

대단면터널 특성을 고려한 지보설계 개선방안 연구

Large-span Tunnel Support Design supplemented by Analytical Methods

정재호¹⁾, Jae-Ho Jeong, 이희석²⁾, Hee-Suk Lee, 허종석³⁾, Jong-Seok Heo, 윤상길⁴⁾, Sang-Gil Yoon

¹⁾ 바우컨설턴트 지반터널부 과장, Manager, Geotechnical/Tunnel Div., BAU Consultant CO.,LTD.

²⁾ SK건설 GSUC Team 과장, Manager, SL Engineering & Construction

³⁾ 바우컨설턴트 지반터널부 부장, Manager, Geotechnical/Tunnel Div., BAU Consultant CO.,LTD.

⁴⁾ 바우컨설턴트 지반터널부 전무, Director, Geotechnical/Tunnel Div., BAU Consultant CO.,LTD.

SYNOPSIS : Despite of the popularity of using empirical methods for support design, empirical rules suffer from the inherent problem of providing no indication of the safety degree of the design. For the support design of large span tunnel, it was considered that the empirical design guidelines should be augmented by more explicit design methods. This paper presents an overview of the analytical support design methodology that is used to refine initial empirical recommendations. The initial support design supplemented by analytical methods is validated by probabilistic and deterministic approach applied to stress-induced and structurally controlled gravity-driven instability problem each. As a result, the extent of the potential failure zone is sorted out and numerical parametric studies were performed to gain insight into the overall behavior of tunnel in the potential failure zone. Consequently, it was decided that additional conservation techniques have to be planed as a reserved support pattern.

Key words : Large-span tunnel, Support design, Analytical methods, Deterministic approach

1. 서 론

최근 터키방식의 터널공사가 시행되는 동안 우리나라의 터널기술은 다양한 재료 및 시공방법 개발 등을 통해 꾸준히 발전해왔으나 지보설계는 외국의 암반분류법에 기초한 경험적 방법에 주로 의존하고 있다. 경험적 방법만 적용할 경우, 안정여부를 정량적으로 파악하기 어렵기 때문에 대체로 과다하게 안전측인 지보량을 산정하게 되며, 현장시공결과의 Feed Back을 통한 지보설계 개선 등 합리적 지보설계방법 확립에 대한 관심이 부족한 원인이 되고 있다. 뿐만 아니라 때로는 추가적인 보강이 필요한 경우에도 보강량을 예측하는데 필요한 정보가 부족하게 되는 문제를 안고 있다. 특히, 4차로 대단면 터널은 단면형상비(높이/폭)가 작아 역학적으로 불리한 단면형상을 가지고 있으며, 국내외 설계 및 시공사례가 많지 않으므로 경험적 암반분류법에 의한 지보설계시 안정문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 지반특성 및 지보재의 파괴메커니즘을 반영하면서도 단순한 지반정보로부터 비교적 간단하게 지보량을 산정하는 설계방법의 도입이 필요하다.

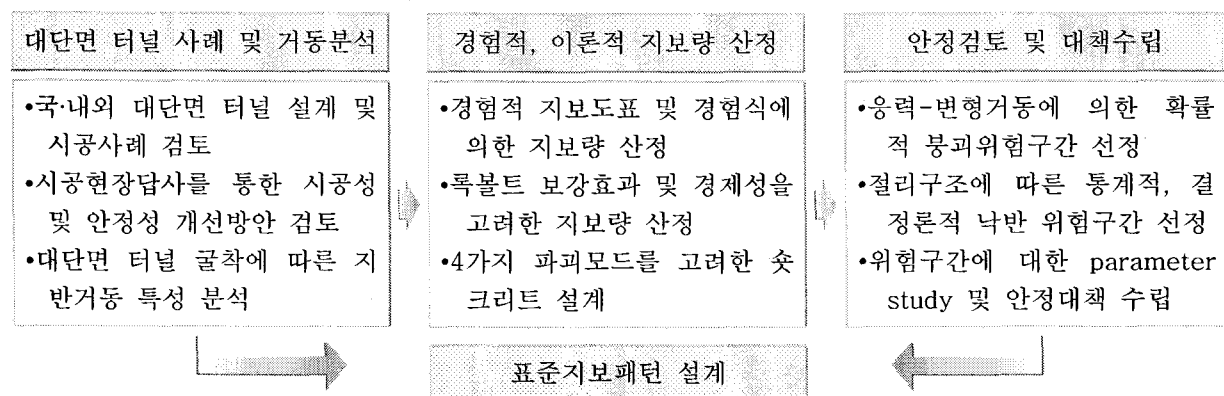
본 연구에서는 국내 4차로 대단면 터널의 설계사례를 중심으로 지보설계방법 개선의 필요성을 제시하고 대단면 터널에서 발생가능한 다양한 위험요인 분석결과 및 경험적 방법을 보완할 몇가지 이론적 방법의 적용성을 평가하고자 한다. 대단면 터널에서의 최적 지보량 산정을 위해 경험적 방법외에 지보 파괴메

커니즘을 추가로 고려하였으며, 굴착시 지반거동을 응력-변형거동과 절리구조에 따른 암반블록거동으로 구분하여 각각 통계적, 결정론적으로 안정성을 검토하였다. 안정검토 결과로부터 위험구간을 선정하고 각 구간의 위험요인들이 터널거동에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석하였으며 표준지보패턴 설계시 추가적용할 위험구간에 대한 안정대책을 수립하였다.

