도심지 지반함몰의 초기발생현상에 대한 흐름해석적 접근

Flow Analysis Approach to Triggering Phenomenon of Ground Sinking in a Metropolitan Area

조영석¹·장연수²

Young-Seok Jo¹ and Yeon-Soo Jang²

(Received December 14, 2016 / Revised February 1, 2017 / Accepted February 3, 2017)

ABSTRACT

In this study, triggering mechanism of ground sinking was analyzed through groundwater flow analysis on the basis of a case of the ground sinking occurred in Yongsan in 2015. The results of geotechnical investigation performed before and after the ground sinking were analyzed for the accurate understanding of geological features in the study area. The numerical groundwater flow analysis was performed to evaluate the influence of the flow behavior from the surrounding area toward the excavated site using software of Visual MODFLOW. As a result, it was found from the geotechnical analysis that the strata of sedimentary layer along the sunken area in the vertical direction was mixed significantly after the ground sinking compared with the status of the soil condition before the ground sinking. Piping was occurred at the toe of cut-off wall in the sandy gravel layer, and this phenomenon was predicted by the numerical flow analysis. Sequential ground displacement scenario of the ground sinking was derived from the geotechnical in situ test and numerical flow analysis performed in this study.

Key words: Ground sinking(지반함몰), Groundwater(지하수), Flow analysis(흐름해설), Ground displacement(지반변위), Piping(파이핑)

1. 서 론

최근 지구촌의 도시화가 진행된 도심지에서 크고 작은 지반함 몰현상이 발생하고 있다. 도심지에서 발생하는 지반함몰 현상은 카르스트 지형에서 장기간 동안 탄산염암이 지하수에 용해되어 발생하는 것과 다르게 인간의 활동들과 밀접한 관계를 가진다. 대표적으로 지상교통시설의 포화로 인해 지하교통공간 확충을 위한 터널공사, 고층건물건축 시 건물을 지지하고 지하공간 활 용을 위한 굴착공사 등으로 지하수가 교란되며 지반함몰현상이 발생하거나, 도심지에 매설된 상하수도관의 노후화에 따라 생긴 파손된 부위로 상부토사가 유입되거나 노후관로에서 새어나온 물에 의해 토사가 씻겨나가 포장체 하부에 공간이 형성되며 지 반함몰이 발생하고 있다. 또한, 지반 내로 정적이거나 동적인 하중이 갑작스럽게 작용하는 경우 지반함몰이 발생하는 경우도 있다(FCG, 2015; Youssef et al., 2016). 이러한 지반함몰현상들 은 인구가 밀집한 도심지에 발생하면서 인명피해 또는 재산상 피해를 초래하고 있다.

스페인의 Oviedo시에서는 다세대 주택 건물 인근에서 지하주 차장을 만들기 위한 굴착공사 도중 지반함몰현상이 발생하였고 2동의 다세대 주택이 파괴되며 1800만 유로의 손실을 초래하였 고(Pando et al., 2013), 사라고사(Zaragoza) 지역에서는 관개작 업 및 오래된 하수관거의 파손으로 인한 누수현상이 인근 충적 층의 지하수 흐름에 큰 영향을 주었고 이로 인해 세립토의 유실 과 지하수면의 하강으로 인한 유효응력의 증가 등으로 인해 447 개의 지반함몰현상이 관측되고 인근 고속도로에는 50m 직경의 대형 지반함몰현상이 발생하였다(Benito et al., 1995; Gutierrez et al., 2007). 중국에서도 2000년부터 2010년까지 총 919개의 지반함몰현상이 발생하였는데 이 중 765개가 터널과 굴착공사 등 인위적인 요인에 기인한 것으로 나타났으며 이와 관련된 현 상이 꾸준히 증가하고 있다(Meng et al., 2012). 2016년 11월에는

¹⁾ 동국대학교 건설환경공학과 박사과정(주저자: youngnam7159@hanmail.net)

²⁾ 동국대학교 건설환경공학과 교수(교신저자: ysjang@dongguk.edu)

일본 후쿠오카현 후쿠오카시의 지하철역 앞 도로에서 폭 15m의 지반함몰현상이 발생하였고 현장 주변 건물 입주자들이 대피하 는 소동이 발생하였다. 지하철 연장공사를 위한 터널굴착공사가 주요 요인으로 꼽히고 있으며 현재 원인을 규명하기 위한 연구 가 진행 중에 있다(김상윤, 2016). 이 밖에 석회암층 상부에 미압 밀 모래층과 자갈층이 있는 구조를 가진 사우디아라비아의 Al Khobar시에서는 무거운 중차량들이 통행하며 지반으로 가해진 동적하중으로 인해 가로 10m 깊이 3m의 지반함몰이 급작스럽 게 발생한 사례가 보고된 적도 있다(Youssef et al., 2016).

