

남해안 매립 해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성 분석

Correlation Analysis between Physical Properties and Compression Index for Dredged and Reclaimed Marine Clay in the Southern Coast of Korea

임 석 훈* 유 남 재**
Lim, Seok-Hun Yoo, Nam-Jae

Abstract

The single regression method was used to analyze the relationship between the compression index with mechanical properties for reclaimed marine clays in the southern coast of Korea. As results of performing regression analysis for 200 samples about reclaimed marine clays in the southern coast of Korea, linear regression lines between compression index and natural water content, void ratio in situ, and liquid limit respectively were obtained. The changed properties of soil due to disturbance during dredging and reclaiming could be investigated by comparing with the existing empirical correlation equations for the original ground where dredging was performed. These regression equations might be rationally used in the preliminary evaluation of settlement of dredged and reclaimed marine clayey ground in the southern coast of Korea.

키워드 : 해성점토, 매립토, 압축지수, 물리적 특성, 상관성 분석

Keywords : *Marine Clay, Reclaimed Soil, Compression Index, Physical Properties, Correlation Analysis*

1. 서론

현재 우리나라뿐만 아니라 세계 여러 나라에서 매립공사가 활발하게 이루어지고 있으며 그 결과로 대규모 산업단지, 공항부지, 항만부지 등이 조성되었다.

매립재료로 산토, 모래의 양질의 매립재가 필요하나 수급의 제한성으로 현장의 해성점토가 활용되고 있다. 해성점토는 연약한 지지력, 과도한 침하량 등으로 다양한 형태의 지반개량이 요구되므로 그때 필요한 합리적인 설계와 경제적인 시공이 요구된다.

효율적인 설계 및 시공을 위해서는 준설매립공사에 수행되어지는 다양한 시공기술과 지반조사에 대한 연구가 필요한 상황이다. 이러한 상황에 맞춰 준설매립지반에 대한 조사를 활발히 하며, 조사과정에서 획득할 수 있는 토질정수를 활용하여 연약지반에 대한 특성을 파악하고 이를 설계에 활용할 수 있도록 하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 준설매립지반의 토질특성 분석 연구의 일환으로 해성점토의 침하와 가장 관련이 깊은 압축지수와 토질정수간의 관계를 분석하였다. 분석대상 지역으로는 남해안 준설매립지반 중 가장 대표적인 광양, 부산 지역으로 하였으며, 최근 시행된 준설매립지반 조사자료를 활용하여 그 상관성에 대해 본 연구를 통해 남해안지역 준설매립지반의 물리적 특성과 압축지수에 관한 상관도를 파악하고 기존 선행되어진 원지반 해성점

* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

토자료와의 비교를 통하여 교란에 따른 물성변화의 특성에 대하여 파악하였다.

2. 토질특성 분석

2.1 개요

남해안 지역의 지반조사보고서(포스코건설, 2003: 대영엔지니어링, 2005; 현대산업개발, 2005; 여수지방항만청, 2004, 2005, 2007; 부산지방해양항만청, 2009, 2011)를 통합 정리하여 광양과 부산지역의 물리적 특성과 압축지수를 분석하였다. 물리적 특성으로는 압축지수와 연관성이 있다고 알려진 함수비, 초기간극비, 액성한계에 대하여 분석하였으며, 광양과 부산 두 지역으로 나누어 분석을 실시하였다. 각 지역별 특성을 분석하기 위해 사용된 자료의 개수는 광양의 경우 98건 부산의 경우 112건이다.

2.2 물리적 특성

(1) 자연함수비

자연함수비에 대한 D/B의 통계처리 결과는 표 1에 나타낸 바와 같다. 광양지역은 11.8~135.1%로 부산지역 보다 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 평균 함수비는 89.56%로 평가되었다. 부산지역 점토의 경우는 34.8~119.3%의 분포로 광양지역보다는 범위가 작게 평가되었으며, 평균함수비는 76.17로 나타났다.

