

급경사 지형에 위치하고 있는 갱구부의 굴착 방안 연구

김우성¹⁾, 이상은^{2)*}

A Study on the Excavation of Tunnel Portal Zone Located at High Steep Slope

Woo-Sung Kim and Sang-Eun Lee

Abstract Recently, planning road construction in South Korea is focused on upgrading of the existing road by rerouting or restructuring. For this, roads under current construction in Korea go for more straight in its alignments and routing. Straight routing makes it all the more required to construct many mountain tunnels and bridges in Korea where mountains are so widely spread. Some portal of mountain tunnel is not rarely planed at high steep slope of mountain valley where it is not easy to secure working space for tunnel excavation. Reverse excavation is an alternative measure for excavation of tunnel portal at high steep slope. Construction in reverse excavation method has three important points requiring careful consideration : 1)planning of pilot tunnel in proper width, height, and length etc., 2)measure against the effect of one-side earth pressure to the direction of tunnel portal, 3)securing tunnel safety against shallow ground condition at portal zone. This paper intends to suggest applicable range of pilot tunnel for reverse excavation at the portal zone located at high steep slope, and shows result of study on the appropriateness of a reverse excavation by means of 3D numerical analysis. Result of 3D numerical analysis for reverse excavation at high steep slope shows that pilot tunneling will be applicable to start from the point 20~25m before the portal from inside the tunnel.

Key words High steep slope, Portal zone, Reverse excavation, Pilot tunnel

초 록 최근에 국내의 도로건설계획은 기존도로의 선형을 개량하거나 변경하는 데에 중점을 두므로, 건설하고자 하는 도로는 보다 현재 직선화되고 있는 추세이다. 국내의 지형은 대부분 산악지로 구성되어 있어 도로선형의 직선화에 따라 많은 교량과 터널의 계획이 불가피하며, 일부 산악터널의 갱구부는 터널굴착시 작업공간이 협소한 가파른 지형을 갖는 산악 계곡에 위치하는 경우가 있다. 이와 같이 가파른 지형에 터널 갱구부 굴착시 대안으로 역방향 굴착을 들 수 있는데, 3가지의 중요한 고려사항이 있다. 첫째, 적절한 폭, 높이, 그리고 길이로 Pilot 터널을 계획하는 것이며, 둘째, 터널 갱구부의 편도압에 대한 영향을 평가하는 것이고, 셋째, 갱구부의 얇은 심도의 지반조건에 대한 터널 안전성을 확보하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구는 3차원 수치해석에 의해 얻어진 결과를 토대로 역방향 굴착의 적정성 및 Pilot 터널의 적용 범위를 제안코자 한다. 해석결과 Pilot 터널은 터널 안쪽 20~25m 지점 전부터 갱구부 쪽으로 굴착하는 것이 적정함을 보이고 있다.

핵심어 급경사 지형, 갱구부, 역방향 굴착, Pilot 터널

1. 서 론

최근 민간자본을 이용한 국도 및 고속국도의 계획.

¹⁾ 우경엔지니어링 대표이사

²⁾ 강원대학교 에너지·자원공학과 조교수

* 교신저자 : lee9367@kangwon.ac.kr

접수일 : 2008년 11월 11일

게재 승인일 : 2008년 11월 25일

건설이 활성화 되고 있다. 민간자본의 도로 계획은 계획구간의 기존 노선이 가지는 취약점을 보완하거나, 충분한 교통수요가 예상되는 지역간의 신설 노선을 건설하는 취지가 강하기 때문에 최근의 신설 또는 대안 노선은 예전에 건설되었던 국도·고속국도와 달리 노선 선형의 직선화가 이루지고 있다. 이와 같이 직선화된 노선은 산악 및 구릉지가 국토 전반에 넓게 분포

하는 국내 여건상, 터널과 교량 구조물을 다수 계획하게 된다. 산악터널의 입·출구 갱구 위치 선정은 시공성 등을 고려하여 도로 및 장비 진입성이 양호한 지역이 가장 바람직하나(한국터널공학회, 2003), 계획 노선의 여건상 그렇지 못한 경우가 다수 발생한다. 특히, 산지가 밀집한 강원 산간지역의 계곡부에 계획되는 교량과 터널은 연속적으로 위치하게 되는 경우가 다반사이다.

