

해안매립지반의 도시철도 시공에 따른 구조물 침하 특성 분석

Characteristics of Structure Settlement due to Urban Railway Construction on Reclaimed Land

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul
임 용 관² Rim, Yong-Kwan
박 정 준^{3*} Park, Jeong-Jun

ABSTRACT

The stability of urban railway foundation can be a problem due to the excessive settlement. The settlement at the base of railway is monitored by the installed settlement gauges. The piezometer and pore water pressure measurement device are installed to measure the variation of pore water pressure and ground water table during the continuous pullout of sheet piles which were used for the braced cut. The settlement of railway is predicted with using the computer program CAIN RDA. The input data for the numerical analysis are obtained from the field soil exploration data and soil properties. The surcharged load from landscaping over the ground surface and the weight of train are taken into account for the estimation of settlement. As a result of numerical analysis, the range of settlement for six different Sites is from 5.94 cm to 12.77 cm. Thus, the settlement level at Site 2 is occurred 12.77 cm which is higher than the allowable settlement of 10 cm.

요 지

본 연구의 대상 현장은 굴착심도가 약 20m 내외로 사업 전구간을 개착공법으로 계획하였고, 흙막이 가시설공법은 굴착심도까지 슈트파일과 버팀보 공법을 적용하여 도시철도 하부기초에서 예측된 침하 자료를 사용, 시공 중 대상 현장에서 발생된 지반공학적 문제점을 분석하였다. 슈트파일 인발에 따른 영향을 알아보기 위하여 제 1구간과 제 2구간에 간극수압계와 지하수 위계를 설치하여 연속적인 슈트파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위의 변화와 하부지반 침하를 평가하였다. 또한, 구조물 하부기초 예측자료와 기존 문헌의 지반정수를 적용하여 계속시점에 해당하는 침하량을 수치해석 프로그램인 CAIN RDA 프로그램을 통하여 비교·분석하였으며 추가하중을 고려하여 장기침하를 산정하였다. 해석 결과, 6개 구간에서 5.94~12.77cm의 침하가 발생되어 제 2구간에서의 침하량이 12.77cm로 허용 침하량 10.0cm보다 크게 나타났다.

Keywords : Geotechnical characteristic, Urban railway, Pore water pressure, Settlement, Numerical analysis

1. 서 론

최근 국내에서는 공유수면 매립으로 부지를 확보하는 대규모 매립공사들이 해안지역을 중심으로 진행되고 있다. 이러한 해안 매립지는 과거에 농업, 공업단지로 주로 사용되어 왔지만 근래에 와서는 주거부지 및 상업부지로

도 그 활용영역을 넓히고 있는 실정이다. 현재 서해안에서는 새만금 간척산업 및 경제자유구역 건설을 위한 해안매립 공사가 진행되고 있다.

이처럼 매립지는 준설선이나 펌프선을 이용해 매립하거나 해성퇴적토로 일부 매립한 이후 상부에 양질의 토사나 암반을 매립하는 방식으로 이루어진다. 1, 2차 압밀완

1 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon)
2 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Univ. of Incheon)
3* 정회원, 인천대학교 건설환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Univ. of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

로이후에도 지하수위가 매우 높고, 해성점토, 실트질 점토, 느슨한 사질토 등의 연약지반이 매립층 하부에 그대로 존재하므로 전단강도가 작고 압축성이 커서 지지력 부족으로 인한 구조물의 활동파괴나 과대침하 등의 문제가 발생할 수 있다. 이에 해안 매립 연약지반의 토목공사 수행을 위해서는 흙막이 벽체의 변형 및 붕괴, 주변 지반의 침하, 시공 완료 후 본 구조물의 침하, 주변 구조물의 안정성 저하와 더불어 상하수도, 전력, 도시가스 등의 지중구조물 등의 파괴를 일으킬 수 있는 위험성을 가지고 있어 올바른 시공과 대처방안이 필요하다.

따라서, 해안 매립지반과 같은 연약지반 상에 토목공사를 수행할 경우에는 지반의 특성을 정확하게 파악하여 설계에 반영하여야 하며, 시공 중 혹은 이후에 지속적인 계측관리를 통하여 지반의 침하속도와 침하량을 예측하여 현장관리를 철저히 하여야 한다. 그러나, 현장 지반의 비균질성 및 지반 조건 등이 복잡하여 현장여건을 충분히 고려하지 않고 설계 할 경우 지반 정수를 평균하거나 지층을 단순화하여 침하를 산정하기 때문에 실제 발생하는 침하량과 상이한 예측결과를 초래한다(나승남, 2002).

본 연구에서 적용된 구조물 또한 해안 매립 지반에 시공된 도시철도 연장사업의 일환으로서 건설공법은 굴착심도가 약 20m 내외로 연장사업 전구간이 개착공법으로 수행되었고, 흙막이 가시설공법은 굴착심도까지 해성퇴적토인 실트질 점토와 사질토로 구성되어 있어 슈트파일과 버팀보 공법을 적용하였다. 그러나 토목공사 수행 중 가시설 구조체의 침하, 보일링 및 파이핑 현상에 의한 지반 침하 등 여러 가지 지반공학적 문제들이 발생되었다.

이에 대상 현장의 기존 문헌 자료 및 현장사례를 평가하고, 도시철도 하부기초에서 계측된 침하 자료를 사용, 시공 중 대상 현장에서 발생된 지반공학적 문제점을 분석하였다. 슈트파일 인발에 따른 영향을 알아보기 위하여 제 1구간과 제 2구간에 간극수압계와 지하수위계를 설치하여 연속적인 슈트파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위

의 변화와 하부지반 침하를 평가하였다. 또한, 구조물 하부기초 계측자료와 기존 문헌의 지반정수를 적용하여 계측시점에 해당하는 침하량을 수치해석 프로그램을 통하여 비교·분석하였으며 추가하중을 고려한 장기침하를 산정하였다.

