

도심지 개착식 굴착공사 붕괴사고 및 도로함몰 저감을 위한 우선 관리 요소 결정

성주현¹ · 정민형^{2*}

¹정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소, 책임연구원

²비회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소, 선임연구원

Determination of priorities for management to reduce collapse accident of open excavation and road sink in urban areas

Joo-Hyun Seong¹ · Min-Hyung Jung^{2*}

¹Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Research Institute for Infrastructure Performance, Principal Researcher

²Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Research Institute for Infrastructure Performance, Senior Researcher

*Corresponding Author : Min-Hyung Jung, mhjung@kistec.or.kr

Abstract

The collapse accidents during a open ground excavation in urban areas not only lead to human injuries and material damages in the construction site, but also lead to road sinks and damages to the adjacent facilities due to settlement of ground around the construction site. Therefore, during a open ground excavation in the urban areas, it is necessary to thoroughly prepare for prevention of collapse accidents, and consider whole construction stage such as planning, design and construction. In this study, the priorities to be managed mainly were obtained in order to prevent collapse accidents during a open ground excavation. After analyzing results from past accidents cases for open ground excavations, priorities were evaluated regarding collapse-inducing elements using the Delphi technique which is a decision-making method by consensus among experts. As a result, insufficient groundwater treatment, bad geotechnical investigation and instability on construction, etc. were obtained as priorities for prevention of collapse accidents.

Keywords: Open ground excavation, Accident cases, Delphi survey, Priorities

초 록

도심지 개착식 굴착공사 중 발생하는 붕괴사고는 공사장 내에서의 인명 및 물질적 피해를 불러일으킬 뿐만 아니라, 공사장 주변의 지반침하로 인한 도로함몰 및 시설물 피해를 유발한다. 따라서, 도심지에서 개착식 굴착공사를 수행함에 있어서, 계획, 설계 및 시공의

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
19(3)489-501(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.3.489>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 14, 2017

Revised May 2, 2017

Accepted May 16, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

건설 전체 단계에서 굴착공사 붕괴 방지를 위한 철저한 대비가 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 개착식 굴착공사 중 붕괴사고 예방을 위해, 중점적으로 관리되어야 할 우선 요소 결정 연구를 수행하였다. 먼저, 과거 흠막이 굴착공사의 사고사례 조사결과를 분석하고, 전문가 합의에 의한 의사결정 방법인 델파이 기법을 이용하여 붕괴 유발 요소에 대한 중요도를 산정하였다. 그 결과, 지하수 처리, 지반조사의 부실, 시공상의 불안정 등이 흠막이 공사 붕괴 예방을 위한 중점 관리 요소로 도출되었다.

주요어: 개착식 굴착공사, 사고 사례, 델파이 기법, 우선 요소

1. 서론

개착식 굴착공사에 대한 기술축적이 상당한 수준으로 이루어졌음에도 불구하고, 최근까지도 관련 사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 도심지 및 도심도에서의 굴착에 따른 사고발생은 그 피해가 상대적으로 크며 사회적으로도 크게 부각되고 있다.

덧붙여, 2016년 지하안전관리에 관한 특별법 제정으로 지반함몰(도로함몰)에 대한 관심이 매우 커지고 있는 상황으로, 주변의 신설공사 현장 굴착공사가 지반함몰을 유발하는 주요 원인 중 하나로 언급되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015). 특히, 도심지에서 흔하게 이루어지고 있는 개착식 굴착공사의 경우, 흠막이가 굴착면 방향으로 발생하는 지반의 주동변위를 억제하고 이는 연직침하와 직접적으로 연관되기 때문에 굴착공사 사고는 도로함몰의 직접적인 원인이라 할 수 있다.

