

NATM 터널의 리스크 관리 시스템 개발 및 현장적용

정희영¹ · 이강현² · 김병규³ · 이인모⁴ · 최항석^{4*}

¹비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원

²정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

³비회원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 박사후연구원

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 정교수

A risk management system applicable to NATM tunnels: methodology development and application

Heeyoung Chung¹ · Kang-Hyun Lee² · Byung-Kyu Kim³ · In-Mo Lee⁴ · Hangseok Choi^{4*}

¹Post-Doctoral Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Senior Researcher, Research Institute, Korea Expressway Corporation

³Post-Doctoral Researcher, Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁴Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : Hangseok Choi, hchoi2@korea.ac.kr

Abstract

In this paper, a risk management system applicable to NATM tunneling projects is proposed. After investigating case histories in NATM tunnel collapse, this paper analyzes the potential risk factors and their corresponding risk events during NATM tunnel construction. The risk factors are categorized into three groups: geological, design and construction risk factors. The risk events are also categorized into four types: excessive deformation, excessive deformation with subsidence, collapse inside tunnels, and collapse inside tunnels with subsidence. The paper identifies risk scenarios in consideration of the risk factors and proposes a risk analysis/evaluation method for the NATM tunnel risk scenarios. Based on the evaluation results, the optimal mitigation measure to handle the risk events is suggested. In order to effectively facilitate a series of risk management processes, it is necessary to develop a risk register and a management ledger for risk mitigation measures that are customized to NATM tunnels. Lastly, the risk management for an actual NATM tunnel construction site is performed to verify the validity of the proposed system.

Keywords: NATM tunnel, Risk management, Risk scenario, Risk analysis, Risk evaluation

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(2)155-170(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.2.155>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 28, 2020

Revised February 18, 2020

Accepted February 21, 2020



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

본 논문의 목적은 NATM 터널에 적용 가능한 리스크 관리 시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해 먼저 NATM 터널 현장의 붕괴 사례를 조사하고, 이를 바탕으로 NATM 터널시공 중 발생 가능한 리스크 사건과 그 발생원인인 리스크 요인을 분석하였다. 리스크 요인은 지질, 설계, 시공 리스크 요인의 세 가지 카테고리로 구분하여 분석하였고, 리스크 사건은 과대변형, 과대변형 및 지표침하, 터널내부 붕락, 붕락 및 지표침하/함몰의 네 가지 유형으로 분석하였다. 또한, 리스크 요인으로부터 리스크 사건이 발생하는 일련의 리스크 시나리오를 리스크 요인별로 식별하였으며, 해당 NATM 터널 리스크 시나리오에 대한 리스크 분석 및 평가 방안을 제시하였다. 평가결과에 따라 리스크 대응이 필요한 시나리오에 대해 최적의 리스크 저감 대책공법을 선정하는 방안을 제시하였고, 일련의 NATM 터널 리스크 관리 프로세스를 효과적으로 수행할 수 있도록 NATM 터널 리스크 등록부 및 대책공법 관리대장을 개발하였다. 또한, 구축한 리스크 관리 시스템을 실제 도로터널 프로젝트에 적용하여 리스크 식별, 분석 및 평가, 대응 과정을 수행함으로써 그 타당성을 검증하였다.

주요어: NATM 터널, 리스크 관리, 리스크 시나리오, 리스크 분석, 리스크 평가

1. 서론

현재 전 세계적으로 건설 산업분야를 비롯한 여러 분야의 프로젝트에서 리스크 관리가 요구되고 있으며, 그 필요성이 점차 확대되고 있다(Tasmanian Government, 2011; Project Management Institute, 2013; Centers for Medicare & Medicaid Services, 2014). 특히 터널공사의 경우 설계단계에서 수행하는 지반조사는 광범위한 지역을 탐사하기 때문에 조사결과의 불확실성이 존재한다. 실제 터널시공 중에 예상하지 못한 지질조건과 조우하는 경우가 많으며, 터널시공 중 예상치 못한 위험지반에 대한 적절한 대처가 이루어지지 않으면 터널 붕괴·붕락 등으로 인한 공사비용 및 공사기간 증가를 비롯하여 인명피해까지도 발생할 수 있다. 따라서 안전성과 경제성을 확보한 성공적인 터널공사를 위하여 설계 및 시공단계에 적용 가능한 리스크 관리 시스템이 필요하다.

싱가포르의 Land Transport Authority (2012; 2018)는 건설공사 프로젝트의 입찰단계에서부터 계약자가 리스크를 관리하도록 리스크 관리에 대한 기준과 규정을 명시하고 있으며, 계약자가 프로젝트 전 단계에 걸쳐 리스크 관리를 지속적으로 수행하도록 요구한다. 또한, WSP | Parsons Brinckerhoff (2016)는 국책연구를 통해 리스크 분석 도구를 개발하였으며, 여러 건설공사에서 리스크 분석을 수행하였다. 하지만 여기서 요구하거나 제시하는 내용은 일반적인 리스크 분석 및 관리에 대한 설명이며, 실제 터널공사에 적용 가능한 리스크 분석 및 관리 방법을 체계적으로 제시하지는 않았다.

국내의 경우 Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-47 (2020)의 ‘건설공사 안전관리 업무수행 지침’에서 설계 안전성 검토(Design for Safety, DFS)가 법령화됨에 따라 향후 건설공사에서는 리스크 분석을 수행하여야 한다. 하지만 이 또한 건설공사 설계단계에 대한 일반적인 리스크 관리에 대한 내용이며, 현재 국내에서는 터널공사를 비롯한 건설 산업분야에서의 리스크 분석 및 관리는 미진한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 NATM 터널시공 중 발생 가능한 리스크를 식별하고, 식별된 리스크를 분석 및 평가하여 대응이 필요한 리스크에 대해 리스크 저감대책을 적용하는 한편, 일련의 리스크 관리 프로세스를 통제할 수 있는 체계적인 NATM 터널의 리스크 관리 시스템을 제안하고자 한다.

