

하수관 누수에 의해 발생하는 공동 주변 지반의 거동에 대한 가소성유동화토의 보강효과

Effects of Reinforced Pseudo-Plastic Backfill on the Behavior of Ground around Cavity Developed due to Sewer Leakage

오 동 욱¹⁾ · 공 석 민¹⁾ · 이 대 영²⁾ · 유 용 선³⁾ · 이 용 주[†]

Dongwook Oh · Sukmin Kong · Daeyoung Lee · Yongseon Yoo · Yongjoo Lee

Received: September 1st, 2015; Revised: September 8th, 2015; Accepted: November 16th, 2015

ABSTRACT : Developed ground cavity due to leakage of decrepit old sewer pipe causes ground surface settlement and brittle fracture of pavement. Recently, for 5 years, frequency of occurrence of ground subsidence phenomenon tends to increase rapidly and/or steadily. It is difficult to investigate ground surface settlement and/or subsidence in urban area because most ground surfaces are covered with asphalt or concrete pavement. In this research, therefore, ground surface settlement, influence zone and settlement of sewer pipe were analyzed using finite element method. Not only reinforced effect of pseudo-plastic backfill that is applied to prevent ground surface settlement or subsidence spot, was compared and analyzed using numerical analysis program, but also direct shear test was carried out to determine strength parameters of pseudo-plastic backfill.

Keywords : Sewer pipe, Ground subsidence, Ground settlement, Cavity, FEM

요 지 : 노후된 하수관의 누수로 인해 발달된 지하공동은 지표침하를 발생시키고 그로 인한 포장재의 취성파괴를 유발시킨다. 이러한 도심지 지반함몰 현상은 최근 5년간 그 빈도수가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 도심지 지표면은 대부분 아스팔트 또는 콘크리트로 포장되어 있어 지하공동의 발생에 따른 지반침하 또는 함몰을 예측하기 어려운 실정이다. 따라서 이 연구는 파손된 하수관의 누수로 인해 발생하는 지하공동의 진행에 따른 지표침하량, 지표면의 영향범위 등 지반거동 및 하수관의 침하를 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 또한 침하 또는 함몰이 발생한 지반을 보강하기 위한 보강재로 가소성유동화토를 사용하였을 때의 보강효과를 수치해석 프로그램을 이용하여 비교·분석하였으며 강도정수 산정을 위해 가소성유동화토의 직접전단시험을 수행하였다.

주요어 : 하수관, 지반함몰, 지반침하, 공동, 유한요소해석

1. 서 론

최근 들어 지속적으로 발생되고 있는 도심지 지반함몰 현상은 우리의 안전을 크게 위협하는 요소 중 하나이다. 그 발생 빈도수 또한 꾸준히 증가하고 있는 추세를 보이고 도시의 대형화가 진행되면 될수록 인구는 증가하고 그에 따른 지하공간 개발이 계속될수록 도심지 지반함몰 현상의 발생은 더욱더 증가할 것이다. 지반함몰 현상을 발생시키는 가장 큰 요소 중 하나는 지하공동의 형성이다. 지하공동이 형성되는 원인은 크게 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분할 수 있다. 자연적 발생은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 지하수와 석회석의 화학적 반응으로 인해 석회석이 용해되어 공동이 형성됨에 따라 상부 지반이 함몰 또는 붕괴되는 것이다

(Thiansky, 1999). 이러한 자연적 원인에 의해 발생하는 지반함몰 현상은 싱크홀 현상이라고 하며 대표적인 석회암 지대인 미국의 플로리다에서 많이 발생하는 것으로 알려져 있다. 인위적 원인은 다시 세 가지로 구분할 수 있는데 첫 번째는 지하수 추출에 의한 지반함몰, 두 번째는 지하수위 변화에 따른 지반침하, 세 번째는 노후된 하수관에 의한 지반침하를 꼽을 수 있다. 이 중 현재 우리나라에서 발생되고 있는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 지반함몰 현상의 80% 이상이 노후된 하수관에 의한 발생이다(강인식 등, 2015; 이준희, 2015).

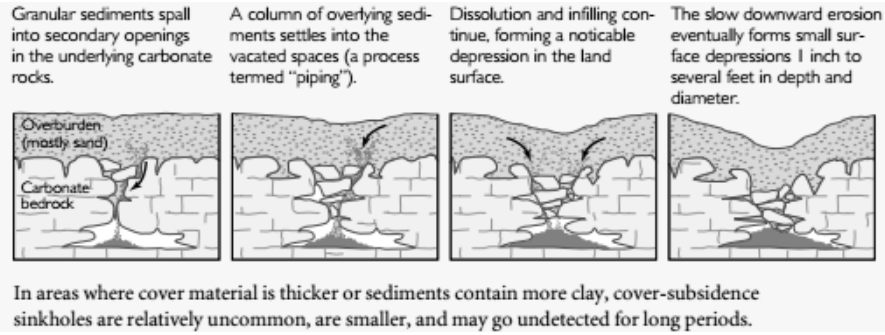
노후로 인해 파손된 하수관 주변 지반의 토사 유실 또는 누수로 인해 지하공동이 형성되고 발달함에 따라 지반함몰이 발생하게 된다. 도심지에서의 지반함몰 현상은 경제적

1) Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

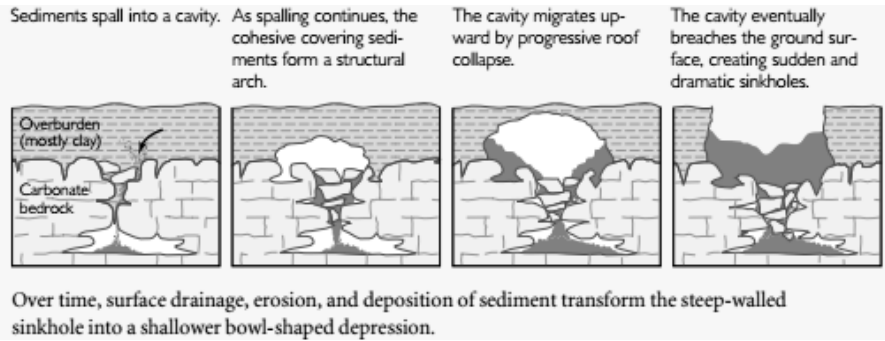
2) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

3) Chemius Korea Co., Ltd.

† Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology (Corresponding Author : ucesyj@seoultech.ac.kr)



(a) Cover-subsidence



(b) Cover-collapse

Fig. 1. Processes and type of sinkhole (Thiansky, 1999)

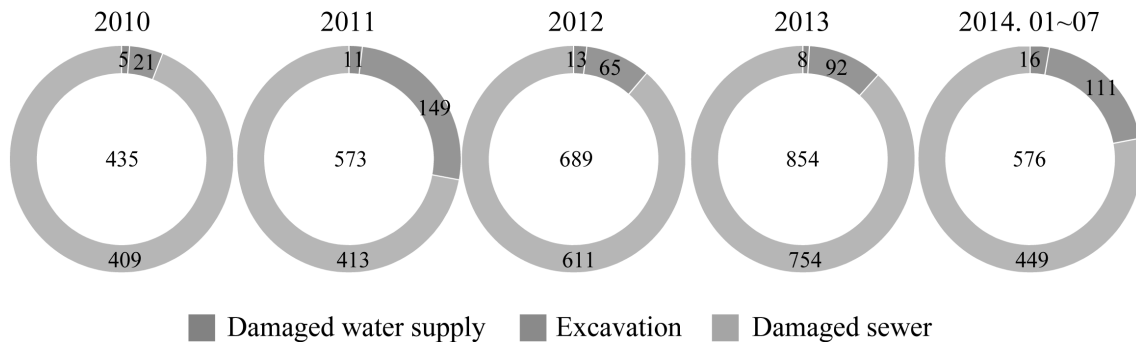


Fig. 2. Frequency and cause of ground subsidence in urban areas (강인식 등, 2015)

손실뿐만 아니라 인명피해를 발생시키고 있어 긴급한 복구가 반드시 필요한 실정이다. 현재에는 지반함몰 지역에 함몰된 지반을 흙으로 되메움 한 후 도로를 재포장하는 방법을 가장 많이 사용하고 있는데 이는 지반함몰을 일시적으로 방지하는 방법에 불과할 뿐 근본적인 해결책은 아니다. 이러한 방법으로 보강된 지반은 추가적인 지반함몰이 발생할 가능성을 배제할 수 없으며 주변 지반의 이완영역 확대에 따라 보다 넓은 범위를 두고 발생할 수 있는 지반함몰에 대한 예방도 이루어질 수 없다.

따라서 지하공동 발생과 이완영역 확대에 따른 지반함몰 발생의 역학적 이해와 도로함몰 징후 발견 시 신속히 지반을 보강하여 피해를 최소화할 수 있는 공법에 대한 연구가 시급한 실정이다. 이러한 필요성에 근거하여 이 연구는 하

수관 매립지역에서 관 주변에 발생하는 지하공동에 따른 주변 지반의 거동과 긴급 복구에 사용할 수 있는 가소성유동화토 적용 시 지반의 거동을 수치해석을 통해 비교·분석하였다.

2. 기존실험 및 해석

지하공동에 의한 지반의 거동에 대한 연구는 터널 굴착 시 지반거동에 대한 연구에서 주로 많이 이루어져 왔다. 수치해석적 연구와 실내모형시험을 통해 활발하게 이루어져 왔으며 실내모형시험 방법 또한 Trap-door를 시작으로 알루미늄 봉을 이용한 사진계측, 원심모형시험기를 이용한 모

형시험까지 다양한 시험방법으로 이루어져 오고 있다. 반면 파손된 하수관의 누수에 의해 발생된 지하공동으로 인한 지반의 거동에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이지만 Kuwano et al.(2010) 실내모형시험으로 지하공동의 발생과정과 이완영역의 확대에 대한 연구를 수행하여 이 연구에서 지하공동의 위치 및 크기, 이완영역을 설정하는데 참조할 수 있었다.

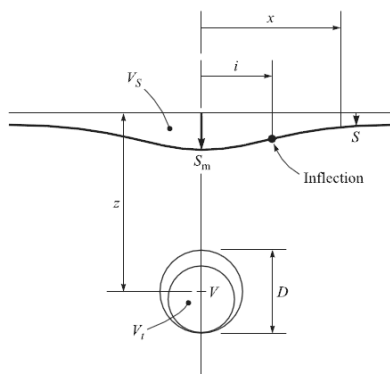
2.1 지표침하

앞에서 언급하였듯이 지하공동에 의한 지표침하에 대한 연구는 연약지반에서의 터널 굴착에 대한 연구로 활발히 진행되어져 왔다. 터널 굴착에 의한 지표침하는 Fig. 3에서 보는 것과 같이 터널 직상부에서 가장 큰 침하를 보이며 거리가 멀어질수록 침하량은 감소하는 Gaussian curve의 형태로 나타나며 터널의 깊이가 깊어질수록 터널 중심축 상부에서의 침하량은 감소하지만 영향범위는 더 넓어지는 것을 알 수 있다. 터널 굴착이 지표침하에 미치는 영향 범위 및 침하량은 Eq. (1)에 의해 산정할 수 있다(Atkinson & Mair, 1981).

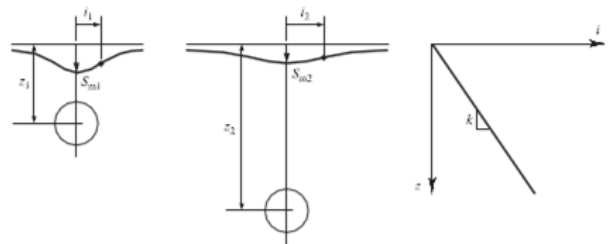
$$S = S_m e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

여기서 S : 측정점의 수직침하량

S_m : 터널 중심축 상부에서의 침하량



(a) Settlement profile above a tunnel in soft ground



(b) Influence of tunnel depth on surface settlement profile

Fig. 3. Settlement and Influence range during tunnelling in soft ground (Atkinson & Mair, 1981)

Table 1. Outline of model tests (Kuwano et al., 2010)

Type	Aim of test
Test 1 Model test of soil outflow due to repeated water supply and drainage	A cavity is occurred due to repeatedly water supply and drainage using valve at the bottom of soil tank. This test carried out for circumstance of outflow of water and inflow of soil through broken area of sewer or service water pipe.
Test 2 Model test of soil outflow due to steady state	Constant water level in the external tank, soil outflow is occurred due to repeatedly water supply and drainage using valve at the bottom of soil tank. This test carried out for circumstance of water inflow through damaged area on the sewer or service water pipe due to upward ground water level.

i : 터널 중심축에서 변곡점까지의 수평거리

x : 터널 중심축에서 측정점까지의 수평거리

2.2 공동 및 이완영역

누수로 인한 공동 및 이완영역에 대한 연구는 최근 Kuwano et al.(2010)에 의해 수행되었다. Fig. 4는 실내모형시험에 사용한 모형토조의 개념도이다. Kuwano et al.(2010)은 Table 1과 같이 실내모형시험을 수행하였으며 PIV 기법과 CT 촬영을 통해 지반의 거동과 이완영역의 단면을 촬영하였다. 이 연구에 따르면 지반재료의 밀도가 작고 초기 함수비가 높을수록 토사유출이 급속하게 진행되는 경향을 나타내었다. Fig. 5는 균등입도의 세사와 관 매립 시 많이 사용되고 있는 10% 정도의 세립분을 함유한 점토 지반으로 Test 1을 수행한 결과이다.

