

터널 붕괴 위험도 분석을 위한 영향인자 가중치 산정에 관한 연구

김정흠*

정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 전임연구원

A study on the weighting of influence factors for tunnel collapse risk analysis

Jeong-Heum Kim*

Research Specialist, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Jeong-Heum Kim, heum@kict.re.kr

Abstract

In this study, the Delphi method and AHP (analytic hierarchy process) were used to evaluate tunnel collapse risk from a comprehensive and multifaceted perspective. Influence factors were established through literature reviews, previous studies, and brainstorming sessions with expert groups, resulting in the construction of five main classification systems. A panel of 21 experts was formed, and three rounds of Delphi surveys were conducted to prevent errors and biases in the expert judgment process, thereby enhancing reliability. Ultimately, 14 influence factors were identified through CVR (content validity ratio) and COV (coefficient of variation) analyses of the experts' responses. Subsequently, the AHP method was applied to assess the relative importance of each influence factor and calculate the final composite weights. The timing of support and reinforcement had the highest priority, followed by groundwater inflow, joint conditions, support pattern levels, and auxiliary methods. These findings help identify the key factors affecting tunnel collapse risk and provide a foundation for developing strategies to improve tunnel safety.

Keywords: Delphi technique, Analytic hierarchy process, Influence factor, Weighting

초 록

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도를 종합적이고 다각적인 관점에서 평가하기 위해 델파이 기법과 AHP (analytic hierarchy process) 기법을 사용하였다. 영향인자 정립은 문헌 조사, 선행 연구 및 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 통해 총 5개의 상위분류체계를 구축하였다. 21 명의 전문가 패널을 구성하여 총 3차의 델파이 조사 과정을 통해 전문가

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(4)315-326(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.4.315>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 23, 2024

Revised June 26, 2024

Accepted June 26, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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 © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

판단과정에서 오류 및 편향을 방지하여 신뢰성을 향상시켰다. 최종적으로 전문가 답변에 대한 CVR (content validity ration) 및 COV (coefficient of variation) 분석을 수행하여 총 14개의 영향인자를 도출하였다. 이후 AHP 기법을 적용하여 각 영향인자의 상대적 중요도를 평가하고 최종 복합 가중치를 산정하였다. 지보 및 보강 시행시기가 가장 높은 우선 순위를 가지며, 지하수 유입량, 절리면 상태, 지보패턴수준, 보조공법이 그 뒤를 이었다. 이러한 연구 결과를 통해 터널 붕괴 위험에 영향을 미치는 주요 요인들을 파악하고, 이를 토대로 터널 안전성을 향상시키는 전략을 수립하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어: 델파이 기법, 계층화 분석법, 영향인자, 가중치

1. 서론

터널은 현대 사회의 교통 인프라에서 중요한 역할을 담당하며, 도시 및 교외 지역의 교통 혼잡을 줄이고, 물류의 효율성을 높이는 데 기여한다. 그러나 터널 공사는 지반 조건, 지하수, 굴착 방법 등 다양한 요소의 영향을 받으며, 이로 인해 터널 붕괴와 같은 위험이 상존한다. 터널 붕괴는 인명과 재산 피해를 초래할 뿐만 아니라, 사회적, 경제적 혼란을 야기하기 때문에 터널 붕괴 위험을 사전에 예측하고 관리하는 것은 중요하다.

터널 붕괴 위험을 평가하고 관리하는 데 있어서 여러 가지 방법이 개발되어 왔다. 대표적인 방법은 현장 조사, 지반 공학적 분석, 수치 해석, 그리고 전문가 경험을 기반으로 한 평가 등이 있다. 이와 같은 방법들은 경험과 엔지니어링 판단에 근거하여 정밀한 검토가 가능하게 하지만 다수의 평가 결과를 종합적으로 판단하여 위험의 우선 순위를 결정하는 것에는 한계가 있다. 이에 따라, 보다 체계적이고 객관적인 평가 방법의 필요성이 대두되고 있으며, 다각적인 관점에서 평가로는 델파이 기법과 계층화 분석법(analytic hierarchy process, AHP)이 사용되고 있다.

델파이 기법(Delphi method)은 통제된 피드백이 제공되는 여러 차례의 설문조사를 통해 특정 문제에 대해 전문가 집단의 합의를 도출하는 데 유용한 의사결정 수단이다. Delbecq et al. (1975)과 Rowe and Wright (2001)에 따르면, 델파이 기법은 집단의 의견을 전체적 차원에서 효율적으로 대응하도록 하는 데 효과적이다. 델파이 기법을 적용하면 전문가들의 직관을 객관화된 수치로 나타낼 수 있어, 터널 붕괴 위험도 영향인자 정립에 적합한 방법이다. Anderson (1995)과 Adler and Ziglio (1996)의 연구에서는 소수의 전문가 그룹을 통한 델파이 기법이 유의미한 결과를 도출할 수 있음을 제시하였으며, Skulmoski et al. (2007)은 델파이 기법이 의사결정 과정에서의 일관성을 유지하는 데 효과적임을 강조하였다. Kim et al. (2017)은 델파이 기법을 적용하여 터널 붕괴 위험 영향인자를 체계적으로 분석하였고, 이를 통해 터널 안전 관리의 효율성을 높이는 방안을 제시하였다.

