Journal of the Korean Geo-Environmental Society
20(9): 5～11. (September 2019) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2019.20.9.5

수치해석을 이용한 도로함몰 예측기법

Prediction Method for Ground Collapse Using Numerical Simulations

김 희 수[1] · 반 호 기†
Hee Su Kim · Hoki Ban

Received: July 17th, 2019; Revised: August 5th, 2019; Accepted: August 27th, 2019

ABSTRACT : Recently, ground collapse in urban area has been widely paid attention as it frequently happens. To investigate the causes and suggest the measurements, many researches such as ground exploration from GPR, mock test and numerical simulations have been conducted. The proposed risk evaluation chart recently focuses only on the current ground status and is not capable of forecasting the ground collapse. This paper presents the prediction method of ground collapse using the numerical simulations of 30 cases considering void size and ground height as variables. It finally provides the charts that can analyze quantitatively the ground collapse.

Keywords : Ground collapse, Numerical simulation, Risk evaluation chart, Quantitative analysis

요 지 : 최근 국내 도심지 지반침하 및 함몰이 빈번히 발생함에 따라 지반침하에 대한 불안감 또한 증가하고 있다. 그로 인해 GPR를 통한 지하 공동 탐지 지반함몰 모사실험 지반의 거동을 확인하기 위한 수치해석 등의 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우 공동 위험도 평가를 최근에 마련하였으나 현재의 지반상태 파악에 초점을 두었기 때문에 향후 발생할 수 있는 지반침하 및 함몰에 대한 예측을 정량적으로 하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 지반침하/함몰의 기하학적 변수인 공동크기와 토피두께를 변화시키며 총 30개의 case에 대한 수치해석을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 현재의 상태 뿐 아니라 향후 발생할 시기를 정량적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

주요어 : 지반함몰, 수치해석, 위험도 평가, 정량적 분석

1. 서 론

최근 국내 도심지 지반침하 및 함몰이 빈번히 발생함에 따라 지반침하에 대한 불안감이 증가하고 있다. 과거에 발생한 지반침하는 자연적 현상으로 발생하는 경우가 많았으나, 최근에 발생하는 지반침하 및 함몰은 지하매설시설의 파손으로 인한 누수 발생, 지하굴착으로 인한 토사 유출 등이 주요원인으로 알려져 있다(Seoul city, 2016). 이러한 지반침하/함몰에 의한 사고는 2010년 이후 서울시에서 크고 작은 도로함몰이 연평균 약 665건 발생하였다고 조사되었다(Bae et al., 2017). 지반 함몰의 발생은 인명, 재산피해 뿐만 아니라 복구에 많은 시간과 비용이 들어가기 때문에 서울시를 중심으로 원인규명과 대책에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 GPR를 활용한 지하 공동 탐지탐사(Chae, 2017), 지반함몰 모사실험(Ryu et al., 2017; Kim et al., 2017), 지하 공동으로 인한 지반의 역학적 거동을 확인하기 위한 수치해석 분석(Kim et al., 2016) 등에 관한 연구 중심으로 수행되고 있다. GPR를 활용하여 서울시 도로 노면하부 공동 탐지 결과 우기철에 도로함몰 사고가 70% 이상 집중되어 있으며, 발생원인은 하수관 손상에 의해 78%, 굴착공사 미흡 20%, 상수관 손상 2% 등 도로 노면 하부의 물의 흐름과 관련이 있다고 보고하였다(Chae, 2017). Ryu et al.(2017)은 얼음블럭을 이용하여 지하공동을 모사하여 지반침하/함몰 실험을 수행하였다. 실험결과 지반함몰은 지하수위 변화에 영향을 받았으며, 강우의 지속시간과 밀접한 상관관계를 가짐을 확인하였다. 또한 Kim et al.(2017)은 상수관로 파손으로 인한 지반함몰 발생과정을 확인하기 위해 토조를 제작하여 관로가 파손된 경우, 관로 내 수압이 지속적으로 작용하여 관 외부로 유출되어 지반으로 침투가 발생한 경우를 모사한 실험을 수행하였다. 실험결과 상대밀도가 느슨한 경우 공동의 발생과 확산이 비교적 좁은 범위에서 발생하여 상부로 공동발생이 전이되었으며, 조밀한 경우 초기 공동발생이 느슨한 경우보다 늦게 나타나며, 지반공동 확산이 느슨한 경우보다 지연됨을 알 수 있었다. Kim et al.

1) Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University
† Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : hban@kangwon.ac.kr)

(2016)은 지하 공동발생으로 인한 도로하부 지반의 역학적 거동의 변화와 이에 따른 상태 평가를 위해 개별요소법(DEM) 기반의 해석을 수행하였다. 해석 결과 지반 거동은 공동의 높이보다 폭에 큰 영향을 받으며, 지반의 입도분포에 따라 강도감소율이 다르게 나타났다.

이와 같이 GPR를 통한 지하 공동 탐사, 지반함몰 실험, 지반의 역학적 거동 분석을 위한 수치해석 수행 등의 선행연구는 진행되었지만 국내의 경우 공동 위험도 평가에 대한 기준이 없어 일본의 공동관리 등급을 사용해왔다. 하지만 이는 일본 지반 상태를 대상으로 하였기 때문에 국내 실정에 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 서울시는 2016년에 국내 실정에 맞춘 긴급복구, 우선복구, 일반복구, 관찰대상으로 4단계로 분류하여 함몰위험 등급표를 제시하였다. 하지만 서울시에서 제시한 공동 위험도표는 탐사를 통한 현재의 지반상태 파악에 초점을 두었기 때문에 추후 보수, 보강함에 있어 정량적인 분석을 하기에 그 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 공동 발생 위험도를 정량적으로 평가하는 방법을 개발하기 위해 지반침하와 함몰에 영향을 미치는 기하학적 변수인 공동크기와 토피두께를 변수로 하여 총 30개의 Case로 수치해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 또한 추세곡선을 이용하여 임계변위까지 남은 시간을 예측하여 공동의 위험여부와 복구시점을 결정할 수 있도록 하였다. 또한 해석결과를 서울시 공동 위험도 평가도표와 비교분석하였다.

2. 국내외 지반 함몰 등급 평가 기법 개발 현황

2.1 국외(일본)의 공동 위험도 판단 기준

일본도로의 공동 위험도표는 Fig. 1과 같이 A class(긴급등급), B class(일반등급), C class(경과등급)로 나누어 등급을 산정하였다(Geo Search, 2014). A class의 경우 토피의 두께 0.3m 이내, B class의 경우 토피의 두께 0.3m 이상, 공동 폭 0.5～1.5m, C class의 경우 토피의 두께 0.3m 이상, 공동 폭 0.5m 이내로 공동의 크기와 토피 두께만을 고려하여 위험등급을 산정하였다. 특히 일본도로의 공동 위험도표는 우기를 고려하여 보수등급을 산정한 것이 특징이다. 하지만 일본의 공동 위험도표의 경우 도로의 포장상태를 고려하지 않고 공동의 크기와 토피 두께만을 고려하여 위험등급을 산정하였기 때문에 국내(서울)의 공동 위험도표보다 판단의 정확도가 낮다.

2.2 국내(서울)의 공동 위험도 판단 기준

국내(서울)의 경우 지반 함몰에 대한 기준이 없어 2016년까지는 일본도로의 공동 위험도표를 사용해 왔다. 하지만 2016년 서울시 도로에 적합한 공동 위험도표가 제작되었다. 서울시 공동 위험도표는 Fig. 2와 같이 관찰등급(A class), 일반등급(B class), 우선등급(C class), 긴급등급(D class)으로 총 4가지로 나누어 등급을 산정하였으며, 공동의 폭, 토피 두께, 포장상태(균열깊이)를 고려하였다. 관찰등급은 AC포장 두께 0.3m 이상, AC포장 균열깊이 0% 미만, 공동토피 0.4m 이상, 공동의 폭 0.8m 미만, 일반등급은 AC포장두께 0.2～0.3m 이내, AC포장 균열깊이 0～10% 이내, 공동토피 0.3～0.4m 이내, 우선등급은 AC포장두께 0.1～0.2m 이내, AC포장 균열깊이 10～50% 이내, 공동토피 0.2～0.3m 이내, 또는 공동의 폭 1.5m 이상, 긴급등급은 AC포장두께 0～0.1m 이내, AC포장 균열깊이 50% 이상, 공동토피 0～0.2m 이내로 일본도로의 공동 위험도표보다 세분화가 되었으며, 아스팔트포장두께를 고려하여 판단의 정확도를 올렸지만 현장에서 등급표상 위험도를 구분하기가 힘들다. 또한

