

1/5축소 모형실험에 의한 조립식 터널라이닝 (PCL)의 내진성능 평가

Seismic performance evaluation of Precast Concrete Lining (PCL) using the 1/5 scale down model test

이용준*¹, 정형식², 이두화³, 조병완⁴

Lee, Yong-Jun · Chung, Hyung-Sik · Lee, Doo-Hwa · Jo, Byung-Wan

Abstract

Precast Concrete Lining (PCL) is invented in order to resolve the problem of the 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 Northern Europe. 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 the case of earthquake. To evaluate the seismic performance of PCL, we used shaking table apparatus by 1/5 scale down model. The result of this research is as shows that deep tunnells satisfied for Korea seismic design criteria.

Keywords: Precast concrete lining (PCL), seismic design, shaking table test

요 지

최근 현장 타설 콘크리트 터널 라이닝의 시공 및 유지관리상 문제점을 개선하기 위해 노르웨이에서 개발된 프리캐스트 콘크리트 라이닝에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 북유럽지역에서는 지진이 거의 발생되지 않기 때문에 PCL공법 적용시 지진하중으로 인한 영향을 고려하지 않았다. 따라서 PCL공법을 국내에 도입하기 위해서는 지진하중으로 인한 PCL의 영향분석을 선행하여야 할 것으로 판단되어 본 연구에서는 지진하중으로 인한 PCL의 안정성 검토를 수행하고자 하며 이를 위해 실물을 1/5로 축소한 모델체에 대한 진동대 실험을 수행하였으며 PCL의 내진성능평가를 수행하였다. 연구결과, 대심도터널에서 PCL공법을 적용할 경우, 국내의 내진설계 기준에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

주요어: 프리캐스트 콘크리트 라이닝, 내진설계, 진동대실험

*1 정희원, 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원 (civillyj@hanmail.net)

2 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

3 정희원, 한양대학교 대학원 박사과정, 삼보기술단 대표이사

4 비희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

1.1 연구목적

국내의 터널 내부라이닝은 주로 현장타설 콘크리트 라이닝공법이 적용되어 왔으며 이 공법의 문제점으로 대두되고 있는 현상으로는 콘크리트 라이닝의 현장타설로 인한 공기지연, 품질관리의 어려움, 콘크리트의 수화열, 건조·수축으로 인한 균열발생, 시공후 하자보수 기간동안의 유지보수비용 부담등의 여러가지 문제점들이 나타나고 있다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위해 최근 국내에서는 현장타설콘크리트 라이닝을 대신한 조립식 라이닝 (PCL)공법에 대한 국내적용성 검토 및 연구가 진행되고 있다. 그러나 PCL공법은 터널굴착면과 내부라이닝이 약 15cm정도 이격되어 있으며 내부라이닝은 상부 및 하부패널이 별도로 공장제작되어 이를 거치하는 구조로 이루어졌으므로 현장타설 라이닝공법의 설계방법과는 많은 차이점을 갖고있다. 즉, PCL의 설계시에는 지반의 장기이완하중, 낙석하중, 공기압 및 차량충돌로 인한 하중 등에 대한 분석이 필요할 뿐만 아니라 PCL이 주변지반과 밀착되어 있지 않기 때문에 지진발생시 현장타설 콘크리트 라이닝에 비해 훨씬 큰 지진하중을 받을 것으로 예상된다. 본래 PCL은 북유럽국가인 노르웨이에서 최초로 고안되어 현장에 적용된 공법으로 이 지역은 지진이 거의 발생하지 않기 때문에 지진하중에 대한 특별한 대책이 강구되지 않은 상태인 것으로 판단된다. 따라서 이 공법은 국내에 도입하기 위해서는 기타의 하중에 대한 검토도 수행되어야 하지만 특히 지진하중에 대한 영향을 많이 받을 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 국내 내진설계기준에 적합한 하중조건을 이용하여 PCL의 내진성능을 진동대 실험결과를 이용하여 평가하였다.

1.2 연구내용

국내의 내진설계기준에 의한 PCL의 내진성능 평가를 위해 본 연구에서는 1/5 축소 모델에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 또한 PCL은 주로 산악터널에 적용되고 있

으므로 고속도로 2차선터널에 해당되는 모형을 이용하였으며 실제 구조체와 거의 유사한 경계조건을 만족하도록 제작된 모형체를 이용하여 지진파에 따른 성능평가, 지진가속도에 따른 성능평가를 수행하였다. 즉 실험에 적용된 지진파로는 국내의 내진설계기준에 제시된 입력변수를 이용한 인공합성지진파와 해외의 실측지진파인 엘센트로지진파, 노트리지지진파에 대해 실험을 수행하였다. 또한 입력지진 가속도는 실측지진파를 이용한 실험시 0.1g, 0.2g, 0.3g 및 실측지진파의 최대 가속도를 적용하였다.