국내에서도 도심지 지반함몰사례가 꾸준히 발생하고 있다. 2012년 2월 인천시 지하철 2호선 공사현장에서는 지름 12m 깊 이 27m의 지반함몰현상으로 1명이 사망하는 사고가 발생하였 다(Lee, 2015). 사고가 발생한 지점에서는 겨울동안 동결된 지반 이 녹으면서 얼어있던 상수도관에 누수가 발생하고, 다량의 누 수된 물이 토사를 유실시켜 만든 공동이 하부 터널공간으로 연 결되며 터널붕괴와 지반함몰이 발생하였다. 또한 전국적으로 2012년부터 2014년까지 70여개의 지반침하현상이 발생했는데 그 중 53건은 하수도관의 파괴(rupture) 또는 누수가 원인이었다. 특히, 서울의 경우 전체 상하수도 시스템의 73.3%가 20년 이상 노후화되었고, 다른 주요도시들도 하수관들의 노후화로 누수가 능성이 높은 것으로 예측되었다(Kang, 2014). 잠실에는 123층 높이의 고층빌딩이 건설되고 있는데 2013년 7월 인근지역에 있 는 석촌호수의 수위가 급속히 저하되어있는 현상이 발견되었고, 2014년 초에는 호수주변지역에서 지름 2~8m, 깊이 5m 내외인 6개의 지반함몰현상이 발생하였다. 지반함몰현상 발생당시에는 신축된 고층빌딩 하부의 배수시스템을 주원인으로 추정하는 경 우가 많았으나 정밀조사결과 20~30년이 경과하며 노후화된 하 수도관에서 물이 새어 주변의 토사를 유실시켜 발생한 것으로 규명되었다. 또한, 호수에서 1km 거리에 진행되고 있는 지하철 공사현장으로 상당량의 지하수가 유입되는 것도 하나의 원인으 로 제시하고 있다.

이와 같이 도심지에서는 인명사고나 재물손실로 이어질 가능 성이 큰 지반함몰현상이 급증하고 있지만 발생원인이 다양하므 로 지반함몰에 대한 책임소재와 사후대책을 세울 수 있도록 지 반함몰발생 메카니즘을 명확히 하는 것이 필요하다. 2015년 2월 용산에서는 지상 40층 높이의 오피스텔을 건축하기 위한 굴착공 사 중 현장인근 버스정류장에 지반함몰이 발생하였고, 버스에서 하차하던 2명이 빠지는 사고가 발생하였다(ABC, 2015; BBC, 2015). 지반함몰의 원인 및 메커니즘 규명의 필요성이 제기되었 는데 본 논문에서는 본 지반함몰현상 사례에 기반하여 도심지 지반함몰의 초기발생 메카니즘을 현장지반조사와 3차원 지하수 흐름 수치해석 프로그램(Visual MODFLOW)을 이용하여 규명 하였다.

2. 연구대상지역

한강인근은 과거 오랜 지질시간동안 지속적으로 발생한 빈번 한 홍수로 광범위한 범람원이 형성되어 있고, 자갈모래층과 모 래, 실트, 점토층이 교호하여 지표부에 10~20m 두께로 퇴적되어 있다. 가로 115m, 세로 65m, 총 면적 7,500m² 크기의 연구대상 현장은 한강으로부터 북동쪽으로 약 1km 떨어진 용산구에 위치 하고 있고 20m 두께의 충적층 지역에 위치하고 있다(Fig. 1). 현장의 주변은 도시화 작업으로 인해 기존에 존재하였던 산계는 평지화되고 대부분의 충적층은 건축물 또는 아스팔트로 복개되 어있는 상태이다. 2000년대 이후에는 도심정비사업으로 대형고 층 건물들이 빈번하게 건설되고 있으며 동시에 지하 굴착작업이 활발하게 진행 중에 있다. 반경 350m 내에는 고속전철역인 용산 역이 존재하고 현장주변에는 다수의 차량이 통행하고 있으며 지반함몰현장의 2m 거리에 버스정류장이 있었다.

대상 현장은 지하굴착 중 지상 1층 슬래브를 지하공사를 위한 작업장으로 사용할 수 있고 소음 및 진동에 대한 민원을 감소시 킬 수 있으며 하부굴착 및 골조공사와 상부 구조물공사를 동시 에 진행시킬 수 있는 Top-Down 공법을 구조물 공사에 적용하였 다. 지하굴착시 흙막이벽 공사는 직경 500mm의 현장 타설 콘크 리트기둥을 잇대어 시공하는 CIP(Cast In Place Pile) 공법을 적 용하였다. 흙막이벽(CIP)의 차수기능 보완을 위하여 차수 그리 우팅공법인 SGR(Space Grouting Rocket System)을 직경 600mm로 CIP 벽면 배면에 겹쳐 충적층과 기반암층 경계까지 실시하였다. 현장의 굴착은 총 심도 40m로 계획되었고 지반함 몰발생 당시에는 약 16~17m 깊이까지 실시된 상태이었다.



