토양의 함수율에 따른 전기비저항 반응 모형 실험 연구

지윤수¹ · 오석훈^{1*} · 이희순²

¹강원대학교 에너지자원공학과
²(주) 지오룩스

Study on Electrical Resistivity Pattern of Soil Moisture Content with Model Experiments

Yoonsoo Ji¹, Seokhoon Oh^{1*}, and Heui Soon Lee²

¹Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Kangwon, Korea
²Geolux Inc., Kangwon, Korea

요 약: 지반조사에서 비파괴 조사 기술은 시추조사보다 경제적으로 비용이 덜 들고 광역에 걸친 지반정보를 제공하는 장점이 있다. 하지만 지반설계정수로서 적용하기에는 어려운 한정된 정보만을 제공하게 된다. 이를 극복하기 위해, 비파괴 조사 방법 중 하나인 전기비저항 탐사를 모형토조실험에 적용하여, 토질상태에 따른 비저항 반응과 함수비에 따른 비저항 반응을 분석하여 비저항 거동 양상에 대한 연구를 수행하였다. 실험에 사용한 토질은 주문진 표준사, 마사토이며 각 토질의 입도 분포, 균등계수를 구하여 실험에 있어 실험재료의 균질한 상태를 유지하였다. 실험에 사용한 모형의 제원은 160 × 100 × 50 (cm)의 아크릴 재질 토조이며, 각 토질의 높이는 30 cm를 유지하였다. 5TE(함수비측정센서)센서를 7~8 cm 간격으로 수직하게 꽂아 층별 함수비를 측정하였다. 모형실험 결과 주문진 표준사는 비저항 거동 양상이 함수비에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었으며, 마사토는 함수비에 따라 비저항이 낮아진 후에도 시간경과에 따른 거동 양상에 큰 변화가 없는 것을 관찰하였다. 또한 토조 실험에 사용된 토양과 유사한 테스트 베드를 선정하여 그 반응을 비교 분석하였다. 이러한 실험을 통해 토질 상태와 함수비에 따른 다양한 비저항 거동 양상 자료를 수집하고, 비파괴 조사기술의 정확도를 향상 시켜 나간다면 지반설계정수를 산정하는데 있어 기초적인 연구가 될 수 있음을 확인하였다.

주요어: 전기비저항, 함수비, 모니터링

Abstract: Geophysical investigation in non-destructive testing is economically less expensive than boring testing and providing geotechnical information over wide-area. But, it provides only limited geotechnical information, which is hardly used to the design. Accordingly, we performed electrical resistivity experiments on large scale of soil model to analyze the correlation between electrical resistivity response and soil water contents. The soils used in the experiments were the Jumunjin standard sand and weathered granite soil. Each soil particle size distribution and coefficient of uniformity of experimental material obtained in the experiments were maintained in a state of the homogeneous. The specifications of the model used in this study is 160 × 100 × 50(cm) of acrylic, and each soil was maintained at the height 30 cm. The water content were measured using the 5TE sensors (water contents sensors) which is installed 7~8 cm apart vertically by plugging to floor. The results of the resistivity behavior pattern for Jumunjin standard sand was found to be sensitive to the water content, while the weathered granite soil was showing lower resistivity over the time, and there was no significant change in behavior pattern observed. So, it results that the Jumunjin standard sand's particle current conduction was better than the weathered granite soil's particle through contact with the distilled water. This lab test was also compared with the result of a test bed site composed of similar weathered soil. It was confirmed that these experiments were underlying research of non-destructive investigation techniques to improve the accuracy to estimate the geotechnical parameter.

Keywords: electrical resistivity, water content, monitoring

2012년 10월 18일 접수; 2013년 4월 10일 수정; 2013년 4월 16일 채택

*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

©2013, 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.

