



하수관거 누수 조건에서 지오셀-지오텍스타일 복합 보강에 따른 싱크홀 위험 저감 성능 평가

Evaluation of sinkhole risk mitigation performance under sewer leakage conditions with geocell-geotextile composites

조예원¹ · 홍주신² · 이은명² · 윤석범³ · 박동석³ · 여성구³ · 신한별³ · 하버들⁴ · 주진철^{1,*}
Yewon Cho¹ · Jushin Hong² · Eunmyeong Lee² · Seokbeom Yun³ · Dongseok Kwak³ ·
Seonggu Yeo³ · Hanbyul Shin³ · Beodeul Ha⁴ · Jin Chul Joo^{1,*}

¹국립한밭대학교 건설환경공학과

²(주)지오셀코리아

³한국환경공단 충청권환경본부 환경시설관리처

⁴금강유역환경청 수질총량관리과

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

²GEOCELLKOREA

³Environmental Facilities Management Department, Chungcheong Regional Headquarters, Korea Environment Corporation

⁴Total Water Pollution Load Management Division, Geum River Basin Environmental Office, Ministry of Environment

Received 10 June 2026, revised 20 July 2026, accepted 27 July 2026.

*Corresponding author: Jin Chul Joo (E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr; Fax: 042-821-1476, Tel. 010-2237-0626)

1 조예원 (석사 과정) / Yewon Cho (Master Student)

대전광역시 유성구 동서대로 125, 34158
125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Republic of Korea

2 홍주신 (대표) / Jushin Hong (CEO)

대전광역시 동구 우암로85번길 11-2, 34620
11-2, Uam-ro 85beon-gil, Dong-gu, Daejeon 34620, Republic of Korea

2 이은명 (과정) / Eunmyeong Lee (Manager)

대전광역시 동구 우암로85번길 11-2, 34620
11-2, Uam-ro 85beon-gil, Dong-gu, Daejeon 34620, Republic of Korea

3 윤석범 (차장) / Seokbeom Yun (Senior Manager)

대전광역시 서구 청사로 156, 35209
156, Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35209, Republic of Korea

3 박동석 (차장) / Dongseok Kwak (Senior Manager)

대전광역시 서구 청사로 156, 35209
156, Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35209, Republic of Korea

3 여성구 (대리) / Seonggu Yeo (Assistant Manager)

대전광역시 서구 청사로 156, 35209
156, Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35209, Republic of Korea

3 신한별 (대리) / Hanbyul Shin (Assistant Manager)

대전광역시 서구 청사로 156, 35209
156, Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35209, Republic of Korea

4 하버들 (주무관) / Beodeul Ha (Administrative Officer)

대전광역시 유성구 대학로 417, 34142
417, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34142, Republic of Korea

1 주진철 (교수) / Jin Chul Joo (Professor)

대전광역시 유성구 동서대로 125, 34158
125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Republic of Korea

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.

pp. 487-500

pp. 501-509

pp. 511-527

pp. 529-539

pp. 541-551

pp. 553-564

pp. 565-582

pp. 583-596

요약문

싱크홀은 도시 지반의 국부적 붕괴로 인명 및 사회·경제적 피해를 초래할 수 있으며, 특히 노후 하수관거 결함에 따른 누수는 내부침식과 공동 발달을 유발하여 지반 함몰로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 하수관거 결함부 누수에 따른 토사 유실, 공동 발달 및 지반침하 거동을 실내 모형 실험을 통해 재현하고, 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재(지오펜포지트)의 적용 위치에 따른 싱크홀 위험 저감 효과를 평가하였다. 실험은 무보강 조건, 하부 보강 조건, 상·하부 보강 조건으로 구분하였으며, 토사손실량과 침하율을 주요 지표로 하여 보강 조건별 지반 거동을 비교하였다. 무보강 조건에서는 누수 직후 결함부 주변으로 유동이 집중되면서 세립분 유출과 파이프링이 발생하였고, 공동이 빠르게 확대되어 급격한 붕괴형 침하로 이어졌다. 이 조건에서 누적 토사손실량은 약 14.5 kg, 최종 침하율은 약 67.33%로 나타났다. 반면, 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재를 적용한 조건에서는 토립자 유실이 거의 발생하지 않았으며, 공동 발달과 국부 붕괴가 효과적으로 억제되었다. 특히 상·하부 보강 조건에서는 보강층의 여과, 유동 분산 및 구속 효과가 복합적으로 작용하여 붕괴 징후 없이 비교적 안정적인 소규모 균등침하 거동을 보였다. 본 연구 결과는 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재가 하수관거 누수로 인한 토사 유실과 공동 발달을 저감하고, 급격한 지반 함몰을 완화하는 데 효과적인 보강 방안이 될 수 있음을 보여준다.

주제어: 하수관거 누수, 싱크홀, 내부침식, 지오셀-지오텍스타일(지오펜포지트) 보강, 지반침하

ABSTRACT

Sinkholes can cause significant human, social, and economic damage due to localized collapse of urban ground. In particular, leakage caused by defects in aged sewer pipes may induce internal erosion and cavity development, eventually leading to ground collapse. In this study, laboratory model tests were conducted to reproduce soil loss, cavity development, and ground settlement behavior induced by leakage from a defective sewer pipe. The mitigation performance of geocell-geotextile composite reinforcement was evaluated according to its installation position. Three experimental conditions were considered: an unreinforced condition, a bottom reinforcement condition, and a top-and-bottom reinforcement condition. Cumulative soil loss and settlement ratio were used as the main indicators to compare ground behavior under different reinforcement conditions. In the unreinforced case, seepage flow was concentrated around the pipe defect immediately after leakage, causing fine particle loss and piping. As a result, the cavity rapidly expanded and led to sudden collapse-type settlement. The cumulative soil loss and final settlement ratio in this condition were approximately 14.5 kg and 67.33%, respectively. In contrast, soil particle loss was nearly prevented in the reinforced cases, and cavity development and local collapse were effectively suppressed. In particular, the top-and-bottom reinforcement condition exhibited relatively stable uniform settlement without signs of collapse owing to the combined filtration, flow dispersion, and confinement effects of the reinforcement layers. Although its final settlement ratio was slightly higher than that of the bottom reinforcement condition, this was attributed to insufficient initial compaction and soil particle rearrangement during saturation. These results indicate that geocell-geotextile composite reinforcement can effectively reduce soil loss and cavity development and mitigate sudden ground collapse under sewer leakage conditions.

Key words: Sewer pipe leakage, Sinkhole, Internal erosion, Geocell-geotextile (Geocomposite) reinforcement, Ground settlement

1. 서 론

도시화와 지하공간 이용의 확대에 따라 하수관로를 포함한 지하매설물이 고밀화·노후화되면서, 도심지 지반침하 및 싱크홀성 지반함몰(sinkhole-like ground collapse) 발생은 시민 안전과 도시 기능을 위협하는 주요 사회 문제로 대두되고 있다(Lee, 2025). 국토교통부 지하안전정보시스템(JIS)의 발생 원인별 통계에 따르면, 2020~2025년 지반침하 사고는 총 1,046건으로 집계되었으며, 이 중 하수관 손상에 의한 지반침하 사

고가 485건으로 전체의 46.4%를 차지하여 가장 높은 비중을 보였다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Joint Information System, 2026). 이는 하수관 거의 균열, 이음부 손상 및 노후화에 따른 누수가 도심지 지반 안정성 저하와 밀접하게 연관될 수 있음을 시사한다. 하수관거에 균열 또는 결함이 발생하면 하수관 내부의 오염수의 외부 유출 또는 지하수의 하수관 내 유입이 결함부를 중심으로 발생하며, 이 과정에서 주변 지반 내 국부적인 침투류(seepage flow)와 수리구배(hydraulic gradient)가 증가한다. 증가된 수리 작



용은 토립자의 이동과 세립분 유출을 유발하고, 장기적으로는 결함부 주변에 공동(cavity)과 이완 영역(loosened zone)을 형성시킨다 (Indiketiya et al., 2017; Karoui et al., 2018; Dastpak et al., 2023). 이후 누수와 내부침식이 지속되면 공동이 상부로 확장되고, 공동 천단부의 지지력이 저하되면서 지표 침하 및 싱크홀성 붕괴로 이어질 수 있다. 이러한 하수관거 누수에 따른 싱크홀 발생 메커니즘은 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

내부침식과 공동 발달에 관한 기존 연구들은 하수관 결함 조건에서 토사 유실과 지반 함몰이 다양한 수리·지반 인자에 의해 지배됨을 보여주었다. Guo et al. (2013)은 결함 하수관 주변 모래 유실 실험을 통해 입경, 결함 크기, 수두 및 토층 높이가 토사 유실률과 공동 형상에 영향을 미친다고 보고하였다. Sato and Kuwano (2015)는 지중 구조물의 위치가 내부침식 과정에서 국부 침투류 경로를 변화시키며, 이에 따라 공동의 형상과 확장 방향이 달라질 수 있음을 보고하였다. Tang et al. (2017)은 결함 슬롯을 통한 수중 모래 유실 실험에서 입경, 슬롯 위치, 슬롯 크기 및 수위가 토사와 물의 유출 특성을 지배하는 주요 변수임을 확인하였다. 또한 Karoui et al. (2018)은 물리모형실험과 PIV 분석을 통해 지하수 흐름 방향, 결함부 주변 수리구배

및 공동 상부 지반의 자립성이 지반침하 메커니즘을 결정하는 주요 인자임을 제시하였다. Kim and Jung (2018)은 지하수위가 높을수록 토사 유출 속도와 공동 규모가 증가하고, 지하수위 저하 과정에서 누적 토사 유출량과 지반함몰 범위가 확대될 수 있음을 보고하였다.

매설심도와 응력 아치 형성도 지반함몰 거동을 설명하는 중요한 인자로 검토되어 왔다. Kwak et al. (2019)은 손상 하수관에 대한 모형실험을 통해 매설심도가 낮은 조건에서 공동 및 지반함몰에 대한 저항성이 상대적으로 작게 나타남을 확인하였다. 반면 Dai et al. (2024)는 매설심도가 증가할수록 결함부 상부 토압과 공동 규모가 증가하여 최종 붕괴 범위와 깊이가 확대될 수 있음을 실험 및 CFD-DEM 해석을 통해 제시하였다. 또한 하수관 누수에 따른 지반 붕괴는 초기 안정 단계, 완만 침하 단계 및 붕괴 단계로 진행되며, 토립자 유실에 따라 형성된 응력 아치가 반복적으로 재형성·붕괴 되다가 최종적으로 지표 붕괴가 발생한다고 설명하였다. 이러한 연구들은 입도분포, 결함 크기와 위치, 수두·수위 조건, 지하수 흐름, 매설심도, 토층 조건 및 응력 아치 형성이 토사 유실, 공동 발달 및 지반함몰 거동을 지배하는 핵심 인자임을 보여준다.

