

장기소성변위가 발생하는 터널의 거동특성 평가와 대책공법 적용



박 치 면
(주)에스코아이에스티
상무이사



이 호
(주)에스코아이에스티 부장
(geotun@escoeng.com)



박 재 훈
(주)에스코아이에스티
과장



황 제 돈
(주)에스코아이에스티
대표이사

1. 서론

산악지역에 건설되는 터널은 지반조건이 양호하여 도심 지역에 계획되는 터널에 비해 안정성 확보 측면에서 유리하여 공사비 소요가 적으며, 공사기간이 단축되는 것이 일반적이다. 그러나 산악터널이라 할지라도 대심도에 계획되며, 원지반의 강도가 상대적으로 낮고 초기지압, 지하수 영향 등의 특별한 외적 조건에 의해 팽창(Swelling)과 압착(Squeezing) 현상이 발생하는 터널의 경우에는 상황이 다르다. 이러한 지반조건에 건설되는 터널을 계획할 때에는 상세한 지반조사를 수행하여 원지반의 강도와 변형특성을 면밀히 평가하고 그 결과를 반영하여 다양한 방법을 통해 시간의존적 변형특성을 보이는 장기소성변위 발생 정도를 평가하는 것이 매우 중요하다. 장기소성변위는 터널내공에 발생하는 전체변위량도 중요하지만 이보다 얼마만큼의 시간동안 어떠한 속도로 발생하는가가 더욱 중요한 문제로 대두된다. 이를 정확히 평가하지 못한다면 장기소성변위 발생에 의해 이미 시공된 1차 지보재와 콘크리트라이닝

의 기능이 점차적으로 저하되어 결국에는 터널의 안정성 확보에 문제점을 야기시킨다. 이러한 장기소성변위 발생에 따라 터널 계획단면이 축소되어 1차 지보재가 손상되거나 최종 구조물인 콘크리트라이닝을 타설할 수 없게 되는 경우는 국외사례에서 빈번히 보고되고 있다. 지금까지 국내의 경우는 국외에서 보고되는 장기소성변위 발생 문제에 대해 그 문제의 심각성을 잘 느끼지 못하고 있었으며, 그 평가방법도 전무한 상태였다. 최근 들어 국내의 경우에도 대심도에 건설되는 터널에서 이와 같은 장기소성변위 발생으로 인한 문제가 종종 보고되고 있으며, 이러한 문제점을 합리적으로 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 본 고에서는 이러한 터널의 장기소성변위 발생에 대한 원인과 공학적 특성을 검토하고 국외에서 제시된 장기소성변위 예측방법과 소성범위 평가방법을 고찰하였다. 나아가 장기소성변위의 제어를 위해 적용할 수 있는 대책공법의 특징과 실제 시공조건에 대한 대책공법의 적용성을 검토하여 향후 장기소성변위 발생이 예상되는 지반조건에 건설되는 터널의 보강계획에 반영할 수 있도록 하였다.

2. 장기소성변위 발생 개념

2.1 암반의 시간의존성 거동

2.1.1 시간의존성 거동 개념

일반적으로 NATM의 설계개념은 지반이 1차 지보재 역할을 하여 굴착 초기에 발생하는 지반의 변형을 수용하고 굴착 후 타설되는 지보재는 남아있는 주변지반의 외력과 평형을 이루어 안정을 찾도록 하는 것이다. 특히 터널 주변 지반의 강성이 작거나 초기지압이 크게 작용하는 조건에서는 터널굴착 이후에도 주변지반의 외력이 상당부분 남아있어 시간경과에 따라 터널에 지속적인 외력으로 작용하게 된다. 이러한 특성을 보이는 암반에 있어서 장기적으로 발생하는 변형거동을 암반의 시간의존성 변형거동이라 한다. 암반의 시간의존적인 대표적인 거동형태로 팽창(Swelling)과 압착(Squeezing) 현상이 있다.

암반의 팽창현상은 퇴적암 계열의 암석이 팽창함으로 인해 체적이 증가되고 이로 인해 터널의 경우 지보재에 추가적인 외력이 작용하여 과다변형을 유발하는 거동을 의미한다. 암반의 압착현상은 터널에서 지보재에 외력이 증가된다는 점에서 팽창성과 유사한 개념을 보이나 압착성 암반의 외력증가는 팽창성 암반과 같이 체적팽창에 기인한 것이 아니라 시간의존적인 장기소성변형에 의해 발생한다는 것이 차이점이라 할 수 있다. 일반적으로 터널에 발

