

FEM해석에 의한 막장볼트 및 보조벤치의 막장안정성 효과에 관한 연구

김성열^{1)*}, 윤지선²⁾

Study on the Effect of Bolt and Sub-bench on the Stabilization of Tunnel Face through FEM Analysis

Sung-Ryul Kim, Ji-Sun Yoon

Abstract In this paper, review was made for the excavation method and optimum bench length for unstable tunnel face in case of rock classification type V in order to make the best use of in-situ bearing capacity. 3D FEM analyses were performed to investigate the influences on the tunnel face and adjacent area with regard to the pattern and number of bolts when face bolts were used as a supplementary measure. As a result of this study, full section excavation method with sub-bench is effective in reducing the displacement greatly due to early section closure. Displacement-resistant effects in accordance with the bolting patterns are grid type, zig-zag type and then circular type in order of their effect. And horizontal extrusion displacement of tunnel face reduces as the number of bolts increase. A grid type face bolt covering 1.5 m^2 of tunnel face could secure the face stability in case of full section excavation method with sub-bench.

Key words Stability of a tunnel face, Face bolt, 3D FEM analysis, Sub-bench

초 록 본 연구에서는 지반등급 V중에서 막장자립이 곤란한 지반에 대해 지반고유의 지지력을 최대한 이용하기 위한 굴착공법 및 적정벤치길이에 대해 검토하고, 보조공법으로 막장볼트를 적용할 경우 타설 패턴, 타설 개수에 따라 막장 및 막장주변지반에 어떠한 영향이 발생하는지에 대해 3차원 FEM해석을 수행하였다. 보조벤치 병용 전단면공법이 조기 단면폐합으로 변위를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있었으며, 타설 패턴으로는 격자상, 교호배치형(지그재그형), 원주상순으로 변위억제효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 타설 개수 증가에 따라 막장축방향 수평변위에 대해 억제효과가 있는 것으로 분석되었으며 보조벤치 병용 전단면공법굴착시공의 경우 막장부 1.5 m^2 에 1개의 막장볼트(격자상) 타설로 막장면 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심어 막장면 안정성, 막장볼트, 3차원 FEM해석, 보조벤치

1. 서 론

지속적인 연구개발에 따라 터널기술이 크게 진보하였으나 아직도 안전하고 원활한 작업을 위해 작업공간을 가능한 크게 하고 터널변위의 최소화를 위해 조기폐합하려는 노력은 계속되고 있다. 이와 같은 상황에서 볼 때 분할굴착이나 반단면공법 보다는 전단면공법이 유리한 면이 많이 있다. 터널굴착 시는 막장자립을 전제

로 하나 전단면공법은 막장면이 크기 때문에 막장자립이 곤란하게 될 가능성이 크다. 이러한 경우 막장안정성을 확보하기 위하여 몇 개의 보조공법을 병용할 필요가 있다. 보조공법에는 여러 가지가 있지만 그 중에서 시공성이 좋고 공기가 빨라 조기폐합이 가능한 보조벤치병용 전단면굴착(윤지선, 2005)시의 막장볼트공법이 바람직한 것으로 판단된다. 그동안 막장볼트에 대한 연구논문들이 다수 있으나 단면크기, 지반조건, 보강재특성 등 여러 변수에 따라 그 거동이 달라짐으로 실제 활용면에서는 제한적일 수밖에 없었다. 지금까지의 설계도 경험적설계에 치우쳐 안전율이 너무 높아 비경제적이거나 안전율이 지나치게 낮아 위험한 경우가 자주 발생하였다. 앞으로도 계속적으로 매개변수를 달리함으로써 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

¹⁾ 동신기술개발주식회사 기술연구소장

²⁾ 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수

* 교신저자 : sykim4909@hanmail.net

접수일 : 2008년 11월 3일

심사 완료일 : 2008년 12월 18일

게재 확정일 : 2008년 12월 22일

본 연구에서는 먼저 터널을 보조벤치 병용 전단면 공법으로 굴착할 때 지반등급 V의 지반이 어느 정도의 변형강도특성이면 막장자립이 곤란하게 되며 보조공법의 필요성이 생기는데 대해 알아보고 막장자립이 곤란한 것으로 판단되는 지반 V_{II} (지반등급V중 막장자립이 곤란한 지반상태)에 대해 지반이 갖는 지지력을 최대한 이용하기 위한 분할위치에 대해 검토를 수행하였다.

다음으로 막장의 자립이 곤란한 지반 V_{II} 에 대해 보조공법으로 페이스볼트를 병용하여 굴착할 경우 3차원 유한요소해석으로 타설 패턴 및 타설 개수에 따라 막장 및 막장주변지반에 어떠한 영향이 생기는데 대해 고찰하여 보았다.

