

실대형 실험을 통한 싱글셸 터널 라이닝 파괴 메커니즘 연구

A study on failure mechanism of single-shell tunnel lining
by real-scale loading tests

신휴성, 임종진, 장수호 (한국건설기술연구원)

1. 서 론

일반적으로 적용되고 있는 NATM공법에서는 2차 콘크리트 라이닝을 포함한 이중구조의 라이닝 체계로 설계되어 시공되고 있다. 초기에는 2차 콘크리트 라이닝이 하중을 받는 구조체로 여겨지지 않았으나, 최근들어 터널 주지보재의 열화 등과 같은 현상을 고려하여 추가 지반하중에 대한 구조체로 설계되고 있다. 이러한 개념은 연약지반상에서 건설되는 터널에서는 매우 합리적이라 판단되지만, 같은 개념을 지하수가 거의 유출되지 않고 암반조건이 매우 양호한 산악터널의 경우에는 과중된 지보투입으로 과도한 공사비 책정의 근본 원인이 될 수 있다(이두화 등 2001, 정성식 등 2001). 또한, 무지보로도 건설(황학 등, 2001) 가능한 현장에서 지반특성을 고려치 않고 2차 콘크리트 라이닝까지 시공하게 되므로, 이에 따른 막대한 공사기간이 소요되게 된다.

본 연구에서는 2차 콘크리트 라이닝의 기능을 슛크리트 라이닝에 포함시켜 공기를 단축할 수 있는 싱글셸 개념을 도입하기 위하여 기존 터널공법과 가장 차별화된 요소인 싱글셸 터널 라이닝의 구조적 거동특성을 고찰하여 보았다. 이를 위해 방수막으로 이분화된 구조를 갖는 NATM의 이중구조 라이닝과 전단력이 전 라이닝 두께에 걸쳐 전달되는 구조를 갖는 싱글셸 라이닝의 지지 성능을 평가하고 천단부 암괴하중에 대한 파괴 메커니즘(Anderson, 1997)을 고찰하기 위한 실대형 실험을 실시하였다. 여기서 라이닝의 현장조건을 만족시키고 실험결과의 정량적 활용을 위하여 곡률을 갖는 터널 라이닝을 실규모에서 하중재하 실험을 할 수 있는 실대형 라이닝 섹션 실험방법을 제안하고, 수치해석적 분석 및 역학적 검토를 통해 라이닝 섹션 실험에 적합한 경계조건을 설정하였다. 터널현장조건에 부합된 터널 라이닝 섹션 끝단의 경계조건을 합리적으로 부여하기 위하여 특수지그를 개발하였다. 지반강성 및 터널 라이닝 경계조건을 고려하여 4m직경의 터널 라이닝 천단부 섹션에 가해지는 집중하중에 대한 라이닝 성능을 평가하였으며, 본 실험 결과를 바탕으로 두 가지 라이닝 체계에 대해 비교하고, 싱글셸 터널 라이닝의 지보성능과 파괴거동 메커니즘을 규명을 위한 실험결과 분석이 이루어 졌다.

2. 본 론

2.1 시료 및 특수장비 제작

천단 암괴하중 작용하의 터널 라이닝 섹션실험을 위한 실험섹션 범위 결정 및 경계조건 설정이 필요하였으며, 이에 역학적 분석 및 수치해석을 통해 라이닝 섹션을 중앙에서 좌우 30도로 결정하였고, 실제 라이닝과 동일한 조건의 실험을 위해 30도 지점부분에 터널 라이닝 주변의 일정한 강성(지반강성, 슛크리트 강성)을 모사하였다(그림 1).

