

사례분석을 통한 베イズ 정리 기반 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위 도출 연구

권기범^{ID*} · 강민규^{ID**} · 황병현^{ID***} · 최항석^{ID****}

Kwon, Kibeom^{ID*}, Kang, Minkyu^{ID**}, Hwang, Byeonghyun^{ID***}, Choi, Hangseok^{ID****}

Study on Risk Priority for TBM Tunnel Collapse based on Bayes Theorem through Case Study

ABSTRACT

Risk management is essential for preventing accidents arising from uncertainties in TBM tunnel projects, especially concerning managing the risk of TBM tunnel collapse, which can cause extensive damage from the tunnel face to the ground surface. In addition, prioritizing risks is necessary to allocate resources efficiently within time and cost constraints. Therefore, this study aimed to establish a TBM risk database through case studies of TBM accidents and determine a risk priority for TBM tunnel collapse using the Bayes theorem. The database consisted of 87 cases, dealing with three accidents and five geological sources. Applying the Bayes theorem to the database, it was found that fault zones and weak ground significantly increased the probability of tunnel collapse, while the other sources showed low correlations with collapse. Therefore, the risk priority for TBM tunnel collapse, considering geological sources, is as follows: 1) Fault zone, 2) Weak ground, 3) Mixed ground, 4) High in-situ stress, and 5) Expansive ground. In practice, the derived risk priority can serve as a valuable reference for risk management, enhancing the safety and efficiency of TBM construction. It provides guidance for developing appropriate countermeasure plans and allocating resources effectively to mitigate the risk of TBM tunnel collapse.

Keywords : TBM, Tunnel, Risk, Collapse, Case study, Bayes theorem

초록

TBM 터널 프로젝트 내 불확실성으로 인한 사고를 예방하기 위해 리스크 관리는 필수적이다. 특히, 터널 막장면부터 지표면까지의 광범위한 피해를 초래할 수 있는 TBM 터널 붕괴는 더욱 신중히 관리되어야 한다. 또한, 각 TBM 터널 프로젝트의 시간과 비용의 제약으로 인해, 합리적 수준의 대응조치 계획을 수립하기 위한 리스크 우선순위를 도출할 필요가 있다. 이에 따라, 본 연구는 TBM 사고 사례조사를 통해 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하였고, 베이스 정리를 활용하여 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 도출하였다. 총 87건의 TBM 사고사례를 기반으로 3가지 사건과 5가지 지질요인을 포함한 TBM 리스크 데이터베이스가 구축되었다. 이때, 자갈층 지반, 고수압 함수대는 관련 사례 수가 적어 통계적 편향을 방지하기 위해 제외되었다. 데이터베이스에 베이스 정리를 적용한 결과, 단층대와 연약지반은 TBM 터널 붕괴의 발생 확률을 상당히 증가시키나, 그 외 3가지 지질요인(복합지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반)은 붕괴와 낮은 상관성을 보였다. 결과적으로, 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위는 다음과 같다: 1) 단층대, 2) 연약지반, 3) 복합지반, 4) 높은 상재압력, 5) 팽창성 지반.

검색어 : TBM, 터널, 리스크, 붕괴, 사례조사, 베이스 정리

* 중신회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Korea University · kиб5@korea.ac.kr)

** 고려대학교 건축사회환경공학과 박사후연구원 (Korea University · dldnjfwp@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Korea University · bh2917@korea.ac.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Corresponding Author · Korea University · hchoi2@korea.ac.kr)

