

부산·경남지역 퇴적 점토의 함수비를 이용한 압밀정수 산정 연구

A Study on the Calculation of Consolidation Constants using Moisture Content of Sedimentary Clay in Busan and Gyeongnam Regions

강성욱¹, 김대환^{2*}, 김태형³, 정진교⁴, 주인곤⁵

Sung-Uk Kang¹, Dae-Hwan Kim^{2*}, Tae-hyung Kim³, Chin-Gyo Chung⁴, In-Gon Joo

¹Non-Member, Ph.D. Candidate, Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

²Non-Member, Ph.D. Candidate, Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

⁴Member, Professor, School of Chemical Engineering, Busan Institute of Science and Technology, 88 Sirang-Ro, Buk-gu, Busan 46639, Republic of Korea

⁵Member, Professor, School of Geoinformatics, Busan Institute of Science and Technology, 88 Sirang-Ro, Buk-gu, Busan 46639, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, physical property tests and standard consolidation tests were conducted on the marine clay of Busan New Port and North Port, the middle and lower reaches of the Nakdong River including Gimhae and Yangsan, and Ulsan regions. The moisture content, a property unrelated to sample disturbance with small individual test errors, was used for regression analysis with the compression index, virgin compression index, consolidation coefficient, expansion index, and secondary compression index, among others. Subsequently, the correlation and accuracy were evaluated. Upon analyzing the correlation between the moisture content, void ratio, and liquid limit commonly used physical properties for calculating compression indexes, it was confirmed that the liquid limit had the lowest correlation. Through a linear regression analysis of the consolidation constants using the current moisture content in the natural state, a high correlation was demonstrated. Relationship equations were then presented to determine settlement and settlement time. This study suggests that moisture content can be utilized as an alternative for evaluating and calculating consolidation constants when examining ground settlement in sedimentary clays distributed in the Busan and Gyeongnam regions.

요 지

본 연구에서는 부산항 신항 및 부산항 북항의 해성점토, 김해와 양산을 포함한 낙동강 중·하류, 울산지역에 분포하고 있는 연약한 점토층에 대하여 물성 시험 및 표준압밀시험을 실시한 후 결과를 활용하여 물성 특성 중 시료의 교란 여부와 관계없고 개인별 시험오차 발생이 작은 물성인 함수비를 이용하여 압축지수, 처녀압축지수, 압밀계수, 팽창지수, 2차압축지수 등을 회귀 분석하여 상관성과 정확도를 평가하여 함수비로 압밀정수를 평가 및 산정할 수 있는 방안을 검토하였다. 압축지수를 산정하기 위해 물성 시험 중 가장 많이 활용되는 함수비 및 간극비, 액성한계와 상관성을 분석한 결과 액성한계가 가장 낮은 상관성을 가지는 것으로 확인되었다. 현재 자연상태의 함수비를 활용하여 압밀정수를 선형회귀분석한 결과 높은 상관성을 보여 침하량 및 침하시간을 결정할 수 있는 관계식을 제시하였다. 본 연구결과 부산, 경남지역에 분포하고 있는 퇴적 점토층의 지반침하 검토 시 함수비를 이용하여 압밀정수를 평가 및 산정할 수 있는 대안으로 활용할 수 있다.

Keywords : Moisture content, Compression index, Virgin compression index, Secondary compression index, Coefficient of consolidation, Sedimentary clay

Received 15 Jan. 2024, Revised 20 Feb. 2024, Accepted 7 Mar. 2024

*Corresponding author

Tel: +82-51-410-4465; Fax: +82-51-410-4460

E-mail address: triaxialdh@gmail.com (D.-H. Kim)

1. 서론

부산 및 경남의 일부 지역은 지리적으로 낙동강 중·하류에 위치하고 있으며, 낙동강 하구 일대는 연약한 점토층이 50m 전·후로 두껍게 분포하고 있다. 또한 부산 및 경남 일부 지역은 남해안에 위치하고 있어 해양 환경에 영향을 받아 다양한 퇴적 지층을 구성하고 있다. 낙동강 주변 지역 지층은 지표로부터 매립층 및 퇴적층의 순으로 이루어져 있으며, 퇴적층의 상부 점토층은 매우 연약한 상태를 보여주고 있다. 연약한 점토층의 두께는 20m에서 40m까지 위치에 따라 다양하게 분포하고 낙동강 어귀에서는 그 두께가 70m를 초과하는 곳도 존재한다(Chung et al., 2002). 이런 퇴적지층에 국토의 효율적인 이용을 위해 항만 및 산업단지 등 대규모 공사들이 진행되고 있다. 하지만 연약한 점토 지반에 구조물을 건설한 경우 과도한 침하가 발생하여 구조물의 안정성에 문제가 발생하는 일이 빈번하게 발생되고 있는 실정이다(Lim, 2019; Kim, 2021).

압밀침하 및 침하 시간 예측은 현장에서 자연 시료를 채취하여 실내시험 중 표준압밀시험(KS F 2316, 2002)을 실시하여 압축지수(C_c), 처녀압축지수(VC_c), 압밀계수(C_v), 팽창지수(C_s), 2차압축지수(C_{α}), 투수계수(k)를 산정하고 있으나, 현장에서 자연 시료를 채취하는 과정에 교란이 발생되면 압밀정수의 정확한 측정이 어렵다. 연약지반 상에 시공이 어려운 이유는 정확한 침하량을 예측하기가 어렵기 때문인데, 만약 이러한 침하량 예측에 실패할 경우 발주처, 시공사, 설계사, 사용자 간의 법적 분쟁과 구조물 파손과 사용 중단에 따른 경제적 손실이 발생한다(Lim, 2019; Park and Kim, 2019).

시료 교란이 압밀 특성에 미치는 주요 영향은 압밀곡선이 완만하게 되어 선형압밀응력이 왜곡되거나 감소하고 원위치 유효응력까지 압밀 시 체적변형률이 커지며 선형 압밀응력 이전의 압축지수는 커지고 그 이후는 작아진다. 그리고 선형압밀응력 이전의 압밀계수는 작아지고 압밀응력 이하에서는 2차압밀계수가 커지고, 그 이후의 응력에서는 차이가 작아지는 특성을 가지고 있기 때문이다(Lee et al., 2022).

