

해성점토의 지반 강도정수 상관성 분석

Analysis on the Relationship of Geotechnical Strength Parameters in the Marine Clay

허 열[†] · 권 선 옥¹⁾ · 이 처 근²⁾ · 배 우 석³⁾

Heo, Yol · Kwon, Seonwuk · Lee, Cheokeun · Bae, Wooseok

ABSTRACT : The physical characteristics of the marine clay in the Korean Peninsula, specifically Pusan areas of the south coast of Korea, were previously studied and reliable data from harbor construction projects were used for the relationship analysis of geotechnical strength parameters. The sample of marine clay classified to ML, MH, CL, CH and ML-CL from USCS were included for the analysis while the samples classified to SC were excluded in order to raise the degree of data analysis. Geotechnical strength properties, such as undrained shear strength, sensitivity ratio, and effective friction angle were analyzed and evaluated using the data obtained from unconfined compression test, triaxial compression test and field vane test. Abnormal values were extracted through statistical analysis. Moreover, the reliability of the results was improved by performing the evaluation of disturbance. Linear regression analysis was used for the relationship analysis, between undrained shear strength and depth. The relationship equation between undrained shear strength and depth was derived from the analysis of unconfined and triaxial compression test data of samples obtained at same location. Consequently, The relationship between depth and undrained shear strength is $S_u = 0.015148D + 0.04624$ and the undrained shear strength derived from the triaxial compression test was estimated to be about 1.26 of derived from the unconfined compression test.

Keywords : Physical properties, Marine clay, Linear regression, Relationship, Reliability

요 지 : 한반도 남해안 부산지역의 해성점토에 대하여 물리적 특성을 사전 파악하고, 지반 강도정수의 상관성을 분석하기 위하여 비교적 신뢰성이 크다고 할 수 있는 대형 항만공사 자료를 활용하였다. 분석자료의 정도를 높이기 위하여 해성점토만을 대상으로 하였다. 통일분류법으로 ML, MH, CL, CH, ML-CL에 해당되는 자료는 분석대상에 포함하였으며, SC로 분류되는 자료는 분석대상에서 제외하였다. 지반강도 특성에 대한 분석은 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장베인시험 결과에 의한 비배수 전단강도, 예민비, 유효마찰각에 대하여 분석하였으며, 자료분석시 통계분석을 통하여 이상치를 제거하였으며, 또한, 교란도분석을 수행하여 결과에 대한 신뢰성을 높이고자 하였다. 상관관계 분석에서는 선형회귀분석을 수행하여 깊이에 따른 비배수전단강도의 상관관계를 검토하였다. 또한, 동일한 위치에서 수행된 일축 및 삼축압축시험 자료를 분석하여 비배수전단강도의 상관관계식을 도출하였으며, 그 결과 심도와 비배수전단강도는 $S_u = 0.015148D + 0.04624$ 의 관계를 보이며, 삼축압축시험에서 구한 비배수 전단강도가 일축압축시험에서 구한 비배수전단강도의 1.26배 정도 크게 평가되었다.

주요어 : 물리적 특성, 해성점토, 선형회귀분석, 상관관계분석, 교란도 분석

1. 서 론

국내 서, 남해안 해성지반은 지형적인 특성으로 연약한 해성퇴적 점토로 이루어진 경우가 대부분이며 내륙의 하천 인근지역에도 광범위한 점성토 지반이 형성되어 있다. 이 중 상당 부분은 과압밀비가 2 이하인 정규압밀 또는 약간 과압밀된 상태에 있으며 자연함수비와 역성한계가 유사한 것으로 보고되고 있다(조성민, 1998). 이들 점성토 지반은 큰 압축성과 작은 전단강도 등 공학적으로 취약한 특성을 가지고 있어 과거에는 이러한 연약지반의 이용을 회피하여

왔으나 최근에는 대형공사의 등장으로 공학적으로 불리한 조건에 있는 이들 지반에서의 건설 공사와 해안 매립 사업이 증가하고 있는 실정이다.

현재도 연약지반 구간을 통과하는 고속도로나 철도가 지속적으로 건설되고 있으며, 서해안과 남해안에서는 바다를 매립하여 부지를 조성해서 항만이나 공항 또는 공업단지를 건설하는 대규모 건설공사들이 진행되고 있다.

이러한 대규모 건설공사로 인해 우리나라의 연약지반 처리 관련기술 수준은 각 분야에서 많은 발전이 이루어져 왔다. 그러나 아직도 개선이 요구되는 분야가 많이 존재하고

† 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail : heoyol@yahoo.co.kr)

1) 정희원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정희원, (주)나노지오이엔씨 대표이사

3) 정희원, (주)나노지오이엔씨 기술연구소 소장

있으며, 특히 정밀한 지반조사의 필요성이 다른 종류의 공사보다도 상대적으로 중요한 지반조사상의 문제점은 점차 개선되어야 할 문제점으로 지목되고 있다. 체계적이고 종합적인 지반조사는 보다 합리적인 연약지반 개량공법의 선정, 설계 및 시공을 가능케 함으로써 안정성 증가는 물론 경제적으로도 막대한 예산 절감 효과를 얻을 수 있다. 따라서 연약지반의 경제적이고 효율적인 처리를 위해서는 체계적이고 정밀한 지반조사를 통하여 대상지반의 공학적 특성을 사전에 정확히 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 전국 규모의 종합 지반조사와 각종 지반조사 결과의 수집, 분석 및 정리가 미흡하여 연약지반의 분포현황 및 특성파악이 불충분하였다.

이러한 한계성의 극복을 위하여 송만순(1988)이 우리나라 서남해안에서 시행된 토질조사 결과를 토대로 554개의 자연시료에 대한 토질 물성치와 압축지수의 상관관계를 검토하여 단일변수의 형태로 압축지수 추정을 위한 경험식을 제안하였다. 장정욱 등(2001)은 경남해안지역의 압축지수가 Terzaghi & peck의 제안식을 적용할 수 없음을 검증하고 초기간극비의 상관식을 제안 하였으며, 김동후 등(2003)은 대형 항만공사 자료를 이용하여 회귀모형을 산정하고 물리적 특성과 압축지수의 상관성을 나타내는 최적의 회귀모형은 토질정수의 누승식 또는 지수승식 형태의 비선형회귀식을 주장하였다. 또한 윤길림 등(2003, 2004)은 1800여개 시료에 대한 압밀시험 결과를 근거로 단일 및 다중회귀 통계분석을 수행하고 경험상관식을 개발하였다. 배우석 등(2009)은 왜곡된 자료의 정규성을 확보하기 위해 Box-Cox 변수변환 후 단순 회귀모형의 적합성을 검증하여 광양점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 대한 회귀모형식을 제안하였다.

