

연구원-2023-58-534.9607호

2023년도 연구보고서

지하공간 굴착공사 사고사례 기반 지하안전평가 업무가이드라인 수립

Establishment of the Underground Safety Evaluation Guideline based
on Analysis of Accident Cases at Underground Development Sites

이항로 · 김영호 · 유영무 · 채홍제 · 정지희 · 이지영



연구원-2023-58-534.9607호

2023년도 연구보고서

지하공간 굴착공사 사고사례 기반 지하안전평가 업무가이드라인 수립

Establishment of the Underground Safety Evaluation Guideline based
on Analysis of Accident Cases at Underground Development Sites

이항로 · 김영호 · 유영무 · 채홍제 · 정지희 · 이지영

ex

■ 연구진

■ 한국도로공사 도로교통연구원

연구책임자 : 이항로(지하안전평가센터 책임연구원)

참여연구원 : 김영호(지하안전평가센터 책임연구원)

유영무(지하안전평가센터 책임연구원)

채홍제(지하안전평가센터 과장)

정지희(안전혁신연구실 책임연구원)

이지영(지하안전평가센터 센터장)

■ 공동연구기관 : (주)에스애피이엔씨

연구용역명 : 굴착공사 사고사례 및 지하안전평가 연계분석을 통한 업무 가이드라인 수립

용역책임자 : 손만길(지반부 전무)

참여연구원 : 정종민(회장)

서종원(지반부 차장)

Contents

목 차	i
표 목 차	iii
그 립 목 차	iv
요 약 문	v
ABSTRACT	vi

제1장 서론 1

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 범위	2

제2장 굴착 및 터널공사 사고사례 조사 4

2.1 사고사례	4
2.2 사고유형별 안전조치	20
2.3 소결	29

제3장 지하안전평가 표준매뉴얼 30

3.1 지하안전평가서 표준매뉴얼	30
3.2 지하안전평가 주요현황	38
3.3 소결	43

제4장 지하안전평가 주요 검토항목 도출 44

4.1 사고인자 분석..... 44

4.2 연계분석을 통한 지하안전평가 주요 검토항목 도출..... 47

제5장 생애주기를 고려한 지하안전평가 업무가이드라인(안) 수립 51

5.1 흙막이 굴착공법의 적절성 52

5.2 터널공법의 적절성 58

5.3 인접구조물 설정 및 현황 62

5.4 지반조사 및 위치선정 69

5.5 연약지반 굴착공법 선정 75

5.6 설계 지하수위 선정 77

5.7 지하수 변화 특성 79

5.8 수치해석을 통한 안전성 확보 83

5.9 탄·소성보 해석을 통한 안전성 확보 85

5.10 계층계획 93

5.11 지반침하 취약구간 선정 94

5.12 차수 그라우팅 계획 95

5.13 배수계획 97

제6장 결 론 98

참 고 문 헌 99

| 표목차 |

표 1.1 수도권 지하고속도로 건설계획	1
표 2.1 기타 굴착공사 사고사례	11
표 2.2 C.I.P 작업시 붕괴위험 요인 및 안전대책	21
표 2.3 숏크리트 작업시 붕괴위험 요인 및 안전대책	23
표 2.4 터널공사 중 사고유형별 응급복구 방법	25
표 2.5 사고유형에 따른 보강대책 실적	26
표 3.1 표준매뉴얼 작성항목별 주요내용	32
표 3.2 표준매뉴얼 개정 이력	33
표 3.3 개정 1차 주요내용	34
표 3.4 개정 2차 주요내용	35
표 3.5 개정 3차 주요내용	37
표 4.1 사고사례별 사고원인 키워드	44
표 4.2 카테고리별 사고원인 키워드 발생빈도	46
표 4.3 사고원인-지하안전평가 항목 연계	47
표 4.4 기타 주요검토항목 도출(착공후지하안전조사 시 검토 필요)	50

| 그림목차 |

그림 1.1 지하안전평가 업무 가이드라인(안) 작성 개요	3
그림 2.1 ○○유치원 붕괴사고 현장	5
그림 2.2 ○○군 지반침하 사고 현장시공관리 미흡	6
그림 2.3 ○○군 지반침하 사고 발생 형태	7
그림 2.4 ○○동 흙막이 붕괴사고 현장	8
그림 2.5 ○○시 ○○동 지반침하사고 현장 및 보강을 위한 그라우팅 재료 선정	9
그림 2.6 ○○○○선 ○○역 가시설 붕락 및 붕괴면	10
그림 2.7 ○○시 ○○동 도로침하 사고 현황	11
그림 2.8 서울지하철 하저터널 지표면 함몰(1993.02)	15
그림 2.9 서울지하철 하저터널 지표면 함몰(1991.11.27.)	16
그림 2.10 차별풍화에 의한 지표면 붕락(2008.07)	17
그림 2.11 계류장 노면 과다침하 현장(2004.03)	18
그림 2.12 커터헤드 개구부에 끼인 자갈	19
그림 2.13 터널내 토사유입에 의한 지표면 함몰사고(2008.02)	20
그림 2.14 차수조건별 성능과 주입재료의 입도(예)	24
그림 3.1 지하안전(영향)평가서 표준매뉴얼(국토교통부)	31
그림 3.2 지하안전평가 현황	39
그림 3.3 지하안전평가 사업비별 현황	40
그림 3.4 굴착깊이별 지하안전평가 협의현황	40
그림 3.5 굴착깊이별 소규모 지하안전평가 협의현황	41
그림 3.6 벽체공법 적용 현황	41
그림 3.7 지보공법 적용 현황	42
그림 3.8 차수공법 적용 현황	42
그림 4.1 사고 카테고리별 발생 비율	47

요 약 문

우리나라의 고속도로 중 지하도로(터널)의 연장은 총 962km(2023년 末)에 달하며, 수도권 지하고속도로 구축계획을 포함한 신설노선에서 터널의 비율은 점점 증가하는 추세이다. 이와 같은 좁은 국토의 입체적 활용 노력과 토목기술의 발달은 영동대로 지하공간 복합개발, 광역철도(GTX; Great Train Express) 등 지하개발사업을 가능하게 하였지만, 동시에 지하 시설물이 점차 대심도, 대규모, 고밀도화됨에 따라 지반침하 등의 지하안전 사고의 위험성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 당면과제로 다가온 지하고속도로의 안전한 구축을 위해 사고사례에 기반한 우리공사의 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 대형 터널 및 굴착공사에서 발생한 지하안전 25가지 사고사례의 원인과 대책을 고찰하고, 설계단계에서 이루어지는 지하안전평가 항목과 연계하여 23가지의 주요검토항목 및 주안점을 도출하였다. 최종적으로 주요검토항목 별 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 도출된 가이드라인(안)은 설계 및 시공 단계뿐 아니라 유지관리 단계를 고려하였으며, 다양한 기관의 전문가 자문을 받아 고속도로 업무 특성에 맞도록 구성하였다. 우리공사 최초로 수립된 ‘고속도로 지하안전평가 업무가이드라인(안)’을 통해, 지하고속도로 업무 담당자에게 도움이 되고, 안전한 지하고속도로 구축에 기여하고자 한다.

ABSTRACT

Among Korea's highways, the total length of underground roads (tunnels) is 962km by the end of 2023, and the portion of tunnels planned, such as underground highways construction in the metropolitan area, has been gradually increased. Such efforts to utilize the small national area and the development of civil engineering technology have made possible underground development projects such as Yeongdong-daero underground complex development and the Great Train Express (GTX). However, underground facilities are gradually becoming deeper, larger-scale, and more dense at the same time. This situation has been more increasing the risk of underground safety accidents such as ground. In this study, the underground safety evaluation guideline based on ground subsidence accidents is established to ensure safe construction of underground highways. We analyzed the causes and countermeasures of 25 underground safety accidents that occurred in large tunnel and excavation construction, and subsequently derived 23 major checklist for review in connection with underground safety evaluation. Finally, we presented the guidelines(draft) for each major checklist. The derived guidelines considered not only the design and construction stages but also the maintenance stages, and were structured to suit the characteristics of highway construction and design. Through the 'Highway Underground Safety Evaluation Guidelines (Draft)' established for the first time by our corporation, we hope to be helpful to those in charge of underground highway work and contribute to the construction of safe underground highways.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라의 고속도로는 총연장 오천키로 개통(2024년초 예정)을 앞두고 있으며, 이 중 지하도로(터널)의 연장은 총 962km에 해당된다. 신설노선에서 터널의 비율은 점점 증가하는 추세로, 10km 이상인 장대터널은 인제양양터널 등이 공용 중에 있으며, 영산터널, 남한산성터널, 한강터널 등은 건설 중에 있다.

국가는 「제2차 고속도로 건설계획(2022.01)¹⁾」을 통해 수도권 지하고속도로 구축계획을 다음 표 1.1과 같이 발표하였다. 해당구간은 상습정체 구간으로, 주변의 도시개발 등으로 인해 수평적인 도로 용량 확장이 불가능한 경부선, 경인선, 수도권 제1순환선 등이다. 국가는 이들 노선 일부구간 지하에 추가도로(터널)를 확장해 도로용량을 증대하는 것을 목적으로 하고 있다.

표 1.1 수도권 지하고속도로 건설계획

구분	간선축	사업명	연장(km)	총사업비(억원)
중점	순환1축	퇴계원-관교	31.5	40,486
	남북3축	화성-서울(경부선 포함)	32.3	32,051
	동서9축	인천-서울(경인선 포함)	19.3	20,041
일반	남북3축	신갈-과천	31.7	31,823

이와 같은 좁은 국토의 입체적 활용 노력과 토목기술의 발달은 영동대로 지하공간 복합개발, 동부간선도로 지하화, 광역철도(GTX; Great Train Express) 등 대규모, 대심도, 고밀도 지하개발사업을 가능하게 하였다. 지하고속도로도 20~50km 이상 연장의 대심도 (초)장대 터널의 구축이 예상되고 있다.

그러나, 석촌 지하차도 싱크홀(2014.8), 용산 보도 함몰(2015.2), 일산 백석동 땅꺼짐(2017.2), 구리 대형 싱크홀(2020.8), 양양군 편의점 붕괴(2022.8), 여수 흙막이 붕괴(2022.11), 부산 대심도 공사장 붕괴(2023.2) 등 지하개발로 인한 일련의 사고가 지속적으로 발생하고 있어, 국민적 불안감이 고조되고 있는 실정이다.

1) 김찬우, 이지영, 최정식, 전윤수, 김낙영. (2023). 서울시 대규모 지하개발사업 현황 고찰. 자연, 터널 그리고 지하공간, 25(2), 28-45.

본 연구에서는 당면과제로 다가온 지하고속도로의 안전한 구축을 위해, 대형 터널 및 굴착공사에서 발생한 지하안전 사고사례의 원인과 대책을 고찰하고, 설계단계에서 이루어지는 지하안전평가 항목과 연계하여 주요검토험목 및 주안점을 도출하였다. 이를 통해 우리공사의 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 도출된 가이드라인(안)은 설계 및 시공 단계뿐 아니라 유지관리단계를 고려하였으며, 다양한 기관의 전문가 자문을 받아 고속도로 업무 특성에 맞도록 구성하였다.

우리공사 최초로 수립된 ‘고속도로 지하안전평가 업무가이드라인(안)’을 통해, 지하고속도로 업무담당자에게 도움이 되고, 안전한 지하고속도로 구축에 기여하고자 한다.

1.2 연구내용 및 범위

본 연구에서는 지하개발현장에서 발생할 수 있는 안전사고 예방을 위해, 생애주기가 고려된 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 구축하고자 하였다. 이를 위해 2023년에 수행한 주요 연구 내용 및 범위는 다음과 같으며, 연구추진 개요는 그림 1.1에 도식하였다.

1.2.1 연구 내용

- (1) 연구방법론 및 추진계획 수립
 - 연구 범위 및 방법 선정
 - 연구 추진 계획 수립
- (2) 굴착 및 터널공사 사고사례 자료수집
 - 굴착 및 터널공사 사고사례 수집
 - 사고사례별 조치결과 적정성 분석
- (3) 지하안전평가 사례 자료수집
 - (소규모)지하안전평가서 표준매뉴얼 조사
 - 지하안전평가 현황 조사
- (4) 사고사례와 지하안전평가 간 연계분석
 - 주요 사고인자별 지하안전평가 항목 연계
 - 연계분석 결과에 따른 지하안전평가법 개선방향 수립
- (5) 지하안전평가 업무 가이드라인(안) 작성

- 연계분석 결과를 반영한 가이드라인(안) 제시
- 최신제도를 반영한 개선된 가이드라인(안) 제시

1.2.2 연구 범위

- (1) 공간적 범위 : 국내 터널 및 굴착 사고사례 현장
- (2) 시간적 범위 : 분석 자료의 기준년도 : 2023년까지
- (3) 내용적 범위
 - 연구 방법론 및 추진계획 수립
 - 지하안전평가 사례 자료 수집
 - 굴착 및 터널공사 사고사례 자료수집
 - 사고사례와 지하안전평가 간 연계분석
 - 지하안전평가 업무 가이드라인(안)작성

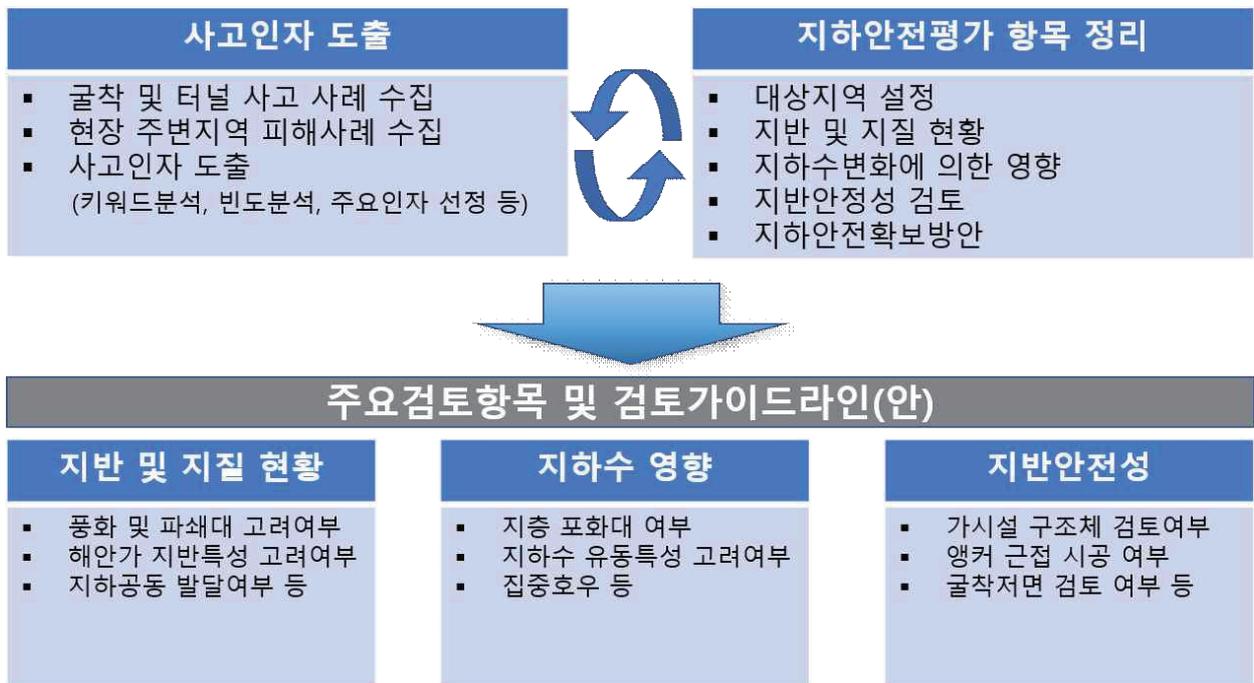


그림 1.1 지하안전평가 업무 가이드라인(안) 작성 개요

제 2 장 굴착 및 터널공사 사고사례 조사

2.1 사고사례

본 장에서는 대형 굴착 및 터널공사에서 발생된 터널 붕괴, 지반침하, 가설흙막이 붕괴, 인접시설물 붕괴 등과 관련된 지하안전 사고사례를 조사하였다. 사고사례는 (중앙)지하사고 조사위원회 보고서, 국토교통부 및 지자체 등 유관기관의 기술자료, 국내외 논문 등을 통해 수집하였다. 수집된 사례 중 터널 및 가시설 붕괴로 인해 지표 및 인접부로 침하가 확산되고, 손상원인이 규명된 25사례(굴착 19건, 터널 6건)를 선별하였다. 선별결과는 다음표와 같다.

2.1.1 굴착공사

(1) ○○구 ○동 ○○유치원 붕괴(2018.09.06.)²⁾

굴착공사 중 흙막이 구조물이 붕괴되고, 인근 유치원이 연쇄 붕괴된 사고이다. 당시 공동주택(6동, 49세대)을 건축하기 위하여 흙막이 공법(소일네일링, H-pile+토류판)으로 유치원 측 토사를 지지하던 중 흙막이 공사부분과 흙막이 상단 옹벽 및 ○○유치원 건물 일부가 붕괴되었다.

현장지층의 기반암은 선캄브리아기의 호상흑운모편마암으로 구성되어 있으며, 변성작용을 받아 형성된 암으로 ‘호상구조’가 잘 발달되어 있다. 매립토와 풍화토의 심도가 깊게 분포하였고, 지하공동 및 단층파쇄대가 존재하는 등 유치원 건물의 지반조건은 설계 시 예측한 지반조건에 비해 상대적으로 불량한 것으로 판단되었다. 추가시추결과 풍화암의 출현심도가 설계 당시보다 7m 정도 깊게 나타나, 설계 당시 불안전층으로 지층을 설정하여 구조계산을 수행한 것으로 확인되었다. 소일네일링으로 지지되는 흙막이 벽체의 경우 굴착지반의 지층구조, 강도특성, 암반 불연속면 발달상황 등을 면밀히 확인하여야 하는데 이에 대한 지반조사가 미흡한 것으로 나타났다.

상부에 옹벽과 유치원 건물이 위치하고 있으나, 설계에서는 일반적인 상재하중 기준

2) 강인철, 강인규 등. (2018). 서울상도유치원 인근 공사장 붕괴사고 진상조사 보고서. 서울상도유치원 사고진상조사위원회. 동작구청.

인 $1.3t/m^2$ 을 적용하여 실제 하중보다 작은값을 반영하였다. 유치원의 L형 옹벽은 도면과 상이하게 그 규모가 축소 시공되어 안전성 관점에서 취약한 조건이었다.

안전관리계획서 작성·검토가 부실하였으며, 감리의 시공품질 확인 절차가 누락되었다. 현장 시공 중 공법 등을 변경할 경우에는 안전관리계획을 수정하고, 감리 또는 감독의 검토·확인 후 인허가기관의 승인을 받아야 함에도 이를 시행하지 않았다. 시공자는 시공현장의 안전성 여부를 정기적으로 확인하는 정기안전점검을 실시하지 않았으며, 가설 구조물의 구조적 안전성 확인 절차가 누락되었다. 현장감리 및 현장 운영체계가 미흡하여 비상주 감리가 현장의 문제점을 인지하고 설계도면 수정요청, 지반조건 변경 등에 대한 대책수립 및 공사중지 등 협조요청을 하였음에도 불구하고 시공사는 적절한 조치를 시행하지 않은 것으로 나타났다.



그림 2.1 ○○유치원 붕괴사고 현장

(2) ○○ 지반침하사고(2022.08.03.)³⁾

○○군 ○○해수욕장 인근 생활형 숙박시설 신축 현장에서 발생한 지반침하사고로(면적 $96m^2 \times$ 깊이 5m), 흙막이 가시설 배면의 편의점이 붕괴되었다. 사고 현장 일대는 해안가의 느슨한 모래지반으로 토사가 유실되기 쉬우며, 바다 영향으로 지하수 유동량도 많아, 지하 개발 시 단단한 화강·편마암으로 구성된 내륙보다 높은 수준의 시공 품질·안전관리가 필요한 구역이다.

시공사는 본 현장의 특수성을 충분히 고려하지 않고 시공하였고, ‘가설 흙막이벽체에

3) 이승호, 여규권 등. (2022). 양양군 땅꺼짐 사고조사 보고서. 중앙지하사고조사위원회. 국토교통부.

작은 틈새가 발생하여 주변 지하수·토사가 일부 유입되었다. 또한, 흙막이벽체에 재료분리가 발생하여 흙막이벽체 및 차수벽체의 형성이 제대로 이뤄지지 않았으며, 차수그라우팅의 성능시험을 미시행한 것으로 나타났다. 시공중 국부적 보강만 진행하는 등의 땀질식으로 대처하였으며, 이후 공사 지연 만회를 위한 단기·집중 공사로 흙막이벽체와 주변 지반이 추가적으로 악화되었다.

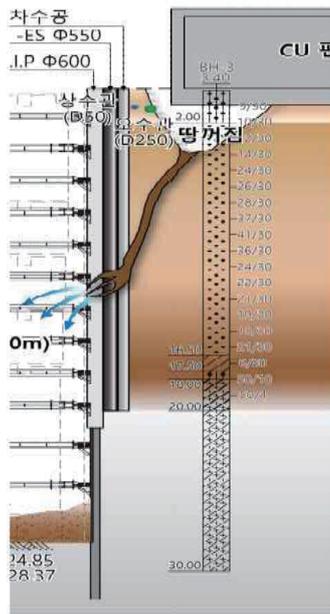
지하안전평가 수행업체는 주변 편의점 건물 안전성 검토를 누락하였으며, 설계 변경 정보와 소규모 지반침하 사고 사실을 인허가청 등에 올바르게 보고하지 않았으며, 시공사가 설치하는 현장 계측기(경사계, 지하수위계 등)도 대부분 손·망실 되어 사고예방 조치가 적절한 시기에 수행되지 않았다.



(a) 흙막이 벽체 형성 미흡

(b) 벽체 차수 시공불량

그림 2.2 ○○군 지반침하 사고 현장시공관리 미흡



(a) 굴착현장내 지하수·토사 유입

(b) 붕괴 직전의 편의점 현황

그림 2.3 ○○군 지반침하 사고 발생 형태

(3) ○○구 ○○동 흙막이 붕괴사고(2018.08.31.)⁴⁾

○○구 ○○동 아파트 인근에 지하굴착 중 길이 44.5m, 최대폭 약 9.6m, 최대 깊이는 약 3.9m에 달하는 땅꺼짐 사고이다. 사고구간은 코너 스트럿, 레이커, 앵커 복합구간으로 레이커 콘크리트 블록을 설치하기 위해서는 최종굴착면까지 굴착을 완료해야 하였다. 따라서, 공정상 4단의 코너 스트럿 설치후 레이커 4단을 순차적으로 설치하는 것을 계획하였다. 사고는 레이커 설치가 완료된 후 코너 버팀보 4단을 해체한 시점에 발생하였다.

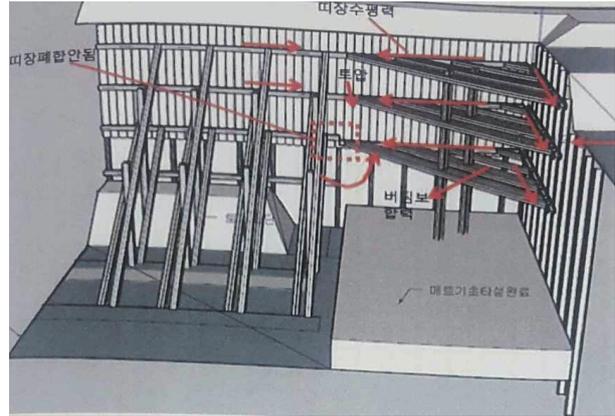
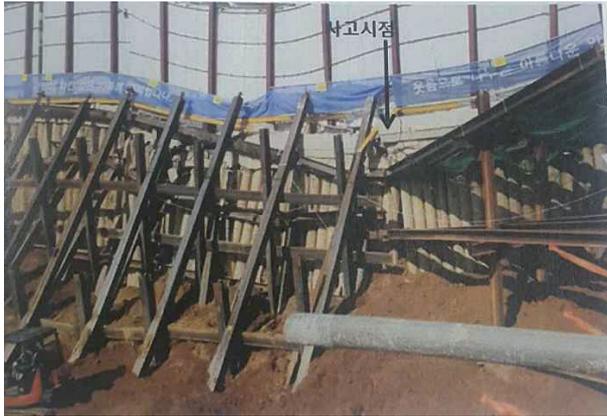
이번 사고는 여러 사고 유발 요인 중 한가지의 직접적인 원인 제공으로 발생한 사고가 아닌 붕괴구간을 중심으로 지반조건의 변화, 주변여건의 변화, 복합적인 지지구조, 시공의 어려움 및 평면적으로 코너버팀보 띠장에 응력 전달시 하중 작용 불균형 문제 등이 동시에 작용됨에 따라 발생한 것으로 판단되며, 다양한 원인은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 띠장 미폐합은 사고에 직접적인 원인은 아닌 것으로 판단되나 불균형 하중 작용시 영향을 줄 수 있음
- ② 코너버팀보와 레이커 구간 시공순서는 사고에 직접적인 원인은 아닌 것으로 판단

4) 정상섭, 백승철 등. (2018). ○○동 ○○현장 공사장 붕괴사고 원인분석 및 인접건물 안전진단 등 연구보고서. 한국지반공학회

되나 코너부 지반고 차이(불균형 하중)와 앵커 및 4단버팀보 해체는 일부 영향을 줄 수 있음

- ③ 상부 지반고 차이로 인한 편토압이 원인이 될 수 있음
- ④ 레이커와 코너버팀보, 앵커 3가지 공법의 복합적인 지지 구간으로 인한 구조적으로 불안정할 수 있음



(a) 흠막이 가시설 붕괴 현황

(b) 사고구간 흠막이 가시설 개념도

그림 2.4 ○○동 흠막이 붕괴사고 현장

(4) ○○시 ○○동 지반침하사고(2022.08.13.)⁵⁾

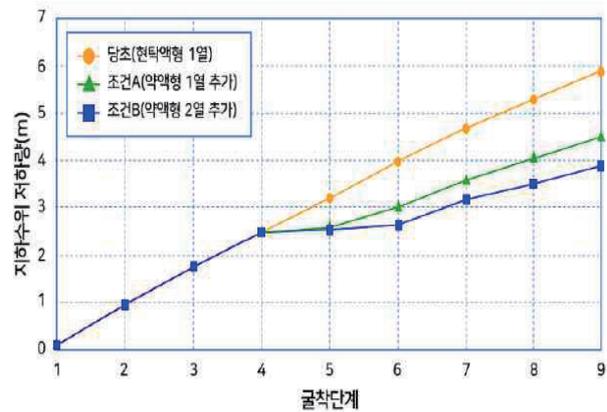
해안가 인접지역에 위치한 본 현장은 시설관리공단 공영주차장 녹지부위에서 소음과 동시에 식재변위와 지반침하(4×2m, 깊이 2.0m)가 발생하여 공사가 중지된 사례이다. 2열 C.I.P을 활용하여 9.6m를 굴착하던 중 지반침하가 발생하였고, 집중호우 (2일 누적 강수량 190mm)로 연약화된 토사가 물과 함께 흠막이 내부 등 차수그라우팅 효과가 상대적으로 미흡한 장소로 유실되었다.

지반침하 발생 이후 지반의 세립자의 입도분석 결과 0.075~0.150mm 구성비율 20~30% 이상으로 나타났으며, 차수그라우팅 주입재료 입경이 세립자의 입경보다 클 경우 차수효과가 설계 시 예측한 목표품질을 확보하기 어려우므로 차수그라우팅 재료를 약액형을 변경하여 시공을 보완하였다.

5) 민용배, 이호 등. (2023). 해안가 인접지역의 투수특성을 고려한 차수그라우팅 시공사례 연구. 2023년 봄 학술발표회. 한국지반신소재학회



(a) 배면 지반침하 사고발생



(b) 그라우팅제에 따른 지하수위 저하량

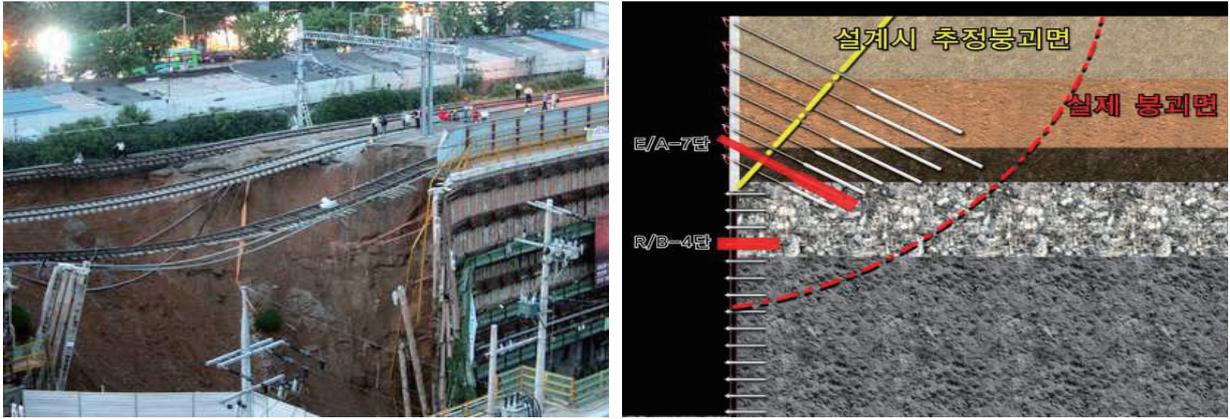
그림 2.5 ○○시 ○○동 지반침하사고 현장 및 보강을 위한 그라우팅 재료 선정

(5) ○○○○선 ○○역 가시설 붕괴사고(2007.06.03.)⁶⁾

철도 역사 신설을 위한 터파기 굴착작업 중(총 굴착깊이 40m 굴착중 38m 굴착) 흙막이 가시설 측벽이 무너지면서 인접한 선로노반이 붕괴(42m×25m, 깊이 25m)된 사고이다. 대상지역의 기반암은 경기편마암복합체에 해당하는 선캠브리아기 흑운모호상편마암이며, 부분적으로 흑운모편암이 편재되어 있다. 과거에는 홍제천 주변의 논이었던 것으로 추정된다. 해당 현장의 흙막이 공법으로는 상부 토사와 풍화암 구간은 CIP(H-pile 근입)+어스앵커, 하부 연·경암구간은 H-pile+숏크리트+록볼트로 계획되었다.

현장 암반층의 파쇄대에서 전단변형이 발생하여 파괴면의 범위가 기존 설계시보다 커짐에 따라 상부 암반층 일부 록볼트의 기능 상실, 그리고 토사층의 어스앵커의 유효 정착장 부족을 초래한 것으로 나타났다. 붕괴구간 암반층 내부에 미끄러짐면이 불리한 방향성 및 쉐기형과 조우하여 대규모 붕괴면이 발생한 것을 주요원인으로 추정하였다.

6) 한국철도시설공단 (2007). 노반붕괴사고 원인조사 및 대책. 한국지반공학회



(a) 역사 배면 붕락

(b) 설계 및 실제 붕괴면과의 차이

그림 2.6 ○○○○선 ○○역 가시설 붕락 및 붕괴면

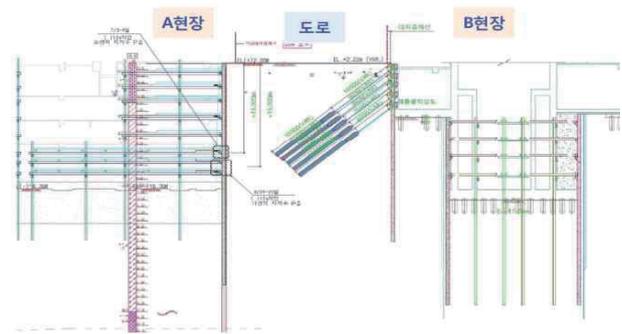
(6) ○○시 ○○동 현장 도로침하 사고(2021.07~10.)

