

근접터널의 설계개념 및 해석기법에 대한 연구

A study on design concept and analysis method of closely spaced tunnels

김상환*¹

Kim, Sang-Hwan

Abstract

The use of tunnels in major transportation schemes has increased considerably during the last decade especially in urban area. The state of stress and the displacements in a zone around a tunnel will be modified by the construction of a tunnel. Therefore, it is necessary to study the influence factors for the nearby tunnels. This paper describes the design concept and analysis method on the closely spaced tunnels. The main purpose of the present paper is to study the influence of tunnel construction on the behaviour induced in the liners of nearby tunnels. The effects of tunnel proximity and alignment, liner stiffness and settlements are also reviewed in this paper. The paper then introduces the design and analysis methods for the closely spaced tunnels which is very useful in practice.

Keywords : Influence factors, closely spaced tunnels, tunnel proximity, alignment

요 지

최근 도심지역에서는 지하철과 같은 주요교통 수단으로 터널의 이용이 날로 증가되고 있는 추세에 있다. 터널 주변의 응력 및 변형상태는 새로운 터널건설에 의하여 변화되어 진다. 따라서, 근접터널에 대한 영향요소에 대한 연구 및 고찰은 필수적이다. 이 논문은 근접터널의 설계개념 및 분석기법에 대한 연구로서 신설터널의 건설로 인한 근접터널의 영향 및 상호거동에 대하여 고찰하였다. 특히 터널의 간격, 기하학적 위치, 라이닝의 강성 및 침하 등에 대하여 이론적 이해를 통하여 설계와 분석기법에 대하여 제안하였다. 결과적으로 이 논문을 통하여 향후 근접터널 설계시 보다 이론적이고 기술적인 접근을 위한 방향제시 및 해석방법등 기술향상을 위하여 도모할 수 있을 것이다.

주요어 : 영향요소, 근접터널, 터널간격, 기하학적위치

1. 서론

교통 System의 급속한 확장 및 발전에 따라 기존터널의 연장 또는 새로운 근접터널의 건설이 날로 증가되어 가는 시대가 되었다. 그러나 주변의 환경적 요인에 의하

여 새로운 Network의 터널 건설에는 해결해야 할 많은 문제점이 동반되고 있는 실정이다. 특히, 전반적인 지반의 반응과 터널간의 상호거동 문제에 대하여서는 설계시 매우 중요한 사항임에도 불구하고 대부분 경험적 방법에 의존할 뿐 이에 대한 체계적인 해석기법이나 설계

*1 정회원, 호서대학교 기계건축토목공학부 토목전공 교수

지침은 매우 부족한 실정이다. ITA (국제터널학회)의 Working Group에서는 그림1과 같이 전반적인 터널구조물의 설계과정을 제시 하였다. 그러나 이 제안은 근접 터널의 해석과 설계에 있어서는 단순함과 포괄적인 흐름도에 불과하다는 것을 알 수 있다. 이러한 관점에서 국내의 터널기술 발전을 위하여 근접터널에 대한 해석과 설계개념에 대하여 고찰 하고자 한다.

2. 터널과 지반의 상호 거동

일찌기 1969년 Peck교수는 터널의 전반적인 거동에 대하여 시공 사례를 이론적 배경과 함께 정리된 State-of-the-Art 보고서를 통하여 발표 한 바 있다. 그 보고서에서 Peck교수는 터널의 안전 설계를 위한 3가지 기본 요구사항에 대하여 다음과 같이 언급하였다.

- 1) 터널의 굴착과 시공 공법은 안전하게 지반상태에 적합하고 용이하여야 한다.
- 2) 터널시공이 터널의 주변 및 상부 구조물의 위험에 원인 제공을 해서는 안된다.
- 3) 터널은 터널구조물의 내구연한 동안 어떠한 영향에도 견딜 수 있어야 한다.

상기 3가지 기본요건은 사실상 일반적이고 포괄적인 제시로 인식되어 지지만, 과거에서 최근까지 터널기술에 대하여 많은 학자 및 기술자들이 이들 요건을 만족시키는 터널을 구축하기 위하여 무단한 연구와 노력을 해왔고 계속적으로 진행되고 있다. 아울러 상기 요건들은 각각 개별적이라기 보다는 서로 연관성 있는 요건들이라 볼 수 있으며, 터널 기술의 분야별 문제점을 세분하여 발전시킬 수 있는 계기를 제공했다는데 큰 의미를 부여할 수 있다.

실질적으로 상기 Peck교수의 기본요건을 만족시키기 위하여 터널설계 시 고려해야 할 사항 중 중요한 항목은 시공전과 완료후의 터널주변지반의 변형과 라이닝에 부과되는 하중의 크기라 할 수 있다. 이에 대하여서 터널설계의 접근 방식은 지반상태에 따라 다르다고 할 수 있다. 'SOFT' 지반의 경우, 터널시공 중 야기되는 변위를 억제하기는 쉬운 작업은 아니다. 아마도 클 것으로 사료되며, 결과적으로 지표면과 주변 구조물에 상당한 영향을 끼칠

