

수평경사계를 이용한 토사터널의 선행변위 예측

김주화¹⁾, 채영수²⁾, 박연준^{2)*}

Prediction of Preceding Displacement of a Soil-Tunnel by Displacement Monitoring using Horizontal Inclinometer

Chuhwa Kim, Youngsu Chae and Yeonjun Park

Abstract Displacement caused by tunneling is difficult to predict since it is affected by many factors such as ground condition, excavation method and supplementary method of reinforcement. In this study, horizontal inclinometer was employed to monitor ground settlements above a tunnel face before and after the excavation. Monitoring results were analyzed to predict the preceding displacement and settlement of the surface structures. The result of the analysis can be used to establish a proper counter measure which keeps the serviceability of the surface structures. Based on the analysis of the monitoring result, ground properties of the site were deduced and the influence of the tunnel excavation on the settlement of the foundation above the tunnel is analyzed.

Key words Horizontal inclinometer, Preceding displacement, Back analysis

초 록 터널의 굴진에 따른 변위량은 터널 주변지반의 지질상태, 굴착방법, 보조공법 등에 따라 다양한 값을 보여 그 값을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 선행변위량을 파악하여 터널굴진 시 주변지반의 지표침하 및 상부구조물의 침하량을 예측하고, 상부구조물의 사용성에 영향을 미치지 않도록 보완대책 공법의 대책방안을 수립하기 위하여 수평경사계를 이용하여 굴착이전 막장 전반부에서 발생하는 침하량과 굴착직후 발생하는 침하량을 계측 하였다. 현장계측 결과를 토대로 역해석을 실시하여 최종 지반 물성치를 도출하였다. 도출된 지반 물성치를 이용하여 터널의 굴진이 터널 직상부에 인접한 구조물 기초의 침하거동에 미치는 영향을 분석 하였다.

핵심어 수평경사계, 선행변위, 역해석

1. 서 론

터널에서 굴진에 의해 발생하는 변위는 터널 주변지반 및 지질상태, 굴착 및 보강방법 등 다양한 변수에 의해 발생되어 예측하기가 매우 어렵다. 터널에서 일반적으로 사용되는 계측기기는 1차 슛크리트가 타설된 후 막장에 근접하여 설치되며 통상 1회 굴진장의 중앙부에 설치되어 터널이 굴착된 후의 변위만이 계측되어진다. 하지만 터널에 발생하는 총 변위는 굴착이전에 발생하는 선행변위와 굴착 후에 발생하는 계측변위를 합한 절대 변위로 구성되며, 일반적으로 계측을 통해 측정된

변위는 절대 변위보다 작다.

굴착이전에 발생하는 선행변위는 지반의 변형특성에 따라 터널의 상·하반 분할굴착의 경우 상반 벤지에서 측정된 내공변위의 약 40%, 최종 변위의 약 17%의 값으로 나타난다(Kitagawa, T., Kumeta, T., 1991). 따라서 도심지내 터널구간과 같이 주변 지반의 변위를 최소화할 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 굴진

¹⁾ 대림산업 (주) 고문

²⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

* 교신저자 : yjpark@suwon.ac.kr

접수일 : 2008년 9월 29일

심사 완료일 : 2008년 10월 24일

게재 확정일 : 2008년 10월 27일

에 의한 막장 전방의 지반변화에 따른 터널의 거동양상을 사전에 예측할 수 있다.

본 연구에서는 도심지내 토사지반에 시공된 지하철 터널구간의 과다변위 발생을 막기 위해 수평경사계를 통한 계측을 실시함으로써 전체 변위량을 추정하고, 터널 주변 지반의 거동양상을 사전에 예측하였다. 수평경사계를 이용하여 도심지 토사지반에 굴착되는 터널의 선형변위와 최종 변위 특성을 분석하였으며, 특히 측정된 계측결과를 분석하고 그 결과를 이용하여 수치해석적 기법으로 터널의 선형변위를 예측하였다. 또한 터널의 굴착이 인접구조물의 기초에 미치는 영향에 대하여서도 분석하였다.

2. 터널의 거동특성

터널 굴진에 따른 터널 주변 지반응력은 그림 1과 그림 2에서와 같이 응력의 재분배로 인해 종방향 아칭효과와 횡방향 아칭효과가 발생된다. 터널 굴착직후 새로 굴착된 공간은 록볼트나 슛크리트 라이닝 등의 지보가 설치되기 이전까지는 막장면의 압반에 의해 부분적으로 지지된다. 일반적으로 터널의 천단변위는 그림 2에

도시한 바와 같이 막장면에서 공동의 반경거리만큼 후방에서부터 시작되어 막장으로 가면서 점점 증가하여 막장으로부터 공동 직경의 1.5배 전방에서 최대변위에 도달한다. 공동의 막장면에서 반경방향 변위는 최대변위의 약 1/3정도가 된다(Hoek, 1998). 이러한 아칭효과로 인해 발생된 공동에서 반경거리 후방에 발생하는 변위를 선형발생변위라 하며 굴착이 실시된 이후에 발생하는 변위를 일반적으로 후행발생변위라 한다.

