

수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성에 관한 연구

이대혁¹⁾ · 김재순²⁾ · 이희근³⁾ · 김성운⁴⁾

On Mechanical Behavior and Cracking Characteristics of Tunnel Lining by Numerical Analysis

Dae-Hyuk Lee, Jae-Soon Kim, Hi-Keun Lee and Seong-Woon Kim

ABSTRACT Numerical algorithms were developed to analyze the behavior of the double lining as well as ground mass separately or simultaneously. A lining interface element was especially developed, verified and applied to the study on the coupled interaction of shotcrete and the concrete lining. It could be known from parameter studies on double lining support systems that as the contact surface between shotcrete and concrete lining was rougher, the more decreased bearing capacity against the cracking of the system. If the thickness of the shotcrete increased, the bearing capacity of the double lining also increased linearly with the thickness. If the thickness of the concrete lining increased, the bearing capacity of the double lining had the relationship of the characteristic S-shape of a sigmoid function with the thickness. When the thickness increased over a given value, it was not useful to increase more the thickness because bearing capacity had no remarkable change. It could be concluded that the behavior of the shotcrete and concrete lining was generally reversed before and after the ratio of horizontal to vertical earth pressure of 1.0 and 0.5 respectively. Therefore, we could guess that the movement which two shotcrete and concrete lining deflect toward each other around the crown caused a friction between two linings and thus this disadvantageous effect could contribute to reducing the bearing capacity against the cracking.

1. 서 론

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

이러한 복층 라이닝 지보시스템의 역학적 거동을 조사하고 균열발생 특성을 연구할 목적으로 경부고속철도 복선단면의 크기를 축소한 축소 모형 시험을 수행하였으며 그 결과를 기 발표하였다.¹⁾ 본 논문에서는 복층 라이닝 및 복층라이닝과 지반을 동시에 해석할 수 있는 수치해석 알고리즘을 개발하여 시험결과를 비교·검토하였으며, 변수해석(parameter study)을 수행하여 지

보 시스템의 거동에 영향을 미치는 주요한 변수들의 변화를 조사하였다. 특히 수치해석에서는 숏크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 상호거동을 수치해석적으로 모사할 수 있는 라이닝 인터페이스 요소(interface element)를 개발하여 검증·활용하였다. 실제 터널 현장에서 발생한 숏크리트 응력 및 변위 데이터를 수치해석과 비교함으로서, 본 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 마지막으로 콘크리트 라이닝 천단에 발생하기 쉬운 균열의 발생 원인에 대한 메카니즘 및 균열 발생 억제 방안을 제시하였다.

터널 콘크리트 라이닝에 관한 수치해석적 연구는 실제 터널 현장의 계측 자료를 이용하거나, 연구자가 적절히 가정한 지압분포에 따라 라이닝이 어떠한 방식으로 거동하는지를 관찰하고 최종적으로는 설계를 위한

- 1) 정희원, 서울대학교 공과대학 공학연구소 특별연구원
- 2) 정희원, 대림산업(주) 건설사업부 사원
- 3) 정희원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수
- 4) 대우건설기술연구소 책임연구원

지침안을 마련하는 방식으로 이루어졌다.²⁾ 그러나 이러한 연구들로서 단일 라이닝 지보 시스템에 관한 연구에 그쳐 콘크리트 및 콘크리트 라이닝으로 이루어지는 복층 라이닝 시스템에 관한 연구는 Pieder³⁾의 연구에 불과하다. 이는 복층 라이닝 지보 시스템에 있어서 콘크리트 라이닝이 지보 역할을 하지 않는다는 개념에 따른 것이다. 그러나 역학적 원인으로 인한 콘크리트 라이닝 내 균열은 이러한 부분적인 지보재로서의 콘크리트 라이닝의 역할에 관한 연구의 필요성을 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 해석 프로그램을 개발하였다. 복층 라이닝 해석을 위해서는 두 라이닝 사이에 상호 거동을 모사하기 위한 새로운 인터페이스 요소를 개발·삽입하여 해석하였다. 또한 지반을 포함한 해석을 수행하여 지반의 물성, 측압계수의 변화에 대한 라이닝 지보계의 거동을 수치해석적으로 조사하였으며, 지반의 초기지압 및 공동 굴착에 따른 지압분포의 변화를 고려한 해석 알고리즘을 개발하여 해석하였다.

본 연구에서는 지반을 연속체요소(continuum element)로 가정하였으므로 지반의 불연속체(discontinuity)를 포함하는 해석을 실시하지 못했다. 따라서 암반블럭(rock block)과 같은 국부적 재하형상을 수치해석 하는 경우에는 지반을 포함하지 않는 알고리즘에서 블럭의 라이닝 재하 하중을 외부하중으로 모사하여 수치해석 할 수 있었다.

2. 복층 라이닝 거동을 위한 라이닝 인터페이스 요소

속크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 상호거동을 수치해석적으로 반영하기 위해서는 두 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 인터페이스 요소를 개발·적용함으로서 콘크리트 라이닝 거동을 수치해석적으로 연구할 수 있었다.

본 프로그램에서 개발한 인터페이스 요소는 Goodman⁴⁾에 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. 따라서 이 요소는 라이닝 요소와 마찬가지로 3개의 자유도를 갖는다.