Fig. 1. Location of the site of interest in Yongsan, boreholes for geotechnical field investigation before & after the ground sinking (BH, NBH), observation well (OW), and sewage box

2.1 지반조사 결과 분석

굴착작업 전 현장지반조사가 현장 내 18곳에서 수행되었다 (BH in Fig. 1). 지반조사결과 대상현장에서 지반함몰이 발생하 기 전의 지층구조는 매립층 하부로 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 기반 암으로 구성되고(Table 1), 풍화암층 상부의 매립층과 퇴적층 두께는 10~19m로 현장의 북동쪽에서 얕고 지반함몰발생지점 인 북서쪽을 향하여 깊어지는 구조를 보였다. 통일분류법상 매 립층과 퇴적층은 SM(silty sand), SM, CL(low plasticity clay), SM, GP(poorly graded gravel with sand)로 구성되어 있고(Fig. 2), 지하굴착 전 지하수위는 GL -9~-11.1m에 위치하였으며 기 반암에 인접한 모래섞인 자갈층(GP, 이하 모래자갈층)이 대수층 의 역할을 수행하는 것으로 파악되었다. 지반함몰발생 후 지반 의 상태를 알기 위해 현장 주변 8곳에서 새롭게 실시된 지반조사 (NBH in Fig. 1)결과, 지반함몰이 발생한 하부 수직원통형 토 사층의 토질 성분이 뒤섞여 혼재되어 있었고 지하수위는 GL -15.58m까지 하강하였다(Fig. 2). 또한 지반함몰이 발생한 장소 인근 하부에서는 표준관입시험시 햄머자중으로만 들어가는 20 ~30㎝ 크기의 공간이 3군데 발견되었고 전반적으로 N치가 떨 어져 있어 지반의 강도가 약해진 것으로 나타났다(Fig. 3). Table 1의 퇴적층, 풍화토층의 투수계수는 현장투수시험을 수행하여 습득하였고, 암반층의 투수계수는 암반수압시험(lugeon test)을 이용하여 측정되었다(성민씨이텍, 2014; 한국지반공학회, 2015).

Table 1. Classification of soil and rock layers of the site obtained from borehole samples before initial excavation work and after ground sinking

	Borehole data before initial excavation work					Borehole data after ground sinking			
Soil layer	Depth (GL,-m)	Thickness (m)	USGS	Hydraulic conductivity (cm/s)	Initial GWL (GL,-m)	Depth (GL,-m)	Thickness (m)	USGS	GWL (GL,-m)
Reclaimed	0.0.4.2	27.42	SM		9.0 ~ 11.1	1.8	1.8	GP	15.58
layer	0.0~4.2	2.7~4.2	SIVI	-		7.1	5.3	SM	
Sedimentary layer	2.7~8.0	1.1~4.6	SM	1.03×10-3		7.8	0.7	SP	
						8.8	1.0	CL-ML	
	5.0~11.6	3.4~3.6	CL	4.68×10-5		9.5	0.7	SP	
						10.5	1.0	CL-ML	
	10.8~18.5	4.9~6.9	SM	8.27×10-5		11.8	1.3	SP	
						14.3	2.5	ML	
	16.0~20.4	0.6~3.9	GP	-		17.0	2.7	SP	
						17.8	0.8	GP	
Weathered soil	11.6~20.0	1.4~3.4	SM	3.30×10-5		-			
Weathered rock	13.7~26.8	0.4~5.8	WR	-		-			
Base rock	-	-	SR,HR	1.05 ~ 4.65×10-5		-			



Fig. 2. Results of geotechnical investigation conducted after ground sinking and before excavation



Fig. 3. Comparison of SPT results at BH and NBH in the vicinity of ground sinking

2.2 현장조사 결과 및 분석

현장의 북서쪽부터 남서쪽으로 지표면하 GL 4m에 빗물이나 현장주변 건물에서 배출하는 하수를 배수하는 2m×2m 크기의 프리캐스트 콘크리트 하수박스가 설치되어 있다(Fig. 1). 도심지 에서 지반함몰은 매설관로의 노후화에 의해 주로 발생하므로 지반함몰발생 당시 함몰의 원인 중 하나일 수 있는 하수박스의 상태를 확인하기 위해 굴착을 실시하였다. 굴착결과 굴착지반은 습윤상태이었고, 단차가 생긴 하수박스 이음부의 기초하부에서 는 하수가 유출되어 지반 내 국부 지하수층이 형성될 수 있음이 확인되었다(Fig. 4). 하수박스로부터 유출된 하수의 수온범위는 23.0~26.0℃이었는데, 시공현장 내로 누수되는 지하수의 온도 는 15.3~19.3℃(평균 16.3℃)로 국토교통부(2014)에서 발표한 전국 지하수 평균온도(14.2℃)와 한강유역 지하수 평균온도(1 4℃)보다 높은 것으로 나타났다. 따라서, 연구대상굴착현장의 차수벽에서 누출되는 지하수는 하수박스의 누수현상에 영향을 받았을 것으로 추정되었다.



