

인버트 설치 터널단면의 안정성 평가 및 적용성 검토



황 제 돈
(주)에스코아이에스티
대표이사



박 치 면
(주)에스코아이에스티
이사



이 호
(주)에스코아이에스티
차장

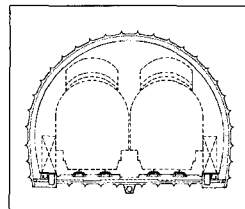


윤 창 기
(주)에스코아이에스티 대리
(yoonck119@escoist.com)

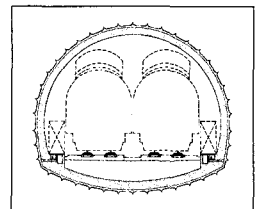
1. 개요

국가 기반시설의 발달로 인한 수송량의 증가와 이에 따른 교통망의 확충으로 인하여 도심지 또는 산악지역에 건설되는 터널은 지형 및 지반조건에 많은 제약이 따르고 있다. 특히 토피고가 매우 높거나(초기응력이 큰 조건) 매우 낮은(지반아치가 형성되기 어려운 조건) 취약한 지반조건, 봉적층 및 충적층이 깊게 발달하고 지하수위가 높은 지반조건, 터널 토피고가 낮아 상부 지형조건에 직접적인 영향으로 편압을 크게 받는 지반조건 등에 터널을 건설하여야 하는 경우가 빈번해지고 있다. 또한 양호한 지반조건이라 할지라도 터널궤구부와 같이 종단 및 평면계획의 특성상 지역적인 차이를 불문하고 대부분 지반조건이 취약할 뿐만 아니라 지형조건에 직접적인 영향을 받는 지역도 나타난다. 따라서 이러한 취약한 지반조건에는 터널 안정성 확보를 목적으로 종종 인

버트 설치를 고려한 터널단면이 계획되고 있으며 최근에는 그 적용사례가 크게 증가하고 있는 추세이다. 터널공사에 있어서 인버트(Invert) 혹은 가인버트(Temporary invert)의 사전적 의미는 『지반이 불량한 지역의 터널공사에 주변변위를 억제하고 안정성을 높이기 위하여 터널의 1차 지보재와 일체의 링(Ring) 구조체를 이루는 아치형으로 굴착된 터널바닥부에 타설하는 뿔어붙임 콘크리트 구조로서 터널 상부의 아치구조에 대응하는 바닥부의 역아치구조,



(a) 일반단면



(b) 인버트단면

그림 1. 일반단면 및 인버트단면 개요도

토목용어사전(대한토목학회)로 정의되어 있으나 현재는 이러한 터널 바닥부 아치구조에 슛크리트로 보강되는 형태뿐만 아니라 터널 바닥부에 아치형상 굴착 후 슛크리트와 일체를 이루는 강지보재의 보강, 채움콘크리트의 타설, 콘크리트라이닝의 타설 등 다양한 형태의 보조·보강공법과 함께 적용되는 일체의 바닥부 아치형 보강 구조체를 의미하는 것이 일반화되었다. 그러나 지반변위를 억제하고 안정성 향상을 목적으로 1차 지보재와 일체화된 링(Ring)폐합 구조체를 형성한다는 인버트의 역할은 사전적인 의미로서 충분하다고 하겠다. 그림 1은 일반적인 철도터널에서 인버트를 적용하지 않은 일반단면과 인버트를 적용한 단면의 개요이다.

본서에서는 터널에 설치되는 인버트의 역할과 설계 및 시공단계에서의 적용사례를 살펴보고 지반조건 변화에 따른 합리적인 터널 인버트의 적용을 위한 안정성 검토사례를 소개하고자 한다.

2. 터널 인버트의 역할과 공학적 특성

(1) 초기 안정성의 확보

연약한 지반조건에 터널이 시공되는 경우는 일반적으로 다단계 굴착공법을 적용함으로써 원지반 초기응력의 단계적인 해방을 유도하여 지반의 자립에 대한 안정성을 최대한 확보하고 분할굴착 단면에 굴착단계별로 지보재를 설치하여 초기에 링(Ring) 폐합함으로써 무지보시간 경과에 따른 터널의 진행성 파괴를 억제하고 있다. 인버트가 설치되지 않는 단면의 경우에는 응력해방에 의한 외력을 상반아치부 및 측벽부의 지반과 1차 지보재가 나누어 분담하지만 바닥부는 지반자체가 외력에 저항하게 되므로 지반조건이 취약한 경우, 터널 우각부에는 지보재와 원지반의 강성차이로 인한 응력집중과 터널 바닥부의 변형이 터널 안정성 확보에 위험 요소로 작용할 수 있다. 따라서 터널 바닥부에 인버트를 설치하고 슛크리트로 보강하여 상반아치와 일체화된 링

