

가중치 부여 방법에 따른 가중 비선형 회귀 쌍곡선법의 침하 예측 정확도 분석

Settlement Prediction Accuracy Analysis of Weighted Nonlinear Regression Hyperbolic Method According to the Weighting Method

곽 태 영 ¹	Kwak, Tae-Young	우 상 인 ²	Woo, Sang-Inn
홍 성 호 ³	Hong, Seongho	이 주 형 ⁴	Lee, Ju-Hyung
백 성 하 ⁵	Baek, Sung-Ha		

Abstract

The settlement prediction during the design phase is primarily conducted using theoretical methods. However, measurement-based settlement prediction methods that predict future settlements based on measured settlement data over time are primarily used during construction due to accuracy issues. Among these methods, the hyperbolic method is commonly used. However, the existing hyperbolic method has accuracy issues and statistical limitations. Therefore, a weighted nonlinear regression hyperbolic method has been proposed. In this study, two weighting methods were applied to the weighted nonlinear regression hyperbolic method to compare and analyze the accuracy of settlement prediction. Measured settlement plate data from two sites located in Busan New Port were used. The settlement of the remaining sections was predicted by setting the regression analysis section to 30%, 50%, and 70% of the total data. Thus, regardless of the weight assignment method, the settlement prediction based on the hyperbolic method demonstrated a remarkable increase in accuracy as the regression analysis section increased. The weighted nonlinear regression hyperbolic method predicted settlement more accurately than the existing linear regression hyperbolic method. In particular, despite a smaller regression analysis section, the weighted nonlinear regression hyperbolic method showed higher settlement prediction performance than the existing linear regression hyperbolic method. Thus, it was confirmed that the weighted nonlinear regression hyperbolic method could predict settlement much faster and more accurately.

요 지

설계 단계에서의 침하 예측은 주로 이론적 침하 예측 방법에 의해 수행되지만, 정확도의 문제로 인해 시공 단계에서는 주로 시간에 따른 침하량 예측 결과를 토대로 장래 침하량을 예측하는 계층 기반 침하 예측 방법을 적용하고

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

2 정희원, 인천대학교 도시환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

5 정희원, 한경국립대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National Univ., Tel: +82-32-670-5143, shbaek87@hknu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있다. 계측 기반 침하 예측 방법 중에서도 쌍곡선법이 주로 쓰이고 있으나 기존의 쌍곡선법은 정확도가 떨어지며 통계적 측면에서 한계점이 명확하기 때문에, 가중 비선형 회귀 분석 기반의 쌍곡선법이 제안된 바 있다. 본 연구에서는 가중 비선형 회귀 쌍곡선법에 두 가지 가중치 부여 방식을 적용하여 침하 예측 정확도를 비교 분석하였다. 부산 신항에 위치한 두 현장에서 측정된 지표침하관 데이터를 활용했으며, 회귀분석 구간을 전체 데이터에 30, 50, 70%로 설정해 나머지 구간의 침하를 예측했다. 그 결과, 가중치 부여 방식과 무관하게 쌍곡선법 기반의 침하 예측 방법은 모두 회귀 분석 구간이 증가할수록 정확도가 높게 나타났으며, 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 통해 기존 선형 회귀 쌍곡선법보다 정확하게 침하를 예측할 수 있었다. 특히 더 작은 회귀분석 구간이 적용되었음에도 가중 비선형 회귀 쌍곡선법이 기존 선형 회귀 쌍곡선법에 비해 높은 침하 예측 성능을 보여, 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 통해 훨씬 빠르고 정확하게 침하량을 예측할 수 있음을 확인했다.

Keywords : Hyperbolic method, Settlement prediction, Weighted nonlinear regression hyperbolic method

1. 서론

최근 부산 신항 및 진해 신항과 같은 항만 개발 사업 뿐만 아니라, 가덕도 신공항 건설 사업이 추진됨에 따라 연약지반 침하 문제에 대한 우려가 제기되고 있다. 일반적으로 사질토의 경우, 압축률은 작지만 높은 투수성으로 인해 순간적으로 물이 유출되는 반면에, 연약지반과 같이 투수성이 작은 점토 지반의 경우는 투수성이 낮아 오랜 기간에 걸쳐 서서히 압축이 이루어지게 된다. 이와 같이 오랜 시간에 걸쳐 흙 속에서 간극수가 배출되면서 흙이 천천히 압축되는 현상을 압밀(consolidation)이라고 한다. 압밀 현상은 크게 간극수의 배출에 의해 발생하는 1차 압밀과 흙 구조의 재배열 등으로 인해 발생하는 2차 압축으로 구분할 수 있으며, 일반적으로 연약지반의 경우는 오랜 기간에 걸친 1차 압밀과 시간의 영향을 받는 2차 압축 모두 침하 문제를 야기한다는 문제점이 있다.

국내에서는 일반적으로 지반조사 및 실내시험 결과를 토대로 설계 단계에서 지반의 물성치(ex. 강도정수, 압축지수 등)를 산정하며, 이를 토대로 Terzaghi의 1차원 압밀 이론(Terzaghi, 1943)을 적용하여 장래 침하량을 예측한다. 그러나, 1차원 압밀 이론은 다양한 가정 조건이 포함되어 있으며, 지반 정보의 불확실성으로 인해 실제 침하량을 정확하게 예측하지 못하고 있는 것이 현장의 실정이다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해 실제 시공 단계에서는 현장에 지표침하관을 설치하여, 시간에 따른 지반의 침하량을 지속적으로 계측하며, 계측된 자료를 이용하여 귀납적으로 장래 침하량을 예측하는 방법을 적용하고 있다(Chung et al., 1998; Asaoka,

1978; Hoshino, 1962; Monden, 1963; Tan et al., 1991; Yoo and Kim, 2000).

