

굴착 전 지반함몰 예측을 위한 위험등급 분류

임명혁¹ · 신상식² · 김우석³ · 김학준^{4*}

¹대전대학교 건설안전방재공학과, 교수

²지산이엔지 주식회사, 대표이사

³한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 수석연구원

⁴대전대학교 건설안전방재공학과, 교수

Ground Subsidence Risk Ratings for Pre-excavation

Myeong-Hyek Ihm¹ · Sang-Sik Shin² · Woo-Seok Kim³ · Hak Joon Kim^{4*}

¹Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Professor

²Jisan ENG Co., Ltd., CEO

³Dept. of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Senior Researcher

⁴Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Professor

Abstract

The recent increase of ground subsidence in Korea requires the development of technology for predicting the possibility of ground subsidence. Eighteen parameters affecting the ground subsidence for pre-excavation are classified into 6 categories considering ground types, groundwater, and external factors. Eighteen parameters consists of a table which gives ground subsidence risk ratings for pre-excavation(GSRp). Certain scores are given to these parameters after they are divided into several classes considering the importance and the credibility of parameters and the engineering judgements of the authors. Because of the difference of ground subsidence factors depending on the ground and field conditions, weighting factors for the individual factor and for the each category are multiplied. Weighting factors are calculated from citation frequencies of influencing factors. Ground subsidence risk ratings for pre-excavation can be quantified by considering the individual score of each parameter and weighting factors for the individual factor and for the each category. The suggested GSRp tables obtained from this study are expected to be used by engineers for the estimation of ground subsidence risk ratings for pre-excavation sites.

Keywords: ground subsidence, ground subsidence factors, ground subsidence risk ratings, GSRp

OPEN ACCESS

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

Received: 21 June, 2018

Revised: 19 December, 2018

Accepted: 21 December, 2018

© 2018 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.

초 록

최근 국내에서 지반함몰의 발생빈도가 증가하고 있으므로 지반함몰 가능성을 사전에 예측할 수 있는 기술개발이 필요하다. 본 연구에서는 굴착 전에 지반함몰에 영향을 미치는 18개의 인자들을 지반의 종류, 지하수, 외부 인자 등을 고려하여 6가지 카테고리로 분류하였다. 18개 인자들은 지반함몰 예측을 위한 굴착 전 적용 가능한 지반함몰 위험등급 분류(GSRp) 도표를 구성하는데, 이러한 영향인자들의 중요도, 신뢰성, 저자들의 공학적 판단 등을 종합적으로 고려하여 등급을 나눈 후 점수를 부여하였다. 지반조건과 현장 상황에 따라 적용되는 지반함몰 영향인자가 다르므로 영향인자 별 가중치와 카테고리 별 가중치가 곱해지게 되는데 가중치는 영향인자들의 인용 빈도수를 기준으로 결정되었다. 지반함몰 영향인자 별 점수, 인자별 가중치, 지반조건에 따라 부여되는 가중치 등을 종합하여 계산하면 굴착 전의 지반함몰 위험등급을 정량화 할 수 있다. 본 연구를 통하여 제안된 GSRp 도표는 굴착 전 현장에서 실무자들이 지반

의 지반함몰 위험성을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 지반함몰, 지반함몰 영향인자, 지반함몰 위험등급, GSRp 도표

서론

최근 국내에서는 도심지에서의 굴착공사와 연관된 지반함몰과 광산지역의 지반 침하현상 등의 발생으로, 인적 및 경제적인 손실뿐 아니라 국민의 심리적 정서를 위협하고 있다. 따라서 국가적 차원의 대책 마련 및 지반함몰에 대한 예측 기술의 개발이 필요하다. 그러나 국내 현장의 경우, 지반함몰 예측 연구에 필요한 지질조사 항목들이 포함되지 않는 경우가 많고, 지질 특성에 따른 지반함몰 양상이 다양하기 때문에 지반함몰을 반영한 적절한 설계에 어려움이 있다. 외국에 비해 국내의 지반은 다양한 암반등급과 복잡한 지질구조를 가지고 있는 경우가 많다. 이러한 이유에서 국내의 현장 지반 특성을 반영한 지반함몰 위험성을 예측할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