2. 현장 지반 특성 및 굴착공사중 흙막이 가시설 변형

2.1 지층 조건

연구대상지역의 지질은 주로 선캠브리아기의 편마암 및 이를 관입한 유라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루며, 기반암은 흑운모 화강암으로써 기반암 상부에는 장기간의 풍화로 생성된 풍화토 및 풍화암이 덮고 있고 풍화대 상부는 해수에 의해 운반 퇴적된 해성퇴적층이 덮고 있다.

지층구조는 지표로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암 순으로 확인되었으며, 매립층 하부의 퇴적토층은 모래질 실트층, 실트질 점토층, 모래질 실트층, 실트질 모래층으로 실트층과 점토층이 교호로 구성되어 있다. 본 지역의 퇴적토 지층특성은 하부의 모래질 실트가 상부의 모래질 실트에 비해 매우 단단하며, 하부모래층은 지하수를 풍부하게 함유하고 있어 피압대수층으로 작용할 가능성이 있으며, 실트층과 점토층에는 부분적으로 샌드십(sand seam)이 얇은 층으로 위치하고 있다(인천도시철도 건설본부, 2004a).

2.2 공학적 특성

연구 대상지역의 기존 문헌에서 자연함수비는 함수비는 10.5~39.3%, 액성한계는 28.4~49.8%, 소성지수는 2.8~26.7%로 분포하고, 자연함수비 및 액성한계는 그림 1과 같이 20m 심도까지 증가하다 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 대부분 무기질 점토(CL) 및 무

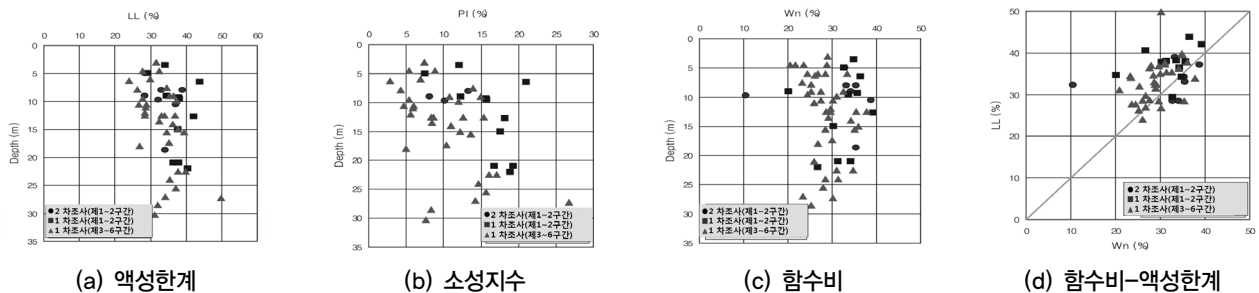


그림 1. 대상지역의 물리적 특성

표 1. 연구 대상지역의 역학적 특성 분석

역학적 특성	1차 조사 (1~6구간)			2차 조사 (1~2구간)			전체 평균
	최소	최대	평균	최소	최대	평균	
초기간극비 (e_0)	0.727	1.052	0.895	0.822	1.031	0.922	0.903
수정압축지수 (C_c)	0.219	0.479	0.329	0.179	0.335	0.282	0.32
팽창지수 (C_s)	0.023	0.061	0.037	0.035	0.058	0.048	0.023
압밀계수 C_v ($10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)	0.964	35.097	4.163	2.263	46.726	10.141	5.202
과압밀비 OCR	0.837	2.701	1.621	1.975	3.403	2.79	1.841
일축압축강도 q_p (MPa)	0.02	0.155	0.079	0.027	0.084	0.054	0.074

표 2. 지층별 투수계수 비교

구분		실시설계 투수계수(cm/sec)		확인조사 투수계수(cm/sec)	
		분포 범위	적용	분포 범위	적용
퇴적토	점토(CL)	$4.98 \times 10^{-7} \sim 1.09 \times 10^{-6}$	8.0×10^{-7}	$4.98 \times 10^{-7} \sim 1.09 \times 10^{-6}$	8.0×10^{-6}
	실트(ML)	$1.42 \times 10^{-5} \sim 1.86 \times 10^{-4}$	8.0×10^{-5}	$1.07 \times 10^{-4} \sim 4.82 \times 10^{-3}$	1.10×10^{-3}
퇴적토(모래), 풍화토		$9.22 \times 10^{-5} \sim 1.07 \times 10^{-4}$	3.0×10^{-4}	$3.84 \times 10^{-5} \sim 4.61 \times 10^{-3}$	2.0×10^{-3}

기질 실트(ML)임을 확인할 수 있다(인천도시철도건설본부, 2004b).

심도별 #200번체 통과중량백분율을 살펴보면 평균 85% 이상이 점성토층이며, 점성토층의 입도분석 결과, 자갈 0%, 조립질 모래 2.5%, 세립질 모래 12.7%, 실트 77.5%, 점토 7.5%의 분포를 나타내었다. 또한, 표 1에서와 같이 과압밀비가 1.837~3.403의 범위를 보이고 있어 과압밀된 상태를 나타내었다. 신뢰성 높은 투수계수를 얻기 위하여 공당 2~5회의 현장투수시험을 수행하였으며, 현장시험 결과 표 2에서와 같이 실시설계시 산정된 투수계수에 비하여 상당히 크게 나타났다. 당초 설계시 산정된 투수계수와 비교하면 투수계수 증가량은 점토층 약 10배, 실트층 약 14배, 모래층 약 7배인 것으로 나타났으며, 특히 실트층의 투수계수는 약 $1.10 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 산정되어 가는 모래로 분류되어 투수성이 높은 지반으로 평가되었다.

이러한 결과는 확인 시추조사 위치가 가시설 배면 1.5m 이격된 위치에서 이미 시공중 보일링 현상 등이 확인된 지역에서 수행된 바, 지하수의 침투현상 발생시 원지반의 세립분이 함께 유실되어 발생한 결과인 것으로 판단된다.

