

지반 공동현상(sinkhole)에 대한 효과적인 탐사방법과 운행선에 미치는 안전성 평가 및 대응방안에 대한 사례

Examples of Effective Exploration and Safety Evaluation and Countermeasures on the Operating Line of the Ground Joints(sinkhole)

전필재*, 엄종우**, 황병복**

Pil-Jae Jeon*, Jong-Woo Eom**, Byung-Bok Hwang**

ABSTRACT

The size of track and track structures is increasing as high-speed trains increase. These high-speed trains require a safe and precise railway, which is directly linked to the stability of the ground. Even a well-made structure can lead to a big accident if the ground collapses. Korea, in particular, fully reviews the safety of such ground and builds railways as there are many different strata and soft ground. Nevertheless, instability of the ground in many places causes subsidence of the earthwork sections and structures. This study tries to address the common phenomena among the many causes of these ground instability. In particular, for limestone stratum sections with a high probability of common occurrence, the joint is identified through investigation and exploration, and the effects and countermeasures of the joint on the operation safety of high-speed railways are studied and proposed.

1. 서론

기술이 향상됨에 따라 철도와 철도구조물은 더욱 견고하며 거대해지는 추세이다. 구조물의 비율이 증가하고, 전 구간을 콘크리트도상으로 시공하고 있다. 이러한 구조물이 증가할수록 지반의 안정성은 철도 운행과 더욱 밀접하게 연결될 수밖에 없다. 특히 지반 불안정의 원인 중 하나인 공동현상이 발생 될 경우 큰 사고로 이어질 수 있다. 따라서 본 논문은 호남고속철도 OO군 OO리 일원 석회암 구간의 땅꺼짐 현상을 전기비저항탐사, 시추조사 등을 통해 조사를 실시하고, 공동 발견시 철도 안정성에 미치는 영향을 평가하고, 대응방안을 제시하고 실시한 사례를 소개한다.

2. 본론

2.1 현장개요

호남고속철도 OO군 OO리 일원은 석회석을 채굴하는 광산이 위치하며 광산 주변부에서 과거에 땅꺼짐이 발생한 기록이 있다. 2017년 5~6월에도 노선과 150m 이격된 위치에서 땅꺼짐이 발생했다. 조사 구간 인근에 석회암 광산이 위치하고 있으며 현재 채굴작업이 진행중인 상태로 OO천교과 OO제2터널 인근 석회암이 분포하고 있을 것으로 판단된다.

2.2 사전조사실시

조사구간 석회암 지대로 보이며 인근 발생한 땅꺼짐의 경우 원인이 확인되지 않았으나 주변의 광산의 영향에 의한 지반이완 가능성이 있어 선로 주변에 공동 유무 확인을 위해 사전 조사의 성격으로 시추조사 없이 깊은 심도에서 비교적 신뢰도 높은 전기 비저항 탐사를 1차 조사 방법으로 선정했다.

* 한국철도시설공단 호남본부 호남권사업단

** 한국철도시설공단 호남본부 시설관리처

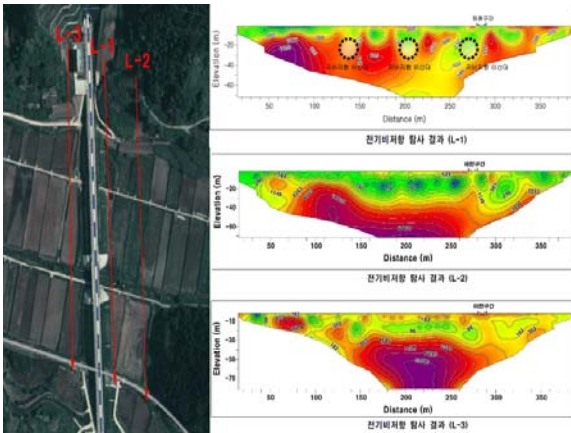
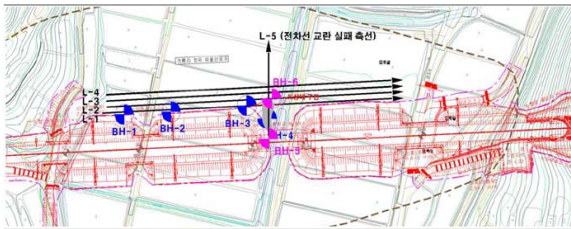


그림1. 전기비저항 탐사 조사 결과

조사결과 기반암에서 확인되는 저비저항대는 노선에 근접한 상부 L-1구간에서만 나타나며, L-2, L-3 구간에서는 확인되지 않았다. L-1 구간에 확인되는 저비저항대(3개소)의 성격(지하공간 또는 단순파쇄대)과 보다 상세한 위치 및 규모를 확인하는 것이 필요하다고 판단되어 이를 확인하기 위한 2차 정밀 조사를 계획, 실시하였다

