

유한요소법을 이용한 지반 공동 및 이완영역 모사에 관한 연구

A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone Using Finite Element Method

유승경^{1*}, 김주봉², 한중근³, 홍기권⁴, 윤중만⁵, 이강일⁶

Seung-Kyong You^{1*}, Joo-Bong Kim², Jung-Geun Han³, Gi-Gwon Hong⁴, Jung-Mann Yun⁵, Kang-Il Lee⁶

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03656, Republic of Korea

²Nonmember, Master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

³Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

⁴Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 150 Jojeong-daero, Hanam-si Gyeonggi-do, 12930, Republic of Korea

⁵Member, Professor, Dept. of Construction Information System, ShinAnsan Univ., 135 Shinansandeahak-ro, Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

⁶Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Deajin Univ., 11-1 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Republic of Korea

ABSTRACT

In order to prevent the ground subsidence accidents caused by the occurrence of underground cavity, it is necessary to evaluate the mechanical characteristics in the relaxation zone of the underground cavity. Also, the relaxation zone including underground cavity be appropriately reinforced. This paper described analysis results based on finite element method that was conducted to analyze the mechanism for occurrence of the relaxation zone around the underground cavity. The finite element analysis applied in forced displacement was carried out to simulate the underground cavity and relaxation zone, and then there were compared with previous research results. The analysis results showed that the void distribution of soil around the underground cavity has figured out. As a result, the area of the relaxation zone could be quantitatively presented by reduction characteristics of the shear stress.

요 지

지반 공동 발생으로 인한 지반함몰 사고를 미연에 방지하기 위해서는 발생된 공동 주변 지반의 이완영역에 대한 역학적 특성 평가와 더불어 이에 상응하는 적합한 보강 대책을 신속히 수립하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 지중 공동 주변의 이완영역 발생에 대한 메커니즘 분석을 위해 유한요소 수치해석을 실시하였다. 수치해석에서는 지중 공동과 이완영역을 모사하기 위해 강체변위법을 적용하였으며, 수치해석 결과는 실내모형실험을 수행한 기존 연구 결과를 이용하여 검증하였다. 유한요소 수치 해석 결과로부터 토사 유실로 인한 공동 주변 지반의 간극비 분포 특성을 파악하였으며, 전단응력 감소 특성을 분석하여 이완영역의 범위를 정량적으로 제시하였다.

Keywords : Cavity, Relaxation zone, Finite element method, Forced displacement, Ground subsidence, Numerical analysis

1. 서 론

최근 국내외적으로 사회적 이슈가 되고 있는 도심지 지

반함몰은 기존 매설되어 있는 상하수도관의 손상이나 지중구조물 시공 중 수행되는 굴착이나 퇴매움 시 시공관리 부실로 인한 토사유출이 중요 원인으로 분석되고 있다(Park & Park, 2014; Choi et al., 2016). 특히 국내에서는 인구밀도가 높고 다수의 노후한 상하수도관이나 지하매설물 등이 분포하는 서울시에서 매년 크고 작은 지반함몰 발생이

Received 28 Nov. 2017, Revised 1 Dec. 2017, Accepted 1 Dec. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-10-9138-7701; Fax: +82-2-300-8833

E-mail address: yousk@mjc.ac.kr (S. K. You)

증가하고 있으며, 최근 5년간 약 3200여건에 달하는 지반 함몰 발생이 보고되고 있는 실정이다(한국지질자원연구원, 2014). 또한 지반함몰 발생 건수 중, 하수관 손상에 의한 지반함몰이 전체 발생 건수의 약 85%(2,636건)를 차지하고 있으며 이는 지중매설관의 손상이 지반함몰 발생빈도와 매우 밀접한 연관성을 갖는 것으로 분석되고 있다(Choi et al., 2016). 따라서 도심지 지반함몰 사고를 예방하기 위해서는 지반 내 공동 방지 대책 마련과 함께 이를 위한 공동 발생의 원인 및 메커니즘 규명에 대한 연구가 필요하다.

이러한 사회적 배경에 따라 최근 공동 발생 메커니즘 및 공동이 지반거동에 미치는 영향에 대한 규명을 위해 많은 연구들이 수행되고 있다. 지중에 공동이 발생되었을 경우 이 공동이 지반을 함몰시켜 궁극적으로 지반을 파괴에 도달시키는 메커니즘을 분석한 사례가 있으며(Brady & Brown, 1985), 지반조건과 공동의 형태, 이상대의 유무 등을 영향 인자로 하여 지반 내 공동에 의한 지표면 침하와 공동 상부에서 비롯된 파괴의 진행 관계를 검토한 연구(Suchowerska et al., 2012)도 발표되었다. 또한, Kim & Umm(2013)은 지하수 유동으로 교란된 지중 토사의 유출에 따라 지중 공동이 확대되는 사례를 연구한 바 있으며, Song & Yoon(2015)은 지반 함몰 메커니즘을 분석함에 있어 수치해석을 효과적으로 활용하기 위해서는 지중에서 국부적으로 발생된 공동과 공동 주변부의 파괴 양상 등을 효과적으로 모사할 수 있고 불연속체의 거동 특성을 고려할 수 있는 개별요소법의 적용이 적절하다고 분석하였다. 한편, Lee et al.(2016)은 유한요소법을 이용해 하수관로의 파손에 의해 발생된 지중 공동이 공동 주변의 이완영역과 함께 확장됨에 따라 지표면 침하량이 증가됨을 검토하였다.