2. NATM 터널 리스크 관리 시스템 구축

Project Management Institute (2013)에서 제시하고 있는 일반적인 프로젝트 리스크 관리 프로세스를 바탕으로 Fig. 1과 같이 리스크 식별, 분석 및 평가, 대응, 통제 단계로 이루어진 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 구축하였다. 본 터널 리스크 관리 시스템은 Act No. 16272 (2019)의 ‘건설기술 진흥법’ 제62조(건설공사의 안전관리), Presidential Decree No. 30256 (2019)의 ‘건설기술 진흥법 시행령’ 제75조의2 (설계의 안전성 검토) 및 Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-47 (2020)의 ‘건설공사 안전관리 업무수행 지침’에서 제시하는 설계 안전성 검토(Design For Safety, DFS)와 국제터널학회(International Tunnelling and Underground Space Association, ITA) Working Group No. 2에서 제시하는 터널 리스크 관리 가이드라인의 내용을 반영하여 구축하였다.

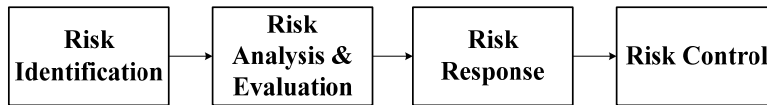


Fig. 1. Overall process of NATM tunnel risk management

2.1 리스크 식별

NATM 터널시공 중 발생할 수 있는 리스크 및 리스크별 대책공법을 도출하기 위해 국내외 여러 NATM 터널 현장에 대한 터널붕괴 사례(총 183개소)를 조사하여 붕괴 발생원인과 결과 그리고 현장에서 적용한 대책공법 등을 분석하였다. 해당 분석결과를 바탕으로 NATM 터널 리스크 요인과 사건에 대한 식별을 수행하였다.

2.1.1 NATM 터널 리스크 요인 및 사건 식별

NATM 터널붕괴 사례 분석결과 기반으로 NATM 터널에 대한 리스크 요인과 사건을 식별하였다. 일반적으로 건설공사에 대한 리스크 관리 시 지질, 설계, 시공 리스크 요인을 리스크 발생원인으로 고려하기 때문에 NATM 터널붕괴 사례 또한 이 세 가지 카테고리로 구분하여 리스크 요인을 Table 1과 같이 분석하였다. 또한, 183개소의 터널붕괴 사례에 대한 각 리스크 요인별 붕괴 발생분포 분석결과, 지질 리스크 요인이 약 84%, 설계 리스크 요인이 약 7%, 시공 리스크 요인이 약 9%로 나타났다. 따라서 NATM 터널에서는 위험지반(지질 리스크 요인)이 주된 리스크 발생원인임을 알 수 있다. NATM 터널 리스크 사건의 경우 Fig. 2와 같이 과대변형, 과대변형 및 지표

침하, 터널내부 붕락, 붕락 및 지표침하/함몰 네 가지 유형으로 분석하였다. 과대변형은 터널 내부에 과도한 변형이 발생하는 경우이며, 과대변형 및 지표침하는 터널 내부에 과도한 변형이 발생될 뿐만 아니라 지표침하까지 동반되는 경우이다. 터널내부 붕락은 터널 내부에서 붕락이 발생하는 경우이며, 붕락 및 지표침하/함몰은 터널 내부 붕락과 함께 지표침하 혹은 함몰이 발생하는 경우이다.

2.1.2 NATM 터널 리스크 요인별 리스크 시나리오 식별

NATM 터널 리스크 요인과 사건 분석결과를 바탕으로 리스크 요인별 NATM 터널 리스크 시나리오를 식별하였다. 리스크 시나리오를 식별함에 있어 리스크 요인으로부터 리스크 사건이 발생하는 과정을 분석하였고, 그 결과 설계 및 시공 리스크 요인은 설계 및 시공단계에서 지질 리스크 요인에 대한 대응이 적절하지 못해 발생하는 것임을 알 수 있었다. 따라서 NATM 터널에서의 주된 리스크 발생원인인 지질 리스크 요인별로 리스크 시나리오를 Table 2와 같이 식별하였다. 지하수/고수압 조건의 경우 불연속면, 연약지반, 낮은 토피고, 카르스트 지형, 인공 구조물의 지질 리스크 요인과 함께 작용하여 리스크 사건이 발생되므로 13가지 리스크 시나리오에 대하여 식별하였다. 이후 해당 NATM 터널 리스크 시나리오에 대한 분석 및 평가를 수행한다.

Table 1. NATM tunnel risk factors

Category	Risk factor		Description
Geological risk factor	G1	Discontinuity	Fractured zone or faults, geological boundary, joint, etc.
	G2	Weak ground	Including weathered layer, earth and sand layer, etc.
	G3	Shallow cover depth	Including locally shallow cover depth
	G4	Karst topography	Limestone cavity, earth and sand in cavity
	G5	Artificial structure	Old well, borehole, cavity, etc.
	G6	Groundwater/High water pressure	Groundwater (including rainfall, snowmelt, etc.) and high water level condition
	G7	Anisotropic ground	Super-elevated ground
	G8	Swelling ground	Including clay expansion
	G9	Ground under great pressure	Overstressed rock mass, ground with brittle fracture (squeezing, rock burst)
Design risk factor	D1	Numerical problem	Overestimation of Geotechnical Parameter
	D2	Unsuitable excavation and support design for ground condition	Lack of support reinforcement, reinforcement unplanned, insufficient measure to support settlement, etc.
	D3	Insufficient geotechnical investigation	Boring investigation unimplemented, weak zone unidentified, lack of rock mass rating evaluation, surveying errors, etc.
Construction risk factor	C1	Poor construction management	Late support time, insufficient support for installation, insufficient reinforcement, etc.
	C2	Excessive excavation	Advance length noncompliance, support base exposure, poor measurement control, construction procedure noncompliance, etc.

