

터널 유지관리를 위한 안전진단시스템 개발에 관한 연구

Development of Inspection and Diagnosis System for Safety and Maintenance in Tunnel



김영근*
Kim, Young-Geun



백기현*
Baek, Ki-Hyun

Abstract

Recently, as tunnel structure is getting old, many deformations and defects have been occurred. As tunnel has the characteristics of underground structure, the estimation of the cause of deformation is very difficult. Then, it is necessary to investigate the state of tunnel lining and to estimate the deformation cause and safety for tunnel. In this study, inspection and diagnosis system for effective maintenance in tunnel was researched. Firstly, non-destructive techniques such as GPR (ground penetrating radar), impact echo test, and infrared thermal techniques were applied to tunnel lining inspection. Tunnel lining analysis system was developed to analyze the stability of tunnel. And, tunnel soundness evaluation system was developed to find the probable causes and indicate the method for repair and reinforcement for tunnel.

Keywords: Tunnel lining, Non-destructive test, Stability analysis, Soundness evaluation, Inspection and diagnosis system

요 지

최근 터널구조물에서 결함이나 변상이 많이 발생하고 있지만 터널구조물의 특수성으로 인하여 그 원인을 평가하거나, 상태 및 안전성 평가에 있어 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 보다 효율적인 안전진단 및 유지관리대책이 요구되고 있다.

*1 정회원, (주)대우건설 토목연구팀 차장

*2 정회원, (주)대우건설 시험지원팀 대리

본 연구에서는 터널에서의 정밀안전진단을 효과적으로 수행하기 위하여 터널 라이닝과 주변지반에 대한 비파괴 조사기술, 터널 라이닝의 구조적 안정성을 평가할 수 있는 해석기술, 그리고 터널의 변상원인 및 건전도를 판단할 수 있는 평가기술을 개발하여 터널의 열화 및 손상정도를 진단하고 터널의 유지관리를 위한 적절한 보수·보강대책을 제시함으로써 체계적인 터널 안전진단업무에 활용하도록 하였다.

주요어: 터널 라이닝, 비파괴 조사, 안정성 해석, 건전도 평가, 안전진단시스템

1. 서론

터널은 지보재와 지반과의 상호 불확실한 역학적 특성으로 인하여, 지반조건에 부적절하게 시공된 경우에는 단기간에 열화가 생기고, 그 열화가 국부적으로 발생하여도 보수, 교체가 곤란하기 때문에 구조물 전체의 사용년수를 단축시키는 경우가 있다. 또한 터널의 경우 터널 라이닝 이외에는 길으로 확인할 수 있는 방법이 극히 제한되어 있어 터널의 손상정도 및 열화상태를 쉽게 감지할 수 없는 특성을 가진다.

터널에서의 안전진단 방법은 주로 터널 라이닝에서의 외관조사에 의존하여 왔다. 그러나 이러한 조사 방법 및 기술은 터널의 지반에 만들어지는 지하구조물이라는 특수성을 고려하면 매우 위험하고도 불안정한 것이라 할 수 있다. 이러한 이유로 인하여 1차적으로 터널의 변상이 외관으로 나타났을 때에는 이미 지반 내에 상당한 정도의 손상이 진행되고 있어 보수대책을 수립하는 데에 어려움을 겪고 있다.

현재 국내에서 실시되고 있는 터널에 대한 안전진단은 구조물에 대한 건전도(안전도)를 평가할 수 있는 정밀안전진단이 아니라 외관조사에 의존하는 전반조사 수준으로 아직까지 정밀 안전진단에 대한 기술이 확립되어 있지 않다고 할 수 있다. 즉 터널과 같은 지하구조물에서의 비파괴 조사에 진단기법, 라이닝의 역학적 특성과 지반과의 상호작용에 대한 구조적 평가 이루어지지 않고 있어 보다 체계적이고 효율적인 정밀안전진단 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 터널 안전관리를 위한 정밀안전진단 시스템을 개발하기 위하여 요소기술로서 비파괴 조사기술, 터널 해석기술, 건전도 평가기술 개발하고자 하였으며, 이를 통해서 터널안전관리 및 유지관리에 필요한 다양한 요소기술들을 시스템화하여 터널 안전진단업무에 효율적으로 활용될 수 있도록 하고자 하였다.

2. 터널 비파괴 조사기술

2.1 터널 비파괴 조사

터널은 다른 구조물과는 달리 터널 라이닝의 벽면 쪽으로만 접근이 가능하며, 라이닝 벽면에 타일이나 코팅 등으로 미장이 되어 있고, 터널 구조물내의 조명, 환기, 접지선 등 다양한 설비시설 등이 설치되어 있으며, 콘크리트 라이닝이 내부에 철근으로 보강되는 경우 등 비파괴 시험의 적용에 어려운 점이 많다.

이와 같은 문제점에도 불구하고 비파괴 시험은 터널에 손상을 입히지 않고 터널의 건전도를 판단할 수 있는 자료를 제공하는데 있어서 필수 불가결한 시험으로 인식되고 있으며 또한 널리 활용되고 있다. 표 1은 터널라이닝에서의 비파괴 조사법을 평가한 결과이다. 대상물은 콘크리트, 철근, 균열, 라이닝으로 구분하여 4가지의 등급으로 그 적용성을 평가하였다. 각각의 비파괴조사법의 적용대상에는 차이가 있으나, 초음파법, 전자파법, 적외선법 그리고 타격법의 적용성이 비교적 높게 평가되었다.

표 1. 터널 비파괴 검사법의 평가

조사 대상물 기법	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	콘크리트					철근			균열		라이닝 박리	라이닝 두께	배면 공동
	압축 강도	배합 추정	골재반응 알카리	중성화 깊이	염화물량	위치 깊이	직경	부식	깊이	길이 폭			
육안검사			○					○		●	○		
반발경도법	○												
초음파법	△					△			○		△	△	△
전자파법						●	△				◎	◎	◎
전자유도법						●	○						
레이다법										●			
사진화상법										○			
적외선법	○									△	◎		△
타격법											○	○	○
평가기준	● : 높은 정밀도로 실용적 ○ : 실용적인 방법					◎ : 높은 능력로 실용적 △ : 원리상으로 적용가능							

2.2 비파괴 모델실험

본 연구에서는 터널구조물에 대한 비파괴 조사법의 적용성을 살펴보기 위하여 거의 실물 크기에 가까운 모형구조물을 제작하여 실험에 사용하였다. 모형실험에 사용된 조사법은 GPR과 충격반향법도 적용하여 보았다. 본 연구에서는 이를 위해 터널모형에서 측정 파라미터를 다양하게 변화시킴으로써 최적의 탐사자료 획득 변수를 얻고자 하였다.

