

## 서해안 중부지역 연약지반의 침하특성 분석을 위한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Settlement Characteristics of Soft Ground in the Central West Coast Region

김준석\*

Joon-Seok Kim\*

Professor, Department of civil and environmental engineering, Chungwoon University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Joon-Seok Kim, jskim@chungwoon.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** An experiment was conducted to analyze the characteristics of the settlement of soft clay soil in the central region of the west coast of Korea, which has a high silt content and is difficult to predict settlement due to various stress histories. **Method:** Field experiments were conducted for three cases. The settlement amount of the subsidence plate was measured in each case, and the following conclusions were drawn by analyzing Terzaghi's one-dimensional consolidation settlement amount, both the hyperbolic method and the Asaoka method. **Result:** The predicted value by Terzaghi was analyzed to be the largest in all cases, and it was predicted to be 111% to 187% larger than the subsidence plate settlement value. That is, the subsidence plate settlement value, which is the amount of settlement of the actual ground, showed a settlement of 53.4~89.9% compared to the predicted value of Terzaghi. Therefore, it was analyzed that the expected settlement of the Terzaghi method in the clay soft ground of the central west coast of Korea is more than the actual settlement. **Conclusion:** It was analyzed that the Asaoka method and the hyperbolic method presented relatively similar results, and in practice, predicting the settlement amount smaller than the actual settlement amount may cause a risk, so the hyperbola analysis method predicted 6~14% larger than the actual settlement amount can be used as a safety side.

**Keywords:** Soft Ground, Consolidation Settlement, Hyperbolic Analysis Method, Asaoka Method, Terzaghi One-dimensional Analysis Method

## 요약

**연구목적:** 실트질 함유가 높으며 다양한 응력이력 때문에 침하량 예측에 어려움이 있는 우리나라의 서해안 중부지역의 연약점토지반의 침하량 특성을 분석하기 위하여 실험을 실시하였다. **연구방법:** 3개의 경우에 대한 현장실험을 실시하였다. 각각의 경우에 대하여 침하판 침하량을 계측하였으며 Terzaghi의 일차원 압밀침하량, 쌍곡선법(hyperbolic method)과 Asaoka법을 모두 분석하여 실무에 유용한 결론을 도출하였다. **연구결과:** Terzaghi에 의한 예측값이 모든 경우에서 가장 큰 것으로 분석되었으며 침하판 침하값에 비하여 111%~187%로 크게 예측하였다. 즉, 실제 지반의 침하량인 침하판 침하값이 Terzaghi의 예측값에 비하여 53.4~89.9%의 침하를 나타내었다. 따라서, 우리나라 중부 서해안 점토질 연약지반에서 Terzaghi방법에 의한 예상침하량은 실제 침하량보다 과다하게 예상하는 것으로 분석되었다. **결론:** Asaoka방법과 쌍곡선 방법은 비교적 유사한 결과를 제시한 것으로 분석되었으며, 실무에서는 실제 침하량 보다 작게 침하량을 예측할 경우 위험을 초래할 수 있으므로 실제 침하량보다 6~14% 크게 예측한 쌍곡선 분석법이 안전측으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 연약지반, 압밀침하, 쌍곡선분석법, Asaoka분석법, Terzaghi일차원분석법

Received | 5 October, 2021

Revised | 25 November, 2021

Accepted | 25 November, 2021

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

우리나라 서해안 지역은 점토성 연약지반이 발달된 지역으로서 항만, 공항, 철도, 공단 등 각종 토지이용에 있어서 지반의 압밀침하문제를 검토하여야 하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 점토지반의 압밀침하특성은 입자의 구성과 응력이력 등 다양한 특성 등으로 인하여 지역적 차이를 보이는 특징이 있다. 즉, 비슷한 조건이라 하더라도 지역적 차이에 따라 압밀침하량의 차이를 보이는 현상이 일반적으로 발생한다. 우리나라의 서해안 연약점토지반은 일반적으로 실트질 함유가 높은 특징이 있으며 다양한 응력이력 때문에 침하량 예측에 어려움이 있다. 특히, Yoon(2016)은 ITS시스템과 같이 정보통신과 인공지능에 의한 도로 및 교통망 구축에 있어서 도로의 침하 안정성은 매우 중요하다. 또한, Chang(2019) 등은 연약지반 침하로 인한 고속도로의 차량 속도 저하는 이산화탄소의 배출량에도 영향을 미치게 됨을 확인하였다.

