

도심지 터널굴착에 따른 선행변위 예측에 대한 연구

이희성(단우기술단)

박연준, 채영수, 김주화(수원대학교)

1. 서론

터널에서 굴진에 의해 발생하는 변위는 터널 주변지반 및 지질상태, 굴착 및 보강방법 등 다양한 변수에 의해 발생되어 예측하기가 매우 어렵다. 터널에서 일반적으로 사용되는 계측 기기는 1차 슛크리트가 타설된 후 막장에 근접하여 설치되며 통상 1회 굴진장의 중앙부에 설치되어 터널 굴착 후의 변위만을 계측한다. 하지만 터널에 발생하는 총 변위는 굴착이전에 발생하는 선행변위와 굴착 후에 발생하는 계측변위를 합한 절대변위로 구성되며, 일반적으로 계측을 통해 측정된 변위는 절대 변위보다 작다.

Kitagawa, T. and Kumeta, T.(1991)에 의하면 굴착이전에 발생하는 선행변위는 지반의 변형특성에 따라 터널의 상·하반 분할굴착의 경우 상반 벤치에서 측정된 내공변위의 약 40%, 최종 변위의 약 17%의 값으로 나타난다. 따라서 도심지내 터널구간과 같이 주변 지반의 변위를 최소화 할 필요가 있는 경우에는 막장굴진 이후 측정된 결과만으로 터널 주변 지반의 전체 변위량에 대한 크기와 양상을 판단하는 것은 옳지 않으며, 선행변위량의 크기에 대한 분석이 필요하게 된다. 이러한 선행변위를 계측하기 위한 방법은 크게 지중침하계를 이용하는 방법, 수압계를 이용하는 방법, 수평경사계를 이용하는 3가지 방법이 있다. 이러한 방법을 통하여 터널굴진에 따른 막장전방 지반의 침하정도를 전체 변위량 차원에서 관리함으로써 굴착면 전방의 불량지반구간(파쇄대 혹은 공동 등)의 존재여부를 사전에 인지하고, 터널의 굴진에 의한 막장 전방의 지반변화에 따른 터널의 거동양상을 사전에 예측할 수 있다.

2. 현장개요 및 계측결과 분석

2.1 현장개요

본 연구 대상지역은 지하철 OO호선으로 터널의 위치는 양천길과 공항로를 연결하는 백석길에 지하철 본선터널이 위치하고 있고 정거장과 정거장간 터널로 연결되는 통과구간이 본 연구지역 하부를 통과하는 복선 터널구간이다. 그림 2.1은 연구대상 현장의 주변상황이다.

터널굴착 방법은 링컷(Ring Cut)굴착 공법으로 막장 주변의 지반이완을 최소화하고 안정성을 확보하고, 강섬유보강 슛크리트는 1, 2차로 구분하여 두께 250mm를 타설하였다. 또한 굴착시 막장의 안정과 주변지반의 강성을 증대시키기 위하여 상반 굴착시 천단부와 측벽부에 $\phi 114\text{mm}$ 의 대구경 자천공 강관다단 그라우팅을 실시하고 막장부에는 GRP 그라우팅을 실시하였다. 응력해방에 따른 바닥부의 용기와 하반굴착시 예상되는 지반변위를 최소화하기 위하여 터널바닥 하부 7~8m까지 시멘트 그라우팅을 11공 시공하였다.

하반굴착시 벤치길이는 30m로 하였으며, 굴착후 록볼트(L=4m)를 좌우 측벽부에 각각 3공씩 설치하고 하반굴착 완료후 인버트를 설치하여 지반변위를 최소화 하였다.

측정구간은 그림 2.2와 같이 120m로 지반의 강도가 극히 낮고 터널까지의 심도가 얕으며 터널직상부에 사유지 건물이 있어 이 구간을 굴착할 때의 안전을 확인함과 동시에 터널 거동을 미리 예측하여 안전하게 시공하기 위하여 사유지건물 하부구간에 30m간격으로 수평경사계 4개를 설치하였다.

