

터널 설계를 위한 지반응답곡선

A Study on Ground Response Curve for Tunnel Design

이 송* 안 성 학** 안 태 훈***

Lee, Song Ahn, Sung-Hak Ahn, Tae Hun

Abstract

The convergence-confinement method is an attempt to evaluate tunnel stability conditions by means of a mathematical model and a ground response curve. In this study, the convergence-confinement method by numerical model was examined. This method don't need the basic assumptions for a mathematical model. Also This is applicable to general tunnel. According to the results of this study, the change of shotcrete stiffness and the load-distribution ratio used for 2-Dimension numerical analysis are not significant factors. The ground response curve and the support reaction curve are mutually dependent. Especially the support reaction curve depends upon the ground response curve. The mechanism of tunnel must be analyzed by the interaction between support and ground. 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.

요 지

수렴-제한법은 수학적 모델 및 지반응답곡선을 통하여 터널안정조건을 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 수치적 모델에 의하여 수렴-제한법을 검토하였다. 이 방법은 수학적 모델을 위한 기본가정이 필요 없고, 일반 형태의 터널에 적용할 수 있다. 본 연구결과에 따르면 2차원 수치해석에서 사용되는 슛크리트 강성변화 및 하중분담율은 중요한 요소가 아니며, 지반응답곡선과 지보반응곡선은 상호의존적인 것으로 나타났다. 터널구조는 지반과 지보의 상호작용에 의하여 분석되어야 한다. 그러므로 합리적인 터널설계를 위해서 터널의 안정성은 지반응답곡선에 의한 정성적 판단과 수치해석에 의한 정량적 검토가 필요하다.

Keywords : 터널, 지반응답곡선, 수렴-제한법, 지보반응곡선, 하중분담율

* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : civilahn@sidae.uos.ac.kr 011-767-8918

•본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

터널설계를 위한 지반조건은 크게 두가지로 구분될 수 있다. 터널굴착에 의해 굴착면 주변 지반에 발생하는 응력이 지반강도를 초과하여 붕괴되는 경우와 지반 자체 강도로 충분히 자립하는 경우이다. 전자의 경우에는 굴착면에 발생하는 소성영역에 대한 검토가 중요하며, 후자의 경우 낙반이나 굴착면 노출에 따른 풍화 검토가 중요하다. 따라서 터널설계시에는 소성영역 제어와 낙반을 유발하는 절리제어를 구분하여 검토하여야 한다.

터널굴착에 의하여 굴착면 부근 지반에 소성영역이 발생될 경우 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 국내 터널설계시 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. 사면안정해석과 비교할 때 사면의 안정성 검토가 아닌 어스앵커의 안정성 판단만 수행하는 것과 유사하다.

터널설계시 이러한 터널지보재의 안정성에만 관심을 둬므로서 하중분담율, 슛크리트의 탄성계수 등이 중요한 설계요소로 부각되었다. 이 두가지 입력치는 정확한 적용값을 선정하는 것이 매우 어려우므로 경험적인 값이 검증 없이 사용되고 있다. 그러나 실제적으로 중요한 것은 지반의 거동이므로 이에 대한 설계방법상의 접근이 필요하다.

터널의 중요 구성요소인 지반의 거동특성을 파악하기 위해서는 지반응답곡선에 대한 이해가 필수적이다. 기존의 지반응답곡선은 수학적 모델을 통하여 구하였기 때문에 특수한 터널조건, 특히, 원형터널단면에서

만 사용되어 왔다. 터널단면은 쉘드터널이나 TBM터널을 제외하면 원형터널이 드물며, 국내 대부분 터널인 마제형 혹은 난형터널에 대해서는 지반응답곡선을 구할 수가 없었다. 따라서, 실무에서 접근할 수 있는 지반응답곡선 선정 가능성을 모색할 필요가 있다.

지반응답곡선은 지보재를 설치하였을 경우에도 개념적으로 구할 수 있다. 이를 수정제한곡선이라 하나 본 논문에서는 개념의 이해가 보다 용이하도록 수정지반응답곡선(Modified Ground Response Curve)라 정의한다.