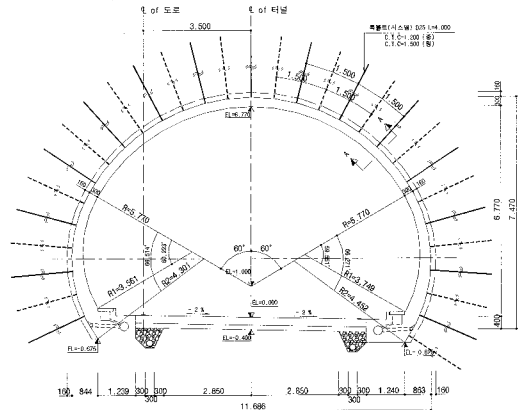


그림 1. 국토해양부 터널표준단면도 typeV

2. 해석조건

2.1 해석모델

수치해석은 3차원 유한요소법에 의한 탄소성 해석으로 수행하는 것으로 하고 해석모델은 토피 36 m(3D : D는 터널 폭)의 지반 내에 건설되는 2차선 도로 터널로 선정하였다. 단면은 국토해양부 터널 표준단면도 typeV를 참고로 하였으며 그림 1과 같다. 편경사를 고려하여 비대칭 단면으로 하였다.

해석영역은 터널 굴착 시 지반의 응력 및 변위 영향이 거의 없는 영역까지 확장하여 경계조건으로 설정하여야 한다. 여기서는 해석 값이 영향 받지 않도록 그림 2에서와 같이 하부해석 영역을 4D(48 m), 측부를 5D(60 m) 그리고 종단 해석영역으로 5D(60 m)를 적용하였다.

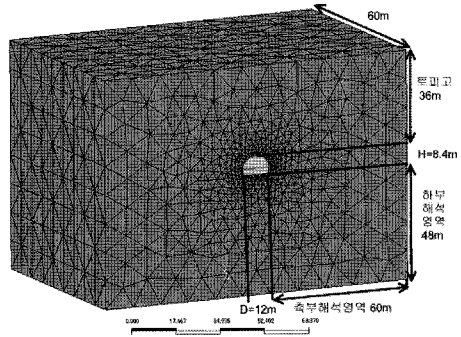


그림 2. 해석모델

축압계수(k)는 중요 프로젝트의 경우 초기응력 측정으로 결정하는 것이 바람직 하지만 본 연구에서는 Brown and Hoek(조태진 외, 2008)의 축압계수(k) - 지표에서 깊이(z) 관계도 그림 3으로부터 k = 1.5를 적용하였다. 축압계수는 1/3보다 작은 경우도 있지만 잔류응력 크기에 따라 1.0이 되던지 이보다 커지는 경우도 있다. 국내에서 초기지압 측정결과 평균 k값은 0.52 ~ 4.91(배성호 외, 2007)정도로 알려지고 있다.

해석프로그램은 지반 및 터널구조물 범용 유한요소 해석프로그램인 MIDAS/GTS를 사용하였으며 항복판정은 Mohr Coulomb의 파괴규준을 적용하였다. 해석에 있어서는 지반은 solid요소, shotcrete는 plate요소, 페이스볼트는 truss요소로 각각 모델화 하였다.

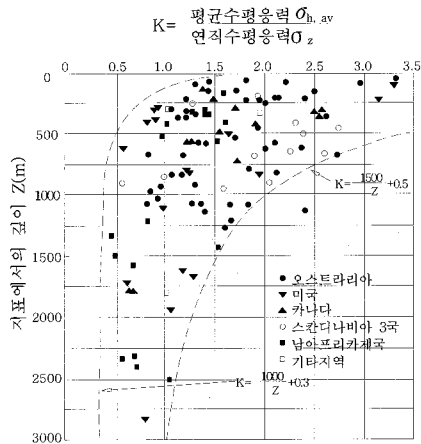


그림 3. 평균수평응력/수직응력의 비(도덕현 외, 2003)

2.2 지반 입력정수

해석에 이용된 입력정수는 표 1과 같다. 이들 입력정수 중 지반의 변형계수를 Serafim and Pereira(1983)이

제안하고 있는 식으로부터 추정하고 강도정수로서 점착력과 내부마찰각에 대해서는 지반등급 V에 대한 Bieniawski의 제안 값(申僖淳 외 2004), 설계 적용사례

(박도현 외, 2007, D. Peila et al, 1996, Nick Barton et al, 2008) 등을 참조하여 설정하였다. 예를 들면 지반등급이 V인 경우 변형계수(E)는 $RMR=20$ 으로부터 $E_{mass} = 10^{-40} = 1.78 \text{ GPa}$ ($\approx 2,000 \text{ MPa}$)로 하고, 설계적용사례에 의한 점착력은 20 kN/m^2 , 내부마찰각은 30° 로 하였다. 또한 슛크리트의 탄성계수 값에 대해서는 $1.5 \times 10^4 \text{ MPa}$, 페이스볼트의 탄성계수에 대해서는 글래스화이버파이프(GFRP)를 타설하는 것으로 하여 $8.5 \times 10^4 \text{ MPa}$ 로 하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 보조공법이 필요한 지반조건

그림 4(a), (b)는 지반등급IV의 지반을 상하 반단면(벤치길이: 30 m)으로 굴착한 경우와 보조벤치 병용 전단면 공법(벤치길이: 3 m)으로 굴착한 경우에 대해 터널 막장면의 축방향 수평변위를 contour로 나타낸 것이다. 막장면에서 축방향 수평변위는 약 1.69 mm 로 두 공법 모두 유사하게 나타났다. 하지만 하부 단면의 경

우 보조벤치 병용 전단면 공법에서 변위가 다소 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 벤치길이 차이로 인한 구속 효과 및 폐합시간 차이 때문으로 판단되며 굴착안정성에 영향을 주는 상부 단면 막장부의 경우는 두 공법의 효과가 유사한 것으로 분석되었다.