모델시험체는 터널 라이닝을 나타내기 위해 콘크리트로 만들어진 4개의 모델로 구성되어 있다. 모델시험 부지의 크기는 1200×1500 cm (길이×너비)이고, 각각의 모델 크기는 1200×300 cm 이다. 4개의 모델 모두 지반과 콘크리트 라이닝 사이에는 방수포가 시공되어 있으며, 타설된 콘크리트의 압축강도는 평균 210 kg/cm² 이다.

터널에서의 록볼트, 강지보, 콘크리트 라이닝 내부공동, 배면공동을 설치하고 비파괴 시험의 적용성을 살펴보았다. 그림 1에는 400 MHz 안테나를 이용하여 측정된 GPR결과로서 유전상수는 7.5로 계산되었다. 라이닝 내

부공동 공동의 형상 및 크기까지 명확히 측정되었으며, 강지보 반응도 잘 나타나고 있다. 배면공동구간에 미약한 반응이 나타나고 있다.

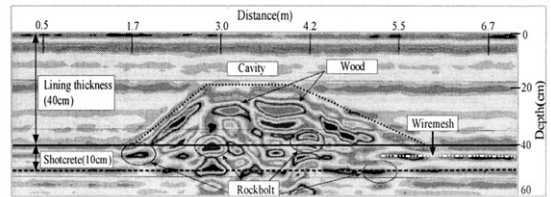


그림 1. 모델시험체에 대한 GPR 측정결과 (400MHz 안테나)

그림 2(a)은 두께 20 cm의 콘크리트 라이닝 모델에서 실시된 충격반향시험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 것이다. 스펙트럼은 8.75 KHz에서 피크를 보여준다. P파 속도 3,600 m/s로부터 두께는 20.6 cm로 계산되었으며, 모델시험체의 두께를 정확히 측정하였다. 그림 2(b)는 두께 30 cm의 콘크리트 라이닝 모델내에 두께 20 cm의 공동(내부결함)이 존재하는 경우에서 실시된 충격반향시험

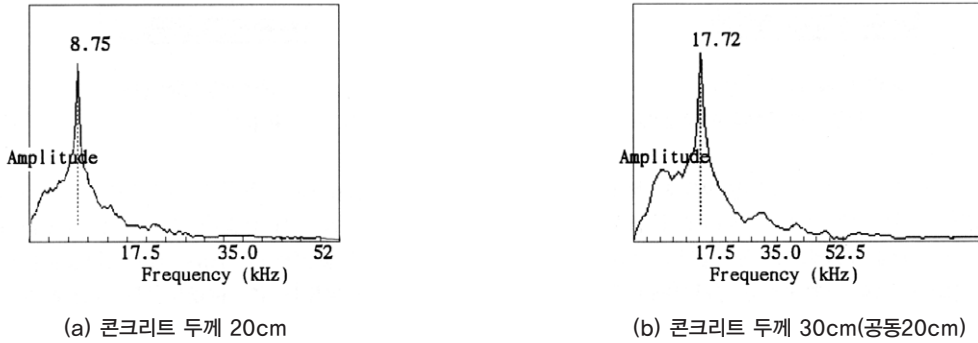


그림 2. 모델시험체에 대한 충격반향 시험결과

으로부터 얻어진 결과를 나타낸 것이다. 스펙트럼은 17.72 KHz에서 최대 피크를 보여주며, 두께는 10.2 cm 로 계산되었다. 그러나 공동의 영향으로 라이닝 모델시험체의 두께에 대한 반응은 나타나지 않았다.

2.3 터널 현장적용

그림 3에는 지보재의 심도가 변화하는 구간에 대한

GPR 조사결과를 나타내었다. 1차 라이닝과 2차 라이닝의 경계가 전구간에서 나타나고 있으며 그 심도는 0.2~0.3 m 범위이다. 지보재의 반응도 약 1.4 m 간격으로 나타나는데, 그 심도가 많이 변화하는 것으로 보아 시공 중 여굴량이 많았던 것으로 추정된다. 측정거리 34~36 m의 구간은 지보재의 심도로 보아 라이닝의 총 두께가 다른 지점보다 얇은 것으로 추정된다.

