

굴착의 안정성에 미치는 영향인자 분석을 위한 전자기적 유전상수와 체적함수비와의 상관관계 분석기법 연구

한유식* · 손희정 · 류기정

한국지반공학회 지반공학연구소

Relationship Analysis of Volumetric Water Content According to the Dielectric Constant for Stability Analysis of Ground Excavation

Yushik Han*, Hee Jeung Sohn, and Ki Cheong Yoo

Geotechnical Engineering Research Institute, Korean Geotechnical Society

요약: 지반 굴착에 따른 지하수위 저하로 인해 발생하는 지반함몰 문제는 지하수 흐름에 대한 이해를 바탕으로 한 해석적인 접근이 필요하다. 이 연구에서는 실내 토질시험 결과를 이용하여 유전상수와 체적함수비 상관식에 대한 여러 경험식의 적합성을 비교 검토하였으며, 수치연산을 통해 GPR 탐사를 이용한 유전상수 추정방법에 대해 검토하였다. 사질 토 지반에 대해 굴착에 따른 침투해석과 응력-변형률 해석을 실시하였으며, 기존 실내시험 연구결과와 비교한 결과, 불포화도에 대한 침투압을 고려한 응력해석 결과에서 불포화지반의 모관흡입력 값을 유사하게 예측하였다.

주요어: 지표투과레이더, 체적함수비, 유전상수, 침투해석

Abstract: In order to prevent ground collapses by groundwater level drawdown, we need to understand the groundwater flow and also make an analytical approach to the cause of the collapses. In this study, we used the result of the soil lab tests to compare and review the suitability of the various interaction equations about the relation between volumetric water content and the dielectric constant. In addition, using GPR (Ground-Penetrating Radar), we reviewed the possibility of calculating an estimate of dielectric constant. Lastly, we applied seepage analysis and stress-strain analysis to the sandy ground given by ground excavation. In comparison with the previous result of the soil lab tests, we similarly predicted the suction of unsaturated soil from results of stress-strain analysis considered the seepage force for the unsaturated soil.

Keywords: GPR (Ground-penetrating radar), volumetric water content, dielectric constant, seepage analysis

서론

도시의 발달로 인하여 도심지에서 대규모 지반굴착 공사 사례는 급증하고 있으며, 굴착공사 시 공사현장 또는 인접구조물 및 시설물이 붕괴되는 사고도 빈번히 발생하고 있다. 현재 우리나라에는 굴착공사에 따른 지하안전영향을 예측·평가하고, 지반침하(함몰) 위험도를 평가하는 구체적인 방법 등이 없는

실정이다. 중앙정부에서는 체계적인 지하안전관리와 제도 시행을 위해서 2015년 12월에 지하안전관리에 관한 특별법을 제정하고, 지하안전관리에 대한 체계적인 제도를 마련하고 있다.

국내의 지반굴착공사 시 주요 붕괴원인으로는 1. 지반조사의 불충분, 2. 가시설 구조체 불안정, 3. 보일링, 허빙에 대한 굴착바닥면의 불안정, 4. 차수, 배수 등의 지하수 처리 미흡에 따른 불안정, 5. 시공상의 실수, 6. 과다굴착으로 인한 붕괴, 7. 사면활동으로 인한 붕괴, 8. 관리 소홀에 따른 붕괴 등으로 나누고 있다(KISTE, 2010).

국내의 굴착공사 붕괴사고의 가장 큰 원인은 Fig. 1에서 보 인바와 같이 설계단계에서 지반조사 부실로 인하여 발생한 사고이며, 이는 지반조사에 있어 암반의 각종 불연속면의 강도, 방향성 등에 대한 조사는 심도 있게 진행하지 않기 때문으로 판단된다. 또한, 대규모건축물 기초터파기 공사 시, 양수를 목적으로 하는 무분별한 지하수 유출은 주변지반의 지하수 흐름을 변하게 하고 지반 내 유효응력을 증가하게 하여 지표침하

Received: 18 August 2016; Revised: 26 August 2016;

Accepted: 26 August 2016

*Corresponding author

E-mail: shikrush@naver.com

Address: RM. #1201, Seocho World Officetel. 19, Seoun-ro, Seocho-gu, Seoul, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

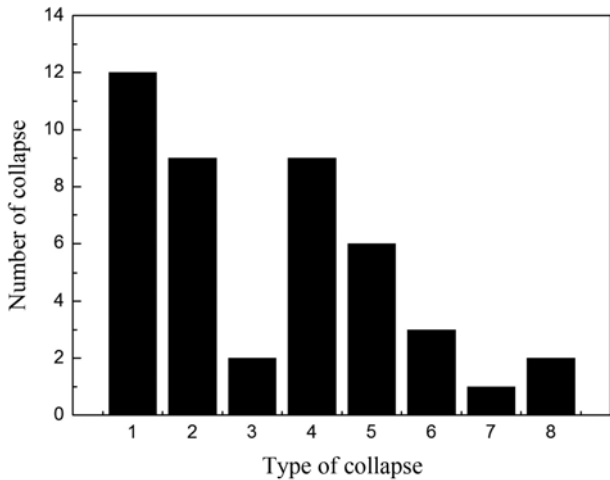


Fig. 1. Type of collapse analysis for construction sites.

(함몰)의 원인이 된다.

지반함몰의 원인인 지하수 흐름을 조사하기 위한 물리탐사 방법에는 다양한 방법이 있으며, 그중에서도 GPR 탐사를 이용한 지하수위 심도 및 변화 등에 관한 연구(Endres *et al.*, 2000; Hargey and Müller, 2000; Lu and Sato, 2004; Pyke *et al.*, 2008; Kuroda *et al.*, 2009; Kim and Kim, 2013)는 현재 활발하게 수행되고 있다. 특히, 지반굴착 분야에서 GPR 탐사 기법을 통해 체적함수비를 도출하고 이에 따른 지하수위 변화를 예측하여 지반굴착의 안정성을 확보하는 연구가 최근 들어 많은 관심을 가지고 있다.

2000년 초에 이르러 GPR은 다양한 분야에 응용되기 시작했으며, Hargey (2000)는 지하수면과 토양수분함량의 측정과 관측에 대한 연구를 수행했으며, Endres (2000)와 Lu (2004)는 양수시험 시 자유면대수층의 공간적 반응과 수리특성에 관하여 연구를 수행하였다. Lu (2004)는 지하수면의 수리전도도와 함수량의 수리특성을 분석했으며, Pyke (2008)는 동역학적 지하수면으로부터 GPR 반사면의 원인을 판정하기 위해 실내시험을 수행하였다. Kuroda (2009)는 지하수 인공함양에 따른 불포화대(vadose zone)의 시간경과에 따른 침투과정과 함수량의 공간적 분포에 대한 연구를 수행하였다.

GPR 탐사에서 레이더파의 전파속도에 큰 영향을 미치는 유전상수는 지하매질의 체적함수비와 밀접한 관련이 있으며, 실내시험을 통해 유전상수와 체적함수비의 상관관계를 규명하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. Topp (1980), Shen (1985), Siddiqui and Drnevich (1995)는 현장 시료로부터 실내시험을 통해 유전상수를 도출하는 경험식을 제시하였으며, Topp (1980), Malicki (1996), Sabouroux and Ba (2001)는 시료의 유전상수로부터 체적함수비를 도출하는 경험식을 제시하였다.

