

개착식 굴착공사 중 지반함몰 위험등급 분류시트의 등급 보정에 관한 연구

신상식¹ · 김학준^{2*}

¹(주)지산이엔지 대표이사, ²대전대학교 건설안전방재공학과 교수

Correction of the Ground Subsidence Risk Ratings during Open Cut Excavation

Sang-Sik Shin¹ · Hak Joon Kim^{2*}

¹CEO, Jisan ENG Co., Ltd.

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

Abstract

Ground subsidence risk ratings obtained from the site investigation during pre-excavation stages could be changed depending on the parameters revealed during construction activities. A method of correcting the pre-excavation ground subsidence risk ratings based on the site conditions observed in the field is suggested in this study. The elevation of groundwater table during the excavation may be different from the predicted value depending on the application of waterproofing methods and construction conditions. The drastic drawdown of groundwater table during the excavation could cause ground subsidence due to soil volume decrease related to consolidation or compression of the ground, whereas the rising of groundwater table caused by the intense rainfall may result in a high potential for ground subsidence due to heaving or boiling of the excavation bottom. Excessive displacements of retaining walls or ground settlements may cause ground subsidence, which also results in a high risk of ground subsidence caused by the destruction of buried pipelines. Reevaluation of ground subsidence risk ratings is suggested considering the fluctuation of groundwater table, condition of groundwater leakage, measured ground displacements, and soil types. Finally, the ground subsidence risk rating system is improved for better evaluation by using 12 factors in 5 categories.

Keywords: ground subsidence, ground subsidence risk ratings, correction of the ground subsidence risk ratings, ground displacements

OPEN ACCESS

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

Received: 2 March, 2021

Revised: 8 June, 2021

Accepted: 14 June, 2021

© 2021 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

굴착 전 지반조사 결과를 활용한 지반함몰 위험등급 분류는 시공 과정에서 들어나는 인자들에 따라 평가 결과가 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제안된 굴착 전 지반조사 결과를 활용한 지반함몰 위험등급 분류 방법을 현장상황을 고려하여 보정하는 방법을 제시하였다. 굴착 진행 중 지하수위는 차수공법의 적용 여부나 시공 상태에 따라 유출되는 정도가 시공 전 예측결과와 다르게 나타난다. 굴착 중 급격한 지하수위 하강은 압밀이나 압축 등의 체적 감소로 지반함몰을 유발하고 집중 호우 등에 의한 수위 상승은 굴착 저면의 히빙이나 보일링을 발생시켜 지반함몰 위험도를 높인다. 굴착 중 흙막이 벽체의 과도한 변위나 지반침하는 지반함몰의 원인이 될 수 있으며, 매설된 관로의 파손을 야기하여 지반함몰 위험도를 높인다. 본 연구에서는 굴착 중 지하수 변동 및 유출상태, 지반변위, 흙의 종류 등을 고

려하여 지반함몰 영향인자를 재평가하는 방법을 제안하였다. 최종적으로 지반함몰 평가의 영향인자를 5개 카테고리의 12개 영향인자로 평가할 수 있도록 개선하였다.

주요어: 지반함몰, 지반함몰 위험등급, 위험등급 보정, 개착식 굴착

서론

도심지에서의 개착식 지반굴착은 흙막이 벽체의 수평거동이나 지반침하에 따른 매설관로의 파손으로 인접지반의 지반함몰 발생빈도를 증가시키고 있다. 지반함몰 사고가 사회적 문제로 제기됨에 따라 굴착 전 지반함몰 위험성을 사전에 예측하여 사고위험을 방재하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Park et al., 2017; Ihm et al., 2018; Shin et al., 2019). Ihm et al.(2018)은 지반함몰과 관련된 기존의 연구 문헌을 분석하여 공동, 흙과 암반의 경계심도, 흙, 암반, 수리지질, 외부영향 등 지반특성과 관련된 6개의 카테고리화 14개의 영향인자를 추출하여 영향인자별 가중치에 따라, 굴착 전 지반함몰 위험등급을 분류하기 위한 평가시트(Ground Subsidence Risk rating for Pre-excavation, GSRp)를 개발하였다.

공동과 관련된 카테고리는 석회암지반을 제외한 우리나라 지반에서는 드물게 나타나고, 특히 국내 개착식 굴착공사가 진행되는 도심지의 지질특성을 고려했을 때 평가시트 및 지반조건에 대한 수정이 필요하다. 굴착 공사 전 지반조사에 의한 지반함몰 위험도 평가는 지반조사 방법의 한계성과 지반의 불균질한 지층 분포 등으로 인하여 지반 특성을 완벽하게 반영할 수 없으며, 지반조건과 현장 여건을 고려한 최선의 굴착 공법이 적용되었다하더라도 이를 평가시트에 반영할 수 없다는 문제점이 있다. Shin et al.(2019)은 5개 굴착현장에 대한 사례조사 결과, GSRp를 이용하여 계산된 특정 현장의 지반함몰 위험등급이 높더라도 흙막이 공법, 차수공법, 시공 중의 품질관리를 적절히 수행하면 지반함몰의 위험성을 낮출 수 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 Ihm et al.(2018)이 제시한 GSRp의 현장 적용사례 분석 결과와 굴착 공사 중 재평가 가능한 지반함몰 영향인자 등을 고려하여 지반함몰 위험등급 결과를 보정할 수 있는 방법을 제시하였다.

