

인천 송도지역 지반의 변동성 분석

Characterization of Soil Variability of Songdo Area in Incheon

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee

안 신 환² An, Shin-Wan

김 재 정³ Kim, Jae-Jung

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

Geotechnical variability is a complex feature that results from many independent sources of uncertainties, and is mainly affected by inherent variability and measurement errors. This study evaluates the coefficient of variation (COV) of soil properties and soil layers at Song-do region in Korea. Since soil variability is sensitive to soil layers and soil types, the COVs by soil layers (reclaimed layer and marine layer) and the COVs by soil types (clay and silt) were separately evaluated. It is observed that geotechnical variability of marine layer and clay is relatively smaller than that of reclamation layer and silt. And, the highly weathered rock and soil show the higher COVs in the interpretation of the strength parameters of the fresh and weathered rock. And the proposed COV of Songdo area can be used for the reliability-based design procedure.

요 지

지반의 변동성은 많은 독립된 불확실성 요소로부터 발생하는 복잡한 요소이며, 지반의 변동성은 주로 내재적 변동성과 측정오차에 의해서 발생한다. 본 논문에서는 지반의 변동성을 평가하는 지표로 사용되는 변동계수를 송도지역의 지반정수 및 지층에 대하여 산정하였다. 지반정수의 변동성은 지층 및 흙의 종류에 영향을 받으므로 지층은 매립층과 퇴적층, 흙의 종류는 점토와 실트로 구분하여 각각의 변동계수를 산정하였다. 퇴적층과 점토의 변동계수가 매립층과 실트에 비하여 작은 것으로 분석되었다. 또한, 풍화가 많이 진행된 암반과 토사가 신선한 암반과 풍화암에 비하여 상대적으로 큰 변동계수를 보이는 것으로 나타났다. 본 논문에서 제시한 송도지역의 변동계수는 신뢰성해석의 기본 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Coefficient of variation (COV), Geotechnical variability, Inherent soil variability, Statistical analysis

1. 서 론

지반공학분야에서 통계학적 분석방법들은 설계와 구조물에 대한 평가를 좀 더 합리적으로 수행하고자 하는 목적으로 도입되었다. 통계학적 분석방법들은 설계자

가 지반조사결과에 내재되어 있는 불확실성을 공학자의 직관에 의한 판단과 함께 분석적 접근을 가능하게 하여 신뢰성 있고 경제적인 설계가 가능하도록 도움을 줄 수 있다(DeGroot와 Baecher, 1993). 또한, 1980년대 초부터 기초를 포함한 지반구조물에 대한 신뢰성 기법

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문에 게재하여 드립니다.

에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 신뢰성을 기반으로 한 설계의 개발을 위해서는 설계지반정수들의 변동성(variability)에 대한 실제적인 통계적 추정 값들이 필요하게 되었다. 신뢰성 설계방법 중 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)과 같은 시뮬레이션 기법을 이용하여 파괴확률을 결정하는 방법을 사용하기 위해서는 설계지반정수의 변동계수(평균, 표준편차)뿐만 아니라 정확한 확률분포특성을 알아야 한다(김창동 등, 2008). MCS 이외의 신뢰성 설계방법으로는 하중저항계수 설계법(Load and Resistance Factor Design, LRFD)과 일차신뢰도법(FORM, First Order Reliability Method) 등이 있으며, 하중저항계수 설계법의 방정식에 사용되는 저항계수들(resistance factors)은 설계지반정수의 변동계수(coefficient of variation, COV)와 밀접한 관계가 있다(Phoon 등, 1995). 따라서 설계지반정수의 통계적 추정 값들 중 변동계수의 결정은 하중저항계수 설계법에 있어 중요한 인자라고 할 수 있다. 외국의 설계지반정수의 변동계수에 관한 연구는 Lee 등(1983), Lacasse와 Nadim(1996), Lumb(1974), Baecher 등(1983), Phoon과 Kulhawy(1999) 등 많은 연구자들에 의해서 광범위하게 진행되어 왔다. 특히, Phoon과 Kulhawy(1999)는 기존 문헌들의 시험결과를 재분석하여 설계대상 지반의 통계적 자료가 없거나 부족할 때 기초자료로 사용할 수 있는 설계지반정수들에 대한 변동계수 범위를 제시하였다. 이러한 자료는 베이저안 방법(Bayesian updating techniques)을 이용하여 최근 조사자료와 결합하여 사용하거나(Spry 등, 1988; Filippas 등, 1988) 변동계수 추정 값에 대한 하나의 지표로 사용될 수 있다. 그러나 특정 지역의 정확한 신뢰성 설계를 위해서는 설계지역의 지반정수들에 대한 변동계수가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 송도지역에서 광범위하게 수행된 지반조사자료를 재분석하여 신뢰성 설계에 직접적으로 사용될 수 있는 지반정수들의 변동계수를 제시하고자 한다.

2. 지반의 변동성

지반의 변동성(geotechnical variability)은 많은 불확실성들로부터 기인하며 복잡한 속성을 가지고 있다(Kulhawy, 1992). 지반정수의 불확실성의 세가지 주요 요인들로는 첫째, 지반에 내재되어 있는 고유 변동성(inherent variability), 둘째, 측정오차(measurement error), 마지막으로 설계모델의 불확실성(transformation uncertainty)을 들 수 있다.

고유 변동성은 지반의 자연적, 지질학적 생성과정에서 발생하며, 측정오차는 장비, 시험절차, 시험종류 및 시험자 등에 영향을 받는다. 이 두 가지 불확실성 원인들은 자료의 분산으로 표현된다. 또한, 현장에서 측정된 자료들은 자료수의 제한으로 인한 통계적 오차 또는 표본 오차를 가지고 있다. 이러한 종류의 불확실성은 시험회수를 증가시켜 최소화 할 수 있으나, 그렇지 못할 경우에는 측정오차의 범주 안에 포함된다(Kulhawy, 1992). 설계모델의 불확실성은 현장과 실내시험결과들을 경험 또는 상관관계 모델을 사용하여 설계지반정수로 변환할 때 발생한다. 측정한 지반정수의 불확실성을 확실하게 평가하기 위해서는 위의 세가지 불확실성 요인들을 독립적으로 분석하는 것이 필요하며, 그 결과를 이용하여 특정 지반에 대한 고유 변동성을 알 수 있다.

지반은 다양한 지질학적, 환경적 그리고 물리·화학적 과정들의 결합에 의해서 형성된 복잡한 공학 재료이며, 이들 과정의 많은 부분들은 지속적으로 진행되고 있다. 이러한 자연 현상들에 의해서 지반특성은 연직 및 수평 방향으로 지속적으로 변하고 있으며, 이러한 특징을 지반정수의 공간적 변동(spatial variation)이라고 한다. 이러한 공간적 변동은 지반정수 변화의 특정 경향을 나타내는 경향함수 $t(z)$ 와 경향선 주위에 자료분산으로 표현되는 변동 성분 $w(z)$ 로 구분될 수 있다(DeGroot와 Baecher, 1993; Phoon과 Kulhawy, 1999).

$$\xi(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

여기서, ξ 는 현장의 지반정수이고, z 는 심도이다. 식 (1)의 변동 성분 $w(z)$ 는 지반의 고유 변동성을 나타내며, 이러한 지반의 고유 변동성을 정량화하기 위해서는 변동성분 $w(z)$ 를 균질한 하나의 확률변수(random variable) 또는 랜덤필드(random field)로 모형화하는 것이 합리적이다(Vanmarcke, 1983). 변동성분 w 의 평균은 변동성분들이 경향함수 주위를 일정하게 변동하기 때문에 0의 값을 갖는다. 이와 같이 지반정수를 확률변수로 모형화할 경우 지반정수의 고유 변동성은 경향함수 주위의 변동성분들의 평균과 표준편차를 이용하여 평가할 수 있다. 변동성분의 평균은 전술한 바와 같이 0이며, 표준편차 SD_w 는 식 (2)와 같다.

$$SD_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [w(z_i)]^2} \quad (2)$$

여기서, n 은 자료의 수, $w(z_i)$ 는 깊이 z_i 에서의 변동성분의 값이다. 고유 변동성을 나타내는 효과적인 지표는 표준편차 SD_w 를 평균지반정수의 경향성분(t)으로 정규화시킨 변동계수, COV_w 이며, 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$COV_w = \frac{SD_w}{t} \quad (3)$$

지반정수의 고유 변동성을 설명하기 위해서 필요한 다른 통계적 파라메타는 상관거리(correlation distance) 또는 변동자(scale of fluctuation) δ 이다. Vanmarcke(1983)는 지반정수들 간의 상관성을 나타내기 위하여 상관성의 공간적인 연속성 또는 범위를 표현하는 변동자 δ 를 사용하였으며, DeGroot과 Baecher(1993)는 자기상관거리(autocorrelation distance)를 사용하였다. 본 논문에서는 지반정수의 변동성을 평가할 수 있는 변동계수, 변동자, 상관거리 중 일차신뢰도법 등의 신뢰성해석에 직접적으로 사용되는 변동계수를 산정하고자 한다. 즉, 송도 지역에서 설계 및 시공을 위해 광범위하게 수행된 시추조사와 실트 및 점토지반에 대한 실내시험결과, 풍화토, 풍화암에 대한 실내 및 현장시험 결과를 이용하여 송도 지역 지반정수의 변동계수를 분석하고자 한다.

