

도심지 굴착공사에 따른 인접지반 및 구조물 침하원인 분석

The contiguity ground and structures sinkage analysis of in city excavation

성주현¹⁾, Seong, Joo-Hyun

¹⁾ 한국시설안전공단 기술본부 기술개발팀 대리, Researcher, Dept. of Technical Development Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

SYNOPSIS : Recently, urban excavations are one of most frequent geotechnical work according to construction of a high rise building and subway. These kind of excavation affect to a adjacent ground or structure and it can trigger various severe accidents.

Generally, the ground is closer to the excavation site, the deformation become larger. In this study, special ground settlement case due to adjacent ground excavation is presented and a cause of deformation is examined by various geotechnical exploration, lab-testing and numerical analysis.

Keywords : 도심지, 굴착, 침하

1. 서론

지반굴착공사는 인근 지반 및 구조물에 영향을 미쳐 크고 작은 사고의 원인이 됨을 메스컴을 통하여 많이 접하게 된다. 특히 최근에 도심지 내에 고층빌딩 및 지하철 건설과 같은 대형 공사가 많이 실시되어 이로 인한 지반침하에 대한 관심이 매우 높은 상황이다. 지반굴착공사로 인한 지반 침하나 변형은 일반적으로 굴착면에 인접할수록 크게 발생하고, 거리가 멀어질수록 작게 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 사례에서는 이와 같은 일반적인 경향과 다른 침하양상이 발생되어, 이를 규명하고자 다양한 현장조사, 실험, 그리고 수치해석을 실시하여 해결한 사례로 본 고를 통하여 소개하고자 한다.

2. 현장 현황

본 지반침하는 OO역 내에 광범위하게 발생하였으며, 침하발생구역의 시설물 현황은 승강장 6개소, 에스컬레이터 12기, 계단 12기, 엘리베이터 6기가 설치되어 있으며, 6번 승강장 인근에서 지반굴착공사가 진행 중에 있었다.

인접 지반굴착공사는 크게 개착구간과 지하터널구간으로 구분되며, 이중 개착정거장 구간은 굴착 폭 약 33~45m, 굴착심도 약 52m로 계획되어 있으며, 2007년 3월 굴착 개시 후 현재 굴착심도는 약 G.L.-22m인 것으로 조사되었다. 본 공사는 공용중인 철도 및 역사와 인접하여 있어, 굴착 공사에 따른 안전성 확보를 위해 Downward 공법을 적용하여 시공 중에 있다. 또한 터널정거장 구간은 토피고 약 40m의 4-Arch 터널 형태로서 2007년 1월 선진터널 굴착 개시 후 현재 굴착이 완료되어 구조물 시공중에 있는 것으로 조사되었다.

침하는 2번~5번 승강장 사이에서 주로 발생된 것으로 조사되었으며, 중앙 연결통로를 기준으로 하행(오른쪽)방향으로 침하현상이 주로 발견되었다. 변형이 발생된 구조물로는 2번, 3번, 4번 승강장 엘리베이터와 3번, 4번 승강장(남측)에스컬레이터, 3번, 4번 계단(남측)으로 조사되었고, 이 중 2번, 4번 승강장

엘리베이터와 3번, 4번 승강장(남측)엘리베이터는 변형이 크게 발생되어 사용이 중지되었다.

