

이정흠
㈜유신 지반터널부
대리



서승우
㈜유신 지반터널부
사원



조병하
㈜유신 지반터널부
부장



황영철
㈜유신 지반터널부
전무

1. 개요

지하공동 구조물을 안전하고 경제적으로 구축하기 위해서는 대상 지반에 대한 물리적, 역학적 성질을 가능한 정확히 파악할 필요가 있다. 그 중에서도 특히 지반의 초기응력을 파악하는 것은 지하 구조물의 안정성 검토에 있어서 매우 중요한 요소이다.

터널 구조물 설계시 굴착에 의한 지반 안정성을 평가하기 위해서 일반적으로 수치해석프로그램을 이용하여 각 패턴별 지보 및 보강에 대하여 적정성을 검토한다. 대부분의 수치해석과정에서 지하구조물의 수평력에 영향을 주는 축압계수 K_0 는 일반적으로 $K_0 = 0.5 \sim 2.0$ 범위내에서 3~4 Case (0.5, 1.0, 1.5, 2.0)의 축압계수를 선정하여 지반의 종류와 상관없이 일률적으로 해석을 실시하고 있다.

하지만 토사지반의 축압계수 K_0 는 실험 및 각종 문헌에 의하면 0.3~0.6의 범위를 보이므로, 암반과 같이 K_0

=0.5~2.0의 범위로 수치해석을 실시하면 실제 지반의 물리적 성질과 상이하여, 과다 설계의 위험성이 있다.

본 고에서는 실제 설계사례를 토대로 수치해석을 수행시 일률적인 축압계수 적용에 대한 문제점을 검토하여 토사지반에서의 합리적인 설계 방안을 제안하고자 한다.

2. 토사지반에서의 설계사례

2.1 CASE- I (지하철 터널)

본 지하철 터널은 전체 연장 2,420m중 토사지반은 PS-2(180°) 159m, PS-2(120°) 520m로 약 30% 구간이 토사지반이며, 수치해석 시행시 축압계수 $K_0 = 1.0 \sim 3.0$ 을 적용하였다. 지보재의 안정성 평가는 $K_0 = 2.0$ 인 경우를 일괄 적용하여 패턴의 적정성 및 안정성을 검토하였다.

표 1. 지반에 따른 지보패턴 적용현황

구 분		PS-2 (180° 보강)	PS-2 (120° 보강)
숏크리트 두께		200mm	200mm
록볼트	길이	3m	3m
	종/횡방향 길이	0.6m/1.0m	0.8m/1.0m
내부라이닝 두께		300mm	300mm
보조공법		대구경 강관 그라우팅 (180°) L=12m, CTC 500mm	대구경 강관 그라우팅 (180°) L=12m, CTC 500mm

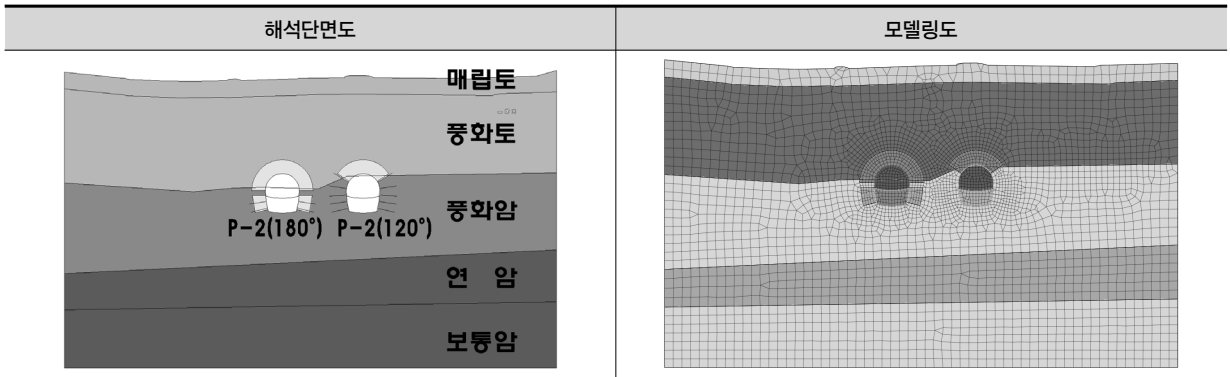
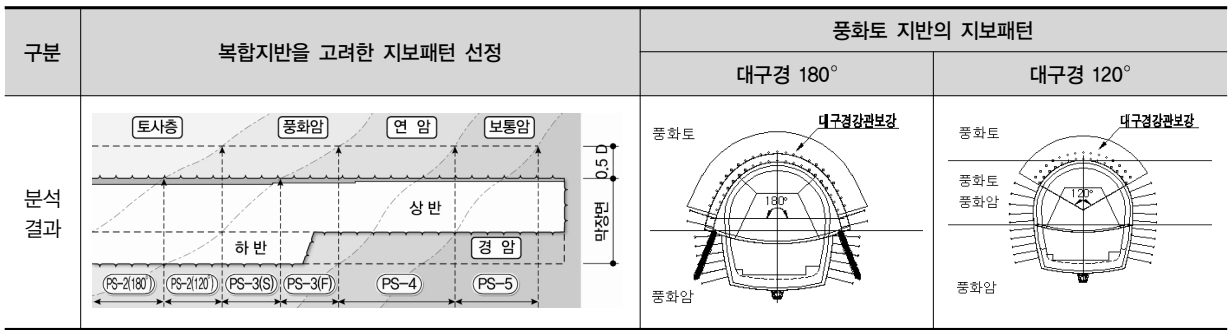


