

# 리브 보강 프리캐스트 터널 Liner의 역학적 거동 특성

이규필<sup>1</sup>, 이성원<sup>2</sup>, 신휴성<sup>3</sup>, 황재홍<sup>4\*</sup>

## Mechanical behaviour of tunnel liner using precast segment reinforced by rib

Gyu-Phil Lee, Sung-Won Lee, Hyu-Soung Shin, Jae-Hong Hwang

**Abstract** Due to the limitation of construction efficiency and structural safety, the application of the high covering and wide width tunnels was limited prior to the introduction of precast cut and cover tunnels. Therefore, a cut and cover tunnel structure with rib reinforcement is proposed to mechanically improve the safety on condition of high covering and wide width tunnel. In this study, large-scale experiments are carried out to examine the mechanical behavior of the cut and cover tunnel structure with rib reinforcement under static load condition. Based on the results obtained from this study, the ultimate load of tunnel structure increases to about 3.3 times by rib reinforcement. Consequently, safety of tunnel structure increases compared to non-installed cases due to confining crown part by rib reinforcement.

**Keywords:** Cut and cover tunnel, precast segment, rib

**요 지** 콘크리트 현장타설 개착식 터널구조물의 문제점을 해결하기 위하여, 시공성 및 품질관리 등 측면에서 유리한 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 시공이 가장 효과적인 대안이라 할 수 있다. 그러나 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 설계 및 시공은 고성토 또는 광폭터널 조건에서는 시공성 및 구조적 안정성 등과 같은 단점 때문에 그 활용이 제한적이다. 따라서, 본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 구조적 안정성 및 시공성 향상을 위하여, 리브 보강 프리캐스트 아치를 이용한 개착식 터널구조물을 개발하였으며, 대형 정적하중재하 실험을 통하여 리브보강에 의한 프리캐스트 아치 터널구조물의 역학적 거동 특성을 분석하였다. 프리캐스트 세그먼트의 리브 보강 효과로 천단부에 균열이 발생하는 하중은 약 1.7배, 구조물의 극한하중은 약 3.3배 증가하는 등 리브 보강효과를 통하여 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 구조적 안정성을 크게 향상시켰다.

**주요어:** 개착식 터널, 프리캐스트 세그먼트, 리브보강

### 1. 서 론

개착식 터널구조물은 현장조건, 시공성 및 경제성 등 여러 검토사항 등에 의해 그 시공법이 결정되며, 콘크리트 현장타설을 통한 시공법이 가장 일반적인 시공법이라 할 수 있다. 그러나 이 경우 철근조립, 강재 거푸집 설치, 콘크리트 타설 및 양생 등 여러 공정이 요구될 뿐만 아니라, 시공성 저하 및 콘크리트 품질관리 등 여러 문제점을 안고 있다.

상기와 같은 콘크리트 현장타설 개착식 터널구조물의 문제점을 해결하기 위하여, 시공성 및 품질관리 등의 측면에서 유리한 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식

터널구조물의 시공이 가장 효과적인 대안이라 할 수 있다.

콘크리트 라이닝을 프리캐스트 세그먼트로 분할 제작 시공시 세그먼트간의 연결부가 내부hin지로 거동하게 되고, 이로 인하여 콘크리트 라이닝의 두께를 경감할 수 있으나(배규진 등, 2003), 성토고 15 m 이상의 고성토 및 4차선 도로터널 등과 같은 광폭터널 시공 조건에서는 세그먼트의 두께가 증가하게 될 뿐만 아니라, 시공성 저하 및 구조적 안정성 확보 등의 문제점이 야기될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 구조적 안정성 향상 및 시공성 향상을 위하여, 리브 보강 프리캐스트 아치를 이용한 개착식 터널구조물을 개발하였다. 프리캐스트 아치 개착식 터널구조물의 리브보강 효과 분석을 위하여 폭 4.8 m, 높이 3 m 아치형 대형 시험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 리브보강에 의한 프리캐스트 아치 터널구조물의 역학적 거동 특성을 분석하였다.

