

계측 및 수치해석을 통한 터널 라이닝의 균열 원인 연구 A study on the cracking of tunnel lining by measurement and numerical analysis

황학¹⁾, Hak Hwang, 정현철²⁾ Hun-Chul Jung, 김유석³⁾, Yu-Seok Kim

¹⁾ LG건설 기술연구소장, 공학박사

²⁾ LG건설 기술연구소/연구개발팀장, 토질 및 기초 기술사

³⁾ LG건설 기술연구소/ 연구개발팀

SYNOPSIS : In this research, the cracking of tunnel concrete lining was investigated and analyzed through long-term measurement and nonlinear numerical analysis. For one year after the casting of lining, the stresses and strains were measured by the sensors installed in hard rock tunnel lining. The measurements showed that only small stresses which were less than cracking stress occurred in every survey sections regardless of sensor directions. It could be induced that the external load applied to the lining was small or ignorable. Also, it was carried out short-term numerical analysis based on such site condition as ambient temperature, the degree of overbreak and mold staying period. Long-term numerical analysis based on creep & shrinkage and nonlinear cracking was carried out. The output showed that construction condition and ambient environments could make the lining concrete crack without external loads. The cracks formed in this process does not indicate the structural instability of the tunnel.

Key Words : Nonlinear Cracking of Concrete, Measurements, Numerical Analysis, Creep & Shrinkage

1. 서론

라이닝 균열에 대해 많은 연구가 진행되었으나, 대부분은 외력에 의한 균열 및 라이닝의 내구성에 대한 것이었다. 이러한 연구들에서 터널 라이닝에 작용하는 구체적인 외력의 크기를 산정한 예는 거의 없다. 일부 해외에서는 하중이외의 원인에 의한 균열 가능성을 제시한 연구가 있었다. 터널 라이닝의 균열의 양상을 보면 균열 부위는 천단부에 집중적으로 발생하였으며, 균열 부위의 라이닝을 제거하고 슛크리트, 록볼트를 관찰한 결과 전혀 열화가 발생하지 않은 경우도 발견되었다. 본 연구는 계측을 기본으로 하여 그 계측 결과를 수치해석에 의해서 증명하는 절차를 통해서 이루어졌다. 터널 라이닝에 대한 계측이 콘크리트 타설 초기에서부터 1년까지의 기간동안 진행되었다. 수치해석 또한 콘크리트의 타설부터 수화열, 거푸집의 탈형, 자중의 작용, 장기적인 크리프 및 건조수축 해석을 비선형 균열모델을 적용하여 수행하였다.

2. NATM 터널의 라이닝 균열의 원인 인자

NATM은 암반의 자립능력을 이용하여 Flexible한 1차 지보재를 적절한 시점에 시공함으로써 터널의 안정을 꾀하는 공법이다. 또한 굴착 후 지속적인 지반거동을 계측하여 다음 굴착 시 적절한 지보 시기

와 패턴을 결정하는 등 계측이 중요한 공법이다. NATM은 슛크리트와 록볼트가 주지보인 공법이며 라이닝은 장기적인 지보재의 열화 및 추가적인 하중 작용에 대비하는 안전을 증가의 개념이다. 이러한 NATM 터널의 라이닝에는 다음 표와 같은 원인에 의해서 균열이 발생할 수 있다.