2. 기존의 경험적 방법 개선방향

현재 우리나라에서 적용되는 지보설계방법은 RMR 또는 Q 도표에 의해 지보량을 산정하고 경험식 및 수치해석기법을 이용하여 산정한 지보량의 적정성을 검증하는 과정으로 이루어져 있다. 경험적 방법에 의해 산정된 지보량은 대강의 범위를 가지고 있어서, 기술자는 일반적으로 가장 안전측의 지보량을 선정하게 되고 이를 검증하기 위한 수치해석적 검토결과는 대부분 지보재의 허용응력을 크게 밀돌아 안정한 것으로 판정된다. 또한 대표구간을 선정하고 지반등급별 대표물성치를 적용한 수치해석 결과는 터널 전 구간에 대한 안정문제의 대표성에 있어 신뢰도 저하의 우려가 있다. 따라서 수치해석 결과로부터 최적의 지보량을 산정하고 통계적으로 신뢰도를 검증하기 위해서는 수십, 수백회의 반복적인 수치해석 수행이 필요하다. 이는 실무적 측면에서 비효율성 문제가 발생하여 일반적으로 적용하기는 쉽지 않다.

표 1. 개선방안을 고려한 지보설계 흐름



본 고에서는 경험적 방법의 불확실성을 보완하기 위해 슛크리트의 파괴메커니즘과 록볼트 보강효과가 반영된 이론적 방법의 적용을 시도하였다. 또한 통계적, 결정론적 해석기법에 의해 안정성을 검증함으로써 수치해석기법 적용시의 비효율성을 개선하고자 하였다. 수치해석기법은 그 본질적 목적이 복잡한 기하학적, 지반공학적 조건에서 지반거동을 정확하게 예측하는 것이므로 위험구간에 대한 parameter study와 안정대책 수립시 적극적으로 활용하였다. 이러한 개선사항들을 반영한 설계흐름은 표 1과 같다.

3. 대단면 터널사례 및 위험요인 분석

3.1 대단면 터널 설계 및 시공사례 분석

3.1.1 국·내외 대단면 터널 설계 및 시공사례

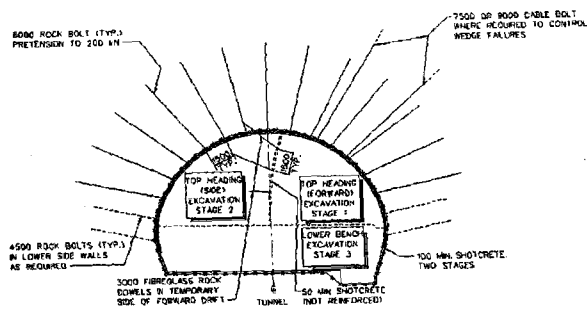
현재 우리나라 국도(4개소) 및 고속도로(6개소)에서 운영중이거나 시공중인 왕복2차로 또는 편도 4차로 대단면 터널의 지보현황을 분석하였다. 지보량 산정은 대부분 RMR, Q 를 비롯한 경험적 방법 및 경험식에 근거하고 있으며 그 결과는 표 2와 같다.

해외사례는 그림 1과 같이 일축압축강도 5~70MPa인 지반을 통과하는 폭 16~19.5m, 높이 6.2~9m

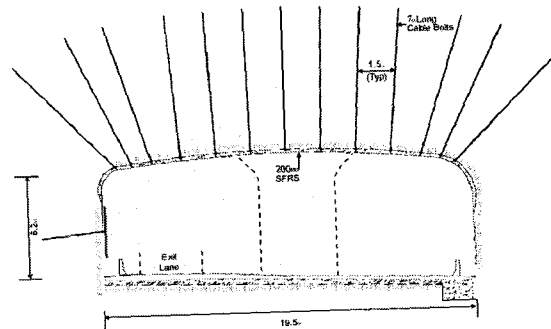
의 대단면 터널에 대하여 검토하였다. 검토결과, 경험적 방법으로 Q-System을 적용하였으며, 이론적 계산결과를 반영하여 지보량을 산정하였다. 또한 굴착초기 안정성 확보를 위한 프리텐션(50~200kN) 겸용 록볼트 및 시공성을 고려한 케이블 볼트(7.5~9m)의 적용이 특기할 만한 사항이다. 대단면 터널 사례조사 결과는 이후, 지보량 산정 및 위험구간 안정확보 대책 수립시에 반영하였다.

