

지반함몰 위험등급 분류(GSRp)의 굴착현장 사례 연구

신상식¹ · 임명혁² · 김학준^{2*}

¹(주)지산이엔지 대표이사, ²대전대학교 건설안전방재공학과 교수

Case Studies of Ground Subsidence Risk Ratings (GSRp) Applied to the Excavation Sites

Sang-Sik Shin¹ · Myeong-Hyek Ihm² · Hak Joon Kim^{2*}

¹CEO, Jisan ENG Co., Ltd.

²Professor, Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

Abstract

As the occurrence of ground subsidence near the excavation site increases recently, studies are being conducted to predict the possibility of ground subsidence prior to excavation. In this study, the ground subsidence risk rating for pre-excavation (GSRp) developed by the previous study was applied to actual excavation sites to verify its applicability. The final results for the evaluation of the ground subsidence risk level for five excavation sites revealed that GSRp scores were calculated between 40 and 79 points and classified mainly into grades II (Good Ground)~III (Fair Ground). In order to verify the evaluation method, the obtained GSRp grades were compared with the measured horizontal displacements. The horizontal displacements measured in five excavation sites were between 25% and 47% of the allowable displacement, which were well agreed with the low subsidence risk level obtained from GSRp calculation. It is expected that the GSRp method can be used as an evaluation tool for predicting the risk of ground subsidence before excavation if GSRp is verified and supplemented through the additional research for the poor soil with the high risk of ground subsidence.

Keywords: ground subsidence, ground subsidence risk ratings, GSRp

초 록

최근 굴착현장 인근의 지반함몰 발생사례가 증가함에 따라 사전에 지반함몰 가능성을 예측할 수 있는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 연구에 의해 개발된 굴착 전 지반함몰 위험등급 평가 시트인 GSRp를 실제 굴착 현장에 적용하여 현장 적용성을 검증하였다. 각각 다른 지반조건을 가진 5개 굴착현장에 대하여 지반함몰 위험등급을 평가한 결과, GSRp 점수는 40~79점으로 산출되어 대부분 II등급(우수지반)~III등급(양호지반)으로 분류되었다. 평가방법의 신뢰성 검증을 위하여 계측결과에 의해 실측된 수평변위량과 비교 분석하였다. 본 연구현장의 수평변위량은 허용치의 25~47%로 나타나 지반함몰 위험이 낮게 평가된 GSRp 결과와 일치하였다. 향후 지반함몰 위험성이 높은 불량한 지반을 대상으로 하는 현장 적용에 대한 연구가 진행되어 검증과 보완이 이루어진다면 GSRp 평가방법이 굴착 전 지반함몰 위험도를 예측하는 평가 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 지반함몰, 지반함몰 위험등급, GSRp

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hak Joon Kim
E-mail: hakkim@dju.kr

Received: 2 September, 2019
Revised: 18 September, 2019
Accepted: 19 September, 2019

© 2019 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 도심 굴착 현장과 관련되어 발생하는 지반함몰로 인한 피해가 사회적 문제로 제기됨으로서, 굴착 전 지반함몰에 대한 위험성을 사전에 예측하고 방재하고자 하는 연구들이 수행되고 있다. 지반함몰을 발생시키는 영향인자들은 매우 다양하고 복잡한 상호관계로 연관되어 있으나 도심지에서 발행하는 지반함몰의 주요 원인은 하수관로의 손상과 굴착공사의 영향으로 조사되었다(Lee and Kang, 2014). 하수관로의 파손은 관로 주변의 토립자 유출을 유발시키고 시간경과에 따라 확장된 지하 공동은 상부 지반의 침하나 함몰로 이어지게 된다. 굴착공사와 관련되어 있는 지반함몰 사고는 사전 지반 조사의 부실 및 이로 인한 설계 오류와 가시설 구조체의 불안정이 주요 원인으로 지목되며, 굴착 진행 중 배수에 의한 지하 수위 저하도 한 원인으로 알려져 있다.

지반함몰을 예측하기 위해서는 여러 인자들과 지반함몰간의 상관성을 분석하고 현장 지반 자료를 통해 주요 인자들을 추출하고 각 인자들의 가중치를 설정하는 과정이 필요하다. 그러나 현장 여건 및 경제적인 이유 등으로 다양한 현장 특성에 따른 신뢰성 있는 지반 정보를 얻기에는 한계가 있어 기존의 지반 자료를 활용한 지반함몰 예측 평가 도구를 개발하는 것은 매우 어려운 과제이다. 현재까지 국내외적으로 지반함몰을 정량적으로 예측하는 연구나 기술은 미비한 상태이며, 최근에 Ihm et al.(2016, 2017, 2018) 등에 의하여 지반함몰 위험성을 정량적으로 예측하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

도심지 굴착공사 현장의 지반함몰 위험성 예측을 위하여, Ihm et al.(2018)은 Ihm et al.(2016, 2017)과 Park et al.(2017)의 연구에서 도출한 지반함몰 영향인자를 바탕으로 지반 및 지질특성에 따른 지반함몰 위험성 인자들을 등급화 하여 지반함몰 위험등급을 평가할 수 있는 GSRp(Ground Subsidence Risk Rating for pre-excavation)시트를 개발하였다. 위험도 평가를 위한 점수 산정을 위하여 영향인자들과 카테고리(인자 그룹)들에 가중치를 부여한 후 각각의 점수를 합산, 100% 기준으로 환산하고 점수에 따라 지반등급을 5단계로 구분하여 지반함몰 위험도를 분류한다.

본 연구에서는 Ihm et al.(2018)에 의하여 제안된 굴착 전 지반함몰 위험도 등급 평가 시트(GSRp)를 이용하여 굴착이 진행 중인 5개 현장의 지반함몰 위험도를 평가하고 계측결과와 비교 분석하였다.

지반함몰 위험도 평가 시트 및 영향인자 가중치

Ihm et al.(2018)은 지반함몰 영향인자, 카테고리별 인자들에 대한 가중치, 지반조건에 따른 가중치 등을 Tables 1~3과 같이 제안하였다. Table 1에 제시된 총 14개의 영향인자는 등급화된 점수에 따라 인자별 점수(Si)를 부여하게 된다. 지반함몰 영향인자들의 등급값은 연구에 이용한 220여개 D/B에서 지반함몰이나 붕괴와 연관된 인자들에 대하여 인자의 중요도, 신뢰성, 연구자의 공학적 경험과 판단 등을 종합적으로 고려하여 결정하였다. 각 인자들의 등급값 결정방법은 Ihm et al.(2018)에 의하여 상세히 제시되었다.

