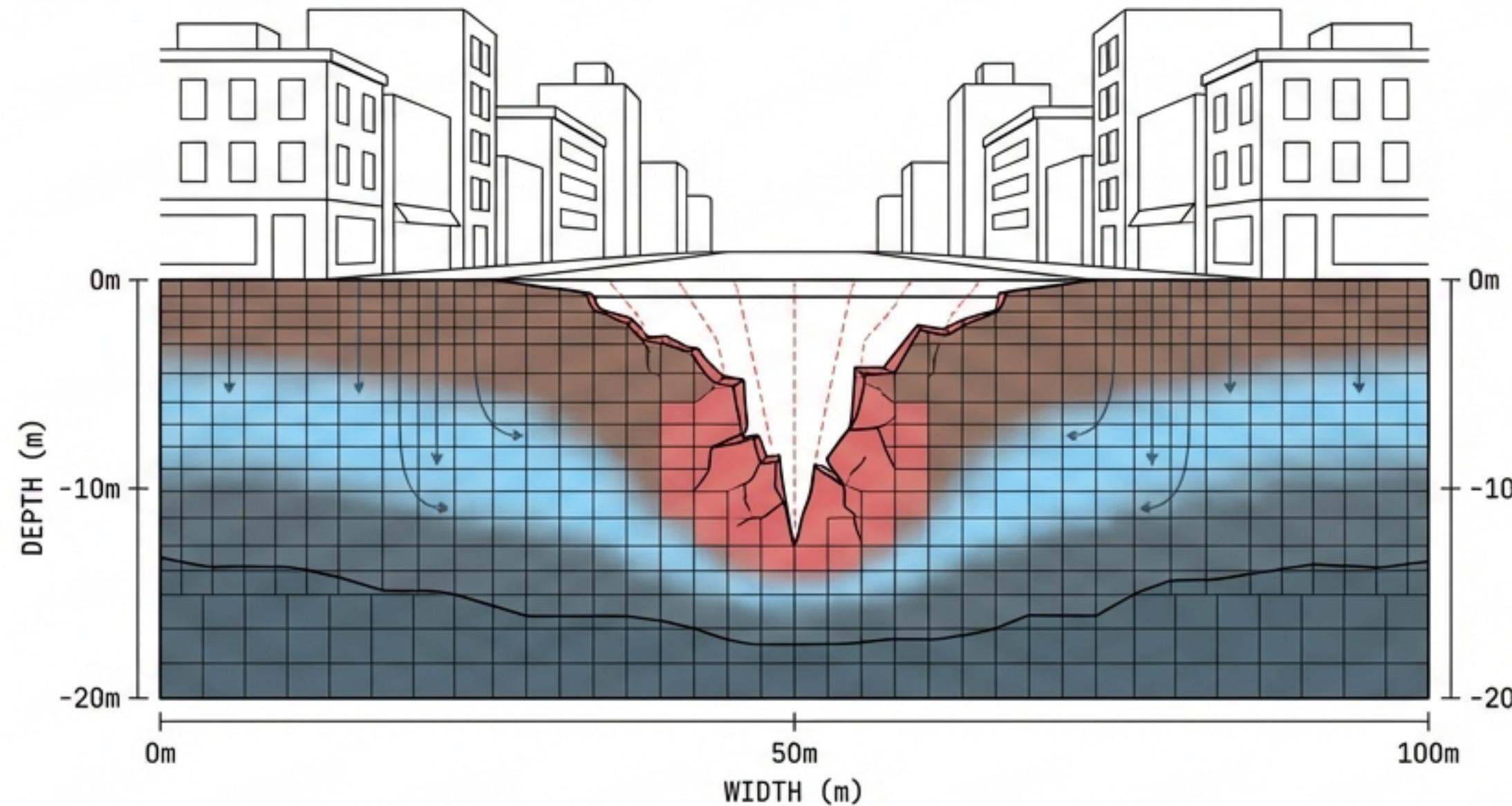
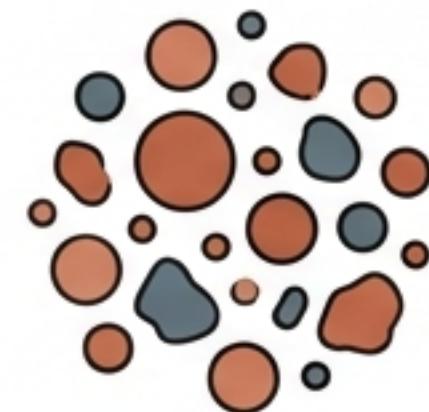


도심지 싱크홀 발생 메커니즘 시뮬레이션

NetLogo 기반의 상호작용 및 인과관계 분석 (Educational Version v7.7)