지반 공동 발생으로 인한 지반함몰 사고를 미연에 방지하기 위해서는 발생된 공동의 규모에 따른 주변 지반의 이완영역에 대한 역학적 특성 평가와 더불어 이에 상응하는 적합한 보강 대책을 신속히 수립하는 것이 필요하다. 그러나 기존의 연구들은 지중에 발생된 공동과 지반 전체의 최종적 파괴 또는 변형과의 국한된 관련성을 분석하고 있을 뿐, 공동 발생 시점으로부터 지반의 전반적 파괴 상태에 이르는 과정의 메커니즘을 엄밀히 분석한 사례가 전무하다.

본 논문에서는 하수관 상부 손상 시, 토사유출에 의한 지중 공동 및 이완영역의 발생 메커니즘을 분석하기 위하여 유한요소 수치해석을 실시하였다. 수치해석에서는 지중의 공동과 함께 이완영역을 모사하기 위해 강제변위법을 적용하였다. 강제변위법을 활용한 지중의 공동과 이완

영역은 기존에 필자들이 수행한 연구 결과(Kim et al., 2017)를 활용하여 설정하였으며, 수치해석 결과는 Kuwano et al. (2010)이 수행한 실내모형실험 결과를 이용해 비교·검증 하였다. 유한요소 수치해석 결과로부터 토사유출로 인한 공동 주변 지반의 간극비 분포 특성을 파악하였으며, 공동 주변 지반의 전단응력 감소비 분포 특성을 분석하여 이완영역의 범위를 정량적으로 제시하였다.

2. 유한요소해석의 적용성 평가

2.1 수치해석 개요

본 연구에서는 지중 공동 주변 지반의 역학거동을 분석하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 이 때, 본 수치해석 결과의 신뢰성 검증을 위해 실내모형실험과 개별요소 수치해석을 수행한 선행연구(Kim et al., 2017)와 동일한 규모와 경계조건으로 모형지반 및 트랩도어를 모델링하였다(Fig. 1). 또한 트랩도어를 통한 토사 유출 현상을 안정적으로 모사하기 위해 모형지반 하단부에 강제 요소를 추가 적용하였으며, 강제 중앙부의 Geometry를 제거하여 트랩도어 개방을 모사하였다. 그리고 Geometry 제거로 인해 노출된 영역의 모형지반 절점에 강제변위를 적용하여 토사유출을 모사하였으며, 해석 결과로부터 지반의 공동부와 이완영역을 분석하였다.

수치해석에서 모형 지반의 구성모델은 선행연구의 개별요소 해석에서 적용한 탄성거동을 모사하는 Linear Elastic 모델을 적용하였다. 탄성거동 해석에서 사용되는 2가지 파라미터는 유효 영률(E')과 유효 포아송 비(ν')이며 식 (1)와 같이 지반의 변형을 나타낸다. 또한, 탄성 거동 모델을 적용한 지반의 물성은 개별요소 해석 시 사용된 값으로 결정하였다(Table 1).

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \\ \sigma'_{xy} \\ \sigma'_{yz} \\ \sigma'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon'_{xx} \\ \epsilon'_{yy} \\ \epsilon'_{zz} \\ \epsilon'_{xy} \\ \epsilon'_{yz} \\ \epsilon'_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

유한요소해석을 통한 지중 공동 생성에 대한 모사는 mesh가 연속적인 유한요소법의 특성으로 기인해 직접적인 모사가 불가능하다. 이에 유한요소법을 이용한 공동 모사방

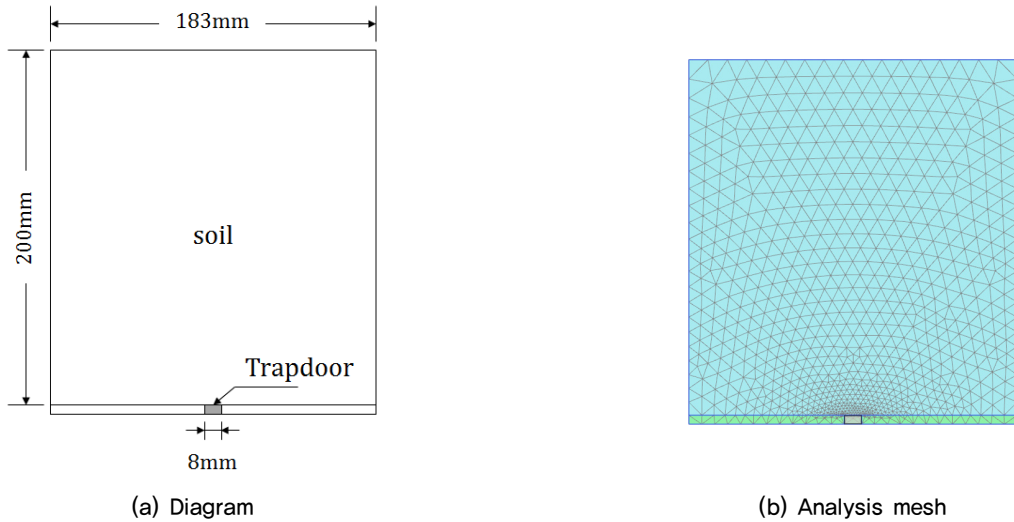


Fig. 1. FEM model

Table 2. Linear Elastic model parameter

Poisson's ratio	Modulus of transverse elasticity	Dry unit weight	Void ratio
0.2	100 MPa	23.1 kN/m^3	0.1

