J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 16(2)225-236(2014)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2014.16.2.225
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

전단파 속도를 이용한 지하 저류조 주변 지반특성 평가

조선아[1] · 오태민[2] · 조계춘[3]*

[1]학생회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
[2]정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 BK21 연구교수
[3]정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 교수

Evaluation of ground characteristics near underground rainfall storage facilities using shear wave velocity

Seon-Ah Jo[1], Tae-Min Oh[2], Gye-Chun Cho[3]*

[1]Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
[2]Member, BK21 Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST
[3]Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

ABSTRACT: Shear wave velocity was used to estimate the geotechnical characteristics (void ratio and shear strength) of ground near an underground rainfall storage facility. An oedometer cell was utilized to measure the shear wave velocity and the displacement of specimens. Shear strengths were obtained by direct shear tests. The relationships along the shear wave velocity, void ratio, and shear strength were verified and used to infer the shear strength profile with the depth. In addition, changes in shear strength due to the construction of the underground rainfall storage system were estimated using the suggested method. The results show that the in-situ shear strength deduced from the shear wave velocity-void ratio-shear strength relationship is in good agreement with that obtained from an in-situ investigation (SPT).

Keywords: Urban underground, Shear wave velocity, Void ratio, Shear strength, Underground rainfall storage

초 록: 본 연구에서는 지하 저류조 설치에 따른 주변지반의 지반공학적인 특성(간극비, 전단강도)을 전단파 속도를 이용하여 예측하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 응력 단계별로 전단파 속도와 밀도 상관관계를 실험을 통해 도출하고 밀도와 전단강도 상관관계를 직접전단실험을 통해 획득하였다. 도출된 응력 단계별 전단파 속도와 밀도 상관관계 및 밀도와 전단강도 상관관계를 바탕으로 현장 전단파 속도를 이용하여 대상 지반의 깊이별 전단 강도를 산정하는 방법을 제시하였으며 제시된 기법을 이용하여 지하 저류조 구조물 적용에 따른 시공후 지반거동을 평가하였다. 제시된 방법으로 도출된 전단강도는 현장실험 결과와 유사한 값을 보이며 지반특성 분석에 적용 가능성을 확인하였다.

주요어: 도심지 지하공간, 전단파 속도, 간극비, 전단강도, 지하 저류조

1. 서 론

도심지 인구 밀도가 증가하면서 이용 가능한 토지의 한계와 기후변화, 사회환경적인 문제들이 제기되고 있다. 특히 부족한 토지확보를 위하여 지하공간으로 활용하고자 하는 노력이 전세계적으로 관심을 받고 있으며 지하공간의 개발이 지속가능한 발전 전략으로 인식되고 있다(Choi et al., 2003; Korea Environment Institute, 2013).

최근에는 공간 확보의 개념과 더불어 지상 환경 보호 및 방재목적으로 지하공간을 활용하는 사례가 늘고 있다. 특히, 도시지역에서는 지하공간을 활용한 지하 저류조 시설을 홍수 및 침수 문제 해결을 위해 활용하고 있으며 관련 기술이 발전하면서 전국적으로 저류조 시설의 설치 확대가 이루어지고 있다(Korea

***Corresponding author:** Gye-Chun Cho
E-mail: gyechun@kaist.ac.kr

Received March 10, 2014; **Revised** March 19, 2014; **Accepted** March 21, 2014

www.kci.go.kr

Copyright ⓒ2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

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

Environment Institute, 2013). 그 예로 2011년 서울시는 '서울시 도시수해안전망 종합개선 대책'을 수립하여 대심도 저류배수시설을 도시홍수 대응시설로 계획하였다.

빗물저류시설과 관련된 연구는 저류시설 설치에 따른 유역의 유출저감 및 침수피해 감소에 관한 효과분석(Choi et al., 2003; Kim et al., 2010; Lee, et al., 2012; Song et al., 2013; Lee et al., 2013) 및 저류조 시설의 적정용량 및 위치 선정을 위한 수치해석이 주로 수행되었다(Son et al., 2010; Kang and Kwon, 2013). 즉, 환경 및 수리수문학적인 관점에서 저류시설의 효과 및 특성 분석에 관한 연구가 주로 수행되고 있으며 지반공학적 안정성 측면에서는 상대적으로 관심이 부족한 실정이다.

지하 저류조 구조물의 시공에 따른 기존 시설물의 안정성은 도심지 지하구조물 설계시 매우 중요한 문제이다. 지하 저류조 시공중 및 시공후 지반의 거동은 기존 구조물의 안정성과 매우 밀접한 관련이 있기 때문이다. 앞으로 이상기후에 따른 폭우 등에 대비하여 빗물 저류조의 설치는 더 많아질 것으로 예상되며 따라서 이에 대한 연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

대규모 지하 저류조 시설의 경우 지하 저류조 구조물의 자중뿐 아니라 빗물 저류에 의한 상재하중의 증가가 상당할 것으로 예상된다. 상재하중 증가는 기초지반의 지지력에 변화 및 지표 침하를 유발하여 지하 구조물뿐만 아니라 지상 구조물의 균열, 파괴 등 심각한 문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 시공후 모니터링을 통해 지반의 시간적 거동 및 안정성을 평가하고 적절한 대책을 세워야 한다.

지반의 안정성 평가를 위한 주요 인자 중 하나는 전단강도이다. 전단강도는 시료를 채취하여 실내실험을 통해 구하는 것이 일반적이나 시료의 채취 및 재성형에는 많은 시간 및 노력이 필요하다. 한편 전단강도 측정을 위한 현장 실험방법들은 전단강도를 획득하기 위하여 필연적으로 지반내로 실험 장비를 관입하여야 하며 이는 대상지반을 교란시켜 유추된 전단강도 결과에 많은 오차를 유발한다.

비파괴 물리탐사는 기존의 현장실험 방법들이 가지고 있는 문제들을 보완하고 시료교란을 방지할 수 있는 방법으로 주목되고 있어 지반조사 분야에서 그 활용이 늘고 있다. 물리탐사 기법중 하나인 탄성파 탐사는 대상 물질의 간극률(porosity), 풍화도(weathering), 강성(stiffness) 등의 물성을 획득하는 방법으로 지반공학 분야에서 널리 이용되고 있다(Lee et al., 2001; Kim et al., 2003; Song, 2013). 또한 최근에는 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole), SPS (suspension PS) 검층, SASW (spectral analysis of surface wave) 등과 같이 탄성파를 이용한 현장 원위치 실험으로 깊이별 전단파 속도 주상도 획득이 가능함을 검증하였다(Sun et al., 2012).

