



지하수위와 세립분 함유량에 따른 지반함몰 메커니즘 Ground Subsidence Mechanism by Ground Water Level and Fine Contents

김진영* · 이성열** · 최창호* · 강재모* · 강권수*** · 정효진** · 홍재철** · 이재수** · 백원진**†

Kim JinYoung · Lee SungYeol · Choi ChangHo · Kang JaeMo · Kang KwonSoo · Jeong HyoJin · Hong JaeCheol · Lee JaeSoo · Baek WonJin

Abstract

Recently, ground subsidence frequently occurs in downtown area. The major causes of the subsidence on the subsurface were the damages of the water supply and sewer pipelines and excavation works in adjacent areas, etc. Because of these various factors, it is not easy to analyze the tendency of occurrence of ground subsidence. The purpose of this study is to clarify the effect of ground subsidence by the change of the fine particle content and ground water level and to establish the ground subsidence mechanism. In this study, a model soil-box was manufactured to simulate the failure of the old sewer pipe which is one of the causes on ground subsidence. And a model test was conducted to investigate the effects of fine contents and ground water level on the cavity occurrence. From the test results, firstly the higher the ground water level, the faster the primary cavity is formed as the seepage stress increases. As a result, the secondary cavity and the ground subsidence rapidly progress due to the relaxation of the surrounding ground. The total amount of discharged soil was decreased as the fine content increased.

Keywords: Ground subsidence, Ground water level, Fine particle content, Model test

1. 서 론

지반 내에 자연 또는 인공적으로 공동 및 이완이 발생하고, 그것이 주변으로 확대, 진전되어 지표면에 도달하면 함몰이 발생하게 된다. 현재 일반적으로 언론에서 크게 대두되고 있는 싱크홀은 석회암 지형에서 지하수의 영향으로 침식이 진행되어 발생하는 것을 뜻하므로, 우리나라의 경우는 싱크홀 보다는 지반침하나 도로함몰(지반함몰)로 표현하는 것이 적합하다. 지반함몰은 주로 손상된 노후 하수관의 이음이나 균열 부로부터 토사가 지하수와 함께 관내부로 유입되어 배면 지반에 공동이나 이완이 발생하여 지반 함몰을 일으키고 있다(JoongAng-Ilbo, 2015).

최근 국내에서 대형으로 발생된 잠실에서 지반함몰로 인해 사회적인 문제로 대두되기 시작하면서, 서울시에서 2010년에서 2014년까지 지반 침하 조사를 실시한 결과, 도로 함몰이 지속적으로 발생하고 있는 것으로 나타났다. 전체 5년간의

각 요인별 발생건수는 하수관 손상의 원인으로 2715건 상수도관 손상으로 59건 주변지반의 굴착 및 기타 요인으로 556건이 발생하였으며, 발생된 총 도로함몰 3330건 중 81.5%가 하수관로 손상으로 인한 토사 유출이 원인이라고 발표했다(Seoul, 2015).

지반함몰과 관련된 국내에서 진행된 실험적 연구로는 실내모형시험을 통한 상대다짐도가 지반함몰에 미치는 영향에 대한 실내 모형실험연구가 진행되었다(Kim et al., 2016). 또한 Kim et al. (2017)은 도로함몰의 영향인자 도출을 위해 서울시를 중심으로 함몰 발생지점 인근의 하수관로 정보를 이용하여 도로함몰과 하수관로의 건전도 및 관로 주변환경의 상관관계를 분석한 연구를 실시하였다. 이와 같은 연구가 진행되었지만, 지반침하 원인에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 국토교통부(2015)에서 진행한 현황조사를 통한 분석결과로는 하수관에 의한 지반함몰은 관로 주변의 지반의 다짐 및 재료 불량, 이상기후에 의한 집중호우, 하수관로의 건전도 불량 등 여러 가지 복합적인 원인에 의해 발생한다고 하였다. 국외의 연구로는 매설관의 파손부 등으로부터 관내부에 토사 유출에 따른 주변 지반내의 공동 발생 과정에 대해 Toda et al. (2005)에 의해 손상된 노후 하수도관 주위의 공동 형성의 모형실험이 진행되고, 공동의 발생 및 진행이 일어나기 쉬운 정도는 흙의 세립분 함유율과 최대입경에 영향을 받지만, 관의 매설심도나 손상정도와는 큰 관련이 없으며 물의 침투방향과 공동의 진행패턴은 관련이 크다고 하였다. 또한 관 축방향의

* Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
** Department of Rural & Biosystems Engineering, Chonnam National University
*** Department of Civil Engineering, Seonam University
† Corresponding author
Tel.: +82-62-530-2151 Fax: +82-62-530-2159
E-mail: bwj215@jnu.ac.kr

Received: September 8, 2017
Revised: September 10, 2017
Accepted: September 11, 2017