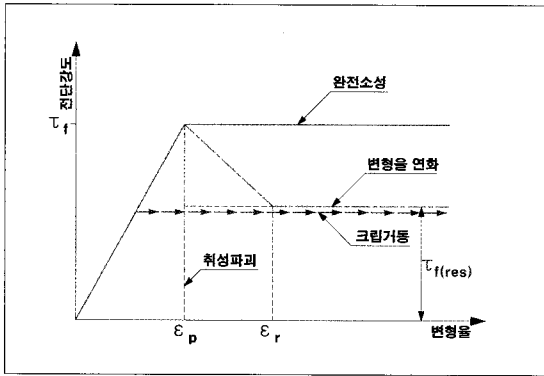
생하는 시간의존성 거동특성에 따른 분류는 표 1과 같으며, 이는 암반 터널의 장기소성변위 발생에 따른 변형-응력 상호관계 분석을 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

2.1.2 점소성역학에 의한 거동 개념

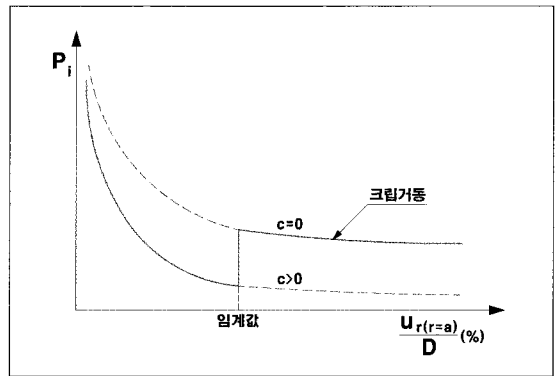
일반적인 암반의 파괴거동은 취성파괴로 설명되며, 암석은 첨두강도(Peak Strength)에 도달한 후 잔류강도(Residual Strength)로 줄어든다는 가정을 기본개념으로 한다. 반면에 완전소성의 개념은 일단 첨두강도에 이르면 변형이 계속 발생하더라도 강도는 계속 유지된다는 개념으로 설명된다. 실제로 암반의 거동은 변형률 연화(Strain Softening)현상을 보이며, 이는 변형률이 증가함에 따라 완전소성에서 잔류강도로 변화하는 과정을 의미한다. 한편, 시간의존성 거동으로 대별되는 크리프 거동은 단기강도의 일정비율(예를 들면 첨두강도의 60% 정도)의 강도를 계속 작용시키게 되면, 암반의 변형률이 소성상태이상으로 발생하여 점착력을 상실하게 되고 과도한 변형의 발생으로 인하여 터널지보재에 추가하중이 작용되고 장기 소성변형을 유발하게 되는 것을 의미한다. 이러한 상태에서의 지반반응곡선(Ground Reaction Curve)은 일반적인 지반에서의 지반반응곡선에 비해 다소 상이한 형태를 보이는데 초기에는 일반적인 변형-응력관계를 보이다가 변형률이 일정수준의 한계상태에 다다르면 지반압력이 증가하는 불안정 영역으로 발전하게 된다. 그림 1은 점소성역학

표 1. 암반의 시간의존적 거동에 따른 터널의 변상 분류

구분	상세분류	지반거동 특성
탄성(Elastic)	• 무지보(Non Squeezing)	• 무지보 상태에서도 안정성을 확보하는 상태
낙반(Ravelling)	-	• 지반굴착 후 천단부 및 측벽부의 느슨한 영역에서 암괴 및 박편이 떨어지는 상태
압착(Squeezing)	• Mild Squeezing : $u/a=1\sim3\%$ • Moderate Squeezing : $u/a=3\sim5\%$ • High Squeezing : $u/a>5\%$ (u : 반경방향 변위, a : 터널반경)	• 암반의 압착으로 소성상태에 도달하는 경우 • 압착성 정도는 지중응력에 의존하며, 점토 등을 함유한 경우는 토피고가 않아도 발생 • 토피고가 큰 단단한 지반인 경우 굴진면 및 굴착면 후방에서 압착성 발생
팽창(Swelling)	-	• 수분을 함유한 점토지반의 체적팽창
유동(Running)	-	• 조립지반의 급경사 사면이 노출되어 안정성을 확보하지 못하는 경우
흐름(Flowing)	-	• 지반이 지하수를 만나 천단, 측벽, 바닥부 배면의 토사가 물의 흐름에 따라 유실되는 경우
파열(Rock burst)	-	• 과지압으로 인해 단단한 암반이 갑작스런 파열을 일으키는 경우