산출된 인자별 점수(Si)에 카테고리별 인자들에 대한 가중치(Xi)를 곱하여 영향인자별 점수(F(Si))를 구하게 되고 각 카테고리별 영향인자들의 점수를 합산하면 카테고리별 점수(Cate(S))를 산정할 수 있다(Table 2). 이렇게 산정된 카테고리별 점수는 현장 지반조건에 따른 가중치(Yi)를 곱하여 합산하게 되면 GSRp점수를 산출할 수 있다(Table 3). 이를 요약하여 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$GSRp = \sum \{ [\sum (Si \cdot Xi)] \cdot Yi \} 1 + \sum \{ [\sum (Si \cdot Xi)] \cdot Yi \} 2 + \dots + \sum \{ [\sum (Si \cdot Xi)] \cdot Yi \} n \quad (1)$$

Table 1. Score by grade for factors of ground subsidence risk rating for pre-excavation (modified after Ihm et al., 2018)

Categories	Factors	Score by grade						
		100 (Safe)			(Danger) 0			
1. Cavity	1-1. Depth of cavity (m)	60~55	55~50	50~45	45~40	40~35	35~30	
	Score by grade	92	75	58	42	25	8	
	1-2. Thickness of cavity (m)	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	
If there is more than a certain size of cavity (for soil, 10 cm × 10 cm × 10 cm; for rock, 1 m × 1 m × 1 m)								
2. Soil + Rock mass	2-3. Depth of boundary between soil and rock mass (m)	<5	5~10	11~15	16~20	21~25	26~30	>30
	Score by grade	93	79	64	50	36	22	7
3. Soil	3-4. Type (USCS)	GW, GP	GM, GC	CH, CL	MH, ML	SM, SC	SW, SP	OL, OH
	Score by grade	93	79	64	50	36	22	7
	3-5. Relative density/degree of compaction: SPT (N)	50			49~1		0	
	Score by grade	100			N × 2 = 98~2		0	
	3-6. Water content (%)	<15	15~25	25~40	40~55	>55		
	Score by grade	90	70	50	30	10		
4. Rock mass	4-8. Rock type	Rock etc.	Shale	Coal shale	Mud- stone	Dolomite	Lime- stone	Gypsum Rock salt
	Score by grade	94	81	69	56	44	31	19 6
	4-9. Distance to main fracture (m)	50			49~2		1	
Score by grade	100			m × 2 = 98~4		2		
If fault or fault zone or fracture zone, or brittle shear zone exist								
5. Hydro- geology	4-10. RQD (%)	100~80	80~60	60~40	40~20	20~0		
	Score by grade	RQD value = Score						
	5-11. Distance to main channel (m)	>400	200~400	100~200	<100			
Score by grade	87	63	38	13				
If a main channel exist								
6. External factors	5-12. Coefficient of permeability (cm/sec)	CL, CH Intact rock	ML, MH Rocks having discontinuities	SC	SM	SW	SP, SW	GP, GW
	Score by grade	93	79	64	50	36	22	7
	5-13. Groundwater level above planned excavation bottom (m)	<1	1~5	6~10	11~15	16~20	>20	
Score by grade	92	75	58	42	25	8		
6. External factors	6-14. Pipelines	No pipeline	Ground level of pipelines ≤ -20 m	Ground level of pipelines ≤ -10 m	Ground level of pipelines ≤ -5 m	Ground level of pipelines ≤ -2 m	Ground level of pipelines ≥ 0 m	
	Score by grade	100	90	70	50	30	10	

Table 2. Abbreviation and constants for weighting factors for ground subsidence risk rating for pre-excavation (modified after Ihm et al., 2018)

Categories (cate)	Factors (F)	Abbreviation symbol	Weighting (Xi)	Cate (S) = (Xi • Si)
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	DC	50%	DC = 0.5 Si
	Thickness of cavity	TC	50%	TC = 0.5 Si
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	DB	100%	DB = Si
Soil (SL)	Type	TS	30.0%	TS = 0.374 Si
	SPT (N)	RS	37.5%	RS = 0.375 Si
	Water content	WC	15.0%	WC = 0.150 Si
	Liquid limit	LL	17.5%	LL = 0.175 Si
Rock mass (RM)	Type	TR	42%	TR = 0.42 Si
	Distance to main fracture	DF	31%	DF = 0.31 Si
	RQD	RQD	27%	RQD = 0.27 Si
Hydrogeology (HG)	Groundwater level above planned excavation bottom	GL	72.7%	GL = 0.727 Si
	Distance to main channel	DDC	11.4%	DDC = 0.114 Si
	Permeability	K	15.9%	K = 0.159 Si
External factors (EF)	Pipeline	PL	100%	PL = Si

Table 3. Weighting (y) by categories according to ground condition during pre-excavation (Modified after Ihm et al., 2018)

No.	Ground condition	Categories	Weighting (Yi)	Constants for weighting categories (y)
P1	No cavities and conditions that can measure the boundary between soil and rock	Soil/rock boundary (SR)	1.3%	$SR_{p1} = 0.013 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	34.6%	$SL_{p1} = 0.346 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	22.5%	$RM_{p1} = 0.225 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	38.1%	$HG_{p1} = 0.381 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	3.5%	$EF_{p1} = 0.035 \times \text{Cate (S)}$
P2	All soil conditions without cavities	Soil (SL)	45.5%	$SL_{p3} = 0.455 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	50%	$HG_{p3} = 0.500 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	4.5%	$EF_{p3} = 0.045 \times \text{Cate (S)}$
P3	All rock mass conditions without cavities	Rock mass (RM)	35.1%	$RM_{p4} = 0.351 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	59.5%	$HG_{p4} = 0.595 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	5.4%	$EF_{p4} = 0.054 \times \text{Cate (S)}$
P4	Conditions that can measure the boundary between soil and rock with cavities	Cavity (CV)	6.5%	$CV_{p5} = 0.065 \times \text{Cate (S)}$
		Soil/rock boundary (SR)	1.2%	$SR_{p5} = 0.012 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	32.4%	$SL_{p5} = 0.324 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	21.1%	$RM_{p5} = 0.211 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	35.6%	$HG_{p5} = 0.356 \times \text{Cate (S)}$
P5	All soil conditions with cavities	External factor (EF)	3.2%	$EF_{p5} = 0.032 \times \text{Cate (S)}$
		Cavity (CV)	8.3%	$CV_{p7} = 0.083 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	41.7%	$SL_{p7} = 0.417 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	45.8%	$HG_{p7} = 0.458 \times \text{Cate (S)}$
P6	All rock mass conditions with cavities	External factor (EF)	4.2%	$EF_{p7} = 0.042 \times \text{Cate (S)}$
		Cavity (CV)	9.8%	$CV_{p8} = 0.098 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	31.7%	$RM_{p8} = 0.317 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	53.7%	$HG_{p8} = 0.537 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	4.8%	$EF_{p8} = 0.048 \times \text{Cate (S)}$