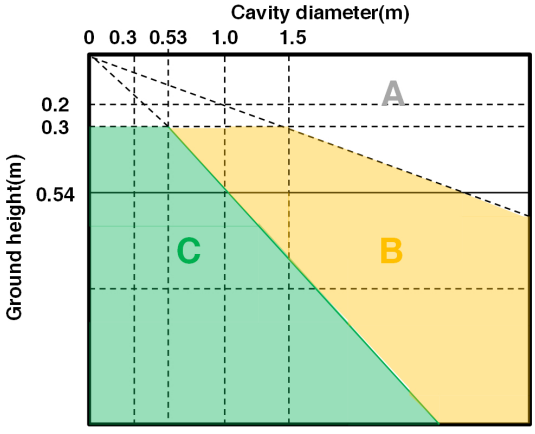


Fig. 1. Cavity risk grading system in Japan (Geo Search, 2014)

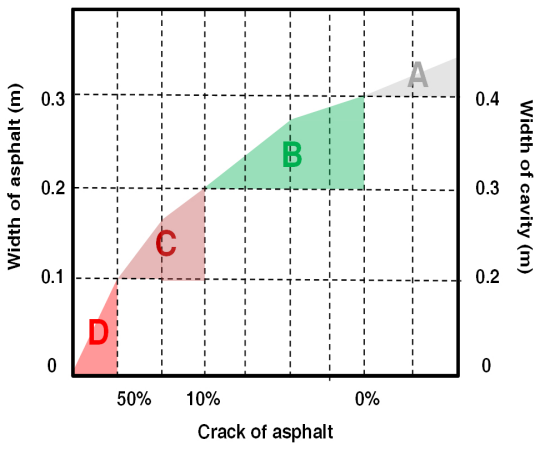


Fig. 2. Cavity risk grading system in Seoul (Seoul city, 2016)

아스팔트포장두께, 토피, 공동 폭, 아스팔트의 균열깊이, 총 4가지의 조건이 만족해야만 한다는 문제점을 지니고 있다. 공동 위험도표는 현재의 안전여부만 판단이 가능하며, 시간이 지남에 따라 공동의 안전여부에 대한 판단에는 한계가 있다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 범위

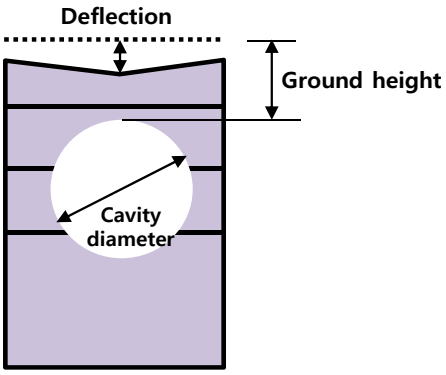
지하공동에 대한 위험도 평가를 위해 Fig. 3(a)과 같이 기하적인 인자인 공동의 크기 및 토피의 두께에 따른 영향을 살펴보았다. Table 1과 같이 공동크기와 토피두께를 변수로 총 30가지의 Case에 대하여, 상용수치해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이때, Fig. 3(b)에서 보듯이 공동은 구형의 형태로 가정하였으며 공동의 크기에 대한 영향을 보기 위해 3차원으로 해석을 수행하였다.

지반의 조건은 Fig. 4와 같이 전형적인 아스팔트포장체이며, 표층의 두께만 102mm 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 토피두께(표면에서 공동까지의 높이)는 100, 200, 300, 400, 500, 600mm, 공동의 크기는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500mm으로 분류하였으며, 토피두께에 따라 공동은 기층(Base), 보조기층(Subbase), 노상(Subgrade) 층에 걸쳐있는 경우를 고려하였다.

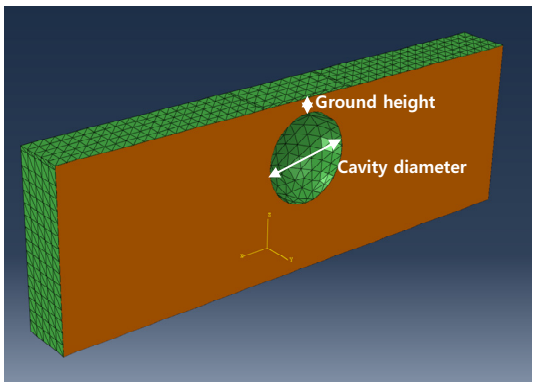
아스팔트는 시간과 온도에 민감한 점탄성 거동을 하는 재료이기 때문에 재료 물성치는 특정온도에 대한 시간에 따른 탄성계수의 변화를 수치해석을 위해 Prony 시리즈형태를 사용하여 적용하였다.

