

## 다양한 조건에 따른 지반함몰과 지중공동 확장에 대한 실험적 연구

정성운 · 타렉 카루이 · 정영훈 · 김동수\*

한국과학기술원 건설및환경공학과

### Experimental Study on Ground Subsidence and Underground Cavity Expansion under Various Conditions

SeongYun Jeong, Tarek Karoui, YeongHoon Jeong, and DongSoo Kim\*

Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

Received 10 May 2017; received in revised form 16 June 2017; accepted 19 June 2017

최근 도심지에서 자주 발생하는 지반함몰 문제는 사회적 문제로 대두되고 있으며, 지반함몰에 대한 시민들의 우려는 증가하고 있다. 그에 비해 지반함몰 발생 메커니즘에 대한 이해는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통해 다양한 지하수 조건에서 지하수와 토사가 동시에 유실될 때의 지반함몰 발생 메커니즘을 평가하고자 한다. 실험을 통해서 밝혀진 지반함몰 메커니즘의 주요 인자는 지하수 흐름 방향, 유출부위 주변 수두차, 지중 공동 유지를 위한 지반 내 강도 등이다. 첫째로 지하수와 토사가 동시에 유실될 때 토사의 유실은 지하수 흐름 방향을 따라 발생하며 이는 지중 공동 생성 및 공동 확장 방향을 결정짓는 요소임을 확인했다. 둘째로 지하수 및 토사가 유실되는 위치 주변의 수두차가 높아질수록 지반함몰 발생 속도가 급격히 빨라지는 것이 실험적으로 확인되었다. 마지막으로 지중 공동 확장으로 인해 최종적으로 갑작스런 붕괴를 일으킬 수 있음이 확인되었다.

**주요어:** 지반함몰, 모형실험, 공동확장, 지하수 흐름, 토사유실

Recently frequent occurrence of ground subsidence cases has become social issue, and people's concern on this problem has been growing accordingly. Meanwhile, understanding on the mechanism of ground subsidence formation is not enough. Therefore, this study aims for evaluating formation mechanism of ground subsidence under various groundwater conditions through model test when groundwater and soil are leaked together. Major factors found through model tests are direction of groundwater flow, head difference around the leakage point, and strength of the ground to support the underground cavity. Firstly, direction of groundwater flow has an influence on the direction of cavity expansion and ground collapse. Secondly, it is observed that the speed of ground subsidence formation increases as the head difference increases. Lastly, the expansion of the cavity can eventually lead to a sudden collapse.

**Key words:** Ground subsidence, Model test, Cavity expansion, Groundwater flow, Soil erosion

\*Corresponding author: [dskim@kaist.ac.kr](mailto:dskim@kaist.ac.kr)

© 2017, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

도심지에서는 효율적인 공간 활용을 위해 상하수도관, 지하차도, 고층건물 기초공사 등 지중 굴착공사가 수행된다. 최근 도심지 굴착공사 현장 주변에서 지반함몰 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 2017년 서울시 보도자료에 의하면 2012년부터 2016년까지 매해 평균 771건의 지반함몰 사고가 발생했다(Fig. 1). 이로 인해 시민들이 지반함몰 사고에 대해 가지는 불안감이 증가하고 있으며, 최근 실시된 설문 조사에 의하면 수도권 주민의 95.2%가 지반함몰에 대해 불안감을 가지고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2).

이와 같이 시민들의 불안감을 야기할 수 있는 지반함몰 사고를 발생시키는 원인으로는 상하수도관 결함, 굴착공사 등으로 알려져 있다. 그러나 지반함몰 발생 메커니즘에 대한 이해는 부족한 실정이다. 따라서 지반함몰 발생 메커니즘 평가를 위해 많은 연구가 진행된 상황이다. 특히 지반함몰 현상에 대한 수치해석 모델링의 한계로 인해 지반함몰 메커니즘에 대한 연구는 주로 모형실험을 통해 진행되어왔다. 현재까지 진행되어온 연구로는 Sato et al. (2015(a), 2015(b)), Kuwano et al. (2010), Kweon et al. (2016) 등이 있으며, 이 연구들을 통해 다양한 지하수 조건 및 지반 조건에서의 지반함몰 메커니즘이 연구되어왔다. Sato et al.

(2015(a), 2015(b))은 지중 구조물이 존재하는 경우 지하수 흐름에 따른 토사 유실로 인한 지반함몰 메커니즘을 평가했다. 또한 Kuwano et al. (2010)은 지속적으로 지하수위가 상승하는 경우 지하수 및 토사 유실로 인한 지반함몰 메커니즘을 평가했다. 마지막으로 Kweon et al. (2016)은 앞서 수행된 연구들을 참고하여 지하수 및 토사가 모형토조 하부 트랩되어 유출되는 경우 및 상하수도관 결함으로 인한 지반함몰 메커니즘을 평가했다.

앞서 언급된 연구들은 대형 굴착으로 인해 발생하는 지반함몰 메커니즘을 평가하기 위한 연구들이 아니며, 현재까지 굴착으로 인해 발생하는 지반함몰 메커니즘 평가에 대해 연구가 진행된 바는 없다. 그러나 실제로 2010년부터 2015년까지 서울시에서 발생한 가로 및 세로 2 m 이상의 지반함몰 사고의 원인 중 62.5%는 굴착공사로 인해 발생한 것이다(Chosun-ilbo, 2015). 실제로 2015년 2월 발생한 용산역 부근 고층건물 지하 굴착 공사 현장 부근 지반함몰 및 2016년 11월 발생한 일본 후쿠오카시 하카타역 터널 공사 현장에서 발생한 지반함몰 사고로 인해 지나가는 행인이 갑자기 생긴 구덩이에 빠지거나 도로에 대규모 함몰이 생기는 등 인명피해 혹은 대규모 재산피해가 발생했다. 앞서 언급한 굴착 관련 지반함몰 사고들은 공통적으로 굴착 현장으로 지하수와 함께 토사가 유입되면서 발생했다. 용산역 부근 굴착현장 지반함몰 사고의 경우 굴착공사 현장으로 지하수 및 토사가 함께 유입되어서 지반함몰이 발생한 것으로 알려졌으며(Jang et al., 2016), 하카타역 공사현장 사고의 경우 터널 공사현장으로 지하수와 함께 토사가 유입되면서 지반함몰 사고가 발생한 것으로 알려졌다(Sankei shimbun, 2016). 그러나 굴착공사 도중 지하수와 함께 토사가 유입되는 경우 발생하는 지반함몰 메커니즘에 대한 이해가 부족한 실정이며, 이에 대한 연구 필요성이 제기되어왔다(Choi et al., 2016).

