

노후터널 확대시 기존터널 지보재 응력 변화에 대한 분석

Analysis on the behavior of a old tunnel supporting system by enlargement

백기현¹⁾, Baek-Ki Hyun, 김웅구²⁾, Woong-Ku Kim, 서경원³⁾, Kyoung-Won Seo

¹⁾ 대우건설, 책임연구원, Principal Researcher, Civil engineering research team, DAEWOO E&C

²⁾ 대우건설, 전임연구원, Associate Researcher, Civil engineering research team, DAEWOO E&C

³⁾ 대우건설, 선임연구원, Researcher, Civil engineering research team, DAEWOO E&C

SYNOPSIS : A 3D FEM numerical analysis was performed to observe the changes of supporting system of a old 1-lane tunnel when it is enlarged to 2-lane, 3-lane and 4-lane. The standard Type-III supporting pattern was applied to the new tunnel because the ground was assumed as Type-III. The observation was carried out at the middle supporting system of the old 1-lane tunnel alignment. The results shows that the changes of old tunnel supporting system began when the new tunnel was excavated at 2D(D is the equivalent diameter of 1-lane tunnel) behind of the observation place and became very rapid from 1D.

Keywords : tunnel enlarge, axial force, protector, support system

1. 서 론

노후터널 중 일부는 교통량 증가로 인해 인접해서 신설터널을 굴착하거나, 변상으로 인한 라이닝 개축, 주변여건의 변화로 인한 터널 내 분기부 설치 등의 이유로 터널을 신축 또는 증축하는 경우가 발생하기 시작하였다. 이러한 공사에는 기존도로의 장기간 차선통제가 필수적으로 이루어져 이에 따른 간접비용의 증가가 예상되며, 지형적인 특성상 대체노선의 확보가 어려운 곳은 계획수립에 큰 차질을 빚을 수도 있다. 그러나 최근 일부 해외에서는 기존터널의 교통 흐름을 유지한 채 외곽부를 확대 굴착하는 공법이 개발되고 이를 실무에 적용함으로써 기존터널을 확대 하면서 동시에 차량흐름을 유지시킬 수 있게 되었다. 이때 기존터널 외곽부를 굴착하는 경우 차량 통행의 안전성 확보나 굴착시의 사고방지를 위해 보호장치(이하 프로텍터)가 필요한데 이 프로텍터는 강제로 제작된 것이 많이 사용되고 있지만 간혹 기존 라이닝을 이용하기도 한다(서경원, 2008). 해외 시공사례의 경우 공사비에 큰 영향을 미치는 것은 프로텍터 제작 및 설치에 소요되는 비용이라 한다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 수치해석을 통해 기존터널의 확대 굴착이 주변지반의 변형특성과 기존 라이닝 콘크리트에 미치는 영향에 대해 분석해 보고자 한다. 또한 이러한 특성을 바탕으로 기존터널을 확대 굴착한다면 막장 전후방 어느 범위까지 프로텍터로 보강해야 하는지에 대해 수치해석 자료와 해외 시공 사례 중 계측사례를 비교해 보고자 한다.

2. 운영중 터널확대 공법의 개요

기존터널의 차량 흐름을 유지한 채 주변을 확대 굴착하는 공법은 그림 1, 그림 2와 같이 기존터널 내부에 차량안전을 위해 프로텍터를 설치하고 프로텍터 내부로 차량을 통행시키면서 주변을 확대굴착 하는 공법이다.

