

터널 모형실험에 대한 상사성 이론 정립에 관한 연구

A study on the establishment of similarity rule for tunneling model tests

박시현*¹, 이석원²

Park, Si-hyun · Lee, Seok-won

Abstract

In this study, a similarity rule is thoroughly discussed for tunnelling model tests which can simulate actual ground conditions. Based on this prior consideration, theoretical works are performed to simulate a real ground condition into a gravitational field with a similarity. A process is arranged to determine a lining condition in laboratory tests for a sandy ground tunnel.

Keywords: Similarity rule, tunnelling model tests, tunnel lining, centrifugal tests, gravitational tests

요 지

본 연구는 터널 모형실험을 실시함에 있어서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모형실험상에서 모사하기 위한 상사성 원리를 종합적으로 검토한 것이다. 이를 바탕으로 중력장에서 모형실험을 실시하는 경우에도 상사성을 만족시킬 수 있는 방법에 대해 이론적 연구를 수행하였으며 토사지반에 시공된 터널 사례에 대하여 모형실험시 라이닝 설정 방법에 관한 실험조건 수립과정을 정리하였다.

주요어: 상사성 이론, 터널 모형실험, 터널 라이닝, 원심모형실험, 중력장 실험

1. 서론

토목구조물 건설에 있어서 그 구조물의 역학적 거동 평가를 위해서는 해석적 검토와 경험적 검토로 대별할 수 있다. 해석적 검토에서는 단순 모델에 대한 간이식을 이용하는 방법과 수치해석적 기법을 활용하는 방법이 있다. 경험적 검토로서는 실제 구조물의 건설을 통한 경험적인 방법과 축소 모형실험에 의한 방법이 있다. 이러한 방법들 중에서 현장에서의 실측을 통한 경험적 방법은 매우 중요한 것이지만 정작 기술자가 알고 싶어하는 결

결과나 현상을 제대로 파악하기란 그렇게 간단한 것이 아니며, 경비·시간·노동력·안전성 측면에서 많은 제약이 따른다. 이러한 제약으로 인해 원지반 상태를 가능한 한 그대로 표현하기 위한 다양한 축소 모형실험이 널리 활용되고 있다.

모형실험은 일반적으로 과거의 경험적 틀로부터 벗어나 과거의 지식에 대한 재검토를 실시할 필요가 있을 경우나 또는 특정 현상에 대한 탐구의 목적으로 실시하고 있는 것이 일반적이다. 역학적 특성변화가 다양한 지반을 그 재료로 하는 지반공학 분야에 있어서 모형실험의

*1 정회원, 한국시설안전기술공단, 과장(parksh@kistec.or.kr)

2 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과, 조교수

표 1. 국내외 터널 모형토조 제작 현황

	국내	일본	서구
기관	건설기술연구원 ¹⁾ , 부산대 ²⁾ , 아주대 ³⁾	Fujita건설 ⁴⁾ , Nagoya공대 ⁵⁾ , Kyoto대 ⁶⁾ , 토목연구소 ⁷⁾	Illinois대 ⁸⁾ , Oxford대 ⁹⁾ , Cambridge대 ¹⁰⁾
토조규모 (길이×폭×높이)	¹⁾ 1300×700×1000mm ²⁾ 1650×400×800mm ³⁾ 6000×6000×3000mm	⁴⁾ 880×300×1500mm ⁵⁾ 800×800×1000mm ⁶⁾ 1000×1000×900mm ⁷⁾ 1400×1000×1000mm	⁸⁾ 1400×800×900mm ⁹⁾ 1000×300×325mm ¹⁰⁾ 360×150×360mm ¹⁰⁾ (원형토조:D581×H1012)
지반 재료	^{1),2),3)} 건조사 ^{1),2),3)} 상대밀도 고려	^{4),5),6),7)} 건조사 ⁷⁾ 함수비 고려	^{8),9)} 건조사 ^{9),10)} 점성토
라이닝 재료	¹⁾ 함석판 ²⁾ 고무멤브레인 ³⁾ 콘크리트, 알루미늄	^{4),6),7)} 아크릴 ⁶⁾ 알루미늄	⁸⁾ 스틸 ⁹⁾ 알루미늄 원형실린더 ¹⁰⁾ 고무멤브레인
계측 항목	¹⁾ 터널변형 ^{2),3)} 지표면/지중 침하 ³⁾ 지중토압	^{4),5),6),7)} 터널변형 ^{4),5),6),7)} 지표면 침하 ^{5),6),7)} 지중토압	^{8),9),10)} 터널변형 ^{8),9),10)} 지표면/지중 침하 ^{9),10)} 지중토압/간극수압
굴착의 모형화	¹⁾ 수평으로 설치된 수동식 회전커터 사용 ³⁾ 복개터널	⁴⁾ 막장 지지판의 수평이동 ^{5),6)} Trapdoor 실험 ⁷⁾ 수평으로 설치된 수동식 회전 커 터사용	⁸⁾ 이중관 설치 후 외부관 압출 ⁹⁾ 쉴드터널 굴착장비 개발 ¹⁰⁾ 공기압을 감소시킴
상사성	^{1),3)} 단순 축소율 적용	^{4),5),6),7)} 단순 축소율 적용	¹⁰⁾ 힘강성비 적용
실험 목적	¹⁾ 복선/교차 터널의 상호 작용 ²⁾ 터널보강공의 영향 평가 ³⁾ 복개 터널 거동 분석	^{4),7)} 록볼트의 지보 효과 ^{4),5),6),7)} 지표면 침하 특성 ^{6),7)} 라이닝의 변형 특성 ⁶⁾ 분기공에 의한 영향평가	^{8),9),10)} 지반거동 예측 ⁸⁾ 터널구조물에 미치는 영향 인자 ⁹⁾ 근접터널 시공의 영향 평가

