

3힌지 지중구조물의 해석방법에 대한 연구

A Study of Analytical Method about 3 hinged Arch Tunnel

오 승 탁¹⁾, 박 상 진²⁾, 임 철 원³⁾

¹⁾ 한국도로공사

²⁾ (주)후레씨네코리아 이사

³⁾ (주)후레씨네코리아 과장

1. 서론

국토의 70%가 산지로 이루어진 한국지형특성상 각종 토목공사에 있어 토목공사로 인한 환경훼손을 최소화 하기 위해 환경복원이 가능한 친환경구조물의 수요가 늘고 있는 실정이다. 이러한 환경복원에 있어 고성도 개착식 지중구조물이 가장 효과적이나 고정하중인 토압하중이 너무 크기 때문에 종래의 박스형, 아치형을 이용한 현장 타설구조물은 토피고의 제한으로 환경복원성이 떨어지는 단점이 있다.

최근 공장제품을 이용한 프리캐스트 구조물의 활성화로 인해 아치세그먼트를 공장에서 제작하여 현장에서 조립하는 지중구조물이 활성화 되고 있다. 2차로 및 3차로 등 도로 및 철도터널을 공장제품을 이용하여 터널을 시공하기 위해서는 부재의 운반이 가능해야한다. 따라서, 아치천단부를 기준으로 좌,우측 곡선판넬 2개의 부재로 분할하여야만 공장제품을 이용하여 대형터널을 건설할 수 있다. 이러한 구조물은 아치지점부와 천단부가 단순한 맞대기로 시공되므로 3힌지 경계조건을 지닌 지중구조물의 거동이 발생된다.

종래의 지중구조물에 대한 설계는 외력인 연직토압과 수평토압이 크고 구조물의 강성이 크므로 뒷채움과 지반의 변형이 일어날정도로 변위가 일어나지 않기 때문에 지반의 압축저항성을 미고려한 구조공학해석(Frame Analysis)로 설계되어왔다.

그러나, 3힌지 구조는 구조물 자체로는 불안정한구조물이며, 외력에 대해 변위가 쉽게 발생하는 구조이다. 따라서, 구조물에 변위가 발생되면 지반에 압축력 또는 인장력이 발생되어 구조물과 지반의 상호작용이 발생되므로 지반과 구조물의 상호작용을 합리적으로 고려해야한다.

본 연구는 3힌지 지점을 지닌 개착식 지중구조물

기술기사

(TechSpan)에 대한 합리적인 해석기법을 정립하기 위하여 구조공학해석과 지반공학해석을 수행하였으며 해석결과와 수렴성을 판단하기 위해 현장계측데이터를 활용하여 분석하였다.

2. TechSpan 공법소개

2.1 TechSpan공법개요

프리캐스트 부재로 제작된 아치형식의 3인치 지중매립구조물로서 철도터널, 고속도로터널 뿐만아니라 지하수로, 교량등 기존 재래식 현장타설 지중구조물을 대체하는 공법이며, 다음의 세부분으로 이루어져있다.

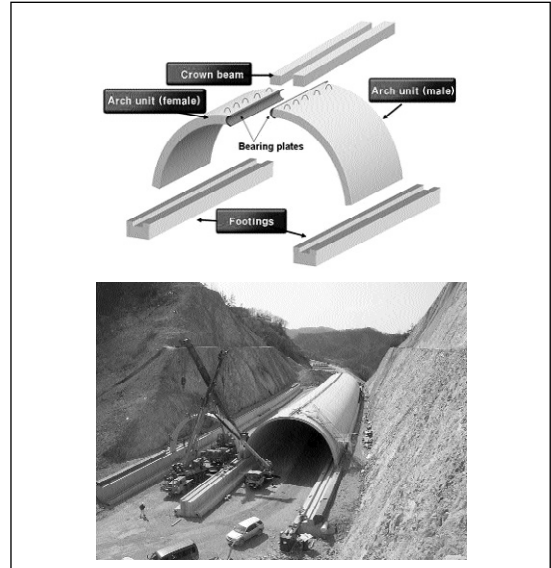


그림 1. TechSpan 개요도

표 1. TechSpan 구성요소

구 분	대 표 도	설 명
프리캐스트 콘크리트 아치부재		공장에서 제작되는 프리캐스트 부재로서, 강재거푸집과 증기양생을 이용하여 엄격한 품질관리를 시행하여 고품질의 TechSpan이 생산가능하며, 내구성이 우수하다.
현장타설 기초		상부구조를 지지하는 TechSpan의 하부구조로서 현장타설 철근콘크리트로 시공된다. 공장에서 PC 제작과 동시에 기초사공이 이루어지므로 공기를 단축시킬수 있다.
크라운빔		아치상단까지 복토후 종방향 결속력을 강화하기 위한 현장타설 철근콘크리트 보

