

준설점토가 상부에 매립된 대심도 연약지반 계측관리

Instrumentation Management of the Deep Soft Ground with Dredged Clay Reclaimed in the Upper

정 나 영¹ Jung, Na-Young
강 승 찬² Kang, Seung-Chan
김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

Abstract

In this study, the measurement results of the coastal deep soft ground buried in the upper part of the dredged clay were analyzed and compared with the current specification standards. Based on the results, a suitable proposal was suggested for the selection, installation, data arrangement, and analysis of each instrument used in the deep soft ground improvement construction. The pore water pressure meter has a range of 1.5 times or more of the expected measurement range, considering the field conditions of the soft ground. The groundwater level meter installed in the horizontal drainage layer checks the change in the groundwater level during the embanking as well as the performance of the catchment well and the horizontal drainage layer. Therefore, it is important to manage so that the groundwater level exists inside the horizontal drainage layer during embanking. It is enough to install the inclinometer in the gravel layer below the soft ground or weathered rock with an N value of 40 or more for the deep soft ground. It seems desirable to install a screw type for differential settlement meter. However, the screw type should not settle due to its own weight. Considering that it is a dredged landfill where subsidence occurs significantly, it is sufficient to manage the tolerance of leveling at about 10 mm (L is the one-way distance (km)).

요 지

본 연구에서는 준설점토가 상부에 매립된 해안가 대심도 연약지반의 계측결과를 분석하고 현재의 시방기준과 비교하여 그 결과를 바탕으로 대심도 연약지반 개량공사에 사용되는 각 계측별 계측기 선정, 설치, 데이터 정리 및 분석에 대하여 적합한 안을 제안하였다. 간극수압계의 경우, 연약지반 현장 여건을 고려하여 예상 가능한 측정 범위의 1.5배 이상 정도의 계측 범위가 가능한 게이지를 적용하는 것이 바람직하다. 수평배수층에 설치되는 지하수위계는 성토 중 지하수위의 변화, 집수정 및 수평배수층의 성능을 확인하는 것으로 성토 중에는 지하수위가 수평배수층 내부에 존재하도록 관리하는 것이 중요하다. 대심도 연약지반에서 지중경사계의 설치심도는 N치가 40 이상인 풍화암 또는 연약지반 하부의 자갈층에 설치하면 충분하다. 층별침하계는 스크류타입을 설치하는 것이 바람직해 보인다. 그러나 스크류타입 게이지가 자중에 의한 침하가 발생하지 않아야 한다. 폐합 또는 결합측량

1 비회원, 한국해양대학교 석사과정 (Graduate Student, Korea Maritime and Ocean Univ.)

2 정회원, (주)광림엔지니어링 이사 (Member Director, Kwanglim Engineering)

3 정회원, 한국해양대학교 건설공학전공 교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

시 수준측량의 허용오차는 침하가 크게 발생하는 준설매립지임을 고려하면 $10\sqrt{L}$ mm(L은 편도거리(km)) 정도로 관리하면 충분하다.

Keywords : Data arrangement and analysis, Deep soft ground, Dredged clay reclaimed, Instrumentation management, Measuring instruments

1. 서론

준설매립지반에서의 계측관리는 연약지반 공사 중의 안정관리 및 침하관리를 목적으로 한다(Asaoka, 1978). 즉 계측은 시공 중 수집 자료로 성토 중 안정성과 침하 거동을 분석하여 설계를 보완 수정하고 최종 지반개량도 품질을 확인하는 것이 주 목적이다(Kim et al., 2015; Kim, 2019). 그리고 계측관리를 통해 설계 시 예상한 지반거동 특성과 실제 지반거동과의 차이를 보완하여 시공 중 안정성과 경제성을 확보하도록 하고 있다(Bjerrum, 1967). 구체적인 계측관리의 기본방향은 1) 지반조사 결과로 추정된 설계 지반정수의 수정, 2) 시공 중 지반조사 결과와 계측자료를 역해석한 지반정수로 연약지반 설계 수정, 3) 계측결과와 확인지반조사 통한 최종 시공 품질확인 등 이다.

현재까지 많은 연구자들이 해안가 준설매립 연약지반의 압밀에 대한 침하특성 및 침하량 예측에 관한 연구를 수행하였는데 주로 계측관련 연구는 데이터 분석을 통한 침하량 예측에 집중되었다(Bo et al., 1998; Arulrajah et al., 2003; Park, 2009, Choo et al., 2010). 즉 계측결과 해석 또는 수학적 기법을 통한 장기 침하량을 예측하는 것이 연구의 대부분을 차지하였다(Chung et al., 2009; Kim et al., 2015; Kang et al., 2021). 압밀 침하량 연구와 달리 계측관리, 계측기기, 데이터 정리 및 분석과 관련된 연구는 상대적으로 미비한 실정이다(Nomura et al., 2008; Jang, 2020; Jang et al., 2021).

해안가 준설매립지반에서 계측의 목적을 효과적으로 확보하기 위해서는 여러 사항을 충분히 고려하여 상세히 수립하여야 한다. 하지만 국가건설기준(KDS 11 10 15)에는 연약지반에서의 계측 시 고려되어야 하는 분석방법이나 데이터의 선정, 분석구간 선정, 지하수위의 적용 등은 명확히 정의되어 있지 않은 현실이다. KCS 11 10 15에서도 주로 시공 중 계측관리는 안정관리를 주목적으로 기술되어 계측 침하관리의 주요 기준에 대해서는 구체적인 기준 제안이 없는 상태이다(Ministry of Land,

Infrastructure and Transport, 2018a, 2018b).

효과적인 계측을 위해서는 다음의 사항이 고려가 필요하다. 계측 대상 시설물(공사)의 규모 및 구조적 형태, 계측항목, 계측범위, 계측위치, 계측방법 및 시스템의 구성, 계측기기의 종류, 사양 및 수량, 계측기의 설치, 설치 시기, 유지관리 방법 등이다. 그 외 수준측량 계획, 계측결과의 수집 및 데이터 관리방법, 계측결과의 해석 방법 등도 필요하다. 장기적인 측면에서 계측자료의 보관, 활용 방법 및 체계, 계측결과를 유지관리에 활용하는 방법, 계측관리방법(위탁 또는 직영), 직영 관리 시 계측요원의 교육방법 등이 포함될 수 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018b).

본 연구에서 준설매립지반에서의 연약지반 계측관리 방법에 적용하고 있는 기존의 설계기준과 전문시방서를 고찰하고 대심도 연약지반 개량공사 현장에서 수행된 실제 계측자료를 계측기별로 내용을 정리, 기술, 분석하여 현재의 시공중 계측관리 기준을 보완할 수 있는 연약지반 계측관리 방법에 대한 개선 방안을 제안하였다. 연구에 사용된 현장 자료는 부산항 신항만 일대 자료를 중점적으로 활용하였다.

2. 국내 기준의 현황

항만 및 어항 설계기준이나 표준시방서에서의 계측관리 부분은 국가건설기준을 적용토록 하고 있어 연약지반 계측관리에 대한 내용은 미흡한 상태이다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2016, 2018).