AHP는 다기준 의사결정 방법으로, 정성적 요소를 정량적으로 평가하는 데 널리 사용된다(Saaty, 1982). AHP는 주어진 의사결정 문제를 상호 관련된 의사결정 요소들로 계층화하고, 쌍대비교(pairwise comparison)를 통해 상대적 중요도를 산정함으로써, 복잡한 문제의 의사결정을 체계적으로 지원한다. Vargas (1990)에 따르면, AHP

는 다층적인 분석을 통해 의사결정의 일관성을 높이고, 중요한 요소들을 명확히 도출하는 데 유리하다. 또한, Saaty (1982)는 AHP의 일관성 비율이 0.1 미만일 때 합리적인 일관성을 가진다고 제안하며, 이를 통해 평가의 신뢰성을 높일 수 있음을 언급하였다.

본 연구는 델파이 기법과 AHP를 결합하여 터널 붕괴 위험도를 평가하는 데 필요한 주요 영향인자를 식별하고, 이들 인자의 중요도를 평가하여 가중치를 산정하는 것이다. 이를 위해 문헌조사 및 선행 연구를 통해 터널 붕괴와 관련된 다양한 영향인자들을 정리하고, 델파이 기법을 통해 전문가들의 의견을 수렴하여 영향인자를 정립하였다. 이후 AHP를 통해 각 영향인자의 상대적 중요도를 산정하고, 최종 가중치를 도출하였다.

2. 영향인자 평가 방법

2.1 델파이 기법

델파이 기법이란 통제된 피드백이 제공되는 여러 차례의 설문조사를 통해 특정 문제에 대해 전문가 집단의 합의를 도출하는데 유용한 의사결정 수단이다. 즉 집단의 의견을 개별적이 아닌 전체적 차원에서 특정 문제에 대한 도의가 부족하거나 지식이 불완전하다고 생각될 때 효율적으로 대응할 수 있다(Delbecq et al., 1975; Rowe and Wright, 2001).

델파이 기법을 적용하기 위해서는 가장 먼저 조사 대상인 전문가의 선정이 수행된다. 델파이 기법이 전문가적 직관을 객관화된 수치로 나타내는 방법이기 때문에, 조사에 참여하는 전문가의 자질은 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 10~15명의 소집단의 전문가만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있다고 조사되고 있다(Anderson, 1995; Adler and Ziglio, 1996). 본 연구에서는 델파이 조사과정에서 21명의 전문가가 참여하였으므로, 델파이 조사 과정의 신뢰도는 적절하다고 판단된다.

전문가의 선정과정 이후, 제1차 설문조사가 실시된다. 제1차 설문은 비 구조화된 응답 양식을 주로 활용하여 전문가들의 발산적 지각(divergent perception)을 고찰한 다음, 이로부터 의견을 수렴하게 된다. 1차 설문은 터널 붕괴 위험도의 영향인자에 대한 전문가들의 다양하고 확산적 의견을 수집하기 위해 개방형 질문을 제시하였다.

제2차 설문조사는 제1차 델파이 설문을 통해 도출된 견해를 정리하여 각 항목에 대한 전문가들의 의견을 재평가하도록 요청한다. 보통 제2차 설문지에서는 항목에 대한 우선순위나 중요도를 평가한다. 중요도는 리커트 5점 척도 또는 7점 척도를 사용하며, 응답결과는 평균과 표준편차 등을 이용하여 조사 대상 전문가의 합의 수준을 확인한다. 제2차 델파이 분석을 통해 도출된 터널 붕괴 위험도의 영향인자 후보군에 대한 중요도를 리커트 7점 척도로 조사하였다. 그리고 기타 의견란을 마련하여 항목 이외의 의견이나 부가 설명 등을 기술할 수 있도록 하여 질적 분석 자료로 사용하였다.

