

교차터널에서의 지반거동 및 안전영역평가에 관한 연구

김우성¹⁾, 유동욱²⁾, 이상은^{3)*}

Study on the Estimation of Safety Zone and the Movement of Ground at the Inter-Crossing Tunnel

Woo-Sung Kim, Dong-Uk Yoo, Sang-Eun Lee

Abstract A certain range of the original ground around the tunnel should be preserved to ensure structural safety of the tunnel when other structures are made around the tunnel, and thus this range is defined as safety zone of the tunnel. The main points to ensure the stability of an existing tunnel when constructing a new tunnel in an inter-crossing area are distance between two tunnels, size of the new tunnel, excavation method for the new tunnel, ground condition around the tunnel, and lining type of the existing tunnel etc. When the new tunnel is excavated above the existing tunnel, the existing tunnel is likely to suffer deformation at a crown zone, damage of arching effect, and live load of the new tunnel etc. On the other hand, when the new tunnel is excavated below the existing tunnel, the existing tunnel is likely to be damaged due to settlement. This study has been made on the behavior of the existing tunnel by means of model test and numerical analysis when the new tunnel is excavated below the existing tunnel. Safety zone of the tunnel was estimated by the results of strength/stress ratio obtained from numerical analysis, and the movement of ground was estimated by the model test. The results of earth pressure, ground displacements, and convergence of the tunnel obtained from model test were compared with those of numerical analysis, and show a similar trend.

Key words Safety zone, Inter-crossing area, Model test, Numerical analysis

초 록 터널 주위에 다른 구조물이 인접하여 건설될 때 터널의 구조적인 안정성을 확보하기 위해서는 주변 지반의 일정범위를 원상태로 보전하여야 하며, 이와 같은 범위를 터널의 안전영역이라고 한다. 터널 교차지역에서 새로운 터널이 건설될 때 기존터널의 안정성을 확보하기 위한 주요 요인은 터널간 이격거리, 새로운 터널의 규모 및 굴착방법, 터널 주변지반의 조건, 기존터널의 라이닝 구조와 건전도 등이며, 새로운 터널이 기존터널의 상부에 근접하여 교차하는 경우 기존터널은 새로운 터널 방향으로 기존터널 상부에서 변형이 발생하고, 기존터널 주변지반의 아칭효과 손상, 그리고 새로운 터널에서의 활하중의 영향 등을 받게 된다. 반면에 새로운 터널이 기존터널 하부에서 굴착되는 경우 기존터널은 침하의 영향을 받게 된다. 본 연구는 새로운 터널이 기존터널의 하부에서 굴착될 때 수치해석을 통하여 안전영역을 평가하였으며, 모형실험을 통하여 지반의 거동특성을 파악하였다. 모형실험과 수치해석에 의하여 토압의 변화, 지반변위 및 내공변위를 상호 비교하였으며, 유사한 경향을 보이고 있다.

핵심어 안전영역, 교차지역, 모형실험, 수치해석

1. 서 론

최근에는 토지가격의 상승·도심지의 토지 부족 등에 따라 교외로의 도시가 확대되고, 토지의 이용도가 증가함으로써 종래에는 생각할 수 없었던 기존 구조물에 대한 근접공사가 증가하고 있다. 특히 대도시의 경우 교통시설은 거의 포화상태에 도달하였기 때문에 기존터

¹⁾ 우경KPE 대표이사

²⁾ 우경KPE 차장

³⁾ 강원대학교 에너지·자원공학과 조교수

* 교신저자 : lee9367@kangwon.ac.kr

접수일 : 2008년 12월 5일

심사 완료일 : 2008년 12월 18일

게재 확정일 : 2008년 12월 26일

널 및 지하철과 상·하부로 교차하는 지하구조물을 건설하는 사례가 증가추세에 있다. 이와 같이 기존 지하철이나 도로·철도 터널에 상부 또는 하부로 교차하여 새로운 터널을 건설하는 경우 그 공사정도가 어렵고, 공사 진행에 따라 기존 구조물 및 각종 시설의 운행이나 안전이 지장을 받거나 시설물이 손상을 받지 않도록 해야 한다. 그러나 터널굴착에 따른 지반의 이완은 필연적이고 이로 인해서 기존 구조물에 구조물의 침하, 발파굴착 및 응력 교란에 따른 이완하중의 증가 등 간섭영향이 미치게 된다. 이러한 영향을 최소화하려면 기존 구조물과 신설되는 구조물간의 일정영역을 확보하여야 한다. 일부 시방서에는 구조물간의 영향을 최소화하기 위하여 이격거리를 터널 폭 이상으로 유지하도록 제시되어 있지만, 각 현장조건에 맞는 적정 이격거리 산정 및 보강범위 결정은 그 현장의 지반조건 및 터널의 교차 각도 등 여러 가지 요인을 종합적으로 검토하여 결정하는 것이 바람직하다¹⁾.

따라서 본 논문에서는 기존에 수행된 설계를 사례로 들어 터널 병설·교차시 적정 이격거리 산정 및 보강구간 결정 방법을 기술하고자 한다. 검토대상은 기존 병설 도로터널(백마터널)하부에 신설되는 철도 복선터널(경안터널)로서 상부 기존터널과의 이격거리는 25 m이고 교차 각도는 15° 정도로서 교차구간은 약 200 m이다. 이격거리 산정을 위한 결정 방법은 기존 사례 조사 및 수치해석을 통해서 이격거리를 결정하였고, 대형 모형실험을 통해서 터널 교차시 하부터널의 굴착에 따른 상부터널에서 발생될 수 있는 문제점과 주변지반의 3차원 거동을 분석하였다.

2. 터널현황

장안터널은 연장 3.5 km의 복선전철 터널로서 그림 1과 같이 기존 백마터널과 이격거리 25 m, 교차 각도

15° 정도로 하부 통과하며, 교차구간은 약 200 m 정도이다. 백마터널 교차부의 지반특성은 변형계수 700~14,000 MPa, 점착력 0.17~그림 1은 2.87 MPa, 내부마찰각 31~41°, 투수계수 1.55×10^{-6} cm/sec의 값을 나타낸다. 호상흑운모와 석영장석질 편마암이 주류를 이루며 단층파쇄대 및 습곡 등이 일부 발달되어 있으나, 대체로 RMR 분류시 3등급 정도로 양호한 암반상태를 보인다. 백마터널 교차부의 수치해석 및 모형실험을 통한 안정 및 보강영역을 산정하여 백마터널 직하부 40 m 구간은 CD 분할굴착 및 강관보강그라우팅 공법을 적용하였다.