2.3 정밀조사실시



위치	조사항목	번호	조사수량 (m)	비고
와룡리 일원	전기비저항 탐사	L-1	연장 250m	남서→북동방향
		L-2	연장 250m	남서→북동방향
		L-3	연장 250m	남서→북동방향
		L-4	연장 250m	남서→북동방향
	시추조사	BH-1	심도 30.0m	
		BH-2	심도 31.0m	
		BH-3	심도 40.0m	
		BH-4	심도 40.0m	빈공동 확인
		BH-5	심도 45.0m	빈공동 확인
		BH-6	심도 35.0m	
탄성파 토모그래피	TM-1		BH-3 및 BH-4 위치	

그림2 정밀조사(전기비저항,시추 조사)위치 및 범위

1차 사전조사에서 추정된 지하공간의 범위와 심도를 보다 상세히 알아보기 위하여 추가로 사전조사의 L-3 위치에 연장 250m, 축점간 폭은 5m로 4개의 선으로 실시 하여 정밀도를 높였다 (그림 2 참조) 또한 저비저항이상대의 위치와 성격을 확인하기 위한 시추조사를 6개소 실시하였고, 이 중 시추공 2개소(BH-3, BH-4)를 활용하여 탄성파

토모 그래피를 수행하여 지하 공 간의 연속성을 확인하였으며, 시추조사 결과 교대 측면부 BH-4 심도 31~71m에서 지하 공간을 확인했다. 시추 중 케이싱이 하부로 빠지면서 코어가 회수되지 않았다. 또한 BH-5에서는 심도 23.4~42.5m까지 간헐적으로 코어 회수가 되지 않아 지하공간이 존재하는 것으로 판정하였다.

탐사결과 종합적으로 확인된 OO천교 인근의 지하 공동은 지표아래 23~31m 하부에 분포하는 것으로 확인되었으며, 연장은 30~40m, 두께는 6~19.1m로 보인다. 지하 공간의 내부는 완전히 비어있는 상태는 아니며 선로측 부분은 암반이 교호하는 것으로 판단된다.

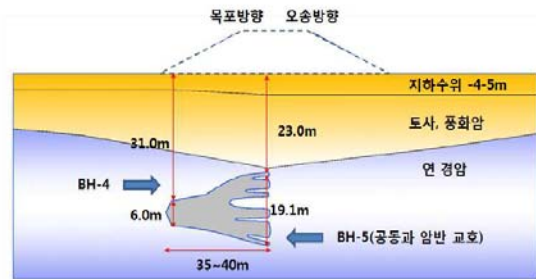


그림3. 지하공간의 예상 위치 및 규모

2.4 안전성 검토

석회암반의 상태가 양호하여 단기간에 공동이 확장되거나 붕괴할 우려가 없다고 판단되어 현재 공동의 지반상태에서는 침하영향이 적어 노선 안전성 확보 됐다고 볼 수 있다. 또한 교대의 말뚝 기초가 암반에 지지하도록 시공 되어 영향이 적다. 그러나 최악의 조건에서 안정성 검토를 수행하기 위해 교대 기초 직하부에 공동이 있고 매우 장기간에 걸쳐서 지하 공간이 붕락된다고 가정하여 안전성 검토를 수행했다. 안전성 평가의 허용침하량 기준은 콘크리트 궤도 허용 잔류침하량 기준에서 30mm로 적용하였다. 철도 유지 관리에서 30mm는 콘크리트 궤도 탄성패드로 조정이 가능한 범위이다.

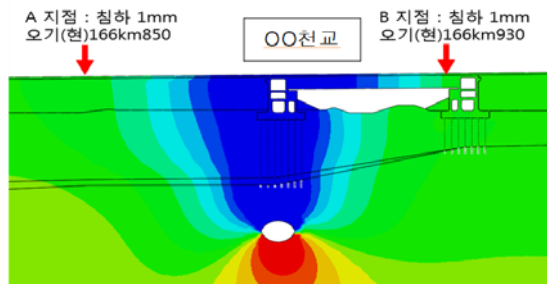


그림4. 해석 범위도

노반침하 1mm를 기준으로 약 80m구간에서 오목한 곡선 형태의 침하 발생이 예상된다.

[토공부 최대: 10.1mm, 교량부 최대: 13.5mm] 또한 노선 하부의 석회 광산 연결통로를 만들 예정이므로 이 연결통로의 붕괴를 가정시 침하량은 0.4mm 이하로 고속철도 운행 안전성에는 문제가 없다.