(2) 간극비

본 연구에서 조사된 간극비의 분포특성은 표 2에 나타낸 바와 같이, 광양 지역은 1.067~8.1의 범위로 나타났으며, 부산은 0.94~2.743의 범위로 조

사되었다. 하지만 지리적으로 가까운 광양지역과 부산지역의 간극비 최대값이 3배 정도의 차이를 보이고 매립이 완료된 지반에서의 조사된 자료임을 감안했을 때, 광양지역의 간극비 자료에서 극단치가 존재하고 있음을 판단할 수 있다.

(3) 액성한계

표 3은 지역별 액성한계 분포를 나타낸 것이다. 액성한계의 경우 광양지역은 31.4~115.5%의 범위로 부산지역 보다 넓은 범위로 분포하고 있으며, 평균 액성한계 역시 80.09%로 부산지역보다 크게 나타났다. 부산지역의 액성한계 분포는 34.7~87.6%의 범위로 평균 액성한계 54.46%로 나타나고 있으며 약 20%의 차이를 보이고 있다. 이는 함수비의 결과에서도 약 20%의 차이를 보이는 것으로 보아 광양지역과 부산지역의 액성한계 분포의 경향성은 비슷하다고 판단된다. 또한, 광양지역보다 부산지역의 액성한계가 20%정도 작게 평가된 것은 부산지역이 광양지역보다 압축성이 작다고 할 수 있다.

(4) 압축지수

표 4에 나타낸 바와 같이, 압밀시험 결과로부터 산정된 압축지수의 경우 광양지역의 경우는 0.009~1.46의 범위로 분포하고 있으며, 평균 압축지수는 0.7623으로 나타났다. 부산지역의 점토시료의 범위는 0.223~1.185의 범위로 0.5623의 평균 압축지수를 갖고 있는 것으로 나타났다. 결과에 따르면 부산지역의 압축지수가 광양보다 작음을 알 수 있으며, 이는 액성한계분포에서도 알 수 있듯이 부산지역의 압축성이 광양지역보다 작다고 판단되어진다.

표 1. 지역별 함수비 분포특성

구분	광양	부산
최소	11.8	34.8
최대	135.1	119.3
95%신뢰구간	84.45~94.67	72.54~79.79
평균	89.5	76.1

표 2. 지역별 간극비 분포특성

구분	광양	부산
최소	1.07	0.94
최대	8.1	2.743
95%신뢰구간	2.46~3.15	1.76~1.98
평균	2.80	1.87

표 3. 지역별 액성한계 분포특성

구분	광양	부산
최소	31.4	34.7
최대	115.5	87.6
95%신뢰구간	76.03~84.14	52.39~56.51
평균	80.09	54.46

표 4. 지역별 압축지수 분포특성

구분	광양	부산
최소	0.009	0.223
최대	1.46	1.185
95%신뢰구간	0.67~0.85	0.49~0.62
평균	0.76	0.56

3. 상관관계 분석

3.1 물리적 특성 상관성 분석

본 장에서는 남해안 준설패립지반의 자료로부터 압축지수와 물리적특성들 사이의 상관관계를 알아보기 위해 SPSS(version 21)을 이용하여 분석을 실시하였다. 우선 토질정수들 간의 상관성을 파악하기 위해 표 5~6에서 나타난 바와 같이, Pearson의 상관계수를 활용하여 자료들간의 얼마나 밀접한 관계가 있는지에 대해 추정하였다. 두 지역 모두 압축지수와 함수비와의 관계가 가장 높게 나타났으며, 전반적으로 모두 양호한 상관관계를 나타내고 있다.

3.2 선형회귀분석

압축지수와 물리적 특성간의 회귀모형을 구함으로써 각 물성을 활용하여 압축지수를 예측할 수 있다. 다음 표 7은 각 토질정수를 활용하여 압축지수를 예측할 수 있도록 각 물성별 선형회귀식을 나타낸 것이다. 부산지역의 액성한계와의 관계를 제외하고는 양호한 결정계수를 보이고 있으나, 그림 1~3에서 나타난 바와 같이 자료의 분산정도가 다소 크게 나타났음을 알 수 있다.