서 론

일반적으로 터널, 사면 등의 대규모 프로젝트는 공사시공 전 단계인 설계 단계에서 기초지반조사를 실시한다. 지반조사에는 크게 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사 그리고 현장 또는 실내시험으로 구분된다. 이를 통해 지반의 특성, 구조, 물성치를 파악하는 것이 최종 목적이다. 현재 일반적으로 터널, 교량 기초 및 댐 사이트 등의 토목지반조사의 경우 주로 시추를 하여 샘플링 분석을 하고 있다. 시추 샘플링 기법은 시간이 많이 소모되고, 비용도 많이 든다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 토목구조물의 설계와 시공에 있어서 지반조사, 특히 물리탐사의 역할이 점차 가중되고 있다. 물리탐사의 경우, 비파괴적인 시험으로 넓은 면적을 짧은 시간 안에 조사할 수 있다는 점과 지반 하부상태를 2차원적으로 도시할 수 있다는 장점이 있다. 전기비저항 측정 기법은 토질 속의 공극수를 특성화 하는데 매우 유용하며 이러한 성질을 이용하여 최근에는 토양 및 지하수의 오염도 조사에까지 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다(Kaya and Fang, 1997). 특히 국내에서는 산악터널, 교량기초 및 댐 사이트 등의 토목 지반조사에 적용되어 전기비저항 탐사결과로부터 단층파쇄대 및 변질대 등의 지질구조, 지하수 분포상태, 암반등급 구분 등 토목 구조물의 설계시 유용한 지반정보를 제공하고 있다(Kim *et al.*, 2000; Park and Kim, 1999; Chung *et al.*, 1999). 하지만 물리탐사를 통해 얻은 정보들은 지반설계정수로서 적용하기에는 어려운 한정된 정보만을 제공하게 된다.

지반설계정수 값은 주로 실내 및 현장 실험을 통해 산정되며, 실내 시험은 시료 취급에 따라 발생하는 교란 효과로 인하여 현장 시험법이 추천되고 있다(Chung *et al.*, 2004; Yoon *et al.*, 2009). 그러나 현장 실험의 경우 현장의 접근성, 경제성, 그리고 경험식을 통해 주로 설계 정수를 산정해야 하는 한계가 있으므로 신뢰성 있는 설계 정수의 산정을 위해서는 새로운 현장 실험법이 요구되고 있다(Yoon *et al.*, 2010). 이에 따라 비파괴 조사 방법 중 하나인 전기비저항 탐사를 현장 적용에 앞서 모형토조실험을 통해 함수비에 따른 비저항 거동양상에 대한 연구를 수행하였다. 여기서 함수비는 토질의 공극사이에 채워진 물의 양으로 규정되며, 응력 평형상태에서 유지되는 함수비는 공극 크기와 물로 채워진 공극부피의 함수이다(Shin *et al.*, 2004).

전기비저항 탐사로 얻어지는 지반의 전기비저항은 주로 포화도, 공극률, 공극수의 전기전도도, 점토함유량, 온도 등에 따라 좌우되며, 실제 지반의 전기비저항은 이들 물성의 복합체로 표현된다(Sakaguchi, 2008). 또한, 토질에서의 전기비저항은 공극유체(pore fluid)의 전기비저항, 토질의 구성성분, 입자모양과 방향성, 공극의 구조(pore structure) 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Abu-Hassanein *et al.*, 1996; Yoon *et al.*, 2002). 이러한 여러 물성요인들을 통제하고, 모형

실험을 통한 토질 상태에서의 함수비에 따른 비저항 거동 양상 자료를 수집 후 비파괴 기술의 정확도를 향상시켜나가는 기반설계정수를 산정하는데 있어 기초 자료를 만드는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 실내에서 두 가지 토질 시료의 함수비에 따른 전기비저항을 측정한 후 그 결과로부터 얻어지는 토질 시료별 전기비저항 거동양상을 획득하고, 실제 현장 실험을 통해 현장 적용성에 대해서 알아보았다. 이를 통해 추후 지반조사 방법에 있어 비파괴 조사방법으로 지반설계정수를 산정할 수 있는 기초 연구가 되고자 하였다.