터널의 변위 곡선은 굴착에 의한 응력재분배와 암반의 변형특성에 의하여 크게 영향을 받는다. 막장과의 거리가 가까울 때는 터널굴착에 따른 응력재분배로 인한 탄소성 변위가 지배적이지만 막장과의 거리가 멀어짐에 따라 탄소성변위는 수렴되고 creep에 의한 유변학적(rheological)인 변위가 지배적 요소로 작용한다. 그러나 대부분의 creep변위는 탄소성변위와 비교해 무시할 수 있을 정도로 작다. 굴착이 계속적으로 진행될 때 해석하고자 하는 단면에서의 변위와 응력 상태는 막장과의 거리에 따라 변하게 된다. 굴착거리에 따라 해석 지점의 변위를 최종변위에 대한 비로 표시하여 정규화한 변위곡선(normalized displacement curve)을 구할 수 있다. 그림 3은 원형 단면의 터널을 굴착하는 경우에

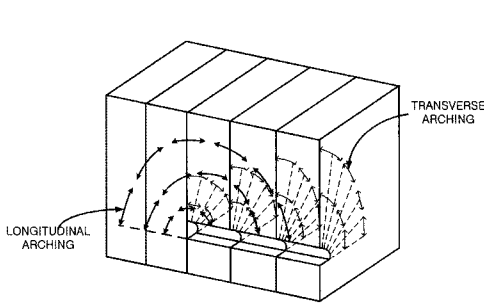


그림 1. 터널주위의 3차원 아칭효과(Gnilsen, R., 1989)

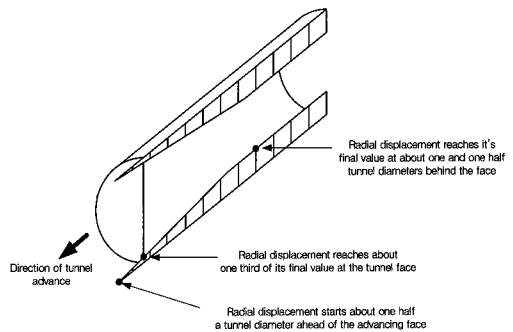
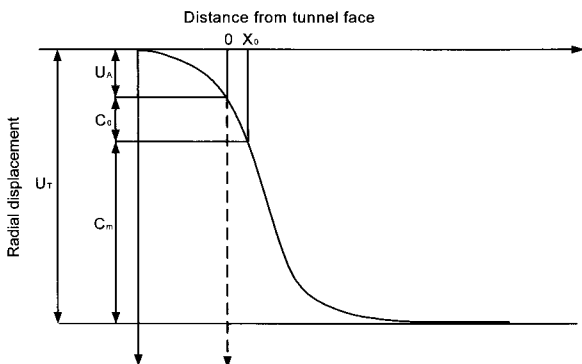


그림 2. 굴착되는 막장주위의 반경변위(Hoek, 1998)



- U_A : Displacement before tunnel face
- C_0 : Displacement before measuring
- U_T : Total displacement by excavation
- C_m : Measured displacement($C_m=U_T-U_A-C_0$)

그림 3. 막장면으로부터 거리와 변위곡선(Walter, 1990)

대해 천단변위와 막장으로부터의 거리와의 관계를 도사한 것이다. 측정된 변위를 모델함수에 대해 회귀분석함으로써 함수의 변수들을 결정할 수 있는데, 막장 굴착 이전의 변위인 U_A 와 막장 굴착 후 계측기 설치 이전의 변위인 C_0 를 고려하여 전체변위의 크기를 결정하여야 하며, 회귀분석으로 구한 최종변위 $C_T(=C_m+C_0)$ 에 굴착면 도달이전의 변위 U_A 를 더하여 전체변위 U_T 를 계산함을 나타내고 있다(Walter, 1990).

그림 3과 같이 굴착에 따른 터널의 거동을 측정하기 위해 터널내부에 설치되는 계측기의 설치시기는 일반적으로 터널을 굴착하고 1차 숏크리트가 타설된 후 막장에 근접하여 설치하며 통상 1회 굴진장의 중앙부에 설치한다. 따라서 막장 굴착 이전의 변위를 포함한 원지반의 침하 형상을 명확하게 측정할 수는 없는데 그림 4에서와 같이 크기의 차이는 있지만 통상 40%~50%의 침하가 발생된 후에야 계측기로부터 침하량을 측정할 수 있게 된다. 이로 인해 계측위치에서의 터널 굴착에 따른 실제의 전체 침하량을 추정하는 여러 가지 방법들이 연구 및 제안되고 있지만 아직까지 명확하게 침하량을 제안하는 방법은 없는 것으로 판단되며, 굴착이전에 발생된 터널 주변 지반의 침하가 인접구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 많지 않다.

3. 터널의 선행변위 계측결과 및 분석

본 연구대상 지역은 지하철 9호선 양천길과 공항로를 연결하는 백석길의 하부에 해당되며 정거장과 연결되는 터널구간은 748 m의 복선터널이다. 지층상태와 구조물의 특성을 고려하여 크게 아파트 하부통과구간, 백석길 터널, 사유지 통과구간으로 구분되며 본 연구에서는 아파트 구간에 대한 지반의 거동특성에 대해 분석하였다. 터널 굴착구간은 상·하반이 모두 풍화도 층을 통과하며 평균 토피고 1D 이하(10 m)의 천층터널로서 터

널의 직상부에 노후화된 건물과 (3~4)련의 하수 박스가 위치하여 지하수위계를 설치할 수 없었다. 그러므로 본 연구대상지역에서는 측정된 총 지표침하량 중에서 지하수위 저하로 인한 침하량의 정량적인 산정에는 어려움이 있어 지하수의 영향을 고려하지 않은 경우에 대한 계측결과를 산정하였다.

3.1 계측계획

본 연구에서는 계측기의 설치간격을 축소하여 계측기의 신뢰도와 정확성을 높이고자 하였다. 천단침하 및 내공변위계의 계측간격을 당초 10 m에서 4 m로 축소하였으며 연직방향의 침하량을 관리하기 위해 지표침하계의 수량을 당초 93개소에서 123개소로 증가시켰다. 또한 정확한 시공관리를 위해 측정빈도를 1회/일로 강화하여 측정하였고, 과다 변위 발생 지점에서는 2시간 간격으로 측정하여 경시변화를 주의 깊게 관찰하였다. 또한 정확한 측정을 위해 지표침하계는 터널의 굴진 전 70 m(7D) 전방에서 개시하였으며 천단 및 내공변위계의 경우 굴착 후 1시간 이내에 계측 핀을 설치하고 숏크리트의 양생시간을 고려하여 5시간 이내에 초기치를 확보하여 실제 발생된 선행 변위량을 파악하고자 노력하였다.