최근에는 수위, 유량, 토질 조건 등 복합적인 수리·지반 조건이 공동 발달과 침하 거동에 미치는 영향도

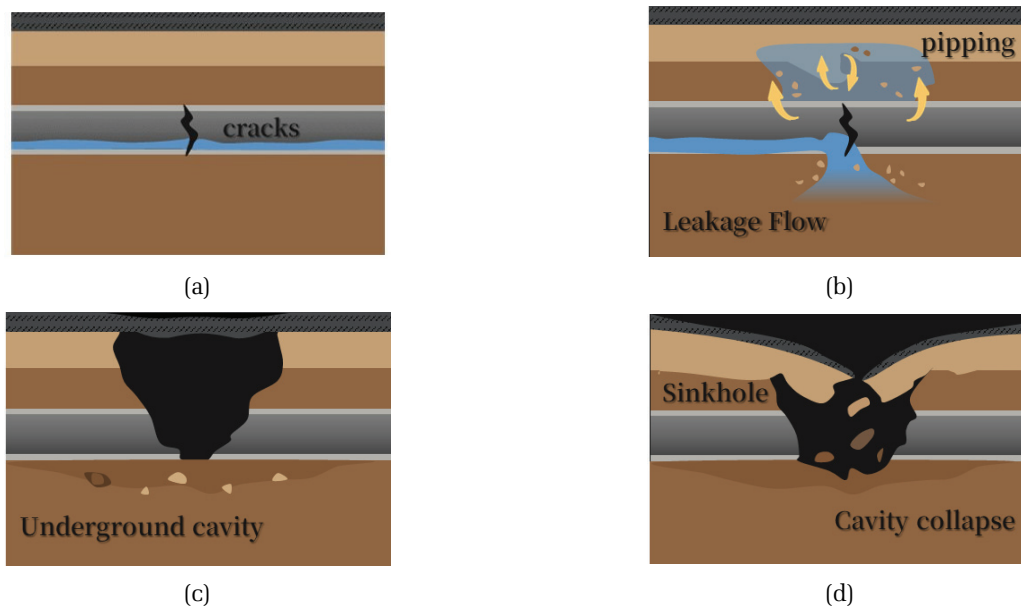


Fig. 1. Mechanism of sinkhole development induced by sewer pipe leakage: (a) pipe defect, (b) soil particle loss and piping, (c) expansion of underground cavity, and (d) ground collapse due to cavity failure.

함께 검토되고 있다. Chen et al. (2023)은 관로 누수에 따른 노상 침식이 침투, 완만 침식, 급격한 침식 및 침식 수렴 단계로 진행되며, 수위, 유량 및 토질 조건이 공동의 형상과 규모에 영향을 미친다고 보고하였다. Lee et al. (2025)는 상대밀도, 지하수위 및 세립분 함량 변화에 따른 공동 형성과 지표침하 거동을 분석하여, 낮은 상대밀도 조건에서는 침하가 빠르게 진행되는 반면 세립분 함량 증가는 토사 유실을 억제할 수 있음을 제시하였다. Yang et al. (2025)은 대형 모형실험을 통해 수위 상승 조건에서 포장 하부의 내부침식, 공동 형성 및 붕괴 과정을 재현하고, 간극수압계, 토압계, 텐시오미터, 레이저 변위계 및 지표투과레이더(GPR)를 활용하여 공동 발달 과정과 탐지 가능성을 분석하였다. 이 연구는 지하수위가 공동 형성 및 확장에 주요한 영향을 미치며, 포장 두께와 뒤채움재 특성이 공동 붕괴 및 GPR 탐지 깊이에 영향을 줄 수 있음을 제시하였다.

종합하면, 기존 연구들은 하수관거 결함 또는 유사한 지중 공동 발생 조건에서 내부침식, 토사 유실, 공동 발달 및 지표침하 메커니즘을 이해하는 데 중요한 기초자료를 제공하였다. 그러나 대부분의 연구는 결함 크기, 입도분포, 지하수위, 매설심도, 토층 조건 및 지중 구조물 위치와 같은 개별 영향인자의 분석에 집중되어 있다. 반면, 하수관거 주변 지반에 보강재를 적용하여 토사 유실과 공동 발달을 직접적으로 저감하는 효과를 실험적으로 비교한 연구는 아직 제한적이다. 따라서 하수관거 누수 조건에서 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재의 적용 위치에 따른 싱크홀 위험 저감 성능을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

일반적으로 지오셀 및 지오텍스타일과 같은 토목섬유 보강재는 매설관 보호, 하중 분산, 지반 지지력 향상 및 변형 저감 등을 목적으로 다양한 지반공학 분야에서 활용되어 왔다 (Hegde and Sitharam, 2015; Pires and Palmeira, 2017; Nagatani et al., 2024). 지오텍스타일(geotextile)은 물의 통과를 허용하면서 토립자의 이동을 억제하는 여과 및 분리 기능을 제공할 수 있으며, 지오셀(geocell)은 셀 내부 충전재를 구속하여 전단변형과 국부 침하를 완화하는 역할을 한다 (Hegde and Sitharam, 2015; Markiewicz et al., 2022). 이러한 특성을 고려할 때, 지오셀과 지오텍스타일을 복합적으로 적용한 보강재는 하수관거 결함부 주변에서 발생하는 토사 유실, 유동 집중 및 공동 발달을 동시에 억

제할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 지오셀과 지오텍스타일을 결합한 복합 보강재를 지오컴포지트(geocomposite)로 정의하였다. 이후 실내 모형실험을 통해 하수관거 결함부 누수에 따른 토사 유실, 공동 형성 및 지표침하 과정을 재현하고, 지오컴포지트의 설치 위치에 따른 싱크홀 위험 저감 효과를 비교·평가하였다. 특히 토사손실량과 침하율을 주요 지표로 설정하여, 지오컴포지트의 여과, 구속 및 유동 분산 효과가 하수관거 주변 지반 안정성 향상에 미치는 영향을 해석하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 지오셀-지오텍스타일 복합 보강 공법은 하수관거 전체 노선에 일괄적으로 적용하기 위한 공법이 아니라, 누수 및 토양 유실 가능성이 높은 취약 구간에 선택적으로 적용하기 위한 예방적 보강 방안으로 제안된다. 여기서 결함부란 관거의 균열, 이음부 불량, 접합부 및 맨홀 연결부의 수밀성 저하, 노후화에 따른 파손부, 부등침하로 인한 관거 변형부 등 하수 또는 우수가 외부 토양으로 유출될 가능성이 높은 지점을 의미한다. 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다. 첫째, 하수관거 결함부 누수 조건에서 무보강 지반의 토사 유실, 공동 발달 및 침하 거동을 실내 모형실험을 통해 재현한다. 둘째, 지오컴포지트의 설치 위치에 따른 토사 유실 및 침하 저감 효과를 비교한다. 셋째, 실험 결과를 바탕으로 지오컴포지트의 여과, 구속 및 유동 분산에 의한 싱크홀 위험 저감 메커니즘을 해석한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험 장치 구성

보강 조건에 따른 하수관거 누수 기반 지반 거동의 차이를 비교하기 위하여 실험 조건은 Case 1(무보강), Case 2(하부 보강), Case 3(상·하부 보강)의 3가지 조건으로 구성하였다. Case 1은 보강재를 적용하지 않은 무보강 조건이며, Case 2는 하수관거 하부에 지오컴포지트를 설치한 조건이다. Case 3는 하수관거 상부와 하부에 각각 지오컴포지트를 설치한 조건으로, 보강재의 설치 위치 및 연속성에 따른 지반 거동 차이를 비교하기 위해 설정하였다. 각 실험 조건은 지오컴포지트의 적용 여부 및 설치 위치를 제외한 나머지 실험 조건은 동일하게 설정하여, 보강 조건에 따른 영향을 비교할 수 있도록 하였다.



실험에 사용한 모형 토조는 150 cm (L) × 15 cm (W) × 30 cm (H) 규모로 제작하였다. 하수관거는 내경 5 cm의 PVC(Polyvinyl Chloride) 파이프로 모사하였으며, 파이프 중앙 하단에 3 cm (L) × 1 cm (W) 크기의 인공 균열을 적용하였다. 하수관거 결함부 누수 조건을 재현하기 위해 정량펌프를 이용하여 PVC 파이프 내부로 물을 공급하였고, 공급된 물이 파이프 하단 균열부를 통해 주변 지반으로 유출되도록 하였다. 유입 유량은 9 L/min으로 일정하게 유지하였으며, 실험 중 유입부 유량계를 통해 유량 변동을 지속적으로 확인하였다. 이러한 조건은 결함부 누수에 따른 유동 집중, 토사 유실, 공동 발달 및 지반침하 거동을 관찰하기 위해 설정하였다.

모형 지반은 전체 높이 30 cm로 조성하였으며, 상부층과 하부층에는 각각 현장토 5 cm를 배치하고, 중앙의 하수관거 매설층 20 cm는 혼합토로 구성하였다. 보강 조건인 Case 2와 Case 3에서는 지오셀-지오텍스타일 복합 보강층, 즉 지오컴포지트를 설치하였으며, 지오셀 내부 충전재로는 주문진 표준사를 사용하였다. 이때 주문진 표준사는 지오셀 내부 충전재료만 사용하였고, 그 외 지반층의 재료 구성은 Case 1과 동일하게 유지하였다. 각 실험 조건의 개략도는 Fig. 2에 제시하였다. 따라서 본 연구에서 비교된 보강 효과는

단일 재료의 효과라기보다, 지오컴포지트가 형성하는 여과, 구속 및 응력 재분배 효과를 포함한 복합 보강 시스템의 효과로 해석하였다.