3. 문헌조사를 통한 안전영역 산정

지하구조물의 건설이 확대됨에 따라 기존터널에 근접하여 신설터널이 병설·교차하는 사례가 급증하고 있고 근접시공 사례가 빈번하게 발생하면서 터널의 안전영역 설정에 대한 관심이 점차 증대되고 있다. 터널굴착에 따른 안전영역(safety zone) 산정은 일률적인 값에 의해 결정되는 것이 아니고, 터널간 이격거리, 상대적인 위치관계, 신설터널의 크기, 신설터널의 시공법, 지형 및 지질조건, 기존터널 라이닝의 건전도 등 여러 가지 조건에 따라 결정되는 것이다. 따라서 본 절에서는 기존 사례연구를 통하여 교차터널 시공시 영향인자에 대해서 검토하였다.

3.1 서울지하철에서 적용한 안전영역

지하철은 대표적인 지하구조물로서 다른 지하구조물과 교차하는 경우가 상대적으로 빈번하게 발생한다. 표 1은 서울시지하철 기준과 부산시 지하철 기준을 나타낸다. 서울시 기준에 의하면 단선터널의 1D(D : 터널의 직경) 이내의 B 지역에서는 시공이 불가능하며 C 지역의 경우는 기존터널의 이완하중 증가를 차단할 수 있는

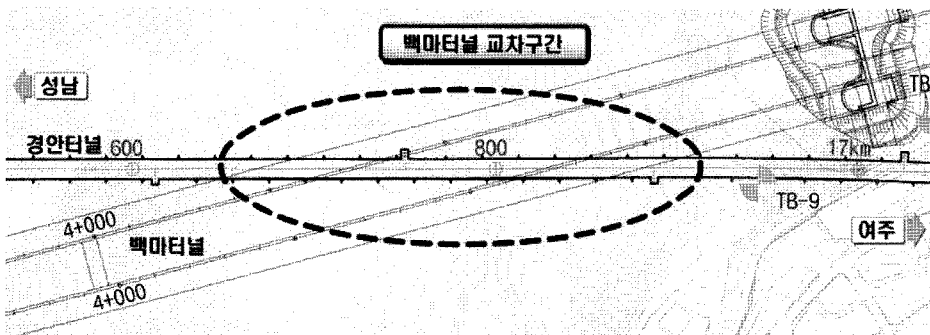
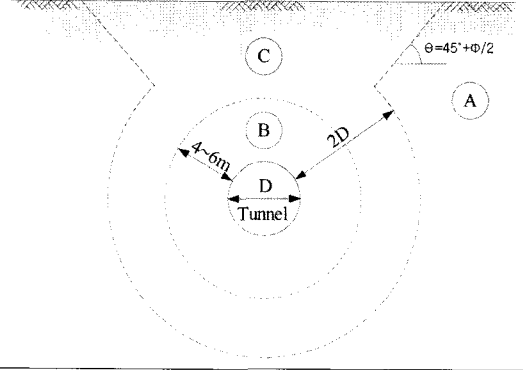
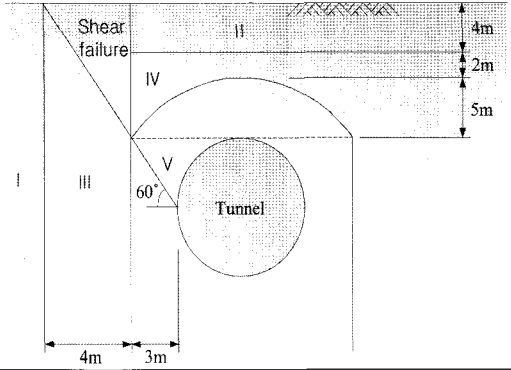


그림 1. 교차구간의 평면도

표 1. 안전영역 기준

서울 지하철 기준	부산 지하철 기준
	
<p>A : 시공 가능 지역 B : 시공 불가능 지역 C : 제한된 조건 하에 시공 가능 지역 D : 터널</p>	<p>I : 시공 가능 지역 II : 5층 이하의 빌딩만 시공 가능 III : 제한된 조건 하에 시공 가능 지역 IV : 임시 구조물을 제외하고 시공 불가능 지역 V : 시공 불가능 지역</p>

지중벽 설치 등의 보강이 있을 때는 제한적으로 시공이 가능한 기준을 설정해 놓고 있다. 부산 지하철의 경우는 터널 측벽에서 침하영역 안식각을 설정하여 I~V 영역으로 구분하고 있으며, V 영역은 시공이 불가능하며, IV는 가시설 등과 같은 임시 구조물을 제외하고는 시공이 불가능한 영역을 나타낸다. II 영역은 5층 이하의 빌딩만 시공이 가능하며, III은 서울 지하철 기준의 C 영역과 동일한 영역을 나타낸다²⁾.

3.2 기존터널 근접시공 관리 매뉴얼

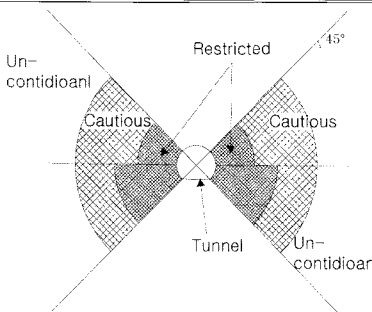
서울특별시 도시철도공사에서는 기존터널에 근접 시공할 경우 그 공사의 종류에 따라 조건별 안전영역을 산정하였다. 이중 기존터널에 근접하여 터널이 신설되는 경우는 터널의 교차와 병설이므로 이 두 가지에 대

한 안전영역 정의는 다음과 같다.

① 터널의 병설

기존터널에 평행하게 신설터널이 건설되는 경우로 증설 공사시에 많이 발생한다. 터널의 신설 등에서 터널이 병설 될 경우 기존터널은 신설터널 쪽에 당겨지듯 변위·변형한다. 근접도가 두드러진 경우에는, 신설터널의 시공에 따라 기존터널 주변의 이완영역 증대로 기존터널 라이닝에 추가 이완하중이 작용한다. 터널 병설의 경우 근접도의 구분은 표 2와 같다. 신설터널이 기존터널보다 위나 아래에 위치하는 병설터널인 경우에 대하여 제한범위는 각각 1D와 1.5D 미만으로 설정하고 있으며 주의해야 할 범위는 2.5D까지 정하고 있다.

