

터널 슛크리트 라이닝의 장기 내구성 평가를 위한 실험기법 개발 Development of experiment technology for assessment of shotcrete lining long-term degradation in tunnels

임종진¹⁾, Jong-Jin Lim, 신휴성²⁾, Hyu-Soung Shin, 배규진³⁾, Gyu-Jin Bae

1) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Department, Korea Institute of Construction Technology

2) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Department, Korea Institute of Construction Technology

3) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장, Director, Geotechnical Engineering Department, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Shotcrete lining is likely to be deteriorated due to the ground water which the lining is exposed to. Some tunnel collapses seemed to be affected by shotcrete degradation were reported. But there isn't any assessment method of shotcret long-term degradation. So, Experimental technology for shotcrete long-term degradation modeling was developed in this study. The shotcrete long-term degradation modeling, developed in other study in Korea Institute of Construction Technology, require the time-history of volume change. Digital strain observation system was used to acquire the time-history of volume change. To verify the Strain Observation Digital System, the measurement using the system was compared to the one using a micrometer. Through this process, The experiment for shotcrete long-term degradation modeling was set up.

Key words : long term degradation of shotcrete lining, assessment of shotcrete degradation, time history of volume change, measurement of volume change, experiment for shotcrete long-term degradation modeling

1. 서 론

터널 배면 슛크리트층은 지하수에 노출되어 있어, 지하수와 슛크리트층의 물리적, 화학적 반응으로 열화가 진행되어 장기적으로 슛크리트 성능이 저하된다. 실제로 터널 측벽부에서 슛크리트 열화에 의한 것으로 추정되는 추가 과대변위(배나옴 현상)가 발생하는 경우가 있으며, 이로 인하여 터널 콘크리트 라이닝이 국부적으로 파괴되는 터널 붕괴 사고사례가 보고되고 있다. 하지만 현재 널리 시공되고 있는 NATM공법의 터널에서는 2차 라이닝 때문에 배면의 슛크리트 열화를 구체적으로 알아보기 힘들며, 이러한 슛크리트 열화로 인한 장기적인 내구성저하를 평가 할 수 있는 체계가 현재까지 전무한 실정이다. 슛크리트가 주변 환경의 영향을 받지 않는 것은 불가능하므로 지하수에 의한 화학적 열화조건과 주변 지압등의 경계조건을 고려하여 슛크리트의 장기 내구성 저하 정도를 정량적으로 예측하고 이를 지보설계에 반영하여야 한다.

이와 같은 배경에서 슛크리트 열화에 의한 장기적인 내구성저하 메커니즘을 규명하고 장기 내구성 저하 평가기법 개발을 위한 실증적 기초연구를 수행하기 위해, 본 연구에서 장기 열화정도를 정량적으로 표현할 수 있는 대표 실험정수를 결정하고, 영상변형을 측정을 통해 실험정수를 산정하는 방법을 소개할 것이다. 슛크리트 장기내구성저하 모델링 방법은 한국건설기술연구원에서 수행한 연구에서 개발되었

으며, 본 연구의 목적은 장기내구성저하 모델링을 위한 숏크리트 장기 내구성 저하 평가기법 개발을 위한 실험체계를 구축하는 것이다.

2. 실험정수 결정 및 실험의 구성

숏크리트의 열화는 숏크리트의 열화에 의하여 화학반응의 결과로 생성되는 부산물들이 팽창함에 따라 숏크리트가 역학적으로 손상되어 발생한다. 따라서 이러한 숏크리트의 열화에 의한 장기 내구성 저하 특성은 시간에 따른 시료의 부피 팽창율을 이용하여 표현할 수 있다. 또한 화학적 열화는 부피팽창을 초래 하여 구조물에 물리적 손상을 주는 공통점이 있으므로 화학반응의 종류와 상관없이 일반화된 손상 평가 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

따라서, 장기 내구성 저하 모델링에 사용되는 입력정수 변화특성을 규정하기위해 열화에 의한 부피팽창 시간이력이 필요하며, 이를 위해 실험을 통하여 화학적 열화에 의한 부피팽창 시간이력을 측정하고자 한다. 본 실험에서는 열화시간에 따른 부피팽창을 측정하기 위해 3차원 공간정보를 정밀하게 측정할 수 있는 디지털 영상 변형을 측정 시스템을 도입하였다.

열화에 의한 부피변화 시간이력을 측정하기 위한 실험은 다음과 같은 순서로 시행한다. 우선 화학적 열화에 의한 숏크리트의 장기 내구성 변화 특성을 알아보기 위해 화학적 열화반응의 원인이 되는 화학 용액을 준비한다. 본 실험에서는 표 1과 같이 숏크리트의 화학적 열화반응 용액을 준비하였다. 다음으로 용액의 종류를 고려하여 숏크리트 시료를 준비한다. 본 실험에서는 숏크리트 화학적 열화반응 용액 8종류에 각각 2개의 시료를 침전시키기 위해 총 16개의 숏크리트 시료를 준비하였다. 그 후 준비된 시료를 각각 디지털 영상 변형을 측정시스템을 이용하여 초기 부피를 측정하였다.