본 연구의 목적은 굴착현장 주위의 다양한 지하수 조건에 따른 지반함몰 메커니즘에 대해 평가하는 것이다. 터널 혹은 기초 굴착을 진행할 때 종종 지하수위 아래에서 굴착이 진행된다. 굴착 현장 내로 지하수 및 토사가 유출될 경우 굴착 현장 주위의 다양한 지하수 조건이 지반함몰 발생 및 확장 메커니즘에 중요한 역할을 할 것으로 추정된다. 따라서 지하수 흐름 및 토사 유실로 인한 지반함몰 메커니즘을 확인하기 위해 지하수 조건 및 배수 방향을 달리한 모형실험을 진행했다. 이를 위해 본 연구에서는 터널 굴착 현장을 모사하기 위한 수직방향 배수 실험, 개착식 굴착 현장을 모사하기 위한 수평방향 배수 실험을 진행했다. 본 연구에서는 입도가 균질한 흙을 이용해 지하수위 아래에서의 지하수 흐름에 따른 지반함몰 메커니즘에 대한 평가를 진행할 예정이다. 또한 지반함몰 메커니즘을 시각적으로 확인하기 용이하도록 2차원 모형토조를 이용해 실험을 진행했다.

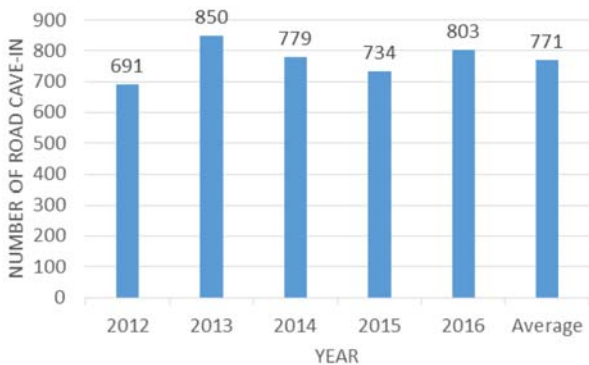


Fig. 1. Ground subsidence case in Seoul (2012~2016) (Seoul, 2017).

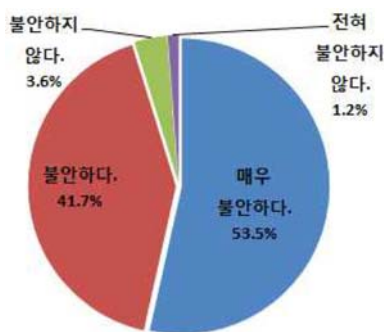


Fig. 2. Survey on the fear on sinkhole of the people living in Seoul Metropolitan area (Gyeonggi Research Institute, 2014).

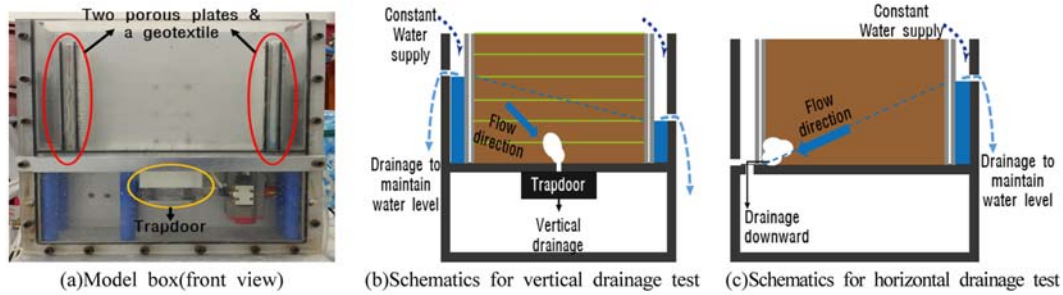


Fig. 3. Model box and experimental setup.

Table 1. Physical properties of silica sand

Index	Value	
Specific gravity ( $G_s$ )	2.63	
Fine contents passing #200 (%)	0.9	
Max dry density ( $kN/m^3$ )	15.5	
Mim dry density ( $kN/m^3$ )	12.3	
Grain size (mm)	$d_{10}$	0.194
	$d_{50}$	0.322
	$d_{60}$	0.344
Soil classification (USCS)	SP	
Uniformity coefficient ( $C_u$ )	1.77	
Plasticity index (PI)	NP	

### 실험 장비, 조건 및 분석방법

#### 실험 토조 및 모형지반 물성치

본 연구에서 모형실험을 위해 사용된 토조의 크기는 가로 580 mm × 폭 140 mm × 높이 680 mm이며 지반함몰 형상을 관찰할 수 있도록 토조 전면을 투명한 아크릴 판으로 제작했다. 토조는 가로 400 mm × 폭 140 mm × 높이 300 mm 크기의 모형지반 조성 공간, 모형지반 양측 수조, 모형지반 하부 트랩도어 및 토사 배출 공간 등으로 구성되어 있다. Fig. 3(a)의 빨간 원으로 표시된 부분에는 모형지반 양측 수조를 통해 모형지반에 지하수가 유입될 때 토사의 유실을 방지하기 위해 두 개의 다공질판을 위치시키고 그 사이를 지오텍스타일로 채웠다. Fig. 3(a)의 노란 원으로 표시된 부분에는 솔레노이드밸브와 공기압으로 작동하는 트랩도어가 위치한다. 모형지반 하부 정중앙에는 폭 5 mm의 틈이 존재하며, 트랩도어 개방 후 이 틈새 아래에 위치한 트랩도어로 지하수와 토사가 유출될 수 있도록 장치가 구성됐다. 토조 양측에는 모형지반 하부부터 100 mm 간격으로 구멍이 존재하며, 적절한 위치의 구멍을 개방하여 모형지반 양측 수조로 물을 공급할 때 지하수위를 일정하게 조절할 수 있도록 설계하였다.

모형지반에 사용된 흙은 실리카 계열의 SP 타입 샌드이며 자세한 물성치는 Table 1에 정리하여 나타내었다. 모형

지반은 낙사법을 이용하여 상대밀도 50%로 조성했다.