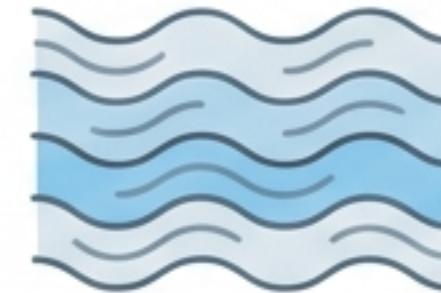


에이전트 기반 모델링 (ABM) 개요



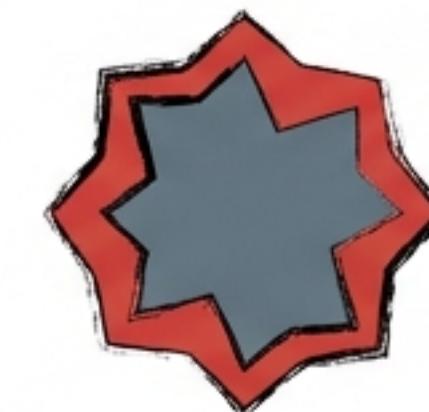
핵심 에이전트: Soil Particles

- 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

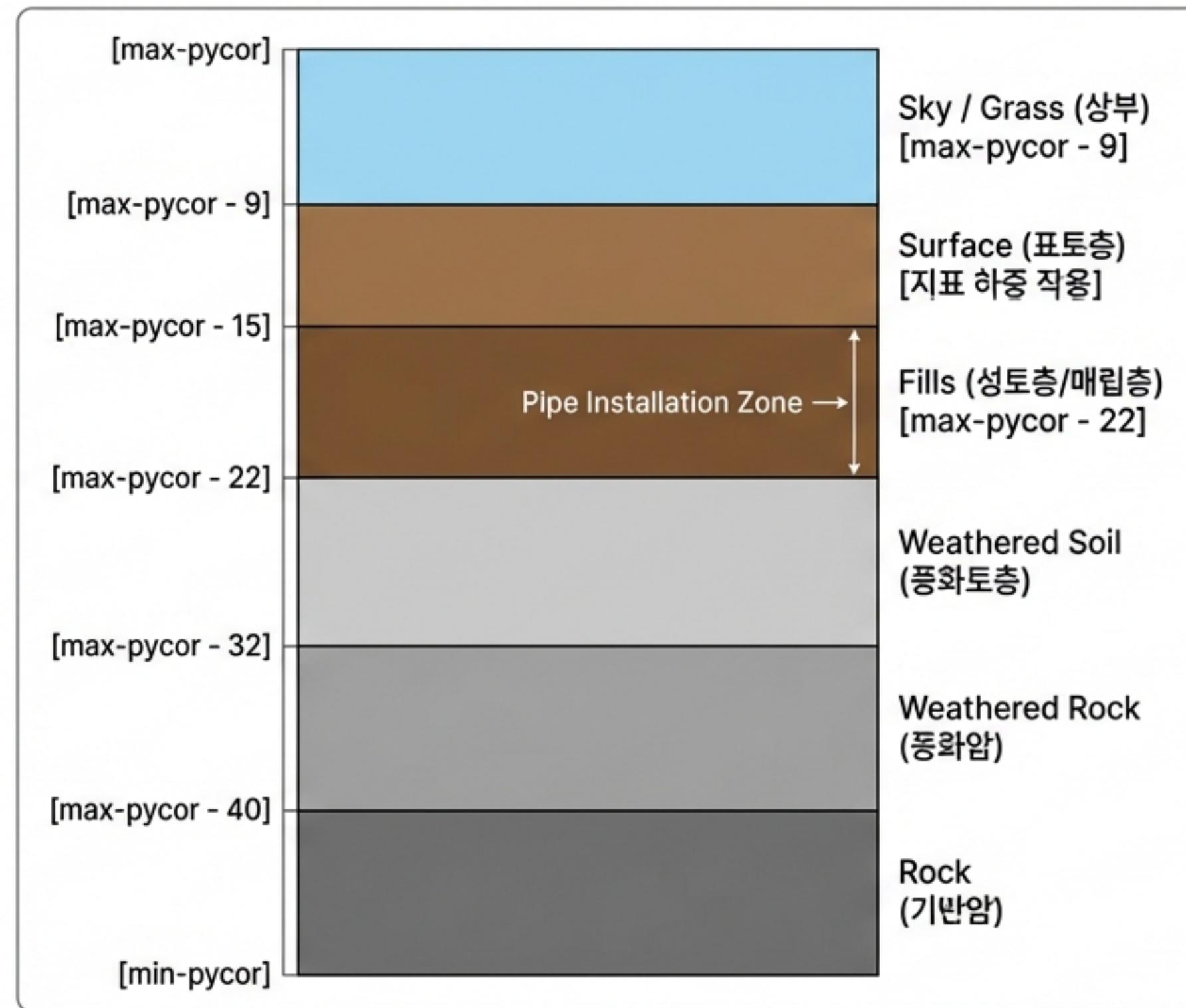
지하 지층 구조 및 환경 설정

지층 정의 (Layer Definition)

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

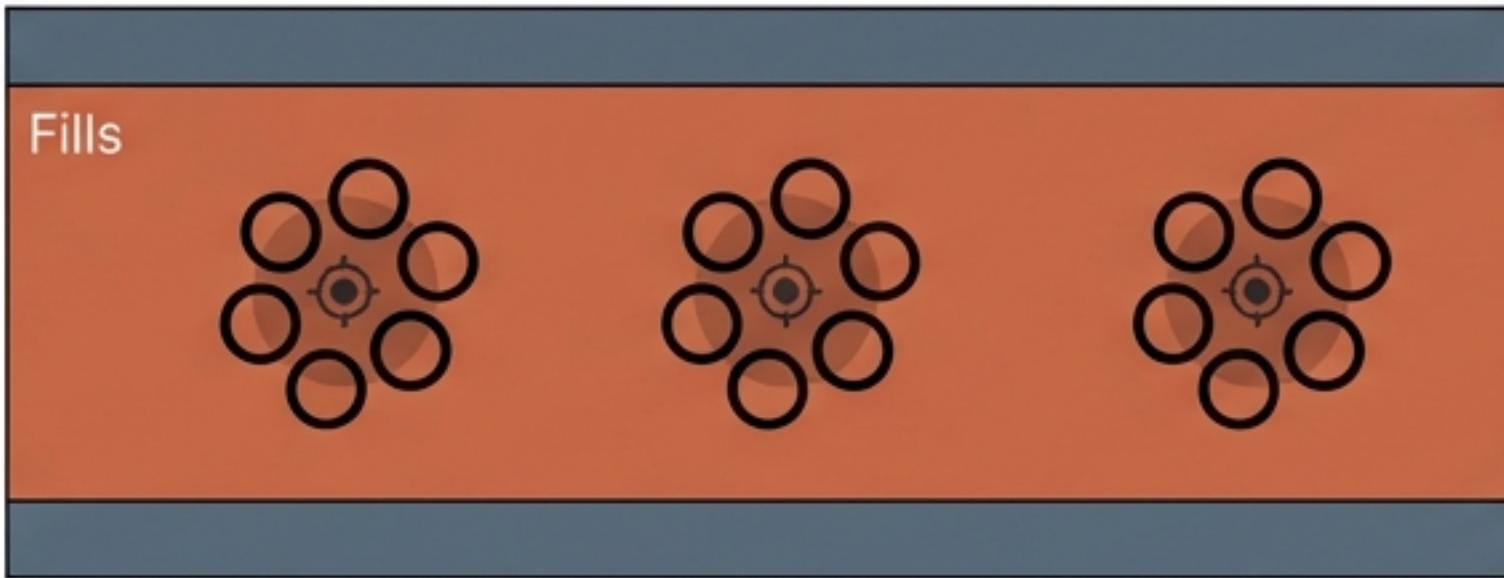
패치 속성 (Patch Properties)

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



지하 관로 배치 및 토양 구성

Infrastructure (관로)



관로 클러스터링 ('setup-underground-pipes')

- 배치: 2~4개의 중심점(Cluster Centers) 기준 집중 배치
- 확률 분포:
 - 거리 < 5: 70% 배치
 - 거리 < 15: 20% 배치
- 초기 상태: 'pipe-health'는 사용자가 설정한 'pipe-condition' 값을 따름

Soil Composition (토양)



세립토 (Fine), 안정성 낮음 (20~49)

세립토 (Fine), 안정성 중간 (30~69)

조립토 (Coarse), 안정성 높음 (40~89)

Logic Note: 오직 '세립토(Fine particles)'만이 지하수 흐름에 의해 유실('lost?')될 수 있는 잠재적 위험 요소를 가집니다.

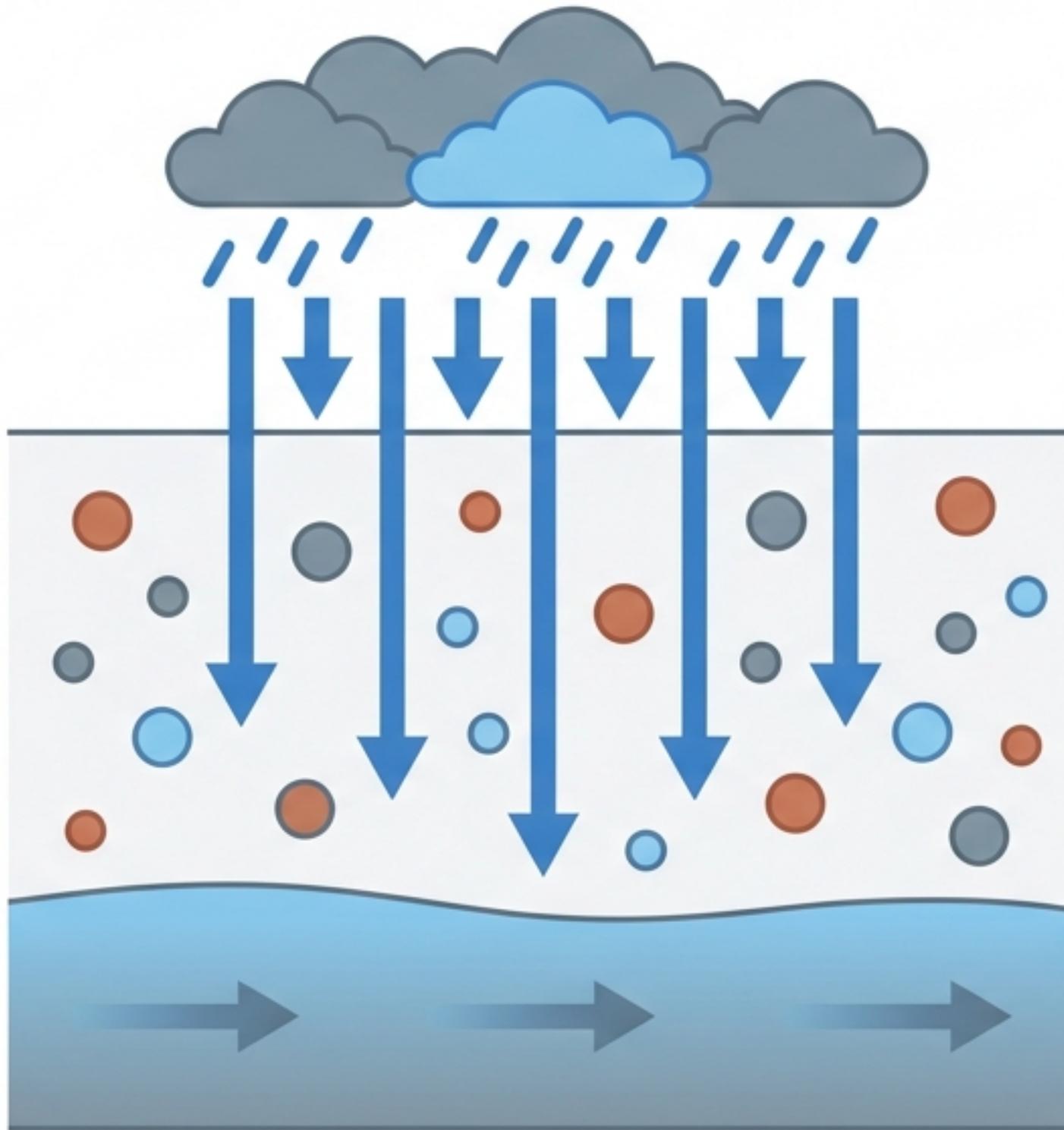
수분 침투 및 지하수 유동 메커니즘

Rainfall Logic (`apply-rainfall`)

