

원심모형실험에 의한 사질토 지반내 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구 Analysis of the Structural Behaviors of Tunnel Linings in Joomunjin Standard Sand by Centrifugal Model Tests

김택곤1), Taek-Kon Kim, 김영근2), Young-Geun Kim, 박중배3), Joong-Bai Park, 이희근4), Hi-Keun Lee

- 1) 대본엔지니어링 지반부 과장, Manager, Geotechnical Team, Daebon Engineering
- 2) 대우건설기술연구소 터널부 과장, Manager, Tunnel Team, Daewoo Inst. of Const. & Technology
- 3) 대우건설기술연구소 지반부 과장, Manager, Geotechnical Team, Daewoo Inst. of Const. & Technology
- 4) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : A series of centrifuge model tests were performed in order to investigate the behaviors of various tunnel linings. A 1/100-scaled aluminum and hydrostone horseshoe tunnel linings with a radius 5cm, height 8cm were buried in a depth of C/D=3 with dry Joomunjin standard sand, the relative density of which was 86%. Bending moments and thrusts along the tunnel circumference were measured by 12 strain gages. Earth pressures in soil and on lining were estimated by pressure transducers, ground surface settlements at center and edges by using LVDTs. Average K_0 (coefficient of earth pressure at rest) was 0.39 for the model sand. The structural behaviors of lining depended on its damaged conditions. But, as a rule, on the crown, the tensile circumferential strain of lining occurred at the inner surface, and the compressive at the outer surface, then positive bending moment was created at the crown. The circumferential strain of the inner surface on the springline was tensile, and the outer compressive, so negative bending moment was measured at the springline. For hydrostone linings, cracks initiated at the inner surface on the crown, and the outer on the springline over average 40g.

Key words : Centrifugal model test, Tunnel lining, Bending moment, Thrust, Earth pressure, Relative stiffness ratio

1. 서론

NATM 터널공법에서는 콘크리트 라이닝은 슛크리트, 록볼트와 같은 1차 지보와 달리 2차 지보재로서 지반하중을 직접 받지 않는 개념으로 설계하고 있다. 그러나 슛크리트 등으로 형성된 지보재가 충분한 안전율이 없는 경우 슛크리트에 균열이 발생하여 지반응력이 콘크리트 라이닝에 전달될 수 있고, 지반 변위가 수렴하기 이전에 콘크리트 라이닝을 시공하거나, 토피가 작은 토사지반에서는 상재하중을 반영한 라이닝의 역학적 검토가 필요하다고 제시하고 있다.[1] 그러나 지반 및 암반공학 분야에서는 소형화 및 단순화의 필요성이 있음에도 실제 거동을 그대로 재현하는데는 많은 어려움이 따른다. 이는 지반 및 암반

공학분야에서는 대개가 자중(self-weight)과 관련된 문제들이 많고, 자중에 의한 구속압이 지반거동을 지배하기 때문에 1g 하에서의 축소모형은 소형화로 인한 자중감소로 인해 실물과 같은 역학적 구조상태를 파악하기가 쉽지 않은데 있다. 지반공학분야에서 이를 어느 정도 해결해주는 것이 원심모형실험(centrifugal model test)이다. 본 연구에서는 원심모형실험을 실시하여 토피코가 터널 높이의 3배에 구축된 구조적 결합 터널 라이닝의 역학적 거동을 분석하였다. 터널 라이닝은 표준형을 비롯하여 1/100로 축소된 천단부 및 어깨부 배면공동, 천단두께부족, 무인버트, 측벽결함 모형으로 나누었다. 라이닝이 구축될 대상지반은 동일하고 균일한 상대밀도에 의한 자중조건을 유지하기 위하여 주문진 표준사를 사용하였다.