KDS 11 10 15(지반계측)(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018a)에 따르면 계측계획의 수립, 계측단면의 선정, 계측항목의 선정 및 배치 기준, 계측기기의 선정과 같은 일반적인 내용은 포함하고 있다. 하지만 연약지반에서의 계측 시 고려되어야 하는 여러 가지 기준들 예를 들면, 분석방법이나 데이터의 선정, 분석구간 선정, 지하수위의 적용 등은 명확히 정의되어 있지 않은 현실이다. 즉 현 설계기준에는 계측결과의 해석방법을

계측계획서에 제안토록 하고 있어 해석방법에 대한 명확한 규정이 없으므로 계측관리 주체에 따라 다양하게 가정하여 해석하고 있는 실정이다.

KCS 11 10 15(시공중 지반계측)(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018b)의 경우, 연약지반공사 중 일반사항과 계측기 종류, 계측기 설치 방법, 계측수행 방법, 계측빈도에 대하여 비교적 상세한 내용을 포함하고 있다. 이 시방서는 주로 시공 중 계측관리는 안정관리를 주목적으로 기술된 것으로 보이며, 이로 인하여 침하관리의 주요 기준에 대해서는 구체적인 기준 제안이 없는 상태이다.

지반공사 일반 전문시방서(EXCS 11 10 15, 시공 중 지반계측)(Korea Expressway Corporation, 2018)도 연약지반 계측관리에 자주 이용되는 기준이다. 이 기준의 경우 연약지반공사 계측관리에 대한 측정방법, 일부 침하관리에 대한 언급은 있으나 결과 정리, 분석 방법 등이 명확하지 않고, KCS 11 10 15에 준하여 관리하도록 하고 있다.

국가건설기준센터에 기준 통합 이전에 적용하였던 연약지반 상의 흙쌓기에 대한 도로설계기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)을 보면, 연약지반공사 중 침하분석 방법에 대하여 일부 언급하고 있으나, 구체적인 분석방법이나 데이터의 선정, 분석구간 선정, 지하수위의 적용과 같은 실제 침하분석에서 필요한 여러 가지 기준들은 없다. 다만 현재 사용되고 있는 설계기준이나 표준시방서보다는 연약지반 침하분석의 방향이나 고려사항을 더 많이 수록하고 있다.

여러 기준들의 분석 결과를 종합하면, 연약지반 시공 중 계측관리에 대한 계획, 설치방법, 측정방법에 대해서는 기술하고 있으나 결과 정리, 분석 방법에 대한 명확한 기준이 없어, 향후 연약지반 침하분석을 명확히 할 수 있는 기준 제시가 필요한 상황이다. 특히 부산 신항만과 같은 준설매립된 대심도연약지반에서는 계측기기, 분석방법이나 가정조건에 따라 침하 예측정밀도의 편차가 크게 발생할 수 있으므로 분석방법에 대해서는 상세한 기준의 정립이 필요하다.

3. 현 지반공사 표준시방서(KCS 11 10 15)의 개선 사항 제안

계측관리의 정밀도에 따라 지반개량 품질의 차이가 크게 발생하게 된다. 기존 표준시방서 시공 중 지반계측

검토 결과, 시공 중 계측관리는 안정관리를 주목적으로 기술된 것으로 보인다. 이로 인하여 침하관리에 대해서는 구체적인 기준 제안이 없는 것으로 판단된다. 준설매립지반에서의 계측관리는 연약지반 공사 중의 안정관리뿐만 아니라 침하관리도 반드시 요구되는 항목이다. 각 계측별 계측기 선정, 설치, 데이터 정리 및 분석에 대해 다음 사항을 제안한다.

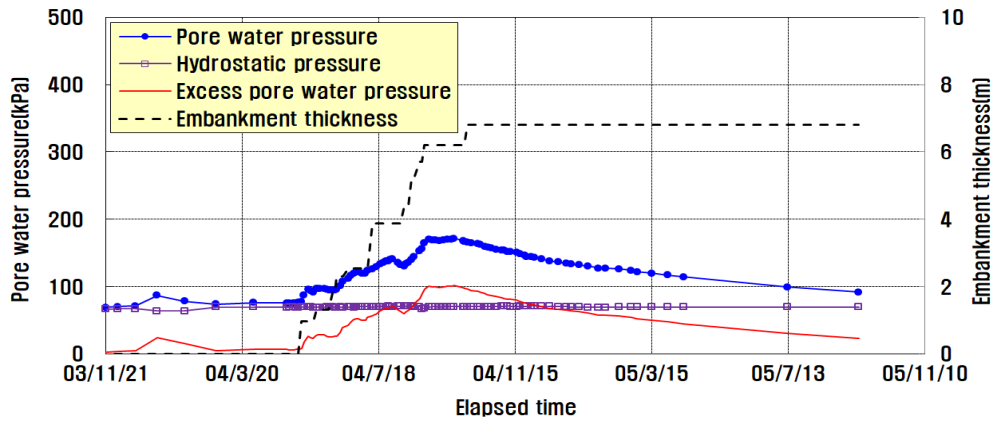
3.1 간극수압계

현행 시공 중 지반계측 표준시방서에는 간극수압의 측정범위는 설계상의 작용 간극수압을 고려하여 계획되어야 하며, 기본적으로 1MPa 이상을 측정할 수 있어야 한다. 그러나 모든 종류의 계측센서는 측정범위가 넓어질수록 정밀도가 감소하게 되므로 단순히 센서의 측정범위가 넓은 제품을 적용한다고 해서 효과적인 관리가 이루어지는 것은 아니다. 따라서, 현장여건을 고려하여 예상 가능한 측정범위의 1.5배 이상 정도의 범위에 맞추어 간극수압 센서를 적용하는 것이 바람직하다. Table 1은 부산항 신항만에 설치된 간극수압계이다. 부산항 신항만 일대에 설치된 간극수압계는 대부분 심도별 예상 정수압과 성토에 의해 예상되는 과잉간극수압을 고려하여 측정범위의 1.5배 정도의 적절한 범위에 있는 센서를 설치한 것으로 판단되지만 일부 현장에서는 관리의 편의성 등으로 설치심도 및 예상되는 측정치보다 훨씬 큰 범위의 센서를 설치한 것으로 나타난다.