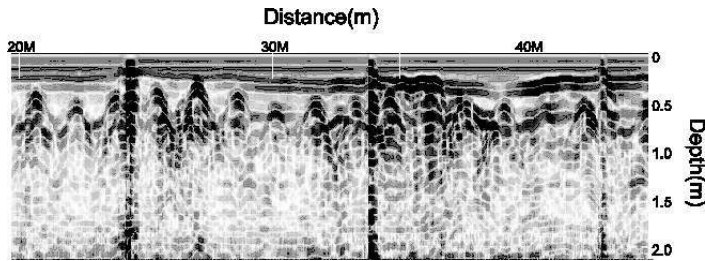


그림 3. 지보재 및 라이닝두께 변화에 대한 GPR 측정결과

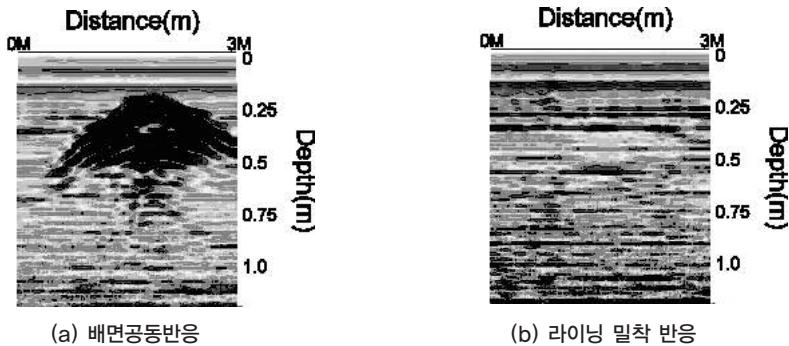


그림 4. 터널 라이닝 천단부에 대한 GPR 측정결과

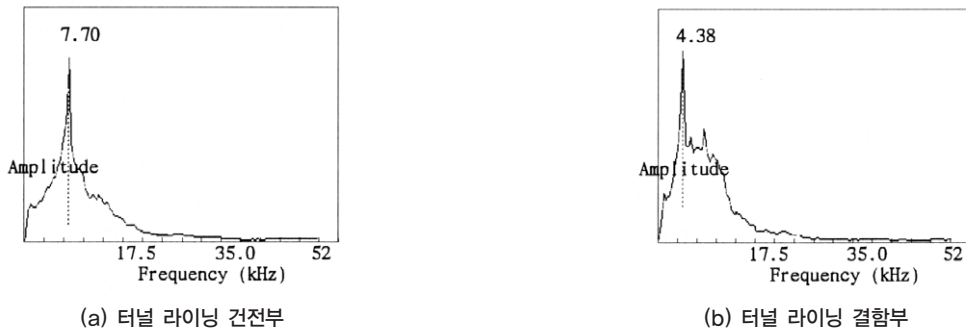


그림 5. 터널라이닝에 대한 충격반향시험 결과

그림 4는 지하철 터널에 대한 GPR 측정결과로서, (a)에는 터널 천정부 중심부로 갈수록 라이닝의 두께가 얇아지는 것으로 나타나고 있다. 이런 반응의 원인은 2차 라이닝과 1차 라이닝 사이에 공기로 채워진 공동이 존재하기 때문으로 해석되었다. (b)에는 특이한 이상반응이 나타나지 않는다. 이는 1차 라이닝과 2차 라이닝이 밀착되어 있어 반사층이 형성되어 있지 않기 때문으로 해석되었다.

콘크리트 라이닝 설계두께가 40 cm인 터널에서 충격반향시험을 실시하였다. 본 시험에서는 현장에 타설된 콘크리트에 대한 P파 속도를 파악하기 위하여 두께를 알고 있는 지점에서 예비시험을 실시하였다. 그림 5(a)는 충격반향시험결과로서, 스펙트럼은 4.38 KHz에서 피크를 보여주며, 두께는 42.2 cm로 계산되었다. 이 지점의 콘크리트 라이닝은 설계두께는 40 ± 4 cm로, 측정결과 설계두께를 충분히 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 콘크리트 라이닝은 내부결함이 없는 건전한 것으로 조사되었다. 그림 5(b)에서 스펙트럼은 7.70 KHz에서 피크를 보여주며, 두께는 24.0 cm로 계산되었다. 이 지점의 콘크리트 라이닝 설계두께는 40 ± 4 cm로, 설계두께를 확보하고 있지 못한 것으로 나타나 콘크리트 라이닝내에 결함이 있을 것으로 조사되었다.

비파괴 시험법인 적외선 열화상기법을 이용하여 터널 구조물의 안전진단에 대한 효율성을 확인하기 위하여 노후화된 터널을 대상으로 측정을 수행하였다. 본 조사에서는 먼저 외관조사를 통하여 누수, 박리, 균열 및 백화 등

이 심하다고 판단되는 천정부와 측벽부를 집중적으로 측정하였다. 그림 6은 터널 입구부의 우측 측벽 상단부에서 전형적인 누수부에 대한 적외선 열화상결과를 보여주고 있다. 건전부는 분홍색을 띠게 되고 누수부는 노란색 및 녹색을 띠며 그 중앙부는 청색을 띠고 있다.

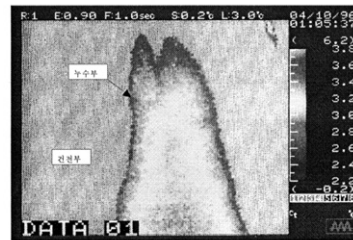


그림 6. 적외선 열화상 측정결과

3. 터널 라이닝 해석 및 안정성 평가

3.1 탄소성 유한요소해석

본 연구에서는 단일 라이닝 및 복층 라이닝의 상호작용을 동시에 해석할 수 있는 프로그램을 개발하여 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하여 각종 변수의 변화를 통한 터널 라이닝의 거동을 조사하고자 하였다. 이를 위해서 각각의 라이닝을 프레임요소로 처리하고 두 라이닝의 상호작용을 모사할 수 있는 인터페이스 요소를 개발하였다. 인터페이스 요소는 Goodman에 의해 개발된 절리

모델을 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. 개발한 라이닝 인터페이스 요소는 복합빔(multiple beam)에 관한 수학적 해와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 수학적 해와 1%의 오차를 보였다.

또한 지반과 터널 라이닝 지보계를 동시에 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하여 다양한 변수 해석을 통하여 라이닝 지보계의 역학적 거동을 조사하였다. 지반은 연속체 요소로서 구현하였으며, 지반과 라이닝 사이에는 하중 전달을 위한 인터페이스 요소를 사용하였다. 사용한 지반 인터페이스 요소는 King에 의해 개발된 요소를 사용하였다. 복층 라이닝 지보계를 동시에 지반과 함께 해석하는 경우에는 개발된 라이닝 인터페이스 요소를 사용하였다.

King에 의해 개발된 지반 인터페이스 요소의 생성과정을 간단히 언급하면 다음과 같다. 이 요소는 기본적으로 Goodman에 의해 개발된 마찰요소를 수정하여 완성되었다.

본 연구에서 개발한 지반을 포함한 통합 해석프로그램은 지반과 슛크리트, 지반과 콘크리트 라이닝, 지반과 슛크리트, 콘크리트의 복층 라이닝에 대한 모든 해석이 가능하다. 여기서는 이러한 해석프로그램을 이용하여, 중요한 해석변수를 변화시키기에 따라 전체 계가 어떻게 변화하는지를 살펴보았다.

지반을 포함한 라이닝에 대하여 파라미터를 변화시키므로써 라이닝 거동이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 파라미터는 지반의 물성, 라이닝 두께의 변화, 지반과 라이닝 사이의 인터페이스 강성비, 복층 라이닝 사이의 인터페이스 강성비이다. 지반의 물성변화 효과는 지반과 라이닝 사이의 휨강성비 즉 F 로 나타내었다. 라이닝 거동은 천단 및 측벽의 처짐, 축력, 휨모멘트, 결과적인 단면력 값을 구하여 비교하였다. 그림 7은 인터페이스 강성의 변화 및 휨강성비 F 의 변화에 따른 천단 처짐을 나타낸 것

이다. 법선하중이 접선하중에 비해 상당히 크기 때문에 접선강성의 역할이 가장 작다. 따라서 천단의 경우 강성비의 변화에 전혀 무관하게 처짐량이 발생하는 반면에, 측벽에서는 0.1까지 처짐이 크게 증가하다가 이후 작은 증가를 보인다. F 가 증가하면 즉 지반의 강성이 증가하면(지반이 경암에 가까워질수록), 처짐량은 작게 발생하는 일반적인 현상을 보인다.