2. 터널 원심모형실험

2.1 개요

원심모형실험이란 1/n로 축소된 모형에 원심력에 의한 인위적인 가속도 n-G장을 부여하여 모형내부에 실제 지반과 동일한 응력 상태를 재현할 수 있는 시험기법이다.(그림 1) 그러나 소규모 원심모형실험에서 모든 지반공학적 거동을 상세히 분석하기 위해서는 그에 동반한 초소형, 고정밀도, 내구성이 뛰어난 계측장비가 필요하며 이는 현재의 기술 수준과 맞물려 있다. 터널 원심모형실험도 예외는 아니어서 터널 굴착 및 라이닝 설치과정을 원심모형실험에서 재현한다는 것은 현 기술단계로는 많은 제약조건이 따른다. 또한, 모형실험의 특성상 모든 지반공학적 관심사들을 그대로 재현하는 것은 불가능하기 때문에 공학적인 관점에서 가치가 있는 중요 특성(key features)들만을 허용할 수 있도록 근사시켜야 한다.[2,3]

2.2 실험 장비 및 계측

2.2.1 원심재하기 및 라이닝 모형제작

일반적으로 원심재하기(이하 centrifuge)는 크게 beam형과 drum형으로 나눌 수 있으나, 현재 지반공학에 이용되고 있는 대부분은 beam형으로 단일 바스켓형(single basket type)이다. 본 연구에서 사용한 원심재하기는 프랑스의 ACTIDYN SA가 1년간의 기간을 통해 제작한 최대 200G-ton급이며(그림 2) 현재 (주)대우건설기술연구소에서 소유하고 있다.[4]

라이닝은 원심모형실험의 축소율 및 모형심도를 고려하여 얇은 심도에 위치한 도심지 터널 라이닝으로 두께는 50cm로 고려하였다. 일반적으로 알루미늄은 취성물질인 콘크리트와 특성이 다른 재료이지만 터널 원심모형실험에서 라이닝 재료로 많이 사용되고 있는데 이는 알루미늄 특성상 얇은 두께로 제작이 용이하며, 밀도가 콘크리트와 큰 차이가 나지 않고, 탄성구간에서는 변형이 용이하게 일어나 역학적 거동 검토에 적합하기 때문으로 생각된다. 그러나 알루미늄은 콘크리트와 물리적 성질이 다르기 때문에 콘크리트 라이닝을 알루미늄으로 재현하는데 있어 등가의 두께로 수정해야한다.

$$t_m = \frac{t_p}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{E_m/E_p}} \quad (1)$$

여기서, m은 모형(model), p는 실물(prototype), n은 축소율, t는 부재의 두께를 나타낸다.

따라서 탄성계수가 약 $1.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 두께 50cm의 콘크리트 라이닝을 탄성계수가 $7.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 알루미늄을 이용하여 1/100로 축소하면, 알루미늄 라이닝의 두께는 약 3mm가 된다. 하이드로스톤 라이닝은 5mm 두께의 거푸집을 제작하여 구조적 결합 및 변상조건 라이닝과 마찰변화 및 강성저하 라이닝을 구현하였다. 배합비 10:3, 직경 50mm, 길이 100mm로 코아형으로 성형한 하이드로스톤의 3회 일축압축강도 평균값은 320 kg/cm^2 , 인장강도는 50 kg/cm^2 이다.