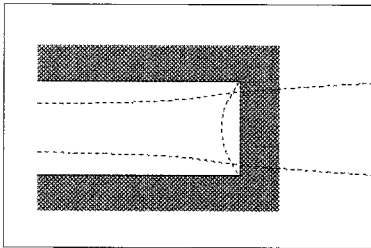


(a) 암반의 응력-변형률 관계

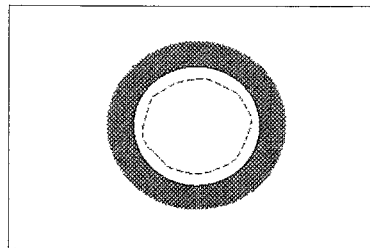


(b) 점소성역학 개념의 지반반응곡선

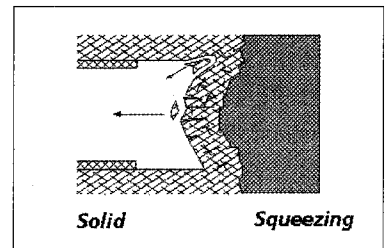
그림 1. 점소성역학 개념에서의 응력-변형률 관계와 지반반응곡선



(a) 굴진면 및 천단 변위 발생경향



(b) 내공변위 발생경향



(c) 굴진면 압출현상 발생경향

그림 2. 압착특성을 보이는 터널 굴진면 거동 개요

개념에서의 응력-변형률 관계와 지반반응곡선을 보여주고 있다.

2.2 시간의존성 특성을 보이는 터널의 거동

2.2.1 터널의 거동특성

시간의존성 특성을 보이는 지반에 건설되는 터널은 굴착 및 지보재 설치 이후에도 장기적으로 발생하는 터널 내공변위에 의해 지반의 붕락과 지보재의 성능저하가 가장 큰 문제로 야기되고 있으며, 이러한 현상은 터널 주변지반 이완영역의 확대, 지반균열부위의 용수영향 등으로 인한 풍화의 가속화 등의 지속적인 문제발생으로 터널 안정성을 저하시킨다. 특히 과다하게 발생하는 터널의 내공변위는 계획된 설계단면을 침범하여 콘크리트라이닝 등의 구조물 시공을 어렵게 하고 설치된 지보재의 변형을 유발하여 추가보강 및 추가굴착 또는 이미 설치된 지보재의 재시

공이 필요하게 되어 궁극적으로는 공사비 및 공기의 증가 요인으로 작용하게 된다. 그림 2는 압착특성을 보이는 터널 굴진면 거동에 대한 개요도를 보여주고 있다.

2.2.2 터널의 내공변위 발생 특성

시간의존성 특성을 보이는 터널에서의 일반적인 내공변위 산정식은 점탄성 지반 및 점소성 지반의 경우 식 (1), (2)와 같이 표현된다. 점소성 지반의 내공변위를 산정하는 식에서 앞부분은 소성거동에 대한 변위를 뒷부분은 점소성거동에 의한 변위를 나타낸다. Panet(1996)은 탄성 및 점소성을 보이는 터널에 대하여 실제로 내공변위를 계측한 결과 소성영역의 크기가 크게 발생하는 경우 계수 m의 값이 크게 증가하여 시간의존성 변위발생이 심각함을 시사한 바 있다.

$$u_r(x, t) = a[1 - \exp(-bx)] + c[1 - \exp(-dt)] \quad (1)$$

$$u_r(x, t) = a \left[1 - \left(\frac{X}{X+x} \right)^2 \right] \times \left[1 + m \left(1 - \frac{T}{T+tt} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서, u_r 은 시간에 따른 최종변위를 의미하며 a, b, c, d, X, T, m, n은 기하학적 조건에 따른 계수를 의미한다.

$$N = (Q)_{SRF} = 1 \quad (4)$$

$$H = (275 N^{0.33}) B^{-1} (m) \quad (5)$$

3. 장기소성변위가 발생하는 터널의 거동 특성 평가

3.1 경험적 방법을 통한 장기소성변위 평가

3.1.1 Q값과 토피고(H)를 이용한 방법

암반의 시간의존성 거동에 따라 발생하는 장기소성변위를 평가하는 방법에는 크게 경험적 방법을 이용한 평가방법과 해석적 방법을 이용한 평가방법이 있다. 경험적 평가방법에서 Singh 등(1992)은 39개소의 현장사례를 기초로 하여 Q값과 토피고(H)로부터 압착성(Squeezing)과 비압착성의 경우를 식 (3)과 같이 하나의 직선에 의해 구분하였다.

$$H = 350Q^{\frac{1}{3}} (m) \quad (3)$$

3.1.2 암반계수(N)를 이용한 방법

Goel 등(1995)이 제안한 장기소성변위 판정방법은 암반계수(N)에 근거를 두고 있으며, 식 (4)와 같이 응력크기에 무관한 Q값으로 결정할 수 있으며, 터널의 심도(H), 폭 또는 직경(B) 및 암반계수(N)의 관계는 식 (5)와 같이 나타내었다.

3.1.3 내공변위를 이용한 방법

경험적 방법으로 현장의 계측결과를 이용하여 내공변위 발생량을 기준으로 표 2와 같이 장기소성변위 발생여부를 판정할 수 있으며, 이를 이용하면 현장에서 신속하게 장기소성변위 발생여부를 개략적으로 평가할 수 있다.