비선형 포화 증가

강우 강도가 선형적으로 증가해도,
지반의 포화도는 지수 함수적으로
급증합니다.

$$\text{Increment} = \frac{(\text{rainfall-intensity})}{50} ^ {1.1}$$



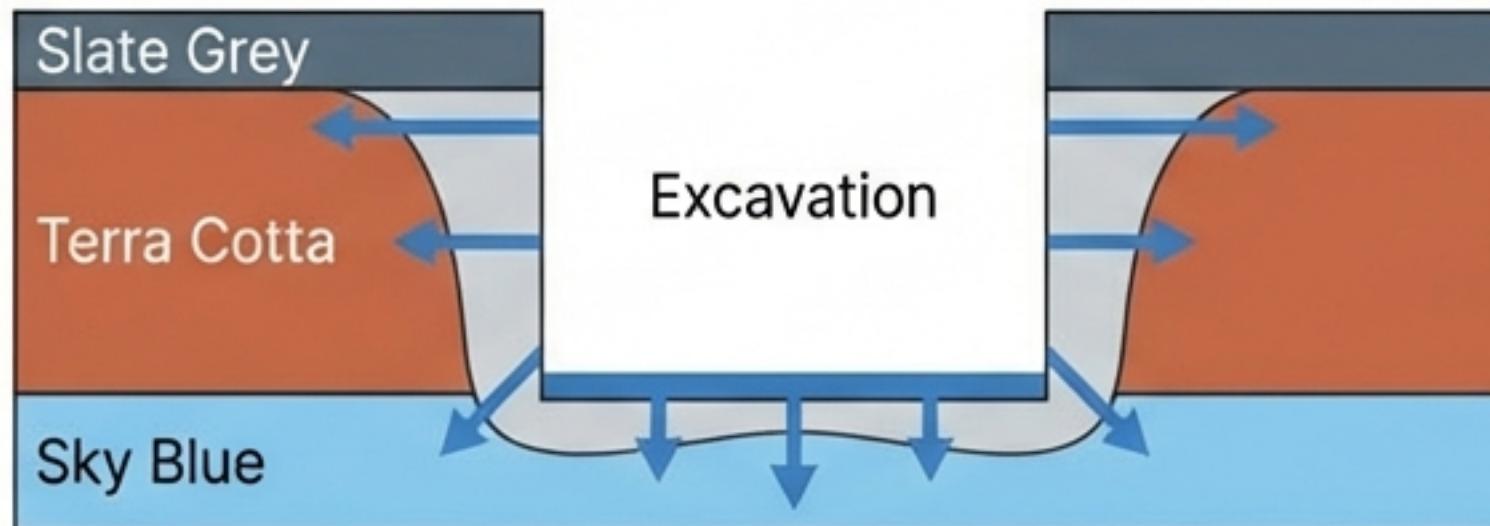
Groundwater Diffusion (`update-groundwater`)

확산 원리

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

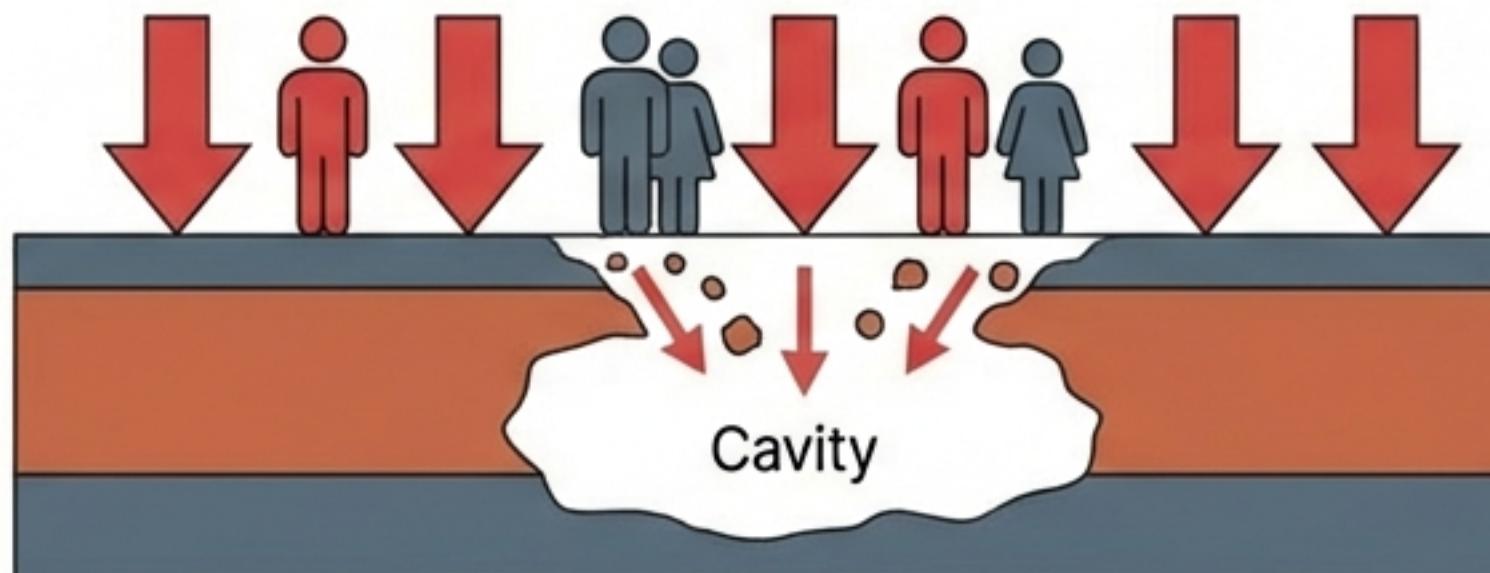
인위적 스트레스 요인: 굴착 및 지표 하중

Excavation Impact ('apply-excitation-effect')