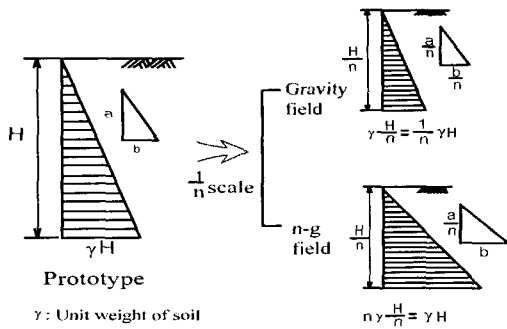


그림 1. 인공 중력장의 모형화

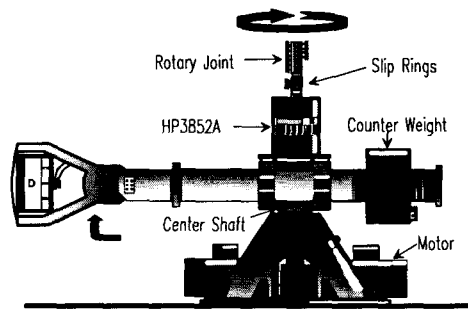


그림 2. 200G톤 원심모형시험기

2.2.3 계측센서

계측항목은 라이닝 원주변형률, 라이닝 토압, 지중토압, 지표침하로 정하였다. 본 실험에서 사용된 계측기는 원심모형실험용이기 때문에 초소형이면서 동시에 100G에서도 견딜 수 있는 고내구성 제품이다. 라이닝 원주변형률(circumferential strain)은 라이닝 내부 및 외부면에 변형률 게이지(strain gage)를 부착하여 측정하였다. 좌우 대칭양상을 확인하기 위해 우측벽 스프링라인(springline) 내외에 변형률 게이지 1쌍을 부착하여 그림 3과 같이 총 12개의 변형률 게이지(S1-S12)를 부착하였다. 라이닝 토압(earth pressure on lining)은 라이닝 외벽면에 직접 작용하는 토압으로 정의하며, 일본 교와(Kyowa)사에서 제작한 라이닝 토압계(모델명 PS-5KA)를 사용하였으며, 라이닝 오른쪽 단면에 4개(P1-P4)를 부착하였다. 지중토압계(Earth pressuremeter)는 일본 SSK사의 P310-10로서 수직 및 수평 토압측정용으로 4개를 사용하였다. 지표침하(surface settlement)는 프랑스 Sensorex사의 LVDT를 이용하였으며, 좌우대칭으로 가정하여 용기의 반단면에 3개(Settle1-3)를 설치하였으며, LVDT가 고속 원심 비행 중에 완전히 고정될 수 있도록 LVDT 거치대를 제작하였다. 그림 4는 설치된 지중토압계와 LVDT의 위치를 나타낸 것이다.

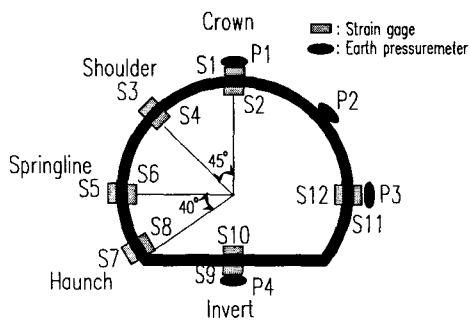


그림 3. 변형률 게이지 및 라이닝 토압

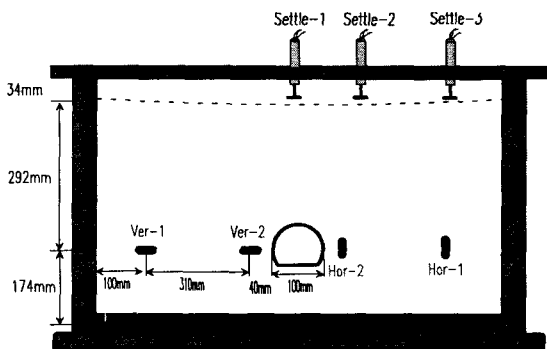


그림 4. 지중토압계 및 침하측정용 LVDT

표 1. 터널원심모형실험의 종류

Reinforcement	No-Reinif.		Epoxy injection	Carbon Sheet	Partial Grouting	Overburden	
	C/D=3.0	R1	R2	R3	C/D=1.0	C/D=2.0	
D0 Standard	AD0	AD0			AK1	AK2	
D1 Void behind crown and left shoulder	AD1	AD1-1	AD1-2				
D2 Shortage of thickness at crown	AD2	AD2	AD2-R2	AD2-R3			
D3 No invert	AD3	AD3					
D4 Side-wall flaw	AD4						
D5 Longitudinal crack at crown	AD5	AD5-R1	AD5-R2				
I1 Friction increase	IS1						
I2 Friction decrease	IS2						
S1 Stiffness reduction	IS1						

< Remark >
 ○ Hydrosstone Lining
 □ Aluminum Lining

2.3 실험 종류

알루미늄 라이닝 종류는 무결함 라이닝(모델명 AD0)를 비롯하여, 라이닝 천단 및 어깨부가 배면공동으로 지반과 일체화되지 않는 경우(모델명 AD1-1, AD1-2), 라이닝 타설이 제대로 되지 않아 천단부의 두께가 부족한 경우(모델명 AD2), 인버트를 설치하지 않은 경우(모델명 AD3), 재래식으로 측벽부와 아치부를 따로 제작하여 측벽결함을 포함하고 있는 경우(모델명 AD4)로 나누어 모형화 하였다.