따라서, 도심지 흠막이 굴착공사 중 사고발생에 영향을 미치는 핵심 요소를 계획·설계·시공 단계에서 우선적으로 중점 관리함으로써, 사고를 감소시키고 굴착공사 현장 자체의 인명 및 재산피해 뿐 아니라, 굴착공사 주변에서 발생하는 도로함몰 역시 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

흠막이 굴착이 인접지반에 미치는 영향은 여러 연구를 통해 이루어졌다. Yang and Kim (1997)은 도심지에서 깊은 굴착으로 발생하는 인접지반 지표침하를 분석하였고, Lee (2007)는 지중연속벽 시공시 선행굴착과 본굴착 과정에서의 지반침하를 분석하였다. Cowland and Thorley (1984)는 슬러리월로부터의 거리와 굴착 깊이에 따른 지반침하를 도표로 나타내었으며, Clough and O'Rourke (1990)는 지반조건과 배면지반 거리에 따른 침하량을 현장계측과 유한요소 해석을 통해 제시하였다.

흠막이 굴착 사고와 관련해서는 Lee et al. (2009)이 지반굴착에 따른 흠막이 붕괴유형을 제시하였고, Joo (1998)가 기술기사를 통해 몇 가지 흠막이 사고 사례 분석과 교훈을 제시하였지만, 현재까지 다수의 흠막이 굴착공사 사고사례 조사와 분석을 통해 흠막이 굴착공사 중 사고 방지를 위한 우선 중점 관리 요소를 제시한 사례는 없었다.

본 연구에서는 다양한 현장의 흠막이 지반굴착 사고사례의 원인분석 결과와, 전문가 활용을 바탕으로 한 의사결정 방법인 델파이 기법을 통해 개착식 굴착공사의 사고 저감을 위해 우선적으로 관리해야 할 요소를 도출하고자 한다.

2. 델파이 기법

2.1 개요

본 연구에서는 개착식 굴착공사시 사고 저감을 위한 우선 관리 요인 도출의 의사결정 방법으로 델파이 기법을 적용하였다. 델파이 기법은 집단 의사결정 기법 중의 하나로, 특정한 주제에 대해 해당 분야 전문가들이 의견을 제시하고 조정하는 과정을 반복하여, 최종 합의점을 집단적 판단으로 정리하는 일련의 절차로 정의되며, 절차의 반응과 통제된 피드백, 응답자의 익명, 그리고 통계적 집단 반응의 절차를 특징으로 한다(Lee, 2001).

델파이 기법은 1950년대 미국 RAND 연구소에서 국방문제에 관한 전문가 합의 과정 중 대면 토의의 제한점을 제거하기 위해 최초로 사용되었으며, 1963년 최초로 델파이 기법을 기술한 논문이 발표되고, 1964년 인구증가, 인간 노동의 자동화, 과학적 발견, 우주과학의 진보, 전쟁 예방 및 군사 기술 분야에 대한 연구보고서가 출간되면서 전 세계적인 관심을 불러일으켰다(Bae, 2003).

토목 및 지반공학 분야에서도 델파이 기법이 적용되어오고 있는데, An and Kim (2016)은 터널의 성능중심 평가기법 개발에 활용한 사례가 있다.

2.2 델파이 조사 절차

델파이 기법을 활용에 있어서 적합한 전문가 패널의 선정이 가장 중요한 요소이다. 전문가들은 익명성에서 안주하지 않고 책임성 있고 성실해야 하며, 조사분야에 대해 전문성이 있으면서도 편협하지 않아야 한다. 의견 합의에 대한 압박으로 전문가의 창의적 발상이 위축될 수 있으므로 조사과정의 의견 피드백에서 쟁점 의견, 소수 의견 및 그 근거를 첨부하며, 대면토론도 진행될 수 있다.

델파이 분석의 신뢰성을 높이기 위해서는 패널의 수가 10명이상이 되어야 한다고 알려져 있고, 참여자 표본 크기에 대해서 명확한 규정이 제시되어 있지 않지만, Anderson (1997)은 10~15명의 패널로도 유용한 결과를 얻을 수 있다고 규명하였다. 본 연구에서는 흠막이 굴착공사와 관련된 전문성 확보를 위해 지반공학 분야 실무에 종사

Table 1. Process of Delphi survey

Order	Contents
Pre-test	<ul style="list-style-type: none"> · Literature survey related with the subject · Categorization and classification of the evaluation item · Panel selection
Primary Survey	<ul style="list-style-type: none"> · Consists of the open and closed questions · Obtain the preliminary evaluation indexes
Secondary Survey	<ul style="list-style-type: none"> · Consists of the closed questions from primary survey · Calculation of Median, quartile (IQR) and CVR etc.
Third Survey	<ul style="list-style-type: none"> · Revaluation of the Secondary research index · Reviewing results for CVR and agreement

하고 있는 14명의 패널을 선정하였다.

