

NATM 터널의 대심도 풍화대층에서의 지반거동 및 보강방법

Ground Behavior and Reinforcing Methods of NATM Tunnel through Deep Weathered Zone

성화돈* 안정환** 천병식***
Hwa-Don Sung Jung-Whan An Byung-Sik Chun

ABSTRACT

This study analyzed ground settlement and ground stress depending on tunnel excavation and the ground reinforcing grouting methods for double line road tunnel through deep weathered zone. Diameter of double line road tunnel was approximately 12m and umbrella arch method and side wall reinforcing grouting were applied. The ring-cut split excavation method and CD-cut excavation method for excavation method were applied. Analysis of failure rate and vertical stress ratio show that the tunnel for which the height of the cover(H) was higher than four times the diameter, it can be considered a deep tunnel.

Comparisons of various excavation and ground reinforcement methods were showed that CD-cut method results in lower surface and crown settlement, and lower failure rate than where using Ring-cut split method. In addition the side wall reinforcing grouting resulted in reduction of tunnel displacement and settlement.

1. 서 론

현재 국내의 대부분의 터널은 록볼트, 슛크리트, 강지보 등의 지보재로 굴착 즉시 보강을 하는 NATM공법으로 시공되고 있다. 이러한 NATM공법은 지반이 양호한 경우에는 일반적인 지보재로도 충분한 지보효과를 기대할 수 있으나, 굴착대상 지반이 연약한 경우 터널의 천단부 및 막장을 굴착 전에 보강하여 터널의 안정성을 도모하여야 한다.

터널굴착에 따른 굴진면의 안정성을 확보하는 방안으로는 터널단면을 분할하여 굴착하면서 지보를 설치하는 분할굴착법과 굴진면의 강도와 차수성을 강화하는 지반보강법을 들 수 있다. 이러한 굴진면 보강공법에는 굴착면의 천단을 따라 보강하는 포어폴링, 파이프루프, FRP 다단그라우팅, 강관다단그라우팅(RPUM) 등을 들 수 있는데, 현재 가장 많이 시공되는 공법은 차수와 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 강관보강형 RPUM이다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 풍화대에 시공되는 터널의 심도를 변수로 하여 지표 및 터널 천단부의 연직응력의 변화를 분석하고 대심도의 기준을 제시하고, 적절한 대심도 풍화대 터널의 굴착방법 및 보강방법을 찾고자 하였다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, 비회원

** (주)동호 지반공학부 이사, 비회원

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, 정회원

E-mail : hengdang@unitel.co.kr

TEL : (02)2220-0326 FAX : (02)2281-0378

2. 수치해석

2.1 수치해석 프로그램

본 연구에서는 변위법을 사용하여 외력에 대한 연속체 내부 절점의 변위를 우선적으로 구하고, 후처리 과정에서 변형률과 응력을 순차적으로 계산해 나가며 해석을 수행하는 PENTAGON 프로그램을 사용하였다.

2.2 해석조건

본 해석에서는 2차로 도로터널을 기준으로 터널직경 $D=12m$ 를 적용하여 유한요소해석을 실시하였다. 지반의 경계조건은 터널 상부에서는 지표까지로 하며, 터널의 좌우측면 및 하부에서는 해석경계를 터널직경(D)를 기준으로 각각 $4D$, $3D$ 이상이 되도록 하여 응력 및 변위의 발생이 해석경계로 인한 오차 발생을 최소화하였다. 터널 굴진면 방향으로는 굴착방법과 상부보강그라우팅에 따른 영향을 확인하기 위하여 터널직경의 3배인 $3D$ 를 해석영역으로 하였다.

지반상태는 하나의 균질한 지반(풍화대)으로 가정하였으며, 상부보강그라우팅의 보강재는 Frame요소로 모델링하고 보강된 지반은 강화된 지반 물성치를 적용하였다.

경계조건은 좌, 우의 경계에서 상·하로 이동되며, 하부의 경계부에서 좌·우로만 이동할 수 있도록 하고, 종방향의 시작단면과 끝단면에서는 앞·뒤로의 이동을 방지하도록 각 요소마다 Roller를 설치하였다. 하부의 좌·우측 끝 절점은 고정되며, 나머지 절점에 대해서는 X, Y, Z방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속을 갖는 경계조건을 설정하였다. 슛크리트와 상부 보강재의 경계조건은 모든 방향의 변위가 자유롭고 X 및 Y 축의 회전에 대해 자유조건으로 설정하였다.