본 논문에서는 보다 합리적인 터널설계를 위하여 일반적인 터널조건의 지반응답곡선을 구하여 지반과 지보재의 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. 이론적 배경

2.1 하중분담율

터널은 완공 후에는 평면변형률상태이므로 2차원 해석이 가능하나 시공 중에는 막장에 의한 종방향아칭효과가 고려되어야 한다. 실제적으로 종방향아칭효과를 고려하기 위해서는 3차원 수치해석이 수행되어야 한다. 얼마전 만 하더라도 터널3차원 수치해석은 실무 차원에서 수행하기가 거의 불가능하였다. 최근에는 다양한 프로그램이 개발되어 해석이 용이하다. 그러나, 아직도 특수한 설계조건에 대하여 실험적으로 쓰이고 있으며 일반적 설계조건에 대한 터널해석은 2차원 해석을 중심으로 수행되고 있다.

터널에 대한 2차원 해석을 실시할 때에는 종방향아칭효과와 슛크리트의 강성변화를 반영하기 위하여 하중분담율을 적용하고 있다. 일반적으로 적용되는 하중분담율은 40-30-30, 50-25-25으로 적용값에 대한 근거는 매우 취약하다. 이러한 하중분담율 적용은 단순히 경험적인 판단에서 결정된 것이나, 현재 국내에 선 절대적인 적용기준치로 사용되고 있다.

적절한 하중분담율 적용값에 대한 연구가 있었으나, 설계시 다양한 설계요소들을 고려하여 하중분담율을 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 연구성과에도 불구하고 최근까지 40-30-30, 50-25-25의 보편적인 값들을 일률적으로 적용하고 있다.

하중분담율의 정확한 적용에 관한 논의에 앞서 먼저 검토해야 할 것은 하중분담율 적용 사유이다. 표면적인 이유는 시공중의 3차원적 거동을 고려하기 위한 단계적 해석이나, 본질적으로는 하중분담율을 적용하지 않고 완공상태의 2차원 터널해석을 수행하였을 경우, 지보재 응력이 설계허용응력을 초과하게 되어 이를 해결하기 위한 사용된 것이었다. 따라서, 하중분담율 적용은 지보재에 걸리는 과도한 하중을 지반으로 분산시켜 지보재에 발생될 것으로 예상되는 응력으로 맞추겠다는 것이 하중분담율 적용의 목적이다. 이는 역해석 개념이므로 설계단계에서의 사용시에는 적용값에 대한 충분한 검토가 요구된다.

2.2 수렴-제한법

수렴-제한법은 지반응답곡선과 지보반응곡선(Support Reaction Curve)을 구하고 이들의 상호관계를 해석하여 터널을 설계하는 방법으로 기본적 내용은 터널역학을 소개하는 대부분의 책에 기술되어 있다. 특징적인 사항은 수학적 모델을 사용하여 터널의 안정성을 평가하는 것이다. 지반거동과 지보재거동에 대한 전반적인 파악이 선행되어 이루어지는 설계방법으로 터널 역학 이론에 근거한 해석방법이다.

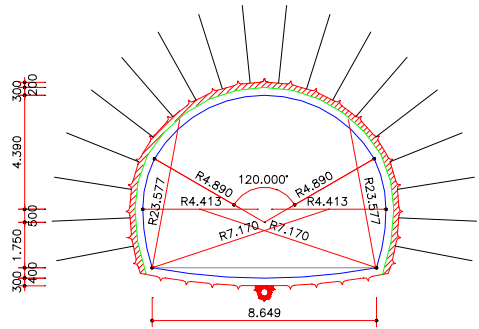
홍콩 Shing Mun 터널등에 설계방법으로 사용되었으며, 원형터널에 대한 설계방법은 구체적으로 제시되어 있다. 그러나 마제형이나 난형과 같은 터널에 대한 적용사례는 미흡하며, 보조공법이 적용되는 연약지반 터널에 있어서 적용이 곤란하다. 또한 다양한 터널단면에 대하여 지보재 특성곡선을 수학적 모델로 산정하는 것은 어려운 문제이다.

따라서 본 연구에서는 수치적 방법으로 지반응답곡선을 구함으로써 일반적인 터널에 대해서도 수렴제한법을 적용할 수 있도록 하였다.