Jamiolkowski et al.(1985)은 시료 교란의 원인은 응력해방, 시료 채취기술, 핸들링 방법 등에 발생한다고 하였다. Lunne et al.(1997)은 체적변형률과 유사한 개념으로써 간극비 변화량(Δe)과 초기간극비(e_0)의 비로 샘플의 품질을 4개의 등급으로 분류하였지만 국내에서는 설계자

가 시료 교란을 평가할 수 없어 활용되고 않고 있는 실정이다.

국내외의 기존 연구들은 점토의 물리적 특성과 압축지수 및 처녀압축지수만을 회귀분석하여 관계식을 제시하였다. 많은 연구들 중 모든 퇴적 점토에 적용할 수 있는 관계식의 경우, Herrero(1983)는 함수비(w_n)를 활용하였으며, Nishida(1956)는 간극비(e_0), Terzaghi and Peck(1967), Mayne(1980)는 액성한계(LL), Azzouz et al.(1976)은 앞서 언급한 물리적 특성 모두 적용할 수 있는 관계식을 제시하였다.

국내 연구결과 Park and Kim(2019)은 동남해안 점토의 압축지수 추정에 관한 연구결과를 이용하여 Terzaghi and Peck(1967), Skempton(1944), Azzouz et al.(1976), Mayne(1980)의 압축지수 추정식을 적용하여 평균제곱근오차(RMSE) 분석을 실시하여 오차율을 계산한 결과를 제시하였다. 그 결과 함수비를 통한 압축지수 추정식은 오차율이 11%~26%로 나타났으며 액성한계를 통한 압축지수 추정식은 오차율이 42%~289%, 간극비를 통한 압축지수 추정식은 9%~211%로 오차율이 나타나 크기와 변동성이 큰 것을 언급하였다.

퇴적 점토층의 압밀정수 결정은 경제적이고 효율적인 침하 관리를 위하여 필요하지만 지반조사에 소요되는 시간 및 경비 등 경제적인 문제들로 인하여, 대부분 정밀 지반조사를 실시하지 못하는 실정이다. 다수의 경우 퇴적층 깊이 10m당 약 1개 정도의 자연 시료를 채취하여, 평균값 또는 단일 값으로 압밀정수를 산정하는 것이 일반적이다.

이러한 경우, 점토층의 각 깊이 별 특성을 고려하지 않고 침하량 및 침하 시간을 산정하므로 설계 침하량과 실제 침하량의 차이가 발생하는 것으로 보인다. 또한, 자연 시료 채취 시 시료 교란이 빈번하게 발생하여, 압밀정수가 정확하지 않아 오차가 큰 결괏값이 사용되는 경우도 발생하는데, 설계자는 압밀정수를 산정함에 있어 시험 값의 신뢰도를 평가할 수 있는 자료가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 부산항 신항 및 북항의 해성 점토 89개소, 낙동강 중·하류지역 퇴적 점토 91개소, 김해 및 양산, 울산지역에 분포하고 있는 퇴적 점토 82개소에 대하여 물성 시험 및 표준압밀시험을 실시한 후, 결과들을 도출하여 물성 특성 중 시료의 교란 여부와 관계없고 개인별 시험 오차 발생이 작은 물성인 함수비(w_n)를 이용하여 압축지수(C_c), 처녀압축지수(VC_c), 압밀계수(C_v), 팽창지수(C_s), 2차압축지수(C_{α}) 등을 회귀분석하여 상관성과 정확도를 평

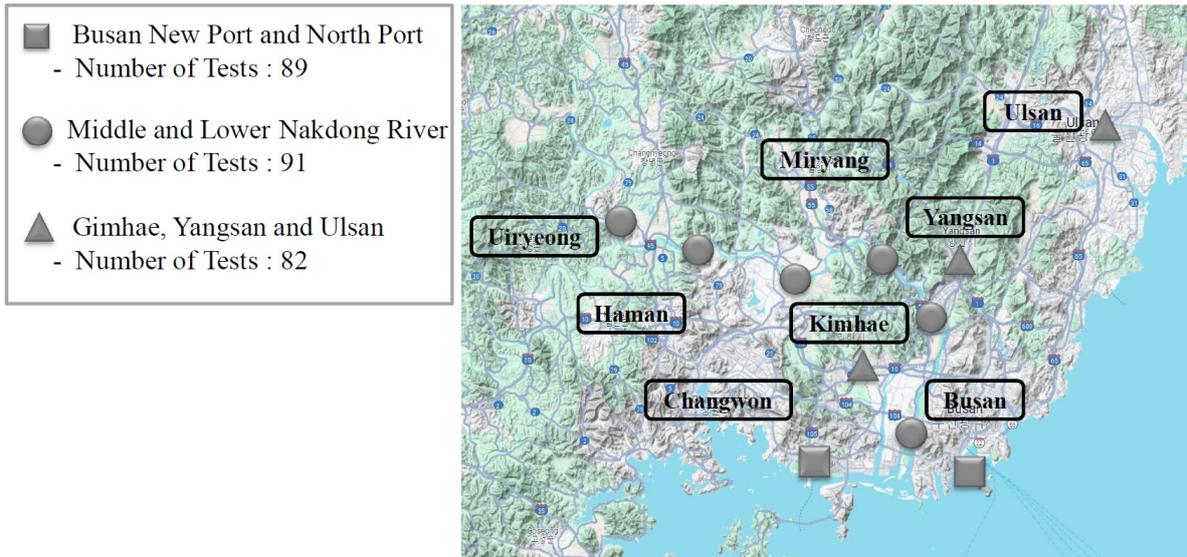


Fig. 1. Sampling soils location used in the study

가하고, 함수비(w_n)를 활용한 침하량 및 침하 시간을 결정할 수 있는 관계식을 제시하였다(Fig. 1).

2. 시험결과 분석

2.1 지역별 시험결과

본 연구를 위하여 부산항 신항 및 북항의 해성 점토, 김해 및 양산을 포함한 낙동강 중·하류, 울산지역에 분포 퇴적 점토를 사용하였다. 이 지역의 점토층은 신생대 제3기 말 플라이스토세-홀로세 기간의 해수면 상승기(간빙기 또는 비빙하기) 동안 단층침식곡을 충전하며 조간대 퇴적층으로 형성되었다. 부산지역의 점토는 주로 양산단층 침식곡을 충전하며 형성되었으며 신항은 낙동강 삼각주 중 하부 삼각주에 해당하며 김해·양산지역은 상부 삼각주에 해당된다. 울산지역 점토는 북서-남동 방향의 울산단층 침식곡을 충전하며 경상계 지층과 이를 피복하는 제3기 지층을 기반암으로 하며 퇴적되어 형성되었다.

