

터널 견전도 평가를 위한 라이닝 모델실험

Model Test of Lining for Estimation
of Tunnel Soundness

김영근 ((주)대우 건설기술연구소, 선임연구원)

Abstract

Recently, many deformations in tunnel such as crack and leakage were occurred. Specially, the defects of tunnel lining have been a serious problem in safety and stability, many repair works for maintenance in tunnel have been carried out. Therefore, it is necessary to estimate the structural cracking for countermeasure in deformed tunnel and to investigate on the characteristics of lining system and the soundness of tunnel.

In this study, model tests for tunnel lining were carried out using test apparatus and centrifuge. In the direct loading test, the prototype was Kyungbu high-speed railway tunnel and the scale is 1/10, and lining models were made of concrete. Test conditions included load conditions such as direction, shape and type, lining conditions such as single and double lining, thickness, and reinforcement. In centrifuge model test, the prototype was Seoul subway tunnel and the scale is 1/100, and lining models were made

of aluminum and hydrostone. Test conditions included tunnel defects such as thickness shortage, behind cavity and longitudinal cracks, reinforcement methods such as epoxy, grouting and carbon sheet.

From these model tests, the characteristics of deformation and failure for tunnel lining were estimated, and the structural behaviors of deformed lining and the effects of repair and reinforcement for tunnel lining were researched.

Keyword : Tunnel Lining, Model Test, Centrifuge, Tunnel Soundness, Repair and Reinforcement

I. 서론

최근 구조물의 노후화로 인한 보수·보강, 구조물에 대한 체계적인 유지관리 등에 대한 사회적 요구가 증가하고 있다. 터널은 지보재와 지반과의 상호 불확실한 역학적 특성으로 인하여 지반조건에 부적절히 시공된 경우에는 열화가 발생하고, 국부적인 열화에도 보수·교체가 곤란하기 때문에 구

조물 전체의 사용년수를 단축시키는 경우가 많다. 또한 터널 라이닝이외에는 손상을 확인할 수 있는 방법이 극히 제한되어 있어 터널의 열화상태를 쉽게 파악할 수 없는 특성을 가진다.

터널과 같은 지하구조물은 지반자체의 강도를 활용하는 구조물로서 대부분의 위험은 지반굴착중에 발생하고 지보재로 보강한 후에는 비교적 안정적인 구조물로 생각하여왔다. 또한 터널에서의 열화나 손상정도는 터널 라이닝을 통하여 발생되는 경우가 많기 때문에 터널에 대한 정밀안전진단은 주로 터널 라이닝에 대한 외관조사 및 평가에 의존하여 왔다.

라이닝은 터널에 작용하는 하중을 지지하고 또는 지반의 변형을 구속하여 터널의 내공단면을 보호하는 역할을 가진다. 그러나 터널은 다른 콘크리트구조물에 비해서 정확한 계산이 되지 않기 때문에 사용중에 균열 등과 같은 변형이 발생한 경우 그리고 터널주변에 근접공사가 시공되는 경우에 터널에 대한 전전도 평가 및 대책 수립시 고도의 기술적 판단이 요구된다.

터널 라이닝에서 발생되는 균열은 터널 라이닝 지보시스템에 대한 체계적인 연구 그리고 균열발생에 대한 원인규명 및 대책수립의 필요성을 부각시키고 있다. 또한 라이닝은 터널에 있어서 주요한 구조물이고, 라이닝의 합리적인 시공은 터널을 보다 경제적으로 신뢰성이 있는 구조물로 만드는데 있어 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 터널 라이닝의 문제점을 검토하고 터널 전전도 평가시 활용하기 위해서 터널 라이닝에 대한 모델실험을 실시하고자 하였다. 유압램(hydraulic ram)을 이용한 직접재하실험과 원심재하기(centrifuge)를 이용한 원심재하실험을 수행하므로서 하중조건과 라이닝 변상조건 그리고 보강조건에 따른 터널 라이닝의 변형거동 및 파괴특성을 평가하고자 하였다.

먼저 직접재하실험에서는 터널 라이닝 지보시스템의 역학적 거동을 조사하고 균열발생 특성을 규

명하기 위하여 경부고속철도 복선단면의 크기를 축소한 모델실험을 수행하였다. 콘크리트 단일 라이닝과 복합지보(콘크리트 및 속크리트 라이닝) 구조체에 대한 모델시험체를 제작하여 실험을 실시하여 라이닝 형상, 하중변화에 따른 라이닝의 파괴특성을 규명하고자 하였다.

또한 원심재하실험에서는 변상 및 결함이 구조적 안전성에 미치는 영향과 이에 대한 보수보강방법의 효과를 검증하기 위하여 서울시 지하철 터널 단면의 크기를 축소한 모델실험을 수행하였다. 모델시험체는 알루미늄과 하이드로스톤(hydrostone)으로 제작하여 100g 상태까지 가압하여 터널 라이닝에 작용하는 토압과 주변지반중의 토압, 그리고 터널 라이닝의 내외측의 변형률, 터널상부의 지표침하 및 라이닝 내공변위를 측정하여 터널변상 및 보강조건에 따른 라이닝의 구조적 안전성을 평가하고자 하였다.

2. 터널 라이닝 변상과 실험

2.1 터널 라이닝의 변상

현재 터널에 대한 정밀안전진단 결과, 터널 라이닝에는 여러 종류의 균열이 발생하고 있는 것으로 조사되고 있다. 터널 라이닝 균열은 콘크리트 타설 후 수화열로 인한 균열 및 콘크리트 경화시 건조수축으로 인한 균열들의 재료적인 원인 이외에 여러 가지 다른 원인에 의해 나타나고 있는데, 특히 여러 개의 라이닝 스판(span)을 가로지르는 방향으로 발생하는 수십m 길이의 균열, 콘크리트 품질 및 시공불량 이외의 외적인 요인에 의해 발생되는 균열도 보고되고 있다^{1,2}.

Fig.1은 외력이 작용하는 경우에 터널라이닝에 발생되는 균열의 모식도를 보여주고 있다.