그림 1. 해석모델링

본 설계구간은 상부 풍화토 및 풍화암 통과구간으로 축압계수 $K_0=2.0$ 에서는 숏크리트 지보재의 응력은 8.0MPa 이내로 허용응력 기준인 8.4MPa에 비하여 안전측이며, $K_0=3.0$ 에서는 17.0MPa 이상의 큰 지보재 응력을 보인다. 이때 풍화토의 경험적인 축압계수 $K_0=1.0$ 에서의 지

보재의 응력은 5.0MPa 이내로 안전을 $F_s=1.79$ 이상으로 판단된다. 천단에서의 변위는 $K_0=2.0\sim3.0$ 구간에서는 지형특성에 맞지않는 과도한 축압에 의해 오히려 천단에서 융기되는 현상이 보였다.

(천단변위 : ↓방향 +, 슛크리트 응력 : 압축 +)

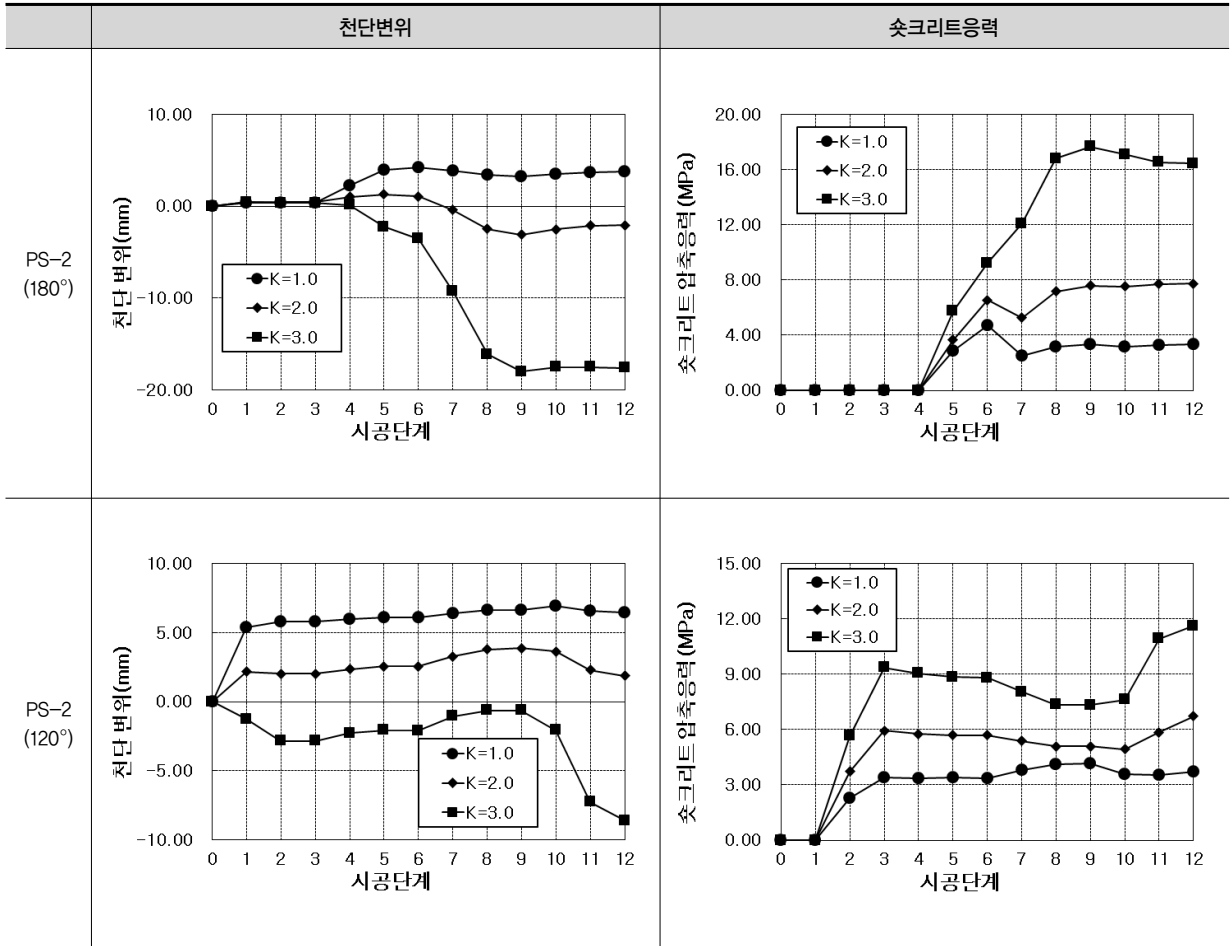


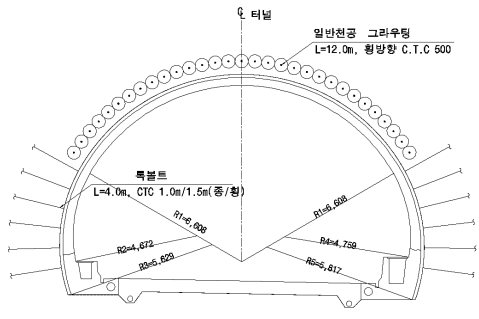
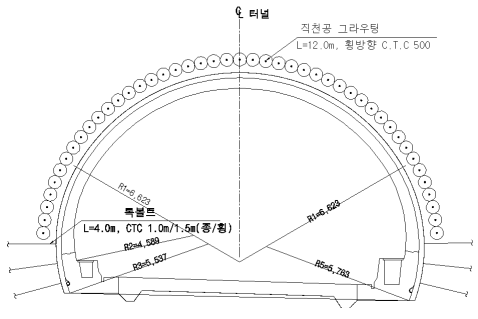
그림 2. 시공단계별 해석결과

2.2 CASE-2 (도로터널)