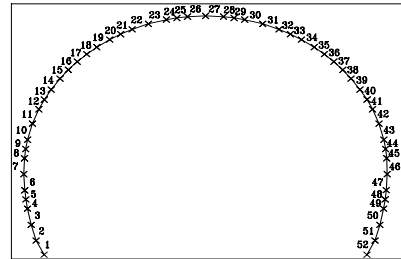
3. 지반응답곡선 선정 및 분석

3.1 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 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig. 1 (a) 터널단면(지하철복선터널)
(b) Shotcrete 요소 번호

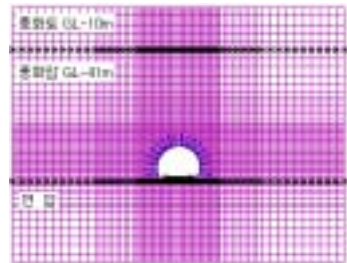


Fig. 2 수치해석 모델링

수치해석을 위해 사용된 지반특성치는 적용값의 공정성을 위하여 기 설계된 용담, 부용 등 20개의 철도 터널과 둔내, 육십령 등 13개의 도로터널의 해석시 물성치들의 평균값을 적용하였다. 수치해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC ver.3.30으로 터널수치해석시 많이 사용되는 범용프로그램이며 해석을 위한 모델링 매쉬는 Fig. 2와 같이 작성하였다.

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 : 숏크리트 강성변화
- CASE. IV : 숏크리트 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.

3.2 지반응답곡선 결과 및 분석

3.2.1 CASE. I

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

점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가되는 경향을 보여주며 점착력=5tf/m² 이하일 때, 천단침하가 급격히 증가함을 보이고 있다.

Table 1 해석에 적용된 물성치

구분	풍화토	풍화암	연암
내부마찰각(°)	26	33	40
점착력(tf/m ²)	5.5	20.1	58.1
푸아송비	0.34	0.3	0.27
탄성계수(tf/m ²)	2,187	27,799	163,137
단위중량(tf/m ³)	1.9	2.2	2.4

침하의 급격한 증가 원인은 지반강도정수인 점착력 감소에 따라 굴착면 주변 지반에 소성영역이 발생되었기 때문이다.

Fig. 4는 Pi=50%에서 타설된 숏크리트(E=1.0×106tf/m²)에 발생하는 축방향응력을 수치해석을 통하여 구한 그래프이다. 점착력이 감소됨에 따라 숏크리트 지보재에 발생하는 응력이 증가하며 증가폭이 증가하나 점착력=4tf/m², 5tf/m²에서는 응력증가가 감소되며 결국, 수렴되는 경향을 보이고 있다.

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

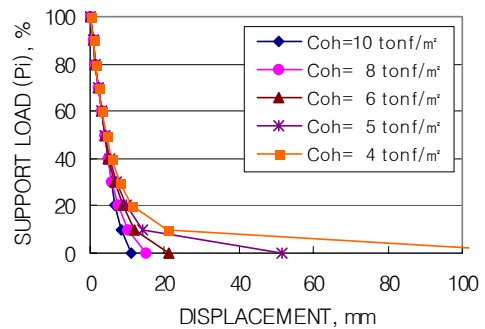


Fig. 3 CASE. I 지반응답곡선

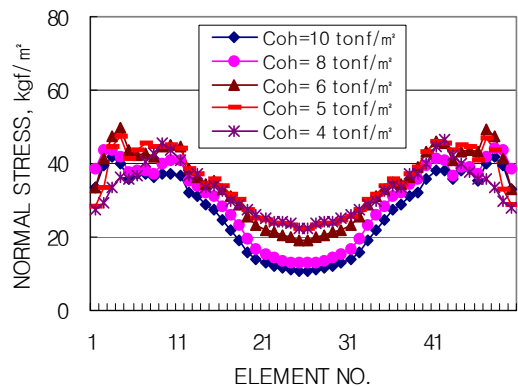


Fig. 4 점착력 변화에 따른 숏크리트 응력

앞에서 언급한 것과 같이 소성영역이 발생된다면 평형을 위해 필요한 지지력은 감소된다. 그러나, 본 수치해석에서 사용된 모델은 완전탄소성모델로서 소성이 발생되더라도 지반지지력은 일정하므로 평형을 위해 지보재 응력이 일정한 값으로 수렴되는 것으로 분석된다.

3.2.2 CASE.II

Fig. 5는 숏크리트 설치(S/C), 록볼트와 숏크리트 설치(S/C & R/B), 무지보(NONE) 조건에 대하여 지반응답곡선을 구한 것이다. 지반응답곡선은 지반 자체의 특성곡선으로 지보재가 설치된 것과 구별하기 위하여 $P_i=60\%$ 에서 지보재를 설치한 지반응답곡선은 수정지반응답곡선으로 명칭하였다.

Fig. 5는 1개의 지반응답곡선(NONE)과 2개의 수정지반응답곡선(S/C, S/C & R/B)에 대한 그래프이다. 그래프에서 숏크리트를 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 결

정된 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 증가되었으므로 응력이 증가하고 지보재가 부담하는 하중도 증가한 것이 분명하다. 이러한 현상은 지반응답곡선과 지보재특성곡선을 따로 구하여 침하량을 분석하는 방법으로는 확인되지 않는 현상이다.

