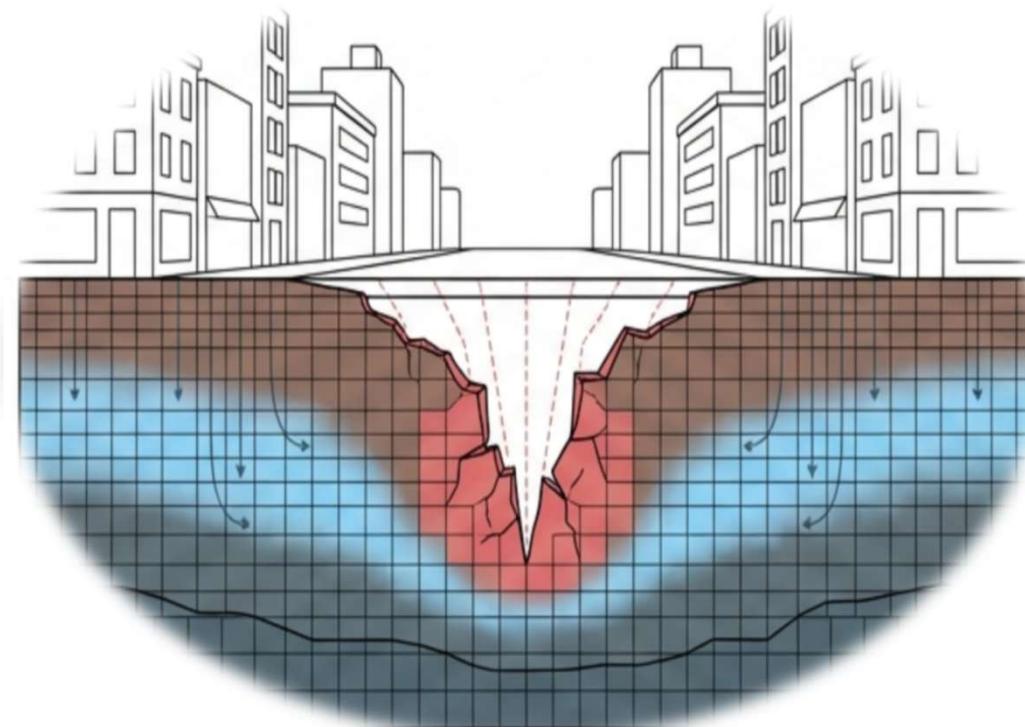


도심 싱크홀 현상의 교육용 시뮬레이션

Urban Sinkhole Formation Simulation

박홍준

2026.1



프로젝트 개요 (Executive Summary)

- 복잡한 사회과학적 쟁점(SSI)을 더 깊이 이해하도록 지원
- 가시화되지 않는 지하의 위험 요소를 에이전츠 기반 모델링으로 재현
- 지하 관로, 지하수 흐름, 굴착공사 등 복잡한 도심 환경 변수가 상호작용하여 싱크홀을 유발하는 과정을 시각화



Feedback Loop

관로 손상과 토양 침식 간의 악순환 구조 구현



Fluid Dynamics

포화도 차이에 따른 지하수 확산 및 침투 시각화



Non-linear Growth

공동(Cavity) 형성의 비선형적 가속 모델링

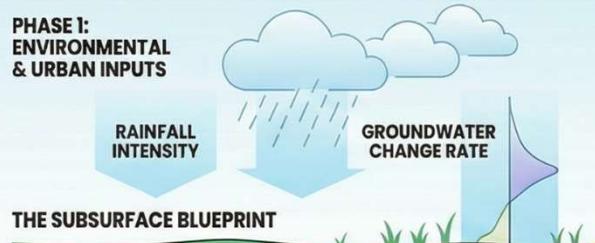


Collapse Types

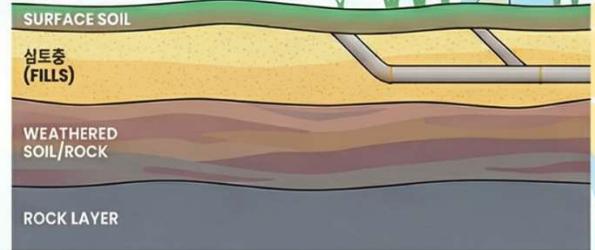
지반 조건에 따른 Punching형 및 Trough형 붕괴 자동 판별

ANATOMY OF AN URBAN SINKHOLE: MECHANISM & SIMULATION

PHASE 1: ENVIRONMENTAL & URBAN INPUTS



THE SUBSURFACE BLUEPRINT

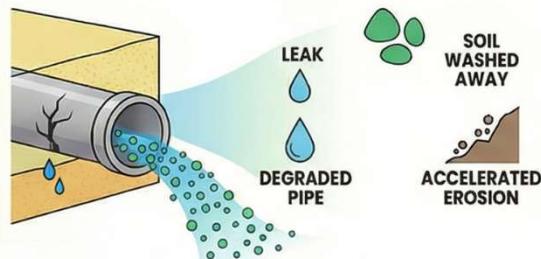


HUMAN AND NATURAL STRESSORS

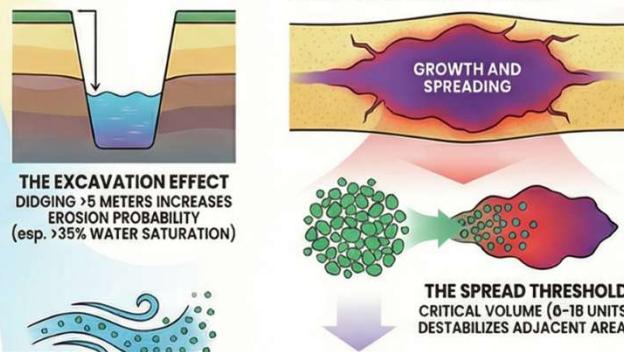


SOIL PARTICLE STABILITY

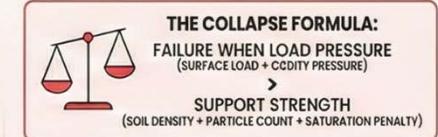
PHASE 2: THE EROSION TRIGGER



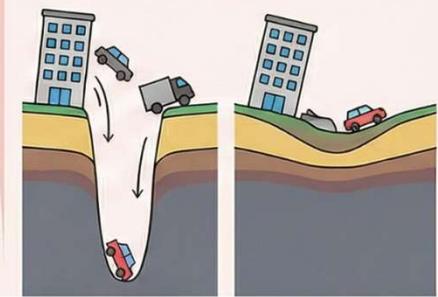
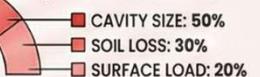
PHASE 3: CAVITY EXPANSION



PHASE 4: FINAL COLLAPSE & CLASSIFICATION



REAL-TIME DANGER INDEX (MAX CONTRIBUTION)



싱크홀 발생의 3대 핵심 동인

지하 관로의 노후화 및 누수



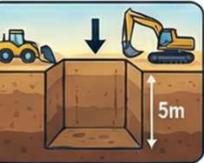
관로 건장도가 낮을수록 험식 확률이 최대 85%까지 증가하며 세월로 유설을 유발합니다.

지하수 흐름과 토양 포화도



수분 포화도가 30%를 초과하면 지하수 흐름이 발생하여 토양 일자의 지지력을 악화시킵니다.

인위적 환경 변화



5m 이상의 심층 굴착 공사와 지표면 하들은 공중 생성을 가속화하는 비선형적 요인입니다.