본 도로터널은 갱구부 구간으로 토피는 15.8m~16.4m이며 지보형식은 P-6-3으로 계획되었다. 터널 수치해석 시 본선구간에서의 축압계수 K_0 는 0.5~2.0을 적용하였으며, 갱구부 구간인 P-6 패턴에서는 축압계수 K_0 를 0.5~1.5의 값을 적용하였다.

본 설계 구간의 터널 천단부 보조공법은 12m 강관다단 그라우팅이 적용되었으며, 해석결과 축압계수 P-6-2패턴의 경우는 축압계수 전구간에서 안전축이며, P-6-3패턴의 경우 $K_0=1.5$ 에서 지보재인 슛크리트 응력이 가장 위험하게 나왔으며, 축압계수 증가에 따라 슛크리트 압축 응력이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

표 2. 지보패턴 적용현황

		P-6-2	P-6-3
패턴도			
	숏크리트 두께	160mm	200mm
록볼트	길이	4m	4m
	중/횡방향 길이	1.0m/1.5m	1.0m/1.5m
내부라이닝 두께		400mm	400mm
보조공법		직천공 그라우팅 (120°)	직천공 그라우팅 (180°)

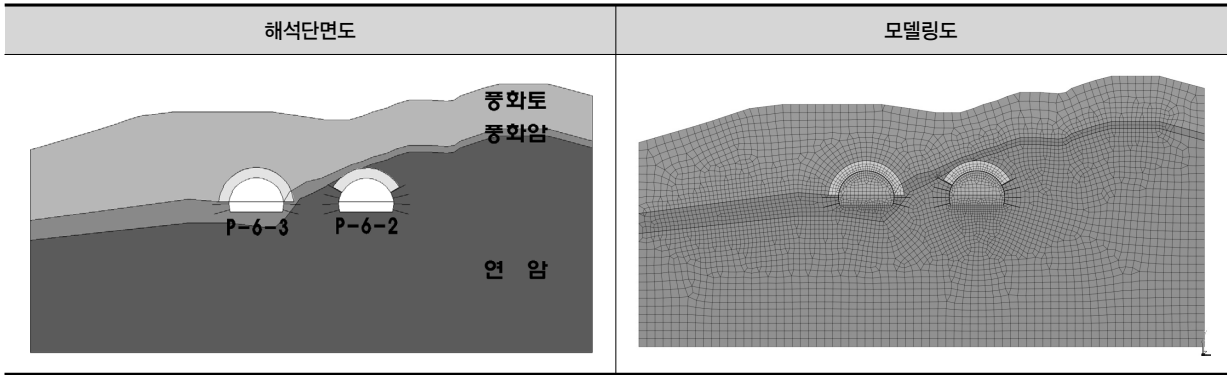


그림 3. 해석모델링

(천단변위 : ↓방향 +, 슛크리트 응력 : 압축 +)

