

프리캐스트 아치형 개착식 터널의 역학적 거동에 관한 수치해석

황재홍^{1*}

Numerical analyses for mechanical behavior of cut-and-cover tunnel with precast arch type

Jae-Hong Hwang

Abstract The thickness of the material can be thinned because arch cut-and-cover tunnel has the support mechanism by the axial force, and the ground reaction force due moderate deformation can be expected thereby making it be dynamically advantageous, therefore the arch cut-and-cover tunnel has become more widely used. An important characteristic of the arch cut-and-cover tunnel is that the thickness of the material can be thinned because precast arch type has the support mechanism by the axial force. However, there is a different stress state surrounding the structures between normally excavated tunnels and cut-and-cover tunnels, it should be considered at designing. Therefore, finite element method was carried out to examine the mechanical behavior of the precast arch cut-and-cover tunnel considering construction procedure.

Keywords: Arch cut-and-cover tunnel, precast, construction procedure, axial force

요 지 아치형 개착식 터널은 종래의 박스형 개착식 터널과 비교하여 외력에 따른 축력으로 지지하는 형식이므로 보다 얇은 부재로 시공이 가능하고, 구조물 특성상 적절한 변형에 의하여 지반반력을 기대할 수 있어 역학적으로 우수한 구조물로서 최근 프리캐스트화되어 그 시공실적이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 프리캐스트 아치형 개착식 터널은 굴착식 터널 및 박스형 개착식 터널 등과 시공방법과 형상이 상이하여 구조물 주변 지반응력 거동이 다르며, 이는 터널구조물 단면설계에 반영 되어야만 하는 중요한 사항이다. 따라서 본 연구에서는 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 시공과정을 고려하여 유한요소해석을 실시하여, 지반과 구조물간 상호작용을 고려한 아치형 개착식 터널의 역학적 거동에 대하여 검토하였다.

주요어: 아치형 개착식 터널, 프리캐스트, 시공과정, 축력

1. 서 론

최근 아치형 개착식 터널 시공시에 현장타설을 하지 않고, 현장주변이나 공장에서 프리캐스트 부재를 제작하여 현장에서 간단하게 조립 및 설치하는 프리캐스트 아치형 개착식 터널이 증가하고 있다. 각 부재를 프리캐스트화 함으로써 품질을 높일수 있으며 시공성이 뛰어나고 현장에서의 공기단축이 가능하게 되었다(이규필, 2008). 하지만, 국내에 적용되고 있는 프리캐스트 아치형 개착식 터널은 구조계산을 이용한 설계에 의하여 성토하중의 적절한 산정이 곤란하며, 프리캐스트 부재간 상호작용 및 구조물과 성토간의 상호작용이 적절히 고려되지 않아 과다설계 되고 있는 실정이다. 본 공법의 기존 연구로서는 Adachi 등(2001, 2002)이 모형실험 및

수치해석을 통하여 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 각종 타입에 따른 역학적 거동에 관하여 검토하였으며, Kawauchi 등(2002)이 개착식 터널의 연직토압에 따른 영향을 검토하였다. 국내에서는 개착식 터널의 적절한 모델링 기법 및 편토압에 관한 연구가 배규진 등(2001, 2003)에 의하여 수행되었다. 하지만 시공과정을 고려하여 개착식 터널의 역학적 거동을 검토하고 이를 설계기법에 적용하기 위한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 시공현장의 시공순서와 지반과 구조물간의 상호작용을 고려한 유한요소해석을 실시하여 적절한 주변지반 응력상태를 검토하고, 나아가 시공완료시의 적절한 부재 단면력을 산정하였다.

2. 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 개요

프리캐스트 아치형 개착식 터널은 도로와 철도 등의 아래를 횡단하는 도로와 수로 등의 성토내 또는 지반내

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 Post-Doc.
*교신저자: 황재홍 (E-mail: hwang@kict.re.kr)

에 설치하는 것으로 아래와 같은 구조형식 및 역학적 특성을 가진다(모듈아치 공법협회, 2002).

- ① 단면형식: 일반적 단면형상은 박스형, 아치형, 게이트형 등으로 분류된다. 이중 아치형은 외력에 대하여 부재의 축력에 의해 지지력이 발휘되는 구조형식이다(Kimura 등, 2004).
- ② 부재의 프리캐스트화: 현장타설식의 박스형 및 아치형 개착식 터널의 내용으로 주요부재를 프리캐스트화 하는 것에 의하여 작업성의 향상, 공기단축 및 높은 품질관리가 가능하기 때문에 그 시공기회가 증가하고 있다.
- ③ 단면의 다분할화: 이전에는 일체형 타입 또는 상하 분할 구조의 프리캐스트 아치형 개착식 터널이 이용되었으나 운반 시 단면크기의 제한이 있었다. 이에 반해서 아치 자체를 분할하는 다분할식의 아치형 개착식 터널은 대단면의 터널(내부폭 10~20 m)이 건설 가능하게 되었다. 더욱이 프리캐스트 아치형 개착식 터널은 분할 위치에 힌지기능을 가지게

함으로써 단면력 감소 및 성토와 기초지반의 변형을 일정량 허용하는 것이 가능하게 되었다.

다분할식에는 2힌지(Modul arch)와 3힌지(Tech span) 구조가 있는데, 현재 이용되고 있는 다분할식의 아치형 개착식 터널은 주로 2힌지 구조이다. 2힌지 구조는 아치 좌우의 양 어깨부를 기준으로 분할 제작되어 현장에서 힌지 기능을 가진 곡볼트로 일체화 하는 구조이다. 2힌지 구조의 프리캐스트 아치형 개착식 터널은 풋팅타입과 인버트타입의 2가지 종류가 있다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 풋팅타입은 각부를 기초로 지지하며, 인버트타입은 현장타설식 인버트에 의하여 양 측벽을 일체화시킨다. 다분할식의 아치형 개착식 터널은 그림 2에 나타낸 바와 같이 기초공사 후 대형 크레인을 이용하여 프리캐스트 부재를 설치하고, 인버트를 현장타설로 설치한 후 성토 및 다짐을 실시하여 아치 부재와 성토를 일체화하는 순서로 시공된다.