굴착 전 지반함몰 위험등급 평가시트

굴착 전 지반함몰 위험등급 평가시트(GSRp)는 Ihm et al.(2018)에 의하여 상세히 제시되었으며, 영향인자 평가 시트, 카테고리별 인자들에 대한 가중치, 지반조건에 따른 가중치 등은 Tables 1~3과 같다. Table 1은 Ihm et al.(2018)이 원래 제안한 GSRp에서 인자들의 점수 범위가 겹치는 문제(ex. 공동심도 60~55, 55~50)가 있어 60~56, 55~51처럼 다수의 인자들에 대하여 수정한 것이다.

지반함몰 위험등급 평가방법은 대상 지반의 조사 결과를 분석하여 총 14개 영향인자의 위험등급에 따라 평가 점수를 부여하고 영향인자에 대한 가중치를 적용한다. 지반 조건은 공동의 유무와 지반을 구성하는 상태에 따라 Table 3과 같이 6개의 지반조건으로 구분되며, 지반조건에 따른 가중치를 곱하여 합산하게 되면 최종적인 지반함몰 위험등급 점수를 산출할 수 있다. 최종적으로 각 영향인자에 대한 합산 점수는 Table 4에 따라 매우 우수한 지반(I)에서 매우 불량한 지반(V)까지 지반등급을 5단계로 분류하여 굴착으로 인한 지반함몰 위험도를 예측하는 지표로 활용하게 된다.

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)	60~56	55~51	50~46	45~41	40~36	35~30		
	Score by grade	92	75	58	42	25	8		
	1-2. Thickness of cavity (m)	0~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30		
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	26~40	41~55	> 55			
Score by grade	90	70	50	30	10				
3. Soil	3-7. Liquid limit (%)	< 35	35~50	51~90	> 90				
	Score by grade	87	63	38	13				
	4-8. Rock type	Rock etc	Shale	Coal shale	Mud-stone	Dolomite	Lime-stone	Gypsum	Rock salt
4. Rock-mass	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 (%)	100~81	80~61	60~41	40~21	20~0			
Score by grade	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 exist								
5. Hydro geology	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	37%	TS = 0.37 Si
	SPT (N)	RS	22%	RS = 0.22 Si
	Water content	WC	19%	WC = 0.19 Si
	Liquid limit	LL	22%	LL = 0.22 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	73%	GL = 0.73 Si
	Distance to main channel	DDC	11%	DDC = 0.11 Si
	Permeability	K	16%	K = 0.16 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%	$SR_{p1} = 0.01 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	30%	$SL_{p1} = 0.30 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	24%	$RM_{p1} = 0.24 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	41%	$HG_{p1} = 0.41 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	4%	$EF_{p1} = 0.04 \times \text{Cate (S)}$
P2	All soil conditions without cavities	Soil (SL)	40%	$SL_{p3} = 0.40 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	55%	$HG_{p3} = 0.55 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	5%	$EF_{p3} = 0.05 \times \text{Cate (S)}$
P3	All rock mass conditions without cavities	Rock mass (RM)	35%	$RM_{p4} = 0.35 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	59%	$HG_{p4} = 0.59 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	5%	$EF_{p4} = 0.05 \times \text{Cate (S)}$
P4	Conditions that can measure the boundary between soil and rock with cavities	Cavity (CV)	13%	$CV_{p5} = 0.13 \times \text{Cate (S)}$
		Soil/rock boundary (SR)	1%	$SR_{p5} = 0.01 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	26%	$SL_{p5} = 0.26 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	21%	$RM_{p5} = 0.21 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	36%	$HG_{p5} = 0.36 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	3%	$EF_{p5} = 0.03 \times \text{Cate (S)}$
P5	All soil conditions with cavities	Cavity (CV)	15%	$CV_{p7} = 0.15 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	30%	$SL_{p7} = 0.30 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	41%	$HG_{p7} = 0.41 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	15%	$EF_{p7} = 0.15 \times \text{Cate (S)}$
P6	All rock-mass conditions with cavities	Cavity (CV)	16%	$CV_{p8} = 0.16 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	25%	$RM_{p8} = 0.25 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	43%	$HG_{p8} = 0.43 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	16%	$EF_{p8} = 0.16 \times \text{Cate (S)}$

Table 4. Final ratings for ground subsidence risk for pre-excitation stages

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

굴착 전 지반함몰 위험등급 평가시트 현장 적용 결과

사례적용 현장

Shin et al.(2019)에 의하여 검토된 5개 현장(A, B, F, G, H)을 포함하여, 총 12개 현장에 대하여 GSRp의 현장 적용성을 검증하였다. 5개 현장을 제외한 나머지 7개 현장을 간단히 소개하면 Table 5와 같다.

Table 5. Case studies used for the application of ground subsidence risk for pre-excitation stages

Site	Layer	Thickness (m)	USCS	S.P.T-N	W/C (%)	LL (%)	K (cm/sec)
C (Geumsan-gun)	Landfill	2.5	SM	8/30~9/30	9.6	-	-
	Sedimentary soil	3.5	SW-SM	-	-	-	4.53×10^{-4}
D (Geumsan-gun)	Landfill	0.7	SM	-	Damp	-	-
	Sedimentary soil	2.4	SM	21/30~23/30	9.5	-	7.02×10^{-4}
E (Geumsan-gun)	Landfill	2.5	SM	6/30~16/30	12.9	-	-
	Weathered soil	2.0	SM	50/19~50/18	26.3	-	2.54×10^{-4}
I (Cheonan)	Landfill	10.5	SM	5/30~8/30	Damp	-	-
	Weathered soil	8.0	SM	13/30~50/18	20.9	-	1.49×10^{-3}
J (Gimje)	Landfill	1.5	SM	8/30	-	-	-
	Clay	-	-	1/30~5/30	36~43	40~47	-
K (Daejeon)	Landfill	4.6	GM	7/30~8/30	Damp	-	-
	Weathered soil	Extended below excavation depth	SM	8/30~50/12	Damp	-	-
L (Cheongju)	Landfill	6.8	SM	3/30~14/30	-	-	-

굴착 전 지반함몰 위험등급 평가시트의 현장 적용성과 검증을 위하여, 굴착 전에 계산된 12개 현장의 GSRp를 계측결과와 비교·검토하였다. 12개의 현장 중에서 대표적으로 C현장에 대한 GSRp산정 사례는 Table 6과 같다.