<sup>1</sup>정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구원

<sup>2</sup>정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 책임연구원

<sup>3</sup>정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원

<sup>4</sup>정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실

\*교신저자: 황재홍 (hwang@kict.re.kr)

## 2. 개착식 터널구조물 개요

### 2.1 현장타설 콘크리트 라이닝을 이용한 개착식 터널구조물

개착식 터널구조물은 원지반 굴착 및 바닥정리, 강제

거푸집 설치, 철근조립 및 콘크리트 현장 타설/양생 후 방수처리 및 성토 등과 같은 일련의 공정을 통하여 이루어지는 것이 일반적인 시공법이다(그림 1~그림 6 참조).

상기와 같은 개착식 터널구조물의 일련의 시공과정은 1 span(약 10 m) 시공에 약 1주일 정도의 시공기간을

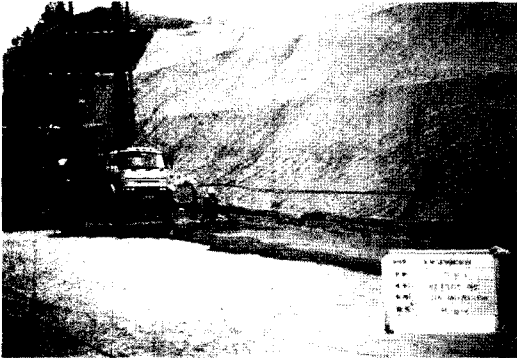


그림 1. 지반굴착 및 기초처리

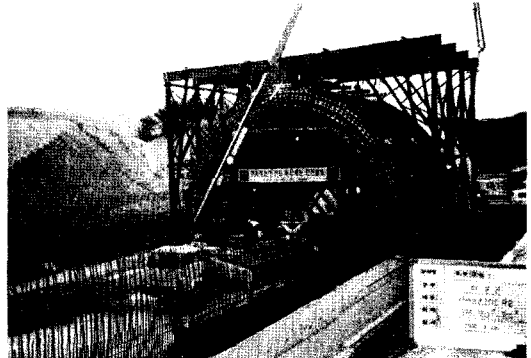


그림 4. 콘크리트 현장 타설

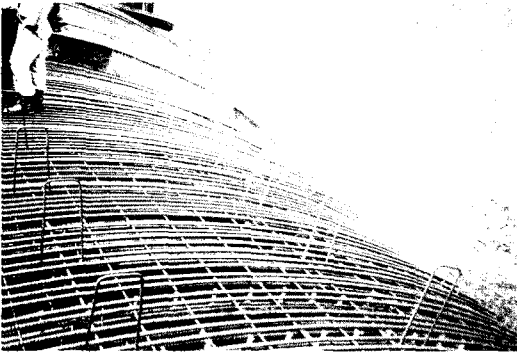


그림 2. 철근조립

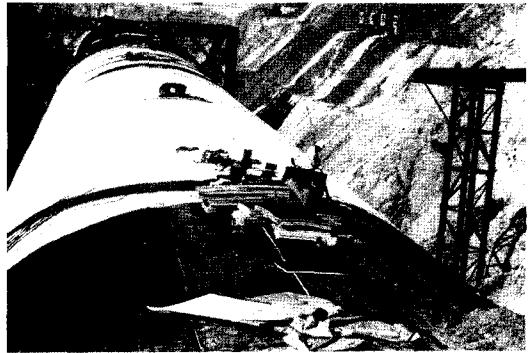


그림 5. 방수막 시공

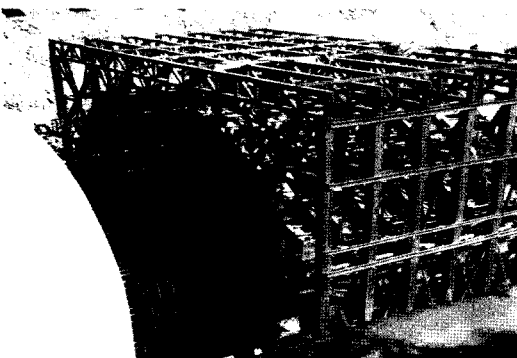


그림 3. 강제 거푸집 설치

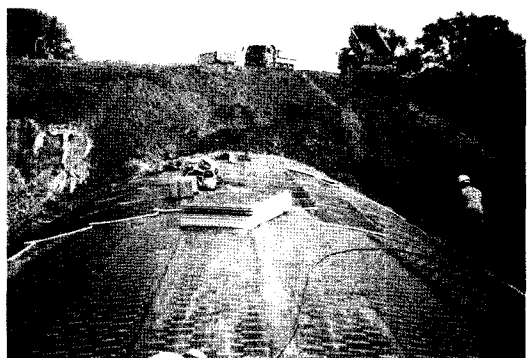


그림 6. 되메움 시공

필요로 하며, 이 기간 중 작업불량은 개착식 터널구조물의 품질은 물론 구조적 안정성에 큰 영향을 미치게 되므로 품질관리에 만전을 기하여야 한다.