디지털 영상 변형을 시스템에서는 우선 측정 사진장비 검정(Calibration)을 실시하고, 이 사진장비를 이용하여 시료를 촬영한다. 촬영시 레이저 타겟장치(Point Clouder)를 이용하여 타겟을 시료위에 생성시켜 촬영한다. 촬영된 사진은 해석프로그램에 의해 3차원 공간정보를 획득하여 시료의 모델을 형성한다. 이렇게 3차원으로 형성된 시료모델을 이용하여 부피를 정밀하게 측정한다.

표 1 실험을 위한 숏크리트 화학적 열화반응 용액

숏크리트 화학적 열화반응 용액	용액의 정도
황산염 용액	농도 1%
	농도 2%
	농도 5%
인공해수 용액	일반 해수 농도의 1배
	일반 해수 농도의 2배
염산 용액	pH1
	pH2
	pH3

3. 디지털 영상 변형을 측정 시스템

시료 표면의 3차원 정보를 획득하여 정밀한 형상을 구현하기 위하여, 본 연구에서는 측정대상에 수많은 타겟 (target)을 생성시키고 이를 촬영한 사진으로부터 타겟의 3차원 정보를 프로그램으로 해석하는

디지털 영상 변형을 측정 시스템을 이용하였다. 우선 계측 범위와 개략적인 주변 형상 파악을 위하여 Coded target과 Single dot target을 설치하였으며, Scale bar를 이용하여 축척을 결정한다. 사진계측 시 타겟의 수가 많을수록 보다 정밀한 3차원 공간정보를 얻을 수 있으므로 그림 1과 같이 PRO-SPOT이라는 장비를 이용하여 수많은 레이저 타겟 (point cloud)이 측정영역에 생성되도록 한다. 레이저 타겟이 시료위에 생성된 상태에서 그림 2와 같이 여러 방향에서 사진 촬영을 실시하여 중첩된 여러 사진들로부터 해석될 계측결과의 정밀도를 높인다.

위에서 소개한 디지털 영상 변형을 측정 시스템을 이용하여 그림 3과 같이 시료를 사진촬영하여 전문 프로그램의 해석과정을 거쳐 그림 4와 같이 3차원공간정보를 획득하여 시료의 변화를 측정한다.

본 연구의 디지털 영상 변형을 측정 시스템은 사진상의 영상과 렌즈의 투영중심 그리고, 대상물간의 기하학적 관계를 이용하여 대상물 이 가지고 있는 정량적·정성적 특성을 측정하는 것이다. 사진의 기하학적인 원리는 중심투영이며, 사진의 상은 대상물로부터 반사된 빛이 렌즈의 중심을 통하여 필름 면에 투영되어 나타나게 된다.