3. 연구지역 위치 및 지반조사자료

송도신도시는 인천광역시 연수구에 위치한 대규모 매립지로 평탄한 지형을 이루고 있으며, 북서쪽으로는 인천국제공항이, 북쪽으로는 청라지구가 위치하고 있다. 송도신도시의 지반조사자료 중 지층분포 분석은 1~4 공구의 자료를 사용하였으며, 지반정수에 대한 분

석은 매립 후 일정기간 내에 집중적으로 수행된 1, 3공구의 자료를 사용하였다. 인천 송도지역의 1~4공구는 1996년부터 매립이 진행되어 2005년에 매립이 완료되었으며, 매립완료 후 일정기간 이상 방치하여 압밀을 진행시킨 후 공사를 진행하고 있다(최현길, 2009). 본 논문에서 사용한 대부분의 지반조사자료는 2005년 매립완료 후 2006. 6~2007. 10에 집중적으로 수행된 것이다. 또한, 분석에 사용된 지반조사는 매립이 완료된 후 퇴적층과 매립층의 특성을 파악하여 도로, 가시설, 말뚝 설계를 위해 수행된 것으로, 모래다짐말뚝공법, 압밀축진공법, 동다짐공법 등이 적용되기 전에 수행되었다. 그림 1은 송도신도시 위치, 매립현황 및 시추조사위치를 나타내고 있으며, 지층 및 지반정수 분석을 위하여 총 755개의 시추조사자료와 실내 및 현장시험 자료를 수집하였다.

4. 송도지반 특성 및 변동성

지반특성의 변동성을 분석하기 위해서는 지반의 지질학적 기원, 시험장비와 방법, 자료의 경향성 및 시간의 영향 등을 고려해야 한다(Phoon과 Kulhawy, 1999). Morse(1971)는 동일한 지질학적 기원을 갖는 자료들만을 이용하여 통계분석을 수행해야 지질학적 기원의 영향을 최소화 할 수 있다고 하였다. 본 논문에서는 동일한 지질학적 기원에 의하여 형성된 송도지반을 분석하였으므로 지반의 지질학적 기원은 변동성 분석결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 또한, 지질학적 기원이 동일하므로 조사밀도가 분석결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하여 모든 자료에 동일한 가중



그림 1. 인천 송도 위치, 공구분할 현황 및 시추조사위치

치를 적용한 후 통계량을 산정하였다. 시험장비와 방법에 관한 문제는 측정오차와 관계된 것으로 시험장비의 유지관리와 시험자의 숙련도에 큰 영향을 받을 것으로 판단된다. 지반정수의 변동성 분석결과를 신뢰성해석에 사용하기 위해서는 측정된 지반정수에서 측정오차를 배제시켜야 한다(Baecher, 1985, Orchant 등, 1988). 본 논문에서 변동성 분석에 사용한 자료들은 설계를 위하여 측정된 것으로 연구를 위하여 수행된 결과보다는 측정오차가 클 것으로 판단된다(Orchant 등, 1988). 지반 특성값이 심도에 따라서 일정하게 증가 또는 감소하는 등의 경향을 보일 경우에는 이러한 경향성을 제거하거나 경향성이 배제될 만큼 분석구간을 나누어 변동성을 분석해야 한다. 본 논문에서는 자료부족에 의한 통계적 불확실성(statistical uncertainty)의 영향을 최소화하면서 경향성의 영향을 배제하기 위해 깊이를 약 1~2m 간격으로 나누어 분석하였다. 연구대상 지반은 최현길(2009)에 따르면 1996년부터 단계적으로 매립이 수행되었으며, 매립 중에도 압밀이 지속적으로 발생했을 것으로 판단된다. 일반적으로 해안에서의 매립은 바다에서 이루어지는 작업특성 때문에 정확한 단계성토높이를 파악할 수 없어 본 연구에서는 매립이 완료된 시점에 일시 성토를 수행하였다고 가정한 후 조사시점에서의 개략적인 압밀도를 평가해 보았다. 평가 결과 매립완료 후 조사를 시작한 약 1년 뒤에는 약 80% 정도 압밀이 진행된 것으로 나타났으며, 이러한 빠른 압밀속도는 인천 송도 지역의 압밀층이 순수한 점토로 구성된 것이 아니라 실트성분이 많이 포함되어 있는 실트질 점토 또는 점토

질 실트로 구성되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 매립단계에서의 압밀을 고려한다면 조사시점에서는 80% 이상의 압밀도를 보일 것으로 판단되며, 본 논문에서 사용한 지반조사자료들은 대략 80~90% 사이의 압밀도에서의 자료일 것으로 추정된다. 따라서 본 논문에서 사용한 지반조사자료들은 압밀진행 정도에 따라 약간의 차이를 보일 것으로 추정되며, 변동성을 증가시키는 요인으로 작용할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 80% 이상 압밀이 진행된 자료이기 때문에 시간에 따른 지반정수의 차이는 크지 않을 것으로 판단되며, 변동성 분석에도 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 영향들을 고려하여 송도 지역 지반특성의 변동성을 분석하였다. 즉, 송도지역을 구성하고 있는 지층분포 및 두께 등에 대한 변동성을 분석하였으며, 물리적 특성으로는 입도, 비중, 간극비, 함수비, 아터버그한계(Atterberg limits) 등을 분석하였다. 또한, 역학적 특성으로는 실트 및 점토지반의 압밀특성, 강도특성, 풍화도, 풍화암 및 암반의 강도특성을 분석하였다.

4.1 지층분포

본 논문에서는 지층분포 분석을 위하여 전술한 바와 같이 총 755공의 시추조사자료를 이용하였다. 지층분석 결과는 표 1과 같고 출현빈도가 높은 지층을 그림 2에 나타내었다. 매립층 상부는 실트질 모래, 하부는 세립의 모래성분이 포함된 실트와 실트질 점토로 구성되어 있다. 퇴적층 상부는 매우 연약~중간 정도(very soft~

표 1. 지층의 하부 표고 및 두께

Soil layer	Soil type	Bottom elevation, m							Thickness, m						
		Range	P25	P75	Median	Mean	SD	Range	P25	P75	Median	Mean	SD	COV, %	
Fill	L1 Silty sand	-8.4~8.1	-1.6	1.8	-0.4	0.1	2.5	0.1~17.1	4.5	8.4	7.0	6.8	3.1	46	
	L2 Clay & Silt	-6.1~4.5	-1.3	0.7	-0.5	-0.3	1.7	0.5~10.5	1.7	5.3	3.3	3.7	2.2	59	
	L3 Silty sand	-4.3~0.0	-1.9	-0.9	-1.6	-1.6	0.9	0.7~5.9	1.5	2.8	1.8	2.1	1.0	48	
Marine Deposit	L1 Silty sand	-20.9~2.0	-6.4	-3.2	-4.5	-5.3	3.9	0.9~21.8	2.2	5.8	3.4	4.6	3.5	76	
	L2 Clay & Silt	-25.2~1.8	-18.8	-11.9	-15.5	-14.9	4.9	1.2~26.7	9.7	17.5	13.5	13.4	5.4	40	
	L3 Silty sand	-29.7~-7.2	-21.9	-15.0	-17.7	-18.5	4.7	1.2~15.3	3.2	8.0	5.4	6.0	3.3	55	
	L4 Clay & Silt	-33.7~-2.4	-23.9	-18.4	-21.4	-20.8	4.4	0.6~20.4	3.7	8.9	5.6	6.6	3.8	58	
	L5 Silty sand	-36.7~-3.0	-26.8	-22.2	-24.4	-24.4	3.6	0.3~28.7	2.8	7.5	4.5	5.6	4.1	73	
	L6 Clay & Silt	-33.6~-18.8	-27.6	-23.7	-25.3	-25.8	2.9	0.7~11.3	1.8	4.4	3.0	3.4	2.1	62	
	L7 Silty sand	-34.9~-23.2	-31.0	-26.3	-28.7	-28.8	2.8	0.9~14.0	1.8	4.5	2.9	3.6	2.4	67	
Residual soil	-	-44.2~-1.3	-33.3	-26.8	-30.1	-29.9	5.4	0.2~24.5	1.8	6.7	3.3	4.5	3.6	80	
Weathered rock	-	-75.6~-5.3	-42.8	-33.3	-38.0	-38.1	7.3	0.5~49.5	5	13	8.5	9.6	6.3	66	

medium)의 연경도를 보이는 모래질 실트와 실트질 점토로 구성되어 있으며, 이 층 사이에는 불규칙하게 실트질 모래층이 분포하고 있다. 상부 퇴적층 하부에는 중간 정도~경질(medium~stiff)의 연경도를 보이는 모래질 실트와 실트질 점토로 구성되어 있으며, 그 하부에는 실트질 모래(silty sand)로 구성된 층이 분포하고 있다. 퇴적층 하부에는 풍화토, 풍화암이 높은 출현 비율로 분포하고 있다. 본 논문에서는 지층 두께의 변동성을 평가하기 위해 각 지층 두께에 대한 변동계수를 산정하였다. 그 결과 지층 두께의 변동계수는 40~80%로 나타났으며, 송도지역은 지층두께의 변화가 큰 것으로 판단된다. 표 1은 각 층의 하부표고(elevation)와 두께의 통계량을 산정한 것으로 range는 값의 범위, P25와 P75는 각각 25%, 75% 위치의 값, median은 중앙값, mean은 평균, SD는 표준편차, COV는 변동계수를 의미한다. 매립층 상부의 실트질 모래층과 퇴적층 상부의 모래질 실트 및 실트질 점토층의 평균 두께가 각각 6.8m, 13.4m로 가장 두껍게 분포하고 있으며, 말뚝의 지지층으로 사용되는 풍화토와 풍화암은 지표면(E.L.+6.0m)에서 평균 34.7m

하부에 존재하는 것으로 분석되었다.