표 5. 압축지수와 토질정수의 상관관계 - 광양

구분	W_n	e_0	LL	C_c
W_n	1	0.919	0.804	0.686
e_0		1	0.710	0.613
LL			1	0.661
C_c				1

표 6. 압축지수와 토질정수의 상관관계 - 부산

구분	W_n	e_0	LL	C_c
W_n	1	0.985	0.451	0.762
e_0		1	0.612	0.736
LL			1	0.398
C_c				1

표 7. 압축지수와 물리적 특성과의 선형회귀분석

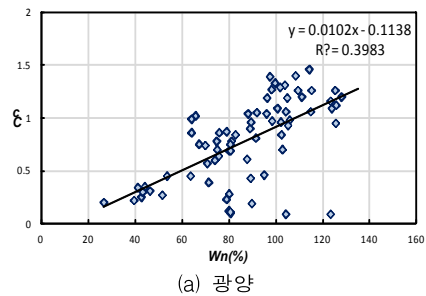
구분	토질정수	압축지수	
		선형회귀식	결정계수
광양	함수비	$C_c = 0.0102 W_n - 0.1138$	0.398
	액성한계	$C_c = 0.013 LL - 0.2483$	0.451
	간극비	$C_c = 0.3266 e_0 - 0.0291$	0.306
부산	함수비	$C_c = 0.0096 W_n - 0.0519$	0.564
	액성한계	$C_c = 0.006 LL + 0.284$	0.122
	간극비	$C_c = 0.322 e_0 + 0.0014$	0.488

(1) 함수비와 압축지수의 관계

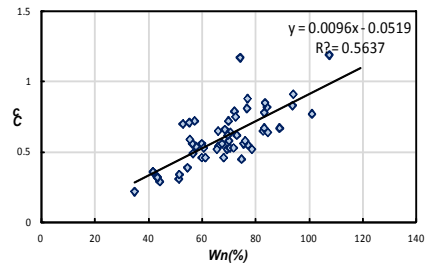
선형회귀분석결과에 의하여 표본별 함수비와 압축지수와의 관계를 도시한 결과, 그림 1과 같이 나타났다. 광양의 경우 추세선의 위치가 다소 압축지수를 과소평가 할 수 있게 나타났으며, 이는 압축지수 0.1~0.3을 갖는 함수비의 범위가 과도하게 측정되어 나타난 결과로 판단된다. 부산의 경우 전체적으로 모든 구간에서 양호한 관계를 보이며 압축지수와의 관계에 있어서 가장 높은 결정계수를 나타냈다. 또한, 함수비와 압축지수의 추세선의 경우 간극비와 압축지수 추세선과 비슷한 경향을 보이며, 이는, 함수비의 경우 암밀실험을 실시하기 전 불교란 시료를 대상으로 그 값을 측정하기 때문에 비중 값간극비와 압축지수 추세선과 비슷한 경향을 보이며, 이는, 함수비의 경우 암밀실험을 실시하기 전 불교란 시료를 대상으로 그 값을 측정하기 때문에 비중 값의 변동 범위가 크지 않게 된다. 따라서 추세선의 경우 간극비 추세선과의 비슷한 경향을 보이고 상관계수도 거의 비슷한 값이 나타나는 것으로 보인다.

(2) 액성한계와 압축지수의 관계

그림 2에서와 같이 액성한계와 압축지수의 선형회귀분석결과 광양지역의 경우 압축지수 0.2이하의 값에 대응하는 액성한계 값을 제외하고는 전체적으로 양호한 결과를 보이나 부산지역의 경우 전체적으로 자료의 분포가 이산분포를 보이고 있어 상관계수가 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