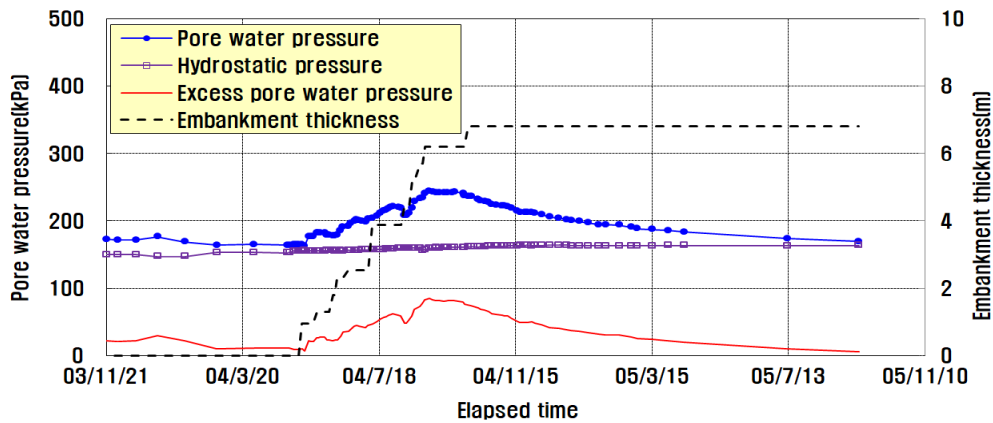
Fig. 1은 부산항 신항만 인근의 연약지반 현장에서 성토에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 1(a)는 GL(-)10m지점, Fig. 1(b)는 GL(-)18m지점에 설치한 간극수압계이며, 계측결과 성토 직전 PBD시공에 따라 미소한 간극수압의 증가가 발생한 후 성토에 따라 과잉간극수압이 증가하고 압밀대기 중에 과잉간극수압이 소산되는 경향으로 나타난다. 구체적으로 보면 6.8m 성토에 따른 최대 과잉간극수압의 증가는 GL(-)10m지점에서 94kPa 정도로 나타나며, GL(-)18m지점에서는 77kPa 정도로 나타나 성토하중 $122\text{kPa}(6.8\text{m}\times 18\text{kN}/\text{m}^3)$ 보다 작게 증가한 것으로 나타났다. 이는 성토 중 일부 과잉간극수압이 소산됨에 따라 작게 평가되는 것으로 판단되며, 상부에 설치된 간극수압계가 하부에 설치한 것보다 과잉간극수압이 더 크게 발생한 사실을 검토하면 성토에 따른 지중응력 증분이나 장비 사용하중이 상부지점에 더 크게 작용하였을 것으로 판단된다.

Table 1. Type and measurement range of pore water pressure gauges applied to each site of Busan Port New Port

Site	Pore water pressure meter	Max. measurement range (kPa)	Model name	Manufacture/ Country
North container terminal stage 1 quay and yard construction	Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
North container terminal stage 2-1	Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
South container terminal stage 2-2	Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
South container terminal stage 2-3	Automatic : Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5810	Sakadadenki/ Japan
South container terminal stage 2-4	Automatic : Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
West container terminal stage 2-5	Automatic : Differential pressure transmitter Manual : Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5810	Sakadadenki/ Japan
Ungdong hinterland zone 1	Automatic : Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
Ungdong hinterland zone 2	Manual : Vibrating string type	500 ~ 1000	G086448	Daedong Inst./ Korea
Ungdong hinterland zone 3	Manual : Vibrating string type	500 ~ 1000	G086448	Daedong Inst./ Korea
Ungdong hinterland area 4	Manual : Differential pressure transmitter	300 ~ 700	EPP-5803 ~EPP-5807	Sakadadenki/ Japan
North container terminal hinterland	Automatic : Differential pressure transmitter Manual : Vibrating string type	300 ~ 700 500 ~ 1000	varous	Daedong Inst./ Korea



(a) At GL (-)10.0m



(b) At GL (-)18.0m

Fig. 1. Examples of pore water pressure measurement

간극수압계 설치지역 주변에 하중의 변화가 발생하면 측정값의 정밀도가 떨어진다. 예를 들어 간극수압계 설치 지역의 연약층 심도의 2배 반경 이내에서 성토중이거나 중장비가 있는 경우가 해당된다. 하지만 계측된 간극수압을 통하여 압밀대상층에서의 하중 및 응력의 변화 여부를 판단할 수 있으므로 간극수압의 측정은 수행되어야 한다. Terzaghi 1차원 압밀식에서의 정확한 압밀의 개념은 과잉간극수압의 소산유무를 통한 압밀도 평가이다. 실무에서의 간극수압계 계측결과는 연직배수재와의 이격거리 등에 따라 실제 평균적인 과잉간극수압 소산정도를 평가하는 데에는 한계가 있지만 최대한 정확히 설치하여 압밀경향을 확인하는 것이 중요하다 (Kim et al., 2014).

다만 측정 자료의 침하분석자료로의 사용 여부는 지반기술자의 판단에 의해 결정하는 것이 적절해 보인다. 간극수압계 계측결과만으로 지반개량도 분석은 현실적으로 어려우므로 동일지점 계측자료와의 비교를 통하여 정성적인 분석을 시행하여 참고용으로 활용하는 것을 추천한다. 즉 간극수압계의 측정결과를 이용하여 과잉간극수압의 소산유무를 확인하고 층별침하계의 침하속도 및 침하량과 비교 분석에 활용하는 것이 바람직하다(Choi, 2020).

3.2 지하수위계

시공 중 및 준공 후 지하수위 적용 기준에 따라 준설매립 연약지반의 시공품질의 차이가 크게 발생하므로 정확한 지하수위 평가가 중요하다(Yang 2005; Nomura et al., 2008; Jang et al., 2021). 현행 시공 중 지반계측(KCS 11 10 15 : 2018)에 제안된 지하수위 설치 및 관리 방법은 준설매립지반에서의 정확한 시공 중 지하수위를 파악하기 어려우므로 보완이 필요하다. 준설매립지반에서의 지하수위계는 사업지구 내 수평배수층에 설치되는 지하수위계와 사업지구 내 점토층 하부 투수층에 설치되는 지하수위계, 사업지구 외 지하수위계가 있다.

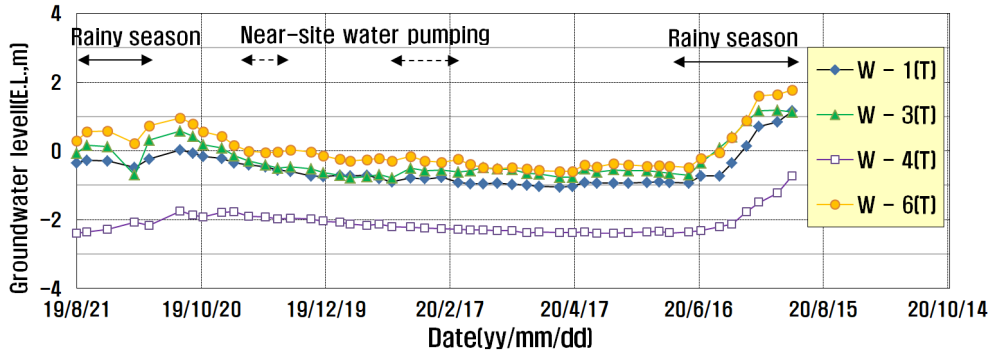
사업지구 내 점토층 하부 투수층에 설치되는 지하수위계는 침하로 인한 파손의 우려가 크므로 센서형 지하수위계를 설치하고, 사업지구 내 수평배수층에 설치되는 지하수위계는 수평배수층에 스탠드 형식으로 설치한다. 다만, 수평배수층 내에 설치되는 지하수위계의 경우 시공 중 예상되는 지하수위보다 높게 시공이 되면 지반내 건수나 지표수 유입에 의하여 지하수위가 높게

평가될 수 있으므로 분석 시 이를 고려하여 평가하여야 한다. 사업지구 외에 지하수위계의 설치가 가능할 경우에는 토공사 이전 시점에 지하수위계를 선 시공하여 초기 지하수위 경향을 확인하고 이를 침하 검토 시 초기 지하수위 자료로 활용하여야 한다. 이 때 정확한 정수위 측정을 위하여 성토의 영향이 없는 구간에 설치하여야 하며, 피압이 예상되는 구간의 경우 압밀대상층의 상부 투수층에 1개소, 하부 투수층에 1개소 총 2개소를 1set로 설치하여 정확한 지하수위 변화를 확인하여야 한다.