4.2 물리적 특성

4.2.1 세립분 함유량

물리적 특성에 영향을 미치는 세립분 함유량을 분석하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 그룹 개수는 표고를 1~2m 간격으로 나눈 구간의 수를 의미하고, 그룹마다의 시험 수는 각 그룹에 포함된 시험결과 수를 의미한다. #200번체 통과량 즉, 입자크기 75 μ m 이하의 세립분 함유량의 구간별 평균은 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 표고 E.L.-5~-7m까지는 증가하며, 그 하부는 일정한 값을 보이고 있다. 매립층의 #200번체 통과량은 CL, ML이 각각 91.7~93.8%, 76.7~77.9%, 퇴적층은 CL, ML이 각각 92.3~97.1%, 79.3~88.3%의 범위를 보이고 있다. 매립층의 #200번체 통과량의 변동계수는 CL, ML이 각각 5~9%(평균 7%), 13~16%(평균 15%), 퇴

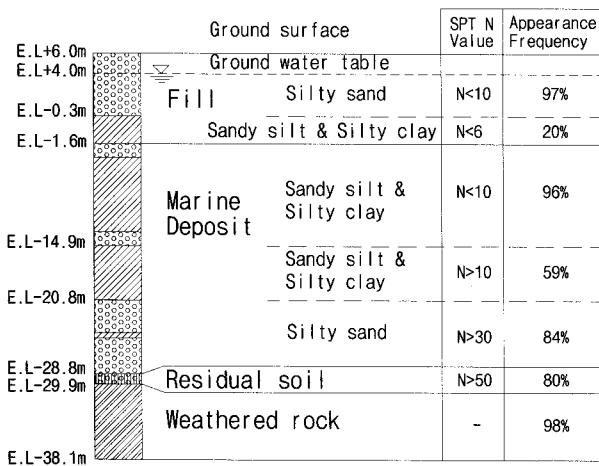


그림 2. 송도지역의 대표지층

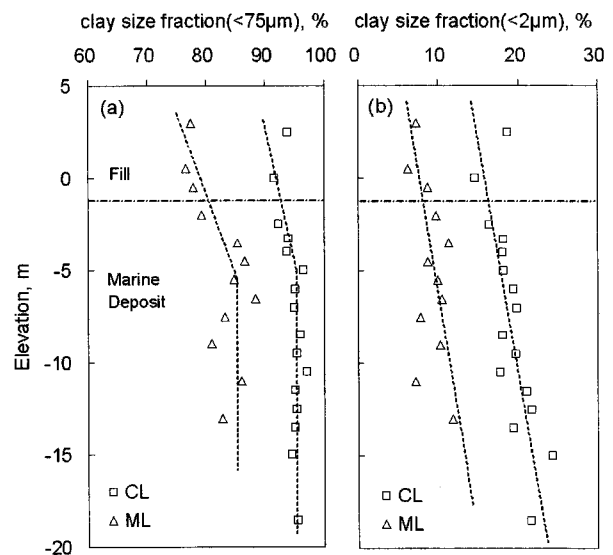


그림 3. 깊이에 따른 점토 함유량

표 2. 세립분 함유량 및 변동계수

Property	Soil type		Layer	No. of Data group	No. of tests per group		Range of Property value		Property COV, %	
					range	mean	Mean	SD	Range	Mean
< 75 μ m (%)	Clay	CL	Fill	2	13~34	24	91.7~93.8	4.9~8.0	5~9	7
			Deposit	14	15~71	37	92.3~97.1	2.8~5.9	3~6	4
	Silt	ML	Fill	3	22~41	29	76.7~77.9	10.3~12.8	13~16	15
			Deposit	9	15~42	26	79.3~88.3	8.5~16.2	10~20	16
< 2 μ m (%)	Clay	CL	Fill	2	5~14	10	14.7~18.7	4.3~6.1	29~32	31
			Deposit	14	14~61	32	16.5~24.2	4.9~8.1	21~40	33
	Silt	ML	Fill	3	9~15	12	6.3~8.7	1.7~2.7	27~37	31
			Deposit	9	11~24	17	7.2~11.9	3.3~5.9	35~73	52

적층의 변동계수는 CL, ML이 각각 3~6%(평균 4%), 10~20%(평균 16%)의 범위를 보이고 있다. 송도지반의 2 μ m 이하 세립분 함유량은 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 2 μ m 이하 세립분 함유량은 75 μ m 이하의 세립분 함유량과 동일하게 퇴적층이 매립층보다 큰 것으로 나타났다. 이는 매립층의 재료로 실트질 모래를 많이 사용하였기 때문인 것으로 판단된다. 2 μ m 이하 세립분 함유량의 변동계수 분석결과 매립층은 CL, ML이 각각 29~32%(평균 31%), 27~37%(평균 31%), 퇴적층은 CL, ML이 각각 21~40%(평균 33%), 35~73%(평균 52%)의 범위를 보이고 있다.

4.2.2 비중, 단위중량, 간극비

비중은 표 3에서 볼 수 있듯이 CL, ML이 각각 평균 2.69, 2.67의 값을 보이고 있다. 비중의 표준편차는 0.02로 매우 작아 변동계수도 흙의 종류에 관계없이 1% 이

하로 나타났다. 비중은 깊이에 따른 경향성을 보이지 않아 전체 자료를 사용하여 변동계수를 산정하였다. 습윤단위중량 분석결과 매립층의 단위중량이 퇴적층에 비하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 매립층이 준설패립에 의하여 형성되어 퇴적층에 비해 상대적으로 느슨하기 때문인 것으로 판단된다. 습윤단위중량은 CL의 경우 매립층은 18.2kN/m³, 퇴적층은 18.7kN/m³, ML의 경우 매립층, 퇴적층 모두 18.6kN/m³인 것으로 나타났다. 간극비는 CL의 경우 매립층, 퇴적층이 각각 평균 0.97, 0.87, ML의 경우 매립층, 퇴적층이 각각 평균 0.87, 0.85의 값을 보이고 있다. 송도지역의 간극비는 그림 4에서 볼 수 있듯이 깊이에 따라 약간 감소 또는 거의 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 흙의 종류에 따른 간극비의 변동계수 분석결과 CL은 매립층, 퇴적층이 각각 22%, 13%, ML은 매립층 및 퇴적층 모두 11%의 값을 보이고 있으며, 퇴적층이 매립층보다 또한 ML이 CL보다 간극비의 변동계수가 작은 것으로 나타났다.

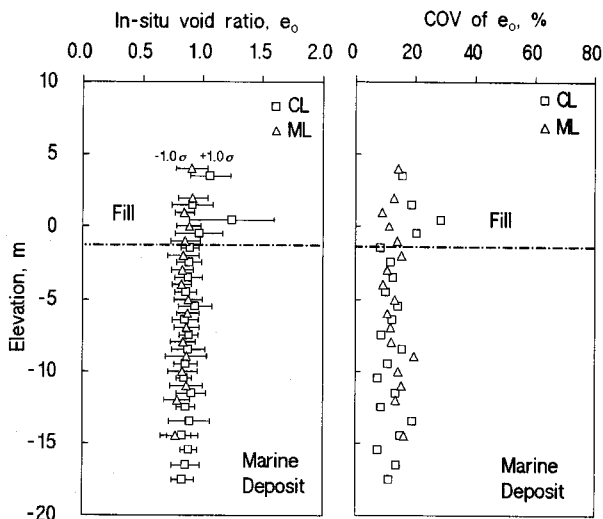


그림 4. 깊이에 따른 간극비 및 변동계수 분포

4.2.3 함수비 및 애터버그 한계

그림 5와 같이 소성도표를 이용하여 송도 지반의 흙

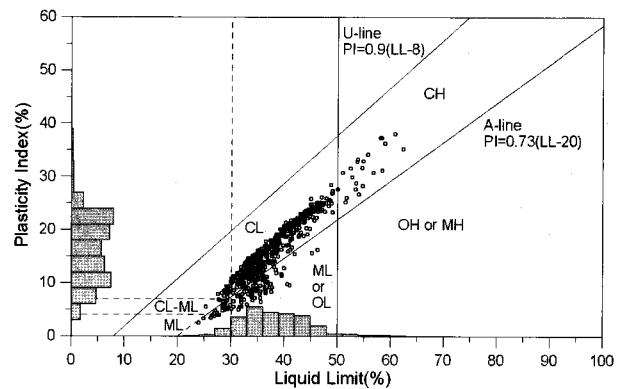


그림 5. 소성도표에 의한 흙의 분류

표 3. 물리적 특성값의 변동계수

Test	Soil type	Layer	Range	P25	P75	median	Mean	SD	COV (%)	No. of tests	
Specific gravity	Clay	CL	—	2.65–2.75	2.68	2.70	2.69	2.69	0.02	528	
	Silt	ML	—	2.64–2.74	2.66	2.68	2.67	2.67	0.02	303	
Total unit weight (kN/m ³)	Clay	CL	Fill	15.8–20.0	17.9	18.7	18.4	18.2	0.75	4	77
		CL	Deposit	16.8–20.5	18.4	18.9	18.7	18.7	0.48	3	376
	Silt	ML	Fill	17.1–20.0	18.3	18.9	18.6	18.6	0.50	3	123
		ML	Deposit	16.4–20.2	18.3	18.9	18.6	18.6	0.53	3	162
Initial Void ratio	Clay	CL	Fill	0.62–1.85	0.87	1.05	0.92	0.97	0.21	22	91
		CL	Deposit	0.55–1.32	0.81	0.93	0.86	0.87	0.11	13	423
	Silt	ML	Fill	0.58–1.25	0.81	0.93	0.86	0.87	0.11	13	130
		ML	Deposit	0.57–1.48	0.79	0.90	0.85	0.85	0.11	13	181