3.1.4 지반강도비를 이용한 방법

Jethwa 등(1984)은 장기소성변위 발생특성을 개략적으로 예측하기 위한 지표로 암반의 Competency Factor(암반의 일축압축강도/토피고에 따른 응력의 비)를 이용하여 표 3과 같이 제안하였다.

3.2 해석적 방법을 통한 장기소성변위 평가

3.2.1 터널변형률을 이용한 방법

경험적인 방법 이외에도 수치해석을 이용한 원지반 강도비와 터널변형률과의 상관관계를 분석하여 장기소성변위를 평가하는 방법과 RMR, 소성영역 범위 및 내공변위 발생량 등을 이용하여 지반의 거동특성을 예측하는 해석적 방법이 있다. 터널변형률을 이용한 방법(Hoek & Marinos, 2000)은 터널의 반경방향 변형률(ϵ_r)과 원지반강도비(σ_{cm}/p_0)를 이용하여 장기소성변위 발생가능성을 정량적으로 평가하는 해석적인 방법으로 축대칭 유한요소법을 이

표 2. 내공변위를 이용한 장기소성변위 발생여부 판정기준

장기소성변위 발생	Mild	Moderate	High
판정기준(내공변위/터널직경)	1~3%	3~5%	5%

표 3. Competency Factor를 이용한 장기소성변위 발생여부 판정기준

장기소성변위 발생	Highly	Moderately	Mildly	None
$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{p_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}$	< 0.4	0.4~0.8	0.8~2.0	> 2.0

↓ ANALYSIS →		Geostructural →		Rock mass				
				Continuous ↔ Discontinuous ↔			Equivalent-Continuous	
Tensional ↓		RMR						
Deformational response ↓	δ ₀ (%)	Rp/Ro	Behavioral Category ↓	I	II	III	IV	V
Elastic (σ _θ < σ _{cm})	negligible	-	a	STABLE				
			b		INSTABLE			CAVING
Elastic - Plastic (σ _θ ≥ σ _{cm})	<0.5	1-2	c			WEDGES		
	0.5-1.0	2-4	d					
	>1.0	>4	e	ROCK BURST				SQUEEZING
			(f)	→ Immediate collapse of tunnel face ↑				

그림 3. 내공변위와 RMR을 이용한 터널의 거동특성 분석 도표

용한 터널 변형률 산정방법을 식 (6)과 같이 제안하였다. 또한 Chem(1998)은 사례분석을 통하여 터널 변형률을 산정하는 근사식을 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_t(\%) = 0.15(1 - p_1/p_0) \frac{\sigma_{cm}^{-(3p_1/p_0 + 1)/(3.8p_1/p_0 + 0.54)}}{p_0} \quad (6)$$

$$\epsilon_t(\%) = 100(0.002 - 0.0025 \frac{p_1}{p_0}) \frac{\sigma_{cm}^{2.4p_1/p_0 - 2}}{p_0} \quad (7)$$

3.2.2 내공변위와 RMR값을 이용한 방법

내공변위와 RMR을 이용한 방법은 RMR, 소성영역 범위 및 내공변위 발생량 등을 이용하여 터널의 다양한 거동특성을 예측하는 방법으로 유럽 Torino 지역의 산악터널에 적용하여 장기소성변위 발생가능성을 평가하였다. 그림 3은 내공변위와 RMR을 이용하여 유럽 Torino 지역의 산악터널

의 거동특성을 분석하는데 적용된 도표를 보여주고 있다.

4. 보강공법 적용 사례

4.1 소성범위와 장기소성변위의 예측

4.1.1 검토조건

파쇄대, 연암 및 경암이 교호하는 두 가지 지반조건 (Case 1, Case 2)을 가정하여 터널 시공에 따른 소성범위와 장기소성변위를 예측하였다. 검토조건에 적용한 대표단면은 00공사(철도터널)에서 설계에 적용된 지반조건을 참고하여 적용하였다. 평균 토피고는 각각 290m와 120m, 터널 통과구간의 지반조건과 터널 상·하부의 지반조건은 표 4와 같으며, 검토구간에 적용한 지반특성치는 표 5와 같다.

