

현장시험을 이용한 인천 송도지반의 변동성 분석

Geotechnical Variability Characterization of Songdo area in Incheon by Field Tests

김동휘¹⁾, Donghee Kim, 배경두²⁾, Kyungdoo Bae, 이주형²⁾, Juhyung Lee, 이우진³⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

³⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

SYNOPSIS : 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 at Song-do region in Korea for evaluating inherent soil variability. 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.

Keywords : Coefficient of variation, Geotechnical variability, Inherent soil variability

1. 서론

지반공학분야에서 통계학적 분석방법들은 설계와 구조물에 대한 평가를 좀 더 합리적으로 수행하고자 하는 목적으로 도입되었다. 통계학적 분석방법들은 설계자가 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 기법에 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 조사 자료와 결합하여 사용하거나(Spry 등, 1988; Filippas 등, 1988) 변동계수 추정 값에 대한 하나의 지표로 사용될 수 있다. 그러나 특정지역의 정확한 신뢰성 설계를 위해서는 설계지역의 지반정수들에 대한 변동계수가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 송도지역에서 수행된 현장조사자료를 재분석하여 신뢰성 설계에 직접적으로 사용될 수 있는 지반정수들의 변동계수를 제시하고자 한다.

2. 지반의 변동성

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 수평방향으로 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 진술한 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, COW_w 이며, 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

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

3. 연구지역 위치

연구위치인 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 분석은 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, 압밀축진

공법, 동다짐공법 등이 적용되기 전에 수행되었다. 또한, 김동휘 등(2009)에 따르면 본 논문에 사용한 시험자료들은 압밀도 80~90% 이상의 자료로 시간에 따른 지반정수의 변동성은 크지 않을 것으로 판단된다. 그림 3은 송도신도시 위치 및 매립현황을 나타내고 있다.

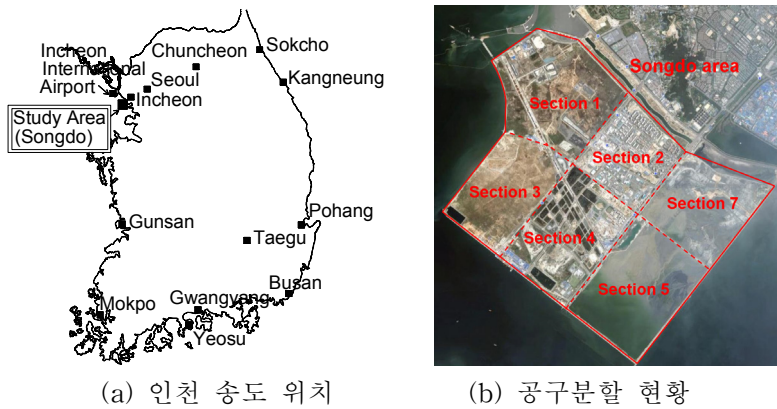


그림 3. 인천 송도 위치, 공구분할 현황 및 시추조사위치(김동휘 등, 2009)

4. 현장시험을 이용한 변동성분석

4.1 콘관입시험

본 논문에서는 콘관입시험결과인 콘선단저항력(q_c)의 변동성을 지층 및 콘선단저항력의 평균값에 따라 분석하였다. 즉, 지층별 콘선단저항력의 평균과 표준편차를 구하여 변동계수를 산정하였으며, 동일한 지층 내에서의 콘선단저항력이 크게 변할 경우에는 심도에 따른 콘선단저항력 변화에 따른 변동계수 왜곡을 최소화하기 위하여 지층을 나누어서 변동계수를 산정하였다. 그림 4의 왼쪽은 송도지역의 대표적인 지층분포이며, 오른쪽의 콘선단저항력 변동계수는 0.50m 간격으로 산정한 것으로 지층에 따라 다른 값을 보이고 있다. 즉, 실트질 점토층과 실트층은 2~10%, 모래층은 9~84%의 변동계수를 보이고 있으며, 이는 실트질 점토층과 실트층이 모래층보다 작은 변동성을 보인다는 것을 의미한다. 그림 5는 콘관입시험결과를 이용한 지층별 변동계수를 깊이에 따라 나타낸 것이며, 이를 요약하면 표 1과 같다. 표 1에서 볼 수 있듯이 각 지층의 변동계수는 실트질 점토가 4~22%(평균 10%), 실트가 7~36%(평균 18%), 실트와 점토가 혼합된 층이 3~47%(평균 22%), 모래층이 15~84%(평균 37%)로 분석되었으며, 실트질 점토의 변동계수가 가장 작고 모래층이 가장 큰 것으로 나타났다. 모래층의 경우 순수하게 모래만으로 구성된 것이 아니라 실트 및 점토 성분이 포함되어 있어 변동성이 큰 것으로 판단된다. 표고 E.L.-1.0m 상부에 존재하는 매립층의 변동계수가 퇴적층보다 큰 것으로 나타났으며, 이는 매립층의 재료로 모래, 실트 및 점토가 다양하게 사용되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 본 논문에서는 평균 콘선단저항력에 따른 콘선단저항력의 변동계수를 분석하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 평균선단저항력이 증가할수록 변동계수도 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