이상과 같은 진동대실험 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 본 연구에서는 진동대실험과 동일한 조건을 반영한 실제 규모의 조건에 대한 수치해석을 수행하여 이의 결과와 진동대실험결과를 비교하였다.

2. PCL공법의 개요

NATM은 오스트리아와 같이 퇴적암이나 변성암계통의 강도가 낮고 초기에 변위발생이 쉬운 연약한 암반을 대상으로 한 터널공법인 반면 PCL공법은 화성암계통의 강도가 높고 상대적으로 균열이 적은 암반을 대상으로 개선된 1차 지보재만으로 터널을 안정화시키는 공법으로 노르웨이에서 처음 개발되었다.

안정성에 있어서 PCL공법의 개념은 원지반의 지지력을 최대한으로 활용하면서 굴착과 동시에 슛크리트나 rock bolt와 같은 지보재로 1차적으로 안정화시키는 NATM의 기본개념과 같으나 이를 영구지보재개념으로 사용하는 점에서 NATM과 다르다.

PCL공법은 그림 1과 같이 강도 및 내구성을 개선한 슛크리트 및 rock bolt와 같은 1차 지보재로 지반을 영구적으로 안정시킨 후, 균질한 공장제품으로 제작된 조립식라이닝을 설치하게 되므로 PCL은 오직 부대시설 보존과 지중만을 유지토록 하기 위한 마감재역할만을 담당한다. 또한 PCL배면은 터널의 유효단면 이외에 굴착에 의한 여굴을 채움없는 빈 공간으로 유지시켜 지반내의 지하수를 완전 유도배수시킬수 있으므로 잔류수압으로 인한 불확실한 하중을 완전제거한다는 것이 PCL공법의 기본설계개념이다 (정형식, 배규진, 이상덕, 2001).

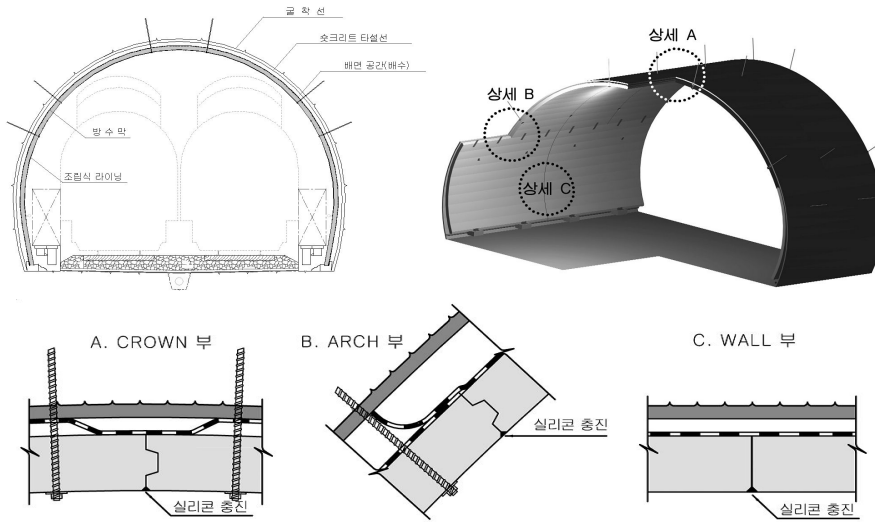


그림 1. 조립식 터널 라이닝 (PCL) 공법의 개념도

이상과 같은 PCL의 기본 설계개념에서 알수 있듯이 설계시 PCL에 작용할 수 있는 주하중으로는 PCL자체의 자중일 것으로 예상되며 기타의 부수적 하중으로는 암반 낙반으로 인한 낙석하중, 철도차량 통과시 공기압하중, 지하수 결빙으로 인한 얼음하중, 터널내 운행차량의 돌발적 충돌로 인한 차량 충돌하중 등이 있다. 그러나 이러한 부하중들은 이미 노르웨이의 PCL설계자료를 통해 이에 대한 설계방법이 제시되어 있을 뿐만 아니라 구조해석만으로도 PCL의 안정성을 쉽게 검토할 수 있을 것으로 판단되나 지진하중에 의한 영향은 PCL최초 개발국인 노르웨이에서조차 정밀검토가 수행되어 있지 않기 때문에 본 공법을 국내에 도입하기 위해서는 이에 대한 영향을 충분히 검토한 후, 터널현장에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

3. 축소모형실험에 의한 PCL의 거동 특성

건축 및 토목구조물의 지진시 안정성 평가를 위해 국내외에서 일반적으로 적용되고 있는 실험법으로는 모달실험법 (modal test), 유사동적실험법 (pushover test), 진동대실험법 (shaking table test) 등이 있다. 이중 모

