

#### 4. 터널복공의 역학적 거동 및 균열특성

서울대 '98. 2 이대혁 박사 / 서울대 에너지자원신기술 연구소



---

## 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성

---

서울대학교 공과대학 에너지자원신기술 연구소 공학박사 이 대 혁

박사학위 논문 “모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구”를 중심으로



문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

## 1. 서론

-shotcrete 및 콘크리트 라이닝을 사용하는 터널에서 콘크리트 라이닝의 역할은 지하수 침투의 방지, shotcrete의 하중지지를 보조적으로 분담하는 역할 등으로 제한되어 있다. 그러나 최근 건설 10년 이내의 노후화된 터널의 콘크리트 라이닝에서 발생하는 심각한 역학적 균열은 이러한 복층 라이닝 지보시스템에 대한 구조적 연구 및 균열발생에 대한 역학적 원인 규명의 필요성을 부각시키고 있다.

본 논문에서는 이러한 복층 라이닝 지보시스템의 역학적 거동을 조사하고 균열발생 특성을 연구할 목적으로 경부고속철도 복선단면의 크기를 축소한 축소 모형 시험을 수행하였고, 복층 라이닝 및 복층라이닝과 지반을 동시에 해석할 수 있는 수치해석 알고리즘을 개발하였다. 특히 수치해석에서는 shotcrete와 콘크리트 라이닝 사이의 상호거동을 수치해석적으로 모사할 수 있는 라이닝 인터페이스 요소를 개발하여 검증·활용하였다. 수치해석은 골조모델 및 FEM 모델을 동시에 사용하여 해석하였다.

터널 콘크리트 라이닝에 관한 모형실험은 전형적인 터널 라이닝을 일정한 크기로 축소하여 라이닝에 직접 하중을 가하거나 지반 재료를 모사하여 간접적으로 하중을 가하는 방식으로 연구가 이루어져 왔다[1,4,5,6]. 본 연구에서는 콘크리트 단일 라이닝으로 구성된 구조체 외에 shotcrete 및 콘크리트 라이닝으로 구성된 복합 지보 구조체의 역학적·구조적 거동 및 균열특성을 파악하는 모형 시험체를 제작하여 실험을 하였다. 또한 실험결과로부터 라이닝 형상, 상재하중 및 균열하중(cracking load)에 따른 지보반응곡선(support reaction curve)을 구함으로서 실제 현장의 변위패턴을 예측하는데 도움을 줄 수 있도록 하였다.

터널 콘크리트 라이닝에 관한 수치해석적 연구는 실제 터널 현장의 계측 자료를 이용하거나, 연구자가 적절히 가정된 지압분포에 따라 라이닝이 어떠한 방식으로 거동하는지를 관찰하고 최종적으로는 설계를 위한 지침안을 마련하는 방식으로 이루어졌다[9]. 그러나 이러한 연구들은 단일 라이닝 지보 시스템에 관한 연구에 그쳐 shotcrete 및 콘크리트 라이닝으로 이루어지는 복층 라이닝 시스템에 관한 연구는 Piede[10]의 연구에 불과하다. 그러나 역학적 원인으로 인한 콘크리트 라이닝내 균열은 하중분담설계(load dividing practice)에 따른 콘크리트 라이닝의 역할에 관한 연구의 필요성 및 1차 지보재가 완전히 기능을 상실한 경우에 대한 연구의 필요성까지 불러 일으키고 있는 실정이다. 또한 지반의 초기지압(in-situ stress) 및 공동 굴착으로 인한 지압분포의 변화에 의해 라이닝이 어떠한 방식으로 거동하는지에 대한 연구도 미비하다. 따라서 본 논문에서는 단일 라이닝 뿐만 아니라 복층 라이닝 지보시스템의 거동을 조사하기 위하여 먼저 프레임 요소(frame element)를 사용하는 라이닝 골조해석 프로그램 및 지반과 동시에 고려하는 FEM 모델을 개발하였다. 복층 라이닝 해석을 위해서는 두 라이닝 사이에 상호 거동을 모사하기 위한

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

새로운 인터페이스 요소를 개발 삽입하여 해석하였다. 또한 실제 터널 현장에서 발생한 슛크리트 응력 및 변위 자료를 수치해석과 비교함으로써 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 콘크리트 라이닝 천단에 발생하기 쉬운 균열의 역학적 발생 원인에 대한 메카니즘 및 발생 억제 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 동력학적인(dynamic) 재하 패턴을 고려하지 않고 사하중의 정력학적(static)인 재하로 인한 라이닝계의 반응을 관찰하였으며 고속전철 차량의 풍압으로 인한 라이닝계의 공명 등을 고려하지 않았다. 하중 재하는 선형적인 하중증분에 의해 시차적으로 적용되므로 일정 재하 하중에서의 지반 및 라이닝의 크리프(creep)현상 등을 고려하지 않았고, 라이닝의 양생에 따른 강도증가 현상 또한 고려하지 않았음을 밝혀둔다.

## 2. 터널 콘크리트 라이닝 균열의 현장계측

실제 우리 나라 터널 라이닝 벽면을 관찰하면 여러 종류의 균열이 발생하고 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 경향은 현재 여러 터널에서 체계적으로 추진중인 터널 안전 진단 결과에서도 나타나고 있다. 이러한 균열은 콘크리트 타설 후 양생시의 시멘트 수화열로 인한 균열 및 콘크리트 경화시 건조수축으로 인한 균열, 천층 터널이나 입갱부에서의 온도차에 의한 균열 등의 재료적 원인이외에 여러 가지 다른 원인에 의해 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 콘크리트 라이닝 타설이 시차적으로 터널의 축방향 간격을 따라 한 회씩 이루어지기 때문에 타설시기가 틀려지는 경계구간에서 터널을 가로지르는 방향으로 발생하는 균열도 보고되고 있다. 그러나 시공상의 콘크리트 품질 불량 및 시공오류 이외에도 역학적으로 발생하는 균열 또한 보고되고 있다. 따라서 슛크리트와 콘크리트 라이닝으로 이루어지는 복층라이닝 지보계에 지반압이 슛크리트를 통해 콘크리트로 전달될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 시공 완료 5년 이내의 4개의 NATM 터널에 대하여 터널 콘크리트 라이닝 벽면에 발생하는 균열을 조사하여 몇 가지 분류에 따라 범주화하였다. 크게 터널의 축방향으로 발생하는 균열을 축방향 균열(longitudinal crack)이라 하고, 터널의 단면을 가로지르는 방향으로 발생하는 균열을 가로지르는 균열(cross sectional crack)이라 칭하였다. 특히 이러한 가로지르는 균열중 균열 발생부위에 따라 아치면에서 발생한 균열(arch cross sectional crack)과 터널 벽면에서 발생한 균열(side wall cross sectional crack)을 구분하였다. 또 위에서 언급한 바와 같이 터널의 축방향으로 라이닝 콘크리트 타설 시기가 틀려지는 부위의 균열을 시공조인트 균열(construction joint crack)이라 칭하고 Table 1.에 정리하였다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

Table 1. Category of cracks occurring in the concrete tunnel lining

Category	Appearance	Possible reasons
Longitudinal cracks	-Occurring along with tunnel longitudinal axis on tunnel arch -Generally large width	Carrying ground load to concrete lining
Arch cross sectional cracks	-Occurring with being crossed over a section on arch surface -Generally small width	Shrinkage cracks and so on
Construction joint cracks (cross sectional)	-Occurring with being crossed over the contact plane between one span and another span -Generally a number of branches	Construction blunders
Side wall cross sectional cracks	-Occurring with being crossed over a section on side wall surface -Generally small width	-Shrinkage cracks -Carrying ground load to concrete lining

총 조사길이는 5.2km이다. 총 균열 수는 236개 였으며 각각의 범주에 따른 점유율은 다음과 같다. 터널 측벽 면에서는 콘크리트 라이닝의 휨작용과 가장 관련이 깊은 축방향 균열이 발생하지 않았다.

- Longitudinal cracks : 42 %
- Arch cross sectional cracks : 11 %
- Construction joint cracks : 17 %
- Side wall cross-sectional cracks : 30%

따라서 터널 아치부에 축방향 균열로 발생하는 균열의 수는 전체의 40% 이상으로서 많은 비중을 차지하고 있다. 이 범주에 해당하는 균열의 폭이 다른 균열들에 비해 훨씬 크고, 균열의 연장(extension)이 한 시공간격(span)에 이르는 것이 많아 구조적인 취약부를 형성하며, 이러한 축방향 균열들이 터널의 건전도를 저해하는 요소로 작용하는 것으로 판단된다.

터널 아치부에 발생하는 축방향균열이 터널 천단을 지나는 중심선으로부터 얼마만큼 떨어진 범위에서 많이 발생하는지를 조사하기 위하여 히스토그램(histogram)을 작성하였다. 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 축방향 균열은 천단으로부터 아치각이 40도인 부위까지 나타났다. 하지만 가장 많은 축방향균열은 아치각이 천단으로부터 5~10도인 범위 내에서 발생한다. 또한 천단으로부터 20도 범위 내에서 모든 축방향균열의 93%가 발생하고 있다. 따라서 터널의 건전도(soundness)를 가장 크게 저해하는 콘크리트 라이닝의 축방향 균열은 천단 부근에서 대부분 발생한다는 사실을 알 수 있다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

위의 사실을 근거로 하여, 본 연구에서는 터널 라이닝 모형 실험의 경우 대부분의 하중 재하를 천단으로부터 40도 범위 내에서 가하도록 하였으며, 모든 거동의 주요 관점은 천단을 중심으로 연구하였다. 본 논문과 가장 관련 깊은 연구를 수행한 Paul et al[4]의 경우도 천단에서 좌우 각각 38도까지의 천단 균열에 관한 연구를 수행한 바 있다.

콘크리트 라이닝 천단 부위의 축방향균열 발생은 콘크리트 타설 시공법과 큰 상관관계가 있는 것으로 사료된다. 콘크리트 라이닝을 타설하기 위해서는 거푸집을 설치하고 천단에 콘크리트 재료를 펴넣는다. 이렇게 함으로써 콘크리트 재료의 자중에 의하여 측벽쪽으로 잘 유동할 수 있게 한다. 따라서 천단 부근은 맨 마지막으로 재료가 처리되며, 이 부근의 재료의 물이 아치 어깨부위 및 공동 내부로 흐를 가능성이 커져 함수율 차이로 양생에 문제가 발생할 여지가 큰 것으로 사료된다.

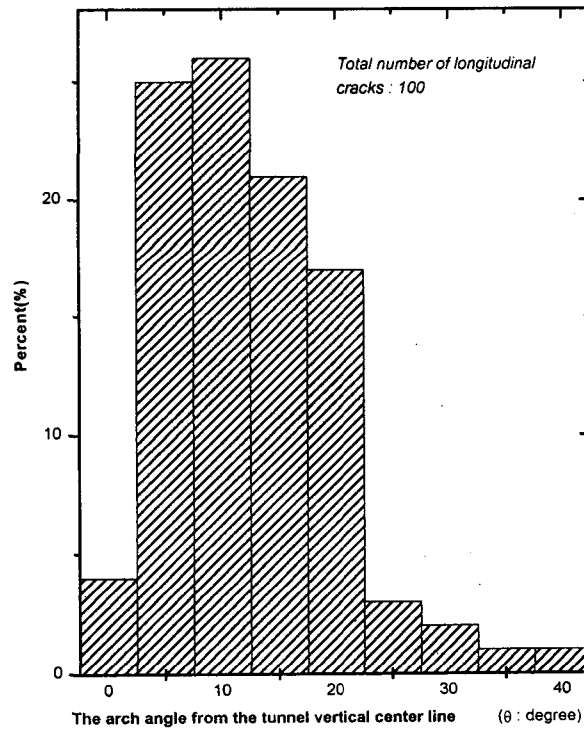


Fig. 1. Histogram for the arch angles of cracks away from the tunnel vertical center line (only longitudinal cracks)



문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

### 3. 터널 라이닝 모형 실험

#### 3.1 모형 실험을 위한 차원해석

터널 라이닝 모형실험과 관련하여 차원해석을 실시하여 실제 크기의 원형(prototype)과 축소 모형의 상사율(similarity)을 결정하고자 하였다. 차원해석(dimensional analysis)으로부터 구한 변수 조합들은 실험결과 및 수치해석 결과를 다루는데 있어서 하나의 지침변수(index variable)로서 사용 가능하였다.

