한국지반공학회논문집 제36권 11호 2020년 11월 pp. 71 ~ 81
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.36, No.11, November 2020 pp. 71 ~ 81

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2020.36.11.71

해상 교량기초용 대형 원형강관 가설공법의 무선 원격 안정성 모니터링을 위한 현장실험

Field Study on Wireless Remote Sensing for Stability Monitoring of Large Circular Steel Pipe for Marine Bridge Foundation

박 민 철[1] Park, Min-Chul
이 종 섭[2] Lee, Jong-Sub
유 정 동[3] Yu, Jung-Doung

Abstract

The large circular steel pipe for a marine bridge foundation has been developed as a construction method capable of performing the role of the working platform and cofferdam. The objective of this study is to demonstrate the wireless remote sensing system for monitoring the stability of the large circular steel pipe during construction and operation through field tests. The artificial seabed ground with an water level of 4 m is constructed for field tests. The large circular steel pipe with a diameter of 5 m and height of 9.5 m is installed into the ground by suction, and the embedded depth is 5 m. The inclinometer and strain gauges are installed on different surfaces of the upper module, and the tilt angle and stress are monitored throughout the entire construction process. As results, tilt angles are measured to be constant during the suction penetration. However, the tilt angle is larger in the x-axis direction. In addition, even when installed on different surfaces, the tilt angle in the same axial direction is measured to be almost the same. The stresses measured by strain gauges increase during suction penetration and decrease during pull-out. Based on measured stresses, it is found that the eccentricity is acting on the large circular steel pipe. This study shows that a wireless remote sensing system built with an inclinometer and strain gauge can be a useful tool for the stability monitoring of the large circular steel pipe.

요 지

해상 교량기초용 대형 원형강관 가설공법은 가물막이와 작업대의 역할을 함께 수행할 수 있는 공법으로 개발되었다. 본 연구의 목적은 현장실험을 통해 시공과 운용 중 대형 원형강관의 안정성을 모니터링하기 위한 무선 원격계측 시스템을 검증하는 것이다. 현장실험을 위해 수심 4m의 인공 해상 지반을 조성하였으며, 직경 5m, 높이 9.5m인 대형 원형강관을 석션 관입하였다. 대형 원형강관의 근입 깊이는 5m이다. 경사계와 변형률계는 상부 모듈의 서로 다른 네 면에 설치되었으며, 강관의 운반, 시공, 해체 전 과정에 걸쳐 경사각과 응력을 모니터링하였다. 실험결과, 경사계로

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료, ㈜백경지앤씨 전무이사 (Member, Ph.D. Candidate, School of Architecture and Civil Engrg., Korea Univ.)
2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Architecture and Civil Engrg., Korea Univ.)
3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Member, Research Prof., School of Architecture and Civil Engrg., Korea Univ., Tel: +82-3290-3838, Fax: +82-2-3290-5999, noorung2@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2020 by the Korean Geotechnical Society
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.

측정된 경사각은 석션 관입 중 일정하게 유지되었으나 x축 방향으로 더 크게 기울어진 것으로 나타났다. 또한, 서로 다른 면에 설치되어 있어도 같은 축 방향의 경사각은 거의 같게 측정되었다. 변형률계로 측정된 응력은 석션 관입 시 증가하였고, 인발 시 감소하였다. 또한, 측정된 응력으로부터 강관에 편심이 작용하고 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 경사계와 변형률계로 구축된 무선 원격계측 시스템이 대형 원형강관의 안정성 모니터링에 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Inclinometer, Large circular steel pipe, Stability monitoring, Strain gauge, Wireless remote sensing

1. 서 론

과거 인류의 해상 활동은 어업과 항해에 국한되었다. 하지만, 현재에는 경제와 건설 기술의 발전을 토대로 다양한 목적을 지닌 해상 활동이 활발히 이루어지고 있으며, 다양한 형태와 목적의 해양 구조물의 건설이 이루어지고 있다. 해양 구조물로는 석유와 가스의 시추와 생산을 위한 플랫폼, 선박 운항과 정박을 위한 마린 터미널, 토지의 확장을 위한 인공섬, 육지 간의 연결을 위한 교량, 그리고 이 외에도 다양한 목적의 해상 플랜트 등이 있다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 이루어져 있으며, 섬의 수는 총 3,348로 세계에서 4번째로 많다. 이와 같은 이유로 섬과 섬을 또는 육지와 섬을 연결하기 위한 해상교량의 건설이 활발히 이루어지고 있다.

해상 교량의 건설에 있어 기초 공사는 공정이 복잡하고 작업 난이도가 높기 때문에 해상 교량의 기초 공사비는 전체 공사비의 30%~50% 정도이며, 육상 교량의 기초 공사보다 공사 기간과 공사비가 2~3배 높다(Lee et al., 2017). 해상 교량의 기초 공사비를 증가시키는 주된 원인은 해상 작업대, 가설도로, 가물막이 부대공과 같은 가설 구조물의 공사비이다. 특히 해상 가물막이의 경우, 다수의 부재를 조립하기 위한 별도의 템플릿이 필요하며, 부재의 조립이 완성되기 전에는 구조적인 불안정성을 내재하고 있다. 또한, 부재간 차수를 위한 추가적인 과정이 필요하다. 가물막이의 내적 안정성 확보를 위해 사용되는 각종 지보재(스트럿, 앵커, 링빔 등)는 기초와의 간섭을 일으키는 문제를 가져온다. 가물막이를 육상화 하기 위한 뒤채움 작업을 위해서는 육상화 전에 작용하는 외측 수압과 뒤채움 후에 작용하는 내측 토압 간의 차이를 예측하여 하중을 고려해야 한다. 그리고, 가물막이 내부와 외부의 수압차로 인한 보일링, 히빙, 구조적 변형과 같은 문제들은 가물막이의 근입 깊이를 증가시키는 원인이 된다. 이 외에도 가물막이 근입을 위해 사용되는 진동 및 항타해머는 가물막이의 연직도와 변형에 영향을 준다. 하지만, 가물막이는 영구 구조물이 아니기 때문에 안정성에 관련한 연구와 원가 절감에 대한 노력이 미흡하였다(KICT, 2015).

최근 한국건설기술연구원(KICT)은 해상 교량 공사에 소요되는 공사비를 절감하고, 공사 기간을 단축할 수 있는 해상 교량기초용 대형 원형강관 가설공법을 개발하기 위한 연구를 수행하고 있다. 대형 원형강관 가설공법은 하나의 대형 원형강관을 부재로 사용하기 때문에 외부 수압, 근입 깊이, 부재간 배열, 그리고 연직도에 따른 안정성을 확보하기 용이하며, 지보재와 기초의 간섭문제를 해결할 수 있다. 이러한 일체형 부재는 케이슨과 같은 연직하중지지 메커니즘을 따르므로 대형 장비의 하중에 저항할 수 있는 작업대로도 병행하여 사용이 가능하다. 대형 원형강관의 관입과 인발은 석션압을 이용하여 이루어 지기 때문에 별도의 템플릿이 필요하지 않으며, 부재간 연결로 인해 수행되었던 안정성 확보를 위한 공법과 차수 작업이 필요하지 않다. 그리고, 인장 강도와 압축 강도가 유사한 대형 원형강관을 재료로 사용하여 뒤채움 후에 내부 토압에 저항하도록 할 수 있다. 이와 같은 대형 원형강관 가설공법은 해상 교량의 기초부 공사비 증가의 주원인인 기존 해상 작업대와 가물막이 공법에 비해 기술적, 경제적으로 경쟁력을 가진 대체 공법으로 기대되고 있다.