## 2.2 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물

콘크리트 라이닝의 품질관리 향상, 공정의 단순화 및 공기단축 등을 통한 개착식 터널구조물의 경제성을 향상 시키는 방안 가운데 가장 현실적인 대안이 프리캐스트를 이용한 조립식 터널구조물 시공방법이라 할 수 있다. 이러한 프리캐스트를 이용한 조립식 구조물 시공법은 공장에서 프리캐스트를 제작한 후 현장에서 조립하

여 완성하는 공법으로, 공기단축은 물론이고 도심지의 경우 교통흐름 방해를 최소화할 수 있으며 공장생산으로 엄격한 품질관리에 의해 균질한 제품을 생산할 수 있는 장점이 있다.

프리캐스트 구조물의 장점을 활용한 개착식 터널구조물 설계 및 시공을 위하여 프랑스 등 선진외국에서는 소형 프리캐스트 박스 구조물 설계 및 시공기술을 발전시켜 그림 7에 나타난 바와 같이 2~3개의 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물을 시공하고 있으며, 국내 전문건설기업에서도 그림 8에서 보이는 바와 같이 PAB(Precast Arch Bridge)공법을 개발 청원-상주간 고속도로 탄부터널 등에 적용하고 있다(우혁근 등, 2007).

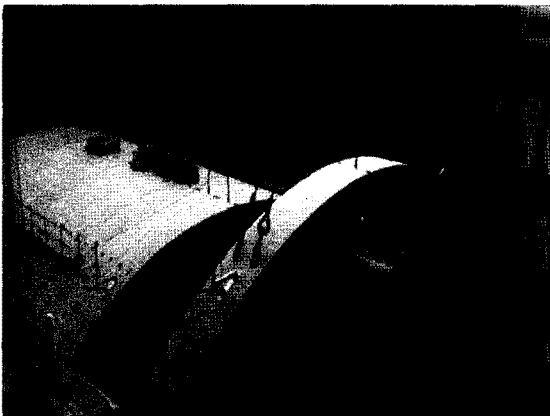


(a) Tech span(프랑스)

## 2.3 리브 보강 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물

프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널의 시공은 기존 현장타설 콘크리트 라이닝 시공법에 비하여 시공성 및 품질관리 등의 장점이 있으며, 세그먼트 연결부가 내부힘으로 작용하게 된다. 따라서 현장타설 콘크리트 라이닝과 같은 개착식 터널구조물 대비 동일하중 조건에서 발생하는 휨모멘트가 감소하게 되므로 세그먼트 부재의 단면이 감소될 뿐만 아니라 부재를 경량화 할 수 있다.