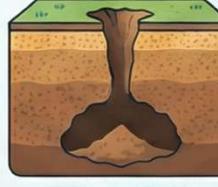
지하 공동의 확장 및 붕괴 유형



지하 공동(Cavity)의 성장
로양 유실점과 강우 강도에 비례하여
지하 빙 공간이 수직 및 수평으로 확장됩니다.

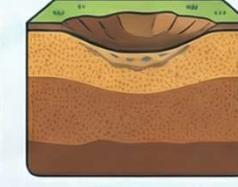
지층 조건에 따른 붕괴 형태

낮은 다짐도



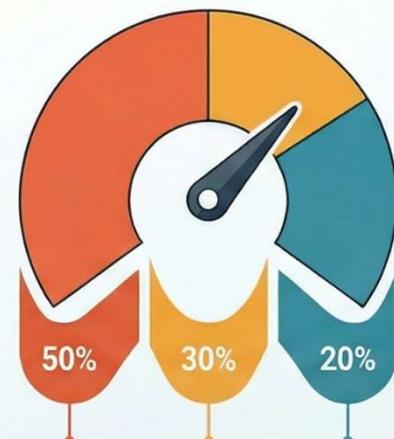
펀칭(Punching)형

높은 다짐도



트로프(Trough)형

위험 지수(Danger Index) 산출

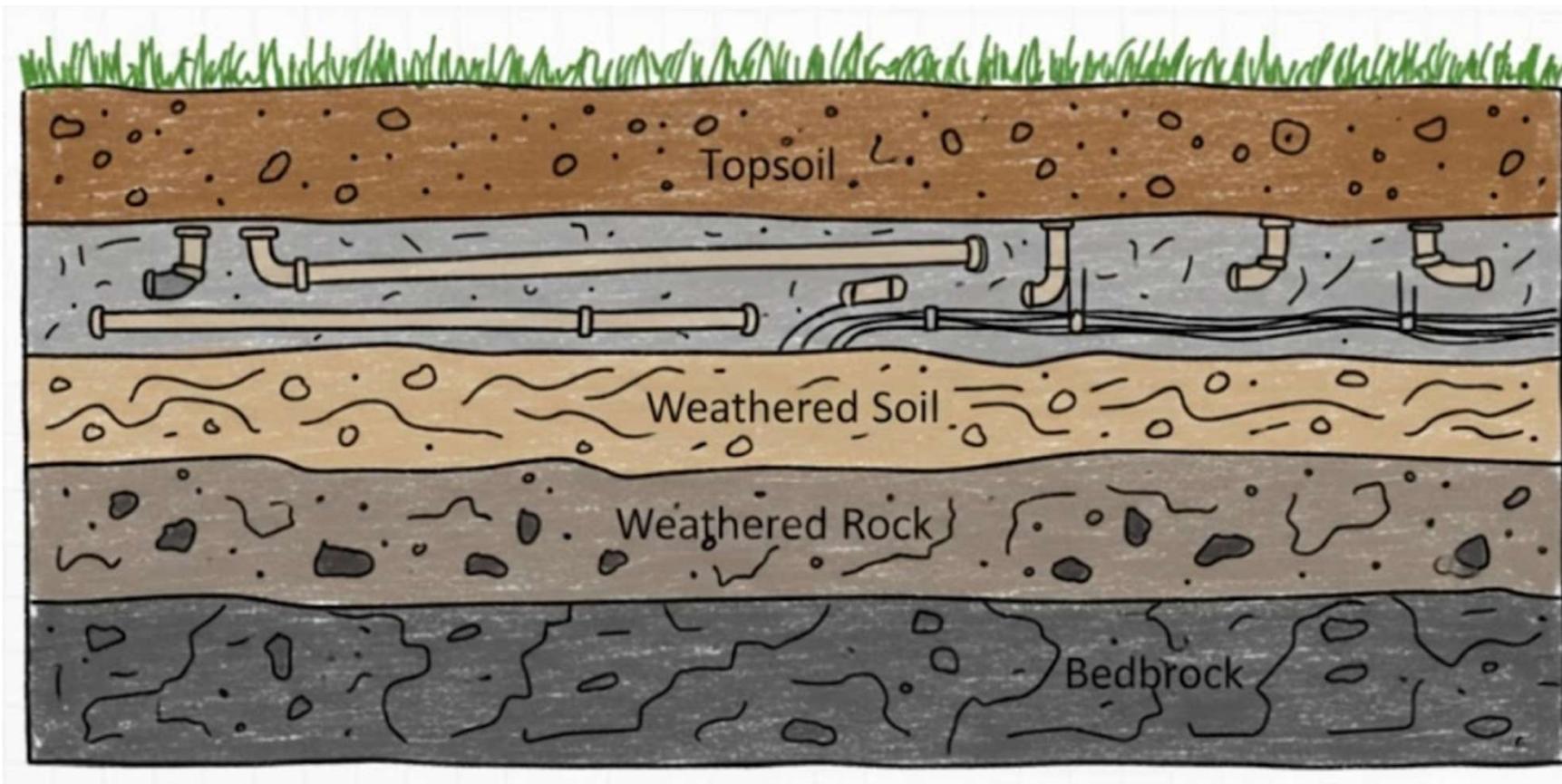


지하 공동 크기
공동 부터가
임계길(5~18)
초과 시 붕괴

토양 유실량
세린토 유실이
방울수록 지지력
급격히 감소

지표 하중
하중 증가 시
토양 지지력과의
금형 파괴

시뮬레이션 대상 지층 단면



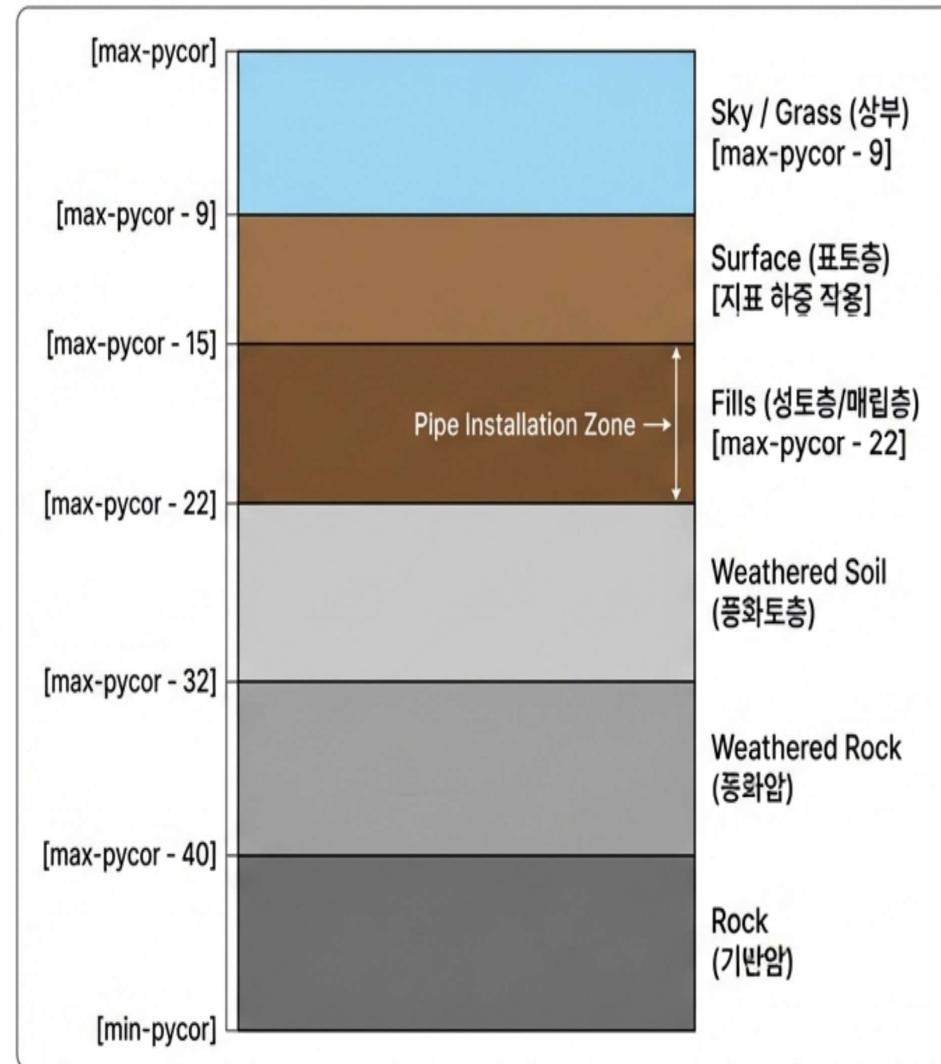
지하 지층 구조 및 환경 설정

지층 정의 (Layer Definition)

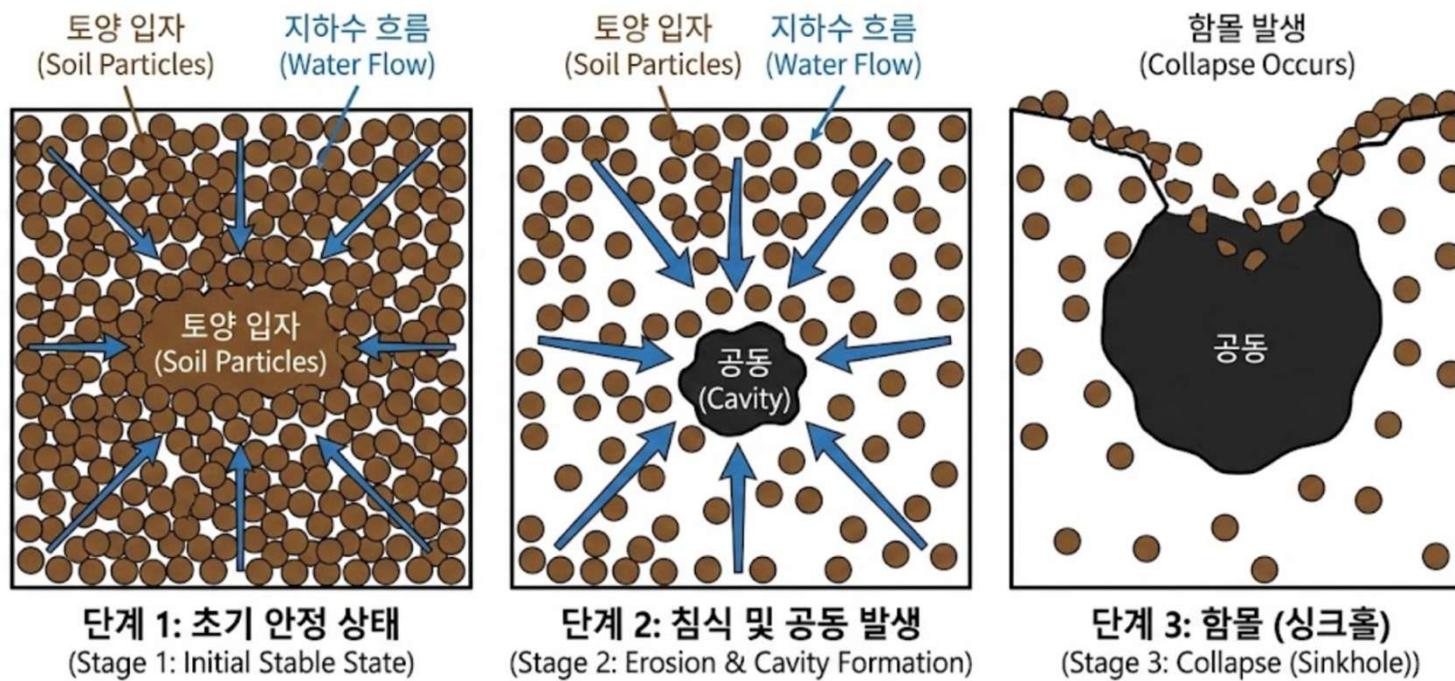
각 지층은 NetLogo의 setup-soil-layers 프로시저를 통해 생성되며, 깊이에 따라 다른 물리적 특성을 가집니다.