#### 수직방향 배수 실험

수직방향 배수 실험에서는 지반조성 시 때 50 mm마다 낙사법으로 지반조성 후 시각적 변위 관찰 목적으로 각 50 mm마다 아크릴판 주위로 초록색가루를 뿌린다. 지반조성 후 Fig. 3(b)와 같이 모형지반 양측에 물을 지속적으로 공급하여 실험간 수위를 유지한다. 수직방향 배수 실험은 수위 및 포화조건을 다르게 하여 총 11개의 조건에 대해 실험을 진행했다. Table 2는 각 실험 조건에 대해 모형지반 좌측 및 우측에서의 모형지반 바다에서부터 측정된 모형지반 지하수위의 높이를 표시했다. 실험 시작 전 모형지반에 물을 공급할 때 실험조건에 따라 지반을 포화시키는 정도를 달리했다. Table 2에 나타난 실험 중 아홉 개의 실험에서는 모형지반에 물 공급을 지속하여 지표면까지 모관흡수력으로 인한 겉보기점착력이 존재하도록 한 뒤에 트랩도어를 개방하여 실험을 진행했다. 나머지 두 개의 실험에서는 모형지반 조성 및 물 공급 후 지하수위가 일정하게 유지될 때 트랩도어를 개방하여 실험을 진행했다. 이 때 모형지반의 지표면은 지반조성 완료 후의 건조 상태 그대로 실험을 진행한다.

#### 수평방향 배수 실험

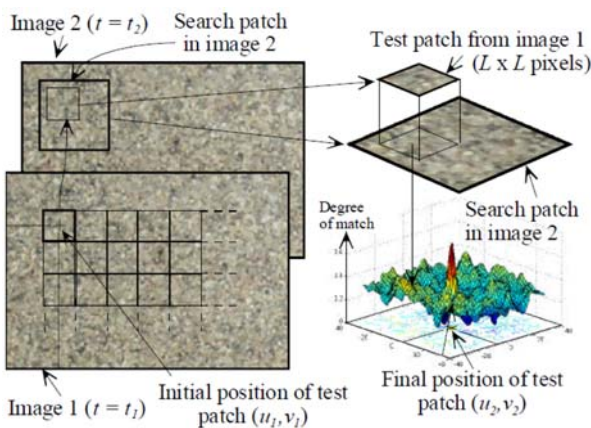
수평방향으로 배수를 진행하는 실험은 Fig. 3(c)와 같이 모형지반 좌측 하부로 배수를 진행하는 실험이다. 이 실험을 위해 모형지반 좌측의 다공질판 두 개 중 한 개를 제거한다. 남은 다공질판은 최하단의 5 mm 정도의 구멍을 제외하고 구멍을 봉인하여 흡과 물이 유출되는 것을 방지한다. 다공질판 최하단 5 mm의 구멍은 청테이프 및 지오텍스타일로 봉인하여 실험 전 지반을 포화시키는 과정에서 물과 흙이 새어나오지 않도록 한다. 토조 우측의 구멍 중 실험 조건에 맞는 적절한 위치의 구멍을 개방한 후 Fig. 3(c)와 같이 모형지반 우측 수조에 물을 지속적으로 공급하여 모형지반 포화과정 간 지하수위를 유지하며 지하수위 윗부분의 흙은 불포화도로 조성한다. 수평방향 배수실험에서의 수위 조건은 총 세 가지이며, 각 조건에서의 모형지반 우측 수조에

**Table 2.** Experimental cases for drainage through the trapdoor

Case	Left side groundwater level (mm)	Right side groundwater level (mm)	Saturation condition
300-300 (PS)	300	300	Partially saturated over water head
300-200 (PS)	300	200	
300-100 (PS)	300	100	
300-0 (PS)	300	0	
200-200 (PS)	200	200	
200-100 (PS)	200	100	
200-0 (PS)	200	0	
100-100 (PS)	100	100	
100-0 (PS)	100	0	
200-200 (NS)	200	200	
100-100 (NS)	100	100	

**Table 3.** Experimental cases for drainage through the bottom left of the wall

Case	Groundwater level (mm)	Saturation condition
300H	300	Partially saturated over water head
200H	200	
100H	100	



**Fig. 4.** Schematic diagram of Particle Image Velocimetry (PIV) analysis (White et al., 2002).

채우는 물의 높이는 Table 3에 나온 바와 같다. 모형지반 포화가 완료된 경우 모형지반 좌측 다공질판 하부 5 mm를 막고 있던 청테이프 및 지오텍스타일을 제거하여 지하수와 토사의 유출시키며 실험을 시작한다.

**분석 방법**

본 연구에서는 흡입자 이미지의 이동을 추적하는 PIV분석을 진행했다(White et al., 2003). PIV분석은 토조 전면에서 촬영한 시간별 이미지를 통해 각 단계별로 흡입자의 이동을 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 정량적으로 추적하는 방법

이며, 각 단계별 변위를 화살표를 통해 시각적으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 트랩도어 개방 시점 및 최종 지반함몰 발생 시점간의 변위를 추적하여 화살표로 도식화한 이미지를 활용했다. PIV분석을 위해 실험시작과 동시에 영상 촬영을 진행한다. 실험 종료 후 촬영한 영상에 대해 지반함몰 진행 속도에 따라 수직방향 배수 실험의 경우 초당 10 프레임, 수평으로 배수시키는 경우 1초~8초당 1프레임의 사진을 추출하여 PIV분석을 진행했다. 본 연구에서 PIV분석을 위해 MATLAB으로 구동되는 GeoPIV프로그램을 사용했다(White et al., 2002).

**수직방향 배수 실험**

수직방향 배수실험의 경우 지하수위 위치, 지하수위 경사, 지표면 포화도 등을 달리 해가며 실험을 진행했다.