서로 다른 물체 사이의 마찰력은 마찰요소(friction element)를 도입하므로써 설명할 수 있다. 수직변위와 전단변위는 마찰요소 내에서 선형적으로 변화한다고 가정한다. 마찰요소의 강성은 인터페이스 물성치인 법선강성(k_n)과 접선강성(k_s)에 의해 결정된다. 마찰요소의 법선응력(σ_n) 및 접선응력(σ_s)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_n &= k_n \ r_n \\ \sigma_s &= k_s \ r_s\end{aligned}\quad (1)$$

식(1)에서 r_n 및 r_s 는 각각 상대법선변위와 상대접선변위이다. Fig. 1과 같이 두께가 없는 4절점 마찰요소를 고려해 볼 때, 요소의 상단변위(u_t, v_t)와 하단변위(u_b, v_b)를 4개의 절점 변위와 적절히 결합하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}u_t &= \frac{u_{k'} + u_{l'}}{2} + \frac{x}{L} (u_{k'} - u_{l'}) \\ u_b &= \frac{u_{j'} + u_{i'}}{2} + \frac{x}{L} (u_{j'} - u_{i'}) \\ v_t &= \frac{v_{k'} + v_{l'}}{2} + \frac{x}{L} (v_{k'} - v_{l'}) \\ v_b &= \frac{v_{j'} + v_{i'}}{2} + \frac{x}{L} (v_{j'} - v_{i'})\end{aligned}\quad (2)$$

따라서 상대변위벡터 $\{r\}$ 은 다음과 같이 된다.⁵⁾

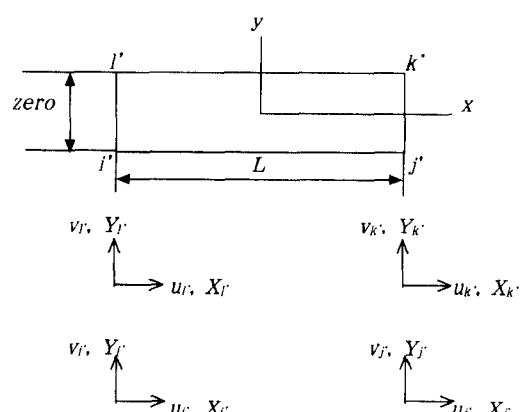


Fig. 1. Friction element

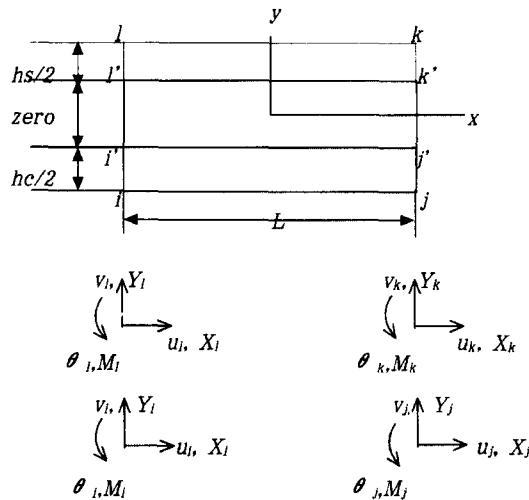


Fig. 2. Developed lining interface element

$$\{r\} = \begin{pmatrix} r_s \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_t - u_b \\ v_t - v_b \end{pmatrix} \quad (3)$$

Fig. 2에 개발된 마찰요소를 나타내었다. i, j 절점은 하부 라이닝 범요소에 위치하고 k, l 절점은 상부라이닝 범요소에 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.

$$\begin{aligned} u_{i'} &= u_i - \theta_i \frac{h_c}{2} \\ u_{j'} &= u_j - \theta_j \frac{h_c}{2} \\ u_{l'} &= u_l + \theta_l \frac{h_s}{2} \\ u_{k'} &= u_k + \theta_k \frac{h_s}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 h_s 및 h_c 는 각각 속크리트 및 콘크리트 라이닝의 타설두께이며, θ 는 절점의 각 변위이다. 이들 4절점의 가상변위를 식(2)와 적절히 결합하고, 라이닝의 요소 길이에 대해 적분하면 필요한 인터페이스 강성행렬을 구할 수 있다.⁶⁾

3. 수치해석을 위한 제반 조건 및 이론

3.1 수치해석에 사용된 모든 요소

수치해석에 사용된 모든 요소는 Fig. 3과 같다. 지반

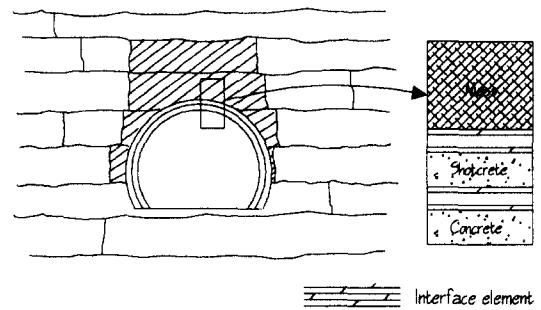


Fig. 3. All elements used in the numerical analyses

요소는 4절점 2자유도 연속체 요소로서 탄소성 해석이 가능하며, 소성기준은 Mohr-Coulomb 기준을 적용하였다. 속크리트 및 콘크리트 라이닝 요소는 2절점 3자유도 평면 프레임 요소(plane frame element)로서 탄소성 해석이 가능하며, 소성기준은 극한 휨모멘트(ultimate flexural moment) 기준을 적용하였다.⁶⁾ 지반과 속크리트를 연결하는 인터페이스 요소는 하중 전달을 위한 요소이다. 사용한 인터페이스 요소는 King⁵⁾에 의해 개발된 4절점 요소이다. 2개의 절점은 지반과 연결되어 있으며 2자유도를 갖는다. 2개의 절점은 속크리트와 연결되어 있으며 3자유도를 갖는다.⁵⁾ 속크리트와 콘크리트 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소는 2절에서 소개한 요소로서, 4절점 요소이다. 2개의 절점은 속크리트에, 2개의 절점은 콘크리트 라이닝에 연결되어 있어 모두 4개의 절점을 갖는다. 속크리트의 하중을 콘크리트 라이닝에 전달한다.