3.2.3 CASE.III

숏크리트 강성변화가 지보재 응력에 어느 정도의 영향을 미치는지 확인하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 숏크리트 강성은 일반적으로 사용되는 연성숏크리트 탄성계수 $E=500,000\text{tf/m}^2$ 에서 콘크리트 탄성계수 $E=2,000,000\text{tf/m}^2$ 까지 변화시켰으며 탄성체로 모델링 하였다. Fig. 6은 숏크리트 탄성계수를 변화시켜 적용하였을 때 수정지반응답곡선을 구한 것이다. 숏크리트의 강성을 4배로 증가시켜도 천단침하에 있어서 억제효과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

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.

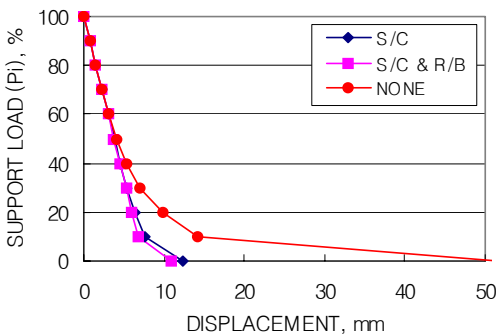


Fig. 5 CASE.II 수정지반응답곡선

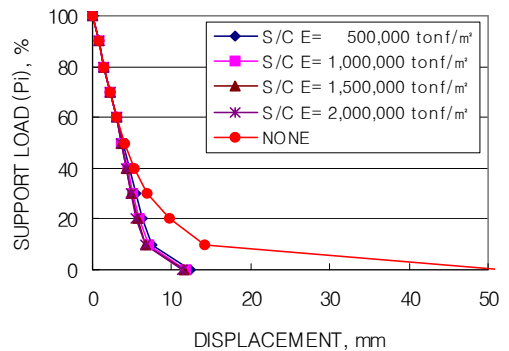


Fig. 6 CASE.III 지반응답곡선

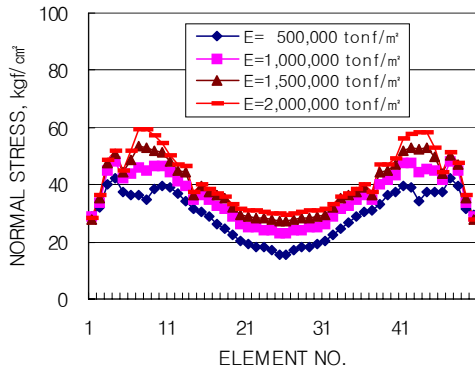


Fig. 7 숏크리트 탄성계수 변화에 따른 응력

따라서 본 터널조건에서 숏크리트의 강성은 터널굴착에 의한 변형제어의 중요한 요소는 아니었다.

Fig. 7은 숏크리트 탄성계수를 변화시켰을 때 발생하는 숏크리트 축방향응력이다. 그래프들은 다소 차이를 보이나, 숏크리트 탄성계수 차이 만큼의 변화가 발생된 것으로 보기 힘들다. 오히려 Fig. 6에서 나타난 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이와 비교되는 것이 더 유사한 경향을 보인다. 지지력도 본 해석조건에서는 지보계의 강성에 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다.

탄성계수가 작은 숏크리트는 보다 작은 응력이 발생되었고 탄성계수가 커질수록 응력이 커지는 것으로 나타났다. 수정지반응답곡선에서 변위량은 숏크리트의 강성과 관계없이 비슷한 값을 보이므로 탄성계수가 클수록 동일한 변위를 나타낼 때 응력이 증가하는 것은 당연하다.

3.2.4 CASE.IV

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

숏크리트 설치시기가 $P_i=90\%$ (막장하중분담율=10%)에서 $P_i=20\%$ (막장하중분담율=80%)까지 변화되었지만, 최종침하량은 유사한 값을 보여주고 있다. 이는 $P_i=10\%$ 에서 $P_i=0\%$ 사이에서 급격한 침하가 발생

하여 최종단계에서 지반응답곡선과 수정응답곡선간의 차이가 일정하게 유지되고 있음을 보이고 있다. 이는 숏크리트 지보계가 부담하는 지지력이 일정하게 수렴된다는 것으로 Fig. 8과 유사한 경향을 보여주고 있다.