**수직방향 배수 실험 결과**

**지하수위의 영향**

지하수위와 지반함몰 메커니즘의 상관관계를 살펴보기 위해 세 가지 지하수위 조건에 대해 실험을 진행했다. Fig. 5(a)와 (d)는 100-100(PS)에 대한 실험 결과이다. Fig. 5(a)에 보이는 바와 같이 초기에 공동은 트랩도어에서 지하수면에 존재하는 토사까지 수직으로 유출 됐으며, 이는 트랩도어 개방 후 트랩도어로부터 지하수위 위에 존재하는 토사가 지하수와 함께 흘러가며 생성된 것이다. 지중 공동 생성 후 지하수가 공동 하부 좌우측에서 유입되며 지하수 흐름을 따라 토사가 트랩도어로 유실되며 공동 바닥에서 좌우측으로 공동이 확장되는 것이 관찰됐다. 이 과정에서 공동이 충분히 확장된 후 공동 상부의 지반이 자중으로 인해 붕괴되며 공동이 더 확장됐다. 100-100(PS)의 경우 트랩도어 하부 토사 배출공간의 한계로 Fig. 5(d)에 나온 형상의 공동을 관찰한 후 실험을 종료했다. Fig. 5(b)와 (e)는 200-200(PS)에



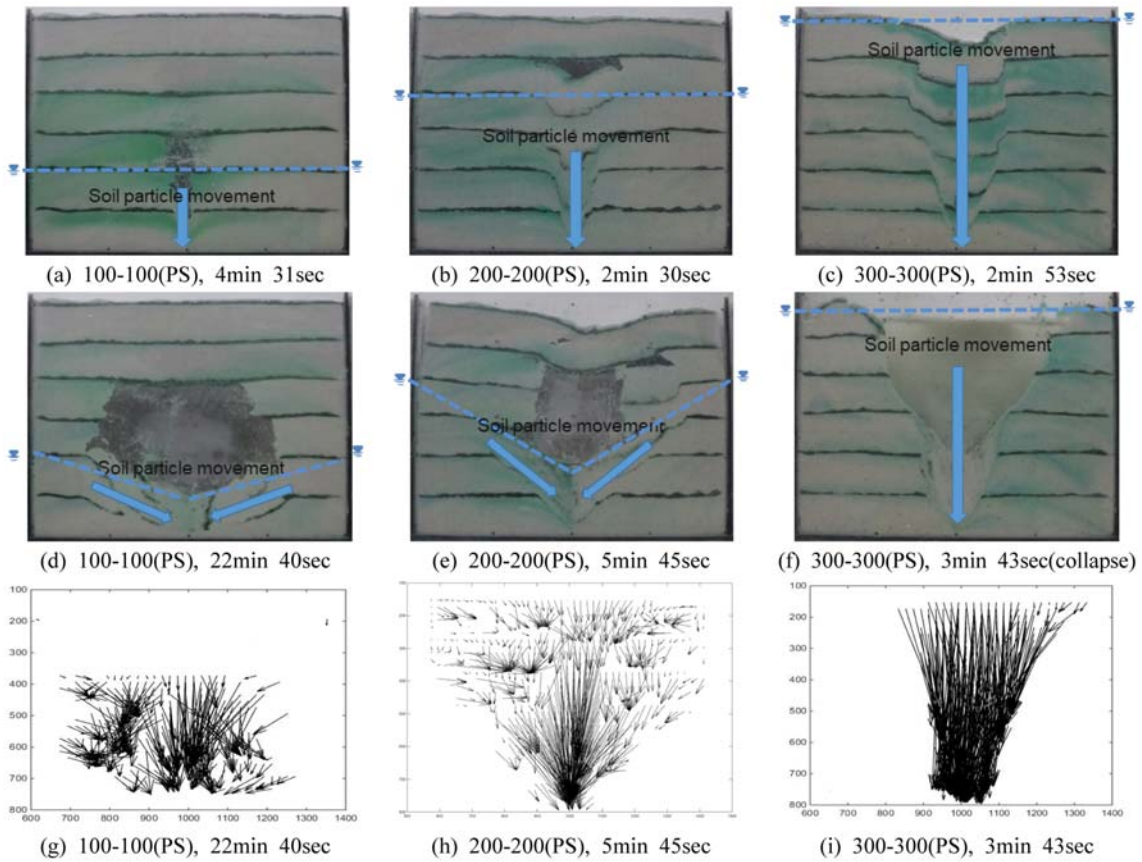


Fig. 5. Effect of groundwater level difference on the development of ground subsidence.

대한 결과이다. 트랩도어 개방 후 100-100(PS)와 마찬가지로 트랩도어로부터 지하수면에 존재하는 토사가 지하수 흐름을 따라 끌려가며 통해 공동이 생성됐다. 이 후 공동 하부에서 양 옆으로 지하수가 유입되며 지하수 흐름을 따라 토사가 유실되며 공동이 확장됨을 관찰했다. 공동이 충분히 확장된 후 공동 상부의 지반이 자중으로 인해 공동 내부로 붕괴되며 지표면에 지반함몰이 발생했다. Fig. 5(c)와 (f)는 지하수위가 지표면에 존재하는 300-300(PS)에 대한 결과이다. 트랩도어 개방 후 지중 공동의 생성이 없이 지표면에서부터 지하수와 토사가 트랩도어로 유실되면서 지반함몰이 발생했다. 즉, 초기 지중 공동 생성 및 지반함몰은 토사가 지하수 흐름을 따라 유실되면서 발생한 것이다.

트랩도어 개방 후 Fig. 5(d)-(f)에 보이는 형상에 도달하는데 소요된 시간은 지하수위 점점 더 지표면으로 가까워질수록 더 짧아짐을 관찰했다. 이는 트랩도어 부근의 지하수면과 트랩도어 사이의 수두차가 클수록 지반함몰이 더 빨리 일어난다는 것을 시사한다.

Fig. 5(g)-(i)는 PIV분석 결과로 트랩도어 개방시간 및 Fig. 5(d)-(f)에 도달한 순간까지의 흡입자의 움직임을 화살표로 표시했다. 100-100(PS)의 경우 Fig. 5(g)에 보이는 바와 같이 공동 내 토사가 트랩도어로 몰려들었음을 알 수 있

다. 200-200(PS)의 경우 Fig. 5(e)에 보이는 바와 같이 공동 내의 토사는 트랩도어로 끌려갔으며, 공동 주변의 지반에는 공동 생성으로 인해 변형이 발생했다. 300-300(PS)의 경우 Fig. 5(i)에 보이는 바와 같이 지표면 상부로부터 모든 토사가 트랩도어로 유실됐다. 이를 토대로 지하수위가 수평인 경우 지하수 흐름에 따른 토사 유출로 인한 공동 생성 및 공동 상부 흙의 붕괴로 인해 지반함몰이 발생함을 알 수 있다.

### 지하수위 경사의 영향

지하수위의 경사에 따른 지반함몰 메커니즘의 차이를 알아보기 위해 지하수위 및 지하수면의 경사를 다르게 해가며 실험을 진행했다.

