

지반의 소성을 고려한 하중분담율 연구

A Study on Load Distribution Factor Considering Plasticity of Ground

김동욱* 정상국** 유오식*** 이송****
Kim, Dong-Wook, Jung, Sang-Kug Yu, Oh-Shick Lee, Song

ABSTRACT

On the tunnel design, 3D model substituted for 2D model because of economic reason and time shortage. It is applied Load Distribution Factor, which is compared of displacement of tunnel crown, generally 50-25-25, 40-30-30 are used for tunnel design. Logicality about used Load Distribution Factor will investigated

1. 서론

NATM 터널의 기본개념은 터널굴착에 의하여 굴착면 부근 지반에 소성영역이 발생될 경우 가축성 지보재인 슛크리트와 록볼트를 주지보재로 사용하여 소성영역을 제어하는 것이다. 따라서, 좁은 의미로 NATM 터널이란 소성영역이 발생하는 연약지반터널에 한정된다고 볼 수 있다.

터널구조물을 터널 단면방향과 진행방향으로 3차원적인 구조임을 감안한다면 설계와 안정성 검토에는 3차원 해석에 의한 실제 현장상황의 재현이 필요하다. 그러나, 국내의 NATM 터널설계의 경우, 3차원 해석은 시간적, 경제적인 문제로 실무 적용에 제약을 받게 되므로 2차원 해석에 의한 검토를 실시하고 있는 실정이다. 국내터널설계에서 사용하고 있는 하중분담율은 천단변위를 기준으로 산정한 것으로 지반이 부담하는 하중분담율을 대한 적절한 검토가 필요하다.

본 연구는 터널굴착에 따른 천단변위곡선과 지반응답곡선을 현장에서 영향을 가장 많이 미치는 지반의 종류별로 산정한다. 산정한 천단변위곡선과 지반응답곡선을 변위를 기준으로 하여 지반의 하중분담율을 산정하기 위해 천단변위곡선에서의 터널의 굴착단면과 지반응답곡선에서의 응력을 동일한 변위에서 비교함으로써 각각의 굴착단계에서의 지보하중을 산정하였다.

이는 기존의 변위를 통한 하중분담율의 간접적인 산정이 아니라 두 곡선의 동일한 변위를 통해 해당 굴착단계에서의 응력상태를 직접적으로 산출하여 비교함으로써 기존의 하중분담율 산정방법과 구분을 두었다. 지반응답곡선은 Flac 3.3을 사용하여 원형단면터널이 등방상태의 지반에 굴착되는 것을 수학적 모델이 아닌 수치해석적 방법을 사용한 것으로 하중분담율을 감소시킬 때 발생하는 천단부의 침하량을 구하여 산정하였다.

천단변위곡선은 Flac 3.3이 2차원 해석프로그램임으로 원형단면의 터널을 축대칭 모델을 적용하여 등방상태의 지반을 단계적으로 굴착하는 것을 모델링하였다. 지보재는 본 연구에서 지반의 하중분담율 산정을 중심으로 한 것이므로 배제하기로 하였다.

* 서울시립대학교 대학원, 정회원
** 송원대학 교수, 정회원
*** 성동 건설관리 사업소장, 정회원
**** 서울시립대학교 교수, 정회원

2. 이론적 배경

2.1 지반응답곡선

터널굴착에 따라 막장의 종방향 아칭효과가 감소하여 내공변위는 증가된다. 지보하중의 감소에 따른 내공변위가 감소하는 경향을 나타내는 것을 지반응답곡선이라 한다.