Received June 14, 2023/ revised August 1, 2023/ accepted August 10, 2023

1. 서론

최근 도시지역 지상 공간 포화, 인구 밀집 현상 가속화, 교통혼잡 비용 급증으로 인해 터널 시공의 중요성이 대두되고 있다(Broere, 2016; Kwon et al., 2022). 특히, 진동 및 소음이 적고 시공 안전성이 우수하며 인접 구조물에 미치는 영향이 적은 TBM(Tunnel Boring Machine) 터널의 시공실적이 국내외적으로 증가하고 있다(Kang et al., 2023). 하지만, TBM 시공 중 조우하는 지반 거동 불확실성, 지반-기계 상호작용 불확실성 등으로 인해 TBM 터널 프로젝트는 리스크 관리가 필요하다(Kwon et al., 2023). 여기서, 리스크란 영향도(Impact, I)와 발생확률(Probability, P)의 조합으로 표현되는 특정 요인(Source)으로 인한 어떤 사건(Accident)의 잠재적 기대손실을 뜻한다(Sturk et al., 1996; Eskesen et al., 2004). 리스크 관리가 적절히 수행되지 않을 경우, 공기 지연, 공사비 증가, 인명 피해 발생으로 이어질 수 있다. 이때, TBM 시공 중 발생 가능한 다양한 사건 종류 중 붕괴(Collapse)는 터널의 막장면부터 지표면까지의 광범위한 손상범위를 가지는 가장 치명적인 사고로, 이에 대한 더욱 면밀한 리스크 관리가 요구된다(Sousa and Einstein, 2021).

일반적으로, TBM 시공에 특화된 위험요인은 지질, 설계, 시공 요인으로 구분되지만(Hyun et al., 2015), 지질요인은 노선을 변경하지 않는 한 필연적으로 마주하고, 설계/시공 요인과 비교하여 사고유발 정도가 높아 더욱 유의하여야 한다(Koh et al., 2020). 하지만, 시공현장 부지에 존재하는 모든 지질요인에 대한 지반보강, 고밀도 이수 적용 등과 같은 대응조치 적용은 시간 비용적 제약이 있다. 따라서, 리스크 우선순위를 도출하고 이를 기반으로 합리적 수준의 대응조치 계획을 수립하여야 한다. 일반적으로 우선순위 도출 시, 주로 활용되는 계층화 분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)은 설문대상 전문가 구성에 따라 편향된 결과가 도출될 수 있다는 한계가 있다(Choi, 2020). 이때, 사례조사(Case study) 기법은 실제 사례를 기반으로 불확실하고 복잡한 문제에 내포된 인과관계의 심층적 탐색이 가능하다(Bennett and Elman, 2006; Crowe et al., 2011). 다만, 추가 소요 공기 및 공사비 등의 정보는 보안상의 이유로 사례조사를 통해 습득하기 어려우므로, 리스크 구성요소 중 하나인 영향도의 산정이 난해하다. 따라서, 본 연구는 TBM 사고 사례조사를 통해 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 발생확률 측면으로 도출하는 데 목적이 있다.

본 논문에서는 국내외 문헌조사를 통해 TBM 사고사례를 수집하여 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하고, 이를 기반으로 베이지 정리(Bayes theorem)를 적용하여 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 도출하였다. 본 연구에서 도출한 TBM 리스크

데이터베이스 및 붕괴 리스크 우선순위는 향후 TBM 시공 리스크 관리의 참고자료로 활용되어 TBM 시공의 안전성 및 효율성 향상에 기여할 것이다.

2. TBM 리스크 데이터베이스 구축

본 연구에서는 문헌조사(Yu, 2008; Font-Capó et al., 2011; Zolfaghari et al., 2011; Gong et al., 2013; Koh et al., 2020; Lee and Moon, 2020; Lin et al., 2022; Seol et al., 2022) 기반 국내외 사례조사를 통해 사건과 사건 발생 지점에 존재하는 지질요인으로 구성된 TBM 시공 사고사례 91건을 수집하였다.

이때, 각 사고사례는 현장-체인거리(Chainage) 지점을 기준으로 구분되되, 다수의 사건 및 지질요인이 하나의 지점에서 중첩하여 나타난 경우는 하나의 사고사례로 간주하였다. 예를 들어, OO현장 Chainage 200 m 지점에서는 점토층과 자갈층이 혼재된 복합지반에서 막장면 토사 붕괴 및 지하수 유입이 발생하였고, OO현장 Chainage 1,500 m 지점에서는 단층활면이 매우 발달된 풍화암 지반에서 터널 천단부 붕괴와 지하수 유입이 발생하였다면, 이는 본 연구에서 다음과 같이 반영되었다. 사례 1: 사건-붕괴, 토사/지하수 유입; 지질요인-복합지반. 사례 2: 사건-붕괴, 토사/지하수 유입; 지질요인-단층대, 연약지반.