그러나 고성토 조건 및 광폭터널 등에 적용하기에는 세그먼트 연결부의 전단변위 및 축력 등에 의하여 구조



(b) Module arch(일본)

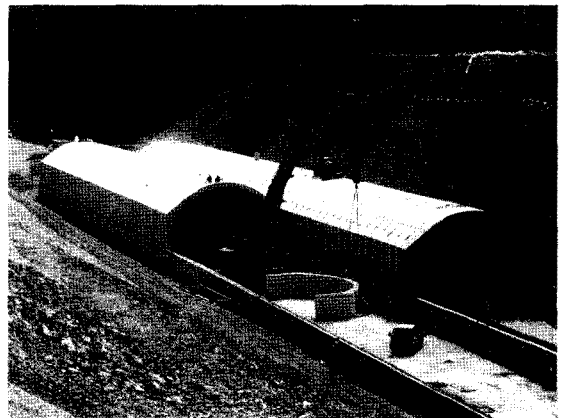


그림 8. PAB(국내사례)

그림 7. 프리캐스트 조립식 터널 시공전경(해외사례)

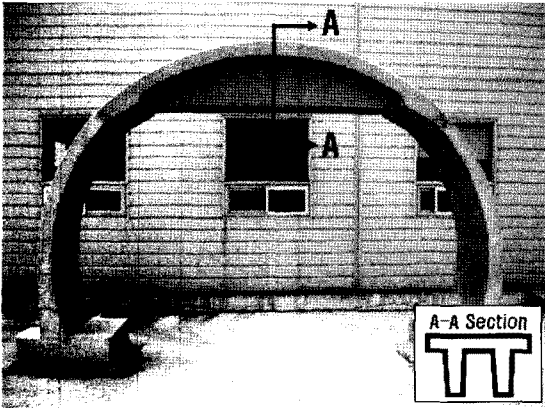


그림 9. 리브 보강 프리캐스트 세그먼트 조립 후 전경

적 안정성 확보에 문제점을 갖고 있다(배규진 등, 2003). 따라서, 본 연구에서는 상기 문제점을 해결하고 리브 보강 프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 구조적 안정성 향상을 도모하고자, 그림 9에서 보이는 바와 같이 천단부에 설치되는 세그먼트 하부에 리브를 설치하여 구조물의 휨강성을 크게 증대시켰다(그림 10(b) 참조).

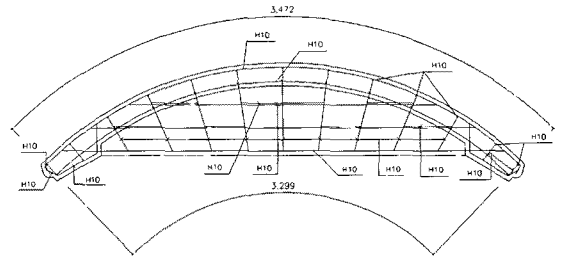
### 3. 대형재하실험

#### 3.1 대형재하실험 개요

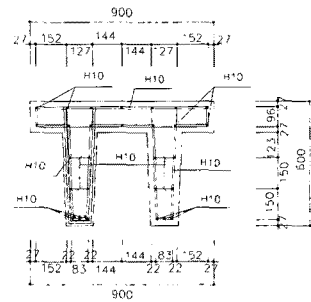
##### 3.1.1 실험체 제작

축소모형 실험을 통하여 실구조물의 거동을 재현하기 위해서는 상사조건이 충족되어야 하며, 이러한 상사조건은 크게 기하학적 상사율, 재료적 상사율과 하중 상사율로 구분될 수 있다(이규필 등, 2007).

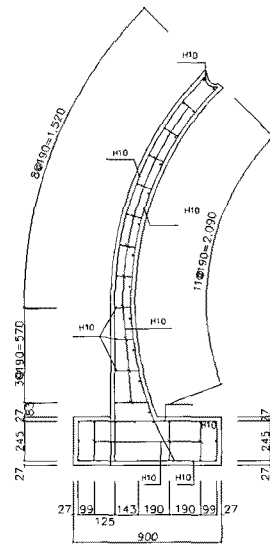
기하학적 상사율은 구조물의 모든 제원을 상사율에 맞추어 축소함으로써 충족되나, 철근은 실구조물에 사용된 제품에 대해 상사율을 고려할 때 이를 충족시키는 기성제품이 제작되지 않고 있으므로 이에 최대한 근접한 직경의 기성제품 철근을 사용하였다. 따라서 철근비는 거의 동일하지만 사용철근의 개수가 작아지므로 철근의 배근간격이 넓어지게 된다. 이와 같은 방법으로 제작된 실험체는 균열 형태에 차이를 나타낼 수 있으나 실구조물의 전반적인 거동을 재현하기에는 충분한 것으로 판단된다. 리브 보강 프리캐스트 세그먼트의 대형 재하실험용 축소모형의 제원, 철근배근 상세 및 제작 전경