해상 교량기초용 대형 원형강관 가설공법의 개발이 진행됨과 함께 이와 관련한 많은 연구들이 발표되고 있다. SSenyondo et al.(2017)은 가물막이로 사용되는 대형 원형강관의 침투 안정성을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 축대칭 흐름조건에서의 침투속도가 2차원 조건과 2차원 흐름집중 조건에서보다 빠르게 나타났으며, 축대칭 흐름조건에서는 물의 흐름이 벽체 중앙부에 집중되어 수두 손실이 커지기 때문에 파이프 안전율이 작아지는 것으로 나타났다. 이 연구를 통

해 대형 원형강관의 직경, 근입 깊이, 그리고 수위차를 고려하여 침투 안정성 해석에 필요한 유출 동수경사를 산정할 수 있는 식을 제시하였다. Song et al.(2018)은 대형 원형강관의 안정성에 영향을 줄 수 있는 선박 충돌과 같은 외부 충격을 모니터링하기 위한 실내실험을 수행하였다. 변형률계와 가속도계를 모형 원형강관에 설치하여 충격 발생 시 나타나는 동적반응을 수위변화에 따라 모니터링하였으며, 충격에 의해 발생한 변형률과 가속도 신호의 에너지를 분석하였다. 또한, 변형률계와 가속도계로 측정된 신호의 주파수 분석을 통해 충격과 측정 방향에 대한 영향을 연구하였다. 그 결과, 강관의 상부가 충격에 가장 민감하였고, 하부로 갈수록 충격에 의한 변형률이 감소하였다. 수위가 증가하면 가속도 신호의 에너지도 감소하였다. 모형 원형강관에 충격이 가해지면 가속도 신호의 주파수가 크게 증가하였으며, 수위가 증가함에 따라 감소하였다. 신호의 주파수는 측정 방향에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Kim(2019)은 대형 원형강관 상판의 휨 변형을 억제하기 위해 설계되는 상판 보강에 대한 구조 거동을 수치해석을 통해 분석하였다. 그 결과, 방사방향 보강재가 상판의 처짐 및 응력 감소에는 큰 효과가 있지만 상판-벽체 연결부의 수평 전단력을 집중시키고 증가시켜 연결부 안정성에는 불리하게 작용하는 것으로 나타났다. 또한, 환형 보강재는 부분적으로 배치된 방사 보강재와 함께 연결해 배치하면 응력과 처짐 개선에 효과적인 것으로 나타났다. Jeong et al.(2018)은 대형 원형강관의 설치단계별 거동 특성에 대한 hydrodynamic과 정적 구조해석을 수행하였다. 석션관입 단계에서는 구속압(정수압, 석션압, 토압)과 1년 빈도의 해양외력(파력, 조류력)을 적용하였으며, 설치완료 단계에서는 구속압(정수압, 토압)과 10년 빈도의 해양외력(파력, 조류력, 풍압)을 적용하였다. 해석 결과, 석션 관입 단계에서는 석션압이 지배적인 영향을 주었으며, 설치완료 단계에서는 정수압이 지배적인 영향을 주었다. Kim et al.(2019)는 지중에 근입된 대형 원형강관의 변위와 안정성을 토압과 수압을 고려하여 탄소성해석과 유한요소해석을 통해 분석하였다. Park et al.(2019)은 실내실험을 통해 세 개의 세그먼트가 볼트로 조립된 모형 원형강관과 일체형 모형 원형강관의 동적 거동을 수위 변화에 따라 모니터링하였다. 이를 위해 측정된 가속도계 신호로부터 MARSE를 산정하였으며, 변형률계 신호의 주파수 특성을 분석하였다. 그 결과, 수위가 증가함에 따라 신호의 에너지가 감소하였으며, 볼트로 조립된 강관에서 더 큰 감소폭을 보였다. 그리고 신호의 우세 주파수는 수위가 증가함에 따라 감소하였다. 우세 주파수의 감소폭은 볼트로 조립된 강관에서 더 적게 나타났다.

석션압에 의해 설치되는 대형 원형강관은 지반의 불균질성 및 편심작용에 의해 지반에 근입되는 과정 중 기울어질 수 있다(Park et al., 2019a). 즉, 정밀한 시공으로 연직성이 유지되었더라도 연약한 지반과 견고한 지반이 혼재되어 있으면 압밀 과정 중에 부등침하에 의한 경사가 발생할 수 있다(Kim et al., 2016). 또한, 해상에 설치되기 때문에 풍력, 파력, 조류력과 같은 반복하중과 및 세굴 등에 의해 기울어짐이 발생할 수 있다(Achmus et al., 2009; Kim et al., 2015; Kim et al., 2017). 이로 인해 발생한 기울어짐은 구조물의 안정성과 성능에 악영향을 줄 수 있다. 그리고 장비의 고장과 구조물 복구에 소요되는 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 인명 피해도 유발할 수 있다. 이에 따른 사회적 파급효과가 크기 때문에 안정성이 반드시 확보되어야 한다(KICT, 2015).

국내에서는 1980년대 후반부터 교량의 유지관리와 안정성 모니터링을 위해 전산화된 교량관리시스템(Bridge Management System; BMS)을 구축하여 활용하고자 하였다. 1989년에 한국건설기술연구원이 고속국도교량의 유지관리를 위해 프라임 컴퓨터와 마이다스 플러스를 이용한 BMS를 개발하였으며, 1996년에는 건설교통부(현 국토교통부)의 지방국토관리청과 국도유지건설사무소를 연결하는 컴퓨터 네트워크를 구성하여 본격적으로 BMS를 활용하고자 하였다(Park et al., 1997). 현재에는 대도심지의 1등급 교량을 중심으로 시설물 유지관리 공공기관과 지자체 등에서 BMS를 운용하고 있으며, IT기술의 발전과 함께 가속도계, 경사계, 처짐계, 지진계 등 다양한 센서를 이용하여 교량의 정·동적 거동에 대한 계측이 이루어지고 있다(Kim et al., 2016; Park et al., 2019b; Park et al., 2019c; Kim, et al., 2020). 하지만, 국내 교량 시설물에 설치된 센서 네트워크 시스템은 대부분 유선 기반 센서 네트워크로 운용되고 있다(Kim et al., 2018). 유선 시스템은 데이터 전송에 필요한 장비가 많이 필요하고 자동 계측을 위한 시스템을 구축해야 하기 때문에 교량 1개소마다 설치되는 비용이 고가이다. 또한, 유선 연결과 전원의 공급을 위한 설치, 운용 및 유지관리가 어렵다(Park et al., 2019b). Kim et al.(2020)은 유선 방식의 시스템을 구축하는데 필요한 시간은 무

선 시스템에 비해 약 2.5배 더 소요되며, 유선 시스템을 구축하는데 소요되는 비용은 무선 시스템을 구축하는 비용의 약 2.3배 더 크다고 하였다. 이와 같은 이유로 사용성과 경제성이 우수한 무선 시스템을 구축하여 교량의 유지관리와 안정성을 모니터링하는 연구와 활용이 요구되어 왔다.