따라서 본 연구에서는 지하 저류조 설치에 따른 대상지반의 지반공학적인 특성(간극비, 전단강도)을 전단파 속도를 이용하여 예측하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 비교적 정형화된 거동을 보이는 사질토 지반에 대해 응력 단계별로 전단파 속도와 밀도의 상관관계를 실험을 통해 도출하고 밀도와 전단강도 상관관계를 직접전단실험을 통해 획득하였다. 도출된 응력 단계별 전단파 속도와 밀도 상관관계 및 밀도와 전단강도 상관관계를 바탕으로 현장 전단파 속도를 이용하여 대상 지반의 깊이별 전단 강도를 산정하는 방법을 제시하였다. 제시된 기법을 이용하여 지하 저류조 구조물 적용에 따른 시공후 지반거동 모니터링을 위한 방법으로 적용성을 평가하였다.

2. 지반공학적 관점에서 지하 저류조 시공에 따른 문제점 파악

도심지 저류시설 설치에 관한 연구는 수리·수문학적 관점에 1990년대부터 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 지하 구조물로서 지하 저류조 안정성 측면에서는 연구가 여전히 미진한 실정이다. 본 연구에서는 지반

www.kci.go.kr

공학적 관점에서 지하 저류조와 주변지반과의 상호거동에 대해 발생할 수 있는 안정성 문제를 다루고자 하였다.

구조물 안정성 평가에 가장 중요한 지반 거동은 변형(침하)과 응력 변화이다. 특히 도심지 지하구조물은 비교적 얕은 심도에 설치되며 얕은 심도의 지반은 대부분 토사 지반으로 지반 변형이 구조물의 거동을 지배하는 주요 인자라 할 수 있다(Kim et al., 1999). 지반 변형을 유발하는 주요 인자는 응력과 간극비의 변화이다. 따라서 지반 변형을 최소화하기 위해서는 지반 응력과 이에 따른 간극비 변화에 대한 관찰 및 이해가 필요하다. 지하 저류조 시공에 따른 지반의 변형과 이로부터 발생할 수 있는 지반공학적 문제들은 다음과 같다(Fig. 1).

- 지하수위가 높은 지반에 지하 저류조 설치시 양압력 변화에 의한 문제
- 저류조 개착 시공후 뒷채움 재료 불량 및 다짐에너지 부족에 의한 침하문제
- 강우 패턴에 상응하는 지하 저류조 저류량 변화 및 이로 인한 상재하중 변화 문제
- 상부 하중(차량 하중, 구조물 하중)에 의한 지반 변형 문제

이와 같은 문제를 파악하기 위해 지하 저류조 지반 주변의 적절한 모니터링이 필요하며 본 연구에서는 지반의 안정성 평가의 중요한 지수인 전단강도 정수 예측을 위해 전단파 속도를 이용한 모니터링 기법을 제시하였다. 또한 제시된 기법의 적용성을 검토하여 지반 거동 및 지하구조물의 안정성 해석의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

3. 현장 지반의 깊이별 간극비 및 전단강도 산정 방안

지반에서의 전단파 전파는 유체의 체적탄성계수에 영향을 받는 압축파와는 달리 유효응력과 지반 입자의 성질에 좌우되며 물의 체적강성에 영향을 받지

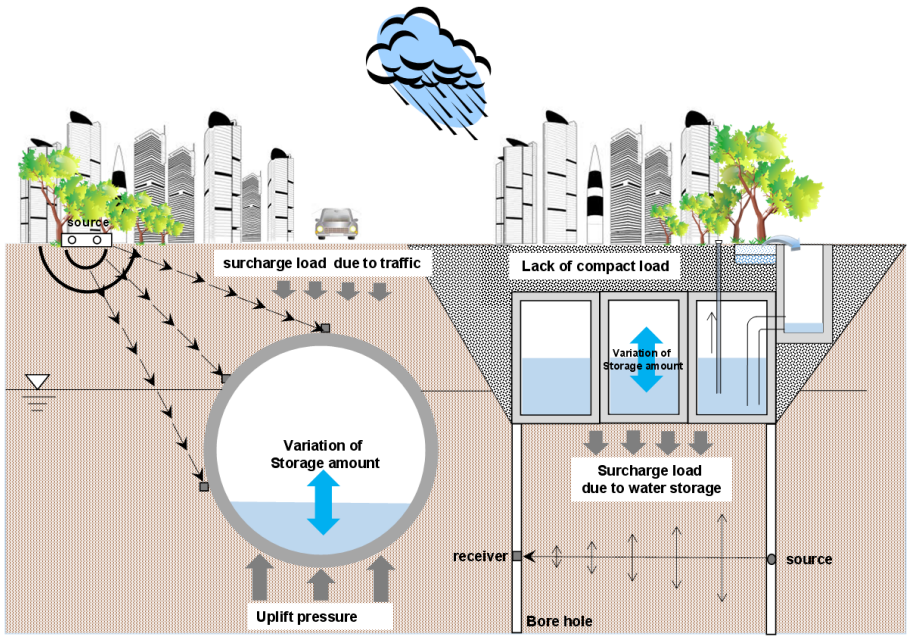

Fig. 1. Schematic diagram of geotechnical issues according to the construction of an underground rainfall storage facility in an urban area

www.kci.go.kr

않는다. 따라서 지반 전단파 속도는 지반의 유효응력과 입자의 특성에 지배를 받는다. 지반 입자의 물리적 특성은 입자 자체의 성질과 간극비와 같은 패킹(packing)의 영향으로 나눌 수 있다. 따라서 지반의 간극비나 밀도는 전단파 속도와 관계되고 전단강도와도 밀접한 관련이 있다. Hardin and Richart (1963)는 일정 간극비 범위에서 응력 단계별 간극비-전단파 속도 영향에 대한 실험식을 제시한 바 있다. Rowe (1962)는 중간 정도로 미세한 모래에서의 초기 간극률과 내부마찰각과의 관계를 제시하였고, Lambe and Whitman (1969)은 입상 지반에 대한 간극비와 내부마찰각과의 관계를 제시하였다. Cha and Cho (2007)는 다양한 조건에서의 실내실험을 통해 전단파 속도-간극비-전단강도 관계를 도출하고 전단파를 이용한 전단강도 예측이 가능함을 규명하였다.

