

리브 보강 프리캐스트 터널의 내진 해석 및 동적거동 특성 파악

송기일¹, 정성훈², 조계춘^{3*}

Seismic analysis and dynamic behavior characterization of rib-reinforced pre-cast tunnels

Ki-Il Song, Sung-Hoon Jung, Gye-Chun Cho

Abstract The novel cut-and-cover tunnel construction method using rib-reinforced pre-cast arch segments has been recently developed and applied for practice to secure a structural stability of high covering and wide width section tunnels. Cut-and-cover tunnels are usually damaged by the seismic behavior of backfill grounds in case of a low covering condition. Seismic analyses are performed in this study to characterize the dynamic behavior of rib-reinforced pre-cast arch cut-and-cover tunnels. Seismic analyses for 2 lane cast-in-place and rib-reinforced pre-cast arch cut-and-cover tunnels are carried out by using the commercial FDM program (FLAC2D) considering various field conditions such as the covering height, embankment slope, and excavation slope. It can be concluded that the amplification of seismic wave is reduced due to an increase in the structural stiffness induced by rib-reinforcement. The results show that the rib-reinforced pre-cast arch cut-and-cover tunnels are more effective against the seismic loading, compared to the cast-in-place cut-and-cover tunnels.

Keywords: Rib-reinforcement, pre-cast arch cut-and-cover tunnel, seismic analysis, frequency domain analysis

요 지 최근 고성토 및 장지간 개착식 터널구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 리브 보강형 프리캐스트 아치 세그먼트를 이용한 개착식 터널공법이 연구 개발되어 시공되고 있다. 이러한 개착식 터널 구조물은 비개착식 터널 구조물에 비해 토피고가 상대적으로 작기 때문에 지진동에 의한 뒤채움 지반의 동적 거동에 의한 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 리브 보강형 프리캐스트 아치 개착 터널에 대한 내진 해석을 수행하여 지진동에 대한 리브 보강의 효과와 개착 터널의 동적 거동 특성을 분석하고자 하였다. FLAC2D를 이용하여 2차로 규모의 일반 현장타설 복개 아치 터널, 리브 보강형 프리캐스트 아치 복개 터널에 대한 동적 내진해석을 수행하였다. 또한 토피고, 굴착사면, 성토사면 조건에 따른 동적 거동특성을 비교 분석하였다. 리브 보강으로 인한 터널 구조물의 강성증가는 지표면으로 전달되는 지진동의 증폭 현상을 감소시키는 것으로 평가된다. 합리적인 동적 내진해석을 통해 리브 보강형 프리캐스트 아치 복개 터널이 일반 현장 타설식 복개 터널보다 동적 하중에 대하여 보다 효과적임을 확인하였다.

주요어: 리브 보강, 프리캐스트 아치 개착 터널, 내진해석, 주파수 영역 해석

1. 서 론

개착식 터널 구조물의 시공법은 크게 현장 타설식과 프리캐스트 세그먼트를 이용한 조립식으로 구분할 수 있다. 현장 타설 콘크리트 라이닝을 이용한 개착식 터널 구조물은 상당한 시공기간과 까다로운 품질관리 절차를 요구하여 시공성과 경제성 측면에서 문제점을 안고 있다. 반면 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착 터널구조물의 조립식 시공법은 일괄적으로 공장에서 제작된 프

리캐스트 세그먼트를 현장에서 조립함으로써 엄격한 품질 관리가 가능하며 공정의 단순화를 통한 공기단축 및 경제성을 확보할 수 있다(이규필 등, 2008). 최근 국내외에서 이러한 프리캐스트 세그먼트를 이용한 박스 구조물 및 개착식 터널구조물의 시공기술을 발전시키고자 하는 연구가 수행되고 있으며 시공사례도 점차 증가하고 있는 추세이다(Twine, 2004).

최근 고성토 및 장지간 개착식 터널구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 리브 보강형 프리캐스트 아치 세그먼트를 이용한 개착식 터널공법이 연구 개발 및 시공되고 있다. 이규필 등(2008)은 리브 보강에 의한 프리캐스트 아치 개착 터널구조물의 역학적 거동 특성을 대형 실내시험을 통해 분석하고자 하였다. 리브 보강에

¹정희원, UiTM 토목공학과 조교수

²KAIST 건설 및 환경공학과 대학원생

³정희원, KAIST 건설 및 환경공학과 부교수

*교신저자: 조계춘 (E-mail: gyechun@kaist.edu)

따라 터널 라이닝의 극한하중 및 균열발생하중이 일반적인 세그먼트 라이닝에 비해 상당히 증가되는 것으로 연구결과 나타났으며 공용 정적 하중에 대해 안정성을 확보하고 있는 것으로 보고되고 있다.

현재까지 국내 지진은 작은 규모로 드물게 발생되고 있지만 점차 그 규모와 빈도가 증가하고 있으며, 최근 일본 및 중국 등과 같은 주변국가에서 대규모의 지진이 지속적으로 발생되고 있으며 그에 따른 피해 규모도 점차 증가되고 있다. 지상구조물과 더불어 지하구조물의 내진 성능에 대한 평가 및 해석의 필요성이 대두되고 있다(최승호 등, 2009). 개착식 터널 구조물은 비개착식 터널 구조물에 비해 토피고가 상대적으로 작기 때문에 지진동에 의한 뒤채움 지반의 동적 거동에 의한 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Nishiyama *et al.*, 1999). 본 연구에서는 리브 보강형 프리캐스트 아치 개착 터널에 대한 내진 해석을 수행하여 지진동에 대한 리브 보강의 효과와 개착 터널의 동적 거동 특성을 분석하고자 하였다.

리브로 보강된 프리캐스트 아치 세그먼트 조립식 복개 터널의 내진에 대한 안정성 분석을 위하여 일반 현장타설 개착 터널과 리브 보강형 프리캐스트 세그먼트 아치 개착 터널에 대한 내진해석을 각각 수행하였다. FLAC2D를 이용하여 2차로 규모의 복개 터널에 대한 동적 내진해석을 수행하였다. 더불어 토피고의 영향, 굴착사면의 영향, 그리고 성토사면의 영향에 대하여 리브 보강 유무에 따른 복개터널의 거동특성을 비교 분석하였다.

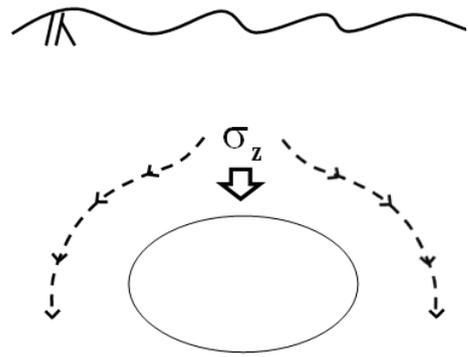
2. 리브 보강형 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널

2.1 개착식 터널의 정적 및 동적 거동 특성

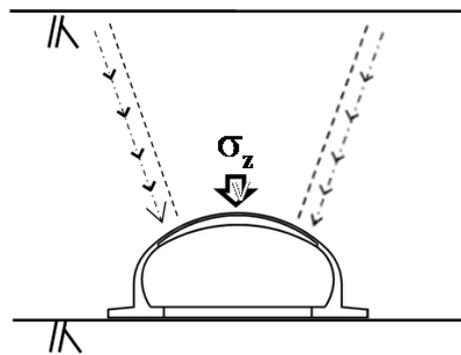
개착식 터널의 정적 거동특성은 뒤채움재의 거동에 의해 영향을 받는다. 그림 1(a)와 같이 굴착식 터널은 굴착을 하면서 터널 상부에서의 하중이 접선방향으로 응력재분배가 발생하는 위로 볼록한 아치(Convex Arch) 현상이 나타나지만 개착식 터널의 경우는 그림 1(b)와 같이 상부 하중으로 인해 터널 상부의 지반이 아래로 침하하게 되어 상대적으로 침하가 적은 지반에서 전단력으로 하중을 경감시켜 주는 아래로 볼록한 아치(Inverted Arch)를 형성한다.

개착식 터널구조물은 뒤채움재 보다 강성이 크기 때문에, 일반적으로 되메움 과정에 있어서 구조물 주변부에서의 침하가 구조물 상부에서의 침하보다 크게 발생하며, 상대 변위에 의해 개착식 구조물 천단부에서는 토피하중보다 큰 연직 하중이 작용하는 역학적 특성을 나타낸다.

