

지반정수의 변동성 추정 및 결과의 활용

Estimation of Variability of Soil Properties and Its Application to Geotechnical Engineering Design

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee김 민 태² Kim, Min-Tae이 창 호³ Lee, Chang-Ho이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

The reliable evaluation of the coefficient of variation (COV) of soil properties is required for the determination of adequate design values and the application of a probabilistic method for the design of geotechnical structures. In this paper, the applicability of methods for estimating the standard deviation, such as the Three-Sigma Rule and a statistical method, is evaluated by using site investigation data of the Songdo area. It is found that the Three-Sigma Rule provides similar results to those of a statistical method when using $N_o=6$ for the property with small variability and $N_o=4.2\sim 5.3$ for the property with large variability. It is also observed that, for the undrained shear strength that has an increasing trend with depth, a N_o value of 4 is adequate for the evaluation of the variability by the Three-Sigma Rule. The COVs of soil properties determined in this paper could be used in the estimation of the confidence interval and characteristic values of soil properties.

요 지

설계지반정수의 합리적인 결정과 확률론적 방법에 의한 지반구조물의 설계를 위해서는 지반정수의 변동계수에 대한 신뢰성 있는 추정이 필요하다. 본 논문에서는 인천 송도지역의 지반조사자료를 이용하여 Three-Sigma Rule 및 통계적인 방법과 같은 표준편차 추정방법의 적용성을 평가해 보았다. 무작위성을 보이는 지반 물성값 중, 변동성이 작은 γ_t , γ_b , e_0 는 $N_o=6$ 을, 상대적으로 변동성이 큰 C_u/C_c , $C/(1+e_0)$, c_v , k_v 의 경우 $N_o=4.2\sim 5.3$ 을 사용하여 Three-Sigma Rule을 적용하면 통계학적 방법과 유사한 결과를 얻는 것이 관찰되었다. 또한 깊이에 따라 경향성을 보이는 비배수전 단강도는 약 40%의 변동계수를 보이는 것으로 관찰되었으며 $N_o=4$ 를 사용하면 Three-Sigma Rule로 비슷한 결과를 얻는 것으로 나타났다. 본 논문에서 추정된 변동계수를 이용하여 지반정수의 신뢰구간, 특성값을 결정할 수 있었다.

Keywords : Characteristic value, Coefficient of variation, Confidence interval, Probabilistic analysis

1. 서 론

설계지반정수의 합리적인 결정과 확률론적 방법을 이용한 지반구조물의 설계를 위해서는 지반정수의 변동성에 대한 신뢰성 높은 추정결과가 필요하다. 일반적으로

로는 통계적인 방법으로 지반정수의 변동성을 결정하기 위해 많은 측정값들이 필요하지만, 지반공학적 문제에서 통계분석 수행에 필요한 충분한 자료를 얻기는 어렵다. 또한, 통계적인 방법만으로 지반정수의 변동성을 산정하는 경향은 지반공학분야에서 확률론적 설계방

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

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

3 정희원, 조지아공대 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post Doctoral Fellow, School of Civil and Environmental Engrg., Georgia Institute of Technology)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

법의 채택을 저해하는 요인이 되기도 한다. 따라서 자료 부족으로 통계적인 방법을 적용하기 곤란한 지반공학 적 문제에 대해 지반정수의 변동성을 합리적으로 추정 할 수 있는 방법이 필요하다.

지반공학분야의 물성값이나 지반정수의 변동성은 매우 커서 이를 합리적으로 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 지반정수의 변동성은 표준편차를 평균으로 나눈 변동계수(coefficient of variation, COV)로 평가된다. 지반정 수의 변동계수에 관한 연구는 Lumb(1974), Baecher 등 (1983), Lee 등(1983), Harr(1984), Lacasse와 Nadim(1996), Cherubini(1997), Phoon과 Kulhawy(1999), Duncan(2000), Baecher와 Christian(2003) 등에 의해 광범위하게 수행 되었다. Phoon과 Kulhawy(1999)는 기존 논문들의 재분 석을 통하여 실내 및 현장시험으로 산정한 지반정수들 의 변동계수 범위를 제시하였다. 국내에서는 이규환과 윤길립(2008), 윤길립 등(2008), 김창동 등(2008), 김동휘 등(2009a, b)이 지반정수 변동성에 대한 연구를 수행하 였으며 이들 대부분은 통계적 해석으로 지반정수의 변 동성을 제시하고 있다. 그러나 전술한 바와 같이 지반공 학분야에서는 측정자료가 충분하지 않은 경우에도 지 반정수의 변동성을 신뢰성 높게 추정할 수 있는 방법이 필요하며 이를 통해 지반정수의 변동성을 고려하는 다 양한 설계방법들이 도입될 수 있다.