그림 5(a), (b)는 지반등급V의 경우이다. 표 1의 지반등급V의 입력정수에서 변형계수를 하향시켜 막장면의 축방향 수평변위를 보조벤치 병용 전단면공법으로 수치해석 하였을 때 허용 축방향수평변위 60 mm 를 초과하는 지반상태이다. 다나카(田中)(道廣一利 외, 2002)는 막장 축방향 수평변위와 관련하여 막장의 안정성 레벨을 객관적으로 판단하는 시도를 하였다. 터널 막장에서 변위를 계측하여 그 결과를 분석함으로써 막장붕괴 예측을 시도하였다. 현장에서는 laser 변위 계를 사용하여 터널 축방향의 변위를 측정하고 있다. 계측된 데이터 터널 변위속도로 환산하면 변위속도가 감소하는 단계에서는 막장은 안정하고 변위속도가 일정한 경우는 막장붕괴로 이어질 가능성이 있는 것으로 지적하고 있다. 다른 한편으로 막장이 붕괴할 때의 터널 축 방향 수평

표 1. 지반입력정수

구 분	변형계수 E (MPa)	포아슨비 ν	점착력 C (kN/m^2)	내부 마찰각 Φ ($^\circ$)	단위 중량 r (kN/m^3)	비 고
암반등급IV	4,000	0.3	200	25	23	Bienawski
암반등급V	2,000 이하	0.33	20	30	19	설 계 적용사례
Soft Shot.	5×10^3	0.27	5×10^3	-	24	-
HardShot	5×10^4	0.2	5×10^3	-	24	-
Rock bolt	2.1×10^5	-	-	-	-	이형철근 (D=25 mm)
Face bolt	8.5×10^4	-	-	-	-	GFRP (D=28 mm)

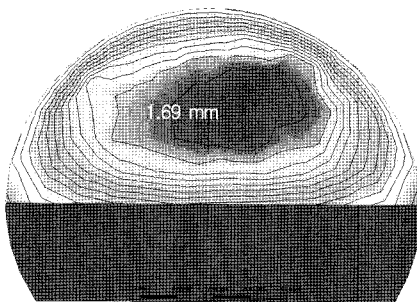


그림 4(a). 상하반단면(벤치길이 30 m) 막장 축방향 수평변위도 [지반등급IV]

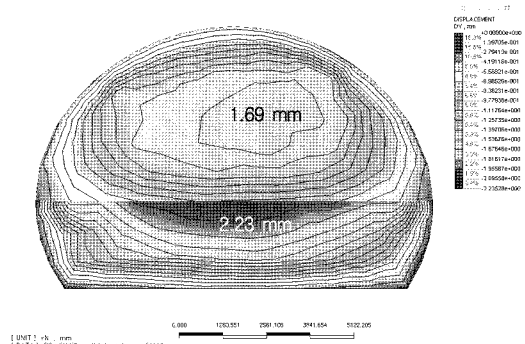


그림 4(b). 보조벤치 병용 전단면공법(벤치길이 3 m) 막장 축방향 수평변위도 [지반등급IV]

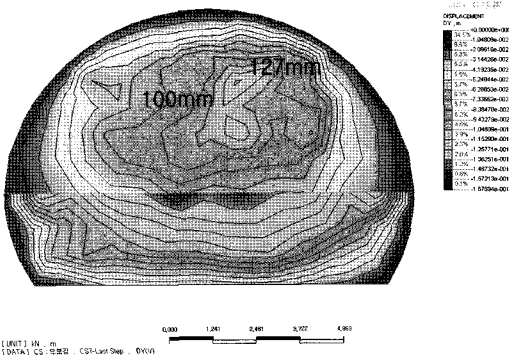


그림 5(a). 막장 축방향 수평변위도 [지반등급 V_{II}]

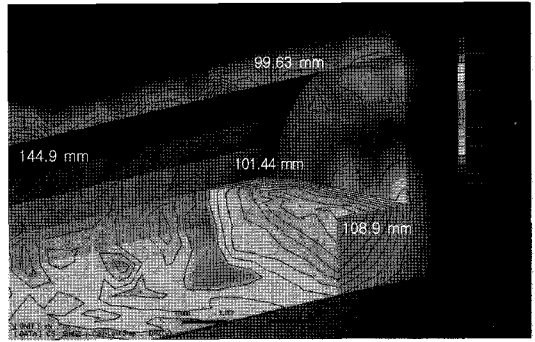


그림 5(b). 내공변위도 [지반등급 V_{II}]

변위는 약 70 mm인 것으로 보고되고 있다. 여기서의 계측결과는 신간선(新幹線) 단면(반경 4,750 mm)의 예이며 고속 자동차도로 터널단면의 크기도 이와 비슷하다.

또한 터널 막장안정성을 생각하는 경우에는 막장 전방지반의 응력이 허용응력에 도달하여 그로 인해 부분적 또는 전반적인 파괴가 일어나는 것은 아닌가하는 응력상의 문제와 재배분응력에 의해 파괴를 일으킬 정도로 큰 변형을 일으키는 것은 아닌가 하는 변형상의 문제가 있다.

