

미고결 파쇄대 구간에서 발생하는 터널바닥 지반 융기의 원인과 대책



이일화
한국철도기술연구원
책임연구원



유민택
한국철도기술연구원
선임연구원



박정준
한국철도기술연구원
선임연구원



최영태
한국철도기술연구원
선임연구원



장동두
한국철도기술연구원
선임연구원

1. 서론

터널을 파쇄대 등의 연약구간에 건설할 때 예상치 못한 바닥 지반의 침하 또는 융기가 발생하는 경우가 있다. 침하의 발생 원인에 대한 메카니즘은 밝혀져 있고 대책 방안도 수립되어 있지만, 융기는 원인 규명이 불명확하고 대책 방안도 매우 제한적이다. 융기는 주로 굴착에 의한 응력변화, 팽창성 점토, 지하수 변동 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있지만 건설이 종료된 이후에도 발생하는 경우도 있다. 이 경우에는 교통안전성을 심각하게 저해시키고 유지관리에 막대한 비용을 필요로 한다. 특히 교통 구조물로 콘크리트 슬래브가 적용되는 구간에서는 하로(높이를 낮추는 작업)가 불가능하기 때문에 슬래브를 전체적으로 올려서 종곡선 선형을 맞추는 보수작업을 실시해야 하며 보수 한도를 초과할 경우에는 대처가 매우 곤란해진다. 따라서 융기가 예상되는 구간에서는 건설단계

에서 발생 가능성을 면밀히 검토하여야 하며, 가능한 모든 조치를 취하는 것이 합리적이다.

본 기사는 터널 건설 및 운영단계에서 발생하는 융기문제에 대처하기 위하여 융기의 원인, 조사방법 및 대책에 관련된 기술적인 정보를 제공하고자 작성하였다.

2. 노반 융기의 원인과 메커니즘

2.1 융기의 원인

터널 노반의 융기 원인은 표 1에 나타난 바와 같이 응력이나 환경변화 등의 외적 요인과 설계 및 시공시에 기인하는 내적 요인으로 구분할 수 있다. 융기는 하나의 요인으로 발생하기보다는 환경적인 외적요인에 의해 복합적으로 발생하는 것으로 추정되며, 주요 원인으로는 연약대에서의 소성압과 지하수 유동을 들 수 있다.

〈표 1〉 노반 용기의 원인

구분	내용	
외적 요인	소성압	터널 주변 지반의 소성화에 따른 압력변화, 팽창성 점토의 흡수팽창압, 크리프 하중의 작용
	지하수 유동	배수 불량 또는 방수형 터널의 배면수압
	동상	동결 팽창에 의해 작용하는 압력
	지진	지진에 따른 지각 변동
	근접 시공	터널에 근접한 구조물 건설로 인한 영향
	교통 하중	터널에 작용하는 교통 하중
내적 요인	재료불량	인버트 콘크리트 및 노반재료 등의 불량
	인버트 부재	인버트가 필요한 지반에서의 인버트 누락으로 인한 변상
	인버트 구조 부적절	인버트 반경과 두께가 적절하지 않게 설계
	인버트의 조기 시공	변위가 수렴하지 않은 상태에서의 조기시공, 콘크리트 양생기간 부족
	인버트와 측면 벽의 연결 불량	인버트와 측벽의 연결 불량에 기인하여 축력 전달 불충분에 의한 접속부의 파괴
	배수 불량	배수불량에 따른 흡수팽창과 공동화에 의한 침하