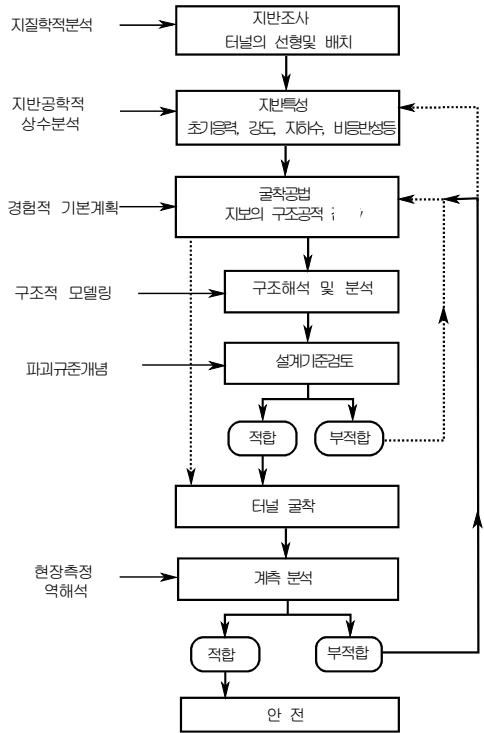


그림 1. 터널의 설계과정 흐름도

것으로 판단된다. 따라서, 이러한 경우의 터널 설계 및 시공에 있어서는 주변 지반 변형의 크기, 범위 및 시간적 변화 등에 대한 한계의 규정 및 관리가 필수적이라 할 수 있다. 이러한 지반에 대하여서 터널의 안전성을 위하여서는 비교적 강성이 큰 라이닝의 선택이라고 할 수 있다. 이러한 경우 Plane Model의 고전적 이론을 적용하여 터널을 설계하여도 충분할 것으로 판단된다. 그림 2는 간단한 설계 모델로써 4가지 서로 다른 Plane 모델들을 제시하였다.

설계 시 모델링은 터널의 깊이, 지반과 라이닝의 강성 관계에 따라 그림 2와 같이

- 1) 부분적인 Bedded Beam 모델,
- 2) Plane Continuum내 라이닝 (Full) 모델,
- 3) Plane Continuum내 라이닝 (Crown부 하중감소) 모델,
- 4) 라이닝에 작용하는 경험적하중 모델 등 4가지 유형의 모델 중 선택 할 수 있다.

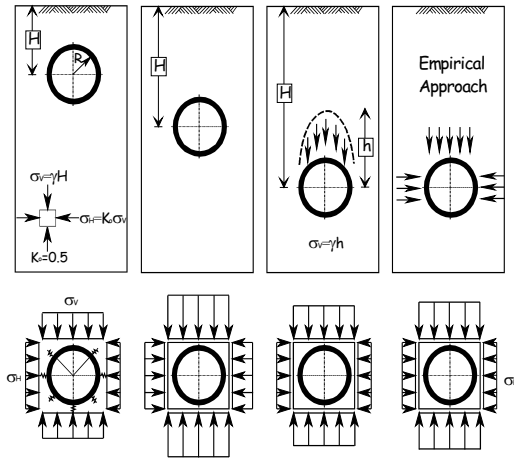


그림 2. Plane Strain Models

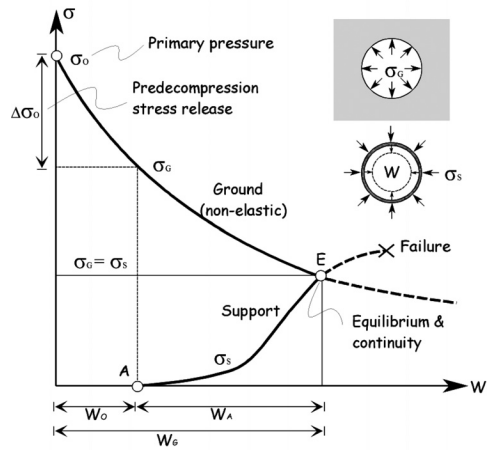


그림 3. Fenner-Pacher Convergence-Confinement 특성

‘HARD’지반의 경우, 터널굴착에 따른 응력변화의 결과는 즉시 주변지반으로 수용되게 되는데, 이러한 경우, 만약 라이닝이 요구되어 진다면, 굴착된 지반의 원상태의 유지와 주변지반을 지지시킬 수 있는 압축성이 적은 라이닝에 대한 설계상의 고찰이 필요하다. 라이닝과 지반의 사이의 거동에 대한 설계 시 가장 기본적인 해석을 위하여 이해해야 할 대표적인 도구로는 그림 3에서 보여주는 Penner-Pacher 특성곡선을 들 수 있다.

그러나, 이 특성곡선은 모든 터널에 있어 라이닝과 지반의 거동을 대변 할 수는 없고, 오직 터널단면이 원형일 경우에 있어서 유용하기 때문에 이러한 단순함을 보완되어 이용되어야 한다. FEM 수치해석에 있어서도 BEM의 접목으로 FEM경계 밖의 요소에 대한 고려를 할수 있었고, 최근에는 지반의 거동 모델에 있어서도 선형거동의 간단한 접근보다는 비선형거동으로 FEM과 BEM를 복합병행으로 해석하고 있는 추세이다.