표 4. 검토조건별 지반조건

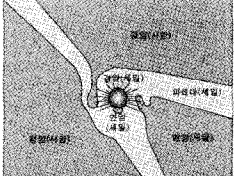
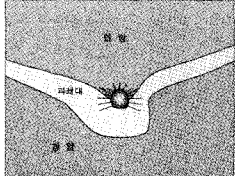
Case 1	Case 2	구 분		지반조건
		토피고(m)	Case 1	290
			Case 2	120
		터널구간	Case 1	파쇄대 분포
		지반조건	Case 2	터널하부 파쇄대 분포
		상부하부	Case 1	상·하부 경암
		지반조건	Case 2	상부 연암, 하부 경암

표 5. 검토구간 지반특성치

구 분	변형계수(ton/m ³)	포아송비(ν)	단위중량(ton/m ³)	점착력(ton/m ²)	내부마찰각($^{\circ}$)
파쇄대	10,000	0.33	2.0	5	31
연암층	100,000	0.31	2.2	16	32
경암층	300,000	0.26	2.4	40	36

표 6. 장기소성변위 발생량 예측과 압착성 판정결과

구 분		경험적 방법				해석적 방법	
평가인자		Q값과 토피고	암반계수	내공변위	지반강도비	터널변형률	내공변위와 RMR
Case1	검토	Q : 12 H : 290	암반계수 : 1 H : 356	4.5%	0.87	ϵ_t : 4.5% σ_{cm}/ρ_0 : 0.18	분류등급 "d" RMR "IV"
	판정	일부 압착성	Mild	Moderate	Mildly	압착성	압착성
Case2	검토	Q : 1.04 H : 120	암반계수 : 1 H : 147	4.6%	2.11	ϵ_t : 4.6% σ_{cm}/ρ_0 : 0.18	분류등급 "d" RMR "IV"
	판정	비압착성	Non	Moderate	None	압착성	압착성

표 7. 이론식 및 경험식을 이용한 소성범위 산정결과

구 분	이론식을 이용한 산정결과				경험식을 이용한 산정결과				
	크리프거동	탄성론	탄소성론	Terzaghi	Unal	Bieniawski	Barton	Grimstad	
이원영역(m)	3.2	0.2	5.7	6.3	8.9	10.3	5.8	8.8	

4.1.2 장기소성변위 및 소성범위 예측

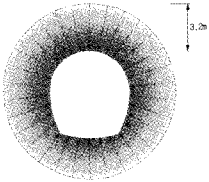
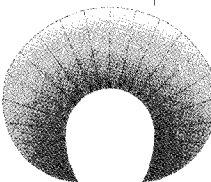
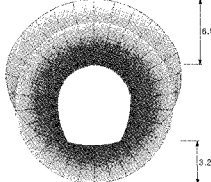
검토조건을 이용하여 장기소성변위와 소성범위 발생 특성을 예측하였다. 장기소성변위 발생량 예측결과에 따라 압착성(Squeezing) 발생 가능성을 평가하였으며, 압착성 발생 가능성 평가방법은 앞서 언급한 장기소성변위 예측을 위한 경험적 방법과 해석적 방법을 이용하였다. 표 6은 경험적 방법과 해석적 방법을 이용하여 예측한 장기소성변위와 압착성 판정결과를 보여주고 있다.

이론식과 경험식을 이용하여 소성범위 분포영역을 개략적으로 예측하였다. 이론식을 이용한 소성범위 산정결과 0.2~6.3m로 나타났으며, 경험식을 이용한 소성범위 산정결과 5.8~10.3m로 나타났다. 장기소성범위는 지반의 시간의존성 거동에 기인하기 때문에 지반의 크리프거동을 고려한 이론식을 이용한 산정결과가 기타의 방법을 이용한 결과 보다 지반의 압착성에 의한 변형특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 표 7은 이론식 및 경험식을 이용한 소성범위 산정결과를 보여주고 있다.

장기소성변위가 발생하는 터널의 거동은 일반적인 지반 조건에 시공되는 터널의 거동과 상이할 것으로 예상되며, 터널의 안정성 확보측면에서 더욱 취약할 수 있다. 따라서 장기소성변위가 발생하는 터널에서 소성범위는 여러 가지 조건을 고려하여 안전측으로 결정하고 이를 지보패턴 및 보강공법 설계에 반영하여야 할 것으로 판단된다. 본 고에서는 크리프 거동을 고려한 이론식과 수치해석을 이용하여 소성범위를 산정하고 이 두가지 경우에서 얻어진 소성범위를 종합적으로 고려하여 설계에 적용할 최종 소성범위를 결정하였다. 표 8은 이와 같은 방법으로 얻어진 소성범위 산정결과를 보여주고 있으며, 수치해석으로 예측한 소성범위가 이론식으로 예측한 소성범위보다 전반적으로 크게 나타났다.