계에 영향을 미치는 모든 변수들을 나열하고 무차원화 함으로서 차원해석을 실시한 결과 지반과 단일 라이닝만으로 이루어진 계의 경우에 15개의 무차원  $\pi$ 항을 구하였다.

지반과 복층 라이닝의 차원해석의 경우에는 두 개의 빔 거동이론[3]을 근간으로 한 두 라이닝의 합성작용을 정의하여 사용하였다. 또한 복층 라이닝의 거동에 있어서 각각의 라이닝의 두께변화가 중요한 영향요소이므로 두께에 가중치를 둔 평균값 개념을 사용하였다.

#### 3.2 시험체 제작

본 실험에서는 총 24개의 라이닝 시험체를 제작하였는데, 14개의 6cm 두께의 단일 라이닝, 6개의 9cm 두께의 단일 라이닝, 4개의 복층라이닝을 제작하였다. 라이닝 모델 시험체를 제작하기 위하여 6cm 및 9cm 두께의 강재 거푸집을 제작하였다. 강재 거푸집의 내부반경은 축소 모형 축척 1/10을 고려하여 710mm로 하였다. 단일 라이닝 시험체는 각각 일회용 배합 콘크리트를 사용하여 타설, 성형하였다. 사용한 콘크리트의 배합은 Table 2.와 같다.

Table 2. Test specimen concrete and mortar mixes

	Coarse aggregates (kg)	Fine sand (kg)	Cement (kg)	Water (kg)	AE (g)	Water : cement ratio
Concrete*	48.85	38	20.45	8.8	40.9	0.43
Mortar**	-	38	13	7	-	0.53

\* 1 batch : 0.05m<sup>3</sup>(116 kg), \*\* 1 batch : 0.027m<sup>3</sup>(58 kg)

양생된 시험체의 일축압축강도는 콘크리트의 경우 평균 500 kg/cm<sup>2</sup>의 값을 보이고 슐크리트로 사용한 모르타르의 경우 평균 400 kg/cm<sup>2</sup>의 값을 보였다. 탄성계수는 각각 평균 3.00 x 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>, 2.5 x 10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>였다. 휨인장강도는 각각 50 kg/cm<sup>2</sup>, 40 kg/cm<sup>2</sup>를 보였다. 따라서 콘

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

크리트와 모르타르 모두 압축강도 대 휨인장강도의 취성비가 10을 보였다.

콘크리트의 타설시 시공상의 잘못으로 인하여 천단이 거푸집 두께만큼 채워지지 않을 경우 배면에 공동이 생성될 수 있다. 이는 라이닝의 국부적인 두께 부족 현상을 일으킨다. 이 경우 지반의 하중은 직접 천단에 재하되지 않고 간접적으로 주위에 재하될 것이다. 따라서 본 실험에서는 라이닝 두께 부족의 경우를 상정하여 6가지 시험체에 대하여 위두께에 비해 평균 30%정도의 두께 감소가 발생하게 제작하였다. 이러한 시험체들은 Table 3.의 shortage항목에 해당하는 시험체들이다.

### 3.3 실험의 종류 및 방법

수행한 실험의 종류 및 변수에 대하여 Table 3.에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 실험의 변수는 하중형상, 축압조건, 단일 라이닝 두께의 변화, 복층 라이닝, 지반을 나타내는 매체의 타설 여부, 라이닝의 강선망 보강, 라이닝 천단의 두께 부족, 복층 라이닝의 배면 공동, 라이닝과 지반 매체의 마찰효과의 10가지 변수로서 이들 변수의 조합을 통하여 24개의 시험체가 시험되었다. 라이닝의 축소모형은 일련의 규칙적인 이름이 부여되는데 표에서 보는바와 같이 6cm 두께의 단일 라이닝에 대해서는 SI를 앞 명칭으로 부여하였으며, 9cm 두께의 단일 라이닝에 대해서는 SII, 스크리트 및 콘크리트 라이닝의 조합인 9cm 복층 라이닝에 대해서는 DL을 부여하였다. 재하하중이 등분포가 아니라 다양한 하중형상을 보이는 경우의 시험체에 대해서는 SS를 앞 명칭으로 부여하였다. 마지막으로 터널 라이닝 주위에 지반을 모사하는 저장도 콘크리트를 타설한 2가지 시험에 대해서는 각각 SG-1 및 SG-2을 부여하였다.

시험체에 대한 실험에 앞서 원형과의 상사율은 다음과 같이 결정되었다. 차원해석 결과로부터 크기축척을 10으로 하여 시험체의 반지름, 두께 등의 선형차원이 결정되었다. 라이닝의 물성은 차원해석 결과로부터 모델법칙에 따라 원 재료의 물성과 동일하게 하였다. 재하하중은 균열이 발생하고 파괴에 이르기까지 일정한 하중 증분에 따라 재하되었다. 결과적인 하중 특성은 모델법칙에 따라 축척의 자승에 비례하는 축척 즉 100으로 조정하여 해석하였다.

Fig. 2. 에서 보는 바와 같이 본 실험은 반력 프레임, 터널 라이닝 모형 시험체, 유압실린더, 유압기, 하중 조절기, 변형률 및 변위 측정장치, 미소파괴음 측정장치 등을 사용하여 수행되었다. 반력프레임은 철근 콘크리트로 제작되었고, 유압실린더는 라이닝 상부에 60도의 범위에 5개, 양측벽부에 각각 1개씩 설치되었다. 유압은 유압동력부(hydraulic power unit)에서 가해지며 라이닝 변형 거동은 라이닝 내·외부면에 부착된 변형률게이지 및 LVDT로부터 자동 계측되었다. 또한 라이닝의 균열 발생 시점 및 균열 위치가 불명확하리라 예측되는 시험체에 대해서는 미소파괴음 측정장치(A.E. measuring unit)로부터 미소파괴음을 계측하여 결정하였다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

Table 3. Summary of tunnel lining tests

Loading condition			Single lining I		Single lining II			Double lining	
Loading type	Condition	Loading shape	Standard	Shortage	Standard	Shortage	Reinf.	Standard	Shortage
Uniform normal load	K=0		SI-1						
	K=0.2		SI-2	SI-21	SII-2	SII-21	SII-22 SII-23	DL-2	DL-21
Uniform eccentric load	K=0		SI-3						
	K=0.35		SI-4	SI-41	SII-4			DL-4	
Point concentrated load	K=0		SI-5						
	K=0.5		SI-6	SI-61	SII-6			DL-6	
Various loading ratio			SS1						
			SS2						
			SS3						
Ground model casting	Sliding		SC-1						
	Serration		SC-2						

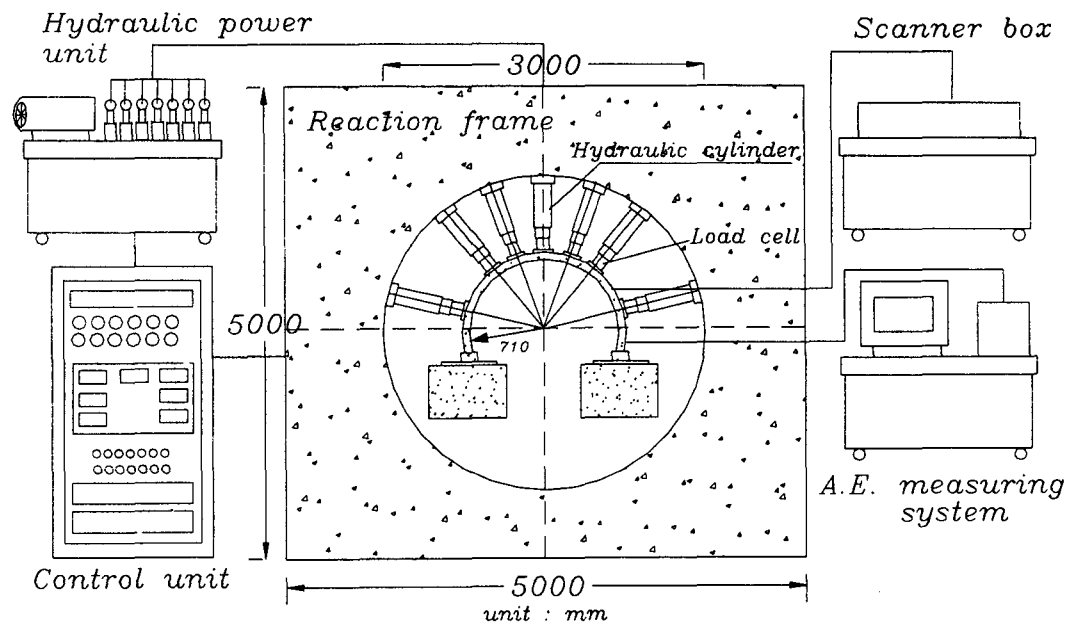


Fig. 2. Plan view of test setup

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

### 3.4 지반모형타설 및 하중조건

시험체 SG-1, SG-2에 대하여 재하영역을 제외하고 라이닝을 둘러싸는 지반 모형을 타설하였다. 이것은 재하에 대하여 공동 외부로 밀려나는 라이닝 부위의 거동이 지반에 의해 제약되는 경우를 모사하기 위함이다. 먼저 라이닝 모형 시험체를 시험대에 장착하고 각부를 구속시킨 상태에서 목재 거푸집을 가설한 후 저강도 콘크리트를 타설하였다. 라이닝과 지반의 접촉면 마찰을 조사하기 위하여 시험체 SG-1의 경우에는 매끄러운 벽면을 유지하였고, SG-2의 경우에는 톱니모양의 마찰이 발생하게 하였다.

본 실험에서는 3가지 재하형태 (loading type)를 기본 형태로 하였는데, 등분포 수직하중, 등분포 편심하중, 일정집중하중이다. 등분포 수직하중은 Table 3.에서 맨 윗그림에 해당하는 경우로서 얕은 심도에 터널이 시공될 때나 깊은 심도의 암반터널이라 하더라도 터널 상부에 심하게 풍화되고, 절리화된 암반이 존재한다는 가정에서 출발한 것이다. 등분포 편심하중은 Table 3.의 위에서 2번째 경우로서 터널 천단 중심선을 기준으로 한쪽으로 치우쳐 연약대가 존재하는 지질현상을 가정한 것이다. Table 3.의 4번째 줄에 있는 3개의 그림은 암반터널의 경우 주 절리군들 (major joint sets)에 의해 형성되는 암반블럭 (rock block)이나 암반썰기 (rock wedge)의 경우를 가정한 것이다.

### 3.5 단면력 계산법

실험결과를 정리하기 위하여 필수적으로 사용되어야 할 몇 가지 용어를 제시함으로써 혼돈을 피하고자 한다. 특히 단면력 계산법에 있어서 필자들은 본 연구의 실험데이터를 이용하는 계산법을 제안하였다[1].

- 균열하중 : 라이닝 지보계에 균열이 발생하기 시작할 때의 상재하중
- 파괴하중 : 균열하중 이후에 구조적으로 붕괴될 때의 상재하중
- 정규화 균열하중 및 정규화 파괴하중 : 시험체의 강도특성이 물성에 좌우되기 때문에 비교차원에서 일축압축강도를 보정했을때의 균열하중 및 파괴하중
- 한계단면 : 균열이 발생한 단면으로서 천단으로부터의 아치 각으로 표시한다.
- 최대처짐 : 균열하중에서의 라이닝의 변형량으로 정의한다.