기존 연구결과를 바탕으로 전단파 속도를 이용하여 시공전 지반특성 평가뿐 아니라 시공후 외부환경 변화에 의한 지반의 거동을 모니터링 하고자 하였다. 전단파 속도를 이용한 지반 모니터링 가능성을 평가하기 위해 본 연구에서는 현장에서 채취한 두 개의 사질토 시료에 대해 전단파 속도-밀도 관계와 밀도-전단강도 관계를 규명하였다. 도출된 관계식을 바탕으로 현장 탄성파 탐사에서 얻은 전단파 주상도와 현장 유효응력을 기본 자료로 활용하여 현장지반의 전단강도를 도출하였으며 현장 실험 결과와 비교하여 제시된 방법을 검증 하였다. 궁극적으로 검증된 관계식을 활용하여 지하 저류조 시공에 따른 지반의 간극비 변화와 이로 인한 전단강도 변화를 예측 및 분석하였다. 제안된 방법의 개략적인 흐름도는 Fig. 2와 같이 도식화 하였다.

4. 실험 개요

4.1 실험시료

지하 저류조 시공에 따른 응력증가와 이에 따른 간극비 및 전단강도 특성 변화를 분석하기 위해, 국내 현장 2곳으로부터 현장지반의 시료를 채취하여 실내실험을 수행하였다. 시료는 교란된 시료로써 원지반의 특성을 정확히 파악하는 것에는 한계가 있으나 다양한 응력조건과 배수조건을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 또한 지하 저류조 설치를 위한 지반의

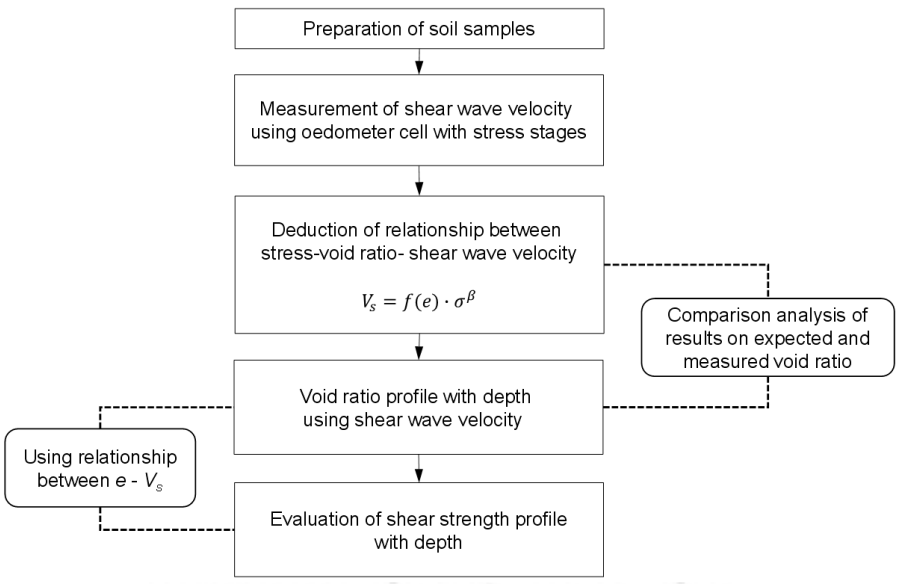

Fig. 2. Methodology for obtaining the shear strength profile with the depth

www.kci.go.kr

Table 1. Properties of the test samples

	G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)
Sample 1	2.75	0.21	0.35	1.90	0.93	1.15	0.70	SW	0.28	0.4
Sample 2	2.71	0.17	0.38	2.71	0.80	1.08	0.77	SW	0.25	0.46

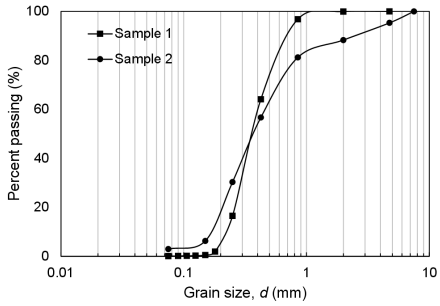

Fig. 3. Particle size distribution of the test samples

굴착은 굴착주변 지반의 교란을 유발하므로 재성형에 의한 교란 효과를 어느 정도 상쇄시킬 것으로 판단하였다.

Fig. 3은 입도분포실험(체가름실험)으로부터 도출된 시료의 입도분포곡선이다. 그림과 같이 Sample 1은 세립분 함유량이 1%내외이고, Sample 2는 세립분 함유량이 3%로 Sample 1에 비해 약간 높지만 통일분류법으로 분류할 경우 SW에 해당하는 모래계열의 입도분포가 양호한 지반으로 나타났다. 실내실험으로부터 구한 시료들의 주요 기본 물성치를 Table 1에 정리하였다.

4.2 벤더엘리먼트가 설치된 오이도미터를 이용한 전단파 속도 측정

전단파 속도를 측정하기 위해 벤더엘리먼트(bender element)를 오이도미터(oedometer)에 Fig. 4와 같이 설치하였다. 벤더엘리먼트는 기계적 에너지와 전기적 에너지의 상호변환이 가능한 압전센서로서, 삼축시험기, 압밀시험기 등 실내실험 장비에 부착하여 다양한 실험 조건에서 비교적 간단하게 시편의 전단파 속도를 측정할 수 있다. 본 연구에서 이용한 벤더엘리먼트

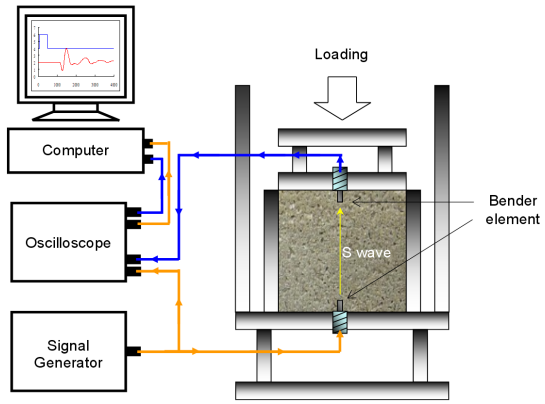

Fig. 4. Test setup for measuring the shear wave velocity using an oedometer cell

는 설치가 용이한 두 개의 압전소자가 나란히 연결되어 있는 것을 사용하였으며 길이 12 mm, 폭 8 mm, 두께 0.6 mm로 제작하였다. 신호발생기에서 하중 주파수 10 kHz의 펄스(pulse) 형태의 가진 신호를 발생시켜, 고분해능 오실로스코프에서 128번 신호평균을 수행하여 가진 및 수신 신호를 획득하였다. 또한 신호필터를 거쳐 노이즈(noise)를 제거하여 데이터의 정확도를 높이고자 하였다.