3. 지반조사 및 실험

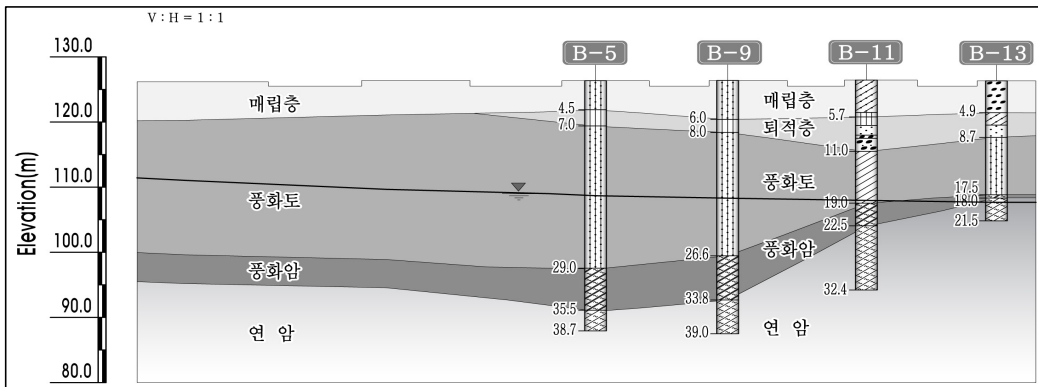
본 침하구역은 실트, 모래, 자갈로 구성된 하상퇴적층과 기반암인 호상흑운모편마암이 분포되어 있는 것으로 지질자료를 통하여 알 수 있었으며, 정확한 지층구조 및 지반 물성을 파악하기 위해서 아래와 같이 지반조사 및 시험을 실시하였다.

<표 3-1> 지반조사 항목

조사 항목		수 량	비 고
시추조사		13공, 433.1m	연암 2.0~13.7m 확인
현장조사 및 시 험	표준관입시험	327회	1m 간격 / KS F 2307
	지하수위측정	13공	2008. 3. 21 까지 측정
	현장투수시험	33회	B-1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
	현장수압시험	2회	B-10, 11
	공내 유량·유속시험	3공, 10개소	B-4, 8, 12
	공내재하시험	19회	B-2, 6, 8, 9, 12, 13
	공내진단시험	13회	B-2, 6, 12, 13
	열차진동 계측	1식	열차의 반복진동에 의한 침하영향분석
	시설물 위치측량	1식	주요구조물 및 시추위치 확인측량
물리탐사	GPR탐사	48단면, 1,223m	1~6번 승강장

지반침하 발생 지역과 조사목적에 부합될 수 있는 위치를 중심으로 승강장 12공, 선로 1공, 총 13공의 시추조사를 수행하였다.

시추심도는 기반암인 연암 3m 확인을 기본으로 하였으며, 연암 상태가 현저히 불량한 공에 대해서는 최고 13.7m까지 굴진하였다. 시추조사 결과 조사지역의 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암의 순으로 분포하고 있으며, 대표 단면과 지층별 분포 특성 및 지반 물성은 아래와 같다.



<그림 3-1> A-A'구간 지층 단면도

<표 3-2> 지반조사 결과

지층명	분포심도		층후(평균)		구성성분	공학적특성		투수계수
	기존 자료	금회 조사	기존 자료	금회 조사		기존 자료	금회 조사	
매립층	0.0 ~11.0	0.0 ~6.7	1.0 ~11.0 (3.9)	2.8 ~6.0 (4.7)	실트질 모래 모래질 자갈	11/30	8/30	$2.82 \times 10^{-4} \sim 3.13 \times 10^{-3}$ m/sec (평균 1.40×10^{-3})
퇴적층	0.7 ~17.5	2.8 ~11.0	2.5 ~6.6 (5.1)	2.0 ~5.3 (3.1)	모래질실트 점토질모래 모래, 모래질자갈	11/30	11/30	$3.49 \times 10^{-5} \sim 7.55 \times 10^{-3}$ m/sec (평균 1.97×10^{-3})
풍화토	4.5 ~27.5	4.6 ~31.0	1.0 ~19.0 (6.4)	8.0 ~23.9 (15.8)	실트질모래와 소량의 모래질점토	37/30	40/30	$4.93 \times 10^{-4} \sim 3.61 \times 10^{-3}$ m/sec (평균 1.10×10^{-3})
풍화암	9.0 ~24.5	16.0 ~35.5	1.0 ~13.3 (6.5)	0.5 ~7.3 (4.5)	굴진시 암편취인 실트질모래로 분해	50/5	50/8	$1.62 \times 10^{-4} \sim 1.71 \times 10^{-3}$ m/sec (평균 9.49×10^{-4})
연암	10.0 ~24.5 하부	18.0 ~35.5 하부	-	-	심한풍화 내지 약간풍화된 편마암	TCR/R QD(%) =62/23	TCR/R QD(%) =84/13	$3.06 \times 10^{-7} \sim 7.04 \times 10^{-6}$ m/sec (평균 3.67×10^{-6})