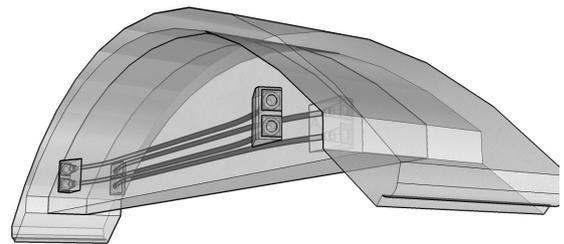
개착식 터널의 정적 거동 특성에 관한 연구로는 터널



(a) 굴착식 터널



(b) 개착식 터널



(c) 리브 보강 프리캐스트 세그먼트

그림 1. 굴착식 및 개착식 터널의 아칭현상과 리브 보강 프리캐스트 세그먼트

라이닝과 뒷채움 지반 사이에서 발생하는 상호작용 및 터널 라이닝과 굴착사면 사이에서 발생하는 벽면마찰과 토압의 거동, 뒷채움 지반과 라이닝 그리고 굴착사면과 뒷채움 지반사이에 발생하는 아칭현상의 변화와 토압의 재분배에 대한 연구가 수치해석적 기법과 원심모형 시험을 통한 실험적 방법을 통하여 국내 연구진에 의해 수행되었다(이명욱 등, 2004; 유건선, 1997).

정형식 등(2001)은 개착식 터널의 동적 거동 특성에 관한 연구를 진동대를 이용하여 실험적으로 연구하였으며, 토피고, 원지반 굴착 사면의 경사 등이 개착식 터널의 동적 거동에 미치는 영향에 대하여 연구 발표하였다. 일반적으로 터널의 토피고가 증가할수록 뒷채움재의 구속효과에 의해 지반응력이 증가하게 되고 진동감쇠가 발생하게 되므로 지진하중이 터널에 미치는 영향은 감소되는 것으로 나타난다. 그러나 성토고가 증가함에 따라 개착식 구조물에 작용하는 토압도 증가하게 되며, 동적 하중에 의한 뒷채움 사질토의 액상화가 발생하는 경우 심각한 구조적 안정성 문제를 야기할 수 있는 것으로 확인되었다.

2.2 리브 보강형 프리캐스트 아치 개착 터널의 정적 거동 특성

현장 타설식 콘크리트 라이닝을 프리캐스트 세그먼트로 분할하여 조립하는 경우 세그먼트간의 연결부가 내부하로 거동하게 되므로 동일 하중에 대한 휨모멘트 감소를 유도할 수 있으며 그에 따른 세그먼트 부재 단면의 감소와 부재의 경량화를 기대할 수 있다(배규진 등, 2003). 고성토 및 장기간 단면의 경우 세그먼트 두께의 증가로 인해 시공성이 저하되고, 세그먼트 연결부의 전단변위 및 축력 등의 발생으로 인해 구조적 안정성 확보 등의 문제점이 있다. 이를 효과적으로 극복하기 위하여 최근 아치부 세그먼트를 리브로 보강하여 구조물의 휨강성을 증대시키고자 하는 시공기법이 개발 소개되고 있다(이규필 등, 2008). 대표적인 리브 보강 프리캐스트 세그먼트의 조감도는 그림 1(c)와 같다(진성토진, 2007).

축소모형 시험을 통해 아치부의 프리캐스트 세그먼트를 리브로 보강하는 경우 균열 발생하중 및 파괴시의 극한하중이 리브가 없는 일반적인 프리캐스트 세그먼트에 비해 상당히 증가하는 것으로 나타나 강성적인 측면에서는 충분한 안전성을 확보한 것으로 평가되었으며,

고성토 및 장기간 단면에서의 적용성에 대한 긍정정인 활용성을 나타내었다(이규필 등, 2008). 구조물의 휨강성 증가는 동적 하중에 대한 저항 증가를 의미하므로 구조물 내에 오히려 더 큰 응력을 야기할 수 있기 때문에 동적하중에 의한 리브 보강형 프리캐스트 아치 개착식 터널의 동적 거동 특성에 대한 연구도 추가적으로 요구된다.

3. 리브 보강형 프리캐스트 아치 개착 터널의 내진 해석

3.1 동적 해석법

지하구조물의 내진해석법에는 등가정적해석법, 응답변위법, 동적해석법 등이 있지만, 본 연구에서는 동적해석법을 중심으로 연구를 수행하였다. 동적해석법은 구조물 및 주변지반을 적절히 모델링하고 해석대상의 내부 또는 경계면에 시간이력 지진운동을 입력하여 지반 및 구조물의 거동 그리고 지보재에 발생하는 단면력 등을 구하는 방법이다. 동적해석법은 주로 구조물의 형상이나 지반조건이 복잡한 경우에 실시하는 경우가 많으며 응답변위법에 의한 계산 결과를 확인하거나 다층지반인 경우, 응답변위법의 적용에 필요한 지반의 자유장운동을 파악하기 위해서 적용되기도 한다.

일반적으로 터널과 같은 지하구조물의 동적해석은 정적 해석결과와 연계되어 수행된다. 즉 원지반을 모델링하고 터널 굴착과 지보재 설치에 따른 지반의 변형 및 지보재에 발생하는 단면력 등에 대한 안정해석을 실시한 후, 이를 초기상태로 하여 지진하중을 재하하고 발생하는 변형 및 단면력에 대한 안정해석을 실시하거나 정적인 해석과 별도로 지진하중에 의한 해석결과만을 파악하고 이를 정적해석결과와 조합하여 설계에 반영한다.

3.2 해석 프로그램 및 해석 조건

본 연구에서는 FLAC2D Ver. 4.0을 이용하여 내진해석을 수행하였다. 유한차분법은 아주 짧은 시간범주 동안 외적 작용이 작용점에 이웃한 절점에만 영향을 미친다는 explicit approach의 개념을 기반으로 모델에 대해 개별 절점에서 독립된 해를 얻어 전체 시스템의 해를 획득한다. FLAC은 유한차분 해석의 대표적인 프로그램이며 시간의존적 해석인 동적 해석에 보다 효과적이다.

터널굴착 등에 대한 정적 해석이 완료된 상태가 동적 해석의 초기조건이 되는 경우에는 지진하중을 재하하기 전에 경계조건의 전환이 필요하다. 정적해석시 설정된 측면의 수평방향에 대한 고정경계조건은 굴착에 따른 응력 및 변형에 영향을 미치지 않는 위치에 수치해석 시간의 단축 등을 위해 설정된 것이며 실제의 지반 조건을 나타낸 것은 아니다. 동적해석시에는 경계면에 도달한 지진파가 고정경계조건 때문에 변형이 억제되고 또한 입사된 지진파의 굴절 및 반사 현상이 발생하게 되어 실제거동과는 다른 해석결과를 초래하게 된다. 그러므로 평면파의 형태로 전파되는 지진파에 의한 측면에서의 변형을 파악하고 경계면에 도달한 파를 흡수하여 지진파의 반사현상을 방지하기 위한 경계조건이 필요하며 이를 위해 FLAC에서는 자유장 경계조건이 사용된다. 자유장 경계조건은 일종의 경계요소법의 수단을 해석영역의 측면에만 적용한 것으로 이전에 설정되어 있던 고정경계조건은 해제가 되며 평면지진파에 의한 지반의 자유장 운동 즉, 같은 깊이에 있는 모든 절점의 지반운동이 동일하게 계산된다. 본 연구에서는 측면 경계조건은 자유장 경계조건을 적용하였고, 상부 경계조건은 반공간(Half Space)을 적용하였으며, 하부 경계조건으로는 감쇠 경계조건을 적용하였다.

3.3 감쇠비

동적해석 수행시 모델의 경계면에서 발생하는 지진파의 흡수와 달리 해석 영역내에서 지반운동의 형상에 따른 기하학적인 감쇠, 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠에 의해 지진파가 전파되면서 진폭이 감소하는 현상을 적절히 고려할 필요가 있다. 기하학적인 감쇠는 응력파가 구형으로 전파됨으로 인한 진폭 감소현상으로 일반적으로 해석프로그램 내에서 별도의 설정 없이 감쇠 효과가 반영이 되며 진원지로부터의 거리가 먼 지진파는 평면파의 형태를 보이는 경우가 많기 때문에 동적해석시 기하학적 감쇠현상이 나타나는 경우는 거의 없다. 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠현상은 지진파가 전파되면서 열 또는 마찰 등에 의해 발생하는 에너지의 손실현상으로 재료감쇠를 고려하지 않으면 매질내에서 자유진동이 발생하게 되고 지진파의 전파거리에 따른 감쇠 현상을 고려할 수 없기 때문에 합리적인 해석결과를 얻을 수 없다.