터널 라이닝에 발생하는 균열 중에는 Fig.2에서 보는 바와 같이 천단부에 종방향으로 발생하는 균열이 많은 비중을 차지하고 있다. 종방향 균열의 폭은 다른 균열들에 비해 크고, 균열의 연장이 한 스판에

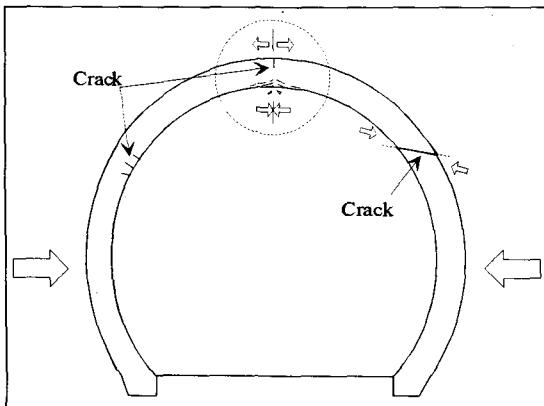


Fig. 1 Schematic view of cracks in tunnel lining

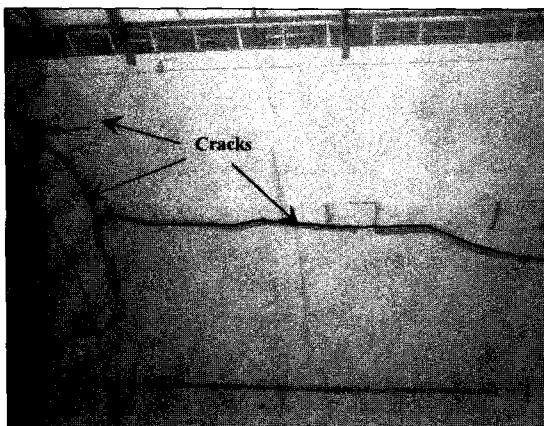


Fig. 2 The view of cracks on tunnel lining

이르는 것이 많아 구조적인 취약부를 형성하여, 터널라이닝에서의 종방향 균열은 터널의 건전도를 저해하는 요소로 작용할 수 있을 것으로 생각된다.

콘크리트 라이닝 천단부의 종방향 균열 발생은 콘크리트 시공법과 관계가 있는 것으로 보이는데, 콘크리트 라이닝을 타설하기 위해서는 강재거푸집을 설치하고 천단에 콘크리트를 펌핑하여 자중에 의하여 측벽쪽으로 유동시키며, 천단부는 마지막으로 콘크리트가 타설된다. 이 때 천단부에 배면공동이 발생할 가능성이 높으며 이때 라이닝의 두께가 부족하게 되는 경우가 발생하게 되는 경우가 보고되고 있다^{3,4}.

2.2 터널 라이닝에 대한 실험

지반공학에서 지반구조물의 실제거동을 그대로 재현하는데는 많은 어려움이 따른다. 이는 지반분야에서는 대부분이 자중(self-weight)과 관련된 문제들이 많고, 자중에 의한 구속압이 지반거동을 지배하기 때문이다. 그렇기 때문에 정상적인 중력장, 즉 1g하에서는 지반공학 축소모델은 소형화로 인해 모델내의 자중이 감소하여 원형과 같은 역학적 구조상의 변형이나 파괴를 발생시키기가 항상 가능하지는 않다.

이를 해결하기 위해 1g 중력장에서 소형 모델실험을 하여 보정치를 이용하거나 이의 보완책으로 토조가 많이 사용되고 있다. 그러나 소형 모델실험에 의한 보정방법에는 많은 불확실성이 있으며, 토조는 축소율이 작아 실지반의 많은 부분을 재현시킬 수 있다는 장점은 있으나 반복 실험을 위한 동일조건의 지반작성이 어렵고 인력, 시간, 경비가 소요되는 단점이 있다.

지반공학분야에 있어서 이러한 문제점을 해결하기 위해 만들어 진 것이 원심재하기(Centrifuge)에 의한 모델실험이다. 원심모형실험은 원형(prototype)구조물을 임의의 비율로 축소모형(model)화 한후, 원심기의 고속회전에 의해 발생하는 원심력으로 축소모델내에 임의 가속도장을 구현하므로써 대상 모델의 자중을 인위적으로 증가시켜 현장의 응력상태를 재현시키는 실험기법이다⁵.

Fig. 3은 정적인 모형실험과 원심모형실험을 실시했을 경우 나타나는 지반내 응력상태를 나타낸 것이다.

모형실험에서 중요한 것은 원형과 모형간의 상사성 문제이다. 원형과 축소모형 지반내의 응력상태를 1-g상태(이하, 중력장)와 n-g의 가속도장에서 비교해보면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 원형의 심도 H에서의 한점의 지반응력은 γH 로 표현할 수 있다. 이를 중력장의 소형 모형내에서 생각하게 되면 깊이와 그

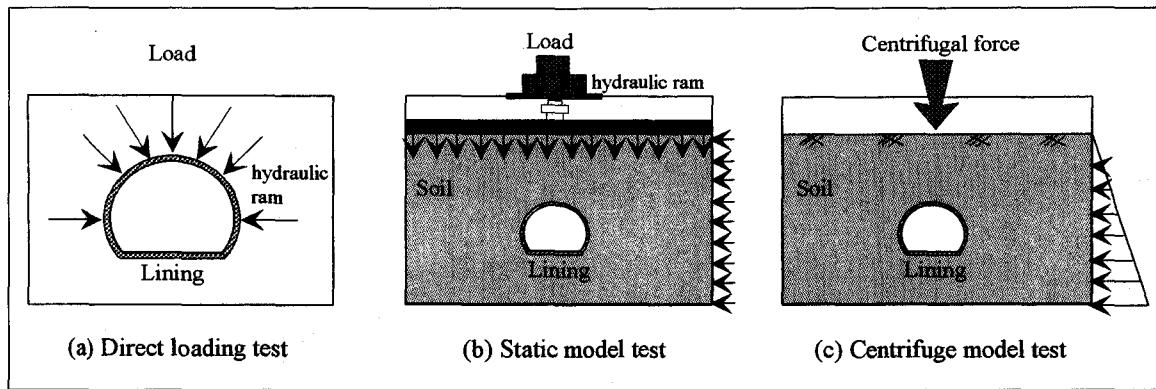


Fig.3 Comparison of model tests for tunnel lining

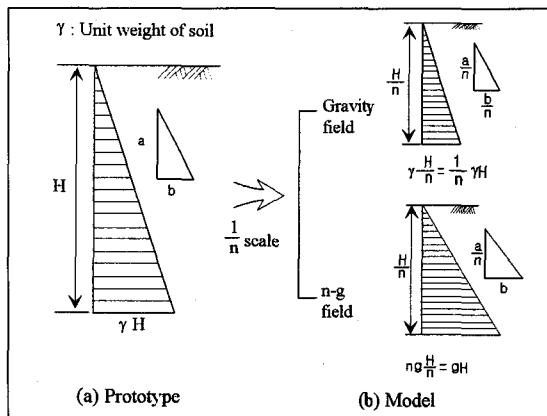


Fig.4 Modeling under artificial gravity field

점의 응력이 각각 원형의 $1/n$ 로 축소되어, 중력장의 소형모형내에서 실지반의 응력상태 재현에는 한계가 있음을 알 수 있다.

