

수치해석 및 계측자료 분석을 통한 막장볼트의 보강효과에 관한 연구

서경원^{1*}, 김웅구², 백기현³, 김진웅⁴

A Comparative Analysis of Prediction and Measurement for Reinforcement Effect of Face Bolts

Kyoung-Won Seo, Woong-Ku Kim, Ki-Hyun Baek, Jin-Woung Kim

Abstract Unlike in Korea where Steel Pipe-reinforced Multistep Grouting is of commonly used methods for tunnel reinforcement, face bolt method is more widely used due to its better workability and lower construction cost in other countries. In this paper, the effects of both methods after tunnel failure were numerically analyzed and verified based on the oversea construction experiences. As a result it is concluded that the face bolt method may be effective to reinforcement especially when there are some fractured zones developed in the face of tunnel.

Keywords: Tunnel collapse, Steel Pipe-reinforced Multistep Grouting, Face bolt, axial displacement

요 지 국내의 경우 터널 지반보강중 강관다단그라우팅 공법이 폭넓게 사용되지만 해외의 경우 시공성 및 경제성이 우수한 막장볼트 공법이 흔히 적용되고 있다. 본 논문에서는 국내 도로터널 붕락 발생시 적용한 강관다단그라우팅 및 막장볼트의 적용효과에 대해서 수치해석을 통해 분석해 보았다. 또한 해외 시공사례의 계측데이터를 바탕으로 두 공법의 보강효과에 대해 분석해 보았다. 본 연구를 통해 막장 전면에 파쇄대가 발달하는 경우 페이스공법도 막장보강에 효과적임을 알 수 있었다.

주요어: 터널붕락, 강관다단그라우팅공법, 막장볼트 공법, 막장수평변위

1. 서 론

터널 굴착중 파쇄대, 붕락부, 토사구간 등 NATM터널의 주지보재인 슛크리트와 록볼트만으로 자립하기 어려운 곳에서는 굴착면의 외곽을 따라 휘폴링, 파이프루프 등을 흔히 적용하고 지반개량 및 차수효과를 얻기 위해서 RPUM(Reinforced Protective Umbrella Method)의 일종인 강관다단그라우팅이 폭넓게 적용되고 있다. 즉 굴착 외곽선에서 막장 전방으로 설치하여 주로 천단을 안정화 시키는 방법을 적용하고 있다.

최근 유럽 등에서는(Lunardi, 1992, 2000) 터널 전방의 변형특성이 터널 전체의 안정성을 좌우하는 중요한 요인으로 지적하고 있으며 터널을 성공적으로 굴착하기 위해서는 전방의 강성을 조절해야 한다고 강조하고 있

다. 즉 그림 1의 ①구간처럼 지반이 탄성적 성질의 범위에서는 지반아치가 터널벽면 근방에서 발생하고 막장면에서는 균열 등에 의해 독립된 암괴가 떨어져 내리는 정도이고 전체적으로 안정되어 있다. 지반이 탄소성적 성질을 나타내는 ②구간에서는 굴착에 의한 지반이완이 시간의 경과에 따라 확대되고 지반아치는 소성화되어 있는 굴착면부터 떨어져서 발생하고 벽면 및 막장면의 변위가 커져 불안정한 상태가 된다. 파괴가 발생하는 ③구간에서는 지반강도가 터널굴착에 의해 발생하는 터널 주변의 응력보다 매우 작고 소성화된 후에 잔류강도를 갖고 있지 않기 때문에 지반아치가 형성되지 않으면 굴착에 의해 변위가 커지고 지보공을 설치할 틈도 없이 막장 및 천단에서 붕괴가 발생한다. 이때 터널반경방향 응력의 감소를 억제하기 위한 구체적인 방법으로는 슛크리트, 프리라이닝 공법, 강관다단그라우팅 등이 사용되고 있고 그리고 터널 축방향의 σ_3 의 감소를 억제하기 위해 막장면 슛크리트, 막장볼트 등이 사용되는데 국내의 경우 막장면 붕락이 예상되는 곳은 주로 막장면 슛크리트 타설 및 강관다단그라우팅의 적용이 많다.

¹정희원, 대우건설 기술연구원, 공학박사

²정희원, 대우건설 기술연구원, 전임연구원

³정희원, 대우건설 기술연구원, 책임연구원

⁴정희원, 한국도로공사 차장

*교신저자: 서경원 (E-mail: skw@dwconst.co.kr)

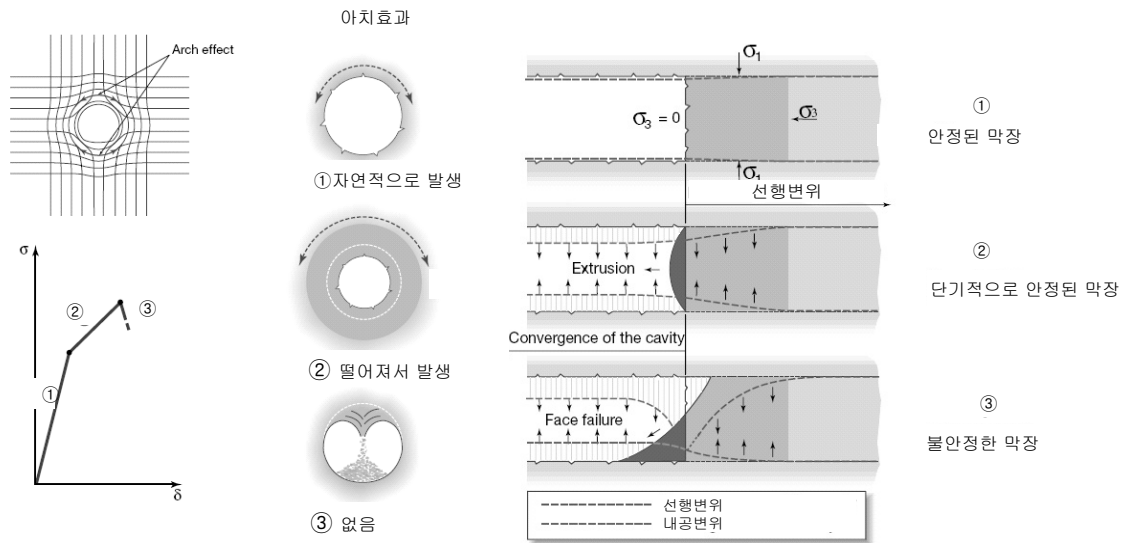


그림 1. 터널 굴착에 따른 막장 안정성(Lunardi, 2000)