3.2 초기 지압 및 지보의 시차적 적용을 고려한 터널 라이닝 해석을 위한 이론

라이닝 지보시스템이 기존 터널의 건전도 평가에서 가 아니라, 사전 설계단계에서의 문제로 떠오를 때는 여러 가지 다른 변수들이 중요하다. 예를들면, 현지 지반의 초기응력상태, 굴착방법, 속크리트 라이닝의 설치시기, 콘크리트 최종 라이닝의 설치시기 등이다. 이러한 변수들중 굴착방법은 각기 터널에 따라 다르고, 시공기술과 관련이 깊기 때문에 이를 사전 설계단계에서 해석에 반영하는 것은 거의 불가능하다. 물론 터널 막장면의 단계적 굴착에 따른 효과를 고려할 수 있으나, 그 효용성에도 불구하고 시공상의 여러 난제로 인하여 가치가 크지는 않다. 본 연구에서는 위의 변수들중 해석에 반영할 수 있는 1) 굴착진 지반의 초기응력 상태, 2) 굴착후 속크리트 설치시까지의 지반의 이완, 3) 속크

리트 설치후 최종 콘크리트 라이닝의 설치시까지의 이완, 4) 콘크리트 라이닝에 걸리는 2차 지압을 고려할 수 있는 해석시스템을 개발하였다.

먼저, 굴착전 지반의 초기응력 상태는 해석하고자 하는 지반에 중력하중(gravitational loading)을 외부하중으로 평형상태로 만든 후의 응력상태로서, 만약 초기지압의 측압계수 값이 구해져 있다면, 이에 맞게 조정하면 된다. 이 때 생긴 초기 지반의 변위는 초기응력을 구하기 위한 것이므로 0으로 조정한다. 다음, 터널의 굴착을 수행한다. 굴착으로 인하여 터널 벽면에 불평형력(unbalanced force)이 발생한다. 그 불평형력을 완전히 해소시키는 과정이 바로 마치 터널이 굴착되고 난 후의 터널 거동이 안정화되는 것과 등가이다. 따라서 이 불평형력을 3개로 나누어 각각의 이완단계(relaxation step)에 따라 적절한 지보재를 적용하는 과정이 바로 지보의 시차적 적용을 고려하는 방법이다. 첫번째 이완단계는 솗크리트가 설치되기 전까지의 시간을 나타내고, 두번째 이완단계는 솗크리트 타설후의 콘크리트 라이닝 타설전까지의 시간을 나타내고, 세번째 이완단계는 콘크리트 라이닝이 타설된 후 터널이 안정화되기까지의 시간을 나타낸다.

터널의 굴착으로 인하여 터널 벽면에 발생하는 불평형력을 계산하기 위한 방법은 이연규⁷⁾ 등에 의해 잘 정리되어 있다. 본 프로그램에서는 이러한 불평형력 계산법을 이용하였다.

4. 터널 라이닝 모형 실험과 수치해석의 비교 검토

본 절에서는 터널 라이닝 모형 실험¹⁾과 같은 라이닝

물성, 하중조건, 구속조건을 통하여 수행한 수치해석 결과를 비교·검토 하였다. 자료의 비교는 균열하중, 균열위치, 최대처짐량, 균열위치인 한계단면의 하중-처짐량 곡선 결과를 통하여 이루어졌다. 라이닝 제작단계에서 동시에 제작, 성형한 공시체를 이용하여 구한 라이닝 콘크리트의 물리적 성질을 수치해석에 가감없이 그대로 반영하였다. 즉 라이닝의 일축압축강도, 휨파괴 강도, 단위중량, 관성 모멘트, 단면적, 라이닝 축방향 해석 길이 등을 수치해석에 사용하였다.

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 2절에서 소개한 인터페이스 요소의 타당성을 입증하기 위하여 복층 라이닝 시험체의 결과만 소개한다. 터널 모형실험에 사용된 표준형은 경부고속 철도 표준단면 Type V였다. 모두 원형(prototype)의 1/10의 크기로서, 속크리트 라이닝은 3 cm, 콘크리트 라이닝은 6 cm이다. Table 1에는 모형 시험체 실험 결과 및 수치해석 결과를 균열하중, 균열위치, 최대처짐량의 항으로 나타내었다. Fig. 4에는 편심재하가 이루어진 DL-4 시험체에 대한 한계단면의 지보하중-처짐곡선을 나타내었다. 시험결과와 수치해석 결과는 거의 유사하다. 균열이 발생한 균열하중, 균열발생 위치, 균열

Table 1. 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 Deflection : similar
	Numerical	1.84	Vault	0.97	
DL-4	Experiment	0.77	R43*	1.28	Cracking : similar Deflection : similar
	Numerical	0.82	R45*	1.59	
DL-21	Experiment	0.85	Vault	1.06	Cracking : similar Deflection : similar
	Numerical	0.95	Vault	0.88	
DL-6	Experiment	1.06	Vault	1.19	Cracking : different Deflection : different
	Numerical	0.76	Vault	0.51	

* : means the arch degrees on left (L) or right side (R) away from the vault.