표 2. 병설터널에서의 안전영역³⁾

	위치관계	터널의 이격	근접도 구분
	신설터널이 기존터널보다 위에 위치하는 경우	1D 미만 1~2.5D 2.5D 이상	제한 범위 주의 범위 무조건 범위
	신설터널이 기존터널보다 밑에 위치하는 경우	1.5D 미만 1.5~2.5D 2.5D 이상	제한 범위 주의 범위 무조건 범위

② 터널의 교차

기존터널의 상부 또는 하부를 신설터널이 횡단하는 경우로, 신설터널이 기존터널의 상부를 통과할 경우에는 기존터널이 위 방향으로 변위·변형하기도 하고, 거꾸로 아치 작용을 할 수 없어 기존터널 라이닝에 작용하는 하중이 증가하며, 신설 터널이 기존터널의 하부를 통과하는 경우에는 기존터널의 침하가 발생하는 문제점이 있다. 터널 교차의 경우 근접도의 구분은 표 3과 같다. 교차터널의 근접도는 신설터널이 기존터널의 위나 아래에 위치하는 경우에 따라 제한범위는 각각 1.5D와 2D 미만으로 정하고 있다.

이와 같이 터널 병설·교차시 안전영역 산정은 발생빈도가 많은 지하철 설제를 중심으로 정의되었다. 그러나 이와 같은 안전영역 산정은 지반조건 및 제반사항을 충분히 고려하지 못한 경우로서 실제 조건에 맞는 안전영역 산정은 위에서 기술한 여러 가지 요소들에 의해서 결정되어야 한다. 앞으로 기술할 내용은 안전영역 산정시 수치해석을 통하여 위에서 기술한 기준의 적합성 여부를 판단하였다.

4. 해석을 통한 안전영역 산정

터널 굴착시 지반조건 및 터널의 형상, 시공방법에 따라 영향범위는 다양한 변화를 보이지만, 기존 안전영역 기준은 이와 같은 조건 등을 고려하지 않고 안전영역이 설정되어 있으므로 보다 합리적인 방법으로 안전영역 산정방법을 검토하고자 한다.

4.1 강도응력비

강도응력비란 다양한 구속압력 σ_3 에 대하여 소성파괴는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 식(1)과 같이 표현되며,

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \tag{1}$$

암반의 일축압축강도 σ_{cm} 은 식(2)와 같이 정의된다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos\phi}{1-\sin\phi} \tag{2}$$

이때 σ_3 에 대한 σ_1 의 기울기 k 는 식(3)과 같다.

$$k = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \tag{3}$$

여기서, σ_1 : 파괴시의 축방향 응력

σ_3 : 구속응력

c : 암반의 점착강도

ϕ : 암반의 마찰각

그림 2는 암반 필라의 강도에 대한 응력상태를 표현한 것이며, 필라의 강도응력비가 필라 전체의 안전율을 나타내지는 않지만, 진행성 파괴(progressive failure)나

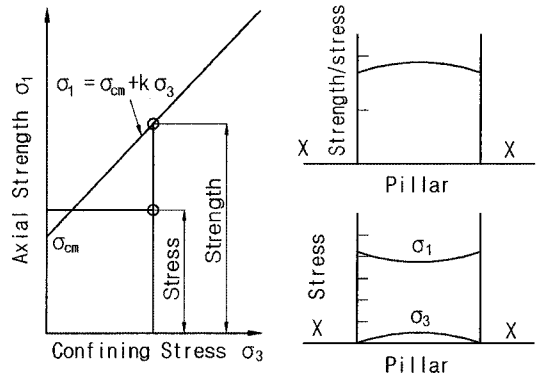
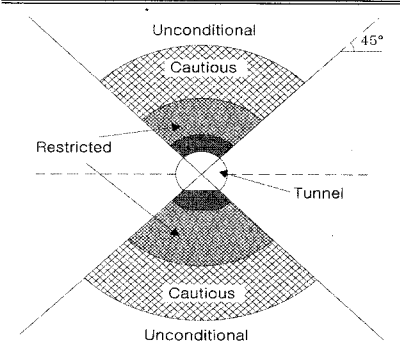
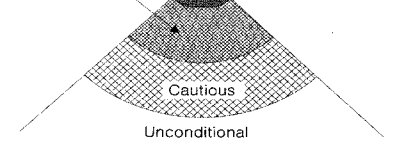


그림 2. 강도응력비 곡선

표 3. 교차터널에서의 안전영역³⁾

위치관계	터널의 이격	근접도 구분
	신설터널이 기존 터널보다 위에 위치하는 경우 1.5D 미만 1.5~3D 3D 이상	제한 범위 주의 범위 무조건 범위
	신설터널이 기존 터널보다 밑에 위치하는 경우 2D 미만 2~3.5D 3.5D 이상	제한 범위 주의 범위 무조건 범위

응력 전이과정(stress transfer progress)을 고려하여 필라 중앙 단면에서의 평균 강도응력비(average strength-stress ratio)가 1.0 이하로 되면 필라 전체가 불안정해지는 것이라고 할 수 있다⁴⁾.

4.2 안전영역 산정

① 터널 갯수와 변형계수에 따른 안전영역 산정

터널 굴착시 지반의 조건 및 터널의 형상에 따라 굴착영향 범위는 상이하게 나타난다. 이에 실제 단선터널 및 병설터널을 굴착하였을 경우 지반조건에 따라 손상영향권은 어느 정도인지 강도응력비를 통하여 검토하였다. 터널해석을 위한 수치해석 범위는 가능한 한 터널굴착으로 인한 지반의 영향이 미치지 않도록 측면은 터널 굴착폭의 약 3배 이상, 하부는 터널 높이의 2배 이상되는 지점으로 경계조건을 설정하였으며, 천단부 위의 지반은 터널 높이의 3배 이상을 확보하였다⁵⁾. 유한차분 해석프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄·소성해석을 수행하였으며, 변형계수는 표 4와 같이 250~10,000 MPa로 변화하며 해석을 수행하였다.

해석결과는 그림 3과 같다. 천단 및 측벽 변위, 지반의 응력상태(수직응력 및 주응력) 등을 이용하여 강도응력비에 의한 안전율을 산정하였으며, 이를 토대로 터널의 손상영향권을 평가하였다.

터널 굴착에 따른 영향범위 산정결과 변형계수가 작을수록 영향범위는 증가하였고, 단선터널과 병설터널 두 경우 유사한 결과를 보였다. 변형계수 700 MPa 이상의 구간에서는 영향범위가 선형적으로 감소하였고, 이

하구간에서는 영향범위가 급격히 증가하는 결과를 보였다. 단선터널 수치해석 결과 변형계수 250 MPa의 경우 시공불가 영역은 약 15 m로 산정되고, 변형계수 10,000 MPa의 경우 시공불가 영역은 약 5 m로 산정되었다. 병설터널 필라부의 경우 중첩구간이 발생하여 동일한 조건의 단선터널에 비해 안전율이 회복되지 못하므로 터널 이격거리별 필라부의 안전율을 추가로 검토하는 것이 필요하며 필라부를 제외한 영역은 단선터널과 유사한 경향을 보였다.