역할은 매우 크다. 흙 요소의 역학적 특성을 구하기 위한 토질시험은 누구라도 동일한 결과를 재현할 수 있도록 실험방법에 대한 규준을 마련하여 왔다. 그러나 대상물의 건설 방법과 목적이 천차만별인 모형실험의 규격화는 불가능한 일이며 또 규격화를 실시하는 것이 필요하다고 단언하기도 무리다¹¹⁾.

국내외적으로 터널 모형실험을 실시한 사례를 조사하여 표 1에 나타내었다. 표에는 각각의 연구기관별로 터널 모형실험시 사용한 토조, 지반재료, 라이닝 재료, 계측 항목, 터널굴착의 모형화 방법, 상사성 적용 및 실험목적 을 각각 요약하였다.

중력장에서 실시된 터널 모형실험에 관한 많은 연구 자료들 중에서 원지반과 모형실험 사이의 상사성에 대해 다루고 있는 예는 많지 않다. 이에 대한 원인은 실지반의 상사성은 원심 모형실험에서 밖에 성립하지 않는다고 하는 일반적인 개념에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서

중력장에서의 모형실험은 흔히 경계조건 및 구조물의 크기를 단순 축소시킨 후 실험을 실시하고 있는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 터널 모형실험을 실시함에 있어서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모형실험상에서 모사하는 경우에 대한 상사성 원리를 종합적으로 검토한 것이다. 이를 바탕으로 중력장에서 모형실험을 실시하는 경우에도 상사성을 만족시킬 수 있는 방법에 대해 이론적 연구를 수행하여 토사지반에 시공된 터널에 대하여 모형실험시 라이닝 설계방법에 관한 실험조건 수립과정을 정리하였다.

2. 모형실험에 있어서의 상사성 원리

일반적으로 물체의 거동을 다루는 물리계에 있어서 차

원해석의 기본 3요소는 길이[L], 질량[M], 시간[T]을 다루고 있다. 이들 요소 중에서 정역학적 접근이 가능한 경우에는 시간[T]에 대한 항은 무시하고 있다. 터널 구조물을 구축함에 있어 지반의 굴착과정 및 이로 인해 동반되는 지반의 거동 평가 등에 있어서 시간의 영향은 결코 무시할 수 없는 특성을 지니고 있다. 그러나 터널 굴착 및 안전성 평가에 있어서 시간적 개념을 고려한 거동 분석이 아직까지는 일반화되어 있지 않는 것이 현실이며 시간적 변화 특성에 의한 영향 평가가 불명확한 상태에 있다. 따라서 일반적으로 터널 모형실험시 시간에 대한 특성을 무시하고 있는 점을 감안하여 본 연구에서는 시간에 대한 특성은 무시하고 길이와 질량에 대한 특성만을 다루기로 한다.

2.1 기하학적 조건

터널 모형실험에 있어서 길이에 대한 물리량을 적용하는 것은 일반화되어 있다. 이는 곧 모형실험의 규모를 나타내기도 하며 터널 구조물의 축소율을 의미하기도 한다. 본 연구에서는 모형실험의 규모를 달리하는 축소율 개념을 기하학적 조건으로 구분하여 모형실험시 적용하기로 한다.

$$\frac{H_m}{H_p} = \frac{1}{\lambda}, \quad H_m = \frac{1}{\lambda} \cdot H_p \quad (1)$$

여기에서, H_m, H_p : 모형 및 원지반에서 터널중심으로부터 지표면까지의 거리, λ : 기하학적 축소율.