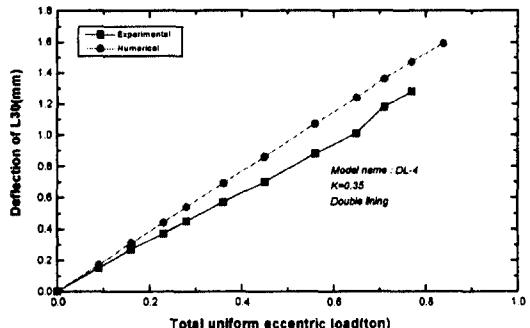


Fig. 4. Load-deflection curve of model DL-4 on the critical section (comparison of model test with numerical analysis)

하중에서의 최대처짐량 등이 매우 유사하였다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 지보하중-처짐량 곡선은 거의 일치하였다. 따라서 본 복층 라이닝 해석 프로그램은 실제 복층 라이닝의 역학적 거동을 충분히 반영하는 것으로 생각된다.

이러한 비교로부터 본 연구에서 개발한 인터페이스 요소의 법선 강성은 다음과 같이 구할 수 있음을 알 수 있었다.

$$K_n = \frac{\overline{E_t}}{h \cdot R^2} \times b \quad (5)$$

여기서, h 는 복층 라이닝의 총 두께이고, R 은 콘크리트 터널 라이닝의 내부반경이다. b 는 해석깊이 즉, 축방향의 해석 길이고, $\overline{E_t}$ 은 두께를 고려한 평균 탄성계수이다. t_s 및 E_s 는 각각 속크리트 라이닝의 두께 및 탄성계수라 하고, t_c 및 E_c 는 각각 콘크리트 라이닝의 두께 및 탄성계수라면, 평균 탄성계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{E_t} = \frac{t_s E_s + t_c E_c}{t_s + t_c} \quad (6)$$

접선강성은 통상 $0.1\sim1.0 k_n^{(5)}$ 을 사용하나 평균 $0.5 k_n$ 을 사용할 수 있다.

5. 복층 라이닝 변수해석 결과 및 검토

본 절에서는 복층 라이닝에 대하여 여러 가지 파라미터 변화를 통하여 각각의 라이닝이 어떻게 거동하는지를 조사하였다. 파라미터들은 두 라이닝 사이에 존재하는 인터페이스 요소의 접선/법선 강성비, 속크리트 라이-

닝의 두께 변화, 콘크리트 라이닝의 두께 변화, 지반 물성의 변화이다. 원형은 경부고속전철 표준단면 패턴-I이다. 따라서 표준 속크리트의 두께는 10 cm, 콘크리트 라이닝의 두께는 40 cm이다. 속크리트 및 콘크리트 라이닝의 물성은 양생 28일 경과된 보통 콘크리트의 물성을 사용하였다. 총 지보계의 내부반경은 710 cm이다.

5.1 인터페이스 접선/법선 강성비에 따른 복층 라이닝의 거동

속크리트 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 속크리트 천단의 축력은 지수함수적으로 감소하는데 최대 약 15% 감소하였다. Fig. 5에 강성비의 변화에 따른 속크리트의 항복 응력을 나타내었다. 특히 콘크리트 천단의 처짐, 두 라이닝의 휨모멘트량은 50% 이상 선형적으로 감소하였다. 그러나 속크리트 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, 속크리트의 처짐량 또한 감소한다는 것을 알 수 있다. 달리 표현하면, 두 라이닝의 접촉면이 거칠수록 내하력이 오히려 감소한다는 사실을 의미한다. 이는 속크리트와 지반 사이의 접선 마찰력이 지반 하중을 분담함으로서 전체 지보

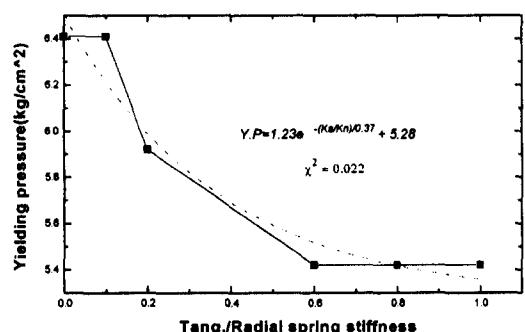


Fig. 5. Yielding pressure of the support system with the stiffness ratio of the interface element between shotcrete and concrete lining

시스템의 내하력이 증가한다는 사실과는 반대이다.