표 2. 우리나라 국도 및 고속도로 대단면 터널의 지보량 적용사례

구 분	굴진장 (m)	쏟크리트 (cm)	록볼트(m)		강지보	콘크리트 라이닝 (cm, σ_{ck})
			길이	간격		
P-1	2.0~3.0	5~10	5.0	random~3	-	40(무근), 240~270
P-2	1.5~2.4	8~15	5.0	1.5~2.4	미설치~LG-50, 70	40(무근), 240~270
P-3	1.2~2.0	10~20	5.0	1.2~2.0	LG-50~95, H-125~150	40(무근/철근), 240~270
P-4	1.0~1.5	12~25	5.0~6.0	1.0~1.5	LG-70~95, H-150	40(무근/철근), 240~270
P-5	0.6~1.2	18~25	5.0~6.0	0.6~1.2	LG-95~115, H-150	40(철근), 240~270



Melbourne City Link Tunnel



M5 East Tunnel

그림 1. 해외 대단면 터널 사례

3.1.2 대단면 터널 현장 시공현황 분석

현재 시공중인 서울외곽순환도로의 ○○터널 및 ○○○터널 현장을 답사하고 안정성 및 시공성 측면에서 개선이 필요한 사항을 조사하였다(그림 2). 조사결과, 대단면 굴착에 따른 낙반사고, 분할굴착시 임시지보재 미반영, 다분할 굴착공법의 잦은 변경으로 인한 시공성 저하 등의 문제가 상존하고 있었다. 조사결과를 반영하여 임시 지보의 안정성 및 시공 연속성을 개선하였으며, 특히 현지 암반의 구조적 특성을 분석하고 낙반에 대한 안정성 확보대책을 수립하였다. 이와 관련하여 본고에서는 수평시추를 통한 과업현장의 절리조사 결과로부터 결정론적·통계적 낙반가능성을 분석하고 낙반안전대책을 수립한 내용에 대해 주로 언급하고자 한다.

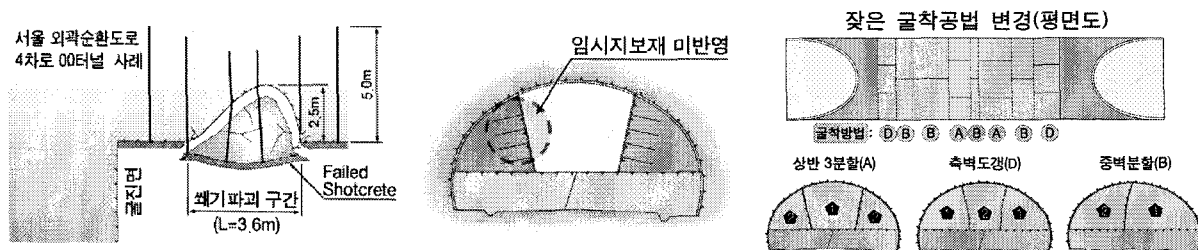


그림 2. 서울 외곽순환도로 대단면 터널 시공현황 조사결과

3.2 대단면 터널 굴착에 따른 지반거동 특성 분석

4차로 대단면 터널은 굴착단면의 형상비(높이/폭)가 일반적인 2차로 터널단면에 비하여 불리하게 형성되므로 굴착시 주변지반의 거동특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 지반조건, 단면형상 및 분할굴착시 필러폭 변화에 따른 안전율, 이완영역 분포 등을 분석하고 굴착 및 지보설계에 반영하였다.

3.2.1 최적단면형상 검토

터널단면은 시설한계 및 터널내 부대시설 수용이 가능한 최소한의 크기로 경제성을 가지며 동시에 안정성을 확보하고 있어야 한다(그림 3). 초기응력이 형성된 응력장에서 안정성 측면의 최적 터널굴착형상은 굴착면 주변의 응력분포가 가능한 한 균등하게 형성되는 형태이다(Richard & Bjorkman, 1978). 본 고에서는 시설한계를 만족하는 몇가지 단면형상비(높이/폭)에 대하여 초기응력-단면형상 관계도표를 작성하고 암반블록의 거동을 분석하였으며 최적단면형상 선정에 활용하였다.

본 고에서 인용한 현장의 측압계수 범위를 고려하면 단면형상비 0.5인 경우, 응력분포가 가장 유리할 것으로 판단된다(그림 4). 또한 암반블록거동은 단면형상비 0.5인 경우 블록변형, 전단변위 및 암반블록 이완영역 등에서 상대적인 안정성을 확보하는 것으로 나타났다(그림 5). 따라서 이를 고려하여 사용성과 안정성을 확보하는 표준단면을 그림 3과 같이 설계하였다.

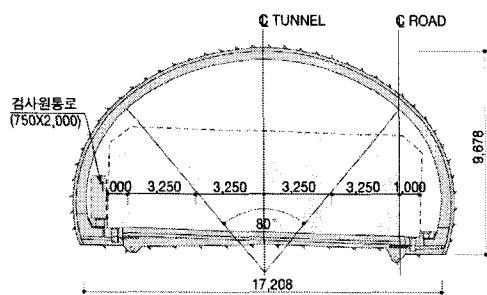


그림 3. 대단면 4차로 터널 표준단면

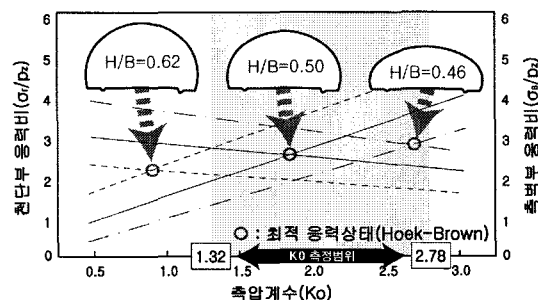


그림 4. 초기응력-단면형상 관계

3.2.2 굴착면 주변지반 파괴거동분석

지반조건 변화에 따른 대단면 터널의 안정성 확보 여부와 잠재적인 지반파괴 형상을 파악하기 위하여 강도감소기법을 적용하였다. 지반조건별 안전율 변화는 주로 암반등급-V인 갱구부 구간에 대하여 검토하고, 지반파괴 형상 파악 결과는 보조공법 적용범위 결정시 반영하였다. 풍화암 이상의 기반암층이 터널 상부 1m 이상 되도록 갱구위치를 정하여 안전율 1.5 이상 확보했으며 변위속도벡터 및 전단변형이 집중

되는 부분을 잠재적 파괴면으로 판단하고 보조공법을 중심각 약 100°의 범위로 적용하였다(그림 6).