Table 4. Final rating (GSRp) for ground subsidence risk

Rating	GSRp	Classification for risk of ground subsidence
I	100~81	Very good ground
II	80~61	Good ground
III	60~41	Fair ground
IV	40~21	Poor ground
V	<21	Very poor ground

Tables 2, 3에 제시된 가중치는 지반함몰 영향인자들의 인용 빈도수를 기준으로, 가장 보편적으로 사용되고 있는 Term Frequency(TF)가중치 산출방법에 의하여 산정되었다(Ihm et al., 2018). 이렇게 산출된 GSRp 점수는 I~V등급까지 5등급으로 분류되어 매우 우수지반에서 매우 불량지반으로 지반함몰 위험도를 평가하게 된다(Table 4). Table 4는 Ihm et al.(2018)이 제안한 도표의 점수가 중복되는 문제점을 보완하고 현장에 적용한 사례분석을 고려하여 내용의 일부를 수정한 결과이다.

사례 적용 현장 지반현황

Ihm et al.(2018)에 의하여 제안된 지반함몰 위험도 평가 시트의 신뢰성을 검증하기 위하여 굴착 공사가 진행 중인 4개 지역의 5개 현장을 선정하였으며, 현장의 지반조사 결과는 다음과 같다.

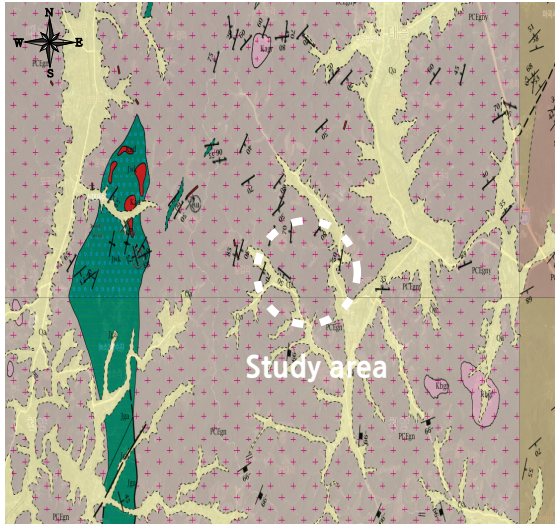
충남 공주시 신평면 지방상수도 ○○기압장

본 지역의 기반암은 한국지질자원연구원의 공주도폭 및 지질조사보고서에 의하면 선캠브리아기의 화강편마암으로 이루어져 있으며 이를 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다(Fig. 1a). 기반암인 화강편마암은 대체적으로 뚜렷한 엽상구조를 보이며 흑운모화강편마암이 주 분포를 보인다. 흑운모를 주된 유색광물로 하는 본암은 우흑질인 부분과 우백질인 부분이 호상구조를 보이며 주로 석영, 흑운모, 백운모, 견운모, 사장석들로 구성되어 있다.

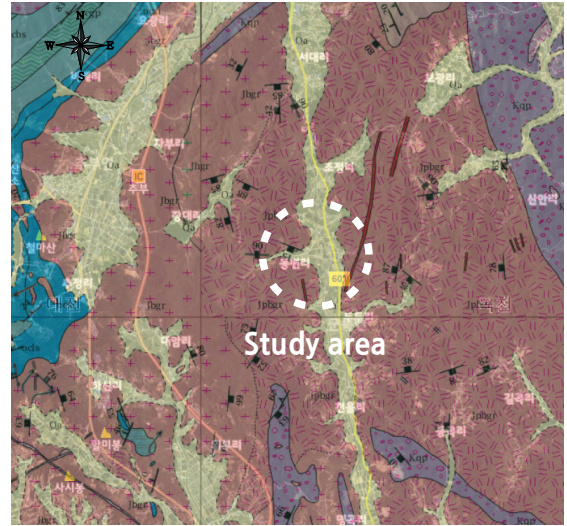
Joun Construction Co.(2018)에 의하면 조사지역의 지층 최상부는 1.3 m의 실트 섞인 모래질 자갈(GW-GM)로 구성된 매립층이 분포하며, 함수비는 10%로 습윤(moist)상태에 비중은 2.66, 비소성(nonplastic)으로 나타난다. No. 200체 통과율이 8.4%로 조립질 비율이 높으며, 표준관입시험에 의한 N값은 25/30(횡수/cm)으로 보통 조밀한 상대밀도를 보인다. 매립층 하부는 화강암으로 구성된 연암으로 TCR/RQD(%)는 87~98/0~7로 매우 심한 균열 상태이며, 풍화 정도는 심한 풍화 내지 약간 풍화를 보인다. 강도는 약함 내지 강함의 강도로 나타난다. 시추공 영상촬영에서 나타난 주 절리군은 4 set가 조사되었으며, 특기할만한 파쇄대나 단층대는 확인되지 않았다.

충남 금산군 군북면 ○○하천 정비사업

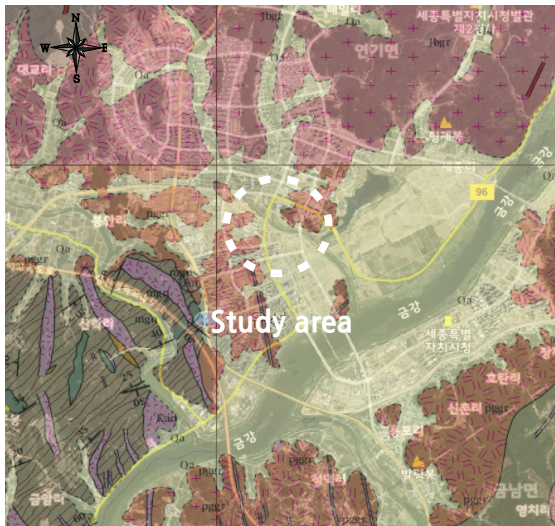
한국지질자원연구원의 무주도폭 지질조사보고서에 의하면 본 지역의 지질은 지역 대부분의 기반암이 중생대 산성 화성암류이며, 그 외 지역은 선캠브리아기의 편마암류와 신생대 제4기의 충적층으로 구성된다(Fig. 1b). 조사지역의 기반암은 쥐라기 흑운모화강암이 분포하며, 상부를 충적층이 피복하고 있다. 가장 지배적인 구성 암석은 흑운모화강암이고 부분적으로 반상화강암과 홍색장석화강암이 나타난다. 주 구성 광물은 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모, 녹니석, 각섬석 및 불투명 광물로 구성되며 전반적으로 등립상 조직(equiangular texture)을 이루고 있다.



