

이론 및 계측 침하량의 SPSS 상관분석을 통한 김해진영 연약 지반의 침하량 예측 보정계수 산출법

장원철, 김병일*, 김영욱
명지대학교 토목환경공학과

A Method of Obtaining Correction Factor for Settlement Prediction of Soft Ground Using Correlation of Theoretical and Measured Settlement of Gimhae-Jinyoung through SPSS Analysis

Won-Cheol Jang, Byoung-Il Kim*, Young-Uk Kim
Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

요약 포화된 연약 점성토 지반에서 침하량을 예측하는 것은 연약 지반 설계 시 매우 중요하다. 이 연구에서는 낙동강 지류 인접 지역인 김해진영 지구를 대상으로 피에조콘 관입시험을 실시한 지반조사 자료를 참고하여 침하량 산정의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 고찰하였다. 해당 지역의 지반을 두 가지 Robertson Chart(1986, 1990)에 따라 분류하고 대표적인 지반 침하량 산정 공식인 Terzaghi(1925) 침하량 산정 공식 및 Sanglerat(1972) 침하량 산정 공식에 의해 이론 침하량을 산정하였다. 산정된 이론 침하량을 실제로 측정된 계측 침하량과 SPSS 상관분석을 통해 비교함으로써 보정계수를 산정하였다. 연구결과 이론 침하량과 계측 침하량의 평균오차율은 각각 17.28% 및 26.96%로 나타났다. 또한 이 지역의 경우 Terzaghi(1925) 방법에 의한 이론 침하량 산정결과가 Sanglerat(1972) 방법으로 구한 이론 침하량보다 계측 침하량에 더 근접한 것으로 나타나 Terzaghi(1925) 침하량 산정 방법이 더 정밀한 것으로 나타났다. 또한 산정된 보정계수를 사용하면 이 지역의 침하량 예측의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Predicting the settlement of soft ground is an important aspect of soft ground design. In this study, a method is proposed that increases the reliability of settlement predictions based on-site investigation data, including piezocone penetration test results, at the Gimhae-Jinyoung district, adjacent area to the Nakdong River. Soils in the area were classified using the Robertson Chart (1986, 1990), and theoretical settlement was calculated using the equations proposed by Terzaghi (1925) and Sanglerat (1972). SPSS was used to obtain the correlation between theoretical and measured settlements. Results produced settlement prediction errors for the Terzaghi and Sanglerat methods of 17.28% and 26.96%, respectively. A correction factor calculated by SPSS correlation analysis for the relation between and theoretical and measured settlements is proposed that improves the reliability of settlement prediction in soils of the classification examined.

Keywords : Piezocone, Penetration Test, Soft Ground, Settlement, Correction Factor

*Corresponding Author : Byoung-Il Kim(Myongji Univ.)

email: bikim@mju.ac.kr

Received February 9, 2021

Accepted May 7, 2021

Revised March 23, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

연약지반은 전단강도의 크기가 작기 때문에 상부구조물을 지지할 수 없거나, 상부구조물로 인해 큰 변형을 일으키는 지반을 말한다. 따라서 연약지반이라는 개념은 상대적인 개념으로 물리적, 수치적으로 명확하게 구분하기 쉽지 않다. 포화된 점성토층, 느슨한 사질토층, 유기질 성분이 다량 함유된 지층이 연약지반에 해당되며 바다나 하천을 매립한 지반이나 위생 매립지도 연약지반이라고 할 수 있다[1].

이러한 연약지반에 구조물을 시공하면 지지력 부족으로 지반의 전단파괴 및 과도한 압밀침하로 인한 문제점들을 야기할 수 있다. 침하, 액상화, 투수문제로부터 연약지반의 안정성을 확보하기 위하여 연약지반 대책공법 적용, 압밀 촉진, 정밀시공 및 유지관리 등을 시행하고 있으며, 또한 좀 더 철저한 조사를 위해 국내외 현장에서 피에조콘 관입시험을 실시하기도 한다.

피에조콘 관입시험은 다양한 지반특성을 비교적 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 측정으로 지층 구분 및 다양한 결과를 심도에 따라 일관되게 얻을 수 있다. 또한 연약지반에 대한 흙의 분류 및 공학적 특성 등 지반상태를 종합적으로 파악하는 장점이 있어 선진국에서는 조사기준에 필수적 장비로 활용하고 있으나 국내에서는 부분적으로만 활용하고 있는 실정이다. 그렇기 때문에 우리나라도 해안개발이나 강 하류 인접지역의 개발 시 지반처리의 효율적 설계를 위해 피에조콘 관입시험을 실시하여야 한다[2].