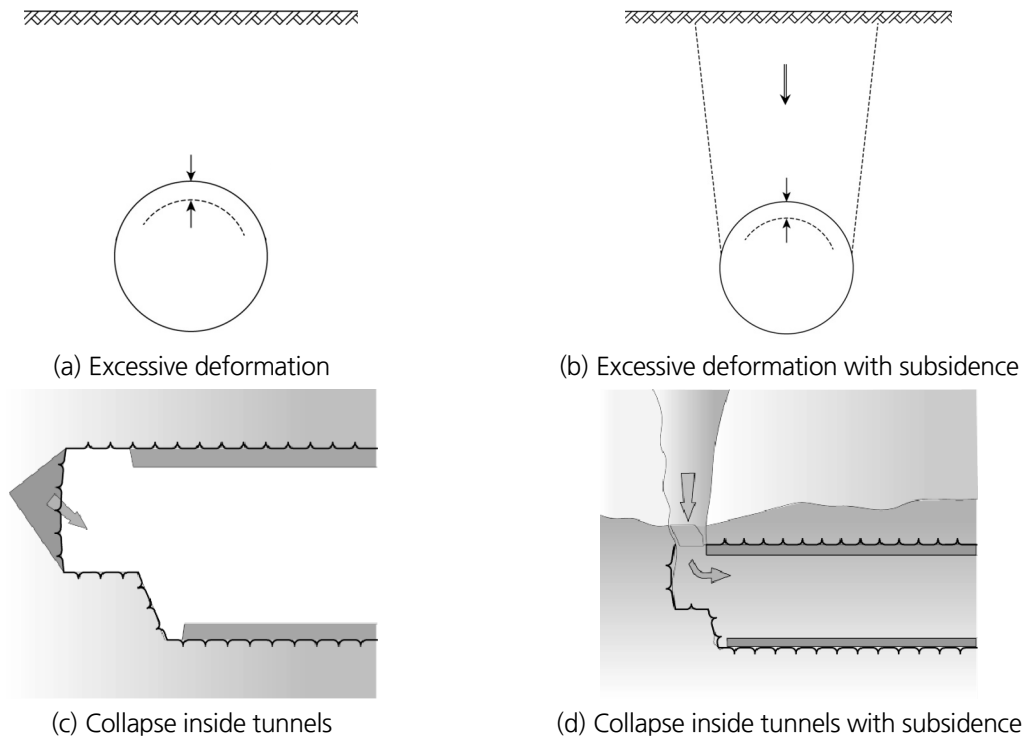


Fig. 2. NATM tunnel risk events

Table 2. NATM tunnel risk scenarios

No.	Risk factor	Risk scenario
1	Discontinuity	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the rock block slid by discontinuity
2	Discontinuity and groundwater/high water pressure	Tunnel deformation/collapse, ground water inflow, and subsidence due to increased load as the high water pressure acted through discontinuity
		Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the rock block slid by shear strength decrease of discontinuity surface due to rainfall infiltration
3	Weak ground	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the relaxation zone expanded by ground bearing capacity reduction
4	Weak ground and groundwater/high water pressure	Tunnel deformation/collapse, ground water inflow, and subsidence due to increased load as the relaxation zone expanded by ground bearing capacity reduction and the water pressure acted through weak ground
		Tunnel deformation/collapse, earth/sand and ground water inflow, and subsidence due to increased load as the relaxation zone expanded by ground bearing capacity reduction due to scour by rainfall infiltration
		Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the support deformation, settlement and damage occurred by long-term deformation due to change of pore water pressure

Table 2. NATM tunnel risk scenarios (continue)

No.	Risk factor	Risk scenario
5	Shallow cover depth	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the relaxation zone expanded by ground bearing capacity reduction due to no arching effect
6	Shallow cover depth and groundwater/high water pressure	Tunnel deformation/collapse, earth/sand and ground water inflow, and subsidence due to increased load as the relaxation zone expanded by ground bearing capacity reduction due to no arching effect and the water pressure acted through shallow cover depth
7	Karst topography	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the collapse of limestone cavity
8	Karst topography and groundwater/high water pressure	Tunnel deformation/collapse, ground water inflow, and subsidence due to increased load as the water pressure acted through the flow path formed by rainfall
9	Artificial structure	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the earth/sand flow occurred through old borehole
10	Artificial structure and groundwater/high water pressure	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to increased load as the earth/sand flow occurred and the water pressure acted through old borehole
11	Anisotropic ground	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to the support deformation, settlement and damage occurred by increased load due to declinating earth pressure action
12	Swelling ground	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to the support deformation, settlement and damage occurred by increased load and long-term deformation due to swelling
13	Ground under great pressure	Tunnel deformation/collapse and subsidence due to the support deformation, settlement and damage occurred by long-term plastic deformation due to squeezing
		Tunnel deformation/collapse and subsidence due to rock burst occurred by local overstress due to stress redistribution

2.2 리스크 분석 및 평가

지질 리스크 요인별 리스크 시나리오를 분석 및 평가하기 위하여 여러 의사결정 방법 중에서 발생빈도와 심각도를 평가기준으로 리스크를 분석하고 평가하는 매트릭스 평가방법을 적용하였다. 리스크 매트릭스는 Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-47 (2020)의 ‘건설공사 안전관리 업무수행 지침’과 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017)의 ‘설계 안전성 검토 업무 매뉴얼’에서 제시하는 평가 방법이며, 국외에서도 일반적으로 활용되는 리스크 평가 방법이다.