쌍곡선법은 시간이 지남에 따라 침하의 속도가 쌍곡선의 형태로 감소한다는 가정을 기반으로 계측된 침하량으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법이며, 귀납적으로 장래 침하량을 예측하는 가장 대표적인 방법이라 할 수 있다(Anderson et al., 1994; Choo et al., 2010; Tan, 1991; 1993; 1995; 1996). 쌍곡선법은 시간(t)와 시간/침하량(t/S)을 각각 x , y 축으로 설정한 후, 선형 회귀 분석을 수행하여 쌍곡선 계수를 산정하며, 산정된 쌍곡선 계수를 통해 장래 침하량을 예측하게 된다. Hoshino 법, root S 법, log S 법은 쌍곡선법과 유사한 형태로 장래 침하량을 예측하는 식이며, 각각 쌍곡선법의 침하량(S) 대신 침하량의 제곱(S^2), 침하량의 제곱근(\sqrt{S}), 침하량의 로그($\log S$)를 대입하여 선형 회귀 분석을 수행하게 된다(Hoshino, 1962; Chung et al., 1998; Yoo and Kim, 2000). 쌍곡선법과 마찬가지로 선형 회귀 분석을 통해 산정된 계수를 통해 장래 침하량을 예측한다는 점에서 상당히 유사성이 있음을 확인할 수 있다.

Asaoka(1978)는 Mikasa(1963)의 1차원 압밀 이론을 토대로 시간-침하량 계측 데이터를 적용하는 장래 침하량 예측 방법을 제시하였으며, 도해적인 접근방법으로 침하량을 예측하는 방법 또한 제시하였다. Monden(1963)은 압밀도를 가정하여 침하량을 분석하는 과정을 반복하는 시행착오법(trial and error)을 적용함으로써, 최적의 장래 침하량 예측 방법을 확인하는 과정을 제안한 바 있다.

Kwak et al.(2022)은 실제 부산 신항 일부 부지에 대해 기존의 계측 기반 침하 예측 방법(쌍곡선법, root S

법, log S법, Asaoka법)을 적용하여, 예측된 장래 침하량과 실제 계측된 침하량의 비교를 통해 침하 예측 방법의 정확도를 확인하였다. 그 결과, 기존의 계측 기반 침하 예측 방법은 모두 낮은 침하 예측 정확도를 보였으며, 특히 쌍곡선법의 경우 독립변수(시간)와 종속변수(시간/침하량) 모두 시간 t 를 포함하고 있어 선형 회귀분석 시 인위적인 선형성이 강요되는 문제가 있음을 밝혔다. 이러한 한계점을 보완하기 위해, Kwak et al.(2022)은 선형 회귀 분석 방법 대신 시간에 따라 가중치를 선형적으로 크게 부여하는 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 제안하였다. 가중 비선형 회귀 쌍곡선법은 최신 계측 데이터(즉, 예측 시점과 가까운 시간에 측정된 침하 계측 데이터)가 더욱 중요한 정보를 포함하고 있다는 가정 하에 제안된 것으로, 더 적은 양의 데이터만 사용했음에도 기존의 계측 기반 침하 예측 방법보다 더 정확한 침하 예측이 가능했다. 하지만, Kwak et al.(2022)은 가중치를 시간에 따라 선형적으로 크게 부여하는 방식만을 적용하여 분석을 진행했다. 가중 비선형 회귀 쌍곡선법의 성능은 가중치 부여 방식에 따라 크게 달라질 것으로 예상되므로, 다양한 가중치 부여 방식에 따른 침하 예측 정확도에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

본 연구에서는 기존에 제안된 가중 비선형 회귀방법에 대해 다양한 가중치 부여 방식을 적용하여, 가중치 부여 방식에 따른 정확도를 비교 및 분석하였다. 기존의 선형 회귀 방식을 적용한 쌍곡선법과 가중치를 시간에 따라 선형적 및 비선형적으로 부여한 가중 비선형 회귀 쌍곡선법의 비교를 통해, 실제 현장 조건에 적합한 가중치 부여 방식을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 기존 쌍곡선법 및 가중 비선형 회귀 쌍곡선법의 회귀분석 방법에 대해 요약했으며, 3절에서는 가중치 부여 방식에 따른 비선형 회귀 쌍곡선법의 침하 예측 결과에 대해 기술했다. 본 연구의 요약 및 결론은 4절에서 기술했다.

2. 쌍곡선법의 회귀 분석 방법

2.1 기존 쌍곡선법

Tan et al.(1993)은 eq. (1)과 같이 시간이 지남에 따라 쌍곡선의 형태로 침하가 발생한다고 최초 제안하였으며, 다양한 연구자들이 제안된 쌍곡선법을 토대로 실제 현장 데이터를 적용하여 장래 침하량을 예측하는 연구

를 수행하였다(Anderson et al., 1994; Tan, 1991; 1993; 1995; 1996).

$$S = \frac{t}{\alpha t + \beta} \quad (1)$$

이 때, S 는 침하량, t 는 시간을 의미하며, α , β 는 쌍곡선 계수를 의미한다.

기존 쌍곡선법은 쌍곡선법 계수 α , β 를 결정하기 위하여, Fig. 1과 같이 x축은 시간 t , y축은 시간을 침하량으로 나눈 t/S 로 설정하여 선형 회귀 분석을 수행하게 된다. t 와 t/S 에 대한 선형 회귀 분석 결과를 토대로 결정되는 기울기와 절편은 각각 쌍곡선법 계수 α 와 β 를 의미한다. 선형 회귀 분석을 통해 쌍곡선법 계수 α , β 를 확인한 후, eq. (1)에 대입을 하게 됨으로써 쌍곡선 형태의 침하 예측식을 취득하게 되며, 이를 토대로 장래 침하량 또한 예측이 가능하게 된다.