5.2 솗크리트의 두께 변화에 따른 복층 라이닝의 거동

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

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

$$\begin{aligned} Y_p (\text{yielding pressure}) &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\ \text{deflection of shotcrete} &\propto (\Delta t_{shot}) \\ T_s (\text{thrust of shotcrete}) &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\ M_s (\text{moment of shotcrete}) &\propto (\Delta t_{shot})^4 \\ \text{deflection of concrete} &\propto (\Delta t_{shot})^2 \\ T_s (\text{thrust of concrete}) &\propto 2(\Delta t_{shot}) \\ M_s (\text{moment of concrete}) &\propto (\Delta t_{shot})^5 \end{aligned} \quad (7)$$

5.3 콘크리트 라이닝의 두께 변화에 따른 복층 라이닝의 거동

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

Fig. 6에는 콘크리트 라이닝 두께비에 따른 속크리트의 항복응력을 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 표준두께 40 cm에 가까워짐에 따라 항복 외부하중은 큰 변화를 보이지 않다가 35 cm에서 급격한 증가를 보였다. 이러한 경향은 콘크리트 천단의 축력에서도 나타

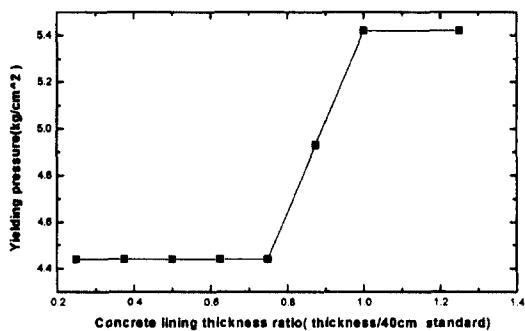


Fig. 6. Yielding pressure of the support system with the thickness ratio of the concrete lining (shotcrete thickness is fixed)

났다. 비슷한 경향을 보이는 것은 속크리트 천단의 처짐량으로서 계속 감소하다가 35 cm에서 갑자기 상승하였다. 콘크리트 천단의 처짐량 및 축력은 지수함수적으로 감소하는데, 35 cm 정도부터 큰 차이를 보이지 않는다. 두 라이닝의 휨모멘트는 모두 계속해서 상승한다.

따라서 항복 외부하중 및 콘크리트 처짐량의 관점에서 볼 때 40 cm는 적절한 두께인 것으로 판단된다. 경제적인 대안으로서 35 cm도 모든 면에서 40 cm와 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 40 cm 이상으로 두께를 증가시킨다 하더라도 콘크리트 천단의 처짐량은 감소하지만 계의 내하력 및 속크리트의 축력 등은 큰 차이가 없어 비경제적이라는 것을 의미한다.

5.4 지반과 속크리트의 휨강성비 및 인터페이스의 접선/법선 강성비에 따른 거동

지반과 속크리트 및 콘크리트 라이닝을 동시에 해석하는 경우에 대하여 변수해석을 실시하여 복층 라이닝 거동을 관찰하였다. 이는 5.1절의 결과를 보충함과 동시에 지반과 속크리트의 휨강성비(flexibility ratio)에 따른 결과를 나타내기도 한다. 지반과 라이닝 사이의 휨강성비는 다음과 같이 정의한다.⁸⁾

$$F = \frac{E_m \cdot (1 - v_l^2) \cdot R^3}{6 E_l I_l \cdot (1 + v_m)} \quad (8)$$

여기서, m 은 지반 매체에 대한 첨자, l 은 라이닝에 대한 첨자이다. E 는 라이닝 또는 지반의 탄성계수, v 는 포아

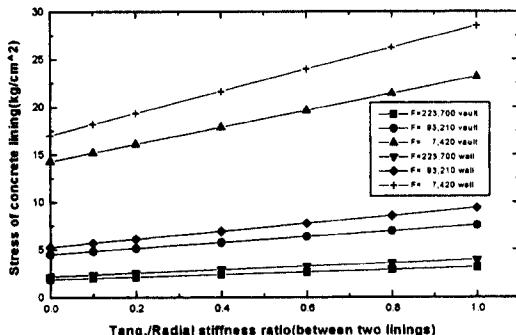


Fig. 7. Stresses of concrete lining with both the variation of interface stiffness ratio between two linings and the variation of flexibility ratio F

송비이다. R 은 라이닝의 내부 반지름, I 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 변화시킴으로써 F 값은 다양하게 변화한다.

Fig. 7에는 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 증가함으로서 양호하지 못한 결과를 도출한다. 이는 5.1 절에서 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 가까울 수록 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.

5.5 초기지압 및 지보의 시차적 적용을 고려한 복층 라이닝의 거동

3.2 절에서 설명한 바와 같이 지반의 굴착, 지보 타설의 시차적 적용을 고려한 유한 요소 코드를 구현하여 복층 라이닝의 거동을 조사하였다. 솔크리트 및 콘크리트 라이닝과 같은 지보 타설 시기는 터널 굴착으로 인하여 벽면에 발생하는 불평형력을 순차적으로 이완시키는 단계에 따라 이루어진다.¹⁾

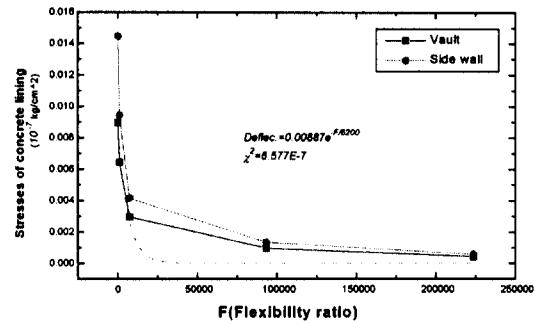


Fig. 8. Stresses of concrete lining with the flexibility ratio, F on both vault and side wall