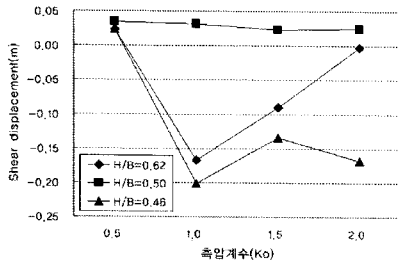


그림 5. 블록거동-단면형상 관계

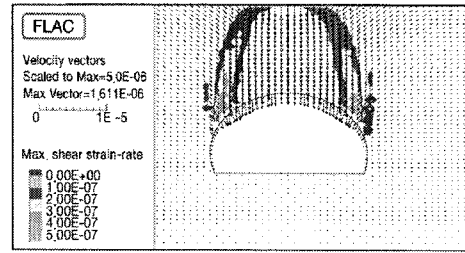


그림 6. 강도감소기법에 의한 파괴거동분석

3.2.3 무지보상태 터널거동의 통계적 분석

무지보 상태의 대단면 터널 거동을 Mohr-Coulomb 및 Hoek-Brown 파괴기준에 의하여 통계적으로 분석하고 암반등급별로 평균적 경향을 분석하였다(그림 7).

소성영역과 관련한 무차원수를 도입하여 통계분석결과를 보간하고 수치해석 결과와 비교하였으며, 암반 등급-4, 5의 암반하중 및 록볼트 길이 산정시 적용하였다.

3.2.4 분할굴착 적용성 검토

대단면 터널은 지반조건을 고려한 분할굴착이 필요하며 3분할 굴착공법 적용시 중앙부 암주 폭을 안정성, 시공성을 고려하여 결정해야한다. 본 과업에서는 암반등급 및 분할형상을 변수로 하는 parameter study를 수행하고 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하여 중앙부 암주 폭을 결정하였다(그림 8).

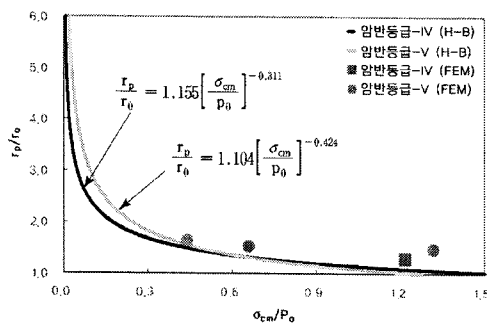


그림 7. 이완영역 분석

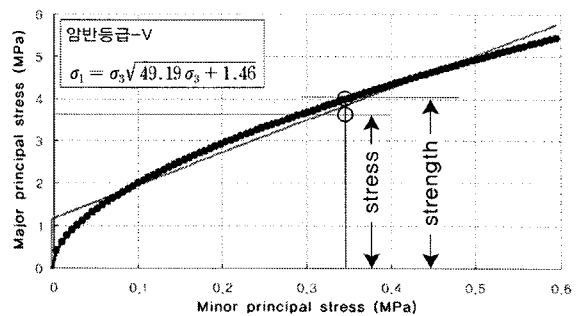


그림 8. 필러폭 결정

4. 지보량 산정방법의 개선

4.1 경험적 방법에 의한 지보량 산정

지반조사 결과로부터 RMR과 Q 값을 산정하고 경험적 제안식 및 Q-System 지보도표를 이용하여 암반 등급별로 지보량을 산정하였으며, 여기에 대단면 터널 사례조사 결과를 반영하였다. RMR은 광산 현장 자료를 수정한 경험적 암반분류법으로 단면형상, 굴착방법, 원지반 응력상태 등에 제한조건이 있으므로 대단면 터널임을 고려하여 Q-System을 주로 적용하였다.

4.2 록볼트 보강효과를 고려한 지보량 산정

록볼트에 의한 지반보강은 매달기 효과, 빔 형성 효과, 압축효과 및 아치형성 효과 등을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 매달기 효과 및 빔 형성 효과는 층상 암반 등 특정한 지반조건에서 주요하게 작용하며 일반적으로는 압축효과와 아치형성 효과의 조합이 주된 메커니즘으로 특히 수평응력장에서는 아치형성효과가 크게 작용한다(Norbert Krauland, 1983). 압축효과는 굴착면에 평행하게 작용하는 구속압력에 의해 증가하는 지반강도를 고려함으로써 산정할 수 있고, 아치형성효과는 록볼트 설치범위내에서 침하에 의해 형성되는 아치형태의 응력분포를 고려하여 계산할 수 있다. 이러한 보강효과는 단면크기, 지반강도 및 록볼트 설치 패턴에 따라 변화하고 동시에 공사비 증감의 요인이 된다.

상기한 보강효과와 공사비의 상관관계를 비지보비용(Specific Support Cost) 개념을 도입해서 분석한 결과, 지보패턴별 최적 록볼트 간격을 산정(그림 10)할 수 있었으며, 경험적 지보량 조정시 반영하였다.