2.3 굴착공사중 흠막이 가시설 변형 분석

2.3.1 지하수 유출과 파이핑현상에 따른 침하

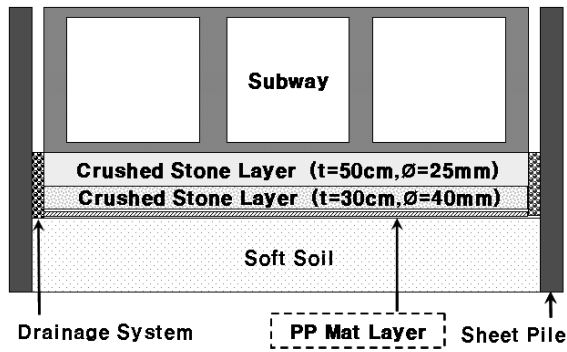
본 연구 대상현장에서는 토류공법 선정시 설계목적, 지



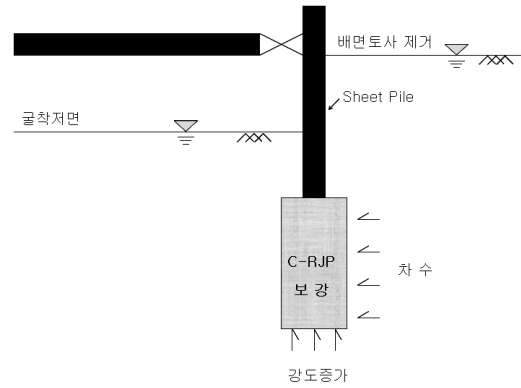
그림 2. 굴착지반 보일링 현상

형, 지질 및 토질, 시공환경, 공정 등을 고려하여 해안매립 지층으로 지하수가 높고, 연약한 지층으로 차수가 시공중에 큰 문제가 될 것으로 판단되어 수밀성이 우수하고 차수성이 양호한 슈트파일 공법을 적용하였다.

그러나, 가시설 8단 토공굴착 및 버팀보 설치작업중에 굴착바닥면에서 보일링 현상으로 추정되는 토립자가 포함된 지하수 유출현상이 발생하였다(그림 2). 지하수 유출이 발생된 후에 슈트파일이 침하되면서 슈트파일 배면지반의 인장균열 및 침하가 좌측부는 슈트파일에서 대략 23m 이격되어 연장 20m 균열폭 7cm로 배면지반이 30cm 가량 침하가 이루어졌으며, 우측 부분은 슈트파일에서 17.24m 이격되어 연장 24m 균열폭 12cm를 가지는 지반 침하가 발생하였다. 즉, 배면지반의 균열 및 침하, 버팀보 잭 파손, 슈트파일의 내측 휨 변형 등이 발생하여 토공작업을 중단

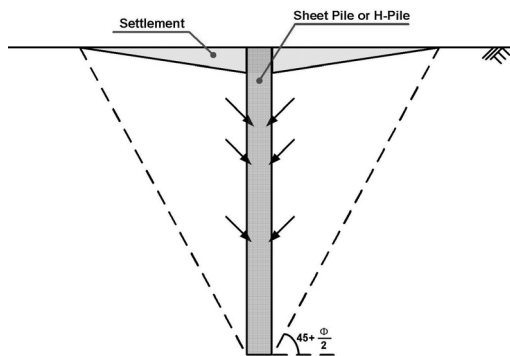


(a) 토목섬유 및 잡석 포설 보강



(b) 슈트파일 근입깊이 연장 RJP 보강

그림 3. 침하 발생원인 모식도



(a) 공극발생에 따른 주변침하 모식도



(b) 지중 토사 유출

그림 4. 슈트 파일 인발에 따른 지중 토사 유출

하고 그림 3에서와 같이 버팀보 추가 보강, 보일링 발생지점에 토목섬유 포설 후 잡석을 포설하여 토립자 유출방지, 슈트파일 근입심도 RJP 보강 등을 실시하였다(박정준 등, 2008). 이와 같은 보강조치를 실시한 후에 토공작업을 재개하였으나 가시설 변형 및 보일링 현상이 심화되어 토공작업을 중지하였다.

슈트파일 침하현상은 굴착바닥에서 토립자를 포함한 지하수 유출이 발생된 후에 배면지반의 침하를 동반하면서 가시설의 변형이 발생하였고, 이 현상의 발생원인은 보일링에 의한 파이핑 현상과 슈트파일의 근입장 부족인 것으로 판단되었다.

2.3.2 슈트 파일 인발에 따른 침하

대상 현장은 준설매립지역으로서 G.L. -16m~G.L.-18m의 위치에 구조물 기초공사를 수행하도록 설계되어 있다. 구조물 하부 지반은 점토가 협재된 실트질 세립모래가 주를 이루고 있으며 굴착 중 지속적으로 지하수가 유출되고 지반 교란과 액상화 현상이 부분적으로 진행됨이 확인되

었다.

굴착면의 되메우기 완료 후 흙막이 벽체로 사용되었던 슈트파일 인발 과정에서 인발 방식에 상관없이 침하가 발생하였다. 디젤해머의 진동에 의한 다짐효과와 슈트파일 배면에 부착된 토립자의 유출로 인하여 침하가 발생한 것으로 판단되며 현장에서 계측된 슈트파일 인발 전후의 구조물 기초의 침하량은 2.0cm~3.8cm로 계측되었다.

인발시 지반에 공극이 발생하여 생기는 인발공극은 슈트파일의 체적에 부착토사량의 합이 될 것이며 공극발생에 따른 주변침하 모식도는 그림 4와 같다. 인발로 인한 공극, 진동으로 주변지반 이완과 지표 및 지중 침하 등의 거동을 정확히 예측하기는 상당히 어려운 실정이다. 또한 공사 진행 중에 연약화된 지반상태로 인하여 침하가 계속된다면 구조물의 장래 안정성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 예상된다(Kim and Drabkin, 1995).