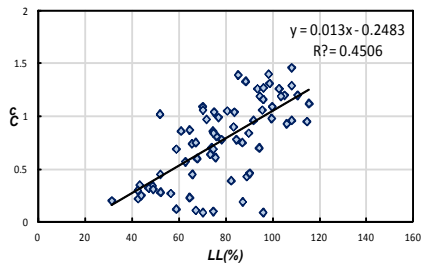


(a) 광양

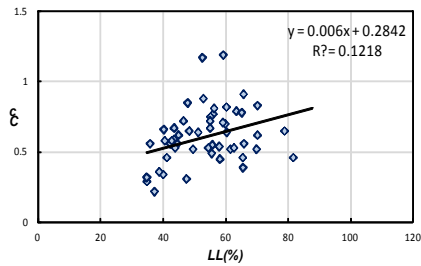


(b) 부산

그림 1. 함수비와 압축지수의 관계

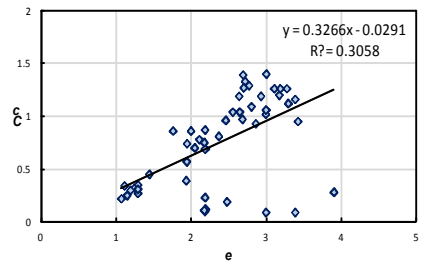


(a) 광양

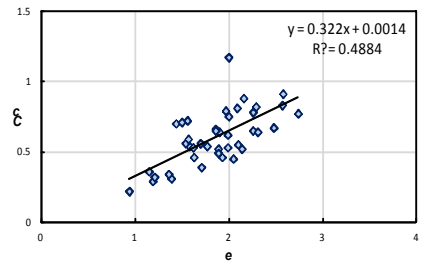


(b) 부산

그림 2. 액성한계와 압축지수의 관계



(a) 광양



(b) 부산

그림 3. 간극비와 압축지수의 관계

이러한 결과를 보았을 때, 액성한계에 따른 압축지수를 예측할 경우 더 많은 자료를 통한 연구가 필요하다고 판단된다.

(3) 간극비와 압축지수의 관계

그림 3은 간극비와 압축지수의 관계를 나타낸 것이다. 간극비와 압축지수의 관계에 있어서 광양의 경우 초기 간극비 2이하의 값에서는 양호한 분포를 보이고 있으며, 2이상의 값에서는 전체적으로 파소평가하게 되는 경향을 보이고 있다. 이는, 압축지수 0.4이하 값에 대응하는 간극비의 분포가 상당히 큰 범위로 나타남으로 인해 추세선의 위치가 전체적으로 낮아진 것으로 판단된다. 부산지역의 경우 전체적 분포가 추세선과 양호한 형태를 보이며, 결정계수 역시 양호한 값을 나타낸다.

4. 선행연구와의 비교

4.1 압축지수에 대한 기존 경험식

원지반 해성점토를 이용한 연구는 국내·외 많은 부분에서 이루어 졌으며, 본 장에서는 국내·외에서 선행되어진 연구와 비교·분석을 통해 그 적용성에 대한 분석을 실시하였다. 우선 기존에 제안된 경험식들 중에서 단일 지반변수를 적용하고 있는 경험식들을 요약하면 다음 표 8과 같다. 일단 국내 연구에서는 송만순(1985)이 우리나라 서·남해안의 14개 지역과 과거 8년 동안 시행된 토질조사 자료 554개의 시료에 대하여 지반정수와 압축지수와의 관계에 대하여 제안한바 있으며, 윤길립(2003)은

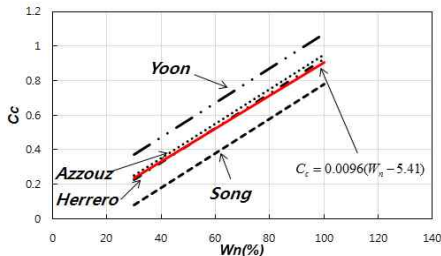
국내 연약지역 1800개의 데이터를 각 해안별로 분석하여 경험식을 제안한 바 있다. 따라서 위의 두 연구자들에 수행되어진 경험식이 신뢰성이 높은 연구로 판단되어, 각 연구에서 제안된 회귀모형을 이용하여 비교를 실시하였다. 국외 연구에서는 해외 다양한 지역을 대상으로 한 경험식을 선택하여 어느 한 지역에 국한되지 않은 경험식을 통해 비교·분석을 실시하였다. 단일변수 함수비(W_n)의 경우 Azzouz(1976), Herrero(1983)의 제안식과 비교를 하였고, 액성한계(LL)의 경우 Yamagutshi(1959), Mayne(1980)의 제안식과, 간극비(e_0)의 경우 Nishida(1956), Sowers(1970)의 제안식과 비교를 실시하였다.