2.2 실험 재료 및 특성

2.2.1 실험토의 입도 분포 특성

본 연구에서는 하수관거 주변 지반을 모사하기 위한 실험토로 주문진 표준사, 규사, 강모래 및 현장토를 사용하였다. 이 중 강모래와 규사는 중량 기준 60:40의 비율로 혼합하여 하수관거 매설층에 사용되는 혼합토로 조성하여 사용하였다. 각 시료의 입도분포 특성을 정량적으로 평가하기 위해 ASTM D6913/D6913M (ASTM International, 2025) 및 KS F 2302 (Korean Agency for Technology and Standards, 2022)에 따라 체분석 시험을 수행하였다. 시험에는 각 시료 1.0 kg을 사용하였으며, 체분석 장치에서 약 10분간 진동시킨 후 각 표준체에 잔류한 시료의 중량을 측정하였다. 측정 결과를 바탕으로 입도분포곡선을 작성하고, 유효입경인 D_{10} , D_{30} , D_{60} 을 산정하였다. 또한 이를 이용하여 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c)를 계산하였다. 체분석을 통해 산정된 각 시료의 입도분포 특성은 Table 1에 정리하였으며, 입도분포곡선은 Fig. 3에 제시하였다. 주문진 표준사와

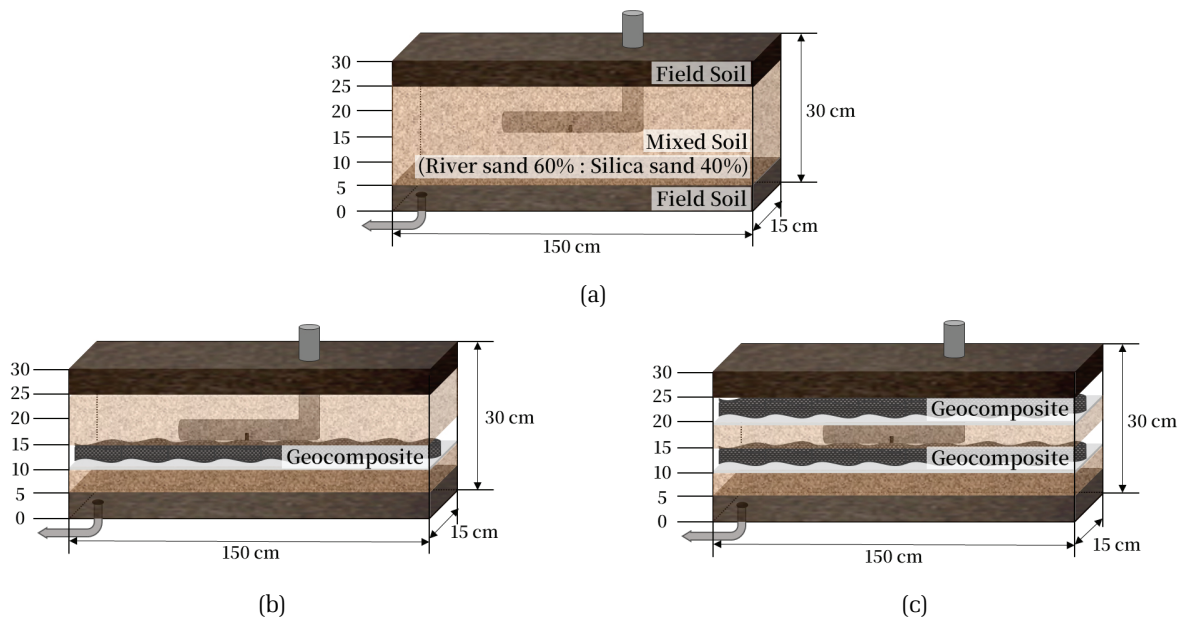
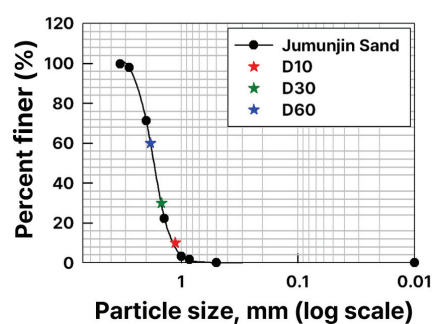


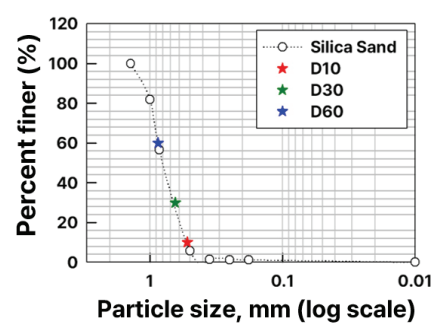
Fig. 2. Schematic diagrams of the model ground configurations for each experimental case: (a) Case 1 (unreinforced), (b) Case 2 (bottom reinforcement), and (c) Case 3 (top and bottom reinforcement).

Table 1. Particle size distribution characteristics of experimental soils

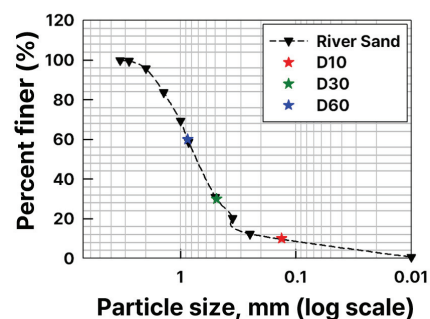
Samples	Particle size (mm)			Coefficient of Uniformity ($C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$)	Coefficient of Curvature ($C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$)
	D_{10}	D_{30}	D_{60}		
Jumunjin sand	1.13	1.48	1.84	1.63	1.05
Silica sand	0.52	0.64	0.87	1.66	0.91
River sand	0.13	0.49	0.87	6.53	2.06
Field soil	0.19	0.46	1.24	6.38	0.90
Mixed sand	0.32	0.56	0.86	2.69	1.16



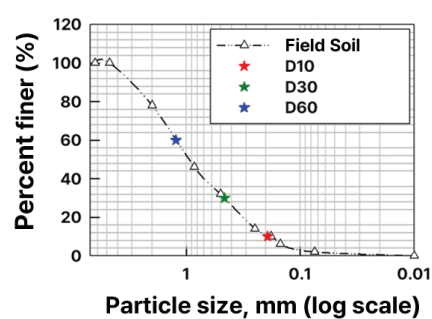
(a)



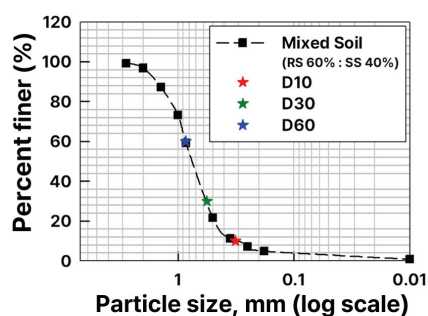
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3. Particle size distribution curves of soils used in the experiment: (a)Jumunjin sand, (b)Silica sand, (c)River sand, (d)Field soil, and (e)Mixed soil.



규사는 C_u 가 약 1.6 수준으로 나타나 입도분포가 비교적 균일한 재료로 판단되었다. 반면, 강모래와 현장토는 C_u 가 6 이상으로 나타나 입도분포 폭이 상대적으로 넓은 재료로 평가되었다. 혼합토(강모래60:규사40)는 C_u 가 약 2.7로 나타나 주문진 표준사 및 규사보다는 넓고, 강모래 및 현장토보다는 좁은 중간 수준의 입도분포 특성을 보였다.

2.2.2 실험토의 투수 특성

본 연구에서는 각 실험토의 상대적인 수리 특성을 비교하기 위하여 유효입경과 공극률을 고려한 Eq. (1)의 Kozeny-Carman형 관계식을 적용하였다(Chapuis and Aubertin, 2003). 본 연구에서 산정한 투수계수(K)는 정수위 또는 변수위 투수시험을 통해 측정한 실측값이 아니라, 입도분포와 공극률을 기반으로 계산한 이론적 추정값이다. 따라서 산정한 투수계수(K) 값은 현장 지반의 절대적인 투수성 또는 실제 누수 조건에서의 유속을 직접적으로 대표하기보다는, 동일한 계산 조건에서 토사 간 상대적인 배수성 및 유체 전달 가능성을 비교하는 지표로 사용하였다.

투수계수 산정에는 입도분포를 대표하는 유효입경(D_{10})과 공극률 n 을 주요 매개변수로 적용하였으며, 이를 통해 토사별 공극 구조와 입도 특성에 따른 유체 전달 특성을 평가하였다. Eq. (1)에서 K 는 토사 내

물의 흐름 용이성을 나타내는 투수계수(hydraulic conductivity, cm/s)이며, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, μ 는 점성계수(dynamic viscosity), d_e 는 입도분포를 대표하는 유효입경(effective grain size, mm), n 은 토사 내 전체 부피 중 공극이 차지하는 비율을 의미하는 공극률(porosity)이다. 일반적으로 투수계수는 입경이 클수록, 그리고 공극률이 높을수록 증가하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서 산정한 이론적 투수계수는 각 토사의 입도 및 공극 구조 차이에 따른 상대적인 배수 특성을 비교하는 데 활용하였다. 다만 Kozeny-Carman형 관계식은 주로 입상재료의 이상화된 공극 구조를 가정하므로, 세립분 함량, 입자 형상, 다짐 상태 및 층상 구조가 반영된 실제 투수 특성과는 차이가 있을 수 있다. 각 토사별 유효입경, 공극률 및 이론적 투수계수 산정 결과는 Table 2에 제시하였다.

$$K = \frac{\rho g}{\mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{d^2}{180} \quad (1)$$

2.2.3 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재(지오펜포지트) 특성

본 연구에서는 지오셀과 지오텍스타일을 결합한 형태의 지오셀-지오텍스타일 복합 보강재, 즉 지오펜포지트를 사용하였다 (Fig. 4). 지오셀은 고밀도 폴리에

Table 2. Theoretical hydraulic conductivity estimated using the Kozeny-Carman equation

Samples	D_{10} (mm)	Porosity, n	Hydraulic conductivity, k (cm/s)
Jumunjin sand	1.13	0.45	2.09×10^0
Silica sand	0.52	0.40	2.61×10^{-1}
River sand	0.13	0.40	1.63×10^{-2}
Field soil	0.19	0.35	1.99×10^{-2}
Mixed sand	0.32	0.40	9.90×10^{-2}

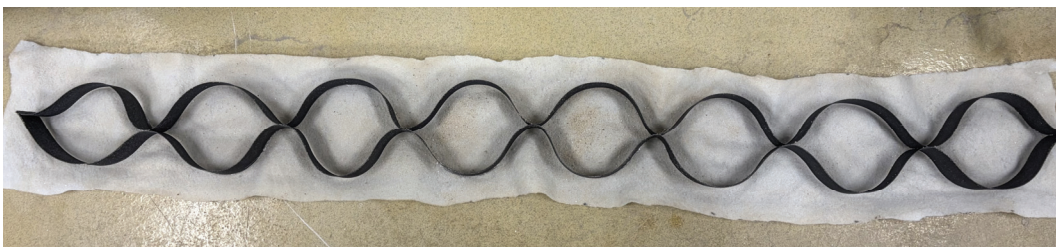


Fig. 4. Geocell-geotextile composite (geocomposite) reinforcement.