본 실험에서는 콘크리트면에 부착된 변형률 자료로부터 축력 및 휨모멘트를 역산하였다. 이는 무근콘크리트에서 중립축 (neutral axis)이 도심에 위치한다는 이론으로부터 계산되었다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

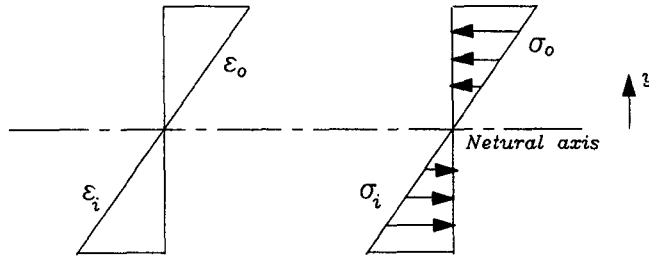


Fig. 3. Strain and stress distribution in plane concrete beam

Fig. 3.에서 보는 바와 같이 변형률 및 응력이 선형으로 분포한다고 가정하면, 작용력 (working force)은 도심 즉 중립축에 작용할 것이다. 따라서 다음과 같이 축력(thrust) 및 휨모멘트(flexural moment)를 구할 수 있다.

변형률 함수는 Fig. 3.과 같이 선형함수로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(y) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_i}{h} \left( y + \frac{h}{2} \right) + \epsilon_i \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 바깥쪽 면의 변형률이고,  $\epsilon_i$ 는 내부면의 변형률이다.  $h$ 는 부재 단면의 두께다. 변형률의 부호는 압축변형률이면 부(-), 인장 변형률이면 정(+)으로 정의한다.

축력  $N$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$N = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(y) \cdot b \cdot dy = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E \cdot \epsilon(y) \cdot b \cdot dy = E \cdot b \cdot h \cdot \frac{\epsilon_0 + \epsilon_i}{2} \quad (2)$$

같은 방식으로 휨모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma(y) \cdot b \cdot y \cdot dy = E \cdot I \cdot \frac{\epsilon_0 - \epsilon_i}{h} \quad (3)$$

여기서,  $I$ 는 관성모멘트(moment of Inertia)로서 다음과 같다.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4)$$

여기서,  $b$ 는 부재 단면의 폭이고,  $E$ 는 부재의 탄성계수이다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 측압·구속 및 재하 형상 효과

시험결과중 측압이 없는 경우인 SI-1과 측압이 있는 경우인 SI-2의 하중에 따른 처짐곡선을 Fig.4 및 5에 나타내었다. 측압이 있는 경우 측압이 없는 경우에 비해 모든 재하 형태에서 1.5~2 배 균열하중이 증가 즉 균열에 대한 내하력이 증가하였으며, 파괴에 대한 내하력은 등분포 재하 형태에서 측압계수가 0.2로 작음에도 불구하고 6배나 증가하였다. 균열발생 위치는 모든 시험체에서 1차 균열의 경우 재하영역의 가운데였고, 2차 균열의 경우 L40~L60(혹은 R40~R60)으로 아치 어깨 부분이였다. 최대 처짐량은 평균 1.2 mm에서 크게 벗어나지 않았다. 따라서 측압으로 인하여 천단 처짐이 어느 정도 억제되기는 하지만 큰 차이가 없는 것으로 파악되었다.

축력 성분은 단면력중 가장 측압에 민감하였다. 즉, 측압이 존재하지 않는 경우에는 대부분의 단면에서 인장력이 발생하지만, 측압이 존재하는 경우에는 측압계수의 크기 및 하중형태에 상관 없이 대부분 압축력으로 전환되었다. 아치 구조물은 휨모멘트보다 더 큰 규모로 아치 축력이 작용하기 때문에, 아치 축력이 압축력으로 전환되면 인장균열의 발생 억제 효과를 가져온다. 따라서 실험결과와 측압으로 인한 축력성분의 압축력 전환은 균열발생 억제에 양호한 효과를 가져왔다. 단면력 중 휨모멘트는 측압으로 인하여 모두 내하력의 증가량 만큼 오히려 작아졌다. 또한 공동 내부로 작용하는 정의 휨모멘트 구간의 규모가 측압으로 인하여 축소되었다.

동일 조건하에서 상부에 재하되는 하중형상이 변화함에 따른 라이닝의 거동을 비교하였다. 상부 L30~R30의 범위에서 각각 등분포(uniform normal), 삼각형, 역삼각형, 편심직각 삼각형 하중 형상으로 재하하였다. Table 4에는 이러한 시험체들의 강도특성을 나열하였다.

Table 4. Strength characteristics of the linings with the variation of loading shape

Test	Loading shape	K	Cracking load (ton)	Failure load (ton)	Normalized cracking load(ton)	Normalized failure load (ton)	Critical section
SI-2	Uniform normal loading	0.15	1.81	6.5	1.81	6.5	Vault (L60,R60)
SS1	Triangular loading	0.12	1.45	1.81	1.48	1.85	Vault (L62,R55)
SS2	Reverse triangular loading	0.15	1.73	4.73	1.69	4.63	L15 (R57,R55)
SS3	Right triangular loading	0.15	1.47	2.6	1.50	2.66	L15 (L62,R45)

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

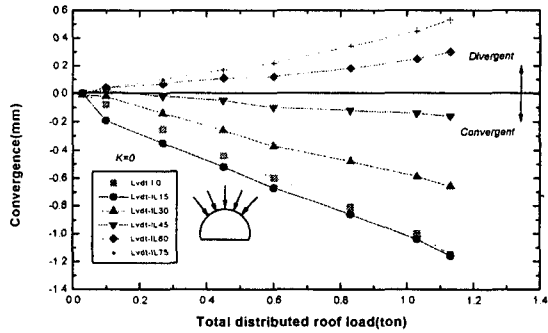


Fig. 4 model SI-1

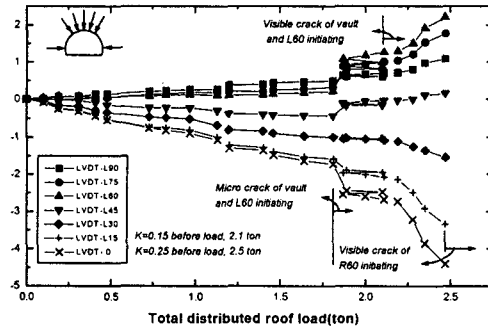


Fig. 5 model SI-2

Relationship between convergence and applied load of models

(SI-1 : uniform normal loading without side pressure)

(SI-2 : uniform normal loading with side pressure)

터널 라이닝 상부에 삼각형 모양의 썬치가 있다고 가정하는 경우의 재하 형태는 삼각형 형상으로서 천단에 가장 큰 하중이 작용한다. Table 4.에서 보는 것처럼, 이는 균열에 대한 내하력을 가장 저하시키며 천단 주위에 휨모멘트가 가장 크게 작용한다. 오히려 편심 직각 삼각형 재하형상의 내하력보다 더 떨어지는 효과를 가져왔다. 이 경우 축력이 모두 인장력으로 작용하여 아치 구조체의 안정성을 저해하였다. 휨모멘트는 국부적 재하 형상 효과 때문에 천단에서 30도 부근까지 모두 내부로 처짐이 발생하는 정(+)의 모멘트가 작용한다. 또 재하형상이 변하더라도, 균열이 발생하는(휨모멘트가 가장 큰) 영역은 상재 하중이 가장 큰 지점이 아니라 모두 천단에서 20도 내외의 영역으로서 천단에 인접하였다. 2절의 현장 자료로부터도 입증해 주고 있는 사실이다.

#### 4.2 재하형태 효과 및 복층 라이닝 효과

같은 종류의 라이닝에 대해, 같은 축압 조건 하에서 재하형태를 달리하면서 라이닝의 거동을 조사한 경우에 대하여 비교해석을 실시하였다. 이 비교해석은 같은 조건의 복층 라이닝에 대해서도 조사되었다. 터널 상단에 천단을 기준으로 좌우측 35도씩 등분포 수직 재하가 되는 경우가 상단에 균등하게 편심재하되는 경우 및 천단에 집중재하가 되는 재하형태에 비해 균열에 대한 내하력이 평균 2배 더 컸다. 편심재하 및 집중재하만을 비교한 경우 편심재하가 20%이상 균열에 대한 내하력이 더 크나, 복층 라이닝에서만은 집중재하의 경우가 2배 가량 더 컸다. 현실적인 지질

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

학적 조건과의 상관관계를 고려하면 터널 상부에 지반 아치력(ground arch force)에 의한 Terzaghi하중과 같이 토사 및 풍화암지반의 등분포 삼재하중에 대해서 가장 내하력이 좋아서, 단층과 같은 경사진 지질학적 불연속면이 터널 상단의 일부를 재하하는 경우에 비해 2배 이상 내하력이 크다고 말할 수 있다. 또한 극단적으로 터널의 축방향을 따라 천단에 불연속면이 수직으로 존재하는 경우에 내하력은 3배 이상 떨어져 극히 취약한 강도특성을 보임을 알 수 있다. 그러나 복층 라이닝의 경우 이러한 극단적으로 불리한 지질학적 조건에서도 같은 두께의 콘크리트 라이닝에 비해 내하력이 50%이상 커진다는 것을 알 수 있어, 복층 라이닝의 정력학적 재하조건하에서의 안정적 효능을 검증하였다.

복층라이닝에서는 슛크리트를 통한 2차적인 지보역할로 콘크리트 라이닝의 거동이 안정화되어 처짐거동이 대부분의 단면에서 안정적으로 발생한다. Fig. 6.과 7.은 복층 라이닝 DL-2의 콘크리트 라이닝 및 슛크리트의 처짐곡선을 나타낸다. 콘크리트 라이닝은 균열이 발생하기 전까지 모두 공동 내부로 처지는 안정적 거동을 보인다. 한편 슛크리트는 균열하중까지 큰 변화를 보이지 않다가 균열하중 이후 지반쪽으로 밀리는 현상을 보인다. 또한 콘크리트 라이닝 천단의 균열발생은 재하형태에 상관없이 슛크리트 보다 먼저 발생하였다. 그리고 천단이 힌지 지점의 기능을 하면서 회전이 발생하기 시작하여 라이닝 어깨 부위에서는 콘크리트 라이닝이 슛크리트 쪽으로 밀리는 현상을 나타내었다. 따라서 복층 라이닝이라 하더라도 편심재하를 제외한 나머지 하중형태에서는 콘크리트 천단 균열은 필연적인 것으로 사료된다.

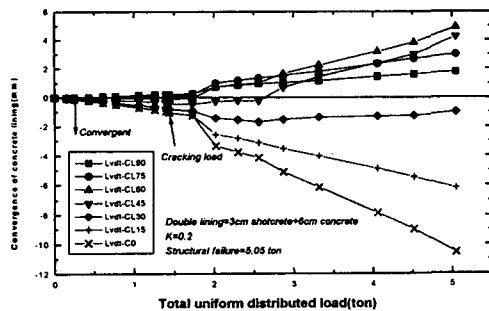


Fig.6. Relationship between convergence and applied load of the concrete lining in DL-2

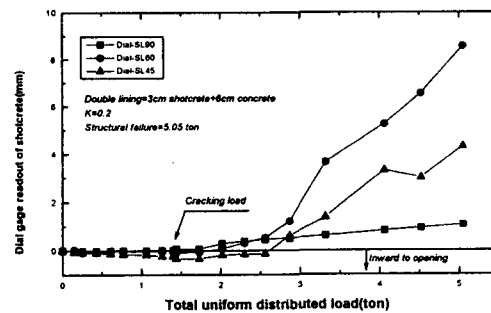


Fig.7. Relationship between convergence and applied load of the shotcrete in DL-2



문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

4.3 배면공동 존재 및 단면 두께 증감 효과

배면공동이 콘크리트 라이닝 천단 배면에 존재함으로써, 콘크리트 라이닝의 국부적 두께 감소가 발생하는 경우에 대하여 그렇지 않은 경우와 비교하였다. 배면공동이 라이닝 천단 배면에 존재함으로써, 국부적으로 단면감소가 발생하는 경우에 단면감소량이 30%이었다. 이때 대부분의 시험체에서 균열에 대한 내하력은 단면 감소량보다 더 큰 평균 40% 정도 감소하였고, 파괴하중에 대한 내하력은 단면감소량과 비슷한 30% 정도 감소하였다. 그러나 콘크리트 배면공동은 지반의 지하수 침투와 같은 부가하중을 불러일으켜서 지하수와 같은 다른 요인이 얼마나 내하력을 더 떨어뜨리는가도 중요한 관건이 된다. 최대처짐량은 공동이 없는 경우 1.2mm로, 공동이 있는 경우 평균 1.3mm 와 큰 차이를 보이지 않는다.