② 터널 교차·병설시 안전영역 산정

기존터널에 근접하여 신설터널이 교차·병설로 시공될 경우 터널굴착에 따른 주변지반의 손상정도와 영향범위 파악이 상당히 중요하다. 그러나 신설터널이 근접함에 따라 기존터널의 안정성과 시공될 터널의 안정성 평가에 관한 평가 기준이 불투명하므로 수치해석을 통하여 신설터널이 교차·병설될 경우에 따른 영향범위를 파악하고 시공이 가능한 범위를 산정하여 적정 이격거리를 나타내었다.

해석프로그램 및 해석영역은 터널 굴착시 안전영역 산정에서 수행된 수치해석과 동일한 조건을 사용하였다. 해석방법은 시공된 기존터널을 기준으로 새로운 터널을 근접시켜 적정이격거리를 산정하였다. 그림 4와 같이 새로운 터널을 횡방향과 종방향으로 각각 7CASE, 5CASE로 접근시켜 해석을 수행하였다.

해석결과는 그림 5와 같이 지반의 응력상태(수직응력 및 주응력) 등을 이용하여 강도응력비에 의한 안전율을 산정하였으며, 이를 토대로 터널 근접시 안전영역을 평가하였다. 이때 신설터널이 굴착될 때 기존터널의 경계

표 4. 지반의 변형계수 적용

Case	E (MPa)	Case	E (MPa)	Case	E (MPa)	Case	E (MPa)
1	250	2	400	3	500	4	700
5	1,000	6	2,000	7	4,000	8	10,000

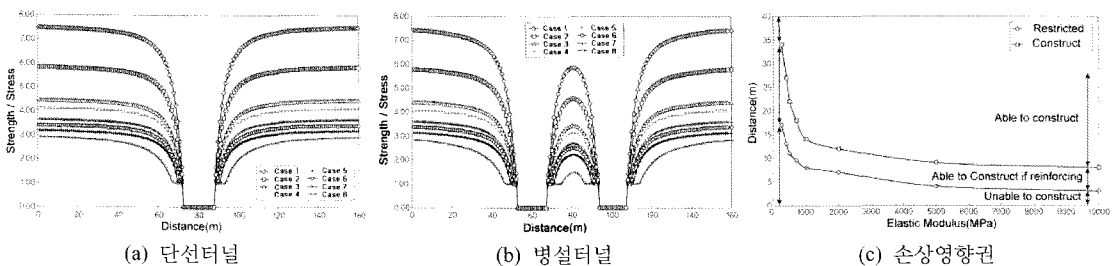


그림 3. 강도/응력비와 손상영향권 결과

면으로부터 거리에 따른 변위값의 거동을 종합적으로

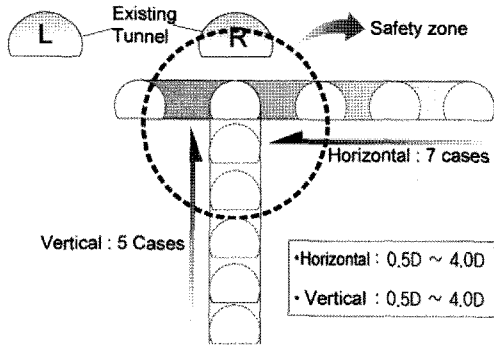
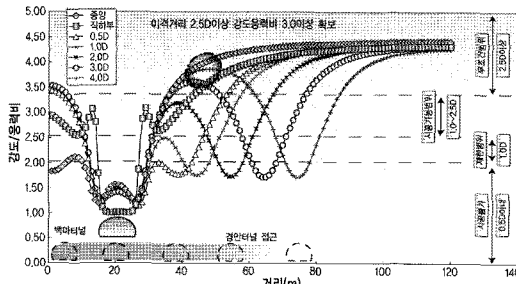
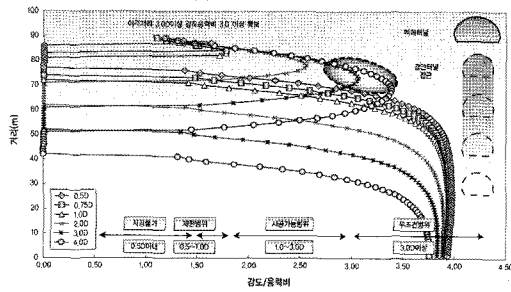


그림 4. 해석개요도



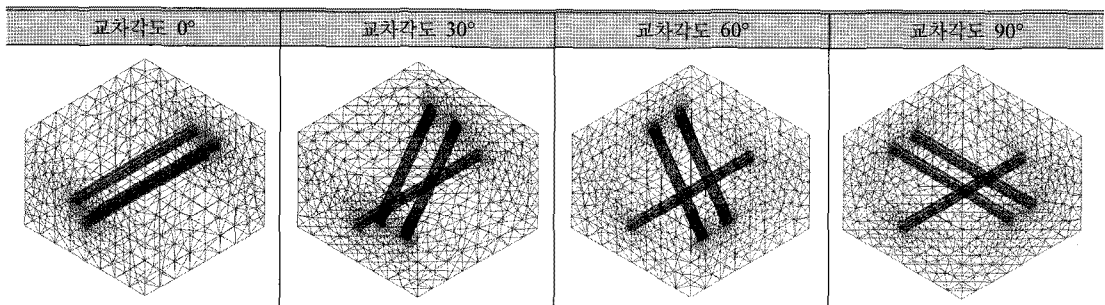
(a) 횡방향 근접



(b) 종방향 근접

그림 5. 터널의 교차·병설시 강도 응력비의 변화

그림 6. 교차각에 대한 모델링도



분석하여, 선형적으로 감소하는 구간, 전이구간, 수렴되는 구간, 값의 변화가 없는 거리(최대 변위값의 10% 이내)를 토대로 시공불가 영역, 제한범위, 시공가능범위, 무보강 범위로 설정하였다. 횡방향 접근에 따른 영향범위 산정결과 시공불가 영역은 이격거리 0.5D 이내로서 안전율은 2이하이며, 1.0D 이내는 제한범위, 1.0D~2.5D 이내는 시공가능범위(보강시), 2.5D 이상 이격되었을 경우 무조건 범위(무보강)로 영역을 산정하였다. 종방향 접근에 따른 영향범위 산정결과 시공불가 영역은 이격거리 0.5D이내로서 횡방향 접근과 마찬가지로 안전율을 2이하이며, 1.0D 이내는 제한범위, 1.0D ~ 3.0D 이내는 시공가능범위(보강시), 3.0D 이상 이격되었을 경우는 무조건 범위로 영역을 산정하였다.

