

-shotcrete 및 콘크리트 라이닝을 고려한 터널 라이닝 거동에 관한 연구 A Numerical Study on the Behavior of Tunnel Linings considering Shotcrete and Concrete Lining

이대혁¹⁾, Dae-Hyuk Lee, 김재순²⁾, Jae-Soon Kim, 김영근³⁾, Young-Geun Kim, 이희근⁴⁾, Hi-Keun Lee

¹⁾ 서울대학교 공과대학 자원공학과 박사과정

Doctor Candidate, Dept. of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University

²⁾ 서울대학교 공과대학 자원공학과 석사과정

Master Candidate, Dept. of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University

³⁾ (주)대우 건설기술연구소 토목연구실 과장

Civil research team, DaeWoo Institute of Construction Technology

⁴⁾ 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

Professor, Dept. of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : To appreciate the stability of NATM tunnels, and to investigate the behavior of double linings (shotcrete contacted with concrete lining), we developed the enable frame analysis program which involves the coupled interaction of shotcrete and concrete members, and ground loads. The program was verified by comparison with the results of model tests, representing 1/10 scale of prototypes. And thus parameter studies were investigated according to variation of tangential-normal stiffness ratio, shotcrete thickness, concrete thickness, and types of reinforcement for shotcrete linings.

KEYWORDS : Shotcrete, Concrete lining, Interface element and Plane frame analysis

1. 서론

우리 나라에서는 80년대 NATM 터널 시공법의 도입에 힘입어 터널 설계 개념 정립 및 시공실적에 있어 눈부신 성장을 이루어 오고 있다. 강지보재, shotcrete 및 콘크리트를 결합한 NATM 개념은 이제 고속전철 터널 구간에까지 활용되어 많은 시공실적을 거두고 있다. 지보 부재에 대한 시공 및 설계 개념은 이미 우리 나라에서도 표준화되어 시행되고 있으며, 터널을 둘러싼 암반 및 토사 지반의 공학적 분류를 비롯한 지반공학 분야의 체계 또한 구체화되고 있다. 그러나 노후화된 기존 터널 구조물의 평가 및 신설 공사의 설계단계에서 shotcrete 및 콘크리트가 결합된 복층 라이닝(Double lining)의 해석 및 평가 기술은 아직까지도 그 발전이 미비하다. 또한 지반을 포함한 라이닝 해석기술은 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 코드의 범용화 및 상용화에도 불구하고 복층 라이닝 해석에 있어 불충분하다. 이는 콘크리트 라이닝이 설계 목적상, 단지 보조적인 지보 수단으로서 건축한계의 구성, 지하수 차단, 외장재로서만 역할을 해야함에도 불구하고, 실제 많은 터널에서 콘크리트의 수축균열 등의 재료적 원인 및 설계 두께 및 설계물성의 외적 원인 외에 현지 지반하중을 받아 균열이 발생하는 변상 터널이 증가하는 현상에 따른 것이다. 본 연구에서는 복층 라이닝을 해석할 수 있는 유한요소 해석 프로그램을 개발하고, 지반과 라이닝을 동시에 고려하는 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서는 개발 알고리즘의 근거 및 몇 가지 검증 및 변수들의 변화를 통한 해석결과를 제시하였다.

2. 해석 알고리즘의 이론

2.1 복층 라이닝

본 알고리즘은 비선형 탄소성 복층 라이닝 해석 프로그램으로서, 각각의 라이닝 요소를 프레임 요소(Frame element)로 처리하고 두 라이닝의 상호작용을 모사할 수 있는 인터페이스 요소(Interface element)를 개발하였다.

라이닝을 프레임 요소로 처리하는 방법은 이미 알려져 있다. 평면 프레임 요소를 구현하기 위해 사용한 빔 요소는 Euler-Bernoulli 빔 이론에 근거하였다. 이 이론은 빔 단면을 가로질러 작용하는 전단변형을 고려하지 않는다. 변위법에 근간을 둔 가장 단순한 Euler-Bernoulli 빔 요소는 3차원 변위를 포함한 Hermitian 요소이다(Hinton and Owen,1979). 휨 모멘트는 요소 상에서 선형적으로 변화한다. 여기에 본 알고리즘에서는 비선형 기법을 추가하였고 라이닝 요소의 파괴를 모사하는 탄소성 해석을 추가하였다.

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. 따라서 이 요소는 라이닝 요소와 마찬가지로 3개의 자유도를 갖는다.

