

터널 붕괴 사례에 기반한 터널 시공 위험도 관리 시스템의 개발

신휴성, 배규진, 권영철, 김영운(한국건설기술연구원)
김영근(삼성물산 건설부문)

1. 서론

터널 시공 위험도 관리 시스템(Tunnel Hazard Management System, THAM-System)은 터널 공사 진행 중 발생할 수 있는 위험도를 정량적인 지수 형태로 제시하여 현장 기술자들에게 신속하고 정확한 대응책을 수립할 수 있도록 관리 및 운영의 중요 참고자료를 제공하는 것을 목표로 개발되었다(한국건설기술연구원, 2008). 본 시스템은 기본지수 평가에서 계측과 특수 조건까지를 포함한 종합적인 터널 시공에 관한 종합적인 평가 관리체계로서 시스템의 개요에 대해 설명하면 이하와 같다. 1차적으로 대상터널 막장 관찰 자료와 기본적인 현장자료에 기반을 두어 터널 붕괴 위험도 지수(KICT Tunnel Hazard Index, KTH-Index)를 산정한다. 현재까지 구축된 개발 수준은 1차 지수산정단계까지는 완료되어 현장 적용을 수행하였으며 일부 특수 조건도 지수평가 체계를 개선함으로써 도입되어 있다. 또한, 본 단계는 시공이 개시되기 전 지반조사 자료와 설계안에 대해 붕괴 위험도를 시뮬레이션 하는데도 적용가능하다. 향후 연구를 통해 1차적으로 산정된 초기 위험도 지수 값을 매 막장마다 수집될 수 있는 세부막장관찰자료 및 계측자료와 연계한 1차 붕괴 위험도 지수 값 보정 방안을 현장적용을 통해 개발할 계획이다. 1차 보정된 지수 값은 별도로 구축된 터널붕괴에 대한 전문가의 경험(지식기반 DB)과 연계하여 3차적으로 붕괴 위험도 지수가 보정될 것이다. 최종적으로 결정된 터널 붕괴 위험도 지수는 본 연구를 통해 구축될 지수 평가 틀을 통해 구체적인 막장상태 및 현장대처방안이 제시될 것이다.

본 논문에서는 터널 붕괴 사례를 기반으로 훈련된 인공신경망을 이용하여 다양한 영향인자로부터 터널 붕괴에 대한 확률적 가능성을 정량적으로 평가하기 위한 새로운 접근을 제시하며 동시에 개발된 기법이 현장적용 측면에 있어서 합리성을 갖고 있는지를 검토한 결과를 정리하였다.

2. 터널 붕괴 위험도 지수(KTH-index) 산정 시스템

2.1 이론적 배경

기존 터널설계는 지반조사에 의해 제공되는 지반정보를 기반으로 터널구간별 지반등급에 따라 지보패턴을 부여하는 방식으로 이루어진다. 지보패턴을 이용한 터널설계방식은 최종적으로 다양한 수치해석을 통한 터널 안정성에 대한 설계 적정성 평가를 수행하기는 하나 몇몇 대표 지반정수 및 터널의 기하학적인 특성만을 고려해 수치 해석적으로 평가된다. 이를 통해 지반 굴착변위에 따른 지보재의 안전성을 검토하는 정도로 설계 적정성 검토를 수행한다.

종래 터널공법의 지보개념은 발생하는 중압에 대해서 이를 지지할 수 있는 강도의 지보를 설계 및 시공하는데 주안점을 두었다. 그러나 지보에 작용하는 중압은 지질조건이나 암석의 물성에 의하여 결정될 뿐만 아니라 시공되는 지보의 물성에 의해서도 변화하는데, 이러한 지보의 특성은 지보 재료의 강성, 강도를 비롯하여 지보의 형상, 설치시기, 암반과의 밀착정도 등에도 크게 영향을 받는다(이희근, 1993). 이외에도 붕괴된 터널사례 및 분석자료(박광준 & 이인근, 1993)에 의하면, 터널 붕괴는 지반의 불확실성에 기인한 국부적인 연약대 출현, 지하수 상태 및 막장관리 등 표준화된 구간별 지반등급만으로는 표현되기 어려운 지반상태와 시시각각 현장여건에 의해 변화하는 시공조건에 대해서도 크게 영향을 받는다.

