

경기해안 준설매립 해성점토의 토질정수 상관성 분석

Correlation Analysis of Soil Parameters of Dredged and Reclaimed Marine Clay in Gyeonggi Coast

안 수 영* 유 남 재**
An, Soo-Yeong Yoo, Nam-Jae

Abstract

The single regression method was used to analyze the correlation between the compression index with mechanical properties for reclaimed marine clays in the Gyeonggi coast of Korea. As results of performing regression analysis for 62 samples about reclaimed marine clays in the Gyeonggi 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 reclaimed 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.

키워드 : 해성점토, 매립토, 압축지수, 물리적 특성, 상관성 분석
Keywords : *Marine Clay, Reclaimed Soil, Compression Index, Physical Properties, Correlation Analysis*

1. 서론

우리나라는 제한된 면적의 국토로 인하여 산업화와 경제발전에 따른 가용토지의 확보를 위해 매립공사가 활발히 이루어지고 있다. 특히 수출입 산업위주의 국제무역 정책이 추진되어 부산, 인천 등의 항구가 발달하였고, 해안매립 및 준설을 통해 산업단지, 항만단지, 농토를 개발하는 대규모 간척 사업을 지속적으로 시행해왔다.

매립공사에 효과적인 재료로 쇄석, 산토, 모래 등의 양질의 매립재가 필요하나 수급의 부족으로 인하여 현장부근의 퇴적된 해성점토가 활용되고 있다. 해성점토는 연약한 지지력, 과도한 압밀침하

등으로 인하여 형성된 지반이 매우 불안정한 지층으로 조성된다. 이러한 해성점토의 공학적 특성으로 인하여 매립지반 설계시 구조물의 안정과 사용성에 특별한 관리가 요구된다. 그러므로 이러한 해성점토의 물리적, 역학적 특성을 정확히 이해하며 설계 및 시공에 반영하는 것을 중요한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 준설토지반의 물성을 파악하기 위하여 최근 국내 경기해안에 분포해 있는 준설매립지반에 대한 지반조사 자료를 중심으로 통계분석을 수행하여 토질정수간의 상관성 분석을 수행하였다. 한편, 국내외 해성점토 원지반의 특성 및 토질정수의 상관성에 관한 선행연구결과와 준설매립토 지반의 특성을 비교·분석함으로써 준설매립에 의한 지반교란효과에 대한 특성을 조사하였다.

* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

2. 토질특성 분석

2.1 개요

본 연구에서는 표 1의 자료목록에 나타난 바와 같이 경기해안 지역에서 수행된 지반조사보고서와 논문 등을 수집 정리하여 토질특성을 분석하였다. 토질특성은 물리적 특성과 역학적 특성으로 구분하였다. 물리적 특성으로는 함수비, 초기간극비, 액성한계 등에 대하여 분석하였으며, 역학적 특성으로는 압축지수를 중심으로 분석하였다. 경기해안지역의 특성을 분석하기 위해 사용된 자료의 개수는 62개이다.

표 1. D/B 목록

논문 및 보고서명	출처	저자
송도신도시 5,7공구 공유수면매립 실시설계 용역(2004)	인천광역시 경제자유구역청	-
인천신항 배후단지 호안축조 기본및 실시설계 용역 (2009)	인천지방해양항만청	-
인천북항 영종도 준설토 투기장 중고 기본 및 실시설계 용역(2009)	인천지방해양항만청	-
인천항 접근항로 준설 실시설계용역 (2012)	해인이엔씨	-
해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 관한 연구(2002)	경희대학교	김동후
해성점토의 압축지수 예측에 관한 연구 (2011)	충주대학교	신정순
경기해안 해성점토의 물리적 역학적 특성 및 토질정수 상관관계 연구(2007)	전남대학교	우관호

2.2 물리적 특성

(1) 자연함수비

다음 표 2는 자연함수비에 대한 조사자료의 통계처리 결과를 나타낸 것이다. 조사지역인 경기해안지역의 함수비 분포는 29.5~81.7%이며, 평균은 47.4%이고, 표준편차는 11.9이다. 또한 평균에 따른 표준편차의 증가를 보정하기 위한 변동계수는 0.251이다.