실험 제원 및 시료 분석

실험을 실시한 대형 토조의 제원은 $1.6 \times 1.0 \times 0.5$ (가로 × 세로 × 높이) m^3 , 두께 10 mm의 아크릴로 만들었다. 전자동 전기비저항 측정장비인 Terrameter LS를 사용하였고, 전자동 측정장비에 연결되는 전극봉을 축소하여 제작하였다. STE 센서를 이용하여 체적 함수비, 토양 온도, 전기전도도등을 측정할 수 있게 토조 아래에서부터 7~8 cm 간격으로 설치하여 각 위치별 함수비에 따른 전기비저항 거동 양상을 알아볼 수 있게 하였다. 대형 토조에 골고루 증류수를 뿌려주기 위해 펌프와 스프링클러를 이용하였고, 증류수의 양은 펌프 제어 시스템을 통해 조절할 수 있었다. 이와 같은 실험 설계에 따라 함수비에 따른 전기비저항 측정이 가능했으며, 증류수 투입 전후의 전기비저항 거동 양상을 알아 볼 수 있었다.

실험에 사용한 토질 시료는 주문진 표준사, 마사토를 이용하였다(Fig. 1). 각 시료에 대한 체분석과 입도분석을 실시하여 균질한 상태의 시료를 사용하였다. 토질에 대한 분류기준은 실내시험결과에 따라 통상적으로 통일분류법(Casagrande, 1948)에 의해 분류한다. 주문진 표준사의 입도분석결과(Fig. 2) 입도분포가 나뉘고, 통일분류법상 SP로 분류되는 것을 확인하였다. SP는 통일분류법에서 사질토에 입도가 나뉘는 토질을 의미한다. Table 1을 통해서도 균등계수(C_u)가 1인 경우 비슷한 크기의 입자로 이루어진 것을 의미하므로 균등계수가 1.3~1.4로 나타나 입도가 균등함을 나타내고 있다.

마사토의 입도분석결과(Fig. 3)는 입도분포가 좋은 사질토로

Fig. 1. Sample of soils (a) Jumunjin standard sand, (b) weathered granite soil.

Fig. 2. Grain size distribution curve of Jumunjin standard sand.

Table 1. Grain size analysis of Jumunjin standard sand.

Grain size analysis	Sample 1	Sample 2	Sample 3
D_{max}	0.850 (No.20)	0.850 (No.20)	0.850 (No.20)
D_{min}	0.075 (No.200)	0.075 (No.200)	0.075 (No.200)
D_{10}	0.35	0.34	0.38
D_{60}	0.50	0.50	0.51
C_u	1.43	1.47	1.36
C_c	1.11	1.14	1.08

Fig. 3. Grain size distribution curve of weathered granite soil.

판단되며, 통일분류법상 SW임을 알 수 있다. SW는 통일분류법에서 사질토에 입도가 좋은 토질을 의미한다. Table 2에서 곡률계수(C_c)가 1~3이면 입도분포가 양호한 토질로 분류 되는데 세 번의 실험 결과 모두 1~3 사이의 값을 나타내고 있어 대체로 입도분포가 양호하다고 볼 수 있다. 이러한 각 시료에 대한 입도분석결과 실험에 사용하고자 하는 시료들이 모두 균질하다는 것을 확인하였고, 전기비저항 측정에 있어 동등한 시료 조건에서 실험을 실시 할 수 있었다.

Table 2. Grain size analysis of Weathered granite soil.

Grain size analysis	Sample 1	Sample 2	Sample 3
D_{max}	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)
D_{min}	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)
D_{10}	0.33	0.53	0.33
D_{60}	2.90	3.35	2.60
C_u	8.92	6.32	8.00
C_c	1.66	2.48	1.07

대형 토조 실험

대형 토조 실험에서는 토질의 높이를 30 cm, 전극봉 간격 4 cm, 5TE센서 간격 7~8 cm(수직), 전극 수 21 ch, 쌍극자 배열법으로 측정을 실시하였다. 함수비의 변화를 주기 위해 대형 토조 위에서 스프링클러를 이용하여 토조 전체에 균일하게 증류수를 투입하였다. 증류수를 사용한 이유는 이온에 대한 영향을 줄인 상태에서, 증류수 투입 후 토질과 섞이면서 이온성 물질이 증류수에 포함되면 토질 종류에 따라 함수비와 전기비저항이 어떻게 변화하는지 알아보기 위해서이다. 실험결과는 함수비 변화에 따른 전기비저항 양상과 전기비저항 변화비로 나타내었다.