연속체역학에 근거한 동적해석 시, 시스템의 자유진동을 감쇠시키고 거리에 따른 감쇠현상을 고려하기 위해 일반적으로 레일리 감쇠비가 사용되며, 감쇠정도를 나타내는 감쇠행렬은 질량에 비례하는 성분과 강성에 비례하는 성분으로 다음과 같이 구성된다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

α : 질량에 비례하는 감쇠계수, β : 강성에 비례하는 감쇠계수

다중모드 시스템에서의 한계감쇠비와 감쇠정수와의 관계는 다음과 같다.

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (2)$$

ω_i : 모드 i에서의 위상각 주파수, ξ_i : 모드 i에서의 한계 감쇠비

질량비례감쇠 α 는 주파수에 반비례하여 작아지고, 강성비례감쇠 β 는 주파수에 비례하여 커진다. 탄성이론에 기초한 파전파에서는 α 와 β 를 모두 구하는 것이 어렵기 때문에 β 를 0에 가까운 값으로 가정하고 α 를 계산한다. 미소변형에서 감쇠비는 모래의 경우 보통 6%, 점토의 경우 4~7% 이므로(Howie and Amini, 2005), 본 연구에서는 6%의 레일리 감쇠비로 선정하였다.

3.4 입력 지진파

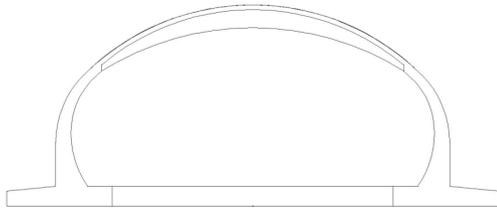
입력파는 지구물리학자 Norman H. Ricker(1896~1980)에 의해 이론적으로 정립된 Ricker 파형 요소를 사용하였으며 그 일반적인 식은 다음과 같다(Ricker, 1945).

$$Ricker(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[\frac{6(t-t_0)^2}{b^2} - \frac{1}{2} \right] \times e^{-\frac{6(t-t_0)^2}{b^2}} \quad (3)$$

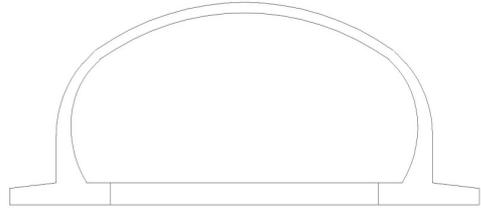
여기서, I , b , t_0 는 Ricker wave의 형태를 결정해주는 상수이다. Ricker 파형요소의 특징은 2가지가 있다. 첫째, 스파이크 형태의 펄스는 음원에서 멀어지면서 그 형태가 변하는데 이는 매질의 비탄성적 성질 때문에 스파이

표 1. 수치해석을 위한 지반 물성치(한국건설기술연구원, 2002)

	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	마찰각 (°)	단위중량 (kN/m ³)	토압계수	Model
경암	1.9E7	0.27	1400	37	27	1	Mohr-Coulomb
풍화암	3.9E5	0.3	183	33	23	1	
성토체	3.5E4	0.35	10	30	19	0.5	



(a) 리브 보강형 프리캐스트아치 복개 터널



(b) 현장 타설식 복개 터널

그림 4. 리브 보강 유무에 따른 대표 터널 단면

1:1.0로 가정하였으며, 이격거리는 그림 3에 나타난 바와 같이 모든 해석 경우에 동일하게 2 m로 하였다.

내진 해석을 위한 원지반의 지반 물성치는 한국건설기술연구원(2002)의 연구결과를 토대로 산정하였다. 성토체의 지반 물성치는 성토시 다짐도 및 성토체의 심도 변화 등에 따라 변화하나, 수치해석시 상기 특성을 고려하기에 많은 어려움이 있다. 따라서, 성토체의 지반 물성치 산정을 위하여 동일한 조건에 대하여 복개터널구조물의 해석에 널리 적용되고 있는 구조공학적 및 지반공학 적 모델링 기법을 이용한 수치해석을 실시하고, 두 해석기법에 의한 콘크리트 라이닝에 발생하는 변위 및 부재력 등을 비교하여 유사한 결과를 보이는 성토체 지반 물성치를 원지반의 물성치로 선정하였다.

3.6 프리캐스트 세그먼트의 단면 물성치 산정

본 연구에서 초점이 되는 리브 보강 유무에 따른 터널의 동적 거동특성을 분석하기 위하여 리브가 보강되어 있는 리브 보강형 프리캐스트 아치 복개 터널단면과 보강이 되어 있지 않은 현장 타설식 복개 터널 단면에 대한 적절한 물성치 산정이 필요하다. 두 대표 단면의 형상은 그림 4와 같다.

해석에 사용된 프로그램은 2차원이므로 실제 3차원 터널 단면을 고려하여 동적 해석에 적용하기 위해서는 단순화해야 한다. 리브 보강부분의 물성치는 부피비로

표 2. 적용된 철근에 대한 단면 특성치

	리브를 제외한 부분	리브부분
종류	D25	D29
개수	50	15
한 개의 단면적(cm ²)	5.067	6.424
단위 중량(kN/m ³)	7.855	7.846

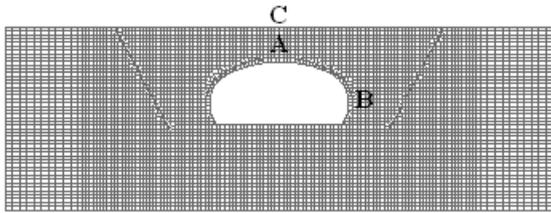
가중한 등가 탄성계수 및 등가 단위중량을 다음 식을 통하여 구하였다.

$$E_{eq} = \frac{E_c \cdot A_c + E_s \cdot A_s}{A_t} \quad (6)$$

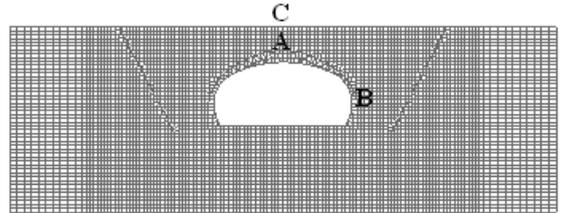
여기서, 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 24.42 GPa, 철근의 탄성계수(E_s)는 250 GPa로 가정하였으며, 등가 환산 물성치 계산을 위한 철근의 단면 특성치는 표 2와 같다. 리브가 보강되어 있는 프리캐스트 개착 터널의 전체 단면적은 53.35 m² 이며, 리브부분의 단면적은 12.09 m² 이다. 리브가 보강되어 있지 않은 일반 현장 타설 개착 터널 단면의 전체 단면적은 46.545 m² 이며 식 (6)을 이용하여 각각의 요소 부분의 등가물성치를 표 3과 같이 구할 수 있다. 본 연구에서는 리브가 보강된 경우와 보강되어 있지 않은 경우의 등가환산직경의 평균값인 8 m를 등가환산직경으로 고려하여 토피고를 계산하였다.

표 3. 등가 물성치

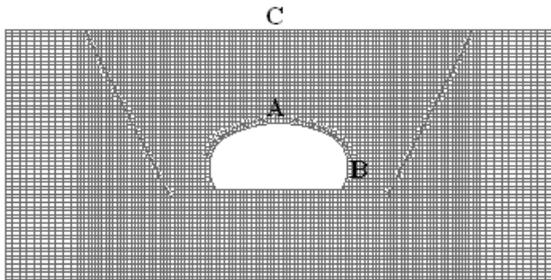
	리브 보강형 프리캐스트 아치 개착터널		현장 타설식 개착 터널
	콘크리트 부분	리브 부분	전체 단면
등가탄성계수(GPa)	24.51	24.56	24.51
등가단위중량(kN/m ³)	22.59	22.61	22.59
등가환산직경(m)	7.7		8.24