막장전방의 선행변위량을 파악하여 터널굴진 시 주변지반의 지표침하 및 상부구조물의 침하량을 예측하고, 상부구조물의 사용성에 영향을 미치지 않도록 보완대책 공법을 수립하기 위하여 수평경사계를 도입하여 막장전방에 설치하였고, 터널의 안정성 확보 및 역해석의 자료로 활용하였다.

그림 5와 같이 수평경사계의 설치를 위해 $\phi 135$ mm의 비트로 천공한 후 ABS 케이싱을 공내에 삽입하고, 공벽과 케이싱 사이에 그라우팅 호스를 이용하여 그라우트재를 주입한다. 그라우트재가 양생된 후 케이싱 내부에 설치된 wire rope를 당겨서 수평경사계를 삽입한

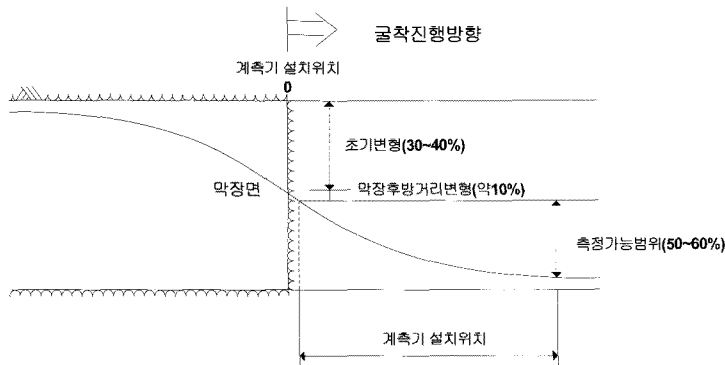


그림 4. 계측시점에 따른 측정가능 범위

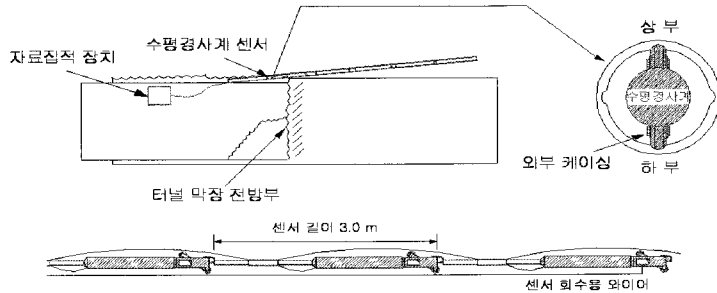
다. 수평 경사계 센서에서 측정된 계측 값은 자료 집적 장치와 무선 전송시스템에 의해 실시간으로 자료가 전송된다. 각 수평경사계 설치위치 간 중첩길이는 2 m로 유지하였으며, 계측기간은 상반굴착 완료시까지이고, 하반 굴착시의 발생변위량은 천단침하계로 대체하였다.

수평경사계의 설치현황은 그림 6과 같이 터널 중앙부 정점에서 강관단단보강이 완료된 이후에 천공각도와 동일한 8°의 경사로 천공하여 설치하였고 천공 깊이는 30 m

로 하여 천공한 후 3 m의 센서를 케이블을 통하여 10개를 조립하여 설치하였다.

측정구간은 90 m로 지반의 강도가 극히 낮고 터널까지의 심도가 얕으며 터널직상부에 아파트가 있어 이 구간을 굴착할 때의 안전을 확인함과 동시에 터널 거동을 미리 예측하여 안전하게 시공하기 위하여 아파트 하부 구간에 설치하였다.

수평경사계의 측정원리는 그림 7과 같이 막장 굴착전



3.0 m의 센서를 케이블을 통하여 연결하여 10 개의 센서를 조립.

그림 5. 수평경사계의 설치방법

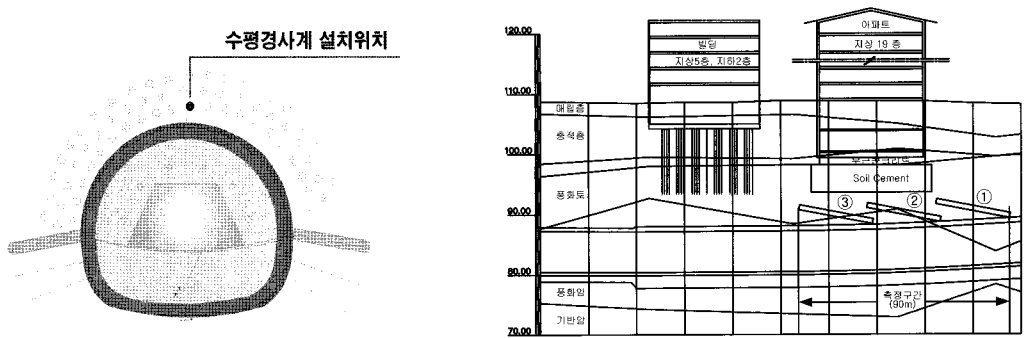
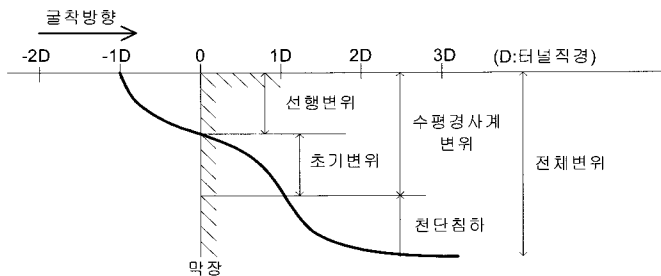


그림 6. 수평경사계의 설치 현황도



- ① 수평경사계의 변위 : 선행변위(막장굴착 전 발생변위)+초기변위(최초계측 지점사이의 발생변위)
- ② 계측 변위 : 천단 침하량(후행변위)
- ③ 전체 변위 : 선행변위 + 초기변위 + 계측변위(후행변위)
- ④ 선형침하 비율(%) = 수평경사계 변위 / 전체변위(수평경사계 변위 + 천단침하)

그림 7. 선행변위의 측정원리

(-1D)에 발생하는 선행변위와 굴착 직후의 최초 계측 시점 사이에서 발생하는 초기변위(1.5D), 그리고 계측기 설치 후에 막장의 전진에 따라 발생하는 계측변위 등으로 구분되며, 이를 이용하여 막장 면과 막장 전방에서 발생한 선행침하 비율을 측정하였다.