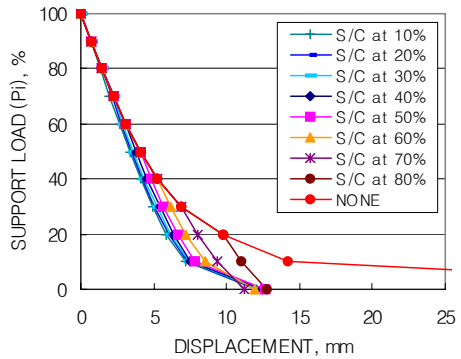


Fig. 8 CASE.IV 수정지반응답곡선

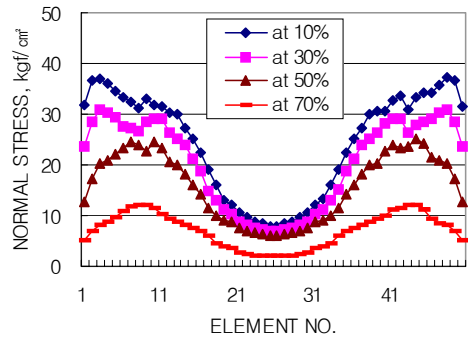


Fig. 9 숏크리트 응력($P_i=20\%$)

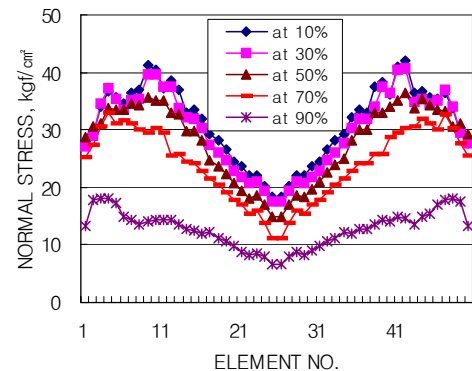


Fig. 10 숏크리트 응력($P_i=0\%$)

Fig. 9는 하중분담율=80%($P_i=20\%$)일 때 슛크리트 설치단계별 슛크리트 응력을 나타낸 것이다. Fig. 8과 비교하면 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이와 비례되는 크기로 응력차가 발생되어 있음을 보이고 있다. 또한 하중분담율100% ($P_i=0\%$)인 Fig. 10의 슛크리트 응력은 Fig. 8과 비교할 때 설치시점에 따른 슛크리트 응력 차이가 상당히 줄어들었다. 따라서 수정지반응답곡선과 지반응답곡선의 차이는 슛크리트가 부담하는 하중과 관계된 것임을 확인할 수 있다.

3.3 지반응답곡선 고찰

수치해석을 통하여 천단침하에 대한 지반응답곡선을 구하였다. 또한 다양한 지보조건에 대하여 수정지반응답곡선을 구해 보았다. 지금까지의 분석 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫번째, 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.

두번째, 지보재 설치시기와 강성은 변형제어에 대한 영향력이 적으며 지보재에 발생하는 응력에도 큰 영향은 미치지 못한다. 지반의 소성영역발생 영향이 더 크다. 터널은 지보재가 지반의 소성영역을 어떻게 제어하는가가 중요한 문제이다. 또한 지보재 설치시기와 지보재의 탄성계수 보다 지반거동특성이 보다 중요하므로 터널설계시 단편적인 지보재의 안정성 검토 보다 터널전체의 역학적 거동 분석이 필요하다. 일반터널에 있어서 천단침하에 대한 지반응답곡선은 대체적으로 터널거동을 잘 보여주고 있다. 원형터널에 한정하여 터널역학에서 언급된 내용들도 수정지반응답곡선과 지반응답곡선을 함께 고려하면 일반터널에 대하여도 동일하게 고려될 수 있다.

하중분담율이 일정 조건에서 지보재가 부담하는 지지력에 대해 의미가 없는 것으로 나타났으나 2차원 해석시에 지보재의 내적 안정성에 검토시 적용할 필요가 있다. 하지만, 적용값 선정도 매우 난해한 문제이고,

기존 적용값도 상당히 문제가 있음을 Roc Support 해석을 통하여 검토하였다.

4. Roc Support 해석을 통한 하중분담율 고찰

4.1 Roc Support 해석 개요

본 프로그램은 굴착시 지반의 거동을 알아보기위해 지반의 응력상태가 정수압장이고 단면형상이 원형단면이라 가정하고 Ladanyi의 수학적 해석방법에 따라 지반응답곡선, 지보반응곡선과 지반의 소성영역 분포를 파악할 수 있는 프로그램이다.