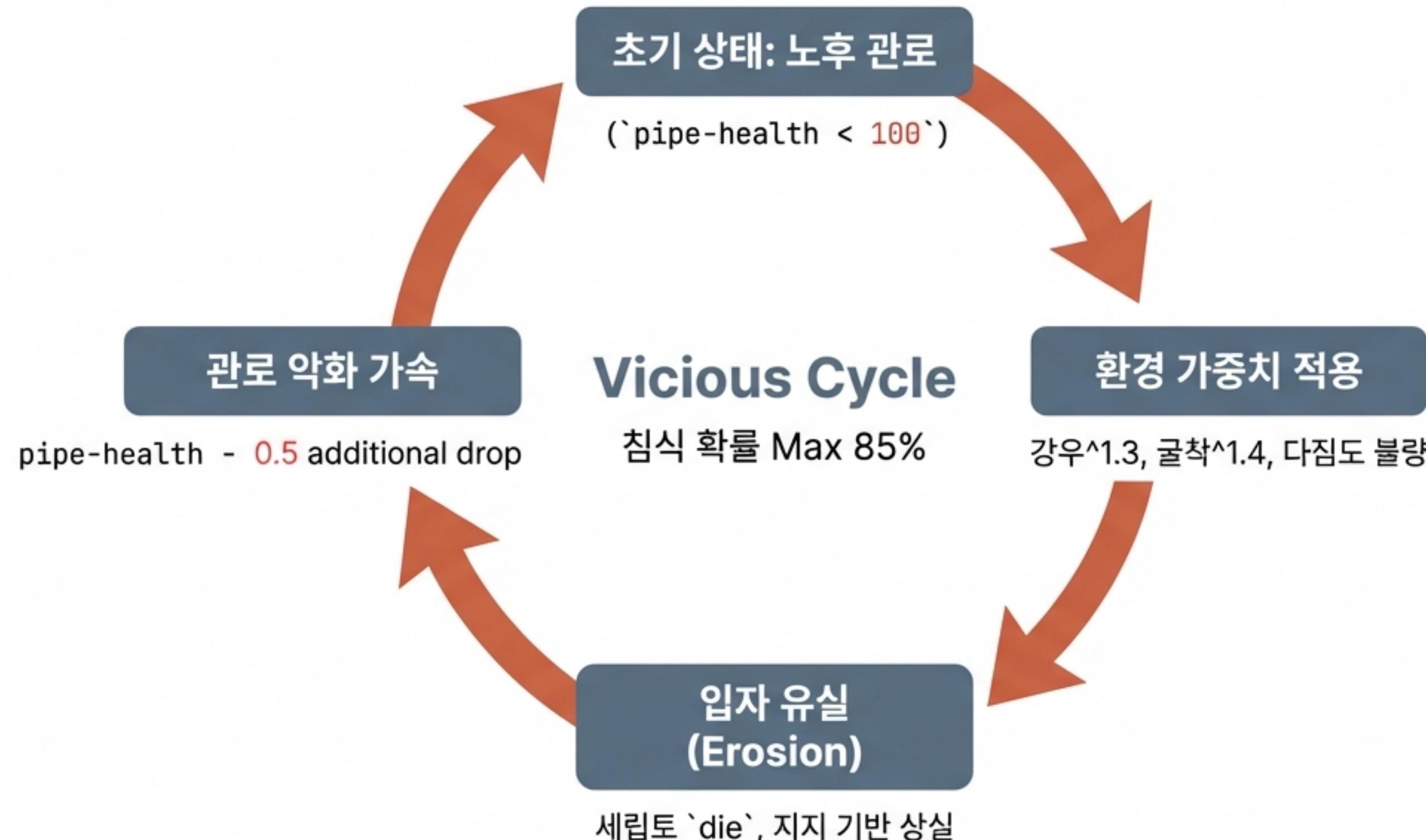
- 영향 범위: 굴착 깊이('excavation-depth') > 5m 일 때 작동
- 배수 효과: 굴착 주변부 수분 급감 → 토양 구조 교란 ('drainage-zone')
- 침식 가속: 깊이에 따른 비선형 침식 확률 증가 ('depth ^ 1.2')

Surface Load ('apply-load')



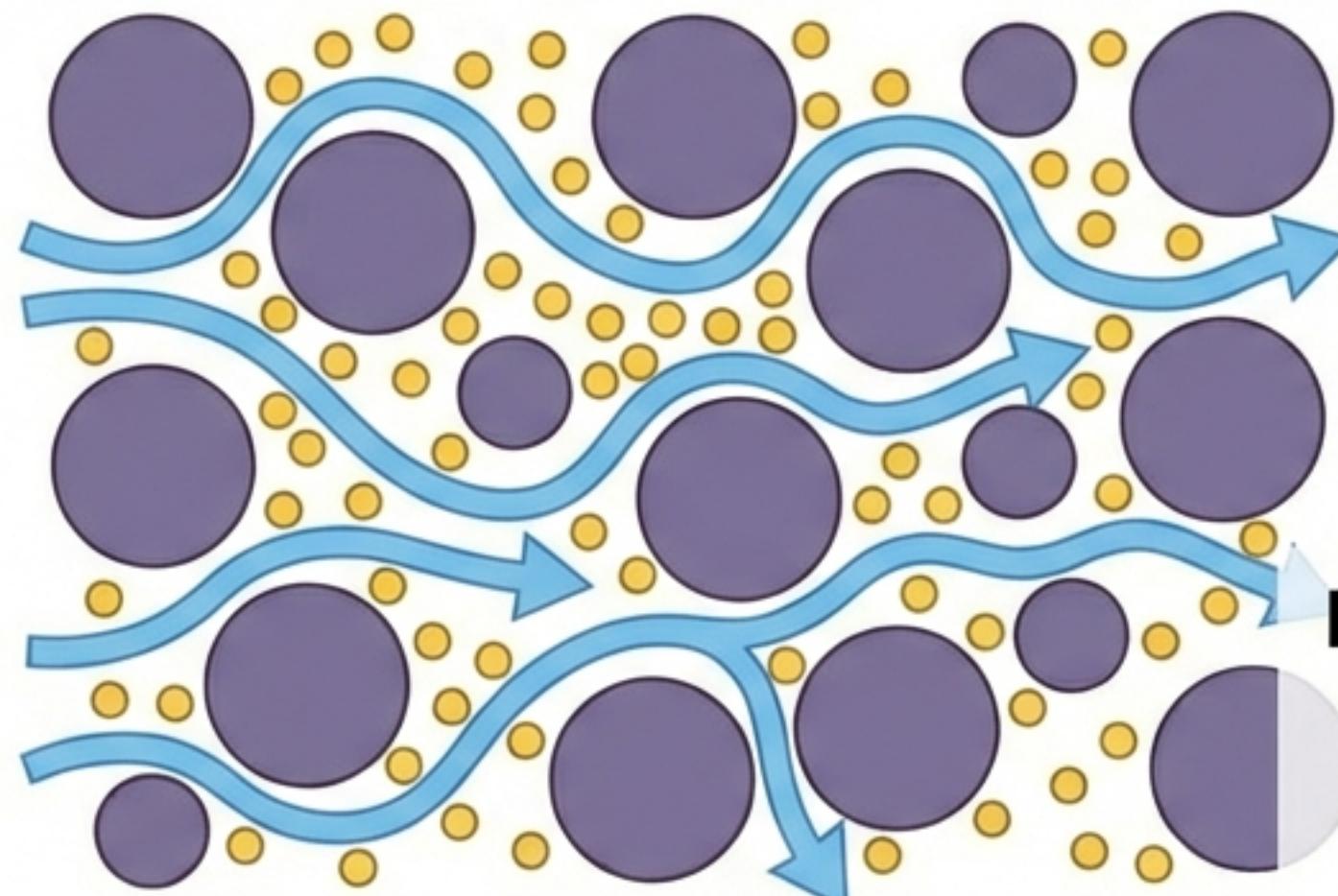
- 진동 및 압력: 지표의 'persons'에 이전트 하중 전달
- 연쇄 반응: 반경 3 이내에 큰 공동('cavity-volume > 3') 존재 시, 상부 토양 입자 유실 가속