연약점토지반의 압밀이론은 Terzaghi(1943)에 의한 일차원 압밀이론이 발표된 이후 많은 연구가 이루어 졌다. Terzaghi의 일차원 압밀이론은 과잉간극수압의 발생과 소멸에 따라 간극수가 배출되고 이에 따라 점토입자가 재배치되면서 압축되는 기본 개념을 토대로 일차원 압밀방정식을 유도하였다. Terzaghi의 압밀이론은 비교적 오래되었지만 지금도 실무에서 우선적으로 사용될 정도로 많은 경험적 자료들이 축적되어 있다. Barron(1948)은 일차원 선형압밀이론을 단순화시킨 방사형 배수문제를 도입하여 지반의 거동상태를 평균압밀도를 구하는 식을 제안하였으나 교란효과(smear effect)와 배수저항(well resistance)를 고려하지 않는 한계가 있었다. Hansbo(1981)는 Smear effect와 Well resistance를 모두 고려한 식을 제안하였으나 연직방향의 배수가 고려되지 않고 방사방향의 배수만이 고려 되는 문제가 있다. Onoue(1988)는 압밀침하의 특성이 교란된 흙의 투수성 감소에 크게 영향 받는 등가간격비(Equivalent spacing ratio)를 이용한 근사식을 제안하였으나 현장 실험자료의 부족으로 적용에 한계가 있다. Hoshino(1962)는 실측 침하량을 분석하여 쌍곡선법과 유사한 침하량을 예측하는 방법을 제안하였다. 쌍곡선 분석법은 Tan(1991) 등에 의하여 실무적 이용가치의 중요성에 대하여 평가되었다. Asaoka(1978)는 Mikasa(1965)에 의해 편미분방정식으로 유도된 압밀방정식을 이용하여 침하량을 예측하는 새로운 방법을 제시하였다. 실무적 이용을 위하여 Chang(1991)은 현장시험을 이용한 예측기법을 제안하였으며, Dave et al.(1994)은 구체적으로 피에조콘을 이용한 예측기법을 제안하였다.

이러한 연구와 이론의 발전과 함께 우리나라에서는 실무적으로 Terzaghi의 일차원 압밀침하 예측방법과 현장침하계측자료를 분석하여 예측하는 쌍곡선법(hyperbolic method)과 Asaoka법을 많이 적용하고 있다. 그러나, 이러한 다양한 분석방법도 지역적 지반특성에 따라 상이한 결과를 나타내게 된다. 따라서, 우리나라의 각 지역에 대한 많은 분석이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 서해안 중부해안지역인 평택의 해안지역에서 연약지반구역을 설정하여 현장 토질조사를 실시하고 성토를 실시하여 압밀침하를 측정하는 현장실험을 진행하였다. 본 연구를 통하여 우리나라 중부지역 서해안 점토의 공학적 특성을 분석하고 압밀침하특성을 분석하여 향후 설계 및 시공에 실무적인 도움이 되고자 하였다.

## 실험의 개요와 시료의 종류

본 논문의 실험은 우리나라 서해안 중부지역인 평택의 해안지역이며 항만 설치를 위한 지반개량을 위하여 사전 연구로 실시되었으며 일차로 실험현장의 지반조사 실시와 점토의 공학적 특성분석을 실시하였다. 현장실험의 진행은 총 3구역으로 구분하여 진행하였으며 Case01(1구역)은 성토고 3.3m, Case02(2구역)은 성토고 5.4m, Case03(3구역)은 성토고 7.0m로 계획하였다. 각 구역은 사면안정 문제를 피하기 위하여 2단계로 나누어 성토하였다. 즉, 1구역은 1단계로 2m를 성토한 후에 압밀

침하가 안정된 후에 2단계로 1.3m를 성토하였으며, 2구역은 1단계로 3m를 성토한 후에 압밀침하가 안정된 후에 2단계로 2.4m를 성토하였으며, 3구역은 1단계로 2m를 성토한 후에 압밀침하가 안정된 후에 2단계로 5.0m를 성토하였다. 각각의 구역에서는 지표침하판을 이용하여 침하량을 측정하였다.

