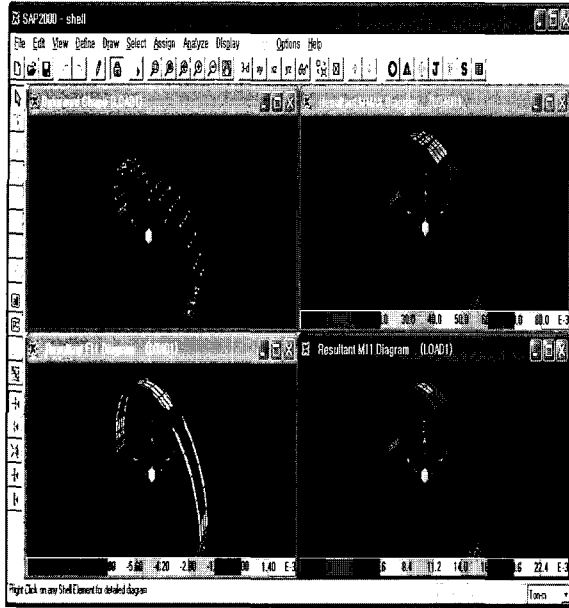


그림 4. 정적하중에 대한 해석결과

반의 지지를 위한 구조물을 형성할 수 있도록 보강할 필요가 있으며, 그 구체적인 방법으로 강 재지보재를 설치한 후 그 지보재 사이를 종방향 강봉 또는 철근으로 연결한 후 그 위에 와이어메쉬를 설치하고 슛크리트를 뿜어, 이들 요소들을 일체화시켜 아치구조물을 형성하도록 한다. 슛크리트를 1차로 뿜어 지보구조물에 막이 형성되면 여굴 단면의 상부에서 하부로 슛크리트를 뿜어서 단면을 증가시키도록 한다. 하부에서 상부로 뿜어서 단면을 증가시키는 것은 터널의 최종 단면에 영향을 미치게 되고 부착에 따르는 문제가 발생할 수 있으므로 상부에서 하부로 타설하는 것이 바람직하다.

터널 설계단면의 상부와 함께 측면에 공동이 크므로 지보공의 안전성 확보를 위하여 지보공 측면하단의 보강이 필요하기 때문에 바닥면에서부터 약 3m 높이에 이르기까지 콘크리트로 채움을 하여 보강하는 것이, 차후 아치구조물을 형성하는 과정과 뒷채움을 하는데도 필요하다. 바닥면에서 부터 3m 높이는 터널의 수평내공이 가장 큰 부분이다.

뒷채움을 하기 전에 지보구조물을 보강한 다음, 보강된 구조물이 뒷채움 재료의 자중에 의해 안정성 문제가 발생하는지의 여부를 구조해석을 수행하여 판단할 필요가 있다. 뒷채움 재료는 슛크리트, 경량콘크리트, 그리고 경량발포수지 등을 고려할 수 있으며, 이들 각각의 뒷채움 재료에 대한 구조적 안정성을 해석에 의하여 판단하였다.

해석을 수행하는 과정에서 보강재로 사용하고 있는 강재아치와 지보공에 뿜어진 슛크리트가 일체화 되어

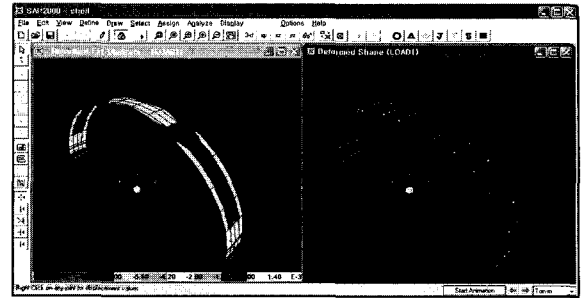


그림 5. 동적하중에 대한 해석결과

있다고 가정하였으며, 슛크리트의 두께는 30cm로 가정하였다. 슛크리트는 구조물 하부에서 상부로 뿌려지는 것이 일반적인 시공방법이지만, 연구대상터널의 경우에는 여굴이 남아 있으므로, 구조해석에서 지보구조물은 아치로 모델링 하였으며, 하부보강 콘크리트의 상단부를 아치의 힌지로 설정하였다. 하중은 여굴의 형상을 따라서 왼쪽에서부터 오른쪽으로 감소하는 형태로 되며, 뒷채움 재료는 하중으로 고려한다.