Fig. 4. Leakage water under the slab of sewage box





지반함몰이 발생한 지점 근처에 설치되어있는 2개의 지하수 위계에서 계측된 자료(EJ Tech, 2015)를 검토한 결과 대수층인 모래자갈층을 굴착하기 전에는 심도 GL -13~-14m에 지하수위 가 위치하고 있었으나, 모래자갈층을 굴착함에 따라 지하수위는 급속히 하강하여 굴착심도와 거의 비슷한 심도 GL -15~-16m 에 위치하였다(Fig. 5). 굴착현장 하부를 조사한 결과 퇴적층이 깊게 발달해 있는 현장의 북서쪽에 설치된 차수벽에서는 지하수 가 누수되고 있었고(Fig. 6), 굴착저면에는 차수벽을 통과해 지 하수와 함께 유출된 토립자와 자갈이 퇴적되어 있었다(Fig. 7).



Fig. 6. Leakage water and soil grains at the toe of cut-off wall in the excavation site



Fig. 7. Soil and gravel escaped through the toe of cut off wall and deposited

지반조사와 현장조사 결과를 분석한 결과 대수층인 모래자갈 층을 굴착함에 따라 모래자갈층과 차수벽이 맞닿은 경계부에서 지하수와 함께 토사가 많이 유출된 것을 알 수 있었다. 특히 지반함몰이 발생한 위치 하부에서 그 양이 가장 많았고 이러한 현상에 대하여 수리지질학적인 규명이 필요하였다. 본 연구에서 는 연구대상지역에서 지반함몰이 발생하던 당시의 굴착상황을 모사하여 수치해석을 이용한 3차원 지하수 흐름해석을 실시하 였다.

3. 수치해석

3.1 경계조건 및 입력파라메터 설정

수치해석에는 3차원 지하수 흐름해석이 가능하고 동시에 수 치지형도와 지반조사보고서의 지층특성을 반영할 수 있으며 정 밀한 해석이 가능한 유한차분법 기반의 Visual MODFLOW를 이용하였다. 대상현장은 오피스텔 건설을 목적으로 하였고 굴착 전 지반조사는 충분히 수행한 상태이었으나 주변지역의 포괄적 수리지질 분석을 위한 광역적 수리자료는 확보되지 않았다. 본 연구에서는 수치해석영역을 지반함몰이 발생한 구역과 건설현 장을 중심으로 가로 300m, 세로 350m 크기로 설정하였다(Fig. 8-a). 요소망 구성시 현장주변으로는 2.5m×2.5m의 크기로 조밀 하게 생성하였고, 그 이외의 지역은 5m×5m, 10m×10m로 구성 하여 지반함몰이 발생한 지점을 포함한 현장으로의 지하수 흐름 을 분석하였다.

해석은 Fig. 8-b에 표시된 점선과 같이 모래자갈층(sandy gravel layer, GP)을 굴착하기 전과 후로 해석시점을 구분하여 정류해석(steady state analysis)을 수행하였다. 요소망의 상하단 과 좌측에는 정수두 경계조건(constant boundary)을 입력하였고 요소망 우측에는 본 현장으로부터 80m 떨어진 곳에서 또 다른 고층빌딩 건축현장이 존재하는 것을 고려해 비흐름 경계조건 (no flow boundary)을 입력하였다(Fig. 8-a).

수치해석에 합리적인 정수두 경계조건을 입력하기 위해 현장 을 중심으로 반경 1km내의 지하수위 정보(서울특별시, 2015)와 현장주변에 설치된 관측정에서의 지하수위(EJ Tech, 2015)를 동시에 고려하였다. 서울특별시(2015)에 따르면 본 현장 북쪽지 역의 지하수위는 현장 남쪽지역보다 상대적으로 높게 형성되어 지하수는 현장의 북쪽에서 남쪽으로 흐르는 경향을 보였고 이를 반영하여 최초 요소망 상부의 정수두 경계값을 하부의 값보다 높게 입력하였다. 또한, 현장에 설치된 관측정에서 모래자갈층 굴착 전후의 지하수위 값을 이용하여 정수두 경계조건 보정작업 을 수행하였고, 최종적으로 현장의 지하수위를 합리적으로 반영 한 수치해석 요소망 상부(현장 북서쪽)와 하부(현장 남동쪽)의 정수두 경계조건을 결정하였다(Fig. 8-a). 해석 시점에 따라 모래 자갈층을 굴착하기 전에는 상하부에 각각 GL -12.75m, GL -13.59m, GL -17.74m가 입력되었다. 요소망 좌측의 정수두 경 계 값은 선형경사함수를 이용하여 변화되는 값을 입력하였다. 해석단면의 지층은 총 6개의 층으로 구분하였고, 정류해석을 위해 수리지질학적 파라메터들(지층의 두께, 지층과 차수벽의 투수계수, 지하수 함양율)을 입력하였다(Fig. 8-b, Table 2). 각 지층의 층후와 퇴적층과 암반층 투수계수는 현장 굴착공사 전 수행된 지반조사보고서(성민씨이텍, 2014)의 시추주상도, 현장 투수시험, 암반수압시험(lugeon test) 결과를 참고하였다. 자료가 존재하지 않는 매립층, 모래자갈층(GP in Table 2), 차수벽의 투수계수와 지하수 함양율은 문헌을 참조하여 결정하였다.



