

구리시 땅꺼짐 사고조사 보고서

2020. 12.



제출문

국토교통부장관 귀하

본 보고서를 "구리시 땅꺼짐 사고조사 보고서"로 제출합니다.

2020. 12.

중앙지하사고조사위원회 위원장 정*기

< 중앙지하사고조사위원회 위원명단 >

구 분	성명	소 속	직 위			
위원장	정*기	서울대학교 교수				
	김*영	한국도로공사	선임연구위원			
	박*준	한서대학교	교수			
	김*주	동국대학교	교수			
위원	정*형	한국건설기술연구원	연구위원			
	박*선	한국토지주택공사	실장			
	이*용	강원대학교	교수			
	김*재	부산대학교	교수			
간사	오*진	국토안전관리원 사무국장				

본 사고조사보고서는 민·형사 관련 재판 등 법률적인 판단이 요구되는 곳에 적용할 수 없으며, 유사원인에 의한 지반침하사고의 예방에 활용할 수 있습니다.

국토교통부 구리시 지반침하사고 중앙지하사고조사위원회

본 보고서의 무단복제를 절대 금합니다.

목 차

1.	서론	····1
	1.1. 개요	1
	1.2. 조사위원회 활동	1
2.	사고발생 현황	3
_	21 사고 개용 ······	3
	2.2. 피해 상황	3
3.	과업 내용 및 방법	····6
	3.1. 과업 수행 개요 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	····6
	3.2. 조사 및 분석 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	····6
4.	사고 원인 분석	·10
	4.1. 지질학적 특성 및 지하수위 변동 특성	10
	4.2. 사고 발생 지역의 지반특성	··14
	4.3. 지중매설관 현황과 땅꺼짐 연관성	23
	4.4. 터널 설계 및 시공 현황	· 4 3
	4.5. 지하터널 공사 관련 규정 검토 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	·69
	4.6. 종합 분석	··72
5.	결언	.73
	5.1. 요약 및 결론	73
	5.2. 재발방지 대책	75

1. 서론

1.1. 개요

본 보고서는 2020년 8월 26일 경기도 구리시 교문동에서 발생한 땅꺼짐 사고에 대해서 정확한 원인을 규명하기 위해 구성된 『국토교통부 중앙지하사고 조사위원회 (이하 '조사위원회')』 활동의 최종결과물로서, 이번 사고와 관련된 각종 정보, 자료의 수집과 조사 및 해석 결과를 토대로 사고 원인의 규명과 재발 방지 대책을 제시하는 내용으로 구성되었다.

1.2. 조사위원회 활동

1.2.1. 조사위원회 현황

- 위 원 장 : 정 *기 (교수, 서울대학교)
- 위 원 : 분야별 7명 (터널 2명, 토질/지반 3명, 수리 1명, 법률 1명)
- 활동기간 : 2020. 8. 29 ~ 12. 31

1.2.2. 추진 경과

조사위원회에서는 현장 방문조사를 실시하고, 구리시, 설계자, 시공자, 감리 등 각 기관이 제출한 자료와 조사위원회의 요청에 따라 추가로 제출한 자료, 그리고 조사위원회에서 자체적으로 수집한 자료 등을 면밀히 검토하였으며, 보다 심층적 분석을 위하여 위원회 자체적으로 시추조사와 터널구조물 수치해석 등을 실시하였다. 조사 및 검토결과들은 조사위원회 회의들을 통해 공유되고 사고 원인을 도출하는데 활용되었다. 아래 표 1.2.1은 조사위원회의 추진 경과를 나타낸다.

<표 1.2.1> 조사위원회 추진 경과

순서	일시	내용			
1차 회의	2020.08.29	중앙지하사고 조사위원회 착수회의			
2차 회의	2020.09.02	위원별 사고분석 분야 설정 및 역할 배정			
3차 회의	2020.09.10	위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의			
4차 회의	2020.09.17	터널부 현장조사, 시공관계자 청문조사			
5차 회의	2020.09.23	위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의 시추조사, 관로촬영 등 용역방안 수립 터널 시공 관련 자료 검토			
6차 회의	2020.10.08	8 위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의, 터널 수초 해석 용역방안 수립			
7차 회의	2020.10.20	위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의, 위원회 운영 연장 결정(시추조사, 터널해석 등 고려)			
8차 회의	2020.11.03	위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의, 시공자 시행 시추자료 추가확보 방안 논의			
9차 회의	2020.11.17	위원 간 수집자료 검토내용 공유 및 토의, 터널시공 안전관리에 관한 분석, 재발방지 대책 개선점 토의, 구리시 제출 사고조사 중간보고서 검토			
10차 회의	2020.12.03	사고원인에 대한 분야별 소결론 토의, 최종보고서 작성 계획 등 논의			
11차 회의	2020.12.09	시공 관련 대응의 적절성 검토, 조사보고서 내용의 법률분야 세부 검토			
12차 회의	2020.12.17	사고조사 보고서 보완 및 논의, 사고조사 결과 발표 자료 관련 논의			
13차 회의	2020.12.29	사고조사 결과 발표			

2. 사고발생 현황

2.1. 사고 개요

- 위 치 : 경기도 구리시 교문동 장자2사거리 00아파트 103동 앞 본선 터널 2구간 STA 4Km 832.35
- 사고유형 : 땅꺼짐
- 사고전개:

- 2020.08.26. 15시 30분경 시공 중인 터널 막장으로 다량의 용수 토사 유입
- 터널 직상부 왕복 4차선 도로 지표 함몰 발생 (15m × 10m × 21m 정도 규모)

<표 2.1.1> 사고 진행 경과

순서	일시		내용	비고
1		15:10	터널 막장 작업자 철수	
2		15:30	지상부 안전요원 배치	
3	2020 08 26	15:34	땅꺼짐 시작	CCTV
Λ	- 2020.08.20	15:41 73	상수도 파열 추정	백교저수지 유량변화를
4		10.41/8		토대로 한 관망해석 결과
5		17:40	되메우기 및 복구작업 착수	
6	2020 08 27	06:30	복구작업 및 1차로 통행	
7	2020.08.27	15:30	복구 완료 및 2차로 통행	

2.2. 피해 상황

- 구조물 손실 : 도로 및 지중매설관 (인접 단지 우수관 1개, 상수관 2개, 오수관 2개, 우수박스 1개, 도시가스관 1개, 통신관 등)에 대하여 긴급 조치 시행
- 인명피해 : 없음
- 주변 환경영향 : 인근 아파트에 영향 우려로 계측 관리 중
- 긴급복구현황 : 상하수도 등 라이프라인을 긴급 복구하고, 토사로 되메우기를 실시하여 도로 주변의 추가 침하를 억제. 터널내부 현장을 보존하고 차수 및 그라우팅 보강 등을 일부 실시 및 추가 계획 중



<그림 2.2.1> 땅꺼짐 사고 위치



(a) 함몰 현황 1





 (c) 되메우기에 의한 복구 작업 후
 (d) 함몰 현장 인근 아파트

 <그림 2.2.2> 사고 상황 및 현장 주변

(b) 함몰 현황 2



<그림 2.2.3> 그라우팅 보강

<그림 2.2.4> 네일링 보강

3. 과업 내용 및 방법

3.1. 과업 수행 개요

본 과업에서 수행된 주요 항목을 요약하면 다음과 같다.

- 자료조사 : 계획, 조사 및 설계, 시공, 감리 및 감독 서류 검토
- 현장조사 : 사고현장조사 및 청문조사(공사 관계자 대상)
- 지질특성 분석
- 현장 시추조사 및 지반특성 분석
- 지중매설관 현황 및 사고관련성 조사
- 터널구조물 수치해석

3.2. 조사 및 분석

3.2.1. 자료조사

사고 상황에 대한 전반적인 파악과 원인 분석에 활용코자 설계, 시공, 감리, 행정 등 각종 자료를 조사하였으며 이에 대한 목록은 다음과 같다.

<표 3.2.1> 서류 조사 목록

구분	내용
설계도서	지반조사보고서, 설계도, 시방서, 구조계산서
시공자료	안전관리계획서, 시공계획서, 안전점검자료, 계측자료, 공문 자료
감리운영자료	작업일보, 공사감리일지, 감리보고서, 작업지시서, 회의록 등
행정자료	안전점검보고서, 상하수도 관망도 등

3.2.2. 현장조사 및 청문조사

조사위원회가 사고 현장을 방문하여 인허가 및 사업시행 관계자료, 설계도서, 안전점검 관련 자료 분석 결과를 수집하고 현장 상황을 조사하였다. 이와 함께 현장소장, 감리단장, 협력사 직원에 대하여 청문조사를 실시하였으며 사고 전 상황과 시공 적절성, 사고 시 대처 방안의 적절성, 땅꺼짐 사고 발생 당시 현장 상황, 터널 내 사고 현장의 잔토 성상, 현장 발생 오탁수와 지하수 배출 처리 문제, 페이스 매핑 작업 절차 준수 여부, 계측 결과 확인 여부 등 광범위한 정보를 수집하였다.

3.2.3. 지중매설관 현황조사 및 사고 관련성 분석

사고지역 주변의 지중매설관 위치와 유지관리 상황을 조사하였으며, 해당 사고와의 인과 관계를 밝히기 위하여 사고 시나리오를 상황별로 구성하여 각 지중매설관을 분석하였다. 사고 현장 주변의 지중매설관 현황은 표 3.2.2과 표 3.2.3와 같으며 하수도관의 노후화와 땅꺼짐의 연관성을 조사하기 위하여 CCTV를 이용한 촬영 검사를 수행하였다.

<표 3.2.2> 상수 관로 현황

	구분	규격	관저고	관종	설치년도	비고
상수	관로(보도)	ø 350mm		덕타일 주철관	1992년	28년

<표 3.2.3> 하수 관로 현황

구분		규격	관저고	관종	설치년도	비고
아스	이 수 비 가	2.5m×2.5m	3.65m	콘크리트	100214	27년
$\top \top$	TT 44			박스	1995년	교문2택지 개발
오수	관로(차도)	ø 300mm	1.9m	고강성PVC	2011년	9년
				이중벽관		한강수계2단계
	쾨크(버드)		0.1	ক না	100013	27년
	컨도(모도)	Ø 300mm	2.1m	古선	1993년	교문2택지개발

3.2.4. 지반특성 조사 및 분석

사고지역은 지표면으로부터 매립토층과 퇴적토층이 10m 이상으로 두껍게 분포하며, 그 하부의 풍화대(풍화토와 풍화암)는 하천과 지하수의 흐름으로 인한 침식에 따라 위치에 따른 두께의 변동성이 다소 크게 나타난다. 지하철 터널은 풍화암 하부의 풍화연암 또는 연암 이상의 단단한 지층 심도에 주로 위치하도록 계획되어 있으며, 물리탐사, 시추조사 및 현장시험 그리고 실내시험 등 광범위한 조사가 시행된 바 있으며, 땅꺼짐 발생구역 인근 500m 영역에서도 10 여공의 시추조사가 시행되었다. 시공 중에 시행한 선진수평보링 결과를 반영하여 지질을 분석하고, 사고 발생 후 본 조사위에서 자체 시행한 2공의 시추조사 결과와 시공사에서 시행한 9공의 시추조사를 종합하여 분석하였다. 특히 최종 분석 단계에서는 3차원 정보화 기법을 적용하여 현장 지반특성을 파악하였다.

3.2.5. 지질학적 특성 및 지하수위 변동 특성 분석

땅꺼짐이 발생한 지점의 지표지질을 분석하였으며, 과거 홍수 시 하천이 범람하게 되면서 주변 지역에 퇴적물이 쌓여 자연제방을 이루는 고결되지 않은 미고결 퇴적층이 존재하였다. 그리고, 과거 항공사진을 분석하여 해당 지점에 인접한 장자못이 과거 한강과 왕숙천을 잇는 지류의 일부였음을 확인하고 지하에 고하도(古河道)가 분포해 지하수 유동이 활발할 수 있음을 제시하였다.

3.2.6. 터널 설계 및 시공 현황 조사

터널은 굴착하는 주변지반을 주지보재로 활용하여 안전을 기하기 때문에 지반에서 이상 거동이 발생하면 응력평형 상태가 깨지며, 경우에 따라 터널 땅꺼짐 또는 국부적인 붕락으로 진행하게 된다. 일반적으로는 지하수의 영향을 직접적으로 받는 경우에 땅꺼짐과 같은 붕락 가능성이 크기 때문에, 터널 설계 시의 자료 검토와 함께 시공 시의 선진수평보링 자료, 막장면 관찰 자료, 땅꺼짐 구간의 강관다단 그라우팅 보강 및 차수 그라우팅 적용 현황을 분석하여 사고원인을 찾고자 하였다.

3.2.7. 수치해석적 방법을 이용한 함몰구간 분석

터널공사와 땅꺼짐 사고 간의 인과 관계를 보다 면밀히 파악하기 위하여 터널 굴착에 대한 3차원 수치해석(시뮬레이션)을 실시하였다. 주요 해석 내용은 다음과 같다.

<표 3.1.4> 터널 수치해석 내용

구분	내용
3차원 터널 굴착해석 (지하수 불고려)	- Case 1 : 기존 설계치 반영 - Case 2 : 사고 이후 추가 시추조사 결과 반영
3차원 터널 굴착해석 (지하수 고려)	- Case 3 : 사고 이후 추가 시추조사 결과 반영 - 시공 중 그라우팅 보강에 따른 지하수 물길 변화 파악 - 시공관리 적절성 여부 추정

4. 사고 원인 분석

4.1. 지질학적 특성 및 지하수위 변동 특성

4.1.1. 지질학적 특성 및 과거 하도

땅꺼짐이 발생한 지점의 지표지질은 제4기(Quaternary) 플라이스토세(홍적세)에 퇴적된 홍적층(Diluvium)이다(그림 4.1.1a). 홍적층은 과거 홍수 시 하천이 범람하게 되면서 주변 지역에 퇴적물이 쌓여 자연제방을 이루는 고결되지 않은 미고결 퇴적층을 의미한다. 일반적으로 미고결 퇴적층은 암석층보다 투수성 및 공극률이 크기 때문에 지하수 유동이 빠르고 물리적 침식에 취약하다.

땅꺼짐 발생 지점은 강(하천)변으로 이곳으로부터 약 0.4~1.2km 거리에 위치한 장자못은 과거 한강과 왕숙천을 잇는 지류의 일부였음을 1947년에 촬영된 위성 사진을 통해 확인하였다(그림 4.1.1b). 이 지역에는 지하에 고하도(古河道)가 분포해 지하수 유동이 활발할 수 있는 조건이다. 한편 2020년 8월 13일에 4km821.35 지점에서 터널 굴착 중 150ℓ/min의 지하수 유출량이 발생하였다. 또한 9월 17일 현장조사 시 터널 내부에서 다량의 유출수가 발생됨을 확인하였다. 이는 지하수 유동이 원활한 고하도에 인접했기 때문에 상대적으로 많은 양의 지하수가 유출된 것으로 사료된다.