텔렌(HDPE) 띠를 일정 간격으로 융착하여 제작한 3차원 벌집형 토목섬유 보강재료, 일반적으로 지반 위에 전개한 후 셀 내부에 토사 또는 채움재를 충전·다짐하여 사용한다(Dash et al., 2001). 지오셀은 셀 벽체를 통해 내부 충전재의 횡방향 변위를 제한하고 구속 효과를 발휘함으로써, 지반의 지지력 향상과 침하 저감에 기여할 수 있다(Avesani Neto et al., 2013; Martins et al., 2024). 지오텍스타일은 토사와 물의 이동을 제어하기 위한 투수성 합성섬유 재료로, 분리, 여과, 배수, 보강 및 보호 기능을 통해 지반과 구조물의 안정성을 향상시키는 데 활용된다(Jeon, 2018; Wu et al., 2020). 특히 지오텍스타일의 여과 기능은 물의 흐름은 허용하면서 토립자의 지속적인 이동을 제한하므로, 누수 조건에서 토사 유실 및 내부침식을 억제하는 데 효과적이다(Sabiri et al., 2020; Markiewicz et al., 2022).

2.3 측정 및 산정 방법

본 연구에서는 하수관거 누수에 따른 토사 유실과 지반 변형 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 공동 부피 기반 토사 손실량(soil loss)과 침하율(settlement ratio)을 주요 분석 항목으로 선정하였다. 본 연구에서 제시한 토사손실량은 유출수와 함께 회수된 건조 토사량을 직접 측정한 값이 아니라, 실험 후 형성된 공동 부피를 기반으로 간접 추정된 값이다. 따라서 이 값은 실제 외부 유출량, 내부 토립자 재배열 및 보강재 주변 포획량을 엄밀히 구분하는 절대값이라기보다, 각 Case 간 상대적인 토사 유실 및 공동 발달 정도를 비교하기 위한 지표로 사용하였다.

공동 부피는 실험 중 모형 토조 측면에서 촬영한 이미지를 이용하여 공동 영역을 추출하였다. 먼저 촬영 이미지에서 공동 영역을 추출하고, 해당 공동의 단면적을 산정한 후 모형 토조의 폭을 곱하여 공동 부피를 계산하였다. 공동이 발생한 경우, 해당 공동은 토립자 유실에 의해 형성된 공간으로 가정하였으며, 공동 부피와 혼합토의 벌크 밀도를 이용하여 토사 손실량을 Eq. (2)와 같이 추정하였다.

$$m_{loss} = \rho_b \cdot V_c \quad (2)$$

여기서 m_{loss} 는 유실 토사의 질량(soil loss mass, g),

ρ_b 는 혼합토의 벌크 밀도(bulk density, g/cm³), V_c 는 공동의 부피(cavity volume, cm³)를 의미한다. 이때 ρ_b 는 혼합토의 밀도인 1.131 g/cm³로 적용하였다.

침하율은 누수 및 보강 조건에 따른 지반 변형 정도를 비교하기 위한 지표로 사용하였다. 침하량은 모형 토조 상부 지표면의 중앙부와 좌우 2개 지점에서 측정하였으며, 각 지점의 평균값을 이용하여 침하율을 산정하였다. 시간에 따른 침하 변화는 실험 시작 후 일정 시간 간격으로 측면 및 상부에 부착된 ruler를 이용해 직접 측정하였다. 침하율은 지반의 초기 높이와 실험 후 높이의 차이를 초기 높이로 정규화한 뒤 백분율로 나타낸 값으로 Eq. (3)과 같이 산정하였다. 이를 통해 각 실험 조건에서 발생한 토사 유실량과 지반침하 정도를 정량적으로 비교하였다.

$$S_r = \frac{H_o - H_i}{H_o} \cdot 100(\%) \quad (3)$$

이때 S_r 은 침하율(settlement ratio, %), H_o 는 초기 지반 높이(initial height), H_i 는 실험 후 지반 높이 또는 각 시간 i에서의 지반 높이(height at time i)를 의미한다.

3. 결과 및 고찰 (Results and Discussion)

3.1 보강 조건에 따른 지반 거동

각 Case의 시간 경과별 지반 거동을 비교한 결과, 지오킴포지트의 적용 여부와 설치 위치에 따라 공동 발달 및 지반침하 양상에 뚜렷한 차이가 나타났다. 무보강 조건인 Case 1에서는 누수 직후 결함부 인근으로 유동이 집중되면서 토립자 이동, 세립분 유실 및 파이핑성 내부침식이 빠르게 진행되었다. 이에 따라 결함부 주변에서 공동이 형성되기 시작하였으며, 시간이 경과함에 따라 공동이 상부 방향으로 확대되었다. 특히 약 30-90 s 구간에서 공동부피 기반 토사손실량이 집중적으로 증가하였고, 이 중 40-80 s 구간에서 공동의 시각적 확대가 가장 뚜렷하게 관찰되었다. 약 100 s 전후에는 공동 천단부의 지지력 저하로 인해 국부 붕괴와 급격한 침하가 발생하였다. 이후에는 추가적인 토사 유실이 둔화되고 일부 입자의 재배열 또는 유출 경로의 부분적 막힘이 진행되면서 변형이 점차 안정화되었으나, 실험 종료 시점까지 붕



과 이후의 공동 및 침하 형상이 유지되었다. Case 1의 시간 경과별 공동 발달 및 지반침하 양상은 Fig. 5에 제시하였다.

하부 보강 조건인 Case 2에서는 하수관거 하부에 설치된 지오킴포지트가 물의 통과를 허용하면서 토립자 이동을 제한하는 여과층으로 작용한 것으로 판단된다. 또한 지오킴포지트는 결함부 주변으로 집중되는 유동과 변형을 완화하여, Case 1에서 관찰된 급격한 공동 형성 및 붕괴를 억제한 것으로 해석된다. Case 2에서는 실험 전 시간대에 걸쳐 Case 1과 같은 뚜렷한 공동 발달이 확인되지 않았다. 다만 상부 보강층이 없는 조건이므로, 지오킴포지트 경계부 주변에서 제한적인 충전재 재배열 또는 국부 변형이 관찰되었다. 이러한 거동은 외부 토사 유출에 의한 공동 발달이라기보다는, 보강층 주변에서 발생한 국부적인 내부 재배열에 가까운 것으로 판단된다. 전체적으로 Case 2는 Case 1에 비해 현저히 안정적인 거동을 보였으며, 급격한 붕괴 없이 완만한 침하 형태로 수렴하였다. Case 2의 시간 경과별 지반 거동은 Fig. 6에 나타내었다.

상·하부 보강 조건인 Case 3에서는 공동 발달과 국부 붕괴가 거의 관찰되지 않아, 세 조건 중 가장 안정적인 붕괴 억제 거동을 보였다. 이는 지오텍스타일

의 여과 효과와 지오텍의 구속 효과가 복합적으로 작용하여 토립자 유출과 전단변형을 제한했기 때문으로 해석된다. 또한 상부와 하부에 설치된 지오킴포지트가 결함부 주변의 유동 집중과 국부 변형을 완화함으로써, 파이핑성 유로의 형성과 공동 확장을 억제한 것으로 판단된다. 그 결과 실험 전 시간대에 걸쳐 육안으로 확인 가능한 파이핑성 유로 또는 공동 발달은 나타나지 않았으며, 지표면에서는 비교적 완만한 균등침하만이 점진적으로 관찰되었다. 이러한 결과는 Case 3 조건에서 지오킴포지트의 구속, 여과 및 응력재분배 효과가 복합적으로 발생되어, 누수 조건에서도 지반의 급격한 붕괴가 효과적으로 억제되었음을 보여준다. Case 3의 시간 경과별 거동 특성은 Fig. 7에 제시하였다.

3.2 시간 경과에 따른 누적 토사 손실량

시간 경과에 따른 공동부피 기반 누적 토사손실량을 분석한 결과, 지오킴포지트 적용 여부에 따라 내부 침식 및 토립자 유출 거동에 뚜렷한 차이가 나타났다. 누적 토사손실량의 시간 변화는 Fig. 8에 제시하였으며, Fig. 8(a)는 초기 3분 구간을 확대한 결과, Fig. 8(b)는 전체 실험 시간인 20분 동안의 변화를 나타낸다. 무보강 조건인 Case 1에서는 누수 초기부터 결함부

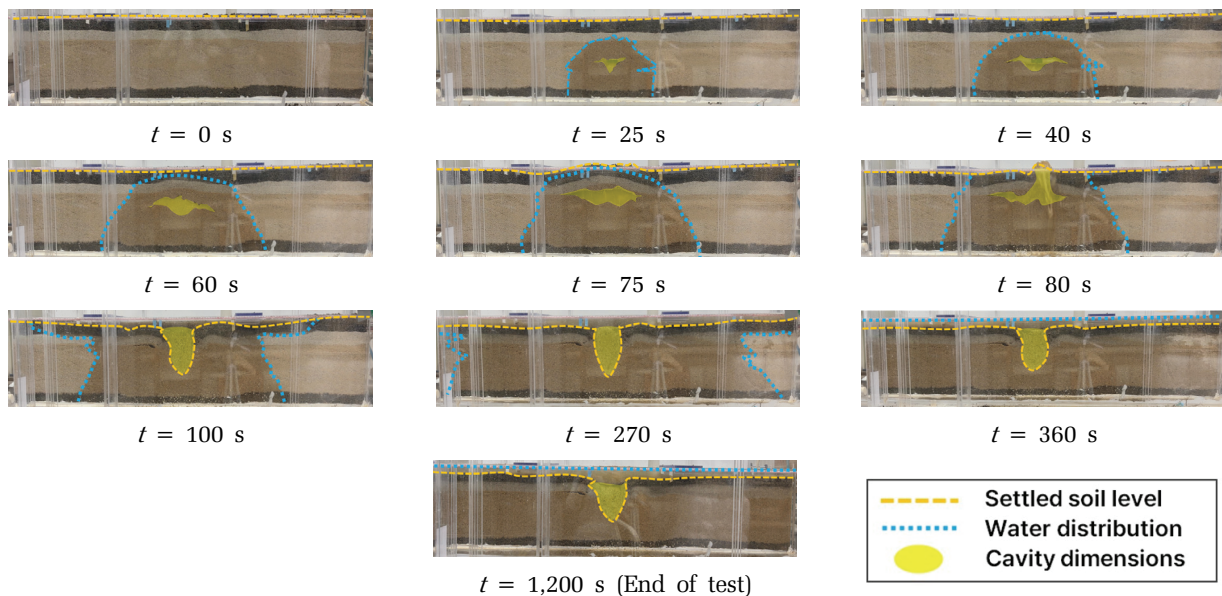


Fig. 5. Cavity development and ground settlement behavior in Case 1 with elapsed time.

