

工學碩士 學位請求論文

표준관입시험의 N 값을 이용한
비배수전단강도 및 선행압밀하중의
추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Undrained Shear Strength
and Preconsolidation Pressure Using N-Value Obtained
from Standard Penetration Test

指導教授 金 泰 亨

2008年 5月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

李 誠 哲

*A Study on the Estimation of Undrained Shear Strength and
Preconsolidation Pressure Using N-Value Obtained from
Standard Penetration Test*

Sung-Chul Lee

*Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University, Busan Korea*

Abstract

The purpose of this study is to estimate undrained shear strength and preconsolidation pressure of marine clays using N-values obtained from standard penetration test(SPT). The study was executed on the marine clay located in the west coast of Korean Peninsula: Kyounggi area(Kyounggi bay), Chungcheong area(Pyeongtaek & Asan), Jeonbuk area(Kunsan and Janghang). The collected sample of marine clays were classified into CH, CL, and ML based on the unified soil classification system. The N values and SPTs and the physical and mechanical properties obtained from the laboratory tests were used to draw the following conclusions. The results of this study can be usefully used as soil design parameters for a planned construction project. In addition, it can be the soil properties of some areas where it is difficult to perform the tests in west coast area can be estimated using the results of this study.

1. Natural water contents of the marine clays sampled from the west coast of Korean Peninsular are 35.01%, 46.19%, and 28.45% of Kyonggi, Chungcheong, and Jeonbuk areas, respectively.
2. Based on the analyzing results related to consolidation state of this area using liquidity index, upper part of marine clay layers in the range of GL (-) 0.0m and GL (-) 8.0m shows overconsolidated state, and below that range, marine clays are in the normally consolidated state with depth.
3. Relationships between N-values and compressive strength (q_u) of CH, CL, and ML soils are obtained as $q_u = N/4.7$, $q_u = N/6.3$, and $q_u = N/6.3$, respectively. For the whole west coast area, the compressive strength and N value shows $q_u = N/7.8$.
4. Relationships between undrained shear strength ($C_u = q_u/2$) and preconsolidation pressure (P_c) of CH, CL, and ML are obtained as $C_u/P_c = 0.002I_p + 0.19$, $C_u/P_c = 0.003I_p + 0.2$, $C_u/P_c = 0.001I_p + 0.24$, respectively.
5. When comparison preconsolidation pressure ($P_{c(est)}$) estimated from N-values and preconsolidation pressure ($P_{c(lab)}$) obtained from standard consolidation test, there are difference about 18%, 2%, 16% of CH, CL, and ML soils, respectively.

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	vi
LIST OF SYMBOLS	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 목적	1
1.2 연구내용과 방법	2
제2장 연구동향	4
2.1 표준관입시험의 역사적 고찰	4
2.2 표준관입시험의 시험방법	5
2.3 N 값 적용성에 대한 문제점	6
2.3.1 N 값 측정시 문제점	6
2.3.2 지반상태에 따라 발생하는 N 값의 변화 및 문제점	9
2.4 N 값과 지반정수의 상관관계	11
2.5 강도증가율	14
2.6 베이시안 기법	17
제 3 장 연구 대상지역 점토의 공학적 특성	21
3.1 지질학적 특성	22
3.1.1 경기지역 연안	22
3.1.2 충청지역 연안	24
3.1.3 전북지역 연안	24
3.2 물리적 특성	32
3.2.1 자연함수비	32
3.2.2 액성지수와 소성도	37

3.3 역학적 특성	41
3.3.1 비배수전단강도	41
3.3.2 선행압밀하중	42
3.3.3 압축지수	44
제 4 장 분석 및 고찰	46
4.1 표준관입시험 결과 값(N)값과 일축압축강도(q_u)의 관계	46
4.2 강도증가율($C_u/P_c - I_p$)	51
4.3 선행압밀하중(P_c)의 예측	56
제 5 장 결 론	60
참고문헌	62

LIST OF TABLES

Table 2.2 Factors and degree of accuracy which give effect to N-value (Schmertmann, 1978)	8
Table 2.3 Correlation of N-value and compressive strength q_u (Park Eun Gyu, 2002)	12
Table 2.4 Correlation of N-value and compressive strength q_u (Bea Yong-Soo, 1991 : Casagrade)	13
Table 2.5 Correlation of N-value and compressive strength q_u (Bea Yong-Soo, 1991 : Bowles)	13
Table 4.1 Incremental strength equations comparison in CH samples	54
Table 4.2 Incremental strength equations comparison in CL samples	54
Table 4.3 Incremental strength equations comparison in ML samples	54
Table 4.4 Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ for the area studied	59

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Standard penetration test	6
Fig. 2.2 Correlations of standard penetration resistance	12
Fig. 2.3 $S_{u(VST)}/\sigma'_{v0}$ versus I_p for NC clays(Skempton,1957)	14
Fig. 2.4 S_u/σ'_{v0} for NC clay versus liquidity index(Bjerrum &Simons, 1960))	15
Fig. 2.5 Basic concept of Bayesian approach	18
Fig. 3.1 The areas studied	21
Fig. 3.2 Drill log in Kyonggi area	27
Fig. 3.3 Drill log in Chungchong area	29
Fig. 3.4 Drill log in Jeonbuk area	31
Fig. 3.5 Natural water content for marine clay of Kyonggi area (Outlier exclusion before and after)	33
Fig. 3.6 Natural water content for marine clay of Kyonggi area	33
Fig. 3.7 Natural water content for marine clay of Chungchong area (Outlier exclusion before and after)	34
Fig. 3.8 Natural water content for marine clay of Chungchong area	35
Fig. 3.9 Natural water content for marine clay of Jeonbuk area (Outlier exclusion before and after)	35
Fig. 3.10 Natural water content for marine clay of Jeonbuk area	36
Fig. 3.11 Natural water contentt for marine clay	36
Fig. 3.12 Liquidity index	38
Fig. 3.13 Plasticity Chart for marine clay	40
Fig. 3.14 Unconfined compressive strength and triaxial compressive strength	41
Fig. 3.15 P_c for marine clay	43

Fig. 3.16 C_c for marine clay 44

Fig. 4.1 Correlation between N-values and q_u 48

Fig. 4.2 Correlation between N-values and q_u for total samples 48

Fig. 4.3 Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p 53

Fig. 4.4 Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p for total samples 53

Fig. 4.5 Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ 59

Fig. 4.6 Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ for total samples 59

LIST OF SYMBOLS

<i>Symbols</i>	<i>Description</i>
I_p	Plasticity index
SPT	Standard Penetration Test
$S_u = C_u$	Undrained shear strength
q_u	Unconfined compressive strength
P_c	Preconsolidation pressure
P'	Present effective vertical pressure
P_0	Effective overburden pressure
$S_{u(VST)}$	Undrained shear strength from vane shear test
σ'_p	Preconsolidation pressure
σ'_{vp}	Present effective vertical pressure
A_f	Skempton's pore pressure parameter
σ'_{v0}	Present effective vertical pressure
OCR	Overconsolidation ratio
$p(\theta)$	Prior probability
$p \bar{x}$	Likelihood probability
$p\theta \bar{x}$	Posterior probability
\bar{x}	Maximum likelihood estimation
MCS	Monte Carlo Simulation
LI	Plasticity Index
w_n	Natural water content
w_p	Plastic limit
w_l	Liquid limit
UU-test	Unconsolidated-undrained triaxial test
C_c	Compression index

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 산업의 발달과 더불어 공사가 대형화되어 가고 있는 건설현장에 있어서 지반조사의 중요성은 점차 증대되어 가고 있으며, 공사대상 지반도 구조물 기초 지반 뿐만 아니라, 도로, 공항, 철도, 항만 등의 광범위한 범위로 확대 적용되고 있다. 특히, 이미 시공된 도로의 확·포장 공사나 기존 성토층 하부의 신설 연결 도로 공사 또는 태풍이나 쓰나미 등에 의한 파손된 구조물의 보수 및 보강 시에 하부지반의 정확한 압밀상태를 파악하기 위한 지반조사는 반드시 실시해야 한다. 그러나 이미 시공된 도로나 구조물의 경우, 보도가 없는 길어깨 또는 인접 구조물로 공급되는 가스관, 상수도관, 통신선 등의 지중에 매설되어 시추조사에 어려움이 있고, 신뢰성 있는 결과 값을 얻고자하는 위치에서 시추조사는 차량의 통행으로 인해 거의 불가능하다. 파손된 사석 경사체의 경우, 기초지반처리공법으로 굴착치환 또는 강제치환 공법을 적용되었을 때는 사석층을 관통하여 사추 조사를 수행해야 하기 때문에 많은 시간이 소요되며, 경제적 비용 또한 증가할 것이다. 이런 지반조사의 어려움으로 대부분 설계자들은 하부지반의 압밀상태와 비배수전단강도를 추정하는데 고민하고, 보수적으로 접근을 시도하고 있다.

그래서 본 연구에서는 우리나라 서해안에 위치한 경기만 일대, 평택 및 아산 향 주변의 충청지역과 군산과 장항지역을 대표로 한 전북지역 해성점토를 대상으로 현장시험과 실내시험의 결과 값을 토대로 각 지역별로 해성점토의 공학적 특성을 파악하고자 한다. 이를 위해 통일분류법에 따라 이들 지역의 흙을 고소성 점토(CH), 저소성 점토(CL) 및 저소성 실트(ML) 분류하고, 분류된 각 시료들에 대해서 역학시험을 실시한 결과와 현장원위치 시험인 표준관입시험(Standard penetration test, SPT)의 결과 값과 상관관계를 조사 한다. 또한, 분류된 시료에 대해서 소성지수와 비배수전단강도 및 선행압밀하중의 관계를 이

용하여 강도증가식을 제안하고자 한다. 제안된 강도증가식을 사용하여 선행압밀하중을 추정한다. 추정된 선행압밀하중과 표준압밀시험에서 구한 시험 값인 선행압밀하중과의 상관성도 분석하고자 한다.

본 연구의 활용방안으로, 우리나라 서해안 지역에서 현장원위치 시험인 SPT 결과 값을 이용하여 시료별 비배수전단강도와 선행압밀하중을 추정함으로써 시추조사가 어려운 지점에 대해서 해성점토의 역학적 거동을 예측할 수 있는 예비적 판단을 제공해주는데 그 목적이 있다.

1.2 연구내용과 방법

본 논문에서는 국내 서해안 지역인 경기만 일대, 평택 및 아산 항 주변의 충청지역과 군산과 장항지역을 포함한 전북지역 해성점토의 현장 및 실내시험 결과 값을 시용하여 자연함수비, 연경도를 이용한 액성지수, 압축지수, 비배수전단강도, 선행압밀하중과 압축지수 등의 공학적 특성을 분석하였다.

SPT 결과 값과 일축압축강도의 상관성을 분석하여, 비배수전단강도($C_u = q_u/2$)를 추정하였다. 또한, 실내시험에서 구한 비배수전단강도 및 선행압밀하중과 소성지수를 이용한 강도증가식을 산정한 후, 이 강도증가식에서 비배수전단강도를 이항시켜 선행압밀하중과 소성지수 및 비배수전단강도를 변수로 하는 방정식을 유도한다. 유도된 방정식에서 선행압밀하중을 미지수, 소성지수는 실내시험 결과 값을 적용하였다. SPT 시험의 결과 값과 일축압축강도의 관계식으로부터 산정된 일축압축강도를 $C_u = q_u/2$ 관계를 이용하여 비배수전단강도를 산정한 후 강도증가식에서 구한 선행압밀하중과 표준압밀시험에서 산정된 시험 값인 선행압밀하중과 상관성을 비교·검토하였다. 각 장별로 내용을 요약하면 다음과 같다.

제2장에서는 본 연구에서 제안하고자 하는 현장 원위치시험인 SPT에 대한 기존연구를 검토하였다. 또한, 점성토 지반에서의 국·내외 학자들이 제안한 강도증가율에 대한 이론식을 정리하였고, 연구지역 해성점토의 공학적 특성이 지

역별로 어떻게 분포하는가를 보여주기 위해서 적용된 확률 통계기법인 베이시안(Bayesian Approach)기법을 설명하였다.

제3장에서는 연구지역에서 해성점토의 공학적 특성을 파악하기 위해서 각 지역별 지질학적 퇴적특성을 먼저 설명하였다. 지역별로 퇴적된 해성점토에 대해서 공학적 특성과 가장 밀접한 관계가 있는 자연함수비를 분석하였고, 액성지수를 사용하여 정규압밀 점토와 과압밀 점토를 구분하였다. 서해안 전체지역의 자연함수비 대해서 분포 경향을 파악하기 위해서 베이시안 기법을 사용하여 분석하였다. 통일분류법에 근거하여 연구지역 해성점토를 고소성 점토(CH), 저소성 점토(CL) 및 저소성 실트(ML)로 분류하고 소성도로 표현하였다. 해성점토를 역학적 특성을 파악하기 위해서 실내시험 결과 값을 각 지역별로 정리하여 심도별 역학특성을 분석하였고, 서해안 전체지역에 대해서는 베이시안 기법을 통한 분포경향을 파악하였다.

제4장에서는 제3장에서 분류된 CH, CL, ML 시료에 대해서 이미 파악된 일축 압축강도와 SPT 시험과의 상관관계를 분석하였다. 또한, 물리적 특성인 소성지수와 비배수전단강도 및 선행압밀하중의 역학적 관계를 분석하여 경험식을 제안하였다. 여기서 제안된 관계식을 사용하여 선행압밀하중을 추정하였다. 추정된 선행압밀하중과 표준압밀시험에서 구한 실험 값인 선행압밀하중과 상관성을 비교·분석하였다.

제5장에서는 전장에서 실시한 일련의 분석을 통하여 본 연구지역의 해성점토의 공학적 특성과 SPT를 통한 시료별 비배수전단강도 및 선행압밀하중의 추정에 관한 본 연구결과를 총 정리하였다.

제 2 장 연구동향

2.1 표준관입시험의 역사적 고찰

표준관입시험은 본래 원형 표준관(tube sampler)을 지반에 타입하여 지층을 파악하고 분석하기 위한 시료를 채취해서 지반조사의 정도를 높일 목적으로 출발하였으며, 그 발전정도는 문헌에 따라 다소 차이는 있으나, 대략 다음과 같다.

독일의 Goodman이 1600년대 1회 타격에 의한 관입저항을 측정하는 것을 시작으로 1870년 Canada의 Fleming은 철도교량 설계 시 3inch 직경의 시추 로드 에 5인치 직경의 케이싱을 사용하여 흙의 관입저항을 측정하였다. 1900년에 이르러 미국의 Gow Drilling사의 Charse Gow는 말뚝의 관입저항을 측정하기 위해 25cm의 수도관을 45kg의 해머에 달아 타격, 관입함으로서 타격저항과 동시에 시료를 채취하였으며, 1927년 미국의 Raymond Pile사의 H.A More와 Fletcher는 현재의 SPT와 가장 유사한 방법으로 발전된 외경 51mm의 Spilt spoon sampler와 63.5kg의 해머를 사용하였다. 1945년에는 표준 로드인 A-로드(외경 41.2mm, 내경 28.5mm)가 채택되었고, 1948년 Parsons에 의해 타격횟수를 15cm마다 기록하는 것으로 개량되었는데 1948년 Terzaghi & Peck은 시험을 현재와 같이 체계화하여 SPT이라 부르게 되었다(이명환, 1991).

Table 2.1 Hammer's standard and method of test

관입시험 타격조건	GOW사	H.A Mohr법	Raymond사 시험법	Terzaghi- Peck법
해머중량(kg)	45.3	63.5	63.5	63.5
낙하고	샘플러를	76.0	76.0	76.0
예비타격심도(cm)	타입하고	-	15.0	15.0
본타격 심도(cm)	시료를 채취	30.0	30.0	30.0

2.2 표준관입시험의 시험방법

국내에서 SPT은 KS F 2307에 규정되어 있으며, 시험방법은 다음과 같다.

- (1) 시추공의 위치, 일시, 번호 등을 기록한다.
- (2) 로드 끝에 비트 + Single Barrel을 연결하여 굴착하면서 흙을 파낸다. 표층에서 공벽의 붕괴 우려가 있으면 케이싱을 삽입하여 공벽을 유지한다.
- (3) 로드를 끌어올려 굴착용 비트를 떼어내고, 표준관을 연결하여 구멍바닥까지 내린다.
- (4) 로드 상부에 Knocking Head, 해머, Guider 등을 장착한다.
- (5) 해머를 자유 낙하시켜 N 값을 측정한다. 이 때 로드의 지중으로 침하되는지 확인하여 기록하고, 예비타 15cm, 본 타격시험 30cm를 실시한다. 관입량 30cm에서 시험을 종료하고, N 값이 50타 이상이면 타격을 중단하고 50/관입량(cm)으로 표기한다,
- (6) 표준관을 회전시켜 교란시료를 채취하여 회수한다. 교란시료를 빼내서 육안 판단으로 시료의 종류, 색조, 특징 등을 기록한다. 채취된 교란시료를 병에 넣어 시추일시, 번호, 심도 등을 기록한 표를 붙이고 상자에 넣어 보관한다.
- (7) 더 깊은 심도에서 시험하려면 굴착용 비트를 붙여서 (2)~(6)를 반복한다.
- (8) 최종심도에서 공내수를 양수하고 24시간 후에 지하수위를 측정한다.
- (9) 로드 불교란 표준관을 장착하면 불교란 시료를 채취할 수 있다.

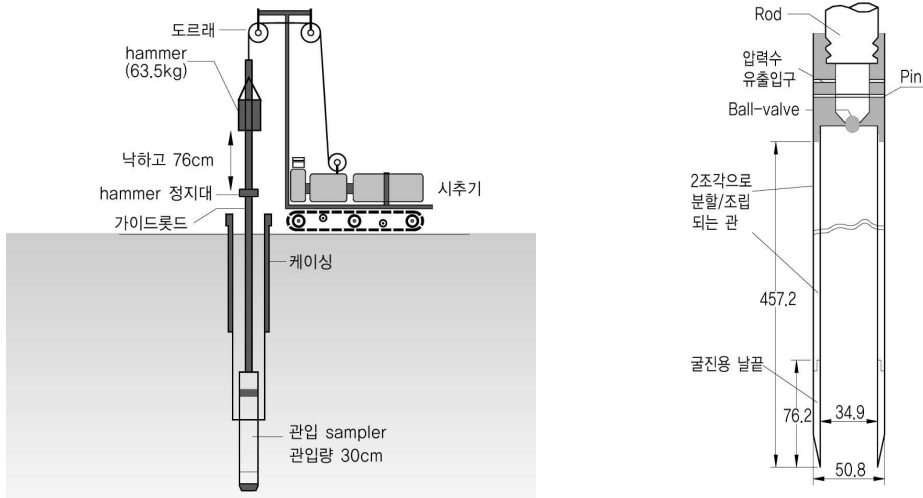


Fig. 2.1 Standard Penetration Test

2.3 N 값 적용성에 대한 문제점

SPT는 점성토보다 사질토에 적합한 시험법으로 점성토의 특성에 대한 판단에 있어서 신뢰도의 문제가 제기되기도 하지만, 한편으로 점성토에 대한 실적이 많이 축적되어 현재에는 대단히 연약한 경우를 제외하고는 N 값을 이용하여 점성토 성질을 추정할 수 있다. N 값은 사용하기가 편리한 반면에 아래와 같이 여러 가지 문제점을 내포하고 있으므로 적용 시 주의해야 하며, 지반상태 및 시료를 보고 신중히 판단해야 된다.