수집된 사고사례 내, 3가지 사건 종류(붕괴, 지반 과다변형, 토사/지하수 유입)와 7가지 지질요인 종류(단층대, 복합지반, 연약지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반, 자갈층 지반, 고수압 함수대)가 식별되었다. 수집된 91건의 사고사례 내 각 사건과 지질요인의 분포와 그 비율(즉, 91건의 사고사례 중 각 사건 혹은 지질요인이 연관된 사고사례의 비율)을 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Proportion of Accidents and Sources of Compiled Cases

	Category	Number of cases	Proportion*
Accident	Collapse	51	56.0%
	Large ground deformation	39	42.9%
	Water and mud inrush	25	27.5%
Source	Fault zone	46	50.5%
	Mixed ground	23	25.3%
	Weak ground	62	68.1%
	High in-situ stress	24	26.4%
	Expansive ground	19	20.9%
	Gravel ground	7	7.7%
	High water pressure	7	7.7%

*Proportion is the ratio of the number of cases regarding each category to the compiled 91 cases. (e.g., Collapse: 51/91 = 56.0%)

Table 2. Accidents and Sources Adopted for TBM Risk Database

Category		Number of cases	Proportion*
Accident	Collapse	47	54.0%
	Large ground deformation	39	44.8%
	Water and mud inrush	21	24.1%
Source	Fault zone	46	52.9%
	Mixed ground	23	26.4%
	Weak ground	62	71.3%
	High in-situ stress	24	27.6%
	Expansive ground	19	21.8%

*Proportion is the ratio of the number of cases regarding each category to the adopted 87 cases. (e.g., Collapse: 47/87 = 54.0%)

수집된 91건의 사고사례 중 56.0%가 붕괴 발생사례인 사실은 붕괴 자체의 발생확률이 높은 것이 아닌 붕괴로 인한 피해 규모(영향도)가 높아 상대적으로 보고되고 기록된 사례가 많기 때문이다 (Sousa and Einstein, 2021). 이때, 사고사례의 10% 미만에서 확인된 2가지 지질요인(즉, 자갈층 지반, 고수압 함수대)에 대한 분석은 편향된 통계 결과를 도출할 우려가 있어, 해당 지질요인만 확인된 사고사례 4건은 본 연구 범위에서 제외하였다.

따라서, 최종적으로 87건의 사고사례를 기반으로 3가지 사건과 5가지 지질요인을 포함한 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하였고, 이에 포함된 사건과 지질요인의 종류 및 분포 비율(즉, 87건의 사고사례 중 각 사건 혹은 지질요인이 연관된 사고사례의 비율)은 Table 2에 정리하였다. 이때, 지반 과다변형은 지표침하(Surface settlement), 낙반(Rock fall) 등을 포함하고, 연약지반은 단층을 제외한 낮은 암반등급(Poor rock-mass class), 풍화암(Weathered rock), 석회암 공동(Limestone cavity), 가스 함유 지반(Gassy ground) 등을 포함한다.

TBM 리스크 데이터베이스의 통계분석을 통해, 사건 발생 지점에 존재하는 지질요인의 수(1~5가지)를 Table 3에 정리하였다. 3가지 이상의 지질요인이 동시에 확인된 사고사례는 발생빈도가 적었고 이는 사전에 지반보강, 노선 변경 등의 대응조치를 수행한 결과로 추정된다. 그러나, 1~2가지의 지질요인이 존재하는 지점에

Table 3. Number of Each Accident according to the Number of Associated Sources

Accident	Number of associated sources				
	1	2	3	4	5
Collapse	17	25	4	1	0
Large ground deformation	9	16	6	4	4
Water and mud inrush	16	5	0	0	0

서는 3가지 사건 발생빈도가 모두 비교적 높는데, 이는 사전에 대응조치가 보수적으로 적용되지 않았거나 예상하지 못한 지질요인을 조우한 결과로 판단된다. 따라서, 특정 지점에서 확인된 지질요인의 수가 적더라도 안전측으로 보수적 대응과 철저한 지반조사를 통해 지층분포의 예측 정확도를 향상할 필요가 있다.

