한국지반신소재학회논문집 제21권 1호 2022년 3월 pp. 49 ~ 56
J. Korean Geosynthetics Society Vol.21 No.1 March 2022 pp. 49 ~ 56

DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2022.21.1.049
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

도로 하부지반에서 발생된 공동이 지반 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석

Numerical Analysis on the Influence Factors of Cavity Occurrence in the Stability of the Underground with Cavity

남준희[1], 김종철[2], 이강일[3]*

Jun-Hee Nam[1], Jong-Chul Kim[2], Kang-Il Lee[3]*

[1]*Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea*

[2]*Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea*

[3]*Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, finite element numerical analysis was performed considering various influence factors(cavity shape and size, pavement thickness and size of traffic load) in order to analyze the impact factors in the underground of the road where the cavity occurred and to evaluate the stability of the ground. In order to verify the reliability of the numerical analysis method applied in this study and the results it was compared and analyzed with the results of previous studies and field measurements. The correlation between the influence factors was analyzed through the distribution of vertical displacement obtained from the numerical analysis results, the distribution of surface settlement and surface settlement, the distribution of the stress ratio, and the distribution of the safety factor. As a result, it was confirmed that as the size of the cavity and traffic load increased and the thickness of the pavement decreased, the vertical displacement and surface settlement at the top of the cavity increased. Also, the shape of the cavity was square, the stability of the ground was significantly reduced compared to the case of a circular cavity. Through these results, it was possible to confirm the overall stability of the lower ground of the road where the cavity was generated.

요 지

본 연구에서는 공동이 발생된 도로 하부지반에서의 영향인자 분석과 지반의 안정성을 평가하기 위하여 다양한 영향인자(공동 형상 및 규모, 포장층 두께, 교통하중의 크기)를 고려한 유한요소 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 수치해석 방법 및 결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 기존 연구 및 현장계측 결과와 비교·분석하였다. 수치해석 결과로부터 얻은 연직변위분포, 지표침하분포 및 침하량, 응력비 분포, 안전율 분포를 통해 영향인자 간의 상관관계를 분석하였으며, 도로 하부지반의 전반적인 역학적 거동 분석을 통해 지반의 안정성을 평가하였다. 그 결과, 공동규모 및 교통하중이 증가하고 포장층 두께가 감소할수록 공동 상부의 연직변위 및 지표침하량이 크게 나타났으며 허용안전율 미만의 위험지반영역이 증가하여 지반의 안정성 감소가 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한 공동의 형상이 사각형일 경우 원형의 공동일 때보다 지반의 안정성 감소가 크게 나타났다. 이러한 결과를 통해 공동이 발생된 도로 하부지반의 전반적인 안정성에 대해 확인할 수 있었다.

Keywords **:** Numerical analysis, Cavity, Influence factors, Surface settlement, Safety factor

1. 서 론

최근, 도심지에서 지반침하 및 도로함몰로 지칭되는 현상이 빈번하게 발생하고 있으며 그 규모가 점차 증가하고

Received *24 Feb. 2022,* ***Revised*** *24 Mar. 2022,* ***Accepted*** *25 Mar. 2022*

Corresponding author
Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-549-2020
E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K.-I. Lee)

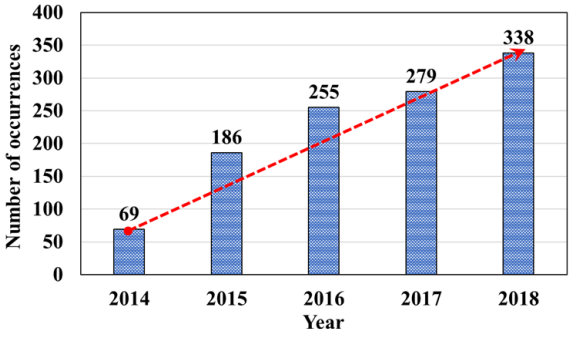


Fig. 1. Number of ground subsidence occurred by year (MOLIT, 2019)

있어 국민의 심리적 불안감이 크게 자리 잡아 국가적 차원으로 대비되어야 하는 큰 재난으로써 받아들여지고 있는 실정이다. 국내에서는 지하안전관리에 관한 특별법(MOLIT, 2018) 시행으로 지반침하의 발생기준(시행령 제35조 제1항)을 면적이 1m^2 또는 깊이가 1m 이상이거나, 지반침하로 인하여 사망자 및 실종자 또는 부상자가 발생한 경우로 제정하였다. 이에 발생기준을 적용한 국내 지반침하 발생 건수를 살펴보면 2014년부터 꾸준히 증가하고 있으며 2018년에는 약 5배가 증가한 것으로 조사되었고, 최근까지도 지속적인 증가경향을 보이고 있다(Fig. 1).