○○호 인근에 위치한 해당 현장은 도로를 사이에 두고 두 현장의 동시굴착 공사 중 중간 도로가 침하되고, 한쪽 현장의 배면 지반이 다른 한쪽 현장 측으로 80mm 정도 이동된 사례이다. 본 지역은 1990년대 이후 조성된 시화지구와 함께 2015년 이후 간척지로 개발된 구역이다. 해성 퇴적층이 매우 두껍게 덮고 있으며 그 상부에는 부지 조성시 성토된 매립층이 분포되어 있다.

A현장에 총 두 번의 지하수 유출이 발생하였는데 첫 번째는 B현장의 PHC 항타 진동으로 A현장에 적용했던 JSP 그라우트에 미세한 파쇄가 발생하였고, CIP 벽체로 지하수가 유입된 것으로 추측하였다. 두 번째는 B현장의 앵커의 정착부 끝부분이 A현장 차수벽과의 5m 정도 이격되어 있어, 정착부에 고압주입 중 기 결합이 있던 A현장의 차수벽에 지하수 및 토사유출 틈을 재확대했을 것으로 판단하였다.



(a) 도로침하 사고 현장



(b) 도로침하 사고 현장의 설계단면도

그림 2.7 ○○시 ○○동 도로침하 사고 현황

굴착공사장에서 발생한 기타 지하안전 사고사례(7~19)⁷⁾는 다음 표 2.1에 정리하였다.

표 2.1 기타 굴착공사 사고사례

사 례 명	내 용	비 고
(7) ○○아파트 건설현장 붕괴	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2014년 4월 • 적용공법 : H-Pile + 토류판 • 발생개요 <ul style="list-style-type: none"> - 흠막이지보공 띠장 2단 하부 약 3.8m 지점에서 토류판 설치를 위해 엄지말뚝 사이의 토사를 삽으로 제거하던 중 엄지말뚝 사이 굴착면 일부 토사가 붕괴 되면서 근로자 1명이 사망 • 사고원인 <ul style="list-style-type: none"> - 과도한 굴착이 주요 원인이며, 굴착면의 높이가 2m 이상 되는 지반의 굴착작업을 하는 경우, 사전에 시공계획서를 작성하고 그 계획에 따라 작업을 시행하여야 하나 미준수 	

7) 이영생 (2018). 흠막이 사고사례 분석을 통한 붕괴원인 및 예방에 대한 연구. 석사학위논문. 경기대학교 공학대학원

<p>(8) ○○ 해운대 오피스텔 신축 공사장 붕괴</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2014년 8월 • 적용공법 : H-Pile + 토류판, 버팀대(Strut) • 발생개요 <ul style="list-style-type: none"> - 철골구조물 붕괴, 인근 도록 50m 가량 붕괴, 6차선 도록 전면 통제, 도시가스관 일부 파손으로 16,200가구 가스 공급 중단 • 발생원인 <ul style="list-style-type: none"> - 지하 6층(18.5m)까지 터파기를 끝내고 골조를 올리는 중 가시설 붕괴 집중호우, 시공사 관리소홀과 부실시공 가능성 	
<p>(9) ○○ ○○연구소 현장 흙막이 가시설 붕괴</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2009년 2월 • 적용공법 : H-Pile+토류판, 그라운드 앵커, Nail • 발생개요 : 강우에 유입된 지하수에 의한 썩기파괴 및 평면파괴 • 발생원인 <ul style="list-style-type: none"> - 암반내 10cm~2m 간격으로 발달한 불연속면에 의한 암반사면 붕괴되었음. 실제보다 설계에 적용된 지반정수가 과다(안정축) 적용 	
<p>(10) ○○ ○○시설 공사현장 흙막이 가시설 붕괴</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2003년 5월 • 적용공법 : H-Pile+토류판, 그라운드 앵커, 버팀대(Strut) • 발생원인 <ul style="list-style-type: none"> - 강우에 의한 인접하천의 수위상승과 흙막이 벽체에 과도한 수압이 증가하여 흙막이 구조물이 붕괴 	
<p>(11) ○○도 ○○빌딩 현장 흙막이 가시설 붕괴</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2001년 06월 • 적용공법 : H-Pile+토류판, 그라운드 앵커 • 발생개요 : 흙막이 구조체 붕괴 • 발생원인 : <ul style="list-style-type: none"> - 어스앵커 소요길이와 근입장의 부족 - 제주의 지반특성을 고려하지 않음 	
<p>(12) ○○구 ○○동 석축 붕괴현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2015년 7월 14일 • 발생원인 : 흙막이 설치 전 석축 하단 정지작업 중 붕괴 	

<p>(13) ○○구 ○○동 석축 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2015년 8월 18일 • 발생원인 : 간이 흠막이(H-Pile) 무단 철거에 의한 석축 지지력 약화로 붕괴 	
<p>(14) ○○구 ○○동 석축 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2015년 8월 22일 • 발생원인 : 흠막이 벽체(C.I.P) 근입길이 부족, 버팀보 미설치 등 시공 불량에 의한 석축 붕괴 	
<p>(15) ○○구 ○○○동 석축담장 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2015년 11월 14일 • 발생원인 : 흠막이 설치공사 중 배면 침하 발생, 간이 흠막이 설치로 인한 석축 지지력 약화로 붕괴 	
<p>(16) ○○구 ○○동 인접구조물 등 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2015년 12월 26일 • 발생원인 : 공사장 지하수 유출로 지반 약화, 과굴착에 따른 지반 침하로 인접주택 등 붕괴위험 발생 	
<p>(17) ○○구 ○○동 석축 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2016년 1월 5일 • 발생원인 : 건물철거 작업 후 석축의 균열 및 붕괴 발생, 계절적인 요인(동절기 영향)으로 균열 확대 	

<p>(18) ○○구 ○○동 인접구조물 등 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2016년 2월 18일 • 발생원인 : 해빙기에 약해진 지반에 터파기 공사 진동 영향으로 옹벽 붕괴 발생 	
<p>(19) ○○○구 ○○동 건물 붕괴 현장</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일시 : 2016년 7월 18일 • 발생원인 : 무단 건물 구조변경에 따른 철거공사 중 기둥을 건드려 건물 붕괴 	

2.1.2 터널공사

(1) 지하철 터널 막장붕괴 및 지표면 함몰현장A(1993.02)⁸⁾

서울시 지하철 하저터널 공사구간으로 본선 STA.15K000 지점에서 천단부 좌측 풍화암이 낙석(약 30×30 cm)되면서 터널상부에 분포되어 있는 모래자갈층이 유출 및 지표면이 함몰된 사고이다. 본 구간은 하천 하류에 위치하고 있으며 북측으로는 한강과 접하고 있는 지형이다. 터널상부는 안양천으로 자갈모래 퇴적층, 하부는 풍화암이 위치하고 일부 암반 구간에서도 활동면을 가진 단층점토대나 파쇄대가 존재한다. 미고결 상태의 충적층 지반에서는 무지보 자립시간이 매우 짧고, 막장 안정성도 매우 취약하기 때문에 유입수를 효과적으로 차단하지 못하여 발생한 사고로 추정되었다.

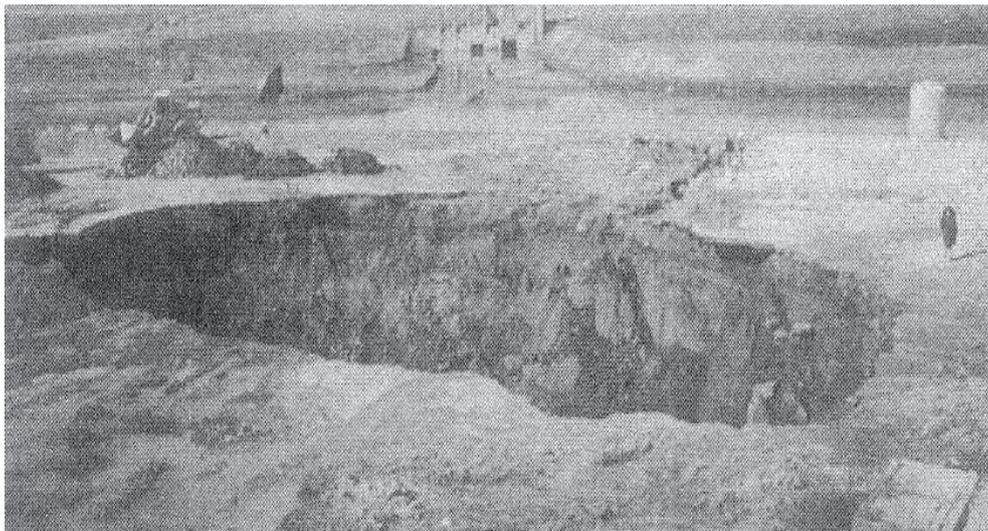


그림 2.8 서울지하철 하저터널 지표면 함몰(1993.02)

(2) 지하철 터널 막장면 붕괴 및 지표면 함몰현장B(1991.11)⁸⁾

서울시 지하철 터널공사 구간으로 발파굴착 중 터널상부의 지반의 저항력이 급격히 감소하여 터널 붕락사고가 발생한 사례이다. 본 구간의 지층은 상부로부터 매립토층, 풍화잔류토층, 연암층, 경암층 순으로 구분되어 있으며, 대수층에서의 지하수 유속은 상당히 크고 청계천 흐름방향으로 흐르는 구간이다. 터널상부의 충적토 자중에 의한 토압과 높은 지하수압이 터널 막장면과 천정부에 작용하는 가운데 발파진동으로 지반의 저

8) 한국터널지하공간학회 및 한국토지주택공사 (2020). 도심지터널 지하안전평가 평가기준 수립, 한국터널지하공간학회

항력이 급격히 감소하여 지하수와 토사가 유입되면서 터널 붕락사고가 발생한 것으로 판단된다. 청계천 하부 통과구간으로 미리 차수그라우팅을 시행하였지만 현장 여건상 충실한 주입이 불가능한 것으로 추정된다.



그림 2.9 서울지하철 하저터널 지표면 함몰(1991.11.27.)

(3) 과거 하천구간 차별풍화에 의한 지표면 붕락(2008.07)⁸⁾

철도터널 굴착공사가 진행 중이던 403km451.7 구간의 막장 굴착 중 붕락이 발생하였으며, 건물 상부의 보도에 침하가 발생하고 터널 상부 구조물에 부등침하가 발생한 사고이다. 본 구간의 지질은 화강암류와 유천층군 화산암류(안산암질암)가 분포하고 동래단층과 인접한 구간에 위치하여 고지형도 분석결과 과거 하천이 위치해 있던 구간에 매립 후 도로 및 건물을 축조한 구간이다. 붕락 발생구간은 대단층에 의한 파생단층이나 하천 하부의 차별풍화대가 발생할 수 있는 구간으로 시추조사에서 일부 단층 가우지나 단층파쇄대가 확인되었다. 기반암은 호상편마암(터널상부 퇴적층(자갈모래), 터널하부 풍화암)으로 구성되어 있으며, 모래자갈층이 SL(+0.5m까지 분포하고 있었다. 터널 천단부 연암은 0~3m 두께로 분포하고 붕괴지점 부근에서 급격히 연암층 두께가 감소하며, 붕락 시작위치로 예상되는 지점은 천단부 부근까지 토사 및 풍화암층이 깊게 존재하였다. 막장관찰 결과 붕락지점에서 풍화도 증가하며, RMR 등급 산정결과 붕락 발생부에서 RMR 등급이 60에서 30대로 급격히 낮아지는 경향을 보여 차별풍화 가능성이 높았을 것으로 예상된다. 이러한 차별풍화나 단층대에 의한 연암층 두께 감소 구간에서 발파에 의한 연암 회복이 손상되어 상부지반의 하중지지 효과가 현저히 저하되어

붕락이 발생한 것으로 추정된다.



그림 2.10 차별풍화에 의한 지표면 붕락(2008.07)

(4) 토립자 유실에 의한 계류장 노면 과다침하 현장(2004.03)⁸⁾

터널 내 굴착 중에 노면에서 침하가 발생한 사고사례이다. 터널 내 지하수의 유출이 과다하게 발생하였고, 지보패턴 변경조치 후 굴착을 계속 진행하던 중 노면에서 최대 침하량이 140mm(침하영역 : 25m×45m) 발생하여 공사를 중지하였다. 노면에서부터 화강암, 풍화암, 잔류토(화강풍화토), 퇴적토층으로 이루어져 있으며 모암은 풍화가 진행된 상태이다. 터널막장은 풍화암 및 잔류토층에 위치하고, 지하수위는 굴착면으로부터 약 20m 높이에 위치하였다.

시공 시 터널상부 1D 이상으로 풍화토가 발생하여 지보패턴을 PD-5로 적용하였고, 하반에 풍화토가 발생할 경우 PD-6으로 변경해야 하나, 일부 구간에만 지보패턴을 PD-5로 변경한 것으로 나타났다(지반변화에 대한 적절한 보강이 수행되지 않음). 터널 막장 및 상부지층을 이루고 있는 풍화토는 세굴에 취약한 지반이므로 지표침하는 국부적으로 분포하는 연약대에서 발생된 다량의 지하수의 유입으로 인한 부분적인 세굴 및 토립자의 유실에 의한 것으로 판단되었다.



그림 2.11 계류장 노면 გადა침하 현장(2004.03)

(5) 도심지 전력구 시공시 자갈층 유입현장(2007.11)⁸⁾

세미셴드 공법을 적용한 전력구 터널 시공 중에 막장면이 유지되지 못하여 커터헤드가 정지되고 공사가 중지된 사례이다. 풍화암 상단에 자갈층이 평탄하게 분포하는 것으로 예상되었으나, 굴착작업이 중단된 부근은 과거 퇴적층의 지층형성 과정에서 수로형성 또는 단층파쇄대의 영향으로 부분적으로 퇴적층이 깊게 형성된 것으로 추정하였으며, 전기비저항탐사 결과 추정 풍화암선과 상이하게 함몰형태의 급격한 비저항대(터널 방향으로 20~40m 가량 분포)가 형성되는 것으로 확인되었다. 일반적으로 암반 굴착용 장비의 경우 자갈층의 굴착도 가능하나, 커터헤드의 개구율을 줄이지 않은 상태에서 예상치 못한 자갈층이 출현하여 자갈이 유입된 것으로 확인되었다.



그림 2.12 커터헤드 개구부에 끼인 자갈

(6) 도심지 터널 토사유입에 의한 지표면 함몰현장(2008.02)⁸⁾

본선터널 상부 반단면 작업 중 터널 천장부에서 토사와 자갈(초기추정 15m³)이 막장면 후방 약 4m까지 흘러내렸으며, 터널상부 20m 위에 위치한 아스팔트 도로가 침하되기 시작하여 포장층이 함몰된 사고이다.

막장관찰 자료조사 결과 붕괴지점의 막장면은 대체적으로 연암이 우세하며, 터널 천장부 및 중앙수직부에 심한 풍화암이 분포하고 막장면은 습윤 상태였다. 붕괴지점에서 약 7m 이격된 곳에서 실시한 추가 시추조사 결과 터널 천장부로부터 1.3m 두께의 풍화토층이 있는 것으로 나타났다.

충적층이 발달한 불량한 지층에서 지반조사 간격이 넓어 미시추구간이 발생하였고, 지층경계와 암질의 변화를 파악하는데 한계가 있었던 것으로 보였다. 이로 인해 터널상부 풍화암 토피가 국부적으로 얇거나 연약한 풍화토층 출현으로 지보량이 부족하여 적절한 응력의 아치가 형성되지 못하여 붕괴로 이어졌을 것으로 판단된다. 또한, 터널 천장부에 인접하여 존재하는 충적층 지반에 대한 차수공법을 미적용하였고 지하수 유입으로 인해 터널의 작업성을 저하시키고 칩투유로를 형성시켜 차별 풍화된 지층의 토립자가 지하수와 함께 터널 내로 유입되어 터널붕괴가 진행된 것으로 추정된다. 굴착공법의 관점에서는 터널상부에서의 기계식 굴착에 의한 충격하중이 천장부의 풍화암 지반에 가해져 일부 이완된 풍화암층의 탈락을 발생시켰을 것으로 보이며, 강관 다단그라우팅의 저각 시공 곤란으로 강관 선단이 풍화암층을 관통함에 따라 일부 천공 내에서 모래와 지하수가 터널 내로 유입되었을 것으로 판단된다.

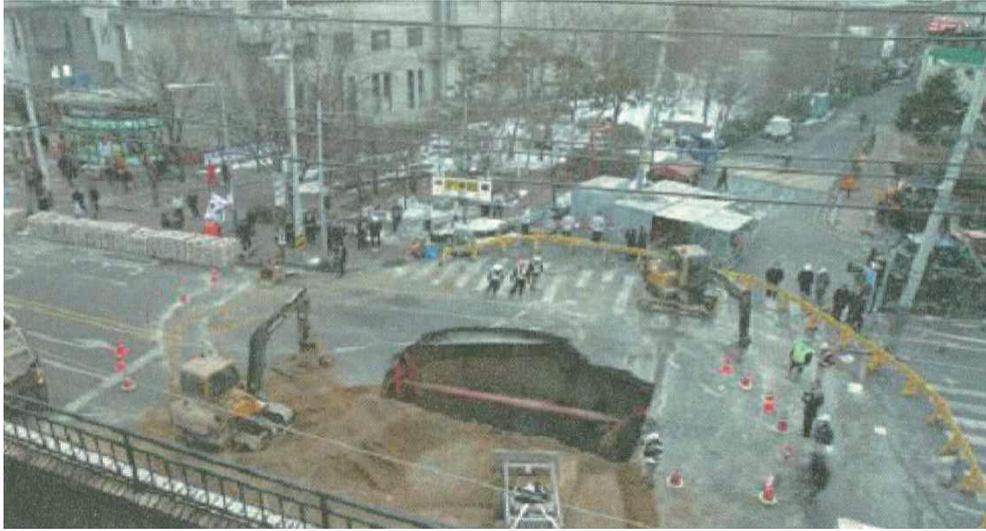


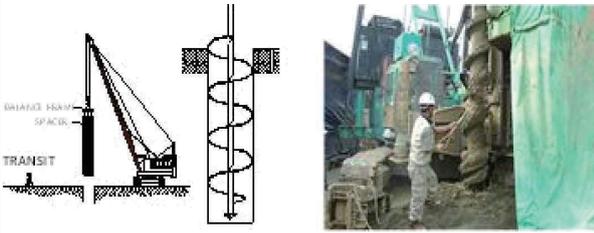
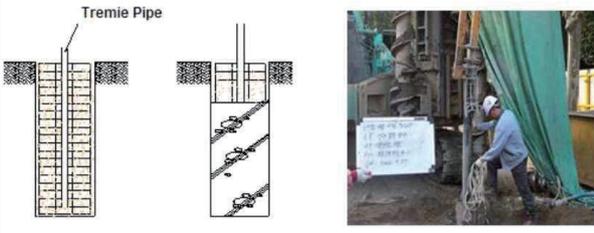
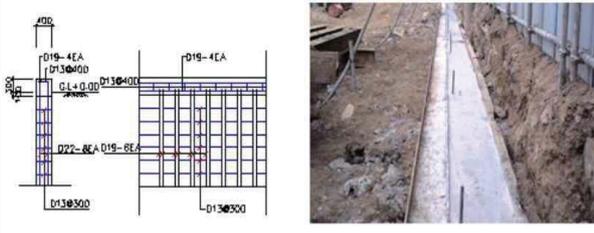
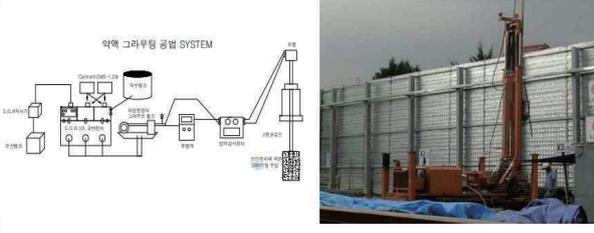
그림 2.13 터널내 토사유입에 의한 지표면 함몰사고(2008.02)

2.2 사고유형별 안전조치

2.2.1 굴착공사

굴착공사 중 발생가능한 사고요인을 미리 숙지하고 문제발생시 즉시 이행가능한 대책을 마련하는 것은 매우 중요한 사안이다. 본 절에서는 굴착공사의 주요 공정 중 C.I.P 작업, 숏크리트 작업, 해안가 굴착에 대한 안전대책을 수록하였고 붕괴 징조에 대한 선제적 행동 및 대처요령을 정리하였다.

표 2.2 C.I.P 작업시 붕괴위험 요인 및 안전대책

	붕괴위험 요인	안전대책
<p>수직도 확인 후 오거천공</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 수직도(1/200) 관리 • 천공시 오거 수직도 관리 철저 • 자동 수직도 측정 장비 이용
<p>H-Pile 및 철근망 삽입</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 철근망 운반, 건입시 변형방지 보강철근 설치 • H-Pile, 철근망 근입시 Balance Frame등을 이용 흔들림 방지 • Flat Bar Spacer를 사용하여 피복두께 확보
<p>콘크리트 타설</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 타설시 재료분리 및 품질확보 • Tremie Pipe를 사용
<p>Cap Beam 타설</p>		<ul style="list-style-type: none"> • CIP 토류벽 상부에는 Cap Beam 콘크리트를 타설하여 주열식 벽체 일체화
<p>차수그라우팅 시공</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 그라우팅 적정성 확인(토질조건, 주입압) • 그라우팅 배합비 Check • 그라우팅 주입압에 의한 주변 구조물 손상 가능성 확인
<p>수직도 불량에 의한 지하수, 배면토사 유출</p>		<ul style="list-style-type: none"> • 시공전 <ul style="list-style-type: none"> - 수직도 관리계획 수립 - 시험천공을 통한 선 지반조건 확인 후 시공 (콘크리트 배합비 또는 몰탈 주입량 조절) • 굴착 중 <ul style="list-style-type: none"> - CIP 틈새 몰탈채움 - 토사 유출방지를 위해 부직포 및 다발관 설치

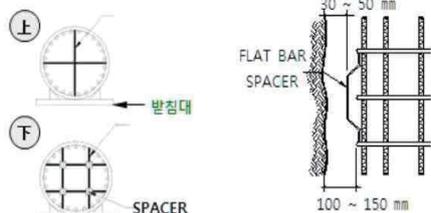
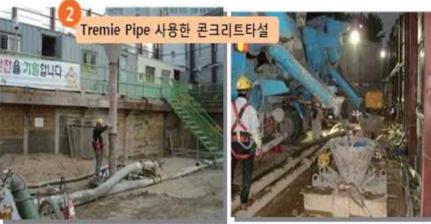
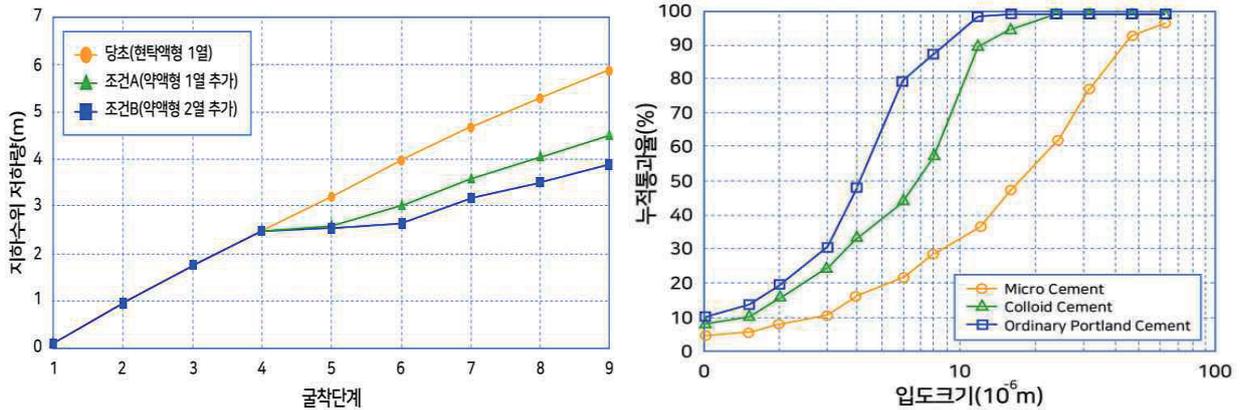
<p>철근망 변형 및 피복두께 불량</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 철근망이 변형되는 사례 <ul style="list-style-type: none"> - 철근망 조립, 운반, 건입시 철근망 변형 • 피복두께 불량 사례 <ul style="list-style-type: none"> - 수직도 불량 시 - 공벽 붕괴시 - 콘크리트 타설 불량 시 - Spacer미 설치시 	<ul style="list-style-type: none"> • 철근망 조립, 운반, 건입 시 변형방지(받침대/보강철근 사용) • Spacer를 사용하여 피복두께 확보 
<p>C.I.P내 콘크리트 타설 불량</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 재료분리로 인하여 벽체강성 저하됨 	<ul style="list-style-type: none"> • Tremie Pipe 사용으로 콘크리트 품질 확보 
<p>C.I.P응력집중 방지</p>	<ul style="list-style-type: none"> • C.I.P 벽체와 띠장 사이에 공간이 발생 시 하중 전달 불량 • 지보재 띠장 접합부는 응력발생이 큰 구간으로 보강 필요  	<ul style="list-style-type: none"> • 몰탈 채움 또는 홈메우기 시공 • 띠장에 Stiffner 보강  

표 2.3 숯크리트 작업시 붕괴위험 요인 및 안전대책

구분	구분	붕괴위험 요인	안전대책
1단계 굴착작업 및 절토면 정리		토압상승 (과다굴착)	<ul style="list-style-type: none"> • 적정 깊이 굴착 : 1.5~3.0m이상 굴착금지 • 굴착각도 15° 정도 유지 • 굴착 후 범면 상부 자재야적 금지
1차 숯크리트 뿔어붙이기		타설두께 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 타설두께 유지(※7~8cm) • 뿔어붙이기 각도 90° 거리 : 1m유지 • 양생강도(24시간) 90kg/cm² 이상
띠장철근 및 지압판 설치		띠장철근 시공불량	<ul style="list-style-type: none"> • 숯크리트면과 밀착시공 • 띠장철근 등 규격 준수 • 지압판 · 링너트 · iner screw 시공철저 • 심하게 부식된 재료 사용금지 • 지압판 인력가조임 1일 양생 후 재조임 • 운반작업 시 작업로 정지
2차 숯크리트 뿔어붙이기 2차 그라우팅		타설두께 부족	<ul style="list-style-type: none"> • 부재를 짚을 수 있도록 타설 • 타설두께 : 평균두께>설계두께 • 최소두께 : 설계의 75%이상 • 뿔어붙이기 각도 및 거리 유지
굴착 흙막이 유지관리 (계측관리)		상부 적재하중 및 설계부족/시공 불량	<ul style="list-style-type: none"> • 정기적 계측관리(변형률계, 응력계) • 계측보고서 확인 • 매일 육안점검 실시 • 이상징후 발견시 즉시 대피, 신속조치 (계측결과, 굴착배면 과도한 크랙 등)

해안가 인접지역 굴착공사의 사고사례에서 해당지반의 입도분석 결과 세립자의 0.075~0150mm 구성비율이 높을 경우(20~30% 이상), 시멘트 등 주입재료 입경이 상대적으로 크면 기대한 차수효과를 발현하기 어렵다. 해안가 인접지역의 굴착 안전성 확보를 위해서는 연약지반 특성 고려한 주입공법 및 재료가 중요할 것이다.



(a) 차수그라우팅 조건별 성능

(b) 주입재료 입도와 누적 통과율

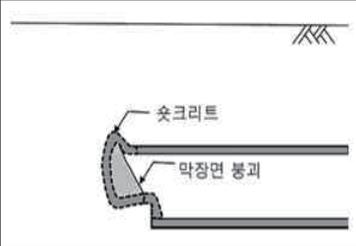
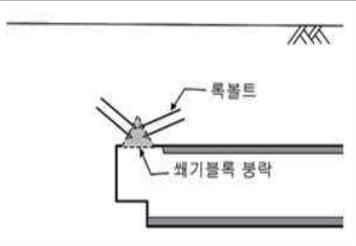
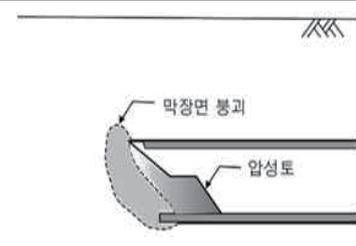
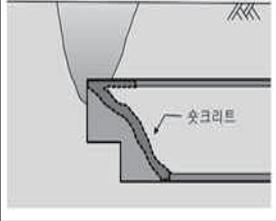
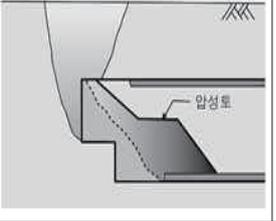
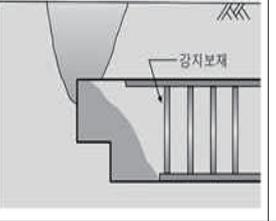
그림 2.14 차수조건별 성능과 주입재료의 입도(예)

2.2.2 터널공사

(1) 사고유형에 따른 응급복구 방법⁸⁾

터널공사는 크게 막장면이 불안정한 경우와 천장부 및 상부지반이 불안정한 경우로 구분하여 그 원인에 적합한 응급복구를 수행하여야 한다. 다양한 응급복구 방안 중 압성토 시공, 물빠기공, 1차 지보재(숏크리트, 록볼트, 강지보재 타설 등) 추가시공 등의 방법들이 있다. 이 중에서 터널 내 피해발생 시 즉각적인 원인파악이 어려울 경우는 2차 사고 방지에 대응성이 가장 우수한 압성토 시공이 가장 먼저 고려될 수 있다. 국부적인 붕락이나 과다변위가 발생하는 경우는 추가적인 1차 지보재의 설치가 가장 효율적인 방법으로 적용될 수 있으며, 터널 내 누수가 많아 세립분 유출로 인한 2차사고가 우려되는 경우는 1차 지보재의 추가시공, 압성토 시공 이외에도 막장면에 물빠기공을 설치할 수 있다. 이 경우에는 부직포 등 세립분 유출을 방지할 수 있도록 별도의 유도 배수재의 고려가 필요하다.