다니모토(谷本)와 요시오끼(吉岡)는(道廣一利 외, 2002) 고속 자동차 도로터널의 내공변위 계측결과를 분석하여 터널 S.L.근방의 내공변위가 150 mm를 초과하면 터널안정성 확보가 곤란하여 일이 진척되지 않는 경우가 많은 것으로 보고하고 있다. 이것은 터널 벽면이 75 mm정도 변위가 발생되면 변형상의 문제가 생기는 것을 의미하고 있다. 따라서 막장 안정성에 있어서도 변형상의 문제를 고려할 필요가 있음을 알 수 있다(道廣一利 외, 2002).

본 연구에서는 터널반경이 5,770 mm로 신간선 4,750 mm보다 크므로 관리 기준치를 신간선보다 작은 값으로 하는 전제하에 『직접 변형을 제어법』(김영수 외, 2008, 東博秋 외, 1998, 久湊風 외, 2007)에 의해 터널반경(R), 한계변형률(ϵ)로 구하여지는 반경방향 변위(δ_r)로서 $\delta_r = R \times \epsilon = 60$ mm를 막장변위의 관리치로 하였다.

이와 같은 것을 고려하여 볼 때 표 2와 같은 V_{II} 지반 등급이 되면 막장면의 축방향 수평변위가 현저히 증가함을 알 수 있었고 지반분류등급이 나빠질수록 막장면의 축방향 수평변위는 증대하는 것을 알 수 있었다. 변형계수가 적어도 300 MPa이상이 될 경우 막장 안정성이 확보되는 것을 알 수 있다.

V_{II} 지반등급을 보조벤치 병용 전단면공법으로 굴착한 경우는 허용기준 60 mm 이상의 영역이 상부 반단면에 나타나므로 막장자립이 곤란한 것으로 판단할 수 있다.

지반의 변형·강도특성이 표 2에 나타난 V_{II}와 같은 지반등급이 되면 시공 중의 막장안정성을 확보하기 위해서는 굴착면을 분할하여 터널을 굴착하던지 보조공법을 병용할 필요가 있는 것으로 생각된다.

이 때문에 굴착공법의 차이가 터널 굴착면의 변형거동에 어떠한 영향이 있는지에 대하여 검토하여 보았다. 점보드릴과 같은 대형기계를 사용하는 전제로 전단면공법과 상부 반단면공법(벤치길이 : 30 m)에 대해 검토하였다. V_{II} 등급 암반에 대해 전단면공법을 비교대상으로 한 것은 보조벤치 병용 전단면 공법에 있어서 벤치길이 3 m의 이점을 알아보기 위해서이다.

그림 6, 7에 각각 전단면공법과 상부 반단면공법에 의해 터널을 굴착한 경우의 막장면에 있어서 축방향 수평변위 등고선을 나타내고 있다. 그림 6에 나타난 전단면공법의 경우에는 그림 5(a)에서의 해석보다 한층 더

표 2. 변형계수별 막장축방향변위 및 지반등급표

변형계수 E (MPa)	포아슨비 ν	점착력 C (kN/m ²)	내부 마찰각 Φ (°)	단위 중량 r (kN/m ³)	막장 압출 변위 (mm)	안정성	비고
500	0.33	20	30	19	38	안정	
300	0.33	20	30	19	60	"	
150	0.33	20	30	19	127	불안정	지반등급 V _{II}

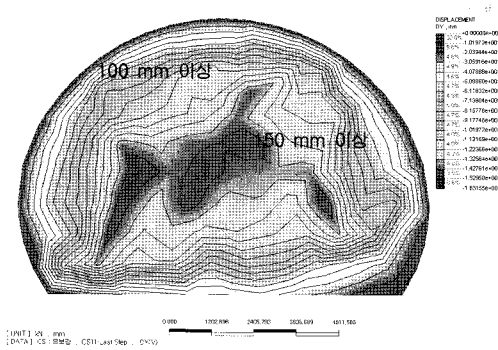


그림 6. 전단면공법

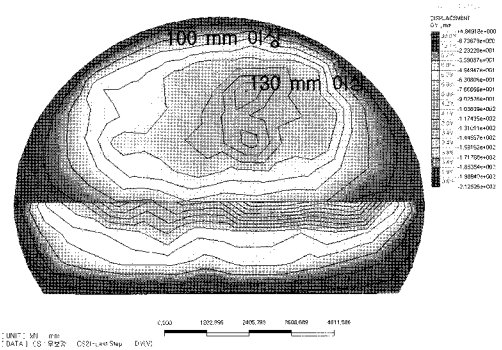


그림 7. 상하반단면(벤치길이 30 m)

막장면의 축방향 수평변위가 증가하기 때문에 막장안정성에는 사정이 나빠진 것을 알 수 있다. 한편, 상부 반단면공법에 의해 터널을 굴착한 경우에 대해서는 그림 7에서와 같이 막장면의 축방향 수평변위는 그림 5(a)의 보조벤치 병용 전단면공법의 결과와 유사하게 나타났다. 불량한 지반등급 V_{II} 에 대해 보조벤치(3 m) 적용 시 효과가 큼(막장변위 15% 정도 감소)을 확인할 수 있었다.

