

서울시립대학교 도시과학연구원
도시과학논총 제29권 2003년 12월
The Journal of Urban Sciences
The University of Seoul
Vol. 29, No.1, December 2003

소성을 고려한 도심지 터널의 하중분담율에 대한 연구

이 송 · 전 제 성 · 박 형 규 · 김 동 욱

A Study on Load Distribution Factor of Downtown Tunnel Considering Plasticity

Lee, Song · Jeon, Je-Sung · Park, Hyung-Kyu · Kim, Dong-Wook

ABSTRACT

This research has ought to assume the three-dimensional model about designing the downtown Tunnel such as subway, underground road, however the research has applied to the concept of Load Distribution Factor through two-dimensional model due to time and economic matter.

Moreover this paper had to scrutinize the universal validity about the computing Load Distribution Factor only crown displacement of tunnel and Load Distribution Factor so-called 50-25-25, 40-30-30 that has been reflected to the design.

This paper has computed Crown Displacement curve and Ground Reaction Curve are classified by the strength of ground and then shown these two curves. Subsequently Support Load at the pertinent location of tunnel has been possible to compute and to determine the Load Distribution Factor as based on the identical displacement. Those were not the indirect computation through the displacement.

The results of computing the Load Distribution Factor, the data has showed the more sharing the load than Load Distribution Factor of the ground which had been carried indirectly through existing the displacement. So it seems to be possible to design the tunnel effectively as well as economically through this method.

Key Words : Downtown Tunnel, Load Distribution Factor, Ground Reaction Curve

1. 서 론

일반적으로 도심의 지하철, 지하도로 등에 시공되는 터널은 NATM터널이 대부분을 차지하고 있다. NATM터널의 기본개념은 터널굴착에 의하여 굴착면 부근 지반에 소성영역이 발생될 경우 가축성 지보재인 슛크리트와 록볼트를 주지보재로 사용하여 소성영역을 제어하는 것이다. 따라서, 좁은 의미로 NATM터널이란 소성영역이 발생하는 연약지반터널에 한정된다고 볼 수 있다.²⁾

도심지 터널의 설계시, 터널이 터널 단면 방향과 진행방향으로 3차원적인 구조임을 감안한다면 3차원 해석에 의한 실제 현장상황의 재현이 필요하다. 그러나, 국내의 NATM터널설계의 경우, 3차원 해석은 시간적, 경제적인 문제로 실무 적용에 제약을 받게 되므로 2차원 해석에 의한 검토를 실시하고 있는 실정이다. 도심지 터널의 설계에 사용하고 있는 하중분담율은 천단변위를 기준으로 산정한 것으로 지반이 부담하는 하중분담율에 대한 적절한 검토가 필요하다.³⁾

본 연구의 목적은 기존의 도심지 터널의 설계시 변위를 기준으로 하여 산정한 기존의 하중분담율에 대한 타당성을 검토하고자 한다.

먼저, 터널굴착에 따른 천단침하곡선과 지반응답곡선을 지반의 종류별로 산정하고, 두가지 곡선을 동일한 변위를 기준으로 하여 지반의 하중분담율을 산정하기 위해 천단침하곡선에서 터널의 굴착단면과 지반응답곡선에서의 응력을 동일한 변위에서 비교함으로써 각각의 굴착단계에서의 지보하중을 산정한다.

이는 기존과 같은 간접적인 하중분담율의 산정이 아니라 동일변위를 기준으로 하여 해당 굴착단계에서의 하중분담율을 직접 산출하여 비교할 수 있도록 하였다.

천단침하곡선은 Flac 3.3이 2차원 해석프로그램임으로 원형단면의 터널을 축대칭 모델을 적용하여 등방상태의 지반을 단계적으로 굴착하는 것을 모델링 하였다. 지보재의 설치를 고려하지 않은 것은 본 연구는 지반의 하중 분담율 산정을 중심으로 한것이므로 배제하기로 하였다.