표 2. 함수비 분포특성

구분	경기해안지역
최소값	29.500(%)
최대값	81.700(%)
평균	47.376(%)
표준편차	11.868
변동계수	0.251

(2) 액성한계

본 연구에서 조사된 액성한계의 분포특성은 표 3에 나타내었으며, 조사대상지역인 경기해안지역의 액성한계 분포는 최소 11.5%에서 최대 80.8%의 범위를 보이고 있으며, 평균은 42.5%이고, 표준편차는 13.6%이다. 변동계수는 0.321로 함수비의 그것 보다는 큰 모습을 보였다.

표 3. 액성한계 분포특성

구분	경기해안지역
최소값	11.500(%)
최대값	80.800(%)
평균	42.466(%)
표준편차	13.614
변동계수	0.321

(3) 간극비

다음의 표 4는 경기해안지역의 간극비 분포를 나타낸 것이다. 간극비의 경우 0.811~2.540의 범위로 나타났으며, 데이터의 평균은 1.372이고, 표준편차는 0.373이다. 마지막으로 변동계수는 0.272로 앞선 자연함수비와 액성한계의 변동계수에 비해 낮은 값을 보였다. 간극비의 값이 앞선 물성치들 보다 변동 폭이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

표 4. 간극비 분포특성

구분	경기해안지역
최소값	0.811
최대값	2.540
평균	1.372
표준편차	0.373
변동계수	0.272

2.3 역학적 특성

다음의 표 5에는 압밀시험 결과로부터 산정된 압축지수의 분포특성을 나타내었다. 압축지수의 경우 최소값 0.130, 최대값 0.660을 보였다. 또한 0.405의 평균 압축지수를 갖고 있는 것으로 나타났다. 표준편차는 0.122이고, 평균에 따라 증가를 하는 표준편차를 보정기 위한 계수인 변동계수는 0.302로 함수비, 액성한계와 비슷한 수준인 것으로 나타났다.

표 5. 압축지수 분포특성

구분	경기해안지역
최소값	0.130
최대값	0.660
평균	0.405
표준편차	0.122
변동계수	0.302

3. 자료에 대한 상관관계 분석

3.1 물리적·역학적 특성에 대한 상관성 분석

경기해안지역 준설패립자료를 범용통계프로그램 IBM SPSS21을 이용하여 물리적 특성간의 관계, 물리적 특성과 역학적 특성의 관계를 분석하였다. 먼저 토질정수들 간의 상관관계를 파악하기 위해 Pearson의 상관계수를 활용하여 자료들 간의 상관성을 분석하여 표 6에 정리하였다. 분석결과 함수비와 초기 간극비와의 관계가 0.801로 상관성이 가장 양호한 것으로 나타났고, 다음으로 함수비와 압축지수와의 관계가 양호한 것으로 나타났다.

표 6. Pearson의 상관계수

구분	W_n	e_0	LL	C_c
W_n	1	0.801	0.636	0.705
e_0		1	0.518	0.654
LL			1	0.314
C_c				1

3.2 물리적 특성간의 선형회귀분석

물리적 특성을 나타내는 토질정수의 상관관계를 파악하기 위하여 선형회귀분석을 실시하였다. 표 7은 경기해안지역 해성점토의 물리적 특성인 함수비, 액성한계, 초기 간극비에 대한 선형회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 세 가지 분석모두 높은 상관성에 해당하는 결과를 보였으나, 액성한계와 간극비와의 관계는 0.371로 상대적으로 낮은 상관성을 보였다.

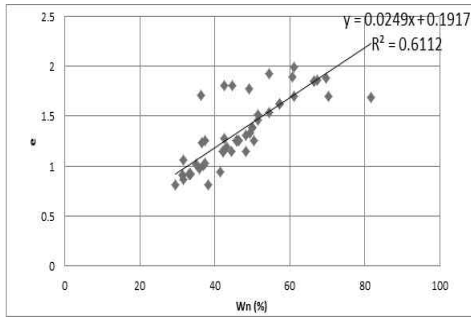
표 7. 토질정수의 선형회귀분석 결과

구분	토질정수	선형회귀식	결정계수
경기 해안	함수비- 간극비	$e_0 = 0.025 W_n + 0.192$	0.611
	함수비- 액성한계	$LL = 0.621 W_n + 11.841$	0.569
	액성한계 -간극비	$e_0 = 0.024 LL - 0.377$	0.371