본 연구대상 지역의 제 5구간에서 슈트파일 인발에 따른 지반침하를 계측하였으며, 이 구간은 정거장구간을 포함하며 전 구간에 걸쳐 직선형이다. 또한, 제 4구간의 종점

표 3. 표준관입시험에 의한 N값

공 번	심도(m)	구성토질	N치(회/cm)	비 고
1-1	20	실트 섞인 세립모래	20/30	인발전
1-2	20	실트 섞인 세립모래	16/30	인발전
1-3	20	실트 섞인 세립모래	9/30	인발후
	20	실트 섞인 세립모래	8/30	인발후
1-4	21	실트 섞인 세립모래	9/30	인발후
2-1	17	점토 협재된 실트질 세립모래	12/30	인발전
	19	점토 협재된 실트질 세립모래	5/30	인발전
2-2	17	점토 협재된 실트질 세립모래	21/30	인발전
	19	점토 협재된 실트질 세립모래	3/30	인발전
2-3	17	점토 협재된 실트질 세립모래	5/30	인발후
	19	점토 협재된 실트질 세립모래	4/30	인발후
2-4	17	점토 협재된 실트질 세립모래	3/30	인발후
	19	점토 협재된 실트질 세립모래	7/30	인발후

으로부터 정거장 구간에 이르는 본선 구간의 단면의 폭은 일정하고, 정거장 구간에서 단면의 폭이 확장된다. 정거장 이후 구간에서 제 6구간의 시점까지는 약간의 변화는 있으나 전반적으로 다시 일정한 폭으로 본선 구간이 이어진다.

공사현장의 지반조사 자료를 참조하면 전반적으로 구조물 기초저면 지반은 잡석치환 2m, N치가 50 이상인 자갈층 7m, N치가 20 이상인 실트질 점토 5m, N치가 12정도인 점토 퇴적층 9m로 구성되어 있다. 길이 26m 정도의 U-Type 슈트파일 인발을 위하여 진동해머가 사용되었다. 즉, 구조물 박스 상부의 퇴메우기 종료 후 슈트파일의 인발에 따른 침하량은 38mm 정도로 나타났다.

3. 현장조사 및 계측결과 분석

기준에 실시된 토질조사 자료 및 설계자료를 토대로 구조물 시공 후 퇴메우기가 완료된 본 연구대상 현장의 구조물 하부지반에 대한 시추조사, 표준관입시험을 실시하였으며 슈트파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위의 변화와 구조물 하부기초의 침하를 계측하고 분석하였다.

3.1 구조물 하부지반 조사

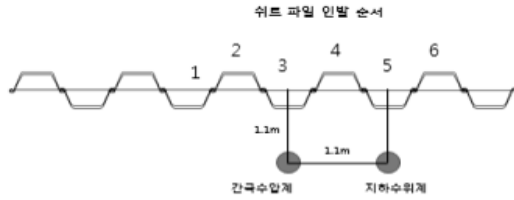
연구대상 현장의 슈트파일 인발에 따라 구조물 하부지반의 교란되고 연약화된 것으로 판단되어 하부지반의 지층상태 및 거동 특성 분석을 위해 1 구간과 2 구간 각각 5곳, 8곳에 심도 17~21m 위치까지 시추조사와 표준관입시험을 수행하여 지층의 연경도 및 조밀도를 나타내는 N

값을 비교 분석하였다. 조사 결과, 구조물 하부지반은 설계 시 파악된 토질과 같은 실트질 세립모래(SM)와 점토질 실트(ML)로 구성되어 본 대상구간의 지층은 모래질과 점토질 성분이 불규칙하게 분포하는 것으로 분석되었으며, N값은 21/30~3/30을 나타내었다. 또한 슈트파일 인발 구간과 미인발 구간의 N값을 비교한 결과 미인발 구간의 N값이 비교적 크게 측정되었으며 조사 결과는 표 3과 같다.

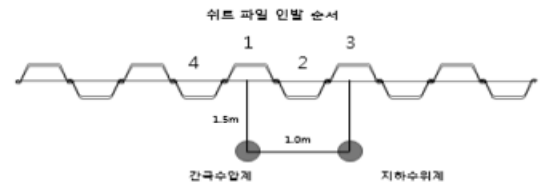
3.2 슈트 파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위의 변화

공사 현장에서 갑작스런 지하수위의 감소는 간극수압 역시 감소되는 만큼 하중의 증가 요인으로 작용하게 되어 주변 건물 및 지반 침하로 나타나므로 허용 침하량 이상의 침하 요인이 될 소지가 크다. 본 연구 대상 현장의 경우 슈트파일 인발에 따라 침하가 발생되었으므로 슈트파일 인발 여부에 따라 구조물 하부지반에 미치는 영향 요인을 분석하기 위하여 진동 해머식 및 유압식 인발 방법을 적용하여 인발 시 간극수압과 지하수위의 변화를 지속적으로 계측하였다. 진동 해머식 인발의 경우에는 인발시점으로부터 인발길이 23~28m의 슈트 파일을 한 번에 연속적으로 인발하였으며, 유압식 인발의 경우에는 인발길이가 8~10m 까지 반복 인발 후 남은 파일 길이는 진동해머식 인발기를 통하여 인발하였다.

