

근접구조물에 의한 터널의 안전영역 평가

황택진^{1*}

¹동의대학교 토목공학과

Estimation of Safety Zone of Tunnel due to Adjacent Structure

Taikjean Hwang^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Dong-Eui University

요 약 기존 구조물에 근접하여 터널을 계획 할 때 상부 토괴하중 및 근접 구조물의 작용하중에 따른 이완영역의 범위를 고려하여 구조물 설치 가능범위 및 터널의 보강패턴을 제시하는 안전영역이 제시되고 있다. 그러나 이 안전영역에 대해서는 기존 구조물과의 이격 거리와 하중 조건 등에 대한 규정이 명확하지 않고 지층조건, 근접 구조물의 위치 및 작용하중 조건 등에 따라 안전영역이 달라질 것이지만 이에 대한 이론적 검증이 없는 실정이다. 본 연구에서는 터널굴착을 파악하기 위해 인한 지반 및 구조물의 거동을 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였으며 근접 구조물의 위치, 지반변형계수의 변화에 따른 터널의 안전영역과의 상관관계 및 적정성을 평가하였다. 안전영역의 범위는 지반 변형계수가 높을수록 크게 나타나고 있으며 재평가된 안전영역 다이어그램에서 제약조건 아래 시공 가능영역은 전단 파괴선이 스프링라인 하부의 인버트 연장선에서 나타나 안전영역이 상당히 확대되는 것으로 나타나고 있다.

Abstract When planning to construct adjacent structure by the side tunnel, the criteria of safety zone of tunnel have been proposed. There are no specific theoretical basis regarding load conditions and the distance of structure and the geological strata and the conditions of adjacent structure's location, and the conditions applied load. Two and three dimensional numerical analysis preformed to prove the deformation of the ground and structures caused by the tunnel excavation and evaluated the correlation and the suitability of the tunnel's safety zone regarding the location of adjacent structures and the changes in the modulus of deformation. This paper proposed the safety zone's range is getting bigger as the modulus of deformation is higher. Also, it seems that the possible range of construction under constraints in the diagram of revalued safety zone significantly expands as shear failure line appears on the invert extension line below the spring line.

Key Words : Modulus of Deformation, Safety Zone, Two and Three Dimensional Numerical Analysis

1. 서론

최근 각종 사회기반시설의 확충 및 지상 시설물과의 간섭을 최소화하기 위한 도심지 지하개발에 따라 지하철, 터널 등 각종 시설물의 지하공간영역이 확대되고 있다. 도심지에서 시행되는 지하공간개발 사업에 있어서는 시설물 상호간의 근접시공으로 인해 시설물의 안전성과 관련된 민원이 빈번히 발생하고 있다. 또한 기존 도로 터널이나 지하철이 인접한곳에 건축물 등 새로운 구조물을

건설을 할 경우 그 공사 정도가 어렵기 때문에 공사 진행에 따라 기존 구조물 및 각종 시설의 운행이나 안전에 지장을 주거나 손상을 받지 않도록 해야 한다. 그러나 굴착으로 인한 지반 이완으로 인해 기존 구조물의 침하, 굴착, 응력교란에 따른 간섭이 발생하게 되며 이에 따른 구조물 등에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 적정 이격거리 산정은 현장의 지반조건, 구조물의 교차 각도 등 여러 요인을 종합적으로 검토하여 결정하는 것이 바람직하다.

본 논문은 동의대학교(2012AA149) 연구 과제로 수행되었으며, 자료를 도와주신 백경중 박사께 감사드립니다.

*Corresponding Author : Taikjean Hwang(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-10-7542-3936 email: tajhwang@deu.ac.kr

Received May 15, 2013 Revised (1st May 24, 2013, 2nd May 29, 2013, 3rd June 5, 2013) Accepted June 7, 2013

기존 구조물에 근접하여 신설 구조물을 시공 시 공사 중 발생하는 지반의 이완으로 인해 기존 구조물의 안정성에 위해한 영향을 미칠 수 있으므로, 계획된 신설 구조물이 기존 시설물에 근접하여 통과하는 경우에는 기존 시설물의 중요도 및 구조적인 특성에 따라 굴착공사로 인한 상호 영향을 검토하여야 한다. 구조물간의 영향을 최소화하기 위하여 근접시공 조건에서는 신설 구조물과 기존 구조물의 구조적 특징 즉, 구조물의 위치, 형상, 재질, 노후화 등과 지반특성 등을 고려하여 근접 구조물간의 상호 간섭을 최대한 배제할 수 있도록 계획하여야 한다.

본 연구에서는 기존 지하철 박스 구조물에 근접하여 측면부에 신설 터널을 계획할 때, 터널 굴착으로 인한 지반 및 구조물의 거동에 대한 수치해석을 수행하여 근접 구조물의 위치 및 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역을 평가하였다. 터널굴착에 따른 아칭영향을 고려하기 위하여 3차원 수치해석에 의한 중 방향 및 횡 방향 변위를 분석하였으며 근접 구조물의 위치 및 지반변형계수 변화에 따른 안전영역과 분포도, 지반변형계수와의 상관관계를 제시하였다.