패치 속성 (Patch Properties)

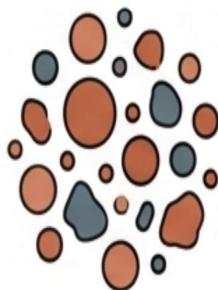
- soil-density (토양 밀도):
 다짐도(compaction-degree)와 연동
- permeability (투수성):
 $100 - \text{compaction-degree}$



시간 경과에 따른 패치 상태 변화 (싱크홀 발생 과정)

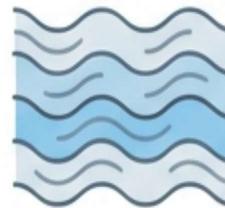


에이전트 기반 모델링 (ABM) 개요



핵심 에이전트: Soil Particles

- 구분: 모래(Sand), 점토(Clay), 자갈(Gravel)
- 속성:
 - stability (안정성)
 - is-fine-particle? (세립토 여부)



핵심 에이전트: Water Flows

- 역할: 지하수 유동 및 토양 운반
- 속성:
 - velocity (유속)
 - carrying-capacity (토양 운반 능력)



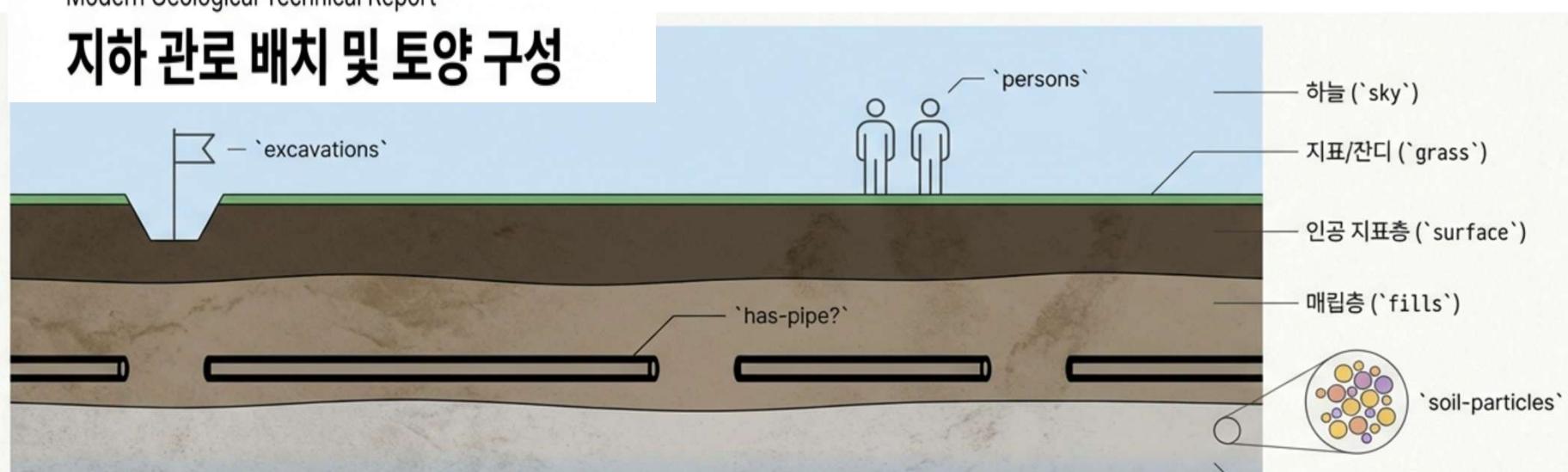
핵심 에이전트: Cavities

- 역할: 지하 공동 (Void)
- 속성:
 - growth-rate (성장 속도)
 - depth / width (수직/수평 확장)