연구 대상 점토에 대하여 물성 시험 및 표준압밀시험을 실시하였다. 퇴적 점토층에 대한 표준압밀시험결과의 신뢰성을 높이기 위하여 Lunne et al.(1997)의 교란도 평가 방법을 활용하여, $\Delta e/e_o$ 값이 1등급(매우 양호) ~ 4등급(매우 불량) 중 $\Delta e/e_o$ 값이 0.14이상으로 4등급에 해당되는 매우 불량한 시료의 시험 결과는 제외하였다. 부산항 신항 및 북항의 경우 총 89개소의 자연 시료를 채취하였으며, 낙동강 중·하류는 91개소, 김해 및 양산, 울산지역은

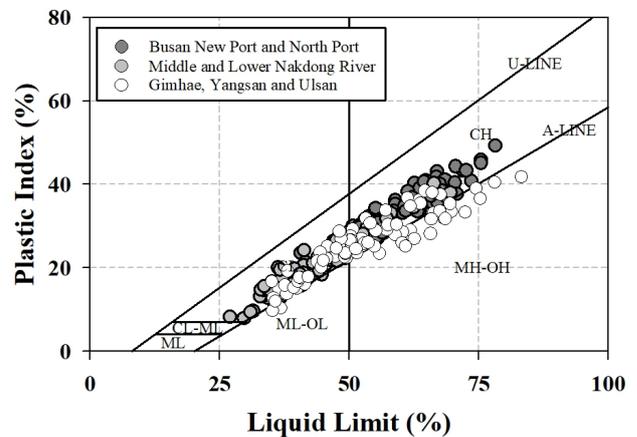


Fig. 2. Results of unified soil classification system by region

82개소의 자연 시료를 채취하여 공학적 분류인 통일분류법(USCS)를 실시한 결과 김해지역은 저소성 실트(ML) 저소성 점토(CL), 고소성 실트(MH), 고소성 점토(CH)로 퇴적환경에 따라 다소 차이를 보였으나 김해지역을 제외한 지역의 경우 저소성 점토(CL) 및 고소성 점토(CH)로 분류되었다(Fig. 2). 본 연구지역의 점토 광물을 산정하기 위하여 활성도를 산정한 결과 함수비(w_n) 50% 미만의 점토는 비활성 점토(Kaolinite)와 보통 점토(Illite), 함수비 50% 이상의 점토에서는 보통 점토(Illite) 및 활성 점토(Montmorillonite)로 분석되었다.

부산 및 경남지역에 분포하고 있는 점토의 물성 범위의 경우 지역에 따른 편차는 크지 않은 것으로 보이나, 압밀정수의 경우 경남지역이 압축지수(C_c) 및 2차압축지수(C_{α}), 팽창지수(C_s) 결과에서 비교적 높은 값을 보이고, 낙동강 중·하류 지역의 압밀정수가 가장 낮게 측정되었다(Table 1).

Table 1. Results of physical property tests and standard consolidation tests on the sediment clay in Busan, Gyeongnam province

Test item	Busan New port and North port	Middle and lower Nakdong River	Gimhae, Yangsan and Ulsan
Moisture content (%)	26.39 ~ 87.79	25.37 ~ 63.32	28.90 ~ 93.59
Specific gravity	2,671 ~ 2,714	2,654 ~ 2,698	2,672 ~ 2,715
Plastic limit (%)	17.1,0 ~ 33,10	16,26 ~ 31,46	18,41 ~ 41,45
Liquid limit (%)	34,35 ~ 78,20	26,98 ~ 69,53	35,07 ~ 83,20
Plastic index (%)	14,82 ~ 49,31	7,91 ~ 40,24	9,71 ~ 41,35
Gravel (%)	0,00 ~ 1,26	0,27 ~ 0,45	0,00 ~ 0,81
Sand (%)	0,26 ~ 30,78	1,19 ~ 67,47	0,40 ~ 65,23
Silt (%)	20,06 ~ 56,06	17,89 ~ 62,13	13,84 ~ 59,19
Clay (%)	33,67 ~ 75,93	10,68 ~ 59,25	17,01 ~ 77,05
Activity	0,44 ~ 1,44	0,38 ~ 1,52	0,48 ~ 1,31
Wet. unit (kN/m ³)	14,72 ~ 19,38	15,89 ~ 19,45	14,48 ~ 18,87
Dry. unit (kN/m ³)	7,84 ~ 15,34	9,73 ~ 15,51	7,49 ~ 18,14
Void ratio	0,714 ~ 2,383	0,695 ~ 1,715	0,801 ~ 2,560
Compression index	0,159 ~ 1,190	0,146 ~ 0,854	0,176 ~ 1,535
Virgin compression index	0,182 ~ 1,341	0,167 ~ 0,984	0,198 ~ 1,801
Max. secondary compression index	0,004 ~ 0,049	0,002 ~ 0,033	0,004 ~ 0,077
Expansion index	0,020 ~ 0,104	0,020 ~ 0,089	0,024 ~ 0,131
Ave. coefficient of consolidation (cm ² /sec)	1,91×10 ⁻⁴ ~ 1,54×10 ⁻³	2,85×10 ⁻⁴ ~ 2,09×10 ⁻³	1,41×10 ⁻⁴ ~ 1,74×10 ⁻³
Ave. coefficient of permeability (cm/sec)	4,49×10 ⁻⁹ ~ 7,19×10 ⁻⁸	5,16×10 ⁻⁹ ~ 4,61×10 ⁻⁸	3,14×10 ⁻⁹ ~ 3,72×10 ⁻⁸

Table 2. Compression index calculation according to physical properties linear regression and RMSE analysis results

