Int. J. Highw. Eng. Vol. 18 No. 5 : 11-19 OCTOBER 2016
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2016.18.5.011

실내모형시험을 통한 도로함몰 매커니즘에 대한 기초적 연구

Basic Study on Mechanism of Cave-in in Road through Laboratory Model Tests

권 기 철 Kweon Gichul | 정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : gckweon@deu.ac.kr)
김 상 록 Kim Sanglok | 정회원 · 동의대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : tkdfhr8911@naver.com)
홍 석 우 Hong Seokwoo | 정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 (E-mail : hongswoo@deu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study identifies the causes and the mechanism of the occurrence of underground cavities.

METHODS : A case study on cave-in and a series of model tests with a small soil chamber were conducted.

RESULTS : A hypothesis about the mechanism of the cave-in in road was established, and the basic influencing factors on underground cavity expansion were identified.

CONCLUSIONS : It was found that the characteristics of shear strength of soil and direction of water flow had a larger influence on cavity formation and expansion than the characteristics of internal erosion. In addition, large cavities suddenly expanded when cavities were caused owing to breakage of buried sewer pipe.

Keywords
cave-in, cavity, soil chamber test, sewer pipe, internal erosion

Corresponding Author : Kweon Gichul, Professor
Department of Civil Engineering, Dongeui University, 176 Eomgwangro, Busanjin-gu, Busan, 47340, Korea
Tel : +82.51.890.1617 Fax : +82.51.890.2633
E-mail : gckweon@deu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received May. 12. 2016 Revised Aug. 30. 2016 Accepted Sep. 06. 2016

1. 서론

최근 들어 도심지를 중심으로 도로함몰이 증가하고 있다(서울시, 2015; Kuwano 등, 2006; Kuwano 등, 2009). 도로함몰은 도로 하부 지반에 발생한 동공이 함몰로 진행된 것인데, 동공의 발생·확장은 특별한 징조 없이 진행되다가 갑작스러운 붕괴에 의해 도로 표면에 큰 구덩이를 형성한다. 도로 하부의 동공은 도시 한복판의 함정과 같이 시민에게 불안감을 야기하고 있는 것이다. 도로함몰은 때로는 인명피해를 수반하는 심각한 사고로 이어지기도 하고 교통흐름 방해를 초래하는 등 시민안전의 위협 요인이 되고 있다.

불행하게도 도로함몰의 정확한 원인 및 매커니즘이 규명되지 못하고 있어, 도로 하부의 동공을 붕괴(함몰) 이전단계에서 다양한 탐사방법에 의해 발견해냄으로써 실질적인 피해를 최소화하는 노력이 우선적으로 진행되고 있다(서울시, 2015; Kuwano 등, 2012). 도로 하부의 동공을 사전에 효과적으로 탐사하는 것은 도로함몰 피해를 실질적으로 저감할 수 있으나 도로함몰의 직접적인 원인인 동공 발생을 억제하는 근원적인 대책이 되지는 못한다. 도로함몰을 근원적으로 차단하기 위해서는 도로하부 동공 발생의 원인 및 매커니즘을 규명하는 것이 무엇보다 중요하다.

도로함몰 매커니즘 규명이 어려운 가장 큰 이유는 도로함몰에 대한 체계적인 조사가 어렵기 때문이다. 도로함몰이 발생하면 대부분의 경우 즉시적으로 복구가 이루어지기 때문에 현장조사를 통한 엄밀한 원인 분석에 한계점이 있다(Kuwano 등, 2012; Sato 등, 2013; Hewage 등, 2012).

도로함몰의 직접적인 원인인 동공 발생·확장 매커니즘에 대한 국내의 연구는 매우 초보적인 단계에 머물고 있다. 동공 발생의 원인에 대해서는 여러 가지 가설적인 추론이 시도되고 있으나 영향요소에 대한 정량적 분석은 이루어지지 못하고 있다. 도로함몰과 다소 유사한 분야인 제방 및 흙댐에서의 내부침식(internal erosion) 또는 교량세굴 및 하천 하상의 유사이동과 같은 지표면 침식에 대한 연구는 진행되어 오고 있으나 도로함몰과는 경계조건과 매커니즘이 상이하여 직접적인 응용이 어렵다. 특히 도로에서 내부침식에 의한 동공 발생은 최근에서야 연구의 필요성이 제기되고 있는 단계다.

국외의 경우에는 일본에서 실내 모형 모사시험 및 삼축압축시험을 이용하여 도로함몰 매커니즘에 대한 연구가 진행된 바 있다(Sato 등, 2011; Sato 등, 2012). 그러나 이러한 연구 또한 동공 발생 요인에 대한 정성적 평가 및 요소기술 개발이 시도되는 단계에 머물고 있다(Sato 등, 2015).