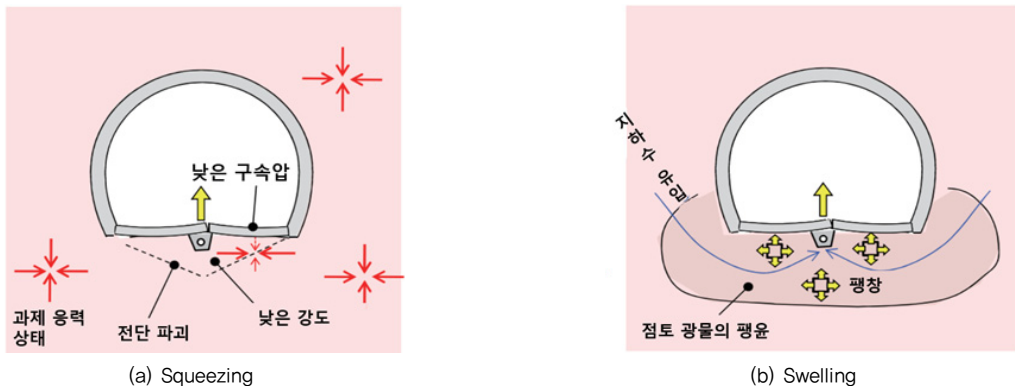
2.2 용기의 메커니즘

용기 메커니즘은 크게 Squeezing(소성화에 따른 압력 변화)과 Swelling(흡수 팽창)으로 구분할 수 있다. 노반 용기에 국한되는 Squeezing과 Swelling의 메커니즘은 그림 1과 같다. 국내외에서 발생한 용기 사례를 검토한 결과 팽창성 지반이 원인인 경우도 있지만, 대부분의 경우는 터널구조의 응력변화에 따른 Squeezing으로 발생하는 것으로 판단된다.

Squeezing은 지반강도비(지반의 일축 압축 강도에 대

한 상부압력의 비율)가 작을 경우, 축차응력이 커져서 노반이 용기하는 현상으로 압력이 커질 경우에는 노반 아래 원지반에서 썩기 모양의 전단파괴가 발생한다. Swelling은 지반이 이완되고 지하수가 유입되면 점토광물이 흡수 팽창하여 노반이 용기하는 현상이다. 흡수 팽창의 크기는 팽창성 점토광물의 종류와 두께에 의해서 결정된다.

용기현상은 기본적으로 시간의 경과에 따라 비례적으로 증가하며 자연적으로 수렴하는 경우는 거의 없는 것으로 알려져 있다[5].

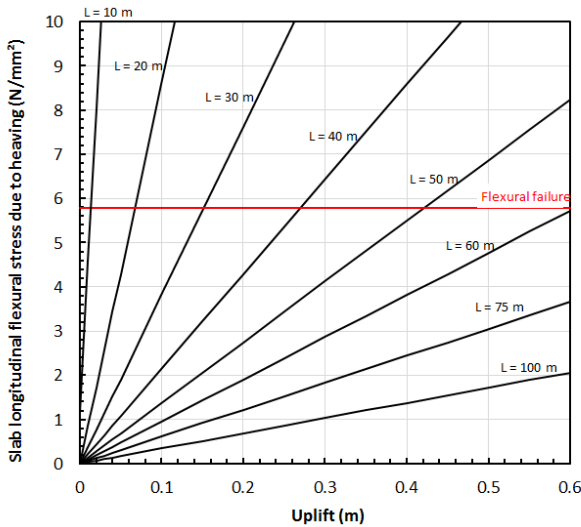


〈그림 1〉 노반용기 메커니즘

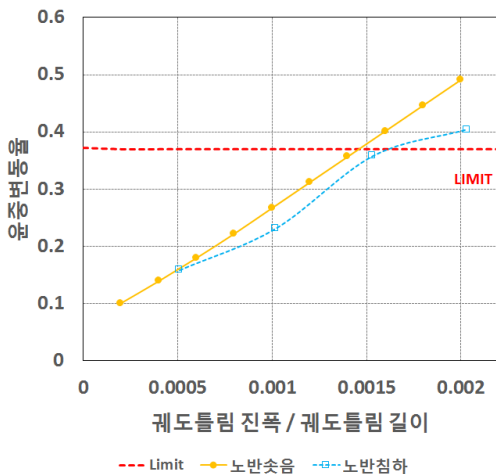
2.3 융기에 의한 콘크리트 슬래브의 사용성 평가

용기구간에서 콘크리트 슬래브의 손상 메커니즘은 과도한 휨 변형에 의한 슬래브 손상(균열 또는 피로균열)으로 나타난다. 용기 등으로 인한 부등침하 구간에서는 슬래브 하부에 간극이 발생하고 여기에 슬래브 자중과 하중

이 재하될 때 슬래브 휨응력이 증가하고 손상이 발생하게 된다. 슬래브 단부가 하부 기층에 닿은 이후의 휨 모멘트는 하중 재하점의 슬래브 하부에서 최대가 된다. 따라서 슬래브에 발생하는 총 응력은 그림 2와 같이 산정된다. 용기 구간의 길이가 짧을수록 작은 부상량(uplift)에서 휨 파괴가 발생하게 된다.[1]



〈그림 2〉 슬래브에 발생하는 총(total) 응력



〈그림 3〉 노반 침하와 용기시의 윤중변동을 비교(새마을호, 주행속도 200km/h)