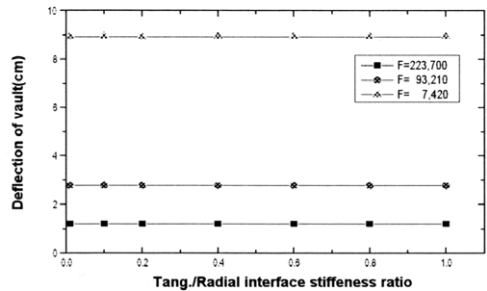


그림 7. 인터페이스 강성 및 휨강성비에 따른 천단 처짐

3.2 초기지압 및 지보시차 고려

본 연구에서는 위의 변수들중 해석에 반영할 수 있는 1) 굴착전 지반의 초기응력 상태, 2) 굴착후 슛크리트 설치 시까지의 지반의 이완, 3) 슛크리트 설치후 최종 콘크리트 라이닝의 설치시까지의 이완, 4) 콘크리트 라이닝에 걸리는 2차 지압을 고려할 수 있는 해석시스템을 개발하였다.

본 프로그램은 구성 요소는 그림 8에서 보는 바와 같이 지반요소, 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 요소, 지반과 슛크리트를 연결하는 인터페이스 요소, 슛크리트와 콘크리트 라이닝을 연결하는 인터페이스 요소이다.

지반을 포함한 라이닝에 대하여 지반의 물성변화를 통하여 즉 휨강성비 F 의 변화를 통하여 라이닝 거동이 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 라이닝 거동은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 천단 및 측벽의 처짐, 축력, 휨모멘트, 결과적인 내부응력의 값을 구하여 비교하였다.

대상은 경부고속전철 표준단면에 대하여 수행하였는데, 패턴 1~5 즉 다섯 가지 패턴에 대하여 해석을 수행하였다. 각각의 패턴에서 강지보공, 용접강선망, 록볼트는 해석에서 제외하여 순수한 슛크리트 및 콘크리트와 지반 사이의 거동만을 해석하였다.

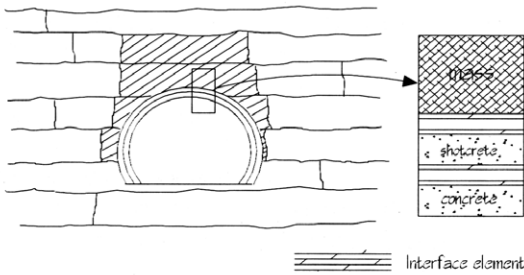


그림 8. 프로그램의 구성 요소

또한 지반의 물성변화 즉 지반의 암종이 변화함에 따라 라이닝 거동이 어떻게 변화하는지를 조사하였다. 축압계수는 1로 고정하였으며 인터페이스의 접선/법선 강성비는 1.0으로 고정하였다.

그림 9에는 콘크리트 라이닝의 처짐을 나타내었다. 모든 처짐량값은 휨강성비가 작을수록 크며, 휨강성비 F가 커질수록 지수 함수적으로 감소하여, 25,000이상의 범위에서 일정한 값을 나타낸다. 따라서 보통의 복층 라이닝과 조합되는 지반은 보통암 이상의 양호한 암반일 경우 처짐량에 있어 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

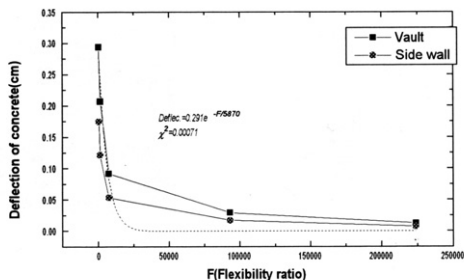


그림 9. 휨강성비에 따른 콘크리트 라이닝 처짐

3.3 터널 라이닝 해석 시스템

지금까지 구현한 각종 해석기법을 하나의 프로그램 시스템으로 총괄 통합하였다. 이 해석시스템은 윈도우용 S/W인 TULAS(Tunnel Lining Analysis System)라 하였으며, 본 해석시스템의 해석모듈은 다음과 같은 6개의 모듈로 이루어진다.

- 1) 단일 라이닝 해석모듈: SINGLE LINING
 슛크리트 혹은 콘크리트 단일 라이닝을 해석하는 모듈이다.
- 2) 복층 라이닝 해석모듈: DOUBLE LINING
 슛크리트 및 콘크리트 라이닝을 동시에 해석하는 복층 라이닝 해석모듈이다.
- 3) 지반-단일 라이닝 해석모듈 (탄성): Q4-SINGLE (ELASTIC)
 지반 및 단일 라이닝과 두 요소를 잇는 인터페이스 요소로 구성된 해석모듈이다.
- 4) 지반-복층 라이닝 해석모듈 (탄성): Q4-DOUBLE (ELASTIC)
 지반 및 복층 라이닝과 두 개의 인터페이스 요소로 구성된 해석모듈이다.
- 5) 지반-단일/복층라이닝 해석모듈 (탄소성): Q4 - DOUBLE(ELASTO-PLASTIC)
 지반 및 복층 라이닝 혹은 단일 라이닝 해석이 가능한 탄소성 해석모듈이다.
- 6) 초기지압 및 지보재의 시차적 적용 모듈
 초기지압을 고려하고 지보재를 시차 적용할 수 있는 모듈이다.

그림 10은 본 해석시스템의 단일라이닝 및 복층라이닝에 대한 제어변수를 입력하는 윈도우창을 나타낸 것이다. 해석모듈에서는 전처리 과정과 해석과정을 모두 포함하고 있다. 전처리 과정은 요소를 자동 생성하는 기능을 갖



그림 10. 라이닝 제어변수입력

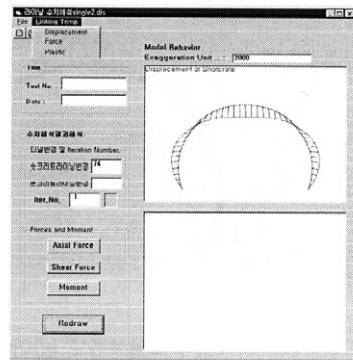


그림 11. 후처리 프로그램

고 있다. 따라서 요소 생성에 필요한 기본적인 입력값만 입력하면 모든 과정이 자동으로 처리된다.