관로 손상과 침식의 피드백 루프

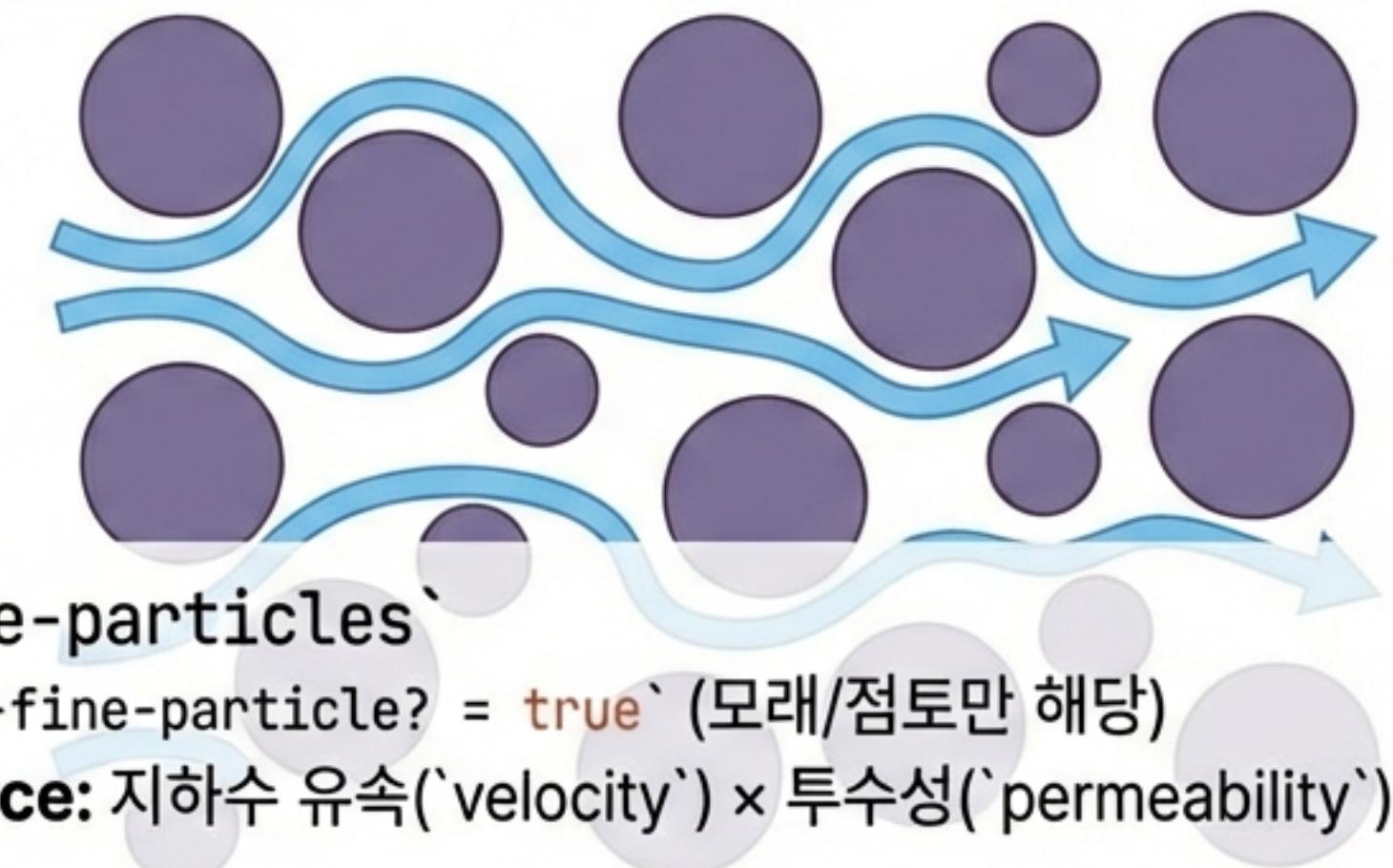


지하 침식 메커니즘 (Subsurface Erosion)

초기 상태 (Initial State)



침식 후 (After Erosion)



Logic: `erode-particles`

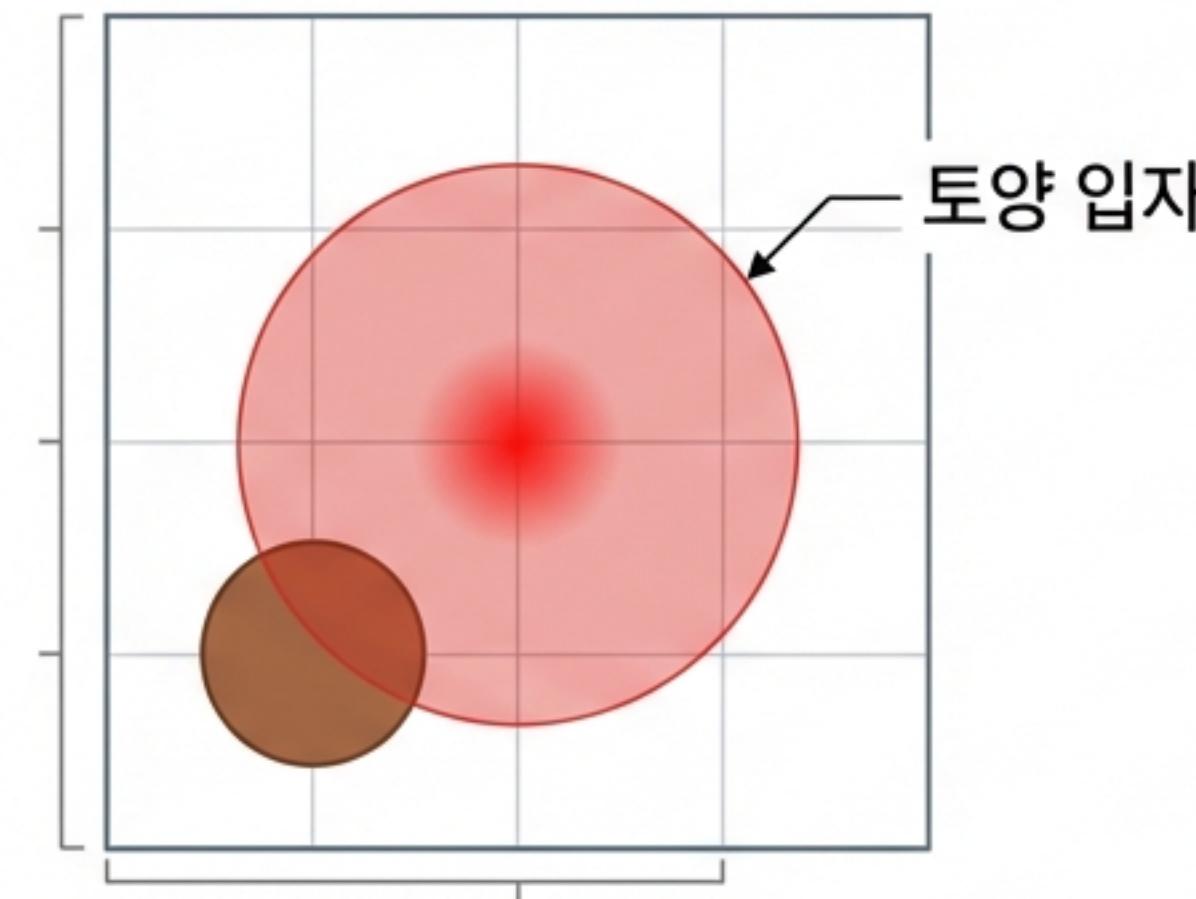
- **Target:** `is-fine-particle? = true` (모래/점토만 해당)
- **Driving Force:** 지하수 유속(`velocity`) × 투수성(`permeability`)
- **Resisting Force:** 토양 입자의 안정성(`stability`)

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

Result: `lost? = true` (입자 소멸)