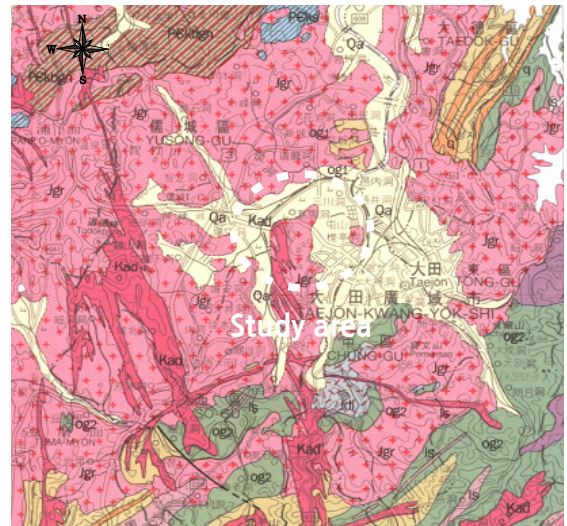
(a) Sanjeong-li, Shin Poong-myeon, Gongju



(b) Cheoneul-li, Gunbuk-myeon, Geumsan



(c) Eojin-dong, Sejong-si (H9BL, C30-31BL)



(d) Bongmyeong-dong, YooSung-gu, Daejeon

Fig. 1. Geological map of the study area.

조사지역의 지층은 매립층, 퇴적층, 풍화토층 및 풍화암층의 층서를 이루고 있다. 최상부 매립층은 1.9~2.5 m의 두께로 분포하며, 자갈 섞인 실트질 모래(SM)로 구성된다(Geumsangun, 2017). 함수비는 9.6%로 다소 건조(dry)한 상태로 나타난다. 비중은 2.67의 비소성상태를 보이며, No. 200체 통과율이 19.1%로 조립질 비율이 높게 나타난다. 표준관입시험에 의한 N값은 8/30~9/30으로 느슨한 상대밀도를 나타낸다. 매립층 하부의 퇴적토층은 2.6~3.5 m의 두께로 분포하며, 실트 및 자갈 섞인 중립 내지 조립질 모래(SW-SM)로 구성된다. 함수량은 13.6%로 습윤한 상태를 보이며 비중은 2.65로 나타

난다. 아터버그한계는 비소성상태이며, No. 200체 통과율이 9.4%로 조립질 비율이 높다. 표준관입시험에 의한 N값은 9/30~16/30으로 느슨한 내지 보통 조밀한 상대밀도를 나타낸다. 퇴적층 하부에 7.5~9.0 m의 두께로 풍화토가 분포하며, 암편 섞인 실트질 모래(SM)로 구성되어 있고, 습윤한 상태를 보인다. 표준관입시험에 의한 N값은 27/30~50/11로 보통 조밀 내지 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 풍화토층 하부는 7.0 m 이상의 두께로 풍화암이 분포하며, 완전 내지 심한 풍화상태로 굴진시 암편 및 실트질 모래로 분해된다. 표준관입시험에 의한 N값은 50/10~50/5로 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다.

세종시 ○○복합시설(H9BL, C30-31BL 인접된 2개 현장)

한국지질자원연구원의 대전도폭, 유성도폭 및 지질보고서에 의하면 본 지역의 지질은 한반도의 지체구조구상 선캄브리아기의 경기변성암복합체에 해당하는 편마암류에서부터 중생대 쥐라기 화강암, 중생대 백악기 관입암류 등의 암석이 분포한다(Fig. 1c). 주로 흑운모화강암이 기반암으로 분포하고 있으며, 그 상위에 제4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 흑운모 화강암은 대체적으로 흑운모의 유색광물대와 석영, 장석의 무색광물대가 뚜렷하게 구분되지는 않으나 2~5 cm의 장석반정이 보이는 부분도 있으며 일부 페그마타이틱(pegmatitic)한 부분도 발달되어 있다. 암의 색은 암회색, 암갈색을 띠며 암맥이 발달되어있기도 하다.

Jungheong Construction Co.(2017)에 의하면 세종 H9BL 현장의 지층은 매립층, 퇴적사질토층, 퇴적점성토층, 풍화토층 및 풍화암층의 층서를 이루고 있다. 최상부 매립층은 2.3~9.7 m의 두께로 분포하며, 자갈 섞인 실트질 모래(SP-SM)로 구성된다. 함수비는 16.8%로 습윤한 상태를 보이고 비중은 2.65, 아터버그한계는 비소성상태를 보인다. No. 200체 통과율이 4.3%로 조립질 비율이 높게 나타난다. 표준관입시험에 의한 N값은 4/30~50/5로 느슨 내지 매우 조밀한 상대밀도를 나타내며, 부분적 자갈 혼재에 따라 과대 측정되는 경향을 보인다. 퇴적사질토층은 1.9~7.0 m의 두께로 분포하며, 실트질 모래(SM)로 구성된다. 함수량은 21.4%로 습윤한 상태를 보이며 비중은 2.66이다. 아터버그한계는 비소성상태이며, No. 200체 통과율이 13.2%로 조립질 비율이 높다. 표준관입시험에 의한 N값은 4/30~12/30으로 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도를 나타낸다. 하부 퇴적점성토층은 1.6~4.2 m의 두께로 분포하며, 표준관입시험에 의한 N값은 4/30~17/30으로 보통 견고 내지 매우 견고한 연경도로 나타난다. 퇴적토층 하부는 4.2~12.0 m 두께의 풍화토층이 분포하며, 실트질 모래(SM)로 구성된다. 함수비는 15.9%로 습윤한 상태를 보인다. 비중은 2.67, 비소성상태이고 No. 200체 통과율은 17.5%로 조립질 비율이 높다. 표준관입시험에 의한 N값은 10/30~50/11로 보통 조밀 내지 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 풍화토층 하부는 풍화암으로 이루어지며, 5.0~17.2 m의 두께로 분포한다. 굴진시 암편 및 실트질 모래로 분해되며, 표준관입시험에 의한 N값은 50/10~50/1로 매우 조밀한 상대밀도를 보인다.