(a) Finite element mesh and boundary condition for groundwater flow analysis







매립층과 모래자갈층(GP)의 투수계수는 Freeze and Cherry (1979)와 Terzaghi and Peck (1967)이 제안한 범위를 이용하여 결정하였는데, 매립층의 투수계수는 5.0×10⁴ cm/s, 모래자갈층 의 투수계수는 1.0×10² cm/s으로 입력하였다. 본 연구대상지역 의 굴착공사 전 초기 지하수위가 약 GL -10m로 나타났고 굴착 공사가 진행됨에 따라 지하수위는 하강하여(Fig. 5) GL -0~ 4.2m에 위치하고 있는 매립층(Table 1)은 지하수 거동 수치해 석 결과에 큰 상관성이 없는 것으로 평가됐다.

차수벽은 CIP에 SGR이 주입된 형태의 설계를 모사하기 위해 1.1m 두께로 설정하였고, 차수벽의 근입깊이는 현장의 토층깊 이를 고려하여 설정하였다. 일반적으로 SGR이 지반으로 충분히 주입되면 토사의 투수계수는 1.0×10⁵ cm/s 이하로 감소하는데 (롯데건설, 2006), 지반함몰이 발생한 지점인 모래자갈층과 기반 암이 접촉하고 있는 경계면에는 차수가 완벽하게 되어 있지 않 았다. 따라서, 전체적인 차수벽의 투수계수는 1.0×10⁵ cm/s로 설 정하고, 모래자갈층과 차수벽이 맞닿은 부분의 차수벽 투수계수 는 1.0×10⁴ cm/s로 입력하여 불완전한 차수기능을 지닌 차수벽 상태를 모사하였다(Table 2).

연구대상지역인 용산은 주택, 산업지역, 포장도로, 철로로 구성 된 불투수 지역이 많은 도심지이기 때문에 이를 고려한 지하수 함양율을 적용하였다. Kim et al. (2001)은 도심지의 지하수 함양 율에 관하여 연구하였고, 도심지를 이루는 구성요소 각각의 지 하수 함양율을 Table 3과 같이 보고하였다. 본 연구에서는 용산 지역의 지하수 함양율을 연구대상지역에 있는 구성요소 (Houses, Industrial area, Roads, Railways in Table 3)의 지하수 함양율의 평균값인 2.13%로 결정하고, 한국수자원공사 (2015) 에서 제공한 2005~2014년도의 강우량 정보를 기반하여 연평균 강우량을 산정한 후 최종적으로 연구대상지역의 지하수 함양율 을 28.05mm/yr로 결정하였다(Table 2).

Table	3.	Precipitation	recharge	rate	estimated	on	various	land-
		use types (k	(im et al.,	2001)			

Land use	Recharge rate (%)			
Rural	6.1			
Mountains	15.0			
Houses	2.9			
Industrial area	2.3			
Schools	3.8			
Roads	0.2			
Railways	3.1 0.35			
Other				

Table 2, Inputs of hydrogeological parameters for numerical analysis of groundwa	er flow
--	---------

		Hydraulic	Precipitation	Hydraulic conductivity of cutoff wall (cm/s)			
Soil layer	(m)	conductivity (cm/s)	recharge rate (mm/year)	No contact with sandy gravel layer	Contact with sandy gravel layer		
Reclaimed layer	3.6	5.0×10-4		1.0×10-5			
Sed	limentary layer		-				
SM	4.2	1.03×10-3	28.05				
CL	3.5	4.68×10-5	annual		1.0×10-4		
SM	5.4	8.27×10-5	Seoul)				
GP	2.2	1.00×10-2					
Rock layer	-	1.95×10-5					

3.2 보정작업 및 해석결과

수치해석은 연구대상현장에서 이루어진 모래자갈층의 굴착 과 지하수 흐름변화의 패턴 및 파이핑 현상의 관계를 면밀히 분석하기 위해 모래자갈층을 굴착하기 전과 후로 나누어 수행하 였다. 또한, 해석의 정밀도와 신뢰성 향상을 위해 현장 주변에 설치된 10개의 관측정(Observation Well, OW)의 지하수위에 맞 추어 정수두 경계조건을 조절하며 보정작업을 수행하였다(Fig. 9). 보정결과 현장의 상하부에 설치된 관측정(OW-1, 2, 3, 7, 8, 9 in Fig. 1)은 실제 관측정 값과 모델에서 계산된 값이 거의 일치하는 결과를 보였다. 현장의 왼쪽에 위치한 관측정(OW-10 in Fig. 1)은 현장의 상부와 좌측에 설치된 하수박스의 영향으로 인해 실제 관측된 지하수위가 해석에서 계산된 값보다 높게 형 성되었고, 현장 우측에 위치한 관측정(OW-4, 5, 6 in Fig. 1)에서 는 본 연구대상현장에서 80m 떨어진 다른 고층빌딩 굴착현장의 영향으로 실제 관측값이 계산된 값보다 낮게 측정되었다.