③ 터널 교차시 교차각도에 따른 거동특성

터널 교차시 교차 각도에 따라 기존터널에 미치는 영향이 다를 것으로 예상되므로 다양한 교차각으로 3차원 해석을 수행하여 그 영향을 정량적으로 분석하였으며, 해석결과를 토대로 교차구간의 보강영역을 산정하였다. 터널 교차시 기존터널과 신설터널 상호영향의 정량적 관정을 위해 이격거리는 실제거리 25 m를 적용하였으며, 터널 교차시 교차 각도는 0°, 30°, 60°, 90°에 대해 해석하고 교차각에 대한 기존터널과 신설터널의 영향을 검토하였다. 해석에 사용된 프로그램은 Visual FEA 이고 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄·소성해석을 수행하였다. 모델링도를 나타내면 그림 6과 같다.

강도응력비와 변위량을 검토하여 교차 각도별 영향범위를 산정하였으며 그 결과는 그림 7과 같다. 강도응력비를 통한 교차 각도별 해석결과와 교차 각도가 증가할수록 지반의 영향범위는 감소하였고, 교차 각도에 대한 영향범위는 0°를 기준으로 30° > 60° > 90°순으로 나타났다. 교차 각도가 30°인 경우 영향범위는 약 1.5D, 60°인 경우 약 1.2D, 90°인 경우 약 1.0D 정도로 나타나고 있다.

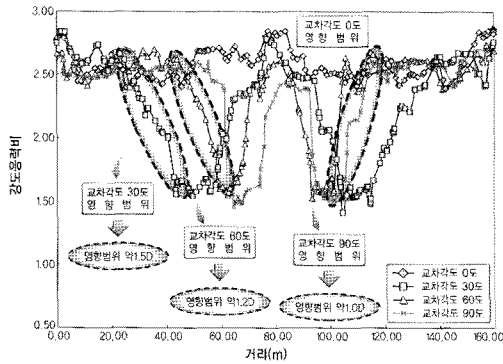


그림 7. 교차각도에 따른 강도응력비 결과

5. 모형실험에 의한 터널의 거동특성

터널의 교차부에서 발생하는 지반 및 터널의 거동을 알아보기 위하여 모형실험을 실시하였다. 즉 하부 신설

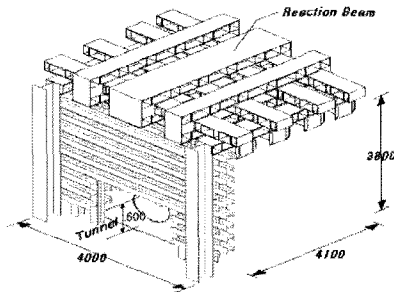


그림 8. 모형토조

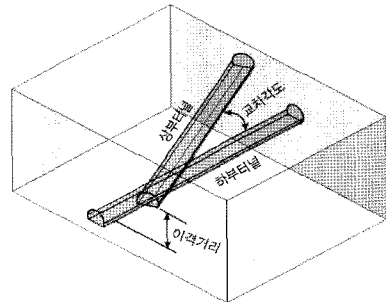


그림 9. 실험개요도

표 5. 모형 지반조성시 사용된 모래의 물성치

비중(Gs)	상대밀도(Dr)	단위중량(γ_d)	내부마찰각(ϕ)	함수비(ω)
2.63	56%	15.39 kN/m ³	38°	6.8%

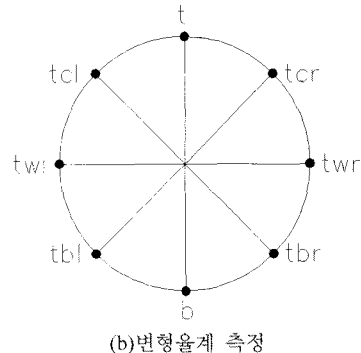
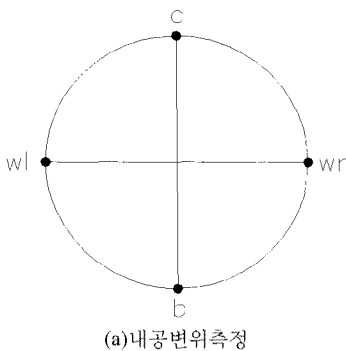


그림 10. 상부라이닝 계측 위치도

터널 굴착에 의한 지반 침하특성 및 기존 상부터널의 침하와 내공변위를 파악하고 주변지반의 3차원 거동을 확인하였다.

5.1 모형실험조건 및 방법

실제 터널의 굴진을 모사하기 위해 4.0 m(폭)×3.3 m(높이)×4.1 m(길이)의 모형으로 실험을 실시하였다⁶⁾. 이때 모형지반은 기초지반 0.5 m이고 하부터널과 상부터널의 이격거리는 0.6 m이며, 실험에 사용된 모형 토조와 실험개요도는 그림 8 및 그림 9와 같다. 실험에 사용된 터널은 원형강관으로 제작하였으며, 표 5는 모형지반 조성에 사용된 모래의 기본물성을 나타낸 것이다.

하부터널 굴착으로 인한 상부터널의 거동을 측정하기 위하여 그림 10과 같이 내공변위 및 변형률계를 설치하였다. 또한 지표변위를 측정하기 위하여 지표면 위에 침하판을 두었고, 하부터널의 굴착에 따른 주변지반의 응력변화 및 변위를 측정하기 위하여 토압계 및 지중변

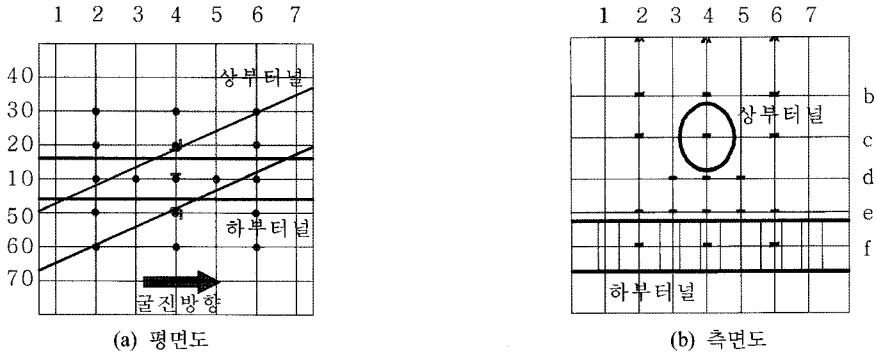


그림 11. 토압계·지중변위계 계속위치

위계를 그림 11과 같이 매설하였다.