C현장은 충남 금산군 하천정비사업의 교량구간으로 굴착심도 8.0 m에 지하수위가 지표하 2.3 m에 위치하고 있는 현장이며 공동의 존재는 확인되지 않았다. 흙막이 벽체는 지하수위가 높은 사질토 지반이 분포함에 따라 버팀보(strut)방식으로 지지되는 널말뚝(sheet pile)이 적용되었다. 시추조사 결과, 기반암은 굴착심도 이하에 위치하며, 상부 매립층과 풍화토는 실트질 모래(SM)으로 구성되고 중간의 퇴적층은 자갈 섞인 중립 내지 조립모래로 통일분류법에 따라 SW로 분류된다. 영향인자 상대밀도의 N값은 굴착심도 중앙 심도의 표준관입시험 결과를 적용하여 12점이 부여되고 함수비와 액성한계는 최고점인 90점과 87점이 적용된다. 하천은 현장 바로 옆에 인접되어 있어 최저점이 부여되고 투수계수와 지하수위에 관한 영향인자는 각각 43점과 58점이 부여되었다. 인근에 매설 관로는 없는 것으로 나타나 최고점인 100점이 적용되었다.

영향인자의 등급별 평가결과를 인자별 가중치와 지반조건별 가중치를 부여한 결과 최종 점수는 53점으로 나타나 지반함물 위험 등급은 양호한 지반(Ⅲ)으로 평가되었다(Table 6). 인접된 B현장의 평가결과와 비교시 비교적 낮은 점수를 보이고 있는데 이는 흙의 종류가 지반함물 위험도가 높은 SM-SW로 구성되고 상대밀도와 수리지질과 관련된 영향인자의 평가 점수가 낮게 부여된 결과이다.

Table 6. Sample calculation of GSRp for Site C

Categories (cate)	Factors (F)	Scores for each factor (Si)	Weighting (Xi)	F (Si) = Si * Xi	Cate (S) = (Xi · Si)
Existence of cavity (CV)	Depth of cavity	-	50%	-	-
	Thickness of cavity	-	50%	-	
Soil+Rock (SR)	Depth of boundary	-	100%	-	-
	Type	29	37%	10.73	
Soil (SL)	SPT (N)	12	22%	2.64	49.61
	Water content	90	19%	17.10	
	Liquid limit	87	22%	19.14	
	Type of rock	-	42%	-	
Rock-mass (RM)	Distance to main fracture	-	31%	-	-
	RQD	-	27%	-	
	Groundwater level above planned excavation bottom	58	73%	42.34	
Hydrogeology (HG)	Distance to main channel	13	11%	1.43	50.65
	Permeability	43	16%	6.88	
External factors (EF)	Pipeline	100	100%	100.00	100
Ground condition	Categories	Weighting (Yi)	Cate (S) * Yi	GSR rating	
P2	Soil (SL)	40%	19.844	53 (Ⅲ)	
	Hydrogeology (HG)	55%	27.858		
	External factor (EF)	5%	5.000		

나머지 11개 사례현장에 대한 지반함물 위험등급 평가결과는 Table 7과 같으며 구체적인 GSRp 계산과정은 지면관계상 생략하였다. 12개 현장의 지반함물 위험등급 분류 결과는 전반적으로 Ⅱ~Ⅲ 등급의 우수 내지 양호한 지반으로 평가되었다.

Table 7. Ground subsidence evaluation results (GSRp)

Site (area)	Excavation depth (m)	Ground condition	Soil or rock type	Groundwater level (G.L. -m)	Score (ratings)
A (Sinpung-myeon)	9.0	Soil (0.0~1.3 m)	GW-GM granitic gneiss	2.7	66 (Ⅱ)
		Soil+Rock (1.3~9.0 m)			
B (Geumsan-gun)	6.0	Soil (0.0~5.1 m)	SW-SM granite	1.5	71 (Ⅱ)
		Soil+Rock (5.1~6.0 m)			
C (Geumsan-gun)	8.0	Soil	SW-SM	2.3	53 (Ⅲ)
D (Geumsan-gun)	6.0	Soil	SM	1.5	62 (Ⅱ)
E (Geumsan-gun)	6.7	Soil	SW-SM	1.2	50 (Ⅲ)

Table 7. Continued

Site (area)	Excavation depth (m)	Ground condition	Soil or rock type	Groundwater level (G.L. -m)	Score (ratings)
F (Sejong)	14.0	Soil	SP-SM	9.4	55 (Ⅲ)
G (Sejong)	24.0	Soil (0.0~18.7 m) Soil+Rock (18.7~24.0 m)	SM, ML, SP granite	6.4	44 (Ⅲ)
H (Daejeon)	16.0	Soil	SM, CL, SP	7.8	61 (Ⅱ)
I (Cheonan)	14.6	Soil	SM	9.9	60 (Ⅲ)
J (Gimje)	4.4	Soil	SM, CL	1.9	61 (Ⅱ)
K (Daejeon)	8.8	Soil	GM, SM	2.3	53 (Ⅲ)
L (Cheongju)	6.6	Soil	SM	6.3	64 (Ⅱ)

지반함몰 위험등급과 계측결과의 비교

지반함몰 위험등급 분류결과의 신뢰도 검증을 위하여 실측된 수평변위량과 침하량을 계산된 GSRp값과 비교·분석하였다.