반면에 균질의 n -g장에서는 $1/n$ 로 축소된 심도에서의 한점 응력은 γH 로 표현되어 원형과 동일하게 됨을 알 수 있다. 물론 n -g장의 원심력장에서는 균질의 n -g장과 같이 응력이 지반 깊이 방향으로 선형적 변화는 하지 않으나 대동소이한 응력변화를 보이고 있어, 전술한 바와 같이 대형 지반구조물의 소형 모형화에 있어서 원심모형실험이 응력의 상상성의 문제를 해결해줄 수 있는 방법임을 알 수 있다.

$1/n$ 로 축소한 모형을 n -g의 원심 가속도장에서 원형과 상사성에 관해 전개하면 아래와 같다. 여기

서 첨자 m 은 모형을, p 는 원형을 나타낸다. 먼저 기하학적으로,

$$\text{길이} : l_m = l_p / n$$

$$\text{면적} : A_m = A_p / n^2$$

$$\text{체적} : V_m = V_p / n^3 \text{ 이 된다.}$$

흙의 단위체적 중량 $\gamma_m = n \cdot \gamma_p$ 이므로, 흙의 중량 $W_m (= V_m \gamma_m)$ 은 다음식과 같다.

$$W_m = \frac{W_p}{n^2} \quad (1)$$

깊이 $z_m (= \frac{z_p}{n})$ 에 있어서 자중에 의한 연직응력 $\sigma_m (= \gamma_m \cdot z_m)$ 은

$$\sigma_m = \gamma_m \cdot z_m = (n \cdot \gamma_p) \frac{z_p}{n} = \gamma_p \cdot z_p = \sigma_p \quad (2)$$

가 되어 원형과 모형의 연직응력을 일치하게 된다. 따라서 모형과 원형의 재료가 동일하면, 연직응력도 같으므로 모든 방향의 응력, 간극수압 또한 모형과 원형은 같게 된다.

터널 라이닝에 대한 모델실험은 라이닝을 일정한 크기로 축소하여 라이닝에 직접적인 하중을 가하거나 지반재료를 모사하여 간접적으로 하중을 가하는 방식으로 연구가 이루어져 왔다⁶.

직접 재하실험의 장점은 콘크리트 라이닝을 둘러싸고 있는 지반의 하중을 지반의 종류에 따라서 적절히 가정하여 라이닝에 직접가함으로서 특정한 라이닝의 거동을 파악할 수 있고, 라이닝에 균열이 발생하기 시작하는 균열하중 및 라이닝이 구조적으로 붕괴되는 파괴하중사이의 관계를 파악할 수 있다.

본 연구에서는 7개의 유압램으로 구성된 시험장치를 설계·제작하여 터널 라이닝 직접재하실험을 실시하였고 (주)대우 건설기술연구소내에 설치된 국내최대 규모의 Centrifuge를 이용하여 터널 라이닝 원심모형실험을 실시하였다.

3. 직접 재하실험

3.1 실험조건 및 실험장치

본 연구에서 수행한 실험의 종류 및 변수에 대하여 Table 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 실험의 변수는 하중형상, 측압조건, 라이닝 두께 변화, 복층라이닝, 지반 타설여부, 강선망 보강, 천단 두께부족, 배면공동, 라이닝-지반 마찰효과의 10가지 변수로서 이들 변수의 조합을 통하여 24개의 시험체가 실험되었다^{7,8}.

터널 실험장치의 평면도를 Fig.5에 나타내었다. 실험은 반력프레임, 유압램, 유압장치, 하중 조절

Table 1. Test conditions of direct loading test

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

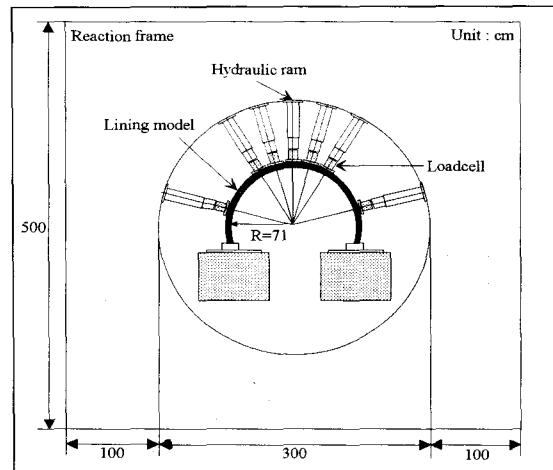


Fig. 5 Plan view of apparatus for model test

기, 변형률 및 변위 측정장치, 미소파괴음 측정장치 등을 사용하여 수행되었다. 반력프레임은 철근 콘크리트로 제작되었고, 유압램은 라이닝 상부에 60도의 범위에 5개, 양 측벽부에 각각 1개씩 설치되었다. 유압은 유압동력부에서 가해지며 전체 실린더의 움직임을 조절하는 조절부가 있으며 각 실린더의 하중 및 각부의 하중등을 지시하는 지시계가 부착되어 있다.

3.2 실험방법

본 실험의 원형은 경부고속전철 복선 표준단면으로서, 원형을 1/10크기로 축소하였다. 총 24개의 라이닝 시험체를 제작하였으며, 6cm와 9cm 두께의 단일라이닝과 4개의 복층라이닝(콘크리트 라이닝 6cm + 속크리트 3cm)을 제작하였다. 라이닝 모델 시험체를 만들기 위하여 강재거푸집을 제작하였으며, 내부반경은 축소 모형 축척 1/10을 고려하여 71cm로 하였다. 라이닝 시험체는 1회의 배합 콘크리트를 사용하여 제작하였다.