2.2.1 NATM 터널 리스크 분석을 위한 발생빈도 및 심각도 등급(점수) 기준 수립

NATM 터널 리스크 분석을 위한 발생빈도 및 심각도의 등급(점수) 기준을 수립하기 위하여 국내외 여러 기준과 적용사례를 조사하고 분석하였다. 그 결과 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017)의 정책자료 ‘설계 안전성 검토 업무 매뉴얼’에서 제시하는 기준을 활용하여 발생빈도 및 심각도 기준을 수립하였으며, 심각

도의 경우 인적피해와 물적피해 모두를 고려할 수 있게 하였다. 여기서 물적피해는 공사기간 손실을 의미하지만 Fig. 3에 제시된 국제터널학회(ITA)의 가이드라인(Eskesen et al., 2004)을 활용하여 물적피해에 경제적 손실 항목을 추가함으로써 심각도의 물적피해 기준을 보완하였다. 발생빈도 및 심각도 등급(점수)은 건설공사의 특성상 정성적인 방법으로 결정하도록 하였으며, 중간 등급(점수) 위주의 발생빈도 및 심각도 추정을 피하기 위해 3등급이나 5등급이 아닌 4등급으로 기준을 수립하였다. 수립한 기준은 Fig. 4와 같다. 여기서 심각도의 경우, 공사기간 손실(물적피해), 경제적 손실(물적피해), 인적피해에 대한 각각의 등급(점수) 중에서 상위 등급(점수)을 심각도 등급(점수)으로 선택하도록 하였다.

Damage or economic loss to third party					
	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Loss in Million Euro	>3	0.3-3	0.03-0.3	0.003-0.03	<0.003

Economic loss to owner					
	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Loss in Million Euro	>30	3-30	0.3-3	0.03-0.3	<0.03

Fig. 3. Classification of economic loss (Eskesen et al., 2004)

		Severity			
		1	2	3	4
Material damage	Delay-loss	< 1 week	1 week ≤	1 month ≤	Collapse of tunnels
	Economic loss	< 4 million KRW	4-40 million KRW	40-400 million KRW	400 million KRW ≤
Human damage		No injury	Minor injury that causes non-stop disaster	Serious injury that causes closed disaster less than one year	Fatality or injury that causes long-term disability over one year
Frequency	1 Very unlikely	1	2	3	4
	2 Unlikely	2	4	6	8
	3 Likely	3	6	9	12
	4 Very likely	4	8	12	16

Risk level	Risk acceptance criteria (Risk score)	Description
I	Acceptable (1-3)	No further consideration for risk mitigation measure
II	Conditionally acceptable (4-6)	Risk shall only be accepted if further risk mitigation measure is not practicable
III	Unacceptable (8-16)	Risk shall be reduced

* Risk score = Frequency score × Severity score

Fig. 4. Risk matrix and risk acceptance criteria for risk evaluation

2.2.2 NATM 터널 리스크 평가 방법 및 허용기준 제시

리스크 평가를 위한 의사결정 방법으로 4등급의 발생빈도와 심각도를 고려한 4×4 매트릭스 평가 방법을 적용하였으며, 본 NATM 터널 리스크 관리 시스템의 리스크 평가 매트릭스 및 리스크 허용기준(리스크 레벨)은 Fig. 4와 같다. 앞서 수립한 발생빈도 및 심각도 기준을 바탕으로 Fig. 4의 리스크 매트릭스를 활용해 각각의 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오를 평가하여 최종 리스크 점수를 산정한다. 최종 리스크 점수는 발생빈도 점수와 심각도 점수를 곱하여 산정하며, 리스크 허용기준(리스크 레벨)에 따라 리스크 저감 대책공법 적용 여부를 결정하게 된다. 리스크 허용기준(리스크 레벨)은 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017)의 정책자료 ‘설계 안전성 검토 업무 매뉴얼’을 비롯하여 프로젝트 관리 분야의 대표 단체인 Project Management Institute (2013), 미국 연방 정부기관인 Centers for Medicare & Medicaid Services (2014)에서 제시하는 기준을 활용하였다. 리스크 대응 여부를 결정하는 이 기준은 리스크를 허용하거나 허용하지 않는 단계뿐만 아니라 조건부로 허용하는 단계까지 포함하여 3단계로 구분하였다. 다국적 건설엔지니어링 기업인 Parsons Brinckerhoff에서도 3단계 기준을 활용하고 있으며(Pennington, 2011), 2013년 이를 미국 지하철 공사에 적용한 사례가 있다.

2.3 리스크 대응

리스크 평가결과 허용기준에 부합하지 않아 대응이 필요한 경우(조건부 허용 및 허용불가의 리스크 레벨) 리스크 저감 대책공법을 선정하여 적용하여야 한다. 문헌조사와 NATM 터널설계 및 시공 전문가 자문을 통하여 리스크 저감을 위한 NATM 터널 보조공법(대책공법)들을 다음과 같이 정리하였으며, 최적의 대책공법 선정 방안 또한 제시하였다.

2.3.1 리스크 저감 대책공법

리스크 대응을 위한 NATM 터널 리스크 저감대책은 터널 안정성을 확보하기 위하여 주변지반의 전단강도 증진, 침하방지, 투수성 저하 및 구조적 보강 등을 목적으로 적용하며 저감대책 적용 시에는 적용공법과 종류별 장단점을 명확히 분석하고 대책공법의 적용 위치와 보강량 및 보강구간 등에 대한 사전계획을 충분히 검토한 후 적용하여야 한다.

NATM 터널 굴착 중 안정성 확보뿐만 아니라 붕락 발생 후 복구공법으로 국내외에서 적용되고 있는 보조공법(리스크 저감 대책공법)은 크게 지반의 역학적 물성을 개량하는 보강공법(막장 및 갱구/사면 안정공법)과 터널 주위의 지하수로부터 터널 안정성을 확보하도록 적용하는 용출수 처리공법으로 구분되며, 일반적으로 많이 사용되는 대표적인 터널 보조공법은 Table 3과 같다. Table 3은 모든 터널 보조공법에 대해 작성한 것이 아니므로, 리스크 저감 대책공법 선정 시 Table 3뿐만 아니라 적용 현장 조건에 적합한 공법들을 모두 고려하여야 한다. 예를 들어 막장 안정공법 중에 천단 보강공법으로 강관보강 그라우팅은 천공 후 삽입하는 방식(일반천공)으로 천공홀의 자립이 불가능할 경우에는 직천공 방식의 공법을 적용해야 한다. 또한, 주입 분사방식에 따라 단관식(주입재 분사),

이중관식(주입재 및 공기 병용 분사), 삼중관식(주입재, 물 및 공기 병용 분사)으로 구분할 수 있으며, 주입재 종류 별로도 여러 공법들이 존재한다. 따라서 강관보강 공법의 경우 천공방식에 따라 직천공과 일반천공, 분사방식에 따라 단관식, 이중관식, 삼중관식 등의 여러 가지 보강공법이 존재하므로 적용 현장에 적합한 공법을 선정하여 적용하여야 한다.