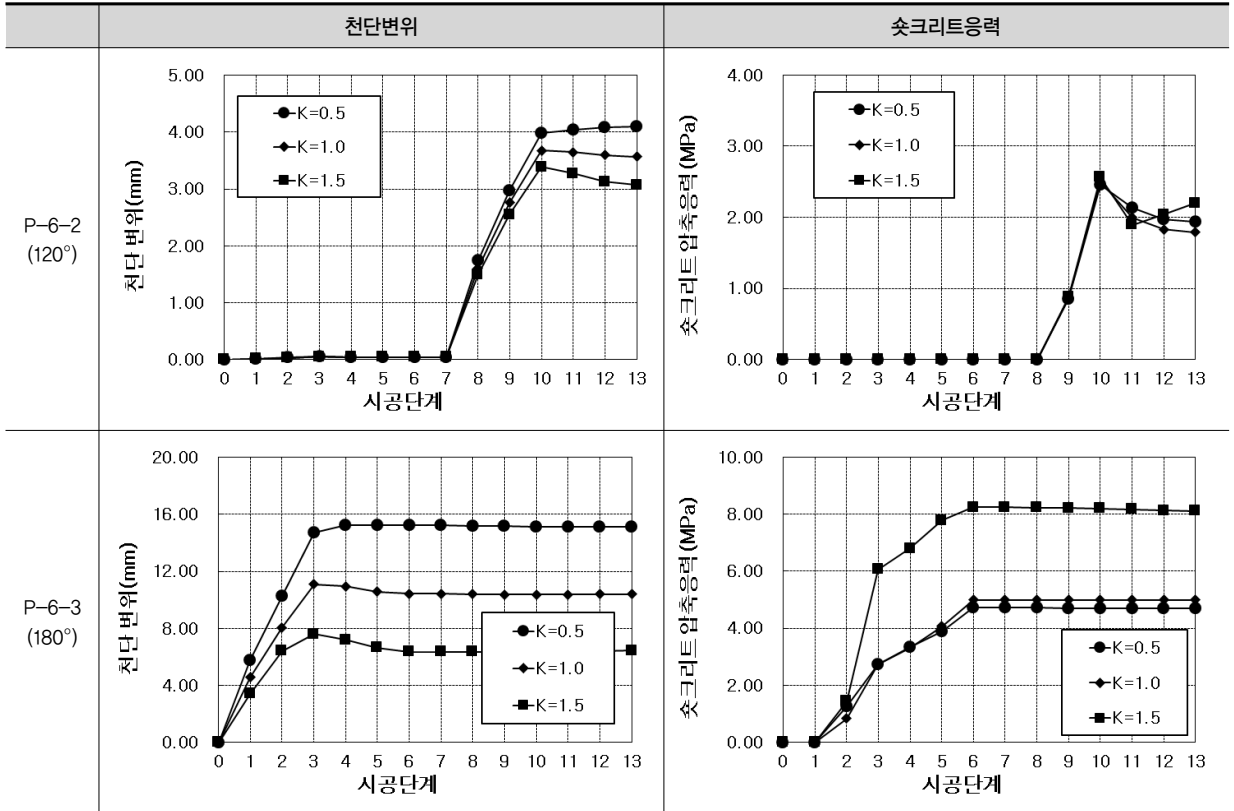


그림 4. 시공단계별 해석결과

2.3 터널 해석결과 검토

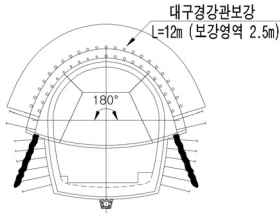
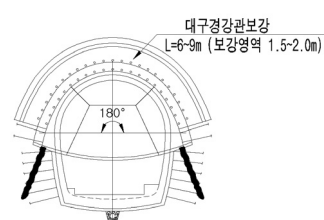
상기 지하철 및 도로터널의 경우 수치해석을 실시함에 있어서 토사와 암반지반에 대한 구분없이 일률적인 측압계수 ($K_0=0.5\sim 3.0$)를 적용하였으며, 이는 토사지반의 측압계수 K_0 가 0.3~0.6범위에서 분포한다는 실험 및 여러 문헌과 비교시, 실제 토사지반의 물리적 특성과 상이한 해석이 이루어질수 있다고 판단되어 지며, 이 해석결과에 의해 적용된 지보재, 보강공법등은 과다하게 적용될 수 있다. 따라서 토사지반에서 수치해석시 측압계수의 적용범위가 적절한 지에 대한 검토가 필요하다.

3. 합리적인 측압계수를 적용한 설계방안

3.1 CASE-1 (지하철 터널)

기존 해석시 측압계수 K_0 를 1.0~3.0의 범위로 해석을 실시하여 일률적으로 K_0 를 2.0일때의 지보재의 응력을 검토하였으며, 이는 풍화토가 주로 존재하는 지반에서의 합리적인 해석이라고 할 수가 없다. 그러므로 본 해석에서는 지반에 맞는 적정 측압계수를 적용후 안정성 변화에 대해서 알아보기로 하며, 슛크리트 두께축소, 터널 천단부 보강영역의 폭 변경, 굴진장 축소등의 고려가 가능하

표 3. 지보패턴 적용현황

		PS-2, 180° (기존)	PS-2, 180° (보강량 축소)
패턴도			
숏크리트 두께		200mm	200mm
목볼트	길이	3m	3m
	중/횡방향 길이	0.6m/1.0m	0.8m/1.0m
보강영역		2.5m	1.5~2.0m