이 가운데 막장볼트는 이탈리아, 프랑스, 일본을 중심으로 막장 전방에 철근, 강봉, GFRP 등을 시공하여 막장 안정성과 시공속도를 향상시키는 사례가 많이 있다 (Geofront 연구회, 2000 : Kinish, 2004).

그러나 최근 일부 현장에서 봉락부 및 파쇄대 구간을 중심으로 막장볼트 공법을 적용하기 시작한 현상이 있는데 본 논문에서는 봉락부의 강관다단그라우팅 공법과 막장볼트 공법의 적용을 수치해석적으로 재현하고 막장볼트의 보강 효과에 대해 고찰해 보았다. 또한 기존 시공사례의 계측 및 해석 데이터 분석을 통해 강관다단그라우팅 공법과 막장볼트 공법의 효과의 차이에 대해 분석해 보았다.

2. 막장볼트 공법의 지반 안정성 효과

막장볼트 공법에 관해서는 국내외에서 실험이나 해석을 통해 보강효과나 메카니즘에 관해 규명되었는데 주요 연구를 소개하면 다음과 같다.

국내에서는 김성열(2009)은 타설간격과 범위에 대한 수치해석으로 1.5 m²당 1개씩 격자형으로 타설하며 보강범위는 상반 120°로 타설하는 것이 효과적이라고 하였다. Yoo(2003)과 유충식(2002)는 모래를 이용한 실내

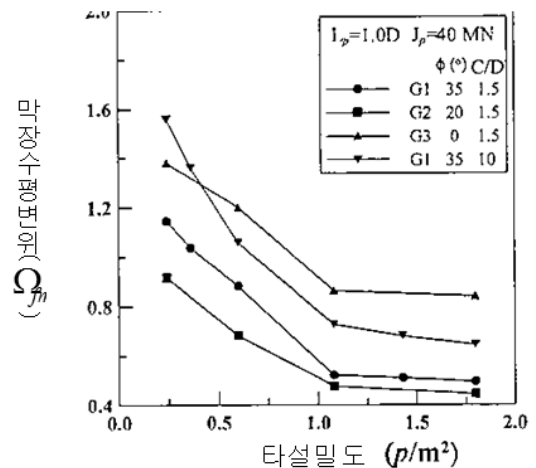


그림 2. 막장막장볼트의 길이와 막장수평변위(Yoo, 2000)

실험을 통해 타설밀도(A_p) 1.1분/m² 이상에서는 막장 수평변위(Ω_{fm})는 그다지 감소하지 않는다고 보고하였다(그림 2). 또한 서경원(2006a, 006b) 등은 실험 및 해석을 통해 길이는 최소 1D 이상이며, 최외곽의 볼트는 약간 상향으로 타설하고 중심부는 수평으로 타설하는 것이 효과적인 것으로 분석하였다. 국외의 연구로서 Ikekuchi (1997)는 원심모형실험을 통해 그림 3처럼 볼트길이가

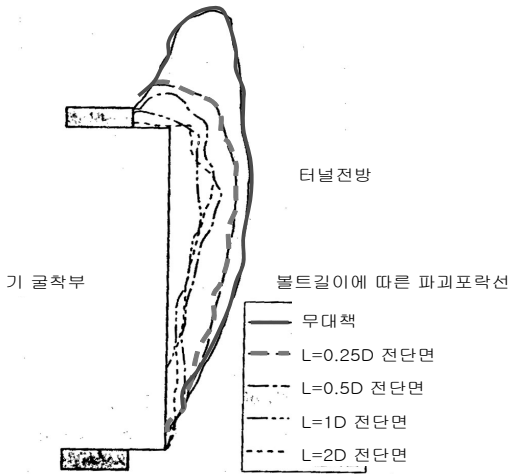


그림 3. 막장볼트길이에 따른 파괴포락선(Ikeguchi, 1997)

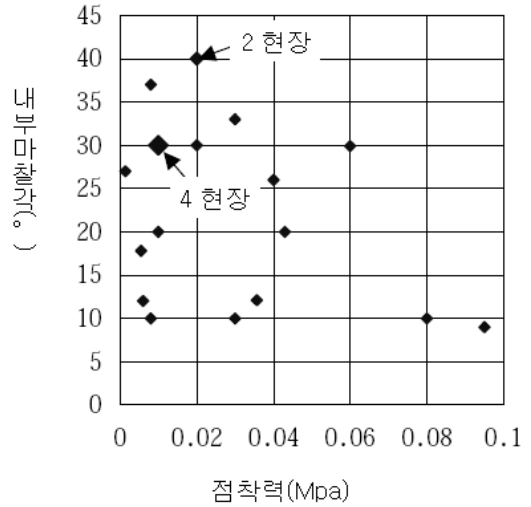


그림 5. 막장볼트의 시공실적과 지반조건

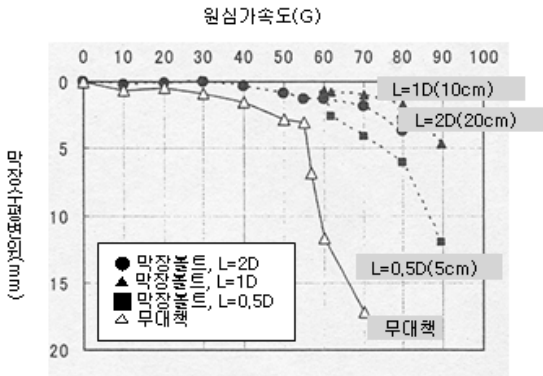


그림 4. 막장볼트의 길이와 막장수평변위(Takahashi, 2005)