본 연구에서는 도로함몰의 기초적인 매커니즘 규명을 위해 사례분석과 2차원 모형토조 시험을 수행하였다. 사례분석을 통해 도로함몰의 공학적 특성과 매커니즘에 대한 가설을 수립하고 도로하부의 동공 발생·확장과 관련된 기본적인 영향요소를 도출하였다. 모형토조 시험은 다양한 조건에서의 도로함몰의 정성적인 특성 규명에 초점을 두고 진행하였고, 시험결과로부터 도로함몰의 기본적인 매커니즘을 제시하였다.

2. 사례분석을 통한 도로함몰의 기본적인 원인 및 매커니즘 추론

우리나라에서 도로함몰이 사회적 문제로 부각된 초기에는 침하(settlement), 함몰(sinking), 싱크홀(sinkhole)이라는 용어를 혼용하여 사용하였다(서울시, 2014; 서울시, 2015). 싱크홀이란 주로 석회암층 또는 화산재층 지반에서 지반이 녹거나 침식되어 자연적으로 붕괴되는 현상(서울시, 2015)으로 인위적인 원인을 포함하는 도로에서의 함몰과는 구별되어야 한다. 침하는 하향 방향의 변위를 광의적으로 표현한 것이며, 침하가 국부적으로 집중되어 움푹 팬 형태로 나타나는 것을 함몰이라 한다. 도로에서는 주로 인위적 요인에 의해 하부에 동공이 발생하고, 발생된 동공이 도로표면에서 붕괴되어 함몰로 나타나는 것을 도로함몰이라 한다.

최근 이슈가 되고 있는 도로함몰이 주로 도심지 도로에서 발생하는 이유는 도심지 도로의 경우 하부에 상하수도관, 통신구, 지하철 등의 다양한 공익시설 및 지하구조물을 수용하기 때문이다. 이러한 도로하부의 난개발과 부적절한 시공, 상하수도관 등의 노후로 인한 시설물 손상, 유지관리 소홀이 그 원인으로 추정되고 있다. 포괄적으로는 도로하부를 비롯한 지하공간 활용에 대한 체계적인 기준이 미흡하고 통합관리 시스템의 부재가 기본적인 원인으로 지적되고 있기도 하다(한국환경정책·평가연구원, 2014).

우리나라뿐 아니라 외국의 사례에서도 도로함몰에 대해 체계적인 원인조사가 이루어진 자료는 제한적이다. 도로함몰이 발생하면 대부분의 경우 즉시적으로 복구가 이루어지기 때문에 현장조사를 통한 엄밀한 원인 분석에 한계점이 있기 때문이다(Kuwano 등, 2012). 대부분의 도로함몰 사례조사는 함몰의 크기 및 발생의 직접적인 추정 원인 정도만 포함하고 있고 지반조건, 지하수 흐름 특성, 토사유출의 경로 등에 대한 자료는 매우 제한적이다.

서울시의 사례를 살펴보면 도로함몰의 직접적인 원인으로 추정되는 요인은 크게 하수관거 손상(81%), 상수관거 손상(2%), 굴착관련(17%)으로 대별된다. 전체 도로함몰에서는 하수관거 손상이 81%로 가장 큰 부분을 차지하나, 함몰의 크기가 2m×2m 이상인 경우에 대해서는 굴착관련 문제가 57%로 가장 큰 비중을 차지하고, 상수관거 손상(29%), 하수관거 손상(14%)순으로 조사되었다(서울시, 2015). 도로함몰 지역의 토사 유출경로는 ①하수관 유입, ②매설관 하부공간 유입, ③매립재 공간 유입, ④구조물 배면 유입으로 분석하고 있다(서울시, 2015). 시기적으로는 강우시 및 강우 후에 집중되고 계절적으로는 여름에 집중적으로 발생(약 40.1%)하고 있다. 이는 도로함몰이 도로하부의 물의 흐름과 밀접한 관련이 있음을 나타내는 것이다.

하수관 유입 형태는 물이 관 접속부의 빈틈으로 반복 유출·입되면서 관 내부로 토사 유출되는 것으로, 하수관 자체의 손상뿐 아니라 하수관과 맨홀 또는 관거 연결부 등에서 불완전한 결합을 포함한다. 매설관 하부공간 유입은 매립된 목재, 콘크리트 덩어리, H 파일 등의 사

이 공간으로 토사 유출이 발생하는 것으로, 특히 모듬으로 매설된 주름형 전력관의 하부에 빈 공간이 많은 것으로 보고되고 있다. 매립재 공간 유입은 하부에 매립된 목재, 콘크리트 덩어리, H 파일 등의 사이 공간으로 토사 유출되는 것으로, 지하철 개착구간, 맨홀, 박스구조물 등의 되메우기와 하수박스 기초부설 등에서 주로 발생한다. 구조물 배면 유입은 구조물 또는 공사장 등의 배면으로 지하수의 유입·유출과 함께 토사 유출이 발생하는 것이다(서울시, 2015).

일본의 사례에서는, 도로 하부의 동공 발생 원인으로 구조물 주변의 토사유출(관거의 파손 및 접합부위 불량 등), 다짐 불량에 의한 구조물 주변 지반의 침하, 대형 구조물 설치에 의한 지하수 흐름 변화, 강우 등에 의한 지하수위 변동, 지진, 인접한 호안으로의 유출 등을 원인으로 추정하고 있다(Kuwano 등, 2012; Hewage 등, 2012). 기본적인 추정 원인 분석에 있어서는 국내의 분석과 유사하다. 다만 지역적인 특수성으로 지진의 영향을 도로함몰의 한 원인으로 추정하고 있다.