(a) 아치부 단면도(정면)



(b) 아치부 단면도(단면)

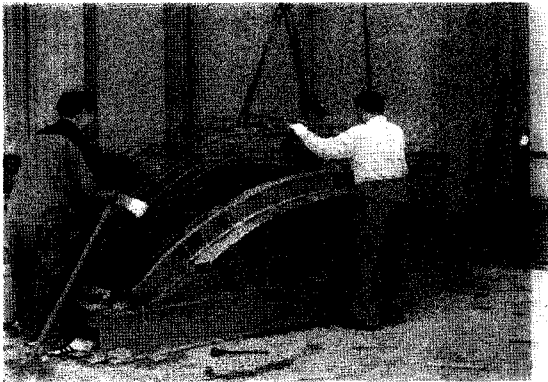


(c) 측벽부 단면도

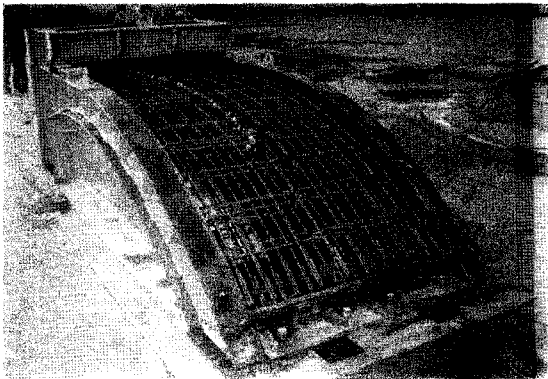
그림 10. 세그먼트 단면도(단위: mm)

은 그림 10~11과 같다.

프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 리브 보강 효과분석을 위하여, 본 연구에서는 리브 보강 유·무 조건에 대한 실험체를 각각 제작하였다.



(a) 아치부

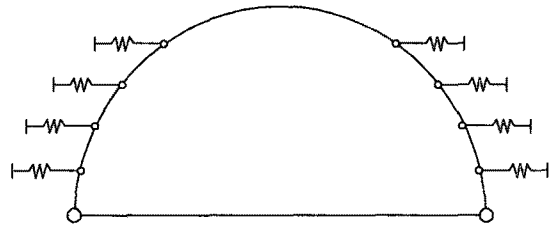


(b) 측벽부

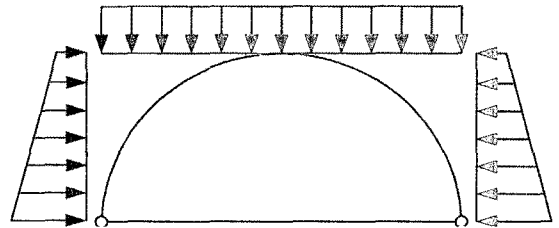
그림 11. 세그먼트 제작 전경

### 3.1.2 재하실험 조건

개착식 터널구조물의 설계 방법에 대해서는 Bickel (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 12(a)와 같이 스프링으로 수평 지지된 뼈대(frame)로 가정하고, 2) 여기에 그림 12(b)와 같은 방법으로 수직 및 수평 하중을 작용시켜, 3) 강성 뼈대 해석 방법을 통하여 라이닝의 구조 요소에 대한 응력으로 전단력, 축력 및 휨모멘트를 산정하여, 4) 구조물로의 안정성을 검토하고 있다. 이때 작용하중은 되메움 지반에 의해 구조물의 상부슬래브 및 측벽에 대해 수직/수평하중으로 가정한다. 수직하중은 토피하중에 대해 연직토압 계수를 곱하여 산정하고 있으며, 연직토압 계수는 터널 구조물의 규모, 토피고, 기초 지지조건 등을 고려하여