4.3 슛크리트 파괴메커니즘을 고려한 지보량 산정

S.V.L.Barrett & D.R.McCreath(1995)는 경험적 지보설계의 문제점을 개선하기 위하여 낙반하중이 작용하는 경우에 대한 결정론적 설계모델을 개발하고, 강섬유 슛크리트 파괴강도로부터 설계안전율을 계산하는 방법을 제시하였다. Barrett의 슛크리트 파괴메커니즘은 슛크리트와 굴착면의 부착상태가 양호한 경우 발생하는 직접전단파괴와 부착파괴가 일어났을 경우 이어지는 휨파괴 및 사인장 파괴로 구성된다. 본 고에서는 슛크리트의 4가지 파괴모드에 대한 안전율을 검토하고 안정성을 확보하는 지보간격을 분석하였다. 설계적용된 슛크리트는 2.6~6.4정도의 안전율을 확보하고 있으나 P-2에서는 부착력을 상실할 경우, 휨파괴가 우려되므로 슛크리트 타설전 면정리에 특별히 주의해야할 것으로 판단된다(그림 11).

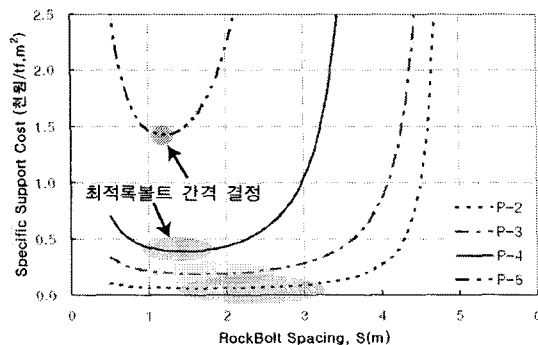


그림 10. 록볼트 지보효과 분석

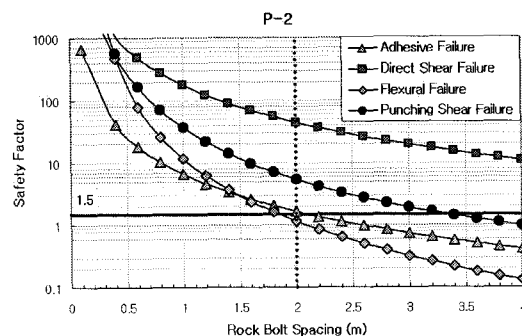


그림 11. 슛크리트 파괴모드 분석

4.4 경험적 지보량의 조정

상기한 바와 같이 이론적 방법을 추가로 고려한 결과, 슛크리트 파괴메커니즘에 관한 Barrett의 방법은 각 패턴별로 지보간격 2.0m이하~3.0m이하의 허용범위를 보이며 지보패턴 P-2의 조정에 주로 영향을 미치고 있다. 한편, 록볼트 효과를 고려한 Norbert의 방법은 효율적인 지보간격이 1.0m~2.8m의 범위로 나타나며 P-4 및 P-5 조정시 영향을 미치고 있다. 이러한 결과를 경험적 선정결과와 비교하여 지보간격 선정범위를 그림 12와 같이 조정하고 안전측의 지보간격을 결정하였다.

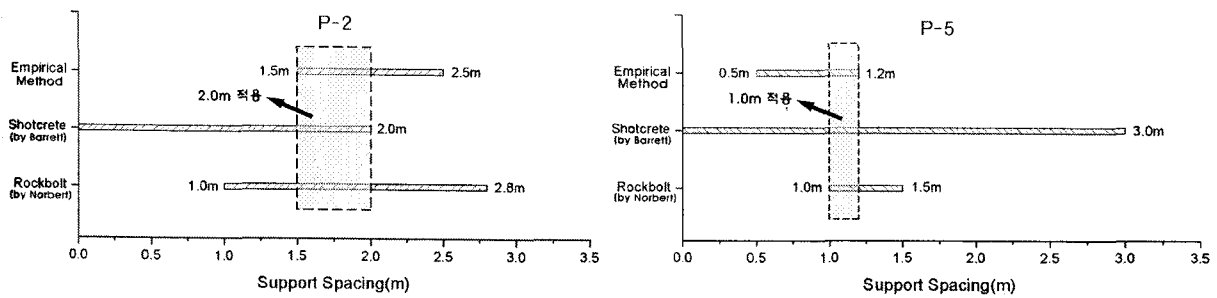


그림 12. 경험적 지보량의 조정

5. 지보 안정성 검토 및 안정대책 수립

터널 굴착시 안정성 확보를 위해서는 지반과 지보의 파괴메커니즘이 효과적으로 연관되어 있어야 하므로 지보설계시 지반 파괴메커니즘에 부합하는 안정성 검토방법을 적용하는 것은 중요한 문제이다. 본 고에서는 지반파괴메커니즘을 굴착면 주변의 응력-변형거동을 따르는 경우와 암반 절리구조에 의한 경우로 구분하여 지보안정성을 검토하고 위험구간에 대한 안정대책을 수립하였다.