또한 후처리 옵션은 그림 11에서 보는 바와 같이 해석 결과로 나오는 라이닝 변위, 단면력 등을 출력하기 위한 모듈로서 지반의 변위 및 응력등은 생략되어 있다.

3.4 터널 현장적용

본 연구에서 개발된 유한요소 프로그램의 터널현장에 대한 활용성을 고찰하기 위하여 초기지압 및 지보의 시차적 적용이 구현된 프로그램을 이용하여 기 건설된 터널단면을 선정하였다. 특히 해석의 정도를 조사하기 위하여 터널 라이닝의 변위 및 응력이 계측되고, 지중변위 및 천단침하가 계측된 단면에 대하여 수치해석을 수행하였다.

본 해석단면 104K 200, 103K 950은 모두 대표단면 계측지점으로서 지중변위, 슛크리트 응력, 지중침하, 천단

침하량을 수치해석과의 비교대상으로 선정하였다. 경계 조건은 공학적 차원에서 일반적으로 설정하는 기준에 따라 터널 상부는 덮개암의 두께, 측부는 2.5D (D는 터널의 직경), 하부는 1.5D로 영역을 설정하였고, 좌·우 측방 경계는 수평변위, 하부 경계는 연직변위를 구속하였다.

표 2에 계측결과 및 해석결과를 나타내었다. 대표단면 103K 950에서는 터널 천단의 침하량이 5.00으로 계측되고, 수치해석 결과는 4.83 mm를 나타내었다. 거의 유사함을 알 수 있다. 같은 현상이 지중변위량에서도 나타나는데 터널 천단으로부터 1.5 m 떨어진 지반내 지중변위량은 5.30 mm로서 수치해석 결과의 4.58 mm와는 거의 유사함을 알 수 있다.

지보재의 물성인 슛크리트의 압축응력은 두 단면 모두 천단과 측벽부에서 계측결과와 수치해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 모든 경우에 슛크리트 압축응력은 허용압축응력 52 kg/cm²에 크게 미치지 못함을 알 수 있다.

표 2. 계측결과와 수치해석 결과와의 비교

Section	Vault subsidence (mm)		Horizontal convergence (mm)		Shotcrete compressional stress (kg/cm ²)				Ground displacement (mm)	
	Mea.	Num.	Mea.	Num.	Vault		Side wall		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
Remark	Num. : Numerical results, Mea. : Measurement data									

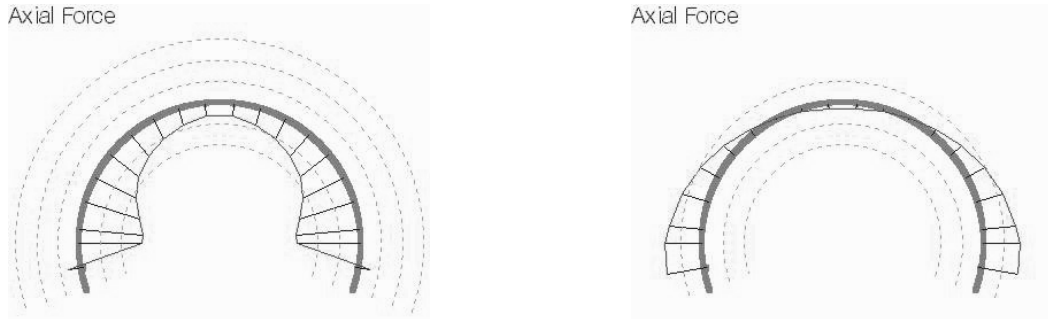


그림 12. 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 축력분포

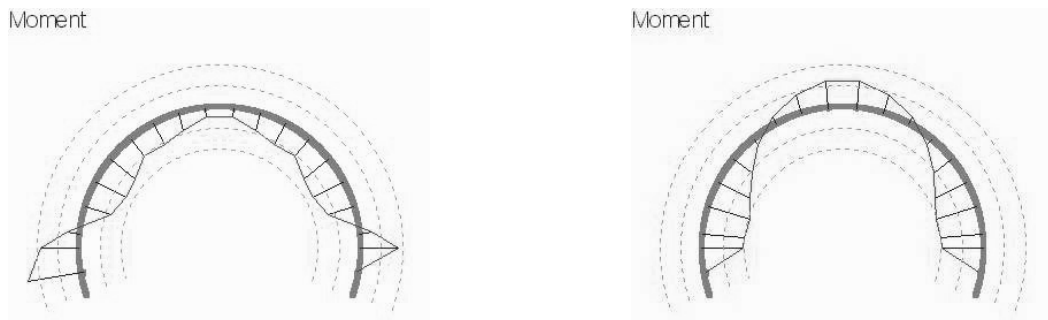


그림 13. 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 모멘트분포

그림 12에는 각각 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 축력을 나타내었다. 슛크리트의 축력은 모든 지점에서 압축력이 작용한다. 최대 압축력은 각부에서 50 kgf로서 작용하고, 천단으로 갈수록 점점 그 크기는 작아진다. 그러나 콘크리트 라이닝의 축력은 대부분의 지점에서 인장력이 작용하며 천단으로부터 30도 이내에서는 압축력이 작용하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 축압계수가 콘크리트 라이닝의 거동이 역전되는 0.5이므로 전 장들에서 살펴본바와 같다.

그림 13에는 각각 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 휨모멘트 분포를 나타내었다. 슛크리트 휨모멘트는 각부점에서 스프링 라인까지는 지반쪽으로 휨이 발생하는 부(-)의 휨모멘트가 그 이후 천단까지는 공동내부로 휨이 발생하는 정(+)의 휨모멘트가 발생함을 알 수 있다.

4. 터널 변상원인 및 견전도 평가

4.1 인공신경망 모델설계

본 연구에서는 외력에 의하여 변상이 발생하였을 때 터널 라이닝에서 관찰할 수 있는 현상을 근거로 하여 어떤 외력이 작용하였는지 판명하기 위한 인공신경망 모델을 설계하였다. 여기에 사용된 다층 역전파 학습 인공신경망은 입력층과 출력층, 두 층 사이에 존재하는 은닉층으로 구성되며 구조 및 학습상수 등을 사용자가 결정할 수 있다.