먼저 지반의 물성 변화 즉, 지반의 암종이 변화함에 따른 라이닝의 거동을 조사하였다. 지반의 물성변화는 휨강성, F 에 의해 반영되었다. 측압계수는 0.3으로 고정하였으며, 지반과 솔크리트 사이에 존재하는 인터페이스 및 두 라이닝 사이에 존재하는 인터페이스의 접선/법선 강성비는 1.0으로 고정하였다. Fig. 8에는 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 솔크리트 물성을 기준으로 할 경우, 기준 25,000은 탄성계수의 범위가 $40\sim100\times10^3$ t/m² 인 보통암 수준이다. 따라서 지반이 보통암 이하의 불량한 지반일 경우 콘크리트 응력은 지반의 종류에 따라 크게 민감하다는 사실을 알 수 있다. 이러한 경향은 솔크리트 및 콘크리트 라이닝의 처짐량, 응력, 축력, 휨모멘트 등의 모든 물리량에서도 같은 경향을 보였다.

다음으로 측압계수의 변화에 따른 복층 라이닝 거동을 조사하였다. 먼저 솔크리트 라이닝의 거동을 기술한다. 측압계수가 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 측압계수 1.0을 기준으로 경향이 역전되었다. 단면력인 축력 및 휨모멘트의 경우에도 측압계수 1.0을 기준으로 경향이 역전되는 현상은 유사하였다. 이에 반해 콘크리트 라이닝의 거동은 다른 경향을 보았다. Fig. 9에는 측압계수의 변화에 따른 휨모멘트의 분포를 나타내었다. 청축은 아치각도로서 0도가 천단을 나타내며 음 및 양의 부호는 각각 좌우측으로의 아치각도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 측압계

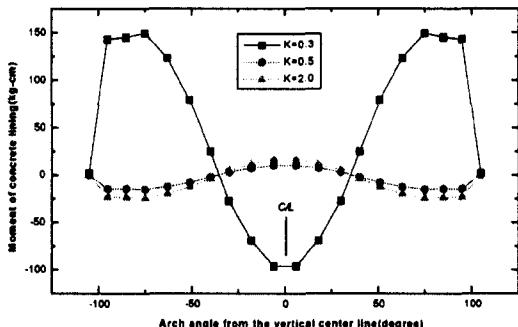


Fig. 9. Flexural moment distribution of the concrete lining in the double lining with the ratio of horizontal to vertical stress

수가 0.3인 경우에는 측벽 및 천단이 흠모멘트가 가장 크고 45도 인근에서 가장 작다. 마찬가지로 측압계수가 0.5 및 2.0의 경우에는 그 경향이 마찬가지이지만 부호는 정반대라는 사실에 유의해야 한다. 즉 모든 경우에 한계단면은 측벽부와 천단일 가능성이 크지만 측압계수가 0.5를 기준으로 부호가 역전되어 흠모멘트 작용방향이 역전되는 현상을 볼 수 있었다. 이러한 경향은 콘크리트의 측력 및 전단력의 경향과 동일하다. 또한 콘크리트 라이닝의 처짐벡터에서도 같은 경향을 보였다. 따라서 측압계수의 변화에 따른 솗크리트 라이닝의 거동은 일반적으로 생각되는 1.0을 기준으로 물리량의 부호가 역전되지만, 콘크리트 라이닝의 거동은 측압계수 0.5 이상부터 역전된다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결론은 현장 적용사례에서도 똑같이 조사되었다.

6. 현장 적용 사례 및 검토

본 연구에서 개발된 유한 요소 프로그램의 현장터널에 대한 활용성을 검증하기 위하여 변위 및 응력 계측

이 수행된 경부고속철도 단면을 선정하여 수치해석을 수행하였다. 특히 해석의 정도를 조사하기 위하여 터널 라이닝의 변위 및 응력이 계측되고, 지중변위 및 천단 침하가 계측된 단면에 대하여 수치해석을 수행하였다.

6.1 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 제시한 복선반원형 표준단면으로 설계되었으며, 내부 반경은 7.1 m로서 각각 지반의 RMR 치에 따라서 지보페턴이 상이하다. 모든 경우에 콘크리트 라이닝의 두께는 40 cm로 일정하며 속크리트 라이닝 두께는 10~25 cm로 다양하다.

지질개요는 다음과 같다. 즉, 선캠브리아기의 편마암류와 이를 관입한 중생대의 화강암류가 지배적으로 분포하고, 이 화강암을 염기성 암맥이 재 관입하였고, 또한 제 4기의 충적층이 꾀복하고 있다. 해석대상 단면은 두 단면으로서 104K200, 103K950 지점으로, 단면 104K 200에서는 지표로부터 5 m 까지는 실트질 모래가 우세하며, 충서적으로 풍화암, 연암, 경암이 분포하고 있다. 터널 상부암의 두께는 25 m 가량이다. 단면 103K950은 마찬가지로 지표로부터 5 m 까지는 실트질 모래가 우세하며, 충서적으로 연암, 경암이 분포하고 있으나 주로 연암이 우세하다. 지표까지의 터널 상부 암의 두께는 터널 반경과 비슷한 약 15 m 가량이다. 수치해석에 사용된 지층 및 지보재의 물성은 Table 2와 같다.