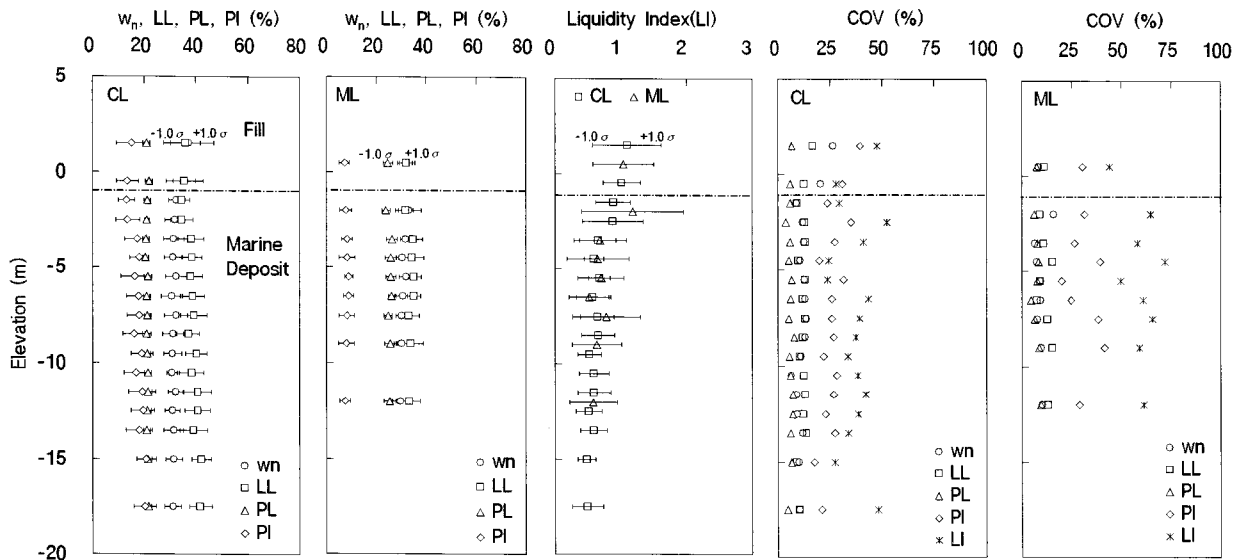


그림 6. 함수비, 애터버그한계 및 변동계수 분포특성

분류를 수행한 결과 송도지반은 대부분 중간 정도의 소성을 가진 점토(CL)와 점토 섞인 실트(ML)로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 그림 5에는 액성한계와 소성지수에 대한 도수분포도 함께 나타내었으며, 액성한계의 경우 30~40%, 소성지수의 경우 10~25%의 범위에서 가장 큰 빈도를 보이는 것으로 나타났다. 함수비와 애터버그 한계의 깊이에 따른 경향성을 배제하기 위해 표고를 1~2m 간격으로 나눈 후 평균, 표준편차 및 변동계수를 평가하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 매립층 함수비 평균은 35.6~37.2%로 퇴적층보다 약 5% 정도 큰 것으로 나타났으며, 이는 매립층이 퇴적층에 비해 상대적으로 물이 많이 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 퇴적층 평균 함수비는 심도가 깊어짐에 따라 약간 감소하거나 거의 유사한 것으로 나타났다. 함수비의 변동성 분석결과 매립층은 CL, ML이 각각 21~26%(평균 24%), 8%(평균 8%), 퇴적층은 CL, ML이 각각 6~14%(평균 11%), 7~16%(평균 9%)의 범위를 보이고 있으며, 퇴적층 함수비의 변동계수가 매립층보다 작은 것으로 평가되었다. 액성한계 평균은 CL이 34.4~42.2%, ML이 31.8~35.1%의 범위를 보이고 있다. CL의 경우에는 심도가 깊어짐에 따라 액성한계가 약간 증가하며, ML의 경우에는 깊이에 따라 거의 일정한 값을 보이고 있다. 또한, 액성한계의 변동계수는 흙의 종류에 관계없이 7~17%의 범위를 보이고 있다. 소성한계는 심도에 관계없이 거의 일정한 경향을 보이고 있으며, 소성한계 평균은 CL이 20.5~21.9%, ML이 24.0~26.3%, 소성한계의 변동계수는 흙의 종류에

관계없이 4~10%의 범위를 보이고 있다. 소성지수 평균은 CL이 13.2~20.8%, ML이 7.2~9.1%의 범위를 보이고 있다. CL의 경우 심도가 증가할수록 소성지수가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 심도가 깊어질수록 상대적으로 소성이 큰 흙이 존재한다는 것을 의미한다. 소성지수의 변동계수는 흙의 종류에 관계없이 18~42%의 범위를 보이고 있다. 액성지수는 함수비가 상대적으로 큰 매립층이 약간 더 큰 것으로 나타났으며, 액성지수의 변동계수는 24~72%로 나타났다. 함수비 및 애터버그한계의 지층 및 흙의 종류에 따른 자세한 통계 분석 결과는 부록 표 1에 제시하였다.

4.3 압밀특성

송도지반의 과압밀비 평균은 그림 7에서 볼 수 있듯이 매립층의 경우 1.1~1.4, 퇴적층의 경우 1.0~1.5의 범위를 보이고 있다. 송도지역은 매립을 수행하여 조성된 지반으로 정규압밀상태로 판단되나 분석결과는 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 평가되었다. 그러나 지하수위, 단위중량, 시험오차 등에 의한 유효응력, 선행압밀하중의 불확실성을 고려한다면 송도지반은 거의 정규압밀상태에 가까울 것으로 판단된다. 그림 8과 같이 압축지수를 CL과 ML로 구분하여 분석한 결과 CL이 ML보다 압축지수가 크며, 매립층의 압축지수가 퇴적층보다 큰 범위를 보이고 있다. CL의 압축지수 평균은 0.28~0.42, ML은 0.17~0.30의 범위로 산정되었으며, 압축지수의 변동계수는 CL이 19~59%, ML이 27~

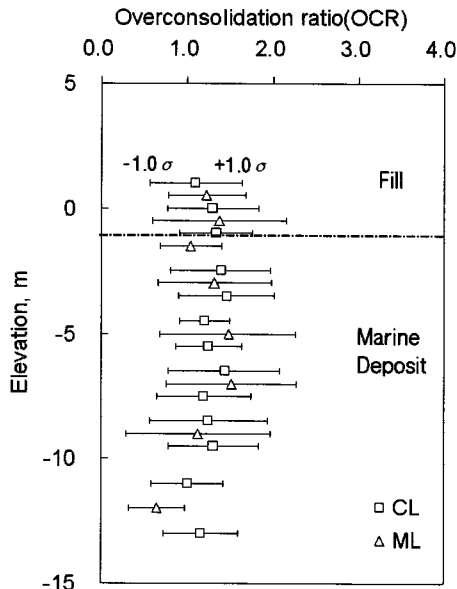


그림 7. 과압밀비(OCR)

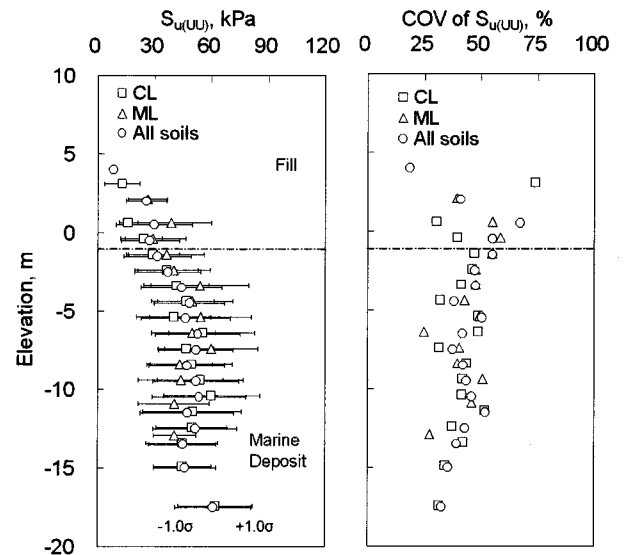


그림 9. 비압밀 비배수시험의 비배수전단강도 및 변동계수 분포

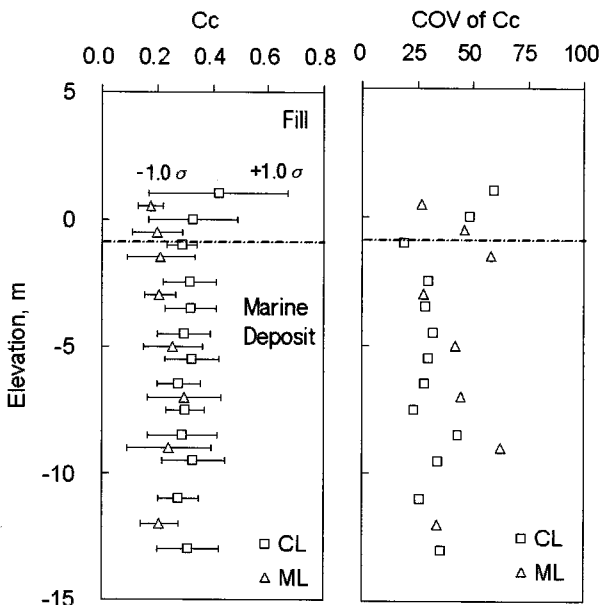


그림 8. 압축지수와 압축지수의 변동계수

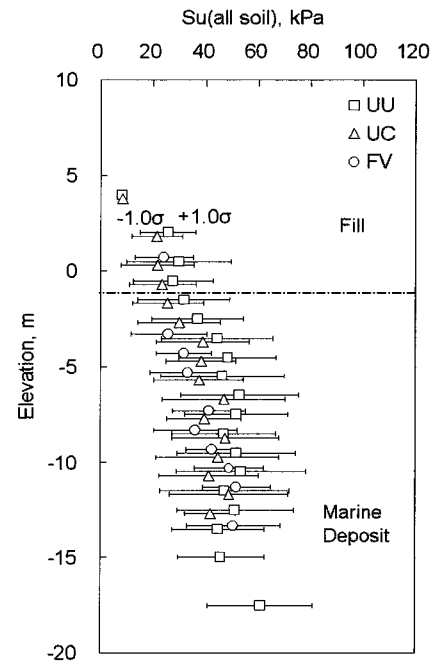


그림 10. 시험방법에 따른 비배수전단강도 분포

63%의 범위로 산정되었다. 압축지수의 지층 및 흙의 종류에 따른 자세한 통계분석결과는 부록 표 2에 제시하였다.