2.3 지반강도 정수 및 지보재의 물성

본 수치해석에 적용된 풍화대의 지반강도정수 및 지보재의 물성 및 제원은 표 1 및 표 2와 같다. 지반의 물성치는 기존설계사례와 문헌상의 자료를 참조하여 설정되었다.

표 1. 지반강도정수

구 분	탄성계수 (E, MPa)	단위중량 (γ_p , MPa)	내부마찰각 (Φ , °)	점착력 (c, MPa)
풍 화 대	2,942,000	205.9	33	294.2
보강풍화대	8,826,000	205.9	38	441.3

표 2. 지보재의 물성 및 제원

구 분	탄성계수 (E, MPa)	규 격 (mm)	길 이 (m)	설치간격 (m)	천공각도 (°)
슛크리트	49,000,000	t=200	-	-	-
강 관	1,960,000,000	$\Phi=60$, t=4	12	0.5(횡)/6.0(종)	10°

2.4 해석심도

풍화대에 시공되는 터널의 대심도 기준을 제시하기 위하여 록볼트와 슛크리트로 시공되는 일반적인

NATM 공법 및 굴착방식으로 상부반단면 분할굴착공법을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

토피고를 터널직경 D를 기준으로 1D에서 10D까지 변화시키면서 지표 및 터널 천단 지반의 침하량, 연직응력 및 소성율을 분석하였다(그림 1). 침하량 및 연직응력은 토피고에 따라 직선적인 변화를 보였으나(그림 1(a), (b)), 소성율과 초기응력(σ_0)에 대한 응력비(σ/σ_0)는 토피고가 증가함에 따라 수렴하는 형태로 나타났다.

따라서, 대심도의 기준은 소성율 및 응력비가 수렴하는 심도인 3D~4D로 설정하여 본 해석에서는 대심도에 해당하는 토피고 5D를 적용하였다. 그림 2에서는 모형화된 해석조건을 나타내었다.

3. 해석결과

3.1 지반변위

지표침하는 1~3차 굴착 모두 중벽분할 굴착방법을 적용할 경우 링컷 굴착방법에 비하여 13~17% 가량 작게 나타났다. 2차굴착에 의한 굴진면이 측벽을 통과하기까지는 1차굴착인 링컷굴착과 좌측상부굴착으로 인하여 침하량에 차이가 발생하지만 2차굴착으로 상부반단면이 모두 굴착되어 발생하는 지표침하량은 굴착방법에 따라 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 굴착이 계속 진행되어 하부반단면 굴착이 진행되면 중벽분할 굴착방법이 링컷 굴착방법에 비하여 13%가량 지표침하가 작게 발생하였다.

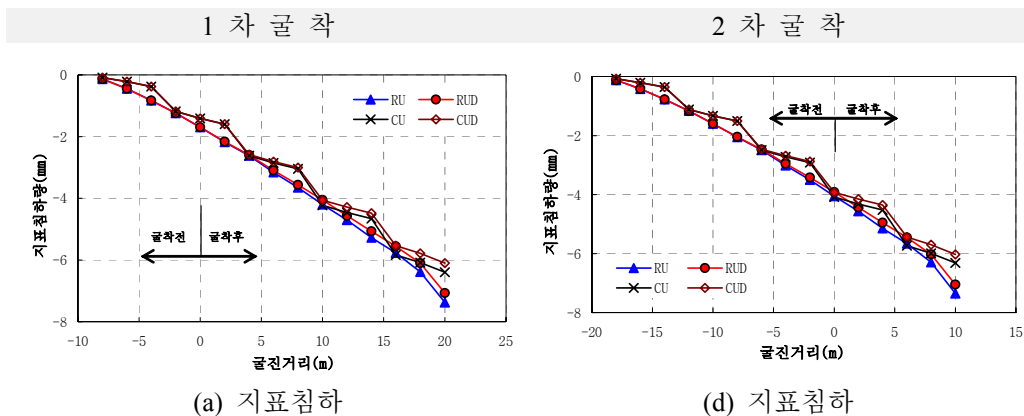
측벽을 보강함에 따라 굴착방법에 관계없이 측벽을 보강하는 2차굴착 이후 지표침하가 감소하였으며, 굴착을 진행함에 따라 보강효과도 증가하였다. 링컷 굴착방법 및 중벽분할 굴착방법 모두 약 4%의 보강효과를 보였다.