균열보다도 관 축 직각방향의 균열에서 공동이 쉽게 발달됨을 보고하였다. 또한 Kuwano et al. (2010)은 지반함몰을 미연에 방지하기 위한 지반내 공동과 이완의 탐지를 위한 기초적 검토로 일본의 표준사를 이용하여 실내모형실험을 수행한 바 있으며, 또한 Sato와 Kuwano (2010)는 하수관의 균열부를 통한 우수의 상향침투와 수위 저하에 따른 하향침투의 재현 실험을 통해 지반내 공동의 형성과 확장 과정에 대한 평가를 위한 모형실험을 수행한 바 있다. 이를 통해 모래의 모델지반 중에 상향 침투후 하향침투시 균열부를 통한 토사유실이 반복적으로 진행되어 공동이 확장되고 주변지반이 이완되어 지반함몰이 발생한다고 하였다. Renuka와 Kuwano (2011)은 표준사를 이용한 공동 상부의 이완영역의 형성과 평가를 위한 실내모형실험을 수행하고 반복적인 토사유실이 주변지반의 이완을 촉진하여 공동이 확장 되어감을 나타낸 바 있다. 이와 같이 관로의 균열부를 통한 지하수위 변동에 따른 토사유실이 지반함몰에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 모형토조를 제작하여 균열부가 존재하는 하수관을 모사하고, 표준사와 점토를 이용하여 지하수위의 변동에 따른 침투력의 변화 및 채움재의 세립분 함량 변화가 공동발생에 미치는 영향을 알아보고 지반함몰 발생의 영향인자에 대한 메커니즘을 규명하기 위해 모형실험을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실내모형실험

파손된 하수관로 배면의 지반을 모사하기 위해 실내 모형 실험장치의 설계 및 제작을 진행하였다. 본 연구에서 제작한 모형토조의 크기는 Fig. 1과 같이 가로 50 cm, 세로 25 cm, 높

이 50 cm의 토조를 제작하였다. 토조는 공동의 확대 전개과정을 확인할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하고 가로방향의 변형을 방지하기 위해 보강용 강재를 부착하는 것으로 하였다. 또한 하부로부터의 상승 침투류의 재현을 위해 하부에 배수밸브를 부착하여 급/배수를 재현할 수 있도록 설계하였다. 배면 지반의 지하수위 조절을 위해 토조 양 옆에 가로 10 cm 세로 25 cm 높이 50 cm의 투수가 가능한 수조를 부착하고 토조와 수조 사이에서 지하수위 상승시의 토사 유출을 막기 위해 토조 측면에 필터를 설치하였다. 또한 토조 저면의 15 mm의 틈새로 하수관의 균열부를 재현하고, 이를 통해 지하수위 변동에 따른 침투류 형성으로 토사를 배출함으로써 모델 지반 내에 이완영역이나 공동을 발생시키게 된다.

2. 실내 시험 재료 및 방법

이 연구는 실제지반에서의 지반함몰 발생의 원인과 영향인자에 대한 메커니즘을 규명하기 위해 실시하는 것으로 다양한 현장조건에서의 모형실험을 수행하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 현장토를 직접 이용할 경우, 다양한 인자(입도 분급(분포)에 의한 영향, 균일한 지반조건의 재현의 어려움, 대량의 현장토 확보의 곤란함 등)의 변화를 단기간에 파악하기 어려워, 주문진 표준사에 광양항에서 채취한 점토(0.075 mm 통과율 95 % 이상)를 이용하여 세립분 함유량을 5.0%~20% (6 Case)까지 변화시키고 각각에 대해 지하수위를 10, 20, 30 cm의 조건에서 실내모형실험을 실시하였다. 표준사는 주문진 표준사를 사용하였으며, 혼합에 이용한 점토의 기본 물성치는 Table 1과 같다. Table 2는 주문진 표준사의 물리특성을 나타낸 것으로 k_{60} 은 상대밀도 60%일때의 투수계수 값을 나타낸 것이다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 표준사와 광양항 점토의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

모형실험은 표준사와 점토가 혼합된 모형지반에 설정된

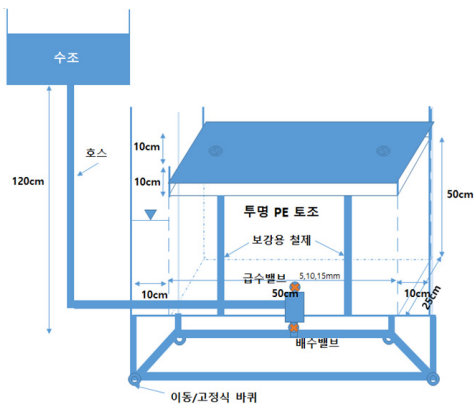


Fig. 1 Laboratory model test equipment

Table 1 Soil properties of clay in Gwangyang Port

Specific gravity (G_s)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index	0.075 mm or less (%)	USCS
2.69	46.91	31.19	15.72	95.0	CL