4.2 기존경험식과의 비교

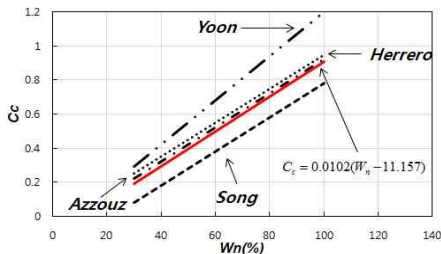
기존 원지반 경험식과 비교를 통해 준설매립지반 경험식의 적용성에 대하여 살펴보고자 하였다. 압축지수에 가장 큰 영향을 미친다는 단일지반 물성값에 대하여 표 5~6에 표현한 바 있다. 다음 그림 4~6은 앞서 제시한 지반변수들을 갖는 기존 원지반 해성점토 경험식들과 본 연구에서 시행되었던 준설매립지반 경험식을 함께 표현하였다. 또한, 보다 높은 상관성을 보이는 경험식을 알아보기 위해 평균제곱예측오차(Mean Squared Prediction Error, MSPE)법을 활용하였다. 평균제곱예측오차법은 다음 식 (1)과 같이 표현하게 되며, 여기서

표 8. 국내·외 압축지수에 대한 제안식

변수	제안자	제안식	적용
$C_c = f(W_n)$	Azzouz et al.(1976)	$C_c = 0.01(W_n - 5)$	모든 점토
	Herrero (1983)	$C_c = 0.01(W_n - 7.549)$	모든 점토
	Song (1988)	$C_c = 0.016(W_n - 22)$	서, 남해안 점토
	Yoon (2003)	$C_c = 0.010(W_n + 7.34)$	경남해안
	Yoon (2003)	$C_c = 0.013(W_n - 6.92)$	전남해안
$C_c = f(LL)$	Yamagutshi (1959)	$C_c = 0.013(LL - 13.5)$	-
	Mayne (1980)	$C_c = (LL - 13)/109$	모든 점토
	Song (1988)	$C_c = 0.016(LL - 15)$	서, 남해안 점토
	Yoon (2003)	$C_c = 0.002(LL + 284.9)$	경남해안
	Yoon (2003)	$C_c = 0.013(LL - 7.64)$	전남해안
$C_c = f(e_0)$	Nishida (1956)	$C_c = 0.54(e_0 - 0.35)$	모든 점토
	Sowers (1970)	$C_c = 0.75(e_0 - 0.50)$	저소성의 흙
	Song (1988)	$C_c = 0.61(e_0 - 0.62)$	서, 남해안 점토
	Yoon (2003)	$C_c = 0.289(e_0 + 0.500)$	경남해안
	Yoon (2003)	$C_c = 0.590(e_0 - 0.686)$	전남해안



(a) 광양



(b) 부산

그림 4. 함수비를 활용한 기존경험식과 비교

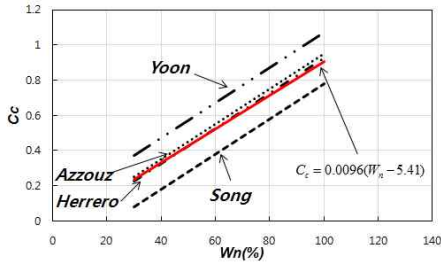
표 9. 함수비를 활용한 회귀모형식 비교

토질 정수	구분	금회	Azzouz	Herrero	Song	Yoon
W_n	광양	0.091	0.093	0.091	0.177	0.163
	부산	0.016	0.017	0.016	0.044	0.039

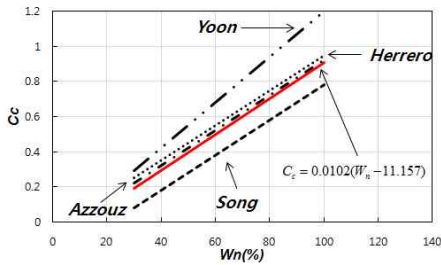
Y_i 는 실험값, \hat{Y}_i 는 모형으로부터 예측된 값을 의미하며 n 은 전체 개수를 의미한다.