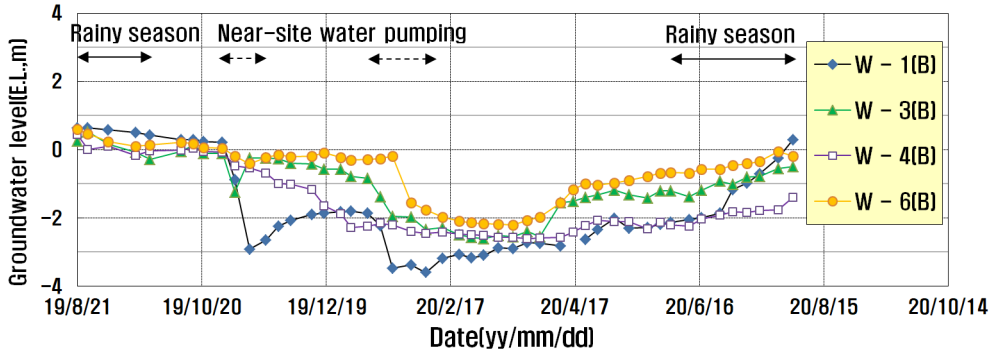
Fig. 2는 연약지반 조성 후 유지관리단계에서 동일한 지점에 설치한 지하수위 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 2(a)는 상부모래층에 설치한 지하수위계이며, Fig. 2(b)는 하부모래층에 설치한 지하수위계이다. 그림에서 보면 동일한 지점에 설치되어 있더라도 수두 측정지점에 따라 지하수위계의 변화 경향이 다른 것을 알 수 있다. 상부 모래층 설치 지하수위계는 수위 변화의 폭이 크지 않으나 우천의 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 하부 모래자갈층 설치 지하수위계는 우천의 영향은 크게 받지 않으나 인접 대심도 굴착공사의 영향을 받아 지하수위의 변화가 크게 발생하기도 한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 자동수위측정 센서를 이용하여 점토층 상, 하부 투수층에 설치한 지하수위계의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 보면 점토층 상부에 존재하는 투수층에 설치한 지하수위계의 경우 조위의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그림에서 왼쪽은 부산항 신항 조위도이다. 점토층 하부에 존재하는 투수층에 설치한 지하수위계의 경우 해안에서의 위치에 따라 그 영향 정도는 차이가 있지만 조위의 영향을 받는 것으로 나타났다. 두 현장 모두 부산항 신항 인접지역이다.

Fig. 5는 연약지반에서 지반개량 중 지하수위 관리 예를 나타낸 것이다. 수평배수층에 설치되는 지하수위계는 성토 중 지하수위의 변화를 통하여 집수정 및 수평배수층의 성능을 확인하고 이를 통해 지반개량효과를 검증하여야 한다. 또한, 성토시공 중에는 성토에 따른 지중응력증분량을 최대로 발휘하기 위하여 지하수위가 수평배수층 내부에 존재하도록 관리하는 것이 중요하다. 지하수위가 수평배수층 내에 존재하지 않으면 수평배수층에서의 압밀수의 배수가 원활하게 이루어지지 않은 것으로 결과적으로 그 위치에서 지반개량이 원활하게 이루어졌다고 볼 수 없다.

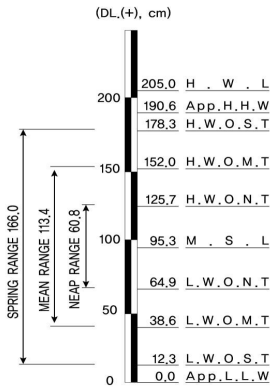


(a) Groundwater level gauge installed in the upper sand layer

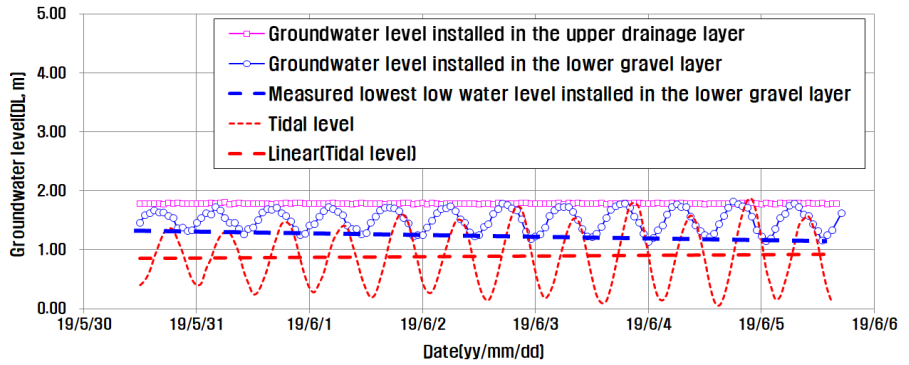


(b) Groundwater level gauge installed in the lower sand layer

Fig. 2. Groundwater level measurement results in the upper and lower sand layers of soft ground (○○ site)

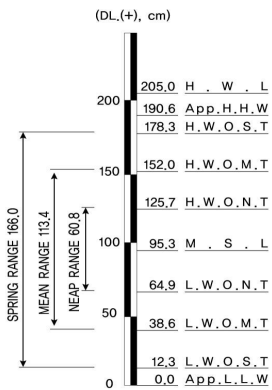


(a)

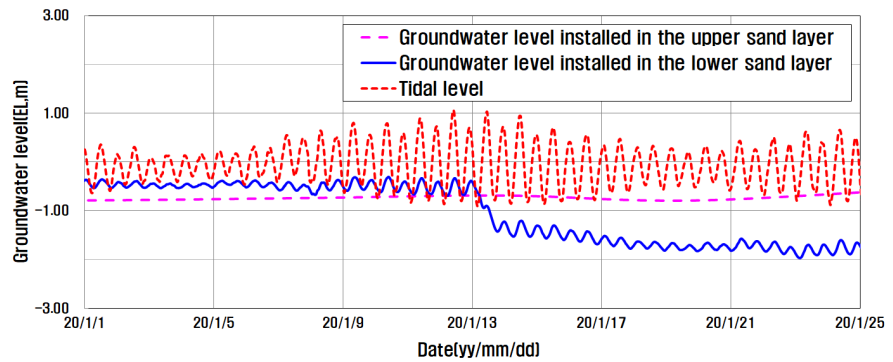


(b)

Fig. 3. Groundwater level measurement results at upper permeable layer of the clay layer (Ungdong hinterland)