이러한 선형점탄성 물성치는 동탄성계수실험(Dynamic modulus test)를 통하여 구할 수 있다. 이 실험을 통해 얻은 동탄성계수는 Eq. (1)로 표현된다(Ban et al., 2011; Ban et al., 2013a; Ban et al., 2013b).

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n} G_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (1)$$



(a) Schematic drawing for simulations



(b) Location of cavity

Fig. 3. Geometric factors for simulations

Fig. 4. Asphalt pavement structure used in the analysis

Table 1. Cases for numerical simulations

Ground height (mm) \ Cavity diameter (mm)	500	1,000	1,500	2,000	2,500
100	Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
200	Case06	Case07	Case08	Case09	Case10
300	Case11	Case12	Case13	Case14	Case15
400	Case16	Case17	Case18	Case19	Case20
500	Case21	Case22	Case23	Case24	Case25
600	Case26	Case27	Case28	Case29	Case30

여기서, $G(t)$ = 전단계수

G_∞ = 장기전단계수

G_i = 맥스웰 모델에서 전단스프링상수

ρ_i = 시간

n = 맥스웰 단위 수

이를 이용하여 시간에 따른 탄성계수를 계산하면 다음 Eq. (2), (3)과 같다.

$$E_\infty = 2G_\infty(1+\nu) \quad (2)$$

$$E_i = 2G_i(1+\nu) \quad (3)$$

여기서, E_∞ = 장기탄성계수

E_i = 맥스웰 스프링상수

ν = 푸아송의 비

표면온도 25°C에서 Asphalt의 시간에 따른 동탄성계수 값은 다음 Table 2와 같다.

Table 2. Dynamic modulus of asphalt in the form of Prony series at 25°C

Layer	s	E_s	ρ_s
Asphalt	1	1.85E+04	1.E-05
	2	1.46E+04	1.E-04
	3	1.05E+04	1.E-03
	4	6.45E+03	1.E-02
	5	3.46E+03	1.E-01
	6	1.69E+03	1.E+00
	7	8.36E+02	1.E+01
	8	4.60E+02	1.E+02
	9	2.94E+02	1.E+03
	10	2.15E+02	1.E+04
	11	1.62E+02	1.E+05
	∞	1.39E+02	-

여기서, s=prony series 개수, Es=동탄성계수(Mpa), ρ_s=시간(초)

기층, 보조기층은 일반적으로 자갈층이기 때문에 선형거동을 하는 것으로 가정 하였으며, 노상의 경우에도 포장체 가장 아래 부분에 위치하고 있어 표층의 점탄성 거동에 의한 누적 변위에 영향을 미치지 않을 것으로 보아 선형 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 그에 따른 물성치는 Table 3에 나타내었다.

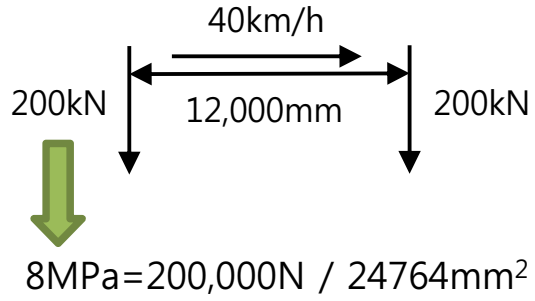
Table 3. Material properties of unbound materials (Ban et al., 2011; Ban et al., 2013a; Ban et al., 2013b)

	Base	Subbase	Subgrade
Density (km/mm^3)	1.6e-6	1.6e-6	1.6e-6
Modulus of elasticity (MPa)	207	172	100
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35

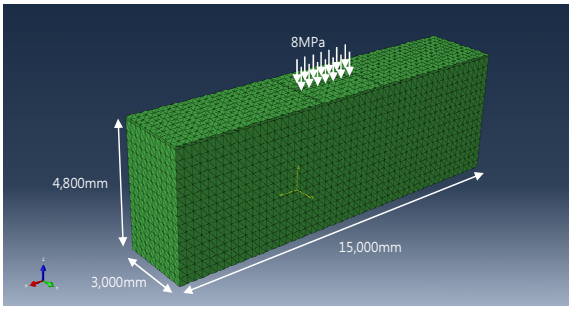
교통하중의 경우 Fig. 5(a)와 같이 20t 차량이 40km/h의 속도로 움직이고 타이어의 축간 거리는 12m로 가정하여 타이어 접지면적(24764mm^2)에 따른 하중을 8MPa로 산정하였다(Ban et al., 2013a; Ban et al., 2013b). 수치해석에 사용된 모델의 크기와 하중은 Fig. 5(b)에 나타냈으며, 수치해석은 다음 Fig. 5(b)와 같이 수행하였다.