이 연구에서는 실트질과 사질성분의 2가지 현장 시료에 대해 실내시험을 통해 기본물성값을 측정하였으며, 각 시료의 기본물성값으로부터 유전상수를 산출하는 경험식과 유전상수로

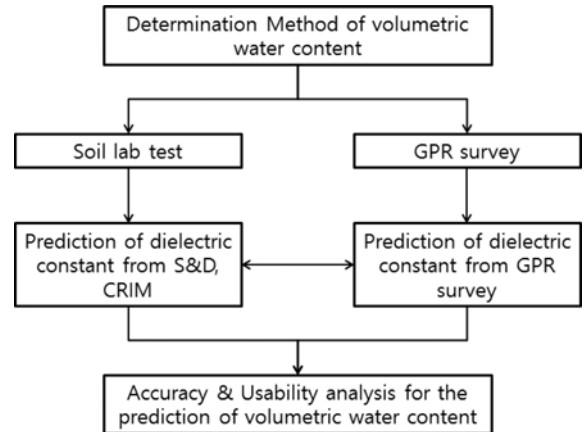


Fig. 2. Flowchart for estimating volumetric water content from dielectric constant (This study).

부터 체적함수비를 산출하는 경험식을 적용하여 적합성을 검토하였다. 또한, 수치모델링을 통해 GPR 탐사로부터 지하매질의 유전상수를 도출하는 여러 가지 방법에 대해 비교 검토하였다. Fig. 2는 실내시험과 GPR 탐사를 통해 유전상수와 체적함수비를 유추하는 방법에 대한 모식도이다. 마지막으로 지반 수치해석을 통해 불포화지반에서 지반굴착 시 모관흡입력에 따른 지반거동의 특성을 분석하였으며, 불포화지반에서의 체적함수비와 모관흡입력간의 상관관계에 대해 고찰하였다.

실내시험에 의한 유전상수 및 체적함수비 결정

유전상수와 체적함수비의 관계를 고찰해 보면 유전상수는 조직, 밀도, 온도, 용존염도에 별다른 영향을 받지 않고 체적함수비에 매우 민감한 반응을 보인다(Park, 1998).

고체, 액체 및 기체가 섞여있는 3상 시스템 특성, 흙의 밀도와 중량함수비를 고려하여 유전상수와 체적함수비를 예측하기 위해 본 연구에서 적용한 관계식을 Table 1에 정리하였다.

Topp (1980)는 모래질 톱(sandy loam), 점토질 톱(clay loam), 유리구슬(glass bead) 시료에 대하여 1 MHz ~ 1 GHz 주파수 범위에서 함수비를 변화시켜가며 실내실험을 수행하였으며, 식 (1)과 같이 유전상수(ϵ_r)와 체적함수비(θ_v)의 관계를 3차 다항식으로 도출하였다(Lee, 2002). 여기서 톱은 통상 화산재가 퇴적되어 형성된 풍성층으로 모래, 실트와 점토가 거의 균등하게 들어 있는 흙을 지칭하며, 습기가 있으면 점착성이 커져서 점성토의 특성이 커진다.

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.03 \theta_v + 146 \theta_v^2 - 76.6 \theta_v^3 \tag{1}$$

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \tag{2}$$

CRIM (Complex Refractive Index Method) 식은 3상(공기, 흙 입자, 물)의 mixing 모델을 토대로 유도된 식으로 식 (3)과

Table 1. Formular for the dielectric constant and the volumetric water content used this study.

	Formular	Parameters
Topp <i>et al.</i> (1980)	$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146\theta_v^2 - 76.6\theta_v^3$ $\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3$	ϵ_r = dielectric constant θ_v = volumetric water content
CRIM eq. (Shen <i>et al.</i> , 1985)	$\sqrt{\epsilon} = \phi(1-S_w)\sqrt{\epsilon_a} + \phi S_w \sqrt{\epsilon_w} + (1-\phi)c_{lv}\sqrt{\epsilon_{cl}} + (1-\phi)(1-c_{lv})\sqrt{\epsilon_s}$	ϵ = dielectric constant ϕ = porosity c_{lv} = volumetric clay ratio S_w = water saturation ϵ_a = dielectric constant of air ϵ_s = dielectric constant of sand ϵ_{cl} = dielectric constant of clay ϵ_w = dielectric constant of water
Malicki <i>et al.</i> (1996)	$\theta = \frac{0.5\epsilon_a - 0.818 - 0.618\rho_b + 0.159\rho_b^2}{7.17 + 1.18\rho_b}$	θ = volumetric water content K_a = dielectric constant of soil ρ_b = bluk density
Siddiqui and Drnevich (1995)	$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw$ Song (2015)은 특성보정상수 $a = 0.80616$, $b = 9.0542$ 제안	K_a = dielectric constant of soil ρ_w = density of water ρ_d = dry density of soil a, b : compensation constant
Sabouroux and Ba (2011)	$\theta_{ref} = \frac{\epsilon_{ref}^{0.5} - (1-\phi) \times \epsilon_s^{0.5} - \phi - \epsilon_a}{\epsilon_w^{0.5} - \epsilon_a^{0.5}}$	θ_{ref} = volumetric water content ϵ_{ref} = dielectric constant of soil ϵ_a = dielectric constant of air ϵ_s = dielectric constant of sand ϵ_w = dielectric constant of water ϕ = porosity

같이 흙의 상대유전율을 각 성분의 상대유전율과 부분 체적비로 나타낸다(Shen *et al.*, 1985). CRIM 식은 다양한 종류의 흙 시료에 적용 가능한 장점을 가지는 반면에, 측정주파수에 따른 유전상수의 변화는 고려하지 않는다(Lee, 2002).

$$\sqrt{\epsilon} = \phi(1-S_w)\sqrt{\epsilon_a} + \phi S_w \sqrt{\epsilon_w} + (1-\phi)c_{lv}\sqrt{\epsilon_{cl}} + (1-\phi)(1-c_{lv})\sqrt{\epsilon_s} \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 공극율, c_{lv} 는 점토체적비율, S_w 는 포화도, ϵ_a 는

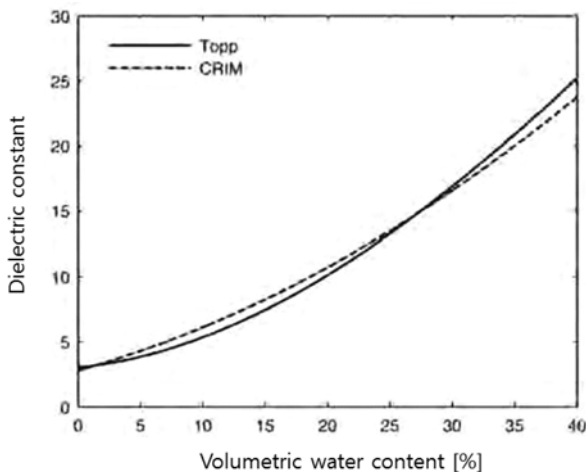


Fig. 3. The modelled dielectric constant using Topp's equation (solid line) and CRIM (dashed line) for sandy soil. The porosity and dielectric constant of the soil matrix are assumed to be $\phi = 40\%$ and $\epsilon_s = 4.5$, respectively (Shen *et al.*, 1985).

공기의 유전상수, ϵ_s 는 모래의 유전상수, ϵ_{cl} 는 점토의 유전상수, ϵ_w 는 물의 유전상수를 나타낸다.