이러한 사회적 배경을 바탕으로 지반침하의 원인 규명을 위해 많은 연구가 수행되었으며, 이를 통해 국내 도심지에서 발생하고 있는 대부분의 지반침하는 도로 하부지반에 매설된 노후 하수관으로 인하여 발생된 공동이 주원인임을 밝힌 바 있다(Oh et al., 2015; You et al., 2017; You et al., 2019a; Choi and Kweon, 2019). 그러나, 지반 내의 공동 발생 및 확장에 대한 메커니즘의 명확한 규명은 어려운 것이 사실인데, 이는 지반 내 공동의 정확한 조사가 어려울 뿐만 아니라, 공동발생에 영향을 미치는 영향인자들의 상관관계가 매우 다양하기 때문이다. 또한 지반침하에 대한 실험적 연구(Kuwano et al., 2010; Mukunoki et al., 2012; Oh, 2016; Kim et al., 2017)가 다수 수행된 바 있지만, 이는 하수관 파손에 의한 제한적 조건으로 실험했기 때문에, 엄밀한 원인 분석에 한계점이 있다. 그리고 도로 하부지반의 공동으로 인한 지반침하와 함몰 현상은 지상 및 지중에 위치한 지반구조물의 물리적 손상과 지반의 공학적 특성에 기인하기 때문에, 이를 실험적으로 묘사하는 것은 어려운 일이다. 따라서, 지반침하 발생 메커니즘을 규명하기 위해서는 다양한 영향인자들을 고려할 수 있는 수치해석적 연구가 필수적으로 병행되어야 하기 때문에, 지반침하의 원인 규명 및 발생 예측을 위한 연구가 다양하게 수행된 바 있다.

You et al.(2019b)은 지중 공동의 발생규모를 정량적으로 분석하기 위하여 강제변위법을 적용한 유한요소 수치해석을 수행하여 공동 및 이완영역의 간극비와 전단응력 감소비를 통한 분석방법을 제시한 바 있다. Ahn(2020)은 공동의 발생에 영향을 미치는 다양한 요소를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과, 지표침하량과 비파괴심도의 상관관계를 통해 공동발생 예측방법을 제시된 바 있다. An et al.(2018)은 전단강도감소기법을 고려한 수치해석을 통해 장단축비를 고려한 타원형 공동의 규모별 안정성 평가를 실시하였으며, Choi et al.(2018)은 공동의 유무 및 아스팔트 포장층 조건을 고려하여 포장체의 파손이 공동 발생에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다. Lee et al.(2018)은 서울시에서 제안한 공동관리 등급제를 참고하여 포장층, 토피고, 공동 폭을 고려하여 집중하중과 등분포하중에 따른 도로 파괴하중을 분석하였으며, 이를 통해 기존 서울형 공동관리 등급보다 세밀한 공동 분류가 필요함을 제시한 바 있다.

기존의 수치해석적 연구들은 공동의 크기, 포장층 및 상재하중과 같은 영향인자를 주로 고려하였으나, 지반침하 및 함몰에 직접적 영향을 미치는 공동규모 및 공동의 형상을 영향인자로 적용하여 공동발생 지반의 거동을 분석한 연구는 미미한 수준이다. 또한 도로 하부지반에서 발생된 공동에 대하여 다양한 영향인자의 상관관계 분석을 통한 지반의 안정성을 평가한 연구도 다소 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 공동발생에 영향을 미치는 다양한 영향인자를 고려하여 공동이 발생된 도로 하부지반에서의 역학적 거동 평가와 지반의 안정성 분석을 위한 수치해석적 연구를 수행하였다. 해석은 공동형상 및 규모와 함께, 포장층 두께, 교통하중 크기를 영향인자로 적용하였고, 기존연구(Choi et al., 2018; Park and Choi, 2019; Ahn, 2020)를 바탕으로 해석 방법의 신뢰성 확보를 위한 검증해석을 수행하였다. 그리고 해석결과를 이용하여 연직변위분포, 지표침하량, 응력비 분포, 안전율 분포를 분석하여 공동이 발생된 도로 하부지반에 대한 안정성을 평가하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 방법

본 연구에서 수행한 수치해석은 범용 해석 프로그램인

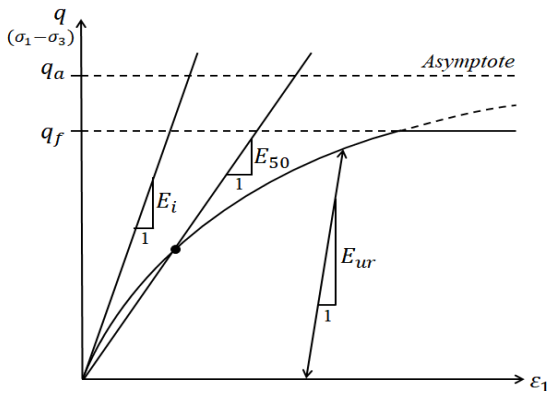


Fig. 2. Relationship of stress and strain in hardening soil model (Schanz et al., 1999)

Table 1. Soil parameters of hardening soil model in numerical analysis (You et al., 2019a)

E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	c (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	γ (kN/m^3)
16,000	22,000	90,000	0.5	37	1.5	18.0