지반함몰에 관한 기존 연구 사례는 주로 지반함몰 영향인자인 흙과 암석의 지반공학적 특성연구(Anon, 1979; Bell, 2000), 굴착 중 지반함몰에 관한 연구(Bell et al., 1995; Boone, 2004; Charles et al., 2004; Hu et al., 2003; Kim, 2014; Moormann and Moormann, 2002) 등이 있다. 석회질 암반 지역의 싱크홀과 관련된 지반함몰 연구는 Bruno and Calcaterra(2008), Jesus and Francisco(2008), Lamb and Shiau(2014) 등에 의하여 수행되었다. Carbognin et al.(1984), Figueroa(1984), Roboski and Richard(2006), Yoo and Kim(2007), Thinh and Ludmila(2015) 등은 지하수 개발에 따른 지반함몰 연구결과를 제시하였다. Choi(2005), Woo et al.(2013), Choi and Kim(2015), Choi and Baek(2016) 등은 터널 굴착 및 광산 개발에 따른 지반붕괴 연구 결과를 발표하였다. 이외에도 지반함몰과 연관된 연구로는 지하수 유출에 따른 토립자 유실로 인한 지반함몰(Cividini et al., 2009), 지진 발생에 의한 지반 액상화로 인한 지반함몰(Dobrescu and Siminea, 2009), 지반 내 지하 시설물에 기인한 지반붕괴(Hou et al., 2015; Lee and Kim, 2016) 등이 있다. 그러나 아직 국내외적으로 지반함몰을 정량적으로 사전에 예측하는 연구나 기술은 미비한 상태이며, 최근에 지반함몰 위험성을 정량적으로 예측하기 위한 연구가 진행 중에 있다(Park et al., 2017 등).

본 연구에서는 도심지 굴착(개착식) 전에 현장의 지반함몰 위험성 예측을 평가하기 위하여, Ihm et al.(2016, 2017)과 Park et al.(2017)의 연구에서 도출한 지반함몰 영향인자를 바탕으로 지반 및 지질특성에 따른 지반함몰 위험성 인자들을 등급화 및 점수화하고자 한다. 이를 위하여 영향인자들과 카테고리(인자 그룹)들에 가중치를 부여한 후 각각의 점수를 합산 및 100% 기준으로 환산하여, 굴착 전에 지반함몰 위험성을 예측할 수 있는 지반함몰 위험등급(Ground Subsidence Risk Rating for pre-excavation: GSRp) 시트를 제시하고자 한다.

지반함몰 영향인자 등급

지반함몰 영향인자를 추출하기 위한 연구는 Ihm et al.(2016, 2017), Ihm(2018) 등에 의해 수행되었다. Park et al.(2017)은 220여 편의 논문과 외국 정부기관 문헌을 분석한 후 문헌에 인용된 빈도수에 따라 상대적인 중요도를 설정하여, 지반굴착에 따른 약 22개의 지반함몰 영향인자를 도출하였으나, 이는 지반 굴착 전과 굴착 중의 모든 경우를 감안한 분석 결과이다. 본 연구의 목적상 지반굴착 전(개착식) 혹은 시공 전 조사 및 설계 단계에서 굴착현장에서의 지반특성별 지반함몰에 영향을 미치는 인자는 굴착 중에 영향을 미치는 4개의 인자를 제외한 6개의 카테고리에 속하는 18개의 인자들이다(Table 1). 18개의 지반함몰 영향인자 사이의 상대적 중요도 순서는 220여개의 사례 연구에서 인용되고 사용된 빈도

수에 따라 결정되었다(Park et al., 2017). 지하수위 변동, 흙의 종류, 암석의 종류, 주 단열과의 거리, 상재하중 심도, 상재 하중 두께, 흙의 전단강도, RQD, 액성한계, 흙의 상대밀도, 흙의 다짐도, 투수계수, 흙의 함수비, 주요 하천(Main Channel)과의 거리, 인공시설물 유무, 강우 강도, 흙과 암반 경계면의 배향 및 심도, 흙의 건조단위 중량 순으로 상대적인 중요도가 낮아지는 것으로 분석되었다. Park et al.(2017)은 지반함몰 인자간 상대적인 중요도 순서에 따라 가장 중요도가 높은 5-17의 지하수위 변동 인자부터 중요도가 상대적으로 가장 낮은 3-8의 흙의 건조단위 중량 인자까지 상세히 기술하였다.

Table 1. Factors of Ground Subsidence risk Rating for pre-excitation (GSRp) due to geotechnical characteristics(modified from Park et al., 2017)

Types	Influence factors
1. Existence of the cavity	1-1. Depth of overburden 1-2. Thickness of overburden
2. Soil + Rock	2-3. Depth of boundary 2-4. Orientation of boundary (Strike/Dip)
3. Soil	3-5. Type 3-6. Shear strength 3-7. Relative density, Degree of Compaction 3-8. Dry unit weight 3-9. Water content 3-10. Liquid limit
4. Rock	4-11. Types 4-12. Distance from main fracture 4-13. RQD
5. Hydrogeology	5-14. Strength of rainfall 5-15. Depth and distance from main channel 5-16. Coefficient of permeability 5-17. Fluctuation of groundwater table
6. External Influence	6-18. Existence of artificial facilities