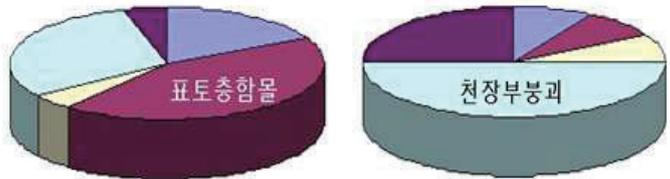
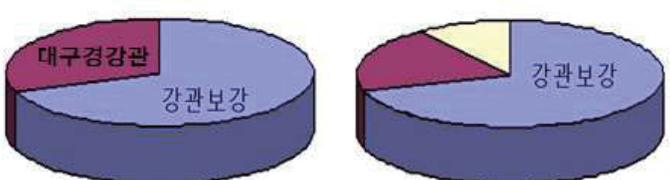
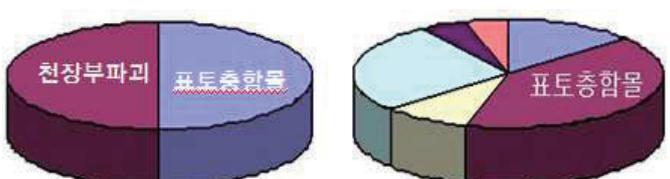
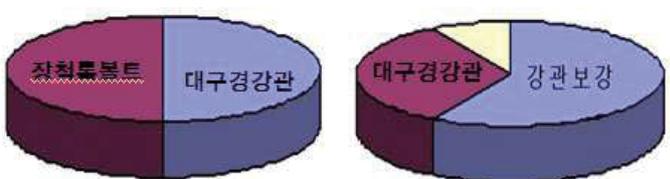
표 2.4 터널공사 중 사고유형별 응급복구 방법

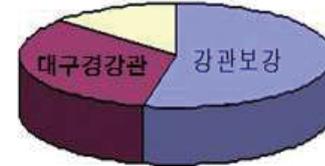
구분	숏크리트 타설	록볼트 타설	압성토 시공
막장면 불안정			
천장 및 상부지반 불안정	숏크리트 타설	압성토 시공	강지보재 타설
			

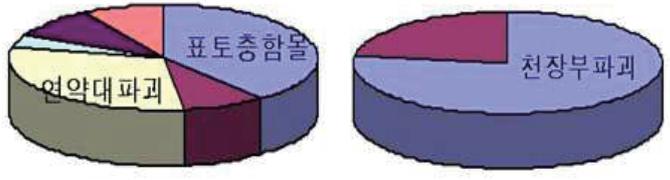
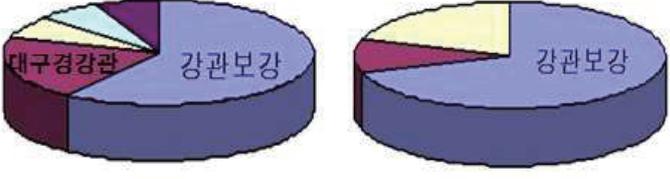
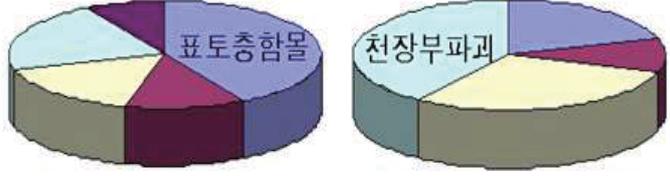
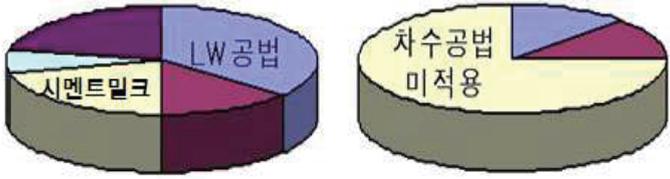
(2) 사고유형에 따른 보강대책⁸⁾

국내 터널의 시공 중 발생한 사고사례는 토파고, 지보패턴, 굴착공법, 막장면의 지반조건, 불연속면 특성, 지하수 조건 등의 다양한 사례가 존재한다. 실제 발생한 사고사례에 대한 보강대책 실적을 정리하면 공통적으로 강관보강그라우팅 공법이 가장 많이 적용되었으며, 이는 지반이완 부분의 강성을 높이고 변위를 줄이는 데 가장 효과적이기 때문으로 평가된다.

표 2.5 사고유형에 따른 보강대책 실적

구분		내용
토피고	토피고에 따른 붕괴유형	 <p><토피고 1.5D 이하> <토피고 2.5D 이상></p> <p>토피고 1.5D 이하는 표토층함몰, 토피고 2.5D 이상은 천장부 붕괴 사례 다수</p>
	보강대책	 <p><토피고 1.5D 이하> <토피고 2.5D 이상></p> <p>보강대책으로 강관보강그라우팅 공법 다수</p>
지보패턴	지보패턴에 따른 붕괴유형	 <p><지보패턴 P-2> <지보패턴 P-5, P-6></p> <p>지보패턴이 낮은 경우(보강량이 적은 경우)는 천장부파괴와 표토층함몰이 유사한 정도로 나타났으나, 지보패턴이 높은 경우(보강량이 많은 경우)는 표토층함몰 우세</p>
	보강대책	 <p><지보패턴 P-2> <지보패턴 P-5, P-6></p> <p>보강대책으로 강관보강그라우팅 공법 다수</p>

굴착공법	굴착공법에 따른 붕괴유형	 <p><상하분할굴착></p>	 <p><전단면굴착></p>
	상하분할 굴착에 비해 전단면 굴착을 적용하는 경우가 천장부 붕괴 사례 많음		
보강대책	보강대책	 <p><상하분할굴착></p>	 <p><전단면굴착></p>
	분할굴착 또는 굴진장 감소 대책 다수		
막장면 지반조건	막장면 지반조건에 따른 붕괴유형	 <p><막장면 풍화암></p>	 <p><막장면 풍화암/연암></p>
	막장면이 풍화암 이하로 취약한 경우 표토층함몰까지 진전 다수		
보강대책	보강대책	 <p><막장면 풍화암></p>	 <p><막장면 풍화암/연암></p>
	추가 강관보강그라우팅 공법 적용 다수		

불연속면 분포특성	불연속면의 분포특성에 따른 붕괴유형	 <p><단층파쇄대 존재> <절리 발달></p> <p>단층파쇄대 또는 절리 등 불연속면이 우세하게 존재하는 지반조건에서는 천장부 파괴와 더불어 연약대 자체 파괴로 인해 표토층 함몰까지 진전되는 사례 많음</p>
	보강대책	 <p><단층파쇄대 존재> <절리 발달></p> <p>강관보강그라우팅 공법 보강 우세</p>
지하수 조건	지하수 조건에 따른 붕괴유형	 <p><지하수 유출량 많음> <지하수 유출량 적음></p> <p>지하수의 유출량이 많은 경우는 표토층함몰까지 진전 사례 많음</p>
	보강대책	 <p><지하수 유출량 많음> <지하수 유출량 적음></p> <p>대책공법으로 차수그라우팅 공법 적용 우세 * 지하수 유출량을 줄이고 공사 재개시 2차사고 방지를 위해 적용되는 차수그라우팅은 터널 내부에서 시공하는 경우와 주변지반이 매우 취약하거나 토피고가 낮아 상부지반에서의 작업여건이 용이한 경우 지상 차수그라우팅 및 보강 그라우팅을 시공 사례 많음</p>

2.3 소결

본 장에서는 대형 굴착 및 터널공사에서 발생한 가설흙막이 붕괴, 지반침하, 인접시설물 붕괴, 터널붕괴 등과 관련한 손상원인이 규명된 25가지 사례(굴착 19건, 터널 6건)의 지하 안전사고사례를 조사하였다. 사고사례는 (중앙)지하사고조사위원회 보고서, 국토교통부 및 지자체 등 유관기관의 기술자료, 국내외 논문 등을 통해 수집하였다. 사고는 지반조사 미흡, 시공설계 미흡, 그리고 시공관리 미흡 등의 다양한 범위에서 발생하였다. 이 중 발생빈도가 높았던 사고는 예상치 못한 풍화대, 파쇄대 및 불리한 절리특성 등의 불리한 지반조건을 제대로 대응하지 못하여 발생한 사고였으며 주로 과업 범위가 크고 지반조사가 어려운 큰 터널공사에서 발생하였다. 또한, 해안가 지반의 특성, 해빙기, 지하공동, 지하수위 상승 등의 현장의 지반특성을 고려하지 못하여 발생한 사고도 존재하였으며 이는 지반조사 및 지반특성 파악이 안전한 시공을 하는데 중요한 요인임을 말해준다고 볼 수 있다. 과업 주변 영향 범위에서는 과업 주변의 석축 등의 취약한 구조물과 노후화된 구조물 등의 인접구조물 현황 파악 미흡이 사고 유발의 요소로 파악되었다. 시공 관리적인 측면에서, 굴착공사에서는 주로 과굴착, 터널공사에서는 발파진동, 충격하중 등으로 인한 사고가 다수 발생되었으며, 차수품질 미확보, 차수공법 미적용 등의 차수그라우팅 문제로 인한 사고도 다수 확인되었다. 이 외에도 띠장 미폐합, 편토압 조건, 앵커 근접시공 등의 여러 가지 사고유발 요인들이 존재한다. 그러나 이와 같은 굴착 및 터널사고는 단독적인 요인이라기보다는 다수의 요인들이 복합적으로 작용하여 인과관계 규명이 어려우므로 사고에 기반한 가이드라인을 작성하기 위해서는 사고사례별 다수의 사고원인 키워드를 선정하고 빈도분석 등을 통하여 중요도를 재평가하고 주요검토 사항을 도출하는 것이 현명할 것으로 판단된다.

제 3 장 지하안전평가 표준매뉴얼

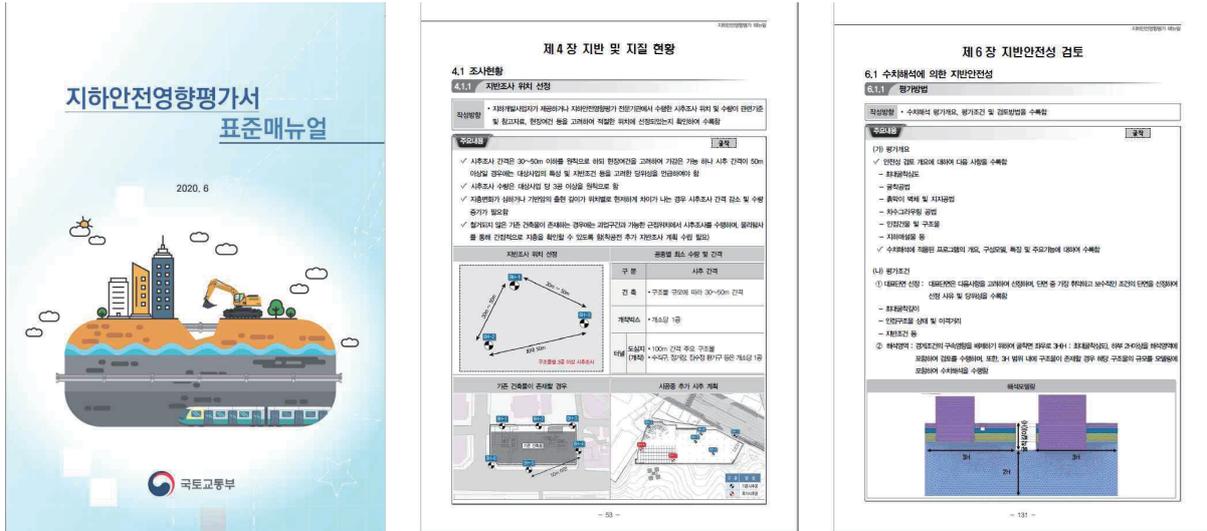
3.1 지하안전평가서 표준매뉴얼

「지하안전관리에 관한 특별법(2018.1월 시행)」에 따라 일정깊이 이상의 굴착공사 또는 터널공사를 하는 지하개발사업자는 해당사업을 승인받기 전까지 설계단계에서 지하안전(영향)평가, 착공한 후에는 착공후지하안전(영향)조사를 전문기관을 통해 실시하도록 의무화되었다. 작성된 평가서와 조사서는 국토교통부(지방국토관리청)에 제출하여 적정성 검토를 받고, 협의된 결과를 사업계획에 반영해야 한다.

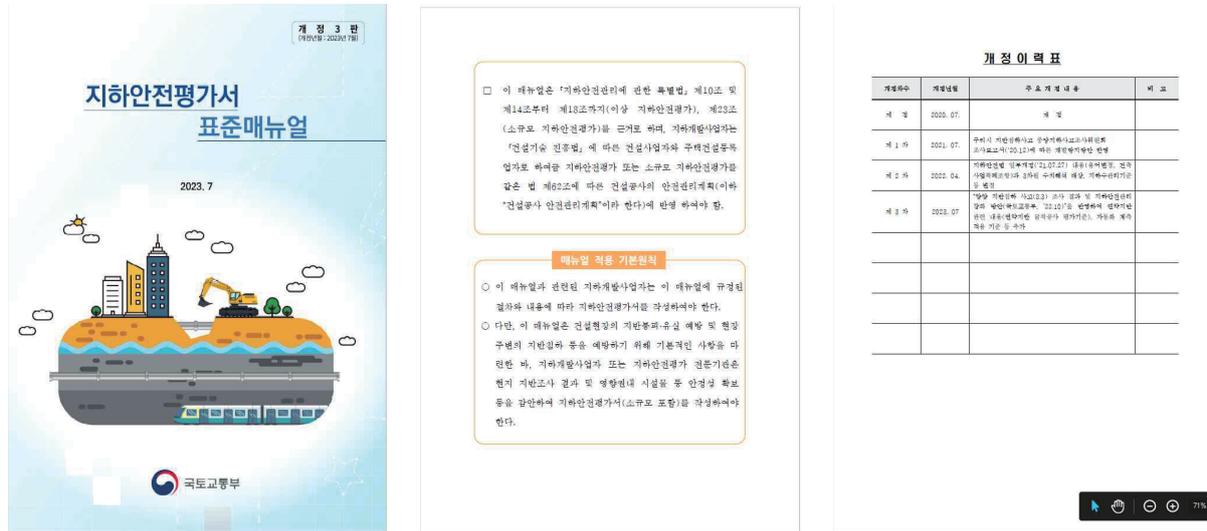
「지하안전관리에 관한 특별법 시행령(2017.11월 제정, 2018.1월 시행)」과 「지하안전관리 업무지침(2017.11월 제정·시행)」에서는 평가서 등(지하안전평가서, 소규모지하안전평가서, 착공후지하안전조사서, 지반침하위험도평가서)의 작성방법이 구체적으로 제시되지 않아 전문기관별 평가서 품질에 격차가 발생하고 이로 인한 협의기간의 지연 등 여러 문제점이 발생함에 따라 지하개발사업자로부터 금융비용 증가에 대한 민원이 다수 발생하였다.

이에 국토교통부는 표준화된 지하안전평가서 작성을 위해 「지하안전영향평가서 작성 및 검토 표준매뉴얼 마련 연구(국토교통부, 2020)」를 통해 지하안전평가서 등에 대한 표준매뉴얼을 배포(2020.7월)하였다. 이후 2021년 구리시 침하사고, 2022년 지하안전법 일부개정, 2023년 양양 지반침하사고를 반영하여 표준매뉴얼을 지속적으로 개정하고 있다.

이번 절에서는 지하안전평가서의 표준매뉴얼에 제시된 평가항목, 항목별 작성방법과 예시 등을 조사하여 굴착공사 사고원인에 따른 지하안전평가 검토가이드라인(안) 작성에 활용하고자 한다.



(a) 표준매뉴얼(최초)



(b) 표준매뉴얼(개정3판)

그림 3.1 지하안전(영향)평가서 표준매뉴얼(국토교통부)

3.1.1 평가 항목

지하안전평가서 표준매뉴얼은 평가서를 구성하는 총 10가지 작성항목(소규모의 경우 9가지)에 대하여 각각의 항목별로 작성방법과 예시를 제시하여 평가서 작성을 돕고 있다. 10가지 작성항목과 항목별 주요내용은 아래의 표 3.1과 같다.

표 3.1 표준매뉴얼 작성항목별 주요내용

작성항목	주요내용	비 고
1. 요약문	• 평가서 전반 요약	
2. 대상사업의 개요	• 사업의 배경과 목적, 현황(적용 공법 선정 등) • 지하안전평가 실시 근거	
3. 대상지역의 설정	• 평가대상 지역 설정 • 대상 지역 내 영향 시설물 조사	소규모 제외 (일부항목)
4. 지반 및 지질현황	• 지반조사 현황 및 조사결과 • 설계지반정수 산정	소규모 제외 (일부항목)
5. 지하수 변화에 의한 영향 검토	• 설계지하수위 산정 • 광역지하수 흐름 분석 • 지하수위 저하량 및 유출량 예측	소규모 제외 (일부항목)
6. 지반안전성 검토	• 수치해석, 탄·소성보 해석 등 검토 결과	
7. 지하안전확보방안 수립	• 계측계획 • 지반침하 취약구간 보강 및 차수방안 • 현장 안전관리 방안	
8. 종합평가 및 결론	• 평가결과 요약 및 종합결론	
9. 착공후지하안전조사 시기	• 착공후지하안전조사 시기	소규모 제외
10. 부록	• 참여인원 인적사항, 설계도서 등	

3.1.2 개정 추이

국토교통부는 앞서 기술한 바와 같이 표준매뉴얼을 제정한 후 지속적으로 현황을 반영하여 개정을 반복하고 있다. 아래 표 3.2는 표준매뉴얼의 제정부터 최근 개정까지의 이력을 나타내고 있다.

표 3.2 표준매뉴얼 개정 이력

구 분	개정년월	주요 개정 내용
제 정	2020.07	제정
개정 1차	2021.07	구리시 지반침하사고 중앙지하사고조사위원회 조사보고서(' 20.12)에 따른 재발방지 방안 반영
개정 2차	2022.04	지하안전법 일부개정(' 21.07.27) 내용(용어변경, 건축사업특례 조항)과 3차원 수치해석 대상, 지하수관리기준 등 변경
개정 3차	2023.07	“양양 지반침하 사고(8.3) 조사 결과 및 지하안전관리 강화 방안(국토교통부, ' 22.10)” 을 반영하여 연약지반 내용(연약지반 굴착공사 평가기준), 자동화 계측 적용 기준 등 추가

이번 절에서는 개정 1차부터 최근까지 각각의 시기별로 어떤 사항들이 개정되었는지를 구체적으로 살펴보았다.

(1) 개정 1차

구리시 지반침하사고 중앙지하사고조사위원회 조사보고서(2020.12)에 따른 재발 방지 방안을 반영한 표준매뉴얼(개정 1차, 2021.07)에서는 최대 굴착깊이, 시추조사, 수치해석 결과, 계측기 설치 등에 대하여 개정이 이루어졌다. 각각의 항목별로 추가 및 개정된 사항은 아래 표 3.3과 같다.

표 3.3 개정 1차 주요내용

구 분	개 정 전	개 정 후
2.2.4 최대굴착 깊이	-	<ul style="list-style-type: none"> • 재협의 평가서의 경우 변경 사항을 요약하여 제시함 • 산지(지목상 임야)를 포함한 사업부지의 경우 산지 구간을 제외하고 굴착깊이를 산정함
* 사업계획 변경내용 수록, 산지구간 제외		
4.1.1 지반조사 위치 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 시추조사 간격은 100m 이하를 원칙으로 현장 여건을 고려하여 가감 가능 • 주요구조물(수직구, 정거장, 환기구 등)은 개소당 1개소 이상 수행을 원칙 	<ul style="list-style-type: none"> • 시추조사 간격은 일반구간과 위험구간(지반침하 취약구간)을 구분하여 적용하고, 특히 주요구조물(수직구, 정거장, 연락갱, 환기구 등) 구간은 개소당 1개소 이상 수행을 원칙 • 일반구간 시추조사 간격 100m 이하, 위험구간 시추조사 간격은 50m 이하를 원칙
* 지반조사 강화(터널 취약구간 지반조사 간격 축소)		
4.2.5 인근시추 자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 사업구간에 대한 국토지반정보 통합DB에서 제공하는 시추 정보를 분석함 	<ul style="list-style-type: none"> • 도심지 터널공사에 대한 지하안전평가지 터널공사에 대한 설계·시공사로 선정된 업체(낙찰자)가 실시한 지반조사 결과 이외에 입찰단계에서 경쟁사가 실시한 지반조사 자료 등 획득 가능한 모든 정보 고려
* 터널공사 설계시 경쟁사 지반조사 자료의 적용		
6.1.2 평가결과	<ul style="list-style-type: none"> • 흙막이 부재의 안전성은 각 부재에 대한 구조계산을 수행하여 기술하되 인접건물 및 지하매설물의 노후화, 지반의 불확실성 등을 고려하여 허용치 대비 90~95% 근접할 경우 계측기 추가설치, 95% 초과하여 근접할 경우 계측기 추가설치와 함께 추가적인 보강대책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 흙막이 부재의 안전성은 각 부재에 대한 구조계산을 수행하여 기술하되 인접건물 및 지하매설물의 노후화, 지반의 불확실성 등을 고려하여 허용치 대비 90~95% 근접할 경우 계측기 추가설치 및 빈도증가, 95%를 초과하여 근접할 경우 계측기 추가설치와 함께 추가적인 보강대책 수립
* 90~95% 근접시 계측빈도 증가		

<p>7.1.1 계측기 설치계획</p>	<p>-</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 굴착방식(비개착공법 포함)이 적용되는 지반침하 취약구간(완전 풍화된 토사, 점토지반, 단층 파쇄대 존재 구간 등) 또는 지반침하 사고 발생시 대규모 인적·물적 피해가 예상되는 구간(아파트 등 주거시설 및 공공이용시설물이 밀집된 지역), 상기에서 언급되지 않은 구간이라 할지라도 지반침하 발생으로 인해 주변지반의 이상거동이 우려되는 구간은 책임기술자의 판단에 따라 추가로 포함할 수 있음
<p>* 도심지 터널공사시 위험지역 자동화 계측 계획</p>		

(2) 개정 2차

표준매뉴얼(개정 2차, ' 2022.04)에서는 법안 개정 에 따른 용어의 변경, 건축사업특례 조항과 3차원 수치해석 대상, 지하수 관리기준 등에 대하여 개정이 이루어졌다. 각각의 항목별로 추가 및 개정된 사항은 아래 표 3.4와 같다.

표 3.4 개정 2차 주요내용

구 분	개 정 전	개 정 후
<p>용어수정</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 지하안전영향평가 • 사후지하안전조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 지하안전평가 • 착공후지하안전조사
<p>* 지하안전관리에 관한 특별법 개정 에 따른 명칭 변경</p>		
<p>2.3.2 지하안전 평가 제출일자</p>	<p>-</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 건축물의 건축사업에 대하여는 협의 등의 절차가 끝나기 전에 「건축법」 제11조에 따른 건축허가를 하거나 같은 법 제14조에 따른 건축신고 를 수리할 수 있다. • 건축허가를 허가 나 건축신고 를 수리한 승인기관의 착공신고의 수리 전까지 협의 등의 절차를 끝내야 한다.
<p>* 건축법에 따른 건축물 설치사업(특례조항)</p>		

<p>6.1.1 평가방법</p>	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 해석을 통해 안전성을 확인해야 하는 경우 <ul style="list-style-type: none"> 「시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법」상 주요시설물 및 노후시설물이 검토 범위 내에 존재 흙막이 벽체 및 지지공법 변화구간 발생 코너스트러트와 띠장의 각도가 30° 미만일 경우 띠장이 폐합되지 않을 경우 2차원 해석결과 부재력이 허용응력의 95%를 초과할 경우 검토범위 내에 동시굴착 현상이 존재하는 경우 	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 수치해석의 적용범위는 다음의 경우를 우선적으로 적용하며, 지반 또는 구조적인 취약구간을 고려하여 책임기술자의 판단에 의해 추가적으로 적용할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> 평면 상 굴착면 내측으로 돌출된 우각부 배면에 흙막이 가시설에 영향을 줄 수 있는 시설물이 존재하는 경우 검토범위 내 사업부지와 인접한 동시굴착이 존재하여 평면상 2차원적으로 단면 검토가 불가능한 경우 검토범위 내에 운영중인 철도시설물(지하철, 고속철도 등)이 3차원 공간적으로 인접한 경우 																				
<p>* 3차원 수치해석 적용 범위</p>																						
<p>6.1.1 평가방법</p>	<ul style="list-style-type: none"> 비탈면 안전성 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 비탈면 안전성 검토(터널사업의 경우 갱구부, 대규모 공동주택 등 비탈면이 존재하는 경우는 본 내용을 따름) <ul style="list-style-type: none"> 비탈면 안전성 검토 시 설계기준 준수 여부와 설계 내용의 적정성을 검토하여야 하며, 특히 비탈면 경사, 지표수 배수를 위한 산마루측구, 표면유실 방지를 위한 보호공 및 보강공 등의 설계 적정성을 검토함 																				
<p>* 비탈면 안전성 검토 항목 추가</p>																						
<p>7.1.1 계측기 설치계획</p>	<ul style="list-style-type: none"> 지하수위계(누적수위변화량) <table border="1" data-bbox="304 1312 850 1406"> <tr> <td>구분</td> <td>1차</td> <td>2차</td> <td>3차</td> <td>비고</td> </tr> <tr> <td>관리 기준</td> <td>4.0m</td> <td>1차+자연 변동량</td> <td>8.0m</td> <td></td> </tr> </table> 	구분	1차	2차	3차	비고	관리 기준	4.0m	1차+자연 변동량	8.0m		<ul style="list-style-type: none"> 지하수위계의 경우 계측기 설치시기, 계절적인 변동, 지반의 불확실성에 의해 타 계측기에 비해 지하수위 및 유출량의 관리기준값으로 안전성을 판단하기 어려우므로 3차 관리기준 초과시 배면지반 및 인접 구조물, 지하매설물의 침하, 변위 및 계측데이터와 현장점검 결과를 연계분석하여 안전성 여부를 판단 지하수위계(누적수위변화량) <table border="1" data-bbox="866 1442 1412 1547"> <tr> <td>구분</td> <td>1차</td> <td>2차</td> <td colspan="2">3차</td> </tr> <tr> <td>관리 기준</td> <td>예측값 ×0.8</td> <td>예측값</td> <td>예측값 ×1.2</td> <td>현장점검 결과 불안전으로 판단시</td> </tr> </table> 	구분	1차	2차	3차		관리 기준	예측값 ×0.8	예측값	예측값 ×1.2	현장점검 결과 불안전으로 판단시
구분	1차	2차	3차	비고																		
관리 기준	4.0m	1차+자연 변동량	8.0m																			
구분	1차	2차	3차																			
관리 기준	예측값 ×0.8	예측값	예측값 ×1.2	현장점검 결과 불안전으로 판단시																		
<p>* 지하수위계(누적지하수위) 및 유량계 관리 기준</p>																						
<p>7.2.2 보강 및 차수방안</p>	<ul style="list-style-type: none"> 시공시 대책방안, 차수그라우팅 시험시공 계획, 착공전 CCTV 매설관로 조사계획 및 시공중 GPR탐사 계획 등 지하안전성을 위해 수립된 계획을 구체적으로 제시하여 시공중 적절히 반영될 수 있도록 함 	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 시험시공은 차수그라우팅 본 공사 전 수행함을 원칙으로 하며, 지하안전평가서에는 차수그라우팅 전반적인 수행계획을 수록하고 상세한 시험시공 결과는 착공후지하안전조사서에 수록함 																				
<p>* 차수그라우팅 시험시공 의무화</p>																						

(3) 개정 3차

“양양 지반침하 사고(2022.08.03) 조사 결과 및 지하안전관리 강화 방안(국토교통부, ' 22.10)” 을 반영한 표준매뉴얼(개정 3차, ' 2023.07)에서는 연약지반 굴착공사 평가기준, 자동화 계측 적용 기준 등이 신설되었고 시추조사, 수치해석 모델링 등에 관련하여 개정이 이루어졌다. 각각의 항목별로 추가 및 개정된 사항은 아래 표 3.5와 같다.

표 3.5 개정 3차 주요내용

구분	개정 전	개정 후
3.1.2 지반 안전성 검토를 위한 대상지역 설정	-	<ul style="list-style-type: none"> 비탈면 구간의 검토범위 산정 방법 <ul style="list-style-type: none"> 비탈면 구간(하부 흩막이공법 미적용 구간)은 수치해석에 의한 방법(침하량 수렴범위)과 한계평형해석에 의한 방법 중 안전측으로 산정함 비탈면 구간의 검토범위 시점부는 비탈면 어깨부터 시작함
	* 비탈면 구간의 검토범위 산정기준 추가	
4.1.1 지반조사 위치선정	<ul style="list-style-type: none"> 시추조사 수량은 대상사업 당 3공 이상을 원칙으로 함 	<ul style="list-style-type: none"> 시추조사 수량은 대상사업 당 3공 이상이며 시추 깊이는 기반암 3.0m이상 확인을 원칙으로 하며, 기반암이 출현하지 않는 토사층(풍화암 포함)은 굴착저면 하부 1H(H:최대굴착깊이)이상 확인하여야 함
	* 시추조사 깊이 기준 추가	
4.1.3 연약지반 시험	-	<ul style="list-style-type: none"> 연약지반 굴착공사 <ul style="list-style-type: none"> 연약지반 굴착공사는 지하안전평가 대상사업으로 근입깊이까지의 토사층 중 연약지반 층두께가 연속적으로 5m이상 분포하는 굴착공사를 의미함 연약지반 층두께는 연약지반 판정기준에 해당되는 모든 지층의 합이 5m이상 임
	* 연약지반 관련 추가	
6.1.1 평가방법	<ul style="list-style-type: none"> 해석영역 : 경계조건의 구속영향을 배제하기 위하여 굴착면 좌우로 3H(H:최대굴착깊이), 하부 2H이상을 해석영역에 포함하여 검토를 수행하며, 또한, 3H 범위 내에 구조물이 존재할 경우 해당 구조물의 규모를 모델링에 포함하여 수치해석을 수행함 	<ul style="list-style-type: none"> 해석영역 : 경계조건의 구속영향을 배제하기 위하여 굴착면 좌우로 검토범위+1H(H:최대굴착심도), 하부 2H이상을 해석영역에 포함하여 검토를 수행하며, 또한, 해석영역내의 시설물은 검토범위 내 해당 시설물의 규모를 모델링에 포함하여 수치해석을 수행함
	* 수치해석 영역 및 해석모델링 범위 명확화	

7.1.1 계측기 설치계획	<ul style="list-style-type: none"> • 도심지 터널공사 시 위험지역 자동화계측 계획 	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착공사시 자동화 계측계획 <ul style="list-style-type: none"> - 지하안전평가 대상사업 - 지반침하 취약구간 및 3차원 수치해석 대상
* 자동화 계측의 적용기준 추가		

3.2 지하안전평가 주요현황

3.2.1 지하안전평가 사례

2014년 8월에 발생한 석촌 지하차도 침하사고 이후 싱크홀이라는 용어가 언론에 언급되면서 국민적 불안감을 초래하게 되었다. 특히 이듬해인 2015년 2월에 발생한 용산역 지반침하 사고는 가시철 배면에 생긴 공동으로 사람이 추락하는 영상이 공개되면서 지반 침하사고에 대한 국민적 불안감이 더욱 확대되었다.

정부는 2014년 12월 4일 국가정책조정회의에서 범정부 민관합동 T/F를 통해 대책을 마련할 것을 주문하였고, 2015년 6월 5일 박인숙 의원의 대표발의로 「지하안전관리에 관한 특별법」이 제정되었다.

이에 따라 2018년 1월 1일부터 시행된 「지하안전관리에 관한 특별법」은 굴착깊이 10~20m는 소규모지하안전평가, 굴착깊이 20m 이상의 굴착공사와 터널공사를 수반하는 사업은 지하안전평가에 대한 협의를 완료하여야만 사업승인을 득할 수 있게 되었다. 최초 지하안전평가 협의를 시작으로 한 해 약 1,000건 이상의 지하안전평가가 수행되고 있다. 「2023 지하안전 통계연보(국토교통부, 국토안전관리원)」에 따르면 지하안전평가는 2018년에 처음으로 시행되어 꾸준하게 증가하고 있는 추세이며 첫 해 394건이었던 협의 건수는 2022년 1162건으로 약 3배 증가하였다(그림 3.2 참고).