Heo et al.(2010)은 가속도계와 블루투스 무선 통신 모듈을 이용하여 교량 모니터링을 위한 무선 계측 시스템을 연구하였다. 블루투스를 이용하여 고유 진동수 계측 데이터를 송·수신한 결과, 통신 거리 280m까지는 데이터의 손실 없이 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있음을 보였다. 하지만, 블루투스로 송·수신하는 전파의 굴절 성능이 저조하여 장애물이 존재할 경우 통신이 단절되는 것으로 나타났다. Sin et al.(2011)은 온도 센서와 습도 센서를 이용하여 교량구간 도로의 결빙을 모니터링하였으며, Zigbee 무선 통신을 이용하여 데이터를 송·수신하였다. Zigbee 무선 통신을 이용하여 데이터 송·수신이 가능한 거리는 약 300m로 나타났으며, 차량이 지나갈 경우 데이터 손실이 발생하여 50m단위로 게이트웨이를 배치하였다. 블루투스와 Zigbee와 같은 근거리 무선 통신은 비교적로 저렴하고 빠른 데이터 전송 속도(250kbps~1Mbps)를 제공하지만, 통신 가능 거리가 300m 이하로 짧고, 주위 장애물의 간섭에 민감하다는 단점이 있다. Ho et al.(2012)은 교량의 진동 특성을 모니터링하기 위하여 주탑, 거더, 케이블에 가속도계를 설치하였다. 또한, 근거리 무선 통신의 단점을 개선하고자 빠른 데이터 전송 속도(1Mbps)와 10km 이상 장거리 통신이 가능한 3G 셀룰러 무선 통신을 이용하여 데이터를 송·수신하였다. 하지만, 셀룰러 기반의 무선 통신(3G/4G/5G/LTE)을 기반으로 구축된 계측 시스템은 과도한 통신비가 발생할 수 있으므로 토목 구조물을 장기적으로 모니터링하기에 적합하지 않다(Kim et al., 2020). 교량을 포함한 사회기반시설의 노후화와 함께 안전 및 유지관리 모니터링에 대한 필요성이 급증하고 있다. 이에 대응하기 위해서는 무선 통신비가 발생하지 않고 자가망 구축이 가능한 별도의 무선 통신 기술인 적용이 필요하다(Park et al., 2019c).

본 연구에서는 대형 원형강관에 작용하는 응력과 기울어짐을 모니터링하기 위한 현장실험을 수행하였다. 경사계와 변형률계를 이용하여 기울어짐과 응력을 측정하였으며, 별도의 무선 통신비가 발생하지 않는 비면허 대역인 LoRa 기반의 무선 원격계측 시스템을 구축하여 실시간으로 모니터링하였다. 본 논문은 현장 실험이 수행된 지반에 대한 개요와 대형 원형강관의 안정성 모니터링을 위한 시스템 구축에 대한 설명을 포함하는 실험방법 및 구성, 경사계와 변형률계로 측정된 데이터를 무선 원격계측한 결과 및 토의, 그리고 결론으로 구성된다.

2. 실험방법 및 구성

2.1 현장 개요

현장실험은 Fig. 1과 같이 전라북도 군산시 새만금 내항 남북도로 건설현장 부근에서 수행되었다. 지반의 심도 0m~12m(매립층)까지 조사된 표준콘관입시험치(SPT N-value)를 Table 1에 나타내었다. 지반은 실트질 모래로 N값은 5~21로 분포하였으며, 조밀도(compactness)는 느슨(loose)~보통조밀(medium dense) 상태였다. 지하수위는 지층으로부터 0.5m였다.

대형 원형강관을 설치할 수 있는 인공 해상(海床) 지반을 조성하기 위해 Fig. 2와 같이 대상 지반의 터파기를 실시하였다. 터파기 상단과 하단의 폭은 각각 30m와 12m이며, 터파기 길이는 상단 폭과 같은 30m이다. 터파

(a) (b) (c)

Fig. 1. Site location: (a) map; (b) satellite photograph (c) site view

Table 1. SPT N-value

Depth [m]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
Blow counts [blows/cm]	12/30	8/30	8/30	6/30	6/30	7/30	10/30	18/30	19/30	5/30	10/30	21/30
Compactness	Medium dense	Loose	Loose	Loose	Loose	Loose	Loose	Medium dense	Medium dense	Loose	Loose	Medium dense

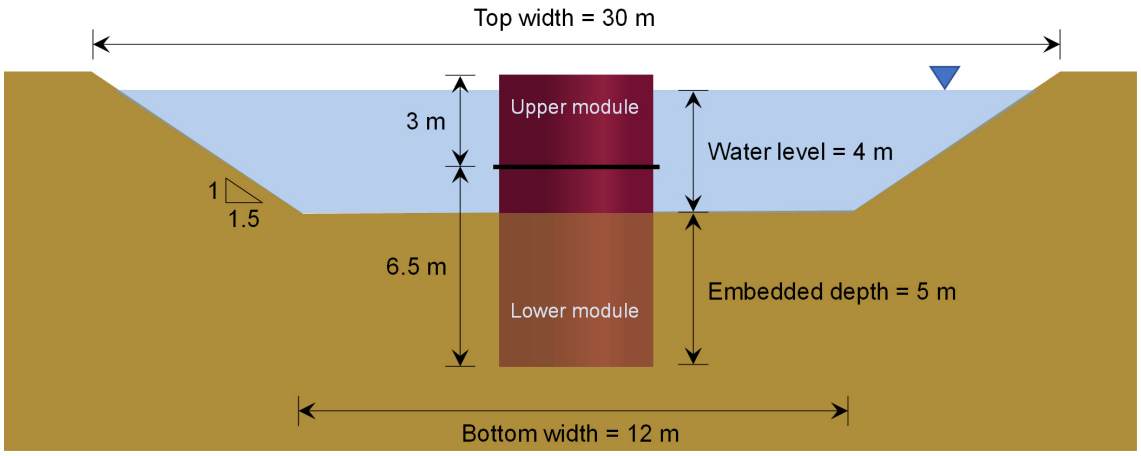


Fig. 2. Schematic diagram of the site excavation

기의 경사각은 33.7°(경사도 1:1.5)이다. 대형 원형강관이 지반에 근입된 깊이는 5m이며, 수중에 위치한 길이(수심, water level)는 4m, 그리고 공기에 노출된 길이는 0.5m이다.