3. 개착식 터널의 성토과정과 연직토압에 관한 상관관계

그림 3에 아치형 터널과 박스형 터널의 콘크리트 라이닝에 작용하는 연직하중을 검토한 사례를 나타내었다(Kawauchi, 2002). 사질토 지반을 2차원모델로 상정하여 지반재료를 알루미늄붕을 이용하였으며, 터널라이닝은 3종류의 아치형 터널 (0, 2, 3개의 힌지)과 2종류의 박스형 터널 (연성체와 강체)을 설정하였는데, 아치형 터널과 연성체의 박스형 터널은 2 mm 두께의 아크릴이 이용되었으며, 강체의 박스형 터널은 아크릴 박스가 사용되었다. 터널라이닝의 연직하중 P는 좌우 각부의 블록에서 계속

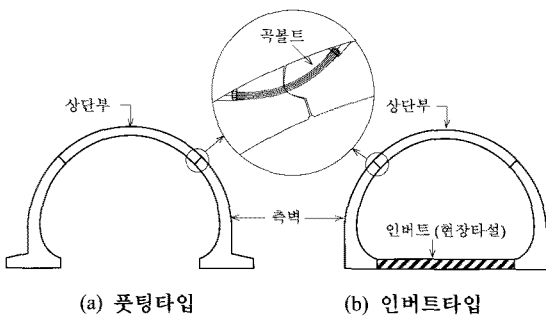


그림 1. 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 구조(2힌지 구조)

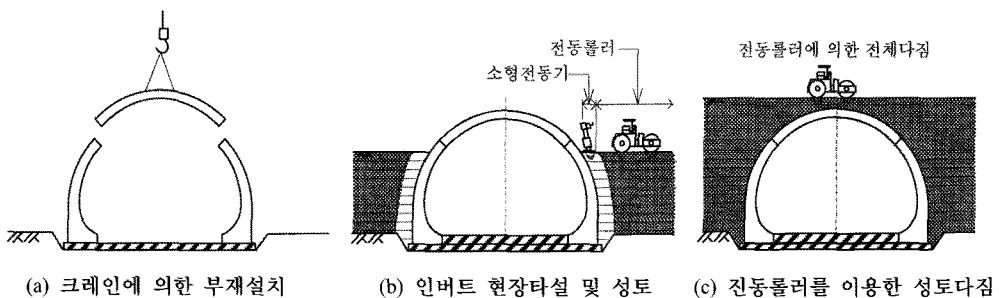


그림 2. 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 시공순서

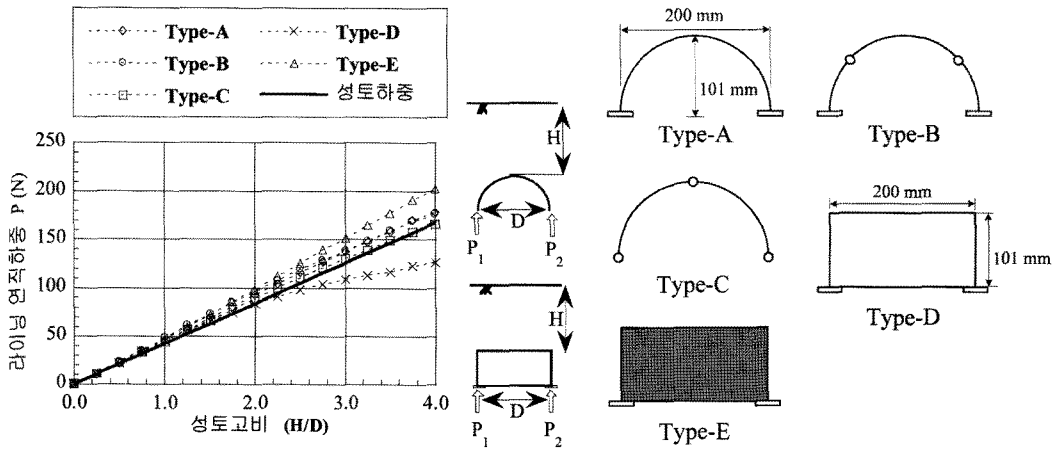


그림 3. 터널 라이닝에 작용하는 연직하중과 성토고와의 관계(Kawauchi, 2002)