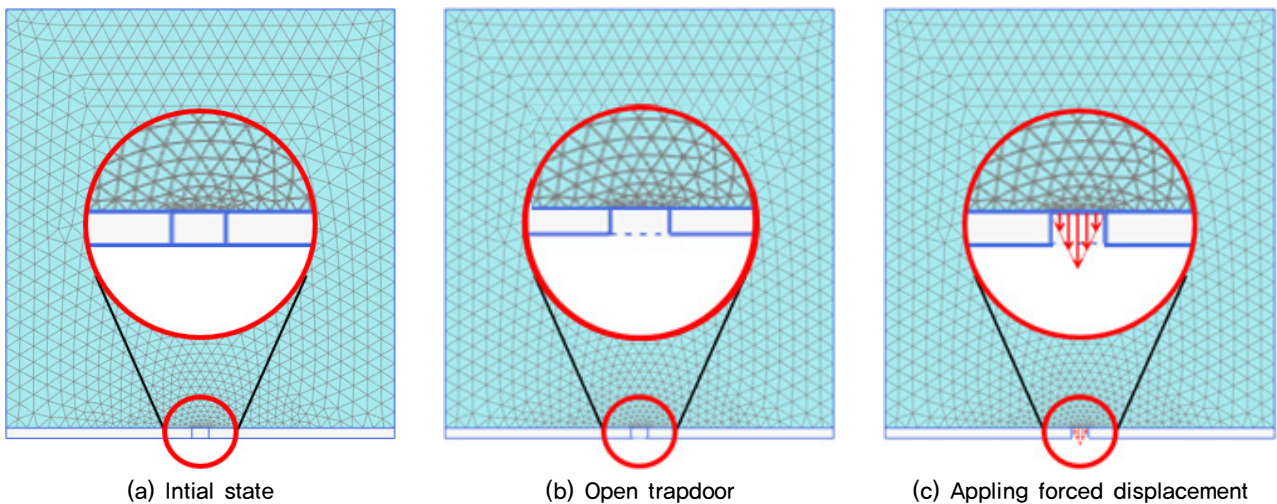


Fig. 2. Analysis steps

법은 임의의 변위를 적용하여 공동을 모사하는 방법이 적합할 수 있기 때문에, 강제변위법을 적용하여 공동과 이완영역을 모사하였다. Fig. 2는 유한요소해석 과정을 나타낸 것으로서, Fig. 2(a)의 초기 단계에서 Fig. 2(b)와 같이 트랩도어를 확장시켰다. 이 후, Fig. 2(c)와 같이 강제변위를 적용함으로써 공동 및 지반거동에 대한 해석을 실시하였다.

2.2 공동 및 이완영역 모사의 적정성

강제변위를 적용한 유한요소해석 결과가 공동 및 이완

영역 모사를 적절하게 나타낼 수 있는지 평가하기 위하여, 선행 연구(Kim et al., 2017) 및 본 해석결과에 의한 간극비 분포도를 비교하였다. Fig. 3은 선행 연구에서 수행한 모형실험 및 개별요소해석과 함께 금번 유한요소해석을 통한 간극비 분포도를 나타낸 것이다. 모형실험과 개별요소해석에 의한 선행 연구에서 지반 공동과 원지반의 경계는 간극비 0.52에서 결정할 수 있었으며, 이완영역은 간극비 0.11에서 그 경계를 결정할 수 있었다. 따라서 금번 수행한 유한요소해석의 결과 분석에서도 지반 공동과 이완영역을 각각 0.52와 0.11의 간극비를 경계로 결정하였다.