2.2 역학적 조건

지구상에 존재하는 모든 물체는 지구와의 인력에 의해 중력이 작용한다. 이러한 중력 작용에 의해 물체는 자체의 무게(중량)가 결정되며 비로서 역학적 관점에서 접근이 가능하게 된다. 모형실험을 실시함에 있어서 이러한 역학적 조건을 달리하기 위한 힘의 조절을 위해 중력의 크기를 조절하는 것을 생각할 수 있다. 지구상의 중력가속도는 $9.8m/sec^2 (=1g)$ 이며 이 값을 달리하는 경우에는 해당 물체의 중량이 달라지게 된다. 이를 식으로 나타내

면 다음과 같다.

$$\frac{g_m}{g_p} = \rho, \quad g_m = \rho \cdot g_p \quad (2)$$

여기에서, g_m, g_p : 모형 및 실제지반에 있어서 중력 가속도 (m/sec^2), ρ : 역학적 조절률.

중력가속도에 의한 역학적 조절률을 이용하면 물체의 중량은 다음과 같은 식의 전개에 의해 결과적으로 모형실험에서의 지반의 단위 중량을 조절하게 된다.

$$\gamma_m = mass_m \cdot g_m = mass_p \cdot (\rho \cdot g_p) = \rho \cdot \gamma_p \quad (3)$$

여기에서, $mass_m, mass_p$: 모형 및 실제지반에 있어서 질량, γ_m, γ_p : 모형 및 실제지반에 있어서 지반재료의 단위중량.

이 식의 의미는 원지반의 지반재료와 동일한 지반재료를 모형실험에서 사용하고 동시에 중력가속도를 조절하게 되면 물리계의 3요소 중 질량[M]에 대한 차원해석이 가능함을 뜻한다.

(3) 기타 제반 물리량의 상사관계

상기에서 언급한 기하학적 조건과 역학적 조건을 활용하여 모형실험에서 사용되는 제반 물리량에 대하여 원지반과의 상사성 관계를 정리하면 표 2와 같다.

표 2를 살펴보면 모형실험상에서의 중력가속도의 크기(ρ)를 모형실험시의 축소율(λ)과 동일하게 적용하면

표 2. 제반 물리량의 상사관계

구 분	모형지반 원지반	구 분	모형지반 원지반
길이	$1/\lambda$	힘(중량)	ρ/λ^3
면적	$1/\lambda^2$	변형률	1
체적	$1/\lambda^3$	변위	$1/\lambda$
중력가속도	ρ	시간	$(\rho/\lambda)^{0.5}$
단위체적중량	ρ	탄성계수	ρ/λ
응력	ρ/λ	단면2차모멘트	$1/\lambda^4$

모형실험을 실시할 때 응력항을 원지반의 응력상태와 동일 (유사)하게 재현할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 모형실험 장치에 중력가속도를 임의 크기로 발생시켜 모형 지반의 응력 레벨을 원지반의 응력 레벨과 유사하게 재현시키는 실험방법이 원심모형실험¹²⁾이다. 원심모형실험은 전 세계적으로 토목구조물의 역학적 거동평가에 유효한 수단으로 활용되고 있다. 그러나 원심모형실험장치를 이용하려면 중력을 임의로 조절할 수 있도록 하기 위한 고가의 실험장비가 필요하게 되며 더불어 모형실험을 실시하기 위한 시간적 제약성이 따르게 된다. 따라서 상기의 기하학적 축소율과 역학적 조절률을 적절히 조절하게 되면 원심모형실험을 실시하지 않더라도 원지반의 응력상태와 유사한 상태를 재현할 수 있다는 결론에 이르게 된다.

여기에서 본 연구에서는 원심모형실험 장치를 사용하지 않고 역학적 조절률을 고려하는 방법에 대하여 다음과 같은 특정한 실험조건을 설정하여 상기의 상사성 원리를 적용코자 한다.