3.2 해석결과

Fig. 6은 총 30개의 Case에 대하여 수치해석을 수행한 결과이다. Fig. 6(a)~(f)는 토피의 두께가 각각 100, 200, 300, 400, 500, 600mm인 경우에 대하여 공동의 크기(500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500mm)별 시간에 대한 변위를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 공동의 크기와 상관없이 토피의 두께가 클수록 시간에 따른 변위가 작게 나타났으며, 토피의 두께가 얇을수록 크게 나타났다. 또한 공동의 크기가 클수록 시간에 따른 변위가 크게 나타났으며, 공동의 크기가 작을수록 변위가 작음을 알 수 있다.

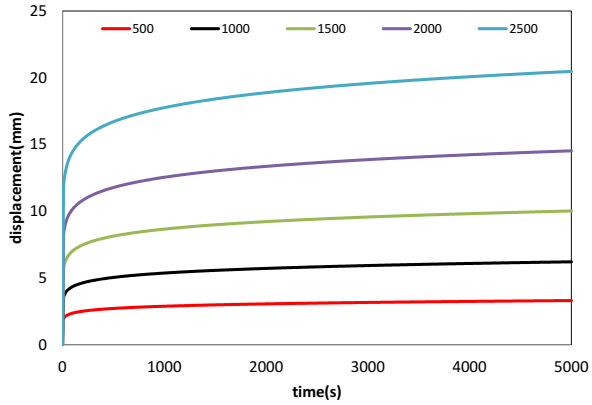


(a) Truck loading

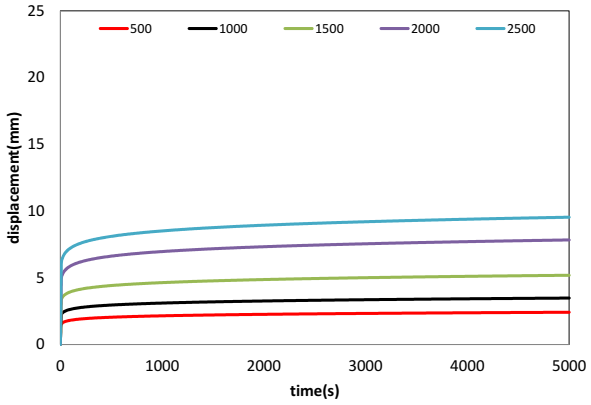


(b) Entire model size and mesh for simulations

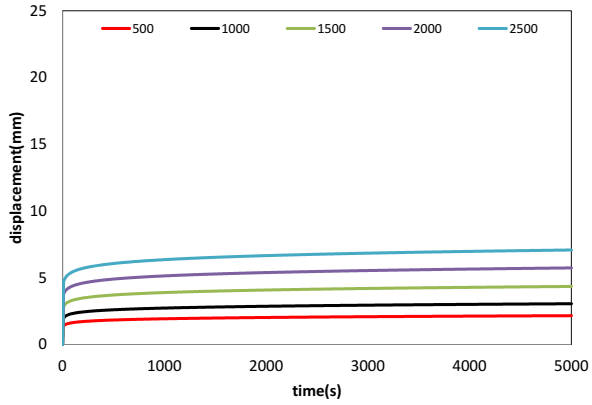
Fig. 5. Truck loading and simulation domain