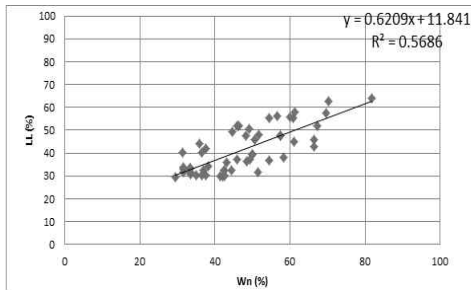
(1) 각 물성치간의 관계

다음의 그림 1은 선형회귀분석결과에 의하여 각 물성치간의 관계를 도시한 결과이다. 함수비 - 간극비의 상관도는 함수비 - 액성한계, 액성한계 - 간극비의 상관도 보다 높게 나타남을 알 수 있다. 현장 또는 실내시험시 함수비의 특성은 $Se = Gw$ 의 관계식에 의하여 직접적으로 간극비의 산정이 가능함을 고려할 때 상관도가 높게 나타남을 알 수 있다. 함수비 - 간극비 관계에 대한 상관성의 분산은 지반의 불포화 상태, 함수비 또는 비중 값의 측정시 실험적 오차에 기인한 것으로 예상할 수 있다.

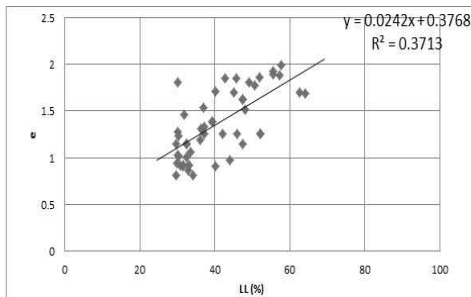
액성한계 - 간극비 또는 함수비 - 액성한계의 상관성에 대해서 세립분이 많은 해성 준설패립토는 간극비와 액성한계가 클 수 있다는 정성적인 경향성을 고려할 때 각각이 비교적 상관성이 있음을 알 수 있다. 그러나 매립 후 방치기간, 매립깊이 등의 현장의 지층형성조건이 현장함수비 또는 간극비의 크기를 결정하기 때문에 그에 대응하는 자료의 분산이 발생한 것으로 판단된다.



(a) 함수비 - 간극비



(b) 함수비 - 액성한계



(c) 액성한계 - 간극비

그림 1. 물리적 특성간의 선형회귀분석

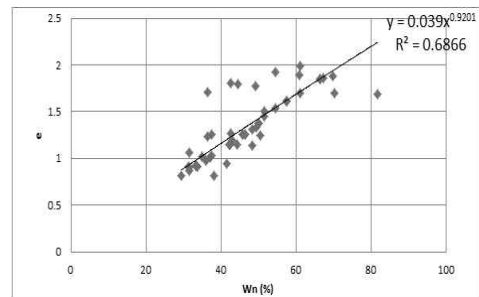
3.3 물리적 특성간의 비선형회귀분석

회귀분석에 있어서 x에 대한 y의 값이 직선 형태로 변화하는 선형회귀분석이 있고, x에 대한 y의 값이 곡선 형태로 변화하는 비선형회귀분석이 있다. 앞서 선형회귀분석을 통해 물리적 특성간의 선형회귀식 및 결정계수에 대해 분석하였는데, 실제 실무에서는 변화의 양상이 곡선의 형태로 변화하는 경우가 많다. 따라서 곡선추정 회귀모형인 비선형회귀분석으로 물리적 특성간의 회귀분석을 수행하였다. 비선형회귀분석에는 여러 가지의 분석방법이 있으며, 그 중 결정계수가 가장 높은 누승형 ($y = a_0 * x^b$)의 방정식을 이용하여 분석을 실시하였다. 다음 표 8은 경기해안지역 해성점토의 물리적 특성인 함수비, 액성한계, 초기 간극비에 대한 비선형회귀분석 결과를 나타낸 것이다.