지반조성과 상부터널을 설치한 후 토조 전면에서 터널굴착기를 이용하여 직경 0.6 m의 원형터널을 시점, 종점부는 40 cm로 굴착하고, 그 외 부분은 30 cm로 굴착하였다. 각 단계 굴진이 종료되면 터널모형을 삽입하여 터널내공을 폐합하였다. 총 13회 굴진을 실시하고 매 단계마다 터널모형을 삽입 폐합하여 총 4.1 m의 터널굴착을 완료하였다

5.2 실험결과

① 터널굴착시 주변지반 거동특성

하부터널 굴착에 따른 토압변화의 양상을 나타내면 그림 12와 같다. 이때 교차시점은 3굴착단계, 교차중심은 7굴착단계, 교차중점은 11굴착단계에 해당한다. 하부터널 직상부 구간은 터널굴착에 따라 토압이 감소한 후 수렴하였다. 하부터널 좌·우측 구간은 굴착에 따라 토압이 증가하였으며, 이것은 굴착으로 인한 토압증가가 주변지반으로 전이되고 있다고 할 수 있다. 그리고 직상부 구간은 각각의 계속지점 굴착에 따라 토압이 감소한 후 추가굴착 후 일정량의 토압증가 후 수렴하였다. 이것은 추가굴착으로 인해서 종방향으로 토압이 전이

되어 토압이 증가된 것으로 생각 할 수 있다. 하부터널이 굴착됨에 따라 막장전방의 변형에 의하여 터널상부의 토압이 변하게 되는데, 막장이 계속점에 근접할수록 토압은 증가하는 경향을 띄나 일정한 시점부터 감소하기 시작한 후 수렴하는 양상을 보인다. 여기서 e-302, 304, 306은 그림 11의 (b)에서 심도 e와 (a)의 평면도에서 터널 좌측부 30단면에서 2번째, 4번째, 6번째 지점이며, e-102~106은 심도 e의 터널 직상부 10단면에서 2~6번째 지점을 나타낸다.

그림 13은 터널 굴진에 따른 단면 10, 30, 60의 종방향 변위를 나타내고 있다. 단면 30의 좌, 우측부에서의 변위는 교차부 중심까지는 거의 미소한 변화를 보이다가 그 이후 굴착이 진행됨에 따라 큰 증가를 보이며, 교차부 종점 11단계 굴착이후 수렴되는 경향을 보이고 있다. 단면 10의 하부터널 직상부에서의 변위는 2번째 지점의 경우 교차시점인 3번째 굴착이후 큰 변위의 증가를 보이며, 6번째 지점의 경우는 교차부 중심까지 미소한 변위의 변화를 보이다가 그 이후 굴착단계에서 급격한 증가를 보인다. 이러한 양상은 교차지점 이후에 확연하게 나타나고 있으며 교차종점 이후는 수렴되는 경향을 보이고 있다.

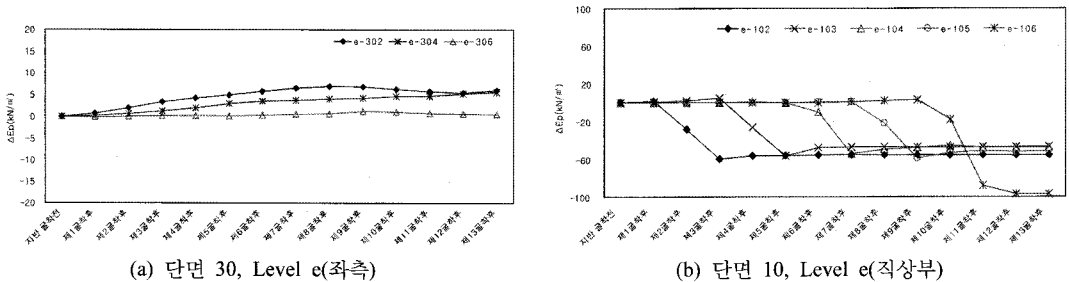


그림 12. 하부터널 굴착에 따른 토압변화

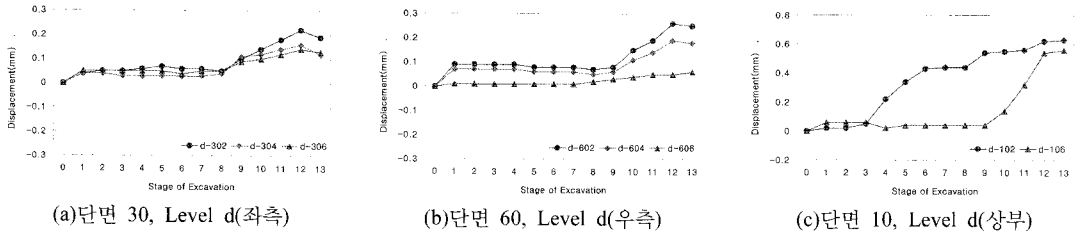


그림 13. 하부터널 굴착에 따른 지반변위

② 터널굴착시 상부터널 거동특성

상부 라이닝 발생 축력은 그림 14와 같이 하부터널의 굴착초기(1~6단계 굴착)에는 큰 변화가 없다가, 교차부 통과 후 12~13단계 굴착시 압축력 증가가 크게 나타났다. 이는 굴착초기에는 종방향 아칭 효과로 라이닝의 단면력 변화가 미미하지만 굴착이 진행됨에 따라 아칭효과의 감소로 인해서 단면력의 증가가 크게 작용한

것으로 판단된다. 여기서 3BL~13BL은 그림 10(b)에서 tb1 지점에서의 계측을 나타내며, 그 의미는 2번째에서 13번째의 굴착지점에서 측정된 계측을 가리킨다. 마찬가지로 3CR~13CR은 tcr 지점에서의 계측을 나타낸다.

하부터널 굴착에 따른 교차부 주변에서의 상부터널의 변위결과를 나타내면 그림 15와 같다. 천단부 침하는 거의 발생하지 않았으며, 하부터널 굴착이 교차부에 접