0.5~2D는 변위억제 효과가 보이며 0.25D는 천단부 봉락의 높이가 약간 감소하지만 큰 효과는 보이지 않는다고 하였다. Takahashi(2005)는 원심모형실험을 통하여 막장볼트에 의해 지표면의 침하 및 막장 수평변위가 크게 감소하는데 볼트길이 L=0.5D, 1.0D, 2D를 적용한 결과, L=0.5D의 경우 70G 부터는 효과가 감소하여 수평변위가 증가한다고 보고하였다(그림 4).

D.Pelia(1994)은 1 단면당 20본~180본 까지 타설한 수치해석 및 현장시공의 결과로부터 80본 이상부터는 설치본수에 비례한 보강효과는 보이지 않는다고 보고하였다. 또한, Ikeguchi(1997)의 실험결과와 Takahashi(2005)의 실험결과로부터 막장볼트는 1.0D 이상이 바

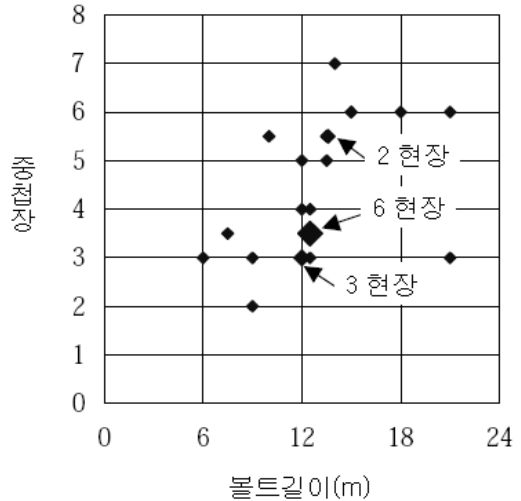
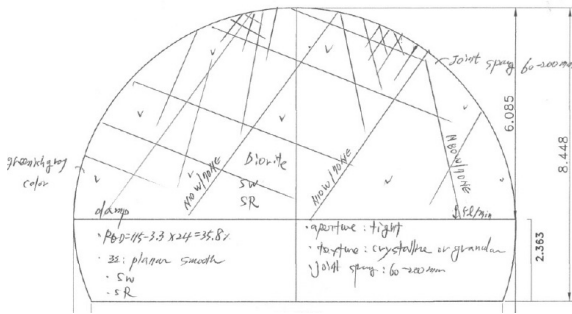


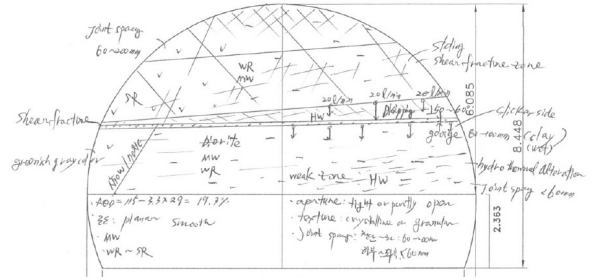
그림 6. 막장볼트의 길이와 중첩장

람직한 것으로 판단된다.

막장볼트의 적용에 관해서 Ohtsuka(2006)는 33개의 현장시료를 분석한 결과(그림 5)점착력은 0.05 MPa 이하의 현장에서 적용된 경우가 많으며 내부마찰각은 30° 근방인 지반에서 적용된 경우가 많다고 보고하였다. 또한, 막장볼트의 길이는 약 12 m의 경우가 제일 많으며 중첩장은 볼트의 길이가 길수록 길어지는 경향은 있지만 3 m~4 m의 현장이 제일 많았다(그림 6).



(a) 1차 봉락 4.2m 후방의 페이스매핑



(b) 2차 봉락시의 페이스매핑

그림 7. 봉락위치의 페이스매핑

3. 봉락터널의 막장볼트 적용 사례

3.1 터널 현황

봉락이 발생한 터널지반은 퇴적암 층을 화강섬록암이 관입한 형태이며 굴착은 4~5 등급지반에서 이루어지고 있었다. 터널 봉락은 6 m 구간에서 2회에 걸쳐 발생하였고, 각각의 봉락발생시 강관다단그라우팅 및 막장볼트 공법을 주 보강대책으로 시공하였다.

3.2 봉락현황 및 원인

3.2.1 1차봉락

봉락지점 4.2 m 후방 굴착까지는 막장면이 습윤한 상태이며, 막장상부에 일부 절리가조밀하게 분포하는 구간이 있었으나 굴착시 큰 문제는 없었다. 봉락지점 2.7 m 후방 굴착시부터는 막장우측부에서 절리가 발달되었으며 우측 하단부에서 용수가 발생하기 시작하였다. 봉락지점에서는 막장 좌측에서 우측으로 파쇄대가 형성되어 있었고 충전물이 80~100 mm 두께로 형성되어 있었다. 봉락지점 상부의 압편 강도는 비교적 강하나 60~200 mm의 간격으로 절리가 발달하고 있었고 막장하부는 심하게 파쇄된 상태를 보이고 있었다. 봉락면에서는 충전물이 5~10 mm의 두께로 충전되어 있었고 경면이 발달하고 있다. 파쇄대는 막장 하반에서 상부로 약 60°의 경사로 발달하고 있어 3~4 m 굴착후에는 막장 전면에 나타났다.

