홀센서 기반의 연약지반 자동 지반침하 계측시스템 개발

Development of Automated Monitoring System for Soft Ground Settlement Based on Hole Sensor

전 제 성¹ Jeon, Je-Sung
이 근 호² Lee, Keun-Ho
윤 동 구³ Yoon, Dong-Gu

Abstract

Magnetic sensing system and automated monitoring system based on digital hall sensor for ground settlement are developed to change traditional method for monitoring surface settlement and underground settlement by manual type and to overcome technical limits of existing automated settlement monitoring system. It's possible to monitor surface settlement and underground settlement with multi-points at the same time in a single hole with NX size. It was possible to verify technical confidence and stability by several case studies of soft ground improvement project.

요 지

연약지반 계측에 있어, 원거리 측량에 의한 지표침하 측정 및 수동 방식의 층별침하 측정 방식을 탈피하고 기존 자동 침하 계측기술의 한계를 극복하고자, 디지털 홀센서를 이용한 자력감지 시스템 및 원위치 지반침하 자동 계측시스템을 개발하였다. 본 연구를 통한 개발 시스템은 지표침하와 다수 층별침하를 NX 규격의 단일 시추공내에서 동시에 측정할 수 있다. 개발 시스템의 실제 연약지반 개량현장 적용 및 기존 수동계측 결과와의 비교, 분석을 통해 그 기술검증 및 안정성을 확인할 수 있었다.

Keywords : Automated settlement monitoring, Digital hall sensor, Ground settlement monitoring, Hall effect, Soft ground

1. 서 론

일반적인 설계 단계에서의 연약지반 장기 압밀침하 예측은, 제한된 위치와 심도에서의 지반조사 수행, 현장 및 실내시험을 통한 대표 압밀특성치 산정, 지층조건과 배수조건에 대한 단순화 및 이를 통한 예측 단면과 해석조건에 대한 확정, 이상화된 압밀이론 적용을 통한 최종 시간별 압밀침하 예측 등의 과정으로 수행된다.

이러한 일련의 과정에서 발생하는 이론 및 기술 오류로 인해 연약지반의 압밀거동을 설계 단계에서 정확히 예측하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이라 할 수 있다. 연약지반의 압밀거동 예측은 설계 단계에서의 확정 설계 개념이 아닌, 장기간 지반개량중의 실제 압밀침하 데이터를 취득하고 이를 이용하여 향후 압밀침하 거동을 재예측 하는 방식으로 수행되고 있다. 이때 가장 중요한 기술적 부분은 신뢰성 있는 압밀침하 데이터의 연속적

1 정회원, 인덕대학교 건설정보공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Construction Information Eng., Induk University, Tel: +82-2-950-7586, Fax: +82-2-950-7599, jsjeon@induk.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, (주)호승이엔씨 대표이사 (Member, President, Hoseung Engineering Corporation)

3 정회원, (주)해외기술공사 전무이사 (Member, Executive Director, Korea Consultants International Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

취득을 위한 현장 계측 및 이를 이용한 계측관리라 할 수 있다. 대부분의 연약지반 침하계측은 수동계측 방식으로 수행되고 있으나, 과거부터 수동계측 방식의 단점을 보완하고 계측관리의 연속성 및 신뢰성을 향상시키기 위한 대안으로서 자동계측에 대한 필요성 제시 및 관련 연구가 수행되었다(한영철 등, 1995; 이강운 등, 2004; Bo et al., 2005).

본 연구에서는 연약지반 개량시의 지반침하 계측기술을 대상으로, 실제 현장사례를 통한 기존 수동계측 방식의 문제점 및 현 자동계측 기술의 한계점을 분석하였다. 이에 대한 대안으로서 홀센서 기반의 지반침하 자동계측시스템을 개발하였으며, 개발 시스템을 준설매립에 의해 형성된 초연약지반 개량 현장 등에 적용함으로써 개발 기술의 검증 및 실용화 연구를 수행하였다.

2. 기존의 지반침하 계측

2.1 자동 침하계측의 필요성

연약지반 개량시, 시간별 압밀도 분석 및 장래 침하거동 예측을 위해 수행되는 주요 계측 항목은 지표침하 및 지반내 임의 심도에 대한 층별침하와 간극수압 등을 들 수 있다. 그러나, 국내 대부분의 연약지반 개량 현장에서는 장래 침하거동 분석 및 압밀도 판정 등에 있어 지표침하 위주의 계측관리를 수행하고 있는 것이 현실이며, 지표침하를 철제 침하판을 지표면에 설치하고 수동으로 그 레벨을 측량하는 방식으로 대부분 수행되고 있다. 이강운 등(2004)은 중량의 침하판 무게 및 상부 성토에 따른 침하봉 연결작업에 기인한 작업성 저하와

측량오차, 측정자의 관측오차, 경제성 등의 측면에서 기존 수동계측의 문제점을 지적하였다.