### 침하판 설치와 점토의 공학적 특성 분석

본 연구에서 사용한 침하량 자료는 침하판 계측방법을 통하여 실시하였다. 침하판 설치는 Fig.1과 같이 강철판을 연약지반 상부의 지표에 올려 놓고 강철판 위에 측정용 연직봉을 부착하여 외부에서 측량기에 의하여 연직봉의 하강상태를 측정하는 것으로서 측정 자체가 단순하기 때문에 계측 결과의 신뢰성이 매우 높은 것으로 인정되고 있다. 또한, 지반의 지층분포는 Table 1과 같이 점성토 지반 아래로는 풍화토 또는 풍화암으로 구성되어 있으므로 연약지반 침하의 배수조건은 일면배수조건으로 확인되었다. 점토층은 점토와 실트로 구성되어 있으며 색상은 암회색으로 공학적 특성과 입도분포는 각각 Table 2와 Fig. 2에 표시하였다.



Fig. 1. Ground settlement plate installation concept and installation

Table 1. Strata distribution

Division	Layer thickness (m)			Fill height (m)
	Clay soil	Weathered soil	Weathered rock	
Case01	5.1	0.2	-	3.3
Case02	6.8	-	0.7	5.4
Case03	10.8	1.7	-	7.0

Table 2. Engineering characteristics

Division	Case01	Case02	Case03
Classification of soil (USCS)	CL	CL	CL
Water content (%)	47.4	55.9	52.6
Specific gravity	2.71	2.71	2.69
Porosity	1.351	1.578	1.449
Wet unit weight ( $kg/m^3$ )	1,699	1,639	1,676
Pre-consolidation load ( $kg/m^2$ )	30,500	31,500	63,000
Compression index	0.46	0.66	0.48

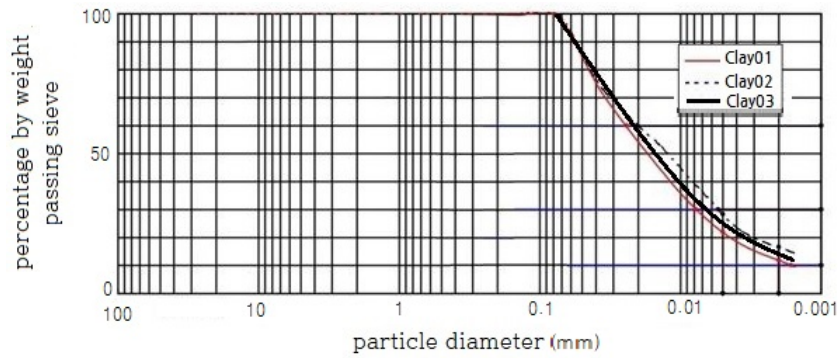


Fig. 2. Particle diameter curve of soil

## 실험결과 분석

### 침하특성분석

각각의 경우에 대하여 지반의 공학적 특성을 이용한 이론적 예측방법인 Terzaghi의 일차원 압밀침하량 예측결과와 현장 계측값의 분석을 통한 예측방법인 쌍곡선법과 Asaoka법의 예측을 비교 분석하였다. Case01의 하중재하이력은 1단계 2.0m 성토 후, 2단계 1.3m를 성토하여 총 3.3m를 성토하였다. 재하기간은 1단계 6.5개월, 2단계 5개월을 재하하여 침하가 수렴하는 것을 확인하였다. 침하량예측은 쌍곡선법과 Asaoka법으로 분석하였으며 각각의 분석결과는 Fig. 3, Fig. 4에 나타내었다.