다음으로 단일 라이닝의 경우 라이닝 전체의 두께 변화에 따른 라이닝 거동의 차이를 비교하였다. 그 강도 특성의 비교결과를 Table 5.에 나타내었다.

Table 5. Strength characteristics of the linings with the variation of thickness

Test	Loading type	K	Cracking load (ton)	Failure load (ton)	Normalized cracking load	Normalized failure load	Critical section
SI-2 (6cm)	Uniform normal loading	0.2	1.81	6.50	1.81	6.5	Vault (L60,R60)
SI-21 (9cm)	Uniform normal loading	0.2	2.71	5.48	2.41*	4.87*	Vault (L50,R50)
SI-21 (6cm)	Uniform normal loading	0.2	2.18	6.09	2.18	6.09	Vault (L60,R60)
SII-21 (9cm)	Uniform normal loading	0.2	3.15	13.72	2.95**	12.86**	Vault (L60,R60)
SI-4 (6cm)	Uniform eccentric loading	0.35	1.18	1.18	1.18	1.18	L10 (R40)
SII-4 (9cm)	Uniform eccentric loading	0.35	2.04	2.59	1.70***	2.16***	L45,R45 (L58,R73)
SII-2 (6cm)	Point loading	0.5	0.83	0.83	0.83	0.83	Vault (L38,R38)
SII-21 (9cm)	Point loading	0.5	1.90	1.90	1.94****	1.94****	Vault (L40,R40)

\*\*\*,\*\*\*\*,\*\*\*\*\* normalized base on SI-2, SI-21, SI-4, SI-6 respectively

라이닝 두께의 증가가 Table 5.에서와 같이 50% 이루어졌을 때, 정규화 균열하중을 기준으로 할 경우 평균 40% 내외로 내하력이 증가하여 라이닝 두께의 증가량에 조금 못 미치지만 공학적 관점에서 볼 때 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 파괴하중의 경우 모두 2배 이상 내하력이 커져 두께 증가분의 4배만큼 파괴에 대한 내하력이 상승하였다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

$$f_{cr}(= \text{cracking load}) \propto \Delta t(\text{thickness})$$

$$f_f(= \text{failure load}) \propto 4 \times (\Delta t)$$

실험결과 라이닝 두께의 증가는 편심재하 및 집중재하와 같은 불리한 재하구조에서 휨선 내하력의 증가를 가져왔다. 따라서 라이닝 설계단계 이전에 현장 지반의 불연속면과 같은 지질학적 조사를 면밀히 할 수 있고 편심재하 및 집중재하를 받는다고 판단할 수 있다면, 두께 50% 증가 시 내하력이 2배 이상 커지는 것을 고려하여 설계할 수 있을 것이다. 균열하중에서의 최대처짐량은 대부분의 시험체에서 두께의 증가에도 불구하고 거의 동일하였다.

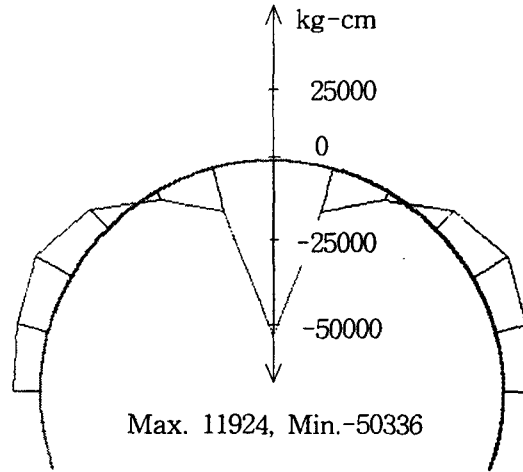
#### 4.4 라이닝 보강 및 지반 설치 효과

중립축에 단근 강선망 배근을 하여 라이닝 거동을 조사하였다. 표준 인장강도를 갖는 철근을 시험에 사용하지 못함으로서 실제의 보강효과를 기대할 수 없을 지라도 배근으로 인한 라이닝의 강도, 변형 특성이 얼마나 변하는지를 간접적으로 알 수 있었다. 그 결과 균열하중은 철근 보다는 콘크리트의 인장강도와 관련있기 때문에, 균열하중은 큰 차이가 없고, 파괴하중은 철근의 인장력으로 인하여 큰 차이가 발생하였다. 또한 균열하중에서의 최대 처짐량도 큰 차이를 보이지는 않았다. 재하 영역에서의 1차 휨균열 발생 위치는 동일하였다. 그러나 보강이 없는 시험체에서는 어깨 부분의 휨인장 2차 균열발생으로 파괴되었으나, 보강을 한 경우 어깨 부분에서의 전단 파괴로 시험체가 파괴되었다. 이러한 파괴양상의 차이가 3배라는 파괴하중의 차이를 불러일으킨 것으로 사료된다. Fig. 8과 9에는 보강을 하지 않는 시험체 SII-2와 보강을 한 시험체 SII-23의 휨모멘트를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 균열하중에서, SII-23가 SII-2에 비해, 휨모멘트가 75%가량 작고, 전체적인 휨모멘트 분포가 안정된 구조를 나타냄을 알 수 있다.

천단 재하영역을 제외한 나머지 구간에 대해서 지반을 설치한 효과는 다음과 같다. 비 재하영역의 밀립현상을 억제하여 휨 균열의 개수가 방해됨으로서 강도 및 변형특성의 차이를 보였다. 본 연구에서는 두 개의 시험체에 대하여 지반 모델을 타설하였는데, 한 시험체에 대해서는 지반과 라이닝 사이에 완전 미끄러짐이 되도록 매끈하게 하여 터널 굴착기계에 의한 굴착 벽면을 재현하였다. 다른 한 시험체에 대해서는 엇물림(interlocking)효과를 재현하기 위하여 톱니모양으로 처리하여 마찰이 발생하게 하였다.

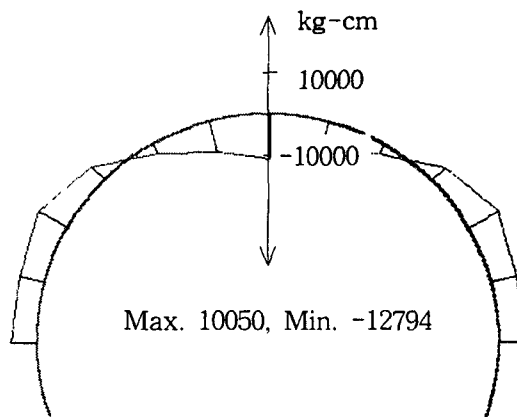
문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석



Cracking load : 2.71 ton

Fig. 8. Flexural moment distribution of model SII-2(Without reinforcement)



Cracking load : 3.12 ton

Fig. 9. Flexural moment distribution of model SII-23(With reinforcement)

문헌 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

Table 6.에 지반모형을 타설한 SG-1, SG-2와 함께 같은 재하형태로 시험한 SI-1 및 SI-2의 결과를 나타내었다.

Table 6. Strength characteristics of the linings surrounded by the casting of the ground concrete models

Test	Loading type	K	Cracking load (ton)	Failure load (ton)	Normalized cracking load	Normalized failure load	Critical section
SI-1	Uniform normal loading	0	1.13	1.13	-	-	Vault (L62,R70)
SI-2	Uniform normal loading	0.2	1.81	6.50	1.81	6.50	Vault (L60,R60)
SG-1	Uniform normal loading	-	5.16	29.62	6.88*	39.49*	Vault (L42,R45)
SG-2	Uniform normal loading	-	15.05	32.30	18.52*	39.75*	Vault (L40,R40)

\* : normalized base on SI-2

균열에 대한 내하력은 SG-1이 SI 시리즈에 비해 평균 4배 크고, SG-2가 SI시리즈에 비해 평균 10배 크다. 다시 말하면, 지반이 라이닝 밀림을 구속하는 재하형태에서는 매끄러운 접촉면을 갖는 경우 평균 4배 이상 내하력이 커지고, 엇물림이 있어 마찰이 존재하는 경우 평균 10배 이상 내하력이 커진다. 균열하중에서의 최대 처짐량은 SI-2에 비해 SG-1이 16%, SG-2가 50%이상 줄어든다. 한계단면은 1차 균열의 경우 천단으로서 지반을 설치하지 않는 경우와 동일하지만, 2차 균열단면은 재하부의 가장자리와 지반을 설치한 부위의 경계부로서 압축전단균열을 나타내었다. 라이닝과 지반의 마찰효과만을 보기 위하여 SG-1과 SG-2만을 비교하면 다음과 같다. 마찰효과가 작용하는 SG-2가 매끄러운 면을 갖는 SG-1에 비해 균열에 대한 내하력이 3배 이상 크지만, 파괴에 대한 내하력에 있어서는 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 지반과 라이닝 사이의 마찰효과는 내하력을 크게 증진시킨다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.5 균열 특성

직접 라이닝에 재하를 실시하였으므로 거의 모든 발생 균열은 휨에 의한 휨균열로서 대부분 터널 축방향의 축방향균열이었다. 터널 라이닝 상단에 등분포 재하가 이루어진 경우 1차 균열은 천단에서, 2차 균열은 천단으로부터 60도 떨어진 부위에서 발생하였다. 이 때 균열하중은 파괴하중의 28% 수준으로 일정하였다. 특히 복층 라이닝의 경우 균열하중에서의 최대 처짐량은 파괴하중에서의 최대 처짐량의 10% 수준으로 일정하였다. 따라서 등분포 재하형태로 라이닝계에 재하

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

되는 구조에서는 균열이 발생하여도 구조적으로 붕괴되는데에는 정역학적으로 많은 하중이 부가적으로 작용하여야 하며, 복층 라이닝의 경우 균열하중에서의 처짐량은 파괴시에 비해 아주 작은 값을 알 수 있었다. 터널 라이닝 천단에 일점 집중재하가 이루어지는 극단적인 재하구조에서는 1차 균열은 천단에서, 2차 균열은 천단으로부터 40도 떨어진 부위에서 발생한다. 균열하중은 파괴하중의 90% 이상이며, 마찬가지로 균열하중에서의 처짐량은 파괴하중에서의 처짐량의 90% 이상이다. 따라서 라이닝에 불리한 이러한 재하구조에서는 균열이 발생하자마자 곧 이어 파괴하중에도 달할 가능성이 크고, 균열이 발생하면 즉각적으로 조치를 취해야 함을 알 수 있었다. 복층 라이닝의 경우 편심재하 구조에 가장 큰 내하력 증진효과 및 균열 억제 효과를 가져옴을 알 수 있었다. 발생하는 모든 휨균열은 재하영역의 경우 라이닝을 완전 관통하나 재하영역이 아닌 단면에서는 중립축에 다달으면 중립축에 연하여 발전한다. 그러나 철근 배근이 이루어진 경우 발생한 인장 휨균열은 철근에 다달으면 균열의 발전이 억제된다. 배면공동이 존재하지 않는 복층 라이닝의 경우, 재하가 슛크리트에 이루어지지만 1차 균열의 발생은 콘크리트 라이닝에서 이루어진다. 그러나 배면공동이 존재하는 경우 두 라이닝에서 동시에 균열이 발생하는 모습을 볼 수 있었다. 또한 복층 라이닝의 경우, 비 재하영역의 최대 휨모멘트가 작용하는 영역에서 슛크리트와 콘크리트 라이닝이 벌어지는 현상이 발생하는데 이러한 현상이 복층 라이닝계의 안정성을 저해하는 주요 원인으로 판단된다.