Kuwano et al.(2010) 연구에 따르면 균등입도의 세사에서는 비교적 작은 공동의 상부에 밀도가 15% 정도 저하된 넓은 이완영역이 급속히 진행된 반면, 점토의 경우 큰 공동과 작은 이완영역의 진행은 느리지만, 밀도의 저하가 50% 정도 발생되어 균등한 입도의 세사보다 이완 정도가 매우 큰 것으로 나타났다. Table 2는 Test 1 수행으로 형성된 공동 및 이완영역을 정량적으로 평가하기 위해 설정한 지표 및 결과이다.

Test 2는 토조 외부의 수조에 수위를 제어하면서 토사를 유출시켜 시험을 수행하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Test

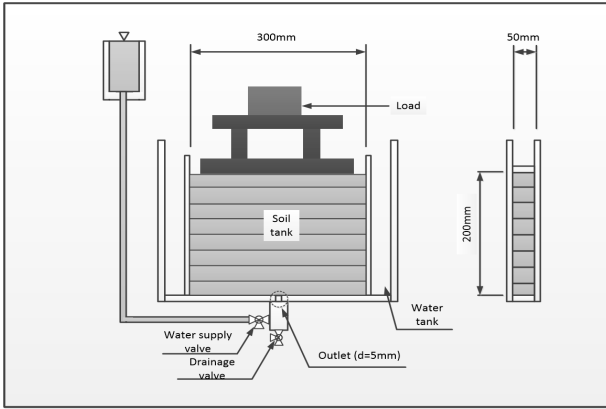
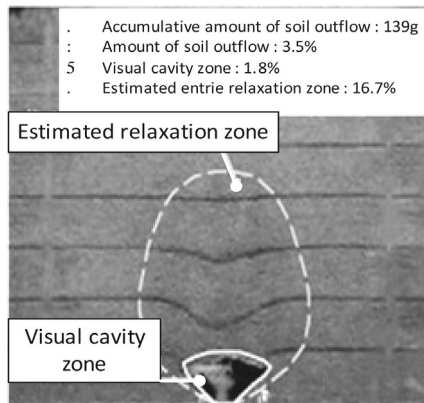


Fig. 4. Concept of model test (Kuwano et al., 2010)

1에 비해 공동의 수평방향으로 더 확대되는 것을 알 수 있다. 이는 심층부에 어떠한 이유로 발생된 공동이 강우 또는 기타 외부요인에 의해 변화되는 지하수위와 맞물려 공동의 확대를 초래하고 이에 따른 지반함물의 위험성 또한 높아지는 결과를 나타내고 있다. Fig. 7은 Test 1과 Test 2의 결과를 모식화 한 것으로써 두 시험의 공동 및 이완영역이 매우 다른 양상으로 진행되는 것을 볼 수 있다.

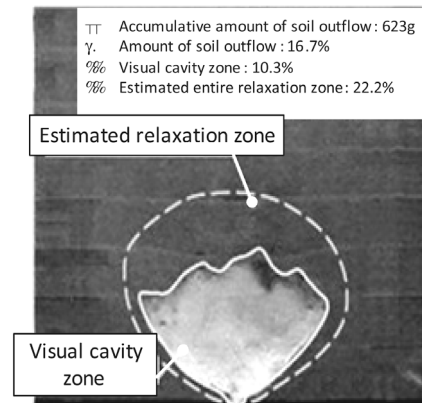
3. 직접전단시험

이 연구의 수치해석에 적용될 가소성유동화토의 특성은



Narrow cavity range wide relaxation range

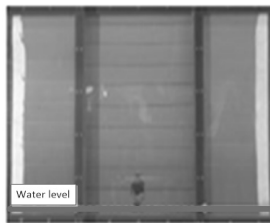
(a) Sand



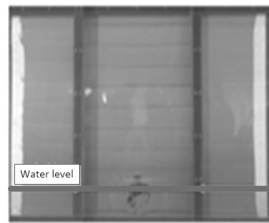
Wide cavity range narrow relaxation range

(b) Clay

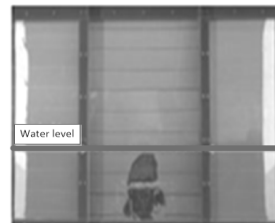
Fig. 5. Results from test 1 (Kuwano et al., 2010)



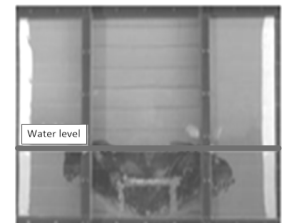
24 min / Water level 10cm



63 min / Water level 20cm



166 min / Water level 40cm



234 min / Water level 40cm

Fig. 6. Results from test 2 (Kuwano et al., 2010)

Table 2. Result of relaxation range (Kuwano et al., 2010)

Index	Definition	Ground material	
		Sand	Clay
Amount of soil outflow	Dry weight ratio of accumulative amount of soil outflow to subject zone	3.5%	16.7%
Visual cavity zone (rate)	Ratio of cavity zone to subject zone (inside of line on Fig. 5)	1.8%	10.3%
Estimated entire relaxation zone (rate)	Ratio of visual estimated entire relaxation zone to subject zone (including cavity zone) (inside of broken line on Fig. 5)	16.7%	22.2%
Estimated relaxation zone (rate)	Ratio of visual estimated relaxation zone to subject zone (excluding cavity zone) 【estimated entire relaxation zone-visual cavity zone】	14.9%	11.9%
Ratio of relaxation zone to cavity zone	【estimated relaxation zone/visual cavity zone】	8.3	1.2
Relaxation degree	Relaxation degree of estimated relaxation zone 【(amount of soil outflow-visual cavity zone) / estimated relaxation zone】	11%	54%