진동식 해머를 사용하여 인발할 경우 본당 15~20분이 소요되었으며 유압식 인발기의 경우는 본당 20~25분이 소요되었다. 슈트파일 인발순서 및 계측기 설치 위치는

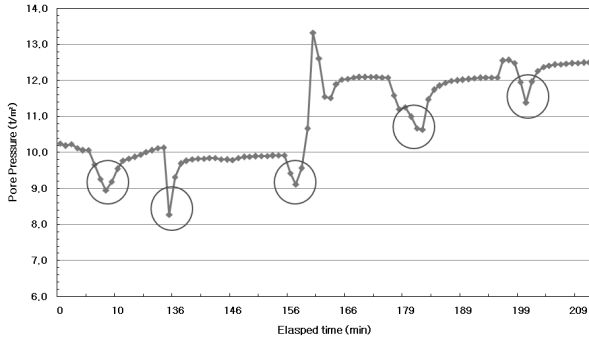


(a) 진동해머 이용

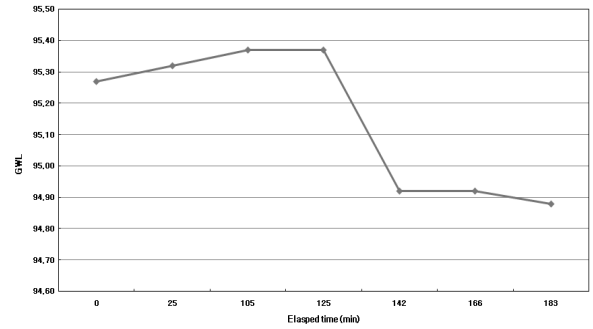


(b) 유압식 인발기를 이용

그림 5. 쉬트파일 인발에 따른 계측모식도

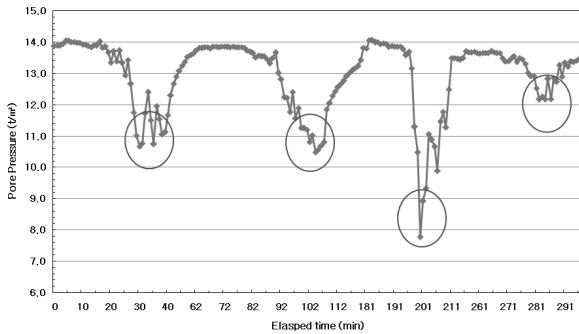


(a) 간극수압 변화

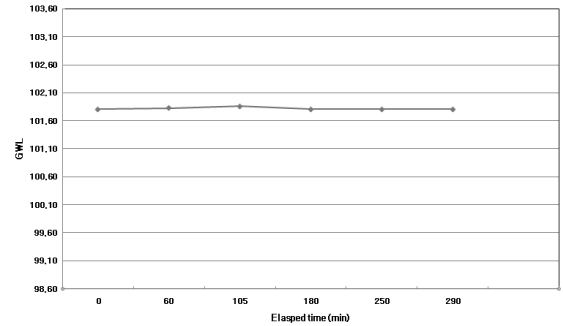


(b) 지하수위 변화

그림 6. 진동해머를 이용한 쉬트파일 인발(Vibro Hammer, 6분)



(a) 간극수압 변화



(b) 지하수위 변화

그림 7. 유압식 인발기를 사용한 쉬트파일 인발(유압식 인발기, 4분)

그림 5에 나타난 바와 같다.

간극수압과 지하수위의 변화는 그림 6, 그림 7과 같으며 진동해머와 유압식 인발기를 사용하여 쉬트파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위의 변화를 연속적으로 나타낸 그래프이다.

쉬트파일 인발에 따른 영향을 살펴보기 위하여 진동해머식과 유압식 인발기를 사용하여 간극수압의 변화를 살펴본 결과, 인발 시 측정된 간극수압은 인발시점으로부터 인발 길이(진동 해머식 $L=28m$, 유압식 인발기 $L=10m$)의 중간 지점까지 간극수압이 감소하다가, 이 후 인발 초기에 측정된 간극수압 값 부근까지 회복하면서 반복된 진동해머식 인발에 따라 전체적으로 간극수압이 증가하였다. 이는 진동해머식 인발시 지속적인 반복 진동으로 구조물 하

부지반의 응력상태가 불안정하게 변화되면서 구조물 하부 지반의 다짐효과에 의한 순간침하가 발생된 것으로 판단된다.

연약지반에서 느슨한 모래는 진동 또는 충격으로 간극수압이 상승하고 누적되면 지반의 유효응력이 감소해 전단강도를 상실하여 액상화가 발생할 수 있으며 진동으로 인하여 사질토가 다져지므로 침하가 발생될 수 있다. 또한 점성토는 진동 영향으로 인하여 지반이 교란되고 전단강도가 감소하게 되며, 과잉간극수압발생 후 소산으로 압밀 침하가 발생하게 된다(Clough and Chameau, 1980; Leathers, 1994).

진동해머를 사용하여 쉬트파일 인발 전과 후의 현장하부 기초 침하가 2.0~3.0cm 발생된 것으로 계측되었으

며, 그 원인은 진동에 따른 지반 다짐과 전체적인 간극수압 상승, 지하수위의 저하와 같은 영향이 발생하게 되어 침하가 발생된 것으로 판단된다.

정적인 방법인 유압식으로 쉬트파일을 인발할 경우, 전체적인 간극수압의 상승은 없었으며, 진동 해머식 인발 양상과 마찬가지로 인발시점부터 쉬트파일의 중간인발 지점까지 간극수압이 감소하였으며, 이 후 간극수압 초기치로 회복하는 과정이 반복되었다. 이는 정적 인발시 쉬트파일의 체적만큼 흙이 부착되어 공극이 발생하면서 간극수의 이동으로 간극수압이 소산되면서 구조물 하부지반의 변위를 유발한 것으로 판단된다. 현장시험을 통한 지하수위 분석 결과, 진동 해머식 적용 시에는 지하수위가 강하하였으나, 정적 방법인 유압식 인발의 경우에는 지하수위의 변화는 나타나지 않았다.

3.3 구조물 하부기초 침하계측

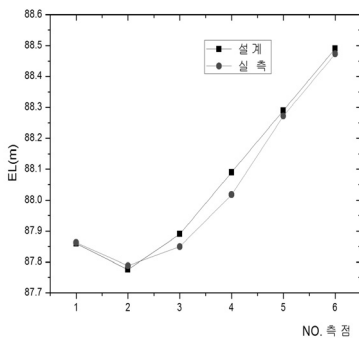
본 연구 대상지역의 토목공사는 되메우기 후 도상부설 작업과 부대공사가 진행중이며 구조물 하부지반의 침하량을 측정하기 위하여 구조물 기초에서 레이저를 이용한 레벨측정 장비를 이용하였다. 침하계측은 계측기에 의한 계

측관리가 원칙이나 층별 침하계의 경우 되메우기 후 도로의 시공과 쉬트 파일 인발로 인하여 설치가 불가능하거나 계측기 손상으로 인하여 구조물 하부 지반의 침하 측정에 어려움이 있었다.