굴착진행에 따른 지반변위는 지반을 구성하는 지반특성 뿐만 아니라 흙막이 벽체의 공법에 따른 강성, 지지방식의 종류나 거치 지점, 굴착속도 등에 따라 차이가 발생하며, 일반적으로 굴착심도와 비례하여 증가한다. Peck(1969)과 Long(2001)은 굴착 중 지반침하하는 조건이 같다면 시공정도와 가시설 지보재의 종류에 따라 달라지고 흙의 연경도, 흙막이 공법의 종류, 굴착 바닥의 용기(base heave)에 대한 안전율과 관련이 크다고 발표하였다. Clough and O'Rourke(1990)는 굴착 심도에 대한 흙막이 벽체의 수평 변위와 침하와의 관계에 대해 단단한 점토, 잔적토, 모래지반의 경우 흙막이 벽체에서 발생하는 최대 변위량은 굴착 심도의 0.15~0.5%로 제시하였다.

굴착 전 지반함몰 위험 등급 평가가 이루어진 현장에 대하여, 지중경사계를 이용한 수평변위량과 지표침하계에 의한 지반침하량을 측정하여 지반함몰 위험등급 평가 점수와 비교 분석하였다. 지중경사계는 천공장비를 이용하여 가시설 벽체에 1 m 이내에 이격하여 설치하고 굴착심도보다 2 m 이상 근입시켜 최하부 고정점이 굴착 중 토압의 영향으로 유동되지 않도록 고정하였다. 지중경사계는 측정센서를 측정관에 삽입하여 심도별 수평변위를 계측하였다. 지표침하계는 측정핀을 지중경사계 설치 위치와 근접한 지표면에 고정시켜 설치하고 오토레벨을 이용한 수준측량을 통해 침하량을 산출하였다. 이때, 기준이 되는 고정점은 굴착지점과 충분히 이격시켜 굴착작업에 따른 영향을 받지 않도록 하였다.

평가가 진행된 현장에 대한 계측결과, Table 8에서와 같이 굴착심도에 대한 수평변위는 0.03~0.24%로 나타나 Clough and O'Rourke(1990)의 연구 결과보다 다소 안전측의 변위량을 보이고 있다. I현장은 굴착심도가 14.6 m이고 어스앵커 지지와 C.I.P.공법이 적용된 구간과 굴착심도 7.0 m이고 레이커(raker) 지지와 H-Pile + 토류판 공법이 적용된 2개 구간으로 나뉘어 공사가 진행되었다. 두 구간에 대한 계측결과를 살펴보면, 굴착심도가 깊은 구간보다 얇은 지반에서 더 큰 변위발생을 보이고 있으며, 지반변위는 지지방식이나 흙막이 벽체의 강성, 시공 상태 등과 매우 높은 관련이 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 지반침하나 함몰에 대한 위험도가 유사하더라도 위험도를 감소시키기 위해서는, 선 굴착 후 시공이 진행되는 레이커방식이나 토사유출이나 지반과의 여굴 발생이 큰 H-Pile + 토류판 공법의 적용은 되도록 피하고 선행하중이 재하된 어스앵커 방식과 강성벽체를 적용하는 것이 바람직하다는 것을 의미한다.

지표침하량과 지하수위 변화와의 관계를 보면, 굴착 중 지하수위 변화가 1 m 이상 비교적 큰 폭의 변화를 보인 현장 중 A현장을 제외하고 대부분 침하 발생도 굴착심도 대비 0.08~0.24%로 타 현장에 비해 크게 나타나고 있어 지하수위 변화가 지반함몰 위험도 평가에 매우 중요한 영향인자로 작용함을 알 수 있다.

Table 8. Field measurement results

Site	GSR	Excavation depth (m, H)	Horizontal displacements		Settlement		Groundwater level			Earth retaining structures
			dh (mm)	dh/H (%)	dv (mm)	dv/H (%)	Initial (G.L-m)	Lowest (G.L-m)	dw (m)	
A	66	9.0	9.49	0.11	-3	-0.03	3.28	6.70	-3.42	H-pile & timber lagging wall with earth anchors
B	71	6.0	1.69	0.03	-1	-0.02	1.54	1.63	-0.09	
C	53	8.0	11.72	0.15	-4	-0.05	4.85	5.31	-0.46	Strutted sheet pile wall due to high groundwater level
D	62	6.0	14.43	0.24	-11	-0.18	1.95	3.40	-1.45	
E	50	6.7	6.28	0.09	-1	-0.01	3.97	4.10	-0.13	
F	55	14.0	25.21	0.18	-11	-0.08	13.55	15.72	-2.17	Augered cast in place pile with strut and earth anchors
G	47	24.0	27.19	0.11	-23	-0.10	7.76	9.31	-1.55	
H	61	16.0	17.40	0.11	-	-	14.17	14.80	-0.63	Augered cast in place pile + H-pile & timber lagging wall with strut
I	60	14.6	34.20	0.23	-35	-0.24	4.66	6.95	-2.29	Augered cast in place pile with earth anchors
		7.0	319.74	4.57	-	-	4.56	5.25	-0.69	H-pile & timber lagging wall with raker
J	61	4.4	1.555	0.04	-10	-0.23	1.40	1.32	0.08	Strutted sheet pile wall
K	53	8.8	19.11	0.22	-15	-0.17	4.72	6.55	-1.83	Soil cement wall with strut
L	64	6.6	7.27	0.11	-7	-0.11	6.94	7.58	-0.64	H-pile & timber lagging wall with strut