3. 상사성 원리의 적용

3.1 가압장치에 의한 터널모형실험에 적용

상기에 언급한 상사성 원리를 그대로 구현하기 위해서는 원심모형실험장치를 활용하는 것이 최적이지만 이

를 활용할 수 없는 실험적 제한성을 고려하는 경우에는 지반의 특성을 고려하여 가압시험¹³⁾장을 생각할 수 있다. 가압시험장은 연직 및 수평방향에 대하여 일정한 크기의 하중을 재하하여 가압에 의해 형성되는 임의의 응력장을 말하는 것이다. 따라서 본 연구에서의 가압시험장은 터널이 구축될 일정한 깊이에서의 응력상태만을 고려하는 것으로서 지표면까지의 응력변화를 구현할 수는 없다. 즉, 터널이 놓인 위치에서의 지반 자중에 의한 연직압이 터널높이에 해당하는 만큼의 연직압 변화량을 무시할 수 있을 만한 경우에 적용가능하며 토피고가 터널높이에 비해 상대적으로 커야하는 제약조건이 있다.

그림 1 및 표 3은 원지반 상태 (Proto type)를 모형실험 (Model test)으로 구현함에 있어서 상사성과 관련되는 각종 물리적 변수를 요약한 것이다.

상사성 원리를 이용하여 기하학적 조건과 역학적 조절률을 단지 적절히 조합하기만 하여 모형실험을 실시하고 제반 물리량을 이에 따라 평가하는 것만으로 현장의 지반 상태를 적절히 표현했다고 보기는 어렵다. 토목 구조물에 대하여 모형실험을 실시함에 있어서는 대상 구조물이 가지는 구조적 특성을 반영하여야 한다.

구조물에 작용하는 하중중에서 축력이 탁월한 경우에는 구조물 변형이 축강성 (Axial Rigidity, EA)에 의해 좌우되며 휨모멘트가 탁월한 경우에는 휨강성 (Flexural Rigidity, EI)에 의해 크게 영향받는다. 터널 구조물은 일정한 편평도를 가지는 타원형 또는 아치형상에 가까워 축력보다는 휨모멘트의 영향이 크다고 할 수 있다. 따라

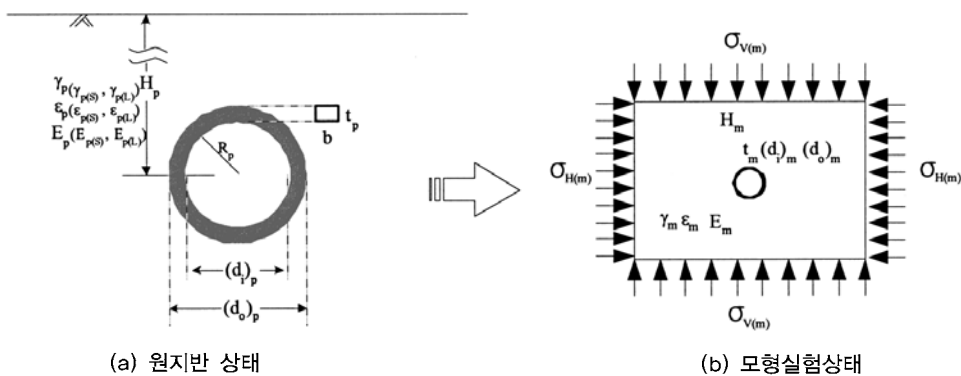


그림 1. 원지반의 모형화

표 3. 모형화에 사용된 제반 변수

구 분	원지반	모형실험
단위중량	γ_p	γ_m
터널 라이닝 탄성계수	$E_{p(L)}$	$E_{m(L)}$
주변 지반의 변형계수	$E_{p(S)}$	$E_{m(S)}$
터널중심까지 토피고	H_p	H_m
터널 라이닝 변형량	$\epsilon_{p(L)}$	$\epsilon_{m(L)}$
지중응력	σ_{Vp}, σ_{Hp}	σ_{Vm}, σ_{Hm}
터널 라이닝 두께	$t_{p(L)}$	$t_{m(L)}$
터널 외경	$(d_o)_p$	$(d_o)_m$
라이닝 단면2차모멘트	$I_{p(L)}$	$I_{m(L)}$

표 4. 각종 재료의 물성치 정리

구 분	원지반상태		모형실험상태	
	지반	라이닝	지반 (가압시)	라이닝
단위중량 (g/cm ³)	1.8	-	1.8	-
적용토피고 (m)	40	-	1	-
적용 직경 (m)	-	8	-	0.2
지반	변형계수 (kg/cm ²)	800	60 (500)	-
	포아송비	0.3	0.3	-
라이닝 탄성계수 (kg/cm ²)	석 고	-	-	2e4
	아크릴	-	-	2.5e4
	콘크리트	-	2.5e5	1.8e5
	알루미늄	-	-	7e5
	스틸	-	-	2.1e6
라이닝 포아송비	-	0.2	-	0.2

서 이러한 구조적 특성을 가지는 터널 라이닝을 모형실험상에서 표현하기 위해서는 원지반 상태에서의 휨강성과 동일한 휨강성을 가지도록 모형실험상에서 라이닝의 두께 ($t_{m(L)}$)를 결정하여야 한다. 다음은 휨강성을 이용하여 모형 터널 라이닝의 두께를 결정하는 과정을 정리한 것이다.