지하수는 봉락 2.7 m 후방에서는 약 1,300 ton/day가 유출되고 있었으나 봉락지점에서는 약 1,600 ton/day의

지하수가 발생하고 있었다. 이 지하수는 막장면 좌우측 하반 및 바닥부에서 집중적으로 발생하고 있는데 이는 막장하부에서 상부로 발달하는 파쇄대의 개구성 불연속면을 따라 발생하는 것으로 추정되었다.

이로보아 봉락원인은 터널 하반부터 발달하는 파쇄대와 1,600 ton/day의 지하수로 인한 막장하부의 지지력 부족이 원인으로 추정되었다(그림 7).

3.2.2 2차 봉락

2차봉락도 1차 봉락과 유사한 지반상황이었으며 1차 봉락시 터널 하부부터 발달한 파쇄대가 더욱 발달하여 막장 전면에 나타나고 있었고 지하수도 1,600 ton/day 이상이 유출되고 있었다. 1차 봉락지점과 약 4.2 m 이격되어 1차 봉락시 타설한 강관다단그라우팅의 보강범위 내에 포함되지만 수평방향으로 발달한 파쇄대의 막장변위를 효과적으로 억제하지 못했기 때문에 봉락이 추가적으로 발생한 것으로 판단된다. 봉락은 폭 7 m, 터널 천단부터의 높이 5 m, 굴착방향으로 약 4 m의 범위가 봉락되었다(그림 7, 그림 8). 1, 2차 봉락 모두 계층단면의 중간에 위치하고 있어 계층값에 의한 이상 발생 징후는 확인할 수 없었다.

3.3 보강대책

1,2차 봉락후 응급조치 및 보강대책은 표 1과 같이 진행되었다. 응급조치는 우선 봉락의 진행을 막기 위해 버력으로 막장면 압성토를 하였으며, 천단부 슛크리트 타설, 지하수 양수작업을 하였다.

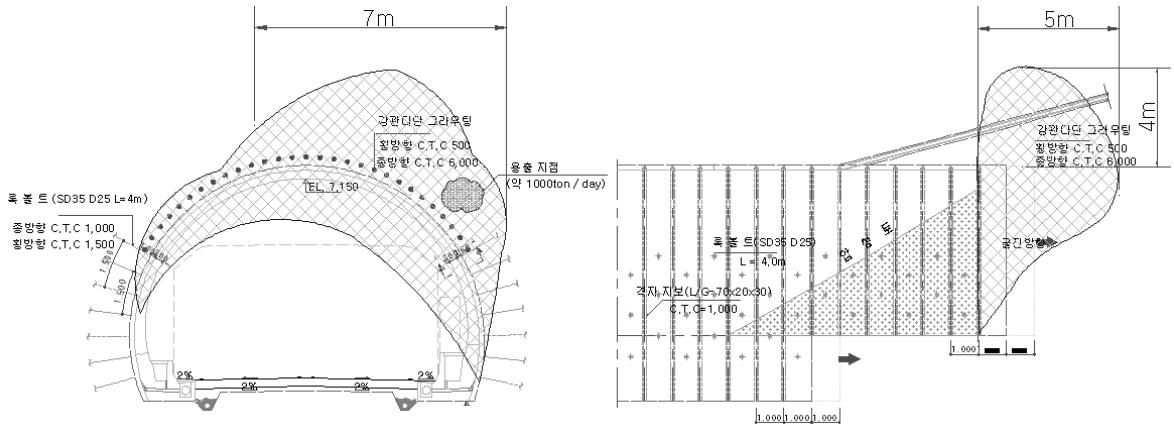


그림 8. 2차 봉락 현황도

표 1. 봉락발생규모 및 보강대책

	1차봉락	2차봉락
봉락규모	2/3×7.0 m(폭)×5.0 m(높이)×3.0 m(깊이)=70 m ³	2/3×7.0 m(폭)×4.0 m(높이)×5.0 m(깊이)=93 m ³
응급조치	<ul style="list-style-type: none"> · 막장면 압성토 · 막장면 슛크리트 타설 · 양수작업 	<ul style="list-style-type: none"> · 막장면 압성토 · 막장면 슛크리트 타설 · 양수작업
주된 보강대책	<ul style="list-style-type: none"> · 강관다단그라우팅(∅114 mm, L=12 m) 	<ul style="list-style-type: none"> · 공동부 우레탄 및 경량기포모르타르 채움 · 막장볼트 시공(소구경 강관) · 슛크리트 두께 증가(260 mm→310 mm)

주된 터널 보강은 표 1처럼 1차 봉락시에는 강관다단 그라우팅을 주 보강공법으로 시행하였으며, 2차 봉락 후에는 막장볼트 공법을 시행하였다.

강관다단그라우팅은 천공홀이 자립하지 못하여 직천공 강관을 시공하였으며 주입재로는 시멘트밀크를 주입하였다. 2차 봉락후 공동부는 우레탄 및 경량기포 모르타르로 충전하였고 막장볼트는 현장에서 즉시 자재공급이 가능한 소구경 강관을 사용하였다. 굴착은 기계식 굴착으로 하였고 매 막장마다 전방에 삽입된 강관을 산소절단기로 절단하면서 굴착을 진행하였다.

응급보강은 봉락의 확장방지와 유출된 지하수 배수작업 등에 초점을 맞추었으며, 2차 봉락 후 막장볼트 공법을 적용한 이유는 1차 봉락시 적용한 강관다단그라우팅이 충분한 보강효과가 없었던 것으로 판단하였고 막장전면에 발달한 파쇄대로 인해 막장 중상부에서 낙석이 계속되었기 때문에 막장면에서 수평방향으로 막장볼트를 적용하는 것이 효과적이라고 판단했기 때문이다.