환경 변수 (Environment Variables)

layer-type, has-pipe?, water-saturation, soil-density, danger-index

지하 관로 배치 및 토양 구성



토양의 특성 (Soil Properties)



토양 유형 ('soil-type'): 모래(Sand), 점토(Clay), 자갈(Gravel)로 구분됩니다.

세립토 여부 ('is-fine-particle?'): 모래와 점토는 물에 쉽게 유실될 수 있는 '세립토'로 분류됩니다. 이는 침식의 핵심 대상입니다.

안정성 ('stability'): 각 입자가 가진 고유한 저항력입니다. 자갈 > 점토 > 모래 순으로 높습니다.

다짐도 ('compaction-degree'): 토양의 밀도와 투수성('permeability')을 결정하는 주요 변수입니다. 다짐도가 높을수록 안정성도 함께 증가합니다.

지하 관로의 상태 (Underground Pipe Conditions)



건전도 높음



건전도 낮음

관로 존재 여부 ('has-pipe?'): 매립층('fills')에 불규칙적으로 분포합니다.

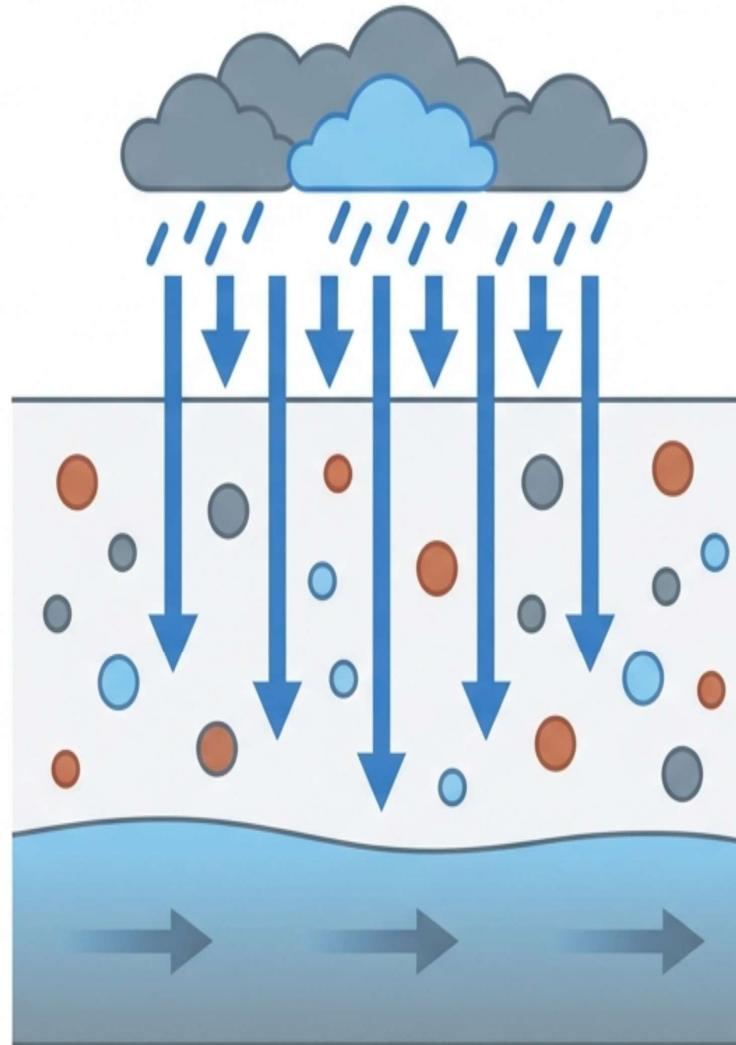
관로 건전도 ('pipe-health'): 0-100 사이의 값으로, 관로의 노후화 및 손상 정도를 나타냅니다. 건전도가 낮을수록 누수 누수 및 주변부 침식의 시작점이 될 확률이 기하급수적으로 증가합니다.

수분 침투 및 지하수 유동 메커니즘

Rainfall Logic (`apply-rainfall`)

비선형 포화 증가

강우 강도가 선형적으로 증가해도,
지반의 포화도는 지수 함수적으로
급증합니다.



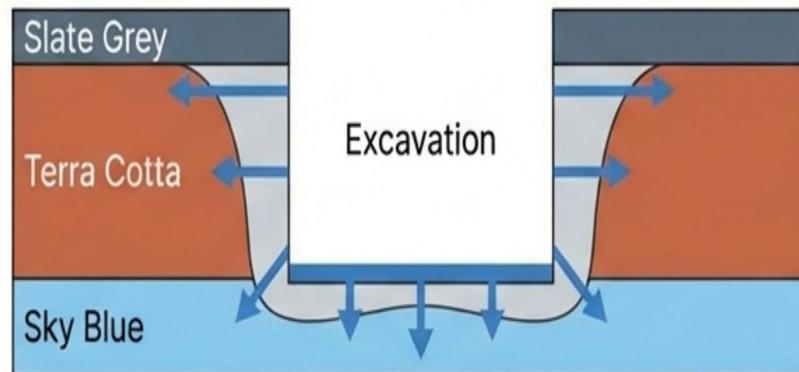
Groundwater Diffusion (`update-groundwater`)

확산 원리

- 이동: 포화도 60% 이상 패치 → 50% 미만 패치
- 임계값: 'WATER-FLOW-THRESHOLD (30%)' 초과 시 지하수 유동 에이전트 생성

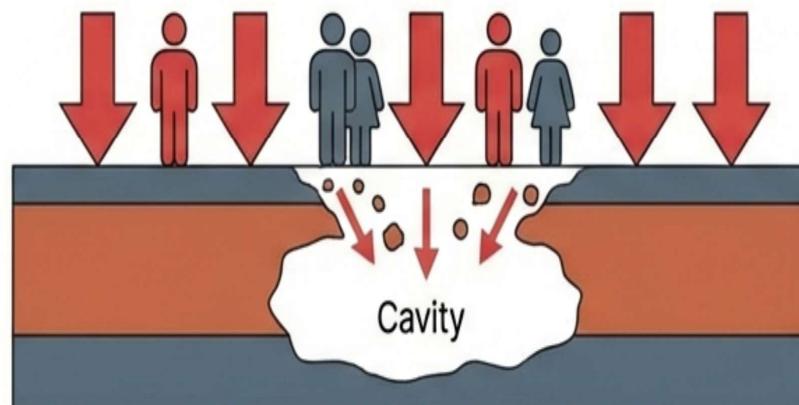
인위적 스트레스 요인: 굴착 및 지표 하중

Excavation Impact ('apply-excitation-effect')