Park et al.(2017)에 의하여 상세히 제시된 인자들 중에서, 중요한 몇 가지 인자들의 적용범위와 특징들을 중요도의 순서에 따라 간단히 설명하면 다음과 같다. 지하수위 변동은 지반내부의 침식과정을 촉진시키는 역할을 하고, 7일간 0.4m 폭의 수위 변동이 지속될 경우 지반함몰이 유발될 가능성이 있으며 수위변동의 폭은 0.4m 이상 유지될 시 붕괴 가능성이 크다(Bruno and Calcaterra, 2008; Thinh and Ludmila, 2015). 통일 분류법에 의한 흙의 분류가 흙의 공학적 성질을 대변해 주기 때문에 흙의 종류를 확인함으로써 함몰 발생 가능성을 예측 할 수 있다(Kwon and Lee, 2001; Vilar and Roger, 2011; Cheng et al., 2013). 지반함몰의 취약성은 암석의 강도, 용해도, 산도 및 연성도 등에 따라 좌우되며, 지반함몰의 취약성을 암석의 종류로 분류하면 석고, 암염, 석회암, 고회암, 석회질 셰일, 탄질셰일, 이암의 순서로 지반함몰의 취약성이 낮아진다(Jesus and Francisco, 2008). 암반에 단층, 파쇄대, 단열대 등과 같은 불연속면이 존재할 경우 일반 암반과 파괴 양상이 판이하게 다르므로(Bell et al., 1995; Shin et al., 2004; Tudes, 2012; Perrin et al., 2015) 주 단열과의 거리에 따라 지반함몰 가능성을 다르게 적용해야 한다. 일정 규모 이상의 공동이 존재할 경우 상재하중이 지반함몰의 주요 영향인자로 작용하며, 공동의 두께와 공동의 심도에 따라 지반함몰의 위험성이 다르게 작용한다. 흙의 전단강도는 싱크홀 형성과 밀접한 연관성을 가지며, 일반적으로 점착력과 마찰각을 동시에 갖고 있는 흙이 비배수 강도를 갖는 점토나 배수상태의 모

래에 비하여 더 높은 안정성을 보인다(Lamb and Shiau, 2014). Oh and Ahn (2016)의 연구에서는 토사의 상대밀도가 작을 때 큰 지표 침하가 발생하는 것을 확인하였다. 투수계수가 높을 경우 지반 내 지하수위 변화의 폭이 커지고, 심한 경우 토사의 유출도 일어날 수 있으며, 투수계수 기준에 따라 10^{-4} cm/sec 이하의 투수계수를 가지는 것이 지반함몰에 대해 안전하였다(Reddy and Jeffrey, 2001; Shin et al., 2004; Sakai and Maeda, 2009; Lee et al., 2014 등). 주변에 하천이 존재하는 경우, 지하수의 유속과 수위 변동에 영향을 받아 지반침하나 함몰의 발생 가능성이 증가한다. 하천과 150m 거리까지 유속 및 수위변동의 영향을 받으며 유속변화 심도는 최대 25m 까지 영향을 줄 수 있다(Carbognin et al., 1984; Perrin et al., 2015). 지반 내 존재하는 인공구조물인 파이프가 천부에 설치된 경우 심부에 있는 파이프와 비교하여 관로의 손상이 발생할 가능성이 더 크며(Cho and Lee, 2014), 지하수위가 하수관로보다 더 높을 경우에 지반손실의 위험성이 더 커지고 하수관로의 설치시기가 오래되었을수록 하수관로의 결함이 증가한다(Park, 2015). Singh(2007)은 풍화된 침식층의 물질이 강우에 의해 포화된 지반상태에서 물과 함께 단층면으로 이동한다고 주장하였고, 실제로 집중호우가 발생한 이후 지반 침하가 발생했다는 사례들이 많이 보고되고 있다(Ihm et al., 2016). 토사와 암반의 경계는 특성이 다른 매질의 경계면으로 투수성 차이 등으로 인한 활동면이 될 가능성이 높으며, 기반암과 토사 경계면의 급격한 변화가 지반침하를 유발하므로 기반암 경계면의 급격한 경사를 지반함몰의 원인으로 제시하였다(Kim et al., 1995).

굴착 전 지반함몰에 영향을 미치는 18개의 인자들 중에서 흙과 암석의 경계 심도와 방향은 흙이 경계면을 따라 미끄러질 가능성이 있는 지역에 해당되는 내용이다. 즉 일반 사면의 경우 풍화가 지표면과 평행하게 발생하므로 흙과 암반의 경계가 경사지어서 형성되며, 이 면을 따라 흙이 미끄러질 가능성이 있으므로 지반침하 영향인자로 간주할 수 있다. 그러나 국내의 굴착공사가 진행되는 현장의 경우에는 흙과 암석 경계면의 경사가 거의 수평에 가까운 것이 일반적이므로 본 연구에서는 토층의 심도만을 영향인자로 간주하였다. 흙의 전단강도와 건조단위중량은 공사 전에 일반 실무자들이 얻기 어려운 인자이므로 사용하지 않고 이 인자들과 상관관계가 있는 표준관입시험 결과를 이용하여 간접적으로 평가하게 하였다. 굴착 전의 강우강도와 지하수위 변화는 굴착예정 현장의 지반함몰에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되며, 굴착이 계획된 바닥면에서 굴착 전의 지하수위까지의 거리가 클수록 굴착면으로 지하수의 유입이 클 것으로 판단되어 지반함몰 영향인자로 포함하였다. 결과적으로 Park et al.(2017)제안한 총 22개의 영향 인자들 중에서 14개의 영향인자가 굴착 전 지반함몰 예측을 위한 위험등급 분류에 이용되었다.