Topp 제안식과 CRIM 식을 이용한 사질토에 대한 유전상수 분포 특성은 Fig. 3와 같다.

CRIM 식은 점성토와 유기질토 지반에서는 적용하기가 부적절하나, GPR 주파수 범위(10 MHz ~ 1.0 GHz)에서 함수비가 5 ~ 50%인 사질토 지반에서는 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다(Park, 1998). 이에 Malicki *et al.* (1996)는 다양한 종류의 흙(62가지: 사질토, 점토, 유기질토 등)에 대한 유전상수를 측정하여 흙의 밀도 효과를 고려한 관계식을 제안하였다.

$$\theta = \frac{K_a^{0.5} - 0.818 - 0.618\rho_b + 0.159\rho_b^2}{7.17 + 1.18\rho_b} \quad (4)$$

여기서, K_a 는 흙의 유전상수, ρ_b 는 흙의 밀도(g/cm^3)이다.

Siddiqui and Drnevich (1995)는 중량함수비로 이루어진 식 (5)과 같은 선형 보정방정식을 제안하였고, 이는 다양한 흙에 대해 만족스러운 결과를 보여주었다(Sallam *et al.*, 2004, Song, 2015).

$$\sqrt{K_a} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (5)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도(g/cm^3), ρ_d 는 흙의 건조밀도(g/cm^3), a 와 b 는 흙의 특성보정상수, w 는 중량함수비이다.

Song (2015)은 Siddiqui and Drnevich (1995)의 제안식을 바탕으로 함수비를 0 ~ 10% 범위에서 변화시켜 화강풍화토 및

주문진 표준사를 대상으로 검증실험을 진행하여 특성보정상수 a 는 0.80616, b 는 9.0542를 제안하였다.

Sabouroux and Ba (2011)은 CRIM 모델과의 유사성 분석을 위해 600 MHz, 1 GHz 안테나를 사용하여 젖은 흙 샘플의 체적함수비와 유전상수와의 상호관계식을 제안하였다.

$$\theta_{ref} = \frac{\epsilon_{ref}^{0.5} - (1-\phi) \times \epsilon_s^{0.5} - \phi \times \epsilon_a}{\epsilon_w^{0.5} - \epsilon_a^{0.5}} \quad (6)$$

여기서, θ_{ref} 는 흙의 체적함수비, ϵ_{ref} 는 흙의 유전상수, ϵ_a 는 공기의 유전상수, ϵ_s 는 흙의 유전상수, ϵ_w 는 물의 유전상수, ϕ 는 간극비이다.

국내에서도 Topp식과 CRIM 모델의 한계성을 극복하기 위해 현장토를 활용하여 다양한 중량함수비(5% ~ 30%)를 갖는 모형토조를 구성하고, 주파수 900 MHz 및 1.0 GHz 안테나를 이용하여 5.22 ~ 38.87의 유전상수를 측정하였다(Oh, 2009).

본 연구에서는 점성토와 사질토 2가지 종류의 흙시료에 대해 Topp 제안식, CRIM 식과 Siddiqui and Drnevich (1995)가 제안한 식을 바탕으로 유전상수를 추정하는 방법과 Topp 제안식, Malicki (1996)와 Sabouroux and Ba (2001)가 제안한 식을 바탕으로 체적함수비를 추정하는 방법에 대해 고찰하였다. 체적함수비 산정을 위한 흙의 물리적 성질은 우리나라 전역에 널리 분포하는 현장토로 MH, SP 두 가지에 대해서 검토하였다(Table 2). 샘플 A는 #200체 통과량 50% 이상의 실트성분의 고소성의 흙(MH)이고, 샘플 B는 #200체 통과량 50% 이하의 사질 성분이 많은 비소성 흙(SP)이다. Table 2는 실내시험을 통해 측정된 샘플 A와 샘플 B의 기본 물성값을 정리한 것으로 샘플 A의 체적함수비는 34.1%, 샘플 B의 체적함수비는

20.9%로 측정되었다.

Table 3은 식 (1), 식 (3)과 식 (5)를 이용하여 시료의 기본 물성값으로부터 유전상수를 추정된 결과이며, Table 4는 식 (2), 식 (4)와 식 (6)을 이용하여 Table 3의 유전상수로부터 체적함수비를 추정된 결과이다. 실트성분의 고소성의 흙(MH)인 샘플 A의 유전상수는 17.9 ~ 21.1의 값을 가지며, 체적함수비는 식 (2)에 의해 31.8 ~ 36.0%, 식 (4)에 의해 28.1 ~ 31.7%, 식 (6)에 의해 27.0 ~ 31.6% 범위의 값을 보인다. 사질 성분이 많은 비소성 흙(SP)인 샘플 B의 유전상수는 10.6 ~ 11.5의 값을 가지며, 체적함수비는 식 (2)에 의해 20.0 ~ 21.8%, 식 (4)에 의해 18.6 ~ 20.0%, 식 (6)에 의해 19.1 ~ 20.0% 범위의 값을 보인다.

경험식별로 체적함수비 추정값을 비교해보면 Topp 제안식에서는 실제 체적함수비와 유사한 범위의 값이 추정되었으며, Malicki 식과 Sabouroux 식에서는 실제 체적함수비에 비해 낮은 값으로 추정되는데 실트질 성분인 샘플 A에서 좀더 큰 편차를 보여주고 있다. 또한, 실트질 성분의 샘플 A에서는 Topp 제안식을 이용하여 유전상수와 체적함수비를 추정할 경우에 실제 체적함수비와 가장 근사한 값이 추정되었으며, 사질 성분의 샘플 B에서는 CRIM 식을 이용하여 유전상수를 추정하고 Sabouroux 제안식을 이용하여 체적함수비를 추정할 경우에 실제 체적함수비와 가장 근사한 값이 추정되었다.

GPR 모델링에 의한 유전상수 추정

GPR 탐사 기법은 군사적, 상업적인 목적으로 많은 발전을 이루어 왔으며, 실질적인 GPR 조사는 1920년대에 빙하의 깊

Table 2. Physical properties of soils (Park, 2014).

Samples	Specific gravity	Grain size distribution (%) (0.074mm)	Void ratio	Plasticity index (%)	Field unit weight (kN/m ³)	Dry unit weight (kN/m ³)	Field water content (%)	Vol. water content (%)	USCS
A	2.65	62.6	0.87	18.3	16.5	12.1	24.0	34.1	MH
B	2.60	1.4	0.54	-	18.0	14.0	12.4	20.9	SP

Table 3. Prediction of relative dielectric constant (ϵ_r) from soil laboratory test (CRIM: C, Siddiqui: S, Topp: T).

Samples	ϵ_r			Volumetric clay ratio (%)
	Topp (식 1)	CRIM (식 3)	Siddiqui (식 5)	
A	20.1	21.1	17.9	62.6
B	10.7	11.5	10.6	1.4

Table 4. Prediction of volumetric water content (θ_v) from soil laboratory test (Malicki: M, Sabouroux: P, Topp: T).

