

지반응답곡선을 이용한 지반과 지보재의 상호작용 분석  
Analysis on interaction of Ground and support using Ground  
response curve for tunnel design

안태훈<sup>1)</sup> · 안성학<sup>2)</sup> · 이 송<sup>3)</sup>  
Ahn, Tae Hun · Lee, Song · Ahn, Sung Hak

---

ABSTRACT

The behavior of an opening and the performance of support system depend upon the load-deformation characteristics of ground and support as well as of the manner and of timing of support installation. The load-deformation characteristics of ground and support are derived by the interaction between ground and support. The interaction between ground and support is qualitatively illustrated by a ground response curve. The behavior of an opening and the performance of support system depend upon the load-deformation characteristics of ground and support as well as of the manner and of timing of support installation. The interaction between ground and support is qualitatively illustrated by a ground response curve. The convergence-confinement method don't need the basic assumptions for a mathematical model. Also This is applicable to general tunnel. Consequently the stability of tunnel must be qualitatively investigated by a ground response curve and quantitatively adjudged by a numerical analysis for the reasonable design of tunnel.

---

1. 서 론

최근에 들어 제한된 지상환경을 보존하고 국토의 효율적인 활용을 위해 지하철, 도로, 철도 공사 등에 터널 건설이 급격히 증가되어 가고 있는 실정으로 경제적이고 합리적인 터널의 설계 및 시공기술에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

- 
- 1) 정희원 · 울트라건설·공학석사·02-2210-2272 (E-mail:ahn1008@msn.com)
  - 2) 정희원·서울시립대학교·대학원생·02-2210-2272 (E-mail:civilahn@hanmail.net)
  - 3) 정희원 · 서울시립대학교 토목공학과 교수·02-2210-2515 (E-mail:scugeo@sidae.uos.ac.kr)

터널굴착에 의하여 굴착면 부근 지반에 소성영역이 발생할 경우 가축성 지보재인 슛크리트와 록볼트를 주지보재로 사용하여 소성영역을 제어하는 것이 터널역학 혹은 NATM의 기본개념이다. 그러므로, 터널굴착에 의해 발생하는 지반의 소성영역 및 지보재와의 상호작용에 대한 이해와 분석은 매우 중요하다. 그러나 터널굴착에 의한 지반거동분석은 매우 중요한 사항이나 국내 터널설계 시 이를 간과하고 있는 것이 현실이다.

터널안정성 검토를 위해 일반적으로 연속체모델에 의한 수치해석을 수행한다. 이때, 추정된 지반특성치와 현장조건에 의해 지보재의 구조적 안정성 검토에 역점을 두고 있다. 이와 같은 터널해석으로는 지반거동특성에 대한 검토는 거의 불가능하다. 단순히 지보재의 안정성 검토만 수행된 것으로 터널전반에 걸친 안정성 해석이 아니라 지보재의 내적파괴에 대한 안정성 검토만 실시하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 실제적으로 중요한 것은 지반의 거동이므로 이에 대한 설계방법상의 접근이 필요하다.

본 논문에서는 보다 합리적인 터널설계를 위하여 일반적인 터널조건의 지반응답곡선을 구하여 지보재와 지반의 상호작용에 대한 특성을 분석해 보고자 한다. 기존 원형터널에 대한 연구결과와 일반터널의 지반응답곡선 차이점을 검토하고 이러한 분석을 통하여 궁극적으로 지반과 지보재의 복합구조체인 터널에 대한 합리적 설계방법을 모색하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 지반응답곡선 선정 및 분석

### 2.1 지반응답곡선 선정

일반적인 터널조건에 대한 지반응답곡선을 구하기 위해 수학적 모델 대신 수치해석적 방법을 사용하였다. 하중분담율을 10%씩 감소시킬때 발생하는 천단침하량을 구하여 지반응답곡선을 선정하였다. 본 연구에서 지반응답곡선을 구하기 위한 터널조건은 그림 1.과 같다.

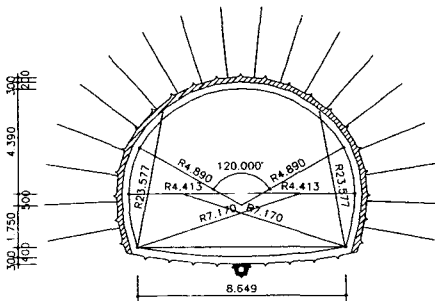


그림 1. 해석에 사용된 지하철복선터널단면

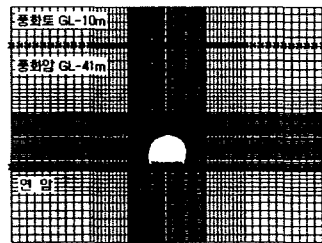


그림 2. 수치해석 모델링

수치해석을 위해 사용된 지반특성치는 적용값의 공정성을 위하여 철도 및 도로터널관련 설계자료 지반특성치의 평균치를 적용하였다. 수치해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC ver.3.30으로 터널수치해석시 많이 사용되는 범용프로그램이며 해석을 위한 모델링 매쉬는 그림 2.과 같이 작성하였다.