본 연구에서는 산악지역 계곡부 급경사 지형에 교량과 연계되어 갱구부 시공을 위한 작업공간의 확보가 곤란하도록 계획된 터널에 대하여 갱구부로의 터널 역방향 굴착을 통한 갱구 시공방법을 계획하였으며, 역방향 굴착시 갱구 저토퍼에서의 안정성 확보를 위하여 Pilot터널을 계획하였다. 따라서 본 논문에서는 3차원 수치해석을 통하여 급경사 지형의 갱구부 역방향 편도 굴착을 위한 Pilot 터널의 적용 범위를 제안하였으며, 급경사 갱구부에서 역방향 편도 굴착의 적용성을 평가하였다.

2. 갱구부의 특성 분석

2.1 지형적인 특성

본 논문의 검토 대상 터널의 갱구 입지 조건은 Fig. 1의 종단도 및 Fig. 2의 평면도와 같이 갱구부가 급경사 지형 계곡부에 위치하고, 교량 종점부 교대가 인접하여 계획됨으로써, 갱구부 시공을 위한 부지 및 버려 반출로의 확보가 용이하지 않다. 갱구부의 지반조건은 토사 및 리핑암이 깊지 않고, 발파암이 지표에 가깝게

분포하고 있는 것으로 조사되었다(현대건설, 2006b).

2.2 갱구부의 지반거동 특성

산악터널은 그 특성상 일정 심도가 확보되는 터널 본선구간은 암질이 양호한 경우가 많으며, 터널 상부의 지형적 특성이 거의 영향을 미치지 못하여 특별한 추가적 보강계획 없이도 굴착시 터널의 안정성 확보가 용이하다. 그러나, 갱구부의 경우 터널 상부 토피가 얇고 터널 종방향의 구속압이 감소함으로써 터널 상부의 지형적 특성이 터널 거동에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 3은 터널 굴착시 터널 상부 지형 특성에 따른 지반 하중의 작용 개념도를 나타낸 것이다. 터널 상부 토피가 충분히 확보되지 못한 경우, Fig. 3(a)에서와 같이 터널 상부 편경사지의 사면활동에 의한 편토압이 작용할 수 있으며, Fig. 3(b)와 같이 갱구 배면 비탈면에 의한 편측 지형이 형성될 경우, 지형적 영향에 의한 편토압이 터널에 작용하게 된다(한국도로공사, 2001; John et al, 1982).

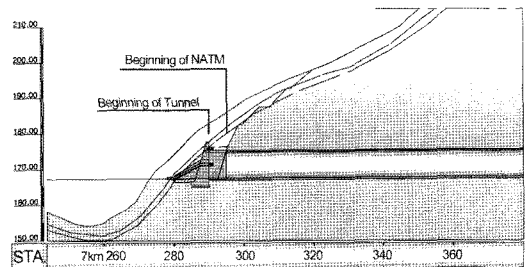


Fig. 1. Longitudinal view of portal zone.

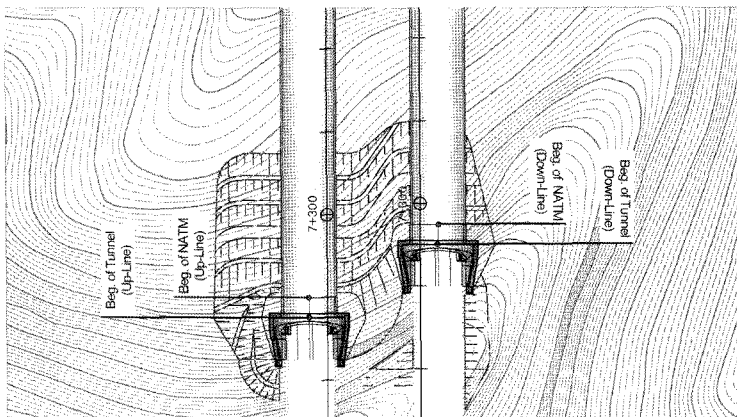


Fig. 2. Plan view of portal zone.