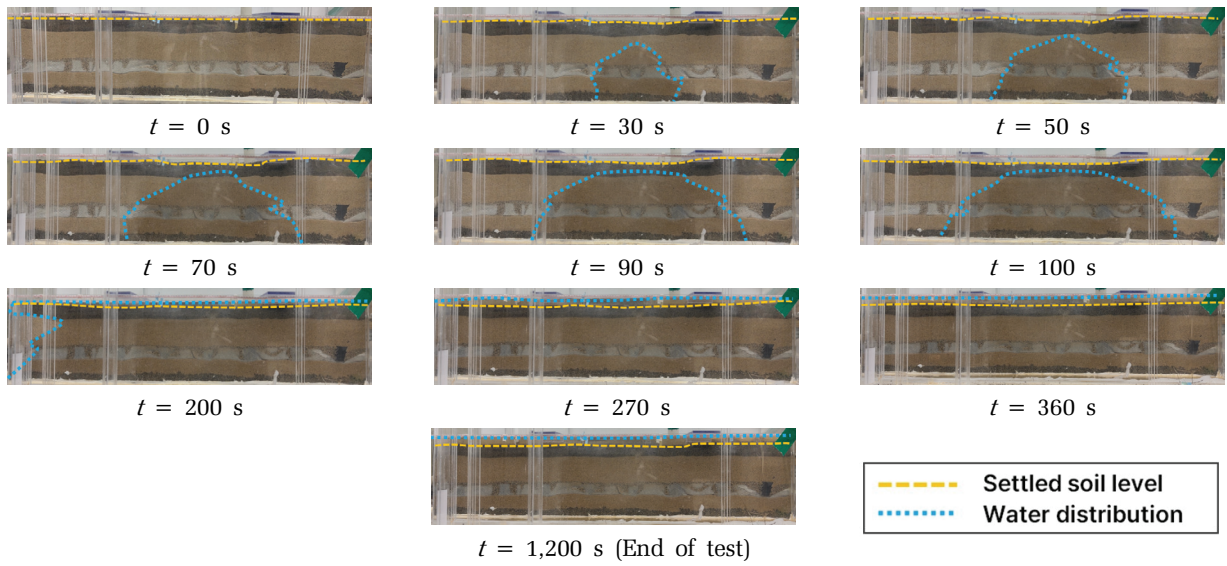


Fig. 6. Cavity development and ground settlement behavior in Case 2 with elapsed time.

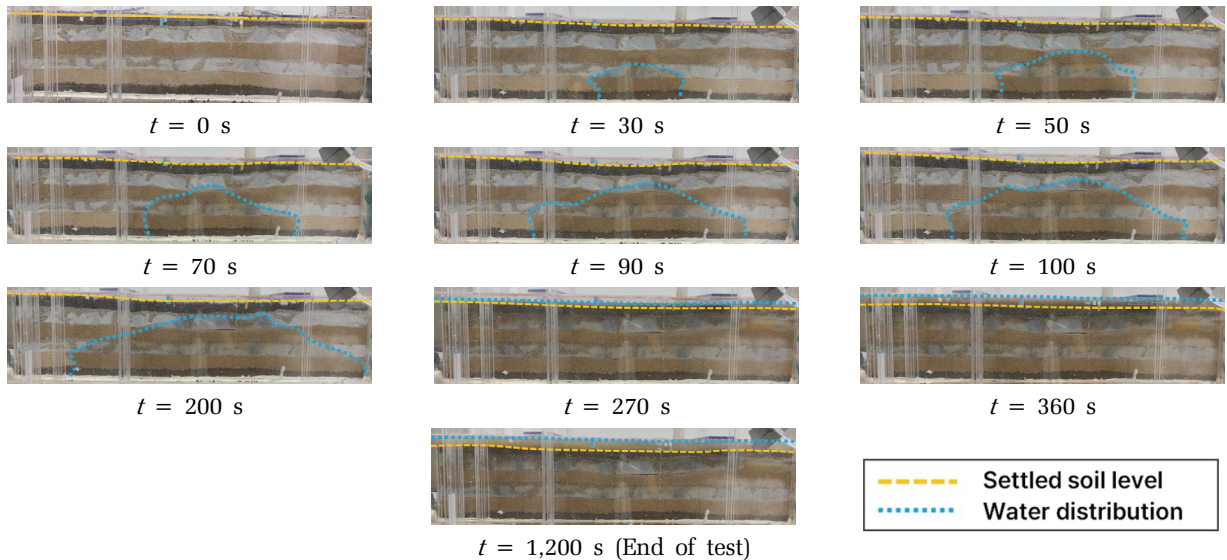


Fig. 7. Cavity development and ground settlement behavior in Case 3 with elapsed time.

주변에서 토립자 유출과 공동 형성이 빠르게 진행되었으며, 시간이 경과함에 따라 누적 토사손실량이 급격히 증가하였다. 특히 약 30-90 s 구간에서 토사손실량 증가가 집중적으로 나타났고, 이후 공동부피로부터 환산한 누적 토사손실량은 약 14.5 kg 수준에 도달한 뒤 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 누수 초기에 결함부 주변으로 유동이 집중되면서

토립자 이동과 공동 발달이 빠르게 진행되었기 때문으로 해석된다. 반면 일정 시간 이후에는 유출 가능한 토립자가 감소하고, 유출 경로의 부분적 막힘 또는 입자 재배열이 발생하면서 추가적인 토사 유실이 제한된 것으로 판단된다.

하부 보강 조건인 Case 2와 상·하부 보강 조건인 Case 3에서는 실험 전 시간대에 걸쳐 공동부피 기반

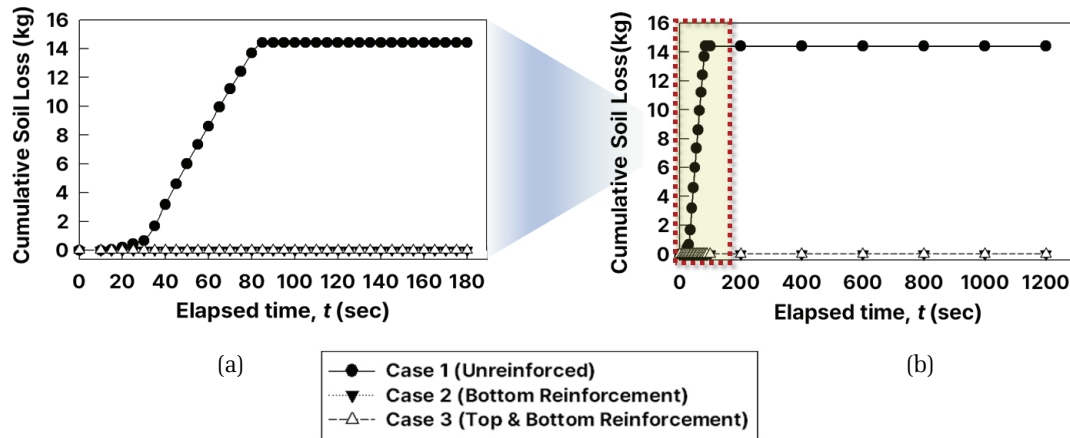


Fig. 8. Variation in cumulative soil loss with elapsed time: (a) enlarged view of the initial 3 min and (b) full experimental period of 20 min.

누적 토사손실량이 거의 0에 가까운 수준으로 유지되었다. 이는 지오텍스타일의 여과 기능이 토립자의 외부 유출을 제한하고, 지오셀의 구속 효과가 보강층 주변의 국부 변형을 완화한 결과로 해석된다. 즉, 두 보강 조건 모두 무보강 조건에서 관찰된 급격한 토립자 유출과 공동 발달을 효과적으로 억제한 것으로 판단된다. 다만 Case 2에서는 상부 보강층이 없는 조건의 특성상 지오펀트 경계부 주변에서 제한적인 충전재 이동 또는 국부 변형이 관찰되었다. 그러나 이러한 변형은 측정 가능한 공동부피 증가나 누적 토사손실량 증가로 이어지는는 않았으며, 최종적으로 급격한 공동 발달이나 국부 붕괴 없이 비교적 안정적인 거동을

을 보였다. Case 3에서는 상부와 하부에 설치된 지오펀트가 토립자 이동과 국부 변형을 동시에 제한함으로써, Case 2에서 관찰된 경계부 주변 변형도 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 Case 3는 토사 유출 억제뿐 아니라 공동 발달 및 국부 변형 억제 측면에서도 가장 안정적인 거동을 보인 것으로 해석된다.

3.3 누적 시간에 따른 침하율

누적 시간에 따른 침하율 변화를 분석한 결과, 보강 조건에 따라 지반 변형 양상과 붕괴 발생 여부에 뚜렷한 차이가 나타났다. 각 Case의 시간 경과에 따른 침하율 변화는 Fig. 9에 제시하였다. 무보강 조건인 Case 1

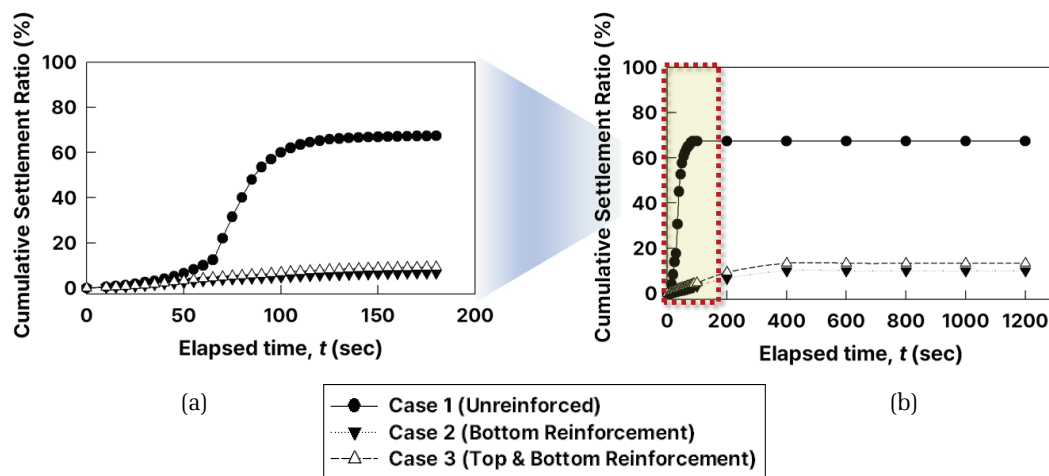


Fig. 9. Variation in cumulative settlement ratio with elapsed time: (a) enlarged view of the initial 3 min and (b) full experimental period of 20 min.