또한, 국내외적으로 터널설계(안)는 상기에서 언급된 국부적인 지반변화 조건 및 가능한 취약 시공조건에 대해 설계(안)를 검토하고 평가할 수 있는 방안은 보고된 바 없다. 나아가, 시공 중 다변하는 막장상태와 시공조건을 조사하여 터널 붕괴에 대한 막장 위험도 수준을 매 굴진장마다 평가하면서 막장관리를 수행할 수 있는 공학적 틀도 존재하지 않는다.

본 연구에서는 상관도 행렬개념과 각 인자의 가중치를 산정하는 체계를 기반으로 터널 위험도 지수라는 새로운 평가체계를 제안하였다. 또한, 기존 적용사례에서는 상관도 행렬을 구성하는 각 행렬항(matrix elements)들을 전문가의 경험상에 기초하여 인위적으로 결정함으로써, 그 결과의 객관성과 동일문제에 대한 범용 틀으로써 발전되지 않았으나, 본 연구에서는 인공지능망 민감도 해석기법을 활용하여 기 구축된 기존 붕괴 터널현장 자료 DB을 분석하여 각 인자간의 민감도를 의미하는 상관도 행렬의 각 항들을 객관적으로 결정할 수 있도록 하였다.

2.2 터널 붕괴 위험도 지수(KTH-index)값 산정

터널 붕괴/붕락 영향인자 분류 및 등급표를 활용하여 총 56개의 붕괴현장 자료를 재구성하였다. 재구성된 자료는 코드화되어 한국건설기술연구원(2005)에서 개발한 인공지능망 학습엔진을 이용해 학습되었다. 학습을 위해 설계된 인공지능망의 입력층(13개 노드)과 출력층(13개 노드)의 형태와 2개의 은닉층(26개 노드)의 구성은 그림 2.1과 같다.

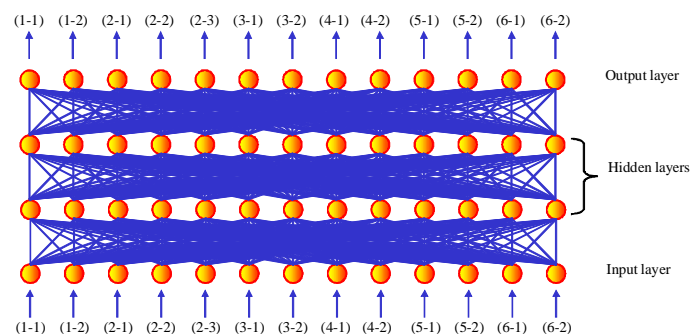


그림 2.1 학습에 사용된 인공지능망 구조

학습된 인공지능망은 총 영향인자수를 고려해 총 13개의 입력노드를 설정하였으며, 모든 영향인자간의 편미분 값을 적절히 산출해 내기 위한 구조를 설정하기 위하여 같은 수의 출력노드를 설정하였다. 선형 KTH-index의 학습시에는 일반적인 인공지능망 학습에 적용되

는 선형 활성화 함수(linear activation function)를 사용하였으며, 비선형 KTH-index에서는 비선형 활성화 함수(activation function)를 사용하였다. 비선형 활성화 함수가 학습에 적용된 경우, 주어진 인자간의 편미분 값은 타 인자값의 상태에 영향을 받게 된다. 하지만 선형 활성화 함수를 사용한 경우에는 주어진 2개의 인자 간 편미분 값이 타 인자들 값에 영향을 받지 않고 일정하게 계산된다. 하지만, 선형 활성화 함수를 적용하였다 하여도 모든 영향인자간의 비선형 연계성을 적절히 학습해 내기 위하여 입력노드와 출력노드수와 같은 13개의 은닉노드로 구성된 2개의 은닉층을 설정하였다. 학습시 적용된 학습알고리즘은 최신 Resilient Propagation Algorithm (RPROP)을 사용하였으며, 학습의 일반화를 추구하기 위하여 early-stopping method가 적용되었다.