본 논문에서는 통계적인 방법을 이용한 지반정수 변 동성 추정방법을 검토하는 한편, 지반정수의 자료수가 부족한 경우에도 지반정수의 변동성을 효과적으로 평 가할 수 있는 방법들을 제시하였다. 또한 본 연구에서 제시한 방법들을 이용하여 인천 송도국제도시 지반정 수들의 변동성을 추정해 보았으며, 그 결과를 간단한 예 제에 적용하여 지반정수의 변동성을 활용할 수 있는 방 안을 제시하였다.

2. 지반정수의 변동성 추정방법

2.1 통계적 방법

지반조사자료의 개수가 충분한 경우에는 통계적인 방법을 이용하여 식 (1)과 같이 표준편차를 산정할 수 있다.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

여기서, s 는 표준편차, n 은 자료의 개수, x_i 는 지반정수 x 의 i 번째 값, \bar{x} 는 지반정수 x 의 평균이다. 이 방법을 사용하기 위해서는 자료의 개수가 충분해야 할 뿐 아니라 측정영역 내에서 자료가 무작위성을 보여야 한다. 통 계학에서는 자료 수가 30개 이상이면 통계분석 결과의 신 뢰성이 높다고 한다(Walpole 등, 2007). Schneider(1997) 는 지반공학분야에서는 자료의 수가 대략 10개 이상이면 통계적 방법을 사용할 수 있다고 주장하였으나 통계 분석 적용 유무를 결정하는 절대적인 자료 수는 없는 것으로 알려져 있다.

지반정수가 위치에 따라 특정한 경향을 보일 경우에는 이 영역의 모든 자료들을 이용하여 표준편차를 구할 수 없다(Baecher와 Christian, 2003). 이 경우에는 자료값 에서 경향성분을 뺀 변동성분들의 표준편차를 산정하여 지반정수의 변동성을 평가해야 한다. x, y 방향으로 는 무작위성을 보이고 깊이 방향으로만 경향성을 보일 경우에는 식 (2)를 이용하여 변동성분들의 표준편차(s_w)를 구할 수 있다.

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

여기서, $w(z_i)$ 는 깊이 z_i 에서 변동성분의 값이다. 지반정 수의 변동성을 나타내는 효과적인 지표는 표준편차 s_w 를 평균지반정수의 경향성분인 t 로 정규화시킨 변동계 수이며, 식 (3)과 같이 산정할 수 있다. 만약, 지반정수가 공간적 경향성을 보이지 않는다면 식 (3)에서 경향함수 t 는 일정한 상수인 평균 \bar{x} , 표준편차 s_w 는 s 로 나타낼 수 있다.

$$COV = \frac{s_w}{t} \quad (3)$$

2.2 Three-Sigma Rule

표준편차를 통계적 방법으로만 산정할 수 있다면, 조 사자료가 적은 지반공학분야의 신뢰성 분석은 상당한 어려움이 있다(Duncan, 2000). 따라서 지반조사자료의 개수가 부족한 경우에도 표준편차를 산정하는 방법들 이 제안되었으며 그 중 대표적인 방법이 Three-Sigma Rule이다. 정규분포를 보이는 자료의 경우 모든 값들의 99.7%가 $6s$ 범위 내에 존재한다. 따라서 자료의 범위는 식 (4)로 나타낼 수 있다(Withiam 등, 1997; Duncan, 2000).

$$\frac{\text{Range}(\text{HCV-LCV})}{6} = s \quad (4)$$

여기서, Range는 측정된 자료의 범위로 HCV와 LCV의 차로 구하며, HCV는 측정된 자료의 최대값(highest conceivable value or maximum value), LCV는 측정된 자료의 최소값(lowest conceivable value or minimum value)이다. 측정된 자료의 HCV와 LCV를 이용하여 산정한 표준편차는 일반적으로 실제보다 작은 경향을 보인다. 따라서 Duncan(2000)은 지반조사자료의 표준편차를 Three-Sigma Rule로 결정할 때 인근 지역의 연구결과 또는 발표된 연구결과와 비교한 후 사용할 것을 권고하였다. 이러한 문제 때문에 Christian과 Baecher(2001), Foye 등(2006)은 실제 자료의 표준편차와 근접한 값을 얻기 위해서 식 (4)에서 6보다 작은 값을 사용해야 한다고 주장하면서 식 (5)를 제안하였다.

