

터널굴착 중 발생하는 변위 및 응력의 변화양상에 대한
기초적인 연구
**A Basic Study on Change Aspect of Displacement and Stress
in NATM Tunnel Excavation**

정인철* 박종관** 이준석*** 이승도*
Jeong, In Cheol Park, Jong Kwan Lee, Jun Seok Lee, Seung Do

ABSTRACT

In Korea, NATM (New Austrian Tunneling Method) has widely been used in order for constructing tunnels. The major support materials of the method are the shotcrete and rockbolt together with the arch-shaped tunnel section, which ensure the inherent strength of the rock masses. One of the most important features of the method is the feedback system between tunnel analyses and measurements, such as tunnel displacement and support stresses.

This study, therefore, attempts to examine the difference in displacement and stresses between numerical results and measurements in order for more practical design and construction of tunnels.

1. 서론

산업 발달로 인한 물류 이동 수요의 증가와 산악지형이 발달한 국내 상황으로 인해, 철도공사의 수행에 있어 지형과 환경의 훼손을 최소화하기 위한 터널공사의 필요성이 증가하고 있다. 국내 터널은 아치형상의 터널단면 자체가 보강 역할을 하는 동시에 숏크리트와 록볼트를 지지보재로 사용하는 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법이 일반적으로 적용되고 있으며, 이 공법의 주요 특징은 계측을 통한 피드백을 실시하여 지보패턴 변경 및 보강대책 선정이 이루어지는 것이다. 따라서 설계와 시공 단계에서의 정확한 변위와 지보재 응력 예측이 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 터널 설계 시 계산된 터널변위와 지보재 응력의 결과를 실제 터널 굴착 시 발생한 터널변위와 지보재 응력의 계측치를 비교하여 NATM 터널의 설계와 시공에 있어서의 차이점을 분석하고, 이를 통해 설계 및 시공의 상호 보완점을 이해하여 보다 합리적인 터널설계와 효율적인 터널시공에 기여하는 데 있다.

* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부, 정회원
** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 정회원
*** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, 정회원

2. 기초 이론

2.1 터널 설계 및 변위 예측

터널 설계는 크게 1단계 기본계획, 2단계 실시설계, 3단계 구조해석으로 구분할 수 있다. 기본계획은 터널의 환경기준 재정립, 소요 환기량 산출방식 검토 및 선정, 적정한 부대시설 계획, 터널 굴착공법 검토 등으로 구성된다. 실시설계는 내공단면 최적설계, 지보패턴 결정, 방수 및 배수 설계, 굴착 및 계측 설계, 지형 및 지질조사, 암반 분류 등의 항목을 고려해야 한다. 구조해석은 전산 프로그램을 이용한 터널 수치해석, 라이닝 해석, 옹벽 해석 등으로 구성된다.

각 단계 중 실시설계 단계에서 지형 및 지질조사에 근거한 지반 물성치, 초기 응력 등과 더불어 암반 등급을 결정하여 적정한 지보패턴을 검토할 필요가 있다. 특히 NATM 공법을 적용하는 경우에는 발파 공법 및 효과적인 지보재의 설치시기 등이 터널변위와 지보재 응력 거동에 근거하여 결정되기 때문에 공학적으로 타당하고 정밀한 검토가 필요하다.

시공단계에서는 사전설계에 따라 시공을 진행하면서 시공 중 직접 지반의 거동을 계측하고 그 결과를 설계치 및 시공관리치와 비교하여 안정 상태를 판단한다. 지반의 거동이 설계치와 시공관리치와 비교하여 문제가 발생할 경우 조속히 적절한 보강조치를 시행하는 동시에 추가 지반조사나 설계 계산에 필요한 여러 가지 공학적 특성들에 대한 재검토와 현상 분석을 실시하여야 한다. 이를 통해 사전설계를 변경하여 지보패턴 및 굴착공법을 수정함으로써 안전하고 경제적인 터널 시공을 달성할 수 있다.

2.2 터널 계측

터널 굴착에 의해 발생하는 내공변위를 측정하기 위한 일반적으로 계측은 시공과 병행하여 실시하며 계측결과는 즉시 시공이나 설계에 반영되어야 한다. 계측의 목적은 지반거동의 관리, 지보공 효과 및 안정상태 확인, 근접 구조물의 안정성 확인, 장래 공사의 자료축적 등에 있다. 이 때 사전 조사를 기초로 하여 계측의 목적, 터널의 용도와 규모, 원지반 조건, 주변 환경 조건 등을 충분히 고려하여 설계 및 시공에 적용될 수 있는 계측계획을 수립하여야 한다.