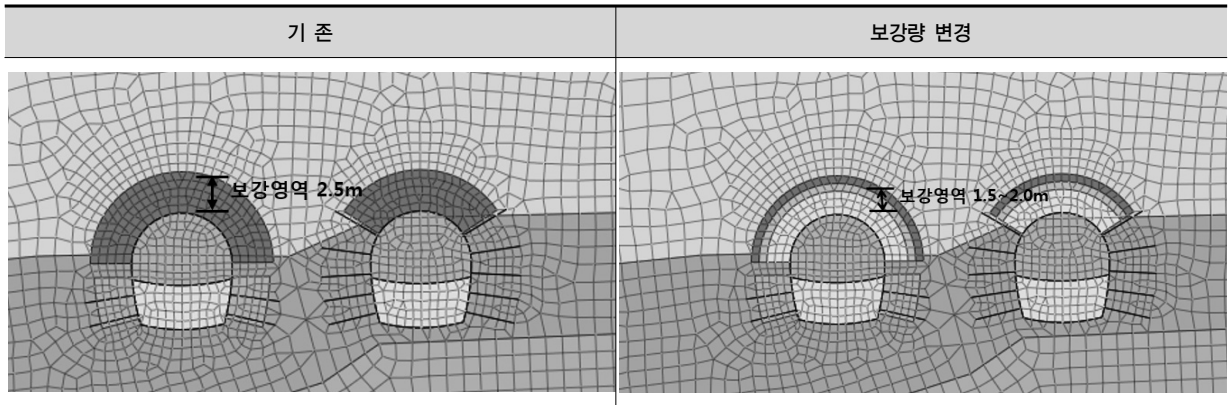


그림 5. 보강량 변경에 따른 해석단면

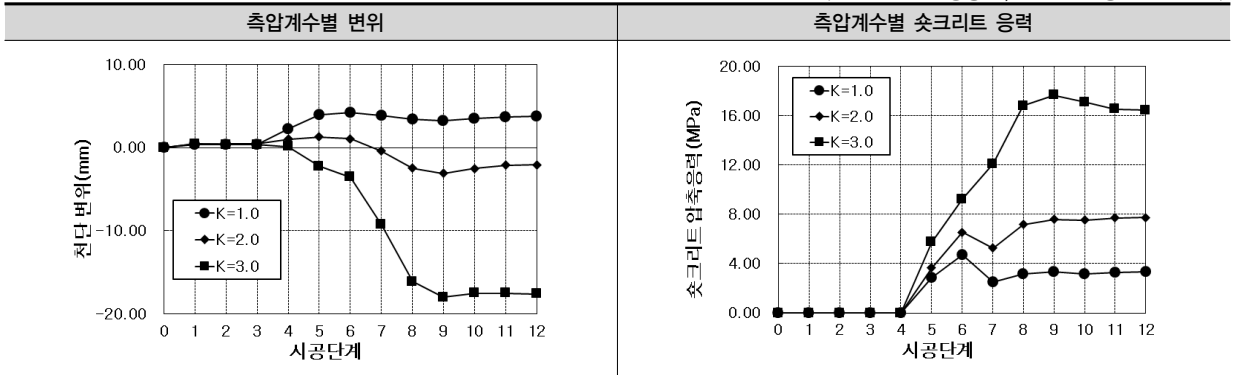
나, 본고에서는 보강영역의 폭을 2.5m에서 1.5m, 2.0m 로 각각 축소시켜서 해석을 실시하였다.

기존해석에서는 상기 구간의 해석에 $K_0=1.0\sim 3.0$ 를 터널 천단부 보강영역이 2.5m인 PS-2 패턴을 적용하였으나, 풍화토의 경우 $K_0=0.5\sim 1.0$ 이내의 범위에서 해석을 실시하는 것이 합리적이다. 축압계수를 $K_0=0.5\sim 1.0$

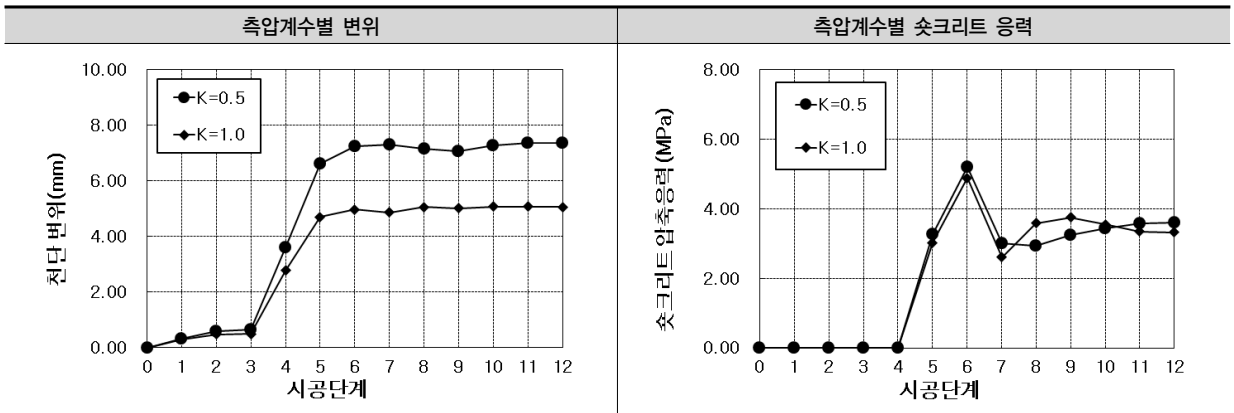
범위로 적용시, 터널 천단부 보강영역 1.5m 적용시에도 지보재 응력의 안정성이 확보됨을 알 수 있다. 상기 해석은 강관단단의 길이를 변화시켜서 합리적인 축압계수에 따른 보강량을 검토한 것이며, 검토방법에 따라 숏크리트 두께변화, 굴진장 변경 등도 가능할 것으로 판단된다.