6.2 수치해석 결과와 계측치의 비교

Table 3에 각각 대표계측 단면 104K200 및 103K 950에 대하여 계측결과 및 수치해석 결과를 나타내었다. 대표 단면 104K200의 천단침하 및 지중변위값을 제

Table 2. Physical properties of ground and support systems

	Type	Elastic modulus (kg/cm ³)	Unit weight (kg/cm ³)	Poisson's ratio	Cohesion (kg/cm ²)	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 = 20 cm ² , I = 666.7 cm ⁴		
	Concrete	260,000			Ac = 40 cm ² , I = 5333.3 cm ⁴		

Table 3. Comparison of measurements with numerical results in two standard sections ($K = 0.5$)

Section	Vault subsidence (mm)		Horizontal convergence (mm)		Shotcrete compressive stress (kg/cm^2)				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. : Measurements

외하고 나머지 모든 물리량은 수치해석 결과와 계측결과가 매우 유사하다. 104K200의 천단침하량은 실제 계측결과가 16 mm로서 수치해석 결과의 1.16 mm와는 10배 이상 차이를 보이며, 터널 천단으로부터 1.5 m 떨어진 지반내 지중변위량은 계측결과가 13.84 mm로서 수치해석 결과의 3.88 mm에 비해 4배 이상 차이를 보인다. 이는 본 대표단면에서는 천단 상부의 국부적 지질 약화로 인한 사하중이나 암반블러의 생성으로 인한 국부적 재하가 이루어진 가능성이 있는 것으로 사료된다. 이에 비해 대표단면 103K950에서는 터널 천단의 침하량이 5.00 mm로 계측되고, 수치해석 결과는 4.83 mm로 나타나 거의 유사함을 알 수 있다. 마찬가지 현상이 지중변위량에서도 나타나는데 터널 천단으로부터 1.5 m 떨어진 지반내 지중변위량은 5.30 mm로서 수치해석 결과의 4.58 mm와는 유사함을 알 수 있다.

지보재의 물성인 솗크리트의 압축응력은 두 단면 모두 천단과 측벽부에서 계측결과와 수치해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 모든 경우에 속크리트 압축응력은 허용압축응력 $52 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에 크게 미치지 못함을 알 수 있다. 여기서는 콘크리트 라이닝내 응력 및 변위값이 계측되지 않았기 때문에 그 값을 비교할 수 없었다.

6.3 부가적인 수치해석 결과와 천단균열 억제를 위한 수치해석 결과 및 검토

본 절에서는 위의 수치해석 결과를 이용하여, 속크리트 및 콘크리트 라이닝의 거동을 비교하고자 한다. Fig. 10과 Fig. 11에는 각각 속크리트 및 콘크리트 라이닝의 처짐벡터를 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 속크리트는 지반의 아치력에 의해 천단에서 가장 큰 아래방향의 처짐을 나타내고 측벽부로 갈수록 처짐량이 작아지는 분포를 나타내고 있다. 그러나 콘크리트 라이닝의 경우에는 다른 양상을 보인다. 콘크리트 라이닝의 어

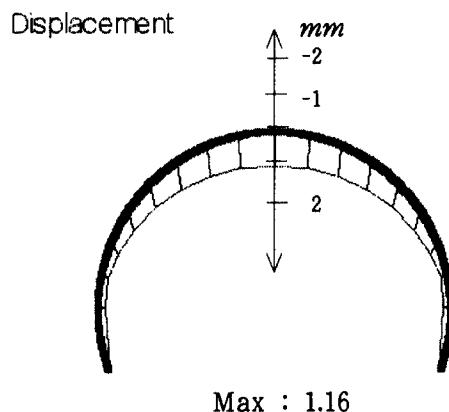


Fig. 10. Displacement vector distribution of the shotcrete in the double lining support system ($K = 0.5$)

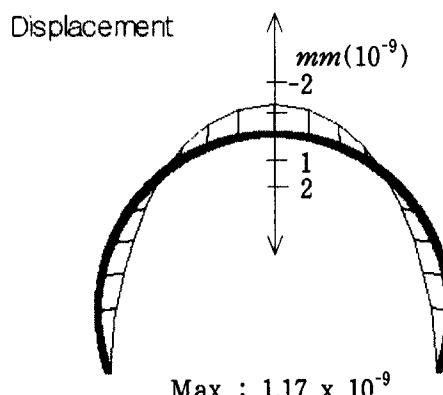


Fig. 11. Displacement vector distribution of the concrete lining in the double lining support system ($K = 0.5$)

깨부위, 측벽 및 각부에서는 공동내부로 처짐이 발생하나 천단부위에서는 터널 상부로의 변위가 발생한다. 이 범위는 천단을 기준으로 약 30° 의 범위로서 대부분의 터널 콘크리트 라이닝 종균열이 천단으로부터 약 20° 내외에서 발생한다는 사실¹¹과 거의 일치하는 범위이다.

