

지하수위 저하가 지반함몰에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Influence of Ground Collapse due to Ground Water Level Lowering

김 숙 자¹⁾ · 정 관 수[†]
Sukja Kim · Kwansue Jung

Received: October 5th, 2018; Revised: October 11th, 2018; Accepted: October 25th, 2018

ABSTRACT : According to recent ground collapse occurrence, ground subsidence is increasing every year in downtown area, which is a social problem. The purpose of this study is to investigate the relationship between ground water level lowering and ground collapse through laboratory model experiments. After mixing 1:1 granite weathered soil with sand, sandy soil was formed as a relative density of 30%, 50%, and 80%. And then the changes of soil discharge with change of groundwater level were compared. The physical property of material of which particle distribution were well graded with maximum dry unit weight of 1.94 kg/cm³ and internal friction angle of 37degrees. Ground water levels were measured at 10 cm, 20 cm, and 30 cm from the bottom. As a result, the experiment shows that the higher the groundwater level works the higher the discharge velocity and the magnitude of underground cavity also increases with elapsed time. Finally, the cumulative quantity of soil discharge occurred up to 30 kg at the elapsed time, 35 minutes. It was also confirmed that the range of ground collapse increased due to soil discharge with ground water level lowering.

Keywords : Ground collapse, Relative density, Ground water level, Quantity of soil discharge, Range of ground collapse

요 지 : 최근 지반사고 발생통계에 따르면 도심지를 중심으로 지반함몰 및 침하발생 빈도수가 매년 증가하고 있어 사회적으로 문제가 되고 있다. 이 연구는 지반공동현상 실내모형실험을 통해 지하수위 변동과 지반함몰과의 연관성을 규명하고자 하였다. 화강 풍화토와 표준사를 1:1로 혼합한 후 상대다짐도 30%, 50%, 80%로 사질지반을 조성하고, 지하수위 변화에 따른 토사유출량의 변화를 비교분석하였다. 사용재료의 물리적 특성은 입도분포가 양호한 모래질로서 최대건조단위중량 1.94g/cm³, 내부마찰각 37°로 조성하였다. 하단으로부터 10cm, 20cm, 30cm 높이에 지하수위를 조성한 후 유출량을 분석하였다. 실험결과 지하수위가 높을수록 유출 속도가 증가하며, 시간에 따른 공동의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 시간에 따른 토사의 누적유출량은 35분 경과 후 최대 30kg 까지 발생하였으며, 지하수 하강에 따른 토사유출로 인해 지반함몰 범위가 증가한 것을 확인하였다.

주요어 : 지반함몰, 상대밀도, 지하수위, 토사유출량, 지반붕괴범위

1. 서 론

최근 도심지를 중심으로 지반함몰의 발생빈도가 많이 증가하고 있다. 1970년대 이후 산업화에 따른 도시의 성장으로 지하수 개발 및 사용량이 매년 증가하는 추세에서, 지반함몰 사례도 많이 발생하고 있다. 도시지역에서 발생한 지반함몰 사례는 상·하수관 노후화에 따른 파손, 대규모 굴착공사에 의한 지하수위 저하 등이 주요 원인으로 규명되고 있다.

도심지 굴착공사는 도로 및 다양한 구조물과 인접하여 시공이 이루어지므로 시공 부주의나 시공기술의 미흡으로 인해 지반함몰이 발생하였다. 서울시의 경우 도로함몰사고

는 연평균 771건으로 발생하였으며, 이 중에서 하수도가 원인인 사고는 전체 발생 건수의 약 74%를 차지하는 것으로 나타났다.

지반함몰 발생원인과 연구와 관련하여 Jeong(2018)은 소규모 지반함몰은 상하수도관 등 시설물의 유지와 관리가 주된 원인이지만, 대규모 지반함몰은 굴착공사로 인해 많이 발생하고 있음을 주장하였다. Lee & Kang(2014)은 도시지역 싱크홀 원인과 대책 연구에서 최근 싱크홀 규모가 커지는 이유는 지하수 이용의 증가에 따른 지하수위 저하와 밀접한 관련이 있다고 보았다. Chung et al.(2015)은 지하수위 저하에 따른 지하철구조물의 안정성 영향연구에서 굴착공사로 인한 지하수위 저하가 구조물의 안정성에 영향을 미칠

1) Ph.D Student, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Chungnam National University

† Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Chungnam National University (Corresponding Author : sherikim315@naver.com)

수 있다고 보고하였다.

지반 공동의 형성에 영향을 주는 인자는 지하수위, 다짐도, 함수비, 투수계수 등 매우 다양한 인자들이 존재한다. Park et al.(2017)은 굴착공사 위험예측과 관련한 지반함몰 인자 분류에서 22개의 지반함몰 영향인자를 도출하고 상호관계 흐름도를 제시하였다. Joung & Lee(2017)는 최근 지반함몰이 발생한 75개소의 지반조사 자료를 이용하여 굴착공사로 인한 지반함몰 요인으로 지하수위 변동, 굴착 중 침하계측, 굴착공사 시 지하수 처리, 상대밀도 등을 영향인자로 제시하였다. Kim et al.(2016)은 모래지반 다짐도에 따른 지반침하 연구에서 지반침하의 크기, 속도, 파괴형태가 다짐도에 영향을 받는다고 보고하였다. Jeong et al.(2017)은 지중 공동확장에 대한 실험적 연구에서 지하수 흐름방향, 지하수 유출부위 동수경사, 지중공동유지를 위한 지반 내강도 등을 지반함몰 주요인자로 제시하였다.