2.2 대형 원형강관

2.2.1 구성요소 및 제원

실험에 사용된 대형 원형강관과 구성요소를 Fig. 3에 각각 나타내었다. 대형 원형강관은 상판과 벽체(강관)으로 이루어져 있으며, 강관은 상부 및 하부모듈로 구성된다. 상판의 직경, 높이, 두께는 각각 5m, 0.5m, 30mm이며, SM490급 강재로 제작되었다. 상판의 처짐과 응력 감소를 위해 8개의 방사형 보강재로 상판을 보강하였다. 보강재의 높이와 두께는 각각 0.3m~0.5m, 10mm이다. 상부와 하부모듈의 직경과 두께는 각각 5m와 25mm이며, SS400급 강재로 제작되었다. 상부와 하부모듈의 높이는 3m와 6.5m이다. 상부와 하부모듈은 플랜지 결합부를 통해 10cm 간격으로 볼트로 조립되었다. 대형 원형강관의 총 무게는 약 43ton으로 상판 및 상·하부 모듈의 무게는 각각 8ton, 13ton, 22ton이다.

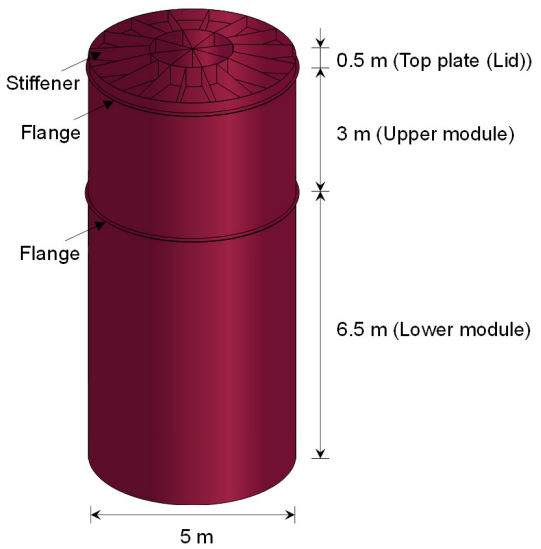


Fig. 3. Schematic diagram of the large circular steel pipe

2.2.2 대형 원형강관 시공

대형 원형강관을 인공 해상 지반에 설치하였으며, 이에 대한 시공 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 우선 대형 원형강관을 시공할 위치를 선정한 뒤에 크레인을 이용하여 대형 원형강관의 하부 모듈을 선정된 시공 위치까지 인양하였다. 그리고 하부 모듈을 지반까지 천천히 하강시킨 후 자중에 의해 지반에 일정 깊이까지 관입되도록 하였다. 하부 모듈이 자중에 의해 관입된 깊이는 약 1m였다. 하부 모듈이 자리잡은 후에 크레인을 이용하여 대형 원형강관의 상부 모듈을 하부 모듈의 위치까지 인