제작된 벤더엘리멘트가 달린 캡 중 하나를 오이도미터의 아크릴튜브 하부에 설치하고 다공질판을 놓은 다음 Table 2에 나타낸 여러 가지 밀도로 재성형된 교란시료를 아크릴튜브에 안착시켰다. 아크릴튜브에 안착된 시료위에 다공질판을 설치한 다음 상부 캡을 위에 올리고 상부 캡이 끼지 않도록 수평을 맞추었다. 시편의 최소 길이를 측정하고 상부 캡 중앙에 수직하중을 가하여 수직변위의 변화량이 수렴되면, 수직변위를 측정한 후 벤더엘리멘트 실험을 수행하였다. 시료는 매우 느슨한 상태부터 매우 조밀한 상태에 이르기까지 서로 다른 밀도로 성형하였다. 또한 저·중

www.kci.go.kr

Table 2. Test conditions under which the shear wave velocity and shear strength were measured

	Sample No.	Initial void ratio, e	Vertical stress, σ_v' (kPa)
Oedometer test	Sample 1	0.71, 0.93, 1.03	58, 115, 231, 461, 917
	Sample 2	0.80, 0.89, 1.05	23, 57, 115, 233, 466
Direct shear test	Sample 1	0.85, 0.90, 0.99	88, 175, 349, 696
	Sample 2	0.80, 0.89, 1.05	88, 175, 354 708

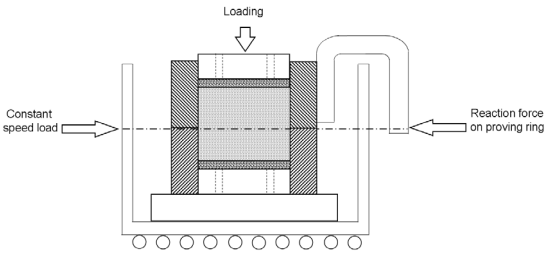

Fig. 5. Test setup of the direct shear test

심도에 시공된 지하 저류조 구조물의 응력 상태를 고려하여 각 시료별로 Table 2와 같이 수직하중을 여러 단계로 나누어 재하 하였다. 한 단계 밀도의 실험이 끝나면 다른 단계의 밀도로 성형하여 같은 하중 조건에서 실험을 실시하였다.

4.3 직접전단실험을 이용한 전단강도 측정

시료의 각 밀도 단계별 직접전단실험을 수행하여 밀도와 전단강도의 상관관계를 도출하였다. 사질토의 전단강도 정수인 내부마찰각을 구하는 실험으로는 직접전단실험과 삼축실험이 있는데 본 연구에서는 비교적 실험방법이 간단한 직접전단실험을 이용하였다(Fig. 5). 시료를 다짐봉을 이용하여 전단박스에서 직접 다져 각각의 밀도를 맞추었으며, 이 때 시료의 높이는 약 2.9 cm로 모든 성형시료에 동일한 체적을 유지하면서 무게를 측정하여 밀도를 계산하였다. 실험은 밀도 및 수직응력에 대하여 단계적으로 수행하였다. 즉, 하나의 밀도에 대한 실험이 끝나면 다른 단계의 밀도로 성형하여 같은 하중 조건에서 실험을 실시하였다. 전단강도 측정을 위한 각 시료별 실험조건은 Table 2와 같다.

5. 제안된 기법을 이용한 현장 전단강도 산정 결과 및 분석

5.1 전단파 속도-밀도-전단강도 실험결과 분석

벤더엘리먼트 실험에서 전단파 속도의 측정은 전단파의 이동거리와 도달시간의 결정이 중요하다. 많은 선행 연구들에 따르면 가진 및 수신 벤더엘리먼트의 끝단 사이의 거리(tip-to-tip)가 이동거리로 고려되며 (Dyvik et al., 1985), 본 연구에서도 수직응력 단계별 이동거리의 변화를 전단파 속도 결정시 반영하였다. 전파시간의 결정은 가진 신호의 가진 시점과 수신 신호의 전단파 도달 시점의 차이를 이용하는 Start-to-Start 방법을 적용하였다.

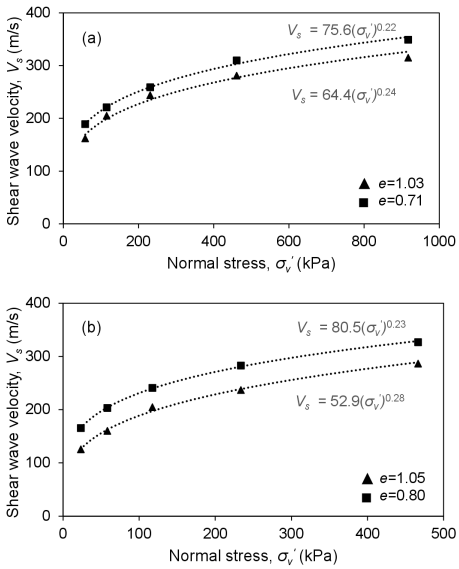

Fig. 6. Relationship between normal stress and shear wave velocity: (a) sample 1 and (b) sample 2

www.kci.go.kr

수직응력 변화에 따른 전단파 속도의 변화는 Fig. 6과 같다. 모든 시료에서 응력이 증가할수록 전단파 속도가 증가하였으며 응력에 대한 전단파 속도의 증가율은 응력이 커질수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 초기 간극비가 작을수록(밀도가 커질수록) 전단파 속도가 크게 나타났으며 이로부터 지반의 응력과 간극비에 따른 전단파 속도를 유추할 수 있다. 즉, 실내실험에 의한 전단파 속도-전단강도 관계에서 현장지반의 전단강도 정수의 추정이 가능할 것으로 보인다.