Fig. 1과 같이 계측결과에 따른 수평변위 및 지반침하량을 굴착심도에 대한 비율로 비교해보면, 지반함몰 평가 결과와 지반변위와의 뚜렷한 상관성은 보이지 않는다. 이러한 이유는 GSRp 평가에는 굴착공법의 종류나 차수 공법적용 여부, 품질관리나 굴착속도 등 굴착과정에서의 관련 인자에 대한 평가가 고려되지 않았기 때문이다. 굴착 전 지반함몰 위험등급이 높게 평가된 경우에도 지반 특성을 적절히 반영한 흙막이 공법의 선정이나 철저한 품질관리에 의한 시공이 이루어진다면 지반함몰 위험도를 낮출 수 있음을 의미하며, 굴착공사로 인한 지반함몰을 방재하기 위해서는 굴착 중 시공과정에서의 관련 인자들을 굴착 단계별로 재평가하여 굴착 전 지반함몰 위험등급 평가를 보정할 필요가 있다.

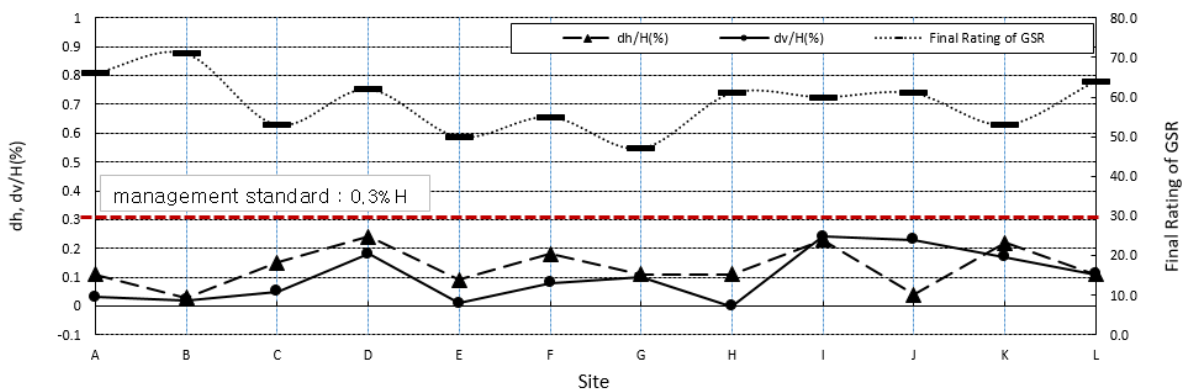


Fig. 1. Comparison of GSRp with field measurements.

굴착 전 지반함몰 위험등급 평가시트의 현장 적용 과정에서 공동과 관련된 영향인자는 12개 현장 모두에서 확인되지 않았다. 만약 굴착 전 조사과정에서 공동이 확인될 경우에는 그라우팅 등에 의한 방법으로 즉시 보강작업을 시행한 후에 공사가 진행되어 위험 요소가 해소되는 것이 일반적이므로, 굴착 전 지반함몰 평가에 있어 공동과 관련된 인자는 제외하였다. 공동 존재 여부와 관련된 카테고리를 제외함에 따라 지반함몰 영향인자는 당초 6개 카테고리, 14개 영향인자에서 5개 카테고리, 12개 영향인자로 평가항목을 수정하였다(Table 9). Table 9에서는 카테고리 내 영향인자들의 가중치 변화는 없으나 공동과 관련된 카테고리가 제외됨으로서 나머지 5개 카테고리의 가중치에 대한 수정이 반영되었다. 지반조건은 Table 10과 같이 공동과 관련된 조건이 제외되어 흙과 암반의 경계를 측정할 수 있는 지반(P1), 모두 흙으로 이루어진 지반(P2), 모두 암반으로 이루어진 지반(P3)으로 간단하게 구분되며, 당초 지반조건에 따라 가중치를 설정하였기 때문에 공동과 관련된 지반조건들만 삭제될 뿐 3가지 지반조건에 따른 가중치 변동은 없다. Table 1에서 제시한 영향인자의 등급 점수 산정시트도 등급 경계 지점에 대한 점수 배점을 명확히 하면서 점수를 연속적으로 부여하기 위하여, 회귀분석 관계식을 이용하여 Table 11과 같이 보완하였다.

Table 9. Modified weights for ground subsidence risk rating for pre-excitation

Categories (cate)	Factors (F)	Number of citations		Weighting (Xi)		Cate (S) = (Xi · Si)
Soil+Rock (SR)	Depth of boundary	3	3	100%	1%	DB = Si
	Type	24		38%		TS = 0.37 Si
Soil (SL)	SPT (N)	14	64	22%	30%	RS = 0.22 Si
	Water content	12		19%		WC = 0.19 Si
	Liquid limit	14		22%		LL = 0.22 Si
	Type	22		42%		TR = 0.42 Si
Rock-mass (RM)	Distance to main fracture	16	52	31%	24%	DF = 0.31 Si
	RQD	14		27%		RQD = 0.27 Si
	Groundwater level above planned excavation bottom	10		73%		GL = 0.73 Si
Hydrogeology (HG)	Distance to main channel	14	88	11%	41%	DDC = 0.11 Si
	Permeability	64		16%		K = 0.16 Si
External factors (EF)	Pipeline	8	8	100%	4%	PL = Si

Table 10. Modified weights by categories according to ground condition during pre-excitation