2. 기존의 안전영역 산정기준

2.1 기존 구조물에 미치는 영향 예측방법

구조물의 근접시공에 따라 기존 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 근접공사의 종류, 규모, 설계 및 시공방법, 기존 구조물과의 위치, 역학적 진전도, 지형 및 지반조건, 대책공법의 시공성 등 여러 조건들을 고려하여야 한다. 근접시공 시 기존 구조물과 병행해서 신설 터널이 건설되는 경우 기존 구조물의 한쪽 지반이 느슨해지면서 신설 터널 쪽으로 밀리는 변위와 변형이 발생한다. 또한, 신설 터널이 기존 구조물 하부로 통과할 경우에는 기존 구조물이 하부로 침하하고 상부로 통과할 경우에는 상부로 변형되는 등 통과 위치에 따라 다른 변형이 발생한다.

계획된 터널이 지상구조물, 지하구조물, 터널 등 기존 시설물에 근접하여 통과하는 경우에는 기존 시설물의 중요도 및 구조적인 특성에 따라 터널 굴착공사로 인한 상호 영향을 검토하여야 하며 장래 지상 및 지하개발계획을 감안하여 사전대책을 수립하여야 한다. 또한 구조물 기초설계 기준 해설에서는 기존 구조물에 미치는 영향의 예측방법으로 기존의 쉐드 터널 바로 위에 굴착공사를 시행하는 경우를 예로 기존 터널에 미치는 영향을 예측하는 방법을 다음과 같이 제시하였다.

1) 지반변형에 의하여 기존 구조물이 변형되었다고 가정하고 해석하는 방법은 기존 구조물의 규모 및 휨강성이 작은 지반변형을 해석할 때 기존 터널을 무시해도 큰 차가 없다고 판단되는 경우의 해석방법이다. 굴착에 따른 지반 변형은 기존 터널을 무시하고 지반을 2차원으로 모델화하여 유한요소법으로 해석하며 이 변형을 터널에 발생한 변형으로 고려하고 있다.

2) 지반과 기존 구조물을 일체로 가정하고 해석하는 방법은 기존 구조물의 규모나 휨 강성이 중간정도로서 구조물과 지반과의 상호 작용을 무시할 수 없는 경우의 해석방법이다. 굴착공사와 기존 구조물을 동일한 2차원으로 모델화하여 지반과 기존 구조물을 일체로 취급하며 지반은 연속체로 고려하고 구조물은 보로 모델화한 후 면 요소와 선 요소를 이용한 유한요소법으로 해석한다.

3) 기존 구조물에 굴착으로 변화된 하중 조건을 주어 해석하는 방법은 기존 구조물의 규모 및 휨강성이 크고 근접시공을 실시하더라도 기존 구조물의 변위나 휨 변형이 대단히 작으며 지반과 구조물의 상호 작용을 무시할 수 있는 경우의 해석방법이다.

이와 같이 구조물 신설에 따른 기존 구조물의 영향을 최소화 하는 것이 근접시공의 주요 관점이다. 굴착에 따른 기존 구조물의 변형 및 침하는 대부분 대상지반이 단일지층이 아닌 복합지층이기 때문에 현장 및 실내시험을 통해 각 지층의 강도 및 변형특성을 고려한 안정해석에 의해 분석한다. 안정해석에서는 구조물과 지반의 경계 및 상호작용, 지반정수 등의 초기 조건의 신뢰성이 확보되어야 한다. 또한, 지반거동은 2차원 거동이 아닌 3차원 응력-변형거동을 나타내므로 수치해석 모델링의 적합성 검증이 필요하다.

2.2 국내외 터널 안전영역 기준

근접시공에 의한 외력의 변화는 안정 상태에 있는 주변 지반 및 기존 구조물에 추가적인 변위 및 응력의 집중을 유발시켜 구조물에 손상을 발생시킬 수 있으며, 장기적인 측면에서 내구성의 저하로 인한 시설물의 공용기간을 단축시킬 수 있다. 근접정도에 따른 시공가능 범위에 대해서는 여러 기관에서 경험적으로 제시하고 있으며, 신설 구조물과 기존 구조물의 규모와 위치관계를 고려하여 안전영역(Safety Zone)의 범위를 규정하고 있다.

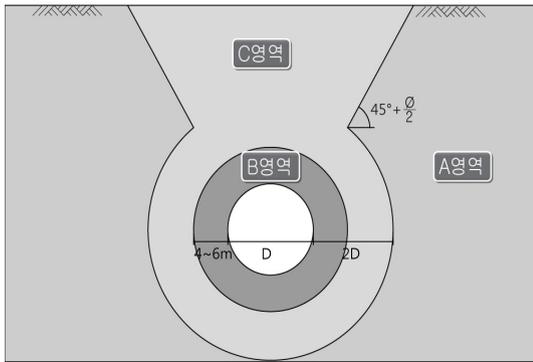
국토해양부 터널설계기준(2007)에서는 안전영역을 다음과 같이 정의하고 있다. 안전영역은 터널의 안전에 영향을 미치는 정도를 규정한 터널 주변의 영역으로서, 각 영역별로 터널 안전을 위한 대책을 강구하도록 규제하는

영역이며 기존 터널과 근접하여 다른 구조물을 계획할 때 터널의 안정성을 확보하기 위하여 터널 주변 지반의 일정 영역을 원상태로 보존하여야 하는 범위를 말한다.