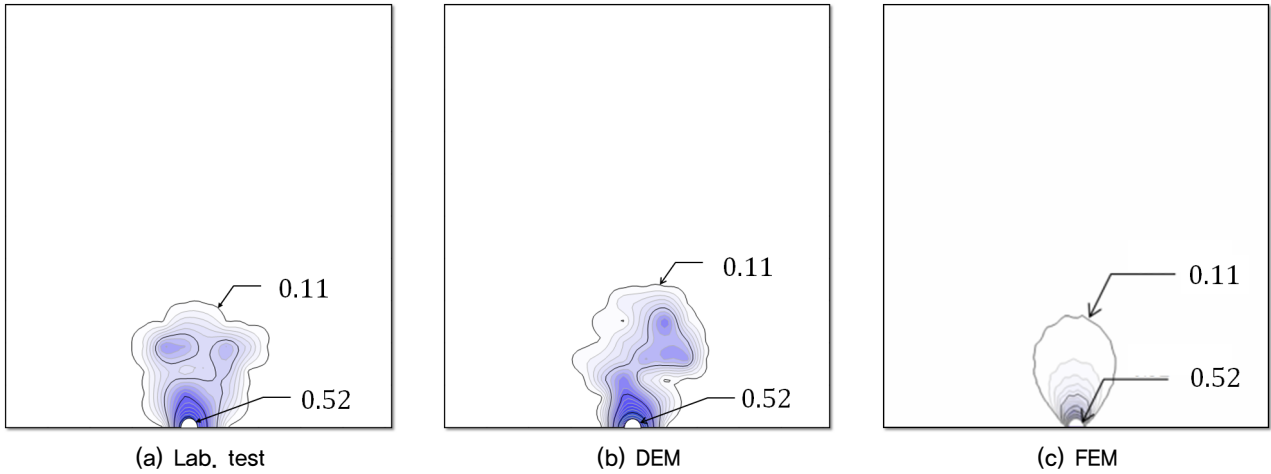


Fig. 3. Distribution of void ratio

유한요소해석에서 모사한 간극비 분포도(Fig. 3(c))를 선행 연구결과와 비교한 결과, 지반 공동의 형상과 규모를 유사하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 이완영역에 대한 간극비 분포 양상은 기존 연구결과와 다소 차이를 보이고 있지만, 전반적인 형상과 규모는 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 수행된 강제변위법에 의한 지반 공동과 이완영역의 모사는 그 형상과 규모, 확장성 등을 고려해 볼 때 적절히 수행되어졌다고 판단할 수 있다.

3. 탄소성 거동을 고려한 공동 및 이완영역 모사

상기에서는 탄성 모델을 이용하여 지반의 공동과 이완영역을 모사함에 있어 유한요소법의 적용성을 평가하였다. 그러나 보다 엄밀히 실제 지반의 거동을 분석하기 위해서는 탄소성 이론에 근거하여 해석함이 바람직하며, 더욱이 지중에서의 공동 발생은 지하수위 조건에 영향을 받기 때문에 이러한 제반 조건을 고려한 해석이 필요하다. 따라서 실제 지반에서의 공동 생성 및 주변 지반의 역학거동을 보다 엄밀히 분석하기 위하여, 지하수위 조건에 따라 수행된 기존의 실험적 연구(Kuwano et al., 2010)를 참고하여 탄소성 모델을 적용한 유한요소해석을 추가적으로 실시하였다.

3.1 유한요소해석 모델 설정

Kuwano et al.(2010)는 지하수위 변화에 따라 토사 유출로 인해 발생하는 공동 및 지반거동을 평가하기 위하여

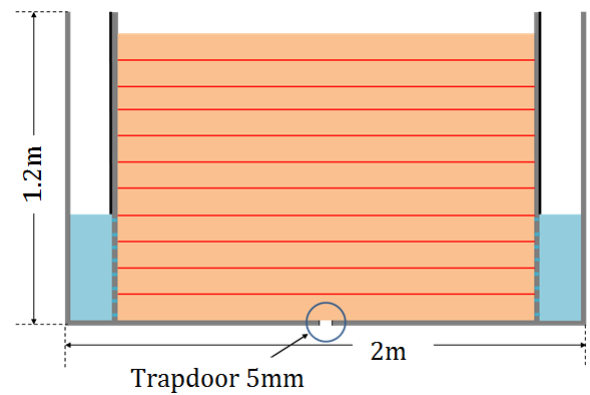


Fig. 4. Diagram of static water level's model test

공동 발생에 대한 실내모형실험을 수행하였으며, 지하수위 변화에 따른 공동의 형상과 규모를 분석하였다. 모형실험은 Fig. 4에서 보는 바와 같이, Toyoura 모래를 이용하여 폭 160cm, 높이 110cm의 모형지반을 제작하였으며. 하수관 파손에 따른 인위적 공동 발생 유도를 위해 토조 하단 중심부에 폭 5mm의 트랩도어를 형성시켰다. 이 때, 지하수위는 10cm, 20cm, 40cm의 순으로 상승시키며 지중 공동을 생성하였다.

Kuwano et al.(2010) 연구결과를 요약하면, Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 지하수위를 지반 하부로부터 10cm 상승시킨 경우에 토사 유출로 인해 지중에서의 공동이 발생하기 시작하였으며, 공동의 높이는 지하수위보다 상부에서 형성된 것을 확인하였다. 또한 공동의 수평방향으로의 폭은 높이에 비하여 좁게 나타났고, 이후의 지반거동은 토사유출이 더 이상 발생하지 않은 정지 상태인 것으로 나타났다. Fig. 5(b)와 같이 지하수위를 20cm까지 상승시킨 경우, 공동의 높이는 지하수위 10cm일 때와 유사하였지만,