계측항목은 일상계측과 정밀계측으로 구분된다. 일상계측은 일상의 시공관리를 위하여 반드시 실시하여야 할 계측항목으로써 갱내 관찰 조사, 내공변위 측정, 천단침하 측정 등이 해당된다. 정밀계측은 일상계측에 추가해서 실시하는 계측항목으로써 지표 및 지중 침하측정, 지중변위 측정, 숏크리트 응력 측정, 록볼트 축력 측정, 원지반 시료시험 등이 있다. 이러한 계측항목에 대해 단계별 관리지침이 필요하며 계측결과를 피드백(feedback)하여 현재의 굴착과 관련한 제반사항을 검토하여 터널시공이 경제적이고 최적화되도록 한다(그림 1).

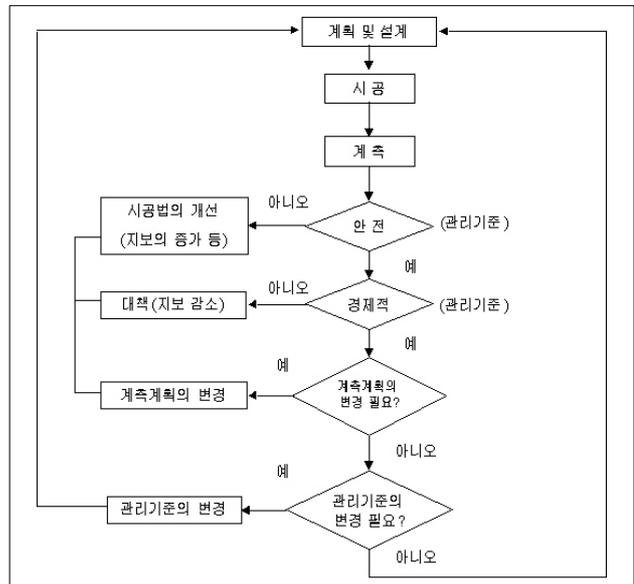


그림 1 터널계측의 과정과 역할

3. 터널설계 검토

3.1 터널설계

본 연구를 위해 적용된 터널의 설계 시 사용된 실내 암석 시험결과와 적용 지반 특성치를 정리하면 표 1과 2와 같다.

표 1 실내 암석 시험 결과

구 분	화 강 압	호 온 펠 스	퇴 적 압	비 고
탄성계수(kg/cm ²)	477,700	433,300~453,300	435,000~521,000	경 압
점 착 력(kg/cm ²)	330	250~340	240~420	경 압
내부마찰각 (deg)	51.5	55.1~56.8	47.7~58	경 압

표 2 설계 시 적용된 지반 특성치

구 분	지반등급 1	지반등급 2	지반등급 3	지반등급 4	지반등급 5	지반등급 6
RMR	100~81	80~61	60~41	40~21	20 이하	토사층
Q	40 이상	40~10	10~1	1~0.1	0.1 이하	
단위중량(t/m ³)	2.7	2.6	2.5	2.3	2.0	1.8
탄성계수(t/m ²)	2,000,000	1,000,000	500,000	200,000	60,000	5,000
마찰각(deg)	45	43	40	35	33	30
점착력(t/m ²)	150	100	80	50	10	0.5
프와송비(v)	0.18	0.20	0.24	0.27	0.30	0.35
투수계수(cm/sec)	1.0e-6	5.0e-6	2.0e-5	1.25e-4	1.50e-4	

수압 파쇄 시험 결과 측압계수는 심도 90~100m 구간에서 1.0~2.0으로 나타났다. 2차원 터널 해석 시 풍화암 이상(암반등급 1~5)은 1.0, 1.5, 2.0의 측압계수를 적용하였고 토사구간(암반등급 6)에서는 0.5를 적용하였다. 3차원 해석을 위한 종방향 측압계수는 1.5를 적용하였다.