서로 다른 물체 사이의 마찰력은 마찰요소(friction element)를 도입함으로써 설명할 수 있다. 수직변위와 전단변위는 마찰요소내에서 선형적으로 변화한다고 가정한다. 마찰요소의 강성은 인터페이스 물성치인 수직강성(k_n)과 전단강성(k_s)에 의해 결정된다. 마찰요소의 수직응력(σ_n) 및 전단응력(τ_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 , r_s 는 각각 상대수직변위와 상대전단변위이다. 두께가 없는 4절점 마찰요소를 고려해 볼 때, 요소의 상단변위(u_t , v_t)와 하단변위(u_b , v_b)를 4 개의 절점 변위와 적절히 결합하면 상대변위벡터 $\{r\}$ 은 다음과 같이 된다.

$$\{r\} = \begin{pmatrix} r_s \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_t - u_b \\ v_t - v_b \end{pmatrix}\quad (2)$$

그림 1에 개발된 마찰 요소를 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.

$$\begin{aligned}u_{i'} &= u_i - \theta_i \frac{h_c}{2} \\ u_{j'} &= u_j - \theta_j \frac{h_c}{2} \\ u_{l'} &= u_l + \theta_l \frac{h_s}{2} \\ u_{k'} &= u_k + \theta_k \frac{h_s}{2}\end{aligned}\quad (3)$$

여기서 hs 및 hc 는 각각 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 타설두께이다. 이들 4절점의 가상변위를 식 (2)와 적절히 결합하고, 라이닝의 요소 길이에 대해 적분하면 필요한 인터페이스 강성행렬을 구할 수 있다.

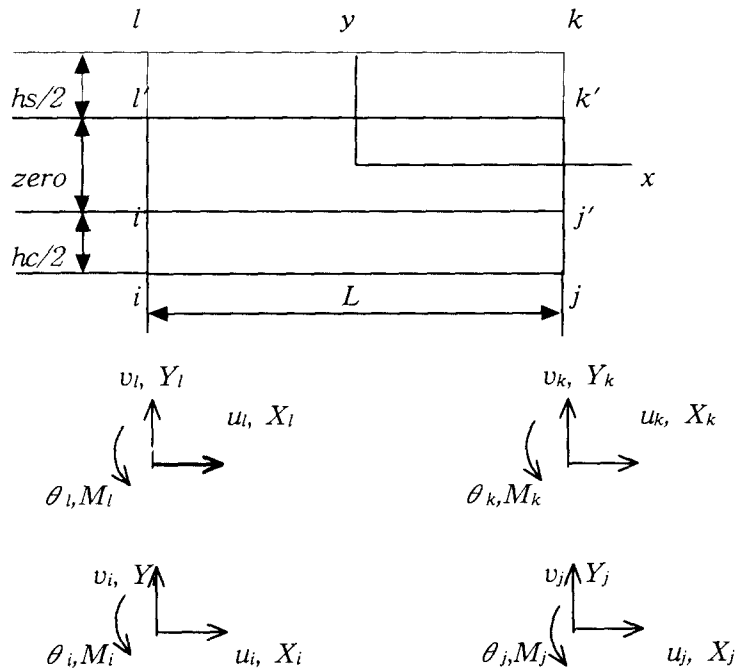


그림 1. 인터페이스요소

2.2 지반을 포함한 복층 라이닝

앞 절에서 언급한 복층 라이닝 외에, 지반을 연속체 요소로 처리하고 지반과 라이닝을 연결하는 또다른 인터페이스 요소를 도입하였다. 그 개념도는 그림 2와 같다. 라이닝과 지반을 연결하는 인터페이스 요소를 도입함으로써 지반과 라이닝의 마찰 등 상호작용에 의한 라이닝의 모멘트 및 축력의 변화를 관찰할 수 있다. 실제 지반, 인터페이스 및 라이닝은 각각 다른 물성치를 갖는다. 인터페이스 요소를 도입하므로써 이러한 물성치의 차이가 라이닝 거동에 미치는 영향을 알 수 있다.