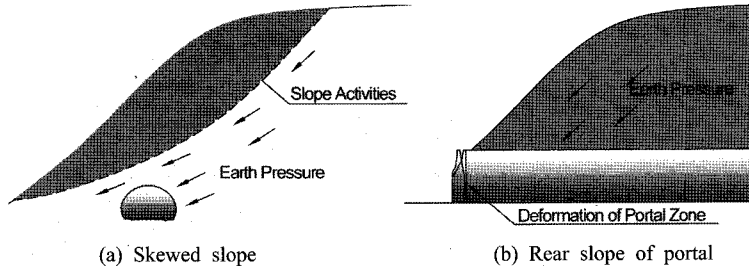


Fig. 3. Load distribution of portal zone.

본 검토 대상 터널의 경우 Fig. 2의 평면도에서 보는 바와 같이 좌측 상행선에서 우측 하행선 방향으로 깊게 발달된 계곡지형으로 인하여 좌측에서 우측으로의 횡방향 편토압이 작용하고, 갱구 배면 비탈면의 급경사로 인하여 터널 본선에서 갱구 방향으로의 종방향 편토압의 영향으로 3차원적인 편토압 작용이 예상된다.

3. 역방향 굴착 검토

3.1 지보패턴 결정

상행선 및 하행선의 상부토피고가 약 20.0m로 본선 터널 굴착높이의 약 2.5H(H : 본선터널 높이)가 확보되는 NATM 시점 18m 지점부터 토피가 점점 낮아지는 NATM시점까지의 구간에서 갱구부 지보패턴인 P-6, 그 이후 구간은 지보패턴 P-4를 적용하였다. 지보패턴 P-4 및 P-6에 대한 지보량을 나타내면 Table 1과 같으며, 지보패턴 P-6은 갱구부의 역방향 굴착시 터널 내공면위 최소화를 위하여 Fig. 4와 같이 상부 반단면에 대하여 반경 3.5m(R=3.5m)의 반원형 Pilot 터널을 계획하였다(현대건설, 2006a).

3.2 단계별 시공계획

갱구부로의 터널 역방향 굴착시 변경 적용된 지보

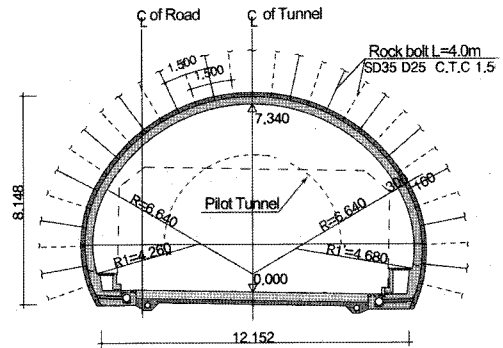


Fig. 4. Supporting pattern - 6 (including pilot tunnel).

패턴 P-6 굴착단면에서 Pilot 터널을 적용한 3분할 굴착을 수행함으로써 상부 지반의 이완이 최소화되도록 하였다. 갱구부 역방향 굴착의 개념도를 Fig. 5에 나타내었으며, 터널 안정성 및 지반 이완 최소화를 위한 단계별 시공계획을 다음과 같이 적용하고, 이에 따른 3차원 수치해석을 수행하였다.

