

전기비저항탐사를 이용한 성토하부 연약지반의 변형 해석

김재홍^{1*} · 홍원표² · 김규범¹

¹K-water연구원, ²중앙대학교 사회기반시스템공학부

Interpretation of Soft Ground Deformation under Embankment using the Electrical Resistivity Survey

Jae-Hong Kim^{1*}, Won-Pyo Hong², and Gyoo-Bum Kim¹

¹K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

²School of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University

해안 매립 연약지반상에 도로나 제방을 성토할 경우 연약지반 속에서는 침하, 융기, 측방유동 등의 지반변형이 빈번하게 발생한다. 연약지반의 지반변형 거동을 지상에서 원지반을 훼손하지 않고 조사하기 위하여 전기비저항탐사법을 적용하여 보았다. 본 연구에서 해안지역의 점토질 퇴적층이 주로 분포하는 서해안 시화지구의 매립지역에서 실험성토를 실시하였다. 실험성토후, 성토하중에 의한 연약지반의 변형 영향범위를 확인하기 위하여 전기비저항탐사법을 실시한 결과, 수평방향으로는 성토 지역에서 남측으로 약 5 m 범위, 수직 방향으로는 지표하부 약 5~6 m로서 성토 높이의 약 1.0~1.2배 심도까지 높은 전기비저항으로 성토의 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구결과 성토에 의한 연약지반의 변형을 해석 하는데 전기비저항탐사 방법을 적용이 가능한 것을 확인하였다.

주요어 : 연약지반, 측방유동, 지반변형, 전기비저항탐사

Soil deformations such as settlement, heaving and lateral flow have frequently happened on marine reclaimed soft grounds due to embankment filling or banking. The electrical resistivity survey was applied to investigate on ground surface such soil deformation without disturbance of ground. A test embankment was performed to assess soil deformation in marine reclaimed soft grounds, where was located at Sihwa area in western coast of Korean peninsula. The soft ground was composed of clayey sediments. After embankment filling, the boundary of soil deformation affected by the filling could be investigated with application of the electrical resistivity survey. The result of electric resistivity survey shows that the extent of deformation is about 5 m laterally to the southern direction of embankment and about 5~6 m vertically in depth, which is about 1-1.2 times of embankment height. This shows that the electric resistivity survey can be applied to interpret the ground deformation in a soft ground region.

Key words : soft ground, lateral flow, ground deformation, electrical resistivity survey

서 론

연약 점토지반에 성토를 하면 하부지반에서는 연직 변위인 침하현상과 지반중에는 수평변위인 측방변형이 발생하게 된다(Fig. 1). 이러한 연약지반의 측방변형 현상을 측방유동(Lateral flow)이라 하는데 하중증가로 과잉간극수압이 급증하여 지반의 강도가 저하되고 소성영역이 확대되어 점차 소성평형상태로 이전된다. 즉, 과잉간극수

압의 소산에 필요한 충분한 시간이 지나기 전에 재하하중을 지속적으로 증가시키면 지반내의 과잉간극수압이 증가하게 되어 측방유동압(Lateral flow pressure)이 발생되고 이로 인해 측방유동현상이 발생하게 된다(홍원표와 안종필, 1994). 측방유동에 대한 국내 연구로는, 연약지반의 측방유동에 대한 실내실험(이광우 외, 2009)과 측방토압에 대한 지하매설물 거동 현상의 실내실험과 수치해석(김재홍과 홍원표, 2010)등이 수행된 바 있다. 지반의 전기

*Corresponding author: kjhprnk@kwater.or.kr

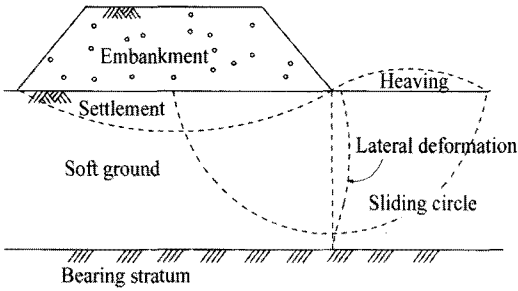


Fig. 1. Lateral flow and slip failure of soft ground.

비저항적 특성은 연약지반의 분포를 파악하는데 활용될 수 있는데, 지반의 공극률, 포화도, 간극수의 전기비저항(전기전도도의 역수), 점토 함유량, 입도 조성, 성분 및 온도 등은 전기비저항에 영향을 미치는 요인으로 연구된 바 있다(박삼규, 2004). 연약지반에 전기비저항탐사를 이용한 연구는 연약지반의 토질역학과 전기비저항탐사를 비교한 연구(송무영과 김팔규, 1992), 전기비저항 콘 프로브를 이용한 해안연약지반의 간극률 산정 연구(김준한 외, 2009), 연약지반조사를 위한 전기비저항탐성과 Flat DMT 장비 개발(방은석 외, 2007) 및 연약지반에 설치된 매설물에 대한 전기비저항탐사(김재홍 외, 2010) 등이 있다.