세종 C30-31BL 현장의 지층은 매립층, 퇴적사질토층, 퇴적점성토층, 풍화토층 및 풍화암층의 층서를 이루고 있다. 매립층은 최상부 지층으로 5.0~8.0 m 내외의 두께로 분포하고 있고 실트 섞인 모래(SM)로 구성되어 있으며 일부 위치에서는 부분적으로 자갈이 확인 되었다. 표준관입시험에 의한 N값은 6/30~19/30로 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도로 나타난다. 함수비는 15.3~16.5%, 아터버그한계는 비소성상태이고 No. 200체 통과율은 13.4~13.8%로 조립질의 구성 비율이 높게 나타난다. 퇴적 점성토층은 1.0~2.9 m내외의 두께로 존재하며, 점토 섞인 실트(ML)로 구성되어 있으며 함수비는 25.9%로 습윤 내지 젖은 상태를 보인다. 표준관입시험에 의한 N값은 4/30~10/30로 연약 내지 단단한 연경도로 나타나며, 액성한계는 31.2%, No. 200체 통과율은 69.1%로 세립질의 구성 비율이 높게 나타난다. 퇴적사질토층은 지표하 5.0~7.0 m의 심도에서 1.5~6.7 m내외의 두께로 존재하며, 실트 섞인 모래(SM), 세립-중립질 모래(SP)로 구성되어 있으며 부분적으로 자갈이 확인된다. 함수상태는 20.3~24.5%를 보이며, 표준관입시험에 의한 N값은 6/30~26/30으로 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도로 나타난다. 아터버그한계는 비소성상태이고 No. 200체 통과율은 9.4~18.6%로 조립질의 구성 비율이

높다. 퇴적층 하부에 위치하는 풍화토층은 지표하 14.0 m의 심도에서 2.5~3.0 m내외의 두께로 존재하며, 기반암인 화강암이 완전 풍화된 상태로 실트 섞인 모래(SM)로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N값은 50/19~50/11로 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 아터버그한계는 비소성상태이고 No. 200체 통과율은 19.46%로 조립질의 구성 비율이 높다. 풍화토층 하부에 위치하는 풍화암층은 지표하 12.9~17.0 m 심도에서 약 1.1~17.0 m의 두께로 분포하며 기반암인 화강암이 완전 풍화된 상태로 굴착으로 인한 분쇄시 실트 섞인 모래로 구성된다. 표준관입시험에 의한 N값은 50/10~50/3으로 상대밀도는 매우 조밀하다. 기반암인 화강암의 연암층은 지표하 14.0~34.0 m 심도에서부터 2.0~16.0 m 이상의 두께로 분포한다. 풍화상태는 심한 풍화내지 보통 풍화상태이며, 강도는 약함 내지 보통 강함의 상태를 나타내고 있다. 부분적으로 균열과 절리가 매우 발달되어 있으며 코아회수율(TCR)은 20~93%, 암질지수(RQD)는 0~83%이다.

대전광역시 유성구 ○○생활주택

한국지질자원연구원의 대전도폭 및 지질보고서에 의하면 본 조사지역의 지질은 선캠브리아기의 편암 및 호상편마암, 화강편마암류를 기저로 쥐라기의 화강암류가 부정합의 관계로 주로 분포하며 이를 제4기의 충적층이 하천변 내지 저지대에 실트, 모래, 자갈 등이 미고결된 상태로 그 수계를 따라 부정합의 관계로 넓게 분포하고 있다(Fig. 1d).

조사지역의 지층은 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층의 층서를 이루고 있다. 최상부 매립층은 0.0~1.8 m의 두께로 분포하며, 실트질 모래 또는 모래 섞인 자갈(SM-GM)로 구성된다(Kayan Construction Co., 2017). 표준관입시험 결과 N값은 4/30~7/30으로 느슨한 상대밀도를 보이며, 함수비는 습윤 상태이다. 퇴적토층은 3.7~3.8 m의 두께로 분포하며, 구성토질은 실트 섞인 모래, 자갈 섞인 모래, 실트질 점토(SM-SP-CL) 등으로 구성되어 있다. 표준관입시험 결과 N값은 3/30~28/30으로 느슨 내지 보통 조밀 또는 연약한 연경도를 보인다. 함수상태는 습윤 내지 젖은 상태를 보인다. 풍화토층은 2.5~7.7 m의 두께로 분포하고 있으며, 구성토질은 실트질 모래(SM)로 구성되어 있다. 표준관입시험결과 N값은 48/30~50/11로 조밀 내지 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 풍화암층은 하부에서 1.3~8.0 m의 두께로 분포하고 있다. 굴진시 암편 섞인 실트질 모래로 분해되어 회수되며, 표준관입시험 결과 N값은 50/8~50/2로 매우 조밀한 상대밀도를 보이고 있다. 풍화대 하부에 분포하는 화강암의 연암층은 지표하 9.3~21.0 m 하부에서 2.0 m 이상의 두께로 분포하고 있다. 회수된 암석코어의 TCR/RQD(%)는 41~100/0~25로 심한 균열 내지 보통 균열 상태, 심한 풍화내지 보통 풍화 상태를 보인다. 강도는 매우 약함 내지 약함으로 나타난다.

지반함몰 위험도 평가(GSRp) 결과

현장에서 조사된 주요 카테고리별 영향인자는 가중치 범위에 따라 점수를 부여하게 된다. 5개 현장에서 조사된 영향인자들에 대한 값을 정리하면 Table 5와 같다. 5개 현장 모두 공동의 존재는 확인되지 않았으며, 공주현장과 대전현장은 토사와 암반으로 구분하여 조사하였다. 금산현장과 세종현장은 굴착심도 내 지층이 상부 매립층 및 하부 퇴적층 등 모두 토사 또는 완전 풍화(CW) 내지 심한 풍화(HW)상태의 풍화대로 이루어져 있어 상부 퇴적층과 하부 풍화대구간을 포함하는 지반조건으로 구분하여 지반함몰에 대한 위험도를 평가하였다.

토사와 암반(P1)으로 이루어진 공주현장의 굴착 전 지반함몰 위험도 평가에 의한 GSRp 점수는 76.6점으로 평가되어 우수지반에 해당하는 II등급으로 분류되었다(Table 6). 상부 토사지반(P2)에 대한 평가 결과 역시 79.3점으로 평가되어 토사와 암반으로 이루어진 지반조건에서의 평가 결과와 유사한 결과를 보이고 있으며, 지하수위가 굴착면보다 하부에 위치하고 있어 전반적인 GSRp 점수가 높게 산출된 것으로 판단된다.