달실험법과 유사동적실험법은 실험방법이 비교적 단순하여 토목분야 및 건축분야의 상부구조물 (건물, 교각 등)에 대한 성능평가지 주로 많이 사용된다 (박영환 등, 1999). 그러나 이 방법들은 구조물 주변지반에 대한 지진시 영향을 자유롭게 모사하기가 곤란할 뿐만 아니라 실험으로 부터 얻어지는 값이 구조물의 응답스펙트럼임을 감안하면 본 연구에서 검토하고자 하는 PCL의 성능평가에 적용하는 것은 곤란하다고 판단된다. 그러나 진동대 실험은 주변지반의 구속효과뿐만 아니라 구조물의 동적 거동도 실험에서 얻을 수 있기 때문에 PCL의 내진성능 평가에 적용하였다. 그러나 이 실험법 역시 prototype의 구조물을 진동대 규모에 맞도록 축소 제작하여야 하므로 이로 인한 오차발생을 피할수 없다. 따라서 본 연구에서는 기존의 상사법칙을 적용하여 모형체를 제작하였으며 실험으로부터 얻어진 응답치와 수치해석에서 얻어진 응답치를 비교하여 진동대실험의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

3.1 1/5 축소모형 (진동대) 실험

3.1.1 진동대실험 개요

본 연구에서 사용된 진동대는 현대건설 기술연구소에서 보유하고 있는 1축 진동대를 사용하였다. 1축진동대

의 규격은 5m×3m이며 최대 가능시험 하중은 약 300kN이며 최대 입력가속도는 1.0g이다 (이용준, 2001).

실험에 사용된 모형체의 규모는 전술한 바와 같이 고속도로 2차선 터널을 대상으로 이를 1/5규모로 축소 제작하여 실험하였으며 prototype을 축소 model화 하기 위해 적용된 상사법칙은 Iai (1989,1999)의 상사법칙 중 Type III을 적용하였다. 또한 모형실험체는 터널 주변지반과 PCL로 구분하여 제작하였으며 주변지반은 목재를 이용하였다. 이는 PCL공법이 주로 보통암이상의 매우 신선한 암반에 적용되는 공법으로 이러한 암반조건에서 지진하중이 작용할 경우, 지반심도에 따른 지진파의 증폭이 거의 발생하지 않기 때문에 모형지반에서도 이를 모사하기 위해 목재를 이용하였으며 실제실험에서도 지진하중으로 인한 모형체 상하부의 지진파 증폭에 따른 상대변위가 발생하지 않은 것으로 관측되었다. 따라서 본 실험의 터널심도조건은 원지반의 강성이 매우 크고 이로 인한 심도별 진동특성이 변하지 않기 때문에 대심도에 해당하는 실험조건으로 가정할 수 있다. PCL 모형체는 알루미늄을 이용하여 제작하였으며 이는 콘크리트의 질량과 알루미늄의 질량이 유사하므로 본 실험에서의 모형 PCL은 알루미늄을 이용하여 제작하였다. 또한 prototype의 실제 모양과 거의 유사하도록 제작하였다. 즉, 그림 2와 3에서 나타낸 바와 같이 PCL은 한개의 하부패널에 두개의 상부패널이 거치되는 형상으로 제작하였으며 PCL과 지반을 연결해 주는 rock bolt는 강봉

(5mm)을 이용하여 목재의 주변지반 모형체와 PCL을 강결하여 조립하였다. 또한 실험에 사용된 계측기로는 Tokyo Sokki Kenkyujo에서 제작된 전기식 소성변형 율계를 사용하였으며 계측기의 설치위치는 상부패널에 4개 하부패널에 2개씩 설치하는 것을 원칙으로 하였고 실험도중 계측기의 고장을 대비하여 각각의 패널에 대해 예비센서를 추가로 설치하였다. 이상과 같이 제작된 터널주변 모델체와 PCL의 모델체를 조립 완성한 사진은 사진 1과 같다.

3.1.2 실험항목

진동대실험시 사용된 입력지진파는 엘센트로지진파, 인공합성지진파, 노트리지진파에 대해 시험을 수행하였으며 실지진파의 sclae조정전의 대표적인 time history는 그림 4와 같다. 각각의 입력가속도는 엘센트로지진파의 경우 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.35g이며 노트리지진파