4. 수치해석을 통한 봉락터널의 보강효과 분석

4.1 모델링 방법

본 장에서는 봉락구간에 적용한 강관다단그라우팅 및 막장볼트 공법의 변위제어 효과에 대해 유한요소법을 근간으로 하는 범용해석프로그램인 MIDAS GTS를 이용하였다.

지반조건 및 적용물성값은 현장 데이터를 바탕으로 표 2와 같이 적용하였다. IV등급 지반 물성값은 실험값을 이용하였는데 완전탄소성체로 모델화하고, 파괴기준은 Mohr-Coulomb의 기준을 적용하였다.

강관다단그라우팅을 모델링하는 방법은 보요소로 가정하는 경우와 지반개량을 가정하는 경우가 있는데 보요소로 가정하는 경우는 수치해석을 위한 요소망 작성과 효율에 어려움이 있으며 지반개량을 가정하는 경우는 그라우팅에 의한 지반 개량범위의 물성값을 평가하는데 큰 어려움이 있다. 개량범위 물성값은 보통 1.5~

표 2. 수치해석 적용 물성값

	단위중량 (kN/m ³)	변형계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아송비 (ν)	
IV등급지반	24	1,470	0.5	35	0.25	
파쇄대지반	19	50	0.15	20	0.27	
강관보강 그라우팅 영역	IV등급지반	24	2,205	0.75	35	0.25
	파쇄대지반	19	75	0.23	20	0.27
막장볼트 (직경 60.4 mm의 소구경 강관)		200,000				

표 3. 수치해석 조건

해석 case	보강공법	보강제원
case1	-	-
case2	강관다단그라우팅	- 터널주변 물성값 개량으로 가정(표 2 참조)
case3	막장볼트	- 막장전방 n=6본/단면 (L=12 m, 중첩장 6 m)
case4	강관다단그라우팅+막장볼트 : 병용공법	- 터널주변 물성값 개량으로 가정 - 막장전방 n=6본/단면 (L=12 m, 중첩장 6 m)

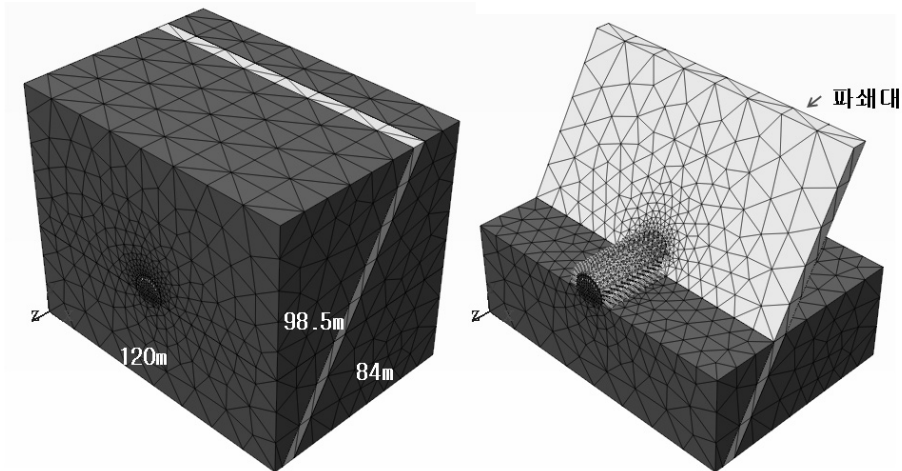


그림 9. 파쇄대를 포함한 수치해석 모델링

2.0배 정도 상향평가하는 것이 일반적이지만 암반그라우팅의 경우 절리면 사이의 충전물 형태 및 지하수압 등에 따라 큰 차이를 보이고 있어 모델링 방법에 따라 과대 혹은 과소평가 될 위험이 있다. 그러나 본 연구에서는 후술하는 타현장 계측자료와의 경향 분석을 위해 통상적으로 수행되는 방법인 원지반 물성이 1.5배가 증가하는 것으로 가정하였다. 막장볼트는 현장시공시와 동일하게 소구경 강관이 삽입되는 것으로 하였다.

파쇄대는 단층점토 및 단층각력, 지하수 존재 등의 지반조건과 타 현장 사례를 참고로 정하였다. 특히 본 봉락구간은 페이스매핑과 지질중단도를 종합하면 파쇄대가 터널 굴착방향으로 약 60°의 각도 및 위쪽 5 m의 두께로 분포하고 있어 그림 9와 같이 모델링하였다.

표 3에는 해석 조건을 나타내었다. 실제 현장에서는 1차 봉락 후 강관다단그라우팅, 2차 봉락 후 막장볼트를 시공하였지만 본 해석에서는 각 공법의 효과를 비교하

기 위해 무보강인 경우 및 두 공법을 동시에 적용한 경우를 추가로 분석하였다. 또한 2차 봉락후 공동을 우레탄 및 경량기포모르타르로 충전하였지만 본 해석에서는 제외하였다.

4.2 수치해석 결과 및 고찰

그림 10에는 파쇄대가 막장 전면에 분포하는 경우의 각 공법별 막장 수평변위를 나타내었다. 무보강과 비교하면 막장볼트 공법은 막장수평변위가 42.1% 감소하고 막장볼트와 강관그라우팅을 병행하면 43.1% 감소하는 것으로 나타났으며 강관다단그라우팅을 단독으로 시공하는 경우는 5.1%가 감소하는 것으로 나타났다. 본 해석 조건에서는 강관다단그라우팅 공법만으로는 파쇄대가 막장 전면에 발달하는 경우 막장 수평변위를 효과적으로 억제하지 못하는 것으로 나타났다. 즉, 막장 수평변

위의 감소에는 막장볼트 공법의 역할이 큰 것을 알 수 있다.