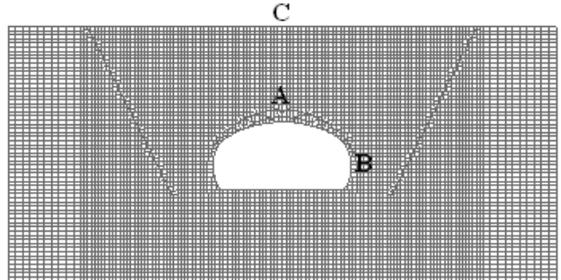
(a) 리브 보강이 없는 경우: 토피고 0.5D



(b) 리브 보강된 경우: 토피고 0.5D



(c) 리브 보강이 없는 경우: 토피고 1.25D



(d) 리브 보강된 경우: 토피고 1.25D

그림 5. 토피고의 영향 분석을 위한 해석 모델

4. 수치해석 결과 분석

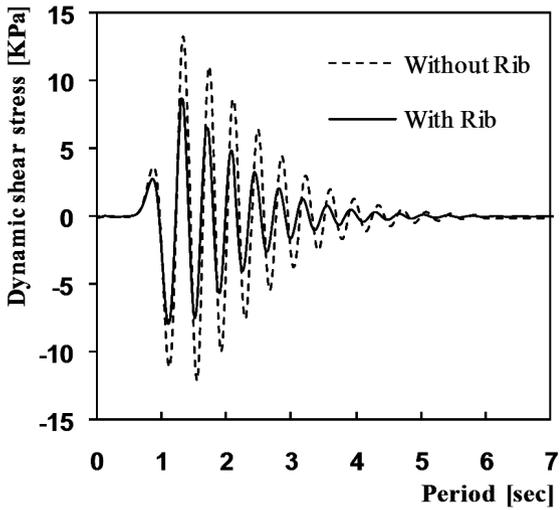
본 연구에서는 리브 보강에 따른 개착 터널의 지진동에 의한 동적 거동 특성을 획득하고, 토피고의 영향, 성토사면의 영향, 굴착사면 구배의 영향 등을 종합적으로 분석하고자 동적 내진 해석을 수행하였고, 터널의 천단부 (A)와 측벽부 (B)에서 동적전단응력, 지표면 (C)에서 가속도를 측정하여 그 특성을 비교·분석하였다.

4.1 토피고의 영향분석

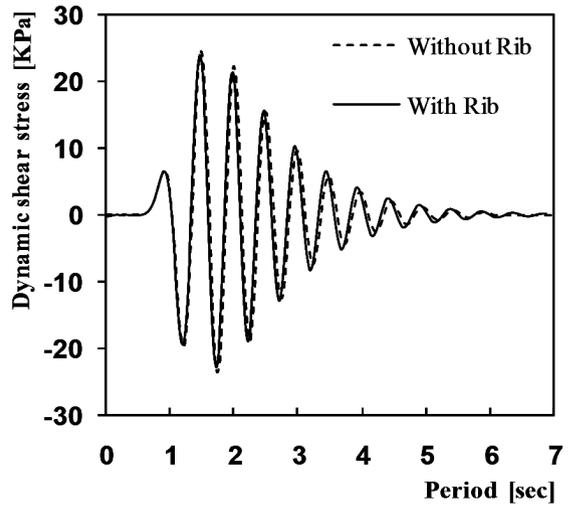
터널과 같은 지중구조물에 지진이 발생할 경우, 앞서 언급한 바와 같이 지상 구조물과는 다른 응답특성을 보인다. 즉, 터널은 지상구조물과 달리 구조물 주변이 토사 또는 암반으로 둘러싸여 지진으로 인해 생성된 구조물

의 진동이 주변지반의 구속효과로 인한 감쇠효과가 지상구조물보다는 크게 작용한다. 토피고에 따른 진동 특성을 분석하기 위하여 굴착사면 원지반을 구배가 1:0.5인 풍화암 조건으로 설정하였으며, 0.5D와 1.25D(D: 등가환산직경)의 토피고에 대하여 해석을 수행하였으며 해석을 위해 구축된 모델은 그림 5와 같다.

그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 굴착사면이 상대적으로 완만한 조건(구배가 1:0.5)에서 토피고가 증가할수록 천단부와 측벽부의 동적전단응력이 증가하였는데(천단부: 14 kPa에서 25 kPa로 증가, 측벽부: 7 kPa에서 9 kPa로 증가) 이는 기존의 연구결과의 경향과 적절히 부합하고 있다. 또한, 토피고가 작은 경우 리브 보강으로 인해 터널 자체의 강성이 증가하여 동적전단응력이 상당히 감소하였으나(천단부: 14 kPa에서 9 kPa로 감소, 측벽부: 7 kPa에

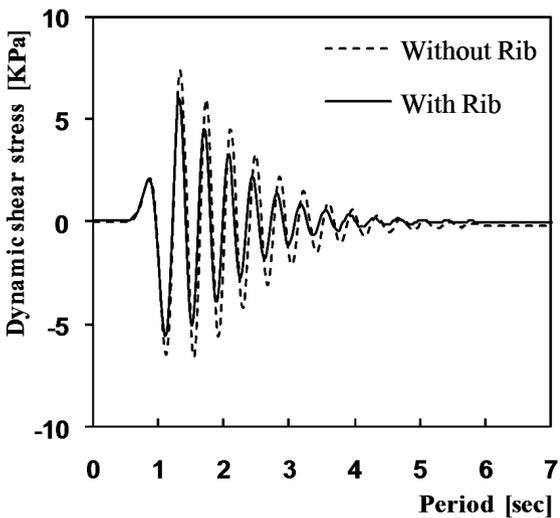


(a) 0.5D

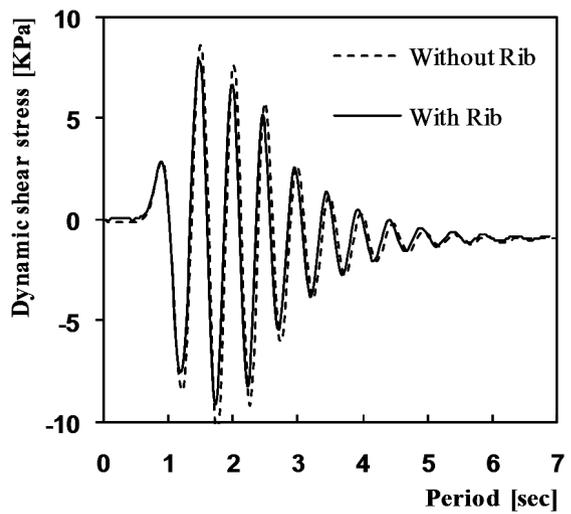


(b) 1.25D

그림 6. 천단부(A)에서의 동적전단응력 변화(굴착사면 구배 1:0.5, 이격거리 2 m)



(a) 0.5D



(b) 1.25D

그림 7. 측벽부 (B)에서의 동적전단응력 변화(굴착사면 구배 1:0.5, 이격거리 2 m)

서 5.5 kPa로 감소), 토피고가 증가할수록 리브의 영향은 상대적으로 작아지는 것으로 나타났다(천단부: 25 kPa에서 24 kPa로 감소, 측벽부: 9 kPa에서 8 kPa로 감소).

지반에 가해진 입력파가 커지는 지반 증폭의 경향을 정량적으로 확인하기 위하여, 입력 지진파로 지표면에서 획득된 지반응답을 정규화하였다.

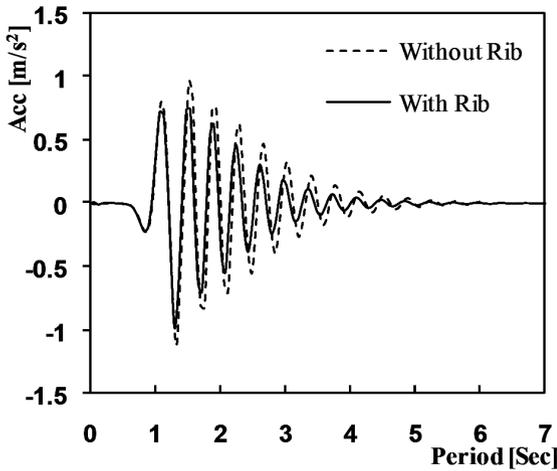
Normalized Autospectral density

$$= \frac{\text{Autospectral density at Surface}}{\text{Autospectral density at Bottom}} \quad (7)$$

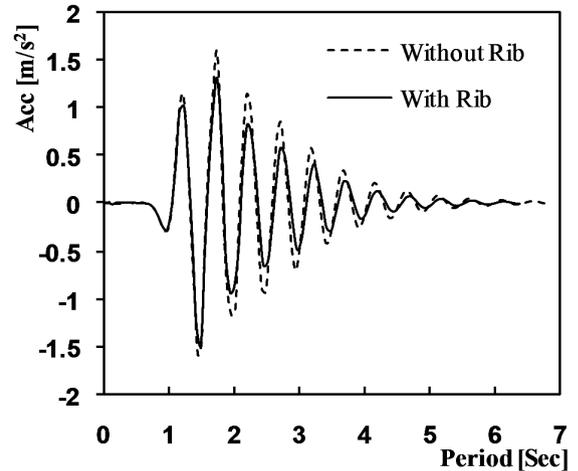
그림 8은 지표면에서 획득한 시간 영역 및 주파수 영역의 가속도 응답 특성이다. 토피고가 증가함에 따라 고