다만 측벽하부와 터널하부에서 발생하는 소성범위는 이론식에 의해서 얻어진 소성범위가 더 크게 발생하였으므로 실제 설계에 반영할 소성범위는 이를 고려하여 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 8. 이론식 및 수치해석에 의한 소성범위 산정결과

구 분	이론식(크리프거등)	수치해석(평균)	적 용
개요도			
천단부	3.2	6.9	6.9
측벽부	3.2	5.6	5.6

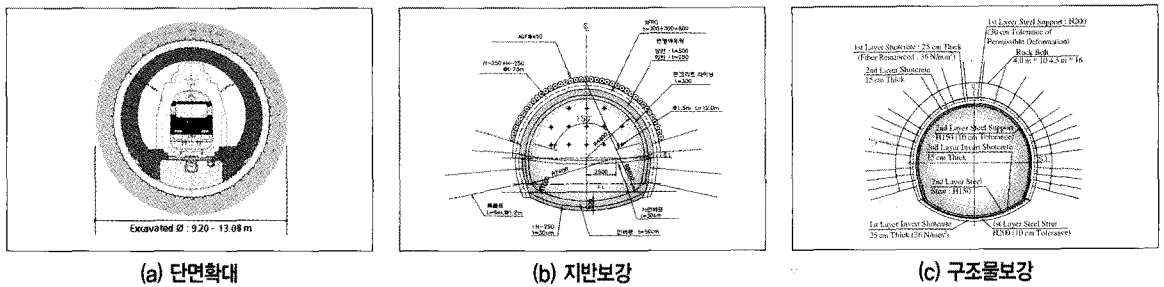


그림 4. 장기소성변위 발생에 따른 대책공법 적용사례

4.2 대책공법 검토

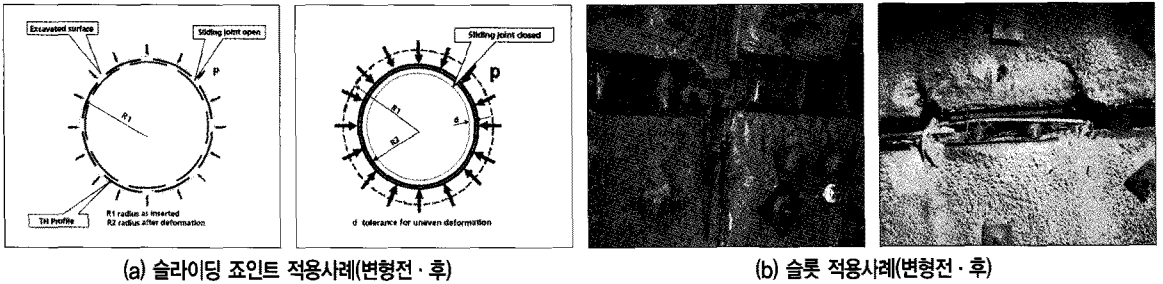
4.2.1 장기소성변위 발생에 따른 대책공법 검토

장기소성변위 발생을 최소화하거나 억제하기 위해 적용하는 대책공법은 크게 단면확대, 지반보강, 구조물보강을 이용하는 방법 등이 있다. 단면확대를 이용하는 방법은 장기 추가변위 발생량을 정량적으로 예측하여 목표하는 터널단면을 변위발생량 만큼 확대하여 계획하는 방법이며, 이 방법을 적용하기 위해서는 지반조사, 현장계측 결과 등을 이용하여 터널의 장기소성변위 발생량을 최대한 정확하게 예측하고 이를 토대로 터널단면 확대량을 사전에 결정하는 것이 중요하다. 지반보강을 이용하는 방법은 추가 록볼트 설치, 강관보강그라우팅 설치, 약액 및 시멘트 주입을 이용한 지반보강 그라우팅 등이 있으며, 이러한 방법을 적용하기 위해서는 터널 주변지반의 이완영역 범위를 예측하여 보강공법의 적용영역을 정확히 산정하는 것이 중요하다. 국외사례의 경우 터널 주변지반의 이완영역 범위

를 고려하여 장척(L=12m)의 록볼트를 적용하거나 강성증가, 보강효과 증대 및 천공홀의 자립성을 개선하기 위해 자가천공방식의 자천공형 록볼트를 적용하기도 한다. 구조물보강을 이용하는 방법은 콘크리트라이닝에 철근을 보강하는 방법과 터널 인버트를 곡선형으로 계획하는 방법 등이 있으며, 이러한 방법을 적용하는 목적은 철근의 보강으로 콘크리트라이닝의 균열과 취성파괴를 최대한 방지하고 곡선형 인버트의 적용으로 원활한 응력 재분배와 국부적인 응력집중을 방지하기 위함이다. 그림 4는 장기소성변위 발생에 따른 대책공법 적용사례에 대한 개요도를 보여주고 있다.