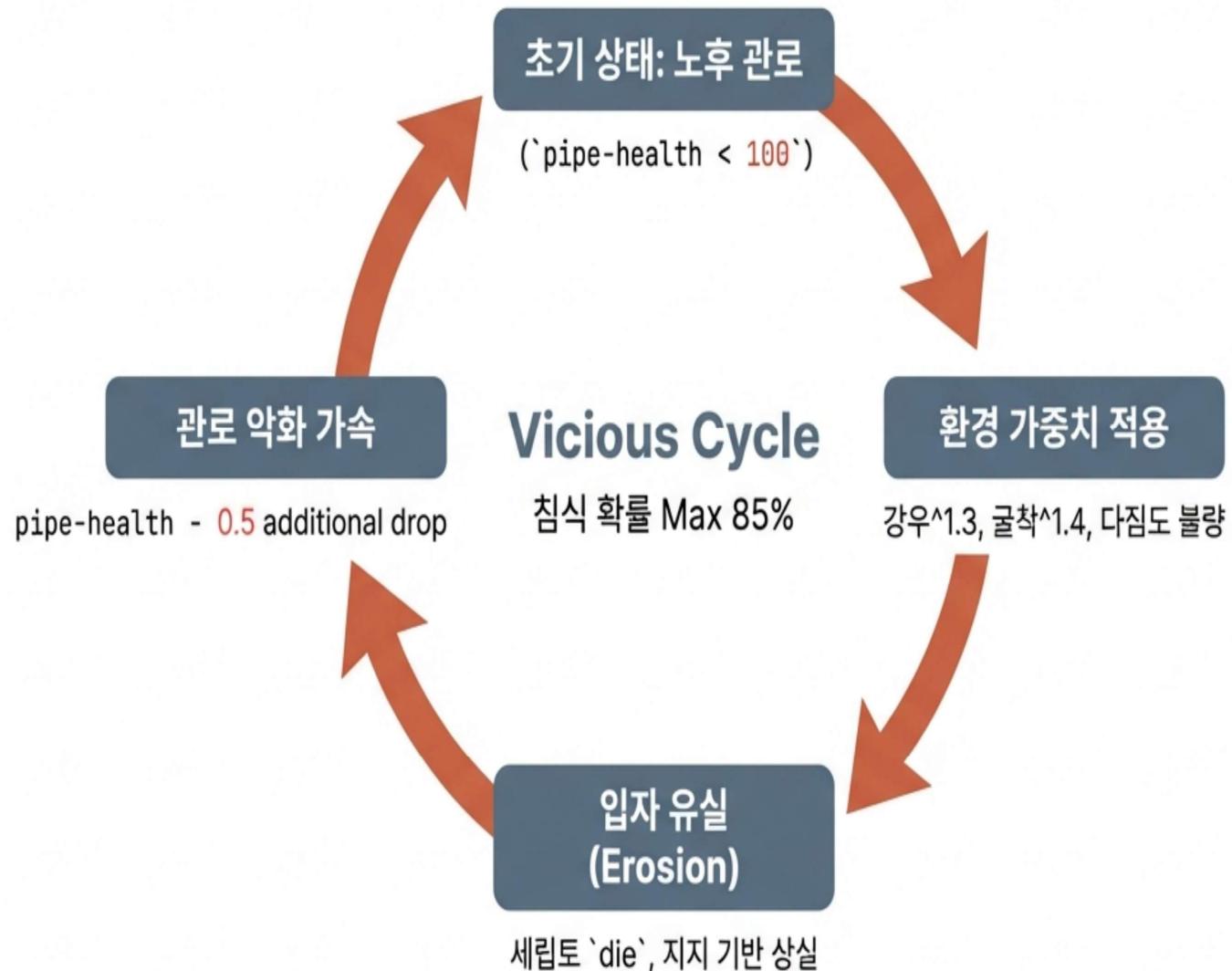
- 영향 범위: 굴착 깊이('excavation-depth') > 5m 일 때 작동
- 배수 효과: 굴착 주변부 수분 급감 → 토양 구조 교란 ('drainage-zone')
- 침식 가속: 깊이에 따른 비선형 침식 확률 증가 ('depth ^ 1.2')

Surface Load ('apply-load')

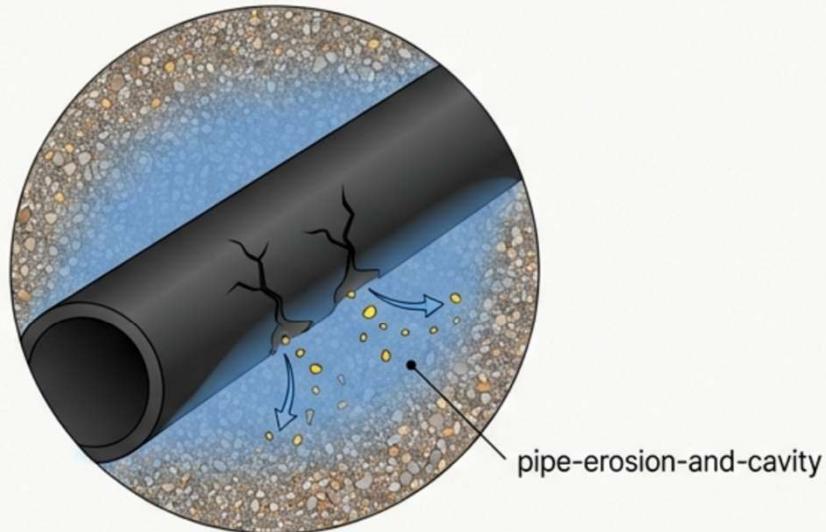


- 진동 및 압력: 지표의 'persons'에 이전트 하중 전달
- 연쇄 반응: 반경 3 이내에 큰 공동('cavity-volume > 3') 존재 시, 상부 토양 입자 유실 가속

관로 손상과 침식의 피드백 루프



관로 누수로 인한 토양 유실(침식)



시스템의 가장 약한 고리는 '건전도가 낮은 관로'입니다.
물이 포화되면 이곳에서부터 침식이 시작됩니다.

침식 확률 (erosion-prob)의 결정 요인

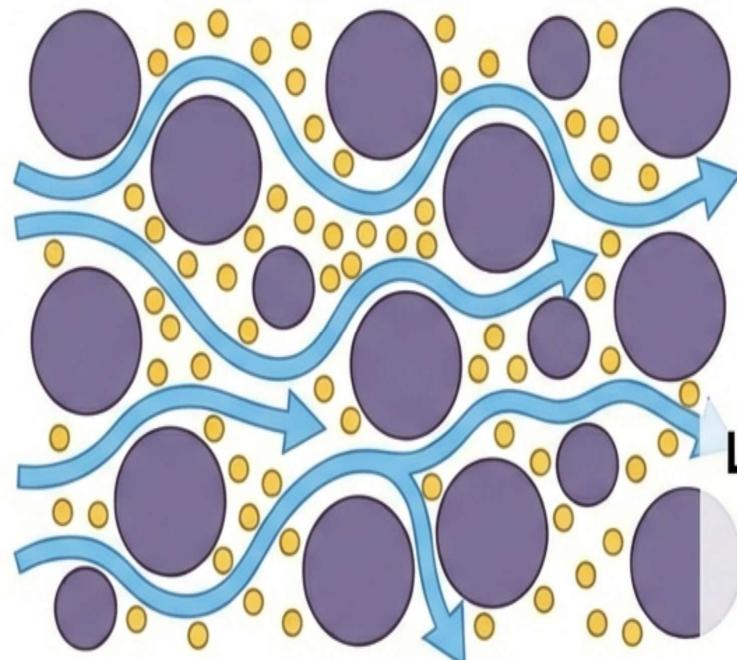
× × × = 최종 침식 확률

기본 침식률 (Base Erosion) : (100 - pipe-health)에 비례합니다.
관로가 낡을수록 확률이 급격히 증가합니다.