제3차 설문조사는 제2차 설문에 대한 통계 분석 결과, 전문가 집단의 사고 방향에 대한 피드백을 포함한다. 보통 3차 설문부터 전문가들의 의사가 합의점에 도달한다. 이는 연속된 횟수의 응답에 있어서의 일치성이라고 정의할 수 있는데, 3차 설문 결과에서 의견이 종합되지 않을 경우, 추가적 설문을 반복적으로 시행할 수 있다(Skulmoski

et al., 2007). 그러나 기존의 대부분의 연구들에서는 일반적으로 3차에 걸친 델파이 조사면 충분하다고 언급하고 있다(Rowe and Wright, 2001).

델파이 조사는 근본적으로 전문가들의 의견의 일치점을 도출하는데 있다. 따라서 조사과정에서 의견의 일치점이 도출되지 않고 전문가 간 의견의 변동성이 크거나 중요도가 낮게 분석된 항목은 제거하거나 재조사할 필요가 있다. 일반적으로 응답 결과의 변동성에 대한 평가는 변동계수(coefficient of variation, COV)를 산정하여 분석할 수 있다. 변동계수의 값이 0.5 이하일 경우 안정도가 높아 추가 설문이 필요 없으나, 0.8 이상일 경우에는 추가 설문이 필요한 것으로 판단한다(Rho, 2006).

조사 결과의 유의미함, 즉 중요도를 평가하는 방법으로는 CVR (content validity ratio)를 활용할 수 있다(Lawshe, 1975). CVR은 아래의 식 (1)을 통해 산정 할 수 있다.

$$CVR = \frac{n_e - N/2}{N/2} \quad (1)$$

여기서, n_e 는 중요하다고 응답한 패널 수, N 은 전체 패널 수를 의미한다. CVR은 중요하다고 인식하는 패널이 많을수록 그 문항의 유효 비율 정도 또는 유효 범위가 증가한다는 가정을 기초로 한다. 즉, 어떤 문항이든 중요하다고 응답한 패널 수가 50% 이상일 때 그 문항은 어느 정도 타당도를 가지고 있다고 볼 수 있다. 중요하다고 응답한 패널 수가 50%보다 적으면 음수 값이 되고, 50%일 때는 0, 50보다 크고 100% 미만이면 0과 1사이의 값, 100%일 때 1의 값을 가진다. Table 1은 패널 수에 따른 CVR 최소값 이상을 가지는 항목만이 타당도가 있다고 판단할 수 있음을 보여준다. 델파이 2차, 3차 조사내용의 변동성과 타당성을 검증하기 위하여 COV와 CVR 분석을 수행하였다.

Table 1. Minimum value of CVR according to number of pannel (Lawshe, 1975)

Number of pannel	Minimum value of CVR
5	0.99
7	0.99
10	0.62
13	0.54
15	0.49
20	0.42
25	0.37
30	0.33
35	0.31
40	0.29

2.2 Analytic hierarchy process

AHP 기법은 1970년대 초에 개발된 것으로, 정성적 요소를 포함하는 다기준 의사 결정에 널리 사용되어 왔다 (Saaty, 1982). 주어진 의사결정 문제를 상호 관련된 의사결정 요소들로 계층화하며, 계층의 최상위층에는 가장 포괄적인 의사결정의 목적이 설정되고, 하위계층들은 의사결정의 목적에 영향을 미치는 다양한 속성들로 구성된다. 이들 속성들은 상호 관련된 의사결정 사항들의 계층으로 분류되어 의사결정을 위한 구조화 시스템으로 설정된다(Vargas, 1990).

의사결정 문제가 계층화되면, 전문가 설문 등을 통해 각 계층을 구성하는 평가 요소별 평가가 수행되고, 선정된 평가 요소 간의 쌍대비교(pairwise comparison)를 수행하여 상대적 중요도를 산정하게 된다(Saaty, 1982). AHP는 쌍대비교에 따른 계층적인 분석과 이를 통해 얻어진 각각의 요소 및 대안 간의 비교를 통하여 각각의 요소 및 대안이 상위 요소와 기준에 대해 얼마나 많은 영향을 미치는지 또는 중요성을 갖는지를 찾아내는 과정이다. 이러한 과정을 전 계층에 대해 수행하고, 고유치 계산방법을 이용하여 최종적으로 각 요소 간의 상대적 중요도를 도출하여 가중치를 확정할 수 있다.

AHP에서는 응답의 일관성 정도를 비일관성비율(inconsistency ratio)로 나타낸다. 비일관성비율이 0.1의 값을 갖는다는 것은 응답자가 완전한 일관성을 유지하며 쌍대비교를 수행하였음을 의미한다. Saaty(1982)는 비일관성비율이 0.1 미만이면 쌍대비교가 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단하고, 0.2 미만일 경우 용납할 수 있는 수준의 비일관성을 갖고 있는 것으로 판단한다. 비일관성 비율이 0.2 이상이면 일관성이 부족한 것으로 재평가가 필요하다고 제안하였다.