붕괴/붕락에 대한 ‘터널 위험도 지수’를 KICT Tunnel Collapse Hazard Index (KTH-index)로써 명명하며 다음과 같은 식으로 KTH-index값을 최종적으로 결정할 수 있다.

$$KTH-Index = \sum W_i V_i$$

여기서 V_i 는 영향인자 i 에 대한 주어진 현장에서 얻어진 등급치를 의미한다.

2.3 붕괴 영향인자별 가중치 산정

선형 상관도 행렬식을 기반으로 상기 식들을 통해 산정된 각 영향인자에 대한 가중치 값은 아래 표 2.1과 같다.

표 2.1 영향인자별 가중치(총합 100, 선형 KTH-index 시스템)

(1-1) 터널 굴착 단면적	(1-2) 터널 환산 심도비	(2-1) 막장 암종	(2-2) 막장 풍화도	(2-3) 지반 등급	(3-1) 불연속 면의 상태	(3-2) 불연속 면의 기하학적 특성	(4-1) 지하수 유입량/ 터널길이	(4-2) 지하 수위	(5-1) 굴착 방법	(5-2) 굴착 효율	(6-1) 지보 패턴 수준	(6-2) 보조 공법
6.43	7.87	5.33	6.44	8.47	13.0	9.28	8.29	6.38	4.97	4.67	9.38	9.49

표 2-1에 의하면 불연속면 조건과 관련된 3번 분류하의 영향인자들과 투입된 지보/보강 수준과 관련된 6번째 분류하의 영향인자들이 터널 붕괴에 가장 민감하게 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 반면에 굴착조건 관련 영향인자들이 상대적으로 터널 붕괴에 미치는 영향이 작은 것으로 파악되었다. 선형 시스템의 경우 표 2-1의 가중치는 평가 현장의 특성과 관계없이 변하지 않는다.

3. 현장 적용

3.1 적용 현장 현황

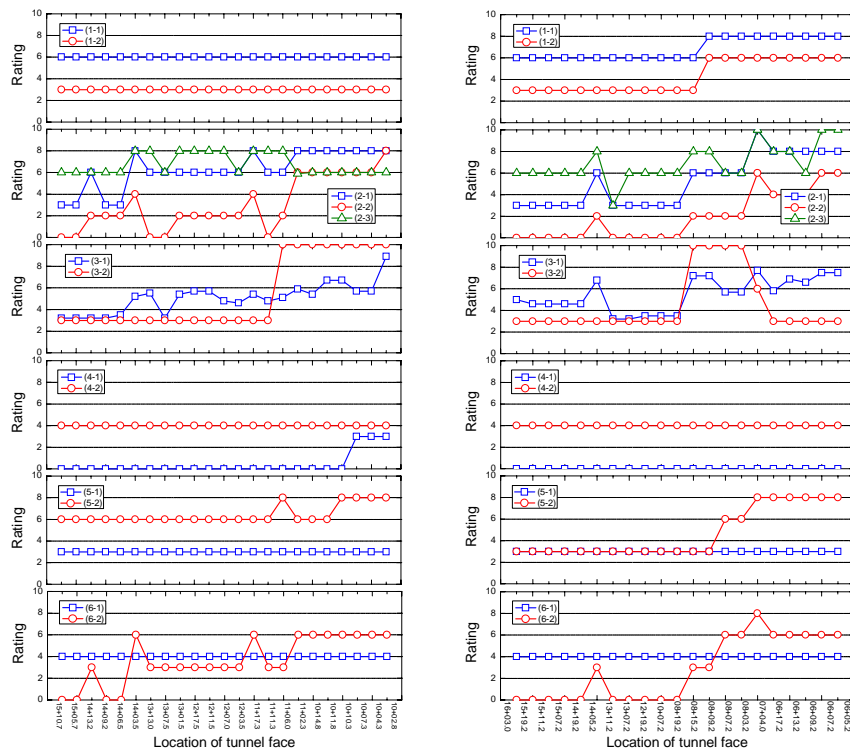
본 ○○ 터널은 국내 시공사례가 없는 환경사식 대형 대단면 터널로서, 굴착공사 중 두 차례에 걸친 붕괴사고(제 1 터널 상부 반단면 굴착, 제 2 터널 상부 반단면 굴착)와 제 1 터널 하부 굴착에서 붕괴사고가 발생하였다.