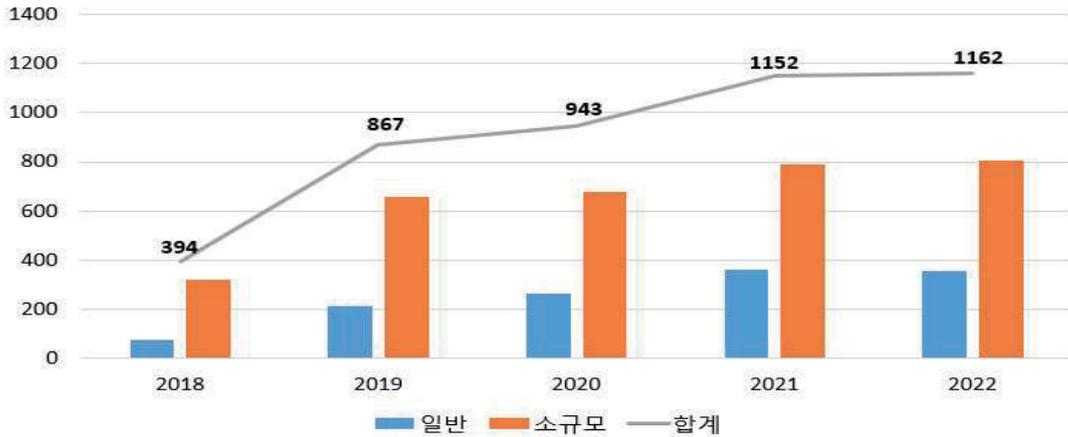


그림 3.2 지하안전평가 현황

「2023 지하안전 통계연보(국토교통부, 국토안전관리원)」을 활용하여 지하안전평가 대상사업을 공사규모(사업비, 굴착깊이)와 적용 공법(벽체, 지보, 차수)으로 구분하여 조사하였다⁹⁾.

(1) 공사규모별 협의현황

공사규모별로 지하안전평가 협의현황을 조사하였다. 사업비와 굴착깊이로 구분하여 현황을 조사하였다.

① 사업비별 협의현황

사업비 규모에 따라 협의현황을 분류하여 나타낸 그래프는 그림 3.3과 같다. 2018년 대비 2022년에 1000억 이상 공사가 약 24배 증가하여 가장 많이 증가한 것을 확인할 수 있으며, 500억 이하의 공사가 약 12~13배 증가하였다. 500억 이상 1000억 미만의 공사 같은 경우 약 6배 증가하여 상대적으로 증가폭이 적은 것을 확인할 수 있었다.

9) 국토교통부, 국토안전관리원. (2023). 2023 지하안전 통계연보. CS-XXX3-E6-009.

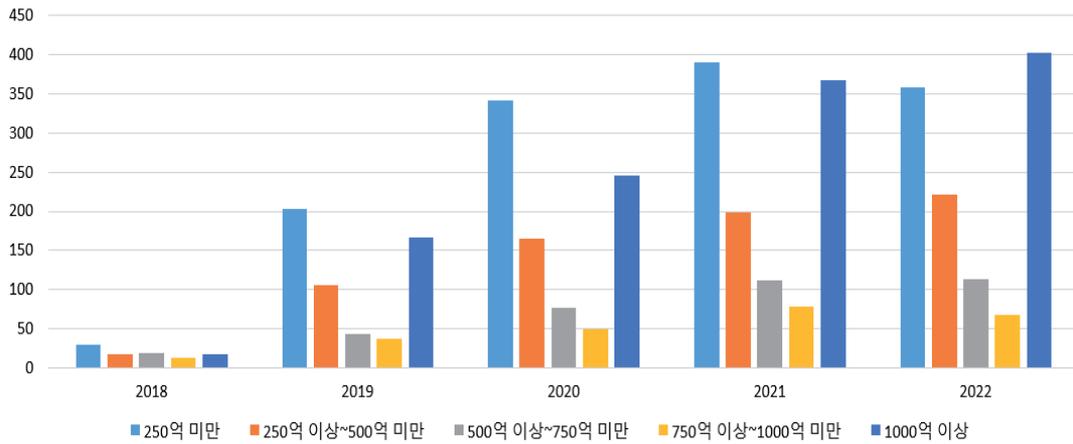


그림 3.3 지하안전평가 사업비별 현황

② 굴착깊이별 협의현황

지하안전평가의 경우 2022년 기준 28m 이상 굴착하는 사업이 151건으로 가장 많은 것으로 확인되며 2018년부터 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다(그림 3.4 참고). 소규모 지하안전평가의 경우에도 2022년 기준 18m이상~20m미만의 사업이 280건으로 전년도 대비 약 40건 정도 감소하였지만 가장 많은 것으로 확인되며 2018년 대비 크게 증가하였음을 알 수 있다(그림 3.5 참고). 이를 통해 도심도 지하 공간에 대한 개발이 꾸준히 증가하는 추세임을 확인할 수 있다.

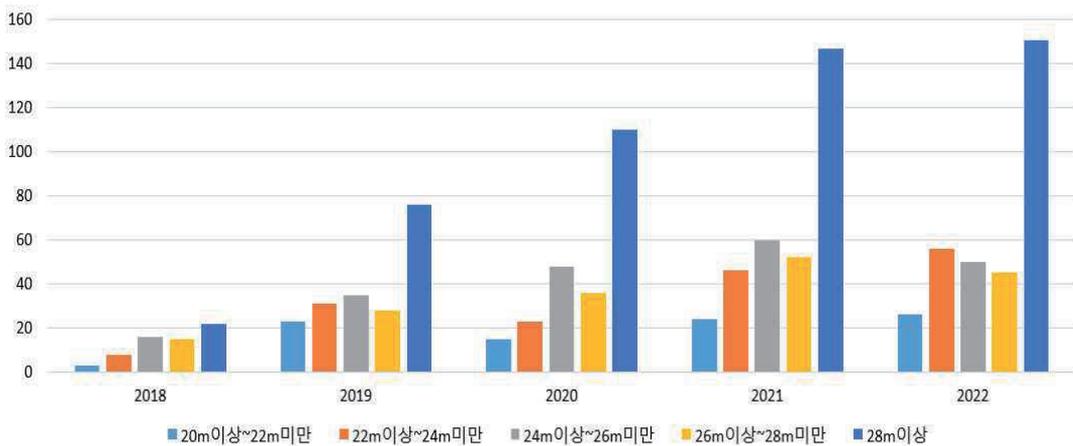


그림 3.4 굴착깊이별 지하안전평가 협의현황

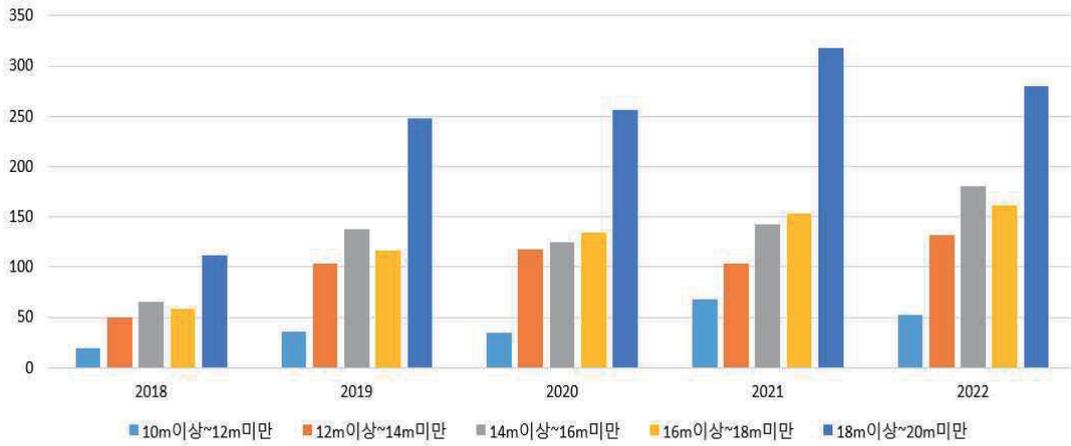


그림 3.5 굴착깊이별 소규모 지하안전평가 협의현황

(2) 적용 공법 현황

2022년도 지하안전평가 대상사업을 대상으로 벽체공법, 지보공법, 차수공법을 구분하여 각각의 유형별로 어떤 공법이 얼마나 적용되었는지를 확인하였다.

① 벽체공법 적용 현황

지하안전평가 대상사업 1,162건 중 가장 많이 사용된 벽체공법은 CIP로 총 774건으로 전체에서 66.6% 비율을 나타내었고 H-Pile+토류판이 168건으로 14.5%로 뒤를 이었다(그림 3.6 참고).

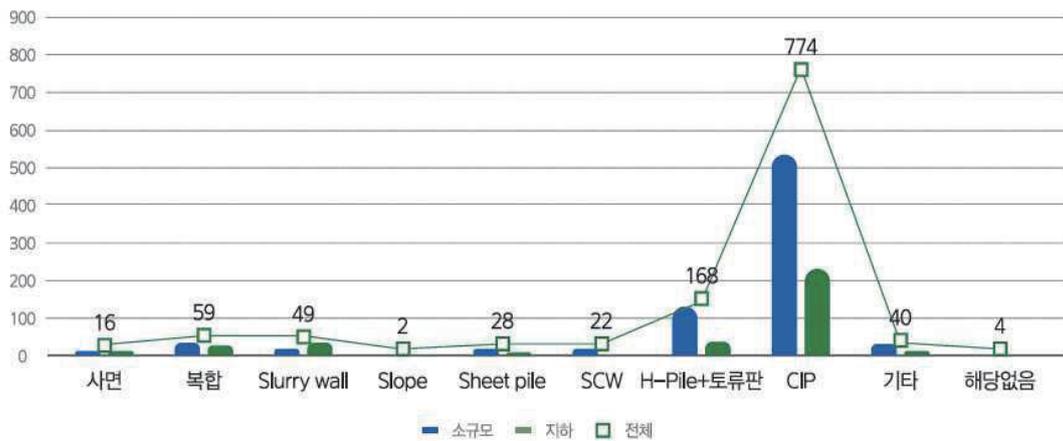


그림 3.6 벽체공법 적용 현황

② 지보공법 적용 현황

지보공법의 경우 Strut을 활용한 지보공법이 가장 많이 적용되었으며, 다음으로 Slab(역타), Anchor, Strut+Raker 순으로 적용한 것으로 나타났다. 하지만, 소규모를 별도로 구분하여 보면 일반 지하안전평가에서는 Slab(역타), Strut, Anchor, 복합 순이었으며, 소규모 지하안전평가에서는 Strut, Anchor, Strut+Raker 순으로 많이 적용되었음을 알 수 있다. 아래 그림 3.7은 이러한 현황을 그래프로 나타낸 것이다.

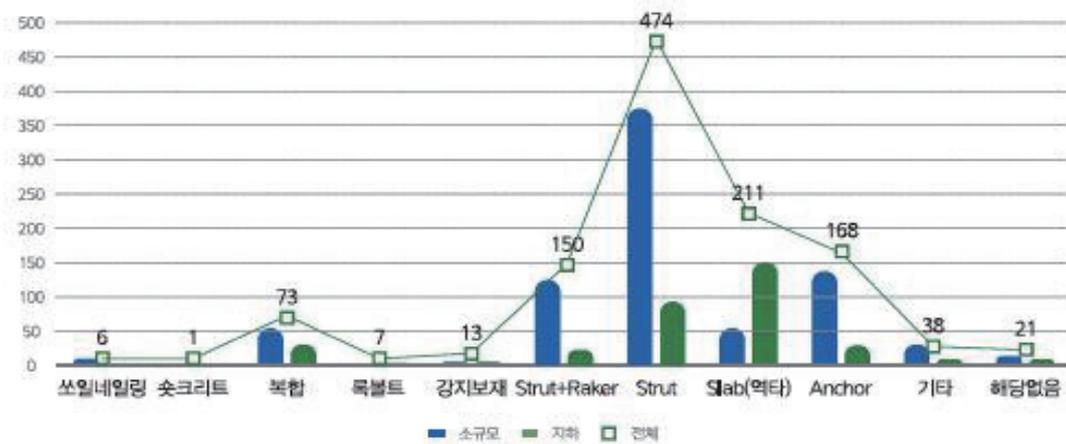


그림 3.7 지보공법 적용 현황

③ 차수공법 적용 현황

차수공법의 경우 그림 3.8에서 확인할 수 있는 것처럼 일반과 소규모 지하안전평가 모두에서 S.G.R 공법이 가장 많이 사용된 것으로 나타났다.

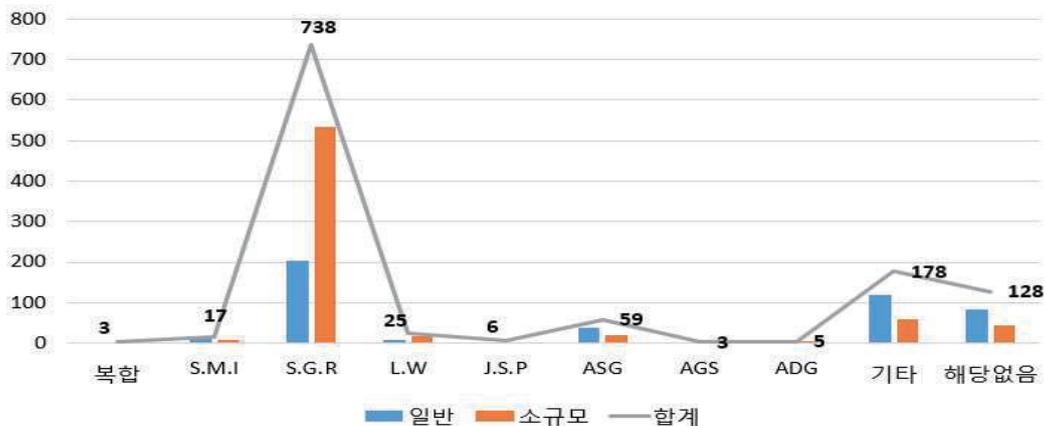


그림 3.8 차수공법 적용 현황

3.3 소결

본 장에서는 「지하안전관리에 관한 특별법(2018.1월 시행)」 과 「지하안전관리 업무지침(2017.11월 제정·시행)」 이후 지하안전평가서 표준매뉴얼이 발간된 배경과 개정추이를 살펴 보았다. 1차개정에서는 터널공사 시 취약구간 지반조사 간격 축소 및 경쟁사 지반조사 자료 활용 등의 지반조사를 강화하는 내용이 포함되었으며, 2차개정에서는 지하수위 계측관리기준 변경, 비탈면 안정성 검토 및 차수시험시공 의무화 등 지반안정성, 계측기, 시공관리 다양한 범위에 걸쳐 수정·보완되었다. 3차개정에서는 22년 8월에 발생한 양양 지반침하 조사 결과를 반영하여 연약지반 판정기준 및 적용, 그리고 자동화 계측적용 기준 등이 신설되었다. 개정추이를 살펴보면 주로 지반특성 파악과 계측 관련 내용이 주요하게 다뤄져 왔음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 지하안전평가의 기본적인 평가항목을 살펴보는 것은 물론, 사업현장의 지반 조사 및 특성 평가, 그리고 계측계획과 관련한 항목을 주요하게 검토하여 가이드라인을 제시해야할 것으로 판단된다. 흙막이가시설 중 지보재는 통계적으로 스트럿을 이용한 공법비율이 높게 나타났지만, 앵커와 지지슬래브 또한 많이 활용되고 있으므로 여러 지지공법에 대한 검토 가이드라인을 다양하게 제시하는 방향이 유의미한 도움이 될 것으로 판단된다.

제 4 장 지하안전평가 주요 검토항목 도출

4.1 사고인자 분석

제2장에서 정리한 굴착 및 터널 사고를 토대로 사고인자를 도출하였다. 대부분의 굴착 및 터널 사고는 주변지반의 이완 또는 침하로 인해 발생하는 것이 주를 이루기 때문에 주변지반의 이완 및 침하에 영향을 미치는 요인을 분석하여 사고인자를 추출하고자 하였다. 사고인자는 지반조건 특성(지반상태 및 지하수 조건), 흙막이 가시설(벽체공법, 지보공법 등), 굴착공법(전단면 굴착, 분할 굴착 등), 굴착방법(발파굴착, 기계굴착 등)의 적정성, 구조물 및 지하매설물 조건(위치, 규격, 노후화 등), 지하공동상태, 시공 불량여부 등 다양하게 구분할 수 있으나 이들 영향인자 중에서 지반 침하사고를 유발하는 핵심적인 요인을 선정하고자 하였다.

앞서 2장에서 언급한 다양한 사고사례에 대한 원인별 키워드를 도출하면 다음의 표와 같다.

표 4.1 사고사례별 사고원인 키워드

No.	사례	사고원인 키워드
1	OO구 OO동 OO유치원 붕괴	시공관리 미흡, 설계대비 불리한 지반조건, 구조물 하중재하조건 오류, 풍화대 및 단층파쇄대 발달
2	OO 지반침하사고	시공관리 미흡, 차수그라우팅 문제(품질 미확보), 해안가 지반특성 미고려(느슨한 모래지반, 지하수 유동특성 미고려)
3	OO구 OO동 흙막이 붕괴사고	가시설 구조체 불안정(띠장 미폐합, 편토압)
4	OO시 OO동 지반침하사고	차수그라우팅 문제(품질 미확보), 집중호우
5	OOOO선 OO역 가시설 붕괴사고	설계대비 불리한 지반조건, 풍화대 및 단층파쇄대 발달
6	OO시 OO동 현장 도로침하 사고	해안가 지반특성 미고려(해성퇴적층 발달), 앵커근접시공
7	OO아파트 건설현장 붕괴	시공관리 미흡(과굴착)

8	00 000 오피스텔 신축 공사장 붕괴	시공관리 미흡, 집중호우
9	00 00연구소 현장 흙막이 가시설 붕괴	설계대비 불리한 지반조건, 가시설 구조체 불안정, 지하공동, 현장조치미흡
10	00 00시설 공사현장 흙막이 가시설 붕괴	굴착저면 검토부실(히빙문제), 수압상승
11	00도 00빌딩 현장 흙막이 가시설 붕괴	설계대비 불리한 지반조건, 가시설 구조체 불안정
12	00구 00동 석축 붕괴현장	인접구조물 상태취약
13	00구 00동 석축 붕괴 현장	인접구조물 상태취약, 무단철거
14	00구 00동 석축 붕괴 현장	시공관리 미흡(일부 가시설 미설치, 근입깊이 부족)
15	00구 000동 석축담장 붕괴 현장	인접구조물 상태취약
16	00구 00동 인접구조물 등 붕괴 현장	시공관리 미흡(과굴착), 지하수 과다유출
17	00구 00동 석축 붕괴 현장	인접구조물 상태취약
18	00구 00동 인접구조물 등 붕괴 현장	해빙기 지반조건 미고려
19	000구 00동 건물 붕괴 현장	무단철거
20	지하철 터널 막장붕괴 및 지표면 함몰현장A	차수그라우팅 문제(품질 미확보), 풍화대 및 단층파쇄대 발달
21	지하철 터널 막장붕괴 및 지표면 함몰현장B	시공관리 미흡(발파진동), 차수그라우팅 문제(품질 미확보)
22	과거 하천구간 차별풍화에 의한 지표면 붕락	풍화대 및 단층파쇄대 발달
23	토립자 유실에 의한 계류장 노면 과다침하 현장	설계대비 불리한 지반조건
24	도심지 전력구 시공시 자갈층 유입현장	설계대비 불리한 지반조건

25	도심지 터널 토사유출에 의한 지표면 함몰현장	시공관리 미흡(충격하중), 설계대비 불리한 지반조건, 차수그라우팅 문제(차수 미적용)
----	--------------------------	---

총 25 사례를 토대로 사고원인 키워드에 대한 발생 비중을 파악하기 위해 카테고리를 생애주기 순서대로 ‘지반조사’, ‘인접구조물 상태취약’, ‘시공계획’, ‘시공관리’ 4개의 카테고리로 구분하였고, 그 외 빈도수가 높은 ‘차수그라우팅’, ‘집중호우’ 2개의 카테고리를 추가하여 총 6 가지의 카테고리로 분류하였다.

표 4.2 카테고리별 사고원인 키워드 발생빈도

카테고리	사고원인 키워드	횟수
지반조사 (14회)	• 설계대비 불리한 지반조건(풍화대, 파쇄대 발달, 불리한 절리방향)	9
	• 해안가 지반(느슨한 모래, 해성퇴적층, 불리한 유동특성) 미고려	2
	• 해빙기 지반조건 미고려	1
	• 지하공동으로 인한 지반함몰	1
	• 지하수위 상승에 의한 수압증가	1
인접구조물 현황 (5회)	• 인접구조물 상태취약(취약구조물, 하중재하조건 과소평가)	5
시공계획 (6회)	• 앵커 근접시공	1
	• 가시설구조체 불안정(띠장 미폐합, 편토압, 복합 지보조건 등)	3
	• 지반조건 대비 보강 부족	1
	• 굴착저면 검토 부실(히빙, 보일링)	1
시공관리 (11회)	• 굴착 및 발파관리 미흡	8
	• 무단 철거	2
	• 지하수 과다유출	1
차수그라우팅 (5회)	• 차수그라우팅 문제(차수품질 미확보, 차수공법 미적용)	5
집중호우 (2회)	• 집중호우	2

그 결과, 지반조사 미흡으로 인한 사고원인이 33%(14건)로 가장 높았으며 그 뒤로 시공관리 미흡 26%(11건), 시공계획 미흡 12%(6건) 차수품질 미확보 및 계획부재 12%(5건), 인접구조물 상태파악 미흡 12%(5건), 집중호우 5%(2건) 순으로 이어졌다.

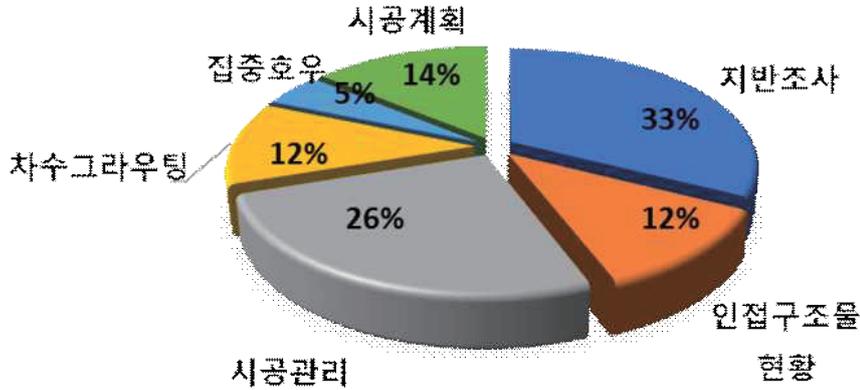


그림 4.1 사고 카테고리별 발생 비율

4.2 연계분석을 통한 지하안전평가 주요 검토항목 도출

사고사례를 통해 도출된 사고 키워드와 지하안전평가 항목을 연계하여 지하안전평가 항목에 따른 사고키워드 및 주요검토항목을 다음과 같이 제시하였다. 사고사례에서 발췌한 사고키워드 이외에도 지하안전평가지 중요하다고 판단되는 요인(* 표기)도 추가적으로 포함하였다.

표 4.3 사고원인-지하안전평가 항목 연계

지하안전평가 항목		사고원인 키워드	주요검토항목
대상사업 의 개요	흙막이 굴착공법 적절성	• 가시설구조체 불안정 (띠장 미폐합)	• 지보공법 변경구간에 대한 구조해석 및 시공계획 확인
		• 앵커 근접시공	• 우각부 등 앵커 근접시공 구간에 대한 앵커 중첩 등 시공계획 확인
		• 가시설구조체 불안정(편토압)	• 편토압구간 구조해석 및 시공(지보설치 및 해체) 조건 확인

	타널공법의 적절성	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조건 대비 보강 부족 • 저토피구간 공법 부적절* 	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조건에 따른 공법 선정 확인 • 공법선정 및 시공계획 확인
대상지역의 설정	인접 구조물 설정 및 현황	<ul style="list-style-type: none"> • 인접구조물 상태취약 (하중재하조건 과소적용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 흠막이 배면 비탈면 구간 상재하중 조건 및 구조계산 확인
		<ul style="list-style-type: none"> • 인접 상·하수도 누수로 인한 공동발생* 	<ul style="list-style-type: none"> • 인접 매설관로 파손으로 인한 굴착구간 토사 유입 및 공동 발생
		<ul style="list-style-type: none"> • 인접구조물 상태취약 (취약구조물) 	<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 설정(이격거리, 상태) 확인
지반 및 지질현황	지반조사 및 위치선정	<ul style="list-style-type: none"> • 설계대비 불리한 지반조건* (지반조사부실) 	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조사 항목 및 시추조사 간격 확인
		<ul style="list-style-type: none"> • 지하공동으로 인한 지반함몰 	<ul style="list-style-type: none"> • GPR 탐사를 통한 지하공동 확인 및 관계기관 제출 여부 확인
		<ul style="list-style-type: none"> • 설계대비 불리한 지반조건 (풍화대, 파쇄대, 불리한 절리방향) 	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조사 결과 및 전방지질조사 계획 검토
	연약지반 굴착공법 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 해안가 지반 (느슨한 모래, 해성퇴적층) 	<ul style="list-style-type: none"> • 흠막이 벽체 및 차수그라우팅 공법 적정성 확인
지하수 변화에 의한 영향 검토	설계 지하수위 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수위 상승에 따른 수압증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계지하수위 산정 및 구조계산시 적용 지하수위 확인

	지하수 변화 특성	<ul style="list-style-type: none"> 지반함수량 증가에 따른 포화대 미고려* 	<ul style="list-style-type: none"> 점토층 협재에 따른 포화대 산정
		<ul style="list-style-type: none"> 해안가 지반(불리한 유동특성) 	<ul style="list-style-type: none"> 해수유입 및 지하수 흐름 방향에 따른 지하수 유동 특성 확인
지반안전성 검토	수치해석을 통한 안전성 확보	<ul style="list-style-type: none"> 구조적 취약구간에 대한 상세 검토 누락* 	<ul style="list-style-type: none"> 취약구간에 대한 3차원 해석을 통한 상세검토
	탄·소성보 해석을 통한 안전성 확보	<ul style="list-style-type: none"> 굴착지면 검토부실(보일링, 히빙) 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착지면 안전검토 (Boiling, Heaving) 검토 결과 확인
		<ul style="list-style-type: none"> 가시설구조체 불안정 (입력값 오기)* 	<ul style="list-style-type: none"> 구조계산의 적정성 확인 (GeoX, Sunex)
		<ul style="list-style-type: none"> 지반함수량 증가에 따른 포화대 미고려* 	<ul style="list-style-type: none"> 포화대 추가 하중을 고려한 구조해석
지하안전 확보방안	계측계획	<ul style="list-style-type: none"> 계측계획(자동화계측 등) 부실* 	<ul style="list-style-type: none"> 지반침하 취약구간 계측계획 확인
	지반침하 취약구간 선정	<ul style="list-style-type: none"> 지반침하 취약구간 설정미흡* 	<ul style="list-style-type: none"> 지반조건, 지하수변화에 의한 영향 및 지반안전성 검토 결과 등을 바탕으로 지반침하 취약구간 선정 (주요계측계획 반영)
	차수 그라우팅 계획	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 문제 (차수품질 미확보, 공법미적용) 	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 시험 시공 계획 수립 여부 확인
	배수계획	<ul style="list-style-type: none"> 집중호우 또는 지하수 과다유출 	<ul style="list-style-type: none"> 흙막이 벽 배면 지하수 및 굴착 내부 지하수 배수계획 수립

반면에, 굴착 및 터널공사 사고원인 중 약 30%는 시공 및 품질관리로 설계단계에서 수행하는 지하안전평가 단계에서 검토가 불가능한 사항은 표 5.2와 같이 분류할 수 있으며, 착공후지하안전조사 시 상세한 검토가 필요하다.

표 4.4 기타 주요검토항목 도출(착공후지하안전조사 시 검토 필요)

구 분	사고원인	주요검토항목
시공 및 건설사업관리	<ul style="list-style-type: none"> 계절적인 요인 (동절기, 해빙기) 	<ul style="list-style-type: none"> 지속적인 계측자료 분석 및 현장 기술자의 지반 굴착면 관찰을 통한 계절별 시공환경 변화에 대한 보완대책 수립
	<ul style="list-style-type: none"> 굴착 및 발파관리 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> 상세한 시공계획 및 안전관리를 통한 과굴착, 과발파, 과충격 등 방지
	<ul style="list-style-type: none"> 가시설 무단철거 등 시공관리부실(과실) 	<ul style="list-style-type: none"> 시공단계별 안정성 검증 (시공현황+계측연계분석)
	<ul style="list-style-type: none"> 현장조치미흡 	<ul style="list-style-type: none"> 시공 전 공종별 발생 가능한 위험요소 도출 및 응급 복구대책 수립 설계도면 및 시방규정에 준한 시공
	<ul style="list-style-type: none"> 설계도면무시 (미허가 공법변경) 	<ul style="list-style-type: none"> 설계도서에 근거한 상세 시공계획도 작성 설계 및 시공관련 전문기술자 의견 수렴을 통한 문제점 및 개선안 도출

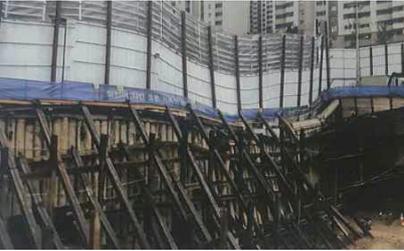
제 5 장 생애주기를 고려한 지하안전평가 업무가이드라인(안) 수립

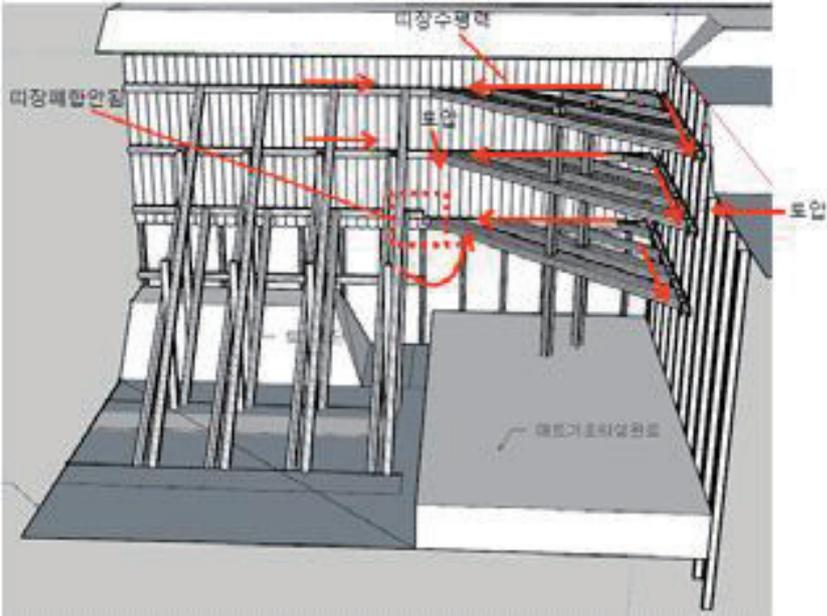
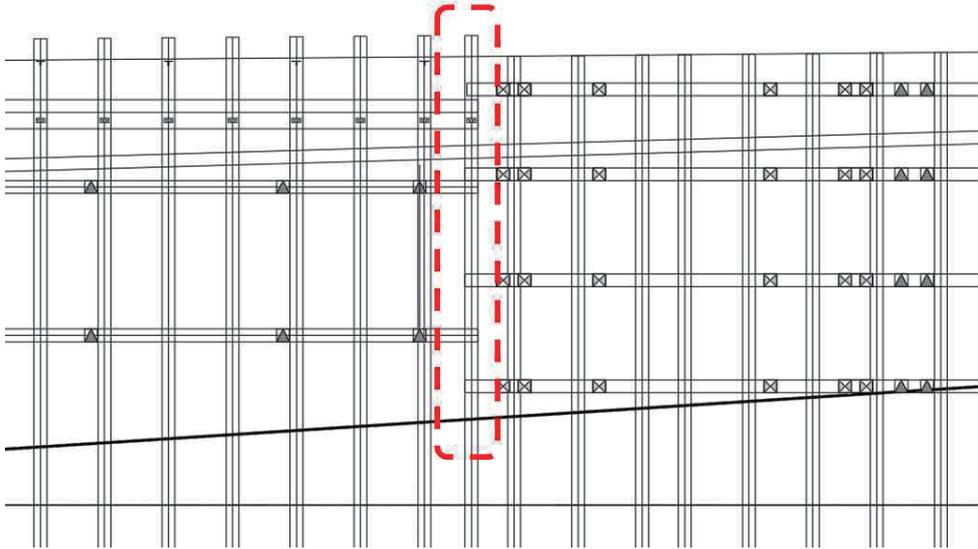
본 장에서는 굴착 및 터널공사에서 발생가능한 흠막이 굴착공법, 지지공법, 차수공법의 부적절한 선정 그리고 굴착계획 미흡 등으로 발생된 사건들에 대해 사고를 미연에 방지하기 위한 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 수립하여 제시하고자 한다.