4.4 강도특성 분석

4.4.1 점토 및 실트층의 비배수전단강도

본 논문에서는 비압밀 비배수시험(Unconsolidated-Undrained Test)과 일축압축시험(Unconfined Compression Test)으로 구한 점토 및 실트의 비배수전단강도를 분석하였다. 비압밀 비배수시험으로 산정한 비배수전단강도는

그림 9와 같이 표고 E.L-7m까지는 증가 경향이 뚜렷하나 그 이하로는 거의 일정한 경향을 보이며, 표고 E.L-15m 이하에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 일축압축시험에서도 관찰 할 수 있다. 실내시험의 비배수전단강도가 E.L-7m에서 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되는 것이 시료의 교란 영향 때문인지를 검토하기 위하여 현장시험인 베인시험(Field Vane(FV) Test)의 결과와 비교해 보았다. 그 결과 그림 10에서 볼 수 있듯이 베인시험결과도 두 실내시험결과와 동일하게 E.L-7m 근처에서 비배수전단강도가 일정한 경향을

보이고 있다. 따라서 이러한 경향은 송도지반의 특성일 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 이는 1, 3공구 전체자료에 대한 분석결과로 심도가 증가함에 따라 비배수전단강도가 증가하는 경향을 보이는 영역도 있을 것으로 판단된다. 표고 E.L-7m는 그림 2에서 볼 수 있듯이 퇴적층 상부에 분포하는 실트질 점토층의 중간까지의 깊이이다. 매립층과 퇴적층 상부에 분포하는 실트 및 점토층의 비배수전단강도는 평균 약 11.0~38.7kPa으로 매우 연약~중간 정도의 강도를 보이고 있으며, 퇴적층 상부에 분포하는 실트 및 점토층 하부의 비배수전단강도는 평균 약 22.4~62.0kPa으로 중간~강한 정도의 강도를 보이고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 E.L.-14.9m 이하에는 N값 10이상의 매우 견고한 실트 및 점토층이 분포하고 있으며, 비배수전단강도도 그 이하에서 그림 9와 같이 증가하는 경향을 보이고 있다. 비배수전단강도의 변동계수는 그림 9와 그림 11에서와 같이 시험방법 및 흙의 종류에 관계없이 깊이가 증가할수록 즉, 비배수전단강도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 비배수전단강도 변동계수의 상한값이 비배수전단강도가 증가함에 따라 감소한다는 Phoon과 Kulhawy(1999)의 분석결과와 일치한다. 비배수전단강도의 변동계수 분석결과 매립층은 29~74%, 퇴적층은 25~58%의 범위를 보이고 있으며, 퇴적층이 매립층보다 상대적으로 변동계수가 작은 것으로 나타났다. 이는 매립층의 경우 준설패입에 의하여 형성되어 강도의 변동성이 퇴적층보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

Cherubini와 Giasi(2001)는 비배수전단강도 보다는 비배수전단강도를 유효응력으로 정규화시킨 강도증가비 ($S_{u(UU)}/P_o'$)를 이용하여 변동성을 분석하는 것이 비배수전단강도 자료에서 경향성을 배제한 후 변동성을 분석하

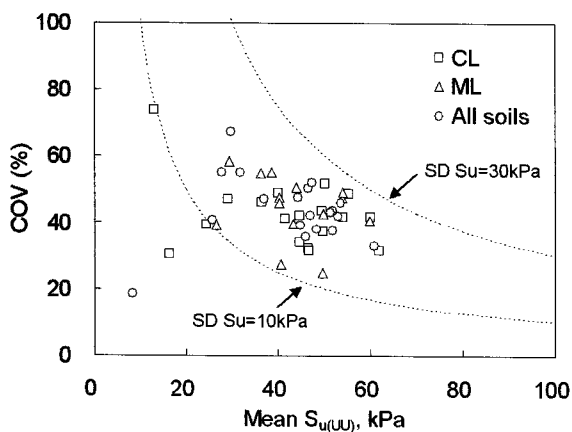


그림 11. 비배수전단강도의 변동계수

는 과정보다 더 효과적이라고 하였다. 따라서 본 논문에서는 비배수전단강도를 유효응력으로 정규화시킨 강도증가비를 깊이에 따라 분석하였다. 비배수 비압밀 시험으로 산정한 비배수전단강도를 이용하여 강도증가비를 계산한 결과는 그림 12와 같으며, 일축압축시험의 결과를 이용하여 산정한 강도증가비도 이와 유사한 경향을 보이고 있다. CL의 경우 매립층의 강도증가비 평균은 0.24~0.33, 퇴적층은 0.22~0.44의 범위를 보이고 있다. 이 값의 범위는 비배수 비압밀시험결과를 이용하여 Ladd와 Lambe(1963)이 정규압밀점토와 약간 과압밀된점토에 대하여 제시한 0.185~0.45의 범위와 유사하다. 퇴적층의 경우 표고 E.L-0~-7m까지는 0.40 내외의 값을 보이며, 표고 E.L-7m부터 심도가 깊어질수록 감소하여 평균 0.22 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. ML의 경우에는 매립층 상부를 제외하고는 표고 E.L-7m까지 약 0.45 내외의 값을 보이며, 그 하부로는 CL과 동일하게 감소하는 경향을 보인다. 매립층 및 퇴적층 상부가 퇴적층 하부보다 강도증가비가 큰 이유는 모래 성분이 많이 포함되어 있어 전단강도가 크게 평가되었기 때문인 것으로 추정된다. 강도증가비의 변동계수는 그림 12와 13에서 볼 수 있듯이 심도가 증가할수록 즉, 강도증가비가 감소할수록 변동계수는 감소하는 것으로 나타났으나 그 경향은 뚜렷하지 않다. 강도증가비의 변동계수는 흙의 종류와 시험방법에 관계없이 유사한 것으로 나타났으며, 그 값은 25~60%의 범위를 보이고 있다. 송도지역의 점토에는 실트 및 모래성분이 많이 포함되어 있어 비배수전단강도의 변동성이 큰 것으로 판단된다. 또한,

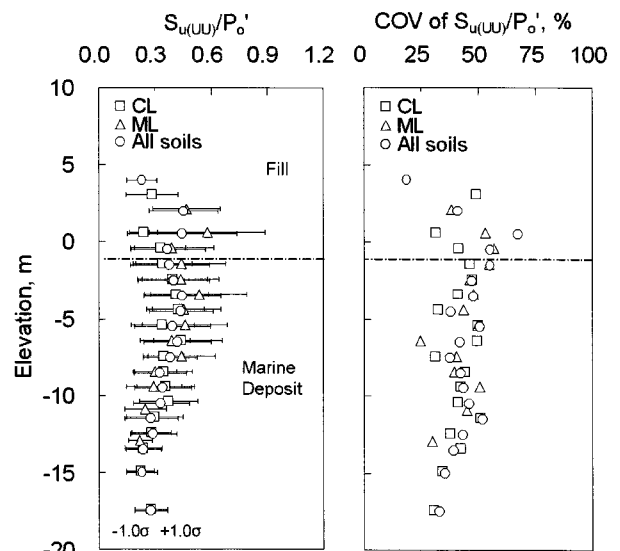


그림 12. 비압밀 비배수시험의 전단강도비 및 변동계수 분포

송도지역의 약 9.3m의 조수간만의 차는 매립층 내부의 지하수위 예측을 매우 어렵게 만들어 유효응력 산정방법에 많은 불확실성이 내재되어 있다. 이러한 이유로 인해 강도증가비의 변동계수가 기존 문헌보다 큰 것으로 판단된다. 비배수전단강도의 지층 및 흙의 종류에 따른 자세한 통계분석결과는 부록 표 3과 4에 제시하였다.