2.3.1 N 값 측정시 문제점

N 값은 시험장비, 시험자의 관리정도와 개인차, 시험방법에 따라 현저한 차이가 있음을 여러 연구결과를 통해서 밝혀졌다.

SPT는 각 나라마다 조금씩 상이하고 시험기기의 형상이 세부적으로 규정되어

있지 않고, 허용된 범위 내에서도 N 값은 다른 값으로 측정될 수 있으며, 해머의 낙하방법에 따라 로드 에 전달되는 에너지가 크게 차이 나기 때문에 결과 값에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

박은규(2002 : 宇都, 冬木)의 연구에 의하면 실용적으로 사용하고 있는 줄을 이용한 자유 낙하법에서 타격 에너지는 이론치의 60~70%, SPT기에 따라 이론치의 80~90%로 큰 차이가 있다고 지적하였다). 타격효율이 60~70%이라면 해머의 낙하고 76cm에 대하여 22.8~30.4cm의 오차가 발생하기 때문에 측정상의 오차는 현저하게 나타날 수 있다.

De Mello(1971)는 SPT에 대한 현상의 문제를 다음과 같이 지적하였다.

- (1) 시험자의 타격속도에 따라 SPT의 품질이 좌우된다.
- (2) 표준관에 전달되는 관입 에너지가 불명확하므로 측정값에는 상당한 변화가 있다.
- (3) 시추공을 만드는 방법에 따라 영향이 클 가능성이 있다.
- (4) 이수의 사용 유무에 따라 영향을 미칠 가능성이 있다.
- (5) 관입 메카니즘의 이론을 확립할 필요가 있다.

Schmertmann(1978)은 N 값에 영향을 주는 요인과 정도에 대하여 Table 2.2와 같이 제시하였다. Kovacs(1981)의 연구에 의하면 N 값의 재현성은 시추기계, 사용하는 시험 장치에 따라서 아주 나쁘고, 특히 줄을 도르래에 3회 이상 감으면 마찰에 의한 에너지의 손실은 치명적으로 된다고 연구결과를 발표하였다.

국내 기술자들의 의견 역시, 시험자 및 굴진방법에 따른 결과의 차이, 해머의 종류 및 효율, 심도가 깊어질 경우 N 값의 보정문제 등의 범주로 나누어 문제점을 제기하였다.

Table 2.2 Factors and degree of accuracy which give effect to N - value
(Schmertmann, 1978)

요 인		N 값의 변화범위
기본적 사항	세 부 사 항	
시추공 하부의 유효응력(모래)	1) 케이싱을 사용하고 청수 및 이수를 사용하는 경우	100%
	2) 시추의 방법, 공내의 수위 변화	$\pm 100\%$
	3) 소경의 공(75mm)과 대경의 공(450mm)과의 상이	+50
표준관에 전달되는 타격 에너지	4) 줄을 이용 낙하와 자유낙하 해머와의 차	+100%
	5) Loading Head의 대소에 의한 차	+50%
	6) 로드 장 : 3m 이내	0%
	10~25m	+10%
	30m 이상	+10%
	7) 낙하고의 변화	$\pm 10\%$
	8) 로드경의 상이	$\pm 10\%$
	표준관의 구조	9) 과대한 표준관 내경 : 모래
중~경점토		-30%
N 값을 측정하는 구간을 변경할 때	10) 예비타입길이의 생략 : 모래	-15%
	중~경점토	-30%
	11) 예비타입 길이를 30cm로 한 경우 : 모래	+15%
	중~경점토	+30%

2.3.2 지반상태에 따라 발생하는 N 값의 변화 및 문제점

N 값은 같은 장소에서 재측정 할 수 없으며, 바로 옆 동일조건인 장소에서 재측정한다고 해도, 결과는 기존 실시한 시추공으로 인해 교란의 영향을 받은 것이며 더 떨어져 있는 장소는 조건이 상이하게 되므로 측정된 N 값의 오차정도를 직접적으로 확인할 방법은 없다.

N 값의 신뢰성에 대한 판단은 어디까지나 추정의 영역을 벗어나지는 못하며, N 값은 전술한 바와 같이 여러 가지 요인에 따라 상이한 값으로 측정되고, 시험자의 개인차에 따라서 오차가 클 수 있으므로 높은 정도를 기대할 수 없다.

N 값은 상재압, 흙의 구성, 공극수압, 지하수위 및 피압수 등에 따라 현저하게 차이가 생기며, N 값이 가지고 있는 의미는 대상지반의 종류나 퇴적 장소에 따라 다르며, 지반상태에 따른 N 값의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 상재압에 따른 N 값의 변화

Gibbs & Holtz(1957), Bazara(1967) 등의 연구에 의하면 상재압은 N 값에 지대한 영향을 미친다고 연구결과를 발표하였다. 지표면 가까이에는 상재압이 작으므로 실제보다 작은 값으로 측정되며 심도가 깊어질수록 상재압이 크게 되므로 N 값은 실제보다 크게 측정된다.

(2) SPT의 적용에 문제가 되는 토질

SPT는 원래부터 점성토보다 사질토에 적합한 시험법으로, 점성토의 토성 판단에 부정적인 의견도 있지만, 점성토에 대한 실적이 많이 집적되어 현재에는 대단히 연약한 경우를 제외한 점성토의 연경도를 추정하는데 있어서 어느 정도 신뢰성을 확보할 수 있다. 그러나 자갈, 호박돌 등이 협재되어 있는 지반에서는 시험결과가 과대하게 평가될 우려가 있다. 사질토에서 SPT의 결과, 신뢰성이

있는 $N_{\text{값}}$ 은 최대 입경 100mm 전·후까지이며 입경에 영향을 받지 않는 입적 가적곡선의 90%가 50mm 정도 일 경우이다. 관입기구에 대한 고찰에 의하면 $N=15\sim 50$ 일 때 SPT은 유효한 사운드이라 밝혀졌다.

- (3) 연약한 점성토에서는 $N_{\text{값}}$ 은 0~3으로 작은 값으로 측정되므로 이 값을 사용하여 점성토의 비배수전단강도를 추정하기는 어려우며, $N_{\text{값}}$ 으로만 설계가 불가능하므로 일축 및 삼축압축시험과 현장배인시험 등과 비교하여 적용해야한다. 연약한 점토에서는 줄의 에너지비 등에 따라서 현저하게 차이가 난다.
- (4) 동일한 $N_{\text{값}}$ 으로 측정된 사질토와 점성토에서는 $N_{\text{값}}$ 이 가지고 있는 공학적 의미는 아주 다르며 사질토 지반에서는 상대밀도를 추정할 수 있으며, 점성토 지반에서는 연경도를 예측할 수 있다.
- (5) 가는 모래나 실트질 지반에서는 타격 시 발생된 간극수압이 소산되지 않으므로 실측된 $N_{\text{값}}$ 은 실제보다 작을 수 있는 반면, 포화되고 조밀한 가는 모래 및 실트 섞인 모래지반에서는 타격 시 발생된 부의 간극수압 때문에 유효 상재압이 커져서 실측 $N_{\text{값}}$ 보다 커진다.
- (6) 모래 섞인 자갈층에서는 지하수위보다 1m상부의 하부구간 $N_{\text{값}}$ 을 비교한 결과, 지하수위보다 아래구간에서의 $N_{\text{값}}$ 이 평균 15% 저하되었다고 발표하였으며, 지하수위의 변동은 상재압과 함수량의 변화를 일으키므로 $N_{\text{값}}$ 에 영향을 미친다. 관입시험 시 불투수성을 뚫고 피압수 층에 도달할 경우, 물이 시추공으로 분출하여 모래층이 느슨하게 되므로 $N_{\text{값}}$ 은 과소평가 된다(박은규, 2002).

2.4 N 값과 지반정수의 경험적 상관관계

흙의 물리적, 역학적 성질을 파악하는 것은 흙 자체가 가지는 성질 중 동질성 결여와 다양함 등으로 인해 매우 어려운 일이라 할 수 있다. 이런 성질을 규명하기 위한 방법의 하나로, 시료를 채취하여 함수비, 비중, 애터버그한계, 입도분석 등의 토성시험과 일축압축강도, 직접전단시험, 삼축압축시험 및 압밀시험 등의 역학시험을 실시하고 있으며 이러한 시험 중 설계에 있어서 매우 중요한 자료로 이용되는 역학시험은 불교란 시료채취에 의해 가능하다. 현재 시험되고 있는 불교란 시료는 흙의 고유한 성질과 채취방법의 문제로 인해 점성토에만 국한되어 시료가 채취되므로 국내 해안 매립지 등의 연약한 점성토층이 발달되어 있는 일부 지역에서만 가능하다. 그러나 사질토와 같이 불교란 시료의 채취가 곤란한 경우, 현장시험인 SPT에 의해 흙의 특성을 추정하고 있다. 이러한 측면에서 SPT와 그 결과치인 N 값은 매우 중요하며, N 값을 이용하여 추정할 수 있는 흙의 성질은 상대밀도, 연경도, 일축압축강도, 점착력, 침하량 산정 및 지지력 등을 추정할 수 있고, 이러한 연구들은 국외의 학자들의 오랜 연구결과로 흙의 특성과 N 값의 상관관계를 분석함으로써 경험식을 제안하게 되었다.

Terzaghi & Peck(1948)은 N 값에 따른 상대밀도를 추정하였으며, Gibbs & Holtz(1957)가 상대밀도와 상재압 등의 영향에 기인하여 N 값이 변화한다는 연구 결과를 발표하였다. Dunham(1954), Meyerhof(1956) 등은 사질토에서 N - ϕ 상관관계를 연구하였다. De Mello(1971)은 Gibbs & Holtz(1957)의 시험결과를 이용하여 내부마찰각(ϕ)을 변수로 하여 N - P (유효상재압)- ϕ 의 관계를 제안하였다.

점성토의 경우, N 값과 일축압축강도(N - q_u)의 상관관계 연구는 Terzaghi & Peck(1948), Dunham (1954), 박은규(2002) 등에 의해 이루어져 왔다. NAVAC Design Manual(7.01)에서는 소성도에 따른 N - q_u 의 상관성을 제안하였다.

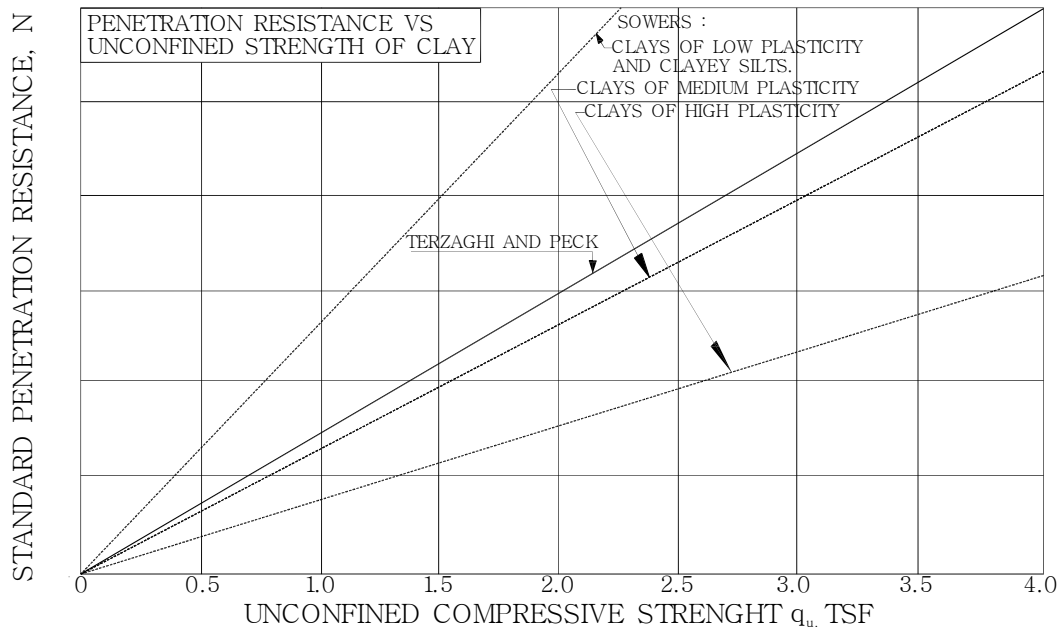


Fig. 2.2 Correlations of Standard Penetration Resistance

Table 2.3 Correlation of N-value and Compressive strength q_u (Park Eun Gyu, 2002)

구 분	q_u	비 고
Terzaghi & Peck	$q_u = \frac{N}{8}$	
Dunham	$q_u = \frac{N}{7.7}$	
오자끼	$q_u = 4 + \frac{N}{2}$	
Sowers	$q_u = \frac{N}{4} \sim \frac{N}{13}$	소성의 정도에 영향을 받음
Tschebotarioff	$q_u = \frac{N}{6.67}$	
Fletcher	$q_u = \frac{N}{6.25}$	Chicago 점토
NAVFAC-Design Manual	저소성 점토 : $q_u = \frac{N}{13.3}$ 중소성 점토 : $q_u = \frac{N}{6.7}$ 고소성 점토 : $q_u = \frac{N}{4}$	소성도에 따른 구분

Fig. 2.2은 소성도와 일축압축강도의 관계를 도시한 것이며, Table 2.3은 N 값과 일축압축강도와의 상관관계를 나타낸 것이다.

N 값으로부터 점성토의 q_u 및 연경도를 추정하는 방법에 대해 많은 연구결과가 발표되고 있다. Terzaghi & Peck(1948)이 N 값과 점성토의 연경도, q_u 와 관계를 제안된 관계식은 지금까지 가장 일반적으로 활용되어져 왔다. 그러나 위의 결과는 일축압축강도시험에 사용된 시료는 SPT시 표준관 속에 들어간 흐트러진 상태의 시료를 사용하였으며 일축압축강도시험 값이 과소하게 측정되어진다. 한편 Casagrade와 Bowls 역시 점토의 연경도에 따른 $N-q_u$ 의 관계를 Table 2.4 및 2.5와 같이 발표하였다.(배용수, 1991 : Casagrade, Bowles)

Table 2.4 Correlation of N -value and compressive strength q_u
(Bae Yong-Soo, 1991 : Casagrade)

N 값	Consistency	q_u (tf/ft ²)
< 2	Very Soft	< 0.5
2~4	Soft	0.5~1.0
4~8	Medium	2.0~4.0
8~15	Stiff	> 4.0

Table 2.5 Correlation of N -value and compressive strength q_u
(Bae Yong-Soo, 1991 : Bowles,)

Strength q_u (Bowles)

Consistency	Very Soft	Soft	Medium	Stiff	Very Stiff	Hard
q_u . Ksf (Kpa)	0.5 (25)	1.0 (50)	2.0 (100)	4.0 (200)	8.0 (400)	
N , Standard Penetration resistance	2	4	8	16	32	
ρ_{sat} , pcf (KN/m ³)	100-200 (16-19)	110-130 (17-20)		120-140 (19-22)		

이장오(1988)는 광양항 광양제철소 지역의 정규압밀상태에 있는 층적 점성토에 대한 $N-q_u$ 관계에서 실측 N 값이 4이하는 $N-q_u$ 의 상관식이 신뢰성이 결여되나, Medium 상태의 연경도를 나타내는 $N < 4$ 이상의 점성토에서는 $q_u = \frac{N}{4} \sim \frac{N}{8}$ 의 범위를 나타내고 있으며, 이는 Terzaghi & Peck이 제시한 $q_u = \frac{N}{8}$ 하한 값에 근접하고 있다고 발표하였다.

2.5 강도증가율

비배수전단강도는 흙의 고유특성은 아니다. 그러나, 점성토의 연경도를 나타내는데 이용되며 시험형태, 경계조건, 재하율, 초기응력상태 등에 영향을 받는다. 비배수전단강도가 응력 의존성이므로 일반적으로 비배수전단강도가 측정되는 연직유효응력(P_0)에 대해 정규화 된다. 즉, 연직 유효 상재압력에 대한 비배수전단강도의 비율은 강도증가율(S_u/P_0)로 표현된다.

Skempton(1957)은 정규압밀 점토의 현장 배인 시험에서 결정된 비배수전단강도와 소성지수(Plasticity index, I_p)의 관계를 제안하였으며 Fig. 2.3과 같다.

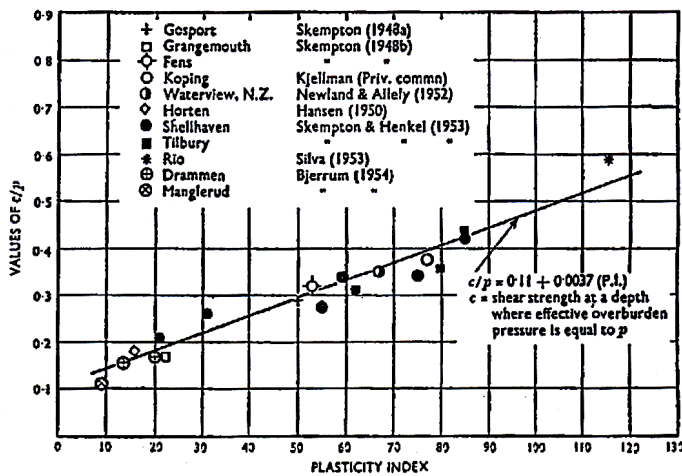


Fig. 2.3 $S_u(VST)/\sigma'_{v0}$ versus I_p for NC clays(Skempton,1957)

높은 액성지수의 예민 점토는 위의 비배수전단강도와 I_p 의 관계가 맞지 않으며 강도증가율은 액성지수와 관계가 더 바람직하다고 보고된다. 정규압밀점성토의 삼축압축시험에서 평가된 비배수전단강도로부터 산정된 강도증가율과 액성지수의 관계는 Fig. 2.4과 같다.(Bjerrum & Simons, 1960)

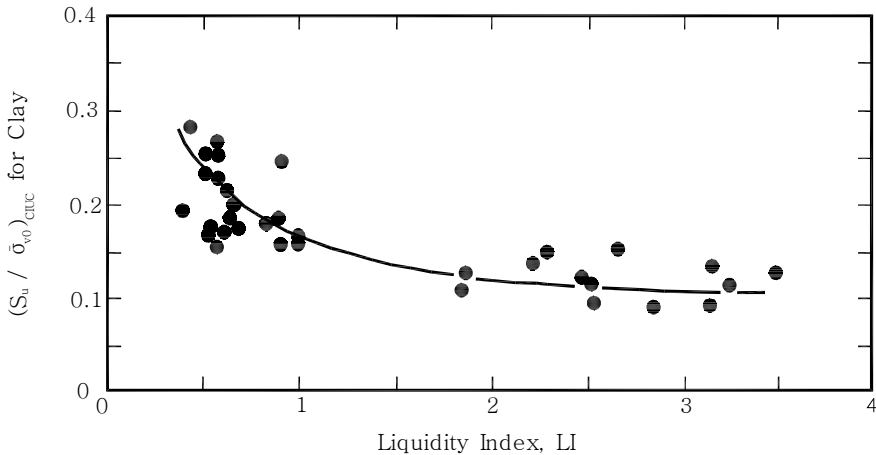


Fig. 2.4 S_u/σ'_{v0} for NC clay versus liquidity Index(Bjerrum & Simons, 1960)

Jamiolkowski et al.(1985)은 약간 과압밀 점토에 대해 다음의 관계를 제시하였다.

$$S_u/\sigma'_p = (0.23 \pm 0.004) \quad (2.1)$$

여기서, σ'_p : 선행압밀응력

Ladd(1975)는 비배수 전단강도 해석을 수행하여 진행성 파괴를 설명하는데 적합한 방법론으로 변형률 기법(strain compatibility technique)을 제시하였다.