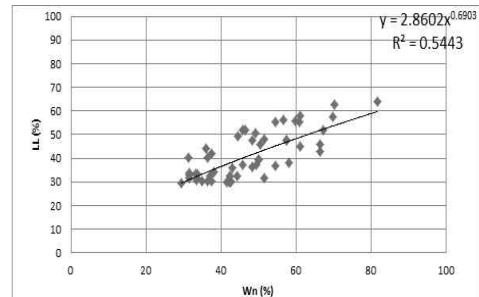
표 8. 토질정수의 비선형회귀분석 결과

구분	토질정수	선형회귀식	결정계수
경기 해안	함수비- 간극비	$e_o = 0.039w_n^{0.920}$	0.687
	함수비- 액성한계	$LL = 2.860w_n^{0.690}$	0.544
	액성한계- 간극비	$e_o = 0.075LL^{0.778}$	0.411

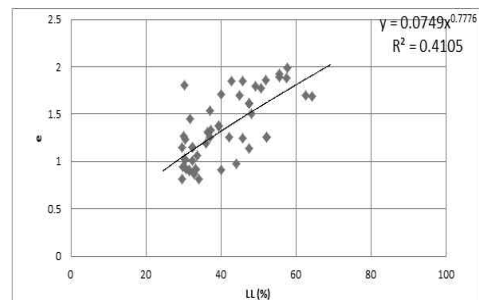
그림 2는 물리적 특성 계수간 비선형회귀분석 결과이다. 그림 1의 선형회귀분석과 비교할 때 상관성을 나타내는 결정계수의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 물리적 특성을 나타내는 토질 변수 간에는 선형적 관계가 있음을 알 수 있다.



(a) 함수비 - 간극비



(b) 함수비 - 액성한계



(c) 액성한계 - 간극비

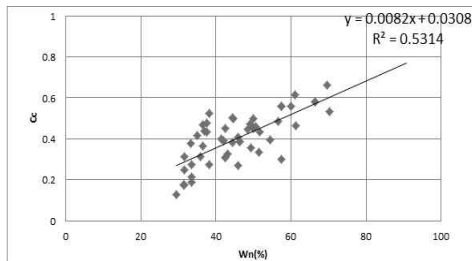
그림 2. 물리적 특성간의 비선형회귀분석

3.4 압축지수와 물리적 특성의 선형회귀분석

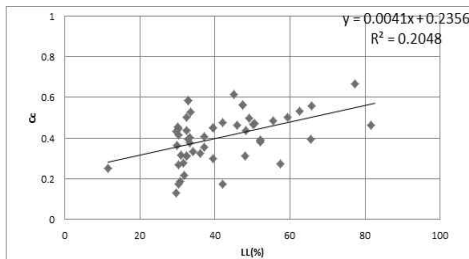
준설패립토의 압축지수와 물리적 특성간의 회귀모형을 구함으로써 각 물성을 활용하여 압축지수를 예측할 수 있다. 다음 표 9는 각 토질정수를 활용하여 압축지수를 예측할 수 있도록 각 물성별 선형회귀식을 나타낸 것이다. 압축지수와 액성한계와의 관계를 제외하고는 비교적 상관성이 있는 결정계수를 보이고 있으나, 그림 3에서 볼 수 있듯이 자료의 분산정도가 다소 크게 나타났음을 알 수 있다.

표 9. 압축지수와 물리적 특성과의 선형회귀분석

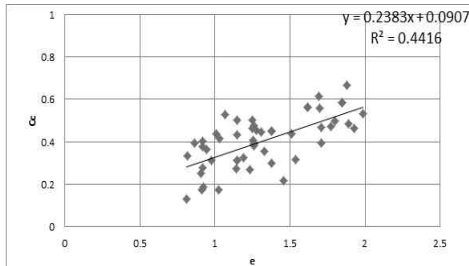
구분	토질정수	선형회귀식	결정계수
경기 해안	압축지수 - 함수비	$C_c = 0.0082 W_n - 0.0308$	0.531
	압축지수 - 액성한계	$C_c = 0.0041 LL + 0.2356$	0.205
	압축지수 - 간극비	$C_c = 0.2383 e_o - 0.0907$	0.442



(a) 압축지수 - 함수비



(b) 압축지수 - 액성한계



(c) 압축지수 - 간극비

그림 3. 압축지수와 물리적 특성의 선형회귀분석

분석결과에 보인바와 같이 압축지수 - 함수비, 압축지수 - 간극비의 상관성이 압축지수 - 액성한계의 상관성 보다 높음을 알 수 있다. 함수비 또는 간극비의 변화에 따른 압축지수 변화가 액성한계 값의 변화보다 직접적으로 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히, 준설토는 매립당시 400~500% 이상의 매우 큰 함수비로 지층을 형성하기 때문에 그의 영향이 큼을 알 수 있다. 따라서 준설패립 점성토와 같이 고함수비의 준설토에 대한 압축지수는 현장함수비 또는 간극비를 사용하여 경험식을 결정하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

4. 선행연구와의 비교

원지반 해성점토의 특성과 비교하기 위하여 기존에 선행되어진 원지반 해성점토 연구결과와 비교·분석 하였다. 원지반 해성점토를 이용한 연구는 국내외를 막론하고 많은 토질공학자들에 의하여 수행되어졌다. 국내외에서 선행된 연구의 경험식, 제안식들은 표 10에 나타내었다.