3.2 계측결과

그림 8은 막장 전·후방의 천단침하 특성을 요약한 선행변위 특성 그래프로 좌측부의 (-)는 굴착전의 선행변위를 나타내며 우측부 (+)는 굴착후의 후행변위를 나타낸다. 선행변위는 평균 (-) 20 mm가 발생되었고, 후행변위는 평균 (-) 22 mm가 발생되었다. 최종변위량은 평균 (-) 42 mm가 발생되었으며 그에 따른 선행침하비율은 46%가 발생되었다. 전방구간에 발생하는 선행변위는 변곡점의 위치가 11 m~12 m로 나타났으며 터널의 굴진 시 발생하는 응력해방으로 인해 터널 전방에 미치는 영향거리가 짧게 나타난 이유는 대구경 자천공 강관 다단 그라우팅 보강효과 때문인 것으로 판단되었다.

계측을 통한 수평경사계의 선행변위 양상은 터널굴진과 막장면에 근접한 위치에서 최대변위량이 발생되며 설치위치별 경시적인 거동 특성을 고찰해 보면 선행변위량이 크게 나타난 지점에서 전체 침하량도 크게 발생되었다.

4. 수치해석결과 및 분석

4.1 해석조건

본 연구에서는 유한차분방식(FDM, Finite Difference Method)에 근거하여 적용된 지반해석용 프로그램 FLAC-3D를 사용하여 탄소성 해석을 실시하였다. 지반의 이론적 해석 모델은 M-C모델(Mohr-Coulomb)을 적용하였으며 록볼트는 cable요소, 슛크리트는 shell요소를 적용하여 모델링 한 후 수행하였다. 지반의 해석범위는 높이 70 m, 폭 160 m, 터널굴진방향 길이는 120 m의 직육면체로 모델링 하였으며 현장과 동일한 조건에서 해석을 실시하기 위해 상부의 기존 구조물인 주유소, 빌딩, 아파트를 초기에 시공하여 발생한 변위를 초기화하는 것으로 고려하였다. 터널 평면선행형을 살펴보면 곡선반경이 170 m인 것으로 나타났지만 수치해석 상에서는 터널의 굴진방향을 일직선으로 가정하였다.

터널 상부 주변 구조물의 위치는 터널굴착 진행방향과 평행하게 모델링하였으며, 굴진장은 2 m로 해석을 실시하였다.

표 1과 같이 기존 설계된 자료를 통해 산정된 초기 지반정수를 기준으로 수정하여 역해석을 수행하였다. 슛크리트의 두께는 200 mm이며 경화단계에 따라 연성 슛크리트와 경성 슛크리트로 나누어 적용하여 표 2와 같이 물성치를 적용하였다. 4.0 m의 록볼트를 터널 하부 좌, 우측면에 모델링하여 표 3과 같은 물성치를 적용

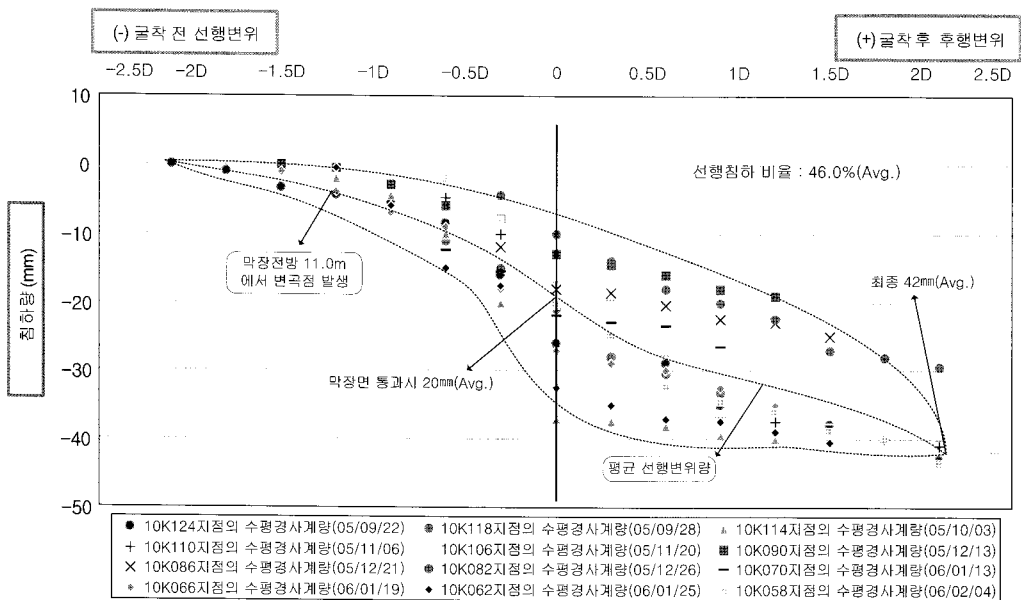


그림 8. 연구대상구간 하부 통과구간의 선행변위 특성

하였다.