4.2 Roc Support 해석 타당성 검토

Fig. 11은 해석조건을 2차원 FDM해석의 경우와 유사한 조건 즉, 심도 약 60m의 초기지압 1.35MPa 과 직경 10m인 원형터널인 경우에 대하여 풍화암의 점착력을 변화시켜 구한 지반응답곡선과 지보반응곡선으로써 앞서 나온 CASE 1과 유사한 조건으로 만들어 보고자 하였다.

해석결과로서 지반응답곡선의 경우 최종변위가 큰것 부터, 지보반응곡선의 경우 오른쪽에서 차례로 점착력이 4, 5, 6, 8, 10 tonf/m^2 인 결과이다.

이 해석에서도 점착력이 감소됨에 따라 천단침하가 증가하는 것으로 나타나며, 이는 소성영역 증가와 관련이 있다.

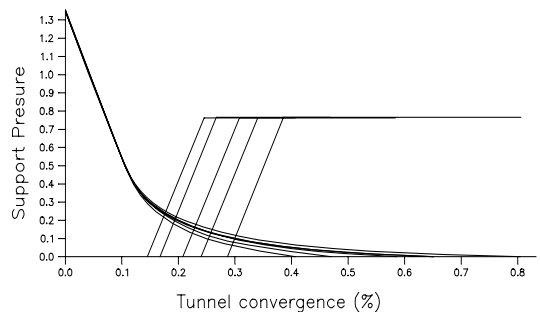


Fig. 11 점착력 변화에 따른 지보반응곡선과 지반응답곡선

Fig. 3의 결과와 비교했을 때 낮은 점착력 단계인 4, 5tonf/m² 일 때 변위가 다소 작게 평가되었지만 나머지 해석 결과는 유사한 분포를 얻을 수 있었다.

낮은 점착력 단계에서의 이러한 차이는 Roc Support 해석에서의 단면형상이 원형단면으로 국한되어 있고 정수압역상태로 암반자중영향 고려하지 못한다는 것으로부터 나온다고 보여지지만 굴착에 의한 지반과 지보의 거동에 대하여 대략적으로는 확인할 수 있는 근거가 될 수 있음이 명백하다 하겠다.

4.3 하중분담률 결정

일반적으로 사용되는 하중분담율은 막장부-1일강성 슛크리트부-변형수렴부로 구분되며, 지반응답곡선과 3차원해석 결과를 분석하여 하중분담율을 결정할 수 있다. 지반응답곡선에서 하중분담율과 이에 상응하는 침하량이 결정되며, 3차원해석 결과에서 막장이격거리와 침하량을 얻을 수 있다. 얻어진 자료를 종합하면 필요한 시공단계의 하중분담율을 결정할 수 있다.

지반내 터널이 굴착되면 그림과 같이 막장면의 전방에서부터 변위가 발생되며 굴착된 막장면에서는 이미 전체 침하량의 어떤 비율로 침하가 발생되고, 막장면이 통과한 후방에서 최대 변위로 수렴하게 된다. Fig. 12는 3차원 해석을 통해 구한 변위 분포를 최대변위로 일반화시켜 막장에서의 거리에 따른 변위분포이다.

즉 예를 들면, Fig. 13은 점착력 10tf/m²인 경우의 지반응답곡선과 지보반응곡선인데, 두 곡선의 교점의 지보압력은 0.22MPa로서 초기지압 1.35 MPa의 약 16%에 해당하므로 막장에서 1m떨어진 지점에서 지반 자체가 받는 하중 분담률은 84%인 것이다.

위에서 설명한 방법대로 암반조건에 따라 지반응답곡선과 지보반응곡선을 이용하여 하중분담률을 결정하여 봄으로써 현재 일률적으로 사용되어지고 있는 하중분담률에 대한 고찰을 하여 보고자 하였다.