본 연구에서는 델파이 기법을 통하여 도출된 총 14개의 평가요소들을 중심으로 AHP 기법을 바탕으로 각 영향인자별 우선순위를 도출하였다. AHP 기법의 적용을 통해 영향인자들의 중요도에 대한 전문가들의 주관적인 판단 내용을 가중치로 정량화하였다.

3. 영향인자 선정 및 가중치 산정

3.1 터널 안정성 영향인자

터널 붕괴 위험과 관련된 영향인자를 신뢰적으로 정립하기 위하여 델파이 기법을 통해 체계화되고 표준화된 영향인자를 정립하였다(Kim et al., 2017). 델파이 기법은 전문가적 직관을 객관화된 수치로 나타내는 방법이기 때문에, 조사에 참여하는 전문가의 자질은 매우 중요한 요소이다. Table 2의 내용과 같이, 경력을 지닌 교수, 설계 및 시공 전문가, 연구원 등 다양한 분야 총 21인의 전문가 패널을 구성하였다. 3차에 걸친 델파이 조사·분석 과정에 모두 참여하여 분석의 신뢰성을 고려하였다.

Table 2. Career history of experts who participated in the Delphi survey

Division		Targeted number of persons for sampling	Number of participated panels		
			1st	2nd	3rd
Academic level	Bachelor	1	1	1	1
	Master	12	12	12	12
	Doctor	8	8	8	8
	Total	21	21	21	21
Career years in related area	10~15 years	0	0	0	0
	15~20 years	12	12	12	12
	20 years or longer	9	9	9	9
	Total	21	21	21	21

전문가 선정 후, 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 통해 터널 붕괴 위험도 영향인자의 후보군 도출 및 체계화의 기준이 되는 5개의 상위분류체계를 구조화 하였다. 하위분류체계에 해당하는 영향인자를 구체화하기 위해 델파이 조사를 수행하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

제1차 델파이 조사는 개방형 설문으로 진행하였다. 분류된 영향인자의 상위분류체계를 바탕으로 각 체계에서 고려될 수 있는 구체화된 하위분류 요소를 자유롭게 나열하도록 하였다. 조사된 모든 항목을 각 상위 체계에 종속되도록 구조화했으며, 5개의 상위분류체계에 종속된 하위분류의 영향인자는 총 181개가 조사되었다. 이 가운데 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 통해 문항별 응답 사례 유형화, 유사 문항의 통합 및 제거 과정을 거쳐 최종적으로 22개의 결과를 도출하였다.

제2차 델파이 조사에서는 1차 조사에서 수집된 총 22개의 영향인자에 대하여 전문가를 대상으로 7점 리커트 척도를 적용하여 각 인자별 중요도에 대한 설문을 진행하였다. 이는 각 평가 요소에 대한 타당성 검증과 3차 델파이 조사에서 사용될 평가 요소들을 도출하기 위함이었다. 1차 조사에서 도출된 각 영향인자의 적용 타당성 검증은 CVR (Lawshe, 1975)을 분석하여 수행하였다. 총 22개의 평가 요소 중에서 8개의 평가 요소가 CVR 분석값이 0.41 미만으로 터널 붕괴 위험도 영향인자로 부적합하다고 분석되었다. CVR 값이 0.41 미만일 경우 타당성이 결여되었다고 판단한 이유는, Table 1에서 조사 대상자의 수가 21명일 경우의 값을 회귀분석을 통해 도출했기 때문이다. 제2차 델파이 조사 분석에 사용된 총 22개의 평가 요소들 중 8개를 제외한 14개의 영향인자가 결정되었다.

제3차 델파이 조사는 2차 델파이 조사 결과 도출된 총 14개의 영향인자를 대상으로 7점 리커트 척도를 활용한 폐쇄형 설문으로 진행하였으며, 1,2차 조사에 참여하였던 전문가들의 최종적인 의견의 일치 및 합의를 도출하기 위한 목적이다. 제3차 델파이 조사 결과를 평가하기 위하여 CVR 분석을 통해 인자별 타당성 검증을 재수행하고, 전문가 답변의 일치성을 측정하기 위하여 COV를 산정하였다. COV의 경우 0.5 이하로 분석되는 경우 추가적인 설문이 필요하지 않다는 의미이다(Rho, 2006). 분석 결과, 총 14개의 영향인자들에 대한 CVR이 모두 0.41 이상으로 분석되어 타당성이 확보된 것으로 나타났다. 14개의 영향인자의 변동계수는 0.5 이하로 분석되어 추가적인

설문이 필요하지 않으며, 응답의 일치성 또한 높아 설문지의 안정도가 확보되었다.