(가) 보(Beam)의 이론을 적용한 경우

$$E_{m(L)} \cdot I_{m(L)} = \left(\frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{\epsilon_{p(L)}}{\epsilon_{m(L)}} \cdot E_{p(L)} \right) \cdot \left(\frac{I_{p(L)}}{\lambda^4} \right)$$

$$= \left(\frac{\rho}{\lambda^5} \cdot \frac{\epsilon_{p(L)}}{\epsilon_{m(L)}} \right) \cdot (E_{p(L)} \cdot I_{p(L)}) \quad (4)$$

$$E_{m(L)} \cdot \frac{b_{m(L)} \cdot t_{m(L)}^3}{12} = E_{p(L)} \cdot \left(\frac{b_{p(L)} \cdot t_{p(L)}^3}{12} \right) \cdot \frac{\rho}{\lambda^5} \quad (5)$$

$(b_{m(L)} = b_{p(L)} = 1)$

$$E_{m(L)} \cdot t_{m(L)}^3 = E_{p(L)} \cdot t_{p(L)}^3 \cdot \frac{1}{\lambda^4},$$

$$t_{m(L)}^3 = \frac{E_{p(L)} \cdot \rho}{E_{m(L)} \cdot \lambda} \cdot \frac{t_{p(L)}^3}{\lambda^3} \quad (6)$$

$$t_{m(L)} = \frac{t_{p(L)}}{\lambda} \cdot \left(\frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{E_{p(L)}}{E_{m(L)}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

(여기서, $\frac{\epsilon_{p(L)}}{\epsilon_{m(L)}} = 1$ 로 가정)

(나) 원형관 이론을 적용한 경우

$$E_{m(L)} \cdot I_{m(L)} = E_{m(L)} \cdot \frac{\pi}{64} \{ (d_o)_{m(L)}^4 - (d_i)_{m(L)}^4 \} =$$

$$\frac{E_{p(L)}}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{64} \left\{ \left(\frac{(d_o)_{p(L)}}{\lambda} \right)^4 - \left(\frac{(d_i)_{p(L)}}{\lambda} \right)^4 \right\} \quad (8)$$

$$(d_i)_{m(L)} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{1}{\lambda} \frac{E_{p(L)}}{E_{m(L)}} \right) \cdot (d_o)_{p(L)}^4 + \frac{1}{\lambda} \frac{E_{p(L)}}{E_{m(L)}} \cdot (d_i)_{p(L)}^4 \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

$$t_{m(L)} = \{ (d_o)_{m(L)} - (d_i)_{m(L)} \} / 2 \quad (10)$$

원형관 이론을 적용하는 경우에는 (9)식에서와 같이 기하학적 축소율 (λ) 값에 따라 모형터널 라이닝의 내경 ($(d_i)_{m(L)}$)이 음의 값을 가지게 되어 불합리한 값을 나타내는 경우도 있다(표 5. 참조).

한편, 터널 구조물은 구조물 자체만으로 형성되어 지는 것이 아니라 구조물을 둘러싸고 있는 주변 지반과의 상호 작용에 의해 영향받는다. 터널 라이닝과 주변 지반과의 상호작용을 나타내는 지표 중에는 휨강성비 (Flexibility ratio, F)⁽¹⁴⁾가 있으며 식 (11)과 같이 주변

지반과 터널라이닝 자체의 물성치를 이용하여 나타내고 있다. 휨강성비가 작을수록 터널 라이닝의 강성은 크다는 것을 알 수 있다.

$$F = \frac{\frac{E_s}{(1+\nu_s)}}{\frac{6E_L \cdot I_L \cdot 1}{(1-\nu_L^2) R^3}} \quad (11)$$

여기에서, ν_s, ν_L : 주변지반 및 라이닝의 포아송 비
 I_L : 라이닝의 단면 2차 모멘트 (보 이론만을 적용하기로 함), R : 터널의 반경.