Physical properties	Busan New port and North port	Middle and lower Nakdong River	Gimhae, Yangsan and Ulsan
Moisture content (%)	$C_c = 0,016(\omega_n - 15,1)$ $R^2 = 0,8228$ RMSE = 0,0747	$C_c = 0,017(\omega_n - 17,7)$ $R^2 = 0,8336$ RMSE = 0,0655	$C_c = 0,019(\omega_n - 22,8)$ $R^2 = 0,9396$ RMSE = 0,0876
Void ratio	$C_c = 0,57(e_o - 0,41)$ $R^2 = 0,8183$ RMSE = 0,0721	$C_c = 0,63(e_o - 0,48)$ $R^2 = 0,8411$ RMSE = 0,0626	$C_c = 0,71(e_o - 0,61)$ $R^2 = 0,9408$ RMSE = 0,0857
Liquid limit (%)	$C_c = 0,014(LL - 16,0)$ $R^2 = 0,5373$ RMSE = 0,1186	$C_c = 0,015(LL - 15,6)$ $R^2 = 0,6316$ RMSE = 0,0967	$C_c = 0,025(LL - 26,9)$ $R^2 = 0,6405$ RMSE = 0,2114

압축지수(C_c)를 산정하기 위해 물성 시험 중 가장 많이 활용되는 함수비(ω_n) 및 간극비(e_o), 액성한계(LL)와 상관성을 분석하기 위해 회귀분석을 실시한 결과 Table 2와 같은 관계식 및 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error)를 얻을 수 있었다. 각 지역별 물성 특성과 압축지수(C_c)에 대한 평균제곱근오차를 분석한 결과 간극비(e_o)와 압축지수(C_c)의 회귀분석에서 가장 낮은 0.0626~0.0857의 평균오차를 가지는 것으로 나타났다. 각 지역별 압축지수는 함수비(ω_n) 및 간극비(e_o)를 활용하여 산정하는 것이 가장 적절한 것으로 분석되었다(Fig. 3 ~ Fig. 5). 하지만 간극비(e_o)의 경우 함수비(ω_n) 및 습윤단위중량(γ_n),

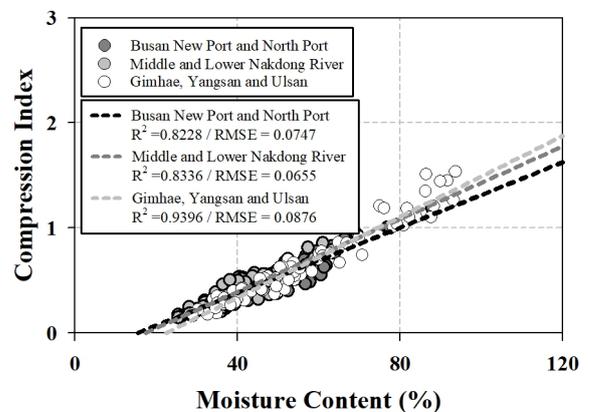


Fig. 3. Moisture content and compression index calculation linear regression and RMSE analysis results

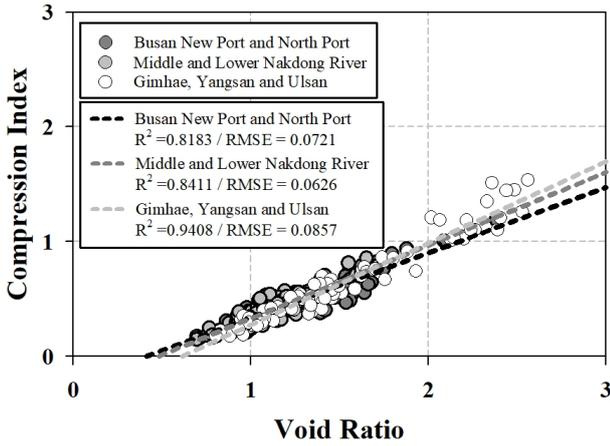


Fig. 4. Void ratio and compression index calculation linear regression and RMSE analysis results

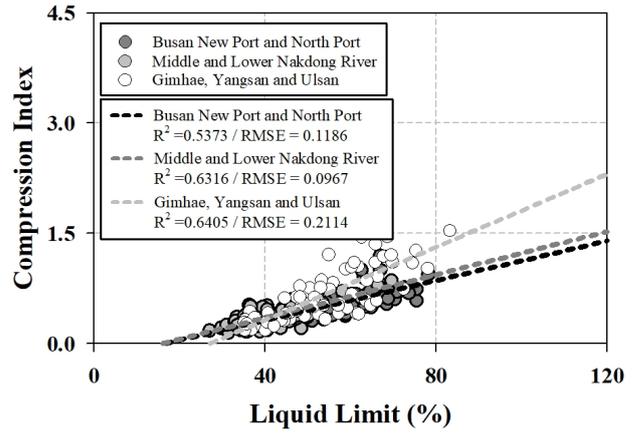
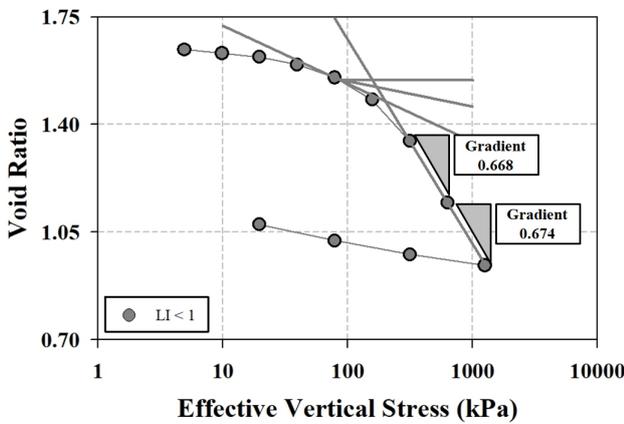
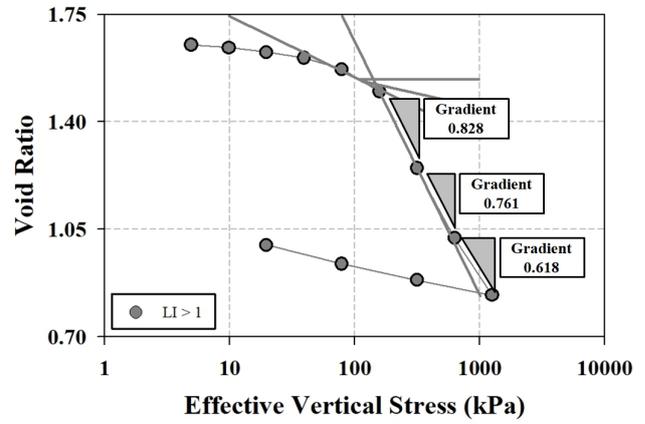