표 1. 해석에 적용된 지반특성치

구분	단위중량 tf/m <sup>3</sup>	변형계수 tf/m <sup>2</sup>	포아슨비 ν	점착력 tf/m <sup>2</sup>	마찰각 °
풍화토	2.0	2000	0.34	5.5	26
풍화암	2.2	3,000	0.30	20	33
연 암	2.4	15,000	0.27	58	40

지반응답곡선을 통한 터널거동 및 지보재와의 상관관계를 분석하기 위하여 다음 4가지 조건에 대하여 지반응답곡선을 구하였다.

- CASE. I : 지반 점착력 변화
- CASE. II : 지보재 설치 형식
- CASE. III : 슛크리트 강성변화
- CASE. IV : 슛크리트 설치시기 변화

터널에서의 지반응답곡선은 터널 내부위치별 즉, 천단, 어깨부, 측벽, 하단 등 다양한 위치에서 구할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 터널거동을 대표할 수 있는 천단침하의 지반응답곡선으로 한정하였다.

## 2.2 지반응답곡선 결과 및 분석

### 1) CASE. I

지반강도정수 중 점착력을 변화시켜 굴착면 부근 지반의 소성영역발생 범위를 변화시켰다. 이때 나타나는 경향을 살펴보기 위하여 수치해석을 수행하고 결과를 정리하였다. 그림 3.은 표 1.에서 제시된 지반 특성치 중 풍화암의 점착력을 변화시켜 구한 천단침하에 관한 지반응답곡선이다.

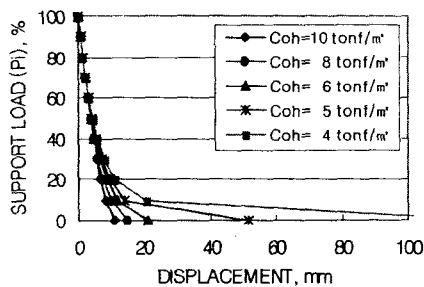


그림 3. CASE. I 지반응답곡선

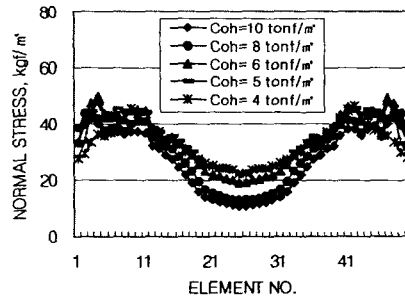


그림 4. 점착력 변화에 따른 슛크리트 응력

점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가되는 경향을 보여주며 점착력=5tf/m<sup>2</sup> 이하일 때, 천단침하가 급격히 증가함을 보이고 있다. 침하의 급격한 증가 원인은 지반강도정수인 점착력 감소에 따라 굴착면 주변 지반에 소성영역이 발생되었기 때문이다.

그림 4.는 Pi=50%에서 탄성계수 E=1.0×10<sup>6</sup>tf/m<sup>2</sup>인 슛크리트를 타설하였을 때 발생하는 측방항응력을 수치해석을 통하여 구한 그래프이다. 점착력이 감소됨에 따라 슛크리트 지보재에 발생하는 응력이 증가하며 증가폭이 증가하나 점착력4tf/m<sup>2</sup>, 5tf/m<sup>2</sup>에서는 응력증가가 감소되며 결국, 수렴되는 경향을 보이고

있다.

변형량과 응력상태가 동일한 시점에 슛크리트가 타설되었을 경우 지반강도가 적은 지반에 있어서 변형량이 클 것이므로 슛크리트에 발생된 응력이 증가하는 것은 당연하다. 그러므로, 지반강도가 감소할 때 응력증가 폭이 증가하다가 감소하는 경향은 예상치 못한 결과이다.

## 2) CASE. II

그림 5.는 슛크리트 설치, 록볼트와 슛크리트 설치, 무지보 조건에 대하여 지반응답곡선을 구한 것이다. 지반응답곡선은 지반자재의 특성곡선으로 지보재가 설치된 것과 구별하기 위하여  $P_i=60\%$ 에서 지보재를 설치한 지반응답곡선은 수정지반응답곡선으로 명칭하였다.