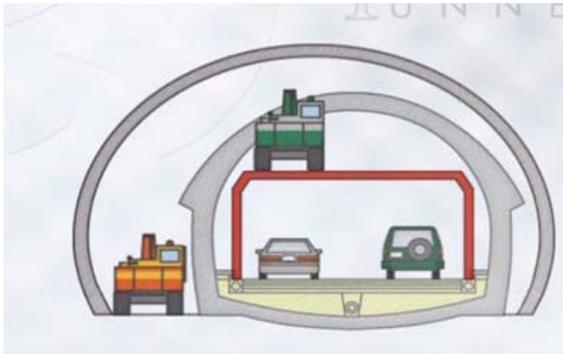


그림 1 터널 확대 공법의 개념도



그림 2 터널확폭중 차량 운행 사례

이 시공방법은 확대량과 확대 방향에 따라 크게 4가지 패턴으로 분류할 수 있다(표 1 참조)

(1) 하부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 노반아래 굴착과 포장두께의 축소에 의한 내공높이만을 확대한다. 비교적 비용은 저렴하지만 터널의 지지력확보와 배수공 이설 등에 문제가 있다.

(2) 상부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 터널 상부 아치의 일부 또는 전면을 확대 굴착하여 내공높이만을 확대한다. 작업공간이 협소하여 작업효율이 나쁘며 결과적으로는 전단면 확대에 비하여 비용이 높게 되는 경우가 많다. 도로터널에서는 실제 시공사례가 없으며, 철도터널에서는 전기 시설물 공사를 위한 실제 사례가 있다.

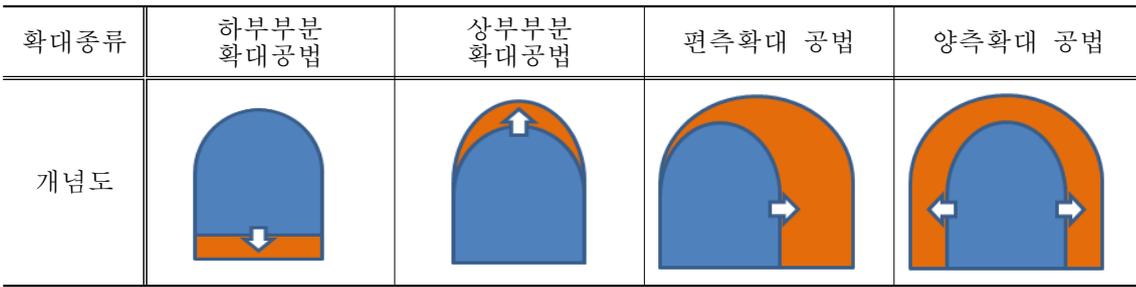
(3) 편측확대 공법

기존 터널의 터널 중심선을 이동하여 한쪽 방향으로 집중하여 작업공간을 크게 하고 효율적인 시공이 가능하다. 단 도로선형 등의 제약조건을 받는 것 이외에 기존 콘크리트 라이닝의 건진도 및 접속부에 관한 구조 등이 중요한 요소로 된다.

(4) 양측확대 공법

기존 터널의 양측으로 단면전체를 확대한다. 터널중심 이동이 크지 않은 경우에 적용한다. 실제 시공사례가 가장 많은 시공패턴이다. 도로선형의 제약이 적지만 작업공간이 협소하고 대형범용기계의 사용이 곤란한 경우가 일반적이다.

표 1. 터널 단면 확대 분류



3. 수치해석 모델

3.1 터널제원

국내의 경우 1차로 터널은 드물지만 굴착면적 확대에 따른 영향을 분석하기 위해 1차로 터널을 2, 3, 4차로 터널로 확대 굴착하는 경우와 2차로 터널을 3, 4차로 터널로 확대 굴착하는 경우를 고려하였다. 표 2에는 각 터널별 제원을 나타내었다. 지보패턴은 지반등급Ⅲ을 가정하여 표 3, 표 4와 같이 설정하였다.