Mesri(1989)는 다음과 같은 관계를 제시하였다.

$$S_u/\sigma'_p = 0.22 \quad (2.2)$$

여기서, σ'_{vp} : 선행압밀응력

Hansbo(1994)는 액성한계를 이용하여 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$S_u / \sigma'_{vp} = 0.45LL \quad (2.3)$$

여기서, LL : 액성한계

삼축압축 시험에 의한 강도 증가율은 Mohr 원의 최대전단응력을 이용하여 흙의 주요 매개변수의 향으로 표현된다. K_0 압밀에 의한 강도 증가율은 다음과 같다.

$$(S_u / \sigma'_{vp})_{K_0} = \frac{\sin\phi[K_0 + A_f(1 - K_0)]}{1 + (2A_f - 1)\sin\phi} \quad (2.4)$$

여기서, K_0 : 정지시 최대 최소의 주응력비
 A_f : Skempton의 간극수압계수

등방압밀에 의한 강도 증가율은 다음과 같다.

$$(S_u / \sigma'_{vp}) = \frac{\sin\phi}{1 + (2A_f - 1)\sin\phi} \quad (2.5)$$

Kulkawy & Mayne(1990)은 등방압밀 시료에 의한 강도증가율과 K_0 또는 이방압밀(Anisotropic consolidation, AC)에 의한 강도증가율을 비교하여 다음과 같은 관계를 나타내었다.

$$(S_u / \sigma'_{z0})_{KoorAC} = 0.15 + 0.49(S_u / \sigma'_{z0}) \quad (2.6)$$

또한, 삼축압축 시험에 의한 전단저항각과 강도증가율의 관계를 등방압밀과 이방압밀에 대해 다음과 같이 나타내었다.

$$(S_u / \sigma'_{z0}) = 0.012 \times \phi \quad (2.7)$$

$$(S_u / \sigma'_{z0})_{AC} = 0.017 \times \phi \quad (2.8)$$

강도증가율은 과압밀비에 따라 증가하며 SHANSEP 방법이 이러한 내용을

잘 나타낸다. Ladd et al.(1977)은 여섯 종류의 점토에 대한 CK_0U 단순 직접전단 시험 자료로부터 강도증가율을 나타내었으며 동일한 자료를 이용하여 각각의 흙에 대한 정규압밀 상태의 강도증가율을 과압밀된 상태의 강도증가율을 나누어 나타내었다. 여러 형태의 흙에서 과압밀비에 대한 강도증가율의 관계는 매우 유사한 형태를 보이며 과압밀에 대한 강도증가율의 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{(S_u/\sigma'_{vo})_{OC}}{(S_u/\sigma'_{vo})_{NC}} = OCR^m \quad (\text{식 2.9})$$

Jamiokowski et al.(1985)은 단순전단, 삼축압축, 그리고 삼축인장의 파괴형태에 따른 시험을 충분히 알 수 없는 경우 단계성토 동안의 안정해석을 위해서는 Oedometer 시험에서 현장 OCR 을 평가하여 다음의 관계에서 비배수 전단강도를 평가가능하다고 제시하였다.

$$S_u/\sigma'_{p} = (0.23+0.04) \cdot (OCR)^{0.8} \quad (\text{식 2.10})$$

여기서, σ'_{p} : 선행압밀응력

2.6 베이시안 기법

베이시안 기법은 미지의 지반정수 계산하기 위하여 사전정보 및 표본정보를 결합하여 사용하는 통계기법이다. 대상지역의 표준정보는 대상지역에서 실시한 지반조사 자료로 우도확률(likelihood probability)을 통해 도입되고, 사전정보는 이전에 조사된 지반조사 자료를 사전확률(prior probability)로 적용하여 분석함으로써, 그 결과를 이용할 수 있는 모든 정보를 포함하는 사후확률(posterior probability)로부터 지반정수를 계산하게 된다.

우도확률과 사전확률의 각 발생확률은 서로 독립적이지 않는 조건부 확률을 가지는 관계가 있으며, 베이시안 기법에 의한 사후추정 확률밀도 함수는 사전

정보와 표본정보의 표준편차보다 작고, 평균값에 근접하여 더욱 집중되는 확률 밀도함수를 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다. 베이시안 정리의 기본 개념은 Fig. 2.5에 도시하였다.

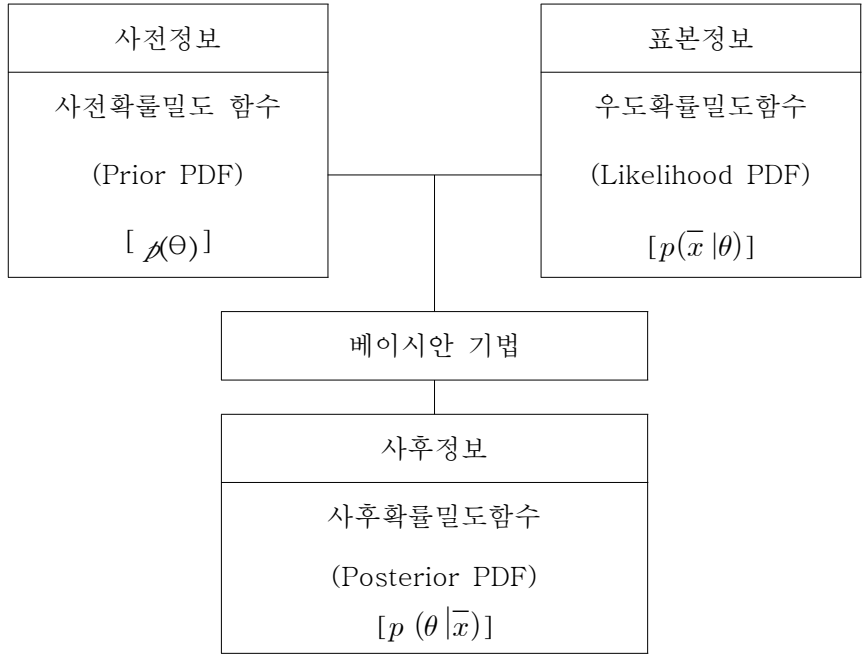


Fig. 2.5 Basic Concept of Bayesian Approach

미지의 모수(θ)의 사후확률밀도함수(posterior PDF)는 사전정보를 포함하는 사전밀도함수(prior PDF)와 표본정보를 포함하는 우도함수에 비례하며 식 (2.11)과 같이 표현된다.(G. N. Smith, 1986)

$$p(\theta | \bar{x}) = \frac{p(\bar{x} | \theta) p(\theta)}{\int p(\bar{x} | \theta) p(\theta) d\theta} \quad (2.11)$$

- 여기서,
- $p(\theta | \bar{x})$: 사후확률밀도 함수
 - $p(\theta)$: 사전확률밀도 함수
 - $p(\bar{x} | \theta)$: Likelihood 함수, 모수의 분포에서의 표본 확률밀도 함수
 - $\int p(\bar{x} | \theta) p(\theta) d\theta$: 정규화 상수

모수 θ 의 확률분포가 정규분포이면 같은 모집단에서 채취한 표본의 확률분포와 사전 확률분포도 각각 정규분포로 가정할 수 있다. 이 경우 사전정보의 확률밀도 함수 및 표본의 확률밀도함수를 이용하여 사후확률 밀도함수를 식 2.14와 같이 표현할 수 있다(심정보, 2003).

- 사전확률밀도 함수 : $N(\nu, \tau^2)$

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \tau^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \times \frac{(\theta - \nu)^2}{\tau^2}\right] \quad (2.12)$$

- Likelihood 함수 : $N(\theta, \sigma^2)$

$$p(\theta | \bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \times \frac{(\bar{x} - \theta)^2}{\sigma^2}\right] \quad (2.13)$$

- 사후확률밀도 함수 : $p(\theta | \bar{x}) = \frac{p(\bar{x} | \theta) p(\theta)}{\int p(\bar{x} | \theta) p(\theta) d\theta}$

$$p(\theta | \bar{x}) \propto p(\bar{x} | \theta) p(\theta)$$

$$p(\theta | \bar{x}) \propto \exp\left[-\frac{(\bar{x} - \theta)^2}{2\sigma^2} - \frac{(\theta - \nu)^2}{2\tau^2}\right]$$

$$\propto \exp\left[\frac{(\tau^2 + \sigma^2)\theta^2 - 2(\bar{x}\tau^2 + \nu\sigma^2)\theta}{2\tau^2\sigma^2}\right]$$

$$\propto \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\left(\theta - \frac{\bar{x}\tau^2 + \nu\sigma^2}{\tau^2 + \sigma^2}\right)^2}{\frac{\sigma^2\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2}}\right]$$

$$N\left(\frac{\bar{x}\tau^2 + \nu\sigma^2}{\tau^2 + \sigma^2}, \frac{\sigma^2\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2}\right) \quad (2.14)$$

- 여기서, ν : 사전정보 평균
 τ : 사전정보의 표준편차
 θ : 표본집단의 평균
 σ : 표본집단의 표준편차
 \bar{x} : 최우추정량(maximum likelihood estimator)

일반적으로 표본에서의 최우추정량(\bar{x})은 표본의 평균(θ)과 같게되며, 사후확률로부터 베이시안 추정치를 결정하게 되는데 이는 사후확률분포의 평균이다 식 2.14에서 사후확률밀도 함수의 평균과 표준편차를 다시 표현하면 식 2.15와 식 2.16과 같다.

$$E[\theta | \bar{x}] = \left(\frac{\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2} \right) \bar{x} + \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \tau^2} \right) \nu \quad (2.15)$$

$$\sigma[\theta | \bar{x}] = \sqrt{ \frac{\sigma^2 \tau^2}{\sigma^2 + \tau^2} } \quad (2.16)$$

여기서, $E[\theta | \bar{x}]$: 사후확률밀도함수의 평균값

$\sigma[\theta | \bar{x}]$: 사후확률밀도함수의 표준편차

베이시안 계산은 표본으로부터 획득한 정보와 사전정보의 가중평균으로 나타나며, 적용되는 가중 값은 정규화된 분산의 역수의 비율로 표시된다.

제 3 장 대상지역 점성토의 공학적 특성

본 연구대상지역은 우리나라 서해안 일원으로 인천지역, 청라지역, 시화지역 등을 포함한 경기만 일대, 평택 및 아산주변의 충청지역, 전북지역을 대표한 군산 및 장항지역 실내시험 결과를 토대로 물리적·역학적 특성을 분석하였다. 대상지역별 전체적인 경향을 분석하기 위해 대표적인 물리적 특성인 자연함수비를 지역별로 분석하였다. 액성지수를 이용하여 연약지반의 압밀상태를 파악하였고, 통일분류법에 의해 분류된 흙을 소성도표로 나타내었다. 역학적 특성을 파악하기 위해 심도에 따른 비배수전단강도, 압축지수 및 선행압밀하중을 분석하였다. 물리적 특성을 분석 시 미국 펜실베니아 주립대학에서 개발한 Minitab Program을 사용하여 이상치를 제거하였고, 제거된 결과를 이용하여 몬테카르로 기법(Monte Carlo Simulation, MCS)을 사용하여 평균값을 산정하였으며, 각 지역별 물리적 특성을 베이시안 기법(Bayesian approach)을 사용하여 물성치의 경향을 파악하였다.

MCS 기법은 확률분포에 있어서 난수의 선택을 기초한 실험적 수학의 한 분야로 불규칙한 운동을 모델화한 기법으로 매우 다양한 문제를 전자계산기에 발생시켜 무작위로 실험결과를 해석하는 유용한 수학적 모의 방법이다. 베이시안 기법은 사전확률을 표준정보로써 수정하여 객관화하여 사후 확률을 구하는 과정을 말할 수 있으며 이론 과정을 베이시안 분석이라 한다. 본 연구에서는 2000개의 난수를 발생시켜 평균값을 산출하는데 사용하였다.

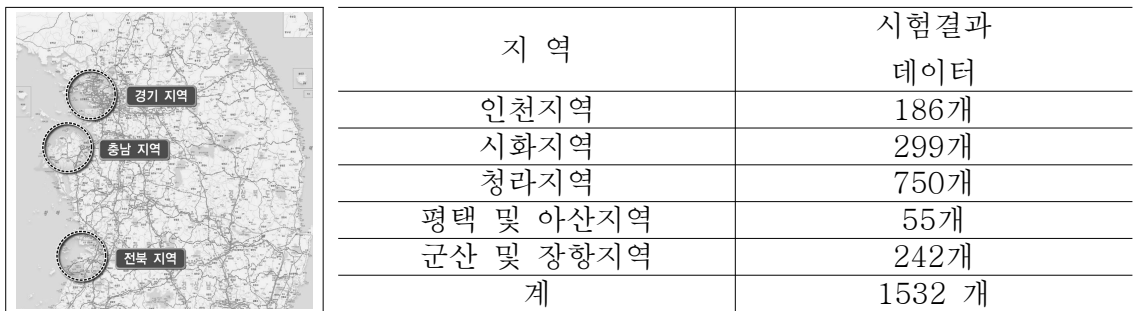


Fig. 3.1 The areas studied

3.1 지질학적 특성

우리나라 해안 연약지역의 특성은 지역별로 또는 성인별로 다르다. 이는 지질학적으로 풍화상태, 광물상태 또는 유기물의 함유상태, 하천 경사도에 따른 유속, 해수의 흐름, 침강 등에 밀접한 관계가 있는 것으로 보여진다(노재민, 2004).

특히 서해안의 경우, 조수간만의 차가 심한 인천, 김포, 아산 등에서 실트질 모래, 모래질 실트가 잔류토층 및 기반암층(풍화암, 연암) 상부에 퇴적되어 있는 곳이 많고 이 위에 실트질 점토가 분포한다. 기반암 상부 퇴적층의 두께는 대략 30m 정도인 곳이 대부분이고, 그 경계는 불규칙하며, 실트질 점토는 다른 연안에 비해 입자가 크고 세립질을 많이 함유하고 있다. 서해안(군산, 목포 연근)은 조수간만의 차가 북쪽에 비해 훨씬 작기 때문에 퇴적점토층이 더욱 연약하며, 그 두께는 약 30m내외로 분포하고 있다. 퇴적점토층 하부에는 얇은 두께로 존재하는 모래, 자갈층이 분포하며, 그 하부에는 잔류토층 및 기반암이 분포하고 있다(이정학, 2000).

연구대상 지역은 서해안 지역으로 크게 3구역으로 분류하여 그 지역의 특성을 구분하였다. 인천, 시화 등의 중심으로 한 경기지역만 지역, 평택 및 아산을 중심으로 하는 충청지역, 군산 및 장항을 중심으로 한 전북지역 등으로 분류하였다. 각 지역별 지형, 지질 및 토층의 분포현황을 개략적으로 살펴보면 아래와 같다.

3.1.1 경기지역 연안

(1) 지형 및 지질

이 지역의 지형은 노년기 지형으로 풍화, 침식작용 등에 의하여 대체적으로 완만한 낮은 구릉지를 형성한다. 해안선을 따라 조그만 구릉이 점차적으로 분포하였고, 산정은 둥근 형태로 침식작용 말기를 나타내고 있다.

사면은 완만하고 구릉지 사이에 비교적 넓은 저지대를 형성하고 있고, 해저경사는

완만하고 연장이 길며, 경기만의 조차는 약 8~9m에 이르고 있다. 이와 같은 조차에 의한 고저 조위 사이에서 해안선의 수평 이동거리가 10km이상 달하고 있는 곳도 있다. 경기만과 임진강과 한강의 유속은 매우 느리게 흐르고 있다. 이 두 강으로부터 퇴적물을 공급받아 오랜 세월동안 침강, 퇴적된 다양한 층적층이 형성되어 간사지가 넓게 발달되어 있는 것이 특징이다(임호인, 1982).

(2) 토층

경기지역 토층은 대체로 퇴적층, 풍화 잔류토층, 풍화암 및 기반암층으로 구분된다. 퇴적층은 상부에 점성토층, 하부에는 사질토층으로 구분되고, 상부의 점성토층은 해수의 작용으로 운반, 퇴적된 층으로 넓게 분포하고 있다. 해측 방향으로 갈수록 두께는 두꺼워지는 경향을 보이고 있다.

하부의 사질토층은 상부로부터 모래질 자갈층, 중간입자의 모래층, 가는 입자의 모래층으로 퇴적된 형상을 나타나고 있다. 모래질 자갈층은 상부로부터 중간입자의 모래층과 가는 입자의 모래층이 계속해서 퇴적되는 경우와 중간입자의 모래층 또는 가는 입자의 모래층만이 퇴적한 경우가 있다. 퇴적층 하부에 분포하는 풍화잔류토 및 풍화암층은 기반암이 원위치에서 오랜 기간 풍화되어 형성된 지층으로서 상부는 풍화잔류토, 하부는 풍화암으로 구분된다.

풍화잔류토는 기반암이 완전 풍화되어 실트 또는 모래질 토사로 되었다. 하부로 갈수록 모암의 역학적 성질은 변화되었지만, 모암의 조직과 구조를 보이며 대단히 치밀하고 견고하다. 풍화암은 화강편마암이 풍화된 것으로 일부는 역학적 성질이 남아 조직이 뚜렷이 나타나는 곳도 있다. 그러나 암질이 부식된 상태이므로 상부의 풍화잔류토와 구분하기 어렵다.

기반암인 화강편마암이 다소 풍화된 상태로 암 내부의 일부를 제외하고는 풍화가 진행되고, 조암광물인 운모는 변색, 변질되고 있으며, 균열이 발달하고 있다.

3.1.2 충청지역 연안

(1) 지형 및 지질

이 지역의 지형은 차령산맥의 일부분 중 끝부분으로, 지형은 노년기의 산지로 형성되어 완만한 경사를 이루고 있다. 대부분 20~60m정도의 완만한 지형형태로 계곡의 발달이 미약하여 하천의 형태를 이루지 못하였다.

또한, 수심이 낮고 파랑이 작으며 해류의 흐름이 느린 특징과 수계는 좁고 짧으며 유속은 느려 간석지가 잘 발달되어있다. 이러한 간석지를 방조제로 축조하여 농지로 활용하는 간척지가 많다는 것이 이 지역의 특징이다.

지질형태는 편암 및 편마암류로 나타나는 선캄브리아기의 변성암류와 이를 관입한 후기의 화성암류로 해안측은 변성암류, 내륙측은 화강암류로 구분된다. 지역의 80%는 4세기로 추정되는 퇴적층이 형성되어 있다.

(2) 토층

최상층 표토층은 모래질 실트, 실트질 점토로 이루어져 있다. 표토층 아래층 상부는 주로 실트질 모래, 실트질 점토, 점토질 실트로 매우 연약하다. 심도가 깊어질수록 점차 조밀 또는 견고해지는 경향이 있다. 하부는 실트질 모래, 실트질 자갈로 느슨한 상태 또는 매우 조밀함 상태를 이룬다.

풍화 잔류토층과 풍화암층은 실트질 모래, 모래질 실트로 구분된다. 퇴적층 하부의 기반암이 완전 풍화된 상태로 분포된 층으로 모암인 편마암류가 풍화되어 토사로 풍화된 상태로 비교적 안정된 상태이다.