외력적인 원인	지반하중	팽창성 지반이나, 지반변형이 늦게 수렴할 경우 장기적인 하중이 슛크리트를 거쳐서 라이닝에 작용할 수 있다.
	수압	산악 배수터널에서 배수가 원활하지 못해 국부적으로 집중될 경우 그 부위에 과도한 하중을 주고 균열을 발생시킬 수 있다.
	편토압	주변의 새로운 구조물 생성이나 새로운 굴착 등에 의해서 지반 평형이 파괴되는 경우에 균열이 발생할 수 있다.
외력의외의 원인	거푸집의 조기 탈형	터널 라이닝의 거푸집 거치 기간은 72시간으로 권장하고 있으나 실제 현장 여건 상 24시간만에 탈형하기도 한다.
	바닥 인버트의 낮은 시공	링폐합효과를 이용하여 안정을 꾀하는 NATM공법에서 인버트의 시공이 늦어지게 되면 그 효과를 발휘할 수 없어 불완전한 구조물이 된다.
	다짐의 부족	콘크리트 라이닝 구조체는 타설이 천장에서만 이루어지는 경우 측벽부는 재료분리를 일으키기 쉬우며 강도가 저하하게 된다.
	Carbonation shrinkage	운행차량 배기가스인 이산화탄소는 콘크리트의 알칼리 성분과 반응하여 강도를 저하시키는 효과를 가져오게 되고 궁극적으로 균열에 이를 수 있다.
	Creep & shrinkage	콘크리트에는 장기적으로 크리프 변위가 발생한다. 이 변위가 라이닝의 구속으로 제한되면서 응력을 발생시켜 균열을 유발한다.
	여굴 및 수화열	라이닝에서 수화열은 큰 문제가 되지 않으나 여굴이나 주변 암반과 온도차가 큰 경우 온도구배가 커져서 균열이 발생가능하다
	라이닝 벽체의 침하	라이닝 기초의 강성이 부족한 경우 자중이 무거운 라이닝이 침하하게 되고 균열이 발생하게 된다.
	부적절한 신축이음 시공	터널 라이닝에는 구속에 의한 응력집중을 막는 신축이음이 시공된다. 이것이 제대로 시공되지 않은 경우 균열의 원인이 될 수 있다.

표 1 균열 발생 원인

3. 계측 연구

3.1 계측의 개요

3.1.1 측정 현장명 및 지질 종단면도, 지질개요

- (1) 측정현장 : 경기도 광주군 중부고속도로 확장 2공구 광지원 터널 서울 방향
- (2) 터널 현황 : 상행선 526m, 하행선 520m
- (3) 지질 개요 : 경기 편마암 복합체인 선캠브리아기 편마암류로 구성되며 편마암류는 주로 호상 혹은모 편마암류로 본 지역의 대부분을 차지하고 있다.

3.1.2 측정항목 및 라이닝 배합강도

- (1) 터널갱구부(STA 812.5) : 철근응력계 5개 + 콘크리트 응력계 10개
- (2) 풍화암부(STA 700.0), 경암부(STA 580.0), 연암부(STA389.0) : 콘크리트 응력계 15개
- (3) 지보 패턴 및 라이닝 배합강도
- (4) 콘크리트 배합강도 : 240kg/cm²

구분	상행선	하행선
위치	2Km345 - 2Km836	2Km345-2Km830
천정 상단부 지반	연암, 경암	연암, 경암
상부토피	15.6m	10.8m
적용지보 Type	Type I- VI	Type I-VI

