

## 조립식 터널 라이닝(PCL)의 내진성능 평가 및 해석기법에 대한 고찰

### A Study on the Seismic Performance Evaluation and the Seismic Analysis Method for Pre-Cast Concrete Lining

정 형 식<sup>\*1</sup> Chung, Hyung-Sik  
배 규 진<sup>\*2</sup> Bae, Gyu-Jin  
이 용 준<sup>\*3</sup> Lee, Yong-Jun

#### Abstract

Since 1980, the New Austrian Tunnelling Method(NATM) has become the preferred construction method in the country. However, the secondary concrete lining of NATM tunnel involves several problems. So, Pre-Cast Concrete Lining(PCL) is invented in order to resolve the problem of cast in place concrete lining in Norway. However PCL could not consider the effect of earthquake because an earthquake rarely occurs in the region of North Europe including Norway. Consequently, the analysis of the effect of earthquake on PCL should be made before introducing PCL to Korea. The purpose of this research is to evaluate the stability of tunnel applying PCL in case of earthquake. To evaluate the seismic performance of PCL, we used pseudo static analysis, response spectrum analysis and soil-structure interaction analysis. The result of this research is as follows that the stress on PCL does not exceed allowable stress and the minimum depth of tunnel safety should be two times as large as the diameter of tunnel.

#### 요 지

1980년대 이래 국내 터널의 시공법은 원지반의 강성을 활용한 NATM이 주를 이루고 있다. 그러나 NATM은 터널내부에 설치되는 내부라이닝의 여러 가지 문제점을 내포하고 있기 때문에 노르웨이에서는 조립식 터널 라이닝(Pre-Cast Concrete Lining, PCL)을 개발하여 현장타설 콘크리트 라이닝의 문제점을 해결하고자 하였다. 그러나 노르웨이와 같은 북유럽지역에서는 지진이 거의 발생되지 않고 있기 때문에 PCL공법 개발당시에 지진에 대한 영향을 고려하지 못하였다. 따라서 PCL공법을 국내에 도입하기 위해서는 먼저 지진에 대한 영향을 분석하여야 할 것으로 판단되므로 본 연구에서는 PCL공법 적용 시 지진에 대한 안정성 평가 및 합리적 내진해석을 위한 연구를 수행하고자 하였다. PCL의 내진성능을 판단하기 위하여 먼저 국내에서 주로 많이 사용되고 있는 해석기법인 유사정적해석법과 응답스펙트럼해석법을 이용하여 분석하였으며 지반과 구조물의 상호작용에 대한 영향을 분석하기 위해 시간이력해석을 수행하여 터널심도별 PCL의 내진성능을 분석하였다. 이와 같은 방법으로 PCL의 내진해석을 수행한 결과, 부재에 발생된 응력이 허용응력내에서 발생되어 PCL의 내진성능은 확보된 것으로 판단된다. 또한 시간이력해석에 의한 지반-구조물 해석을 수행한 결과에 의하면 PCL의 내진성능을 확보하기 위한 터널의 최소 토피고가 터널직경에 2배이상인 것으로 확인되었다. 또한 단순 구조물의 내진해석만으로는 PCL의 내진성능을 과소평가할 우려가 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** PCL, Pseudo static analysis, Seismic design, Time domain analysis

\*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부장

\*3 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

### 1.1 연구목적

1980년대 초반 이후 국내에서 터널의 설계 및 시공은 원지반의 강성을 최대한으로 활용하는 NATM의 개념을 대부분 적용하여 왔다. 따라서 NATM 도입 초기의 콘크리트 내부라이닝은 터널의 구조적 역할이 아닌 시설공간 확보 및 미관확보에 주안점을 주었으나 최근에 들어서는 장기적인 지반이완, 배수시설의 장기적인 기능저하에 의한 잔류수압 등 장기적으로 나타나는 불확실한 요소에 대한 안전율을 증가시키는 역할을 하도록 설계하기도 한다.

그러나 이러한 내부라이닝을 현장타설 콘크리트 공법으로 적용할 경우 공기지연, 품질관리의 어려움, 콘크리트 수화열, 건조, 수축으로 인한 균열발생, 시공 후 하자 보수기간(10년) 동안의 추가적인 유지보수 비용부담 등의 여러 가지 문제들이 나타났다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 최근에 국내에서도 재래식의 내부 콘크리트 라이닝 대신에 조립식 라이닝(Precast Concrete Lining; PCL)을 설치하는 터널공법(PCL공법)에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 PCL공법은 터널 굴착면과 PCL이 약 15cm 이상 이격되어져 있기 때문에 설계 시 현장타설 콘크리트 라이닝과 다른 설계개념 및 검토사항을 필요로 한다. 즉 지반의 장기이완하중, 낙석, 공기압 및 차량 충돌에 의한 하중 등에 대한 분석이 필요할 뿐만 아니라 PCL이 주변지반과 밀착되어 있지 않기 때문에 지진발생 시 재래식 현장타설 콘크리트 라이닝 보다 훨씬 큰 지진에너지를 받을 것으로 예상되므로 이에 대한 정밀 분석을 필요로 한다. 그러나 PCL공법을 처음으로 개발한 국가인 노르웨이에서는 지진이 거의 발생되지 않기 때문에 초기 PCL공법 개발시에도 지진에 대한 검토를 수행하지 않았다. 그러나 국내에서는 현재 지진발생에 대한 우려가 증가되고 있을 뿐만 아니라 각종 토목구조물의 설계시 내진설계를 기본으로 하는 설계기준이 발표되고 있어 이러한 우리나라의 내진설계 현실을 감안하면 PCL을 이용한 터널설계 시 지진에 대한 영향을 간과하지 않을 수 없다. 또한 현재 국내에서 PCL내진설계 시 주로 많이 사용되고 있는 유사정적해석법 및 응답스펙트럼해석법과 같은 구조물자체의 내진설계는 지중구조물이라는 특수성을 반영하기 힘든 기법이므로 이에

대한 합리적 내진해석기법 고찰이 절실히 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 PCL적용 시 검토하여야 할 사항중에 구조물에 가장 큰 영향을 줄수 있는 지진 시 PCL의 동적거동 특성 및 내진성능 평가를 각종 수치해석기법을 통해 분석하고자 하며 현재 국내에서 적용되고 있는 내진해석기법에 대한 적절성을 분석하고자 한다.