Table 2 Soil properties of Jumunjin standard sand

Specific gravity (G_s)	Maximum void ratio (e_{max})	Minimum void ratio (e_{min})	Mean grain size (D_{50} , mm)	Coefficient of uniformity (C_u)	Coefficient of permeability (k_{60} , cm/sec)	USCS
2.64	0.94	0.65	0.58	1.68	9.45×10^{-2}	SP

Table 3 Sample molding conditions according to experimental conditions

Fine contents (%)	Ground water level (cm)	Weight of standard sand (kg)	Weight of fine contents (kg)	Water contents (%)
5	10	79.10	4.163	5
	20			
	30			
7.5	10	77.02	6.24	
	20			
	30			
10	10	74.93	8.33	
	20			
	30			
12.5	10	72.85	10.41	
	20			
	30			
15	10	70.77	12.49	
	20			
	30			
20	10	66.61	16.65	
	20			
	30			

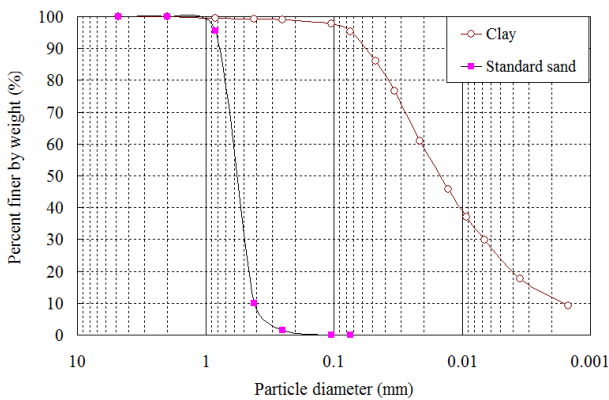


Fig. 2 Grain size distribution curves

각각의 지하수위로 포화가 이루어진 것을 확인하고 토사 배출구를 개방하여 경과시간별 배토량을 측정하는 것으로 진행하였으며, 실험 진행시에 동영상 촬영을 통해 1차 공동의 발생 및 확대, 2차 공동의 발생과 확대를 기록하여 각 단계별 시간, 지반함몰 시간과 각 단계별 누적배토량을 측정하였다. 실험 결과는 세립분이 지반함몰 발생에 미치는 영향을 각각의 지하수위별로 정리하였다. 시험 조건에 따른 시료 성형 조건은 Table 3과 같다. 실험 방법으로는 표준사와 점토를 사용하여 상대밀도 60%에 해당하는 토조에 필요한 표준사 및 물의 무게를 계산하여 일정한 지반형성을 위해 총 9층 (5 cm/층으로 나누어 필요한 토사를 투입하고 다짐봉을 이용하여 직접

다짐을 진행하여 균일한 지반이 형성되도록 하였다. 또한 각 층의 다짐이 완료되면 벽면에 색모래를 포설하여 공동의 형성 및 확대 과정을 투명 아크릴 벽면을 통해 관찰 할 수 있도록 하였다.

모형지반에 대한 포화방법으로는 하부의 밸브를 잠그고 측면의 수조를 이용하여 수위를 상승시켜, 설정된 지하수위까지 도달하도록 수조에 물을 공급하고 수조의 수위가 일정하게 유지되는 것을 확인하고 수위변동이 발생하지 않을 때를 포화과정이 종료되었다고 판단하고 1시간 동안 동일 수위를 유지한후, 수위변동이 없으면 실험을 진행하는 것으로 하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 지하수위 변화에 따른 공동발생시간 및 누적배토량

가. 지하수위 10 cm

세립분 함유량 변화에 따른 공동발생 영향을 알아보기 위해 주문진 표준사에 점토를 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 20%로 배합하여 각각 지하수위를 10 cm, 20 cm, 30 cm를 두어 실험을 실시하였다. 세립분 함유량이 5%일 경우에 1차, 2차 공동 발생시간 및 최종함몰(붕괴) 시간은 각각 8분, 14분 및 14분 30초 정도로 나타났다.

동일한 지하수위에서 세립분 함유량 7.5%로 실험을 수행한 결과 1차 공동 발생은 실험시작 5분 40초 후 발생하였고 실험시작 10분 18초 후 2차공동이 발생하였다.

세립분 함유량 10%로 실험을 수행한 결과 지반 안정까지의 시간은 30분이 걸렸고 6.60 kg의 흙이 배토 되었다. 실험 시작 30분 후에 토사가 섞이지 않은 물이 배수되어 지반안정으로 판단, 실험을 종료하였다. 세립분 함유량 5%,의 실험 후 5분간 배출된 토사량은 9.26 kg이고 세립분 함유량 7.5%의 실험 후 5분간 배출된 토사량은 3.17 kg, 세립분 함유량 10%의 5분간 배토량은 2.37 kg으로 세립분 함유량이 높아질수록 단위시간당 배출되는 토사의 양이 적어지는 경향을 관찰 할

수 있었다.