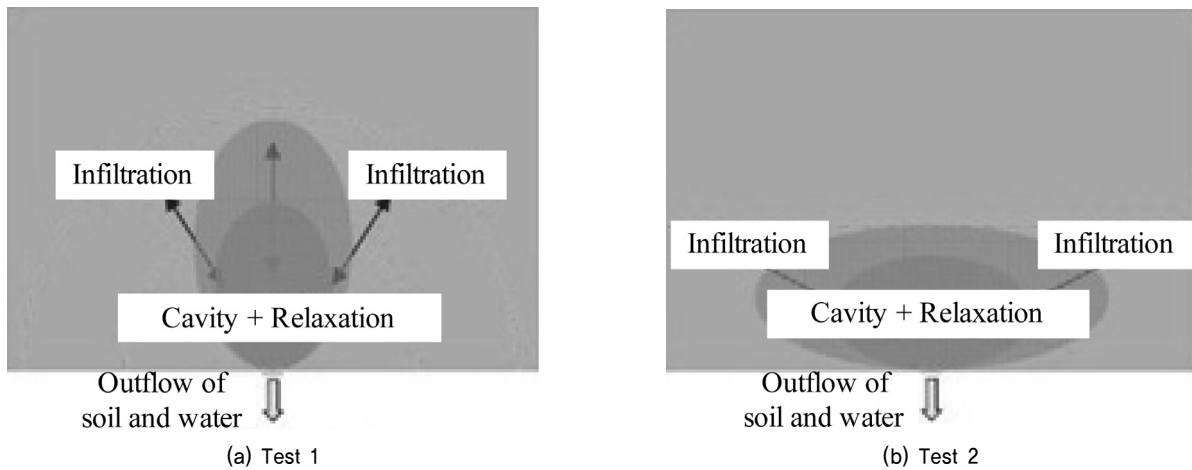


Fig. 7. Comparison between test 1 and test 2 (Kuwano et al., 2010)

Table 3. Material composition of Pseudo-Plastic backfill

Type	Basic material		Additional material	
	Fly-ash	Calcium aluminate	Calcium hydroxide	Plasticizer
General type	90%	10%	-	-
Antiwashout underwater	90%	10%	1%	0.4%

기존의 유동성 채움재, 즉 CLSM(Controlled Low Strength Material)의 특성과 유사하며 기존의 CLSM에 비하여 조기에 강도를 발현할 수 있는 장점이 있다. 유동성 뒤채움재가 관 변형 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어지고 있다(Lee & Song, 2006; Nam et al., 2013). 유동성 뒤채움재는 자기수평능력, 자기다짐, 유동성, 인위적인 강도조절, 시공 후 재굴착 시 시공성 용이, 품질의 균일성 등 기존의 모래 또는 토사 뒤채움재에 비해 많은 장점들을 가지고 있다(Nam et al., 2013). 이러한 장점과 더불어 유동성 뒤채움재가 대안으로 언급될 수 있는 가장 중요한 부분은 다짐 작업이 필요하지 않아도 된다는 것이다(Nam et al., 2013). 관 매설 후 뒤채움재로 모래 또는 토사를 사용할 경우 뒤채움재의 다짐은 관 침하, 파손에 절대적인 영향을 미치게 된다. 하지만 유동성 뒤채움재를 적용하면 별도의 다짐 작업 없이도 관 하부에 균일하게 관을 지지할 수 있는 지지체가 형성되어 관의 부등침하로 인한 관 파손이 현저하게 줄어들게 된다. 이 연구를 통해 개발된 가소성유동화토는 기존의 유동성 뒤채움재의 장점을 포함하며 동시에 강도발현까지 걸리는 양생시간을 단축시킴으로써 현장 적용성을 높이고 경제적, 인적 피해를 최소화할 수 있는 재료이다. 개발된 가소성유동화토는 일반형과 수중시공이 가능한 수중불분리형, 두 가지로 분류할 수 있으며 이 연구에서는 일반형 가소성유동화토를 적용하였다. 각각의 성분비는 Table 3에 나타내었다. 개발된 재료의 직접전단시험은 사질토의 직접전단시험의 과정과 동일하게 수행되었다. 시

료는 W/M 비율 100%로 24시간 양생한 시료와 4시간 양생한 시료로 수직하중은 100kPa, 200kPa, 300kPa의 경우로 시험을 수행하였다. 수평하중 재하 속도는 1mm/min을 적용하였으며 시료가 완전히 파괴되어 전단에 저항할 수 없을 때까지 시험을 수행하였다. 점착력과 내부마찰각을 제외한 다른 물성치는 Nam et al.(2013) 논문을 참조하였다.

4. 수치해석

이 연구에서는 누수로 인해 발생된 공동의 크기를 가정하여 그것이 발달됨에 따라 지반거동에 미치는 영향을 범용 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D AE(2012)를 통해 수행하고 그 결과를 분석하였다. 지하공동의 형태와 크기는 Kuwano et al.(2010)의 급배수 반복토사유출시험과 정수위 토사유출 시험의 결과를 근거로 하였으며 지하공동 발생으로 인한 이완영역의 물성치 또한 Kuwano et al.(2010)에서 언급된 것처럼 기존 지반 밀도의 15% 저하된 값을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 이완영역은 지하공동으로부터 $(45^\circ + \frac{\phi}{2})$ 방향으로 진행되는 것으로 가정하였다. 수치해석은 누수로 인한 지하공동이 하수관 상부에서 발생하는 시나리오와 하부에서 발생하는 시나리오로 구분하였으며 각각의 시나리오에서 공동의 확장과정을 2단계로 구분하여 수행되었다. 지하공동의 크기는 관경(D)기준 폭 1.0D~2.0D, 두께 0.5D로 가정하였다. Table 4는 수치해석을 수행한 시나리오와

케이스를 정리하여 나타내었다. Fig. 8은 수치해석을 수행하기 위한 단면 모델링이다. 검토단면의 하수관경, 베딩기초 크기, 재질, 터파기 높이 구배 등은 2011년 환경부에서 제

정한 하수관시설기준을 참조하였다. 하수관 관경은 250mm, 베딩기초의 높이는 200mm, 재질은 원지반이 보통토일 때를 기준으로 하여 모래기초로 적용하였으며, 터파기 구배는 1:0.3, 관 하부 터파기 폭은 관로 접합부 기준으로 관 양쪽으로 600mm씩 여유 폭을 두는 것으로 모델링을 실시하였다. 상재하중은 12.7kN/m로 2012년 국토해양부에서 제정한 도로교설계기준에서의 교통하중을 적용하였다. 가소성유동화토 적용의 경우 되메움 시 베딩기초부터 관 상부까지 적용하는 것으로 모델링 하였는데 이는 Lee & Song(2006)을 참조하였다.