해안연약지반에 성토로 인한 하부지반의 변형분석을 평가하기 위하여 매립중인 연약지반상에 실험성토를 시행하였으며, 실험성토 후 성토로 인한 성토체 인접 연약지반의 느슨함과 조밀함을 파악하기 위하여 실내실험과 수치해석이 아닌 전기비저항탐사를 적용하여 하부지반의 거동을 분석하였다.

연구대상 지역

지형

본 연구지역은 경기도 시흥시 정왕동 시화방조제 입구

부근으로서 수도권 첨단사업의 분산을 위하여 해안을 매립하여 부지를 조성중이다. 연구지역을 포함하는 광역 지역은 한반도 중서부 서해안에 위치하며 전형적인 리아스식 해안을 보이고 있다. 노년기의 지형으로 대부분이 구릉성 산지를 형성하며, 서해안과 인접하여 침식해안을 이루고 있으며 육지와 인접하여 크고 작은 섬들이 분포하며 육지에서 유입되는 퇴적물에 의한 갯벌지대가 넓게 발달하였다(Fig. 2).

지층 분포

실험성토 구간 인접 2개소 및 주변 지역 2개소의 시추 자료에 의하면(Fig. 5 참조), 당초 지표면의 상단 1.5m는 해상 준설모래를 이용하여 성토되었으며, 성토 지표면을 기준으로 하부 1.5~5.0m는 주로 실트질 모래가 분포하고, 5.0~10.0m는 실트질 점토, 10.0~20.0m는 점토로 구성되며, 그 하부는 풍화암과 기반암이 분포한다. 본 지역은 해안 퇴적층으로서 편평한 지형 특성으로서 수평 방향의 퇴적층의 변화가 거의 없는 것으로 파악되었다(Fig. 3).

시추조사중 시행한 표준관입시험과 불교란 시료를 채

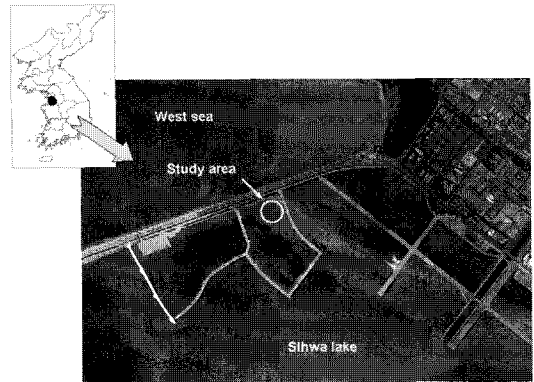


Fig. 2. Location of study area (Scale : None).

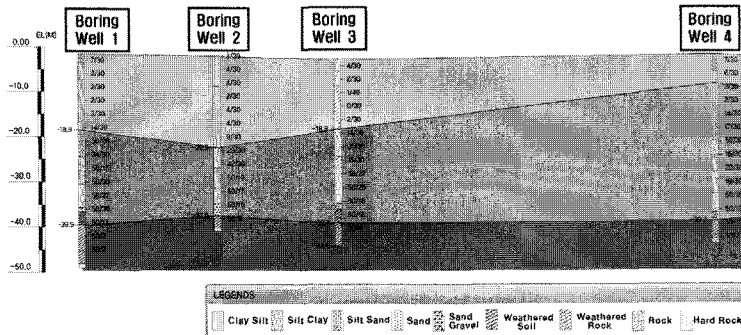


Fig. 3. Geologic profile of study site.

취하여 실내에서 삼축압축실험을 수행한 결과에 의하면, 지표 하부 10.0 m 심도 범위의 퇴적토는 N치가 5~7정도이며 10 m 이하는 N치가 2~4정도의 연약한 점토로 나타났다. 점토층의 비배수전단강도 c_u 는 약 0.14~0.25 kgf/cm²이고 점착력은 0.18~0.25 kgf/cm²이며, 내부 마찰각은 25°~30°로 나타났다(한국수자원공사, 2003).