Table 3. NATM tunnel risk mitigation measures

Category		Mitigation measure	Category		Mitigation measure
Tunnel face stabilization method	Crown reinforcement method	Forepoling	Tunnel face stabilization method	Side wall reinforcement method	Rock bolt
		Inclined bolt			Reinforcement grouting
		Pipe roof		Invert reinforcement method	Temporary invert
		Steel reinforcement grouting			Invert
		Large diameter steel reinforcement grouting			Reinforcement grouting
		Mini pipe roof			Tunnel portal/slope stabilization method
	Grouting	Soil nailing			
	Face reinforcement method	Support core	Earth anchor		
		Shotcrete	Rock bolt		
		Rock bolt	Covering		
		Grouting	Water prevent method	Water insulation method	Grouting
		Freezing			Freezing
	Foot reinforcement method	Leg pile			Pneumatic method
		Reinforcement bolt		Water drainage method	Deep well method
		Ground improvement			Well point method
				Weep hole	

2.3.2 최적의 리스크 저감 대책공법 선정 및 제시

리스크 평가결과, 대응이 필요한 경우에는 대책공법을 적용하게 된다. NATM 터널은 쉴드 TBM 터널에 비해 다양한 보조공법이 적용되기 때문에 이를 고려하여 적용 가능한 여러 대책공법 중 최적의 대책공법을 선정하는 과정이 필요하다. 따라서 객관적인 기준으로 최적의 대책공법을 선정하기 위하여 Chung et al. (2016)이 제안한 다기준 의사결정론(Multi Criteria Decision Making, MCDM)을 활용한 최적의 대책공법 선정 방법을 제시하였다. 다기준 의사결정론은 Fig. 5와 같이 대안(적용 가능한 대책공법) 선정, 속성(대안들을 비교할 기준) 선정, 속성 정규화, 속성별 가중치 산정, 최적 대안 선정 순서로 진행된다. 속성의 경우 공사비와 공사기간의 양적기준 속성과 신뢰성과 적용성의 질적기준 속성을 고려하였다. 속성값 정규화는 로그정규화 방법(logarithmic normalization method)을 활용하였으며, 속성 가중치는 엔트로피 절차를 통해 산정하였다. 또한, 가중치를 적용한 각 대책공법별 최종 의사결정 점수를 비교하기 위해 단순가중합법(Simple Additive Weighting Method, SAW)을 활용하였다. 최적 대책공법 선정 방법에 대한 자세한 과정은 Chung et al. (2016)에서 확인할 수 있다.

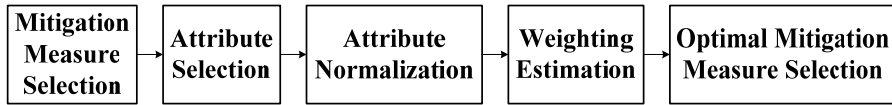


Fig. 5. MCDM flow chart (Chung et al., 2016)

2.4 리스크 통제

리스크 저감 대책공법을 적용하여 리스크에 대응한 경우에도 일정 수준으로 리스크가 잔존할 수 있으므로 설계단계에서의 리스크 대응 이후에 잔존하는 리스크에 대하여 시공단계에서 잔존 리스크의 상태를 확인하고 관리할 수 있어야 한다. 이를 위해 잔존 리스크를 평가하여야 하며, 잔존 리스크 등급(점수)에 따라 리스크 관리의 종료

Risk identification							Risk analysis / evaluation			Risk response plan	Risk control			
No	Risk factor	Risk event	Risk scenario	Management phase	Management owner	Risk section [Sta.]	Frequency score	Severity score	Risk score (level)		Response status	Frequency score of residual risk	Severity score of residual risk	Residual risk score (level)

Fig. 6. NATM tunnel risk register form

Register No.	CPI				
Risk factor	•	Risk event	•		
Risk scenario					
Management phase / owner	/		Risk score / level	/	
Section of risk occurrence [Sta.]			Residual risk score / level	/	
Risk response plan [Mitigation measure]	[Mitigation measure 1]		Application	☉	
	[Description of mitigation measure 1]		[Figure / Photo]		
	Cost [KRW million]	Period [day]	Reliability [score]	Applicability [score]	MCDM score
	[Mitigation measure 2]		Application		
	[Description of mitigation measure 2]		[Figure / Photo]		
	Cost [KRW million]	Period [day]	Reliability [score]	Applicability [score]	MCDM score
	[Mitigation measure 3]		Application		
[Description of mitigation measure 3]		[Figure / Photo]			
Cost [KRW million]	Period [day]	Reliability [score]	Applicability [score]	MCDM score	
Response status	•				
Note	•				

Fig. 7. Risk management ledger form for NATM tunnel risk mitigation measures

및 지속 여부를 결정함으로써 리스크를 통제할 수 있다. 잔존 리스크 평가는 리스크 평가와 동일하게 수행되며, 리스크 저감 대책공법이 적용된 후의 발생빈도와 심각도 등급(점수)을 산정하여 잔존 리스크를 평가한다.

지금까지 서술한 리스크 식별, 평가, 대응, 통제에 이르는 일련의 리스크 관리 프로세스의 결과를 설계단계 이후에도 지속적이고 효과적으로 활용할 수 있도록 본 논문에서는 NATM 터널 리스크 관리를 위한 리스크 등록부 (Fig. 6)와 대책공법 관리대장(Fig. 7)을 개발하였으며, 이를 통해 NATM 터널 프로젝트에서 발생 가능한 리스크를 통제/관리할 수 있는 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 구축하였다.