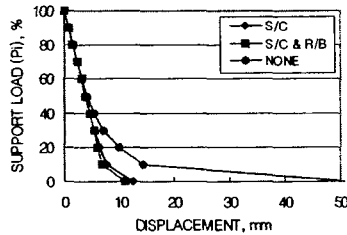


그림 5. CASE. II 수정지반응답곡선

그림 5.는 1개의 지반응답곡선(NONE)과 2개의 수정지반응답곡선(S/C, S/C & R/B)에 대한 그래프이다. 그래프에서 슛크리트를 타설할 경우 침하량이 상당 부분 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 록볼트를 추가로 설치할 경우 침하량의 감소는 미흡한 것을 볼 수 있다.

특정터널조건에 대하여 수정지반응답곡선과 지반응답곡선을 알게 되면 정성적으로 수정지반응답곡선에 설치된 지보재의 하중분담량을 알 수 있다. 즉 동일한 변형량을 나타내는 지반응답곡선과 수정지반응답곡선의 지지하중의 차이가 설치된 지보재가 부담하는 지지력이다. 일반적인 지보반응곡선은 지반과의 분담관계를 고려하지 못하는 반면 수정지반응답곡선에서 구하는 지보재의 지지력은 지반과의 상호작용에 의하여 결정된 지지력이다. 따라서, 기존의 해석방법보다 수정지반응답곡선을 통한 지보재 지지력 검토가 더 합리적인 방법이라 할 수 있다.

수정지반응답곡선이  $P_i=10\%$ 에서 급격한 침하가 발생하는 것으로 나타난다. 또한, 지보재의 분담량은 침하량이 급격히 증가함에 의하여 일정한 수준을 유지하고 있다. 그러나, 지보재의 변형은 증가 되었으므로 응력이 증가하고 지보재가 부담하는 하중도 증가한 것이 분명하다. 이러한 현상은 지반응답곡선과 지보재특성곡선을 따로 구하여 침하량을 분석하는 방법으로는 확인되지 않는 현상이다.

## 3) CASE. III

스�크리트 강성변화가 지보재 응력에 어느 정도의 영향을 미치는지 확인하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 슛크리트 강성은 일반적으로 사용되는 연성스�크리트 탄성계수  $E=500,000\text{tf/m}^2$ 에서 콘크리트 탄성계수  $E=2,000,000\text{tf/m}^2$  까지 변화시켰다. 그림 6.은 슛크리트 탄성계수를 변화시켜 적용하였을 때 수정지반응답곡선을 구한 것이다. 슛크리트의 강성을 4배로 증가시켜도 천단침하에 있어서

억제효과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

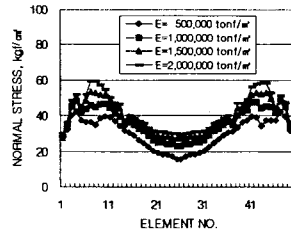
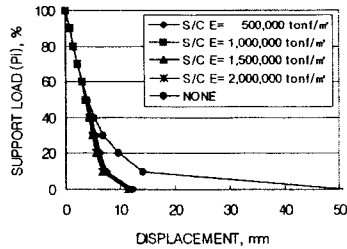


그림 6. CASE.III 지반응답곡선      그림 7. 숏크리트 탄성계수 변화에 따른 응력

숏크리트의 강성을 증가시킨다 하더라도 0.2m 두께의 구조물로는 터널거동에 영향을 미치기에는 미흡하다고 볼 수 있다. 숏크리트는 지지보조재의 역할을 할 뿐이며 터널변형은 지반특성치에 의하여 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 터널조건에서 숏크리트의 강성은 터널굴착에 의한 변형제어의 중요한 요소는 아니었다.

그림 7.은 숏크리트 탄성계수를 변화시켰을 때 발생하는 숏크리트 축방향응력이다. 그래프들은 다소 차이를 보이나, 숏크리트 탄성계수 차이 만큼의 변화가 발생된 것으로 보기 힘들다. 오히려 그림 3.14에서 나타난 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이와 비교되는 것이 더 유사한 경향을 보인다. 지지력도 본 해석조건에서는 지보재의 강성에 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다.

#### 4) CASE.IV

그림 8.은 숏크리트의 타설시기를 조정하여 구한 수정지반응답곡선이다. 이때 숏크리트 탄성계수는 일반적으로 적용하는 연성숏크리트 탄성계수  $E=500,000 \text{ t f/m}^2$ 을 동일하게 적용하였다.