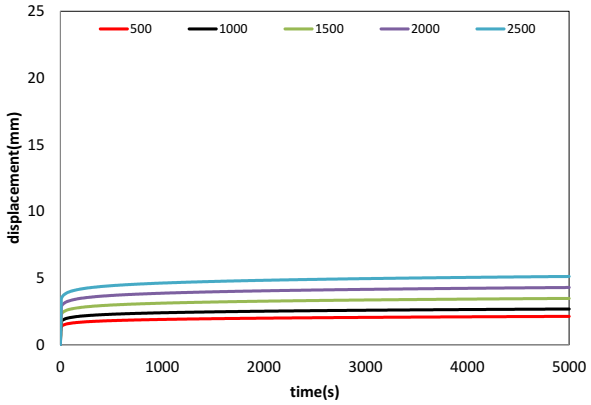
(a) Ground height of 100mm



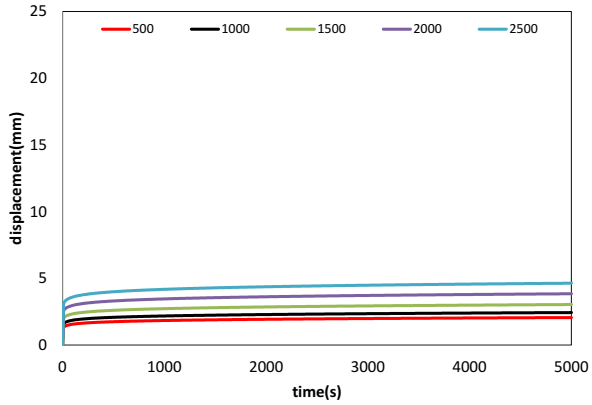
(b) Ground height of 200mm



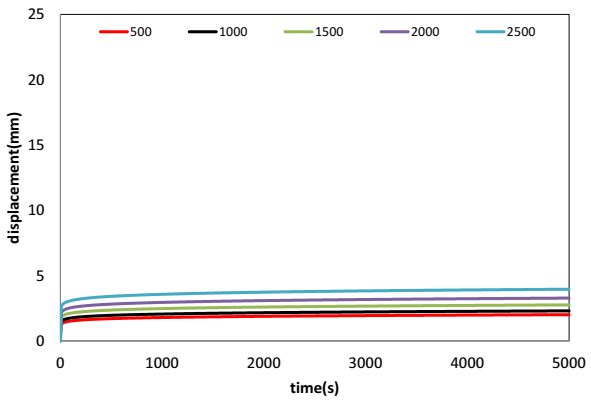
(c) Ground height of 300mm



(d) Ground height of 400mm



(e) Ground height of 500mm



(f) Ground height of 600mm

Fig. 6. Surface displacement with respect to time at various ground heights

3.3 지반공동 위험도 평가 시나리오

다음 Fig. 7은 지반의 공동이 발생 후 교통하중에 의해 상부 변위가 발생되었을 때, 임계변위까지의 남은 시간을 그래프로 나타냈다. 이를 통한 예측 시나리오는 다음과 같다. Step 1. 토피두께에 맞는 변위-시간 그래프를 선택한다. Step 2. 측정된 상부로부터 변위와 공동 크기에 맞는 그래프 위치를 찾는다. Step 3. 공동 발생 후 GPR 탐사 측점 시점까지의 지나간 시간을 찾는다. Step 4. 앞으로 임계변위까지 얼마의 시간이 남았는지 예측한다.

3.4 공동 위험도 평가 예시

Fig. 8은 수치해석 결과를 Fig. 7의 임계변위 예측 시나리오를 바탕으로 한 예시를 보여주고 있다. 현재 시점의 토피두께가 200mm, 공동의 크기가 1,700mm, 지표면의 변위가 7mm인 경우를 살펴보자. Fig. 6에서 보여준 그래프 중 토피두께와 공동크기에 해당하는 그래프를 선택한다(Step 1, Step 2 in Fig. 7). Step 3. 측정된 변위에 해당하는 값이 현재의 상태를 나타낸다. '도로포장 구조 설계 요령(2015)'의 공용성 평가에서 영구변형을 설계등급이 1인 경우, 10mm