일반적으로 통계 분야에서 선형 회귀 분석을 수행하는 경우에, 다중공선성(Multicollinearity)에 대해 유의할 필요가 있음이 제시되어 있다. 다중공선성이란 회귀 분석 시에 사용되는 독립 변수 및 종속 변수 사이에 상관성이 있어, 데이터 분석 시에 부정적인 영향을 미치는 현상으로 Frisch(1934)가 처음 다중공선성이란 용어를 사용한 이후, 다양한 연구자들에 의해 연구가 수행된 바 있다(Farrar and Glauber, 1967; Thompson et al., 2017; Daoud, 2017). 쌍곡선법의 경우도 독립변수 및 종속변수를 각각 시간 t 및 시간을 침하량으로 나눈 t/S 로 설정하였기 때문에, 독립변수와 종속변수 모두 시간 t 를 포함하고 있어 인위적인 선형성을 강제한다는 다중공선성 문제가 있다는 한계점이 존재한다.

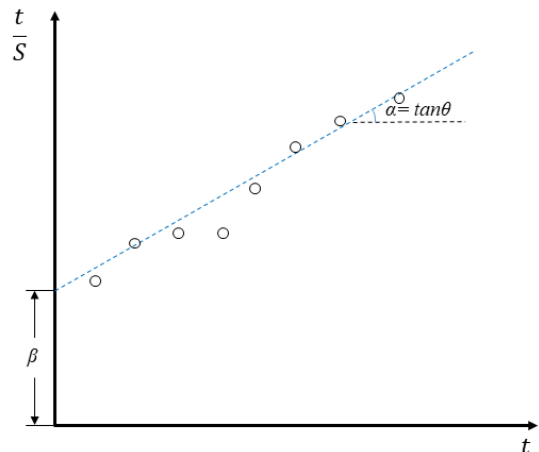


Fig. 1. Linear regression of the hyperbolic method

2.2 가중 비선형 회귀 쌍곡선법

Kwak et al.(2022)은 기존 쌍곡선법의 한계점을 보완하기 위해, 가중 비선형 회귀 분석을 통한 기존 쌍곡선법의 개선 방법에 대해 제안하였다. 가중 비선형 회귀 분석 방법은 크게 1) 기존 선형 회귀 분석 방법의 통계학적 한계점을 보완하기 위한 비선형 회귀 분석 방법과 2) 최신 데이터에 더 높은 가중치를 부여 방법의 개념을 적용한 쌍곡선법 기반의 개선된 침하 예측 방법이다.

첫 번째 적용 개념으로 비선형 회귀 분석 방법을 적용하였으며, Fig. 2와 같이 쌍곡선 형태의 침하 예측 모델과 실제 계측 데이터와의 잔차 제곱의 합을 최소화할 수 있도록 하는 최소자승법을 적용하였다. 잔차 제곱의 합

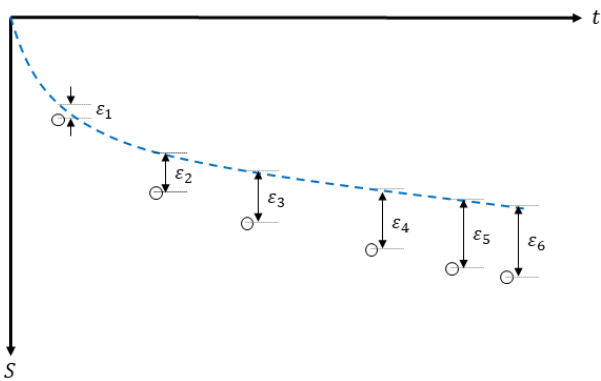


Fig. 2. Concept of the nonlinear regression hyperbolic method

이 최소가 되는 쌍곡선법 계수 α, β 를 산정하게 되며, 이를 토대로 쌍곡선 형태의 침하 예측식을 취득하게 된다.

두 번째 적용 개념은 최신 데이터에 더 높은 가중치를 부여하는 것이다. 이는 실제 현장에서 성토 직후에 지하수위가 상승하였다가 안정화되는 과정이 진행되며 초기 계측 데이터에 오차가 많이 발생하므로, 데이터 신뢰도가 떨어진다는 문제점이 있다는 한계점을 보완하기 위해 적용되었다(Choo et al., 2010). 하중 재하 초기에 계측된 침하 데이터보다 최근에 측정된 침하 계측 데이터가 더 중요한 정보를 포함하고 있기 때문에 최신 데이터가 더 높은 가중치를 가질 수 있도록 비선형 회귀 분석 시에 가중치 값을 부여하였다. 가중 회귀 비선형 쌍곡선법의 회귀 분석 방법은 eq. (2)와 같이 표현된다.

$$R = \sum_i W_i \left(\frac{t_i}{at_i + b} - S_i \right)^2 \quad (2)$$

이 때, R 은 가중치가 부여된 잔차 제곱의 합을 의미하며, a, b 는 쌍곡선법과 관련된 계수, t_i 는 최종 성토 완료 이후부터의 날짜, S_i 는 t_i 에서의 침하량 계측데이터, W_i 는 가중치 함수를 나타낸다. 즉, 가중치 함수와 잔차 제곱의 합을 의미하는 R 이 최소가 되도록 비선형 회귀 분석을 수행하여 쌍곡선 계수를 산정하게 되며, 이를 통해 장래 침하량을 예측하게 된다. 본 연구에서 가중치 함수 W_i 는 선형 가중치를 부여하는 방식과 비선형 가중치를