Fig. 5. Liquid limit and compression index calculation linear regression and RMSE analysis results



(a) Liquid index less than 1



(b) Liquid index 1 or more

Fig. 6. e-log P curve characteristics according to liquid index

비중(G_s)을 측정하여 산정하고, 지하수위 아래에 있는 퇴적 점토는 포화 상태로 습윤단위중량(γ_t)은 함수비(ω_n)에 의해 결정된다. 또한 교란된 시료 및 자연 시료를 채취하지 못하는 경우 습윤단위중량(γ_t)을 측정할 수 없어 함수비(ω_n)를 활용하여 압축지수(C_c)를 결정하는 것이 적절한 것으로 보인다. 액성한계(LL)와 압축지수의 상관성을 분석한 결과 모든 지역에서 분산된 양상을 보여 2.2절에서 추가 분석을 실시하였다.

2.2 액성지수(LI)에 따른 액성한계(LL)와 압축지수(C_c)의 상관성 분석

국내외 연구자들 중 Skempton(1944), Terzaghi and Peck(1967), Azzouz et al.(1976), Mayne(1980), Song(1988) 등은 액성한계(LL)와 압축지수(C_c)의 상관성에 대한 연구 결과를 제시하였다. 액성한계(LL)를 가지고 상관성을 분

석한 주 이유는 액성한계(LL)가 흙의 고유 물성 중 하나이기 때문이다. 하지만 본 연구결과 액성한계(LL)와 압축지수(C_c)의 상관성은 함수비(ω_n) 및 간극비(e)와 같은 물성보다 분산된 경향을 보여, 압밀정수를 산정할 수 있는 대안 자료로 부적절한 것으로 나타났다. 함수비(ω_n)와 간극비(e)가 흙의 현 상태(자연상태)특성을 설명하기 때문이다.

상관성이 분산된 경향의 원인을 찾기 위하여 액성지수(LI) 1을 기준으로 세분화하여 추가 분석을 실시하였다. 그 이유는 성토 이력이 없는 원지반 점토의 액성지수(LI)는 1이상이므로, e-log P 곡선에서도 성토 이력이 있는 점토와는 확연히 차이가 있기 때문이다(Fig. 6). 액성지수가(LI) 1 이상인 퇴적 점토의 침하 특성은 선행압밀하중 이후에 급격한 침하가 발생하고, 단계별 하중 증가 시 침하량이 점차 감소되는 경향을 보이나, 액성지수가(LI) 1 이하인 성토 이력이 있는 퇴적 점토는 선행압밀하중 이후에도 단계 하중별 일정한 침하량이 발생하는 경향을 보이기

때문에 이러한 특성을 고려하기 위해 액성지수(LI) 1을 기준으로 분석하였다.

그 결과 결정계수 값이 액성지수(LI)를 고려하지 않았을 때 보다 분산된 양상이 작아져, 결정계수 (R^2)가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 액성한계(LL)를 활용하여 압축지수(C_c)를 산정할 경우 이와 같이 현 지반 상태를 충분히 분석한 후 상관성을 연구해야 할 것으로 보인다 (Fig. 7).

2.3 기존연구 자료와 비교 분석

함수비(w_n)에 따른 압축지수(C_c)는 지역에 따른 편차가 크지 않고 관계식 또한 유사하여 연구지역 전체 결과를 활용하여 비교하였다.

본 연구에서는 함수비(w_n)에 따른 압밀정수를 산정하는데 그 목적이 있으므로 국내·외 자료 중 함수비(w_n)를 활용하여 압축지수(C_c)를 산정한 연구 자료 중 국외의 경우 모든 점토 지반에 사용할 수 있는 Moran et al.(1958), Azzouz et al.(1976), Herrero(1983)의 관계식을 사용하였다. 국내 기존 연구 자료는 Song(1988)서남해안 점토의 압축지수와 Park and Kim(2019)의 동남해안 점토의 압축지

수에 대한 관계식을 본 연구결과에 적용하여 비교 분석하였다.

연구결과 Azzouz et al.(1976)과는 상당한 차이를 보이지만, Herrero(1983)과는 상당한 유사성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 Moran et al.(1958)의 경우 원점을 통과하는 분석을 실시하여 회귀분석 식을 제안하여, 본 연구 결과에서도 같은 방법으로 회귀분석을 실시한 결과 일치하는 결과를 보였다. 하지만 강제적으로 원점을 통과하여 회귀분석을 실시한 그래프의 경우 낮은 함수비에서 다소 높은 압축지수(C_c)를 보이고, 함수비가 높아질수록 평균보다 낮은 압축지수(C_c)를 보여 압밀정수로 사용하기에는 다소 부적절한 것으로 보인다(Fig. 8).

기존 연구결과에서 제시한 관계식을 본 연구결과에 적용하여 상대표준오차율(Relative Standard Error)를 산정한 결과 Park and Kim(2019) 및 Herrero(1983)의 경우 13.84%, 16.05%로 본 연구결과와 상대표준오차율 12.45%와 매우 유사한 경향을 보이거나 Azzouz et al.(1976) 및 Song(1988)은 22.78%, 31.30%로 본 연구결과와 다소 차이가 있는 것으로 분석되었다(Table 3). 일반적으로 상대표준오차율 10% 내외를 보이는 경우 분석의 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.