<그림 4.1.1> 땅꺼짐 발생 지점 주변의 지표지질 및 과거 하도

땅꺼짐 발생 지점은 기반암인 화강암(granite) 및 퇴적층(홍적층)으로 구성되어 있으며 이들의 수평적 변동성이 매우 크다(그림 4.1.2). 그와 달리 장자못 아래 등 3공구 2-1구간 내 지하지질 중 대부분은 선캄브리아기의 편마암(gneiss)이 분포한다. 이는 본래 기반암인 편마암에 화강암이 관입한 것으로 판단된다. 이 화강암이 관입 하면서 절리 및 단층(fault) 등의 복잡한 지질구조가 불규칙하게 발달된 것으로 보인다. 이들 지질구조는 암석의 물리화학적 풍화 및 침식에 중대한 영향을 미친다.

게다가 해당 지역 화강암을 구성하는 광물들 중 사장석(plagioclase)이 가장 많 은 비중(44.1%)을 차지하는데 장석류는 다른 광물에 비해 풍화에 취약한 것으로 잘 알려져 있다. 한편 땅꺼짐 지점의 터널 상부 지층(overburden)에는 두께 약 20m의 풍화암 및 풍화토가 분포하고 있는데 이들의 두께 및 수평적인 연장성은 매우 불규칙하다.



<그림 4.1.2> 지하지질 및 터널 굴착과 지하수위의 변동(2020.06.22.~2020.08.26.)

4.1.2. 지하수위 변동 특성

지하수위(m, GL)는 땅꺼짐 발생지점인 4km832.35로부터 남쪽으로 8m 정도 떨어진 4km824의 TW-5에서 1~5일 간격으로 측정되었다(그림 4.1.3a). TW-5의 지하수위는 2020년 6월 22일 -10.64m로부터 8월 24일 -15.62m까지 4.98m 만큼 감소한 후 땅꺼짐 발생일인 8월 26일에 -14.60m로 1.02m 만큼 증가했다. 이는 다량의 강우에도 불구하고 터널 굴착에 따라 지하수위가 하강하다가 땅꺼짐과 함께 발생한 상수관 파열로 지하수위의 상승이 발생한 것으로 사료된다. TW-5 지하수위의 땅꺼짐 전 감소 속도는 2020년 8월 6일에 0.25m/day로 가장 빨랐고 8월 12일까지 대체로 상승하였다. 이와는 달리 TW-5로부터 5.3~5.8km 정도 떨어진 서울시에서 운영하는 보조 지하수 관측정들의 지하수위(그림 4.1.3b)는 강우에 반응하여 전반적으로 상승하였다.



<그림 4.1.3> 구리시 수택동의 강우량 및 땅꺼짐 지역과 인근의 지하수위

TW-5의 지하수위가 다량의 강우가 있었음에도 감소한 것은 터널 굴착 과정 중에 내부로 유출된 물을 외부로 배수하였기 때문으로 보인다. 한편 2018년 12월에 발간된 경기도의 별내선 3공구 지반조사보고서에 따르면 땅꺼짐 지점으로부터 약 100m 떨어져 있는 시추공 ST-5의 시추 종료(2015년 6월) 후 24, 48, 72시간이 경과된 안정 지하수위는 각각 -6m, -5.8m. -5.8m이다. 이는 터널 시공 전 이 지역 주변의 지하수위가 2020년 6월 22일의 지하수위보다 4.64~4.84m 위에 있었다는 것을 의미한다. 또한 ST-5의 2015년 6월 5일부터 2015년 7월 2일까지의 지하수위는 -5.8m 부터 -6.32m 까지 0.52m 만큼 감소하였다. 한편 3공구 2-1구간의 상부 터널 굴착은 하루에 1~2m 씩 진행되었고 굴착 과정에서 지하수위는 대체로 하락 했다(그림 4.1.3a).

4.2. 사고 발생 지역의 지반특성

4.2.1. 지반특성 조사 현황

지반 함몰이 발생한 구역(4km 825.8 ~ 841.7)을 포함한 별내선 3 공구 지역 일원은 하천 인근으로 매립을 통해 조성된 지역이다. 지표면으로부터 매립토층과 퇴적토층이 10m 이상으로 두껍게 분포하며, 그 하부의 풍화대(풍화토와 풍화암)는 하천과 지하수의 흐름으로 인한 침식에 따라 위치에 따른 두께의 변동성이 다소 크게 나타난다.

별내선 구간, 특히 땅꺼짐 발생 구역 일대(STA 4km ~ 5km)의 터널은 풍화암 하부의 풍화연암 또는 연암 이상의 단단한 지층 심도에 주로 위치하도록 계획되어 있다. 별내선 건설을 위하여 물리탐사, 시추조사 및 현장시험 그리고 실내시험 등 광범위한 조사가 시행된 바 있으며, 땅꺼짐 발생구역 인근 500m 영역에서도 10여공의 시추조사가 시행되었다(그림 4.2.1).



<그림 4.2.1> 땅꺼짐 발생 지역 부근의 시추조사 위치도

본 과업에서는 함몰 구역 인근의 지반특성을 1차로 기존 시추조사 결과를 토대로 예측하고, 다음으로 시공 중에 시행한 선진수평보링 결과에 따라 분석한 후, 마지막으로 사고 발생 후 본 조사위에서 시행한 2공과 시공사에서 시행한 9공의 시추조사를 활용하여 분석하였다. 특히 최종 분석 단계에서는 3차원 정보화 기법을 적용하여 현장 지반특성을 파악하였다.

4.2.2. 설계 및 시공 시 지반조사 분석

그림 4.2.1은 별내선 건설 시 수행된 땅꺼짐 발생 지역 인근(STA. 4km 550 ~ 5km 000)의 시추조사 위치를 보여준다. 땅꺼짐 지점 인근의 BN2정거장을 중심으로 11곳에서 시추조사가 이루어졌으며, 이중에 타사에서 조사한 NBH-14는 땅꺼짐 위치로부터 10m 이내에 근접해 위치하고, TB-9와 ST-5가 땅꺼짐 지역 중심으로 대척점에 대략 67.55m와 110.75m 이격되어 있다.

NBH-14를 제외하고 예측하는 경우(그림 4.2.2)에는 터널 상부에 4m 이상의 연암층이 분포하는 것으로 추정되며, 따라서 실시설계 시에는 땅꺼짐 발생 구역의 위험성을 예측하기 어려울 수 있다. 그러나, 근접한 NBH-14의 시추 조사 결과를 반영할 경우(그림 4.2.3), 땅꺼짐 영역의 터널 상부는 보통암층과 연암층이 2m 이내로 분포하고, 그 상부에 바로 풍화암층이 존재하는 것으로 추정할 수 있으며, 따라서 터널 상부 지반의 취약성을 예상할 수 있다. 즉, 주변에 비하여 땅꺼짐 발생 구역의 연암, 보통암층이 매우 얕게 분포하는, 위치에 따른 지층의 변동성이 나타난다. 그러나 시공사에서 제시한 설계자료에 근거할 때, 실시설계(2016.04) 이후 제2회 설계변경(2018.12) 시에는, NBH-14의 자료 정보를 활용한 것으로 판 단되며, 이에 따라 재설계 시에는 사고 구역의 터널 직상부에 근접하여 풍화암층 이 존재하는 것을 예측할 수 있을 것으로 추정된다.

15





굴착 중인 터널 내에서 실시한 선진수평보링의 결과(그림 4.2.4)를 살펴보면, 100m 구간 사이의 터널 시공 심도에 보통암, 연암, 풍화암, 풍화토 그리고 실트질 모래층까지 다양한 지층이 존재하는 것으로 나타나, 지층 그리고 지반 특성의 위치별 변동성이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 특히 땅꺼짐 위치(4km 825.8 ~ 841.7)의 터널 심도 지반은 RQD가 25 이하인 취약한 암반으로 구성되어 있으며, 땅꺼짐 발생 시 막장(4km 832.25) 배면 3m 구간에는 실트질 모래로 분류할 수 있는 풍화대가 형성되어 있다. 참고로 시공 중 STA. 4km 820.35의 위치에서 8월 13일 관측된 150ℓ/min/hole의 지하수 유출은 이때 사용한 강관의 길이 12m를 감안하면, 이 실트질 모래에서 유출된 것으로 추정할 수 있다. 그리고 과도한 유출수 발생에 따라 그 주변에 시행한 차수그라우팅은 오히려 막장 배면의 실트질 모래층에 지하수 유입을 촉진시켜, 과도한 수압을 유발시켰을 가능성도 있다.



<그림 4.2.4> 땅꺼짐 발생 지역 부근의 선진수평보링 결과

다만, 선진수평보링 결과의 STA. 4km 786.35 ~ 812.35 의 26m 구간은 RQD가 20 이하이고, 구간 내에서 실트질 모래 풍화대가 두 번이나 확인되었는데도 불구하고, 시공 중에 땅꺼짐이 발생하지 않았다. 이는 확인된 정보만으로 판단하기 어렵지만, 해당 구간의 시공성과 그 상부 및 주변의 지층 특성이 땅꺼짐 발생 구간과 차별되기 때문일 가능성도 있는 것으로 추정된다. 그리고 땅꺼짐 사고 바로 직전에 이러한 취약 지반에서 특이사항 없이 시공이 원만하게 이루어지게 된 것은 시공 및 감리자의 입장에서 땅꺼짐 및 안전사고에 대한 대처를 미흡하게 한 하나의 요인으로 판단된다.

4.2.3. 추가 조사와 3차원공간정보화에 의한 지반특성 평가

땅꺼짐 사고 이후 원인 규명을 위하여 사고 구역 인근에서 조사위원회 주관으로 시추조사를 2공 실시하였으며, 이후 해당 공구 시공사에서 추가로 9공의 시추조사를 실시하였다(그림 4.2.5).



<그림 4.2.5> 땅꺼짐 발생 지역 부근의 추가 시추조사 위치도

추가로 수행한 시추조사와 함께, 사고 발생 인근의 전체 시추조사 결과를 표 4.2.1에 정리하였다. <표 4.2.1> 땅꺼짐 발생 지역 부근의 지반조사 결과 종합 분석

위치	시추공	지반 특성	비고
4km700 부근	ST-4(673.6)	0~16.0m 일반토사층 16.0~21.5m 연암층	연암층: TCR은 80이상이지만 RQD는 1~21로 풍화연암층에 가까움
	ST-5(721.6)	0~14.0m 일반토사층 14.0~26.2m 연암층	_
4km810 부근	NBH-14(816.42)	0~17.3m 일반토사층 17.3~20.3m 풍화암층 20.3~21.5m 보통암층 21.5m~ 하부 경암층	보통암층: TCR 67, RQD 39 → 연암으로 볼 수도 있음
	BH-5(806.40)	0~17.0m 일반토사층 17.0~19.0m 풍화암층 19.0~35.0 풍화연암층	풍화연암층: 풍화연암으로 분류하였지만 상대적으로 양호함(채취 시료)
4km835 보그	BH-2(832.22)	0~18.0m 일반토사층 18.0~19.4m 풍화암층 19.4~24.1m 연암층 24.1m~ 보통암층	22.0~24.0m에 풍화암으로 추정되는 층 존재 (채취 시료에서 확인)
부근	BH-6(836.64)	0~21.0m 일반토사층 21.0~32.3m 연암층	23.2~23.7m, 24.3~25.8m 부근에 심하게 파쇄된 층 존재 (채취 시료)
	BH-1(847.74)	0~19.0m 일반토사층 19.0~20.7m 풍화토층 20.7~35.0m 연암층	19.0~26.0m 부근까지는 파쇄가 심함 (채취 시료)
	BH-2(847.60)	0~19.2m 일반토사층 19.2~20.5m 풍화토층 20.5~23.0m 연암층 23.0~35.0m 보통암층	21.5~22.5m는 균열이 다소 심함 (채취 시료)
4km848 부근	BH-3(849.74)	0~18.9m 일반토사층 18.9~21.0m 풍화암층 21.0~24.7m 연암층 24.7~35.1m 보통암층	21.0~24.7m는 부분적으로 파쇄가 심함 (채취 시료)
	BH-7(852.08)	0~19.2m 일반토사층 19.2~21.2m 풍화암층 21.2~36.0m 연암층	풍화암층은 풍화토층과 구분이 안됨. 23.4m부근 대략 0.5m층은 파쇄가 심함 (채취 시료)
	BH-9(845.31)	0~19.0m 일반토사층 19.0~20.5m 풍화토층 20.5~21.7m 풍화암층 21.7~35.0m 연암층	23.2~23.7m 부분에 파쇄대, 이외의 연암층 상태는 대체로 양호 (채취 시료)
4km900 0~11.8 부근 TB-9(899.9) 비용 14.0~1 18.2~		0~11.8m 일반토사층 11.8~14.0 풍화토층 14.0~18.2m 풍화암층 18.2~36.5m 연암층	연암층 TCR은 81이상, RQD는 26m 심도까지는 30이상, 26m 하부에 RQD가 20이하인 파쇄대 구역이 일부 있음.

땅꺼짐에 주된 영향을 미치는 터널 시공 구간의 직상부를 중심으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 4km 700 부근에는 터널 직상부에 연암층이 5m 내외의 두께로 분포하고, 그 상부에 충적층이 존재한다.
- 4km 810 부근은 터널 직상부에 2m 내외의 연암층 그리고 그 위로 풍화대가 분포하여 시공 구간의 상부 지반특성이 취약한 것으로 판단된다.
- 함몰 발생 시 막장 위치인 4km 835부근은 터널 직상부에 2m 이내의 얇은 연암층 그리고 그 위에 1m 내외의 풍화대 또는 토사로 분류되는 충적층이 바로 분포한다. 또한 터널 시공 심도에도 파쇄가 심한 지층이 분포하는 것으로 나타났다.
- 사고 발생 구역 이후의 미시공 구간인 4km 850에도 터널 상부에 1m 내외의 연암층과 함께 풍화대가 바로 나타나서 취약한 것으로 평가된다.
- 그러나 4km 900에는 터널 직상부에 4m 이상의 연암층이 존재하는 것으로 나타나서 상대적으로 지반특성이 양호한 것으로 판단된다.

즉, 사고 발생 인근의 200m 터널 시공 구간에서 시행한 시추조사 결과를 검토해볼 때, 4km 800 ~ 890 구역은 그 밖의 영역에 비하여 터널 직상부에 상대적으로 취약한 풍화대 또는 토사층이 존재하므로, 이 구간에서는 땅꺼짐 사고 발생에 대한 위험성이 높았을 것으로 추정된다.