에서는 초기 약 50-100 s 구간에서 침하율이 급격히 증가하였으며, 이후 약 67.33% 수준에서 점차 안정화되는 경향을 보였다. 이는 누수에 의해 결함부 주변에서 토립자 유출과 공동 발달이 빠르게 진행되고, 공동 상부 토체의 지지력이 저하되면서 침하가 단시간 내 집중적으로 발생하였기 때문으로 해석된다. 따라서 Case 1의 침하 거동은 단순한 표면 침하라기보다, 내부침식에 의해 형성된 공동이 일정 규모 이상으로 확대된 이후 공동 천단부가 상부 토체를 더 이상 지지하지 못하면서 발생한 국부 붕괴형 침하로 판단된다. 즉, 초기에는 토립자 유출과 공동 발달이 진행되었고, 이후 공동 천단부의 지지력이 한계에 도달하면서 점진적 침하가 붕괴형 침하로 전이된 것으로 볼 수 있다.

하부 보강 조건인 Case 2에서는 Case 1과 같은 급격한 침하율 증가는 나타나지 않았다. 이는 하부에 설치된 지오킴포지트가 토립자 이동을 제한하고, 결함부 주변의 유동 및 변형 집중을 완화함으로써 공동 형성과 이에 따른 국부 붕괴를 억제했기 때문으로 해석된다. 다만 상부 보강층이 없는 조건의 특성상 지오킴포지트 경계부를 중심으로 제한적인 충전재 이동 또는 국부 변형이 관찰되었다. 그러나 이러한 변형은 급격한 붕괴로 이어지지 않았으며, 최종적으로는 완만한 균등침하 형태로 수렴하였다.

상·하부 보강 조건인 Case 3에서도 공동 발달이나 붕괴 징후 없이 비교적 안정적인 침하 거동이 나타났다. 상부와 하부에 배치된 지오킴포지트가 관 주변 지반을 동시에 구속함으로써, 누수에 의한 토립자 이동과 국부 변형이 효과적으로 완화된 것으로 판단된다. 다만 최종 침하율은 Case 2와 Case 3에서 각각 10.00% 및 13.33%로 나타나, Case 3의 최종 침하율은 Case 2보다 높게 나타났으므로, 상·하부 보강 조건이 하부 보강 조건보다 항상 더 안정적이라고 단정하기는 어렵다. 본 연구는 별도의 다짐을 수행하지 않은 조건에

서 진행되었으며, Case 3의 경우 하수관거 상부와 하부에 각각 보강층이 설치되어 Case 2보다 보강층-토층 경계면이 증가하였다. 이러한 조건에서는 누수 및 포화 과정에서 상·하부 보강층 사이 토체의 토립자 재배열과 압축침하가 발생할 수 있으며, 이로 인해 최종 침하율이 증가한 것으로 판단된다. 사실토에서는 포화도 변화와 습윤 과정에 따라 입자 골격의 재배열이 발생하고, 이에 따른 체적 감소 및 침하가 유발될 수 있음이 보고된 바 있다(Milatz et al., 2016). 따라서 Case 3의 침하는 공동 붕괴에 의한 급격한 침하라기보다는, 보강층 배치와 다짐조건의 영향을 받은 누적 침하로 해석하는 것이 타당하다. 향후 연구에서는 다짐도를 주요 변수로 고려하여 보강재 배치 위치와 다짐 조건이 침하 거동 및 보강 효과에 미치는 영향을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 종합하면, Case 1에서는 내부침식과 공동 붕괴에 의한 급격한 침하가 발생한 반면, Case 2와 Case 3에서는 급격한 붕괴형 침하가 억제되었다. 특히 Case 3의 경우 최종 침하율은 Case 2보다 다소 높게 나타났으나, 공동 발달과 공동부피 기반 토사손실량이 거의 발생하지 않았다는 점에서 구조적 붕괴보다는 포화 및 입자 재배열에 의한 완만한 침하로 해석된다. 각 Case의 최종 토사손실량, 최종 침하율 및 주요 지반 거동은 Table 3에 요약하였다.

종합하면, Case 1에서는 내부침식에 따른 공동 발달과 공동 천단부 붕괴로 인해 급격한 침하가 발생한 반면, Case 2와 Case 3에서는 이러한 붕괴형 침하가 효과적으로 억제되었다. 특히 Case 3의 최종 침하율은 Case 2보다 다소 높게 나타났으나, 측정 가능한 공동 발달과 공동부피 기반 토사손실량이 거의 발생하지 않았다는 점에서 구조적 붕괴에 의한 침하라기보다는 포화 과정에서의 입자 재배열 및 체적 감소에 따른 완만한 침하로 해석된다.

Table 3. Summary of final soil loss, settlement ratio, and main behavior for each case

Cases	Final soil loss (kg)	Final settlement ratio (%)	Main behavior
Case 1	14.41	67.33	Collapse-type settlement induced by cavity formation and expansion
Case 2 (below image-detection threshold)	0.00	10.00	Uniform settlement without measurable cavity formation
Case 3	0.00	13.33	Stable uniform settlement with suppressed cavity development and soil loss



3.4 보강에 의한 하수관거 누수 기반 싱크홀 저감 메커니즘

지오컴포지트는 하수관거에 결함이 발생하더라도 결함부 인근에 형성되는 선호 유로(preferential flow path)를 분산시켜, 유선 집중에 따른 국부 수리구배 (i)의 피크를 완화하는 역할을 한다. 이에 따라 누수 유동은 특정 지점으로 집중되기보다 지오컴포지트를 따라 수평 및 상향 방향으로 분산·침투하게 되며, 결함부 주변에서의 급격한 내부침식 진행이 억제된다(Huang et al., 2017). 특히 지오텍스타일은 여과 및 배수 기능을 통해 세립분의 외부 유실을 억제하고 간극수압 u 의 국부적 누적을 저감하며, 지오셀은 토립자에 대한 구속 효과를 발휘하여 전단변형과 공극 발달을 제한한다.

이와 같은 복합 작용은 결과적으로 지반의 유효응력 (σ')을 보다 안정적으로 유지하도록 하며, 내부침식과 공동의 성장 가능성을 저감한다. 지오컴포지트는 단순히 토사를 지지하는 역할에 그치지 않고, 누수 유동의 분산, 토립자 유실 억제, 응력 재분배 및 지반 구속을 동시에 유도함으로써 침하의 진행과 싱크홀 발생 가능성을 종합적으로 감소시키는 데 크게 기여한

다. 이러한 복합 보강재의 싱크홀 저감 메커니즘은 Fig. 10에 제시하였다. 싱크홀 또는 지반함몰은 관거 결함, 누수, 지하수위 변화, 토사의 입도 및 다짐 상태, 퇴매움재 조건, 강우 침투, 반복 교통하중 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 본 연구에서 제안한 지오셀-지오텍스타일 복합 보강 공법은 싱크홀 발생을 단독으로 방지하는 공법으로 해석되어서는 안 된다. 본 연구의 결과는 하수관 누수로 인해 발생할 수 있는 토양 유실, 내부침식, 공동 발달 및 국부적 지반변형을 완화할 수 있는지를 평가한 것으로, 싱크홀 위험 저감에 대한 간접적이고 제한적인 보조 대책으로 이해하는 것이 타당하다.

다만 본 연구에서는 간극수압, 국부 수리구배 및 유속장을 직접 측정하지 않았으므로, 유동 집중 완화와 수리구배 저감 효과는 시간 경과별 영상 관찰, 공동 발달 여부, 공동부피 기반 누적 토사손실량 및 침하율 변화를 종합하여 해석한 결과이다. 향후 연구에서는 간극수압계, 유속 추적 기법, PIV 분석 또는 영상 기반 입자 이동 분석을 병행하여 지오컴포지트의 수리-역학적 저감 메커니즘을 보다 정량적으로 검증할 필요가 있다.

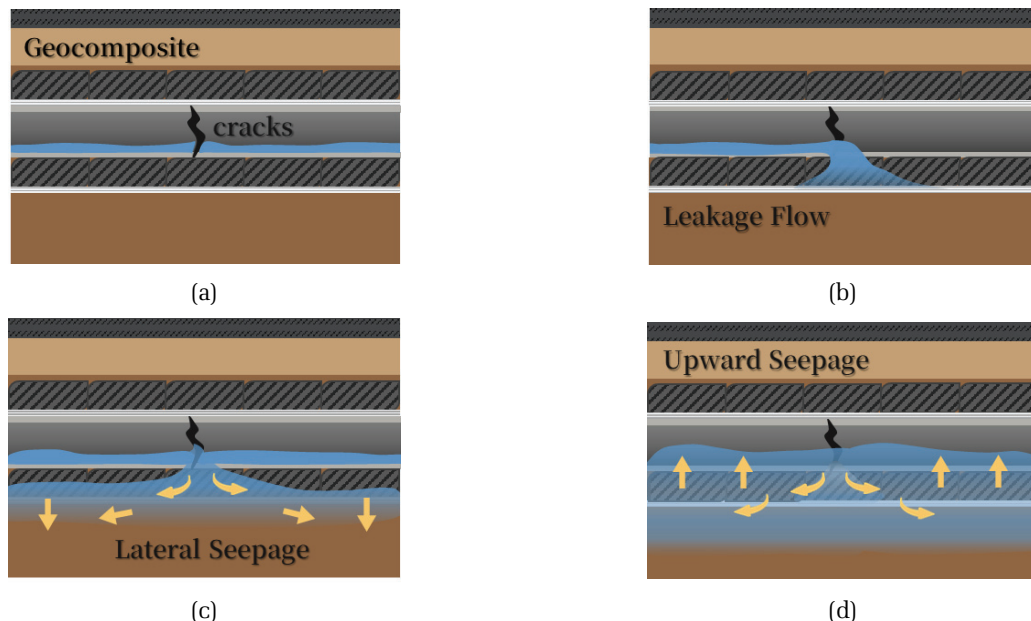


Fig. 10. Mechanism of sinkhole mitigation by geocell-geotextile reinforcement under sewer pipe leakage: (a) pipe defect, (b) sewer leakage, (c) lateral migration of leaked water followed by infiltration into the ground, and (d) upward seepage and expansion of ground saturation.