2.2.1 서울지하철에서 적용한 안전영역

서울지하철 3, 4호선 건설구간 중 설계 및 감리를 실시하는 과정에서 도심지 NATM 터널을 대상으로 안전영역을 시공 가능영역, 시공 불가영역, 제약조건 아래 시공 가능영역으로 구분하여 Fig. 1과 같이 적용하였으며 설정한 안전영역은 터널의 상부에 대한 접근 심도와 하중 조건 등에 대한 규정이 명확하지 않다.

Fig. 1에서 안전영역 A는 B, C 영역을 제외한 영역으로 지하수위 영향 및 발파진동 영향을 고려할 필요가 있는 시공 가능영역이며, 안전영역 B는 터널의 안정에 즉각적인 영향을 미치는 시공 불가영역으로 풍화대의 경우 터널굴착 면에서 외곽으로 6m의 범위이며, 연경암의 경우 4~6m의 범위이다. 안전영역 C는 제약조건 아래 시공 가능영역으로 터널 굴착 면에서 외곽으로 2D까지의 영역과 파괴선($\theta = 45 + \phi/2$) 상부의 영역으로 근접구조물의 종류, 하중상태, 지반조건 등을 고려하여야 하며 대심도 터널의 경우에는 적용이 다소 불합리한 영역이다.

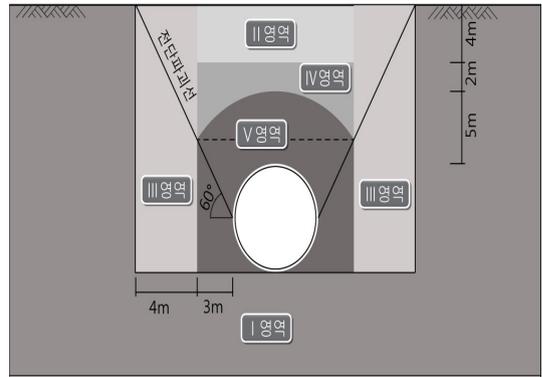


[Fig. 1] Safety zone of Seoul metro line 3,4

2.2.2 부산지하철에서 적용한 안전영역

부산지하철 1호선 건설당시 시공감리를 수행하여 풍화암층의 복선 NATM 터널을 대상으로 안전영역을 시공 가능영역, 조건부 제한 시공 가능영역, 구조물 침범 불가영역으로 구분하여 Fig. 2와 같이 적용하였다. 안전영역 I은 지하부지 사용에 제한이 없는 시공 가능영역이며, 안전영역 II는 건축한계에 따른 시공 가능 영역이다. 안전영역 III 및 IV는 토류공법의 계획에 따른 조건부 제한 시공 가능 영역이며, 안전영역 V는 구조물 침범 불가영역이

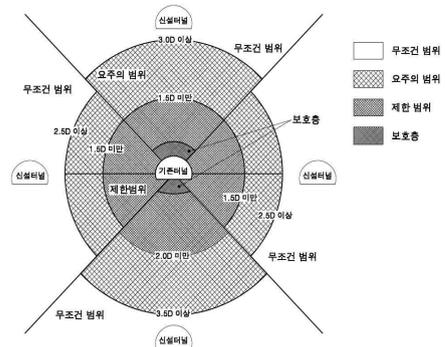
다. Fig. 2에서 구조물 침범 불가영역은 터널의 스프링라인에서 전단파괴선과 터널의 천단부에서 5m 이격된 원호와의 교차지점 외부 영역과 터널의 측벽에서 3m 이격거리의 영역을 나타낸다.



[Fig. 2] Safety zone of Busan metro line 1

2.2.3 도로 터널구조물 근접시공 시 안전 이격거리(한국도로교통 연구원)

지하고속도로 계획 및 운영방안 연구보고서(한국도로교통 연구원, 2012)에서 Fig. 3과 같이 터널구조물 근접시공 시 안전이격거리를 제안하고 있다. 안전이격거리는 신설 터널이 기존 터널의 좌우보다 상·하부에 위치할 경우 기존 터널에 영향이 더 크며, 기존 터널 하부에 위치할 경우 영향이 가장 큰 것으로 판단하고 있다. 기존 터널에 대한 신설 터널의 시공가능 이격거리는 기존 터널의 좌우측 근접 시 1.5D, 상부 근접 시 1.5D, 하부 근접 시 2.0D 이상을 확보하여야 할 것으로 제안하고 있다.



[Fig. 3] Safety zone for adjacent tunnel

2.2.4 일본의 터널 안전영역

일본에서는 일반적으로 터널 안전영역을 터널 주변 0.5m의 보호 폭과 5m의 보호 층으로 설정하여 적용하고 있는데 이는 역학적 검토에 의한 영역 설정 보다는 환경적 측면을 고려한 개념으로 알려져 있다.

3. 수치해석을 통한 안전영역 분석

안전영역에 대한 통일된 기준이 제시되지 못한 이유는 안전영역 설정이 지반조건 및 신설 구조물과 기존 구조물의 규모와 위치관계 등에 따라 고려조건이 매우 복잡하고 다양하기 때문에 통일된 기준을 제시하는 것이 어렵기 때문이다. 따라서 여러 관련기관에서 제시된 자료를 기초로 구조물의 위치, 주변현황 및 지반조건 등을 고려하여 각 경우에 대한 안전영역 산정이 필요하다. 터널 안전영역은 터널의 상부에 대한 접근 심도와 하중 조건 등에 대한 규정이 명확하지 않으므로 근접시공에 따른 기존 구조물의 안정성을 확보하기 위해 지반의 강성, 구조물의 위치 및 작용하중에 따른 응력 재분배로 인한 지반의 소성파괴 및 근접 구조물의 상대변위 등을 고려하여 분석하는 것이 타당하다.

