

터널 단면적 변화를 고려한 각부보강 영향성 평가

A Case Study on the effects of Elephant Foot Method considering the rate of Changes in Tunnel Cross Section

이길용¹, 오현문¹, 조계환², 오정호³, 김종주⁴, 김용성^{5*}

Gil-Yong Lee¹, Hyeon-Mun Oh¹, Kye-Hwan Cho², Jeong-Ho Oh³, Jong-Ju Kim⁴, Yong-Seong Kim^{5*}

¹Member, Graduate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon Gangwon-do 24341, Republic of Korea

²Member, General Manager, Geotechnical and Tunnel Engineering Division, Chunil Engineering Consultants, Byeoryangsangga-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do 13837, Republic of Korea

³Member, Professor, Department of Railroad Infrastructure System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Choldobak-moolkwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 10106, Republic of Korea

⁴Member, Graduate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon Gangwon-do 24341, Republic of Korea

⁵Member, Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon Gangwon-do 24341, Republic of Korea

ABSTRACT

In case of excavation of the tunnel under weak ground conditions, such as fault zone, leg pile reinforcement with the purpose of suppressing tunnel crown settlement and side wall displacement is commonly applied. There are convergence, crown settlement, leg settlement, and the axial force of leg as a main factor for confirming the safety of support considering the installation angle and length of leg pile reinforcement according to the increase in rate of change of tunnel cross-section. In particular, the influence of right corner settlement, among variables for safety confirmation during excavation, has been analyzed as the dominant factor in the most important priority management showing larger displacement tendency than the increase in rate of the cross-section. And, it was analyzed that the occurrence tendency of axial force on leg pile reinforcement showed the influence of behavior according to the friction support concept mechanism of the pile reinforcement rather than the increase in rate of tunnel cross-section, as it showed a small increase compared to the increase rate of the tunnel cross-section which did not show a great correlation from the viewpoint of the change of the axial force by the length of each leg pile reinforcement with regards to the change in rate of increase in tunnel cross-section. If a certain length of the leg pile reinforcement is selected based on the above grounds, even if the cross-section of the tunnel in poor ground condition is somewhat larger, it has been proved to be a more reasonable method considering the workability and economical efficiency by not extending the length of the leg pile reinforcement by force.

요 지

단층 등 취약지반 조건에서의 터널굴착 시 터널천단 및 측벽변위의 억제를 목적으로 하는 각부보강공이 일반적으로 적용되고 있으며, 터널 단면증가 변화율에 따른 각부보강공 설치각도 및 길이를 고려한 지보안전성 확인을 위한 주요 인자로서 내공변위·천단침하·각부침하·각부축력 등의 여러 응력변위 특성 변수들이 있다. 이러한 굴착중 안전성확인을 위한 변수들에 대한 검토 결과, 우각부 침하영향성이 단면증가율 보다 더 큰 변위경향을 보이는 가장 중요한 중점관리 지배요소로 분석되었으며, 터널단면 증가 변화율에 대한 각 보강공 길이별 축력의 변화관점에서는 큰 연관성을 보여주지 못하는 터널단면 증가율 대비 작은 증가율을 나타냈다. 또한, 각부 보강공 축력의 발생경향은 터널 단면증가율보다 보강공 마찰지지 개념 메커니즘에 따른 거동 영향성을 보여주는 것으로 분석되었다. 본 연구결과, 일정한 길이의 각부 보강공이 선정될 경우 지반불량 구간에서의 터널 단면이 다소 대단면화 하여도 무리하게 각부보강공의 길이를 연장시키지 않는 것이 시공성 및 경제성을 고려한 보다 더 합리적인 방법으로 판단된다.

Keywords : Leg pile reinforcement, Axial force, Settlement

Received 15 Jan. 2018, Revised 16 Mar. 2018, Accepted 21 Mar. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-33-250-6463; Fax: +82-33-251-6463

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr (Y. S. Kim)

1. 서론

일반적으로 단층파쇄대 등 지반불량구간의 굴착중 터널 보조 및 보강공법으로 급격한 천단 및 측벽변위의 억제 및 수평저항력의 증대를 위해 각부보강공법을 적용하고 있다. 측벽지반 지지력 부족의 문제와 우각부 침하가 수반되는 불안정한 영역이 점진적으로 인근 지반으로 확대되는 이완영역의 증가가 있는 취약한 불량지반의 비교적 대단면에서의 터널 안정성 확보를 위하여 선택적으로 적용하고 있다. 단층파쇄대 취약지반조건에서의 각부보강공법의 시공조건별(파일연장 및 각도) 적용성과 관련하여 Lee(2016)는 각부보강공의 경우 설치각도 조건과 더불어 보강파일의 경사를 가능한 작게 하여 하반굴착깊이(1.5H, H=하반굴착고) 정도의 파일길이를 적용토록 제안하였다.