표 2. 터널 제원 및 지반 물성값

	구 분	굴착단면적 (m ²)	1차로 대비 굴착비(%)	터널환산 직경(D)	
	1차로(기존터널)	31.7	100%	6.3m	
	1차로→2차로	43.8	138%	9.8m	
	1차로→3차로	91.4	288%	12.5m	
	1차로→4차로	140	441%	14.8m	
지반 등급	단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	마찰각 (°)	탄성계수 (tf/m ²)	포아송비
Type-3	2.5	70.0	35.0	100,000	0.3

표 3. 확대터널의 지보패턴

구 분	단 위	1차로	2차로	3차로	4차로	
굴진장(전단면굴착)	m	2	2	1	1	
록볼트	설치개수	ea	3	14~15	16~17	22~23
	설치길이	m	4	4	5	5
	종방향 CTC	m	2	2	1	1
	횡방향 CTC	m	상부만	1.5	1.2	1.2
숏크리트 두께	m	0.3	0.08	0.12	0.18	

표 4. 기존터널 및 신설터널 라이닝 콘크리트

구 분	단위중량 (tf/m ³)	탄성계수 (tf/m ²)	포아송비	두께(m)	설계압축강도 (kgf/cm ²)
기존터널 라이닝	2.4	1,713,549	0.2	0.30	131
2차로 터널 숏크리트	2.4	1,500,000	0.2	0.08	210
3차로 터널 숏크리트	2.4	1,500,000	0.2	0.12	210
4차로 터널 숏크리트	2.4	1,500,000	0.2	0.18	210

3.2 기존터널 지보시스템

터널 확대가 필요한 터널은 대부분 NATM 이전의 터널로 예상되지만 이전 터널의 라이닝 콘크리트에 관한 물성값 등의 제원에 관해서는 많은 의문이 남아 있다. 본 검토에서는 라이닝 물성값 산정을 위해 한국건설기술연구원(2006)에서 조사한 노후터널의 각종 물성값을 참고로 하였다. 그러나 표 5에 보듯이 동일터널에서도 큰 편차를 보이고 있어(한국건설기술연구원, 2006) 이의 중간값인 130kgf/cm²을 이용하였다. 라이닝의 모델링 방법에 관해서는 많은 논란이 있지만 본 검토에서는 단순화를 위해 굴착보다 1막장 뒤에서 타설하여 연성(500,000tf/m²), 강성(1,700,000tf/m²)을 거치는 것으로 설정하였다. 기존 노후터널의 경우 록볼트 없는 경우가 많지만 본 해석에서는 분석을 위해 중앙부 및 좌우 SL에 각 1개씩 총 3개의 록볼트가 시공된 것으로 가정하였다.

그림 3에는 해석메쉬를 나타내었으며, 유한요소프로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다.

표 5. 노후터널의 라이닝 상태

터 널	코어공시체 일축압축 강도(kgf/cm ²)		형 식	지 보
	Min.	Max.		
R1	128	417	마제형	콘크리트라이닝
R2			마제형	콘크리트라이닝
R3	51	133	마제형	콘크리트라이닝
R4	81	194	마제형	콘크리트라이닝
R5	67	136	마제형	콘크리트라이닝
R6	83	136	마제형	콘크리트라이닝
R7	115	266	마제형	콘크리트라이닝
R8	60	160	마제형	ASSM
S1	240	386	R/C Box	
S2	117	267	마제형	NATM
T1	43	186	마제형	NATM

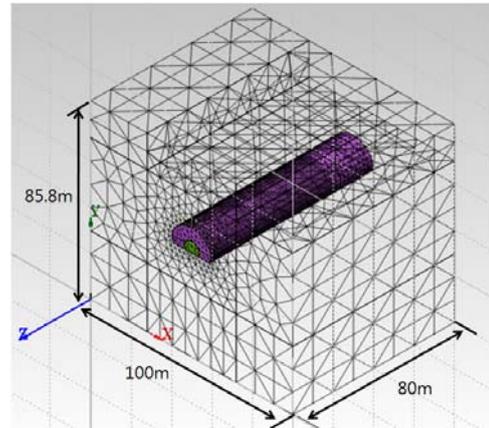


그림 3 터널 해석 메쉬

4. 결과분석

그림 4에는 기존터널 1차로를 2, 3, 4차로로 확대하는 경우의 천단변위를 나타내었다. 1차로를 2차로로 확대하는 경우는 막장 후방 약 2.0D에서 수렴하며, 3차로로 확대하는 경우는 후방 약 2.5D에서 수렴하고 4차로로 확대하는 경우는 후방 약 3.5D 부근에서 수렴하는 것을 알 수 있다(여기서, D는 1차로 터널의 환산직경) 이를 확대하는 신규터널의 환산직경으로 분석하면 약 1.3D에서 1.5D의 범위에 해당된다. 이를 기존터널의 시공사례(石村利明, 2005)와 비교해 보면 신규터널 후방 약 2D 부근에서 천단변위가 수렴하는 경향과 유사하다. 또한 막장전방의 침하도 신규터널 직경 D로 환산하면 약 2D 이내에서는 수렴하는 것을 알 수 있다.