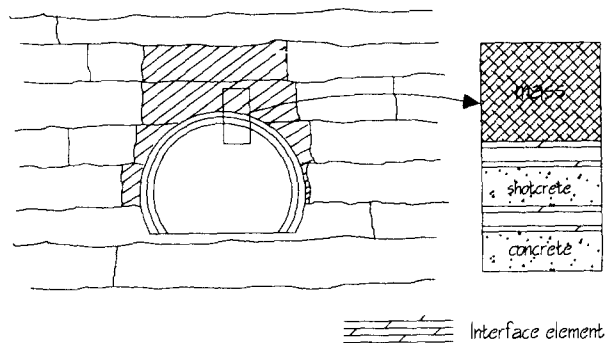


그림 2. 개발된 알고리즘이 포함하는 영역

3. 복층 라이닝 해석 알고리즘의 검증 및 결과

본 해석 알고리즘들은 모두 적절한 가정이 포함된 수학적 해를 통해 검증 되었다. 또한 보다 다양한 하중 재하 조건 및 구속조건, 물성 변화 등에 따라 적절히 복층 라이닝의 거동을 모사하는 지를 조사하기 위하여 (주)대우 건설기술연구소에서 수행한 터널 라이닝 축소 모형 실험결과를 이용하여 비교 검토하였다. 터널 모형실험에 사용된 표준 Prototype 은 경부고속철도 표준단면 Type V였다.

모두 Prototype의 1/10의 크기로서, 스틱리트 라이닝은 3cm, 콘크리트 라이닝은 6cm이다. 표 1에는 모델 실험 결과 및 수치해석 결과를 균열하중, 균열위치, 최대처짐량(Deflection)의 향으로 나타내었다. 그림 3은 편심재하가 이루어진 DL-4 모델에 대한 한계단면(Critical section)의 지보하중 및 처짐곡선을 나타내었다.

표 1. 복층 라이닝에 대한 모형 시험 결과 및 수치해석 결과의 비교

시 험 체	구 분	균열하중(ton)	균열위치	최대처짐량(mm)	비 고
DL-2	실 험	1.44	천단	1.03	균열하중 차이 처짐량 유사
	수치해석	1.84	천단	0.97	
DL-4	실 험	0.77	R43	1.28	균열하중 유사 처짐량 유사
	수치해석	0.82	R45	1.59	
DL-21	실 험	0.85	천단	1.06	균열하중 유사 처짐량 유사
	수치해석	0.95	천단	0.88	
DL-6	실 험	1.06	천단	1.19	균열하중 유사 처짐량 차이
	수치해석	0.76	천단	0.51	

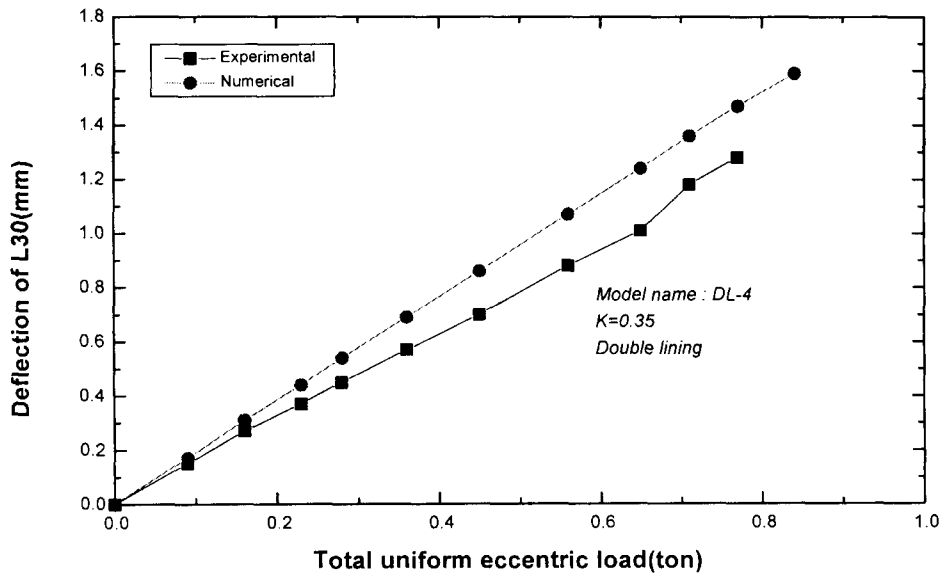


그림 3. DL-4 모델에 대한 한계단면의 지보하중-처짐량 곡선

표 1 및 그림 3에서 보는 바와 같이, 시험결과와 수치해석 결과는 거의 유사하다. 균열이 발생한 균열

하중, 균열발생 위치, 균열하중에서의 최대처짐량등이 매우 유사하였다. 또한 그림 3에서 보는 바와 같이 시험 모델과 수치해석 결과에서 지보하중-처짐량 곡선은 거의 일치하였다. 따라서 본 복층 라이닝 해석 프로그램은 실제 복층 라이닝의 역학적 거동을 충분히 반영하는 것으로 사료된다.