### 1.2 연구내용

전술한 바와 같이 PCL공법을 국내 터널현장에 도입하기 위해서는 터널의 안정성 문제에 대한 심도 깊은 검토가 선행되어야 한다. 이러한 터널의 안정성에 미치는 요소중 일반 재래식 현장 타설 라이닝의 구조적 특징과는 달리 PCL은 터널의 슛크리트면과 라이닝이 약 15cm 이상 이격되어져 있기 때문에 슛크리트 및 록볼트와 같은 1차지보재의 역할이 훨씬 중요할 뿐만 아니라 지진발생 시에도 재래식 현장타설 라이닝보다 훨씬 큰 지진하중에 대한 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 지진동으로 인한 PCL의 동적거동 특성 및 내진성능 평가를 국내외적으로 주로 많이 사용하고 있는 구조해석기법을 통해 PCL의 내진성능을 평가하고자 한다. 터널과 같은 지하구조물은 터널의 설치심도 즉, 터널주변의 구속응력이 어느정도 발휘하느냐가 지진시 안정성에 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 동적 구조해석법에서는 모사가 불가능한 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction) 효과를 고려한 시간이력해석을 통해 PCL이 적용가능한 지반조건인 보통암지반에 대해 터널의 설치심도별 PCL의 거동 및 내진성능을 평가하고자 하며 PCL공법 적용시 내진성능을 확보할 수 있는 최소 토피고를 수치해석기법에 의해 제안하고자 한다.

## 2. PCL공법의 개요

NATM은 오스트리아와 같이 퇴적암이나 변성암 계통의 강도가 낮고 초기에 변위 발생이 쉬운 연약한 암반을 대상으로 한 터널공법인 반면 PCL공법은 화성암 계통의 강도가 높고 상대적으로 균열이 적은 암반을 대상으로 개선된 1차 지보재만으로 터널을 안정시키는 공법으로 노르웨이에서 처음 개발되었다.

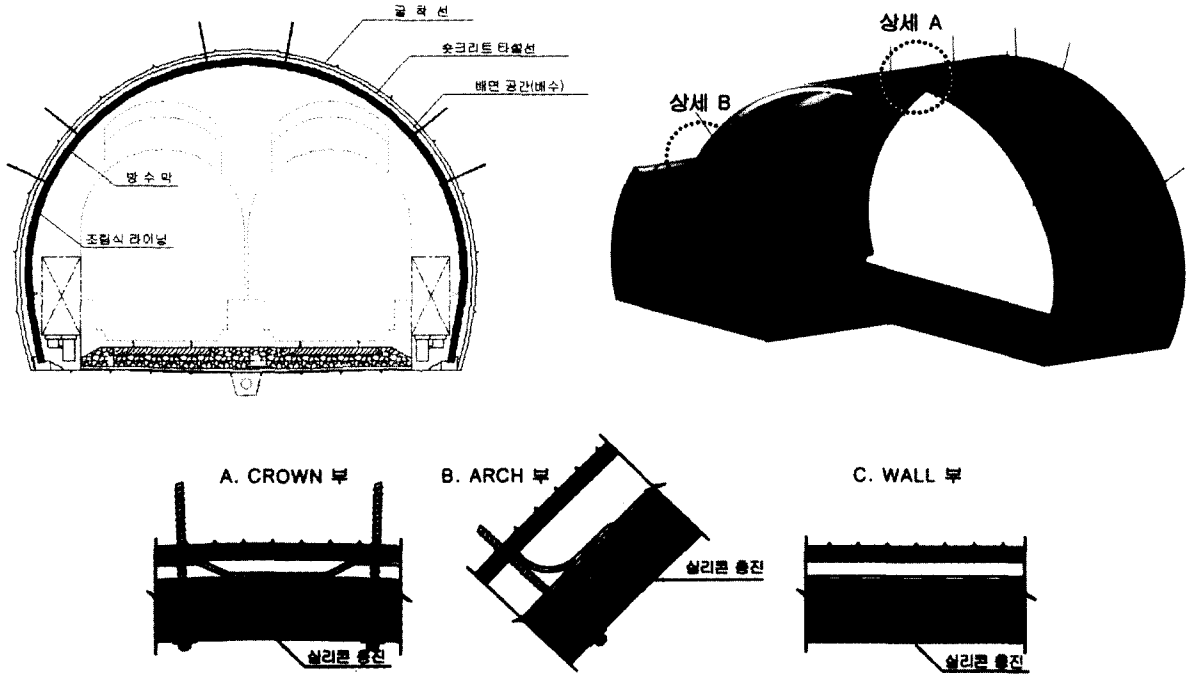


그림 1. 조립식 라이닝(PCL) 공법 개념도

안정성에 있어서 PCL공법의 개념은 원지반의 지지력을 최대한으로 활용하면서 굴착과 동시에 숏크리트나 록볼트 같은 지보재로 1차 안정시키는 NATM의 기본 개념과 같으나 이를 영구 지보재개념으로 사용하는 점에서 NATM과 다르다.

PCL공법은 그림 1과 같이 강도 및 내구성을 개선한 숏크리트 및 록볼트와 같은 1차지보재로 지반을 영구적으로 안정시킨 후, 균질한 공장제품으로 제작된 조립식 라이닝을 설치하여 PCL을 오직 부대시설 보존과 자중만을 유지하기 위한 마감재 역할로만 이용하는 공법이다. 또한 조립식 라이닝 배면은 터널의 유효단면 이외에 굴착에 의한 여굴을 채움없는 공간으로 유지시켜 완전배수를 유도하고 라이닝에 작용할 수 있는 불확실한 하중을 완전 제거한다는 것이 PCL공법의 기본 설계개념이라 할 수 있다.

이상과 같은 PCL의 기본 설계개념에서 알 수 있듯이 설계 시 PCL에 작용할 수 있는 주하중으로는 PCL자체의 자중일 것으로 예상되며 기타의 부수적 하중으로는 암반의 낙반으로 인한 낙석하중, 철도차량 통과 시 공기압하중, 지하수의 결빙으로 인한 얼음하중, 공사차량의 돌발적 충돌로 인한 차량충돌하중 등이 있다. 그러나 이러한 부하중들은 구조해석만으로도 PCL의 안정성검토

가 충분할 것으로 판단되나 지진으로 인한 하중을 단순 유사정적해석법 또는 응답스펙트럼해석법만으로는 지반-구조물의 상호작용에 따른 영향을 충분히 고려하지 못할 것으로 판단되므로 PCL의 설계시 각종 작용하중에 의한 구조해석외에도 지진동으로 인한 지반 및 구조물의 내진해석이 필수적으로 적용되어야 할 것으로 판단된다.