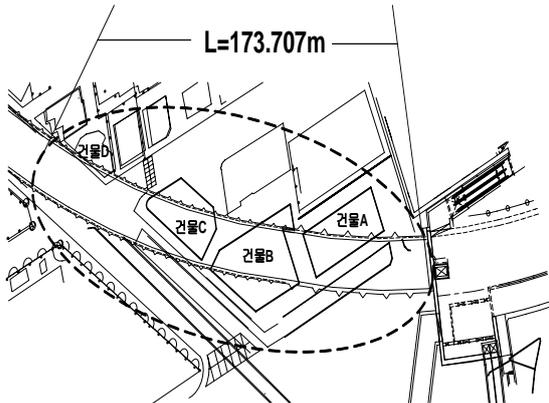


그림 2.1 연구대상지역 주변현황

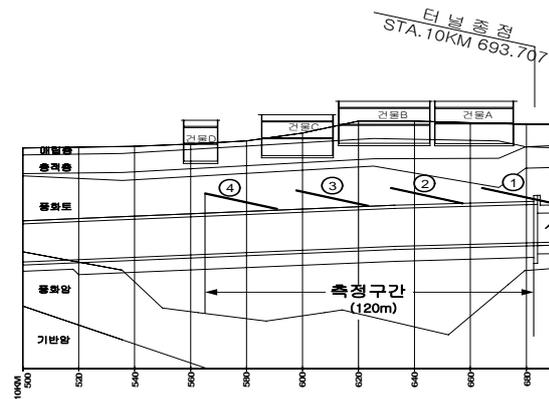


그림 2.2 수평경사계 설치 단면도

표 2.1 연구대상 구간 지층특성

지 층 현 황	조 사 결 과		
	구 분	분포심도 (GL.-m)	N 치 (TCR/RQD)
<ul style="list-style-type: none"> 연구구간 지층현황은 매립층, 풍화대(풍화토, 풍화암), 기반암(연암, 보통암, 경암)으로 구성 옛 하천 제방구간에 근접하여 풍화대가 매우 두텁게 발달하여 있음 	매립층	1.3~5.8	2/30~11/30
	총적층	4.8~10.7	4/30~25/30
	풍화토	26.0~34.5	9/30~50/11
	풍화암	28.8~34.5	50/10~50/3
	연 암	30.8~33.0	(68~78/0~17)

2.2 현장계측 결과 및 분석

그림 2.3은 수평경사계를 이용한 측정구간 10K 601~10K 668 지점에서의 선행침하량, 전체 침하량 및 선행침하비율을 나타내었다. 선행침하량이 가장 많이 발생한 지점은 10K 662 지점으로 (-) 35.03mm로 나타났으며 전체침하량이 가장 많이 발생한 지점은 10K 617 지점으로 (-) 75.75 mm로 나타났다. 선행침하량이 크게 나타난 지점에서의 전체 침하량은 다른 지점보다 크게 발생됨을 알 수 있다.

그림 2.4는 막장 전·후방의 천단침하 특성을 요약한 선행변위 특성 그래프로 x축의 좌측부는 굴착전의 선행변위를 나타내며 우측부는 굴착후의 후행변위를 나타낸다. 막장면 통과시의 발생변위량은 평균 (-) 20~30mm로 나타났으며, 최종변위량은 평균 (-) 47~60mm로 나타났다. 막장 전방구간에 발생하는 선행변위의 변곡점 위치는 12m로 나타났다. 수평경사계의 선행변위 양상은 터널 굴진과 함께 막장면과 근접된 위치에서 최대변위량이 발생된다.

터널의 굴진시 발생하는 응력해방으로 인한 터널 전방에 미치는 영향거리가 짧게 나타난 이유는 대구경 자천공 강관다단 그라우팅의 보강효과인 것으로 판단된다.