하이드로스톤으로 제작한 라이닝의 종류는 무결함(모델명 HD0), 천단 배면공동(모델명 HD1), 천단 두께부족(모델명 HD2), 천단 두께부족보강(모델명 HD2-R2, HD2-R3), 무인버트(모델명 HD3), 종균열(모델명 HD5), 종균열보강(모델명 HD5-R1, HD5-R2), 마찰증가(모델명 HI1), 마찰감소(모델명 HI2), 강성저하(모델명 HS1)이다.(표 1)

2.4 강사법에 의한 주문진 표준사 지반작성

본 원심모형실험을 위한 지반하중을 일정하게 유지하기 위해서는 균질한 지반 작성이 가능해야 한다. 이를 위해 입자크기 분포가 균등한 주문진 표준사를 이용하였다. 체분석을 통하여 구한 주문진 표준사의 균등계수 C_u 는 1.56으로서 표준사 입자크기가 균일하다는 것을 알 수 있으며, 곡률계수 C_c 는 1.16으로 입도분포가 좋다고 할 수 있다. 실험에 의한 주문진 표준사의 기본 물성은 표 2와 같다.

표 2. 주문진 표준사의 물성

비 중, G		2.62
최대건조밀도 (g/mm ³), γ_{dmax}		1.67
최소건조밀도(g/cm ³), γ_{dmin}		1.38
상대밀도 (D_r) _{ave} = 86 %	변형계수 (kg/cm ²)	500
	내부마찰각 (°)	37.8

본 실험에서는 강사기(sand rainer)를 제작하여 균질한 지반을 작성하였다. 강사기의 진동판 낙하고와 왕복속도를 변수로 설정한 후, 용적을 알고있는 알루미늄 캔에 표준사를 낙하하여 상대밀도 80%이상 표준사 지반작성에 필요한 낙하고 및 왕복속도를 결정하였다. 이후 용기를 넓혀 지반을 작성한 경우 평균 상대밀도는 약 86%로 나타났다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정지토압계수

20g 간격으로 100g까지 수평/수직응력비인 정지토압계수 K_0 를 측정하여 평균한 결과는 표 3과 같다. 수직 및 수평 지중 응력이 각 모델마다 약간씩 차이가 나지만, 상대밀도 평균 86%의 주문진 표준사 지반에서는 수평응력이 수직응력의 약 0.3-0.5 사이로 수직응력이 크게 나타났으며, 평균치는 약 0.39이다. 그런데 앞서 상대밀도 86% 표준사의 내부 마찰각은 37.6°로서, 이것을 점착력이 없는 사질토 지반의 정지토압계수를 유추하는데 많이 사용되는 Jacky의 공식에 대입하면 약 0.39로서 그 결과가 실험 평균치와 일치함을 알 수 있다. ($1 - \sin 37.6^\circ \approx 0.39$) 0.5D 거리에 위치한 AD0, AD1-1, AD2의 수직 및 수평 지중토압은 수직에 비해 수평응력이 약 1.2-1.6배가량 증가하였는데, 이는 라이닝의 변형이 수평으로 발생하여 수동토압이 작용했기 때문이다. 그러나 AD3 및 AD4는 예상외로 라이닝 수평응력에 비해 수직응력의 증가분이 크게 나타났는데 이는 라이닝의 하단 및 측벽이 일체화되지 않아 이 부분을 향해 지반이 약간 느슨해졌기 때문으로 생각된다.

표 3. 지중토압 및 토압계수 (단위 : kg/cm²)

	Ver-1	Hor-1	Ko	Ver-2	Hor-2	Kp
AD0	4.35	1.40	0.32	4.18	2.31	0.55
AD1-1	4.27	1.88	0.44	4.48	2.29	0.51
AD1-2	4.24	1.74	0.41	4.36	-	-
AD2	4.02	1.55	0.39	4.39	2.56	0.58
AD3	4.66	1.55	0.33	5.23	1.64	0.31
AD4	3.67	1.74	0.47	4.14	1.88	0.45

3.2 지표 침하

본 실험에서는 실제 현장의 시공상황을 모사한 것이 아니기 때문에 지표침하를 정량적으로 평가하는 것엔 큰 의미가 없다. 각 실험에 따라 차이는 있으나 일반적으로 터널 중심에서 멀어질수록 침하량이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 원심가속도장이 반경방향으로 증가하기 때문이다.(표 4) 이러한 침하는 원심모형실험의 성격상 발생하는 것으로서 동일한 무게에서 지반의 부피가 감소하기 때문에 상대밀도가 높아지지만 그 영향은 크지 않다. 만일 침하량이 3mm라고 가정한다면 상대밀도는 1% 미만으로 증가하게 된다.