그림 11에는 막장에 파쇄대가 없는 경우의 각 공법별 막장 수평변위를 나타내었다. 파쇄대가 막장 전면에 발달하는 그림 10과 비교하면 수평변위가 매우 작아 각 공법의 효과를 쉽게 확인할 수는 없다. 그러나 무보강과 비교하면 막장볼트 공법은 막장수평변위가 2.5% 감소하고, 막장볼트와 강관그라우팅을 병행하면 5.9% 감소하는 것으로 나타났으며 강관다단그라우팅과 막장볼트를 단독으로 시공하는 경우는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

즉 그림 10과 그림 11로부터 막장 전면에 파쇄대가 발달하는 경우는 막장볼트 공법의 효과가 매우 우수한 것을 알 수 있다.

그림 12에는 각 공법 적용에 따른 천단침하를 나타내었다. 강관다단그라우팅 단독 혹은 강관다단그라우팅과 막장볼트를 병행하는 경우 막장 후방에서의 천단침하에 대한 억제 효과를 볼 수 있지만, 막장볼트만을 단독 시공하는 경우는 굴착막장에서만 천단침하억제 효과가 있으며 막장 후방에서는 보강효과가 거의 없는 것을 알 수 있다. 즉 터널을 굴착한다는 것은 $\sigma_{3av} = \sigma_h \rightarrow 0$ 의 의미 이므로 이때의 응력변화를 모어원으로 나타내면 그림 13의 점선에 해당된다. 이때 막장볼트를 설치하면 지반과의 마찰에 의해 구속압이 증가하므로 이 경우의 모어원은 A의 원이 된다. 이와 같이 막장볼트는 주변지반과의 마찰에 의해 구속압을 증가시키는 효과를 갖고 있

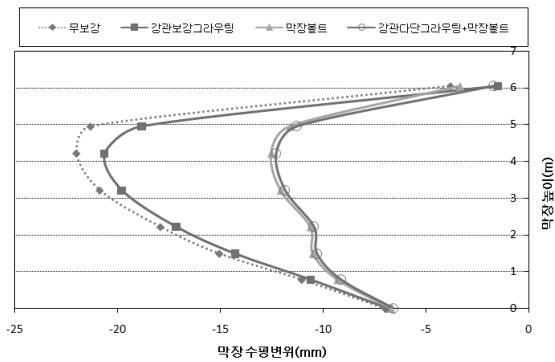


그림 10. 각 공법별 막장수평변위 : 파쇄대가 막장 전면에 분포하는 경우

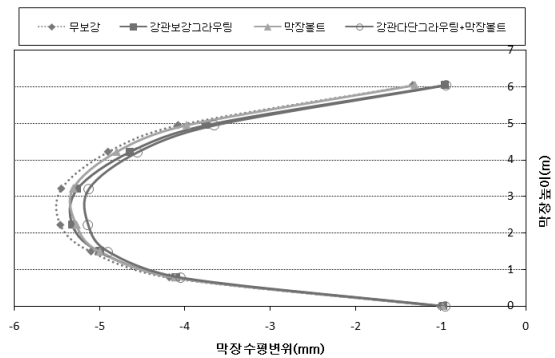


그림 11. 각 공법별 막장수평변위 : 파쇄대가 없는 경우

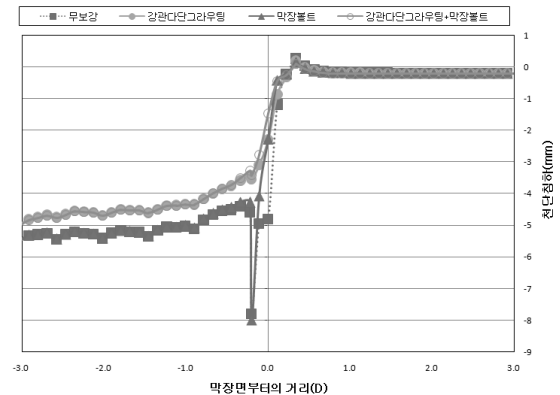


그림 12. 각 공법별 천단침하

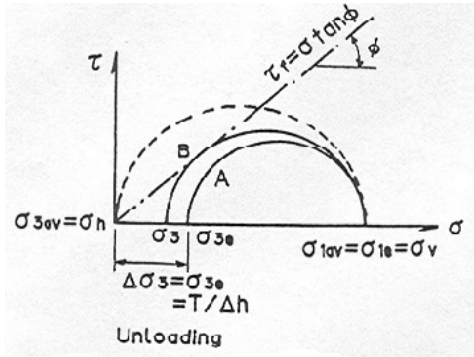


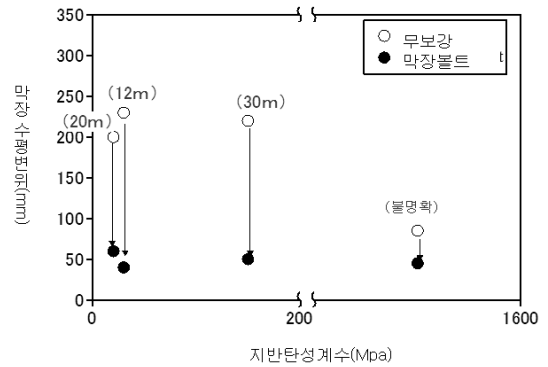
그림 13. 지반요소의 터널굴착에 따른 응력변화(Hukushima, 1989)

으며 이 때문에 볼트주변의 지반은 강성이 커지게 되며 일체화가 되는 것으로 생각할 수 있다.