초기의 낮은 전단강도 및 고함수비 특성을 보이는 연약지반은 지반 개량공사중 상부 성토, 연직배수재 타입 등의 각종 시공내용으로 인해 잦은 융기와 전단변형 등의 지반변형을 수반하게 된다. 연약지반 침하계측 결과에서 이러한 전단변형을 제거하여 순수 압밀침하를 선별하는 것은 장래 침하거동 예측 및 압밀도 판정에 있어 매우 중요한 부분이다. 그러나, 주 1~2회 정도 주기로 지반침하를 측정하는 기존 수동 계측방식으로는 이러한 분석이 불가능하며, 수동 계측주기의 단축은 과도한 인건비 상승의 경제적 요인으로 인해 현실적으로 불가능한 것도 사실이다.

Jeon 등(2008)은 준설매립 연약지반에 대한 지반개량 사례를 이용하여, 지반침하 계측결과 분석, 압밀특성치 재산정 및 압밀 재해석 수행 등을 포함하는 장래 침하거동 예측에 관한 연구결과를 발표하였다. 연구 대상지역은 준설매립에 의해 형성된 OO지역 지반개량 현장으로서, 원지반 점토층과 준설 매립층이 각각 10m에 달하는, 대략 20m 층후의 연약지반이다. 대상 현장에서는 지반 개량이 상당기간 진행된 시점에서 당초 설계시의 예측 침하량을 대략 1.2m 이상 상회하는 과다 지반침하가 발생하였다. 이 현장의 지반침하 계측은 지표면에 설치된 침하판을 이용한 수동계측 방식으로 수행되었으며, Fig. 1은 적용된 침하판 사양 및 0.8m 두께의 1차 쇠석포설이 완료된 후의 침하봉 현황이다. Fig. 2는 각 구간별(P1, P2) 특정 위치에서의 지표침하 계측결과를 나타낸다. Fig. 2의 P1구간 계측결과를 살펴보면, 동일 구간내 3개의 계측지점이 30m 내외의 근접 지점이지만, 각각의 지반침하

Fig. 1. Surface settlement plate and its tilting due to shear deformation of ground

계측결과는 최대 1.7m 이상 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 각 지점별로 상이한 압밀거동을 보이기 때문이 아니며, 지반개량 초기에 집중된 단계별 성토 및 PVD 타설 등의 상부 시공영향으로 인한 전단 변형에서 그 원인을 찾을 수 있고 이는 Fig. 1의 사진에서와 같이 일부 배수층 시공 후 기 설치된 침하봉의 변형상태를 통해 확인할 수 있음을 언급하였다.

압밀기간 중 신뢰성 있는 압밀도 판정과 장래 침하거동 예측을 위해서는 이러한 지반침하 계측결과로부터 전단변형을 제거한 순수 압밀침하량 추출하고 이를 정확하게 분석하는 과정이 매우 중요시 된다. 그러나, 본 지역과 같이 주 1회 측정주기의 수동계측 결과에는 1주일 간의 다양한 전단변형과 압밀침하가 복합적으로 포함되어 있는 바, 이 계측 결과로부터 적정 압밀침하량을 추출하는 것은 현실적으로 한계를 가질 수밖에 없다. 즉, 실시간으로 발생하는 전단변형을 적절하게 보정하여 신뢰성 있는 압밀침하량을 추출하기 위해서는 계측 주기 단축이 필수적이나, 기존 수동계측 방식에서는 과다한 인건비 상승 및 시공지연 등을 이유로 그 적용이 불가능하다.

연약지반 침하계측에 있어, 기존의 수동계측 방식은 시공영향 등으로 인한 전단변형 보정에 필요한 계측주기 단축에 한계가 있다. 또한 레벨측량에 의한 수동계측은 현장 시공여건 및 기상변화에 따라 측정이 불가능한 경우가 발생할 수 있으며, 측량시 기준점을 침하영향이 없는 대상부지 외곽에 설치함으로 인한 측량시간 증가와 오차누적 등의 기술적 문제점을 내포하고 있다. 이러한 이유에서 연약지반 침하과정에 대한 연속적 모니터링 및 계측결과의 신뢰성 확보를 위한 자동 침하계측의 필요성이 대두 되었다. 이러한 지반침하 자동계측 방식은 지반개량 후의 장기 유지관리 계측으로 별도조치 없

이 전환이 가능한 장점도 있다.

2.2 기존의 자동 침하계측 기술 분석

지반정보 및 설계인자 등에 있어 많은 불확실성을 내포하고 있는 터널, 댐, 제방, 사면 등의 지반공학 구조물은 확정설계가 아닌 실 거동을 근거로한 지속적 분석과 대책 수립 등이 매우 중요한 과정으로 인식되고 있으며, 이러한 목적에서 신뢰성 있고 효율적인 지속적 계측관리가 요구된다. 앞서 언급된 기존 수동계측 방식의 기술적, 운용상 문제점을 극복할 수 있는 대안으로서 자동계측 기술의 필요성이 인식되고 있는 가운데, 연약지반 지반개량 과정중의 계측관리에 있어서도 자동계측 방식이 도입되고 있다.