표 2 암반 분류 및 지보 패턴

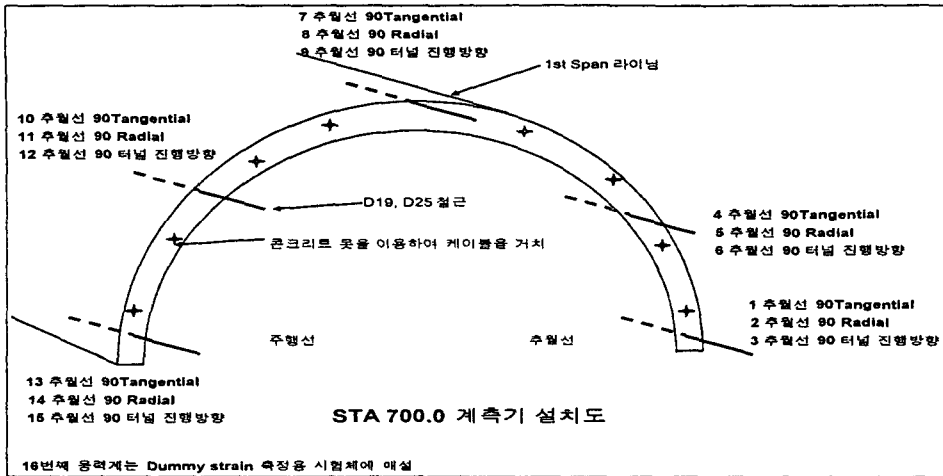


그림 1 계측기 설치도

3.2 온도와 응력 계측 결과의 그래프

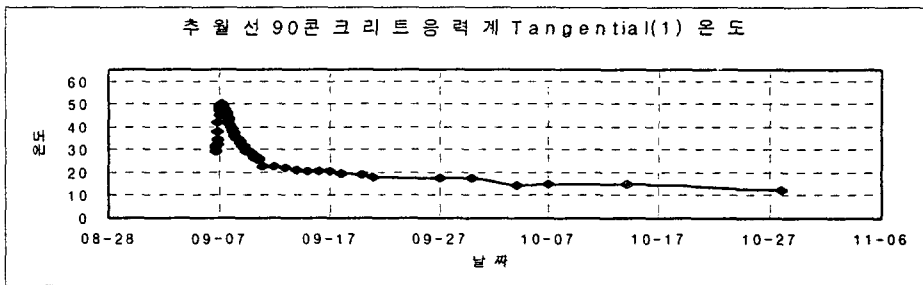


그림 2 추월선 측벽부 온도 변화

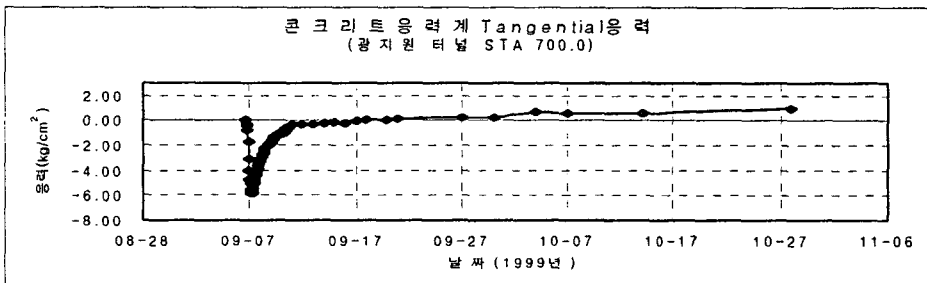


그림 3 추월선 측벽부 콘크리트 응력

3.3 응력의 최대값 및 최소값

응력(kg/cm ²)	추월선 측벽	추월선 45도	천장	주행선 측벽	주행선 45도
갱구부 최대	철근 응력만	+4.35	+6.17	+5.42	철근 응력만
STA812 최소	측정함.	-2.29	-4.50	-2.47	측정함.
연암부 최대	+2.91	+5.65	+3.32	+4.03	+3.55
STA389 최소	-3.80	-2.14	-2.73	-3.14	-3.62
봉화암부 최대	+1.87	+2.57	+2.87	+2.62	+2.11
STA580 최소	-1.26	-3.50	-3.68	-1.41	-2.40
경암부 최대	+6.02	+3.83	+5.18	+2.56	+3.76
STA700 최소	-3.10	-5.80	-3.05	-3.48	-2.56

표 3 계측 결과의 범위(장기적인 범위)

3.4 터널 계측의 장기적인 결과

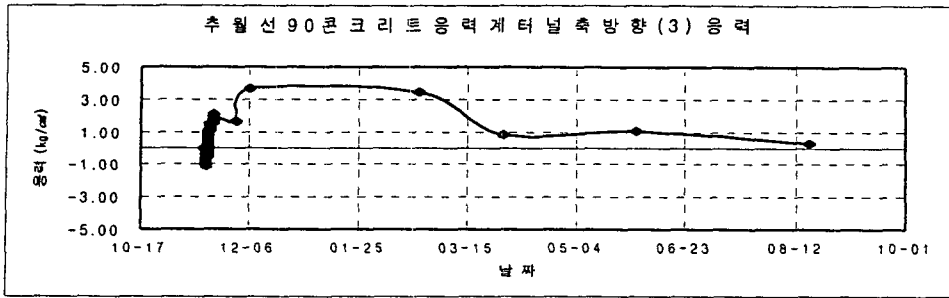


그림 4 추월선 측벽부 콘크리트 응력

3.5 계측결과에 대한 고찰

장기 계측 결과의 특징들을 다음과 같이 요약된다.

- (1) 계측기의 위치와 방향에 관계없이 응력 이력과 크기가 유사하다.
- (2) 장기적인 응력은 어떤 값으로 수렴하는 것이 아니라 일정한 범위를 두고 움직인다.
- (3) 라이닝에 발생하는 응력은 균열 응력 이내의 값이다.