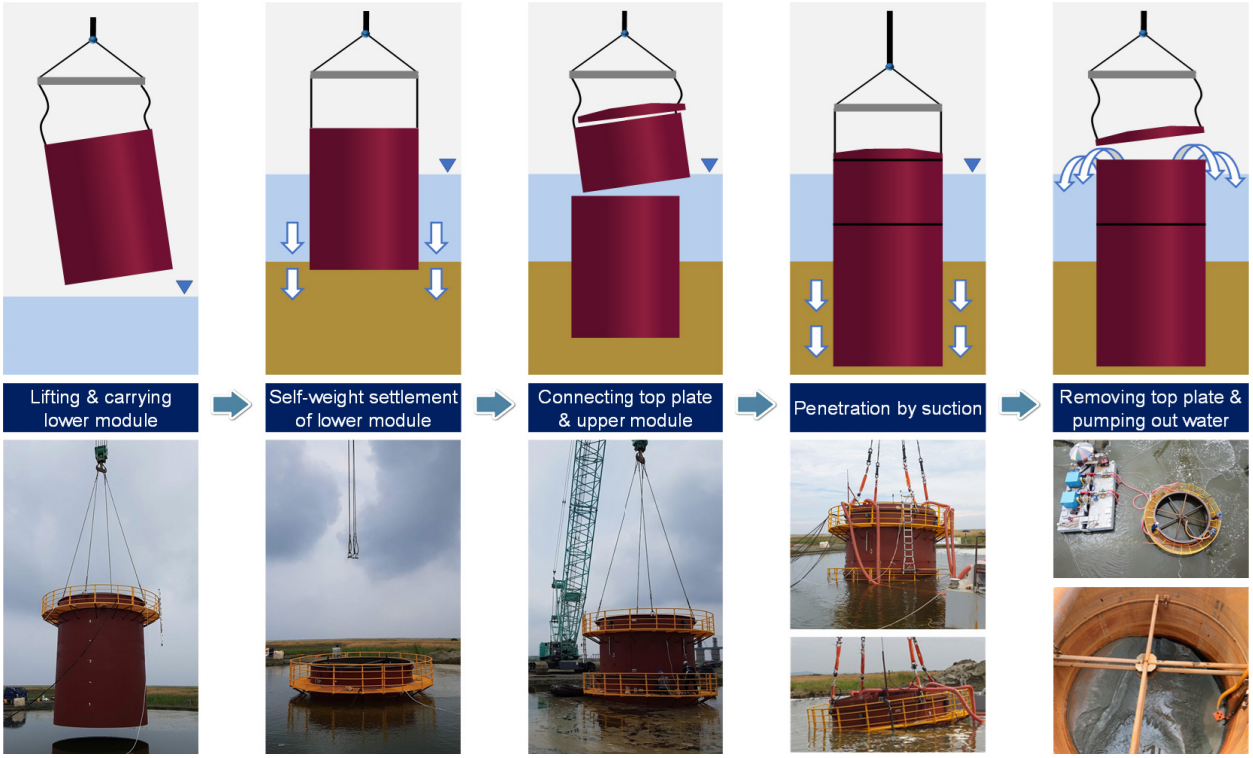


Fig. 4. Procedure of the large circular steel pipe installation

양하였으며, 상부 모듈을 하부 모듈 위에 거치시켰다. 상부 모듈과 하부 모듈은 플랜지 연결부를 볼트로 조립하여 연결되었다. 상부 모듈과 하부 모듈이 연결된 후에 상판을 인양하였으며, 상부 모듈을 연결을 위해 플랜지 연결부를 볼트로 조립하였다. 상부와 하부 모듈이 결합된 상태에서 자중에 의해 추가로 0.5m 더 관입되었다. 자중에 의해 관입된 대형 원형강관의 총 관입 깊이는 총 1.5m이다. 석션을 이용하여 대형 원형강관을 지반에 관입시키기 위해 석션펌프를 배치하고 직경 127mm의 고내압 호스를 연결하였다. 고내압 호스는 상판에 등간격으로 설치되어 있는 4개의 압력 배관 플랜지에 체결하였다. 대형 원형강관 내부의 공기와 해수를 펌프로 제거하였고, 이로 인해 발생한 강관 내부와 외부의 압력차(석션압)를 이용하여 대형 원형강관을 지반에 관입시켰다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 대형 원형강관이 지반에 근입된 깊이는 5m이다. 대형 원형강관의 근입이 완료된 후 대형 원형강관의 상판을 분리하여 제거하였고, 강관 내부에 남아 있는 해수를 배출하였다. 대형 원형강관의 시험 운용이 종료된 후에 상판을 다시 인양하여 대형 원형강관의 상부 모듈에 연결하였으며, 강관 내부가 밀폐되도록 하였다. 설치시와 반대로 강관 내부로 해수를 주입하였으며, 이로 인해 강관 내부에 발생한 양압력을 이용하여 대형 원형강관을 (석션)인발하였다. 마지막으로 석션에 의해 인발된 대형 원형강관을 해체하였다.

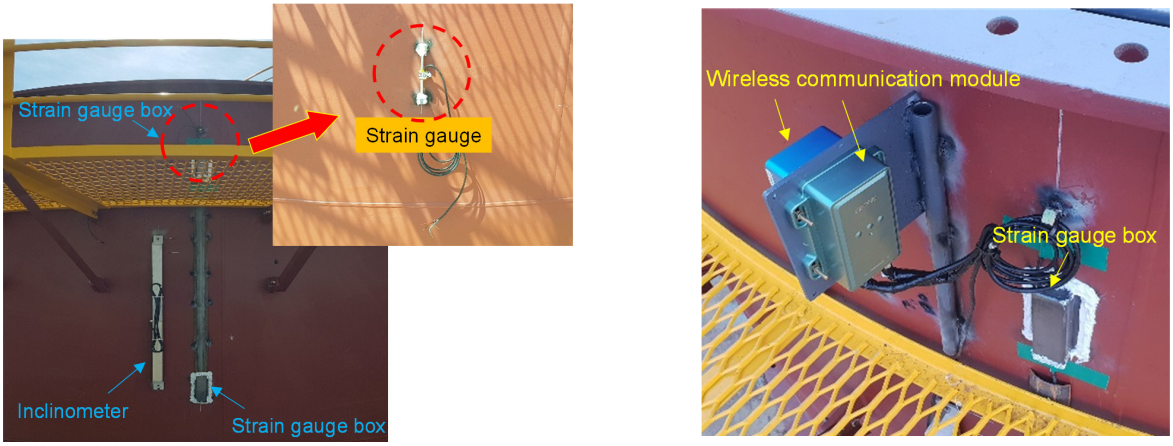
2.3 안정성 모니터링 시스템 구축

본 연구에서는 시공 단계 및 완료 후 운영 중에도 대형 원형강관의 안정성을 모니터링 할 수 있도록 무선 원격계측 시스템을 구축하였다. 대형 원형강관에 작용하는 응력과 기울어짐을 모니터링하기 위해 변형률계와 경사계를 강관의 상부 모듈에 설치하였으며, 무선 계측을 위해 양방향 통신모듈을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 변형률계를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 변형률계는 진동현식 아크용접용 변형률계(Model 4000, 지오코리아 이엔지)로 3,000με의 측정범위와 1με의 분해능을 지니고 있으며, 측정 정확도는 ±0.5% F.S이다. 경사계는 Fig. 5(b)에 나타낸 것과 같이 전기전압식 경사계(Model 7100, 지오코리아 이엔지)로 측정 범위는 ±10°이며, 0.002°의 분해능을 지닌다. 경사계의 측정 정확도는 ±0.5% F.S이다. 경사계는 x방향과 y방향으로 기울어진 기울기를 측정할 수 있는 2축 경사계이다. 무선통신을 위한 장비는 외부로부터의 전원 공급 없이도 운용될 수 있도록 일회성 배터리를 내장하여 설계되었

(a) (b) (c)

Fig. 5. Sensors: (a) strain gauge; (b) inclinometer; (c) wireless communication module



(a) (b)

Fig. 6. Upper module instrumented with: (a) strain gauge and inclinometer; (b) wireless communication module

으며, 양방향 통신이 가능하도록 MCU(Micro Controller Unit) 기반의 독립형 데이터 통신모듈(GEONE-M9000, 지오코리아 이엔지)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 무선통신 측정장비(Fig. 5(c) 참고)는 변형률계와 경사계의 측정 조건을 PC나 스마트폰 앱을 통해 설정할 수 있으며, 센서에 의해 측정·수집한 데이터를 실시간으로 서버에 전송한다. 데이터를 서버에 전송하기 위해 사용한 무선통신은 사물인터넷의 LPWAN(Low Power Wide Area Network) 방식 중 하나인 전용망을 기반으로 하는 무선 프로토콜 LoRa(Long Range)를 이용하였다. LoRa는 저전력으로 초장거리 통신이 가능하도록 개발된 통신 방식으로 넓은 대역폭을 필요로 하지 않으면서 산업, 의료, 과학 등의 분야에서 사전 허가 없이 공통으로 사용할 수 있는 ISM(Industry-Science-Medical) 밴드를 사용하기 때문에 저렴한 비용으로 무선통신 시스템 구축이 가능하다(Park et al., 2020). ISM 밴드의 주파수 대역은 1GHz 이하이며, 대역폭은 125kHz~500kHz이다.

대형 원형강관 상부 모듈에 설치된 변형률계, 경사계, 그리고 무선통신 측정장비를 Fig. 6에 나타내었다. 변형률계는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 상부 모듈의 A, A', B, B'면에 각각 2개씩 총 8개를 설치하였다. 변형률계는 상부 모듈의 상단으로부터 수직으로 0.5m와 2m 아래에 설치되었다. 경사계는 상부 모듈의 A, A', B, B'면에 각각 1개씩 설치되었으며, 상부 모듈의 상단으로부터 수직으로 1.5m 아래에 설치되었다. 무선통신 측정장비는 상부 모듈의 A, A', B, B'면에 각각 2개씩 총 8개가 설치되었다. 무선통신 측정장비는 상부 모듈의 상단으로부터 수직으로 0.5m 아래에 2개가 나란히 설

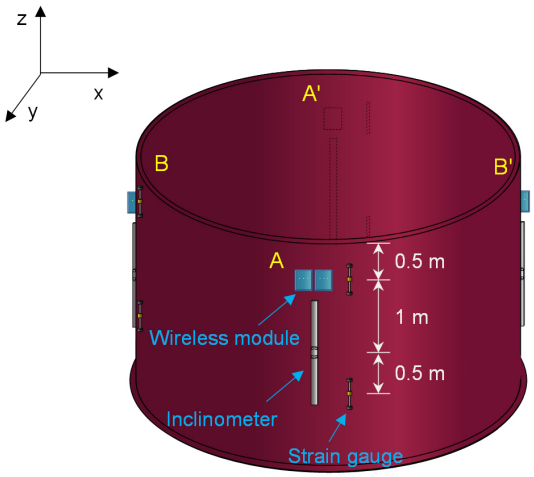


Fig. 7. Installation position of strain gauge, inclinometer, and wireless communication module

치되었다. 무선통신 측정장비는 각 면당 2개씩 총 8개가 설치되었다.