Campanella 등(1994)은 연약지반 변형에 대한 자동계측을 위해 케이싱 내부에는 경사계를 설치하고 외부에는 지중 침하용 스파이더에 마그네틱을 부착하여 임의 시간에서의 연약지반 수직침하와 수평변위를 자동계측할 수 있는 SID 시스템을 개발 하였다. 이 시스템은 향후 미국립연구회 산하의 교통연구위원회(TRB) 주관의 지반공학 계측관련 연구과제에 적용 및 응용되었다(Machan 등, 2008). 그러나, 이 당시의 자동계측은 실시간 모니터링 및 전송 등의 개념이 아닌, 특정 시간에 여러 위치별 계측값들을 자동으로 취득하는 형식의 제한적 자동화 방식이었다.

IT 및 센싱기술의 발달과 더불어, 최근에는 지반공학 분야에 있어 실시간 모니터링 및 전송 등을 포함하는 자동계측 기술로 인해 공간차표, 간극수압, 지반내 수평변위, 응력 등의 실시간 변화를 장소와 시간의 제약없이 취득할 수 있게 되었다. 이러한 자동계측 기술의 적용은 대상 구조물 외부 또는 지반내 특정 위치에 고정된 센서를

Fig. 2. Monitoring results of surface settlement for soft ground (Jeon et al., 2008)

통해 가능하지만, 연약지반의 침하 계측과 같이 지반내 센서의 위치가 실시간으로 변화하는 경우는 그 적용에 한계가 있는 것도 사실이다.

최근 지반공학 분야에서는 정밀도 향상 및 Multi-antenna 등에 의한 경제성 확보 등을 포함한 GPS 기술을 활용하여, 사면, 댐, 방파제 등의 외부변위 자동계측과 분석에 대한 연구 및 기술적용이 활발히 시도(Xiu-feng 등, 2004; Grosso 등, 2007; TASCI, 2008) 되고 있다. 임은상 등(2008)은 댐 시설물을 대상으로 3차원 레이저 스캐닝 기법을 적용하여 포인트 개념의 변위계측이 아닌 일정 면적에 대한 3차원 공간좌표 계측을 수행하였고, 이를 이용하여 댐체의 외부변위 거동분석 및 안정성 검토를 수행하였다. 그러나, GPS 기술을 이용한 변위계측은 외부에 노출된 특정 지점의 공간적 변위계측이며, 수직변위에 대한 정확도가 20mm 내외인 점을 고려할 때 연약지반의 지표침하 계측에는 그 적용에 한계가 있고, 층별침하 측정 불가능하다. 3차원 레이저 스캐닝 기술도 외부 변위에 그 적용 대상이 제한되어 있으며, 현장에서의 임의 영역별 3차원 공간좌표 취득 및 이미지 접합 등의 결과처리 과정에 상당한 노력과 시간이 소요되므로 연약지반 침하계측

Fig. 3. Monitoring of surface deformation by using GPS and 3D-laser scanner

적용에는 한계가 있다.

연약지반의 지표침하와 층별침하에 대한 자동계측 방법으로서, 기존 국내외 현장에 일반적으로 적용되었던 기술은 와이어의 길이변화 감지를 이용한 매립형침하계 및 침하셀의 수두차 감지를 이용한 액상침하계 등이라 할 수 있다.

Fig. 4는 매립형침하계를 이용한 지반침하 계측 개념을 나타낸 것으로서, 지반침하에 따른 정착 와이어의 길이 변화량을 감지해 최종적인 지반 침하량을 산정하는 방식이다. 지반침하가 발생함에 따라 와이어는 침하량 만큼 풀리(pulley)에 감기게 되며, 감긴 와이어의 양은 로터리 포텐서미터(rotary potentiometer)를 통해 전압신호로 변환되거나, 기계적 기어방식을 통해 변위로 환산되어 최종적인 지반 침하량 값으로 기록된다. 그러나 이러한 방식의 매립형침하계를 지반내 임의 심도에 대한 층별침하 측정에 적용하기 위해서는 과다한 지반굴착이 요구되므로, 매립형 침하계의 적용은 지표침하에 제한되는 단점이 있다. 최근에는 포텐서미터를 지반내 임의 심도에 정착시켜 그 길이변화를 측정하는 방식도 개발되어 적용되고 있으나, 모든 매립형 침하계에는, 연약지반 상부 시공중 흔히 나타나는 수평변위 및 히빙 발생시의 지반변위도 와이어의 변화량으로 감지되어 최종적인 지반침하에 반영되는 기술오류의 한계가 있다.

Bo 등(2005)은 싱가포르 창이공항 건설공사시, 준설매립으로 형성된 초연약지반의 지층내 지반침하를 계측

Fig. 4. Settlement measurement system by using draw-wire and rotary potentiometer

하는데 있어, Fig. 5와 같은 액상침하계 방식의 자동계측 기술을 적용하였다. 액상침하계는 지반내 임의 위치에 수두압을 측정할 수 있는 진동현 방식의 센서를 설치하고, 침하가 발생하지 않는 지반 외곽 기준점에 수조를 설치한 후, 이 수조와 센서를 튜브와 케이블로 연결하여 시스템을 구성하게 된다. 수조와 센서를 연결하는 튜브는 유체로 채워지게 되며, 지반침하에 따른 추가 유체의 보충은 기준점에 설치된 수조를 통해 이루어진다. 지반침하가 발생하면 기준점과 센서사이의 수두값에 변화가 생기게 되며, 이를 감지하여 최종적인 지반침하량을 산정하게 된다. 그러나, 이러한 기존 진동현 방식의 액상침하계는 온도과 습기에 대한 민감성 및 주파수 변형률 간의 비선형성, 주파수 출력방식에 따른 반응속도 저하, 과도한 전력소모량 등의 문제점을 내포하고 있다.