그림 1 point cloud

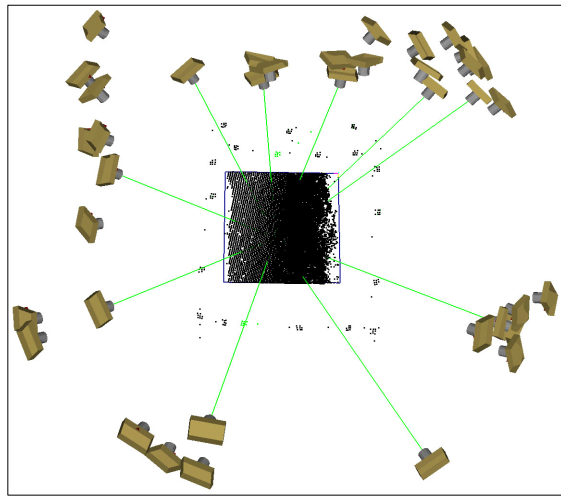


그림 2 Point cloud에 의한 사진계측



그림 3 시료 촬영

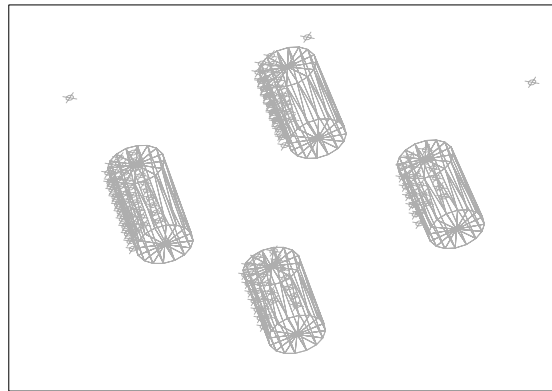


그림 4 시료의 3차원 좌표

4. 정밀도 검증 시험

시료의 3차원 공간 정보를 획득하기 위해 디지털 영상 변형을 측정 시스템을 도입하였는데 우선 본 실험 방법을 도입하기 전에 정밀도 검증 시험을 수행하였다. 정밀도 검증을 위해 디지털 마이크로미터(정밀도 1/100in)를 이용하였다. 정밀도 검증 시험은 다음과 같이 시행하였다. 그림 5와 같이 0.038mm와 9.558mm 값을 마이크로미터에 생성시키고 이를 디지털 영상 변형 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 그림 5(a)와 그림 5(c)는 각각 0.038mm, 9.558mm의 측정 장면이며 그림 5(b)와 그림 5(d)는 마이크로미터에 나타난 눈금을 확대한 사진이다. 디지털 영상을 이용한 변형 측정시 그림 5와 같이 주변 형상을 개략적으로 파악하기 위해 마이크로미터 주위에 타겟을 설치하였으며 Scale Bar를 설치하여 측척을 파악할 수 있게 하였다. 또한 변위 측정을 위해 마이크로미터 측정 부위에 타겟을 부착하였다.

타겟을 부착한 마이크로미터를 촬영한 사진을 전문 프로그램(Photo Modeler)에서 해석 후 3차원 공간 정보를 획득하였는데 그 결과는 그림 6과 같다. 그 후 3차원 공간 정보를 해석한 결과를 바탕으로 마이크로미터의 측정 값과 디지털 영상 변형 측정 시스템을 이용한 측정 값을 비교하였다.

정밀도 검증을 위해 측정시 원점을 설정하고 이를 기준점으로 하여 0.038mm와 9.558mm일때의 각각 상대좌표를 측정하여 마이크로미터 눈금의 상대좌표거리(9.52mm)와 비교하는 방법을 사용하였다. 영상 변형 측정 시스템을 이용하여 측정한 결과 상대좌표거리는 9.4836mm로 얻어졌으며 마이크로미터의 상대좌표거리와의 오차는 0.0364mm로 얻어져 마이크로미터의 수동 조작에 의한 오차까지 고려한다면 사진 계측 결과의 정확도가 우수한 것으로 판단된다.



(a) 0.038mm 측정 사진



(b) 마이크로미터 눈금(0.038mm)



(c) 9.558mm 측정 사진



(d) 마이크로미터 눈금(9.558mm)

그림 5 영상 변형 측정 검증 시험

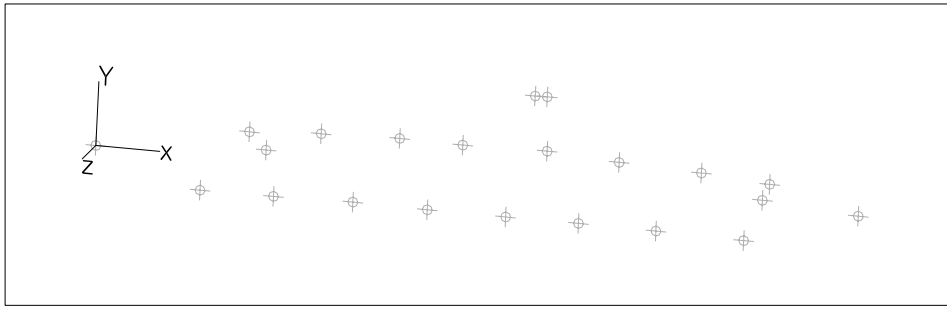


그림 6 디지털 영상 변형을 측정 시스템에 의한 상대좌표거리

5. 실험체계 및 계획

본 실험을 통하여 초기 탄성계수 및 강도 정수 등 숏크리트의 열화에 의한 시간 이력 특성을 파악하기 위해 그림 7과 같이 열화관련 실험정수 산정을 위하여 실험체계를 구축하고자 한다. 우선 최종 체적 변형율, 초기탄성계수, 압축/인장강도 등 각 정수별 시간이력을 표현하는 매개변수를 결정한다. 이러한 매개변수는 열화반응을 표현하는 대표적 실험 정수 이다. 다음으로 열화반응을 일으키는 화학용액, 시료 등 각 열화반응 종류별로 화학적 열화반응 실험환경을 구축한다. 단일 화학적 열화 반응용액을 준비하여 실험하는 것도 필요하지만, 화학적 열화반응 실험환경 구축시 실제 여러 화학적 물질에 의하여 열화반응이 일어나는 실제 상황을 고려할 때, 여러 가지 화학적 열화반응이 혼합되어 일어날 수 있는 실험환경 구축 또한 필요하다. 실험 환경 구축 후, 앞서 소개한 영상촬영 기법을 활용하여 시료의 시간에 따른 변화를 정밀하게 측정한다. 측정한 데이터를 해석하여 시간이력의 특성을 파악하고 이로부터 실험정수의 시간이력 매개변수를 결정한다.