Table 5. Applied scores of influencing factors for excavation sites

Site			Categories												
			1. Cavity	2. Soil + Rock	3. Soil			4. Rock mass			5. Hydrogeology			6. External factors	
Site	Excavation depth	Ground condition		Depth of boundary (m)	Type	SPT (N)	Wn (%)	Liquid limit	Rock type	Distance to main fracture (m)	RQD (%)	Groundwater level above planned excavation bottom (m)	Distance to main channel (m)	Permeability	Pipelines
1. Gongju	9.0 m	0.0~1.3 m (soil)	-	1.3	GW-GM	25	10.0	NP	Gneiss	-	4	0	1,600	GW-GM	-
		0.0~9.0 m (soil + rock)													
2. Geumsan	8.0 m	0.0~6.0 m (sediment)	-	-	SW-SM	12	11.6	NP	Granite	50	-	5.6	10	SW-SM	-
		0.0~8.0 m (+weathered)			SM	31	20.0	NP							
3. Sejong H9BL	14.0 m	0.0~9.0 m (sediment)	-	-	SP-SM	9	19.1	NP	Granite	-	-	8.2	50	SP-SM	-
		0.0~14.0 m (+weathered)			SM	30	15.9	NP							
4. Sejong C30,31BL	25.0 m	0.0~14.0 m (sediment)	-	-	SM	15	20.1	NP	Granite	-	-	18.1	40	SM	-
		0.0~25.0 m (+weathered)			SM	33	14.9	NP							
5. Daejeon	16.0 m	0.0~13.0 m (soil)	-	13.0	SM	30	20.0	NP	Granite	-	10	8.3	370	SM	1.5
		0.0~16.0 m (soil + rock)													

Table 6. Final rating of GSRp for a site in Gongju

Cate.	Factors (F)	Xi (weighting)	Si (factor score)	F (si) = Si*Xi	Cate (S)	Ground condition	Cate	Yi	Cate (S)*Yi	GSRp
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	0.5	0	0	0.00		SR	0.013	0.091	
	Thickness of cavity	0.5	0	0			SL	0.346	24.627	
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	1	7	7	7.00	P1	RM	0.225	16.101	76.6
	Type	0.3	79	23.7			HG	0.381	32.291	
Soil (SL)	SPT (N)	0.375	50	18.75	71.18		EF	0.035	3.500	
	Water content	0.15	90	13.5			SL	0.455	32.385	
	Liquid limit	0.175	87	15.225			P2	HG	0.5	
Type	0.42	94	39.48	EF	0.045	4.500				
Rock mass (RM)	Distance to main fracture	0.31	100	31	71.56		Final rating (GSRp)			
	RQD	0.27	4	1.08			I	100~81	Very good ground	
Hydrogeology (HG)	Groundwater level above planned excavation bottom	0.727	92	66.884	84.75		II	80~61	Good ground	
	Depth to main channel	0.114	87	9.918			III	60~41	Fair ground	
	Permeability	0.159	50	7.95			IV	40~21	Poor ground	
External effects (EF)	Pipeline	1	100	100	100	V	20~0	Very poor ground		

상부 퇴적사질토 지반과 하부 풍화대 지반(P1)으로 이루어진 금산현장의 GSRp 점수는 57.5점으로 산출되어 최종 등급은 양호지반의 III등급으로 분류되었다(Table 7). 그러나 상부 느슨한 퇴적사질토층으로 이루어진 지반조건(P2)으로 평가했을 경우 51.0점으로 산출되었으며, 하부 풍화대를 포함하는 전체 구간에 대한 지반조건으로 산출된 점수보다 낮은

점수로 나타나는데, 이는 퇴적토층 하부에 위치한 조밀한(N치 50 이상) 상대밀도를 보이는 풍화대 지반에 대한 인자별 점수의 영향 때문이다.

Table 7. Final rating of GSRp for a site in Geumsan

Cate.	Factors (F)	Xi (weighting)	Si (factor score)	F (si) = Si*Xi	Cate (S)	Ground condition	Cate	Yi	Cate (S)*Yi	GSRp
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	0.5	0	0	0.00	Sediment P2	SL	0.455	20.714	51.0
	Thickness of cavity	0.5	0	0			HG	0.5	25.799	
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	1	0	0	0.00		EF	0.045	4.500	
Soil (SL)	Type	0.3	36	10.8	45.53/ 59.78	Weathered P2	SL	0.455	27.198	57.5
	SPT (N)	0.375	24/62	9/23.25			HG	0.5	25.799	
	Water content	0.15	70	10.5			EF	0.045	4.500	
	Liquid limit	0.175	87	15.225						
Rock mass (RM)	Type	0.42	0	0	0.00	Final rating (GSRp)				
	Distance to main fracture	0.31	0	0		I	100-81	Very good ground		
Hydrogeology (HG)	RQD	0.27	0	0	51.60/ 51.60	II	80-61	Good ground		
	Groundwater level above planned excavation bottom	0.727	58	42.166		III	60-41	Fair ground		
	Depth to main channel	0.114	13	1.482		IV	40-21	Poor ground		
	Permeability	0.159	50/50	7.95/7.95		V	20-0	Very poor ground		
External effects (EF)	Pipeline	1	100	100	100					

세종 H9BL 현장은 상부 퇴적토층과 하부 풍화대로 이루어진 지반조건(P2)이며, 현장 조사 결과를 토대로 지반함물 위험도 평가를 시행한 결과, 최종 GSRp 점수는 57.2점으로 나타나 III등급의 양호지반으로 분류되었다(Table 8). 상부 퇴적토층만의 지반조건에 의한 GSRp 점수는 50.0점으로 산출되어 전체 지반조건에 의한 지반함물 위험도가 높게 산출되었는데 이는 퇴적토층 하부에 위치하는 매우 조밀한 상태의 풍화대 지반의 N값(50 이상)이 등급 계산에 반영되지 않았기 때문이다.