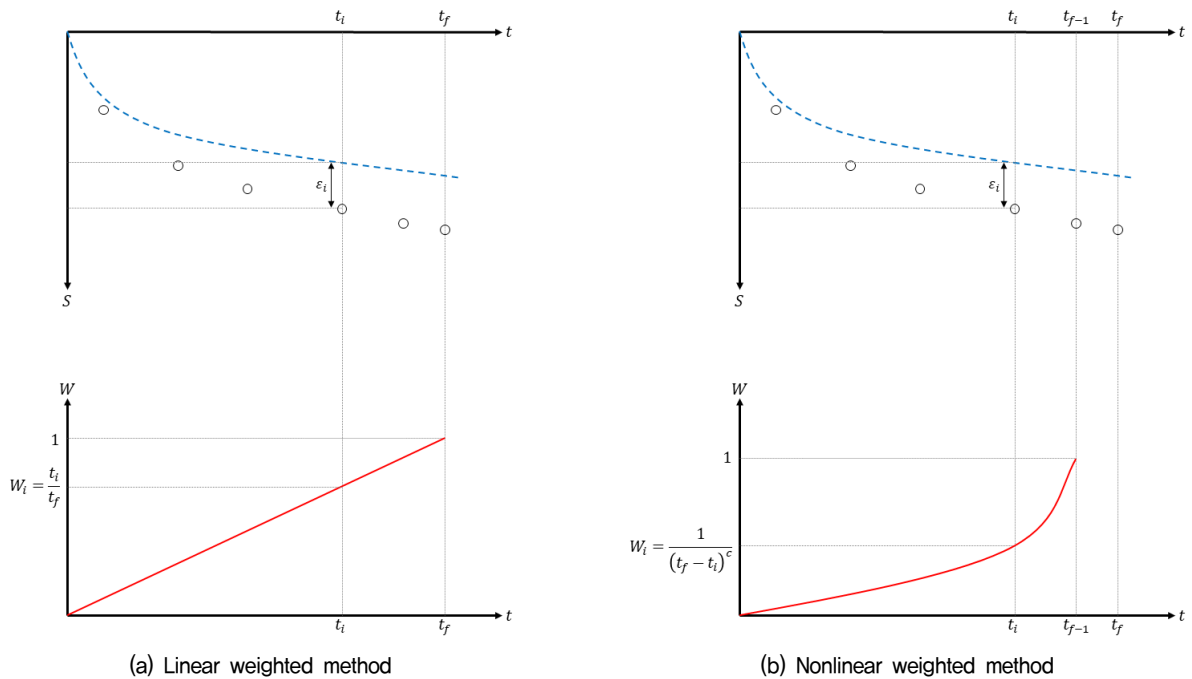


Fig. 3. Concept of the weighted nonlinear regression hyperbolic method

부여하는 방식을 적용하였으며, 이는 각각 eq. (3)과 (4)와 같이 표현된다.

$$W_i = \frac{t_i}{t_f} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{1}{(t_f - t_i)^c} \quad (4)$$

이 때, t_i 는 최종 성토 완료 이후의 마지막 계측날짜를 나타내며, 비선형 가중치 부여 시, 계수 c 는 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0을 적용하여 비교하였다. Fig. 3은 선형 및 비선형적으로 가중치를 부여하는 방식을 도식화한 형태이다.

3. 계측 데이터 기반 가중 비선형 회귀 쌍곡선법 적용성 검토

3.1 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 통한 분석 방법

개선된 가중 비선형 회귀 분석 방법의 적용성을 검토하기 위하여, 부산신항 현장 부지 두 곳을 선정하여, 시간에 따른 성토고 및 침하량 계측 데이터를 확인하였다.

선정된 부산신항 A 현장 부지와 B 현장 부지의 지층 구성 및 SPT N 값은 Fig. 4와 같다. A 현장 부지와 B 현장부지는 각각 심도 16.0m와 42.0m까지 점토층이 존재하며, 대상 지층에서 SPT N 값이 대부분 0/30으로 나타날 정도로 매우 연약한 현장임을 확인할 수 있었다. 선정된 두 지역의 현장부지에서 계측된 지표침하판 데이터를 분석하여, 200일 이상 계측된 데이터를 우선적으로 선정하였으며 데이터의 경향이 이상한 경우(ex. 최종 성토 이후 단계 성토가 추가적으로 진행되지 않았음에도, 계단식으로 침하량이 증가)는 분석 대상에서 제외하였다. 최종적으로 부지별로 각각 조건을 만족하는 지표침하판 데이터(시간에 따른 성토고 및 침하량) 중 5개씩 선정하여 시범분석을 수행하였다.

상세 분석 방법은 Kwak et al.(2022)에서 제시된 프로그래밍 내용을 토대로 수행하였으며, 본 연구에서는 가중치 부여 방식에 대한 내용을 추가적으로 보완하였다. 프로그래밍을 수행하기 위하여 오픈 소스 기반의 Python을 활용하였으며, 1) 선형 가중치 부여 비선형 회귀 쌍곡선법, 2) 비선형 가중치 부여 비선형 회귀 쌍곡선법, 그리고 비교 분석을 위한 3) 기존 선형 회귀 쌍곡선법의 세 가지 침하 예측 방법에 대한 내용을 프로그래밍을 수행하였다. 프로그램을 이용하여 실제 대상 현장 부지