용기 현황

성토지반의 변형 특성을 파악하기 위하여 2010년 7월 6일부터 8일까지 3일에 걸쳐 실험성토를 실시하였으며, 재하 성토체는 하부의 폭이 15.0 m, 상단의 폭이 8.0 m, 높이 5.0 m, 길이는 총 60.0 m로 성토하였다. 실험성토 종료 후 11일째에 성토로 인한 하부지반의 측방거동으로 성토체의 남측 끝단 지표면에서 용기(Heaving)가 나타났다(Fig. 4). 용기된 부분의 형상을 파악하기 위하여 3차원 레이저 스캐너(3D-laser scanner)를 적용한 결과 약 30 cm 정도 용기된 것으로 해석되었다.

탐사 계획 수립

임의의 물체 양단에 일정한 전압을 걸어주면 어떤 물체는 많은 양의 전류를 흘려 보내주지만 어떤 물체는 훨씬 적은 양의 전류밖에 흘려 보내지 못한다. 이렇게 전류를 흐르지 못하게 하는 특성을 그 물체의 전기 저항(R)이라 하는데, 만약 도선에 전류를 흘려 보내주면 도선은 그 도선을 이루는 물체의 성질과 길이(L)에는 비례하고 단면적(A)에는 반비례하는 전기 저항을 갖게 된다. 또한, 물체의 모양과 크기에 관계없는 물체의 전기적 특성을 나타내는 비례상수를 전기비저항(Resistivity)이라 하며

단위는 ohm-m가 된다. 즉 전기비저항이란 단위체적 물질이 갖는 저항이라고 정의할 수 있다. 전기비저항탐사는 한 쌍의 전류전극에 전류(I)를 흘려주면 전류선이 형성되고 이에 수직인 방향으로 등전위선이 형성되는데 이때 전기적으로 불균질한 매질이 존재할 경우 등전위선이 왜곡현상을 일으키게 된다. 전기비저항탐사란 지표상의 여러 지점에서 전위차를 측정하고 이를 분석하여 전기적 이상대를 찾고자 하는 방법이다. 일반적으로 전기비저항값을 감소시켜 주는 요인들은 함수비 증가, 물의 염도 증가, 점토 함량의 증가, 입자 크기의 감소 등이며 물이 공극을 채우고 있다고 가정하면 전기비저항값은 공극률의 증가, 파쇄대의 증가, 풍화정도의 증가 등에 의해 낮아진다. 반대로 고결과 암석화(Lithification) 작용의 증가는 전기비저항값을 증가시킨다.

본 연구에서는 매립중인 해안연약지반에 실험 성토를 시행하여 실험성토체 인접 하부 지반의 변형거동을 전기비저항탐사로 확인하고자 미국 AGI의 Super Sting R8/IP을 사용하여 전기비저항탐사를 실시하였다. 전극배열은 쌍극자 배열(Dipole-dipole) 방식을 적용하였으며, 전기비저항탐사 범용해석 프로그램인 Dipro (Ver 4.0)로 하였다. 현장에서 측정된 외견비저항치(Apparent resistivity)를 이용하여 야외자료 가단면도(FDP: Field Data Pseudosection), 이론자료 가단면도(TDP: Theoretical Data Pseudosection)를 작성하여 역산해석을 시행하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 성토지반의 남측에 4개의 측선을 배치하여 수행하였다. 특히, 측선 1에서는 추가적인 변형 여부 등을 파악하기 위하여 50일 경과 후에 재탐사(측선 5)를 실시하였다. 성토직후에는 지속적인 우천 관계로 탐사가 불가하여 성토완료후 11일후부터 탐사를 시작하였다. 실험성토 인접에 위치한 시화호는 일정한 수위(EL.-1.0 m)로 관리하기 때문에 해수유입으로 실험에 지장을 초래하지는 않았다.

측선 1은 실험 성토 지역의 남측으로 2.0m 떨어진 지점을 따라 배열되었으며, 측선 2는 측선 1로부터 3.0m, 측선 3 및 측선 4는 인근 측선으로부터 5.0m 떨어져 배치하였다. 전극 간격은 조밀한 지층 분포를 파악하기 위하여 1.5m 간격으로 실시하였다.

탐사 결과

측선 1 구간

측선 1에서 최초 실시한 전기비저항탐사 결과는 Fig. 6과 같으며 측선과 성토체의 중심인 11번 전극을 기준으로

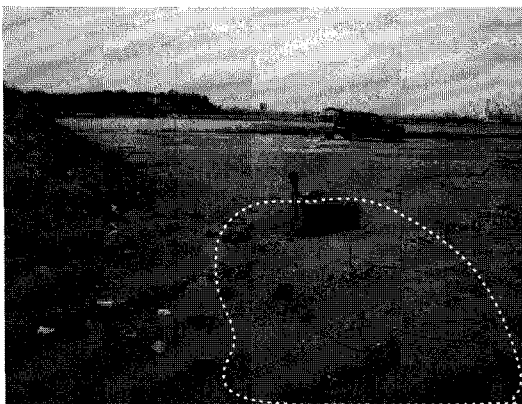


Fig. 4. Heaving area after an embankment.