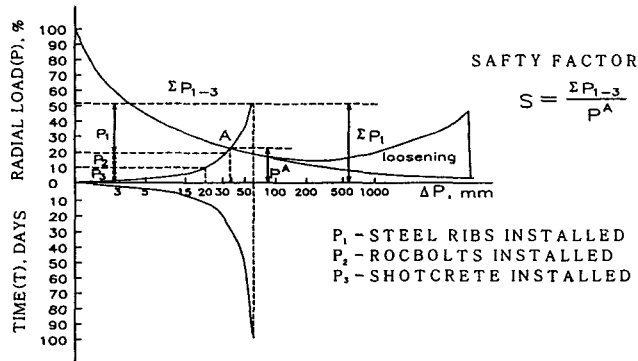


그림 1. 터널의 지반응답곡선 개념

그림 1을 살펴보면 지보재 즉, 강지보재, 록볼트 및 슛크리트를 설치함으로써 지반응답곡선이 이완영역에 도달하지 않도록 하고 있다. 이것은 터널설계의 중요한 개념이나 터널설계 시 이러한 개념적 접근은 이루어지지 않고 있다. 즉, 지반에 대한 역학적 분석은 미흡한 것이 현 실정이다.

그림 1에서는 이완영역에 도달하였을 경우 지지하중이 급격히 증가하는 것으로 나타나, 이에 대한 부정적 의견도 많다. 터널역학에 따르면 소성영역을 발생시킴으로 지보재가 지지해야 할 하중을 줄일 수 있으므로 이에 대하여는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

2.2 천단변위곡선

지반내 터널이 굴착되면 아래 그림 2와 같이 막장면의 전방에서부터 변위가 발생되며 굴착된 막장면에서는 이미 전체 변위량의 어떤 비율로 침하가 발생되고, 막장면이 통과한 후방에서 최대 변위로 수렴하게 된다.

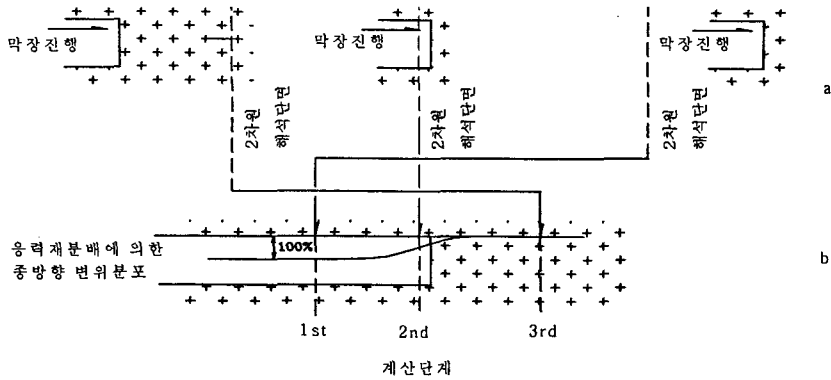
즉, 터널 해석은 막장진행에 의한 지반의 3차원 거동효과를 나타낼 수 있는 해석 방법이 요구되며 일반적으로 2차원적으로 모형화 할 수 있는 주요방법으로는 응력 분배법, 강성 변화법, 점탄성 해석법 등의 방법이 있다.

강성변화법은 터널굴착시 주변응력의 3차원 배열은 지반의 강성과 직접 관계된다는 관점에서 지반의 탄성계수를 하중분담율에 따라 적절히 줄여주는 방법으로, 터널굴착 및 지보 설치 단계별로 터널 내부의 강성을 감소시키는 것이다.

응력 분배법은 터널 굴착에 따른 천단변위곡선을 활용하는 방법으로 측정된 천단변위량을 터널 주변에 굴착으로 인해 발생한 응력의 이완과 직접적인 상관관계를 가진다는 가정을 기초로 한 것이다.

국내 터널 설계시에도, 이 천단변위량을 기초로 하여 터널 굴착에 따른 특정 위치에서의 하중분담율을 산정하는 기준으로 사용하여 왔다.

아래의 그림 2는 막장의 진행에 따른 변위의 발생형태 및 분포를 나타낸 것이다.



a : 터널 막장 진행 상태
b : 터널 막장 위치별 변위 형태

그림 2. 막장진행에 따른 천단변위곡선

3. 지반강도별 지반응답곡선

지반응답곡선의 산정은 연암, 풍화암, 풍화토로 지반의 강도별로 실시하였는데, 이는 연암 이하인 지반으로 소성영역의 증가에 의한 지반 응력이완과 소성변위를 발생하는 지반으로 한정하였다. 이는 연구의 범위를 연약지반터널에 맞추고자 함이다.