표 4. 100g에서의 지표침하 (평균상대밀도 Dr=86%, 단위 : mm)

	AD0	AD1-1	AD1-2	AD2	AD3	AD4
Settle1	3.44	3.23	1.82	3.24	3.18	2.15
Settle2	3.19	3.00	0.95	3.00	2.99	1.33
Settle3	2.50	2.53	0.71	2.52	2.42	1.00

3.3 라이닝의 변형률, 휨모멘트 및 축력

라이닝 내외 원주 변형률로부터 라이닝의 단위 길이당 휨모멘트(M)와 축력(T)을 식 (2), (3)으로 계산할 수 있다.[5] 휨모멘트 부호는 터널 중심을 향한 변형을 유발하는 휨모멘트를 '정(+)', 그 반대로 지반을 향한 변형을 유발하는 휨모멘트를 '부(-)'로 정의하였다. 반면에 축력의 부호는 인장력이 우세하면 '정(+)' 혹은 인장축력, 압축력이 우세하면 '부(-)' 혹은 압축력으로 정의하였다.

$$M = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot I \cdot \frac{\epsilon_i - \epsilon_o}{t} \quad (2)$$

$$T = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{(\epsilon_i + \epsilon_o) \cdot t}{2} \quad (3)$$

여기서,

E : 라이닝의 탄성계수(kg/cm²)

t : 라이닝의 두께(cm)

I : 2차 단위 관성모멘트(= $t^3/12$)