2.4 용기시 차량 주행안정성

다음 그림 3은 용기시의 차량 주행안정성을 검토하기 위하여 200km/h 주행속도의 새마을호를 대상으로 윤중 변동율을 수치해석적으로 검토한 사례이다. 용기된 궤도의 변형별(용기 연장 대비 용기량) 윤중변동율을 노반침하인 경우와 비교하여 나타낸 것으로, 점선은 노반침하인 경우이고 실선은 노반용기의 경우이다. 노반이 용기한 경우의 윤중변동율이 노반이 침하한 경우 보다 약 10% 크게 나타나 용기가 침하보다 더 불리한 것으로 나타났다.

3. 터널바닥 용기 사례

3.1 국외사례(일본)

일본은 지질학적으로 연약대가 많이 분포하기 때문에 다양한 용기현상이 발생하고 있다. 그림 4는 Ipponmatsu



〈그림 4〉 터널노반 용기 사례(Ipponmatsu터널)



〈그림 5〉 터널바닥 용기로 인한 인버트 추가시공(Toriyasan터널)

도로터널에 발생한 용기로서 10년 동안 280mm의 용기가 발생하였다. 그림 5는 Toriyasan터널(2,6km)로서 개통 이후 18개월 동안 187mm의 용기가 발생하여 교통을 전

면 차단하고 폐합인버트를 추가 시공하였다.

표 2는 개통 이후 용기가 발생한 일본터널 16개소의 사례를 정리한 것이다. 도로와 철도 구분없이 용기가 발생하며, 연간 수 백mm의 용기가 보고되기도 하였다. 인버트가 있는 경우에도 용기가 발생하였다.

그림 6은 압력의 변화가 발생한 터널에서 경과 년수에 따른 내공변위와의 관계를 나타낸 것으로서, 경과 년수가 증가함에 따라 비례적으로 내공변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그림 7은 노반 용기의 계측 결과를 나타낸 것으로, 용기 속도는 다르지만 시간의 경과에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 내공변위의 변화가 용기와 상관성이 있음을 알 수 있다.

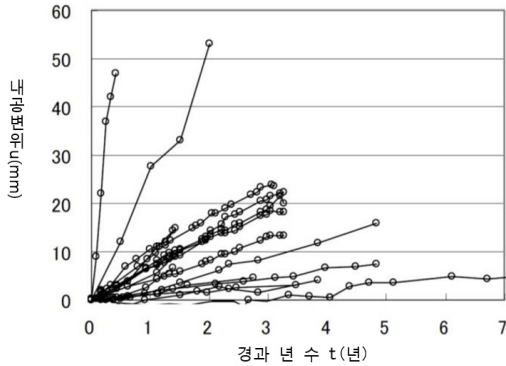
표 3에서 용기 구간에서 보강 전후의 상태를 비교하였다. 보강방법은 주로 폐합인버트와 락볼트가 적용되었다.

〈표 2〉 노반 용기 터널 일람(일본)

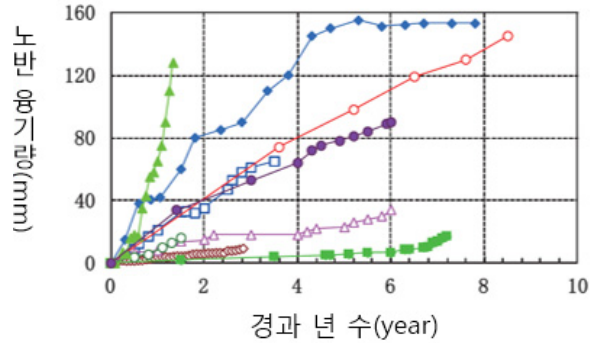
번호	터널명	선명	단면	인버트 유무	대표 암종	복공	지반 강도비	수평내공 변위(mm/년)	노반 용기 (mm/년)	팽창성 점토광물	참고 문헌
(1)	카미이	JR 하코다테 본선	복선	있음	사문암	170	0.03	50	120	없음 (Mg형)	10
(2)	구로이와	국도231호	2차선	없음	안산암 용암 (열수변질)	100	1	1	15	있음	11
(3)	레분하마	JR 무로란 본선	복선	없음	안산암	100	0.19	2.4	15	있음	12
(4)	제3토마무	JR 세키쇼센	단선	없음	흑색 편암	200	0.78	2	3	없음	8
(5)	오야마다	현도 미야코코선	2단선	없음	화강암	70	2.68	6	219	있음	13
(6)	사카즈키야마	야마가타 차도	2단선	있음	유문암질 응회암 (열수변질)	90	0.1	456	13870	있음	7
(7)	아사히	국도 7호	2차선	있음	응회암	130	0.07	13	26	없음	14
(8)	다이마이	국도 7호	2차선	있음	이암	-	-	1	14	있음	15
(9)	로쿠주리고에	JR 타다미선	단선	없음	응회암	350	0.68	15	6	불명확	16
(10)	다고쿠라	JR 타다미선	단선	없음	응회암	150	1.58	11	8	있음	16
(11)	가케마쓰	니가타현 씨사이드라인	단선	없음	유문암	50	0.5	13	13	불명확	17
(12)	우스이토게	호쿠리쿠 신간선	복선	없음	응회각력암	200	1.36	1	3	있음	9
(13)	이치노세	호쿠리쿠 신간선	복선	있음	응회각력암	200	2.47	1	12	불명확	9
(14)	아사마야마	조신에쓰 차도	2차선	없음	응회각력암	90	-	1	39	있음	18
(15)	우레심노	나가사키 차도	2차선	없음	응회각력암	90	1.33	4	23	있음	6, 19
(16)	타와라자카	나가사키 차도	2차선	없음	혈암	240	0.04	9	45	없음	6