중력장에서 2차원 모형실험을 실시하는 경우에는 폭 $b_{m(L)}=b_{p(L)}=1$ 이며, 단면 2차 모멘트 I 는 3차원량이 된다. 변형률에 대해서는 $\frac{\epsilon_{p(S)}}{\epsilon_{m(S)}} = \frac{\epsilon_{p(L)}}{\epsilon_{m(L)}} = 1$ 로 가정하면 모형실험에서의 휨강성비 (F_m)는 실제 지반의 물성치를 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{\frac{E_{m(S)}}{(1+\nu_{m(S)})}}{\frac{6E_{m(L)} \cdot I_{m(L)} \cdot 1}{(1-\nu_{m(L)}^2) R_m^3}} \\ &= \frac{\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\epsilon_{p(S)}}{\epsilon_{m(S)}} \cdot E_{p(S)}}{(1+\nu_{p(S)})} \\ &= \frac{6 \left(\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\epsilon_{p(L)}}{\epsilon_{m(L)}} \cdot E_{p(L)} \right) \cdot \frac{I_{p(L)}}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{R_p^3}}{(1-\nu_{p(L)}^2)} \\ &= \frac{\frac{E_{p(S)}}{(1+\nu_{p(S)})}}{\frac{6E_{p(L)} \cdot I_{p(L)} \cdot 1}{(1-\nu_{p(L)}^2) R_p^3}} = F_p \quad (12) \end{aligned}$$

즉, 모형실험과 실제 지반에서의 터널 라이닝과 주변지반과의 상호 작용에 의한 영향은 휨강성비를 동일하게 함으로서 상사조건을 만족시킬 수 있게 된다. 단면 2차

모멘트는 $I_{m(L)} = \frac{t_{m(L)}^3}{12}$, $I_{p(L)} = \frac{t_{p(L)}^3}{12}$ 을 이용하여 정리하면, 모형 터널 라이닝의 두께 ($t_{m(L)}$)는 다음과 같다.

$$t_{m(L)} = \sqrt[3]{\frac{E_{m(S)} \cdot E_{p(L)} \cdot (1+\nu_{p(S)}) \cdot (1-\nu_{m(L)}^2) \cdot t_{p(L)}}{E_{p(S)} \cdot E_{m(L)} \cdot (1+\nu_{m(S)}) \cdot (1-\nu_{p(L)}^2) \cdot \lambda}} \quad (13)$$

식 (13)을 휨강성에 보이론을 적용한 식 (7)과 비교하면 주변지반의 물성치를 더욱 다양하게 고려할 수 있음을 알 수 있다. 또한 식 (13)에서 주변지반의 물성치와 포아송비를 무시하는 경우에는 식 (7)과 같게 된다.

3.2 모형터널 라이닝 설계 사례

상기의 상사성 원리를 바탕으로 하여 가압 장치를 이용하는 경우와 이용하지 않는 경우에 대하여 모형 터널 라이닝의 두께를 산정하였다. 이때, 원지반 터널의 조건으로는 터널직경 (외경) 8m, 콘크리트 라이닝 두께 50cm 인 원형터널을 선정하였으며 토피고 40m인 사질지반을 대상으로 하였다. 원지반에서의 휨강성비는 $F_p=2.4$ 정도이다. 기하학적 축소률은 $\lambda = 40$ 을 적용하였으며 따라서 모형터널 라이닝의 직경 (외경)은 20cm, 토피고는 1m에 각각 해당된다. 한편 모형지반 재료로는 낙동강 모래를 사용하며 모형터널 라이닝의 재질은 석고, 아크릴, 콘크리트, 알루미늄, 스틸을 사용하는 경우에 대하여 각각 검토하였다. 모형 터널라이닝 설계에 사용된 각종 재질의 물성치는 표. 4에 정리하였다.

(1) 단순 축소율만을 적용한 경우

먼저 기하학적 축소율만을 적용하여 모형토조의 라이닝 두께를 산정하는 경우이다. 모형 라이닝의 두께는 1.5cm가 되며 이때는 모형 라이닝의 재질은 원지반에서의 터널 라이닝과 동일한 재질임을 전제로 하고 있기 때문에 콘크리트 재질을 사용하게 되며 1.25cm 두께의 콘크리트 라이닝을 제작하여야 하는 어려움을 쉽게 생각할 수 있다.