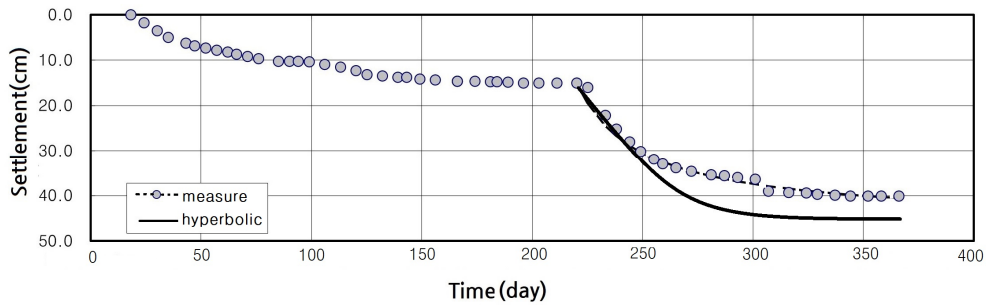


Fig. 3. Prediction of settlement amount by hyperbolic method (Case01)

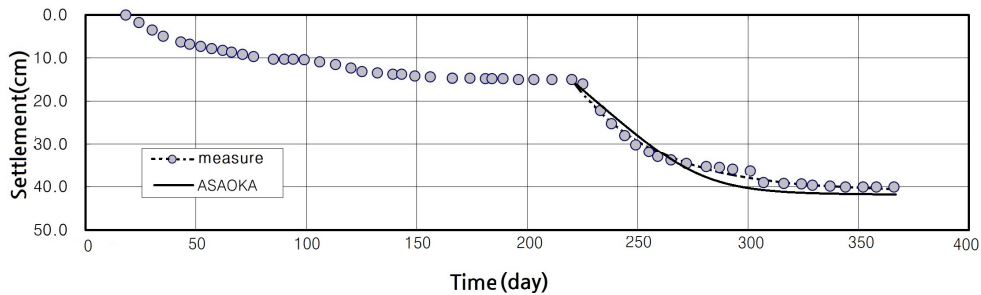


Fig. 4. Prediction of settlement amount by Asaoka method (Case01)

Case02의 하중재하 이력은 1단계 3.0m 성토 후, 2단계 2.4m를 성토하여 총 5.4m를 성토하였다. 재하기간은 1단계 5.5개월, 2단계 5개월을 재하하여 침하가 수렴하는 것을 확인하였다. 침하량예측은 쌍곡선법과 Asaoka 법으로 분석하였으며 각각의 분석결과는 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다.

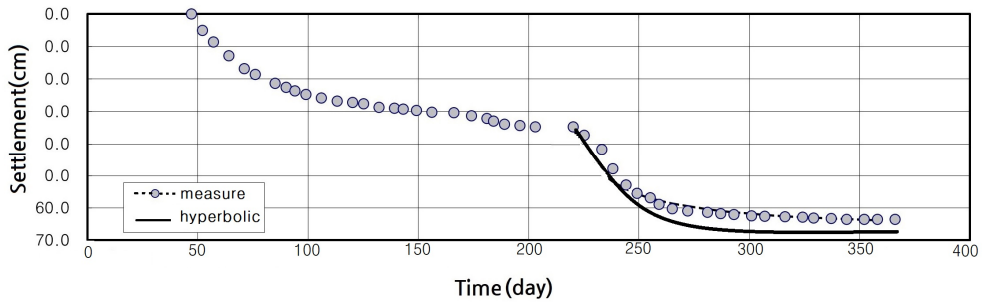


Fig. 5. Prediction of settlement amount by hyperbolic method (Case02)