기술기사 4

미고결 파쇄대 구간에서 발생하는 터널바닥 지반 융기의 원인과 대책



〈그림 6〉 내공변위의 변화



〈그림 7〉 노반융기의 변화

〈표 3〉 터널별 융기 대책공법과 효과

번호	터널명	단면	인버트 유무	노반부 주요 대책공법	락볼트 길이 (m)	타설 길이		락볼트 지름 (mm)	프리스트레스 (kN)	대책공법 전후의 노반융기속도 (mm/년)	대책공법 적용후의 융기속도 계측기간	노반 융기 제어율 (%)	참고 문헌
						횡단 (m)	종단 (m)						
(1)	아사히	2차선	있음	하향 RB	5	1.5	1	25	0	26→6	2년	77	14
(2)	오고토	2차선	있음	하향 RB	5	1.5	1	25	0	14→7	1년	50	15
(3)	가케마쓰	2차선	없음	하향 RB	7	1	1	25	*	11→*	*	*	17
(4)	레분하마	복선	없음	하향 RB	3~5	1	1.5	*	50	5→*	*	*	12
(5)	이티노세	복선	있음	하향 RB	7~8	2	1.1	25	50	12→1	1년 3개월	90	9,31
(6)	우스이토게	복선	없음	하향 RB	8	1.4	1.5	25	*	3→0	8개월	100	9
(7)	제3토마루	단선	없음	RC 사이드 블럭, 하향 RB	6	1.8	2.5	25	*	3→0	*	100	8
(8)	신노보리카와	단선	없음	RC 사이드 블럭, 하향 RB	6	1.8	2.5	25	*	2.4→0	21일	100	32
(9)	카미이	복선	있음	인버트와 측벽접합부 개축, 하향 RB	9	1.3	0.657	32	50	120→0	*	100	10
(10)	오야마다	2차선	없음	인버트 신설, 하향 RB	4	1	1.2	*	*	219→0	1년	100	13
(11)	잇분마쓰	2차선	없음	*	하향 RB는 타설하지 않음					4→*	*	*	33
(12)	레분하마	복선	없음	인버트 신설	"					15→*	*	*	12
(13)	아사마야마	2차선	없음	인버트 신설	"					39→*	*	*	18
(14)	우레시노	2차선	없음	인버트 신설	"					23→*	*	*	6,19
(15)	타와라자카	2차선	없음	인버트 신설	"					45→*	*	*	6
(16)	구로이와	2차선	없음	인버트 신설	"					15→0	3년	100	11
(17)	사카즈키야마	2차선	있음	인버트 개축	"					3900→0	6개월	100	7

* : 문헌에 언급 없음

락볼트 보강은 길이 3~9m, 타설 간격은 횡단/종단 모두 1~2m 전후로, 단위면적당 타설 개수로 환산하면 0.25~1 개/m² 정도를 사용한다. 대책공으로서 하향 락볼트만 실시한 경우의 용기 억제율은 50~100%이다. 표 3의 1번과 2번 터널에서는 용기가 충분히 억제되지 않았으나, 5번과 6번 터널에서는 충분히 억제하는 것을 알 수 있다. 용기 속도가 빠른(30~40mm/년 이상) 경우에는 인버트 신설이나 개축 등 대규모 보수를 실시하였다. 용기 속도가 매우 빠른(120~219mm/년) 9번과 10번 터널의 경우는 인버트 신설과 하향 락볼트가 동시에 적용되었다.