총 14개 지반함몰 영향인자들의 등급값의 설정은 연구에 이용한 220여개 D/B에서 지반함몰이나 붕괴가 있었던 현장에 나타나는 값을 선정하여 결정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 지반함몰 영향인자 중 공동이 있을 경우, 공동의 심도와 두께에 따라 6 등급으로 구분하고 최저 8점에서 최고 92점이 대표 값으로 제시되었다. 대표 값의 결정 방법은 100점을 균등하게 6 등급으로 구분하여 각 구간별로 최소값과 최대값을 부여한 후 각 구간의 중간 값을 대표 값으로 선정하였다. 각 영향인자의 등급 개수는 인자의 중요도, 신뢰성, 연구자의 공학적 경험과 판단 등을 종합적으로 고려하여 결정하였다.

흙과 암반의 경계면이 인지될 경우, 경계면의 심도를 7 등급으로 구분하고 최저 7점에서 최고 93점의 점수가 정해졌다. 흙의 경우, 유형(Type)은 국내외에서 널리 사용되고 있는 통일분류법(USCS)을 활용하도록 하였으며 종류에 따라 7 등급으로 구분하고 최저 7점에서 최고 93점의 점수를 대표 값으로 부여 하였다. 상대밀도 값은 표준관입시험의 N 값에 따라 50 등급으로 구분 가능하여 최저 0점에서 최고 100점의 점수가 $N \times 2$ 로서 나타낼 수 있도록 하였다.

암반의 경우, 암석의 종류에 따라 지반함몰과의 발생 빈도를 고려하여, 8 등급으로 구분하고 최저 6점에서 최고 94점의 점수로 구분하였다. 주 단열과의 거리(m)에 따라 50 등급으로 구분하고 최저 2점에서 최고 100점의 점수가 거리(m) $\times 2$ 로서 나타낼 수 있고, 시추조사 시 회수한 암석의 RQD 값이나 노두에서 측정한 RQD 값을 등급 점수 그대로 최저 0점에서 최고 100점으로 사용할 수 있다.

Table 2. Score by grade for factors of Ground Subsidence risk Rating for pre-excavation(GSRp)

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			
	3-7.Liquid Limit (%)	< 35	35~50	35~90	> 90				
Score by Grade	87	63	38	13					
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								
4-10.RQD (%)	Score by Grade	100~80	80~60	60~40	40~20	20~0			
	RQD Value = Score								
5.Hydro Geology	5-11.Distance to Main Channel (m)	> 400	200~400	100~200	< 100				
	Score by Grade	87	63	38	13				
	If a Main Channel is exist								
	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)	Score by Grade	< 1	1~5	6~10	11~15	16~20	> 20		
	Score by Grade	92	75	58	42	25	8		
6.External Factors	6-14.Pipe-lines	No pipeline	Ground Level of Pipe-lines ≤-20m	Ground Level of Pipe-lines ≤-10m	Ground Level of Pipe-lines ≤-5m	Ground Level of Pipe-lines ≤-2m	Ground Level of Pipe-lines <0m		
	Score by Grade	100	90	70	50	30	10		

수리지질 인자의 경우, 주 channel과의 거리에 따라 4 등급으로 구분하고 최저 13점에서 최고 87점의 점수가 부여되었다. 투수계수는 흙은 통일분류법, 암석은 불연속면의 포함 여부에 따라 7 등급으로 분류하였는데, 투수계수와 통일분류법의 상관성은 Powers(1992)의 연구결과를 참고하였다. 굴착 예정 바닥면과 지하수위 거리는 6 등급으로 구분하여 해당되는 대표 값을 부여하였다. 이것은 지하수위보다 굴착면이 깊을 경우에는 굴착면과 배면 지하수위의 수두차로 인하여 굴착면에 침투수압이 발생될 수 있고 굴착면을 따라 토사가 유출될 가능성이 커지기 때문이다. 외부 영향인자의 경우, 파이프라인의 유무와 심도에 따라 6 등급으로 구분하고 최저 10점에서 최고 100점의 점수로 구분하였다.

지반함물 영향인자 및 카테고리 가중치

지반함물 영향인자 전부가 모든 굴착 현장 지반에 적용되는 경우는 거의 없으며, Table 2에서 제시한 6개의 카테고리 및 14개의 인자 중 지반조건과 현장 상황에 따라 최소 2개에서 최대 4개의 인자까지 다양하게 적용된다. 따라서 각 카테고리 별 등급 점수 및 인자 별 등급 점수가 경우에 따라 다르므로 지반함물 영향인자 별 가중치(weighting)와 카테고리 별 가중치가 곱해지게 된다. Table 3과 Table 4에 제시된 가중치는 Park et al.(2017)이 제시한 각 지반함물 영향인자들의 인용 빈도수를 기준으로, 가장 보편적으로 사용되는 Term Frequency(TF) 가중치 산출 법에 의거하여 산정되었다. TF 가중치 산출 방법은 인용 빈도수가 높은 인자가 더 중요하다는 가정을 전제로 하며 가중치는 인용 빈도수에 비례한다. 예를 들면, 암반(RM)의 경우 인용 빈도수는 암석유형 22회(42%), 주 단열과의 거리 16회(31%), RQD 14회(27%)로 총 52회(100%)이다.