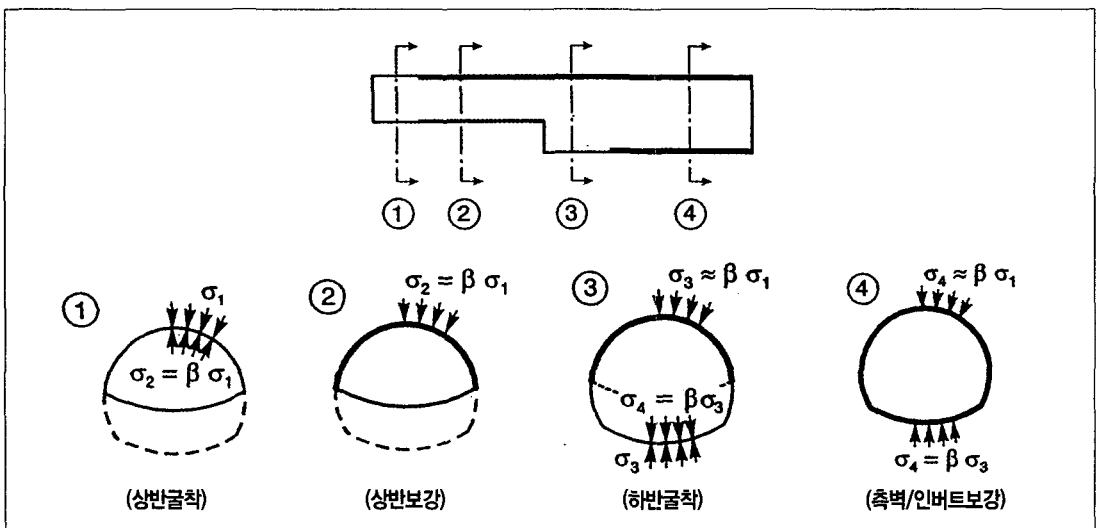


그림 2. 응력해방과 지보재 평형조건

인버트 설치 터널단면의 안정성 평가 및 적용성 검토

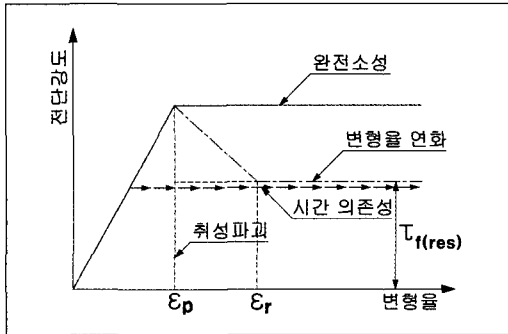


그림 3. 지반의 시간 의존적 거동

(Ring)폐합 구조체를 형성하여 1차 지보재에 국부적인 응력집중과 바닥부의 변위를 제어함으로써 터널의 초기 안정성을 향상시킬 수 있다. 그림 2는 터널 굴착시 초기응력 해방에 따른 지반응력과 1차 지보재의 평형상태를 모식화한 것이다.

(2) 소성영역의 확대방지

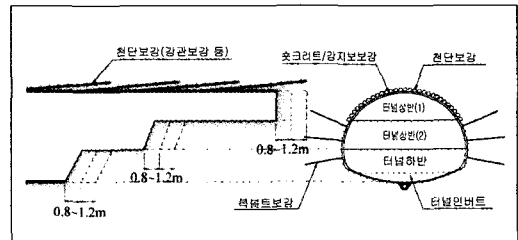
터널 시공 대상 지반은 물, 공기, 온도변화 등의 물리적인 영향에 따라 팽창대가 깊게 발달한 경우나 팽창성 지반에서 지속적인 지압발생에 따라 굴착 및 1차 지보재 타설시기뿐만 아니라 콘크리트라이닝 타설 이후에도 소성영역이 확대되어 터널의 장기적인 안정성에 영향을 미치는 경우가 종종 발생한다. 그림 3은 팽창성 지반과 같이 시간의존적 특성을 보이는 지반의 응력-변형률 관계이다.