#### 4.6 지보곡선 및 휨모멘트

라이닝과 같은 지보 부재에 가해진 상재하중과 그에 따른 라이닝의 변위는 서로 상관 관계를 갖는다. 터널내에 설치된 지보의 강성은 강성계수,  $k$ 로 특징지워지는데, 지보에 의해 제공된 반경방향의 지지압  $P_i$ 와의 관계는 다음과 같다[2].

$$p_i = k \frac{u_{ie}}{r_i} \quad (5)$$

실험한 결과인 처짐곡선을 통하여 한계단면에서의 지보곡선 및 지보강성을 구하였는데 지보곡선은 차원해석에 의한 변수를 이용하여 무차원항으로 표현하였다.

먼저 라이닝에 가해지는 하중을  $f_a$ , 균열하중을  $f_{cr}$ , 라이닝 반지름을  $r_i$ , 내부 처짐량 즉 수렴 변위를  $u_i$ 라 할 경우에 대하여  $\frac{f_a}{f_{cr}} \sim \frac{u_i}{r_i}$  곡선의 관계를 유도하였다. 즉 이 곡선은 가해진 재하하중을 균열하중으로 나눈 무차원 하중값과 처짐량을 라이닝 반지름으로 나눈 무차원 처짐량값의 관계를 나타낸다. 무차원 지보곡선 관계  $f_a/f_{cr} \sim u_i/r_i$ 에서  $f_a/f_{cr}$ 의 단위는 (kg/kg)이며,

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

$u_i/r_i$ 의 단위는 (cm/cm)로서 하중 항은 어떠한 단위이든지 관계가 없지만, 변위항은 사용한 반지름 값 및 변위단위에 지보강성이 좌우되기 때문에 유의하였다. 시험체의 한계단면에서의 처짐량을 이용하여 무차원 지보강성을 구한 결과 상관관계가 99%인 값을 구하였다. 따라서 평균 지보곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_a}{f_{cr}} = (0.78 \sim 1.07) \frac{E_l}{\sigma_{ck}} \frac{u_i}{r_i} + 0.033 \quad (6)$$

지보강성의 평균값은 0.9이다. 따라서 1차 균열하중  $f_{cr}$  및 터널에 가해지는  $f_a$ 만 예측할 수 있다면 처짐량 즉 변위를 구할 수 있다. 또한 터널의 변위  $u_i$ 를 알고, 가해지는 하중  $f_a$ 만 예측할 수 있다면, 1차 균열이 발생하는 하중을 예측할 수 있다.

실제 아치 라이닝 시험체에서 계측한 변형률값을 이용하여 계산한 단면력인 계측 최대 휨모멘트 값과 일반 기준식의 값을 비교함으로써 기준식에 대한 수정을 가하고자 하였다.

최대휨모멘트 관계식은 측압이 무시할 수 있을 만큼 작거나 토사지반에서 정지토압이 작용하는 경우 안전계수를 고려하지 않으면 다음과 같은 관계를 가져야 정확한 휨모멘트 설계가 됨을 알 수 있었다.

$$M_d = \frac{\sigma_{ru}}{C \cdot S_f} \cdot b \cdot \frac{h^2}{6} \quad (7)$$

$$C(\text{Correction coefficient}) = 1.1 \sim 1.5$$

여기서  $M_d$ 는 설계 휨모멘트강도(kg-cm),  $\sigma_{ru}$ 는 평면 콘크리트의 휨인장강도(modulus of rupture, kg/cm<sup>2</sup>),  $S_f$ 는 안전율(safety factor),  $b$ 는 재하 면의 폭(cm)이고,  $h$ 는 전체 콘크리트 층의 두께(cm)이다.

측압이 0.5이하인 경우, 측압이 존재하는 6개의 시험체에 대하여 고려한 경우 모두 균열이 발생한 한계단면에서 설계휨모멘트의 16%이상, 최고 3.8배에서 균열이 발생하였다. 그러므로 지하수압과 같은 부가적인 하중에 대하여 안전계수를 보정한다면, 큰 지장이 없는 것으로 파악할 수 있다. 엔지니어링 측면에서 실제의 설계 최대휨모멘트를 다음과 같이 증가시켜도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

$$M_d = C \cdot \frac{\sigma_{ru}}{S_f} \cdot b \cdot \frac{h^2}{6} \quad (8)$$

$$C(\text{Correction coefficient}) = 1.2 \sim 1.8$$

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

5. 라이닝 인터페이스 요소 및 수치해석에 사용된 모든 요소

shotcrete와 콘크리트 라이닝 사이의 상호거동을 수치해석적으로 반영하기 위해서 두 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소를 개발하였다[1].

본 프로그램에서 개발한 인터페이스 요소는 Goodman에 의해 개발된 절리모델(joint model)을 수정한 모델로 마찰요소(friction element)를 이용하여 구현하였다. 이 인터페이스 요소는 구조적으로 상부 및 하부 라이닝 요소에 각각 연결되어 있다.

Fig. 10에 개발된 마찰요소를 나타내었다.  $i, j$  절점은 하부 라이닝 빔요소에 위치하고  $k, l$  절점은 상부라이닝 빔요소에 위치한다.  $i', j'$  및  $k', l'$  절점은 가상절점으로  $i, j$  절점변위와  $i', j'$  절점변위와의 관계 및  $k, l$  절점변위와  $k', l'$  절점변위와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_i &= u_i - \theta_i \frac{h_c}{2} \\
 u_j &= u_j - \theta_j \frac{h_c}{2} \\
 u_l &= u_l + \theta_l \frac{h_s}{2} \\
 u_k &= u_k + \theta_k \frac{h_s}{2}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서  $h_s$  및  $h_c$ 는 각각 shotcrete 및 콘크리트 라이닝의 타설두께,  $\theta$ 는 절점의 각 변위이다.

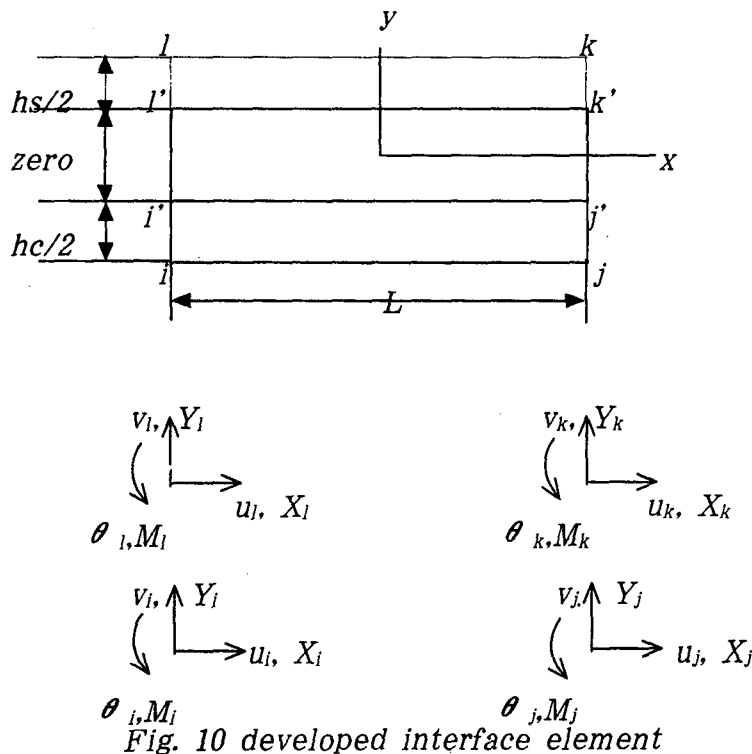


Fig. 10 developed interface element

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

수치해석에 사용된 모든 요소는 Fig. 11과 같다. 지반 요소는 4절점 2자유도 연속체 요소로서 소성기준은 Mohr-Coulomb 기준을 적용하였다. 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 요소는 3자유도 평면 프레임 요소(plane frame element)로서, 극한 휨모멘트(ultimate flexural moment) 기준을 적용하였다[1]. 지반과 슛크리트를 연결하는 인터페이스 요소는 하중 전달을 위한 요소이다. 사용한 인터페이스 요소는 King[8]에 의해 개발된 4절점 요소이다. 슛크리트와 콘크리트 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소는 위에서 개발한 요소이다.

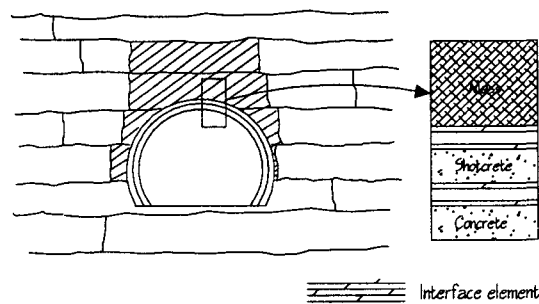


Fig. 11. All elements used in the numerical analyses

수치해석은 해석목적에 따라 지중골조모형을 사용하거나 지반을 고려한 FEM해석을 수행하였다. 특히 지반을 고려한 FEM해석 모델에서는 초기 지압 및 지보의 시차적 적용을 고려한 터널 라이닝 해석을 실시하였다. 즉 1) 굴착전 지반의 초기응력 상태, 2) 굴착후 슛크리트 설치시까지의 지반의 이완, 3) 슛크리트 설치후 최종 콘크리트 라이닝의 설치시까지의 이완, 4) 콘크리트 라이닝에 걸리는 2차 지압을 고려할 수 있는 해석시스템을 개발하였다.

지반과 슛크리트 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소의 법선 강성은 다음과 같이 구하였다.

$$k_n = K \cdot R \cdot b \cdot \theta \tag{10}$$

여기서 K는 지반반력계수, b는 터널의 해석 종축길이,  $\theta$ 는 하나의 스프링이 나타내는 영향역역에 해당하는 각도이다. Table 7은 사용한 지반 반력계수이다.

Table 7. Some types of modulus of subgrade reaction

Model type	Method	modulus	Description
Frame model	Simple method	$K = E_m/R$	$E_m$ : 지반의 탄성계수
	Paul method	$K = E_m/2C_0$	$R$ : 터널의 반지름 $\nu_m$ : 지반의 포아송비
FEM model (considering groud)	Kunmar method	$K = \frac{E_m}{(1 + \nu_m)R}$	$C_0$ : 터널바닥에서 분리점까지의 거리



문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

### 6. 터널 라이닝 모형 실험과 수치해석의 비교 검토

본 절에서는 터널 라이닝 모형 실험과 같은 라이닝 물성, 하중조건, 구속조건을 통하여 수행한 수치해석 결과를 비교·검토 하였다. 단일 라이닝 모형 시험체 시험결과와 수치해석 결과를 비교하면 다음과 같다. 실험적 균열하중과 수치해석적 균열하중은 대부분의 시험체에서 10% 이내의 오차를 보이는 양호한 부합성을 나타내었다. 균열위치는 한계단면이 천단인 경우는 서로 일치하였고, 편심재하에 해당하는 시험에서는 아치 각도 5도 이내의 오차를 보이는 역시 양호한 부합성을 나타내었다. 하중-처짐량 곡선 또한 실험과 수치해석 결과가 그 경향 및 최대 처짐량 측면에서 잘 부합하였다.