Table 4. Numerical investigation methods to prevent cracking in the vicinity of crown of the concrete lining

Item	Real method	Type	Numerical method
Contact surface between shotcrete and concrete lining	Reduce the contact stiffness of side wall between two linings to prevent load from transferring to the concrete lining	(a)	Reduce the stiffness of lining interface by 90%
Concrete lining	Increase locally the thickness of side wall of the concrete lining	(b)	Increase from 40 to 50 cm for the concrete lining side wall
	Increase locally the thickness of crown of concrete lining	(c)	Increase from 40 to 50 cm for the concrete lining vault
	Reinforce the tension fiber of the concrete lining using steel wire mesh etc.	(d)	-
Shotcrete	Increase locally the thickness of side wall of the shotcrete	(e)	Increase from 40 to 50 cm for the shotcrete side wall

본 해석단면의 측압계수는 0.5 이었다. 따라서 5.5절의 결과와 유사한 경향을 보이는데, 콘크리트 라이닝의 처짐이 천단 부위에서 다른 부위와는 반대로 속크리트 쪽으로 향하는 현상을 보인다. 이러한 천단 부위에서 속크리트의 처짐과 콘크리트 라이닝의 충돌은 결국 마찰효과를 발생시킬 것이며, 속크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 마찰이 지보계의 내하력을 감소시킨다는 5.4절의 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.

다음으로 이러한 콘크리트 라이닝 천단 균열 발생 억제를 위한 여러 방법들을 적용함으로서 수치해석적으로 그 효과를 조사하였다. 본 해석에서 사용한 방법들은 Table 4와 같다. 여기서는 정량적인 비교보다는 그 경향을 보기 위한 정성적인 비교를 한다. 따라서 접촉강성의 줄인 비율, 라이닝의 두께 증가량, 속크리트 두께 증가량 등은 어느 기준에 따라 선정되었다기 보다는 그 효과를 보기 위하여 적절히 합리적으로 선택되었다. 따라서 접촉강성은 1/10으로 저하시켰으며, 라이닝 두께는 국부적으로 10 cm 증가시켰다.

처짐베타, 축력, 휨모멘트의 관점에서 그 결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 즉, 콘

크리트 라이닝 천단의 균열발생을 억제하기 위해서는 측벽부의 속크리트와 콘크리트 라이닝 사이의 접촉강성을 저하시키는 (a)의 방법이 가장 바람직하며, 그 강성을 수치적으로 1/10로 저하시킨 경우 휨모멘트는 천단에서 1/2 수준으로 작아짐을 알 수 있었다. 차선책으로서는 콘크리트 라이닝 천단의 두께를 증가시키는 방법(c) 또한 바람직하나 처짐베타는 훨씬 커진다. 콘크리트 라이닝의 두께를 위와같이 국부적으로 25% 증가시킨 경우 휨모멘트는 1/10 수준으로 저하한다. 실제적으로 속크리트와 콘크리트 라이닝의 접촉강성을 국부적으로 저하시키는 방법으로는 방수를 위해 사이에 설치하는 부직포의 연성을 증가시키거나, 부직포외에 또 다른 연성의 충전물을 충진하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

7. 결 론

본 논문에서는 복층 라이닝 및 복층 라이닝과 지반을 동시에 해석할 수 있는 수치해석 알고리즘을 개발하여 모형 실험결과와 비교·검토하였으며, 변수해석을 실시하였다. 또한 실제 터널 현장에서 발생한 응력 및 변위 자료를 수치해석 결과와 비교하였고, 콘크리트 라이닝 천단에 발생하기 쉬운 균열의 발생원인에 대한 메커니즘 및 균열 억제 방안을 위한 대책을 제시하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 솗크리트 및 콘크리트 라이닝의 상호 작용을 수치 해석적으로 해석하기 위한 새로운 인터페이스 요소를 개발하였으며, 터널 라이닝 모형 실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하였다. 또한 이 인터페이스 요소의 법선강성을 결정하기 위한 수식을 제안하였다.

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

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

4) 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.

5) 휨강성비의 증가에 따라, 즉 지반의 경암일수록 모든 복층 라이닝의 물리량이 지수함수적으로 감소하였다. 큰 변화가 없는 시점은 보통의 지보재 물성에서 보통암 이상의 경우이다. 그러므로 보통암 이하의 지반에서는 지반의 종류에 따라 복층 라이닝 거동이 민감하다는 사실을 알 수 있었다.

6) 지반의 측압계수 변화에 따라 솗크리트 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 솗크리트와

의 마찰 현상을 알 수 있었다. 따라서 이러한 현상이 균열발생에 큰 영향을 끼침을 알게 되었다.

사 사

본 연구는 (주)대우 기술연구소의 지원아래 1997년 10월부터 1998년 10월까지 이루어졌으며, 자료제공에 협조를 아끼지 않은 연구소 관계자 여러분께 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이대혁, 김영근, 이희근, 1998, 모형실험에 의한 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지 제 8권 1호, pp.53-66.
2. El-Nahhas, 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.
3. Pieida, Liu, 1986, Model test study on double lining of tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 1 No. 1, pp.53-58.
4. Goodman, R.E., Taylor R.L. and Brekke, T.L., A model for the mechanics of jointed rock, J. of the Soil. Mech. and Found. Div. Pro. of ASCE Vol. 94, No. SM3 pp.637-657 (May, 1968).
5. 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.
6. 이대혁, 1998, 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구, 서울대학교 공과대학 공학박사학위 논문, p.292.
7. 이연규, 1994, 록볼트로 보강한 절리암반의 점소성 거동에 관한 수치해석 모델개발, 서울대학교 공과대학 공학박사학위 논문.
8. Paul, S.L., Hendron, A.J., Cording, E.J., Sgouros, G.E. and Saha, P.K. 1983 Design recommendation for concrete lining-Vol. 1 Results of model tests and analytical parameter studies, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., p. 464.