도로함몰의 주요 원인으로 추정되는 하수관거 손상과 관련해서는 보다 세부적인 분석이 수행된 바 있다(Hewage 등, 2012). 하수관의 손상에 의한 도로함몰은 하수관 설치 후 30년 경과 후 급격하게 증가하는 형태로 나타나고 있으며, 하수관의 직접적인 손상이 설치 후 25년 시점에서 급격하게 진행되는 점을 고려하면 하수관 손상 후 약 5년 경과 시점에서 도로함몰로 이어지는 것으로 보고하고 있다. 시기적으로는 강우 시 및 강우 후에 집중되고 있고 계절적으로는 여름에 집중적으로 발생하고 있다. 도로함몰이 발생하는 하수관거의 재질은 관거의 파손이 쉽게 발생하는 도관이 가장 많고 다음으로 콘크리트 관이 많은 것으로 보고되고 있다(Hewage 등, 2012).

구조물 하부에 동공의 발생·확장이 침식에 의해 지반함몰로 이어지는 대표적인 현상으로 제방 또는 흙댐에서의 파이핑(piping) 현상이 있다(Tony 등, 2010; Lin 등, 2014). 파이핑 현상은 지속적인 물의 침투가 발생하는 상황에서 제체 비탈면으로 토사유출이 반복적으로 발생하여 최종적으로는 제체 내부에 동공이 확장되어 함몰에 이르는 것이다(Brown 등, 2008; Lin 등, 2014; Benelli 등, 2007). 도로함몰의 경우 기본적으로 이러한 파이핑 현상과는 차이가 있으나 일부 유사점이 있어서 도로함몰 매커니즘 규명에 활용 가능성이 있다.

제방에서 함몰과 도로함몰의 원초적인 유사점은 하부에 어떠한 방법으로든 동공이 발생하여 함몰로 이어진다는 것이다. 기본적인 차이점은 제방에서는 내부침식(internal erosion)을 포함한 수평방향 침투에 의한 파이핑 현상이 주요 원인이지만 도로함몰에서는 내부침식뿐 아니라 매우 다양한 요인에 의해 동공이 발생하고 동공의 확장이 수평방향 뿐 아니라 수직방향을 포함한 다양한 경로 특성을 갖는다는 것이다.

도로함몰 사례로부터, 도로하부의 동공 발생과 관련된 기본적인 영향요소는 ①최종적인 토사 유출 지점의 특성, ②유출 토사 이동경로, ③도로하부 침투수 발생 요인, ④유실된 토사의 특성으로 구분된다. 각각의 영향요소별 세부적인 유형을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Effects on Cavity Expansion of Cave-in in Road

Effects	
Out flow	• Sewer pipe • Initial cavities • Excavation • Loosen soil • Slope face • Unknown
Path	• Horizontal soil pipe • Vertical • Seepage flow line • Buried structure boundary • Into the loosen layer • Suffusion
Seepage	• Pressure water • Sewer pipe leakage • Well pumping • Variation of water table • Rainfall
Soil	• Cohesion soil • Cohesionless soil • Dispersive soil

도로함몰 매커니즘은 크게 두 가지 부분으로 구성된다. 첫째는 도로함몰의 직접적인 원인인 하부 동공의 발생·확장에 대한 것이고, 두 번째는 일정 크기의 동공이 지표면의 함몰로 이어지는 붕괴의 위험도에 대한 것이다. 일본에서는 도로하부에 동공이 도로 표면의 급격한 붕괴로 이어지는 위험도에 대하여 동공의 폭 및 동공의 심도를 중심으로 위험도를 A, B, C 등급으로 구분하는 위험도 모형을 Fig. 1과 같이 제시하고 있다(Hewage 등, 2012).

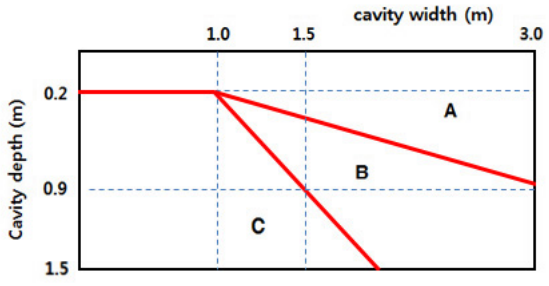

Fig. 1 Cavity Collapse Risk Model (Japan, Hewage et. al., 2012)