세립분 함유량 12.5%의 실험 결과는 실험 시작 13분 48초 후 1차공동이 발생하였고 14분 43초에 토사가 섞이지 않은 물이 배수되어 지반안정이라 판단, 실험을 종료하였다.

세립분 함유량 15%의 실험 결과는 실험 시작 18분 후 토사가 섞이지 않은 물이 배수되어 실험을 종료하였다. 공동이나 지반함몰이 발생하지 않고 지반안정이 발생하는 것을 관찰 할 수 있었다.

세립분 함유량 20%의 실험 결과는 배토량을 측정하기 어려운 소량의 점토만 배출되어 실험 시작 30분 후 실험을 종료 하였다.

지하수위가 10 cm일 경우에 세립분 함유량과 공동 발생시간에 따른 배토량의 관계는 Table 4와 Fig. 3과 같다. 지하수위 10 cm인 경우에는 세립분 함량 7.5%에서만 시간 경과에 더불어 배토량이 증가하며 공동의 확장으로 지반함몰이 발생한 것으로 나타났다. 괄호안의 stable은 더 이상 배토가 일어나지 않고 맑은 물이 흘러나오는 안정을 나타낸다.

나. 지하수위 20 cm

세립분 함유량 5%로 실험을 수행한 결과 실험 시작 1분 23초 후 1차공동이 발생하였고 시작 2분 7초 후 2차공동이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이후 공동이 차츰 양 옆으로 전개

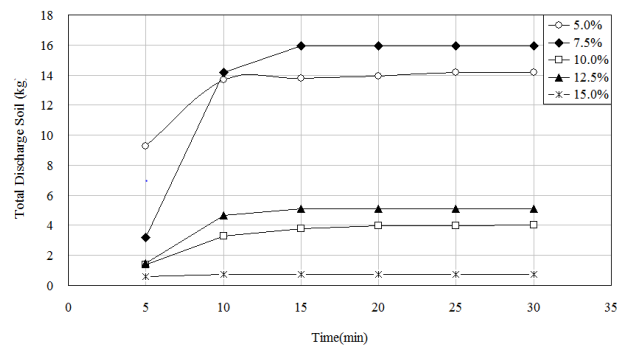


Fig. 3 Time-cumulative discharged soil (ground water level 10 cm)

Table 4 Time of cavity occurrence and weight of discharged soil (GWL:10 cm)

Fine contents (%)	First cavity occurrence (kg)	Secondary cavity occurrence (kg)	Ground subsidence (kg)	Ground subsidence (Time)
5	11.88	13.78	14.17 (stable)	25min (stable)
7.5	9.34	14.17	15.96	11min 6sec
10	6.6	N/A	6.82 (stable)	30min (stable)
12.5	4.98	N/A	5.08 (stable)	14min 43sec (stable)
15	N/A	N/A	0.73 (stable)	18min (stable)

확대되면서 실험 시작 3분 40초 후 상부지반까지 완전히 무너지는 지반함몰이 발생하였다. 2차 공동 발생 후 상부의 토사가 무너져 빠르게 배출되어 공동이 확장된 후 지반함몰이 발생하였다.

세립분 함유량 7.5%의 조건에서 실험을 수행한 결과, 1차 공동이 3분 42초에 발생하였고 실험 시작 6분 33초에 2차 공동이 발생하였으며 실험시작 15분이 경과된 후 지반함몰이 발생하였다. 2차 공동 발생 후 상부 3층 정도의 상부지반이 겔보기점착력으로 지반을 유지하고 있다가 하부지반의 토사가 대부분 배출되었을 때 상부지반이 함몰되는 것을 관찰 할 수 있었다.

세립분 함유량 10%의 조건에서의 실험 결과는, 실험 시작 후 2분 15초에 1차 공동이 발생하였고 지하수위가 20 cm로 형성되고 3분 9초에 지반이 안정되어 실험을 종료하였다. 토조의 20 cm 부분까지 포화가 되어 지하수위가 형성되었지만 상부지반의 세립분에 의한 겔보기 점착력의 발현으로 지반함몰이 일어나지 않은 것으로 판단된다.

세립분 함유량 12.5%의 실험 결과는, 실험 시작 2분 45초 후 1차 공동이 발생하였고 2차 공동은 발생하지 않았다. 지반이 안정되기까지 걸린 시간은 총 6분 45초이다.