Table 3은 총 3차에 걸친 델파이 조사 결과를 토대로 최종적으로 도출된 터널 붕괴 위험도 영향인자에 대한 내용이다. 이들 영향인자들은 다양한 분야의 터널 전문가를 대상으로 의견의 일치와 합의를 도출한 결과로서, 터널 붕괴 위험도 지수 개발을 위한 사전조사 및 분석단계에서 요구되는 영향인자로서 매우 가치가 있다고 판단된다.

Table 3. Delphi survey result

Main hierarchy	The first Delphi survey	The second Delphi survey		The third Delphi survey		
	Subordinate hierarchy	CVR (>0.41)	Result	CVR (>0.41)	COV	Result
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions	1.00	Suitable	1.00	0.13	Suitable
	Rock mass strength	0.71	Suitable	0.81	0.15	Suitable
	Ground grade (RQD/N)	0.62	Suitable	0.71	0.17	Suitable
	Joint face spacing	0.62	Suitable	0.62	0.17	Suitable
	Adjustment for joint orientations	0.62	Suitable	0.71	0.20	Suitable
	Underground stress conditions	0.33	Unsuitable	-	-	-
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	0.81	Suitable	0.90	0.20	Suitable
	Depth ratio	0.43	Suitable	0.43	0.27	Suitable
	Sectional shape	0.33	Unsuitable	-	-	-
	Adjacent clearance to the tunnel	0.33	Unsuitable	-	-	-
	Neighboring land use status	-0.52	Unsuitable	-	-	-
Groundwater conditions	Groundwater inflow	0.90	Suitable	1.00	0.10	Suitable
	Groundwater level	0.71	Suitable	0.43	0.20	Suitable
	Groundwater leak position	0.33	Unsuitable	-	-	-
	Groundwater source	0.33	Unsuitable	-	-	-
Excavation conditions	Divided excavation method	0.81	Suitable	0.90	0.14	Suitable
	Advance	0.90	Suitable	0.71	0.18	Suitable
	Bi-directional excavation status	0.14	Unsuitable	-	-	-
	Excavation efficiency	-0.05	Unsuitable	-	-	-
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	1.00	Suitable	1.00	0.12	Suitable
	Support pattern level	0.81	Suitable	1.00	0.11	Suitable
	Auxiliary method	0.90	Suitable	0.81	0.16	Suitable

최종 도출된 14개의 영향인자들의 중요도 평가를 위해 상위계층과 하위계층을 구분하여 평가 대안을 구조화하였다(Fig. 1). 상위분류체계는 지반의 물성 및 형상, 터널 기하학적 조건, 지하수 조건, 굴착 조건, 지보 및 보강 조건의 5개 요인으로 구분되며, 각 상위계층 내에 포함되는 하위계층은 절리면 상태, 암반강도, 지반등급(RQD/N), 절리면 간격, 절리방향에 대한 보정, 굴착 단면적, 심도비, 지하수 유입량, 지하수위, 분할굴착공법, 굴진장, 지보

및 보강 시행시기, 지보패턴수준, 보조공법을 고려한 14개 인자로 구성된다.