추가로 수행한 시추조사 결과와 기존의 시추조사 자료 그리고 시공 중 수행한 선진수평보링 결과를 종합하여, 사고 발생 구역 부근 (4km 800 ~ 880)에 대하여 AI 기반의 자료 모사 기법을 이용하여 3차원공간정보화를 실시하였다. 이를 통해 대상 구역의 지층 변화 및 지반 특성에 대한 공간적 정보를 취득하였으며, 그 결과로 얻어진 터널 방향 기준 지층의 종단면도는 그림 4.2.6과 같다.

터널 중심의 종단면도상에서 터널 단면 상부와 직상부 영역의 지반이 위치에 따라 풍화암과 연암이 교행하는, 위치별 변동성이 매우 큼을 알 수 있다. 함몰 구역을 포함한 4km 800 ~ 840 구간은 터널 상부 단면이 주로 풍화암으로 구성되어 지층의 취약성을 확인할 수 있다. 그러나, 그로부터 3m 하부는 취약한 풍화암이 나타나지 않고, 연암 이상의 단단한 지층으로 구성된다.



<그림 4.2.6> 3차원 공간정보화 결과 예측한 지층 종단면도



<그림 4.2.7> 3차원 공간정보화 결과 예측한 지층 횡단면도

그림 4.2.7의 사고 발생 시 막장면 위치의 횡단면의 지층 구성은 터널 위치의 단면 상부와 그 직상부가 주변보다 풍화암과 풍화토가 두껍게 분포하여 지반이 취약함을 알 수 있다. 즉, 3차원공간정보 해석 결과로부터, 대상 구역은 전반적으로 지반의 위치별 변동성이 큼을 알 수 있으며, 땅꺼짐이 발생한 영역은 종·횡방향으로 터널 시공 상단면과 직상부 심도에 주변보다 풍화대(풍화암과 풍화토)가 두껍게 분포한다. 이러한 3차원 공간정보 결과는, 발생한 땅꺼짐이 해당 구역의 취약한 지반 특성이 원인임을 알 수 있는 근거를 제공하여 준다.

결론적으로 땅꺼짐 사고의 기술적 원인은 설계 시에는 예측하지 못한 사고 발생 구역 터널 직상부의 풍화대 지층과 막장 배후면에 풍화도가 심한 실트질 모래층 등의 취약 지반이 존재하는 것이며, 이에 따라 터널 주변에 작용하는 높은 토압과 수압에 의해 터널의 막장 주변이 붕괴하여 발생한 것으로 판단된다. 시공 이전인 실시설계 시에 주어진 자료만으로는 이러한 지반의 취약성을 확인하여, 반영하기는 불가하였다고 판단되지만, 이후 인근에서 수행한 타사의 시추조사 자료 (NBH-14)와, 사고 13일 전 땅꺼짐 구역 인근 10m 이격거리(STA. 4km 821.35)의 지하수 과다 유출 현상 그리고 사고 영역 부근에서 수행한 선진수평보링의 결과로부터 막장 배후면(STA. 4km 832.35 ~ 835.35)의 실트질 모래 존재 등 지반의 취약성을 예상하는 것이 가능함에도 이러한 제반사항을 면밀히 검토하여 설계 및 시공에 반영하지 못한 것이 땅꺼짐 사고를 발생시킨 하나의 가능성 있는 원인으로 추정된다.

4.2.4. 소결론

- 땅꺼짐 발생 지역 부근의 별내선 구간(STA. 4km 700 ~ 5km 000)은 지반의 변동성, 즉 위치별 지층의 변화가 매우 크다. 특히 땅꺼짐 발생 구역(STA. 4km 825.8 ~ 841.7)은 인근 구역과 달리 터널 직상부가 얇은 연암층과 함께 풍화암으로 구성되어 있고, 땅꺼짐 발생 시 막장 배후면은 풍화가 심한 실트질 모래로 나타났다.
- 시공 이전인 실시설계 시에 시추를 포함한 지반조사 자료만으로는 이러한 지반의 취약성을 확인하여 반영하기는 불가하였다고 판단되지만, 이후 인근에서 수행한 타사의 시추조사 자료와 사고 13일 전 땅꺼짐 구역 인근의 지하수 과다 유출 현상, 그리고 사고 영역 부근에서 수행한 선진수평보링의 결과 등 제반사항을 면밀히 검토하여 설계 및 시공에 반영하지 못한 것은 땅꺼짐 사고를 발생시킨 하나의 가능성 있는 원인으로 추정된다.

4.3. 지중매설관 현황과 땅꺼짐 연관성

지중매설관과 땅꺼짐의 연관성에 대해서 상수도관 파열과 땅꺼짐 연관성 및 하수도관 노후화와 땅꺼짐 연관성을 조사하고 분석 및 정리하였다.

4.3.1. 지중매설관 현황

구리시 땅꺼짐 지점은 도심지 구간으로 오수, 우수, 상수, 통신관 및 가스관 등의 주요 관로들이 지하에 매설되어있는 것으로 확인되었다. 오수관은 2개의 관로가 차도 및 보도 지하에 하나씩 매설되어있으며, 우수관은 콘크리트 박스로, 상수관은 보도 지하에 350mm 규격의 관로로 매설되어있는 상황이다.

대부분의 지중매설관은 사고지점 터널 천단부 중심 직상부에서 보도 측으로 17.401m~21.183m 떨어진 위치에 매설되어있다.

표 4.3.1 및 표 4.3.2에 상·하수관로를 정리하였으며, 그림 4.3.1 및 그림 4.3.2에 지중매설관 현황을 도시하였다. 기타 통신관 및 가스관이 지하에 매설되어있음을 확인하였다.

통신관은 다양한 관경의 관로가 아래 표 4.3.3과 같이 매설되어있으며, 가스관 에 대한 정보는 입수할 수 없어서 정리하지 못하였다.

구분		규격	관저고	관종	설치년도	비고
상수	관로(보도)	ø 350mm	_	덕타일 주철관	1992년	28년

<표 4.3.1> 상수 관로 현황

<표 4.3.2> 하수 관로 현황

구분		규격	관저고	관종	설치년도	비고
우수	우수 박스	2.5m×2.5m	3.65m	콘크리트 박스	1993년	27년 교문2택지 개발
오수	관로(차도)	Ø 300mm	1.9m	고강성PVC 이중벽관	2011년	9년 한강수계2단계
	관로(보도)	Ø 300mm	2.1m	흄관	1993년	27년 교문2택지개발

<표 4.3.3> 통신 관로(통신시설) 현황

구분	규격	관저고	관종	설치년도	비고
통신관	Ø 100mm	_	PVC	1992	
동케이블	0.4-900JFS	_	_	2002	
동케이블	0.4-1500JFS	_	_	1994	
동케이블	0.4-2400JFS	-	-	2004	
동케이블	0.4-3600JFS	-	_	2002	
광케이블	SM-114C	_	_	2004, 2009	
광케이블	SM-72C	_	_	1999, 2001	
광케이블	SM-48C	_	_	2014	
광케이블	SM-24C	-	-	2013	
광케이블	SM-4C	_	—	2008	



<그림 4.3.1> 땅꺼짐구간 지장물 현황도



<그림 4.3.2> 땅꺼짐구간 단면도

사고현장 지중매설관의 분포에 대한 이해를 돕기 위하여 그림 4.3.3과 그림 4.3.4에 구리시 땅꺼짐 지역의 지중매설관 현황을 2차원 및 3차원 실측 캐드도면으로 도식 정리하였다. 터널 천단부는 상수도관 바닥으로부터 19.96m하부에 존재하고, 오수관 바닥으로부터 19.53m하부에 존재한다.



<그림 4.3.3> 지중매설관 2차원 현황(캐드도면)



<그림 4.3.4> 지중매설관 3차원 현황(캐드도면)

4.3.2. 지중매설관 중심 사건 경과

- 일시 : 2020. 08. 26 (수) 15:30 경
- 장소 : 터널2구간 4km 832.35 막장

- 피해 현황
 - 사고지역 (1차) 침하영역은 약 15m×10m×21m
 - 피해 현황을 간단하게 정리하면 상수도관(D350) 10m, 신호등 1개소, 가로등 전선 파손, 도시가스관(D200) 변형에 따른 공급 중단 등
- 사고 진행경과 (현대측 확인)
 - 15:15 ~ 15:30 경 : 터널막장 부석 다량 발생에 따른 공사중지, 상부도로
 땅꺼짐 증후 및 차량 출입통제 실시
- 사고 진행경과 (인근상가 CCTV영상 자료)



① 15:34:00~15:34:07 도로균열 진행

② 15:34:08~15:34:14 땅꺼짐 시작 및 먼지 솟음 (상수도 물 솟음 없음)



③ 15:35:38 신호등 전도



④ 15:36:05 1차 땅꺼짐



⑤ 15:39:07~15:48:03 2차 땅꺼짐 (땅꺼짐 부위 확장)



⑥ 15:48:11 완전 땅꺼짐 (상수도 물 솟음 없음)



⑦ 15:41~16:23 경 : 백교저수지 유출유량 증가 확인

4.3.3. 상수도관 파열과 땅꺼짐 연관성

4.3.3.1. 백교배수지 유량 변화를 이용한 상수도관 파열시간 예측

상수도관 파열시간 예측을 위하여, 백교배수지와 사고지점 사이의 관망을 조사한 후, 이를 최대한 반영할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하여 해석을 수행하였다. 관망의 해석에 대해서 정리하면 다음과 같다.

- 관망(pipe network)이란 여러 개의 관이 서로 복잡하게 연결되어 폐합회로 혹은 망을 형성하는 것이다.
- 관망의 해석은 연속방정식과 Bernoulli 방정식을 적용하며, 관망을 형성하는 개개의 폐합회로에 대한 연립방정식을 풀어 각 관에 배분되는 유량과 관 내 수압을 계산하는 해석법이다.
- 관망 해석을 위해 만족시켜야 하는 두 가지 조건 방정식은 다음과 같다.
- 교차점 방정식(junction equation) : 관망을 형성하는 개개 교차점 (junction)에 유입되는 유량의 합과 유출되는 유량의 합이 같아야 한다. 즉,
 ∑Q_{유입} = ∑Q_{유출}을 만족해야 한다.

② 폐합회로 방정식(loop equation) : 관망상의 임의의 두 교차점 사이에서 발생되는 손실수두의 크기는 두 교차점을 연결하는 경로에 관계없이 일정 함으로 어떤 폐합회로에서 발생하는 손실수두의 합은 영이 되어야 하며, 다시 설명하면 ∑h_t = 0을 만족해야 한다.

다음 그림 4.3.5를 이용하여 관망의 해석에 대해서 설명하면 다음과 같다.

다음 그림의 폐합회로 A(Loop A)에서 화살표 방향으로 유량이 흐른다고 가정할 때, 교차점(junction) b, c, d, e 각각에서는 교차점으로 흘러들어오는 유량과 흘러나가는 유량이 같아야 한다(교차점 방정식). 또한, 회로 내의 반시계방향의 흐름으로 인해 관로 bc와 cd에서 생기는 마찰손실은 시계방향의 흐름으로 인해 관로 bc와 ed에서 생기는 마찰손실의 크기와 같아야 함.



<그림 4.3.5> 관망 해석 예시

(1) 백교배수지와 사고지점 사이의 거리 및 관망도

구리시 땅꺼짐 사고지점의 유입구 유량계는 상수도를 공급하는 백교배수지로 부터 약 1.2km 떨어진 곳에 위치한다. 사고지점에 상수도를 공급하는 백교배수지와 사고현장이 위치한 지점의 개략적인 상수관망도 그림 4.3.6을 살펴보면, 분기되는 관의 정확한 관경이나 길이 등은 알 수 없지만, 중간에 분기되는 지점이나 급수 지점이 여러 곳 존재하는 것은 알 수 있다.

분석에 앞서 정확한 상수관망 정밀자료, 즉 관로의 관경, 길이, 관의 경사 등이

확보되지 않아 정확한 관망의 구성을 알 수 없으나, 다음 그림과 같이 개략적인 관망자료를 이용하여 백교배수지와 사고지점 사이의 거리를 측정한 결과는 1,211.66m이다(그림 4.3.7).



<그림 4.3.6> 백교배수지와 사고현장 사이 관망도



<그림 4.3.7> 백교배수지와 사고지점 사이의 상수관망 (캐드 관망도를 사용하여 추정)

(2) 백교배수지와 사고지점 사이의 관망 해석

백교배수지와 사고지점 사이의 관망의 관경과 길이 정보만을 가지고 대략적인 관망해석을 위해 EPA-NET모형(Environmental Protection Agency) 구축하였다. EPA-NET** 모형 구축을 위해, 다음 그래프와 같이 백교배수지와 4-1-3블록 유량계의 10분 간격 관측치를 적용하여 절점의 수요량으로 설정하고, 2020년 8월 26일 14:00부터 17:50까지의 모형을 10분 단위로 모의(simulation)하도록 구축하였다. ** 참고: EPA-NET은 1993년에 미국 환경청(Environmental Protection Agency)에서 개발한 상수관망 해석 및 설계에 널리 활용되고 있는 공개 소프트웨어이고 프로그램 다운로드 웹주소 (https://www.epa.gov/water-research/epanet) 임.

관망해석결과 그림 4.3.8에서 정리한 것과 같이 백교배수지의 유출 유량증가분 (Δ*Q*=1,159.5m³/hr)과 4-1-3블록 유입구 유량계의 관측 유량의 증가분(Δ*Q* =1,138.7m³/hr)이 같은 시간에 거의 비슷한 양으로 산정됨으로, 백교배수지의 유량 증가분(Δ*Q*)이 사고지점의 상수관 파열에 기인한 것임을 추정할 수 있다.



<그림 4.3.8> 백교배수지와 사고지점 유입 유량계의 유량 관측값

관망해석 과정을 설명하면, EPA-NET 모형 구축을 위해 백교배수지와 사고지점 사이의 분기되는 유량값을 알 수는 없지만, 분기되는 유량의 합이 백교배수지에서의 유출량 값이 되도록 적절히 분배하여 구성한다.

그림 4.3.9의 EPA-NET 모형 중 Junction 2와 Junction 3은 백교배수지에서 사고지점까지 1,100mm 관으로 오는 동안 유량의 분기가 발생하는 지점이며, Junction 4는 사고지점이 존재하는 4-1-3 블록으로 350mm 관으로 분기가 발생하는 지점이고, Junction 5는 4-1-3 블록으로 분기된 후 계속 1,100mm 관으로 하류로 유량이 흘러가는 지점이다. 분기가 발생한 후, 4-1-3 블록의 Junction 7이 유량계가 설치된 절점이며, Junction 4, 6, 7은 수요량이 발생하지 않는 절점이다.