본 연구에서는 실내모형실험을 통해 굴착공사 중 지하수 유출로 인한 지하수위 저하 시 다짐도, 초기 지하수위에 따른 주변 지반의 지반함몰 발생특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. 또한, 침투해석을 이용하여 침투속도에 따른 토사의 유출경향을 확인하였다.

2. 지반함몰의 원인 및 발생현황

2.1 지반함몰의 원인

지반함몰은 지반 내 다양한 요인에 의하여 지내력을 잃어 상부지반이 땅속으로 내려앉는 현상을 말한다. 지반침하는 지반이 하부로 가리앉는 현상을 말하는 넓은 범위에서의 용어이고, 지반함몰은 지반이 움푹 파인 형상으로 가리앉는 것을 의미한다. 최근 자주 발생하는 도심지 지반함몰은 개발사업으로 인한 인공적 함몰이며, 다양한 요인에 의한 복합작용으로 발생하여 왔다(Jeong, 2018). 지반함몰은 지하수 대량 양수로 인한 지하수 흐름 교란, 상·하수도관 부식, 부실이음, 누수 등이 주된 원인으로 분류된다(국토교통부, 2015).

인위적 지반함몰은 주로 지하구조물을 시공하기 위한 굴착공사 중 암반 내에서 과도한 지하수 양수에 의한 공의 발생에서 비롯된다. 도심지역의 지하매설물 중 상·하수도관 노후화 및 접합부 부실이음 등에서도 인위적 지반함몰이 발생하고 있다. 상·하수도관으로부터 배출된 물은 지하매설물 주변의 다짐도를 연약화시키며, 물과 함께 토사가 유실되면서 주변에 공극이 발생한다. 흐르는 물로 인해 공극의 부피가 확장되어 지표 침하 및 지반함몰이 야기된다.

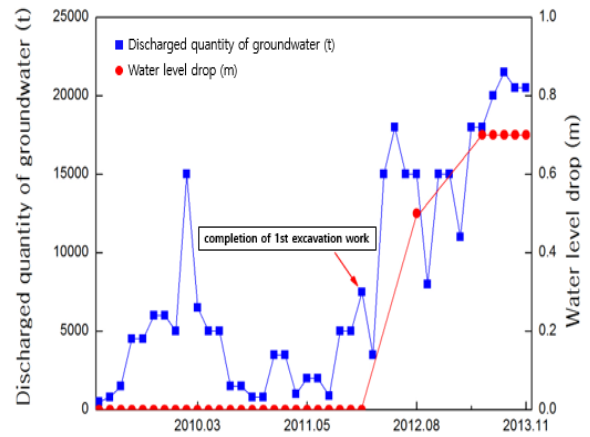


Fig. 1. Relationship between change of ground water level and quantity of ground water discharge during excavation

인위적 지반함몰은 두 가지 이상의 요인이 복합 작용하여 발생하기도 한다. 지하수위가 높은 토사지반에서 비 개착식 굴착공법 공사 시 상수도관 누수가 발생하면 대규모 지반함몰로 이어질 수 있다. Fig. 1은 석촌호수 주변 굴착공사에 따른 지하수위 유출량과 지하수위 변화의 관계를 도시한 것이다(서울시청, 2013).

2.2 도시지역 지반함몰 발생현황

전국 지반함몰 발생현황에 따르면 서울시의 사례가 가장 많으며, 대부분 도로함몰이 차지하고 있다. 도로함몰이 발생하는 경우 교통문제 등으로 인해 원인 규명보다는 교통피해 감소를 위한 즉각적인 복구가 이루어져 왔다.

지하수위 저하에 따른 지반함몰 및 공동발생은 송파구 일원에서 많이 발생하여 왔으며, 대부분 2014년도 6월과 8월 사이 석촌지하차도 공사, 지하철 9호선 공사 현장과 인접하고, 석촌호수에서 멀지 않은 지점에서 발생하였다.

서울 외곽지역의 경우 제2외곽순환도로 인천 방향 지점에서 발생한 붕락사고가 최근 발생한 대표적인 사례이다. 초기 내부붕괴 후 이완 영역이 확대되어 지상부의 지반이 가라앉아 함몰로 이어졌다(Shin et al., 2017). 인천 도시철도 2호선 00공구의 경우 연약한 지반 내에서 터널 굴진 작업이 진행되던 중 지중 침하가 발생하여 대형 상수도관이 파손되었고, 파손 부위에서 유출된 상수로 인해 지반의 지지력이 약화하면서 지반함몰이 발생하였다.

지반함몰사례는 지하에 지하매설관이나 지하구조물이 조성된 도시지역에서 주로 발생하였으며, 서울, 경기, 광주, 경남, 부산 순으로 발생빈도가 높다. Table 1은 전국 지반함몰 발생현황을 나타낸다.