4.4.2 점토 및 실트층의 내부마찰각(friction angle)

압밀 비배수시험(Consolidated Undrained test) 결과 파괴시 Skempton의 과잉간극수압계수 A_f 는 0~0.8 사이의 범위를 보이므로 송도지역의 점토지반은 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반인 것으로 추정할 수 있다. 이는 그림 7의 과압밀비 분석결과와 일치한다. 일반적으로 유효응력 기준의 내부마찰각(effective stress friction angle)은 소성지수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있으며(Holtz와 Kovacs, 1981), 분석결과 그림 14와 같이 송도지역 실트 및 점토지반의 내부마찰각도 소성지수가 증가함에 따라 감소하는 것

로 나타났다. 압밀 배수시험(Consolidated Drained(CD test))으로 산정한 유효응력 기준의 내부마찰각이 압밀 비배수시험으로 산정한 값보다 큰 것으로 알려져 있으나(Bjerrum과 Simons, 1960) 그 경향은 뚜렷하게 관찰할 수 없었다. 이는 두 시험결과가 동일한 위치의 시료에 대한 결과가 아니기 때문인 것으로 판단된다. 최대응력차 $(\sigma_1' - \sigma_3')_{max}$ 를 기준으로 산정한 본 논문의 유효응력 기준의 내부마찰각 평균은 정규압밀점토에 대하여 최대주응력비 $(\sigma_1' - \sigma_3')_{max}$ 를 기준으로 산정한 Bjerrum과 Simons(1960)의 유효응력 기준의 내부마찰각보다 그림 14와 같이 약 2~3° 작은 것으로 나타났다. 이는 $(\sigma_1' - \sigma_3')_{max}$ 를 기준으로 산정한 내부마찰각이 $(\sigma_1' - \sigma_3')_{max}$ 를 기준으로 산정한 값보다 크다는 결과와 일치한다. 그러나 송도지반의 두 시험방법에 의한 차이 2~3°는 Bjerrum과 Simons(1960)의 연구결과인 약 7° 차이에 비하여 작은 것으로 나타났다. 압밀 배수시험으로 산정한 유효응력 기준의 내부마찰각 평균은 26°~34°이고 압밀 비배수 시험으로 산정한 값은 24°~31°이다. 정규압밀점토는 점착력이 0에 가까우나 송도지반은 전술한 바와 같이 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 압밀 비배수 시험에서는 평균 12kPa(0~50kPa), 압밀 배수시험에서는 평균 17kPa(2~35kPa)의 점착력을 보이는 것으로 나타났다. 압밀 비배수시험을 이용하여 산정한 전응력 기준의 내부마찰각(total stress friction angle)은 14°~20°의 범위를 보이고 있으며, 점착력은 평균 15kPa(0~77kPa)의 값을 보이고 있다. 유효응력 기준의 내부마찰각 변동계수는 6~20%, 전응력 기준의 내부마찰각 변동계수는 14~31%의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 본 논문에서 분석한 내부마찰각 범위가 좁아 내부마찰각이 증가할수록 내부마찰각의 변동계수가 감소한다는 Phoon과

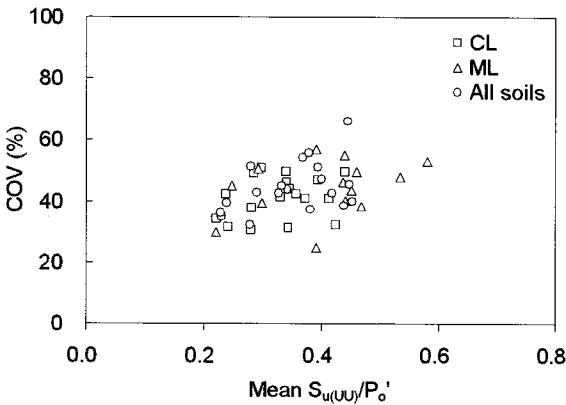


그림 13. 전단강도비의 변동계수

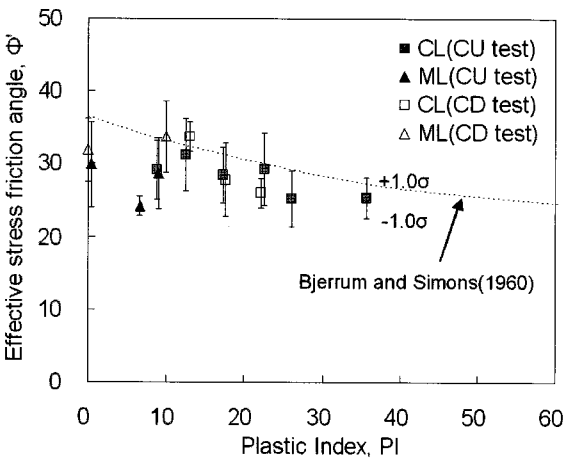


그림 14. 유효응력 기준 내부마찰각 ϕ'

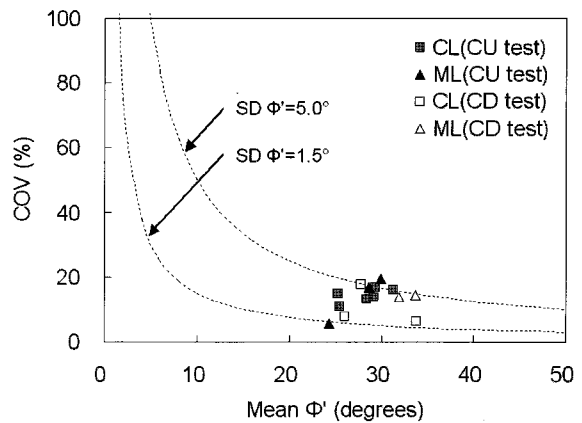


그림 15. 유효응력 기준 내부마찰각의 변동계수

표 4. 암반의 일축압축강도와 RQD의 변동계수

Test	Rock type	No. of tests	Property value		Standard deviation	COV (%)
			Range	Mean		
Compressive Strength, q_u (MPa)	MWR	259	0.3-4.6 (1.3-100.9)	2.9 (24.4)	0.87	30
	SWR	159	1.1-4.7 (3.1-112.0)	3.3 (32.6)	0.65	20
	FR	15	3.4-5.0 (31.0-143.7)	4.3 (79.8)	0.37	9
RQD (%)	MWR	259	0-100	38.4	27.07	70
	SWR	159	0-100	48.5	25.07	52
	FR	15	65-100	81.2	12.45	15

※ ()안의 값은 로그변환 전 일축압축강도 값임

Kulhawy(1999)의 연구결과는 확인할 수 없었다. 그러나 송도지반의 유효응력 기준의 내부마찰각 변동계수는 그림 15와 같이 Phoon과 Kulhawy(1999)가 제시한 변동계수 범위 내에 존재하고 있다. 내부마찰각의 지층 및 흙의 종류에 따른 자세한 통계분석결과는 부록 표 5에 제시하였다.

4.4.3 기반암의 일축압축강도 및 RQD

송도지역에서는 초고층 빌딩의 지지층으로 기반암이 사용되고 있으며, 이 기반암의 종류는 화강암이다. 기반암은 절리 분포 및 풍화정도에 따라서 심하게 풍화된 암반(Highly Weathered Rock, HWR), 보통 풍화된 암반(Moderately Weathered Rock, MWR), 약간 풍화된 암반(Slightly Weathered Rock, SWR), 신선한 암반(Fresh Rock, FR)으로 분류할 수 있다. 여기서, HWR의 경우 암시편을 채취할 수 없을 정도로 심하게 풍화되어 있으므로 본 연구에서는 MWR, SWR, FR의 세 종류의 암시편에 대한 압축강도를 분석하였다. MWR, SWR에 대한 압축강도 분포는 왼쪽으로 치우친 분포를 보이는 것으로 나타나 압축강도 값을 로그변환하여 평균, 표준편차 및 변동계수를 산정하였다. MWR, SWR, FR의 일축압축강도는 표 4에서 볼 수 있듯이 각각 1.3~100.9MPa(평균 24.4MPa), 3.1~112.0MPa(평균 32.6MPa), 31.0~143.7MPa

(평균 79.8MPa)의 범위를 보이고 있다. MWR, SWR, FR의 일축압축강도 변동계수는 각각 30%, 20%, 9%로 풍화정도가 작을수록 변동계수는 작은 것으로 나타났다.

암반의 성질을 평가하는 중요한 지표중의 하나인 RQD 값을 MWR, SWR, FR에 대하여 분석하였다. RQD 분석 결과 MWR, SWR, FR는 각각 0~100%(평균 38.4%), 0~100%(평균 48.5%), 65~100%(평균 81.2%)로 암반이 신선할수록 RQD의 평균은 높은 것으로 나타났다. MWR, SWR, FR의 RQD 변동계수는 각각 70%, 52%, 15%로 암반이 신선할수록 변동계수는 작은 것으로 분석되었다. FR의 자료수가 MWR, SWR에 비하여 작으므로 상대적인 신뢰성은 떨어질 것이므로 사용시 유의해야 할 것으로 판단된다.

4.4.4 풍화토, 풍화암의 강도정수

풍화토의 강도정수를 산정하기 위하여 직접전단시험(Direct Shear Test, DST) 및 공내재하시험(Borehole Shear Test, BST) 결과를 분석하였다. 직접전단시험은 풍화토의 강도정수를 산정하기 위하여 수행되었으며, 시료의 함수비와 상대밀도를 실내에서 재현하여 시험을 수행하였다. 풍화암의 강도정수는 현장시험인 공내전단시험을 통하여 산정하였다. 직접전단시험으로 산정한 풍화토의 점착력과 내부마찰각은 표 5에서 볼 수 있듯이 각

표 5. 풍화토, 풍화암 강도정수의 변동계수

Test	Soil type	Test type	No. of tests	Property value		Standard deviation	COV (%)
				Range	Mean		
Cohesion, c (kPa)	RS	DST	10	7.9-14.7	10.6	2.2	21
		BST	2	18.5-26.0	22.3	-	-
	WR	BST	18	16.7-32.4	27.5	4.2	15
Friction angle, ϕ (degree)	RS	DST	10	27-34	30	3	8
		BST	2	27-29	28	-	-
	WR	BST	18	30-35	33	1	4

각 7.9~14.7kPa(평균 10.6kPa), 27~34°(평균 30°), 변동계수는 각각 21%, 8%로 분석되었다. 직접전단시험으로 산정한 풍화토의 점착력은 공내전단시험보다 작게 평가되었으며, 내부마찰각은 반대의 결과를 보였다. 그러나 풍화토에 대한 공내전단시험 자료수가 부족하여 값을 비교할 때 유의해야 할 것으로 판단된다. 풍화암의 점착력과 내부마찰각은 각각 16.7~32.4kPa(평균 27.5kPa), 30~35°(평균 33°), 점착력과 내부마찰각의 변동계수는 각각 15%, 4%로 산정되었다. 풍화암 강도정수의 변동계수는 풍화토에 비하여 상대적으로 작게 평가되었으며, 이는 암반이 신선할수록 암반 특성값의 변동계수가 작은 결과와 일치한다.