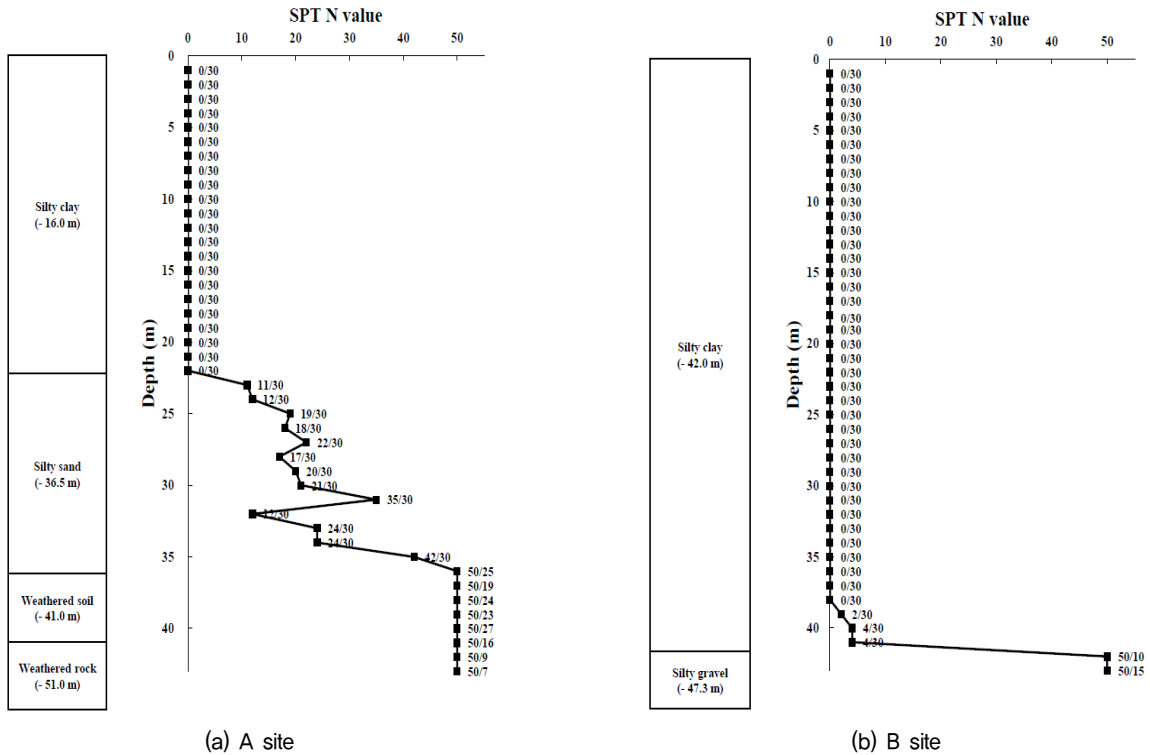


Fig. 4. Soil profile and SPT N value of Busan port

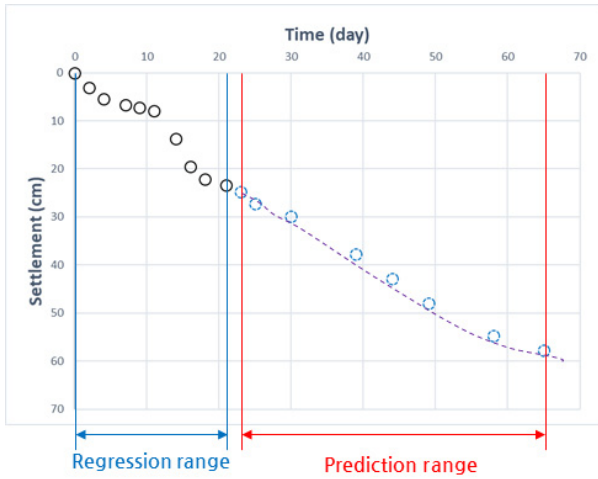
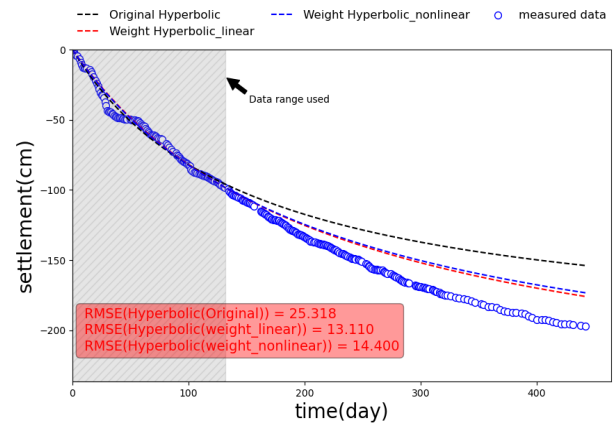


Fig. 5. Verification concept of weighted nonlinear regression analysis method and hyperbolic method

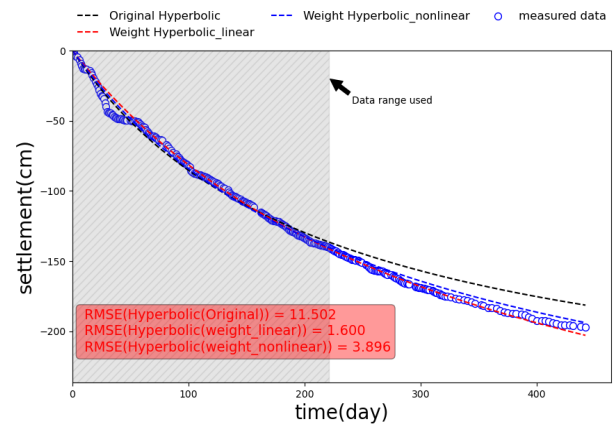
에서 측정된 시간-침하량 계측 데이터를 불러온 후, Fig. 5와 같이 회귀 분석 구간과 예측 구간을 구분할 수 있도록 하였다. 회귀 분석 구간은 0-100%까지 설정할 수 있도록 하였으며, 본 연구에서는 회귀 분석 구간을 30, 50, 70%로 설정하여 분석을 수행하였다. 각 현장 부지별 회귀 구간의 데이터를 활용하여 각각 선형 회귀 및 가중 비선형 회귀 분석을 수행하였으며, 회귀 분석 결과를 토대로 쌍곡선법 계수 α , β 가 산정하였다. 산정된 쌍곡선법 계수를 토대로 예측 구간에서 침하 예측 방법 별 예측 침하량을 확인하였으며, 예측된 침하량과 및 예측 구간에서 실제 계측된 침하량 사이의 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하여 각 침하 예측 방법의 정확도를 확인하였다.

3.2 개선 침하 예측 방법을 통한 분석 결과

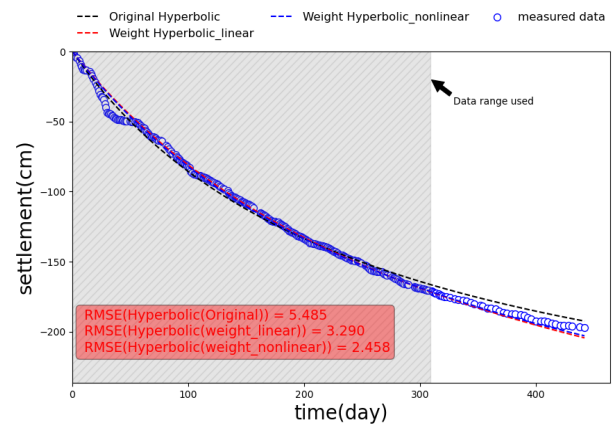
시범분석 대상인 부산신항 A 현장부지에서 선정된 지표침하판 데이터 5개(A-1, A-2, A-3, A-4, A-5)와 B 현장 부지에서 선정된 지표침하판 데이터 5개(B-1, B-2, B-3, B-4, B-5)에 대한 분석 결과는 각각 Table 1과 2와 같다. 지표침하판 별로 회귀 분석 구간에 따른 세 가지 쌍곡선법 기반 침하 예측 방법의 RMSE를 나타내고 있으며, 비선형 가중치 부여 비선형 회귀 쌍곡선법의 경우는 계수 c 를 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0로 적용하는 모든 경우에 대한 RMSE를 확인하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 쌍곡선법 및 가중 비선형 회귀분석 방법(선형 가중치 부여 및 비선형 가중치 부여 방식)의 대표적 현장 적용 예시로서, 지표침하판 A-2와 B-1에 대한 예측 결과 및 실