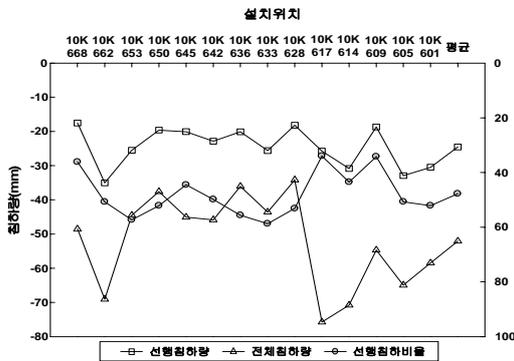


그림 2.3 침하량 및 선형침하비율

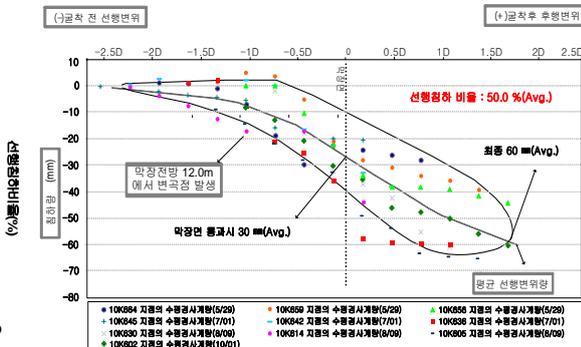


그림 2.4 연구대상 구간의 선행변위 특성

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 해석조건 및 방법

본 연구에서는 유한차분방식(FDM, Finite Difference Method)에 근거하여 적용된 지반해석용 프로그램 FLAC-3D를 사용하여 탄소성 해석을 실시하였다. 지반의 해석범위는 높이 70m, 폭 120m, 터널굴진방향 길이는 150m의 직육면체로 모델링 하였으며 현장과 동일한 조건에서 해석을 실시하기 위해 지하수위는 고려하지 않았고 상부의 기존 구조물들은 초기에 시공하여 발생한 변위를 초기화하는 것으로 고려하였다. 터널 평면선형을 살펴보면 곡선반경이 170m인 것으로 나타났지만 수치해석 상에서는 터널의 굴진방향을 일직선으로 가정하였다.

터널 상부 주변 구조물의 위치는 터널굴착 진행방향과 평행하게 모델링하였으며, 굴진장은 2m로 해석을 실시하였다. 표 3.1과 같이 기존 설계된 자료를 통해 산정된 초기 지반정수를 기준으로 수정하여 역해석을 수행하였다. 슛크리트의 두께는 250mm이며 경화단계에 따라 연성 슛크리트와 경성 슛크리트로 나누어 적용하였으며, 록볼트는 터널 하부 좌, 우측면에 4.0m로 모델링 하여 표 3.2와 같은 물성치를 적용하였다.

표 3.1 기존 설계에 적용된 지반 정수

지층종류	분포심도 (GL.-m)	단위중량 (kPa/m)	탄성계수 (MPa)	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (°)	포아송비
매립층	3m	17.65	9.8	-	30	0.35
층적층	4m	18.63	29.4	49.0	35	0.35
풍화토	27m	18.63	196.1	19.6	30	0.35
풍화암	5m	19.61	490.3	49.1	35	0.33
연암	31m	22.55	1471.1	196.1	35	0.3

표 3.2 입력 물성치

	숫크리트		록볼트	구조물
	soft	hard		
포아송비	0.2	0.25	-	0.2
탄성계수(kPa)	$5e^6$	$5e^7$	$2.1e^8$	$5e^7$
단면2차모멘트(m^4)	$1.3e^{-3}$		-	-
면적(m^2)	0.25		$4.9e^{-4}$	-
인장항복강도(N)	-		$1e^5$	-
단위중량(kPa/m)	-		-	5.56

3.2 선행변위 예측 결과 및 분석

3.2.1 기존설계에 대한 해석결과

그림 3.1은 기존 설계 지반정수에 따른 선행 침하량, 전체침하량 및 선행침하비율을 나타내었다. 선행침하량은 계측값의 15%정도 밖에 미치지 못하는 (-) 3.73mm의 변위가 나타났으며 전체침하량은 계측값의 22%정도의 값인 (-) 11.35mm로 나타났다. 측정된 평균 천단침하량은 (-) 7.62mm로 나타나 선행침하 비율은 평균 32.85%로서 계측값의 68%값이 나타났다. 선행침하량과 전체침하량은 계측값과 큰차이를 보였지만 선행침하 비율은 계측값에 비교적 근접하고 있는 이유는 선행침하와 전체침하량 모두 작게 나왔기 때문으로 사료된다.

그림 3.2는 기존 설계지반정수에 따른 변위의 거동특성으로 막장 전·후방의 천단침하 특성을 요약하였다. 그래프 x축의 좌측부는 막장면으로부터 굴착전 터널 직경에 대한 2.5D의 영향을 나타내었으며 우측부는 막장면으로부터 굴착후 3.5D의 후행변위를 나타내어 수렴되는 구간을 확인하였다.