본 논문에서는 대형 항만공사가 시행되어 비교적 많은 지반조사결과가 있는 지역이면서 국내 주요항만이 위치한 남해안의 대표적 항만지역인 부산항 및 부산신항 지역을 대상지점으로 선정하여 각종 실내시험 및 현장조사 자료를 분석하여 부산지역 해성점토의 강도특성을 파악하였다. 본 연구에서 강도특성 분석은 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장 배인시험 결과에 의한 비배수전단강도, 예민비, 유효마찰각에 대하여 분석하였고, 깊이에 따른 비배수전단강도의 상관관계 등에 대한 분석을 실시하였다.

2. 물리적 특성

2.1 개요

본 연구에서는 부산지역의 지반조사보고서(부산신항만 주식회사, 1997, 1999; 해양수산부, 1997; 부산지방해양수산

청, 1999, 2002, 2003; 현대건설, 2000, 2003; 대림산업, 2002; 포스코건설, 2002, 2003; 동아지질, 2003; 삼성물산, 2003; 한국컨테이너부두공단, 2003)를 정리하여 각 지역의 깊이에 따른 토질특성을 분석하였다. 토질특성은 물리적 특성과 역학적 특성으로 구분하여 분석하였으며, 역학적 특성은 강도 특성을 중심으로 평가하였다.

분석자료의 정도를 높이기 위하여 원칙적으로 해성점토만을 대상으로 하였으며, 지역별로 시험결과들을 비교, 분석하여 시험 값이 전반적인 경향에서 크게 벗어나는 자료는 분석대상에서 제외하였다. 통일분류법으로 ML, MH, CL, CH, ML-CL에 해당되는 시험자료는 분석대상에 포함하였으며, SC로 분류되는 자료는 분석대상에 포함하지 않았고, 깊이는 불교단시료 채취 심도의 중간 값을 사용하였다. 부산지역 점성토의 물리적 및 역학적 특성분석에 이용된 자료의 수는 표 1과 같다.

2.2 자연함수비

부산지역 점토의 자연함수비는 그림 1과 같이 18.4~129.1%의 범위에 분포하고, 평균 함수비는 58.05%로 평가되었다. 깊이가 증가함에 따라 함수비가 약간 감소하는 경향을 나타내었으며, 깊이 35m 정도 이하에서는 자료는 대부분 평균 함수비보다 작은 값을 나타내고 있다.

2.3 전체단위중량 및 초기간극비

전체단위중량은 1.323~2.116tf/m³의 범위로 깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났지만, 결정계수는 매우 작은 것으로 평가되었다(그림 2). 부산지역의 경우 깊이 30m 정도 이하의 토층에서는 평균 이상의 전체단위중량을 보이고 있다. 초기간극비는 압밀시험, 일축압축시험, 삼축압축시험시 측정된 결과를 이용하였으며, 그림 3에 나타낸 바와 같이 초기간극비는 0.61~2.82의 범위에 분포하며, 평균 초기간극비는 1.639로 분석되었다.

2.4 액성한계와 소성지수

전반적으로 깊이에 따라 일정한 경향을 보이고 있으며,

표 1. 분석에 사용된 자료수

구분		최대 자료수
물리적 특성		1217
일축압축시험		857
삼축압축시험	UU 시험	737
	CU 시험	63
현장배인시험		457

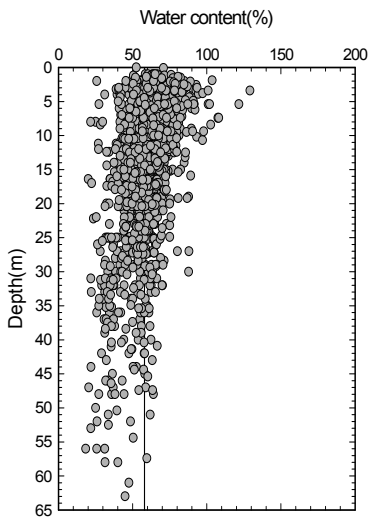


그림 1. 깊이에 따른 자연함수비

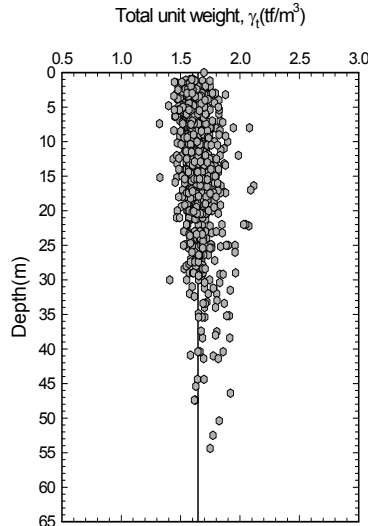


그림 2. 깊이에 따른 전체단위중량

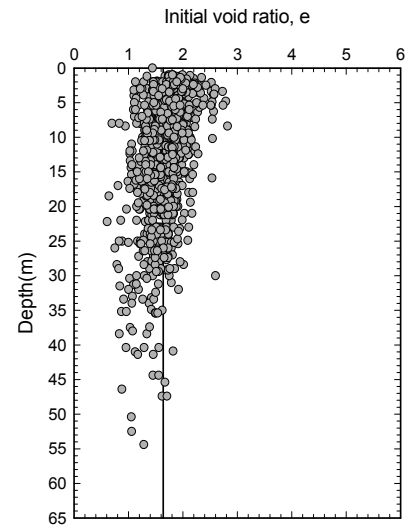


그림 3. 깊이에 따른 초기간극비

전반적으로 액성한계 50%이상으로 압축성과 팽창성이 큰 고소성점토에 속한다고 할 수 있다. 부산지역 점토의 액성한계는 24.5~118.7%로 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 평균 액성한계는 64.06%를 보이고 있다.

소성지수는 전반적으로 분포범위가 크며, 깊이에 따라 뚜렷한 경향을 나타내지 않으며, 자료의 분산이 크다는 것을 알 수 있다. 부산지역 시료의 경우에도 소성지수의 범위는 3.1~77.9%의 범위에 분포하고 있고, 평균 소성지수는 37.3%를 나타내고 있다. 부산지역 점토의 82% 정도가 통일분류법으로 CH로 분류되며, 15% 정도가 CL로 분류되고, 약 3% 정도가 ML-CL, ML, MH로 분류되는 것으로 나타났다.

2.5 활성도

부산지역 시료의 2 μ m 이하의 점토입자 함유율은 3~61.4%로 평균 점토입자 함유율은 35.23%를 나타내었으며, 그림

6에 나타난 바와 같이 활성도는 0.43~7.6의 범위로 평균 1.09를 나타내어 대부분의 시료가 활성도 1.25 이하의 보통 활성도를 보이고 있다.

3. 지반강도특성 분석

3.1 일축압축강도

그림 7은 불교란 시료에 대한 일축압축시험결과와 깊이에 따른 일축압축강도 q_u 의 변화를 나타낸 것으로 일축압축강도는 깊이에 따라 비교적 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 자료의 분산이 크고, 일부 이상치로 인하여 결정계수가 작게 평가되어 상관성이 크지 않은 것으로 분석되었다.