표 2. TechSpan시공순서도

단 계	시공사진	단 계	시공사진	단 계	시공사진
1. PC 부재 제작		4. PC 부재 제작		7. 크라운빔 /상부성토	
2. 기초 시공		5. 연결부 부분방수		8. 시공완료 (청원상주7공구 고속도로, 토파15m, 부재두께=40cm, 2~3차로20차)	
3. PC 부재 운반		6. 뒷채움 /다짐			

2.2. 적용분야



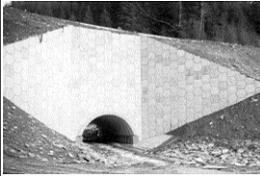






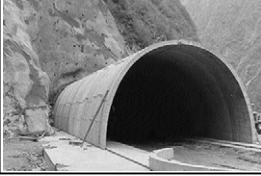


TechSpan은 3хин지 지중아치구조물에 작용하는 외력에 저항하여 최적아치형상(Funicular Curve)를 적용하기

때문에 고성토, 장시간 지중구조물도 부재두께를 얇게 만들 수 있으며, 일반적으로 적용되는 제원과 적용분야는 다음과 같다.

표 3. TechSpan 적용범위

구 분	적용범위	구 분	적용범위
아치상단토피고	최소1.0m~최대50m	부재중량	25톤이내
아치지간	최대21m	부재 폭	1.0~2.5m
부재두께	15cm~45cm	아치형상	Funicular Curve

표 4. TechSpan 적용분야

단 계	시공사진	단 계	시공사진	단 계	시공사진
도로 터널		Eco Bridge		고성토 구조	
철도 터널		무바닥 아치교		댐 여수로	
지하 차도		소교량		군사시설 보호물	
터널 경구		긴급 수해 복구		내부 전경	

3. 연구내용

3.1 개요

지중구조물은 고정하중인 토압이 크기 때문에 뒷채움 강성을 무시하고 외력인 토압을 하중으로 작용할 경우 구조물의 단면이 크므로 강성구조물이 되며, 이러한 구조체

의 해석법으로는 구조공학적 해석(Frame 해석)이 일반적으로 수행되었다. 그러나, 구조물 두께가 얇고 3хин지 경계 조건을 지닌 아치구조물은 변위에 대해 유연한 구조이므로 구조물과 지반의 상호작용이 발생하여 구조물과 지반이 동시에 외력에 저항하는 구조가 형성된다. 변위에 대해 유연한 지중구조물에서 지반의 상호작용을 고려하기

기술기사

위해 구조물 주변에 압축전단 지반스프링을 이용한 구조 공학적 해석모델을 적용하기도 하며, 최근 유한요소해석 프로그램의 발달로 지반공학적 해석이 보편적으로 설계에 이용되고 있다.

본 연구는 변위에 대해 유연한 3면지 지중구조물에 가장 적합한 해석기법을 밝히고자 지반공학적 유한요소 해석과 뒷채움 강성을 무시한 구조공학적 해석, 뒷채움 강성을 고려한 구조공학적해석결과를 분석하여 현장실측치

와 비교/분석하였다.

3.2 현장계측

현장계측은 청원~상주간 고속도로공사중 제7공구의 내서1터널에 대한 계측을 실시하였다. 본 과업구간은 대 절토사면으로 인한 환경훼손을 최소화하기 위해 고성토 지중구조물이 계획되었으며, 표준단면과 종평면도는 표5와 같다.