측정항목은 변위(처짐), 변형률, 하중, 균열위치의 4가지이다. 라이닝의 내부 및 외부면에서 라이닝 면에 법선 방향으로의 변위를 LVDT를 이용하였으며, 변형률은 라이닝 내부 및 외부면에 부착된 콘크리트



Fig.6 The view of direct loading test for tunnel lining

변형률 계이지로부터 측정하였다.

하중은 유압램에 설치된 하중계(load cell)를 이용하였고, 라이닝 각부 바닥에도 하중계를 설치하여 바닥에 전달되는 하중을 측정하였다. 균열위치는 실험 중에 균열이 발생할 때마다 균열도에 균열의 생성 위치 및 전파양상을 기록하였다. LVDT는 15도 간격으로 총 15개가 배치되었으며, 변형률 계이지도 15도 간격으로 30개가 부착되었다.

Fig.6은 터널 라이닝에 대한 직접재하 실험장면이다.

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 측압 및 재하형상 효과

측압의 유무에 따른 라이닝의 거동을 비교하였다. 측압이 있는 경우인 SI-2의 하중에 따른 처짐곡선을 Fig.7에 나타내었다.

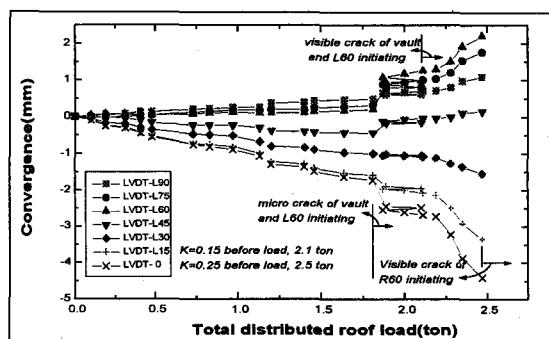


Fig.7 Convergence data of model SI-2

측압이 있는 경우 없는 경우에 비해 모든 재하 형태에서 1.5~2배 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 또는 R40~R60으로 아치 어깨부분이었다. 최대 처짐량은 평균 1.2mm으로 나타났다.

상부에 재하되는 하중형상이 변화함에 따른 라이닝의 거동을 비교하였다. 상부 L30~R30의 범위에서 각각 등분포, 삼각형, 역삼각형, 편심직각삼각형 하중형상으로 재하하였다. Table 2에는 이러한 시험체들의 강도특성을 나타내었다. 라이닝 상부에 삼각형 모양의 압반쇄기가 있는 경우 천단에 가장 큰 하중이 작용하게 되어, 편심 직각삼각형의 경우보다 내하력이 감소하는 결과를 나타내었다. 이 경우 축력이 모두 인장력으로 작용하여 아치구조체의 안정성을 저해하였다. 휨모멘트는 국부적 재하 형상 효과 때문에 천단에서 30도 부근 까지 모두 내부로 처짐이 발생하는 정 (+)의 모멘트가 작용하였으며, 재하형상이 변하더라도 균열이 발생하는 영역은 천단에서 20도内外의 영역으로서 천단에 인접하여 발생하였다.

Table 2. Strength characteristics of lining with loading shape

Model	Load	K	균열하중 (ton)	파괴하중 (ton)	한계단면
SI-2	균등수직하중	0.15	1.81	6.5	Vault(L60,R60)
SS1	삼각하중	0.12	1.45	1.81	Vault(L62,R55)
SS2	역삼각하중	0.15	1.73	4.73	L15(R57,R55)
SS3	편심하중	0.15	1.47	2.6	L15(L62,R45)

3.3.2 재하형태 및 복층 라이닝 효과

재하형태에 따른 라이닝의 거동을 비교하였다. 터널 상단에 등분포 수직재하가 되는 경우가 상단에 편심재하되는 경우 및 천단에 집중재하가 되는

경우에 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. 또한 극단적으로 터널의 종방향을 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 안정성을 확인하였다.

복층라이닝에서는 속크리트의 지보역 할로 콘크

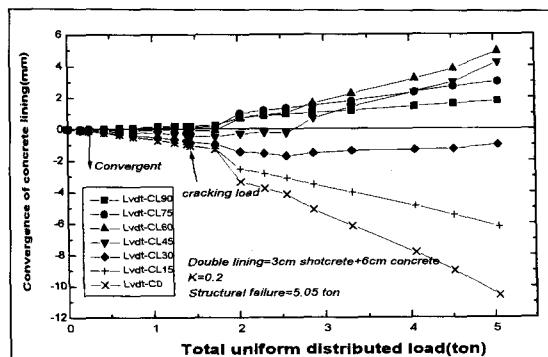


Fig.8 Convergence data of model DL-2

Table 3. Strength characteristics of lining with thickness

Model	Load	K	균열하중 (ton)	파괴하중 (ton)	한계단면
SI-2 (6cm)	균등수직하중	0.2	1.81	6.50	Vault(L60,R60)
SI-21 (9cm)	균등수직하중	0.2	2.71	5.48	Vault(L50,R50)
SI-21 (6cm)	균등수직하중	0.2	2.18	6.09	Vault(L60,R60)
SII-21 (9cm)	균등수직하중	0.2	3.15	13.72	Vault(L60,R60)
SI-4 (6cm)	균등편심하중	0.35	1.18	1.18	L10(R40)
SII-4 (9cm)	균등편심하중	0.35	2.04	2.59	L45,R45(L58,R73)
SII-2 (6cm)	일점집중하중	0.5	0.83	0.83	Vault(L38,R38)
SII-21 (9cm)	일점집중하중	0.5	1.90	1.90	Vault(L40,R40)

리트 라이닝의 거동이 안정화되어 처짐이 대부분의 단면에서 안정적으로 발생하였다. Fig.8은 복층라이닝 DL-2의 콘크리트 라이닝의 처짐곡선을 나타낸 것이다. 콘크리트 라이닝은 균열이 발생하기 전 까지 모두 공동 내부로 처지는 안정적 거동을 보였다. 속크리트는 균열하중까지 큰 변화를 보이지 않다가 균열하중 이후 지반쪽으로 밀리는 현상을 보였으며, 천단이 헌지기능을 하면서 회전이 발생하기 시작하여 라이닝 어깨 부위에서는 콘크리트 라이닝이 속크리트 쪽으로 밀리는 현상이 나타났다.