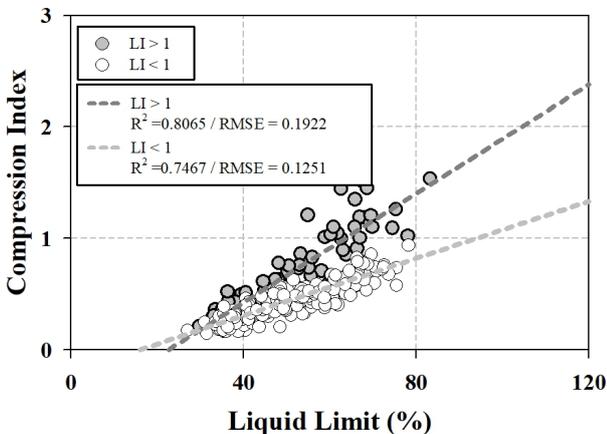


Fig. 7. Correlation between liquid limit and compression index considering liquid index

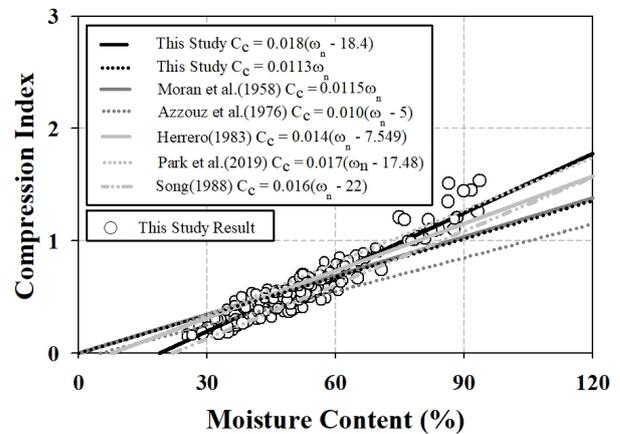


Fig. 8. Correlation analysis results between moisture content and compression index

Table 3. Statistical analysis results of moisture content and compression index

	Linear regression analysis equation	RMSE	Ave. RSE (%)
This study	$C_c = 0.018(w_n - 18.4)$	0.0813	12.45
Azzouz et al.(1976)	$C_c = 0.010(w_n - 5)$	0.1601	22.78
Herrero(1983)	$C_c = 0.014(w_n - 7.549)$	0.1062	16.05
Song(1988)	$C_c = 0.016(w_n - 22)$	0.1271	31.30
Park and Kim(2019)	$C_c = 0.017(w_n - 17.48)$	0.0852	13.84

3. 함수비와 압밀정수의 상관성 분석

3.1 함수비(ω_n)와 압축지수(C_c) 및 처녀압축지수(VC_c) 상관성 분석

연구지역 전체 결과를 활용하여 함수비(ω_n)와 압축지수(C_c), 처녀압축지수(VC_c)를 선형회귀분석을 실시한 결과 처녀압축지수(VC_c)는 압축지수보(C_c)다 약 1.11배 정도 크며, 결정계수(R^2)를 산정한 결과 지역에 따른 편차가 크지 않고 0.8982~0.9102로 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다.

회귀분석 결과를 이용하여 각 시험 결과 별 오차 범위 및 오차율을 산정한 결과 평균제곱근오차(RMSE)는 0.0813~0.0963의 범위를 보이며, 상대표준오차율(RSE)은 12.45~13.59%로 설계자가 압축지수(C_c)를 산정하여 설계 정수를 결정하는 비교 및 대안 자료로 활용하기에는 신뢰성이 높을 것으로 판단된다(Fig. 9). 또한 현장에서 자연 시료채취 시 발생할 수 있는 교란과 실내시험 오차 등을 고려하면 신뢰성이 높은 것으로 보여 함수비(ω_n)를 활용한 압축지수(C_c) 및 처녀압축지수(VC_c)를 산정할 수 있는 관계식을 제시하였다(식 (1) ~ (2) 참조).

$$C_c = 0.018(\omega_n - 18.4) \quad (1)$$

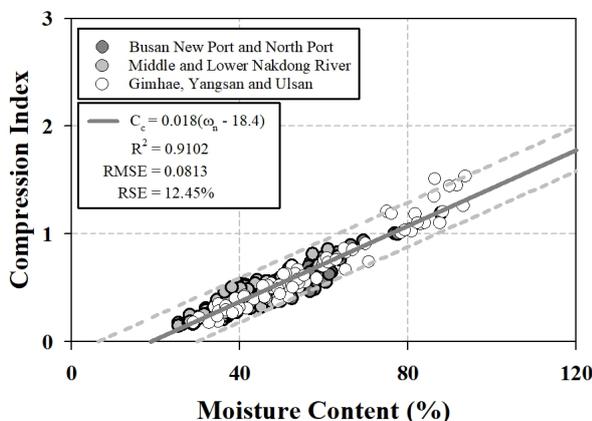
$$\text{Upper Limit, } C_c = 0.018(\omega_n - 6.3)$$

$$\text{Lower Limit, } C_c = 0.018(\omega_n - 29.8)$$

$$VC_c = 0.021(\omega_n - 18.9) \quad (2)$$

$$\text{Upper Limit, } VC_c = 0.021(\omega_n - 7.1)$$

$$\text{Lower Limit, } VC_c = 0.021(\omega_n - 30.7)$$



(a) Moisture Content - Compression Index Curve

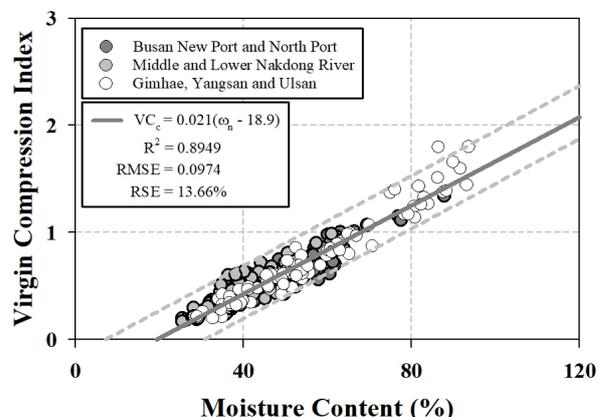
3.2 함수비(ω_n)와 2차압축지수(C_a) 및 팽창지수(C_s) 상관성 분석

2차압축지수는 장기적인 침하량을 예측하는 데 매우 필수적인 설계 정수로 2차압축지수(C_a)는 정규압밀점토(NC)의 경우 선행압밀하중 직후 하중에서 가장 크게 발생하며, 하중 단계가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이러한 이유로 함수비(ω_n)와 2차압축지수(C_a)를 분석할 경우 가장 큰 값을 적용하여 분석하는 것이 장기 침하량 예측에 유리할 것으로 보인다.

2차압축지수(C_a)는 1차 압밀이 완료된 후 침하하는 크리프 침하로 표현하며, 비교적 함수비가 높은 고소성 점토 및 유기질 토에서 높게 측정되었다. Mesri(1973)는 2차압축지수(C_a)의 경우 초기 함수비에 비례하여 증가하고, 점토 및 유기질 토의 2차압축지수(C_a)와 압축지수(C_c)의 비값은 0.025~0.100의 범위에 속한다고 제시하였다. 본 연구지역의 2차압축지수(C_a)와 압축지수(C_c)의 비는 0.014~0.051의 범위로 Mesri(1973)이 제시한 범위보다 다소 낮게 분포하는 것으로 분석되었다.