콘크리트 관과 지반재료의 물성치는 Table 5, 6과 같이 적용하였다. Table 6은 가소성유동화토의 점착력과 내부마찰각의 24시간 양생한 시료의 직접전단시험 결과이다.

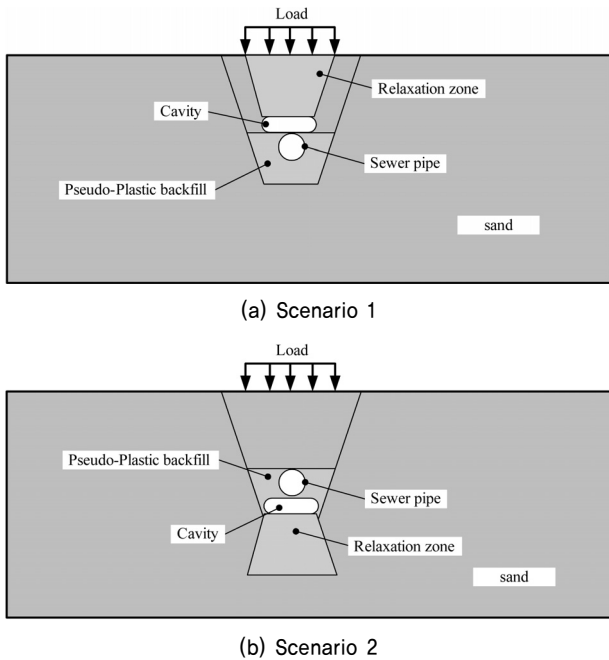


Fig. 8. Modelling for FE analysis

5. 결과 및 분석

5.1 직접전단시험

개발된 가소성유동화토에 대한 직접전단시험 결과는 Fig. 9와 같다. 시료의 양생시간을 24시간과 4시간으로 구분하

Table 4. Cases of FE analysis

Location of cavity	Scenario	Case		Note	
		Reinforcement	Development step		
	1	○	1	1	Scenario 1_case 1-1
				2	Scenario 1_case 1-2
		×	2	1	Scenario 1_case 2-1
				2	Scenario 1_case 2-2
	2	○	1	1	Scenario 2_case 1-1
				2	Scenario 2_case 1-2
		×	2	1	Scenario 2_case 2-1
				2	Scenario 2_case 2-2

Table 5. Sewer pipe material properties for FE analysis

	Diameter (mm)	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	W (kN/m/m)	Poisson ratio
Concrete pipe	250	1,374,447	5,369	1.66	0.2

Table 6. Ground and backfill material properties for FE analysis

	Unit weight (kN/m ³)	Young's modulus (kN/m ²)	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (°)	Poisson ratio
Sand	17	20,000	6	30	0.2
Backfill	15.5	28,197	15.33	32.69	0.2
Relaxation zone	16.15	17,000	5.1	25.5	0.2

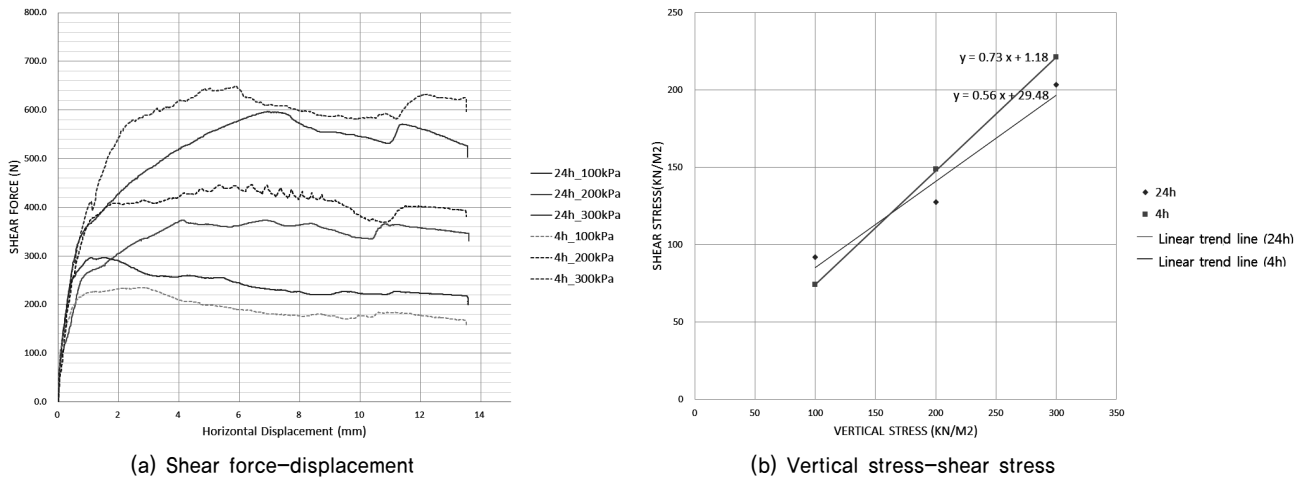


Fig. 9. Results from DS test

Table 7. Backfill properties from DS test

Cure	Vertical stress (kN/m ²)	Shear stress (kN/m ²)			Friction angle (°)		Cohesion (kN/m ²)	
		Peak	Critical	Residual				
24 hour	100	106.1	77.8	92.0	29.3	32.7	29.5	15.4
	200	134.4	120.3	127.3				
	300	215.8	191.0	203.4				
4 hour	100	84.9	63.7	74.3	36.1	32.7	1.2	15.4
	200	162.7	134.4	148.6				
	300	233.5	208.7	221.1				

였다. 전단응력은 하중-변위 곡선의 잔류 값을 이용하였다. 잔류 값의 산정은 침투 값과 수렴 값의 평균값으로 하였으며, 수치해석에 적용된 점착력과 내부마찰각은 4시간, 24시간 양생된 시료의 각각의 점착력과 내부마찰각의 평균값을 적용하였다. 각 시료에 대한 결과값을 Table 7에 나타내었다. 개발된 가소성유동화토의 물성치에 대한 연구는 보다 다양한 조건에서 직접전단시험뿐만 아니라 일축압축시험, 삼축압축시험 등 여러 실내시험을 통해 산정되어야 할 것으로 판단된다.