전문가 패널을 결정한 후, 개방형과 폐쇄형이 혼합된 형태의 1차 델파이 조사를 수행하였다. 개방형이란 주관식 의견 설문을 의미하고, 폐쇄형은 정해진 항목에 대한 객관식 형태의 설문이다. 1차 델파이 조사에서는 전문가들의 혼란을 방지하기 위해, 기존의 선행연구 및 문헌조사를 통해 예비평가 지표를 정리하여 이를 제공한 후 그 타당성을 묻고, 추가적인 항목을 전문가로부터 제시받았다.

2차 델파이 조사와 3차 델파이 조사는 1차 조사를 통해 정리된 항목을 폐쇄형으로 구성하여 재차 설문을 시행한다. 전문가들은 2차 조사부터 각 항목에 대한 우선순위나 중요도를 평가하게 되는데, 본 연구에서는 Likert 5점 척도를 적용하였다. 설문 결과는 통계 분석을 통하여 각 항목의 중요도 및 합의 수준 등을 평가한다.

3차 델파이 조사는 2차 조사 결과의 중앙값 및 사분범위를 설문지에 표시함으로써, 전문가들이 각 항목의 중요도를 재평가할 수 있는 의견 수렴 과정을 포함한다. 보편적으로 3차 조사에서부터 합의점에 도달하고, 의견 수렴이 미흡하다고 판단되면 4차 이상의 설문을 실시한다.

2.3 타당도 판단 및 검증

델파이 조사 결과에서 제시된 항목의 타당성 여부를 판단할 때, Lawshe (1975)의 내용타당도(CVR, Contents Validity Ratio) 분석이 대표적이며, 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$CVR = \frac{n_e - N/2}{N/2} \tag{1}$$

여기서, n_e 는 대항 항목이 ‘중요하다’라고 응답한 전문가의 수로써, Likert 5단계 척도에서는 4점과 5점이 이에 해당한다. N 은 총 설문 응답 전문가 수이다. CVR 값이 1에 가까울수록 중요하다고 응답한 패널 수가 100%에 근접하다는 것을 의미한다. 반면, CVR의 최저값은 -1이며, 이 때는 중요하다고 응답한 패널 수가 없는 경우이다. 총 전문가 수에 따른 최소 CVR 값은 Table 2 (Lawshe, 1975)와 같고, 본 연구의 조사에서는 14명의 전문가 패널이 선정되었으므로 0.51 이상의 값을 기준으로 항목의 내용타당도를 판단하였다.

전문가 의견수렴과 합의정도를 분석하기 위해 수렴도와 합의도를 평가하였다. 수렴도는 식 (2)와 같이 산정하며, 의견이 한 점에 모두 수렴하였을 때, 0의 값을 나타내고, 반대로 의견의 편차가 크면 그 값이 커진다. 합의도의 경우, 4분편차와 중앙값을 이용하여 3/4분위수와 1/4분위수 사이의 값을 도식화함으로써 전문가들 사이의 합의정도를 검증하는 방법이다.

합의도는 수렴도와 반대로 의견이 일치할수록 그 값이 1에 가까워진다.

$$\text{수렴도} = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \tag{2}$$

Table 2. Min. value of CVR considering number of panels

Number of Panels	Min. Value of CVR
10	0.62
11	0.59
12	0.56
13	0.54
14	0.51
15	0.49
20	0.42
25	0.37
30	0.33
35	0.31
40	0.29

$$\text{합의도} = 1 - \frac{Q_3 - Q_1}{M_d} \quad (3)$$

여기서, Q_3 는 3/4분위수, Q_1 은 1/4분위수, M_d 는 중앙값이다.

