연약지반 침하관리 효율화를 위한 ARIMA 기반 초기 예측 및 베이지안 업데이트

김동환*, 김재용*, 문성우**
*부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
**부산대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사
e-mail:soil33@naver.com

Efficient Soft Ground Settlement Management through ARIMA-Based Initial Prediction and Bayesian Updating

Dong-Hwan Kim*, Jae-Yong Kim*, Sung-Woo Moon**
*Dept. of Civil and Envioronmental Engineering, Pusan National University
**Dept. of Civil and Envioronmental Engineering, Pusan National University

요 약

연약지반에서 발생하는 침하 현상은 구조물 안정성과 장기 유지관리에 심각한 영향을 미친다. 이에 따라 연약지반 침하관리기간 중 침하량에 대해 계측 초기단계에서 침하량을 예측하여 침하관리기간중 관리방안을 효율적으로 마련하기 위한 방안이 요구된다. 본 연구에서는 ARIMA(Auto-Regressive Integrated Moving Average)시계열 모델을 활용하여 침하량을 초기 예측하고, 이후 추가 계측 데이터를 활용하여 베이지안(Bayesian) 업데이트를 수행함으로써 침하관리 효율화 방안을 제안하였다. 연구 결과, 베이지안 업데이트를 통한 예측 침하량에 대한 발생 가능성을 정량적으로 파악하여 침하관리를 위한 방안 마련에 기여할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

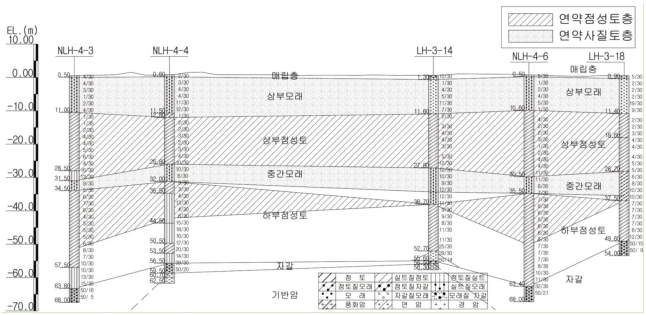
연약지반은 강도가 약하고 높은 압축성과 느린 배수 특성으로 인해 장기간에 걸쳐 침하를 지속적으로 유발하는 특성이 있다. 이러한 침하 현상은 구조물 기초 안정성, 상부 구조물 변형, 유지관리 비용 증가 등 다양한 문제를 야기할 수 있다. 전통적으로 침하 예측은 Terzaghi(1943)의 압밀 이론, FEM 기반 수치해석, 쌍곡선법 등 다양한 방법을 통해 수행되어 왔다. 그러나 초기 계측 데이터의 한정성, 지반 이질성, 시간에 따른 토질 물성 변화 등으로 인해 장기 예측 정확성에는 한계가 존재하였다.

이에 따라, 초기 계측 데이터만을 이용해 침하량을 조기에 예측하고, 이후 추가 계측 정보를 반영하여 예측값을 점진적으로 개선하여 침하관리기간 중 적절한 침하관리의 효율성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 ARIMA 시계열 모델을 활용하여 초기 침하량 예측을 수행하고, 추가 데이터에 따라 베이지안 업데이트를 통해 예측값을 통해 침하관리에 대해 체계적으로 수행하기 위한 방안을 마련하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상 및 데이터

본 연구의 대상지는 낙동강 하구 인근 대규모 택지 개발지구로 연약점토층의 평균두께 25.1m, 연약모래층의 평균 두께 12.7m의 정규 압밀 지반조건의 지반으로 그림 1에 나타내었으며, 성토고 3.6m를 조건으로 계측이 완료된 현장을 선정하여 계측결과를 이용하여 분석하였다.



[그림 1] 연약지반 대표 지층 단면

2.2 ARIMA 시계열 모델 적용

ARIMA(p,d,q) 모델은 침하량 시계열 데이터의 자기상관성과 오차항 구조를 반영하여 미래 침하량을 예측한다. 기본 수식은 식 (1)과 같다

$$y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varnothing_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \epsilon_{t-j} + \epsilon_t \qquad (1)$$

여기서, y_t 는 시점t의 침하량, ϕ_i 는 자기회귀 계수, θ_j 는 이동평균 계수, ϵ_t 는 백색잡음, c 는 상수항을 의미한다. 정상성 검정

을 위해 단위근 검정(ADF Test)을 수행하고, ACF 및 PACF 분석을 통해 적정 차수(p,q)를 설정한 후, AIC 최소화 기준으로 최적 모델을 선정하였다.