국내 연구에서는 송만순(1988)이 국내 서·남해안에서 시행된 554개의 자연시료에 대한 토질조사 결과를 가지고 토질 물성치와 압축지수의 상관관계를 검토하여 단일변수의 형태로 압축지수 추정을 위한 경험식을 제안하였고, 윤길림(2003)등은 국내 지역별 연약지반의 1,800여개 시료에 대한 압밀시험 결과를 토대로 단일 및 다중회귀 통계분석을 수행하고 경험상관식을 제안하였다.

국외 연구에서는 다양한 지역을 대상으로 한 경험식이 유도되었으며 단일변수 함수비의 경우 Azzouz(1976), Koppula(1981), Herrero(1983)의 제안식과 비교를 하였고, 액성한계의 경우 Skempton(1944), Yamagutshi(1959), Mayne(1980)의 제안식과 간극비는 Nishida(1956), Cozzolino(1961), Sowers(1970)의 제안식과 비교하였다.

4.1 기존 선행된 제안식과의 비교

기존의 원지반 경험식과 본 연구에서 얻은 준설패립 해성점토 지반의 경험식을 비교·분석 하므로써 원지반의 불교란 시료와 준설패립지반의 교란시료 또는 제성형시료의 압축특성에 대하여 비교할 수 있었다. 그림 4~6은 앞서 제시한 지반변수들을 갖는 기존 원지반 해성점토 경험식들과 본 연구에서 시행되었던 준설패립지반 경험식을 비교하여 도시하였다.

(1) 함수비와 압축지수의 관계

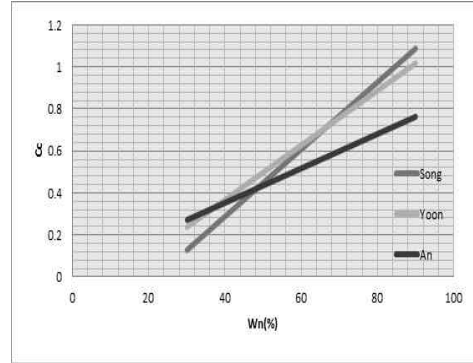
경기해안 62개의 준설패립지반 시료를 분석한 결과 압축지수와 상관성이 높았던 함수비와의 상관관계식은 아래와 같다.

$$C_c = 0.0082(W_n + 3.08) \quad (1)$$

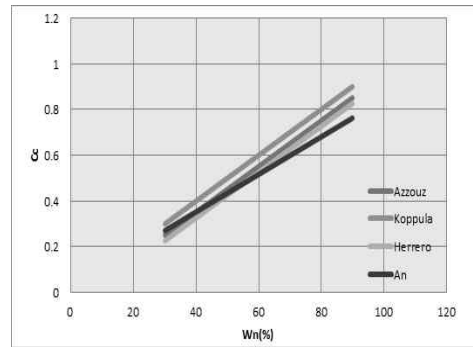
회귀분석결과 얻어진 제안식을 그림 4에 기존의 연구자들로부터 선행된 국내의 원지반 해성점토의 제안식과 비교하였다.

먼저 국내 선행연구자와의 비교에선 본 연구의 압축지수와 함수비의 관계가 선행 연구자인 송만순(1988), 윤길립(2003)의 제안식보다 기울기가 완만함을 알 수 있다. 따라서, 선행연구는 원지반 불교란 시료의 압축성을 나타내는 반면에 본 연구의 준설매립토는 원지반이 준설과정에 의하여 교란된 상태에서 매립되었으므로 교란된 재성형시료의 압축특성을 나타낸다. 교란도가 클수록 압축지수가 감소하는 경향을 그림 4의 비교·분석 결과에서 알 수 있다.

국외 원지반 해성점토 제안식과 위의 식을 비교해보니, 함수비와 압축지수의 관계에선 Azzouz(1976), Koppula(1981), Herrero(1983)의 제안식을 채택하여 비교해 보았는데 위의 식과 그 경향성이 매우 비슷하나 동일한 함수비에 비하여 압축지수가 작음을 알 수 있다.