3.2 라이닝 콘크리트의 두께를 확보하기 위한 터널 내공변위 문제

그림 8은 터널을 상부 반단면공법, 보조벤치 병용 전단면공법으로 굴착한 경우의 천단부 침하곡선을 나타낸다. 그림 8에서 횡축의 막장거리 (-)의 값은 막장전방의 미 굴착부분, (+)의 값은 막장후방의 시공이 끝난 구간간의 변위를 표시하고 있다. 또한 터널단면의 폐합위치는 상부 반단면공법은 막장후방 30 m, 보조벤치 병용 전단면공법은 막장후방 3 m로 하고 있다.

터널 미 굴착부분의 선행변위, 터널굴착후방의 변위에 큰 차이가 없는 것은 터널 굴착면이 지보재(숏크리트, 록볼트)에 의해 일시적으로 피복되어진 영향으로

생각된다.

그림 9는 측벽간의 상대적인 내공변위를 나타낸다. 터널 미 굴착 부분의 선행변위에 대해서는 굴착공법의 차이에 의한 차이는 거의 없다. 그러나 측벽간의 상대적 변위에 대해서는 상부 반단면공법은 터널단면폐합이 막장 면에서 30 m후방에 있기 때문에 하반 굴착 시 구속속력 해방, 폐합시간차이로 인해 측벽 내공변위는 최대 약 1.4배 까지도 커지는 것으로 나타났다.

이것은 터널 굴착 후 내공변위에 의해서 시공 면에서 순조롭게 되지 않을 것이 우려되는 지반에 터널을 굴착하는 경우에는 조기에 터널단면을 폐합하지 않으면 안 되는 것을 시사하고 있다.

이상의 것으로부터 막장의 자립이 곤란하고 또한 터널 굴착에 따른 내공변위가 우려되는 지반에서는 조기 폐합이 가능한 보조벤치 병용 전단면공법(벤치길이 3 m)으로 굴착하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.3 막장볼트의 보강효과

(1) 배치형상

수치해석에서는 막장면의 안정성확보를 위해서 막장

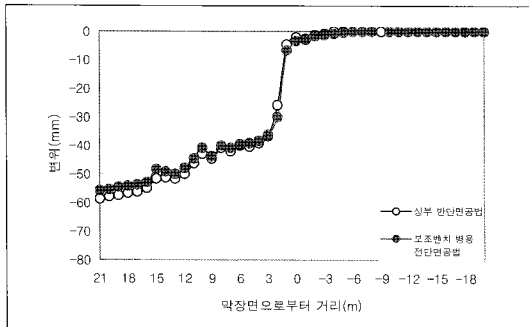


그림 8. 천단부 침하곡선

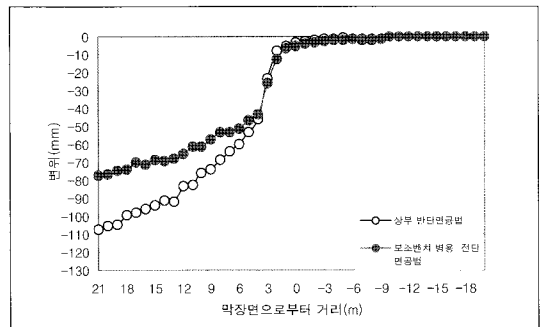


그림 9. 측벽내공변위

볼트(수평타설)를 병용한 보조벤치 병용 전단면공법으로 터널을 시공하는 것으로 하였다. 또한 막장볼트의 타설 길이는 12 m로 하였다. 이것은 보조공을 병용하지 않고서 굴착한 경우에는 그림 10과 같이 막장전방에 dome상의 소성역이 약 3.0 m 정도 발생하고 있어 여기에 정착장 및 여유를 고려하여 타설 길이를 결정하였다. 터널굴진장은 상 하 단면 모두 1.0 m로 굴진하며 해석 시 굴착단계는 원지반상태 → 상반굴착 및 막장볼트 타설 → 1차지보설치(목볼트, 슛크리트) → 슛크리트 경화단계 → 하반굴착 → 1차지보설치(목볼트, 슛크리트) → 슛크리트 경화단계의 순서로 하였다. 막장볼트는 굴착

과 동시에 타설한 것으로 하였으며 6.0 m 굴착마다 중첩배치 하였다.

먼저 막장볼트를 배치형상 차이에 의해 터널굴착면의 변형거동에 어떠한 영향이 생기는 가에 대해 검토하였다. 막장볼트의 배치형상으로는 격자상, 교호배치형, 원주상의 3가지를 생각하였다(그림 11(a)~(c)참조).

단, 각 패턴 모두 타설 개수는 터널 상부단면에 31개로 하였다. 격자상의 경우에는 1.5 m²에 1개 타설하는 것으로 한다.

그림 12 (a)~(c)는 막장볼트의 타설 패턴별 막장축방 수평변위도이다.

먼저 막장볼트를 격자상으로 타설한 경우에는 상부반 단면 막장면의 중앙부 축방향 수평변위가 32 mm이다. 보조공법을 병용하지 않고 굴착한 경우 그림 5(a)의 127 mm에 비해 수평변위가 75%까지 감소되는 것을 알 수 있다.

다음으로 교호 배치형으로 배치한 경우에는 격자상으로 배치한 경우와 거의 동일한 경향을 나타낸다. 그리고 원주상의 경우이지만 이것은 터널아치 벽면형상으로 배치한 막장볼트로 그 효과는 막장볼트 미 적용시에 대해 약 60%의 감소효과는 있지만 타설 패턴별 비교결과 상대적으로 가장 작은 것으로 나타났다.