Fig. 6은 모형지반 좌측 지하수위가 300 mm인 경우에 대한 실험결과이다. 지하수위에 경사가 존재하지 않는 경우 Fig. 6(e)의 PIV분석결과에 보이는 바와 같이 토사가 트랩도어 상부에서 수직방향으로 이동했음을 알 수 있다. 지하수면의 경사가 증가할 경우 Fig. 6(f)-(h)에 보이는 바와 같이 전반적으로 지하수위가 더 높은 쪽으로 토사 유출경로의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 모형지반 좌측 지하수위가 200 mm 및 100 mm

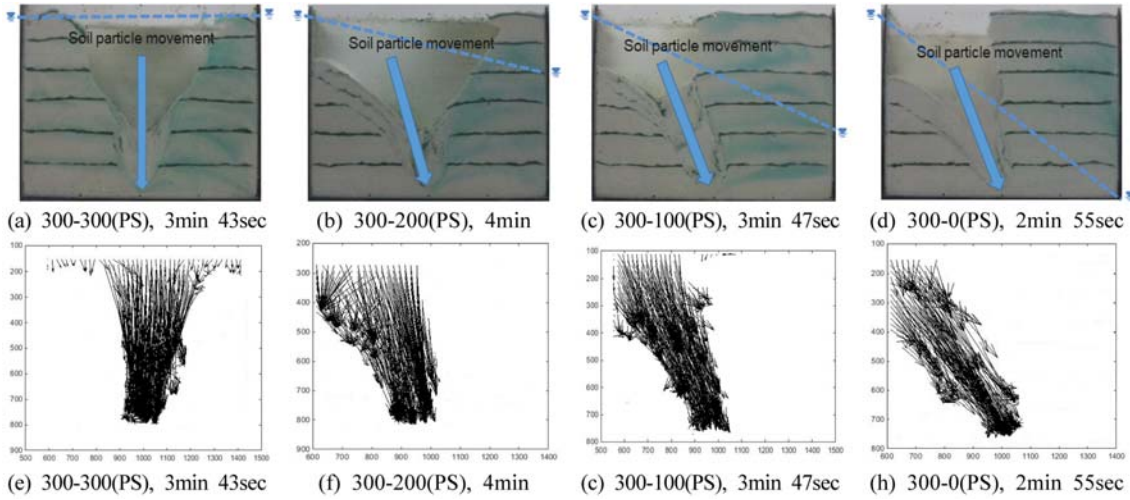


Fig. 6. Effect of groundwater table inclination on the development of ground subsidence.

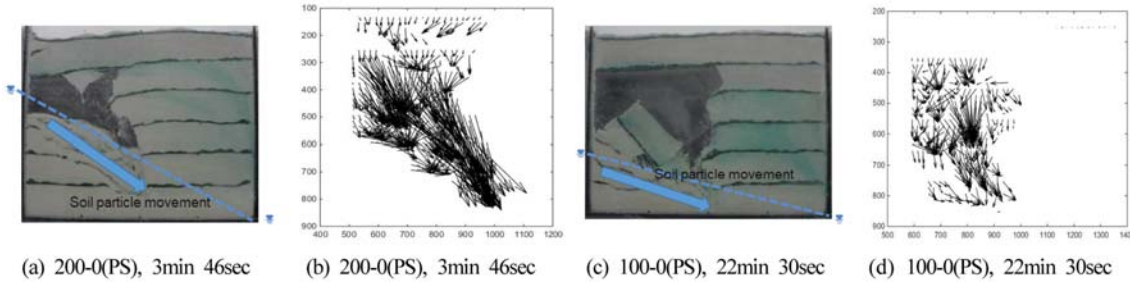


Fig. 7. Effect of groundwater table inclination on the development of ground subsidence.

인 경우이다. 이 경우 지하수위가 지표면 아래에 존재하는 경우와 같이 트랩되어 주위로 공동이 생성된 것을 관찰했다. 이 공동은 Fig. 7(a), (c)에 보이는 바와 같이 지하수위가 더 높은 쪽으로 확장되는 것이 관찰됐다. Fig. 7(b), (d)에 나온 PIV 결과를 살펴보면 공동 내 토사는 지하수 흐름에 따라 트랩되어 유실됐으며, 공동 상부의 지반은 자중으로 인해 하방향으로 침하함을 알 수 있다. 이를 통해 토사 유실과 지하수 흐름 방향이 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있다.

**지중 공동 상부 지반의 영향**

지중 공동 상부 지반 강도의 영향을 확인하기 위해 지하수위가 지표면 아래에 있을 때 지표면이 건조한 조건에서 실험을 진행했다.

지중 공동이 확장되는 과정에서 지표면이 건조한 경우 지반 함률 양상이 달라짐을 관찰했다. 200-200(PS)의 경우 지중 공동 생성 및 확장으로 지반함률이 발생한 반면에 200-200(NS)는 지표면부터 붕괴함으로 지반함률이 발생함을 관찰했다. 지금까지 살펴본 바와 같이 지중 공동은 트랩되어부터 지하수면이 존재하는 부근까지 존재하는 토사가 쓸려가며 발생한다. 그러나 200-200(NS)에서는 공동 생성 후

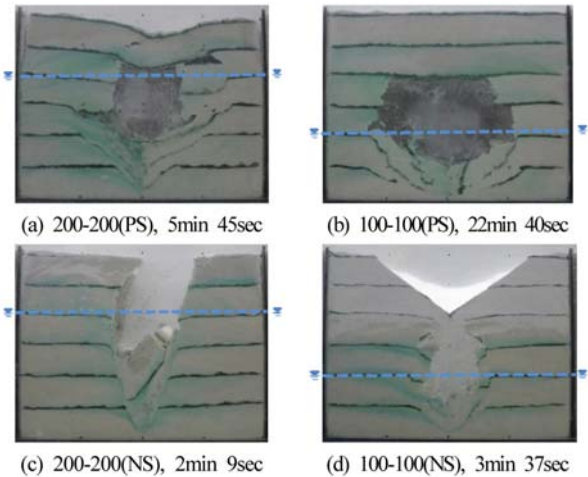


Fig. 8. Effect of overburden strength on the development of ground subsidence.

지표면의 포화도 영향으로 인한 공동 상부의 강도 부족으로 공동 상부가 같이 무너지며 지표면으로부터 지반함률이 발생했다.