3.5 수학적 해석

하수관거 결함부에서 누수가 발생하면 결함부 주변에는 국부적인 침투류가 형성되며, 이로 인해 토립자에 작용하는 유효응력이 감소할 수 있다. 특히 유출수가 좁은 균열부를 통해 집중적으로 이동할 경우, 짧은 유동 경로 내에서 수두손실이 발생하여 국부 수리구배가 임계 상태에 근접할 수 있다. 본 연구에서는 결함부 주변의 실제 3차원 침투류를 단순화하여, 국부 침투류가 사질토 지반의 유효응력 저하와 내부침식을 유발할 수 있는 조건을 개념적으로 평가하였다. 포화 사질토에서 상향 침투류에 의한 quick condition을 기준으로 임계 수리구배는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (4)$$

여기서 i_{cr} 은 임계 수리구배, G_s 는 토립자의 비중, e 는 간극비를 의미한다. 일반적인 모래질 토사의 경우 G_s 는 약 2.65이며, $e=0.55-1.0$ 범위에서 i_{cr} 은 약 0.8-1.1 수준으로 산정된다. 따라서 결함부 주변의 국부 수리구배가 0.8-1.1 범위 이상에 도달할 경우, 토립자 간 접촉력이 급격히 저하되어 내부침식, 파이핑 및 공동 발달이 촉진될 수 있다.

임계 수리구배 조건은 수두차 관점에서 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta h_{cr} = i_{cr} \cdot L \quad (5)$$

여기서 Δh_{cr} 은 임계 수두차, L 은 누수 경로 길이를 나타낸다. 결함부 주변에서는 유동 경로가 짧기 때문에 L 이 제한적인 경우 작은 수두차만으로도 국부 수리구배가 임계 상태에 근접할 수 있다. 이때 발생하는 간극수압 증가량은 Eq. (6)과 같이 산정된다.

$$\Delta u_{cr} = \gamma_w \cdot \Delta h_{cr} \quad (6)$$

여기서 Δu_{cr} 은 수두차에 따른 간극수압 증가량, γ_w 는 물의 단위중량이다. 예를 들어 $\Delta h_{cr}=0.1-0.2$ m로 가정 할 경우, Δu_{cr} 은 약 1-2 kPa 수준으로 산정된다. 이는 하수관거 결함부 주변에서 큰 토사손실이 발생하기 이전에도, 작은 수두차와 간극수압 증가만으로

국부적인 불안정이 유발될 수 있음을 의미한다. 포화 지반에서 유효응력은 Eq. (7)과 같이 전체응력과 간극수압의 차이로 정의된다.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (7)$$

여기서 σ' 은 유효응력, σ 는 전체응력, u 는 간극수압을 의미한다. 누수로 인해 결함부 주변의 간극수압이 증가하면 유효응력은 감소하며, 특히 국부 수리구배 i 가 임계 수리구배 i_{cr} 에 도달하거나 이를 초과할 경우 토립자 간 접촉력이 크게 저하되어 유효응력은 0에 가까워질 수 있다. 일반적인 모래질 지반에서 i_{cr} 은 약 0.8-1.1 수준으로 산정되므로, 결함부 주변의 국부 수리구배가 이 범위에 근접할 경우 파이핑 및 공동 발달이 시작될 수 있는 불안정 조건이 형성된다.

이러한 수학적 관계는 무보강 조건에서 관찰된 급격한 공동 발달과 붕괴형 침하가 단순한 토사 유출량 증가뿐만 아니라, 결함부 주변의 국부 수리구배 증가와 유효응력 저하에 의해 설명될 수 있음을 보여준다. 반면 지오펜포지트는 토립자 이동을 제한하고 결함부 주변의 유동 및 변형 집중을 완화함으로써, 국부 수리구배가 임계 상태에 도달하는 과정을 지연 또는 억제한 것으로 해석된다. 다만 본 연구에서는 간극수압과 국부 수리구배 및 유속장을 직접 계측하지 않았으므로, 위 해석은 실험에서 관찰된 공동 발달, 토사손실량 및 침하율 변화를 설명하기 위한 개념적 수리-역학 해석으로 제시하였다.

3.6 싱크홀 발생 가능성 지수, Π

하수관거 누수에 의해 발생하는 싱크홀 거동은 단일 인자만으로 설명되기 어렵다. 누수부 주변의 국부 수리구배, 간극수압 증가, 공동의 확장 정도가 복합적으로 작용하며, 이들 인자가 임계 상태에 도달할 경우 공동 붕괴와 지표 침하로 이어질 수 있다(Scheperboer et al., 2022). 따라서 본 연구에서는 실험 결과를 해석하기 위한 개념적 지표로 싱크홀 발생 가능성 지수 (sinkhole propensity index, Π)를 Eq. (8)와 같이 정의하였다.

$$\Pi = \left(\frac{i}{i_{cr}} \right) \cdot \left(\frac{\Delta u}{\sigma_0} \right) \cdot \left(\frac{B}{B_{cr}} \right) \quad (8)$$

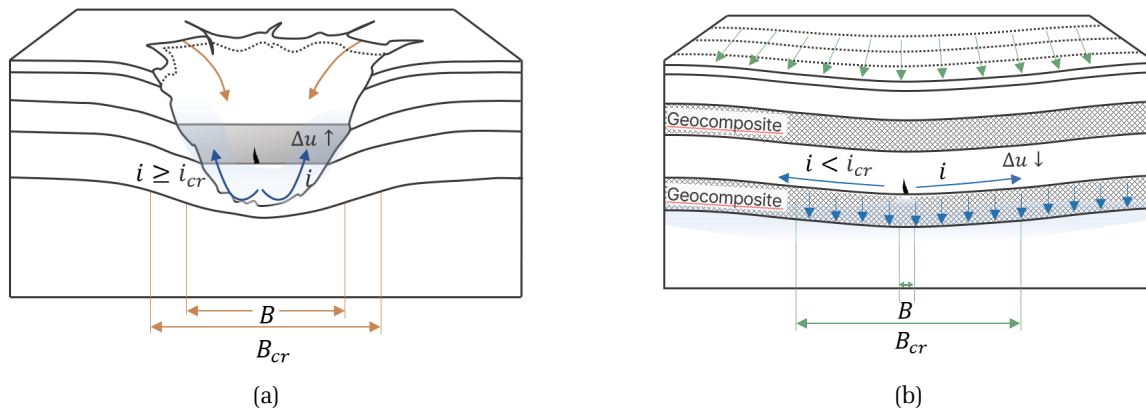


Fig. 11. Conceptual interpretation of the sinkhole propensity index (II) according to reinforcement condition: (a) unreinforced condition and (b) reinforced condition.

여기서, B 는 공동 확장 폭(cavity span), B_{cr} 은 공동 천단부가 붕괴되기 전의 임계 공동 폭(critical span before roof collapse)을 의미한다. Eq. (8)에서 첫 번째 항은 수리구배의 임계 상태 도달 정도를, 두 번째 항은 간극수압 증가에 따른 유효응력 저하 정도를, 세 번째 항은 공동 확장에 따른 붕괴 한계 접근 정도를 나타낸다. 제안된 지수에 따른 무보강 및 보강 조건의 개념적 거동은 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)는 무보강 조건에서 $II \geq 1$ 에 도달하는 경우를 나타낸 것으로, 누수 유동이 결합부 주변으로 집중되면서 국부 수리구배와 간극수압이 증가하고, 공동 폭이 임계 폭에 근접하여 붕괴 가능성이 커지는 상태를 의미한다. 이 경우 공동이 국부적으로 성장하고, 상부 지반의 지지력이 저하되면서 싱크홀 형태의 지반 붕괴로 이어질 수 있다. 반면 Fig. 11(b)는 지오킴포지트가 적용된 조건에서 $II \ll 1$ 로 유지되는 안정 상태를 나타낸다. 보강층은 누수 유동을 분산시키고 간극수압의 국부적 상승을 완화함으로써 수리학적 불안정성을 저감한다. 또한 보강층의 구속 및 하중 분산 효과는 공동 천단부의 안정성을 증가시켜 B_{cr} 을 상대적으로 크게 유지하는 데 기여한다. 이에 따라 보강 조건에서는 공동의 급격한 성장보다 완만한 침하 또는 안정적인 변형 거동이 우세하게 나타난다. 따라서 제안된 싱크홀 발생 가능성 지수는 하수관거 누수 조건에서 무보강 지반과 보강 지반의 거동 차이를 설명하기 위한 개념적 해석 지표로 활용될 수 있다. 특히 지오킴포지트는 국부 수리구배와 간극수압 상승을 저감하고, 공동 붕괴에 대한 저항성을 증가시킴으로써 II 를 감소시키는

역할을 하는 것으로 해석된다.

따라서 제안된 싱크홀 발생 가능성 지수, (II)는 하수관거 누수 조건에서 무보강 지반과 보강 지반의 거동 차이를 설명하기 위한 개념적 해석 지표로 활용될 수 있다. 특히 지오킴포지트는 국부 수리구배 증가, 유효응력 저하 및 공동 확장으로 이어지는 싱크홀 발생 전이 과정을 억제함으로써 II 를 낮추는 역할을 하는 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서는 간극수압 및 유효응력을 직접 계측하지 않았으므로, 이들 인자를 이용한 싱크홀 발생 가능성의 정량 평가는 수행하지 않았다. 대신, 실험에서 직접 관측된 최종 침하율, 침하속도, 누적 유출량 및 토양 유실량을 기반으로 보강 조건별 효과를 평가하였다. 그 결과, 지오킴-지오텍스 타일 복합 보강층은 누수 조건에서 토양 유실과 급격한 지반변형을 완화할 수 있는 가능성을 보였으나, 보강 위치와 배수 조건에 따라 누적 침하가 증가할 수도 있음을 확인하였다. 따라서 향후 연구에서는 간극수압, 유효응력 변화 및 토층 내부 수리경사 등을 직접 계측하여 보강 공법의 안정성 평가를 보다 정량화할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수관거 결합부 누수에 따른 토사 유실, 공동 발달 및 지반침하 거동을 실내 모형실험을 통해 재현하고, 지오킴포지트의 적용 위치에 따른 싱크홀 위험 저감 효과를 비교·평가하였다. 본 연구 조건에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

pp. 487-500

pp. 501-509

pp. 511-527

pp. 529-539

pp. 541-551

pp. 553-564

pp. 565-582

pp. 583-596

첫째, 무보강 조건에서는 하수관거 결함부 누수 이후 결함부 주변으로 유동이 집중되면서 토립자 유출, 파이핑성 내부침식 및 공동 발달이 빠르게 진행되었다. 이후 공동이 일정 규모 이상으로 확대되면서 공동 천단부의 지지력이 저하되었고, 최종적으로 급격한 지반함몰 형태의 붕괴형 침하가 발생하였다. 이는 하수관거 결함부 누수가 토사 유실과 공동 확장을 유발하여 지반 안정성을 급격히 저하시킬 수 있음을 보여준다.