2. 하중분담율

터널굴착 과정은 주변 지반의 3차원적인 응력-변형을 거동을 야기시킨다. 특히 종방향 아칭이 발생하는 막장 인접부에 대한 해석에 있어서는 3차원적 해석이 도입되어야 하나 아직까지 3차원 해석을 수행하는데 있어서 여러 가지 기술적 혹은 경제적 측면을 고려하여 터널 교차부 등 특수한 구간에 대한 해석을 제외하고는 2차원 해석이 수행된다. 즉 3차원 해석을 2차원 해석으로 단순화 시키는 과정에서 하중분담율이라는 개념을 도입하여 굴착하중을 막장으로부터 거리에 따라 적절히 분배한다. 현재 우리가 적용하는 일반적인 하중분담율 40-30-30, 50-25-25는 극히 간단한 시공과정을 모사한 것으로 선진도갱공법, 중벽분할식 공법, Two-Arch 터널 등 보다 복잡한 시공순서를 포함하는 단면에 대한 해석에 있어서는 이러한 하중분담율의 적용에 있어서 조심스러운 접근이 요구된다.^{1),10),12)}

3. 지반응답곡선

터널굴착에 따라 막장의 종방향 아칭효과가 감소하게 되고 이에 터널의 내공변위는 증가하게 된다. 지반의 지보하중의 감소에 따른 내공변위가 감소하는 경향을 나타내는 것을 지반응답곡선이라 한다.

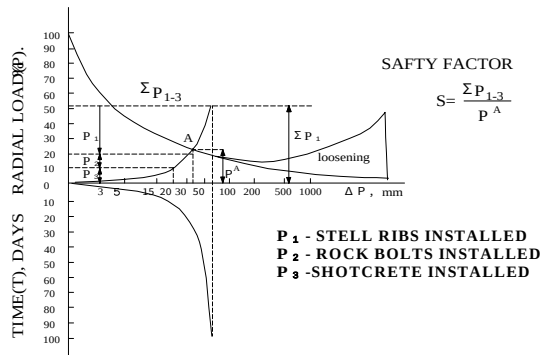


그림 1. 지반응답곡선

그림 1을 살펴보면 지보재 즉, 강지보재, 록볼트 및 슛크리트를 설치함으로써 지반응답곡선이 이완영역에 도달하지 않도록 하고 있다.^{6),9)}

4. 천단침하곡선

도심지에서 터널을 굴착하게 되면 아래 그림2와 같이 막장면의 전방에서부터 변위가 발생되며 굴착된 막장면에서는 이미 전체 변위량의 어떤 비율로 침하가 발생되고, 막장면이 통과된 후방에서 최대변위로 수렴하게 된다.^{4),8)}

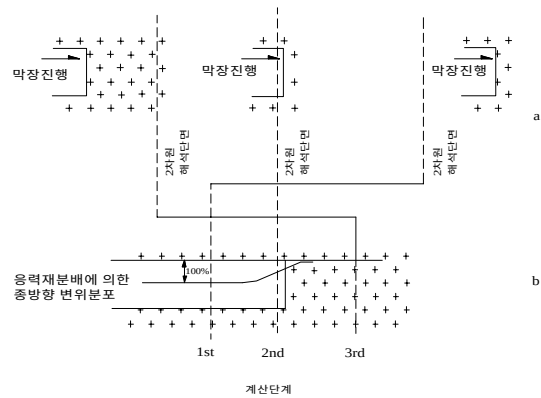


그림 2. 막장진행에 따른 천단침하곡선

그림1에서는 이완영역에 도달하였을 경우 지지하중이 급격히 증가하는 것으로 나타나, 이에 대한 부정적인 의견도 많다. 터널 역학에 따르면 소성영역을 발생시킴으로 지보재가 지지해야 할 하중을 줄일 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.^{5),11)}

5. 지반강도에 따른 지반응답곡선

지반응답곡선은 연암, 풍화암, 풍화토 등 3가지 종류별로 나누어서 산정을 하였다. 연암 이하인 지반으로 산정한 이유는, 소성영역의 증가에 의한 지반 응력이완과 소성변위를 발생하는 지반으로 한정하였다.

이는 연구의 범위를 도심지터널이 대부분 차지하는 연약지반터널에 초점을 맞추고자 함이다.