이강운 등(2004)은 이러한 문제점을 보완하고자, 지반침하에 따른 수두값 감지를 위하여 기존 진동현식 센서 대신 전기식 반도체 소자를 이용하였는데, 기준점에서의 수조설치 및 튜브 연결, 액체 충전 등의 전체적인 시스템은 기존 방식과 유사하게 구성되어 있다. 그러나, 센서의 종류와 관계없이 액상침하계는 매립형침하계와 마찬가지로 지표 또는 표층 인근의 침하측정에 그 적용이 제한된다. 또한, 넓은 면적의 지반개량시 기준점이 측정지점과 상당히 떨어져 있으므로, 기준점과 측정점의 센서를 연결하는 튜브 포설을 위하여 상당 거리에 대한 일정 심도 이상의 지반굴착이 필요하게 되고, 최종 포설된 튜브의 길이도 상당하게 된다. 이는 상부 성토시공 등으로 인한 튜브파손 및 튜브내 기포발생으로 인한 측정 수두값의 정확도 저하 등의 문제점을 발생시킬 수 있다.

Li 등(2006)은 연약지반 층별침하에 대한 자동계측을 위하여, 기존 수동계측 방식과 같이 임의의 심도에 원형 스파이더 마그넷을 설치하되, 지반침하에 따른 마그넷 위치를 감지하는데 있어, 기존의 인력방식이 아닌 자동

Fig. 5. Settlement measurement system by using liquid settlement gauge

기계방식으로 감지센서가 부착된 와이어를 내리고 올리는 방법을 사용하였다. 이는 자동화 계측이라기 보다는 기존 수동방식에서 부분적 편의성을 개선한 계측방법이라 판단된다.

즉, 지반침하에 대한 기존 자동계측 방식은 과도한 부대시공 필요성에 기인한 시공성 저하 및 정밀도 저하, 측정오류 등의 기술한계를 내포하고 있는 것이 사실이며, 이로 인해 그 필요성은 인식되지만 대부분의 현장에서는 과거 수동방식으로 지반침하를 측정하고 있는 것이 현실이다.

3. 지반침하 자동 계측시스템 개발

3.1 Hall effect sensor

홀효과(hall effect)란, 자기장 속의 도체에 자기장 직각방향으로 전류가 흐르게 되면, 자기장과 전류 모두에 직각방향으로 전기장이 나타나는 현상으로서, Edward Hall(1879)에 의해 발견되었다. Fig. 6에서 보듯이, 자력이 없는 얇은 반도체에 전류가 흐르고 있다면 이 전류는 균일한 흐름을 보이게 되며 별도의 전위차는 발생하지 않는다. 그러나, 이 전류흐름 조건에 자력이 작용하게 되면, 전류에는 로런츠 힘이 발생하게되고 이 힘은 전류의 흐름을 왜곡시켜 결과적으로 두 지점간의 전위차를 발생시키게 된다.

홀센서(hall sensor)는 이러한 홀효과 원리를 이용한

Fig. 6. Hall effect principle

센서로서, 외부 자력에 비례하여 전압신호를 출력하게 되며, 기계분야에서는 테이프 레코더, 자기 디스크의 자기 헤드 등 자력의 위치나 회전을 감지 또는 자기장의 세기를 감지하는 용도로 사용되어 왔다.

디지털 홀센서는 기존 아날로그 방식에 슈미트 트리거 회로(schmitt trigger circuit)를 추가하여 최종적인 디지털 출력방식을 구현하였으며, 최종 출력결과는 자력 감지 여부에 대한 ON 및 OFF 방식으로 처리되도록 고안되었다.

본 연구에서는 지반내에서 지반침하와 함께 자력의 위치 변화를 감지하는데 있어 디지털 홀센서를 적용하였다. 연구에 이용된 디지털 홀센서는 Fig. 7과 같은 홀 엘리먼트와 증폭 출력체계를 갖도록 설계되었으며, 본 연구에 사용된 홀센서는 고감도 자기센서로서, chip-on-chip 구조를 사용하여 높은 출력전압을 실현하였으며, 신뢰성 향상을 위해 전극막은 증착공정으로 제조되고 리드프레임과의 연결에는 금 와이어가 사용되었다.