Fig. 9. Results of calibration work at the observation wells in Fig. 1 before and after excavation of sandy gravel (GP) layer

지하수 거동 수치해석을 기반으로 지하수와 흙이 함께 토출된 모래자갈층과 차수벽이 맞닿은 부분에서의 파이핑에 대한 안전 율을 출구동수경사(*i_{exit}*)와 한계동수경사(*i_{exit}*)의 비율로 식(1) 을 이용하여 계산하였다. 한계동수경사는 1.0을 사용하였고 안 전율이 1.0보다 작으면 파이핑이 발생할 가능성이 높은 것으로 나타난다.

$$Fs, piping = i_{cr} / i_{exit}$$
(1)

수치해석 결과는 지반함몰이 발생한 지점을 포함한 A-A' 단면(Fig. 8-a)을 기준으로 하여 Fig. 10에 지반함몰발생 위치, 수두분포, 지하수위, 출구동수경사를 포함하여 나타내었다. 파 이핑에 대한 안정성을 검토한 결과 모래자갈층을 굴착하기 전에 는 출구동수경사가 0.36으로 파이핑에 대한 안전율이 2.78이었 지만, 굴착공사가 진행되어 모래자갈층이 노출되었을 때 차수벽 에서의 출구동수경사는 1.36으로 파이핑에 대한 안전율이 0.74 로 하락하였다. 이는 모래자갈층이 노출된 초기에 모래자갈층에 인접한 차수벽 벽체 배면에서 파이핑이 유발되었음을 시사한다.







Fig. 10. Variation of groundwater level and the distribution of total head equipotential line before and after the excavation of the sandy gravel layer (* Strata refer to Fig. 8-b)

3.3 수치해석 결과에 대한 영향성 검증을 위한 파라메터 민감도 분석

수치해석을 위해 프로그램에 입력한 수리지질학적 파라메터 중 모래자갈층, 차수벽의 투수계수, 지하수 함양율은 문헌을 참 조하여 가정하였다. 따라서, 가정된 파라메터가 수치해석 결과 에 미치는 영향을 검토하기 위해 민감도 분석을 수행하여 결과 의 신뢰성을 높이고자 하였다.

일반적으로 모래자갈층의 투수계수(KSG)는 $10-1 \sim 10-3$ cm/s 의 범위를 가지고 있어(Freeze and Cherry, 1979; Terzaghi and Peck, 1967), 저자들은 문헌 값의 범위를 0.005 cm/s 별 4구간으 로 나누어 파이핑에 대한 안전율을 검토하였다. 그 결과 KSG= $1.0 \times 10-1 \sim 2.0 \times 10-3$ cm/s의 범위에서는 안전율이 1.0 미 만으로 산정되었고, KSG= $1.0 \times 10-3$ cm/s 인 경우도 한계동수경 $\Lambda(i_{cr})$ 의 변동성($i_{cr} = 0.8 \sim 1.2$)을 고려한다면 파이핑에 대한 안전율이 확보될 수 없는 것으로 평가되었다(Fig. 11).

차수벽의 투수계수(Kwall)는 SGR이 잘 주입된 Kwall = 1.0×10-5 cm/s에서는 파이핑에 대한 안전율이 유지되는 것으로 나타났다. 하지만, 차수벽의 투수계수를 1.0×10-4 cm/s으로 감소 시켰을 때는 출구동수경사의 증가로 인해 파이핑에 대한 안전율을 확보하지 못했다. 만약 차수벽의 투수계수를 1.0×10-3 cm/s으로 증가시키면 안전율이 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 차수벽이 필터로써의 역할을 수행하여 흙입자가 토출되지 않고 지하수가 자유롭게 배수될 수 있다는 것을 의미한다(Fig. 12). 지하수 함양율을 1~5%로 변화시켜가며 파이핑에 대한 안전율을 검토하였다. 그 결과 3.1절에서 산정한 지하수 함양율 2.13%를 사용했을 때와 비교하여 안전율의 변화가 거의 없어, 지하수 함양율은 수치해석결과에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다(Fig. 13).



Fig. 11. Safety factor against piping for changes of hydraulic conductivity of sandy gravel layer



Fig. 12. Safety factor against piping with respect to the changes of the hydraulic conductivity of the cut-off wall



Fig. 13. Safety factor against piping according to the variation of precipitation groundwater recharge rate

4. 지반함몰현상의 순차적 발생순서 분석

지하수 거동에 대한 수치해석과 현장지반조사 결과를 분석한 결과 본 연구대상현장 지반함몰의 시간흐름에 따른 순차적 발생 메커니즘을 다음과 같은 4단계로 구분해볼 수 있었다(토층구분 은 Fig. 2 참조).