지하안전평가 세부항목인 흠막이 굴착공법의 적절성, 터널공법의 적절성, 인접구조물 설정 및 현황, 지반조사 및 위치선정, 연약지반 굴착공법 선정, 설계지하수위 산정, 지하수 변화특성, 수치해석, 탄소성보해석, 계층계획, 지반침하 취약구간 선정, 차수그라우팅 계획, 배수계획에 대한 23가지의 주요 중점검토사항과 이와 관련한 관련기준을 제시하였다.

5.1 흙막이 굴착공법의 적절성

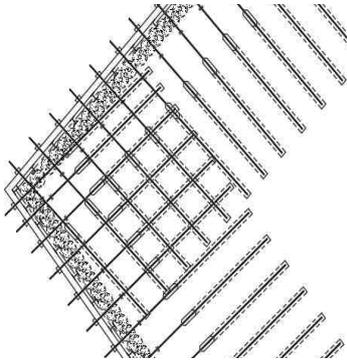
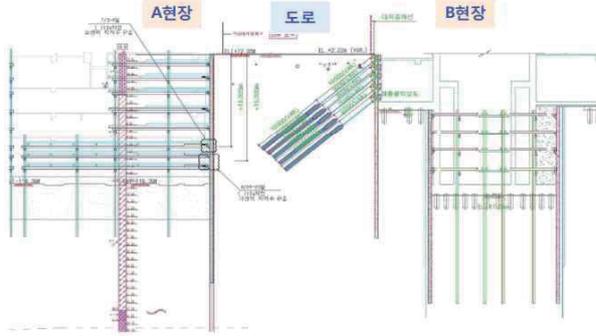
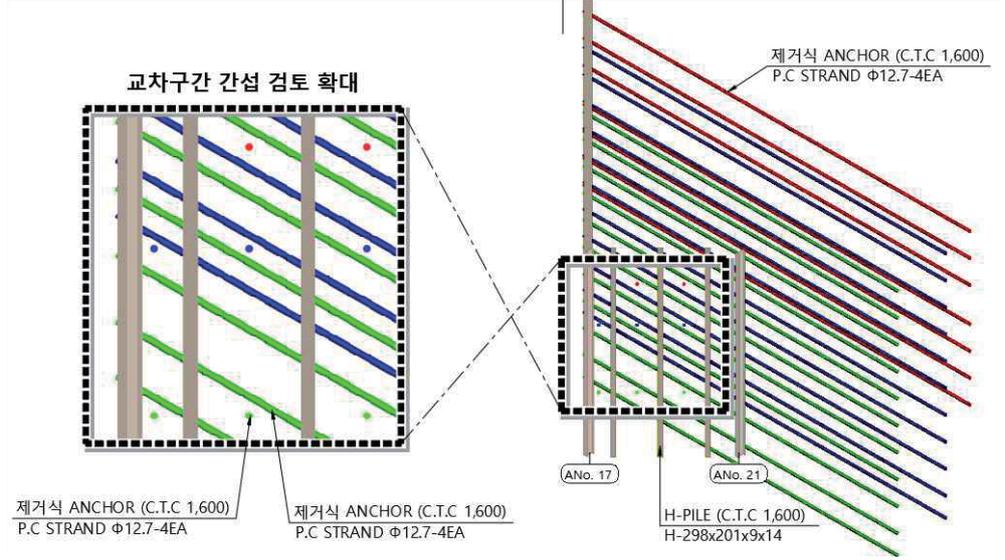
(1) 가시설구조체 불안정(띠장 미폐합)

구 분	내 용	
사고원인 및 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 띠장 미폐합 등 구조적으로 불리한 지보조건 선정 ① 코너버팀보(1~4단) 및 레이커(1~4단) 설치 완료된 상황에서 코너버팀보 4단 해체시 코너버팀보에 복합적인 응력 발생 ② 미폐합된 코너버팀보 띠장에 과도한 수평력 작용 ③ 코너버팀보 회전에 따른 흙막이벽체 붕괴 및 지반침하 발생 	
관 련 기 준	<p>가설흙막이 공사 KCS 21 30 00 (2022)</p>	<p>3.9.2 띠장(wlae)</p> <p>(2) 버팀대 띠장은 원칙적으로 전 구간에 걸쳐 연속재료로 설치되어야 하며 기타의 경우에는 설계도서에 준하여 시공하여야 한다</p> <p>(3) 띠장과 버팀대 혹은 지반앵커와의 접합부분은 국부좌굴에 대하여 안전하도록 철재를 덧대어 보강한다.</p> <p>(7) 우각부에 경사버팀대가 설치될 경우에는 경사버팀대 및 띠장은 측면방향력에 의한 밀림을 방지할 수 있는 구조로 설치되어야 한다.</p>
	<p>지하안전평 가서 표준매뉴얼 (2023. 07.)</p>	<p>3차원 수치해석의 적용범위는 다음과 경우를 우선으로 적용하며, 지반 또는 구조적인 취약구간을 고려하여 책임기술자 판단 및 지하안전평가 협의를 통해 추가적으로 적용할 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> - 평면 상 굴착면 내측으로 우각부 배면에 흙막이 가시설에 영향을 줄 수 있는 시설물이 존재하는 경우 - 굴착영향범위 내 사업부지와 인접한 동시굴착이 존재하여 평면상 2차원적 모델링이 불합리한 경우 - 굴착영향범위 내에 위치하는 철도시설물이 3차원 공간상 인접한 경우
	<p>가설흙막이 공사(전문) EXCS 21 30 00 (2021)</p>	<p>3.8 띠장(wale)</p> <p>(1) 띠장은 KCS 21 30 00에 따른다.</p>

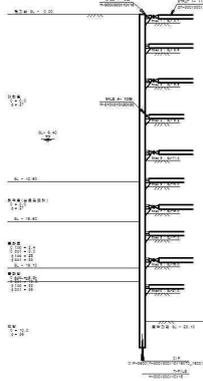
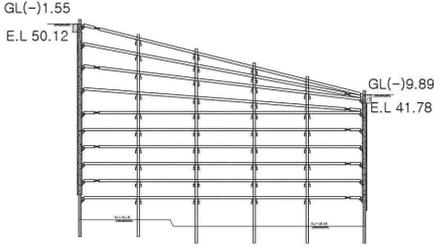
구 분	내 용
	 <p style="text-align: center;"><개요도></p>
<p>주요검토펙목</p>	 <p style="text-align: center;"><띠장 미폐합 구간></p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>현장여건에 적합한 지보조건 선정</u> • <u>지보공법 변경구간에 대한 지보연결상태 확인, 구조해석 및 시공계획 확인</u> • <u>흙막이 설계도면 중 굴착계획 평면도 및 전개도 상 띠장 미폐합 구간 확인</u> • <u>미폐합 구간에 대한 안전성 검토(3차원)를 통한 안전성 확보 여부 확인</u>

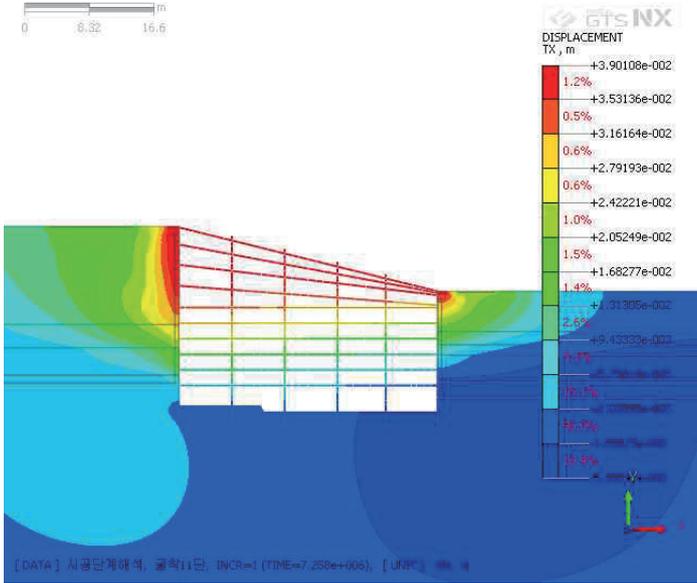
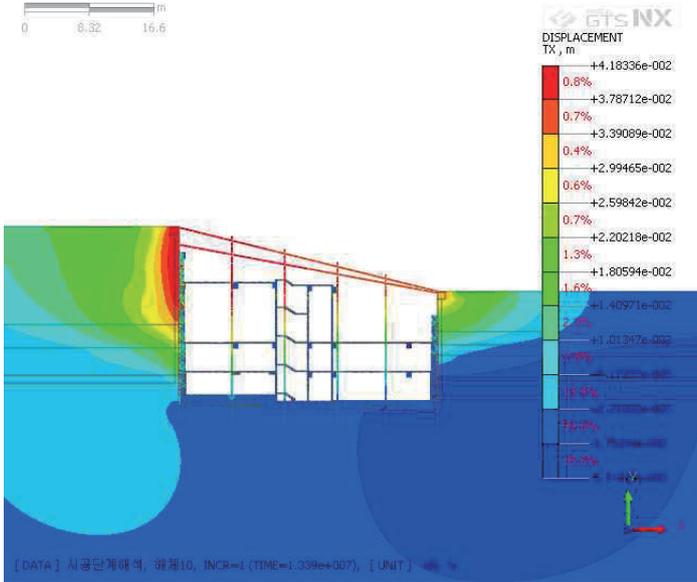
(2) 앵커 근접시공

구 분	내 용	
<p>사고발생원인 및 결과</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 우각부 정착장 미확보 앵커 중첩 설계 <ul style="list-style-type: none"> ① 우각부 구간 앵커 설치계획 중첩 ② 정착장 부족으로 소요앵커력 미확보 ③ 흠막이벽체 붕괴 및 지반침하 발생 	
	<ul style="list-style-type: none"> • 인근공사부지 흠막이 벽체와 앵커 정착장 최소 이격거리 미확보 <ul style="list-style-type: none"> ① 인근 공사현장과 앵커의 정착장 근접시공으로 최소 이격거리 미확보 ② 인접현장의 차수벽이 손상발생 ③ 차수성 손실로 지하수와 토사혼합물이 굴착면으로 유출됨에 따른 인근 도로 지반침하 발생 	
<p>관 련 기 준</p>	<p>그라운드 앵커 설계·시공 및 유지관리 매뉴얼 (국토교통부, 2021)</p>	<p>2.3.1 앵커의 배치</p> <p>가. 기존 구조물의 시공시 발생한 지반의 교란 및 되메우기 불량 등에 따른 앵커체가 설치될 부위의 느슨해짐 등의 영향과 함께 앵커의 설치위치에 따라서는 앵커천공기로 시공할 수 없는 경우도 있으므로 이에 대한 충분한 검토가 필요하다. 참고로 영국의 설계기준(BSI, 1989)에서는 앵커와 인접하는 기초, 지하구조물과는 수평거리로 3.0m 이상이 되도록 규정하고 있으므로 3.0m 이내로 하는 경우 인접구조물 등의 안전성에 대한 특별한 검토가 필요하다.</p>
	<p>가설흠막이 공사(전문) EXCS 21 30 00 (2021)</p>	<p>3.10 앵커(anchor) 설치</p> <p>(1) 앵커의 설치는 앵커가 설치되는 주변의 지장물에 영향을 주지 않아야 하며, 중요 지장물이 있을 경우는 반드시 해당분야 특급기술자 이상의 전문기술자의 안전검토를 받아 공사감독자의 확인을 받은 후 시행하여야 한다.</p>

구 분	내 용	
	 <p data-bbox="486 728 662 761"><우각부 중첩></p>	 <p data-bbox="981 728 1220 761"><정착부 근접시공></p>
<p data-bbox="183 1115 343 1149">주요검토향목</p>	 <p data-bbox="750 1467 1029 1500"><교차구간 3차원 검토></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • 우각부 구간 그라운드 앵커 시공계획 중 앵커중첩구간 확인 • <u>우각부 앵커 중첩구간은 3차원 검토를 통해 간섭 여부 확인</u> • 앵커 정착부와 인접구조물 간의 이격거리 확인 • <u>그라운드 어스앵커 정착장과 인접구조물 등과 3m 이상 이격 여부 확인</u> • <u>그라운드 어스앵커 정착장과 인접구조물 등과 이격거리를 3.0m 이내로 하는 경우 인접구조물 등의 안전성에 대한 특별한 검토 수록 여부 확인</u> 	

(3) 가시설구조체 불안전(편토압)

구분	내용		
<p>사고원인</p>			
	구조해석(좌측)	흙막이 계획	구조해석(우측)
	<p>• 굴착면 상부 지반고 차이로 인한 편토압 발생</p> <p>① 상부 지반고 차이로 인한 편토압이 발생</p> <p>② 주동토압이 발생하는 부분과 수동토압을 받는 부분과의 응력 불균형 발생</p>		
<p>관련 기준</p>	<p>가설흙막이 공사 KCS 21 30 00 (2022)</p>	<p>3.9.3 버팀대(strut), 경사버팀대 및 경사고임대(레이커, Raker)</p> <p>(9) 최상단에 설치되는 버팀대는 편토압의 우려가 있으므로 단절되지 않고 반대편 흙막이 벽까지 연장되어야 한다.</p> <p>3.17.4 되메우기</p> <p>(2) 버팀대(strut) 사이를 다짐하는 경우에는 다짐에 의한 충격이나 편토압의 영향을 받지 않도록 하여야 한다.</p>	
	<p>가설흙막이 공사(전문) EXCS 21 30 00 (2021)</p>	<p>3.9 버팀대(strut)</p> <p>(13) 최상단에 설치되는 버팀대는 반드시 반대편 흙막이 벽까지 연장되어야 하며, 중간 파일(pile) 등에 의해 단절되어서는 안 된다. 또한 이러한 경우에는 편토압에 대한 검토가 수행되어야 한다.</p>	

구분	내용
<p>주요검토항목</p>	<div style="text-align: center;">  <p><흙막이 가시설 굴착단계></p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p><경사 버팀보 해체단계></p> </div>
	<ul style="list-style-type: none"> • 유한요소해석을 통한 굴착단계 및 해체 단계 확인 • 경사버팀보 응력집중구간에 대한 안전성 검토(수평변위, 응력) 확인 • 편토압구간 구조해석 및 시공(지보설치 및 해체) 조건 확인 • 필요 시, 응력집중구간에 대한 흙막이 및 배면지반 보강 확인

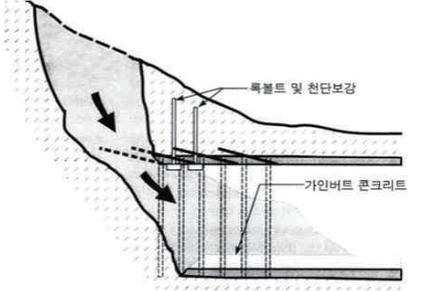
5.2 터널공법의 적절성

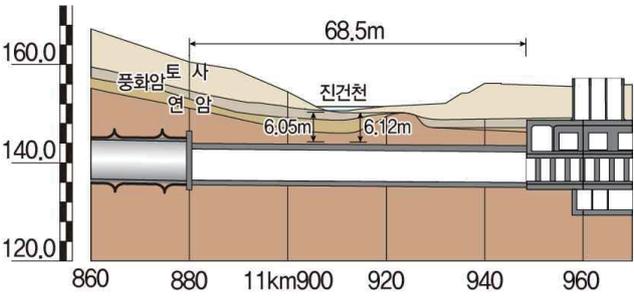
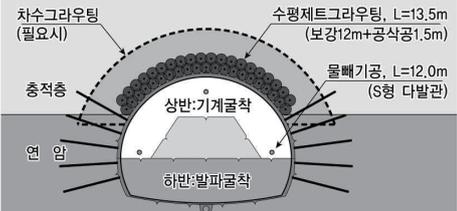
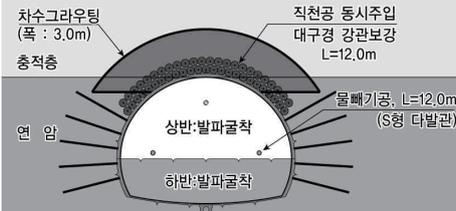
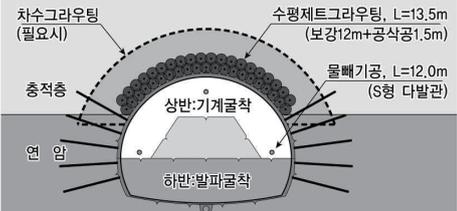
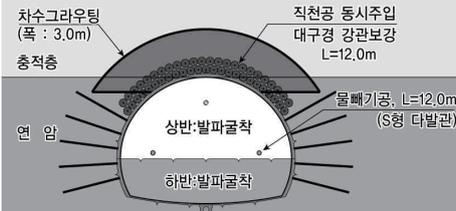
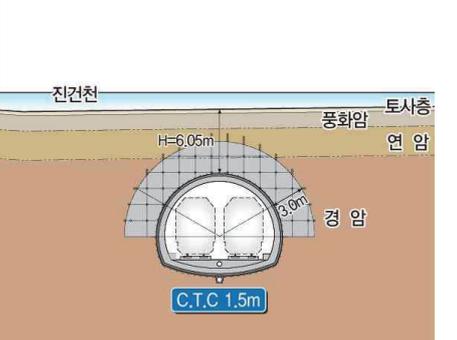
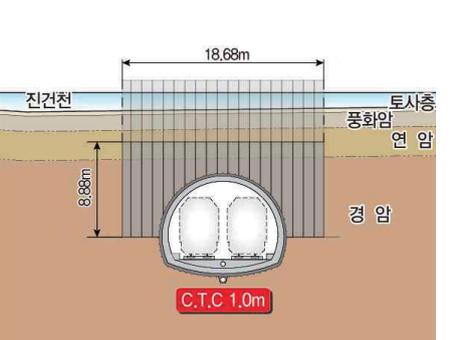
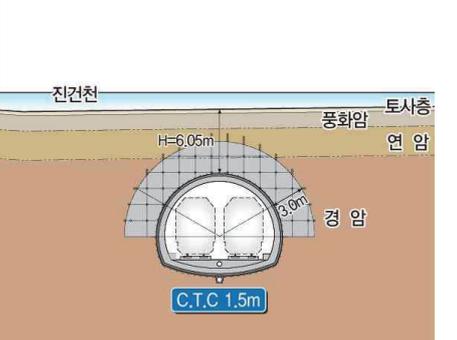
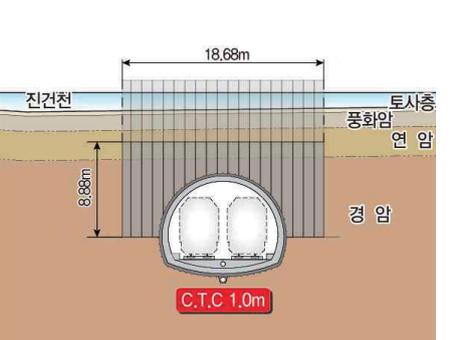
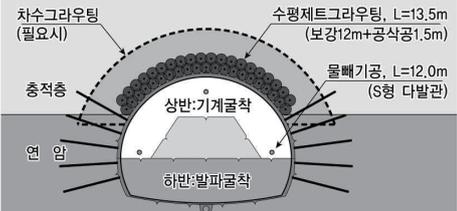
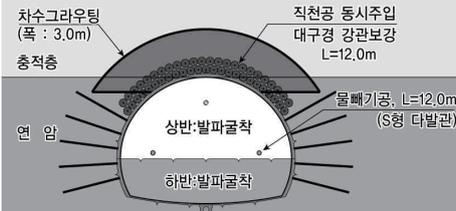
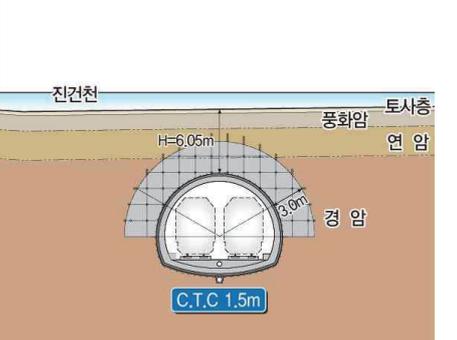
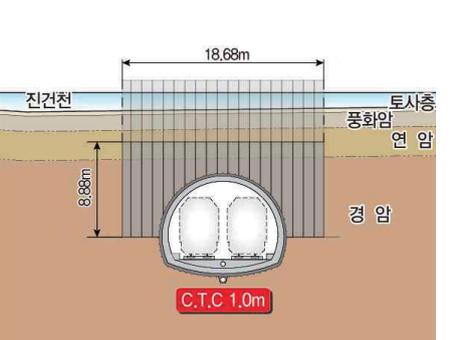
(1) 지반조건 대비 보강 부족

구 분	내 용	
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> • 터널공법 지보재 보강량 부족 ① 연약한 지반조건 및 지하수 유입에 의한 과다변위 발생 ② 막장관찰 자료조사 결과 붕괴지점의 막장면은 대체적으로 연암이 우세하며, 터널 천장부 및 중앙수직부에 심한 풍화암이 분포하고 막장면은 습윤상태 ③ 붕괴지점에서 약 7m 이격된 곳에서 실시한 추가시추조사 결과 터널 천장부로부터 1.3m 두께의 풍화토층이 있는 것으로 나타남 	
관련 기준	터널설계기준 KDS 27 00 00 (2018)	1.7. 해석과 설계원칙 (2) 해석 수행 시 다음 사항을 고려하여야 한다. ③ 해석 시 사용하는 지반특성치들은 해당 지반의 시험 결과를 토대로 추정된 값을 사용하여야 한다. 단, 공사의 규모 또는 현장 여건상 시험 결과를 얻을 수 없는 경우에는 경험이 풍부한 기술자의 판단에 의하여 유사 지반의 지반특성치를 제한적으로 준용할 수 있다. (3) 해석에 사용되는 모든 프로그램은 그 적합성이 확인되고 지반의 거동을 적절하게 모사(Simulation)할 수 있는 기능을 보유하여야 하며, 터널의 단계별 굴착을 재현할 수 있는 기능과 지반, 지보재의 변위, 응력 그리고 모멘트 등을 계산하여 터널설계 및 안정해석에 이용할 수 있어야 한다.
	터널굴착 (전문) EXCS 27 20 00 (2021)	3.1.1 시공일반 (4) 굴착방법은 원지반이 가지고 있는 지보능력을 최대한 활용할 수 있는 방법을 채택하여야 한다. (5) 굴착공법은 지반조사를 통한 암반분류 및 원지반의 자립성에 기초하여 선정하며, 보조공법의 적용도 수용할 수 있도록 결정하여야 한다. (6) 굴착은 설계도서에 따라 시행하되 시험시공 등을 통해 현장여건에 적합하게 굴착공법, 굴진장 등을 변경하여 시행할 수 있으나 사전에 공사감독자에게 승인을 받아야 한다. (7) 굴착은 설계도서에 제시된 시공순서를 참고하되 현장여건에 적합하게 작성된 시공계획서에 따라 진행하여야 하며, 과도한 지압, 파쇄대, 용수 등의 이유로 인해 굴착방법을 변경할 필요가 생긴 경우에는 사전에 공사감독자에게 보고하여 확인을 받아야 한다.

구 분	내 용		
주요검토항목	<ul style="list-style-type: none"> 표준지보패턴 설계흐름 		
	단 계	검 토 내 용	설계흐름도
	현황분석	<ul style="list-style-type: none"> 터널단면, 지반조건, 주변구조물 현황 등을 분석 지보패턴 설계를 위한 기초자료로 활용 	
	지보재선정	<ul style="list-style-type: none"> 도심지 터널의 특성을 고려한 지보재 적용 검토 안정성 및 시공성이 검증된 친환경적인 지보재 선정 	
	사례분석	<ul style="list-style-type: none"> 기존사례 분석을 통해 실제 경험을 설계에 반영 이론적·경험적 방법에 의한 지보량 검토 	
	지보패턴 결정	<ul style="list-style-type: none"> 터널별로 특수한 현황을 고려하고 개선사항을 반영 각 터널별로 현황에 적합한 최적의 지보재량 결정 	
	지보패턴 적용	<ul style="list-style-type: none"> 지반조건, 주변현황 등을 반영하여 지보패턴 적용 수치해석을 통해 적용 지보패턴의 적정성을 검증 	
	Feed Back	<ul style="list-style-type: none"> 공사 중 계측을 통해 지보패턴의 적정성 확인 계측결과를 반영하여 필요시 지보패턴 변경 	
	<ul style="list-style-type: none"> 보조공법 적용계획 		
	구 분	휘폴링	소구경 강관보강 그라우팅
개념도			
특징	<ul style="list-style-type: none"> 국부적 낙반방지 	<ul style="list-style-type: none"> 상부 하중경감 및 아치효과 	<ul style="list-style-type: none"> 강관규격 확대로 강성증대
<ul style="list-style-type: none"> 지반조건에 따른 공법 선정 확인 지반조건에 적합한 지보량 설계 내용 확인 			

(2) 저토피구간 공법 부적절

구분	내용	
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> • 저토피 구간 미고려로 인한 상부토사 붕괴 ① 저토피 구간의 경우, 지반 아치현상의 감소 또는 소멸로 인해 지반이완 범위가 지표면까지 확장되는 경우 발생 ② 터널 갱구부의 인장균열, 저토피 상부의 일시붕락 등을 초래 ③ 상대적으로 큰 규모의 사고 발생 가능 	
관련기준	<p>터널설계기준 KDS 27 00 00 (2018)</p>	<p>2.2.2 지반조사</p> <p>(5) 해석 수행 시 다음 사항을 고려하여야 한다.</p> <p>⑥ 터널 갱구부 및 저토피 구간에서는 충분한 시추조사 및 물리탐사 등을 시행하여 지층 변화를 상세히 파악하여야 한다.</p>
	<p>터널 설계기준 (2016)</p>	<p>10.2 갱구부의 설계</p> <p>(2) 갱구부는 갱구부 깎기 최소화를 위하여 특수한 지형 및 지질 조건을 제외하고는 갱구부 상단 토피 3~5m 또는 암토피고 1~2m 확보되는 지점에 갱구부를 형성하는 것을 표준으로 한다.</p>

구 분	내 용																			
<p>주요검토항목</p>	  <p style="text-align: center;">〈저토피 개요도〉</p>																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="368 813 488 869">구 분</th> <th data-bbox="488 813 963 869">수평제트그라우팅</th> <th data-bbox="963 813 1442 869">직천공 대구경강관보강</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="368 869 488 1093">개요도</td> <td data-bbox="488 869 963 1093">  </td> <td data-bbox="963 869 1442 1093">  </td> </tr> <tr> <td data-bbox="368 1093 488 1189">특 징</td> <td data-bbox="488 1093 963 1189"> <ul style="list-style-type: none"> 지층을 치환하여 구근을 형성하므로 보강효과 확실 </td> <td data-bbox="963 1093 1442 1189"> <ul style="list-style-type: none"> 천공과 동시에 강관사입 및 주입 가능 </td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">〈통과구간 보강공법 적용〉</p>	구 분	수평제트그라우팅	직천공 대구경강관보강	개요도			특 징	<ul style="list-style-type: none"> 지층을 치환하여 구근을 형성하므로 보강효과 확실 	<ul style="list-style-type: none"> 천공과 동시에 강관사입 및 주입 가능 	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="368 1283 488 1339">구 분</th> <th data-bbox="488 1283 963 1339">갱내그라우팅</th> <th data-bbox="963 1283 1442 1339">지상 그라우팅</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="368 1339 488 1693">개요도</td> <td data-bbox="488 1339 963 1693">  </td> <td data-bbox="963 1339 1442 1693">  </td> </tr> <tr> <td data-bbox="368 1693 488 1765">특 징</td> <td data-bbox="488 1693 963 1765"> <ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 보통 </td> <td data-bbox="963 1693 1442 1765"> <ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 우수 </td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">〈차수그라우팅 선정〉</p>	구 분	갱내그라우팅	지상 그라우팅	개요도			특 징	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 보통 	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 우수
	구 분	수평제트그라우팅	직천공 대구경강관보강																	
개요도																				
특 징	<ul style="list-style-type: none"> 지층을 치환하여 구근을 형성하므로 보강효과 확실 	<ul style="list-style-type: none"> 천공과 동시에 강관사입 및 주입 가능 																		
구 분	갱내그라우팅	지상 그라우팅																		
개요도																				
특 징	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 보통 	<ul style="list-style-type: none"> 차수그라우팅 신뢰도 우수 																		
<ul style="list-style-type: none"> • 공법선정 및 시공계획 확인 • 현황 및 지반조건을 고려한 적절한 보강공법 선정 확인 																				

5.3 인접구조물 설정 및 현황

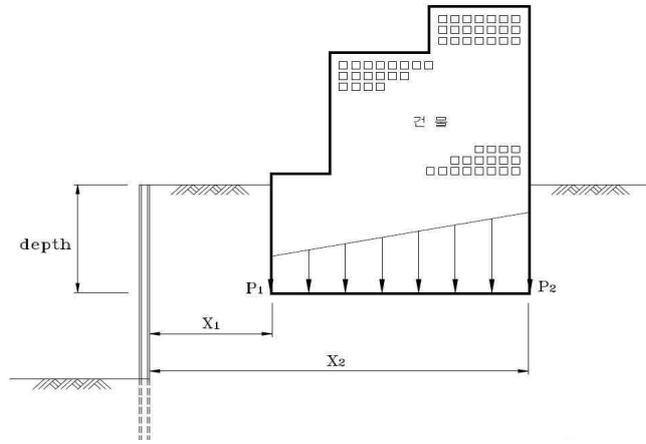
(1) 인접구조물 상태취약(하중재하조건 과소적용)

구분		내용	
사고발생원인 및 결과		<ul style="list-style-type: none"> • 흠막이 배면 활동파괴 ① 대상구간은 지질조건이 매립토와 풍화토의 심도가 깊게 분포, ② 지하공동 및 단층과쇄대 존재 등 배면 건물의 지반조건은 설계 시 예측한 지반조건에 비해 상대적으로 불량 ③ 설계 시 지반조건보다 불리한 조건에서 지반안전성 재검토 미수행으로 인해 활동파괴에 의한 흠막이 벽체 붕괴 	
관련기준	가설흠막이공사 KCS 21 30 00 (2022)	<p>1.7.1 설계외력</p> <p>(1) 지반굴착 시 가설흠막이 벽체에 작용하는 설계외력은 배면토 자중에 의한 토압, 지하수위에 의한 수압, 장비하중 등의 상재하중, 굴착영향 범위 내에 있는 인접건물하중, 인접도로를 통행하는 교통하중 등이며, 이외에 벽체에 작용할 수 있는 하중을 포함하여야 한다.</p>	

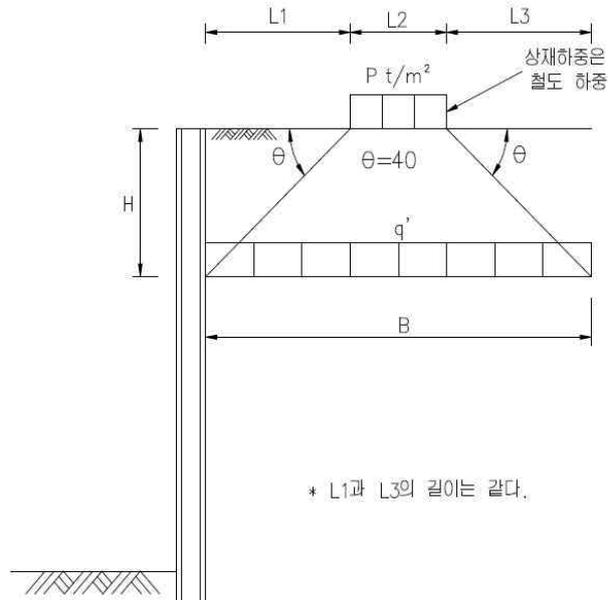
구분		내용	
주요검토항목		<ul style="list-style-type: none"> • SUNEX [LOAD] (분포하중의 추가) LOAD depth x1 p1 x2 p2 multiplier <ul style="list-style-type: none"> • depth : 분포하중이 작용하는 깊이 • x1, x2 : 벽체로부터 떨어진 거리 • p1, p2 : 그림 참조 (하향력일때 +) (t/m2, kN/m2) • multiplier : 지중하중 계산결과에 곱할 계수 (1~2의 범위) ※ 건물 등으로 인한 하중이 작용할 때 토류벽면에 미치는 지중응력(수직성분)을 계산하여 현재까지의 과재하중에 추가한다(일본 지반공학 핸드북 P.108 참조 $\sigma_z = \frac{2pz^3}{\pi R^4}$). 	