깊이에 따른 일축압축강도의 선형관계식은 $q_u = 0.02657D$

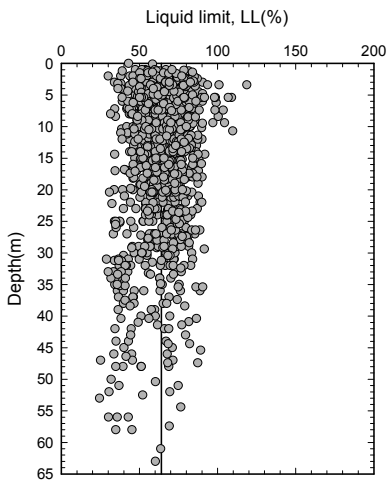


그림 4. 깊이에 따른 액성한계

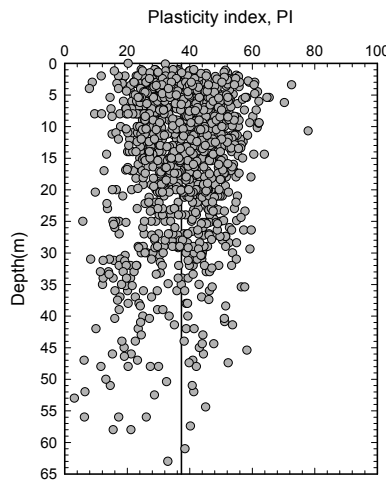


그림 5. 깊이에 따른 소성지수

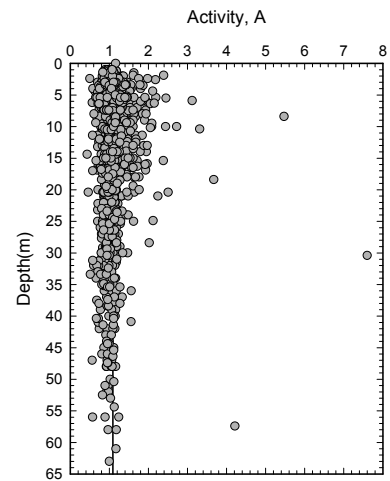


그림 6. 깊이에 따른 활성도

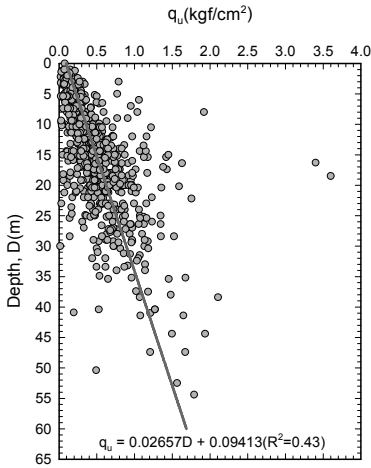


그림 7. 깊이에 따른 q_u

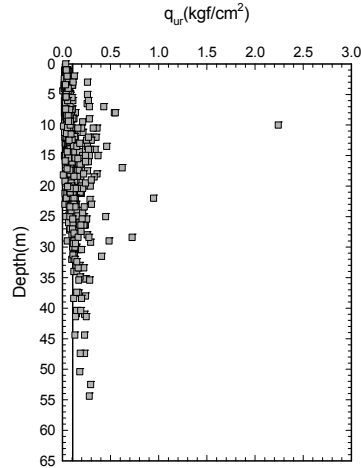


그림 8. 깊이에 따른 교란시료의 q_u

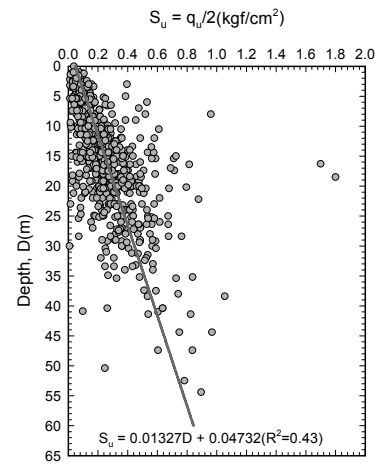


그림 9. 깊이에 따른 비배수전단강도($q_u/2$)

+0.09413으로 0.02657의 기울기로 증가하며, 결정계수는 0.43으로 분석되었고 평균 일축압축강도는 0.459kgf/cm^2 인 것으로 나타났다. 그림 8은 교란시료에 대한 일축시험결과로 깊이에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내고 있지만, 불교란시료의 일축압축강도에 비해서는 증가경향이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 교란시료의 일축압축강도는 $0.005 \sim 2.24\text{kgf/cm}^2$ 로 분포범위가 크며, q_{ur} 의 평균값은 0.107kgf/cm^2 으로 평가되었다.

그림 9는 일축압축시험 결과 비배수 전단강도($S_u = q_u/2$)의 분포를 나타낸 것으로 깊이와 비배수전단강도(S_u)와의 선형관계식은 $S_u = 0.01327D + 0.04732 (R^2 = 0.43)$ 으로 깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 분석되었으며, $0.008 \sim 1.8\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로 나타났다.

3.2 예민비

그림 10은 일축압축시험결과 깊이에 따른 예민비를 나타낸 것으로 예민비는 $0.2 \sim 19.04$ 의 범위에 분포하고 있어 자

료의 분산이 큰 것으로 나타났으며, 평균 예민비는 5.12로 Roenqvist의 분류에 의하면 매우 예민한 점토에 속한다고 할 수 있다.

3.3 변형계수와 파괴시 변형률

그림 11은 일축압축시험 결과로부터 산정된 변형계수 E_{50} 의 분포를 나타낸 것으로 전반적으로 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 변형계수는 $0.38 \sim 95.37\text{kgf/cm}^2$ 의 범위에 분포하고 있으며, 평균 변형계수 19.97kgf/cm^2 을 나타내었다. 변형계수는 시료의 교란정도에 따라 크게 영향을 받으므로 분산의 범위가 크게 나타났으며, 깊이와 변형계수와의 선형관계식은 $E_{50} = 0.8937D + 6.83 (R^2 = 0.29)$ 로 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

파괴시 변형률은 시료의 교란도 특성파악에 이용되며, 일반적으로 자연시료의 강도시험시 파괴변형률은 6% 이내이며, 파괴시 변형률이 6% 이내의 시료를 보통등급으로 분류하며, 양호한 자연시료의 경우 파괴변형률의 범위는 $2 \sim 4\%$