해석조건은 등방상태인 지반조건에 직경 10m의 원형터널에 1.35 MPa의 초기응력이 존재하는 가장 이상적인 조건으로 유한차분해석 프로그램인 Flac 3.3을 이용하였다. 각각의 수치해석을 위해 사용한 지반 물성치는 적용값의 공정성을 위하여 1991년 지반공학회 추계학술발표회 논문집의 "지반공학에서의 컴퓨터 활용"에서 제시한 지반 물성치를 사용하였다.

터널의 지지하중을 단계별로 감소시킴으로써 발생하는 천단변위를 구하여 지반응답곡선을 작성하였다.

아래의 표 1은 수치해석을 위해서 입력한 지반 물성치를 나타낸 것이며, 그림 3은 지반응답곡선을 구하기 위한 터널 해석단면이다.

표 1. 수치해석에 사용한 지반의 물성치

구 분	단위중량 (kg/m ³)	변형계수 (MPa)	포아송비 (ν)	점착력 (MPa)	마찰각 (°)
풍화토	2,000	80	0.286	0.02	25
풍화암	2,200	1,000	0.231	0.05	35
연 암	2,400	5,000	0.2	0.1	40

표 2. 지반강도별 최종변위

지반조건	최종천단변위
풍화토	388cm
풍화암	34mm
연 암	3mm

지반응답곡선의 산정결과를 살펴보면, 풍화토는 터널직경의 38%에 해당하는 약 3880mm의 최종천단변위가 발생하는 것으로 나타났다. 풍화암은 터널직경의 3%에 해당하는 약 34mm의 최종천단변위가 발생하였으며, 연암은 터널직경의 0.3%에 해당하는 약 3mm의 최종천단변위가 발생하였다.

지반의 강도에 따라 발생한 최종천단변위는 그 발생정도에서 매우 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 표 2는 지반강도별 최종천단변위를 정리한 것이다. 그림 4, 5, 6은 지반강도별로 산정한 지반응답곡선을 나타낸 것이다.