2.3 침하량 확률 CDF 분석

침하량 예측값을 평균 μ, 표준편차 σ를 갖는 정규분포로 가정하고, 누적분포함수(CDF)를 통해 침하량이 특정 값 이상일 확률을 계산하였다.

$$F(s) = P(S \leq s) = \Phi\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

여기서, Φ는 표준정규분포의 누적분포함수이다.

2.4 베이지안 업데이트 적용

ARIMA 모델을 통해 얻은 초기 예측값을 사전확률(Prior probability)로, 추가 계측값을 우도(Likelihood)로 설정하여 베이지안 업데이트를 수행하였다. 업데이트 수식은 식(3), 식(4)과 같다.

- 사후 평균 (Posterior Mean)

$$\mu_{posterior} = \frac{\sigma_{obs}^2\,\mu_{prior} + \sigma_{prior}^2\,\mu_{obs}}{\sigma_{prior}^2 + \sigma_{obs}^2} \quad (3)$$

- 사후 분산 (Posterior Variance)

$$\sigma_{posterior}^2 = \frac{\sigma_{prior}^2\,\sigma_{obs}^2}{\sigma_{prior}^2 + \sigma_{obs}^2} \quad (4)$$

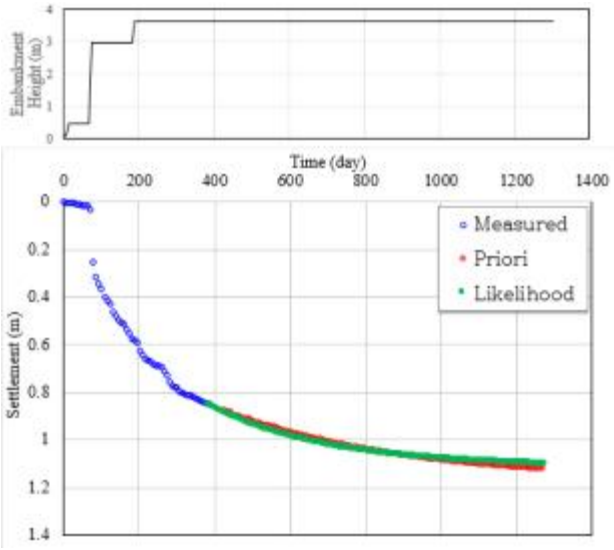
이를 통해 추가 데이터가 반영될수록 침하량을 점진적으로 예측하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 침하 예측 결과

전체 계측 기간 중 초기 데이터의 30%를 이용하여 ARIMA 모델을 이용하여 침하량 예측결과, 지점 A에서 초기예측 침하량은 1.10m 예측 RMSE는 약 0.0385로 나타났다. 추가 계측결과 침하량 1.119m 이며, RMSE는 0.0359 이다.

베이지안 업데이트 적용시을 이용하여 최종예측침하량은 1.110m 이며, 최종 RSME는 0.02624로 나타났다.



[그림 2] A지점 30% 계측진행시 침하예측결과

4. 결론

본 연구는 연약지반 침하 예측을 위하여 ARIMA 시계열 모델과 베이지안 업데이트, 그리고 확률적 분석을 통합한 방법론을 제안하였다. 연구 결과, 추가 데이터 반영을 통한 예측 신뢰성 향상과 침하량 발생 확률 정량화의 가능성을 확인하였다. 향후에는 다변량 시계열 분석(Multivariate Time Series), 비정규 분포 기반 확률 모델링 및 실시간 계측–예측 통합 시스템 개발이 필요할 것으로 전망된다.

참고문헌

[1] S. Y. Kang “A comparative study on the prediction of the final settlement using preexistence method and ARIMA method” Journal of the Korean Geo-environmental Society, Vol.20, No.10, 2019, pp.29-38

[2] S. M. Jang, H. S. Han “Modification of the Hyperbolic Method for Staged Fill” The Journal of Engineering Geology, Vol.32, No.4, 2022, pp.513-523