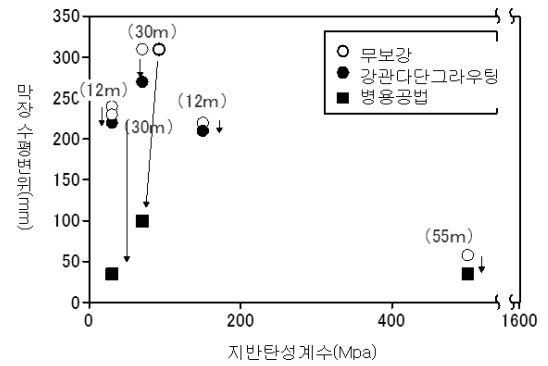
4.3 기존 시공 사례의 분석

그림 14~그림 16에는 시공사례중(徐景源, 2006) 붕락이 발생한 현장의 무보강, 막장볼트, 강관다단그라우팅을 각각 적용한 현장과 동시에 적용한 현장의 계측 및 해석데이터를 나타내었다. 수집한 자료는 철도터널, 도로터널의 23개소이다. 대상터널의 지반 탄성계수는 2 MPa~10,000 MPa이고, 토피고는 4~100 m의 범위이다. 자료중에는 계측위치, 보조공법의 타설제원 및 사용재료 등이 불명확한 점도 있지만 각 보조공법의 역할, 주된 효과를 분석하기 위해 굴착단면 및 천단침하가 수렴하는 막장후방으로 나누어 분석하였다.

그림 14에 각 보조공법의 적용에 따른 막장 수평변위의 감소를 나타내었다. 그림중의 괄호안 문자는 토피고를 의미하며, 병행공법은 강관다단그라우팅과 막장볼트를 동시에 적용한 현장을 말한다. 우선 그림 14(a)에는 무보강과 막장볼트만을 타설한 현장의 변위를 비교하였다. 막장볼트의 타설에 의해 수평변위는 약 47~82% 감소되며 최종변위는 공통적으로 약 50 mm에서 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 14(b)에 무보강-강관다단그라우팅-병행공법의 막장 수평변위를 나타내었다. 강관다단그라우팅 단독으로는 수평변위의 감소는 작고, 병행공법에 의해 감소효과가 큰 것을 알 수 있다. 이것으로부터 막장의 수평변위에 대해서는 강관다단그라우팅보다 막장볼트가 효과적인 것을 알 수 있다.



(a) 무보강-막장볼트



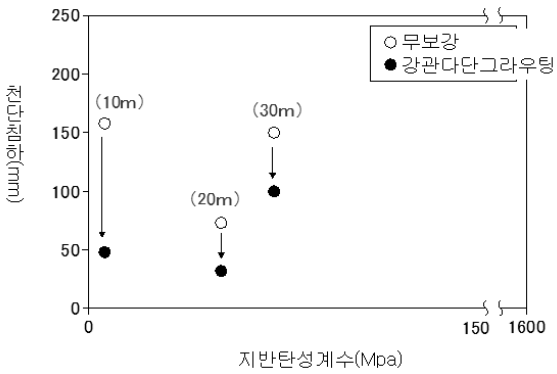
(b) 무보강-강관다단그라우팅-병행공법

그림 14. 무보강-강관다단그라우팅-병행공법에 의한 막장 수평변위

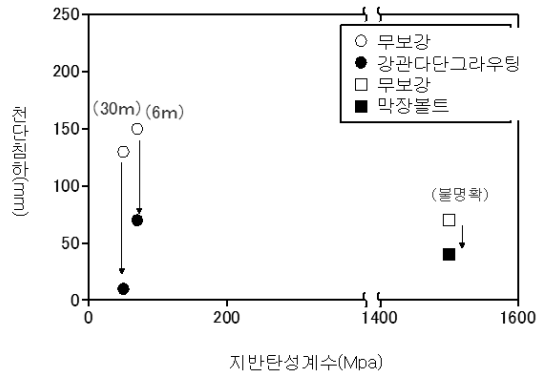
그림 14~그림 16의 그래프는 X축으로 토피고와 지반 탄성계수로 표시하였는데 토피고 및 지반탄성계수별 막장변위와의 상관성은 보이지 않으나 분석자료중 붕락이 발생한 현장의 토피고는 약 30 m 이내의 현장이 대부분이며 이때 지반 탄성계수는 약 200 MPa 이내의 현장이 많은 것을 알 수 있다.

그림 15에 각 공법에 의한 굴착단면의 천단침하량을 나타내었다. 우선 그림 15(a)의 강관다단그라우팅만을 적용한 경우는 약 30~70%의 감소를 보이고 있고, 막장볼트를 적용한 경우는 강관다단그라우팅보다 효과가 작고, 두 공법을 병행한 경우는 효과가 큰 것으로부터 천단침하에 대한 효과는 강관다단그라우팅이 큰 것을 알 수 있다.