Table 1. Overview of ground collapse in Korea (국토교통위원회, 2015)

Province	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Total	573	723	898	858	1,035	4,087
Seoul	572	691	850	779	733	3,625
Busan	1	5	-	11	11	28
Daegu	-	-	-	5	7	12
Incheon	-	1	-	3	7	11
Gwangju	-	17	37	19	11	84
Daejeon	-	-	-	-	12	12
Ulsan	-	1	1	5	21	28
Sejong	-	-	-	1	3	4
Gyeonggi	-	4	6	15	122	147
Gangwon	-	-	-	-	27	27
North Chungcheong	-	-	-	2	13	15
South Chungcheong	-	-	1	3	7	11
North Jeolla	-	4	-	2	7	13
South Jeolla	-	-	1	2	14	17
North Gyeongsang	-	-	-	3	6	9
South Gyeongsang	-	-	2	8	26	36
Jeju	-	-	-	-	8	8

3. 실내 모형실험을 통한 지반함몰 경향 분석

3.1 실내모형실험 조건

실험에 사용된 모래는 화강풍화토와 주문진 표준사를 1:1로 혼합한 시료를 사용하였으며 체분석시험(KS F 2302, 2017), 다짐시험(KS F 2312, 2016), 직접전단시험(KS F 2343, 2017)을 통해 물리적 특성을 파악하였다. 최대건조단위중량은 1.94 kg/cm³이며, 점착력은 4.45kPa, 내부마찰각은 37°, 투수계수는 6.267×10⁻³cm/s로 측정되었다. 시료의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

지하수위 저하에 따른 지반함몰 영향을 분석하기 위하여 가로 62cm, 폭 16cm, 깊이 47cm의 토조를 제작하였다. 다짐도에 따른 영향을 관찰하기 위해 지하수위 20cm 조건에서 상대밀도 30%, 50%, 80%로 조성하였다.

초기 지하수위 높이에 따른 영향을 관찰하기 위해 상대밀도 30% 조건에서 지하수위를 저면으로부터 10cm, 20cm, 30cm 높이까지 물을 채워 지하수위 저하에 따른 지반함몰을 모사하였다. 조성된 지반의 두께는 43cm이다. Table 3은 지하수위 저하에 따른 지반침하 실내실험 조건을 나타낸다.

Table 2. Physical property of specimen

Classification	Maximum dry unit weight (kg/cm ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Coefficient of permeability (cm/s)
SW	1.94	4.45	37.44	6.267×10 ⁻³

Table 3. Laboratory condition with ground water level

Soil box size (cm)	Relative density (%)	Ground water level (cm)	Depth of ground (cm)
62×16×47	Dr=30%	10	43
		20	
		30	
	Dr=50%	20	
	Dr=80%	20	

시료는 표준사와 화강풍화토를 1:1비율로 혼합하여 준비하였으며, 상대밀도 30%, 50%, 80%에 따른 다짐도를 계산한 후 1층(8~9cm)씩 총 5층에 해당하는 시료의 양을 준비하였다. 시료의 층별로 토조에 넣은 뒤 다짐봉을 이용하여 다짐도를 맞추었다. 지하수위는 토조하단으로부터 각각 10cm, 20cm, 30cm로 바꾸면서 지반상태를 재구성하였고 실험이 진행되는 동안 추가로 물을 주입하여 지하수위를 일정하게 유지하였다. 최종적으로 지하수 유출은 하부의 유출구를 통해 토사와 물을 중력에 의해 자연적으로 유출시킴으로써 지하공동과 지반침하를 형성하는 방식으로 실험을 진행하였다. 토조의 규격은 Jeong(2018)과 Kim et al.(2017)이 제시한 내용을 참고하여 제작하였다. 실험에 사용된 토조의 규격은 Fig. 2와 같다.

다짐도는 Lee & Singh의 제안식에 따라 목표하는 상대밀도에 따른 다짐도를 계산하였다(Das & Sobhan, 2013). 각 층을 8~9cm씩 5층으로 해당 단위중량에 대한 시료의 양을 측정 후 토조 내에서 다짐하였다. 상대다짐도와 상

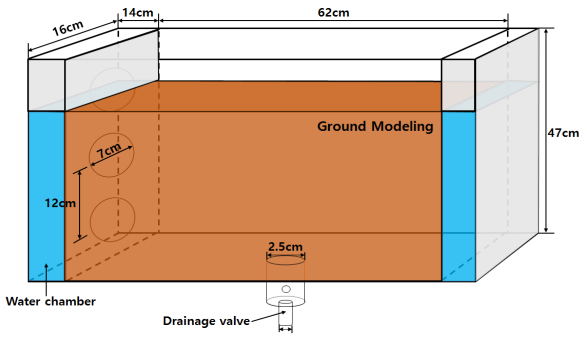


Fig. 2. Schematics of soil reservoir with ground water

Table 4. Soil-water discharge test with compaction degree

Case	Relative density (%)	Compaction degree (%)	Ground water level (cm)	Height of ground (cm)
Case 1	30	86	20	43
Case 2	50	90		
Case 3	80	96		

대밀도의 관계식은 Eq. (1)과 같다.

$$R = 80 + 0.2D_r \quad (1)$$

지하수위는 모두 20cm로 고정하여 상대밀도 외의 다른 요인에 의한 영향을 최소화하였다. 지반조성이 완료된 후 토조 하부의 유출구를 개방하여 시간에 따른 공동형성과정을 관찰하였다. 상대밀도에 따른 지반과 지하수 유출시험을 위한 지반조성 기본 물성값은 Table 4와 같다.