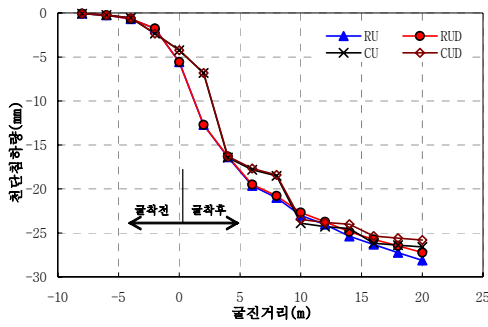
천단침하는 지표침하와 비슷한 경향으로 나타났다. 즉, 중벽분할 굴착방법을 적용하면 링컷 굴착방법에 비하여 1차굴착시 침하량이 24% 작게 발생하나, 상부반단면을 모두 굴착하는 2차굴착에 따라 발생하는 천단침하량은 차이가 나타나지 않았다. 또한 하부반단면을 굴착하는 3차굴착으로 링컷 굴착방법보다 중벽분할굴착방법이 5% 작은 천단침하를 보였다.

측벽을 보강함에 따라 굴착방법에 관계없이 측벽을 보강하는 2차굴착 이후 천단침하가 감소하였으며, 굴착을 진행함에 따라 보강효과도 증가하였다. 링컷 굴착방법 및 중벽분할 굴착방법 모두 약 3%의 보강효과를 보였다.

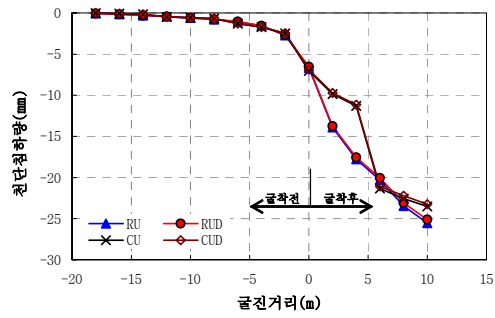
측벽변위는 지표 및 천단침하와는 달리 중벽분할굴착을 적용하는 경우 전체적으로 더 큰 변위량이 나타났다. 상부반단면을 모두 굴착하는 2차굴착시 7배 가량 크게 나타났으며, 하부반단면 굴착이 계속 진행됨에 따라 3% 정도 큰 측벽변위를 보였다.

측벽을 보강함에 따라 측벽내공변위가 감소하였으며, 링컷 굴착방법은 약 44%, 중벽분할 굴착방법은 약 22%의 보강효과를 보이므로 측벽보강효과는 링컷 굴착방법이 더 우수함을 알 수 있었다.