<그림 4.3.9> EPA-NET 모형 구축

EPA-NET 모형의 유량 단위 중 관측치의 유량 단위인 m³/hr에 가장 근접한 ℓ/min의 단위를 이용하여 모형을 구성하였으며, 각 절점의 시간별 수요량은 다음 그림 4.3.10과 같으며, 표로 나타내면 다음 표 4.3.4와 같다.



<그림 4.3.10> 백교배수지와 4-1-3블록 유량계 유량 관측값 및 사고지점 사이에 존재하는 절점(J2, J3, J5)의 유출량(가정)
	유량 (ℓ/min)										
time	4-1-3블록유량계	junction	junction 3	junction 5	백교배수지						
	(Junction 8)	2 유출량	유출량	유출량	유출량						
14:00:00	406.7	5126.3	4271.9	7282.7	17087.5						
14:10:00	485.0	5437.5	4531.3	7671.3	18125.0						
14:20:00	438.3	6228.8	5190.6	8904.8	20762.5						
14:30:00	2251.7	5925.0	4937.5	6635.8	19750.0						
14:40:00	2325.0	6776.3	5646.9	7839.4	22587.5						
14:50:00	2320.0	5107.5	4256.3	5341.3	17025.0						
15:00:00	2251.7	6300.0	5250.0	7198.3	21000.0						
15:10:00	2188.3	5801.3	4834.4	6513.5	19337.5						
15:20:00	440.0	4533.8	3778.1	6360.6	15112.5						
15:30:00	480.0	3915.0	3262.5	5392.5	13050.0						
15:40:00	685.0	3768.8	3140.6	4968.1	12562.5						
15:50:00	19663.3	3826.5	2551.0	5846.7	31887.5						
16:00:00	19791.7	3798.1	2532.0	5528.7	31650.5						
16:10:00	19913.3	3798.0	2532.0	5406.7	31650.0						
16:20:00	19446.7	3796.5	2531.0	5863.3	31637.5						
16:30:00	19933.3	3070.5	2047.0	536.7	25587.5						
16:40:00	16666.7	2647.5	1765.0	983.3	22062.5						
16:50:00	643.3	2643.8	2203.1	3322.3	8812.5						
17:00:00	496.7	2103.8	1753.1	2659.0	7012.5						
17:10:00	455.0	2696.3	2246.9	3589.4	8987.5						
17:20:00	433.3	3382.5	2818.8	4640.4	11275.0						
17:30:00	430.0	3948.8	3290.6	5493.1	13162.5						
17:40:00	416.7	3390.0	2825.0	4668.3	11300.0						
17:50:00	423.3	3753.8	3128.1	5207.3	12512.5						

<표 4.3.4> 2020년 8월 26일 14:00:00~17:50:00 사이 10분 간격 각 절점의 유출량

* Junction 8 유출량은 4-1-3 블록 유량계에서 관측된 유량을 사용하였으며, 백교배수지 유출량도 관측 유량을 사용하였다. Junction 2, 3, 5의 유출량은 총 유출량이 백교배수지 유출량이 되도록 비율을 정해 배분하였으며, 가정한 유량임을 명시함. 그림 4.3.10에서 알 수 있는 바와 같이, 총합을 백교배수지에서 나오는 유출량과 맞추기 위해 Junction 2는 백교배수지 유출량의 30%, Junction 3은 백교배수지 유출량의 25%, 그리고 남은 유량을 Junction 5의 유출량으로 가정하여 계산한다.

그러나 13:50~16:40 사이의 유량을 같은 비율로 배분할 경우, 총합이 백교배수지의 유출량보다 커지므로, Junction 2는 백교배수지 유출량의 12%, Junction 3은 백교 배수지 유출량의 8%, 그리고 남은 유량을 Junction 5의 유출량으로 가정하여 재 계산하는 것이 합리적이다. 사고가 발생하고 큰 유량이 Junction 8에서 흘러나가게 되어, 전체 백교배수지 유출량에서 차지하는 비중이 커져 발생하는 현상으로 해석된다.

EPA-NET 모형을 이용하여 14:00:00~17:50:00 사이의 상수관망 모형을 모의하여 각 시간별 결과를 나타내면, 다음 그림 4.3.11과 같이 14:00:00의 유량흐름을 볼 수 있으며, 각 절점에서 요구하는 유출량을 만족시키기 위해 백교배수지에서 총합과 같은 유량이 유출되는 것을 알 수 있다.

또한, 시간이 지나 15:50:00이 되었을 때의 유량 흐름도는 다음 그림 4.3.12에 정리하였으며, Junction 8의 큰 유출량(19,663.3ℓ/min) 공급을 위해 백교배수지 에서도 증가된 유량인 31,887.5ℓ/min가 유출되고 있는 것을 볼 수 있다.



<그림 4.3.11> 백교배수지와 사고지점 사이의 14:00:00의 유량 흐름도



<그림 4.3.12> 백교배수지와 사고지점 사이의 15:50:00의 유량 흐름도

본 해석을 통해, 매 시각 모든 절점에서의 유입유량의 합과 유출유량의 합이 같아야 한다는 교차점 방정식을 만족해야 하므로, 관망 내 특정 절점의 갑작스러운 유량의 증가는 시간의 지체없이 유출량의 급격한 공급 증가를 발생함을 알 수 있었다.

이는 모의 시간 간격이 10분이 아닌 1분이 되어도 같은 결과를 발생함으로, 백교 배수지의 유출량 증가가 발생한 시각이 사고지점의 유량 증가가 발생한 시각과 일치함을 유추할 수 있다.

(3) 백교배수지의 유량변화를 이용한 사고지점의 상수도관 파열시간 예측

다음 그림 4.3.13에서 알 수 있는 바와 같이 백교배수지에서 측정한 1분 간격의 유출량 자료를 살펴보면, 15:42~16:41까지 유출량의 급격한 상승이 발생하였음을 알 수 있다.

백교배수지의 유출량은 15:40:12에도 873.00㎡/hr으로 상승하지 않았으나(그림 4.3.14), 15:41:06에 1,775.25㎡/hr으로 급격히 상승한 것으로 나타났다(그림 4.3.15).



<그림 4.3.13> 백교배수지 유출유량 변화 그래프



<그림 4.3.14> 백교배수지 15시 40분 12초 유출유량 873.00㎡/hr



<그림 4.3.15> 백교배수지 15시 41분 06초 유출유량 1,775.25㎡/hr

그러므로 앞의 관망해석 결과로부터 살펴본 바와 같이, 상수관망 내 유량의 평형 상태를 맞추기 위해 백교배수지의 유출량이 상승한 15:41:06가 사고지점의 상수관 파열시각일 것으로 추정할 수 있다. 이는 사고지점의 땅꺼짐 부위가 확장 (15:39:07; 2차 땅꺼짐)되고 약 2분 후에 사고지점 상수도관이 파열되었다고 추정할 수 있는 증거가 될 수 있다.

결론적으로 터널 붕괴 이후에 상수도관이 파열되었다고 판단할 수 있다. 백교 배수지에서 15:41:06에 유출된 물이 사고지점까지 도달하는 데 걸리는 시간은 급격히 증가된 유량이 사고지점까지 도달해야만 유량의 증가가 발생할 수 있는 것은 아니므로, 사고지점의 파열시간 추정에 의미가 없다.

4.3.3.2. 유량계를 이용한 상수도관 파열시간 예측

사고현장에서 가장 근접한 유량계(M)가 위치한 D300관은 메인관인 SP/D1,000 관에서 분기되어 4-1-3블록으로 유입되는 지점에 있다(그림 4.3.16).

땅꺼짐은 유량계(M) 위치에서 약 150m(지도에서 대략 측정) 이격된 D350관 지점에서 발생하였다(그림 4.3.16). 유량계의 순간유량 및 유속은 매시간 10분 단위로 측정되고 있었다(표 4.3.5).



<그림 4.3.16> 유량계 지점 확대 관망도

날짜	시간	순간유량(m³/hr)	유속(m/s)	CCTV 영상 자료
	14:00:00	24.4	0.098	
	15:00:00	135.1	0.545	
	15:10:00	131.3	0.530	
	15:20:00	26.4	0.106	
	15:30:00	28.8	0.116	
	15:34:00	-	-	①도로 균열 시작
202013	15:40:00	41.1	0.166	⑤땅꺼짐 부위 확장 시작
2020년 09의 96회	<u>15:50:00</u>	<u>1179.8</u>	<u>4.762</u>	⑥완전 땅꺼짐 2분 후
08월 20일	16:00:00	1187.5	4.793	
	16:10:00	1194.8	4.823	
	16:20:00	1166.8	4.710	
-	16:30:00	1196.0	4.823	
	16:40:00	1000.0	4.037	
	16:50:00	38.6	0.156	
	17:00:00	29.8	0.120	

<표 4.3.5> 4-1-3블록 순간유량 및 유속 (2020년 8월 26일)

땅꺼짐 지점으로 유입되는 4-1-3 블록 유입구 유량계의 사고일 8월 26일 14:00 부터 17:00까지 유량 변화를 분석하면, 사고 직후 15:50경 유량이 급격히 증가해 최대 유량이 1,194.8㎡/hr (16:10:00)까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다(그림 4.3.17 및 표 4.3.5).



<그림 4.3.17> 4-1-3 블록 순간 유량

또한, 땅꺼짐 지점으로 유입되는 4-1-3 블록 유입구 유량계의 사고일 8월 26일 14:00부터 17:00까지 유속 변화를 분석한 결과 사고 직후 15:50경 유속이 급격히 증가해 최대 유속이 4.823m/s (16:10:00)까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다(그림 4.3.18 및 표 4.3.5).



그러므로 CCTV 영상 자료에 의해 초기 지반 균열 및 땅꺼짐이 관측된 15:34:00에는 유량계 지점의 유량 및 유속의 증가가 관측되지 않았으므로, 사고지점의 상수도관 파열은 발생하지 않았던 것으로 보인다. 시간이 더 지난 15:40:00에도 유량계 지점에서 유량이나 유속의 급격한 증가가 발생하지 않은 것으로 관측 되었으므로, CCTV 영상 자료에서 땅꺼짐 부위가 확장되기 시작한 15:39:07에도 상수관 파열로 인한 유량 및 유속 증가는 발생하지 않았던 것으로 보인다.

갑작스런 사고지점의 상수관 파열은 관내 부압(negative pressure)을 발생시키며, 관 내 급격히 증가된 유량으로 인해 압력파(wave pressure)가 발생하게 된다.

관이 파괴된 지점을 중심으로 양쪽으로 압력파가 발생하며 4-1-3블록 유량계가 있는 지점까지 유량 변화에 따른 압력파가 영향을 미칠 것으로 판단되나, 압력 계측 자료가 확보되지 않아 정확한 영향의 정도 파악에는 어려움이 있다.

4-1-3 블록 유량계가 설치된 지점에는 일반적으로 역류방지를 위한 밸브가 설치되어 있으므로, 사고지점의 압력파는 유량계 지점까지만 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 4-1-3 블록 유량계의 관측 시간 간격이 10분이므로, 15:40:00~15:50:00 사이에 사고지점의 유량이 급격히 증가했다는 것은 분명하지만, 정확한 시간을 추정하는 것은 무리가 있다.

그러나 백교배수지 유량 증가시점이 15:41:06초이며, 이는 15:40:00 이후이므로, 백교배수지 유출량 증가 시간과 사고 발생 시간이 동일하다는 앞 절의 분석은 4-1-3 블록 유량계 계측 값에 따른 결과와도 일치한다.

4.3.4. 하수도관 노후화와 땅꺼짐 연관성

하수도관의 노후화와 땅꺼짐의 연관성을 조사하기 위하여 2020년 11월 13일에 CCTV를 이용한 촬영검사를 수행하였다.

CCTV 촬영위치는 그림 4.3.19와 같이 사고지점과 근접한 구리교문한양아파트 단지 내 우수관 2개소, 보도 오수관 1개소 및 차도 오수관 1개소로 지정했다.



<그림 4.3.19> CCTV촬영 위치도

CCTV 촬영대상 우수관 및 오수관의 배수방식, 관종, 규격 및 촬영거리를 정리하면 표 4.3.6과 같다.

<표 4.3.6> CCTV 조사대상 하수관거 (2020. 11. 13)

피그비누	상류	하류	배수	괴조	규격	연장	주행거리	
윈도민오	맨홀	맨홀	방식	선중	(mm)	(m)	(m)	
단지우수		MIL 9	0 스	흉관	450	17	17	
$MH\text{-}1{\sim}MH\text{-}2$		$M\Pi^{-2}$	ΤT	(HP)	430	17	17	
단지우수	MIL-9	MII_2	이스	흄관	450	165	165	
$MH\text{-}2\!\sim\!MH\text{-}3$		WII1-3	77	(HP)	400	10.5	10.5	
보도오수	MII_9	MII_2	ㅎ스	흉관	200	17	0	
MH-2~MH-3	$M\Pi^{-2}$	MIT-3	エ干	(HP)	300	47	0	
차도오수	MU_1	MU_9	0스	DVC	300	05	05	
$MH1{\sim}MH2$			17		500	90	95	

CCTV 조사를 통한 하수관거의 이상 항목을 표 4.3.7에 요약·정리하였다.

<표 4.3.7> CCTV 조사대상 하수관거 이상항목 요약

											0]	상	항	목										
관로번호	ĬĊ	합겨	ן	(३ १	관로 변형	<u>!</u>)	(과 연	관로 결 돌출	관	(국 이 국	관로 음· 손싱	구 뉴 ((, 장	관로 김지 애	<u>[</u>)] 물	(4 *	관로 침ㅎ	<u>!</u>) }	ן נ נ	관로 토시 퇴조	<u>!)</u> }	بة) ج	판로 표면 손싱	_) ! !
	대	Кю	소	대	Кþ	소	대	Кю	소	대	Кþ	소	대	Кþ	소	대	Кþ	소	대	Кþ	소	대	중	소
단지우수																								
MH-1			2									2												
\sim MH-2																								1
단지우수																								
MH-2			6						1			2												3
\sim MH-3																								
보도오수																								
MH-2		1												1										
~MH-3																								
차도오수																								
MH-1		1	3			1						1						1		1				
\sim MH-2																								
	0	2	11	0	0	1	0	0	1	0	0	5	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3
		13			1			1			5			1			1			1			3	

단지 내 우수관은 이음부 경미한 손상과 연결부 경미한 돌출 등이 조사되었지만 구조적으로 심각한 파손 부위는 없었다.

보도 오수관은 관로 내에 임시장애물이 다소 존재하였지만 구조적으로 심각한 파손 부위는 없었다. 차도 오수관은 미소한 관로 침하, 이음부 손상 및 관로변형 등이 발견되었고 관로 내부에 토사퇴적이 다소 많이 발견되었지만 구조적으로 심각한 파손 부위는 없었다.

사고현장 내 우수관 2개소 및 오수관 2개소에 대해서 CCTV 조사결과 중대결함은 존재하지 않음을 확인하였다.