3.2 국내사례

3.2.1 다산터널

도로터널로서 Montmorillonite의 영향으로 팽윤이 크고, 수분 흡수 시 급격히 풍화되어 토사화 되는 성질(Slaking)이 있으며, 선구조 분석결과, 절리나 층리의 불연속면 경사방향이 터널굴진에 불리하게 위치되어 있다. 대책은 상하반 모두에 인버트를 설치하여 조기에 링폐합이 되도록 하였으며, 보조공법으로는 수평선진보링, 프리그라우팅, 휘폴링 등을 적용하였다.

3.2.2 양북터널

혼펠스화 및 단층의 영향으로 분쇄암반을 형성한 파쇄대를 통과하고, 지하수 영향으로 암반강도 저하 및 파쇄대 단층점토의 결합력이 저하되어 여러 건의 낙반이 발생하였다. 대책은 숏크리트(300mm), 1차 강지보(H-200), 2차 강지보(H-100), 가인버트 숏크리트(150mm), 인버트 숏크리트(200mm), 인버트 강지보(H-200), 가압식 휘폴링을 적용하였다.

3.2.3 OO터널

콘크리트궤도 터널로서 환경적 요인(동해)으로 인하여 운영 중 들뜸, 단차, 파손, 균열이 발생한 것으로 보고되

었다. 체결장치의 고저조절패드를 이용하여 용기를 정정한 이후에는 추가 변형은 진행되지 않았다.

4. 용기 우려개소에 대한 조사분석 사례

용기 우려개소에 대한 조사분석 사례를 제시하였다. 해당구간에 대한 실내시험과 현장시험 위주로 제시하였으며, 지보패턴, 보조공법, 압중, 침하 등을 추가적으로 조사하였다.

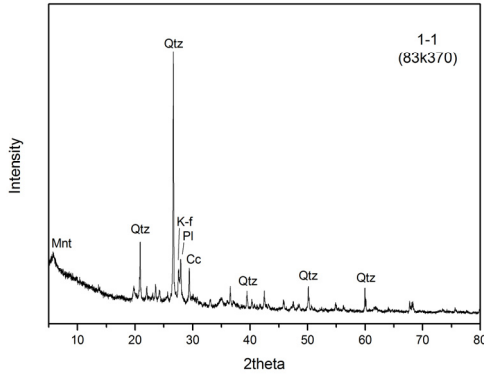
4.1 지형 및 지질 특성

해당 구간은 붕적토사층에 해당하며, 풍화잔류토와 풍화전석이 협재된 토질로 구성되어 있다. 전 구간에서 전반적으로 단층파쇄대가 존재하는 것으로 나타났으며, 단층점토 및 단층각력으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 또한 절리에 의한 파쇄대가 발달하여 시추조사의 코어회수율이 저조하였고 터파기 중 침출수로 인한 포화지반의 지지력 저하가 발생하였다.

4.2 실내시험

실내시험은 지반의 팽창성을 확인하는 것이 주목적이다. 개소별 기본 물성 및 다짐시험을 수행하였으며, 팽창성광물 함유량에 대한 정량적 분석을 위해 XRD 시험을 수행하였고 팽창률 시험도 병행하였다. 특히 개소에 대해서는 내구성 시험(Slaking)을 추가하였다. 그림 8의 XRD 시험 결과, 석영(Quartz; Qtz), 사장석(Plagioclase; Pl), K-장석(K-feldspar; K-f), 몬모릴로나이트(Montmorillonite; Mnt), 방해석(Calcite; Cc) 이 함유되어 있는 것으로 확인되었다. 1번 개소는 팽창성 몬모릴로나이트의 함량이 14.1%로 나타났으며, 팽창률 시험 결과 최대 4.7%까지 체적이 증가하였다. 1번 개소를 제외한 시료에서는 1% 이내의 작은 팽창률을 보였다.