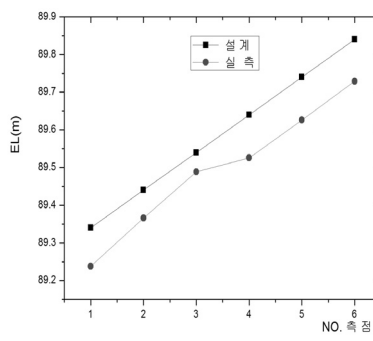
계측 현황과 침하량은 표 4와 같으며 연구 대상지역의 6개 구간에서 침하량을 계측하였다. 그림 8은 구조물 하부 지점의 종단면 설계값과 실측값을 비교한 것이다. 계측 결과 제 3~6 구간의 경우 다른 구역보다 침하량이 작게 계측되었다. 이는 제 3~6 구간의 구조물 하부 지반에서 심도 5.0m까지 R.J.P 보강을 한 구간으로 보강 여부에 따라 침하가 적게 발생된 것으로 판단된다.

표 4. 대상 구간별 구조물 하부 계측 침하량

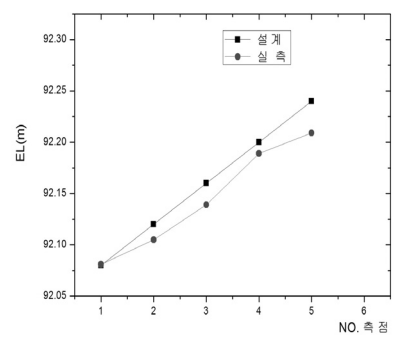
구 분	구조물 하부 침하량(cm)	
	최소	최대
제 1구간	1,7	7,2
제 2구간	5,1	11,4
제 3구간	1,1	3,4
제 4구간	0,4	0,4
제 5구간	1,4	5,3
제 6구간	1,8	7,8



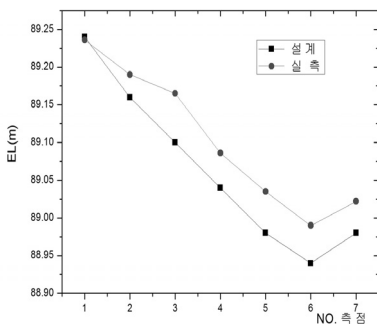
(a) 제1구간



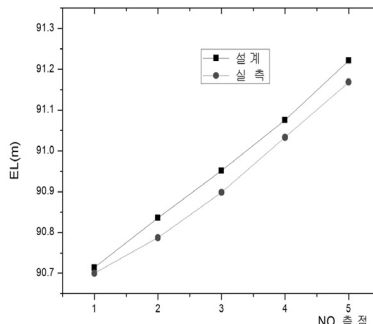
(b) 제2구간



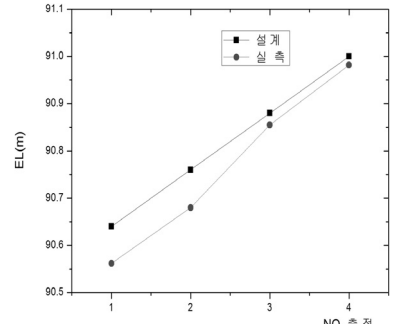
(c) 제3구간



(d) 제4구간



(e) 제5구간



(f) 제6구간

그림 8. 대상 구간별 구조물 하부 종단 침하계측

4. 수치해석에 의한 침하량 예측

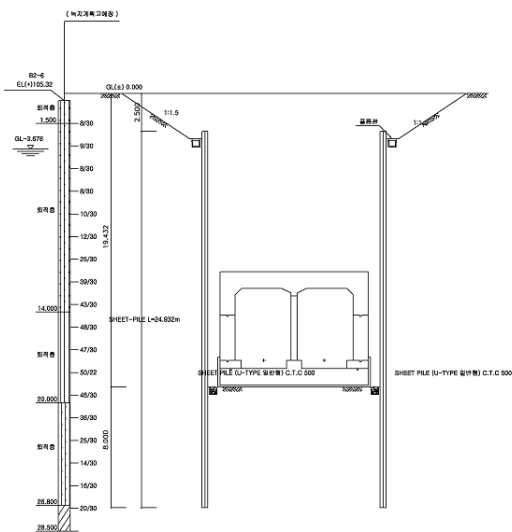
4.1 해석단면 및 경계조건

본 연구 대상 검토 구간의 최종 침하량을 산정하기 위하여 2차원 유한요소프로그램인 CAIN RDA(CAIN RDA, Crip Aided Internet For Roadbed Thickness Design and FE Analysis)를 사용하였고, CAIN RDA는 2차원 유한요소프로그램이며 철도 노반 해석/설계 통합 자동화 분야, 연약지반 개량 공법 해석 분야(SCP, PBD)등으로 일반적인 지반분야 뿐만 아니라 특화시공까지 도입될 수 있는 지반 범용 유한요소 해석/설계 프로그램이다(지구환경전문가그룹, 2008; Russell, 1990; Woods and Clayton, 1992).