3.3.3 배면공동 존재 및 두께효과

배면공동이 라이닝 천단부에 존재함으로서, 콘크리트 라이닝의 두께감소가 발생하는 경우(단면감소량이 30%)에 대하여 라이닝의 거동을 비교하였다. 균열에 대한 내하력은 단면 감소량보다 더 큰 평균 40% 정도 감소하였고, 파괴하중에 대한 내하력은 단면감소량과 비슷한 30% 정도 감소하였다. 최대처짐량은 공동이 없는 경우 1.2mm로, 공동이 있는 경우 평균 1.3mm 와 큰 차이를 보이지 않는다.

라이닝 두께변화에 따른 라이닝 거동을 비교하였다. 두께증가가 Table 3에서와 같이 50% 이루어졌을 때, 균열하중의 경우 평균 40% 내외로 내하력이 증가하였으나, 파괴하중의 경우 모두 2배 이상 내하력이 커져 두께 증가분의 4배만큼 파괴에 대한 내하력이 증가하였다.

3.3.4 라이닝 보강 효과

중립축에 단근배근을 하여 철근보강에 따른 라이닝 거동을 비교하였다. 균열하중은 철근보다는 콘크리트의 인장강도와 관련 있기 때문에, 균열하중은 큰 차이가 없고, 파괴하중은 철근의 인장력으로 인하여 큰 차이가 발생하였다. 또한 균열하중에서의 최대 처짐량도 큰 차이를 보이지는 않았으며, 재하영역에서의 1차 휨균열 발생 위치는 동일하였다. 그러나 보강이 없는 시험체에서는 어깨 부분의 휨인장

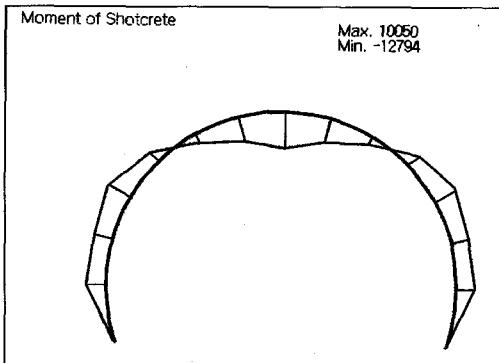


Fig.9 Moment distribution of model SII-23

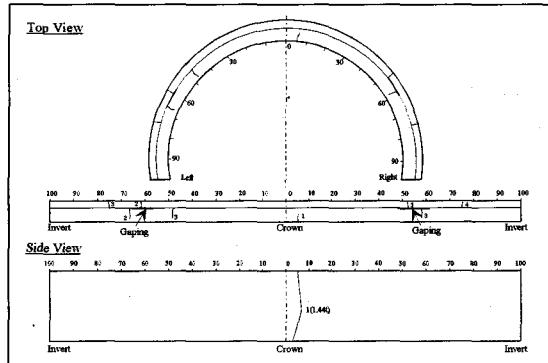


Fig.10 Cracking pattern of model DL-2

2차 균열발생으로 파괴되었으나, 보강을 한 경우 어깨 부분에서의 천단파괴로 시험체가 파괴되었다.

Fig.9에는 보강을 한 시험체 SII-23의 흄모멘트를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 균열하중에서, SII-23가 SII-2에 비해, 흄모멘트가 75% 가량 작고, 전체적인 흄모멘트 분포가 안정된 구조를 나타낸을 알 수 있다.

3.3.5 균열특성

라이닝 모델시험체의 균열 발생위치 및 균열종류 등을 조사하였다. 발생균열은 흄에 의한 흄균열로서 대부분 종방향 균열이었다. 터널 라이닝 상단에 등분포 재하가 이루어진 경우 1차 균열은 천단에서, 2차 균열은 천단으로부터 60도 떨어진 부위에서 발생하였다. 이때 균열하중은 파괴하중의 28% 수준으로 일정하였다.

복층 라이닝의 경우 편심재하구조에 가장 큰 내하력 증진효과 및 균열 억제 효과를 가져옴을 알 수 있었다. 발생한 균열은 재하영역의 경우 라이닝을 완전 관통하나 재하영역이 아닌 단면에서는 중립축에 다다르면 중립축에 연하여 발전하였다. 그러나 철근 배근이 이루어진 경우 발생한 인장 흄균열은 철근에 다다르면 균열의 발전이 억제되었다. 배면공동이 존재하지 않는 복층 라이닝의 경우, 1차 균열의 발생은 콘크리트 라이닝에서 이루어졌다. 그러나 배면공동이 존재하는 경우 솗크리트와 콘크리트 라이닝에

서 같이 균열이 발생하였다. 또한 복층 라이닝의 경우, 비재하영역의 최대 흄모멘트가 작용하는 영역에서 솗크리트와 콘크리트 라이닝이 벌어지는 현상이 발생하는데 이러한 현상이 복층 라이닝계의 안정성을 저해하는 주요 원인으로 판단된다.

Fig.10의 복층 라이닝 모델 DL-2의 균열도에서 이러한 현상을 관찰할 수 있다.

4. 원심모형실험

4.1 실험조건

본 실험에서 수행한 실험의 종류 및 변수에 대하여 Table 4에 나타내었다. 실험조건은 라이닝 시공중에 발생할 수 있는 천단부 배면공동, 천단두께부족, 무인버트, 측벽결함같은 구조적 결함과 종균열등의 변상조건, 그리고 라이닝 강도부족과 같은 강성저하조건으로 분류하였다. 특히 천단부 두께부족과 종균열의 경우 보수, 보강조건을 추가하였다⁸.

실험에 사용한 라이닝의 축소모형은 알루미늄과 하이드로스톤을 사용하였다. 알루미늄은 라이닝 파괴를 전제하지 않고 순수한 재하하중에 의해 구조적 결함 라이닝의 변형거동을 분석하기 위해 제작하였고, 하이드로스톤 라이닝은 재하에 의한 균열 발생 위치 및 보수, 보강 모형을 재현하기 위해 사용하였다. 또한 기본적으로 재하하중조건인 토피고는

Table 4. Test conditions of centrifuge model test

Reinforcement		R0	R1	R2	R3
Lining Condition		No Reinforcement	Epoxy Injection	Carbon Sheet	Partial Grouting
D0	Standard	HD0 AD0			
D1	Cavity behind lining	HD1 AD1-1 AD1-2			
D2	Thickness shortage at crown	HD2 AD2		HD2-R2	HD2-R3
D3	No invert	HD3 AD3			
D4	Sidewall flaw	AD4			
D5	Longitudinal crack at crown	HD5	HD5-R1	HD5-R2	
Remark		H : Hydrostone Lining A : Aluminum Lining			

라이닝 높이의 3배, 즉 C/D=3으로 설정하였다.