먼저 콘크리트 라이닝이 위치, 방향에 관계없이 일정한 응력을 받고 있다는 것을 의미하는 것이다. 만일 암반으로부터 하중이 지속적으로 작용하고 있다면 그 하중의 방향에 해당하는 응력이 더 크게 발생해야 할 것으로 판단된다. 응력의 이력은 콘크리트 타설 직후 수화열에 의해서 팽창하려는 콘크리트가 팽창이 억제되면서 압축응력을 받게 되고 거푸집 탈형 후에는 인장 응력 상태로 전환하는 양상을 모든 계측기가 보여주었다. 이의 비교를 위하여 구속을 받지 않는 상태에서의 Dummy Plate의 콘크리트 응력을 계측하였다. 이는 무응력계의 원리와 동일한 것으로 이 응력이력 또한 콘크리트 라이닝이 보여준 응력 이력과 거의 동일한 것이다. 다만 구속의 영향이 상대적으로 적으므로 응력의 절대값이 더 작게 나타나게 된다.

응력의 이력을 살펴보면 계속 수렴하지 않고 어느 범위 내에서 움직이는 현상을 발견할 수 있었다. 이는 계절적인 온도변화에 의한 원인으로 판단되는 데 겨울철에는 인장 축으로 여름에는 압축으로 이동하는 경향을 보여 준다. 이는 겨울철에는 수축하려는 콘크리트를 구속이 막아 수축이 방해받게 되고 따라서 인장응력을 발생시키게 된다. 반대로 여름철에는 콘크리트가 팽창하려고 하나 팽창이 구속되어 압축응력을 발생시키게 되는 것으로 판단된다.

마지막으로 계측 결과 콘크리트 응력은 28일 강도 콘크리트에서 균열을 발생시키는 크기보다 더 작게 나타났다.

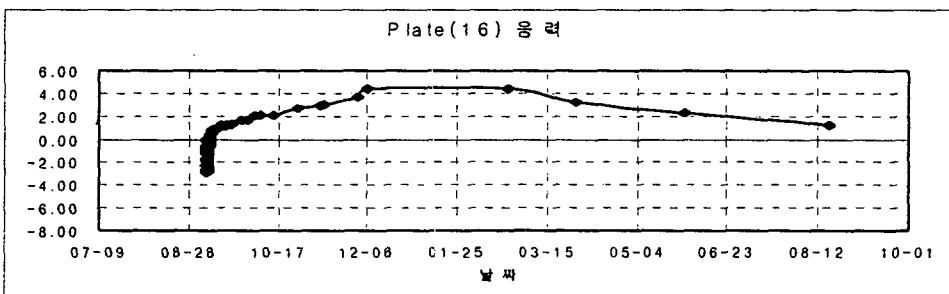


그림 5 무응력 상태의 콘크리트 응력

4. 수치해석 연구

4.1 수치해석의 개요

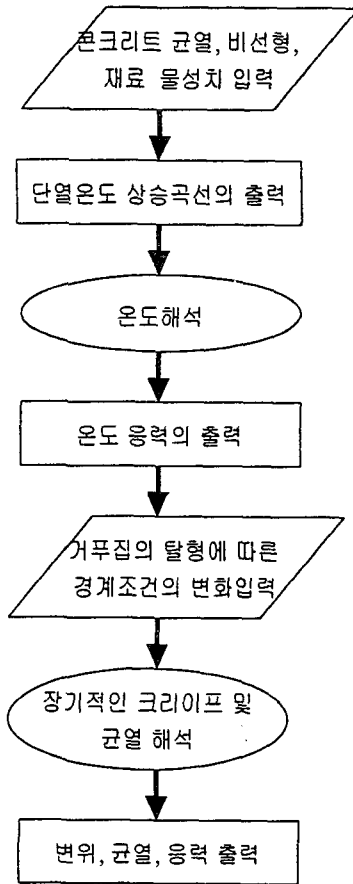


그림 6 수치해석의 Flow

수치해석은 터널 라이닝에 대하여 콘크리트 타설 시기부터 1년까지를 시간순서에 따라서 모델링하고 해석하였다. 다음 그림은 수치해석의 Flow를 보이는 것이다.

4.2 수치해석 모델링

수치해석은 다음 4가지 경우에 대해서 수행되었다.

- (1) 1일 탈형에 여굴이 없는 경우
- (2) 1일 탈형에 여굴이 있는 경우
- (3) 3일 탈형에 여굴이 없는 경우
- (4) 3일 탈형에 여굴이 있는 경우

4.2.1 단열온도 상승곡선

단열온도 상승곡선은 콘크리트 배합 조건을 이용하여 단열 상태에서 재료의 열특성치와 그 그래프를 얻어낸 것이다. 이 과정은 네덜란드의 델프트 공대에서 개발한 HYMOSTRUC 프로그램을 이용하였다.