(a) 터널 라이닝과 지반반력의 모델링



(b) 라이닝 주변의 토압분포 모사도

그림 12. 개착식 터널구조물 설계 및 해석 기법 예시

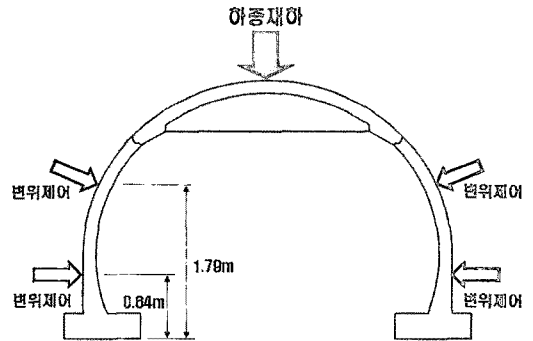


그림 13. 재하실험 개요

일정한 상수로서 제안되어 있다. 한편, 수평하중은 단기 안정성 검토시 주동토압 또는 장기 안정성 검토시 정지 토압으로 가정하고 있다.

개착식 터널구조물 시공시 성토체는 터널구조물에 연직 및 수평 토압으로 작용할 뿐만 아니라, 터널구조물의 변위를 제어하기도 한다. 리브 보강 프리캐스트 구조물의 성능 개선효과를 평가하기 위해서는 이러한 터널구조물과 성토지반과의 상호작용 등을 모사하여야 하나, 하중재하 시스템의 제한 등으로 인하여 연직하중과 변위제어 효과를 모사하기 위하여 그림 13에서 보이는 바와 같이 천단부에 하중을 재하하고 좌·우측 측벽부 및 어깨부 총 4개소에 변위제어 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

재하하중은 천단부에 선하중으로 재하를 하였으며 servo controller를 통한 하중제어 방식으로 하중재하속도는 19.62 kN/min 이다.

### 3.1.3 계측

대형 재하실험시 계측은 그림 14~15에 나타난 바와 같이, 바닥으로부터 0.64 m, 1.79 m 지점의 내·외측, 천단 아치부의 내·외측 및 리브 보강 세그먼트의 경우에는 리브 하부 중앙부 2개소 등 6개소에 12개의 스트레인 게이지를 설치하였다. 본 논문에서는 아치 천단부의 중앙(총 3개소: 내·외측 및 리브)에서 측정한 계측결과를 토대로 구조적 안정성을 비교 분석하였다.