라이닝 모델시험체는 Fig.11에서 보는 바와 같이 사각용기(container)내부에 1/100로 축소되어 설치된다. 터널 라이닝의 변형 및 모멘트, 축력을 산정하기 위해 라이닝 내외로 12개의 변형률 계이지를 부착하였으며, 라이닝 내공변위는 4개의 소형 LVDT를 설치하여 측정하였다. 또한 라이닝에 직접 작용하는 토압을 측정하기 위해 라이닝에 부착용 토압계를 설치하였다. 그리고 지반내부에는 지반자중에 의한 토압을 측정하기 위한 2개의 토압계와 라이닝에의한 수동토압을 측정하기 위해 2개의 토압계를 매설하였다. 또한 지표면 침하를 측정하기 위해 3개의 지표침하용 LVDT를 설치하였다.

4.2 실험장치 및 실험방법

원심재하기기는 크게 beam형과 drum형으로 나눌 수 있으나, 현재 지반공학에 이용되고 있는 대부분은

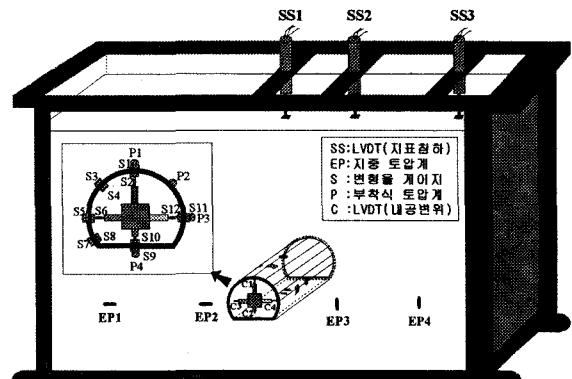


Fig.11 The view of container, lining model and sensors

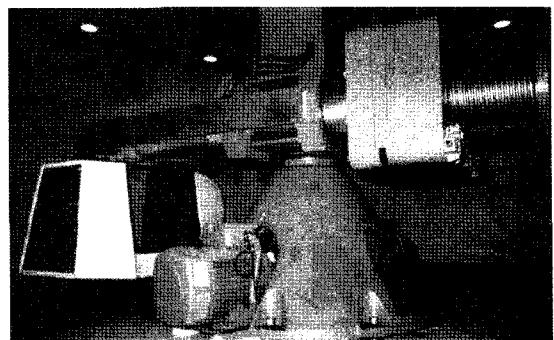


Fig.12 The view of geotechnical centrifuge for model test

beam형 단일バス켓형(single basket type)으로 본 연구에서 이용한 Centrifuge는 ACTIDYN사가 제작한 최대 200G-ton급으로 Fig.12에 나타나 있다.

본 실험에서는 균질한 지반재하에 의해 다양한 터널 라이닝 거동을 비교 분석해야하기 때문에 매 실험마다 동일한 특성을 지니는 지반재료를 재작성해야 한다. 이를 위해서 본 실험에서는 강사기(sand rainer)를 사용하였다. 지반재료는 모형용기의 벽면마찰감소와 입도의 균등성을 고려하여 주문진 표준사를 사용하였으며, 균질한 지반을 작성하였다. 작성된 지반의 상대밀도는 86%이며, 강사기의 낙하고는 75cm, 왕복속도는 60Hz이다. 실험순서는 라이닝 모형준비, 용기준비, 지반작성, 지반성형 및 마무리단계를 거쳐 원심재하기에 탑재한 후 g를 상승시켜 실험을 수행하였다.

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 라이닝의 변형률

Fig.13과 같이 천단부 두께의 단위면적이 40%로 감소한 경우, 20g에서 40g로 상승할 때 천단 내벽에서 제일 먼저 인장균열이 발생하였으나 g가 증가할수록 변형률의 증가율은 감소하였다. 천단 외벽 압축변형은 HD0와 달리 스프링라인 압축변형보다 크게 발생하였다. 스프링라인 좌측 외벽은 40g에서 60g로 상승할 때 인장균열이 발생하였으며 그 증가율도 천단부와 마찬가지로 g상승에 따라 줄어드는 경향을 보였다. 80g로 감속할 때보다 40g로 감속함에도 변형률이 급증하는 것으로 미루어볼 때, 수평지반반력이 변형률 증가율을 감소시켰던 것으로 파악된다.

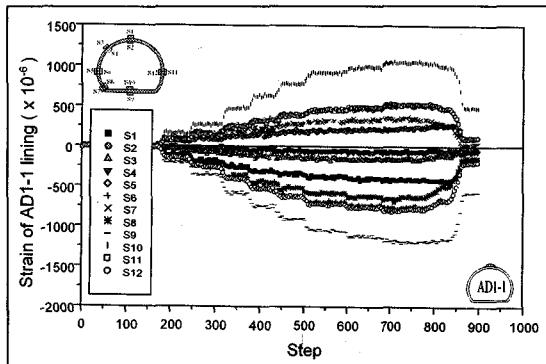


Fig.13 Strains of model AD1-1

4.3.2 라이닝의 균열발생

Table 5는 라이닝내부에 균열이 발생한 시점을 변

Table 5. Crack initiating g-level according to lining position

라이닝 조건		천단균열 (내벽)	스프링라인 균열 (외벽)	전체 균열
HD0	표준형	40g이상	40g이상	20g이상
HD1	천단배면공동	40g이상	40g이상	40g이상
HD2	천단두께부족	20g이상	40g이상	60g이상
HD3	무인버트	100g이상	40g이상	20g이상
HD5	종균열	×	40g이상	40g이상

형률 자료로부터 구한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 1/100로 축소한 하이드로스톤 라이닝의 균열이 발생하는 시점은 평균적으로 40g이상이며, 취약부분이 존재할 경우는 20g부터 균열이 발생하여 라이닝의 내하력이 1/2이하로 감소하는 것으로 판단된다.