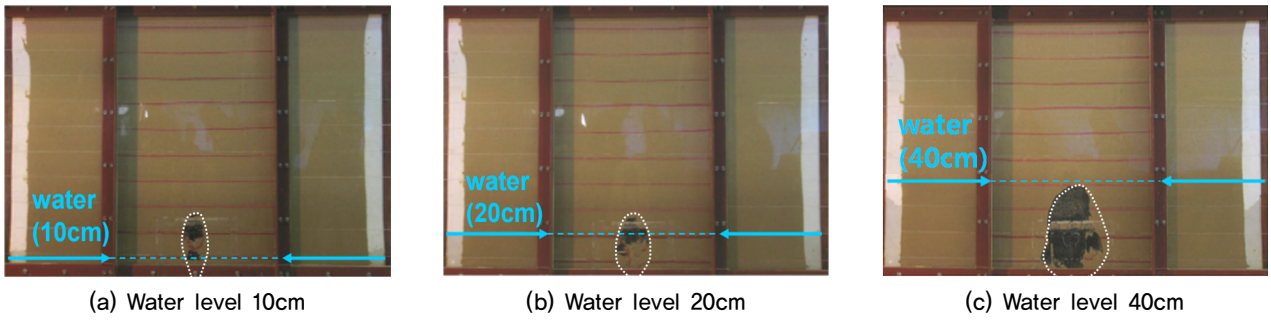


Fig. 5. Static water level's model test (Kuwano et al., 2010)

그 폭이 확장되는 것으로 나타났으며, 지하수위를 40cm까지 상승 시켰을 경우에는 공동의 높이가 지하수위 높이만큼 연직으로 확장됨과 동시에, 폭 또한 2배 이상으로 확장되는 것을 확인하였다(Fig. 5(c)).

상기의 기존 연구결과를 바탕으로 동일한 조건에서의 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석에서는 상기의 실내 모형실험과 동일한 경계조건으로 지반을 모델링하였으며, Fig. 6에 나타난 바와 같이, 지하수위 조건을 단계(0cm → 10cm → 20cm → 40cm)별로 적용하고, 각 지하수위 단계에서 강제변위를 적용하여 공동의 생성과 확장을 모사하였다. 이 때, 지반 모델은 탄소성 거동을 모사하기 위해 Hardening soil 모델을 적용하였다. Hardening soil 모델은 기존 탄소성 모델에 비하여 소성거동을 세밀히 모사할 수 있다고 알려져 있으며, 흙의 다일러턴시 효과를 고려하고 있으므로 공동 생성에 따른 주변 지반의 거동을 보다 엄밀히 나타낼 수 있다. Table 2는 본 해석에서 적용한 지반 재료의 물성치를 나타내고 있다.

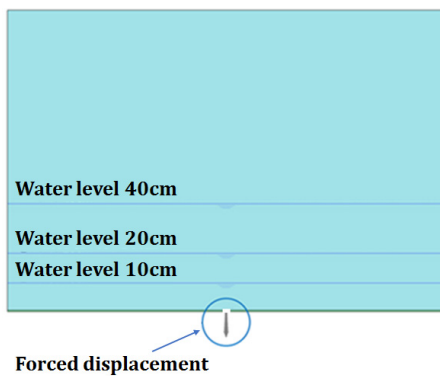


Fig. 6. Modeling of model test

3.2 공동 모사 결과 검증

각 지하수위 조건에 따라 기존 연구결과와 유사한 공동의 크기 및 형태를 모사하기 위해 적용된 최대 강제변위량을 Fig. 7에 나타내었다. 본 수치해석에서 지하수위 조건(10cm, 20cm 및 40cm)에 따른 최대 강제변위량은 각각 20cm, 32cm 및 70cm인 것으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 유한요소해석 결과로부터 얻은 간극비 분포도를 나타내고 있다. 그림에는 모형실험 기반의 기존 연구결과로부터 얻은 공동 형상도 함께 도시(점선)하였다. 지하수위가 10cm인 경우, 공동의 높이는 22.5cm로써 지하수위보다 약 2.2배 높게 형성되었으며, 모형실험에서 나타난 공동 높이 25.5cm보다는 다소 낮게 나타났다. 또한 공동의 폭은 16.5cm로 실험결과인 10.7cm보다 다소 넓게 형성되는 것으로 확인되었다. 지하수위가 20cm인 경우에는 공동의 높이와 폭은 각각 24.2cm, 18.3cm로 나타나 모형실험 결과와 유사하게 생성되었음을 알 수 있으며, 지하수

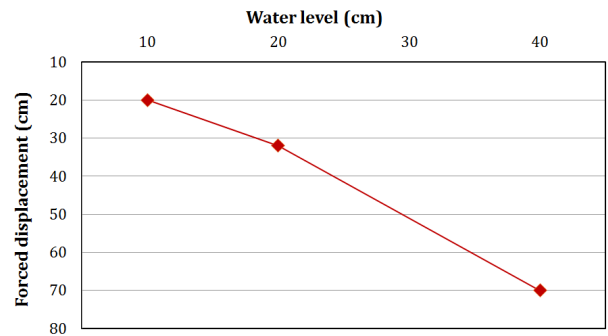


Fig. 7. Forced displacement according to water level

Table 2. Parameter applying Hardening soil model

E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	c	ϕ'	ψ	γ
56MPa	56MPa	168MPa	0	26.48°	4.8°	23.2kN/m ³