그러나 실제 복층 라이닝은 시차적으로 슛크리트가 타설된 후 슛크리트가 1차 지보 부재로서 내압을 받으며, 어느 정도 수렴이 된 후 콘크리트 라이닝이 타설되기 때문에 동시에 같은 지보하중을 받지 않는다. 따라서 이러한 시차적 고려를 수행하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 지반과의 결합을 통하여, 현지 지반의 초기 지압하에서 터널이 굴착되고, 굴착된 터널에 슛크리트 및 콘크리트가 시차적으로 적용되는 현장적 여건을 감안한 수치해석이 가능한 알고리즘을 개발하였다.

4. 복층 라이닝의 변수 해석

여러 가지 터널을 구성하는 변수의 변화에 따라 복층 라이닝이 어떠한 방식으로 거동하는지를 살펴보기 위하여 Parameter 해석을 수행하였다. 변화하는 변수는 1) 인터페이스 접선 대 법선 강성비의 변화, 2) 콘크리트 라이닝의 두께 변화, 4) 슛크리트 라이닝의 두께 변화, 5) 용접강선망(Welded wire mesh)의 효과 등이다. 라이닝의 물성은 근래 현지 터널에서 사용되고 있는 보통 콘크리트 및 슛크리트 물성을 사용하였고, 대상 Prototype은 경부고속전철 터널 표준단면에 대하여 수행하였다. 하중 재하조건은 모든 슛크리트면에 등분포 균등하중이 작용하는 것으로 하였다.

4.1 인터페이스 접선/법선 강성비의 변화

보통 접선강성은 법선강성의 0.1 ~ 1.0 수준으로서 매끄러운 접촉면을 갖는 경우 0.1에 가깝고, 거칠수록 1.0에 가깝다. 따라서 접선 대 법선 강성비의 변화를 통하여 항복응력, 슛크리트 및 콘크리트 천단의 처짐, 축력(Axial force or Thrust), 휨모멘트의 변화를 조사하였다. K_s/K_n 이 0.0에서 1로 변화함에 따라 라이닝이 항복하는 외부하중 및 슛크리트 천단의 축력은 지수함수적으로 감소하는데 최대 약 15% 감소한다. 그러나 슛크리트 천단의 처짐량 및 콘크리트 천단의 축력은 7% 상승한다. 콘크리트 천단의 처짐, 두 라이닝의 휨모멘트량은 50%이상 선형적으로 감소한다. 따라서 두 라이닝의 접촉면이 매끄러울수록 균열에 대한 내하력은 증가하며, 슛크리트의 처짐량 또한 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 굴착 터널의 벽면의 여굴을 최대한 줄이는 것이 가장 좋다는 것을 암시하는 것으로서 일반적인 사항이다.

4.2 콘크리트 라이닝의 두께 변화

스�크리트 두께 10cm, 콘크리트 두께 40cm인 표준단면 I에 대하여 콘크리트 두께를 표준 두께 40cm에 대하여 0.2에서 1.3배로 증가함에 따른 라이닝 거동을 조사하였다. 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. 콘크리트 라이닝 두께 증가에 따른 복층 라이닝 거동의 변화(천단기준)

콘크리트 라이닝 두께	항복외부응력 (kg/cm ²)	스�크리트 처짐(cm)	콘크리트 처짐(cm)	스�크리트 축력(kg)	콘크리트 축력(kg)	스�크리트 휨모멘트 (kg-cm)	콘크리트 휨모멘트 (kg-cm)
0.25(10cm)	4.44	3.23	0.613	5112.6	40.28	4.33	34.13
0.375(15cm)	4.44	2.9	0.238	5125.6	27.43	29.59	58.39
0.5(20cm)	4.44	2.77	0.111	5123.5	29.35	35.04	63.17
0.625(25cm)	4.44	2.73	0.0587	5125.4	27.4	40.30	68.08
0.75(30cm)	4.44	2.72	0.0357	5129.4	23.6	47.13	74.53
0.875(35cm)	4.93	3.02	0.025	5701.3	24.07	56.69	86.82
1(40cm)	5.42	3.34	0.019	6276.2	21.75	71.49	102.8
1.25(45cm)	5.42	3.36	0.00996	6278.5	19.32	76.79	109.4

표에서 보는 바와 같이 표준두께 40cm에 가까워짐에 따라 항복 외부하중은 큰 변화를 보이지 않다가 35cm에서 급격한 증가를 보인다. 이러한 경향은 숯크리트 천단의 축력에서도 나타난다. 비슷한 경향을 보이는 것은 숯크리트 천단의 처짐량으로서 계속 감소하다가 35cm에서 갑자기 상승한다. 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 35cm 도 모든 면에서 40cm 와 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 4는 콘크리트 처짐량을 도시한 것이다.