이러한 경우에 있어서 1차 지보재의 보강과 함께 신속하게 설치된 터널 인버트는 터널 상·하반과 인버트의 구조적인 일체화로 취약한 지반조건에 국부적인 응력집중을 주변지반에 효과적으로 분산시켜 소성영역의 확대를 최소화시킬 수 있다. 장기적인 소성영역의 확대는 터널주변에 이완영역을 증가시켜 1차 지보재의 기능을 약화시키고 콘크리트라이닝

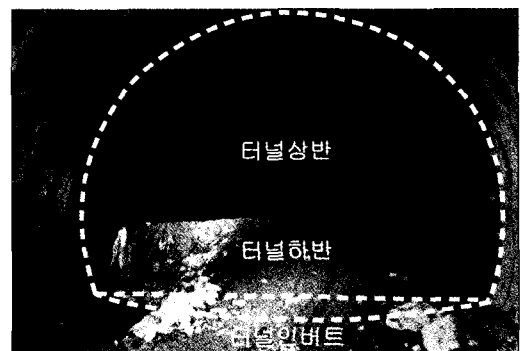
닝 타설 이후에도 지속적으로 지압을 발생시켜 설계 시 예상했던 것보다 큰 이완하중이 작용하여 터널 구조물의 안정성에 문제를 가져올 수 있다. 특히 팽창성(Swelling), 압착성(Squeezing) 등 시간 의존적인 거동을 보일 가능성이 높은 천매암(Phyllite), 이암(Mudstone), 미사암(Siltstone), 암염(Salt) 등이 발달한 지역에 터널이 시공되는 경우는 설계단계에서부터 인버트 설치 단면의 적용을 신중하게 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 터널 인버트 단면 적용사례

본 절에서는 앞서 언급한 인버트의 역할에 따라 실제 설계 및 시공에 적용된 사례를 살펴보도록 하

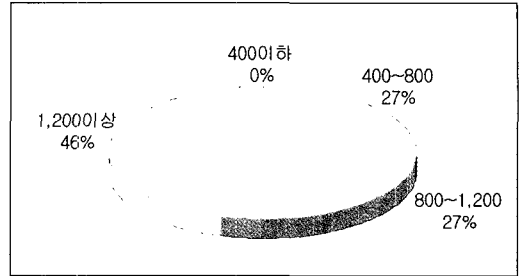
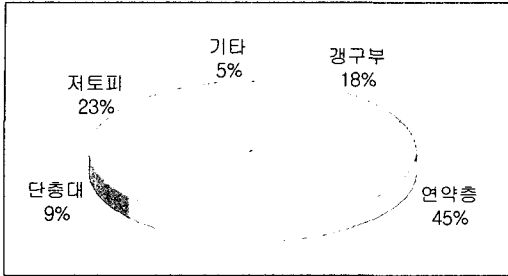


(a) 인버트단면 시공개요



(b) 인버트단면 시공진경

그림 4. 인버트단면 시공사례



(a) 인버트단면 적용지반 사례

(b) 인버트깊이 적용규모 사례

그림 5. 인버트단면 적용지반 및 적용규모 사례

겠다. 그림 4는 연약한 지반에서 분할굴착 공법으로 시공되는 대표적인 터널 인버트 단면의 시공개요와 전경을 보여주고 있다. 그림과 같이 연약한 지반에 터널이 시공되는 경우는 인버트 단면의 적용과 함께 터널 천단부의 안정성을 확보하기 위해 천단부 보강 공법을 적용하고 있다.

인버트가 설치된 터널단면의 적용현황을 살펴보기 위해 총 34개소의 도로, 철도, 지하철 터널의 설계 및 시공사례를 검토한 결과 인버트 단면이 적용된 경우는 22개소로 전체의 약 65%를 차지하였다. 그림 5는 인버트 단면이 적용된 경우에 대해 인버트 단면이 적용되는 지역의 지반특성과 인버트의 규모(깊이)에 따른 사례분석 결과를 정리한 것이며, 토사, 풍화대, 퇴적층, 충적층 등이 깊게 분포하는 연약층에 적용된 사례가 전체의 45%를 차지하였고 인버트 깊이는 1,200mm 이상이 전체의 46%로 가장 많이 적용된 것으로 나타났다.

4. 터널 인버트 설치에 따른 안정성 검토

일반적으로 설계단계에서부터 터널의 안정성 확보를 위해 인버트 단면을 적용하는 특수한 지반조건

은 다음과 같이 알려져 있다.

- ① 풍화암 이하의 연약한 심도가 낮은 지반
- ② 표층이 풍화된 경사지형의 영향을 받는 지반
- ③ 지층경사가 급한 지역의 갱구부 지반
- ④ 팽창성에 의해 과대토압을 받는 지반
- ⑤ 단층과쇄대 등 국부적인 취약지반
- ⑥ 지진 등 지반진동의 영향을 받는 지반

(1) 터널 안정성 검토개요

터널의 인버트 설치에 따른 지반공학적인 특성을 평가하여 이를 현장에 적용하기 위해서는 설계단계에서부터 인버트의 설치 유무, 지반 및 지층조건에 따른 적용기준, 지반조건에 따른 인버트의 형상(규모 또는 깊이) 등을 정량화할 필요가 있다. 따라서 본 절에서는 다양한 지반조건에서 인버트 설치 필요성과 규모를 결정하기 위해 설계단계에서 검토된 내용과 그 결과를 소개하겠다.