4.3.3 라이닝의 휨모멘트와 축력

천단에서의 휨모멘트는 Fig.14에서 보는 바와 같이 AD1-2를 제외하고 모두 정의 휨모멘트를 나타내고 있다. 이는 천단부에서는 상재하중이 주동 토압으로 작용하고 있기 때문이다. 크기를 비교해 보면 천단두께부족인 AD2가 이미 20g에서부터 소성한계를 넘고 있음을 알 수 있다. AD2는 라이닝 두께단면이 50% 축소된 경우로서, 무인버트, 측벽결합보다 천단부가 취약함을 알 수 있다.

천단배면공동이 존재하는 AD1-1은 비록 천단

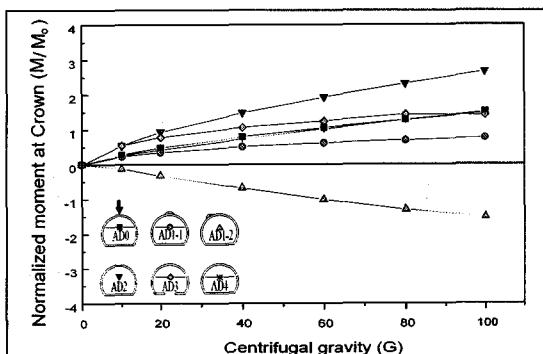


Fig.14 Normalized moment at crown of aluminum lining

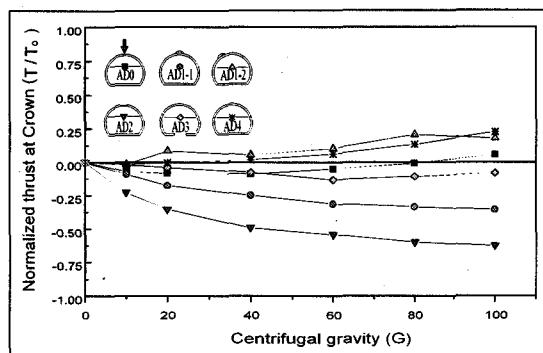


Fig.15 Normalized thrust at crown of aluminum lining

부분에 직접적인 지반하중을 받지는 않지만, 항복모멘트의 70% 수준까지 증가하였다.

라이닝에서의 압축력은 그 한계치를 넘지 않는다면 아치구조물을 지탱해주는 역할을 하게 된다. 천단부의 축력은 Fig.15와 같이 라이닝 조건에 상관없이 초기 10g까지는 압축력을 나타내다가 하중이 증가할수록 AD1-1, AD2, AD3은 압축력을, AD0, AD1-2, AD4는 인장력을 보였다. AD0를 기준으로 비교해보면 그 크기는 천단부 결함에 직접 가까울수록 정의 힘모멘트가 커짐과 동시에 그 만큼 축력의 저항도 크다는 것을 알 수 있다.

4.3.4 라이닝의 항복비

본 실험에서는 항복 힘모멘트비(M/M_o)와 항복축력비(T/T_o)를 더하여 라이닝 항복비(lining yielding ratio)로서 라이닝의 상태를 파악하고자 하였다. 라이닝 항복비가 2를 넘으면 소성상태가 된다.

Fig.16은 60g 상태에서 항복축력비를 고려하지 않은 항복힘모멘트비만 나타낸 것으로 라이닝은 평균 40g-60g 사이에 균열이 발생하였다. 그럼에서 보는 바와 같이 대부분 1을 초과하는 곳에서 균열이 발생하였다. 기본형 HD0의 스프링라인 우측은 천단에 비해 이미 균열이 완전히 진행되었음을 알 수 있다. 천단부가 제일 취약한 곳은 중균열 모델 HD5이며, 그 다음이 천단두께부족 모델 HD2이다. HD1은 천단부에 모멘트가 급등하여 균열이

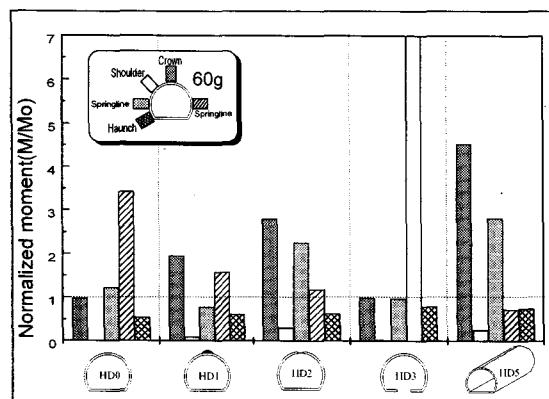


Fig. 16 Comparison of yielding ratios for hydrostone lining

발생하였다. 어깨부의 힘모멘트는 HD2와 HD5가 상대적으로 크게 나타났는데 이는 천단 균열발생 영향으로 사료된다.

4.3.5 라이닝의 토압분포

터널 라이닝에 작용하는 외부하중은 터널 굴착법, 지보시기, 3차원적 거동과 관련된다. 본 실험에서는 굴착영향을 고려하지 않고 외부하중이 라이닝에 그대로 작용한다고 가정하였다. Fig.17은 알루미늄 라이닝 천단부의 토압을 g상승에 따라 나타낸 것이다. 라이닝 토압은 각 위치에 해당하는 연직토압으로 나누어 무차원화 하였다. 천단배면 공동 AD1-1을 제외하고 초기 40g까지 모든 라이닝에서 같은 결과를 보였으나, 60g 이상이 되면서 각 라이닝마다 동일한 심도임에도 불구하고 차이가 나타났는데, 라이닝에 작용하는 토압은 단순한 지반하중에 의해 나타난 것이 아니라 지반 및 라이닝의 상호변화에 따라 복합적으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig.18(a)은 천단부 두께부족과 보강한 경우의 토압을 나타낸 것이다. HD2는 천단에서 스프링라인으로 갈수록 하중이 증가하는 경향을 보였다. 천단부는 모두 주동영역으로 HD2, HD2-R2는 이미 한계 힘모멘트를 벗어나, 균열에 의한 하중이 완현상으로 라이닝에 작용하는 토압은 힘모멘트와 반대의 크기인 HD2-R3, HD2-R2, HD2순 이었다.