5.1 응력-변형거동에 대한 안정검토

5.1.1 Hoek-Brown 파괴기준(2002)에 의한 붕괴확률 검토

굴착면 주변지반의 응력-변형 거동과 지보와의 상호작용을 분석하기 위하여 간단한 이론적 모델을 이용하였다(Hoek & Brown, 1980). 암반강도정수와 터널심도를 각각 정규분포와 균등분포를 따르는 무작위 변수로하여 통계적으로 시뮬레이션하고, 확률적 지반거동 특성을 분석하였다(Hoek, 1999).

본 연구의 대상인 대단면 터널에 대하여 지보패턴별로 2000회의 Monte Carlo Simulation을 수행한 결과, 파괴가 우려되는 터널내 변형의 크기는 2.5~6%의 범위로 분석되었으나, 이론해의 기본가정이 정수압 상태의 폐합된 원형단면 터널임을 감안하여 경험적 제안치(Hoek, 1999)인 2%를 파괴시 변형율로 결정하였다. 그에 따라 지보패턴 P-4, 5에서 각각 1.6%와 10.9%의 파괴확률이 있는 것으로 판단되어(그림 13) 수치해석을 수행하고 추가적인 보강방안이 포함된 예비지보패턴을 계획하였다.

5.1.2 연속체 해석기법에 의한 지보반응곡선 분석

터널 주변지반의 응력-변형거동은 지반강도나 현장응력 조건은 물론 지보의 강성과 설치시기에 의존하므로(Brady & Brown, 1985) 복잡한 현장응력조건에서 폐합되지 않은 단면의 암반-지보 상호거동을 분석하기 위하여 수치해석기법을 적용하였다.

수치해석은 시추결과와 현장시험 결과로부터 통계적으로 산정한 지반등급별 대표 물성치와 수압파쇄시험에 근거한 초기응력조건을 적용했으며, 지보패턴별로 지보반응곡선을 분석한 결과, 각 지보패턴이 안정적으로 평형상태를 확보할 수 있는 것으로 나타났다(그림 14). 이 결과는 상기한 바와 같이 지반등급별 대표물성치를 적용하였으므로 안전측 설계를 위하여 이론식에 의한 통계적 검토결과를 표준지보패턴 설계에 반영하였다.

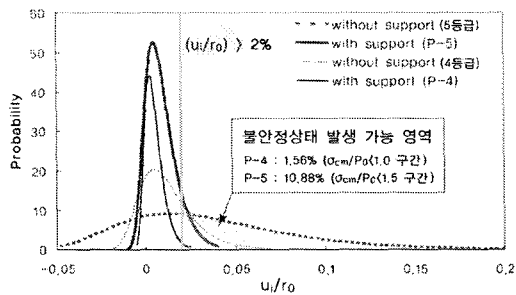


그림 13. 지보패턴별 파괴확률 분석

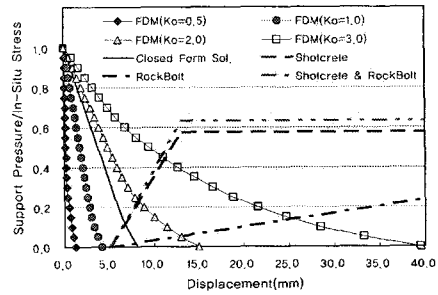


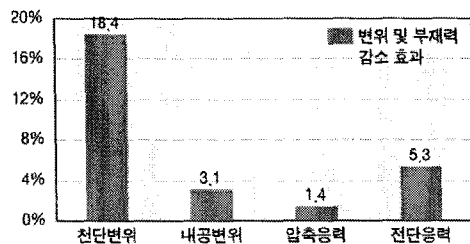
그림 14. 지보반응곡선 분석

5.1.3 붕괴위험구간 선정 및 안정대책

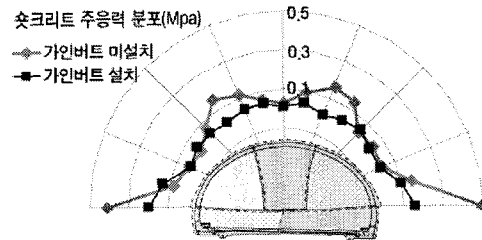
굴착면 주변지반 응력-변형 거동의 통계적 분석결과, 지보패턴 P-4는 $\sigma_{cm}/P_0 < 1.0$ 인 조건에서 1.6%, P-5는 $\sigma_{cm}/P_0 < 1.5$ 인 조건에서 10.9%의 붕괴확률로 위험구간이 형성되었다. 이 결과는 여러 가지 조사 및 시험결과로부터 예측한 평균적 초기응력이나 지반강도보다 불리한 조건이 형성될 수 있음을 의미한다. 실제로 본 연구의 설계현장은 호상 혹은 편마암이 주 암종이나 화강암 관입의 영향을 받은 변성대가 넓게 존재하여 연약대 및 암석강도 저하구간이 출현할 가능성이 있는 것으로 예측된다. 따라서 지반조건의 불확실성을 고려하여 추가적인 안정대책이 필요한 것으로 판단하였다.

P-4의 위험구간에서 록볼트 형식에 따른 터널거동변화를 분석한 결과, 프리텐션 겸용 록볼트 적용시 변위 및 부재력 측면에서 유효한 기능을 발휘하는 것으로 나타났다. P-4의 위험구간에서는 일반적으로 적용되는 전면접착식 마찰형 록볼트의 수동적 지보 개념을 보완하고 초기변형억제 및 굴착직후 암반의 건전도 유지 등(Sharpe et. al., 1984)의 기능을 수행하도록 프리텐션 겸용 록볼트를 예비지보패턴으로 적용하였다.