Table 3. Abbreviation and constants for weighting factors for Ground Subsidence Risk rating for Pre-excitation (GSRp)

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

* Remark: Score based on grade by using term frequency

Table 3은 통계학적 계산과 편의를 위해 설정한 약어 기호 및 인자별 가중치 값(x)을 계산한 것이고, Table 4는 전술한 지반조건에 따라 부여되는 가중치 값(y)을 나타낸 것이다. 즉, 공동이 없는 경우에는, 흙과 암반 경계를 측정할 수 있는 조

건(P1)과 모두 흙이나 암반으로 구성된 조건(P2~P3), 공동이 있는 경우에는, 흙과 암반의 경계를 측정할 수 있는 조건(P4), 모두 흙이나 암반으로 구성된 조건(P5~P6) 등을 나타낸 표이다.

Table 4. Weighting (y) by categories according to ground condition during pre-excitation (GSRp)

No.	Ground Condition	Categories	Weighting Constants for weighting categories(y)		Remark
P1	No cavities and conditions that can measure the boundary between soil and rock	Soil/rock boundary (SR)	1.3%	$SR_{p1}=0.013 \times Cate(S)$	The most common site
		Soil (SL)	34.6%	$SL_{p1}=0.346 \times Cate(S)$	
		Rock mass (RM)	22.5%	$RM_{p1}=0.225 \times Cate(S)$	
		Hydrogeology (HG)	38.1%	$HG_{p1}=0.381 \times Cate(S)$	
		External factor (EF)	3.5%	$EF_{p1}=0.035 \times Cate(S)$	
P2	All soil conditions without cavities	Soil (SL)	45.5%	$SL_{p3}=0.455 \times Cate(S)$	A site that usually appears
		Hydrogeology (HG)	50%	$HG_{p3}=0.500 \times Cate(S)$	
		External factor (EF)	4.5%	$EF_{p3}=0.045 \times Cate(S)$	
P3	All rock mass conditions without cavities	Rock mass (RM)	35.1%	$RM_{p4}=0.351 \times Cate(S)$	A site that usually appears
		Hydrogeology (HG)	59.5%	$HG_{p4}=0.595 \times Cate(S)$	
		External factor (EF)	5.4%	$EF_{p4}=0.054 \times Cate(S)$	
P4	Conditions that can measure the boundary between soil and rock with cavities	Cavity (CV)	6.5%	$CV_{p5}=0.065 \times Cate(S)$	Occasional occurrence site
		Soil/rock boundary (SR)	1.2%	$SR_{p5}=0.012 \times Cate(S)$	
		Soil (SL)	32.4%	$SL_{p5}=0.324 \times Cate(S)$	
		Rock mass (RM)	21.1%	$RM_{p5}=0.211 \times Cate(S)$	
		Hydrogeology (HG)	35.6%	$HG_{p5}=0.356 \times Cate(S)$	
P5	All soil conditions with cavities	External factor (EF)	3.2%	$EF_{p5}=0.032 \times Cate(S)$	A rare occurrence site
		Cavity (CV)	8.3%	$CV_{p7}=0.083 \times Cate(S)$	
		Soil (SL)	41.7%	$SL_{p7}=0.417 \times Cate(S)$	
		Hydrogeology (HG)	45.8%	$HG_{p7}=0.458 \times Cate(S)$	
P6	All rock mass conditions with cavities	External factor (EF)	4.2%	$EF_{p7}=0.042 \times Cate(S)$	A rare occurrence site
		Cavity (CV)	9.8%	$CV_{p8}=0.098 \times Cate(S)$	
		Rock mass (RM)	31.7%	$RM_{p8}=0.317 \times Cate(S)$	
		Hydrogeology (HG)	53.7%	$HG_{p8}=0.337 \times Cate(S)$	
		External factor (EF)	4.8%	$EF_{p8}=0.048 \times Cate(S)$	

지반함몰 위험등급 분류(GSRp)

지반함몰 영향인자 별 등급화한 점수는 Table 2와 같이 계산할 수 있고, Table 3에 따라 이미 계산된 각 점수에 인자별 가중치 값(x)을 곱하여 합산한 후에 Table 4에 제시한 지반조건에 따라(P1 ~ P6) 부여되는 가중치 값(y)을 다시 곱하여 합산하면 최고 100점에서 최저 0점까지 지반함몰 위험등급 분류를 할 수 있게 된다. 즉, 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$GSRp = \sum \{ [\sum (S_i \cdot x_i)] \cdot y_i \}_1 + \sum \{ [\sum (S_i \cdot x_i)] \cdot y_i \}_2 + \dots + \sum \{ [\sum (S_i \cdot x_i)] \cdot y_i \}_n \quad (1)$$

이때, S_i 는 각 인자별 점수(Table 2), x_i 는 각 인자별 가중치(Table 3), y_i 는 각 인자들의 카테고리별 가중치(Table 4)를 나타낸 것이다. 따라서 지반함몰 위험등급 분류 GSRp 점수는 Table 5에 나타낸 것처럼 최종적인 지반함몰 위험등급 (GSRp)을 매우 우량한 지반(I)에서 매우 불량한 지반(V)까지 5단계로 분류하여 상시 지반의 지반함몰 위험성을 예측하는 지표로 나타낼 수 있다.