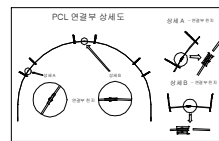


그림 3. 모형 PCL의 상하부패널 연결방식

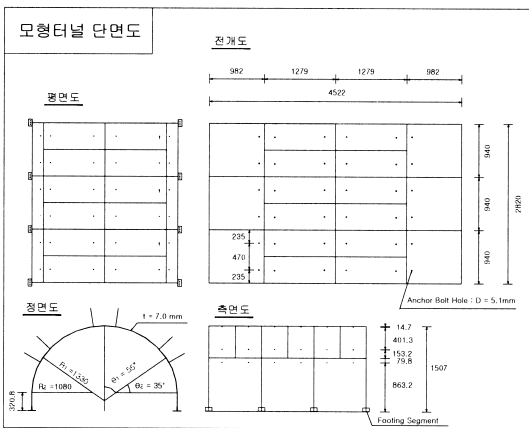


그림 2. 진동대 실험용 PCL모형체



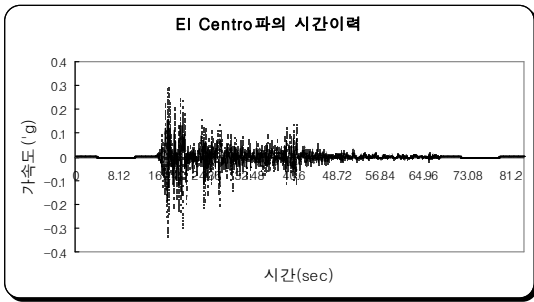
사진 1. 조립 완성된 모형체

인 경우 0.1g, 0.2g, 0.32g를 사용하였으며 인공합성지진파는 0.15g를 사용하여 실험하였다. 물론 입력지진파의 주파수는 scale factor를 이용하여 주파수의 scale을 재조정하여 적용하였다. 이중 인공합성지진파는 지반조건이 보통암지반이며 지진재현주기 1000년 빈도인 1등급 내진설계구조물에 해당되는 조건을 이용한 인공합성지진파를 이용하였다. 또한 엘센트로지진파 및 노트리지지진파는 원래의 최대가속도가 약 0.35g, 0.31g이므

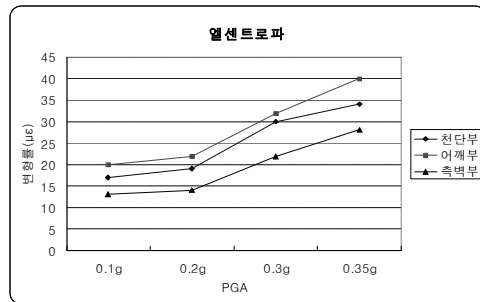
로 이에 대한 실험을 수행하였으며 입력가속도의 증가에 따른 영향을 분석하기 위해 0.1g, 0.2g, 0.3g에 대해서 실험을 수행하였다.

3.2 실험결과

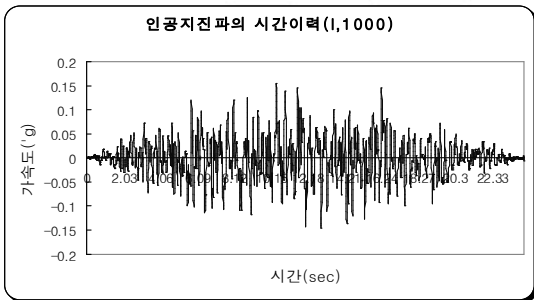
상기와 같은 진동대실험 조건에 의한 결과를 각 지진파의 가속도 별로 나타내면 다음의 그림 5~6과 같다.