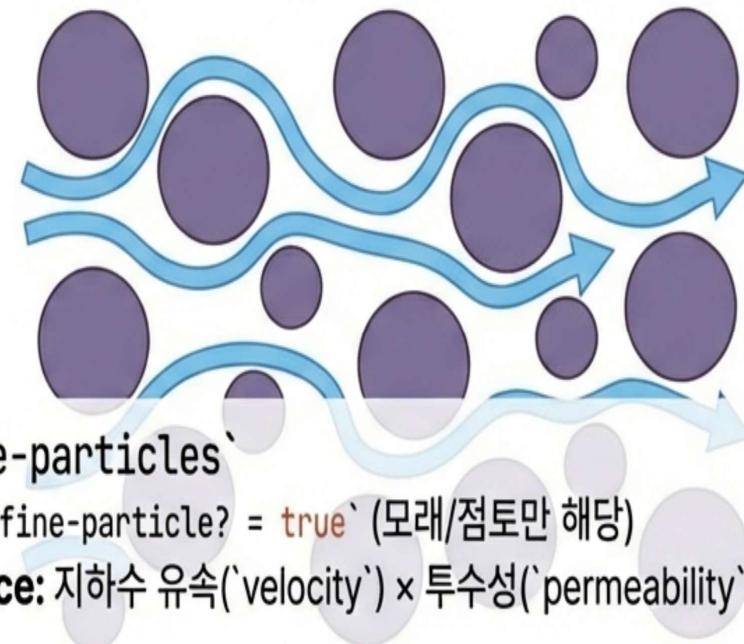
가중치 (Weighting Factors) : 지하수 포화도(water-saturation),
강우 강도(rainfall-intensity), 굴착 깊이(excavation-depth)가
높을수록 침식 확률이 최대 1.2~1.5배까지 증폭됩니다.

지하 침식 메커니즘 (Subsurface Erosion)

초기 상태 (Initial State)



침식 후 (After Erosion)



Logic: `erode-particles`

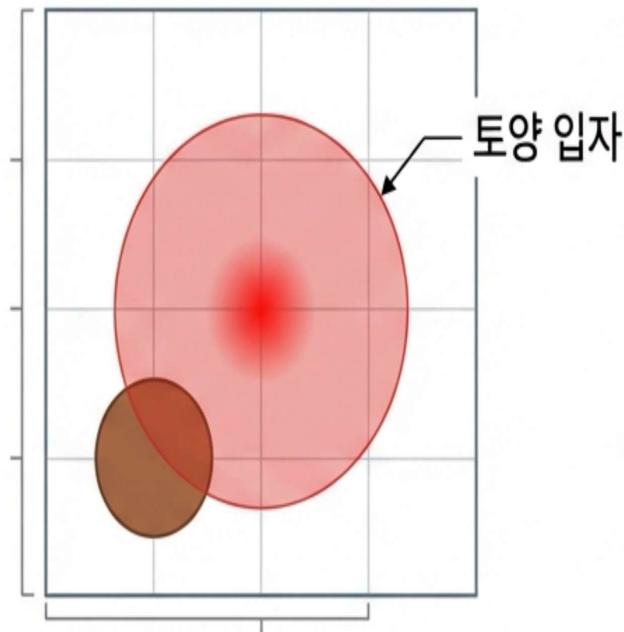
- Target: `is-fine-particle? = true` (모래/점토만 해당)
- Driving Force: 지하수 유속(`velocity') × 투수성(`permeability')
- Resisting Force: 토양 입자의 안정성(`stability')

Condition: Random < (Base Probability * (100 - Stability))

Result: `lost? = true` (입자 소멸)

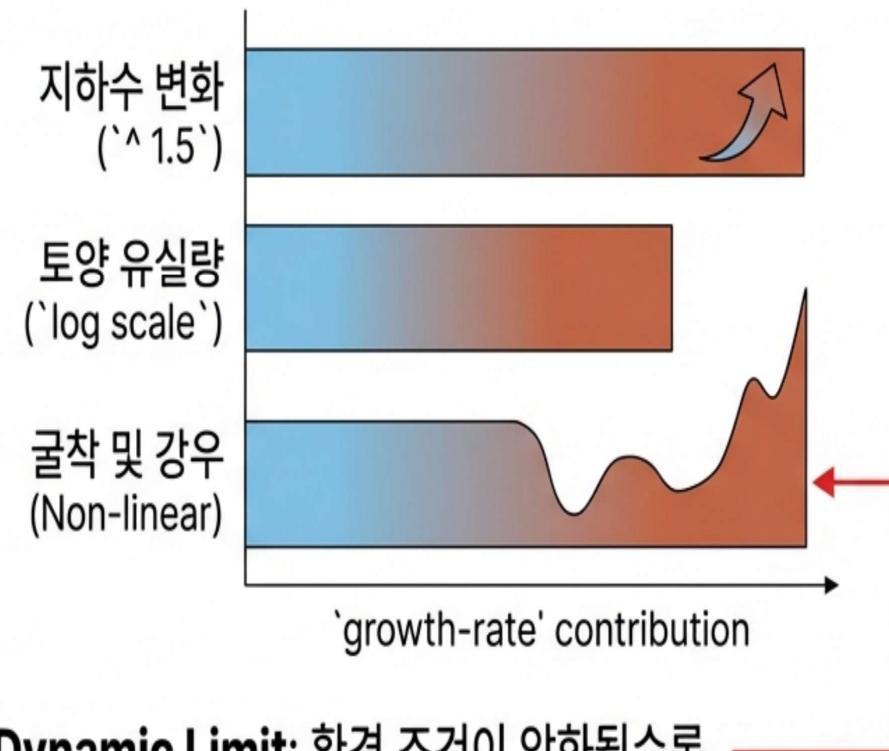
공동(Cavity)의 생성 및 확장 알고리즘

Nucleation (생성)



패치 내 토양 입자 < 2개
→ 'sprout-cavities'

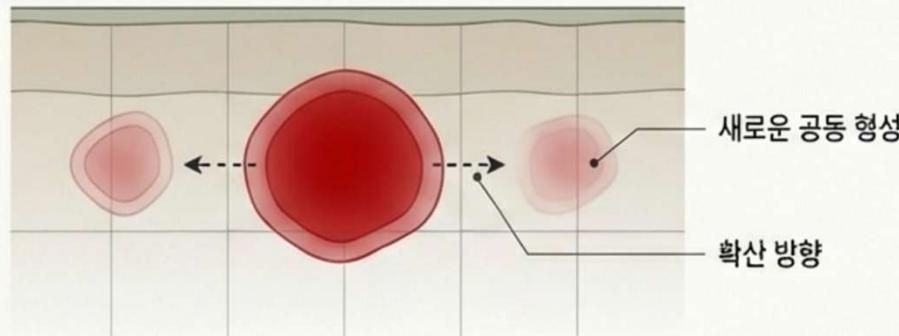
Expansion (확장)



Dynamic Limit: 환경 조건이 악화될수록
'max-growth-rate' 제한이 해제되어 붕괴 가속화.