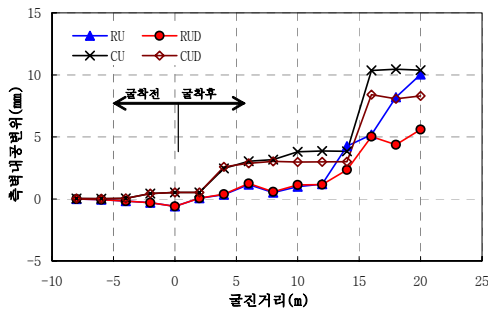




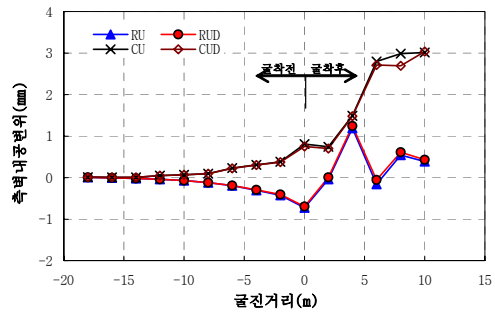
(b) 천단침하



(e) 천단침하



(c) 측벽변위



(f) 측벽변위

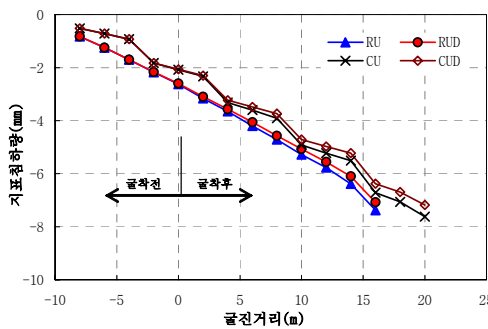
RU : 링컷굴착+상부보강
 CU : 증벽분할굴착+상부보강

RUD : 링컷굴착+상부보강+측벽보강
 CUD : 증벽분할굴착+상부보강+측벽보강

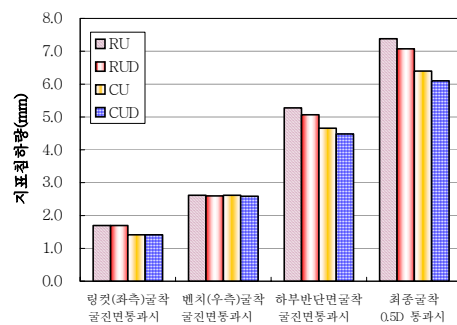
그림 1. 1,2차 터널굴착에 따른 지반변위

3 차 굴 착

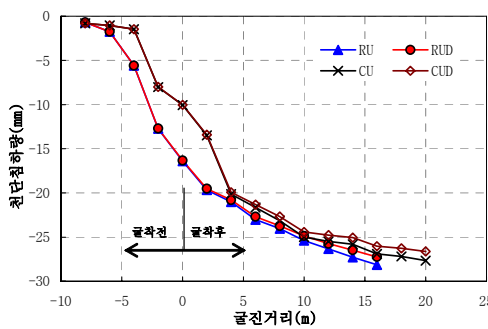
굴진면 통과시 지반변위



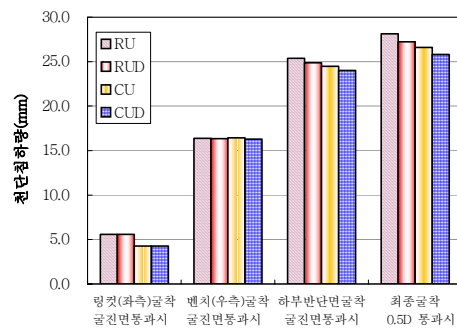
(g) 지표침하



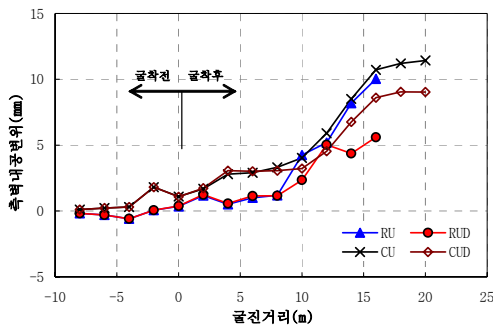
(j) 지표침하