또한, 설문과정에서 패널들의 응답 차이가 적어 응답의 일치성이 높은 경우 안정도가 확보되었다고 하는데, 안정도는 식 (4)와 같이 구할 수 있는 변동계수(COV, Coefficient Of Variation)로 판단한다.

$$COV = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \quad (4)$$

Jeong et al. (2012)의 연구에서는 10인의 전문가 델파이 조사에서, 수렴도 0.5 이하와 합의도 0.75 이상의 조건에서 타당성을 확보하는 것으로 판단하였고, 본 연구에서도 동일 기준을 수렴도와 합의도 판단에 적용하였다. 안정도는 0.5 이하인 경우 추가적인 설문이 필요 없으며, 0.5~0.8인 경우는 비교적 안정적인 것으로, 0.8 이상이면 추가적인 설문조사가 필요하다(Rho, 2006)

3. 흙막이 굴착공사 사고 사례 조사

개착식 굴착공사인 흙막이 공사 중 발생한 사고가 실제로 어떤 요인에 의해 주로 발생되었는지를 파악하기 위해, Seong et al. (2011)의 분석 자료를 활용하였다. 본 자료는 총 25건의 흙막이 관련 굴착공사 현장의 자료로, 대규모 붕괴가 일어났거나, 굴착공사 중 안전성 문제가 발생하여 원인 조사 및 대응을 실시한 사례로 구성되어 있다.

Table 3. Analysis of failure Cases for ground excavation (Seong et al., 2011)

No.	SITE	Bad geo-technical investigation	Instability of temporary structure	Insufficient ground-water treatment	Instability on construction	Excessive excavation	Surface excavation instability (Boiling, Heaving)	Negligence on management (measuring)	Landslide
1	Gyeongui Line ○○	○	○						
2	Daedeok ○○Center	○		○					
3	Library of Congress ○○	○		○					
4	Mokpo ○○ office	○	○			○			
5	Busan ○○ World		○					○	
6	Seoul ○○ center	○			○				
7	Pangyo ○○ Institute	○	○	○					
8	Seochon ○○ building	○	○						
9	Jung dong ○○ church			○	○				
10	Bundang ○○ station	○							
11	Banpo ○○ praza			○				○	
12	Anyang ○○ tower		○						
13	Jeju Island ○○ building	○	○						
14	Sangdo dong ○○ APT			○					
15	Heukseokdong ○○ officetel				○	○			
16	Hannam ○○ APT				○				
17	Incheon Juan ○○ APT						○		
18	Gwangyang ○○ facility			○			○		
19	Seongbukdong ○○ office			○					
20	Mapo Seokyo ○○ APT			○					
21	Suwon Sindong ○○	○							
22	Gwanggyosan ○○	○							○
23	Guro ○○ site				○	○			
24	Bucheon ○○ site		○		○				
25	Pangyo ○○ site	○	○						
Frequency		12	9	9	6	3	2	2	1

각 현장의 문제 요인 분석은 Table 3에 제시되어 있으며, 흠막이 굴착공사 사고 및 문제 발생은 특정 요인이 단독적으로 작용하였기보다는 복합적으로 작용하였음을 알 수 있다. 흠막이 굴착공사 사고에 영향을 미친 요인에 대하여 빈도수가 높은 순서대로 정리하면 다음과 같다.

- 지반조사의 부실
- 가시설 구조체의 불안정
- 차수, 배수 등 지하수 처리에 따른 불안정
- 시공상의 불안정
- 과다굴착으로 인한 불안정
- 보일링, 히빙 등 굴착바닥면의 불안정
- 관리(계측) 소홀로 인한 불안정
- 사면활동으로 인한 불안정

실제 개착식 굴착공사의 사고 방지를 위해서는 모든 요소가 중요하다고 할 수 있으나, 사고사례 빈도 조사를 통해 높은 빈도의 요소가 현재 국내 흠막이 굴착공사 사고에 더욱 취약하여 우선적 관리가 필요한 것으로 판단할 수 있다.