3.2 지보패턴별 터널변위 및 지보재 응력

본 연구에서는 지보타입 2구간과 지보타입 4구간에 대해 굴착단계를 고려한 2차원 및 3차원 터널해석을 실시하여 그 결과를 시공 계층치와의 비교를 시도하였다. 터널해석은 실제 시공단계를 모사하기 위해 지반형상, 지반 및 지보재 특성치, 시공순서 등을 고려하였다. 특히, 2차원 해석에서 굴착단계를 모사하기 위해 지보타입 2구간과 4구간에 대한 굴착→연성 쏿크리트(Soft Shotcrete)→경화 쏿크리트(Hard Shotcrete)의 하중분담률을 각각 70%→15%→15%와 50%→25%→25%로 적용하였다.

1) 지보타입 2구간

지보타입 2구간의 굴착은 상반과 하반으로 나누어 분할굴착을 하고 굴진장은 상반과 하반이 각각 2m 와 4m 이다. 지보재는 슛크리트 8cm(두께)와 록볼트 4m(길이)의 종방향과 횡방향 간격 2m를 적용하였다(표 3).

표 3 지보타입 2구간의 지보패턴

구 분			해 석 단 면
굴착공법	상하반 분할굴착		
지 보 패 턴	굴진장 (상반/하반)	2m/3m	
	슛크리트 두께	8cm	
	록볼트 길이 록볼트 간격	L=4m CTC 2×2m	

2차원 해석 결과, 측압계수가 커질수록 천단변위는 감소하고 내공변위가 증가하는 경향을 보였고, 천단변위는 하반굴착에 의한 영향이 매우 적은 것으로 나타났다. 3차원 터널 해석 결과, 굴착면 전방의 선행 천단변위가 약 0.4mm 발생하고 굴착 후 1.0~1.5mm 의 추가 변위가 발생하는 것으로 나타났으며 1회 굴진장이 2m 인 경우 굴착면 후방 약 15m 지점부터 천단변위가 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 1일 2회 발파를 기준으로 굴착 후 약 3일이 경과한 후 천단변위가 수렴함을 의미한다. 지보타입 2구간의 터널해석 결과를 정리하면 표 4와 같다.

표 4 터널변위 및 지보재 응력 해석결과(지보타입 2구간)

구 분	천단변위 (mm)	내공변위 (mm)	슛크리트 휨 압축응력 (kg/cm ²)	록볼트 축력 (ton)
2차원 해석	2.51	5.18	12.4	6.14
3차원 해석	1.91	3.50	35.9	1.99

2) 지보타입 4구간

지보타입 4구간의 굴착은 지보타입 2구간과 동일하게 상반과 하반으로 나누어 분할굴착을 하고 굴진장은 상반과 하반이 각각 1.2m 와 2.4m 이다. 지보재는 슛크리트 16cm(두께)와 록볼트 5m(길이)의 종방향과 횡방향 간격을 각각 1.2m와 1.5m로 적용하였다(표 5).

터널해석 결과, 측압계수가 커질수록 천단변위는 감소하고 내공변위가 증가하는 경향과 천단변위는 하반굴착에 의한 미미한 영향이 지보타입 2구간과 동일하였다. 3차원 터널 해석 결과, 굴착면 전방의 선행 천단변위가 약 1.2mm 발생하고 굴착 후 6.0~6.5mm 의 추가 변위가 발생하는 것으로 나타났으며 지보패턴 2구간보다 약 5m 정도 빠르게 천단변위가 수렴하였다. 지보타입 4구간의 터널해석 결과를 정리하면 표 6과 같다.

표 5 지보타입 4구간의 지보패턴

구 분			해 석 단 면
굴착공법	상하반 분할굴착		
지 보 패 턴	굴진장 (상반/하반)	1.2m/2.4m	
	췁크리트 두께	16cm	
	록볼트 길이 록볼트 간격	L=5m CTC 1.2×1.5m	

표 6 터널변위 및 지보재 응력 해석결과(지보타입 4구간)

구 분	천단변위 (mm)	내공변위 (mm)	췁크리트 휨 압축응력 (kg/cm ²)	록볼트 축력 (ton)
2차원 해석	5.24	6.44	6.33	6.08
3차원 해석	7.01	10.03	63.0	5.30

4. 시공 중 터널변위 및 지보재 응력 계측 비교

본 연구의 시공 중 터널계측은 지속적인 관찰 및 기록이 가능한 정밀계측(B 계측) 위주로 실시하고 분석하였다. 계측항목은 지중변위, 췁크리트 응력, 록볼트 축력이며 계측기는 상행선과 하행선에 각각 10개 단면과 11개 단면에 설치하였다.