(a) 국내 기존 제안식과 비교



(b) 해외 기존 제안식과 비교

그림 4. 함수비 - 압축지수

표 10. 국내·외 압축지수에 대한 제안식

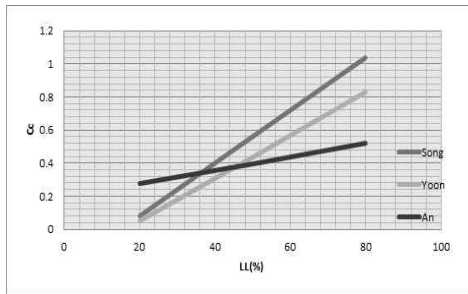
변수	제안자	제안식	적용
$C_c = f(W_n)$	Azzouz et al.(1976)	$C_c = 0.01(W_n - 5)$	모든 점토
	Herrero (1983)	$C_c = 0.01(W_n - 7.549)$	모든 점토
	Song (1988)	$C_c = 0.016(W_n - 22)$	서, 남해안
	Yoon (2003)	$C_c = 0.013(W_n - 11.72)$	서, 남해안
	Koppula (1981)	$C_c = 0.01W_n$	시카고 점토
$C_c = f(LL)$	Yamagutshi (1959)	$C_c = 0.013(LL - 13.5)$	-
	Mayne (1980)	$C_c = (LL - 13)/109$	모든 점토
	Song (1988)	$C_c = 0.016(LL - 15)$	서, 남해안
	Yoon (2003)	$C_c = 0.013(LL - 16.13)$	서, 남해안
	Skempton (1944)	$C_c = 0.007(LL - 7)$	교란된 시료
$C_c = f(e_0)$	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
	Yoon (2003)	$C_c = 0.437(e_0 - 0.281)$	서, 남해안
	Cozzolino (1961)	$C_c = 0.43(e_0 - 0.25)$	브라질 점토

(2) 액성한계와 압축지수의 관계

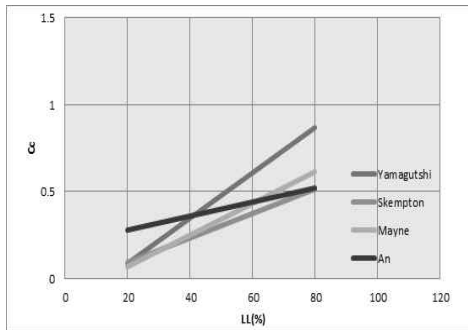
압축지수와 상관성이 높았던 액성한계와의 상관관계식은 아래와 같다.

$$C_c = 0.0041(LL + 47.12) \quad (2)$$

그림 5에 보인바와 같이 국내 원지반 해성점토와 해외원지반 해성점토와의 비교 결과, 본 연구에서 얻어진 원지반의 제안식보다 완만한 경사를 보임을 알 수 있다.



(a) 국내 기존 제안식과 비교



(b) 해외 기존 제안식과 비교

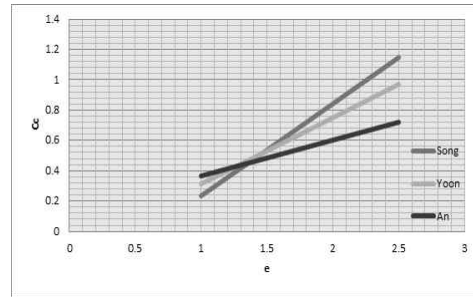
그림 5. 액성한계 - 압축지수

(3) 간극비와 압축지수의 관계

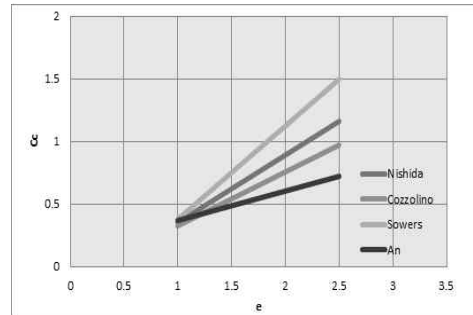
압축지수와 상관성이 높았던 간극비와의 상관관계식은 아래와 같다.

$$C_c = 0.238(e_0 + 531) \quad (3)$$

그림 6의 간극비 - 압축지수의 관계에서는 그림 4의 함수비 - 압축지수의 비교결과와 동일한 분석결과를 얻을 수 있었다.