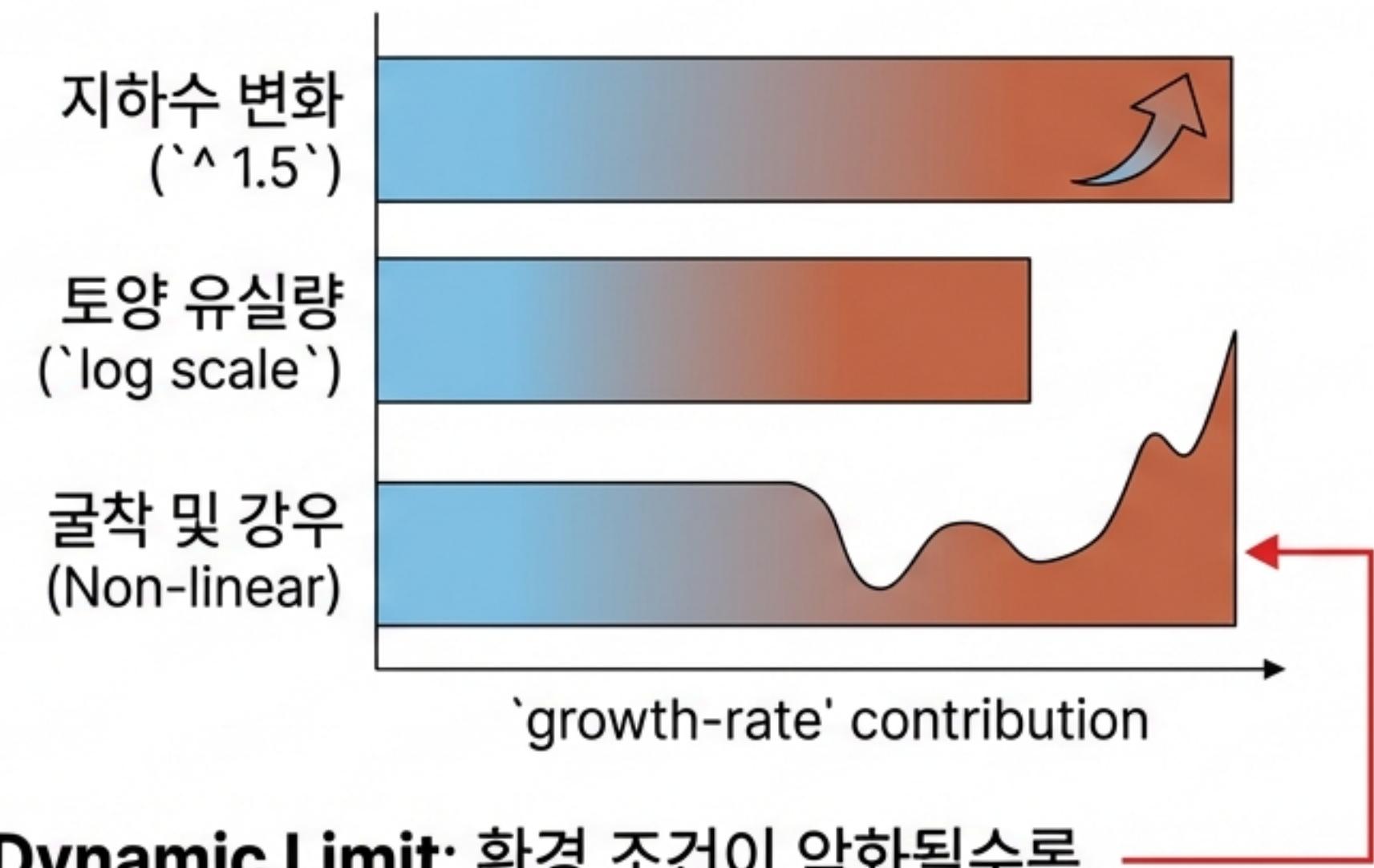
공동(Cavity)의 생성 및 확장 알고리즘

Nucleation (생성)



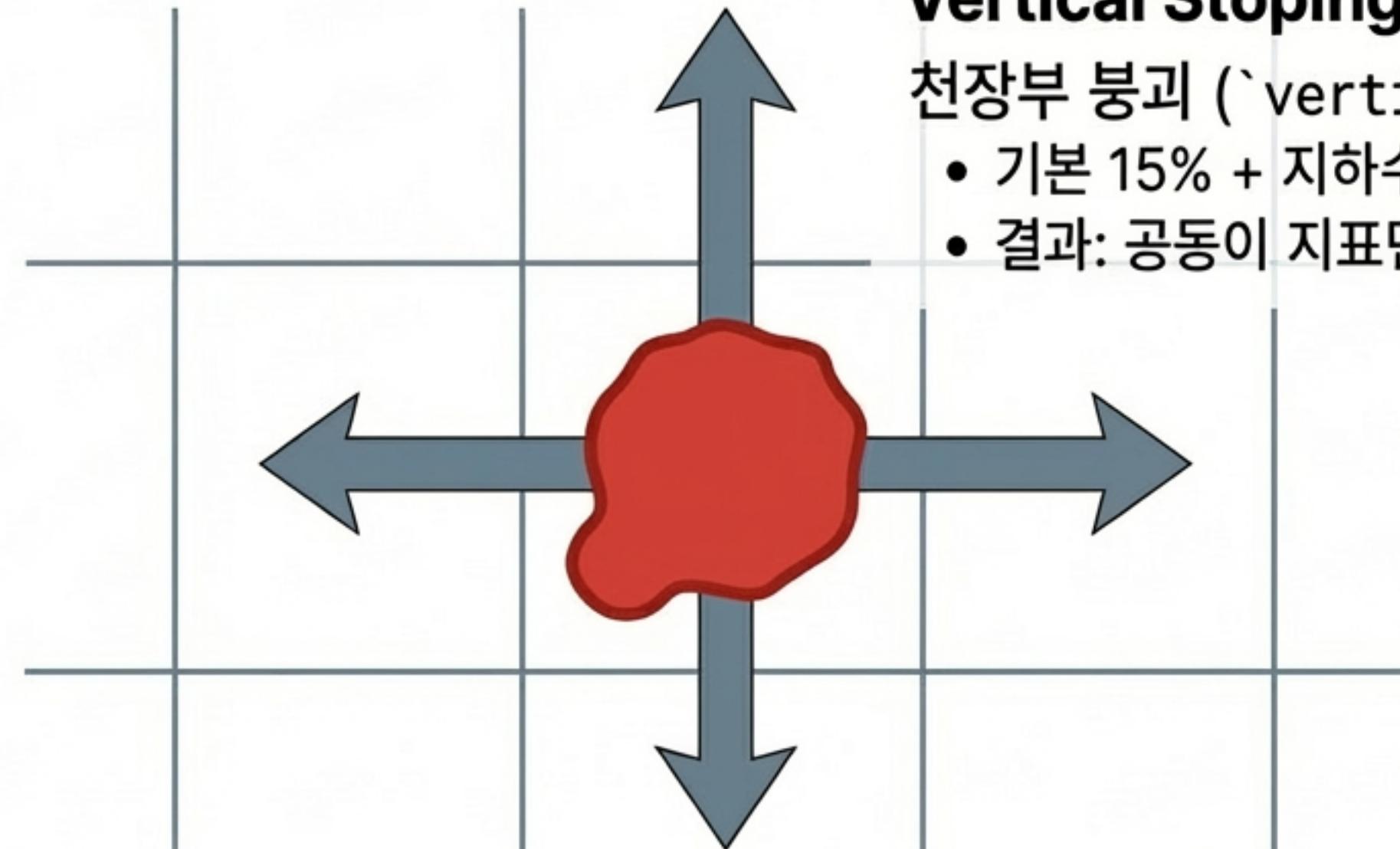
패치 내 토양 입자 < 2개
→ `sprout-cavities`

Expansion (확장)



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

공동의 이동: 수평 확산과 수직 상향



Vertical Stoping

천장부 붕괴 (`vertical-prob`)

- 기본 15% + 지하수/강우 가중치
- 결과: 공동이 지표면을 향해 상승

Horizontal Spread

부피 > `spread-threshold` 일 때 인접 패치로 확산.

붕괴 임계점 산정 (Check Collapse)

Resisting Force (지지력)

- Soil Density ($\wedge 1.5$)



- Particle Support (입자 수)



- Saturation Penalty (물 -)



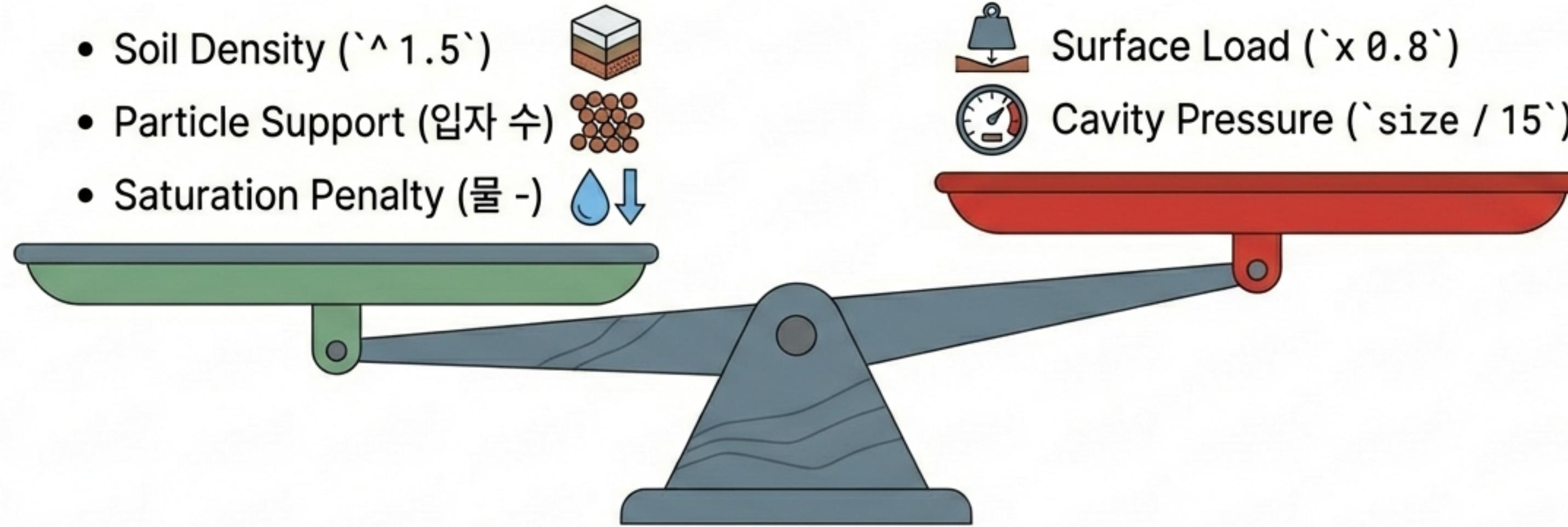
Driving Force (하중)