3. 근접터널의 이해와 상호 거동해석

실질적으로 터널에 관한 연구와 해석은 Single 터널에 대한 사항이 대부분이다. 이는 Single 터널의 충분한 이해가 선행되어야 Multi 터널에 대한 문제점을 쉽게 해결할 수 있을 것이라는 심증은 있으나, 최근 많은 터널 Net-

work이 기하학적으로 다양하게 (즉, 교차터널, 평행터널 등) 구축되고 있는 실정에 있어 점차적으로 Multi 터널에 대한 연구가 활발해 지고 있는 실정이다.

Multi 터널의 상호 거동을 잘 설명 할 수 있는 터널의 기하학적 배치는 그림 4와 같은 동일 심도에 평행하게 놓인 두 터널의 경우라 할 수 있다.

그림 4에서 보여주는 두 터널의 영향범위가 중첩된다면, 두 터널 사이에는 상호 거동이 발생 할 것이다. 그러므로 이러한 경우 새로운 터널시공에 의한 기존터널의 안전성에 어떠한 영향이 미치는가에 대하여 설계 시 상호거동에 대한 사전 검토가 필요하다. 근접터널에 있어서 시공 시 주된 문제점을 야기 시키는 항목을 열거하면 다음과 같다.

- 1) Unacceptable deformation
- 2) Instability (불안정)

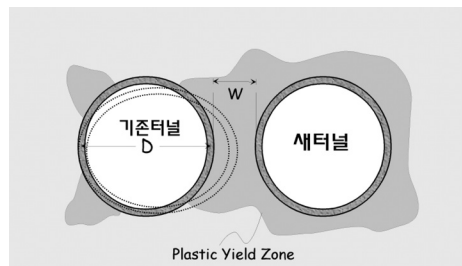


그림 4. 두 평행터널사이의 상호 거동

3) Collapse of heading (막장의 붕괴)

4) Large amount of groundwater inflow 이 항목 중 가장 빈번하게 문제를 야기시키는 것으로서는 터널의 큰 변형이다. 이는 많은 보수비용과 아울러 시공 공정상에 있어서도 시간적 소비를 야기 시킨다. 따라서 근접터널 시공 시 터널변형에 대한 관리는 매우 중요한 문제중 하나이다.

터널 변형의 Mechanism은 매우 복잡한 문제로서 이 Mechanism에 영향을 주는 주요 요인들은 지반의 초기 응력 (In-situ stress), 지반상태 (Quality of ground), 굴착 순서 (Excavation sequence), 지보설치시기 (Support installation timing) 및 터널형상 (Geometry of tunnel) 등이라 할 수 있다. 이들 요인들은 터널 시공 시 영향범위를 결정하는 매우 중요한 사항들이지만, 우선적으로 이행되어야 할 사항은 두 터널사이의 상호작용 (Interaction)에 대한 문제의 충분한 이해이다. 두 터널의 상호작용은 신설터널에 의하여 야기되는 주변지반의 이완으로 지반의 응력상태가 변하고 이에 따라 기존터널의 안전성 문제가 야기되기 때문이다. 따라서, 근접터널에 대한 설계 및 해석 시 상기 요인들과 아울러 추가의 근접터널에 대한 Mechanism에 대한 구체적인 분석이 요구된다.

4. 근접터널에 대한 설계시 고려 사항

상기 언급내용과 아울러, 근접터널의 경우 설계 및 시공시 기본적으로 검토되어야 할 사항을 열거하면 다음과 같다.

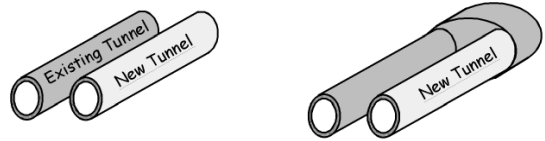
- 1) 두 터널의 기하학적위치 (평행/교차)
- 2) 두 터널의 이격거리
(Pillar Width/ Pillar Depth)
- 3) 두 터널의Flexibility 와 Compressibility
- 4) 터널시공방법에 대한 정확한 수치해석상 시뮬레이션 기법

4.1 터널의 기하학적 위치

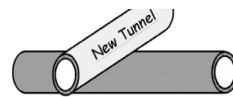
기존터널에 새로운 터널의 기하학적 배치는 두 터널사이의 상호작용에 매우 중대한 영향을 미친다. 기하학적

인 배치는 어떠한 경우에 있어서도 다음과 같이 크게 세 가지로 분류 될 수 있다.

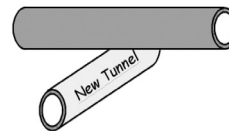
- 1) 기존터널과 평행하게 근접하여 새로운 터널을 시공할 경우



- 2) 기존터널의 상부에 근접하여 새로운 터널을 시공할 경우



- 3) 기존터널의 하부에 근접하여 새로운 터널을 시공할 경우



가장 일반적으로 터널 기술자가 접하는 두 터널의 기하학적인 구조는 1)의 경우와 같은 평행터널의 경우일 것이다. 이 경우에 있어서는 신설 터널의 시공에 의하여 기존터널의 Pillar 쪽 Springline의 라이닝의 변형에 주목하여야한다. 변형의 발생은 라이닝에 부가되는 휨모멘트의 증가를 의미하고 나아가서는 파괴의 위험에 직면하기 때문에 상당히 중요하다. 따라서 평행터널의 배치경우 Pillar Width (터널간격)은 무엇보다도 중요한 검토 사항이다. 터널간격에 대한 고찰은 다음절에서 설명하였다.