본 조사를 통해서 하수도관의 노후화로 인한 땅꺼짐과의 연관성은 무관한 것으로 판단된다. 표 4.3.7에 정리된 하수관거 이상 항목에 대해서 조사한 보고서는 <부록. 2>에 정리하였다.

4.4. 터널 설계 및 시공 현황

4.4.1. 터널 굴착에 따른 주변지반 거동 양상

터널은 지반 자체의 지지능력을 최대한 활용하려는 항토압 구조물이므로 지중에 터널을 굴착하면 지반은 응력 변화와 지반 변형(침하/변위)이 발생하게 되고, 이러한 변형은 다음 그림 4.4.1과 같이 지반조건(물리적/역학적 특성), 유입수(지하수), 입지조건(토피고), 터널크기와 형상, 굴착방법, 지보방법 등 자연적인 조건(지질 및 지형)과 인위적인 조건(설계와 시공)이 복합적으로 상호 연관되어, 그 변형규모가 결정된다.



<그림 4.4.1> 지중에 터널굴착시 발생되는 변형 규모 관련 요인



<그림 4.4.2> 지반조건이 불량한 경우 터널시공시 지반변형과 주변 지반의 영향

일반적으로 지중에 터널 굴착 시 지반조건이 양호한 경우에는 침하 등의 변상이 발생하지 않는다. 그러나 터널 굴착 주변 지반조건이 불량한 경우에는 다음 그림 4.4.2와 같이 굴착면 주변의 지반응력 상태가 변화하고 굴착 단면의 변형과 변위가 증가되며 터널 주변의 이완영역이 발생하고 이로 인하여 지표침하 및 상부구조물의 변형이 발생하게 된다.



<그림 4.4.3> 터널설계 및 시공평가 흐름도

이와 같이 터널은 굴착 주변 지반강도 특성의 불량 여부에 따라 침하 등을 발생시키므로 불균질한 지반의 물리적, 역학적 특성을 파악하여 굴착으로 인한 변형을 예측하고 대응하여야 한다. 따라서 다음 그림 4.4.3과 같이 설계단계, 시공 단계로 구분하고 최종적으로는 시공하는 과정 중에 현장계측(막장면 관찰, 일상계측, 정밀계측)을 수행하면서 종합적인 판단으로 최종적인 안정성을 평가하게 된다.

4.4.2. 터널굴착 중 안전율 개념

터널은 굴착하는 주변지반을 주지보재로 활용하여 안전을 기하기 때문에 지반에서 이상 거동이 발생하면 응력평형 상태가 깨지며, 경우에 따라 땅꺼짐 또는 국부적인 붕락으로 진행하게 된다. 일반적으로는 지하수의 영향을 직접적으로 받는 경우에 땅꺼짐과 같은 붕락 가능성이 가장 크다고 알려져 있고 터널 굴착 중 가장 불안정한 위치는 다음 그림 4.4.4와 같이 안전율이 최소가 되는 막장면이다.



<그림 4.4.4> 터널 굴착 안전율 최소위치

터널 천장부와 상부지반이 불안정한 경우에 발생하는 붕괴유형은 다음 그림 4.4.5과 같이 연약대 붕괴, 터널 상부 공동 등으로 인한 붕괴, 침투에 의한 붕괴, 토피 부족으로 인한 붕괴를 들 수 있으며 대부분 터널 붕괴가 지표면까지 확장되는 땅꺼짐 형태의 표토층 함몰이라는 유형을 나타낸다.



<그림 4.4.5> 터널 천장부와 상부지반이 불안정한 경우 붕괴유형

4.4.3. 땅꺼짐 구간 조사현황

4.4.3.1. 시공 중 선진수평시추조사

터널 굴착으로 인한 안정성은 터널굴착 주변지반 강도의 양호, 불량의 정도에 따라 결정되게 된다. 따라서 안전한 터널 건설을 위해서는 굴착작업이 발생되는 지반의 물리적, 역학적 특성(양호, 불량 여부)을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 터널 건설의 특징을 고려하여 터널 굴착 중에는 매 막장면 마다 암질 변화/불량구간 유무와 RMR(Rock Mass Rating, 암반등급평가) 평가를 실시하여 지보패턴을 선정하여야 하고, 또한 터널시공 중 미굴착 구간에 대해서 터널 내에서 선진수평시추조사를 실시하여 향후 굴착구간에 대한 취약구간에 대한 지반조건을 분석하여야 한다. 당 현장에서는 표 4.4.1과 같이 땅꺼짐 발생 한달 여 전인 2020년 7월 18일에 해당 구역에 대한 선진수평시추조사를 실시하였다.

선진수평시추조사 결과에 의하면, 표 4.4.2와 같이 땅꺼짐이 발생한 구간이 포함된 STA 4Km832.35~835.35구간은 굴진 시 실트질 모래로 분해(TCR/RQD(%), 0) 되는 것으로 조사되었다. 또한, STA 4Km823.35~826.35구간 시추코아에 대한 RMR은 "0"로 평가되었다. 요약하면 땅꺼짐이 발생한 STA 4Km832.35 구간은 시추가 시행된 터널 상부가 국부적으로 불량한 지반조건이 형성되었다는 것이다. 당 현장에서 수행된 선진수평시추조사에서 분석된 지층상태와 RMR 평가결과는 표 4.4.2와 같다.

<표 4.4.1> 선진수평시주조사 내용

조사항목	조사구간(길이)	비고
유압식회전시추조사	STA 4K+799.35~4K+849.35	1공 실시
(NX)	(L=50.0m)	(HB-7)





<표 4.4.2(a)> 선진수평시추조사 결과(지층상태)

공번	sta.	조사심도 (m)	지층명	지층 상태	TCR/RQD (%)
	4km799.35~803.35	0.0~4.0	풍화암	 굴진시 암편섞인 실트질 모래로 분해 완전 풍화	8/0
	4km803.35~806.35	4.0~7.0		 기반암의 풍화암 와전 풍화 	21/12
	4km806.35~809.35	7.0~10.0	풍화암	 매우 약함 ~ 보통 강함 메우 시차 규여 ~ 비통 규여 	16/3
	4km809.35~812.35	10.0~13.0		• 세편 내지 단주상 코어로 회수	18/16
	4km812.35~815.35	13.0~16.0	풍화암	 굴진시 암편섞인 실트질 모래로 분해 완전 풍화 	_
	4km815.35~820.35	16.0~21.0	연암	 기반암의 연암/심한 풍화~보통 풍화 매우 약함~보통 강함 매우 심한 균열~보통 균열 심도 16.0~18.6m : 심한 파쇄 상태, 코어회수율 저조 심도 19.9~20.2m : 파쇄 상태 	42/32
HB-7	4km820.35~823.35	21.0~24.0	보통암	 기반암의 보통암 보통 풍화 약함~보통 강함 심한 균열~보통 균열 심도 21.0~21.1m, 21.4~21.5m, 23.9 ~24.0m : 파쇄상태 	69/54
	4km823.35~826.35	24.0~27.0		 굴진시 암편섞인 실트질 모래로 분해 완전 풍화~심한 풍화 	15/0
	4km826.35~829.35	27.0~30.0	풍화암	• 심도 24.0~27.0m : 세편상 코어로 회수	20/19
	4km829.35~832.35	30.0~33.0		• 심도 29.5~30.6m : 단주상 코어로 형성	19/14
	4km832.35~835.35	33.0~36.0	풍화암	 굴진시 실트질 모래로 분해 완전 풍화	
	4km835.35~838.35	36.0~39.0		 기반암의 연암 심한 풍화~보통 풍화	34/0
	4km838.35~841.35	39.0~42.0		 매우 약함~보통 강함 매우 심한 균열~보통 균열 	72/25
	4km841.35~844.35	42.0~45.0	연암	• 절리 및 파쇄 발달 • 심도 36.0~39.0m, 45.0~48.0m	77/37
4	4km844.35~847.35	45.0~48.0		: 코어회수율 저조 • 심도 41.6~41.8m : 점토 충진	27/14
	4km847.35~849.35	48.0~50.0		• 심도 48.0~50.0m : 단주상 코어로 회수	32/12

<표 4.4.2 (b)> 선진수평시추조사 결과(RMR 평가)

공번	sta.	심도 (m)	평점	<u>RMR</u> 등급	분류	지층 상태			
	4km799.35~803.35	0.0~4.0		포경	하암				
	4km803.35~806.35	4.0~7.0	28	IV	불 량				
	4km806.35~809.35	7.0~10.0	28	IV	불 량	풍화암			
	4km809.35~815.35	10.0~13.0	26	IV	불 량				
	4km812.35~815.35	13.0~16.0	풍화암						
	4km815.35~820.35	16.0~21.0	38	IV	불 량	연 암			
	4km820.35~823.35	21.0~24.0	48	III	양 호	보통암			
	4km823.35~826.35	24.0~27.0							
HD-7	4km826.35~829.35	27.0~30.0		<u> </u>	t ol				
	4km829.35~832.35	30.0~33.0							
	4km832.35~835.35	33.0~36.0							
	4km835.35~838.35	36.0~39.0	28	IV	불 량				
	4km838.35~841.35	39.0~42.0	39	IV	불 량	1			
	4km841.35~844.35	42.0~45.0	35	IV	불 량	연 암			
	4km844.35~847.35	45.0~48.0	27	IV	불 량				
	4km847.35~849.35	48.0~50.0	25	IV	불 량				

귯분		시드	일 축		절리		절	리면 상	} 태			Ba RN	.sic /IR	절리의	수	정 RN	/I R
구간	위치	/a £ (m)	강도 (MPa)	(%)	간격 (cm)	연장성 (m)	틈새 (mm)	거칠기	충전물 (mm)	풍화도	지하수	평점	둥급	방향성 보정	평점	둥급	상태
									}								
		10.0 ~	38	16	N/A	$10 \sim 20$	>5	매끄 러움	없음	심한 풍화	습윤	31	IV	보통	26	IV	불량
		13.0	4	3	5	1	0	1	6	1	10			~5			
별 내		13.0					풍	화	암								
선		16.0															
(암 사		16.0 ~	26	32	6	$10 \sim 20$	0.1 ~1.0	매끄 러움	없음	심한 풍화	습윤	13	ш	보통	38	IV	부랴
~ 増		21.0	4	8	8	1	4	1	6	1	10			~5		1.	20
내)		21.0	28	54	8	3~10	0.1 ~1.0	약간 거침	없음	보통 풍화	습윤	52	ш	보통	18	ш	야ㅎ
복		24.0	4	13	8	2	4	3	6	3	10		111		40	111	0-2-
선 저	н	24.0					풍	화	암	1							
철	B	27.0															
3 공	7	27.0 ~					풍	화	암								
- 구		30.0															
 ਸ		30.0 ~					풍	화	암								
선		33.0															
공		33.0 ~					풍	화	암	1							
		36.0															
		36.0 ~	15	0	6	$10 \sim 20$	1~5	매끄 러움	없음	심한 풍화	습윤	33	IV	보통	28	IV	불량
		39.0	2	3	8	1	1	1	6	1	10			~5			
		39.0 ~	28	25	6	3~10	0.1 ~1.0	매끄 러움	견고 (<5)	보통 풍화	습윤	44		보통	39	IV	불량
		42.0	4	8	8	2	4	1	4	3	10			~5			
									1								

<표 4.4.3> 선진수평시추 시편에 대한 RMR 세부평가 결과

그림 4.4.6과 같이 땅꺼짐이 발생한 STA 4km832.35에서 3m 후방지점 STA 4km835.35까지가 특히 상대적으로 거의 토사화된 지층이 터널 굴착면 상단부에 국부적으로 존재하는 것으로 조사되었다. 일반적으로 이러한 지층조건의 경우에 는 터널 굴착 시 안정성 확보에 중요한 아칭효과 발현이 쉽지 않다.

	시료상자	비고
HB-7 (0.0~21.0m)		
HB-7 (21.0~42.0m)		굵은선으로 표시한 부분이 땅꺼짐 구간
HB-7 (42.0~50.0m)		

<그림 4.4.6> 땅꺼짐 구간 선진수평시추조사 시추 사진

4.4.3.2. 막장면 관찰(Face Mapping) 결과

터널 시공 중 안정성과 지보패턴 적절성 판단을 위해서는 터널 내에서 수행되는 막장면 관찰(Face Mapping)이 필수적인 사항이다. 이를 정리한 막장면 관찰 (Face Mapping)일지는 터널 시공 중에는 매 막장마다 반드시 작성하게 되어 있다. 막장면 관찰(Face Mapping)일지에 표기되는 주요 내용은 막장면 ①암반일축압축 강도, ②RQD, ③절리면 간격, ④불연속면 상태, ⑤지하수 조건으로 터널 막장면 안정성과 직결되는 요소들이다. 이러한 6가지 요소들을 평가하여 RMR 값을 산정하고 계획된 터널지보패턴의 적절성을 판단하게 된다.

그림 4.4.7과 그림 4.4.8은 땅꺼짐 발생 전 막장면인 STA 4Km830.35, STA 4Km831.35에서 수행된 막장면 관찰일지(Face Mapping)이고 막장면 막장관찰에서

평가된 RMR은 "40점"으로 평가되었다. 막장면에서 평가된 RMR은 "40점"은 풍화 정도를 의미하고, 막장면 관찰(Face Mapping)일지에 표기된 절리상태를 보면 터널 붕락을 발생시킬 정도의 대규모 단층대 등은 관찰되지 않은 것으로 표기되었다.



(a) STA 4Km830.35 막장관찰 (b) STA 4Km830.35 RMR 평가 결과(40점)

<그림 4.4.7> STA 4K+830.35 막장관찰일지



(a) STA 4Km831.35 Face Mapping
 (b) STA 4Km831.35 RMR 평가 결과(40점)
 <그림 4.4.8> 4Km831.35 지점 막장관찰일지

4.4.3.3. 현장계측결과

터널공사는 지중을 굴착하는 공사로서 굴착 시 지반조건과 시공성에 따라 변형량이 변화하며, 실제 굴착 시에는 반드시 변위량에 대한 계측관리기준을 설정하고, 이에 따라 시공 관리를 해야 한다. 즉, 시공 중 계측관리 기준치를 초과하는 경우에 대비하여 그림 4.4.9, 표 4.4.4와 같이 관리기준치 수립과 단계별 대응이 중요하다.

터널 굴착 중 당 현장에서는 땅꺼짐 구간에서 가장 인접한 구간 STA 4Km824.35에서 측정된 A계측(천단침하 및 내공변위), B계측(록볼트 축력, 숏크리트 응력, 지중변위, 지중침하, 지표침하) 결과 그림 4.4.10과 같이 모두 허용치 이내로 측정된 것으로 나타났다.