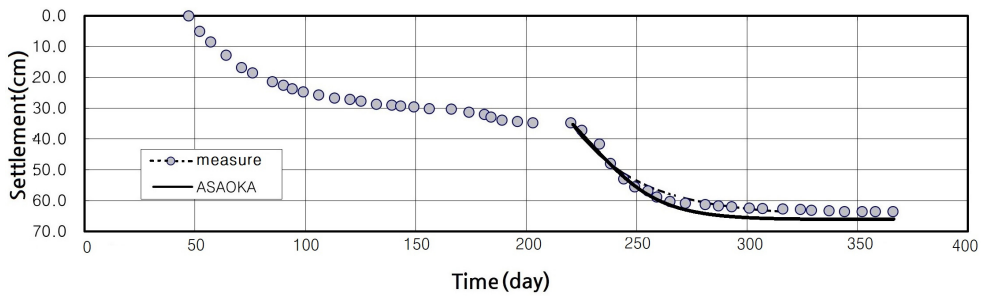


Fig. 6. Prediction of settlement amount by Asaoka method (Case02)

Case03의 하중재하 이력은 1단계 2.0m 성토 후, 2단계 5.0m를 성토하여 총 7.0m를 성토하였다. 재하기간은 1단계 6.5개월, 2단계 4.5개월을 재하하여 침하가 수렴하는 것을 확인하였다. 침하량예측은 쌍곡선법과 Asaoka 법으로 분석하였으며 각각의 분석결과는 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다.

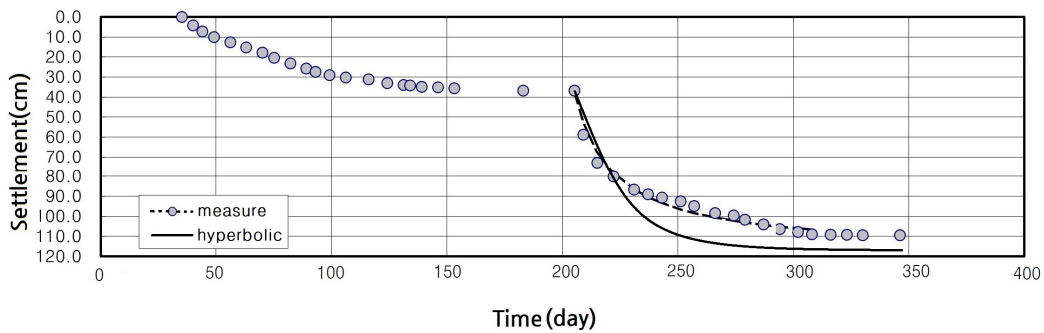


Fig. 7. Prediction of settlement amount by hyperbolic method (Case03)

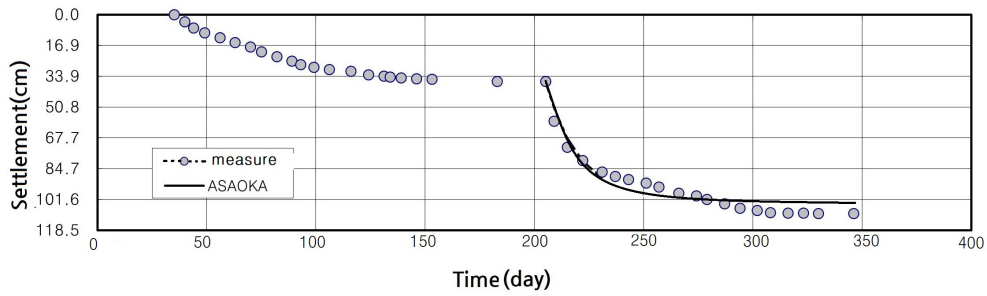


Fig. 8. Prediction of settlement amount by Asaoka method (Case03)