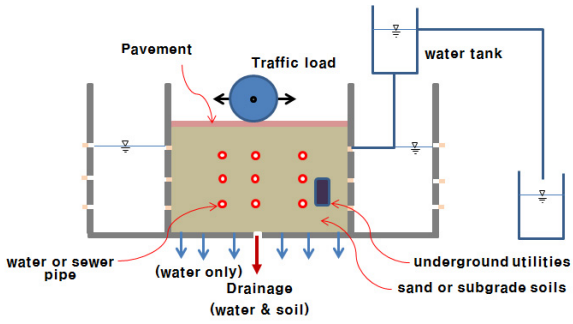

Fig. 2 Schematic Diagram of Soil Chamber

Fig. 1과 같이 제시된 도로함몰 위험도 평가에 있어서는 상부 교통하중의 영향, 상부 포장층의 강성, 장축방향 동공의 크기, 함몰 시점의 지하수위 조건 등은 별도로 고려하지 않고 있다. 특히 동공의 붕괴를 일방향 슬래브의 파괴로 고려하여 단축방향의 폭만 고려하고 있으나 실제 동공발생 형태는 장축과 단축의 길이비가 2 이하로 일방향 슬래브로 고려하기 힘든 경우가 많이 보고되고 있다. 따라서 도로함몰 동공의 붕괴를 이방향 슬래브의 형태로 고려하여 위험도를 재평가할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 동공의 심도 또한 동공 상부의 토체 및 포장층의 강성을 일정하게 고려하는 가정을 적용하고 있는 것으로, 실제 도로함몰 사례에서는 상부층의 강성은 매우 다양한 것으로 나타나고 있어서 보다 세부적인 평가가 필요한 부분이다.

3. 도로함몰 특성 평가를 위한 모형토조 시험

3.1. 모형토조 시험장치 및 시험절차

도로함몰 특성 평가를 위한 대표적인 모사시험으로 2차원 모형토조시험이 있다(Kuwano 등, 2012). 본 연구에서 적용한 모형토조 시험장치의 개요는 Fig. 2와 같다. 본 시험방법은 일본 동경대에서 도로함몰을 모사하기 위한 시험으로 개발되었으며, 본 시험장치 토조의 크기는 600mm×300mm×100mm로 동경대에서 사용하고 있는 크기의 8배(부피기준)에 해당한다. 시험은 기본적으로 토조 내부에 시험대상 흙을 성형하고, 토조 하부에 위치한 유출경로를 개방하여 하향으로 토사가 유출되면서 토조 내부에 형성되는 동공이 발생·확장되는 것을 관찰하고 유출량을 측정하여 동공을 정량화하는 것이다.

본 연구에서 개발된 토조는 도로에서 불포화 흐름을 모사하기 위해서 토조 하부에 물의 유출을 충분히 확보할 수 있는 밸브를 설치하였고, 하수관거 및 상수관거의 손상을 모사하기 위하여 직경 20mm의 모형관 설치가 가능하도록 개선하였다.

(a) Front View

(b) Side View

Fig. 3 Soil Chamber Equipment

대형의 토조에서 모래시료를 성형하는 일반적인 방법은 낙사법(sand raining)을 적용한다. 그러나 본 장치와 같이 소형의 토조에 있어서는 경계조건의 영향이 크기 때문에 일반적으로 낙사법을 적용하지 않고 봉다짐(tamping)에 의한 직접적인 방법을 적용한다(Kuwano 등, 2012). 본 시험장치 크기에서는 다짐층 높이 5cm일

때 다짐이 가장 용이한 것으로 나타났고, 이러한 다짐층 높이에서는 과소다짐(under compaction)의 필요성은 작은 것으로 나타났다. 봉다짐(tamping)에 의한 직접적인 시료 조성 방법은 모래 뿐 아니라 노상토 및 입상 보조기층 재료에 있어서도 적용이 수월한 장점이 있다.

하수관거 및 상수관거의 손상을 모사하기 위하여 직경 20㎜의 모형관을 적용하였다. 인위적으로 손상된 부분으로 시료 다짐과정에서 관거 내부로 토사유출을 억제하기 위해 손상된 부분을 하부로 향하게 한 상태에서 다짐을 실시하고 유출시험 직전에 관거를 회전하여 손상의 위치가 상부 또는 측면을 향하도록 하였다.

다짐 층과 층 사이에 착색모래는 검은색을 띄는 안트라사이트(anthracite)를 사용하였다. 안트라사이트는 점성이 없고 입자를 파쇄하여 입도조정이 가능한 장점이 있다. 시험에서는 시료(모래)의 입도분포와 동일한 입도분포로 조정하여 사용하였다. 본 토조 크기에서는 한 층당 130g의 안트라사이트를 도포하면 동공 확장 과정을 뚜렷하게 관찰하는데 좋은 시인성을 확보할 수 있었다.

모형토조에서 토사는 물과 혼합되어 유출이 발생한다. 소형의 토조에서는 물과 혼합된 토사를 측정하는데 특별한 어려움이 없으나, 본 연구에서 적용한 토조의 크기에서는 유출량(물+토사)이 매우 많기 때문에 물과 토사를 분리하여 토사 유출량만을 별도로 측정하였다. 물과 토사의 분리는 #200체를 적용하였으며, #200체를 통과하는 세립분의 량은 시험에 적용된 입도분포곡선의 세립분 통과량을 고려하여 보정하였다.