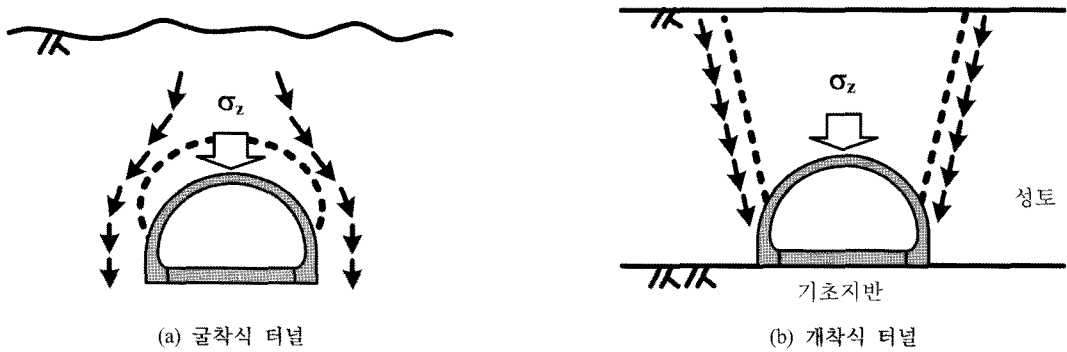


그림 4. 굴착식 및 개착식 터널의 연직토압 개념도

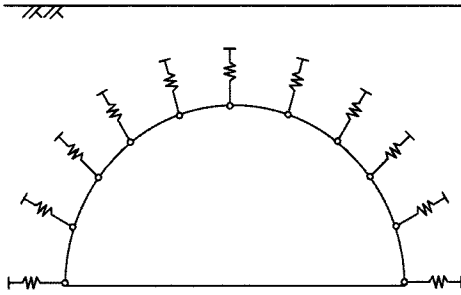
되는 연직하중 P_1 과 P_2 의 합으로 정의되는데, 성토하중은 $\gamma H \times D \times B$ (γ : 알루미늄봉의 단위중량, H : 천단으로부터의 성토고, D : 터널 내부폭, B : 종단폭)에 의하여 계산한 이론치이다. 본 실험에 따르면 성토고비가 2.0 이상일 때 아치형 개착식 터널은 현지의 종류에 상관없이 터널 라이닝 각부에 작용하는 하중이 성토하중보다 크며, 박스형 개착식 터널은 연성체인 경우에는 성토고비가 2.0 이상일 때 터널 라이닝 각부에 작용하는 하중이 성토보다 작지만, 강체의 경우에는 아치형 개착식 터널보다도 하중증가율이 크게 나타난다. 이는 Type-E의 강성이 극도로 크기 때문에 터널라이닝의 변형이 발생하지 않고, 주변지반은 성토하중에 의하여 연직방향으로 압축되어 경계부분에서 발생한 전단력이 더해졌기 때문이다.

그림 4에 굴착식 터널과 개착식 터널의 주변지반 응력

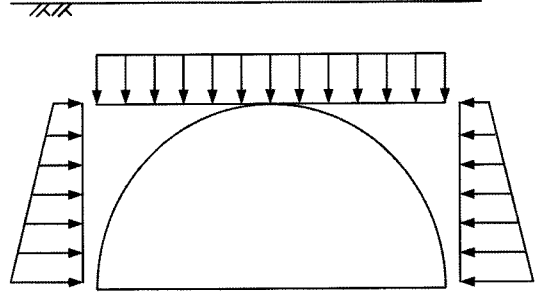
상태를 비교하는 개념도를 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 굴착식 터널에서는 상부 주변지반에서 응력해방이 발생하여 연직토압이 γH 보다 작게 되며, 개착식 터널에서는 성토 증가에 따라 주변지반은 연직방향으로 압축되어 성토고 γH 보다 크므로 설계시에 하중증가 계수 α 를 사용하여 연직하중의 증가분을 고려한다.

4. 개착식 터널구조물의 설계 개요

개착식 터널 라이닝의 설계 방법은, 설계상의 간편성으로 인해 현재까지도 수직 개착공법으로 시공되는 개착식 터널의 라이닝에 대한 구조해석적 기법인 강성해석(Rigid frame analysis)이 널리 사용되고 있다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 수치해석적 기법을 실시하여, 개착공법



(a) 터널 라이닝과 지반반력의 모델링



(b) 라이닝 주변의 토압분포 모사도

그림 5. 구조해석적 기법 예시

으로 시공되는 개착식 터널 라이닝의 역학적 거동에 대한 연구가 이루어지고 있다.

수직 개착공법으로 시공되는 개착식 터널구조물의 구조해석적 설계 방법에 대해서는 Bickel 등(1996), 일본 토목학회(1987) 등이 제안한 바 있으며, 현재 개착식 터널구조물에 대한 설계 방법은 이를 준용하고 있다. 이 설계 방법의 수행 순서는, 1) 터널 라이닝을 그림 5(a)와 같이 스프링으로 수평 지지된 frame으로 가정하고, 2) 여기에 그림 5(b)와 같은 방법으로 수직 및 수평 하중을 작용시켜, 3) 강성 해석 방법을 통하여 라이닝의 구조 요소에 대한 응력으로 전단력, 축력 및 휨모멘트를 산정하여, 4) 구조물로의 안정성을 검토하고 있다. 이때 작용 하중은 되메움 지반에 의해 구조물의 상부 슬래브 및 측벽에 대해 수직/수평하중으로 가정한다. 수직하중은 토피하중에 대해 연직토압계수를 곱하여 산정하고 있으며, 연직토압 계수는 터널 구조물의 규모, 토피고, 기초 지지조건 등을 고려하여 일정한 상수로써 제안되어 있다. 한편, 수평하중은 단기 안정성 검토시 주동토압 또는 장기 안정성 검토시 정지토압으로 가정하고 있다.

그러나 개착식 터널 구조물 주변에 단계적으로 시공되는 되메움 지반은 처음에는 라이닝에 하중으로 작용하게 되지만, 되메움 시공이 완료된 이후에는 구조체의 일부로서 터널 라이닝의 측방 변위에 저항하는 지반 반력이 형성되는 개착식 터널구조물의 시공에 의해 유발하는 역학적 특성을 적절히 반영하지 못하고 있다. 이렇듯 강성해석은 되메움 지반과 터널 라이닝 사이의 상호 작용 메커니즘을 적절히 반영하지 못하게 될 뿐만 아니라, 굴착 사면의 경사, 굴착폭 및 지표면의 경사 등에 의한 영향을 고려하지 못하는 문제점이 있다.