- Surface Load ($\times 0.8$)



- Cavity Pressure ($\text{size} / 15$)



ALGORITHM

```
IF `Support Strength` < `Load Pressure`\nTHEN `collapse-occurred?` = true
```

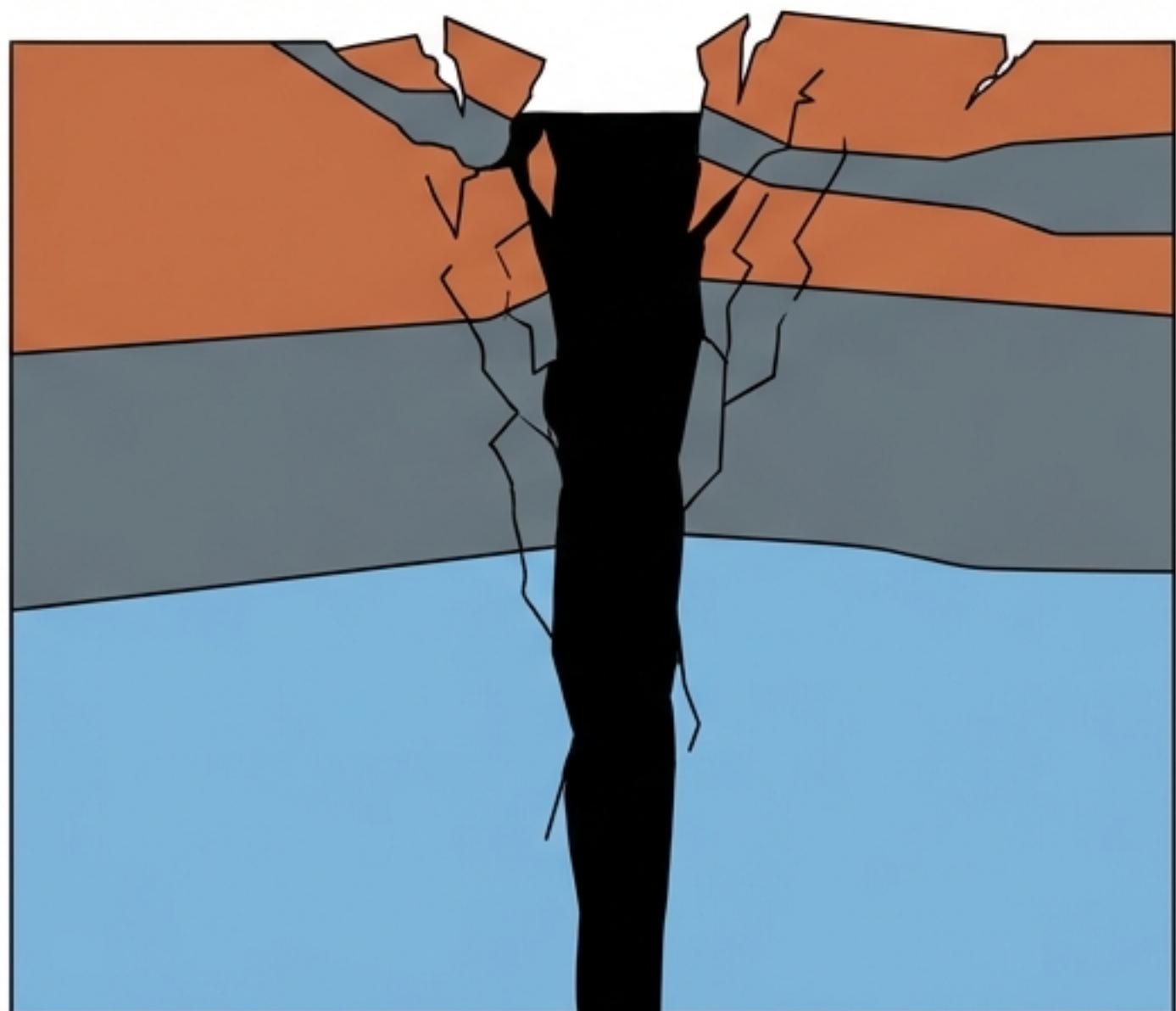
붕괴 시나리오 A - 편칭 파괴 (Punching Collapse)

조건 (Trigger Conditions)

- 다짐도 불량 (compaction-degree < 55)
- 또는 급격한 지하수 변화 (change-rate > 12)

특성 (Characteristics)

- 형태: 좁고 깊은 함몰 (Narrow width, Deep penetration)
- 위험성: 전조 증상 없음. 급작스러운 붕괴.
- 시각화: pcolor black (즉시 소멸)



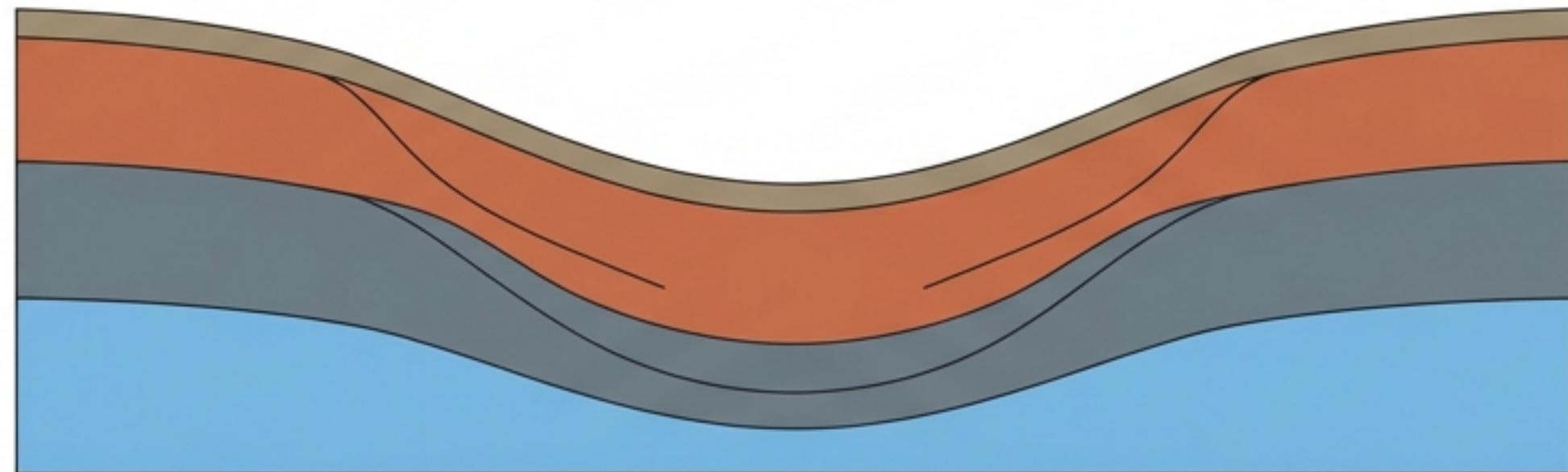
붕괴 시나리오 B - 트러프 함몰 (Trough Collapse)

조건 (Trigger Conditions)

- 다짐도 양호 (Good Compaction)
- 지하수 상태 안정적 (Stable Groundwater)