터널 구조물이 계획되는 위치에 인버트를 설치하느냐 마느냐하는 문제와, 설치하게 된다면 그 규모를 어떻게 하느냐 하는 문제를 두고 설계자는 다양한 아이디어를 구체화하기 위해 수치해석을 통한 매개변수 해석이라는 유용한 검토방법을 종종 사용한

인버트 설치 터널단면의 안정성 평가 및 적용성 검토

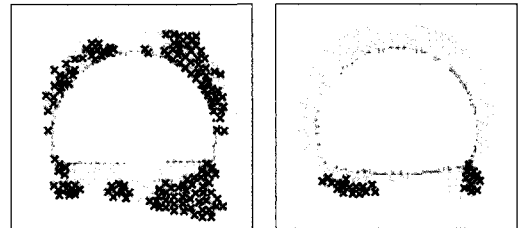
다. 현재 터널관련 여러 설계에서 다양한 매개변수 해석을 통해 터널의 인버트 설치에 따른 적정성이 검토되고 있으며, 그 중에서 직접적인 영향을 미치는 매개변수는 지반 변형계수, 축압계수(K_0), 토피고, 지층조건(다층지반의 지층구분 조건), 인버트의 형상(규모 또는 깊이) 정도이다. 따라서 본 절에서는 설계단계에서 주로 적용되고 있는 매개변수를 크게 묶어 표 1과 같이 세 가지 조건에 대한 검토사례를 소개하겠다.

표 2는 표 1에서 제시한 검토조건에 대해 실제 수치해석에서 적용한 입력특성치와 주요 적용변수를 나타내고 있다. 세가지 조건에 적용한 수치해석 입력값은 각 검토가 이루어진 설계 프로젝트의 대상이 된 지역특성과 지반조건, 목적구조물(도로, 철도, 지하철 등)의 용도에 따라 상이하므로 각각의 검토조건에(Case 1 ~ Case 3)대한 상호비교는 수행하지 않았으며 각 조건에서 선정된 가정조건에 입각하여 그 결과를 분석하였음을 미리 주지하는 바이다.

(2) 인버트 설치에 따른 영향검토 (Case 1)

인버트 설치 유무에 따른 터널의 안정성을 검토하기 위해 터널이 계획되는 지반조건을 풍화암 지반으로 가정하고 풍화암 지반의 변형계수(E)를 400~700MPa, 축압계수(K_0)를 0.5~1.5로 변화시켜가며 일반(직선)단면과 인버트단면에 대한 해석결과를 분석해보았다.

검토에 적용한 터널단면은 산악지역에 일반적으로 적용되고 있는 도로터널 단면이며 수치해석 결과 터널 주변지반에 발생하는 소성영역 분포는 그림 6과 같이 나타났다. 터널의 굴착에 따른 지반의 초기 응력 해방으로 터널주변에는 소성영역이 발생하며 특히 인버트가 설치되지 않은 일반단면의 경우 터널 아치부와 바닥부에 집중적으로 분포하는 것으로 나



(a) 일반(직선)단면 (b) 인버트단면

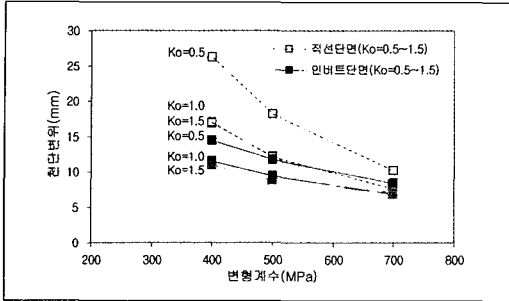
그림 6. 지반 소성영역 분포경향 (E=500MPa)

표 1. 안정성 검토조건 (Case)

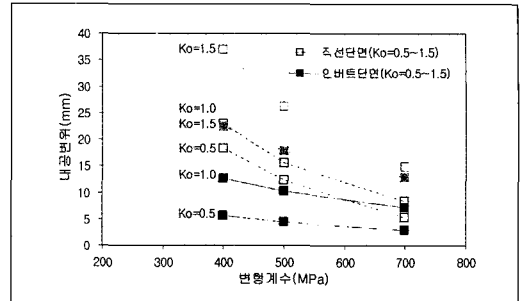
구 분	검토조건 설명	매개변수
Case 1	• 인버트 설치에 따른 영향검토 (4.(2)절)	변형계수(E), 축압계수(K_0)
Case 2	• 터널하부 지반조건에 따른 영향검토 (4.(3)절)	토피고, 지층경계위치(풍화암-연·경암)
Case 3	• 인버트 형상에 따른 영향검토 (4.(4)절)	인버트깊이(D), 변형계수(E)