## 3.2 대형 재하 실험결과

### 3.2.1 단순 프리캐스트 아치세그먼트

리브보강을 하지 않은 단순 프리캐스트 아치 세그먼트

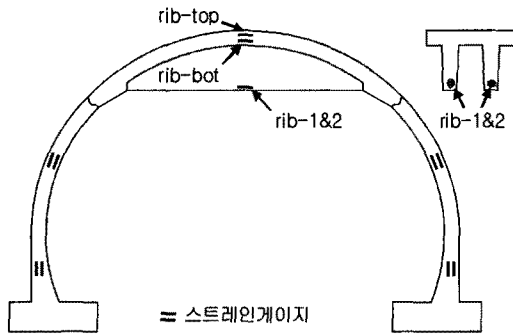


그림 14. 스트레인 게이지 설치 개요

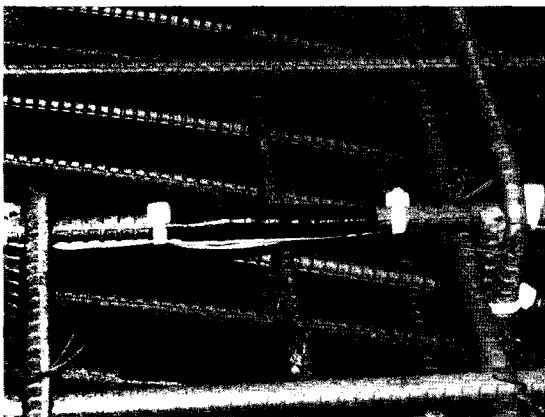


그림 15. 스트레인 게이지 설치 전경

트에 대한 실험결과, 초기 하중재하단계에서 아치 세그먼트 상부 철근(arch-top)은 압축거동, 하부철근(arch-bot)은 벽체 세그먼트 상부의 변위제어에 의한 구속효과로 인하여 변형률이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 재하하중이 증가함에 따라 약 70 kN의 재하하중 조건에서 균열이 발생되면서 중립축이 상승하고, 재하하중이 200 kN을 넘어서면서부터 하부철근의 항복과 동시에 상부철근의 인장거동이 관찰되었다. 최종적으로 재하하중 213 kN에서 압축측 콘크리트의 압괴에 의하여 실험체 파괴가 발생되었다(그림 16~17 참조).

### 3.2.2 리브 보강 프리캐스트 아치세그먼트

리브 보강 프리캐스트 아치 세그먼트에 대한 실험결

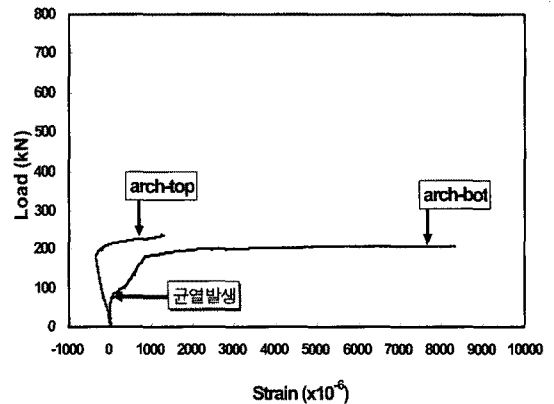


그림 16. 단순 프리캐스트 아치세그먼트 하중-변형률 관계



그림 17. 단순 프리캐스트 아치세그먼트 파괴 전경

과 초기 하중재하단계에서 아치부 하부 철근(arch-bot)에서는 하중재하시 변형이 발생하지 않았으며, 중립축은 아치부와 리브의 경계부에 위치하는 것으로 판단된다.

그러나 재하하중 약 116 kN에서 리브 중앙하부에 균열이 발생되고, 하중이 증가함에 따라 리브하부에 발생한 균열이 진전되면서 중립축이 상승되어 아치부 하부 철근에 인장력이 발생하였다. 리브 하부 철근의 항복은 재하하중 약 430 kN(rib-1) 및 490 kN(rib-2)에서 발생하였으며, 이때부터 아치부 하부 철근의 하중부담이 증가되어 하중-변형을 곡선의 기울기가 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

재하하중 550 kN에서 아치부 하부 철근은 항복점에 도달하였고, 아치부 상부 철근의 인장거동이 관측되었

으며, 703 kN 재하하중 조건에서 최종적으로 압축측 콘 크리트의 압괴로 인한 실험체의 파괴가 발생되었다(그림 18~19 참조).

### 3.3 결과분석

프리캐스트 세그먼트를 이용한 개착식 터널구조물의 리브 보강 효과분석을 위한 정적재하실험으로부터 얻어진 각 실험체의 균열발생 하중 및 극한하중은 다음의 표 1과 같다.

표 1에서 보이는 바와 같이 프리캐스트 세그먼트의 리브 보강 효과로 천단부에 균열이 발생하는 하중은 리브가 없는 단순 프리캐스트에 비해 약 1.7배, 구조물의 극한하중은 약 3.3배 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 프리캐스트 세그먼트의 리브 보강에 의하여 터널구조물의 구조적 안정성을 크게 향상시킬 수 있으며, 고성토 조건 및 4차선 도로터널 등과 같은 광폭 터널 구조물 시공시 프리캐스트 세그먼트의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