마사토의 실험 모형은 Fig. 4와 같이 실시하였다. 마사토의 높이는 30 cm, 전기비저항 측정시 배열은 쌍극자배열, 전극봉 간격은 4 cm씩 21 ch, 5TE 센서 간격은 수직으로 7~8 cm 간격이다. 실내 실험에서 획득한 자료를 2차원적으로 해석하기 위해 DIPROfWin(Yi et al., 2003)을 이용해 해석을 실시하였다. 마사토 실험 결과는 Fig. 5의 Phase 1과 2의 양상으로 나타났다. Phase 1은 Phase 2보다 시간적으로 앞선 상태의 전기비저항 결과이다. Phase 1에서 2로 함수비가 증가함에 따라 고비저항을 띄었던 부분이 줄어든 것을 알 수 있다. 증류수가 투입되면서 토조 아래에서부터 점점 비저항 값이 낮아지는 것을 알 수 있다.

이는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 점선으로 표시된 지점이 증류수 투입 지점이고, 이 때부터 함수비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 함수비 측정 센서가 1번이 토조 제일 아래, 4번이 토조 제일 위 부분에 위치하고 있는 것과 같이 함수비가 제일 먼저

Fig. 4. Experiment design of weathered granite soil.

Fig. 5. Ratio of resistivity variation between phase 1 and phase 2.

Fig. 6. Moisture content of weathered granite soil.

Fig. 7. Experiment design of Jumunjin standard sand.

변하는 곳이 4번임이 확인된다. 이와 같이 함수비를 변화시킨 상태에서 Phase 1과 2의 전기비저항 변화비를 나타낸 것이 Fig. 5의 세번째 그림이다. 전기비저항 변화비는 함수비가 높은 상태의 전기비저항 측정 결과를 함수비가 낮은 상태의 전기비저항 측정 결과로 나누어 시료의 전기비저항 변화비를 나타내는 것이다(Park, 2005). 전기비저항 변화비 값이 1이면 전

기비저항 변화가 없다는 것을 의미하고, 1보다 크면 전기비저항이 높아진 것이며, 1보다 작으면 전기비저항이 낮아진 것을 의미한다. Phase 1과 2의 전기비저항 변화비는 1보다 작게 나타나고 있다. 이는 전기비저항이 증류수를 투입 후 감소했다는

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 3 (April. 3 21:40 Jumunjin standard sand)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 4 (April. 4 08:50 Jumunjin standard sand)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 4 / Phase 3 (ratio)

Fig. 8. Ratio of resistivity variation between phase 3 and phase 4.

것을 알 수 있고, 이에 대한 영향이 대형 토조 전체에 신속하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 마사토에도 증류수의 영향이 빠르게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

주문진 표준사의 실험 모형은 Fig. 7과 같이 설계를 하였다. 주문진 표준사의 실험은 Fig. 8의 Phase 3과 4의 양상으로 나타났다. Fig. 8의 세 번째 그림인 주문진표준사의 전기비저항 변화비를 보면 상부와 하부의 변화비가 현저히 다르게 나타나는데, 상부에선 변화비가 1이상으로 나타나고 하부로 갈수록 변화비가 작아지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 주문진 표준사와 마사토를 비교해 보았을 때, 주문진표준사가 마사토보다 함수비 변화에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 주문진 표준사 같은 사질토의 경우 토질 입자를 통한 표면전도의 효과가 작기 때문에 전기비저항 값은 공극 내에 포함된 물에 의한 영향을 크게 받는다(McCarter, 1984; Abu-Hassanein *et al.*, 1996;

Saarenketo, 1998; Oh and Park, 2000). 따라서 주문진 표준사 상부에서 나타나는 영향은 입자들끼리의 접촉을 통한 전류전도일 것이라 생각되고, 하부의 영향은 증류수에 의한 전류전도가 잘 일어나는 것임을 알 수 있다. 한편 Fig. 8에서 경계층의 구분이 평행하게 나타나지 않은 이유는, 모형실험의 한계에 의한 효과로 보인다. 즉 토질의 특성상, 층별로 일정한 상태를 유지하여 모형을 구성하더라도 시간의 경과에 따라 변화 양상이 수평적으로 일정하게 나타나지 않아 생겨난 현상으로 보인다.