■ 보강영역 2.5m 적용 (기준설계)

(천단변위 : ↓방향 +, 슛크리트 응력 : 압축 +)



■ 보강영역 1.5m 적용



■ 보강영역 2.0m 적용

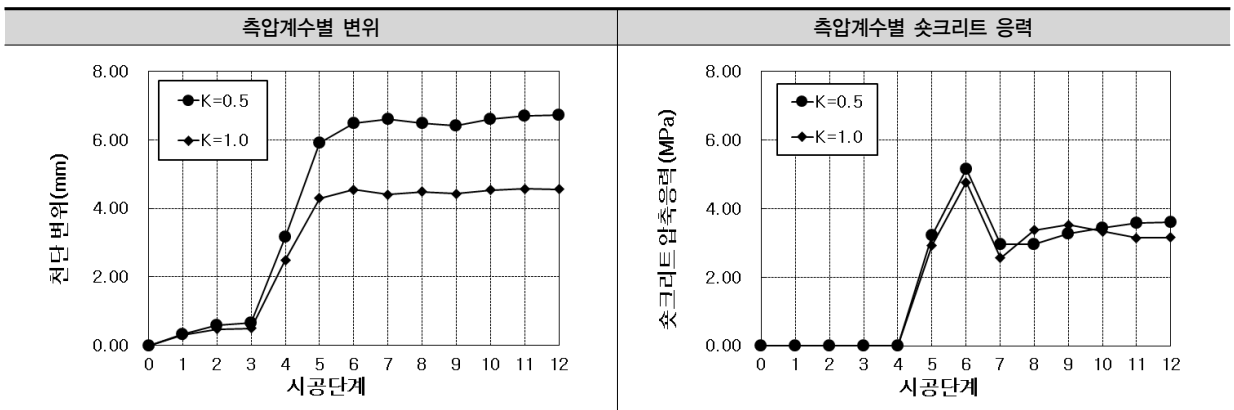


그림 6. 보강량 변경에 따른 해석결과

표 4. 보강영역에 따른 해석결과 비교

(천단변위 : ↓ 방향 +, 슛크리트 응력 : 압축 +)

분 류		PS-2, 180°		PS-2, 120°	
		연직변위 (mm)	스�크리트 응력 (MPa)	연직변위 (mm)	스�크리트 응력 (MPa)
보강영역 1.5m	K=0.5	7,362	5,206	11,234	4,992
	K=1.0	5,072	4,887	7,847	4,309
보강영역 2.0m	K=0.5	6,712	5,148	10,292	4,909
	K=1.0	4,567	4,769	7,377	4,221
보강영역 2.5m (기준설계)	K=1.0	3,722	4,695	6,914	4,159
	K=2.0	-3,075	7,744	3,847	6,725
	K=3.0	-17,999	17,671	-8,584	11,611

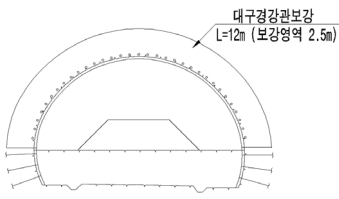
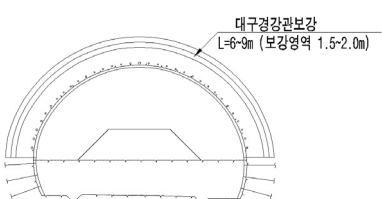
3.2 CASE-2 (도로터널)

도로터널 설계 사례에서 이론적인 축압계수론에 의하면 풍화토의 축압계수의 최대값이 $K_0=1$ 임을 감안하여, 기존 사례의 축압계수 K_0 를 0.5~1.5의 범위로 적용할때의 지반보강량과, K_0 를 최대 1까지만 적용했을 때의 보강량을 비교하여 적정 축압계수에 의한 합리적인 보강량을 결정하기로 한다. P-6-3지보패턴에 적용된 보강영역의 폭을 2.5m에서 1.5m, 2.0m로 각각 축소시켜서 해석을 실시하였다.