그러나, 최근 대단면 터널을 통한 지하공간의 효율성 제고가 강조되고 있으며 여타 추진 및 계획중인 지하정거장의 효율적인 배선 및 정거장의 수요증가 등에 따라 지반의 불리한 조건에도 불구하고 대단면화를 목적으로 한 터널 단면의 선정이 빈번히 이루어지고 있는 실정이다. 취약지반에서의 대단면 철도터널의 굴착중 안정성 확보를 위한 각부보강공을 선정함에 있어 철도터널단면의 복선·확폭 등의 대단면화 증가율을 고려한 각부보강공법의 평가를 통한 시공중 터널 지보안전성 확보를 위한 가장 주요한 평가 인자 및 변수조건을 찾으려 하여야 할 것으로 사료된다. 특히 도심지 등에서의 불량지반을 내포한 위험지수가 상대적으로 높은 지층조건에서의 대단면 터널굴착시 안전성 제고에 효과적인 지보 안전성 평가 요인을 파악하기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

앞서 언급한 바와 같이 단층파쇄 지반 등의 불량한 지반 성상 조건에서의 터널천단 및 측벽변위 억제를 목적으로 각부보강공을 적용하고 있으나, 본 연구에서는 터널 단면의 대·소에 따른 즉, 터널단면의 증가율 대비 부재력의 증·감 여부를 파악하여 천단 및 내공변위·보강파일공 축력·각부침하 변위 및 응력의 발생 특성 등에 대한 지보 부재력의 시공중 안전성 평가기준으로서의 주요인자에 대

한 영향성을 분석하였다. 이는 터널의 굴착중 계측을 통한 터널의 부재력 발생특성이 터널 단면이 증가함에 따라 어떠한 영향을 미치고 있는가를 구명하는 유의미한 연구로 철도 노반분야 기술자에게 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

이와같이 터널의 단면증가를 대비 시공중 각부보강공의 부재력(변위 및 응력) 발생 특성 및 변화 추이의 증감율은 터널의 굴착시공 시 안전성 평가기준으로서의 객관적인 평가를 통해 보강 효과를 판단 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 주요 시공관리 인자 등의 영향성 분석결과로서 설계, 시공 및 품질관리시 각 지보 부재력에 대한 우선 순위 의사결정 등 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본론

2.1 관련 연구동향

Lee et al.(2016)은 신갈단층대 지반에서의 수도권 고속철도 터널단면에 대한 우각부 보강공 시공조건(각도 및 길이)에 따른 보강효과를 수치해석적으로 검토하여 단층대 등의 지반취약구간에서의 각부 보강공 설치를 위한 적절한 조건을 분석하였다.

여기서, 단층대와 같은 지반불량구간에서의 보강파일 설치각도는 천단 및 내공변위량 발생추이 고려 시 가능한 직각방향으로 설치하는 것이 공학적으로 가장 유리할 것이며 시공조건을 고려한 불가피한 조건을 고려하더라도 40도 이내로 설치하는 것이 터널 주변지반 이완하중의 분산·전달 및 측방변형 억제에 가장 효과적인 조건으로 제안하였다(Fig. 2).

각부보강 길이 영향조건에 대한 적용성 평가결과, 파일의 연장이 길어짐에 따른 변위의 제어효과는 좋아지는 경향이거나 내공변위 및 각부 보강공 축력분포의 결과에서와 같이 터널단면의 하반굴착 깊이의 기준길이를 적용하는



Fig. 1. Variation in pile installation angle and length

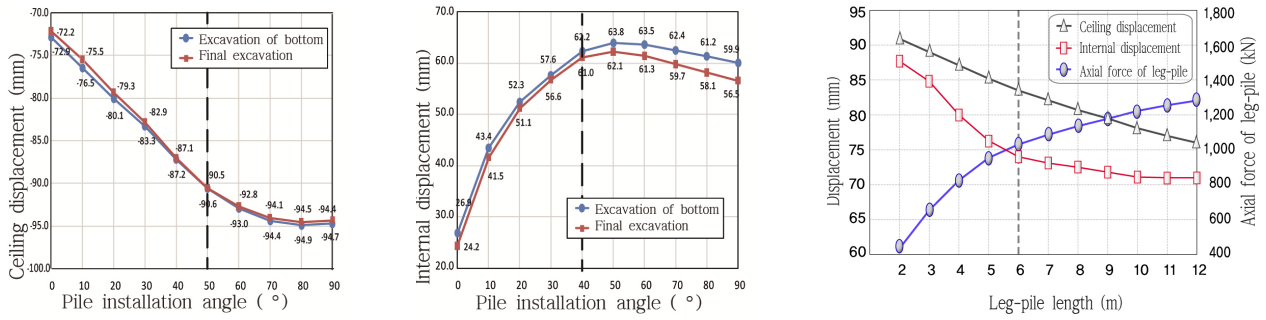


Fig. 2. Variation of tunnel displacement by leg pile installation angle and length (Lee et al., 2016)