현장계측 항목에서 안정성 평가 시 중요한 A계측(천단침하 및 내공변위)은 "1mm"로 미소한 값을 보이고 터널 내 설치된 지보재 록볼트, 숏크리트에 발생 되는 응력을 측정하는 B계측도 허용치 이내인 것으로 측정되었다. 따라서 현장 계측값으로는 터널굴착으로 인한 변형 등이 예측하기 어려운 안정적인 값으로 계측되었다.



<그림 4.4.9> 터널공사중 주요계측 계획(설계 시)

<표 4.4.4> 현장계측 관리기준치

표준	천	단변위 (mm)	1)	내	공변위 (mm)	2)	지.	표침하 (mm)	. 3)	숏 응i	·크리프 력(MI	≣ Pa)	축	락볼트 력(tor	nf)										
단면	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차										
TCase1	설계	1.25×	50	설계	1.25×	50	설계	1.25×	20	설계	1.25×	허용	설계	1.25×	허용										
TCase2	예상치	실계 예상치	90	예상치	실계 예상치	50	예상치	실계 예상치	30	예상치	실계 예상치	응력	예상치	실계 예상치	응력										
TCase3																									
TCase4	설계	1.25× 석계	30	설계	1.25× 석계	30	설계	1.25× 석계	25	설계	1.25× 석계	허용	설계	1.25× 석계	허용										
TCase5	예상치	예상치	00	예상치	예상치	00	예상치	예상치	20	예상치	예상치	응력	예상치	예상치	응력										
TCase6																									
TCase7																									
TCase8		1.055			1.05.4			1.05.4			1.05.2			1.054											
TCase9	설계 ····································	1.25× 설계	10	설계	1.25× 설계	10	설계	1.25× 설계	10	설계	1.25× 설계	허용	설계	1.25× 설계	허용										
TCase10	예상치	예상지 예상치		예상지 예상치		예상치	예상치		예상치	예상치		예상치	예상치	응력	예상치	예상치	응력								
TCase11																									
TCase12																									
TCase13	설계	1.25× 서게	25	설계	1.25× 서게	25	설계	1.25× 서게	20	설계	1.25× 서게	허용	설계	1.25× 서게	허용										
TCase14	예상치	예상치	20	예상치	예상치	20	예상치	예상치	20	예상치	'크게 예상치	응력	예상치	예상치	응력										
TCase15	설계	1.25× 서게	20	설계	1.25× 서게	15	설계	1.25× 서게	15	설계	1.25× 서게	허용	설계	1.25× 서게	허용										
TCase16	예상치	실제 예상치	20	예상치	실제 예상치	10	예상치	·즐게 예상치	15	예상치	실제 예상치	응력	예상치	실제 예상치	응력										
TCase17	설계	1.25× 서게	20	설계	1.25× 서게	15	설계	1.25× 서게	10	설계	1.25× 서게	허용	설계	1.25× 서게	허용										
TCase18	예상치	예상치	20	예상치	예상치	10	예상치	예상치	10	예상치	'르/기 예상치	응력	예상치	예상치	응력										
TCase19																									
TCase20																									
TCase21	설계	1.25× 선계	10	설계	1.25× 서게	10	설계	1.25× 서게	10	설계	1.25× 선게	허용	설계	1.25× 서게	허용										
TCase22	예상치	르/기 예상치	10	예상치	^{르/11} 예상치	10	예상치	^{르/11} 예상치	10) ⁽	르/기 예상치	응력	예상치	¹¹ 설계 ·치 예상치	응력										
TCase23																				예상치	예상지		예상시		
TCase24																									



(a) 천단침하 및 내공변위(STA 4Km824)



20-8-24 20-8-25

(b) 록볼트 축력계(STA 4Km+824)



(c) 숏크리트 응력계(STA 4Km824)

5.4.3

-4 -5

20-8-22

(d) 선행 지중변위계(STA 4Km700)



(e) 지중변위계(STA 4Km824)





(g) 지표침하계(STA 4Km824)

<그림 4.4.10> 땅꺼짐 인접구간 STA 4Km824 측정된 현장계측값(A계측, B계측)

4.4.4. 땅꺼짐 구간 강관다단 그라우팅 보강 및 차수 그라우팅 적용 현황

장관다단 그라우트 주입 보장 방법(Umbrella Arch Method)은 다음 그림 4.4.11과 같이 터널 진행 방향을 따라 약 12m의 강관을 터널 천단부에서 천공한 홀에 강관을 삽입한 후 강관을 통해 그라우트재를 지중에 주입하여 지반강도를 증가시킴으로써 터널 상부의 약한 지반에 의한 붕락 등의 위험에 대응하는 보강 방법이다.



(c) 종방향 아칭

<그림 4.4.11> 강관다단 그라우팅 지지 메커니즘에 대한 도식적인 설명

(b) 횡방향 아칭

(a) 강관보강 그라우팅 개요

그림 4.4.11(a)와 같이 강관다단 그라우트를 중첩시켜 터널을 보강하는데 강관 길이의 1/3~1/2 정도를 중첩시키며, 우리나라에서는 통상 1/2(6m)를 중첩시켜 사용하고 있다.

당 현장의 땅꺼짐 발생 인접구간 후방 5m(STA 4km827.35) 지점에는 다음 그림 4.4.12과 같이 소구경 강관다단 그라우팅(L=12m)이 보장, 시공되어 있다.

또한, 그림 4.4.13는 당 현장의 땅꺼짐 구간과 인접구간에 적용된 강관다단 그라우팅과 차수그라우팅 보강 적용 현황인데 소구경 강관다단그라우팅을 6m 중첩하여 설치를 한 것으로 되어있다. 그림 4.4.14는 강관다단 그라우트와 차수 그라우트 주입량, 그리고 막장면 유출수 발생량을 각각 표시한 것이다.

■ 공 사 명 : 별내선(암사~별내) 복선전철 3공구 건설공사



<그림 4.4.12> 소구경 강관다단그라우팅 설치사진 (STA 4Km827.35)



<그림 4.4.13> 강관다단그라우팅 및 차수그라우팅 보강 현황

그림 4.4.13과 같이 STA 4km 832.35(땅꺼짐 구간)에서 5m 후방에 위치한 STA 4km 827.35에서 소구경강관다단그라우팅이 적용되었는데 본 위치에서 지반 보강그라우트재 주입량은 11.24m'이 주입되었다. 그림 4.4.14와 같이 앞서 기 시공 시 적용된 주입량 보다 상대적으로 많은 양의 그라우트재가 주입되었다. 이는 선진 수평시주조사 결과에 나타난 바와 같이 대상 구역에 부분적으로 파쇄된 실트 모래층이 국부적으로 분포하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.



<그림 4.4.14> 강관다단 그라우트 주입량(STA 4km 827.35에서 증가)

또한, 그림 4.4.15와 같이 땅꺼짐 구간 11m 전방 STA 4km 821.35 막장면에서 150 ℓ/mim의 유출수가 발생하였고 터널 내 유입을 억제하기 위하여 25.78㎡의 차수그라우트가 주입되었다.



58

4.4.5. 적용된 굴착 및 지보패턴

당 현장 땅꺼짐 구간에서 시공중 적용된 지보패턴은 막장면에서 RMR평가 결과에 따라서 PD-3A를 적용하였는데 그림 4.4.16과 같다. 또한 터널 설계 시 해당위치에 선정된 지보패턴(PD-3A)으로 동일한 것으로 확인되었다.

7	느 분	PD-2A/2B/2C	PD-3A	PD-3B	PD-4A	PD-4B	PD-5	PDU-3/4
굴	착공법	링컷 /상하반분할	상하반 분할	상하반 분할	상하반 분할	상하반 분할	상하반 분할	상하반 분할
굴진장 (m)		1.0 / 1.0	1.0 / 1.0	1.0/1.0	1.2/1.2	1.5/1.5	2.0/2.0	1.0/1.0 1.2/1.2
• 숏크리트 (mm)		200	180	150	120	120	80	180 / 120
록	길이 (m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
E E	간격 (종/횡)	1.0/1.0	1.0/1.2	1.0/1.2	1.2/1.5	1.5/1.5	2.0/2.0	1.0/1.2 1.2/1.5
2	지보	H-125	H-100	70×20×30	50×20×30	_	-	H-100 / 50×20×30
라이닝 (mm)		400	400	400	400	400	400	500
보조공법		대구경 강관	소구경 강관	휘폴링	필요시 휘폴링	_	_	소구경 강관/ 필요시 휘폴링

<그림 4.4.16> 땅꺼짐 구간 적용된 지보패턴(PD-3A)(시공중, 설계시 동일한 지보패턴)

또한, 땅꺼짐 발생 전후 구간에 적용된 지보패턴을 조사한 결과, 구역별로 구분하여 PD-2C, PD-3A가 적용되었는데 STA 4km 700~712(PD-2C), STA 4km 712~984(PD-3A), STA 4km 984~5km 030(PD-2C)이 해당된다.

4.4.6. 수치해석적 방법을 이용한 함몰구간 분석

4.4.6.1. 수치해석 목적

별내선 복선전철 3공구 공사 중 발생한 땅꺼짐 사고 발생 구간에 대하여 3차원 터널 수치해석을 수행하여 사고 원인에 관한 터널 공사의 영향을 검토하였다.

4.4.6.2. 검토 구간의 지층조건

당초 설계 시 지층분포는 대체로 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암, 경암의 순서로 이루어져 있으며 터널 심도는 천단 기준으로 풍화암 내지 연암 구간을 통과할 것으로 예측되었으나, 시공 중 시행한 선진수평시추결과 터널심도에서 사고지점 기준 약 9m 후방부터 사고지점 3m 전방까지 약 12m 구간의 시추시편에 대한 RMR평가가 어려운 풍화암에 해당하는 암질 불량 구간이 있는 것으로 조사되었다.

4.4.6.3. 터널 지보패턴

당초 설계 시 본 땅꺼짐이 발생한 전후 구간은 터널 천단부에 풍화연암 내지 연암이 분포하는 것으로 파악되어 지보패턴 PD-3A를 적용토록 계획되었다.

	굴착	방법	상·하분할굴착
	굴진기	장(m)	1.0(상반)/1.0(하반)
	소그기도	ニ 別 (ma ma)	180
	굿그디드	十勿(IIIII)	(강섬유,100(1차)/80(2차))
	로보드	길이(m)	4.0
	국글드	간격(m)	1.0(종)/1.2(횡)
역 담 문화면암	보강	범위	120°

<그림 4.4.17> 땅꺼짐 구간 적용 지보패턴(PD-3A)

당초 설계 시 구간별 선정된 지보패턴 안정성을 분석하기 위하여 표 4.4.5와 같이 대표단면 13개소를 선정하여 수치해석을 실시하였다. 설계 시 수치해석 대상 위치 선정은 지보패턴별 대표단면을 적용하여 지보패턴 적정성을 검증하고, 지보 패턴별 대표단면의 안정성 해석결과를 분석하여 설계의 적정성을 판단하게 된다. 땅꺼짐 발생 구간은 설계 시 수치해석 대표단면에는 선정되지 않았다.

<표 4.4.5 (a)> 설계시 수치해석 안정성 평가 선정 위치(13개소)

구분	지보패턴	해석위치	선정사유
1	PD-2A	STA.5km615.00	풍화토-풍화암 통과구간, 지보패턴 적정성 검토
2	PD-2B	STA.5km465.00	풍화토-풍화연암 통과구간, 쌍용아파트 근접구간
3	PD-2C	STA.4km705.00	풍화토-풍화연암 통과구간, 우성아파트 근접구간
4	PD-3A	STA.4km760.00	풍화토-연암 통과구간, 원앙아파트 근접구간
5	PD-3B	STA.5km430.00	풍화암-보통암 통과구간, 수택동 주거밀집지 통과부
6	PD-4A	STA.4km305.00	연암-보통암 통과구간, 지보패턴 적정성 검토
7	PD-4B	STA.4km340.00	연암-경암 통과구간, 목양교회 근접구간
8	PD-5	STA.3km880.00	보통암-경암 통과구간, 지보패턴 적정성 검토
9	PDU-3	STA.3km960.00	장자못 하부 및 단층대(F2) 통과구간
0	PD-4	STA.4km020.00	장자못 하부 통과구간, 지보패턴 적정성 검토

<표 4.5.5 (b)> 불연속체 지보패턴 안정성 검토 선정 위치

구분		균질절리영역	해석위치	지보패턴	
1	HFD-1	STA.3km800~4km800	STA.4km130	PD-3B	
12	HFD-2	STA.4km800~5km680	STA.5km200	PD-3B	
14	HFD-3	STA.5km680~6km175	STA.5km940	PD-4B	

4.4.6.4. 해석 개요

(1) 해석 프로그램

해석 대상 구간과 지반 침하 현상을 효과적으로 모델링하기 위하여 지하수 흐 름과 지반 거동의 연계해석이 가능한 미국 Itasca社의 FLAC3D(Ver. 6.0) 해석 코드를 사용하였다.

(2) 해석 모델 및 절차

해석모델은 터널 진행방향으로 60m, 터널 횡방향으로 80m이며, 터널하부는 계획고부터 25m 하부까지 상부는 지표까지 모델링하는 것으로 하였다. 사고 발생 지점을 모델의 터널 진행 방향으로 중심에 있는 것으로 가정하였으며, 따라서 터널은 모델의 중심부까지 굴착하는 것으로 해석하였다. 해석은 실제 굴착·보강 과정과 굴진장을 반영하여 해당 구간 굴진장인 1m를 굴진하고 그 이전 구간에 숏크리트와 록볼트 보강을 시행하는 방식으로 총 30번의 단계로 시행하였다.



<그림 4.4.18> 수치해석 모델 및 해석절차

(3) 입력 물성 및 지층조건

본 해석에 사용된 각 지층의 입력 물성은 당초 설계에서 제시한 값을 준용하는 것을 원칙으로 하였다. 강관다단 보강 지반의 변형계수의 경우 보강 영역에서 차지하는 강관과 원지반의 체적분율에 따라 계산된 값을 적용하였으며 전단강도, 투수계수 등은 보강 효과로 인하여 지층 구성상 한 단계정도의 상향이 이루어진 것으로 가정하였다.