100-100(PS)와 100-100(NS)에서도 마찬가지로 지반함률 메커니즘의 차이가 존재함을 관찰했다. 지표면이 불포화상태인 100-100(PS)의 경우 공동 확장 간에 공동 상부 지반

이 겉보기점착력으로 인해 지지력이 존재하여 Fig. 8(b)에 보이는 바와 같이 공동의 붕괴로 인한 함몰이 발생하지 않은 반면에 지표면이 건조한 100-100(NS)의 경우 공동이 생성된 후 공동이 토사가 존재하는 영역까지 확장됐을 때 Fig. 8(d)에 보이는 바와 같이 공동 상부의 건조한 토사가 공동 내부로 순식간에 유입되어 지반함몰이 발생함을 관찰할 수 있었다.

200-200(NS)와 100-100(NS)에서 살펴본 바와 같이 지중 공동 생성 후 공동 확장 간에 공동 상부의 강도가 충분하지 않으면 공동의 함몰로 지반함몰이 발생할 수 있음을 살펴보았다.

**결과 분석**

위 실험 결과를 토대로 지중 공동 생성 및 확장에 있어서 중요한 몇 가지 요소를 발견했다.

첫째로 지하수 흐름을 따라 발생하는 토사의 유실이다. 초기 지중 공동의 규모는 지하수위가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 초기에 지중 공동은 트랩도어 개방 후 트랩도어로부터 지하수면까지 존재하는 토사가 지하수 유출과 함께 쓸려가면서 발생했다. 이 후 공동 하부에서 유입되는 지하수와 함께 토사가 유실되며 공동이 확장되었다. 이를 통해 공동 생성 및 확장은 지하수 흐름을 따라 토사가 유실을 통해 발생하는 것을 확인했다.

둘째로 트랩도어 주변 지하수위와 지반함몰 진행 속도의 상관관계이다. 지하수면의 경사와 관계없이 모형지반 좌측 지하수위가 300 mm인 경우 4분 내로, 모형지반 좌측 지하수위가 200 mm인 경우 4~6분 내로 지반함몰이 발생했다.

모형지반 좌측 지하수위가 100 mm인 경우 실험 시작 후 22분이 지난 후에도 지반이 붕괴되지 않고 Fig. 5(d)와 Fig. 7(c)에 보이는 바와 같이 지반함몰이 발생하지 않고 지중 공동이 존재했다. 이는 트랩도어와 주변 지하수면과의 수두차가 클수록 지반함몰 진행 속도가 더 빨라지는 경향성이 있음을 보여준다.

셋째로 지중 공동 생성 후 공동 확장 과정에서 공동 상부 지반의 붕괴로 인해 지반 함몰이 발생했다. 이 과정에서 공동 상부의 강도의 차이에 따라 공동 확장 후 지반함몰 발생에 차이가 발생했다. 이는 공동이 확장될 때 공동 상부의 강도가 더 이상 공동 상부를 지탱하지 못하는 경우 지반함몰이 발생함을 보여준다.

Fig. 9는 실험 결과를 바탕으로 지반함몰 발생 과정을 순서대로 요약한 그림이다. 초기에 지하수 흐름을 따라 토사가 유실되면서 공동이 생긴다(Fig. 9(a)). 이 후 공동 바닥에서 지하수 흐름 방향을 따라서 토사가 유실되며 공동이 지하수가 유입되는 방향으로 확장된다(Fig. 9(b)). 공동의 지지력이 공동 상부를 지지하지 못할 정도로 충분히 확장된 경우 공동 상부가 무너지면서 추가적으로 공동이 확장된다(Fig. 9(c)). 이 후 앞서 설명한 과정을 반복하며 최종적으로 공동이 무너짐을 알 수 있다.

**수평방향 배수 실험**

수평방향 배수실험의 경우 모형지반 우측 지하수위를 일정하게 유지하는 방식으로 세 개의 서로 다른 초기 지하수위에 대해 실험을 진행했다.

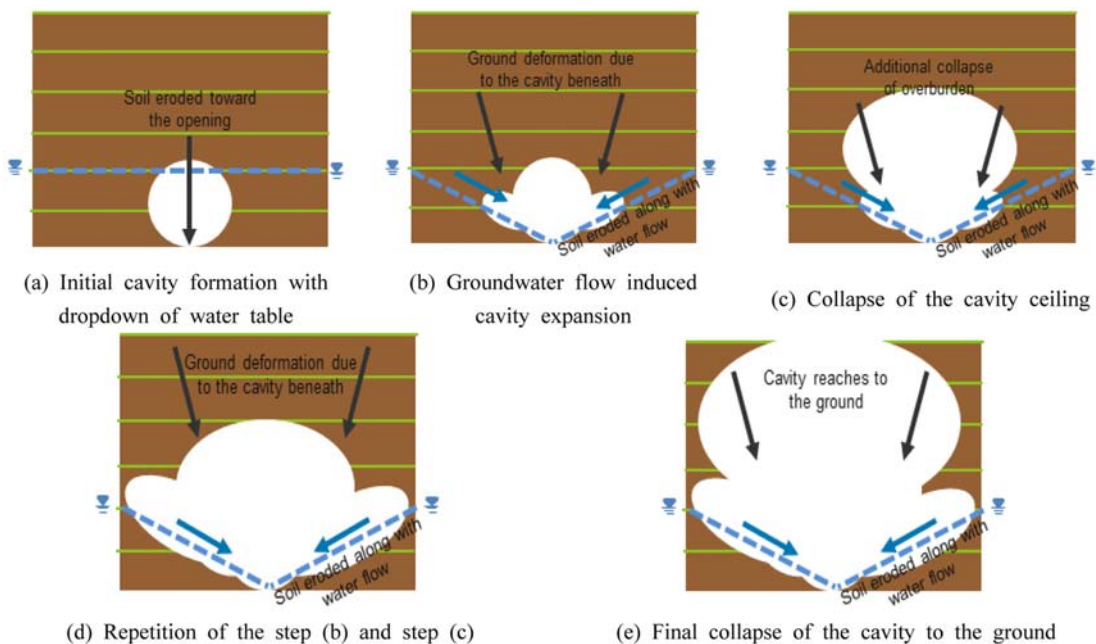


Fig. 9. Summary of ground subsidence mechanism due to vertical groundwater flow.