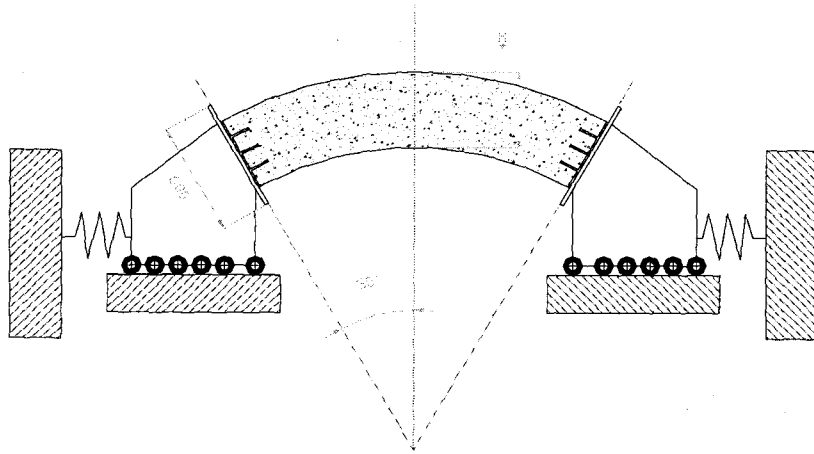
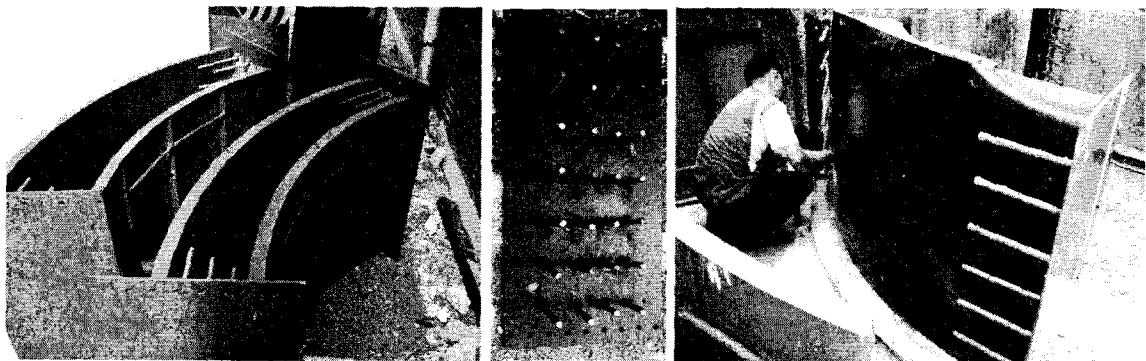


그림 1. 경계조건을 구현한 실험형태

시료제작을 위해 실대형 시료 강제거푸집과 시료에 설치되어 지그에 부착될 판을 특수제작하였으며 case3(더블셀) 시료의 경우 실제 터널 라이닝에 사용되는 방수막을 설치하여 시료를 제작하였다(그림 2). 특수 제작된 판은 철근을 설치하여, 시료가 양생된 후 시료와 판이 일체거동을 할 수 있게 하였고, 이 판은 경계조건 구현을 위한 지그에 볼팅하여 고정될 수 있도록 하였다.



(a) 강제 거푸집

(b) 특수 판

(c) 더블셀 방수막 설치

그림 2. 강제거푸집, 특수판 제작 및 더블셀 방수막 설치

2.2 실험모델 설정

실대형실험은 다음 표 1과 같이 4가지 유형으로 설정하였으며, 실험을 위해 형태의 정확한 성형이 요구되어 콘크리트를 이용하여 시료를 제작하기로 하였다. 싱글셀 라이닝과 비교하기 위하여 NATM 라이닝을 더블셀 명칭하였다. 앞서 설정한 바와 같이 시료는 좌우 30도섹션(총60도)가 되도록 제작하기로 하였다. 각각의 경우에 대한 시료의 개략도는 그림 3과 같다.

표 1. 실험 유형

실험명	구분	재료구성 및 두께	설명
case 1	싱글셀	강섬유 보강 콘크리트 25cm	2단계의 단차를 두고 타설 - 1차 10cm, 2차 15cm
case 2	싱글셀	콘크리트 40cm	타설단차 없이 한번에 타설
case 3	더블셀	콘크리트 40cm	10cm 타설후 멤브레인설치, 30cm 타설
case 4	싱글셀	콘크리트 10cm + 강섬유 보강 콘크리트15cm	2단계의 단차를 두고 타설 - 1차 10cm, 2차 15cm