그림 5, 그림 6 및 그림 7은 1차로 터널을 2, 3, 4차로 터널로 확대 굴착하는 경우 1차로 터널의 천단부에 설치한 계측용 록볼트에 작용하는 축력을 비교한 것이다(D:1차로 터널의 환산직경). 신규터널이 차로별로 각각 2D, 0.5D, 1.5D에 근접하면 록볼트에 의미있는 변화가 일어나기 시작하는데 이를 신규터널의 직경으로 환산하면 각각 1.3D, 0.5D, 0.6D에 해당된다. 또한 축력은 공통적으로 막장에 근접할수록 압축력이 증가하고 있는데 특히 기존터널의 1D 후방까지 신규터널 막장이 근접하면 축력 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이로 보아 기존터널의 외곽부 확대 굴착에 따른 영향범위는 최대 2D(기존터널 환산직경)인 것으로 판단할 수 있으며 이는 기존 시공사례(石村利明, 2005)의 결과와 유사한 것으로 나타났다.

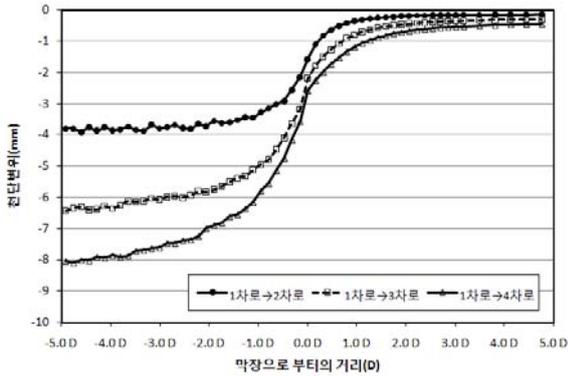


그림 4. 터널확대별 천단침하

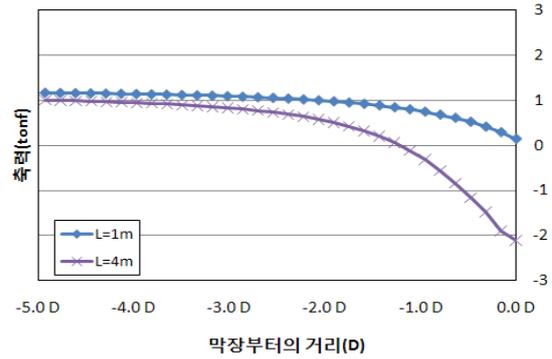


그림 5. 1차로에서 2차로 확대시의 록볼트 축력

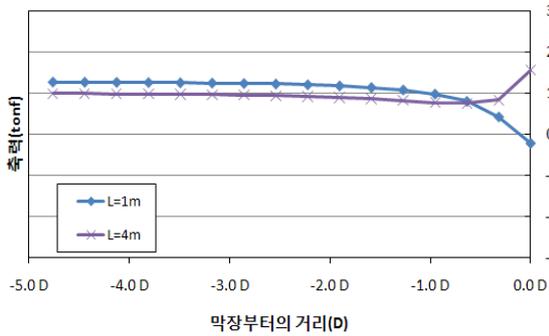


그림 6. 1차로에서 3차로 확대시의 록볼트 축력

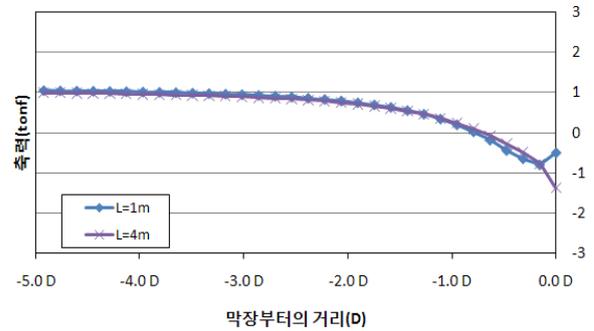


그림 7. 1차로에서 4차로 확대시의 록볼트 축력

그림 8에 기존 1차로 터널을 2, 3, 4차로로 확대 굴착하는 경우 신설터널의 막장이 분석막장에 접근함에 따른 기존 터널의 콘크리트 라이닝의 천단부에 증가되는 압축응력의 변화를 나타내었다. 응력의 변화를 살펴보면 록볼트 축력의 변화와 유사하게 차로에 관계없이 신규 터널의 막장이 후방 2D로 접근할 경우 변화가 시작되어 1D에서 가장 급격히 변하는 것으로 나타났다. 차로별 변화량을 살펴보면 차로가 클 경우 가장 큰 변화를 보였다. 이것은 굴착된 지반이 감당하던 응력을 좌/우, 전방 지반이 부담하는 아칭효과로 4차로의 경우에 굴착량이 가장 많아 제일 큰 아칭효과가 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