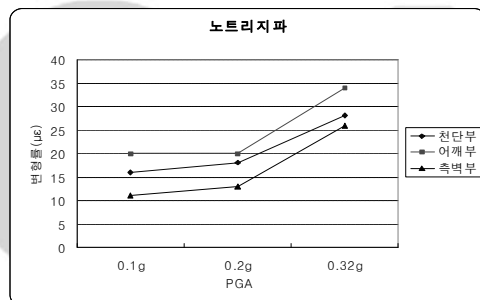
(a) 엘센트로 지진파



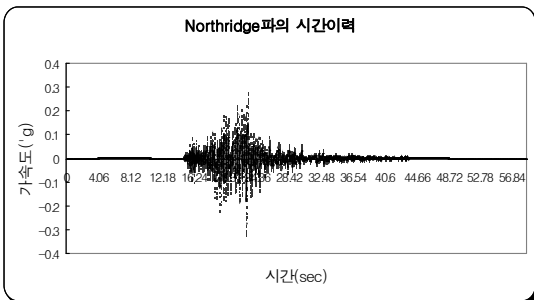
(a) 엘센트로지진파



(b) 인공합성 지진파



(b) 노트리지지진파



(c) 노트리지 지진파

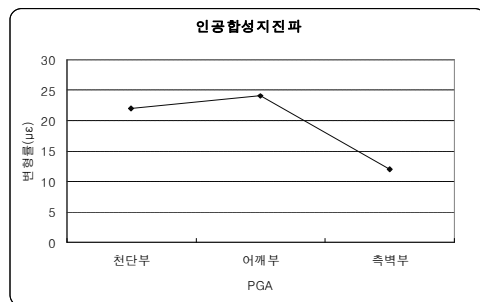


그림 5. 진동대실험으로 부터 얻어진 PCL의 최대변형을

그림 4. 진동대 실험에 적용된 대표적 입력지진파

그림 6. 인공합성지진파에 의한 PCL의 위치별 최대변형을

엘센트로지진파의 입력가속도를 0.1g에서 0.35g까지 증가시키며 실험을 수행한 결과, 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 PCL에 발생하는 최대 변형율은 약 20~40 $\mu\epsilon$ (15~30kgf/cm²)이 발생하는 것으로 나타났으며 최대 변형율이 발생하는 위치는 주로 터널 어깨부에서 발생하는 것으로 나타났다.

또한 노트리지진파의 입력가속도를 0.1g에서 0.32g까지 변화시켜며 진동대실험을 수행한 결과, 그림 5(b)에서 보여주는 바와 같이 최대변형율은 약 20~34 $\mu\epsilon$ (15~26kgf/cm²)이 터널 어깨부에서 발생하는 것으로 나타났다.

인공합성지진파인 경우, 그림 6에서 보여주는 바와 같이 입력가속도가 0.15g에 대해 진동대실험을 수행한 결과 최대변형율은 약 24 $\mu\epsilon$ (13kgf/cm²) 정도 발생하는 것으로 나타났으며 인공합성지진파 역시 터널 어깨부에서 최대 변형율이 발생하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로 부터 지진하중으로 인해 PCL터널에 가장 취약할 것으로 예상되는 지점은 터널의 어깨부인 것으로 나타났으며 각 입력가속도별 PCL의 내진성능은 5장에서 분석하였다.

상기의 그림 5~6의 $\mu\epsilon$ 은 $10^{-6}\epsilon$ 을 의미하며 모형PCL의 재료는 알루미늄으로 제작되었기 때문에 750,000kgf/cm²의 탄성계수를 적용하여 PCL에 발생하는 응력을 계산하였다.

4. 실험 결과의 신뢰성 분석

진동대실험 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 본 연구에서는 실규모 (prototype)의 터널구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석기법으로는 주파수영역 (frequency domain)을 이용한 시간이력해석을 사용하였으며 원지반의 강성은 보통암 조건에 해당되는 전단계수를 적용하였다. 또한 PCL판넬 상하부의 연결방식에 따른 최적경계조건을 선정하기 위해 상하부의 판넬이 완전 강결된 조건과 분리된 조건을 적용하여 이를 진동대실험결과와 비교하였다. 실제 PCL의 연결부 구조는 외적하중에 대한 하중전달이 이루어지지 않는 조건이므로 이에 대한 모델링기법을 보다 실제와 근사하게 모사하기 위해 두가지 조건에 대한 해석을 수행한후 이를 진동대실험결과와 비교한 것이다. 수치해석에 사용된 프로그램으로는 일본 후지쯔사가 미국의 Univ. of California, Berkeley에서 개발된 FLUSH를 window용으로 upgrade시킨 AFIMEX를 사용하였다 (이용준, 2001).

4.1 Prototype의 터널제원 및 특성치

수치해석에 사용된 터널의 prototype은 전술한 바와 같이 고속도로 2차선 터널을 기준으로 하였으며 수치해석에서 사용된 터널의 prototype 단면은 그림 7과 같다.

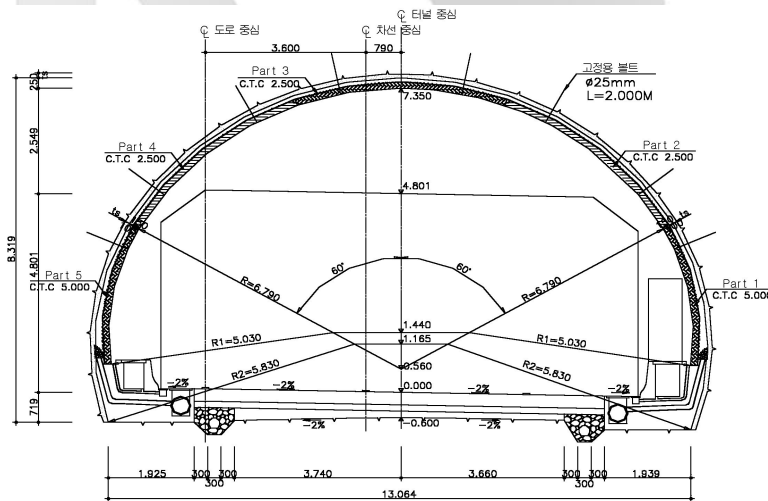


그림 7. 수치해석에 사용된 Prototype의 터널단면

또한 해석에 사용된 터널토피고는 터널직경의 2배에 해당되는 해석영역에 대해 수치해석을 수행하였다. 이는 진동대실험시 토피고 조건이 대심도터널에 해당되므로 해석시에도 터널직경의 2배에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 해석시 사용된 원지반은 전단파 속도가 1500 m/sec, 단위중량 2.4t/m², 전단계수 약 500,000t/m² 인 보통암 또는 경암에 대한 강성을 적용하였으며 그 밖의 터널구조물의 특성치는 표 1과 같다 (정형식, 배규진, 이용준, 2001).