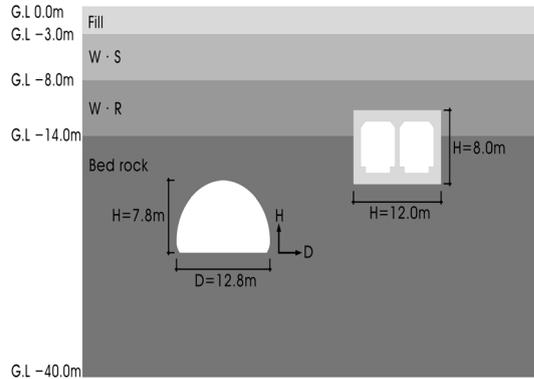
본 연구에서는, 지반의 강성변화, 근접 구조물의 위치변화를 고려한 경우에 대하여 터널굴착으로 인한 지반 및 구조물의 거동을 수치해석을 통하여 분석한 후 근접 구조물의 위치 및 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역을 평가하여 제시된 안전영역과 비교하였다. 안전영역은 2차원 수치해석에 의해 시공 불가영역 및 제약조건 아래 시공 가능영역으로 구분하였으며, 횡 방향 각 변위에 의한 안전영역을 터널굴착에 따른 종 방향의 영향을 고려하기 위하여 3차원 수치해석에 의한 종 방향 및 횡 방향 각 변위를 분석하여 2차원 수치해석에 의해 제안된 안전영역의 적정성을 평가하였다.

3.1 수치해석

3.1.1 해석단면 설정

일반적으로 근접시공은 도로 터널보다는 도심지 지하철 터널공사에 발생되므로 본 연구의 수치해석 단면은 신설 터널은 지하철 표준단면을 적용하였으며 근접 구조물은 지하철 박스 구조물의 일반도를 기준으로 하였다. Fig. 4는 근접 구조물이 신설 터널의 0.5D, 1.0D, 1.5D 측면에 위치하는 수평변화 및 근접 구조물의 저판이 신설 터널의 인버트와 동일한 위치의 경우와 0.5H, 1.0H 상부에 위치하는 수직변화 조건의 대표단면을 나타낸 것이다.

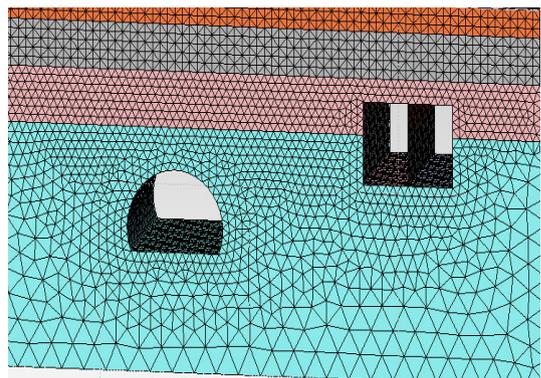
도심지역의 대표 지층단면인 매립토, 풍화대, 기반암으로 구성되어 있는 지반조건에서 신설 터널은 기반암층에 위치하는 것으로 고려하였다.



[Fig. 4] Section for numerical analysis

3.1.2 해석영역 및 경계조건

본 연구의 수치해석 영역은 Fig. 5와 같이 경계면은 측면의 경우 2.0D, 하부 2.0D 이상을 고려하였다. 경계조건은 측면 경계는 횡 방향 변위를 구속하였으며 하부 경계는 수직방향의 변위를 구속하였다. 3차원 수치해석에서 근접 구조물의 종 방향 각 변위는 굴착 장을 2.0m로 고려하여 해석하였으며 상재하중은 도로하중 DB24를 적용하였으나 열차하중은 고려하지 않았다. 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 탄소성 모델로 가정하였으며 터널주변 요소망은 해석결과의 정확성을 위하여 가급적 작게 분할하였다.



[Fig. 5] 3-Dimension analysis model

3.1.3 지반물성

Table 1은 매립토, 풍화토, 풍화암 및 기반암의 대표

지반물성 값을 나타낸 것이다. 느슨한 상태의 실트 섞인 모래로 구성되어 있는 매립토, 조밀한 상태의 실트 섞인 모래로 구성되어 있는 풍화토, 매우 조밀한 상태의 실트 섞인 모래로 구성되어 있는 풍화암의 지층조건을 고려하여 지반 물성 값을 선정하였다. 신설 터널이 위치하는 기반암의 강성변화에 따른 안전영역을 분석하기 위하여 기반암의 지반변형계수(E)를 500, 700, 1,000, 1,500MPa로 변화하는 조건을 고려하였다.