3. 리스크 우선순위 도출기법

3.1 베이즈 정리

베이즈 정리는 두 확률 변수(A, B)의 사전확률(Prior probability)과 사후확률(Posterior probability)의 관계를 나타내는 정리로, Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \tag{1}$$

여기서, $P(A)$ 는 사전확률(사건 A의 확률), $P(B|A)$ 는 가능도(사건 A 발생 전제하에 사건 B의 확률), $P(A|B)$ 는 사후확률(사건 B 발생 전제하에 사건 A의 확률), 그리고 $P(B)$ 는 사후확률을 $[0, 1]$ 로 조정하는 정규화 상수(Normalizing constant)이다. 다시 말해, 베이즈 정리는 새로운 정보(B)를 바탕으로 사건 A가 발생할 확률($P(A)$)이 갱신(Update)된 사후확률($P(A|B)$)을 도출하는 정리이다.

전체확률의 법칙(Law of total probability)은 조건부 확률로부터 조건이 붙지 않는 확률을 산정하는 법칙으로, 확률 공간(X) 내 사건 A_1, A_2, \dots, A_n 에 대해 $A_i \cap A_j = \emptyset (i \neq j)$ $A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n = X$ 전제하에, 전체확률의 법칙은 Eq. (2)와 같다.

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i) \tag{2}$$

지질요인 존재에 따른 사건 발생확률을 도출하고자, Eq. (1)에서 A와 B를 각각 사건, 지질요인으로 설정하였고, 확률 공간 내에 하나의 사건과 그 사건에 대한 여집합만 존재하도록 가정하였다. 이에 따라, Eq. (1)은 전체확률의 법칙에 따라 Eq. (3)과 같이 표현된다(Grzegorzewski, 2013).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|A^c)P(A^c)} \tag{3}$$

베이즈 정리는 직접 산정이 어려운 확률을 우회적으로 산정할 수 있다는 이점이 있어, 의학, 공학, 심리학 등의 분야에서 활용되고 있다(Tommasi et al., 2018; Chang et al., 2020; Lin et al.,

2022). 특히, TBM 시공 리스크 관리에 대한 베イズ 정리의 효용성이 다양한 연구사례를 통해 입증되었다. Chung et al.(2019)는 베イズ 정리 기반 결합확률 개념을 사용하여 대응공법 소요비용 측면의 TBM 시공 리스크 관리를 수행하였다. Liu et al.(2019)는 TBM 시공에 따른 지표침하의 리스크 관리를 수행하기 위해 Bow-tie 기법과 베イズ 정리를 접목하였다. Lin et al.(2022)은 베イズ 정리를 활용하여 TBM 끼임(jamming)을 유발하는 가장 치명적인 사건과 요인을 식별하였다.

3.2 붕괴 리스크 우선순위 도출

실제 사고사례에서 Table 1에 제시된 사건-지질요인 간 인과성 성립 여부는 불확실하나, 사건 발생과 지질요인 존재 간 상관성이 존재한다고 가정하였다. 또한, 본 연구의 목적은 TBM 사고 사례조사를 통해 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 발생확률 측면으로 도출하는 것이다. 이에 따라, 본 연구에서는 구축된 TBM 리스크 데이터베이스에 베イズ 정리를 적용하여 각 지질요인 존재에 따른 붕괴 발생확률을 도출함으로써 상기 상관성의 정도를

분석하였다. 최종적으로, 도출된 확률의 크기에 따라 지질요인을 순위화하였고, 이를 붕괴 리스크 우선순위로 제안하였다. 본 연구의 구체적 절차는 다음과 같고, Fig. 1에 전반적 흐름도를 도시하였다.

- 1) 문헌조사를 통해 수집된 87건의 사고사례를 기반으로, 사건과 지질요인을 구성항목으로 하는 TBM 리스크 데이터베이스 구축
- 2) TBM 리스크 데이터베이스의 통계분석을 통해, 붕괴 발생 시 지질요인 존재확률 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴})$ 와 붕괴 미발생 시 지질요인 존재확률 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴}^c)$ 을 각각 지질요인 별로 산정
- 3) 2)에서 산정된 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴})$ 와 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴}^c)$ 를 Eq. (3)에 대입하여, 지질요인 존재에 따른 붕괴 발생확률인 사후확률 $P(\text{붕괴} | \text{지질요인})$ 을 지질요인별로 산정. 이때, 사전확률 $P(\text{붕괴})$ 는 각 지질요인에 따른 사후확률의 상대적 크기 비교에 영향을 미치지 않기 때문에, 본 연구에서는 이를 1%로 가정
- 4) 지질요인별 사후확률의 크기를 우선순위 기준으로 하여 도출된 지질요인 순위화 결과를 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위로 제안