팽창성 흙의 경우 상재하중에 의해 팽창률이 억제되는



〈그림 8〉 XRD분석 결과

경우가 있어, 1번 시료에 대해서는 궤도 상재하중에 해당하는 하중을 재하하고 팽창률 시험을 수행하였다. 일반적인 궤도상재하중은 35kN/m²을 적용하나 본 시험에서는 안전측 검토를 위하여 10kN/m²을 사용하였다. 팽창률은 0.1% 이내로 매우 작게 측정되어 흙 자체의 팽창성으로 인한 융기 가능성은 낮다고 판단하였다.

4.3 현장시험

현장시험은 콘관입시험, 평판재하시험, 시추조사, 표면

파탐사(MASW)를 수행하였다. 콘관입시험을 통하여 시험 대상 8개소 중 3개소에서 이완영역이 1m 내외에 분포하는 것으로 확인하였다. 확인 구간은 지하수로 포화된 구간으로서, 다른 구간에서도 지하수의 침투에 의한 이완 가능성이 있을 것으로 예상되었다. 표면파탐사를 통하여 국부적으로 전단파속도가 낮은 층과 여러 개의 불연속면을 확인할 수 있었다. 또한 표준관입시험 결과는 풍화토층의 두께 2m 이상에서 N값이 100회/30cm 이상으로 나타났으며, 상부 2m 이내에서는 26~46회/30cm로 나타났다.

4.4 지반 굴착에 따른 구조안정성 분석

해석을 수행하는 단면은 상부 토피고가 194m이며, 터널 주변에는 V등급 암반이 분포하고, 상부에는 IV등급 암반이 존재한다. 해석에 적용한 지보패턴은 그림 9와 같다. 해석을 위한 지반경계범위는 터널 좌·우측 4.0D(D:터널 직경), 하부 경계까지는 4.0D로 모델링하여 주요 해석 영역이 경계조건에 의한 영향을 받는 것을 최소화하였다. 적용 하중 분담율은 40-30-30이었으며, 측압계수는 $K_0 = 1.7$, 해석프로그램은 FLAC 2D, 해석 모델은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 해석모델을 사용하였다.

〈표 4〉 실내물성시험 결과

번호	실내시험						
	단위중량 (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	OMC(%)	팽창률 (%)	세립분 함유율	XRD
1	17.4	43	29.2	13.9	4.18~4.7 (0.053~0.059)*	26.0	팽창성 높음 (몬모릴로나이트)
2	18.77	42.5	19.7	9.7	0.54~0.81	21.0	팽창성 미미
3	18.6	44.1	18.2	10.3	0.71~0.89	19	팽창성 미미
4	18.5	35.1	12.4	10.5	0.70~0.97	12	팽창성 없음
5	19.3	40.2	16.1	9.0	0.24~0.37	16	팽창성 보통
6	19.4	33.2	11.2	9.2	0.16~0.22	8	팽창성 없음
7	18.5	40.9	17.5	10.4	0.74~0.86	16	팽창성 없음
8	20.9	31	7.1	7.1	0.09~0.10	10	팽창성 미미

*10kN/m² 상재하중 재하 후 시험 결과

해석 결과, 터널 바닥부의 추가적인 굴착으로 인해서 발생하는 터널 천단변위는 10mm 내외(천단변위의 8% 이내)로 나타났다(표 5 참조). 천단부의 경우 대구경 보강 그라우팅과 슛크리트, 강재보재로 보강이 되어 있어 하단부 굴착으로 인한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 터널의 측벽부는 바닥부 굴착으로 추가적인 변위 발생량은 약 27mm 정도로(측벽 변위의 7% 이내)로 나타났으며, 측벽부 역시 대구경 보강 그라우팅과 슛크리트, 강지보재, 레그파일(Leg pile)로 보강이 되어 있어 하단부 굴착의 영향이 제한적인 것으로 판단된다.

다만, 해석 결과에서 보면, 하반 슛크리트 굴착 후 발생하는 측벽부의 변위가 387.9mm로 상당히 크게 산출되

어 터널의 안정성에 영향을 줄 것으로 판단된다. 이러한 결과는 194m의 깊은 심도와 V등급 암반 조건, $K_0=1.7$ 의 해석조건이 불리하기 때문으로 판단된다.