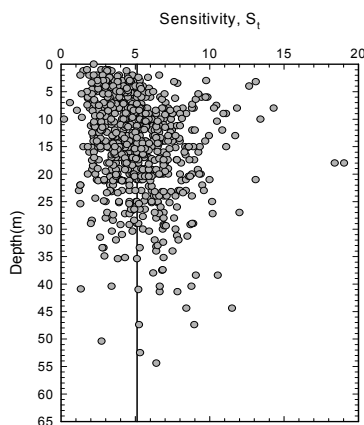


그림 10. 깊이에 따른 예민비

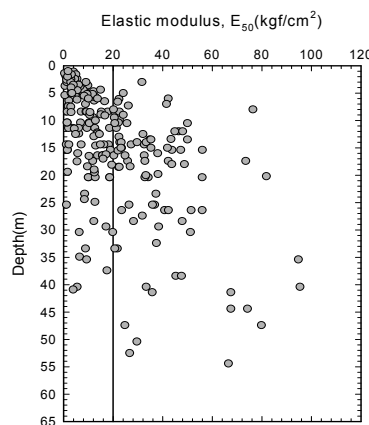


그림 11. 깊이에 따른 변형계수

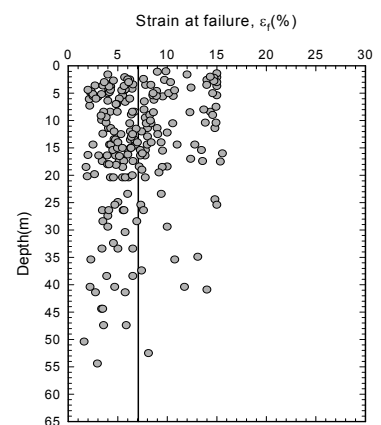


그림 12. 깊이에 따른 파괴시 변형률

표 2. 일축압축시험에 의한 교란도분류

파괴변형률(%)	<2	2~4	4~6	6~15	> 15
시료등급	1등급 (매우양호)	2등급 (양호)	3등급 (보통)	4등급 (불량)	5등급 (매우불량)

이다. Lunne 등(1997)은 일축압축 파괴변형률에 의한 시료 등급을 표 2와 같이 5등급으로 구분하였다.

그림 12는 일축압축시험결과 깊이에 따른 파괴시 변형률의 변화를 도시한 것으로 깊이에 따라 파괴시 변형률이 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 파괴시 변형률은 1.61~15.6%의 범위에 분포하며, 평균 7.07%를 나타내었다. 전반적으로 보면 변형률 6% 이상의 시료가 다수 있는 것으로 조사되었다. 따라서, 일축압축시험에 의한 비배수 전단강도 산정시 시료의 교란도를 고려하였다.

3.4 비배수 전단강도와 유효마찰각

그림 13은 비압밀비배수(UU) 삼축압축시험에서 측정된 비배수 전단강도 C_{uu} 의 깊이에 따른 변화를 도시한 것이다. 측정결과 자료의 분산도가 비교적 크게 나타나고 있지만 깊이가 깊어짐에 따라 비배수 전단강도가 증가하며, 0.03~1.3kgf/cm²의 범위에 분포하고, 평균값은 0.288kgf/cm²로 나타났다. 깊이와 비배수 전단강도(C_{uu})의 선형관계식은 $C_{uu} = 0.01666D + 0.06039 (R^2 = 0.59)$ 로 분석되었다.

그림 14는 압밀비배수(CU) 삼축압축시험 결과 산정된 깊

이에 따른 유효마찰각의 분포를 나타낸 것으로 측정결과와 분산이 다소 있지만 깊이에 따라 비교적 일정한 경향을 보이고 있으며, 유효 내부마찰각 ϕ' 의 범위는 10.8~36.4° 정도를 나타내고 있다.

표 3은 이상치 제거 전후의 유효마찰각을 나타낸 것으로 평균 유효 내부마찰각 ϕ' 은 23.01°로 나타났다. 이상치 제거 후 유효마찰각은 23.19°로 나타났으며, 정규성 검정결과 유의확률이 유의수준보다 크게 평가되어 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다.

3.5 강도증가율

강도증가율은 Skempton의 제안식, Hansbo 제안식과 ϕ' 를 이용하는 방법으로부터 산정하였다. Skempton의 제안식(1957)은 소성지수 PI를 이용하는 방법으로 $m = S_u/P = 0.11 + 0.0037PI$ 이며 소성지수가 10보다 큰 경우에 적용하는 것으로 제안하고 있다. Hansbo 제안식(1994)은 액성한계를 이용하는 방법으로 $m = S_u/P = 0.45LL$ 이며 액성한계가 40 이상인 경우에 적용하는 것으로 제안되었다. 또한 유효마찰각(ϕ') 방법(Das, 1997)은 $m = \sin\phi' / (1 + \sin\phi')$ 로 압밀비배수(CU)

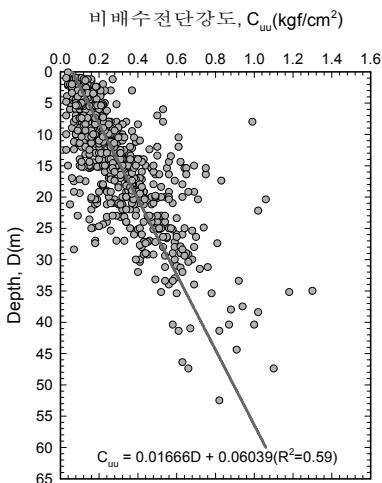


그림 13. 깊이에 따른 비배수전단강도(C_{uu})

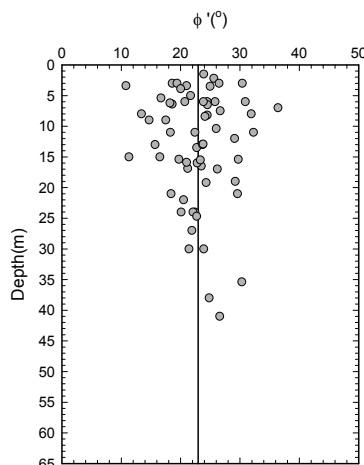


그림 14. 깊이에 따른 유효마찰각

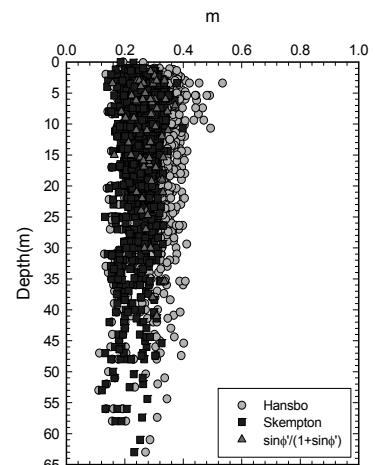


그림 15. 깊이에 따른 강도증가율

표 3. 이상치 제거 전후의 유효마찰각에 대한 통계분석

구분	평균(°)	표준 편차	변동계수	범위(°)	95% 신뢰구간	
					하한	상한
원시험자료	23.0121	5.0386	0.2190	10.8~36.4	21.7431	24.2810
이상치 제거 후	23.1877	4.3308	0.1868	13.4~32.3	22.0689	24.3064

표 4. 이상치 제거 전후의 강도증가율에 대한 통계분석

제안식		평균 강도증가율, m
Skempton	$m = S_u / P = 0.11 + 0.0037II$	0.248
Hansbo	$m = S_u / P = 0.0045LL$	0.288
ϕ' 방법	$m = \sin\phi' / (1 + \sin\phi')$	0.278

삼축압축시험결과를 이용하는 방법이다. 산정 결과 깊이에 따른 강도증가율의 변화를 그림 15와 표 4에 나타내었다.