(a) 30% regression range



(b) 50% regression range

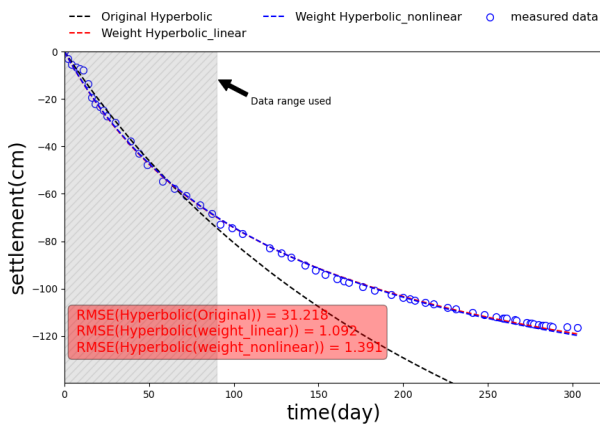


(c) 70% regression range

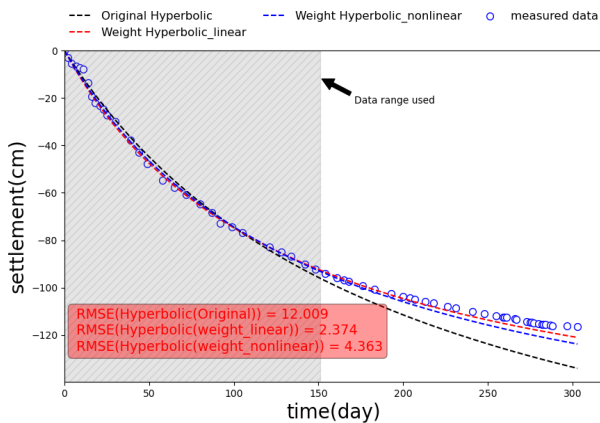
Fig. 6. Analysis results of A-2 settlement plate

제 예측 결과를 보여준다.

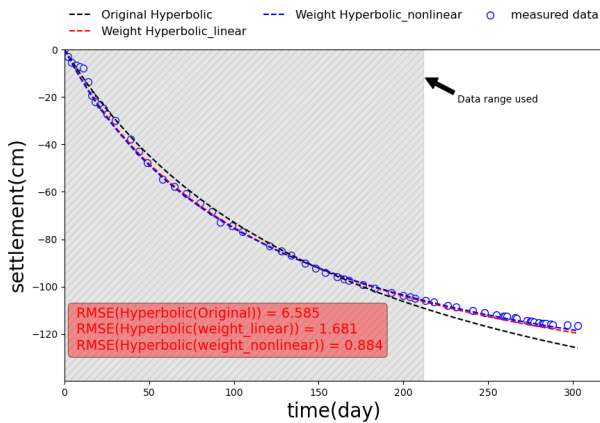
우선적으로, 비선형 가중치 부여 비선형 회귀 쌍곡선법의 최적 계수 c 를 결정하기 위하여 A 현장 부지와 B 현장 부지 지표 침하판 데이터를 토대로 확인된 계수별 RMSE 결과의 평균값을 확인하였다. 비선형 가중치 계수 c 의 경우, A 현장 부지와 B 현장 부지에서 모두 지표침하판과 회귀 분석 구간별 RMSE의 경향이 뚜렷하



(a) 30% regression range



(b) 50% regression range



(c) 70% regression range

Fig. 7. Analysis results of B-1 settlement plate

게 나타나지 않았다. 이로 인해, 비선형 가중치 계수별 RMSE 평균값을 확인하였으며, 대체로 $c=1.1$ 인 경우에 RMSE가 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과를 토대로 비선형 가중치 부여 비선형 회귀 쌍곡선법의 최적 계수 c 를 1.1로 설정하여 분석을 수행하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이, A 현장 부지의 지표 침하판 데이터를 분석한 결과, 회귀 분석 구간 30%, 50%,

70%에서 기존 선형 회귀 쌍곡선법의 RMSE가 각각 9.56-42.63cm, 5.14-25.69cm, 5.49-17.64cm의 범위로 나타났다. 이에 반해 가중 비선형 회귀 쌍곡선법의 경우는 회귀 분석 구간 30%, 50%, 70%에서 가중치를 선형으로 부여하였을 때 각각 RMSE가 8.58-32.01cm, 1.60-12.20cm, 0.99-5.27cm의 범위로 나타났으며, 가중치를 비선형적으로 부여한 경우에는 각각 RMSE가 1.24-23.80cm, 1.65-7.67cm, 0.91-4.73cm 범위로 나타났다. 기존 선형 회귀 쌍곡선법의 RMSE를 100%로 설정하였을 때, 가중치를 선형 및 비선형적으로 부여한 경우의 RMSE는 각각 최대 9.9%(평균 46.7%) 및 6.5%(평균 36.8%) 수준까지 감소하는 것으로 나타났다.