표 2. 수치해석에 적용한 입력특성치

구 분	변형계수(MPa)	점착력(MPa)	마찰각(°)	적용변수
Case 1	400~700	0.3	35	$K_0=0.5\sim 1.5$
Case 2	190~1,700	0.05~0.3	33~35	토피고 : 5~20m 지층경계 : 측벽~(-)15m
Case 3	200~7,000	0.1~2	34~40	인버트깊이 : 100~800mm
비 고	지반의 단위중량과 포아송비는 각 지반조건에 부합되도록 가정하여 적용함			

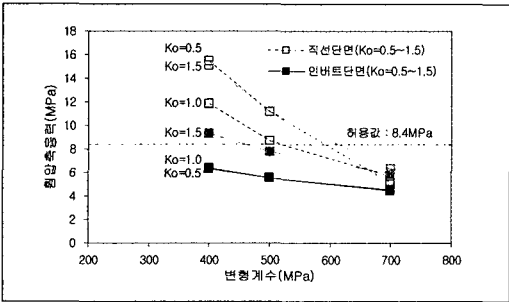


(a) 터널 천단변위

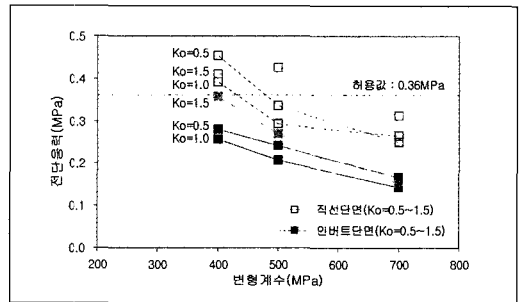


(b) 터널 내공변위

그림 7. 터널 최대변위 발생경향



(a) 숏크리트 힘압축응력



(b) 숏크리트 전단응력

그림 8. 숏크리트 최대응력 발생경향

타났으나 인버트를 설치하는 경우 아치부와 바닥부의 소성영역은 많이 감소하는 것으로 나타나 연약한 풍화암 지반에 인버트 단면을 적용할 경우 터널 주변지반의 소성파괴에 대한 저항력이 크게 증가하는 것으로 평가되었다.

그림 7과 8은 인버트 설치 유무에 따른 터널의 변위와 숏크리트의 응력 발생경향을 보여주고 있다. 인버트 설치에 따른 터널의 발생변위 분석결과 축압계수의 변화에 따라 천단변위는 최대 약 37%, 내공 변위는 최대 약 64%가 감소하는(지반 변형계수의 변화에 따른 평균감소율) 것으로 나타났으며 숏크리트의 힘압축응력과 전단응력은 각각 최대 약 48%와 36%가 감소하는 것으로 나타났다.

특히 숏크리트의 힘압축응력 발생은 일반단면을 적용할 경우 지반 변형계수가 700MPa 미만에서는 허용값(8.4MPa)을 초과하는 것으로 나타났으나 인버트를 설치할 경우, 축압계수(K_0)가 1.5인 경우를 제외하고는 모두 허용응력 이내로 인버트 설치에 의한 안정성 확보가 가능한 것으로 평가되어 풍화암 지반에 인버트 설치의 터널의 안정성에 크게 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

(3) 터널하부 지반조건에 따른 영향검토 (Case 2)

인버트 단면을 적용할 경우 풍화암 이하의 연약한

인버트 설치 터널단면의 안정성 평가 및 적용성 검토

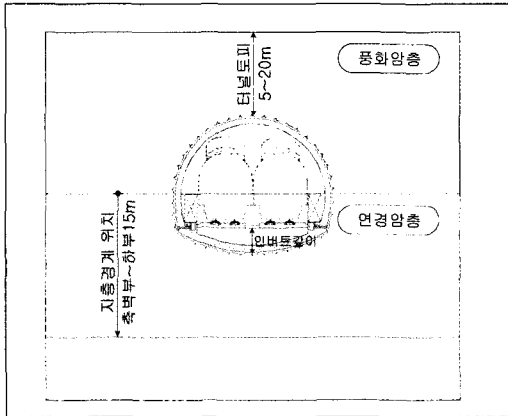
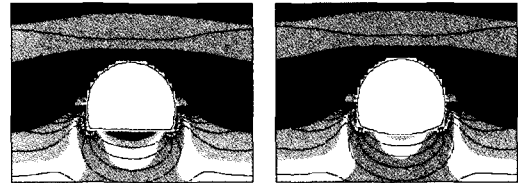