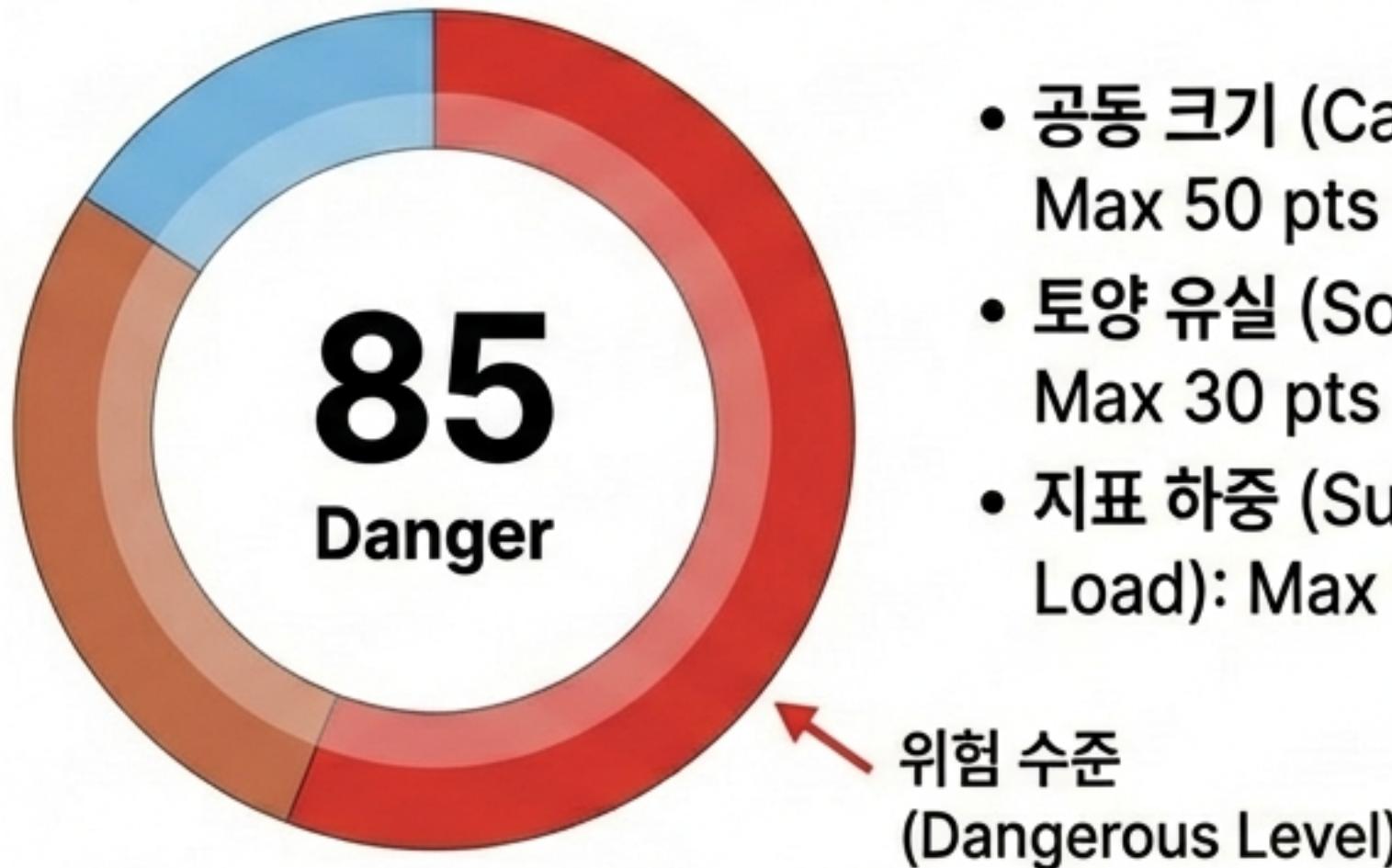
특성 (Characteristics)

- 형태: 넓고 얕은 함몰 (Wide width, Shallow depth)
- 진행: 점진적인 지반 침하 (Subsidence)
- 시각화: 부분적 함몰 (Random 65% loss)



위험도 정량화 지표 (Risk Metrics)

Danger Index (0-100)



Effective Stress (유효 응력)

- 공동 크기 (Cavity Size): Max 50 pts
- 토양 유실 (Soil Loss): Max 30 pts
- 지표 하중 (Surface Load): Max 20 pts

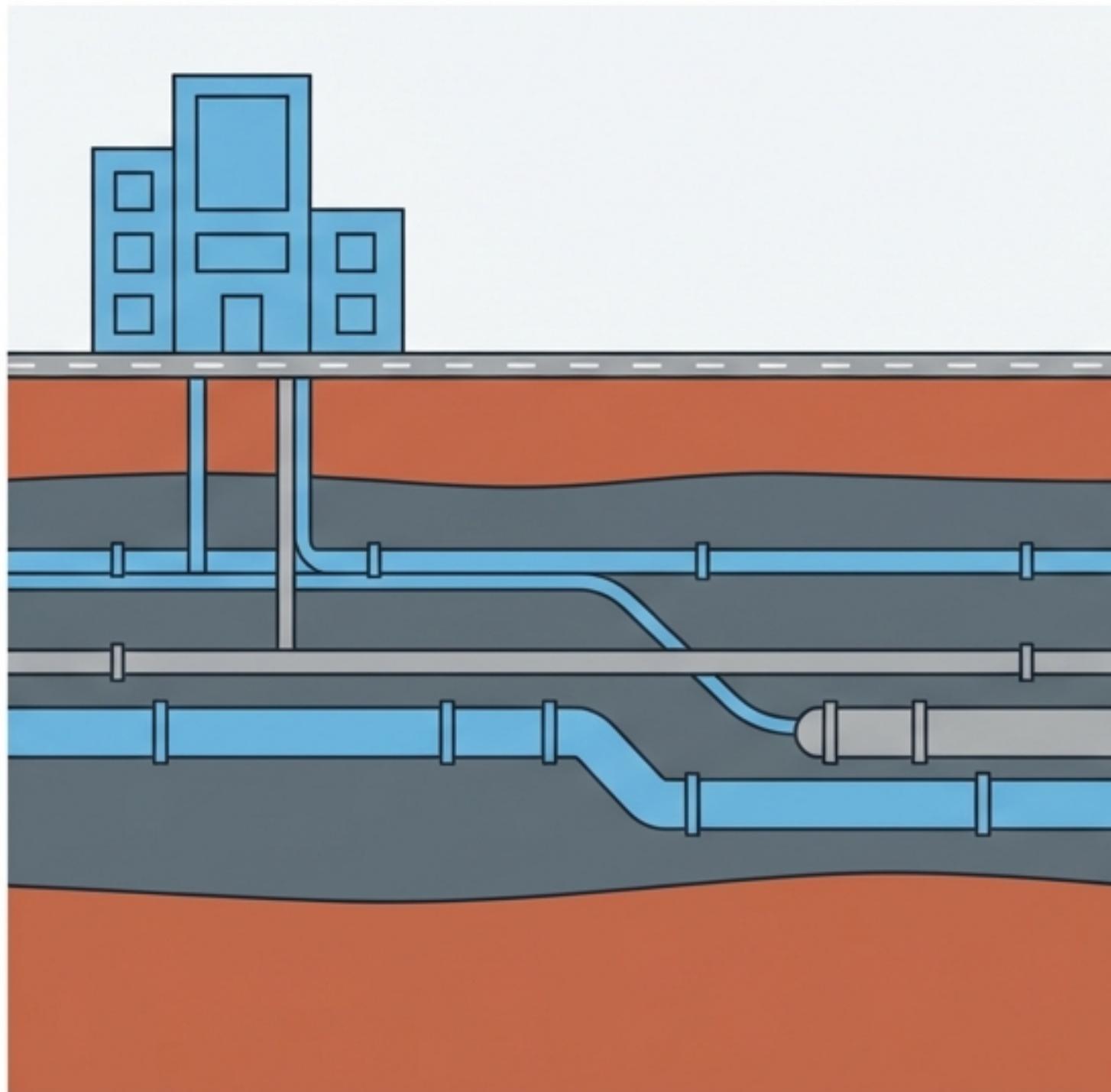
Effective Stress

$$\begin{aligned} &= \text{Compaction} \times (1 - \text{Cavity}\%) \\ &\quad \times (1 - \text{Loss}\%) \end{aligned}$$

지반이 붕괴에 저항할 수 있는 잔존 내력.

Note: 붕괴(`collapse') 발생 시 Danger Index = 100 고정.

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.