Table 5. Final Rating(GSRp) for Ground Subsidence Risk

Rating	GSRp	Classification for risk of ground subsidence
I	> 80	Very good ground
II	80 ~ 60	Good ground
III	60 ~ 40	Moderate ground
IV	40 ~ 20	Poor ground
V	20 <	Very poor ground

토의

본 연구의 검증을 위하여, 세종시 00현장의 BL-30구간과 BL-31구간 각각 1개소에 대하여 지반조사보고서와 현장 시험자료 등을 근거로 GSRp 점수를 산정하였다. BL-30지점은 탄성파탐사 결과 주변에서 소규모의 지반공동이 확인(CV)되고 지층 상부의 흙(SL)과 지층 하부의 암반(RM)이 모두 분포(SR)하고 있는 것으로 조사되었다. 수리지질(HG) 및 외부영향(EF) 카테고리의 영향인자를 포함한 지반조건은 P4(Conditions that can measure the boundary between soil and rock with cavities)를 적용하였으며, 최종 GSRp 점수는 60.6으로 산출되어 지반함몰 위험도는 II 등급(Good Ground)으로 분류되었다. BL-31 지점은 주변지반의 공동이 확인되지 않고 지층 상부의 흙(SL)과 지층 하부의 암반(RM)이 모두 분포(SR)하며 수리지질(HG) 및 외부영향(EF) 카테고리의 영향인자를 포함하는 P1(Conditions that can measure the boundary between soil and rock without cavities)의 지반조건을 적용하였으며, 최종 GSRp 점수는 39.3으로 산출되어 지반함몰 위험도는 IV등급(Poor Ground)으로 분류되었다. 현장적용 수행 과정에서, 지반함몰 영향인자 중 암반 카테고리에서 주 단열과의 거리 인자는 최대 50m 이상 이격되면 영향이 거의 없는 것으로 하여 100점을 설정하였다. 이는 연구에 이용한 D/B에서 단열대와 이격거리에 따른 빈도 분포도에 따라 0~50 m 구간을 0점~100점으로 환산하는 것이 가장 일정한 등급분포를 나타내는 것으로 분석되었기에 이에 맞춰 등급화를 하였다. 그러나 주단열의 종류와 특성에 따라 50 m 이상 이격된 상태라도 양산단층대와 같이 대규모 단층대에는 동일한 기준으로 등급화 하기는 곤란하므로 향후 주 단열과의 거리 인자는 심도 있는 연구가 필요하다.

투수계수는 Powers(1992)가 제안한 통일분류법 유형에 따른 흙의 투수계수를 참고하여 분류하였다. 단지 자갈(GP, GW)의 경우 흙의 유형에서는 가장 점수가 높는데 투수계수에서는 가장 낮은 점수가 된다는 문제점이 있다. 그러나 지반함몰을 유발하는 가장 중요한 인자는 흙과 물의 이동인데, 자갈의 경우 흙 자체는 이동하지 않으나 주변 지반의 지하수위를 급격하게 하강시킬 수 있으므로 이와 같은 분류가 타당한 것으로 판단된다.

지반함몰 영향인자 중 외부영향 인자인 상·하수도관과 같은 파이프라인의 심도에 따라 5등급으로 구분하였으나, 이는 파이프라인에서 누수의 양 및 유실되는 토립자의 영향이 적용되지 않은 상황이므로 향후 이에 대한 연구와 보완이 추가되어야 한다고 판단된다.

지반함몰에 영향을 주는 인자를 도출하는 과정에서 전술한 6개 카테고리 및 14개 인자 외에도 소수의 인자들이 있으나

GSRp 시트 상에 점수로 나타낼 수 없을 만큼 영향력이 적은 인자들은 제외하였으나, 현재까지 고려치 못한 지반상황에서 향후 도출될 수 있는 인자들이 나온다면 GSRp 시트는 수정 및 보완되어야 할 것으로 판단된다.

현재 제안된 가중치는 문헌조사를 통한 빈도수를 이용하여 계산된 값이므로 더 많은 국내 사례연구를 통하여 가중치의 보완 연구도 필요할 것으로 사료된다. 현재 GSRp 적용에 대한 사례연구가 진행 중에 있으며 이러한 연구결과를 토대로 제안된 GSRp에 대한 지속적인 검증과 보완 작업이 필요하다.