공동의 이동: 수평 확산과 수직 상향

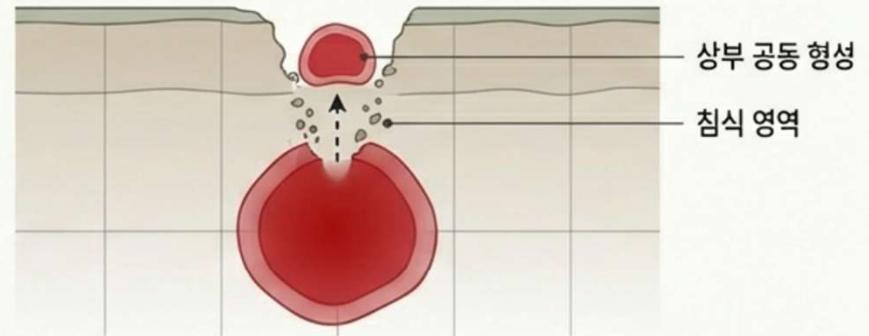
수평 확산 (Horizontal Diffusion)



Trigger: 공동 부피('cavity-volume')가 임계값(15)을 초과할 때 발생합니다.

Mechanism: 하나의 공동이 충분히 커지면, 주변의 약한 지점으로 압력을 가해 새로운 공동을 생성할 확률이 생깁니다. 이는 단일 공동이 광범위한 공동 지대로 발전하는 과정입니다.

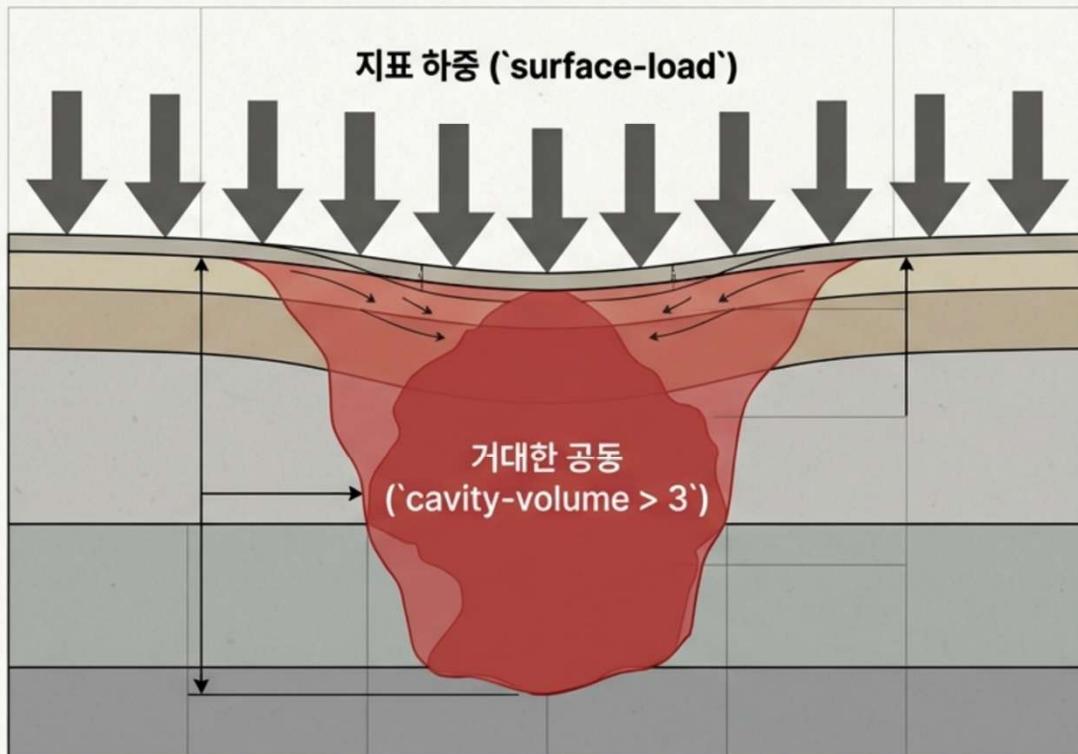
수직 확장 (Vertical Expansion)



Trigger: 확률적(25%)으로 발생합니다.

Mechanism: 공동은 위쪽으로도 성장하려는 경향을 보입니다. 상부 지층의 토양 입자를 직접 침식시키고('lost? = true'), 지지기반이 약해지면 상부에도 새로운 공동을 형성하며 지표면을 향해 점차 다가옵니다.

마지막 압력: 지표 하중의 역할

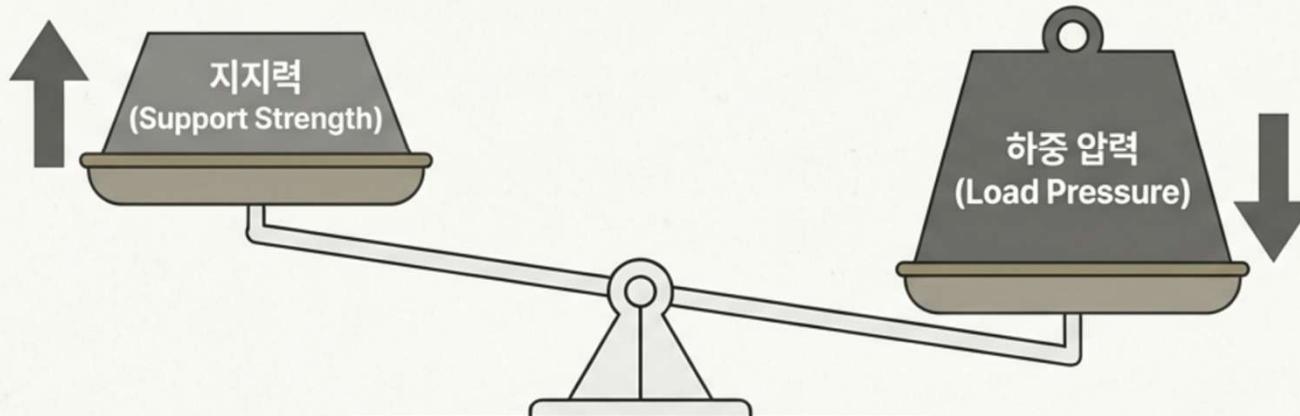


Core Mechanic: 'apply-load'

Explanation: "지표면의 하중(건물, 차량 등)은 평소에는 지반이 충분히 지지합니다. 하지만 하부에 거대한 공동('cavity-volume > 3')이 존재할 경우, 이 하중은 더 이상 분산되지 않고 약해진 지반에 집중됩니다."

Mechanism: "지표 하중('surface-load')이 높을수록, 공동 상부의 마지막 남은 토양 입자들을 붕괴시켜 유실시킬 확률이 증가합니다. 이는 붕괴를 위한 마지막 단계를 준비하는 과정입니다."

붕괴의 임계점: 지지력과 하중의 싸움



'지지력 (Support Strength) < 하중 압력 (Load Pressure)'

지지력 ('support-strength')

공동 주변에 남은 토양 입자의 수와 토양 밀도(soil-density)에 의해 공동이 커지고 토양 유실이 많을수록 지지력은 급격히 약해집니다.