3. NATM 터널 리스크 관리 시스템 현장적용

구축한 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 실제 도로터널 프로젝트에 적용하였으며, 프로젝트 현장에서 발생할 수 있는 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오의 리스크 레벨을 평가함으로써 그 타당성을 검증하였다.

3.1 적용 현장 개요

리스크 관리 시스템을 적용한 현장은 ○○터널 프로젝트이다. 터널 연장은 약 3.942 km, 최대 굴착폭은 약 13.4 m, 내공단면적은 약 74 m²이며, 최대 토피고가 약 405 m인 산악터널 현장이다. 지질 종단면도는 Fig. 8과 같다.

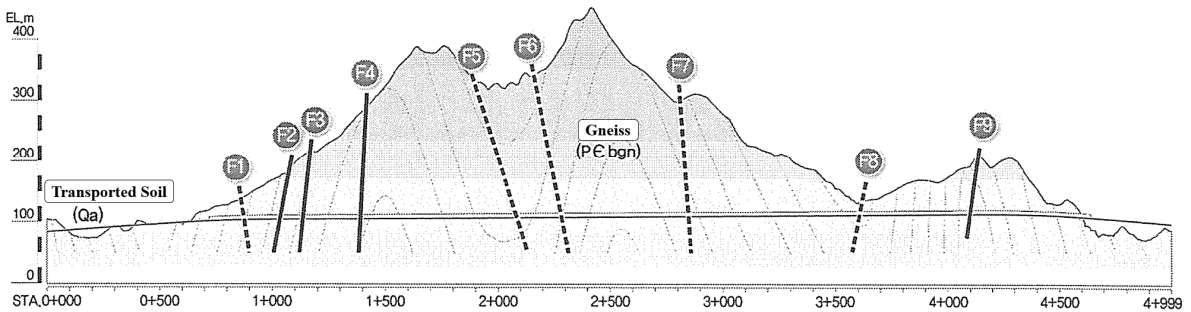


Fig. 8. Longitudinal geological profile

3.2 현장 적용성 평가

3.2.1 리스크 식별

현장 적용의 첫 번째 단계는 해당 프로젝트의 지질 리스크 요인을 선정하는 것이며, 지질 리스크요인은 프로젝트 구간에 대한 지반조사 보고서를 바탕으로 선정하였다. 갱구부의 경우 기본적으로 낮은 토피고이며, 연약지반 (풍화층, 토사/토석층)과 지하수/고수압 조건이나 불연속면(단층파쇄대)의 지질 리스크 요인이 확인되었으며, 일반 굴착부는 불연속면(단층파쇄대), 낮은 토피고, 큰 압력을 받는 지반의 지질 리스크 요인이 확인되었다. 또한,

일반 굴착부 중 시추공 근처의 터널 노선이 아닌 구간(큰 토피고의 산지 구간)에서 전기비저항 탐사 등으로 폭이 좁고 수직적 경향의 저비항대가 확인되어 해당 이상대를 불연속면(단층파쇄대)로 선정하였다.

프로젝트 터널구간에서 지질 리스크 요인으로 식별된 위험지반은 불연속면(단층파쇄대), 연약지반(풍화층 및 토사/토석층), 낮은 토피고와 지하수/고수압 조건, 큰 압력을 받는 지반이며, 해당 지질 리스크 요인으로 인해 발생 가능한 사건에 대한 리스크 시나리오를 Table 4와 같이 작성하였다. Table 4는 NATM 터널 리스크 관리 시스템의 현장 적용 결과표이며, 앞서 개발한 NATM 터널 리스크 등록부(Fig. 6)의 일부 항목을 정리한 것이다.

Table 4. Results of risk and residual risk evaluation for the NATM tunnel project

No.	Geological risk factor	Risk scenario	Risk section [Sta.]	Risk response plan [Mitigation measure]	Risk evaluation			Residual risk evaluation			Risk status
					Frequency score	Severity score	Risk score (level)	Frequency score	Severity score	Risk score (level)	
1	Shallow cover depth Weak ground Groundwater/ High water pressure	Tunnel deformation/collapse, earth/sand and ground water inflow, and subsidence due to increased load as the ground bearing capacity reduced by no arching effect and scour by rainfall infiltration	0+686	Steel pipe reinforcement grouting	3	4	12 (III)	2	2	4 (II)	Responding
			4+599	Large diameter steel pipe reinforcement grouting (direct drilling)							
2	Discontinuity Ground under great pressure	Tunnel collapse due to rock block slide by long-term plastic deformation due to squeezing	1+015~033 (18 m)	Steel pipe reinforcement grouting	3	3	9 (III)	2	2	4 (II)	Responding
			4+575~593 (18 m)								
			4+048~060 (12 m)	Forepoling							
3	Ground under great pressure	Tunnel collapse due to long-term plastic deformation by squeezing and rock burst by local overstress	2+420~440 (20 m)	Invert installation	2	3	6 (II)	1	2	2 (I)	Complete response
4	Shallow cover depth	Tunnel collapse due to increased load as the ground bearing capacity reduced by no arching effect	3+577~601 (24 m)	Double steel pipe urethane grouting	3	4	12 (III)	2	2	4 (II)	Responding

3.2.2 리스크 분석 및 평가

각각의 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오의 발생빈도와 심각도를 분석하여 리스크 저감대책 적용 여부를 판단할 수 있도록 앞서 구축한 4등급의 발생빈도와 심각도를 고려한 4 × 4 매트릭스 평가 방법을 적용하여 리스크 평가를 수행하였다. 앞에서 제시한 발생빈도 및 심각도 기준으로 10명의 터널 설계 전문가 및 시공 전문가 설문조사를 수행하였고, Fig. 4의 리스크 평가 매트릭스 및 리스크 허용기준(리스크 레벨)을 통해 각각의 리스크 시나리오를 평가한 결과는 Table 4와 같다. 각각의 발생빈도와 심각도 등급(점수)은 각 시나리오별 설문조사 결과의 평균값을 사용하였으며, 각 시나리오별 표준편차의 최대값은 0.6으로 최대 표준편차가 1 이하로 확인되었다.