가장 불리한 조건에서 검토결과, 예측 침하량 기준(30mm) 이내 이므로 고속철도 운행 안전성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

다만, 지반의 불확실성은 항상 존재하고 석회암 지반의 지속적인 침식, 용해를 감안하여 하고 대규모 승객을 빠르게 수송하는 고속철도의 중요도와 사회적 안전 의식을 감안하여 현재 지하 공간을 선제적으로 충전하는 것을 검토하여 시행하였다.

2.5 대응방안

석회공동의 대응방안은 공동 충전방식과 국부 보강방식이다. 공동 충전 방식은 빈 공동에 주입재를 이용하여 공동을 직접 채워나가는 방식이며, 국부 보강방식은 상부의 지반에 보강재를 설치하거나 상부부터 하부까지 기둥을 설치하는 등의 방법을 통해 공동 구간의 지반을 보호하는 공법이다.

공법	개요도	개요	특징
수입식 충전법		• 물을 이용하여 충전 재료를 Slurry 형태로 이송시켜 공동을 충전시키는 방법	• 많은 양의 재료 단기간 충전 가능 • 충전의 정도는 충전물들의 인식각에 좌우됨 • 경사가 심한 곳에서는 충전재의 유출을 방지하기 위해 차단벽이 필요
공압식 충전법		• 공기압에 의해 충전물을 이송시켜 공동을 충전시키는 방법	• 충전성 양호. 배수처리 문제 없음 • 급속광산에서 주로 사용됨 • 대규모 공동에는 적용성 곤란
그라우트 충전법		• 시멘트를 혼합한 충전재를 Slurry 형태로 이송시켜 충전시키는 방법	• 충전재의 강성이 좋음 • 충전효과 좋음 • 공사비가 고가

표1. 공동 충전 공법

공법	개요도	개요	특징
상부 보강법		• 공동 상부지반에 그라우팅 또는 Micro Pile을 시공하여 보강하는 방법	• 시공이 간단함 • 부분적인 지반이나 구조물 보강시에는 경제성이 좋음 • 침하를 완전히 억제시키기 위해서는 공사비가 다소 고가임
그라우트 기둥		• 시추공을 통하여 골재 투입 후 그라우트 재를 주입하여 공동내에 기둥을 형성	• 공동심도가 얕은 경우 효과적임 • 주변에 구조물 있을 경우 적용 곤란 • 상반과의 접촉이 불확함 • 함몰 부분에 대한 추가 보강 필요
강관 기둥		• 공동 하부부터 강관을 설치한 후 콘크리트를 타설하여 기둥을 형성	• 지상에서 시공 가능 • 일시적인 함몰 방지 • 대형 크레인 등 대형장비의 작업공간 확보 필요

표2. 국부 보강 방법

본 논문에서 분석한 석회 공동의 사례에서는 그라

우트 공동 충전 공법을 적용하였으며, 충전공사 완료 후 확인 시추 2공, BIPS(시추공 영상 촬영)을 시행하였으며, 시추 및 촬영결과에 대해 전문가의 자문을 시행하여 공동 충전 시공결과 밀실하게 충전 되었음을 확인하였다.

3. 결론

앞서 본론의 내용을 통해 검토한 바와 같이 공동 존재의 유무를 발견하고 안정성 평가를 통해 적절하게 대응하는 것은 열차가 주행하는 운행선의 안전에 장기적인 관점에서 필요한 조치라고 볼 수 있다. 그러나 본론의 안정성 검토에서 보듯 본 논문에서 다룬 공동에 의한 노반침하 현상은 허용침하량 기준을 초과하는 부분은 없다. 따라서 철도의 유지관리 차원에서 조치할 수 있는 부분이다. 또한 현재의 노반 침하 상황을 미루어 보았을 때 대응 단계에서 이루어지는 공동의 충전, 공동의 국부 보강 방법 등은 많은 비용이 발생하게 되므로 경제성을 고려했을 때 가장 타당한 방안이라고 확신할 수는 없다. 하지만 공동이 시간이 지날수록 불확실성은 항상 존재하고 지속적인 침식, 용해를 감안 했을 때 대규모 승객을 빠르게 수송하는 고속철도의 중요도와 사회적 안전의식을 감안하여 선제적인 공동에 대한 대응으로 사고 발생 요소를 조기에 해소하는 것이 옳다고 판단된다. 따라서 본 논문에서 소개된 전기비저항탐사, 시추조사 등의 탐사방법에 더불어 경제적이고 효과적인 탐사방법의 검토와 연구가 필요하며, 공동의 충전을 실시할 때 지하 공간의 공동을 더욱 밀실하게 시공할 수 있는 기술들의 연구 또한 지속적으로 필요하겠다.

참고문헌

[1] 호남고속철도 안전성 검토 용역 보고서