전체적으로 보면 깊이에 따른 강도증가율은 일정한 경향을 보이고 있으며, 각 방법에 의한 평균 강도증가율 m은 0.248(Skempton), 0.288(Hansbo), 0.278(ϕ' 방법)로 평가되었다. 3가지 방법 중에서는 Hansbo의 제안식에 의한 방법이 가장 크게 평가되는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 점토가 대부분 액성한계 50% 이상의 고소성을 나타내기 때문이며, Hansbo의 방법은 일반적으로 저소성 점토에 대해서는 과소평가되기 때문이다. 그림 15로부터 깊이에 따른 강도증가율은 측정결과와 분산이 다소 존재하지만 깊이에 따라 비교적 일정한 경향을 보이고 있다.

표 4는 Skempton, Hansbo, ϕ' 방법에 의한 평균강도증가율을 나타낸 것이다. 이 값에 대한 통계분석 결과 이상치 제거 후의 평균 강도증가율은 0.2674이며, 95% 신뢰구간은 0.2652~0.2696으로 분석되었으며, 이상치 제거 후 자료에 대한 정규성 검정결과 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다

3.6 현장베인시험 결과

그림 16은 불교란 지반에 대한 현장베인시험에서 측정된 깊이에 따른 비배수전단강도의 분포를 나타낸 것이고, 그림 17은 현장베인시험에서 측정된 비배수전단강도 $S_{u,vane}$ 를

Bjerrum(1972)이 제안한 방법에 의해 보정한 수정 비배수전단강도 $S_{u,corrected,vane}$ 의 분포를 나타낸 것이다. 이로부터 베인시험 결과 비배수 전단강도와 수정 비배수전단강도는 측정결과에 다소 분산이 있지만, 깊이가 증가함에 따라 비교적 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

깊이에 따른 비배수 전단강도의 선형관계식은 $S_{u,vane} = 0.01768D + 0.08408$ ($R^2 = 0.44$) 로 나타났다. 현장베인시험 결과로부터 구한 평균 비배수 전단강도는 0.256kgf/cm^2 로 일축압축시험결과(0.230kgf/cm^2)보다 11.3% 정도 크게 나타났다지만, 비압밀비배수 삼축압축시험결과(0.288kgf/cm^2)에 비해서는 11.1% 정도 작게 측정되었다.

그림 17로부터 깊이에 따른 수정 비배수전단강도의 관계식은 $S_{u,corrected,vane} = 0.01855D + 0.03649$ 로 나타났으며, 현장베인시험 결과 수정비배수 전단강도의 평균값은 0.209kgf/cm^2 으로 일축압축시험결과(0.230kgf/cm^2), UU 시험 결과(0.288kgf/cm^2)보다 작게 평가되었다.

그림 18은 현장베인시험 결과 예민비를 나타낸 것으로 예민비는 1.04~20.07의 범위에 분포하고 있으며, 예민비의 평균값은 4.14로 일축시험에서 구한 예민비(5.12)보다 19% 정도 작은 것으로 나타났으나, Roenqvist의 분류에 따르면 매우 예민한 점토로 분류된다.

4. 상관관계 분석

4.1 토질정수사이의 상관성분석

본 장에서는 분석대상 자료로부터 물리적 특성에 대한 상관 관계, 깊이에 따른 비배수전단강도의 상관성분석을 실시하였으며, 본 분석에 사용된 통계소프트웨어는 시카고대학에서 개발된 SPSS version 10.0(박성현 등, 1999)을 이용

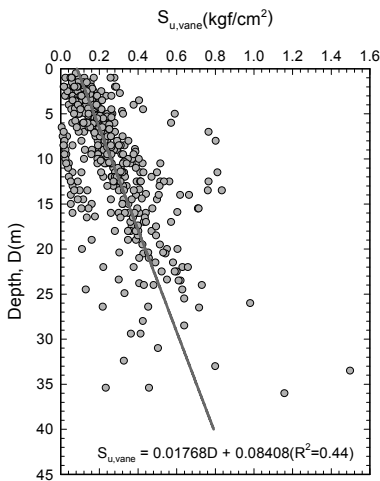


그림 16. 깊이별 $S_{u,vane}$

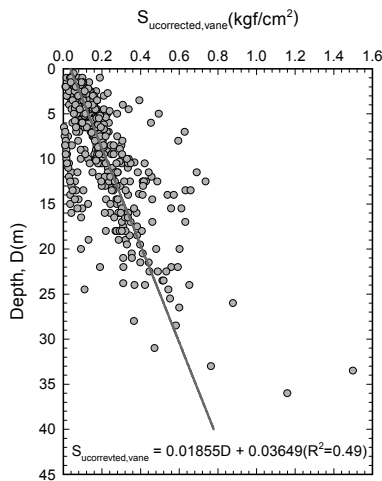


그림 17. 깊이별 $S_{u,corrected,vane}$

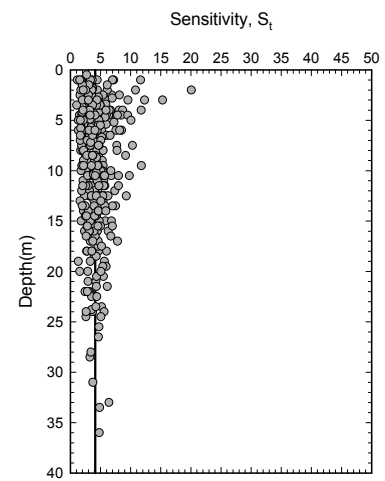


그림 18. 베인시험결과 깊이별 예민비

표 5. 토질정수사이의 Pearson의 상관계수

상관계수	W_n	γ_t	e	LL	PL	$q_u/2$	E_{50}	C_{uu}
W_n	1	-0.742	0.925	0.724	0.544	-0.430	-0.364	-0.430
γ_t		1	-0.879	-0.527	-0.405	0.439	0.376	0.443
e			1	0.623	0.462	-0.446	-0.413	-0.458
LL				1	0.731	0.0008	0.176	-0.031
PL					1	-0.068	0.152	-0.082
$q_u/2$						1	0.868	0.869
E_{50}							1	0.737
C_{uu}								1

하였다. 회귀분석에 앞서 각 토질정수사이의 상관성 분석을 실시하여 회귀식을 구하지 않고도 두 변수가 얼마나 밀접한 관계에 있는가를 추정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서도 부산지역에서 분석된 원자료를 대상으로 하여 물리적 및 역학적 특성을 나타내는 토질정수들에 대한 상관성분석을 실시하였으며, 그 결과 Pearson의 상관계수(Rodgers 등, 1988)를 표 5에 나타내었다.

4.2 깊이에 따른 비배수 전단강도에 대한 선형회귀분석

깊이에 따른 비배수 전단강도에 대한 상관성을 분석하기 위하여 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장베인시험에서 측정된 자료를 대상으로 선형회귀분석을 실시하였다. 단, 일축압축시험 자료의 경우에는 교란도 분석을 통하여 파괴시 변형률이 6% 이내로 시료등급이 보통인 자료를 대상으로

하였으며, 불가피하게 파괴시 변형률이 없는 자료인 경우에는 동일깊이에서 측정된 자료를 근거로 하여 편차가 큰 자료를 제외한 자료를 분석대상으로 하였다.