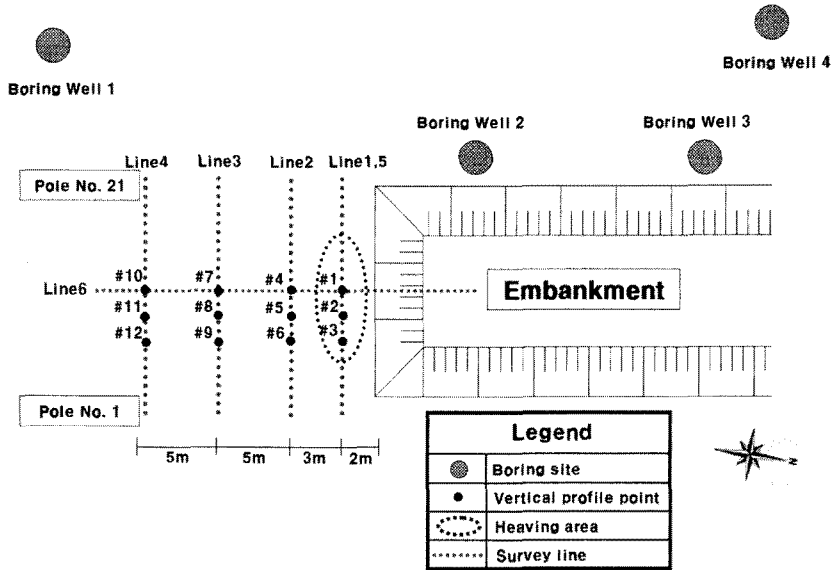


Fig. 5. Electrical resistivity survey lines at the study area.

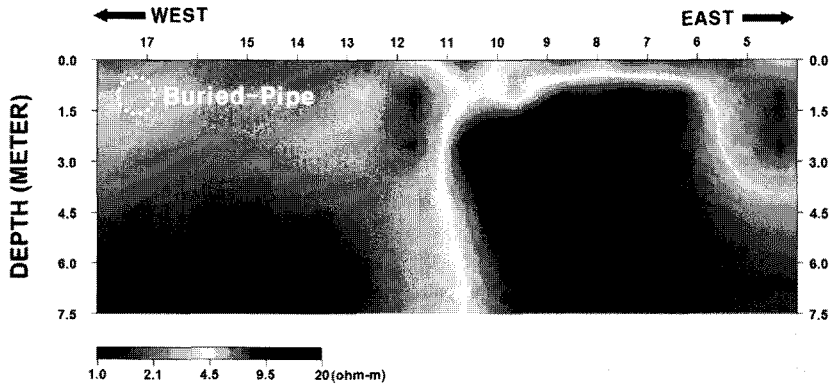


Fig. 6. Inverted resistivity distribution of the line 1 (from West to East : from 17 to 5).

하부지반의 좌우 경향이 다르게 나타났다.

전극 11~18 지점의 경우 지표면에서 하부 1.5m까지는 1 ohm-m의 전기비저항이 분포하며 이것은 매립한 준설 토사를 의미한다. 하부로 갈수록 높은 전기비저항을 나타내며 심도 3~5m에서 가장 높은 전기비저항을 보인다. 성토체의 동측 대각선 끝에 해당하는 전극 16번부터는 재하성토로 인한 상재하중의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 전체적으로 동측 지역은 성토체 높이에 해당하는 지표하부 5m 까지가 전기비저항이 크게 나타나 성토에 의한 영향을 받는 것으로 해석된다.

측점 11부터 서측 하부지반은 낮은 전기비저항을 보이며, 전극 4~5의 하부 1.5~2.0m는 인접 매립관으로 인하여 높은 전기비저항을 보이는 것으로 나타났다.

측선 2 구간

전극 11번을 중심으로 동측인 전극 11번부터 8번 까지 높은 전기비저항이 형성되어 있다. 또한, 측점 4~6번의 하부 3m까지의 높은 전기비저항은 공사용 도로에 의한 다짐 작용의 영향으로 해석된다. 중심 서측을 살펴보면 지표면에서 하부 심도 1.5m는 매립 토사가 분포하며 하부로는 점토의 낮은 전기비저항이 나타난다.