[Table 1] Input parameter

classification	modulus of deformation E (MPa)	unit weight (KN/m ³)	cohesion (KPa)	soil friction angle (°)	poisson ratio
reclamation soil	30	18	0.0	28	0.35
weathered soil	40	19	10	30	0.33
weathered rock	100	21	20	32	0.30
bed rock	500	23	30	35	0.25
	700				
	1,000				
	1,500				

3.2 안전영역 분석

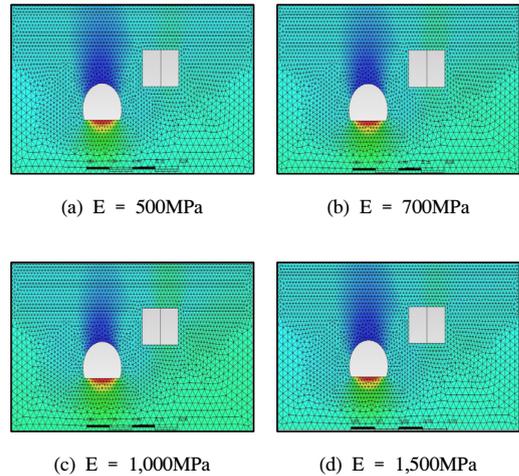
3.2.1 2차원 수치해석에 의한 안전영역 분석

2차원 수치해석 결과로 부터 안전영역은 터널굴착에 따른 하중전이로 인해 발생하는 지반의 변위 및 주응력, 전단응력에 의해 소성영역을 분석하여 평가하였다. 안전영역을 소성영역이 발생하는 시공불가 영역과 지반의 변형 및 최대주응력 변화가 완화되는 영역인 제약조건 아래 시공 가능영역으로 구분하였다. 기존 구조물의 안정성 분석은 지하철 구조물이므로 철도설계기준에 의해 열차를 지지하는 구조물의 레일 면에서의 허용 부등 변위량을 1/1,000 기준으로 하였다

1) 연직변위, 최대 주응력 및 최대 전단응력

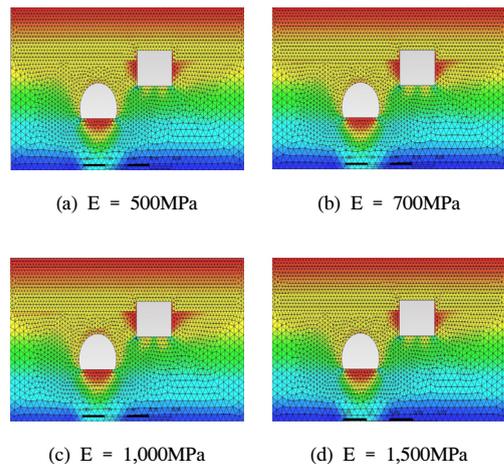
터널굴착에 따른 응력이완에 의해 발생하는 연직변위, 최대주응력 및 최대 전단응력은 Fig. 6 ~ Fig. 8과 같다. Fig. 6은 지반변형계수별 연직변위도이며 연직변위는 터널 이완영역 및 인버트부에서 최대 변위가 발생하고 있다. Fig. 7은 지반변형계수 별 최대 주응력도를 나타낸 것이며 터널의 인버트부에서 응력이완에 의한 응력집중이 나타나고 있으며 인버트부의 연장선에서 나타나는 전단 파괴선에 기존 구조물이 근접할수록 응력집중 영역이 확대되는 것으로 나타나고 있다. 또한, Fig. 8은 지반변형계

수별 최대 전단 응력도를 나타낸 것이며 터널의 인버트부 및 스프링라인부에서 전단응력의 집중이 나타나고 있으며, 인버트부의 연장선에서 나타나는 전단 파괴선에 기존 구조물이 근접할수록 응력집중 영역이 확대되는 것으로 나타나고 있다.

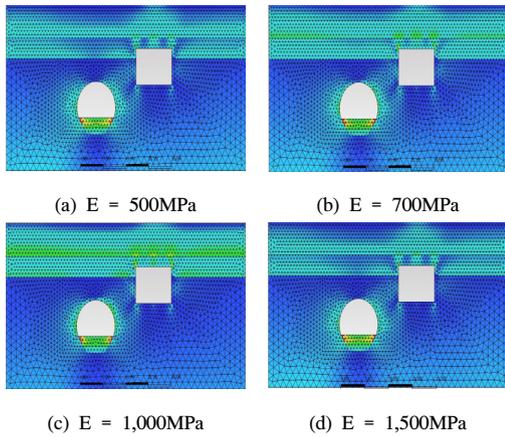


[Fig. 6] Vertical displacement

근접 구조물이 측면으로 0.5D, 상부로 1.0H 이격조건에서 터널의 인버트부에서 전단 파괴선에 지하 구조물이 근접할수록 안전영역이 확대되는 것으로 나타나고 있다. 또한, 지하 구조물의 위치가 굴착지면과 동일선상에 위치할 경우 스프링라인의 최대주응력 및 최대 전단응력의 집중에 따라 안전영역이 확대되는 것으로 나타나고 있다.