3.2 다짐도 조건에 따른 지반함몰 경향 분석

각각의 상대밀도에서 시간에 따른 공동의 생성과정을 관찰하였다. 공동은 지하수위 부근에 균열이 발생하기 시작하여 확장되는 형태로 진행되는 것으로 나타났다. 느슨한 모래의 경우 조밀한 모래보다 공동 발생시간과 실험종료시간이 더 빠르며 그 크기도 큰 것으로 나타났다.

각각의 Case에서 유출된 토사량을 측정한 결과, 시간에 따른 거동은 유사한 것으로 나타났다.

상대밀도에 따라 지하수위 하강에 따른 유출실험을 통해 Case별 지반함몰 붕괴형상을 관찰하였다. Drainage valve로 유출된 물과 건조하여 얻은 건조 시료의 양을 비교한 결과, Case 1은 19.58kg, Case 2는 20.48kg, Case 3은 22kg으로 조밀한 모래일수록 유출량이 증가하였다. 상대밀도 30%일 때의 지반함몰 경향은 5분 경과 후 붕괴하기 시작하여 30분 경과 후 상부까지 붕괴하였다. Fig. 3은 상대밀도 30% 지반의 지반함몰 과정을 보여준다.

상대밀도 50% 지반일 때 지반함몰은 상대밀도가 느슨한

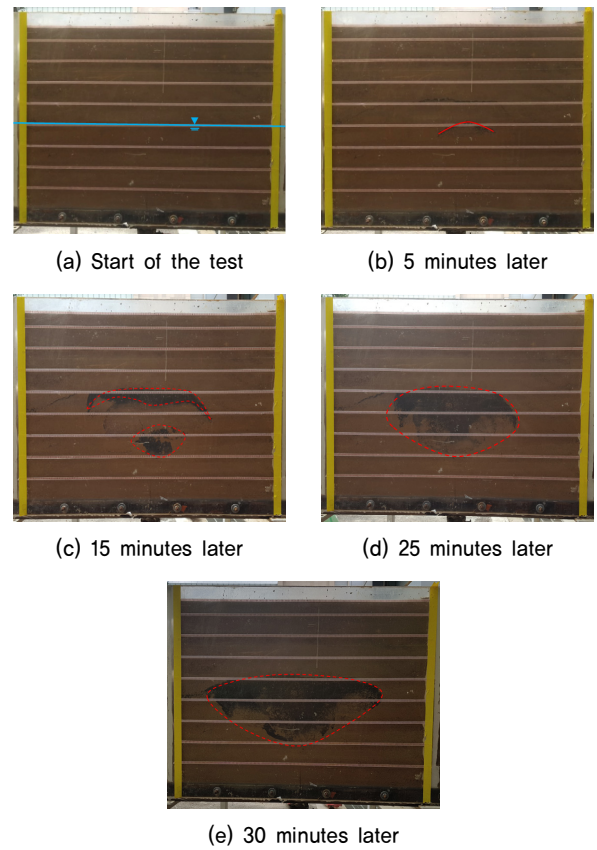


Fig. 3. Ground collapse with ground water lowering, Case 1 (Dr=30%)

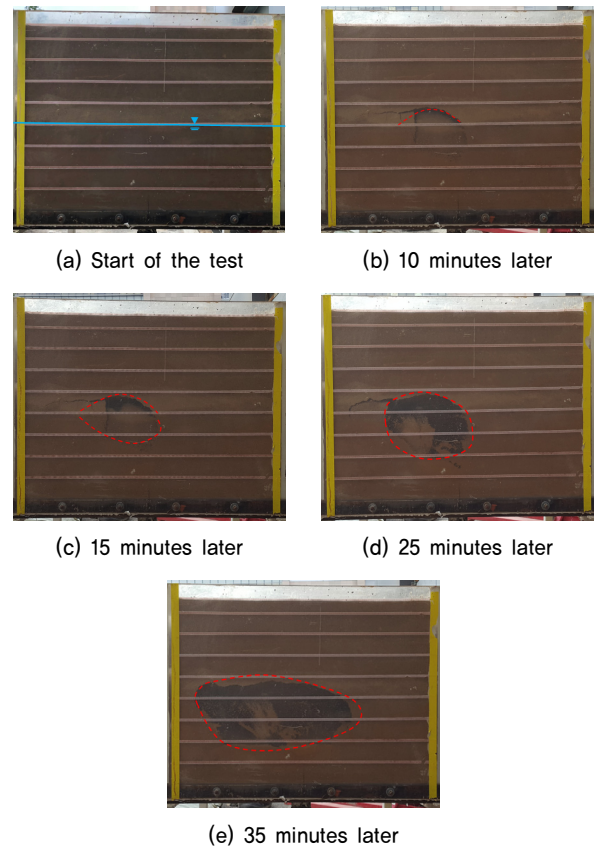


Fig. 4. Ground collapse with ground water level lowering, Case 2 (Dr=50%)

Case 1과 비교하면 붕괴 현상이 상대적으로 느리게 진행되었다. 상대밀도 50% 지반의 실험 종료시간은 35분이었으며 시간경과에 따른 지반함몰 결과는 Fig. 4와 같다.