해석에 사용된 슛크리트의 자중은 $2t/m^3$, 경량콘크리트의 자중은 모르타르와 스킨로폼 볼의 부피 비를 4:6로 가정하여 $1.0t/m^3$ 경량발포수지는 $45 kgf/m^3$ 으로 일반적으로 가장 많이 사용되는 값들이다.

지보공에 작용하는 하중은 공동 뒷채움의 양생이 진행되는 단시간 동안에 안정화되어 있다고 가정하고, 여굴에 타설되는 뒷채움 재를 슛크리트와 폴리우레탄 폼 및 경량콘크리트로 나누어 수행하였다.

해석시 지보의 단면은 폭 100 cm×높이 30 cm로 가정하였으며, 강지보재의 세원은 $100 \times 100 \times 6 \times 8$ 이다. 강지보재와 그 위의 철근, 와이어메쉬 및 콘크리트는 합성구조로 거동할 것이며, 이때 상부의 압축력은 콘크리트가 부담하고 하부의 인장력은 강재가 부담하는 철근콘크리트 부재로 생각할 수 있다. 이때의 단면계수를 개략적으로 산정하면,

$$A = A_c + nA_s = 3,013cm^2,$$

개략적인 중립축의 거리는,

$$y_1 = 15\text{cm}, y_2 = 30\text{cm}$$

또한 개략적인 I 값은

$$I = 559,228\text{cm}^4$$

$$Z_1 = \frac{I}{y_1} = 37,281\text{cm}^3,$$

$$Z_2 = \frac{I}{y_2} = 18,641\text{cm}^3$$

라이닝 콘크리트의 설계기준강도를 180kgf/cm^2 이라고 가정하면, 라이닝 콘크리트의 허용 휨압축응력은 $f_{ca} = 72\text{kgf/cm}^2$ 이며, 강재의 허용인장응력은 $f_{ta} = 1,800\text{kgf/cm}^2$ 이다.

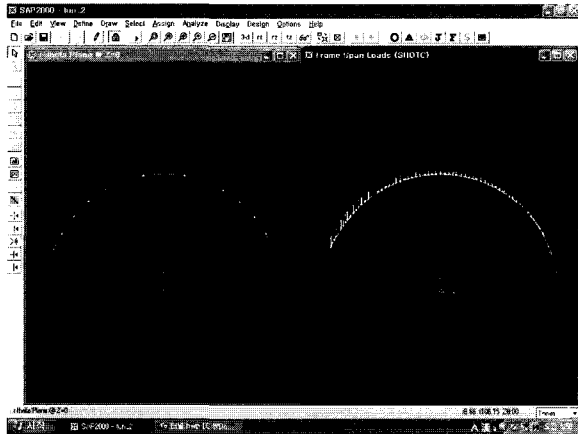


그림 6. 강지보재에 작용하는 하중

4.2 구조해석을 통한 안전성 검토결과

숏크리트와 폴리우레탄 폼 및 경량콘크리트로 채우는 경우 지보에 작용하는 최대내력 및 응력에 대한 구조해석 결과는 표 2에 나타나있다.

표 2에서 알 수 있는 것처럼 대상 터널의 여굴 뒷채움 후의 해석결과는 모든 뒷채움 재료에 대해 안전하지만, 콘크리트의 휨압축에 대한 결과를 볼 때, 숏크리트로 뒷채움을 할 경우 지점부에서 휨에 의한 파괴의 가능성을 배제할 수 없으므로 경량의 재료를 사용하는 것이 안전할 것으로 판단된다. 그렇지만, 지보구조물을 구성하고 있는 강지보재, 지보재를 연결하고 있는 철근, 그리고 그 위의 와이어메쉬의 역할을 제외하고 해석한 것이므로 여타의 응력은 상당히 안전한 결과로 생각 할 수 있다.