것이 합리적인 것으로 평가하였다. 또한, 각도시공조건과 더불어 보강파일의 경사를 가능한 작게(직각방향)하여 하반굴착 깊이가 1.5H 정도의 파일길이를 적용토록 하는 것이 적정한 최적의 조건으로 제안한 바 있다(Fig. 2).

$$\theta > 40^\circ, L=1.5H \quad (1)$$

여기서, θ = 보강파일 시공각도($^\circ$)
 L = 보강공 길이(m)
 H = 터널 하반굴착 높이(m)

2.2 해석방법 및 조건

본 연구에서는 터널단면의 대·소 영향을 고려한 지반불량구간에서의 각부보강공의 영향성을 평가하기 위하여 터널굴착 등 단계시공 해석에 적용되는 MIDAS GTS 프로그램을 사용하여 터널의 단면적 증감율에 따른 각부보강공 영향성을 평가하였다. 일반적으로 터널거동 및 지보재 응력변화 특성에 가장 큰 영향을 프로그램을 미치는 지반 변형계수(E_0) 선정 조건이 발생 부재력의 변화에 가장 민감한 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서 지반조건은 일반적인 풍화토 및 암반 5등급 물성치를 사용하고 터널이 위치한 주변지반 단층파쇄대의 경우 취

약지반에 대한 보강파일의 불리한 발생 부재력 경향성을 평가하기 위해 변형계수 $E_0=70\text{MPa}$ 값을 적용하였다.

2.2.1 해석조건

터널의 굴착 단면적 차이 즉, 단면 대·소에 따른 각부 시공조건을 고려한 지반변위·거동 영향성을 비교·분석 하였다. 비교 단면적 대상은 고속철도 복선 단면(case 1) 대비 상대적으로 작은 단면인 일반철도 건설사업 복선단면(case 2) 선정하고, 동등한 지반성상의 취약지반을 가정하였다. 보다 구체적으로 굴착단면적 증감율에 따른 굴착중 터널상부의 이완하중을 보강파일이 분담하는 원리에 의해 발생하는 지보 부재력의 발생특성에 대하여 분석하였다. 이들 단면에 대한 단면적(m^2) 및 규모 등 설계단면 조건이 Fig. 3에 나타나 있다. 터널단면적비 A(고속철도 복선 대 단면)/B(일반철도 복선단면) = $122.275 / 89.878 = 1.36$ 배의 단면증가율 기준으로 한 보강파일 변위 및 응력특성을 구명하고자 하였다.

또한, 일반적인 각부보강공의 원론적인 적용목적은 상반굴착 후 1차 지보재 시공 후 각부침하량 억제 및 하반굴착 시 측면 이완하중 변형을 억제하고 종국적으로 이 이완하중의 토압효과에 대한 저항력을 확보하기 위함이다. Park et al.(2009)은 단층 등과 같은 변형계수(E_0)가 매우 작은 취약지반에서의 각부보강 적용효과가 더 우수한 것

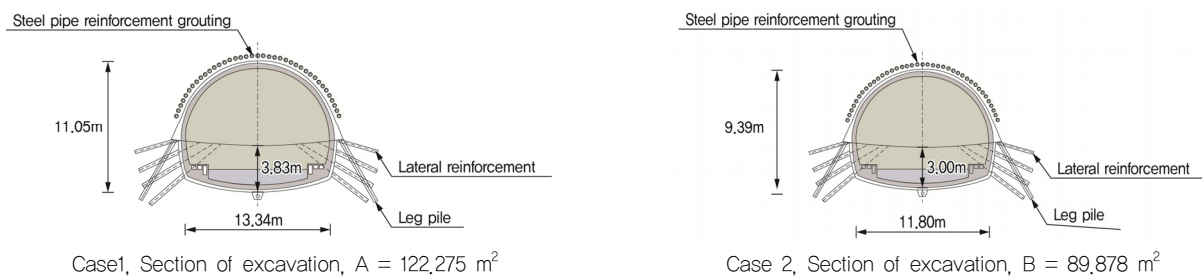


Fig. 3. Comparing the section increase rate of tunnel excavation

Table 1. Parameters γ , C, ϕ , E_0 for each material.