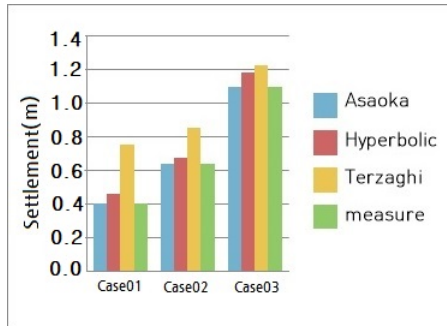
3개의 현장 실험에서 각각에 대한 침하량 예측값과 실측값에 대하여 Table 3에 정리하였다. 침하판의 침하 값은 연약지반 위에 설치된 침하판이 침하하는 것을 계측한 침하량으로서 현재의 기술수준에서는 실제 침하값으로 사용하고 있다. 따라서, 지반이 실제로 침하한 침하 값인 침하판 침하량을 기준으로 각각의 예측값을 비교하여 Table 4에 정리하였다. Table 4에서 Terzaghi에 의한 예측값이 모든 경우에서 가장 큰 것으로 분석되었으며 침하판 침하값에 비하여 111%~187%의 결과로 분석되었다. Asaoka분석결과는 침하판 침하값에 비하여 95%~103%의 결과로 분석되어 비교적 예측이 잘된 것으로 분석되었으나 Case03과 같이 침하판 침하량보다 작게 예측한 경우가 발생하여 Asaoka의 예측결과가 실제 침하량보다 작게 예측할 수 있는 것으로 확인되었다. 쌍곡선 분석법은 침하판 침하값에 비하여 106%~114%의 결과로 분석되었으며 세 경우 모두 Asaoka분석결과 보다 크게 예측하였다. 쌍곡선 분석법은 Fig. 9와 같이 Asaoka분석결과 보다 크게 분석되었으나 불확실성이 큰 현장상황을 감안하면 4~13%의 차이는 상당히 근접한 결과를 의미하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, Asaoka방법과 쌍곡선 방법은 비교적 유사한 결과를 제시한 것으로 분석될 수 있다. 단, 실무에서는 실제침하량 보다 작은 침하량 예측이 위험을 초래할 수 있으므로 실제 침하량보다 6~14% 크게 예측한 쌍곡선 분석법이 안전측으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 설계단계에서 수행하는 Terzaghi의 예측값과의 비교를 위하여 Terzaghi의 예측값을 기준으로 각각의 침하량을 비교하여 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 실제 지반의 침하량인 침하판 침하량이 Terzaghi의 예측값에 비하여 53.4~89.9%의 결과를 나타낸 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 우리나라 서해안 점토질 연약지반이 지반의 불균질성 등 다양한 요인들에 의하여 Terzaghi방법에 의한 예상침하량이 과다하게 예측된다는 것을 의미한다.

Table 3. Amounts of settlement for each case

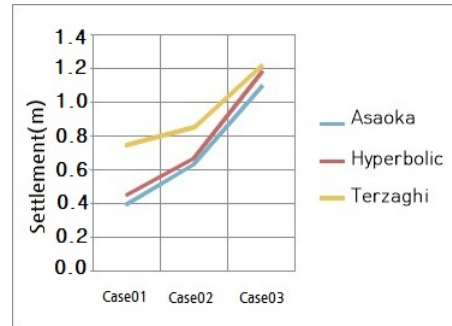
Division	Case01	Case02	Case03
Soft layer thickness (m)	5.1	6.8	10.8
Fill height (m)	3.3	5.4	7.0
Predicted value of settlement by ASAOKA method (m)	0.411	0.649	1.034
Predicted value of settlement by hyperbolic method (m)	0.456	0.673	1.177
Predicted value of settlement by Terzaghi method (m)	0.749	0.852	1.216
Measured value of subsidence plate settlement (m)	0.400	0.635	1.093

**Table 4.** Comparison of the amount of settlement for the surface settlement plate

Division	Case01	Case02	Case03
Predicted value of settlement by ASAOKA method (%)	103	102	95
Predicted value of settlement by hyperbolic method (%)	114	106	108
Predicted value of settlement by Terzaghi method (%)	187	134	111
Measured value of subsidence plate settlement (%)	100	100	100



(a) Comparison by bar graph



(b) Comparison by continuous graph

**Fig. 9.** Comparison of settlement amount for each case

**Table 5.** Comparison of the amount of sedimentation for Terzaghi method

Division	Case01	Case02	Case03
Predicted value of settlement by ASAOKA method (%)	54.8	76.2	85.0
Predicted value of settlement by hyperbolic method (%)	60.9	79.0	96.8
Predicted value of settlement by Terzaghi method (%)	100	100	100
Measured value of subsidence plate settlement (%)	53.4	74.5	89.9