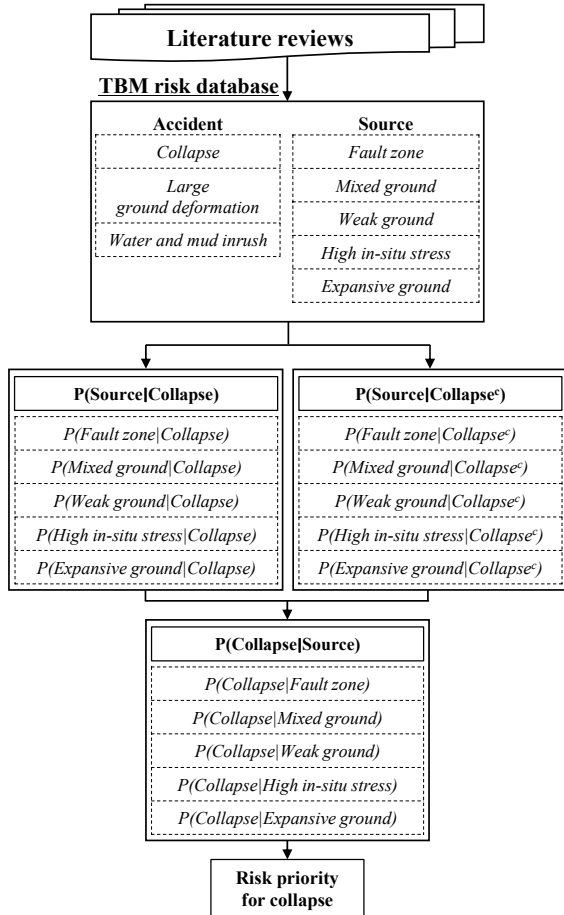


Fig. 1. Overall Flowchart of This Study

4. 결과 및 논의

통계분석을 통해 도출된 지질요인별 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴})$ 와 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴}^c)$ 결과를 Table 4에 정리하였다. 이를 베イズ 정리에 적용하여 각 지질요인에 대한 사후확률 $P(\text{붕괴} | \text{지질요인})$ 를 Fig. 2와 같이 도출하였다.

붕괴의 사전확률(1%)과 지질요인의 존재로 인해 갱신된 사후확률의 비교분석 결과, 단층대와 연약지반의 경우는 사후확률이 각각 1.59%와 1.18%로 사전확률(1%) 보다 증가하였다. 이는 불연속면과 낮은 강도로 인한 전단파괴에 기인한 것으로 추정되므로, 해당 지질요인이 존재하는 지점에서는 굴착 전에 지반보강 등의 대응조치를 적용할 필요가 있다. 이때, 단층대가 연약지반에 비해, Table 4에 제시된 $P(\text{지질요인} | \text{붕괴})$ 는 낮게 도출되었지만 Fig. 2에

Table 4. Two Types of Conditional Probability Corresponding to Each Source

Source	$P(\text{Source} \text{Collapse})$	$P(\text{Source} \text{Collapse}^c)$
Fault zone	63.83%	40.00%
Mixed ground	14.89%	40.00%
Weak ground	76.60%	65.00%
High in-situ stress	12.77%	45.00%
Expansive ground	8.51%	37.50%