1건의 조건부 허용 등급을 제외하고는 모두 허용불가 등급으로 리스크 대응(저감대책 적용)이 필요한 것으로 확인되었다. 따라서 조건부 허용 등급의 리스크 시나리오를 포함한 모든 시나리오에 대하여 리스크 저감 대책공법 적용 검토를 수행하였다.

3.2.3 리스크 대응

대응이 필요한 리스크 시나리오에 대해 해당 현장에 적용 가능한 리스크 저감 대책공법들을 선정하고, 공사비, 공사기간, 신뢰성, 적용성의 속성을 고려한 다기준 의사결정론을 활용하여 위험구간별 각각의 리스크 시나리오에 대한 최적의 리스크 저감 대책공법을 Table 4와 같이 제시하였다. 리스크 대응 과정은 앞서 개발한 NATM 터널 리스크 대책공법 관리대장(Fig. 7)을 통해 관리한다. Table 4의 첫 번째 시나리오는 낮은 토피고의 토사층(연약지반)에서 아칭효과 미발현에 의한 지반 지지력 감소 및 우수침투에 의한 세굴현상으로 하중이 증가하는 경우이다. 이 리스크 시나리오의 시점부(0+686)에 대한 최적의 대책공법 선정과정은 다음과 같다.

먼저 리스크 저감을 위한 세 가지의 대책공법을 선정하고, 각 대책공법별 속성값을 결정하였다. 속성값은 대책공법들을 해당 현장에 적용할 경우 소요되는 공사비(백만원), 공사기간(일)과 9점 척도를 활용한 신뢰성, 적용성 점수이다. 서로 다른 단위를 갖는 속성값을 비교하기 위해서는 정규화 과정이 필요하며, 로그정규화 방법을 활용하였다. 공사비, 공사기간과 같이 낮을수록 유리한 속성은 비용기준(cost criteria)을 적용하였고, 신뢰성, 적용성과 같이 높을수록 유리한 속성은 혜택기준(benefit criteria)을 적용하였다. 속성의 상대적 중요성을 나타내는 속성 가중치는 다기준 의사결정론에서 중요한 요인이며, 정규화된 속성값 간의 차이가 큰 속성을 중요한 속성으로 보는 엔트로피 절차를 통해 산정하였다. 마지막으로 단순가중합법을 적용하여 최종 의사결정 점수를 산정하였으며, 최적 대책공법 선정을 위한 다기준 의사결정표는 Table 5와 같다. 의사결정 점수가 0.3707로 가장 큰 강관보강 그라우팅을 최적의 리스크 저감 대책공법으로 제시하였다. 이후 해당 리스크 저감 대책공법을 적용한 후에도 잔존하고 있을 리스크에 대한 평가(잔존 리스크 평가)를 수행하였다.

Table 5. Result table of the Multi Criteria Decision Making (MCDM)

	Cost	Period	Reliability	Applicability	MCDM score
Weighting factor	0.1989	0.1989	0.0803	0.5219	1.0000
Large diameter steel reinforcement grouting (direct drilling)	0.3045	0.3045	0.3531	0.2798	0.2955
Large diameter steel reinforcement grouting	0.3278	0.3278	0.3342	0.3383	0.3338
Steel reinforcement grouting	0.3677	0.3677	0.3127	0.3819	0.3707

3.2.4 리스크 통제

리스크 평가와 동일한 방식으로 각각의 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오에 대한 잔존 리스크를 평가하여 리스크 관리의 지속여부를 결정하였다. 리스크 저감 대책공법이 적용된 후의 발생빈도 및 심각도 등급(점수)을

산정하여 잔존 리스크를 평가하였으며, 잔존 리스크 평가 또한 10명의 터널 설계 전문가 및 시공 전문가 설문조사를 통해 산정하였다. 잔존 리스크 평가 역시 각각의 발생빈도와 심각도 등급(점수)은 각 시나리오별 설문조사 결과의 평균값을 사용하였으며, 각 시나리오별 표준편차의 최대값은 0.781로 최대 표준편차가 1 이하로 확인되었다. 해당 현장에 대한 잔존 리스크 평가결과는 Table 4와 같으며, 1건은 허용, 3건은 조건부 허용의 리스크 레벨로 잔존 리스크가 평가되었다. 허용불가 및 조건부 허용 단계였던 시나리오들은 최적의 리스크 저감 대책공법을 적용함으로써 각각 조건부 허용 및 허용 단계로 리스크 레벨이 낮아졌으며, 각 리스크의 리스크 레벨에 따라 리스크 관리의 종료 및 지속 여부를 결정하고, 이를 리스크 등록부의 리스크 상태에 표시함으로써 추후 시공단계에서도 잔존 리스크 상태를 확인하고 관리할 수 있다.