$$\frac{\text{Range}}{N_\sigma} = s \quad (5)$$

여기서, N_σ 는 자료의 수에 따라서 변하는 상수이다. Foye 등(2006)은 Tippett(1925)이 제시한 N_σ 값을 사용하면 신뢰성 있는 표준편차를 얻는다고 하였으며, Christian과 Baecher(2001)는 식 (5)를 사용할 때 Burlington과 May(1975)가 제시한 N_σ 값을 사용하도록 추천하고 있다.

2.3 Graphical Three-Sigma Rule

이 방법은 심도에 따라서 증가하는 비배수전단강도와 같은 지반정수의 표준편차를 추정하는데 적절하다. Graphical Three-Sigma Rule의 원리는 Three-Sigma Rule의 원리와 동일하다. 즉, 지반정수와 심도의 관계 그래프에서 최대값, 최소값, 평균값을 보이는 선을 작도한 후에 식 (4)를 이용하여 심도별 표준편차를 산정하면 된다. 통계적 방법에서 식 (2)를 이용하여 심도에 따라 증가하는 지반조사자료의 표준편차를 산정할 경우에는 자료값에서 경향성분을 제거해야 한다. 그러나 이 방법은 지반조사자료와 심도의 관계 그래프로부터 직접 표준편차를 산정할 수 있는 장점이 있다. Duncan(2000), Foye 등(2006)은 이 방법을 이용하여 과압밀비, 비배수전단강도, SPT N값 및 CPT q_c 의 표준편차를 산정하였다.

2.4 기존 연구결과의 활용

지반조사자료의 수가 부족한 경우에는 표준편차의 추정을 위해 기존의 연구결과를 활용할 수 있다. 기존의 연구결과들은 주로 변동계수를 제시하고 있으며, Lumb(1974), Lee 등(1983), Harr(1984), Lacasse와 Nadim(1996), Phoon과 Kulhawy(1999) 등이 대표적이다. 기존의 연구결과들은 자세한 시험방법, 시료채취상태, 퇴적 특성 등을 상세하게 기술하지 않고 대략적인 변동계수의 범위만을 제시하므로 신중하게 사용해야 한다.

3. 변동성 추정방법을 이용한 변동계수 추정 및 적용성 검토

본 논문에서 사용한 인천 송도지반의 습윤단위중량(γ_t), 유효단위중량(γ_b), 간극비(e_0), C_α/C_c , $C_\alpha/(1+e_0)$, 압밀계수(c_v), 투수계수(k_v)는 공간적으로 특정한 경향을 보이지 않는 것으로 나타났다(김동휘 등, 2009a, b). 따라서 각 지반정수들의 표준편차를 식 (1)의 통계적 방법과 식 (3)의 Three-Sigma Rule을 이용하여 추정하고, 이를 기존 연구결과와 비교하였다. 인천 송도지반에 대한 γ_t , γ_b , e_0 , C_α/C_c , $C_\alpha/(1+e_0)$, c_v , k_v 의 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 및 확률분포의 산정결과는 표 1과 같다(김동휘 등, 2009b). 식 (1)을 이용하여 산정한 변동계수는 Lumb(1974), Lee 등(1983), Harr(1984), Lacasse와 Nadim(1996), Phoon과 Kulhawy(1999)이 제시한 변동계수의 범위와 유사한 것으로 나타났다. 분석된 송도지반의 지반정수들의 자료 수는 30개 이상이므로 식 (1)로 산정한 변동계수는 실제값과 유사할 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 통계적 방법으로 산정한 변동계수를 기준으로 하여 다른 방법들로 산정한 변동계수를 평가하였다.