그림 9. Case 2의 검토개요도

지반조건에서는 굴착으로 인한 지반의 초기응력 해방과 이로 인한 변위발생, 지보재의 응력발생 측면에서 구조적으로 유리한 역할을 할 것으로 판단되며 특히 터널토피가 높고 양호한 암반(연암이상)과의 지층경계가 터널하부에 깊게 나타날 경우 인버트 단면은 구조적인 안정성 확보 측면에서 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 따라서 Case 2에서는 철도터널 단면에 대해 터널토피를 5~20m, 풍화암층과 기반암(연경암)층의 경계위치를 측벽부~하부로 15m까지 변화시켜가며 검토를 수행하여 터널토피와 지층경계가 터널 인버트 단면의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. 그림 9는 본 검토의 해석조건에 대한 개

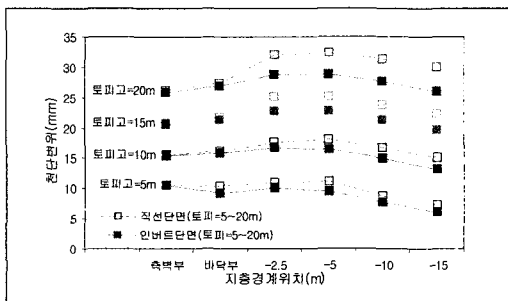


(a) 일반(직선)단면 (토피고 : 15m)
(b) 인버트단면 (토피고 : 15m)

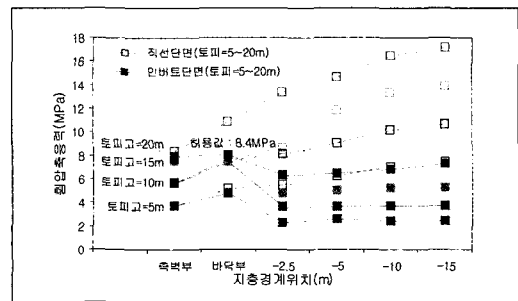
그림 10. 인버트 설치에 따른 지반응력 분포경향

요도이다.

그림 10은 풍화암과 기반암(연경암)의 지층경계 위치가 충분히 먼 경우(지층경계위치가 터널 측벽하부로 15m) 터널토피가 15m인 조건에 대한 지반 응력분포 결과이다. 인버트를 설치한 경우 일반단면에 비해 터널 바닥부 인접지반의 응력 집중이 감소하여 터널하반의 구조적 안정성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단되었으며 이러한 경향은 터널토피와 지층경계의 위치를 변화시켜가며 검토한 결과(그림 11)를 보면 더욱 분명하게 확인할 수 있는데 터널 천단변위의 경우 터널토피가 증가할수록, 풍화암과 기반암의 지층경계위치가 터널 바닥부 이하에 나타나 터널의 변형거동이 풍화암 지반조건에 직접적으로 영향을 받을수록 인버트 단면과 일반단면의 천단변위가 크게 차이를 보여 최대 약 13%가 감소하는 것