Materials	Unit weight (γ) (kN/m ³)	Cohesion (C) (kPa)	Internal friction angle (ϕ) (°)	Deformation modulus (E_0) (Mpa)
Weathered soil	19	25	28	50
Weathered rock	21	34	31	270
fault zone	21	60	31	70

으로 검증한 바 있는데, 본 연구에서는 수치해석 시 적용 지반요소 중 터널거동 및 지보재 응력변화 특성에 가장 큰 영향을 미친다고 판단되는 지반변형계수(E_0)를 주요 적용 물성조건으로 결정하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 일반적인 토사터널 및 단층파쇄지반에서의 변형계수보다 비교적 적은 값의 $E_0=70\text{MPa}$ 의 불리한 조건의 물성치를 적용한 터널 수치해석을 수행하였다. 이러한 값을 적용할 이유는 터널단면의 증가에 따른 각부보강공 부재력 변위·응력특성이 확연히 나타내어지도록 유도하는 것이 결과물에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단하였다. 그리고, 터널단면의 선정 시 보강공의 각도 및 길이의 경우 통상적인 시공성을 고려한 각도 $\theta=30^\circ$ 조건을 적용하도록 하였으며 파일길이는 기 연구사례인 Lee et al.(2016)을 참고하여 하반굴착깊이의 1.5H(H=하반굴착고)로 설정하여 터널단면의 대·소에 따른 일관성 기준을 확보한 지보 부재력 결과가 도출될 수 있도록 하였다.

2.3 터널의 단면적 증가율을 고려한 각부보강 설치 각도에 따른 거동특성평가

취약지반조건에서의 터널의 단면크기가 증가함에 따른 지반변형·거동 영향성에 대한 각부보강공 설치조건을 고려한 터널 지보 부재력 특성은 Table 2에 나타내었다. 터널의 상반굴착 바닥면을 기준으로 한 설치각도 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ 의 다양한 시공조건을 고려하여 터널의 단면적 증가율을 고려한 터널안정성을 검토하였다. 일반적인 각부보강의 시공은 장비의 근접천공 및 강관파일 거치 등의 시공성을 고려한 30° 내외로 시공하고 있다.

Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 천단변위 및 내공변위·파일축력·우각부 침하에 대한 부재력 변위·응력 발생 경향성은 단면적 증가율(1.36배)과 비교하여 다소 작은 1.04~1.2배의 증가율을 보이고 있다. 각 설치 시공각도 단계별($0 \sim 90^\circ$) 증감율 또한 거의 일정한 증감율 패턴의 일관성을 나타내고 있다. 이러한 결과는 단층파쇄대 등 취약지반 조건에서의 각부 보강공 적용 시 터널의 단면이 대

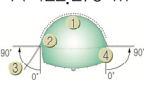
단면화 한다 할지라도 천단 및 내공변위·축력의 발생관점에서는 단면의 증감율에 못미치는 변위 경향성을 나타낸다고 할 수 있다. 즉, 일정한 우각부 보강공의 길이가 적용되었다고 가정하면 터널의 단면증가율 대비한 천단변위·내공변위·축력의 발생 부재력 특성은 시공중 안전성 평가 시 주요 비교 인자로 판단하기는 어려운 것으로 보인다. 또한, 동일한 불량 지반조건을 고려한 경우에 대한 터널의 단면이 증가한다고 하여 내공변위·천단침하·우각부 보강 파일 축력의 발생 경향성이 터널 단면적 증가비율만큼과 동일한 비율로 증가하지는 않음을 확인 할 수 있었다. 각 부보강 설치각도 변화를 기준으로 터널단면이 증가할 경우에 대한 터널 안정성 수치해석결과는 증가율 대비 천단 변위·내공변위·축력발생 거동특성이 약 85%정도의 부재력 증감이 발생하였다(1.16/1.36=0.85).

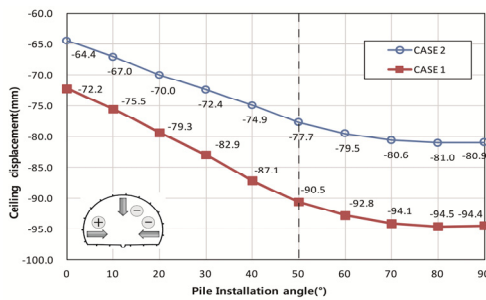
한편, 터널단면 크기 증가율 고려한 각부 침하변위 경향성의 경우 시공각도에 따른 일부 차이는 있으나 대체적으로 1.44~1.57배 정도로서 터널의 단면증가율 대비 상대적으로 큰 변위 증가율의 변위특성을 나타내었다. 이러한 원인은 터널의 대단면화시 바닥지지 지간(터널폭)의 증가에 따른 지반 지지력의 영향성이 단층파쇄대와 같은 취약지반조건에서 매우 주요한 요인으로 작용한다는 것을 나타낸다. 단면의 증가율에 따른 각부침하율은 단면의 증가율 대비 보다 더 큰 변위·응력특성을 보이므로 설계 및 시공시 각별히 각부침하 제어를 위한 대책수립이 매우 중요한 사항임을 재삼 확인해 주는 것으로 사료된다.