[Fig. 7] Maxium principal stress

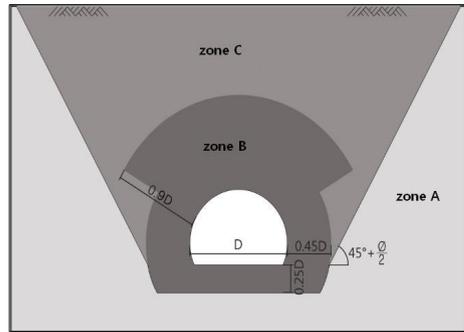


[Fig. 8] Maxium shear stress

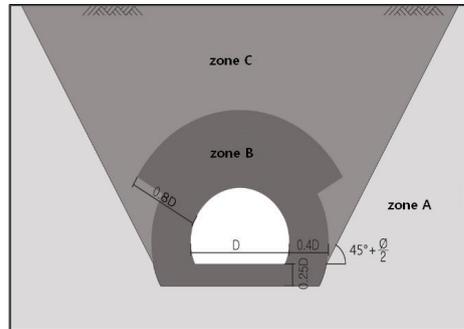
2) 지반변형계수에 따른 안전영역

Fig. 9는 Fig. 1과 같이 서울지하철의 안전영역과 비교 분석하기 위하여 지반의 강성변화에 따른 안전영역 분석 결과를 나타낸 것이다. 시공 불가영역은 지반변형계수 E=500, 700, 1,000, 1,500MPa의 경우 각각 터널 인버트 하부는 0.25D, 0.25D, 0.25D, 0.2D이며, 측벽부는 0.5D, 0.45D, 0.4D, 0.3D이며, 천단부는 1D, 0.9D, 0.8D, 0.6D로 지반변형계수가 증가함에 따라 감소되는 것으로 나타나고 있다. 또한, 제약조건 아래 시공 가능영역은 스프링라인에서 전단파괴선 사이의 범위가 해당하는 관련 기관의 기준과 달리 터널의 인버트 연장선에서 전단파괴선 사이의 범위가 해당하는 것으로 분석되었다.

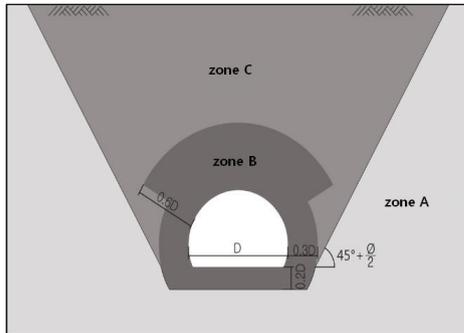
시공 불가영역은 측벽부에서는 0.3D~0.5D로 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 0.4D에 비해 0.6D~1D로 1.5배에서 2.5배 정도 증가되는 영역을 나타내고 있으며 제약조건 아래 시공 가능영역은 전단파괴선이 터널의 인버트 연장선에서 나타나므로 안전영역이 상당히 확대되는 것으로 나타나고 있다. 여기서, 안전영역은 본 연구에 적용된 터널단면 폭 D=12.8m를 기준으로 환산한 범위이다.



(b) E = 700MPa



(c) E = 1,000MPa

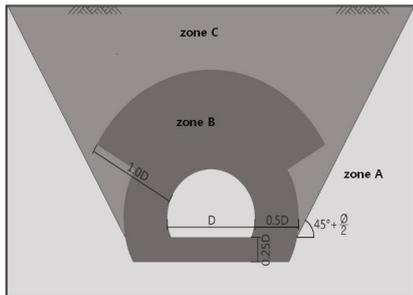


(d) E = 1,500MPa

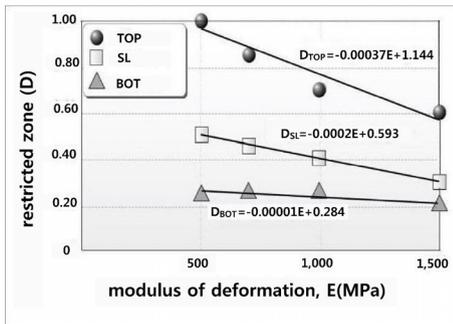
[Fig. 9] Safety zone under modulus of deformation

3) 안전영역과 지반변형계수의 상관관계

2차원 수치해석에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 지반변형계수가 증가함에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 그 경향은 Fig. 10과 같다. 지반변형계수의 변화에 따른 시공 불가영역의 변화추이는 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.00001E + 0.284$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0002E + 0.593$, 천단부는 $D_{Top} = -0.00037E + 1.144$ 의 관계식을 나타낸다.



(a) E = 500MPa



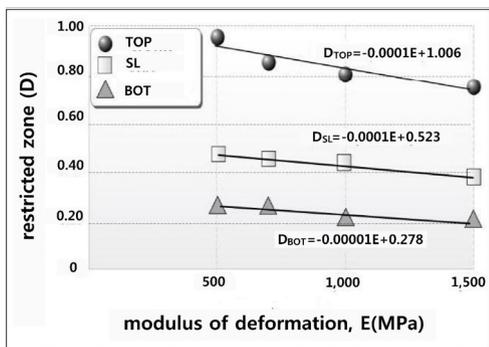
[Fig. 10] Safety zone by 2-dimension numerical analysis

3.2.2 3차원 수치해석에 의한 안전영역 분석

2차원 수치해석의 횡 방향 각 변위에 의한 안전영역 결과를 종 방향 티널굴착에 따른 아칭영향을 고려한 3차원 수치해석에 의해 근접 구조물의 종 방향 및 횡 방향 각 변위를 분석하여 시행한 안전영역의 평가는 다음과 같다.