Fig. 9를 보더라도 함수비의 변화가 Fig. 6과 달리 증류수를 투입해도 급격하게 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 주문진 표준사의 특성상 입자가 작고 고르며 천연규사로 원형에 가까워 여과사 등으로 많이 쓰이는 특징이 있고, 이러한 특징 때문에 마사토와 주문진사의 함수비에 따른 전기비저항 거동 양상이 확연히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 상이한 거동

Fig. 9. Moisture content of Jumunjin standard sand.

양상을 보이는 두 시료의 차이가 층으로 구분 지었을 때 전기 비저항으로 구별 할 수 있는지 알아보기 위해 두 시료의 층을 만들어 함수비에 따른 거동양상을 살펴보았다.

주문진 표준사와 마사토를 이용해 층을 이룬 상태에서의 함수비 변화에 따른 전기비저항 거동양상 실험을 실시하였다. 토조 하부 20 cm에는 주문진 표준사를 채우고, 상부 10 cm에는

Fig. 10. Experiment design of Jumunjin standard sand and weathered granite soil.

마사토를 채워 실험을 수행하였다(Fig. 10).

Fig. 11과 12의 Phase 5, 6과 7은 동일 시료에서 함수비가 점점 증가하는 그림이다. Phase 5, 6, 7의 변화 양상을 보면 증

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 5 (April. 10 11:18 Jumunjin standard sand + weathered granite soil)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 6 (April. 12 18:04 Jumunjin standard sand + weathered granite soil)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 6 / Phase 5 (ratio)

Fig. 11. Ratio of resistivity variation between phase 5 and phase 6.

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 5 (April. 10 11:18 Jumunjin standard sand + weathered granite soil)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 7 (April. 12 20:00 Jumunjin standard sand + weathered granite soil)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Phase 7 / Phase 5 (ratio)

Fig. 12. Ratio of resistivity variation between phase 5 and phase 7.

류수가 투입 되면서 상부에 있는 마사토의 경우 큰 변화 양상이 나타나지 않지만 하부의 주문진 표준사의 경우 점점 저비저항대가 나타남을 알 수 있다. 이는 Fig. 13의 함수비 변화 양상에서도 나타나고 있다. 상부에 있는 포트 3, 4번은 큰 변화가 없지만 하부의 포트 1, 2 번은 함수비 변화 폭이 큰 것을 알 수 있다. 상부에서 투입된 증류수가 마사토를 지나 하부로 내려오면서 함수비가 급격히 증가했다고 생각된다. Fig. 11과 12의 세 번째 전기비저항 변화비 그림을 보면 시간이 경과 할수록 상부의 마사토는 큰 변화가 없지만 하부의 주문진사는 함수비에 영향을 받아 전기비저항이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 마사토 토질의 특성으로 증류수를 머금고 있는 것이라 확인되며, 주문진사는 증류수를 잘 투과 시켜 하부에 주문진사가 증류수에 포화되면서 함수비가 점점 증가하는 양상이 나타나는 것이라 생각된다. 따라서 마사토와 주문진사같이 층으로

Fig. 13. Moisture content of Jumunjin standard sand and weathered granite soil.

구별된 토질을 함수비에 따른 비저항 변화 모니터링을 한다면, 비저항 거동 양상이 다르므로 토질을 구분 지을 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 실내 실험의 적용성을 알아보기 위해 토조 실험과 유사한 테스트 베드를 선정하여 현장 실험을 실시하였다.

Fig. 14. Photos of site, (a) field test line, (b) used hand auger extracted sample of soil, (c) resistivity survey, (d) seismic refraction survey.