상대밀도 80%로 다짐된 지반의 경우 초기 붕괴가 발생하기까지 다른 Case에 비해 시간이 더 걸리는 것으로 나타났다. 상대밀도 80%의 조밀한 상태에서 종료시간은 40분이었으며 시간경과에 따른 지반함몰 결과는 Fig. 5와 같다.

다짐도가 높을수록 초기 지반함몰 면적은 작게 발생하며, 시간경과에 따라 점차 범위가 빠르게 확대되는 것으로 나타났다.

지하수위 저하에 따른 지반침하 분석을 위해 다짐도에 따른 지반함몰 경향을 확인하였다. Case 1은 느슨한 상태, Case 2는 보통조밀, Case 3은 조밀한 상태로 지반을 조성하였다. 지하수 유출과 함께 발생한 지반함몰량을 유출시간에 따라 측정할 결과, 느슨한 지반은 초기부터 유출량이 많아 기울기가 선형에 가깝지만, 조밀한 지반은 초기에 토사 유출량이 적게 발생하였으나 시간이 지날수록 유출량이 증가하였다.

느슨한 사질토에서 가장 먼저 지반함몰이 발생하였으며

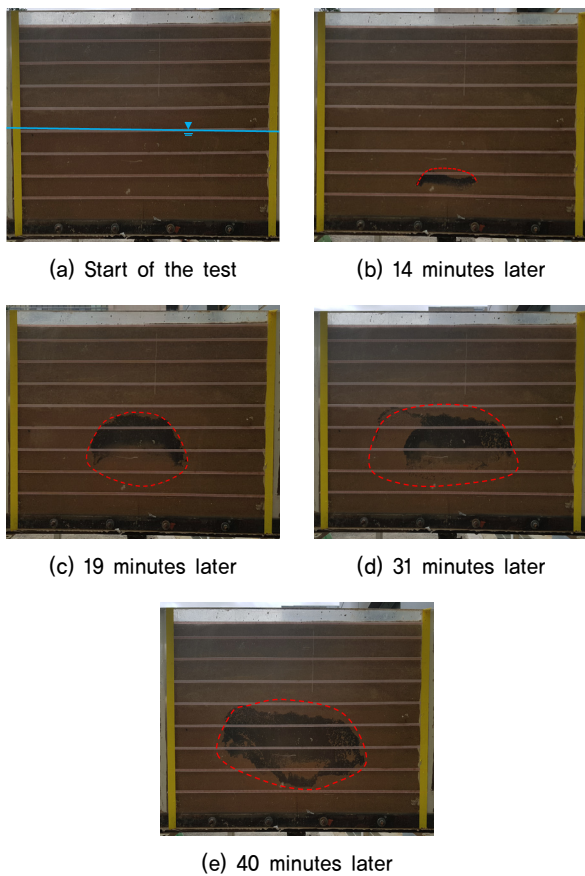


Fig. 5. Ground collapse with ground water level lowering, Case 3 (Dr=80%)

조밀할수록 지반함몰이 늦게 발생하였다. 그러나 붕괴 발생 이후 토사 유출량이 급격히 증가하는 시점은 짧아지는 것으로 나타났다. 초기단계에서 지중 중심부부터 붕괴하는 경향을 보이며 이후 지표면이 함몰되기까지의 경향은 다짐도에 관계없이 유사한 경향을 나타내었다. 시간경과에 따른 토사 유출의 총량은 Fig. 6과 같다.

지하수가 유출됨에 따라 지반함몰은 지반의 다짐도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 상대밀도가 낮을수록 지반 내에서 균열 발생시간이 빨라졌으며, 붕괴하는 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 모래 지반 내에서 유출이 시작된 순간부터 30분 경과 후에 Case 1의 최종 지반함몰량은 19.58kg으로 나타났으며, 같은 경과시간에서 Case 2는 Case 1에 비해 27.83%, Case 3은 44.84% 감소하였다.

Case 1의 함몰 종료점을 기준으로 토사 유출량은 각각 Case 1은 19.58kg, Case 2는 14.13kg, Case 3은 10.8kg으로 나타났다. 상대밀도에 따른 토사 유출량을 이용하여 Eq. (2)에 따라 지반함몰 감소율(Reduction of Ground Collapse, RGC)을 계산하였다.

$$RGC(\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (2)$$

여기서, A는 지반의 다짐도가 가장 느슨한 상태인 30% 일 때의 지반함몰량(kg)이며 B는 임의의 다짐도에서 지반함몰량(kg)을 의미한다.