등방성 응력재하 상태에서 흙의 전단파 속도-응력 관계를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Hardin and Richart, 1963; Santamarina et al., 2001).

$$V_s = A\left(\frac{\sigma'_m}{1kPa}\right)^{\beta} \tag{1}$$

여기서, σ'_m는 평균유효응력, V_s는 전단파 속도이며, A와 β는 실험적으로 결정된다(A는 1 kPa의 구속응력 하에 있는 매질에서의 속도로 정의한다). 따라서 1차원 압밀조건 하의 수직유효응력 σ'_v대한 평균유효응력은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}\sigma'_m &= \frac{1}{2}(\sigma'_v + \sigma'_h) = \frac{1}{2}(\sigma'_v + K_0\sigma'_v) \\ &= \frac{1}{2}(1+K_0)\sigma'_v\end{aligned} \tag{2}$$

여기서, K_0는 정지토압계수이고, σ'_h는 수평유효응력, σ'_v는 수직유효응력이다. 결과적으로 1차원 압밀조건하의 수직유효응력에 대한 전단파 속도는 식 (3)으로 표현 가능하다.

$$V_s = A\left[\frac{1+K_0}{2} \cdot \frac{\sigma'_v}{1kPa}\right]^{\beta} = \alpha\left[\frac{\sigma'_v}{1kPa}\right]^{\beta} \tag{3}$$

식 (3)에서 β인자는 입상 매질(particulate material)의 특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정된다. α인자는 패킹(packing) 형태(간극비와 입자당 평균접촉수(coordination number), 입자를 구성하는 재료 특성, 입자간의 접촉, 구조 변화에 따라 변화한다. 일반적으로 입자들이 더 단단해지고 다짐정도가 커질수록 α의 값은 커지며 β의 값은 작아진다. 점토에서는 특히 소성지수가 증가할수록 β의 값은 커지고 α의 값은 감소하는 경향을 보인다.

구속응력에 따른 전단파 속도 변화 결과로부터 Fig. 6과 같이 α인자와 β인자를 결정하였으며 도출된 전단파 속도-구속응력 관계는 Santamarina et al. (2001), Cha and Cho (2007)등의 연구결과와 유사한 경향을 보였다. Sample 1의 경우 α, β값은 각각 76-64, 0.23-0.24의 값을 보인 반면, Sample 2는 α값은 80-52, β값은 0.23-0.28로 값의 범위가 큰 것으로 나타났다. 즉, Sample 2의 경우 응력증가에 따른 시료의 침하가 더 많이 발생하는 것으로 해석되며, 이는 Sample 2의 경우 Sample 1에 비해 더 많은 세립토를 포함하고 있기 때문으로 설명할 수 있다.

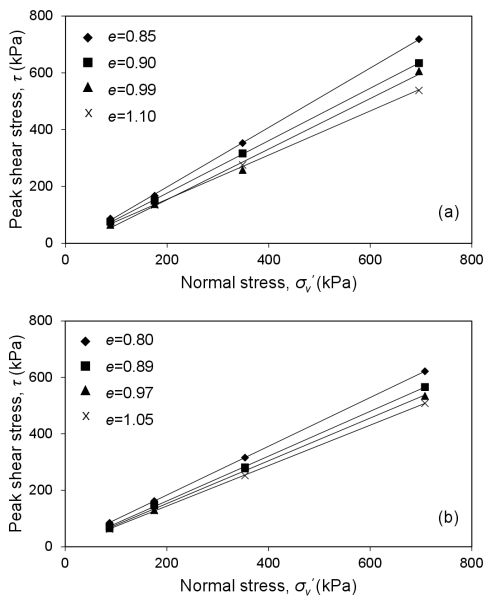

Fig. 7. Relationship between the shear strength and void ratio with normal stresses: (a) sample 1 and (b) sample 2

www.kci.go.kr

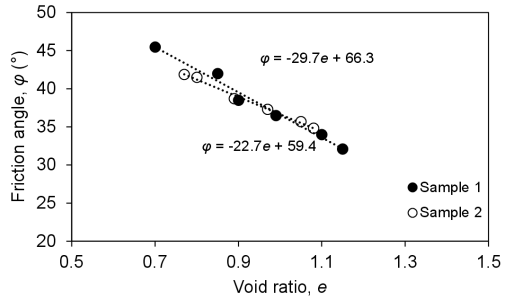

Fig. 8. Relationship between void ratio-friction angle

직접전단실험은 Table 2에 명시된 실험 조건에 따라 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 실험이 수행된 모든 밀도에 대하여 수직응력에 대한 최대전단응력은 선형적인 관계를 보였으며 간극비가 증가할수록 기울기가 감소하는 경향을 나타냈다. 이로부터 구해진 내부마찰각 역시 간극비가 클수록 작은 값을 가졌으며 본 연구에서 선정한 간극비 하에서 내부마찰각은 대략 35.0°～46.0°범위로 나타났다.

직접전단실험으로부터 획득한 밀도별 내부마찰각을 이용하여 각 실험 시료의 밀도-내부마찰각 관계를 Fig. 8과 같이 나타내었고, 밀도와 내부 마찰각의 관계를 선형으로 가정하여 도출된 관계식을 함께 도시하였다. 내부마찰각은 흙의 간극비가 증가할수록 작아지는 경향을 보였다. 이 관계식에 현장 간극비를 적용함으로써 지반 심도별 원지반 모래의 내부마찰각을 유추할 수 있다.

5.2 원지반 전단파 속도를 이용한 간극비-전단강도 산정

전단파 속도와 간극비 관계를 통해 최소 간극비와 최대 간극비에서 전단파 속도를 추정하고 이로부터 현장 간극비를 유추할 수 있다. 응력별 밀도-전단파 속도 실험 결과로부터, 간극비에 따라 전단파 속도가 선형적으로 변화한다고 가정하여 식 (4)와 같이 관계