3.1.3 전북지역 연안

(1) 지형 및 지질

이 지역의 지형은 해변측은 크고 작은 섬들이 산재되어 있다. 내륙측은 금강을 중심으로 저지대를 형성하고 있으며, 주로 농경지로 이용되고 있다. 수심은 평균 55m 매우 얇고 평탄한 해저 면을 이루고 있다. 연해는 조수간만의 차가 6m정도로 비교적 커서 간조 시 약 3~4km정도의 간석지가 노출된다.

지질 상태는 한반도의 기반암을 이루는 선캄브리아기의 변성암류를 기반암으로

하여 유라기 시대의 화강암과 백악기의 퇴적암류가 부분적으로 분포하는 양상을 보인다.

(2) 토층

이 지역의 토층은 전담토층, 상부퇴적층, 하부퇴적층, 풍화잔류토층, 기반암층으로 구분되고 있다. 전담토층은 육상측에서 농경지로 이용되고 있는 층으로 실트질 점토와 실트층으로 분류되며 함수비는 높은 편이다. 또한 육상측 퇴적층은 상부와 하부로 구분된다. 상부 토층은 실트섞인 점토, 점토섞인 실트, 모래섞인 실트, 점토 및 모래섞인 실트로 분류된다. 하부 토층은 자갈층, 모래층 등 매우 다양하게 형성되어 있다.

풍화 잔류토층은 장기간에 걸쳐 심한 풍화작용을 받아 흙으로 변하여 잔류하고 있다. 기반암층은 선캄브리아기의 경기변성암 복합체에 속하는 편마암과 중생대 유라기의 대보화강암으로 구성되어 있고 대단히 치밀하고 안정된 토층이다.

해성 퇴적층은 상부 모래층, 상부 점토층, 중간 점토층, 하부 모래층, 하부 자갈층으로 분포하고 있다. 금강에서 운반된 토사와 해수의 유속 및 운반, 퇴적작용에 의해 형성된 층으로 지형조건에 따라 분포경향이 상이하다.

地質柱狀圖 DRILL LOG

調査名 PROJECT	시화 멀티 테크노밸리 제5공구 조성공사 지반조사	孔番 HOLE No.	BH - 6 (1)	標高 ELEV.	2.911	(주) 시료 채취 방법의 기호 REMARKS
調査場所 LOCATION	X : 421,476.9 Y : 181,151.8	T.B.M. 地下孔内水位 GROUNDWATER	GL-1.30m	○ 자연 시료 U.D. SAMPLE ⊙ 표준관입시험기에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE ● 코어 시료 CORE SAMPLE ⊗ 흐트러진 시료 DISTURBED SAMPLE		
調査年月日 DATE	2002년 6월 7일	擔當者 DRILLER				

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	層厚 (m)	現場觀察記錄				標準貫入試驗						試料採取						
				土質記號	土質名	色調	觀察	타격회수 입량	타격회수		N 值						試料 番號	深度 (m)	採取 方法	
									15cm	15cm	10	20	30	40	50	60				
				SM	암갈색 적갈색		매립 실트 섞인 모래로 구성. 자갈 함유. 소량의 점토 혼재. 매우 느슨(Very loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist).	4/30	2	2								S1	1.5	○
				ML	암회색		실트 실트로 구성. 매우 연약(Very soft). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	12/30	6	6								S2	3.0	○
				CL	암회색		실트질 점토 실트 섞인 점토로 구성. 매우 연약(Very soft) -연약(Soft). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	1/30	0	1								S3	4.5	○
				ML	암회색		실트 실트로 구성. 매우 연약(Very soft) -보통 견고(Medium Stiff). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	3/30	1	2								S4 S01	6.0	○
				SM	암회색		실트질 모래 실트 섞인 세립 모래로 구성. 느슨(Loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	2/30	1	1								S5	7.5	○
				ML	암회색		실트 실트로 구성. 매우 연약(Very soft) -보통 견고(Medium Stiff). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	2/30	1	1								S6	9.0	○
				SM	암회색		실트질 모래 실트 섞인 세립 모래로 구성. 느슨(Loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	6/30	4	2								S7	10.5	○
				SM	암회색		실트질 모래 실트 섞인 세립 모래로 구성. 느슨(Loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	6/30	2	4								S8	12.0	○
				SM	암회색		실트질 모래 실트 섞인 세립 모래로 구성. 느슨(Loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	8/30	2	6								S9	13.5	○
				SM	암회색		실트질 모래 실트 섞인 세립 모래로 구성. 느슨(Loose)- 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	10/30	4	6								S10	15.0	○
				ML	암회색		실트 실트로 구성. 매우 연약(Very soft) -보통 견고(Medium Stiff). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	5/30	2	3								S11	16.5	○
				ML	암회색		다음 페이지 참조. 다음에 계속됨.	4/30	2	2								S12	18.0	○

Fig. 3.2(a) Drill Log in Kyonggi area

調査名 PROJECT		시화 멀티 테크노밸리 제5공구 조성공사 지반조사		孔番 HOLE No.		BH - 6 (2)		標高 ELEV.		2.911		(주) 시료 채취 방법의 기호 REMARKS									
調査場所 LOCATION		X : 421,476.9 Y : 181,151.8		T.B.M.		_____		地下孔内水位 GROUNDWATER		GL-1.30m		○ 자연 시료 U.D. SAMPLE	◎ 표준관입시험기에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE								
調査年月日 DATE		2002년 6월 7일		擔當者 DRILLER		_____		● 코어 시료 CORE SAMPLE	⊗ 혼트러진 시료 DISTURBED SAMPLE												
標尺 (m)	標高 (m)	深 (m)	層 厚 (m)	現場觀察記錄				標準貫入試驗					試料採取								
				土質 記號	土質名	色調	觀察	타격회 수 입양	타격회수 15cm	타격회수 15cm	N 值					試料 番號	深度 (m)	採取 方法			
							앞에서 계속됨.														
19					ML	담회색	모래질 실트 세립모래 섞인 실트로 구성. 보통 견고(Medium stiff). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	4/30	2	2							S13	19.5	○		
		17.79	20.7	2.9																	
21					SM	담회색	모래 세립모래로 구성. 보통 조밀(Medium dense). 습윤(Moist)-젖음(Wet).	23/30	10	13							S14	21.0	○		
		18.99	21.9	1.2																	
22					GP	담회색	모래질 자갈 자갈 섞인 중립내지 조립의 모래로 구성. 보통 조밀(Medium dense) -매우 조밀(Very dense). 습윤(Moist).	37/30	17	20							S15	22.5	○		
23																					
24										32/30	14	18							S16	24.0	○
25										50/24	30	20/9							S17	25.5	○
26																					
27								24/30	12	12						S18	27.0	○			
28		25.39	28.3	6.4																	
29					연암	담회색	연암 편마암의 연암. 보통 풍화(M.W)상태. 보통 강함(M.S)- 강함(Strong). 균열 및 절리 발달.										C1		●		
30		27.59	30.5	2.2															C2		●
31							암편-점추상 core로 산출. #28.3-28.5m T.C.R:100%, R.Q.D:0%														
32							#28.5-30.5m T.C.R:100%, R.Q.D:72%														
33							시추 종료 : 30.5m														
34																					
35																					
36																					

Fig. 3.2(b) Drill Log in Kyonggi area

지 질 주 상 도

DRILL LOG

SHIL 104 2

조 사 명 평택항 모래부두 비관리청 공 번 표 고 (주) 시료 채취 방법의 기호
 PHO.LOCI 항만공사 설계유역 지반조사 HOLL No. BH-3 LLLV. DI (t) 3.5 m HLLSHFS
 조사 장소 X : 390,259.380 I.U.W. 자역시료 U.D. SAMPLE
 LOCATION Y : 181,701.513 지하공내수위 관입시험기^o 의한 시료
 GHOUNDAILH
 조사년월일 당 당 자 정 길 만
 DATE 2004. 7. 3. DRILLH

표 적 (T)	표 도 (T)	심 도 (T)	층 수 (T)	현 장 관 찰 기 록			표 수 관 입 시 험				시 료 재 취 심도 (T)	재 취 방법			
				토질 기록	색 조	관 찰	타격회수 15cm	타격회수 30cm	N	치 10 20 30 40					
1				퇴적층	암회색	* 퇴적층 심도 0.0 - 5.9 m 실트질 점토. UD채취 : 4.5 - 5.3m 매우연약, 습유.	0/30	0	0			0.1	○		
2								0/30	0	0			1.5	○	
3									0/30	0	0			3.0	○
4														4.5	○
5														UD	
6	-2.4	5.9	5.9	퇴적층	암회색	* 퇴적층 심도 5.9 - 8.1 m 모래자갈. 보통조밀, 젖음.	10/30	6	4			6.0	○		
7									1/30	7	10			7.5	○
8	-4.6	8.1	2.2	퇴적층	암회색	* 퇴적층 심도 8.1 - 18.4 m 실트질 점토. 소량의 모래 함유. UD채취 : 10.5 - 11.3m 매우연약-보통강고, 습유. 8.1-15.0m : 실트 우세.	0/30	0	0			9.0	○		
9														UD	
10														UD	
11														UD	
12									3/30	1	2			12.0	○
13									3/30	1	2			13.5	○
14									4/30	2	2			15.0	○
15									3/30	2	1			16.5	○
16							1/30	0	1			18.0	○		
17															
18	-14.9	18.4	10.3			* 풍화도									

Fig. 3.3(a) Drill Log in Chungchong area

표		심		총		현				관				표				시		료	
척	도	도	후	토	토	색	조	관		타	타		N		치	시	심	채			
(m)	(m)	(m)	(m)	질	질			찰	격	격	15	15	10	20	30	호	도	취			
			기록	명	명			관	회	회	관	관	관	관	관	번호	(m)	방법			
20	-16.8	20.3	1.9	+	풍화토	황갈색		심도 18.4 - 20.3 m 실트질 모래. 암편 함유. 매우조밀. 습윤.	50/20	50/20							19.5				
21				+					50/13	50/13							21.0				
22				+				* 풍화암 심도 20.3 - 27.0 m	50/10	50/10							22.5				
23				+																	
24				+	풍화암	황갈색			50/4	50/4							24.0				
25				+																	
26				+					50/4	50/4							25.5				
27	-23.5	27.0	6.7	+																	
28	-24.5	28.0	1.0	+	연암	황갈색		* 연암 심도 27.0 - 28.0 m 심한풍화. 약함. 암편상 코어 회수. 시추종료 : 28.0 m													
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					

Fig. 3.3(b) Drill Log in Chungchong area

토 질 주 상 도

용역명	군정항 국가 산업단지(군정지구)호안도로공사 대한설계 지반조사	공 변	BH-14	시작일자 종료일자	2005. 06. 3 2005. 06. 5	SAMPLE // U. D. S.P.T. ● CORE — VANE	
위 치	STA. NO. 128+10.9	조사목적	지반조사	해저면고	E.L.(-1.54)M		
심 도	32.9M	조사방법	회전수세식	조 사 자	수 심		3.3M
좌 표	X : 281838.08 Y : 166937.82	조사장비	유압-400	천 공 자	공 경		NX

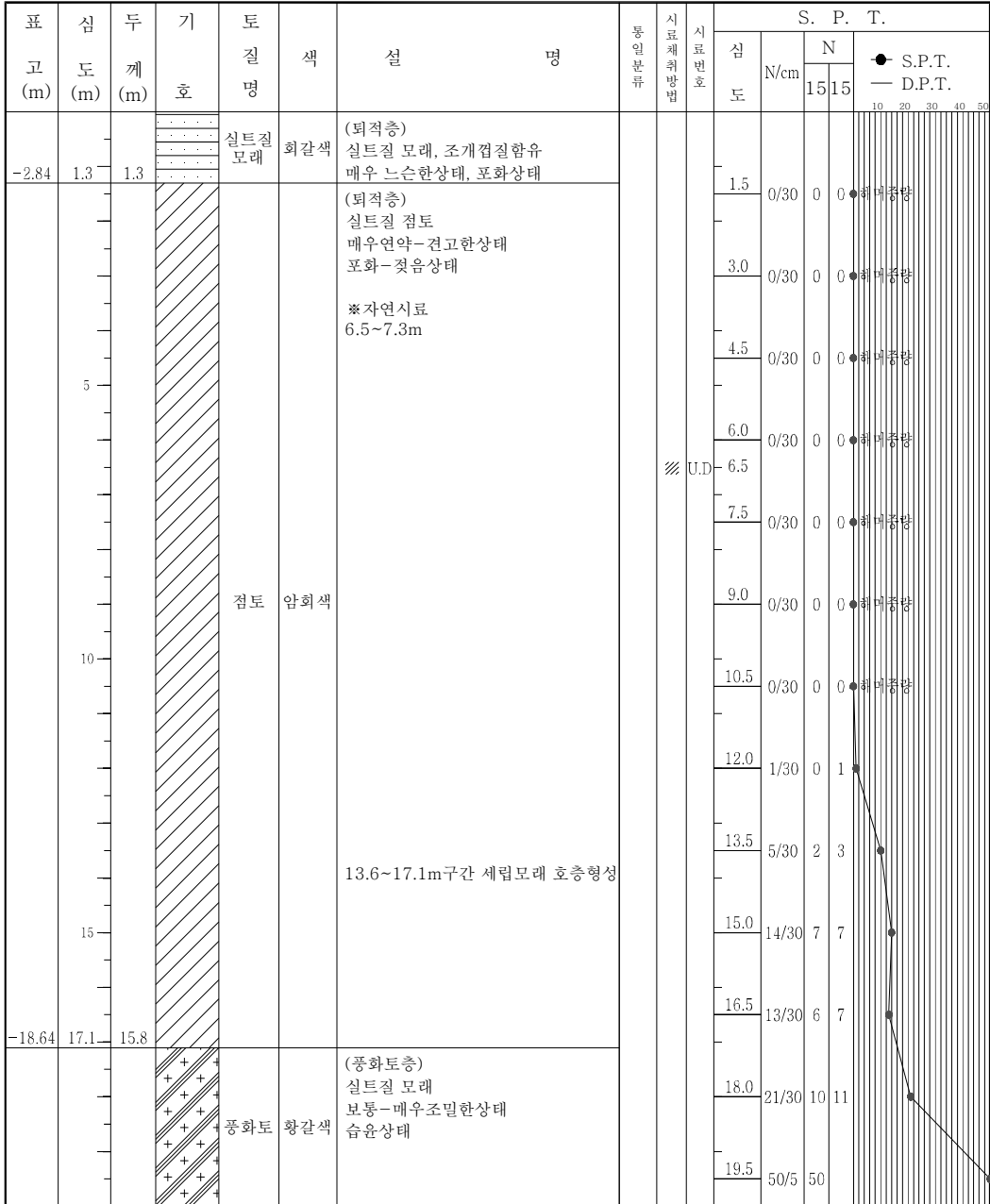


Fig. 3.4(a) Drill Log in Jeonbuk area

용역명	군장항 국가 산업단지(군장지구)호안도로공사 대안설계 지반조사			공번	BH-14	시작일자 종료일자	2005.06.3 2005.06.5	SAMPLE U. D. S.P.T. CORE VANE
위치	STA. NO. 128+10.9			조사목적	지반조사	해저면고	E.L(-1.54)M	
심도	32.9M	조사방법	회전수세식	조사자		수심	3.3M	
좌표	X 213	조사장비	유압-400	천공자		공경	NX	

표고 (m)	심도 (m)	두께 (m)	기호	토질명	색	설명	통일분류	시료취취방법	시료번호	S. P. T.				
										심도	N/cm	N		S.P.T. D.P.T.
												15	15	
-22.54	21.0	3.9	+	풍화암	황갈색	(풍화암층) 굳진시 실트질 모래로 분쇄 매우조밀한상태 습윤상태				21.0	50/15	50		
-26.84	25.3	4.3	+	연암	담회색	절리 및 파쇄집합 보통풍화상태~심한풍화 편암류 <25.3~27.1m구간> 1.8 TCR:83.3%, RQD:5.5% <27.1~28.9m구간> 1.8 TCR:77.7%, RQD:0.0% <28.9~30.9m구간> 2.0 TCR:100%, RQD:0.0% <30.9~32.9m구간> 2.0 TCR:80.0%, RQD:15.0% 전체적 $\angle 65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ *Medium Hard~Very Hard Smooth				22.5	50/13	50		
-34.44	32.9	7.6	+			심도 32.9에서 시추종료				24.0	50/7	50		
	35													

Fig. 3.4(b) Drill Log in Jeonbuk area

3.2 물리적 특성

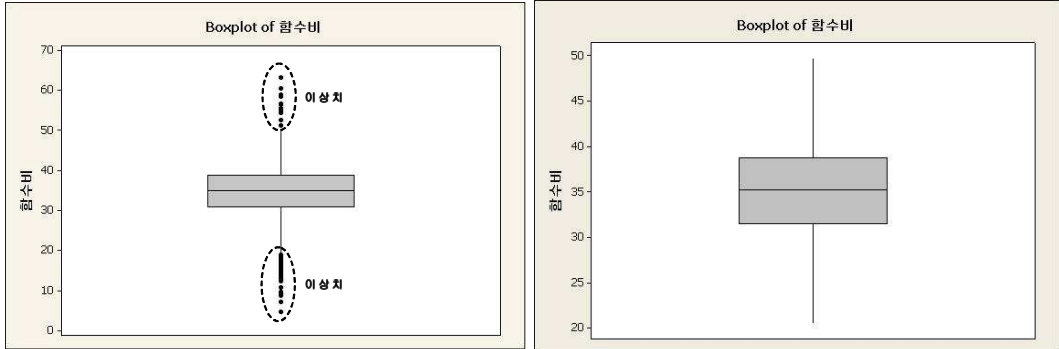
흙의 분류와 판별에 관한 기본적인 성질을 총칭한 것이 물리적 특성이며, 그 특성을 파악하기 위한 시험으로는 입도, 비중, 액·소성한계 등과 같은 흙의 분류 및 판별하기 위한 시험과 함수량, 간극비, 밀도 등과 같이 흙의 상태를 파악하기 위한 시험으로 구분된다. 대상지역의 점성토를 대상으로 실시된 함수비(KS F-2306), 액성한계시험(KS F 2303) 및 소성한계 시험(KS F-2304)의 시험 결과를 분석하였다.

3.2.1 자연함수비

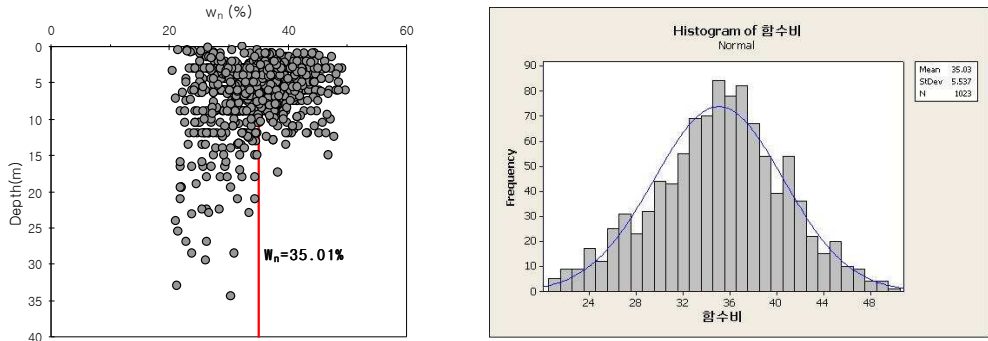
해성점토의 역학적 성질은 그 함수량에 의해 크게 좌우되기 때문에 함수비를 파악하면 흙의 성질을 대략 추정할 수 있다. 연약한 충적점토는 일반적으로 지하수위 아래 있으므로 완전히 포화되어 있어 자연함수비가 그 지역 해성 점토의 역학적 특성을 파악하는데 중요한 지표가 된다.