표 5. 내서터널 표준단면 및 종평면도

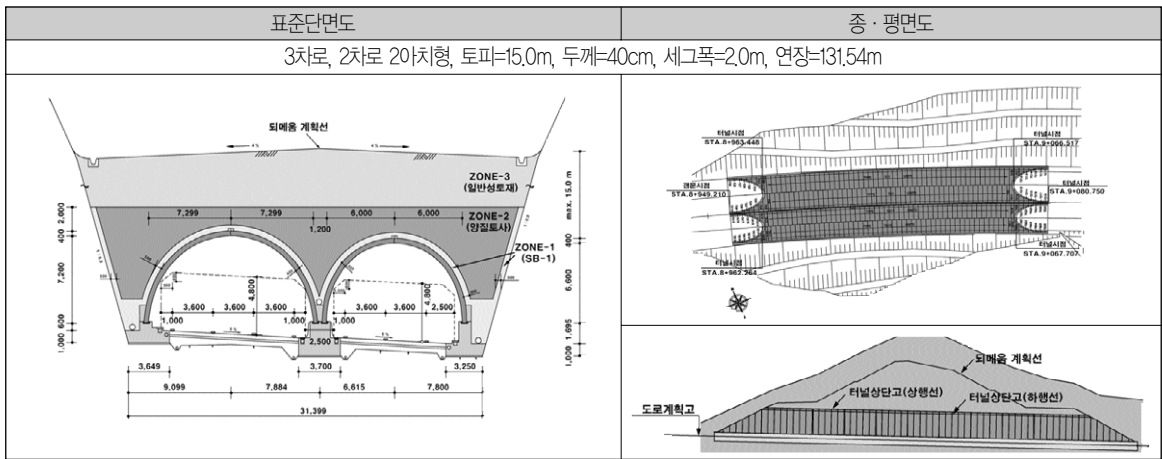
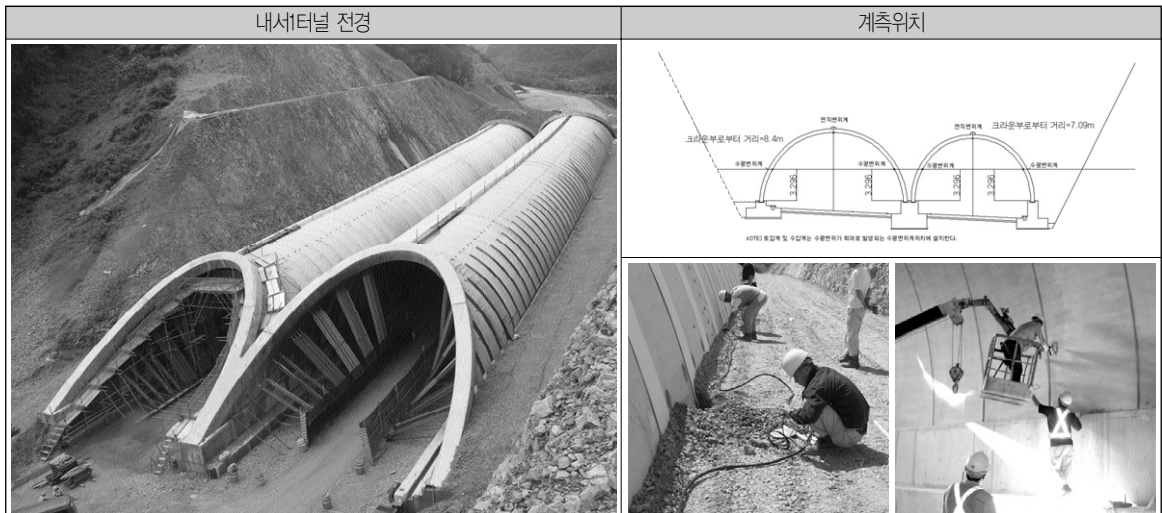


표 6. 현장전경 및 계측위치



3.3 지중구조물 해석방법비교

앞서 언급했던 지중구조물에 대한 해석법에 따른 차이 점은 표7과 같다. 물론, 실제 지형과 거동을 가장 합리적으로 고려할 수 있는 FEM해석이 지중구조물의 해석에 가장 적합한 해석틀이라는것은 누구나 인정하는 바이다.