ϵ_i : 라이닝 내벽 원주 변형률

ϵ_o : 라이닝 외벽 원주 변형률

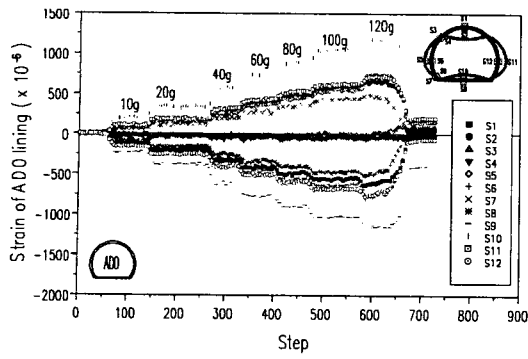


그림 5. 표준형 AD0의 변형률

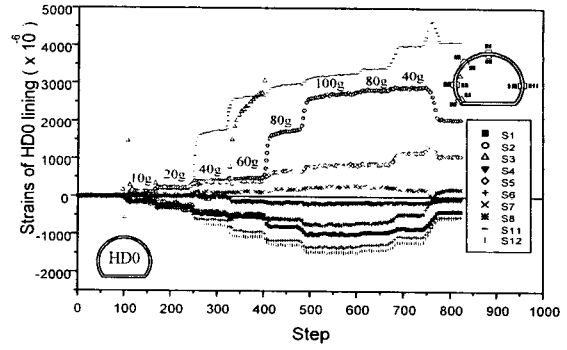


그림 6. 표준형 HD0의 변형률

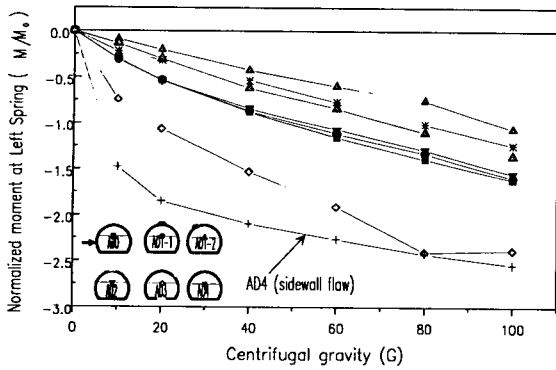


그림 7. 알루미늄 라이닝의 스프링라인 정규 모멘트

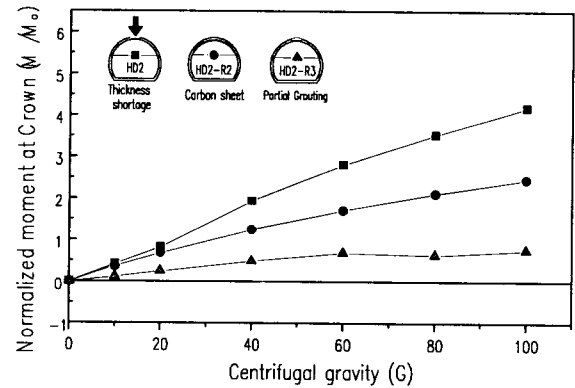


그림 8. 천단두께부족 보강 라이닝의 천단 모멘트

원심모형실험 결과 표준사의 자중에 의한 라이닝 원주변형은 대부분 AD0와 같이 그림 5의 변형률 양상을 나타내었다. 라이닝 천단(crown) 내부변형률(S2)은 인장(+), 외부변형률(S1)은 압축(-) 상태가 되었으며, 스프링라인(spring line) 좌측 및 우측에서는 천단과 반대의 양상을 보였다. 이는 본 실험에서 측정된 정지토압계수 K_0 가 평균 0.39로 수평압보다 수직압이 크기 때문에 스프링라인 내부변형률(S6, S12)은 압축을, 외부변형률(S5, S11)은 인장상태를 나타낸 것이다. 또한 천단의 압축변형률(S1)이 스프링라인의 압축변형률(S6)보다 크기가 작게 나타났는데 이는 라이닝의 곡률 때문으로 생각된다. 라이닝 좌측 어깨부(shoulder)에서의 변형률 S3, S4는 거의 0에 근접한 인장, 압축을 나타내었다. 이는 주동토압이 작용하는 천단은 자유면을 향하려고 하고, 수동토압이 발생하는 스프링라인은 지반을 향하려고 하기 때문에 중간지점인 어깨부에서 이 둘의 변형양상이 서로 교차되었기 때문이다. 따라서 휨모멘트는 천단을 기준으로 45도 근처에서 방향이 전환될 것이다. 한편 좌측하단 각부(haunch)에서는 외부변형률 S7은 인장, 내부변형률 S8은 압축을 받고있어 스프링라인의 변형양상과 유사하며, 그 크기는 어깨부 변형률보다 크게 나타났는데 이는 라이닝 형상이 마제형이기 때문에 편평한 인버트에서는 지반하중이 치력으로 분산되지 못했기 때문이다. 이로 인해 인버트에서의 내외부 변형률(S9, S10)이 가장 크게 나타났다.

하이드로스톤 라이닝은 평균 40g 이상에서 균열이 발생하였다. 균열은 천단 내벽과 스프링라인 외벽에서 시작하여 발전하였고, 기본형의 경우 천단 내벽보다 스프링라인 외벽에서 처음으로 균열이 발생하였는데 이는 스프링라인 아치의 외벽 만곡이 휨모멘트에 순응하는 형상이기 때문이다.(그림 6) 균열은 발생초기에 급증하였지만, g상승에 따라 지반반력도 함께 커지므로 그 변형률의 증가율은 둔화되었다.

천단부 배면공동이 존재할 경우(AD1-1), 어깨부는 천단과 동일하게 정의 휨모멘트와 압축력을 나타내었으며, 어깨부에 배면공동이 존재할 경우(AD1-2), 비대칭 하중 경향이 나타나 특히 인버트의 변형률이 많이 감소하였다. 특히 좌측 어깨부에서는 배면공동의 영향으로 항복모멘트의 96% 해당하는 높은 부의 휨모멘트를 나타내어 어깨부의 축력은 초반에는 압축을 보이다 80g 이상에서 인장 축력이 우세하였다.