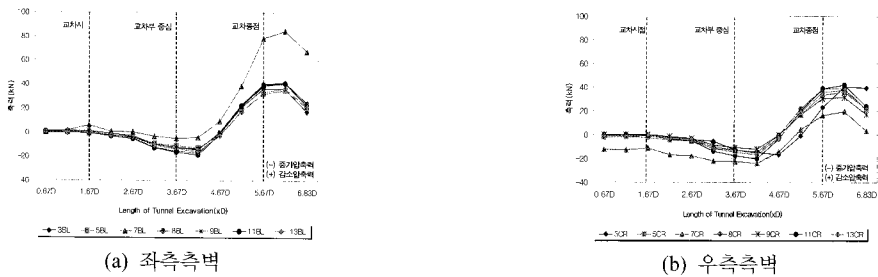


그림 14. 하부터널 굴착에 따른 상부터널의 축력분포

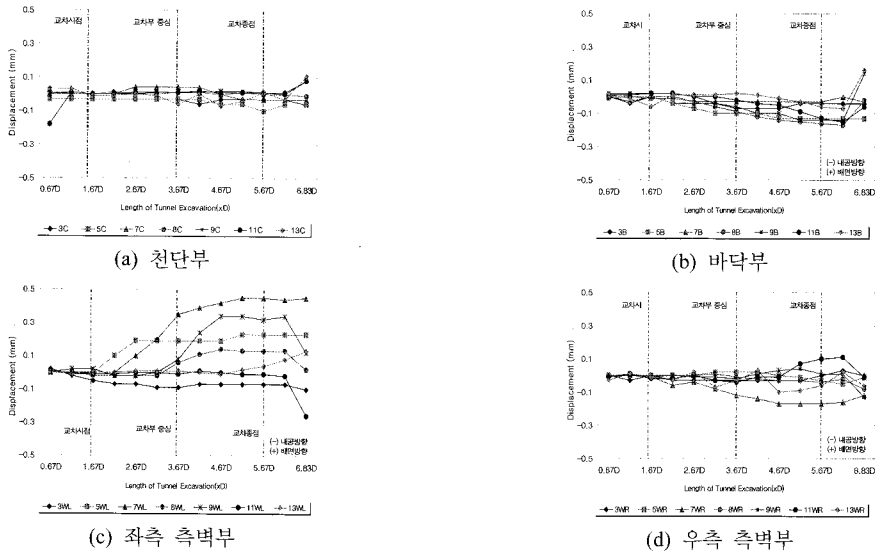


그림 15. 하부터널 굴착에 따른 상부터널의 변위분포

근한에 따라 상부터널 라이닝의 바닥부는 교차지점을 지나면서 교차중점까지 음(-)의 값(내공방향)을 보였다. 좌측 교차부 주변의 측벽부는 교차시점을 통과한 후 계속해서 양(+)의 값(배면방향)으로 변화하기 시작했고 교차중심으로부터 약 1.0D정도 떨어진 위치에서 수렴했다. 여기서 3C~13C, 3B~13B, 3WL~13WL, 3WR~13WR은 그림 10(a)의 계측지점을 의미한다.

5.3 수치해석을 통한 모형실험의 적정성 검토

모형실험에 대한 3차원 수치해석을 실시하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 해석모델링도 및 지반의 적용 물성치는 표 6과 같다. 모형실험을 모사하는 터널 해석의 신뢰도를 높이기 위해 해석시 모형실험의 절차 및 방법을 동일하게 적용하였다. 즉, 해석시 경계조건은 모형실험과 마찬가지로 모델링의 좌, 우 및 전, 후 경계에서는 수평방향의 변위를 구속하였고, 바닥 경계에서는 수직방향의 변위를 구속하였다.

수치해석 결과를 토압변화, 지반변위, 상부터널의 거

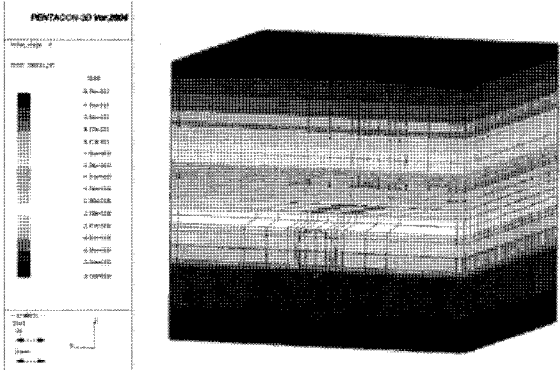
동특성별로 모형실험과 비교하였으며, 터널굴착에 따른 하부터널 직상부의 횡방향 토압 및 지중변위를 나타내면 각각 그림 16 및 그림 17과 같다. 굴착에 따른 토압의 수치적인 증감은 실험과 차이가 있으나 굴착에 따른 토압 증감 경향은 유사한 것으로 나타났다. 굴착단계별 지중변위의 증가는 유사하게 나타났으나 변위발생 시기는 다소 차이를 보였다.

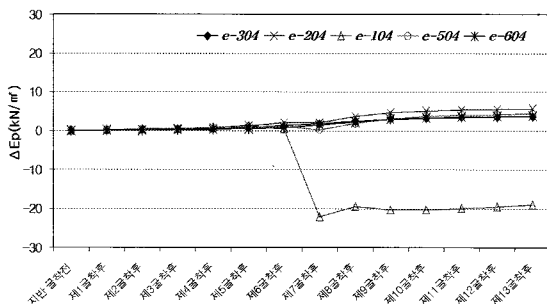
그림 18은 내공변위에 대한 결과를 나타낸 것이다. 수치해석시 상부터널 라이닝을 쉘로 해석하였으며, 천단부는 감소, 우측 측벽부는 감소, 좌측측벽부는 증가, 바닥부는 증가하여 모형실험결과와 유사한 값을 보였다.

본 설계구간의 경안터널과 백마터널의 교차터널의 이격거리는 3.2절을 참조하여 2.0D인 25 m를 이격하는 것으로 계획하였으며, 교차부의 보강영역은 모형실험과 수치해석으로부터 굴착에 따른 지반변위 및 내공변위의 경향을 토대로 교차시점에서 교차중점까지 그림 19와 같이 보강영역을 선정하였다.

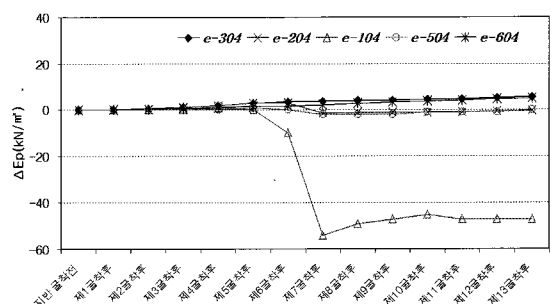
이상으로 기 시공된 상부터널 하부에 터널이 신설될

표 6. 해석모델링과 지반의 물성치

모델링도		적용 물성치	
	탄성계수 (kN/m ²)	52,270	
	단위중량 (kN/m ³)	16.0	
	점착력 (kN/m ²)	5.9	
	토압계수 (K ₀)	0.6	