- 1단계 - Pilot터널 선굴착
- 2단계 - 갱구 비탈면 깎기 및 비탈면 보강
- 3단계 - NATM시점 부터 상반확공 및 하반 굴착
- 4단계 - 가설갱문의 설치

3.3 대상 지반의 3차원 수치해석

역방향 굴착시 지보패턴 계획에 따라 역방향 굴착

Table 1. Support requirements for P-4 and P-6 pattern

Support pattern	P - 4	P - 6
Construction procedure	Top heading and bench cut	Top heading and bench cut
Excavation method	Drill & blast	Drill & blast
Advance length per round (m)	1.5/3.0	1.0/1.0
Support requirements	<ul style="list-style-type: none"> • Shotcrete(120mm) • Systematic grouted bolting ($\phi=25\text{mm}$, L=5m, spacing 1.5m×1.5m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Shotcrete(160mm) • Systematic grouted bolting ($\phi=25\text{mm}$, L=5m, spacing 1.0m×1.0m)

방향을 따라 P-4 굴착후 P-6 굴착(Pilot 터널 적용)을 적용하였다. 모델링의 지반경계조건은 터널 좌·우측

으로 5.0D(D:터널 폭), 하부로 4.0D로 하였으며, 굴착에 따른 터널의 거동양상 파악을 위하여 중방향 100m 구간을 모델링 하였으며, 수치해석의 과정을 나타내면 Table 2와 같다(현대건설, 2006c). 해석 1단계- 초기응력의 생성, 해석 2~11단계 - 지보패턴 P-4의 굴착 및 지보, 해석 12~17단계 - Pilot 터널의 굴착, 해석 18~19단계 - 사면의 깎기 및 갱구부에서 터널 상부부의 FRP보강, 해석 20~27단계 - 지보패턴 P-6의 굴착 및 지보, 해석 28단계 - 굴착 및 지보 완료 순으로 시공과정과 동일하게 해석을 수행하였으며, 표 안의 그림은 연직방향으로의 응력을 나타낸 것이다. 이

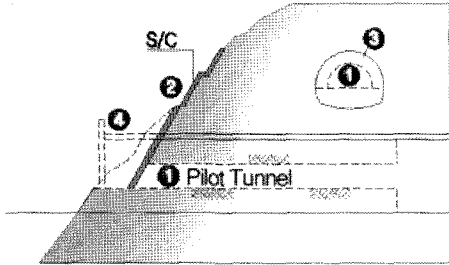


Fig. 5. Concept diagram of reverse excavation at portal zone.

Table 2. Procedure in numerical analysis

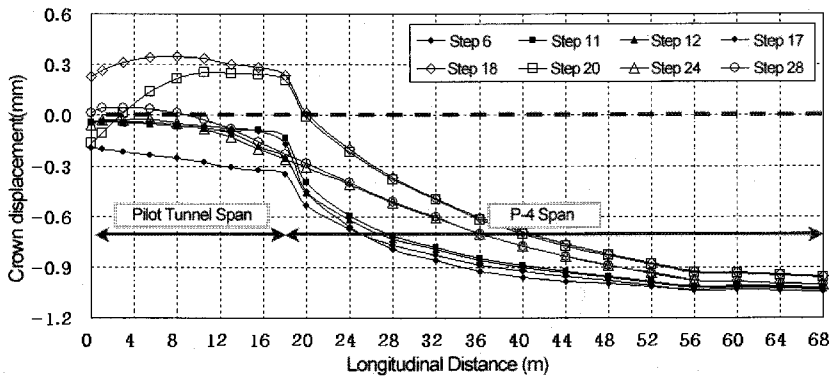
Analysis step	Procedure	Analysis step	Procedure
1	<p>Formation of initial stress</p>	18 ~ 19	<p>Cutting of slope in portal zone and FRP grouting reinforcement to the upper section of the tunnel at portal</p>
2 ~ 11	<p>Excavation of P-4 and installation of supports</p>	20 ~ 27	<p>Excavation of P-6 and installation of supports</p>
12 ~ 17	<p>Excavation of pilot tunnel</p>	28	<p>Finishing</p>