- 제 1단계: 투수계수가 큰 모래자갈층(GP)을 굴착할 때 노출된 불완전한 차수벽의 틈을 통해 세립모래층의 세립분 이 이탈하는 과정이다. 모래자갈층 내부의 세립분이 한계동수경사(*i_{cr}*)를 초과한 출구동수경사(*i_{exit}*)로 인해 발생한 파이핑 현상으로 토출되었다. 모래자갈 층의 세립분이 빠져나가 형성된 공간 직상부에 있는 세립모래층(SM)에서 세립분이 중력과 자갈층의 수 평 유출수에 침식이 발생하였고, 대수층인 자갈층을 통해 굴착현장으로 빠져나갔다. 지반함몰이 발생하 기 전부터 차수벽 틈으로 유출된 현장 지하수에는 세 립분이 다량 포함되었다.
- 제 2단계: 세립모래층(SM)의 점진적인 균열발생과 붕괴이다. 차수벽 바깥으로 지하수가 유출되는 시간이 경과함 에 따라 모래자갈층 직상부의 세립모래층(SM)의 지 하수위가 낮아지고 유효응력이 증가하였으며 이는 토사층의 중량을 증가시키기 시작하였고 세립모래층 (SM)의 하부로부터 점토층 및 지표를 항하여 점진적 인 균열발생 및 붕괴가 촉발되었다.
- 제 3단계: 2단계에서 만들어진 균열부로 점토층 상부에 존재하 는 하수박스로부터 누수된 국부지하수의 유입과 지층 이 교란되는 단계이다. 지속적인 세립모래층(SM) 상 부로의 붕괴는 점토층(CL)에 수직균열들을 발생시키 고 점토층 상부의 세립모래층(SM)에 존재하는 국부 지하수가 균열로 유입되며 세립모래층(SM)과 점토층 (CL)간의 혼합이 시작되었다. 점토층(CL)의 붕괴로 인해 탈락된 실트 성분은 그 하부에 위치한 세립모래 (SM)의 특성을 모래질실트(ML)로 변화시켰다.
- 제 4단계: 지반함몰발생 최종단계이다. 연화된 점토층(CL)이 붕 괴되면서 상부 세립모래층(SM)과 매립층(SM)도 같 이 붕괴하였다. 3단계 이후 균열부가 확대되어 전단강 도가 저하된 점성토(CL)층은 두께가 감소하고 실트질 모래층과 혼입 교란된 실트질 점토층(CL-ML)으로 바 뀌었다. 세립분이 빠져나간 모래자갈층과 인접한 세 립모래층은 통일분류법상 SM에서 SP로 바뀌었고 상 부의 세립모래층은 점성토층에서 탈락한 실트성분이

유입되어 SM에서 ML로 분류되었다. ML층 상부 세 립모래층은 국부지하수의 하향이동과 함께 세립분이 빠져나가 SP로 분류되는 균질한 모래층으로 변화하 였다. 혼합된 실트질 점토(CL)와 그 하부 모래질 실트 (ML)층의 일부(심도 GL -11 ~ -12m)에는 햄머자중으 로만 들어가는 20~30㎝의 공간이 3곳 존재하였다(Fig 3). 지반함몰 발생 지점에 버스정류장이 있어 빈번하 게 가해지는 차량의 정차와 출발 진동하중은 느슨한 지반의 상태와 맞물려 지반함몰 발생에 영향을 준 것 으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 자갈, 모래, 세립토로 구성된 충적층 위에 시행 되는 고층건물건축 굴착현장의 지반함몰발생 원인을 규명하고 지반공학적인 파괴메카니즘을 분석하였다. 이를 위해 지반조사, 현장조사, 지하수 흐름 수치해석을 수행하여 발견한 사항과 결 론을 요약하면 다음과 같다.

현장지반조사결과 대상현장의 지반은 지반함몰 후 매우 교란 된 상태로 나타났고 표준관입시험결과로 N<1의 동공이 3개 발견되었다. 흙막이벽과 기반암 경계면은 투수계수가 큰 모래자 갈층으로 나타났는데 경계면 흙막이 전면 굴착후 자갈과 토사가 뒤섞여 지하수와 함께 흙막이벽 하부로 토출되어 있음이 발견되 었다.

대상지역의 3차원 흐름해석결과 경계면에서의 출구동수경사 는 지반함몰이 발생할 당시 1.36, 즉 파이핑에 대한 안전율 0.74 로 지하수/토사유출의 조건이 만들어 진 것으로 확인되었다. 프로그램에 적용한 수리지질학적 파라메티 중 모래자갈층, 차수 벽의 투수계수, 지하수 함양율은 실제 지반조사에서 구할 수 없어 문헌에 의거하여 결정하였고 이들의 분포범위가 넓어 범위 내의 값을 적용한 해석결과의 민감도 분석이 필요하였다. 그 결과 모래자갈층(GP)의 투수계수의 분포에 따라 해당층의 출구 동수경사가 한계동수경사를 초과하게 되면 파이핑이 발생할 수 있는 가능성을 내포하고 있었으며, 흙막이벽의 경우는 투수계수 1.0×104 cm/s 부근에서 파이핑에 취약한 것으로 나타났다. 지하 수 함양율의 변화는 파이핑의 발생에 민감하게 작용하지 않음을 알 수 있었다.

지반함몰현상의 순차적 분석으로 지속적인 세립분의 유출로 인하여 발생된 경계부의 공동으로부터 상부퇴적층으로까지의 점진적인 변이가 발생한 후, 상부에 존재한 국부대수층의 누출 과 아울러 현장에 인접한 버스정류장에서 빈번한 차량의 급정거 와 출발시 진동하중으로 일시에 기둥형태의 지반함몰이 발생한 것으로 추정되었다.