3.2.5 현장 적용성 평가 결과

본 논문에서 제안한 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 터널 프로젝트 현장에 적용하여 해당 현장의 위험지반(지질 리스크 요인)과 그로 인해 발생 가능한 리스크 사건(리스크 시나리오)을 식별하였고, 식별된 리스크 시나리오를 분석 및 평가하여 대응이 필요한 리스크에 대하여 리스크 저감대책을 적용하는 일련의 리스크 관리 프로세스를 수행하였다. 그 결과 위험지반(지질 리스크 요인)으로부터 발생 가능한 리스크를 효과적으로 관리할 수 있었다. 하지만 위험지반 식별을 지반조사 보고서에만 의존하여 수행하였고, 리스크 시나리오 식별 시 리스크 요인과 발생 가능 사건 사이의 인과관계 분석 과정이 불명확한 문제점이 존재하였다. 향후 보다 체계적인 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 구축하기 위해서는 굴착면 전방 예측 결과 활용방안 및 리스크 요인과 사건간의 인과관계 분석 등의 후속 연구를 수행하여야 할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 구축하기 위하여 국내외 여러 터널공사 현장에서 발생한 불량사례들을 중심으로 발생원인 및 결과, 보강방안 등을 분석하여 NATM 터널 리스크 요인과 사건을 도출하였고, 지질 리스크 요인별로 리스크 사건이 발생하는 NATM 터널 리스크 시나리오를 식별하였다. 해당 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오를 분석하고 평가할 수 있는 방안을 제시하였고, 리스크 평가결과 대응이 필요한 경우 리스크 저감 대책공법을 적용할 수 있도록 가능한 터널 보조공법을 정리하였으며, 다기준 의사결정론을 활용하여 최적의 대책공법을 선정하는 방안을 제시하였다. 또한, NATM 터널 리스크 등록부 및 리스크 대책공법 관리대장을 개발하여 리스크 식별, 분석 및 평가, 대응, 통제 단계에서 리스크를 효과적으로 관리할 수 있는 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 구축하였다.

총 183개소의 국내외 NATM 터널에 대한 터널붕괴 사례를 분석하여 NATM 터널 리스크 요인과 사건 그리고 리스크 시나리오를 도출하였다. 리스크 요인은 지질 리스크 요인, 설계 리스크 요인, 시공 리스크 요인의 세 가지 카테고리 분류하여 분석하였으며, 리스크 사건은 과대변형, 과대변형 및 지표침하, 터널내부 붕락, 붕락 및 지표침

하/함몰 네 가지 유형으로 구분하였다. 이를 바탕으로 13가지 지질 리스크 요인별 리스크 시나리오를 식별하였다.

리스크 분석/평가를 위하여 국내외 여러 기준과 적용사례를 조사/분석한 결과, NATM 터널 리스크 평가에 적용할 의사결정 방법으로 국토교통부 고시 제2020-47호 ‘건설공사 안전관리 업무수행 지침’과 국토교통부 정책자료 ‘설계 안전성 검토 업무 매뉴얼’에서 제시하는 평가방법인 리스크 매트릭스 평가방법을 선정하였다. 4등급의 발생빈도와 심각도 기준을 리스크 평가기준으로 수립하였으며, 심각도의 경우 인적피해와 물적피해(공사기간 및 경제적 손실) 모두를 고려할 수 있게 하였다. 리스크 허용기준(리스크 레벨)은 3단계(허용, 조건부 허용, 허용불가)로 구분하였으며, 리스크 레벨에 따라 리스크 저감 대책공법의 적용 여부를 결정할 수 있다.

NATM 터널 굴착 중 안전성 확보를 위한 터널 리스크 저감 대책공법(터널 보조공법)을 막장 및 갱구/사면 안정 공법, 용출수 처리공법으로 나누어 조사하였으며, 막장 안정공법은 천단, 막장면, 각부, 측벽 보강공법으로 구분하였고 용출수 처리공법은 차수, 배수 공법으로 구분하였다. 또한, 다기준 의사결정론을 활용하여 여러 리스크 저감 대책공법 중 최적의 대책공법을 선정하는 방안을 제시하였다. 의사결정을 위한 속성은 공사비 및 공사기간, 신뢰성, 적용성으로 선정하였으며, 네 가지 속성 기준으로 대안을 평가하여 최적의 대안을 선정하도록 하였다.

현장 적용성 검증을 위하여 구축한 NATM 터널 리스크 관리 시스템을 ○○터널 건설공사 현장에 적용하였다. 프로젝트 현장의 위험지반 식별, 위험지반별 발생 가능 리스크 시나리오 파악 및 평가, 리스크 저감대책 적용을 통한 대응 그리고 통제에 이르는 일련의 리스크 관리 프로세스를 수행하였다. 그 결과 리스크 레벨이 높은 위험지반별 리스크 시나리오를 파악하고 해당 리스크를 사전에 대응함으로써 리스크 레벨을 낮추어 효과적으로 리스크를 관리할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 터널 시공 중 안전관리를 위한 리스크 관리 체계 구축 연구의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

정희영은 데이터 해석, 시스템 구축 및 원고 작성을 하였고, 이강현은 연구 개념 수립, 시스템 현장적용을 하였고, 김병규는 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 이인모, 최향석은 연구 설계, 원고 검토 및 연구비 수주를 하였다.

References

1. Act No. 16272 (2019), Construction Technology Promotion Act, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.

2. Centers for Medicare & Medicaid Services (2014), XLC Risk Management Guidance and Risk Register Instructions Version 2, Office of Information Services, Centers for Medicare & Medicaid Services, Baltimore, MD, USA.
3. Chung, H., Park, J., Lee, K.H., Park, J., Lee, I.M. (2016), “TBM risk management system considering predicted ground condition ahead of tunnel face: methodology development and application”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 1, pp. 1-12.
4. Eskesen, S.D., Tengborg, P., Kampmann, J., Veicherts, T.H. (2004), “Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 217-237.
5. Land Transport Authority (2012), Construction Safety Handbook, Land Transport Authority, Singapore.
6. Land Transport Authority (2018), Safety, Health and Environment (General Specification Appendix A), Land Transport Authority, Singapore.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Task Manual on Design for Safety, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2020-47 (2020), Construction Safety Management Task Guidelines, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.
9. Pennington, T.W. (2011), Tunneling Beneath Open Water, Parsons Brinckerhoff Inc., NW, USA.
10. Presidential Decree No. 30256 (2019), Enforcement Decree of the Construction Technology Promotion Act, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea.
11. Project Management Institute (2013), A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide) Fifth Edition, Project Management Institute, Inc., Newtown Square, PA, USA.
12. Tasmanian Government (2011), Project Management Guidelines, Office of eGovernment, Department of Premier and Cabinet, Hobart, Tasmania, Australia.
13. WSP | Parsons Brinckerhoff (2016), NCHRP 08-36 Task 126 Development of Risk Register Spreadsheet Tool, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, DC, USA.