실제의 경우 강지보재, 철근, 그리고 와이어메쉬가 대부분의 인장응력을 부담하고, 강지보재 사이를 철근과 와이어메쉬가 일체로 지지하게 되어 상부하중을 측면으로 분산시키는 3차원의 거동을 하게 되어 응력의 감소가 일어난다. 또한, 해석에 사용된 하중상태는 여굴에 의한 공동이 가장 크게 나타나는 부분에 대한 것이므로 실제의 응력은 위의 결과보다 더 작은 값으로 나타난다.

이러한 해석결과를 바탕으로 뒷채움 이후에 지보공의 안전을 위해서는 다음과 같은 방법으로 지보재의 시공을 하는 것이 안전성 확보를 위해 필요하다고 판단된다.

- ① 강지보재의 간격을 1.5m로 하고 지보재위에 철근과 와이어메쉬를 설치한 다음 숏크리트를 두께를 30cm로 타설하여 일체화된 지보구조물을 만드는 방법
- ② 강지보재의 간격을 0.75m로 하고, 철근과 와이어메쉬를 시공한 다음 숏크리트 두께를 20cm로 타설하여 일체화된 지보구조물을 만드는 방법

표 2. 뒷채움 재료별 해석결과

| 뒷채움 종류 | 최대 단면력 | 부재위치 | 응 령 (kgf/cm ²) | 지보재 응력 | 판 정 |
|---------------|----------------------|-----------|----------------------------|-----------------|----------|
| 숏크리트 | 104.92 tonf (압축력) | 측면(수직) 부재 | 34.82 | 압 축 | OK |
| | 24.29 tonf-m (휨 모멘트) | 중양(수평) 부재 | 65.15 1179.54 | 휨압축 휨인장 (철근) | OK OK |
| 폴리우레탄폼 | 5.25 tonf (압축력) | 측면(수직) 부재 | 1.75 | 압 축 | OK |
| | 1.21 tonf-m (휨 모멘트) | 중양(수평) 부재 | 3.25 5.4 | 휨압축 휨인장 (철근) | OK OK |
| 폴리우레탄폼 포화된 경우 | 52.46 t (압축력) | 측면(수직) 부재 | 17.49 | 압 축 | OK |
| | 12.15 t-m (휨 모멘트) | 중양(수평) 부재 | 32.58 596.62 | 휨압축 휨인장 (철근) | OK OK |
| 모르타르 + 스티로폼 볼 | 41.97 t (압축력) | 측면(수직) 부재 | 13.92 | 압 축 | OK |
| | 9.72 t-m (휨 모멘트) | 중양(수평) 부재 | 22.07 379.26 | 휨압축 휨인장 (철근) | OK OK |