세립분 함유량 15%의 실험 결과는, 지반함몰이 발생하지 않고 지반안정을 이루는 것을 관찰 할 수 있었다. 1차 공동은 실험

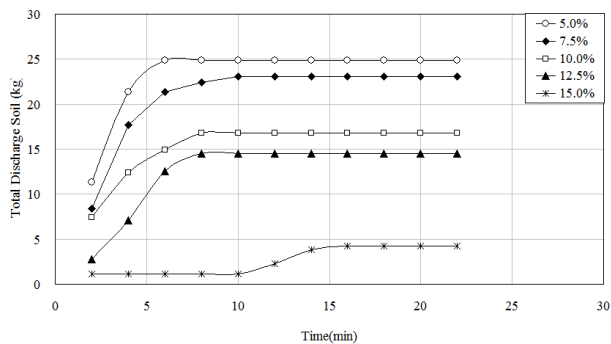


Fig. 4 Time-cumulative discharged soil (ground water level 20 cm)

Table 5 Time of cavity occurrence and weight of discharged soil (GWL:20 cm)

Fine contents (%)	First cavity occurrence (kg)	Secondary cavity occurrence (kg)	Ground subsidence (kg)	Ground subsidence (Time)
5	7,82	12,10	24,86	3min 43sec
7,5	3,65	12,01	24,73	22min
10	10,84	N/A	13,56	3min 9sec
12,5	4,42	N/A	14,52	6min 45sec
15	2,88	N/A	4,24 (안정)	33min (stable)

험 시작 14분 34초로 상대적으로 느리게 일어났고 20분 후 지반안정이 이루어졌다. 실험 시작 후 세립분이 토사배출구를 막는 현상이 일어나 토사배출구를 인위적으로 뚫어주어 실험을 진행하였다. 토사배출구를 뚫어 주게 되면 순간적으로 배토량이 증가하는 것을 관찰 할 수 있었고 이와 같은 현상이 반복되어 1차 공동 발생까지의 시간이 오래 걸렸고 1차 공동 발생 이후의 배토량이 상대적으로 많은 것을 관찰 할 수 있었다.

세립분 함유량 20%의 조건에서 실험결과는 지하수위 10 cm와 마찬가지로 배토가 이루어지지 않아 공동과 지반함몰이 발생하지 않았다. 지하수위 20 cm에 대한 세립분 함유량 별 시간 누적 배토량 그래프는 Fig. 4와 같다.

세립분 함유량 7.5%가 10%보다 실험 초기 배토량이 적은 이유는 토사배출구가 막히는 현상이 많이 발생함에 따라서 초기에 배토가 원활하게 이루어지지 않았기 때문이다. 실험 시작 후 12분경 후부터 토사배출구가 뚫려 배토량이 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 지하수위 20 cm에서의 지반함몰 발생시간과 배토량은 Table 5와 같다. 표에서 알 수 있는 것처럼 지하수위 20 cm인 경우에는 세립분 함유량 5~12.5%인 경우에 1차 공동, 2차 공동 및 지반함몰이 발생하였으며 10, 12.5%에서는 외관상 2차 공동의 확인은 불가하였으며 시간 경과에 더불어 배토량이 증가하며 공동의 확장으로 지반함몰이 발생한 것으로 나타났다.

다. 지하수위 30 cm

지하수위에 따른 세립분 함유량 변화에 따른 공동발생 영향을 알아보기 위하여 지하수위 30 cm를 두고 세립분 함유량을 변화주어 실험을 수행하였다. 세립분 함유량 5%에 대한 실험결과는 실험시작 42초 후 1차 공동이 발생하였고, 2차 공동은 시각적으로 관찰할 수 없었으며 실험 시작 2분 15초 후 지반함몰이 발생하였다. 1차 공동 발생까지의 배토량은 4.73 kg이고 지반함몰 발생까지의 배토량은 10.69 kg이었다. 1차 공동이 발생하고 지반함몰까지의 경과 시간동안 배토량이 줄어든 이유는 1차 공동의 발생으로 인하여 공동주변의 토사가 붕괴되면서 일시적으로 토사들이 토사배출구를 막아 배토가

원활하게 이루어지지 않은 현상이 발생하였기 때문이다.

세립분 함유량 7.5%의 실험 결과는 실험 시작 18초 만에 1차 공동이 발생하였고, 실험 시작 50초후에 2차 공동의 발생 없이 순간적으로 지반함몰이 발생하였다. 상대적으로 빠른 시간에 공동이 발생하고 지반함몰이 발생하였다.

세립분 함유량 10%의 결과는 실험 시작 13초후 1차공동이 발생하였고, 1분 9초 후 지반함몰이 발생하였다.