2.4 터널의 단면적 증가율 고려한 각부보강 설치연장에 따른 거동특성평가

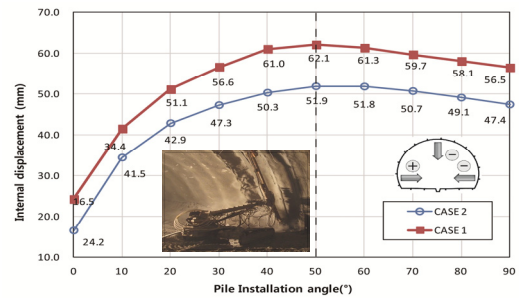
일반적인 우각부 보강공 설치조건은 터널의 측벽 아치형상을 고려한 파일의 최대연장을 적용하고 있으며, 각부 보강공 길이와 측벽 아치형상 등의 시공조건을 고려한 일반적인 설치각도라고 판단되는 $\theta=30^\circ$ 를 기준으로 한 터널단면 증가율 대비 보강공 파일의 길이별 응력·변위 특성을 구명하고자 하였다.

Table 2. Variation of tunnel displacement by comparing the section increase rate (Installation angle)

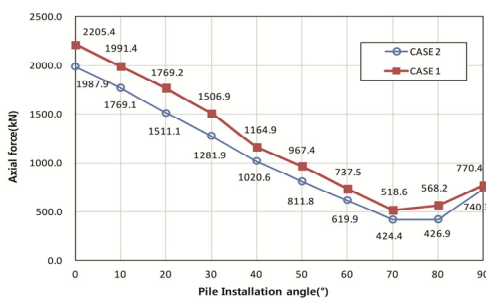
Items	Installation angle (°)										Remarks	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
Case 1 A=122,275 m ² 	① Ceiling displacement (mm)	72.2	75.5	79.3	82.9	87.1	90.5	92.8	94.1	94.5	94.4	
	② Internal displacement (mm)	26.5	41.5	51.1	56.6	61.0	62.1	61.3	59.7	58.1	56.5	
	③ Axial force (kN)	2,205	1,991	1,769	1,506	1,164	967	737	518	568	770	
	④ Right-angle settlement (mm)	23.3	29.3	35.4	40.4	44.8	47.5	48.6	48.9	48.5	47.6	
Case 2 B=89,878 m ²	Ceiling displacement (mm)	64.4	67.0	70.0	72.4	74.9	77.7	79.5	80.6	81.0	80.9	
	Internal displacement (mm)	24.2	34.4	42.9	47.3	50.3	51.9	51.8	50.7	49.1	47.4	
	Axial force (kN)	1,987	1,769	1,511	1,281	1,020	811	619	424	426	740	
	Right-angle settlement (mm)	14.8	18.9	23.2	26.3	29.1	31.7	33.0	33.6	33.5	33.0	
Section increase rate (A/B=1.36)	Ceiling displacement	1.12	1.12	1.13	1.14	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	
	Internal displacement	1.09	1.20	1.19	1.19	1.21	1.19	1.18	1.16	1.16	1.16	
	Axial force	1.10	1.12	1.17	1.17	1.14	1.19	1.19	1.22	1.33	1.04	
	Right-angle settlement	1.57	1.55	1.52	1.53	1.53	1.49	1.47	1.45	1.44	1.44	



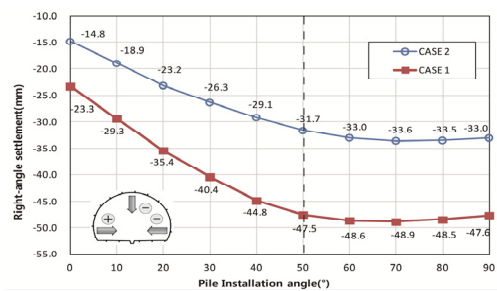
(a) Ceiling displacement of Pile installation angle



(b) Internal displacement of pile installation angle



(c) Axial force of pile installation Angle



(d) Right-angle settlement of pile installation angle

Fig. 4. Variation of tunnel displacement by leg pile installation angle

터널의 단면적 증가율 대비 일정 기준을 고려한 보강공 설치연장에 따른 전단침하 및 축력발생 경향성은 단면적 증가율을 고려한 보강공 설치각도 거동 특성에서 나타난 결과와 동일한 경향의 터널 단면적 증가율 대비 작은 부재

