

대심도 준설 매립지반에서의 층별침하 계측관리에 관한 사례 연구

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

김태형¹, 강승찬², 장지건³, 허성훈^{4*}

Tae-Hyung Kim¹, Seung-Chan Kang², Ji-Gun Chang³, Soung-Hun Heo^{4*}

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejeong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

²Non-Member, Director, Kwanglim Engineering Construction Co. Ltd., 916 Busan Venture Tower, 22 Mora-ro, Sasang-gu, Busan 46918, Republic of Korea

³Non-Member, President, Kwanglim Engineering Construction Co. Ltd., 916 Busan Venture Tower, 22 Mora-ro, Sasang-gu, Busan 46918, Republic of Korea

⁴Non-Member, Director, Seumtech Co. Ltd., 111 Hyoyeol-ro, Buk-gu, Busan 46508, Republic of Korea

ABSTRACT

There are a lot of difference between the surface settlement and the differential settlement measured at the Busan New Port, where the dredged and reclaimed clay layer exists and below the clay is originally thickly distributed. To find the cause and solution of this, the actual conditions of each differential settlement used for the soft ground improvement, characteristics, installation method, measurement frequency, measurement data management, and data analysis of each type were considered. In the deep soft ground improvement work where large deformation occurs, the bending deformation of the screw-type differential settlement gauge is less than that of other types of measuring instruments, so there is less risk of loss, and the reliability of data is relatively high as the instruments are installed by drilling for each stratum. Since the greater the amount of high-precision settlement measurement data, the higher the settlement analysis precision. It is necessary to manage with higher criteria than the measurement frequency suggested in the standard specification. For the data management of the differential settlement gauge, it is desirable to create graphs of the settlement and embankment height of the relevant section over time, such as surface, differential, and settlement of pore water pressure gauge for each point. In the case of multi-layered ground with different compression characteristics, it is more appropriate to perform settlement analysis by calculating the consolidation characteristics of each stratum using a differential settlement data.

요 지

상부에 준설매립점토층이 존재하고 점토층이 두껍게 분포되어 있는 부산항 신항만에서 측정된 지표침하 값과 층별침하 값은 많은 차이가 있다. 이런 결과의 원인과 해결방안을 찾기 위하여 연약지반 개량에 사용된 층별침하계의 실태, 층별침하계 형식별 특성, 설치방법, 계측 빈도, 계측데이터 관리방안, 결과의 정리 및 분석 등에 대해 고찰해 보았다. 대변형이 발생하는 대심도 연약지반 개량공사에서 스크류타입의 층별침하계의 경우 휨 변형이 다른 형식의 계측기에 비해 적어 망실의 우려도 적고 각 지층별로 천공하여 계측기를 설치하므로 데이터의 신뢰도도 상대적으로 높다. 정도 높은 침하계측 자료의 양이 많을수록 침하분석 정밀도는 높아지므로 표준시방서에서 제시한 계측빈도보다 기준을 강화하여 관리가 필요하다. 층별침하계 계측데이터의 관리는 측정별 지표침하량, 층별침하량, 간극수압계 침하량과 같이 해당 구간의 침하량과 성토고의 경시 그래프 작성하여 관리하는 것이 바람직하다. 침하분석은 압축특성이 다른 다층지반일 경우 층별침하 데이터를 이용하여 각 지층별 압밀특성을 각각 산정하여 침하분석이 이루어지는 게 더 타당하다.

Keywords : Dredged and reclaimed clay layer, Surface settlement, Differential settlement, Screw differential settlement gauge, Multi-layered ground

Received 31 Jan. 2023, Revised 17 Mar. 2023, Accepted 24 Mar. 2023

*Corresponding author

Tel: +82-51-507-7311; Fax: +82-51-507-7312

E-mail address: bear_3139@hanmail.net (S.H. Heo)

1. 서론

연약지반에서의 계측관리는 설계 시 예상한 지반거동 특성과 실제 지반거동과의 차이를 보완하여 시공 중 안정성과 경제성을 확보하도록 하는 것이 그 목적이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018a). 여러 문헌에 언급된 계측관리의 기본방향을 살펴보면 1) 지반조사 결과로 추정된 설계 지반정수의 수정, 2) 시공 중 지반조사 결과와 계측자료를 역해석한 지반정수로 연약지반 설계 수정, 3) 계측결과와 확인지반조사를 통한 최종 시공품질 평가 등이다. 이를 통해 단계 성토 중 안정성 재평가와 침하계측 자료로 압밀특성을 역해석하여 침하량과 침하속도에 대하여 수정을 하고, 품질, 경제성을 확보할 수 있도록 하는 것이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018b; Bjerrum, 1967; Kim et al., 2015; Kim, 2019).

특히, 계측의 목적을 효과적으로 확보하기 위해서는 여러 항목을 고려해야 한다. 계측 대상 공사의 개요 및 규모, 계측 대상 공사의 구조적 형태(여건, 환경관련 자료조사 포함), 계측목적, 계측항목, 계측범위, 계측위치, 계측방법 및 시스템의 구성, 계측기기의 종류, 사양 및 수량, 계측기의 설치, 유지관리 방법(설치 전 초기 침하에 대한 보정 방법 포함), 계측결과의 수집 및 데이터 관리방법, 계측결과의 해석방법 등에 대한 상세한 검토가 필요하다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018b).

준설점토가 매립된 대심도 연약지반 개량공사에서 이루어지는 주 계측항목은 지표침하, 층별침하, 간극수압, 지하수위, 지중경사 등이다. 이들 항목을 측정하기 위하여 지표침하판, 층별침하계, 간극수압계, 지하수위계, 지중경사계를 활용한다. 대심도 굴착에서는 지중경사계 값이 가장 중요한 계측항목이지만, 대심도 연약지반 개량공사에서는 침하가 가장 중요한 계측 항목이다. 특히 상부가 준설토 매립지반인 경우 준설매립 점토층과 원지반 점토층의 응력증분 이력이 다르기 때문에 이를 고려한 침하 분석이 필요하다(Lee et al., 2000). 따라서 다른 계측항목보다 지표침하판과 층별침하계에 의한 침하량 분석이 매우 중요하다(Nomura et al., 2008; Jang, 2020). 원지반 상부에 준설점토가 매립된 경우 그리고 원지반이 깊게 분포하는 경우 층별침하계에 의한 지층별 침하 측정과 분석은 더욱 중요하다.