숏크리트 설치시기가  $P_i=90\%$  즉, 막장하중분담율= $10\%$ 에서  $P_i=20\%$ 로 막장하중분담율= $80\%$ 까지 변화되었지만, 최종침하량은 유사한 값을 보여주고 있다. 이는  $P_i=10\%$ 에서  $P_i=0\%$  사이에서 급격한 침하가 발생하여 최종단계에서 지반응답곡선과 수정응답곡선간의 차이가 일정하게 유지되고 있음을 보이고 있다. 이는 숏크리트 지보재가 부담하는 지지력이 일정하게 수렴된다는 것으로 그림 5.과 유사한 경향을 보여주고 있다.

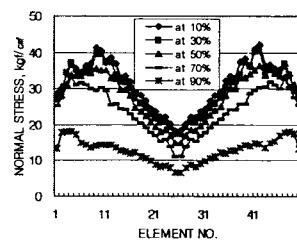
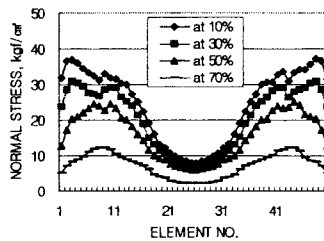
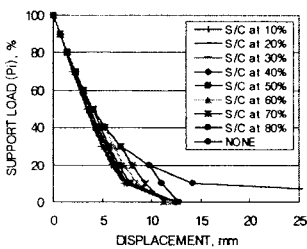


그림 8. CASE.IV 수정지반응답곡선      그림 9.  $P_i=0, 20\%$ 인 경우 숏크리트 응력

그림 9.는 하중분담율= $80\%$  즉,  $P_i=20\%$ 일 때 숏크리트 설치단계별 숏크리트 응력을 나타낸 것이

다. 그림 8.과 비교하면 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이와 비례되는 크기로 응력차가 발생되어 있음을 보이고 있다. 또한 하중분담율=100%인 그림 9.의 슛크리트 응력은 그림 8.과 비교할 때 설치시점에 따른 슛크리트 응력 차이가 상당히 줄어들었다. 따라서 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이는 슛크리트가 부담하는 하중과 관계된 것임을 확인할 수 있다.

## 제 5 장. 결 론

수치해석을 통하여 나타난 결과가 단순히 지보재의 안정성 판단에 한정되는 것이 아니라 지반상태에서 소성발생의 적정성까지 검토될 때 합리적인 터널설계가 가능하므로 지반자체로의 자립여부 판단, 지반변형허용범위 검토 및 이에 따른 지보재 및 보조공법 적용여부에 대한 검토가 필수적이다.

본 연구에서는 수학적 방법에 의한 지반응답곡선과 지보반응곡선을 구하는 기존의 방법을 탈피하고, 다양한 터널조건에 적용할 수 있도록 수치해석을 통한 지반응답곡선과 수정지반응답곡선 구하였다. 다양한 해석조건에 대하여 검토하였으며 이에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 수치해석을 통해 구한 천단침하 지반응답곡선도 터널거동을 충분히 반영한다. 따라서, 지반응답곡선을 통하여 지반자체로의 자립여부 판단, 지반변형허용범위 및 이에 따른 지보재 및 보조공법 적용여부에 대한 검토가 가능하다.
2. 지보재를 설치하여 얻은 수정지반응답곡선과 지반응답곡선을 함께 고려하면 지보재가 부담하는 지지력을 정성적으로 파악할 수 있다.
3. 동일한 응력조건 및 지보조건일 경우 지반강도가 감소함에 따라 지보재에 발생하는 응력이 수렴된다. 지반강도가 감소하면 소성영역이 증가하여 지지력도 증가하여야 하나, 지반과 지보재의 상호작용에 의하여 한계지지력 값을 결정할 수 있다.
4. 동일한 터널조건에서 지보재에 작용하는 하중은 지보재의 탄성계수나 하중분담율보다 지반강도나 변형계수가 보다 큰 영향력을 미친다. 또한, 지보재에 발생하는 응력의 수렴성은 소성영역과 관련된 지반특성으로 분석된다.

### 참고문헌

1. 안태훈, 이 송(1994년), “터널지반과 지보재의 상호작용에 대한 해석”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 735-738
2. 우종태(1992년), “터널굴착시 주변지반의 변위에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울시립대학교
2. Z.T.Bieniawski(1984년), “Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling”, A.A.BALKEMA, PP. 145-149
3. E.Hoek & E.T.Brown(1980년), Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, pp248-252
4. Brown,E.T.,Bray,J.W.,Ladanyi,B. and E.Hoek(1983년) Ground Response Curves for Rock Tunnels, Journal of Geotechnical Engineering 109, pp.15-39
5. W.H.Ward(1978년), “Ground Supports for Tunnel in Weak Rocks”, Geotechnique 28 No.2, pp.133-171
6. Muir Wood A. M.(1979년), “Ground behavior and support for mining and tunneling.” Tunnels and tunneling, Vol. 11, No. 4, pp. 43-48