그림 9와 같이 지상 5층, 지하 2층으로 구성된 빌딩의

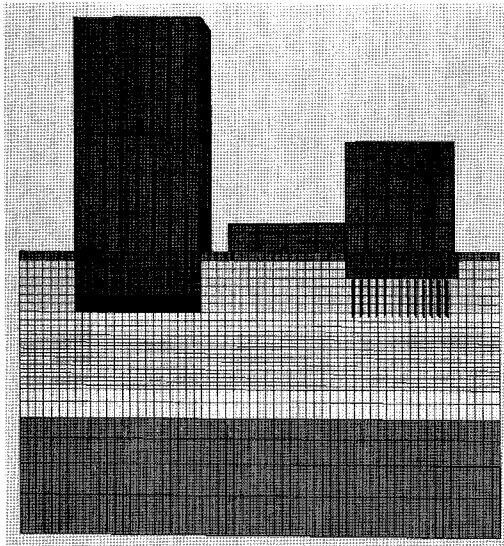


그림 9. 구조물 및 기초 모델링

기초를 PHC 말뚝으로 묘사하여 적용하였다. 그리고 지상 19층, 지하 2층으로 구성된 아파트 기초의 경우 4.5 m의 Soil Cement 영역을 수치해석에서는 풍화암 상당 물성치를 적용함으로써 지반개량 효과를 고려하였으며, 상부구조물의 상재하중은 단위중량을 $566.63(\text{kg}/\text{m}^3)$ 으로 모델링하여 표 4와 같이 적용하였다.

4.2 역해석 절차 및 물성치 산정

역해석이란 일반적으로 정해석(Forward analysis)의 수치해석 결과가 현장계측 자료에 일치하도록 수치해석 모형의 미지 매개변수(Unknown parameter)를 정의하는 해석과정을 말한다.

직접법(Direct search method)은 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 최소화 될 때 까지 수치해석 과정의 반복연산을 통하여 역해석 대상인 미지 매개변수를 수정해 나가는 방법이다. 이 방법은 정해석 과정을 통해 해석결과와 계측결과와의 차이인 오차함수를 최소화 하여 허용범위에 수렴할 때까지 반복연산과정이 수행되도록 되어있다. 따라서 역산법에 비하여 계산시

표 1. 기존 설계에 적용된 지반 정수

지층종류	분포심도(GL.-m)	단위중량(kg/m^3)	탄성계수(MPa)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	포아송비
매립층	3 m	1,800	9.81	-	30	0.35
층적층	6 m	1750~1900	5.88~29.42	0~49	0~35	0.35~0.4
풍화토	6 m	1,900	196.13	19.61	30	0.35
풍화암	25 m	2,000	343.23~490.33	49.03	35	0.33
연암	30 m	2,300	1470.99	196.13	35	0.3

표 2. 슛크리트 물성치

두께(cm)	포아송비		탄성계수(kN/m^2)		단면2차모멘트(m^4)
	soft	hard	soft	hard	
20	0.2	0.25	5e6	5e7	1.3e-3

표 3. 록볼트 물성치

록볼트 종간격(m)	면적(m^2)	탄성계수(kN/m^2)	인장항복강도(N)
1	4.9e-4	2.1e8	1e5

표 4. 상부구조물의 적용 물성

구분(구조물)	적용물성치		
	탄성계수(Pa)	포아송비	단위중량(kg/m^3)
주유소	5e10	0.2	566.63
빌딩	5e10	0.2	566.63
아파트	5e10	0.2	566.63

간이 길다는 단점이 있으나 해석대상의 비선형성 등 다양한 문제에 적용할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 시공중 계측에서 얻어진 변위값을 이용하여 지반의 물성치를 변경하면서 계측값과 가장 근사한 물성치를 추정하는 직접법을 채택하여 연구를 수행하였다. 그림 10은 본 연구에서 사용된 역해석을 순서도화 한 것이다.

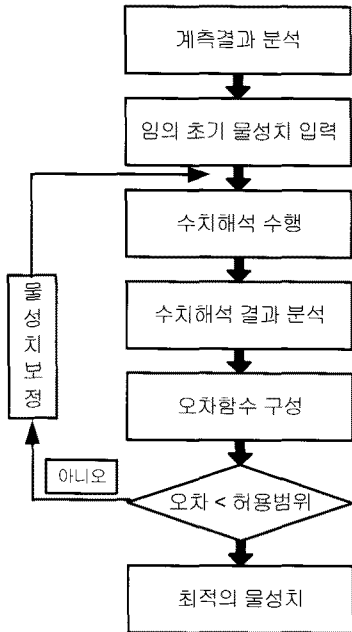


그림 10. 역해석 순서도

4.3 해석결과 분석

그림 11은 기존설계 지반정수에 따른 거동특성으로 선행변위는 평균 5.56 mm가 발생되었으며 최종침하량은 평균 15.96 mm가 발생되어 선행변위비율은 평균 35%의 거동을 보였다. 기존 설계자료를 통해 발생한 선행변위는 실제 계측데이터보다 10.49 mm, 최종 전체 침하량은 평균 20.31 mm가 작게 발생되었다.

기존설계 지반정수를 바탕으로 해석을 실시한 결과변위가 실제 계측데이터보다 작게 나타나 수치해석결과와는 많은 차이를 보였다. 그러므로 본 연구와 같이 원지반의 물성치를 정확하게 추정하지 않으면 계측자료 분석결과에 많은 오류가 발생 할 수 있다. 이러한 문제점을 최소화하고 보다 정확한 계측자료의 분석을 위하여 시공중 천단침하 계측데이터를 기준으로 하여 적절한 지반 물성치를 표 5와 같이 산정하였다.

현재 시공시 계측된 자료를 이용하여, 지반-구조물의 변형과 직접적인 관계인 입력 매개변수 중 가장 변형에 민감도가 높은 원지반의 물성치중 탄성계수, 단위중량 및 포아송비를 추정하였다. 해석값이 계측치와 유사한 값을 가질 경우, 이때의 지반 물성치를 실제 지반의 물성치로 간주하였다.

그림 12는 역해석 결과에 따른 거동특성으로 선행변위 특성 그래프는 막장면 통과시의 천단침하량이 실측치의 경우 평균 20 mm가 발생하였으나 해석결과 15 mm가 발생되었다. 최종변위량은 실측치보다 평균 6.5 mm 크게 발생하였다.