현장 적용 실험과 실내 실험 비교

현장 적용실험

실내 실험을 통해 각 시료별 함수비에 따른 거동 양상을 알아보았다. 이를 현장에 적용했을 때 비슷한 양상이 나오는지에 대한 적용 실험을 실시하였다. 앞서 실시한 모형 실험은 규모의 차이가 있어 직접 현장에 적용할 수 있는지에 대한 한계를 포함하고 있다. 이러한 규모 문제의 불확실성을 확인하기 위해 실내 실험과 비슷한 시료를 포함하고 있는 테스트 베드를 선정하여 비교해 보았다. 현장은 춘천시 서면에 위치하고 있고, 산을 깎아 평평한 대지를 이루고 있는 현장을 선정하였다. 이곳의 토질은 대부분이 마사토로 이루어져 있어 실내 실험에서 실시한 마사토 결과와 비교를 해 볼 수 있었다. 또한 실내 실험에서 하지 못했던 탄성과 굴절법 탐사를 이용해 마사토층의 경계를 확인하여 함수비 변화에 따른 현장 전기비저항 거동 양상을 알아보았다. Fig. 14를 보면 현장 사진(Fig. 14(a))과 전기비저항(Fig. 14(c)), 탄성과 굴절법 탐사(Fig. 14(d))를 실시한 것과 핸드 오거를 이용하여 시료를 채취(Fig. 14(b))하여 현장

Fig. 15. Grain size distribution curve of field sample of soils.

토질에 대한 입도분석을 실시하였다.

Fig. 15는 현장 시료의 입도 분석을 나타낸 결과이다. Table 3의 결과를 통해 실내 실험을 실시한 마사토와의 입도를 비교해보면, 곡률계수는 실내실험 마사토보다 더 낮게 나오고 1보다 낮게 나타나고 있어 입도분포가 양호하지 못한 것을 확인할 수 있다. 균등계수는 실내실험 시료와 비슷한 영역에서 나오고 있다. 따라서 현장 시료는 실내 실험 시료보다 균질하지 않은 상태의 마사토라는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 실내 실험 시료와 비교했을 때 균질하지 않지만 마사토라는 것을 바탕으로 전기비저항 탐사와 탄성과 굴절법 탐사를 수행하였다.

전기비저항 탐사는 2012년 7월 2일과 7월 16일에 걸쳐 실시하였다. 7월 16일에는 비가 온 뒤 바로 전기비저항 탐사를 수행하여서 현장 함수비에 따른 거동 양상을 비교할 수 있었다. 탐사 설치는 총 측선 40 m의 21 ch 전극봉과 전극간격 2 m, 쌍극자 배열을 이용하여 측정을 하였다. Fig. 16은 2회에 걸쳐 전기비저항을 측정한 결과와 그 결과에 따른 전기비저항 변화비를 나타내고 있다. Phase 1은 2012년 7월 2일, Phase 2는 2012년 7월 16일에 전기비저항을 측정하여 얻은 자료를 역산을 통해 구한 전기비저항 분포도이다. 각 Phase 1, 2에 표시된 a~e는 직접 시료를 채취하여 함수비를 구한 위치이다. Table 4에서 보는 바와 같이 비가 온 뒤에 함수비가 증가한 것을 볼 수 있다. 2012년 7월 2일 c지점의 시료는 누락되어서 함

Table 3. Grain size analysis of field sample of soils.

Grain size analysis	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
D_{max}	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)	4.750 (No.4)
D_{min}	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)	0.038 (No.400)
D_{10}	0.35	0.35	0.45	0.25	0.22
D_{60}	2.5	2.2	2.1	1.7	1.2
C_u	7.14	6.29	4.67	6.8	5.45
C_c	0.73	0.83	1.28	0.85	0.95

Fig. 16. Ratio of resistivity variations between Phase 1 and Phase 2.

수비를 측정하지 못하였다. 현장 상부에 나타나는 Fig. 16의 전기비저항 변화비 그림은 변화비가 1보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 현장에서의 마사토 실험도 실내 실험과 마찬가지로 물의 영향을 받아 비슷한 거동양상을 나타내는 것을 확인하였다. 하지만 전기비저항 변화비에서 1보다 큰 부분, 더 낮은 부분에 대해서 설명할 근거가 없어 이에 대한 추가적인 탐사로 탄성과 탐사를 실시하였다.