그림 19는 깊이에 따른 일축압축강도의 선형회귀분석 결과를 나타낸 것으로 측정결과와 자료의 분산도가 다소 크게 나타나고 있지만 깊이가 깊어짐에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이상치를 제거한 상태에서 결정계수는 0.692로 나타났다. 그림 20은 일축압축시험에서 산출된 비배수전단강도에 대한 회귀분석결과로 일축압축강도 분석결과와 유사한 양상을 나타내며, 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다.

그림 21은 UU 삼축압축시험으로부터 얻은 비배수전단강도를 깊이에 따른 분석결과와 깊이가 증가함에 따라 0.01 ~ 1.10kgf/cm²의 범위로 분포함을 알 수 있으며, 결정계수는

표 6. 깊이에 따른 비배수전단강도에 대한 선형회귀분석결과

관계	선형 회귀식	결정계수
깊이-일축압축강도	$q_u = 0.02779D + 0.04999$	0.692
깊이-비배수전단강도($q_u/2$)	$S_u = 0.01397D + 0.02410$	0.694
깊이-비배수전단강도(C_{uu})	$C_{uu} = 0.01644D + 0.05712$	0.749
깊이-수정비배수전단강도($S_{u,cor,vane}$)	$S_{u,cor,vane} = 0.01774D + 0.04510$	0.734
깊이-비배수전단강도(일축, 삼축, 베인)	$S_u = 0.015148D + 0.04624$	0.691

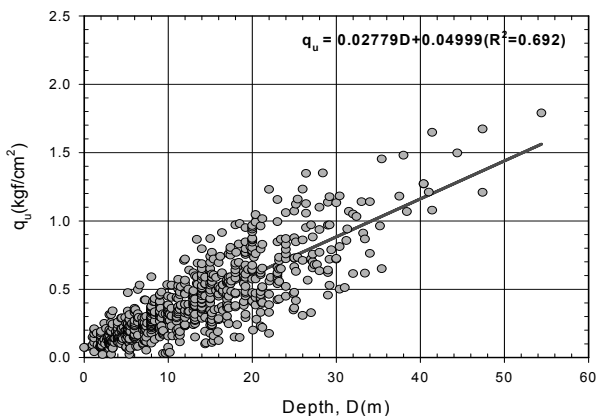


그림 19. 이상치제거 후 깊이-일축압축강도

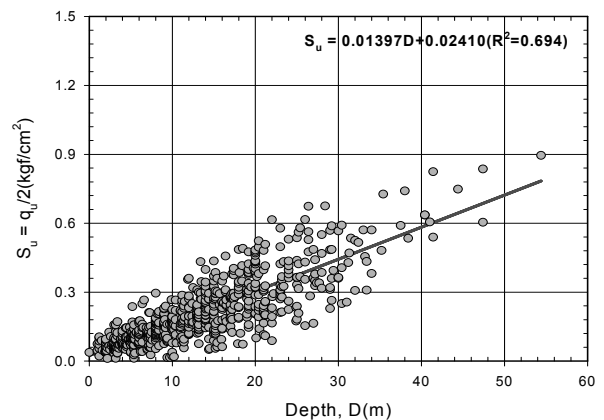


그림 20. 이상치제거 후 깊이-비배수전단강도($q_u/2$)

0.749로 분석되었다.

그림 22는 베인전단시험을 통해 얻은 수정비배수전단강도를 회귀분석한 결과로 깊이가 증가함에 따라 0.01~0.77

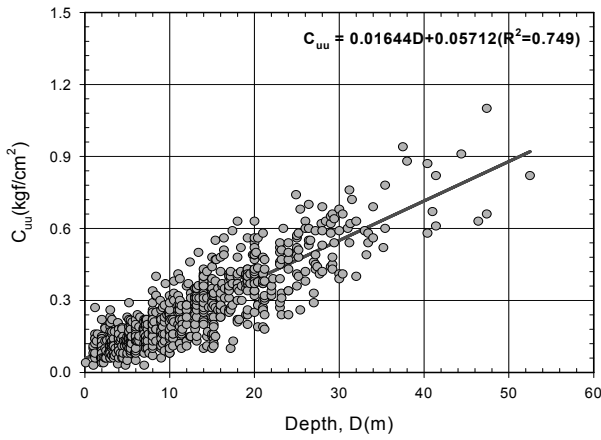


그림 21. 이상치제거 후 깊이-비배수전단강도(C_{uu})

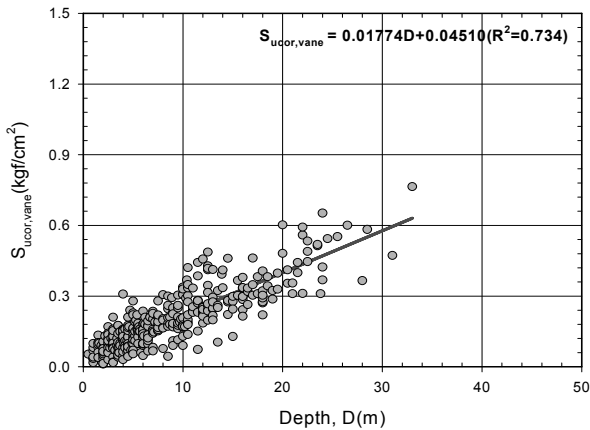


그림 22. 이상치제거 후 깊이-비배수전단강도($S_{uucor,vane}$)

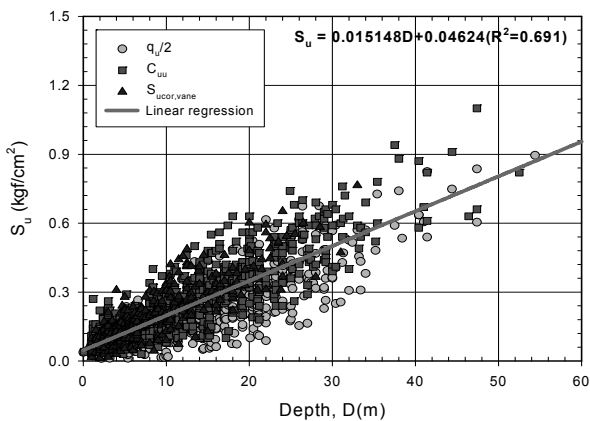


그림 23. 이상치제거 후 깊이-비배수전단강도

표 7. 비배수전단강도비에 대한 통계분석 결과

평균	중위수	표준편차	분산	변동계수	왜도	첨도	95% 신뢰구간	
							하한	상한
1.2645	1.2214	0.3273	0.1071	0.2588	0.222	-0.082	1.2382	1.2909

kgf/cm²의 범위로 분포하며, 결정계수는 0.734로 나타났다. 그림 23은 일축압축시험, UU삼축압축시험, 현장베인시험을 통해 얻은 비배수 전단강도를 깊이별로 종합하여 하나의 회귀분석방정식을 나타낸 것으로 결정계수는 0.691로 나타났다.