기준해석에서는 상기 구간의 해석에 $K_0=0.5\sim 1.5$ 를 적용하여 터널 천단부 보강영역이 2.5m인 P-6-3 패턴을 적용하였으나, 풍화토의 경우 $K_0=0.5\sim 1.0$ 이내의 범위에서 해석을 실시하는 것이 합리적이다. 축압계수를 $K_0=0.5\sim 1.0$ 범위로 적용시, 터널 천단부 보강영역이 2.0m 적용시에도 지보재 응력의 안정성이 확보됨을 알 수 있다.

상기 해석은 강관다단의 길이를 변화시켜서 합리적인 축압계수에 따른 보강량을 검토한 것이며, 검토방법에 따라 슛크리트 두께변화, 굴진장 변경등도 가능할 것으로 판단된다.

표 5. 지보패턴 적용현황

구 분		P-6-3	P-6-3 (보강량 축소)
패턴도			
스�크리트 두께		200mm	200mm
록볼트	길이	4m	4m
	중/횡방향 길이	1.0m/1.5m	1.0m/1.5m
내부라이닝 두께		400mm	400mm
보강영역		2.5m	1.5~2.0m

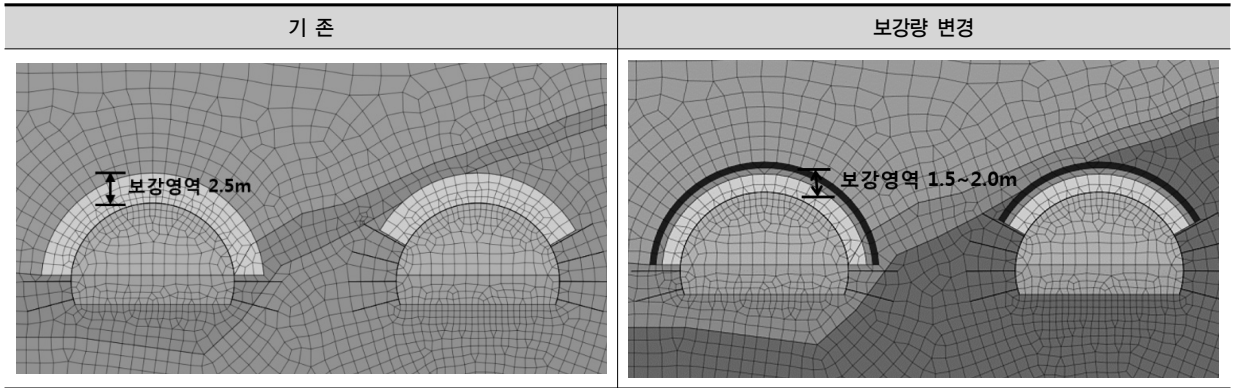


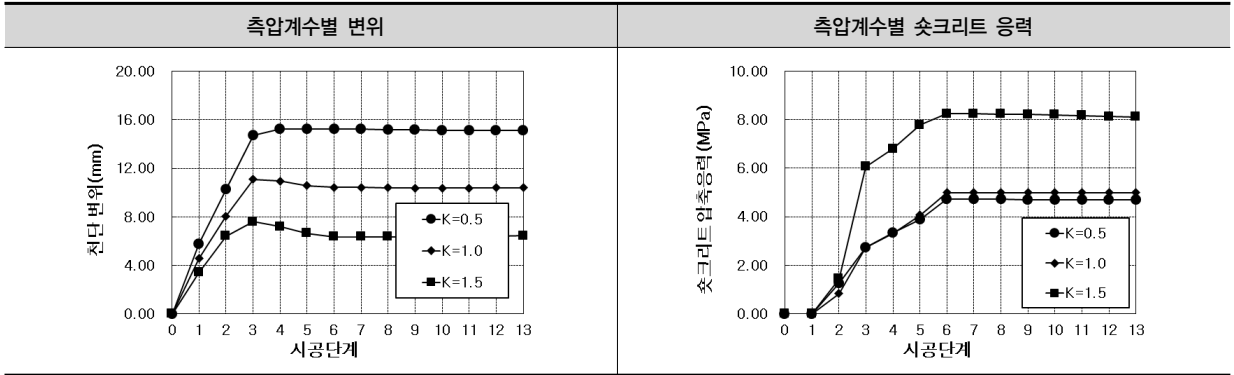
그림 7. 보강량 변경에 따른 해석단면

표 6. 보강영역에 따른 해석결과 비교

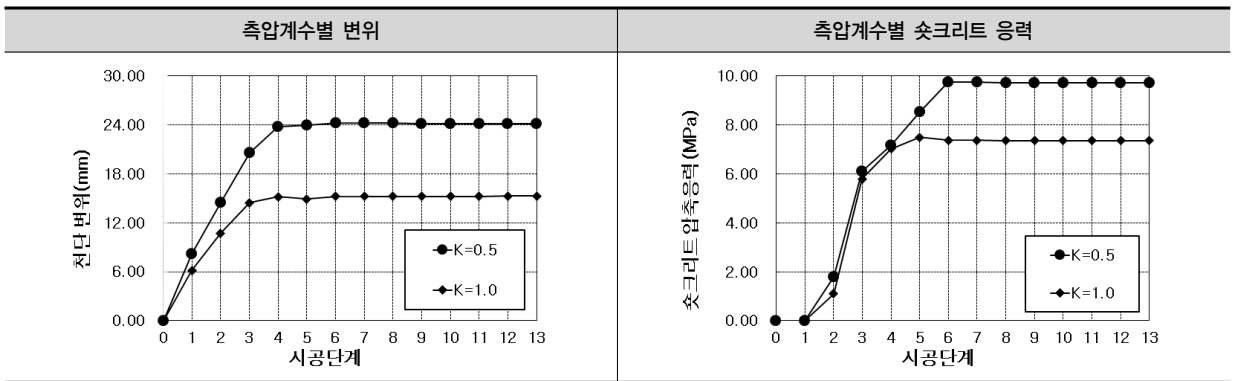
분 류		P-6-2 패턴		P-6-3 패턴	
		연직변위 (mm)	숏크리트 응력 (MPa)	연직변위 (mm)	숏크리트 응력 (MPa)
보강영역 1.5m	K=0.5	5,340	4,268	24,251	9,737
	K=1.0	4,967	3,974	15,296	7,506
보강영역 2.0m	K=0.5	5,477	4,379	18,663	5,015
	K=1.0	5,108	4,069	12,783	6,256