탄성과 굴절법 탐사는 총 측선 46 m, 24개의 지오폰, 지오폰 간격 2 m로 하여 실시하였다. 탄성과 굴절법 탐사를 통해 현장의 지층 구조가 어떻게 이루어져 있는지 알아보고자 하였다. 탐사를 실시한 결과 탐사 상부에서는 300 m/s의 속도가 나타나고 하부에서는 1000 m/s의 속도 층으로 나누어져 나타났다. 속도 경계 결과로 봐서 풍화된 암석의 P파 속도보다 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. Fig. 17은 탄성과 결과 그림과 전

Table 4. Moisture contents for each location.

Location	July. 2 moisture content (%)	July. 16 moisture content (%)
a	18	16.2
b	10.9	17.3
c	x	17.5
d	5.7	11.8
e	8.6	12.7

기비저항 변화비 그림을 합쳐 그린 것이다. 탄성과 속도 영역에서 300 m/s에 해당되는 대부분의 지역이 전기비저항 변화비 그림과 비교 했을 때 1보다 낮게 나타나는 지역이다. 하지만 1000 m/s의 영역에서 변화비가 1보다 크고 작은 부분이 있는데 이는 탄성파를 통해 확인된 층 경계에 따라 빗물이 흘러 전기비저항 변화비가 낮아진 것이라 생각되어진다. 변화비가 1

Fig. 17. Combination of seismic wave and ratio of change in resistivity.

보다 높게 나타난 지점은 하부의 경계층 영향으로 물의 흐름이 막혀 1보다 높게 나타난 것이라 생각되어진다. 이러한 탄성과 굴절법 탐사를 통해 전기비저항 변화비에 대한 해석을 높일 수 있었다.

현장 탐사와 대형 토조 실험 전기비저항 양상 비교

실내실험을 통해 얻은 마사토의 전기비저항 거동 양상과 현장 탐사를 통해 얻은 마사토 지반의 전기비저항 거동 양상은 Fig. 18과 Fig. 19를 통해 비교해 볼 수 있다. 실내 실험과 다른 점은 현장에서는 마사토가 넓은 범위에 분포하고 있기 때문에 모형 토조와 같이 아래 부분에 수분을 머금게 되어 전기비저항이 낮게 나타나는 현상이 발생하지 않는다. 실내 실험의 경우 함수비가 증가함에 따라 전기비저항 거동 양상이 신속하게 변하는 것을 전기비저항 변화비를 통해 알 수 있었는데, 현

Phase 1 (March, 27 20:30 weathered granite soil)

Phase 2 (March, 28 00:40 weathered granite soil)

Phase 2 / Phase 1 (ratio)

Fig. 18. Ratio of resistivity variation between phase 1 and phase 2.

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

TEST LINE (2-D Resistivity Structure)

Fig. 19. Ratio of resistivity variations between Phase 1 and Phase 2 on field experiment.

장 탐사를 통해 얻은 결과에서도 시간의 차이는 있지만 비슷한 거동양상을 나타내었다. 현장 적용 실험을 추가적으로 실시한다면 실내 실험과 현장 실험의 규모에 따른 불확실성을 줄여 줄 수 있을 것이라 생각된다. 따라서 실내 실험과 현장 마사토 실험을 통해 함수비에 따른 전기비저항 거동 양상에 대한 모니터링을 실시하면 토질 종류를 해석 할 수 있을 것으로 보인다.

결론

지반 설계 정수를 산정하는데 있어 비파괴 조사 방법인 전기비저항 탐사를 이용하여 토양 특성에 따른 전기비저항 거동 양상을 알아보고자 하였다. 주문진 표준사와 마사토를 이용하여 대형 모형 토조를 제작한 후 전기비저항 탐사를 수행하여

각 시료의 함수비와 전기비저항의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 두 시료의 모형 토조 실험을 통하여 대체적으로 함수비가 높아질수록 전기비저항은 낮아지는 경향이 나타나는 것을 알 수 있었다. 마사토는 주문진 표준사에 비해 투수성이 낮기 때문에 수분을 더 오래 함유 할 수 있어 두 시료를 같이 비교하였을 때 시간이 경과한 뒤에도 전기비저항 거동양상이 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다.