측선 3 구간

측선 3에서 전극 7~18에 해당하는 대부분의 구간에서 지표면 하부 1.5m까지 매립토사에 의한 균질한 전기비저항이 나타나고 그 하부에는 연약 점토층의 낮은 전기비저항을 보여 측선 1 및 2에서와 같은 높은 전기비저

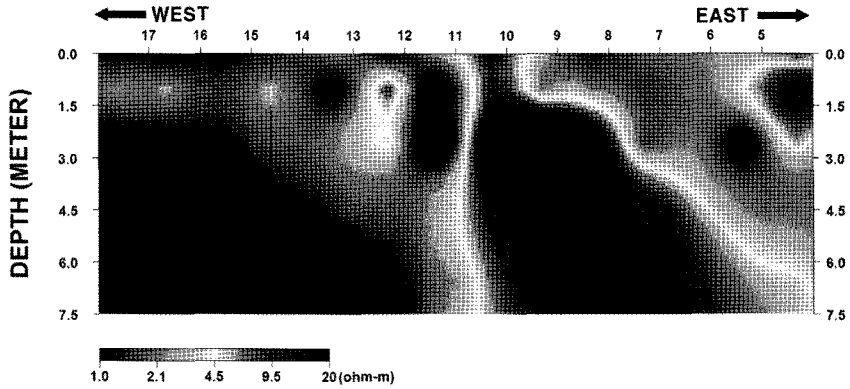


Fig. 7. Inverted resistivity distribution of the line 2 (from West to East : from 17 to 5).

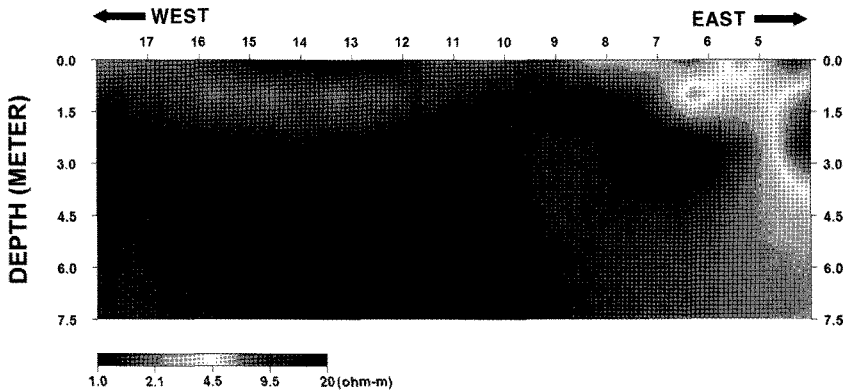


Fig. 8. Inverted resistivity distribution of the line 3 (from West to East : from 17 to 5).

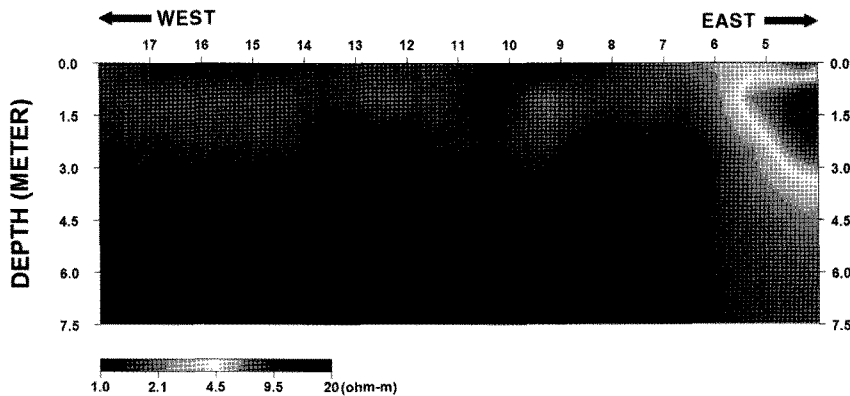


Fig. 9. Inverted resistivity distribution of the line 4 (from West to East : from 17 to 5).

항의 분포는 나타나지 않는다. 전국 4~6번에서는 지표면에서 하부 심도 4.0m까지 높은 전기비저항이 좁게 나타나는데 이는 축선 2와 마찬가지로 공사용 도로의 영향으로 해석된다.