층별침하계는 압축특성이 다른 다층지반일 경우 지층별 압밀특성을 각각 산정하여 침하분석을 실시한다. 이를

통해 지층별 지반개량도를 평가하여 층별 압밀도 및 침하량을 결정한다. 특히 층별침하값이 정확하다면 압축특성이 다른 준설매립지반에서 정밀도 높은 침하 분석이 가능하다. 층별침하계를 활용한 비배수전단강도 평가 및 단계 성토 안정성 검증도 가능하다(Lee et al., 2000).

현재 다양한 층별침하계가 대심도 연약지반의 침하량 측정에 사용되고 있다. 종래 연구보고서(Korean Society of Civil Engineers, 2019; Busan Port Authority, 2021; Kang, 2021)에 따르면 층별침하 값과 지표침하판의 계측 값이 상이하다고 보고되었다. 그것은 사용된 층별침하계가 준설매립지반에서 침하 경향을 정확하게 산정할 수 없음을 보여주고 그 정밀도가 낮음을 보여주는 사례이다. 하지만 항만 및 어항 설계기준 및 표준시방서에서 층별침하계 계측관리 부분을 포함한 전반적인 연약지반 계측관리에 대한 내용이 미흡한 상태이다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2016, 2018).

본 연구에서는 현재 대심도 연약지반 개량에 사용되는 층별침하계의 실태, 층별침하계형식별 특성, 설치방법, 계측 빈도, 계측데이터 관리방안, 결과의 정리 및 분석 등에 대해 고찰해 보았다. 이를 위해 국내 시방기준(KCS: 11 10 15 : 2018)에 대한 검토와 국내에서 연약지반 심도가 가장 깊은 부산항 신항만에 적용된 사례를 중심으로 분석하였다. 연구 결과를 통해 대심도 연약지반에 적합한 층별침하계 형식, 설치방법, 계측 빈도, 데이터 관리 방안, 결과의 정리 분석에 대하여 안을 제시하였다.

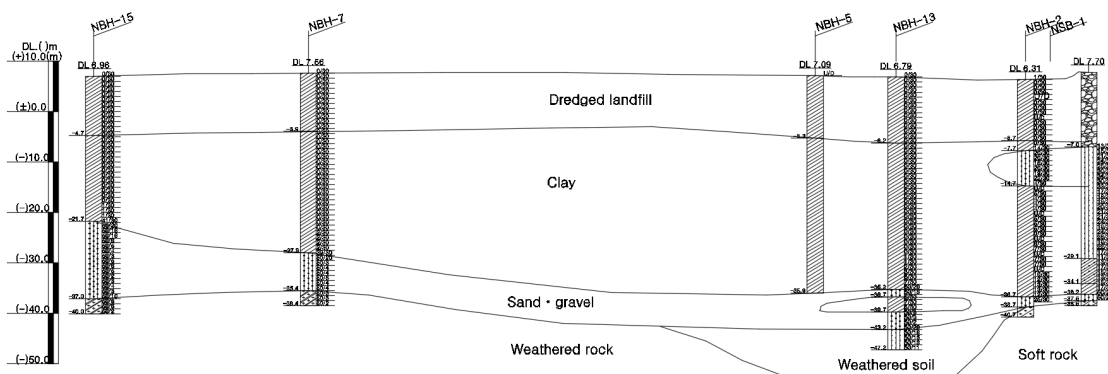
2. 대심도 준설매립 지반에서의 층별침하 측정 실태

층별침하계는 측정 형식에 따라 마그네틱타입, 스크류식, 접동저항식, 와이어센서식, 진동현식 등이 있다. Table 1은 부산항 신항만 주변 준설매립지반에 적용된 층별침하계에 대한 조사 결과이다.

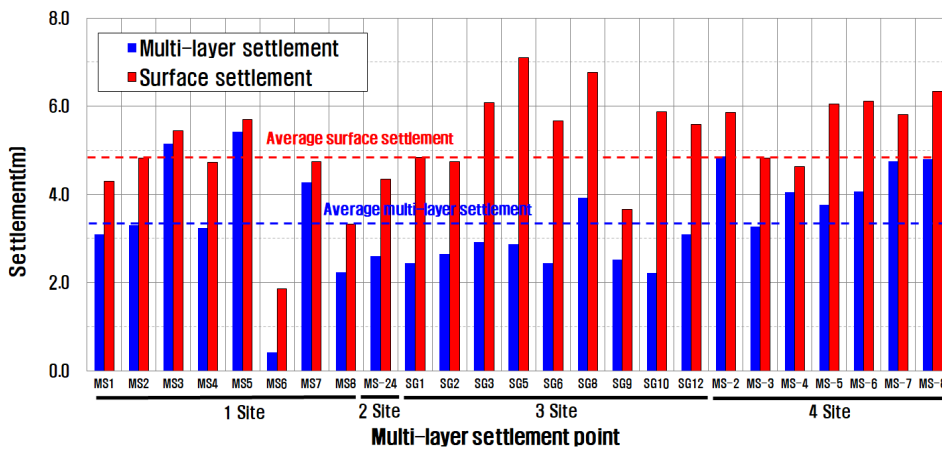
Fig. 1(a)는 부산항 신항만의 대표적인 토질주상도로 상부 준설매립점토층이 존재하고 점토층이 두껍게 분포되어 있어 큰 침하가 발생하는 것을 예상할 수 있다. 이런 지층에서 측정된 지표침하 값과 층별침하 값을 비교하였다(Fig. 1(b)). 층별침하 값이 지표침하 값과 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다(준설점토가 상부에 매립된 대심도 연약지반 계측관리(한국지반공학회논문집 제38권 12호 2022년 12월 pp. 67~78). 참고로 부산항 신항만에 다양한 형태의

Table 1. Type of differential settlement gauges applied to each site of Busan New Port

Site	Differential settlement gauge
North container terminal stage 1 quay and yard construction	Sliding resistance
North container terminal stage 2-1	Sliding resistance
South container terminal stage 2-2	Automatic : sliding resistance
South container terminal stage 2-3	Automatic : sliding resistance, Manual : magnetic
South container terminal stage 2-4	Automatic : sliding resistance, Manual : magnetic
West container terminal stage 2-5	Automatic : sliding resistance, Manual : magnetic
Ungdong hinterland zone 1	Automatic : sliding resistance, Manual : magnetic
Ungdong hinterland zone 2	Manual : magnetic
Ungdong hinterland zone 3	Manual : magnetic (double tube)
Ungdong hinterland area 4	Manual : sliding resistance
North container terminal hinterland	Automatic : sliding resistance, Manual : screw



(a) Soil profile based on drill log



(b) Settlement measurement

Fig. 1. Comparison of settlements of surface settlement plate and magnetic differential settlement installed at ○○ site in Busan New Port

층별침하계가 사용되고 있는데 이 중에서 수동측정의 경우 침하소자식(마그네틱타입) 층별침하계가 가장 많이 사용되고 있다(Table 1).