PLAXIS 2D를 이용한 유한요소해석으로 하였으며, 해석에 적용된 모델과 경계조건 등은 기존 연구(You et al., 2019b; Ahn, 2020)를 적용하였다. 즉, 지반 상부에 포장층을 묘사하여 포장층에 교통하중이 작용할 수 있도록 하였으며, 지반의 역학모델은 탄소성이론을 기반으로 하는 Hardening soil model(Schanz et al., 1999; PLAXIS, 2016)을 적용하였다. Hardening soil model은 실제 지반의 거동을 엄밀하게 재현할 수 있으며, 공동 생성에 따른 공동 주변 지반의 변형을 면밀하게 나타낼 수 있는 특징이 있다. Fig. 2와 같은 Hardening soil model의 자세한 내용은 기존 연구를 참고할 수 있다(You et al., 2019b; Ahn, 2020). 그리고 지반 내부에 형상과 규모가 다른 공동을 묘사하여 영향인자 변화에 따른 지반의 안정성을 평가하였다.

해석에 적용된 지반정수는 Table 1에서 보는 바와 같으며, 이는 일반적인 사질토 재료를 Hardening soil model에 대하여 적용한 값(Benz, 2007)과 기존연구(You et al., 2019a)를 참고하였다.

2.2 해석방법의 검증

본 연구에서 수행된 수치해석의 방법 및 결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서 공동이 발생된 도로 하부지반의 현장계측결과(Choi, 2018)를 활용하여 이를 비교·분석하였다. 현장계측결과는 GPR 조사로부터 계측된 1개의

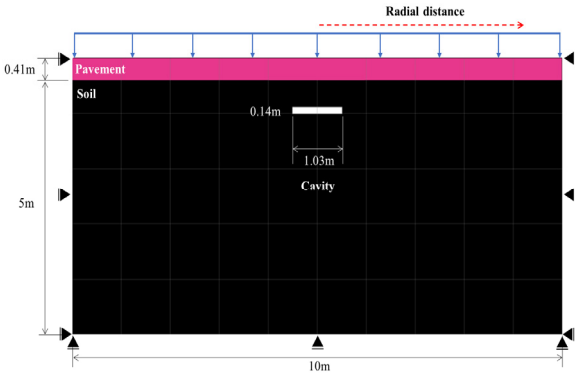


Fig. 3. Numerical analysis model for verification

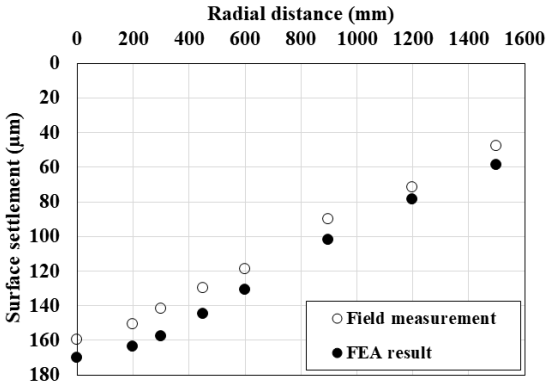


Fig. 4. Verification result of numerical analysis

공동 지점에 대한 도로처짐량(지표침하량) 계측 정보를 활용하였다. Fig. 3은 조사된 공동 및 현장 조건을 바탕으로 현장계측지점의 포장층 두께, 공동규모, 공동 상부의 토피고를 고려한 해석 모델을 나타낸 것이다.

검증 결과, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 지표침하량은 모델지반 중심의 지표면에서 가장 큰 침하량이 나타났으며 공동 중심에서 멀어질수록 침하량은 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 현장계측 결과와 유사한 침하량을 나타내고 있음을 확인하였다. 따라서, 현장계측 결과와 수치해석 결과의 비교를 통하여, 본 연구에서의 수치해석 방법은 공동이 발생된 도로 하부지반의 역학 거동 모사가 가능한 것으로 판단되었다.

3. 영향인자를 고려한 수치해석

3.1 해석 개요

본 연구에서 수행된 수치해석의 영향인자로는 공동형상, 공동규모, 포장층 두께, 교통하중 크기로 적용하였다. 공동의 상부 토피고는 1m로 설정하였으며, 이는 노후 하수관의

매설심도 기준인 1m를 참고하여 설정하였다. 공동형상은 사각형 및 원형으로 하였고, 공동규모는 공동형상과 함께 도심지 내 가장 많이 발생되고 있는 소규모 공동 및 그 이상 규모의 공동을 고려하여 0.79m^2, 1.77m^2, 3.14m^{2}로 적용하였다. 또한 포장층은 일반적인 포장층 두께인 0.1m~0.3m로 하였으며, 수치해석에 적용된 포장층의 정수는 Table 2에 나타내었다. 교통하중의 크기는 국내 건설현장에서의 표준트럭하중과 적재시 하중을 고려한 하중크기(12.7kN/m^2~38.1kN/m^2)를 적용하였다. 해석모델은 검증 모델에 적용된 조건과 동일한 조건으로 하였으며, Table 3에 상기 설명된 조건을 정리하여 수치해석 case를 나타내었다.