5. 이완영역 추정

일반적으로 터널 바닥부는 발파 등에 의한 손상 때문에 일부 이완 또는 손상영역이 발생할 수 있으나 안정성 등에 영향을 미칠 수 있는 수준이 아니어서 설계단계에서 검토하지 않는다. 그러나 용기가 예상되는 경우, 터널 주변지반을 포함하여 바닥지반의 연약도도 검토하여야 한다. 터널 공사시 이완영역은 굴착단계에 따라 터널 상부

터널 단면		적용지보패턴		
		굴착공법	상·하 반단면 굴착	
		굴진장(m)	0.8/0.8	
		스�크리트(cm)	40	
		록볼트	길이(m)	4.0
			개수	3.0
			간격(m)	(중) 0.8/(횡) 1.0
		강지보/간격(m)	H-300/0.8	
보조공법	대구경 보강 그라우팅(150)			

〈그림 9〉 적용지보패턴

〈표 5〉 변위 발생 결과

구분	천단변위(mm)	측벽변위(mm)	하단변위(mm)	
터널 굴착	상반 굴착	-129.5	341.9	150.8
	상반 Soft Shotcrete	-136.5	339.7	149.4
	상반 Shotcrete 경화	-144.9	337.2	148.4
	하반 굴착	-147.0	352.7	170.6
	하반 Soft Shotcrete, Rock bolt 설치	-147.4	364.2	174.5
	하반 Shotcrete 경화	-150.8	387.9	184.1
터널 바닥부 굴착	터널 바닥부 굴착(1m)	-161.9	414.2	184.6
	터널 바닥부 굴착(1.5m)	-154.1	393.3	170.1
	터널 바닥부 굴착(2m)	-162.7	414.2	179.1

와 주변 지반의 응력해방으로 발생한다. 특히 미고결 파쇄대에서는 응력해방과 함께 지하수가 유입되면서 급격한 강도상실을 유발하기 때문에 건설 당시에 양호한 지반으로 평가되었다고 운영중에 점진적으로 연약화되어 콘크리트궤도의 침하나 융기를 유발할 수 있다.

현장에서의 연약화에 대한 판단은 변위계측자료(내공 변위, 융기의 속도)를 기반으로 페이스맵핑, 현장조사, 지하수변위량, 지지력 평가 등에 대한 정보를 종합적으로 사용하여 검토하여야 한다.

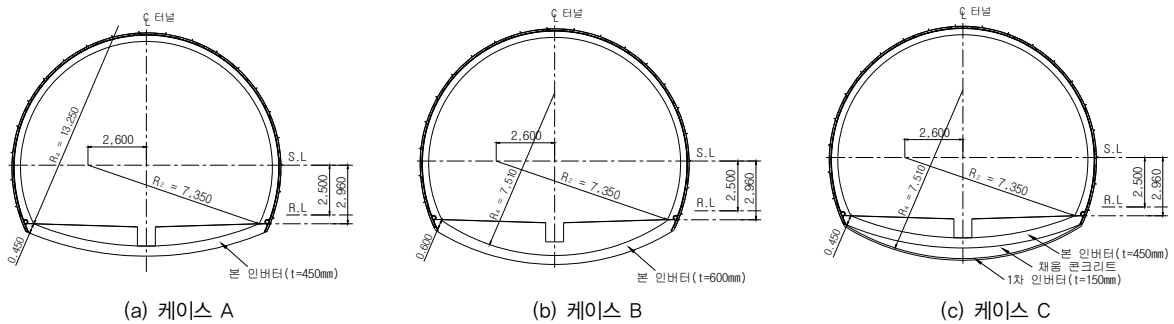
6. 바닥지반 변형 발생에 대한 대책

대책선정을 위해서는 대상 구간의 변위계측자료(내공 변위, 융기의 속도)를 필수적으로 확인하여야 하며, 페이스

스맵핑, 현장조사, 지하수변화 등 굴착시의 정보를 종합적으로 사용하여 검토하여야 한다.

6.1 인버트

건설단계에서의 가장 효과적인 보강방안은 인버트를 사용하여 폐합시키는 것이다. 그림 10은 일본에서 제시하는 인버트 보강시의 단면사례를 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 통상적인 신간선 터널의 단면이다. 그림 10(b)는 인버트의 반경을 작게 하여 보강하는 방안이지만, 굴착이 깊어지는 단점이 있다. 또한 그림 10(c)는 본 인버트 하단의 추가로 1차 인버트를 조기폐합하여 설치하는 안이다. 조기폐합의 경우에는 건설시의 변위소성영역의 억제뿐만 아니라 공용중의 변위억제에도 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다.