대상지역중 경기지역의 경우, 총 1,235자료 중 함수비를 시험한 723개의 시험 결과를 이용하였고, 자연함수비는 4.7~60.5%의 범위로 분포하고 있으며, 평균 34.9%로 나타났다. 시료채취 중 시료의 교란 및 실내시험에서의 오차 등으로 인한 이상치가 발생되었다. 시험결과 값들 중 발생된 이상치를 제거하기 위해서 Minitab Program을 활용하였다. 이상치를 제거한 후 시험결과 값은 709개로, 함수비의 범위는 15.1~54.9%로 나타났으며, 평균값은 35.0%로 분석되었다. 이상치가 제거된 시험결과를 바탕으로 MSC 분석을 실시하였다. 이 과정에서 2,000개의 난수를 생성시켰고, 신뢰도 95%로 수준에서 다시 이상치를 제거하였다. 이 과정에서 7개의 이상치가 발생하였으며, 이것을 제거한 후 함수비는 17.32~52.22%로 나타났다. 평균은 35.01%, 표준편차는 5.267로 나타났다. 오차 범위는 0.231이고 신뢰도 95%구간에서 하한 값은 34.86, 상한 값은 35.32로 나

타났다. Fig. 3.1은 Minitab 프로그램을 이용하여 이상치의 제거 전·후 과정을 보여주고 있다. 도표에서 보면 위 또는 아래에 분포하는 점들은 이상치를 나타낸 것이고, 상부의 끝선은 상한선을, 하부의 끝선은 하한선을 나타낸 것이다. Fig. 3.2(a)는 경기지역의 함수비를, Fig. 3.2(b)는 이상치 제거 후 함수비 히스토그램을 나타낸 것이다.



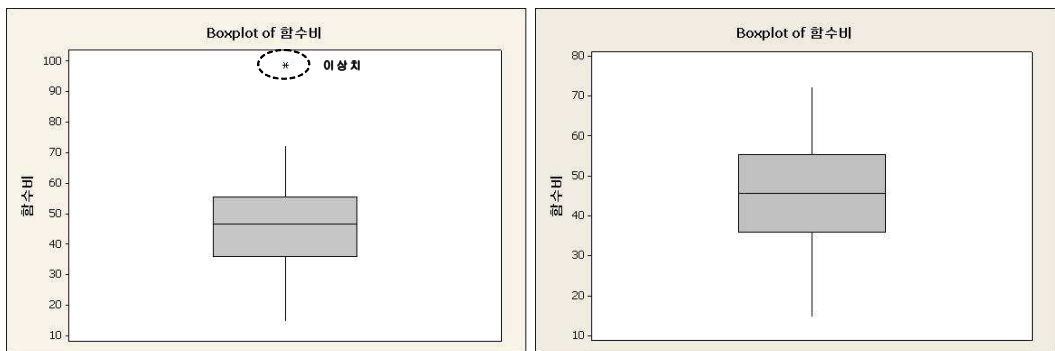
(a) Outlier exclusion before (b) Outlier exclusion after
Fig. 3.5 Natural water content for marine clay of Kyonggi area
(Outlier exclusion before and after)



(a) Natural water content by depth (b) Histogram of Natural water content

Fig 3.6 Natural water content for marine clay of Kyonggi area

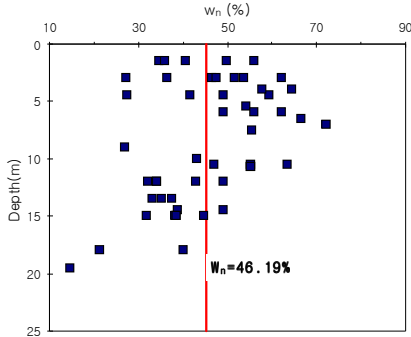
충청지역은 총 55개의 자료 중 함수비를 시험한 50개의 실내시험 결과를 이용하였다. 자연함수비의 전체범위는 14.7~72.3%로 나타났으며, 평균값은 46.19%로 분석되었다. 전체적으로 실내시험 자료의 부족과 퇴적환경의 영향으로 인해 분산도가 넓게 분포하고 있으며, 상부에서 GL(-) 7~8m 지점까지 자연함수비가 증가하다가 이후 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 조수간만 차에 의한 간조위시 상재하중 변화에 기인한 과압밀 점성토 때문이라 추측된다. Bjerrum(1973)은 건조표층의 두께는 배수조건이 불량한 상태의 소성점토 지반의 경우 1~3m, 배수조건이 양호한 상태의 저소성 점성토 지반의 경우 6~8m 범위로 확인 된다는 연구결과를 발표했는데, 충청지역의 점성토가 이 경우에 해당되는 것이라 생각된다. 향후 더 많은 데이터를 수집 및 분석하면 과압밀의 원인과 정확한 심도까지 파악될 수 있을 것이다. 충청지역의 함수비 분석은 경기지역의 분석과 같이 이상치를 제거한 후 신뢰도 95%구간에 대해 MCS분석을 실시하였다. 분석결과 신뢰도 95%구간에 대해 오차범위는 0.541로 나타났고, 하한 값은 44.80%, 상한 값은 45.89%의 범위에 분포되는 것으로 조사되었다. 평균은 45.34%로 나타났다.



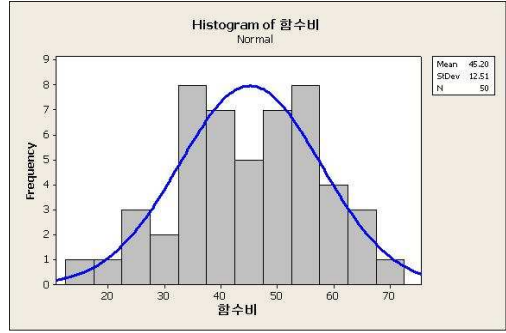
(a) Outlier exclusion before

(b) Outlier exclusion after

Fig. 3.7 Natural water content for marine clay of Chungchong area (Outlier exclusion before and after)



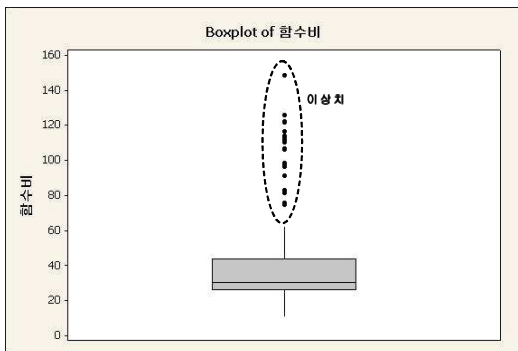
(a) Natural water content by depth



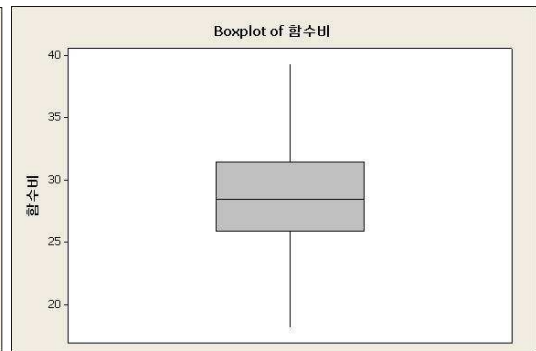
(b) Histogram of Natural water content

Fig. 3.8 Natural water content for marine clay of Chungchong area

전북지역은 총 242의 실내시험 자료 중 158개의 함수비 시험결과를 이용하였다. 표준편차는 4.432로 분석되었다. 경기지역 및 충청지역과 같이 이상치를 제거하여 MCS기법을 이용하여 신뢰도 95%수준, 오차범위 0.691수준에서 함수비 평균값을 산정하였다. 하한 값은 28.0% 상한 값은 29.4%로 나타났으며, 평균 28.5%로 분석되었다. 전체적으로 분산도가 적으며, 심도에 관계없이 일정한 경향으로 분포되고 있다.

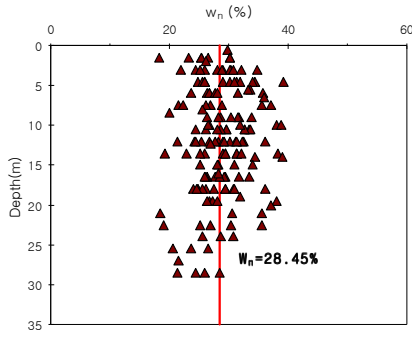


(a) Outlier exclusion before

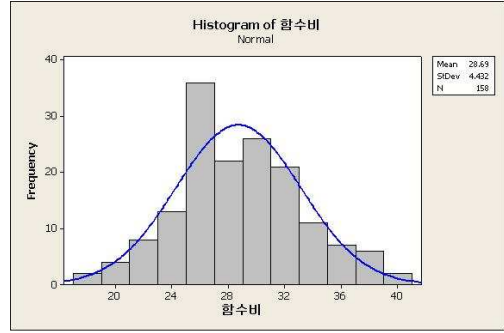


(b) Outlier exclusion after

Fig. 3.9 Natural water content for marine clay of Jeonbuk area
(Outlier exclusion before and after)

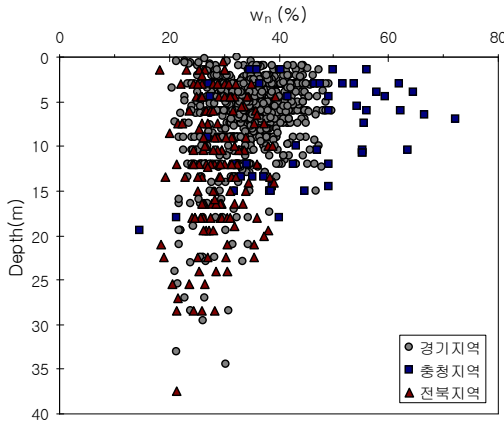


(a) Natural water content by depth

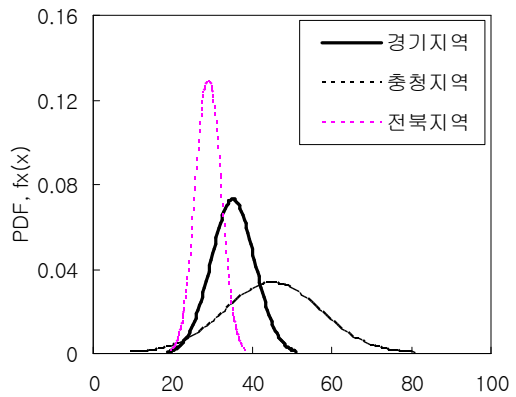


(b) Histogram of Natural water content

Fig. 3.10 Natural water content for marine clay of Jeonbuk area



(a) Natural water content distribution by depth



(b) Distribution of Natural water content

Fig 3.11 Natural water contentt for marine clay

Fig. 3.11(a)는 서해안 지역 전체(충청, 경기, 전북)의 함수비를 나타내었다. 심도에 따라 함수비가 증가하다가 대략 GL.(-)8.0~10.0m 이후 심도에 관계없이 일정하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 지표로부터 0.0~8.0m까지 함수비의 분산도가 넓은 것을 알 수 있다. 이는 경기지역의 분석 자료가 가장 많고, 상부층 점성토가 매립과 증발산에 의한 과압밀 상태와 정규압밀 상태로 분포하는 점성

토가 지역에 따라 다르게 분포하기 때문이라 추측된다. 하부 층으로 갈수록 정규압밀 상태를 보여 심도에 상관없이 일정하게 분포하는 것으로 추측된다. Fig. 3.11(b)는 경기지역, 충청지역, 전북지역의 함수비를 베이시안 기법을 사용하여 분포경향을 나타낸 것이다. 당초 토목분야에서 베이시안 기법은 설계정수 산정을 위해 사전정보와 표본정보를 결합하여 미지의 정수를 산정하는 방법이나 본 연구에서는 각 지역별 함수비의 경향을 파악하기 위해 사전정보에 각 지역을 함수비를 입력하는 방식으로 함수비 경향을 나타내었다. 베이시안 기법을 사용하여 함수비를 분석한 결과, 함수비는 충청지역이 가장 높았고, 경기지역, 전북지역 순으로 나타났다. 또한 분산도는 충청지역이 가장 넓게 나타났으며, 경기지역, 전북지역 순으로 분포되었다. 분산도가 넓은 충청지역은 분석 자료가 적고 심도별 함수비의 변화가 심하다는 것을 의미한다. 전북지역의 분산도가 좁은 것은 함수비의 분포가 평균 값 근처에 밀집되어 있음을 의미한다. 또한, 자연 함수비의 변화가 심하지 않다는 것을 의미한다.

3.2.2 액성지수와 소성도

액성지수(Plasticity Index, LI)는 흙이 성형 가능한 소성상태를 가질 수 있는 함수비의 범위 내에서 현재의 함수비가 상대적으로 어느 위치일까, 즉 자연상태의 흙이 교란되어질 경우 어느 정도 액체상태로 되기 쉬운가를 나타내는 지수이다.

$$LI = \frac{w_n - w_p}{w_l - w_p} = \frac{w_n - w_p}{I_p} \quad \text{식 (3.1)}$$

여기서, LI : 액성지수
 w_n : 자연함수비
 w_p : 소성한계
 w_l : 액성한계
 I_p : 소성지수

LI 는 점성토의 응력이력을 개략적으로 판별하는데 사용되는데, 정규압밀 점성토의 액성지수는 0.6~1.0, 과압밀 점성토의 LI 는 0~0.6 정도이다(Simons & Menzies, 1975). 자연함수비가 액성한계보다 크면 LI 값이 1이상이 되어 충격을 받으면 슬러리 상태가 되어 유동화 되기 쉽다. LI 가 0에 가까울수록 높은 공학적 안정하다(한국지반공학회, 2003).

본 연구에서는 LI 를 사용하여 대상지역의 개략적인 압밀도를 평가하기 위해서 Fig. 3.12와 같이 나타내었다.

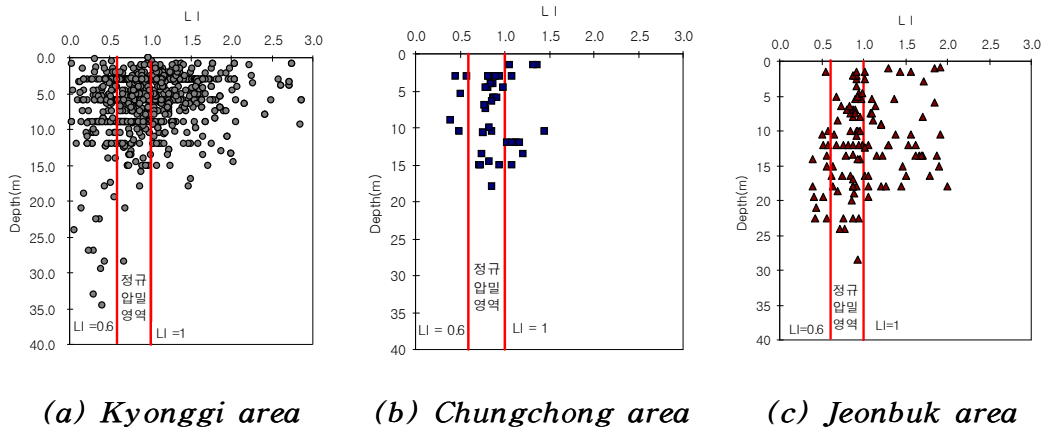


Fig. 3.12 Liquidity index

경기지역의 LI 를 보면, GL(-)0.0~15.0m에는 넓은 분산도를 보이고 있으며, 심도가 깊어질수록 분산도가 줄어드는 것을 알 수 있으나 일정한 경향은 보이지 않는다. 이는 GL(-)0.0~15.0m까지는 매립과 건조에 의한 과압밀 상태와 정규압밀 상태의 점성토가 지역에 따라 다르게 분포되기 때문이라 추측된다. 또한 $LI < 1$ 이상의 경우는 시료의 교란과 토질시험에 따르는 오차가 수반되었기 때문이라 생각되며, 향후 다 많은 자료분석을 통해 원인을 규명해야 할 것으로 판단된다.

충청지역의 경우, 전반적으로 $0 < LI < 1$ 로 분포되며 과압밀에서 정규압밀 상

태를 보이고 있다. 전체적인 경향을 보고 판단했을 때 정규압밀 상태에 가까운 응력이력을 가지고 있음을 예측할 수 있다.

전북지역의 경우, 자연함수비가 일정한 경향을 보이는 반면에 LI 는 분산이 심하게 나타는 것을 알 수 있다. 이는 자연함수비에 소성지수(Plasticity index, I_p)가 작은 것에 기인된 것으로 조립질 성분이 많이 함유되어 있기 때문이라 판단된다.

대상지역의 전체적인 경향은 상부층의 분산도가 넓게 분포한다는 것이다. 이는 경기지역의 분석 자료가 가장 많고, 상부층 점성토가 매립과 증발산에 의한 건조로 인한 과압밀 상태와 정규압밀 상태로 존재하는 점성토가 지역에 따라 다르게 분포하기 때문이라 추측된다. 자연함수비에 비해 조립질 성분이 많이 함유되어 있어, 소성한계의 범위는 좁아 I_p 가 적게 나타난 결과라 추측된다. 경기지역 일부 및 전라지역의 점성토가 $0 < LI < 0.6$ 의 과압밀 현상이 나타나는데 이는 퇴적환경의 의한 건조(Desiccation)와 화학적 작용이라 추측된다(OO 지역 퇴적이력 분석 보고서: 2006. 01). 건조작용은 간극수압의 감소 및 유효응력의 증가원인이 된다. 또한 간극비의 감소를 유발시켜 건조와 수축을 수반하는 건조표층의 성격을 갖게 되고 풍화과정의 가속과 산화의 원인 및 겔보기 과압밀의 발생원인이 된다. 건조표층의 두께는 배수조건이 불량한 상태의 소성점토 지반의 경우 1m~3m, 배수조건이 양호한 상태의 저소성 점성토 지반의 경우 6m~8m의 범위로 확인되고 있다(Bjerrum, 1973). 대상구역은 저소성 점성토가 많이 분포된 지반으로 과압밀 점성토의 범위가 Bjerrum (1973)의 연구결과와 유사한 경향으로 나타났다. Fig. 3.13은 서해안 지역의 소성도를 도시화 한 것으로, 채취된 시료에 대해 연경도 분석을 실시한 결과, CL시료가 CH시료나 ML시료 보다 많으며 이는 시험결과 값이 가장 많은 경기지역의 영향 때문이라 생각된다. Casagrande(1936)의 분류에서 보면 $LL > 50$ 이상이면 압축성이 큰 흙으로 $30 < LL < 50$ 이면 중간 압축성을 나타내며, 그 이하는 작은 압축성을 의미하는 것으로 전북지역을 제외한 대부분의 서해안 지역은 중간 압축성을 보이고 있다.