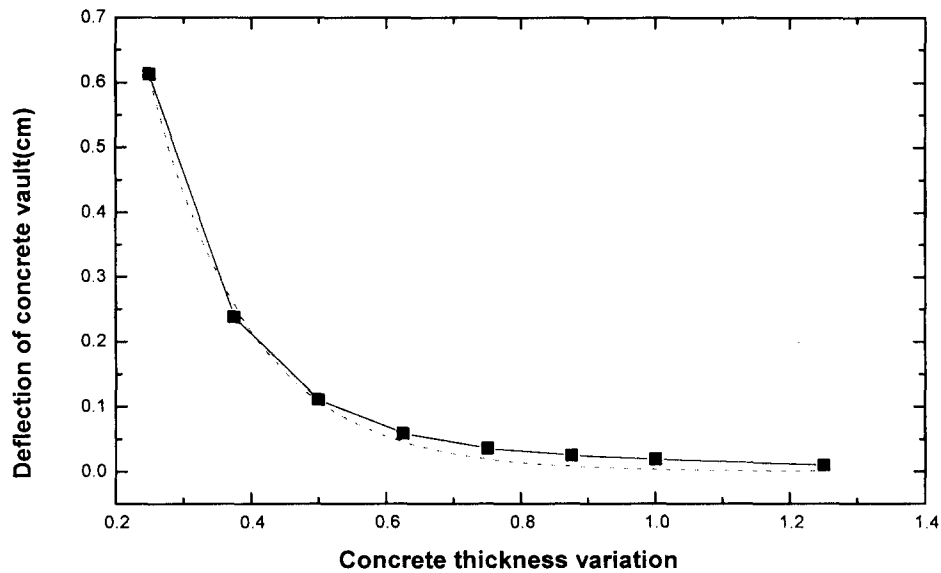


그림 5. 콘크리트 두께 변화에 따른 콘크리트 천단의 처짐량 변화(표준두께 40cm 기준)

4.3 숯크리트 라이닝 두께의 변화

숯크리트 라이닝은 일차적으로 외부하중을 지보하기 때문에, 라이닝 두께 변화에 라이닝 거동이 민감하다. 표준단면 I의 숯크리트 라이닝 두께인 10cm에 대해 5, 15, 20cm로 변화함에 따른 라이닝 거동의 변화를 조사하였다. 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. 숯크리트 라이닝 두께 증가에 따른 복층 라이닝 거동의 변화(천단기준)

숯크리트 라이닝 두께	항복외부응력 (kg/cm ²)	숯크리트 처짐(cm)	콘크리트 처짐(cm)	숯크리트 축력(kg)	콘크리트 축력(kg)	숯크리트 휨모멘트 (kg-cm)	콘크리트 휨모멘트 (kg-cm)
0.5(5cm)	1.97	2.27	0.003	2272	18.26	5.03	2.41
1.0(10cm)	5.42	3.34	0.019	6276	21.75	71.49	102.8
1.5(15cm)	8.87	4.24	0.054	10282	23.4	252.2	474.9
2(20cm)	13.8	5.82	0.088	16005	24.29	180.4	942.4

표에서 보는 바와 같이 슛크리트 라이닝 증가에 따라 모든 값이 급격히 증가한다. 특히 항복 외부응력 및 슛크리트 축력은 7배 상승한다. 콘크리트 처짐량, 두 라이닝의 모멘트는 모두 크게 증가하는 반면, 슛크리트 처짐량 및 콘크리트 축력은 큰 변화를 보이지 않는다. 예상했던 바와 같이 슛크리트의 증가는 항복응력등을 크게 증가시키고, 콘크리트 라이닝의 처짐량 및 휨모멘트 등을 더욱 크게 증가시킨다. 따라서 슛크리트 두께는 타설상의 여건도 고려해야 하지만, 두께 증가만이 전지전능한 것이 아님을 알 수 있고 더불어 설비되는 강지보공에 대한 해석을 겸해야 정확히 해석할 수 있음을 알 수 있다.