그림 13과 그림 14는 실제 계측된 결과와 해석결과의 선행변위 전체침하량을 비교한 결과이다. 비교 결과 설치위치별 선행변위의 차이는 10K 116지점에서 가장 많

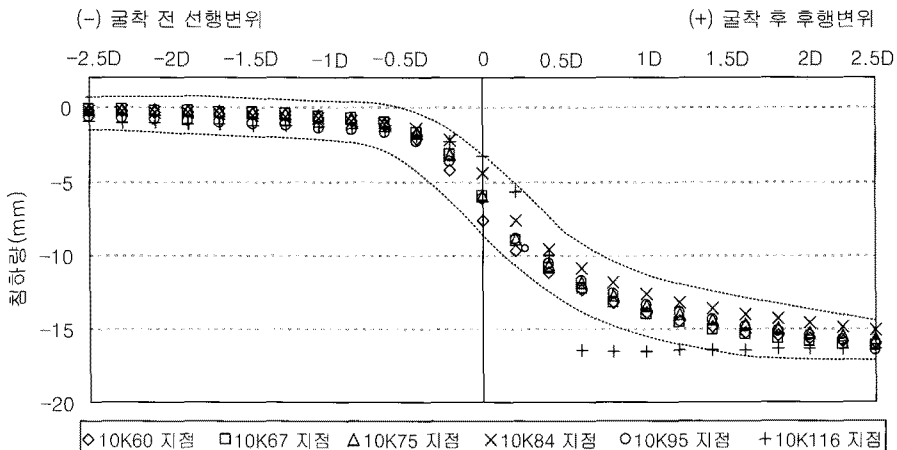


그림 11. 기존 설계 지반정수에 따른 거동특성

표 5. 역해석을 통해 산정된 최종 지반 물성치

지층종류	분포심도 (GL.-m)	단위중량 (kg/m ³)	탄성계수 (MPa)	점착력 (kPa)	인장강도 (kPa)	내부마찰각 (°)	포아송비
매립층	3m	1,800	2.10	7.36	3.73	30	0.30
층적층	6m	1,900	5.88	14.72	7.35	35	0.28
풍화토	6m	1,900	39.24	19.62	9.81	30	0.26
풍화암	25m	2,000	83.35	49.05	24.25	35	0.23
연암	30m	2,300	294.17	196.20	98.10	35	0.20

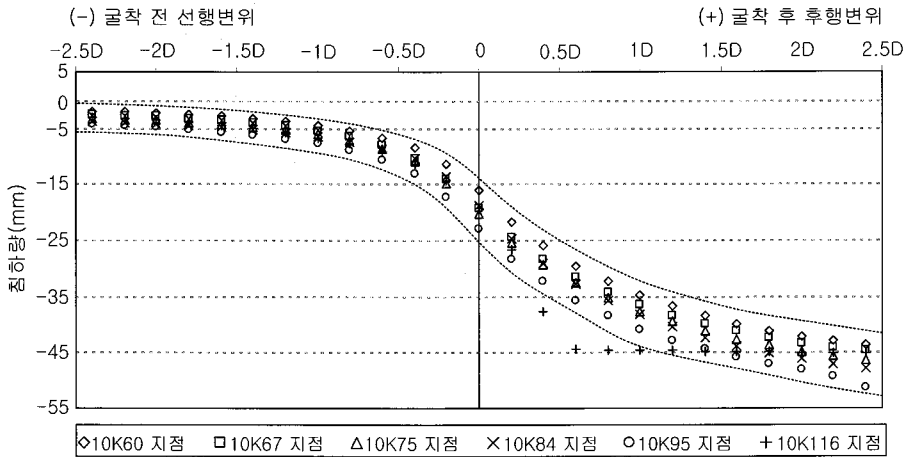


그림 12. 역해석결과에 따른 거동특성

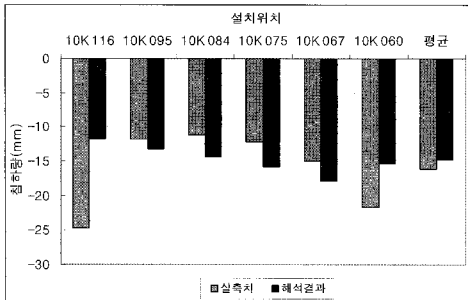


그림 13. 실측치와 해석결과의 선형침하량

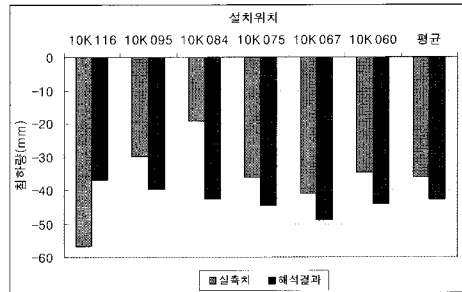


그림 14. 실측치와 해석결과의 전체침하량

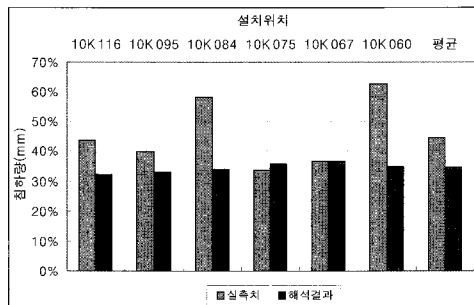


그림 15. 실측치와 해석결과의 선형침하량 비율

은 12 mm의 차이를 보였으며 10K 095지점에서 가장 작은 1.3 mm의 차이를 나타냈다. 실측치와 해석결과의 평균 선행변위는 1.3 mm의 차이를 보였다.

전체침하량도 선행변위와 마찬가지로 10K 116지점에서 가장 많은 19 mm의 차이가 났으며 10K 067지점에서 가장 작은 7.9 mm의 차이를 보였다. 평균 전체침하량의 차이는 6.5 mm로 선행변위 보다는 많은 차이가 났다. 설치위치별 경시적인 거동 특성을 고찰해 보면, 선행변위량이 크게 나타난 지점에서 전체 침하량도 크게 발생되었다.