표 1. 콘선단저항력의 변동성 분석결과

Soil type	No. of data	Property value (MPa)		Property COV (%)	
		Range	Mean	Range	mean
Silty clay	73	0.28-1.83	1.13	4-22	10
Silt mixtures	23	0.30-3.17	1.49	7-36	18
Clayey silt (Silt & clay mixtures)	51	0.33-3.29	1.31	3-47	22
Sand mixtures	66	0.79-15.91	3.11	15-84	37

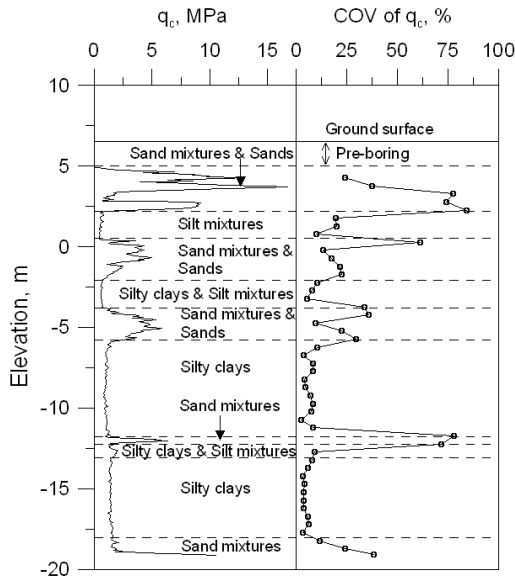


그림 4. 대표지층 및 콘선단저항력의 변동계수

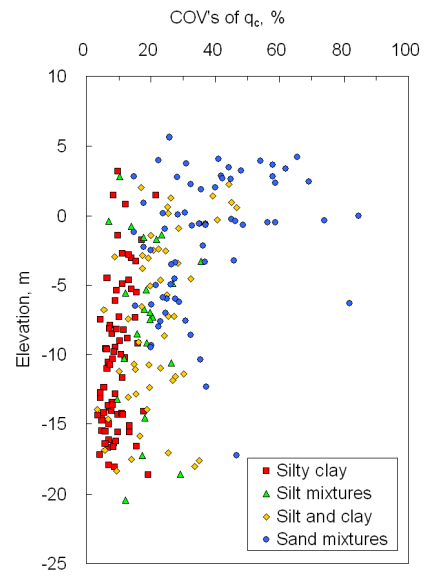


그림 5. 심도에 따른 콘선단저항력의 변동계수

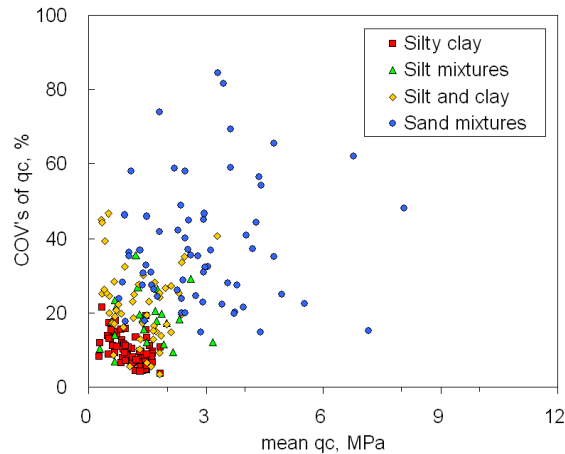


그림 6. 평균 콘선단저항력에 따른 변동계수

4.2 현장베인시험

본 논문에서는 현장시험인 현장베인시험(Field Vane(FV) Test)와 실내시험인 비압밀 비배수시험(Unconsolidated-Undrained Test), 일축압축시험(Unconfined Compression Test)으로 구한 점토 및 실트의 비배수전단강도를 분석하였다. 비압밀 비배수시험으로 산정한 비배수전단강도는 그림 7과 같이 표고 E.L-7m까지는 증가 경향이 뚜렷하나 그 이하로는 거의 일정한 경향을 보이며, 표고 E.L-15m 이하에서는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 이는 1, 3공구 전체자료에 대한 분석결과로 심도가 증가함에 따라 비배수전단강도가 증가하는 경향을 보이는 영역도 있을 것으로 판단된다. 표고 E.L-7m는 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. 인천 송도지반에 대한 비배수전단강도를 포함한 자세한 지반특서는 김동휘 등(2009)을 참조할 수 있다.