4.4 슛크리트 라이닝 용접강선망 보강에 따른 효과

표준단면 2 및 3의 경우 록볼트(Rock bolt) 지보재가 추가로 타설되지만, 이를 제외하고 슛크리트 라이닝에 용접강선망이 보강되는 경우의 효과를 관찰하였다. 표 4는 이러한 보강에 따른 라이닝 거동을 나타내고 있다.

표 4. 슛크리트 라이닝 보강에 따른 복층 라이닝 거동의 변화(천단기준)

Type	항복외부응력 (kg/cm ²)	스�크리트 처짐(cm)	콘크리트 처짐(cm)	스�크리트 축력(kg)	콘크리트 축력(kg)	스�크리트 휨모멘트 (kg-cm)	콘크리트 휨모멘트 (kg-cm)
I*	5.42	3.34	0.019	6276	21.75	71.49	102.8
II**	15.78	9.73	0.055	18258	63.25	208.0	301.0
III***	22.49	10.7	0.136	26047	59.29	638.9	1202.8

*Type I은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 두께가 10 및 40cm이다.

*Type II은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 두께가 10 및 40cm이다. 단일 강선망

*Type III은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 두께가 15 및 40cm이다. 이중 강선망

표에서 보는 바와 같이 보강 효과는 항복 외부응력을 4배 이상 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 같은 두께인 Type I과 II에서 단일 강선망의 효과로 모든 물리량이 평균 3배 증가함을 알 수 있다. 따라서 같은 두께에서 라이닝 보강의 효과는 모든 물리량에서 동일하다는 것을 알 수 있다. 슛크리트의 두께가 15cm인 Type III에서 항복응력이 Type II에 비해 1.5배 증가하고, 슛크리트 처짐량은 10%이내의 작은 증가량을 보이는데 비하여, 콘크리트 처짐량은 약 2.5배 증가한다. 슛크리트 축력은 항복응력의 증가량인 1.5배와 동일한 반면, 콘크리트 축력은 큰 차이를 보이지 않고 오히려 줄어든다. 휨모멘트는 모두 3배 이상 크게 증가한다.

5. 결론

본 연구에서는 슛크리트 및 콘크리트 라이닝을 동시에 고려하는 알고리즘을 개발하였고, 수학적 해석 해 및 축소 모형 모델실험 결과와의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다. 또한 인터페이스 요소의 강성 변화, 라이닝 두께의 변화, 보강 효과 등의 변수해석을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 개발된 복층 라이닝 해석 알고리즘은 그 타당성이 입증되었고, 지반을 포함한 복층 라이닝의 동시해석이 가능하리라 사료된다.

축소모형실험결과와의 비교에서는 균열하중, 균열발생 위치, 최대처짐량 등이 거의 유사하였다. 파라미터 해석결과, 인터페이스의 접선/법선 강성비는 작을수록 유리하다는 것을 알 수 있었고, 콘크리트 라이닝의 두께의 해석 결과 표준단면 두께가 적절함을 알 수 있었고, 35cm의 대안도 충분히 가능하리라 판단되었다. 슛크리트 라이닝 두께의 변화는 외부하중에 민감하였고, 두께 증가에 따라 항복 외부하중이 증가하지만, 다른 물리량도 모두 증가하므로 강지보공의 해석이 포함되어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 건설교통부(1996), 콘크리트표준시방서, 사단법인 한국토목학회
2. 朝倉 俊弘, 松本 吉雄, 小島 芳之, 川上 義輝(1990), “トンネル覆工の力學舉動解析”, 第 8回 岩の力學國內シンポジウム講演論文集, pp. 219-224
3. El-Nahas, F., El-Kadi, F. and Ahmed, A.(1992), “Interaction of tunnel linings and soft ground”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No.1, pp. 33-43
4. Goodman,R.E., et al.(1968) “A model for the mechanics of jointed rock”, *J. Soil Mech. Fdns Div. ASCE*, 94, SM3, Mar., pp.637-659
5. Hinton, E. and Owen, D.R.J.(1979), *An introduction to Finite element computations*, Pineridge Press, Swansea, U.K.
6. Huges, T.J.R., Taylor, R.L. and Kanoknukulchai, S.(1977), “A simple and efficient finite element for bending”, *Int. J. Num. Meth. Engng.*,11, pp. 1529-1543
7. King,G.J.W. and Williams,F.W.(1978), “The analysis of infilled frames using finite elements”, *Proc. Instn Civ. engrs, Part 2*, 65, Dec., pp. 749-760