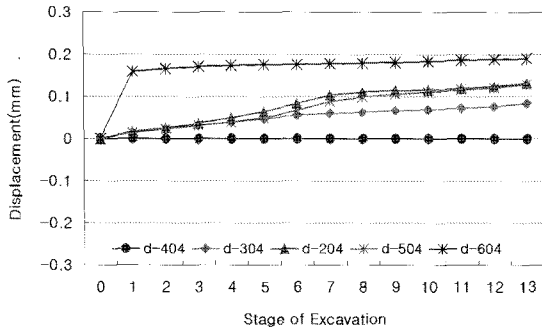


(a) 해석결과

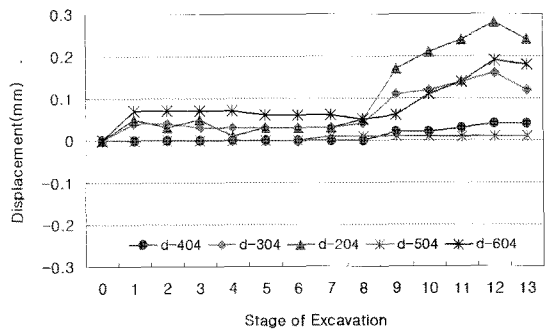


(b) 실험결과

그림 16. 단면 4에 대한 하부터널의 토압분포

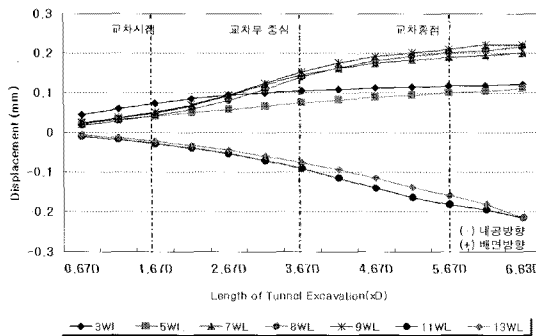


(a) 해석결과

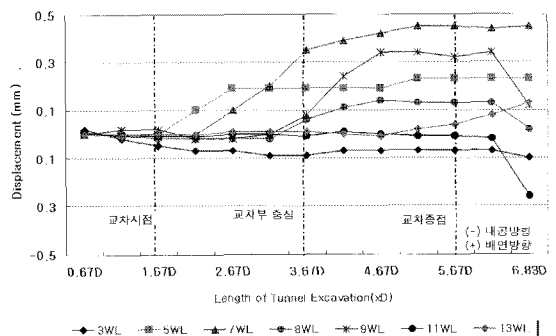


(b) 실험결과

그림 17. 단면 4에 대한 하부터널의 변위분포



(a) 해석결과



(b) 실험결과

그림 18. 상부터널의 좌측 측벽부 내공변위거동

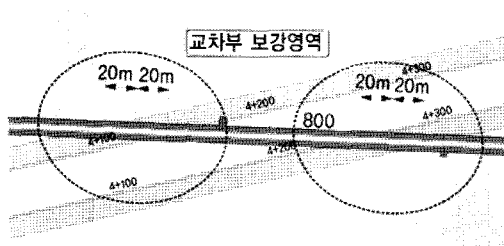


그림 19. 보강 개요도

경우 하부터널 굴착에 따른 주변지반의 거동특성 및 상부터널의 거동특성을 수치해석 및 모형실험을 통해 평가하였으며, 터널 교차 병설시 지반조건 및 신설터널의 크기와 상대적인 위치관계 등을 고려하여 수치해석을 실시함으로써 터널 설계시 적정이격거리를 산정하였다.

터널의 교차·병설시 주변지반조건 및 여러 가지 요소를 고려치 않은 획일적인 안전영역의 산정은 설계시 중대한 오류를 범할 수 있으므로 합리적인 방법을 통한 안전영역을 산정하고 지반의 거동을 분석하여 보강영역, 보강공법 및 굴착공법을 선정하는 것이 중요한 것

으로 판단된다. 따라서 본 연구는 향후 교차하는 터널의 거동에 대한 안전영역의 산정을 위한 검토 방법 및 주변지반 거동 예측을 위한 자료로 활용가능할 것으로 생각된다.

6. 결론

암반파괴이론에 근거한 강도응력비를 이용하여 안전영역을 산정함과 아울러 서울특별시 도시철도공사에서 제시한 터널 교차·병설시 보강영역과의 유사성을 증명하였다. 위에서 기술한 방법으로 안전영역을 산정하여 보강구간 선정, 보강방법 및 굴착공법을 선정하여 설계에 반영하였고, 3차원 수치해석을 실시하여 터널 교차 각도별 영향범위를 파악하여 2차원 수치해석과 비교 검토하여 보강구간을 검증하였다.

기 시공된 상부터널에 하부에 터널이 신설될 경우 하부터널 굴착에 따른 주변지반의 거동특성 및 상부터널의 거동특성을 수치해석 및 모형실험을 통해 알아보았다. 시공된 상부터널에 하부터널을 시공할 경우 하부터

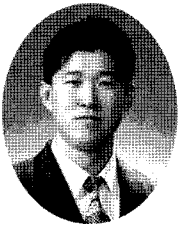
널 굴착에 따른 주변지반의 토압분포 경향을 파악하였고 하부터널 굴착시 지반의 이완영역 확대로 토압이 전이되어 토압이 증가하였다. 그리고 하부터널 굴착에 따른 상부터널의 거동특성은 하부터널이 상부터널과 교차되기 전과 교차구간 통과시점에 비해 통과 후 굴착에 따른 단면력 및 변위가 급격히 증가되었다. 따라서 교차시점 보다 교차구간을 통과한 후 터널굴착이 상부터널에 미치는 영향이 큼을 실험 및 해석을 통하여 확인하였다.

참고문헌

1. 김도식 등, 2004, 비대칭 근접병설터널의 안정성 및 보강 공법 검토, 터널 사공 기술향상 대토론회 4회 논문집, 대한토목학회, pp.179~197.
2. 서울특별시도시철도공사, 2001, 도시철도인접굴착공사 관리실무.
3. (사)한국지반공학회, 지반공학시리즈, 터널, 도서출판 구미서관.
4. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, pp. 87-177.
5. 박병석 등, 2005, 하부에 근접한 터널굴착에 따른 기존 병설터널의 안정성, 대한토목학회 2005년 정기학술대회 논문집, pp. 5596~5599.
6. 김동갑, 2005, 아주대학교 박사학위논문, "기존터널에 근접한 하부터널 굴착에 따른 교차부 지반의 거동".

김우성

1996년 경기대학교 공과대학 토목공학과 공학사



Tel: 02-3402-0071
E-mail: aguns@hanmail.net
현재 (주)우경KPE 대표이사

유동욱

2000년 영남대학교 토목공학과 공학사
2002년 영남대학교 대학원 토목공학과 공학석사



Tel: 02-3402-0071
E-mail: donguk1223@hanmail.net
현재 (주)우경KPE 차장

이상은

1991년 강원대학교 자원공학과 공학사
1993년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1998년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사



Tel: 033-570-6306
E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 조교수