유 진동수가 감소하였으며(리브가 없는 경우: 2.67 Hz에서 1.92 Hz로 감소, 리브가 있는 경우: 2.67 Hz에서 2.17 Hz로 감소), 정규화 자기스펙트럼 밀도는 증가함을 알 수 있다(리브가 없는 경우: 92에서 267로 증가, 리브가 있는 경우: 52에서 225로 증가). 이는 토피고가 증가함에 따라 지반 증폭도 증가하는 것을 의미한다. 굴착사면이 완만한 조건에서 토피고가 증가함에 따라 성토체의 구속응력이 지진동으로 인하여 감소하기 때문에 이러한 특성이 나타난다. 저토피고 조건(0.5D)에서는

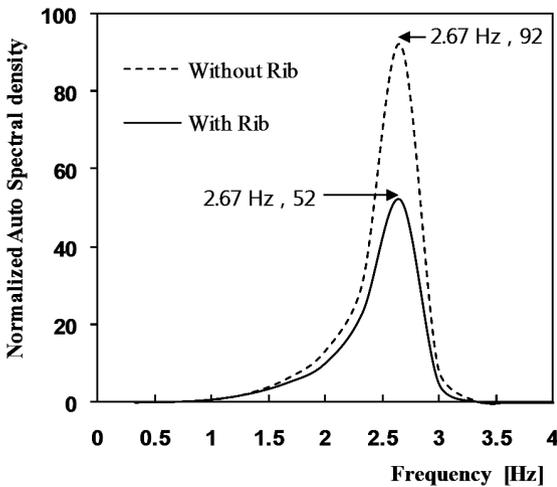
리브로 보강된 경우나 리브가 없는 경우 2.67 Hz의 동일한 고유진동수가 나타나나 토피고가 증가하는 경우(1.25D) 리브로 보강되면 고유진동수는 커지는 것으로 나타난다(리브가 없는 경우: 1.92 Hz, 리브가 있는 경우: 2.17 Hz). 토피고가 작은 경우 구속효과가 작아 리브의 보강 유무에 관계없이 지표면에서는 동일한 고유진동수가 나타난다. 한편, 토피고가 증가하면 구속효과도 증가되고 그에 따른 감쇠효과도 증가된다. 리브가 있는 경우 터널의 강성이 리브가 없는 경우보다 크므로 고유진



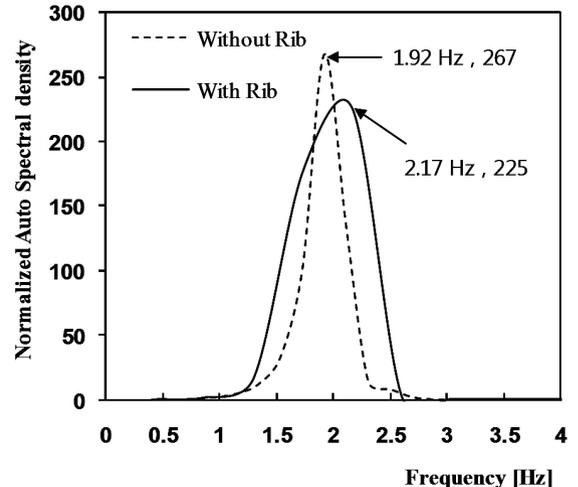
(a) 0.5D 에서의 시간 영역 응답



(b) 1.25D 에서의 시간 영역 응답



(c) 0.5D 에서의 주파수 영역 응답



(d) 1.25D 에서의 주파수 영역 응답

그림 8. 지표면(C)에서의 시간 및 주파수 영역 응답 가속도 특성

www.kci.go.kr

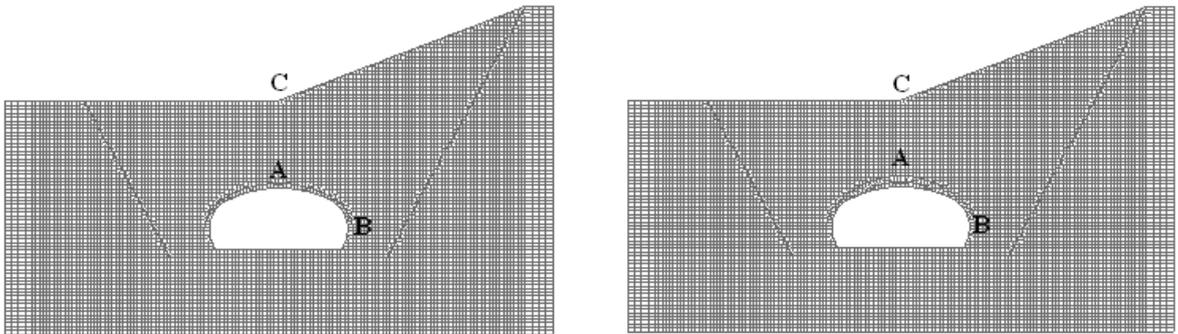
동수가 더 크게 나타난다. 그리고, 토피고와는 상관없이 리브로 보강된 세그먼트를 적용한 개착 터널의 경우 정규화 자기 스펙트럼 밀도가 리브가 없는 경우 보다 감소하는 특성을 나타냈다(토피고 0.5D: 92에서 52로 감소, 토피고 1.25D: 267에서 225로 감소). 즉, 리브 보강으로 인하여 지표면에서의 지반 증폭이 감소한다.

4.2 성토사면 영향분석

성토사면으로 인해 발생하는 편토압이 리브 보강 유무에 따른 개착 터널에 미치는 영향을 분석하고자 하였

다. 굴착사면 원지반은 풍화암(구배는 1:0.5)으로 가정하였으며, 토피고는 1.25D, 성토사면의 구배는 20°, 성토사면 설치 시작 위치는 그림 9와 같이 라이닝 천단부로 모델하였다.

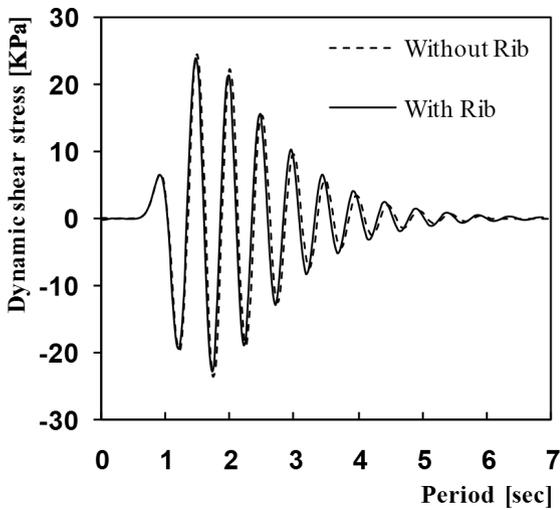
그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 성토사면이 있는 경우가 동적전단응력이 다소 작게 발생하였다(리브가 없는 경우 천단부: 25 kPa에서 21 kPa로 감소, 측벽부: 9 kPa에서 3 kPa로 감소). 이는 지진으로 인하여 복개터널 주변을 둘러싸고 있는 터널 우측부의 성토량이 증가하여 주변 지반으로 빠져나가는 에너지 감소, 즉



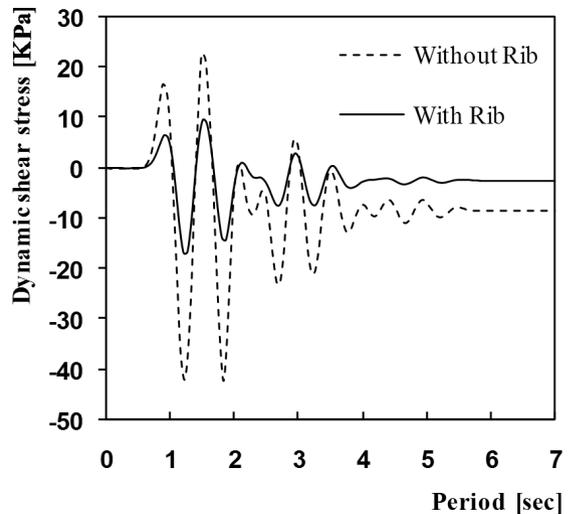
(a) 리브 보강이 없는 경우

(b) 리브 보강된 경우

그림 9. 성토사면 영향분석을 위한 해석 모델(성토사면의 구배 20°)