구분	단위중량 (kN/m³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비	투수계수 (cm/sec)
매립층	18.0	5.0	27	10.0	0.35	9.0×10-4
퇴적토 (모래)	18.0	0.0	29	20.0	0.34	2.0×10-3
매립충+퇴적토	18.0	2.5	28	15.0	0.35	1.5×10-3
풍화토	19.0	20.0	30	60.0	0.32	$5.0 \times 10 - 4$
풍화토+풍화암	20.0	27.5	31	155.0	0.31	3.5×10-4
풍화암	21.0	35.0	33	250.0	0.30	2.0×10-4
풍화연암	21.0	100.0	33	1000.0	0.30	2.0×10-4
연암	23.0	420.	35	2100.0	0.27	7.0×10-5
보통암	25.0	1050.0	38	5200.0	0.24	2.0×10-5
경암	26.0	1550.0	42	15000.0	0.22	5.0×10-6

<표 4.4.6 (a)> 해석 구간 지층별 원지반물성

<표 4.4.6 (b)> 해석 구간 보강지반 등가물성

구분	단위중량 (kN/m³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비	투수계수 (cm/sec)
풍화토 A	19.0	27.5	31	200.0	0.32	3.5×10-4
풍화토 B	19.0	27.5	31	340.1	0.32	$3.5 \times 10 - 4$
풍화토+풍화암A	20.0	35.0	33	294.3	0.31	$2.0 \times 10 - 4$
풍화토+풍화암B	20.0	35.0	33	433.7	0.31	$2.0 \times 10 - 4$
풍화암 A	21.0	100.0	35	388.6	0.30	7.0×10-5
풍화암 B	21.0	100.0	35	527.3	0.30	$7.0 \times 10 - 5$
풍화연암 A	21.0	250.0	35	1133.1	0.30	7.0×10-5
풍화연암 B	21.0	250.0	35	1266.2	0.30	7.0×10-5

4.4.6.5. 수치해석 결과

(1) 해석 조건별 비교

본 수치해석은 원설계 조건과 변경된 지층조건, 변경된 지층조건에 지하수를 고려한 조건으로 구분하여 지층조건에 따른 비교분석을 위한 수치해석을 실시하였다. 원설계 조건의 경우 구간에 따라 대체로 수직적인 층서를 유지하는 지층 조건이므로 터널이 굴진해 나가면서 천단부에 가장 큰 변위가 나타나는 양상을 관찰할 수 있으며 막장에 가까운 천단 변위는 억제되는 종방향 아칭 효과도 나타난다. 반면에 변경된 지층조건의 경우는 그림 4.4.19와 같이 수평 시추를 통해 확인된 암질 불량 구간을 반영하였으므로 막장 직전 천단변위가 증가하고 터널 변형의 영향이 상부로 상당한 거리까지 미치는 것으로 나타났다. 한편 변경 조건의 수리-역학 연계 해석의 경우는 막장 인근 천단 변위와 막장면 변위의 증대 범위가 중첩되면서 그 영향범위가 지표 인근까지 넓어짐을 볼 수 있다.

그림 4.4.20은 최종 단계에서 막장으로부터의 거리별 변위 양상을 보여준다. 그림 4.4.20(a)를 보면 원설계 조건의 경우는 비교적 일정한 값으로 수렴되고 있음을 알 수 있으나 변경 조건에서는 암질 불량 구간에서 급격한 변위량의 증가를 보이고 있다. 그림 4.4.20(b)의 경우에는 원설계 조건과 변경 조건 역학 해석에 비해 변경 조건 수리-역학 해석 결과에서 매우 큰 지표침하 양상을 보인다.







<그림 4.4.20> 최종단계 거리별 변위 발생양상

(2) 변경 조건 : 수리-역학 해석결과

수리-역학 해석에서는 지하수위의 강하와 일시적 상승을 모사하기 위하여 초기 지하수위 조건을 GL-10.64m 로 놓고 터널 굴진에 따라 터널 내부로 배수되는 유량에 의해 해석이 진행되면서 자연스러운 지하수위 강하 현상이 발생하도록 하였고, 최종 단계에서 지표에 유입량 경계 조건을 설정하여 사고 직전 일시적 지하수위 상승을 유도하였다. 그림 4.4.21(a)는 해석 결과 지하수위 변화 추이를 보여준다. 최종 단계의 지하수위 상승 폭이 실제보다 다소 큰 점을 제외하고 실제 계측과 유사한 결과를 나타내고 있다.

그림 4.4.21(b)는 터널 막장, 터널 천단, 사고 위치 지표 침하의 변화 추이를 보여 주고 있다. 이들 변위의 변화 추이는 모두 2개 위치에서 변곡점이 있음을 나타내고 있다. 첫 번째는 암질 불량 구간이 노출되는 21단계 지점의 변위량 증가이며 두 번째는 사고 발생 직전인 30단계 굴착에서 나타나는 변위량의 증가이다.



<그림 4.4.21> 수리-역학 해석시 해석 단계별 변화 추이



<그림 4.4.22> 해석 결과 변위 발생 양상 비교

이들 변곡점을 전후한 각 구간의 대표적 해석 단계들의 변위발생양상은 그림 4.4.22에서 볼 수 있다. 비교적 양호한 암질의 구간을 통과하는 그림 4.4.22(a)는 천단에서 미미한 크기의 변위가 발생하는 양상을 보이고 있는 반면, 암질 불량 구간에 진입한 그림 4.4.22(b)는 막장 변위와 천단 변위가 크게 증가한 양상을 볼 수 있다. 지하수위 재상승 직전 상태인 그림 4.4.22(c)는 천단 변위의 영향 범위가 터널 상부로 확대되고 있음을 볼 수 있으며 최종 단계인 그림 4.4.22(d)는 터널 천단과 막장 변위의 영향이 지표에까지 미치는 양상을 보여주고 표 4.4.7은 단계별 막장면 최대변위량은 43.67mm까지 증가하였다.

<표 4.4.7> 변경조건 수리-역학해석 단계별 변위량 (단위 : mm)

구 분	15단계	25단계	29단계	30단계
막장 변위	0.31	15.77	15.81	43.67
천단 침하	1.13	5.90	8.89	11.25
지표 침하	0.66	1.93	2.98	8.04

4.4.7. 소결론

- 터널 설계에서는 터널주변 주요구간(지상부 중요 보안물건, 단층파쇄대, 지층 및 지반조건 변화부, 대표적인 지질조건 등)을 선정하고 단계적인 터널 시공 현황을 고려한 후 안정성 평가를 수행하여 터널 시공 및 운용 중 안정성을 검토하였다. 당초 설계에서는 주요구간 13개소를 선정하였고 각 주요구간의 지반조건 및 터널 현황을 고려한 지보패턴 및 보강공법을 수립하였으며, 수치 해석을 통한 안정성 검토를 통하여 보강대책의 적정성을 검토하였다.
- 또한, 당초 설계에서는 땅꺼짐이 발생된 STA 4Km832.35를 포함하는 STA 4Km700.0~5Km040.0(L=340.0m)구간을 상대적으로 지반강도 및 투수특성이 불량하고 절리 분포밀도가 높은 것으로 평가하여 차수 그라우팅(120°)과 강 관보강그라우팅이 보강된 PD-3A패턴을 적용하도록 계획하였다.

- 터널 시공은 당초 설계 지반조사 결과, 시공 중 터널 막장에서 수행한 확인 수평시추(STA 4Km799.35~849.35, L=50.0m) 및 터널 막장면 관찰자료(Face Mapping 및 RMR분류=35~40점)에 근거하여 당초설계 지보패턴과 동일한 PD-3A패턴을 적용하였다. 터널 굴착 중 막장면에서 수행된 수평시추 조사 결과에 의하면 땅꺼짐이 발생된 STA 4Km832.35~835.35(L=3.0m)구간은 풍화암(완전풍화, 실트질 모래로 분해) 분포를 고려할 때, 터널 안정성에 직접적인 영향을 미치는 터널 상부 및 아치부 지반은 강도특성이 불량한 토사 ~풍화암의 분포가 예상되었다. 또한, STA 4Km695.35~821.35(L=126.0m) 구간에서 수행된 차수그라우팅(L=18.0m, 총8회) 주입량(Q)을 검토결과, STA 4Km695.35~803.35(L=108.0m, 1~7회)구간의 주입량(Q)은 7.84~19.95㎡이었으나, 땅꺼짐 위치(STA 4Km832.35)가 포함된 STA 4Km821.35 위치의 주입량(Q)은 불량한 지반조건 및 투수조건에 의하여 25.78㎡로, 약 1.6~3.2배 증가한 것으로 확인되었다.
- 일반적인 NATM터널의 시공 중 가장 중요한 안정성 판단요소는 현장계측이므로, 터널변위(천단침하, 내공변위 및 지중침하 등), 지보재 응력 및 주변 보안물건 침하 등을 검토한 결과, 터널 시공 중 변위는 미소하였고 지보재 응력은 허용값을 모두 만족하는 것으로 확인되었다
- 땅꺼짐 위치(STA 4Km832.35, 2020. 8. 26)가 포함된 STA 4Km821.35 위치에서 차수그라우팅(L=18.0)과 중첩하여 4Km827.35 위치에서 소구경 강관보강 그라우팅(L=12.0)을 수행하였으나, 터널 굴착 중 STA 4Km828.35 막장부에서 과다 유출수로 추가적인 차수그라우팅(4공, 2020. 8. 23)을 수행하였다
- 이와 같이 터널의 시공 중 현황을 종합적으로 고려해 볼 때, STA 4Km820.0
 이후의 터널지반은 지반강도와 투수특성이 불량한 토사~풍화암이 터널 주변 지반에 보다 깊게 분포하는 특징을 나타내고, 그러한 지반조건 변화에 따라 터널의 안정성이 저하된 것이 땅꺼짐의 주요 원인으로 작용하였을 가능성이 있는 것으로 판단된다. 특히, 도심지 터널의 땅꺼짐은 터널 막장에서 명확하게 확인되지 않는 지층변화조건에서 터널 막장부에서 지하수 유출이 선행된 후,

강도가 저하된 막장부 변형이 진행되어 터널붕괴가 발생되는 메커니즘을 나타내므로, 본 터널 시공 중 확인된 땅꺼짐 위치(STA 4K+832.35)의 불량한 지반조건(완전풍화, 실트질 모래로 분해되는 풍화암), 차수 그라우팅 주입량 증대, 지중침하계 증가 경향 및 터널 막장부 과다 유출수 발생 현황 등을 사전에 인지하여 보수적인 보강대책(강관 중첩길이 최소화, 강관 및 H-지보재 강성 증대)을 적용하였다면 땅꺼짐을 예방할 수 있었을 것으로 판단된다.

- 본 검토에서는 다음과 같이 3가지 조건에 대하여 시공 시 거동형태를 모사하기 위하여 수치해석을 실시하였다.
- (1) 첫 번째 조건은 설계 당시 지반조건을 적용한 경우로, 땅꺼짐 구간(STA 4km832.35)에 대하여 수치해석을 실시한 결과 안정한 것으로 확인되었다.
 즉 일정한 값으로 수렴되고 지보재는 허용치 이내로 확인되었다.
- (2) 두 번째 조건은 땅꺼짐 발생 이후 추가로 조사된 변화된 지층조건을 고려하여 해석한 경우로, 해석결과 첫 번째 조건에 비교하여 변형량이 큰 것으로 확인 되었다.
- (3) 세 번째 조건은 변화된 지층조건과 실제 측정된 지하수위 조건을 반영하여 해석한 경우로, 그 결과 막장면에서 43.67mm 변위가 발생하였고 지표면까지 가장 큰 영향을 준 것으로 확인되었다. 수치해석 결과상으로는 불량한 지반 조건과 지하수 발생시 가장 큰 변위를 발생시키는 것으로 분석되었다

수치해석 결과를 요약하면 당초 설계보다 불량한 지반조건과 지하수 존재 시 막장 변위와 천단 변위가 크게 증가하는 경향을 보였고 터널 천단과 막장 변위의 영향이 지표에까지 미치는 것으로 분석되었다.

68
4.5. 지하터널 공사 관련 규정 검토

(1) 관련법 및 국토교통부 지침 검토

이번 사고와 관련하여 관련법과 국토교통부 관련지침 등 상위규정을 살펴보면 「건설기술 진흥법 시행령」 제55조 제1항 제3호, 제68조 제1항 제8호 및 제59조 제5항과 국토교통부 「건설공사 사업관리방식 검토기준 및 업무수행지침」 제68조에 따르면 "설계조건과 상이한 암질변화 시 굴착방법과 보강방법을 암판정위원회의 심의를 거친 후 시행"하도록 되어 있다,

또한, 국토교통부 「철도건설공사 전문시방서(노반편)」의 제1장 총칙(사전 조사)에서 "수급인은 설계도서의 내용과 현장을 확인하여 이상유무를 검토해야 하며, 현장여건 및 지반조건 등 본공사와 관련된 제반사항을 철저히 조사하여 시공 과정에서 발생될 것으로 예상되는 문제점과 대책을 감독자/감리원에게 보고해야 한다."고 되어 있으며, 제10장 터널공사(공동 또는 싱크홀 추가조사)에서는 "공동이 예상되는 경우 시공자는 감독원의 승인을 얻어 추가 조사를 시행하고 필요 시 대책을 수립하여 안전한 시공이 가능하도록 하여야 한다."고 되어 있는 등 관련 법과 국토교통부 지침상 수급자 등은 설계도서와 공사현장여건을 확인하여 이상 유무를 검토하고 적절한 조치를 취하도록 명시되어 있다.

(2) 입찰안내서, 현장설명서, 공사시방서

이번 사고와 직접적인 연관이 있는 해당 공사의 입찰안내서, 현장설명서, 공사 시방서를 살펴보면, 경기도에서 2015년 2월에 안내한 입찰안내서 「별내선(암사-별대)복선전철 3공구」의 1-1-4 유의사항(P.1-5)에는 "안정성 확보 등에 우려가 있는 개소는 추가 지반조사를 시행하여 시공 전 지층 조건을 확인"토록 되어 있고, 1-2-7 사업범위 (5) 과업수행 시 유의사항(P.1-16~17)에는 "지하구조물 건설 계획 시 시설물의 안정성 및 도시철도의 안정성 확보를 위한 계획에 만전을 기하여야 하며", "본 공구의 노선은 수택동 주거 밀접지역을 통과하는 구간으로 본선에 근접하는 건물의 근접시공에 따른 안정성 확보방안을 고려한 시공 계획을 수립" 하도록 되어 있다.

또한, 발주처인 경기도에서 동일한 기간에 입찰업체를 대상으로 제작한 현장설명서 「별내선(암사-별대)복선전철 3공구」의 과업수행 시 유의사항(P.6~7)에서도 "(3)입찰자(계약상대자)는 공사시행과 관련된 법규 및 기준, 방침, 각종 시방서 등 본 공사시행을 위한 관련 규정을 입찰 전에 완전히 숙지하여 공사시행에 소요되는 모든 비용을 설계에 반영하여야 하며, 만약 설계에 누락, 착오 등으로 인한 문제 발생 시 모든 책임은 계약상대자에 있으므로 설계 및 입찰내역 작성에 주의를 기울여야 함", "(6) 입찰참가자는 지반조사 및 각종 현황조사(민원발생요인, 관련기관, 협의포함)를 자신의 책임 하에 시행". "(7) ~ 지반이 불리할 것으로 예상되는 구간은 충분한 지반조사 및 지하수위조사 등을 통한 안전성을 확보 할 수 있도록 계획을 수립하여야 함"을 명시하여 입찰참가자에게 관련 모든 규정을 숙지하고 충분한 지반조사를 하도록 하였다.