5. 고유 변동성

현장 및 실내시험을 이용하여 측정된 지반정수는 필연적으로 측정오차가 포함되어 있으며, 측정된 지반정수에서 측정오차를 제거하지 않고 변동성을 평가할 경우에는 실제 지반의 고유변동성보다 크게 평가하게 된다. Lumb(1971), Orchant 등(1988)은 측정된 지반정수의 변동성을 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$\xi_m(z) = \xi(z) + e(z) = t(z) + w(z) + e(z) \quad (4)$$

이 식에서 ξ_m 은 측정된 지반정수 값, e 는 측정오차,

t 는 경향함수, w 는 고유 변동성이다. 지반정수의 불확실성을 나타내는 w 와 e 는 다른 원인에 의해서 발생하기 때문에 서로 독립, 즉, 상관성이 없다고 가정한다(Lumb, 1971; Baecher, 1985; Filippas 등, 1988; Kulhawy 등, 1992). 고유 변동성 w 는 자연의 지질학적 과정에 의해 발생하는 반면에 측정오차 e 는 장비, 시험방법 및 시험자 등에 의하여 발생한다(Phoon과 Kulhawy, 1999). 측정오차는 시험장비를 제조하는 회사에서 주로 수행되었으며(Hammit, 1966; Johnson, 1969; Sherwood, 1970; Singh과 Lee, 1970; Minty 등, 1979), 이러한 결과들을 이용하여 측정오차를 추정할 수 있다. 그러나 이러한 연구결과들을 이용한다 할지라도 본 논문에서 사용한 자료들의 측정오차를 정확하게 추정한다는 것은 매우 어려운 일이다. Lumb(1974), Lee 등(1983), Phoon 등(1995), Lacasse와 Nadim(1996), Phoon과 Kulhawy(1999), Baecher(2003) 등의 연구자들은 측정오차의 중요성을 인식하였으나, 지반의 고유변동성에 비하여 측정오차가 상대적으로 작고 측정오차를 지반정수에서 명확하게 제거하는 것이 매우 어렵기 때문에 현장 및 실내에서 측정된 지반정수들의 자료를 그대로 이용하여 지반정수의 고유변동성을 제시하였다. 본 논문에서도 기존 연구와 같이 지반조사에서 얻은 자료들을 이용하여 인천 송도지반을 대표할 수 있는 지반정수의 고유 변동계수를 산정하였다.

표 6. 물리적 특성값의 고유 변동성

Test type	Property	Soil type	Layer	Songdo area		Phoon & Kulhawy (1999)		Lumb(1974)	Lee et al.(1983)	Lacasse and Nadim(1996)
				Mean ¹⁾	COV	Mean ¹⁾	COV(%)	COV(%)	COV(%)	COV(%)
Lab index	w_n , %	Clay, silt	Fill	31.8~37.2	7~25	13~105	7~46 (18) 2)	-	6~63 (15) 2)	-
			Deposit	29.6~32.8	5~15					
	LL, %	Clay Silt	All layers	34.4~36.0	8~16	27~89	7~39 (18) 2)	-	2~48 (10) 2)	3~20
				31.8~35.1	6~15					
	PL, %	Clay Silt	All layers	20.5~21.9	5~8	14~27	6~34 (16) 2)	-	9~29 (1) 2)	3~20
				24.0~26.3	5~10					
	PI, %	Clay Silt	All layers	13.2~20.8	15~35	12~44	9~57 (29) 2)	-	7~79 (30) 2)	-
				7.2~9.1	20~40					
	LI, %	Clay, silt	Fill Deposit	1.0~1.1	25~45	-	60~88 (74) 2)	-	-	-
				0.5~1.2	20~70					
γ_t , kN/m ³	Clay, silt	Fill Deposit	18.2~18.6	3~4	14~20	3~20 (9) 2)	-	-	-	
			18.6~18.7	3						
e_0	Clay, silt	Fill Deposit	0.87~0.97	10~20	-	-	15~30	13~42 (25) 2)	7~30	
			0.85~0.87	10						

¹⁾ 지반특성값 평균의 범위

²⁾ 문헌에서 제시하고 있는 변동계수의 평균 또는 표준 값을 의미

송도지반 주요 지반정수의 고유 변동계수와 기존 연구자들이 제안한 지반정수의 고유 변동계수를 요약하면 표 6~8과 같으며, 점토와 실트, 매립층과 퇴적층에 따라서 변동계수가 큰 차이를 보일 경우에는 각각에 대한 변동계수 값을 제시하였다. 송도지역의 물리적 특성값의 고유 변동성은 기존 연구자들이 제시한 고유 변동성보다 작거나 유사한 결과를 보이고 있는 것으로 나타났다. 그러나 압축 및 강도 특성값의 고유 변동성은 기존 연구자들이 제시한 값보다 크거나 유사한 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 지반 특성값의 고유 변동성, 즉 변동계수는 송도지역 구조물 설계를 위하여 추가 조사한 지반조사 결과와 결합하여 사용될 수

있을 뿐만 아니라 추가 조사자료가 불충분할 경우에는 직접적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 지반의 변동성을 평가하는 지표로 사용되는 변동계수(COV)를 현장 및 실내시험결과를 직접적으로 이용하여 송도지역의 지반정수 및 지층에 대하여 산정하였다. 지반정수의 변동성은 지층 및 흙의 종류에 영향을 받으므로 지층은 매립층과 퇴적층, 흙의 종류는 점토와 실트로 구분하여 각각의 변동계수를 제시하였다. 지반정수의 변동계수는 퇴적층과 점토가 매립층과 실트에 비하여 유사하거나 작게 평가되었으며, 이는

표 7. 압축 및 강도 특성값의 고유 변동성

Test type	Property	Soil type	Layer	Songdo area		Phoon & Kulhawy(1999)		Lumb (1974)	Lee et al. (1983)	Lacasse & Nadim(1996)
				Mean ¹⁾	COV	Mean ¹⁾	COV(%)	COV(%)	COV(%)	COV(%)
Consolidation	Cc	Clay	All layers	0.22~0.33	18~58	-	-	25~30	18~73 (30) ²⁾	-
		Silt		0.14~0.23	25~55					
Strength of clay and silt	$s_u(UC)$, kPa	Clay, silt	Fill	12.9~38.7	30~72	15~363	11~49 (22) ²⁾	10~35	20~50 (30) ²⁾	20~50
			Deposit	29.0~62.0	25~55					
	$s_u(UC)$, kPa	Clay, silt	Fill	11.0~26.1	25~60	6~412	6~56 (33) ²⁾			
			Deposit	22.4~53.6	25~55					
	$\frac{s_u(UU)}{P_0'}$	Clay, silt	Fill	0.24~0.58	30~55	-	-	-	-	5~15
			Deposit	0.22~0.54	25~55					
	$\frac{s_u(UC)}{P_0'}$	Clay, silt	Fill	0.22~0.41	25~60					
			Deposit	0.20~0.42	25~55					
	ϕ'_{CU} , °	Clay, silt	All layers	24~31	5~20	17~41	4~12 (9) ²⁾	-	12~56	-
	ϕ'_{CD} , °			26~34	5~15					
ϕ_{CU} , °	14~20			15~30	-					

¹⁾ 지반특성값 평균의 범위

²⁾ 문헌에서 제시하고 있는 변동계수의 평균 또는 표준 값을 의미

표 8. 기반암 및 풍화암, 풍화토 강도 특성값의 고유 변동성

Test type	Property	Soil type	Mean ¹⁾	COV
Strength of weathered soil and rock	q_u , MPa	MWR	2.9 ²⁾	30
		SWR	3.3 ²⁾	20
		FR	4.3 ²⁾	9
	c, kPa	RS	7.9~14.7	20
		WR	16.7~32.4	15
	ϕ , °	RS	27~34	8
WR		30~35	4	

¹⁾ 지반특성값 평균의 범위

²⁾ 암석의 일축압축강도를 로그변환한 값임

퇴적층과 점토가 상대적으로 지반의 변동성이 작다는 것을 의미한다. 또한, 물리적 특성의 변동계수가 압밀 및 강도특성의 변동계수보다 작은 것으로 나타났다. 기반암의 강도와 RQD에 대한 변동성 분석결과 풍화가 많이 진행된 암반이 큰 변동계수를 보이는 것으로 나타났다. 풍화토와 풍화암에 대한 강도정수의 변동계수 분석결과 암반의 분석결과와 동일하게 풍화가 상대적으로 더 진행된 풍화토가 더 큰 변동계수를 보이는 것으로 나타났다.