5. 유한요소법을 이용한 수치해석

5.1 수치해석 모델링

본 연구에서는 성토 및 기초지반을 Drucker-Prager model(Drucker and Prager, 1952)을 이용하여 모델링하였다. Drucker-Prager model은 식 (1)과 같이 정의된다. 주응력 공간에 있어 항복곡면 $F(\sigma) = 0$ 은 그림 6에 나타난 바와 같이 정수압축을 중심으로 하는 원추모양이 된다. 탄성영역 구간인 $F(\sigma) < 0$ 에서는 탄성체로서 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ 에 따르며, $F(\sigma) = 0$ 일 때 지반은 전단력에 의해 항복하여 소성적 거동을 나타낸다. 여기서, 관련흐름법칙을 가정하면, 소성변형을 증분의 방향은 항복곡면과 직교하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$F(\sigma) = \sqrt{J_{2D}} - \alpha I_1 - \kappa \quad (1)$$

여기서, J_{2D} : 축차응력의 제2불변량, I_1 : 응력의 제1불변량, α , κ 는 항복곡면의 크기를 나타내는 매개변수로서, Mohr-Columb 파괴기준에서의 내부마찰각 ϕ , 점착력 c 와 관련시켜 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$d\varepsilon^p = h \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (2)$$

여기서, $h > 0$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4)$$

하지만 Drucker-Prager model은 그림 7에 나타난 바와 같이 응력상태가 파괴기준에 다다르면, 하중증가시 파괴 기준을 따라 응력상태가 변화하는 특성이 있다. 하지만 실제 지반은 파괴기준에 도달한 후에 전단력이 파괴기준 상에서 거의 일정하게 유지되는 특징을 나타내지 않는다. 하지만 본 연구에서는 저성토 조건이므로 구조물 주변지반 응력상태가 안정구간에서 거동할 것으로 판단된다.

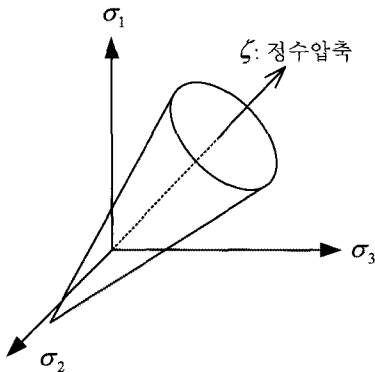


그림 6. 주응력공간에 놓인 항복곡면

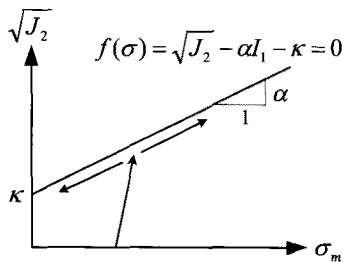


그림 7. Drucker-Prager model에서 파괴선상 응력경로

5.2 수치해석 입력정수의 결정

본 연구에서는 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 일반적인 역학적 거동을 검토하기 위하여 일본 모토아치 매뉴얼(2002), 일본 도로교 시방서(2002), N치의 이야기(2004) 등의 참고문헌을 참조하여 기초 및 성토 지반의 재료상수를 결정하였다. 성토재료의 N치는 다짐도에 따라 일정하지 않지만 일반적으로 5~12이며, 기초지반은 실제상 15 이상을 표준으로 한다. 따라서 본 연구에서는 연약지반을 가정하여 기초지반은 N=15, 성토는 N=10으로 가정하였으며, 내부마찰각과 변형계수는 일본 도로교 시방서(2002)를 기준으로 식 (5), (6)을 이용하여 적용하였다. 나아가 동문헌을 참고하여 단위중량(γt)을 기초지반은 20 kN/m³, 성토는 19 kN/m³로 가정하였다.

표 1. 지반재료정수

	성토	기초지반
변형계수(kN/m ²)	28000	42000
마찰저항각(°)	27.2	30
단위체적중량(kN/m ³)	19	20
정지토압계수	0.5	0.5
포아송비	0.3	0.3
간극비	0.65	0.65

표 2. 터널 라이닝 재료정수

콘크리트	탄성계수(kN/m ²)	1.5×10 ⁷
	압축강도(kN/m ²)	4.0×10 ⁴
	인장강도(kN/m ²)	2.69×10 ³
철근	탄성계수(kN/m ²)	2.0×10 ⁸
	항복강도(kN/m ²)	4.0×10 ⁵

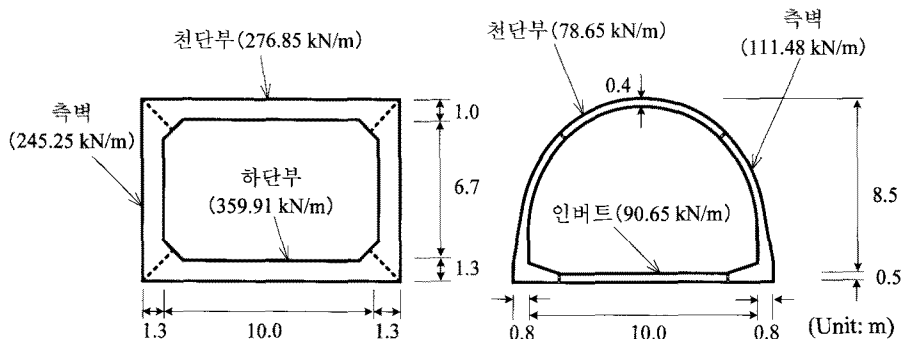


그림 8. 현장타설식 박스형 개착식 터널 및 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 중량제원

터널라이닝은 철근콘크리트구조로서 천단으로부터 지표면까지의 성토고 1.5 m의 성토하중에 대하여 구조해석을 실시하여 설계되었다. 표 2에 나타난 바와 같이 일반적 철근콘크리트의 제원을 이용하였으며 본 수치해석에서는 탄성 범으로 모델링하여 그림 8에서와 같이 프리캐스트 각부재의 중량을 해당절점에 부여하는 방식으로 수치해석을 수행하였다.