인공신경망 학습을 위한 자료를 구성하기 위해서는 입력 및 출력자료가 함께 주어져야 한다. 따라서 변상현상으로 원인을 파악하고자 한다면 상세한 항목별 조사 및 그에 따른 전문가의 판단이 주어져야 하지만 현재 국내외

터널 관련 자료에서 그러한 부분은 매우 부족한 상태이다. 이러한 문제의 해결을 위해 터널 변상현상에 대한 연구내용을 바탕으로 하여 타당한 사례들을 구성하였다. 즉 변상현상들을 원인별로 적절하게 조합하였다. 129개의 사례를 조사하였다.

인공신경망 구조와 학습상수를 함께 고려하기 위하여 4종류의 구조와 3종류의 학습상수를 조합해서 12개의 인공신경망 모델을 구성하였으며 허용 시스템오차를 0.01로 설정하였을 때의 학습결과 및 재추론결과를 이용하여 최적의 인공신경망을 선택하고자 한다. 설정된 모델은 표 3과 같다. 여기에서 입력층은 변상현상에 따라 41개의 노드를 가지며, 11가지 변상원인이 있으므로 출력층은 11개의 노드를 가진다.

표 3. 인공신경망 설정을 위한 모델

구조	학습상수			
	0.1-0.9*	0.3-0.7	0.5-0.5	
20	Model 1	2	3	
20-20**	4	5	6	
41	7	8	9	
41-41	10	11	12	

* : 0.1-0.9는 학습율 0.1, 관성율 0.9를 의미
 ** : 20-20은 은닉층이 2개이며 각각 20개의 노드로 구성됨을 의미

모델의 선정기준으로는 학습에 사용된 129개 사례 중 임의로 선택된 22개 사례를 재추론하여 구한 결과의 오차율을 삼는다. 재추론결과의 오차율은 22개 사례별 오차를 구한 뒤 이 값들의 평균을 취한다. 여기서 오차는 추론결과와 목적 결과의 차와 목적 결과의 상대적 비를 의미한다. 시스템에서 다른 자료를 이용하여 학습할 가능성이 매우 적으므로 학습시간과 횟수는 인공신경망의 특성 파악에만 이용한다. 표 4에 오차, 학습수행시간 및 수행횟수를 정리하였다.

평균오차 및 최대·최소오차는 큰 차이를 보이지 않으며, 은닉층의 구조가 복잡해짐에 따라 학습시간이 상당량 증가함을 알 수 있다. 반면에 적은 학습횟수에 요구하는

시스템오차에 도달할 수 있음을 알 수 있는데 이는 은닉층의 개수가 증가함에 따라 상호연관성 패턴인식 영역이 고급화되기 때문이다. 아울러 시스템오차 0.01이 그다지 가혹한 수렴조건이 아닌 점도 학습횟수 감소의 원인이 될 수 있다.

오차들의 평균보다 값이 작은 모델은 4, 5, 7, 10, 11, 12이며 이중 은닉층이 단층인 7번 모델은 제외하였다. 나머지 5개의 모델 중에서는 5번 모델과 12번 모델이 최대 오차가 작는데 현재 시스템 구성에서는 학습시간이 중요한 요소가 아니므로 좀 더 복잡한 구조의 12번 모델을 최종 최적 인공신경망 모델로 선정하였다.

표 4. 구성된 인공신경망 모델의 학습결과

모델	평균오차 (%)	최대오차 (%)	최소오차 (%)	학습시간 (mm:ss)	학습횟수
1	8.25	19.39	2.56	13:34	329
2	8.68	20.11	4.04	19:05	461
3	8.38	19.90	3.30	14:50	360
4	7.75	19.82	2.24	17:43	306
5	7.13	17.85	2.12	20:08	348
6	8.11	19.03	3.19	21:41	374
7	7.36	18.11	2.38	22:21	270
8	8.03	22.62	3.77	20:38	251
9	8.00	19.35	3.46	22:49	276
10	7.24	19.49	3.00	35:30	234
11	7.47	19.35	2.58	40:39	270
12	7.08	17.56	2.79	41:07	273

4.2 터널 건전도 평가 시스템

(1) 대상터널의 제원 입력

시스템을 처음 시작하면 그림 14과 같은 입력창이 나타난다. 이 창에서 입력된 내용을 기준으로 하여 터널별로 자료가 저장되어 데이터베이스를 구성하게 된다. 또한 터널별 자료의 하부에 구간별 자료를 두어 관리하므로 한 터널에 대하여 여러 구간을 적용하고 저장할 수 있

다. 읽어오기를 선택하면 기존에 입력된 자료를 불러올 수 있다.

(2) 터널 변상현상 입력

왼쪽 상단의 터널형태에서 부분별 버튼을 선택하면 그림 15의 오른쪽 상단에 선택사항들이 제시된다. 이 항목들 가운데 해당되는 것을 선택하면 화면 하부의 표에 선택사항이 함께 나타난다. 세부기능으로 만일 수평균열이 어떠한 형태인지 알고 싶은 경우 왼쪽 하단의 표에서 수평균열 란을 더블클릭하면 균열 발생 사례를 균열의 종류 별로 볼 수 있으므로 선택에 도움을 줄 수 있다.

터널 변상현상을 모두 입력한 뒤 변상원인을 추론하고자 한다면 추론 버튼을 선택하며, 시공 및 주변환경조

건이 있다면 종료 후 환경조건입력을 선택하는데 환경조건을 함께 고려하는 것이 정확성을 높일 수 있다고 생각된다.

(3) 시공조건 및 주변환경조건 입력

그림 16의 창에서 해당되는 사항을 선택한다. 터널 변상현상 입력장과 구분되어 있으므로 환경조건만으로도 추론이 가능하다. 터널 시공 이전이나 이후에 일어나기 쉬운 외력작용을 고려하는데 도움을 줄 수 있다.