대상현장의 지층과 같이 과거의 지속적이고 빈번한 한강홍수

로 인해 모래자갈층과 모래, 실트, 점토층이 교호한 퇴적층이 발달한 지역은 굴착 시 파이핑 현상에 의한 지반함몰에 취약한 구조임이 밝혀졌다. 이는 도심지에서 굴착공사를 진행할 때 사 전에 공사현장의 지질 및 수리지질 특성을 이해하고 차수벽 설 계 시에 이를 반영할 필요가 있음을 시사한다.

서울시에서는 용산 지반함몰사고를 계기로 고층건물 건축을 위해 깊이 10m 이상 또는 지하 2층 이상의 굴착공사를 진행하는 경우 전문가에게 토질상태, 지하수위, 굴착계획에 대하여 굴토 심의를 받는 것으로 건축조례를 개정한 바 있다.

감사의 글

저자들은 본 연구가 진행될 수 있도록 현장에 대한 의견을 주신 현장관계자들과 지반조사를 수행한 업체관계자들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1. 국토교통부 (2014), 「지하수 관측연보」, 국토교통부
- 2. 롯데건설 (2006), 「흙막이 가시설 가이드북」, 롯데건설 기술연구소, p.107.
- 서울특별시 (2015), 「지반정보 통합관리시스템」, 서울특별 시청 공간정보담당실, http://surveycp.seoul.go.kr:8080/Soil/ main.do.
- 4. 성민씨이텍 (2014), 「지반조사보고서: 용산역 전면 제2구역 신축공사, 2014」.
- 5. 김상윤 (2016), 「일본 후쿠오카 도심에 15m 대형 싱크홀... 피난 권고」, 조선일보, http://news.chosun.com/site/data/ html_dir/2016/11/08/2016110801318.html.
- 6. 한국수자원공사 (2015), 「국가 수자원 관리 종합정보시스템」, WAMIS, 한국수자원공사, http://www.wamis.go.kr/
- 7. 한국지반공학회 (2015), 「연구보고서: 용산역 앞 보도함몰 원인조사 및 대책수립 KGS15-123」.
- ABC News (2015), "Sinkhole swallows two pedestrians in Seoul, pair survive fall with only minor injuries", Australian Broadcasting Corporation", http://www.abc.net.au/news/ 2015-02-25/two-pedestrians-rescued-after-falling-into-a-sink hole/6260590.
- 9. BBC News (2015), "Recent sinkholes around the world and what caused them", British Broadcasting Corporation, http://www.bbc.com/news/science-environment-31602248.
- Benito G., Perez del Campo P., Gutierrez-Elorza M., and Sancho C. (1995), "Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain", Environmental Geology, 25(3): 156-164

- 11. EJ Tech (2015), 「용산 푸르지오 써밋 신축공사 월간 계측 관리 보고서」.
- FCG (2015), "Sinkhole: Solving drainage and erosion problems", Fairfax County Government, Virginia, http:// www.fairfaxcounty.gov/nvswcd/drainageproblem/sinkhole. htm.
- 13. Freeze, R.A. and Cherry, J.R. (1979), Groundwater: Prentice-Hall, p.29
- 14. Gutierrez F, Galve JP, Guerrero J, Lucha P, Cendrero A, Remomdo J, Bonachea J, Gutierrez M, and Sanchez JA. (2007), "The origin, typology, spatial distribution and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream of Zaragoza city (NE Spain)", Earth Surface Processes and Landforms, 32(6): 912-928
- Kang, I.S. (2014), "Sinkhole are here to stay", Korea Joongang Daily, http://koreajoongangdaily.joins.com/news/ article/Article.aspx?aid=2994167.
- 16. Kim, Y.Y., Lee, K.K. and Sung, I.H. (2001), "Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Seoul area,

Korea", Hydrogeology Journal, 9(4): 401-412

- Lee, S. (2015), "Sinkhole, a hole of fear swallows up road in a moment", Newshankuk, http://eng.newshankuk.com/ ?p=242.
- Meng, Y., Lei, M.T., Lin, Y.S., Dai, J.L., and Guan, Z.D. (2012), "Models and mechanisms of drilling-induced sinkhole in China", Environmental Earth Science, 67(7): 1961-1969.
- Pando, L., Pulgar, J.A., and Gutierrez-Claverol, M. (2013), "A case of man-induced ground subsidence and building settlement related to karstified gypsum (Oviedo, NW Spain)", Environmental Earth Science, 68(2): 507-519.
- 20. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), Soil mechanics in engineering practice: Wiley, p.48.
- Youssef, A.M., Al-Harbi, H.M., Gutierrez, F., Zabramwi, Y.A., Bulkhi, A.B., Zahrani, S.A., Bahamil, A.M., Zahrani, A.J., Otaibi, Z.A., and El-Haddad, B.A. (2016), "Natural and human-induced sinkhole hazards in Saudi Arabia: distribution, investigation, causes and impacts", Hydrogeology Journal, 24(3): 625-644.