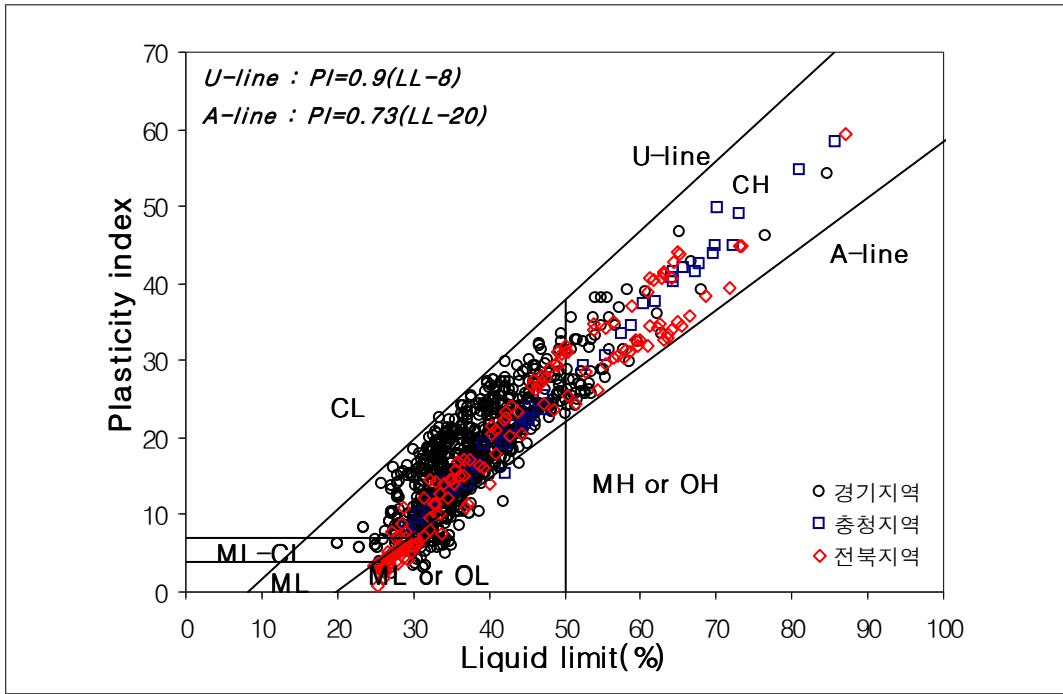


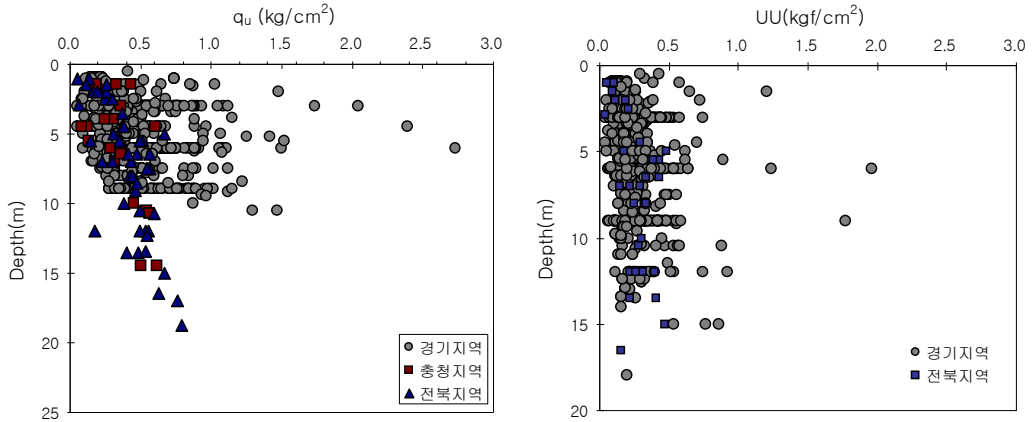
Fig. 3.13 Plasticity chart for marine clay

3.3 역학적 특성

대상지역 시료에 대한 실내시험을 실시하여 심도에 따른 비배수전단강도 경향을 파악하였다. 비배수전단강도는 일축압축시험과 삼축압축시험의 결과 값을 사용하여 분석을 실시하였고, 압밀특성을 파악하기 위해 표준압밀시험에서 구한 결과 값들을 이용하여 압축지수와 선형압밀응력을 분석하였다.

3.3.1 비배수전단강도(*Undrained Shear Strength, S_u*)

일축압축시험(Unconfined compression test)은 시험장치가 간단하고 연약한 점성토에서 편리한 시험이며, 이용실적이 풍부하다. 삼축압축시험(Unconsolidated - Undrained Triaxial test, UU-test)은 배수조건을 조절할 수 있고, 등방 및 비등방 압밀을 조절 가능하다. 본 연구에서는 상호 보완적인 의미로 일축시험과 UU-test를 병행하여 실시한 결과를 분석에 사용하였다. Fig. 3.14는 심도에 따른 서해안 전체 지역의 일축압축강도와 비배수전단강도(Undrained shear strength, S_u)를 나타낸 것이다.



(a) Unconfined compressive strength (b) Triaxial compressive strength
 Fig. 3.14 Unconfined compressive strength and triaxial compressive strength

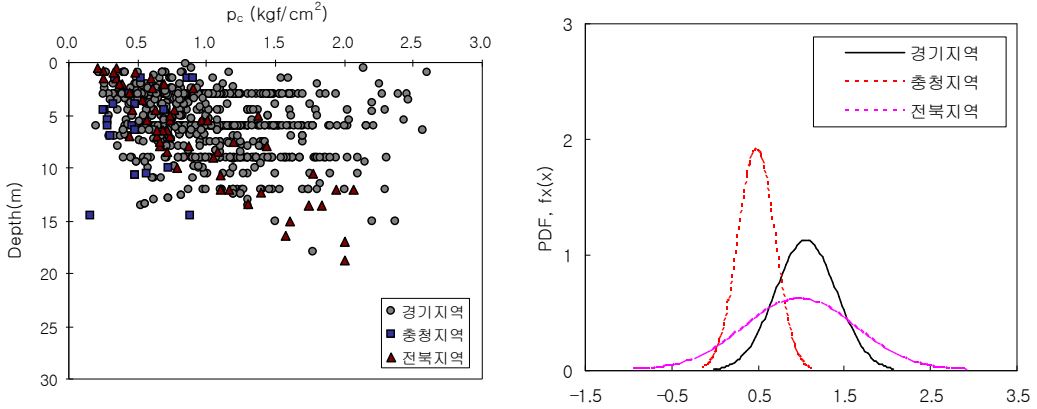
Fig. 3.14(a)는 서해안 지역의 일축압축강도를 나타낸 것으로, 경기지역은 분산도가 넓게 분포되고 있다. 이는 앞에서 분석한 결과와 같은 이유 때문이라 추측된다. 충청지역과 전북지역은 심도에 따라 일정하게 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 전북지역의 경우, LI 를 이용한 압밀상태의 분석과 다른 결과를 보인다. 이는 역학시험(일축 및 UU-test)한 시료가 정규압밀영역에 해당된 것이기 때문이라 추측된다. Fig. 3.14(b)는 UU-test한 결과를 보여주고 있다. 경기지역은 일축압축강도의 결과 분포도와 약간 분산이 있으나, 분산도가 넓지 않음을 알 수 있다. 충청지역은 UU-test의 결과 값들이 없어서 표현하지 못했다. 전북지역은 심도가 깊어질수록 선형적으로 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

3.3.2 선행압밀하중(Preconsolidation Pressure, P_c)

Casagrade(1936)는 선행압밀하중(P_c)을 결정하는 경험적인 접근방법으로 $e - \log p$ 압밀곡선에서 P_c 을 초과하는 정규압밀구간에서는 직선부분으로 나타난다. 반대수 도표에 의한 점성토의 특성은 비선형 압밀과 한계상태 개념과

같은 흙의 거동에 관계된 이론을 유추하는 요소로서 이용되고 있다.

대상지역에서 선행압밀응력의 산정은 Casagrade(1936)가 제안한 표준압밀시험에 의해 산정된 결과 값을 사용하였다.



(a) P_c distribution by depth

(b) Distribution of P_c

Fig. 3.15 P_c for marine clay

Fig. 3.15(a)는 심도에 따른 P_c 의 분포를 나타내었다. 경기지역은 분산도가 넓고 일정한 경향을 보이지 않는다. 다만 상부 층은 분산도가 크고 심도가 깊어질수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 LI 의 분석과 같이 과압밀 상태와 정규압밀 상태로 존재하는 점성토가 지역에 따라 다르게 분포하기 때문이라 추측된다.

충청지역이 경우, 상부는 P_c 가 크고 심도가 깊어짐에 따라 작아지는 경향을 보이고 있으나, 시험결과의 데이터가 적은 관계로 경향을 파악하는데 무리가 있으나, 자연함수비와 LI 및 비배수전단시험의 결과 값들과 비교해 볼 때, 시료의 교란과 토질시험에 따른 오차로 기인된 것이라 추측된다. 전북지역은 심도가 깊어지면 P_c 가 증가하는 경향을 보이고 있으며, S_u 와 유사한 형태로 나타난다.

Fig. 3.15(b)는 경기지역, 충청지역, 전북지역의 P_c 의 베이시안 기법을 사용

하여 P_c 의 분포경향을 보여준다. 경기지역은 평균 1.053kgf/m^2 이고 표준편차는 0.353, 충청지역은 평균 0.481kgf/m^2 이며 표준편차는 0.209로 분석되었다. 또한, 전북지역은 평균 0.984kgf/m^2 , 표준편차는 0.644로 나타났다. 충청지역의 P_c 의 평균값이 경기지역과 전북지역보다 적게 평가된다. 이는 LI 를 이용한 압밀상태의 평가와 관련 있으며, 경기지역과 전북지역은 과압밀 상태와 정규압밀 상태의 점성토가 공존하고 있으나, 충청지역은 대부분 정규압밀상태에 가까운 응력이력을 경험하고 있어 위와 같은 경향을 보이는 것으로 추측된다.

3.3.3 압축지수(Compression Index, C_c)

점성토의 압축거동과 압축특성을 나타내는 지표로 이용되는 압축지수(C_c)는 표준압밀곡선에서 P_c 를 초과하는 직선부분의 기울기를 말한다. 표준압밀시험에 의한 압축지수 산정에는 상당한 시간이 소요되므로 각종 물리적 성질에서 C_c 를 유도하는 많은 경험식이 제안되고 있다. 본 연구에서는 서해안 지역별로 심도에 따른 점성토의 C_c 의 분포를 분석하였고, 경기지역, 충청지역, 전북지역에 대한 점성토의 C_c 경향을 도시화하였다.

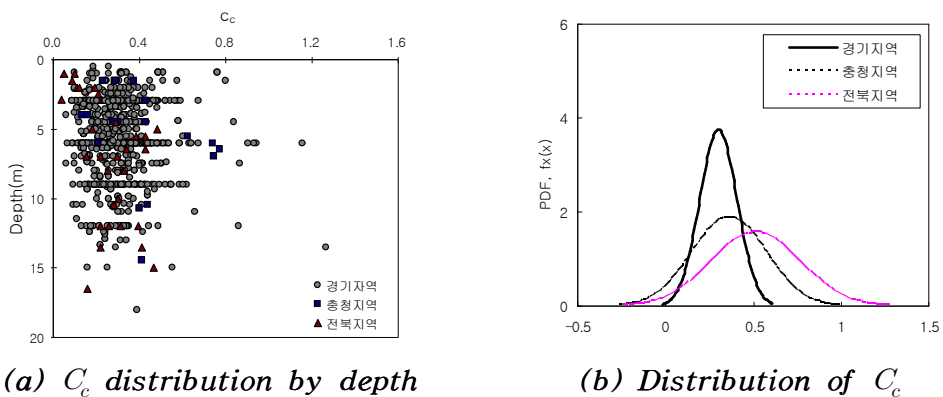


Fig. 3.16 C_c for marine clay

Fig. 3.16(a)의 경우, 경기지역은 C_c 의 분포는 전체적으로 분산도가 심하며, 일정한 경향을 보이지 않는다. 상부 GL(-) 6m까지는 C_c 가 넓게 분포하며, 이후 심도가 깊어질수록 분산이 감소되는 것을 알 수 있다. 충청지역은 하부로 갈수록 C_c 가 증가하는 형태를 보이나, 뚜렷한 형태는 보이지 않는다. 전북지역은 심도가 깊을수록 약간 증가하는 경향을 보이나 대체로, 일정한 값을 보인다.

Fig. 3.16(b)는 서해안 지역의 C_c 의 편차와 경향을 보여주고 있다. 경기지역은 평균 C_c 는 0.301, 표준편차는 0.106을 보이고 있다. 충청지역은 평균 C_c 는 0.362, 표준편차는 0.210으로 나타났다. 전북지역은 평균 C_c 는 0.513, 표준편차는 0.253을 보이고 있다. 가장 많은 시험결과 값이 있는 경기지역의 표준편차가 적게 나타났고, 전북지역의 표준편차가 가장 크게 나타났다.

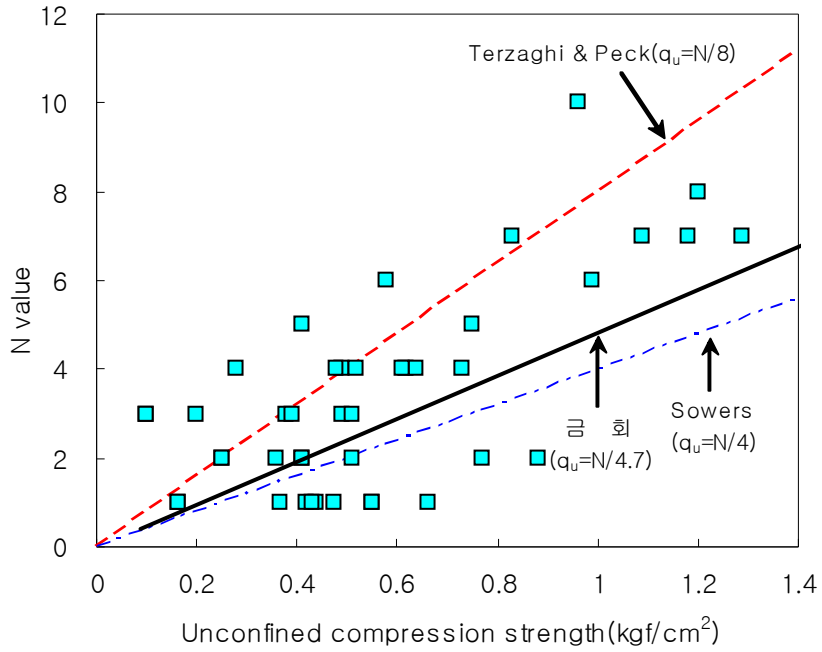
제 4 장 분석 및 고찰

본 장에서는 경기, 충청, 전북 3곳의 서해안 점성토를 통일분류법에 의해 CH, CL, ML 시료로 분류하여 표준관입시험(SPT) 결과 값인 N 값과 일축압축강도(q_u)를 관계를 이용하여 경험식을 제안하고, 서론에서 제시된 국·내외 경험식과 비교하여 연구대상지역의 시료별로 적용될 수 있는 경험식을 제안하고자 한다.

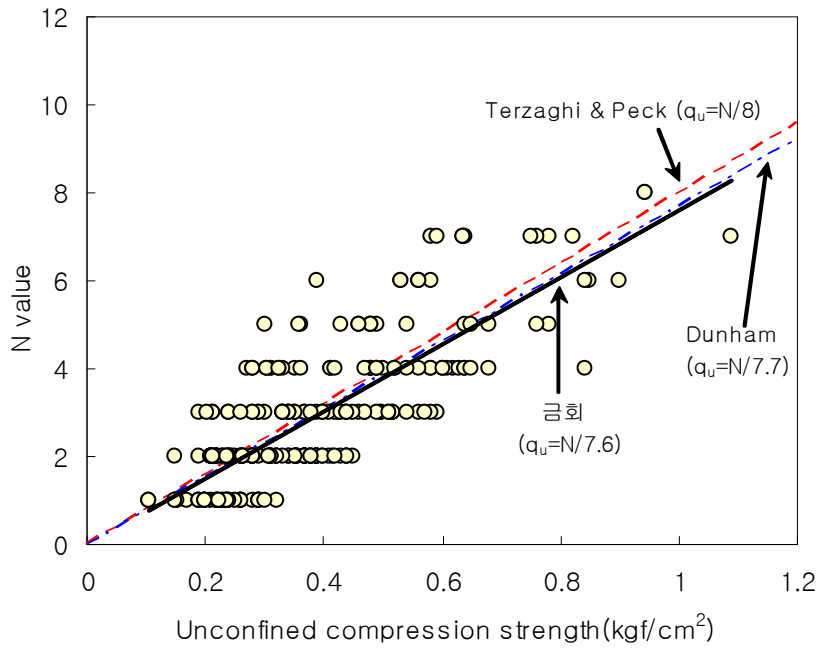
또한, 선행압밀하중(P_c)과 비배수전단강도(S_u) 및 소성지수(I_p)를 이용하여 토질별 적합한 강도증가식을 제안하였다. 이 제안식에서 P_c 를 미지수로 하여 C_u 와 I_p 의 방정식으로 나타내었다. 여기서, 점성토에서는 $S_u = C_u$ 의 관계가 성립하므로 C_u 는 $q_u/2$ 의 관계식을 이용하여 산정하였다. q_u 는 N 값과 q_u 의 경험식으로부터 구하였다. I_p 는 실내시험 결과를 사용하였다. 이런 관계에서 예측한 $P_{c(est)}$ 과 표준관입시험에서 구한 시험 값인 $P_{c(lab)}$ 과 상관성을 분석하였고 신뢰도를 검증하였다.

4.1 표준관입시험 결과 값(N 값)과 일축압축강도(q_u)의 관계

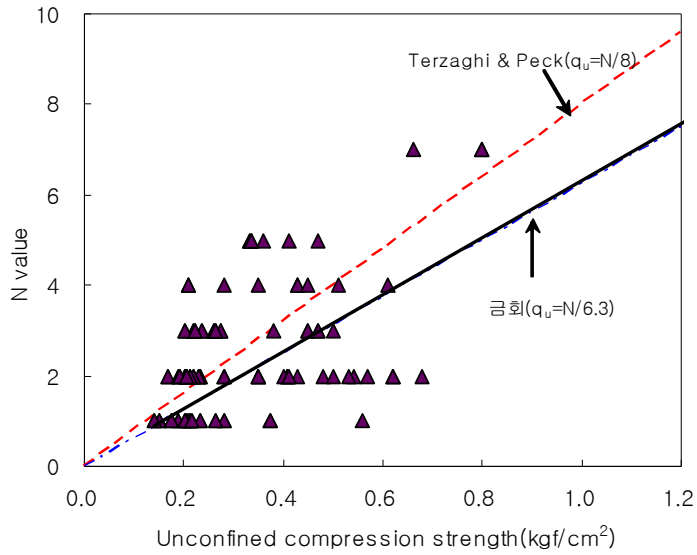
N 값은 현장에서 발생된 여러 가지 인자들로(제2장 참조) 결과 값에 신뢰성이 결여 되어 보정을 실시해야 한다. 본 연구에서는 적용된 N 값은 타격에너지에 대한 보정, 유효응력에 대한 보정 및 로드길이에 대한을 실시한 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 서해안 지역에서 채취된 시료를 통일분류법을 근거로 CH시료, CL시료, ML시료로 분류하였다. 분류된 시료에서 일축압축강도 시험을 실시한 결과 값과 SPT 시험에서 구한 N 값을 상관관계를 분석하여 Fig. 4.1에 나타내었다.