4.4 해석방법 및 조건

해석조건은 심도 약 60m의 초기지압 1.35MPa를 적용시키고 원형단면에 대한 암질에 따른 지반응답곡

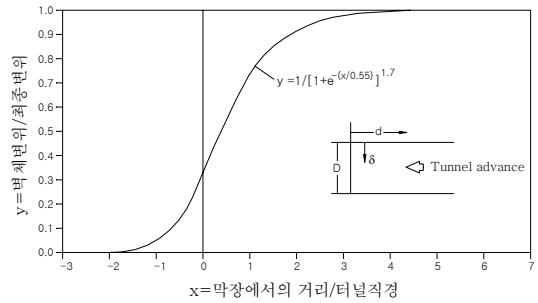


Fig. 12 일반화된 증방향 변위 분포

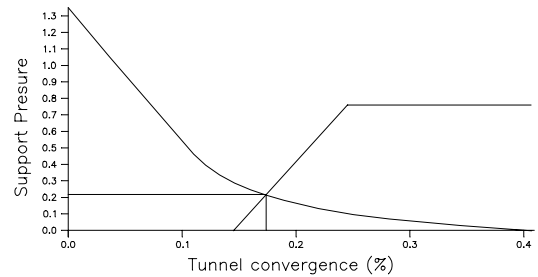


Fig. 13 점착력=10tf/m²일 경우 지보반응곡선과 지반응답곡선

선과 지보반응곡선을 구하여 보았다.

지보재는 150mm의 슛크리트를 막장과격의 이격거리 1m로 하여 나아가도록 모델링 하였으며, 여기서 사용된 물성치는 FDM해석에서와 동일하게 적용하였다.

4.5 Roc Support 해석 결과 검토

1) 풍화토 지반

풍화토인 경우 막장이격거리가 조건대로 1m에 불과하지만 Fig. 14에서 보면 환경에 대한 변위의 비율인 convergence가 24%를 초과하게 되고 그 때의 지반 자체의 하중분담률은 90.3%가 된다. 만일 이러한 지반의 2차원 해석시 하중분담률을 50-25-25로 적용한다는 것은, Fig. 14에서 지반의 하중분담이 0.675MPa이고 이때의 지반응답곡선에서 변위는 250mm이다. 이를 최종변위로 일반화한다면 약 7%인데 이 결과는 Fig. 12에서 살펴보면 지보재 타설 위치가 오히려 막장면보다 전방에 위치한 시공단계에서의 하중분담률이 되는 것이다. 그러므로 이러한 수치를 그대로 해석에 적용한다는 것은 상당한 오류를 범할 수 있다고 보여진다.

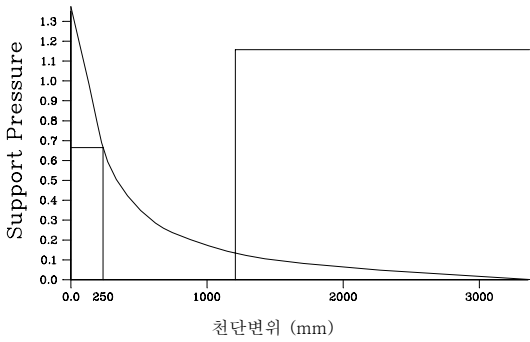


Fig. 14 풍화토타널 지반응답곡선과 지보반응곡선

2) 풍화암 지반

풍화암에서 무지보인 경우에 소성영역의 두께가 2.3m로 최종변위가 49mm로 계산되었으나 지보설치 후 소성영역이 없어지고 변위 또한 19.5mm로 수렴하게 된다.

이 경우에도 위와 같은 방법으로 하중분담률을 살펴보면 Fig. 15에서 지반의 하중분담 50%인 0.68MPa일 때의 변위는 16mm이고 이는 최종변위의 약 35%정도가 된다. 이는 3차원 해석결과에 적용하면 막장에서 0.9m 떨어진 지점의 하중분담률로 막장 이격거리 1m와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3) 연암 지반

연암에서는 Fig. 16에서 지반의 하중분담률이 70.3%로 계산되고, 지반의 하중분담 50%일 때의 변위는 2.65mm이고 최종변위의 50%인데 이는 막장면으로부터 3.7m 떨어진 지점에 지보가 설치되는 것을 나타낸다.