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

우선, 함수비 - 압축지수관계를 살펴보면 광양과 부산지역의 경우 원지반 경험식들과 비교적 근접하고 함수비 증가에 따른 압축지수의 증가가 비슷한 경향을 보인다. 각 지역별 평균제곱예측오차의 경우 함수비와 압축지수 관계에 있어서는 국외경험식들이 국내경험식들 보다 다소 근접하게 나타났으며, 국외에서는 Azzouz(1976)의 경험식과 국내에서는 윤길립(2003)의 경험식과 가장 근접한 값을 나타냈다. 액성한계와의 관계에서는 광양의 경우 원지반 경험식과 비교적 근접하지만 부산의 경우 액성한계 증가에 따른 압축지수의 값이 과소평가 되는 것으로 나타났다. 이는 액성한계에 의한 압축지수의 변화가 상당히 이산분포를 나타내고 있는 관계로 이들과 압축지수와의 상관성이 높지 않아 이러한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 평균제곱오차의 경우 Yamagutshi(1959)의 경험식과 가장 근접한 값을 나타냈지만, 국내경험식과 국외경험식 자체의 경향에서도 다소 차이가 있으므로 이 부분은 더 많은 자료와 연구를 통해 검증이 필요한 부분이라 판단된다. 간극비의 경우 두 지역 모두 기존 경험식들 보다 과소평가되어 나타났으며, 비교적 국외 경험식보다는 국내경험식들과 비슷한 경향을 보였다.



(a) 광양



(b) 부산

그림 5. 액성한계를 활용한 기존경험식과 비교

표 10. 함수비를 활용한 회귀모형식 비교

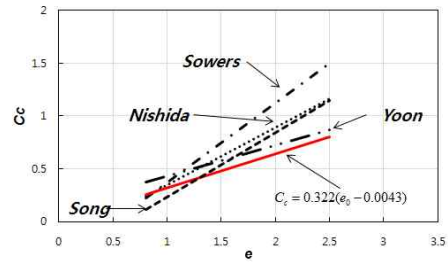
토질 정수	구분	급회	Yamagutshi	Mayne	Song	Yoon
LL	광양	0.083	0.089	0.118	0.148	0.106
	부산	0.033	0.047	0.089	0.046	0.040

기존 원지반 경험식과의 비교를 통해 준서매립지반의 경험식의 적용성에 대하여 연구해본 결과 함수비와 압축지수와의 관계에서는 그 경향성이 근접함을 볼 수 있었으며, 액성한계-압축지수, 간극비-압축지수와의 관계에서는 함수비와의 관계보다는 다소 떨어지는 상관성을 보였다. 따라서 원지반 경험식을 통해 준서매립지반의 특성을 파악할 경우 함수비를 활용한 부분이 가장 적합하다고 판단되며, 나머지 지반특성 물성치의 경우 보다 많은 자료와 연구가 필요하다고 판단된다.

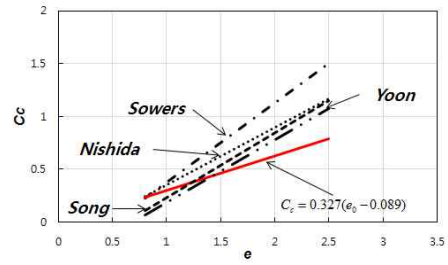
5. 결론

본 연구는 남해안 준서매립지역을 연구대상으로 선정하여 실내시험 및 현장조사 자료를 수집하여 통계분석을 실시하였으며, 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 압축지수와 지반정수(함수비, 간극비, 액성한계 상관관계 분석결과, 함수비와 가장 높은 상관성을 보였으며, 간극비 액성한계 순으로 나타



(a) 광양



(b) 부산

그림 6. 간극비를 활용한 기존경험식과 비교

표 11. 간극비를 활용한 회귀모형식과 비교

토질 정수	구분	급회	Nishida	Sowers	Song	Yoon
e ₀	광양	0.264	0.829	1.869	0.970	0.849
	부산	0.019	0.070	0.218	0.055	0.026

났다.