본 절에서는 5절에서 소개한 인터페이스 요소의 타당성을 입증하기 위하여 복층 라이닝 시험체의 결과만 소개한다. 터널 모형실험에 사용된 표준형은 경부고속철도 표준단면 Type V였다. 모두 원형(prototype)의 1/10의 크기로서, 슛크리트 라이닝은 3cm, 콘크리트 라이닝은 6cm이다. Table 8에는 모형 시험체 실험 결과 및 수치해석 결과를 균열하중, 균열위치, 최대처짐량의 항목으로 나타내었다. 또한 시험체에 대한 한계단면의 지보하중-처짐곡선을 나타내었는데 시험결과와 수치해석 결과는 거의 유사하다. 균열이 발생한 균열하중, 균열발생 위치, 균열하중에서의 최대처짐량등이 매우 유사하였다. 이러한 비교로부터 본 연구에서 개발한 인터페이스 요소의 법선 감성은 다음과 같이 구할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 8. Comparison of scaled model tests with numerical analyses

Test	Analysis type	Cracking load(ton)	Cracking location	Max. deflec. (mm)	Comparison
DL-2	Experiment	1.44	Vault	1.03	Cracking : similar
	Numerical	1.84	Vault	0.97	Deflection: similar
DL-4	Experiment	0.77	R43	1.28	Cracking : similar
	Numerical	0.82	R45	1.59	Deflection: similar
DL-21	Experiment	0.85	Vault	1.06	Cracking : similar
	Numerical	0.95	Vault	0.88	Deflection: similar
DL-6	Experiment	1.06	Vault	1.19	Cracking :different
	Numerical	0.76	Vault	0.51	Deflection:different

$$k_n = \frac{\bar{E}_t}{h \cdot R^2} \times b, \quad \bar{E}_t = \frac{t_s E_s + t_c E_c}{t_s + t_c} \quad (11)$$

여기서,  $h$ 는 복층 라이닝의 총 두께이고,  $R$ 은 콘크리트 터널 라이닝의 내부반경이다.  $b$ 는 해석

문헌 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

깊이 즉 축방향의 해석 깊이이고,  $\overline{E}_t$  은 두께를 고려한 평균 탄성계수이다.  $t_s$  및  $E_s$  는 각각 슛크리트 라이닝의 두께 및 탄성계수,  $t_c$  및  $E_c$  는 각각 콘크리트 라이닝의 두께 및 탄성계수이다. 접선강성은 통상 0.1~0.9  $k_n$ 를 사용하나 평균 0.5  $k_n$ 를 사용할 수 있다.

## 7. 복층 라이닝 변수해석 결과 및 검토

본 절에서는 복층 라이닝에 대하여 여러 가지 파라미터 변화를 통하여 매개변수해석을 실시하였다. 파라미터들은 두 라이닝 사이에 존재하는 인터페이스 요소의 접선/법선 강성비, 슛크리트 라이닝의 두께 변화, 콘크리트 라이닝의 두께 변화, 지반 물성의 변화이다. 원형은 경부고속전철 표준단면 패턴-I이다. 따라서 표준 슛크리트의 두께는 10cm, 콘크리트 라이닝의 두께는 40cm이다. 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 물성은 양생 28일 경과된 표준 콘크리트의 물성을 사용하였다. 총 지보계의 내부반경은 710cm이다.

### 7.1 인터페이스 접선/법선 강성비에 따른 복층 라이닝의 거동

스�크리트 및 콘크리트 라이닝 사이에 존재하는 인터페이스 요소의 접선/법선 강성비의 변화에 따른 복층 라이닝의 거동을 조사하였다. 보통 접선강성은 법선강성의 0.1 ~ 1.0 수준으로서, 매끄러운 접촉면을 갖는 경우 접선/법선 강성비가 0.1에 가깝고, 거칠수록 1.0에 가깝다. 조사 결과로서,  $K_s/K_n$ 이 0.0에서 1로 변화함에 따라 라이닝이 항복하는 외부하중 및 슛크리트 천단의 축력은 지수함수적으로 감소하는데 최대 약 15% 감소하였다. Fig. 12에 강성비의 변화에 따른 슛크리트의 항복응력의 변화를 나타내었다. 특히 콘크리트 천단의 처짐, 두 라이닝의 휨모멘트량은 50% 이상 선형적으로 감소하였다. 그러나 슛크리트 천단의 처짐량 및 콘크리트 천단의 축력은 오히려 7% 상승하였다. 그러나 상승률은 아주 미미하므로 결과적으로 큰 영향을 받지 않았다는 사실을 알 수 있다. 따라서 두 라이닝의 접촉면이 매끄러울수록 균열에 대한 내하력은 증가하며, 슛크리트의 처짐량 또한 감소한다는 것을 알 수 있다. 달리 표현하면, 두 라이닝의 접촉면이 거칠수록 내하력이 오히려 감소한다는 사실을 의미한다. 이는 슛크리트와 지반 사이의 접선 마찰력이 지반 하중을 분담함으로써 전체 계의 내하력이 증가한다는 사실과는 반대이다.

### 7.2 슛크리트의 두께 변화에 따른 복층 라이닝의 거동

표준 슛크리트 두께 10cm를 기준으로 하여 두께를 변화시킴에 따른 복층 라이닝의 거동을 조사하였다. 슛크리트의 두께는 함께 시공되는 강지보공(steel arch)의 제원 및 용접 강선망(wire mesh)의 크기와 관련있기 때문에, 이를 고려하여 그 범위를 5~20cm로 하였다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

예상했던 바와 같이 슛크리트 두께 증가에 따라 모든 물리량이 급격히 증가한다. 특히 항복 의 부응력 및 슛크리트 축력은 7배 이상 상승하였다. 콘크리트 라이닝의 처짐량, 두 라이닝의 모멘트는 모두 크게 증가하는 반면, 슛크리트 처짐량 및 콘크리트 라이닝의 축력은 큰 변화를 보이지 않는다. 특히 콘크리트 라이닝의 처짐량 및 휨모멘트 등은 더욱 크게 증가하였다. 따라서 위의 두가지 물리량의 측면에서 볼 때, 슛크리트 두께 증가만이 항상 계의 안정성에 양호한 것이 아님을 알 수 있었다. 모든 결과를 종합한 결과 슛크리트 두께 증가량을  $\Delta t_{shot}$  라 할 경우 다른 물리량과의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_p \text{ (yielding pressure)} &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\
 \text{deflection of shotcrete} &\propto (\Delta t_{shot}) \\
 T_s \text{ (thrust of shotcrete)} &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\
 M_s \text{ (moment of shotcrete)} &\propto (\Delta t_{shot})^4 \\
 \text{deflection of concrete} &\propto (\Delta t_{shot})^2 \\
 T_s \text{ (thrust of concrete)} &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\
 M_s \text{ (moment of concrete)} &\propto (\Delta t_{shot})^5
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

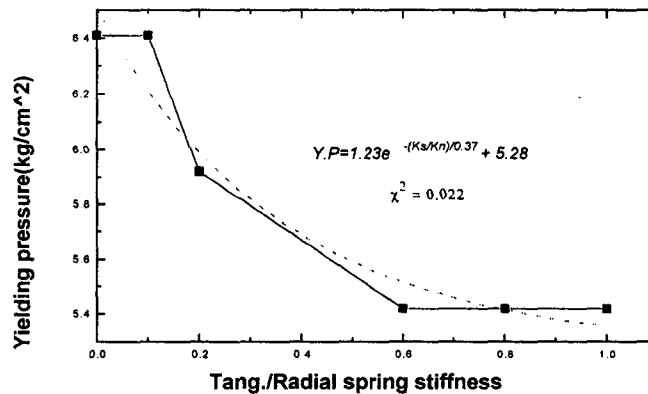


Fig. 12. Yielding pressure of the support system with the stiffness ratio of the interface element between shotcrete and concrete lining

7.3 콘크리트 라이닝의 두께 변화에 따른 복층 라이닝의 거동

콘크리트 라이닝 두께를 40cm 기준으로 하여 변화시킴에 따른 복층 라이닝의 거동을 조사하였다. 변화의 범위는 표준 두께 40cm 에 대하여 0.2에서 1.3배 사이이다. 본 해석에서는 구조적인 관점에서 두께 40cm가 적절한지를 평가하는데에도 그 목적이 있다.

Fig. 13에는 콘크리트 라이닝 두께비에 따른 슛크리트의 항복응력을 나타내었다. Fig. 13에서

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

보는 바와 같이 표준두께 40cm에 가까워짐에 따라 항복 외부하중은 큰 변화를 보이지 않다가 35cm에서 급격한 증가를 보였다. 이러한 경향은 슛크리트 천단의 축력에서도 나타났다. 비슷한 경향을 보이는 것은 슛크리트 천단의 처짐량으로서 계속 감소하다가 35cm에서 갑자기 상승하였다. 콘크리트 천단의 처짐량 및 축력은 지수함수적으로 감소하는데, 35cm정도부터 큰 차이를 보이지 않는다. 두 라이닝의 휨모멘트는 모두 계속해서 상승한다.

따라서 항복 외부하중 및 콘크리트 처짐량의 관점에서 볼 때 40cm는 적절한 두께인 것으로 판단된다. 경제적인 대안으로서 35cm도 모든 면에서 40cm 와 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 콘크리트 라이닝의 두께를 증가시킴에 따라 계의 항복하중이 비례상승하는 것이 아니라 어느 두께 범위에서 급격하게 증가한다는 사실은 매우 중요하다. 이러한 사실은 표준 두께 40cm 이상으로 두께를 증가시킨다 하더라도 콘크리트 천단의 처짐량은 감소하지만 계의 내하력 및 슛크리트의 축력 등은 큰 차이가 없어 비 경제적이라는 것을 의미한다.

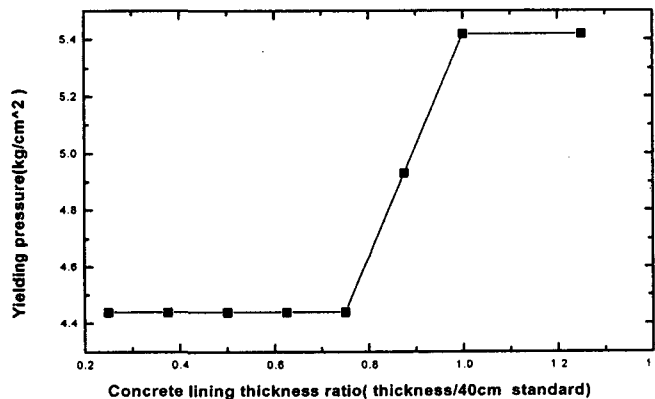


Fig. 13. Yielding pressure of the support system with the thickness ratio of the concrete lining (shotcrete thickness is fixed)

7.4 지반과 슛크리트의 휨강성비 및 인터페이스의 접선/법선 강성비에 따른 거동

지반과 슛크리트 및 콘크리트 라이닝을 동시에 해석하는 경우에 대하여 변수해석을 실시하여 복층 라이닝 거동을 관찰하였다. 이는 7.1절의 결과를 보충함과 동시에 지반과 슛크리트의 휨강성 (flexibility ratio)에 따른 결과를 나타내기도 한다. 지반과 라이닝 사이의 휨강성비는 다음과 같이 정의한다.

$$F = \frac{E_m \cdot (1 - \nu_l^2) \cdot R^3}{6E_l I_l \cdot (1 + \nu_m)} \tag{13}$$

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

여기서,  $m$ 은 지반 매체에 대한 첨자,  $l$ 은 라이닝에 대한 첨자이다.  $E$ 는 라이닝 또는 지반의 탄성계수,  $\nu$ 는 포아송비이다.  $R$ 은 라이닝의 내부 반지름,  $I_l$ 는 라이닝의 단위길이당 2차 모멘트 즉 관성모멘트이다. 여기서 라이닝의 물성은 일반적으로 고정되어 있고, 라이닝의 내부 반지름 또한 설계에서 정해지므로, 결국 지반의 물성인  $E_m$ 을 변화시킴으로서  $F$ 값은 다양하게 변화한다.