이렇게 구축된 시스템을 통하여 열화에 의한 장기 내구성 저하 매개변수를 체계적으로 파악할 수 있는 방안을 마련하였으며 향후 타 연구에도 열화에 의한 장기내구성 저하 매개변수 산정에 지침이 될 수 있을 것이다.

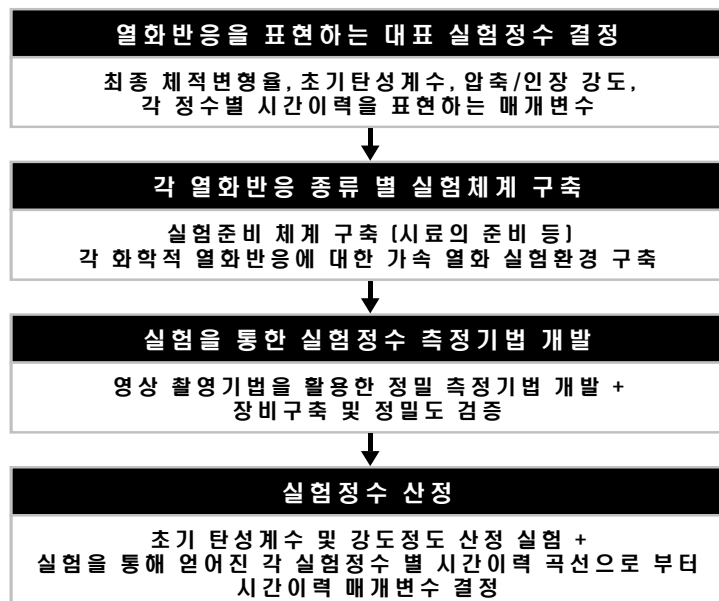


그림 7 열화관련 실험정수 산정을 위한 실험환경 구축을 위한 연구체계

6. 결론

본 연구에서는 터널내에 발생 가능한 열화 메커니즘을 일반적으로 표현할 수 있는 수치모델에 사용될 수 있는 탄성계수와 강도정수 값들의 시간이력 감소곡선을 얻어내기 위한 체계적인 실험체계를 수립하였다.

숏크리트 열화에 의한 장기적인 내구성저하 메커니즘을 규명하고 장기 내구성 저하 평가기법 개발의 기초연구를 수행하기 위해, 본 연구에서 장기 열화정도를 정량적으로 표현할 수 있는 대표 실험정수를 결정하고, 영상변형을 측정을 통해 실험정수를 산정하는 방법을 도입하였다. 영상변형을 측정 방법의 검증을 위해 마이크로미터를 이용한 측정값과 비교하였으며 영상변형을 측정 방법의 정확도가 우수함을 알 수 있었다. 본 연구에서 수립한 터널 숏크리트 라이닝의 장기내구성 저하 평가를 위한 실험기법을 이용하여 얻어진 각 실험정수별 시간이력곡선으로부터 시간이력 매개변수를 결정하고 장기내구성 저하 수치텔링에 이용할 수 있도록 하였다. 터널의 장기적인 안정성을 확보하기 위해 적정 숏크리트 재료 및 두께 산정시 숏크리트 라이닝의 장기 내구성 저하가 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 주신 비전테크 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 이창수, 윤인석(2003), “중성화와 염해를 고려한 콘크리트의 복합열화 예측, 콘크리트학회 논문집, Vol 15, No. 6, pp. 902-912
2. 한국건설기술연구원(2004), “한국형 싱글셀 터널공법개발(I)”, 건설교통부 산학연 연구과제 연차보고서(1차년도).
3. 日本コンクリート工學協會(2004), “콘크리트구조물의 전략적 매니지먼트-4.1 열화예측기술의 현상과 과제”, 콘크리트工學
4. Bazant, Z. P.(1988), *Mathematical modelling of creep and shrinkage of concrete*, Wiley, New York.
5. Hobbs, D. W.(1988), *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Telford, London.
6. Huang, M. and Pietruszczak, S.(1999), "Modelling of thermomechanical effects of alkali-silica reaction", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 125, Issue 4, pp. 476-485.
7. Magni, E. R., Rogers, C. A. and Grattan-Bellew, P. E.(1986), "The influence of the alkali-silica reaction on structures in the vicinity of Sudbury, Ontario", *Proc., 7th Int. Conf on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, pp. 17-21.
8. Pietruszczak, S.(1996), "On the mechanical behaviour of concrete subjected to alkali-aggregate reaction", *Computers & Structures*, Vol. 58, No. 6, pp. 1093-1097.