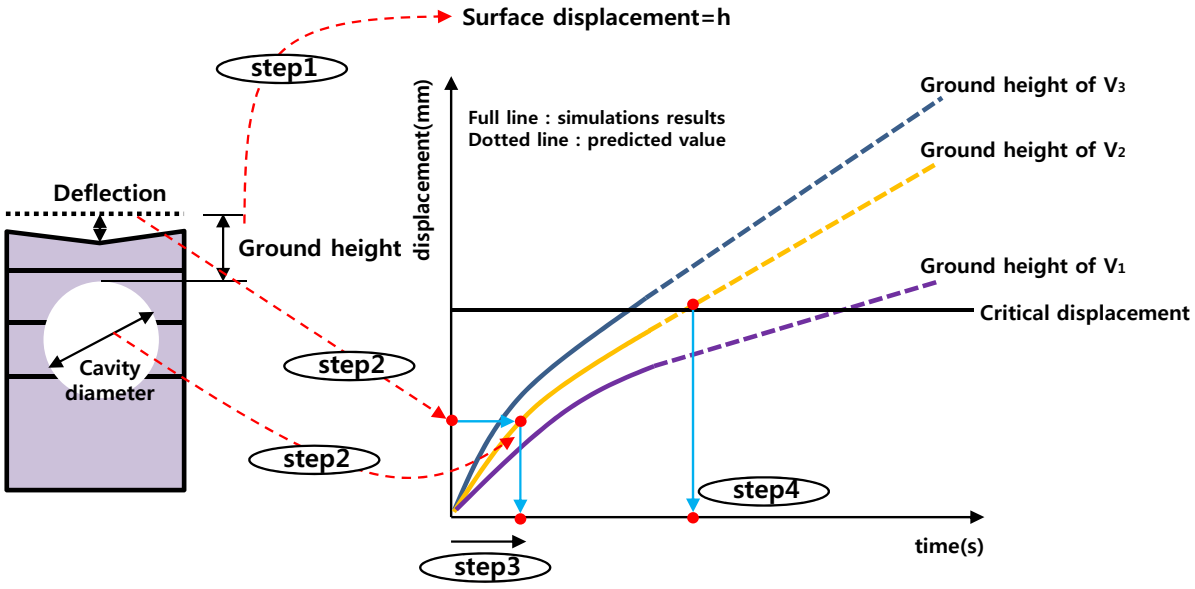


Fig. 7. Prediction scenario for cavity risk evaluation

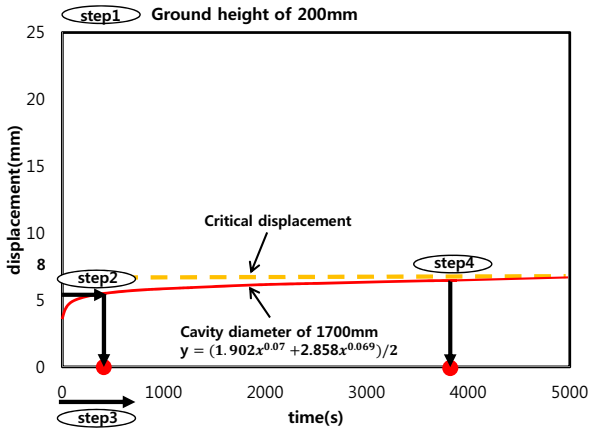


Fig. 8. Example for cavity risk prediction

이하, 설계등급이 2인 경우 15mm 이하로 규정하고 있다. 본 연구에서는 보다 보수적인 기준을 적용하기 위해 한계 변위를 8mm라고 가정하여 추세곡선을 적용하여 남은 시간을 구하였다. 그 결과 그래프에서 보듯이 약 447일임을 알 수 있다.

Fig. 9는 토피두께가 200mm인 수치해석 결과와 서울시 공동위험도표를 비교분석한 결과이다. 한계 변위가 8mm라고 가정하면 공동의 크기가 2,500mm인 경우에는 한계 변위를 지났음을 알 수 있다. 동일한 상태일 때 서울시 공동위험도표에서도 긴급등급(D class)으로 나타남을 알 수 있다. 공동의 크기가 500, 1000, 1,500, 2,000mm인 경우 한계 변위를 지나지 않았음을 알 수 있으며, 서울시 공동위험도표에서 우선등급(C class) 이하임을 알 수 있다. 따라서 수치해석 결과가 서울시 공동위험도표와 같이 현재 공동의 상태를 예측이 가능하며, 수치해석을 통해 얻은 그래프를 이용하면 공동의 임계변위를 예측이 가능하여 보수, 보강 결정에 정량적인 지표로 활용될 수 있다.