4.2.2 온도해석

단열온도 상승곡선 해석을 통해서 콘크리트의 열특성치와 온도변화 그래프를 얻은 뒤 이 결과를 이용하여 라이닝의 수화열 온도 해석을 수행하였다. 이 때 사용한 요소는 온도를 자유도로 가지는 potential flow element이며, 이 요소는 나중에 구조해석을 위해서 구조해석용 요소로 전환이 가능하다.

4.2.3 온도 응력 해석

열해석용 FEM 요소는 구조해석용 요소로 전환되어 온도해석을 수행한다.

4.2.4 거푸집의 탈형

거푸집의 탈형은 라이닝의 아래 쪽 경계조건을 고정에서 자유로 변화시킴으로써 수치해석 모델 내에서 구현된다.

4.2.5 장기적인 크리이프 건조수축 및 균열 해석

본 해석에서는 Double Power Law를 크리이프 함수로 이용하였다. Double Power Law은 초기 콘크리트(young concrete)의 Creep 거동을 묘사하기 위하여 특별히 개발된 모델이다.

4.3 균열 해석 결과

4.3.1 모델링도

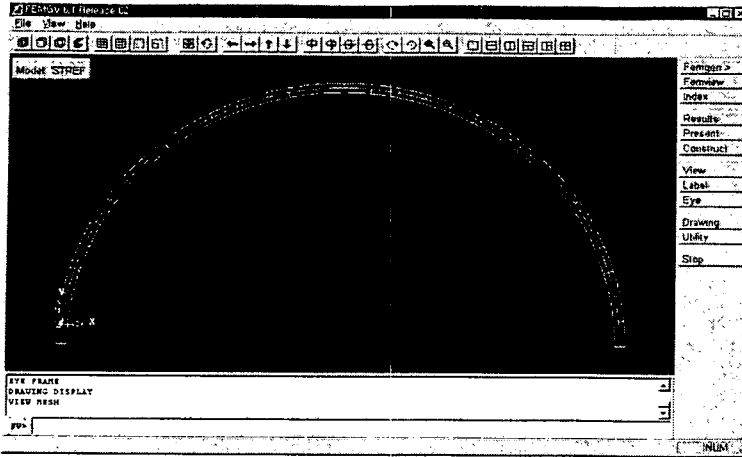


그림 7 여골이 없는 경우의 모델링도

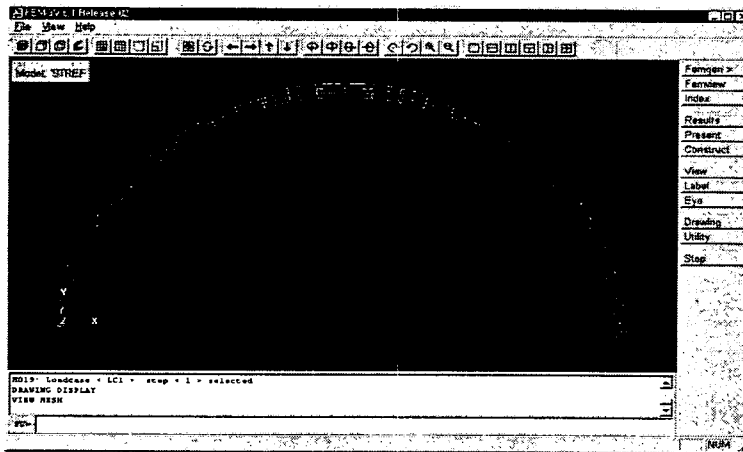


그림 8 여골이 있는 모델의 모델링도

4.3.2 온도 변화

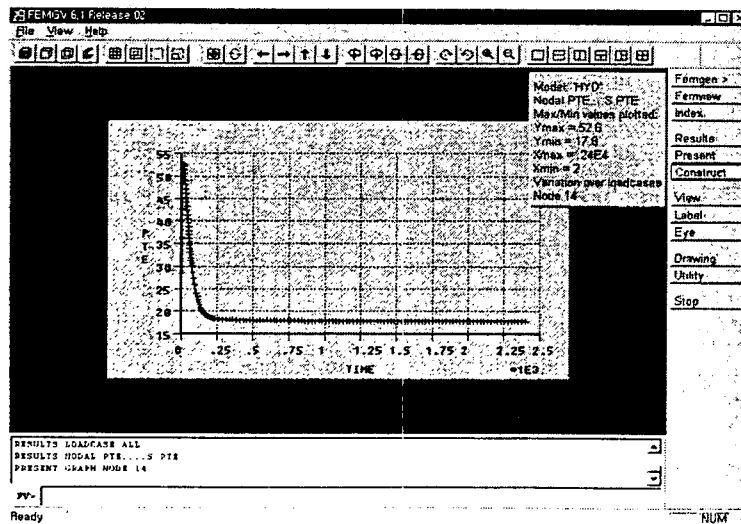


그림 9 온도변화의 그래프(300일)