표 1에 의하면 γ_t 와 γ_b 의 경우 식 (4)로 산정한 변동계수가 약간 큰 반면 그 밖의 모든 물성치에서 식 (4)로 산정한 변동계수가 식 (1)로 산정한 것보다 작거나 같은 것으로 나타났다. γ_t , γ_b , e_0 는 다른 지반정수들보다 변동성이 작기 때문에 식 (4)로 변동계수를 산정하여도 어느 정도 신뢰성 있는 값을 얻는 것으로 나타났다. 그러나 변동성이 큰 C_α/C_c , $C_\alpha/(1+e_0)$, c_v , k_v 의 경우 $N_\sigma=6$ 을 사용하면 변동성을 과소평가하는 것으로 나타났다. 특히, 확률밀도함수(probability density function, PDF)가 대수정규분포를 보이고 변동성이 가장 큰 c_v 와 k_v 의 변동계수가 가장 과소평가되는 것으로 나타났다. 따라서 식 (1)에

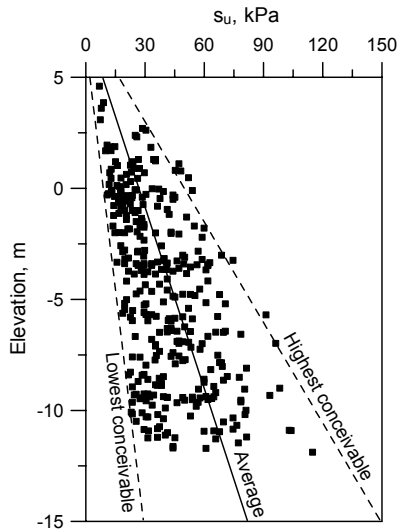


그림 1. 심도에 따른 비배수전단강도

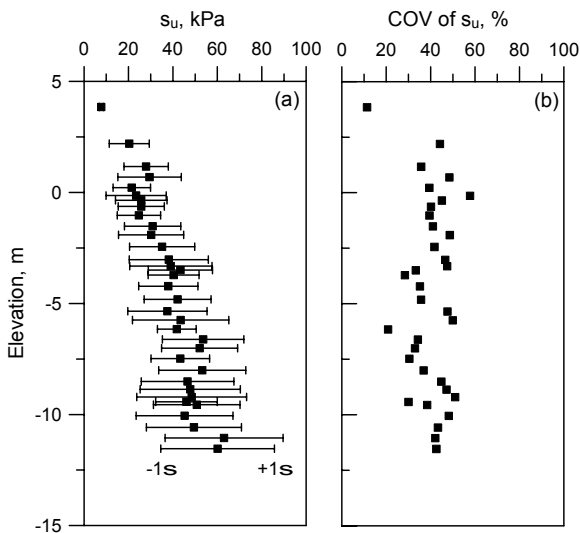


그림 2. 심도에 따른 비배수전단강도의 평균 및 변동계수: (a) 평균, (b) 변동계수

표 1. 지반정수의 통계량 및 변동계수

Soil properties	Number of Data, n	Statistics of soil properties ¹⁾					Coefficient of variation (COV), %			N_{σ} ⁴⁾
		Mean	s	Min	Max	PDF ²⁾	Eq (1)	Eq (4)	Published Data ³⁾	
γ_r (kN/m ³)	100	18.7	0.53	16.4	20.5	N	3	4	3-7	7.7
γ_b (kN/m ³)	100	8.9	0.53	6.6	10.7	N	6	8	0-10	7.7
e_0	200	0.87	0.10	0.61	1.19	N	11	11	7-30	5.8
C_d/C_c	61	0.034	0.0087	0.017	0.063	N	26	23	-	5.3
C_d/e_0	400	0.133	0.045	0.039	0.273	N	34	29	10-37	5.2
C_v ($\times 10^{-3}$ cm ² /sec)	70	4.23	1.99	1.28	9.54	LN	47	33	33-68	4.2
K_v ($\times 10^{-7}$ cm/sec)	64	0.868	0.486	0.224	2.630	LN	56	46	68-90	4.9

주 1) Mean은 평균, s는 표준편차, Min은 최소값, Max는 최대값, PDF는 확률밀도함수

2) PDF에서 N은 정규분포(Normal distribution), LN은 대수정규분포(Lognormal distribution)

3) Lumb(1974), Lee 등(1983), Harr(1984), Lacasse와 Nadim(1996), Phoon과 Kulhawy(1999)이 제시한 변동계수의 범위