Samples	θ_v (%) (Topp, 식 2)			θ_v (%) (Malicki, 식 4)			θ_v (%) (Sabouroux, 식 6)		
	C→T	T→T	S→T	C→M	T→M	S→M	C→P	T→P	S→P
A	36.0	34.7	31.8	31.7	30.6	28.1	31.6	30.2	27.0
B	21.8	20.1	20.0	20.0	18.7	18.6	20.9	19.2	19.1

이를 결정하는데 이용된 이후 1950년대까지 별다른 발전을 이루어 내지 못했다. 1980년대에 들어 전기, 전자 기술의 급격한 발달로 지오레이다(georadar)라는 용어와 함께 물리탐사 분야에서 활용도가 높아지기 시작하였으며 현재 GPR System은 지하수 수위와 같은 지하매질을 영상화(imaging mode)하는 고해상도 탐사기술에 사용되고 있다(Cho, 1999).

GPR 탐사에서 레이더파는 송신안테나에서 지하매질로 방사되며 전자기적 물성차이를 갖는 이상체에서 반사된 레이더파를 수신안테나에서 측정하여 지하매질의 물성, 이상체의 분포 양상과 심도 등을 추정한다. 지하매질 내 레이더파의 전파속도는 일반적으로 식 (7)과 같이 유전상수에 의해 결정되며, 따라서 레이더파의 속도만 알면 지하매질의 유전상수를 추정할 수 있다.

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

여기서 V 는 지하매질에서의 레이더파 속도, C ($= 3 \times 10^8$ m/sec)는 공기 중에서의 레이더파 속도이며, ϵ_r 은 유전상수(상대 유전율)이다.

GPR 탐사에서 천부 지하매질에서의 레이더파의 전파속도를 추정하는 방법에는 다양한 방법이 있으며, 그 중 대표적인 방법을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)는 지표직하부 직접파의 도달주시를 이용하는 방법, Fig. 4(b)는 반사면의 깊이를 알고 있는 경우에 적용되는 방법, Fig. 4(c)는 회절반사체가 존재하는 경우에 적용하는 회절근사법, Fig. 4(d)는 수평반사면이 있는 경우에 적용하는 공통중간점(CMP, Common Mid Point) 방법을 도시한 것이다.

Fig. 4(a)는 레이더파 속도를 산출하는 가장 간단한 방법으로 송수신 안테나의 이격거리를 멀리하면서 지표직하부 직접파의 도달시간을 이격거리로 나눠줘서 속도를 산출하는 방법을 나타낸다.

Fig. 4(b)는 반사면의 심도를 알고 있는 경우에 적용되는 방법으로 수신기에서 측정된 레이더파의 왕복주시로부터 식 (8)을 이용하여 속도를 산출할 수 있다.

$$2 \times \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + h^2} = V \times t \quad (8)$$

여기서 x 는 송수신 안테나의 이격거리, h 는 반사면의 심도, t 는 레이더파의 왕복주시이다.

Fig. 4(c)는 지하매질물과 같은 회절반사체가 존재하는 경우에 적용하는 회절근사법을 도시한 것으로 탐사자료에서 왕복주시법과 반사 쌍곡선법을 이용하여 해석하는 방법이다. Fig. 4(c)에서 회절반사체 직상부에서 반사파의 왕복주시가 t_0 , 직상부에서 x 만큼 떨어진 곳에서 반사파의 왕복주시가 t 라고 할 때 레이더파 속도는 식 (9)로부터 계산할 수 있다.

$$V = \frac{x}{\sqrt{(t/2)^2 - (t_0/2)^2}} \quad (9)$$

만약에 Fig. 4(c)와 같이 회절반사체가 존재하지 않는 경우에는 수평반사면에 대한 공통중간점 탐사를 통해 회절근사법을 적용할 수 있다. Fig. 4(d)는 수평반사면에 대한 공통중간점 탐사를 도시한 것으로 공통중간점에서 송신안테나 및 수신안테나의 이격거리가 x 라고 할때 식 (9)를 적용하여 레이더파 속도를 산출할 수 있다.

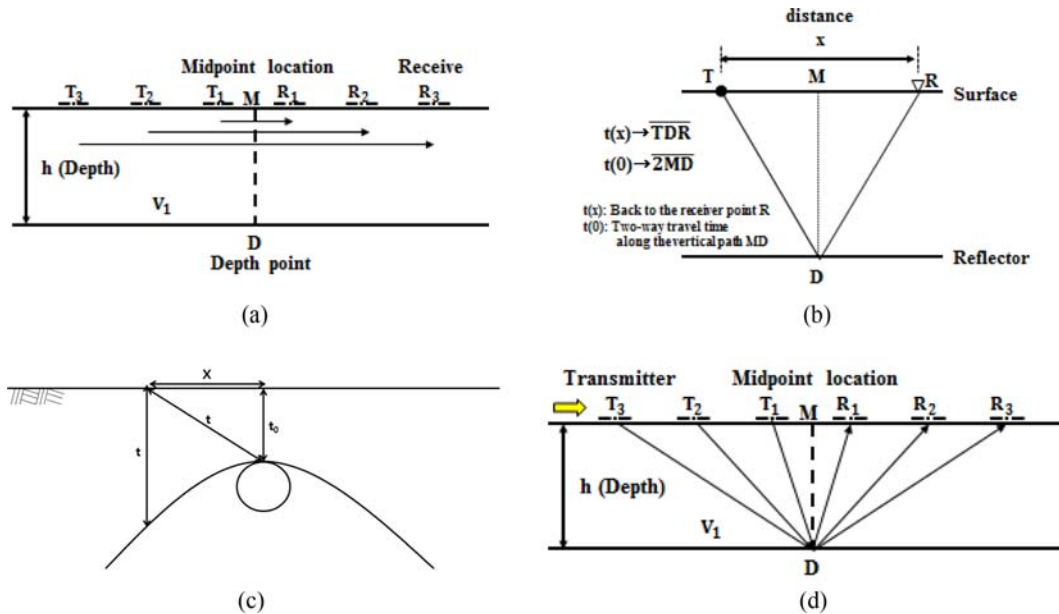


Fig. 4. GPR configuration (a) Direct wave travel time from T-R offset distance (b) Two-way travel time from horizontal reflector (c) Schematic illustrations of hyperbolic pattern, and (d) CMP gather for a single horizontal reflector (Diffraction approximation) (Fisher et al., 1992).