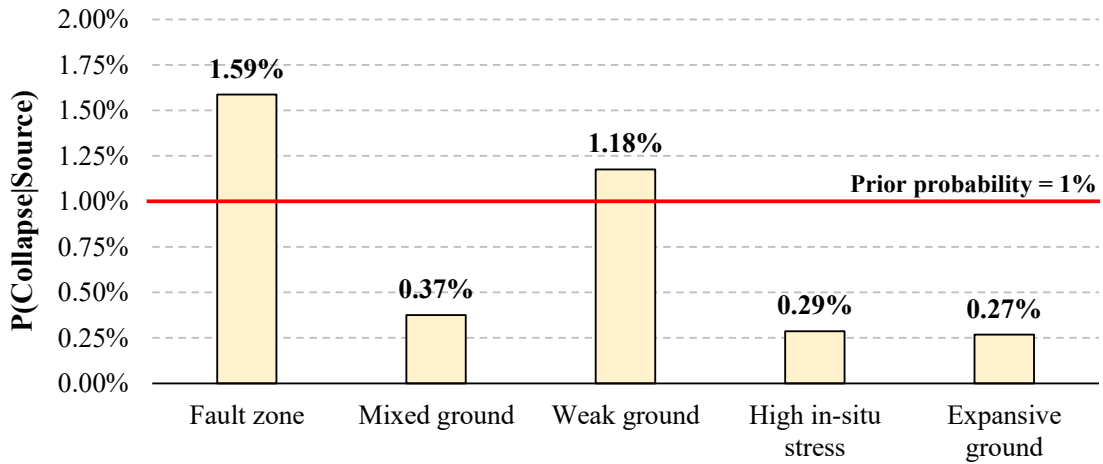


Fig. 2. Probability of Collapse Given Each Source

제시된 $P(\text{붕괴} | \text{지질요인})$ 는 높게 도출되었다. 이는 연약지반의 경우에 ($\text{지질요인}^c \cap \text{붕괴}$) 사례보다 ($\text{지질요인} \cap \text{붕괴}^c$) 사례가 상대적으로 많기 때문이다.

반면에, 복합지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반의 경우, 사후확률이 사전확률보다 감소하였다. 먼저, 복합지반은 상이한 강도를 갖는 지반이 혼재되어 막장압의 불균형을 유발할 수 있고, 이에 따른 저강도 지반의 과다 굴착은 붕괴에 기인할 수 있다(Gong et al., 2016). 또한, 대심도 터널과 같은 높은 토피고의 터널 시공 시의 높은 상재압력은 암반 파괴를 유발하고, 이는 결과적으로 붕괴로 이어질 수 있다(Gong et al., 2013; Zhu et al., 2019). 그러나, Fig. 2는 상기 복합지반과 높은 상재압력에 의한 붕괴 발생 메커니즘의 실현 가능성이 낮아 해당 지질요인(복합지반, 높은 상재압력)과 붕괴 간의 상관성이 낮음을 나타낸다. 한편, 팽창성 지반은 커터헤드 폐색을 유발하여 TBM 굴착 및 배토 성능을 저하할 수 있고, 이는 Fig. 2에서 나타난 팽창성 지반과 붕괴 간의 낮은 상관성과 상응함을 확인할 수 있었다(Rostami, 2016). 최종적으로, 베이스 정리를 활용한 TBM 사고 사례조사 분석을 통해 도출된 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 Table 5에 정리하였다.

본 연구를 통해 분석된 지질요인이 붕괴 발생에 미치는 영향은

Table 5. Risk Priority for TBM Tunnel Collapse

Rank	Source
1	Fault zone
2	Weak ground
3	Mixed ground
4	High in-situ stress
5	Expansive ground

실무에서 사전 식별된 지질요인에 대한 적절한 대응을 가능하게 한다. 하지만, 시간적 비용적 제약으로 충분한 시추조사 수행이 어려운 경우, TBM 시공 중 사전에 예상하지 못한 지질요인을 조우할 수 있고, 이는 TBM 시공의 안전성과 효율성을 상당히 저하한다(Kang et al., 2022). 따라서, 전기 비저항 탐사, 탄성과 탐사 등 비파괴탐사 기반 전방예측 기법을 활용하여, 지질요인 식별 결과의 신뢰도를 향상하는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 사례조사를 통해 국내외 TBM 사고사례를 수집하여 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 구축된 데이터베이스를 기반으로 베이스 정리를 활용하여 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위를 도출하였다.