한편, 현장계측자료를 이용한 침하예측법이 필요한 이유는 이론침하량이 실제 현장침하량과 차이가 있는 경우가 많기 때문이다. 주요 요인으로는 시료 채취 시 시료의 교란으로 토질정수가 실제와 달라지는 경우와 지층이 두꺼울 경우 상부층 시료에서 획득된 토질정수가 전체 지반을 대표하지 못하는 경우가 있다. 그렇기 때문에 현재는 침하관리 방법으로 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법 등의 방법으로 침하량을 예측하고 있다[3].

이 연구에서는 낙동강 지류 인접지역의 한 구역을 대상으로 피에조콘 관입시험을 실시한 지반조사 자료를 참고하여 침하량 산정의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 고찰하였다. 대상 연약지반은 Robertson(1986) 및 Robertson(1990) 도표를 따라 흙 분류를 하였으며, Terzaghi(1925) 및 Sanglerat(1972) 침하량 산정공식에 의해 침하량을 산정하였다. 이 연구에서는 산정된 이론 침하량과 계측 침하량을 SPSS 상관분석을 통해 침하

량 예측의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하는 것을 목적으로 한다. Fig. 1은 이 연구에서 진행한 침하량 평가의 신뢰성을 향상시키는 방법의 절차를 나타내고 있다.

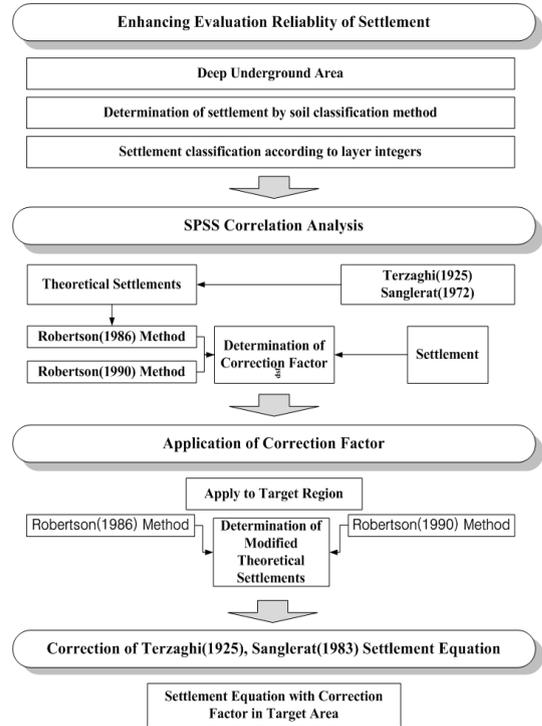


Fig. 1. Flow chart of this study

2. 이론적 배경

2.1 Robertson 도표(1986)

Robertson(1986)은 북미 여러 지역에서 간극수압 측정이 가능한 피에조콘 관입시험의 결과값을 토대로 Fig. 2와 같은 관입저항값(Q_t)-마찰률(F_r) 도표와 관입저항값(Q_t)-간극수압계수(B_q) 도표를 제안하였다. 제안된 도표들은 동일한 깊이의 데이터라도 마찰률에 의해 분류된 흙 분류 영역과 간극수압에 의한 흙 분류 영역이 상이하게 다를 수 있으므로 주의가 필요하다. 또한 관입깊이 30m 이하인 지반층에 대한 결과들을 근거로 만들어졌으며 지반 깊이가 깊어질수록 측정값들이 증가하므로 상재하중이 큰 지반의 경우에는 측정값의 차이가 존재할 수 있다[4].

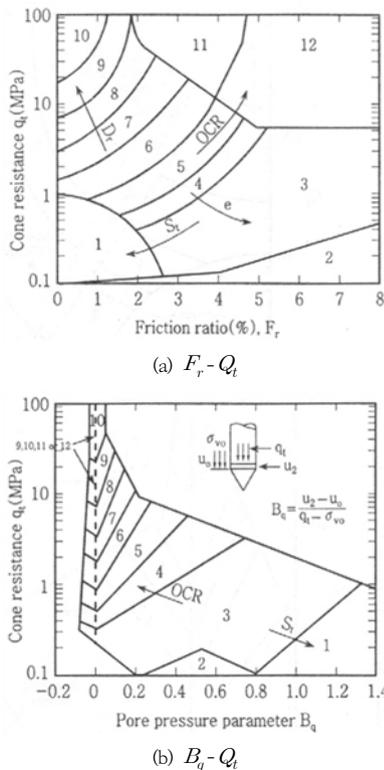


Fig. 2. Soil classification charts(Robertson, 1986)