결론

본 연구에서는 기존 연구에 의하여 도출된 22개의 지반함몰 영향인자 중에서 지반굴착 전에 지반함몰에 영향을 미치는 14개의 인자를 추출하였으며, 이 인자들은 다시 6개의 카테고리별로 분류하였다. 이를 토대로 굴착 전에 지반함몰을 예측할 수 있는 위험등급 분류방법을 제시하였다. 지반함몰 인자 카테고리별로 따로 각 인자별 D/B에서 등급 계산에 사용된 D/B의 빈도 분포에 따라 가중치 값을 결정하였으며, 6개의 지반함몰 카테고리별과 14개의 인자 중 지반조건과 현장 상황에 따라 최소 2개에서 최대 4개의 인자까지 다양하게 적용된다. 따라서 각 카테고리 별 등급 점수 및 인자 별 등급 점수가 경우에 따라 다르므로 지반함몰 영향인자 별 가중치(x)와 카테고리 별 가중치(y)가 곱해지게 된다. 즉, 공동이 없는 경우에는, 흙과 암반 경계를 측정할 수 있는 조건(P1)과 모두 흙이나 암반으로 구성된 조건(P2~P3), 공동이 있는 경우에는, 흙과 암반의 경계를 측정할 수 있는 조건(P4), 모두 흙이나 암반으로 구성된 조건(P5~P6) 등에 따라 가중치 y의 값이 다르게 적용된다. 산정된 GSRp 점수를 활용하면, 0~100점 범위에서 특정 현장의 지반함몰 위험등급 분류가 가능하다. 최종적으로 지반함몰 위험등급(GSRp)을 매우 우량한 지반(I)에서 매우 불량한 지반(V)까지 5단계로 분류하였으며, 본 연구를 통하여 제안된 도표는 굴착 전에 현장 실무자들이 지반의 지반함몰 위험성을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 추가적인 사례 연구를 통하여 제안된 영향인자 점수와 가중치에 대하여 검증과 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 18SCIP-B108153-04)과 2017학년도 대전대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Anon, O. H., 1979, Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, Part I: Rock and soil materials, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 19, 364-371.
- Bell, F. G., 2000, Engineering properties of soils and rocks, Blackwell Science Ltd., Oxford.
- Bell, F. G., Cripps, J. C., and Culshaw, M. G., 1995, The significance of engineering geology to construction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications 10.1, 3-29.
- Boone, S. J., 2004, Analysis of Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database. Soil and foundations, 45(4), 87-98.
- Bruno, E., and Calcaterra, D., 2008, Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy. Preliminary sinkhole susceptibility assessment, Engineering Geology 99, 198-209

- Carbognin, L., Gatto, P., and Mozzi, G., 1984, Case history no. 9.15: Ravenna, Italy. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. UNESCO, Paris, 291-305.
- Charles, N., Erin, W. W., Leung, H. Y. and Lau, C. K., 2004, Inherent anisotropic stiffness of weathered geomaterial and its influence on ground deformations around deep excavations. *Canadian Geotechnical Journal* 41(1), 12-24.
- Cheng, Y., Zhang, J. and Peng, J., 2013, ArcGIS-based evaluation of geo-hazards at Yaozhou County, Shaanxi, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5(4), 330-334.
- Cho, S. H. and Lee, K. S., 2014, Cause of ground subsidence in urban areas case analysis and countermeasures(Oversea Cases), *The Journal of Disaster Prevention*, Korea Disaster Prevention Association, 16, 3-60 (in Korean with English Abstract).
- Choi, S. K. and Baek, S. H., 2016, Geotechnical investigation on the causes and countermeasures of ground subsidence due to tunnel and underground installation, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 18(2), 143-154. (in Korean with English Abstract).
- Choi, S. W., 2005, Development and analysis of ground subsidence mechanism, *Tunnel and underground space*, 15(3), 195-212. (in Korean with English Abstract).
- Choi, W. S. and Kim, E. S., 2015, Ground subsidence of limestone mine saturated with groundwater, *The Journal of engineering geology*, 25(4), 511-524. (in Korean with English Abstract).
- Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G. C., and Gioda, G., 2009, Seepage-induced erosion in granular soil and consequent settlements.. *International Journal of Geomechanics* 9(4), 187-194.
- Dobrescu, C., and Siminea, I., 2009, Environmental factors and local soil condition influence related to susceptible soil liquefaction in seismic risk assessment. *Annals Food Science and Technology* 10(2), 537-542.
- Figuroa V., G. E., 1984, Case history No. 9.8 Mexico, DF, Mexico. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, *Studies and Reports in Hydrology* 40, 217-232.
- Hou, Y., Fang, Q., Zhang, D., and Wong, L. N. Y., 2015, Excavation failure due to pipeline damage during shallow tunnelling in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 46, 76-84.
- Hu, Z. F., Yue, Z. Q., Zhou, J., and Tham, L. G., 2003, Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai metro tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 933-948.
- Ihm, M. H., 2018, Ground subsidence risk rating(GSR 1.0) for prediction of sink-hole and ground collapse, *Geotechnical Engineering Society of Korea, 2018 Spring Conference*, 24-25 (in Korean with English Abstract).
- Ihm, M. H., Jang, Y. J., Kim, H. J., Park, J. Y., and Shin, S. S., 2017, Ground subsidence risk rating(GSR) in order to predict ground subsidence, *Engineering Geological Society of Korea, 2017 Fall Conference*, 43-43 (in Korean).
- Ihm, M. H., Park, J. Y., Jang, E. G., and Kim, W. S., 2016, "Extraction of influence factor for evaluation of ground subsidence risk rating, *Korean Geosynthetic Society, 2016 Fall Conference*, 15-16 (in Korean).
- Jesus, G., and Francisco G., 2008, A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum- and salt-bearing evaporites (NE Spain), *Engineering Geology*, 102, 1-2.
- Kim, J. H., 2014, Experimental study on the ground failure prevention by soft ground excavation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(3), 907-917. (in Korean with English Abstract).
- Kim, J. Y., Jang, H. S., Kim, Y., Hyun, H. J. and Kim, G. S., 1995, Application of seismic tomography to the Investigation of underground structure in Gupo train accident area. *The Journal of Engineering Geology*, 5(1), 1-20. (in Korean with English Abstract).
- Kwon, K. S. and Lee, J. Y., 2001, GIS for ground settlement analysis considering the surface conditions, *The Journal of Natural Environmental Geology*, 34(6), 595-600 (in Korean with English Abstract).
- Lamb, B. and Shiau, J., 2014, A physical and numerical investigation into sinkhole formation, *Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, Brisbane, Australia, 1-6.