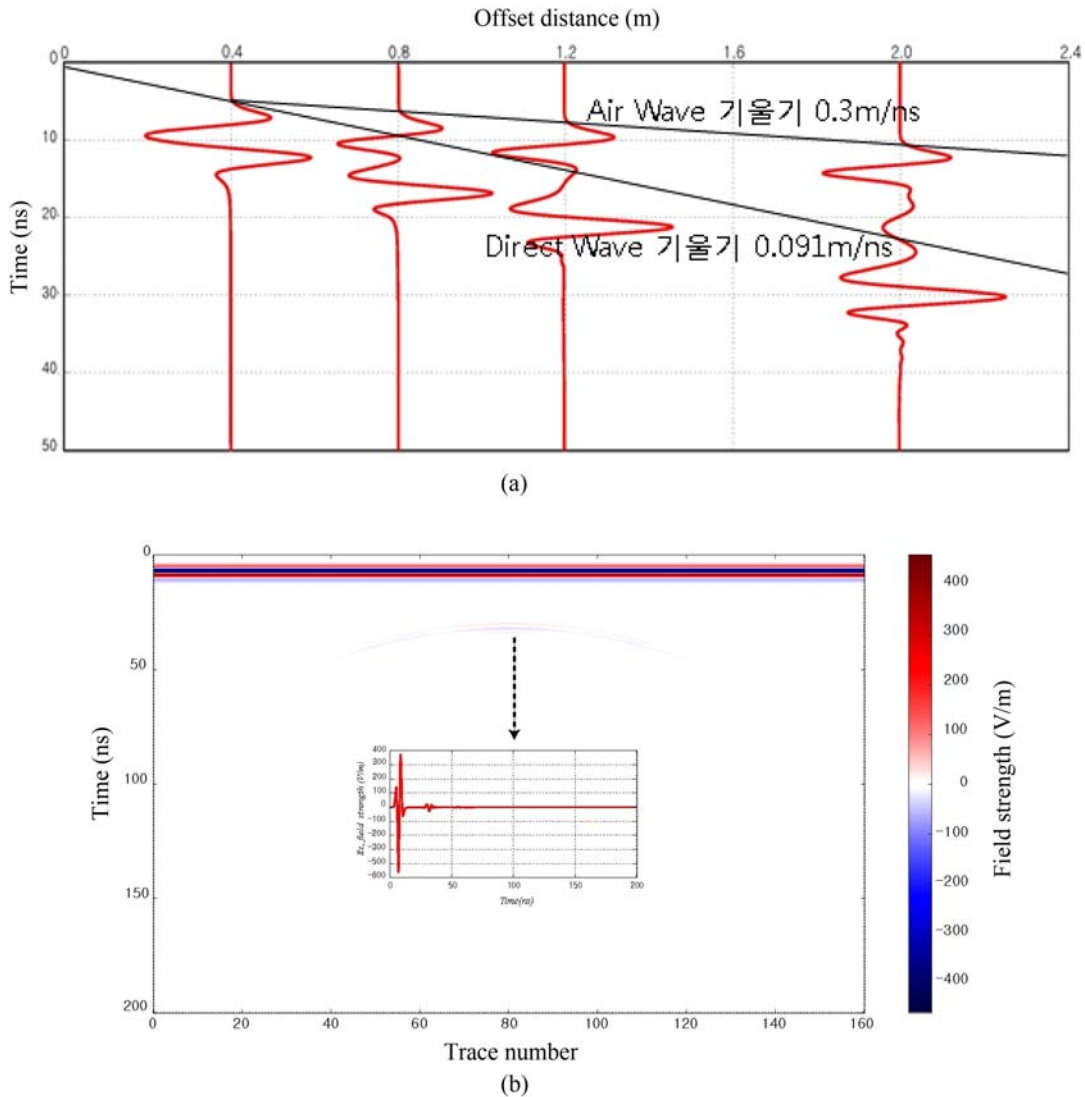


Fig. 5. Synthetic radargrams (a) Estimation of direct wave velocity due to the offset distance (b) Schematic illustrations of hyperbolic pattern (Diffraction approximation, radius 0.5 m).

Fig. 4에서 제시한 레이더파 속도 산출방법의 적용성 검토를 위해 2차원, 3차원 유한차분 시간영역 수치모델링 프로그램인 gprMax를 이용하여 수치모델링을 수행하였다. 지하매질 모델 크기는 8 m × 6 m, 유한차분 격자수는 200(개) × 150(개)이며, 격자 간격은 4 cm로 일정한 간격을 유지하였다. 송신원은 중심주파수가 200 MHz인 Ricker Waveform을 사용하였으며, 송수신기의 이격거리는 4 cm로 하였으며, 인공반사파를 제거하기 위해 PML (Perfect Matched layer) 흡수경계조건을 적용하였다.

Fig. 5(a)는 유전율이 10.9인 수평반무한 매질에 대해 송수신 안테나 이격거리를 0.4 m, 0.8 m, 1.2 m, 2.0 m로 멀어지도록 설정하여 계산된 수치연산 결과이다. 레이더파 그래프를 보면, 가장 먼저 공기 중으로 전파된 직접파가 도달하고 그 이후에 지표면을 따라 전파된 직접파가 도달한다. 지표 직하부 직접파

의 도달시간은 각각 4.5 ns, 8.7 ns, 13.0 ns, 22.0 ns이며 이로부터 계산된 레이더파 속도는 0.091 m/ns이다. 레이더파 속도를 식 (7)에 적용하면 유전상수는 10.87로 계산되어 지하매질의 유전상수 10.9와 거의 일치된 값을 얻을 수 있다. 직접파를 이용한 유전상수 추정방법은 지표면을 따라 전파하는 직접파를 이용하므로 지하매질 조건의 영향을 받지 않고, 탐사 및 계산방법이 매우 단순하여 직하부 매질의 유전상수 추정에 매우 효과적인 방법이다.

Fig. 5(b)는 유전율이 10.9인 수평반무한 매질 내 1.5 m 심도에 회절반사체가 존재하는 모델에 대한 수치연산 결과이다. 포물선 모양의 반사파에 대해 Fig. 4(c)에 도시한 회절근사법을 적용하였으며, 산출된 유전상수는 11.32이다. 이는 지하매질의 유전상수 10.9와 근소한 차이가 있는데, 이는 송신파형의 주기 5 ns(주주파수 200 MHz)를 고려 할 때 회절파의 도달시간 측

정에 발생한 오차의 영향으로 판단된다.

체적함수비와 모관흡입력의 상관관계 분석

지반수치해석 조건

지반굴착에 따른 지반의 거동을 수치해석적으로 분석하기 위해서는 실제 지반상태를 모사하여야 하지만, 현장상황은 매우 복잡하고 가변적이기 때문에 수치해석에서는 이를 단순화하여 모사한다. 지반굴착에 대한 안정성 평가 시 지하수위 변화는 지반거동에 큰 영향을 미치며, 지반굴착 단계별로 지하수

위 심도를 지정하여 지하수위 변화를 고려한다. 통상적인 흙막이 벽체 설계에서는 굴착영역에 물이 가득 차 있는 것으로 지하수를 모사하는 경우가 많은데, 이 방법은 굴착단계별 지반거동을 분석하는 방법으로는 적합하지 않다. 실제 지반거동에서는 지하수위 변화로 인해 지반내부 물의 흐름에 따라 간극수압이 식 (10)의 관계로부터 변화되며 유효응력에도 영향을 미치게 된다. 또한 실제 지반은 포화상태보다 대부분 불포화상태이며 이러한 지반에서는 음의 간극수압으로 표현되는 모관흡입력이 지반 거동특성에 중요한 역할을 하게 된다.