주요검토항목

① 건물하중이 작용할 때



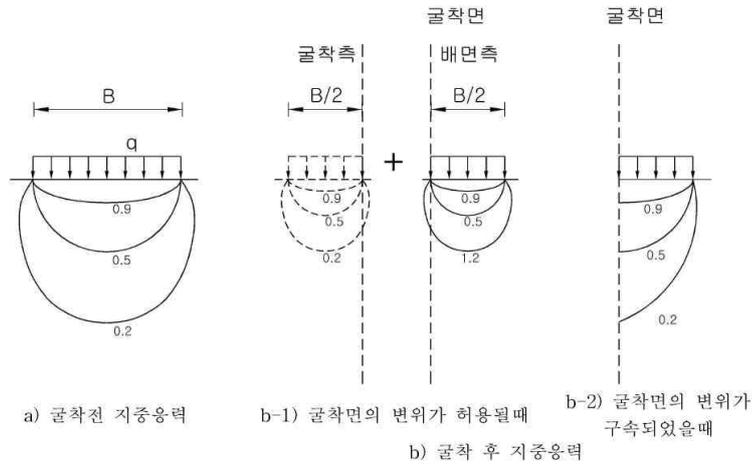
② 철도하중이 작용할 때



- 가시설벽체 주변에 철도가 위치할 경우 선로에 작용하는 하중이 실질적으로 가시설 벽체에 작용하는 위치를 산정하는 것이 중요하다.
(계산방법 ; $H = L1 \times \tan \theta$, $B = L1 + L2 + L3$, $q' = (P \times L2) / B$
 $\therefore \text{depth} = H$, $X1 = 0$, $p1 = q'$, $X2 = (L1 + L2 + L3)$, $p2 = q'$)
- Bousinesq 식에 의하여 하중이 흙막이 벽체에 미치는 수직하중을 계산하고 그 수직하중에 토압계수를 곱하여 토압에 가산한다.

- SUNEX
 - multiplier(곱할계수)

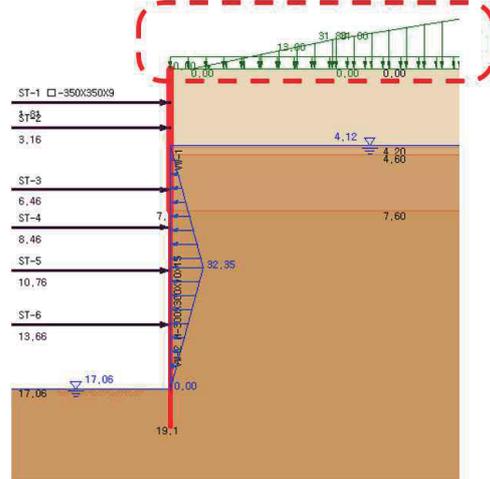
주요검토항목



그림은 등분포하중의 경우 지중응력을 나타낸다. 그림 a)는 하중 q, 하중작용폭이 B인 경우 지중 응력을 나타내며 그림에서 보이는 수치×q 크기만한 지중응력 증가가 있다. 그림 b-1)은 굴착으로 인하여 그 반이 없어지고 반만 작용할 경우 지중응력으로 굴착전의 1/2이다. 그림 b-2)는 굴착면의 수평변위가 구속되었을 때의 지중응력이며 수치의 크기는 굴착전과 마찬가지로이며 그림의 반쪽만 있다. SURCHARGE 하중의 경우 굴착측만 있음에도 굴착면의 변위가 구속된 것으로 가정하여 그림 b-1)과 같이 작용하는 것으로 하고 있다. b-2)는 Bousinesq의 식으로 계산한 값의 2배가 된다. 프로그램에서는 굴착면의 구속여부에 따라 그림 b-1(계산한 값의 1배)부터 b-2(계산한 값의 2배)를 적용 할 수 있도록 multiplier값을 입력하게 하였다. 생략 시 1.0 적용.

- Midas GEO XD

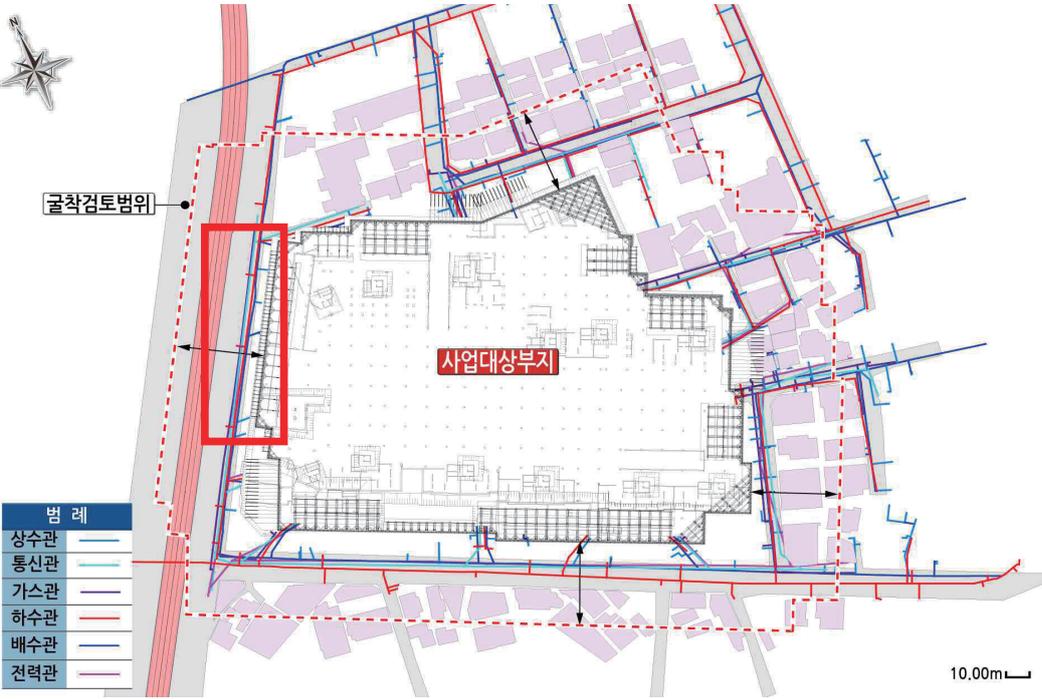
상재하중조건 적용



- 흙막이 배면 비탈면 구간 상재하중 조건 및 구조계산 확인

(2) 인접 상·하수도 누수로 인한 공동발생

구 분	내 용	
<p>사고원인</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 상수관로 파손으로 토사유실에 기인한 지반침하 <ul style="list-style-type: none"> ① 굴착에 의한 영향으로 지하매설물에 손상 발생 ② 상수 송수압력에 의한 압력수두가 상부 토피에 작용함에 따라 지표까지 세굴현상 발생 ③ 지표 침하 혹은 지반함몰 발생 • 하수관로 파손으로 토사유실에 기인한 지반침하 <ul style="list-style-type: none"> ① 굴착에 의한 영향으로 지하매설물에 손상 발생 ② 하수관로 손상부로 지하수 및 토사혼합물 유실 ③ 지표 침하 혹은 지반함몰 발생 <p>* 노후 매설관로(30년 이상)의 경우, 파손 가능성 높음</p>	
<p>관 련 기 준</p>	<p>가설 흙막이 설계기준 KDS 21 30 00 (2022)</p>	<p>1.6 검토사항</p> <p>(1) 가설흙막이 벽과 지지구조의 형식에 대한 설계 시 지형, 지반조건, 지하수 처리, 교통하중, 인접 건물하중, 작업 장비하중 등 굴착면의 붕괴를 유발시키는 인자뿐만 아니라, 지반변형에 의해 야기될 수 있는 주변 구조물 및 지하 매설물의 피해 가능성, 공사비, 공기 등의 경제성 및 시공성 영향 가능성, 환경 등의 민원발생 가능성 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 즉, 가설흙막이 벽의 안정성, 지지구조의 안정성, 굴착저면의 안정성에 대한 검토는 필수항목이며, 주변 구조물에 대한 안정성 검토와 지하수 처리에 관한 문제도 반드시 고려하여야 한다.</p> <p>(5) 가설흙막이 구조물 설계에서는 굴착 단계별로 벽체자체의 안정성을 검토뿐만 아니라 해체 시 안정성도 검토하고 지하매설물과 인접구조물에 미치는 영향을 검토하여야 한다.</p>
	<p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023)</p>	<p>3.2.3 지하매설물 현황</p> <ul style="list-style-type: none"> • 검토범위 내에 위치하는 지하매설물의 종류, 위치 및 심도 등 지하매설물 현황자료를 조사함

구 분	내 용																																										
주요검토항목	 <p style="text-align: center;"><지하매설물도></p>																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>구 분</th> <th>규 격</th> <th>설치심도(m)</th> <th>최소이격거리(m)</th> <th>준공연도</th> <th>관계기관</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상수관로</td> <td>D13-D200</td> <td>0.60~1.00</td> <td>2.34</td> <td>1973~2017</td> <td>OOOO 수도사업소 (000-0000-0000)</td> </tr> <tr> <td>하수관로</td> <td>D300-D800</td> <td>0.10~5.80</td> <td>8.80</td> <td>1982</td> <td>OOOO 건설과 (000-0000-0000)</td> </tr> <tr> <td>배수관로</td> <td>D80~150</td> <td>1.40~1.91</td> <td>8.00</td> <td>1982</td> <td>OOOO 건설과 (000-0000-0000)</td> </tr> <tr> <td>통신관로</td> <td>D10-D100</td> <td>0.95~1.00</td> <td>3.21</td> <td>1993~2002</td> <td>OOOO지사 선로과 (000-0000-0000)</td> </tr> <tr> <td>가스관로</td> <td>D50-D200</td> <td>1.00~1.20</td> <td>11.27</td> <td>1989~2018</td> <td>OOOO 굴착공사지원센터 (000-0000-0000)</td> </tr> <tr> <td>전력관로</td> <td>D100</td> <td>0.80~1.50</td> <td>2.34</td> <td>2009</td> <td>OOOO본부 배전운영부 (000-0000-0000)</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><지하매설물 정보></p>	구 분	규 격	설치심도(m)	최소이격거리(m)	준공연도	관계기관	상수관로	D13-D200	0.60~1.00	2.34	1973~2017	OOOO 수도사업소 (000-0000-0000)	하수관로	D300-D800	0.10~5.80	8.80	1982	OOOO 건설과 (000-0000-0000)	배수관로	D80~150	1.40~1.91	8.00	1982	OOOO 건설과 (000-0000-0000)	통신관로	D10-D100	0.95~1.00	3.21	1993~2002	OOOO지사 선로과 (000-0000-0000)	가스관로	D50-D200	1.00~1.20	11.27	1989~2018	OOOO 굴착공사지원센터 (000-0000-0000)	전력관로	D100	0.80~1.50	2.34	2009	OOOO본부 배전운영부 (000-0000-0000)
	구 분	규 격	설치심도(m)	최소이격거리(m)	준공연도	관계기관																																					
상수관로	D13-D200	0.60~1.00	2.34	1973~2017	OOOO 수도사업소 (000-0000-0000)																																						
하수관로	D300-D800	0.10~5.80	8.80	1982	OOOO 건설과 (000-0000-0000)																																						
배수관로	D80~150	1.40~1.91	8.00	1982	OOOO 건설과 (000-0000-0000)																																						
통신관로	D10-D100	0.95~1.00	3.21	1993~2002	OOOO지사 선로과 (000-0000-0000)																																						
가스관로	D50-D200	1.00~1.20	11.27	1989~2018	OOOO 굴착공사지원센터 (000-0000-0000)																																						
전력관로	D100	0.80~1.50	2.34	2009	OOOO본부 배전운영부 (000-0000-0000)																																						
<ul style="list-style-type: none"> • 인접 매설관로에 대한 종류, 이격거리, 설치연도 등을 확인 • 노후화된 관로가 위치하는 경우, 지반취약구간 등으로 선정하여 지하안전확보방안 제시 																																											

(3) 인접구조물 상태취약(취약구조물)

구 분	내 용	
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> • 인접 취약구조물 붕괴 <ul style="list-style-type: none"> ① 굴착영향 범위 내 취약 인접구조물 미설정 ② 취약 인접구조물의 안전성 검토 누락 ③ 흙막이 설치 전 석축 하단 정지작업 중 배면 취약 구조물 붕괴발생 	
관 련 기 준	<p>가설 흙막이 설계기준 KDS 21 30 00 (2022)</p>	<p>1.6 검토사항</p> <p>(1) 가설흙막이 벽과 지지구조의 형식에 대한 설계 시 지형, 지반조건, 지하수 처리, 교통하중, 인접 건물하중, 작업 장비하중 등 굴착면의 붕괴를 유발시키는 인자뿐만 아니라, 지반변형에 의해 야기될 수 있는 주변 구조물 및 지하 매설물의 피해 가능성, 공사비, 공기 등의 경제성 및 시공성 영향 가능성, 환경 등의 민원발생 가능성 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 즉, 가설 흙막이 벽의 안정성, 지지구조의 안정성, 굴착저면의 안정성에 대한 검토는 필수항목이며, 주변 구조물에 대한 안정성 검토와 지하수 처리에 관한 문제도 반드시 고려하여야 한다.</p> <p>(5) 가설흙막이 구조물 설계에서는 굴착 단계별로 벽체자체의 안정성을 검토뿐만 아니라 해체 시 안정성도 검토하고 지하매설물과 인접구조물에 미치는 영향을 검토하여야 한다.</p>
	<p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023)</p>	<p>3.2.2 구조물 현황</p> <ul style="list-style-type: none"> • 검토범위 내 위치하여 굴착으로 인해 영향을 받을 가능성이 있는 구조물의 현황을 수록함
	<p>가설흙막이 공사(전문) EXCS 21 30 00 (2021)</p>	<p>3.1 시공준비</p> <p>(3) 주위 건물 및 기타 시설물의 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 굴착 전에 주위 건물과 지상 위에 설치된 시설물에 대해 철저히 조사하여 균열상태 · 균열의 크기 · 시설물의 상태 · 시설물의 안전도 등 굴착 전의 상태를 정확히 기록하고, 굴착 후 변동사항을 비교할 수 있도록 기록대장을 작성하여 공사감독자의 승인을 득한 후 보존하여야 한다.

구분	내용
<p>주요검토항목</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • 검토범위 내 위치하는 구조물의 노후 연도를 확인 • 특히, 석축과 같이 굴착공사로 인해 영향을 미칠 우려가 있는 구조물의 경우 지반취약구간 등으로 선정하여 지하안전확보방안 제시

5.4 지반조사 및 위치선정

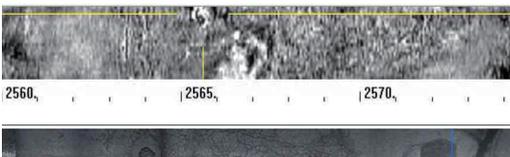
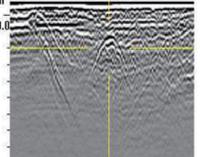
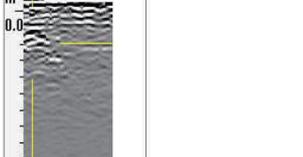
(1) 설계대비 불리한 지반조건(지반조사 부실)

구분	내용	
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조사 미흡으로 설계대비 불리한 지반조건 ① 층적층이 발달한 불량한 지층 ② 지반조사 간격 초과 ③ 시추 누락구간의 지층경계와 암질의 변화 파악 시 한계 발생 	
관련기준	<p>「지하안전관리 업무지침」 (2022)</p>	<p>제1절 지하안전영향평가서 제9조(지반 및 지질 현황)</p> <p>지반 및 지질 현황은 법 제43조에 따른 지하정보통합체계, 「국가공간정보 기본법」 제9조 및 제28조에 따른 국가공간정보체계(국토지반정보 포털시스템), 지반 및 지질조사보고서, 기본 및 실시설계자료 등의 기존 자료와 시추조사, 투수시험, 지하물리탐사 등의 현장조사 결과를 바탕으로 작성한다. 이 경우 가장 최근의 자료를 활용하고 지하안전영향평가서의 해당 내용 하단에 인용 문헌 또는 그 출처를 표기하여야 한다.</p>
	<p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p>	<p>4.1.1 지반조사 위치 선정</p> <ul style="list-style-type: none"> • 굴착 <ul style="list-style-type: none"> - 시추조사 간격은 30~50m 이하를 원칙으로 하되 현장여건을 고려하여 가감은 가능 하나 시추 간격이 50m 이상일 경우에는 대상사업의 특성 및 지반조건 등을 고려한 당위성을 언급하여야 함 • 터널 <ul style="list-style-type: none"> - 일반구간의 시추조사 간격은 100m 이하, 위험구간(지반침하 취약구간)의 시추조사 간격은 50m 이하를 원칙으로함(위험구간의 정의와 대상은 본 매뉴얼 7.1.1 계측기 설치계획의 내용을 따름)
	<p>도심지 소규모 굴착 건축공사장 안전관리 매뉴얼 (2016.11.)</p>	<p>[2] 자치구 인·허가 담당자 확인사항</p> <ul style="list-style-type: none"> - 착공 신고 전 지반조사가 필히 수행되어야 하며, 설계도서에 인접 구조물을 고려한 굴착안정성 검토 여부를 확인한다.

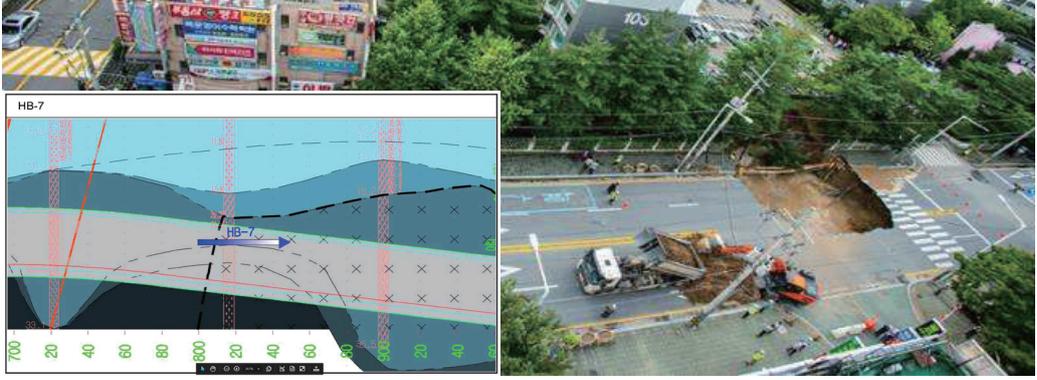
구 분	내 용												
주요검토항목	지반조사 위치 선정		공종별 최소 수량 및 간격										
			<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">구 분</th> <th style="text-align: center;">시추 간격</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">건 축</td> <td>• 구조물 규모에 따라 30~50m 간격</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">개착박스</td> <td>• 개소당 1공</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">터널 도심지 (개착)</td> <td>• 100m 간격 주요 구조물 • 수직구, 정거장, 집수정 환기구 등은 개소당 1공</td> </tr> </tbody> </table>			구 분	시추 간격	건 축	• 구조물 규모에 따라 30~50m 간격	개착박스	• 개소당 1공	터널 도심지 (개착)	• 100m 간격 주요 구조물 • 수직구, 정거장, 집수정 환기구 등은 개소당 1공
	구 분	시추 간격											
	건 축	• 구조물 규모에 따라 30~50m 간격											
	개착박스	• 개소당 1공											
터널 도심지 (개착)	• 100m 간격 주요 구조물 • 수직구, 정거장, 집수정 환기구 등은 개소당 1공												
구 분	조사내용 및 시험시 주의사항	지하 안전 평가	소규모 지하 안전 평가	최소수량									
현장 조사	시추조사	<ul style="list-style-type: none"> • 지층확인 및 시료채취, 암반분류 선정 • 기반암 또는 굴착저면 깊이 이상 수행 	○	○	3공								
현장 시험	표준관입시험	<ul style="list-style-type: none"> • N치로부터 지반의 강도 및 변형특성 파악 	○	○	시추공별 풍화암까지 1m 간격 3공 (시추조사와 동일)								
	공내지하수위 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수위 분포현황을 파악 • 지하수위는 안정기까지(24hr, 48hr, 72hr) 측정 	○	○	(시추조사와 동일)								
	현장투수시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지반(토사)의 투수계수 산정 • 지반의 투수성을 대표하는 구간에서 최소 1회 수행 	○	○	지층별 1회								
	현장수압시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지반(암반)의 투수계수 산정 • 지반의 투수성을 대표하는 구간에서 최소 1회 수행 	○	○	지층별 1회								
	공내전단시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지반 강도정수 산정 • 지반의 특성을 확인 할 수 있도록 지층별로 수행 	○	○	지층별 1회								
	공내재하시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지반 변형계수 산정 • 지반의 특성을 확인 할 수 있도록 지층별로 수행 	○	○	지층별 1회								
	양수시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수 유동변화 및 유입량 예측 	○	-	1회								
	지하수유향 · 유속시험	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수의 유동방향과 유동속도 측정 	○	-	1회								
	순간충격시험	<ul style="list-style-type: none"> • 저류계수, 투수량계수, 비산출량 등 파악 	○	-	1회								
지하 물리 탐사	GPR (지표레이더탐사)	<ul style="list-style-type: none"> • 도로 하부 공동 및 지하매설물 위치파악 	○	-	검토범위 내 모든 도로								
	전기비저항탐사	<ul style="list-style-type: none"> • 전기비저항 분포를 파악하여 지질구조대, 연약대, 파쇄대의 위치 및 규모를 파악 	○	-	굴착 매면 측선								
	탄성파탐사	<ul style="list-style-type: none"> • 인위적인 탄성파를 이용하여 지층분포 파악 	○	-	굴착 매면 측선								
<p>• <u>지하안전관리 업무지침 및 지하안전평가서 표준매뉴얼에 따른 지반조사 항목, 위치, 간격 및 항목 확인</u></p>													

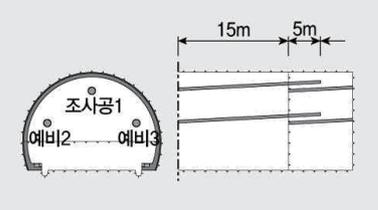
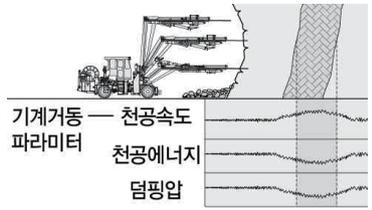
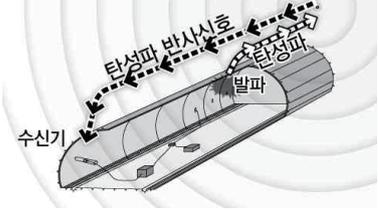
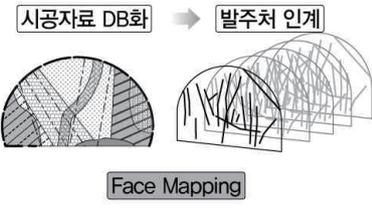
(2) 지하공동으로 인한 지반함몰

구분	내용	
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> • 지하공동 발생으로 인한 지반함몰 발생 <ul style="list-style-type: none"> - 토립자의 이동형태에 따라 (a) 매립재 공간유입형, (b) 구조물·공사장 배면유입형, (c)상하수관 유입형 및 (d) 매설관 하부 공간유입형(인위적 요인) - 지하수와 석고층, 석회암 등으로 구성된 기반암이 물과의 접촉으로 인하여 용해되어 지표층이 침하되거나 함몰되는 현상(자연적 요인) 	
관 련 기 준	지하안전관리 업무지침 (2022)	<p>제1절 지하안전영향평가서 제9조(지반 및 지질 현황) 지반 및 지질 현황은 법 제43조에 따른 지하정보통합체계, 「국가공간정보 기본법」 제9조 및 제28조에 따른 국가공간정보체계(국토지반정보 포털시스템), 지반 및 지질조사보고서, 기본 및 실시설계자료 등의 기존 자료와 시추조사, 투수시험, 지하물리탐사 등의 현장조사 결과를 바탕으로 작성한다. 이 경우 가장 최근의 자료를 활용하고 지하안전영향평가서의 해당 내용 하단에 인용 문헌 또는 그 출처를 표기하여야 한다.</p>
	지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)	<p>4.2.4 지하물리탐사</p> <ul style="list-style-type: none"> • 지표투과레이더 탐사는 도로하부의 지하매설물 및 공동조사 결과를 수록함
	착공후 지하안전 조사서 표준매뉴얼 (2023.07.)	<p>4.2 지하물리탐사</p> <p>4.2.2 지하물리탐사 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> • 착공 전(지하안전평가) 수행한 지표투과레이더 탐사 등의 지하물리탐사 결과를 바탕으로 착공후지하안전조사 시 공동발생 구역을 위주로 추적 관리한 결과를 수록함 <p>4.2.3 지하물리탐사 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> • 착공 전·후 시행한 지하물리탐사를 비교 검토하여 착공전 확인된 지하공동 및 지반이완 구간에 대해 굴착에 따른 영향 및 안전성을 분석하여 수록함

구 분	내 용											
	소	OO 로		치	차선	중앙선 기준 1차로	규모	도로횡단 폭(cm)	57	분석	번호	CN
	방향	OO 사거리 → OO 사거리		지점		멘홀 전방 18.41m	규모	바닥 깊이(cm)	-	공통	등급	우선
평면도	공동 위치도						공동 주변사진					
												
							(상단) 탐사영상 평면 / (하단) 노면영상	탐사영상 수직단면		공동확인 내시경		
												
주요검토항목	<공동조사서>											
												
	<육안조사 결과>											
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>지하물리탐사를 통한 지하공동 확인 및 관계기관 제출 여부 확인</u> • <u>검토범위 내 도로에 대한 GPR탐사 결과에 따라 의심 공동이 있는 구간은 착공 전 승인기관 또는 도로관리기관에 GPR탐사 결과를 제출하도록 지하안전평가서에 명시</u> • <u>공동의심구간에 대한 지하매설관로 연관성을 분석하여 지하매설물 파손 등에 따라 누수 발생여부를 확인</u> • <u>착공후지하안전조사 시 지하안전평가서에 기재된 GPR탐사 시기에 따른 굴착 전·후 GPR탐사 결과를 비교 분석하여 굴착으로 인한 공동의심 구간의 확장, 추가 등에 대한 검토를 수행하도록 지하안전평가서에 계획 수립 여부 확인</u> 											

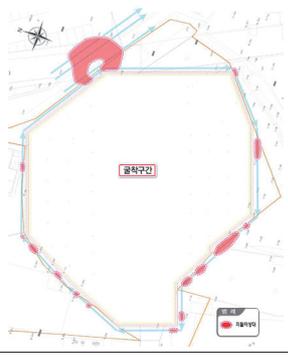
(3) 설계대비 불리한 지반조건(풍화대, 파쇄대, 불리한 절리방향)

구 분	내 용
<p>사고원인</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p>• 터널 굴착 시 지반취약구간의 조우에 의해 터널 붕락에 의한 땅꺼짐 발생</p>
<p>터널설계기준 KDS 27 00 00 (2018)</p> <p>관 련 기 준</p> <p>터널굴착 (전문) EXCS 27 20 00 (2021)</p>	<p>2.2 조사</p> <p>2.2.4 시공 중 보완조사</p> <p>- 시공 중 보완조사의 목적은 굴진면 전방과 굴진면주변의 지반상태를 파악하는 데 있으며 시공 중 관찰되는 노출된 지반상태를 분석하여 예기치 않았던 지반 변화나 시공 중의 계측 결과가 이상치를 보일 경우 반드시 필요한 추가 조사 및 시험을 실시하여야 한다.</p> <p>3.1.3 막장 지질조사</p> <p>(3) 막장 지질조사 결과 실제 지반상태가 설계할 때의 적용조건과 상이하여 설계보완이 필요한 경우에는 안정성 검토에 필요한 추가 지반조사를 실시하여야 하며, 터널 막장 전방탐사(tunnel seismic profiling)를 실시할 경우에는 다음의 내용을 따른다.</p> <p>④ 터널 막장 전방탐사는 터널 시공 중에 이루어지므로, 탐사결과 해석 및 평가는 사전조사, 사전설계 및 시공 중의 관찰, 계측 및 시공자료 등을 반영하여 종합적으로 수행되어야 한다.</p> <p>⑤ 수급인은 터널 막장 전방탐사로부터 얻어진 결과를 공사감독자에게 제출하여야 하며, 탐사위치 및 축선배치도, 측정자료 및 전산처리결과, 막장 전방 단층파쇄대의 탐사해석결과(막장과의 이격거리, 터널과의 교차각도, 방향 등) 등이 포함되어야 한다.</p> <p>⑥ 수급인은 터널 막장 전방탐사로부터 얻어진 자료를 분석하여 전방 지층이 단층, 파쇄대, 이상대 등으로 예상될 경우 공사감독자와 협의 후 선진수평시추 조사를 수행하여야 한다.</p>

구 분	내 용	
<p>주요검토항목</p>		
	<p>근거리</p>	
	<p>선진수평시추</p>	<p>Lim System</p>
		
	<ul style="list-style-type: none"> • 막장전방 지질이상대규모 및 지질상태 파악 	<ul style="list-style-type: none"> • 막장전방 천공특성을 통한 암질예측
	<p>원거리</p>	<p>막장면</p>
	<p>다중채널 TSP 탐사</p>	<p>Face Mapping</p>
		
	<ul style="list-style-type: none"> • 막장전방 연약대 등 지질이상대 위치 예측 	<ul style="list-style-type: none"> • 막장면 실제 지반조건 확인
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>지반조사 항목 및 시추간격 확인</u> • <u>단층파쇄대, 활성단층대 구간 등에 대해 위험구간으로 선정하여 위험구간 시추간격 준수여부 확인</u> • <u>도심지 터널공사에 대한 설계·시공 시 경쟁사의 지반조사자료 (건설기술진흥법 제2조 제6호에 따라 발주청이 시행한 건설공사의 지반조사 결과) 등 획득 가능한 모든 정보를 고려하여 설계 시 지반조사 수량의 제약으로 인해 시공 시 발생할 수 있는 위험성 최소화</u> • <u>파쇄대 등 취약구간에 대해 지반침하 취약구간으로 선정하여 전방지질조사 등의 계획 수립여부 확인</u> 	