그럼에도 불구하고 구조공학해석과 지반공학해석으로 3단지 지중구조물에 대한 연구를 수행한 이유는 3단지 구조물과 지반의 상호작용을 고려했을때와 미고려했을때의 차이를 분석하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

표 7. 지중구조물 해석방법 비교

구 분	구조공학해석(Frame Analysis)		지반공학해석(F.E.M.)
	지반스프링 미고려	압축전담 지반스프링 고려	
	CASE3	CASE2	CASE1
Soil-Structure interaction	NO	Partly	YES
Staged loading	NO	Possible	YES
Load/Unload compaction phases	NO	NO	YES
Soil Arching	NO	NO	YES
Soil-Structure friction	NO	Possible	YES
Foundation displacements	NO	NO	YES
Non linear soil behaviour	NO	Possible	YES
Stress dependant modulus	NO	Possible	YES
Soil parameters determination	N/A	Difficult	Easy

3.4 지반공학적 유한요소 모델

3.4.1 모델링

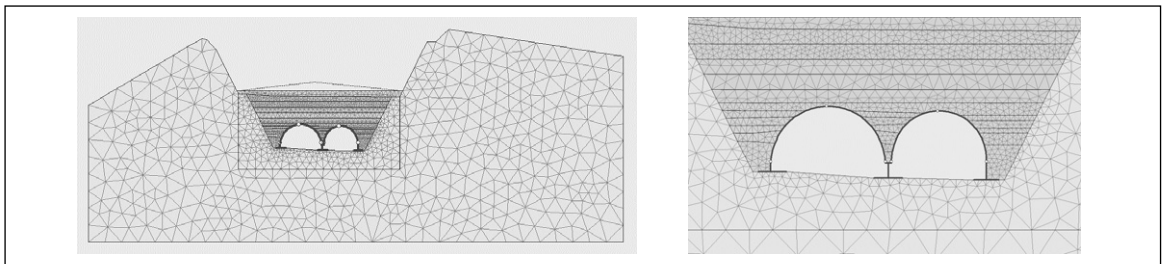


그림 1. 지반공학적 유한요소 모델링

실제 구조물과 지반의 상호작용을 고려하기 위해서 지반공학적 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석시 다음과 같은 사항을 고려하여 해석하였다.

- 구조물의 변위에 따른 토압분포변화를 고려
- 마찰요소를 이용하여 구조물과 지반의 불연속성 고려

- 구조물 뒷채움 단계에 따른 시공단계별 해석
- 콘크리트 부재는 보요소, 지반은 plain stain요소를 이용
- 해석프로그램 : PLAXIS V7.3

3.4.2 지반정수 및 단면특성

기술기사

표 8. 지반정수

구 분	변형계수(E, kN/m ²)	점착력(C, kN/m ²)	내부마찰각(ϕ , °)	프와송 비(ψ)	단위중량(γ , kN/m ³)
경 암	10,000,000	100	45	0.25	25.0
뒷채움	30,000	0	30	0.35	20.0

PC Arch 부재두께 : 400mm , fck=40MPa

3.4.3 해석시공단계 구분

아치천단부의 변위를 살펴보면 아치상단까지 뒷채움시 천단부 변위가 위로발생되고 토피 12.0m에서 수평으로 뒷채움이 완료된 시공완료시 아랫방향으로 최대변위가 발생되었다. 본 연구에서는 이러한 두 거동의 차이를 살펴보기 위해 해석모델에서 아치상단까지 뒷채움 했을 경우와 시공완료시에 대한 해석을 수행하였다.

3.5 구조공학적 해석모델(뒷채움부 지반스프링 고려)

3.5.1 모델링

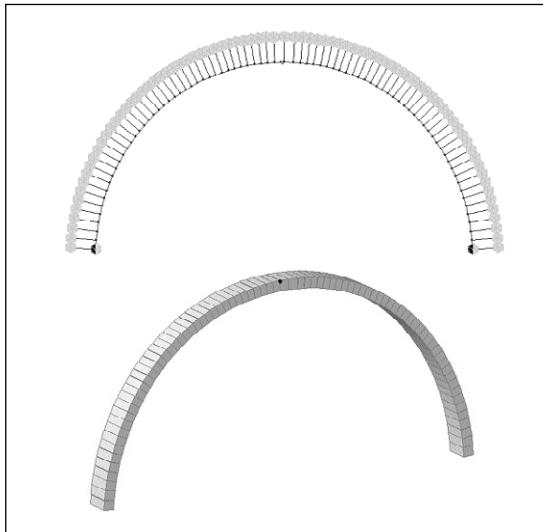


그림 2. 구조공학적 해석모델(지반스프링 고려시)

지반스프링을 이용한 구조공학적 해석은 아치부재와 뒷채움을 아치주변에 지반스프링을 절점마다 적용하여 상호작용을 구현할 수 있다. 지반스프링은 구조물의 법선방향

으로 선형탄성스프링을 적용하였으며, 지반은 압축력에 대한 강성을 제공하므로 압축전담스프링을 적용하였다.