3.2 홀센서 기반의 자력감지 및 자력발생 시스템

본 연구에서는 임의 고정된 위치에서의 자력감지를 위해 디지털 홀센서를 적용하였으며, 이러한 홀센서를 이용하여 2.5mm 수준의 지반침하 분해능 확보 및 저전력 소모의 자력감지 시스템을 개발하였다. 디지털 홀센서는 실리콘 홀 소자와 증폭회로가 하나의 기판위에 Fig. 8과 같이 집적되어 있어 자력 감시시 ON, 자력 미감시시 OFF의 결과를 출력하게 되고, 이러한 특성을 이용하여 영구 자석이 내장된 스파이더 마그네틱의 위치변화를 감지하며 최종적인 침하량을 측정하도록 고안되었다.

Fig. 9와 같이, 고유번호가 지정된 홀센서를 일정간격

으로 회로기판에 집적하고, 회로기판 주위의 특정 심도에 층별침하 마그넷 및 지표에 플레이트 마그넷을 설치하게 된다. 지반침하가 발생하면, 그 침하량만큼 마그네틱의 위치는 아래로 이동하게 된다. 마그네틱의 이동에 따라 자력감지 출력신호를 보내는 홀센서의 고유번호가 변경되게 되며, 출력신호를 발생시키는 각 센서의 절대위치 변화를 분석하여 최종적인 각 기간별 지반침하량을 평가하게 된다.

자력감지 시스템은 영구 자석의 두께와 거리에 비례하여 자력 위치를 감지하게 되며, 최적의 자력감지를 위해 Fig. 10에서와 같이 영구자석을 2.0mm~4.0mm 범위 내에서 여러 가지 두께로 가공한 후 각 크기별 자력감지 실험시험을 수행하였다. 영구자석의 두께가 3.0mm 이

Fig. 7. Hall element and digital output hall effect sensor

Fig. 8. Integrated circuit board with digital hall sensor

Fig. 9. Monitoring of grounding settlement using integrated hall sensor

상인 경우에는 모두 기준값 대비 측정값이 계단식으로 불일치하는 현상을 살펴볼 수 있었으며, 2.0mm 두께에서는 일부 영역에서 부분적 불일치 현상이 발생하였다. 기준값과 실측값의 상호 일치성이 가장 우수한 경우를 선정하였으며, 이를 통해 최적 자력 감지조건인 자석 두께를 2.3mm로 결정하였다. 이러한 영구자석을 지표 침하 측정용 플레이트와 지중 층별침하 측정용 스파이더에 일체형으로 장착한 플레이트 마그넷 및 스파이더 마그넷을 고안하였다.

3.3 원위치 지반침하 자동 계측시스템

본 연구에서는 지표 및 지반내 임의 심도에 홀센서 기반의 자력감지 시스템을 위치시키고 각 위치별 시스템을 상부 데이터로거에 연결하는 방식의 단일홀 설치식 일체형 지반침하 자동계측 시스템을 개발 하였다.

지반침하 자동계측 시스템은 Fig. 11에서와 같이, 기본적으로 상부 지표침하와 함께 실시간 자력위치를 송출하는 ①플레이트 마그넷, 지반내 임의 심도에 설치되어 층별침하에 대한 실시간 자력위치를 송출하는 ②스파이더 마그넷, 지반내 임의의 원하는 위치에 자력발생장치를 설치하기 위한 ③간격유지로드, 각 위치별로 지반침하에 따른 실시간 자력위치 감지를 위한 ④홀센서 기반의 자력감지시스템, 전체 시스템이 설치되며 지반변형에 따른 시스템 보호기능을 담당하는 고강도 ⑤가이드 파이프, 각 심도별 자력감지시스템으로부터 송출되는 자력의 디지털 신호를 감지하여 최종 지반침하량을 산정하는 ⑥데이터 처리장치, 전원공급 및 통신장치 등을 포함하는 ⑦상부 시스템운영 장치 등으로 구성되었다. Fig. 12는 지반침하 자동계측 시스템을 통한 지표

(d) standard and reading value during tests

Fig. 10. Integrated magnetic generation system

침하와 임의 심도별 층별침하를 측정하는 개념을 나타낸 것으로서, ON 출력신호를 보내는 홀센서의 고유번호 판정을 통해 각 센서의 절대 위치를 파악할 수 있으며, 이를 통해 각 심도별 지반침하량을 평가할 수 있다.

이러한 전체적인 지반침하 자동계측 시스템은 일반적인 NX규격의 단일 시추공에 일체식으로 설치가 가능하다. 즉, 지표침하와 층별침하를 동시에 포함하는 시스템으로서, 별도의 원거리 기준점이 필요 없는 관계로 기존의 기준점 시공과 연결작업 등에 소요되는 관련 부대

시공이 대폭 간소화되고, 단일 시추공내에 지표침하와 임의의 심도별 층별침하를 동시에 시공할 수 있어 시공성 및 시공속도, 경제성, 운용관리상의 효율성 등이 매우 높다 할 수 있다.