(h) 천단침하

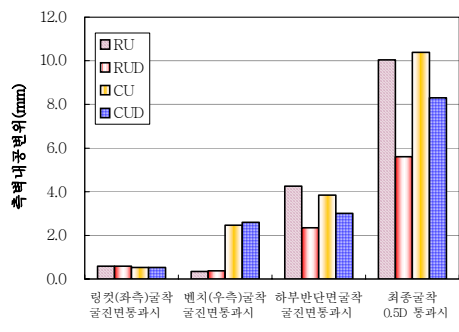


(k) 천단침하



(i) 측벽변위

RU : 링컷굴착+상부보강
 CU : 증벽분할굴착+상부보강



(II) 측벽변위

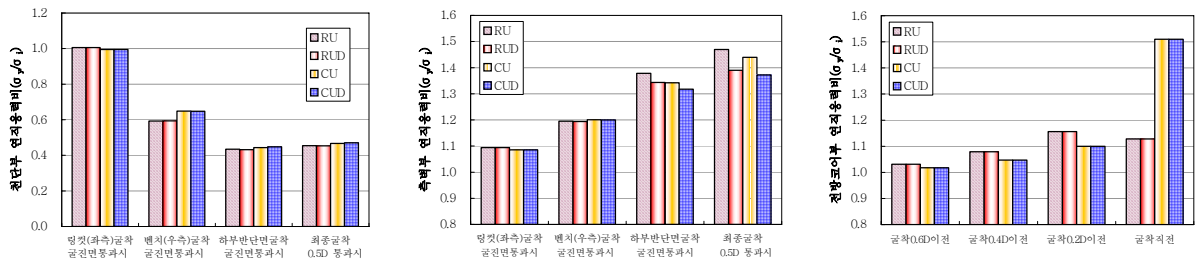
RUD : 링컷굴착+상부보강+측벽보강
 CUD : 증벽분할굴착+상부보강+측벽보강

그림 2. 3차굴착 및 굴진면 통과시지반변

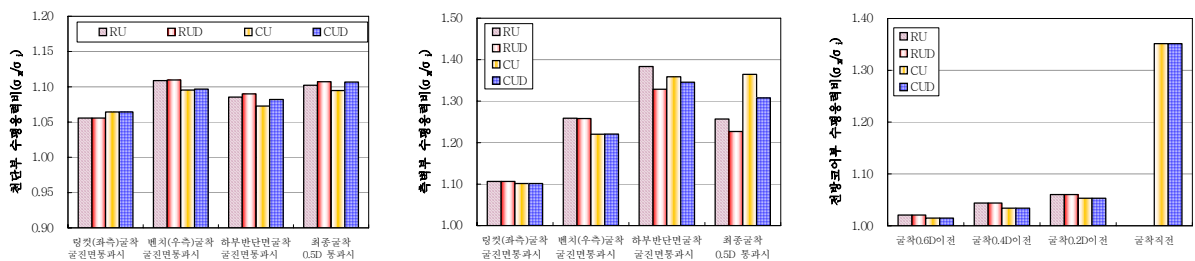
3.2 지중응력

터널굴착으로 인하여 발생하는 3차원적인 지중응력을 분석하였으며, 터널 횡방향으로 작용하는 지중응력을 수평응력, 증력방향을 연직응력, 터널 굴진면방향의 지중응력을 증방향응력으로 정의하였다. 단계별로 굴착되는 지중응력 σ_x , σ_y , σ_z 의 변화를 초기 지중응력 σ_i 에 대한 응력비($\sigma_{x,y,z}/\sigma_i$)는 그림 3과 같다.