〈그림 10〉 보강구조별 터널 단면적

〈표 6〉 락복트 보강시의 표준설계(안)

	보강type 1	보강type 2	보강type 3
개요	L=4m	L=4m	L=6m
락복트제원	D25 X 4본/단면 L=4m, 1.5m 간격	D29 X 4본/단면 L=4m, 1.0m 간격	D35 X 6본/단면 L=6m, 0.5m 간격
프리스트레스	50kN	50kN	50kN
비고	연직변위 구속도를 60%로 제어	연직변위 구속도를 40%로 제어	연직변위 구속도를 20%로 제어

6.2 락볼트

표 6은 일본 철도에서 사용하는 락볼트 표준설계(안)으로서 복선 터널을 기준으로 한다. 목표로 하는 수직변위 속도 억제율에 따라 락볼트의 표준 패턴(보강 등급을 I~III)을 구분하였다. 천단 및 측벽에서의 내공변위 계측 결과와 노반의 수직변위 및 물성치 정보를 기반으로 노반 수직변위의 허용값을 계산하여 락볼트의 설계 제원을 결정할 수 있다. 노반의 용기속도를 측정하는 것은 필수적이며, 측정방법은 수준측량과 지중변위계, 궤도검측차를 이용한다. 락볼트는 축방향 전단력에 대한 저항이 아니라 인장재로 설계한다. 용기 억제 효과는 연직으로 타설하는 것이 효과적이지만, 각도가 20° 이내이면 영향이 적으며, 볼트 길이가 부족할 경우는 충분한 효과를 얻을 수 없다.

6.3 그라우팅주입공법

그라우팅주입공법의 종류는 LW, SGR, JSP, Jet grout, RJP, CGS, SRC, SQJ, MSG, NDS, SMI, ASG, AGS 등이 있으며, 밀크시멘트를 침투, 압밀, 할렬 주입하여 지반의 강성을 개량한다. 그라우팅공법 선정시에는 원지반 및 성토의 재료, 강도, 지형, 지질, 입도조건, 장비운용 특성 등에 대한 광범위한 사전조사가 필요하고 보강시에는 노반의 변형을 감시하기 위한 계측시스템을 구축하여야 하며, 보강 후에는 보강효과를 검증하기 위한 방안을 강구하여야 한다.

6.4 측벽부 보강공법

측벽부 보강은 터널하반의 양 측면을 대상으로 하며, 연약한 지층에 위치한 터널 하반의 측벽부 변위를 억제하여 굴착 시 주변지반 이완으로 측벽 및 바닥부 팽창압

로 인한 구조물 손상을 방지한다. 보강방법에는 강관, 그라우팅, 락볼트, 소일네일링 등이 사용된다.

7. 결론

국내에서 발생하는 터널 용기의 주요 원인은 지반구속 해제 및 지하수 유입 등으로 인한 스퀴징(Squeezing)일 것으로 판단된다. 조사를 위해서는 터널의 변위계측자료(내공변위, 용기의 속도)를 필수적으로 확인하여야 하며, 페이스맵핑, 현장조사, 지하수변화 등 굴착시의 정보를 종합적으로 사용하여 검토하여야 한다. 용기에 대한 보강은 폐합인버트 구조가 가장 효과적이며, 락볼트, 그라우팅, 측벽부 보강 등을 검토할 수 있다.

콘크리트궤도 또는 콘크리트포장이 적용되는 터널은 과도한 용기가 발생할 경우, 유지관리대책을 적용하기가 매우 어렵기 때문에 용기가 예상되는 구간에 대해서는 건설 단계에서 충분한 보강설계를 실시하는 것이 합리적이다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단(2012), 고속철도 콘크리트궤도 유지보수 기준 정립방안 연구보고서.
2. 한국철도시설공단(2008), 철도 토공구간 원지반 안정성 강화 기술 개발 보고서.
3. 한국철도시설공단(2014), 호남고속철도 토공노반의 신뢰성 확보를 위한 침하안정 평가 연구보고서.
4. 渡邊康夫, 藍郷一博, and 鈴木尊(2007), “供用中の新幹線トンネルで発生した路盤隆起の原因とその対策,” *トンネルと地下*, Vol. 38, No. 9, pp.7-16.
5. 野城一榮, 嶋本敬介, 中西祐介, and 小島芳之(2012), “山岳トンネルの路盤隆起補強工の効果とその設計手法(特集 構造物技術),” *鉄道総研報告*, Vol. 26, No. 4, pp.41-46.
6. 이일화, “건설 및 공용 중 터널 바닥에서 발생하는 용기 현상과 대책,” *철도저널 제21권 제3호*, 2018.6, pp. 68-78.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]