5.5 연약지반 굴착공법 선정

(1) 해안가 지반(느슨한 모래, 해성퇴적층)

구분	내용																																								
<p>사고원인</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>• 차수그라우팅 시공품질 미흡으로 인한 지반이완 발생</p>																																								
<p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p> <p>관련 기준</p> <p>가설흙막이 공사 KCS 21 30 00 (2018)</p>	<p>• 지반침하 취약구간의 보강 및 차수방안 및 시공 시 주의사항 등을 수록함</p> <p>2.8.1 일반 사항</p> <p>• 약액주입공법(LW, SGR공법 등)은 정압주입을 원칙으로 하며, 정압주입으로 할 경우의 주입률은 지층조건에 따라 표 2.8-1을 참조하여 시공을 할 수 있으며, 이 때 반드시 시험시공을 실시하여 주입효과를 확인한 후 설계조건에 합당한지 검토한 후 본 시공을 시행한다. 다만, 매립지, 유기질토 등 특수지반에서는 반드시 현장주입시험 결과에 의해 주입률을 결정하여야 한다.</p> <p style="text-align: center;">표 2.8-1 지반 조건에 따른 추정 주입률</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>지반 종류</th> <th>SPT-N값</th> <th>간극률(n, %)</th> <th>충전율(α, %)</th> <th>주입률(λ, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">점성토</td> <td>0~4</td> <td>65~75</td> <td>35~45</td> <td rowspan="10"> $\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%) </td> </tr> <tr> <td>4~8</td> <td>50~70</td> <td>25~35</td> </tr> <tr> <td>8~15</td> <td>40~60</td> <td>15~25</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">사질토</td> <td>0~10</td> <td>46~50</td> <td>60~90</td> </tr> <tr> <td>10~30</td> <td>40~48</td> <td>55~80</td> </tr> <tr> <td>30 이상</td> <td>30~40</td> <td>55~70</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">사력토 (모래·자갈)</td> <td>10~30</td> <td>40~60</td> <td>60~85</td> </tr> <tr> <td>30~50</td> <td>28~40</td> <td>60~85</td> </tr> <tr> <td>50 이상</td> <td>22~30</td> <td>55~65</td> </tr> <tr> <td>풍화암</td> <td>-</td> <td>18~22</td> <td>50~80</td> </tr> </tbody> </table>	지반 종류	SPT-N값	간극률(n, %)	충전율(α, %)	주입률(λ, %)	점성토	0~4	65~75	35~45	$\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%)	4~8	50~70	25~35	8~15	40~60	15~25	사질토	0~10	46~50	60~90	10~30	40~48	55~80	30 이상	30~40	55~70	사력토 (모래·자갈)	10~30	40~60	60~85	30~50	28~40	60~85	50 이상	22~30	55~65	풍화암	-	18~22	50~80
지반 종류	SPT-N값	간극률(n, %)	충전율(α, %)	주입률(λ, %)																																					
점성토	0~4	65~75	35~45	$\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%)																																					
	4~8	50~70	25~35																																						
	8~15	40~60	15~25																																						
사질토	0~10	46~50	60~90																																						
	10~30	40~48	55~80																																						
	30 이상	30~40	55~70																																						
사력토 (모래·자갈)	10~30	40~60	60~85																																						
	30~50	28~40	60~85																																						
	50 이상	22~30	55~65																																						
풍화암	-	18~22	50~80																																						

구 분		내 용
관 련 기 준	가설흙막이 공사(전문) EXCS 21 30 00 (2021)	<p>3.1 시공준비</p> <p>(4) 지하수 차수대책</p> <p>① 굴착작업을 할 때에는 지하수에 대한 차수공법이 필요하다고 판단될 경우 공사감독자의 승인 하에 차수공법을 시공하고, 부분적인 누수가 발생할 경우에는 시공계획서를 보완한 후 공사감독자에게 제출하여 확인을 받아 조속히 보완공사를 실시하여야 한다.</p> <p>② 차수공법으로 배면 그라우팅 적용시 시험시공을 하여 설계에 적용된 설계직경(D), 투수계수(k)값을 확인하여야 한다.</p>

구 분		내 용
주요검토항목		<p>매립층 차수그라우팅 삭제</p> <p>차수그라우팅 지표면까지 시공</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>해안가 지반특성을 반영한 차수그라우팅 공법 적정성 확인</u> • 차수그라우팅 시험시공 계획을 수립여부를 확인하고, 차수그라우팅 시공 시 품질 확보 여부를 감리 또는 승인기관에 제출하여 확인하도록 함 • <u>주열식 벽체 적용 시 최근 이상강우에 따른 지표수 유입 등이 우려되므로, 지표까지 차수그라우팅 계획 수립 여부 확인</u> • <u>입도분석 결과 입자크기 No.100~No.200 사이 구성 비율이 25% 이상이면 해당지층에 차수강화공법(ex. 2열 차수그라우팅 등) 적용</u> 	

5.6 설계 지하수위 선정

(1) 지하수위 상승에 따른 수압증가

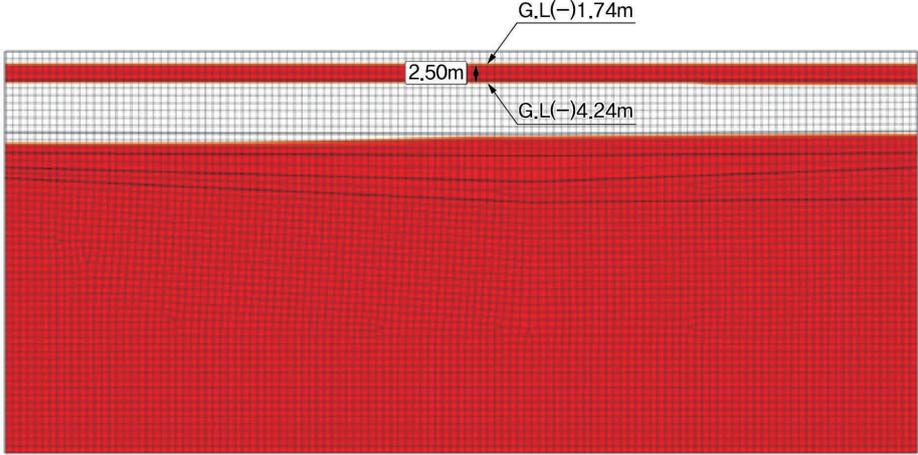
구 분		내 용
사고원인		<ul style="list-style-type: none"> 배면 지하수위 상승으로 인한 수압의 배면 수압의 증가로 흙막이 벽체 안정성 저하
관 련 기 준	가설 흙막이 설계기준 KDS 21 30 00 (2022)	1.7.1 설계외력 <ul style="list-style-type: none"> 지반굴착 시 가설흙막이 벽체에 작용하는 설계외력은 배면토 자중에 의한 토압, 지하수위에 의한 수압, 장비하중 등의 상재하중, 굴착영향 범위 내에 있는 인접건물하중, 인접도로를 통행하는 교통하중 등이며, 이외에 벽체에 작용할 수 있는 하중을 포함하여야 한다.
	지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)	5.1.3 설계지하수위 <ul style="list-style-type: none"> 대상지역의 강우에 따른 지하수위 상승고 및 인근 관측망의 수위 변화량 등을 종합 검토하여 대상사업의 설계지하수위를 산정하여 수록함

구 분	내 용						
주요검토향목	<ul style="list-style-type: none"> • 설계지하수위의 적정성 검토 - 설계지하수위 산정 예 						
	구 분	단면 A-A		단면 B-B		단면 C-C	
		좌측	우측	좌측	우측	좌측	우측
	지반고(E.L(+), m)	19.70	20.68	20.13	20.87	19.85	20.97
	관측 지하수위						
	E.L(+), m	0.30	0.60	0.60	1.10	0.70	1.10
	G.L(-), m	19.40	20.08	19.53	19.77	19.15	19.87
	침투해석 상승고(m)	1.01	1.03	2.37	1.61	2.24	1.61
	관측공 상승고(m)	2.86					
	적용 상승고(m)	2.86					
	설계 지하수위 산정						
	E.L(+), m	3.16	3.46	3.46	3.96	3.56	3.96
	G.L(-), m	16.54	17.22	16.67	16.91	16.29	17.01
	<ul style="list-style-type: none"> • SUNEX 						
	----- E C H O O F I N P U T D A T A -----						
STEP GWL : 지하수위 적용							
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> LOAD 0 1 13 20 13 1 GWL 8.95 8.95 0 31 EXCAVATION 0.6 </div>							
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> 굴착면 GL(-) 8.95m, 배면 GL(-) 9.85m 적용 </div>							
CONSTRUCTION STRUT 1 EXCAVATION 0.8 STEP 3 EXCAVATION AND CONST STRUT 2 CONSTRUCTION STRUT 2 EXCAVATION 2.8 STEP 4 EXCAVATION AND CONST STRUT 3 CONSTRUCTION STRUT 3 EXCAVATION 5.3 STEP 5 EXCAVATION AND CONST STRUT 4 CONSTRUCTION STRUT 4 EXCAVATION 7.8 STEP 6 EXCAVATION AND CONST STRUT 5 CONSTRUCTION STRUT 5 EXCAVATION 10.7							
GWL agwl [pgwl] [unit] [auto option] agwl : 배면측의 변경된 지하수위 pgwl : 굴착측의 변경된 지하수위, 생략시 agwl 또는 굴착깊이 (exdepth) 중 낮은 값 unit : 지하수의 단위중량 (생략시 1.0 t/m ³ , SI 단위 사용시는 9.81(통상 10으로 함) kN/m ³) auto option : Automatic water pressure balance option 1 : 자동수압조절하지 않고 정수압 작용 2 : 굴착바닥을 기준으로 수압조절 3 : 흙막이 벽체 하부를 기준으로 수압조절							
<ul style="list-style-type: none"> • MIDAS GEO XD 							
<ul style="list-style-type: none"> • 설계지하수위 산정 및 구조계산 시 적용 지하수위 확인 							

5.7 지하수 변화 특성

(1) 지하함수량 증가에 따른 포화대 미고려

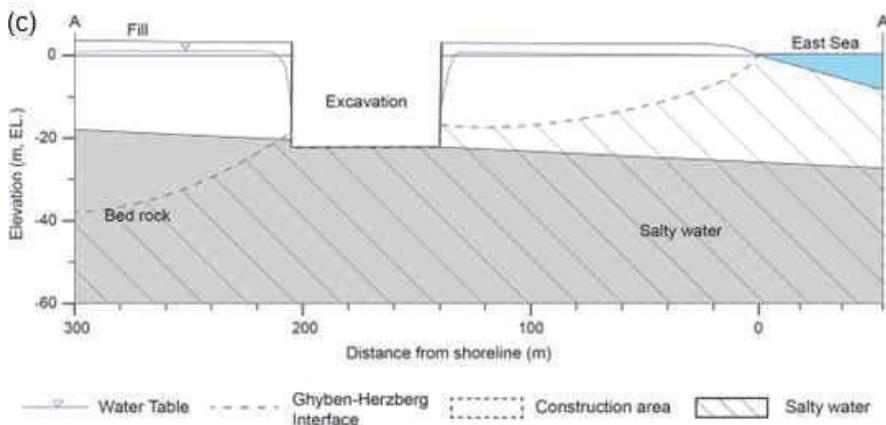
구분	내용
<p>사고원인</p>	<p>• 매립층 하부에 투수계수가 작은 점토층이 위치함</p>
<p>관련기준</p>	<p>1.6 검토사항</p> <p>(4) 수압</p> <p>⑦ 가시설 배면의 지층에 피압대수층, 불투수층, 암반 등이 존재할 경우 지하수위에 의한 정수압과는 다른 수압이 작용할 수 있으므로 벽체 배면 지반의 수리학적 특성을 고려하여 별도의 수압을 적용할 수 있다.</p>

구 분	내 용
<p>주요점토항목</p>	<p>- 침투해석에 의한 습윤대 산정</p>  <p>• 투수계수가 작은 점토층 존재 시 점토층 상부 함수량 증가로 수압 발생 • 침투해석 시 습윤대 산정(ex. 포화도 80%)을 반영한 해석결과 수특 확인</p>

(2) 해안가 지반(불리한 유동특성)

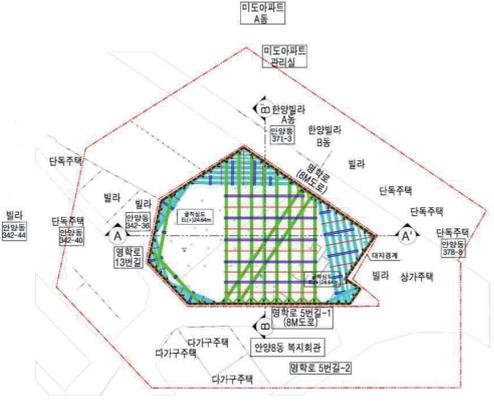
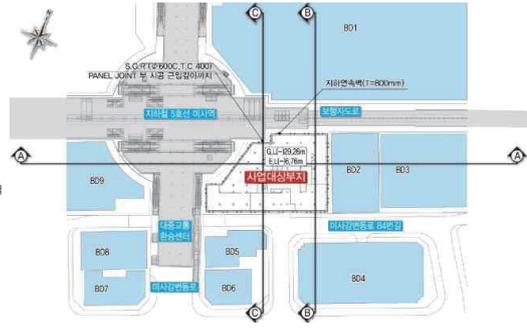
구 분	내 용
<p>사고원인</p>	 <p>• 해안가 모래질 퇴적층의 지하수 유동 특성에 의한 지하수위 급상승으로 흙막이 벽체 내 과도한 수압 작용</p>
<p>가설흙막이 공사 KCS 21 30 00</p> <p>관 련 기 준</p>	<p>2.8.1 일반 사항</p> <p>(1) 이 기준은 그라우팅 공법에 의한 차수 및 지반보강공법에 적용하는 것으로, 시공 시 이 기준 이외의 것은 각 공법들의 공사시방서 및 관련법규 등에서 정하는 것을 따른다.</p> <p>(2) 약액주입공법(LW, SGR공법 등)은 정압주입을 원칙으로 하며, 정압주입으로 할 경우의 주입률은 지층조건에 따라 표 2.8-1을 참조하여 시공할 수 있으며, 이 때 반드시 시험시공을 실시하여 주입효과를 확인한 후 설계조건에 합당한지 검토한 후 본 시공을 시행한다. 다만, 매립지, 유기질토 등 특수지반에서는 반드시 현장주입시험 결과에 의해 주입률을 결정하여야 한다.</p> <p>(3) 차수용으로 적용된 그라우팅 공법은 지하수의 유입을 방지하기 위하여 보강 후 지반의 투수계수는 $k \leq 1 \times 10^{-5}$ cm/s를 확보하여야 한다.</p>
<p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p>	<p>㉔ 시험시공 위치</p> <ul style="list-style-type: none"> • 시험시공의 규모는 가능한 크게 하는 것이 바람직하고, 대상 사업의 일부구간을 이용하는 것을 원칙으로 하며, 대상 사업의 일부구간 중 사업구간을 대표할 수 있는 구간 및 가장 취약한 구간에 우선 적용함을 원칙으로 함 <p>㉕ 시험시공 항목</p> <ul style="list-style-type: none"> • 시험시공에서는 사전에 현장의 토질특성 파악과 주입효과를 확인하기 위하여 현장 투수시험을 필수 항목으로 수행하고, 필요 시 주입상태 확인을 위해 다음의 방법을 복수로 하여 적용할 수 있음 • 육안 확인법, 투수성 확인법, 강도시험, 물리탐사 및 화학적 분석법 등

구 분	내 용
<p>관 련 기 준</p> <p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p>	<p>㉔ 기타 사항</p> <ul style="list-style-type: none"> • 차수효과 뿐만 아니라 강도 증가 효과를 기대해야 하는 경우는 설계기준에서 제시하는 변위, 응력 등의 허용치를 만족하여야 함. 이 경우는 보강 후 지반의 변형 및 강도 특성을 반영한 수치해석을 통해 적정성을 검증하여야 하며, 이는 설계 단계에서는 각종 설계도서에 수록되어야 하고 지하안전영향평가서 내에 검토의견을 수록하여야 함. 또한 그 결과는 사후지하안전영향조사서에 시험시공 결과와 비교 분석하여 요약 정리하여야 함

구 분	내 용
<p>주요검토항목</p>	<div style="text-align: center;">  <p>지하수 흐름 분석 예</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • 지하수위 흐름에 대한 분석을 통해 <u>지하수위 및 지하수 흐름방향에 대한 검토를 수행여부 확인</u> * 해안가 인접한 지역에 두꺼운 모래질 퇴적층으로 구성되어 있을 경우 모래질 퇴적층의 투수성은 일반적인 암석에 비해 상당히, 높아 인근 해안가의 조위에 상당한 영향을 받으므로 해안가와 인접할 경우 조위의 영향에 따른 지하수위 변화를 포함하여야 함 • <u>지층조건(사질계열 퇴적토층), 주변여건(하천, 강, 해안) 및 굴착심도, 해안가와와의 거리 등을 고려하여, 투수성 지반 및 천공홀의 유지가 어려운 현장의 경우에는 흙막이 벽체의 강성 및 차수성이 높은 공법 선정 확인(ex. 흙막이벽 2열, 차수성 높은 공법(지하연속벽) 적용 등)</u> • <u>유수 및 지하수의 영향을 받는 하천, 강 및 해안가의 경우 담수 및 해수의 영향이 미칠 수 있으므로 전체 현장부지에서 본공사 전에 반드시 차수그라우팅 시험시공을 실시계획 수립 후 수록 여부 확인</u> • <u>지하안전확보방안에 구조안전성 및 차수효과를 확인하여 시공 시 품질에 대한 문제점을 확인하여 시공 시 주의사항(품질 확보, 등) 수록 확인</u>

5.8 수치해석을 통한 안전성 확보

(1) 구조적 취약구간에 대한 상세검토 누락

구분	내용
<p>사고발생원인 및 결과</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">우각부 등 구조적 취약구간</p> <p>• 취약구간에 대한 3차원 해석을 통한 상세검토 누락</p>
<p>관련 기준 지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p>	<p>6.1.1 평가방법</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3차원 수치해석의 적용범위는 다음의 경우를 우선적으로 적용하며, 지반 또는 구조적인 취약구간을 고려하여 책임기술자의 판단 및 지하안전평가 협의를 통해 추가적으로 적용할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 평면 상 굴착면 내측으로 돌출된 우각부 배면에 흠막이 가시설에 영향을 줄 수 있는 시설물의 존재하는 경우 - 굴착영향범위 내 사업부지와 인접한 동시굴착이 존재하여 평면상 2차원적 모델링이 불합리한 경우 - 굴착영향범위 내에 위치하는 철도시설물(선로유지관리지침에 따른 궤도 안전성 검토가 필요한 경우)이 3차원 공간상 인접한 경우

구 분	내 용
<p>주요검토항목</p>	<div style="text-align: center;">  <p>3차원 해석 모델링</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> • <u>하기의 경우, 지반 또는 구조적인 취약구간을 고려한 3차원 수치해석 수행 여부 확인</u> <ul style="list-style-type: none"> - <u>평면 상 굴착면 내측으로 돌출된 우각부 배면에 흠막이 가시설에 영향을 줄 수 있는 시설물의 존재</u>하는 경우 - <u>굴착영향범위 내 사업부지와 인접한 동시굴착이 존재</u>하여 평면상 2차원적 모델링이 불합리한 경우 - <u>굴착영향범위 내에 위치하는 철도시설물(선로유지관리지침에 따른 궤도 안전성 검토가 필요한 경우)이 3차원 공간상 인접</u>한 경우

지하안전
평가서
표준매뉴얼
(2023.07)

(다) 굴착저면 안전검토

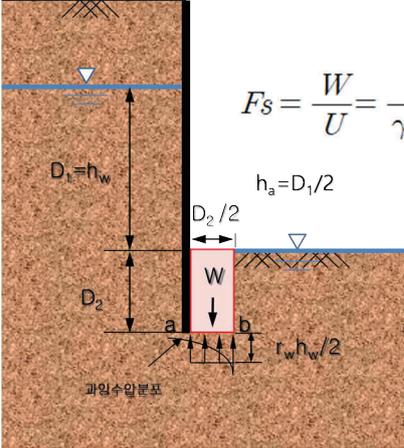
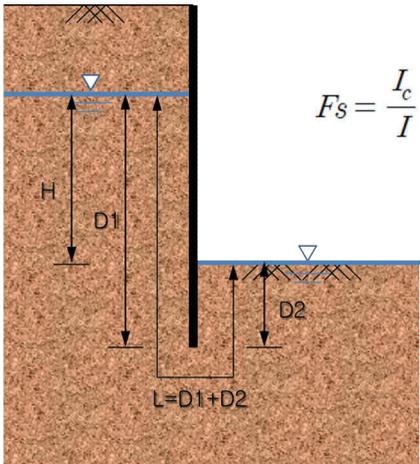
- 굴착저면 안전은 최소 근입깊이의 확보여부와 히빙 및 보일링의 발생가능성에 대하여 검토를 수행함
- 굴착저면 지층이 풍화암 이상의 단단한 지반으로 구성되어 있는 경우에는 히빙과 보일링에 대한 검토를 생략할 수 있음
- 연약지반 굴착공사에 해당되며 굴착저면이 연약지반(점토층)인 경우 히빙 안전율은 3.0 이상 확보하여야 함
- 벽체의 근입깊이는 안전성 검토시 안전율은 1.2 이상이 되어야 하며 히빙이나 파이핑에 대하여도 안전한 깊이로 설치하여야 함

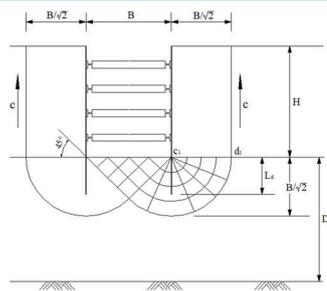
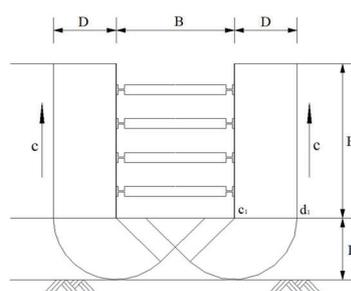
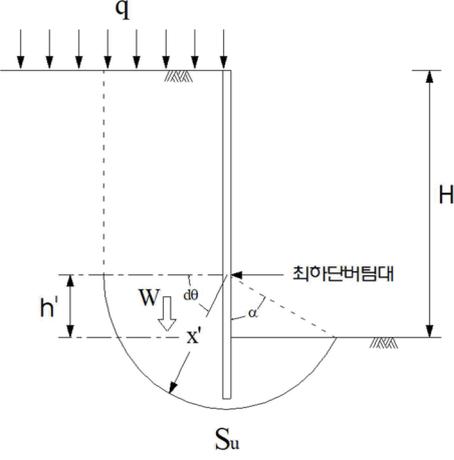
① 히빙 검토

- 히빙 검토는 하중 지반 지지력식(Terzaghi-Peck의 방법, Bjerrum & Eide의 방법, Tschebotarioff의 방법)에 의한 방법과 모멘트 평형(일본 건축학회 수정식)에 의한 방법 중 최소한 각 한 가지 이상 검토하여 안전율이 적은 것을 채택하여 안전성을 평가함

② 파이핑(보일링) 검토방법

- 굴착깊이가 얇거나 수위차가 작은 경우(3.0m 미만)의 보일링 검토는 유선망 해석 방식을 수행하거나 Terzaghi 간편식 또는 한계동수구배를 고려한 방법을 비교 검토하여 두 방식의 조건을 만족하도록 함
- 굴착깊이가 깊거나 다층지반을 굴착하는 경우는 투수계수에 따라 침투수압의 변화를 고려할 수 있는 침투해석을 활용한 검토를 수행함
- 유선망 해석은 침투해석과 같은 개념이나 설계기준에 명시된 내용을 준용하여 유선망해석 방식을 수행함

구 분	내 용
<p>주요검토항목</p>	<p style="text-align: center;"><보일링 검토></p> <p>• Terzaghi에 의한 방법</p>  $F_s = \frac{W}{U} = \frac{\gamma' \times (d_2^2/2)}{\gamma_w \times h_a \times (d_2/2)}$ <p> F_s: 보일링에 대한 안전율 W: 흙의 유효중량(kN/m³) U: 평균과잉 간극수압 (kN/m³) r': 흙의 수중단위중량 (kN/m³) r_w: 물의 단위중량 (kN/m³) L_d: 벽체의 근입깊이(m) h_w: 수위차이 </p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>침투해석 적용시</p> $F_s = \frac{W}{U} = \frac{\gamma' \times (d_2^2/2)}{\gamma_w \times h_{ave} \times (d_2/2)}$ <p>• 평균과잉수두(H_{ave}): - 침투해석에서 (a 전수두 + b 전수두)/2 - 굴착저면 전수두</p> </div>
	<p>• 한계동수경사에 의한 방법</p>  $F_s = \frac{I_c}{I}$ $I_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad I = \frac{H}{L}$ <p> F_s: 보일링에 대한 안전율 $D1$: 지하수위면에서의 흙막이벽 근입깊이 $D2$: 굴착저면에서의 흙막이벽 근입깊이 r': 흙의 수중단위중량 (kN/m³) r_w: 물의 단위중량 (kN/m³) H: 수두차 </p>
	<p>굴착저면(보일링) 안정성 검토</p> <p>• <u>굴착깊이가 얇거나 수위차가 작은 경우(3.0 m 미만)에는 보일링(boiling) 검토 시 유선망 해석 방식을 실시하거나, Terzaghi 간편식 또는 한계동수 경사를 고려한 방법을 비교 검토하여 모두 만족여부 확인</u></p> <p>• <u>굴착깊이가 깊거나 다층지반을 굴착하는 경우에는 보일링(boiling) 검토 시 투수계수에 따라 침투수압이 변화되는 침투해석을 통한 안정성 검토결과 안정성 확보 여부 확인</u></p>

구 분	내 용
<p>주요검토항목</p>	<p><히빙 검토></p>
	<p>• 하중지반지지력식</p>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> $P_r = \gamma_t H - \frac{\sqrt{2}}{B} cH + q$ </div> <div style="width: 45%;"> <p>• c, d₁면에 작용하는 하중</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center; background-color: #0070c0; color: white; padding: 2px;">단단한 지반이 깊은 경우(D≥B√2)</p>  $F_s = \frac{q_d}{P_r} = \frac{5.7c}{\gamma_t H - \frac{\sqrt{2}}{B} cH + q} \geq 1.5$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center; background-color: #0070c0; color: white; padding: 2px;">단단한 지반이 얇은 경우(D<B√2)</p>  $F_s = \frac{q_d}{P_r} = \frac{5.7c}{\gamma_t H - \frac{cH}{D}} \geq 1.5$ </div> </div> <p>• Terzaghi에 따르면 점성토 지반의 극한 지지력 q_d=5.7c가 됨</p>
	<p>• 모멘트평형법</p>
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2; margin-left: 20px;"> $F = \frac{M_r}{M_d} = \frac{x' \times (\frac{\pi}{2} + a) \times x' \times S_u}{(\gamma H + q) \times x' \times \frac{x'}{2}} = \frac{(\pi + 2a) \times S_u}{\gamma_t H + q} \geq 1.5$ <p> F_s : 히빙에 대한 안전율 M_r : 지반의 전단저항모멘트(kN/m) M_d : 활동모멘트(kN/m) S_u : 굴착저면보다 아래쪽 흙의 비배수전단강도(kN/m²) q : 상재하중(kN/m²) a : 최하단 버팀보 중심에서 굴착저면까지의 간격과 원호활동의 반경에서 정해지는 각도(rad) H : 굴착깊이(m) </p> </div> </div>	
<p>굴착저면(히빙) 안정성 검토</p>	
<p>• 히빙 검토는 하중 지반 지지력식에 의한 방법과 모멘트 평형에 의한 방법으로 구분</p> <p>• 히빙에 대한 검토결과는 흙막이벽체의 종류, 지반조건, 설계규정별로 상당한 차이가 발생한다. 따라서, 하중 지반 지지력식에 의한 방법과 모멘트 평형에 의한 방법을 검토하고, 안전율이 상대적으로 보수적으로 산정되는 방법을 채택하여 굴착저면 안정성 확보 여부 검토</p>	

(2) 가시설구조체 불안정(입력값 오기)

구분	내용
사고원인	• 가시설구조체 불안정

구분	내용
주요검토항목	<p style="text-align: center;"><탄소정보 해석프로그램 SUNEX></p> <p>• Model data의 작성</p> <pre> UNIT KN ELG/L GL 0.00 SOIL 1 매립토 (CL) 15 21 15000 0 0 0 1.6E-05 1.00 17 8 설계지반 2 매립토 (GM,SC) 0 25 23000 0 0 0 1.6E-05 1.00 정수 3 풍화토 A 18 9 10 27 25000 0 0 0 1.6E-05 1.00 19 4 풍화토 B 19 10 15 30 34000 0 0 0 1.6E-05 1.00 20 5 풍화암 20 11 30 30 45000 0 0 0 1.6E-05 1.00 PROFILE 1 1.3 1 1 2 4.1 2 2 지층두께 3 6.8 3 3 4 15.8 4 4 5 30 5 5 흙막이벽체 제원 WALL 1 14.8 .05966 9.4194E-04 2.05E+08 1 1 1 0 0 2 17.4 .01198 .000204 2.05E+08 1.5 .9 .3 0 0 STRUT 1 0.1 0.02396 23.6 3.3 0 0 0 2 1 지보공보 2 0.3 0.02396 23.6 3.3 0 0 0 0 1 3 2.3 0.02396 23.6 3.3 0 0 0 0 1 4 4.8 0.02396 23.6 3.3 0 0 0 0 1 5 7.3 0.02396 23.6 3.3 0 0 0 0 1 6 10.2 0.01198 4.4 2.5 0 0 0 45 0 SLAB 1 0.8 0.2 10 0 건축슬래브 2 5.0 0.2 10 0 3 8.6 0.2 10 0 4 12.2 0.6 10 0 5 13.4 0.6 10 0 WALL 1 12.2 13.4 0.3 0 건축벽체 2 8.6 12.2 0.3 0 3 5.0 8.6 0.3 0 4 0.8 5.0 0.3 0 Division 0.1 Solution 0 Output 0 NoteMode 0 MINRES 100 ECHO • Step data의 작성 E C H O O F I N P U T D A T A ----- STEP 1 EXCAVATION 적용토압 RANKINE 1 0 33 0 하중 LOAD 0 1 13 20 13 1 지하수위 GWL 8.95 8.95 0 31 EXCAVATION 0.6 STEP 2 EXCAVATION AND CONST STRUT 1 CONSTRUCTION STRUT 1 EXCAVATION 0.8 STEP 3 EXCAVATION AND CONST STRUT 2 CONSTRUCTION STRUT 2 EXCAVATION 2.8 STEP 4 EXCAVATION AND CONST STRUT 3 CONSTRUCTION STRUT 3 EXCAVATION 5.3 STEP 5 EXCAVATION AND CONST STRUT 4 CONSTRUCTION STRUT 4 EXCAVATION 7.8 STEP 6 EXCAVATION AND CONST STRUT 5 CONSTRUCTION STRUT 5 EXCAVATION 10.7 STEP 7 EXCAVATION AND CONST STRUT 6 CONSTRUCTION STRUT 6 EXCAVATION 13.4 근입장 DEPTH_CHECK 침하 GROUND_SETTLEMENT 50 2 0 0 </pre>