1) 종 방향 각 변위에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계

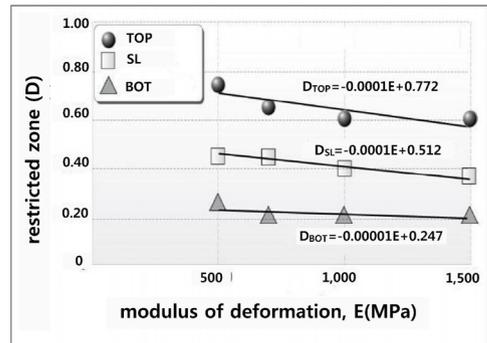
종 방향 각 변위에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 2차원해석과 같이 지반변형계수가 증가함에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 그 경향은 Fig. 11과 같다. 지반변형계수의 변화에 따른 시공 불가영역의 변화추이는 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.00001E + 0.278$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0001E + 0.523$, 천단부는 $D_{Top} = -0.0001E + 1.006$ 의 관계식을 나타낸다. 2차원 수치해석에 비해 인버트 하부와 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역의 변화가 작게 나타나나 안전영역의 범위는 전반적으로 크게 나타나고 있다.



[Fig. 11] Safety zone of longitudinal displacement by 3-dimension numerical analysis

2) 횡 방향 각 변위에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계

횡 방향 각 변위에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 2차원해석과 같이 지반변형계수의 증가에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 그 경향은 Fig. 12와 같다. 지반변형계수의 변화에 따른 시공 불가영역의 변화추이는 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.00001E + 0.247$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0001E + 0.512$, 천단부는 $D_{Top} = -0.0001E + 0.772$ 의 관계식을 나타낸다. 2차원 수치해석에 비해 인버트 하부와 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역의 변화가 작게 나타나며 안전영역의 범위는 지반변형계수가 낮을수록 작게 나타나고 있다.

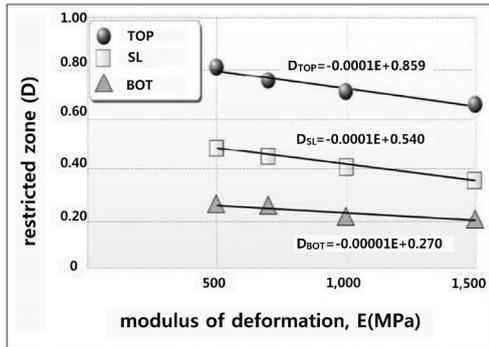


[Fig. 12] Safety zone of lateral displacement by 3-dimension numerical analysis

3) 종 방향 및 횡 방향 각 변위에 의한 안전영역과 지반변형계수의 상관관계

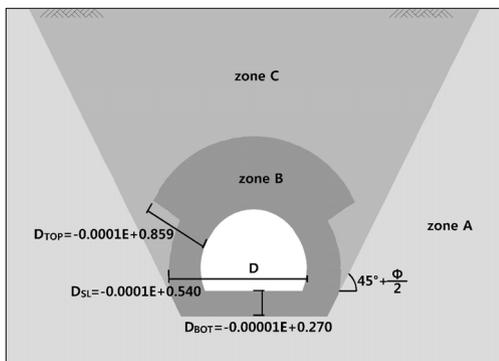
종 방향 및 횡 방향 각 변위의 해석결과에서 안전영역과 지반변형계수의 상관관계를 분석한 결과는 Fig. 13과 같다. 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 2차원해석과 같이 지반변형계수의 증가에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 지반변형계수 변화에 따른 시공 불가영역의 변화추이는 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.00001E + 0.270$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0001E + 0.540$, 천단부는 $D_{Top} = -0.0001E + 0.859$ 의 관계식을 나타내고 있다. 안전영역은 2차원 수치해석에 비해 인버트 하부와 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역의 변화가 작게 나타나며 안전영역의 범위는 지반변형계수가 낮을수록 작게 나타나며 높을수록 크게 나타나고 있다. 또한, 티널 굴착 진행방향인 종 방향 각 변위의 경우가 횡 방향 및 종횡 방향 각 변위를 동시에 고려한 경우보다 안전영역의 범위가 크게 나타나며 횡 방향 각 변위의 경우가 가장 작게

나타나고 있는 것을 알 수 있다.



[Fig. 13] Safety zone of longitudinal displacement and lateral displacement by 3-dimension numerical analysis

Fig. 14는 서울지하철의 안전영역과 비교 분석하기 위하여 3차원 수치해석의 종 방향 및 횡 방향 각 변위에 의한 안전영역 다이어그램을 나타낸 것이다. 서울지하철 안전영역과 비교 시 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 증가되는 영역을 나타내고 있다. 제약조건 아래 시공 가능영역은 전단파괴선이 서울지하철 기준과는 달리 터널의 인버트 연장선에서 나타나므로 안전영역이 상당히 확대되는 것으로 나타나고 있다. 서울지하철의 안전영역은 신설 터널을 기준으로 하여 안전에 영향을 미치는 정도를 규정한 것으로 본 연구에서는 근접시공에 따른 기존 구조물의 안전성에 미치는 영향을 분석하는 것이므로 서울지하철의 안전영역 기준과 같이 신설 터널을 기준으로 하면 천단부의 시공 불가영역과 제약조건 아래 시공 가능영역이 확대되는 결과가 나타나며 기존 구조물을 기준으로 하면 시공 불가영역 및 시공제한 영역이 축소되는 결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.