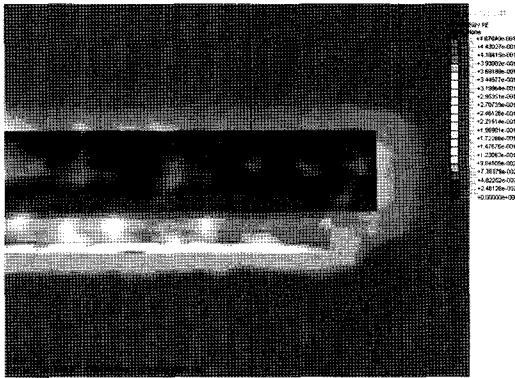


그림 10. 소성역

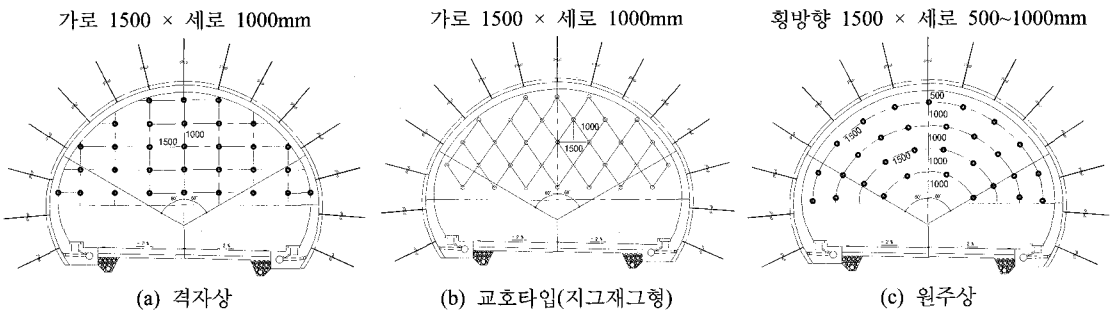


그림 11. 막장볼트 타설 패턴

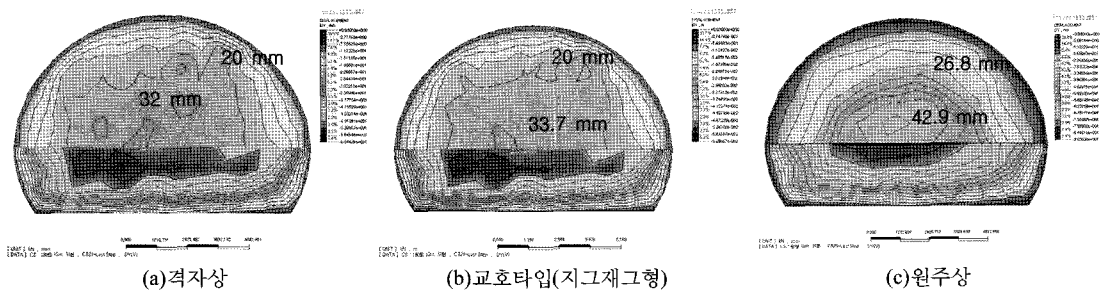


그림 12. 막장볼트의 타설배치 형상별 막장 축방향 수평변위경향

이상에 나타난 3가지의 배치형상해석 결과에서 막장면의 축방향 수평변위 억제효과가 큰 패턴으로서는 격자상, 교호 배치형, 원주상의 순서로 나타났으나 그 차이는 미소하다. 그 원인은 변위contour가 큰 막장 중앙부에 어느 배치형상의 막장볼트가 많이 물려 있는가에 따른 영향으로 판단된다.

그림 13, 14는 각각 보조공법(막장볼트)을 병용하지 않고 굴착한 경우와 막장볼트를 격자상(타설개수 31개)으로 타설하여 굴착한 경우의 터널 종단방향에 있어서 막장전방지반의 수평변위를 나타낸 것이다. 이들의 그림을 비교하면 보조공법을 병용하지 않은 경우는 127 mm를 넘는 영역이 발생하지만 막장볼트를 격자상으로 31개 타설한 것에서는 이 영역이 소실되고 있다. 또한 막장볼트를 병용한 그림 12에 있어서는 축방향 수평변위가 32 mm를 초과하는 범위는 일부에 불과한 것으로 분석되었다.

그 외에 보조벤치 부분의 수평변위량도 억제되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 보조공법을 병용하지 않고서 굴착한 그림 13의 경우는 막장볼트를 병용한 그림 14에 비해 상대적으로 큰 수평변위가 나타났다.

(2) 타설개수

막장볼트의 타설 패턴은 격자상으로서 그 타설 개수를 변경시켜 터널막장면의 변형거동에 어떠한 영향이 있는가에 대해 검토하였다. 타설 개수는 이미 타설한 31개를 포함하여 15개와 47개의 3종류이다.

이것은 2차선 도로 터널단면에서 각각 3.0, 1.5, 1.0 m²에 1개 타설하는 것에 상당하다. 그림 15, 16에 막장볼트를 격자상으로 15개, 47개 타설한 경우의 막장면에 있어서 축방향 수평변위를 나타낸다. 이들 그림에 의해 막장볼트를 15개 타설한 경우에는 47 mm까지 47개 타설한 경우에는 31 mm까지 막장면의 수평변위가 억제되는 것을 알 수 있다. 또한 보조벤치 부분의 수평변위도 타설 개수가 증가함에 따라 억제되고 있는 것을 알 수 있다(서경원, 2006).