표 6은 깊이별 비배수 전단강도에 대한 선형회귀분석을 실시하여 얻은 방정식과 결정계수를 나타낸 것으로 UU삼축압축시험에 의한 비배수 전단강도에 대한 회귀분석이 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 3가지 시험결과를 모두 통합하여 회귀분석한 결정계수와 각각의 시험에 대한 결정계수를 비교해 보면 일축압축시험에 의한 비배수 전단강도에 대한 회귀분석결과 결정계수는 통합결과의 결정계수와 거의 같게 평가되었다.

4.3 일축압축 및 UU삼축 시험결과 비배수전단강도의 관계

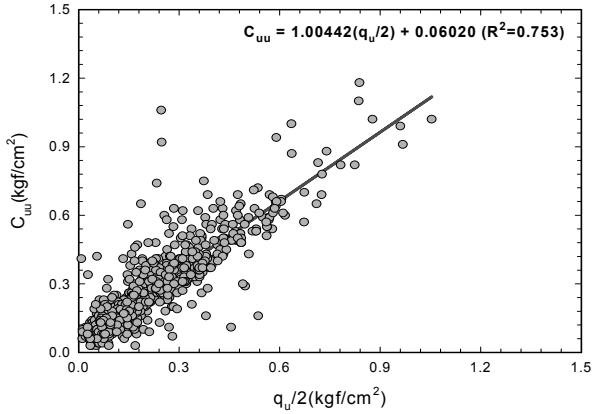
일반적으로 UU삼축압축시험에서 구한 비배수전단강도가 동일 시료에 대한 일축압축시험에서 구한 비배수전단강도보다 약간 큰 것으로 알려져 있다. 본 분석에서는 일축압축시험에서 구한 비배수전단강도와 삼축압축시험에서 구한 비배수전단강도와의 관계, 즉, 비배수전단강도비 $C_{uu}/(q_u/2)$ 를 파악하기 위하여 동일심도에서 두 시험이 같이 시행된 자료를 대상으로 하여 통계분석을 실시하였다.

표 7은 이상치 제거 후의 비배수전단강도비, $C_{uu}/(q_u/2)$ 에 대한 통계분석 결과를 나타낸 것이다. 비배수전단강도비는 95% 신뢰구간을 기준으로 1.2382~1.2909로 평가되었으며, 비배수 전단강도비의 평균값은 1.2645로 나타났다. 즉, 일축압축시험과 비압밀비배수 삼축압축시험에 의한 비배수전단강도는 $C_{uu} = 1.2645(q_u/2)$ 의 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

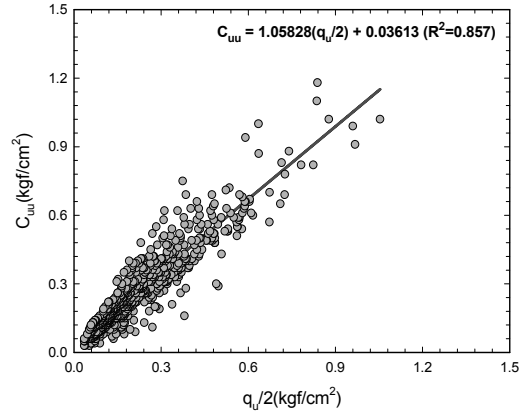
그림 24는 원자료와 이상치 제거 후의 일축압축시험결과 비배수 전단강도($q_u/2$)와 UU삼축압축시험 결과 비배수전단강도(C_{uu})의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 사이에는 거의 선형적인 관계를 보이고 있으며, 이상치 제거 후 결정계수가 0.86 정도로 양호한 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

4.4 강도정수 산정결과

표 8은 부산지역 점토지반에 대한 통계분석 및 회귀분석



(a) 원자료



(b) 이상치 제거 후

그림 24. 일축압축시험결과와 비배수전단강도와 삼축압축시험결과와 비배수전단강도의 관계

표 8. 토질정수 산정결과

구분	단위	대표값 또는 상관관계식	95% 신뢰구간		비고
			하한	상한	
비배수전단강도(S_u)	kgf/cm ²	$S_u = 0.015148D + 0.04624$	-	-	D: 깊이(m)
변형계수(E_{50})	kgf/cm ²	16.90	15.0980	18.6997	
유효마찰각(ϕ')	°	23.18	22.0689	24.3064	
강도증가율(m)	-	0.267	0.2652	0.2696	

을 통하여 결정된 각종 강도정수 산정결과를 요약하여 나타낸 것이다.

4.5 분석결과 및 고찰

회귀분석에 앞서 각 토질정수사이의 상관성 분석을 실시하여 회귀식을 구하지 않고도 두 변수가 얼마나 밀접한 관계에 있는가를 추정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서도 부산 지역에서 분석된 원자료를 대상으로 하여 물리적 및 역학적 특성을 나타내는 토질정수들에 대한 상관성분석을 실시하였으며, 그 결과 Pearson의 상관계수를 표 5에 나타내었다. 깊이에 따른 비배수 전단강도에 대한 상관성을 분석하기 위하여 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장베인시험에서 측정된 자료를 대상으로 선형회귀분석을 실시하였다. 단, 일축압축시험 자료의 경우에는 교란도 분석을 통하여 파괴시 변형률이 6% 이내로 시료등급이 보통인 자료를 대상으로 하였으며, 불가피하게 파괴시 변형률이 없는 자료인 경우에는 동일깊이에서 측정된 자료를 근거로 하여 편차가 큰 자료를 제외한 자료를 분석대상으로 하였다.

그림 19는 깊이에 따른 일축압축강도의 선형회귀분석 결과를 나타낸 것으로 측정결과 자료의 분산도가 다소 크게 나타나고 있지만 깊이가 깊어짐에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이상치를 제거한 상태에서 결정계

수는 0.692로 나타났다. 그림 20은 일축압축시험에서 산출된 비배수전단강도에 대한 회귀분석결과로 일축압축강도 분석결과와 유사한 양상을 나타내며, 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다. UU삼축압축시험에서 구한 비배수전단강도가 동일 시료에 대한 일축압축시험에서 구한 비배수전단강도보다 약간 큰 것으로 알려져 있다. 본 분석에서는 일축압축시험에서 구한 비배수전단강도와 삼축압축시험에서 구한 비배수전단강도와의 관계, 즉, 비배수전단강도비 $C_{uu}/(q_u/2)$ 를 파악하기 위하여 동일심도에서 두 시험이 같이 시행된 자료를 대상으로 하여 통계분석을 실시하였다.