력 증가율 추이패턴을 보이는 거동특성 결과를 Table 3에서 보여주고 있다. 한편, 보강공 축력의 발생경향성은 터널 단면의 증가시 보강공 각 연장별로 거의 일정한 패턴의 결과를 보이는 비교적 단면적 증가율 대비 작은 축력증가

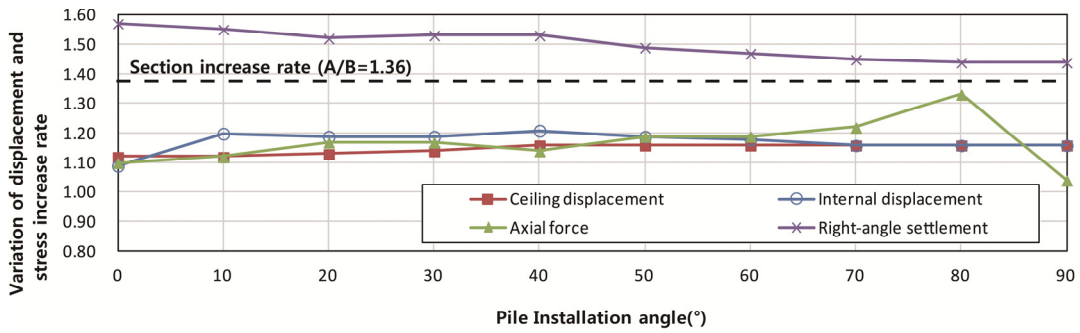



Fig. 5. Variation of displacement and stress increase rate by pile angle

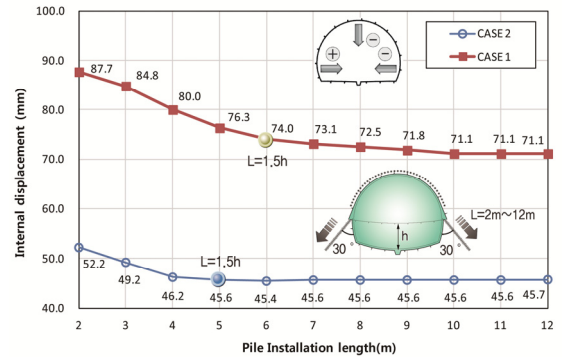
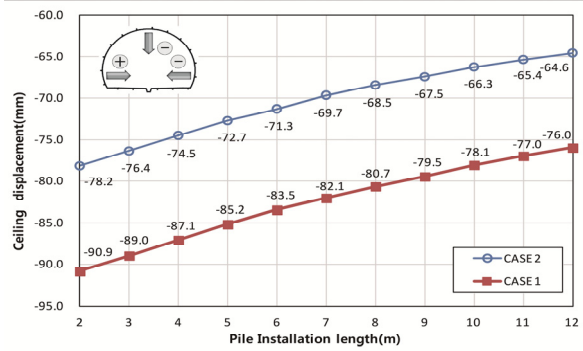
Table 3. Variation of tunnel displacement by comparing the section increase rate (Installation length)

Items		Leg pile length (m)										Remarks	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
Case 1 A=122,275 m ² 	① Ceiling displacement (mm)	90.9	89.0	87.1	85.2	83.5	82.1	80.7	79.5	78.1	77.0	76.0	
	② Internal displacement (mm)	87.7	84.8	80.0	76.3	74.0	73.1	72.5	71.8	71.1	71.1	71.1	
	③ Axial force (kN)	435.3	654.1	825.5	954.5	1,031	1,086	1,135	1,177	1,223	1,255	1,282	
	④ Right-angle settlement (mm)	49.8	47.1	44.3	42.0	40.4	39.1	38.0	36.9	35.8	34.8	34.0	
Case 2 B=89,878 m ²	Ceiling displacement (mm)	78.2	76.4	74.5	72.7	71.3	69.7	68.5	67.5	66.3	65.4	64.6	
	Internal displacement (mm)	52.2	49.2	46.2	45.6	45.4	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.7	
	Axial force (kN)	426.6	666	852.3	951.9	1,036	1,100	1,145	1,181	1,218	1,245	1,267	
	Right-angle settlement (mm)	31.5	29.2	27.3	25.5	24.3	23.1	22.0	21.1	20.2	19.4	18.7	
Section increase rate (A/B=1.36)	Ceiling displacement	1.16	1.16	1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
	Internal displacement	1.68	1.72	1.73	1.67	1.62	1.60	1.58	1.57	1.55	1.55	1.55	
	Axial force	1.02	0.98	0.96	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.01	
	Right-angle settlement	1.58	1.61	1.62	1.64	1.66	1.69	1.72	1.74	1.77	1.79	1.81	