현재 부산항 신항만 건설공사시 적용된 층별침하계(수동)는 대부분 마그네틱타입이며, 동일한 지점에서의 지표 침하량과 비교해볼 때 침하량의 차이가 다소 크게 발생하

였으므로, 마그네틱타입의 층별침하계가 준설매립 대심도 연약지반에서 침하 경향을 정확하게 측정하는데 문제가 있으며, 그 정도가 다소 낮음을 보여주는 사례이다. 그래서 대부분의 부산항 신항만 현장에서 계속 분석 시에 층별 침하계 데이터를 적절하게 활용하지 못하고 지표침하판 침하량의 보조자료만으로 활용하고 있다.

3. 층별침하계

3.1 층별침하계 형식

층별침하계는 설계도서의 심도, 연직배수재 시공 심도 및 지층정보를 고려하여 설치되어야 한다. 연약지반에 연직배수재 시공이 이루어지고 미개량층이 존재할 경우(연직배수재가 미 설치된 지반)에도 미개량층에 반드시 층별침하계를 설치하여 미개량층의 침하특성도 확인하여야 한다.

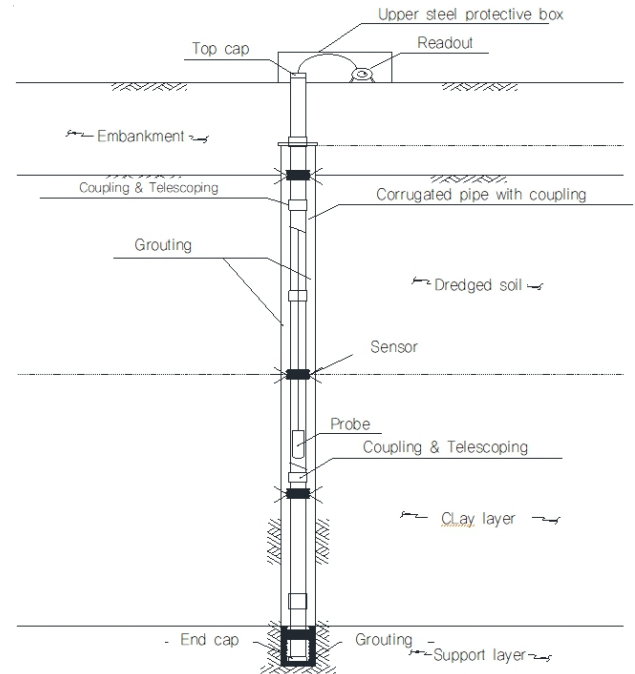
각 층별침하계 형식별 특징은 Table 2에 정리하였다. 부산항 신항만에 가장 많이 적용된 마그네틱타입 층별침하계의 경우 천공홀 1공에 전체 센서가 설치되는 형식을 가진다. Fig. 2는 지반에 설치된 마그네틱타입 층별침하계의 모식도(Fig. 2(a))와 파이프와 센서의 연결형태(Fig. 2(b))이다.

마그네틱타입 층별침하계의 경우 대변형이 발생하는 연약지반에서 가이드 파이프의 마찰, 연결 coupling의 문제가 발생하는 것으로 나타난 계속오류(침하량 과소 평가)가 있는 것으로 알려져 있다(Fig. 3(a)). 이것은 마그네틱의 경우 관내로 센서를 삽입하여 측정하는 형식이다 보니

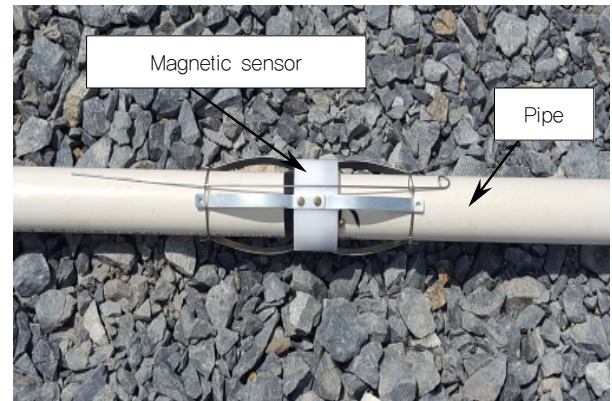
Table 2. Various differential settlement gauges

Type	Characteristics
Magnetic	<ul style="list-style-type: none"> • Installation of all sensors in one hole (manual measurement) • Big error in case of bending of pipe due to big settlement • There is a possibility that an error may occur when a foreign substance is caught between the pipe and the sensor.
Screw	<ul style="list-style-type: none"> • Boring required for each layer (manual measurement) • High accuracy by maintaining verticality of the steel bar and installing one settlement gauge per drilling hole
Sliding resistance Differential transformer	<ul style="list-style-type: none"> • Installation of all sensors in one hole (automatic measurement possible) • When the sensor fixing jig is difficult to attach or foreign substances are caught, an error occurs. • Error may occur due to bending of stainless rod
Wire sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Installation of all sensors in one hole (automatic measurement possible) • It is difficult to maintain verticality during settlement, so there is a high possibility of error.
Vibrating Wire	<ul style="list-style-type: none"> • Installation of all sensors in one hole (automatic measurement possible) • Settlement measurement range is small • It is difficult to maintain verticality during settlement, so there is a high possibility of error.