축선 4 구간

축선 4에서 실시한 전기비저항탐사 결과는 축선 3과 유사하게 지표면에서 하부 1.5 m까지는 매립 토사의 분포를 보여주며, 그 하부로는 연약 점토층을 의미하는 낮은

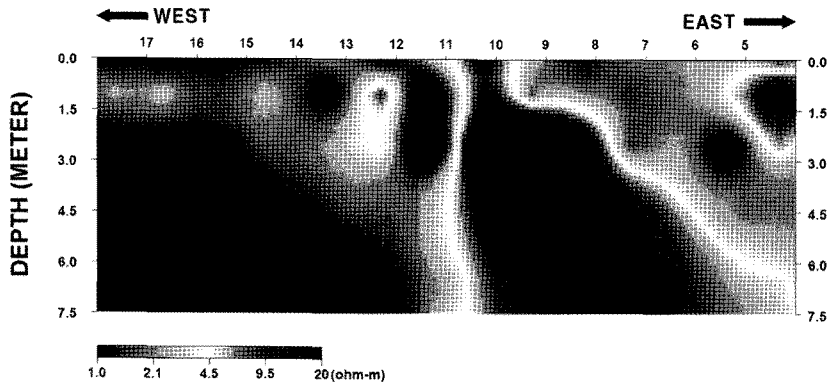


Fig. 10. Inverted resistivity distribution of the line 5 (from West to East : from 17 to 5).

전기비저항이 나타난다. 전국 4-6번의 경우 지표면 하부 심도 4.0m까지 높은 전기비저항이 나타나는데 측선 3과 유사하게 도로의 다짐작용에 의한 결과라 할 수 있다.

측선 5 구간

50일 경과한 이후 측선 1과 동일한 노선을 따라 전기비저항탐사를 재실시하였는데 그 결과는 Fig. 10과 같다. 지표면에서 하부 1.5m까지는 준설토사의 표층이 나타나며, 측점 11번부터 동측에서는 Fig. 5와 마찬가지로 하부 지반의 높은 전기비저항이 분포한다. 측점 4-5번 사이 하부 심도 3.0m까지 높은 전기비저항이 나타나는데, 이는 측선 2와 마찬가지로 공사용 도로로 인하여 지반이 다져진 결과로 해석된다. 서측에서는 지표면 1.5m 하부까지 준설토사가 나타나고, 그 하부에는 연약 점토층이 낮은 전기비저항을 보인다. 전체적으로 낮은 전기비저항으로 50여일 전후의 전기비저항은 큰 차이는 없지만 다른 측선과 구별되게 성토로 인한 하부지반의 거동이 확인되었다.

해석 및 토의

용기 지반의 수직적 특성을 파악하기 위하여 상기 전기비저항탐사 측점 중 12개 지점에 대하여 전기비저항의 수직적 분포를 분석하였다(Fig. 5 참조). 측선 1 및 5의 경우 #1, #2 및 #3 지점에서의 심도별 전기비저항을 도시한 결과(Fig. 11 참조), #1 지점에서의 수직적 변화는 거의 발생하지 않았으나 #2 및 #3 지점에서는 높은 전기비저항이 분포하고 있다. #1 지점보다 #2 및 #3 지점의 전기비저항이 높게 나타난 것은 성토지반 서측에 설치된 지하매설관 및 역지막쪽의 영향으로 측선 1의 동측 방향에서 주로 압축 현상이 나타남을 설명한다. 용기 현상이

발생한 직후 수행한 탐사에서는 높은 전기비저항이 심도 1~3m 정도까지 나타나고 있으나 50일 경과 후 수행한 탐사에서는 높은 전기비저항이 심도 약 5m 정도까지 분포하고 있고 전기비저항이 증가한 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 실험성토 이후 용기가 발생하고 일정 기간이 경과한 이후 지반의 다짐 작용 등이 증가되었음을 보여준다.

측선 2의 경우, 중앙부근인 #4 지점은 심도에 따라 적은 범위 내에서 전기비저항에 변화가 있으며, #5 및 #6 지점의 경우 전기비저항 범위의 변화는 상대적으로 크고 5~6m 심도까지 높은 전기비저항이 나타났다. 측선 3 및 4의 경우, 각 측점의 심도별 전기비저항 변화는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다.

전체적으로 측선 1, 2 및 5 구간은 일정 심도까지 전기비저항이 높게 나타나고 있으나 측선 3 및 4 구간의 하부에서는 큰 변화가 없는 것으로 해석되어 실험 성토에 의한 지반 변형은 성토 경계부에서 남측으로 약 5m 정도까지 미치고 있으며, 지표 하부로도 최대 약 5~6m 정도로서 성토 높이의 1~1.2배 정도 영향을 받는 것으로 해석된다. 이 결과는 실제 지표면에서 나타난 용기 발생 지역보다 넓은데, 실험 성토에 의한 하중이 수평 및 하부 일정 구간까지 영향을 미치고 있음을 보여준다. 이와 같이 육안 상으로 확인하기 어려운 지하 하부의 영향 범위를 파악하기 위해서는 전기비저항탐사와 같은 지구물리 탐사 방법을 적용하는 것이 효과적이며, 향후 용기 및 변형 지역의 보강 대책 수립시 탐사에서 제시된 영향 범위까지 고려하는 것이 필요하다.