### 3. PCL의 내진성능 평가기법

지중구조물의 지진시 거동을 해석하는 방법으로는 구조물에 지진으로 인해 발생된 최대관성력을 작용시키거나 지반의 지진응답해석에서 구한 변위를 구조물에 작용시켜 해석하는 유사정적해석법과 지진시의 진동을 동력학적으로 취급하는 동적해석법으로 구분하고 있다.

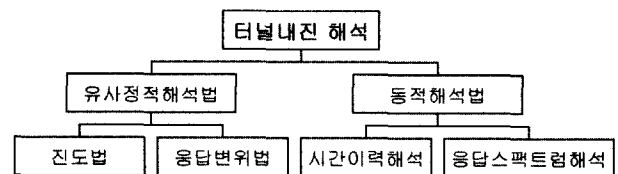


그림 2. 내진설계법의 종류

앞의 내진해석기법 중 응답변위법은 지진동으로 인해 발생된 지반의 상대변위를 구조물에 강제적으로 변위를 발생시키는 방법이기 때문에 PCL과 같이 주변지반과 밀착되어 있지 않은 경우에 적용한다는 것은 매우 불합리 할것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 응답변위법을 제외한 진도법(유사정적해석법), 시간이력해석법, 응답스펙트럼해석법을 이용하여 PCL의 내진성능을 평가하고자 한다.

### 3.1 진도법

본래 진도법은 교량 또는 제방과 같은 지상구조물의 내진설계에 주로 사용되는 기법으로 구조물 주변지반에 의한 영향은 고려하지 못하는 기법이다. 그러나 이를 지중구조물에 적용하는 경우도 있으나 진도법을 이용하여 지중구조물의 내진설계를 할 경우에는 지반에 대한 영향 보다는 구조물자체의 관성력이 지배적인 영향을 받을 것으로 판단되는 구조물에 적용하여야 한다.

따라서 진도법을 이용한 PCL과 같은 지중구조물의 내진해석을 위해서는 구조물자체의 관성력을 설계지역의 지진계수와 구조물의 중량을 이용하는 것이 일반적이며 이러한 관성력을 산정하기 위한 이론으로는 아래의 식과 같은 뉴턴의 제2법칙을 이용하게 된다.

$$f_i = m_i \cdot a_i = W_i \cdot K_{hi}$$

여기서  $m$ 과  $a$ 는 구조물의 질량과 설계가속도를 의미하며  $W$ 와  $K_h$ 는 구조물의 중량 및 설계지진계수를 의미한다.

이러한 방법에 의해 계산된 관성력은 정적인 상태의 하중으로 가정하여 구조물에 수평하중으로 입력하게 된다. 그러나 이러한 방법은 구조물 자체의 관성력은 반영되지만 지진동으로 인해 발생된 주변지반의 변위와 같은 영향을 고려할수 없을 뿐만 아니라 기반암과 구조물의 심도에 따른 가속도변화를 정확하게 모사하기 곤란하므로 정밀해석이라 할수 없다.

### 3.2 응답스펙트럼해석법

응답스펙트럼해석은 진도법과 같이 주로 지상구조물의 내진해석에 사용되는 기법이다. 그러나 이 기법은 진도법과는 달리 지진동의 주기별 또는 주파수별 특성을 반영할 뿐만 아니라 이러한 입력 지진동으로 인한 구조

물의 모드별 응답치를 얻을 수 있어 내진해석시 진도법 보다는 정밀한 결과를 얻을수 있다고 볼 수 있다. 그러나 이 방법 역시 지진동으로 인한 시간에 따른 구조물의 응답치를 얻는 것이 아니라 주파수 또는 주기별 최대 응답치를 이용하여 통계적 방법(SRSS, Square Root of Sum of Squares)에 의한 구조물의 최대 응답치를 얻게 되므로 경우에 따라서는 과다한 응답치를 얻게되는 모순이 있을 뿐만 아니라 이 방법 역시 주변지반의 동적 거동으로 인한 영향을 전혀 고려할 수 없으므로 지중구조물의 내진설계에 응답스펙트럼해석의 적용은 불합리 할 것으로 판단된다. 그러나 PCL과 같이 터널 라이닝이 주변지반과 이격되어 있을 경우에는 주변지반에 대한 영향도 중요하지만 구조물 자체의 동적특성에도 지배적인 영향을 받을 것으로 예상되므로 절대적으로 불합리한 해석기법이라고는 볼 수 없다.

### 3.3 시간이력해석법

본 연구에서 사용된 시간이력해석은 시간영역의 지진동을 FFT(Fast Fourier Transformation)분석을 이용하여 주파수영역으로 변환한 후 이를 이용하여 주파수 또는 주기별 지반 및 구조물의 응답특성을 계산한다. 또한 이를 다시 IFFT(Inverse Fast Fourier Transformation)를 이용하여 시간영역으로 변환하여 구조물에 발생된 동적응답특성을 시간영역에서 보여줄 수 있는 기법이다. 따라서 이와 같은 방법은 지반 및 구조물 전체구조계에 대한 동적응답특성을 계산할 수 있을 뿐만 아니라 등가 선형화기법(Equivalent Linear Method)을 이용하여 지반의 비선형 특성을 모사할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이 방법은 다른 내진해석기법에 비해 매우 정밀한 결과를 얻을 수 있으나 구조계의 경계조건, 지진동의 전파조건, 원지반의 물성치 산정이 다른 해석기법에 비해 복잡할 뿐만 아니라 해석시간 및 컴퓨터 메모리를 많이 차지하게 되므로 일본 등지에서는 특수한 구조물 또는 지진에 대해 민감한 영향을 받을 것으로 예상되는 구조물 외에는 주로 유사정적해석 등과 같은 단순한 내진해석을 수행하는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 PCL이라는 특수한 구조물에 대해 지반 및 구조물의 동적 응답특성을 파악하고 유사정적해석이나 응답스펙트럼해석에서 모사가 불가능한 터널의 설치심도별 동적특성을 파악하기 위해 시간이력해석을 수행하였다.