지보재의 설치를 고려하지 않은 것은 지반의 하중분담율의 산정을 중심으로 하였기 때문이다.

해석조건은 등방상태인 지반조건에 직경 10m의 원형터널에 1.35Mpa의 초기응력이 존재하는 가장 이상적인 조건으로 유한차분 해석 프로그램인 Flac 3.3을 이용하였다. 각

각의 수치해석을 위해 사용한 지반물성치는 적용값의 공정성을 위하여 1991년 지반공학회 추계학술발표회 논문집의 “지반공학에서의 컴퓨터 활용”에서 제시한 것을 사용하였다.⁷⁾

아래의 표1은 수치해석을 위해서 입력한 지반의 물성치를 나타낸 것이다.

표 1. 수치해석에 사용한 지반의 물성치

구분	단위중량 (kg/m ³)	반향계수 (MPa)	포아송비	점착력 (MPa)	마찰각 (°)
풍화토	2000	80	0.286	0.02	25
풍화암	2200	1,000	0.231	0.05	35
연암	2400	5,000	0.2	0.1	40

아래의 그림3은 지반응답곡선을 산정하기 위해서 사용한 해석단면을 보여주고 있다.

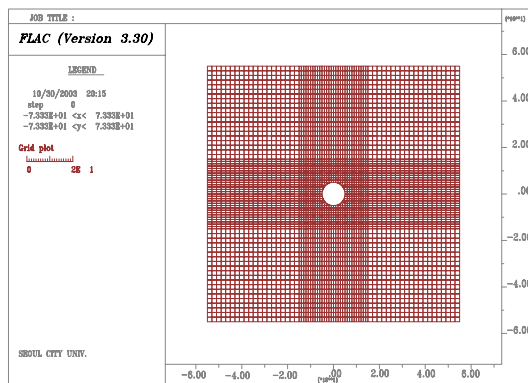


그림 3. 지반응답곡선 해석단면

지반응답곡선의 산정결과, 풍화토는 터널 직경의 38%에 해당하는 약 3880mm의 최종천단침하가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 지보재의 설치를 임의로 고려하지 않은 상태에서의 최종천단침하임을 밝혀두고자 한다.

풍화암은 터널직경의 3%에 해당하는 약 34mm의 최종천단침하가 발생하였다.

연암은 터널직경의 0.3%에 해당하는 약 3mm의 최종천단침하가 발생하였다.

지반의 강도에 따라 발생한 최종천단침하는 그 발생 정도에서 매우 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

그림 4, 5, 6은 지반강도별로 산정한 지반응답곡선을 나타낸 것이다.