Table 2. Pavement parameters in numerical analysis

E (MPa)	ν	γ (kN/m^3)
3,000	0.35	24.0

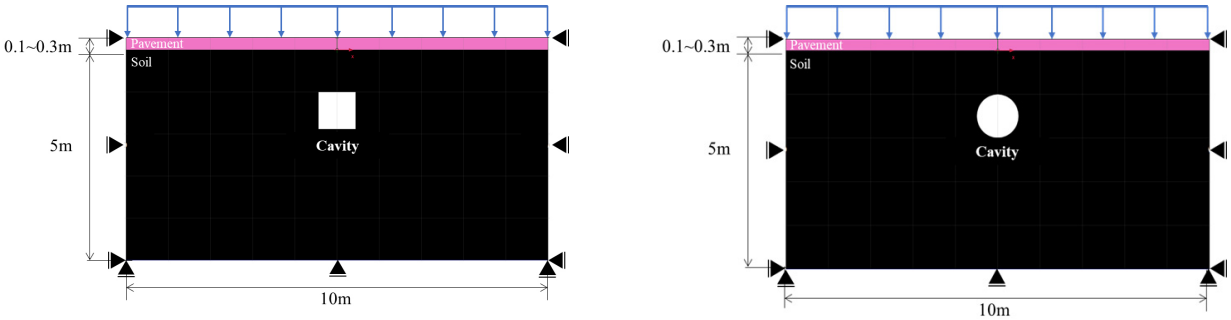
Table 3. Numerical analysis cases

Cavity type	Cavity area (m^2)	Pavement thickness (m)	Traffic load (kN/m^2)
Rectangular & Circular	0.79	0.1, 0.2, 0.3	12.7
			25.4
			38.1
	1.77	0.1, 0.2, 0.3	12.7
			25.4
			38.1
	3.14	0.1, 0.2, 0.3	12.7
			25.4
			38.1

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 모델지반의 측면부 경계면에서의 구속에 대한 영향을 최소화하기 위하여 지반의 폭을 10m로 넓게 적용하였으며, 모델지반 상부에 적용된 포장층을 제외한 지반의 높이는 5m로 적용하였다. 또한, 도로 하부지반에서 발생될 수 있는 공동의 형상에 따른 영향을 파악하고자 공동의 형태를 사각형 및 원형으로 가정함으로써 공동 주변 지반에 발생되는 응력에 대한 지반변형에 대해 분석하고자 하였다.

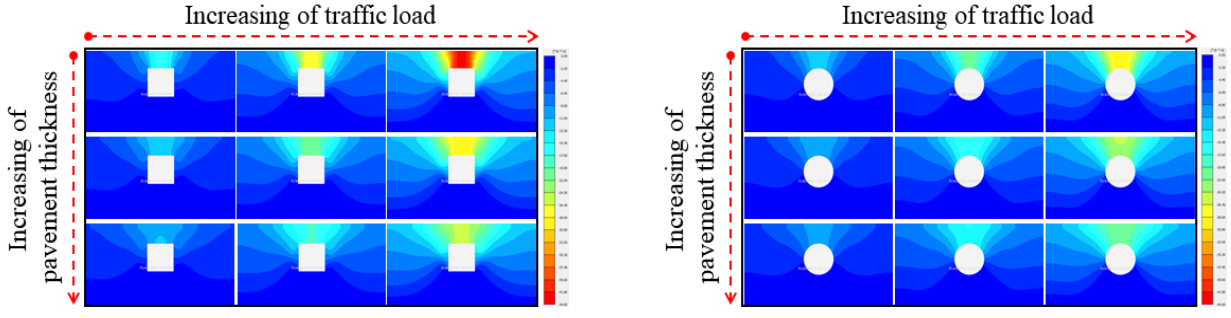
3.2 해석 결과

Fig. 6은 공동형상별로 공동규모 3.14m^2, 포장층 두께 0.1m, 0.2m, 0.3m, 교통하중 크기 12.7kN/m^2~38.1kN/m^2 범위가 적용된 해석조건에서 공동 상부지반의 연직변위분포를 나타낸 것이다. 상부 포장층에 적용된 교통하중의 크기가 증가하고, 포장층 두께가 감소할수록 공동 상부 지반요소의 연직변위량이 크게 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 공동의 형상 및 규모에 관계없이 동일한 결과로 확인되었다.



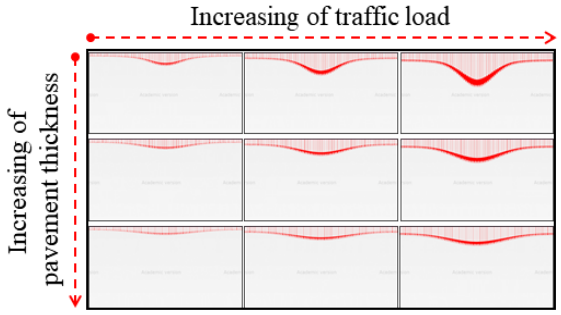
(a) Rectangular cavity (b) Circular cavity