표 1. 터널지보공 및 PCL의 단면특성

구 분	설계기준강도(kg/cm <sup>2</sup> )	두께(cm)	단면이차모멘트(m <sup>4</sup> /m)	비 고
shotcrete	C40	5	$1.0 \times 10^{-5}$	C : Cube Strength(MPa)
Anchor Bolt(특볼트)	SB40	D25	-	C.T.C 2.0m
PCL	400	15	$2.8 \times 10^{-4}$	

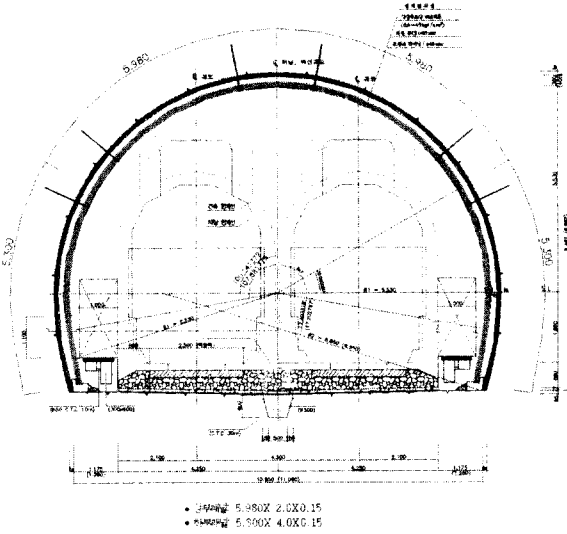


그림 3. 터널 대표단면

#### 4. 수치해석을 이용한 PCL의 내진성능 평가

##### 4.1 해석조건

###### 4.1.1 터널의 제원

본 연구에서는 그림 3과 같은 철도터널의 대표단면을 이용하였으며 터널의 제원 및 단면특성은 표 1과 같이 현재 국내에서 설계되었던 자료를 이용하여 정하였다.

###### 4.1.2 지반의 동적물성치 산정

지반-구조물의 내진해석을 위한 지반의 동적물성치 산정방법은 원지반의 탄성파탐사, 공내 탄성파 시험(Cross Hole Test, Down Hole Test) 및 SASW실험법 등이 있으며 이러한 시험에 의해 얻어진 지반의 전단파속도를 이용하여 원지반의 전단계수를 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 본 연구에서는 어느 특정한 지역에 대한 지반특성치를 이용하여 내진해석을 수행하지 않고 우리나라 산악터널의 일반적인 지반특성을 반영하여 PCL의 내진성능을 평가하고자 한다. 즉, 우리나라의 산악터널은 주로 보통암 이상의 암반조건에서 시공되는 것이 일반적일 뿐만 아니라 본 PCL공법은 원지반상태가 연약할 경우에 대해서는 적용이 곤란하므로 보통암 이상의 암반에서 적용되기 때문에 본 연구에서도 보통암에 해당되는

표 2. 수치해석에 적용된 동적물성치

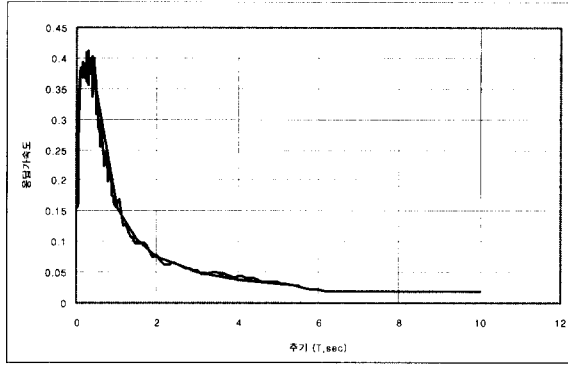
전단파속도 (m/sec)	최대전단계수 (t/m <sup>2</sup> )	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	포아송비	초기 감쇠비 (%)
1500	$6.0 \times 10^5$	2.6	0.2	5

전단파속도(1500m/sec)를 이용하여 원지반의 전단계수를 산정하였다. 또한 지반은 응력-변형률관계에서 비선형 거동을 하게 되므로 본 연구에서도 암반의 비선형 거동 특성을 반영하기 위한 수치해석 모델인 등가선형화법(Equivalent Linear Method)을 이용하였으며 이때 사용된 암반의 비선형 특성을 1970년도에 Seed와 Idriss가 제안한 변형률 의존곡선(Strain-Compatible Curve)을 이용하였다. 그 밖의 지반의 물성치는 터널설계 시 주로 많이 사용되는 물성치를 이용하였으며 본 연구에서 적용된 지반의 동적물성치는 표 2와 같다.

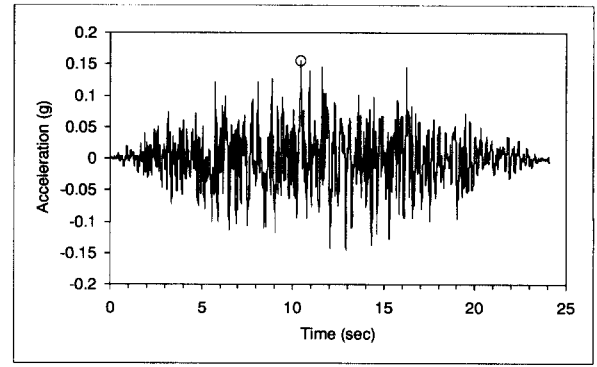
##### 4.1.3 설계지반 운동의 결정

터널의 지진해석시 적용되는 지진파는 지반의 종류, 지진구역, 구조물의 중요도에 따라 산정된 설계스펙트럼을 이용한 인공지진파를 적용토록 터널설계기준(건설교통부, 1999)에 제시되어 있다. 따라서 본 연구에서도 이러한 지진파 선정 조건을 이용한 인공합성지진파를 적용하였다.

본 연구에서 적용된 인공합성지진파는 국내 내진설계기준상, 산악터널은 1등급 구조물에 속하며 대체로 산악터널의 특성상 보통암 이상의 지반에 시공되는 것이 일반적이므로 본 연구에서 적용된 지진파 역시 보통암을 기준으로 작성하였다. 또한 국내 내진설계기준상 지진구역을 I구역과 II구역으로 나뉘어져 있는데, 본 연구에서는 지진의 강도가 큰 I구역에 대한 구역계수를 사용하여 인공지진파를 작성 적용하였다. 인공지진파 작성을 위하여 SIMQKE를 이용한 원시 인공지진파를 생성하였고 이를 다시 미국의 NRC(Nuclear Regulation Committee)규정에 부합하는 최종 인공지진파로 수정하였다. 이와 같은 조건에 의해 생성된 인공지진파의 스펙트럼 및 시간이력은 다음의 그림과 같으며, 이때의 유효가속도(EPA)는 0.154g이며 강진지속시간(Duration)은 약 24초이며 탁월주파수는 약 2.2Hz로 산정되었다.