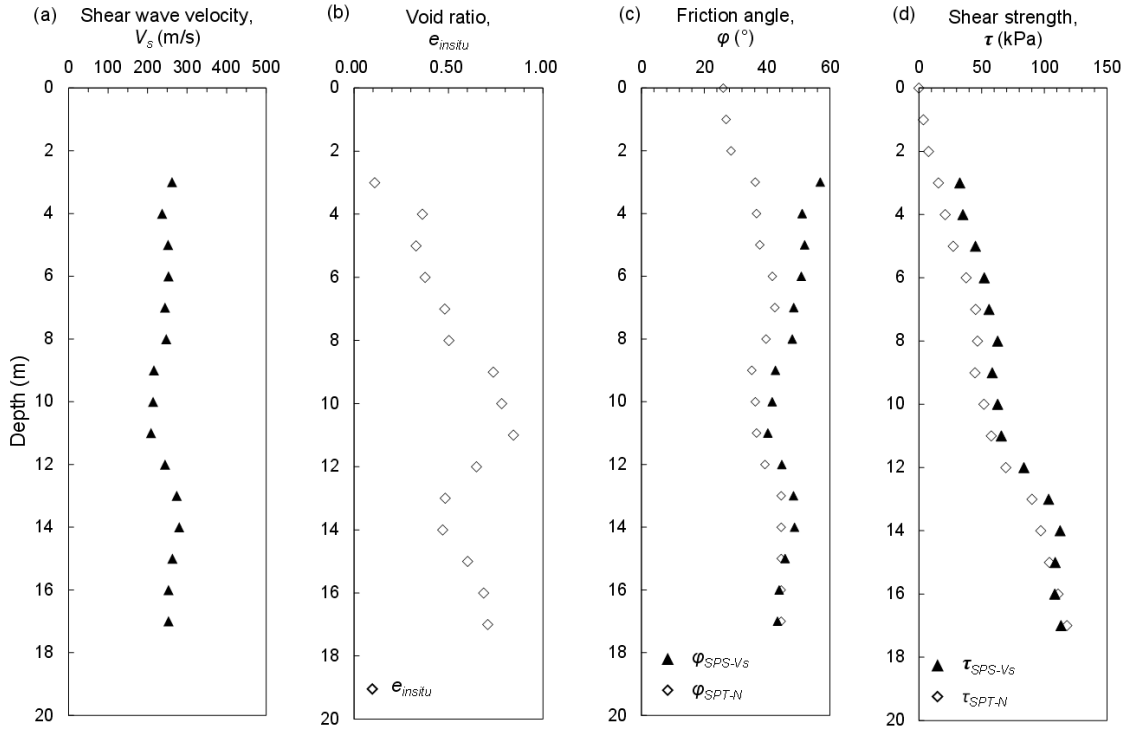

Fig. 9. In-situ properties inferred from relationship between the shear wave velocity-void ratio (Sample 1)

www.kci.go.kr

식을 도출하였다. 현장 지반의 전단파 속도를 알면 이 관계식을 이용하여 현장 지반의 간극비를 예측할 수 있다.

$$e_{insitu} = e_{\max} - (e_{\max} - e_{\min}) \frac{V_s^{insitu} - V_s^{emax}}{V_s^{emin} - V_s^{emax}} \quad (4)$$

여기서, V_s^{emax}는 최대 간극비일 때 전단파 속도, V_s^{emin}은 최소 간극비일 때 전단파 속도, V_s^{insitu}는 현장 전단파 속도이다. 그리고 $e_{\max}$, $e_{\min}$, e_{insitu}는 최대 및 최소, 현장 간극비를 나타낸다. 그러나 최대 및 최소 간극비 조건에서 실험을 수행하는 것은 사실상 까다로운 작업이기 때문에 최대 및 최소 간극비에 가까운 각 실험 시료의 최대 실험 간극비와 최소 실험 간극비를 이용하여 현장 간극비를 계산하고자 하였다.

현장에서 SPS 검층 탄성파 탐사기법을 이용하여 Fig. 9(a), 10(a)와 같이 전단파 속도 주상도를 획득하였다. 현장 깊이별 유효응력을 계산 후, Fig. 6에 나타낸 유효응력-전단파 속도 상관관계를 이용하면 깊이별, 최대 간극비, 최소 간극비에서의 전단파 속도를 획득할 수 있다. 여기에 깊이별 최대 간극비, 최소 간극비에서 전단파 속도와 식 (4)를 이용하면 현장 시료의 깊이별 현장 간극비를 산출할 수 있다. 이와 같이 산출된 깊이별 현장 간극비는 Fig. 9(b), 10(b)와 같다. 최종적으로 Fig. 8의 간극비-내부마찰각의 관계로부터 현장 내부마찰각(Fig. 9(c), 10(c))과 전단강도(Fig. 9(d), 10(d))를 유추할 수 있다. 전단파 속도로부터 도출된 내부마찰각은 SPT N값으로 구해진 전단강도 정수에 비해 다소 큰 값을 나타냈으며 이는 시료 재성형에 의한 시료 교란 및 실험적으로 구해진 e_{max}와 e_{min}의 오차에서 발생하는 차이로 판단된다. 그러나 전단파 속도로부터 유추된 전단강도 주상도의 경향이 현장실험 결과와 매우 유사한 것을 확인하였으며 시료의 고결 및 교란의 영향을 고려할 경우 현장 지반강