5.2 수치해석

수치해석은 앞에서의 Table 3을 기준으로 하여 수행되었다. 공동 발생의 단계를 구분하여 수치해석을 수행하였고, 결과값은 공동이 최종적으로 진행된 단계에서의 결과값을 그림으로 나타내었다(Fig. 10, 11). 공동의 형태와 크기, 이완영역의 크기 등은 Kuwano et al.(2010)을 참조하였으며 공동의 진행에 따라 이완영역 또한 확대시켜 수치해석을 수행하였다. Fig. 10은 침하를 나타낸 그림이다. 관 상부에 지하공동이 발생하는 경우는 가소성유동화토의 적용과 관계 없이 이완영역에서 집중적으로 침하가 발생하는 것을 알 수 있다. 반면 관 하부에 공동이 발생할 경우 관 상부에 지하공

동이 발생하는 경우보다 침하가 적게 발생하고 가소성유동화토의 적용 효과가 확실한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 지하공동 확장 마지막 단계에서의 전단변형률을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 상부 공동 발생 시 가소성유동화토로 보강을 수행할 경우 이완영역에서 집중적으로 변형이 발생하는 것을 볼 수 있어 가소성유동화토를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 변위가 적게 나오는 것을 알 수 있다. 반면 관 하부 지하공동 발생 시에서는 성토면을 따라 전단변형이 집중적으로 발생하지만 가소성유동화토 적용 후에는 성토면에서의 전단변형이 작아지는 것을 알 수 있다.

각 Case에서 발생된 최대침하량을 Table 7에 정리하였다. 최대침하는 관 상부에서 발생하였으며, 침하량을 기준으로 가소성유동화토 적용 효과는 관 상부 공동 발생 시 약 5%, 관 하부 공동 발생 시 약 48%가량 있는 것으로 나타났다. 침하량을 비교하였을 때 침하량은 상부에 공동 발생 시 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 10과 11에서 알 수 있듯이 관 상부에 공동이 발생할 경우 이완영역의 확대가 지표 침하의 주된 원인이 되며, 관 하부에 공동이 발생할 경우에는 관이 침하되면서 지반 전체의 거동이 원인이 됨을 알 수 있다.