Fig. 14에는  $F$ 값의 변화 및 두 라이닝 사이의 접선/법선 강성비에 따른 콘크리트 라이닝의 천단 및 측벽에 작용하는 응력(축력 및 휨모멘트의 결합 응력)을 나타내었다. 전체적으로 접선/법선 강성비가 증가할수록 비례하여 단면력이 크게 증가함으로써 양호하지 못한 결과를 도출한다. 이는 7.1절에서 이미 설명된 바 있다. 휨강성비  $F$ 의 변화에 따른 결과는 다음과 같다. 즉,  $F$ 가 클수록 경암이고 작을수록 연암에 가깝다. 그림에서 보는 바와 같이  $F$ 가 작을수록 응력은 크게 작용한다. 또한  $F$ 가 작을수록 천단과 측벽의 응력이 차이가 나며  $F$ 가 클수록 그 반대이다. 따라서 지반이 연암에 가까울수록 콘크리트 라이닝 단면에 큰 응력이 작용한다는 일반적인 양상을 나타내며, 지반과 동시에 복층 라이닝을 해석하더라도 복층 라이닝 사이의 마찰력은 지보계의 안정성을 해친다는 사실을 알 수 있다.

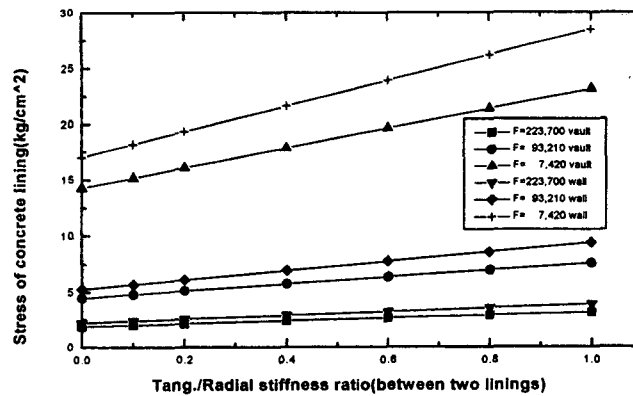


Fig. 14. Stresses of concrete lining with both the variation of interface stiffness ratio between two linings and the variation of flexibility ratio,  $F$

### 7.5 초기지압 및 지보의 시차적 적용을 고려한 복층 라이닝의 거동

지반의 굴착, 지보 타설의 시차적 적용을 고려한 유한 요소 코드를 구현하여 복층 라이닝의 거동을 조사하였다. 스티크리트 및 콘크리트 라이닝과 같은 지보 타설 시기는 터널 굴착으로 인하여 벽면에 발생하는 불평형력을 순차적으로 이완시키는 단계에 따라 이루어진다[1].

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

먼저 지반의 물성 변화 즉 지반의 암종이 변화함에 따른 라이닝의 거동을 조사하였다. 지반의 물성변화는 휨강성,  $F$ 에 의해 반영되었다. 축압계수는 0.3으로 고정하였으며, 지반과 슛크리트 사이에 존재하는 인터페이스 및 두 라이닝 사이에 존재하는 인터페이스의 접선/법선 강성비는 1.0으로 고정하였다. Fig. 15에는 휨강성비의 변화에 따른 천단과 측벽에서의 콘크리트의 응력을 나타내었다. 휨강성비  $F$ 가 증가함에 따라 응력은 지수함수적으로 감소하여 25,000 이상일 경우 큰 차이를 보이지 않게 되었다. 일반적으로 사용되는 슛크리트 물성을 기준으로 할 경우, 기준 25,000은 탄성계수의 범위가  $40 \sim 100 t/m^2$ 인 보통암 수준이다. 따라서 지반이 보통암 이하의 불량한 지반일 경우 콘크리트 응력은 지반의 종류에 따라 크게 민감하다는 사실을 알 수 있다. 이러한 경향은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 처짐량, 응력, 축력, 휨모멘트 등의 모든 물리량에서도 같은 경향을 보였다.

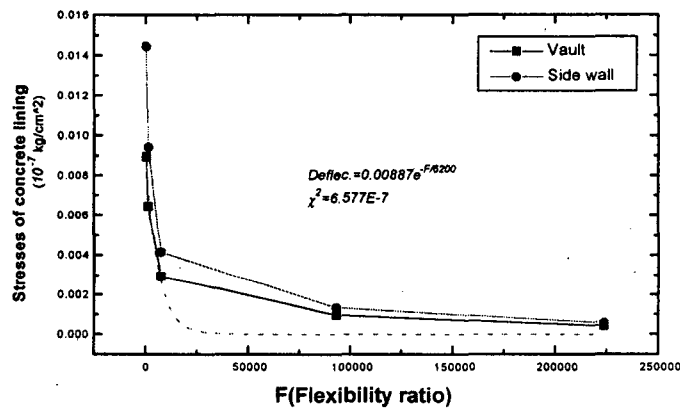


Fig. 15. Stresses of concrete lining with the flexibility ratio,  $F$  on both vault and side wall

다음으로 축압계수의 변화에 따른 복층 라이닝 거동을 조사하였다. 먼저 슛크리트 라이닝의 거동을 기술한다. 축압계수가 0.3, 0.5, 2.0으로 변화함에 따라, 순수 연직 방향의 변위만을 고려한 경우 모두 지반의 아치력(arching force)에 의해 터널 내부로 수렴하였지만, 변위 벡터로 고려한 경우 축압계수 1.0을 기준으로 경향이 역전되었다. 단면력인 축력 및 휨모멘트의 경우에도 축압계수 1.0을 기준으로 경향이 역전되는 현상은 유사하였다. 이에 반해 콘크리트 라이닝의 거동은 다른 경향을 보였다. Fig. 16에는 축압계수의 변화에 따른 휨모멘트의 분포를 나타내었다. 휨축은 아치각도로서 0도가 천단을 나타내며 음 및 양의 부호는 각각 좌우측으로의 아치각도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 축압계수가 0.3인 경우에는 측벽 및 천단이 휨모멘트가 가장 크고

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

45도 인근에서 가장 작다. 마찬가지로 축압계수가 0.5 및 2.0의 경우에는 그 경향이 마찬가지로이지만 부호는 정반대라는 사실에 유의해야 한다. 즉 모든 경우에 한계단면은 축벽부와 천단일 가능성이 크지만 축압계수가 0.5를 기준으로 부호가 역전되어 휨모멘트 작용방향이 역전되는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 콘크리트의 축력 및 전단력의 경향과 동일하다. 또한 콘크리트 라이닝의 처짐백타에서도 같은 경향을 보였다. 따라서 축압계수의 변화에 따른 콘크리트 라이닝의 거동은 일반적으로 생각되는 1.0을 기준으로 물리량의 부호가 역전되지만, 콘크리트 라이닝의 거동은 축압계수 0.5 이상부터 역전된다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결론은 현장 적용사례에서도 똑같이 조사되었다.

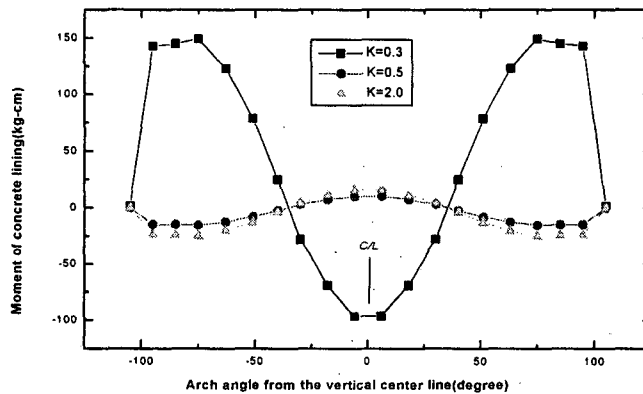


Fig. 16 Flexural moment distribution of the concrete lining in the double lining with the ratio of horizontal to vertical stress

## 8. 현장 적용 사례 및 검토

본 연구에서 개발된 유한 요소 프로그램의 현장터널에 대한 활용성을 검증하기 위하여 변위 및 응력 측정이 수행된 경부고속철도 단면을 선정하여 수치해석을 수행하였다. 특히 해석의 정도를 조사하기 위하여 터널 라이닝의 변위 및 응력이 측정되고, 지중변위 및 천단침하가 측정된 단면에 대하여 수치해석을 수행하였다.

### 8.1 터널의 제원 및 지질개요

본 터널의 위치는 충남 연기군 전의면 대곡리~전동면 청송리 구간이고, 총 길이 1.46 km의 대표적인 NATM 공법으로 시공된 터널이다. 이 구간의 터널 단면은 한국 고속 철도건설 공단에서

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

제시한 복선반원형 표준단면으로 설계되었으며, 내부 반경은 7.1 m로서 각각 지반의 RMR치에 따라서 지보패턴이 상이하다. 모든 경우에 콘크리트 라이닝의 두께는 40cm로 일정하며 슛크리트 라이닝 두께는 10~25cm로 다양하다.

지질개요는 다음과 같다. 즉, 선 캄브리아기의 편마암류와 이를 관입한 중생대의 화강암류가 지배적으로 분포하고, 이 화강암을 염기성 암맥이 재 관입하였고, 또한 제 4기의 충적층이 피복하고 있다. 해석대상 단면은 두 단면으로서 104K200, 103K950 지점으로, 단면 104K200에서는 지표로부터 5m까지는 실트질 모래가 우세하며, 층서적으로 풍화암, 연암, 경암이 분포하고 있다. 덮개암의 두께는 25m 가량이다. 단면 103K950은 마찬가지로 지표로부터 5m까지는 실트질 모래가 우세하며, 층서적으로 연암, 경암이 분포하고 있으나 주로 연암이 우세하다. 지표까지의 덮개암의 두께는 터널 반경과 비슷한 약 15m 가량이다. 수치해석에 사용된 지층 및 지보재의 물성은 Table 9와 같다.

Table 9. Physical properties of ground and support systems

	Type	Elastic modulus (kg/cm <sup>2</sup> )	Unit weight (kg/cm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Friction angle	K
Ground	Weathered rock	1,000	0.0022	0.28	5.0	25	0.5
	Weak rock	6,000	0.0024	0.23	11.2	33.5	0.5
	Hard rock	36,000	0.0026	0.20	24.7	42	0.5
Support	Shotcrete	150,000	As = 20cm <sup>2</sup> , I = 666.7cm <sup>4</sup>				
	Concrete	260,000	Ac = 40cm <sup>2</sup> , I = 5333.3cm <sup>4</sup>				

8.2 수치해석 결과와 계측치의 비교

Table 10에 각각 대표계측 단면 104K200 및 103K950에 대하여 계측결과 및 수치해석 결과를 나타내었다. 대표 단면 104K200의 천단침하 및 지중변위값을 제외하고 나머지 모든 물리량은 수치해석 결과와 계측결과가 매우 유사하다. 104K200의 천단침하량은 실제 계측결과가 16mm로서 수치해석 결과의 1.16mm와는 10배 이상 차이를 보이며, 터널 천단으로부터 1.5m 떨어진 지반내 지중변위량은 계측결과가 13.84mm로서 수치해석 결과의 3.88mm에 비해 4배이상 차이를 보인다. 이는 본 대표단면에서는 천단 상부의 국부적 지질 악화로 인한 사하중 이나 암반블럭의 생성으로 인한 국부적 재하가 이루어진 가능성이 있는 것으로 사료된다. 이에 비해 대표단면 103K950에서는 터널 천단의 침하량이 5.00로 계측되고, 수치해석 결과는 4.83mm로 나타나 거의 유사함을 알 수 있다. 마찬가지로 현상이 지중변위량에서도 나타나는데 터널 천단으로부터 1.5m 떨어진 지반내 지중변위량은 5.30mm로서 수치해석 결과의 4.58mm와는 유사함을 알 수 있다.



문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

지보재의 물성인 슛크리트의 압축응력은 두 단면 모두 천단과 측벽부에서 계측결과와 수치해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 슛크리트 압축응력은 허용압축응력 52 kg/cm<sup>2</sup>에 크게 미치지 못함을 알 수 있다. 여기서는 콘크리트 라이닝내 응력 및 변위값이 계측되지 않았기 때문에 그 값을 비교할 수 없었다.