율을 나타내고 있는데(0.96~1.02배), 이는 터널의 단면증가가 각부 보강공 길이에 따른 축력의 변화에는 큰 연관성을 주지 못하는 것으로 판단된다. 단면의 증가율 보다 오히려 보강공의 길이 관점에서의 일반적인 기초공 말뚝 마찰지지 메커니즘과 같은 거동양상으로 판단함이 더 합리적인 분석 방법이라고 사료된다. 그러나, 내공변위에 있어서는 단면적 대비 더 큰 증감율을 보이는 결과를 나타내고 있는데 이것은 본 연구에서 각부보강공 설치기준 $\theta=30^\circ$ 에 대한 보강공 길이별(2~12m) 거동 특성을 전제로 한 검토 결과이므로 터널의 굴착시 측방이동 지반이완에 대한 수평저항 및 하중분산의 효과를 발휘하기 위한 보강과

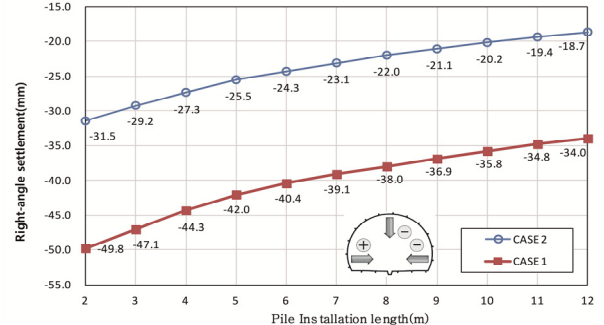
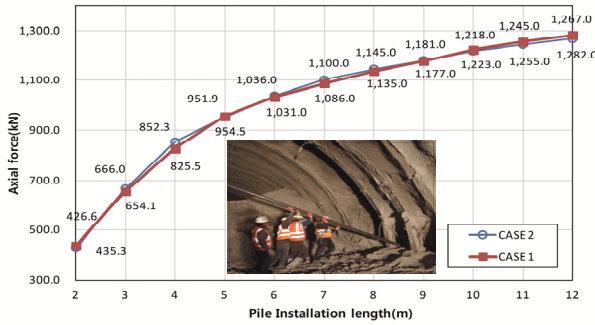
일에 대한 측방향 이완하중 지지면적이 작은 설치 각도조건이기 때문이며, 이러한 결과는 단층 등의 취약지반 굴착시 터널의 단면이 커질 경우 각부측에서의 측벽 이완하중 부담력이 터널지보력에 매우 큰 영향을 주는 조건이라고 판단할 수 있다.

결국, 터널의 대단면화 단면증가율 고려한 굴착시 지보 안전성 확보를 위한 주요인자로서 내공변위·천단침하 등의 여러 변수들 중 일정한 길이의 각부보강공이 적용되었다면 터널의 단면이 다소 커진다 하더라도 무리하게 파일 길이를 연장하여 비경제적인 터널계획하는 것은 바람직하지 않을 것으로 보여진다. 또한, 각부침하의 경우 단면증



(a) Ceiling displacement of pile installation length

(b) Internal displacement of pile installation length



(c) Axial force of pile installation length

(d) Right-angle settlement of pile installation length

Fig. 6. Variation of tunnel displacement by leg pile installation length

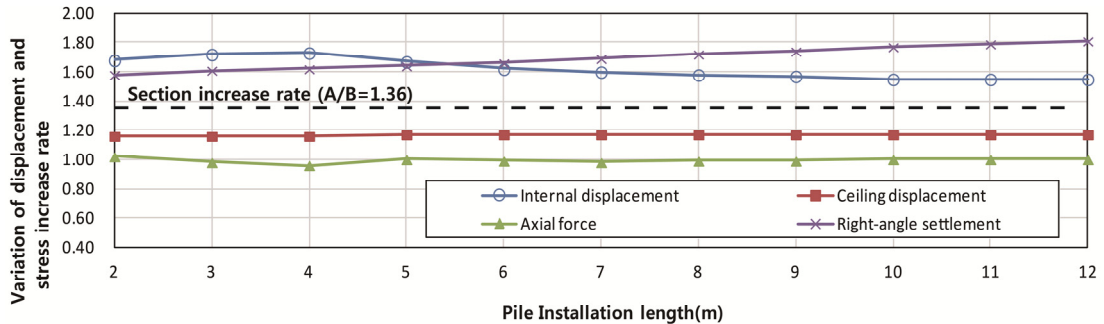


Fig. 7. Variation of displacement and stress increase rate by pile length

가울보다 매우 큰(1.58~1.81배>1.36배) 침하변위 경향성을 보여주고 있는 바, 이 또한 시공각도 변수와 더불어 동일한 변위추이 경향성을 나타내는 주요 인자로 확인할 수 있었다. 즉, 지반불량조건에서의 각부보강공 연장성을 고려한 터널 굴착 시 우각부 위치에서의 내공변위와 우각부 침하 변수는 터널의 단면적 증가 시 부재력 변화율 증감율에 주요한 거동특성 영향인자 인 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 철도터널에서의 굴착단면 대·소 영향성 관련 보강공(Elephant foot pile)을 고려한 지반거동 양상