3.2. 모형토조 예비실험 및 분석

도로함몰 모사 가능성 평가를 위한 모형토조 실험은 모두 여덟 가지 경우에 대하여 실시하였다. 각각의 시험에서 동공의 발생·확장 및 함몰을 Fig. 4에 정리하였다.

건조모래에 대한 시험(Fig. 4(a))에서는 하부의 유출경로를 개방함과 동시에 지속적인 유출이 진행되고, 초기에 동공이 발생함과 동시에 이완영역이 확장하여 최종적으로 안식각으로 안정될 때까지 지속적으로 유출이 발생하면서 함몰이 진행되었다. 이완영역(파괴 영역)은 Terzaghi가 제시한 터널에서의 상부 지반의 붕괴와 매우 유사한 형태로 나타나고 있다. 이와 같이 하부에 토사 유출경로가 있는 경우의 함몰 발생 및 확장은 내부침식에 의한 요인이 아니라 토체 자체의 전단강도 부족에 의한 단순한 붕괴의 연속과정으로 나타나고 있다. 즉, 도로함몰에 있어서 유출경로가 하부에 존재하는 경우에는 물의 흐름에 의한 침식과정이 아니라 토체의 전단강도 특성에 따라서 동공 발생·확장 및 함몰이 발생하는 매커니즘으로 나타나는 것을 의미한다.

일부 수분을 함유한 불포화 모래에 대한 시험(Fig. 4(b))에서는 하부의 유출경로를 개방함에 따라 즉시적인 유출이 발생하지 않고 초기에는 안정한 상태를 유지하였다. 건조모래의 경우와 차이점은 모래가 약간의 수분을 포함한 불포화상태에서 모관흡수력(matric suction)에 의한 겉보기 점착력(apparent cohesion)이 있는 것으로, 폭 5mm의 유출경로가 열린 상황에서는 안정을 유지하고 있는 것이다.

초기 안정 상태에서 상부에 600㎖(강우량 10mm)의 물을 공급하였을 때 유출이 시작되면서 초기 동공이 발생하였다. 공급된 물의 침투에 의한 토사유출은 지속적으로 발생하지 않았고 물의 흐름이 멈춰지는 시점에서 동공 또한 안정한 상태를 유지하였다. 추가적으로 상부에 600㎖의 물을 공급함에 따라 동공의 확장은 각각 사이클마다 지속적으로 확장하여 최종적으로는 안식각의 형태까지 유출이 발생하면서 동공의 함몰이 진행되었다(Fig. 5).

결국 이러한 과정 또한 내부침식의 과정이 아니라 물의 공급에 따라 발생하는 침투에 의해 전단응력이 증가하면서 토체의 붕괴와 유출이 반복되는 현상으로 평가된다. 따라서 하부에 유출경로를 갖는 도로함몰의 경우, 유출경로의 크기만큼 하부가 지지되지 못한 조건에서 토체에 작용하는 전단응력이 토제의 전단강도보다 큰 상황이 발생하면 토사유출에 따른 동공의 확장이 반복적으로 진행됨을 알 수 있다. 다만 본 시험에서는 초기의 유출 경로 크기를 고정하고 있는 것으로 실제 도로함몰 조건과는 상이할 수도 있다. 실제 도로함몰에서는 초기에 작은 유출경로를 갖는 경우라 할지라도 내부침식에 의해서 초기 동공의 확장이 발생하여(즉, 하부의 비지지 조건이 내부침식에 의해 확장) 붕괴·유출의 반복에 의한 동공 확장이 발생할 수 있을 것으로 추정된다.

Fig. 4(c)는 유출경로 상부에 일정한 강성을 갖는 구조물이 놓이는 경우에 대한 것이다. 동공발생 초기에는 불포화 모래에 대한 시험(Fig. 4(b)) 결과와 매우 유사한 결과로 나타나고 있다. 그러나 초기 동공발생 후 이완영역이 진행되는 과정에서 상부구조물에 의해 이완영역의 형태가 제한되므로, 이완영역이 구조물 하부의 수평방향으로 진행되는 형태로 나타나고 있다. 강우 사이클에 따라서 물의 침투가 구조물의 영향으로 수평방향 흐름 성분을 더욱 포함하게 되어 전반적으로 동공 확장의 속도는 느리게 진행되었다. 그러나 동공의 수평방향 확장이 구