<탄소정보 해석프로그램 MIDAS GEO XD>

사용부재

CIP

심도구간 : 0.0 m - 8.0 m 부재규격 : CIP-D500(H-300X300X10X15CTC₁₅₀₀)N8

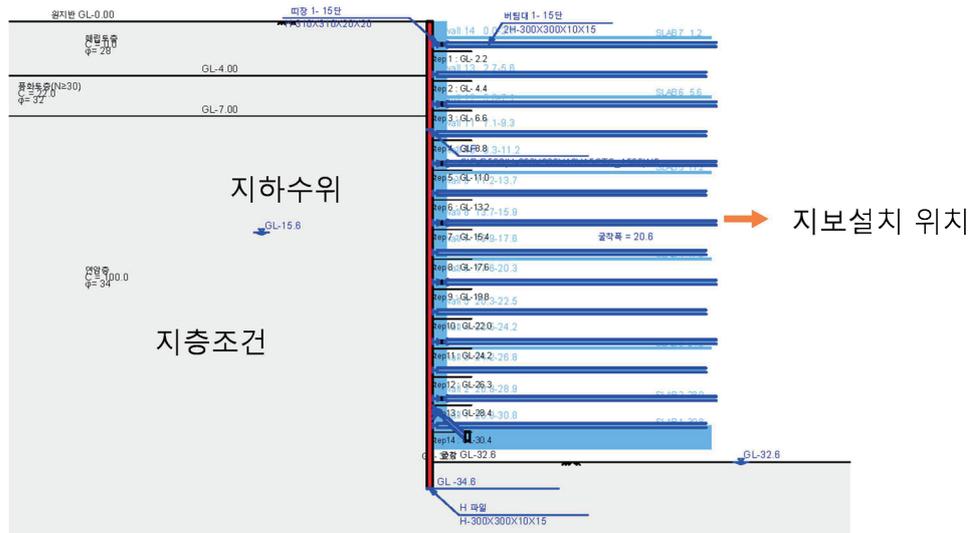
H 파일

심도구간 : 8.0 m - 34.6 m 부재규격 : H-300X300X10X15

버팀대

- | | | |
|------|---------------|-------------------------|
| 1 단 | 설치심도 : 1.7 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 2 단 | 설치심도 : 3.9 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 3 단 | 설치심도 : 6.1 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 4 단 | 설치심도 : 8.3 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 5 단 | 설치심도 : 10.5 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 6 단 | 설치심도 : 12.7 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 7 단 | 설치심도 : 14.9 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 8 단 | 설치심도 : 17.1 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 9 단 | 설치심도 : 19.3 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 10 단 | 설치심도 : 21.5 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 11 단 | 설치심도 : 23.7 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 12 단 | 설치심도 : 25.8 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 13 단 | 설치심도 : 27.9 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 14 단 | 설치심도 : 29.9 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |
| 15 단 | 설치심도 : 28.9 m | 부재규격 : 2H-300X300X10X15 |

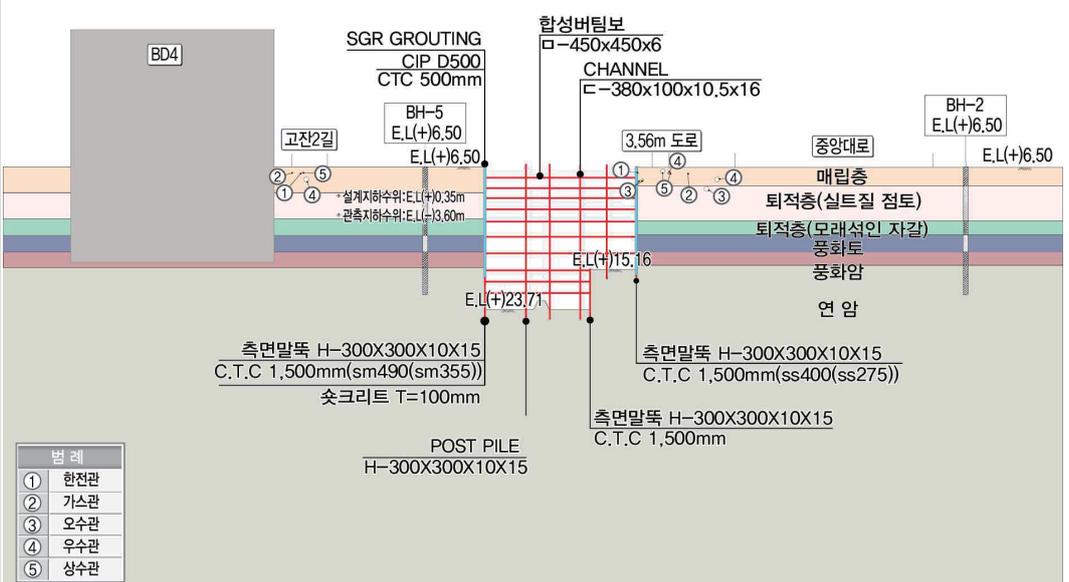
1 표준단면도

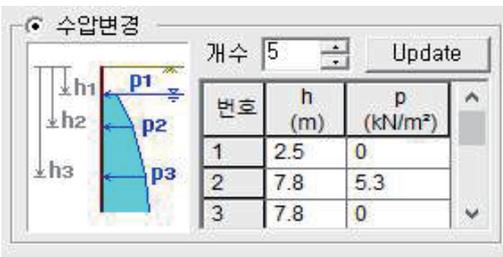
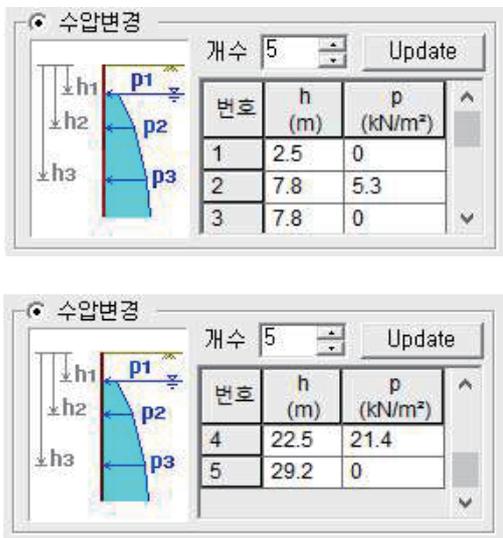


Graphics by MetaDraw ©

- 구조계산의 적정성(SUNEX) 확인
- 구조계산의 적정성(MIDAS GEO XD) 확인
- 모델링 적정성 검토 여부 확인
- 버팀보 선행하중(스크류재, 유압재) 과다 산정 여부 확인
- 굴착 최종단계 이후, 경험토압을 적용한 안전성 검토 여부 확인

(3) 지반함수량 증가에 따른 포화대 미고려

구분	내용												
<p>사고원인</p>	 <table border="1" data-bbox="375 840 486 985"> <thead> <tr> <th>범례</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>한천관</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>가스관</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>오수관</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>우수관</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>상수관</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • 지층 내 점토층 존재 시, 지반 함수량 미적용으로 수압 미고려로 인한 벽체 변위발생 <ol style="list-style-type: none"> ① 매립층 하부 투수계수가 작은 점토층이 위치 ② 집중호우 시 침투를 고려한 점토층 상부 포화대 미고려 ③ 상부 수압 발생으로 인한 벽체 변위(배면지반 침하) 발생 	범례		①	한천관	②	가스관	③	오수관	④	우수관	⑤	상수관
범례													
①	한천관												
②	가스관												
③	오수관												
④	우수관												
⑤	상수관												
<p>관련기준</p>	<p>1.6 검토사항</p> <p>(4) 수압</p> <p>⑦ 가시설 배면의 지층에 피압대수층, 불투수층, 암반 등이 존재할 경우 지하수위에 의한 정수압과는 다른 수압이 작용할 수 있으므로 벽체 배면 지반의 수리학적 특성을 고려하여 별도의 수압을 적용할 수 있다.</p>												

구 분	내 용		
주요검토항목	- 구조해석 시 별도 수압 적용		
	단면 A-A 좌측		
		H(m)	P(kN/m ²)
	2.5	0	
	7.8	5.3	
	7.8	0	
	22.5	21.7	
	29.5	0	
	단면 B-B 좌측		
		H(m)	P(kN/m ²)
2.5	0		
7.8	5.3		
7.8	0		
22.5	21.4		
29.2	0		
<ul style="list-style-type: none"> • 투수계수가 작은 점토층 존재시 점토층 내 함수량 증가로 수압 발생 • <u>침투해석에 의한 습윤대 산정(포화도 80%) 여부 확인</u> • <u>구조해석 시 습윤대 추가 하중 적용 여부 확인</u> 			

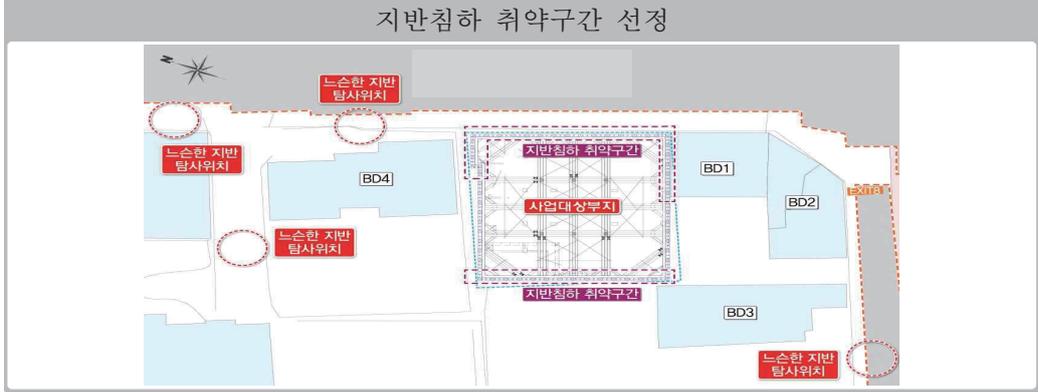
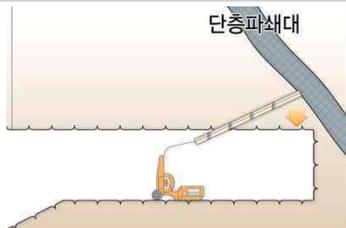
5.10 계측계획

(1) 계측계획(자동화계측 등) 부실

구분	내용											
관 련 기 준 지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07)	<p>① 굴착공사 자동화 계측계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 적용대상 : 지하안전평가 대상사업(굴착깊이 20m이상, 수직구 및 추진/도달기지 포함) - 적용위치 : 지반침하 취약구간 및 3차원 수치해석 대상(우각부 뒷편의 시설물 위치 구간) 중에 불리한 단면 최소 1개소 이상(철도, 지하철 별도) - 계측항목 : 자동화 계측항목은 지중경사계, 지하수위계, 지표침하계, 하중계(축력계), 건물경사계 등이며, 자동화 계측이 적용 불가한 항목은 상세한 사유를 제시함 <p>② 도심지 터널공사 시 위험지역 자동화계측 계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 적용대상 : 지하안전평가 대상 사업 중 도심지 터널 공사를 대상으로 하되 도심지라 함은 [국토의 계획 및 이용에 관한 법률] 제6조에서 제시하는 도심지역을 의미하며, 이는 인구와 산업이 밀집되어 있거나 밀집이 예상되어 그 지역에 대하여 체계적인 개발·정비·관리·보전 등이 필요한 지역으로 정의함 - 적용위치 : 터널 굴착방식(비개착공법 포함)이 적용되는 지반침하 취약구간(완전 풍화된 토사, 점토지반, 단층 파쇄대 존재 구간 등) 또는 지반침하사고 발생 시 대규모 인적·물적 피해가 예상되는 구간(아파트 등 주거시설 및 공공이용시설물이 밀집된 지역), 상기에서 언급되지 않은 구간이라 할지라도 지반침하 발생으로 인해 주변지반의 이상거동이 우려되는 구간은 책임기술자의 판단에 따라 추가로 포함할 수 있음 - 계측항목 : 지반침하 취약구간의 주변지반 이상거동을 합리적으로 분석할 수 있도록 침하계(지표, 지중), 지중경사계 및 지하수위계를 필수항목으로 적용하고 필수항목 이외의 계측항목은 현장여건 등을 고려하여 책임기술자의 판단에 따라 조정 가능함. 상기에 언급한 자동화계측 필수항목과 주요 분석내용은 다음과 같음 											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="379 1615 507 1682">구분</th> <th data-bbox="507 1615 694 1682">자동화계측 항목</th> <th data-bbox="694 1615 1449 1682">분석내용</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="379 1682 507 1742">일상계측</td> <td data-bbox="507 1682 694 1742">지표침하계</td> <td data-bbox="694 1682 1449 1742">· 대상사업의 굴착외측 도로 등 지표면의 침하량(연직변위)측정</td> </tr> <tr> <td data-bbox="379 1742 507 1803">정밀계측</td> <td data-bbox="507 1742 694 1803">지중침하계</td> <td data-bbox="694 1742 1449 1803">· 대상사업의 굴착외측 지반의 지중 침하량(연직변위) 측정</td> </tr> <tr> <td data-bbox="379 1803 507 1892">기타계측</td> <td data-bbox="507 1803 694 1892">지중경사계 지하수위계</td> <td data-bbox="694 1803 1449 1892">· 대상사업의 굴착외측 지반의 지중 변형량(수평변위) 측정 · 대상사업의 굴착외측 지반의 지하수위 변화량 측정</td> </tr> </tbody> </table>	구분	자동화계측 항목	분석내용	일상계측	지표침하계	· 대상사업의 굴착외측 도로 등 지표면의 침하량(연직변위)측정	정밀계측	지중침하계	· 대상사업의 굴착외측 지반의 지중 침하량(연직변위) 측정	기타계측	지중경사계 지하수위계
구분	자동화계측 항목	분석내용										
일상계측	지표침하계	· 대상사업의 굴착외측 도로 등 지표면의 침하량(연직변위)측정										
정밀계측	지중침하계	· 대상사업의 굴착외측 지반의 지중 침하량(연직변위) 측정										
기타계측	지중경사계 지하수위계	· 대상사업의 굴착외측 지반의 지중 변형량(수평변위) 측정 · 대상사업의 굴착외측 지반의 지하수위 변화량 측정										

5.11 지반침하 취약구간 선정

(1) 지반침하 취약구간 설정미흡

구분	내용
관련 기준 지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07)	
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>단층파쇄대 통과구간</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>풍화대 통과구간</p>  </div> </div>
주요검토항목	<p>7.2.1 지반침하 취약구간 선정</p> <ul style="list-style-type: none"> · 지반침하 취약구간 선정시는 다음과 같은 사항을 고려하여 선정하며, 지반침하구간에 대한 관리방안을 수록함 - 사업구간 중 최대 굴착깊이 구간 - 지반조사 결과 지반조건이 가장 불리한 구간 - 인접 구조물과 근접한 구간 - 중요도가 높은 매설물이 근접한 구간 - 지하수 저하량이 크며 이에 따른 침하량이 높게 평가된 구간 - 지반안전성 평가시 지반변형이 높게 평가된 구간 - 공동의심구간(지하안전평가) <p>· 지반조건, 지하수에 의한 영향 및 지반안전성 검토결과 등을 바탕으로 지반취약 구간 선정</p>

5.12 차수 그라우팅 계획

(1) 차수 그라우팅 문제(차수품질 미확보, 공법 미적용)

구분	내용																																								
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">흙막이 벽체 지하수 유입 및 토사유출에 의한 지반침하</p>																																								
사고원인	<ul style="list-style-type: none"> 차수품질 미확보 및 시험시공 누락으로 흙막이 벽체로 배면토사 유실로 인한 지반침하 																																								
관련기준	<p>2.8.1 일반 사항</p> <ul style="list-style-type: none"> 약액주입공법(LW, SGR공법 등)은 정압주입을 원칙으로 하며, 정압주입으로 할 경우의 주입률은 지층조건에 따라 표 2.8-1을 참조하여 시공을 할 수 있으며, 이 때 반드시 시험시공을 실시하여 주입효과를 확인한 후 설계조건에 합당한지 검토한 후 본 시공을 시행한다. 다만, 매립지, 유기질토 등 특수지반에서는 반드시 현장주입시험 결과에 의해 주입률을 결정하여야 한다. <p style="text-align: center;"><지반 조건에 따른 추정 주입률></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>지반 종류</th> <th>SPT-N값</th> <th>간극률(n, %)</th> <th>충전율(α, %)</th> <th>주입률(λ, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">점성토</td> <td>0~4</td> <td>65~75</td> <td>35~45</td> <td rowspan="9"> $\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%) </td> </tr> <tr> <td>4~8</td> <td>50~70</td> <td>25~35</td> </tr> <tr> <td>8~15</td> <td>40~60</td> <td>15~25</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">사질토</td> <td>0~10</td> <td>46~50</td> <td>60~90</td> </tr> <tr> <td>10~30</td> <td>40~48</td> <td>55~80</td> </tr> <tr> <td>30 이상</td> <td>30~40</td> <td>55~70</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">사력토 (모래·자갈)</td> <td>10~30</td> <td>40~60</td> <td>60~85</td> </tr> <tr> <td>30~50</td> <td>28~40</td> <td>60~85</td> </tr> <tr> <td>50 이상</td> <td>22~30</td> <td>55~65</td> </tr> <tr> <td>풍화암</td> <td>-</td> <td>18~22</td> <td>50~80</td> </tr> </tbody> </table>	지반 종류	SPT-N값	간극률(n, %)	충전율(α , %)	주입률(λ , %)	점성토	0~4	65~75	35~45	$\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%)	4~8	50~70	25~35	8~15	40~60	15~25	사질토	0~10	46~50	60~90	10~30	40~48	55~80	30 이상	30~40	55~70	사력토 (모래·자갈)	10~30	40~60	60~85	30~50	28~40	60~85	50 이상	22~30	55~65	풍화암	-	18~22	50~80
지반 종류	SPT-N값	간극률(n, %)	충전율(α , %)	주입률(λ , %)																																					
점성토	0~4	65~75	35~45	$\lambda = n \times \alpha (1 + \beta)$ 여기서, n : 공극률 α : 충전율 β : 손실률 (5~10%)																																					
	4~8	50~70	25~35																																						
	8~15	40~60	15~25																																						
사질토	0~10	46~50	60~90																																						
	10~30	40~48	55~80																																						
	30 이상	30~40	55~70																																						
사력토 (모래·자갈)	10~30	40~60	60~85																																						
	30~50	28~40	60~85																																						
	50 이상	22~30	55~65																																						
풍화암	-	18~22	50~80																																						

관 련 기 준	지하안전 평가서 표준 매뉴얼 (2023.07.)	<p>7.2.2 보강 및 차수방안</p> <p>㉓ 시험시공 일반사항</p> <ul style="list-style-type: none"> - 가설공사 표준시방서(가설흙막이공사, KCS 21 30 00) 내용을 준용하여 액주입공법은 정압주입을 원칙으로 하며, 이 때 반드시 시험시공을 실시하여 주입효과를 확인한 후 설계조건에 합당한지 검토한 후 본 시공을 실시함 - 지하수의 유입을 방지하기 위하여 보강 후 지반의 투수계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 이하를 확보하여야 함 (현장여건, 지반특성 등을 고려할 때 차수그라우팅 적용구간의 목표 투수계수를 만족하지 못하는 경우 그 사유를 명시하고 원인을 규명하여 보고서에 수록하여야 함) <p>㉔ 시험시공 수량</p> <ul style="list-style-type: none"> - 굴착(개착)공사는 사업구간 내 최소 1회, 터널공사는 시공 공구별 또는 주요구조물(정거장, 환기구 등)별 최소 1회 실시하는 것을 원칙으로 하며, 현장여건 및 지반조건을 고려하여 증가 적용할 수 있음 - 터널사업의 경우 동일한 시공 공구라 할지라도 위험구간(지반침하 취약구간)의 경우는 책임기술자의 판단에 의해 시험수량을 증가시켜 적용하여야 함(위험구간의 정의와 대상은 본 매뉴얼 7.1.1 계측기 설치계획의 내용을 따름) <p>㉕ 시험시공 위치</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시험시공의 규모는 가능한 크게 하는 것이 바람직하고, 대상 사업의 일부구간을 이용하는 것을 원칙으로 하며, 대상 사업의 일부구간 중 사업구간을 대표할 수 있는 구간 및 가장 취약한 구간에 우선 적용함을 원칙으로 함 <p>㉖ 시험시공 항목</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시험시공에서는 사전에 현장의 토질특성 파악과 주입효과를 확인하기 위하여 현장투수시험을 필수 항목으로 수행하고, 필요 시 주입상태 확인을 위해 다음의 방법을 복수로 하여 적용할 수 있음 • 육안 확인법, 투수성 확인법, 강도시험, 물리탐사 및 화학적 분석법 등
------------------	-------------------------------------	--

(2) 주요검토 항목

구 분	내 용
주요검토항목	<ul style="list-style-type: none"> • 차수그라우팅 시험시공 계획 수립 여부 확인 • 차수성 보강 후 지반 투수계수 확보기준, 시험시공 위치, 시험시공 항목 확인

5.13 배수계획

(1) 집중호우 또는 지하수 과다유출

구분	내용
<p>사고원인</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <ul style="list-style-type: none"> • 집중호우에 의한 굴착현장 내로 우수 유입으로 인한 굴착 현장 침수
<p>관련 기준</p> <p>지하안전 평가서 표준매뉴얼 (2023.07.)</p>	<p>5.3 침투해석에 의한 지하수 흐름 분석</p> <p>5.3.2 평가결과</p> <ul style="list-style-type: none"> • 침투해석을 통해 확인된 지하수위 저하량 및 유출수량 등을 기술하고 지하수 변화에 의한 영향을 분석하여 수록함
<p>주요검토항목</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>흘막이 배면 지하수 및 굴착 내부 지하수 배수계획</u> • <u>지하수 및 강우에 의한 침수 대비를 위한 배수계획 수립 적정성 검토</u>

제 6 장 결 론

국토의 입체적 활용 노력과 토목기술의 발달은 영동대로 지하공간 복합개발, 광역철도 (GTX; Great Train Express) 등 지하개발사업을 가능하게 하였지만, 동시에 지하 시설물이 점차 도심도, 대규모, 고밀도화됨에 따라 지반침하 등의 지하안전 사고의 위험성이 증가하고 있다. 지하안전법 시행 이후 법 및 제도 관련 개선 연구, 지반침하 사고 원인 분석 연구 등이 개별적으로 수행되었으나, 지하안전평가 단계에서 수행되는 안전성 검토 등이 지반침하 사고 발생에 미치는 영향 등에 대한 연계분석 연구는 미흡하다. 본 연구에서는 당면과제로 다가온 지하고속도로의 안전한 구축을 위해 사고사례에 기반한 우리공사의 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 먼저 대형 터널 및 굴착공사에서 발생한 25가지 지하안전 사고사례의 원인을 고찰하였다. 그 결과 지반조사 미흡으로 인한 사고원인이 33%(14건)로 가장 높았으며 그 뒤로 시공관리 미흡 26%(11건), 시공계획 미흡 12%(6건) 차수품질 미확보 및 계획부재 12%(5건), 인접구조물 상태파악 미흡 12%(5건), 집중호우 5%(2건) 순으로 이어졌다. 이러한 사고요인을 토대로 설계단계에서 이루어지는 지하안전평가 항목과 연계하여 굴착 및 터널공법 적절성, 인접 구조물 현황, 지반조사, 연약지반, 설계지하수위 선정, 계측계획, 지반침하 취약구간, 차수그라우팅, 배수계획 등 총 23가지의 주요검토항목을 도출하였고 항목별 업무 가이드라인(안)을 제안하였다. 도출된 가이드라인(안)은 설계 및 시공 단계뿐 아니라 유지관리 단계를 고려하였으며, 다양한 기관의 전문가 자문을 받아 지하안전평가 업무 특성에 맞도록 구성하였다. 우리공사 최초로 수립된 ‘고속도로 지하안전평가 업무가이드라인(안)’을 통해, 지하고속도로 업무 담당자에게 도움이 되고, 안전한 지하고속도로 구축에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김찬우, 이지영, 최정식, 전윤수, 김낙영. “서울시 대규모 지하개발사업 현황 고찰”. 자연, 터널 그리고 지하공간, 25(2), 28-45, 2023
2. 강인철, 강인규, 광창진, 금동성, 김대현, 김태문, 송승언, 신주열, 오세길, 이봉열, 이인영, 이종현, 이중재, 정택동, 조성하, 서백년, 이지영, “서울상도유치원 인근 공사장 붕괴 사고 진상조사 보고서”. 서울상도유치원 사고진상조사위원회. 동작구청, 2018
3. 이승호, 여규권, 이봉열, 김현기, 김은섭, 김영진, 이진용, 김현재, 오광진, “양양군 땅꺼짐 사고조사 보고서”. 중앙지하사고조사위원회. 국토교통부, 2022
4. 정상섭, 백승철, 김경식, 김덕용, 김동준, 정경식, 박종전, 장연수, 백경중, 조성하. “OO동 OO현장 공사장 붕괴사고 원인분석 및 인접건물 안전진단 등 연구보고서”. 한국지반공학회, 2018
5. 민용배, 이호, 정덕교, 윤만수. “해안가 인접지역의 투수특성을 고려한 차수그라우팅 시공사례 연구”. 2023년 봄 학술발표회. 한국지반신소재학회, 2023
6. 한국철도시설공단, “노반붕괴사고 원인조사 및 대책”. 한국지반공학회, 2007
7. 이영생, “흙막이 사고사례 분석을 통한 붕괴원인 및 예방에 대한 연구”. 석사학위논문. 경기대학교 공학대학원, 2018
8. 국토교통부, 국토안전관리원, “2023 지하안전 통계연보”. CS-XXX3-E6-009, 2023
9. 국토교통부. “지하안전평가서 표준매뉴얼”, 개정3판, 2023
10. 한국터널지하공간학회 및 한국토지주택공사 (2020). 도심지터널 지하안전평가 평가기준 수립, 한국터널지하공간학회

도 서 정 보

1. 연구보고서 번호 : 연구원-2023-58-534.9607호	2. 도서목록번호	3. 수령번호	
4. 제 목 지하공간 굴착공사 사고사례 기반 지하안전평가 업무가이드라인 수립	5. 발간년월일 : 2024년 2월		6. 연구수행 기관명 코드
	7. 연구담당자와 소속연구실 지하안전평가센터 이항로		8. 연구보고서 발간번호
9. 연구수행기관 또는 부서 한국도로공사 도로교통연구원	10. 사업분류코드		11. 계약 또는 인가번호
	12. 연구제안 부서 또는 기관명 한국도로공사 도로교통연구원		13. 연구기관과 보고형태
		14. 연구의뢰 기관명코드	
15. 기타사항			
16. 요 약 : 우리나라의 고속도로 중 지하도로(터널)의 연장은 총 962km(2023년 末)에 달하며, 수도권 지하고속도로 구축계획을 포함한 신설노선에서 터널의 비율은 점점 증가하는 추세이다. 이와 같은 좁은 국토의 입체적 활용 노력과 토목기술의 발달은 영동대로 지하공간 복합개발, 광역철도(GTX; Great Train Express) 등 지하개발사업을 가능하게 하였지만, 동시에 지하 시설물이 점차 도심도, 대규모, 고밀도화됨에 따라 지반침하 등의 지하안전 사고의 위험성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 당면과제로 다가온 지하고속도로의 안전한 구축을 위해 사고사례에 기반한 우리공사의 지하안전평가 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 대형 터널 및 굴착공사에서 발생한 25가지의 지하안전 사고사례의 원인과 대책을 고찰하고, 설계단계에서 이루어지는 지하안전평가 항목과 연계하여 23가지의 주요검토항목 및 주안점을 도출하였다. 최종적으로 주요검토항목 별 업무가이드라인(안)을 제시하였다. 도출된 가이드라인(안)은 설계 및 시공 단계뿐 아니라 유지관리 단계를 고려하였으며, 다양한 기관의 전문가 자문을 받아 고속도로 업무 특성에 맞도록 구성하였다. 우리공사 최초로 수립된 ‘고속도로 지하안전평가 업무가이드라인(안)’을 통해, 지하고속도로 업무 담당자에게 도움이 되고, 안전한 지하고속도로 구축에 기여하고자 한다.			
17. 키워드: 지반침하, 사고사례, 지하안전평가, 가이드라인		18. 발행부서 및 배포구분	
19. 비밀구분	20. 비밀페이지	21. 총페이지 99	22. 가격

INFORMATION

1. Report No. KECRI-2023-58-534.9607	2. Accession No.	3. Receipt No.	
4. Title and Subtitle Establishment of the Underground Safety Evaluation Guideline based on Analysis of Ground Subsidence Accidents at Underground Development Sites		5. Report Date : 2024. 2.	
		6. Performing	
7. Researchers Underground Safety Evaluation Center Lee, Hang-Lo		8. Performing Organization Report No.	
9. Performing Organization Name or Department Korea Expressway Corporation Research Institute		10. Work Unit Code	
		11. Contract or Grant No.	
12. Sponsoring Agency Name and Address Korea Expressway Corporation Research Institute		13. Type of Report and Period Covered	
		14. Sponsoring Agency	
15. Supplementary Note			
16. Abstract : Among Korea's highways, the total length of underground roads (tunnels) is 962km by the end of 2023, and the portion of tunnels planned, such as underground highways construction in the metropolitan area, has been gradually increased. Such efforts to utilize the small national area and the development of civil engineering technology have made possible underground development projects such as Yeongdong-daero underground complex development and the Great Train Express (GTX). However, underground facilities are gradually becoming deeper, larger-scale, and more dense at the same time. This situation has been more increasing the risk of underground safety accidents such as ground. In this study, the underground safety evaluation guideline based on ground subsidence accidents is established to ensure safe construction of underground highways. We analyzed the causes and countermeasures of 25 underground safety accidents that occurred in large tunnel and excavation construction, and subsequently derived 23 major checklist for review in connection with underground safety evaluation. Finally, we presented the guidelines(draft) for each major checklist. The derived guidelines considered not only the design and construction stages but also the maintenance stages, and were structured to suit the characteristics of highway construction and design. Through the 'Highway Underground Safety Evaluation Guidelines (Draft)' established for the first time by our corporation, we hope to be helpful to those in charge of underground highway work and contribute to the construction of safe underground highways.			
17. Key Word : Ground Subsidence, Accident Case, Underground Safety Evaluation, Guideline		18. Circulation and Distribution Statement	
19. Security Classify	20. Security Page	21. No. of Page 99	22. Price

보고서 집필 내역

구분	소속 및 직책	성명	집필 부분	비고
연구책임자	지하안전평가센터 책임연구원	이항로	총괄	-
참여연구자	지하안전평가센터 책임연구원	김영호	제5장	-
	지하안전평가센터 책임연구원	유영무	제3장	-
	지하안전평가센터 과장	채홍제	제4장	-
	안전혁신연구실 책임연구원	정지희	제1장	-
	지하안전평가센터 센터장	이지영	제2장	-
	(주)에스앤이피엔씨		제2장, 제3장, 제4장, 제5장	위탁 용역

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원에서 수행한 연구성과물로써
정부와 공사의 정책이나 견해와는 관계없으며, 공사의 승인없이 연구내용의
일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

발행처 :  한국도로공사 도로교통연구원

우편번호 : 18489

주 소 : 경기도 화성시 동탄순환대로 17길 24

전 화 : 031-8098-6161

F A X : 031-8098-6149

홈페이지 : <http://www.ex.co.kr>

발행월 : 2024년 2월

지하공간 굴착공사 사고사례 기반 지하안전평가 업무가이드라인 수립

Establishment of the Underground Safety Evaluation Guideline based on Analysis of Accident Cases at Underground Development Sites

<http://www.ex.co.kr/research/>