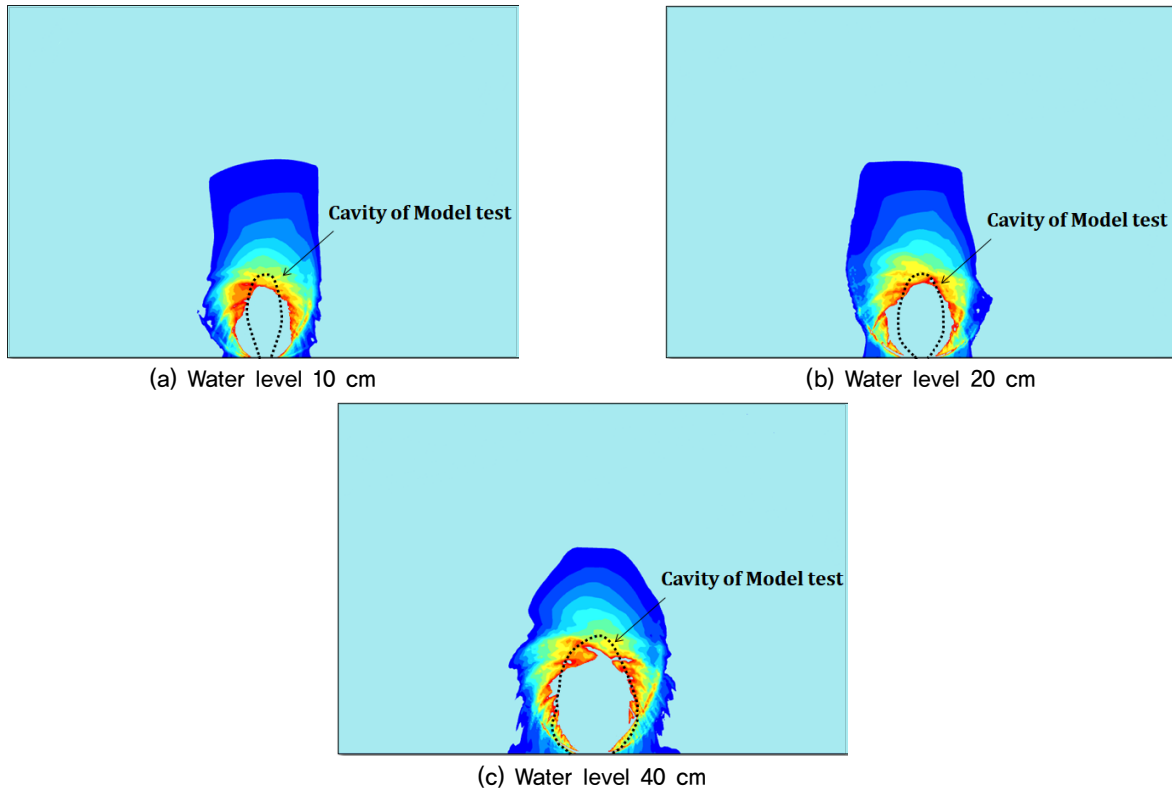


Fig. 8. Void ratio of FEM analyses with water level

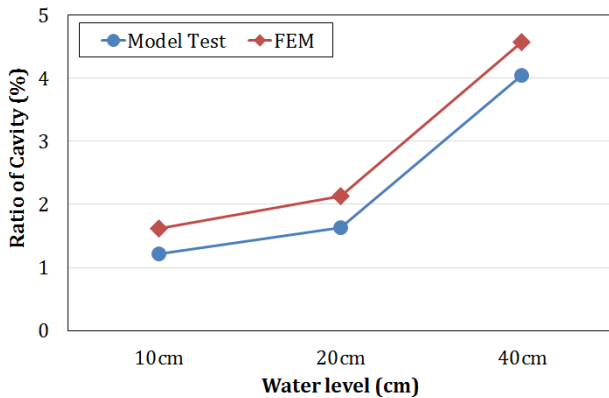


Fig. 9. Variation of Cavity ratio with water level

위 40cm인 경우의 공동 높이 및 폭은 각각 34.6cm 및 28cm로 확장되었으며, 지하수위 20cm의 경우와 마찬가지로 모형실험결과와 유사한 형상과 규모의 공동이 발생된 것으로 확인되었다.

Fig. 9는 모형실험 및 유한요소해석 결과를 바탕으로 지하수위 조건에 따른 공동비(Cavity area ratio)를 비교하였다. 여기서 공동비는 선행연구(Kim et al., 2017)에서 설정한 육안 공동 영역(Cavity relative to total area)과 동일한 개념으로써, 전체 모형지반의 면적 대비 분석된 공동의 면적비로 정의하였다. 유한요소해석을 통한 공동비는 모형

실험에 비하여 지하수위 조건에 따라 각각 약 33%, 31% 및 13%가 증가한 것으로 확인되었으며, 이는 공동생성이 진전됨에 따라 유한요소해석에 의한 공동모사가 실제 지반에서 생성되는 공동과 유사해지는 것을 의미한다. 즉, 지반의 공동이 발생하는 초기단계에서는 유한요소해석 결과가 공동비를 다소 과다하게 평가하는 것으로 나타났으나, 지하수위 상승과 함께 지속적인 토사 유출로 인하여 공동이 확장되는 상태에 대해서는 유한요소해석으로 공동을 적절히 모사할 수 있다고 판단된다.