2)와 3)의 경우에 있어서는 3차원적 거동이므로 해석상의 어려움이 따른다. 그러나 신설터널의 위치에 따라 평행터널보다는 적은 영향을 기존터널이 받을 수 있다. 신설터널이 기존터널 상부에 위치할 경우에 있어서는 Hansmire (1981) 시공사례의 분석결과를 보면 시공 중 기존터널의 Crown 부분의 지반의 이완으로 인한 응력 감소로 기존터널의 직경이 수직방향으로 증가됨을 보여

주었다. 그러나 두 터널의 Pillar Depth가 작은 것에 비하면 기존터널의 안전성에는 큰 영향이 없는 것으로 발표되었다. 그러나 반대의 경우, 기존터널 하부로 신설 터널이 시공될 때는 정확한 시공사례보고는 없으나, 수치해석과 모델시험으로부터 얻어진 결과에 의하면 기존 터널은 Pillar Depth에 상당한 영향을 받으며, 주목할 사항으로는 두 터널사이에는 추가의 침하 Mechanism이 부가된다는 사실이다.

따라서, 근접터널 설계 시, 신설터널의 기하학적 위치는 가능하면 기존터널 상부에 배치되어야 바람직할 것으로 판단되나, 기존터널의 이용성을 충분히 검토하여 신설터널의 안전성을 더욱 중요시 할 경우에 있어서는 기존터널의 하부로 배치하는 것도 바람직할 것이다.

4.2 터널간격 (Pillar Width & Depth)

그림 5는 Peck교수가 평행하게 배치된 근접터널에 있어서 터널간격 및 크기에 따른 터널의 변형에 대하여 간단한 지침을 제시한 내용이다. 이 지침은 두 터널의 변형에 대하여 변형량을 직접 추정한다기 보다는 상대적 변형을 추정하는 것으로 초기 단계의 근접터널 설계시 유용하게 이용될 수 있다는 점에서 가치를 부여 할 수 있다

터널 시공 순서	Distortion	
	터널 1	터널 2
	$\frac{2\Delta a}{a}$	$\frac{\Delta a}{a}$
	$\frac{\Delta a}{a}$ With local curvature equal to twice that for the above distortion	$\frac{\Delta a}{a}$
	$\frac{2\Delta a}{a}$	$\frac{\Delta a}{a}$

그림 5. 근접터널시공에 따른 터널의 변형증가

(터널간격이 신설터널직경의 1/2 인 경우). 그러나, 만약 두 터널사이의 간격이 터널의 직경보다 상당히 클 경우에 있어서는 두터널은 서로 각각의 터널로 간주되어 거동할 것이다.

근접터널의 상호 거동에 대한 영향에 매우 중요한 요소는 Pillar width 또는 Pillar depth 이다. 두 터널의 이격거리에 있어서는 동등 깊이에서 두 터널이 평행할 경우 연구결과 및 시공자료들에 의하면 두 터널이 터널 직경의 1배 이상이 될 경우 그 영향은 10% 미만이라고 제시되어 있으나, 지반의 초기응력과 강도 등에 의하여 복합적으로 결정되어야 할 것이다.

두 터널에 있어서 Pillar의 평균응력 (S_p) 다음과 같이 근사적으로 표현 할 수 있다.

$$S_p = \gamma \cdot H \cdot \left(1 + \frac{B}{w}\right) \tag{1}$$

여기서 γ : 지반의 단위중량
 H : 지표면으로 부터의 터널 깊이
 B, w : 터널폭, Pillar width

Pillar 의 일축압축강도 (σ_p)는 다음과 같이 추정 할 수 있다.

$$\sigma_p = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \tag{2}$$

여기서, c 와 ϕ : 지반의 점착력과 내부마찰각이다. 그러므로, Pillar 의 초기항복 (Initial yield)에 대한 안전계수(SF)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SF = \frac{\sigma_p}{S_p} \tag{3}$$

그림 6 은 W/B와 상재응력 (γH)에 의하여 Pillar강도 (σ_p)를 Normalization 시킨값과의 관계를 안전율 (S.F)에 따라 수치해석된 것을 나타낸 것으로 설계상 유용하게 활용될수 있도록 제시하였다.

이 그림에서 보여주듯이 pillar 응력과 강도에 의한 Pillar 강도비로 부터 터널사이의 간격에 대한 근접터널의 안전성을 우선적으로 판단 할 수 있다.