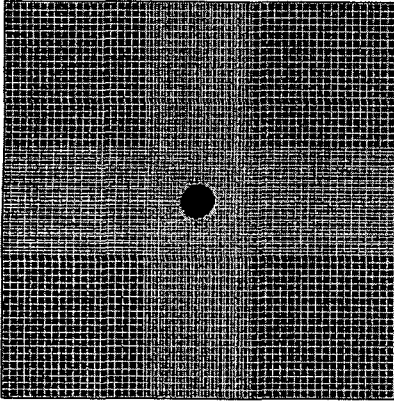


그림 3. 지반응답곡선의 산정을 위한 해석단면

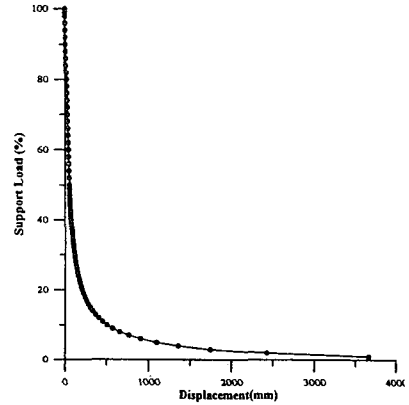


그림 4. 풍화토의 지반응답곡선

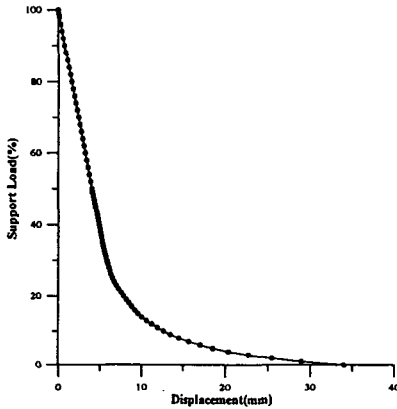


그림 5 풍화암의 지반응답곡선

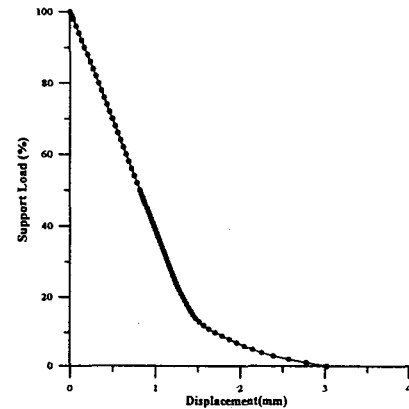


그림 6. 연암의 지반응답곡선

4. 지반강도별 천단변위곡선

천단변위곡선을 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 천단변위곡선을 산정하기 위해 사용한 지반물성치는 앞의 지반응답곡선의 산정시에 사용한 것과 같은 표 1의 지반 물성치를 적용하고 굴진장은 1.0m를 적용하여서 천단변위를 구하여 산정하였다.

아래의 그림 7은 천단변위곡선을 산정하기 위한 터널해석단면을 나타낸 것이며 그림 8, 9, 10은 풍화토, 풍화암, 연암에서의 천단변위곡선을 산정한 것이다.

천단변위곡선의 작성을 통해서 막장면과의 거리에 따른 천단변위를 산정할 수 있다. 막장면에서의 변위를 살펴보면, 풍화토는 약 669mm의 천단변위가 발생하였으며 풍화암은 8.31mm, 연암은 0.75mm정도의 변위가 발생하였다. 막장면 1.0D지점에서의 천단변위는 풍화토는 2270mm, 풍화암은 27.2mm, 연암은 2.7mm의 천단변위가 발생하는 것으로 나타났다.

풍화토에서의 막장면과 1.0D지점에서의 천단변위는 각각 669mm, 2270mm로 터널직경에 비해 6%, 23%정도에 해당하는 천단변위가 발생하였다. 이는 터널굴착 후 1차 지보재를 설치하는 구간에서의 터널의 붕괴가 발생하는 것을 의미한다.

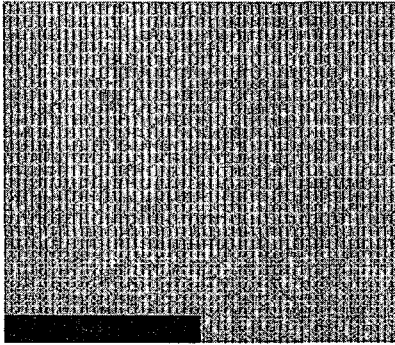


그림 7. 천단침하곡선의 산정을 위한 해석단면

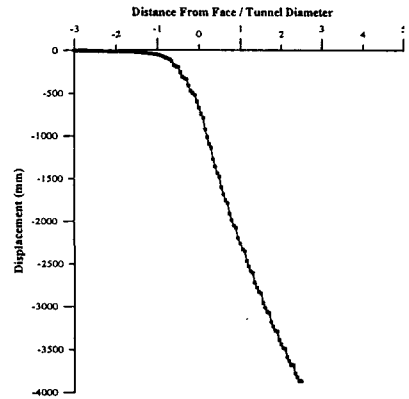


그림 8. 풍화토의 천단변위곡선

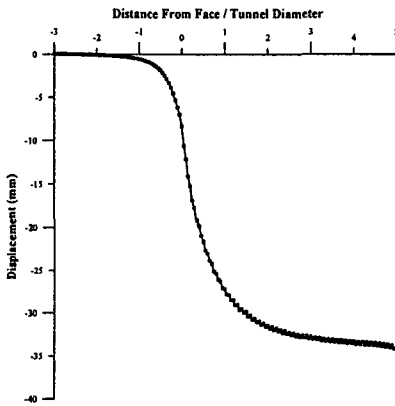


그림 9. 풍화암의 천단변위곡선

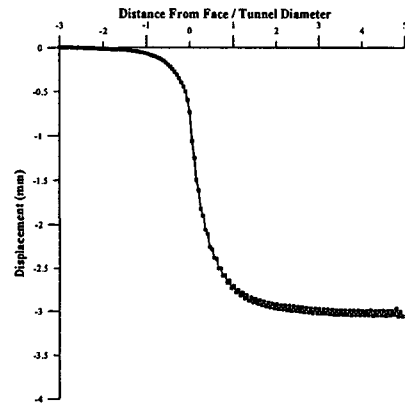


그림 10. 연암의 천단변위곡선

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.