2.2 Robertson 도표(1990)

콘관입저항값, 마찰저항값, 간극수압은 깊이가 깊어질 수록 값이 증가하는 문제점을 고려해 볼 때 보정에 대한 필요성이 강조되었다. Robertson은 싱가포르 지역의 시험 결과를 토대로 깊이 30m 이상인 지반층에도 적용될 수 있는 식 (1) ~ (3)과 같은 각각 정규화된 원추관입저항값 (Q_t), 마찰비(F_r), 간극수압계수(B_q)을 이용하여 새로운 흙 분류 차트를 Fig. 3과 같이 제안하였다. 이러한 흙 분류 도표를 이용할 때는 동일한 깊이라도 예민비, 간극비와 같은 영향인자들로 인해 흙 분류 영역이 다르게 나올 수 있으므로 주의가 필요하다[5].

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}'} \quad (2)$$

$$B_q = \frac{u_b - u_0}{q_t - \sigma_{v0}'} \quad (3)$$

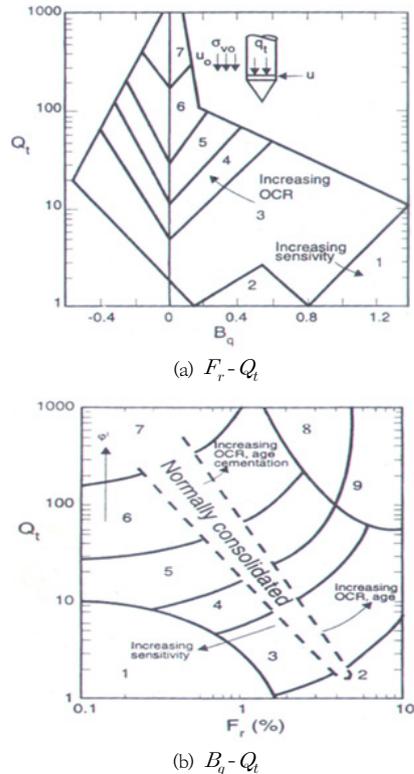


Fig. 3. Soil classification charts(Robertson, 1986)

where, q_t denotes tip resistance, σ'_{v0} denotes effective stress, u_b denotes pore water pressure, σ_{v0} denotes total stress, u_0 denotes hydrostatic pressure

2.3 SPSS 상관분석

SPSS는 통계 분석 프로그램으로 교차분석, 상관분석, 회귀분석, 분산분석 등 다양한 분석이 가능하다. 파일관리나 데이터 변환 등 거의 모든 통계분석 방법이 포함되어 있는 종합적인 통계 프로그램이다. 데이터 정리 및 데이터베이스 관리를 위해 엑셀(Excel)을 많이 활용하지만 방대한 자료나 복잡한 자료를 처리하고 분석하는데 SPSS보다 효율이 떨어진다. SPSS는 엑셀보다 사용하기는 복잡하지만 효율적인 자료 처리 및 분석을 수행할 수 있는 장점이 있다[6].

이 연구에서 피어슨(pearson) 상관분석을 사용하였다. 피어슨(pearson) 상관계수(r)는 두 변수간의 관련성을 구하기 위해 보편적으로 이용되는 개념이며, 식 (4)와 같다.

$$r = \frac{X와 Y가 함께 변하는 정도}{X와 Y가 각각 변하는 정도} \quad (4)$$

이 연구에서 SPSS 기능은 피에조콘 관입시험을 통해 산정된 지반의 침하량데이터들을 수집하여 데이터들 사이의 상관관계를 분석하고 신뢰성분석을 통해 자료의 신뢰성 향상을 확인하는데 사용하였다.

Table 1은 상관계수에 따른 상관관계성을 나타내며, 피어슨(pearson) 상관계수 항목의 값이 높을수록 분석값들 사이의 상관성이 높다[7].