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%	$SR_{p1} = 0.01 \times \text{Cate (S)}$
		Soil (SL)	30%	$SL_{p1} = 0.30 \times \text{Cate (S)}$
		Rock mass (RM)	24%	$RM_{p1} = 0.24 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	41%	$HG_{p1} = 0.41 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	4%	$EF_{p1} = 0.04 \times \text{Cate (S)}$
P2	All soil conditions without cavities	Soil (SL)	40%	$SL_{p3} = 0.40 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	55%	$HG_{p3} = 0.55 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	5%	$EF_{p3} = 0.05 \times \text{Cate (S)}$
P3	All rock mass conditions without cavities	Rock mass (RM)	35%	$RM_{p4} = 0.35 \times \text{Cate (S)}$
		Hydrogeology (HG)	59%	$HG_{p4} = 0.59 \times \text{Cate (S)}$
		External factor (EF)	5%	$EF_{p4} = 0.05 \times \text{Cate (S)}$

Table 11. Modified scores by grade for GSRp factors

Categories	Factors	Score by grade								
		100 (safe)				(danger) 0				
1. Soil+ Rock-mass	1-1. Depth of boundary between soil and rock-mass (m)	< 5				5~30				> 30
	Score by grade	93				-3.44 × (Depth of Boundary) + 110				7
	2-1. 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		
2. Soil	2-2. Relative density/ Degree of compaction: SPT (N)	50				49~1				0
	Score by grade	100				N×2 = 98~2				0
	2-3. Water content (%)	< 15				15~55				> 55
	Score by grade	90				-2.0 × (Water Content) + 120				10
	2-4. Liquid limit (%)	< 35				35~90				> 90
	Score by grade	87				-1.35 × (LL) + 134				13
3. Rock-mass	3-1. 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	
	3-2. Distance to main fracture (m)	50				49~2				1
	Score by grade	100				2 × (Distance) = 98~4				2
		If fault or fault zone or fracture zone, or brittle shear zone exist								
	3-3. RQD (%)	100~81		80~61		60~41		40~21		20~0
	Score by grade	RQD value = Score								
4. Hydro geology	4-1. Distance to main channel (m)	> 400				100~400				< 100
	Score by grade	87				0.247 × (Distance) - 11.67				13
		If a main channel exist								
	4-2. 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	
	4-3. Groundwater level above planned excavation bottom (dw, m)	< 1				1~20				> 20
	Score by grade	92				-4.42 × (dw) + 96				8
5. External factors	5-1. Pipelines	No pipeline	Ground level of pipelines ≤ -20 m		-20 m < Depth < -1 m			Ground level of pipelines < 0 m		
	Score by grade	100	90		-4 × (-Depth) + 10			10		

수정된 지반함몰 위험등급 평가시트를 이용하여 현장에 재 적용한 결과, Table 12와 같이 E, G, J 및 K 현장 등에서 소폭의 증감을 보이고 있으며, 영향인자의 등급 평가가 관계식에 따라 등급 점수를 부여함으로써 보다 객관적인 평가가 이루어질 수 있게 되었다.

Table 12. Ground subsidence reevaluation results

Site	Excavation depth (m)	Ground condition	Original score		Reevaluation score	
A	9.0	Soil (0.0~1.3 m)	66	II	68	II
		Soil+Rock (1.3~9.0 m)				
B	6.0	Soil (0.0~5.1 m)	71	II	70	II
		Soil+Rock (5.1~6.0 m)				
C	8.0	Soil	53	III	56	III
D	6.0	Soil	62	II	60	III
E	6.7	Soil	50	III	54	III
F	14.0	Soil	55	III	55	III
G	24.0	Soil (0.0~18.7 m)	44	III	49	III
		Soil+Rock (18.7~24.0 m)				
H	16.0	Soil	61	II	60	III
I	14.6	Soil	60	III	57	III
J	4.4	Soil	61	II	55	III
K	8.8	Soil	53	III	65	II
L	6.6	Soil	64	II	64	II

굴착 중 지반함몰 위험등급 보정

굴착 전 지반함몰 위험등급 분류방법은 사전에 진행된 지반조사 결과를 반영하여 평가가 진행된다. 그러나 사업부지가 넓고 지층 구성이 복잡한 경우에는 지반상태를 정확하게 파악하여 평가를 진행함에 한계가 있다. 정확한 지반 정보를 바탕으로 평가가 이루어진 경우에도 설계상의 오류나 시공 상태, 지층의 심도에 따라 지반특성이 변화됨으로 굴착 단계에 따라 평가 점수가 달라질 수 있다. 따라서 굴착 진행 중에 굴착 심도에 따라 지반함몰 위험성에 영향을 미치는 인자들을 재평가하여 굴착 전 평가된 위험등급 점수를 보정할 필요가 있다. 굴착 중 재평가된 인자들은 굴착 전 평가된 지반함몰 위험등급 점수에 적절히 반영해야 한다. Table 13은 Park et al.(2017)이 지반함몰과 관련된 국내외 200여 편의 논문과 다수의 외국 정부기관 분석 자료를 검토하여 제시한 영향인자 인용회수를 기준으로 가중치를 부여한 결과이다. 굴착 전 지반함몰 위험등급 최종 점수 100점을 기준으로 굴착 중 재 평가된 인자들의 보정비율을 단어빈도(Term Frequency) 가중치에 따라 40%로 설정하고 각 인자별 가중치를 적용하여 지하수위 변동, 계측결과, 흙의 종류에 대한 보정 점수를 산정하면 각각 20점, 12점, 8점이 된다. 가중치는 계산상 편의를 위하여 10단위로 정리하였다.