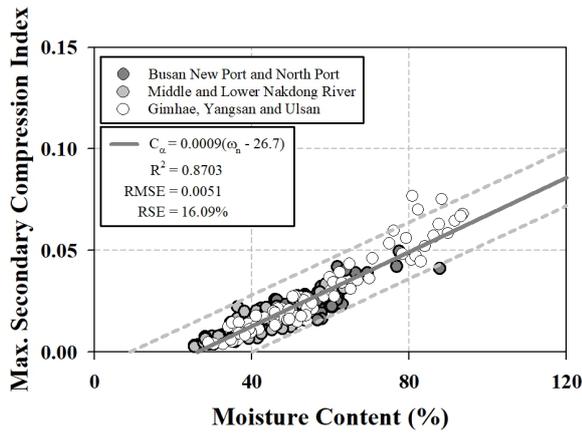
함수비(ω_n)와 2차압축지수(C_a)에 대한 상관성을 선형회귀분석한 결과 결정계수가(R^2) 0.8703이며, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.0051, 평균적인 상대표준오차율(RSE)은 16.09%로 높은 상관성을 보인다(Fig. 10). 함수비(ω_n)를 활용하여 2차압축지수(C_a) 산정할 수 있는 관계식은 식 (3)과 같다.

팽창지수(C_s)는 배수 공법으로 연약지반을 개량하는 경우 계획고의 높이를 고려하여 성토체 제거 시 지반의 팽창량을 산정하기 위해 필요한 설계 정수이다. Park and Kim(2019)는 동남해안 점토의 팽창지수(C_s)는 $(1/5 \sim 1/12)C_c$ 범위에 분

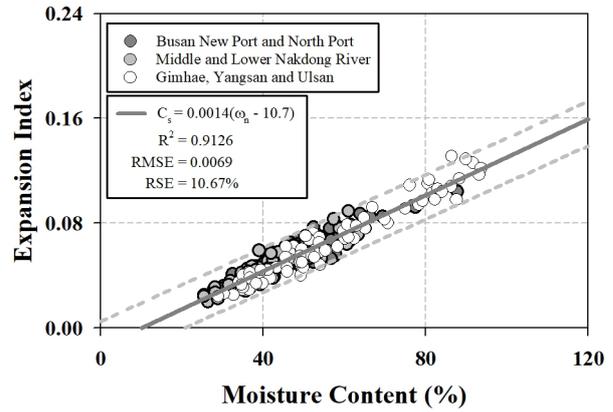


(b) Moisture Content - Virgin Compression Index Curve

Fig. 9. Compression index and virgin compression index correlation analysis results according to moisture content



(a) Moisture Content – Max. secondary compression index



(b) Moisture Content – Expansion Index

Fig. 10. Max. secondary compression index and Expansion Index correlation analysis results according to moisture content

포하는 것으로 연구결과를 제시한 바 있으나, 그 범위가 넓어 설계 정수로 사용하기에는 다소 어려움이 있다.

함수비(ω_n)와 팽창지수(C_s)에 대한 상관성을 선형회귀 분석한 결과 결정계수가(R^2) 0.9126이며, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.0069, 평균적인 상대표준오차율(RSE)은 10.67%로 매우 높은 신뢰성을 보인다(Fig. 10). 함수비(ω_n)를 활용하여 팽창지수(C_s) 산정할 수 있는 관계식은 식 (4)와 같다.

$$C_\alpha = 0.0009(\omega_n - 26.7) \quad (3)$$

$$\text{Upper Limit, } C_\alpha = 0.0009(\omega_n - 8.9)$$

$$\text{Lower Limit, } C_\alpha = 0.0009(\omega_n - 40.0)$$

$$C_s = 0.0014(\omega_n - 10.7) \quad (4)$$

$$\text{Upper Limit, } C_s = 0.0014(\omega_n - 3.6)$$

$$\text{Lower Limit, } C_s = 0.0014(\omega_n - 20.7)$$

3.3 함수비(ω_n)와 압밀계수(C_v) 상관성 분석

성토하중 작용 시 퇴적 점토층의 침하시간은 압밀계수(C_v)를 활용하여 결정한다. 압축지수(C_c)는 침하량을, 압밀계수(C_v)는 침하시간을 결정하는 설계정수로 지반침하 설계에서는 매우 중요한 설계정수이다. 압밀계수(C_v)는 선형압밀하중 이전의 결과값은 제외하고 설계 정수로 결정한다. 또한 압밀계수(C_v)를 결정하기 위해 \log - t 법과 \sqrt{t} 법을 활용하여 압밀도 50%에 도달하는 시간과, 90%에 도달하는 시간을 산정하여 결정한다. 본 연구에서는 두 분석법에 대하여 압밀계수(C_v)를 산정하고 평균값을 적용한 후 선형압밀하중 이하의 단계별 결과값을 평균하였다.

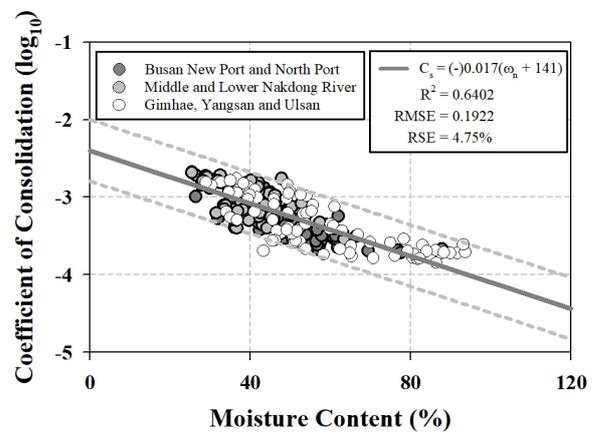


Fig. 11. Coefficient of Consolidation correlation analysis results according to moisture content