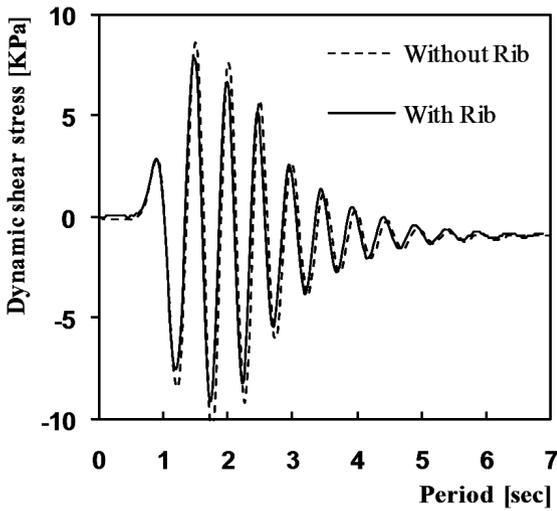


(a) 성토사면이 없는 경우

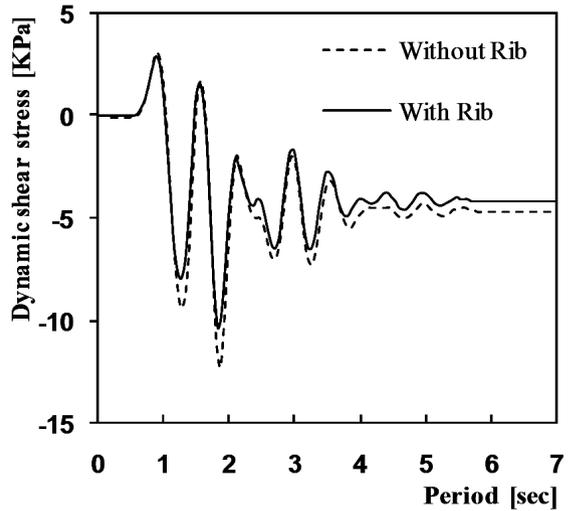


(b) 성토사면이 있는 경우

그림 10. 천단부 (A)에서의 동적 전단응력 변화(굴착사면 구배 1:0.5, 이격거리 2 m, 토피고 1.25D)



(a) 성토사면이 없는 경우



(b) 성토사면이 있는 경우

그림 11. 측벽부 (B)에서의 동적 전단응력 변화(굴착사면 구배 1:0.5, 이격거리 2 m, 토피고 1.25D)

발산감쇠 효과 때문이다. 또한, 성토사면이 있는 경우 리브 보강으로 인해 터널의 강성이 증가하여 천단부에서 동적전단응력이 21 kPa에서 10 kPa로 상당히 감소되었다.

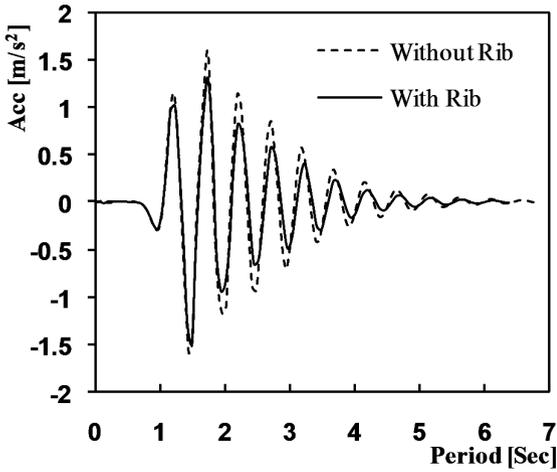
성토 사면과 지표면과의 교점에서 시간 영역 가속도 응답을 획득하고 이를 푸리에 변환하여 주파수 영역 응답을 획득할 수 있다. 획득한 주파수 응답을 식 (7)을 이용하여 정규화 자기스펙트럼 밀도를 획득한 결과, 그림 12에서와 같이 성토사면으로 인한 발산감쇠효과로 인해 고유진동수가 감소(리브 보강이 없는 경우: 1.92 Hz에서 1.46 Hz로 감소, 리브 보강이 있는 경우: 2.17 Hz에서 1.26 Hz로 감소)하였으며 정규화 자기스펙트럼 밀도도 현저히 감소하였다(리브 보강이 없는 경우: 267에서 42로 감소, 리브 보강이 있는 경우: 225에서 20으로 감소). 성토 사면의 유무와 상관없이 리브로 보강한 경우 정규화 자기스펙트럼 밀도는 감소하며 성토 사면이 있는 경우 그 감소폭은 더욱 증가하는 것으로 나타난다(성토사면이 없는 경우: 267에서 225로 감소, 성토사면이 있는 경우: 42에서 20으로 감소). 즉, 리브 보강으로 인해 성토 사면이 존재하는 경우 지반 증폭 현상은 현저히 감소되는 것으로 나타난다.

4.3 굴착사면 영향분석

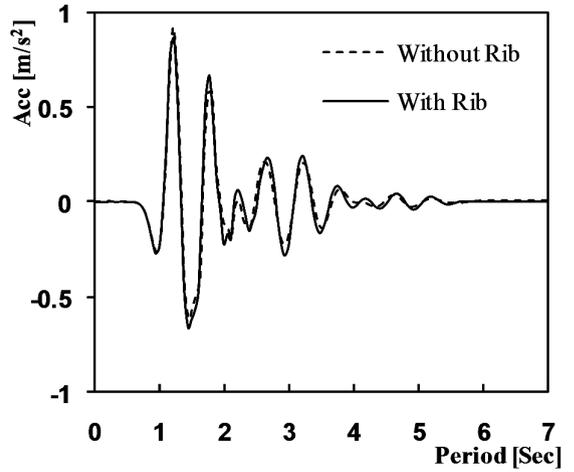
지진동으로 인한 원지반의 강성이 터널에 미치는 영향을 판단하고 실제 시공현장에서 굴착가능한 원지반의 굴착경사를 조건별로 수치해석을 수행하여 이에 따른 결과를 분석하고자 하였다. 굴착사면 원지반을 풍화암(구배는 1:0.5), 경암(구배는 1:1.0)으로 변화시켜 수치해석을 수행하였으며, 해석을 위해 구성된 모델은 그림 13과 같다.

굴착사면이 수직일수록 터널 주변 지반의 구속응력 증가로 인한 발산 감쇠 효과에 의하여 수평 및 수직변위와 전단응력이 감소하는 경향을 보인다. 하지만 굴착경사가 완만해질수록 전단응력은 증가하며, 변위는 감소하지 않는 경향을 보인다(이용준, 2001). 이는 개착식 터널의 경우 상부 하중으로 인해 터널 상부의 지반이 아래로 침하하게 되어 상대적으로 침하가 적은 지반에서 전단력으로 하중을 경감시켜 주는 아치현상으로서 중심부가 더 많이 침하하므로 아래로 볼록한 아치가 형성이 되고, 토피고가 증가함에 따라 성토체를 구성하는 성토량이 증가하여 복개 터널의 천단부에는 균등한 수평토압이 작용하고 측벽부에는 편토압이 작용하기 때문이다(배규진 등, 2003).