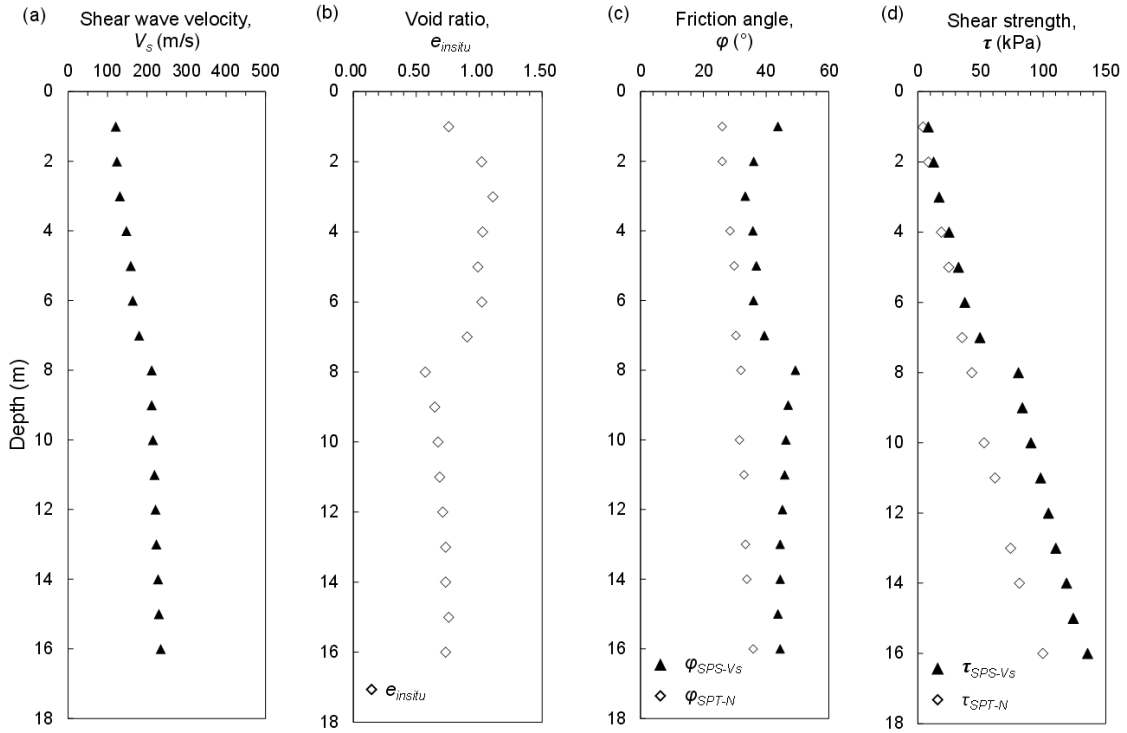

Fig. 10. In-situ properties infered from relationship between the shear wave velocity-void ratio (Sample 2)

www.kci.go.kr

도 정수 예측 방법으로 유용할 것으로 판단된다.

6. 지하 저류조 주변 지반의 거동 분석 및 향후 연구방향

지반공학적 측면에서 지하 저류조 설치에 중요한 문제중 하나는 기존 시설물에 영향을 최소화하는 것이다. 그러나 지하 저류조 설치에 따른 지반의 하중 변화는 즉시 침하 및 장기적 크리프(creep) 거동에 의해 지반 침하를 유발할 수 있으며 특히 빗물 저류에 의한 하중 변화는 이러한 거동을 가속 시킨다. 즉, 강우패턴에 따라 저류되는 빗물양의 시간적 변화는 주기적인 하중변화를 유발하여 지반의 변형이나 지지력에 영향을 줄 있다. 더욱이 도시지역과 같이 공간적으로 협소한 위치에 저류조를 시공할 경우 장비 접근이 어려워 뒷채움 다짐이 불량하거나 설계 지지력이 발현되지 않을 수 있다. 이는 시공후 지표면의 부등침하 등 지상 구조물의 손상 및 저류조 주변 지하 구조물에 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 사전에 방지하고 적절한 대책을 세우기 위해서는 시공후 장기적인 거동에 대한 모니터링을 통해 유지관리가 수행되어야 한다. 본 연구에서 제시된 방법은 지하 저류조 설치에 따른 지반의 변형 및 응력 변화를 전단파 속도를 통해 유추된 전단강도와 간극비로부터 예측함으로써 안정성 평가에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

지하 저류조 주변 지반 탐사를 위한 전단파 속도 활용 예시는 Fig. 1과 같다. 지하 저류조의 시공단계에서 저류조 측면 및 하부에 탄성파 수신기(receiver)를 설치하고 지상이나 지하 저류조 바닥에서 가진된 전단파 신호를 수신하고 분석하면 상시계측이 가능할 것으로 판단된다. 특히 뒷채움 부분에 대한 계측으로 부등침하에 따른 지상구조물의 영향을 최소화 할 수 있으며, 지하 저류조 하부 계측을 통해 하중 변화에 따른 지반의 침하 예측이 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 11은 현장에 지하 저류조를 매립할 경우 간극비 및 전단강도 변화를 예측한 것이다. 지하 저류조 높이를 10 m로 하고 기존에 받던 상재하중(184 kPa)을 구조물의 하중으로 단순 가정하였다. 건기시 저류높이는 0 m, 강우시 10 m로 상승한다고 하면 건기시 하중은 184 kPa, 강우시 하중은 273 kPa에 상당한다. 보수적 관점에서 Sample 2의 높은 간극비(e=1.05) 결과를 적용하였으며 Fig. 11(a)로부터 도출된 전단파 속도는 건기시와 우기시에 각각 228 m/s, 254 m/s이다. Fig. 11(b)의 간극비-전단파 속도 관계에서 건기시와 우기시의 간극비 0.82, 0.80을 산정하였다. 도출된 간극비를 이용하여 Fig. 11(c)에서 구해진 내부마찰각은 각각 40.5°, 41.0°이며 이로부터 전단응력 158 kPa과 239 kPa을 산정할 수 있다. 즉, 강우 저류에 의해 응력이 약 80 kPa 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

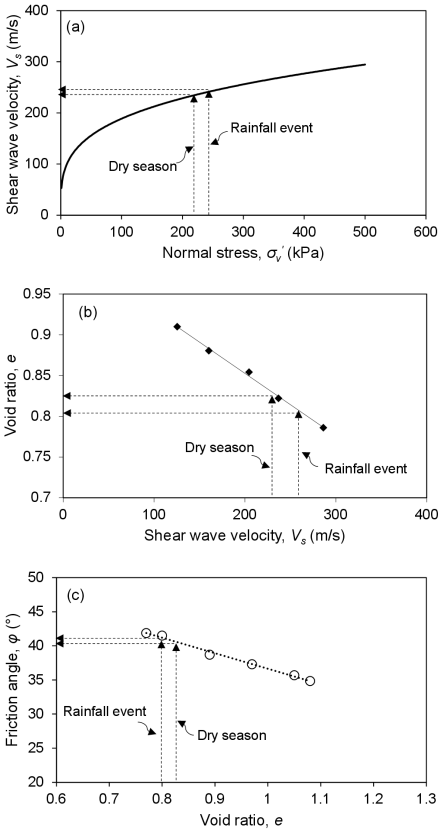

Fig. 11. Deduction of the shear strength of the ground near an underground rainfall storage facility from the shear wave velocity: (a) $V_s - \sigma_v'$, (b) $e - V_s$ and (c) $\phi - e$

www.kci.go.kr

이러한 응력 변화는 강우 패턴에 따라 증감을 반복하게 되며 이는 지하 저류조 하부 지반에 반복 상재하중으로 작용하게 된다. 지반에 반복적인 응력이 작용할 경우 잔류변형을 유발하며 그 크기가 전단강도보다 작다하더라고 전단파괴에 도달할 수 있음이 기존 연구를 통해 밝혀졌다(Ko et al., 2003). 따라서 이러한 관점에서 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한 지하 저류조 및 주변 지반 안정성에 영향을 미치는 변수들(특히 투수특성, 지하수위, 지진 등)에 대한 고려가 필요하다. 한 예로, 대규모 지하 저류조의 경우 빗물이 저류되지 않은 건기시 공동으로 유지되며 저류조가 지하수위보다 깊이 시공될 경우 양압력에 대한 영향도 무시할 수 없다. 따라서 지하 저류조의 안정성에 영향을 미치는 지반환경의 영향을 고려한 연구가 향후 수행되어야 한다.