Fig. 5. Numerical analysis model for evaluation of influence factors

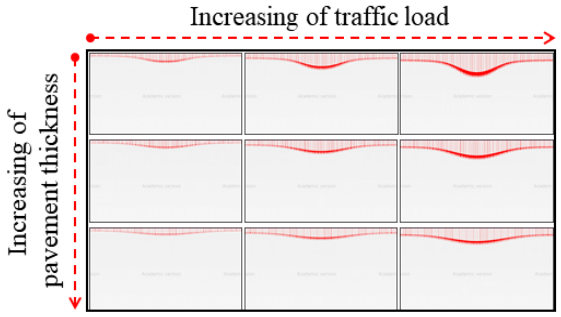


(a) Rectangular cavity (b) Circular cavity

Fig. 6. Vertical displacement distribution



(a) Rectangular cavity



(b) Circular cavity

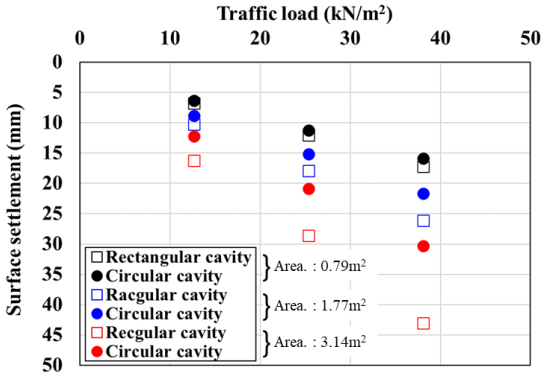
Fig. 7. Surface settlement distribution

Fig. 7은 지표의 침하분포를 나타낸 것으로서, 모든 해석조건의 지표침하분포는 지반의 중심에서 최대로 발생되었으며, 중심부에서 멀어질수록 감소하였다. 이러한 경향은 교통하중의 크기가 클수록, 포장층 두께가 작은 조건일수록 확연하게 나타났으며, 공동의 형상이 사각형인 경우가 원형인 경우에 비하여 뚜렷한 경향을 나타내었다.

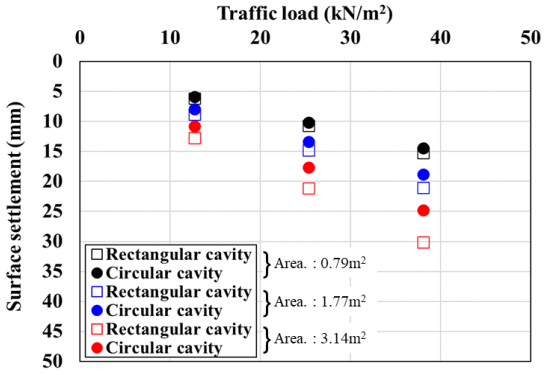
4. 영향인자를 고려한 지반의 안정성 평가

4.1 지표침하량과 교통하중 크기 및 공동규모의 상관관계

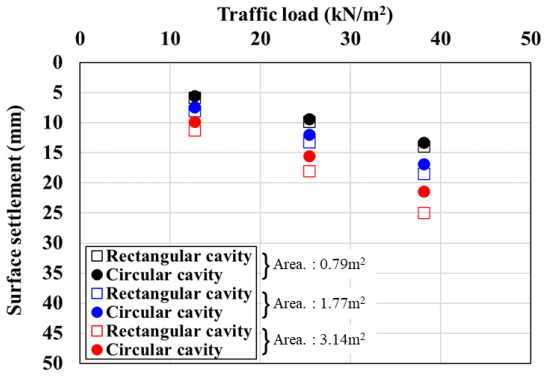
Fig. 8은 교통하중 크기 및 공동규모에 따른 지표침하량을 포장층 조건별로 분석한 결과이다. 모든 포장층 조건에서 교통하중의 크기와 공동규모가 증가할수록 지표침하량은 크게 발생하였으며, 이러한 경향은 포장층 두께가 감소할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이는 지표에서 발생하는 침하량이 포장층 두께에 큰 영향을 받는 것을 의미한다. 또한 공동의 형상에 따른 지표침하량에도 큰 차이가 확인되었는데 공동의 형상이 사각형인 경우가 원형에 비하여 지표침하량이 크게 발생한 것을 고려하면, 사각형 공동이 상대적으로 지반의 안정성 감소가 큰 것으로 분석되었다. 이는 3.2절에서 언급된 공동 상부 지반의 연직변위분포 및