본 구간은 주로 운포편암으로 구성되어 있고, 유입부 지역의 단층대 주변은 불량한 암질의 운포편암이 발달하여 분포하고 있다. 제 2 터널 상부 반단면 굴착 STA. 5+00구간부터 제 1 터널 상부 반단면 굴착 STA. 10+00구간으로 주 단층이 10m 이상 두껍게 발달하고 있고, STA. 14+00과 STA. 20+00 지점에서는 가막골 방향과 유사한 방향으로 소규모 단층이 고각으로 분포하고 있다.

3.2 붕괴 위험도 평가 결과

(1) 입력데이터

그림 3.1은 KTH-index의 상승 원인을 분석하기 위하여 각 막장별로 13개의 입력데이터를 도시한 결과이다. 제 1 터널 상부 반단면 굴착에서 11K+11.3 지점의 급격한 지수 상승은 RQD값의 저하(2-2), 불연속면의 기하학적 특성(3-2) 및 지보패턴수준의 저하(6-1)가 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 후반부의 붕락부(10K+043)에서 보이는 지수의 지속적인 상승은 RQD값의 저하(2-2), 불연속면의 상태(3-1) 및 지하수의 유입량 증가(4-1)가 주로 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 제 2 터널 상부 반단면 굴착의 경우, 8K+19.2 지점의 지수의 급격한 상승은 터널환산단면적(1-1), 터널환산환산 심도비(1-2), 암종(2-1), RQD(2-2), 불연속면의 상태(3-1), 불연속면의 기하학적 특성(3-2) 및 보조공법(6-2)가 복합적으로 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 표 2-22의 영향인자별 가중치 산정 결과에서 알 수 있듯이 지수의 변화에 미치는 영향이 가장 큰 인자는 불연속면 조건과 지보/보강수준이며, 이 점을 감안할 때 다른 인자에 비해 이들 인자가 증감하면 지수의 변화를 유발하게 될 것으로 사료된다.



(a) 제 1 터널 상부 반단면 굴착

(b) 제 2 터널 상부 반단면 굴착

그림 3.1 입력데이터의 변화 추이

(2) 지수평가 결과 및 고찰

그림 3.2는 제 1 터널 상부 반단면 굴착과 제 2 터널 상부 반단면 굴착의 천정부 붕락 붕괴유형에 대한 평가결과를 나타내고 있다. 당해 연도에는 전년도에 평가된 선형 모델 평가결과와 더불어 비선형 모델의 평가결과도 함께 도시하였다. 평가 결과 비선형 모델과 선형 모델에서 거의 유사한 추이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 그림에서와 같이 실제 붕괴가 발생한 제 1 터널 상부 반단면 굴착의 10K+050구간으로 접근할수록 지수가 증가해 가는 변화 추이를 알 수 있다. 평가 결과, 붕괴막장에서 6막장 정도 후방까지 접근하였을 때부터 위험수준 1등급에 돌입하였고, 2막장 후방정도에서 위험수준 3등급에 돌입하였다. 제 2 터널 상부 반단면 굴착의 경우에도 붕괴 발생 지점으로 접근하면서 점차 지수가 상승하였으며 4막장 후반부터는 위험수준 1등급에 돌입하였다. 붕괴가 발생한 7K+040 부근에서는 지수가 급상승하여 위험수준 3등급 후반부로 접근했다. 이후 붕괴구간에서는 위험수준 1등급과 3등급에 지수가 분포하였다. 위와 같은 사실에 입각하여 판단하면 위험수준 1정도에서는 붕괴의 조짐 등이 파악될 수 있는 가능성이 있으며, 실제로 위험수준 3이상에서 실제 붕괴가 발생하였음을 알 수 있다. 본 평가는 실제 붕괴가 발생한 현장에 적용된 경우로, 지수의 변화추이와 작성된 위험수준 분포범위의 현장 적용성을 직관적으로 파악할 수 있다.