횡압에 의한 관의 변형시 측정자체가 안되어 망실되는 단점이 있다. Fig. 3(b)와 같이 신축폭이 충분하지 못하면 파이프에 휨이 발생되고 신축폭이 충분하면 휨이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 대부분 부산항 주변에 적용된 층별침하계는 신축 폭이 충분하지 않은 것을 사용하여 휨 문제로 침하가 과소 평가되는 결과가 발생한다. 그리고 관외부에 설치되는 마그네틱 스파이더(앵커)가 지반에 정착되어 각 지층 침하에 따라 같이 침하가 이루어져야 하나 정착불량시 지반침하보다 덜 내려가는 경우 침하판에 비해 층별침하량이 적게 발생할 수 있다. 스파이더의 정착방법은 자동 층별침하계(점동저항식)의 경우 센서부 날개를 유압으로 터트려 지반에 정착시키는 방식이며 마그네틱의 경우는 정착용 날개를 삽입시 와이어로 고정한 뒤 전체 센서



(a) Magnetic differential settlement gauge installation



(b) Pipe and sensor connection

Fig. 2. Installation and pipe and sensor connection of magnetic differential settlement

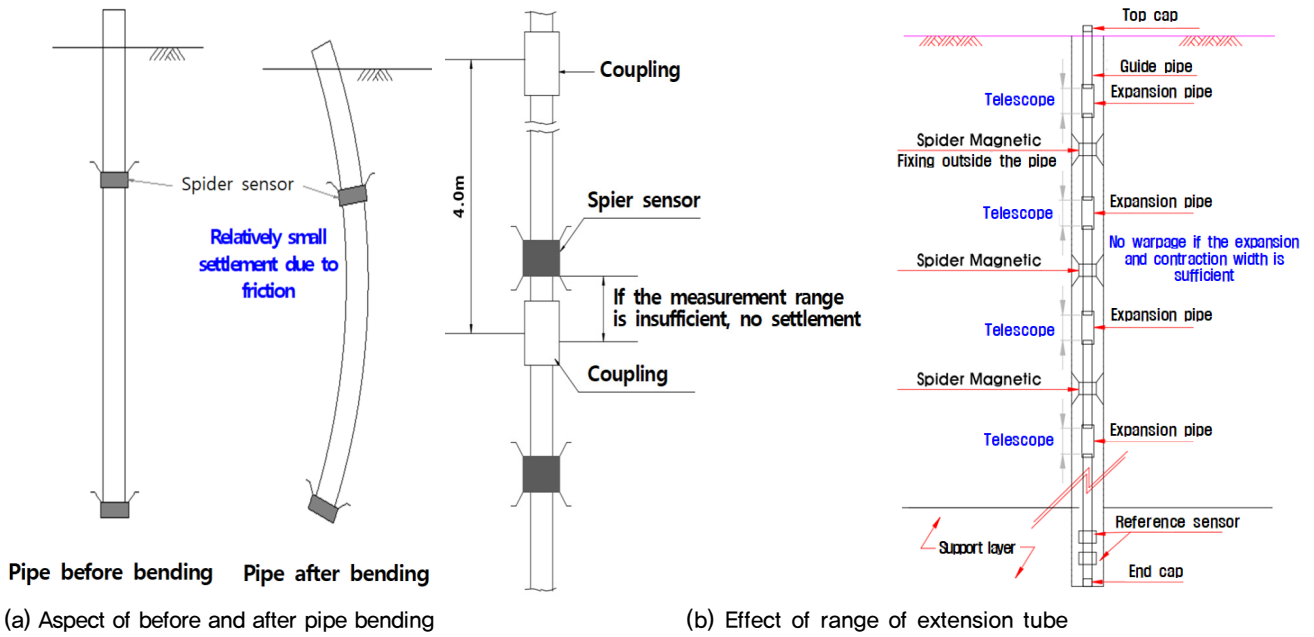
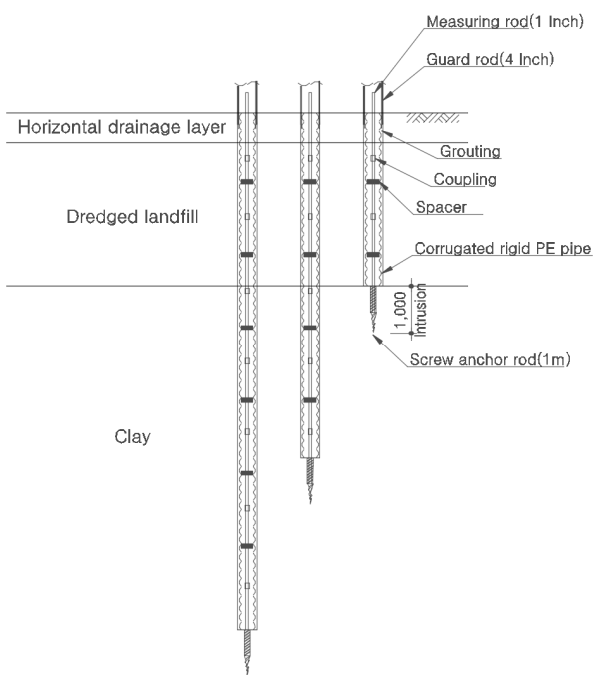
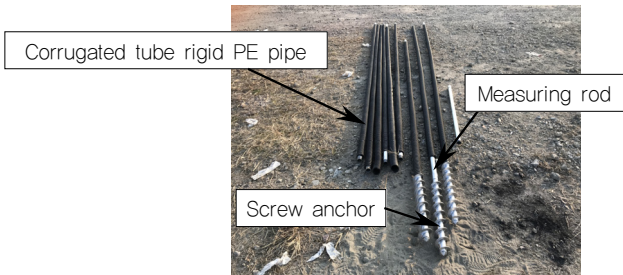


Fig. 3. Causes of small settlement measurement in the magnetic differential settlement



(a) Screw differential settlement installation



(b) Screw differential settlement gauge assembly

Fig. 4. Installation and assembly view of screw differential settlement

설치완료 이후 와이어를 당겨서 날개를 활착시키는 방법인데 제대로 지반에 정착이 되는지에 대한 확신이 부족하다. 그 외 마그네틱소자와 관외부에 이물질이 끼어 소자가 안 내려가는 경우도 발생할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 천공홀 1공에 전체 센서 설치되는 점동저항식(차동트랜스식), 와이어센서타입, 진동현타입 층별침하계도 마그네틱타입 층별침하계처럼 대변형이 발생하는 준설점토 매립 대심도 연약지반에서는 휨에 대한 문제를 가지고 있다.