B 현장 부지의 지표 침하판 데이터 분석 결과(Table 2), 회귀 분석 구간 30%, 50%, 70%에서 기존 선형 회귀 쌍곡선법의 RMSE가 각각 30.70-4026.11cm, 9.82-66.54cm, 6.16-20.81cm의 범위로 나타났다. 가중 비선형 회귀 쌍곡선법은 회귀 분석 구간 30%, 50%, 70%에서 선형 가중치 부여 방식에서 각각 RMSE가 1.09-28.10cm, 0.99-11.25cm, 1.68-12.34cm의 범위로 나타났으며, 비선형 가중치 부여 방식에서 각각 RMSE가 1.39-23.54cm, 1.72-8.11cm, 0.49-14.76cm 범위로 나타났다. 기존 선형 회귀 쌍곡선법의 RMSE를 100%로 설정하였을 때, 가중치를 선형 및 비선형적으로 부여한 경우의 RMSE는 각각 최대 0.1%(평균 18.5%) 및 0.3%(평균 18.6%) 수준까지 감소하는 것으로 나타났다.

분석 결과를 토대로 가중치 부여 방식과 무관하게 쌍곡선법 기반의 침하 예측 방법은 모두 회귀 분석 구간이 증가할수록 정확도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 가중 비선형 회귀 쌍곡선법이 기존 선형 회귀 쌍곡선법보다 정확하게 침하를 예측한다는 사실을 확인할 수 있었다. 가중 비선형 회귀 쌍곡선법은 회귀분석 구간을 50%만 설정하여도 회귀분석 구간을 70%로 설정한 기존 선형 회귀 쌍곡선법에 비해 높은 침하 예측 성능을 보였다. 특히 B 현장 부지의 경우 회귀분석 구간을 30%로 설정한 가중 비선형 회귀 쌍곡선법이 회귀분석 구간을 70%로 설정한 기존 선형 회귀 쌍곡선법에 비해 훨씬 높은 침하 예측 성능을 보였다. 이는 성토를 통한 연약지반 개량 시, 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 통해 훨씬 빠르고 정확하게 침하량을 예측할 수 있음을 시사한다. 가중치 부여 방식에 따른 정확도 차이는 A 현장 부지에서는 비선형적으로 가중치를 부여한 경우에 전반적으로 RMSE가 더 낮게 나온 반면에, B 현장

Table 1. Analysis results of A site in Busan port by hyperbolic method and weighted nonlinear regression method

Surface settlement plate	Regression range	RMSE (unit : cm)							
		Original hyperbolic	Linearly weighted nonlinear regression	Nonlinearly weighted nonlinear regression					
				c=0.5	c=0.7	c=0.9	c=1.1	c=1.5	c=2.0
A-1	30%	9.56	13.46	8.35	7.32	5.62	3.22	5.64	14.44
	50%	5.14	2.29	2.43	2.67	2.89	3.06	3.35	3.50
	70%	6.59	3.00	3.35	3.60	4.01	4.73	9.12	20.93
A-2	30%	25.32	13.11	18.09	16.46	15.31	14.40	12.60	9.53
	50%	11.50	1.60	2.27	2.43	2.97	3.90	6.51	6.06
	70%	5.49	3.29	2.59	2.77	2.71	2.46	1.13	2.34
A-3	30%	19.26	8.58	10.91	7.16	3.74	1.24	6.49	10.66
	50%	8.04	2.72	2.10	1.88	1.99	2.42	4.31	7.84
	70%	5.66	2.08	2.89	2.81	2.81	2.85	2.99	3.18
A-4	30%	42.63	32.01	32.21	29.43	26.77	23.80	15.75	2.87
	50%	25.69	8.85	12.20	10.25	8.78	7.67	6.54	7.17
	70%	17.64	5.27	6.41	5.10	4.20	3.48	2.05	0.84
A-5	30%	28.91	18.68	19.06	16.59	14.13	11.39	4.15	5.75
	50%	16.33	2.55	4.95	3.45	2.36	1.65	1.23	1.84
	70%	9.97	0.99	1.88	1.33	1.05	0.91	0.78	0.98
Average		15.85	7.90	8.65	7.55	6.62	5.81	5.51	6.53

Table 2. Analysis results of B site in Busan port by hyperbolic method and weighted nonlinear regression method

Surface Settlement plate	Regression range	RMSE (unit : cm)							
		Original hyperbolic	Linearly weighted nonlinear regression	Nonlinearly weighted nonlinear regression					
				c=0.5	c=0.7	c=0.9	c=1.1	c=1.5	c=2.0
B-1	30%	31.22	1.09	3.57	2.50	1.79	1.39	1.30	2.53
	50%	12.01	2.37	3.53	3.66	3.93	4.36	5.78	8.10
	70%	6.59	1.68	1.67	1.35	1.10	0.88	0.49	0.28
B-2	30%	30.70	2.03	4.91	4.13	3.70	3.57	4.26	6.78
	50%	9.82	0.99	1.51	1.45	1.52	1.72	2.74	5.01
	70%	6.16	2.10	1.66	1.22	0.83	0.49	0.71	1.80
B-3	30%	68.35	28.10	40.89	34.93	29.36	23.54	10.31	5.04
	50%	38.62	4.15	16.39	12.87	10.03	7.71	4.36	2.37
	70%	17.85	3.11	1.14	1.41	2.97	4.28	6.39	7.99
B-4	30%	96.14	6.12	29.50	16.46	6.71	8.00	23.77	39.19
	50%	52.41	11.25	5.27	6.15	7.26	8.11	8.87	8.48
	70%	20.81	12.34	11.35	12.53	13.37	14.76	17.22	20.15
B-5	30%	4026.11	2.66	9.29	8.76	9.17	10.50	16.11	28.24
	50%	66.54	1.47	2.18	2.34	2.67	3.18	4.73	6.92
	70%	20.49	3.96	3.36	2.94	2.51	2.07	1.15	0.57
Average		300.25	5.56	9.08	7.51	6.46	6.30	7.21	9.56