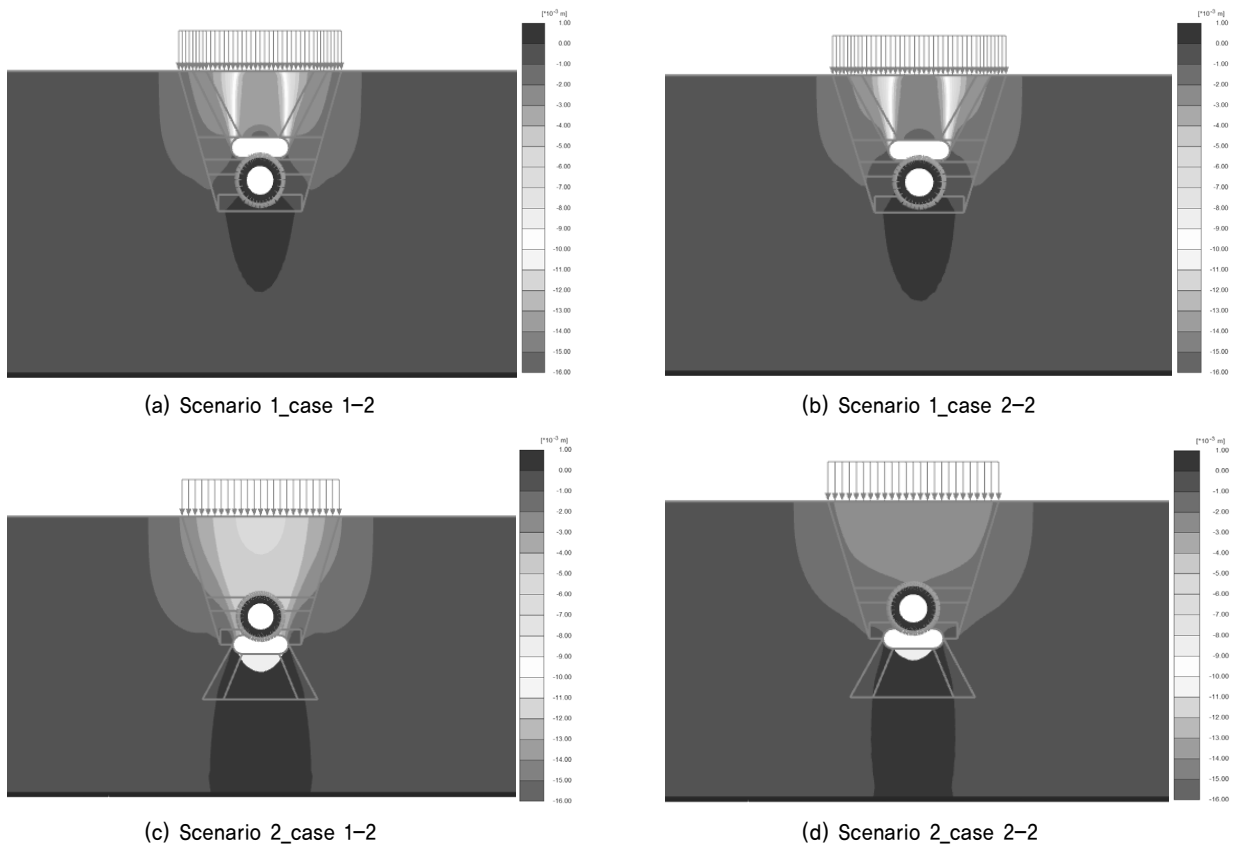


Fig. 10. Y-displacement

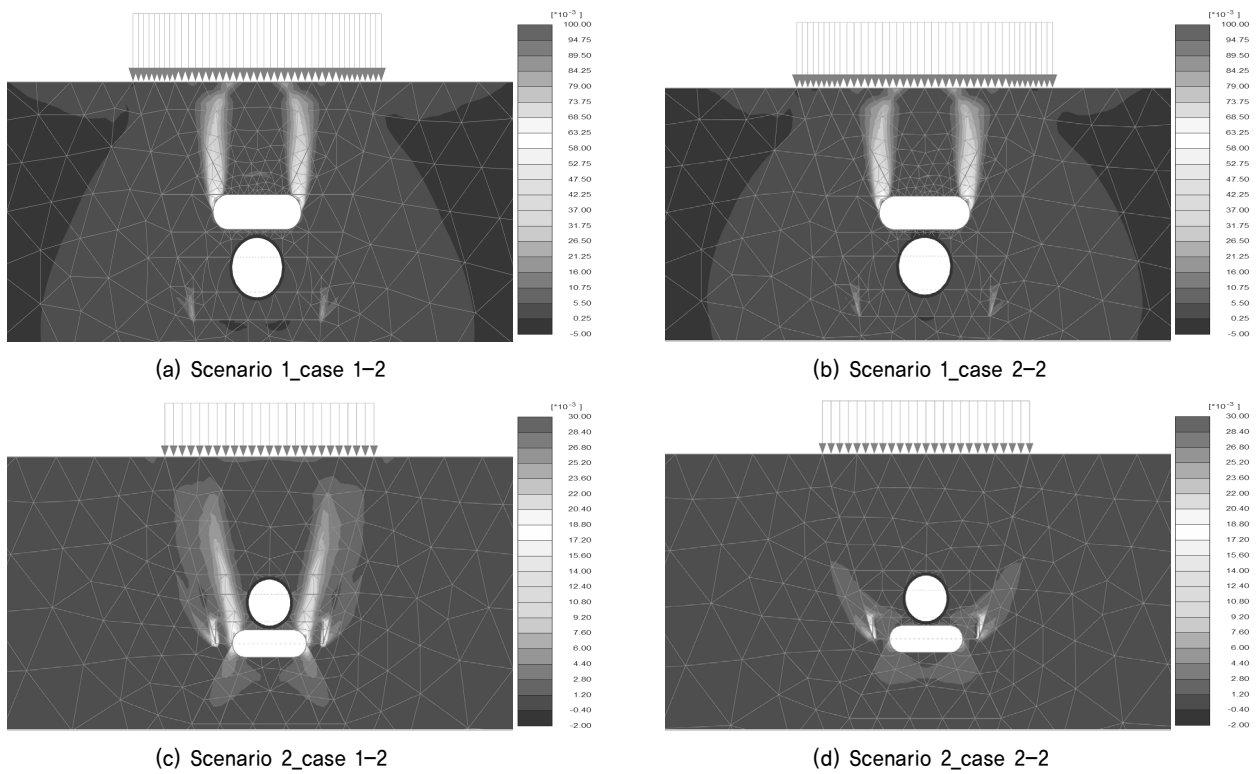


Fig. 11. Shear strain

Fig. 12는 지하공동의 진행단계에 따라 지표침하량을 분석한 그래프이다. 가소성유동화토가 적용되지 않은 경우와 적용된 경우 모두 침하량의 크기는 관 상부에 지하공동이

발생하였을 때 더 큰 것으로 나타났다.

가소성유동화토를 적용하지 않은 경우 관 상부에 지하공동이 발생, 가소성유동화토가 적용되지 않았을 경우 공동의

확장에 따라 침하량은 3.87mm에서 15.41mm로 약 3배 증가한 것을 알 수 있으며, 이는 가소성유동화토를 적용하였을 때도 비슷한 경향이 나타난 것을 알 수 있다. 다시 말해 관 상부에 지하공동 발생 시 지하공동의 크기는 100% 확장할 때 침하량은 300% 확장되어 나타났다. 반면 관 하부 지하공동 발생, 가소성유동화토가 적용되지 않았을 경우에는 공동의 확장에 따른 침하량의 증가는 3.55mm에서 5.69mm로 증가, 약 60% 증가하였으며 가소성유동화토가 적용된

경우에는 2.26mm에서 3.12mm로 증가, 약 38% 증가하였다. 이는 관 상부 지하공동 발생 직후 포착 시 긴급한 복구를 통해 침하를 사전에 예방해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 13은 관 침하량에 대한 그래프이다. 관 침하량은 관 하부 지하공동 발생할 경우를 분석하였다. 관 침하량 또한 지하공동의 발생에 따라 침하량이 증가되는 것을 알 수 있다. 가소성유동화토가 적용되지 않은 경우 2.61mm에서 4.58mm로 약 75%가량 증가하였다. 가소성유동화토가 적용된 경우는 1.29mm에서 1.89mm로 약 47%가량 증가하였다. 가소성유동화토의 적용을 통해 관 침하를 통한 지반의 침하를 억제할 수 있으며, 공동의 확장에 따른 침하량의 억제효과 또한 기대할 수 있는 것으로 판단된다. Fig. 14는 지하공동 발생에 따른 침하량과 침하가 발생하는 범위를 나타낸 것이

Table 8. Maximum settlements of ground

	Scenario 1		Scenario 2	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Settlement (mm)	15.41	14.57	5.26	2.78

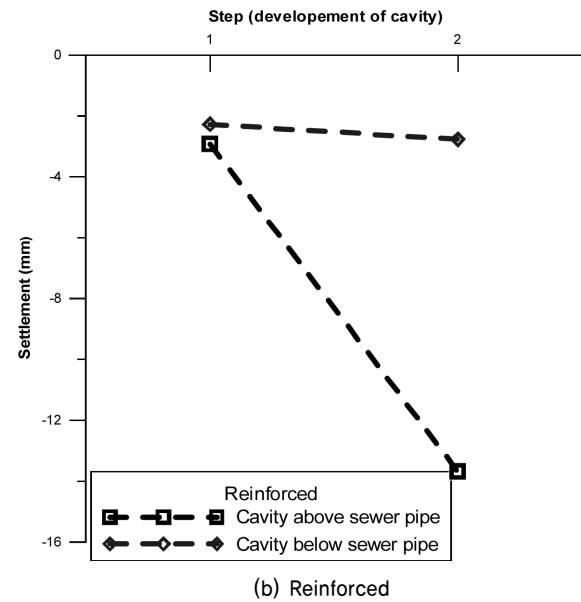
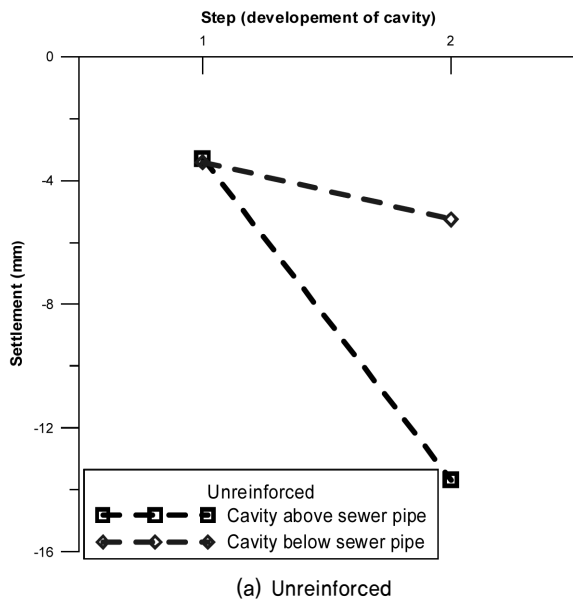