둘째, 지오컴포지트를 적용한 조건에서는 무보강 조건에서 관찰된 급격한 공동 발달과 국부 붕괴가 효과적으로 억제되었다. 이는 지오텍스타일의 여과 기능이 토립자의 외부 유출을 제한하고, 지오셀의 구속 효과가 보강층 및 주변 지반의 국부 변형을 완화하였기 때문으로 판단된다. 그 결과 보강 조건에서는 급격한 붕괴형 침하 대신 완만한 변형 및 균등침하가 나타났다. 지오컴포지트 적용이 하수관거 누수 조건에서 지반 거동을 붕괴형 거동에서 안정적인 변형 거동으로 전환하는 데 기여함을 확인하였다.

셋째, 지오컴포지트의 설치 위치와 연속성은 보강 효과에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하부 보강 조건과 상·하부 동시 보강 조건 모두 공동부피 기반 토사손실량이 거의 발생하지 않았으며, 무보강 조건에 비해 침하 및 붕괴 거동이 현저히 완화되었다. 특히 상·하부 동시 보강 조건에서는 공동 발달과 붕괴 징후가 관찰되지 않아 붕괴 억제 측면에서 가장 안정적인 거동을 보였다. 다만 최종 침하율은 하부 보강 조건보다 다소 높게 나타났는데, 이는 보강 효과의 저하라기보다 상·하부 보강층 사이 토체의 초기 충전 상태, 포화 진행 및 입자 재배열에 따른 완만한 침하가 반영된 결과로 해석된다.

종합적으로, 지오컴포지트는 하수관거 누수로 인한 토립자 유출, 공동 발달 및 급격한 붕괴형 침하를 억제하는 데 효과적인 보강 방안으로 평가된다. 다만 본 연구 결과는 현장 규모의 성능을 직접적으로 예측하기 위한 설계 기준이라기보다는, 제한된 실험실 조건에서 누수로 인한 토양 유실 및 지반 변형 저감 가능성을 평가하기 위한 기초적 연구 결과로 해석되어야 한다. 실제 현장 적용을 위해서는 토사의 입도분포, 세립분 함량, 다짐도, 투수계수, 지하수위, 관거 결함의 크기와 위치, 누수 유량 등 다양한 현장 조건을 고

려한 추가 검증이 필요하다. 또한 간극수압, 국부 수리구배 및 유속장을 직접 측정하지 않았으므로, 보강재에 의한 유동 집중 완화 및 수리-역학적 저감 메커니즘은 관찰 결과에 기반한 개념적 해석으로 제시되었다. 본 연구에서 제안한 복합 보강 공법은 싱크홀 발생을 근본적으로 차단하는 단일 대책이 아니라, 하수관 누수로 인한 토양 유실과 공동 발달을 억제함으로써 지반함몰 위험을 완화할 수 있는 보조적·예방적 공법으로 제안된다. 실제 현장 적용을 위해서는 관거 결함 상태, 지반 조건, 지하수위, 강우 및 교통하중 등을 포함한 종합적인 위험도 평가가 병행되어야 한다. 향후 연구에서는 결함 크기, 누수 유량, 지하수위, 다짐도 및 반복하중 조건을 고려한 추가 실험과 함께, 간극수압, 변위장, 유속장 및 토사 유실량을 연계한 정량 예측 기반 분석이 필요하다. 이를 통해 지오컴포지트 보강층의 싱크홀 억제 메커니즘을 보다 명확히 규명하고, 노후 하수관거 주변 지반 보강을 위한 설계·시공·점검 기준으로 확장할 수 있을 것이다.

기호설명 및 약어 정리 (해당 경우에만)

K 이론적 투수계수(cm/s)

n 공극률

m_{loss} 유실 토사의 질량 또는 토사손실량(g 또는 kg)

ρ_b 혼합토의 밀도(g/cm³)

V_c 공동 부피(cm³)

S_r 침하율(%)

H_0 초기 지반 높이 (cm)

H_i 시간 i 또는 실험 후 지반 높이(cm)

i 국부 수리구배

i_r 임계 수리구배

G_s 토립자의 비중

e 간극비

Δh_{cr} 임계 수두차

L 누수 경로 길이(m)

u 간극수압(kPa)

Δu 간극수압 증가량(kPa)

Δu_{cr} 임계 수두차에 따른 간극수압 증가량(kPa)

$\Delta \gamma_w$ 물의 단위중량(kN/m³)

σ' 유효응력(kPa)

σ 전체응력(kPa)



- II 싱크홀 발생 가능성 지수
 B 공동 확장 폭(cm 또는 m)
 B_{cr} 공동 천단부 붕괴 전 임계 공동 폭(cm 또는 m)

References

- ASTM International. (2025). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, ASTM D6913/D6913M-17(2025).
- Avesani Neto, J.O., Bueno, B.S., and Futai, M.M. (2013). A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell, *Geosynth. Int.*, 20(3), 129-142.
- Chapuis, R.P. and Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils, *Can. Geotech. J.*, 40(3), 616-628.
- Chen, X., Chen, W., Zhao, L., and Chen, Y. (2023). Influence of buried pipeline leakage on the development of cavities in the subgrade, *Buildings*, 13(7), 1848.
- Dai, Z., Peng, L., and Qin, S. (2024). Experimental and numerical investigation on the mechanism of ground collapse induced by underground drainage pipe leakage, *Environ. Earth Sci.*, 83, 32.
- Dash, S.K., Krishnaswamy, N.R., and Rajagopal, K. (2001). Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, *Geotext. Geomembr.*, 19(4), 235-256.
- Dastpak, P., Sousa, R.L., and Dias, D. (2023). Soil erosion due to defective pipes: A hidden hazard beneath our feet, *Sustainability*, 15(11), 8931.
- Guo, S., Shao, Y., Zhang, T., Zhu, D.Z., and Zhang, Y. (2013). Physical modeling on sand erosion around defective sewer pipes under the influence of groundwater, *J. Hydraul. Eng.*, 139(12), 1247-1257.
- Hegde, A.M. and Sitharam, T.G. (2015). Experimental and numerical studies on protection of buried pipelines and underground utilities using geocells, *Geotext. Geomembr.*, 43, 372-381.
- Huang, Z., Bai, Y., Xu, H., Cao, Y., and Hu, X. (2017). A theoretical model to predict the critical hydraulic gradient for soil particle movement under two-dimensional seepage flow, *Water*, 9(11), 828.
- Indiketiya, S., Jegatheesan, P., and Rajeev, P. (2017). Evaluation of defective sewer pipe-induced internal erosion and associated ground deformation using laboratory model test, *Can. Geotech. J.*, 54, 1184-1195.
- Jeon, H.Y. (2018). Polymeric synthetic fabrics to improve stability of ground structure in civil engineering circumstance, In: *Engineered Fabrics*, IntechOpen, 75-92.
- Karoui, T., Jeong, S.Y., Jeong, Y.H., and Kim, D.S. (2018). Experimental study of ground subsidence mechanism caused by sewer pipe cracks, *Appl. Sci.*, 8(5), 679.
- Kim, S. and Jung, K. (2018). Experimental study on influence of ground collapse due to ground water level lowering, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, 19(11), 23-30.
- Korean Agency for Technology and Standards. (2022). KS F 2302: Test method for particle size distribution of soils, KS F 2302.
- Kwak, T.Y., Chung, C.K., Kim, J., Lee, M., and Woo, S.I. (2019). Experimental assessment for the effect of burial depth on the formation of underground cavities and ground cave-ins by damaged sewer pipes, *J. Korean Geotech. Soc.*, 35(11), 37-49.
- Lee, J.Y. (2025). Characteristics of ground subsidence in Korea based on data from the Underground Safety Information System: Implications for effective countermeasures, *J. Geol. Soc. Korea*, 61(2), 171-180.
- Lee, S., Kang, J., Kim, J., Kong, M., and Baek, W. (2025). Experimental study on cavity formation and ground subsidence behavior based on ground conditions, *Appl. Sci.*, 15(14), 7744.
- Markiewicz, A., Koda, E., and Kawalec, J. (2022). Geosynthetics for filtration and stabilisation: A review, *Polymers*, 14(24), 5492.
- Martins, C., Macedo, J., and Pinho-Lopes, M. (2024). Geocells for unpaved roads: Analysis of design methods from the literature, *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 10, 57.
- Milatz, M., Törzs, T., and Grabe, J. (2016). Settlements in unsaturated granular soils induced by changes in saturation and suction, *E3S Web Conf.*, 9, 14009.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport Joint Information System. (2026). Statistics by cause of ground subsidence accidents, https://www.jis.go.kr/statistics/acd_report003.do (May 7, 2026).
- Nagatani, T., Sawada, Y., Ikebata, R., Ito, S., Sonoda, Y., and Kawabata, T. (2024). A labor-saving method of pipe uplifting countermeasure with geocell-geotextile combination, *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, 11, 3845-3877.
- Pires, A.C.G. and Palmeira, E.M. (2017). Geosynthetic protection for buried pipes subjected to surface surcharge loads, *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 3, 30.
- Sabiri, N.-E., Caylet, A., Montillet, A., Le Coq, L., and Durkheim, Y. (2020). Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 24(5), 670-688.

pp. 487-500

pp. 501-509

pp. 511-527

pp. 529-539

pp. 541-551

pp. 553-564

pp. 565-582

pp. 583-596

- Sato, M. and Kuwano, R. (2015). Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion, *Soils Found.*, 55(4), 829-840.
- Scheperboer, I.C., Suiker, A.S.J., Bosco, E., and Clemens, F.H.L.R. (2022). A coupled hydro-mechanical model for subsurface erosion with analyses of soil piping and void formation, *Acta Geotech.*, 17, 4769-4798.
- Tang, Y., Zhu, D.Z., and Chan, D.H. (2017). Experimental study on submerged sand erosion through a slot on a defective pipe, *J. Hydraul. Eng.*, 143(9), 04017026.
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., and Liu, T. (2020). Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering, *Materials*, 13(7), 1774.
- Yang, S., Sassa, S., Kudai, K., and Wada, Y. (2025). Prototype-scale experiments on the processes and detection of coastal internal erosion, cavity formation and collapse beneath asphalt pavement, *Proc. 12th Int. Conf. Scour Erosion*, Chongqing, China, 1-10.