Pillar 강도에 적절한 터널간격은 Pillar가 초기에 항복된다 하더라도 필연적으로 pillar 응력 (S_p)는 Pillar

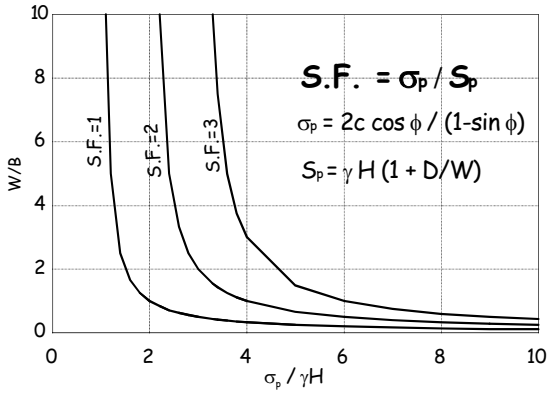


그림 6. 안전율 (S.F.)에 따른 W/B와 강도비 관계곡선

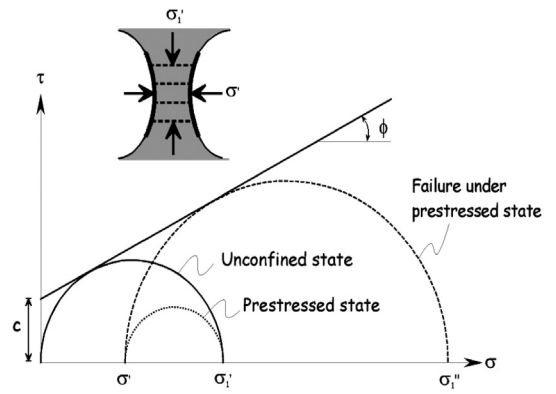


그림 7. 지반의 응력상태 (Prestress 전후)

강도 (σ_p)이내가 유지되도록 설계되어야 한다. 만약 터널사이의 지반의 강도가 상기 언급한 기준에 만족시키지 못하고 안전성이 낮을 경우에 있어서는, 터널의 지지 System은 경험적인 설계기준에 의한 보강대책의 제시 보다는 실질적인 현장상태를 충분히 관찰 분석하여 이에 따라 보강대책을 수립함이 원칙이라 할 수 있다. 일반적으로 Pillar의 강도를 증가시키는 방법으로, Pillar 부분을 양쪽에서 견고하게 고정시켜 Prestress를 가하여 강도를 증가시키는 방법이 일반적이라고 할 수 있다. 이는 앵커가 큰 역할을 하며, 이와 같이 보강되는 과정을 이론적 접근해 보면, 그림 7과 같다. 그림에서 보여 주는 것과 같이 Pillar의 강도는 일축압축상태에서 삼축압축상태로 전환됨에 따라 Pillar강도 (σ_p)는 Pillar응력 (S_p)을 충분히 지지할 수 있도록 보강되는 것이다.

4.3 Flexibility 와 Compressibility

터널에 인접에 있는 지반의 거동은 라이닝의 강성에 큰 영향을 받는다. 1972년 Peck교수는 지반 내에서 라이닝의 거동을 지반과 라이닝의 상호 거동에 따라 Flexible과 Stiff로 구분하여 언급하였다. 'SOFT' 지반내의 Stiff 라이닝은 'HARD' 지반에서는 Flexible하게 거동한다는 의미이다. Flexible 라이닝의 경우, 초기에는 Ring 압축과 같이 라이닝과 연직방향으로 지반의 하중이 라이닝에 균등한 분포로 작용하게 되며, 따라서 휨모

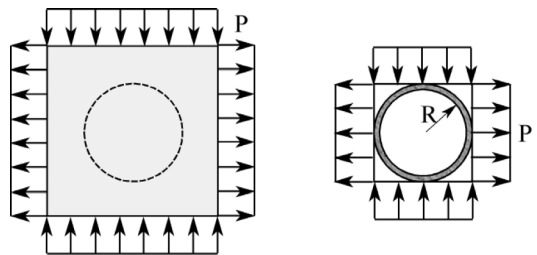
멘트도 작게 발생된다. 반면 Stiff 거동을 하는 라이닝의 경우 지반하중은 라이닝의 Bending Action에 의해 지지하는 것이라 볼 수 있다.

이와 같이 지반내의 라이닝 거동 특성은 라이닝 자체의 강성과 지반의 강성의 비로 표현 할수 있다. 따라서 근접 터널의 경우 두터널 라이닝의 Flexibility 와 Compressibility는 터널거동의 중요한 영향 요소의 하나이다.

Flexibility Ratio (F) 값은 주변지반의 전단강도에 따른 터널 라이닝의 Bending Stiffness에 의해 결정하는 요소이며, 다음과 같은 식에 의하여 계산되어진다.

$$F = \frac{E_s \cdot R^3 \cdot (1 - \nu_l^2)}{6 \cdot E_l \cdot I \cdot (1 + \nu_s)} \quad (4)$$

- 여기서 E_s, E_l : 지반과 라이닝의 변형계수
- R : 터널의 반경
- ν_s, ν_l : 지반과 라이닝의 포아송비
- I : 라이닝의 2차관성 모멘트

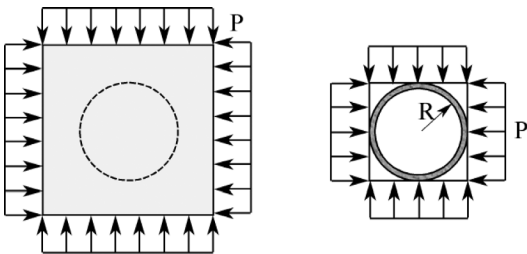


F 값이 작을 수록 상호거동은 작아지기 때문에 두 터널의 상호거동에 대한 영향을 최소화시키기 위해서는 터널 라이닝의 두께를 보통보다 두껍게 설계하여 라이닝의 거동특성을 Stiff하게 하는 것이 바람직하다.