그림 15는 실측치와 해석결과의 선행침하 비율을 비교한 결과이다. 선행 침하비율은 설치위치마다 차이가 있지만 실측치의 평균 선행침하비율은 44%이며 해석 결과는 이보다 9% 작은 35%의 결과를 보였다.

그림 16은 터널의 굴착에 따른 인접구조물의 침하 거동형태로 말뚝기초가 시공된 구조물인 경우이다. 계측 지점은 구조물 중앙에서 터널중심에 가까운 지점을 A 점, 구조물의 정중앙을 B점, 터널중심과 가장 먼 곳을 C점으로 하여 터널 굴착시 구조물의 거동을 분석하였다. 터널의 중심과 가까운 A지점의 침하 거동은 터널 굴착으로 인하여 초기에 급속한 변위가 발생되다가 구조물 하부를 지날 때 부터 직선적인 거동이 발생되었으며 터널의 중심과 거리가 가장 먼 C지점의 침하 거동 양상은 초기부터 직선적인 거동 형태를 보이며 침하가 발생되었다.

구조물의 평균 침하량은 3 mm, 부등침하량은 7 mm가 발생되었으며 일반적인 철골구조물의 허용 변위량인 25 mm~50 mm와 부등침하량 1/500의 기준에 비해 낮은 값을 보여 안정한 것으로 나타났다.

터널의 굴착이전에 발생된 구조물 기초의 변위는 터

널의 중심과 가까운 A지점의 경우 1.39 mm로 전체변위 7.24 mm에 대한 변위비는 19%로 나타났으며 C지점의 경우 0.15 mm로 전체변위 0.25 mm에 대한 선행 변위비는 61%로 발생하였다. 터널의 천단변위 결과에 의한 선행변위비와 비교해보면 A지점은 계측결과보다 25%, 수치해석결과 보다는 16%작게 발생되었으며 C 지점은 계측결과 보다 17% 수치해석 결과보다는 26% 크게 발생되었다. 구조물의 선행변위비를 비교한 결과 터널의 중심과 가까운 지점일수록 선행변위비가 작게 발생됨을 알 수 있었다.

그림 17은 터널의 굴착에 따른 인접구조물의 침하 거동형태로 직접기초가 시공된 구조물인 경우이다. 계측 지점은 말뚝기초 구조물과 같은 위치에서 구조물의 거동을 분석하였다. 터널의 중심과 가까운 A 지점의 경우 침하 거동 형태는 터널의 천단변위 거동 양상과 유사하게 발생되었으며 터널의 중심과 거리가 가장 먼 C지점의 경우에는 침하 거동 양상이 직선적인 거동 형태를 보였다. 구조물의 평균적인 침하량은 11.4 mm가 발생되었으며 부등침하량은 8.52 mm로 일반적인 철골구조물의 허용 변위량인 25 mm~50 mm와 부등침하량 1/500의 기준에 비해 낮은 값을 보여 안정한 결과를 보였다. 터널의 굴착이전에 발생된 구조물 변위는 터널의 중심과 가까운 A지점의 경우 3.52 mm로 전체변위에 대한 선행 변위비는 22%로 발생하였으며 C지점의 경우 2.19 mm로 전체변위에 대한 선행변위비는 30%가 발생하였다. 터널의 천단변위 결과에 의한 선행변위비와 비교하면 A지점은 계측결과에 22%, 수치해석결과에 13% 작게 발생되었으며 C지점은 계측결과에 14%, 수치해석 결과에 비해 5% 작게 발생되었다.