하지만 스크류타입 층별침하계의 경우 강봉으로 구성되어 있어 PVC Pipe인 다른 계측기에 비해 휨 변형이 상대적으로 적고 각 지층별로 천공하여 계측기를 설치하므로 데이터의 신뢰도를 높일 수 있으며 상부를 레벨로 측정하는 형식으로 횡압력에 대한 망실에 대한 우려도 적다. 그러므로 대심도 연약지반의 경우 지반개량시 스크류타입의 층별침하계가 가장 적합한 것으로 판단된다. 다만 계측이 수동으로 이루어지고 침하계 설치지점에서의 지반강도가 상당히 연약할 경우에는 지반 내로 관입될 수 있으므로 스크류타입 층별침하계가 자중에 의해 관입하지 않도록 하는 것이 중요하다(Fig. 4). 스크류의 길이가 1.0m인 경우 주면마찰력에 의한 관입의 영향이 거의 없으므로 스크류의 길이는 1.0m 이상을 확보하여야 한다. 또한, 계측기 천공시 천공장비의 수직도는 1°이내를 유지하여 계측기의 수직도에 대한 신뢰성을 확보하고, 계측기간 이격거리는 1m 이내로 설치하여 동일지층내의 계측이 이루어지도록 하여야 한다.

3.2 층별침하계 설치방법

층별침하계별 설치방법을 공통적인 사항과 각 형식별로 구분하여 설명하면 다음과 같다. 공통적인 사항으로, 준설매립지반에서는 지층별 침하분석이 이루어져야 하므로 침하 정밀도가 확보될 수 있는 형식 선정이 중요하며, 현장 여건, 예상침하량을 고려하여 설치한다. 층별침하계 설치 위치는 압축 특성의 변화가 큰 지층(준설토층, CH, CL, ML)의 경계부나, 배수재 시공 경계부(개량층, 미개량층)에 설치가 되어야 하며 연약층 층후가 두꺼울 경우 (15m 이상) 토질특성이 비슷하더라도 10~15m 간격으로 구분하여 설치한다. 현장에 반입된 층별침하계는 설치하기 전에 공사시방서 사양과 동일여부를 확인한 후 설치하며, 지층 경계의 구분은 설계도서의 심도, 연직배수재 시공 심도 및 계측기 설치를 위한 천공 시 판정되는 지층 정보를 고려하여 설치한다.

스크류타입 층별침하계의 경우, 설치계획심도 1m 전까지 천공하고, 보링 내경은 86mm~116mm으로 한다. 천공홀당 1개소를 기준으로 한다. 천공면 하부 1m는 길이 1m, 직경 7.62cm(3inch) 이상의 스크류를 돌려 지반에 고정시킨다. 이때 층별침하계가 자중에 의해 관입하지 않아야 한다. 지반과의 마찰을 방지하기 위하여 측정봉을 보호관(파상형 경질관(ELP))으로 천공심도까지 설치하고, 스페이서를 설치하여 측정봉의 수직도를 유지시킨다. 설치되는 측정봉의 상단에 측정봉의 총 연결길이를 기입하여 관리하여야 한다. 측정원리는 지표침하판과 동일한데 침하봉 상단의 높이를 수준측정을 통해 침하를 측정한다.

마그네틱타입의 경우, N치 40이상인 지층까지 케이싱 굴진 후 공내에 슬라임을 완전히 제거한다. 굴진 후에 가이드 파이프를 커플링으로 연결하여 파이프 하단(end-cap)이 지지층에 도달할 때까지 내린다. 굴착공 안에 센서를 설치하되 풍화암 또는 암반의 부동층에 기준소자(datum magnet)를 고정하고, 원하는 측점에 침하소자(spider magnet)를 설치한다. 기준소자 및 지지파이프 하단(end-cap)이 지지점에 충분히 고정되도록 시멘트 그라우팅을 실시한다. 침하를

측정하려는 위치에서 침하소자는 앵커로 확실하게 고정되어야 한다. 센서가 침하함에 따라 휨 변형이 발생하여 롯데/와이어에 마찰력이 걸릴 수 있으므로 지반의 침하시에도 파이프에 마찰력이 걸리지 않도록 신축관(텔레스코픽 커플링)을 설치하여야 한다. 신축관의 신축량은 설계 침하량의 1.5~2.0배 이상이 되어야 하며, 층간 압축 특성을 고려하여 연속적으로 배치한다. 층별침하계 설치 후 보링 홀의 그라우팅은 “시멘트+벤토나이트+물”혼합액을 사용하며 이들 재료의 배합은 경화 후 원지반 강도를 넘지 않게 조절되어야 하는 것을 원칙으로 하나, 지반이 매우 연약하여 자연 함몰이 이루어질 경우 그라우팅을 하지 않아도 된다.

점동저항식 층별침하계의 경우, 10.16cm(4inch) or NX 케이싱으로 지지층까지 천공한다. 줄자를 이용하여 천공심도를 확인한다. 지상부에서 소자 설치위치에 맞추어 센서 측정 롯데, 보호마찰 방지 파이프를 조립하고 순서를 정하여 준비한다. 이때 센서와 센서 사이는 예상 설치 위치에서 1m 이내의 범위로 유지할 수 있도록 와이어로 고정한다. 설치 시 센서와 부품의 하중을 지지할 수 있도록 상단에 와이어로 묶어 내린다. 단계별로 “롯데 + 주름관”을 스토퍼를 사용하여 연결하여 설치한다. 유압잭으로 앵커 고정 작업을 실시한다. 침하관(센서포함) 및 롯데 체결 후 보호커버를 설치한다. 수동측정기로 센서 상태를 확인한다.

3.3 층별침하계 계측 빈도

Table 3(KCS 11 10 15 : 2018)을 참조하여 계측빈도와 기간에 의거하여 정해진 계측빈도로 계측을 수행해야 한다. 계측의 빈도는 설계도면 및 공사시방서를 표준으로 하되 현장여건과 지반조건을 감안하여 감독자의 확인을 받은 후에 조정할 수 있다.

현행 표준시방서에 제시된 계측빈도는 성토 중 사면 안정성 확보에 중점을 두어 성토완료 후 1개월까지는 1일 1회 계측빈도로 측정을 실시하고 성토완료 이후에는 계측빈도가 1~2주 1회 계측빈도를 제안하고 있다.