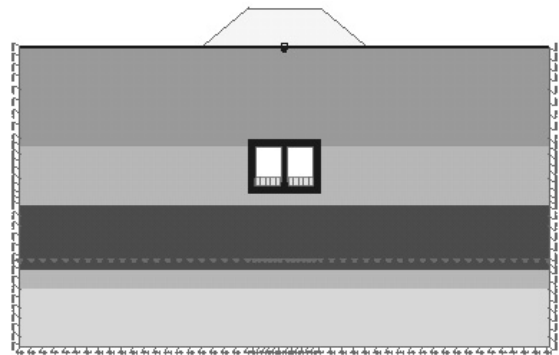
그림 9는 유한요소 압밀해석에 사용된 제 1 구간의 대표단면과 경계조건을 나타낸 것이다. 표 5는 해석시 사용된 각 구간 대표 단면의 녹지성토고 및 지하수위 위치를 나타낸 것이며, 6개 대상 구간의 되메우기 높이는 총 6m

로서 되메우기 1단계에서 되메우기 3단계까지는 각각 2.0m 높이로 단계 성토 되었으며, 녹지조성을 위한 최종 성토가 2.0~5.0m, 열차하중이 33 KN/m²이다. 또한, 현장에서 적용되는 되메우기 및 녹지성토를 위한 토사는 인근 사토장에 적치되어 있는 대상 현장의 굴착 토사로서 점토질 실트이며 해석을 위한 물성치 또한 동일하게 적용하였다.

유한요소망에 사용된 요소는 절점과 매개 요소로 구성 되었으며, 경계조건 중에서 변위는 양 측면에서 수평 변위만 구속하였고 바닥면에서는 수평 및 연직방향에 대하여 구속하였다. 배수에 대한 경계조건은 하부 점토층 아래에 풍화토 내지 풍화암층이 존재하므로 지표면 부근과 연약층 바닥면에서 양면 배수를 허용하도록 하였다. 본 해석에 적용된 해석단계는 최대한 실제적으로 수행된 공사과정 및 기간을 고려하여 해석하였다. 총 3단계의 되메우기 후 일정기간을 방치하고 녹지성토와 열차하중을 고려하여 실시하였으며, 본 단면 해석에 사용된 지반정수는 표 6과 같다.



(a) 해석 단면도



(b) 유한요소망 (지하수위 GL-3m, 50mX45m)

그림 9. 대표구간의 해석단면도 및 유한요소망

표 5. 각 구간 대표 단면의 녹지성토고 및 지하수위

구 분	녹지성토고(m)	지하수위(m)
제 1구간	4.8	GL-3.0
제 2구간	5.0	GL-7.0
제 3구간	3.0	GL-5.0
제 4구간	2.0	GL-1.0
제 5구간	2.6	GL-3.0
제 6구간	2.0	GL-1.0

표 6. 수치해석에 적용된 기초지반 설계정수

구 분		단위중량 γ_t (MN/m ³)	점착력 c (MPa)	내부마찰각 ϕ (Deg.)	변형계수 E (MPa)	포아송비 ν	
매 립 토		0,018	-	30,0	10,0	0,37	
퇴적층	모 래 (비소성 실 트)	N≤10	0,018	-	28,0	5,0	0,35
		10<N≤20	0,018	-	30,0	15,0	0,35
		20<N≤30	0,018	-	33,0	15,0	0,35
		N>30	0,019	-	35,0	30,0	0,35
	점 토 (소 성 실 트)	N≤6	0,018	0,03	-	3,0	0,40
		6<N≤15	0,018	0,05	-	6,0	0,40
		15<N≤30	0,019	0,14	-	10,0	0,40
		N>30	0,02	0,2	-	15,0	0,40
풍화대		풍화도	0,019	0,015	30,0	30,0	0,35
		풍화암	0,02	0,03	35,0	100,0	0,30
기반암		연 암	0,024	0,1	40,0	1,000	0,27

표 7. 수치해석에 적용된 하중재하 단계

No.	1	2	3	4	5
Step	되메우기	방치	열차하중	녹지하중	방치

표 8. 단계에 따른 구간별 해석결과

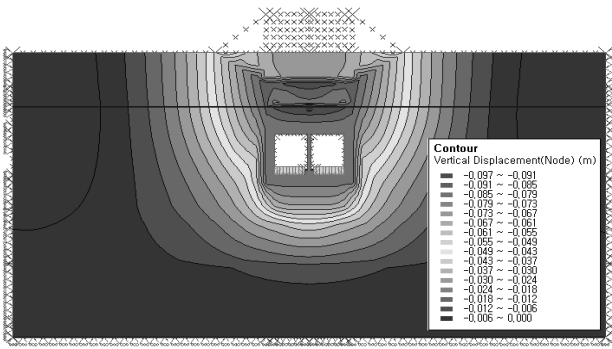
(단위 : cm)

구 분	1~2 Step	3~5 Step	총 발생 침하량
제 1구간	5,33	2,83	8,16
제 2구간	7,4	5,37	12,77
제 3구간	4,67	2,13	6,8
제 4구간	4,98	1,47	6,45
제 5구간	3,65	2,29	5,94
제 6구간	5,16	1,44	6,6

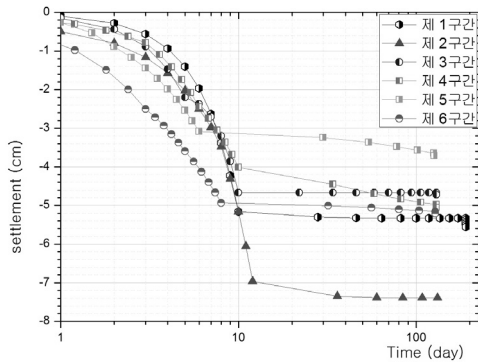
4.2 해석 결과

유한요소망과 지반물성치를 이용하여 6개 대상 구간의 구조물 하부 지반의 침하는 표 7과 같이 하중의 재하와 일정 기간 동안 방치의 단계를 주어 해석한 결과 표 8과 그림 10과 같이 6개 구간에서 총 발생 침하량은 2,200일 후 5.94~12.77cm이 발생하였다. 구조물 BOX 하부 계측 시점과 같은 2단계 160일 후의 1~2 Step(되메우기→방치)의 단계에서는 3.65~7.4cm로 구조물 실측 침하 데이터와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 각 구역의 되메우기와 추가하중(녹지하중, 열차하중)에 따른 전반적인 침하양상은 그림 10의 연직변위 분포도를 이용하여 살펴볼 수 있다. 6개 대상 구간 모두 성토체 중앙부분과 구조물 하부 지반에서 과도한 침하가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 녹지성토 모서리 부분과 구조물 모서리 부분으로 갈수록 침하량이 감소하였다.