Table 13. Weights for correction of the risk rating of ground subsidence during excavation

Sort in order of influence	Influence factors	Number of citations	Correction weight		
			All	Factors	Score
1	Fluctuation of groundwater	58	40% (37%)	50% (47%)	20
2	Measuring results during excavation	40		30% (33%)	12
3	Type of soil	24	-	20%	8
	etc.	205	-	-	-
Total		327	-	-	40

각 영향인자의 등급은 영향정도에 따라 3단계로 나누어 평가한다(Table 14). 지반침하의 가장 주요 원인으로 조사된 지하수 변동은 일일변화량 1 m/day를 가장 위험한 단계로 설정(Seoul Metropolitan City, 2016)하고 변화량을 단계별로 분배하여 등급 분류한다. 지하수 유출은 굴착진행 중 흙막이 벽체나 굴착 저면에서 육안관찰 등을 통해 유출 정도에 따라 젖음, 물방울 떨어짐, 흐름으로 분류한다. 지하수와 관련된 인자의 평가는 굴착 전 지하수위를 고려하여 적용된 차수공법의 적성성이나 시공 상태를 점검함으로써 지반함몰 위험도를 보정하는 과정이다. 지하수 유출시 토립자를 포함하는 경우에는 지하공동이나 지반함몰의 위험성이 높아지므로 토립자를 포함하는 정도에 따라 물방울 떨어짐의 경우 최대 -10점, 흐름이 관찰되는 경우 최대 -15점을 보정한다. 흙막이 벽체의 수평변위나 지반침하량은 일반적으로 굴착 중에 별도 외주 용역으로 시행하는 계측결과를 분석하여 평가에 반영할 수 있다. 일반적으로 흙막이 벽체의 수평변위나 지반침하는 지반특성이나 흙막이 벽체의 강성, 지지공법에 따라 변위량의 차이가 있으나 대체로 굴착심도에 비례하여 발생한다. 지반함몰 위험도 평가가 진행된 12개 현장에 대한 계측결과와 Clough and O'Rourke(1990)가 제시한 변위량을 기준으로 수평변위와 지반침하에 대한 분류 기준은 굴착심도의 1/300을 안정영역으로 설정하고 1/100을 흙막이 벽체 안정성의 한계치로 정하였다. 점토와 실트 같은 세립토는 지하수위의 변화에 민감하게 반응하고, 점토와 실트 이외에 유기질 토양 역시 지반침하에 큰 영향을 줄 수 있다. 갑자기 발생하는 지반 함몰이나 파괴와 같은 형태는 침식에 민감한 세립질의 균질하고 느슨한 모래가 지하수위 변화나 흐름과 함께 유출되어 발생하므로 굴착 진행 중 노출되는 흙의 구성 상태를 파악하여 굴착 전 평가결과를 보정한다.

Table 14. Correction of the risk rating of ground subsidence during excavation

Category		Score by grade							
Fluctuation		h < 0.5 (m/day)		0.5 < h < 1 (m/day)			1 (m/day) < h		
Rating (F1)		0		-2			-5		
Ground water	General condition	Wet	Dripping			Flowing			
			Contents of soil particle			Contents of soil particle			
				None	Slight	High	None	Slight	High
Rating (F2)		0		-2	-5	-10	-5	-10	-15
Horizontal displacement (dh)		dh ≤ H/300		H/300 < dh ≤ H/100			dh > H/100		
Rating (F3)		0		-3			-6		
Settlement (dv)		dv ≤ H/300		H/300 < dv ≤ H/100			dv > H/100		
Rating (F4)		0		-3			-6		
Soil type		Coarse grained soil		Low plastic silt & clay			High plastic silt & clay (peat)		
Rating (F5)		0		-4			-8		
GSR = GSRp + (F1+F2+F3+F4+F5), 0 ≤ GSR ≤ 100									

H: Excavation depth, h: Groundwater level change after applying retaining walls.

굴착 중 지반함몰 위험등급 보정은 버팀보 거치 단계나 해체 단계 시점에서 노출된 지반상태나 계측결과를 참고하여 평가하고 각 항목별 등급에 따른 평점 결과를 합산하여 굴착 전 지반함몰 위험등급 평가점수를 보정할 수 있다. Table 15는 굴착 완료 후 노출된 지반상태와 계측결과를 기준으로, Table 12에서 제시한 GSRp에 대하여 굴착 중 지반함몰 위험등급을 반영하여 보정한 결과이다. J현장의 경우, 물이 흐르는 정도의 지하수 유출은 있었으나 흙 입자를 포함하지 않고(-5점) 노출된 흙은 실트질 점토(-4)로 분류되어 보정점수는 -9점으로 가장 큰 보정 폭을 나타내었으며, 전반적으로 -9~0점의 보

정이 이루어져 최종 지반함몰 위험등급 점수(GSR_e)는 44~66점으로 나타났으나 지반등급의 변동은 없다.

일반적으로 지반 상태는 심도별로 불 균질한 경우가 많으므로 굴착 중 지반함몰 위험등급 점수의 보정은 굴착 저면이 지하수위 하부까지 진행된 이후부터 굴착 완료시까지 일정단계마다 진행하고, 지하수위의 변동 폭이 크거나 지하수 유출 시 흙 입자를 포함하는 경우에는 그 빈도를 높이는 것이 권장된다.