(a) 설계스펙트럼



(b) 시간이력곡선

그림 4. 인공합성 지진파의 설계스펙트럼과 시간이력곡선

표 3. 부재의 허용응력

부재	구분	PCL 설계 기준강도		비고
		450kg/cm <sup>2</sup>	400kg/cm <sup>2</sup>	
PCL	허용 휨응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	압축	180	160
		인장	8.9	8.4
	허용 전단응력(kg/cm <sup>2</sup> )	5.3	5.0	콘크리트의 허용응력
	Punching전단강도(ton)	12.27	11.57	
록볼트	허용 압축응력 (Buckling,kg/cm <sup>2</sup> )	1,933		SB40 (D25)
	허용 인장응력(kg/cm <sup>2</sup> )	2,400		

4.1.4 구조물 모델링 및 부재의 안정성 판단기준

본 연구에서 사용된 설계가속도 및 설계응답스펙트럼은 전술한 바와 같이 보통암지반(SB), 지진구역 1지역, 내진 1등급 구조물(지진 재현주기 1000년)의 조건에 부합되는 입력치를 사용하였으며 유사정적해석 및 응답스펙트럼해석에 사용된 구조물의 경계조건은 PCL판넬과 연결되는 지점은 내부힌지조건을 사용하여 모멘트전달이 되지 않도록 하였다. 또한 록볼트 상단 즉, 암반과 연결되는 부분은 고정경계로 하였으며 PCL판넬과 판넬기초 연결부에는 힌지조건을 적용하여 SAP90을 이용하여

표 4. PCL에 발생하는 최대 응력

구분	휨 응력(kg/cm <sup>2</sup> )			전 단 응 력		
	f <sub>ck</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>	발생위치	f <sub>ck</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>	발생위치
최대	15.52	15.47	어깨부	0.88	0.88	어깨부
최소	-18.48	-18.71	어깨부	0.86	0.86	어깨부

표 5. 록볼트에 발생하는 최대 축력

터널 심도	f <sub>ck(PCL)</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>			f <sub>ck(PCL)</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>		
	최대축력(t)	축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	발생위치	최대축력(t)	축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	발생위치
최대	1.73	346.6	어깨부	1.73	346.2	어깨부
최소	-1.62	-323.2	어깨부	-1.63	-326.0	어깨부

구조해석을 수행하였다. 또한 내진성능평가기 적용된 안정성 판정기준은 허용응력개념을 이용하였으며 PCL의 휨응력(압축, 인장), 전단응력, 록볼트의 좌굴 및 인장에 대한 안정성, 록볼트에 전달된 축력으로 인한 PCL의 Punching 전단에 대해 안정성을 검토하였다. 이와 같은 부재의 허용응력은 표 3과 같다.

4.2 해석결과

4.2.1 PCL의 내진성능 평가

(1) 유사정적 해석법에 의한 평가

PCL의 내진성능 평가를 위해 본 절에서는 설계지진 계수 및 구조물의 중량을 이용하여 PCL에 발생하는 관성력을 산출하였으며 이를 터널 라이닝에 수평방향으로 관성력을 적용하였을 경우에 대한 구조해석을 수행하였다.

이러한 조건에 의해 구조해석을 수행한 결과를 요약 정리하면 다음의 표 4 및 표 5와 같다.

표 4의 해석결과를 이용하여 PCL에 발생하는 휨응력에 대한 안정성 검토를 수행한 결과, 휨압축응력에 대해

표 6. PCL에 발생하는 최대 응력

구분	휨 응 력(kg/cm <sup>2</sup> )			전 단 응 력		
	f <sub>ck</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>	발생위치	f <sub>ck</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>	발생위치
최대	18.21	18.3	어깨부	1.02	1.02	천단부
최소	-28.99	-28.73	S.L	1.02	1.02	천단부

표 7. 록볼트에 발생하는 최대 축력

터널 심도	f <sub>ck(PCL)</sub> = 450kg/cm <sup>2</sup>			f <sub>ck(PCL)</sub> = 400kg/cm <sup>2</sup>		
	최대축력(t)	축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	발생위치	최대축력(t)	축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	발생위치
최대	2.04	407.8	어깨부	2.06	411.0	어깨부
최소	-1.57	-314.0	어깨부	-1.57	-314.4	어깨부

서는 모두 허용응력이내에서 발생되어 안전할 것으로 판단되나 휨인장응력에 대해서는 콘크리트의 허용인장 응력을 초과하여 철근보강이 필요할 것으로 판단된다. 그밖의 Anchor Bolt(록볼트)의 좌굴(Buckling), 인장, Punching전단에 대한 안정성을 검토한 결과, 발생된 Anchor Bolt(록볼트)의 축응력이 모두 허용응력이내인 것으로 계산되었다.

(2) 응답스펙트럼 해석법에 의한 평가

응답스펙트럼법을 이용하여 구조계산을 수행한 결과 최대 부재력은 터널 어깨부 및 S.L부에서 발생되었으며 이때 발생된 부재력에 대한 발생응력은 표 6, 표 7과 같다.

상기의 표 6의 해석결과를 이용하여 PCL에 발생하는 휨응력에 대한 안정성 검토를 수행한 결과, 휨압축응력에 대해서는 모두 허용응력이내에서 발생되어 안전할 것으로 판단되나 휨인장응력에 대해서는 콘크리트의 허용인장응력을 초과하여 철근보강이 필요할 것으로 판단된다. 그밖의 Anchor Bolt(록볼트)의 좌굴(Buckling), 인장, Punching전단에 대한 안정성을 검토한 결과, 발생된 Anchor Bolt(록볼트)의 축응력이 모두 허용응력이내인 것으로 계산되었다.

4.2.2 터널의 설치심도별 내진성능 평가

터널의 설치심도별 PCL의 내진성능을 평가하기 위해서 본 연구에서는 지반 및 구조물의 상호작용을 고려한 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석시 사용된 Program은 AFIMEX로 동적해석에 사용되는 Main Solver는 FLUSH(1975, UC Berkeley)이다.

또한 해석에 사용된 원지반의 전단파 속도는 전술한 바와 같이 1,500m/sec일 경우에 대해 수치해석을 수행하였으며 PCL의 설계기준강도가 450kg/cm<sup>2</sup> 및 400kg/cm<sup>2</sup>

일 경우에 대해 터널의 설치심도가 터널의 직경의 1D, 2D, 3D에 대해 시간이력해석을 수행하였다(그림 5 참조). 이와 같은 조건에서의 경계조건으로는 모델 좌우측은 전달경계를 이용하여 지진동으로 발생된 동적에너지가 모델 좌우측 경계면에서 반사되지 않도록 하였으며 기반면에 대한 경계조건으로는 점성경계조건을 이용하였다.