Fig. 11. Automated ground settlement monitoring system

Fig. 12. Assessment of ground settlement with developed monitoring system

3.4 실용성 및 내구성 확보를 위한 시스템 개선

본 연구를 통한 지반침하 자동계측 시스템을 직접 현장에 적용하는데 있어, 시공성 및 내구성 측면의 추가 개선이 필요하였는데, 많은 지반침하가 예상되는 곳에서의 자력감지체 길이 증가로 인한 설치시 어려움 및 장기간 지중 센서의 안정적 기능유지를 위한 자력감지체 방수가 가능 큰 문제점으로 대두되었다. 이러한 문제점을 극복하고자, 본 연구에서는 지반침하 자동계측 시스템의 현장 설치시, 손쉬운 현장 운반 및 시공을 도모할 수 있도록 개별 자력감지체를 현장에서 손쉽게 임의 길이로 연결하여 다양한 현장 지중조건에 맞도록 시공할 수 있는 다연장 현장 조립형 시스템을 Fig. 13과 같이 개발하였다.

한편, 자력감지체가 지하수위하에서 장기간 그 기능을 유지하는데 있어 방수처리는 현실적으로 가장 중요한 부분이며, 본 연구에서는 자력감지체 보호 및 수밀성 확보를 위하여 실리콘 엘라스토머를 적용하고 이에 대한 별도 탈기처리를 통한 고밀도 충전 기술을 구현하였다. 실리콘 엘라스토머(silicon elastomer)는 $-60\sim 300^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 범위에서 탄성 등의 물성변화가 거의 없으며, 내후성, 내유성, 내열성, 수밀성 등이 우수한 재료이다. 별도 고안된 진공장치를 이용하여 실리콘 엘라스토머 내부의 공기를 제거한 후, 이를 자력감지체 내부에 충전함으로써 자력감지체 전체에 대한 강성 및 수밀성 극대화를 유도하였다.

4. 현장적용 및 검증

본 연구를 통한 단일홀 설치식 일체형 지반침하 자동계측 시스템을 실제 연약지반 개량현장에 적용하여 그 시공성 및 기술검증을 수행하였다. 실제 적용사례 언급에 앞서, 본 연구개발품은 현장 시공과정은 Fig. 14와 같다.

4.1 여수 국가산업단지 6블럭 연약지반 개량현장

본 현장은 남해안 해성점토를 준설패입하여 형성된 초연약 지반으로서, 원지반 점토층이 15.5m 층후로 분포하고 있으며, 그 상부에 준설패입층이 9.5m 층후로 분포하고 있다. 연직배수재 배치간격은 1.0m이며, 상부의 최종 성토고는 2.35m로서 단계별 재하가 수행되었다. 연직배수공법에 의한 연약지반 개량공사가 수행되는 현장내에 Fig. 15와 같은 50m×50m 규모의 별도 시험시공 구간을 2개소(TS-1, TS-2) 선정한 후, 개발된 자동 지반침하 계측시스템을 이용한 실시간 지표침하 및 3개 심도에 대한 층별침하를 측정하였다. 이와 함께 동일 지점에 대한 기존 수동계측 방식의 지반침하 계측을 동시에 수행하였으며, 계측결과 비교 및 분석을 통해 개발기술의 신뢰성 검증을 수행하였다.

2개소(TS-1, TS-2)에 대하여 NX 규격의 지반천공 후, 자동 지반침하 계측시스템과 케이블을 설치하였다. 지표면 및 GL-8.65m, GL-13.63m, GL-19.68m, GL-26.68m 지점에 플레이트 마그넷 및 스파이더 마그넷을 설치하였으며, 해당위치에 자력감지체를 설치하였다. 데이터

Fig. 13. Connection of each magnetic monitoring system

① 보호관내 자력감지체 삽입

② 센서 및 연결 가이드 조립

③ 센서 연결가이드 연결

④ 지반천공 및 심도확인 (NX)

⑤ 가이드 파이프 설치

⑥ 스파이더 마그넷 조립

⑦ 층별침하 스파이더 마그넷 설치

⑧ 각 마그넷 설치위치 재확인

⑨ 간격유지로드 및 자력감지체 준비

⑩ 간격유지로드 설치

⑪ 자력감지체 설치 및 연결

⑫ 현장 방수처리

⑬ 지표침하 플레이트 마그넷 설치

⑭ 상부 데이터 처리시스템 설치

⑮ 최종 설치 전경

Fig. 14. Install procedure for automated ground settlement monitoring system

로거 및 전원공급, 낙뢰방지, 자동 계측결과 전송 등을 위한 상부 로거함은 Fig. 17과 같이 설치하였다. 실시간 자동 측정된 데이터는 로거에 자동 저장되며 RS-485 통신방식 및 CDMA 무선 모뎀을 이용하여 전송되는 방식을 적용하였고, 전원공급은 인근 집수정에서 직접 분기한 전원을 사용하였다.

Fig. 18은 총 626일 동안의 지표침하 및 심도별 층별

침하 계측결과를 나타낸 것으로서, 지표침하의 경우 기존 수동 측량방식에 의한 계측결과를 동시에 나타내었다. 단, 기존의 수동계측 방식은 그 적용지점이 지표면에 한정되는 바, 자동계측 시스템의 지표면 결과와의 비교, 분석을 수행하였다.