본 연구에서는 구조물 뒷채움 강성을 고려하기 위하여 압축전담 지반스프링(k=24,231kN/m³)을 적용시켰다. 3힌지구조물은 정정구조물로서 지점의 침하등의 영향이 적기 때문에 상부구조인 PC부재의 천단부와 지점부를 힌지조건으로 적용한다.

3.5.2 작용하중

- 자중 : 프로그램내 자동재하, 부재두께 400mm인 철근콘크리트부재
- 토압 : 토피고 12.0m로서 연직토압, 수평토압을 적용 (정지토압, $\phi=30^\circ$)
- 하중의 적용 : 지중구조물의 연직토압과 수평토압은 동시에 작용되므로 두하중을 동시에 재하한다. 이때, 지반스프링에 인장력이 발생되었을 때 지반은 인장력에 저항성이 없으므로 제거하며 지반스프링에 압축력만 작용하도록 반복 계산하여 지반스프링에 압축력만 작용시켰다.
- 아치상단까지 뒷채움시 : 아치상단까지 뒷채움시 천단부는 복토가 되어있지 않으므로 뒷채움의 구속효과를 기대할수 없고 측벽 부역시 상부는 뒷채움강성이 적기 때문에 아치높이의 1/2영역까지만 지반스프링을 모델링하여 뒷채움 강성을 고려하였다.
- 토피 12.0m까지 뒷채움시(시공완료시) : 뒷채움이 완료되면, 아치구조물 주위의 뒷채움강성이 모두 발휘되므로 구조물 주위에 압축전담스프링을 부재

의 모든 면에 적용시켰다.

기 위해 지반스프링은 적용하지 않는다.

3.6 구조공학적인 해석모델(뒷채움부 지반스프링 미고려)

3.6.1 모델링

3회지구조물은 정정구조물로서 지점의 침하등의 영향이 적기 때문에 상부구조인 PC부재의 천단부와 지점부를 한지조건으로 적용한다. 이때 뒷채움부의 강성을 무시하

3.6.2 작용하중

- 자중 : 프로그램내 자동재하, 부재두께 400mm인 철근콘크리트부재
- 토압 : 토피고 12.0m로서 연직토압, 수평토압을 적용 (정지토압, $\phi=30^\circ$)
- 하중의 적용 : 지중구조물의 연직토압과 수평토압은 동시에 작용되므로 두하중을 동시에 재하한다.

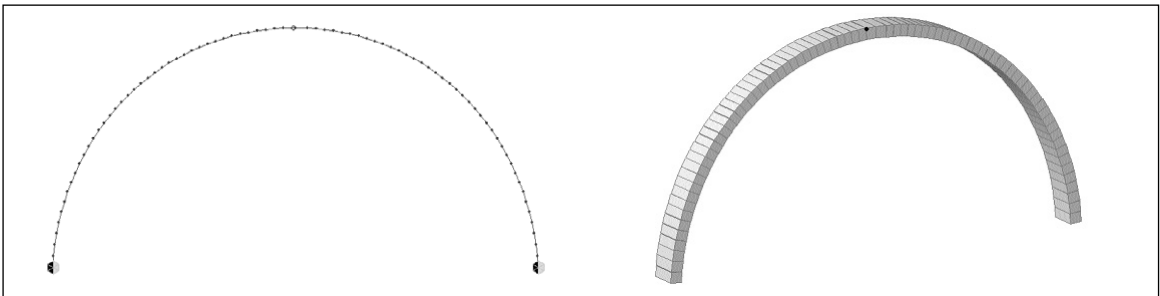


그림 3. 구조공학적인 해석모델(지반스프링 미고려시)

4. 결과분석

4.1 천단부 연직변위

구 분		아치상단까지 뒷채움시 +10.4 mm (상향)	시공완료시 -9.6 mm (하향)
지반공학적인 해석 (CASE1)			
구조공학적인 해석	지반스프링고려 (CASE2)	+19.0 mm (상향) MAX: 19.008 	-14.31 mm (하향) MAX: 14.30
	지반스프링미고려 (CASE3)	+19.0 mm (상향) MAX: 19.008 	-56.62 mm (하향) MAX: 56.620