이와 같은 조건을 이용하여 수치해석을 수행한 결과, PCL에 발생된 변위는 그림 6과 같다.

그림 6에서 알 수 있듯이 PCL에 발생하는 최대변위는 터널 어깨부에서 주로 발생되며 최대수평변위는 설계기준강도가 450kg/cm<sup>2</sup>일 경우 약 2.28~2.72cm 정도의 변위가 발생하는 반면 설계기준강도가 400kg/cm<sup>2</sup>일 경우에는 약 2.38~2.71cm 정도의 변위가 발생하는 것으로 나타났으며 최대연직변위는 설계기준강도가 450kg/cm<sup>2</sup>일 경우 약 0.14~0.64cm 정도 발생하는 반면 설계기준 강도가 400kg/cm<sup>2</sup>일 경우에는 약 0.12~0.66cm 정도 발생하는 것으로 나타났다(그림 6 참조). 또한 시간이력해

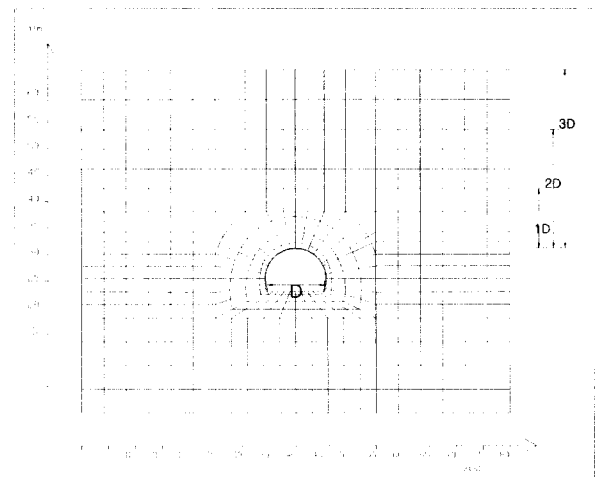


그림 5. 수치해석 모델링

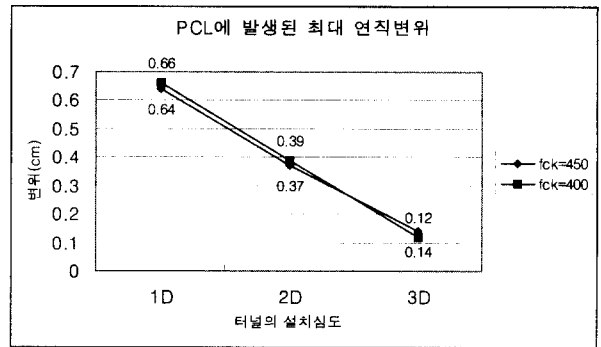
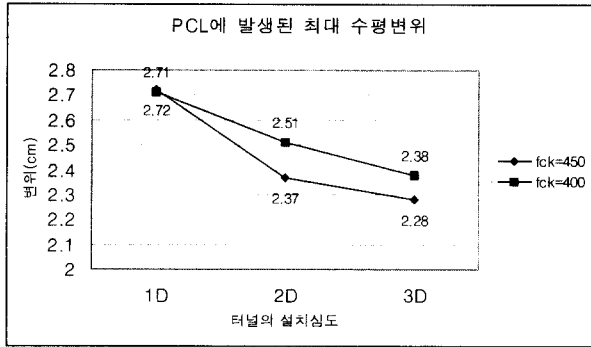


그림 6. PCL에 발생되는 최대변위

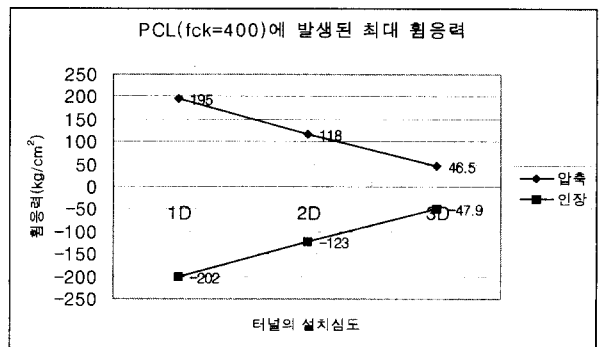
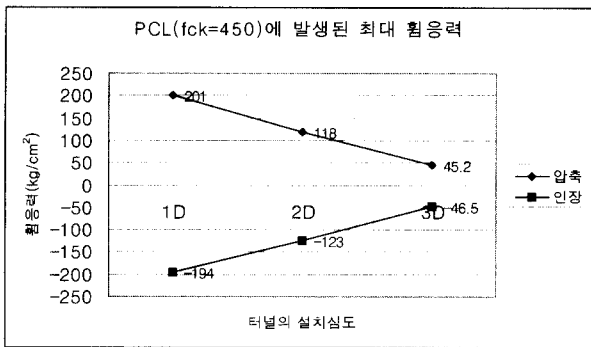


그림 7. PCL에 발생되는 최대 힘응력(kg/cm²)

석에서 얻어진 숏크리트면의 최대 수평변위가 약 1.58~2.27cm이며 최대 연직변위는 약 0.05~0.08cm로 나타나 숏크리트면에서 발생된 최대변위가 PCL에서 발생된 최대변위 보다 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 숏크리트자체가 원지반과 밀착되어 있어 원지반의 구속응력에 의한 감쇠효과가 발휘되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 PCL에 발생된 최대변위는 터널의 설치심도가 증가할수록 발생된 변위가 감소됨을 알수 있는데 이 역시 주변지반의 구속효과로 인해 터널의 설치심도가 증가할수록 변위 또한 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 PCL의 설계기준강도가 증가할수록 PCL에 발생하는 변위는 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 그렇게 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서 PCL과 같은 구조물에 대한 지진 시 영향을 미치는 요소는 주변지반의 구속효과와 PCL자체의 관성력인 것으로 판단된다.

다음은 PCL에 발생된 힘응력을 정리하면 그림 7과 같다.