세립분 함유량 12.5%의 조건에서 결과는 실험 시작 7분 50초후 1차 공동이 발생하였고, 11분 30초후 지반함몰이 발생하였다. 세립분 함량이 10%를 초과한 상태에서의 지하수위 30 cm에서의 분당 배토량이 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 공동발생시간도 보다 천천히 발생하는 것으로 나타났다. 이는 점토의 점착력의 발현에 의한 것으로 판단할 수 있다. 상대적으로 지하수위 30 cm 일 때 상부에 공동이 발생하여 빠르게 지반함몰이 발생하는 것을 관찰 할 수 있다.

세립분 함량 15%의 결과는 실험 시작 4분 후 1차 공동이 발생하였으나 이후 22분 동안 더 이상의 공동이 전개 및 확대 되지 않고, 지반함몰도 발생하지 않았다.

세립분 함유량 20%의 결과는 지하수위가 상승하였지만 10 cm, 20 cm의 결과와 마찬가지로 미세한 점토만 배출되고 변화가 없는 것을 관찰 할 수 있었다. 지하수위 30 cm에 대한 세립분 함유량별 시간 누적 배토량 그래프는 Fig. 5와 같다.

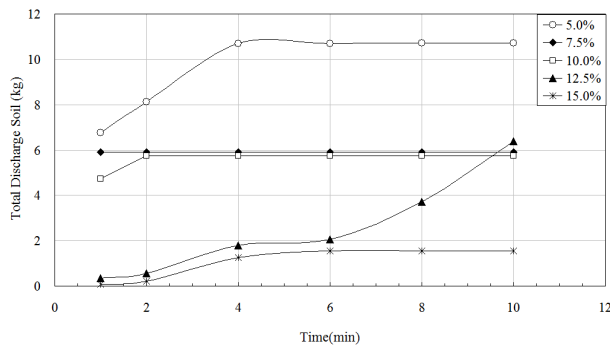


Fig. 5 Time-cumulative discharged soil (ground water level 30 cm)

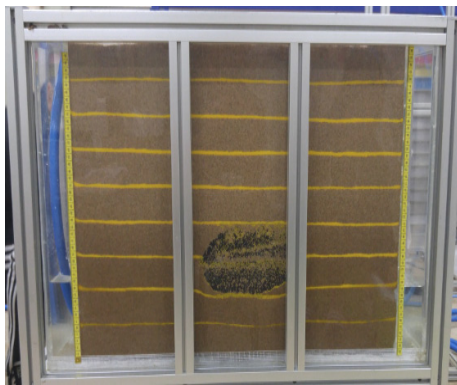
지하수위 30 cm에서는 초기 배출량이 많아 1분단위로 배출토의 무게를 측정하였다. 세립분이 적을수록 초기 배출되는 토사의 양이 많은 경향을 볼 수 있었고 세립분 함유량 5%, 7.5%, 10%에서는 상대적으로 빠른 시간에 지반함몰이 되는 것을 알 수 있었다. 실험을 수행하는 과정에서 토사배출구가 막히는 현상이 빈번하게 발생하였다. 이 때문에 공동과 지반함몰이 발생하는 시간에 따른 상관성을 파악하기는 힘들다. 지하수위 30 cm에서의 지반함몰 발생시간과 배토량은 Table 6과 같다. 표에서 알 수 있는 것처럼 지하수위 30 cm인 경우에는 세립분 함량 5~12.5%인 경우에 1차공동, 2차공동 및 지반함몰이 발생하였으며, 1차공동 발생후 급격하게 공동이 확장되어 지반함몰이 발생되어 외관상 2차공동의 확인은 불가하였으며 시간 경과에 더불어 배토량이 증가하며 공동의 확장으로 지반함몰이 발생한 것으로 나타났다. 지하수위 30 cm인 경우에도 세립분 함유량 15% 이상에서는 지반함몰이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 표준사 표면과 점토사이에 점착력이 발생되어 토사유실이 감소한 것으로 판단된다.

IV. 지반함몰 발생 메커니즘 분석

Fig. 6은 상대밀도 60%로 5 cm마다 공동의 확장을 확인하고자 색모래를 측면에 배치하여 실험을 진행한 것으로 각각의 지하수위 10 cm, 20 cm, 30 cm에 대해서 세립분 함유량 10%일 때의 대표적인 결과를 각각의 지하수위별 공동발생과 확장되는 사진을 나타낸 것으로 지하수위 형성된 면에서 공동이 확장 되어감을 알 수 있다. Fig. 7은 설정된 지하수위 상태에서의 실험진행시 촬영된 동영상 분석을 통해 1차 공동 발생, 2차 공동발생 및 지반함몰의 영상을 개략적으로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 지하수위가 형성된 부분에서 초기 공동이 발생되고 시간경과에 더불어 지하수위면 하부에서의 주변지반의 응력감소로 인해 공동이 확장되어 추가적으로 주변지반의 이완에 따른 2차 공동이 발생되고 확장된 공동이 상부지반의 하중을 견디지 못해 최종적으로 상부지반으로 확장되어 지반함몰이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 지하수위