3. 결과 및 토의

대형 원형강관의 인양과 석션 설치, 그리고 인발 후 해체하는 전 과정에 대해 무선 모니터링을 수행하였으며, 경사계와 변형률계에서 측정된 경사각과 응력을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8(a)는 A, A', B, B'면에 설치된 경사계로 측정된 경사각으로 강관이 x방향으로 기울어진 경사각을 나타낸다. A면에 설치된 경사계로 측정된 경사각을 보면, 강관의 인양과 조립 단계(0분~173분)에서의 경사각은 약 -3°~15°로 매우 불규칙하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 상부 모듈이 크레인에 케이블로 매달려 인양되고 조립되는 과정에서 흔들림이 발생되기 때문이다. 또한, 강관을 지지하고 있는 다수의 케이블에 발생한 장력이 서로 달라 기울기가 발생한 것으로 사료된다. 강관을 석션 설치하는 단계(174분~450분)에서 측정된 경사각은 약 9°로 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 강관이 동일한 기울기로 관입되고 있음을 보여준다. 석션 관입이 끝나고 강관을 인발하는 단계(451분~570분)에서 측정된 경사각을 보면 초기에는 일정한 각도를 유지하지만, 이후에는 강관의 인양과 설치시와 유사하게 경사각이 불규칙하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 강관에 작용하는 토압이 석션 인발시의 인발 경로를 일정하게 유지시켜주기 때문으로 사료된다. 하지만, 석션 인발이 종료되는 시점부터 인양 단계에서는 크레인 케이블의 흔들림과 함께 경사각이 불규칙 하게 측정된다. 강관의 인양이 종료되고 해체 작업시(571분 이후)에 측정된 경사각은 약 0.3°로 매우 작게 나타났다. 이는 강관이 비교적 평평한 지반 위에 놓여져 있기 때문이다.

A면과 마주보고 있는 A'면에 설치된 경사계의 x방향에 대해 측정된 경사각을 보면 강관의 인양과 조립 단계에서의 경사각은 약 -10°~1°로 불규칙하고 분포하고 있으며, 강관을 석션 설치하는 단계에서는 약 -10°로 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 석션 인발과 인양 단계에서는 다시 불규칙한 경사각 변화를 보이고 있으며, 강관의 인양이 종료되고 지반 위에 놓여져 있을 때에는 0°에 가까운 경사각을 보이고 있다. 강관의 인양, 설치, 해체까지의 전 과정에서 나타나는 경사각의 변화 양상은 A면에 설치된 경사계에서 측정된 것과 유사하지만 대칭을 보인다. 이는 A면과 A'면에 설치된 경사계에서 측정되는 기울기가 서로 반대 방향으로 측정되기 때문이다.

B면과 B'면에 설치된 경사계의 x방향에 대해 측정된 경사각은 각각 A면과 A'면에 설치된 경사계의 x방향에 대해 측정된 경사각과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 양방향의 기울기를 측정할 수 있는 4개

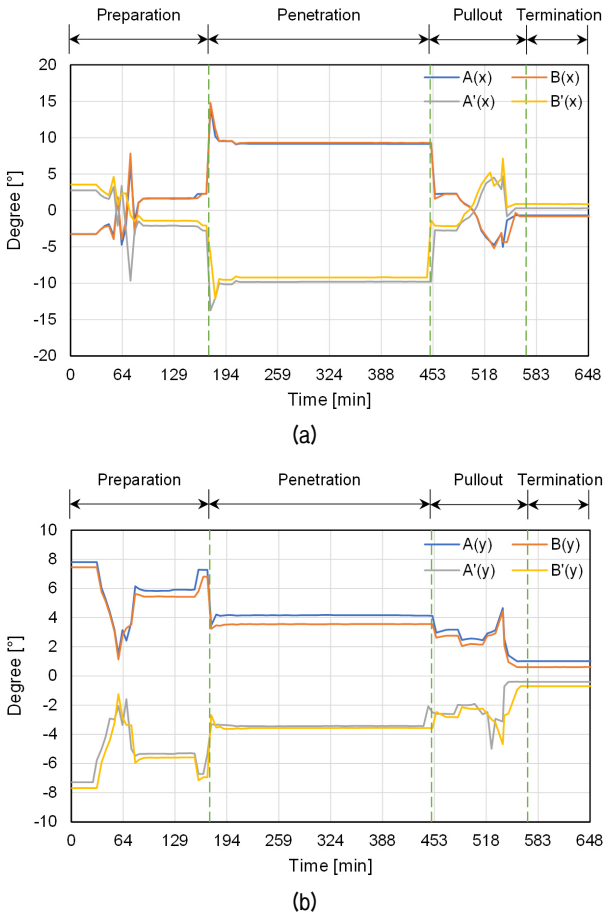


Fig. 8. Tilt angle: (a) x-direction; (b) y-direction

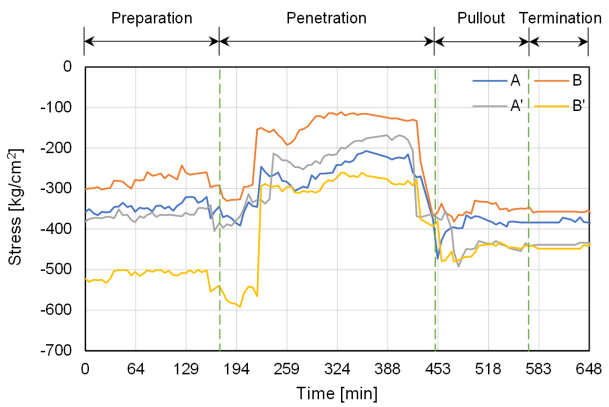


Fig. 9. Stress measured by upper strain gauge

의 2축 경사계를 설치하였다. 하지만, 같은 방향에 대해 동일한 경사각이 측정됨을 고려하면, 2축에 대해 측정할 수 있는 2개의 경사계만 설치하여 비용을 절감할 수 있을 것으로 사료된다. 또는, 직각으로 배치된 두개의 경사계 사이에 경사계를 배치하여 더 많은 기울기 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

대형 원형강관이 y방향으로 기울어진 정도를 측정한 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. A면에 설치된 경사계에서 측정된 경사각을 보면, 강관의 인양과 조립 단계에서의 경사각은 약 1°~8°로 강관이 흔들리고 있음을 알 수 있다. 강관이 석션 관입되고 있는 단계에서 측정된 경사각은 약 4°로 흔들림 없이 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 강관이 석션 인발되고 있는 단계에서 측정된 경사각을 보면 석션 인발 초기에는 일정한 경사각을 유지하지만, 인양 중에는 강관의 움직임으로 인한 불규칙한 기울기를 보여주고 있다. 강관의 인양이 종료되고 해체하는 작업 단계에서의 기울기는 약 1°로 나타났다.