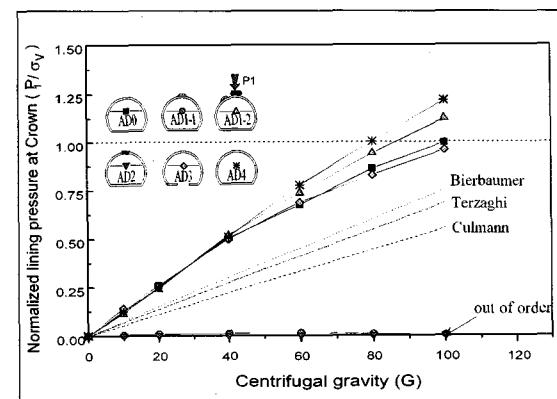
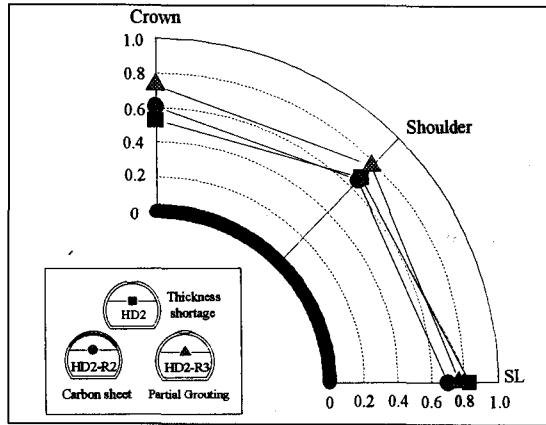
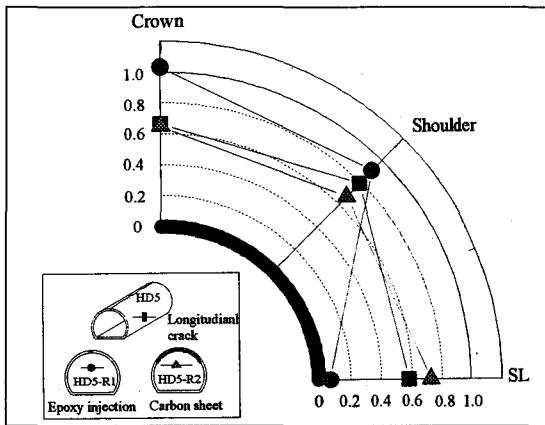


Fig.17 Earth pressure ratios at crown of aluminum lining



(a) Thickness shortage and reinforcement



(b) Longitudinal crack and reinforcement

Fig.18 Distribution of earth pressure ratios for reinforcement

우측어깨부는 거의 비슷한 토압을 보였다. 스프링 라인에서는 HD2가 가장 큰 토압을 나타내 지반을 지반쪽으로 변형이 많이 발생함을 추측할 수 있다.

Fig.18(b)은 종균열과 보강한 경우의 토압을 나타낸 것이다. HD5와 탄소섬유보강 HD5-R2는 천단에서 스프링라인으로 갈수록 토압이 증가하는 경향을 보인다. 탄소섬유보강이 천단에 효과적으로 나타났으나 그 영향이 스프링라인까지 주지는 못함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 터널 라이닝에 대한 직접재하실험과 원심재하실험을 실시하여 하중조건과 라이닝 변상조건 그리고 보강조건에 따른 터널 라이닝의 변형 거동 및 파괴특성 그리고 안정성을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

직재하되는 경우가 편심재하되는 경우 및 집중재하되는 경우에 비해 균열에 대한 내하력이 평균 2배 크게 나타났으며, 단일라이닝에서는 편심재하가 균열에 대한 내하력이 20% 이상 큰 반면에 복층라이닝에서는 오히려 집중재하가 균열에 대한 내하력 2배 가량 크게 나타났다.

- 2) 직접재하실험에 의해 발생된 균열은 대부분 종방향 균열로서, 등분포 재하형태에서 1차 균열은 천단 부근에서 2차 균열은 천단으로부터 60도 떨어진 부위에서 발생하였으며, 균열하중은 파괴하중의 30%수준이었다.
- 3) 원심재하실험결과, 천단부 두께부족인 경우 천단부의 휨모멘트와 측력은 가장 크게 나타났으며, 무인버트인 경우 스프링라인과 허리부에서 가장 큰 휨모멘트를 나타내었다. 또한 측벽결합인 경우 스프링라인의 휨모멘트가 크게 감소하였으며, 종균열인 경우 천단에서 정의 휨모멘트가 가장 크게 나타났다.
- 4) 원심재하실험결과, 라이닝 두께부족에 대해 보강한 경우, 그라우팅이 보다 효과적으로 나

타났으며 흠모멘트는 탄소섬유보강은 40% 두께보강은 80%가 감소하였다. 종균열에 대해 보강한 경우, 탄소섬유보강이 보다 효과적인 것으로 나타났으며 예폭시 주입은 흠모멘트를 10%, 탄소섬유보강은 70%가 감소하였다.

- 5) 터널 라이닝에 대한 다양한 모델실험을 통하여 라이닝의 역학적 특성을 규명할 수 있었으며, 향후 쟁구부 편토압구간, 터널 상호교차 구간, 터널 근접공사구간에서의 터널의 구조적 안정성 및 영향평가등에 대하여 실험을 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. (財)鐵道總合技術研究所, トソネル補強・補修マニュアル, 1990
2. (財)鐵道總合技術研究所, 變狀トソネル對策工設計マニュアル, 1998
3. 김영근, 장정범, 정한중, 조철현, 터널 라이닝 건전도 평가를 위한 비파괴 조사법의 적용연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 383~386, 1996
4. 김영근, 김유석, 이대혁, 터널 콘크리트 라이닝에 발생되는 천단부 종균열에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.11~14, 1998
5. Taylor, R.N., Geotechnical centrifuge technology, Chapman & Hall, 1995
6. Paul, S.L., et al., Design recommendation for concrete linings, UMTA-MA-06-0100-83-1, U.S. Department of Transportation, 1983
7. 김영근, 이용호, 이대혁, 정한중, 모델실험에 의한 콘크리트 터널 라이닝의 역학적 거동평가, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 373~376, 1997
8. (주)대우 건설기술연구소, 터널안전관리를 위한 정밀안전진단 시스템 개발 연구보고서, 과학기술부, 1998