이 같은 방법 이외에도 장기소성변위 발생에 보다 능동적으로 대처하고 변위발생에 대한 지보재의 보강기능을 최대한 유지하기 위해 가축성의 강지보재 적용과 강지보재 연결부위에 상호거동을 수용할 수 있는 슬라이딩 조인트나 슬롯을 계획하는 방법이 있으며, 이러한 방법을 적용하면 장기소성변위 발생에 따른 지보재의 손상을 최대한

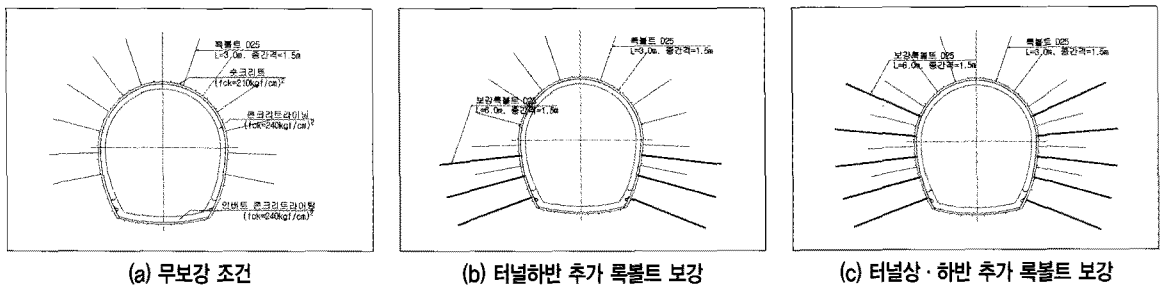
장기소성변위가 발생하는 터널의 거동특성 평가와 대책공법 적용



(a) 슬라이딩 조인트 적용사례(변형전·후)

(b) 슬롯 적용사례(변형전·후)

그림 5. 강지보재 연결부위의 슬라이딩 조인트 및 슬롯 적용사례



(a) 무보강 조건

(b) 터널하반 추가 목볼트 보강

(c) 터널상·하반 추가 목볼트 보강

그림 6. 대책공법 적용 계획

표 9. 대책공법 적용에 따른 보강효과 검토조건

Case 1		Case 2	
검토단면	해석요소망	검토단면	해석요소망
<ul style="list-style-type: none"> 터널주변 파쇄대 층 분포 터널 상부 및 하부지반 경암층 분포 		<ul style="list-style-type: none"> 터널하부 파쇄대 층 분포 터널 상부지반 연암층, 하부지반 경암층 분포 	

방지하고 지보기능을 유지하여 터널의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 5는 강지보재 연결부위에 슬라이딩 조인트 및 슬롯이 적용된 사례를 보여주고 있다.

4.2.2 대책공법 적용에 따른 보강효과 검토

지반의 압착이 발생할 가능성이 있는 터널의 대책공법 선정은 장기소성변위 평가결과와 소성범위 산정결과를 종합적으로 반영하여야 하며, 선정된 대책공법에 대해서는

수치해석 등의 방법을 통한 터널의 안정성 검토를 수행하여 대책공법의 적정성을 검증한 이후에 시공을 수행하여야 한다. 그림 6은 지반의 장기소성변위 발생 특성과 소성범위 예측결과를 반영하여 선정된 대책공법이다. 장기소성변위가 발생하는 지반에 계획되는 터널은 천단면의 발생에 대한 영향보다 내공변위 발생에 대한 영향이 터널의 안정성에 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며, 이러한 경향은 장기소성변위가 발생하는 대부분의 터널은 토피코가

표 10. 대책공법 적용에 따른 터널 안정성 검토결과

구 분		무보강		터널하반 추가 록볼트		터널상·하반 추가 록볼트	
		Ko=2.0	Ko=2.5	Ko=2.0	Ko=2.5	Ko=2.0	Ko=2.5
Case 1	내공변위(mm)	98.0	98.0	43.0	41.0	35.0	31.0
	감소율(%)	-	-	56	58	64	68
Case 2	내공변위(mm)	98.0	98.0	42.5	23.5	29.2	17.1
	감소율(%)	-	-	57	76	70	83

높아 횡방향 초기지압이 커서 축압계수(Ko)가 1.0보다 크게 나타나기 때문이다. 따라서 장기소성변위 발생에 대한 대책공법으로 추가 록볼트를 보강하는 지반보강 공법을 적용하였으며, 추가 록볼트 타설위치는 측벽부에 집중적으로 계획하였다. 그림 6은 대책공법 적용에 따른 보강효과를 검증하기 위해 2가지 경우에 대한 보강계획을 수립하고 무보강 조건을 기준으로 보강효과를 분석하였다. 표 9는 대책공법 적용에 따라 보강효과와 검증을 위한 검토조건을 보여주고 있다.

보강효과 검토결과 측벽부에 추가 록볼트 보강시 무보강 조건에 비해 내공변위가 56~83% 감소하는 것으로 나타나 장기소성변위가 발생하는 지반에 대책공법을 적용함으로써 터널의 안정성 확보에 많은 기여를 하는 것으로 나타났다. 표 10은 대책공법 적용에 따른 터널 안정성 검토결과이다.