(a) Pavement 0.1m



(b) Pavement 0.2m



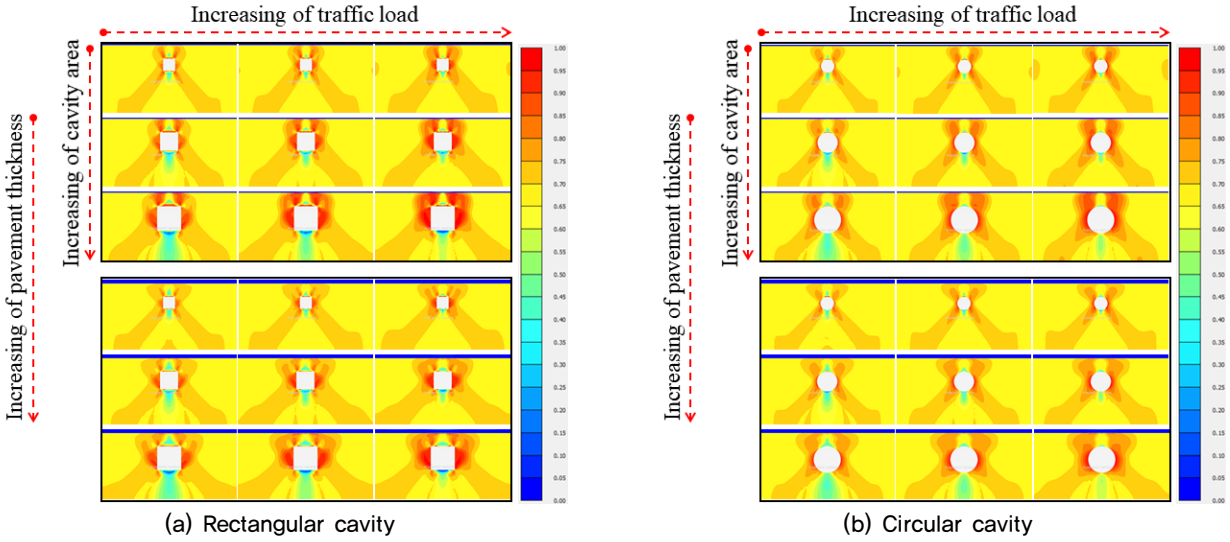
(c) Pavement 0.3m

Fig. 8. Surface settlement according to traffic load by cavity area

지표침하분포와 부합하는 결과이다.

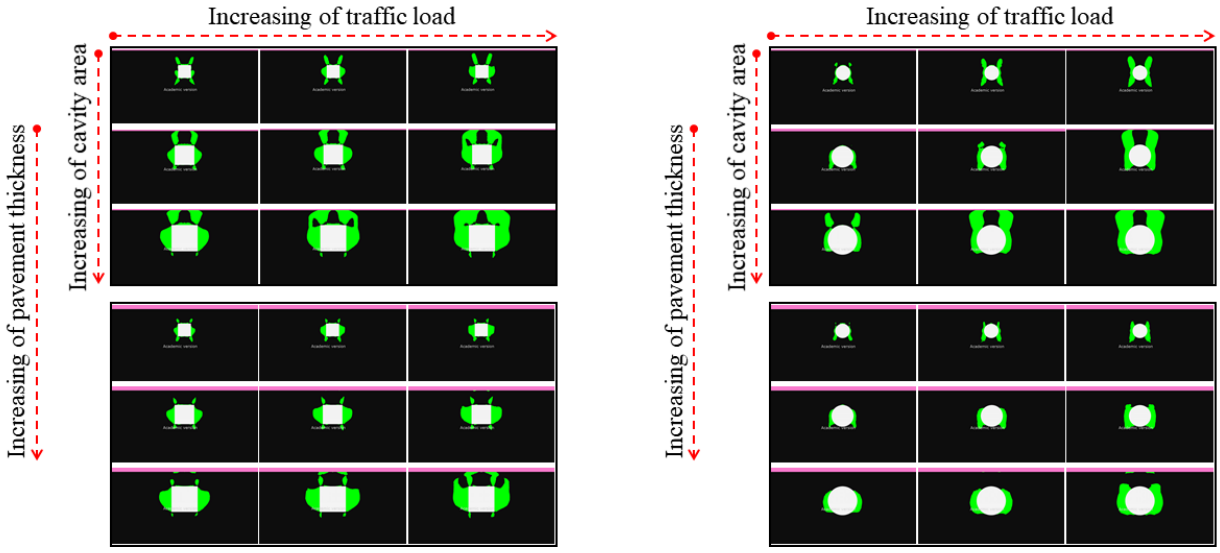
4.2 응력비 분포 특성

Fig. 9는 응력비 분포를 나타낸 결과로서, 응력비(Stress ratio)는 지반 요소에 대한 전단강도와 모델지반 상부에 교통하중 적용 및 응력해방으로 인해 발생된 전단응력의 비를 의미한다(You et al., 2019b; Ahn, 2020). 교통하중 재하로 인해 발생된 전단응력이 전단강도에 도달할수록 적색으로 도식화되면 불안정한 것으로 확인할 수 있다.



(a) Rectangular cavity (b) Circular cavity

Fig. 9. Stress ratio distribution



(a) Rectangular cavity (b) Circular cavity

Fig. 10. Safety factor distribution

응력비 분포 결과를 통해 공동 주변 지반의 불안정 영역을 확인한 결과, 공동규모와 교통하중의 크기가 증가하고, 포장층 두께가 감소할수록 공동 주변 지반의 불안정 영역이 증가하였다. 특히, 공동규모가 0.79m^{2}인 경우, 불안정 영역이 포장층 하부까지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났지만, 공동규모가 1.77m^2, 3.14m^{2}인 경우에는 교통하중 크기가 38.1kN/m^{2}이 적용되었을 때 포장층 하부까지 불안정 영역이 확대되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 포장층 두께가 작을수록 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 공동형상이 사각형 공동인 경우가 원형의 공동에 비하여 안정성이 감소된 지반의 범위가 크게 나타났다.