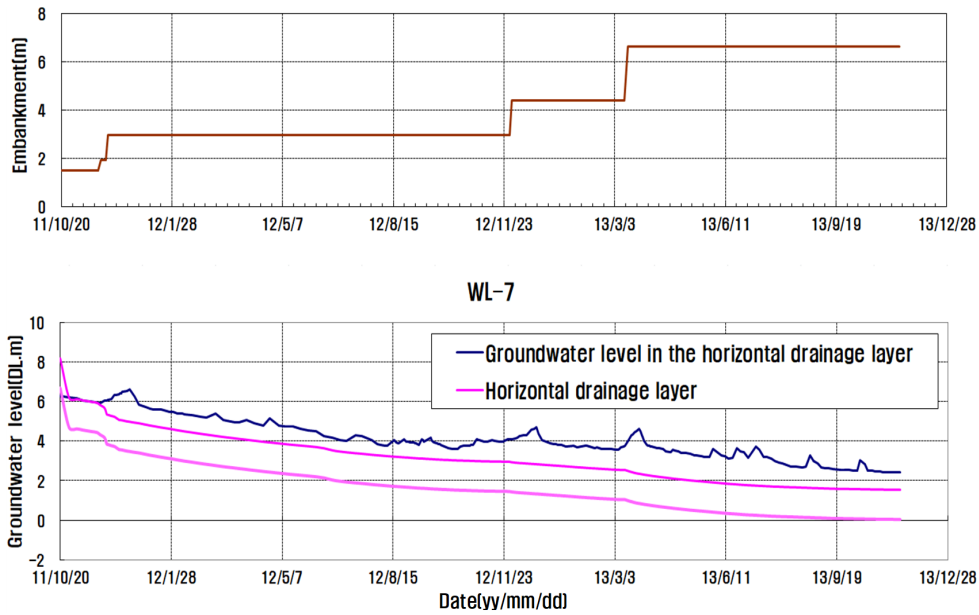


(a)

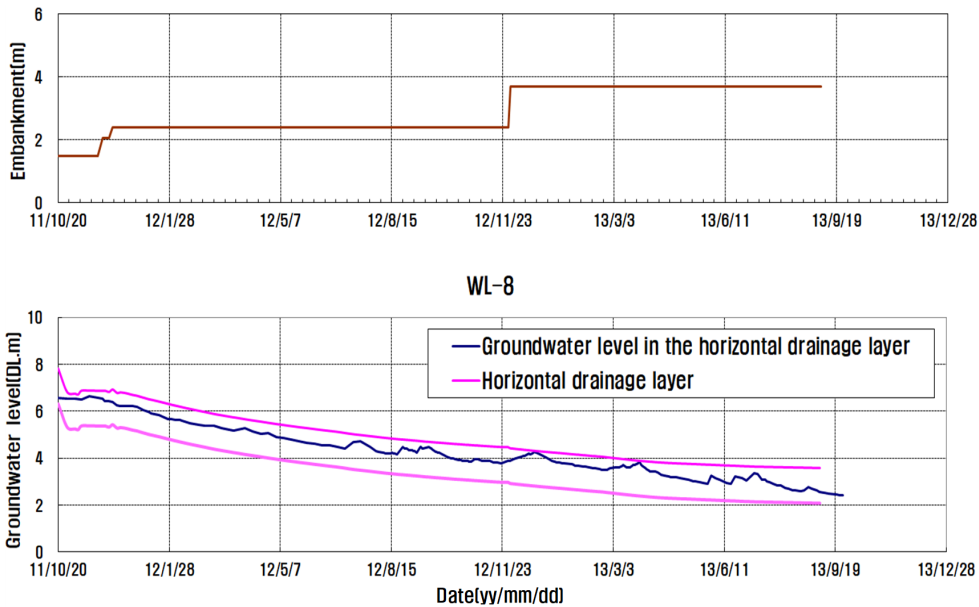


(b)

Fig. 4. Groundwater level measurement results at lower permeable layer of the clay layer (○○ site)



(a) Not good example



(b) Good example

Fig. 5. Cases of groundwater level management during soft ground improvement (Ungdong hinterland)

3.3 지중경사계

시공 중 지반계측(KCS 11 10 15 : 2018) 표준시방서에서는 지중경사계를 반드시 부동층(예를 들면 기반암)에 설치하도록 되어 있으나, 연약지반 개량공사가 수행되는 준설매립된 대심도 연약지반의 경우 N치가 40 이상인 풍화암 또는 연약지반 하부의 자갈층에 설치하더라도 수평변위량을 파악하는데 문제가 없다고 본다(Fig. 6). 연약지반에서는 재하성토에 의한 수평변위 발생이 연

약지반 하부지점부터 발생할 수 있으며, 계측관리 시에는 지중경사계 설치심도의 맨 하단부를 “0”으로 설정하고 심도별 상대변위를 구하여 전체변위량을 산정하기 때문에 지중경사계 하부 설치심도를 부동점이 아닌 지점에 설치할 경우에는 설치지점 이하에서 발생하는 수평변위량을 확인할 수 없으므로 정확한 안정성 평가가 어렵다.

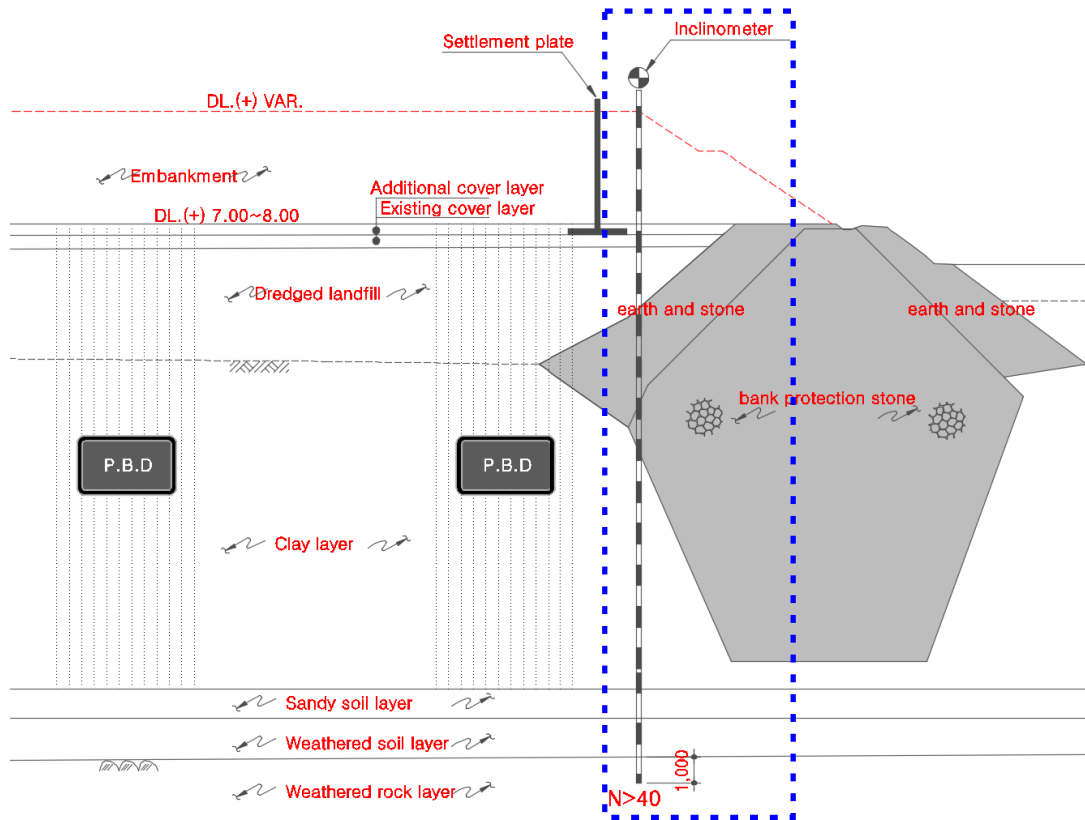


Fig. 6. Cross-sectional view of the installation of an inclinometer during soft ground improvement