Table 3. Mechanical properties of rock mass

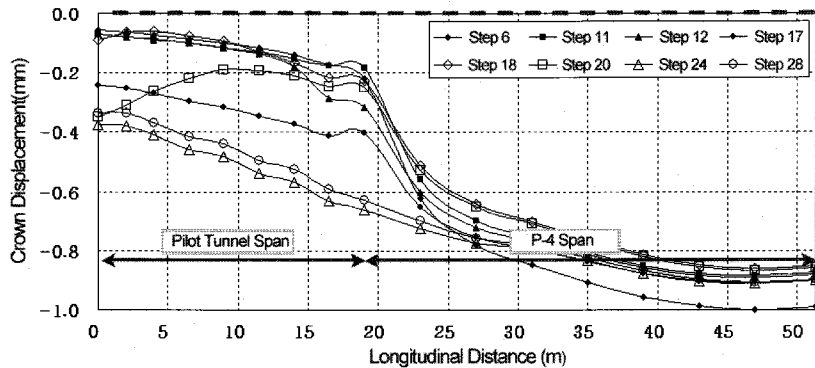
Young's modulus, E	Unit weight, γ_t	Poisson's ratio, ν	Int'l friction Angle, Φ	Cohesive stress, c
5,790 MPa	23.0 kN/m ³	0.24	34°	1.5 MPa

Table 4. Construction stage according to numerical analysis step

Analysis step	6	11	12	17	18	20	24	28
Construction stage	Excavation of P-4 upper section	Excavation of P-4	Begin excavation of pilot tunnel	Excavation of pilot tunnel	Cutting of slope	Enlarging P-6 upper section	Excavating P-6 lower section	Completion of construction



(a) Up-line tunnel (left tunnel)



(b) Down-line tunnel (right tunnel)

Fig. 6. Longitudinal crown displacement at every construction stage.

때 검토 구간의 지형적 영향을 고려하기 위하여 수치 지도를 통한 실제 지형 모델링 후, AE 법 및 DRA 법을 통하여 결정된 측압계수 $K=2.0$ 을 적용하여 터널 계획심도에서의 초기응력 상태를 모사하였다.

지반의 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 수치해석시 적용된 암반 물성치는 Table 3과 같다⁶⁾. 단계별 터널 시공을 모델링 하였고 총 28 step의 단계로 해석하였으며, 수치해석에 사용된 프로그램

Visual FEA Ver.2.25를 사용하였다.

4. 해석 결과

해석단계에 대한 시공계획을 Table 4에 기술하였다. 수치해석 결과 측정된 해석단계별 종방향 천단변위를 Fig. 6에 나타내었으며, 터널 모델링의 Pilot 터널구간은 2.0m, 지보패턴 P-4 구간은 4.0m 간격으로 터널

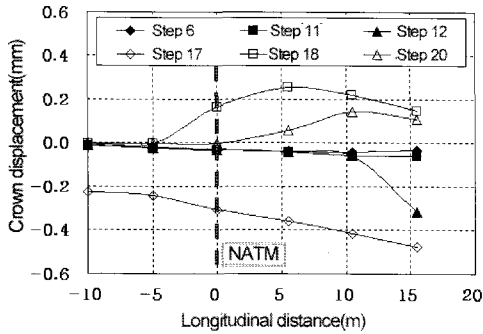


Fig. 7. Crown displacement of pilot tunnel (up-line tunnel).

천단변위를 측정하였다. 굴착에 따른 천단변위는 상행선의 경우 NATM 시점 20m, 하행선의 경우 NATM 시점 22m 이내에서 변위의 증감폭이 크게 발생하였다. 또한 Pilot 터널 굴착이 시작되는 12단계 이후에 변위 변화폭이 큰 폭으로 증·감을 반복하였다. Pilot 터널이 시공완료된 17단계에서 사면이 시공되는 18단계 사이의 천단변위 변화가 큰 폭으로 상향으로 발생하는데, 이것은 갱구 비탈면 시공에 따른 터널 상부의 하중 감소에 따른 영향으로 볼 수 있다. 굴착에 따른 천단변위 변화폭은 상행선 1.5mm, 하행선 1.0mm 이내로 터널의 안정성 확보가 가능한 것으로 나타났으며, NATM 시점부의 변위가 본선 P-4구간에 비하여 상대적으로 크게 발생하는 것은 토피가 낮은 NATM시점과 토피가 높은 본선의 편향적 지형에 의한 편토압 영향 때문인 것으로 보인다.