B면에 설치된 경사계의 y방향에 대해 측정된 경사각은 A면에 설치된 경사계의 y방향으로 기울어진 경사각과 비슷한 양상으로 변화하는 것으로 나타났다. 하지만, x방향에 대해 측정된 결과와 달리 A면과 B면에서 측정된 y방향에 대해 측정된 경사각은 약 0.5° 정도 오차가 있는 것으로 나타났다. 이는 경사계가 0.5°만큼 기울어져 설치되었거나 초기 값을 0°로 보정하지 않아서 발생한 오차로 사료된다. A면과 B면의 y방향에 대해 측정된 경사각의 변화는 이와 마주보는 면에 설치된 A'면과 B'면에서 측정된 y방향 기울기에 대한 경사각 변화와 대칭을 이루고 있는 것을 볼 수 있으며, 거의 동일한 기울기를 보이고 있는 것으로 나타난다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 마주보고 있는 두 면은 경사계 기준에서 서로 반대 방향의 기울기를 가지기 때문이다.

A, A', B, B'면에 설치된 경사계의 x방향과 y방향에 대해 석션 관입 단계에서 측정된 경사각은 각각 약 9°와 4°이다. 즉, 석션 관입된 강관은 x방향으로 9°, y방향으로 4°만큼 기울어져 있는 것으로 나타났다. 대형 원형강관과 같이 석션에 의해 설치되는 구조물은 상판에 경사계를 설치하여 석션 관입시 수직도를 모니터링 할 수 있으며, 크레인 케이블의 장력을 조절하여 수직도를 보정할 수 있다(Park et al., 2019; Park et al., 2020). 하지만, 강관을 석션 설치한 후에는 상판을 제거하여 운용하기 때문에 지반 압밀, 침하, 풍력과 파력과 같은 반복하중, 그리고 세굴 등과 같은 요인으로 인해 발생할 수 있는 기울어짐을 평가할 수 없다. 본 연구에서 적용한 것과 같이 경사계를 상판뿐만 아니라 대형 원형강관의 상부 모듈에 설치하면 시공 단계 및 시공 완료 후 운용 중에도 기울어짐을 모니터링 할 수 있을 것으로 사료된다.

대형 원형강관 상부 모듈의 A, B, A', B'면의 상부에 설치된 변형률계로 측정된 응력을 Fig. 9에 나타내었다. 측정된 응력은 석션 관입이 시작되면서 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 강관이 압축 응력을 받고 있기 때문이다. 석션 관입 단계에서 A, B, A', B'면에서 측정된 평균 응력은 각각 약 -333kg/cm^2, -266kg/cm^2, -349 kg/cm^2, -429kg/cm^{2}으로 나타났다. A와 A'은 유사한 응력 값을 보여주지만, B와 B'은 -163kg/cm^{2}의 응력 차이를 보인다. 즉, B와 B'면의 연직방향으로 편심이 작용함을 보여준다. 이는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 강관이 x와 y방향으로 각각 약 9°와 4°만큼 기울어져 있어 편심이 작용하고 있기 때문으로 사료된다. 대형 원형강관이 석션 인발되는 단계의 응력은 석션 관입되는 단계에서 작용하던 압축력이 이완되면서 응력이 작아지는 것을 볼 수 있다. 강관에 작용하는 응력의 변화는 그 원인이 구조물에 발생한 균열과 같은 구조적 결함일 수도 있고, 강관 기울기에 의한 편심이 원인이 될 수도 있다. 만약 강관의 기울기에서 그 원인을 찾지 못했다면 구조적인 결함이나 외력을 의심해야 한다. 해상에 설치되는 대형 원형강관의 안정성을 정확히 모니터링하기 위해서는 강관의 기울기와 이에 작용하는 응력을 동시에 측정하여 분석해야 될 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 경사계와 변형률계를 이용하여 해상 교량기초용 대형원형강관의 안정성을 모니터링하기 위한 현장실험을 수행하였으며, 무선 원격계측 시스템을 구축하였다. 대형 원형강관의 직경은 5m이며, 상부 모듈과 하부 모듈의 높이는 각각 3m와 6.5m였다. 대형 원형강관은 수위가 4m인 인공 해상 지반에 석션으로 관입 및 인발되었으며, 근입 깊이는 5m였다. 경사계와 변형률계는 대형 원형강관의 상부 모듈에 설치되었으며, 강관의 운반, 관입, 인발, 해체의 전 과정에 걸쳐 모니터링하였다.

대형 원형강관을 운반하는 단계에서 경사계로 측정된 경사각은 크레인 케이블의 흔들림으로 인해 불규칙

하게 나타났다. 석션 관입 단계에서는 경사각이 일정하게 측정되어 움직임 또는 흔들림 없이 강관이 관입되고 있음을 나타냈다. 비록 석션 관입 단계에서 경사각이 일정하게 유지되었지만, x방향과 y방향으로 기울어진 경사각은 각각 9°와 4°로 강관이 기울어져 관입되고 있음을 알 수 있었다. 상부 모듈의 서로 마주보고 있는 두 면에서 측정된 경사각은 방향은 반대이나 동일한 각으로 측정되었다. 또한, 서로 다른 면에서 측정되었더라도 경사계의 같은 축에서 측정된 측정각은 서로 동일하게 나타났다. 2개 이상의 축을 측정할 수 있는 경사계를 사용한다면 서로 마주보고 있지 않은 90°의 각을 이루는 두 측면에만 경사계를 설치하여도 모니터링이 가능할 것으로 사료된다. 본 연구와 같이 대형 원형강관의 벽면에 경사계를 설치한다면 강관의 시공 단계뿐만 아니라 운용 중에도 지반 압밀, 침하, 풍력과 파력, 그리고 세굴 등과 같은 요인으로 인해 발생할 수 있는 기울어짐을 모니터링할 수 있을 것으로 사료된다.