지반함몰 감소율은 상대밀도가 낮은 50% 이하에서 감소량이 크게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 일반적으로 보통조밀 이상의 조밀한 지반에서는 감소율이 상대적으로 완만해지며 수치가 클수록 지반함몰 가능성이 낮아지는 경향을 보인다. Fig. 7은 지반함몰 감소율과 상대밀도의 관계를 도식한 것이다.

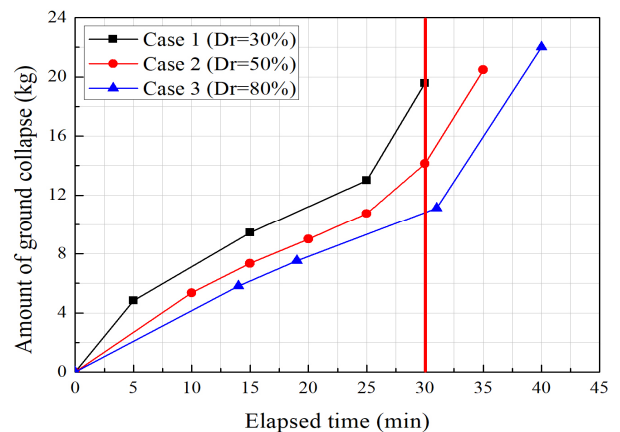


Fig. 6. Amount of ground collapse with elapsed time

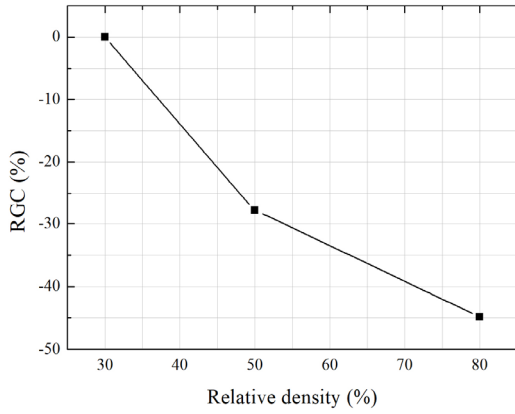


Fig. 7. Relationship of RGC and relative density

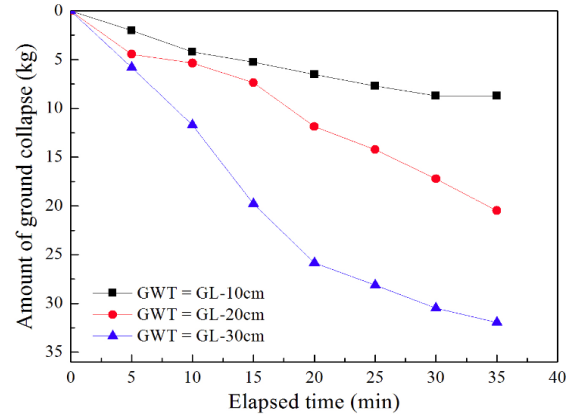


Fig. 8. Quantity of soil discharge with elapsed time

3.3 지하수위 조건에 따른 지반함몰 경향 분석

지하수위를 저면으로부터 10cm, 20cm, 30cm 지점에 지하수위를 조성한 후 토사의 유출 경향을 확인하였다. 느슨한 모래로 구성된 사질지반이므로 지하수위가 감소함에 따라 빠르게 붕괴하는 경향을 보여 측정간격을 5분 단위로 유출량을 확인하였다.

지하수위가 가장 낮은 10cm의 경우 시간경과에 따라 일정한 감소량을 나타내었으며, 토사유출량은 가장 적었다. 지하수위가 30cm인 경우 초기 유출량이 크게 늘어나면서 후반으로 갈수록 유출량 증가속도가 완만해져 다짐도 30%의 증가경향과 유사한 형태를 나타내었다.

다짐도 조건에 따른 지하수 유출실험에서 지반함몰의 시간 및 크기는 지반의 상대밀도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 지반의 다짐도에 따른 지반함몰 범위는 유사하였다. 따라서 다짐도가 높은 토질의 경우 최종 유출되는 토사량은 상대적으로 느슨한 상태의 다짐도를 보이는 지반보다 토사 유출량이 더 많이 발생한다고 볼 수 있다. 이는 모래지반의 경우 초기 붕괴 발생 이후 다짐도가 급격히 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지하수위 저하에 따른 토사의 유출량을 확인하기 위해 소형 토조를 제작하여 실내모형실험을 수행하였다. 지하 공동 형성에 영향을 미치는 인자 중 지하수위와 상대밀도를 변화시키면서 지하수위 높이에 따른 공동의 크기, 배출량을 확인하였다. 그 결과 초기 지하수위가 높을수록 공동의 크기가 커지는 것으로 나타났으며, 배출량도 비례하여 많아지는 것으로 나타났다.

지반지하수위 높이별 시간경과에 따른 공동의 크기 및 형태는 Fig. 8과 같다.

4. 수치해석을 통한 실내실험 결과 고찰

실내실험결과를 토대로 침투해석 모델을 구성하였다. 토조의 규격과 같이 가로 62cm, 높이 47cm로 모델링 후 지하수위 조건, 유출부, 강우조건 등 경계조건을 부여하였다. 지하수위 상부는 불포화 상태로 설정하였으며 하부는 포화상태로 모델링하였다.