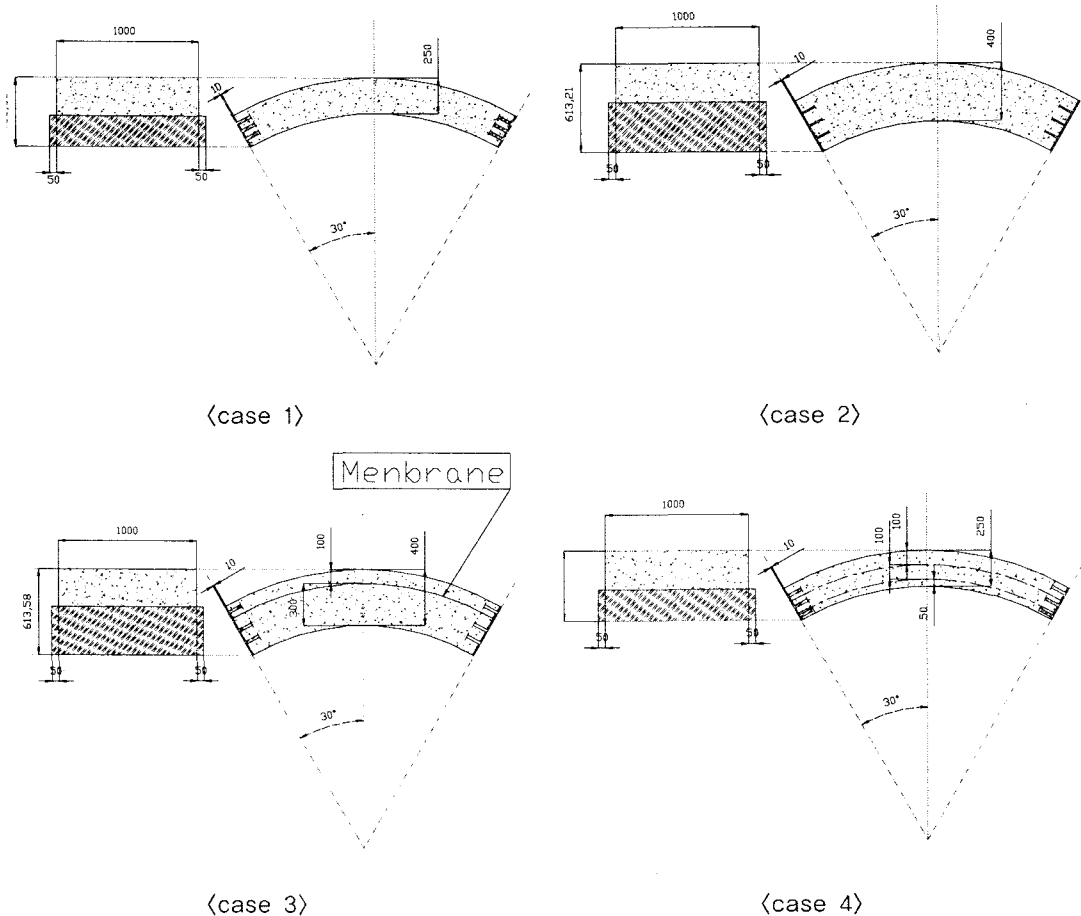


그림 3. 실대형 실험 시료의 개략도

경계부의 수평강성을 구현하기 위해서 시료의 30도 지점에 붙어 있는 판을 지점부에 접합시켜 변위가 구속되도록 하며, 지점부를 수평으로 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 지점부의 수평강성을 가할 수 있게 하였다. 수평강성은 가압장치가 변위에 따라 가하는 힘을 변하게하여 강성을 나타낼 수 있도록 하였다. 지점부의 형상은 그림 4와 같으며, 지점부 아래에 레일을 설치하여 수평이동을 가능하게 하였다. 그림 5와 같이 가압장치가 지점부에 강성을 가할 수 있게 하였으며, 가압장치는 프레임에 직접 연결을 해서 고정시켰다. 실험 계측을 위해 시료 중앙 하부에 LVDT 및 시료 표면에 12개의 스트레인게이지를 부착하였다(그림 6).

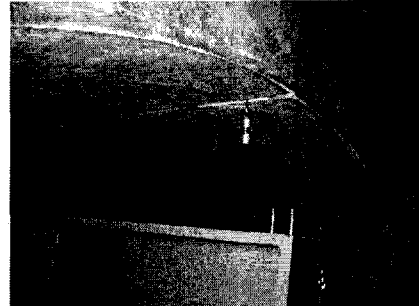
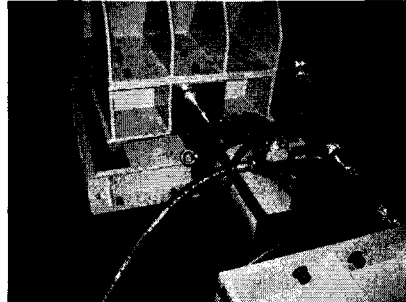


그림 4. 지점부 형상

그림 5. 수평강성의 가압

그림 6. LVDT 및 스트레인게이지

2.3 실대형 실험 및 결과분석

경계부의 수평강성을 구현하기 위해서 시료의 30도 지점에 붙어 있는 판을 지점부에 접합시켜 변위가 구속되도록 하며, 지점부를 수평으로 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 지점부의 수평강성을 가할 수 있게 하였다. 수평강성은 가압장치가 변위에 따라 가하는 힘을 변하게하여 강성을 나타낼 수 있도록 하였다(그림 7).