3.4 층별침하계

층별침하계는 설계도서의 심도, 연직배수재 시공 심도 및 지층정보를 고려하여 정확히 설치되어야 하며, 수직배수재 시공이 이루어지더라도 미개량층이 존재할 경우 미개량층에 반드시 층별침하계를 설치하여 미개량층의 침하특성도 확인하여야 한다.

층별침하계의 경우 설치형식에 따라 설치방법이 다르지만, 시공 중 지반계측(KCS 11 10 15 : 2018) 표준시방서에는 침하소자식(마그네틱타입) 층별침하계 설치방법만 언급하고 있다.

기본적으로 준설매립지반에 설치되는 층별침하계는 그 설치 형식에 따라 설치방법이 다르므로 이를 고려하여 설치가 필요한데 형식에 상관없이 공통적으로 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

- ① 준설매립지반에서는 지층별 침하분석이 이루어져야 하므로 지층별 침하 정밀도가 확보될 수 있는 층별침하계 형식 선정이 중요하다.
- ② 현장 여건, 예상침하량을 고려하여 설치 형식을 선정한다.
- ③ 층별침하계 설치 위치는 압축특성의 변화가 큰 지

층(준설토층, 압축성이 큰 점토층, 압축성이 작은 점토층, 실트층)의 경계부, 연약층 층후가 두꺼울 경우(15m 이상) 토질특성이 비슷하다면 10~15m 간격으로 구분하여 설치, 배수재 시공 경계부(개량층, 미개량층)에 설치가 이루어져야 한다.

- ④ 현장에 반입된 층별침하계는 설치하기 전에 자체 확인 및 초기치 측정, 장비실험을 실시하고 공사 시방서 사양과 동일여부를 확인한 후 설치하여야 한다.
- ⑤ 지층 경계의 구분은 설계도서의 심도, 연직배수재 시공 심도 및 계측기 설치를 위해 천공 시 판정되는 지층정보를 이용하여 설치되어야 한다.

준설매립지반에서 현장사례 조사 결과(Table 2), 침하소자식(마그네틱타입) 층별침하계의 경우 소규모 전단변형, 가이드 파이프의 마찰, 연결 coupling의 문제로 인하여 대부분 침하량이 과소평가되었다. Fig. 7은 마그네틱 층별 침하계가 사용된 부산항 신항에서 측정된 계측 결과이다. 전반적으로 지표침하판으로 측정된 결과와 층별침하계로 측정된 결과와 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 마그네틱타입 층별침하계가 좌굴 변위

Table 2. Type of multi-layer settlement gauges applied to each site of Busan Port New Port

Site	Differential settlement meter	Model name	Manufacture/ Country
North container terminal stage 1 quay and yard construction	Sliding resistance	ESD-7120C	Sakadadenki/ Japan
North container terminal stage 2-1	Sliding resistance	ESD-7120C	Sakadadenki/ Japan
South container terminal stage 2-2	Automatic : sliding resistance	ESD-7120C	Sakadadenki/ Japan
South container terminal stage 2-3	Automatic : sliding resistance Manual : Magnetic	ESD-7120C HI3P+Ringmagnet	Sakadadenki/ Japan Daedong Instuments/ Korea
South container terminal stage 2-4	Automatic : sliding resistance Manual : Magnetic	ESD-7120C HI3P+Ringmagnet	Sakadadenki/ Japan Daedong Instuments/ Korea
West container terminal stage 2-5	Automatic : sliding resistance Manual : Magnetic	ESD-7120C HI3P+Ringmagnet	Sakadadenki/ Japan Daedong Instuments/ Korea
Ungdong hinterland zone 1	Automatic : sliding resistance Manual : Magnetic	ESD-7120C HI3P+Ringmagnet	Sakadadenki/ Japan Daedong Inst./ Korea
Ungdong hinterland zone 2	Manual : Magnetic	HI3P+Ringmagnet	Daedong Inst./ Korea
Ungdong hinterland zone 3	Manual : Magnetic (double tube)	-	
Ungdong hinterland area 4	Manual : sliding resistance	ESD-7120C	Sakadadenki/ Japan
North container terminal hinterland	Automatic : sliding resistance Manual : screw	ESD-7120C HI3P+Ringmagnet	Sakadadenki/ Japan Daedong Inst./ Korea

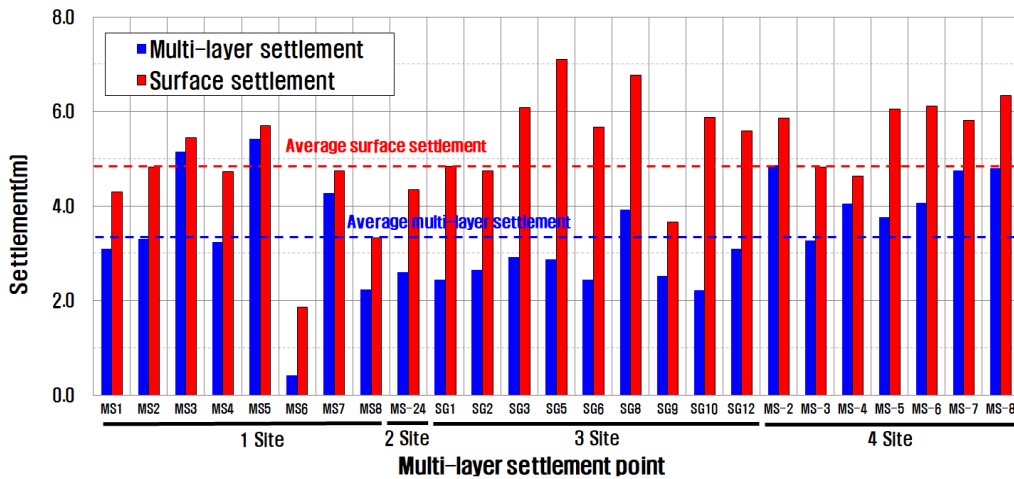


Fig. 7. Comparison of settlements of surface settlement plate and differential settlement meter (magnetic type) installed at the same point