(4) 변상원인 추론 결과제시

입력된 자료를 바탕으로 추론한 결과는 그림 17과 같은 형식으로 제시된다. 표시된 수치는 라이닝 변상현상과 환

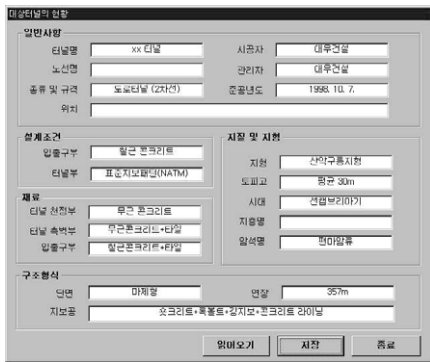


그림 14. 터널의 제원 입력모듈

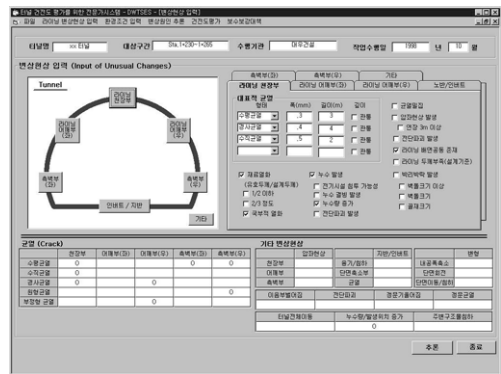


그림 15. 터널 변상현상 입력모듈

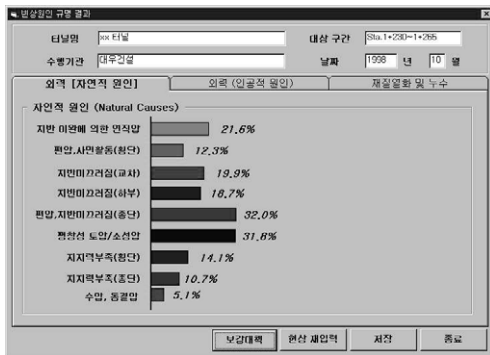


그림 16. 시공조건 및 주변환경조건 입력 모듈

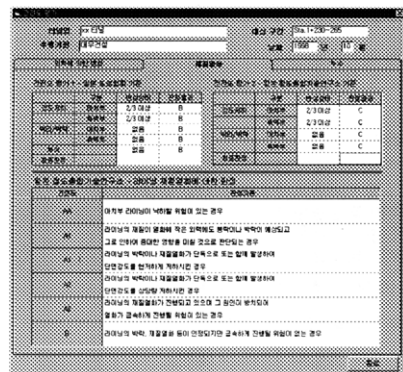


그림 17. 변상원인 추론결과

그림 18. 건전도 평가 모듈

그림 19. 보수보강대책 제시 모듈

경조건의 가중치가 고려된 합이 되며 다른 구간에 대해서 도 ②의 과정부터 실행될 수 있다.

(5) 건전도 평가결과

입력된 내용을 근거로 한 대략적 건전도 평가결과가 두 기준에 따라 외력에 의한 변상, 재질열화, 누수별로 제시되며 최종판정을 위해서 정성적 판정기준이 그림 18과 같은 화면하단에 표시된다. 상단 좌측이 표를 선택하면 아래 제시된 기준도 같이 바뀌게 된다.

(6) 보수보강대책 제시

건전도 평가결과와 선정기준에 따른 몇 가지 문항의 입력자료를 바탕으로 다음과 같은 보수보강대책 제시창이 그림 19과 같이 나타난다. 그림과 같이 특정 항을 선택하면 공법에 대하여 간단하게 목적, 적용상황, 방법이 함께 제시된다. 대개 두세 가지의 공법을 병용하는 사례가 많은데 이를 위해 보수목적에 맞는 최적의 공법 조합사례를 제시할 수 있는 기능을 추가함으로써 시스템의 개선을 도모할 수 있을 것으로 생각된다.

4.3 터널 현장사례 적용

본 연구에서 개발된 시스템의 현장터널에 대한 활용성을 검증하기 위하여 현장사례를 적용하였다.

(1) 터널 변상현상 및 환경조건

본 터널은 연장 6,359 m로서 1970년 준공되었다. 단선 2호형으로 콘크리트 구조물이며 일부 구간에만 인버트가 설치되어 있다. 지형 및 지질조건을 살펴보면 변상이 발생한 구간 부근에 응회암과 유문암이 있으며 상부지반은 대체로 평평한 형태이고 변상이 일어난 구간의 토피는 300 m이다. 라이닝 두께는 23~45 cm로 일부구간에서 설계보다 작게 시공된 것으로 판단되었다.

터널에 일어난 변상을 알아보면 초기에 지반이 부풀어 오르고 측벽이 압출된 이력이 있으며, 계속 단면의 축소가 발생하고 있다. 내공변위량 측정 결과 최대진행속도가 약 15 mm/year이며, 1977년 터널 아치부에 압좌현상이 발생하였다. 그리고 지반이 부풀어오르는 현상의 영향으로 노반이 얼마간 융기하였으며 터널 양쪽의 배수구도 변형을 일으켰다. 변상구간의 균열 등을 나타낸 변상전개도

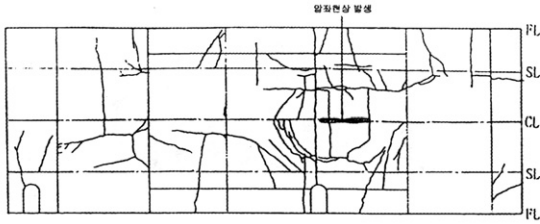


그림 20. 터널 라이닝 변상전개도

표 5. 터널 주요 입력자료

현상	위치 및 특징
균열 (폭 3mm 이상)	수평균열-어깨부(좌, 우), 측벽부(좌) 수직균열-천장부, 어깨부(좌, 우), 측벽부(좌, 우) 경사균열-어깨부(우), 측벽부(좌,우)
압좌현상	천장부 (길이 7m)
지반·인버트 변형	지반팽창에 따른 융기 내공폭 축소 발생 (최대변위량 15mm/year)
환경조건	지반팽창 발생 변상구간에 인버트 미설치 라이닝 두께부족

는 그림 20과 같다. 대표적 균열은 아치 어깨부 양쪽의 수평균열과 왼쪽 측벽부의 수평균열, 천장부 및 어깨부, 측벽부 전반에 걸친 수직균열, 오른쪽 어깨부의 경사균열, 양쪽 측벽부의 경사균열을 들 수 있다. 프로그램에 입력된 내용은 표 5와 같다.