## 결론

본 연구에서는 실트질 함유가 높으며 다양한 응력이력 때문에 침하량 예측에 어려움이 있는 우리나라의 서해안 중부지역의 연약점토지반의 침하량 특성을 분석하기 위하여 3개의 경우에 대한 현장 실험을 진행하였다. 3개의 경우는 각각 연약 점성토의 두께가 5.1m, 6.8m, 10.8m 이며 성토고는 각각 3.3m, 5.4m, 7.0m 로서 서해안 중부지역에서 비교적 많이 발생하는 경우이다. 각각의 경우에 대하여 침하판 침하량을 계측하였으며 Terzaghi의 일차원 압밀침하량, 쌍곡선법(Hyperbolic method)과 Asaoka법을 모두 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Terzaghi에 의한 예측값이 모든 경우에서 가장 큰 것으로 분석되었으며 침하판 침하값에 비하여 111%~187%의 크게 예측하였다. 즉, 실제 지반의 침하량인 침하판 침하값이 Terzaghi의 예측값에 비하여 53.4~89.9%의 침하를 나타내었

다. 따라서, 우리나라 중부 서해안 점토질 연약지반에서 Terzaghi방법에 의한 예상침하량은 실제 침하량보다 과다하게 예상하는 것으로 분석되었다.

- 2) Asaoka분석결과는 침하판 침하값에 비하여 95%~103%의 결과로 분석되어 비교적 정확도가 높은 것으로 분석되었으나 침하판 침하량보다 작게 예측한 경우가 발생하여 Asaoka의 예측결과가 실제 침하량보다 작게 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.
- 3) 쌍곡선 분석법은 침하판 침하값에 비하여 106%~114%의 결과로 분석되었으며 모든 경우에서 Asaoka분석결과보다 크게 예측하였다.
- 4) Asaoka방법과 쌍곡선 방법은 비교적 유사한 결과를 제시한 것으로 분석되었으며, 실무에서는 실제침하량 보다 작게 침하량을 예측할 경우에 위험을 초래할 수 있으므로 실제 침하량보다 6~14% 크게 예측한 쌍곡선 분석법이 안전측으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 2021년도 청운대학교 학술연구조성비의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Asaoka, A. (1978). "Observational procedure of settlement prediction." *Soils and Foundations, JSSMFE*, Vol. 18, No. 4, pp. 87-101.
- [2] Barron, R.A. (1948). "Consolidation of fine grained soils by drain wells transactions." *American Society of Civil Engineers*, Vol. 113.
- [3] Chang, H.H., Choi, S.H., Yoon, B.J. (2016). "GHGs emissions based on individual vehicles speed." *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 560-569.
- [4] Chang, M.F. (1991). "Interpretation of over consolidation ratio from in situ tests in recent clay deposits in Singapore and Malaysia." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 210-225.
- [5] Dave, J.R., Senapathy, H., Murphy, W. (1994). *Settlement Predictions using Piezocone. Vertical and Horizontal Deformation of Foundations and Embankments*. ASCE GSP 40, New York, USA.
- [6] Hansbo, S. (1981). "Consolidation by vertical drains." *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-66.
- [7] Hosino, T. (1962). "Problems of foundation in Recent Years." *Society of Civil Engineering*, Vol. 47, No. 7, pp. 124-131.
- [8] Mikasa, M. (1965). *The consolidation of soft clay*. Japan Society of Civil Engineer, Japan.
- [9] Onoue, A. (1988). "Consolidation by taking well resistance and smear into consolidation." *Soil Sand Foundations* 28, No. 4, pp. 165-174.
- [10] Tan, T.S., Inoque, T., Lee, S.L. (1991). "Hyperbolic method for contributions analysis." *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 117, No. 11, pp. 1723-1737.
- [11] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [12] Yoon, B.J. (2016). "ITS System architecture based upon object-oriented methodology." *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 12, No. 1, pp. 105-115.