4.3.3 최종 변형을

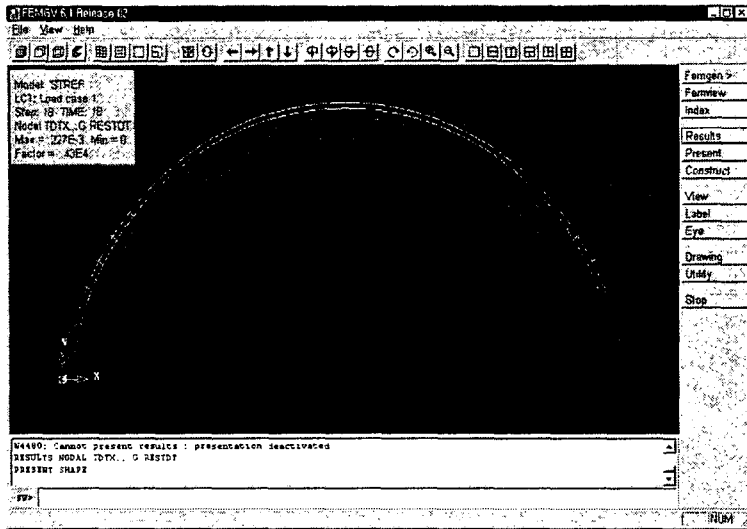


그림 10 최종적인 변형 형상

4.3.4 균열 strain의 변화

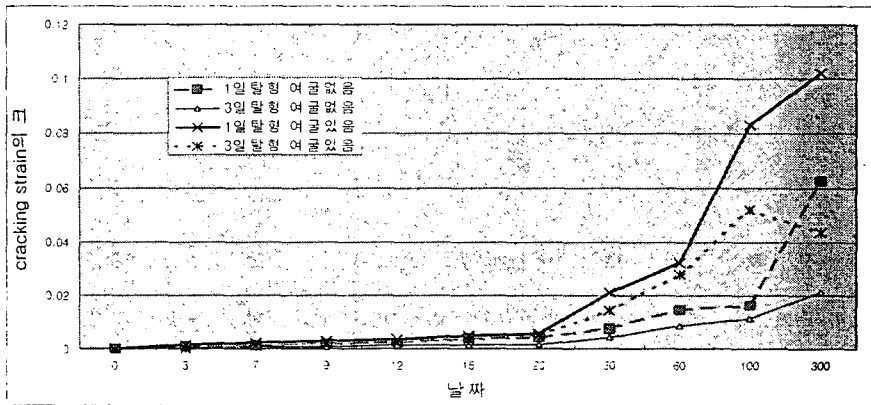


그림 11 crack strain의 발달 과정

터널 라이닝에서의 균열의 양상은 4가지 경우 모두 위에 나타난 경향과 비슷하다. 따라서 보다 객관적인 데이터를 통해서 균열의 양상을 표현하기 위하여 각 case에 있어서의 최대 cracking strain을 표시하였다. 또한 이를 그래프로 표시해 보면 그림 9와 같다.

4.4 수치해석 결과에 대한 고찰

천단부는 자중을 가장 많이 받으며 변형이 가장 자유로워 균열은 조기 탈형일수록 그리고 여굴이 발생할수록 많이 나타났다. 강도 발현 이전의 조기 탈형에 의한 초기 균열발생이 크리이프와 건조수축에 의해서 발전해 나간 때문이라고 볼 수 있다.

천단의 응력이 압축에서 인장으로 발전하는 양상을 보이는 데, 이는 계측 결과에서 나오는 온도이력과 거의 일치하는 것이다. 단지 수치해석에서는 마지막의 응력이 일정하게 유지되는 것을 보이는 데 이는 수치해석 과정에서 1년이라는 기간동안의 온도변화를 정확히 묘사하지 못하고 외부 기온을 연평균기온으로 모델링하였기 때문에 나타난 현상이다.