막장면 통과시의 발생변위량은 (-) 2~6mm로 나타났으며, 최종변위량은 (-) 10~12mm로 나타났다. 선행침하 비율과 마찬가지로 거동특성 또한 계측값에 못미치는 결과를 나타냈다. 선행변위의 변곡점 위치는 7m로 나타났으며 해석에 의한 선행변위 양상은 계측한 결과와 마찬가지로 터널의 굴진과 함께 막장면의 근접된 위치에서 최대변위량이 발생된다.

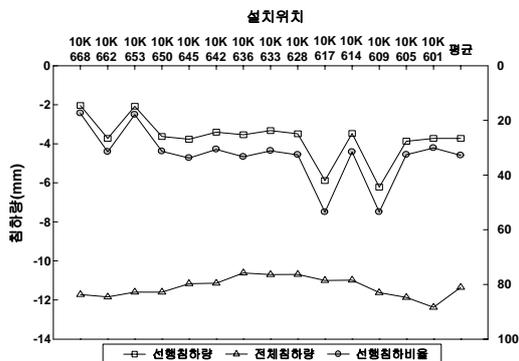


그림 3.1 침하량 및 선행침하비율

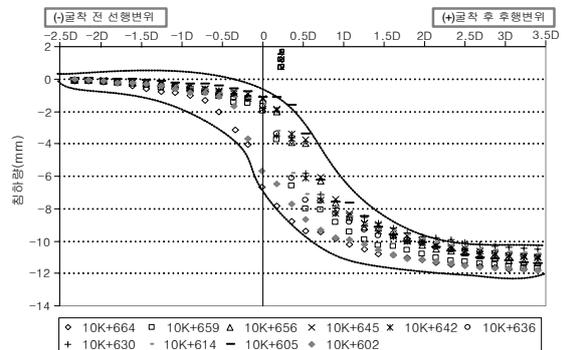


그림 3.2 연구대상 구간의 선행변위 특성

3.2.2 현장계측을 통한 역해석

터널 내공의 변형에 따라 터널라이닝에 발생하는 하중을 추정하고 이로 인한 라이닝의 안전여부를 판단하기 위해서는 터널주변의 지반 자료가 가능한 한 정확하여야 한다. 그러나 설계시에 적용한 물성치들은 지반조사 자료만으로 원지반의 물성치를 정확하게 추정하는 것은 한계가 있을 뿐만 아니라, 터널 굴착공사를 그대로 수치해석에 Simulation이 불가능하다.

그림 3.3은 기존 설계시의 지반물성치를 적용한 선행변위 거동특성으로 현장계측치와 실시설계시 시행된 수치해석결과와는 많은 차이를 보였다. 그러므로 본 연구와 같이 원지반의 물성치를 정확하게 추정하지 않으면 계측자료 분석결과에 많은 오류가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 최소화 하고 보다 정확한 계측자료의 분석을 위해 유한차분방식(FDM, Finite Difference Method)을 사용하여 역해석을 수행하였다.

시공시 계측된 자료를 이용하여, 지반-구조물의 변형과 직접적인 관계인 입력 매개변수 중 가장 변형에 민감도가 높은 지반의 물성치(탄성계수, 단위중량 및 포아송비)를 추정하였다. 즉, 대상지반에서의 최대 및 최소 물성치와 기존 문헌을 참조하여 설정한 후에 수행된 해석값이 계측치와 유사한 값을 가질 경우, 이때의 지반 물성치를 실제 지반의 물성치로 간주하여 적절한 지반물성치를 표 3.3과 같이 산정하였다.