본 논문에서 결과분석에 사용한 시험자료들은 설계를 위하여 수행된 것으로 연구를 위하여 수행된 시험결과 보다는 측정오차가 클 것으로 판단된다. 그러나 현실적으로 본 논문에서 측정된 자료들의 측정오차를 정확하게 추정하기 어려울 것으로 판단되며, Phoon 등(1995)의 기존 연구자들이 제시한 측정오차를 사용하여 대략적으로 추정해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 지반정수들의 고유 변동계수는 Phoon과 Kulhawy(1999)가 제시한 고유 변동계수에 대한 대략적인 지침(guideline)과 같이 인천 송도지반의 변동계수에 대한 지침으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 제시한 고유 변동계수는 송도지역 구조물 설계를 위하여 추가 조사한 지반조사 결과와 결합하여 사용될 수 있을 뿐만 아니라 추가 조사자료가 불충분할 경우에는 직접적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김창동, 김병일, 김수일, 이준환 (2008), “확률변수의 분포특성을 고려한 앞은기초 신뢰성 설계”, *한국지반공학회 논문집*, 제24권, 1호, pp.119-130.
2. 최현길 (2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
3. Baecher, G. B. (1985), “Geotechnical error analysis”, Special Summer Course 1.60s, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
4. Baecher, G. B., Marr, W. A., Lin, J. S., and Consla, J. (1983), “Critical Parameters for Mine Tailings Embankments”, Denver, CO, U. S. Bureau of Mines.
5. Baecher, G. B. (2003), Reliability and Statistical Engineering, John Wiley & Sons Ltd., pp.177-203.
6. Bjerrum, L., and Simons, N. E. (1960), “Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays”, *Proceedings of the ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, pp.711-726.
7. Cherubini, C. and Giasi, C. I. (2001), “Characterization of geotechnical variability and Evaluation of geotechnical property variability: Discussion”, *Canadian Geotechnical Journal*, 38, pp.213.
8. DeGroot, D. J., and Baecher, G. B. (1993), “Estimating Autocovariance of In-Situ Soil Properties”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.1, pp.147-166.
9. Filippas, O. B., Kulhawy, F. H., and Grogoriu, M. D. (1988), Reliability based foundation design for transmission line structures: uncertainty in soil property measurement, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Report EL-5507(3).
10. Hammitt, G. M. (1966), Statistical analysis of data from comparative laboratory test program sponsored by ACIL. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Miscellaneous Paper 4-785.
11. Holtz, R. D., and Kovacs, W. D. (1981), An Introduction to Geotechnical Engineering, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, pp.536-639.
12. Johnson, M. M. (1969), “Laboratory comparison tests using compacted fine-grained soils”, *In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Vol.1, pp.197-202.
13. Kulhawy, F.H. (1992), “On evaluation of static soil properties”, In Stability and performance of slopes and embankments II (GSP 31). Edited by R.B. Seed and R.W. Boulanger. American Society of Civil Engineers, New York, pp.95-115.
14. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), “Uncertainties in characterizing soil properties”, *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp.49-75.
15. Ladd, C. C., and Lambe, T. W. (1963), “The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests”, *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM Special Technical Publication No. 361, pp.342-371.
16. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
17. Lumb, P. (1971), Precision and accuracy of soil tests, *In Proceedings of the 1st International Conference on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Hong Kong, pp.329-345.
18. Lumb, P. (1974), “Application of statistics in soil mechanics”, *Soil Mechanics:New Horizons*. Lee, I. K., ed., London, Newnes-Butterworth: pp.44-112, pp.221-239.
19. Minty, E. J., Smith, R. B., and Pratt, D. N. (1979), Interlaboratory testing variability assessed for a wide range of N.S.W. soil types, *In Proceedings of the 3rd International on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Sydney, Vol.1, pp.221-235.
20. Morse, R. K. (1971), “Importance of proper soil units for statistical analysis”, *In Proceedings of the 1st International Conference on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Hong Kong, pp.347-355.
21. Orchant, C.J., Kulhawy, F.H., and Trautmann, C.H. (1988), Reliability based foundation design for transmission line structures:critical evaluation of in situ test methods. Electric Power Research Institute,

Palo Alto, Calif., Report EL-5507(2).

22. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Characterization of geotechnical variability", *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp.612-624.

23. Phoon, K. K., Kulhawy, F. H., and Grigoriu, M. D. (1995), Reliability based foundation design for transmission line structures, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Report TR-105000.

24. Sherwood, P. T. (1970), Reproducibility of results of soil classification and compaction tests, Road Research Laboratory, Crowthorne (U.K.), Report LR 339.

25. Singh, A., and Lee, K. L. (1970), "Variability in soil parameters", *In Proceedings of the 8th Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, Idaho, pp.159-185.

26. Spry, M.J., Kulhawy, F.H., and Grigoriu, M.D. (1988), Reliability based foundation design for transmission line structures: geotechnical site characterization strategy. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Report EL-5507(1).

27. Vanmarcke, E. H. (1983), Random fields: analysis and synthesis, MIT Press, Cambridge.

(접수일자 2009. 5. 6, 심사완료일 2009. 7. 13)

부 록

부록 표 1. 함수비 및 애터버그한계의 변동계수

Property	Soil type		Layer	No. of Data groups	No. of tests per group		Range of Property value		Property COV, %	
					range	mean	Mean	SD	Range	Mean
Water Content (%)	Clay	CL	Fill	2	13~19	16	35.6~37.2	7.3~9.8	21~26	24
			Deposit	15	15~64	33	30.6~32.3	2.0~4.4	6~14	11
	Silt	ML	Fill	1	17	17	31.8	2.7	8	8
			Deposit	7	7~20	13	29.6~32.8	2.1~5.2	7~16	9
Liquid Limit (%)	Clay	CL	Fill	2	13~19	16	35.5~36.0	4.4~6.0	13~17	15
			Deposit	15	15~64	33	34.4~42.2	3.3~5.4	9~14	12
	Silt	ML	Fill	1	17	17	32.0	3.6	11	11
			Deposit	7	7~20	13	31.8~35.1	2.6~5.2	7~15	12
Plastic Limit (%)	Clay	CL	Fill	2	13~19	16	20.9~21.9	1.3~1.4	6~7	7
			Deposit	15	15~64	33	20.5~21.6	0.8~1.7	4~8	6
	Silt	ML	Fill	1	17	17	24.8	1.8	7	7
			Deposit	7	7~20	13	24.0~26.3	1.2~2.4	5~10	7
Plastic Index (%)	Clay	CL	Fill	2	13~19	16	13.6~15.2	4.2~6.0	31~39	35
			Deposit	15	15~64	33	13.2~20.8	3.2~5.2	18~35	26
	Silt	ML	Fill	1	17	17	7.2	2.2	31	31
			Deposit	7	7~20	13	7.2~9.1	1.8~3.3	20~42	31
Liquidity Index (%)	Clay	CL	Fill	2	13~19	16	1.0~1.1	0.3~0.5	28~48	38
			Deposit	15	15~64	33	0.5~0.9	0.1~0.5	24~52	37
	Silt	ML	Fill	1	17	17	1.0	0.5	44	44
			Deposit	7	7~20	13	0.5~1.2	0.3~0.8	44~72	60

부록 표 2. 압축지수의 변동계수

Property	Soil type		Layer	No. of Data groups	No. of tests per group		Range of Property value		Property COV, %	
					range	mean	Mean	SD	Range	Mean
Compression Index, Cc	Clay	CL	Fill	2	13~21	17	0.26~0.33	0.13~0.20	49~59	54
			Deposit	11	10~41	21	0.22~0.26	0.04~0.09	19~42	29
	Silt	ML	Fill	2	21~37	29	0.14~0.16	0.04~0.07	27~46	37
			Deposit	6	10~27	22	0.16~0.23	0.04~0.11	27~58	43

부록 표 3. 비배수전단강도의 변동계수

Property	Soil type		Layer	No. of Data groups	No. of tests per group		Range of Property value		Property COV, %	
					range	mean	Mean	SD	Range	Mean
$S_{u(UU)}$ kPa	Clay	CL	Fill	3	8~13	10	12.9~24.3	4.9~9.6	30~74	48
			Deposit	15	8~48	22	29.0~62.0	13.7~27.1	32~52	41
	Silt	ML	Fill	3	15~32	22	26.4~38.7	10.4~21.3	39~58	51
			Deposit	11	8~20	14	36.3~59.8	11.2~26.7	25~55	43
$S_{u(UC)}$ kPa	Clay	CL	Fill	3	6~20	13	11.0~19.6	3.2~7.8	29~40	35
			Deposit	10	6~27	13	22.4~53.6	8.5~27.9	38~57	47
	Silt	ML	Fill	3	20~36	26	23.1~26.1	9.6~16.2	42~63	53
			Deposit	8	7~25	11	28.9~42.1	11.8~19.5	28~58	43

부록 표 4. 전단강도비의 변동계수

Property	Soil type		Layer	No. of Data groups	No. of tests per group		Range of Property value		Property COV, %	
					range	mean	Mean	SD	Range	Mean
$\frac{S_{u(UU)}}{P_0'}$	Clay	CL	Fill	3	8~13	10	0.24~0.33	0.08~0.14	32~49	41
			Deposit	15	8~48	22	0.22~0.44	0.08~0.22	31~51	41
	Silt	ML	Fill	3	15~32	22	0.39~0.58	0.18~0.31	38~57	49
			Deposit	11	8~20	14	0.22~0.54	0.07~0.26	25~55	43
$\frac{S_{u(UC)}}{P_0'}$	Clay	CL	Fill	3	6~20	13	0.22~0.27	0.06~0.11	28~41	35
			Deposit	10	6~27	13	0.27~0.39	0.10~0.22	37~58	47
	Silt	ML	Fill	3	20~36	26	0.35~0.41	0.17~0.23	42~60	52
			Deposit	8	7~25	11	0.20~0.42	0.09~0.19	28~58	43

부록 표 5. 내부마찰각의 변동계수

Property	Soil type		No. of Data groups	No. of tests per groups		Range of Property value		Property COV, %	
				range	mean	Mean	SD	Range	Mean
ϕ'_{cu}	Clay	CL	6	6~25	11	25~31	3~5	11~17	14
	Silt	ML	3	4~18	9	24~30	1~6	6~20	14
ϕ'_{cd}	Clay	CL	3	5~7	6	26~34	2~5	6~18	11
	Silt	ML	2	8~10	9	32~34	4~5	14~15	14
ϕ_{cu}	Clay	CL	6	4~42	22	14~20	3~6	15~31	21
	Silt	ML	3	10~28	17	18~19	3~6	14~31	21