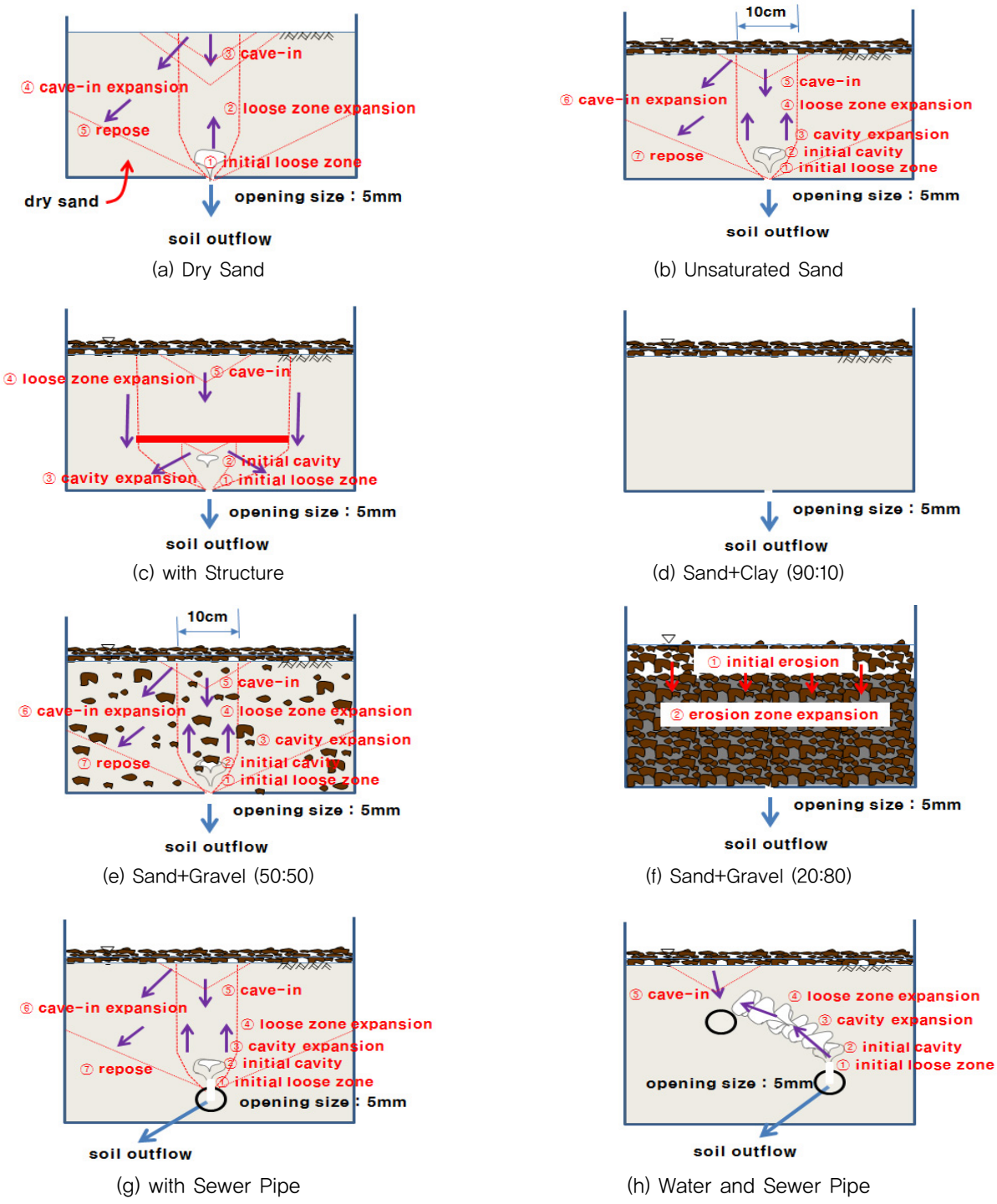

Fig. 4 Expansion of Cavities with Various Conditions

조물의 범위까지 진행된 이후에는 구조물을 지지하는 하부층이 사라지면서 동공이 매우 급작스럽고 크게 진행되어 바로 상부의 함몰로 진행되었다. 실제 도로함몰에서 이와 같은 조건이 발생하면 비파괴적 방법으로 동공의 확인도 어렵고, 구조물 하부에 동공이 함몰 직전까지 확장되더라도 상부에는 영향이 없는 상태로 진행되어 갑작스럽고 대규모의 함몰이 우려될 것으로 추정된다.

Fig. 4(d)는 모래+점토 혼합토에 대한 것이다. 점토는 무게비로 10% 혼합된 흙의 경우인데, 상부에 물이 충분히 공급한 상황에서 8일 간의 관찰 기간동안 전혀 변화를 발견할 수 없었다. 모래+점토 혼합토의 경우 모래에 비하여 전단강도가 매우 크고, 투수계수가 작아 물의 흐름이 충분하게 발생하지 않으므로 동공의 발생이 억제된 것으로 판단된다. 결국 하부에 유출경로를 갖는

Fig. 5 Typical Cavity Expansion in Unsaturated Sand

경우 일정한 투수계수가 작고 일정한 전단강도 이상의 흙이 유출경로 상부에 놓이는 경우 도로함몰을 일정부분 억제할 수 있을 것으로 예상된다. 파이핑에 의한 제방 붕괴의 경우에도 소성지수(PI)가 15% 이상인 흙은 파이핑에 저항성이 아주 강한 흙으로 분류되고 있다(U.S. DOIBR, 2010).