$$\mu = (h_w + z \pm \Delta h) \gamma_w \tag{10}$$

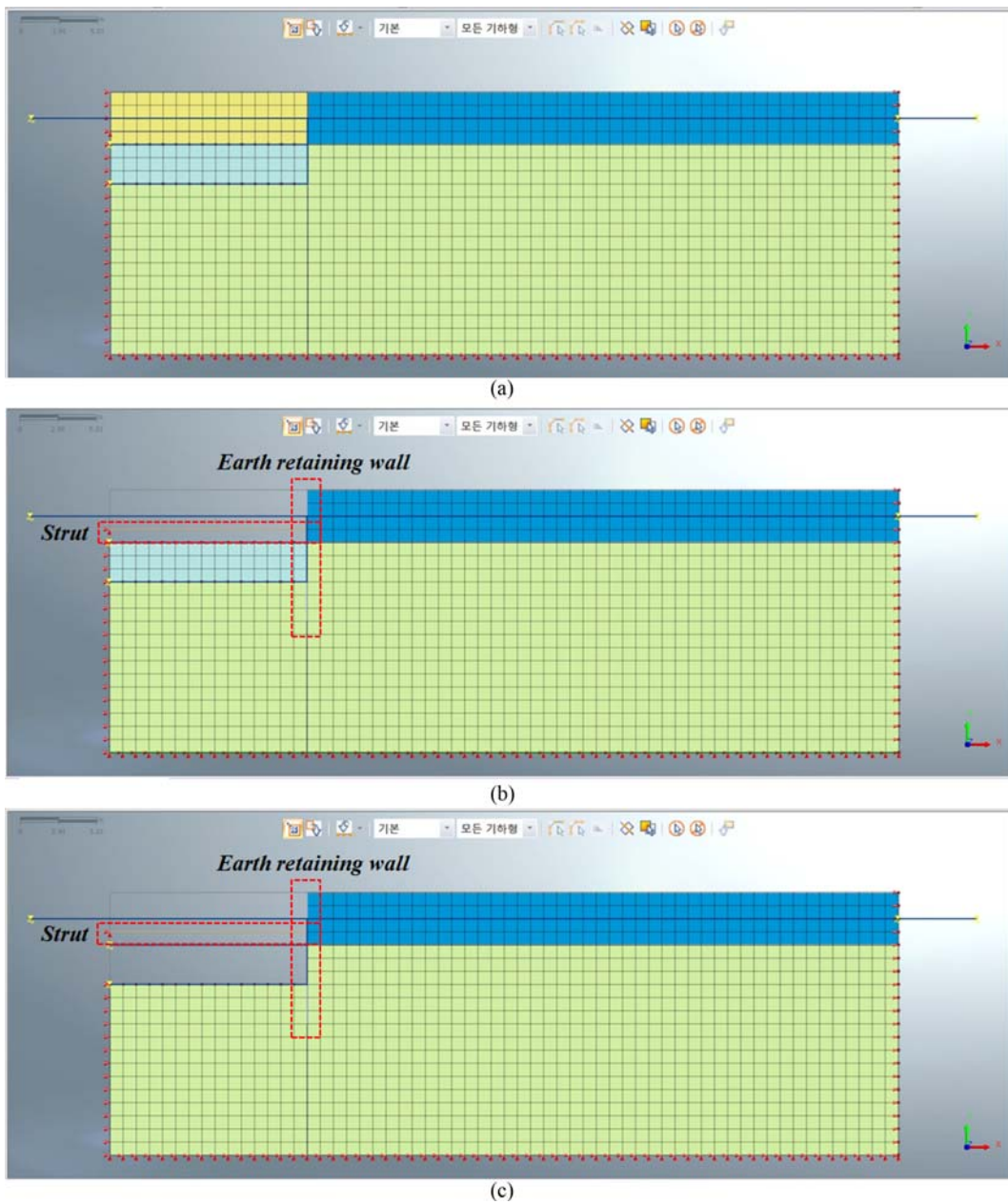


Fig. 6. Analysis for construction phase of ground excavation. (a) Ground modeling, (b) 1st, Ground Excavation, and (c) 2nd, Ground Excavation.

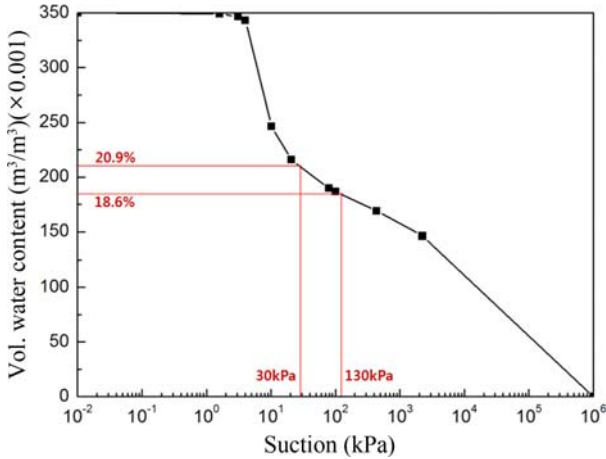


Fig. 7. Soil-water characteristic curve (SWCC).

여기서, μ 는 간극수압, h_w 는 전 수두, z 는 침투거리, Δh 는 수두 차, γ_w 는 물의 단위중량이다.

불포화지반에서 지반굴착 시 모관흡입력에 따른 지반거동 특성을 분석하기 위해 이 연구에서는 3가지 경우에 대하여 수치해석(MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2015)을 실시하였다. 수치해석 단면의 크기는 60 m × 20 m이며, 지표 하부에 4 m 두께의 매립층이 그 하부에 풍화토가 분포하며 지하수위는 지표면 2 m 하부에 분포하는 것으로 설정하였다(Fig. 6(a) 참조). 굴착은 위한 시공단계는 지표면 10 m 아래에 흙막이 벽체의 설치, 4 m 깊이에서 1단 굴착후 3 m 깊이에 스트럿 설치(Fig. 6(b) 참조), 7 m 깊이에서 2단 굴착(Fig. 6(c) 참조)을 하는 것으로 가정하였다.

지하수위변화는 Case 1에서 굴착단계 마다 지하수위를 저하시켜 흙막이 벽체 및 지반에 정수압을 고려하여 응력해석을 실시하였으며, Case 2에서는 굴착단계마다 지반내부 물의 흐름을 고려하여 응력해석을 실시하였다. Case 3에서는 지반조건에 맞는 불포화 함수특성곡선(Fig. 7)과 투수계수곡선(Fig. 8)을 프로그램에 내장된 DB파일(Geo-Slope International Ltd., 2001)을 적용하여, 침투압을 고려한 응력해석을 실시하였다. 이 연구에서의 사용한 불포화 함수특성곡선과 투수계수곡선(Geo-Slope International Ltd., 2001)은 샘플 B (SP)의 특성과 유사한 사질토(Fine sand)의 간극율 35%, 포화시에 투수계수가 4.3×10^{-6} m/s를 가지는 Bruch (1993)의 실내시험에서 얻

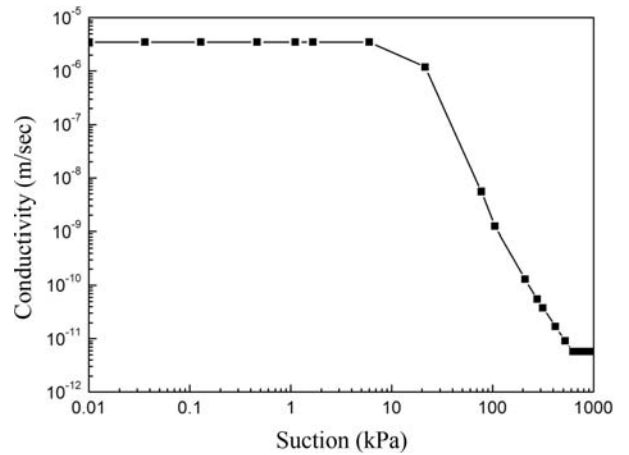


Fig. 8. Unsaturated permeability function.

은 데이터를 이용하여 Fredlund and Xing (1994)이 제안한 식 (11)에 적용하여 함수특성곡선(Fig. 7)을 예측하였고, Green and Corey (1971)가 제안한 식 (12)에 적용하여 불포화투수계수(Fig. 8) 곡선을 예측하였다.