Table 1. Correlation analysis criteria and correlation

Standard	Correlation
±0.9 or more	Very high correlation
±0.7 or more to less than ±0.9	High correlation
±0.4 or more to less than ±0.7	Slightly higher correlation
±0.2 or more to less than ±0.4	Low correlation
Less than ±0.2	Little correlation

2.4 침하량 산정식

포화된 점성토 지반의 압밀침하량을 산정하는 방법으로 가장 많이 사용되는 방법은 Terzaghi(1925) 방법과 Sanglerat(1972) 방법이다. Terzaghi(1925)는 일차원 압밀이론을 적용하여 식 (5)와 같은 정규압밀 점토지반의 압밀침하량을 산정하는 방법을 제시하였다[8].

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (5)$$

where, S_c denotes consolidation settlement, C_c denotes compression index, C_s denotes expansion index, P_c denotes pre-consolidation load, P_0 denotes effective payload, e_0 denotes initial void ratio, H denotes consolidation layer thickness, ΔP denotes load increase

또한 Sanglerat(1972)는 콘관입시험 결과를 이용하여 침하량을 산정할 수 있는 방법을 식 (6)과 같이 제시하였다. 식 (6)에서 보는 것처럼 이 방법에서는 콘저항값(\bar{q}_c)에 대한 계수(α_m)와의 상관관계를 이용하여 압밀침하량을 계산할 수 있다[9].

$$S = \sum_1^H H \frac{\Delta \sigma}{\alpha_m \times \bar{q}_c} \quad (6)$$

where, S denotes total settlement, H denotes soil thickness, α_m denotes soil compression coefficient, \bar{q}_c denotes cone resistance value, $\Delta \sigma$ denotes stress in the middle of the soil

3. SPSS를 활용한 침하량 보정

3.1 김해지구

이 연구에 활용된 김해진영지구 지층 조건 및 공학적 특성 등에 관한 것은 토질조사 보고서를 참고하였다 [10-12]. 대상지역은 경상남도 김해군 진영읍 일원이며 이 지역의 지형은 동쪽으로 낮은 구릉이 발달되어 있다. 또한 지질의 경우는 경상북도에 한하여 화강편마암을 주로 하는 해성퇴적층, 안산암질암, 산성화성암류 등으로 분류된다.

3.2 대상지역 침하량

이 연구에서는 김해진영 지역 중 12개 지점에 대하여 분석을 수행하였다. 피에조콘 관입시험을 통해 얻은 자료들을 분석하여 Robertson(1986) 및 Robertson(1990) 흙 분류법에 따라 지층을 분류하였다. 분석에는 피에조콘 관입시험을 통해 측정된 콘관입저항값, 마찰저항값, 간극수압을 Robertson 도표(1986) 및 Robertson 도표(1990)로 비교하여 지층을 구분하였다. 그리고 각 지역에 대해서 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀공식에 의한 침하량 및 Sanglerat(1972) 침하량 산정공식에 의한 2가지 방법으로 이론침하량을 산정한 후 계측침하량과 비교하였다.

Robertson(1986) 및 Robertson(1990) 방법에 따른 이론침하량과 계측침하량을 상관분석 실시한 결과는 Table 2와 같다. Robertson(1986) 방법에 따른 이론침하량과 계측침하량의 평균 오차율은 17.28%, Robertson(1990) 방법에 따른 이론침하량과 계측침하량의 평균 오차율은 26.96%로 나타났다. 각 분류법에 의한 상관계수의 의미를 살펴보면 Robertson(1986) 분류법에 의해 산정된 이론침하량이 계측침하량과 0.942의 계수를 가지며 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 또한 Robertson(1990) 분류법에 의해 산정된 이론침하량은

계측침하량과 0.687의 계수를 가지며 다소 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

3.3 소성지수와 액성한계를 통한 보정계수 제안

이 연구에서는 이론침하량과 계측침하량을 비교하여 SPSS 상관분석을 실시하고 보정계수를 산정하였으며, 침하량 평가의 신뢰성을 향상시키는 방법을 찾기 위해 기존의 계측침하량과 침하량 차이가 작게 나타난 Table 2의 Robertson(1986) 이론침하량 값을 기준침하량으로 사용하였다.

기준침하량과 비교하여 계측침하량이 큰 경우와 작은 경우로 나누어 지역들을 분류하였다. 기준침하량이 계측침하량보다 큰 지역들은 P-20, P-22, P-25, P-27, P-28, P-30, P-38, P-39 등이다. 이러한 8개 지역들을 SPSS 상관분석 실시한 결과 보정계수 0.961을 얻었다. 또한 기준침하량이 계측침하량보다 작은 지역들은 P-07, P-23, P-26, P-32 등이며, SPSS 상관분석을 실시한 결과 보정계수 1.058을 산정되었다.