표 7은 이상치 제거 후의 비배수전단강도비, $C_{uu}/(q_u/2)$ 에 대한 통계분석 결과를 나타낸 것이다. 비배수전단강도비는 95% 신뢰구간을 기준으로 1.2382~1.2909로 평가되었으며, 비배수 전단강도비의 평균값은 1.2645로 나타났다. 즉, 일축압축시험과 비압밀비배수 삼축압축시험에 의한 비배수전단강도는 $C_{uu} = 1.2645(q_u/2)$ 의 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

그림 24는 원자료와 이상치 제거 후의 일축압축시험결과와 비배수 전단강도($q_u/2$)와 UU삼축압축시험 결과 비배수 전단강도(C_{uu})의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 사이에는 거의 선형적인 관계를 보이고 있으며, 이상치 제거 후 결정계수가 0.86 정도로 양호한 상관성을 보이는 것으로 나타났

다. 표 8은 부산지역 점토지반에 대한 통계분석 및 회귀분석을 통하여 결정된 각종 강도정수 산정결과를 요약하여 나타내었다.

5. 결 론

남해안의 대표적 항구지역인 부산항 및 부산신항 지역을 연구대상 지점으로 선정하여 각종 실내시험 및 현장조사 자료를 수집하여 토성분포를 파악하고 그 결과를 통계적 분석을 실시하여 강도특성을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시험에 사용된 부산지역의 시료는 26.4~88.2%의 범위의 자연함수비와 1.437~1.848tf/m³ 범위의 전체단위중량, 0.8~1.5의 활성도 분포를 가지고 있으며 대부분이 CH와 CL로 분류되는 연약점성토인 것으로 나타났다.
- (2) 이상치 제거 후 Kolmogorov-Smirnov 방법에 의한 정규성 검정결과 자연함수비, 소성한계, 유효마찰각, 강도증가율이 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다.
- (3) 비배수 전단강도는 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 깊이와 비배수 전단강도의 관계는 $S_u = 0.015148D + 0.04624$ 로 나타났으며 광양지역의 연구결과에서는 $S_u = 0.00761D + 0.04657$ 로 나타났다. 이에 부산지역이 깊이에 따라 비배수 전단강도는 2배이상의 값을 보여주고 있다.
- (4) 깊이에 따른 수정 비배수 전단강도의 선형관계식은 $S_{u,corrected,vane} = 0.01855D + 0.03649$ 로 나타났으며, 베인 시험결과 수정비배수 전단강도의 평균값은 0.209kgf/cm²으로 일축압축시험, UU 시험결과보다 작게 평가되었다.
- (5) 강도증가율은 깊이에 따라 일정한 경향을 보이고 있으며, 각 방법에 의한 평균 강도증가율 m은 0.248(Skempton), 0.288(Hansbo), 0.278(ϕ' 방법)로 3가지 방법 중에서는 Hansbo의 제안식에 의한 방법이 가장 크게 평가되는 것으로 나타났다.
- (6) 동일위치 및 심도에서 수행된 일축압축시험 및 삼축 압축시험에서 구한 비배수전단강도에 대한 통계분석에서 $C_{uu} = 1.2645(q_u/2)$ 의 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연

구비지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2008).

참 고 문 헌

1. 김동후, 김기웅, 백영식(2003), 해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성, *한국지반공학회논문집*, Vol. 19, No. 6, pp. 371~378.
2. 대림산업(2002), *부산신항 배후철도 제3공구(진영-녹산) 건설공사 지반조사보고서*, pp. 23~34.
3. 동아지질(2003), *부산항 신선대 컨테이너 터미널 확충사업 기본 및 실시설계 지반조사보고서*, pp. 28~54.
4. 박성현, 조신갑, 김성수(1999), *통계 자료 분석을 위한 한글 SPSS*, SPSS 아카데미, pp. 207~228.
5. 배우석, 김종우(2009), 광양점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성, *한국지반환경공학회논문집*, Vol. 10, No. 7, pp. 7~14.
6. 부산신항만주식회사(1997), *부산신항만 개발사업 민자사업 1단계 구간 지반조사 보고서*, pp. 7~28.
7. 부산신항만주식회사(1999), *북컨테이너 터미널 실시설계 지반특성 분석 보고서*, pp. 17~78.
8. 부산지방해양수산청(1999), *부산신항 준설토 투기장(2차) 실시설계 보고서-해양지반조사편*, pp. 11~18.
9. 부산지방해양수산청(2002a), *부산신항 연결잔교 및 다목적부두 축조공사 실시설계 보고서*, pp. 56~88.
10. 부산지방해양수산청(2002b), *부산항 국제여객 및 해경부두 축조 기본설계용역 지반조사 보고서*, pp. 35~128.
11. 부산지방해양수산청(2003), *부산항 국제여객 및 해경부두 축조 실시설계용역 지반조사 보고서*, pp. 67~138.
12. 삼성물산주식회사(2003), *부산신항 북컨테이너 터미널 축조공사 지반조사보고서*, pp. 37~243.
13. 송만순(1988), *우리나라 해성점토의 제 토질계수의 상관관계*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 61~79.
14. 윤길림, 김병택(2003), 국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안, *대한토목학회논문집*, Vol. 23, No. 3C, pp. 169~176.
15. 윤길림(2004), *차세대 항만 설계기술 개발(IV): 지반의 불확실성을 고려한 토질정수 개발*, 한국해양연구원연구보고서 538. 1한15차 v.4, 해양수산부, pp. 11~45.
16. 장정욱, 최성민, 박춘식(2001), 경남해안지역 연약점토의 토질특성과 압축지수와의 상관성에 관한 연구, *한국 해양해양공학회지*, Vol. 13, pp. 282~289.
17. 조성민(1998), *국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형특성 분석*, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 22~35.
18. 포스코건설(2002), *원전항 건설공사 지반조사보고서*, pp. 7~28.
19. 포스코건설(2003), *부산항 국제여객 및 해경부두 축조공사 지반조사보고서*, pp. 89~132.
20. 한국컨테이너부두공단(2003), *부산신항만 개발사업(북항만측 4선식) 기본 및 실시설계 지반특성분석보고서*, pp. 127~238.
21. 해양수산부(1997), *부산신항 방파제 실시설계 지반조사 보고서*, pp. 17~47.
22. 현대건설주식회사(2000), *감천항 공영수산물 도매시장 건설공사 실시설계 지반조사보고서*, pp. 214~227.
23. 현대건설주식회사(2003), *부산신항 북컨테이너 터미널 축조공사 지반조사보고서*, pp. 12~78.
24. Das, B.M.(1997), *Advanced Soil Mechanics*, Second Edition.

- Taylor & Francis, Washington, DC. pp. 89~91.
25. Hansbo, S.(1994), *Foundation Engineering*, Elsevier Science B.V. Amsterdam, The Netherlands, pp. 89~91.
26. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M.(1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, New York. pp. 15~20.
27. Rodgers, J. L. and Nicewander, W. A.(1988), *Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient*, *The American Statistician*, Vol. 42, No. 1, pp. 59~66.
28. Rosenqvist, I, Th.(1953), Considerations on the Sensitivity of Norwegian Quick-Clays, *Geotechnique*, Vol. 3, pp. 195~200.
29. Skempton, A.W.(1957), Discussion : The Planning and Design of New Hong Kong Airport, *Pro. Inst. Civil. Eng.*, Vol. 7, pp. 305~307.

(접수일: 2010. 2. 25 심사일: 2010. 3. 4 심사완료일: 2010. 6. 11)