보강영역 2.5m (기존 설계)	K=0.5	4,093	2,454	15,235	4,720
	K=1.0	3,674	2,508	11,103	4,993
	K=1.5	3,388	2,561	7,587	8,237

■ 기존 해석단면 (보강영역 2.5m)

(천단변위 : ↓방향 +, 슛크리트 응력 : 압축 +)



■ 보강영역 1.5m 적용



■ 보강영역 2.0m 적용

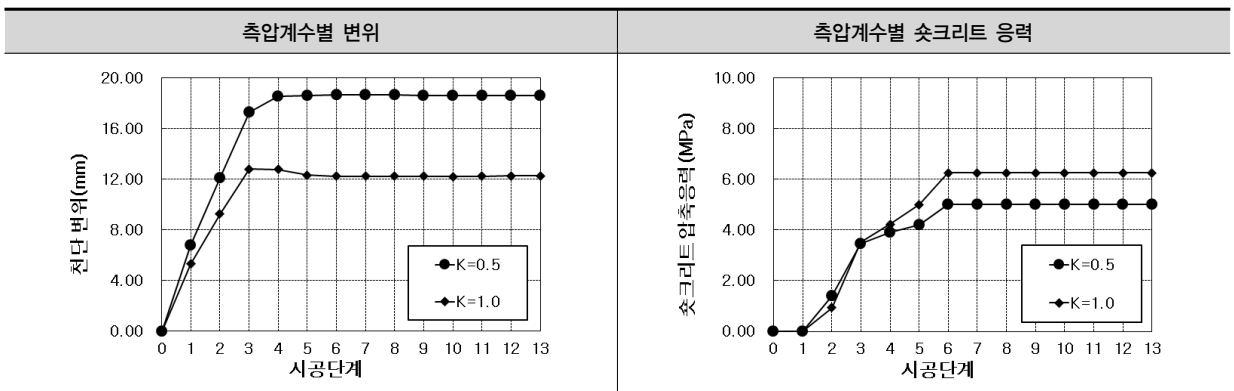


그림 8. 보강량 변경에 따른 해석결과

4. 결 언

NATM 은 지반변위를 허용하고 지반 자체를 주요 지보재로 사용하는 터널공법으로 주로 암반구간에 적용하며 토사구간 적용구간은 매우 적은 실정이다. 그래서 설계편의성을 위해서 토사구간의 측압계수는 암반구간 측압계수를 일괄 적용하는 것이 일반적이다. 하지만, 실험 및 기존문헌등을 고려시 암반과는 달리 토사지반의 경우 측압계수 $K_0=0.4\sim 0.6$ 의 범위를 보이며, 특수한 과압밀 상태가 아닌 경우 측압계수는 1을 넘기지 않는다. 지금까지 안정성 해석을 실시함에 있어서, 지반특성과 상관없이 일률적인 측압계수를 적용하여 해석을 실시하고 있으며, 과

다한 지반보강이 적용될 가능성이 있다.

본 고의 해석 Case와 같이 토사지반에 합리적인 측압계수를 고려시 기존에 적용된 보강영역보다 작은 보강영역의 적용이 가능하며, 또한 슛크리트 두께감소, 굴진장변경 등의 합리적인 지보패턴 적용도 가능할 것으로 판단된다. 따라서 터널설계라는 안정성 해석을 실시함에 있어서 우선 적용 지반에 대한 이해 및 정확한 조사를 통한 지반상태를 파악하고, 획득된 정보를 이용하여 일률적인 측압계수의 적용이 아닌 합리적인 측압계수의 적용을 실시하여 터널의 안정성과 경제적인 설계가 균형을 이룰수 있도록 노력해야 할 것이다.