지하수위는 토조 하단으로부터 각각 10cm, 20cm, 30cm로 유량 변화를 관찰하였다. 또한, 다짐도에 따른 유량의 변화는 간극비의 변화와 투수계수를 이용하여 산출하였다. Table 5는 해석 조건별 구성을 나타낸 것이다.

침투해석결과 투수계수를 고정하고 지하수위를 10cm, 20cm, 30cm로 변화시켰을 때, 지하수위가 증가할수록 물의 배출량 또한 증가하는 것으로 나타났다.

동일한 지하수위 조건에서는 투수계수가 증가할수록 물의 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 지하수위 30cm에서 물의 유출량은 지하수위 10cm에서 유출량보다 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

다짐도가 증가하면서 다짐도 30%와 비교하여 지하수 유

Table 5. Configuration by numerical analysis condition

Case	G.W.L (cm)	Coef. of permeability ($\times 10^{-3}$ cm/sec)	Nodes	Elements
Case-1	10	2.85	1388	1314
Case-2	20	2.85	1347	1274
Case-3	30	2.85	1344	1271
Case-4	10	2.01	1388	1314
Case-5	20	2.01	1378	1304
Case-6	30	2.01	1344	1271
Case-7	10	1.20	1388	1314
Case-8	20	1.20	1347	1274
Case-9	30	1.20	1344	1271

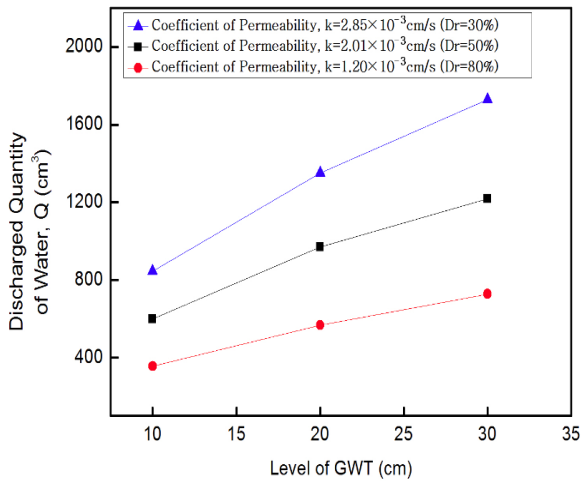


Fig. 9. Discharged quantity of water vs. level of GWT

출량은 75%로 감소하였다. 다짐도가 느슨한 상대밀도 30%의 지반과 비교하여 상대밀도가 높아질수록 지하수 유출량의 증가량은 점차 감소하는 것으로 나타났다.

다짐도 30%에서 초기 지하수 유출량은 800cm^3 이었으나 다짐도가 80%로 증가하였을 때 지하수 유출량은 약 400cm^3 발생하였다. 시간경과에 따른 유출경향도 유사한 것으로 나타났다. 상대밀도 30%, 50%, 80%에서 지하수위와 유출량의 관계는 Fig. 9와 같다.

사질토 모래지반으로 조성된 시료의 투수계수 증가 경향은 상대밀도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 상대밀도 30%의 느슨한 모래지반의 경우 투수계수가 $2.85 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이었으나 상대밀도 80%의 모래지반에서는 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 으로 약 40% 감소하는 것으로 나타났다.

지하수위에 따른 지하수 유출량과 토사 유출량은 다짐도가 30%일 때 보다 다짐도가 80%로 일 때 더 많이 유출된 것으로 나타났다. 이는 모래질지반의 특성상 초기 토사유실이 발생하면 기존의 다짐도가 점차 느슨해지기 때문으로 판단된다.

최종 붕괴형태는 지하수위와 관계없이 유사한 형태와 크기를 가지는 것도 유출량의 차이 때문에 발생한 현상으로 볼 수 있다.

모래질지반으로 실내 실험한 결과 지하수위 10cm에서 토사량은 약 10kg 유출되었으며, 배수량은 약 850cm^3 정도 발생하였다. 토사의 유출 경향과 지하수의 유출 경향은 다짐도와 관계없이 유사하였다. 이는 상대밀도가 낮은 모래질지반은 지하수 이동 시 초기유실량이 많으며, 상대밀도가 높은 지반은 초기유실량은 적으나 시간이 지나면서 느슨한 지반보다 유실량이 더 많아짐을 의미한다. Fig. 10은 토사유출량과 지하수 유출량의 관계를 비교 검토한 것으로 유출경향이 유사함을 보여준다.