4. 의사결정 결과 및 분석

4.1 1차 델파이 조사 및 평가항목 선정

델파이 조사를 위한 평가항목 선정을 위해, 3절 Seong et al. (2011)의 실제 사고 영향 요인과의, Joo (1998) 및 Lee et al. (2009)의 자료를 토대로 예비평가항목으로 선정하였다. 14인 전문가의 1차 델파이 조사를 통해 모든 예비평가항목에 대한 적절성을 확보하였다. 또한 개방형 1차 델파이 과정에서, 추가적인 개착식 굴착공사의 붕괴 사고 위험 요인 평가항목을 얻을 수 있었다.

추가 선정된 항목으로는 공법선정 오류, 주변 지반굴착공사 현황 등이 제시되어, 최종적으로 Table 4와 같이 총 13개의 폐쇄형 델파이 조사 평가항목을 결정하였다.

4.2 2차 및 3차 델파이 조사 결과

2차 델파이 조사 결과에 대하여 평균, 표준편차 및 내용타당도를 Table 5에 나타내었다. 2차 조사에서는 지반 조사의 부실, 가시설 구조체의 불안정, 차수 및 배수 등 지하수 처리에 따른 불안정 등 6개의 항목이 0.51 이상의 내용타당도 CVR 값을 나타내었다. 지장물 등 주변 구조물 영향, 비예측성 기후변동 항목의 경우, 가장 낮은 CVR

Table 4. Evaluation items for 2nd and 3rd Delphi surveys

No.	Items
1	Bad geotechnical investigation
2	Error in selection of construction method (wall, strut or cut-off etc.)
3	Instability of temporary structure
4	Surface excavation instability(Boiling, Heaving)
5	Landslide
6	Insufficient groundwater treatment
7	Instability on construction
8	Excessive excavation
9	Influence of surrounding structures including obstacle
10	Status of adjacent excavations
11	Negligence on management (measuring)
12	Unpredictable climate change
13	Inadequate management of construction materials (corrosion, reuse)

Table 5. Results of 2nd Delphi survey

No.	Items	M±SD	CVR
1	Bad geotechnical investigation	4.29±0.80	0.857
2	Error in selection of construction method (wall, strut or cut-off etc.)	3.79±0.77	0.143
3	Instability of temporary structure	4.07±0.70	0.571
4	Surface excavation instability (Boiling, Heaving)	3.71±0.96	0.286
5	Landslide	3.57±0.98	0.143
6	Insufficient groundwater treatment	4.57±0.62	0.857
7	Instability on construction	4.14±0.64	0.714
8	Excessive excavation	4.00±1.13	0.571
9	Influence of surrounding structures including obstacle	2.64±0.81	-0.571
10	Status of adjacent excavations	3.29±0.96	0.000
11	Negligence on management (measuring)	3.93±0.46	0.714
12	Unpredictable climate change	2.93±1.22	-0.143
13	Inadequate management of construction materials (corrosion, reuse)	3.00±1.07	-0.429

값과 중요도 평균값을 나타내었다.

3차 델파이 조사 결과에서도 내용타당도를 만족시키는 항목이 2차 델파이 조사 결과와 동일한 6개의 항목으로 나타났다. 내용타당도를 만족시킨 항목의 CVR 값과 중요도 평균값은 대체로 2차 조사 결과에 비해 상승하여 나타났다. 2차 조사 결과에서 낮은 CVR 값을 나타낸 항목은 대체로 3차 조사 결과에서 2차 조사 결과에 비해 하락한 CVR 값과 중요도 평균값을 나타내었다. 이는 3차 델파이 조사에서는 2차 델파이 조사 결과의 통계 처리된

Table 6. Results of 3rd Delphi survey

No.	Items	M±SD	CVR
1	Bad geotechnical investigation	4.43±0.49	1.000
2	Error in selection of construction method (wall, strut or cut-off etc.)	3.71±0.70	0.143
3	Instability of temporary structure	4.21±0.56	0.857
4	Surface excavation instability (Boiling, Heaving)	3.71±0.59	0.286
5	Landslide	3.71±0.59	0.286
6	Insufficient groundwater treatment	4.79±0.41	1.000
7	Instability on construction	4.29±0.59	0.857
8	Excessive excavation	4.36±0.61	0.857
9	Influence of surrounding structures including obstacle	2.79±0.56	-0.857
10	Status of adjacent excavations	3.64±0.61	0.143
11	Negligence on management (measuring)	4.00±0.53	0.714
12	Unpredictable climate change	3.29±0.88	-0.429
13	Inadequate management of construction materials (corrosion, reuse)	3.14±0.74	-0.571

내용 일부가 배포됨으로써, 전문가들의 합의가 유도되었기 때문이며, 각 항목의 표준편차가 3차 델파이 조사 결과에서 비교적 크게 줄어드는 것도 이와 같은 원인이다.