계측으로 구조물 기초의 실제적인 침하량을 계측하기

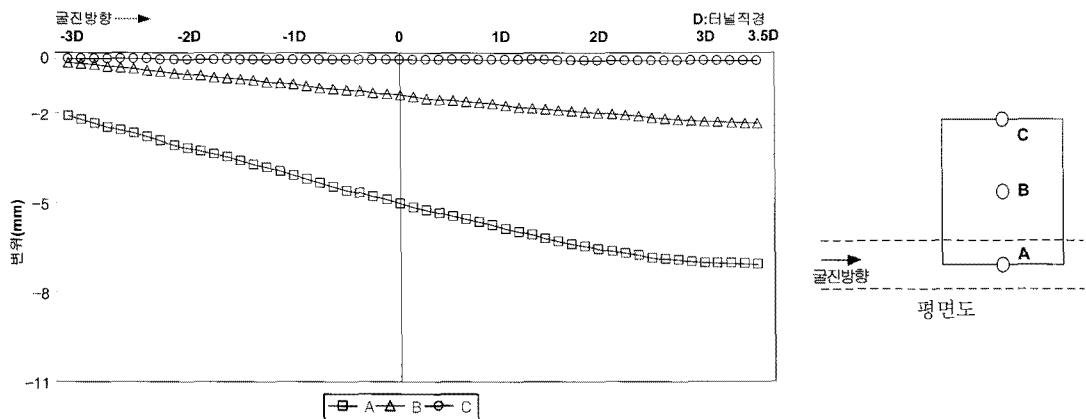


그림 16. 말뚝기초가 시공된 구조물의 침하거동형태

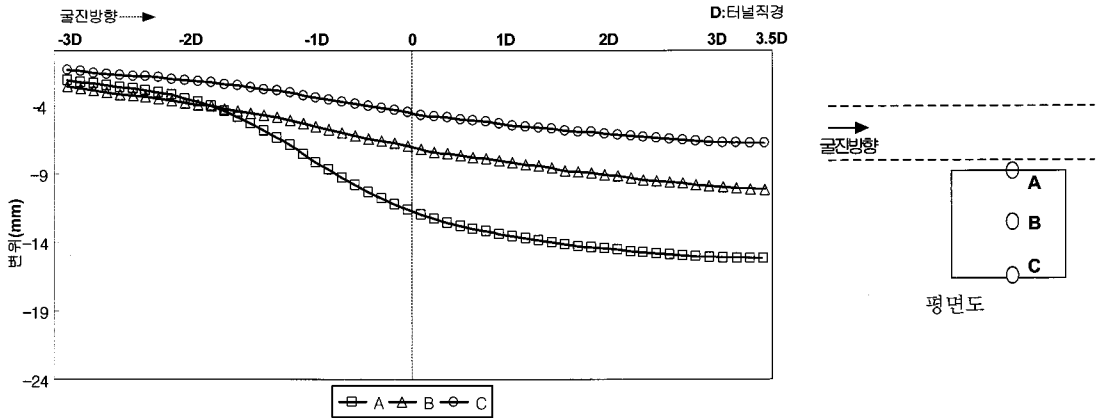


그림 17. 직접기초가 시공된 구조물의 침하거동형태

에는 어려움이 있으나 수치해석을 통해 건물의 침하를 예측한 결과, 도심지 천층터널의 경우 터널과 인접한 구간의 직접기초는 터널의 천단변위 거동양상과 동일한 거동을 보였으나 터널과 먼 지점의 구조물의 침하는 직선적인 거동 형태를 보였다. 그리고 말뚝기초는 터널의 중심과 가까운 지점의 경우에는 초기에 급속한 변위가 발생이 되지만 막장면 통과후 부터는 직선적인 거동을 보여 직접기초와는 거동의 형태가 상이한 것으로 판단되었고 침하량도 작게 발생되었다. 수치해석에 의한 기초의 침하 거동 특성을 분석한 결과 실제 구조물의 거동이 수치해석과 같은 형태를 보인다면 말뚝기초에 비해 직접기초인 경우 구조물의 부등침하에 대해 매우 취약하며 침하변위도 크게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 구조물이 직접기초인 경우 하부 토사터널 굴착 시 추가적인 계측을 통해 구조물의 거동 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도심지의 토사터널의 거동특성을 파악하기 위해 수평경사계를 설치하여 계측과 수치해석을 통해 선행발생변위와 구조물 기초의 거동특성을 분석한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수평경사계(30 m 길이, 3 개소)를 이용하여 막장전방의 선행변위를 측정된 결과, 수평경사계의 선행변위 양상은 터널 굴진과 함께 막장면과 근접된 위치에서 최대변위량이 발생되며 설치위치별 경시적인 거동 특성을 고찰해 보면 선행변위량이 크게 나타난 지점에서 전체 침하량도 크게 발생되었다.
2. 기존설계에서 적용한 지반정수를 통해 수치해석을

실시한 결과 계측결과에 비해 선행변위는 10 mm, 전체침하는 20 mm, 선행침하비율은 9% 작게 나타나는 결과를 보였다. 계측치와 유사한 거동특성을 찾기 위해 지반정수를 수정하여 역해석을 실시한 결과 선행변위는 1.3 mm 작게 나타났으며, 전체침하는 6.5 mm 많게 나타났다. 해석결과 선행침하비율은 9% 작게 발생되었다.

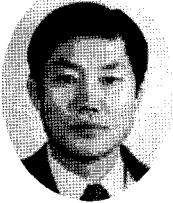
3. 막장면 전방에서 발생하는 선행 천단침하량은 터널 굴착 시 상반에서 발생하는 전체 천단침하량의 약 46.52%이며, 총 천단 침하량의 37.03%이다. 그러므로 수평경사계를 이용한 막장전방의 선행변위 측정은 연약대를 통과하는 NATM 터널의 시공 시에 지표침하의 관리와 주변지반의 변위억제 및 터널 지보재의 보완대책 수립 등에 효과적으로 사용될 수 있으며, 누적된 경험을 바탕으로 터널 굴진 시 간과될 수 있는 선행침하량의 측정을 통한 막장 전방의 불확실성을 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 터널의 굴착에 따른 인접구조물 기초의 거동특성을 수치해석을 통해 예측한 결과 말뚝기초의 경우 침하 거동특성이 비교적 직선적인 형태를 보이나 직접기초에서는 터널의 중심과 가까운 지점의 경우 터널의 천단변위와 같은 형태의 거동특성을 보이고 터널의 중심과 비교적 먼 구간의 경우에는 직선적인 거동형태를 보이며 침하가 발생되었다.
5. 구조물 기초의 경우 말뚝기초에 비해 직접기초가 터널의 굴착에 따른 지반의 침하에 영향을 크게 받는 것으로 예측되어 침하량과 부등침하량이 비교적 크게 발생되므로 터널의 시공 시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강석기, 권형중, 김용준, 김치환, 2005, 토사터널에서 구조물 하부통과 시공사례, 대한토목학회지, pp.103 ~ 116.
2. 김광엽, 김창용, 홍성완, 배규진, 서용석, 전제성, 2003, 수평경사계를 이용한 터널 내 선행변위 측정에 관한 연구, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp.4878 ~ 4883.
3. 신동오, 임한욱, 김치환, 1998, NATM 시공에 의한 터널굴착 시 선행변위 추정에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 8, pp.87 ~ 95.
4. 천병식, 1999, 지반공학 이론과 실제, 구미서관, pp.572.
5. Gnilsen., R., 1989, Numerical Methods, Underground Structures Design and Instrumentation, Elsevier.
6. Hoek. E., 1998, Tunnel Support in Weak Rock, Proc. Regional Symposium, on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Nov 20-22, pp.1 ~ 12.
7. 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.
8. Walter Wittke, 1990, Rock Mechanics Theory and Applications with Case Histories, Spring-Verlag, pp.444 ~ 471.

김 주 화

1971년 한양대 공학사 토목공학 전공
2005년 수원대 석사 토목공학 전공



Tel: 02-2011-7022
E-mail: jukim@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 토목사업본부 고문

채 영 수

1974년 고려대학교 토목공학 공학사
1977년 고려대학교 지반공학 공학석사
1985년 고려대학교 지반공학 공학박사



Tel: 031-220-2318
E-mail: yschae@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

박 연 준

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사



Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수