- (1) 사례조사를 통해 수집된 국내외 TBM 사고사례 91건을 통해 3가지 사건(붕괴, 지반 과다변형, 토사/지하수 유입)과 7가지 지질요인(단층대, 복합지반, 연약지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반, 자갈층 지반, 고수압 함수대)이 식별되었다. 통계적으로 편향된 결과의 도출을 방지하기 위해 2가지 지질요인(자갈층 지반, 고수압 함수대)을 제외하여, 총 87건의 사고사례를 기반으로 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하였다.
- (2) 데이터베이스의 통계분석 결과, 전체 사고사례 중 1~2가지 지질요인에 의한 사고사례비율이 상대적으로 높게 도출되었다. 이에 따라, 특정 지점에 확인된 지질요인의 수가 적은 경우에도 안전측으로 보수적으로 대응할 필요가 있고, 예상하지 못한 지질요인을 마주하지 않도록 철저한 지반조사로 지층분포 추정 의 정확도를 향상하여야 한다.
- (3) 베이스 정리 적용 결과, 단층대와 연약지반의 경우 붕괴의





사전확률 대비 사후확률이 증가하였다. 이와 달리, 나머지 3가지 지질요인(복합지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반)은 붕괴와 낮은 상관성을 보였다. 이에 따라, 발생확률 측면으로 도출된 지질요인의 TBM 터널 붕괴 리스크 우선순위는 단층대, 연약지반, 복합지반, 높은 상재압력, 팽창성 지반 순으로 나타났다.

(4) 본 연구에서는 다양한 문헌 내 기록을 기반으로 TBM 리스크 데이터베이스를 구축하였지만, 사건-요인 간의 직접적 인과관계와 각 요인의 기준이 불명확하다는 한계점이 존재한다. 추후, 사고 조사 보고서 등을 통해 인과관계가 판명된 요인들만을 반영하고, 요인 식별 기준(예: 복합지반 강도 차이, 토포고)을 명확히 하여, TBM 리스크 데이터베이스의 신뢰성을 향상하는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgements

This research was conducted with the support of the “National R&D Project for Smart Construction Technology (No. RS-2020-KA157074)” funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and managed by the Korea Expressway Corporation.

ORCID

Kibeom Kwon  <https://orcid.org/0000-0001-8889-1386>
 Minkyu Kang  <https://orcid.org/0000-0001-8205-5424>
 Byeonghyun Hwang  <https://orcid.org/0000-0002-7986-8915>
 Hangseok Choi  <https://orcid.org/0000-0002-2040-8850>

References

Bennett, A. and Elman, C. (2006). “Complex causal relations and case study methods: The example of path dependence.” *Political Analysis*, Cambridge University Press, Vol. 14, No. 3, pp. 250-267, <https://doi.org/10.1093/pan/mpj020>.
 Broere, W. (2016). “Urban underground space: Solving the problems of today’s cities.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 55, pp. 245-248, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.012>.
 Chang, C. S., Yeh, Y. T., Chien, T. W., Lin, J. C. J., Cheng, B. W. and Kuo, S. C. (2020). “The computation of case fatality rate for novel coronavirus (COVID-19) based on Bayes theorem: An observational study.” *Medicine*, Wolters Kluwer Health, Vol. 99, No. 21, <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000019925>.
 Choi, M. C. (2020). “Evaluation of analytic hierarchy process

method and development of a weight modified model.” *Management & Information Systems Review*, DAMIS, Vol. 39, No. 2, pp. 145-162, <https://doi.org/10.29214/damis.2020.39.2.009> (in Korean).
 Chung, H., Lee, I. M., Jung, J. H. and Park, J. (2019). “Bayesian networks-based shield TBM risk management system: methodology development and application.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 23, No. 1, pp. 452-465, <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0912-y>.
 Crowe, S., Cresswell, K., Robertson, A., Huby, G., Avery, A. and Sheikh, A. (2011). “The case study approach.” *BMC Medical Research Methodology*, Springer Nature, Vol. 11, No. 1, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100>.
 Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampmann, J. and Veicherts, T. H. (2004). “Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No. 2.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 19, No. 3, pp. 217-237, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.01.001>.
 Font-Capó, J., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Martí, D., Carbonell, R. and Pérez-Estaun, A. (2011). “Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM).” *Engineering Geology*, Elsevier, Vol. 121, Nos. 1-2, pp. 46-54, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.012>.
 Gong, Q., Yin, L., Ma, H. and Zhao, J. (2016). “TBM tunnelling under adverse geological conditions: an overview.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 57, pp. 4-17, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.04.002>.
 Gong, Q. M., Yin, L. J. and She, Q. R. (2013). “TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer, Vol. 72, pp. 163-172, <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0460-0>.
 Grzegorzewski, P. (2013). “On some basic concepts in probability of IF-events.” *Information Sciences*, Elsevier, Vol. 232, pp. 411-418, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.11.010>.
 Hyun, K. C., Min, S., Choi, H., Park, J. and Lee, I. M. (2015). “Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 49, pp. 121-129, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.007>.
 Kang, M., Kim, S., Lee, J. and Choi, H. (2022). “Development of FE model for simulating electrical resistivity survey to predict mixed ground ahead of a tunnel face.” *Geomechanics & Engineering*, Techno-press, Vol. 29, No. 3, pp. 301-310, <https://doi.org/10.12989/gae.2022.29.3.301>.
 Kang, M., Lee, J., Kwon, K., Park, S. and Choi, H. (2023). “Laboratory simulations on hybrid non-destructive survey of electrical resistivity and induced polarization to predict geological risks ahead of a TBM tunnel.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 135, 105066, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105066>.
 Koh, S., La, Y. S. and Kim, B. (2020). “Shield TBM trouble cases review and parameter study for the cause analysis.” *Journal of*