기술기사

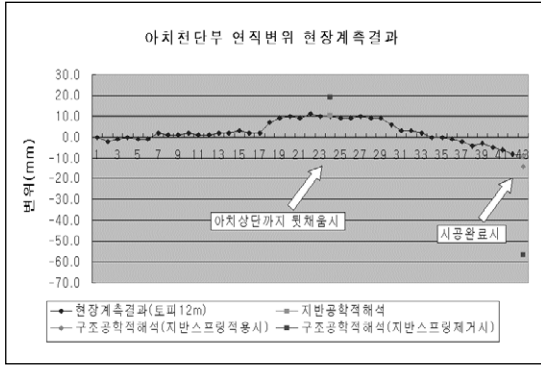


그림 4. 현장실측데이터와 비교

아치천단부의 변위를 분석했을때 지반공학적해석에 의한 결과는 실측치와 거의 유사하게 나타났다. 지반스프링을 이용한 구조공학적 해석모델시 실측치보다 변위가 아치상단까지 뒷채움시는 1.9배 시공완료시는 1.6배 크게 나타났다. 지반스프링을 고려하지 않은 구조공학적 해석모델은 뒷채움지반의 구속효과가 전혀 없는 것으로 고려되기 때문에 아치상단까지 뒷채움시는 1.9배, 시공완료시는 변위가 실측치보다 6.3배이상 큰 해석결과를 나타내었다.

표 9. 천단부 연직변위

구 분	아치상단까지 뒷채움시		시공완료시	
	연직변위	실측치에 대한 비율	연직변위	실측치에 대한 비율
지반공학적해석	+10.4 mm	104 %	-9.6 mm	106 %
구조공학적해석(지반스프링 고려시)	+19.0 mm	190 %	-14.31 mm	159 %
구조공학적해석(지반스프링 미고려시)	+19.0 mm	190 %	-56.62 mm	629 %
실측치	+10.0 mm	100 %	-9.0 mm	100 %

4.2 측벽부 수평변위

구 분		아치상단까지 뒷채움시	시공완료시
지반공학적해석 (CASE1)		-7.3 mm(터널 내측방향)	+5.1 mm(터널 외측방향)
구조공학적 해석	지반스프링고려 (CASE2)	-8.7 mm(터널 내측방향)	+3.9mm(터널 외측방향)
	지반스프링미고려 (CASE3)	-8.8 mm(터널 내측방향)	+23.5mm(터널 외측방향)

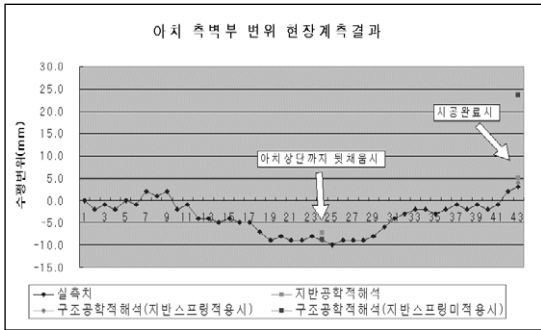


그림 5. 현장실측데이터와 비교

아치측벽부의 최대변위를 분석했을때 계속오차 2mm를 고려했을때 아치상단까지 뒷채움시 변위는 지반공학해석모델과 구조공학해석모델 모두 실측치에 근접한 결과를 나타내었다. 특히, 구조공학해석모델에서 지반스프링을 고려할때와 고려하지 않았을때의 결과가 실측치와 비슷한 결과를 나타내었는데 이는 아치 상단까지 뒷채움시 구조물 뒷채움의 강성을 표현한 지반스프링의 작용이 되지 않는다는것을 의미한다. 즉, 아치상단까지 뒷

채움시 변위가 터널내부방향으로 발생되어 흠에 인장력이 발생되어 지반스프링의 역할이 적은 것으로 판단된다.