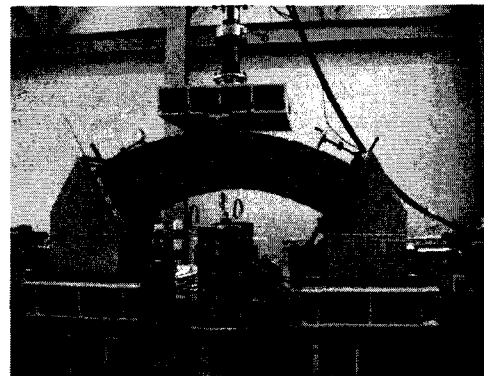
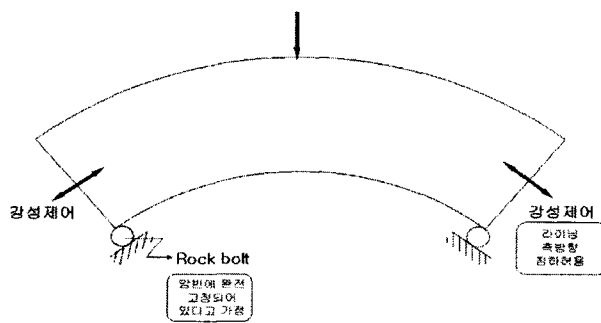


그림 7. 실대형 실험 조건 및 실대형 실험시료 거치 상태

시료의 표면상에 총 12개의 변형율계를 측정방향을 고려하여 부착시켰으며 라이닝 안쪽면 중앙부와 지그배면 수평방향으로 LVDT를 각각 설치하였다. 실대형 실험결과 관찰된 파괴진행 양상은 그림 8과 같은데, 이중구조의 라이닝의 인장균열의 발생은 각 라이닝 층 하단에서 각각 발생하여

상부로 진전되어 최대 균열진전 가능길이가 일체형보다 짧고, 이에 따른 지지능 저하현상이 발생하는 것으로 나타났다. 추가로 실대형 실험에서는 방수막으로 이분화된 경계면에서 큰 전단파괴가 발생하여 라이닝 어깨부에서도 추가 2차 균열이 발생되어 수직균열과 수평전단균열이 합체되어 빠르게 파괴가 진행되는 것을 확인하였다. 이중구조 라이닝의 어깨부 2차 수직균열은 시료의 끝단에 타설된 철근의 영향이 컸던 것으로 판단되나, 2차 균열이 발생하지 않은 같은 두께의 일체형 구조보다는 큰 인장응력이 발생한 것으로 나타났다.

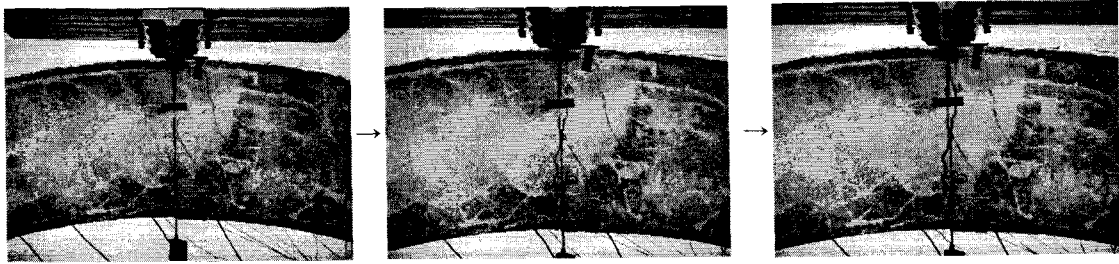


그림 8. 시편 증양부에서 균열 진전 양상

실대형 실험결과 하중-변위 곡선은 그림 9와 같고, 본 그림에서 최대지지하중은 현재의 하중재하용 가압 액추에이터 용량의 한계로 적절히 산정해 내지 못했지만 초기 균열발생 하중 결과는 case 4를 제외한 나머지 경우에 대해 적절히 산출되었다. 이중구조 라이닝(case 3)은 균열발생 하중이 약 10톤정도이며 방수막을 생략한 case 2의 경우는 약 12톤 정도에서 균열이 발생함으로써 방수막에 의하여 약 20%정도의 지지능 저하를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 두께가 case 2 혹은 case 3 보다 15cm나 얇은 25cm의 강섬유 라이닝은 균열발생 시점이 약 17톤 정도로 나타나서 가장 지지성능이 좋은 것으로 나타났다.