천단 두께부족의 경우(AD2) 천단부의 휨모멘트비와 축력비가 모형중 가장 크게 나타났다. 하이드로스톤 라이닝은(HD2), 종균열모형 다음으로 천단부에서 휨모멘트와 축력이 크게 나타났다. 천단균열은 20g에서 발생하였다. 무인버트 AD3, HD3는 스프링라인과 각부에서 타모형에 비해 큰 휨모멘트를 나타내었다.(그림 7) 또한 두 경우 라이닝이 완전한 일체화거동을 하지 않아 스프링라인의 휨모멘트가 표준 AD0, HD0 보다 작게 나타났다. 측벽 결함 AD4는 결함부분이 새로운 하중 지점이 되어 어깨부에서도 정의 휨모멘트가 발생하였다.

종균열 HD5는 천단에서 정의 휨모멘트가 나타났으나, 축력은 유일하게 압축력이 우세하였는데 이는 종균열 외벽의 압축변형률이 내벽 인장변형률보다 크게 나타났기 때문이다. 천단 두께부족 보강결과 천단 휨모멘트는 탄소섬유보강 HD2-R2는 40%, 두께보강 HD2-R3는 80%가 감소하여 두께보강이 유리하였다.(그림 8) 종균열 보강의 경우 예폭시 주입 HD5-R1은 천단휨모멘트를 10% 감소, 탄소섬유 HD5-R2는 70% 감소로 탄소섬유보강이 유리하게 나타났다.

표 5는 허용응력법에 의하여 알루미늄 라이닝에 작용하는 응력상태를 나타낸 것이다. AD1-2를 제외한 모든 라이닝의 천단 정의 휨모멘트는 AD0, AD4의 경우 내벽에서의 인장응력이, AD1-1, AD2, AD3는 외벽 압축응력이 우세한 상태이며, 인장응력이 커서 내벽 인장균열 발생을 예측할 수 있다. 특히 AD1-1의 천단에서는 내벽 인장응력보다는 외벽 압축응력이 더욱 크게 나타나 배면공동과 근접한 라이닝 외벽의 압좌 가능성을 예측할 수 있다. 또한 측벽결함 AD4는 내벽의 인장응력이 압축응력에 비해 1.9배나 크게 나타났다. 어깨부에서는 대부분 모두 압축이 우세하나, 측벽결함 AD4는 내외벽 모두에서 인장응력이 발생하였으며, 특히 AD1-2는 앞서 언급한 바와 같이 내벽에서 압축 및 외벽에서 인장응력이 작용하고 있다. 스프링라인에서는 AD1-2, AD4를 제외하고 내벽의 압축응력이 외벽 인장응력보다 크게 나타나 내벽 압좌를 예상할 수 있다. 특히 천단 배면공동 AD1-1은 천단에서 흡수 못한 변형률 에너지를 스프링라인으로 전환되어 큰 압축응력을 나타낸 것으로 사료된다. 각부의 내벽에서는 압축, 외벽에서는 인장응력이 발현되었으며, AD1-2, AD4를 제외하고 인버트로 인한 내벽의 압좌를 예상할 수 있다.

표 5. 최종 환산 라이닝 응력(단위 : kg/cm², *: 좌측어깨배면공동)

종류	천단부		어깨부		스프링라인		각부	
	내부	외부	내부	외부	내부	외부	내부	외부
AD0	80	-70	-12	-6	-93	67	-65	53
AD1-1	2	-73	-36	-48	-122	28	-112	6
AD1-2	-58	94	-43*	53*	-39	53	-33	50
AD2	405	-656	-56	-26	-114	29	-113	8
AD3	62	-78	-38	-11	-141	96	-85	80
AD4	96	-51	14	5	-43	80	-20	43

3.4 알루미늄 라이닝 토압분포

모든 라이닝 토압은 라이닝 각부분의 토피 h에 해당하는 수직토압 γh 로 나누어 정규화 하였으며 그림 9는 100g에서 각 부분의 라이닝 토압을 나타낸 것이다. 천단부에서의 토압은 천단 배면공동 AD1-1을 제외하고 초기 40g까지 모든 라이닝에서 거의 유사한 토압을 나타내다가 60g 이상이 되면서 라이닝마다 차이를 보이기 시작하였다. 이는 라이닝에 부착한 토압계가 단순한 지반하중뿐만 아니라 라이닝의 변형거동의 영향을 받았기 때문이다. 측벽결함 AD4는 이론 수직압보다 약 20%가량 토압이 크게 발생하는데, 이는 측벽결함부분이 새로운 하중지점이 되어, 라이닝 상단부인 천단, 어깨부가 지반과 더욱 밀착한 것으로 생각된다. AD1-2는 좌측 어깨부 배면공동의 영향으로 주동영역인 천단에서 유일하게 지반을 향한 부의 휨모멘트가 발생하였는데 이것이 천단 지반에 저항하여 정규 라이닝 토압이 1을 초과한 것으로 사료된다. AD0와 AD3의 정규 라이닝하중은 1에 근접하였으며 AD3가 약간 작게 나타났