$$\phi = 15 + \sqrt{15N} \leq 45^\circ \quad (N > 5) \quad (5)$$

$$E = 2.8N \quad (\text{MN/m}^2) \quad (6)$$

5.3 수치해석 대상 및 경계조건

본 연구에서는 터널 천단부 중앙으로부터의 성토고 1.5 m, 터널 내부폭 10 m의 동일조건에 대하여 설계된 박스형 및 아치형 개착식 터널을 대상으로 그 역학적 거동을 비교/검토하였다. 수치해석 대상과 해석모델 및 경계조건을 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 해석영역은 x방향 400 m, z방향 약 30 m로 설정하였다. 본 수치해석에서는 종단 방향으로 프리캐스트 부재간 마찰은 고려하지 않고, 단위 폭을 두어 2차원 평면변형상태를 표현하기 위하여 각 절점의 종단방향으로의 변위를 고정조건으로 설정하였다. 수치해석 프로그램은 균말뚝의

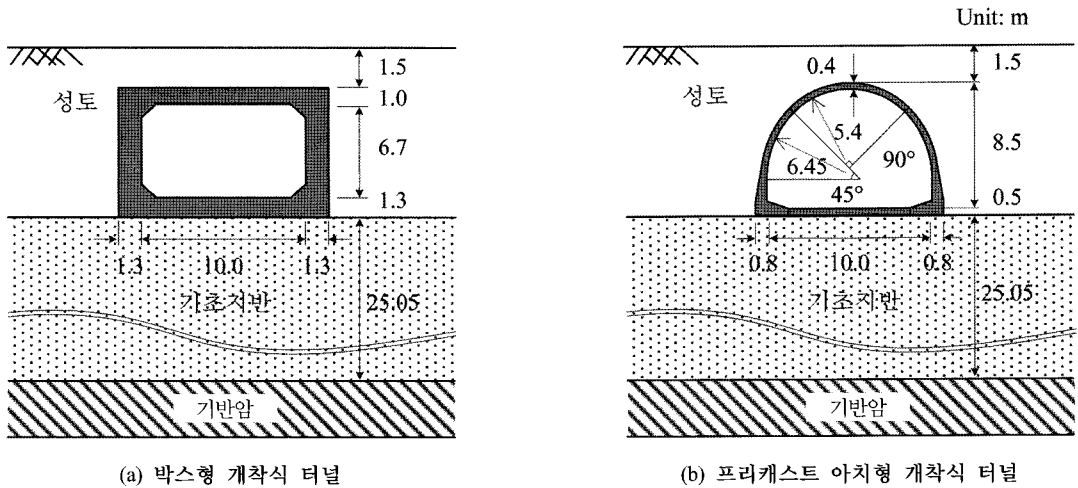


그림 9. 박스형 및 아치형 개착식 터널 구조물의 제원

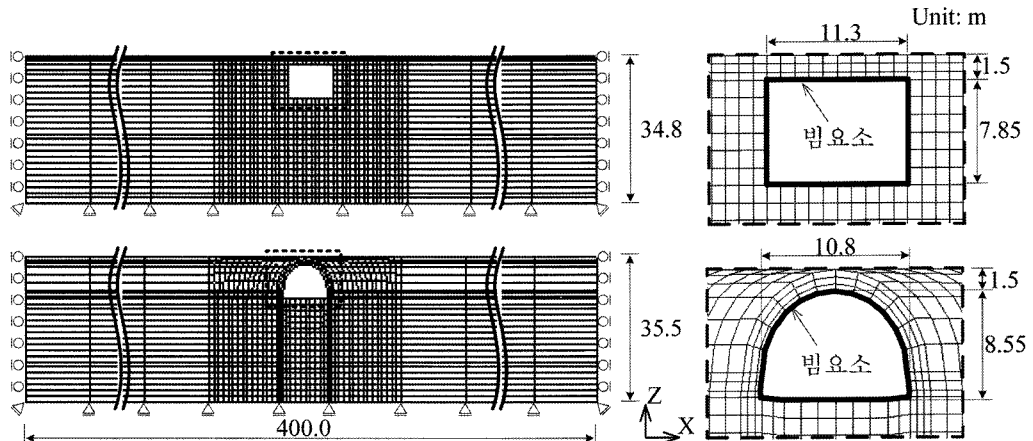
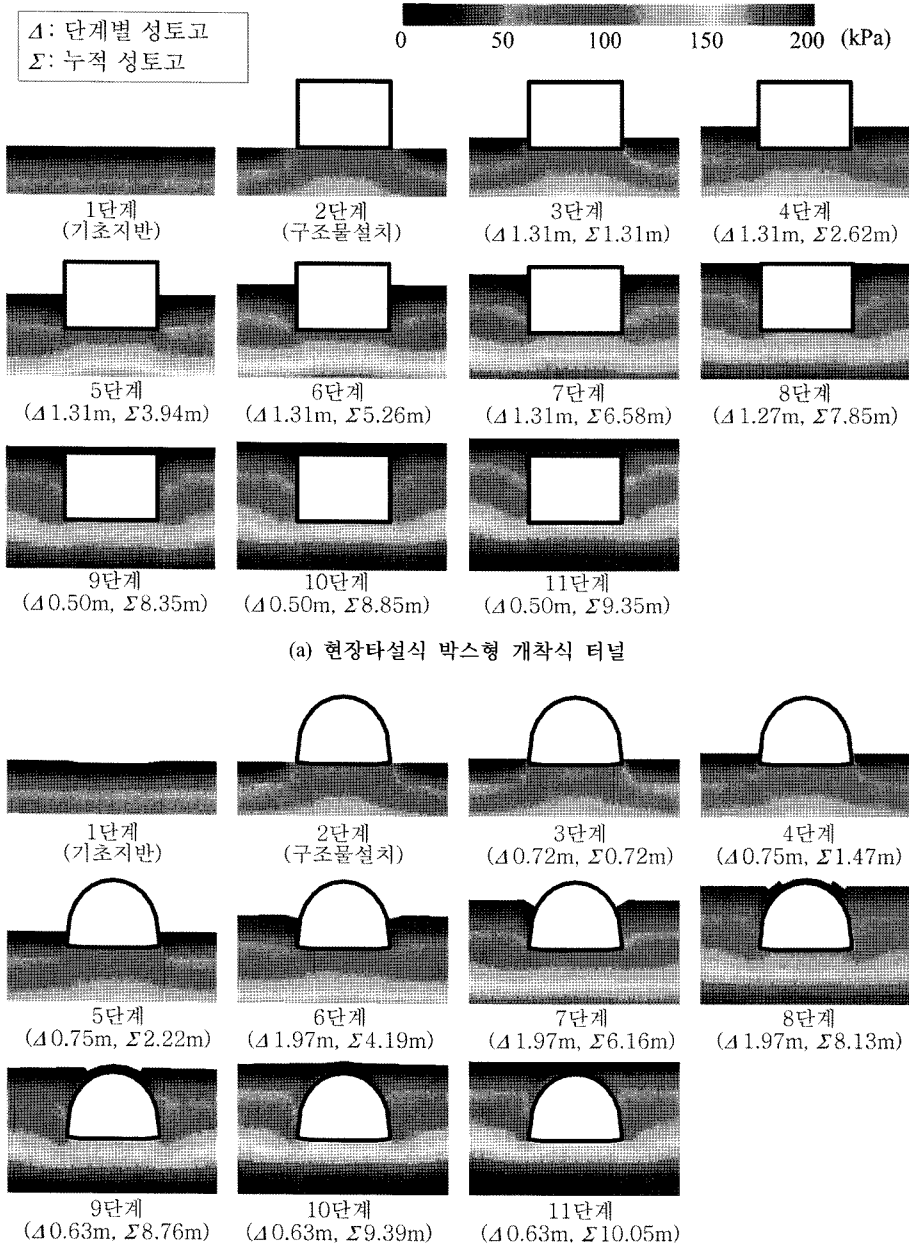