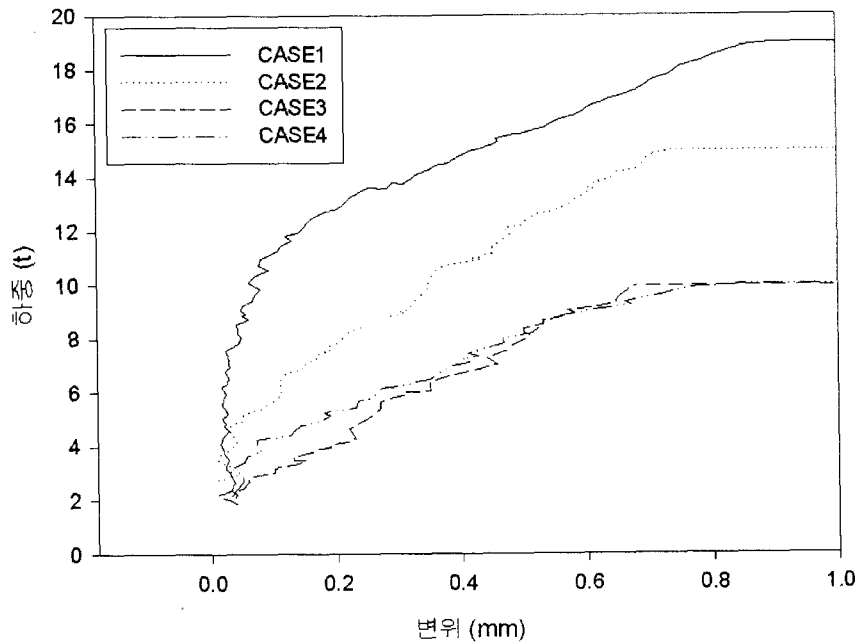


그림 9. 각 CASE별 하중-변위 곡선

3. 결 론

실대형 라이닝 섹션 실대형 실험을 수행하여, NATM 라이닝과 싱글셀공법 라이닝 거동특성을 비교하고, 싱글셀 터널 라이닝의 지보성능과 파괴거동을 살펴보았다. 본 실험에서는 적합한 경계조건을 설정하였고, 경계조건 구현을 위한 특수장비를 제작하여 라이닝 섹션 실험을 수행하였다. 실험에서 지반강성 및 터널 라이닝 경계조건을 고려하여 4m직경의 터널 라이닝 천단부 섹션에 가해지는 집중하중에 대한 라이닝 성능을 평가하였으며, 본 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 이중구조 라이닝의 인장균열은 방수막으로 분리된 각 라이닝 층에서 동시에 발생하여 상부로 진전되는 것을 확인하였으며, 때문에 일체형 구조가 이중구조보다 인장균열을 허용할 수 있는 단면길이가 더 길어져 일체형 라이닝이 지보성능이 더 크게 나타난다.

2. 일체형 구조 라이닝(case2)은 같은 재료와 단면을 갖는 이중구조 라이닝(case 3)에 비해 20%정도 지보성능이 향상되는 것을 확인하였으며, 강섬유라이닝을 사용한 경우(case1)는 이중구조 라이닝(case 3)보다 작은 단면으로 이중구조 라이닝(case 3)과 비슷한 지보성능을 발휘함을 확인하였다.

참고문헌

1. 이두화, 이성기, 백동호, 2001, 대심도 암반 터널링에서의 NMT 적용 설계 사례, 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집-국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 1~15.
2. 정형식, 배규진, 이상덕, 2001, 경춘선 제 7공구 4개 터널의 PCL공법 적용 타당성에 관한 연구, 한양대학교 건설연구소.
3. 한국건설기술연구원, 2005, 한국형 싱글셀 터널공법 개발
4. 황학, 정현철, 나승훈, 2001, 무라이닝 터널의 국내 적용, 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집- 국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 16~35.
5. Anderson, J., 1997, HSE reports on NATM safety, Tunnels & Tunnelling, March, pp. 49~51.