결과에서 알 수 있듯이, 본 연구를 통한 자동 지반침하 계측시스템 및 기존의 수동계측방식에 의한 지표침하

결과가 유사하게 나타났으며, 각 심도별 층별침하 결과도 이론적 예측경향과 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

일부 구간에서 자동 지반침하 계측시스템에 의한 계측 데이터가 누락된 것을 확인할 수 있는데, 이는 현장 침수로 인하여 인근 집수정으로부터의 전원공급이 중단된 시기이며, 전원공급 이후에는 기존의 데이터 누락

과 관계없이 안정적인 지반침하 계측이 가능하였다. 300일 경과시점 부근에서는 현장침수가 지속된 후, 자력감지체의 방수기능에 문제가 발생하여 상당기간 계측이 불가능하였다. 그러나 본 개발 시스템은 특정 심도의 자력감지체에 고장이 발생하더라도 상시 교체가 가능하며, 교체후에는 지속적인 안정적 자동계측이 가능

Fig. 15. Test bed in Yeosu national industrial complexes (6-block)

Fig. 16. Install view of automated ground settlement monitoring system

한 장점을 가지고 있다. 본 현장적용을 통해 자력감지체의 방수기능 보완 필요성이 제기되었으며, 이를 위해 앞서 언급된 탈기처리의 실리콘 엘라스토머를 자력감지체에 주입하는 방식을 고안하게 되었다.

4.2 여수 국가산업단지 4블럭 연약지반 개량현장

앞서 언급된 현장 인근의 4블럭에도 자동 지반침하 계측시스템을 적용하여 압밀침하 계측을 수행하였다. 원지반 점토층이 5.5m 층후로 분포하고 있으며, 그 상부에 준설패립층이 10.0m 층후로 분포하고 있다. 1개소에 대하여 지표침하 및 GL-4.5m, GL-12.4m, GL-17.1m 지점의 층별침하를 총 422일에 걸쳐 2시간 주기로 측정하였다. 본 현장의 경우는 안정적 전원공급을 위하여 태양전지판을 사용하였으며, 데이터 취득 및 전송은 기존 6블럭 현장과 동일한 형식을 적용하였다.

Fig. 19는 지표면 및 각 심도별 층별침하 결과를 나타낸 것으로서, 최종 지표침하량은 2.6m 가량 발생하였고, 선단 지층에서는 별도의 압밀침하가 발생하지 않았으며 연약층내 두 심도에서도 이론적으로 타당한 경향의 압밀침하가 발생하는 것을 알 수 있다. 초기의 성토시공 영향으로 인해 지표면 및 GL-4.5m 지점에서는 순간침하 및 히빙이 발생한 것을 알 수 있으며, 상부시공의 영향이 GL-12.4에는 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 본 현장과 같이 2시간 정도의 짧은 주기에 대한 지반거동 계측결과를 이용하면 전체 지반거동에서 전단변형과 압밀침하를 효과적으로 구분하는 것이 가능하며, 이는 자동 지반침하 계측의 큰 장점으로 판단된다.

4.3 OO지역 신항 연약지반 개량현장

남해안 OO지역 신항 준설토 투기장 하부의 연약지반

개량현장을 대상으로 자동 지반침하 계측시스템을 이용한 압밀침하를 측정하였다. 연약지반은 대략 37m 전후의 층후로 분포하고 있으며, 최대 4.6m 재하성토 및 연직배수공법을 통한 지반개량이 수행되었다. 현장내 1개 지점을 대상으로 지표침하 및 지중 3개 심도에 대한 층별침하를 자동계측 방식으로 측정하였다. 자동 지반침하 계측시스템 설치 및 데이터 처리, 전송 방식 등은 기존과 동일하다. 본 현장에서는 초기 지반변형으로 인한 자력감지체 파손을 방지하기 위하여 기존의 플라스틱

Fig. 17. Organization of ground settlement monitoring system

Table 1. Existing ground settlement monitoring system by manual type

항 목	사 양	비 고
침하판	○재질: 강철판 ○규격: 600 × 600 × 6mm	
침하봉	○재질: 스테인레스 스틸 ○규격: 외경 25mm, 길이 1.0m	
보호관	○재질: ABS Pipe ○규격: 내경 80mm, 길이 1.0m

Fig. 18. Ground settlement by automated monitoring system and existing survey method

Fig. 19. Ground settlement by automated monitoring system in Yeosu NIC (4BL)

Fig. 20. Ground settlement by automated monitoring system in OO area

가이프 파이프 대신 고강도 스테인레스 가이드 파이프를 사용하였다. 지표침하 측정을 위한 플레이트 마그넷을 DL+2.0m 지점에 설치하고 스파이더 마그넷을 DL-16.9m, DL-25.9m, DL-34.9m 지점에 설치하였다. Fig. 20은 1시간 주기로 자동 계측된 지반침하 결과를 나타낸 것으로서 각 심도 및 성토이력을 고려할 때 전 기간에 걸쳐 안정적 데이터 취득이 가능하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

연약지반 계측에 있어, 기존의 수동 계측방식은 원거리 측량 기준점 및 작업자 숙련도에 의한 측량오차, 현장여건 및 기상변화에 따른 데이터 취득 곤란, 지표침하와 증별침하 장치의 개별 설치, 인건비 상승과 관련된 계측빈도 단축한계 등의 단점을 내포하고 있으며, 현재 국내에 적용되고 있는 국내외 자동계측 방법들도 지표침하에만 그 적용이 제한되는 적용한계, 정밀도 및 내구성과 관련된 센서자체의 기술한계, 원거리 기준점 설치시 요구되는 과도한 지반굴착, 매설 튜브의 파손 및 기포생성에 기인한 기술오류 등의 단점이 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 디지털 홀센서를 이용한 자력감지 시스템 및 원위치 지반침하 자동 계측시스템을 개발하였으며 그 주요 내용은 다음과 같다.