Table 3. Measurement frequency of differential settlement presented in standard specifications (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018b)

Instrument	After embanking is complete up to 1 month	1-3 months	After 3 months	Note
Differential settlement	1 time/day	1 time/week	1 time/2weeks	Manual

Table 4. Examples of application of differential settlement measurement frequency for each site in Busan Port New Port

Site	Frequency of differential settlement measurement				Note
	During embanking	After embankment completion ~ 1 month	1~3 months	After 3 months	
North container terminal hinterland stage 2-1	1 time/day	1 time/3days	1 time/week	1 time/mon.	
North container terminal hinterland	3times/week	2 times/week	1 time/week	2 times/mon.	After 6 months 1time/mon.
South container terminal stage 2-2	1 time/day	2 times/week	1 time/week	1 time/2weeks	
South container terminal stage 2-3	1 time/day	1 time/day	2 times/week	1 time/week	
South container terminal stage 2-4	1 time/day	1 time/week	1 time/week	1 time/week	
West container terminal stage 2-5	1 time/day	1 time/day	1 time/3days	1 time/week	
Ungdong hinterland zone 1	1 time/day	1 time/2days	1 time/week	1 time/week	When considering removal of PL 1 time/day
Ungdong hinterland zone 2	1 time/day	1 time/day	1 time/week	1 time/week	When considering removal of PL 1 time/day
Ungdong hinterland zone 3	2times/day	2 times/week	2 times/week	1 time/week	
Ungdong hinterland area 4	1 time/day	1 time/2days	1 time/week	1 time/week	When considering removal of PL 1 time/day
West container terminal stage 2-6	1 time/day	1 time/day	1 time/3days	1 time/week	

Table 5. Measurement frequency of the differential settlement gauge of deep thick soft ground with dredged and reclaimed clay existed at the top

Item	During embanking	After embankment completion			
		1 month	2 ~ 3 months	After 4 months later	1 month before preloading removal
Differential settlement	3 times/week (1 time/day)	3 times/week (1 time/day)	2 times/week (1 time/week)	2 times/week (1 time/2weeks)	2 times/week

Note: () the measurement frequency presented in KCS 11 10 15 (2018).

Table 4는 부산항 신항만 현장 별 적용된 층별침하계 계측빈도이다. 성토시기에 따라 총 4단계로 나누어 성토 중, 성토완료~1개월, 1~3개월, 3개월 이후로 구분하여 운영되었다. 현장별 계측빈도가 차이가 있는 것을 알 수 있다. KCS 11 10 15(2018) 기준과 비교하면, 신항만에서는 침하를 우선하다 보니 성토중에도 계측이 이루어지고, 계측빈도도 약간 차이가 있음을 알 수 있다.

일반적으로 정도 높은 침하계측 자료의 양이 많을수록 침하분석 정밀도는 높아지므로 표준시방서에서 제시한 계측빈도(Table 3)보다 기준을 강화하여 관리가 이루어지면 침하분석 정도를 높일 수 있을 것이다. 특히 부산항 신항만과 같이 준설매립된 대심도 연약지반개량에서의 층별침하계 계측빈도는 압밀대기 기간이 짧은 단계별 성토 종료 시에는 침하 자료의 양이 많지 않으므로 계측빈도를 Table 5와 같이 강화하는 것이 바람직할 것이다. 단, 성토중 및 성토후 1개월간은 주3회로 측정하되 이상징후 발생시 계측빈도를 증가하는 것이 계측관리시 보다 더 효율적일 것이다.

3.4 층별침하계 계측데이터의 관리방법

층별침하계는 설치 완료 후 토질주상도를 같이 표기하여 설치단면도를 작성하여 관리하는 것이 바람직하다. 기록지에는 사업명, 위치, 측정명, 설치 좌표, 설치 일자, 설치 심도, 설계 정보(배수재 시공깊이 및 간격, 연약층 층후, 설계 성토고, 설계침하량, 원지반고)를 기록한다. 현장 계측 시에는 날짜, 날씨, 센서의 지점침하량, 지층별 침하량, 성토지반고, 성토두께, 인접 토공 현황을 기재하여 관리한다. 스크류타입의 경우 매 측정 시 폐합 또는 결합 측량 오차를 기재한다. 성토에 따른 붕 인상 시에도 인상 길이를 정확히 측정하여 기록, 관리한다. 전체침하량에 대한 각 층별 침하 비율이나 침하 속도를 확인할 수 있어야 한다. 측정별 지표 침하량, 층별 침하량, 간극수압계 침하량과 같이 필요한 구간의 침하량과 성토고의 경시 그래프 작성하여 관리하고 이를 이용하여 침하관리를 한다(Fig. 5).