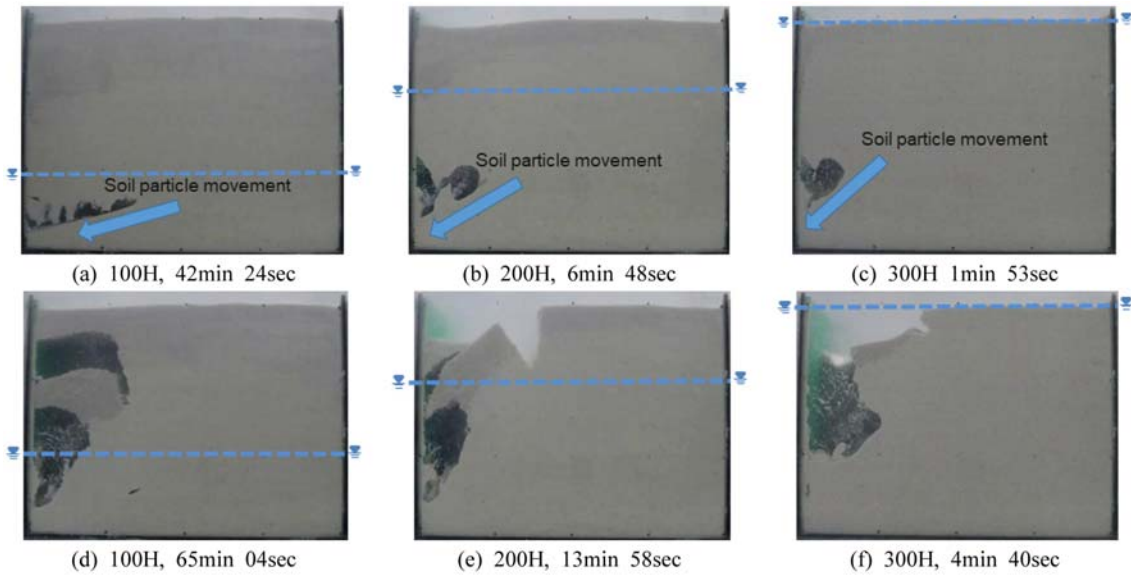


Fig. 10. Effect of initial groundwater level on the development of ground subsidence.

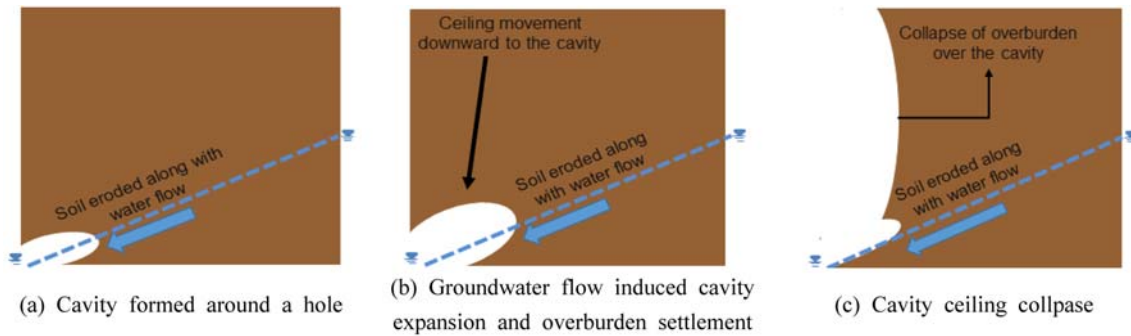


Fig. 11. Summary of ground subsidence mechanism due to horizontal groundwater flow.

**실험 결과**

첫째로 모형지반 내 초기 지하수위가 증가함에 따라 지반 함몰 발생속도가 빨라짐을 관찰했다. 100 H의 경우 Fig. 10(d)에 보이는 바와 같이 실험 시작 후 약 65분이 경과한 후에도 지표면이 완전히 함몰되지 않은 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 200 H의 경우 13분 58초 후 Fig. 10(e)에 보이는 바와 같이 지반함몰이 발생했으며, 300 H의 경우 5분이 안 되어 지반함몰이 발생했다. 이는 수직방향 배수 실험에서와 같이 초기 지하수위가 높을수록, 즉 지하수 유출부위와 지하수면간의 수두차가 클수록 지반함몰이 더 빨리 발생함을 알 수 있다.

지하수 유출 부위에서 공동이 생성된 후 공동 바닥의 경사는 Fig. 10(a)-(c)에 보이는 바와 같이 모형지반 우측 지하수위가 높아질수록 더 가파르게 변했다. 지하수는 공동 바닥 표면을 따라 흐르고 있음을 관찰했으며, 지하수 흐름과 함께 토사가 쓸려가며 공동이 확장되었다. 이를 통해 지하수 흐름 방향을 따라 토사가 유실되는 것을 알 수 있다.

공동 확장 후 공동 상부가 붕괴하기 직전 지표면에 인장 균열이 발생했다. 이는 지중 공동 확장에 따라 공동 상부 지반의 무게를 견디지 못하고 공동이 함몰되어 지반함몰이 발생함을 보여준다.

**결과 분석**

수평방향 투수 실험 결과 지하수 흐름 방향, 수두차, 공동 상부의 지반 강도 등이 지중 공동 생성 및 확장에 따른 지반함몰 메커니즘에 중요 요소로 확인되었다. 각 요소가 지반함몰 메커니즘에 미친 영향은 다음과 같다. 먼저 지하수 흐름 방향을 따라 공동 확장 방향이 달라졌다. 이를 통해 지하수 흐름 방향이 공동 확장 방향에 영향을 미침이 확인되었다. 또한 지하수 유출부위 수두차가 커질수록 지반함몰 발생 속도가 급격하게 빨라짐을 알 수 있다. 즉, 지하수 유출이 발생할 경우 주변 지하수위가 낮은 경우 지표면에서 아무 징후가 발생하지 않은 채로 천천히 공동이 확장되다가 지반함몰이 발생할 수 있다는 점을 시사한다. 마지막으로 지



중 공동이 충분히 확장된 경우 공동 상부 지반이 붕괴되면서 지반함몰이 발생했으며, 이를 통해 지중 공동 상부 강도가 지반함몰 발생에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

수평방향 투수로 인한 지반함몰 발생 과정에 대해서는 Fig. 11에 개념도로 요약하였다. Fig. 11에 나타난 순서는 수직방향 투수로 인한 지반함몰 발생과정과 유사한 것을 확인할 수 있다. 처음에 지하수 흐름에 따라 토사가 쓸려가며 지중 공동이 발생한 후(Fig. 11(a)) 공동 바닥에서 지하수 흐름방향을 따라 공동이 확장되며(Fig. 11(b)) 공동 상부의 붕괴로 지반함몰이 발생했다(Fig. 11(c)).