4.2 수치해석 및 진동대 실험결과 비교 분석

4.2.1 진동대 실험결과의 신뢰성 분석을 위한 수치해석 결과

실험결과의 신뢰도를 확인하기 위해 수행된 수치해석은 전술한 바와 같이 3개의 지진파를 보통암 지반조건, 지진구역 1지역, 1000년빈도의 지진 재현주기에 해당되는 설계가속도 (한국지진공학회, 1997, 1999)로 축소하여 분석하였으며 PCL 판넬 상하부의 경계조건은 강결조건과 분리조건에 대해 수치해석을 수행하였다. 또한 터널 상부토피고는 터널직경의 2배에 해당되는 토피고조건을 적용하여 대심도터널의 조건을 모델링하였다. 수치해석에 적용된 경계조건으로는 모델좌우측은 전단경계

조건 (transmitting boundary condition)을 적용하여 해석영역에서 발생된 지진에너지가 모델 좌우측 경계부에서 반사되지 않도록 모델링하였다. 이상과 같이 해석에 적용된 모델의 경계조건을 그림으로 나타내면 그림 8과 같다.

이상과 같은 조건을 이용하여 수치해석을 수행한 결과, 표 2와 같은 터널의 응답치를 얻을 수 있었다.

4.2.2 수치해석을 이용한 진동대 실험 결과의 검증
4.2.1절의 수치해석 및 3.2절의 진동대실험을 이용한

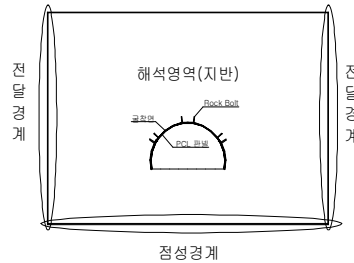


그림 8. 해석모델의 경계조건

표 1. 터널의 지보공 및 PCL이 단면 특성치

구 분	두께 (m)	단위중량 (tf/m ³)	탄성계수 (tf/m ²)	비 고
PCL	0.15	2.5	2.8e6	f _{ck} = 400kgf/cm ²
숏크리트	0.05	2.35	2.5e6	C40
Rock Bolt	D25	7.0	2.1e7	C.T.C = 2m

표 2. 상하부 패널 연결조건별 수치해석 결과 (단위: tf, m)

지진파	연결조건	모멘트	축력	전단력
엘센트로 지진파	강결	2.2	4.4	2.5
	분리	2.5	0.9	1.5
인공합성 지진파	강결	2.1	3.5	2.3
	분리	2.9	1.0	1.7
노트리 지진파	강결	2.5	3.3	3.4
	분리	1.3	0.6	0.8

여 입력지진파별로 수치해석을 수행한 결과와 진동대실험 결과를 휨응력에 대해 비교하면 그림 9~11과 같다.

그림 9~11에 나타난 바와 같이 터널의 천단부, 어깨부, 측벽부 모두 강결 (fix)로 상하부패널을 모델링한 경우 보다 분리조건 (free)에 의한 연결방식이 보다 진동대 실험결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 PCL의 내진설계를 위한 수치해석시에는 상하부 패널의 연결방식을 일체화되게 모델링하는 것은 불합리할 것으로 판단되며 보다 합리적인 PCL의 지진해석을 위해

서는 상하부 패널이 분리된 조건을 이용하여야 할 것이며 이는 실제 PCL구조물의 하중전달 메카니즘과 동일한 결과라 할 수 있다.