(a) 터널 천단변위



(b) 슛크리트 휨압축응력

그림 11. 터널 천단변위 및 슛크리트 휨압축응력 발생경향

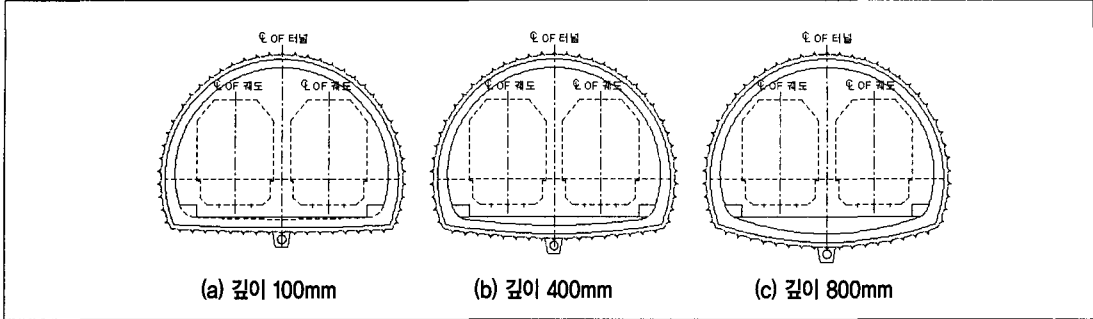


그림 12. 인버트 깊이(D)에 따른 터널단면 개요도

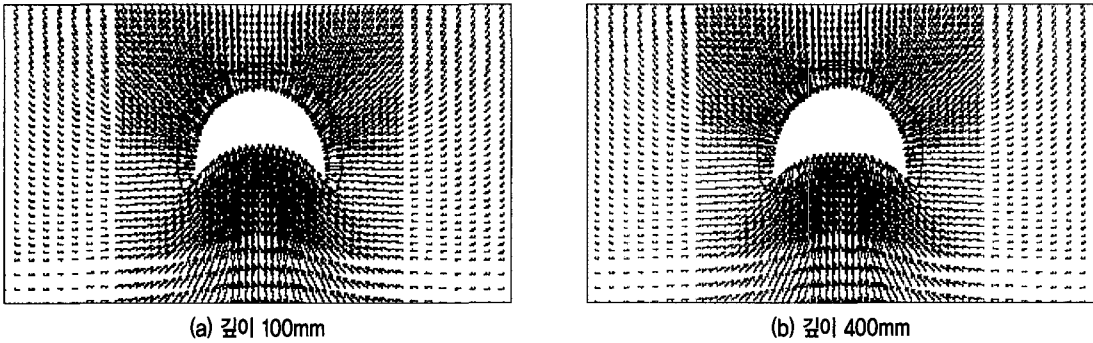


그림 13. 인버트 깊이에 따른 터널변위 분포경향

으로 나타났으며 슛크리트의 휨압축응력은 이보다 더 큰 차이를 보여 인버트를 설치한 경우 최대 약 57%의 감소를 보였다. 따라서 풍화암과 기반암(연경암)의 지층경계 위치가 충분히 먼 경우에 즉, 하부의 기반암의 지지력이 약하고 토피고가 큰 경우 인버트 단면적용은 터널의 안정성 향상에 보다 큰 영향을 주는 것으로 평가되었다. 따라서 동일한 지반 조건이라 할지라도 터널의 토피고와 지층조건을 감안하여 인버트 단면을 적절히 적용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

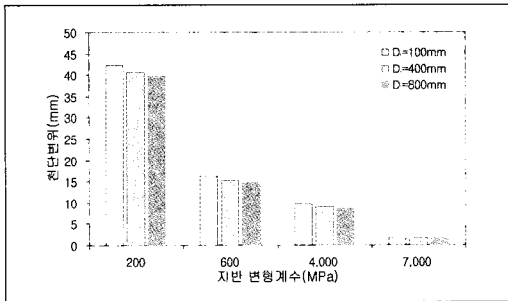
(4) 인버트 형상에 따른 영향검토 (Case 3)

Case 1, 2의 결과에서는 터널이 계획되는 위치의

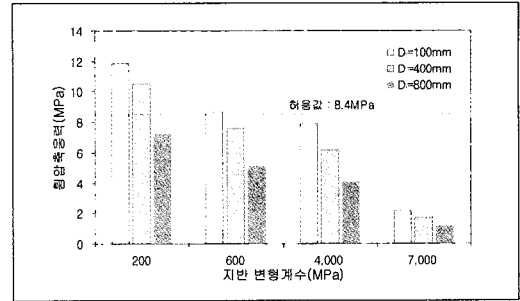
지반조건이 풍화암강도 이하이고 토피고가 높은 취약한 지반조건에서 인버트 단면의 적용성이 큰 것으로 나타났다. 이번에는 지반조건에 따른 적절한 인버트의 적용 규모를 알아보기 위해 그림 12와 같이 지하철 터널단면에 대해 인버트의 깊이와 변형계수의 변화에 따른 검토를 수행하였다.

그림 13은 풍화암 지반조건에서 인버트 깊이가 100mm인 경우와 400mm인 경우에 대한 터널변위 분포경향을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 인버트의 깊이가 깊은 경우(b)는 얇은 경우(a)에 비해 터널 바닥부의 변위가 적게 발생하는 것으로 평가되었다. 그림 14는 지반 변형계수가 변화할 때 터널 인버트 깊이(D)에 따른 천단변위와 슛크리트 휨압축응력의 발생경향을 보여주고 있는데 지반변