Fig. 4(e) 및 Fig. 4(f)는 모래+자갈 혼합토에 대한 것이다. Fig. 4(e)와 같이 모래+자갈 혼합비율이 50:50인 경우에는 자갈입자가 서로 접촉하여 골격을 형성하지 못하고 모래에 떠있는 형태를 띠게 된다. 이러한 상태를 플로팅(floating) 상태라 하는데 이때의 거동은 세립분의 특성이 좌우하게 되는 것으로 알려져 있다(Lin 등, 2014). 토사유출 모형토조 실험의 결과 또한 모래의 경우와 매우 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 모래의 혼입비율이 일정 이상으로 플로팅(floating) 상태가 되면 도로함몰의 매커니즘 또한 잔입자의 영향을 주요하게 받는 것으로 나타났다.

Fig. 4(f)는 모래+자갈 혼합비율이 20:80인 경우에는 자갈입자가 서로 접촉하여 골격을 형성하고 모래입자는 자갈의 간극사이를 일부 채우고 있는 상태가 된다. 이러한 상태를 매트릭스(matrix) 상태라 하고 이때의 거동은 자갈의 특성이 좌우하게 되는 것으로 알려져 있다(Su, 1989). 그러나 유출경로 크기(5mm)보다 큰 입자로 구성된 자갈만 있는 경우에는 동공의 발생·확장에 필요한 토사의 유출이 전혀 관찰되지 않은 것에 비하여 혼합토의 경우에는 내부침식에 의한 토사의 유출은 지속적으로 발생하고 있다. 큰 입자 사이의 간극을 통해 잔 입자가 이동하는 내부침식의 형태(suffusion)가 발매트릭스(matrix) 상태의 조립토의 경우에도 내부침식에 의한 간극의 지속적인 확장이 발생하고, 이러한 층 상부에 세립의 흙이 존재하는 경우 동공 발생·확장의 유출경로로 작용할 수 있음을 나타내는 것이다.

하수관거 손상에 의한 함몰은 Fig. 4(g)에 나타내었다. 하수관거 모형은 직경 20mm, 손상의 폭은 5mm로 모사하였다. 동공은 손상부 상부에서 발생하고 있으며, 동공 발생·확장의 기본적인 형태는 하부에 유출경로를 갖는 불포화 모래에 대한 시험(Fig. 4(b))과 매우 유사하게 나타나고 있다. 토사의 유출은 하수관을 통해 흐르는 물과 함께 지속적인 유출이 발생하였다.

토조 하부에 유출경로가 있는 경우에는 유출된 토사는 별도의 저항없이 바로 외부로 빠져 나가지만, 하수관거 손상의 경우는 하수관거로 유입된 토사가 물의 흐름과 함께 외부로 유출되게 된다. 유입된 토사가 일정량 이상이 되면 하수관거가 일시적으로 막혀 유출이 억제됨과 동시에 하수관거의 물이 손상부위를 통해 상부 토사로 흘러 들어간다. 이는 상부 토사를 국부적으로 포화상태에 이르게 하고 상향의 침투압이 발생하여 전단강도를 급격하게 저하시키게 된다. 이때 하수관거의 토사가 일시에 유출되면서 동공이 갑작스럽게 확장되고, 또다시 하수관거가 막히는 상황을 반복하는 것으로 나타났다. 결국 하수관거의 손상에 의한 동공의 확장은 연속적으로 발생하는 것이 아니라 갑작스러운 확장 및 일시적 안정을 반복하는 형태로 나타나고, 손상된 하수관거 상부에 전단강도를 급격하게 떨러뜨리면서 전체적인 동공의 발생 규모는 매우 큰 형태로 나타났다.

Fig. 4(h)는 상수관과 하수관의 손상이 복합적으로 발생한 경우를 나타내고 있다. 상수관 손상부에서 지속적인 물의 공급이 이루어지고 하수관 손상부에서 토사유출이 발생하여 본 실험조건 중에서 가장 빠른 속도로 동공이 확장되는 형태로 나타났다. 동공은 초기에 하수관거 손상부 상부에서 발생하였으며 물의 지속적인 공급이 있는 상수관거 손상부위로 동공이 확장되었다. 최종적인 함몰은 물이 공급되는 상수관거 손상부위 상부에서 발생되었다. 상수관거가 손상되는 경우 상당한 수압을 동반한 물의 유출이 지반 내부에 발생하여 전단강도를 급격하게 저하시키고 토사 유출지점이 일정한 거리 이상의 경우에도 지속적인 동공의 확장 가능성이 크게 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 도로함몰 사례분석과 2차원 모형토조 시험을 통하여 도로함몰의 기본적인 매커니즘을 규명하여

다음의 결과를 얻었다.