5. 진동대실험에 의한 PCL의 내진성능 평가

본 절에서는 진동대실험으로 부터 얻어진 PCL의 각

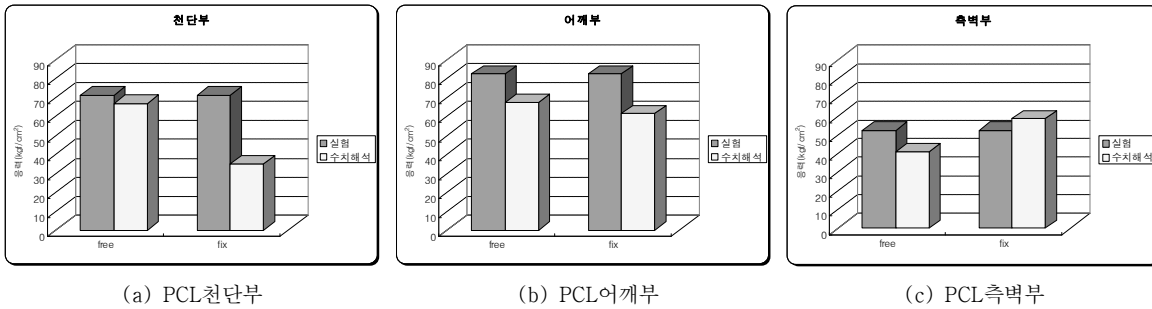


그림 9. 엘센트로지진파에 대한 실험 및 해석결과 비교

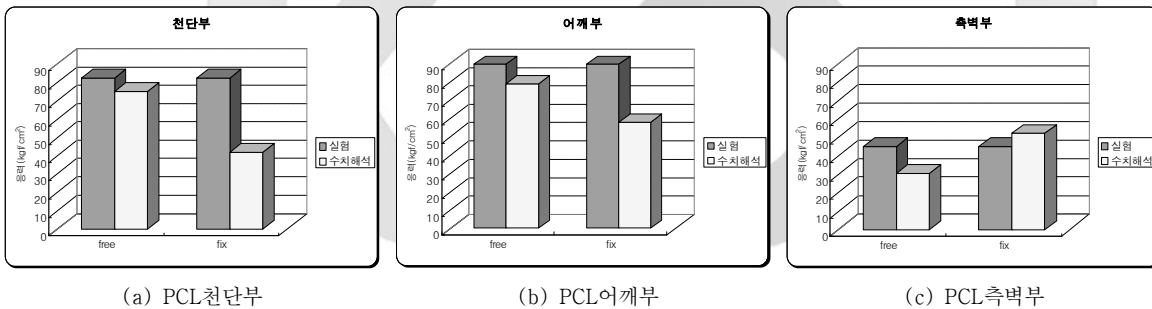


그림 10. 인공합성지진파에 대한 실험 및 해석결과 비교

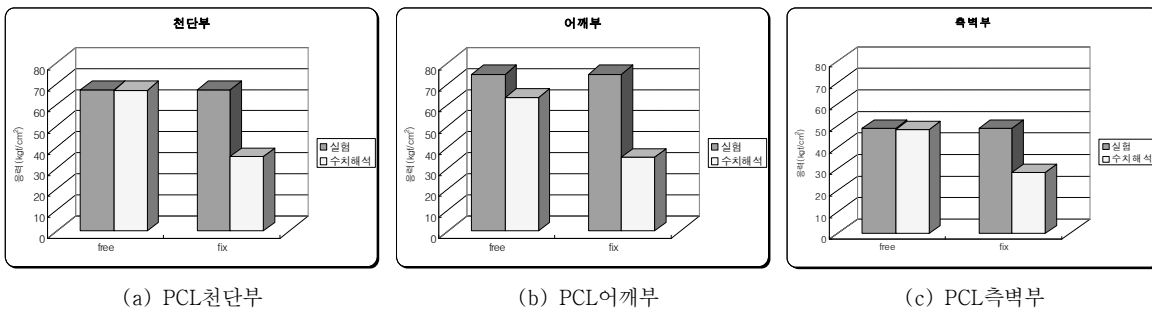


그림 11. 노트리지진파에 대한 실험 및 해석결과 비교

표 3. 진동대 실험결과에 의한 내진성능평가 결과

지진파	입력 가속도	천단부		어깨부		측벽부	
		변형율 ($\mu\epsilon$)	휨응력 (kgf/cm^2)	변형율 ($\mu\epsilon$)	휨응력 (kgf/cm^2)	변형율 ($\mu\epsilon$)	휨응력 (kgf/cm^2)
엘센트로	0.1g	17	64	20	75	13	49
	0.2g	19	71	22	83	14	53
	0.3g	30	113	32	120	22	83
	0.35g	34	128	40	150	28	105
인공합성	0.15g	22	83	24	90	12	45
노트리지	0.1g	16	60	20	75	11	41
	0.2g	18	68	20	75	13	49
	0.32g	28	105	34	128	26	98

위치별 대표적인 최대응답치를 이용하여 실제구조물의 내진성능을 확인하고자 한다.