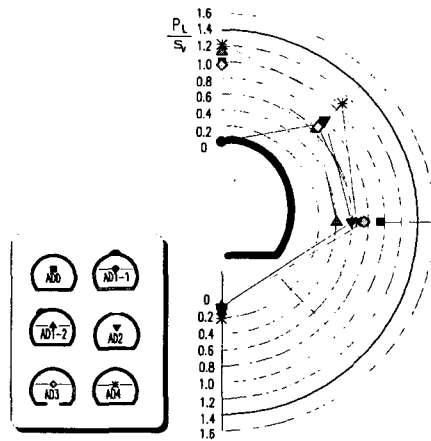


그림 9. 알루미늄 라이닝 정규화
토압분포(100g)

다. 이밖에 천단 배면공동 AD1-1은 당연히 천단 토압이 작용하지 않으며, AD2는 토압계 이상으로 계측되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 원심모형실험(centrifuge test)을 실시하여 토피고가 터널 높이의 3배($C/D=3$)에 구축된 다양한 터널 라이닝의 역학적 거동을 규명하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 평균 상대밀도 86% 주문진 표준사의 자중에 의한 정지토압계수는 0.3-0.5사이로 나타났으며, 평균 0.39로 확인되었다. 이는 Jacky가 제안한 사질토 지반내 정지토압계수 추정결과와 일치하는 값이다. 또한 지표침하는 용기 중심부에서 멀어질수록 작게 나타났다.
- 2) 주 변형률값으로부터 유추해볼 때 모든 라이닝은 지반 자중에 의해 타원형으로 변화하였다. 천단 내벽에서는 인장, 외벽에서는 압축변형을 일으켜 자유면을 향한 정의 휨모멘트가 발생하였으며, 스프링라인 내벽에서는 압축, 외벽에서는 인장변형이 발생하여 지반을 향한 부의 휨모멘트가 발생하였다. 어깨부와 각부는 천단과 스프링라인의 중간지점으로 상호 영향을 받는 것으로 나타났다. 절대적인 변형 및 휨모멘트, 축력은 인버트에서 가장 크게 발생하였다.
- 3) 하이드로스톤 라이닝은 평균 40g이상에서 균열이 발생하였다. 균열은 천단 내벽과 스프링라인 외벽에서 시작하여 발전하였고, 기본형의 경우 천단 내벽보다 스프링라인 외벽에서 처음으로 균열이 발생하였는데 이는 스프링라인 아치의 외벽 만곡이 휨모멘트에 순응하는 형상이기 때문이다. 균열은 발생초기에 급증하였지만, g상승에 따라 지반반력도 함께 커지므로 그 변형률의 증가율은 둔화되었다.
- 4) 라이닝 토압은 단순히 지반 수직하중에 의해 나타나는 것이 아니라 라이닝과의 상호작용에 의한 결과로 나타난다.

참고문헌

1. 건설교통부(1996), 터널표준시방서, 구미서관. 186p.
2. Konig D., Gutter, U., & Jessberger, H.L.(1991), "Stress redistribution during tunnel and shaft constructions", *Proc. Int. Conf. Centrifuge 91*, pp.129-135
3. Chambon, P., and Corte, J.F.(1994), "Shallow Tunnels in Cohesionless Soil : Stability of Tunnel Face", *Journal of Geotechnical Eng.* Vol. 120, No. 7, pp.1148-1165
4. 박중배, 김유석, 김성준, 정한중(1997), "지반공학에 있어서의 Centrifuge 모형실험", *대우건설기술보*
5. Taylor, R.N.(1995), *Geotechnical centrifuge technology*, Chapman & Hall, 296p.