- Korean Tunnelling and Underground Space Association*, KTA, Vol. 22, No. 2, pp. 197-217, <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.2.197> (in Korean).
- Kwon, K., Choi, H., Oh, J. Y. and Kim, D. (2022). "A study on EPB shield TBM face pressure prediction using machine learning algorithms." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, KTA, Vol. 24, No. 2, pp. 217-230, <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.2.217> (in Korean).
- Kwon, K., Kang, M., Kim, D. and Choi, H. (2023). "Prioritization of hazardous zones using an advanced risk management model combining the analytic hierarchy process and fuzzy set theory." *Sustainability*, MDPI, Vol. 15, No. 15, 12018, <https://doi.org/10.3390/su151512018>.
- Lee, S. and Moon, J. S. (2020). "Excessive groundwater inflow during TBM tunneling in limestone formation." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 96, 103217, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103217>.
- Lin, P., Xiong, Y., Xu, Z., Wang, W. and Shao, R. (2022). "Risk assessment of TBM jamming based on Bayesian networks." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer, Vol. 81, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02511-z>.
- Liu, W., Zhai, S. and Liu, W. (2019). "Predictive analysis of settlement risk in tunnel construction: a bow-tie-bayesian network approach." *Advances in Civil Engineering*, Hindawi, Vol. 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/2045125>.
- Rostami, J. (2016). "Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 57, pp. 173-182, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.009>.
- Seol, H., Won, D., Jang, J., Kim, K. Y. and Yun, T. S. (2022). "Ground Collapse in EPB shield TBM site: A case study of railway tunnels in the deltaic region near Nak-Dong River in Korea." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 120, 104274, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104274>.
- Sousa, R. L. and Einstein, H. H. (2021). "Lessons from accidents during tunnel construction." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 113, 103916, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103916>.
- Sturk, R., Olsson, L. and Johansson, J. (1996). "Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Vol. 11, No. 2, pp. 157-164, [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(96\)00019-3](https://doi.org/10.1016/0886-7798(96)00019-3).
- Tommasi, M., Ferrara, G. and Saggino, A. (2018). "Application of Bayes' theorem in valuating depression tests performance." *Frontiers in Psychology*, Frontiers, Vol. 9, 1240, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01240>.
- Yu, G. H. (2008). "A study on engineering characteristics of weak rock ground happened TBM Jaming accident in Tunnelling." *Journal of the Korea Construction Safety Engineering Association*, KCSA, Vol. 45, pp. 60-70.
- Zhu, H., Yan, J. and Liang, W. (2019). "Challenges and development prospects of ultra-long and ultra-deep mountain tunnels." *Engineering*, Elsevier, Vol. 5, No. 3, pp. 384-392, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.04.009>.
- Zolfaghari, M., Mokhtari, E. and Morsali, M. (2011). "Geological evidences of collapse zones in TBM tunneling; a case study of Ghomroud water conveyance tunnel, IRAN." In *Proceedins of First Asian & 9th Iranian Tunneling Symposium*, IRTA, Tehran, Iran.