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (11)$$

여기서, θ_s 는 포화체적함수비, ψ 는 모관흡수력, a 는 공기유입값, n 는 변곡점의 경사에 관계된 계수, m 은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

$$k(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \times \frac{30T^2}{\mu g \eta} \times \frac{\xi^p}{n^2} \times \sum_{j=1}^m [(2j+1-2j)h_i^{-2}] \quad (12)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$

여기서, $k(\theta)$ 는 간격 i 번째에 해당하는 체적함수백분율에서의 투수계수, i 는 m 개의 간격에서의 간격 번호, j 는 i 에서 m 까지 수($m = i + j$), k_s 는 포화된 흙에서 측정된 투수계수, k_{sc} 는 포화된 흙에서 계산한 투수계수, T 는 표면 장력, μ 는 물의 밀도, g 는, η 는 물의 점성, ξ 는 포화된 체적함수백분율, n 는 체적함수백분율이 0인 점에서 간격을 나누었을 경우의 총 간격수($n \geq m$), h 는 수두 높이, p 는 실험상수이다.

Table 5. Parameters of geotechnical and structure for the analysis (Samples B).

Material	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m³)	cohesion (kPa)	ϕ (°)	Saturated Hydraulic Conductivity (m/day)
Soil	19000	0.4	17.5	-	30	0.300672
Weathered soil	49000	0.3	18.0	20.0	35	0.008664
Earth Retaining Wall	980000	0.2	24.5	-	-	-
Strut	19000000	0.2	76.5	-	-	-

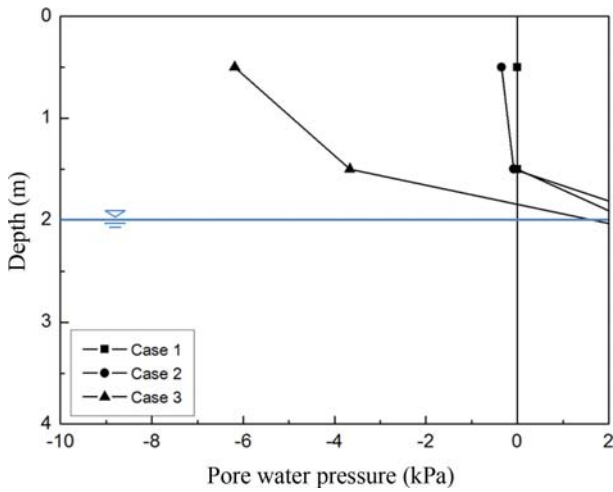


Fig. 9. Pore water pressure of depth 4.0 m.

지반해석결과 및 토의

지반굴착의 안정성에 미치는 영향인자를 분석하기 위해서 3 가지 해석조건에 대해서 지반 해석프로그램(MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2015)을 이용하여 해석을 실시하였다. 굴착시 흙막이 벽체 후면에 작용하는 간극수압은 Fig. 9와 같이 작용하였다. Case1의 경우 불포화지반(심도 2 m 이내)에서의 간극수압은 작용하지 않았으며, Case2의 경우 불포화지반(심도 2m 이내)에서 약간의 간극수압(0.4 kPa)이 작용하였다. Case3의 경우 불포화지반(심도 2 m 이내)에서의 모관흡입력은 약 6 kPa이 작용하였다. 시료 B에 대한 토질실내시험과 GPR 탐사를 통해 산정된 체적함수비를 불포화 함수특성곡선(Fig. 7)에 적용한 결과 모관흡입력은 130 kPa ~ 30 kPa 정도 나타났다. 여기서, 모관흡입력이 0인 경우에는 포화상태를 의미하고, 완전 건조 상태가 되면 모관흡입력은 100,000 kPa 정도의 큰 압력이 작용하게 된다.

지반수치해석 결과와 GPR 탐사를 통해 산정된 모관흡입력은 유사한 경향을 보였으나, 매우 복잡하고 가변적인 현장상황

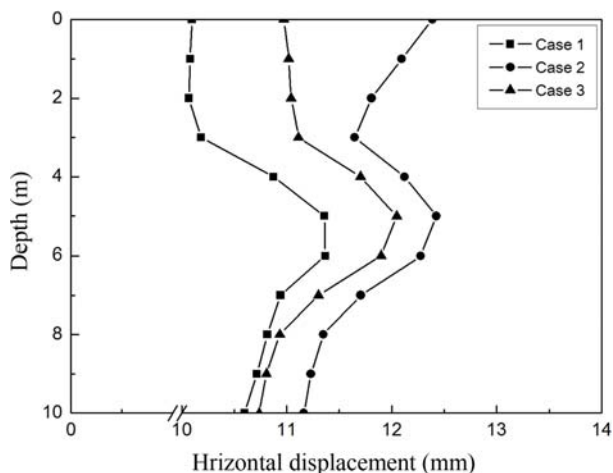


Fig. 10. Horizontal displacement on the earth retaining wall.

및 불확실성이 포함된 지반특성을 수치해석에서 반영하지 못하여 모관흡입력의 절대적인 값은 차이를 보였다.

흙막이 벽체에 작용하는 수평변위는 Fig. 10과 같이 Case2, Case3, Case1 순으로 변위가 크게 발생하였다. 이는 하향침투력에 의해 수평력이 증가하여 수평변위가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 불포화지반에서 굴착 안정성에 미치는 영향인자인 지하수흐름에 대한 분석을 위해 전자기적 유전상수와 체적함수비와의 제시된 상관관계식을 실내 토질시험 결과에 적용하여 대상지반의 유전상수를 산정하고, Malicki (1996) 제안식, Sabouroux (2011) 제안식과 Topp (1980) 제안식에 각각 적용하여 체적함수비를 산출하여 상호비교분석을 실시하였다. 일반적으로 불포화토 지반에서 체적함수비는 레이더파의 왕복 주시와 전파속도의 변화에 영향을 미치며, 레이더파의 왕복주시의 증가는 포화도 증가로 나타난다. 이를 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실트성분의 고소성의 흙(MH)인 샘플 A의 유전상수는 17.9 ~ 21.1이고, 체적함수비는 27.2 ~ 36.0%이며 실내시험에 의한 체적함수비(34.1%)에 비해 대체로 작은 값을 보인다. 사질 성분이 많은 비소성 흙(SP)인 샘플 B의 유전상수는 10.6 ~ 11.5의 값으로 계산되고, 체적함수비는 18.6 ~ 20.9%이며, 이 흙(SP)도 실내시험에 의한 체적함수비(20.9%)와 거의 유사한 값을 보인다.

(2) 실트질 성분의 샘플 A에서는 Topp 제안식을 이용하여 유전상수와 체적함수비를 추정할 경우에 실제 체적함수비와 가장 근사한 값이 추정되었으며, 사질 성분의 샘플 B에서는 CRIM 식을 이용하여 유전상수를 추정하고 Sabouroux 제안식을 이용하여 체적함수비를 추정할 경우에 실제 체적함수비와 가장 근사한 값이 추정되었다.

(3) GPR 탐사 수치연산을 통해 레이더파의 속도와 유전상수를 예측하는 방법을 비교 검토하였으며, 직접파 방법에 의한 유전상수 예측결과는 10.87로 실제 유전상수 10.9와 상당히 일치된 결과를 획득하였다.

(4) 회절근사법을 통해 산출된 유전상수는 11.32이다. 이는 지하매질의 유전상수 10.9와 다소 차이가 있는데, 반사파의 도달시간 측정에 발생한 오차로 판단된다.