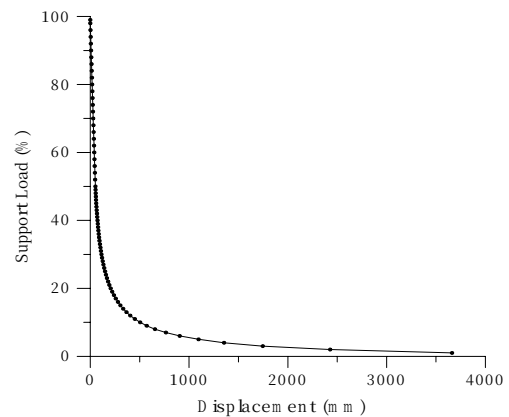


그림 4. 풍화토에서의 지반응답곡선

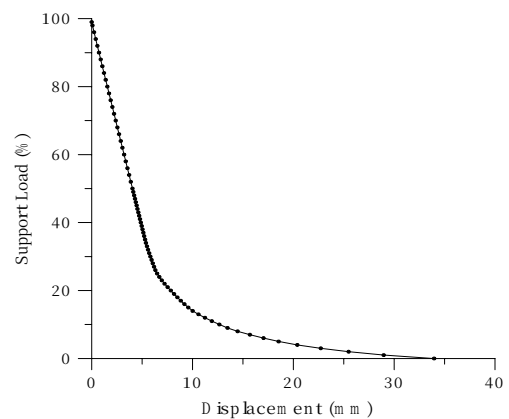


그림 5. 풍화암에서의 지반응답곡선

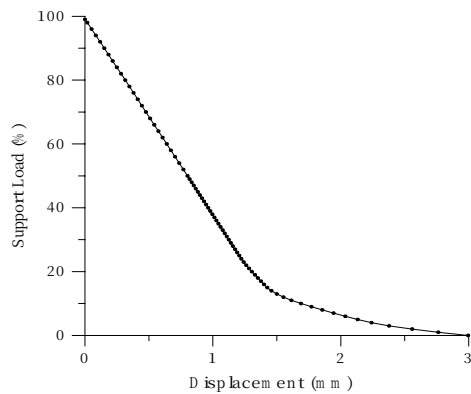


그림 6. 연암에서의 지반응답곡선

6. 지반강도에 따른 천단침하곡선

천단침하곡선을 산정하기 위하여 국내 터널설계에 주로 사용하고 있는 Flac 3.3을 사용하였으며, 2차원 프로그램의 한계를 극복하기 위하여 축대칭 상태로 모델링을 하였다. 이를 위하여 터널의 단면은 원형을 사용하였으며, 해석조건은 지반응답곡선의 산정에서 사용한 조건과 동일하다.

지반의 강도별로 천단침하곡선을 산정하기 위해 사용한 지반물성치는 앞의 지반응답곡선의 산정시에 사용한 것과 같은 표 1의 지반 물성치를 적용하고 굴진장은 1.0m를 적용하여서 천단침하를 구하여 산정하였다.

아래의 그림 7, 8, 9는 풍화토, 풍화암, 연암의 천단침하곡선을 산정한 것이다.

천단침하곡선의 작성을 통해서 막장면과의 거리에 따른 천단침하를 산정할 수 있다. 막장면에서의 침하량을 살펴보면, 풍화토는 약 669mm의 천단침하가 발생하였으며 풍화암은 8.31mm, 연암은 0.75mm 정도의 침하가 발생하였다. 막장면 1.0D지점에서의 천단침하는 풍화토는 2270mm, 풍화암은 27.2mm, 연암은 2.7mm의 천단침하가 발생하는 것으로 나타났다.

풍화토에서의 막장면과 1.0D지점에서의 천

단침하는 각각 669mm, 2270mm로 터널직경에 비해 6%, 23%정도에 해당하는 천단침하가 발생하였다. 이는 터널굴착 후 1차 지보재를 설치하는 구간에서의 터널의 붕괴가 발생하는 것을 의미한다.

풍화토의 경우는 터널 굴착이전에 막장 전면에 대한 지반강도 향상을 위한 사전보강조치가 필요하다고 판단된다.

연암에서의 막장면과 1.0D 지점에서의 천단변위는 각각 0.75mm, 2.71mm로 터널직경에 비해 1% 이하의 천단변위가 발생하였다. 연암은 터널의 직경에 비해 매우 경미한 수준인 것으로 나타났다.

연암이상의 강도를 갖는 지반에서는 연속체 모델을 통한 변위와 지반응력보다는 불연속체 모델을 통한 암반자체의 절리면에 대한 보강을 통해 낙반 등에 중점을 두어야 할 것으로 판단된다.