수평 및 수직적인 전기비저항의 차이는 매질 자체가 갖고 있는 이방성에 의하여 태생적으로 나타날 수 있으나, 본 지역이 해안 퇴적층으로서 수평방향의 균질한 점토질로

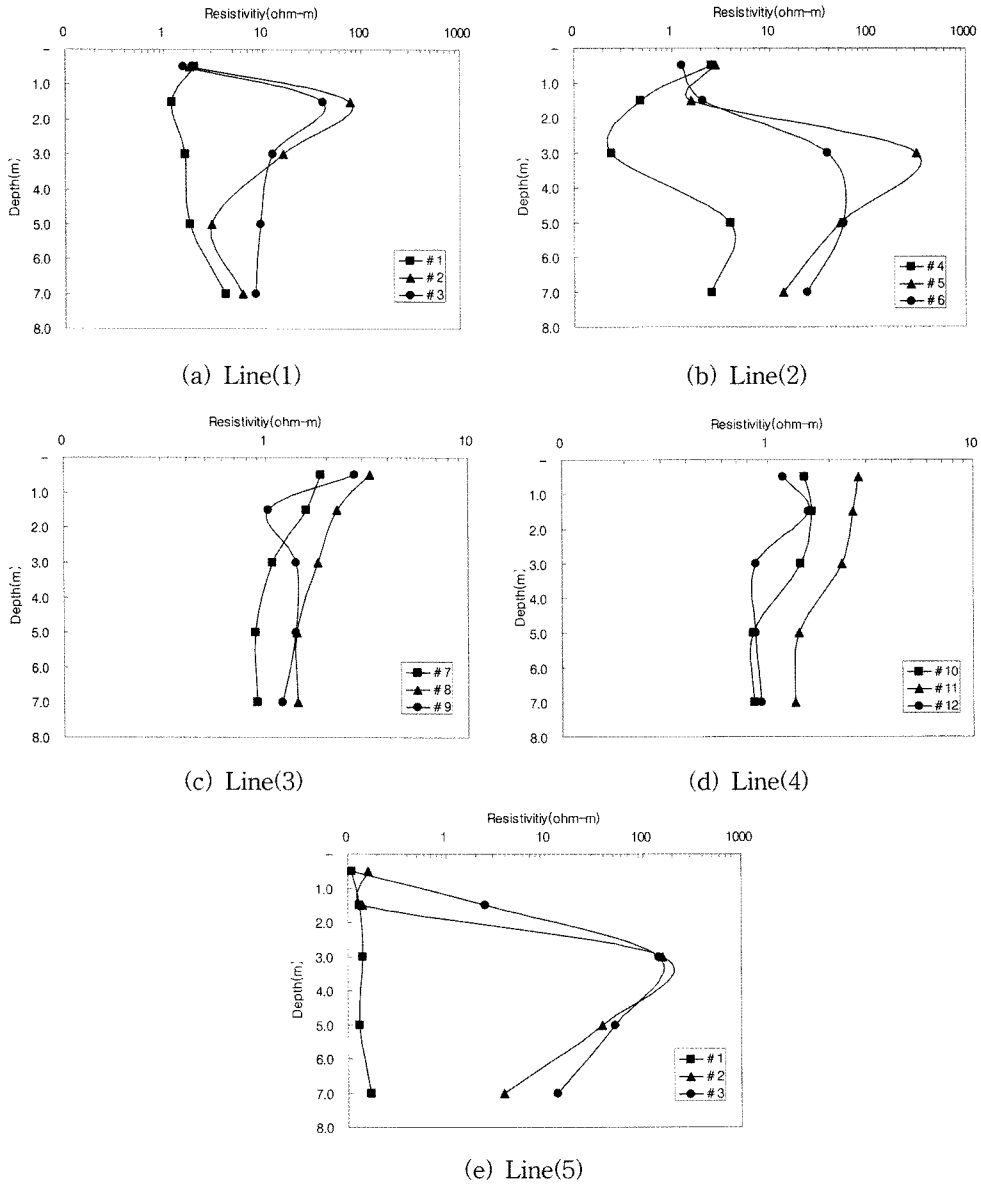


Fig. 11. Resistivity vertical profile at each survey point.

구성되는 등 십 여 m 이내에서는 수평 방향 이방성이 거의 없다는 점을 고려한다면 전기비저항의 차이는 실험 성토에 의한 지하 연약지반의 변형에 의한 결과로 해석된다.