4.3 타당도 검증

2차 및 3차 델파이 조사 과정에서 참여한 전문가들은 전체 설문 결과를 바탕으로 자신의 의견을 수정 및 보완하여 의견수렴에 도달하는 과정을 거쳤다. Table 7은 본 연구에 대한 의견수렴의 수치적 결과 즉, 조사 결과의 타당도 판단을 위한 수렴도, 합의도 및 안정도를 나타낸 것이다.

먼저, 수렴도를 살펴보면, 2차 델파이 조사에서 2개의 항목이 수렴도 기준 0.5를 넘겼으나, 3차 델파이 조사에서는 모든 항목에서 0.5 이하의 수렴도를 나타내었다. 수렴도 평균 역시 0.50에서 0.36으로 감소되었다.

합의도의 경우도 2차 조사에서는 3개의 항목이 기준값 0.75 이하였고 평균도 0.71 정도로 낮은 결과를 나타내었으나, 3차 조사에서는 모든 항목이 0.75 이상의 합의도를 나타내었고 0.81로 평균값도 크게 상승하였다. 변동 계수로 판정하는 수렴도는 2차 및 3차 조사 모두 기준값 이하였으나, 역시 3차 델파이 조사 결과에서 대체로 더 작은 값을 보였다.

결과적으로, 3차까지의 델파이 조사를 통해 개착식 굴착공사 우선 관리 항목 도출에 대한 전문가들의 합의를 도출할 수 있었고, 다음의 6가지 우선 관리 항목을 선정하였다.

- 지반조사의 부실
- 가시설 구조체의 불안정

Table 7. Results of validity and stability

No.	Items	Conver-gence (≤ 0.5)		Agreement (≥ 0.75)		COV (≤ 0.5)	
		2nd	3rd	2nd	3rd	2nd	3rd
1	Bad geotechnical investigation	0.50	0.50	0.75	0.75	0.19	0.11
2	Error in selection of construction method (wall, strut or cut-off etc.)	0.50	0.50	0.75	0.75	0.20	0.19
3	Instability of temporary structure	0.38	0.38	0.81	0.81	0.17	0.13
4	Surface excavation instability (Boiling, Heaving)	0.50	0.50	0.75	0.75	0.26	0.16
5	Landslide	0.50	0.50	0.75	0.75	0.27	0.16
6	Insufficient groundwater treatment	0.50	0.00	0.80	1.00	0.14	0.09
7	Instability on construction	0.38	0.50	0.81	0.75	0.15	0.14
8	Excessive excavation	0.50	0.50	0.75	0.75	0.28	0.14
9	Influence of surrounding structures including obstacle	0.50	0.38	0.50	0.75	0.31	0.20
10	Status of adjacent excavations	0.88	0.50	0.50	0.75	0.29	0.17
11	Negligence on management (measuring)	0.00	0.00	1.00	1.00	0.12	0.13
12	Unpredictable climate change	1.00	0.38	0.33	0.75	0.42	0.27
13	Inadequate management of construction materials (corrosion, reuse)	0.38	0.00	0.75	1.00	0.36	0.24
Average		0.50	0.36	0.71	0.81	0.24	0.16

- 차수, 배수 등 지하수 처리에 따른 불안정
- 시공상의 불안정
- 과다굴착으로 인한 불안정
- 관리(계측) 소홀로 인한 불안정

5. 고찰

5.1 실제 사례와 조사 결과의 비교

3절의 실제 흙막이 굴착공사 사고 사례 조사 내용과 델파이 조사 결과를 비교·분석하여 Table 8에 나타내었다. 각 항목에 대하여, 사례 조사의 경우는 빈도수로 순위를 정하였고, 델파이 조사의 경우는 CVR 값이 높은 순서로 순위를 나타내었다.