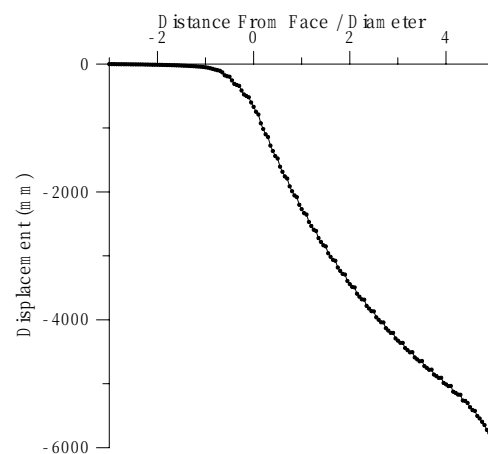


그림 7. 풍화토에서의 천단침하곡선

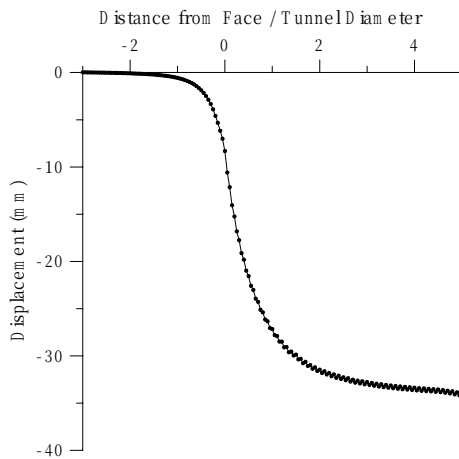


그림 8. 풍화암에서의 천단침하곡선

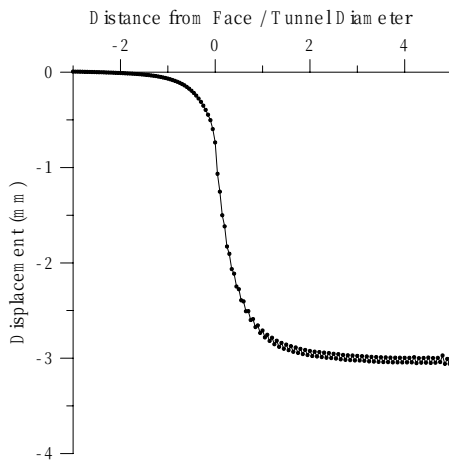


그림 9. 연암에서의 천단침하곡선

7. 소성을 고려한 하중분담율 산정

풍화토는 막장면과 1.0D 지점에서의 과도한 침하가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 막장면에서의 붕괴를 의미하는 것으로 굴착 이전에 막장면에 대한 사전보강이 필요한 것으로 나타났다.

연암은 막장면과 1.0D 지점에서 터널직경에 비해 매우 경미한 수준의 천단침하가 발생하는 것으로 나타났다.

풍화토와 연암의 경우는 위에서 설명한 바와 같이 하중분담율의 산정보다는 해석개념

이 달라 그 의미가 없어 하중분담율 산정이 무의미한 것으로 판단된다.

풍화암에서 산정한 지반응답곡선과 천단침하곡선의 산정 결과, 최종천단침하가 약 35mm로 일치하였다. 천단침하축을 기준으로 두 곡선을 일치하여 작성하면 터널의 막장면으로부터의 거리에 따른 변위와 지보하중을 산정할 수 있다. 이를 통해서 지반의 하중분담율을 산정하였다.

아래의 그림 10은 풍화암에서의 하중분담율 산정곡선을 나타낸 것이며, 표2는 풍화암에서의 주요지점에 대한 하중분담율을 산정한 것이다.

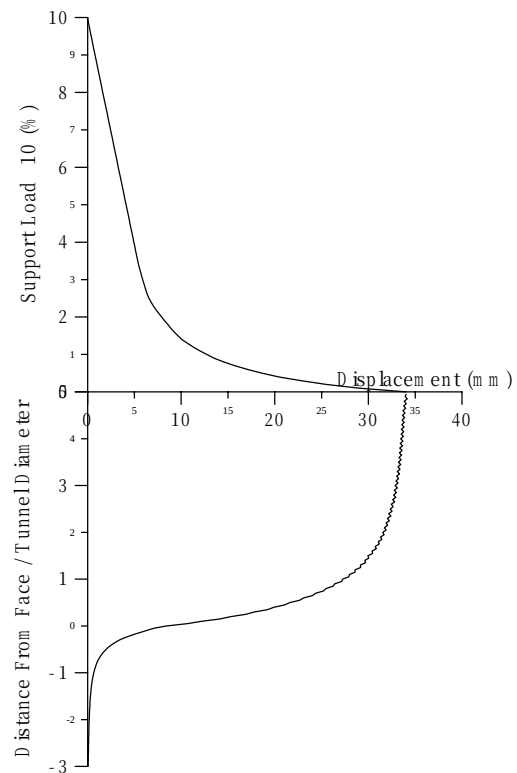


그림 10. 소성을 고려한 하중분담율 산정

표 2. 주요지점에서의 하중분담율

	하중분담율(%)	변위비율(%)	변위(mm)
막장면	81	24.7	8.31
막장면0.5D	96	63.6	21.6
막장면1.0D	98.5	80	27.2