그림 10. 수치해석 요소망 및 경계조건

정적 및 동적 거동을 검토하기 위하여 제작된 DG-PILE 3D(Zhang and Kimura, 2002)를 이용하였는데, 프리캐스트 터널 구조물을 모델링하기 위하여 코드의 일부를 변환하여 사용하였다.

5.4 시공과정을 고려한 유한요소해석

시공과정을 고려한 수치해석을 실시하여 박스형 및 아치형 개착식 터널의 단면력 및 주변지반응력을 산정하였다. 수치해석은 그림 11에 나타난 바와 같이 기초지



(b) 프리캐스트 아치형 개착식 터널
그림 11. 각 시공단계별 평균주응력 분포

반상에 구조물을 설치하고, 성토를 단계별로 실시하는 등 총 11단계의 스텝으로 시뮬레이션을 수행하였다. 수치해석 기법으로는 시공과정중 증가하는 요소를 더미(dummy)요소로 설정하여, 각 단계별로 재료물성을 부여하는 방법을 사용하였다. 그림 11에 시공과정에 따른

구조물 주변 지반의 평균주응력 분포를 나타내었다. 전체적으로 지반응력은 성토하중에 비례하는 형태로 분포하며, 박스형 및 아치형 모두 터널 양 각부 외측에서 지반응력이 작게 발생하였다.