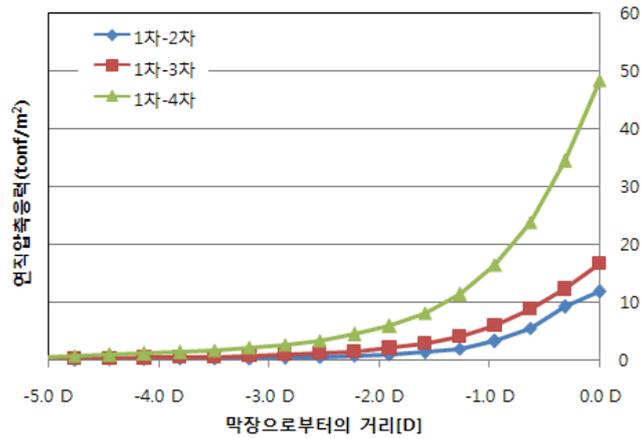


그림 8 터널확대 시 콘크리트라이닝 응력변화

5. 결 론

본 연구는 기존터널의 교통흐름을 유지한 채 확대 굴착하는 경우 기존터널 지보재에 미치는 응력적인 변화를 검토해 보았다. 본 검토를 통해 이하와 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 기존 1차로 터널을 2, 3, 4차로 터널로 확대하는 경우 천단변위는 신규터널 환산직경의 최대 2D 부근에서 수렴하는 것을 알 수 있으며, 이는 기존 시공 사례와 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 기존터널의 록볼트 축력 변화로부터 기존터널의 약 2D에 신규터널이 근접하면 축력 변화가 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) 기존터널의 콘크리트 라이닝 천단부 압축응력의 변화는 록볼트 축력의 변화와 유사하게 신규 터널의 막장이 후방 2D로 접근할 경우 변화가 시작되어 1D에서 가장 급격히 변하는 것으로 나타났다

감사의 글

본 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업(과제번호 09CCTI-C053462-01-000000)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2006b), “노후터널 안전관리 및 재해 예방기술 개발”, 한국건설기술연구원 기관고유사업, 3차년도 보고서
2. 서경원, 백기현, 노종륜(2008), “운영중인 터널의 확폭 굴착에 관한 해외 시공 사례 분석(I)”, 터널기술, 10권, 1호, pp.40~50
3. 서경원, 백기현, 김웅구(2008), “운영중인 터널의 확폭 굴착에 관한 해외 시공 사례 분석(II)”, 터널기술, 10권, 2호, pp.71~79
4. 石村利明, “기존터널의 단면확대시의 거동 계측”, (사)토목학회 제 33회 암반역학에 관한 심포지움, 2005