둘째, 원지반 경험식과 준서매립지반 경험식의 유사성을 판단하기 위하여 국내·외 경험식과 비교·분석결과, 함수비와 압축지수와의 관계에서는 근접함을 보였으나 간극비와 액성한계와의 관계에서는 다소 떨어지는 상관성을 보였다.

셋째, 기존에 제안된 국내·외 경험식을 통해 준서매립지반 경험식과의 상관성을 평균제곱예측오차법을 통하여 비교·분석한 결과, 두 지역 모두 함수비의 경우 Herrero(1983)의 경험식과 유사하였으며, 액성한계는 Yamagutshi(1959)와 윤길립(2003), 간극비 역시 윤길립(2003)의 경험식과 유사한 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김동후, "해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 관한 연구", *경희대학교 대학원*, 2002.

- [2] 김상규, 이영휘, 오세봉, *토질역학(이론과 응용)*, 청문각, 2012.
- [3] 부산지방해양항만청, “부산항 신항 옹동지구 1단계 항만배후단지(제1공구) 조성공사 조사 보고서 I (지반조사보고서)”, 2009.
- [4] 부산지방해양항만청, “부산항 신항 옹동지구 1단계 항만배후단지(제1공구) 조성공사 조사 보고서Ⅲ (지반조사보고서)”, 2009.
- [5] 부산지방해양항만청, “부산항 신항 옹동지구 1단계 항만배후단지(제2공구) 조성공사 조사 및 실험보고서 (I) (지반조사/측량)”, 2009.
- [6] 부산지방해양항만청, “부산항 신항 서「컨」(1단계) 항만배후단지 기본 및 실시설계 지반조사 보고서”, 2011.
- [7] 송만순, “우리나라 해성점토의 토질계수의 상관관계”, *한양대학교 대학원*, 1988.
- [8] 여수지방해양수산청, “광양항 배후단지개발 기본 및 실시설계용역 지반조사보고서”, 2004.
- [9] 여수지방해양수산청, “녹동신항 배후부지 지반개발 실시설계 용역 지반조사보고서”, 2005.
- [10] 여수지방해양수산청, “광양항 서측배후단지(1공구)조성공사 조사보고서”, 2007.
- [11] 윤길림, 김병탁, “국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안”, *대한토목학회 논문집*, 제23권, 제3C호, pp.169~176, 2003.
- [12] 현대산업개발, “광양항 동측배후단지(2단계) 조성공사 지반조사 보고서”, 2005.
- [13] ㈜대영엔지니어링, 한라대학교 산업기술연구소, “부산신항 남컨 준설토 투기장 준설토 침강 및 자중압밀 분석 연구”, 2005.
- [14] ㈜포스코건설, ㈜대영엔지니어링, “광양항 중마 일반부두 축조공사 지반조사(개별) 보고서 제3권 연구성과”, 2003.
- [15] Azzouz, Amr S., Krizek Raymond J. and Conrotis Ross B, “Regression Analysis of Soil Compressibility”, *Soil and Foundations*, Vol.16, No.2, pp.19~29, 1976.
- [16] Herrero O. R., “Universal Compression Index Equation: Closure”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.109, No.5, pp.755~761, 1983.
- [17] Mayne, P.W. and Holtz, R. D., “Profiling Stress History from Piezocone Soundings”, *Soil and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.1~13, 1988.
- [18] Nishida, Y. (1956), “A Brief Note on Compression Index of Soil”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation, ASCE, Division*, Vol.82, No.3, pp.1027-1~1027-14, 1956.
- [19] Sowers, G. B., “Introductory Soil Mechanics and Foundations 3rd Edition”, London, The Macmillan Company, Collier-Macmillan Limited, 1970.
- [20] Yamagutchi, H. T .R., “Characteristics of Alluvial Clay”, *Report of Kyushyu Agriculture Investigation Center of Japan*, 5(4), pp.349~358. 1959.