그림 17, 18은 터널 종단방향에 있어서 막장전방지반의 수평변위를 나타낸 것이다. 그림을 비교하면 막장볼트의 타설 개수가 증가함과 더불어 막장변위가 47 mm, 32 mm, 31 mm로 막장면의 축방향 수평변위가 억제되는 효과가 커지고 있다. 그러나 31개 타설 이상에서는 효과 증가가 거의 없었다. 그 원인은 막장에서 발생하

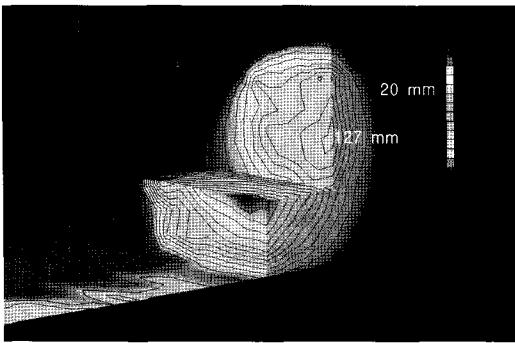


그림 13. 보조벤치 병용 전단면공법 적용시 막장 수평변위분포

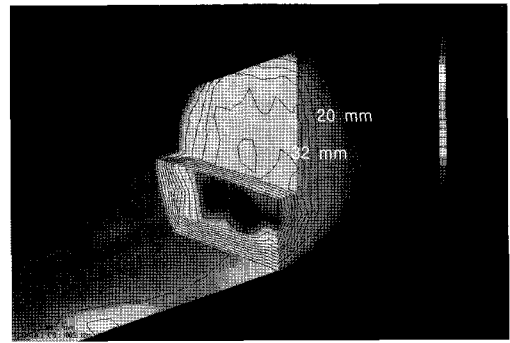


그림 14. 막장볼트31본(격자상) 적용시 막장 수평변위분포

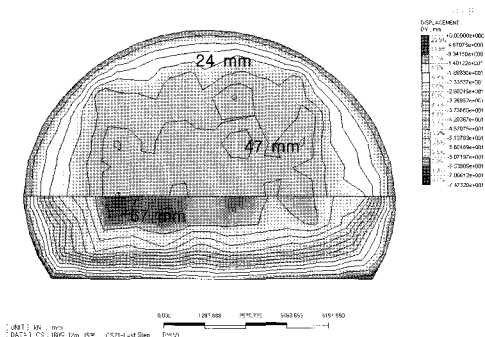


그림 15. 막장볼트 15개 적용시 막장 수평변위분포

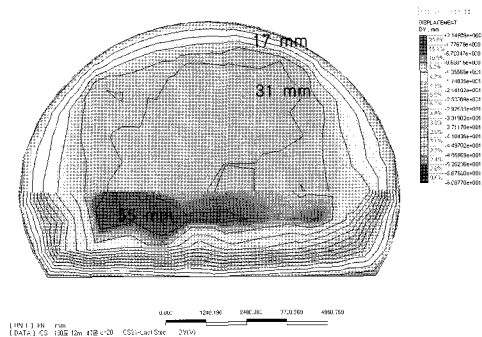


그림 16. 막장볼트 47개 적용시 막장 수평변위분포

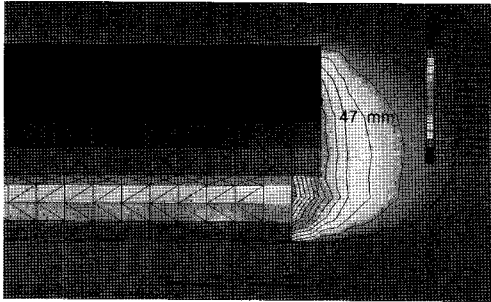


그림 17. 막장볼트 15개(격자상) 적용시 막장 수평변위분포

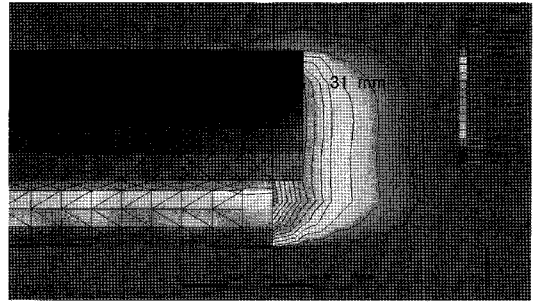


그림 18. 막장볼트 47개(격자상) 적용시 막장 수평변위분포

는 축력에 대해 소요볼트수를 초과한 과잉 배치 때문으로 생각되며 타설개수 결정에는 경제성 및 시공성을 고려할 필요가 있다.