5. 풍화암에서의 하중분담을 산정

풍화토는 막장면과 1.0D 지점에서의 과대한 변위가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 막장면에서의 붕괴를 의미하는 것으로 굴착 이전에 막장면에 대한 사전보강이 필요한 것으로 나타났다. 이는 하중분담을 산정이 무의미하다고 판단되어 제외하도록 하겠다.

연암은 막장면과 1.0D 지점에서 터널직경에 비해 매우 경미한 수준의 천단변위가 발생하는 것으로 나타났다. 연속체 모델의 적용을 통한 터널해석이 아니라 불연속체 모델의 적용을 통한 암반 자체의 절리에 대한 제어에 중점을 두어야 될 것으로 판단되어 제외하도록 하겠다.

풍화암에서 산정한 지반응답곡선과 천단변위곡선의 산정 결과, 최종천단변위가 약 35mm로 일치하였다. 천단변위축을 기준으로 두 곡선을 일치하여 작성하면 터널의 막장면으로부터의 거리에

다른 변위와 지보하중을 산정할 수 있다. 이를 통해서 지반의 하중분담율을 산정하였다.

아래의 그림 11은 풍화암에서의 하중분담율 산정곡선을 나타낸 것이며, 표 3은 풍화암에서의 주요지점에 대한 하중분담율을 산정한 것이다.

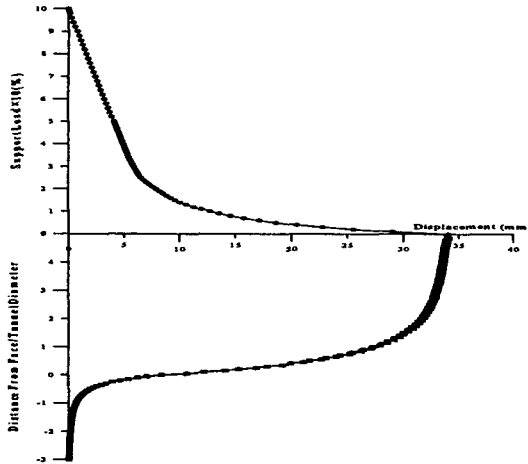


표 3. 주요지점에서의 하중분담율

	하중분담율(%)	변위비율(%)	변위(mm)
막장면	81	24.7	8.31
막장면 0.5D	96	63.6	21.6
막장면 1.0D	98.5	80	27.2

그림 11. 풍화암에서의 하중분담율 산정

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.

6. 결 론

본 연구에서 지반의 강도별 지반응답곡선과 천단변위곡선을 산정하여, 지반의 하중분담율을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 풍화토는 막장면과 1.0D 지점에서의 과도한 변위가 발생하므로, 터널 굴착이전에 지반강도향상을 위한 사전보강이 필요한 것으로 나타났다.
2. 연암이상의 강도를 갖는 지반은 연속체 모델의 적용보다는 불연속체 모델의 적용을 통한 암반자체의 절리 제어에 중점을 두어야할 것으로 판단된다.
3. 연구결과, 천단변위나 지표침하를 통한 하중분담율 산정은 지반의 소성을 정확히 고려할 수 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 이송, 안태훈(2003년), "지반응답곡선에 의한 터널특성 연구", 대한토목학회 논문집 제23권, pp 59-70
2. 안성학(2003), "터널 설계를 위한 지반응답곡선", 석사학위논문, 서울시립대학교
3. Itasca Consulting Group(1994), "FLAC-2D Manual", Minnesota, U.S.A