Table 2. Measured and theoretical settlements of the site

CPTU	Robertson (1986)	Robertson (1990)	Measured Settlements (cm)
	Theoretical Settlements (cm)	Theoretical Settlements (cm)	
P-07	53.44	43.25	59.5
P-20	59.97	61.60	53.8
P-22	27.16	23.12	14.4
P-23	97.31	102.43	104.8
P-25	58.16	57.43	56.8
P-26	41.79	41.83	49.3
P-27	62.99	73.41	44.5
P-28	46.34	46.58	39.3
P-30	52.77	104.64	49.3
P-32	59.48	59.73	61
P-38	78.89	80.30	78.5
P-39	76.64	76.36	74.5
Error Rate(%)	17.28	26.96	-
Correction Factor	0.942	0.687	-

Table 3. Correction factor according to measured and theoretical settlements

Comparison of Settlements	Correction Factor
Theoretical > Measured	0.961
Theoretical < Measured	1.058

이후에 보정계수를 적용하여 Terzaghi(1925) 및 Sanglerat(1972) 방법으로 침하량(수정침하량)을 각각 산정하였다. 이때 수정침하량과 계측침하량의 차이가 10cm 이상 되는 지점들은 예측의 정확도를 향상시키기 위해서 제외하고 분석하였다. Terzaghi(1925) 방법을 적용했을 때 수정침하량과 계측침하량의 차이가 10cm 이상 되는 지점들은 P-20, P-22, P-27, P-38 등이며, 이 지점들을 제외하고 8개 지점에 대해서만 분석하였다. 8개 지점의 소성지수는 24.0~26.9%이며, 액성한계는 41.4~45.8%이다. 8개 지점에서 이론침하량이 계측침하량보다 큰 경우는 보정계수 0.961을 사용하며, 이론 침하량이 계측 침하량보다 작은 경우는 보정계수 1.058을 적용하여 침하량을 다시 계산하여 Table 4를 얻었다.

Table 4. Modified settlements of Terzaghi(1925) according to PI and LL range

CPTU	Robertson (1986)			Measured Settlements (cm)	PI	Liquid Limit
	Theoretical Settlements (cm)	Correction Factor	Modified Settlements (cm)			
P-23	97.31	1.058	102.95	104.8	26.9	45.8
P-39	76.64	0.961	73.65	74.5	26.9	45.8
P-25	58.13	0.961	55.86	56.8	24.7	42.5
P-26	41.79	1.058	44.21	49.3	24.7	42.5
P-30	52.77	0.961	50.71	49.3	24.7	42.5
P-28	46.34	0.961	44.53	39.3	24.5	42.2
P-07	53.44	1.058	56.54	59.5	24.0	41.4
P-32	59.48	1.058	63.93	61	24.0	41.4

Table 5. Modified settlements of Sanglerat(1972) according to PI and LL range

CPTU	Robertson (1986)			Measured Settlements (cm)	PI	Liquid Limit
	Theoretical Settlements (cm)	Correction Factor	Modified Settlements (cm)			
P-38	87.8	0.961	84.38	78.5	27.3	45.8
P-39	80	0.961	76.88	74.5	26.9	45.8
P-30	48.1	1.058	50.89	49.3	24.7	42.5
P-07	63.1	0.961	60.64	59.5	24.0	41.4
P-32	51	1.058	53.96	61	24.0	41.4
P-27	53.6	0.961	51.51	44.5	23.4	43
P-20	49.4	1.058	52.27	53.8	20.5	38.1

마찬가지로 Sanglerat(1972) 방법을 사용하여 Table 5를 얻었다. 이때에도 수정침하량과 계측침하량 차이가 10cm 이상 되는 지역(P-22, P-23, P-25, P-26, P-28)

들은 제외하고 7개 지점에 대해서만 분석하였다. 7개 지점의 소성지수는 20.5~27.3%이며, 액성한계의 범위는 41.4~45.8%이다. 침하량을 다시 계산할 때 이론침하량이 계측침하량보다 큰 경우는 보정계수 0.961을 사용하며, 이론침하량이 계측침하량보다 작은 경우는 보정계수 1.058을 적용한다. 계산결과는 Table 5와 같다.