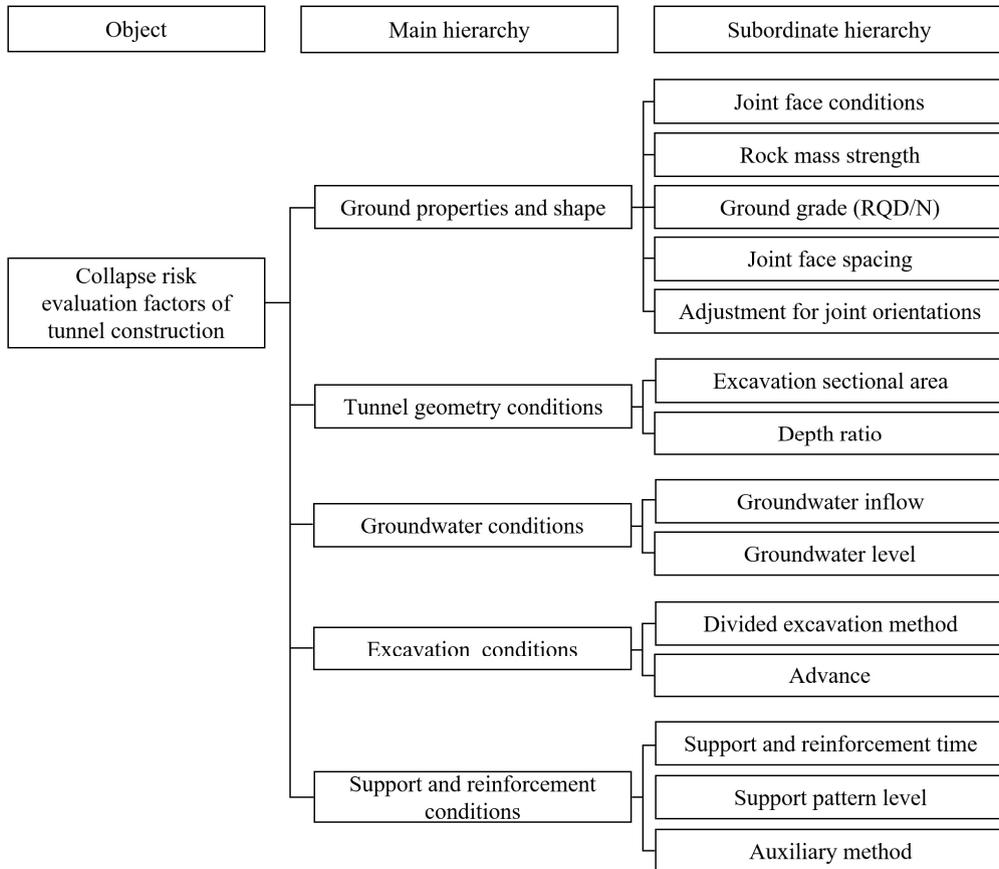


Fig. 1. AHP hierarchy used in this study

3.2 상위계층 영향인자의 가중치 산정

구조화된 영향인자의 쌍대비교(pairwise comparison)를 통한 가중치를 설정하기 위해서는 각 인자간 상대적 중요도가 결정되어야 한다. 상대적 중요도를 파악하기 위해 리커트 9점 척도를 이용하여 전문가 21인을 상대로 설문조사를 수행하였다. 또한 조사된 내용을 토대로 Expert Choice v.11을 활용하여 각 계층별로 인자별 가중치를 산정하였다. 결과의 논리적 일관성 유지를 판단하기 위해 비일관성비율(inconsistency ratio)로 검증하였다 (Saaty, 1982). 마지막으로 최종적인 가중치는 각 계층별로 분석한 가중치를 바탕으로 상위계층 인자의 가중치와 종속된 하위계층 인자의 가중치를 곱하여 복합 가중치를 산출하였다. 최종 결정된 가중치를 토대로 상대적 우선 순위 결정법을 적용하여 인자 간 우선순위를 결정하였다.

상위계층의 요소는 지반의 물성 및 형상, 터널 기하학적 조건, 지하수 조건, 굴착 조건, 지보 및 보강 조건 요인

으로 구분된다. 본 연구의 설문에 참여한 전문가들은 5개의 상위계층 중 지보 및 보강 조건과 지반의 물성 및 형상을 가장 중요한 요인으로 평가하였다. 다음으로는 지하수 조건, 굴착 조건, 터널 기하학적 조건 순으로 평가하였다.

한편, 쌍대비교 결과의 신뢰성을 가늠하고 전문가 집단의 정확한 응답 정도를 확인하는 비일관성비율 값은 0.00278로 분석되어, 설문에 응한 전문가의 판단이 논리적 일관성을 유지하고 있는 것으로 나타났다(Table 4).

Table 4. Weighting calculation results on influence factors in the main hierarchy

Main hierarchy	Weighting	Priority	Inconsistency ratio
Geotechnical properties and shape	0.347	2	CR = 0.00278 (CR < 0.10)
Tunnel geometry conditions	0.058	5	
Groundwater conditions	0.155	3	
Excavation conditions	0.091	4	
Support and reinforcement conditions	0.349	1	

3.3 하위계층 영향인자의 가중치 산정

지반의 물성 및 형상에 대한 하위계층 영향인자인 절리면 상태, 암반강도, 지반등급(RQD/N), 절리면 간격, 절리방향에 대한 보정에 대한 설문 결과를 쌍대비교를 통해 가중치를 산정하였다(Table 5). 5개의 영향인자 중 절리면 상태가 가장 중요도가 높은 요인으로 분석되었으며, 다음으로는 절리면 간격, 지반등급(RQD/N), 절리방향에 대한 보정, 암반강도 순으로 나타났다. 또한, 쌍대비교의 신뢰성을 가늠하고 전문가 집단의 정확한 응답 정도를 확인하는 비일관성비율 값은 0.00609로 분석되어, 설문에 응한 전문가의 판단이 논리적 일관성을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 절리면 상태 및 절리면 간격이 상대적으로 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 암반의 거동이 암반 내에서 발달하고 있는 절리면의 특성에 따라 영향을 받으므로 터널공사의 안정성에 큰 영향을 미치는 인자로서 평가된 것으로 분석된다.

터널 기하학적 조건에 해당하는 하위계층 영향인자는 터널 굴착 단면적과 터널 심도비이며, 굴착 단면적이 심도비보다 대략 두 배의 가중치가 산정되었다. 비일관성비율도 0.1보다 작아 유의미한 결과를 보였다.