풍화암에서의 하중분담율을 변위비율과 비교하여 본 결과, 막장면에서의 변위비율은 25%이나, 지보하중을 통한 하중분담율은 약 81%로 나타났다. 이는 변위를 기준으로 한 하중분담율은 지반의 소성을 고려하지 못한 것으로, 지반의 소성을 고려하여 지보하중을 직접적으로 산정한 하중분담율이 필요한 것으로 나타났다.

8. 결론 및 향후 과제

본 연구에서 지반의 강도별 지반응답곡선과 천단침하곡선을 산정하여, 도심지 터널이 시공되는 지반의 하중분담율을 산정하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

풍화토는 막장면과 1.0D 지점에서의 과대한 침하량이 발생하므로, 터널 굴착 이전에 지반강도향상을 위한 사전보강이 필요한 것으로 나타났다.

연암 이상의 강도를 갖는 지반은 연속체 모델의 적용보다는 불연속체 모델의 적용을 통한 암반자체의 절리 제어에 중점을 두어야 할 것으로 판단된다.

풍화암에서의 천단침하곡선과 지반응답곡선에서 산정한 막장면에서의 하중분담율 81%와 단순히 천단침하량을 비교하여 구한 하중분담율 24.7%는 상당한 차이를 보이고 있다.

이는 도심지 터널의 굴착으로 인한 응력이

완에 의해서 소성영역이 확대됨에 따라 발생하는 소성적 특성을 고려하였기 때문으로 판단된다.

향후 과제로는, 연속체 해석을 모든 도심지 지반에 적용하는 것보다 풍화암 정도의 강도를 갖는 지반에 적용하는 것이 의미가 있으며, 기타 지반에 적용하는 것은 추후 연구가 필요하다고 판단된다.

또한, 본 연구에서는 지반을 등방상태, 터널단면을 원형으로만 가정을 하였으나, 추후 연구에서는 실제 지반조건을 고려하고 현재 주로 사용되고 있는 마제형 단면상에 터널 지보재의 영향을 고려한 지반의 하중분담율 산정에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 안태훈, “터널지반과 지보재의 상호작용에 대한 해석”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 735-738, 1994.
2. 안태훈 외 3인, “터널설계를 위한 지반응답곡선”, 대한토목학회 2002년 학술발표회, pp. 23-26, 2002
3. 이송 외 1인, “지반응답곡선에 의한 터널 특성연구”, 대한토목학회 논문집, Vol 23. No 1C, pp 59-70, 2003
4. 이현범, “터널 굴진에 의한 3차원 지반 거동의 2차원적 해석방법”, 한국과학기술원, 석사학위논문, 1992
5. 우종태, “터널굴착시 주변지반의 변위에 관한 연구”, 서울시립대학교, 석사학위논문, 1992.
6. 유충식, “터널해석 및 안정성 평가”, 터널기술 Work Shop- II, 한국지반공학회, 터널기술위원회, pp. 201-239, 1997.

7. “지반공학에서의 컴퓨터 활용”, 한국지반 공학회, 추계학술발표회 논문집, 1991.
8. Barton N., Lien, R. and Lunde. J., “ Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support”, Rock Mech., Vol. 6, pp. 183-236, 1974.
9. Brown, E.T.,Bray, J.W.,Ladanyi,B. and E.Hoek “Ground Response Curves for Rock Tunnels”, Journal of Geotechnical Engineering 109, pp.15-39, 1983.
10. Bieniawski Z. T., “ Rock mass Classification in Rock Engineering”, Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, pp. 97-106. A. A. Balkema, Rotterdam, 1976.
- 11.E.Hoek & E.T.Brown, “ Underground Excavations in Rock ” , Institution of Mining and Metallurgy, pp248-252, 1980.
12. Pannet, M. “Calcul des Tunnels par la mehode convergence confinement ” Deartement Edition de l'Association Amicale des Ingieurs Anciens Eles. Paris, 1995.