그림 16에 각 공법의 적용에 따른 막장후방(변위가 수

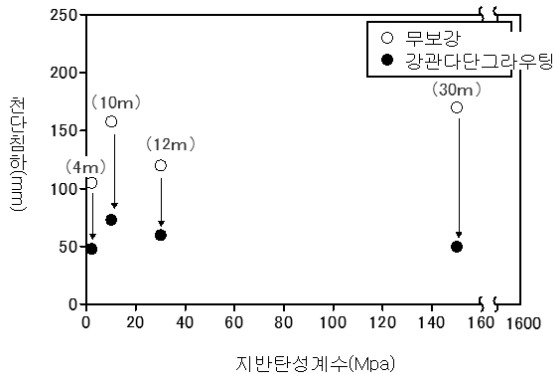


(a) 무보강-강관다단그라우팅

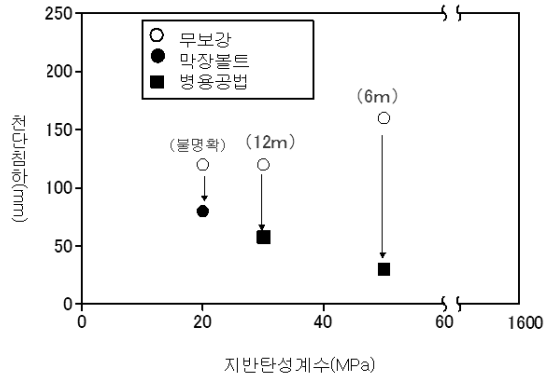


(b) 무보강-막장볼트-병용공법

그림 15. 굴착단면에서의 천단침하 감소효과



(a) 무보강-강관다단그라우팅



(b) 무보강-막장볼트-병행공법

그림 16. 막장후방에서의 천단침하 감소 효과

림하는 지점)의 천단침하량을 나타내었다. 그림 16(a)의 강관다단그라우팅만을 시공한 경우는 50~70%의 감소 효과를 보이고 있다. 그림 16(b)의 막장볼트만을 시공한 경우는 보강효과가 작고 두 공법을 병행한 경우는 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 막장볼트는 굴착단면에서는 천단침하에 대하여도 보강효과가 있지만 시공특징상 굴착과 동시에 절단하면서 굴착을 진행하므로 막장후방에서는 볼트에 의한 영향이 작아지기 때문으로 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 터널 붕락시 적용한 강관다단그

라우팅과 막장볼트 공법의 효과 및 보강 메커니즘에 대해 분석하였으며 이를 해외 시공사례와 비교 검토하였다. 위의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 본 연구에서 소개한 터널 붕락은 터널하반부터 굴착 방향으로 발달한 파쇄대와 1,600 ton/day이상의 지하수 유출로 인한 지반 지지력 부족으로 발생하였으며 1차 붕락시 적용한 강관다단그라우팅으로는 굴진 방향으로 발달한 파쇄대의 막장 수평면위와 막장면의 낙석을 효과적으로 억제하지 못한 것으로 분석된다.
2. 본 터널과 같이 파쇄대가 터널 굴진방향에 대해 약 60° 정도로 발달하고 굴착에 따라 파쇄대가 막장 전

면에 발달하는 경우 수치해석상 무보강인 경우에 비해 막장볼트 공법은 막장수평변위가 42.1% 감소하고, 막장볼트와 강관다단그라우팅을 병행하면 43.1% 감소하고, 강관다단그라우팅을 단독으로 시공하는 경우는 5.1%가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 파쇄대가 막장 전면에 나타나지 않는 경우는 강관다단그라우팅과 막장볼트의 변위제어 효과는 비슷한 것으로 나타났다.

3. 기존 시공사례의 계측 및 해석데이터 분석 결과 막장볼트의 타설에 의해 수평변위는 약 47~82% 감소되며 최종변위는 공통적으로 약 50 mm에서 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 막장 후방의 천단침하는 강관다단그라우팅만을 시공한 경우는 50~70%의 저감효과를 보이고 있으며 막장볼트의 시공에 따른 침하 감소효과는 미미한 것으로 나타났다.

이와 같은 결과 막장에 파쇄대가 막장 전면에 발달하는 경우 경제성과 시공성이 우수한 막장볼트 공법도 보강공법의 하나로써 유효하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성열, 윤지선(2009), “터널막장 안정 평가기법 및 보강효과에 관한 수치해석적 연구”, 터널기술, 제11권, 제1호, pp. 11-22, 2009.
2. 서경원, 배규진, Nishimura Kazuo, Tsuyoshi Doman(2006a), “터널 안정화를 위한 막장볼트의 효율적 배치에 관한 수치해석적 연구”, 터널기술, Vol. 8, No. 2, pp. 141-149.
3. 서경원, Nishimura Kazuo, 김창용(2006b), “실내실험 및 수치해석을 이용한 페이스볼트의 최적타설 개수에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 제16권, 제6호, pp. 467-475.
4. 유충식, 양기호(2002), “Behaviour of a tunnel face reinforced

with longitudinal pipes-Laboratory investigation”, 터널기술, Vol. 4, No. 2, pp. 91-99.

5. Geofront(2000), “장척볼트의 시공실적과 이의 분석”.
6. Kinashi Hideo(2004), “A study on development and effect of the longitudinal face bolt, Kyoto University, Ph.D Thesis.
7. P.Lunardi, A.Forcaracci et al(1992), “Tunnel face reinforcement in soft ground and controls”, Toward New Worlds in Tunnelling, Vieitez-Utesea&Montanez, pp. 897-908.
8. D.Pelia(1994), “A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face”, Geotechnical and Geological Engineering, 12, pp. 145-168.
9. P.Lunardi(2000), “The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils”, T&T International ADECO-RS Approach May, pp. 3-30.
10. Ikeguchi Masaki, Mashimo Hideto(1997), “The effect of facebolt on face stability, Proceeding of tunnel engineering”, JSCE Vol. 7, pp. 93-98.
11. Hukushima Shinji(1989), “Model test on prereinforcement of shallow tunnels in sandy ground”, JSCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 406./III-11, pp. 79-86.
12. Yoo Chungsik, Shin hyun-kang(2003), “Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory and numerical investigation, Tunnelling and Underground Space technology”, 18, pp. 303-319.
13. Takahashi Shinchi, Shigehiko (2005), “Centrifuge model test on tunnel excavation (Part 3), Proceedings of tunnel Engineering”, JSCE, Vol. 15, pp. 9-14.
14. Ohtsuka Isamu(2006), “Study on performance and application range of long face bolts, Proceedings of the 35th Symposium on Rock Mechanics”, JSCE”C, pp. 41-46.
15. 徐景源(2006), “新たな切羽ボルトの打設パターンに関する研究”, 東京都立大学 学位論文, pp. 23~29.

접수일(2010.6.28), 수정일(2010.8.20), 게재확정일(2010.9.17)