을 분석하여 내공변위 및 천단변위·각부침하·보강공 축력의 발생경향성 추이에 대하여 수치해석적 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시공각도를 기준으로 한 터널의 단면증가율에 따른 시공중 안전성 평가 결과, 일정한 각부보강공 길이 ($L=1.5H$, H : 하반굴착고)가 적용되는 경우 시공각도를 고려한 터널의 단면증가율 대비 천단·내공변위·축력의 발생 경향성은 미미한 것으로 나타나, 시공중 안전성 평가 시 주요 영향인자로 판단하기에는 부적합한 것으로 판단된다.
- (2) 터널단면 증가율에 따른 각부 침하의 경우 시공각도

의 변화에 따라 다소의 차이는 있으나 1.44~1.57배의 증가율을 보여 단면증가율대비 상대적으로 큰 변위증가율 경향을 나타냈으며 단면의 증가율에 따른 각부 침하율은 단면증가율 대비 보다 더 커질 수 있으므로 설계 및 시공시 각별히 각부침하 제어를 위한 대책 및 강구가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

- (3) 우각부 보강공 길이변화를 기준으로 한 터널단면 증가율대비 침하 변위경향성 연구결과도 단면 증가율 보다 매우 더 큰 침하경향성을 보여주고 있는 것을 확인하였다(1.58~1.81배 > 1.36배).
- (4) 각부보강공의 설치각도가 일정한 경우 단면증가율 대비 보강길이별 천단침하 및 축력 발생경향은 터널단면의 증가가 있다 하더라도 보강공 각 연장별(2~12m)로 거의 일정한 패턴의 결과를 보이는 것으로 나타나 터널의 단면증가율이 각 보강공 길이변화에 따른 축력의 변화에는 큰 연관성을 주지 못하는 것으로 판단된다. 이러한 원인은 단면의 증가율보다 보강공 길이 관점에서의 일반적인 기초공에서의 말뚝 마찰지지 매커니즘과 동일한 거동양상으로 판단함이 더 합리적인 것으로 사료된다.
- (5) 터널의 대단면화 단면증가율을 고려한 굴착시 지보 안전성 확보를 위한 주요인자로서의 내공변위·천단침하 등의 여러 변수 조건들에 대한 변위 응력특성 분석결과, 일정한 길이의 각부보강공 선정될 경우 터널의 단면이 다소 커진다 하더라도 무리하게 비경제적으로 각부 보강공의 연장을 증가시킬 필요는 없는 것으로 판단된다.

- (6) 터널 설계·시공관리 주요 지배인자로서는, 단면증가율을 고려한 「터널의 각부 단면에서의 침하영향성」에 대한 중점적인 평가를 통한 터널의 지보 보강공 효과를 판단하도록 하는것이 적절한 것으로 판단된다.

References

1. Jung, H., Kim, H., Chun, B. (2009), "A study on the ground settlement and reinforcement measures in the case of tunneling at the yangsan fault." *Journal of the Korean Geotechnical society*, Vol.10, No.6, pp.35-48.
2. Lee, G.-Y., Oh, J.-H., Cho, K.-H., and Lee, D.-S. (2016), "A case study on elephant foot method for railway tunneling in large fault zone.", *Journal of the Korean society of civil engineers*, Vol.36, No.6, pp.1161-1167.
3. Lee, G.-Y. (2016). A case study on elephant foot method for tunneling in large fault zone. Ms. Thesis, Korea National University of Transportation.
4. Park, C., Lee, H., Park, J., Yoon, C., Hwang, J. (2009), "A Case study on elephant foot method for tunneling in the soft ground." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, September 25~26, 2009, Incheon, Korea.
5. Shin, H. (2014). A study for tunneling excavation and reinforcement in excessive displacement ground characteristics. Ms. Thesis, Woosong University.
6. Yim, C. (2006), Optimum tunnel excavation and reinforcement method in large fault zones. Ms. Thesis, Korea University.
7. Yim, S., Seo, Y., Kim K., Kim C., Kim H. (2010), "Reinforcing Effect by Tunnel Support System." *KSEG Conference*, April 8-9, 2010, Kyeongju, Korea, pp.255-258.