반면 Compressibility Ratio (C) 값은 지반의 Compressive Stiffness 와 터널라이닝의 Hoop Stiffness의 비를 의미하는 것으로써, 다음과 같은 식에 의하여 계산되어 진다.

$$C = \frac{E_s \cdot R \cdot (1 - \nu_s^2)}{E_l \cdot t \cdot (1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} \quad (5)$$

여기서 t: 라이닝의 두께



C 값에 대하여서는 같은 지반의 특성을 보이면 그 값의 차이는 비교적 작은 편이며, 토사터널의 경우에 있어서는 1보다 작게 설계되는 것이 바람직하다.

실질적으로 터널의 라이닝의 거동은 휨모멘트의 증가에 따라 안전성이 야기됨으로 C값 보다는 F값의 검토가 더욱 중요하다고 말할 수 있다.

라이닝의 거동특성에 대하여 Peck 교수는 Flexible 과 Stiff 라이닝 거동의 경계를 F=10으로 하여, F값이 10이상의 경우에 있어서 그 터널의 라이닝은 Flexible 하게 거동하는 것으로 제안하였다. 현재 건설된 국내의 터널에 있어서 상기 주어진 식에 의하여 F값을 추정해보면 그 범위가 5에서 500사이의 값으로, 터널 라이닝은 Flexible 에서부터 Stiff 거동까지 광범위하게 설계, 시공되었다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 이는 설계상에 이론적인 접근보다는 경험적인 접근을 하여 현재 시공된 터널의 경우 터널굴착공법, 지반상태 및 지반 보강 등에 따라 일률적인 설계 및 시공되었다기 보다는 현장여건에 적합한 터널이 건설되었다는 것을 알 수 있다.

4.4 터널시공에 대한 시뮬레이션 기법

근접터널의 설계에 있어서 필수적인 사항으로는 수치 해석에 의한 근접터널의 거동 예측이다. 수치해석에 의해 정확한 터널 및 지반 거동을 초기 단계에 예측한다는 것은 상당한 어려움이 따른다는 것은 터널의 설계와 시공을 경험한 기술자라면 누구나 호응이 가는 말일 것이다. 수치해석 기법에는 서두의 터널거동에서 언급은 했듯이, 유한요소기법, 유한차분법, 경계요소기법 등 다양한 방법들이 있으나, 무엇보다도 중요한 사항은 적용할 정확한 지반상수, 실질적인 지반거동 모델 및 시공과정의 정확한 시뮬레이션 기법 등의 적용을 들 수 있다. 이중 수치해석상 터널굴착의 시뮬레이션 기법은 무엇보다 중요한 사항이라 볼 수 있다. 정확한 시뮬레이션 기법이 선택되어 진다면 지반상수와 지반거동 모델은 순차적으로 다양한 수치와 모델을 적용하여 해석 가능하기 때문이다. 이러한 면에서 볼 때, 설계과정에서 정확하게 수치 해석을 수행한다는 것은 어렵지만, 또한 단순한 수치해석 모델을 적용하더라도 접근방식에 있어서는 실제 시공 과정을 최대한 반영되어 지도록 수행되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 이 절에서는 우선적으로 시공과정의 정확한 시뮬레이션 기법의 선택을 위하여 굴착에 따른 터널과 지반 거동을 이해하고 지반과 터널의 거동에 대한 시뮬레이션 기법에 대하여 고찰 하고자 한다.

4.4.1 굴착에 따른 터널거동

만약 터널주변의 응력상태가 항복한계를 초과하지 않는다면, 굴착과정의 방법에 관계없이 터널의 변형은 서로 같은 결과를 얻게 될 것이다. 이와 같은 것은 변형이 탄성영역상태에서 응력 경로에 영향을 받지 않기 때문이고, 즉, 굴착 후 터널주변의 지반이 소성상태를 나타내는 영역은 발생되지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 일반적인 지반의 굴착에 있어서는 이와 같은 상태의 존재가 불가능하기 때문에 실질적으로는 굴착의 과정 또는 순서가 터널의 변형에 상당한 영향을 주게 된다. 서로 다른 굴착과정 및 순서는 다시 말해서 터널의 Unloading Rate 가 다르다는 것을 의미하며, Full face 굴착 방법으로 터널을 굴착 할 경우 상당히 빠른 Unloading 과정으로 인하여 많은 양의 변형이 발생된다. 그러므로, 지반

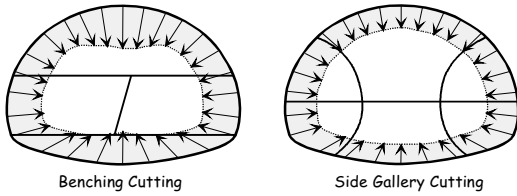


그림 8. 굴착방법에 따른 터널의 변형 비교 (수치해석결과)

의 강도가 약할수록 막장의 안정과 적은 양이 변형을 유도하기 위하여 여러 단계에 걸쳐 굴착되어야 하는 것이다. 가장 많이 이용되고 있는 대표적인 굴착공법을 열거하면 다음과 같다.