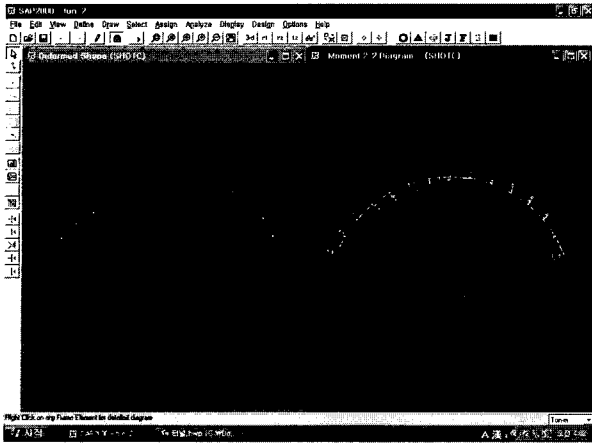


그림 7. 숯크리트 뒷채움시 변형형상 및 휨모멘트 도

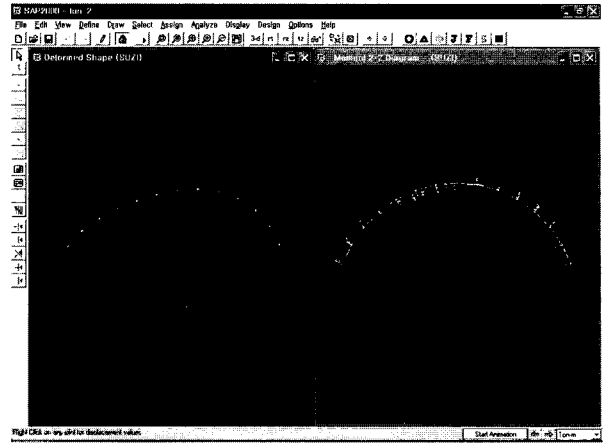


그림 8. 발포수지 뒷채움시 변형형상 및 휨모멘트 도

5. 결론

여굴이 큰 터널의 안전성 검토를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 낙반에 대한 지보재의 보강은 강지보재(arch rib)위에 D-19의 철근을 30cm의 간격으로 배치하고, 와이어메쉬를 얹은 후 15cm 두께의 숯크리트 또는 콘크리트를 타설하여 일체의 구조물을 만든다. 지보재의 간격이 1.5m이므로 자중에 의한 처짐이 발생할 가능성이 있으므로, 필요에 따라서는 횡방향 철근도 배치할 필요가 있다. 또한 강지보재의 사이에는 일시적인 동바리도 필요할 수 있다.
- (2) 구조해석 결과에서, 상기의 합성 지보재(Composite Structure)는 100kgf의 암석이 3m의 높이에서 낙하하는 경우 안전하다. 그러나 예기치 못한 큰 낙반이나 다량의 낙반을 방지하기 위해 취약한 부분은 고결할 필요가 있다.
- (3) 일반적인 여굴 공동의 뒷채움 재료는 토압의 영향을 줄이는 것이 목적이므로, 건조한 모래, 롱자갈, 모르타르, 콘크리트 등을 사용할 수 있으며 그 강도는 콘크리트의 강도와 동등할 필요가 없고 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상이면 만족한다. 그러나 뒷채움재의 자중이 라이닝에 하중으로 작용하여 피해를 줄 수 있으므로 경량의 재료를 사용해야 한다.

- (4) 공동 뒷채움은 숯크리트, 발포수지, 경량콘크리트로 할 수 있으나, 구조해석 결과 가장 경제적이고 안전한 방법은 모르타르와 스티로폼볼을 혼합한 경량 콘크리트를 사용하는 경우이며, 그 배합비율은 시공성을 고려하여 시험 후 결정한다.

- (5) 뒷채움 재의 주입은, 지보재를 보강한 후 주입관을 여굴의 최대높이 까지 연장하여 공동의 바닥(지보재의 상부)부터 수차례에 걸쳐 단계적으로 타설하며, 뒷채움이 완료된 여굴은 아치작용으로 인하여 구조적으로 안전하다.

참고 문헌

- 국립한경대학교 건설공학연구소 (2003). **만세터널 안전성검토 보고서**, 한경대학교출판부.
- 국립한경대학교 토목공학과 (2003). **건설공사관리**, 한경대학교출판부.
- 박운용 (2003). **토목시공학**, 형설출판사.
- 윤지선, 김두영 (2001). **터널공학**, 구미서관.
- 장동일, 구봉근 (2000). **건설재료실험**, 형설출판사.
- 최재진 (1998). **구조재료실험법**, 원창출판사.
- 한국지반공학회 (1998). **굴착 및 흙막이 공법**, 한국지반공학회.

© 논문접수일 : 2006년 03월 07일

© 심사의뢰일 : 2006년 03월 08일

© 심사완료일 : 2006년 03월 27일