이상의 것으로부터 막장의 자립이 문제되는 지반을 막장볼트를 병용한 보조벤치 병용 전단면공법에 의해 시공하는 경우에는 1.5 m²에 1개씩 격자상으로 타설하는 것에 의해 막장면의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론 및 토의

막장 자립이 곤란한 지반(V_{II})은 어느 정도의 변형강도정수를 갖게 되며 V_{II} 지반에서 보조벤치 및 막장볼트공법이 막장안정에 미치는 영향을 알아보기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구결과에서 이하와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 막장자립이 곤란한 지반을 링컷, 반단면공법과 같은 분할굴착을 할 경우 폐합지연으로 내공변위가 증가되므로 라이닝 소요단면 확보가 어렵기 때문에 조기폐합이 가능하고 작업공간도 넓은 보조벤치 병용 전단면공법이 효과적임을 알 수 있었다.
- (2) 막장볼트보강효과는 타설밀도에 영향을 받으며 어느 정도의 타설밀도(1.5 m²)를 넘으면 보강하여도 보강효과 증진에 기여하지 못함을 알 수 있었다. 볼트수가 어느 정도 이상 증가하면 소요 축력이상으로 배치되기 때문으로 여겨진다. 보조벤치병용 전단면공법으로 굴착 시 1.5 m²정도에 1개씩 격자상 타설로 막장면 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (3) 막장볼트 배치형상은 격자상이 가장 억제효과가 좋고 교호배치형, 원주상 순으로 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 그 원인은 변위 contour가 큰 중앙부에

어느 배치 형상이 볼트를 많이 배치하였는가에 관련된 것으로 보인다.

- (4) 막장주변에서 재해를 감소시켜 작업의 안전성을 확보하기 위해서는 막장 안전성 레벨을 몇가지 방법에 의해 객관적으로 판단할 필요가 있다. 그 방법으로서 막장의 변위량 측정으로부터 막장의 붕괴위험성을 예측하는 방법들이 검토되고 있다.

터널의 내공변위나 천단침하에 대해서는 많은 계측데이터가 있지만 막장변위 계측데이터는 전무한 상태이며, 그 거동도 명확하지 않다.

막장의 안전성을 정량적으로 판정할 수 있도록 laser 변위계와 측량기에 의해 막장 수평변위를 모니터링함으로써 보다 많은 데이터를 축적하여 막장 안전성 레벨설정과 더불어 막장 감시방법의 시스템화에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

이상의 연구 결과에 대해서는 앞으로 실제 현장에서 의 계측에 의한 검증이 필요하다.

참고문헌

1. 김영수, 이재호, 문홍득, 김광일, 2008, 정량적인 막장 안정성 평가 기법을 이용한 NATM터널의 보강공법 평가, 한국지반공학회, Vol.24, No.2, pp38-40.
2. 도덕현, 이재현, 고재만, 2003, 암반공동의 설계와 시공, pp98'106, 건설정보사.
3. 박도현, 김영근, 2007, 암반능력의 분포특성을 고려한 터널거동분석에 관한 연구, 터널기술, 제9권 3호, pp275-286.
4. 배성호, 김재민, 김장순, 박의섭, 2007, 국내 암반 초기응력의 전반적 분포특성과 공학적 중요성, 춘계 지질 과학 기술 공동 학술대회, pp310-312.
5. 서경원, Nishimura kazho, 김장용, 2006, 실내실험 및 수치해석을 이용한 막장볼트의 최적타설개수에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol.16, No6 pp.467-674.
6. 윤지선, 2005, 토목지질학, 미래기술, pp235-241.

7. 조태진, 윤용균, 이연규, 장찬동, 2008, 21C 암반역학, 건설정보사 PP309-312
8. D. Peila, P.P Oreste & S. Pelizza, 1996, "Study of the influence of sub-horizontal fiber glass pipes on the stability", Proc. Int. Conf. on North American Tunneling 96. Vol.1, pp425-431.
9. Nick Barton, ZT Bieniaski, 2008 KMR and Q-setting records straight, tunnels & tunnelling international, February, pp26-29.
10. 久濑風·森近裕一郎·山本一郎·藤野晃, 2007 未固結沢部を小かぶりで掘る, トンネルと地下, Vol.38, No.3, pp18-19.
11. 谷本親伯, 吉岡尙也, 1992, 變形に基づくトンネル地山分類の提案, 材料, 第41卷, 第463号, pp424-429.
12. 道廣一利, 吉岡尙也, 2002, 鏡止めボルトの作用効果を三次元 FEMで解析, トンネルと地下, 第33卷, 6号, pp43-48.
13. 東博秋·早瀬邦仁·浅井貞一, 1998, ため池の点在する地域を小かぶり施工, トンネルと地下, Vol.29, No.8, pp25-26.
14. 徐景源, 2006, 新たな切羽ボルトの打設ボタンに関する研究, pp151-180.
15. 中情淳, 鮮于椿, 李斗禾, 2004 토목기술자를 위한 地質調査 및 岩盤分類, 구미서관, pp221-238.
16. 田中一雄, 川上純, 池田宏, 怡土一美, 1996, 切羽變位計測にする切羽崩壊豫測の一試み, トンネルと地下, Vol.27, No.6, pp55-60.

김 성 열

1977년 연세대학교 토목공학과 공학사
1994년 연세대학교 토목공학과 공학석사



Tel: 02-424-0095
E-mail: sykim4909@hanmail.net
현재 동신기술개발(주) 기술연구소 소장

윤 지 선

1971년 일본 동경대학교 자원개발공학과 공학석사
1975년 일본 동경대학교 자원개발공학과 공학박사



Tel: 032-860-7557
E-mail: JYOON@inha.ac.kr
현재 인하대학교 지구환경토목공학부 교수