추가로 수행된 지표함몰 붕괴유형에 대한 잠재 붕괴 위험도 평가 결과를 그림 3.3에 나타내었다. 그림에서와 같이 제 1 터널 상부 반단면 굴착의 토피층 함몰유형에 대해서는 5막장 후방에서 위험수준 2에 돌입하였으며, 2막장 후방에서 위험수준 4로 진입함으로써 높은 붕괴 위험도 수준을 경고하였다. 제 2 터널 상부 반단면 굴착의 경우에도 터널 붕괴구간 이전에도 위험도 수준 2등급 이상의 높은 지수들이 평가되고 있으며 특히 붕괴가 발생한 구간에서는 2막장 전방부터 위험도 수준 4등급에 돌입하여 이후 급증하는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 평가된 위험도 수준은 기존 붕괴사례에 기반을 두어 판단하는 것이므로 기존 붕괴사례와 동일한 입력 자료와 위험수준이라기 보다, 기존 붕괴사례의 상세한 현장조건 등에서 차이가 날 수 있으므로 결정론적으로 붕괴가 발생한다고 판단내릴 수는 없다. 하지만 평가하고 있는 막장의 조건들과 유사한 조건에서 붕괴가 발생한 사례가 존재하므로, 평가차트에 나타난 위험수준별로 붕괴가 발생할 확률이 점차 높아지는 것으로 이해하는 것이 타당하다. 따라서 평가된 위험수준별로 보다 면밀한 현장 사전 조사를 통한 위험요소 사전 인지 노력은 막장의 안전성 확보차원에서 매우 중요하다 하겠다.