계측관리 중 급속침하 또는 용기와 같은 이상 거동 발생 시에는 이를 기록하여 정확한 원인을 파악할 수 있도록 한

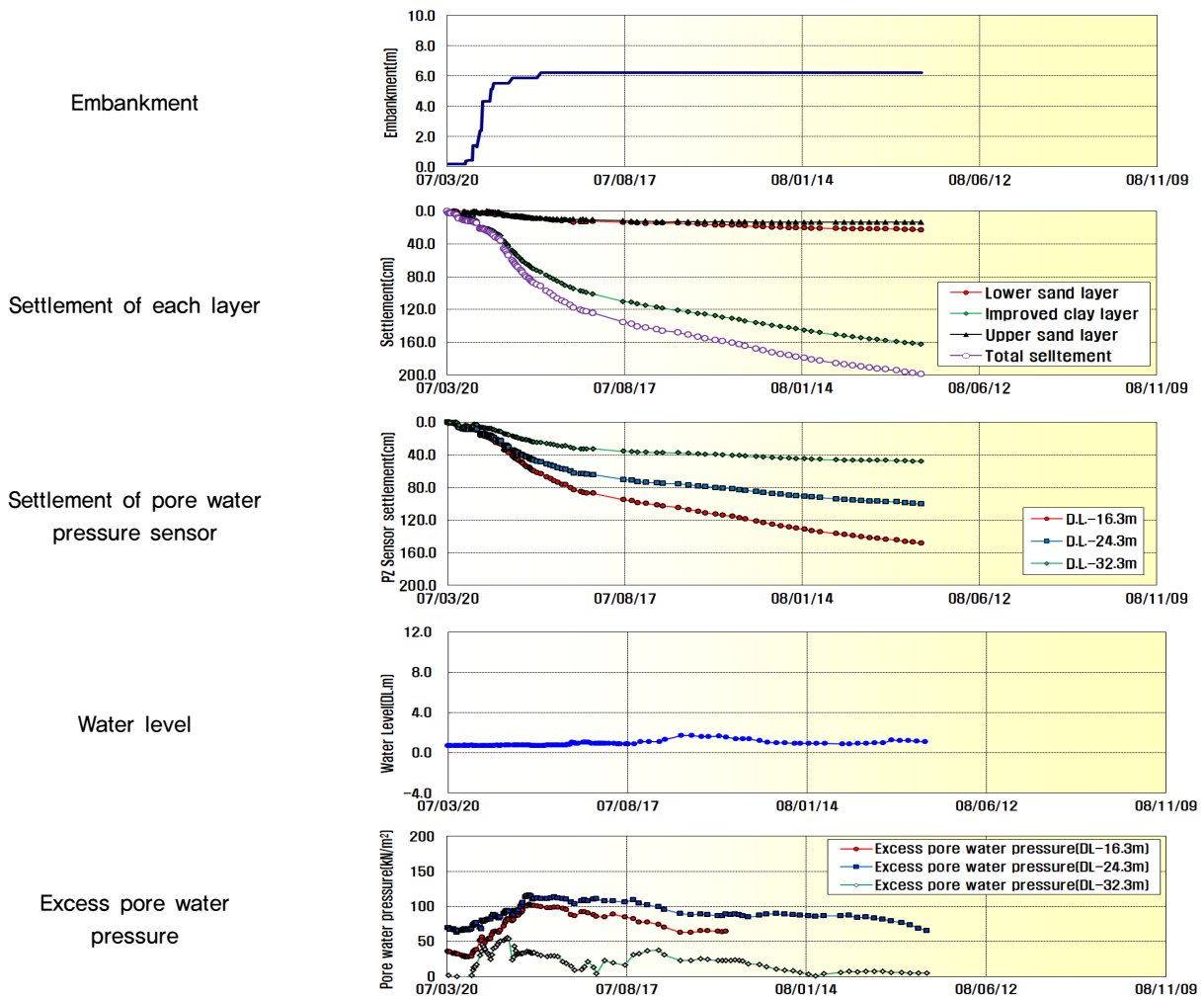


Fig. 5. Example of organizing and analyzing settlement results by point

Table 6. Comparison of predicted settlement by hyperbolic method depending on the ground dividing strata consideration

Ground	Thickness (m)	Embank. height (m)	Actual settlement at the time of analysis, St (m)	Predicted final settlement by hyperbolic method, Sf (m)	Note
Considered as multi-layer strata	6.0	9.0	1,421	1,938	Upper dredged layer
	6.0	9.0	1,208	1,482	Lower dredged layer
	15.0	9.0	2,199	2,793	Upper clay layer
	10.0	9.0	1,199	1,387	Lower clay layer
Considered as single layer	37.0*	9.0	6,027	7,600	
			6,027	7,485	0.115m difference

다. 단계 성토 구간인 경우 단계 성토 종료시점을 기록하고 단계 성토 중 일정한 압밀대기기간을 가질 경우 예비 침하 해석을 수행하여 예상침하량과 토공 계획을 수립한다.

3.5 층별침하계 결과의 정리 및 분석

층별침하계 결과를 이용하여 층별로 침하량을 분석한 결과와 층별침하량을 합산한 침하량으로 침하량을 분석한

결과를 비교하였으며, 층별침하계 계측기는 웅동배후단지 1단계 4공구 층별침하계(MS-8)의 계측결과를 이용하였다.

Table 6은 Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 표로 정리한 것으로 지반을 층별침하계 측정결과를 이용하여 다층지반으로 분석한 경우 최종예상침하량은 7.600m이고(Fig. 7), 지표침하 판 침하량을 이용한 단층지반으로 분석한 경우 7.485m로서 (Fig. 8), 다층지반으로 분석한 결과가 단층지반으로 분석한 결과보다 최종예상침하량이 0.115m 더 크게 산정되었다.