4. 전단응력 감소비를 이용한 공동 및 이완영역 제시

지하수위 조건에 따라 공동을 모사한 모형실험결과는 공동의 규모 및 형상을 확인할 수는 있지만, 공동 생성에 의해 주변 지반의 응력 재분배로 인한 이완영역 평가는 어려운 일이다. 이에 유한요소해석 결과를 이용하여 공동 주변 지반의 이완영역을 평가하고자, 전단응력 감소비를 통해 주변 지반에 나타나는 이완영역의 응력저동을 분석하였다. 이 때, 전단응력 감소비는 초기 전단응력과 간극비 증가로 인해 감소한 전단응력의 비로 정의하였다.

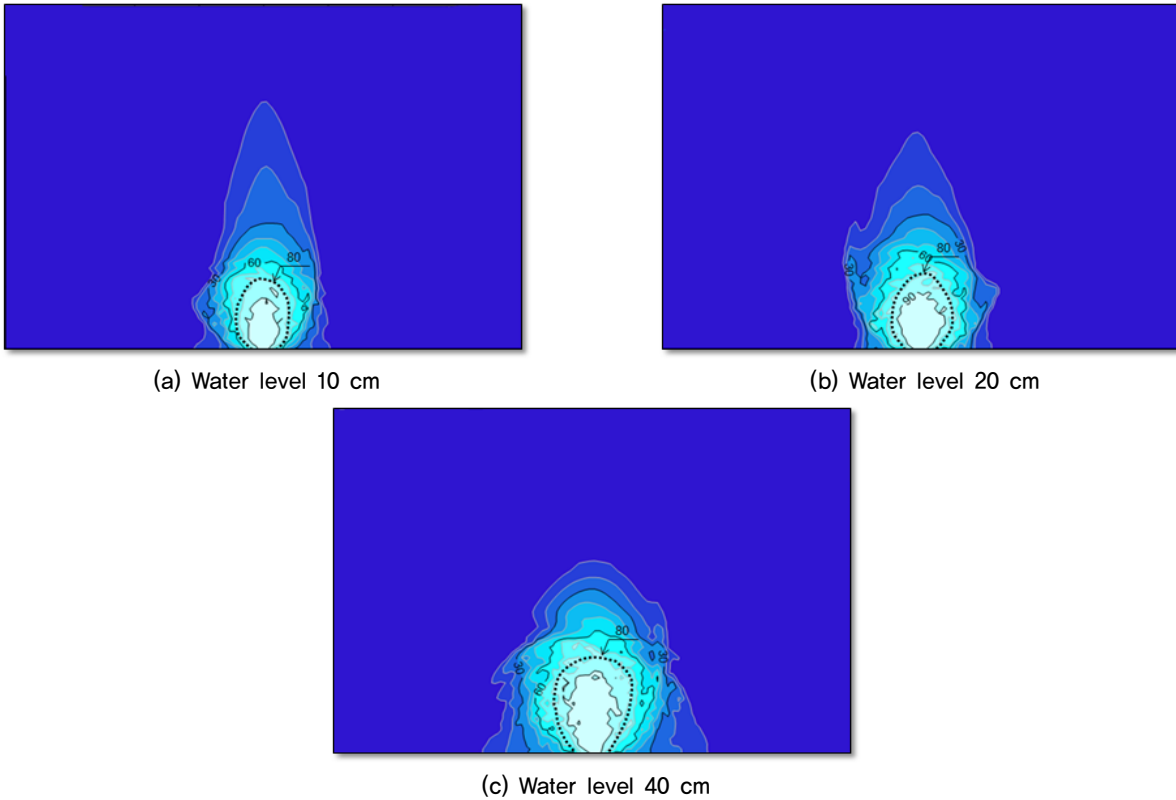


Fig. 10. Distribution of shear stress reduction with water level

Fig. 10은 지하수위에 따른 전단응력 감소비의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 간극비 분포도를 통해 설정한 공동 영역(점선부)은 전단응력 감소비가 80%인 경계부와 거의 일치하는 것으로 확인되었다. 즉, 수치 해석에서 초기 전단응력과 비교하여 전단응력이 80% 이상 감소하는 영역에 대해서는 공동으로 평가할 수 있음을 의미한다. 또한 이 경계를 벗어난 부분에서 전단강도 감소비가 점차 감소하며 확장되는 형상을 볼 수 있으며 이러한 부분을 이완영역으로 추정할 수 있다. 따라서 본 수치해석의 결과를 통해 지반의 공동과 이완영역의 경계를 추정할 수 있으며, 이완영역의 지반 강도 저하 정도를 정량적으로 산정할 수 있다고 판단된다.