(a) Correlation between N -values and q_u for CH sample



(b) Correlation between N -values and q_u for CL sample



(c) Correlation between N -values and q_u for ML sample

Fig. 4.1 Correlation between N -values and q_u

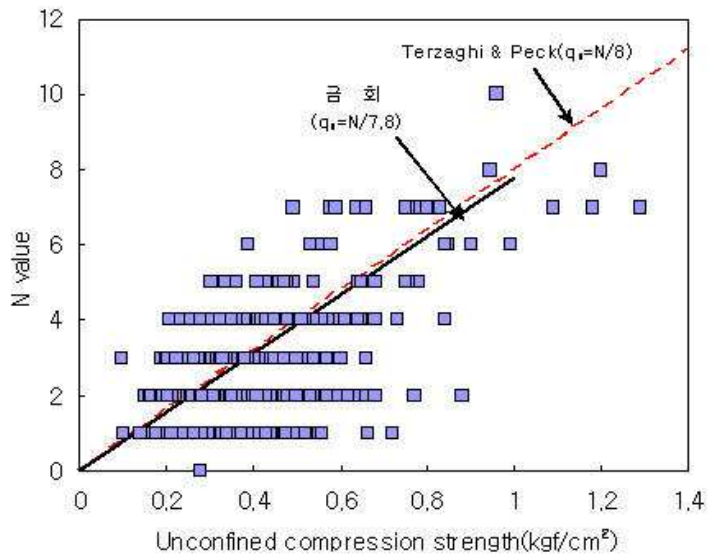


Fig. 4.2 Correlation between N -values and q_u for total samples

Fig. 4.1(a)에서 CH시료의 경우, 금회 연구에서는 $q_u = \frac{N}{4.7}$ 의 상관관계를 보였다. N 값이 1~3 사이에 분산도가 넓게 분포하는 것이 보인다. 이는 실내시험 과정에서의 시료의 교란, 과압밀 점토의 영향이라 추측되며, $N < 4$ 에서는 상관관계를 구하기 힘들다는 이장오(1988)의 연구결과와 유사하게 나타났다. N 값이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 많이 실무에 적용되는 Terzaghi & Peck(1948)의 제안식과 비교했을 때, 다소의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 Terzaghi & Peck(1948)의 연구에 사용된 시료는 교란된 시료를 사용하여 일축압축시험을 실시하였기 때문이라 사료된다. Sowers (1900)와 NAFVAC-Design Manual(7.01)에서 제시한 제안식과는 유사한 경향을 보이나, N 값이 증가할수록 변동 폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 금회 연구에서는 통일분류법에 의한 흙의 구분이 이루어 졌으나, NAFVAC-Design Manual에서는 소성도에 따라 분류했기 때문이라 사료된다.

Fig. 4.1(b)에서 CL시료의 경우, $q_u = \frac{N}{7.6}$ 의 상관관계를 보였다. $N=1 \sim 4$ 범위에서 분산도가 넓게 분포하고 있으며, q_u 값 또한 일정한 경향을 보이지 않는다. 이는 같은 CL시료라도 과압밀 점성토와 정규압밀 점성토가 구분되어 분포하기 때문이라 추측되며, 향후 과압밀 점성토에 대한 $N-q_u$ 의 상관관계를 나타내는 많은 시험자료를 토대로 분석을 실시하여 최적의 경험식이 제안되어야 할 것으로 생각된다. CL시료에서의 $N-q_u$ 의 상관관계는 Terzaghi & Peck(1948)과 Dunham (1954)의 제안식과 매우 유사한 경향으로 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 NAFVAC-Design Manua에서 제시한 중소성 점토의 $q_u = \frac{N}{6.7}$ 와는 다소 차이가 있으며, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 금회 연구에서는 통일분류법에 의한 분류를 기준으로 하였고, NAFVAC-Design Manual에서는 소성도를 기준으로 분류했기 때문이다.

Fig. 4.1(c)에서 ML시료의 경우, $q_u = \frac{N}{6.3}$ 의 상관관계를 보였다. $N=1\sim 4$ 의 범위에서 분산이 넓게 분포되고 있고 q_u 값도 다양하게 분포되는 것을 볼 수 있다. 이는 CH시료와 CL시료에서와 같이 과압밀점성토와 정규압밀점성토의 영향 때문이라 사료된다. ML시료는 Fletcher(박은교, 2002)의 제안식 $q_u = \frac{N}{6.25}$ 와 유사한 경향을 보이고 있다. 대상 시료들에서 I_p 는 4.0~16.5의 범위로 존재하고 있는 저소성 점성토에 해당되며, NAFVAC-Design Manual에서 제시한 저소성 점성토에 적용되는 제안식 $q_u = \frac{N}{13.3}$ 과 다소 차이가 있다.

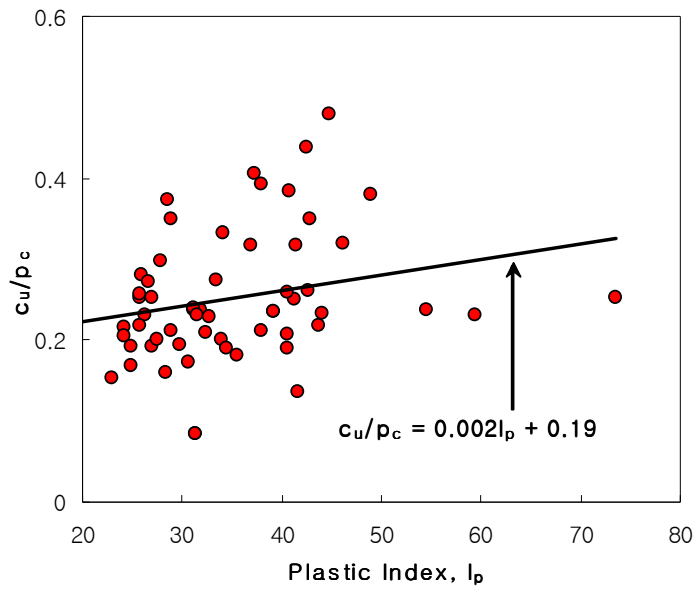
대상지역의 전체적인 $N-q_u$ 의 상관관계는 Fig. 4.2에서 나타내었다. $q_u = \frac{N}{7.8}$ 의 경험식으로 나타났다. Terzaghi & Peck(1948)의 제안식과 유사한 경향을 보이고 있다. 전체적으로 분산도가 심하여 $N-q_u$ 의 경험식을 적용 시킬 경우 신중한 판단이 요구되며, NAFVAC-Design Manual이나 많은 연구자들을 통해 $N-q_u$ 의 관계는 입도구성이나 I_p , 점성토의 연경도에 의해 변화되는 것을 제안하고 있기 때문에 향후 흙의 특성치를 세분화하여 정도가 높은 $N-q_u$ 의 관계가 제안되어야 할 것으로 사료된다.

4.2 강도증가율($\frac{C_u}{P_c} - I_p$)

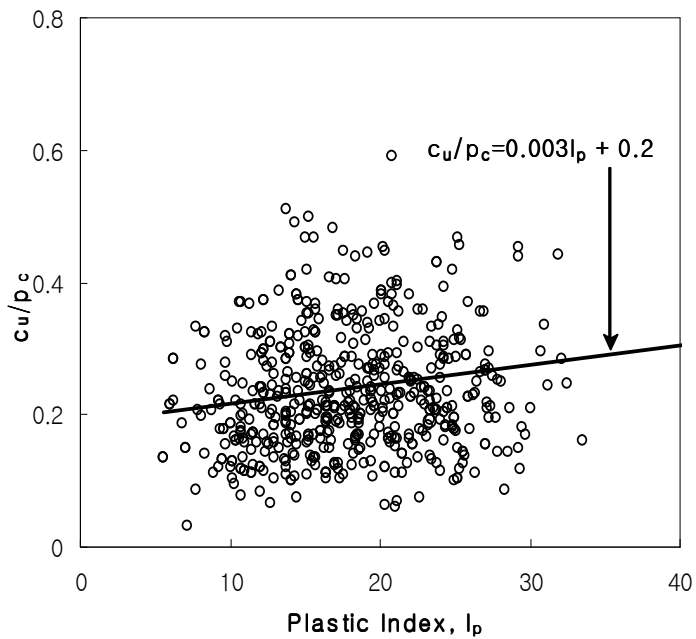
전단강도를 유효응력에 의한 강도로 표시할 때 $S = C + \sigma' \cdot \tan\phi'$ 이다. 유효응력이 증가하면 전단강도도 증가하게 된다. 점성토 지반에서는 하중에 의해 압밀이 진행되면 초기에 상재하중은 간극수의 간극수가 부담하다가 시간이 경과함에 따라 간극수가 배출되어 점차 흙 입자가 부담하게 되어 유효응력이 증가되고 전단강도도 증가하게 된다. 이와 같이 점성토는 하중재하에 의해서 전단강도가 증가한다. 강도증가율 추정법에는 비배수전단강도에 의한 추정, \overline{CU} 시험에 의한 방법, I_p 와 액성한계에 의한 방법 등이 있다. 이 중에서 I_p 를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 강도증가율이 I_p 와 관련되어 있다고 가정하였다. 여기에 사용된 I_p 는 연구지역의 연경도 시험결과를 이용하였다. C_u 는 시료에 대한 보정이 되어있지 않아 q_u 를 이용하여 시료의 보정방법으로 Nakase(1967)에 의해 제안된 $S_u = C_u = \frac{q_u}{2}$ 값을 적용하여 교란된 시료를 보정하였다(한국지반공학회, 2003).

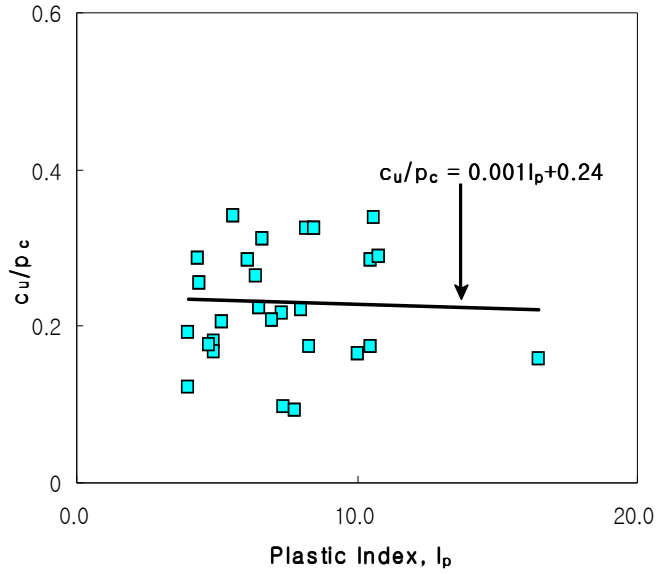
지금까지 설계에서 보편적으로 적용되는 Skempton(1964)에 의해 제안된 경험식을 기준으로 국내·외에 학자들이 제안한 경험식과 금회 제안식을 비교하여 연구지역의 강도증가율 산정에서 오차의 발생범위를 나타내었다. 여기에 사용된 I_p 는 연구지역의 연경도 시험 결과를 이용하였다.



(a) Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p for CH sample



(b) Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p for CL sample



(c) Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and PI for ML sample

Fig. 4.3 Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p

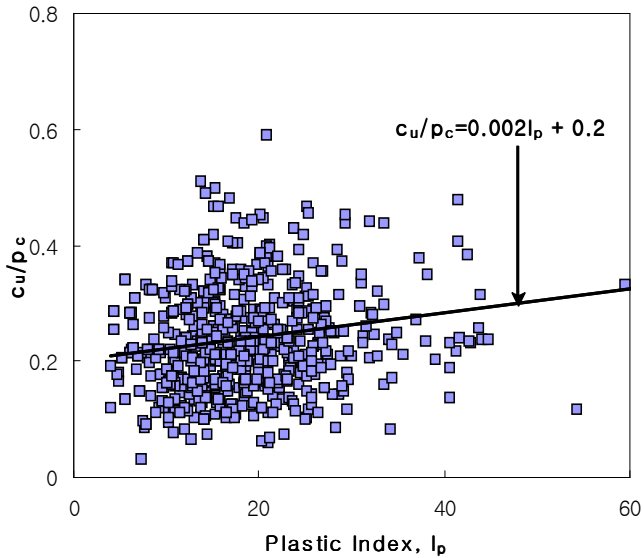


Fig. 4.4 Correlation between $\frac{C_u}{P_c}$ and I_p for total samples

Table 4.1 Incremental strength Equations comparison in CH samples

소성 지수 (I_p)	Skempton(1957) $0.0037I_p + 0.11$	Leouil(1983) $0.0024I_p + 0.2$	홍원표(1994) $0.0074I_p + 0.3$	금 회 $0.002I_p + 0.19$	편 차 (min-max)
20	0.184	0.248	0.448	0.230	0.04-0.26
30	0.221	0.272	0.522	0.250	0.03-0.30
40	0.258	0.296	0.596	0.270	0.01-0.37
50	0.295	0.320	0.670	0.290	0.01-0.41

Table 4.2 Incremental strength Equations comparison in CL samples

소성 지수 (I_p)	Skempton(1957) $0.0037I_p + 0.11$	Leouil(1983) $0.0024I_p + 0.2$	홍원표(1994) $0.0074I_p + 0.3$	금 회 $0.003I_p + 0.20$	편 차 (min-max)
10	0.147	0.224	0.374	0.230	0.08-0.27
20	0.184	0.248	0.448	0.260	0.06-0.26
30	0.221	0.272	0.522	0.290	0.05-0.30
40	0.258	0.296	0.596	0.320	0.01-0.45

Table 4.3 Incremental strength Equations comparison in ML samples

소성 지수 (I_p)	Skempton(1957) $0.0037I_p + 0.11$	Leouil(1983) $0.0024I_p + 0.2$	홍원표(1994) $0.0074I_p + 0.3$	금 회 $0.001I_p + 0.24$	편 차 (min-max)
10	0.147	0.224	0.374	0.23	0.07-0.23
20	0.184	0.248	0.448	0.24	0.06-0.26

Fig. 4.3(a)는 CH시료의 강도증가율을 도시한 것이다. I_p 는 20~50 범위에 C_u/P_c 값이 집중되어 있고, 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 시료채취 및 실내시험과정에서의 교란에 의한 것이라 판단되고, 현장원위치 시험인 CPT, Vane 시험 및 DMT 시험에 의한 구한 C_u 를 적용하였다면, 높은 신뢰도 확보

할 수 있을 것이라 추측된다. Table 4.1은 CH점성토의 강도증가율을 국내·외에서 사용되는 C_u/P_c 관계와 금회 연구에서 제안한 경험식을 비교한 것이다. 편차는 실무에서 가장 많이 적용되고 있는 Skempton(1957)의 제안식을 기준으로 국내·외에서 제안한 경험식과 차를 나타낸 것으로, $C_u/P_c = 0.01 \sim 0.41$ 정도의 편차가 나타났다. 특히, 금회 제안식의 경우 비교적 Skempton(1957)의 제안식과 유사한 경향을 보이고 있다. 광양지역(홍원표, 1994)지역의 제안식은 금회 제안식보다 과대평가된 것으로 나타났다. 이는 지역별 점성토의 특징이 다르며 이 지역은 실트질 성분이 많이 함유되었고 통일분류법에 의한 시료를 분류하지 않고 전체시료에 대한 강도증가율을 산정하였기 때문이라 추측된다. Fig. 4.3(b)는 CL시료의 강도증가율을 표시하였다. I_p 가 5~35%의 범위에 존재하고 있으며, 분산도가 넓고, 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table 4.2를 살펴보면, 금회 제안식은 I_p 가 증가할수록 Skempton (1957)의 제안식과 유사한 경향을 보이고 있으며, 오차범위도 감소됨을 알 수 있다. CL시료에서는 I_p 가 CH시료보다 작기 때문에 오차범위가 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4.3(c)는 ML시료의 강도증가율을 나타낸 것으로, Skempton(1957)은 $I_p > 10$ 이상의 지반에서의 적용되는 경험식이므로 금회 제안식과 비교하는 것은 다소 무리가 따른다. 대상지역의 전체의 점성토에 관한 $C_u/P_c - I_p$ 의 관계식은 Fig. 4.4에 나타내었다. CH시료의 제안식과 유사한 경향을 보이고 있으며, 대상지역 전체에 대해서는 Leouil(1983)의 식과 금회 제안식이 가장 유사한 경향으로 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.3 선행압밀하중(P_c)의 예측

SPT을 통해 C_u 를 예측할 수 있고, $C_u/P_c - I_p$ 의 상관관계를 이용하여 강도증가율을 추정할 수 있다. 따라서 P_c 의 추정은, N 값을 이용하여 점성토의 $N - q_u$ 의 관계식을 사용하여 q_u 에 대한 방정식으로 표현하고, $C_u = q_u/2$ 을 관계를 이용하여 C_u 을 평가하였다. 예측된 C_u 를 사용하여 $C_u/P_c - I_p$ 관계식을 통하여 P_c 를 예측하였다.

예를 들어 설명하면, 연구지역전체에 대한 강도증가식은 식 (4.1)과 같다.

$$C_u/P_c = 0.002I_p + 0.2 \quad (4.1)$$

이 식을 P_c 에 대한 방정식으로 나타내면 (식 4.2)와 같다.

$$P_c = \frac{C_u}{0.002I_p + 0.2} \quad (4.2)$$

여기서, 연구지역 전체의 $N - q_u$ 관계는 (식 4.3)과 같고, 이렇게 산정된 관계식을 이용하여 C_u 의 추정은 (식 4.4)와 같다.