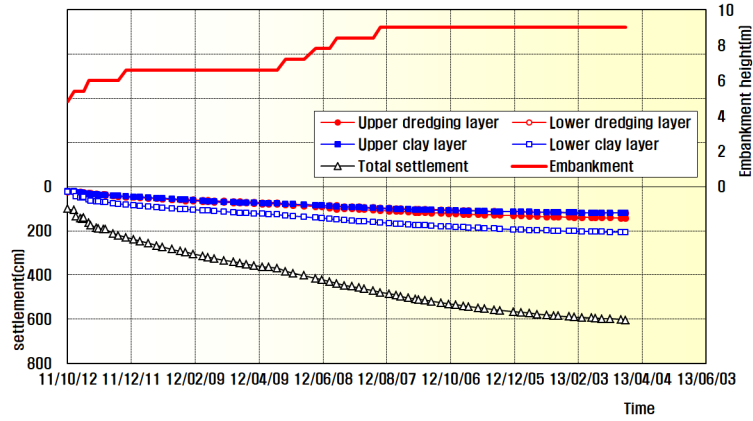


Fig. 6. Graphs of embankment height with total and differential settlements

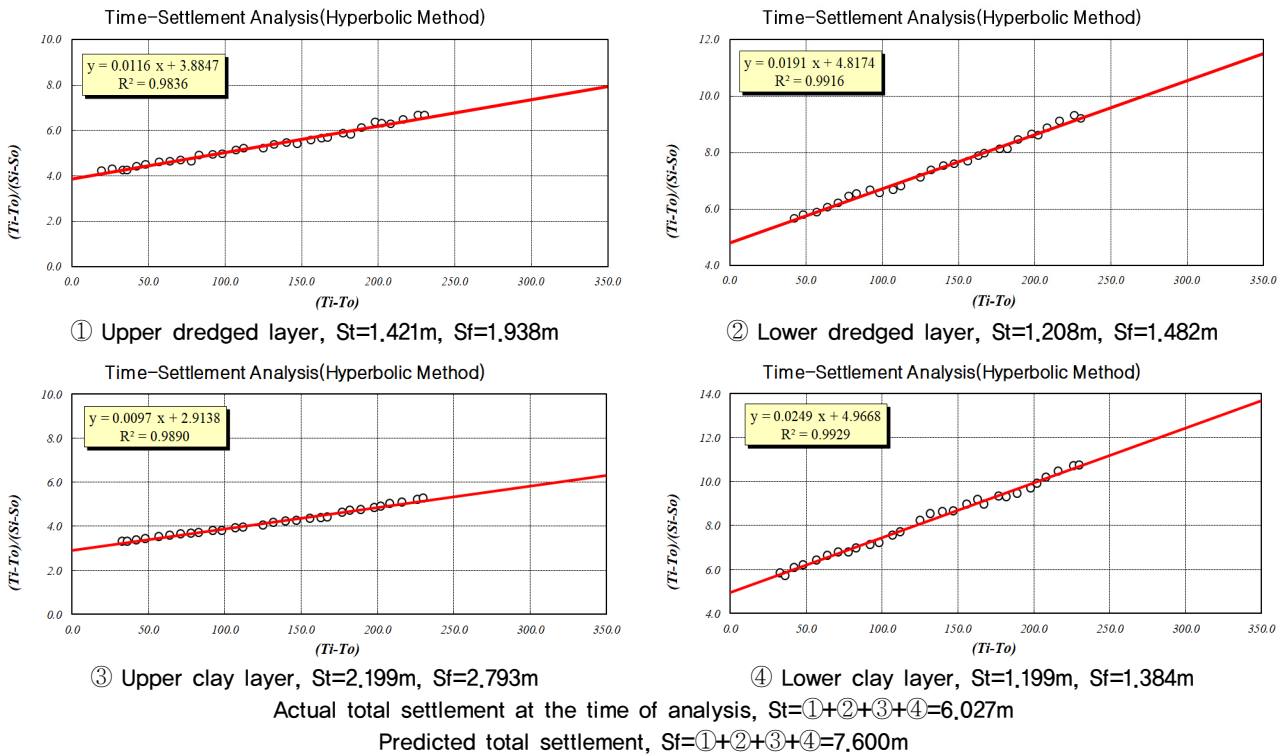


Fig. 7. Predicted settlement by hyperbolic method in case of the ground is treated each layer separately

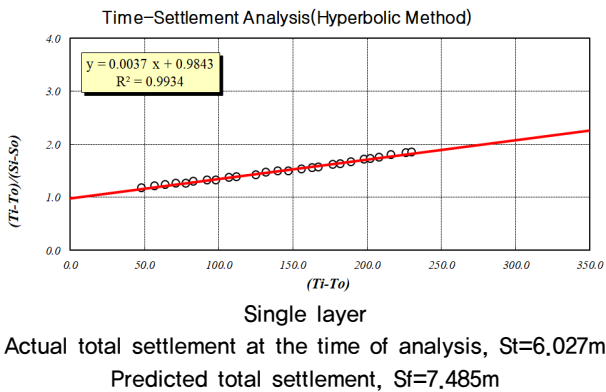


Fig. 8. Predicted settlement by hyperbolic method in case of the ground is treated as one layer

침하결과의 분석은 쌍곡선법으로 주로 이루어지고 있다. 침하분석 시 압축특성이 다른 다층지반일 경우 층별침하계를 이용하여 각 지층별 압밀특성을 각각 산정하여 침하분석이 이루어져야 한다(Fig. 6). 일반적으로 전체층의 침하량으로 침하분석을 실시하는 것보다 각 침하특성이 다른 각 지층별(준설매립층, 모래층, 점토층, 미개량층)로 침하분석을 시행하고 합산할 경우 잔류침하량이 커지며 안전측이므로 층별로 침하분석을 하여야 한다. 또한, 연직배수재 시공지반 하부에 무처리지반이 존재할 경우에는 개량지반과 구분하여 침하분석이 이루어져야 한다(Fig. 7).

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 준설점토가 매립된 대심도 연약지반 개량공사에서 층별침하계의 실태, 층별침하계 형식별 특성, 설치방법, 계측 빈도, 계측데이터 관리방안, 결과의 분석 등에 대해 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 대변형이 발생하는 준설점토가 매립된 대심도 연약지반 개량공사에서 스크류타입의 층별침하계의 경우 횡변형이 다른 형식의 계측기에 비해 적고 각 지층별로 천공하여 계측기를 설치하므로 데이터의 신뢰도를 높일 수 있으며 강봉의 상부를 레벨로 측정하는 형식으로 PVC Pipe를 사용하는 마그네틱 타입에 비해 횡압력에 의한 망실 우려도 적다. 스크류타입 층별침하계 설치시 스크류를 돌려 지반에 고정시키는데 이때 침하계가 자중에 의해 관입하지 않도록 하는 것이 중요하다.
- (2) 층별침하계 계측데이터의 관리는 측정별 지표침하량, 층별침하량, 간극수압계 침하량과 같이 필요한 구간의 침하량과 성토고의 경시 그래프 작성하여 침하관리를 하는 것이 바람직하다.
- (3) 침하분석은 압축특성이 다른 다층지반일 경우 층별침하계를 이용하여 각 지층별 압밀특성을 각각 산정하여 침하분석이 이루어져야 한다. 일반적으로 전체층의 침하량으로 침하분석을 실시하는 것보다 각 침하특성이 다른 각 지층별로 침하분석을 실시하고 합산할 경우 잔류침하량이 커져 안전측으로 침하가 분석된다.

Acknowledgement

This study is the result of the support from the Busan Port Construction Office of the Busan Regional Office of Oceans and Fisheries of Ministry of Oceans and Fisheries, “Research Service for Ground Performance Improvement in Busan Port and Jinhae New Port”. (Project Number: 202204047CD-00)

References

1. Bjerrum, L. (1967), “Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings”, *Geotechnique*, pp.17-83.
2. Busan Port Authority (2021), Design and construction of soft ground improvement work and maintenance manual.
3. Jang, J. G. (2020), *A study on the application of settlement prediction method according to field Conditions at the field of soft ground*, Ph.D. Thesis, Pusan Nation University.
4. Kang, S. C. (2021), “A study on the evaluation method of undrained shear strength using settlement measurement data”, Ph.D. thesis, Dong Eui University.
5. 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.
6. 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
7. Korean Society of Civil Engineers (2019), Research service on the cause of settlement and long-term settlement prediction at the Ung-dong hinterland of Busan New Port.
8. Lee, S. W., Jee S. H., Yoo, S. J. and Lee, Y. N. (2000), “Sedimentation and consolidation behavior of dredged clay fill”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.4, pp.149-156.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018a), Korean Design Standard : Ground measurement, KDS 11 10 15, MOLIT.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018b), Korean Construction Specification : Ground measurement during construction, KDS 11 10 15, MOLIT.
11. Ministry of Oceans and Fisheries (2016), Port and fishing port design standards.
12. Ministry of Oceans and Fisheries (2018), Port and fishing port standard specifications.
13. 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”, *Journal of the Japanese Geotechnical Society*, Vol.56, No.9, pp.10-13.