그림 12 및 그림 13에 구조물 하부에 위치한 기초지반

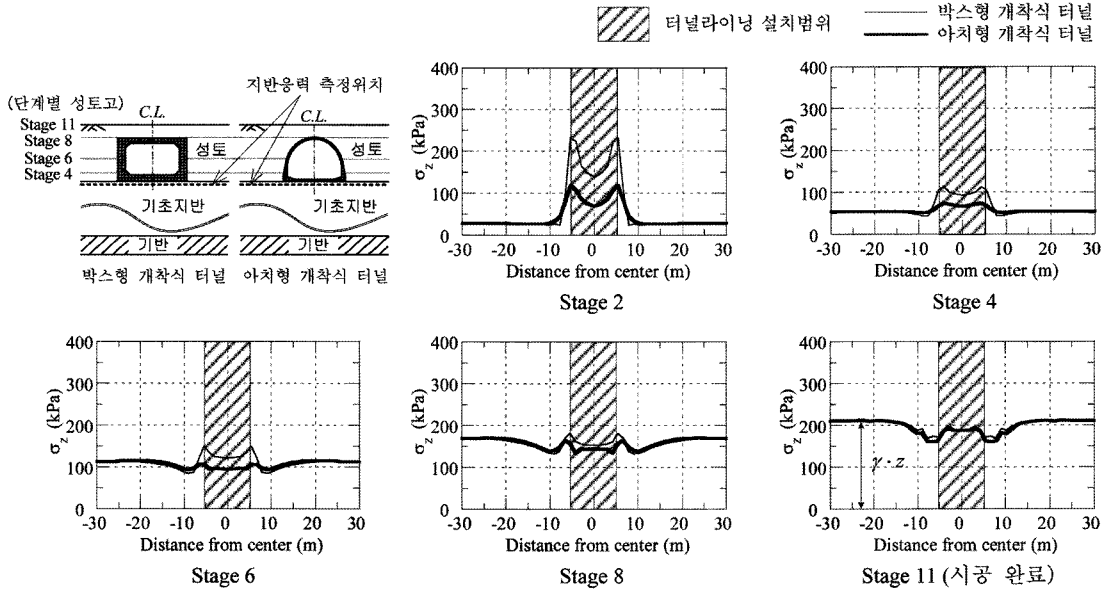


그림 12. 시공과정에 따른 기초지반의 연직응력

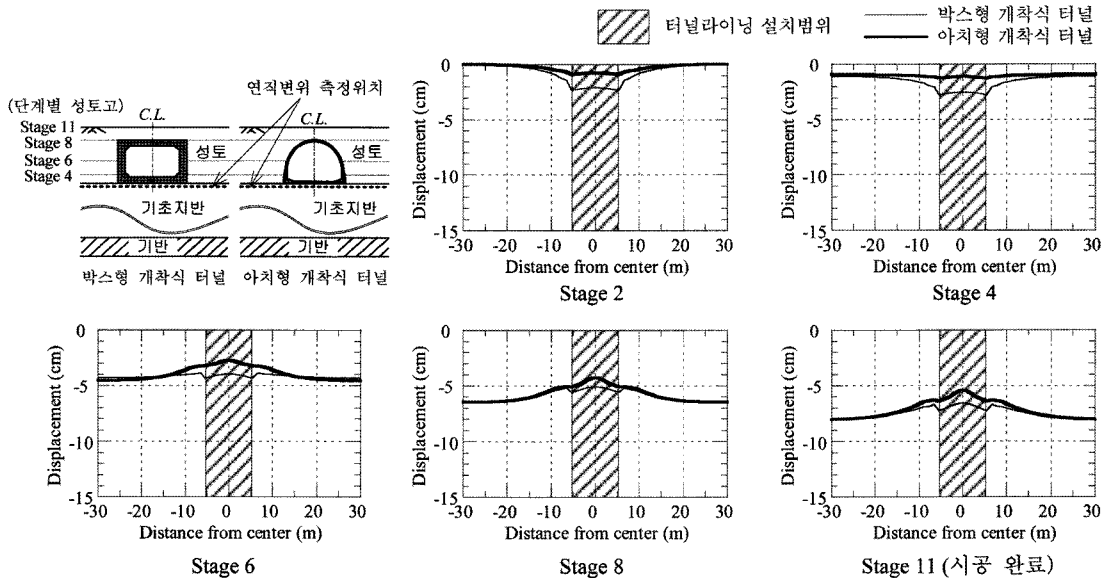
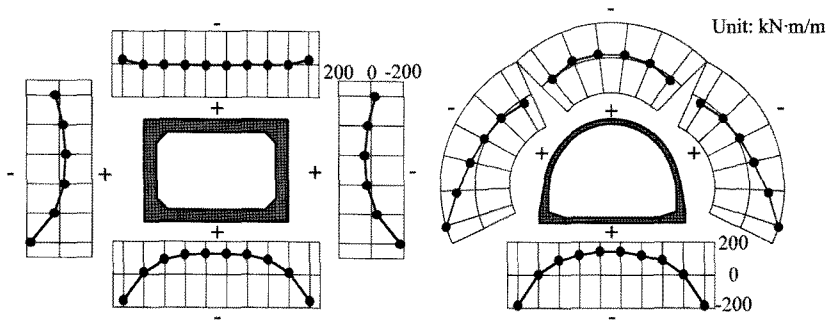


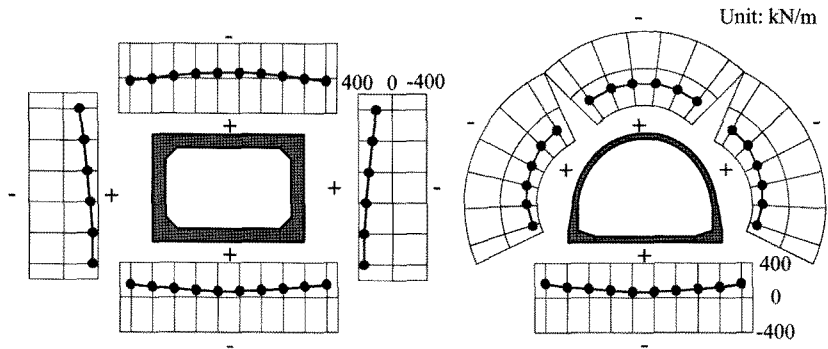
그림 13. 시공과정에 따른 기초지반의 연직변위

의 연직응력 및 연직변위 분포를 나타내었다. 박스형 개착식 터널의 중량이 아치형보다 크기 때문에 최초 구조물 설치시에는 박스형이 아치형보다 2배 이상의 응력과 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 하지만, 시공 완료 후에는 박스형과 아치형이 거의 유사한 지반응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 박스형 개착식 터널에서는 천

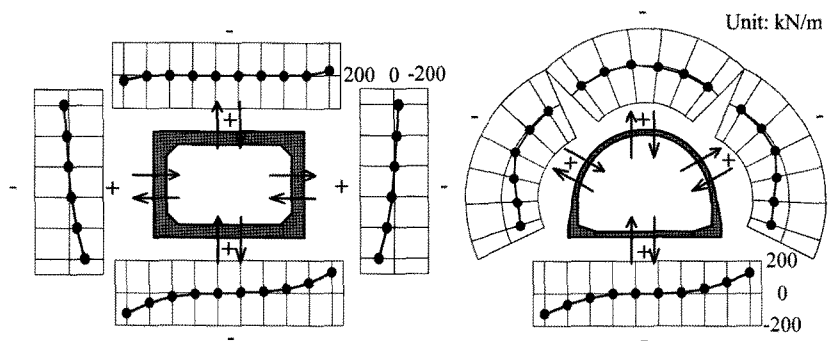
단부의 상부 성토하중만을 지지하지만, 아치형 개착식 터널에서는 어깨부 상부의 성토량을 포함하여 많은 성토하중이 작용하기 때문이다. 시공 완료 시에 박스형 및 아치형 개착식 터널의 하부지반에서는 γH 와 유사한 지반응력이 발생하였다. 이는 본 해석의 대상이 저성토고 ($H/D=0.15$)이므로 응력집중현상이 발생하지 않는 것으로



(a) 휨모멘트



(b) 축력



(c) 전단력

그림 14. 박스형 및 아치형 개착식 터널의 시공 완료 시 단면력 분포

판단되며, 이와 같은 결과는 기존 연구 결과(Kawauchi, 2002)와도 같은 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 시공 완료 후 기초지반의 침하는 박스형이 아치형 보다 1.5 cm 이상 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 2가지 케이스 모두 양측 각부에서 최대 침하가 발생하였다. 하지만, 아치형의 개착식 터널은 박스형의 개착식 터널에 비하여 중앙부에서 침하량이 작게 발생하고 나아가 각부 부근에서의 침하량의 차이가 작은 것으로 나타나 터널 구조물 하단부에 발생하는 전단력을 감소시키는 구조인 것으로 판단된다.