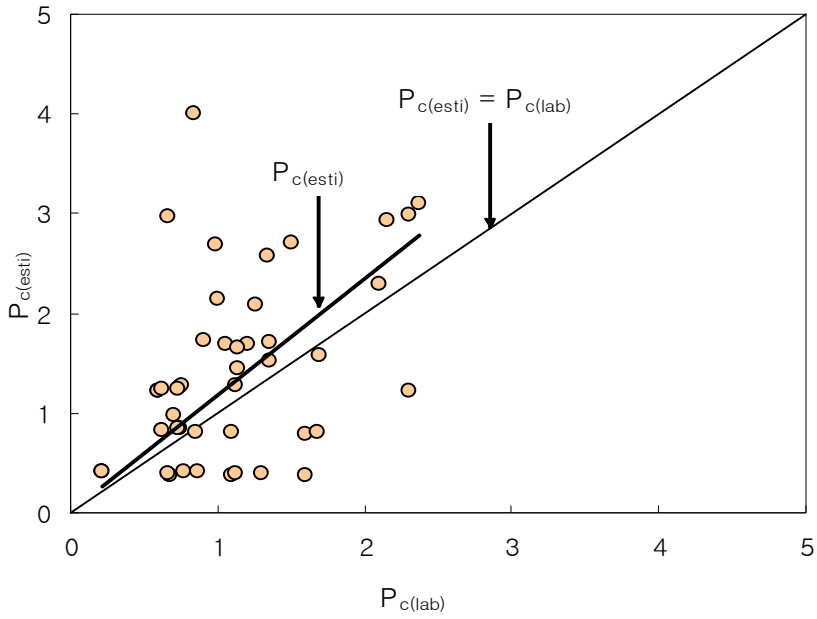
$$q_u = \frac{N}{7.8} \quad (4.3)$$

$$C_u = \frac{q_u}{2} = \frac{N}{7.8} \times \frac{1}{2} \quad (식 4.4)$$

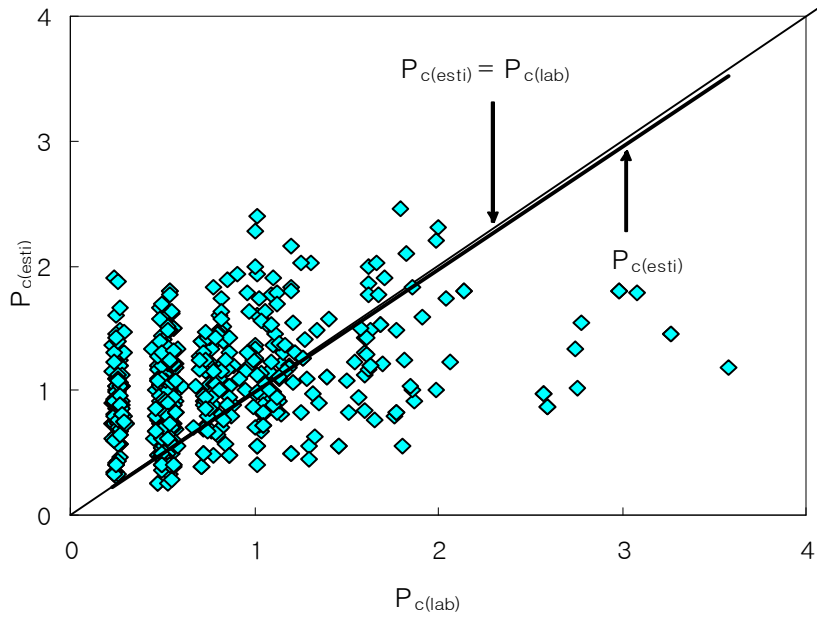
식 (4.4)에서 산정된 C_u 값을 (식 4.2)에 대입하면 (식 4.5)와 같다.

$$P_c = \frac{N}{7.8} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{0.002I_p + 0.2} \quad (4.5)$$

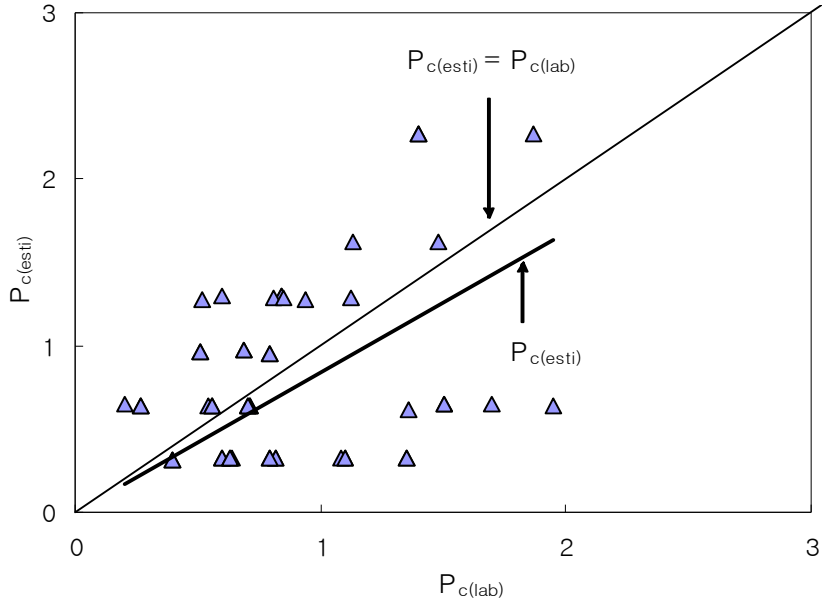
이렇게 예측된 $P_{c(est)}$ 와 표준압밀시험에서 구한 시험 값인 $P_{c(lab)}$ 와 비교하였다. 분류된 각 시료별로 $P_{c(est)} - P_{c(lab)}$ 에 대한 상관성을 파악하였고, 비교·분석하였다.



(a) Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ for CH sample



(b) Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ for CL sample



(a) ML시료 $P_{c(실측)}$ - $P_{c(예측)}$ 관계

Fig. 4.5 Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$

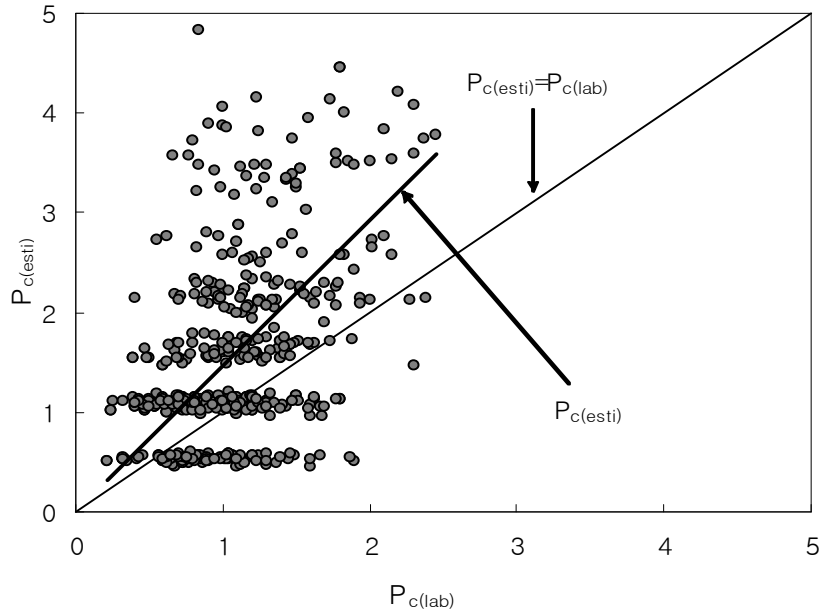


Fig. 4.6 Correlation between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(esti)}$ for total samples

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 $P_{c(est)} - P_{c(lab)}$ 결과를 나타내 것으로, CH시료의 경우 예측된 $P_{c(est)}$ 은 표준압밀시험에서 구해진 $P_{c(lab)}$ 보다 18%크게 산정되었고, 테이터의 분산도가 크게 나타났다. CL시료의 경우 예측한 값이 실측한 값보다 2%정도의 오차가 있었으며, ML시료는 16%로 다소 과대한 오차가 발생되었다. 이는 강도증가를 산정과 같이 분산이 심하며, 실트성분의 영향으로 인한 시료의 교란에 따른 실내시험의 오차라고 판단된다. 전체시료에 대해서 47%의 오차가 발생되었으며, 시료의 분산이 크게 나타났다. 본 연구대상지역에서 CH시료 및 CL시료에서는 비교적 잘 일치되고 있으며, 전체시료에 대한 $P_{c(lab)}$ 의 추정은 오차가 크며, ML시료에 대해서는 분석 자료의 양이 적어 적용에 있어서 신중한 판단이 요구된다.

본 분석을 통하여 점성토의 강도와 I_p 를 알고 있다면 압밀시험을 실시하기 이전에 개략적인 P_c 을 추정할 수 있음을 알 수 있다. SPT결과를 이용하여 정확한 강도를 산정할 수 있다면 개략적인 대상지반의 압밀정도를 파악할 수 있는 지표로 이용될 수 있을 것이다. 이를 위하여 추후 더 많은 현장 데이터들과 교란도 분석 등을 통한 양질의 시험결과를 분석하여 다양한 연구가 실시되어야 할 것이다.

Table 4.4 Correlation Between $P_{c(lab)}$ and $P_{c(est)}$ for the area studied

구 분	상관관계	오차(%)
CH시료	$P_{c(est)} = 1.18 \cdot P_{c(lab)}$	18
CL시료	$P_{c(est)} = 0.98 P_{c(lab)}$	-2
ML시료	$P_{c(est)} = 0.84 \cdot P_{c(lab)}$	-16
전체시료	$P_{c(est)} = 1.47 \cdot P_{c(lab)}$	47

제 5 장 결 론

본 연구에서는 우리나라 서해안에 위치한 경기만 일대, 평택 및 아산항 주변 지역과 군산, 장항 지역에서 실시한 현장시험과 이들 지역에서 채취된 불교란 시료를 사용하여 실시한 실내시험의 결과 값들을 사용하였다. 채취된 불교란 시료에 대해서 각 지역별 흙의 공학적 특성을 파악하였고, 액성지수 LI 를 사용하여 압밀상태를 분류하였다. 또한, 각 지역별 점성토를 통일분류법을 근거로 고소성 점성토(CH), 저소성 점성토(CL) 및 저소성 실트(ML)로 분류하였고, 현장 원위치시험인 SPT결과 값과 실내시험에서 산정된 시험 값인 일축압축강도와 상관관계를 분석하여 관계식을 제안하였다. 표준압밀시험에서 구한 시험 값인 선형압밀하중(P_c)과 일축압축강도 시험에서 산정된 시험 값을 $C_u = \frac{q_u}{2}$ 의 관계를 사용하여 배수전단강도(C_u)를 산정하였다. 산정된 C_u 와 P_c 및 소성지수(I_p)의 관계를 이용하여 강도증가식을 제안하였다. 제안된 강도증가식을 이용하여 $P_{c(est)}$ 을 추정하였고, 추정된 P_c 의 신뢰성을 검증하기 위해 표준압밀시험에서 구한 시험 값인 $P_{c(lab)}$ 과 비교하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 몇 가지로 정리할 수 있다.

1. 서해안 점성토의 함수비는 충청지역, 경기지역, 전북지역 순으로 나타났다.
2. LI 를 이용하여 대상지역의 압밀상태를 분석해 본 결과, 상부 GL(-)0.0~GL(-)8m 까지는 과압밀 상태를 보이고 있으며, 이후 심도가 깊어짐에 따라 정규압밀 상태를 보이는 것으로 나타났다.
3. 배수전단강도는 경기지역을 제외한 충청, 전북지역은 심도가 깊어질수록 증

가하는 일반적인 경향을 보이고 있으나, 경기지역은 과압밀의 영향으로 심도에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보이지는 않는다.

4. SPT 결과인 N 값과 일축압축강도의 관계를 살펴보면, CH 시료에서는 $q_u = N/4.7$ 의 상관관계가 나타났고, CL시료는 $q_u = N/7.6$, ML시료는 $q_u = N/6.3$ 의 상관관계가 있으며, 전체적으로는 $q_u = N/7.8$ 로 Terzghi & Peck(1948)의 제안식과 유사한 경향으로 나타났다.
5. 강도증가율을 살펴보면, CH시료에서는 $C_u/P_c = 0.002I_p + 0.19$, CL시료에서 $C_u/P_c = 0.003I_p + 0.2$, ML시료에서는 $C_u/P_c = 0.001I_p + 0.24$ 로 나타났고, ML시료는 I_p 가 작고, 분산도가 넓어 적용에 있어서 적용에 있어서 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.
6. N 값을 이용하여 일축압축강도(q_u)을 산정한 후 C_u 및 C_u/P_c 과 I_p 의 상관관계를 이용하여 강도증가식을 제안하였고, 제안된 상관식을 사용하여 $P_{c(est)}$ 값을 추정한 결과, 표준압밀시험에서 구한 시험 값인 $P_{c(lab)}$ 과 비교해 보면, CH시료는 약 18%, CL시료는 약 2%, ML시료는 16%의 오차가 있음을 알 수 있다.
7. SPT 결과인 N 값을 이용하여 $P_{c(lab)}$ 을 근사적인 예측이 가능하나 보다 정확한 관계를 예측하기 위해서는 신뢰할 수 있는 더 많은 자료와 추가적인 분석이 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

박기용(2001), “서해안 해성점토의 공학적 특성”, 석사학위논문, 건국대학교.

박은규(2002), “N치에 따른 지반평가에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대학교.

배용수(1991), “점토지반의 표준관입시험(N치)과 지반정수의 상관성”, 석사학위논문, 조선대학교 산업대학원

송만순(1988), “우리나라 해성점토의 토질계수의 상관관계”, 석사학위논문, 한양대학교.

이명환(1991), 표준관입시험 결과의 표준화 , 한국지반공학회지, 제7권, 제 1호, pp.69- 85.

이윤우(1984), “실트질 흙의 압밀에 의한 전단강도에 관한 연구” 석사학위논문, 부산대학교.

이정학(2000), “한국 연안 해성 퇴적토층의 토질 공학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 건국대학교.

임호인(1982), “서남해안 해성점토의 공학적 특성 연구”, 석사학위논문 건국대학교.

조용수(1991), “粘土地盤의 標準貫入抵抗(N值)과 地盤定數의 相關性”, 석사학위논문, 조선대학교.

한국수자원공사(2003), 시화 MTB 조성공사 , 1, 3, 5공구 중 지반조사보고서.

한국지반공학회 : “연약지반 (2003)” 지반공학 시리즈 p455.

한국지반공학회(2003), “지반조사결과의 해석 및 이용” 지반공학 시리즈 p140~151.

한국토지공사(2005), 군장 국가 산단 산업단지 00도로 축조공사 중 지반조사보고서.

한국토지공사(2007), 인천 청라 지구 경제자유구역 개발사업(2007). 1, 2, 3, 5 공구 중 지반조사보고서.

해양수산부(2007), 평택·당진항 모래부두 공사 중 지반조사보고서.

홍원표, 이근하, 이재호 (1996), “광양 제철소부지의 전단강도 증가특성에 관한 연구”, 대한토목학회 1996년도 학술발표회 논문집(Ⅲ), pp. 331-334.

土質工學會(日本)(1979), 土質調査試験結果の解析と適用에 例, 東京, 44p.

Navac - Design Manual 7.01, 1982, pp 71-88.

Bazaraa, A, R.(1967), Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlement of Shallow Foundations on Sand, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 379p.

Bjerrum,L.(1967), "Engineering geology of Norwegiannormally consolidated clays as related to settlements of buildings,"Geotechnique, Vol. 17, pp.81-118.

Bjerrum,L.(1973), Problems of soil mechanis and consolidation on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). Proc. 8th

ICSMFE. Moscow, Vol. 3, pp.111-159.

Bjerrum, L.(1973) "Problems of soil mechanics and consolidation on soft clays", Proceedings, 8th int. Conf, SMFE, Moscow, Vol. 3, pp.111~159.

Bjerrum,L., and N.E.Simons.(1960), "Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clay," in Proc. Res. Conf. Shear Strength Cohesive Soils, Am. Soc. of Civ. Eng., pp.711-726.

Casagrade, A.C.(1936) Discussion on 'The determination of the pre-consolidation load and its practical significance.' Pro. 1st ICSMFE, Cambridge, Vol. 3, pp. 60-64.

Chandler, R.J(1988), "the in situ Measurement of the Undrained Shear Strength Testing in Soils : Field Laboratory studies, ASTM, pp. 13-44.

Dunham, J. W.(1954), Pile Foundation for Buildings, ASCE, vol. 80, SM1 pp. 1-21.

DeMello(1971), V. in proceeding, 4th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico, Vol. 1. 1971, pp. 1-86

Gibbs, H. J. and W. G. Holtz(1957), "Research on Determining the density of sands by Spoon Penetration Testing", Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Eng., London. Vol. 1. pp. 35-39.

Hansbo, S.(1994), Foundation Engineering, ElsevierScienceB.V.Amsterdam, The Netherlands, pp. 89~91.

Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., and Lancellotta, R.(1985) "New Development in Field and Laboratory Testing of Soils", Proceedings, XIth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 1, pp. 57-153.

Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990), Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, RP1493-6, Electric Power Res. Ins. and Cornell Uni., Ithaca, New York, pp.4-1~4-68.

Ladd, C. C.(1975), Foundation design of embankments constructed on Connecticut valley varved clays, Research Report R75-7, No.343, Dept. of Civil Engrg., MIT, Cambridge, MA, 439p.

Ladd, C. C., Foott R., Ishihara K., Schlosser, F. and Poulos H. G. (1977), Stress deformation and strength characteristics. SOA report, Proc. of IX ICSMFE, Tokyo.

Leroueil, s., Sanson, L., and Bozozuk, M.(1983) Laboratory and field determination of preconsolidation pressure at Gloucester, Canadian Geotechnical J., Vol. 20(3), pp. 477-490.

Mesri, G.(1989), "A re-evaluation of $s_u(\text{mob}) \approx 0.22\sigma_p$ using laboratory shear tests, "Can. Geotech. J., Vol.26, No.1, pp.162~164.

Meyerhof, G.G.(1956), Penetration Test and Bearing capacity of Cohesionless Soils, ASCE, vol.82, SM1, pp 1-19.

Schmertmann, J. H.(1978), " Use the SPT to Measure Dynamic Properties? - Yes, Bit... !" Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 341-355.

Simons, N.E.. and Menzies, B. K.(1975), " A short Course in Foundation Engineering. Butterworth & Co, pp. 63

Skempton, A.W(1957), "Discussion : The planning and Design of New Hong Kong Airport, proceeding Institute of Civil Engineers, London Vol. 7. pp. 305-307.

Skempton, A.W.(1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation", Geotechnique, Vol. 36, No.3, pp. 425-447.

Smith, G., N.(1986), Probability and Statistics in Civil Engineering : An Introduction, Collins Professional and Technical Books.

Terzaghi, K. and Peck, R. B(1948), "Soil mechanics in engineering practice" John-wiley & Sons.

감 사 의 글

어느덧 하나의 작은 봉우리에 올라 이마에 맺힌 땀방울을 훔치게 되었습니다. 토질이라는 거대한 산맥에 겨우 작은 한 봉우리를 올랐지만, 이 봉우리에 서기까지 많은 어려움이 있었지만, 늘 곁에서 손을 잡고 이끌어 주셨던 많은 고마운 분들이 있었기에 이마에 맺힌 땀방울을 훔칠 수 있었습니다.

언제나 바르게 나아가야 할 길이 무엇인가를 술선수범으로 보여주시고 학문적 열정을 가질 수 있도록 자상한 가르침으로 제자를 이끌어주시며, 때로는 질책과 훈계로써 부족한 저를 사랑으로 이끌어 주신 김태형 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 학부시절 무지한 저에게 토목이 무엇인가를 깨우쳐주고 항상 제자들 잘 되기만을 바라시는 이중우 교수님, 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 경갑수 교수님께 진심으로 감사드리며 오래오래 건강하시길 기원합니다.

대학원 입학에서 졸업까지 때론 초코렛 같은 달콤한 길이었고, 때론 가시밭길이었지만, 힘들고 지칠 때 쉬어갈 그들이 되어준 토질연구실 선·후배님께 감사드립니다. 항상 자기일을 110% 이상 달성하는 기천이와 수정이, 힘들거나 어려움 일에도 너털웃음으로 보는 사람들에게 편안함을 주는 용수, 언제나 바른 생활 사나이 정현이, 조금은 엉뚱하지만 항상 긍정적인 생각을 가진 잘생긴 옹기에게도 고마운 말을 전합니다. 특히 생소한 토질설계에 관해서 광범위하게 가르쳐주시고 항상 후배 걱정을 해주시는 강기민 선배님과 넓은 세계를 보면 꿈과 희망을 가져라는 변기준 선배님께 감사드립니다. 논문작성에 있어서 많은 도움을 주신 김지용 박사님께도 감사드립니다. 그리고 지금까지 저에게 항상 용기를 주고 있는 친구들과 사장님 이하 회사 임직원들께 감사드립니다.

마지막으로 하늘나라에서 항상 저를 위해 기도하고 계실 아버지와 오늘이 있기까지 정성껏 뒷바라지 해주신 어머니 그리고 가족들에게 감사드립니다.

여러분이 주신 사랑이 너무나도 부족하나만, 이 논문을 빌어 다시 한번 저를 지켜 봐주신 모든 분께 감사드립니다.

2008년 4월 30일

이 성 철 올림