- 1) Benching Cutting
- 2) Side Gallery Cutting: 터널폭이 넓은 경우 적합 (비교적 심도가 낮은 지반)

경험적으로 Side Gallery Cutting 방법을 이용하여 적절한 시간에 터널 지지를 할 경우 터널의 침하는 Benching Cutting 방법에 의한 것과 비교해 볼 때 1/2 정도로 작게 발생된다고 한다. 상기 두 경우에 대한 수치해석 결과는 그림 8에 나타난 것과 같으며, 이 결과에서 보듯이 터널의 변형은 Side Gallery Cutting 방법의 경우 상당량의 변형을 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히 터널의 Crown 과 Invert 부분의 변형은 터널의 굴착방법에 따라 상당히 차이를 보여주는 것을 알 수 있다.

상기 언급내용과 그림 8로부터, 두 터널의 경우, 동시에 굴착하는 것은 각각 터널을 굴착하는 것보다 더욱 불리할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 이는 두 터널을 동시에 굴착할 경우 주변지반의 갑작스러운 이완으로 예견치 못한 큰 변형이 야기될 수 있기 때문이다.

근접터널의 경우에 있어서도 상기와 같은 터널의 변형 거동은 동등하기 때문에 지반조건 및 기존 터널의 안전성을 검토, 분석 후 적합한 굴착방법을 선택하여 지반의 거동을 최소화 시켜야 할 것이다.

4.4.2 터널시공의 시뮬레이션 기법

수치 해석상에 있어서 일반적으로 채택되고 있는 터널 시공 과정의 시뮬레이션 기법으로는 지반과 라이닝을 모델링 한 후 전 요소에 초기응력조건의 In-situ 응력 상태로 만들고, 터널단면 내의 요소들을 제거하는 것을 지

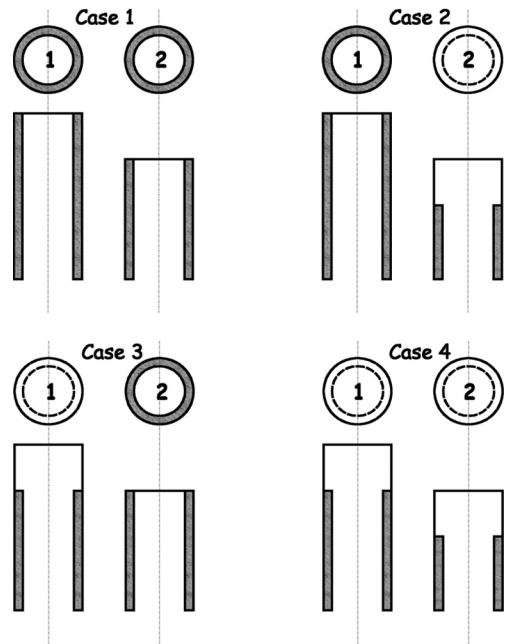


그림 9. 터널시공과정의 모델링

반굴착으로 하고, 라이닝의 설치는 미리 모델링 되어 있는 라이닝부분의 Element에 라이닝의 강도 상수를 교환하는 것으로 라이닝 타설로 간주하여 수행한다.

이 방법은 수치해석상 가장 바람직한 기법의 하나이나, 라이닝과 지반이 항상 밀착되었다는 가정 하에 이루어지기 때문에 실제 시공 과정과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 Single 터널과는 달리 Multi 터널 (근접터널)의 해석에 있어서는 상당한 영향을 미치게 되는데, 이는 근접하여 시공하는 터널의 여굴량에 따라 이미 시공 완료된 기존터널의 거동에 상당한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 그림 9 에서 제시된 4가지 경우에 대하여 개별적인 분석이 요구된다.

그림 9에서 보여주는 것은 Multi터널 (근접터널 포함) 시공 시 발생 가능한 시공과정을 나타낸 것으로써 신설터널에 의한 기존터널의 영향분석 뿐 만 아니라 쌍굴터널의 시공 시에 있어서도 매우 유용한 모델들이다.

터널 굴착시 발생하는 여굴에 대한 수치해석상 시뮬레이션 기법은 여러 방법이 있으나 최근 방법을 소개하면 그림 10과 같다.

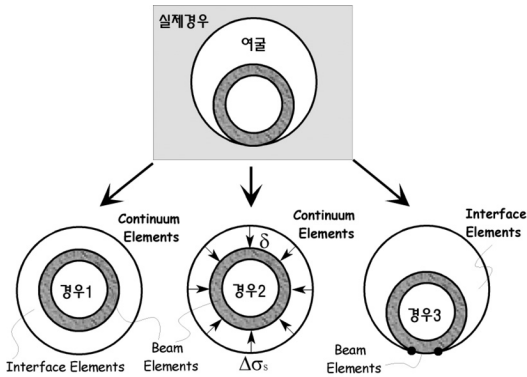


그림 10. 여굴에 대한 모델링

1의 경우는 라이닝과 지반의 접촉부분을 Interface 요소로 철하는 기법이며, 이 방법은 수치해석 프로그램의 작성에 고도의 수치해석 기술이 요구된다. 이 경우에 있어서 좀더 최신 모델링 기법은 3의 경우와 같이 중력에 의해 라이닝이 굴착저면에 붙기 때문에 저면의 일부 요소를 Interface 요소 대신 Beam 요소를 사용하는 경우이다.