표 5. 상사성을 고려한 모형 터널 라이닝의 두께

구 분	라이닝 두께 (cm)						
	단순 축소율 이용	휨강성 (E) 이용				휨강성비 (F) 이용	
		보 이론		원형관 이론			
		$\lambda=40$ $\rho=1$	$\lambda=40$ $\rho=40$	$\lambda=40$ $\rho=1$	$\lambda=40$ $\rho=40$	$\lambda=40$ $\rho=1$	$\lambda=40$ $\rho=40$
그림 2.에서	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
석 고	-	0.85	2.90	0.34	-	1.22	2.48
아크릴	-	0.79	2.69	0.27	-	1.14	2.30
콘크리트	1.5	0.41	1.39	0.04	1.92	0.59	1.19
알루미늄	-	0.26	0.89	0.01	0.39	0.37	0.76
스틸	-	0.18	0.61	0.01	0.13	0.26	0.53

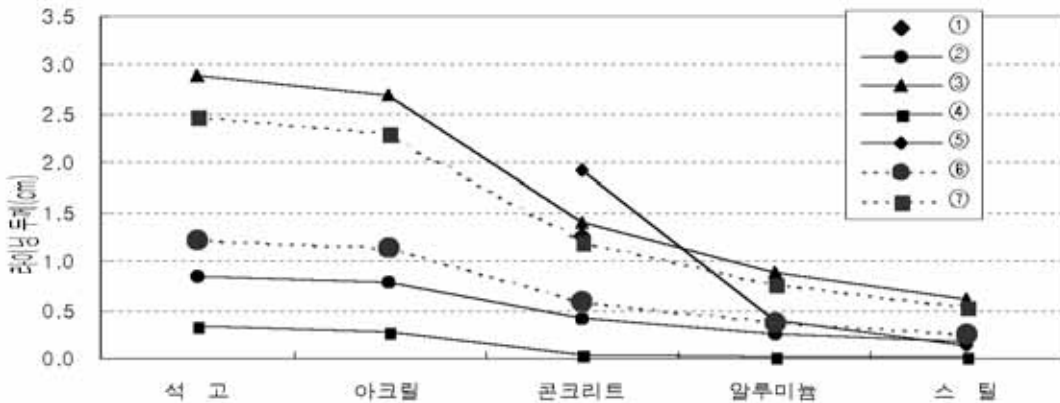


그림 2. 라이닝 재질에 따른 두께 산정 결과

(2) 휨강성 및 휨강성비를 이용하는 경우

휨강성 및 휨강성비를 각각 이용하는 경우에 대해서는 기하학적 축소율만 사용하는 경우와 역학적 조절률을 함께 사용하는 경우에 대하여 각각 검토하였다. 역학적 조절률을 사용하는 경우에는 기하학적 축소율과 동일한 값을 사용하였다. 기하학적 조건에 의한 축소율만이 고려되는 경우에는 원지반에 있어서 터널직경 및 토피고가 모형실험에서는 기하학적 축소율만큼 고려된 상태에서 사용됨을 뜻한다. 그리고 역학적 조절률을 사용하는 경우에는 중력가속도 항목을 고려한 모형실험을 전제로 하는 것이며 모형지반 주변응력을 임의로 조절할수 있는

기계장치를 도입하여야 한다. 또한 역학적 조절율을 사용하는 경우에는 식 (13)에서 알 수 있듯이 원지반의 물성치 및 모형지반의 물성치가 함께 필요하며 이를 위해서는 터널 시공 지점에 대한 물성시험 결과 및 모형지반의 재료 특성을 파악해 두어야 한다. 본 연구에서는 원지반의 물성치에 대해서는 현장 조사사례¹⁵⁾를 적용하였으며 모형지반의 물성치에 대해서는 낙동강 모래에 대하여 구속압을 달리한 삼축 압축 실험 결과¹⁶⁾를 참고하였다.

(3) 모형 라이닝의 재질에 따른 두께 설정

표 4를 이용하여 직경 20cm의 모형터널 라이닝의 소

요 두께를 구하면 표 5와 같으며 이를 그림으로 나타낸 것이 그림 2이다.

라이닝의 재질이 강성일수록 모형 라이닝의 두께는 작아지는 일반적인 경향을 보이며 단순 축소율을 적용시킨 콘크리트 라이닝 두께 1.25cm에 비해 적용기준에 따라 라이닝 두께가 더 작아지는 (②, ④, ⑥) 것으로 나타났다.

보 이론 (②, ③)과 원형관 이론 (④, ⑤)에 의해 구한 라이닝 설계 두께는 역학적 조절률을 고려하지 않는 경우 (②, ④)에는 그 경향은 유사하나 역학적 조절률을 고려한 경우 (③, ⑤)에는 라이닝에 강성에 따라 라이닝 두께의 차이가 심한 것을 알 수 있다. 따라서 원지반에 설치된 터널에 대하여 원형관이론에 의해 모형라이닝 두께를 결정함에 있어서는 주의를 요한다. 한편, 휨강성과 휨강성비를 사용하는 경우에 있어서 단순 축소율만 적용시킨 경우 (②, ⑥)는, 휨강성비를 이용하는 것 (⑥)이 휨강성을 이용하는 것 (②)에 비해 모형 라이닝의 두께는 두꺼워진다. 반면 역학적 조절률을 사용한 경우 (③, ⑦)에는 상반된 경향을 보이고 있다. 그러나 이러한 경향 및 차이는 원지반의 물성 및 터널 라이닝의 물성에 따라 다른 양상을 보이게 된다.