5. 결 론

장기소성변위가 발생하는 터널의 거동특성 평가와 대책공법 적용에 대해 본 고에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 암반터널에서 압착(Squeezing)현상은 시간의존적인 장기소성변형에 의해 발생하며, 장기소성변위 발생량과 소성범위의 평가를 위해 지반의 강도와 변형특성을 상세히 평가하는 것이 중요하다.
- 2) 암반의 시간의존성 거동은 변형률 연화(Strain Softening) 및 크리프(Creep) 현상을 보이며, 이는 변

형률이 증가함에 따라 완전소성에서 잔류강도로 변화하는 과정을 의미하는데 단기간도의 일정 비율의 강도가 계속 작용하면, 암반의 변형률이 소성상태 이상으로 발생하여 점착력을 상실하게 되고 과도한 변형의 발생으로 인하여 지보재에 추가하중이 작용하고 터널의 안정성에 영향을 미친다.

- 3) 터널의 장기소성변위 발생 및 압착성을 평가하는 방법은 경험적 방법과 해석적 방법이 있다. 경험적 방법은 Q값과 토포고(H)를 이용한 방법, 암반계수(N)를 이용한 방법, 내공변위를 이용한 방법, 지반강도비를 이용한 방법 등이 있으며, 해석적 방법은 터널변형률을 이용한 방법과 내공변위와 RMR값을 이용한 방법 등이 있으나 원지반 강도특성과 토포고, 내공변위와의 상관성을 분석하고 비교한다는 점에서는 그 원리를 같이한다.
- 4) 장기소성변위가 발생하는 터널의 거동은 일반적인 지반조건에 시공되는 터널의 거동과 상이하며, 터널의 안정성 확보측면에서 더욱 취약할 수 있다. 따라서 장기소성변위가 발생하는 터널에 있어서 소성범위의 산정은 이론적, 수치해석적 방법 등을 이용한 다양한 평가방법을 통하여 안전측으로 결정하고 이를 지보패턴 및 보강공법 설계에 반영하여야 한다.
- 5) 장기소성변위 발생을 최소화하거나 억제하기 위해 적용하는 대책공법은 단면확대, 지반보강, 구조물보강을 이용하는 방법 등이 있으며, 장기소성변위 발생특성을 고려하여 합리적으로 적용해야 한다.
- 6) 장기소성변위가 발생할 것으로 예상되는 지반조건을 예로 들어 이 구간에 추가 록볼트 타설을 통한 지반보강 공법을 대책공법으로 적용하고 보강효과를 검토한

결과 무보강 조건에 비해 내공변위가 56~83% 감소하는 것으로 나타나 터널의 안정성 확보에 많은 기여를 하는 것으로 나타났다.

squeezing problems in weak heterogeneous rock masses". Tunnels and Tunnelling International, pp. 45-51: part one ; 33-36 : part two

참고 문헌

1. 이인모(2005), *임반역학의 원리*, 새론
2. 정소걸(2003), "압출암반내 굴착된 터널의 안정성 해석", 한국암반공학회
3. Bhawani Singh, R.K. Goel, J.L. Jethwa,(1997), "Support pressure assessment in arched underground opening through poor rock masses". *Engineering Geology*
4. Hoek E. and Marinos P. (2000), "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses". *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 45-51: part one ; 33-36 : part two
5. Jethwa J.L., Singh B and Singh B.(1984), "Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions a new approach". *Design and Performance of Underground Excavations*, ISRM Symposium, Cambridge, pp. 231-238.
6. Mahir Vardar(2005), "Time dependent stability problems in tunnels and time-dependent behavior of the rock mass". ITA, Istanbul
7. Panet M. (1996), "Two case histories of tunnels through squeezing rocks". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 3, pp. 155-164.

이달의 엔지니어상 추천안내

산업현장의 우수 엔지니어를 발굴·포상하여 산업기술인력의 자긍심을 제고하고 현장기술자 우대 풍토를 조성하고자 제정된 「이달의 엔지니어상」 수상후보자를 접수하오니 많은 신청 바랍니다.

- 대 상 : 기업의 엔지니어로서 계속하여 5년 이상 근무한자 중 최근 3년 이내의 공적이 우수한 자
- 주 관 : 한국산업기술진흥협회 / 문화일보 / 한국경제신문 / YTN
- 후 원 : 교육과학기술부
- 포상내용 : 교육과학기술부장관 상패, 트로피 · 부상(상금 1,000만원)
- 문 의 : 한국산업기술진흥협회 심사평가팀 이달의 엔지니어상 담당자
(Tel: 02-3460-9025~6, Fax: 02-3460-9029, E-Mail: jsw8055@koita.or.kr)

■ 세부내용 및 신청서는 한국산업기술진흥협회 홈페이지(<http://www.koita.or.kr>)의 본회 주요사업 중 "이달의 엔지니어상"에서 보실 수 있습니다.

>> 향후 접수계획

구분	제31차 이달의 엔지니어상	제32차 이달의 엔지니어상
신청·접수기간	10월 초~11월 중순	'10년 1월 초~2월 중순