부지에서는 선형적으로 가중치를 부여한 경우에 전반적으로 RMSE가 더 낮게 나왔다. 두 현장에서 산정된 RMSE가 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났으므로, 가중치 부여 방식에 따라 침하 예측 성능에 괄목할 만한 변화는 없는 것으로 보인다. 다만, 이상의 결과는 유사한 지층 구조를 가지는 부산 신항의 두 현장의 침하 예측 데이터만을 이용해 도출된 것이므로 향후 보다 다

양한 현장에서 예측된 데이터를 활용해 상술한 결과를 검증해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 제안된 가중 비선형 회귀방법에 대해 다양한 가중치 부여 방식을 적용하여, 가중치

부여 방식에 따른 정확도를 비교 및 분석하였다. 기존의 선형 회귀 쌍곡선법과 가중치 부여 방식에 따른 가중 비선형 회귀 분석 쌍곡선법의 침하 예측 정확도를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 가중치 부여 방식과 무관하게 쌍곡선법 기반의 침하 예측 방법은 모두 회귀 분석 구간이 증가할수록 정확도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 가중 비선형 회귀 쌍곡선법이 기존 선형 회귀 쌍곡선법보다 정확하게 침하를 예측하였다. 특히 더 작은 회귀분석 구간이 적용되었음에도 가중 비선형 회귀 쌍곡선법이 기존 선형 회귀 쌍곡선법에 비해 높은 침하 예측 성능을 보였으므로, 성토를 통한 연약지반 개량 시 가중 비선형 회귀 쌍곡선법을 통해 훨씬 빠르고 정확하게 침하량을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 비선형 가중치 부여 방식의 경우에는 가중치 계수 c 의 값에 따라 변동성이 상당히 크게 나왔으며, $c=1.1$ 에서 가장 정확도가 높게 나타났다. 다만, 이는 부산 신항 현장 부지 데이터의 최적 가중치 계수로 향후 보다 다양한 현장에서 계측된 침하 데이터를 적용해 지반 조건 등에 따른 최적 가중치 변화를 분석할 필요가 있을 것으로 보인다.
- (3) A 현장 부지에서는 비선형 가중치 부여 방식이 정확도가 더 높게 나타난 반면에, B 현장 부지에서는 선형 가중치 부여 방식이 정확도가 더 높게 나타났다. 두 현장에서 산정된 RMSE가 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났으므로, 가중치 부여 방식에 따라 침하 예측 성능에 괄목할만한 변화는 없는 것으로 보인다.

본 연구는 부산신항 일부의 지표침하판 데이터를 바탕으로 도출된 결론으로, 추가적인 연약지반 현장 데이터를 활용하여 분석을 수행할 경우에 더 높은 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 본 연구 결과를 토대로 최적의 비선형 가중치 부여 방식에 대한 연구를 수행한다면, 본 연구 결과에서 제안된 선형 가중치 부여 방식보다 정확도는 높지만 변동성이 크지 않은 비선형 가중 회귀 비선형 쌍곡선법이 제안될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌 (References)

1. Anderson, L. R., Sampaco, C. L., Gilani, S. H., Keane, E., and Rausher, L. (1994), "Settlements of Highway Embankments on Soft Lacustrine Deposits", Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Publication, No.40, pp.376-395.
2. Asaoka, A. (1978) "Observational Procedure of Settlement Prediction", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
3. 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", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.26, No.7, pp.147-159 (in Korean).
4. Chung, S. G., Choi, G. H., Choi, H. K., and Cho, K. Y. (1998), " \sqrt{s} - Observational Procedure for Consolidation Analysis", *Geotechnical Engineering*, Vol.14, No.2, pp.41-53.
5. Daoud. (2017), "Multicollinearity and Regression Analysis", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.949.
6. Farrar, E. and Glauber, R. (1967), "Multicollinearity in Regression Analysis: The Problem Revisited", *The Review of Economics and Statistics*, Vol.49, No.1, pp.92-107.
7. Frisch, R. (1934), "Statistical Confluence Analysis by Means of Complete Regression Systems", Oslo, Norway: University Institute for Economics, Vol.5, pp.5-8.
8. Hoshino, S. (1962), "Problems of Foundation s in Recent Years", *Society of Civil Engineering*, Vol.47, No.7, pp.63-67 (in Japanese).
9. Kwak, T. Y., Hong, S., Lee, J. H., and Woo, S. I. (2022), "Analysis of the Limitations of the Existing Subsidence Prediction Method Based on the Subsidence Measurement Data and Suggestions for Improvement Method Through Weighted Nonlinear Regression Analysis", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.38, No.12, pp.103-112 (in Korean).
10. Mikasa, M. (1963), "Consolidation of Soft Clay", *Kajima-shuppan-kai*, Tokyo, Japan (in Japanese).
11. Monden, H. (1963), "A New Time Fitting Method for the Settlement Analysis of Foundation on Soft Clays", *Memoir Fac. Eng., Hiroshima University*, Vol.20, No.1, pp.21.
12. Tan, S. A. (1993), "Ultimate Settlement by Hyperbolic Plot for Clays with Vertical Drains", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.950-956.
13. Tan, S. A. (1995), "Validation of Hyperbolic Method for Settlement in Clays with Vertical Drains", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.101-113.
14. Tan, S. A. and Chew, S. H. (1996), "Comparison of the Hyperbolic and Asaoka Observational Method of Monitoring Consolidation with Vertical Drains", *Soils and Foundations*, Vol.16, No.3, pp. 31-42
15. Tan, T. S., Inoue, T., and Lee, S. L. (1991), "Hyperbolic Method for Consolidation Analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*,

- ASCE, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.
16. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, USA.
17. Thompson, C. G., Kim, R. S., Aloe, A. M., and Becker, B. J. (2017), "Extracting the Variance Inflation Factor and Other Multicollinearity Diagnostics from Typical Regression Results", *Basic and Appl Social Psychol*, Vol.39, No.2, pp.81-90.
18. Yoo, H. K. and Kim, J. H. (2000), "A Study on the Prediction of Long-Term Settlement by the Modified Hyperbolic Method", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.16, No.3, pp.163-172.

Received : March 16th, 2023

Revised : March 24th, 2023

Accepted : March 25th, 2023