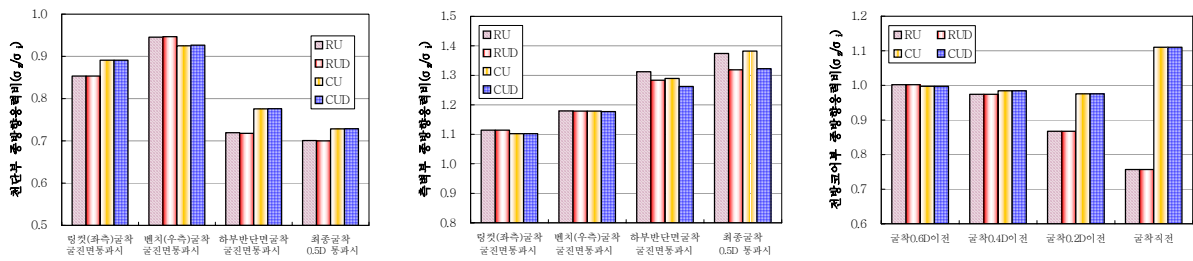
천단부 지중응력 측벽부 지중응력 전방코아부



(a) 연직응력



(b) 수평응력



(c) 종방향응력

RU : 링컷굴착+ 상부보강
 CU : 중벽분할굴착+ 상부보강

RUD : 링컷굴착+ 상부보강+ 측벽보강
 CUD : 중벽분할굴착+ 상부보강+ 측벽보강

그림 3. 터널굴착에 따른 주변지반의 지중응력

4. 결 론

본 연구에서는 대심도 풍화대에 시공되는 2차로 도로터널을 기준으로 터널의 굴착방법과 지반보강그라우팅에 의한 지반변위 및 지중응력의 분석을 통하여 최적의 시공방안을 찾고자 하였다. 2차로 도로터널의 직경은 약 12m를 적용하였으며, 풍화대에 시공되는 터널의 기본적인 보강공법으로 터널천단부에 강관다단그라우팅을 적용하였다. 굴착방법은 1차굴착 : 링컷굴착, 2차굴착 : 벤치굴착, 3차굴착 : 하부반단면굴착으로 구분되는 링컷굴착방법과 1차굴착 : 좌측상부굴착, 2차굴착 : 우측상부굴착, 3차굴착 : 하부반단면 굴착으로 구분되는 중벽분할굴착방식으로 검토하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 터널 천단의 소성율과 연직응력비를 분석한 결과, 풍화대 지반에 굴착되는 터널에서 토피고(H)가 터널직경(D)의 4배 이상일 경우($H > 4D$) 대심도 터널로 판단된다.
- 2) 중벽분할 굴착방법을 적용할 경우 링컷 굴착방법에 비하여 지표 침하는 13~17%, 천단 침하는 5% 가량 작게 나타났으나, 측벽 변위의 경우에는 약 3% 정도 크게 나타났다.
- 3) 천단부의 연직응력은 굴착방식에 따라 초기에 천단부의 굴착이 많이 진행되는 링컷 굴착의 경우 굴착직후 응력 감소량이 크게 발생하였으나 최종 단계에서는 중벽분할 굴착방식과 큰 차이가 발생하지 않았다.
- 4) 측벽부의 수평응력은 하부반단면 굴착이전까지는 링컷 굴착방법이 중벽분할 굴착방법에 비하여 큰 수평응력이 작용하나 하부반단면 굴착이후에는 오히려 수평응력이 더 작아졌다.
- 5) 하부측벽보강을 실시할 경우 두가지 굴착방법 모두 천단침하는 약 3%, 지표침하는 약 4% 감소하였다. 측벽변위는 링컷 굴착방법의 경우 44%, 중벽분할 굴착방법에서는 22% 감소하여 측벽보강 효과가 가장 크게 나타났으며, 측벽 보강효과는 링컷 굴착방법이 중벽분할 굴착방법에 비하여 양호한 것으로 나타났다. 따라서, 하부보강을 실시하여 터널의 내공변위 및 침하 발생을 억제하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- 6) 상기의 해석결과를 정리하면, 상부 또는 측벽부 지반보강에 따른 지반변형은 감소하는 것으로 나타났으며 굴착방법에 대해서는 링컷 굴착방법보다는 중벽분할 굴착방법이 지반변형 및 지중응력 측면에서 유리한 것으로 나타났다.
- 7) 본 연구에서 토압계수로 $K=0.5$ 를 적용하였으나 토압계수의 차이에 따라 굴착방법에 따른 지반거동은 본 연구결과와 상이할 수 있으므로 향후 대심도 풍화대에 대한 토압계수의 재정립이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 남기천, 허 영, 김치환, 유광호(2002), “RPUM과 유리섬유 파이프로 막장을 보강한 토사터널의 변형거동”, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제4권, 제3호, pp.185-193.
2. 최용기(2003), “굴진면 보강에 의한 토사터널의 종방향 아칭 효과”, 건국대학교 박사학위논문, pp.5-35.
3. Broms, B. and Bennermark, H.(1967), Stability of clay at vertical openings, Swedish Geotechnical Institute Publication, No.16, pp.71-94.
4. Chambon, P. and Corté, J.F.(1990), "Stabilité du front de taille d'un tunnel dans un milieu frottant approche cinématique en calcul à la rupture", Rev. Franc. Geotech., 55, pp.51-59.
5. Lo, K.Y., Ogawa, T., Sekiguchi, K. and Rowe, R.K.(1990), "Large deformation and face instability in tunnelling through thick fault zones", Proceedings of International Conference Tunnelling in the 90's, Vancouver, pp.101-120.
6. Peck, R.B., Henaron, A.J. and Mohrae, B.(1972), "State-of-the-art of soft ground tunnelling", Proceedings 1972 RETC, Vol.1, Chicago, pp.259-280.