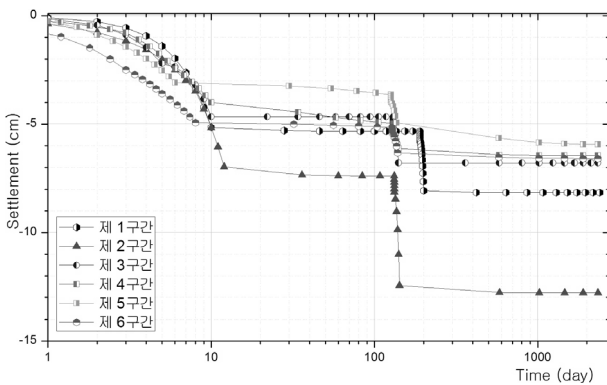
구조물 하부지반의 경우 대상 구간의 제 3~6구간과 같이 N 값과 설계정수가 크게 입력된 구역에서 침하가 작게 발생하였고, 구조물 상부지반의 경우 성토 높이에 따라 침하가 크게 발생 구조물 하부 지반 침하에도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 그림 10의 총 발생 침하량 그래프에서 단계적인 하중이 작용하는 시점에서 급격한 침하를 보이다가 시간경과에 따라 침하량이 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 결과는 단계적인 하중재하에 따른 전형적인 계단식 형태의 모양을 나타내고 있으며 하중재하 시점에서 급격한 침하 발생이 나타난 후 시간이 경과함에 따라 침하량이 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 대상 구간중 제 2구간의 경우 침하가 가장 많이 발생하는 것으로 나타나는데 그 원인으로는 녹지성토고가 5.0m로 가장 큰 하중이 작용하며 구조물 하부지반 또한 연약하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 제 1구간 연직변위 분포도



(b) 1~2단계 해석결과



(c) 1~5단계 해석결과

그림 10. 6개 대상 구간의 침하량 해석 결과

5. 결론

본 연구에서는 대상 현장의 기존 문헌 자료 및 현장사례를 평가하고, 도시철도 하부기초에서 예측된 침하 자료를 사용, 시공 중 발생한 지반공학적 문제점 분석과 슈트파일 인발에 따른 간극수압 및 지하수위 변화와 하부지반의 침하를 평가하였다. 또한, 구조물 하부기초 예측자료와 수치해석 프로그램을 통하여 얻은 침하량을 비교 분석하고, 추가하중을 고려한 장래 침하를 예측하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 슈트파일 인발에 따른 영향을 살펴보기 위하여 진동해머식과 유압식 인발을 구분하여 실험한 결과, 진동해머식 인발이 수행된 구간은 지층구성이 세립모래로 구성되어 있어 인발시 지속적인 반복 진동으로 구조물 하부지반의 응력상태가 불안정하게 변화되면서 구조물 하부지반의 다짐효과에 의한 순간침하가 발생하였으며, 정적인 유압식 인발이 실시된 구간의 경우에는 점토가 협재된 지층으로 구성되어 있어 슈트파일의 체적만큼 흙이 부착되어 공극이 발생하면서 간극수의 이동으로 간극수압이 소산되면서 구조물 하부지반의 변위가 발생한 것으로 나타났다.
- (2) 따라서, 굴착공사 완료후 슈트파일 인발시 진동해머식의 경우 지반진동으로 인한 강도저하, 유압식의 경우 부착토사에 의한 이완으로 N 값이 감소하기 때문에 슈트파일 인발 계획시 지반진동에 의한 구조물의 안정과 주변의 침하를 예측하여 보강대책을 강구하여야 한다.
- (3) 추가하중을 고려한 수치해석 결과, 6개 구간에서 5.94~12.77cm의 침하가 발생되었으며, 제 2구간에서의 침하량이 12.77cm로 허용 침하량 10.0cm 보다 크게 나타났다. 향후 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 구조물 하부지반 침하에 대한 동적 실험과 간극수압이 고려된 동해석을 수행하여 실제 예측된 결과를 비교 분석하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 나승남 (2002), “연약지반의 현장계측에 의한 침하량 추정 기법에 관한 특성 연구”, *대한토목학회 논문집*, pp.307-310.
2. 박정준, 김성환, 신은철 (2008), “토목섬유매트를 활용한 호안축조공사 사례 연구”, *한국토목섬유학회논문집*, 제7권, 제2호, pp.7-13.
3. 인천광역시 도시철도건설본부 (2004a), *인천도시철도 1호선 송도연장건설사업 지반조사보고서(설계 1구간~설계 3구간)*.
4. 인천광역시 도시철도건설본부 (2004b), *인천도시철도 1호선 송도연장건설사업 실시설계보고서(설계 1구간~설계 3구간)*.
5. 지구환경전문가그룹 (2008), *CAIN RDA USER & Technical Manual*.
6. Russell, D. (1990), “An element to model thin, highly permeable materials in two dimensional finite element consolidation analyses”, *Proc. 2nd European Speciality Conference on Numerical Method in Geotechnical Engineering*, Santander, pp.303-310.

7. Woods, R. I. and Clayton, C. R. I. (1992), "The application of CRISP finite element program to practical retaining wall problems", *Proc. ICE Conference on Retaining Structures*, Cambridge, UK.
8. Clough, G. W. and Chameau, J. L. (1980), "Measured Effects on Vibratory Sheetpile Driving", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.104 GT10, pp.1081-1099.
9. Kim, D. S. and Drabkin, S. (1995), "Investigation of Vibration Induced Settlement using Multifactorial Experimental Design", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.18, No.4, pp.463-471.
10. Leathers, F. D. (1994), "Deformations in Sand Layer During Pile Driving", *Proceedings of Settlement '94, Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, Vol.1, pp.257-268.

(논문접수일 2012. 2. 12, 심사완료일 2012. 3. 12)