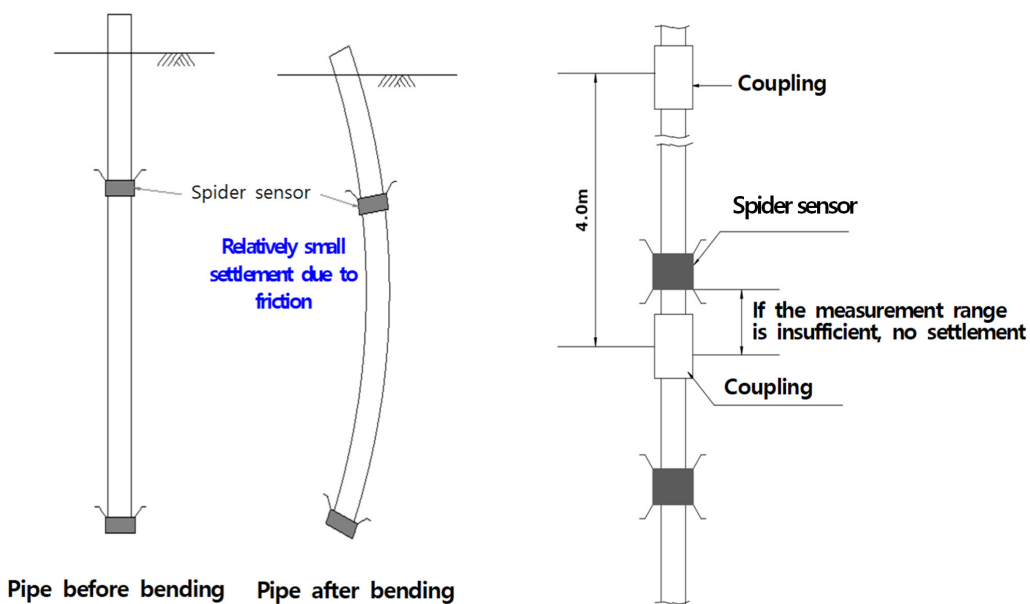


Fig. 8. Causes of under settlement in the differential settlement meter (magnetic type)

에 취약한 구조를 가지고 있어 휨 변형 발생 시 측정 센서 관입이 불가능하거나 파손이 자주 발생하여 침하량 측정을 제대로 할 수 없기 때문이다(Fig. 8).

그러므로 대심도 연약지반의 침하 특성을 고려하여 층별침하계는 스크류타입으로 설치하는 것이 바람직해 보인다. 다만 설치지점에서의 지반강도가 상당히 연약할 경우에는 지반 내로 관입될 수 있으므로 스크류타입 층별침하계가 자중에 의해 관입되지 않도록 하는 것이 중요하다.

각각의 층별침하계 결과의 정리 및 침하분석은 각 지층별, 배수 특성별로 각각 분석이 이루어져야 한다. 침하분석 시 압축특성이 다른 다층지반일 경우 층별침하계를 이용하여 각 지층별 압밀특성을 각각 산정하여 침하분석이 이루어져야 한다. 일반적으로 전체층의 침하량으로 침하분석을 실시하는 것보다 각 침하특성이 다른 각 지층별(준설매립층, 모래층, 점토층, 미개량층)로 침하분석을 실시하고 합산할 경우 잔류침하량이 크다.

3.5 수준측량에 대한 오차 관리

연약지반 공사 중 최종성토단계에서의 정확한 침하 분석을 위해서는 시공 중 정확한 침하 계측자료의 수집이 중요하다. 그러므로 정도 높은 침하계측자료의 확보를 위해서는 수준측량 계획 및 오차 관리가 필요하다. 수준측량에 대한 계획은 다음과 같다.

과업착수 전 수준측량 계획서를 작성하여 제출한다. 수준측량은 수준측량기에 의한 수준측량을 원칙으로 하며, 수준측량 계획서에는 수준점의 위치, 관리구역의 설정, 폐합 또는 결합 측량방법, 허용오차 및 오차의 보정방법이 수록되어야 한다, 자세한 수준측량 오차관리 방

법은 다음과 같다.

- ① 지표침하판에 대한 매회의 수준측량은 관리구역 단위로 실시하고 해당 수준기준점에 폐합 또는 결합시켜 측량의 정밀도를 검증한 후 오차를 보정하여야 하며, 계측성과는 측량야장과 침하관리대장을 정리하여 확인을 받아야 한다.
- ② 수준측량의 허용오차는 연약지반 시공 중 발생침하량의 크기나 측량 목적에 따라 적정하게 선정되어야 하며, 침하량이 작거나 정밀측량을 요구할 경우 2등수준측량의 허용오차 이내로 관리하고, 준설매립지반과 같은 큰 침하가 발생하는 경우 3등수준측량의 허용오차 이내로 관리한다.

시공 중 정도 높은 침하분석을 위해서는 오차관리가 중요하므로 수준점 관리 및 측량오차를 최소화하기 위해 폐합측량이나 결합측량을 실시하여야 한다. Fig. 9는 시공 중 수준측량 오차에 따른 장래침하량 예측범위를 나타낸 것이다. 수준측량 오차관리를 5mm 이내로 관리할 경우와 50mm 이내로 관리한 경우를 비교한 결과, 침하 예측범위의 크기는 10배 이상 차이가 발생한다.

부득이한 현장 여건으로 수준점(reference point) 관리가 어려울 경우 부지 외곽부에 성토에 의한 침하나 수평변위가 없을 것으로 예상되는 지점을 선정하고 지지층까지 시추 및 룯드(φ34mm 강관)를 고정 설치하고, 이를 소규모 침하기준점(base point)으로 활용할 수 있다. 이러한 경우 주기적으로 확인 측량이 이루어져야 한다.

폐합 또는 결합측량 시 수준측량의 허용오차는 침하가 크게 발생하는 준설매립지임을 감안하면 공공수준측량의 3등급 정도인 $10\sqrt{L}$ mm(L은 편도거리(km)) 정도로 관리하여 오차 보정을 실시한다면 침하분석에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 다만, 침하발생이 크지

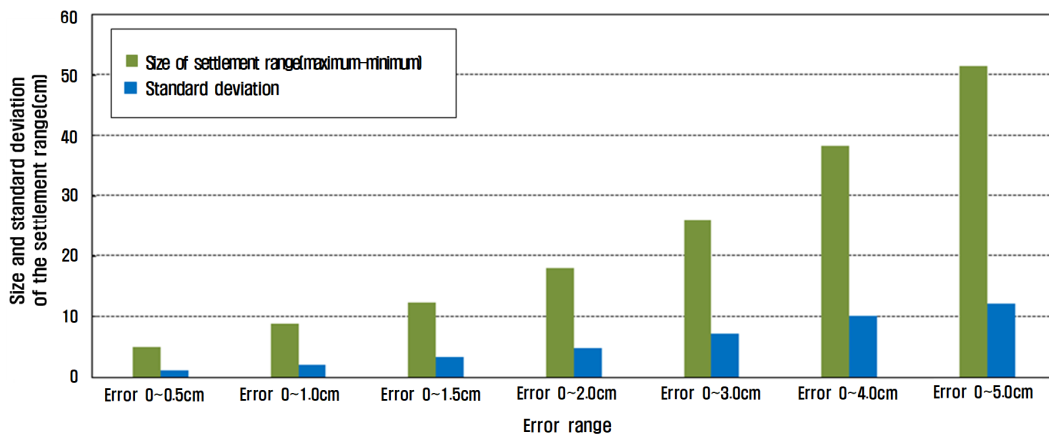


Fig. 9. The magnitude of the final settlement prediction range according to the error (Kang, 2012)

Table 3. Leveling tolerances

Gauge	Reclaimed soft ground (mm)	General soft ground or required high precision
Surface settlement plate	3rd degree error	2nd degree error
Differential settlement meter	$10\sqrt{L}$ mm (L: one-way distance, km)	$5\sqrt{L}$ mm (L: one-way distance, km)

않거나 정도 높은 측량을 요하는 경우에는 기본수준측량의 2등급 정도를 제한한다(Table 3).