Table 15. Results of GSR_p correction considering excavation stages

Site	Excavation depth (m)	Ground condition	GSR _p		GSR _e		
					Correction	Final score	
A	9	Soil (0.0~1.3 m) Soil+Rock (1.3~9.0 m)	68	II	-2	66	II
B	6	Soil (0.0~5.1 m) Soil+Rock (5.1~6.0 m)	70	II	-5	65	II
C	8	Soil	56	III	-5	51	III
D	6	Soil	60	III	-5	55	III
E	6.7	Soil	54	III	-5	49	III
F	14	Soil	55	III	0	55	III
G	24	Soil (0.0~18.7 m) Soil+Rock (18.7~24.0 m)	49	III	-5	44	III
H	16	Soil	60	III	0	60	III
I	14.6	Soil	57	III	-5	52	III
J	4.4	Soil	55	III	-9	46	III
K	8.8	Soil	65	II	-2	63	II
L	6.6	Soil	64	II	0	64	II

토의

지반함몰 위험등급 평가 현장을 대상으로 계측결과를 분석한 결과, 수평변위는 굴착심도의 0.03~0.24%, 지반 침하는 0.01~0.24%로 나타났다. 전반적으로 수평변위 및 지반침하량이 굴착심도의 0.3% 이내의 안정적인 지반거동만을 나타내고 있어 굴착 전 지반함몰 위험도 평가 결과에 의한 II~III 등급(우수한 지반~양호한 지반)과 유사한 결과를 보인다. 그러나 지반함몰 위험성 평가 점수와 계측결과 사이의 뚜렷한 상관성은 보이지 않는다. 이는 굴착 전 지반함몰 위험등급 평가 도구는 지반특성과 지하수, 매설관로 유무 등의 인자들만 고려된 반면, 가시설 벽체나 배면지반의 지반 변위는 지반을 구성하는 특성뿐만 아니라 흙막이 공법이나 지지공법의 종류, 차수공법 적용 여부, 품질관리, 굴착속도 등과 더 관련성이 높다. GSR_p와 계측결과의 상관성이 낮은 것은 연구가 진행된 현장들은 대체로 지반 특성을 잘 반영하여 적절한 흙막이 공법의 적용과 시공이 이루어졌음을 의미한다.

굴착 중 발생하는 지반함몰을 예방하기 위해서는 지반함몰 위험성이 높은 지반에 대해서는 H-Pile + 토류판 공법이나 레이크 방식 등 배면지반의 토사 유출이나 과변위 발생 우려가 있는 공법 적용은 피하는 것이 바람직하며, 현장의 지반 특성을 고려한 적절한 흙막이 공법을 적용하고 철저한 품질관리에 따라 시공이 이루어지는 것이 중요하다. 또한 굴착 진행 단계에 따라 관련된 영향인자를 재평가함으로써 굴착 전 지반함몰 위험등급 분류결과를 보정할 필요가 있다. 굴착 중에 발생하는 지반함몰은 지반특성 뿐만 아니라 적절한 굴착 공법 선정과 시방에 따른 철저한 품질관리 여부가 변수로 작용할

수 있으므로 설계상의 오류나 부적절한 시공에 대한 각 분야별 전문가의 평가 결과를 반영하는 것이 중요할 수 있다. 또한 지반분류나 상대밀도와 같이 정성적인 평가항목은 시험에 의하지 않을 경우 평가자의 주관적 판단에 의해 평가 결과가 달라질 수 있음에 유의할 필요가 있다.

시공 중 지반함몰 위험도 평가는 방법과 절차가 복잡하거나 과도한 비용과 시간이 요구되는 경우에는 공사비 증액이나 공기 연장으로 이어져 사업자와 시공업체에 부담이 될 수 있고 결국 형식적인 요식행위로 전락할 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 일반적으로 흙막이 구조물 공사에서 수행되는 지반조사결과를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구 결과는 공사 전의 굴착공법을 포함한 흙막이벽 선정이나 공사 중의 지반함몰 위험성 평가에 활용하는 것이 권장되며, 향후 위험등급이 낮은 지반을 포함한 더 많은 사례연구를 통하여 개선해 나갈 예정이다.

결론

굴착 전 지반함몰 위험등급 분류방법은 6개 카테고리의 14개 영향인자를 대상으로 가중치에 따라 지반 등급을 분류한다. 굴착 전 지반함몰 위험등급 분류방법은 굴착 현장에 적용하여 실용성과 신뢰성을 검증하는 과정에서 공동과 관련된 카테고리를 삭제하여 5개 카테고리와 12개 영향인자만으로 평가할 수 있도록 평가시트를 개선하였다. 지반조건 또한 기존 6개 조건에서 3개 조건으로 간략하게 수정하였다. 굴착 전 지반함몰 위험등급 분류 결과는 굴착진행 중 굴착 심도에 따라 변화되는 영향인자를 재평가하여 최종 결과를 보정함으로써 오차를 보완할 수 있다. 굴착 중 지반함몰 위험등급 분류 결과의 보정을 위하여 기존의 연구결과와 현장 적용성 등을 종합적으로 검토하여 지하수 변동 및 유출 상태, 수평변위 및 지반침하량, 흙의 종류 등 3개의 재 평가인자를 도출하였다. 추가적인 비용 부담 없이 일반적으로 수행되는 지반조사결과를 활용하여 지반함몰 위험등급 평가를 할 수 있으므로 대규모 굴착현장 뿐만 아니라 비교적 관리감독이 소홀한 소규모 현장에서도 활용도가 높을 것이라고 판단된다. 본 연구에서 제안한 평가 방법에 따라 현장에서 적절한 조치가 신속하게 이루어진다면 지반침하 및 함몰 사고 예방에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 지속적인 현장적용 사례를 통하여 본 연구결과에 대한 검증과 보완이 필요하다.

References

- Clough, G.T., O'Rourke, T.D., 1990, Construction induced movements of in-situ walls, Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Special Conference, Ithaca, New York, 439-470.
- 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).
- Long, M., 2001, Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(3), 203-224.
- 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).
- Peck, R.B., 1969, Deep excavation and tunneling in soft ground, State-of-the-Art Report, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 225-290.
- Seoul Metropolitan City, 2016, Manual of construction site groundwater management, 60p.
- Shin, S.S., Ihm, M.H., Kim, H.J., 2019, Case studies of ground subsidence risk ratings (GSRp) applied to the excavation sites, The Journal of Engineering Geology, 29(3), 289-302 (in Korean with English abstract).