자력감지 시스템의 경우, 고유번호가 지정된 디지털 홀센서를 회로기판에 일정간격으로 집적한 후, 각 센서에서 주위의 자력발생 유무를 실시간 출력하게 하고, 그

변화를 판정하여 최종적인 지반침하량을 평가하도록 하였다. 실내시험을 통해 최적 자력감지 조건의 자석두께를 2.3mm로 결정하였으며, 이러한 영구자석을 일체형으로 가공한 플레이트 마그넷과 스파이더 마그넷을 개발하여 지표침하 및 증별침하시 적용하였다. 자력감지 시스템을 기본으로 간격유지로드, 가이드 파이프, 플레이트 마그넷, 다수의 스파이더 마그넷, 데이터 처리장치 및 통신장치 등을 종합하여 Fig. 11과 같은 실시간 지반침하 자동 계측시스템을 개발하였다. 본 시스템은 별도의 기준점 없이 지표침하와 다수 증별침하를 동시에 측정할 수 있는 원위치 지반침하 자동 계측시스템으로서 시공성 및 시공속도, 경제성, 운용관리상의 효율성 등이 매우 높다고 할 수 있으며, 필요시 손쉽게 재설치가 가능한 장점이 있다. 연약지반 개량이 진행되는 3개 현장을 대상으로 지반침하 자동 계측시스템을 적용한 결과, 모든 현장에서 장기간 안정적 지반침하 데이터를 취득할 수 있었으며, 동일지점에 대한 수동계측 결과와도 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 현장적용 과정을 통해 압밀침하량이 매우 크게 발생하는 현장의 경우, 자력감지 시스템을 임의 길이로 현장에서 연결할 수 있도록 개선하였으며, 탈기된 실리콘 엘라스토머 충진을 통해 방수성능과 내구성도 향상시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 연약지반기술위원회 (2004), 연약지반 연구 및 기술동향, 한국지반

- 공학회 2004년도 발자취, pp.289-309.
2. 이강운, 이병도 (2004), “반도체방식 침하계를 이용한 연약지반 침하 계측”, *대한토목학회지*, 제52권, 제6호, pp.36-43.
 3. 임은상, 신동훈, 김재홍, 이종욱 (2008), “댐 시설물의 안전관리를 위한 3차원 거동 모니터링 분석”, *한국지반공학학회 봄학술발표회*, 서울, pp.663~666.
 4. 한영철, 송정락, 윤동덕, 이경수 (1995), “연약 지반 자동계측 및 분석 시스템”, *한국지반공학학회 가을학술발표회*, 서울, pp.III-9-III-14.
 5. Allegro MicroSystems, Inc. (2010), “Micropower, ultrasensitive hall-effect switches”, Massachusetts, USA.
 6. Bo, M. W., Choa, V. and Wong, K. S. (2005), “Reclamation and soil improvement on ultra-soft soil”, *Ground Improvement*, Vol.9, No.1, pp.23-31.
 7. Campanella, R. G., Ortigao, J. A. R., Crawford, C. and Jackson, S. (1994), “Design and installation of a new settlement-inclinometer device”, *ASCE Conference Settlement '94*, No.119.
 8. Grosso, A. D. and Lanata, F. (2007), “Data analysis and interpretation from GPS monitoring of a breakwater”, *The 3rd Int. Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Vancouver, BC, Canada.
 9. Jeon, J. S, Koo, J. K. and Oh, J. T. (2008), “Prediction and assessment on consolidation settlement for soft ground by hydraulic fill”, *Journal of the KGS*, Vol.24, No.9, pp.33-40.
 10. Li, D., Wang, Z., Zhang, W. and Weng H. (2006), “A research into the automatic monitor of soft-soil ground settlement under freeway”, *6th Int. Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control and Computer Simulation*, Fang, J. and Wang, Z., Eds., Proc. of SPIE Vol.6358.
 11. Machan, G. and Bennett, V. G. (2008), “Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects”, TRB, Washington.
 12. TASI, L. (2008), “Dam Deformation Measurements with GPS”, *GEODEZIJA I KARTOGRAFIJA/GEODESY AND CARTOGRAPHY*, Vol.34, No.4, pp.116-121.
 13. Xiu-feng, H. Guang, Y., Xiao-li, D. and Yong-qi, C (2004), “Development of GPS Multi-antenna Switch for Deformation Monitoring”, *Int. Symposium on GNSS/GPS*, Sydney, Australia.

(접수일자 2011. 11. 3, 심사완료일 2012. 6. 7)