지하수 조건에 대한 하위계층 영향인자에 대한 가중치 산정 결과를 살펴보면, 지하수 유입량이 가장 중요도가 높은 요인으로 분석되었으며, 다음으로는 지하수위 순으로 나타났다. 또한, 비일관성비율도 0.1보다 작아 유의미한 결과를 보였다. 지하수 조건 평가 요인 중 지하수 유입량이 상대적으로 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이는 터널 시공 중 암반 내로 각종 균열을 통해 흐르는 지하수와 지표수가 지반 연약화, 토압증대, 지보공의 지지력 저하, 지표 침하에 의한 토압증대로 인해 지반과 막장의 붕괴를 유발하는 요인으로 분석되었다.

굴착 조건에 대한 하위계층 영향인자의 가중치 산정 결과, 분할 굴착 공법이 가장 중요도가 높은 요인으로 분석되었으며, 다음으로는 굴진장순으로 나타났다. 또한, 비일관성비율도 0.1보다 작아 유의미한 결과를 보였다.

마지막으로 지보 및 보강 조건에 대한 하위계층은 지보 및 보강 시행시기, 지보패턴수준, 보조공법 순으로 나타났다. 비일관성비율 값도 0.00053으로 매우 유의미한 것으로 판단되었다. 지보 및 보강 시행시기는 굴착 후 가능한 한 조기에 수행하여 지반의 변위가 허용 범위 이내에 존재하도록 하는 것이 매우 중요하다는 것을 의미한다. 또한, 지보 및 보강 조건에 해당하는 지보패턴수준 및 보조공법은 설계 요소와 관련된 것으로서, 막장 조건과 암반 상태를 잘 파악하여 적극적으로 대처한 설계가 이루어졌을 경우 붕괴 위험도는 감소될 것으로 분석된다.

Table 5. Weighting calculation results on influence factors in the subordinate hierarchy factors

Subordinate hierarchy				
Division	Influence factors	Weighting	Priority	Inconsistency ratio
Geotechnical properties and shape	Joint face conditions	0.343	1	CR = 0.00609 CR < 0.10
	Rock mass strength	0.146	5	
	Ground grade	0.171	3	
	Joint face spacing	0.186	2	
	Adjustment for joint orientations	0.155	4	
Tunnel geometry conditions	Excavation sectional area	0.655	1	CR = 0.0 CR < 0.10
	Depth ratio	0.345	2	
Groundwater conditions	Groundwater inflow	0.804	1	CR = 0.0 CR < 0.10
	Groundwater level	0.196	2	
Excavation conditions	Divided excavation method	0.633	1	CR = 0.0 CR < 0.10
	Advance	0.367	2	
Support and reinforcement conditions	Support and reinforcement time	0.471	1	CR = 0.00053 CR < 0.10
	Support pattern level	0.312	2	
	Auxiliary method	0.217	3	

3.4 최종 복합가중치 산정 및 우선순위 도출

본 연구에서 AHP를 활용한 영향인자별 최종 가중치를 산정하기 위해서는 두 계층별로 영향인자를 나누고 각 계층별 가중치를 분석하였다. 상위계층의 영향인자에 대한 가중치와 종속된 하위계층의 가중치를 곱해서 최종적인 복합가중치를 도출하게 되며 산정 결과를 요약하여 정리하면 Table 6과 같다. 우선순위를 살펴보면 지보 및 보강 시행시기가 1위, 지하수 유입량이 2위, 절리면 상태가 3위, 지보패턴수준이 4위, 보조공법이 5위순으로 나타났다. 반면, 우선순위 중 하위의 평가지표 항목을 살펴보면 심도비가 14위, 지하수위가 13위, 굴진장이 12위, 굴착 단면적이 11위로 나타났다. 최종 가중치 도출 및 우선순위 도출은 AHP의 이상적 방식을 적용하여 이루어졌으며, 전체 비일관성비율은 0.00278로 분석되어 유의미한 것으로 나타났다.