Fig. 12. Settlement due to development cavity

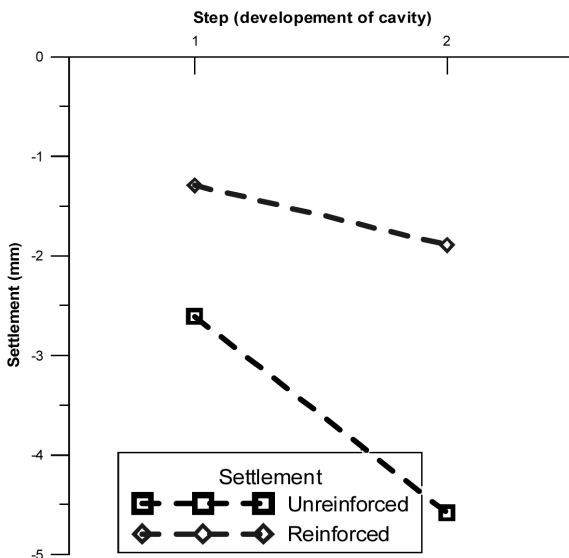


Fig. 13. Sewer pipe settlement due to development cavity

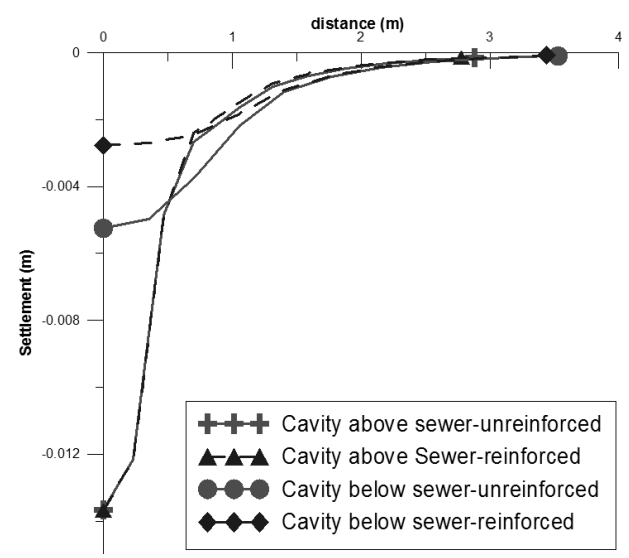


Fig. 14. Result of settlement

다. 지하공동의 크기는 2.0D까지 확장된 상태이며, 지하공동의 위치와 가소성유동화토의 적용 여부로 구분하였다. 침하량의 크기는 관 상부에 공동이 발생하는 경우가 하부에 공동이 발생하는 경우에 비해 현저히 크고, 그 범위는 하부 공동 발생 경우보다 더 좁은 것으로 나타났다. 이는 앞의 Fig. 3에서 언급한 연약지반에서 터널굴착에 따른 지표침하의 경향과 유사하게 발생된다는 것을 알 수 있다. 관 상부 지하공동 발생 시 침하가 발생하는 거리는 관 중심의 상부를 기준으로 하여 x축으로 2.9m 떨어진 거리까지인 것으로 나타났으며, 가소성유동화토 적용 후 약 0.1m 감소되는 것으로 나타났다. 관 하부 지하공동 발생의 경우 침하가 발생하는 수평거리는 3.62m로 나타났으며, 가소성유동화토 적용 시 약 0.1m 감소하는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

- (1) 관 상부에 지하공동이 발생하는 경우와 관 하부에 지하공동이 발생할 경우의 지반거동은 분명한 차이점을 가진다. 관 상부에 공동 발생 시에는 큰 침하량이 발생하지만 관 상부에 국한되는 거동을 보였다. 반면 관 하부 공동 발생의 경우 침하량은 작지만 넓은 범위에서 지반거동이 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (2) 가소성유동화토가 적용되지 않은 원지반에서 지하공동이 1.0D에서 2.0D(D=관 직경)로 진행됨에 따른 지반침하 증가는 관 상부에 공동이 발생할 경우 약 300%, 하부에 발생할 경우 약 60%로 나타났다.
- (3) 관 상부 지하공동 발생 시 공동과 이완영역의 확장 전 긴급한 복구가 필요하며, 관 하부 지하공동 발생 시 지속적인 관찰과 복구, 근본적인 원인 해결을 통해 넓은 범위에서 대규모로 발생할 수 있는 지반함몰 현상에 대비해야 할 것으로 판단된다.
- (4) 가소성유동화토 적용효과는 관 상부에 공동이 발생한 지반에 대한 적용보다는 관 하부에 공동이 발생된 지반에 적용 효과가 큰 것으로 판단되었다. 관 상부 공동 발생 시 이완영역에 대한 보강이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 추후 현재 개발된 가소성유동화토와 지반을 혼

합한 재료의 연구를 통하여 가소성유동화토를 적용한 이완영역 보강 및 적용 높이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

- (5) 추후 공동의 위치와 크기에 따른 지반거동, 지하수의 영향, 지반조건의 다양성, 성토지반의 다짐도에 대한 연구, 가소성유동화토의 지반재료와의 혼합에 따른 재료적 특성에 대한 연구를 수행할 예정이다.
- (6) 현장시험을 수행하여 지하공동의 형태와 크기 및 위치에 따른 지반거동에 대한 결과를 2D 평면변형률 조건뿐 아니라 3D 수치해석을 통해 비교·분석할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 환경부 “환경산업기술선진화기술개발(과제번호 2014000150022)” 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. 강인식, 강기현, 김나한 (2015), 모래지층 송파구로, 하구관 낚은 종로, 도로함몰 집중, 중앙일보, pp. 10.
2. 이준희 (2015), 싱크홀 부르는 ‘노후하수관’...예산부족이 ‘화’키워, 엔지니어링데일리, <http://www.engdaily.com/news/articleView.html?idxno=4344>.
3. Atkinson, J. H. and Mair, R. J. (1981), Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling, *Ground Engineering*, July, pp. 20~26.
4. Kuwano, R., Sato, M. and Sera, R. (2010), 地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 5, No. 2, pp. 219~229.
5. Lee, K. H. and Song, C. S. (2006), Performance evaluation of underground pipe with in-situ recycled controlled low strength materials, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 1~12 (in Korean).
6. Nam, J. W., Byun, Y. S. and Chun, B. S. (2013), Evaluation of the applicability of CLSM by numerical method and field test, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 5~12 (in Korean).
7. Plaxis 2D AE (2012), Reference manual, Plaxis bv, pp. 1~372.
8. Thiansky, A. B. (1999), Sinkholes, West-Central Florida, Land subsidence in the United States, U.S. Geological Survey Circular 1182, pp. 121~140.