본 실험에서 적용된 상사비는 5이므로 실험결과로부터 얻어진 변형율에 상사비 5를 곱하여 이를 응력으로 환산한 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3에서 나타난 바와 같이 prototype에서 발생할 것으로 예측되는 최대 휨응력은 엘센트로지진파인 경우 약 150kgf/cm^2 , 인공합성지진파인 경우 약 90kgf/cm^2 , 노트리지지진파인 경우 약 128kgf/cm^2 정도 발생할 것으로 예측된다. 따라서 PCL의 설계기준강도가 400kgf/cm^2 이며 이때의 허용휨응력이 약 160kgf/cm^2 임을 감안하면 각 지진파의 최대가속도인 조건에서도 모두 허용응력을 만족할 것으로 예상된다. 그러나 이러한 결과는 3.1.1절 및 4.1절에 언급한 바와 같이 대심도조건에 대한 결과이며 천층에 터널이 시공되는 조건에 대해서는 부적절할 것으로 예상되므로 이에 대한 다양한 조건에서의 분석은 추후에 본 연구의 결과를 바탕으로 수치해석적 기법을 이용하여 수행하고자 한다.

6. 결론

본 연구에서는 PCL을 이용한 터널 설계시 지진하중으로 인한 영향을 1/5축소 모형에 의한 진동대실험을 이용하여 검토하였다. 이에 대한 연구결과를 종합정리하면 다음과 같다.

1. PCL에 대한 진동대 실험 결과, 각 지진파별 최대 변형율은 엘센트로 지진파인 경우 약 $20\sim40\mu\epsilon$, 노트리지 지진파인 경우 약 $20\sim34\mu\epsilon$, 인공합성지진파인 경우 약 $24\mu\epsilon$ 인 것으로 나타났으며 최대 변형율 발생 위치는 일반적으로 터널 어깨부에서 발생하는 것으로 나타났다.
2. 진동대 실험결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 수치해석을 수행한 결과, PCL판넬의 연결조건인 분리 및 강결인 조건에 대해 분석하면 각 지진파별 최대 모멘트, 축력 및 전단력은 대체로 강결조건 보다 분리조건에 의해 얻어진 응답치가 적은 것으로 나타났다.
3. 진동대 실험 결과에서 얻어진 휨응력 및 진동대 실험과 동일한 조건을 이용한 수치해석 결과에서 얻어진 PCL의 휨응력과 비교한 결과, 대체적으로 PCL판넬의 연결방식을 분리조건을 이용하여 수치해석을 수행하는 것이 보다 합리적인 것으로 분석되어 향후 수치해석을 이용한 PCL의 내진해석시 PCL상하부 연결판넬을 분리조건을 이용하여 수행함이 적절할 것으로 판단된다.
4. 터널의 설치심도가 터널직경의 2배이상의 토피고 조건에서 수행한 진동대 실험결과, PCL판넬의 허용휨응력 이내에서 PCL의 휨응력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 현행 국내의 내진설계기준에 의한 PCL의 성능은 만족하는 것으로 분석되었다.
5. 이상과 같은 PCL의 내진성능 평가는 천층터널이 아닌 중대심도의 터널에 대한 연구결과이므로 보다 중

합적인 성능평가를 위해서는 본 연구에서 수행된 연구결과를 바탕으로 다양한 조건에서의 분석을 필요로 할 것으로 판단되며 향후 이에 대한 연구결과를 수치 해석적 기법에 의해 추가적으로 수행하고자 한다.

참고문헌

1. 정형식, 배규진, 이상덕 (2001), “경춘선 제 7 공구 4개 터널의 PCL공법 적용타당성에 관한 연구”, 한국터널공학회 연구보고서, pp. 53-73.
2. 정형식, 배규진, 이용준 (2001), “조립식 터널 라이닝 (PCL)의 내진성능 평가 및 해석기법에 대한 고찰”, 한국지반공학회, 제17권 제5호, pp. 197-207.
3. 이용준 (2001), “지진동으로 인한 개착식터널의 거동특성에 관한 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, pp. 7-56.
4. 박영환, 김정호, 김형일, 곽종원 (1999), “대형 구조물 모형실험 정착을 위한 연구”, 한국건설기술연구원, pp. 248-331.
5. 한국지진공학회 (1999), “지중구조물의 내진설계”, pp. 28-42.
6. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원 (1997), “내진설계 기준연구 (II)”, 건설교통부, pp. 32-37.
7. SUSUMU Iai (1989), “Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field”, Soils and Foundations, JSCE, Vol. 29, No. 10, pp. 109-118.
8. S. Iai and T. Sugano (1999), “Soil-Structure Interaction Studies through Shaking Table Tests”, Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 1163, pp. 927-940.



이용준

한양대학교 산업과학연구소
선임연구원
civillyj@hanmail.net



정형식

한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
chunghs@ihanyang.ac.kr



이두화

한양대학교 대학원 박사과정, 삼보기술단 대표이사
sbege@chollian.net



조병완

한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
joycon@hanmail.net