PCL의 설계기준강도가 450kg/cm²일 경우, 허용휨압축응력은 약 180kg/cm²이고 설계기준강도가 400kg/cm²일 경우, 허용휨압축응력이 약 160kg/cm²인 점을 감안하면 PCL의 설계기준강도가 400kg/cm², 450kg/cm²인 경우 모두 터널폭의 2D이상의 토피고를 확보하여야 안전할 것으로

판단되나 부재에 발생된 휨인장응력이 PCL의 허용인장응력인 8.9kg/cm²(fck=450kg/cm²), 8.4kg/cm²(fck=400kg/cm²)을 모든 경우에 대해 초과하게 되므로 PCL에 철근 보강이 필요할 것으로 판단된다. 그밖의 지진동으로 인해 PCL에 발생하는 전단력 역시 아래의 그림 8과 같이 터널의 최소 안전토피고가 2D이상은 확보하여야 안전할 것으로 판단된다.

또한 PCL의 탈락을 방지하기 위한 목적으로 사용되는 Anchor Bolt(록볼트)에 대해 안전성을 검토한 결과, Anchor Bolt(록볼트)의 좌굴에 대해서는 PCL과 숏크리트의 이격거리가 15cm인 조건(허용좌굴응력 : 1933kg/

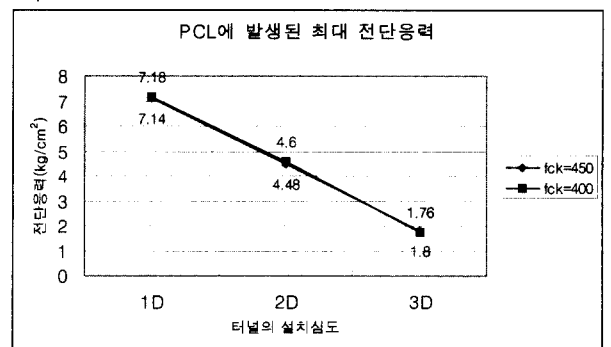


그림 8. PCL에 발생되는 최대 전단응력



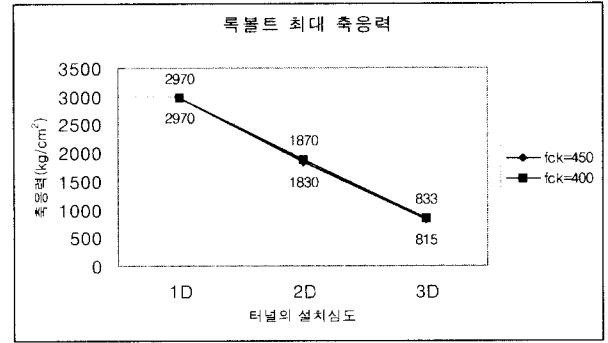
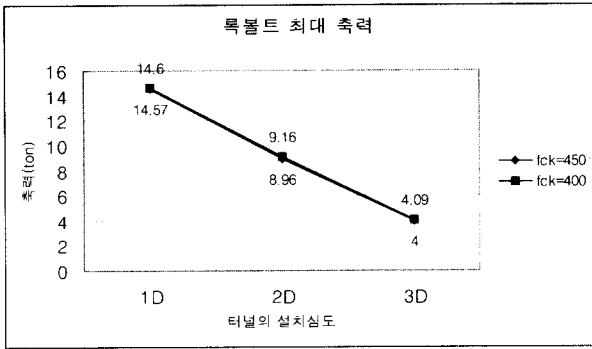


그림 9. Anchor Bolt(록볼트)의 최대 축력

cm)에서는 위의 그림 9에서 알 수 있듯이 터널의 심도가 2D이상인 경우, 발생 축응력이 허용좌굴응력 이내에서 발생하게 되므로 좌굴에 대한 안정성은 터널직경의 2D를 확보하여야 할 것으로 판단되며 Anchor Bolt(록볼트)의 인장에 대한 안정성을 검토한 결과, Anchor Bolt(록볼트)에 발생된 인장력은 터널의 설치 심도가 1D인 경우에만 Anchor Bolt(록볼트)의 지진 시 허용인장응력 (2400kg/cm<sup>2</sup>)을 초과하는 것으로 나타났다.

또한 Anchor Bolt(록볼트) 축력에 의한 PCL Panel의 Punching 전단을 검토한 결과, PCL의 허용전단력이 약 12ton임을 감안하면 그림 9에서 알 수 있듯이 터널의 토 피고가 2D이상일 경우에 허용전단력을 만족하는 것으로 나타났다.

#### 4.2.3 내진해석 기법별 분석

PCL의 내진성능을 평가하기 위한 구조해석 및 수치 해석을 수행한 결과를 비교 정리하면 다음의 표 8, 표 9와 같다.

##### (1) 유사정적해석과 응답스펙트럼해석 결과 비교

PCL의 내진성능을 평가하기 위해 국내외적으로 일반적으로 사용되고 있는 해석기법인 유사정적해석법과 응답스펙트럼해석법을 이용하여 PCL의 구조해석 결과

를 각각의 해석기법별로 정리하면 다음과 같다.

표 8에서 알 수 있듯이 유사정적해석 및 응답스펙트럼 해석 결과에 의한 PCL의 발생응력은 모두 부재의 허용 응력내에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 이와 같은 내진해석기법에 의한 PCL의 내진성능은 모두 확보된 것으로 판단되나 PCL에 발생하는 인장응력은 콘 크리트의 허용인장응력을 초과하게 되어 적절한 철근량이 확보될 경우, 발생된 인장응력에 대해서도 PCL의 내진성능은 확보될 것으로 판단된다. 그러나 표 8에서 알 수 있듯이 유사정적해석에 의해 발생된 부재의 단면력이 응답스펙트럼해석에 의해 발생된 부재의 단면력보다 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 유사정적해석인 경우 단순히 구조물에 발생될 것으로 예상되는 관성력만을 정적인 수평하중으로 입력되는 반면 응답스펙트럼해석은 입력 지진동의 동적특성과 구조물의 동적 거동특성을 포함한 결과, 즉 각각의 주파수 또는 주기별 최대응답치를 Modal Analysis에 의해 계산되므로 유사정적해석법에 의한 결과값보다 큰 응력치를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 PCL과 같이 지반과 밀착되지 않은 구조물에 대한 내진해석을 위해서는 유사정적해석만을 이용한 내진설계는 다소 과소설계의 우려가 예상된다.