4. 결론

계측관리에 따라 지반개량 품질의 차이가 크게 발생하게 된다. 부산항 신항만과 같이 대심도 준설매립 연약지반에서의 계측관리는 지반개량의 품질을 확보하는 측면에서 더 중요하다. 본 연구에서는 부산항 신항 주변 자료를 분석하여 대심도 연약지반의 개량공사에 사용되는 각 계측별 계측기 선정, 설치, 데이터 정리 및 분석에 대해 다음 사항을 제안하였다.

간극수압계의 경우, 연약지반 현장 여건을 고려하여 예상 가능한 측정범위의 1.5배 이상 정도의 범위를 가진 간극수압 센서를 적용하는 것이 바람직하다. 간극수압의 측정결과는 과잉간극수압의 소산을 확인하고 층별 침하계의 침하속도 및 침하량과 비교 분석에 간접적으로 활용할 수 있다.

지하수위계의 경우, 평면상의 동일한 지점에 설치되어 있더라도 수두 측정지점에 따라 지하수위계의 변화 경향이 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 지하수위계의 설치는 점토층 상부 통수층과 점토층 하부 통수층에 2개소를 설치하여 관리하는 것이 필요하다. 연약지반 개량공사 중 수평배수층에 설치되는 지하수위계는 시공 중에는 시공관리에 사용되어 지하수위가 수평배수층 내부에서 관리 되도록 하는 것이 중요하다.

연약지반 개량공사가 수행되는 지중경사계는 준설매립된 대심도 연약지반의 경우 N치가 40 이상인 풍화암 또는 연약지반 하부의 자갈층에 설치하더라도 수평변위량을 파악하는데 문제가 없다고 본다.

층별침하계는 스크류타입을 설치하는 것이 바람직해 보인다. 스크류타입 층별침하계는 자중에 의한 침하가 발생하지 않게 중량과 스크류 관입심도를 지반특성에 맞게 검토한 후 설치되어야 한다. 각각의 층별침하계 결과의 정리 및 침하분석은 각 지층별, 배수 특성별로 각각 분석이 이루어져야 한다.

폐합 또는 결합측량 시 수준측량의 허용오차는 침하

가 크게 발생하는 준설매립지임을 감안하면 공공수준측량의 3등급 정도인 $10\sqrt{L}$ mm(L은 편도거리(km)) 정도로 관리하면 충분할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 부산지방해양수산청 부산항건 설사무소의 “부산항 진해신항 지반성능 개선 연구용역”의 지원으로 이루어진 결과임.

참고문헌 (References)

1. Arulrajah, A., Nikraz, H., and Bo, M.W. (2003), “Factors Affecting Field Settlement Assessment and Back-analysis by the Asaoka and Hyperbolic Methods”, *Australian Geomechanics*, Vol.38, No.2, pp. 29-37.
2. Asaoka, A. (1978), “Observational Procedure of Settlement Prediction”, *Soil and Foundations, J. of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
3. Bjerrum, L. (1967), “Engineering Geology of Norwegian Normally-consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings”, *Geotechnique*, pp.17-83.
4. Bo, M.W., Arulrajah, A., and Choa, V. (1998), “Instrumentation and Monitoring of Soil Improvement Work in Land Reclamation Projects”, *Proceedings of the Eighth International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Vancouver, Canada.
5. Choi, H.S. (2020), Prediction of consolidation settlement by measuring settlement and pore water pressure of soft ground, PhD. Dissertation, Chosun University.
6. Choo, Y.S., Kim, J.H., Hwang, S.H., and Chung C.K. (2010), “The Optimization of Hyperbolic Settlement Prediction Method with the Field Data for Preloading on the Soft Ground”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.153-159.
7. Chung, S.G., Lee, N.K., and Kim, S.R. (2009), “Hyperbolic Method for Prediction of Prefabricated Vertical Drains Performance”, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.135, No.10, pp.640-642.
8. Jang, J.-G. (2020), A study on the application of settlement prediction method according to field Comditions at the field of soft ground, Ph.D. Dissertations, Pusan Nation University.
9. Jang, J.-G., Son, S.-W., and Hong, S.-W. (2021), “A Study on the Analysis of Monitoring Settlement Considering the History of the Groundwater Level in the Dredged Landfill Area Affected by Algae”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.7, pp.13-23.
10. Kang, S.C. (2012), Sensitivity of the parameters affecting estimation

- of the final consolidation settlement, MD thesis, Korea Maritime University and Maritime Industry University.
11. Kang, G., Kim, T.-H., and Yun, S.-K. (2021), "Measured Performance and Analysis of the Residual Settlement of a PVD-improved Marine soft Hround", *J. of Ocean University of China*, Vol.20, pp.1055-1066.
 12. Kim, J.-H., Kang, S.-H., and Kim, T.-H. (2015), "Settlement Prediction for Staged Filling Construction on the PVD-improved Soft Ground Using SPSFC Method", *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol.15, pp.146-151.
 13. Kim, J.-M. (2019), A case study on the prediction of final consolidation settlement analysis considering the results of soft ground instrumentation in Busan, Master thesis, Pukyong National University.
 14. Kim, S. K., Kim, Y. T., and Kim, J. H. (2014), "Considering Factors in Design of Vertical Drainage in Deep Thick Soft Soil", *Technical Note, Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.5, pp.15-24.
 15. Korea Expressway Corporation (2018), General specialty specification for ground measurement during construction (EXCS 11 10 15).
 16. Nomura, S., Ikeda, T., Katagiri, M., and Terachi, M. (2008), "Consolidation Settlement Prediction of Reclaimed Land with Dredged Clay Case Record of Kita-Kyushu Airport", *J. of the Japanese Geotechnical Society*, Vol.56, No.9, pp.10-13.
 17. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Road design standards.
 18. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018a), Korean Design Standards (KDS) 11 10 15 : Ground measurement.
 19. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018b), Korean Construction Specification (KCS) 11 10 15 : Ground measurement during construction.
 20. Ministry of Oceans and Fisheries (2016), Port and fishing port design standards.
 21. Ministry of Oceans and Fisheries (2018), Port and fishing port standard specifications.
 22. Park, C.H. (2009), A study on prediction of consolidation settlement of soft soils, Master thesis, Pukyong National University
 23. Yang, T.S. (2005), "A Case Study of Measuring Residual Groundwater Level on Reclaimed and Dredging Clay Layer", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.7, pp.63-72.

Received : November 9th, 2022

Revised : November 17th, 2022

Accepted : November 17th, 2022