터널 시공 중 실시된 계측에 의한 터널변위, 췁크리트 응력, 록볼트 축력을 지보타입 2구간과 4구간에 대해 정리하여 해석 결과와 비교하였다. 계측된 터널의 천단변위는 하반굴착에 있어서 해석결과와 반대의 경향을 보이고 수렴거리에 있어서도 터널해석 결과와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(표 7). 췁크리트 응력에 있어서는 하반굴착의 영향보다는 최대값의 범위가 해석결과와 차이를 보이고 있으며, 록볼트 축력은 하반굴착 이후 축력의 증가량 및 최대값에 있어서 계측치가 해석치보다 작게 나타났다(표 8).

표 7 해석 및 계측의 천단변위 비교

구 분	지보타입	하반굴착 이후	수렴거리	수렴값
해석 결과	2구간	감소	15m	2.3~2.5mm
	4구간	감소	12m	4.2~5.2mm
계측 결과	2구간	0.7mm 증가	100m	0.23~0.29mm
	4구간	0.12mm 증가	45~80m	0.06~1.25mm

표 8 해석 및 계측의 지보재 응력 비교

구 분	지보구간	숏크리트 응력 (kg/cm ²)		록볼트 축력 (ton)	
		하반굴착 이후	최대값	하반굴착 이후	최대값
해석 결과	2구간	감소	12.4	1ton 증가	6.14
	4구간	감소	6.33	1ton 증가	6.08
계측 결과	2구간	감소	21.93	약 0.1ton 증가	0.86
	4구간	증가	18.4	약 0.4ton 증가	0.98

5. 결론

본 연구에서는 철도 터널에서의 내공변위와 지보재 응력에 대해 설계 해석과 시공 중 계측결과를 비교 분석하여 설계단계 및 현장 계측단계에서 개선되어야 할 문제점을 살펴보고자 하였다. 계측과 관련된 해석의 문제를 연구하기 위해서는 해석방법, 물성치 결정, 초기응력 결정 등에 대한 충분한 논의가 선행될 필요가 있다. 그러나 이에 대한 연구를 위해서는 광범위한 시공 자료가 필요하며, 추가적인 연구를 통해 보완될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 상하반 분할굴착에 있어서 해석결과는 하반굴착 후 천단변위가 감소한 반면 계측결과는 천단변위가 증가하였다. 천단변위 수렴거리는 계측결과가 해석결과의 약 4~8배로 나타났으며, 수렴값에 있어서는 해석결과가 계측결과의 약 10배 이상으로 나타났다. 이 결과는 하반굴착이 천단변위에 미치는 영향에 비중을 두어 효과적인 하반굴착 및 보강방법을 검토해야 할 필요성을 의미한다. 또한 터널 시공 시 계측기는 굴착 후 가능한 한 조기에 설치하여 초기값을 측정하고 이를 바탕으로 피드백이 실시되어야 할 것이다.

2) 하반굴착이 숏크리트 응력에 미치는 영향에 있어서는 해석결과와 계측결과의 차이가 비교적 크지 않았으나 최대값에 있어서는 계측결과가 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 터널의 실제 단면이 해석단면보다 국부적인 응력집중에 취약하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 설계 시 이를 고려한 안전을 차원의 보강방법이 제시될 필요성이 있을 것이다.

3) 록볼트의 경우, 하반굴착의 영향은 해석결과에 더 크게 나타나고 있으며 최대값도 해석결과가 계측결과의 약 6배 이상으로 계산되었다. 이는 수치해석의 경우 록볼트가 지반과 완벽한 일체 거동을 보장하는 반면에 실제 시공된 록볼트는 여러 가지 이유에 의해 지반과 일체 거동이 불가능하기 때문으로 사료된다.

참고문헌

1. 이희근 (1995) “터널과 지하공간 굴착공학” 구미서관
2. 정소걸, 류창사, 최성웅 (1998) “지하공동 굴착 설계 및 시공 시 계측과 해석기술” 건설기술세미나
3. 문상조, 장석부, 정동호, 김선홍 (1999) “터널의 설계개념과 안전한 터널시공을 위한 고려사항” 유신기술회보