마지막으로 이번 사고와 직접적으로 연관이 가장 큰 2016년 4월 발주처인 경기도에서 제작한 공사시방서(토목분야) 「별내선(암사~별내) 복선전철 3공구」를 살펴보면 더 명확하게 안전한 시공을 위해 수급인 등이 지켜야 할 사항이 나온다.

첫째, 1-5-4장 안전 및 공사 현장관리 (P.1-55) 중, 다. 관리 및 보상의 책임 "수급인은 공사의 수행으로 인하여 ~ 손해를 가하였을 경우에는 이를 원상 복구하거나 보상을 하여야 한다."에서 수급인의 안전관리에 대한 책임을 명시하고 있다.

둘째, 2-1-1장 사전조사 (P.2-1) 중, (1) 일반사항에서는 "수급인은 공사 착수 전에 현장여건, 지반여건, 그리고 지장물 등 본 공사와 관련된 다음의 제반사항을 확인하여야 하며, 발주자가 제시한 설계내용과 상이한 사항이 있을 경우에는 이를 책임감리원에게 보고하여 설계에 반영되도록 하여야 한다. ① 조사항목 가. 지반 조사 및 지하수의 특성 확인조사, 다. 공사로 인하여 피해가 발생할 가능성이 있는 인접건물 및 구조물에 대하여는 조사결과"에서 수급인의 공사 시 안전을 위한 사전조사 사항을 열거했다.

셋째, 2-4장 계측관리(P.2-29) 중, 가. 계측일반에서는 "계측은 ~ 안전한 시공이 될 수 있도록 실시하여야한다."고 공사시행 전, 후 계측의 중요성에 대해서 명시 하였다.

넷째, 9-1장 터널공사 (1)일반사항 (P.9-1)에서는 "가. 수급자는 ~ 상세지반조사 결과 등을 파악하여야 한다. 나. 수급자는 상세지반조사가 부족한 경우 추가로

지반조사를 하여야 하며~"라고 상세지반조사 실시와 부족한 경우 추가 지반조사의 필요성을 보여주었다.

다섯째, 9-1장 터널공사 (3)시공 (P.9-6)에서는 "② 시공 중 조사 가. 터널굴착 작업과 병행하여 지질상태, 갱내변위, 용수, 지보재상태, 가스발생, 갱내온도~ 및 원지반 상태 등을 주기적으로 조사하여 사고가 발생하지 않도록 사전대비하여야 한다.", "③시공법 변경 가. 터널시공법이 공사안전에 부적합하다고 판단될 때에는 지체없이 안전하고 적합한 공법으로 시공할 수 있도록 시공법을 변경하여 시공 하여야 한다. 나. 터널 굴착 시에는 암반조사 및 계측결과를 정밀하게 분석 검토하여 현장실정에 적합한 공법으로 변경하여 시공하여야 한다."고 나타낸 부분은 사고 예방 및 계측 결과에 따른 적정 시공방법 변경 등 시공 시 주의점을 보여주고 있다.

이 외에도, 시방서에서는 터널공사의 안전 관리를 위한 계측, 주요 통과구간의 시공계획 등 이번 사고와 연관된 사항들이 자세히 열거되어 있다.

4.6. 종합 분석

구 분	분 석 내 용
1] 지반	·사고위원회 시추조사(2공), 현대건설 시추조사(9공), Geo-tomography 분석, 기존 시추조사, 선진 수평보링 결과로 지반특성 평가
	• 땅꺼짐 발생지역 인근은 위치별 지층 변화가 크게 나타났으며 사고 발생구역(STA.k825.8~841.7)은 인근 지역과 달리 터널 직상부가 풍화암으로 구성되어 있고, 막장 배후면은 풍화가 심한 실트질 모래로 파악됨
	 ·1947년 위성사진 판독결과, 사고지점은 과거 장자못으로 한강과 왕숙천을 잇는 지류로 확인, 일부 퇴적층은 지하수 유동이 빠르고 물리적 침식임 심할 수 있음
2 설계	·지상부 여건, 단층대, 지질조건 등을 고려하여 13개 주요구간을 선정, 수치해석 안정성 검토를 수행하여 지보패턴과 보강공법을 적용
	·설계 시 활용한 ST-5, TB-9 등 시추조사를 포함한 지반조사 만으로는 사고지역의 지반 취약성을 판단하기 어려울 것으로 추정
3 시공	· 설계 지보패턴 적정성을 평가하기 위해 RMR 평가 등을 수행하여 시공
	·계측(A계측, B계측)은 수계측으로 관리하였으며, 허용기준치 이내에서 측정관리(공사일지, 계측일지로 확인)
	·(특이사항) 2020년 8월 13일 STA. 4k821.35 상반 차수 그라우팅(120°)
	천공작업 중 150ℓ/min/hole 대량 용출수 발생, 차수그라우팅을 실시 · 시고 시 대략 요축수 반생 서지스펴버리격과(STA 4b818 25~
④ 감리	834.35)구간의 파쇄대, 실트질 모래 관찰 시에 특별한 사전 검토는 파악이 안됨
5 기타	·상수도관 파열과 땅꺼짐 사고 연관성 확인을 위해 4-1-3블록 유량계
	최대 순간유량과 유속, 사고지점까지의 거리를 통해 사고 시간을
	예측한 결과, 더닐붕괴 이우에 상구도관이 과열되었나고 주정 • 시공 이전인 실시설계 시에 시추를 포함하 지반조사 자료만으로는
⑥ 종합결론	이러한 지반의 취약성을 확인하여 반영하기는 불가하였다고 판단
	되지만, 이후 인근에서 수행한 타사의 시추조사 자료와, 사고 13일
	전 땅꺼짐 구역 인근의 지하수 과다 유출 현상 그리고 사고 영역
	부근에서 수행한 선진수평보링의 결과 등 제반사항을 면밀히 검토하여
	설계 및 시공에 반영하지 못한 것은 문제의 소지가 있으며, 땅꺼짐
	사고가 발생한 가능성의 원인이라고 추정된다

5. 결언

5.1. 요약 및 결론

경기도 구리시 장자2사거리 인근에서 2020년 8월 26일 발생한 땅꺼짐 사고에 대하여, 현장 조사와 관련 자료 분석, 추가 시추조사, 터널 수치 해석 등을 통하여 종합적으로 심층 검토하였으며, 주요 내용과 결론은 아래와 같다.

(1) 지반 및 지질

사고 발생 지역은 하천 범람에 의한 퇴적층이 두껍게 분포하며, 고하도에 인접하여 지하수 유동이 큼과 동시에 기반암층이 편마암을 관입한 화강암으로 구성되어 절리 및 단층이 불규칙하게 발달되어 침식에 취약하다. 따라서 암층의 위치별 수평적인 변동성이 크며, 풍화대와 연암층의 두께와 심도의 변화가 심하다.

사고지역 인근의 지하수위는 사고 이전 두 달여 동안 다량의 강우에도 불구하고, 터널 시공에 따른 유출수 배수로 인하여 저하하는 것으로 관측되었다.

사고 발생 구역 인근의 시공 전 지반조사 자료, 공사 중과 사고 후 지반조사 자료를 분석한 결과 땅꺼짐 발생지역 부근은 지반특성의 위치별 변동성이 크게 나타남을 확인하였다. 특히 땅꺼짐 발생 구역은 터널 아치부와 터널 직상부 심도의 지반이 취약한 것으로 예상된다.

실시설계 시에는 사고지역 지반의 취약성을 확인하기는 어려울 것으로 판단되지만, 이후 인근의 타사 시추 자료, 사고 발생 전 지하수 과다 유출, 사고 영역 부근의 선진수평 보링 결과로부터 사고 구역 지반의 취약성을 사전에 예측할 수 있었을 것으로 판단된다.

(2) 설계/시공/감리

땅꺼짐이 발생한 구역을 포함하는 구간은, 터널이 다소 취약한 암반층을 통과함을 감안하여, 수치해석을 통한 안전성 검토 후, 차수 그라우팅(120°)과 강관 그라우팅으로 보강하는 PD-3A패턴을 적용하는 것으로 계획하고 시공하였다.

비록 현장 계측 자료에는 땅꺼짐에 대한 징후가 사전에 나타나지 않았지만, 터널 시공 중 현황을 종합적으로 고려해 볼 때, 사고 발생 지점 인근의 하부 지반은

강도와 투수특성이 불량한 토사 및 풍화암이 보다 깊게 분포하는 특징을 나타내고, 그러한 지반조건 변화에 따라 터널의 안정성이 저하된 것이 땅꺼짐의 주요 원인으로 작용하였을 가능성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 터널 시공 중 과다 유출수 발생, 막장 배면의 불량한 지반조건(완전풍화, 실트질 모래로 분해되는 풍화암), 차수 그라우팅 주입량 증대 등이 특정 구역에 발생하였을 때, 사고 발생 가능성 을 분석 평가하고, 보수적인 보장대책(강관 중첩길이 최소화, 강관 및 H-지보재 강성 증대)을 적용하였다면 땅꺼짐을 예방할 수 있었을 것으로 판단된다.

실시설계 시 반영한 지반조건 그리고 시공 중 확인된 지반 및 지하수 조건을 반영하여 수치해석한 결과, 당초 설계 조건에서는 안정하지만, 실제 지반 및 현장 조건에서는 과도한 변위가 발생하는 불안정한 결과를 얻었으며, 이를 통해 위에서 설명한 취약한 지반조건이 땅꺼짐의 원인임을 확인할 수 있다.

(3) 기타 - 지중매설관의 영향

사고 발생 구역에 매설된 상수도관의 파손과 땅꺼짐의 상관성을 조사하기 위하여, 인근의 관로 유량계와 백교 저수지의 사고 전후의 시간별 유량 계측 변화를 해석한 결과, 상수도관은 땅꺼짐 발생 이후에 파손된 것으로 분석되었으며, 따라서 사고 발생과는 무관한 것으로 나타났다.

하수관 손상에 따른 영향을 조사하기 위하여 사고현장 인근의 우수관 2개소 및 오수관 2개소에 대하여 CCTV 조사를 실시하였으며, 그 결과 중대결함은 나타나지 않았으며, 따라서 땅꺼짐과 연관성은 없는 것으로 판단된다.

(4) 종합결론

시공 이전인 실시설계 시에 시추를 포함한 지반조사 자료만으로는 사고 구역 지반의 취약성을 확인하여 반영하기는 불가하였다고 판단되지만, 이후 인근에서 수행한 타사의 시추조사 자료와, 사고 13일 전 땅꺼짐 구역 인근의 지하수 과다 유출 현상 그리고 사고 영역 부근에서 수행한 선진수평보링의 결과 등의 제반사항을 면밀히 검토하여 설계 및 시공에 반영하지 못한 것은 문제의 소지가 있으며, 땅꺼짐 사고가 발생한 가능성의 원인이라고 추정된다.

5.2. 재발방지 대책

지하공간 개발 시행 중에 발생하는 땅꺼짐 사고와 같은 안전사고가 발생하지 않도록 하기 위해서는 부적절 설계와 부실시공을 원천적으로 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 이에 더하여 현재의 규정과 절차에 따르더라도 불가피하게 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하기 위해서는 불확실한 지반 특성 그리고 시공 중 예기치 못하게 발생할 수 있는 상황 등을 체계적으로 확인, 제어, 관리하여 안전성을 확보하는 대책을 제도적인 관점을 중심으로 수립하는 것이 필요하다. 이에 본 과업의 수행 중 나타난 현상을 중심으로 현재의 문제점을 고찰하여, 아래와 같이 재발 방지 대책을 제시하였다.

(1) 계획-설계 단계

- 도심지 지하공간 개발 시, 지하 안전 취약 구간으로 설정한 구간에 대해서는 지반조사 기준을 강화하여 시행한다. 즉, 지반조사(시추조사)와 관련된 통상적 조사간격 100m~200m을 축소하여 50m 이내로 조사 간격 기준을 설정하고 시행하거나 확보하는 것이 필요하다.
- ② 대상 구역의 지반조사를 위해 시행한 모든 자료, 즉 경쟁사 조사자료 등 취득 가능한 모든 정보를 검토하여 설계 및 시공에 반영토록 하고, 발주처는 이를 확인토록 해야 한다.
- (2) 시공 단계
- 티널 시공 시 안전 관리에 관한 사항, 즉 계측값, 선진수평보링 결과, 지하수 유출, 굴착 막장면 상태, 보강공법의 시공성 등을 확인하고, 필요한 대처 방안을 신속히 결정하기 위해서는 지반 및 터널 기술자가 현장에 상주하여, 지하안전 업무를 총괄토록 하는 것이 필요하다.
- ② 외부전문가 자문 제도의 도입이 필요하다. 특히, 취약구간에서는 반드시 외부 전문가 자문을 실시하고, 문제가 발생하는 경우 필요한 안전대책을 마련하여 조치를 취한 후, 외부자문의견과 함께 발주처에 보고하도록 하는 시스템을 구축할 필요가 있다.
- ③ 자동계측 시스템 적용이 필요하다. 현재, 대부분의 굴착구간에 적용 중인

수동 계측관리(주2~3회 계측)는 실시간 사고감지가 불가능하다. 따라서, 도심지 터널을 중심으로 자동계측 시스템을 적용하여 공사관계자 간 계측 데이터를 실시간 공유하고, 문제 발생 시 즉시 대처할 수 있도록 해야 한다.

- (3) 기타
- ① 지하 공간 개발 시 안전을 전담하는 기구를 국토부 직할로 설치하는 것을 중장기적으로 고려할 필요가 있다. 해당 분야 박사, 기술사 자격 소지자로서 충분한 경력을 갖춘 사람을 구성원으로 하고, 지하 안전만을 전담하도록 직무를 한정하며, 지하공간 개발과 관련한 기획, 조사, 설계, 시공, 감리 등의 업무 중에서 전반적 안전 관리 업무를 총괄 조정, 관리토록 한다. 더불어 지하안전 관련 제도, 교육, 홍보 등도 담당토록 할 수도 있다. 현재의 지하안전특별법에 따른 행정업무를 총괄토록 하는 것도 고려할 수 있다.
- ② 지하 안전 사고 발생 시에, 추가 사고 등을 방지하기 위한 신속한 보강 방안을 수립함과 동시에, 사고 원인 조사를 위하여 사고 시 현장의 사진과 계측 자료와 설계 및 시공 자료를 신속히 확보할 수 있는 신속 대응 체계를 구축하는 것이 필요하다. 아울러 드론, 무선 로봇 및 센서와 IoT, AI 등과 같은 미래 기술이 지하 안전 사고의 신속 대응과 사고조사를 위하여 적극적으로 개발, 활용될 필요가 있다.