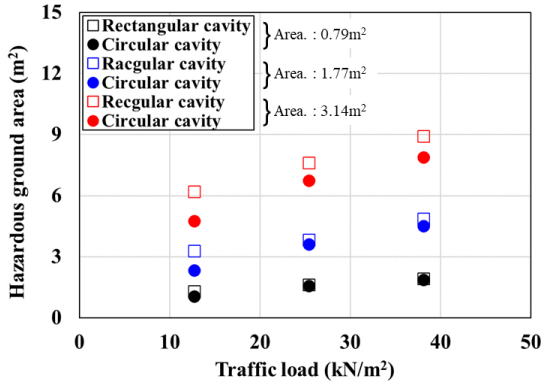
4.3 안전율 분포 특성

Fig. 10은 기존 연구(You et al., 2019b; Ahn, 2020)에서 제시된 방법을 이용하여 안전율 분포도를 나타낸 것으로서, 안전율(Safety factor) 분포도는 앞서 설명된 응력비 분포도에 안전율 개념을 적용한 것이다. 이때, 한국도로공사 시방서를 바탕으로 일반적인 허용안전율(=1.25)을 적용하여 허용안전율 미만의 지반 영역이 표시되도록 하였다.

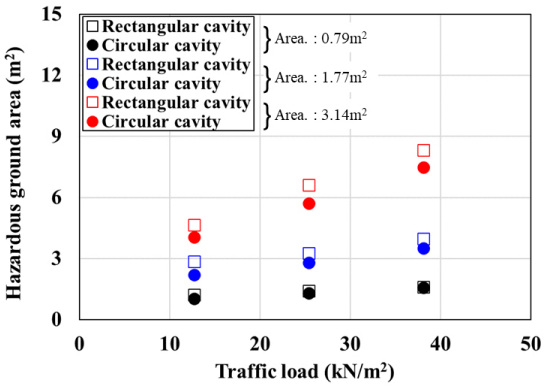
모든 해석조건에서 공동규모 및 교통하중이 증가하고, 포장층 두께가 작을수록 허용안전율 미만의 불안정한 지반 영역이 크게 나타났다. 공동규모가 0.79m^{2}인 조건에서는 교통하중 증가 및 포장층 두께 감소에 따른 허용안전율 미만의 지반 영역이 포장층 하부까지 확장되지는 않았다.

그러나, 그 이상의 공동규모에서는 포장층 두께가 0.2m 이하로 감소하고 교통하중의 크기가 25.4kN/m^2 이상 작용하게 되면 허용안전율 미만의 영역이 점차 확장되어 지표면까지 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 앞서 분석된 결과와 동일하게 공동의 형상이 사각형인 경우가 지반의 안정성 감소 영역과 포장층 하부 지표면까지 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

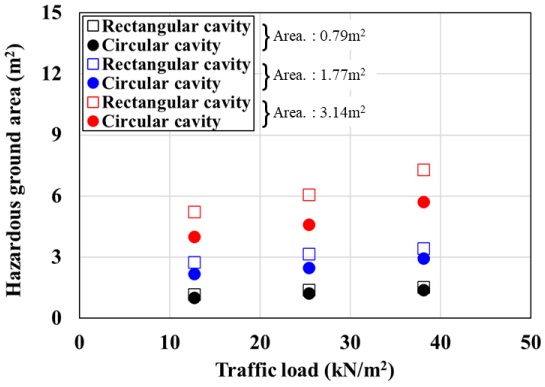
Fig. 11은 허용안전율 미만의 불안정 지반 영역을 면적으로 산정한 결과를 나타낸 것으로서 이를 위험지반으로 정의하였다. 공동규모 및 교통하중 크기 증가와 함께, 포장층 두께가 감소할수록 위험지반 면적이 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히, 포장층 두께가 0.1m 조건에서 공동규모 0.79m^2, 3.14m^{2}의 위험지반 면적을 비교한 결과, 공동규모는 약 4배가 차이가 나지만 위험지반 면적은 약 4.7배가 차이나는 것으로 분석되었다. 또한, 동일한 조건에서 공동형상에 따라 비교한 결과, 공동이 사각형인 경우의 위험지반 면적이 원형에 비하여 약 1.2배 크게 나타나는 것으로 확인되었다.



(a) Pavement 0.1m



(b) Pavement 0.2m



(c) Pavement 0.3m

Fig. 11. Hazardous ground area according to traffic load by cavity area

포장층 두께와 관계없이 공동규모가 작은 경우에는 공동형상에 따른 위험지반 면적의 차이는 크지 않았지만 공동규모가 증가할수록 위험지반 면적에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 공동이 발생된 도로 하부지반에서의 역학적 거동 평가와 지반의 안정성 분석을 위하여 공동형상 및 규모, 포장층 두께, 교통하중 크기를 영향인자로 하는 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 지표침하량을 분석한 결과, 모든 포장층 조건에서 교통하중의 크기와 공동규모가 증가할수록 지표침하량이 크게 발생한 것으로 미루어, 지표침하량은 포장층 두께에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

(2) 응력비 분포도를 바탕으로 공동 주변 지반의 불안정 영역을 분석한 결과, 공동규모 및 교통하중 크기의 증가와 함께, 포장층 두께의 감소에 따라 안정성이 감소된 공동 주변지반의 불안정 영역이 점차 확장되는 것을 알 수 있었다.