- Lee, D. Y. and Kim, D. M., 2016, Geotechnical approach to groundwater deposition by sewer pipeline, Korean Geotechnical Society Conference, 3-4. (in Korean with English Abstract).
- Lee, K. Y., Lee, S. Y., OK, J. A., Ha, G. C., Han, S. H., and Lee, H. D., 2014, Basic study for preparing and using geotechnical ground subsidence risk, Kyung-gi Research Institute, 62, 44p. (in Korean with English Abstract).
- Moormann, C. H. and Moormann, H. R. 2002, A study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences. Proceedings of the 3rd International Symposium, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 51-56.
- Oh, D. W. and Ahn, H. Y., 2016, A study on the range of influence of surface subsidence due to sewer tube failure in sandy soils with various relative density by model test, Korea Geotechnical Society, 32, 19-30 (in Korean with English Abstract).
- Park, I. J., 2015, Sinkhole status and its measures, The Journal of Disaster Prevention, Korea Disaster Prevention Association, 17(2), 64-72. (in Korean with English Abstract).
- Park, J. Y., Jang, Y. J., Kim, H. J. and Ihm, M. H., 2017, Ground subsidence risk rating(GSR) in order to prediction of ground subsidence during excavation, The Journal of Engineering Geology, 27(2), 1-12 (in Korean with English Abstract).
- Perrin, J., Cartannaz, C., Noury, G., and Vanoudheusden, E., 2015, A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis. Engineering Geology 197, 296-305.
- Powers, J. P., 1992. Construction dewatering, New methods and applications, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 495p.
- Reddy, K. R., and Jeffrey A. A., 2001, Effects of soil heterogeneity on airflow patterns and hydrocarbon removal during in situ air sparging. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127(3), 234-247.
- Roboski, J., and Richard J. F., 2006, Distributions of ground movements parallel to deep excavations in clay. Canadian Geotechnical Journal 43(1), 43-58.
- Sakai, H., and Maeda, K., 2009, Seepage failure and erosion mechanism of granular material with evolution of air bubbles using SPH. AIP Conference Proceedings. eds. Masami Nakagawa, and stefan luding. 1145(1), AIP, 2009.
- Shin, J. H., Park, C., Song, W. K., Han, G. C., and Kim, J. H., 2004, Evaluation of subsidence stability of limestone area, Korean Society for Rock mechanics, Fall Conference, 1, 159-170. (in Korean with English Abstract).
- Singh, K. B., 2007, Pot-hole subsidence in son-Mahanadi master coal basin. Engineering Geology, 89(1), 88-97.
- Thin, H. P., and Ludmila, A., 2015, Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam, Resource Efficient Technologies, 1, 80-89.
- Tudes, S., 2012, Correlation between geology, earthquake and urban planning. INTECH Open Access Publisher, 417-434.
- Vilar, O. M., and Roger A. R., 2011, Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. Canadian Geotechnical Journal 48(2), 226-233.
- Woo, K. S., Eberhardt, E., Elmo, D., and Stead, D., 2013, Empirical investigation and characterization of surface subsidence related to block cave mining, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 61, 31-42.
- Yoo, C. S. and Kim, S. B., 2007, A study on ground subsidence due to groundwater drawdown during tunnelling, The Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, 9(4), 361-375.