전반적으로 사고 사례의 항목 빈도수 순위와 전문가에 의한 델파이 조사의 CVR 값 순위가 유사하게 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서 수행된 전문가 의사결정 결과는 실제 사례와 비교해보아 대체적으로 합리적인 결과를 도출하였다고 판단할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 개착식 흙막이 사고 방지를 위해 필요한 관리 요소 중에서, 우선적으로 관리되어야 할 요소를 6가지로 결정하여 제시한 것이다.

세부적으로 살펴보면, 사고 사례에 비해 전문가들은 지하수 처리 미흡을 지반조사의 부실과 동급인 위험 요인

Table 8. Comparison between case studies and Delphi Survey

Items	Rank		Priority by Delphi
	Case Study	Delphi	
Bad geotechnical investigation	1	1	○
Error in selection of construction method (wall, strut or cut-off etc.)	-	9	
Instability of temporary structure	2	3	○
Surface excavation instability (Boiling, Heaving)	6	7	
Landslide	8	7	
Insufficient groundwater treatment	2	1	○
Instability on construction	4	3	○
Excessive excavation	5	3	○
Influence of surrounding structures including obstacle	-	13	
Status of adjacent excavations	-	9	
Negligence on management (measuring)	6	6	○
Unpredictable climate change	-	11	
Inadequate management of construction materials (corrosion, reuse)	-	12	

으로 판단하였고, 시공상의 불안정 및 과다굴착으로 인한 불안정도 더 중요한 요인으로 판단하였다. 그리고, 사고 사례에서 공동 6위에 위치한 보일링, 히빙 등 굴착바닥면의 불안정 요인은 본 연구의 우선 요인에서 배제되었는데, 전문가들은 지하수처리 미흡, 시공상의 불안정 및 과다굴착으로 인한 불안정과 같이 관련성 있는 요인에서 제어가 될 수 있다고 판단한 것으로 보인다.

5.2 우선 요소의 관리 방안

가장 중요도가 높았던 항목 중 하나인 지반조사 부실 문제의 경우, 지반조사 계획시부터 조사 수량을 증대, 지반조사의 품질 향상, 굴착시 지반조사 결과와 상이한 지반 분포의 경우는 설계 재검토 수행 등의 관리 방안이 있을 수 있다.

역시 중요도가 가장 높은 차수, 배수 등 지하수 처리 미흡에 따른 불안정을 대처하기 위해서는 집중호우에 따른 지하수위의 증가, 관로파손에 의한 지하수위 증가, 벽체 또는 굴착면으로의 침투에 의한 지하수위 저하 등의 문제가 있을 수 있고, 이를 대처하기 위해서는 지하수위계 또는 간극수압계 계측 결과와 굴착면의 유입수량을 관찰하여한다. 또한, 주변 하천 수위 변화와 같이 지하수위 영향도 살펴야 할 것이다.

가시설 구조체 불안정 문제의 경우, H-pile+토류벽 공법의 H-pile 근입심도가 부족하지 않게 하고, 앵커 정착 위치 및 앵커력 확보해야하며, 버팀보가 좌굴 및 모멘트 저항력에 부족하지 않게 하고, 2단 흙막이벽 연결부를 철저히 관리하는 등의 방안이 있다.

시공상의 불안정을 유발하지 않기 위해서는 굴착 및 지보의 단계굴착을 계획에 맞춰 진행하고, 벽체 공사시 수

직도 및 품질을 확보하는 등의 노력이 필요할 것이며, 과다굴착으로 인한 불안정 문제는 시공의 편의성에 따른 과굴착을 피하고 소단을 높이와 폭을 충분히 두어 설치하는 등의 현장 관리를 수행해야 할 것이다.

관리(계측) 소홀로 인한 불안정에 대응하기 위해서는 계측관리 기준을 초과하는 계측 결과에 대한 능력 대응을 피할 수 있도록 하고, 자동계측시스템 도입을 통하여 철저한 계측 관리를 도모할 수도 있을 것이다.