7. 결 론

본 연구에서는 지하 저류조 주변지반의 전단강도 및 간극비를 전단파 속도로부터 유추하여 현장 전단강도 산정에 이용하는 방법을 제안하였다. 제시된 방법은 현장실험 결과와 비교 검증하여 그 적용성을 확인하였으며 지하 저류조 주변 지반의 특성 평가에 활용 가능함을 시사하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 밀도 및 응력 단계별 전단파 속도를 측정하여 전단파 속도와 전단강도의 상관관계를 도출하였다. 초기 밀도가 낮고 응력 단계가 높아질수록 지반의 간극 감소 및 접촉면 증가에 의해 전단파 속도가 증가하였다.
2. 전단파 속도-밀도-전단강도 상관관계를 이용하여 현장 전단파 속도 데이터로부터 깊이별 전단강도를 유추하였다. 전단파 속도를 이용한 방법은 현장실험 결과와 비교하여 실제 현장의 고결특성 및 교란에 의한 영향을 정확히 고려하기는 어렵지만, 안정적이고 보수적인 설계 관점에서 어느 정도 신뢰성 있는 결과를 제시하는 것으로 판단된다.
3. 도심지에서는 지하공간 활용에 있어 기존 환경 및 구조물의 영향을 최소화하는 것이 중요하며 현장 보링(boring)이나 시험 장치의 관입에 의한 방법을 이용하는 것은 한계가 있다. 반면, 전단파 속도를 이용한 방법은 기존 환경에 물리적 변화를 주지 않으므로 도시지역에 특히 저·중심도 지반조사 방법으로 유용할 것으로 판단된다.
4. 도심지 지하공간 활용을 위한 지반조사 방법으로 전단파 속도의 적용 가능성을 시사였으나 이는 적용 가능성 평가를 위한 기초적인 연구로서 실질적으로 현장 적용을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 지하 구조물의 안정성은 지반 재료 특성뿐 아니라 지반환경(지하수, 기존 지하 시설물, 외력 등)에 의해서도 상당한 영향을 받기 때문에 이러한 영향인자들을 고려한 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술개발 사업[과제번호:413-111-004]과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 (No. 20131010501790) 지원 아래 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Cha, M., Cho, G.C. (2007), “Shear strength estimation of sandy soils using shear wave velocity”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 30, No. 6, pp. 484-495.
2. Choi, G.W., Choi, J.Y., Li, J.W. (2003), “Reduction rate of the total runoff volume though installing a rainfall storage tank in the sub-surface”, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 36, No. 3, pp. 455-464.
3. Dyvik, R., Madshus, C. (1985), “Lab measurements of Gmax using bender elements”, Proceedings of

www.kci.go.kr

the ASCE Annual Convention on Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, Detroit, pp. 186-196.
4. Hardin, B.O., Richart, F.E. (1963), “Elastic wave velocities in granular soils”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. 1, pp. 33-65.
5. Kang, S.J., Kwon, T.J. (2013), “Multi-use of urban infrastructure facilities to enhance stormwater detention capacity in the urban areas”, GRI REVIEW, Vol. 15, No. 2, pp. 145-161.
6. Kim, C.Y., Moon, H.K., Bae, G.J. (1999), “A study on the safety assessment of adjacent structures caused by tunnel excavation in urban area - focused on the characteristics of geometries and locations for nearby building”, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 15, No. 4, pp. 19-42.
7. Kim, Y.I., Cho, S.K., Yang, J.H., Kim, J.S., Lee, N.Y. (2003), “Application of seismic reflection method in the tunnel of Youngdong railroad(Mt. Dongbaek~Dokye)”, Tunnelling Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 89-100.
8. Kim, Y.J., Han, K.Y., Cho, W.H. (2010), “Analysis on the effects of flood damage mitigation according to installation of underground storage facility”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 1B, pp. 41-51.
9. Ko, D.H., Tatsuoka, F., Kim, D.S. (2003), “Investigation on residual strain in cyclic and creep loading triaxial tests on sand”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 3C, pp. 127-133.
10. Korea Environment Institute (2013), Environmental impacts of deep underground space development in urban areas and policy suggestions, 2013-16, Korea Environment Institute, pp. 1-4.
11. Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley & Sons, pp. 151-161.
12. Lee, J.H., Song, Y.H., Jo, D.J. (2013), “Determination of optimal locations of urban subsurface storage considering SWMM parameter sensitivity”, Journal of KOSHAM, Vol. 13, No. 4, pp. 295-301.
13. Lee, J.M., Kwak, H.J., Kim, Y.G., Baek, K.H., Cho, C.H. (2001), “Prediction and evaluation of rock mass condition by seismic profiling method in tunnel”, Tunnelling Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 45-56.
14. Lee, J.Y, Jung, J.M., Kim, D.H. (2012), “Field study on the unit type infiltration and storage system for the urban flood resilience”, GRI REVIEW, Vol. 14, No. 1, pp. 305-318.
15. Rowe, P.W. (1962), “The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 269, 1339, pp. 500-527.
16. Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A. (2001), “Soils and Waves”, John Wiley & Sons, pp. 254-260.
17. Son, M.N., Kim, Y.S. (2010), “A study on the determining the tank size of rainwater harvesting system for apartment house”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 12, pp. 287-294.
18. Song, C.H., Seo, I.W., Jung, Y.J. (2013), “Reduction of rainfall runoff by constructing underground storage tank”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 3, pp. 927-935.
19. Song, G.I. (2013), “Stochastic numerical study on the propagation characteristics of P-wave in heterogeneous ground”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 13-24.
20. Sun, C.G., Han, J.T., Cho, W. (2012), “Representative shear wave velocity of geotechnical layers by synthesizing in-situ seismic test data in Korea”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 22, No. 3, pp. 293-307.

www.kci.go.kr