Pilot 터널의 천단변위 경향은 굴착이 진행됨에 따라 수렴하는 경향을 보이나, 지표로의 관통지점에 가깝고 토피가 낮은 영향으로 18단계의 사면 시공에 따른 영향이 천단변위 경향에 뚜렷하게 나타나고 있다. 사면 시공에 따른 Pilot 터널의 거동 양상은 Fig. 7의 Pilot 터널 천단변위의 발생경향에서도 확인할 수 있다. Pilot 터널 시공이 완료되는 17단계까지는 아래 방향으로 발생하던 천단변위가 사면이 시공되는 18단계에서는 큰 폭으로 위 방향으로 발생하였으며, 확공에 따라 Pilot 터널 천단변위가 다시 아래 방향으로 발생하였다. 하지만, 굴착 단면이 작고 대상지반의 암반이 비교적 양호하여 전체적인 천단변위의 변화폭은 0.6mm 이내로 미소하게 나타났다.

5. 결론

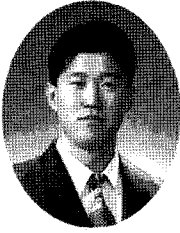
본 논문은 갱구부 시공을 위한 작업부지 확보가 곤란한 급경사지에 위치한 갱구부에 대한 역방향 굴착의 적용성을 검증하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 천단변위의 변화폭은 Pilot 터널 굴착이후 증·감폭이 크게 발생하였고, 상행선은 NATM 시점 20m, 하행선은 NATM 시점 22m 이내에서 변위의 증·감폭이 크게 나타난다.
- 2) 선행 굴착되는 Pilot 터널 및 본선터널 모두 갱구 사면 시공에 따른 응력 변화에 천단변위가 영향을 많이 받으므로, 역방향 굴착 후 갱구 사면 시공시 Pilot 터널 및 갱구부에 인접한 본선 터널 구간의 천단변위 변화에 유의하여야 한다.
- 3) 상행 및 하행선 모두에서 갱구부 굴착 및 사면 시공에 따른 영향은 NATM 시점 20m~25m 이내에서 나타나므로, 이 구간에 대한 Pilot 터널을 적용한 지보패턴 P-6은 적절하였다.

본 연구는 특정 지반조건에 대한 것으로 향후 다양한 지반조건 및 갱구부 지형의 경사도 변화에 따른 영향 구간 분석이 추가로 요구되며, 수치해석적 접근과 더불어 모형실험 및 실제 시공 자료의 분석을 통한 종합적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. 한국도로공사, 2001, 도로설계요령 제4권 터널, pp. 156-167.
2. 한국터널공학회, 2003, 터널의 이론과 실무, pp. 1-5.
3. 현대건설, 2006a, 제2영동(서울~원주) 고속도로 민간투자사업 설계보고서.
4. 현대건설, 2006b, 제2영동(서울~원주) 고속도로 민간투자사업 지반조사보고서.
5. 현대건설, 2006c, 제2영동(서울~원주) 고속도로 민간투자사업 터널해석보고서.
6. John O. B. and T. R. Kuesel, 1982, Tunnel engineering handbook, pp. 12-35.

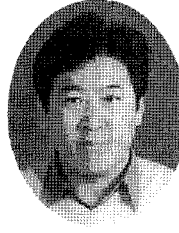


김 우 성

(주)우경KPE 대표이사

Tel : 02-3402-0071

E-mail : aguns@hanmail.net



이 상 은

강원대학교 에너지·자원공학과
조교수

Tel : 033-570-6306

E-mail : lee9367@kangwon.ac.kr