그림 14에 시공 완료 시에 터널 라이닝에 발생하는 단면력(휨모멘트, 축력, 전단력)을 나타내었다. 부호 기준은, 휨모멘트는 구조물 내측으로 인장발생하는 것을 (+)로, 축력은 압축을 (+), 전단력은 시계방향으로 작용하는 것을 (+)로 설정하였다. 휨모멘트, 축력, 전단력의 모든값이 좌우대칭이며, 좌우각부에서 최대 휨모멘트와 최대 전단력이 발생하는 것으로 나타나, 박스형 및 아치형 개착식 터널 모두 양측 각부에서 최대 단면력이 발생하는 것으로 확인되었다. 축력 검토 결과에서는, 박스형 개착식 터널은 상하부 부재에서는 축력이 현저하게 발생하고 양측 측벽에서만 성토고에 비례하여 발생하는 것에 반하여 아치형 개착식 터널은 아치부에서 전체적으로 일정한 축력이 발생하여 상부 성토하중을 축력으로 지지하는 기구인 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 성토고 1.5 m, 터널 내부폭 10 m의 같은 용도로 설계된 현장타설식의 박스형 개착식 터널과 프리캐스트 아치형 개착식 터널의 역학적 거동에 관하여 수치해석을 실시하여 비교/검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 최초 구조물 설치 시에는 박스형이 아치형보다 2배 이상의 기초지반 응력 및 침하가 발생하였지만, 시공 완료 시에는 박스형과 아치형이 거의 유사한 지반응력 및 침하가 발생하였다. 이는 박스형 개착식 터널에서는 천단부의 상부 성토하중만을 지지하지만, 아치형 개착식 터널에서는 어깨부 상부의 성토량까지

포함하여 하중으로 작용하여 기초지반에 가해지는 전체 하중이 유사하기 때문이다.

2. 아치형 개착식 터널은 각부에서부터 천단부까지의 모든 아치부에서 상부 성토하중을 지지하기 때문에 아치 전체적으로 축력이 유사하게 발생하였는데, 이는 아치형 개착식 터널 구조물의 단부에서 발생하는 단면력을 줄이는 원인으로 작용하였으며, 결과적으로 아치형 개착식 터널이 박스형 개착식 터널보다 단면력이 작게 발생하였다.
3. 본 연구에서는 개착식 터널 구조물의 시공과정에 따른 역학적 거동에 관하여 검토하였는데, 차후 다양한 성토고 및 지반조건에 관한 검토를 수행하여 지반과 구조물간 상호작용을 고려한 설계법 도입을 위한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구에 아낌없이 조언을 해 주신 일본 교토대학교 Kimura Makoto 교수님과 Kishida Kiyoshi 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 모듈아치 공법협회 (2002), 일본 모듈아치 매뉴얼 (일본어).
2. 배규진, 이규필 (2001), “복개 터널라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 대한터널협회 학술논문집, 터널기술, Vol. 3-2, pp. 13-22.
3. 배규진, 정형식, 이규필 (2003), “복개 터널구조물에 작용하는 편토압 고려를 위한 수치해석적 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 227-239.
4. 사단법인 일본도로협회 (2002), 도로교 시방서·동해설; V내진설계편 (일본어).
5. 이규필, 이성원, 신후성, 황재홍 (2008), “리브 보강 프리캐스트 터널 Liner의 역학적 거동특성”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 1-8.
6. 일본토목학회 (1987), 터널 표준 시방서, pp. 28-36 (일본어).
7. Adachi, T., Kimura, M., Kishida, K. and Samejima, R. (2001), “Experimental study on stability of the pre-cast concrete tunnel”, Modern Tunneling Science and Technology, Swets & Zeitlinger, pp. 985-990.

8. Adachi, T., Kimura, M., Kishida, K., Samejima, R., Iwasaki, T. and Kohno, S. (2002), "프리캐스트 터널구조의 역학적 안정성에 관한 실험적 연구", 일본 토목학회 논문집, No. 708 / III-59, pp. 25-40 (일본어).
9. Bickel, J.O., Kuesel, T.R. and King, E.H. (1996), "Tunnel engineering handbook", ITP An International Thomson Publishing Company, 2nd Ed., pp. 350-359.
10. Drucker, D.C. and Prager, W. (1952), "Soil mechanics and plasticity analysis in limit design", Quart. Appl. Math., No. 10, pp. 157-162.
11. Kawauchi, K., Adachi, T., Kimura, M. and Kishida, K. (2002), "칼버트에 작용하는 연직토압에 관한 실험적 검토", 토목학회 2002년 간사이지부 연차학술발표회 강연 개요, III-59-1 ~ III-59-2 (일본어).
12. Kimura, M., Kishida, K., Miura, S., Kikumoto, M. and Hayashi, Y. (2004), "부재강도의 축력의존성을 고려한 다연식 아치 칼버트의 지진응답해석", 제 39회 지반공학 연구발표회 강연집, pp. 1693-1694 (일본어).
13. N차 이야기 편집위원회 (2004), 개정 N차 이야기, 이공도서출판 (일본어).
14. Zhang, F. and Kimura, M. (2002), "Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation", Soils and Foundations, Vol. 42, No. 3, pp. 72-92.

접수일(2009.6.22), 수정일(2009.7.6), 게재확정일(2009.7.24)