P-5의 위험구간에서는 가인버트를 설치하고 슛크리트 단부의 면적을 확대하여 과도한 천단침하 및 바닥부 변형을 최대 56%까지 감소할 수 있음을 확인하고 이를 보조공법과 병행하여 예비지보패턴 P-5-1을 계획하였다(그림 15).



프리텐션 겸용 록볼트 효과



가인버트 및 슛크리트 단부 확대효과

그림 15. 예비지보패턴 적용을 위한 예비검토

5.2 암반 블록거동에 대한 안정검토

제한적으로 수집한 절리정보에 따른 암반블록 예측의 한계는 절리암반터널의 불연속체 거동 분석시 발생하는 일반적 문제점이다. 따라서 이를 극복하기 위해 터널 전 구간의 수평방향 BIPS 결과로부터 절리정보를 수집하고 통계적 방법(BLOCKSTAB) 및 결정론적 방법(RoSA)으로 낙반가능성을 분석하였다.

5.2.1 통계적 낙반가능성 검토

기존의 낙반안정성 검토방법은 임의로 설정한 주절리군에 의해 형성된 암반블럭의 안정성만을 검토하므로 불확실성이 존재하는 절리자료로 인한 신뢰도 저하의 문제를 내포하고 있다. 확률적으로 블록발생량을 산출하여 수많은 불규칙 절리를 고려할 수 있는 검토기법(BLOCKSTAB)을 적용하여 기존 블록해석 방법을 개선하였다(서울대 에너지·자원 신기술 연구소, 1999).

본 고에 인용된 사례에서는 터널 전체구간에서 수집된 절리정보를 방향성, 강도특성의 동질성에 따라 균질절리영역(HFD)으로 분류하고 균질절리영역별 통계자료로부터 거동가능블럭의 규모, 거동 및 안전율을 확률분포로 예측하였다(그림 16).

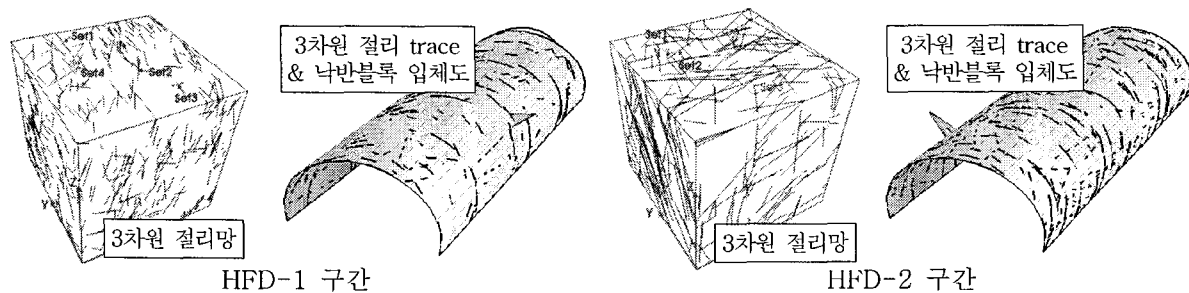


그림 16. 통계적 낙반가능성 검토

분석결과, HFD-2 구간에서 최대 규모 6.3m의 잠재적 키블록 발생확률이 36%인 것으로 나타나 결정론적 분석결과를 추가적으로 고려하여 낙반위험구간을 선정하고 보강대책을 수립하였다.

5.2.2 결정론적 낙반가능성 검토

임의로 선정한 3개조의 주절리군만으로 형성된 키블록으로부터는 실제 낙반위치나 낙반가능블럭의 밀집도 등에 대한 정보를 알 수 없으므로 구체적 안정대책을 수립하기 어렵다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 현장조사된 모든 절리의 방향성과 기하좌표를 이용하여 굴착예정면의 암반블록 분포를 예측하는 방법(RoSA)이 개발된 바 있다(조태진, 2004).

RoSA는 각 불연속면과 터널굴착 예정면의 절대좌표를 고려하여 절리자료를 결정론적으로 해석하므로 낙반가능한 암반블럭의 파괴유형, 규모 및 발생위치를 예측할 수 있다. 비교적 짧은 터널(L=250m)임을 고려하여 터널 전 구간 수평방향 시추 및 BIPS 조사를 수행하고 그 결과를 반영하여 낙반위험구간을 선정하였다(그림 17).

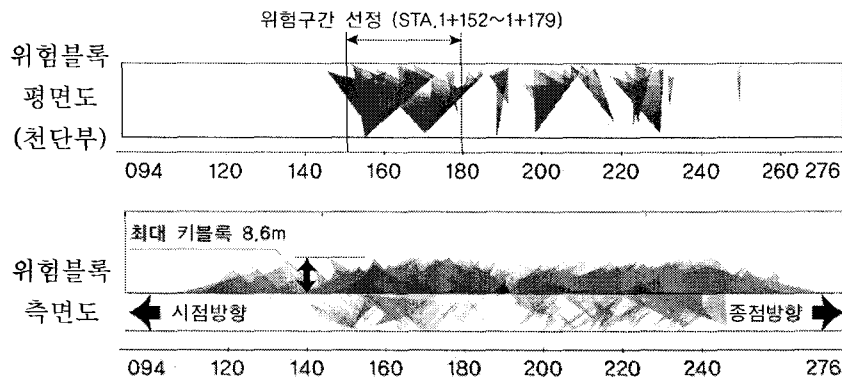
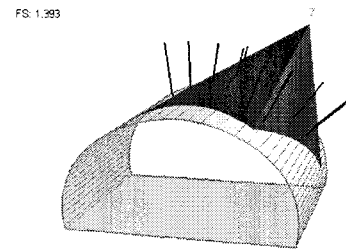