Table 11. Comparison of measured data with numerical results in two standard sections(K=0.5)

Section	Vault subsidence (mm)		Horizontal convergence (mm)		Shotcrete compressive stress ( kg/cm <sup>2</sup> )				Ground displacement (mm)	
					Vault		Side wall			
	Mea.	Num.	Mea.	Num.	Mea.	Num.	Mea.	Num.	Mea.	Num.
104K200	16.00	1.16	2.47	1.76	3.07	4.05	17.27	13.25	13.84	3.88
103K950	5.00	4.83	0.55	0.552	7.04	7.2	6.55	7.19	5.30	4.58

\*\* Num. : Numerical results, Mea. : Measured data

8.3 추가적인 수치해석 결과와 천단균열 억제를 위한 수치해석 결과 및 검토

본 절에서는 위의 수치해석 결과를 이용하여, 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 거동을 비교하고자 한다. Fig. 17과 Fig. 18에는 각각 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 처짐벡터를 나타내었다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 슛크리트는 지반의 아치력에 의해 천단에서 가장 큰 아랫방향의 처짐을 나타내고 측벽부로 갈수록 처짐량이 작아지는 분포를 나타내고 있다. 그러나 콘크리트 라이닝의 경우에는 다른 양상을 보인다. 콘크리트 라이닝의 어깨부위, 측벽 및 각부에서는 공동내부로 처짐이 발생하나 천단부위에서는 터널 상부로의 변위가 발생한다. 이 범위는 천단을 기준으로 약 30°도의 범위로서 대부분의 터널 콘크리트 라이닝 종균열이 천단으로부터 약 20도내외에서 발생한다는 사실과 거의 일치하는 범위이다.

본 해석단면의 측압계수는 0.5이었다. 따라서 7.5절의 결과와 유사한 경향을 보이는데, 콘크리트 라이닝의 처짐이 천단 부위에서 다른 부위와는 반대로 슛크리트 쪽으로 향하는 현상을 보인다. 이러한 천단 부위에서 슛크리트의 처짐과 콘크리트 라이닝의 충돌은 결국 마찰 효과를 발생시킬 것이며, 슛크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 마찰이 지보재의 내하력을 감소시킨다는 7.4절의 결과와 비교할 때, 천단 부위에서의 균열발생에 크게 기여하리라 판단할 수 있다. 즉 콘크리트 천단 부위의 콘크리트 재료적 결함을 제외한, 측압계수 0.5 이상에서의 이러한 마찰이 콘크리트 천단 부위 균열발생의 주요한 원인이 되리라 판단된다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

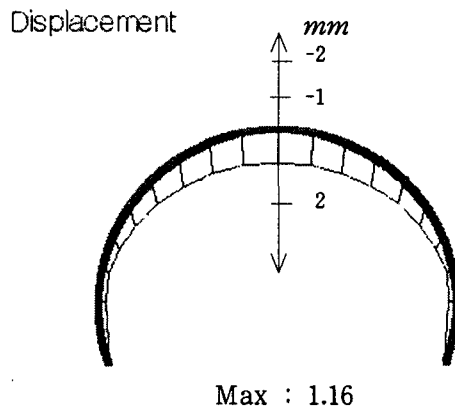


Fig. 17 Displacement vector distribution of the shotcrete in the double lining support system(K=0.5)

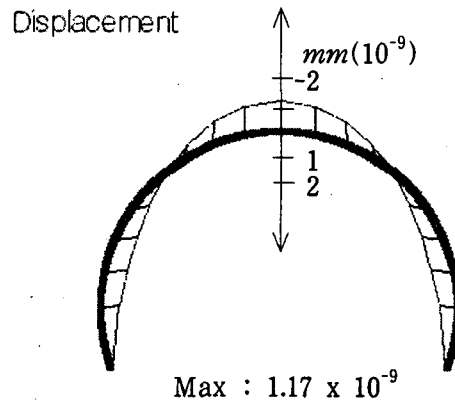


Fig. 11 Displacement vector distribution of the concrete lining in the double lining support system(K=0.5)

다음으로 이러한 콘크리트 라이닝 천단 균열 발생 억제를 위한 여러 방법들을 적용함으로써 수치해석적으로 그 효과를 조사하였다. 본 해석에서 사용한 방법들은 Table 12와 같다. 정량적인 비교보다는 그 경향을 보기 위한 정성적인 비교를 한다. 따라서 접촉강성의 줄인 비율, 라이닝의 두께 증가량, 슛크리트 두께 증가량 등은 어느 기준에 따라 선정되었다기 보다는 그 효과를 보기 위하여 적절히 합리적으로 선택되었다. 따라서 접촉강성은 1/10으로 저하시켰으며, 라이닝 두께는 국부적으로 10cm 증가시켰다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

Table 12. Numerical investigation method to prevent cracking on roof of the concrete lining

Item	Real method		Numerical method
Contact surface between shotcrete and concrete lining	reduce the contact stiffness of side wall in two linings to prevent load from transferring to the concrete lining	Ⓐ	reduce the stiffness of lining interface by 90%
Concrete lining	Increase locally the thickness of concrete lining side wall	Ⓑ	Increase from 40 to 50cm for concrete lining side wall
	Increase locally the thickness of concrete lining roof	Ⓒ	Increase from 40 to 50cm for concrete lining vault
	reinforce the tension fiber of concrete lining using steel wire mesh etc.	Ⓓ	-
Shotcrete	Increase locally the thickness of shotcrete side wall	Ⓔ	Increase from 40 to 50cm for shotcrete side wall

처짐벡타, 축력, 휨모멘트의 관점에서 그 결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 즉, 콘크리트 라이닝 천단의 균열발생을 억제하기 위해서는 측벽부의 슛크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 접촉강성을 저하시키는 ①의 방법이 가장 바람직하며, 그 강성을 수치적으로 1/10로 저하시킨 경우 휨모멘트는 천단에서 1/2 수준으로 작아짐을 알 수 있었다. 차선택으로서는 콘크리트 라이닝 천단의 두께를 증가시키는 방법(Ⓒ) 또한 바람직하나 처짐벡타는 훨씬 커진다. 콘크리트 라이닝의 두께를 위와같이 국부적으로 25% 증가시킨 경우 휨모멘트는 1/10수준으로 저하한다. 실제적으로 슛크리트와 콘크리트 라이닝의 접촉강성을 국부적으로 저하시키는 방법으로는 방수를 위해 사이에 설치하는 부직포의 연성을 증가시키거나, 부직포외에 또다른 연성의 충전물을 충전하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

9. 결론

- 1) 시공 완료 5년 이내의 4개의 터널에 대하여 터널 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열을 조사하였다. 역학적으로 중요한 측방향 균열은 전체 균열중 42%를 차지했으며, 히스토그램 분석 결과 측방향균열중 93%가 터널 천단의 중심선으로부터 20° 이내의 범위에서 발생하는 것으로 파악되었다.
- 2) 실험결과 측압효과로서 측압이 있는 경우 측압이 없는 경우에 비해 균열에 대한 내하력이 1.5~2배 증가하였다. 균열하중에서의 최대 처짐량은 측압효과가 가장 좋은 등분포 수직재하를 제외하고 모두 1.2mm 근처에서 발생하였다. 따라서 축척이 10이므로 실제 원형에서는 균열발생 한

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

계치집량이 천단의 경우 12mm라는 것을 알 수 있다.

3) 실험결과 재하형태 효과로서 터널 상단에 등분포 수직 재하되는 경우가 등분포 편심재하되는 경우 및 천단에 집중재하되는 경우에 비해 균열에 대한 내하력이 평균 2배 컸다. 편심재하형태 및 집중재하만을 비교할 때, 단일라이닝에서는 편심재하형태가 균열에 대한 내하력이 20%이상 큰 반면에 복층 라이닝에서는 오히려 집중재하가 균열에 대한 내하력이 2배 가량 컸다.

4) 복층 라이닝에서는 콘크리트 라이닝의 거동이 안정화되면서 처짐거동이 대부분의 구간에서 발생한다. 콘크리트 라이닝 천단의 균열발생은 천단 주위에 등분포 재하가 이루어지던지, 일점 집중재하가 이루어지던지 슛크리트보다 먼저 균열이 발생하였다.

5) 실험결과 균열특성으로서 대부분의 균열은 터널 축방향 균열이었다. 등분포 재하형태에서 1차 균열은 천단 부근에서 2차 균열은 천단으로부터 60도 떨어진 부위에서 발생하였으며, 균열하중은 파괴하중의 30% 수준이었다. 특히 복층 라이닝의 경우 균열하중의 처짐량은 파괴하중 처짐량의 10% 수준으로 나타났다.

6) 실험결과와 처짐량을 분석함으로써 새로운 무차원 지보반응곡선을 유도하였다. 또한 휨모멘트를 분석한 결과 설계휨모멘트에 관한 일반식에 대하여 보정을 하였다.[참조 식(6),(7),(8)]

7) 복층 라이닝의 변수해석 결과로서, 두 라이닝의 접촉면이 매끄러울수록 균열에 대한 내하력은 증가하며, 슛크리트의 처짐량 또한 감소한다는 것을 알 수 있었다. 즉 두 라이닝의 접촉면이 거칠수록 내하력이 오히려 감소한다는 사실을 알 수 있었다.

8) 슛크리트 두께를 증가시키면, 그에 비례하여 내하력이 일정한 관계를 유지하며 상승한다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 두께 증가에 따라 콘크리트 라이닝의 처짐량 및 휨모멘트가 급격히 증가함으로써 무조건적인 두께 증가는 오히려 계의 안정성을 해칠 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

9) 콘크리트 라이닝 두께를 증가시키면, 내하력 등이 S자 형태의 상승을 보임으로서 비례관계가 아님을 알 수 있었다. 따라서 적절한 콘크리트 라이닝 두께가 내하력을 보장하며, 그 이상의 두께 증가는 경제적으로 큰 의미가 없음을 알 수 있었다.

10) 지반의 측압계수 변화에 따라 슛크리트 라이닝의 거동은 측압계수 1.0을 기준으로 그 방향이 역전되는데 비해, 콘크리트 라이닝은 측압계수 0.5를 기준으로 역전되었다. 또한 측압계수 0.5에서 현장 계측치와의 비교를 통하여 콘크리트 라이닝 천단 부위의 슛크리트와의 마찰 현상을 알 수 있었다. 따라서 이러한 현상이 균열발생에 큰 영향을 끼침을 알게 되었다.

## 사사

본 연구는 (주) 대우 기술연구소의 지원아래 1997년 10월부터 1998년 10월까지 이루어졌으며 연구과정에서 실험을 도와준 연구소 관계자 여러분께 깊은 감사말 드리는 바이다.

문건 : 한국지반공학회 터널·암반역학 위원회 98 박사학위 논문 발표회 98/05/22

내용 : 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 수치해석

참고문헌

1. 이대혁, 1998, 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구, 서울대학교 공과대학 공학박사학위 논문, p.292
2. Hoek, E., and Brown, E.T., 1980, Underground excavation in rock, The institution of Mining and Metallurgy, London, England.
3. Obert, L. and Duvall W.I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Willey & Sons, Inc., p. 650.
4. Paul, S.L., Hendron, A.J., Cording, E.J., Sgouros, G.E. and Saha, P.K., 1983. Design recommendation for concrete linings - Vol.1 Results of model tests and analytical parameter studies, UMTA-MA-06-0100-83-1, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. (November).
5. Piede, Liu, 1986, Model test study on double lining of tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.1 No.1, pp. 53-58.
6. 近久 博志, 荒井 莘夫, 筒井 雄行, 櫻井 春輔, 1990, トンネル掘削時の挙動に関する模型実験装置と評價法, 土木學會第47回年次學術發表會, pp 678-679.
7. 이대혁, 김영근, 이희근, 1998, 모형실험에 의한 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지 제 8권 1호, pp. 53-66
8. King, G.J.W. & Chandrasekaran,V.S., 1975, An assessment of the effects of interaction between a structure and its foundation, In Settlement of structures, Pentech, London, pp. 368-383
9. El-Nahas, F., El-Kadi, F. and Ahmed, 1992, A., Interaction of tunnel linings and soft ground, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No.1, pp. 33-43.
10. Piede, Liu, 1986, Model test study on double lining of tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.1 No.1, pp. 53-58.