본 연구에서 사용된 예제의 경우에는 원지반 및 모형지반에서의 휨강성비는 2.4로 동일하다. 따라서 모형라이닝의 재질을 달리하는 경우에는 이러한 일련의 과정을 거쳐 해당 모형 실험에 적절한 라이닝을 설정하는 것이 중요하다.

4. 결론

터널 굴착에 따른 지반의 거동 특성 및 붕괴 메커니즘을 파악하기 위해서는 현장계측에 의한 방법과 모형실험에 의한 방법이 매우 유용하다. 본 연구에서는 터널 모형 실험을 실시함에 있어서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모형실험상에서 모사하는 경우에 대한 상사성 원리를 종합적으로 검토한 것이다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 터널 모형실험을 실시함에 있어서 원지반과 모형지반

과의 상사성을 만족시키기 위하여 기하학적 축소율과 역학적 조절율을 이용하여 모형실험에 관계되는 제반 물리량을 정의하였다.

2. 중력장에서 실시하는 모형실험중에서 2차원 가압시험장을 설정하여 상사성 원리를 응용하여 터널 모형 라이닝의 두께를 산정하는 과정을 정리하였다.
3. 모형터널 라이닝의 두께를 선정하기 위하여 단순축소율, 휨강성 및 휨강성비를 각각 적용하여 모형 라이닝의 재질에 따른 라이닝 두께를 상호 비교하였다. (4) 모형터널 라이닝의 두께를 결정함에 있어서는 터널 라이닝과 주변 지반과의 역학적 특성을 고려할 수 있는 휨강성비를 활용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설기술연구원 (1985), 지반 침하방지공법에 관한 연구, KICT 연구보고서.
2. 임종철, 고호성, 박이근, 오명렬 (2000), 토사 NATM 터널의 네일 보강에 의한 지반침하 억제효과에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제 16권 제 2호, pp. 51-60.
3. 김은섭, 이상덕 (1999), 지하박스구조물에 작용하는 토압에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회논문집, 제 15권 제 4호, pp. 235-246.
4. 香川和夫, 福島伸二 (1989), 土かぶりの浅い砂質地山トンネルに關する横斷土槽實驗, 第21回土質工學研究發表會, pp. 622-623.
5. Nakai T. and Zang F. (1999), Numerical simulation of excavation sequence in model tunnels, 第34回土質工學研究發表會, pp. 870-871.
6. Adachi T., Yashima A. and Kojima K. (1991), Behavior and simulation of sandy ground tunnels, Developments in Geotechnical Aspects of Embankments, Excavations and Buried Structures, Balkema, Rotterdam, pp. 291-329.
7. 國道交通土木研究所 (2001), 砂質地山における先受工の効果と近接トンネルの影響に關する研究報告書.
8. Hong S. W. (1984), Ground movements around model tunnels in sand, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana Champaign.
9. Kim S. H. (1996), Model testing and Analysis of

- interactions between tunnels in clay, Ph.D. Thesis, University of Oxford.
10. Britto A.M. (1979), Thin walled buried pipes, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
 11. 박시현, 이석원 (2001), 지반공학에 있어서의 모형실험, 건설기술정보, V.215, pp. 28-30.
 12. Malishitsky Y.N. (1975), The Centrifugal Model Testing of Waste-heap Embankments, (Translation), Cambridge University Press.
 13. 西畑誠, 山本浩史 (1995), R C C 칼버트 공법의 모형실험 결과와 그 검증, 第30回土質工學研究發表會, pp. 1957-1960.
 14. Ranken R.D., Ghaboussi J. and Hendron A.J. Jr. (1978), Analysis of Ground liner interaction of tunnels, Report No. UMTA-IL-06-0043-78-3, Urban Mass Transportation Administration, U.S. Department of Transportation, Washinton, D.C., October.
 15. 岸孝雄, 岡田久延 (1996), 大都市の地下70mと貫く50万Vのトンネル, トンネルと地下, pp. 741-747.
 16. 김병탁 (2000), 비균질 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구, 경북대학교 공학박사 학위논문.

K C I



박시현
한국시설안전기술공단
과장
parksh@kistec.or.kr



이석원
건국대학교 사회환경시스템공학과
조교수
swlee@konkuk.ac.kr