Table 6. Final compound weighting calculation on risk evaluation influence factors for tunnel collapse

Main hierarchy			Subordinate hierarchy			Overall	
Division	Weighting (a)	Priority	Division	Weighting (b)	Priority	Compound weighting (a*b)	Priority
Geotechnical properties and shape	0.347	2	Joint face conditions	0.343	1	0.119	3
			Rock mass strength	0.146	5	0.051	10
			Ground grade	0.171	3	0.059	7
			Joint face spacing	0.186	2	0.065	6
			Adjustment for joint orientations	0.155	4	0.054	9
Tunnel geometry conditions	0.058	5	Excavation sectional area	0.655	1	0.038	11
			Depth ratio	0.345	2	0.020	14
Groundwater conditions	0.155	3	Groundwater inflow	0.804	1	0.125	2
			Groundwater level	0.196	2	0.030	13
Excavation conditions	0.091	4	Divided excavation method	0.633	1	0.058	8
			Advance	0.367	2	0.033	12
Support and reinforcement conditions	0.349	1	Support and reinforcement time	0.471	1	0.164	1
			Support pattern level	0.312	2	0.109	4
			Auxiliary method	0.217	3	0.076	5

4. 결론

본 연구에서는 터널 붕괴 위험도 수준을 종합적이고 다각적인 평가를 위해 델파이 기법을 통해 붕괴 위험도 영향인자를 도출하였고, AHP 기법을 이용하여 영향인자의 가중치를 산정하였다. 터널 붕괴 위험도에 영향을 미치는 인자를 결정하기 위해 문헌조사 및 선행연구를 통한 전문가 집단의 브레인스토밍 과정을 거쳐 영향인자의 상위분류체계를 도출하였다. 총 3차의 델파이 조사를 수행하여 영향인자를 정립하였다.

제1차 델파이 조사 결과 5개의 상위분류체계에 종속된 하위분류의 영향인자는 총 181개로 조사되었다. 이 가운데 문항별 응답 사례 유형화, 유사 문항의 통합 및 제거 과정을 거쳐 최종적으로 22개의 결과를 도출하였다. 제2차 델파이 조사에서는 1차 조사에서 수집된 총 22개의 영향인자에 대하여 전문가를 대상으로 7점 리커트 척도를 적용하여 각 인자별 중요도에 대한 설문을 진행하였고, 각 영향인자에 대한 적용 타당성 검증은 CVR을 분석하여 14개의 영향인자를 결정하였다. 제3차 델파이 조사는 2차 델파이 조사 결과 도출된 총 14개의 영향인자를 대상으로 7점 리커트 척도를 활용하여 인자의 타당성 및 전문가들의 최종적인 의견의 일치와 합의를 도출하기 위해 CVR 및 COV 평가를 수행하여 최종 14개의 영향인자를 정립하였다.

AHP 기법을 사용하여 이러한 영향인자들의 상대적 중요도를 평가하고 최종 복합 가중치를 산정하였다. 우선 순위를 살펴보면 지보 및 보강 시행시기가 1위, 지하수 유입량이 2위, 절리면 상태가 3위, 지보패턴수준이 4위

보조공법이 5위 순으로 나타났다. 우선순위 중 하위의 평가지표 항목을 살펴보면 심도비가 14위 지하수위가 13위, 굴진장이 12위, 굴착 단면적이 11위로 나타났다. 연구 결과를 통해 터널 붕괴 위험에 가장 큰 영향을 미치는 요인들이 파악되었으며, 이를 토대로 터널 안전성을 향상시키기 위한 전략을 수립하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

저자 기여도

김정흠은 연구 개념 및 설계, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성 및 검토를 하였다.

References

1. Adler, M., Ziglio, E. (1996), *Gazing Into the Oracle: The Delphi Method and Its Application to Social Policy and Public Health*, Jessica Kingsley Publishers, London, pp. 3-33.
2. Anderson, D.R. (1995), *Strands of System: The Philosophy of Charles Peirce*, Purdue University Press, West Lafayette, pp. 204.
3. Delbecq, A.L., Van de Ven, A.H., Gustafson, D.H. (1975), *Group Techniques for Program Planning: A guide to nominal group and Delphi processes*, Scott Foresman, Glenview, IL, pp. 174.
4. Kim, J.H., Kim, C.Y., Lee, S.S., Lee, J.H. (2017), "A study on influence factors for tunnel collapse risk analysis using Delphi method", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 165-172.
5. Lawshe, C.H. (1975), "A quantitative approach to content validity", *Personnel Psychology*, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
6. Rho, S.Y. (2006), "Delphi technique: professional insight to predict the future", *KRIHS Planning and Policy*, Vol. 299, pp. 53-62.
7. Rowe, G., Wright, G. (2001), *Expert Opinions in Forecasting: The Role of the Delphi Technique*, *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*, Springer, Boston, pp. 125-144.
8. Saaty, T.L. (1982), "The analytic hierarchy process: a new approach to deal with fuzziness in architecture", *Architectural Science Review*, Vol. 25, No. 3, pp. 64-99.
9. Skulmoski, G.J., Hartman, F.T., Krahn, J. (2007), "The Delphi method for graduate research", *Journal of Information Technology Education*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-21.
10. Vargas, L.G. (1990), "An overview of the analytic hierarchy process and its applications", *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 2-8.