(a) 국내 기존 제안식과 비교



(b) 해외 기존 제안식과 비교

그림 6. 간극비 - 압축지수

국내 또는 해외 원지반 해성점토의 압축특성과 본 연구를 통해 구한 준설매립토의 압축특성에 대한 상관성 분석 결과를 비교한 결과, 준설과 매립 과정에서 교란이 심한 준설매립토의 경우 원지반에 비하여 압축지수가 작게 나타남을 확인할 수 있었으며, 그의 경향성을 현장함수비 또는 현장간극비로 적절히 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 경기해안의 준설매립지역을 연구대상으로 선정하여 각종 실내시험 및 현장조사 자료를 수집 하였고, 통계분석을 실시하여 얻은 토질정수들을 가지고 선형·비선형 등의 상관성분석을 수행하여 준설매립 해성점토의 물리적·역학적 특성을 파악하였다. 이러한 과정을 거쳐 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 토질정수(함수비, 간극비, 액성한계)간의 상관관계 분석결과, 함수비 - 간극비의 상관관계가 높게 나타났으며 함수비 - 액성한계, 간극비 - 액성한계간의 상관성은 선형적 상관성이 비교적 강하게 나타남을 알 수 있었다.

둘째, 세립분이 많이 함유하고 있는 해성점토는 현장간극비 또는 현장함수비가 증가할수록 액성한계와 압축지수가 증가하는 경향성을 확인하였다.

셋째, 함수비가 큰 준설패립점토의 압축성을 나타내는 압축지수의 경험식을 유도하기 위하여 현장함수비 또는 간극비를 사용하는 것이 적합함을 알 수 있었다.

넷째, 준설패립토의 압축특성에 관하여 원지반 해성점토에 관한 경험식과 본 연구결과 얻은 상관관계식을 비교한 결과, 원지반 해성점토에 비하여 준설패립토의 압축성은 작게 평가되는 경향이 있으며 그 관계식은 현장함수비와 현장간극비로 표현하는 것이 타당함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김동후, “해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 관한 연구”, 경희대학교 대학원, 2002.
- [2] 송만순, “우리나라 해성점토의 토질계수의 상관관계”, 한양대학교 대학원, 1988.
- [3] 신정순, “해성점토의 압축지수 예측에 관한 연구”, 충주대학교 대학원, 2011.
- [4] 우관호, “경기해안 해성점토의 물리적, 역학적 특성 및 토질정수 상관관계 연구”, 전남대학교 대학원, 2007.
- [5] 윤길림, 김병탁, “국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안”, *대한토목학회 논문집*, 제23권, 제3C호, pp.169~176, 2003.
- [6] 인천광역시 경제자유구역청, “송도신도시 5,7공구 공유수면매립 실시설계 용역 지반조사 보고서”, 2004.
- [7] 인천지방해양항만청, “인천신항 배후단지 호안축조 기본 및 실시설계 용역 침강자중압밀 및 원심모형실험 보고서”, 2009.
- [8] 인천지방해양항만청, “인천북항 영종도 준설토 투기장 증고 기본 및 실시설계용역 지반조사 보고서”, 2009.
- [9] 헤인이앤씨, “인천항 접근항로 준설토 실시설계 용역 침강자중압밀 및 원심모형실험 보고서”, 2012.
- [10] 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.
- [11] Cozzolino, V. M., *Statistical forecasting of compression index*, Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1, pp.51~53, 1961.
- [12] Herrero O. R., “Universal compression index equation; Closure”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.5, pp.755~761, 1983.
- [13] Yamaguchi, H. T .R., “Characteristics of Alluvial Clay”, *Report of Kyushyu Agriculture Investigation Center of Japan*, 5(4), pp.349~358, 1959.
- [14] Koppula, S. D., “Statistical estimation of compression index”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.4, No.2, pp.68~73, 1981.
- [15] Mayne, P.W. and Holtz, R. D., “Profiling stress history from piezocone soundings”, *Soil and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.1~13, 1988.
- [16] Nishida, Y., “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.
- [17] Skempton, A.W., “Notes on compressibility of clays”, *Journal of Geological Society*, London, pp.119~135, 1944.
- [18] Sowers, G. B., *Introductory Soil Mechanics and Foundations*, 3rd Edition, London, The Macmillan Company, Collier-Macmillan Limited, 1970.