본 연구에서는 지구물리 탐사로서 전기비저항탐사 방법을 활용한 연약지반 변형 평가의 적용성을 검토하였으나, 하나의 방법에 의한 해석에는 한계가 있으므로 다양한 현장 및 실내 실험이 병행되어 최종적인 영향범위를 결정하는 것이 바람직하다.

결론

해안 연약지반 상부에 성토를 할 경우 성토체 주변지역에서 발생하는 지반 변형의 특성을 파악하기 위하여 전기비저항탐사를 실시한 결과는 다음과 같다.

1) 점토질로 구성된 원지반 상부를 1.5m로 매립중인 부지에 성토로 인한 하부지반의 전기비저항 변화를 관찰하기 위하여 5m 높이의 실험성토로 원지반에 변형이

발생하여 3차원 스캐너로 분석한 결과 약 30 cm의 응기가 나타났다.

2) 응기지반의 지하 변형특성을 파악하기 위하여 전기비저항탐사를 실시한 결과, 실험성토 구간으로부터 남측으로 약 5 m, 깊이로는 약 5~6 m 실트질 모래층에서 높은 전기비저항이 나타나 성토에 의한 영향 구간임을 알 수 있다.

3) 본 연구지역 연약지반의 특성상 수평방향으로는 균질한 점토질 퇴적층이 분포하고 있기 때문에, 측방유동 변형은 매질 자체에 의한 영향보다는 실험성토에 의하여 발생하였음을 알 수 있으며, 하부 지반의 변형은 성토체 서측의 역지대책이 없는 방향으로 주로 나타났다.

4) 전기비저항탐사에 의한 지층 하부지반 변형의 영향 범위는 지표면에서 육안으로 확인되는 것보다 넓으며, 이는 추후 기초 보강 대책 수립시 지표면에 나타난 영향 지역 뿐 아니라 탐사에서 제시된 영향 범위까지 고려해야 함을 보여준다.

연약지반에 하중이 가해지면 공극, 포화도, 압축강도 등 다양한 변화가 나타날 수 있으며, 이들 물리적인 특성은 전기비저항탐사에서 전기비저항의 변화를 가져오게 된다. 따라서, 본 연구와 같이 해안 연약지반에 각종 도로 및 구조물을 설치할 경우에 나타날 수 있는 주변지역의 하부지반 변형 범위를 파악하는데 전기비저항탐사를 적용 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 김재홍, 홍원표, 2010, 연약지반의 측방유동으로 인하여 매설관에 작용하는 측방토압, 한국지반환경공학회 논문집, 11(9), 27-38.
- 김재홍, 홍원표, 임은상, 2010, 해안 해안연약지반에 성토후 하부지반 거동분석을 위한 전기비저항 탐사, 2010 대한토목학회 학술발표회논문집, 66p.
- 김준한, 윤형구, 최용규, 이종섭, 2009, 전기비저항 콘 프로브를 이용한 해안 연약지반의 간극률 산정, 한국지반공학회논문집, 25(2), 45-54.
- 박삼규, 2004, 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인, 물리탐사학회지, 7(2), 130-135.
- 방은석, 성낙훈, 김영상, 박삼규, 김정호, 김동수, 2007, 연약지반조사를 위한 전기비저항탄성파 Flat DMT 장비의 개발 및 적용, 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동학술대회논문집, 248-253.
- 송무영, 김팔규, 1992, 서산간척지 연약지반의 토질역학과 물리탐사 비교연구(I), 한국지구과학회, 13(2), 145-155.
- 이광우, 조삼덕, 홍원표, 2009, 성토하부 연약지반의 변형거동에 관한 모형실험, 한국지반공학회논문집, 25(5), 17-28.
- 한국수자원공사, 2003, 시화멀티테크노밸리 제 1공구 조성공사 지반조사 보고서(제1권), 20-24.
- 홍원표, 안종필, 1994, 측방유동을 받는 연약지반의 변형 거동에 관한 연구, 한국지반공학회지, 10(2), 25-40.

2010년 11월 27일 원고접수, 2011년 5월 18일 게재승인

김재홍

K-water연구원

305-730, 대전광역시 유성구 전민동462-1번지

Tel: 042-870-7623

Fax: 042-870-7619

E-mail: kjhpmk@kwater.or.kr

홍원표

중앙대학교 사회기반시스템공학부

156-756, 서울특별시 동작구 흑석동 221

Tel: 02-820-5258

Fax: 02-817-8050

E-mail: wphong@cau.ac.kr

김규범

K-water연구원

305-730, 대전광역시 유성구 전민동462-1번지

Tel: 042-870-7640

Fax: 042-870-7629

E-mail: gbkim@kwater.or.kr