대형 원형강관의 상부 모듈에 설치된 변형률계에서 측정된 응력은 석션 관입 단계에서 크게 증가하고 인발 단계에서 감소하는 것으로 나타났다. 이는 석션 관입되는 단계에서 작용하던 압축력이 인발 단계에서 이완되기 때문이다. 상부 모듈의 서로 다른 네 면에서 측정된 응력을 보면, 서로 마주보고 있는 두 면인 A면과 A'면에서 측정된 응력은 유사하나 B면과 B'에서 측정된 응력은 큰 차이를 보였다. 이는 B면과 B'면에서 연직 방향으로 편심을 받고 있음을 나타난다. 실제로 경사계로 측정된 기울기가 x축 방향으로 더 큰 경사각을 보이고 있다. 변형률계로 측정되는 응력은 강관의 기울기에 의한 편심뿐만 아니라 구조물에 발생한 균열이나 토압, 그리고 외부 충격에 의한 변형에도 영향을 받는다. 따라서, 구조물의 안정성을 정확히 모니터링하고 측정 결과의 발생 원인을 명확히 규명하기 위해서는 변형률계로 측정된 응력뿐만 아니라 경사계를 통해 측정된 경사각도 함께 분석되어야 할 것이다.

대형 원형강관과 같이 해상에 설치되는 구조물은 선박충돌, 지반, 풍력, 파력 등과 같은 동적 외부 요인에 의해 충격을 받을 수 있으며, 이는 구조물의 안정성에 악영향을 가져올 수 있다. 따라서, 외부 충격에 의한 대형 원형강관의 동적 거동특성을 모니터링하기 위한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 20SCIP-B119953-05)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Achmus, M., Kuo, Y. S., and Abdel-Rahman, K. (2009), "Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral Load", *Computers and Geotechnics*, Vol.36, No.5, pp.725-735.
2. Heo, G.H., Lee, W.S., Lee, C.O., Jeon, J.R., and Sohn, D.J. (2011), "Development of Smart Wireless Measurement System for Monitoring of Bridges", *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.15, No.2, pp.170-178 (in Korean).
3. Ho, D.D., Lee, P.Y., Lee, S.Y., and Kim, J.T. (2012), "Vibration-based Structural Health Monitoring of Full-Scale Cable-Stayed Bridges Using Wireless Smart Sensors", *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.1, pp.75-81 (in Korean).
4. Jeong, Y.J., Kim, J.S., Park M.S., and Song, S.H. (2018), "Structural Behavior of Large Cylindrical Cofferdam System according to Marine Installation Process", *KSCE 2018 Convention (Conference and Civil Expo)*, Korean Society of Civil Engineers, Gyeongju, Korea, pp. 61-62 (in Korean).
5. KICT, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2015), *Planning Research on Development of Marine Bridge Foundation Large Circular Steel Pile Construction Method*, Final Report 14RDPP-C090994-01, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, p.268 (in Korean).
6. Kim, B., Kim, Y., Jin, B., Bae, K.T., and Youn, H. (2016), "Numerical Analysis on Tiling Control of Suction Pile for Offshore Wind Power", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.17, No.9, pp. 5-12 (in Korean).
7. Kim, H.J., Gwon, Y.H., and Choi, J.O. (2019), "A Study on the Stability Analysis by Analysis Method of Circular Cofferdam", *KSCE 2019 Convention (Conference and Civil Expo)*, Korean Society of Civil Engineers, Pyeongchang, Korea, pp.772-773 (in Korean).
8. Kim, J.H., Park, W.J., Park, J.O., and Park, S.H. (2018), "LoRa LPWAN Sensor Network for Real-Time Monitoring and Its Control Method", *The Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.31, No.6, pp.359-366 (in Korean).
9. Kim, J.H., Park, W.J., Park, J.O., and Park, S.H. (2020), "LoRa LPWAN-based Wireless Measurement Sensor Installation and Maintenance Plan", *The Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.33, No.1, pp.55-61 (in Korean).
10. Kim, J.T., Sim, S.H., Cho, S., Y, C.B., and Min, J. (2016), "Recent R&D Activities on Structural Health Monitoring in Korea", *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol.3, No.1, pp.91-114.
11. Kim, K., Nam, B.H., and Youn, H. (2015), "Effect of Cyclic Loading on the Lateral Behavior of Offshore Monopiles Using the Strain Wedge Model", *Mathematical Problem in Engineering*, Vol.2015, pp.1.
12. Kim, S. (2019), "Numerical Investigation on Structural Behavior

of a Lid with Stiffeners for Suction-installed Cofferdams", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.20, No.10, pp.7-17 (in Korean).

13. Kim, Y.S., Bae, K.T., Lee, J.P., Joung, J.W., and Choo, Y.W. (2017), "Model Tests for Tilting Control of Suction Bucket Foundation for Offshore Wind Turbine", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.17, No.2, pp.207-218 (in Korean).
14. Lee, J.H., Cho, J.W., and Kim, H.M. (2017), "Installation Method of Large Circular Steel Pipe Using Suction Pressure", *KSCE 2017 Convention (Conference and Civil Expo)*, Korean Society of Civil Engineers, Busan, Korea, pp.13-14 (in Korean).
15. Park, K.H, An, I.S., Jeong, Y.J., and Park, H.S. (1997), "Development of Bridge Management System", *KSCE Conference*, Korean Society of Civil Engineers, Suwon, Korea, pp.69-172 (in Korean).
16. Park, H., Oh, M., Kim, S., Han, T., and Baek, S. (2019a), "Model Tests on Verticality Correction using Individual Length Control Method for Lifting Cable during Suction Pile Penetration", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.19, No.5, pp. 217-223 (in Korean).
17. Park, H., Oh, M., and Kang, H. (2020), "Effect of Lifting Cables Tension on Verticality Correction of Suction Pile during Ground Penetration", *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol.7, No.2, pp.63-72 (in Korean).
18. Park, J.O., Park, S.H., An, S.J., Park, W.J., and Kim, J.H. (2019b), "A Study on the Application of Bridge Maintenance System using LoRa LPWAN Wireless Communication", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.23, No.1, pp.138-146 (in Korean).
19. Park, J.O., Park, S.H., An, S.J., Park, W.J., and Kim, J.H. (2019c), "Bridge Wireless Measurement System Development based on LoRa IoT", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.23, No.7, pp.164-171 (in Korean).
20. Park, J.O., Park, S.H., Kim, K.S., Park, W.J., and Kim, J.H. (2020), "Bridge Monitoring System based on LoRa Sensor Network", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.33, No.2, pp.113-119 (in Korean).
21. Park, M.C., Lee, J.S., Kim, D.H., and Yu, J.D. (2019), "Small-scaled Laboratory Experiments for Dynamic Stability Monitoring of Large Circular Steel Pipe Cofferdam of Marine Bridge Foundation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.12, pp. 123-134 (in Korean).
22. Sin, G.H., Song, Y.J., and You, Y.G. (2011), "Bridge Road Surface Frost Prediction and Monitoring System", *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol.11, No.11, pp.42-48 (in Korean).
23. Song, J.U., Lee, J.S., Park, M.C., Byun, Y.H., and Yu, J.D. (2018), "Laboratory Experiments for Evaluating Dynamic Response of Small-scaled Circular Steel Pipe", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.81-92 (in Korean).

Received : September 21st, 2020
Revised : October 30th, 2020
Accepted : November 13th, 2020