그러나, 본 연구에서 선정된 우선 요소를 집중적으로 관리하더라도, 개착식 굴착공사 사고는 우선 관리 요소로 선정되지 못한 요소들과 그 외 다양한 요소가 개착식 굴착공사의 안정에 문제를 일으킬 수 있다는 점을 상기하고 대비해야 할 것이다.

6. 결론

본 연구는 개착식 굴착공사 사고 및 이에 따른 도로함몰 발생 저감을 목적으로, 우선적으로 관리해야 할 요소를 선정하였다. 이를 위해 선행 연구에서 흙막이 공사에 대한 사고 사례를 조사하고, 이를 바탕으로 전문가 의사결정 방법인 델파이 기법을 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사고 사례 문헌조사와 개방형 1차 델파이 조사를 통해 총 13개의 평가항목을 도출하였다.
2. 폐쇄형 2차, 3차 델파이 조사를 통해 내용타당도를 만족시키는 6개의 요인을 얻을 수 있었고, 3차 델파이에서 모두 합의에 도달하였다.
3. 사고 사례의 빈도수와 델파이 조사 결과의 내용타당도 순위는 전반적으로 유사하게 나타남으로써, 우선 요인 도출이 합리적인 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 도출된 개착식 굴착공사 우선 관리 요소를 통하여, 사고 방지를 위해 더 취약한 요소부터의 중점적인 관리가 기대된다. 그러나, 이 외 다양한 요소가 개착식 굴착사고 발생 원인이 될 수 있음을 인지하고 관리에 임해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 “도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발(과제번호 17TLRP-C099510-03)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. An, J.W., Kim, H.K. (2016), “Developments of performance-based assessment technique for existing tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 6, pp. 525-533.
2. Anderson, E.T. (1997), “Important distance education practices: A delphi study of administrators and

- coordinators of distance education programs in Higher Education”, Ph.D. Thesis, University of Idaho.
3. Bae, H.J. (2003), “A study on the priority of virtual reality game elements using delphi and AHP : Focused on the FPS games”, Master’s Thesis, Incheon National University.
 4. Clough, G.W., O’Rourke, T. D. (1990) Construction induced movements of insitu walls. Design and performance of earth retaining structures, Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE.
 5. Cowland, J.W., Thorley, C.B.B. (1984), “Ground and building settlement associated with adjacent slurry trench excavation”, Proceedings of Third International Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff, pp. 723-738.
 6. Jeong, J.C., Lee, J.B., Lee, H.M., Gong, H.R. (2012), “The development and application of evaluation index measuring the activation degree of invention education in Korea”, The Korean Association of Practical Arts Education, Vol. 25, No. 2, pp. 129-150.
 7. Joo, T.S. (1998), “Analysis of case study for collapse of excavation in urban areas”, Information of Construction Technology, Vol. 21, pp. 62-77.
 8. Lawshe, C.H. (1975), “A quantitative approach to content validity”, Personnel Psychology, Vol. 28, pp. 563-575.
 9. Lee, M.K. (2007), The behavior of adjacent grounds during underground excavation with diaphragm walls, Ph.D. Thesis, Chung-Ang University.
 10. Lee, J.J., Jung, K.S., Lee, C.N. (2009), “Consideration of failure type on the ground excavation”, International Symposium on Urban Geotechnics, September, Korean Geotechnical Society, Incheon, pp. 660-670.
 11. Lee, J.S. (2001), Delphi method, Kyoyookbook.
 12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), Manual of safety management for ground settlement (sink).
 13. Rho, S.Y. (2006), “Delphi technique : Prediction of the future with professional insights”, Planning and Policy, KRIHS, September, pp. 63-62.
 14. Seong, J.H., Jung, S.H., Shin, J.Y. (2011), “A study for safety management on ground excavation by analysis of accident events”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 15, No. 6, pp. 175-183.
 15. Yang, G.S., Kim M.M. (1997), “Analysis of perimetrical ground settlement behavior for deep excavations in urban areas”, Vol. 13, No. 2, pp. 101-124.