여굴이 있는 모델이 여굴이 없는 모델에 비하여 균열의 크기가 크다. 특히 여굴이 생긴 모델의 경우는 여굴부위에서 균열이 많이 발생하는 데 이 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다.

(1) 여굴부위는 콘크리트 타설 두께가 표준 라이닝 두께보다 크거나 2-3배까지도 증가하게 된다. 이로 인

하여 수화열 발생량이 많아지고 온도 구배가 커지게 된다.

(2) 큰 온도 구배에 의해 발생된 높은 온도 응력이 발생하지만, 여굴부위의 특성상 접촉면이 넓어져서 보다 많은 구속을 받게 된다.

(3) 여굴 부위에서의 큰 온도 응력과 구속은 여굴이 없는 경우보다 균열을 확실히 많이 발생시킨다고 볼 수 있다.

1일 탈형 모델과 3일 탈형 모델은 1일 탈형 모델이 균열이 조기에 발생하며 그 폭도 클 것으로 예상했는데 실제로 수치해석 결과도 cracking strain의 값이 1일 탈형 모델에서 더 컸다. 그러나, 최대 응력의 크기는 3일 모델이 1일 모델보다 더 컸는데 이는 조기에 탈형된 라이닝에서는 구속이 먼저 없어져서 응력 이완이 용이하였기 때문으로 보인다. 반면에 3일 후 탈형하는 경우 응력 소산이 강도가 상당히 발현된 이후에 발생하므로 응력의 크기가 크다.

6. 결론

계측 결과와 수치해석 결과는 절대적인 수치에서는 차이를 보이지만, 응력과 변형율의 경향에서는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이 점은 특히 단기적인 응력의 그래프에서 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 특히 고무적인 현상은 자중과 크리이프 건조수축해석에 의한 결과가 계측의 결과와 거의 일치하면서, 장기적으로 균열을 발생시킨다는 점이다. 이로써 수치해석으로 외부하중 이외의 원인에 의하여 균열이 발생할 수 있음을 보였다.

계측 대상 현장이었던 광지원 터널에 대해서 균열 여부를 확인하면 가장 좋았을 것이나, 광지원 터널의 경우 천단부의 콘크리트는 모두 섬유보강된 제품을 사용하여 균열 저항 강도를 높인 것이었고 균열은 거의 발생하지 않았다. 따라서 균열 양상의 확인이 불가능하였다.

마지막으로, 이 수치해석은 터널 라이닝의 균열이 외력 이외의 재료 및 시공적인 원인으로 발생 가능하다는 것을 밝혔으며 계측결과와의 비교를 통해서 그 신뢰성을 높였다. 수치해석의 결과는 계측결과와 경향 면에서 매우 일치하였으며 절대적인 응력의 차이도 $3\text{-}5\text{kg/cm}^2$ 으로 균열에 결정적인 영향을 미칠 크기는 아니었다.

이번 해석을 통하여 시공 및 재료적인 원인이 충분히 균열을 발생시킬 수 있음을 밝혔고, 외력이 발생하지 않을 경우 탈형 시기와 여굴의 영향이 균열 발생에 결정적인 영향을 미친다는 것을 밝혔다.

참고문헌

1. 모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성에 관한 연구, 이대혁, 서울대학교 박사 논문 1998
2. 우리 나라의 NATM 적용에 있어서의 문제점과 개선 방향, 성균관대학교, 유충식 교수
3. NATM 터널에 있어서의 2차 라이닝 콘크리트 균열제어방안 연구, 박주경, 한양대학교 산업대학원 1996
4. 남산 2호 터널 입찰 안내서 작성 및 기본 설계 용역안, 경일 기술공사, 1997
5. Computational modelling of young concrete, TNO Building and Construction Research, Delft, Netherlands, 1997
6. Cracking of unreinforced concrete lining in the TAG motorway tunnels, Abdullah Memon, Tunnels and Metropolises, Negro Jr & Ferreira(eds), 1998
7. DIANA User's manual Release 7, TNO Building and Construction Research, Delft, Netherlands, 1999
8. Prediction of lining loads from case histories, H. J. Kim & Z. Eisenstein, Tunnels and Metropolises, Negro Jr & Ferreira(des), 1998