Fig. 11은 지하수위 조건에 따른 모형지반의 추정 이완영역(Estimated relaxation zone)을 나타내고 있다. 여기서 추정 이완 영역은 전체 영역에 대한 추정 이완 영역의 비율(공동 영역 제외)을 의미한다(Kim et al., 2017). 지하수위가 10cm 및 20cm인 경우에는 이완영역이 유사한 것으로 확인되었지만, 지하수위가 40cm일 때에는 이완영역이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 지하수위가 낮은 경우보다 높게 유지되는 경우에 이완영역의 확장이 더욱 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 파손된 하수관 상부

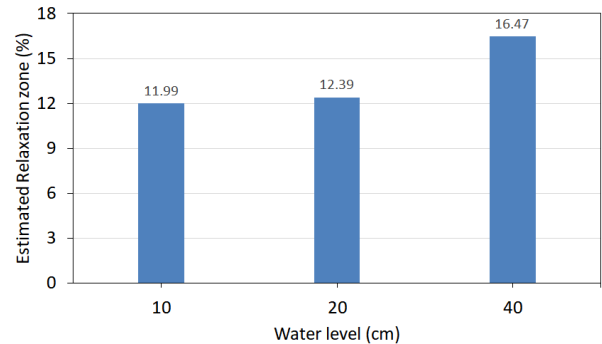


Fig. 11. Estimated relaxation zone with water level

에 지하수위가 높게 형성되는 경우에 이완영역의 규모가 증가할 수 있음을 시사한다.

5. 결론

본 연구에서는 하수관 상부 손상 시, 토사유출에 의한 지중 공동 및 이완영역의 발생 메커니즘을 분석하기 위하여, 강제변위법을 활용한 유한요소해석을 수행하여 공동 및 이완영역을 모사하였으며, 기존 연구결과와의 비교를 통해 이를 검증하였다. 또한 공동 주변 지반의 전단응력 감소비 분포 특성을 분석하여 공동 및 이완영역의 범위를

정량적으로 제시하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모형실험 및 개별요소법 기반의 수치해석결과에 의한 간극비 분포도를 유한요소해석 결과와 비교함으로써 유한요소해석의 한계점을 확인하였지만, 공동의 형상 및 규모와 공동 주변지반의 이완영역의 확장정도를 바탕으로, 유한요소해석을 활용한 공동 모사는 충분히 가능한 것으로 판단되었다.
- (2) 기존 모형실험 결과를 대상으로 탄소성 유한요소해석을 수행하여 지하수위 조건에 따른 공동과 이완영역을 모사한 결과, 공동생성이 진전됨에 따라 실제 지반에서 생성되는 공동과 이완영역의 규모와 형상이 모형실험 결과와 유사해지는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 수치해석결과로부터 강제변위 적용으로 인해 지반의 전단응력이 80% 이상 감소되는 영역은 지반 공동으로 추정할 수 있었으며, 그 경계를 벗어나면서 전단강도 감소비가 점차 감소하며 확장되는 영역을 이완영역으로 추정할 수 있었다.
- (4) 유한요소 수치해석을 통한 전단응력 감소비를 활용하여 공동 및 주변 지반의 이완영역 경계를 추정할 수 있으며, 이완영역의 지반 강도 저하 정도를 정량적으로 산정하여 공동발생에 따른 이완영역 예측 및 그에 대한 합리적인 보강 방안 수립이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 17SCIP-B108153-03)

References

1. Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (1985), Rock mechanics for underground mining, George Allen and Unwin., pp.527.
2. Choi S. K., Back S. I., An J. B., and Kwon T. I. (2016), "Geotechnical investigation on causes and mitigation of ground subsidence during underground structure construction", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.18, No.2, pp.143-154.
3. Kim, J. B., You, S. K., Han, J. G., Hong, G. G. and Park, J. B. (2017), "A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone Using Laboratory Model Test and Discrete Element Method", J. Korean Geosynthetics Society, Vol.16, No.2, pp.11-21.
4. Kim, N. Y. and Umm, T. W. (2013), "A case study on the Chimney collapse of tunnel under construction", Proceeding of Korean geo-environmental society, Seoul, pp.43-53.
5. Korea institute of geoscience and mineral resources (2014), Research on causes and policy suggestions by sinkhole type, Research report, pp.18-39.
6. 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 Vol.5, No.2, pp.219-229.
7. Lee, S. H., Lee H. L., and Song, K. I. (2016), "The effect of formation of spherical underground cavity on ground surface settlement : Numerical analysis using 3D DEM", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.18, No.2, pp.129-142.
8. Park, I. J. and Park, S. H. (2014), "Cause analysis and counterplan for sinkhole", Magazine of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.5, pp.12-17.
9. Song, K. I. and Yoon, J. S. (2015), Tunnel deformation mechanism, CIR, Seoul.
10. Suchowerska, A. M., Merifield, R. S., Carter, J. P., and Clausen, J. (2012), "Prediction of underground cavity roof collapse using the Hoek-Brown failure criterion", Computers and Geotechnics, Vol.44, pp.325-342.