### 결론 및 토의

본 연구를 토대로 지중 굴착 현장으로 지하수와 토사가 유실됨으로 인한 지반함몰 메커니즘에서 중요한 요소 세 가지 및 각 요소가 지반함몰 발생 메커니즘에 미치는 영향을 확인했다.

(1) 지반함몰 발생 및 공동 확장 메커니즘에 영향을 미치는 세 가지는 지하수 흐름에 따른 토사 유실, 지하수 유출 부위 부근 동수경사, 공동 생성 후 공동 상부 지반 강도의 영향이다. 이 요소들은 각각 공동 확장 방향, 공동 확장 속도, 공동 상부 붕괴 등에 영향을 미쳤다.

(2) 지하수위 경사에 따라 지중 공동 확장 방향이 달라짐을 관찰했다. 지중 공동 생성 발생 가능성이 있는 위치에서 지중 공동 확장 방향은 주변 지하수위 혹은 지하수 흐름 방향을 통해 알 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 공동 발생 후 지표면에 현저한 침하가 발생하지 않았다. 이는 굴착공사 도중 지중 공동이 발생한 경우 공동 규모가 확장되기 전 까지 지표면에 아무 징후가 감지되지 않는다는 점을 시사한다.

본 연구에서는 균질한 사질토를 이용해 지반함몰 메커니즘을 평가했다. 그러나 실제 지반의 입도 분포는 다양하며, 실제 사례 및 실험 결과에 의하면 다양한 입도분포를 가진 지반에서 세립분의 유출이 지반함몰 메커니즘에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려졌다(Kuwano et al., 2010, Jang et al., 2016). 또한 모래지반의 경우 국내에서는 대부분 불포화대를 형성하므로 실제 현장을 모사하는데에는 제한적인 상황이다. 따라서 실제 현장을 모사하기 위해 다양한 입도 분포를 가진 지반에 대한 지반함몰 메커니즘 평가가 이뤄져야 할 것으로 전망된다.

Tharp (1999)는 지하수 흐름 조건, 수압과 토압 조건 등에 따라 수직으로 지하수 및 토사가 유실됨에 따른 지반함몰 위험성에 대한 이론을 제시했다. 또한 Sekiguchi et al. (2003)은 해안 방파제 후면 지반의 지반함몰 발생과 지표면의 모관흡수력간의 상관관계에 대해 연구한 바가 있다. 추후에 이와 같은 이론 및 실험 결과 등을 토대로 지반 함몰

발생과 간극수압, 토압, 모관흡수력 등에 대한 정량적 측정 값 및 관련 이론과의 비교를 통한지반 함몰 메커니즘의 정량적 평가가 필요할 것으로 판단된다. 정량적으로 평가된 지반함몰 메커니즘을 바탕으로 실제 굴착 현장에서 다양한 계측 결과를 이용하여 굴착 현장 주위 지반함몰 발생 및 위험성을 더 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 16SCIP-B108153-02)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### References

Choi, S. K., Back, S. H., An, J. B., and Kwon, T. H., 2016, Geotechnical investigation on causes and mitigation of ground subsidence during underground structure construction, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 18(2), 143-154. (in Korean with English abstract).

Chosun-ilbo, 2015, Dangerous underground, scared when touching the wall wetted by groundwater... Excavation sites are main causes for large sinkhole, Retrieved from [http://news.chosun.com/site/data/html\\_dir/2015/04/17/201504170161.html](http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2015/04/17/201504170161.html)

Jo, Y. S., Cho, S. H., and Jang, Y. S., 2016, Field investigation and analysis of ground sinking development in a metropolitan city, Seoul, Korea, *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1353.

Kuwano, R., Sato, M., and Sera, R., 2010, Study on the detection of underground cavity and ground loosening for the prevention of ground cave-in accident, *Japanese Geotechnical Journal*, 5(2), 219-229 (in Japanese with English abstract).

Kweon, G. C., Kim, S. L., and Hong, S. W., 2016, Basic study on mechanism of cave-in in road through laboratory model tests, *International journal of highway engineering*, 18(5), 11-19 (in Korean with English abstract).

Lee, K. Y. and Kang, S. J., 2014, Sinkhole, threatening the urban area, its cause and countermeasure. Gyeonggi Research Institute.

Sankei shimbun, 2016, Ground subsidence, possible everywhere, consecutive ground subsidence accidents due to aging infrastructure, Retrieved from <http://www.sankei.com/affairs/news/161109/afr1611090003-n1.html>

Sato, M. and Kuwano, R., 2015a, Influence of buried structures on underground seepage and generation of cavities, *Japanese Geotechnical Journal*, 10(1), 113-125 (in Japanese with English abstract).

- Sato, M. and Kuwano, R., 2015b, Influence of location of sub-surface structures on development of underground cavities induced by internal erosion. *Soils and Foundations*, 55(4), 829-840.
- Sekiguchi, H., Li, F. Y., Miyamoto, J., and Minakuchi, M., 2003, Experimental studies of wash out and cavity formation in granular backfill behind a seawall, In: Sekiguchi, H., Li, F. Y., Miyamoto, J., Minakuchi, M., 38th conference on Geotechnical researches, The Japanese Foundation Engineering, Akita, 1191-1192.
- Seoul, 2017, Seoul metropolitan government to invest 130.6 billion won into the maintenance of sewer pipe to prevent road cave-in, retrieved from <http://opengov.seoul.go.kr/press/11189819>
- Tharp, T. M., 1999, Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering geology*, 52(1), 23-33.
- White, D. J. and Take, W. A., 2002, GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing.
- White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D., 2003, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, 53(7), 619-632.

**김동수**

한국과학기술원 건설및환경공학과  
대전광역시 유성구 대학로291 W16 지오센트리퓨지센터  
204호(34141)  
E-mail: dskim@kaist.ac.kr

**정성윤**

한국과학기술원 건설및환경공학과  
대전광역시 유성구 대학로291 W16 지오센트리퓨지센터  
308호(34141)  
E-mail: dhrdunwn1@kaist.ac.kr

**타렉 카루이**

한국과학기술원 건설및환경공학과  
대전광역시 유성구 대학로291 W16 지오센트리퓨지센터  
106호(34141)  
E-mail: thetarek@kaist.ac.kr

**정영훈**

한국과학기술원 건설및환경공학과  
대전광역시 유성구 대학로291 W16 지오센트리퓨지센터  
309호(34141)  
E-mail: yeonghoon@kaist.ac.kr