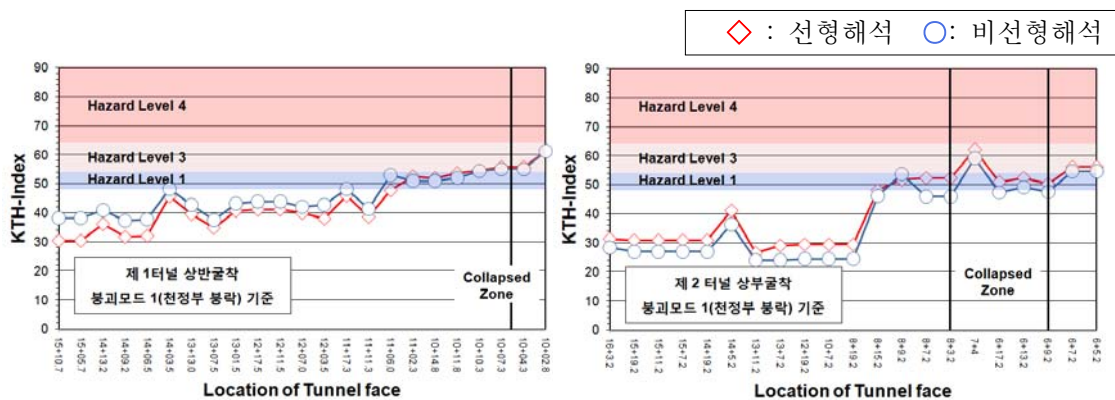


그림 3.2 붕괴 모드 1(천정부 붕락)에 대한 붕괴 위험도 지수 평가 결과

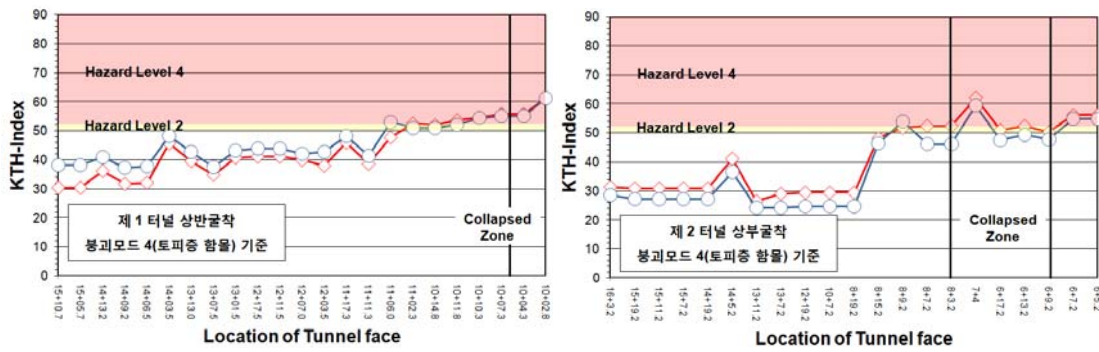


그림 3.3 봉괴 모드 4(토피층 함몰)에 대한 봉괴 위험도 지수 평가 결과

5. 결론

본 연구를 통해서 터널의 봉괴 위험도 지수개념을 제안하고 정량적인 지수를 산정키 위한 제반 이론적 배경과 산정방법을 제시하였다. 또한, 주어진 터널 설계자료나 시공 중 터널의 막장상태에 대하여 평가된 KTH-Index값을 적절히 평가함으로써, 터널 봉괴위험을 사전에 평가 그리고 조속한 대처를 통하여 봉괴위험을 최소화 시킬 수 있는 조건을 확보할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통해 개발된 신규 위험도 지수 산정 및 평가 차트의 현장 적용성을 평가하기 위하여, 이미 봉괴가 발생한 터널구간을 대상으로 터널 봉괴 위험도 지수 산정추이를 파악해 보았다. 본 현장적용 연구에서는 1차적으로 봉괴구간 100m 정도 후방에서 굴착해 들어오면서 터널 봉괴 위험도 평가를 수행하는 상황을 가상하여 봉괴 위험도 평가를 실시하였다. 새로운 터널 봉괴 위험도 평가차트를 이용해 위험도 지수의 봉괴 위험도를 평가하고 현장자료 및 발생되었던 봉괴현황과 비교함으로써 개발된 지수 및 지수산정 체계의 현장 적용성을 평가하였다. 이를 통해 본 연구를 통해 개발된 위험도 평가 시스템의 현장 적용 가능성을 충분히 확인하였으며 위험요소 사전 인지 노력에 대한 구체적인 대안 제시 측면에서 의미 있는 성과를 얻을 수 있었다. 제안된 KTH-Index는 현장자료를 기반으로 객관적인 산정과정을 통하여 결정되지만, 핵심인 상관도 행렬과 이로부터 결정되는 분류항목들의 가중치들은 봉괴 터널현장 자료가 확장되고 자료의 완성도가 높아짐에 따라 KTH-Index 평가의 신뢰도가 점진적으로 향상될 것이다. 따라서 제시된 KTH-Index의 version관리와 기반이 되는 현장자료 관리가 매우 중요하다 하겠다. 또한, 봉괴 터널현장 자료의 지속적인 업데이트와 함께, 시공 중인 터널현장에 사전 적용해 봄으로써 개발된 기법의 현장 적용성 평가 및 KTH-Index값과 함께 제공할 수 있는 정보를 다양화하기 위한 노력을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. 박광준, 이인근, 1993, 도심지 지하철 터널의 봉괴유형과 원인, 한국지반공학회 봄 학술 발표회 논문집, pp. 41-48.
2. 이희근, 1993, 지하철 공사장의 봉괴사고와 NATM공법, 서울공대, 기술기사, pp. 16-21.
3. 한국건설기술연구원, 2008, 터널공사 재해 최소화 및 예방기술개발, pp. 49-201.