Table 8. Final rating of GSRp for a site in Sejong H9BL

Cate.	Factors (F)	Xi (weighting)	Si (factor score)	F (si) = Si*Xi	Cate (S)	Ground condition	Cate	Yi	Cate (S)*Yi	GSRp
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	0.5	0	0	0.00	Sediment P2	SL	0.455	19.690	50.0
	Thickness of cavity	0.5	0	0			HG	0.5	25.799	
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	1	0	0	0.00		EF	0.045	4.500	
Soil (SL)	Type	0.3	36/36	10.8/10.8	43.28/ 59.03	Weathered P2	SL	0.455	26.856	57.2
	SPT (N)	0.375	18/60	6.75/22.5			HG	0.5	25.799	
	Water content	0.15	70	10.5			EF	0.045	4.500	
	Liquid limit	0.175	87	15.225						
Rock mass (RM)	Type	0.42	0	0	0.00	Final rating (GSRp)				
	Distance to main fracture	0.31	0	0		I	100-81	Very good ground		
Hydrogeology (HG)	RQD	0.27	0	0	51.60/ 51.60	II	80-61	Good ground		
	Groundwater level above planned excavation bottom	0.727	58	42.166		III	60-41	Fair ground		
	Depth to main channel	0.114	13	1.482		IV	40-21	Poor ground		
	Permeability	0.159	50/50	7.95/7.95		V	20-0	Very poor ground		
External effects (EF)	Pipeline	1	100	100	100					

세종 C30-31BL 현장의 상부 매립층 및 퇴적층의 지반조건에 의한 GSRp 점수는 40.0, 하부 풍화대까지의 지반조건을 적용했을때의 점수는 42.6으로 산출되어 지반조건이 유사한 인근 세종 H9BL 현장보다 다소 낮게 평가되었다(Table 9). 이러한 결과는 세종 C30-31BL 현장의 굴착심도가 세종 H9BL 현장보다 깊어 굴착면과 지하수위 관계에 대한 영향인자 등급 점수가 불리하게 적용된 결과이다.

Table 9. Final rating of GSRp for a site in Sejong C30-31BL

Cate.	Factors (F)	Xi (weighting)	Si (factor score)	F (si) = Si*Xi	Cate (S)	Ground condition	Cate	Yi	Cate (S)*Yi	GSRp
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	0.5	0	0	0.00	Sediment P2	SL	0.455	21.738	40.0
	Thickness of cavity	0.5	0	0			HG	0.5	13.804	
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	1	0	0	0.00	Weathered P2	EF	0.045	4.500	42.6
	Type	0.3	36/36	10.8/10.8			SL	0.455	24.297	
Soil (SL)	SPT (N)	0.375	30/45	11.25/16.875	47.78/ 53.40	Weathered P2	HG	0.5	13.804	42.6
	Water content	0.15	70	10.5			EF	0.045	4.500	
	Liquid limit	0.175	87	15.225						
Rock mass (RM)	Type	0.42	0	0	0.00	Final rating (GSRp)				
	Distance to main fracture	0.31	0	0		I	100-81	Very good ground		
	RQD	0.27	0	0		II	80-61	Good ground		
Hydrogeology (HG)	Groundwater level above planned excavation bottom	0.727	25	18.175	27.61/ 27.61	III	60-41	Fair ground		
	Depth to main channel	0.114	13	1.482		IV	40-21	Poor ground		
	Permeability	0.159	50/50	7.95/7.95		V	20-0	Very poor ground		
External effects (EF)	Pipeline	1	100	100	100					

상부 매립층, 퇴적토층 및 풍화대로 이루어진 토사구간과 하부 연암질의 암반으로 이루어진 대전현장은 상부 토사지반 (P2)까지의 지반조건으로 산출한 GSRp 점수와 하부 암반까지 포함한 흙과 암반으로 이루어진 지반조건(P1)에 의한 GSRp 점수가 각각 59.6점과 62.0점으로 평가되었다(Table 10). 즉, 상부 토사지반(P2)만의 지반조건으로 산출한 지반등급(III)이 흙과 암반의 지반조건(P1)으로 산출한 지반등급(II)보다 다소 낮은 평가결과를 보였다.

Table 10. Final rating of GSRp for a site in Daejeon

Cate.	Factors (F)	Xi (weighting)	Si (factor score)	F (si) = Si*Xi	Cate (S)	Ground condition	Cate	Yi	Cate (S)*Yi	GSRp	
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	0.5	0	0	0.00	P1	SR	0.013	0.169	62.0	
	Thickness of cavity	0.5	0	0			SL	0.346	21.461		
Soil + Rock (SR)	Depth of boundary	1	13	13	13	P1	RM	0.225	16.466	62.0	
	Type	0.3	36	10.8			HG	0.381	22.873		
Soil (SL)	SPT (N)	0.375	60	22.5	62.03	P2	EF	0.035	1.050	59.6	
	Water content	0.15	90	13.5			SL	0.455	28.221		
	Liquid limit	0.175	87	15.225			HG	0.5	30.017		
Rock mass (RM)	Type	0.42	94	39.48	73.18	P2	EF	0.045	1.350	59.6	
	Distance to main fracture	0.31	100	31			Final rating (GSRp)				
	RQD	0.27	10	2.7			I	100-81	Very good ground		
Hydrogeology (HG)	Groundwater level above planned excavation bottom	0.727	58	42.166	60.03	II	80-61	Good ground			
	Depth to main channel	0.114	87	9.918		III	60-41	Fair ground			
	Permeability	0.159	50	7.95		IV	40-21	Poor ground			
External effects (EF)	Pipeline	1	30	30	30.00	V	20-0	Very poor ground			

굴착 진행 중 배면지반에 설치된 지중경사계를 이용하여 지반의 수평변위를 측정하였으며, 허용기준치에 대한 수평변위량의 비율과 최종 GSRp 점수와 비교하였다(Table 11). 계측에 의한 수평변위량은 허용치의 25~47%로 나타나 전반적으로 안전영역내의 변위만을 보이고 있어 대부분 보통~양호한 지반으로 분류된 GSRp 지반함몰 위험도 평가 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

Table 11. Comparison between GSRp final ratings and horizontal displacements

Site			GSRp (ground condition)	Ratings	Measurement
Site	Excavation depth (m)	Ground condition			Horizontal displacement / Management standard* (%)
1. Gongju	9.0	0.0~1.3 m (soil)	79 (P2)	II	47
		0.0~9.0 m (soil + rock)	77 (P1)	II	
2. Geumsan	8.0	0.0~6.0 m (sediment)	51 (P2)	III	44
		0.0~8.0 m (+weathered)	58 (P2)	III	
3. Sejong H9BL	14.0	0.0~9.0 m (sediment)	50 (P2)	III	46
		0.0~14.0 m (+weathered)	57 (P2)	III	
4. Sejong C30,31BL	25.0	0.0~14.0 m (sediment)	40 (P2)	IV	31
		0.0~25.0 m (+weathered)	43 (P2)	III	
5. Daejeon	16.0	0.0~13.0 m (soil)	60 (P2)	III	25
		0.0~16.0 m (soil + rock)	62 (P1)	II	

*Management standard: H/300, H = Excavation depth.