(3) 안전율 분포를 이용하여 허용안전율 미만의 불안정 지반 영역을 면적으로 산정하여 위험지반을 평가한 결과, 응력비 분포 분석결과와 동일한 해석조건에서 위험지반 영역이 증가하였다. 또한 공동규모가 작은 경우에는 공동형상이 위험지반 생성에 큰 영향을 미치지 않았지만, 공동규모가 클수록 공동형상이 미치는 영향이 증가하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서 수행된 해석결과를 바탕으로, 공동형상 및 규모, 포장층 두께, 교통하중 크기의 상관관계를 통해 공동이 발생된 도로 하부지반의 안정성 평가가 충분히 가능

한 것을 알 수 있었다. 다만, 다양한 해석 조건의 추가 연구결과를 통하여 보다 정량적인 안정성 평가 및 예측 지표 제시가 필요한 것으로 판단된다.

References

1. Ahn, H. C. (2020), "*Analysis of Ground Cavity Occurrence Characteristics and Ground Stability using Numerical Analsis*", Master`s thesis, Chung-Ang University.
2. An, J. S., Kang, K. N., Song, K. I., Kim, W. S. and Kim, B. C. (2018), "A numerical study on the 3-Dimensional shape characteristics of small underground cavities", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.20, No.5, pp.787-807.
3. Benz, T. (2007), *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*, Ph.D. Thesis, University of Stuttgart.
4. Choi, S. I. and Kweon, G. C. (2019), "Characteristics of Road Subsidence Caused by Damaged Water and Sewer Pipes", *International Journal of Highway Engineering*, Vol.21, No.1, pp.9-16.
5. Choi, Y. W. (2018), "*A Study on the Characteristics of Cave-in and Its Risk Assessment in Urban Road*", Ph.D. Thesis, Sejong University.
6. Choi, Y. W., Lee, W. S., Lee, H. J. and Park, H. M. (2018), "Development of an Asphalt Pavement Response Model for Subsurface Cavity Section Using the 3D Finite Element Method", *International Journal of Highway Engineering*, Vol.20, No.5, pp.85-91.
7. Kim, Y. H., Kim, J. B., Kim, D. W. and Han, J. G. (2017), "Experimental Study on Generating mechanism of The Ground Subsidence of Due to Damaged Waters supply Pipe", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.139-148.
8. 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.
9. Lee, K. C., Park, J. H., Choi, B. H. and Kim, D. W. (2018), "Analysis of Influencing Factors on Cavity Collapse and Evaluation of the Existing Cavity Management System", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.1, pp.45-54.
10. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transprt). (2018), "Special Act on Underground Safety Management".
11. MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure, and Transprt). (2019), "We will create a safe land without subsidence".
12. Mukunoki, T., Kumano, N. and Otani. J. (2012), "Image analysis of soil failure on defective underground pipe due to cyclic water supply and drainage using X-ray CT", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol.6, No.2, pp.85-100.
13. Oh, D. W., Kong, S. M., Lee, D. Y., Yoo, Y. S. and Lee, Y. J. (2015), "Effects of Reinforced Pseudo-Plastic Backfill on the Behavior of Ground around Cavity Developed due to Sewer Leakage", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.16, No.12, pp.13-22.
14. Oh, S. J. (2016). "*Laboratory Model Test for Identification of a Rear Cavity Occurrence Mechanism at Sewage pipe in Sandy Ground*", Master's Thesis, Chon-nam National University.
15. Park, H. M. and Choi, Y. W. (2019), "Evaluation of Structural Capacity of Asphalt Pavement in Subsurface Cavity Sections using Falling Weight Deflectometer Backcalculation Method", *International Journal of Highway Engineering*, Vol.21, No.4, pp.19-25.
16. PLAXIS (2016), "Material Models Manual", pp.65-91.
17. Schanz, T., Verrmeer, P. A. and Bonnier, P. G. (1999), "The hardening soil model: Formulation and verification", *Beyond 2000 in computational geotechnics*, Balkema, Rotterdam, pp.1-16.
18. You, S. K., Ahn, H. C., Kim, Y. H., Han, J. G., Hong, G. G. and Park, J. J. (2019a), "A Numerical Study on the Occurrence Scope of Underground Cavity and Relaxation Zone Considering Sewerage Damage Width and Soil Depth", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.1, pp.43-53.
19. You, S. K., Ahn, H. C., Kim, Y. H., Han, J. G., Hong, G. G. and Park, J. J. (2019b), "A Numerical Analysis on Stability Analysis of Cavity Ground considering Pavement Thickness and Traffic Load", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.18, No.4, pp.287-297.
20. You, S. K., Kim, J. B., Han, J. G., Hong, G. G., Yun, J. M. and Lee, K. I. (2017), "A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone Using Finite Element Method," *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.4, pp.67-74.