4. 기존자료 분석

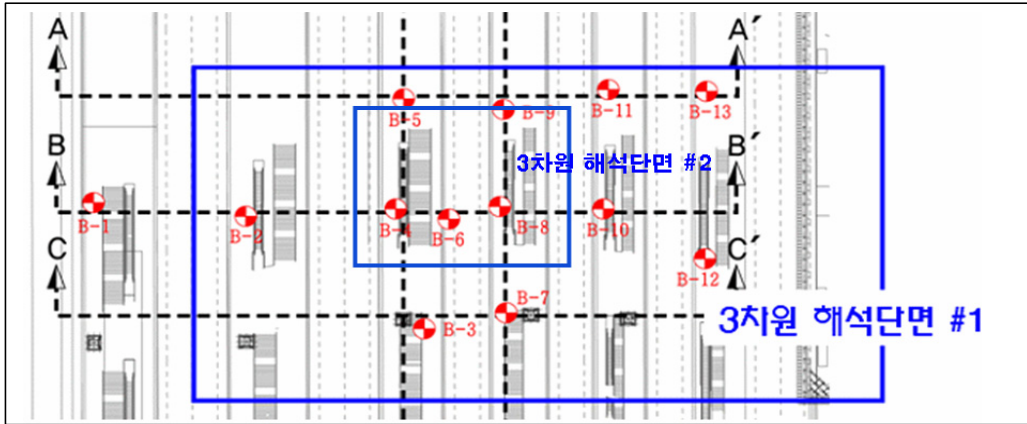
본 구간은 1990년대 초반부터 선로로 이용되어 온 것으로, 당시 시추조사 결과자료를 볼때, 매립층 및 퇴적층의 연약구간이 존재하고 있음을 인식하고 있었던 것으로 사료된다. 그 후, 신역사 건설공사 중, 연약구간을 대비하여 구조물에 대한 기초공사가 준공 완료되었고, 2003년 장애인관련법 개정으로 인해 무빙위크를 대신하여, E/V, E/S를 설치하는 것으로 설계 변경되었다. 에스컬레이터 설치 시 기존에 설치된 기초를 최대한 이용하여 구조물 시공이 된 것으로 조사되었으며, 엘리베이터는 그라우팅 공법을 통한 지반 보강만 이루어진 것으로 조사되었다. 신역사 준공 후부터 2007년 말까지 운영함에 있어 최근 인접 지반굴착공사로 인한 지하수위 저하가 발생하기 전까지 특이할만한 구조물 이상변형은 인식되지 못한 것으로 조사되었다.

5. 수치해석

본 연구에서는 수치해석을 위하여 범용 해석프로그램인 ABAQUS/Standrad version 6.5-1과 FLAC 2D Ver.5.0을 사용하여 수행하였다.

5.1 해석단면 선정

수치해석을 위한 해석단면은 운행이 중단된 2번과 4번 승강장 엘리베이터와 운행이 중지된 후 운행이 재개된 3번과 4번 승강장 에스컬레이터 주변, 굴착공사가 진행되고 있는 과업구간을 전반적으로 반영할 수 있도록 선정하였다.