토의

지반 조건에 따른 지반함몰 위험등급을 평가하고자 개발된 GSRp의 검증을 위하여 굴착이 진행 중인 5개 현장을 대상으로 지반함몰 위험도를 산출하고 지반등급을 분류하여 계측결과에 의한 수평변위량과 비교 분석하였다. 상부 1.3 m를 제외한 굴착심도 대부분이 암반으로 이루어진 공주현장의 경우 GSRp 점수가 72~73점으로 산출되어 II등급의 우수지반으로 분류되었으며 토사와 암반으로 구성된 대전현장과 같이 흙으로만 이루어진 타 현장의 평가 점수보다 높은 등급으로 나타났다. 화강암이나 화강편마암 등 지반함몰 위험성이 낮은 것으로 알려진 암종의 기반암을 포함하는 지반이 흙으로만 이루어진 지반보다 지반함몰의 위험성이 상대적으로 낮은 결과를 보여 준다. 또한, 굴착심도가 깊고 지하수위가 굴착 계획면보다 높게 형성되며, 흙으로만 이루어진 굴착현장의 경우에는 GSRp 점수가 다소 낮게 산출되는 결과를 보여 굴착에 따른 지하수위 하강 폭이 크거나 흙으로만 이루어진 지반조건에서 지반함몰 위험도가 높게 평가됨을 알 수 있다.

본 5개 연구현장의 수평변위량은 허용치의 25~47%로 나타나 지반함몰 위험 등급이 대부분 II등급(우수지반)~III등급(양호지반)으로 분류된 GSRp 결과와 일치하였다. 그러나 GSRp 점수와 실측된 수평변위의 뚜렷한 상관성은 보이지 않았다. 이는 배면지반 및 가시설 벽체의 변위가 지반조건 뿐만 아니라 흙막이 벽체의 종류, 지지공법, 차수공법 적용 여부, 실제 시공 중의 품질관리 및 굴착속도 등과 더 밀접한 관련 있기 때문으로 판단된다.

결론적으로, 굴착 전에 지반함몰 위험등급을 평가할 수 있는 GSRp 시트는 지반특성, 지하수, 파이프라인의 존재유무와 같은 인자들을 고려하여 제안되었다. 그러나 GSRp 시트를 이용하여 계산된 특정 현장의 지반함몰 위험등급이 높더라도 현장 지반과 지하수 특성을 고려하여 흙막이 공법, 차수공법, 시공 중의 품질관리를 적절히 수행하면 지반함몰을 방지

할 수 있다. 따라서 제안된 GSRp 시트는 특정 지반의 지반함몰 위험성을 굴착 공사 전에 판단하여, 굴착공사로 인한 지반함몰의 위험성을 감소시키는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 불량한 지반을 포함한 더 많은 사례 연구를 통하여, 개발된 GSRp에 대한 검증과 보완이 필요할 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 기존 연구에 의해 개발된 지반함몰 위험등급 평가 시트(GSRp)를 실제 굴착 현장에 적용하여 지반함몰 위험도를 평가하였다. 토사 및 암반으로 이루어진 공주와 대전현장의 GSRp 점수는 60~79점으로 산출되어 지반함몰 위험등급은 II등급의 우수지반으로 분류되었으며, 토사만으로 이루어진 금산 및 세종현장은 40~57점으로 평가되어 III~IV등급의 양호~불량지반으로 분류되었다. 토사 및 암반으로 이루어진 지반조건(P1)의 GSRp 점수가 토사만으로 이루어진 지반조건(P2)의 GSRp 점수보다 높은 점수로 산출되었으며, 지하수위가 굴착면보다 낮은 경우에도 지반함몰 위험도 점수가 높게 평가되었다. 세종 C30-31BL 현장의 GSRp 점수가 지질 및 지반조건이 유사한 세종 H9BL 현장보다 약 10점 정도 낮은 결과를 보이고 있는데 이는 지하수위가 다소 높고(G.L-6.9 m) 굴착심도가 상대적으로 깊은(G.L-25 m) C30-31BL 현장의 수리지질과 관련된 카테고리의 등급점수가 낮게 평가된 결과로 보인다. 평가방법의 검증을 위하여 계측결과에 의해 실측된 수평변위량과 비교 분석한 결과, 지반함몰 등급 분류결과와 유사한 결과를 보이고 있으나 GSRp 결과와 실측된 수평변위의 뚜렷한 상관성은 보이지 않았다. 향후 불량한 지반을 포함한 더 많은 사례 연구를 통하여, 개발된 GSRp에 대한 검증과 보완이 필요할 것으로 사료된다. 제안된 GSRp 시트는 특정 지반의 지반함몰 위험성을 굴착 공사 전에 판단하여, 굴착공사로 인한 지반함몰의 위험성을 감소하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 18SCIP-B108153-04)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Geumsangun, 2017, Jojeongcheon improvement project, Site Investigation Report, 42p (in Korean).
- Ihm, M.H., Jang, E.G., Kim, H.J., Park, J.Y., Shin, S.S., 2017, Ground subsidence risk rating (GSR) in order to predict ground subsidence, Fall Conference of the Engineering Geological Society of Korea, 43-43 (in Korean).
- Ihm, M.H., Park, J.Y., Jang, E.G., Kim, W.S., 2016, Extraction of influence factor for evaluation of ground subsidence risk rating, Fall Conference of the Korean Geosynthetics Society, 15-16 (in Korean).
- Ihm, M.H., Shin, S.S., Kim, W.S., Kim, H.J., 2018, Ground subsidence risk ratings for pre-excitation, The Journal of Engineering Geology, 28(4), 553-563 (in Korean with English abstract).
- Joun Construction Co., 2018, Local water supply project in Shinpoong-myeon, Site Investigation Report, 32p (in Korean).
- Jungheong Construction Co., 2017, Sejong-si, 1-5 living area, H9 block construction sites, Site Investigation Report, 72p (in Korean).
- Kayan Construction Co., 2017, Yoosung-gu Bongmyeong-dong 448-4 construction sites, Site Investigation Report, 30p (in Korean).

Lee, K.Y., Kang, S.J., 2014, Sinkhole swallowing the city, causes and their measures, Issue & Analysis, Gyeonggi Research Institute, 19p (in Korean).

Park, J.Y., Jang, E.G., Kim, H.J., Ihm, M.H., 2017, Classification of ground subsidence factors for prediction of ground subsidence risk (GSR), The Journal of Engineering Geology, 27(2), 153-164 (in Korean with English abstract).