Table 6 Time of cavity occurrence and weight of discharged soil (GWL:30 cm)

Fine contents (%)	First cavity occurrence (kg)	Secondary cavity occurrence (kg)	Ground subsidence (kg)	Ground subsidence (Time)
5	4.73	N/A	10.692	2min 15sec
7.5	1.77	N/A	5.90	50sec
10	1.026	N/A	5.73	1min 9sec
12.5	3.64	N/A	6.98	11min 30sec
15	1.25	N/A	1.54 (stable)	22min (stable)



GWL:10 cm



GWL:20 cm

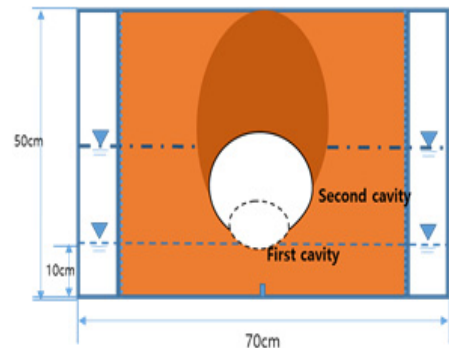


GWL:30 cm

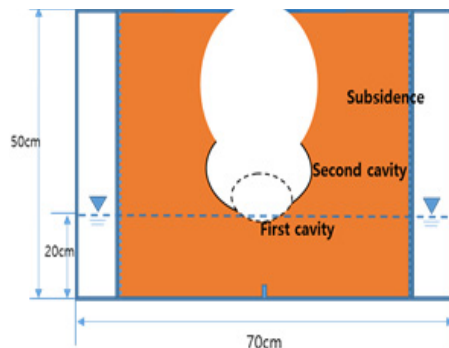
Fig. 6 Appearance on end of test (Fine contents : 10 %)

상승과 더불어 상부지반의 붕괴영역이 확장되는 것으로 나타났다.

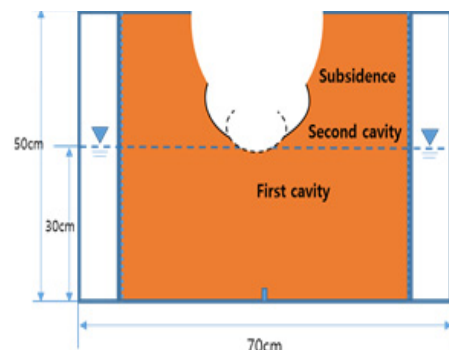
현장에서 예측할 수 있는 일반화된 하수관 균열에 의한 토사유실로 인한 공동발생과 지반함몰은 Fig. 8에 요약한 것과 같이 크게 3단계로 구분할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 지하에 매설된 하수관의 균열부를 통해 지하수위와 함께 토사가 유출이 시작되어 진행되어 지반내부에 1차공동이 형성



GWL:10 cm



GWL:20 cm



GWL:30 cm

Fig. 7 Concept of cavity occurrence according to ground water level (Fine contents : 10 %)

되는 1단계, 형성된 공동 주변의 응력감소로 인한 추가 토사 유실에 의한 공동의 확장 및 주변지반의 이완에 따른 상부 처짐이 발생하는 2단계, 최종적으로 상부지반의 하중을 견디지 못하고 지반이 함몰되는 상부지반 붕괴의 3단계로 정리할 수 있다. 즉 공동발생 1단계인 경우에는 GPR과 같은 전문적인 장비를 이용한 탐색으로 추가적인 공동발생을 예방할 수 있으나 광역적으로 설치된 모든 지역을 조사하기 어려운 실정이므로 노후 하수관이 설치된 지역을 중심으로 현장 기초조사를 통해 공동 발생이 진행된 상부 침하가 발견되는 2단계에