[Fig. 14] Comparison of safety zone

본 연구는 근접 구조물이 신설 터널의 측벽부에 위치하고 있는 조건에서의 안전영역 분석한 것이다. 터널 직상부의 개발인 경우에는 응력이완 및 하중 재분배로 인하여, 신설 터널의 안정성과 관련된 해석결과가 상이하게 나타나므로 안전영역을 재분석할 필요성이 있다. 또한 지반조건에 따라 안전영역의 범위가 증가 또는 감소할 것으로 예상되며, 추후 다양한 지반조건 및 터널형상에 대한 검토가 필요하다. 본 연구결과에서 제시된 이러한 터널의 안전영역은 본 연구 해석조건과 같이 근접된 지하 구조물이 존치하고 있는 상황에서 신설 터널의 계획시 전략적인 계획지표로 이용은 가능하나, 지반 조건 및 지하공간개발 영역의 제한조건 등을 고려하여 상세 해석 후 안전영역을 결정하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 터널의 상부에 대한 접근 심도와 하중 조건 등에 대한 규정이 명확하지 않은 터널의 안전영역에 대해 근접 구조물의 위치 및 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역을 2차원 및 3차원 수치해석에 의해 평가하였으며 안전영역과 지반변형계수와의 상관관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 2차원 수치해석에 의해 발생하는 연직변위, 최대 주응력 및 최대 전단응력에서 근접 구조물이 측면으로 0.5D, 상부로 1.0H 이격조건에서 터널의 인버트 부에서 전단파괴선에 지하 구조물이 근접할수록 안전영역이 확대되며, 지하 구조물의 위치가 굴착저면과 동일선상에 위치할 경우 안전영역이 확대되는 것으로 나타났다.
- 2) 시공 불가영역은 지반변형계수가 E=500Mpa 에서 1,500MPa로 증가함에 따라 각각 터널 인버트 하부는 0.25D에서 0.2D로, 측벽부는 0.5D에서 0.3D로, 천단부는 1.0D에서 0.6D로 감소되는 것으로 나타나고 있다. 또한, 제약조건 아래 시공 가능영역은 터널의 인버트 연장선에서 전단파괴선 사이의 범위가 해당하는 것으로 분석되었다.
- 3) 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 지반변형계수가 증가함에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 지반변형계수의 변화에 따른 시공 불가영역의 변화추이는 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.00001E + 0.284$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0002E + 0.593$, 천단부는 $D_{Top} = -0.00037E + 1.144$ 의 관계식을 나타낸다.

- 4) 종 방향 터널굴착에 따른 아칭영향을 고려한 3차원 수치해석에서 종 방향, 횡 방향 및 중횡 방향 각 변위를 동시에 고려한 경우의 안전영역과 지반변형계수의 상관관계는 2차원해석과 같이 지반변형계수가 증가함에 따라 시공 불가영역은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다.
- 5) 안전영역은 3차원 수치해석의 경우, 인버트 하부와 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 지반변형계수의 변화에 따른 안전영역의 변화가 작게 나타나며 안전영역의 범위는 지반변형계수가 높을수록 크게 나타나고 있다. 터널 굴착 진행방향인 종 방향 각 변위의 경우 인버트 하부는 $D_{Bot} = -0.0001E + 0.278$, 측벽부는 $D_{Sl} = -0.0001E + 0.523$, 천단부는 $D_{Top} = -0.0001E + 1.006$ 의 관계식을 나타내며 안전영역의 범위가 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.
- 6) 서울지하철 안전영역과 비교 시 측벽부는 유사한 결과를 나타내고 있으나 천단부는 증가되는 영역을 나타내고 있다. 제약조건 아래 시공 가능영역은 전단파괴선이 서울지하철 기준과는 달리 터널의 인버트 연장선에서 나타나므로 안전영역이 상당히 확대 되는 것으로 나타나고 있다.

References

- [1] Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs, Tunnel Design Standard, 2007
- [2] Do-Sik Kim, Young-Keon Kim, Doo-Hwa Lee, Chang-Young Kim, Kyu-Jin Bae, Seung- Ho Lee, Ho-Sung Lee, "A Study on Stability and Pillar Reinforcement of a Asymmetry Parallel Tunnel", KSCE Tunnel Committee Special Conference, 16th, pp. 181-197. Dec. 2004
- [3] Woo-Sung Kim, Dong-Uk Yoo, Sang-Eun Lee, "Study on the Estimation of Safety Zone and the Movement of Ground at the Inter-Crossing Tunnel", Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol 18, No 6, pp.491-502, 2008
- [4] Hefny, A. M., Chua, H. C. and Zhao. J."Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, Issues 4-5, pp. 471. 2004
- [5] Korean Geotechnical Society, Geotechnical engineering Series 7, Tunnel, 1996
- [6] Korean Geotechnical Society, Geotechnical engineering

- Series 11, Rock Mechanics for Civil Engineer, 2000
- [7] Korean Geotechnical Society, Structure Foundation Guide Explanation, 2009
- [8] Chung-Sik Yoo. Ah-Ran Song, "Effects of Tunnel Construction on an Existing Tunnel Lining", Tunnelling Technology, Vol. 8, No. 4, pp.307-324. December 2006
- [9] Addenbrooke, T. I. and Potts, D. M. "Twin tunnel interaction: Surface and subsurface effects", The International Journal of Geomechanics, Vol. 1, No. 2 , pp. 249-271. 2001
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2001\)1:2\(249\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2001)1:2(249))
- [10] Hoon-Ki Moon, Jong-Ho Shin, "Effect of Blast-induced Vibration on a Tunnel", Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 207-219, 2008

항 택 진(Taik-Jean Hwang)

[정회원]



- 1981년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 부산대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 1월 ~ 2010년 7월 : 부산광역시청 건설국장, 도시개발실장
- 2010년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질및기초, 건설관리