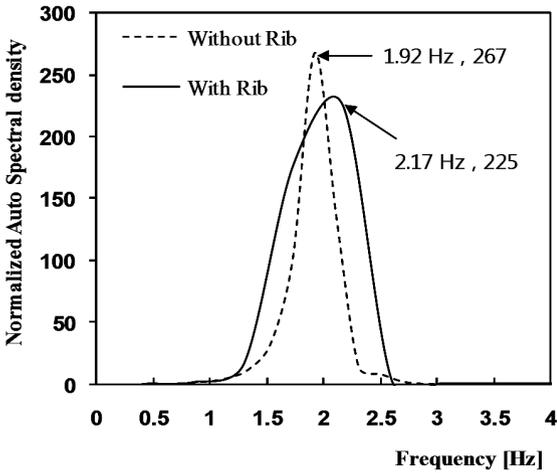
그림 14와 그림 15에서 보는 바와 같이 원지반의 굴착경사가 수직에 접근하고, 굴착사면 원지반의 강성이 증



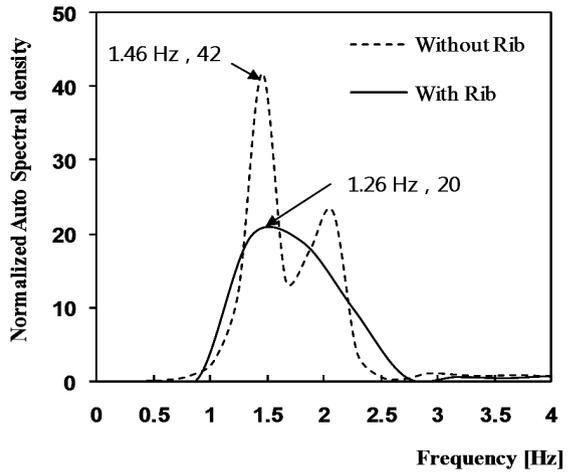
(a) 성토사면이 없을때의 시간 영역 응답



(b) 성토사면이 있을때 시간 영역 응답

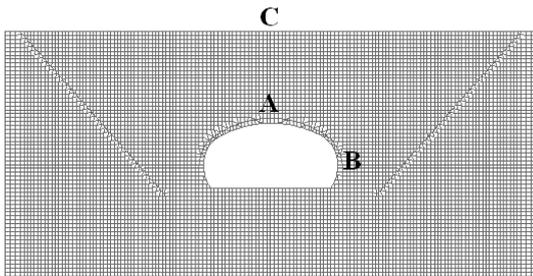


(c) 성토사면이 없을때의 주파수 영역 응답

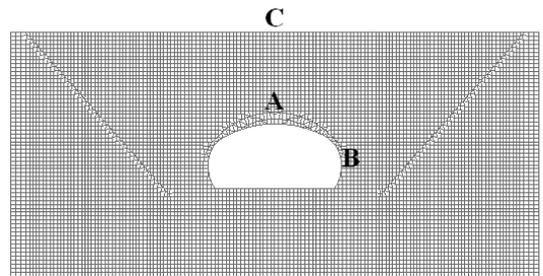


(d) 성토사면이 있을때 주파수 영역 응답

그림 12. 지표면(C)에서의 시간 및 주파수 영역 응답 가속도 특성



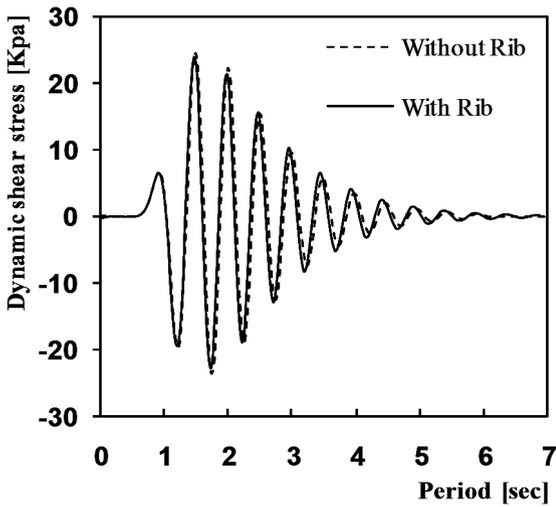
(a) 리브 보강이 없는 경우



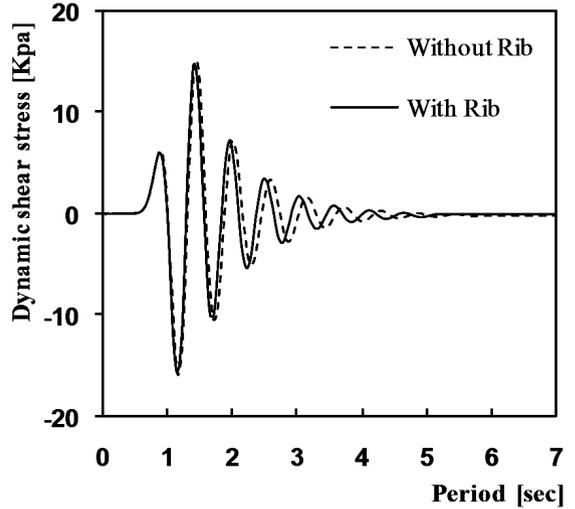
(b) 리브 보강된 경우

그림 13. 굴착사면 영향분석을 위한 해석 모델(구배가 1:1.0인 경암지반)

www.kci.go.kr

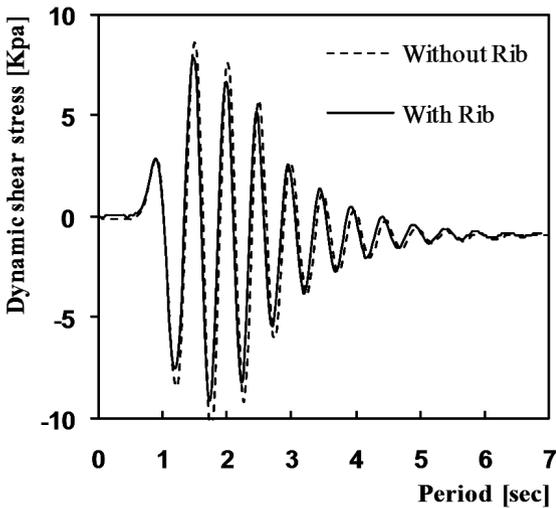


(a) 풍화암(1:0.5)

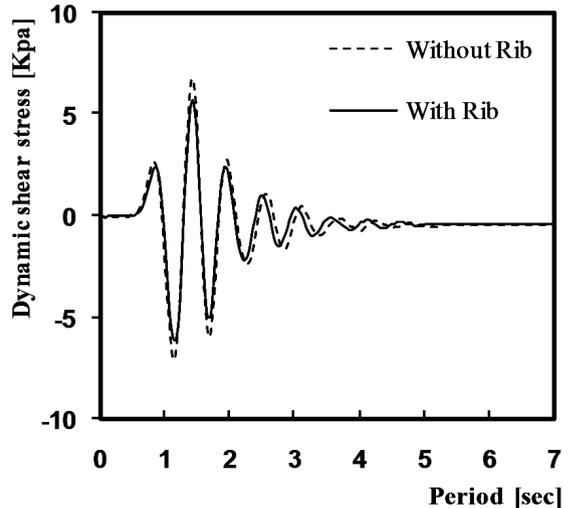


(b) 경암(1:1.0)

그림 14. 천단부(A)에서의 동적전단응력 변화(이격거리 2 m, 토피고 1.25D)



(a) 풍화암(1:0.5)



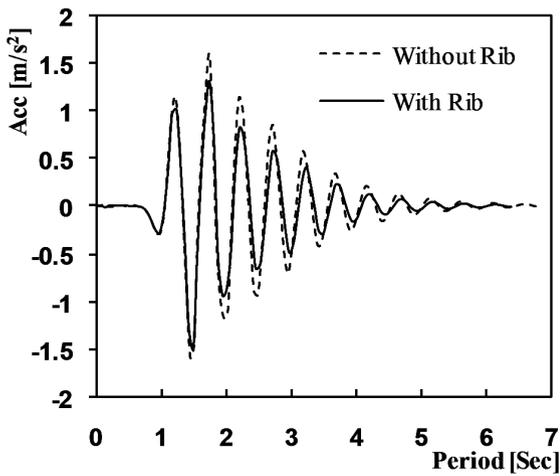
(b) 경암(1:1.0)

그림 15. 측벽부(B)에서의 동적전단응력 변화(이격거리 2 m, 토피고 1.25D)

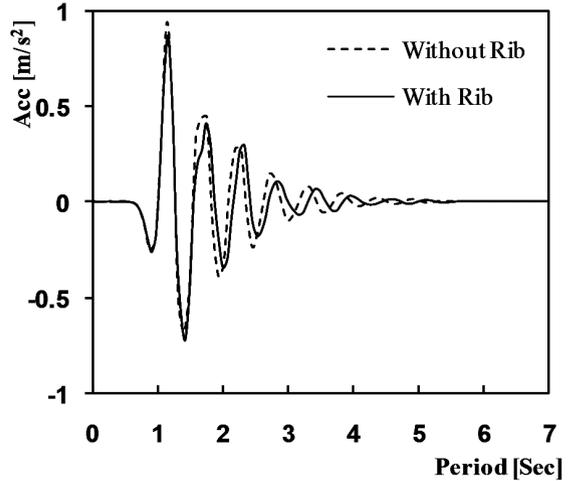
가함에 따라 천단부와 측벽부에서 동적전단응력이 감소하였다(천단부: 25 kPa에서 15 kPa로 감소, 측벽부: 9 kPa에서 6.5 kPa로 감소). 이러한 경향은 되메움 토사의 진동특성에 의한 영향 보다는 굴착사면 원지반의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 리브 보강으로 인해 터널의 강성이 증가하여 천단부와 측벽부에

서 동적전단응력을 감소되었음을 확인하였다(측벽부 풍화암 조건: 9 kPa에서 8 kPa로 감소, 측벽부 경암 조건: 6.5 kPa에서 5.5 kPa로 감소).