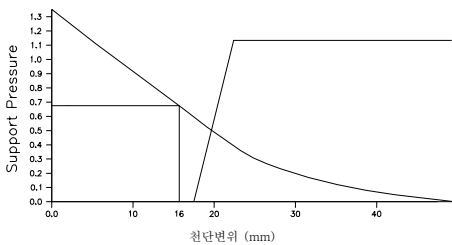


Fig. 15 풍화암터널 지반응답곡선과 지보반응곡선

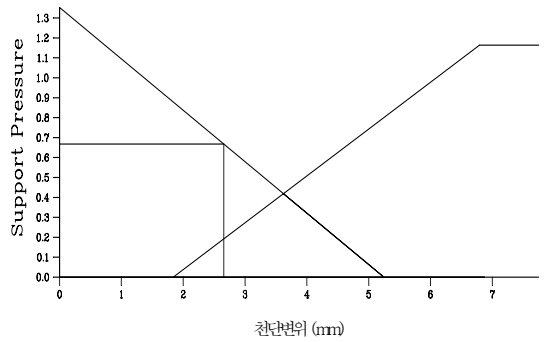


Fig. 16 연암터널 지반응답곡선과 지보반응곡선

해석의 결과를 표로 요약하면 다음과 같다. 소성영역의 반경이 풍화토, 풍화암, 연암에 대하여 각각 무지보시 암질이 좋아질수록 소성영역의 반경이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 기존의 하중분담률과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있고, 암질에 따라서도 상당한 차이가 있다.

본 연구에서는 지반응답곡선을 통한 하중분담률을 고찰하는 방법을 언급하였고 이러한 지반응답곡선을 이용하여 충분히 가능하다는 것을 알 수 있었고, 일률적인 하중분담율을 이용한 수치해석은 적용값에 문제가 있을 것으로 판단된다.

실제로 하중분담율이나 슛크리트 강성변화의 적용은 계측에 의한 역해석시 유용한 것으로 적용값은 계측값과 일치하도록 유연하게 적용하는 것이 필요하다.

Table 2 Roc Support 해석결과

구분	풍화토		풍화암		연암		
	무지보	지보	무지보	지보	무지보	지보	지보보강
소성영역 두께(m)	12.6	5.8	2.3	0	0.1	0	0
지보압력 (MPa)		0.13		0.496		0.401	0.553
convergence (%)	67.56	24.11	0.98	0.39	0.1	0.07	0.06
안전률		8.71		2.29		2.83	4.16
지반의 하중분담률 (%)		90.3		63.3		70.3	59

5. 결 론

수치해석에 의한 터널설계방법은 단편적인 결과만 확인하게 되어 해석결과에 대한 분석이 어렵다. 또한 지반응답곡선과 지보반응곡선에 의한 방법은 지반과 지보재의 상호작용을 고려하지 못하므로 정량적인 분석상 문제가 있었다.

따라서, 합리적인 터널설계를 위하여 지반응답곡선과 수정지반응답곡선을 통한 전체적인 지반의 거동을 정성적으로 파악하고 수치해석을 통한 정량적 안정성 검토를 수행하여야 한다. 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 터널조건에서 지보재에 작용하는 하중은 지보재의 탄성계수나 하중분담율보다 지반강도나 변형계수가 보다 큰 영향력을 미친다. 또한, 지보재에 발생하는 응력의 수렴성은 소성영역과 관련된 지반특성으로 분석된다.
- 4) 3차원해석결과와 지반응답곡선을 통하여 기존 하중분담율 적용성을 분석하였을 때 상당한 문제점을

을 보이고 있다. 수치해석시 적용되는 하중분담율과 슛크리트 강성변화 등의 입력치도 일률적인 적용보다 역해석과 접목하여 보다 유연한 적용이 필요하다.

참고문헌

1. Fathalla El-Nahas, Farouk El-Kadi and Ali Ahmed "Interaction of Tunnel Linings and Soft Ground", Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 7 No.1, PERGAMON PRESS, 1992, PP.33-43.
2. Z.T.Bieniawski "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A.BALKEMA, 1984, pp 145-149.
3. E.Hoek & E.T.Brown, "Underground Excavations in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, 1980, pp 248-252.
4. P.P.Oreste and D.Peila "Modelling Progressive Hardening of Shotcrete in Covergence Confinement Approach to Tunnel Design", Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, pp.425-431.
5. Brown,E.T.,Bray,J.W.,Ladanyi,B. and E. Hoek "Ground Reponse Curves for Rock Tunnels", Journal of Geotechnical Engineering 109, 1983, pp15-39.
6. M.Verman, B.Singh, J.L.Jethwa and M. N.Viladkar, "Determination of Support Reaction Curve for Steel-Supported Tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, pp. 217-224.
7. X.D.Pan, J.A.Hudson, "Plane Strain Analysis in Modelling Three-Dimensional Tunnel Excavation", Int.J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.25, No.5, 1988, pp.331-337.
8. Alan M. Muir Wood, "Development of Tunnel Support Philosophy", Pergamon Vol.4, 1993, pp.349-368
9. W.H.Ward, "Ground Supports for Tunnel in Weak Rocks", Geotechnique 28 No.2, 1978, pp. 133-171.

(접수일자 : 2002년 10월 29일)