그림 17. 결정론적 낙반가능성 검토



케이블 볼트 보강효과

그림 18. 낙반안정대책

5.2.3 낙반위험구간 선정 및 안정대책

터널 전 구간에서 연속적으로 획득한 절리자료를 통계적, 결정론적으로 분석한 결과, 낙반으로 인한 표준지보패턴의 파괴가 우려되는 구간이 형성되었다.

낙반에 대한 통계적 안정성 검토결과, HFD-1 구간에서 키블록 최대 규모 1.47m, 발생확률 1%, HFD-2 구간에서 키블록 최대 규모 3.14m, 발생확률 5%로 표준지보패턴에 의해 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 HFD-2 구간에서 최대 규모 6.3m의 잠재적 키블록 발생확률이 36%인 것으로 나타나 추가적으로 결정론적 분석기법에 의하여 해석한 결과, HFD-2구간인 STA. 1+ 152~ 1+ 179에서 최대 규모 8.6m의 키블록이 발생하였다. 이는 절리 연장을 50m 이상으로 가정한 결과로 키블록의 발생여부를 확정할 수는 없으나 표준지보패턴의 파괴가 우려되는 규모이므로 추가적인 안정대책을 검토하였다.

굴착단면의 높이에 비하여 예상 암반블록의 규모가 크므로 시공성을 고려하여 깊이 9m의 케이블 볼트를 해당 위험구간에서 계획하여 낙반위험시 신속히 대응가능토록 하였다(그림 18).

6. 결론 및 제언

본고에서는 4차로 대단면 터널의 설계사례를 중심으로 기존의 암반터널 지보설계 방법을 보완하기 위한 이론적, 통계적 분석방법 도입의 필요성 및 적용성을 검토하였다. 기존의 경험적 방법외에 몇가지 이론적 방법을 동시에 고려하여 경험적으로 산정한 지보량을 조정하였다. 대단면 터널 주변 지반거동의 지배적인 요인이 응력상태인지 암반 절리구조인지에 따라 적합한 통계적, 결정론적 분석방법을 적용함으로써 터널안정성 확보 여부에 관한 신뢰도를 향상시켰다. 이러한 지보설계과정을 통하여 선정된 불안정 구간에서 다양한 조건들을 고려하여 수치해석을 수행함으로써 효과적인 안정대책을 수립하였다.

본 연구에서 적용한 이론적 방법들은 비교적 단순하고 현장시공시 쉽게 적용할 수 있으므로 시공결과의 원활한 피드백을 유도하고 합리적인 지보설계 시스템을 확립하는데 긍정적 효과가 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 설계단계에서의 지반분류 및 지보설계 기법을 개선하거나 올바른 시스템을 확립하는 것은 본질적으로 기술자가 설계이후 단계인 시공현장에 지속적 관심을 가져야하는 문제로 오랜 노력이 있어야 점차 발전할 수 있음을 인식하는 것이 중요하다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교 에너지·자원 신기술 연구소, SK건설(주), 1999, 터널굴착시 낙반사고 예방을 위한 암반블록의 안정성 해석에 관한 연구
2. 조태진, 2004, 암반 내부에서의 절리분포 예측을 통한 사면해석, 2004 한국암반공학회 추계 학술 발표회
3. Brady, B.H.G and E.T. Brown, 1985, Rock Mechanics for Underground Mining, Allen and Unwin, London, 527p.
4. Daniel N. Adams, Manfred K. Lechner and Isabelle Lamb, 2001, M5 East Tunnels : A Flat Roofed, Bolt and Shotcrete-Lined Highway, In 2001 RETC Proceedings, Chapter 41, 501-512.
5. Hoek, E., 1999, Rock Engineering, Vancouver, 204-221p.
6. Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, Underground Excavations in Rock, IMM, London, 527p.
7. M.T. McRae, C. Wilson, S.J. Porter, and B. Hutchison, 1997, Primary Support Design for large Span Tunnels in weak Rock: The Melbourne City Link Tunnels, In 1997 RETC Proceedings, Chapter 42, 679-700.
8. Norbert Krauland, 1983, Rock bolting and Economy, Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisko, 499-507p.
9. Richards, R. and Bjorkman, G.S. Optimum shapes for unlined tunnels and cavities. Engineering Geology, Vol. 12, No. 2, 1978, pages 171-179
10. Sharp, J.C., Endersbee L.A., and Mellors, T.W. 1984. Design and Observed Performance of Permanent Cavern Excavations in Weak, Bedded Strata. *Proceedings of the ISRM/BGS*. Cambridge, 1984.
11. S.V.L.Barrett & D.R.McCreath, 1995, Shotcrete Support Design in Blocky Ground : Towards a Deterministic Approach, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10. No. 1, pp.77-89.