(2) 프로그램 수행결과

인공신경망을 이용하여 변상현상만을 입력한 결과 프로그램에 의해 제시된 원인별 가능성은 그림 21에 나타난 바와 같이 소성압(53%), 동결압(33%), 터널 종단방향 지지력부족(32%), 지반이완에 의한 연직압(19%), 지반 미끄러짐(18%) 순서이다.

환경조건을 살펴보면 지반팽창, 인버트 미설치, 라이닝 두께부족이 소성압 발생환경에 모두 해당되며 라이닝 두께부족이 지반이완에 의한 연직압과 편압·사면활동, 수압, 동결압에 해당된다. 결과적으로 소성압이 37.5%를, 그 외 해당원인이 12.5%의 가능성을 가지며 지반 미끄러

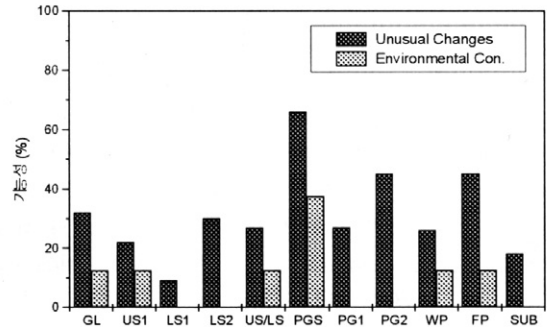


그림 21. 변상원인 평가결과

짐과 지지력부족, 지반침하에 따른 터널침하에 우호적인 환경조건은 없으므로 값을 가지지 않는다. 두 과정의 결과를 함께 그래프로 제시하면 그림 22와 같다.

최종적으로 소성압 작용 가능성이 가장 크며, 그 다음으로 동결압, 지반이완에 의한 연직압 등이 제시될 수 있으나 소성압에 비해 그 가능성이 매우 작다고 할 수 있다.

보수보강대책제시를 살펴보면 외력에 의한 변상대책에서 배면주입공법과 록볼트보강공법이 가장 우선적으로 제시되며, 다음으로 슛크리트 또는 현장타설 콘크리트를 이용한 라이닝 보강, 스트리트공법, 인버트 콘크리트 설치가 제시되었다.

5. 결론

본 연구에서는 터널의 효율적인 안전관리 및 유지관리를 달성하기 위하여 터널 비파괴조사, 터널해석 및 안정성 평가, 터널 변상원인 및 건전도 평가에 관한 요소기술을 개발하고 이를 시스템화한 터널 정밀안전진단 시스템을 개발하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) GPR조사에서는 터널조사에 있어서는 중심 주파수가 400 MHz인 안테나의 사용이 유용하였다. 또한

측정거리에 따라 일정한 전자파를 발생시키는 survey wheel의 사용이 권장된다. 원지반과 밀착된 콘크리트 라이닝의 두께를 파악하는 데에는 매우 제한적으로 적용될 수 있다.

- 2) 충격반향조사에서는 원지반과 밀착된 콘크리트 라이닝의 경우에도 두께를 파악할 수 있었고 두께가 30 cm 규모의 라이닝 두께 검측에 가장 효율적인 것으로 나타났다. 두께가 50 cm 이상의 라이닝에는 측정오차에 의한 결과값의 변화가 매우 컸으며, 터널라이닝의 형상은 공진을 발생시키기에 양호한 형상을 띠고 있어 적용성은 더욱 높았다.
- 3) 숏크리트 및 콘크리트 라이닝, 지반과 숏크리트 사이에 존재하는 새로운 라이닝 인터페이스 요소를 개발하여 라이닝을 나타내는 프레임 요소와의 결합을 통하여 터널 라이닝을 수치해석적으로 검토할 수 터널 라이닝해석시스템을 개발하였다.
- 4) 지반압을 1차적으로 지보하는 숏크리트와 2차적으로 지보하는 콘크리트 라이닝 거동과는 모든 거동에 있어 상이한 거동을 보이므로 숏크리트에 작용하는 지압의 형태, 지반특성 등과 관련하여 복층 라이닝 해석이 반드시 필요하리라 판단된다.
- 5) 터널 라이닝에 발생하는 변상의 경우 인공신경망을 이용하여 기존의 현장자료나 관련 이론을 학습함으로써 패턴매칭(pattern matching)을 통한 경향 파악이 가능하였다. 또한 학습에 사용되지 않은 자료에 대해서도 학습결과를 기초로 한 추론이 가능하였다.
- 6) 터널 라이닝 변상현상만으로 원인을 추론한 결과 대체로 전문가의 판단과 유사함을 보였다. 그러나 터널 시공조건 및 주변환경조건을 함께 고려함으로써 정확성을 높일 수 있다. 변상원인 추론 및 건전도 평가결과를 이용하여 보다 효율적인 보수보강대책을 세울 수 있다.

참고 문헌

1. 과학기술부 (1998), 터널안전관리를 위한 정밀안전진단 시스템 개발 최종보고서.
2. 김영근, 이용호, 정한중, 신상범, 조철현 (1997), "지하레이더 (GPR)를 이용한 터널 라이닝 비파괴 시험에 관한 연구", 한 국암반공학회지, Vol. 7, No. 4.
3. JTA 保守管理委員會 (1996), "トンネルの新しい検査手法 (1)", トンネルと地下, 日本トンネル技術協會誌, Vol.27, No. 8, pp. 57~65.
4. (財)鐵道總合技術研究所, トソネル補強・補修マニュアル, 平成2年.
5. 日本技術協會, トソネル變狀の實態調査とその原因解明に関する研究(その2)報告書, 昭和 56年.
6. (財)鐵道總合技術研究所, 變狀トソネル對策工設計マニュアル, 平成 10年 2月, 1998.
7. Haack, A., Schreyer, J., Jackel, G. (1995), "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 413 - 431.
8. ITA Working Group (1988), "Guidelines for the design of tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3 No. 3, pp. 237-249.
9. O'Rourke, T.D. (1985), "URTC Study: Design of tunnel linings", Underground Space, Vol. 9, pp. 102-108.
10. Paul, S.L., Hendron, A.J., Cording, E.J., Sgouros, G.E. and Saha, P.K. (1983), "Design recommendation for concrete linings - Vol. 1 Results of model tests and analytical parameter studies", UMTA-MA-06-0100-83-1, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
11. Faghri, A. and Hua, J. (1992), "Evaluation of Artificial Neural Networks Applications in transportation Engineering", Transportation Research Board 71st Annual Meeting.