함수비(ω_n)와 압밀계수(C_v)에 대한 상관성을 선형회귀 분석하기 위하여 압밀계수(C_v)에 상용로그(\log_{10}) 값을 적용하여 분석한 결과 결정계수가(R^2) 0.6402이며, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.1922, 평균적인 상대표준오차율(RSE)은 4.75%로 분석되었다(Fig. 11). 함수비(ω_n)를 활용하여 압밀계수(C_v) 산정할 수 있는 관계식은 식 (5)와 같다.

$$C_s = (-)0.017(\omega_n - 141) \quad (5)$$

$$\text{Upper Limit, } C_v = (-)0.017(\omega_n - 118)$$

$$\text{Lower Limit, } C_v = (-)0.017(\omega_n - 164)$$

4. 결론

부산항 신항 및 북항의 해성 점토, 김해 및 양산을 포함한 낙동강 중·하류, 울산지역에 분포하고 있는 퇴적 점토층에 대하여 물성 시험 및 표준압밀시험 결과를 활용하여

기존 연구 자료와 비교 분석을 실시하였다. 물성 특성 중 시료의 교란 여부와 관계없고 개인별 시험 오차 발생이 작은 함수비(ω_n)를 이용하여 압축지수(C_c), 처녀압축지수(VC_c), 2차압축지수(C_a), 팽창지수(C_s), 압밀계수(C_v)에 대한 상관성을 선형회귀분석 및 오차 통계분석을 실시하여 다음의 결론을 얻었다.

압축지수(C_c)와 물성 특성에 대한 상관성은 함수비(ω_n)가 가장 높은 것으로 분석되었으며, 액성한계(LL)가 가장 낮은 상관성을 가지는 것으로 확인되었다. 간극비(e_0)의 경우 압축지수(C_c)와 상관성은 높으나 교란된 시료 및 자연 시료를 채취하지 못하는 경우 습윤단위중량(γ_t)을 측정할 수 없어 간극비(e_0)를 산정할 수 없으므로, 함수비(ω_n)를 활용하여 압축지수(C_c)를 결정하는 것이 가장 적절하다.

액성한계(LL)와 압축지수의 상관성은 액성지수(LI)를 고려하여 선형회귀분석을 하는 것이 상관성을 향상시키므로 액성한계(LL)를 활용하여 압축지수(C_c)를 산정할 경우 현 지반 상태(자연 함수비)를 충분히 고려하여 상관성을 파악하는 것이 필요하다.

함수비(ω_n)에 대한 압축지수(C_c), 처녀압축지수(VC_c), 2차압축지수(C_a), 팽창지수(C_s), 압밀계수(C_v)의 상관성을 선형회귀분석하여 결정계수(R^2)를 산정한 결과 압밀계수(C_v)에서 다소 낮은 값을 보이지만, 대부분의 압밀정수는 함수비(ω_n)와 매우 높은 상관성을 보이는데 함수비(ω_n)는 흙의 현 상태(자연상태) 특성을 반영하기 때문인 것으로 보여진다. 또한 해성 및 육상 퇴적 점토의 압밀정수는 퇴적환경에 따른 영향보다는 물성 특성 중 함수비(ω_n)와 상관성이 높고 상대표준오차율(RSE)를 활용하여 정확도를 평가한 결과 83.91% ~ 95.25%로 국내에 분포하고 있는 퇴적 점토의 압밀정수를 산정함에 있어 시험 값의 신뢰도를 평가할 수 있는 자료로 활용하기에는 유용하다.

본 연구결과는 부산 및 경남지역 퇴적 점토층에 대하여 자연 시료를 채취할 수 없거나 교란이 발생되어 압밀정수 결정이 어려울 때 함수비(ω_n)만으로 압밀정수를 산정할 수 있는 대안으로 활용 가치가 있다.

References

1. Azzouz, A. S., Krizek, R. J. and Corotis, R. B. (1976), "Regression Analysis of Soil Compressibility, Soils and Foundation", *Japan Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Tokyo, Japan.
2. Chung, S. G., Giao, P. H., Kim, G. J. and Leroueil, S. (2002), "Geotechnical properties of Pusan clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, No.5, pp.1050-1060.
3. Herrero, O. R. (1983), "Universal Compression Index Equation, Closure", *J. Geotech. Engrg, ASCE*, Vol.109, No.5, pp.755-761.
4. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine J. T. and Lancellotta, R. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", *Proceedings of 11th ICSMFE, San Francisco*, Vol.1, pp.57-153
5. Kim, T. H. (2021), "A research report of design and construction of soft ground improvement work and maintenance improvement plan", *Korean Society of Civil Engineers*, p.170
6. KS F 2316 (2002), "Test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading", *Korean Standards Association*, Seoul, South Korea. (in Korean)
7. Lee, Y. G., Yang, K. J., Kim, S. B., Kim, J. C. and Kim, C. K. (2022), "Correction of Consolidation Parameters of Cohesive Soils due to Disturbance", *Spring Geosynthetics Conference, Seoul*, pp.111-112. (in Korean).
8. Lim, J. C. (2019), "A final report on research on causes of settlement and prediction of long-term settlement in the Ungdong hinterland complex of Busan Port New Port", *Korean Society of Civil Engineers*, p.340. (in Korean)
9. Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S. (1997), "Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay", *Symp. on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rio de Janeiro*, pp.81-102.
10. Mayne, P. W. (1980), "Cam-clay Predictions of Undrained Strength", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol.106, No.11, pp.1219-1242.
11. Mesri, G. (1973), "Coefficient of secondary compression", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.99, No.1, pp.123-137.
12. Moran, Proctor, Mueser, and Rutledge, P. C. (1958), "Study of deep soil stabilization by vertical sand drains, Bureau of Yards and Docks", *Department of the Navy*, Washington, D. C.
13. Nishida, Y. (1956), "A Brief Note on Compression Index of Soil", *J. Soil Mech. and Found Eng., ASCE*, Vol.82, No.3, pp.1-14.
14. Park, C. S. and Kim, S. S. (2019), "A Study on the Estimation of Compression Index in the East-Southern Coast Clay of Korea", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.8, pp.43-56. (in Korean)
15. Skempton, A. W. (1944), "Note on Compressibility of Clays", *Quarterly Journal of the Geotechnical Society of London*, Vol.100, pp.119-135.
16. Song, M. S. (1988), *Correlation of soil properties of marine clay in Korea*, Master's Thesis, Hanyang University.(in Korean).
17. Terzaghi, K. and Peck R. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, Inc, New York N.Y.