~ $f(\text{soil-density}, \text{count soil-particles})$

하중 압력 ('load-pressure')

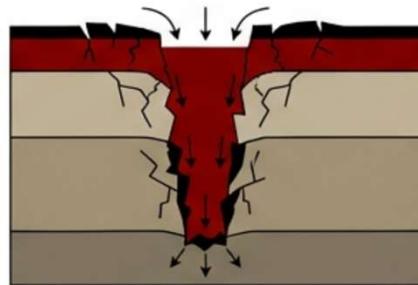
지표 하중(surface-load)과 전체 공동의 크기(cavity-size)에 의해 공동이 클수록 하중이 집중되어 압력이 강해집니다.

~ $f(\text{surface-load}, \text{cavity-size})$

클라이맥스: 붕괴의 두 가지 시나리오

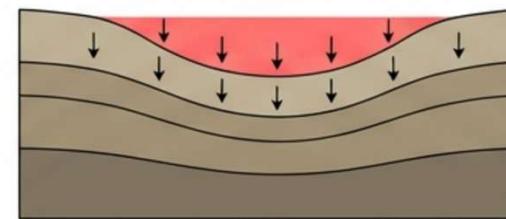
Scenario 1: 펀칭형 붕괴 (Punching Collapse)

Type A: Punching (급속 붕괴)



Scenario 2: 침하형 붕괴 (Trough Collapse)

Type B: Trough (완만 붕괴)



- 조건: compaction-degree < 55% OR groundwater-change > 12
- 형태: 좁고 깊은 수직 함몰 (Deep/Vertical)
- 위험도: 높음 (급격한 진행)

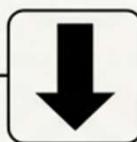
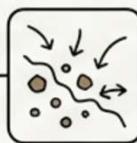
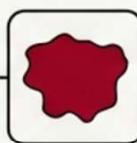
- 조건: 다짐도 양호(High) AND 지하수 변화 완만(Low)
- 형태: 넓고 얕은 접시형 함몰 (Wide/Shallow)
- 위험도: 중간 (완만한 진행)

위험의 정량화: 위험 지수 (Danger Index)

input

공동 인자 ('cavity-factor' - Max 50)

전체 공동 크기('cavity-size')가 클수록 증가합니다.



input

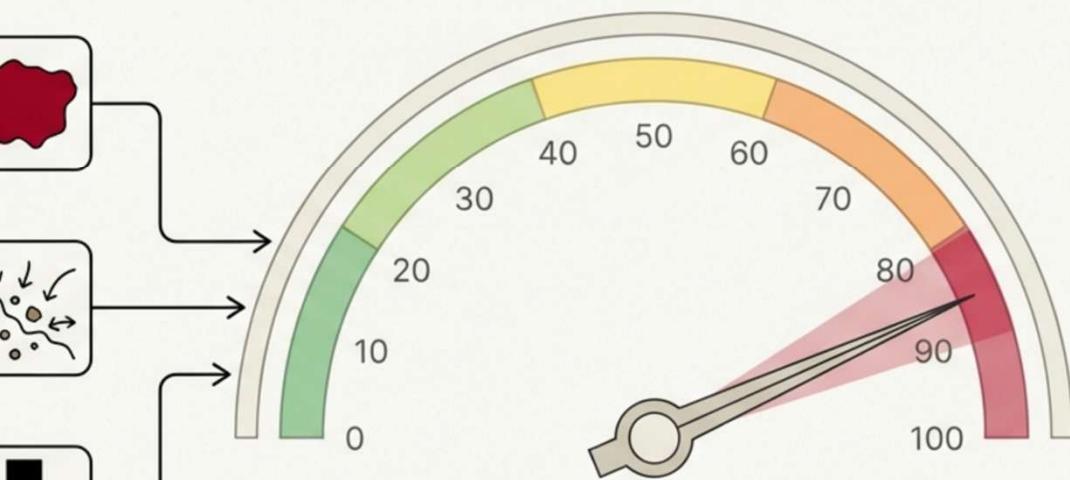
토양 유실 인자 ('soil-loss-factor' - Max 30)

총 토양 유실량('total-soil-loss')이 많을수록 증가합니다.

input

하중 인자 ('load-factor' - Max 20)

지표 하중('surface-load')이 무거울수록 증가합니다.

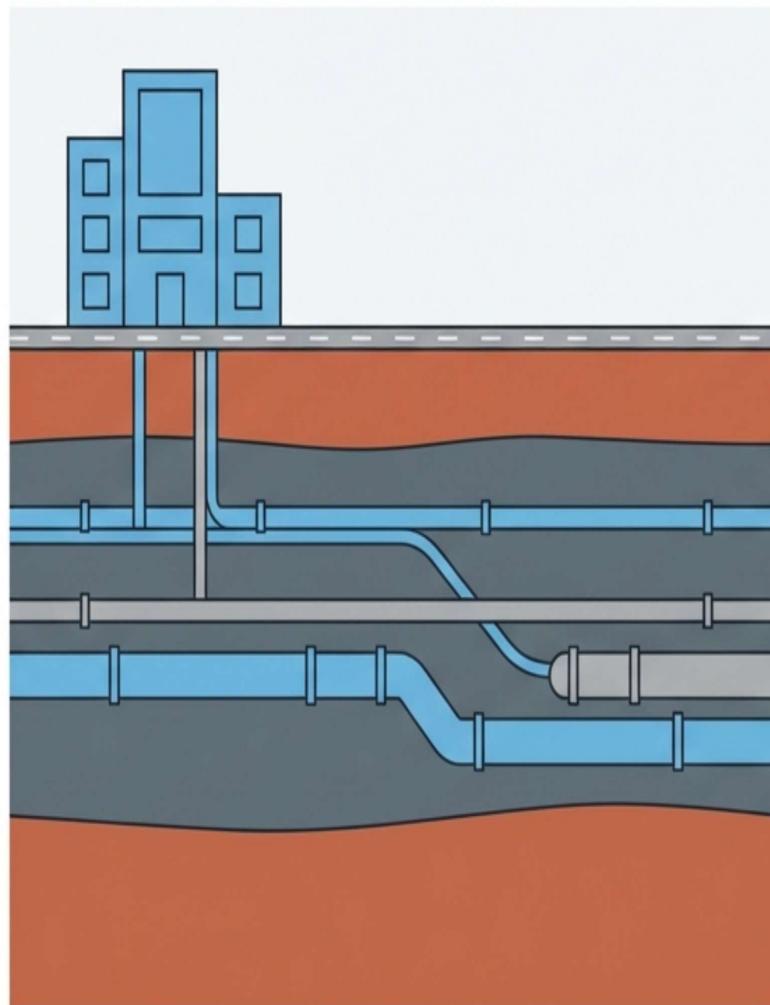


시뮬레이션은 붕괴 가능성을 0에서 100까지의 '위험 지수'로 실시간 평가합니다.

$$\text{위험 지수} = \text{공동 인자} + \text{토양 유실 인자} + \text{하중 인자}$$

붕괴 발생 시('collapse-occurred? = true'), 위험 지수는 즉시 100으로 설정됩니다.

시뮬레이션의 시사점 및 결론



- **상호 연결성 (Interconnectivity)**

싱크홀은 단일 원인이 아닌, 노후 관로, 강우, 다짐 불량, 굴착 공사가 결합된 복합 재난입니다.

- **비가시성 (Invisibility)**

Danger Index가 상승하더라도 지하 공동은 지표면 붕괴 직전까지 감지하기 어렵습니다.

- **핵심 제언 (Takeaway)**

도시 방재를 위해서는 단순한 관로 교체를 넘어, 지반 다짐도(compaction) 관리와 지하수 유동(groundwater flow) 제어가 필수적입니다.

Seeing the unseen risks beneath our cities.