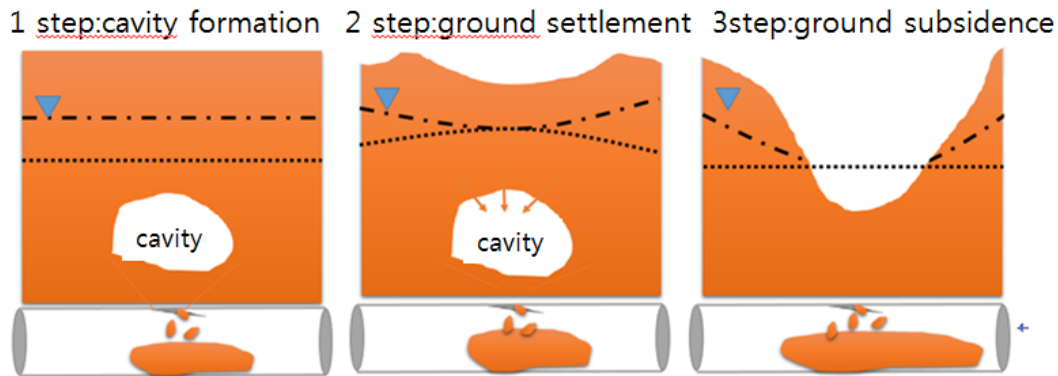


Fig. 8 Concept of cavity occurrence around the sewer

서 대책을 강구할 수 있다면 전반적인 상부 지반붕괴는 대비할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 모형토조를 이용하여 노후관에 발생된 균열부를 통해 토사유출이 발생할 것을 상정하고 세립분 함유량과 주변지반의 지하수위 변화가 공동발생에 미치는 영향에 대한 실내 모형실험을 수행하였다. 또한, 주어진 조건에서 배토되는 토량을 측정하여 공동의 발생과 확장 및 지반함몰에 관한 메커니즘을 비교/분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지하수위가 높아질수록 침투력의 증가에 따라 1차 공동이 빠르게 발생되고 이에 따른 주변지반의 이완으로 2차 공동 및 지반함몰이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.
- (2) 세립분 함유량이 지반함몰에 미치는 영향을 알아보기 위하여 세립분 함유량을 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 20%까지 설정하고 실험을 진행한 결과, 세립분 함유량 15% 이상이 되면 표준사와 점토사이에 겔보기 점착력이 크게 발휘되어 지하수위와 상관없이 상부지반까지 공동이 확장되지는 않았다.
- (3) 세립분 함유량에 따른 배토량을 통해 공동발생 및 확장, 지반함몰 경향을 알아보기 위하여 배토량을 측정된 결과 세립분 함유량이 많아질수록 전체적인 배토량이 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.
- (4) 단위시간당 배토량을 알아보기 위하여 지하수위 10 cm는 5분, 지하수위 20 cm는 3분, 지하수위 30 cm는 1분단위로 배토량을 측정하였을 때, 대부분의 결과가 실험 시작 후 초기에 배토량이 많았고 실험이 진행될수록 단위시간당 배토량이 점차적으로 줄어드는 것으로 나타났다.

- (5) 실내실험 결과를 통해 공동은 지하수위 면을 따라 발생하는 것으로 나타났으며, 지반 함몰은 공동형성, 상부 침하, 상부지반붕괴로 크게 3단계로 발생하는 것을 알 수 있었다.

본 실험에 모사된 지반형태인 표준사와 세립분 함유량뿐만 아니라 지반의 종류나 조건에 의해 토사유출, 공동 확대의 속도, 공동 주위의 이완영역의 특성이 다르게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 현장 적용에 따른 지반특성 (입도분포, 세립분 함유율 등)에 의한 추후 실험을 통해 다양한 환경 인자가 공동 발생에 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석이 요구된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행하였음. [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷 (IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발]

REFERENCES

1. JoongAng-Ilbo, 2015. Songpa, Guro-Sand Ground, Jongno-Old Sewerage, A danger zone of ground subsidence, JoongAng-Ilbo, Seoul :.10 (in Korean).
2. Kim, J., C. Choi, J. Kang, W. Baek, and M. Chung, 2016. Model test for the observation of cavity formation in sandy ground, *The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop, Japanese Geotechnical Society Special Publication*: 64-67.
3. Kim, J., J. Kang, C. Choi, and D. Park, 2017. Corellation analysis of sewer integrity and ground subsidence, *Journal of the Korean*

- Geo-Envrionmental Socieity* 18(6): 31-37 (in Korean).
4. Kuwano, R., T. Horii, K. Yamaguchi, and H. Kohashi, 2010. Formation of subsurface cavity and Loosening due to defected old sewer pipe, *Journal of Geotechnical Engineering, JGS* 5(2): 219-229
 5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 2015. <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z1SH1Vit25sA.k17BY17EYtLY> (in Korean).
 6. Renuka, S. and R. Kuwano, 2011. Formation and evaluation of loosened ground above a cavity by laboratory model test with uniform sand, *Proc. of 13th International Summer Symposium, Uji, Japan*: 211-214.
 7. Sato, M. and R. Kuwano, 2010. Model tests for the evaluation of formation and expansion of a cavity in the ground, *Proc. of 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*: 581-586, Zurich, Switzerland.
 8. Seoul City, 2015. Identification and management of cavity generation mechanism (in Korean).
 9. Sewerage and Wastewater Management Department, City and Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, website, 2009. <http://www.milt.go.jp/crd/sewerage/sesaku/03kaichiku.html> (in Korean).
 10. Toda, J., A. Ohsugi, Y. Muraki, and Y. Kaneko, 2003. Void detection around deteriorated old sewer pipelines, *The 38th Symposium of Japanese Geotechnical Engineering Society*: 1755-1756.