현장베인시험에 의한 비배수전단강도의 변동계수는 그림 8과 9에서와 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. 현장배인시험에 의한 비배수전단강도의 변동계수 분석결과 23~56%의 범위를 보이고 있으며, 이는 실내시험결과와도 유사한 것으로 나타났다.

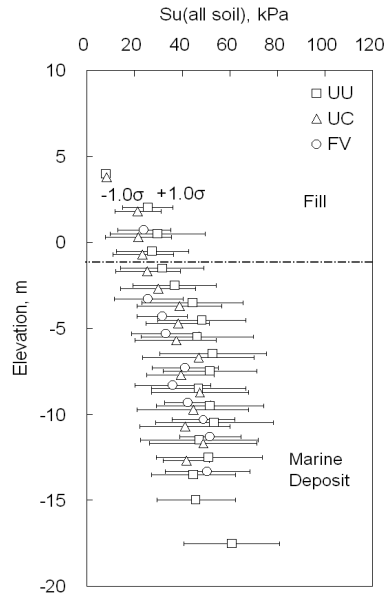


그림 7. 비배수전단강도 분포

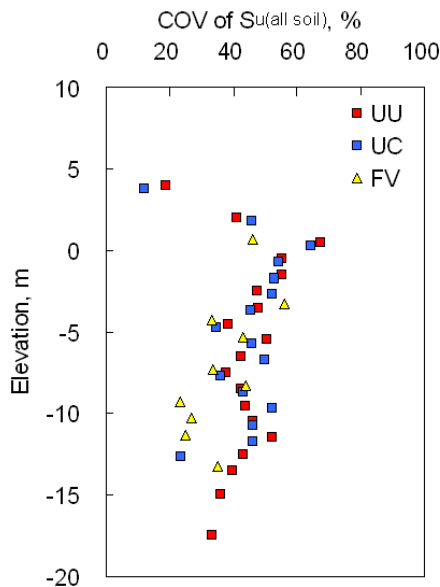


그림 8. 비배수전단강도 변동성

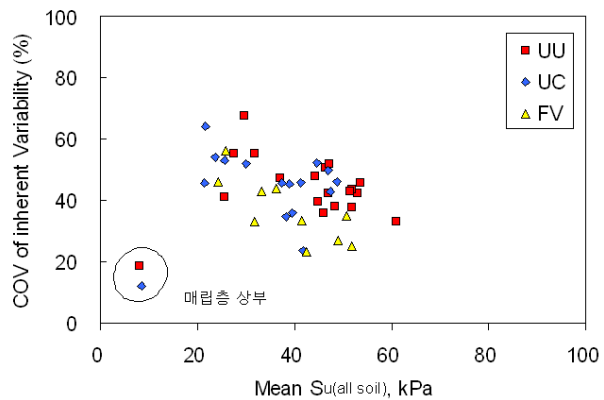


그림 9. 비배수전단강도 평균에 따른 변동성

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 현장시험인 콘관입시험과 현장배인시험 결과를 이용하여 각각의 시험에 대한 변동성을 분석하였다. 분석결과 콘선단저항값은 모래층이 실트 및 점토층에 비하여 상대적으로 변동성이 큰 것으로 나타났다. 이는 인천 송도지역의 모래층에는 모래뿐만 아니라 실트 및 점토가 혼재되어 있어 변동성이 큰 것으로 판단된다. 현장배인시험에 대한 변동계수는 23~56%의 범위를 보이고 있으며, 이는 실내

시험결과와도 유사한 것으로 나타났다. 이러한 변동성은 설계정수의 대표값을 결정하는데 영향을 미치므로 설계값 결정시 활용할 경우 합리적인 결정을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진(2009), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 6호, pp.73~88.
2. 김창동, 김병일, 김수일, 이준환(2008), “확률변수의 분포특성을 고려한 얕은기초 신뢰성 설계”, *한국지반공학회 논문집*, 제24권, 1호, pp.119-130.
3. 최현길(2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
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. 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.
6. Filippas, O. B., Kulhawy, F. H., and Grogriu, 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).
7. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), “Uncertainties in characterizing soil properties”, *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp.49-75.
8. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
9. 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.
10. 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.
11. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), “Characterization of geotechnical variability”, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp.612-624.
12. 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.
13. 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).
14. Vanmarcke, E. H. (1983), *Random fields: analysis and synthesis*, MIT Press, Cambridge.