(5) 사질토 지반에 대해 지반해석 프로그램을 이용하여 굴착 해석을 실시한 결과 불포화지반에서의 모관흡수력은 약 6 kPa 이 지표까지 작용하였으며, 토질실내시험에서 사질토 샘플 B에서 측정된 체적함수비를 불포화 함수특성곡선(Fig. 7)에 적용한 결과 모관흡수력은 130 kPa ~ 30 kPa 정도 추정되었으며, 지반해석 결과와는 유사한 경향을 보였다.

본 연구에서 검토된 경험식을 근거로 강우에 의한 현장함수

비 증가와 굴착에 의한 지하수위 저하로 인한 유전상수와 체적함수비 변화를 예측할 수 있을 것이며, 국내 지반조건을 고려한 지반정수 ↔ 유전상수 ↔ 체적함수비와의 관계식을 구성하기 위해 실내 토조실험과 현장 GPR 탐사의 적용이 필요한 것으로 판단된다. 앞으로 정밀한 불포화 투수계수곡선과 함수특성곡선의 정밀한 예측을 통해 신뢰도 높은 지반의 거동특성을 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술 연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 15SCIP-B108153-01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Bruch, P. G., 1993, *A laboratory study of evaporative fluxes in homogeneous and layered soils*, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Cassidy, N. J., 2009, *Electrical and magnetic properties of rocks, soils, and fluids*, In: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Jol, H.M., 41-72, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Cho, B. J., 1999, *Depth Evaluation of Solidified Layer in Waste Landfill Using GPR Prospecting Method*, Master's thesis, Yonsei University, 3.
- Childs, E. C., and Collis-George, N., 1950, The Permeability of porous materials, *Proc. Royal Soc.*, **201**, 392-405.
- Daniels, D. J., 2004, *Ground Penetrating Radar (2nd Edition)*, IEE, London
- Endres, A. L., Clement, W. P., and Rudolph, D. L., 2000, Ground Penetrating radar imaging of an aquifer during a pumping test, *Ground Water*, **38**, 566-576.
- Fredlund, D. G., and Xing, A., 1994, Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 521-532.
- Fisher, E., McMechan G. A., Annan, A. P., and Cosway, S. W., 1992, Examples of reverse-time migration of single-channel, ground-penetrating radar profiles, *Geophysics*, **57**, 577-586.
- Geo-Slope International Ltd., 2001, *SEEP/W for finite element seepage analysis, Version 5*, users manual. Calgary, Alta. 408.
- Giannopoulos, A., 2005, *Modelling ground penetrating radar by GprMax*, Construction and Building Materials, 755-762.
- Goodman, D., 1994, Ground-Penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology, *Geophysics*, **59**, 224-232.
- Green, R. E., and Corey, J. C., 1971, Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods, *Soil Science Society of America Proc.*, **5**, 3-8.
- Hagrey, S. A., and Müller, C., 2000, GPR study of pore water content and salinity in sand, *Geophysical Prospecting*, **48**, 63-85.
- Kim, B. W., and Kim, H. S., 2013, Estimation of Groundwater Table using Ground Penetration Radar (GPR) in a Sand Tank Model and at an Alluvial Field Site, *The Journal of Engineering Geology*, **23**, 201-216.
- Kim, M. I., and Makoto, N., 2006, Slope Failure Predicting Method Using the Monitoring of Volumetric Water Content in Soil Slope, *The Journal of Engineering Geology*, **16**, 135-143.
- MIDAS Information Technology Co., Ltd., 2015, *GTS NX V250 - Online Manual*.
- Kim, S. G., and Oh, H. D., 2003, Application of GPR to Prospect Archaeological Remains, *The Journal of Engineering Geology*, **13**, 475-490.
- KISTEC, 2010, *A research for establishing safety management standards on neighboring facilities in accordance with ground excavation*, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, 77-214.
- Kjartansson, E., 1979, Constant Q-Wave Propagation and Attenuation, *Geophys. Res.*, **84**, 4737-4748.
- Kuroda, S., Jang, H., and Kim, H. J., 2009, Time-lapse borehole rata monitoring of an infiltration experiment in the vadose zone, *Journal of Applied Geophysics*, **67**, 361-366.
- Lee, J. H., Oh, M. H., Park, J. B., and Kim, H. S., 2002, Variation of Dielectric Constant of Sand due to Water Content and Measuring Frequency, *Korean Geotechnical Society*, **18**, 129-139.
- Lu, Q., and Sato, M., 2004, Estimation of hydraulic property of unconfined aquifer by GPR, *Proceedings of the Tenth International Conference on*, 715-718.
- Malicki, M. A., Plagge, R., and Roth, C. H., 1996, Improving the Calibration of Dielectric TDR Soil Moisture Determination Taking into Account the Solid Soil, *European Journal of Soil Science*, **47**, 357-366.
- Noh, M. G., Oh, S. H., and Jang, B. S., 2009, Integrated Application of GPR, IE and IR Methods to Detection of the Rear Cavity of Concrete, *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, **13**, 338-346.
- Oh, H. D., and Shin, J. W., 2004, Archaeological Interpretation of GPR Data Applied on Wolseong fortress in Gyeongju, *Journal of the Korean Geophysical society*, **7**, 256-261.
- Oh, J. W., 2009, *Measurement of Moisture Level in soil using Electromagnetic Wave*, Master's Thesis, Yonsei University, 37.
- Park, J. H., 2014, *A Case Study on Weathered Soil Slope Due to Rainfall Characteristic*, Master's thesis, Keimyung University, 28-33.
- Park, S. K., 1998, *Determination of Dielectric Constant for GPR Prospecting*, Master's thesis, Kon-Kuk University, 37-38.
- Pyke, K., Eyuboglu, S., Daniels, J. J., and Vendl, M., 2008, A Controlled Experiment to Determine the Water Table Response Using Ground Penetrating Radar, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **13**, 335-342.
- Sabouroux, P., and Ba, D., 2011, *Epsimu, a tool for dielectric-properties measurement of porous media: Application in wet-*

- granular materials characterization*, Progress In Electromagnetics Research B, **29**, 191-207.
- Sallam, A. M., White, N. K., and Ashmawy, A. K., 2004, *Valauation of the Purdue TDR Method for Soil Water Content and Density Measurement*, Final Report the the Florida Department of Transportation.
- Siddiqui, S. I., and Drmvich, V. P., 1995, *Use of Time Domain Reflectometry for determination of water content and density of soil*, FHWA/IN/JHRP-95-9, Purdue University, West Lafayette, IN
- Shen, L. C., Savre, W. C., Price, J. M., and Athavale, K., 1985, Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies, *Geophysics*, **50**, 692-704.
- Song, M. W., Kim, D. H., and Choi, C. Y., 2015, A New Calibration Equation for Predicting Water Contents With TDR, *J. Korean Geosynthetics Society*, **14**, 59-65.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P., 1980, Electro-magnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resource Research*, **16**, 574-582.
- Turner, G., 1992, GPR and the Effect of Conductivity, *Exp l. Geophys.*, **23**, 381-386.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W., 1996, Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, **33**, 379-392.
- Wang, T., and Tripp, A. C., 1994, Simulation of Electromagnetic Wave Propagation in Three-Dimensional Media by an FDTD Method, *Fifth International Conference on GPR*, 247-267.
- Warren, C., Giannopoulos, A., and Giannakis I., 2015, An advanced GPR modelling framework – the next generation of gprMax, *In Proc. 8th Int. Workshop Advanced Ground Penetrating Radar*.