1. 도로함몰은 도로 하부의 물의 흐름과 밀접한 관련이 있으며, 기본적 영향요소를 토사 유출 지점의 특성, 유출 토사 이동경로, 도로하부 침투수 발생 요인, 유실된 토사의 특성으로 구분하여 제시하였다.
2. 하부에 토사 유출경로가 있는 경우의 함몰 발생 및 확장은 내부침식에 의한 요인이 아니라 토체 자체의 전단강도 부족에 의한 단순한 붕괴의 연속과정으로 나타나고 있다. 따라서 동공확장은 흙의 전단강도 특성, 작용하는 전단응력이 주요 영향요소가 되는 것으로 판단된다.
3. 유출경로 상부에 일정한 강성을 갖는 구조물이 놓이는 경우 이완영역이 진행되는 과정에서 상부구조물에 의해 이완영역의 형태가 제한되어, 이완영역이 구조물 하부의 수평방향으로 진행되는 형태로 나타났다. 동공 확장 속도는 느리게 진행되었으나 동공이 구조물의 범위까지 진행된 이후에는 동공이 매우 급작스럽고 크게 진행되어 바로 상부의 함몰로 진행되었다.
4. 하수관거의 손상에 의한 동공의 확장은 연속적으로 발생하는 것이 아니라 갑작스러운 확장 및 일시적 안정을 반복하는 형태로 나타나고, 손상된 하수관거 상부 흙의 전단강도를 급격하게 떨어뜨리면서 전체적인 동공의 발생 규모는 매우 큰 형태로 나타났다.
5. 상수관과 하수관의 손상이 복합적으로 발생한 경우, 동공은 초기에 하수관거 손상부 상부에서 발생하였으며 물의 지속적인 공급이 있는 상수관거 손상부위로 동공이 확장되었고, 최종적인 함몰은 물이 공급되는 상수관거 손상부위 상부에서 발생되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/교통물류연구개발사업의 연구비 지원(15TLRP-C099511-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Benelli S., Brivois O. and Lachouette D. (2007) "The Scaling Law of Piping Erosion" 18th Congress Frangais Mecanique, pp. 27-31.

Brown, A. J. and Bridle, R. C. (2008) "Progress in Assessing Internal Erosion" Ensuring Reservoir Safety into the Future, London.

Hewage I. and Renuka S. (2012) "Evaluation of Ground Loosening Behavior and Mechanical Properties of Loosened Sand Associated with Underground Cavities" U Tokyo Repository.

Korea Environment Institute (2014) "1st Environmental Disaster and Safety Forum", Seoul.

(한국환경정책·평가연구원 (2014) "환경재난과 안전포럼" 제1차 환경재난과 안전포럼, 서울)

Kuwano R., Yamauchi, K., Horii T. and Kohashi H. (2006) "Defects of Sewer Pipes Causing Cave-in' s in the Road" Proceeding of 6th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia. Phuket: No. H63.

Kuwano R. and Sato M. (2009) "Basic Study for Prevention of Ground Cave-in; 地盤陷沒未然防止のための基礎的檢討" 生産研究(研究速報), Vol. 61, No. 4, pp. 673-677.

Kuwano R., Kohata Y. and Sato M. (2012) "A Case Study of Ground Cave-in due to Large Scale Subsurface Erosion in Old Land Fill" ICSE 6, Paris, pp. 265-271.

Lin K. and Akihiro T. (2014) "Experimental Investigations on Suffusion Characteristics and its Mechanical Consequences on Saturated Cohesionless Soil", Soil and Foundation, Vol. 54, No. 4, pp. 713-730.

Lin K. and Akihiro T. (2014) "Strength Reduction of Cohesionless Soil due to Internal Erosion Induced by One-dimensional Upward Seepage Flow", Soil and Foundation, Vol. 52, No. 4, pp. 698-711.

Sato M. and Kuwano R. (2011) "Model Test to Investigate the Influence of Buried Structures on the Generation of Subsurface Cavities; 地盤內空洞生成における地中埋設軀體影響に關する模型實驗" 生産研究(研究速報), Vol. 63, No. 4, pp. 399402.

Sato M. and Kuwano R. (2012) "Influence of Underground Structure on Cavity Formation due to Various Conditions of Water Flow" Advanced in Transportation Geotechnics, pp. 617-622.

Sato M. and Kuwano R. (2013) "Effects of Buried Structures on the Formation of Underground Cavity" Proceedings on the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp. 1769-1772.

Sato M. and Kuwano R. (2015) "Effects on Internal Erosion on Mechanical Properties Evaluated by Triaxial Compression Tests" The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Seoul City (2014) "Cause of cavity in Seokchon Underpass and Special Control Measures for Cave-in in Road".

(서울시 (2014) "석촌지하차도 동공 발생원인과 도로함몰 특별관리 대책")

Seoul City (2015) "Management Policy for Cave-in in Road in Seoul City".

(서울시 (2015) "서울시 도로함몰 관리정책")

Seoul City (2015) "Mechanism of Cavity Development and

Countermeasures for the Prevention of Cave-in in Road".

(서울시 (2015) "도로함몰 예방을 위한 동공발생 매커니즘과 대응방안")

Su, W. (1989), "Static Strength Evaluation of Cohesionless Soil with Oversize Particles", Ph.D Dissertation, Washington State University.

Tony L. Wahl (2010) "A Comparison of the Hole Erosion Test and Jet Erosion Test", Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydraulic Modeling, Las Vegas.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2010), "Internal Erosion, Dam safety Risk Anaysis Best Practices".