한편, 주문진 표준사는 모형 토조 실험에서 마사토 보다 함수비에 따라 전기비저항 거동양상이 민감하게 반응하고, 공극률이 크고 투수성이 높아 토조의 상부보다 하부에서 전기비저항 값이 낮게 나타나고 상부에서는 전기비저항 변화가 크게 나타났다. 이는 상부에서 전류가 잘 통하지 않는다는 것을 의미하며, 마사토가 주문진 표준사보다 입자끼리의 접촉을 통한 전류전도와 증류수에 의한 전류전도가 잘 일어나는 것임을

알 수 있었다. 추가적으로 시간의 변화에 따른 실험을 수행하고, 지반의 전기비저항을 측정한다면 전기비저항의 분포와 변화양상을 통하여 지반의 토질을 예측 할 수 있을 것이라 판단되었다.

현장 탐사를 통하여 실제 지반의 함수비에 따른 전기비저항 변화 양상을 알아보았다. 실내 실험과 비슷한 테스트 베드를 선정하여 탄성과 굴절법 탐사를 통해 지반의 층 구조를 알아내고, 전기비저항 변화비를 통해 함수비에 따른 변화를 해석한 결과 실내 실험과 비슷한 전기비저항 거동양상이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 차후, 다양한 토질의 상태와 종류별 함수비에 따른 전기비저항 거동양상 자료를 수집한다면 토질 층의 구분과 지반설계정수 산정의 기초자료로 이용하는 것에 무리가 없을 것이라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(과제#11 기술혁신 E02) 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0007031). 관계 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R., 1996, Electrical resistivity of compacted clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 397-406.
- Casagrande, A., 1948, Classification and identification of soils, *American Society of Civil Engineers of Soils*, **113**, 901-991.
- Chung, S. H., Lee, M. J., Kim, J. H., Cho, S. J., and Song, Y. H., 1999, 3-D resistivity method for geotechnical survey, *KSEG, 2nd Conference*, 21-36.
- Chung, S. G., Kwag, J. M., Giad, P. H., Baek, S. H., and Prasad, K. N., 2004, Study of soil disturbance of Pusan clays with reference to drilling, sampling and extruding, *Geotechnique*, **54**, 61-65.
- Kaya, A., and Fang, H. Y., 1997, Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity, *Journal of Environmental Engineering*, **123**, 169-177.
- Kim, J. H., Song, Y. H., and Chung, S. H., 2000, Subsurface imaging using electric and EM method, *Conference by KSEG and KGES*, 121-154.
- McCarter, W. K., 1984, The electrical resistivity characteristics of compacted clays, *Geotechnique*, **34**, 263-267.
- Oh, M. H., and Park, J. B., 2000, Laboratory tests for the development of the contaminant leakage detection system in soil, *Proceedings of GeoEng2000, International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia*, **2**, 286.
- Park, S. G., and Kim, H. J., 1999, Application of geophysical exploration to geotechnical survey in Japan, *KSEG, 2nd Conference*, 1-20.
- Park, S. G., 2005, Application of electrical resistivity monitoring technique to maintenance of embankments, *Mulli-Tamsa*, **8**, 177-183.
- Saarenketo, T., 1998, Electrical properties of water in clay and silty soils, *Journal of Applied Geophysics*, **40**, 73-88.
- Sakaguchi, K., 2008, Proposal of engineer against a geophysical exploration application, *KSGE*, **44**, 600-610.
- Shin, E. C., Lee, H. J., and Oh, Y. I., 2004, Prediction of soil-water characteristic curve and unsaturated permeability coefficient of reclaimed ground, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **20**, 109-120.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., and Chung, S.-H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.
- Yoon, G. I., Oh, M. H., and Park, J. B., 2002, Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer, *Environmental Geology*, **43**, 18-28.
- Yoon, H. K., Kim, D. H., Lee W., and Lee, J. S., 2010, Field elastic wave and electrical resistivity penetrometer for evaluation of elastic moduli void ratio, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, **30**, 85-93.
- Yoon, Y. Y., Kim, Y. J., Kim, Y. S., and Choi, E. H., 2009, Evaluation on disturbance of undisturbed clay due to sampling methods, *Conference Co-Hosted by KISTEC & KGES, KGES*, 209-214.