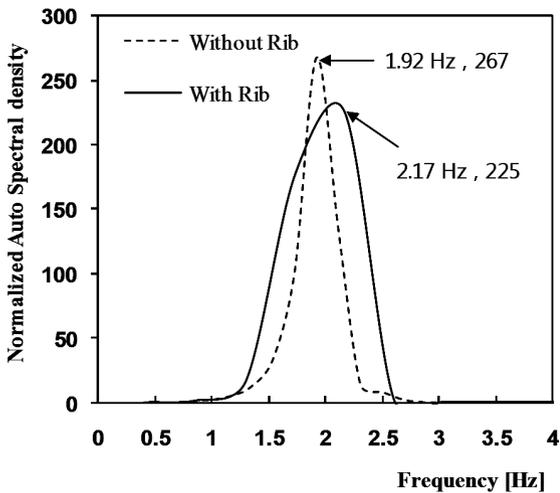
굴착사면의 구배가 1:0.5에서 1:1로 변화함에 따라 공진 주파수가 감소하며(리브가 없는 경우: 1.92 Hz에서 1.73 Hz로 감소, 리브가 있는 경우: 2.17 Hz에서 1.92



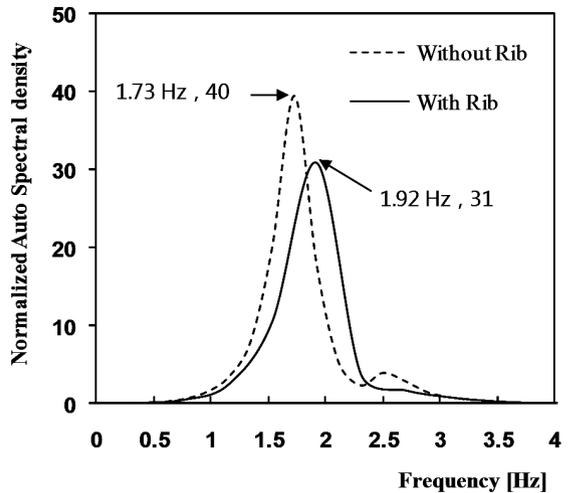
(a) 풍화암(1:0.5) 시간 영역 응답



(b) 경암(1:1.0) 시간 영역 응답



(c) 풍화암(1:0.5) 주파수 영역 응답



(d) 경암(1:1.0) 주파수 영역 응답

그림 16. 지표면(C)에서의 시간 및 주파수 영역 응답 가속도 특성

Hz로 감소) 정규화 자기스펙트럼 밀도도 감소하는 것으로 나타나며(리브가 없는 경우: 267에서 40으로 감소, 리브가 있는 경우: 225에서 31로 감소), 이는 굴착사면의 구배가 증가함에 따라 지진동으로 인한 파동의 증폭 현상이 감소하는 것을 의미한다. 또한 굴착사면의 구배에 상관없이 리브가 보강된 경우가 리브가 없는 경우 보다 공진 주파수가 증가했으며(구배 1:0.5의 조건: 1.92 Hz에서 2.17 Hz로 증가, 구배 1:1의 조건: 1.73 Hz에서 1.92 Hz로 증가), 정규화 자기스펙트럼 밀도는 감소하였다(구배

1:0.5의 조건: 267에서 225로 감소, 구배 1:1의 조건: 40에서 31로 감소). 이는 리브 보강으로 인해 지표면에서의 지진동에 의한 증폭현상이 감소되는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 리브 보강형 프리캐스트 세그먼트 아치 개착 터널에 대한 내진 해석을 수행하여 지진동에 대한 리브 보강의 효과와 개착 터널의 동적 거동 특성을

분석하고자 하였다. FLAC2D를 이용하여 2차로 규모의 일반 현장 타설식 복개 아치 터널 및 리브 보강형 프리캐스트 아치 복개 터널에 대한 동적 내진해석을 수행하였다. 또한 토피고, 굴착사면, 성토사면 조건에 따른 동적 거동특성을 비교 분석하였다. 해석 및 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 토피고가 증가할수록 천단부와 측벽부에서의 동적 전단응력이 증가한다. 토피고가 작은 경우 리브 보강으로 인해 터널 자체의 강성이 증가하여 동적 전단응력이 감소하였으나, 토피고가 증가할수록 리브의 영향은 상대적으로 작아졌다.
2. 성토사면이 있는 경우 발산감쇠 효과에 의해 동적 전단응력이 다소 작게 발생하였다. 또한, 리브 보강으로 인해 천단부와 측벽부에서 동적 전단응력이 감소하였다. 성토사면으로 인한 발산감쇠 효과로 인해 지표면에서의 고유진동수가 감소하였으며 정규화 자기스펙트럼 밀도도 현저히 감소하였다.
3. 원지반의 굴착사면의 구배가 증가할수록 천단부와 측벽부 동적 전단응력의 감소폭이 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 굴착사면의 구배가 증가함에 따라 공진 주파수가 감소하며 정규화 자기스펙트럼 밀도도 감소했다. 즉, 원지반 강성의 증가와 굴착사면 구배의 증가에 따라 지진동으로 인한 파동의 증폭 현상이 감소했다.
4. 모든 해석 조건에 대하여 리브로 보강된 프리캐스트 세그먼트를 적용한 경우, 정규화 자기스펙트럼 밀도가 감소하는 현상을 나타냈으며 이는 리브 보강으로 인한 터널 구조물의 강성증가가 지표면으로 전달되는 지진동의 증폭 현상을 감소시키는 역할을 하는 것으로 평가된다.

합리적인 동적 내진해석을 통해 리브 보강형 프리캐스트 아치 복개 터널이 일반 현장 타설식 복개 터널보다 동적 하중에 대하여 보다 효과적임을 확인하였다. 복개터널과 원지반의 인터페이스를 고려한 해석, 종방향 거동 특성 규명을 위한 3차원 해석 및 측벽부 세그먼트와 천단부 아치 세그먼트와의 상호거동 등으로 확장 연구가 추후 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁시행한 2006년도 건설핵심연구개발사업(과제번호: 06-건설핵심 C19, 과제명: 리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 배규진, 정형식, 이규필 (2003), “복개 터널 구조물에 작용하는 편도압 고려를 위한 수치해석적 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제5권, 제3호, pp. 227-239.
2. 유건선 (1997), “실험 및 수치해석에 의한 복개터널 주위의 지압과 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 서울.
3. 이규필, 이성원, 신휴성, 황재홍 (2008), “리브 보강 프리캐스트 터널 liner의 역학적 거동 특성”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제3호, pp. 295-302.
4. 최승호, 박인준, 김상환 (2009), “대형 지하구조물의 내진해석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호, pp. 163-174.
5. 이명욱, 박병수, 전용배, 유남재 (2004), “수치해석에 의한 복개터널 라이닝의 변위거동”, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, No. 24 A, pp. 227-238.
6. 이용준 (2001), “지진동으로 인한 개착식 터널의 거동 특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위논문, 서울.
7. 정형식, 조병완, 이영남, 이두화, 이용준 (2001), “진동대 실험을 이용한 개착식터널의 동적 거동특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제6호, pp. 173-180.
8. 한국건설기술연구원 (2002), “복개 터널 구조물의 거동 해석 및 설계요소 기술 개발 최종보고서”, 건기연 2002-055.
9. FLAC 2D (2002), FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN
10. Howie, J.A. and Amini, A. (2005), “Numerical simulation of seismic cone signals”, Can. Geotech. J., Vol. 42, No. 2, pp. 574-586.
11. Nishiyama, S., Muroya, K., Haya, H., Tanamura, S. and Nishimura, A. (1999), “Seismic design of cut and cover tunnel based on damage analyses and experimental studies”, Quarterly Report of RTRI, Vol. 40, No. 3, pp. 158-164.
12. Ricker, N. (1945), “The computation of output disturbances from amplifiers for true wavelet inputs”, Geophysics, Vol. 10, pp. 207-220.
13. Twine, D. (2004), “Cut-and-cover tunnels”, The ARUP Journal, Vol. 39, No. 1, pp. 29-32.

접수일(2009.7.7), 수정일(2009.7.23), 게재확정일(2009.7.27)