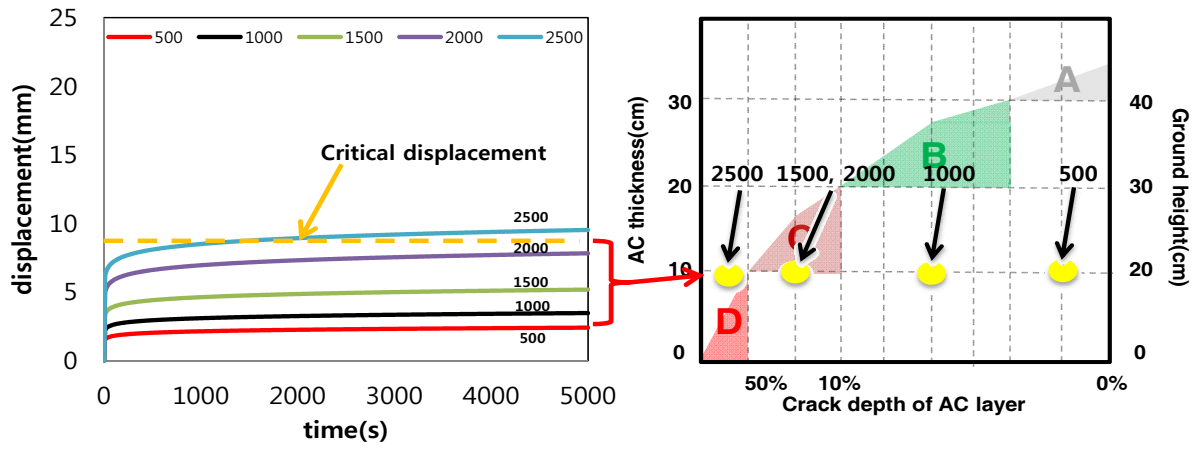


Fig. 9. Developed prediction method vs. cavity risk grading system in Seoul (at groud height of 200mm)

4. 결 론

지반의 공동 발생 위험도를 정량적인 평가하는 방법을 개발하기 위해 지반함몰에 영향을 미치는 기하학적 변수인 공동의 크기와 토피두께를 변수로 하여 총 30가지 Case를 이용하여 수치해석을 수행 및 서울시 공동위험도표와 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석 결과 공동의 크기와 상관없이 토피의 두께가 클수록 시간에 따른 변위가 작게 나타났으며, 토피의 두께가 얇을수록 변위가 크게 나타났다. 또한 공동의 크기가 클수록 시간에 따른 변위가 크게 나타났으며, 공동의 크기가 작을수록 변위가 작음을 알 수 있다.
(2) 공동 위험도 평가 예시를 통해 수치해석 결과와 서울시 공동위험도표를 비교분석한 결과 서울시 공동위험도표와 같이 현재 공동상태를 예측함을 알 수 있다. 또한 수치해석을 통해 얻은 추세곡선을 이용하면 공동의 임계변위를 알 수 있기 때문에 앞으로의 공동 지반 거동상태를 예측이 가능함을 알 수 있다.
(3) 서울시 공동위험도표의 경우 시간에 따른 공동의 안전여부에 대한 판단이 불가능하였지만 본 연구결과를 통해 앞으로의 공동 지반 거동상태를 예측하여 보수, 보강 결정에 정량적인 지표로 활용이 될 수 있을 것으로 기대된다.
(4) 향후 여름철의 경우를 고려한 고온(40°C)에서의 아스팔트의 변형과 기하학적 인자들을 고려한 분석을 통해 보다 정확한 지반침하/함몰에 대한 예측이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(2017R1D1A1B03034236).

References

1. 국토교통부 (2015), 도로포장 구조 설계 요령, pp. 74~77.
2. Bae, Y. S., Kim, K. T. and Lee, S. Y. (2017), The road subsidence status and safety improvement plans, Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 18, No. 1, pp. 545~552.
3. Ban, H., Im, S. and Kim, Y. (2013a), Nonlinear viscoelastic approach to model damage-associated performance behavior of asphaltic mixture and pavement structure, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 40, pp. 313~323.
4. Ban, H., Kim, Y. and Pinto, I. (2011), Integrated experimental-numerical approach for estimating material-specific moisture damage characteristics of binder-aggregate interface, Transportation Research Board, Vol. 2209, pp. 9~17.
5. Ban, H., Kim, Y. and Rhee, S. (2013b), Computational micro-structure modeling to estimate progressive moisture damage behavior of asphaltic paving mixtures, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37, pp. 2005~2020.
6. Chae, H. Y. (2017), Study on subsurface collapse of road surface and cavity search in urban area, Tunnel and Underground Space, Vol. 27, No. 6, pp. 387~392.
7. Geo Search (2014), Method for evaluating ground sink (In Japanese).
8. Kim, Y., Kim, J. B., Kim, D. 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.
9. Kim, Y., Park, H., Kim, B. and Park, S. W. (2016), Condition assessment of various types of road cavities using DEM, International Journal of Highway Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 39~47.
10. Ryu, D. W., Yum, B. W., Lee, H. J., Jeong, S. W. and Jung, B. (2017), Real-scale experimental simulation to identify a mechanism for urban subsidence, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 65, No. 9, pp. 34~40.
11. Seoul City (2016), Road collapse management comprehensive countermeasures reporter briefing, pp. 1~107.