시공완료시 지반공학해석 모델과 지반의 강성을 고려한 구조공학해석모델은 실측치와 거의 유사하게 나타났다. 지반스프링을 고려하지 않은 구조공학해석 모델은 뒷채움지반의 구속효과가 전혀 없는 것으로 고려되기 때문에 변위가 실측치보다 7.8배이상 큰 해석결과를 나타내었다. 이것은 시공완료시 구조물의 변위가 터널외측방향 즉, 뒷채움부에 압축을 주는 방향으로 변위가 발생되기 때문에 지반스프링의 강성을 고려할 수 있는 지반공학해석과 지반스프링을 고려한 구조공학해석모델은 실측치와 유사하나 지반스프링을 미고려한 구조공학해석은 변위가 과다하게 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 변위에 대해 유연한 3хин지 지중구조물에 대한 적합한 해석모델기법을 수립하고자 지반공학해석과 구조공학해석을 수행하여 실제 구조물의 계측데이터와 비교/분석하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 3хин지 지중구조물은 뒷채움이 순차적으로 이루어지며, 아치상단까지 뒷채움시는 최대연직변위는 위쪽으로, 최대수평변위는 터널내측으로 발생되었다. 수평면으로 시공완료가 되는 토피 12.0m까지 뒷채움 되었을때 최대연직변위는 아랫방향으로, 최대수평변위는 터널외측으로 발생된다.

따라서, 3хин지 지중구조물의 거동은 아치상단까지 뒷채움했을때와 시공완료시 두 단계가 구조물에 최대 변위

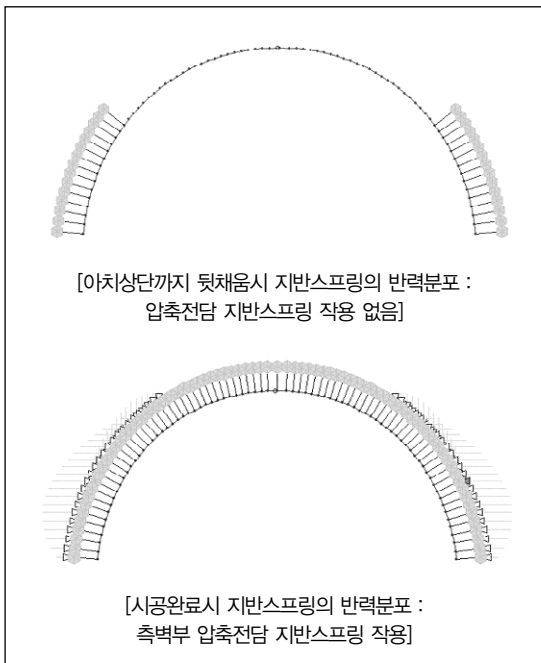


그림 6. 시공단계별 지반스프링에 발생하는 반력분포

기술기사

를 유발시키는 단계라고 판단된다.

(2) 아치상단까지 뒷채움시 구조물의 수평변위는 터널 내측으로 발생된다. 뒷채움 지반은 압축력에 대해서만 저항하므로 구조물의 변위가 뒷채움부로부터 멀어지는 터널내측변위가 발생하는 아치상단까지 뒷채움시 지반공학 적 해석과 구조공학해석모델 모두 유사한 결과를 나타낸다. 특히, 구조공학해석모델에서 지반스프링의 역할이 거의 없는 것으로 나타났으며, 이는 아치상단까지 뒷채움시는 종래의 구조물의 강성에 연직도압과 수평도압을 외력으로 작용시키고 지반스프링의 역할을 고려하지 않은 보수적인 설계법이 유효하다는 것을 나타낸다.

(3) 시공완료시 구조물의 수평변위는 뒷채움부로 압축력을 발생시키는 터널 외측방향으로 발생된다. 구조물의 연직변위 및 수평변위에서 뒷채움부의 강성을 고려한 지반공학해석모델과 지반스프링을 고려한 구조공학해석 모델은 실측치와 유사한 결과를 나타내었으나 뒷채움 강성을 무시한 구조공학해석 모델은 과다한 변위가 발생되어 실측치와 큰 오차를 나타내었다.

따라서, 토피가 큰 3인치 지중구조물의 시공완료시에 대한 해석은 반드시 지반의 압축저항성을 고려할 수 있는 지반공학해석 모델 또는 압축전담지반스프링을 이용한 구조공학해석 모델이 유효하다고 판단된다.

[참고문헌]

1. 도로교설계기준 (2000), 한국도로교통협회
2. 콘크리트구조설계기준 (1999), 한국콘크리트학회 · 대한건축학회
3. Techspan Design Manual (2002), Group TAI
4. TechSpan 홈페이지: <http://www.taiik.co.kr>