표 8. 구조해석기법별 PCL에 발생된 단면력 비교(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

구분		유사정적해석법		응답스펙트럼해석법	
		f <sub>ck</sub> (PCL)=450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> (PCL)=400kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> (PCL)=450kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>ck</sub> (PCL)=400kg/cm <sup>2</sup>
PCL 휨응력	최대	15.52	15.47	18.21	18.30
	최소	-18.48	-18.71	-28.99	-28.73
PCL 전단응력	최대	0.88	0.88	1.02	1.02
	최소	0.86	0.86	1.02	1.02
록볼트 축응력	최대	346.6	346.2	407.8	411.0
	최소	-323.2	-326.0	-314.0	-314.4

표 9. 응답스펙트럼해석과 시간이력해석 결과 비교(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

	시간이력해석			응답스펙트럼해석		
	터널심도	$f_{ck(PCL)}=450\text{kg/cm}^2$	$f_{ck(PCL)}=400\text{kg/cm}^2$	$f_{ck(PCL)}=450\text{kg/cm}^2$	$f_{ck(PCL)}=400\text{kg/cm}^2$	
PCL 휨응력	1D	최대	201.0	195.0	최대 : 18.21 최소 : -28.99	최대 : 18.30 최소 : -28.73
		최소	-194.0	-202.0		
	2D	최대	118.0	118.0		
		최소	-123.0	-123.0		
	3D	최대	45.2	46.5		
		최소	-46.5	-47.9		
PCL 전단응력	1D	7.14	7.18	최대 : 1.02 최소 : 1.02	최대 : 1.02 최소 : 1.02	
	2D	4.48	4.60			
	3D	1.80	1.76			
록볼트 축응력	1D	2970.0	2970.0	최대 : 407.8 최소 : -314.0	최대 : 411.0 최소 : -314.4	
	2D	1830.0	1870.0			
	3D	815.0	833.0			

(2) 응답스펙트럼해석과 시간이력해석 결과 비교

지반과 구조물의 상호작용으로 인한 구조물의 내진 성능을 평가하기 위해 이용된 시간이력해석은 터널상부 토피고가가 터널 직경(D)의 1D, 2D, 3D에 대해 수행하였고 이에 따른 결과를 동적 구조해석결과중 가장 큰 응답치를 나타낸 응답스펙트럼 해석결과와 비교하면 위의 표 9와 같다.

상기의 표에 나타난 바와 같이 응답스펙트럼해석에 의해 계산된 부재의 최대 단면력이 시간이력해석에 의한 결과 보다 훨씬 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 응답스펙트럼 해석에 사용된 해석모델이 지반요소를 고려하지 않은 단순 PCL구조에 대한 동적해석을 수행하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 시간이력해석 시 사용된 모델이 지반 및 구조물의 전체구조계를 이용한 수치해석기법이기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 지반 및 구조물의 동적인 고유특성치가 상이하므로 동일한 시간에서의 진동모드가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이러한 지반-구조물의 상호작용에 대한 영향을 크게 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 동적구조해석(Structural Dynamic Analysis)만을 수행할 경우, 구조물의 내진성능을 과소평가할 소지가 있으므로 필히 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction Analysis)을 고려한 지진해석을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

상기와 같이 유사정적 해석법, 응답스펙트럼 해석법 및 시간이력 해석법을 이용하여 지진동으로 인한 조립

식 터널 라이닝(PCL)의 내진성능 평가 및 해석기법에 대한 고찰을 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) PCL의 내진성능 평가를 위해 현재 국내의 터널설계에 적용되었던 단면특성을 이용하여 유사정적해석 및 응답스펙트럼해석을 수행한 결과 PCL에 발생하는 응력은 모두 허용응력내에서 발생하게 되어 PCL의 내진성능은 확보된 것으로 판단된다.
- (2) 그러나 PCL에 발생하는 인장응력이 콘크리트의 허용인장응력을 초과하게 되어 향후 PCL을 이용한 터널설계시에는 적절한 철근보강이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 또한 터널의 설치심도별로 PCL의 내진성능을 평가하기 위해 지반-구조물 상호작용을 고려한 시간이력해석을 수행한 결과, 터널의 설치심도가 터널전단부에서 터널폭의 2배이상 되는 경우에 부재에 발생된 응력이 허용응력내에서 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 이역시 PCL의 발생된 인장응력이 콘크리트의 허용인장응력을 초과하게 되어 적절한 철근의 보강이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 이상과 같은 PCL의 내진해석결과를 해석기법별로 분석한 결과, 유사정적해석에 의해 발생된 응력이 가장 적게 나타났으며 가장 큰 응력을 발생시키는 해석기법으로는 지반-구조물 상호작용을 고려한 시간이력해석법으로 나타났다.
- (5) 시간이력해석에 의한 결과값이 가장 큰 이유는 지반과 구조물의 고유주기 또는 고유주파수가 상이하므로 동일한 시간에서의 진동모드가 구조물과 주변지

반이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 PCL과 같이 주변지반의 동적거동에 영향을 받는 구조물에 대해서는 단순 동적 구조해석 또는 유사정적해석만으로 구조물의 내진설계를 수행하게 되면 구조물의 내진성능을 과소평가할 우려가 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 정형식, 배규진, 김성환(1997), "NATM터널용 프리캐스트 콘크리트 라이닝의 개발연구", 대한토목학회, pp.23~86
2. 정형식, 이용준, 이규필(2001), "지진으로 인한 개착식터널의 동적거동 특성에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제21권, 제3-C호, pp.187~195.
3. 정형식, 배규진(2001), "경춘선 제7공구 4개터널의 PCL공법 적용 타당성에 관한 연구", 한양대학교 건설연구소, pp.53~73.
4. 한국전력기술(주)(1985), "내진설계를 위한 동적 지반-구조물 상호작용해석", 한국전력기술(주), pp.47~93.
5. 한국전력기술연구원(1989), "동역학적 지반특성치의 평가 및 응용에 관한 연구", 한국전력공사, pp.277~303.
6. 한국지진공학회(1999), "지중구조물의 내진 설계", pp.275~398.
7. 한국토지공사(1999), "토지개발기술", 한국토지공사, pp.50~73.
8. CLOUGH, G.W. and DUNCAN, J.M.(1971), "Finite element analysis of retaining wall behavior", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div, ASCE, Vol.97, No.SM12, pp.1657~1674.
9. DADDAZIO,R.P.,ETTOUNEY,M.M., and SANDLER,I.S.(1987), "Nonlinear dynamic slope stability analysis", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.113, No.4, pp.285~298.
10. ISHIBASHI,I. and ZHANG,X.(1993), "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay", Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.182~191.
11. John Lysmer(1988), "SASSI USER'S MANUAL", University of California.
12. STEVEN L. KRAMER.(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering" PRENTICE HALL., pp.308~347.

(접수일자 2001. 8. 30)