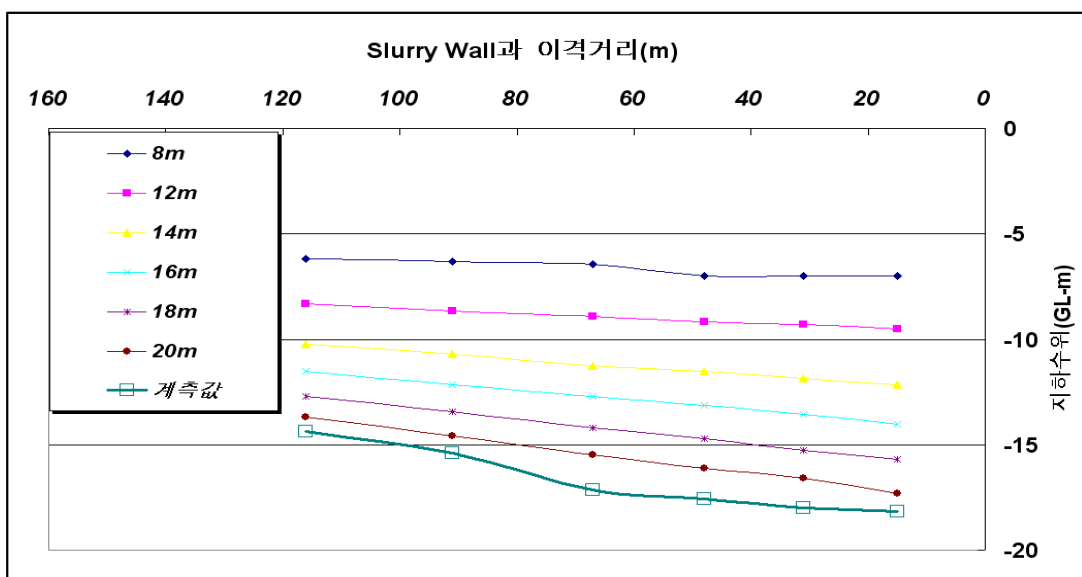
<그림 5-1> 해석단면 선정

5.2 적용 물성치

<표 5-1> 적용 지반 물성치

	단위	매립층	퇴적층	풍화토	풍화암	연암
단위중량(γ)	tonf/m ³	1.80	1.75	1.90	2.00	2.40
점착력(C)	tonf/m ³	0.28	1.14	1.44	2.39	20.00
내부마찰각(ϕ)	°	27.81	21.90	29.54	33.42	35.20
변형계수(E)	tonf/m ³	657	178	4,492	20,397	238,533
포아송비		0.35	0.38	0.33	0.30	0.26
투수계수(k)	m/sec	1.40E-05	1.97E-05	1.10E-05	7.59E-06	3.67E-08
간극비		0.736	0.829	0.657	0.490	-

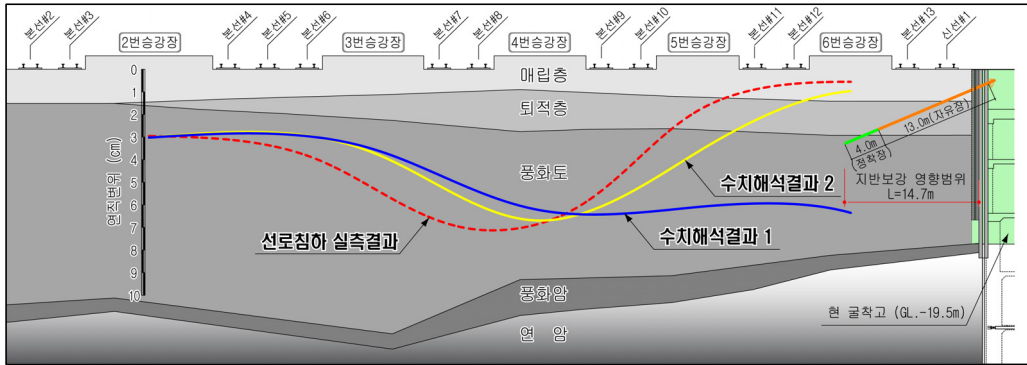
5.3 침투해석 결과



<그림 5-2> 지하수위 수치해석결과 및 계측결과 비교

인접지반굴착공사로 인한 배수과정을 기초로 한 침투해석 결과와 현재 지하수위 계측결과가 유사한 경향을 나타내는 것으로 보아, 현재 지하수위 감소영향은 인접공사에 영향을 크게 받은 것으로 판단된다.