표 3.3 역해석을 통해 산정된 최종 지반 물성치

지층종류	분포심도 (GL.-m)	단위중량 (kPa/m)	탄성계수 (MPa)	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (°)	포아송비
매 립 층	3m	17.65	2.21	3.67	30	0.33
층 적 층	4m	18.63	6.62	24.5	35	0.32
풍 화 토	27m	18.63	4.41	9.81	30	0.30
풍 화 암	5m	19.61	110.3	24.5	35	0.28
연 암	31m	22.55	331.1	98.1	35	0.25

역해석을 통하여 얻은 물성치 표 3.3을 적용하여 수치해석을 실시한 결과 그림 3.3과 같은 선행침하 변화비율의 결과를 얻었다. 선행침하량은 평균 (-) 24.33mm로 계측치와 유사한 값을 얻었으며 전체침하량 또한 (-) 53.18mm로 계측치와 유사한 값을 얻었다. 평균 선행침하 비율은 계측치보다 4% 적은 45.74%로 나타났다.

그림 3.4는 막장 전·후방의 천단침하 특성을 요약한 선행변위 특성 그래프이다. 막장면 통과시의 발생변위량은 평균 (-) 20~30mm로 나타났으며, 최종변위량은 평균 (-) 50~60mm로 나타났다. 막장전방 구간에서 발생하는 선행변위의 변곡점은 10m로 나타났으며, 선행변위의 양상은 계측과 같이 막장면에 근접된 위치에서 최대 변위량이 발생되었다.

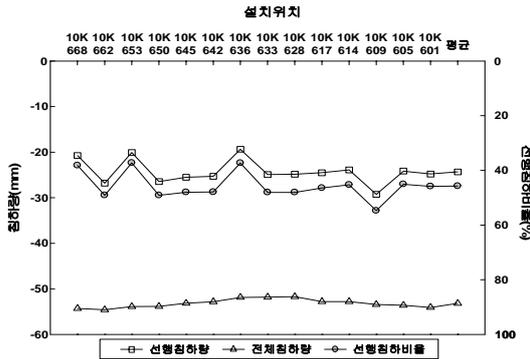


그림 3.3 침하량 및 선형침하비율

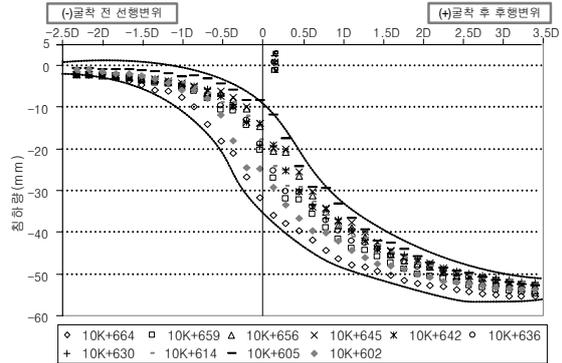


그림 3.4 연구대상 구간의 선형변위 특성

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수평경사계를 이용한 막장전방의 선형변위 측정은 연약대를 통과하는 NATM 터널의 시공 시에 지표침하의 관리와 주변지반의 변위억제 및 터널 지보재의 보완대책 수립 등에 효과적으로 사용될 수 있으며, 누적된 경험을 바탕으로 터널 굴진 시 간과될 수 있는 선형침하량의 측정을 통한 막장 전방의 불확실성을 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 수평경사계를 이용하여 막장전방의 선형변위를 측정된 결과, 수평경사계의 선형변위 양상은 터널 굴진과 함께 막장면과 근접된 위치에서 최대변위량이 발생되며 설치위치별 경시적인 거동 특성을 고찰해 보면 선형변위량이 크게 나타난 지점에서 전체 침하량도 크게 발생되었다.
3. 역해석으로 얻은 지반정수를 통해 수치해석을 실시한 결과 막장 전방에 발생하는 선형 침하량은 전체 침하량의 45.74%로 나타났고, 선형변위는 막장면에 근접한 위치에서 최대 변위량이 발생되었으며, 변곡점은 10m로 나타났다.

참고문헌

1. 신동오, 임한욱, 김치환, 1998, "NATM 시공에 의한 터널 굴착시 선형변위 추정에 관한 연구", 한국암반공학회 터널과지하공간, Vol. 8, pp. 87~95.
2. 이송, 장주원, 2006, "인공신경망을 이용한 PHC 매입말뚝의 지지력 평가", 구조물진단학회 제10권 제6호 pp. 213~221.
3. Kitagawa, T., Kumeta, t., 1991, "Application of Convergence Confinement Analysis to the Study of Preceding Displacement of Squeezing Rock Tunnel", Rock Mech & Rock Engineering 24, pp.31~51.