2경우에 있어서는 예상되는 여굴량을 미리 추정하여 추가하중을 각Node에 가하는 방법으로 추가 하중량 (ΔF)에 대하여서는 다음과 같은 식으로 산정 할 수 있다.

$$\Delta F = E_t \cdot A \cdot \frac{\delta}{R} \quad (6)$$

여기서 δ 여굴량

4.4.3 지표침하 거동

기존터널과 근접하여 신설터널을 시공할 경우에 있어서는 상부구조물의 안전성 차원에서 지표침하의 예측은 매우 중요하다. Single 터널의 경우, Peck교수가 제안한 침하예측 곡선식으로 부터 많은 현장자료의 연구를 통하여 반경험적 이론식이 구체화되어 있고 이에 따라 침하의 예측이 가능하나, Multi터널(근접터널)의 경우 그 양상은 반대인 실정이다. 그러나 1991년 New와 O'Reilly 박사들은 그림 11과 같이 Single 터널의 침하곡선의 중첩방법을 이용하여 근접터널의 경우 침하예측을 시도하였다.

이들이 제시한 반경험적 이론식은 다음과 같다.

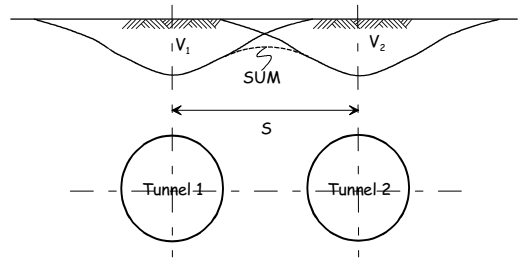


그림 11. 근접터널에 있어서 중첩방법에 의한 지표침하

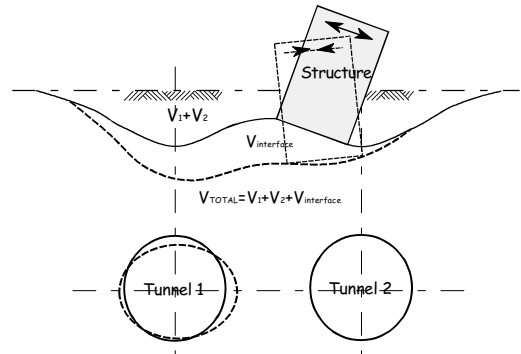


그림 12. 근접터널에 있어서 중첩방법에 의한 지표침하

$$S_{(x,z)} = \frac{V}{Kz\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{x^2}{2(Kz)^2}} + e^{-\frac{(x-s)^2}{2(Kz)^2}} \right] \quad (7)$$

여기서 S : 두 터널의 중심부터의 간격

K : 지반상태에 따른 경험적 상수

(심도에 따라 증가될 때 기울기)

그러나 상기식은 두 터널이 동시에 굴착할 경우를 제외하고는 실제 현장 측정 자료와는 상이하다는 점에서 좀더 추가적인 보완이 필요하다. 실질적으로는 근접터널의 경우 그림 12의 침하량에 두 터널의 상호작용에 의한 Interface 침하를 추가시켜야 한다.

상기 그림에서 보여주듯이, 주목할 사항은 신설터널 시공 시 기존터널의 지반에 추가로 더 크게 침하가 발생된다는 사실이다. 따라서, 근접터널에 대한 설계과정에 있어서는 신설터널 상부의 구조물에 대한 안전과 아울러 기존터널의 상부 구조물에 대하여서도 철저한 검토와 분석이 요구된다.

5. 결론 및 제언

이 논문은 근접터널의 해석과 설계에 대한 고찰로써, 근접터널의 이해를 도모하기 위하여 전반적인 터널과 지반과의 상호거동에 대하여 고찰하였으며, 근접터널의 상호거동과 설계 시 고려사항에 대하여 고찰하고 이에 따른 터널기술의 연구개발방향에 대하여 제시하였다.

근접터널의 경우 지반과 라이닝의 거동은 Single터널에 비하면 상당히 복잡하고 미지의 세부사항들이 많음에 따라 설계 시 상세 분석을 통한 해석이 요구된다.

끝으로, 이 논문이 국내에서 서서히 문제시되고 있는 근접터널의 해석과 설계하는데 다소나마 도움이 되기를 기원하며, 이 논문 내에서 미흡하게 서술되거나 전개된 내용에 있어서는 국내 현장자료를 추가분석 검토하여 보완되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Craig, R. N. and Muir Wood, A. M. (1978). A review of tunnel lining practice in the United Kingdom. TRRL Sup. Rept. 335.
2. Megaw, T. M. and Bartlett, J. V. (1982). Tunnels: Planning, Design and Construction (2 Vols.) E. Horwood.
3. Muir Wood, A.M. (1975). Tunnelling: in Civil Engineers Reference Book, ed. L. S. Blake, Butterworths.
4. Kim, S. H, Burd,H,J, and Milligan, G. W. E (1998), Model testing of closely spaced tunnels in clay. Geotechnique 48, No.3, p375-288
5. Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. 7th Int. Conf. S. M. F. E. Mexico City, State of the Art Volume.
6. Szechy, K. (1967). Art of Tunnelling (2nd Ed.) Akademiai Kiado, Budapest.
7. Ward, W. J. and Pender, M. J. (1981). Tunnelling in Soft Ground. General Rept, 10th Int. Conf. S. M. F. E. Stockholm.



김상환

호서대학교 토목공학과 조교수
kimsh@office.hoseo.ac.kr