5.4 응력-변형 해석결과



<그림 5-3> 응력-변형 해석결과

지반조사를 통한 지층단면과 물성치만을 고려한 해석에서는 5,6번 승강장에서도 침하가 크게 발생하는 것으로 나타나 발생한 침하경향과 일부 차이를 보이는 것으로 나타났다.

그러나, 토류벽 앵커 및 앵커정착을 위한 그라우팅 보강이 인접한 5,6번 승강장 연약 퇴적층에 끼친 영향, 5,6번 승강장 인근에 설치된 다수의 기초효과, 2~6번 승강장 사이 초기 지하수위 구배영향 및 3,4번 승강장 및 선로의 KTX 승객 이용 빈도를 종합적으로 고려한 해석 결과에서는 실제 발생한 침하경향과 매우 유사하게 나타났다.

5.5 결과 분석

굴착공사 현장으로의 투수조건을 고려한 침투해석결과는 현재 지하수위 계측결과와 유사한 양상을 나타내는 것으로 보아 지하수위 저하는 인근 굴착공사로 기인한 것으로 판단된다. 수치해석은 변형계수에 따라 크게 좌우되는 특성상, 지하수위 저하의 영향을 받은 연약 퇴적층 두께에 따라 지반 변형이 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 해석 예상 침하량은 2번~6번 승강장까지 3~6cm 정도로 지반 침하가 발생하는 것으로 나타났다.

수치해석은 지층구조만을 고려한 경우와 현 흙막이 시공시 실시된 여러 보강공법과 열차 운행빈도, 설치된 기초와 지층구조의 불확실성 및 초기 지하수위 구배 등을 고려한 경우로 나누어 실시해본 결과, 1번~4번 승강장은 모두 비슷한 경향을 나타내었으나, 4~6번 승강장에서는 여러 효과들에 의하여 확연하게 구분되었다. 여러 효과를 고려한 해석이 실제 침하양상과도 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아, 흙막이 시공시 실시된 여러 보강공법과 열차 운행빈도, 설치된 기초와 지층구조의 불확실성 및 초기 지하수위 구배 등이 연약 퇴적층의 두께와 함께 영향을 미쳤던 것으로 보인다.

6. 결론

본 ○○역사에 발생한 지반 침하에 대한 원인은 다음과 같이 규정하고자 하였다.

신역사 준공 및 KTX 개통후, 인접 지반굴착공사가 실시되기 이전까지는 별다른 침하 현상 및 시설물의 변형이 발생되지 않은 것으로 보아 본 침하 발생은 인근 굴착공사와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되며, 인접 굴착공사 공정 중, 본 역사 지반 침하에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 흙막이벽체 변형, 지하수위 저하, 암 절취 시 진동 등으로 사료되나 이 중 흙막이 벽체 변형 및 암 절취시 진동에 의하여 발생하는 지반 침하 양상과 현 역사내 현장 상황과는 차이가 있는 것으로 보아, 큰 영향을 미치지 않은

것으로 판단되었다..

지하수위 저하에 의한 지반 침하 영향을 분석하기 위해 지반 조사 결과를 바탕으로 수치해석을 수행한 결과 연약 퇴적층의 두께에 따라 2~6cm 발생됨에 따라 지반 침하에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 해석결과, 에스컬레이터, 엘리베이터 기초는 본 현장에서 발생한 지반 침하와 같은 환경·조건 변화에 적절하지 않은 것으로 판단되었다. 따라서, 본 현장에 발생한 지반 침하 및 시설물의 변형은 인근 굴착공사로 인한 지하수위 저하와 예상치 못한 지반 침하에 대한 시설물 기초의 지지 기능 상실이 주된 원인으로 작용한 것으로 본 지반침하에 대한 결론을 짓고자 한다.