표 1. 균열발생 하중 및 극한하중 비교

구 분	균열발생 하중	극한하중
단순 프리캐스트 아치	70 kN	213 kN
리브 보강 프리캐스트 아치	116 kN	703 kN

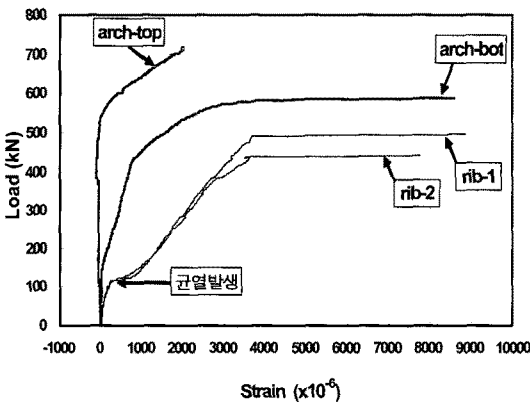


그림 18. 리브 보강 프리캐스트 아치세그먼트 하중-변형을 관계

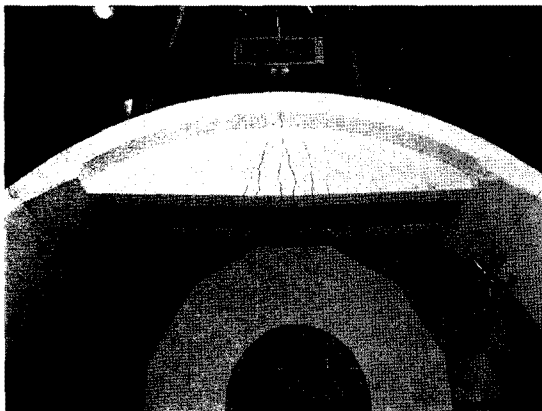


그림 19. 리브 보강 프리캐스트 아치세그먼트 파괴 전경

### 4. 결 론

본 연구에서는 프리캐스트 아치 개착식 터널구조물의 리브보강 효과 분석을 위하여 2차선 도로터널을 기초로 하여 1/2.67 scale의 대형 시험체를 제작하고 하중재하 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 성토체에 의한 터널구조물의 구속효과 등을 모사하기 위하여 총 4개소에서 변위제어 구속조건에 대한 실험결과, 리브 보강 프리캐스트 아치 실험체의 균열 발생 하중은 116 kN, 파괴시 극한하중은 703 kN이며, 리브 보강이 없는 단순 프리캐스트 아치 실험체의 균열발생 하중은 70 kN, 파괴시 극한하중은 213 kN으로 리브보강에 의하여 구조물의 극한하중 기준으로 약 3.3배의 내하력 상승효과가 나타났다.

2. 프리캐스트 세그먼트의 리브 보강은 터널구조물의 구조적 안정성을 크게 향상시킬 수 있으며, 고성토 조건 또는 4차선 도로터널 등과 같은 광폭 터널구조물 시공시 프리캐스트 세그먼트의 활용이 가능할 것으로 판단된다.
3. 대형 정적하중 재하실험에 사용된 축소모형 시험체는 리브 보강 유무 조건 모두 설계에서 요구되는 균열모멘트 및 극한모멘트에 대하여 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 개착식 터널로서 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 06-건설핵심 C19, 과제명: 리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

### 참고문헌

1. 배규진, 이규필 (2001), “개착식터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 3, No. 2, pp. 13-22.
2. 배규진 등 (2003), “복개 터널구조물의 성토하중 경감 및 라이닝 설계기술 개발”, 건기연 2003-037, pp. 272-303.
3. 우혁근 등 (2007), “리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발”, R&D/06건설핵심-C19, pp. 78-96.
4. 이규필, 이성원, 김영진, 황훈희 (2007), “프리캐스트 아치 터널구조물의 리브 보강 효과”, 2007년도 대한토목학회 학술발표회, pp. 1072-1075.
5. 日本土木學會 (1987), トソネル 標準示方書, pp. 28-36.
6. 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.



**이 규 필**

한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
연구원

E-mail: freely@kict.re.kr



**이 성 원**

한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
책임연구원

E-mail: swlee@kict.re.kr



**신 휴 성**

한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
선임연구원

E-mail: hyushin@kict.re.kr



**황 재 홍**

한국건설기술연구원  
지하구조물연구실  
Post-Doc.

E-mail: hwang@kict.re.kr