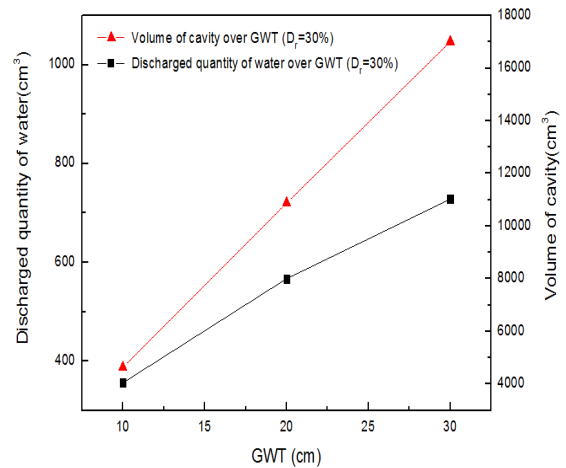


Fig. 10. Comparison quantity of soil discharge with quantity of water discharge

5. 결 론

이 연구는 최근 도심지를 중심으로 증가하고 있는 지반함몰사고와 관련하여 지하수위 저하가 지반함몰에 미치는 영향에 대해 실험적으로 분석하였다. 화강풍화토와 모래를 이용하여 지반을 조성하고 다짐도와 지하수위 변화를 통해 공동현상을 확인하였다. 실험결과에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 다짐도에 따른 지반함몰 실험결과, 공동발생으로 인한 토사의 유출량은 지하수위가 높을수록 많이 발생하였다. 지하수위가 높을수록 유출시간, 유출속도가 커지므로 유출되는 토사량도 증가하기 때문이다. 따라서 지속적으로 지하수위가 하강하는 지반에서 공동발생가능성이 높은 것으로 판단된다.
- (2) 일반적으로 느슨한 지반에서 공동이 발생할 가능성이 크며 실험적으로도 확인되었다. 본 연구에서는 상대밀도에 따른 지반함몰 감소율을 제시함으로써 감소율이 커질수록 지반함몰 발생 가능성이 감소함을 확인하였다.
- (3) 상대밀도 30%의 느슨한 지반에 비해 상대밀도 80%인 지반의 투수계수는 약 40% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 느슨한 지역이 높은 투수계수로 인해 공동발생 가능성이 크므로 매설관 주변 등 상대적으로 다짐이 불량한 주변에서 공동발생 가능성이 큰 것으로 판단된다.

이 연구에서는 지하수위와 다짐도를 중심으로 공동현상을 관찰하였다. 공동의 생성 및 지반침하의 발생인자는 이외에 흙의 종류, 입도분포, 지반 내 지하수 흐름속도 등 다양하므로 실험과 해석적인 방법을 이용하여 지반공동현상에 대한 지속적인 규명이 필요하다.

References

1. 국토교통부 (2015), 지반침하(함몰) 안전관리 매뉴얼.
2. 국토교통위원회 (2015), 「지하안전관리에 관한 특별법」 검토 보고서.
3. 서울시청 (2013), 석촌호수 수위저하원인 자문의견서.
4. Chung, J. S., Lee, S. G., Lee, G. Y., Jung, H. W. and Kim, H. J. (2015), A Case study on the effects on underground structure due to changes in the groundwater level and ground Stress, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 13~21 (In Korean).
5. Das, B. M. and Sobhan, K. (2013), *Principle of Geotechnical Engineering*, Cengage Learning, USA, p. 171.
6. Jeong, H. J. (2018), Analysis of ground subsidence characteristics by influence factor through laboratory model test, Ph. D. thesis, Chonnam National University (In Korean).
7. Jeong, H. S. (2018), Detection of cavities under pavements using 2D full seismic waveform inversion method, Ph. D. thesis, Incheon National University (In Korean).
8. Jeong, S. Y., Karoui T., Jeong, Y. H. and Kim D. S. (2017), Experimental study on ground subsidence and underground cavity expansion under various conditions, *Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 143~152 (In Korean).
9. Joung, H. Y. and Lee, G. H. (2017), A study on risk influence factors of ground subsidence through soil investigation analysis, *Journal of Korean Society of Disaster & Security*, Vol. 10, No. 1, pp. 43~46 (In Korean).
10. Kim, S. W., Jeong, S. W., Yeom, B. W., Ryu, D. W., Lee, H. J., Jeong, B. J., Bang, E. S. and Lee, I. H. (2016), Results of ground subsidence simulation according to the degree of compaction of sand, *Proceedings of KSEG 2016 Spring Conference*, pp. 85~86 (In Korean).
11. Kim, Y. H., Kim, J. B., Kim, D. W. and Han, J. G. (2017), Experimental study on generating mechanism of the ground subsidence of due to damaged waters supply pipe, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 139~148 (In Korean).
12. KS F 2302 (2017), Standard test method for particle size distribution of soils, Korea Standard Association.
13. KS F 2312 (2016), Standard test method for soil compaction using a rammer, Korea Standard Association.
14. KS F 2343 (2017), Standard test method for direct shear test of soils under consolidation drained conditions, Korea Standard Association.
15. Lee, K. Y. and Kang, S. J. (2014), Sinkhole swallowing a town – Cause and countermeasure, Gyeonggi Research Institute (In Korean).
16. Park, J. Y., Jang, E. G., Kim, H. J. and Ihm, M. H. (2017), Classification of ground subsidence factors for prediction of ground subsidence risk (GSR), *Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 2, pp. 153~164 (In Korean).
17. Shin, E. C., Kang, J. K., Shin, H. S. and Yoo, J. S. (2017), Stability analysis of underground express highway tunnel in Incheon, *Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, pp. 1773~1776.