인버트 설치 터널단면의 안정성 평가 및 적용성 검토

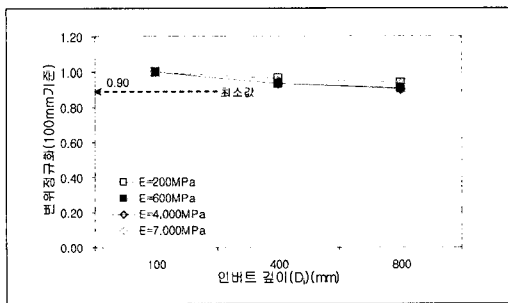


(a) 터널 천단변위

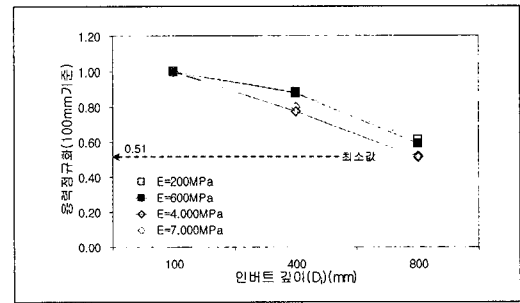


(b) 숏크리트 휨압축응력

그림 14. 인버트 깊이(D) 변화에 따른 천단변위 및 휨압축응력 발생경향



(a) 터널 천단변위



(b) 숏크리트 휨압축응력

그림 15. 인버트 깊이(D) 변화에 따른 천단변위 및 휨압축응력 발생경향

형계수가 적을수록 인버트 깊이가 터널의 안정성에 미치는 영향이 크다는 것을 나타내고 있다. 터널 인버트의 깊이가 100mm일 경우 지반 변형계수가 600MPa 이하에서, 인버트의 깊이가 400mm일 경우 지반 변형계수가 200MPa 이하에서 숏크리트 휨압축응력이 허용값(8.4MPa)을 초과하는 것으로 나타나 인버트의 깊이가 800mm일 경우는 지반 변형계수가 200MPa 이하이더라도 터널의 안정성 확보가 가능한 것으로 평가되었다. 즉 주어진 지반조건에 대해 수치해석 결과만을 보고 판단해 본다면 지반 변형계수가 200MPa 정도의 연약한 풍화암 지반조건에는 인버트 깊이를 800mm 이상으로 적용해야 하며 변형계수가 4,000MPa 정도의 양호한 지

반조건에는 인버트의 깊이를 100mm 정도로 적용하여도 터널의 구조적 안정성에는 문제가 없다는 것을 의미한다. 그림 15는 인버트의 깊이가 증가할 경우 터널의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴 보기 위해 인버트의 깊이가 100mm인 경우로 각각의 수치해석결과를 정규화하여 나타낸 것인데 인버트 단면이 800mm인 경우는 100mm인 경우에 비해 터널 천단변위는 약 90%, 숏크리트 휨압축응력은 약 51% 수준으로 나타나 인버트 깊이의 증가는 터널의 변위발생 측면보다는 지보재의 응력발생 측면에 더욱 민감한 영향을 주는 것으로 평가되었다. 그러나 이러한 경향은 수치해석에 의한 결과에 한정된 것이며 실제 주어진 지반조건에 대해 터널 인버트

단면의 규모(인버트의 깊이 등)를 결정할 경우는 지반의 변형계수 변화에 따른 안정성뿐만 아니라 강도 정수, 토피고, 지층조건, 시공성, 경제성, 후속공정과 연계성 등을 감안하여 안정성을 확보하는 범위 내에서 합리적으로 결정해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

터널공사에서 인버트 단면을 적용하는 특수한 지반조건은 풍화암 이하의 연약층, 편토압을 받는 지형, 갱구부, 팽창성 토질, 단층 등의 파쇄대, 지반진동의 영향을 받는 지역 등이 있으며 취약한 지반조건에서의 인버트 설치 단면의 적용은 터널의 초기 안정성 확보와 소성영역 확대 방지측면에서 가장 큰 역할을 담당한다. 인버트 터널 단면이 적용된 사례 분석 결과 연약층이 존재하는 지역에 적용한 사례가 가장 많았으며 인버트의 깊이는 1,200mm 이상이 적용된 사례가 많은 것으로 나타났다.

인버트 단면의 적용에 있어서, 설계단계에서는 지반의 변형조건, 강도조건, 지형조건, 지층조건과 함께 시공성, 경제성, 후속공정과 연계성 등을 감안하여 적용성을 평가하고 인버트의 적용 유무와 규

모를 결정해야 한다. 또한 설계자와 시공자는 인버트 단면이 적용되어야 할 취약한 지반조건임에도 불구하고 공정상의 편의성과 경제적인 이유로 인버트 단면을 적용하지 않거나 적용하더라도 공정과 공사기간상의 문제로 인한 링(Ring)폐합의 지연으로 시공중 문제가 빈번히 발생했던 점을 간과해서는 안 될 것이다.

Reference

1. 한국지반공학회, 지반공학 시리즈(7) 터널, 제3장, pp.131-134
2. 서울특별시 지하철건설본부, 서울지하철 9호선 912공구 설계보고서, pp. 332-333.
3. 김대영, 박영호 등(2006), "도심 밀집지역 충적층 터널의 설계와 시공", 한국지반공학회, pp.9-29
4. 김승렬(2006), "Technical Solutions and Case Histories for Soft Ground Tunnelling in Urban Area", Training Course of International Tunnelling Association, pp. 81-116
5. 이인모, "터널의 지반공학적 원리", 제5장, pp. 206-233.