4. 결론

이 연구에서는 낙동강 지류 인접지역인 김해진영지구를 대상으로 피에조콘 관입시험을 실시한 지반조사 자료를 참고하여 Robertson(1986, 1990) 도표에 따라 흙 분류를 수행하고 이를 Terzaghi(1925), Sanglerat(1972) 침하량 산정식에 적용하여 이론침하량을 산정하였다. 또한 계측침하량과의 SPSS 상관분석을 통해 침하량 예측의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 보정계수를 제안하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연구범위 내 지반을 Robertson(1986,1990) 도표에 따라 흙 분류를 수행한 후 이론침하량과 계측침하량을 비교한 결과, Robertson(1986) 흙 분류법에 따른 이론침하량과 계측침하량의 평균오차율은 17.28%로 나타났으며 Robertson(1990) 흙 분류법에 따른 평균 오차율은 26.96%로 나타났다. 따라서 이 지역의 지반특성은 Robertson(1986) 흙 분류법이 Robertson(1990) 흙 분류법보다 정확성이 더 높은 것으로 나타났다.
- 2) 이론침하량과 계측침하량을 비교하여 SPSS 상관분석을 수행하여 이론침하량이 계측침하량보다 큰 경우에는 보정계수 0.961을 얻었으며, 이론침하량이 계측침하량보다 작은 경우에는 보정계수 1.058을 얻었다. 이 지역에 대하여 얻어진 보정계수를 참고하여 침하량을 계산하면 좀 더 정확한 침하량 예측이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 이 지역의 경우에는 Terzaghi(1925) 방법에 의한 침하량 산정결과가 Sanglerat(1972) 방법에 의한 침하량 산정결과보다 계측침하량에 근접하게 산정된 것으로 나타나 Terzaghi(1925) 침하량 산정방법이 더 정밀한 것으로 나타났다.

References

- [1] B. I. Kim, S. M. Cho, J. H. Kim, and S. L. Kim, *Soft Ground Improvement Methods*, CIR Publishers, 2015, pp.3-4.
- [2] S. W. Baek, *Prediction of long-term settlements of soft ground using Piezocone*, ph.D dissertation, Myongji University, Yongin, Korea, pp.1-9, 2020.
- [3] H. S. Choi, *Prediction of Consolidation Settlement by Measuring Settlement and Pore Water Pressure of Soft Ground*, ph.D dissertation, Chosun University, Gwangju, Korea, pp.32-37, 2020.
- [4] P. K. Robertson, R. G. Campanella, D. Gillespie and J. Greig, "Use of Piezometer Cone data", *In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering*, Gsp 6, ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, SM92, pp.1263-1280, January, 1986.
- [5] P. K. Robertson, "Soil Classification Using the Cone penetration Test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- [6] N. K. Heo, *A study on the Utilization of SPSS for Teaching Statistics*, Master's Thesis, Keimyung University, Daegu, Korea, pp.11-15, 2009.
- [7] Y. S. Kim, "Correlation Analysis : Application in SPSS", *Journal of Information Management*, Vol.17, No.4, pp.37-54, 1984.
- [8] K. Terzaghi, "Principles of Soil Mechanics: I-Phenomena of Cohesion of Clays", *Engineering News Record*, Vol.95, No.19, PP.742-746, 1925.
- [9] G. L. Yoon, G. H. Lee, *Applications of cone penetration test for geotechnical design*, Goomi book Publishers, 2004, pp.134-140.
- [10] Korea Land and Housing Corporation, *Soil quality survey report for the construction of housing site development project in GimHae-Jinyoung district*, Interim Report, Korea Land and Housing Corporation, Korea, pp.1-15.
- [11] Korea Land and Housing Corporation, *Report on the treatment of soft ground for the construction of housing site development project in GimHae-Jinyoung*, Interim Report, Korea Land and Housing Corporation, Korea, pp.151-170.
- [12] Korea Land and Housing Corporation, *GimHae-Jinyoung housing site development project construction work, soft ground settlement stability management service final report*, Final Report, Korea Land and Housing Corporation, Korea, pp.178-181.

장 원 철(Won-Cheol Jang)

[준회원]



- 2019년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (토목공학학사)
- 2021년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (지반공학석사)

<관심분야>

토목공학, 지반공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 대학원 토목과 (지반공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 토목과 (지반공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

연약지반, 사면안정

김 영 옥(Young-Uk Kim)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 대학원 토목과 (지반공학석사)
- 2000년 5월 : 미)펜실베이니아주립대학교 토목과 (지반공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수
- 2021년 1월 ~ 현재 : 명지대학교 산학협력단 단장

<관심분야>

지반환경, 지반굴토