4) 자료의 Range와 식 (1)로 구한 표준편차 s를 식 (5)에 대입하여 계산한 N_{σ}

의한 표준편차와 동일한 값을 얻기 위해서는 $N_{\sigma}=4.2\sim 5.3$ 의 값을 사용해야 한다. 남약신도시(Won, 2009) 및 남해고속도로(유신코퍼레이션, 2008) 자료를 이용하여 e_0 , C_c , $C_d/(1+e_0)$ 에 대해 분석한 결과, 두 지반 모두 식 (1)로 산정한 표준편차와 동일한 표준편차를 산정하기 위해서는 $N_{\sigma}=4.7\sim 4.9$ 를 사용해야 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 500개 이하의 자료에서 식 (5)를 이용할 경우 $N_{\sigma}<6$ 의 값을 사용하도록 제시한 Tippett(1925)과 Burlington과 May(1970)의 결과와 일치한다. 또한, Duncan (2001)이 지반공학분야 적용 시 $N_{\sigma}=4$ (Two-Sigma Rule)를 추천한 것과도 유사하다. 표 1의 마지막 열의 N_{σ} 는 각 지반정수들의 Range(최대값과 최소값의 차)와 식 (1)로 구한 표준편차 s를 식 (5)에 대입하여 얻은 값이다.

인천 송도지역의 물성값 중 비배수전단강도(s_u)는 심도에 따라 증가하는 경향을 보인다. UU시험을 통해 얻은 비배수전단강도의 심도에 따른 분포, 전단강도의 평균, 최대값 및 최소값의 영역은 그림 1과 같다. Schneider (1997)는 자료의 수가 10개 이상이면 변동성을 분석하기 위해서 통계적 방법을 사용할 수 있다고 하였다. 따라서 본 논문에서는 최소 자료수가 10개 이상 되도록 깊이를 0.2~0.8m의 두께를 가지는 구간으로 나누고, 통계적 방법으로 각 구간에서의 평균, 표준편차 및 변동계수를 산정하였다. 그림 2(a)는 깊이에 따른 비배수전단강도의 평균과 표준편차, 그림 2(b)는 변동계수이다. 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 통계적 방법으로 구한 변동계수는 평균 40%로 평가되었다.

그림 1에 보이는 비배수전단강도의 평균, 최대값, 최소값의 영역을 이용하여 Graphical Three-Sigma Rule($N_{\sigma}=6$)로 전단강도의 변동계수를 산정한 결과 약 23%로 나

타났다. 따라서 $N_0=6$ 을 사용한 Graphical Three-Sigma Rule이 통계적인 방법보다 비배수전단강도의 변동계수를 과소평가하는 것으로 나타나는 반면, $N_0=4$ 를 사용하면 통계적인 방법으로 산정한 변동계수와 유사한 값을 얻을 수 있다. 인천 송도지반의 비배수전단강도의 변동계수는 Harr(1984), Kulhawy(1992), Lacasse and Nadim(1997), Duncan(2000)이 제시한 변동계수 범위 13~40%의 상한선과 유사하거나 약간 큰 것으로 나타났다.

4. 변동계수 산정결과와 활용

4.1 평균값의 신뢰구간 산정

국내에서는 결정론적 방법을 이용하여 설계를 수행하는 것이 일반적이며, 이 경우 변동성이 큰 자료들은 평균값을 설계지반정수로 사용하는 경우가 많다. 본 절에서는 지반정수의 변동계수 추정결과를 이용하여 평균값의 신뢰구간을 산정해 보았으며, 이 신뢰구간을 설계지반정수 평가에 어떻게 사용할 수 있는지 살펴보았다.

지반조사자료의 수가 증가하면 모수추정의 정확성은 향상되지만 추정하려는 모수와 정확히 일치하는 값을 기대할 수 없다. 따라서 지반정수 평균의 참값이 포함될 구간을 결정하는 것이 더 바람직하다. 이러한 구간을 신뢰구간(confidence interval)이라고 하고 신뢰구간에 부여되는 확률을 신뢰계수(confidence coefficient)라고 부른다. 지반조사자료의 수(n)가 적을 경우 표본평균 \bar{X} 는 정규분포가 아닌 자유도가 (n-1)인 t 분포를 따르게 되며, t 분포는 표본크기 n에 의존하는 확률변수이다. 표본의 크기 n이 작을 때(소표본) 분산 σ^2 의 인지 유무에 따라서 모평균 μ 의 100(1- α)% 신뢰구간을 구할 수 있다. 대부분의 지반조사자료의 경우 분산을 알 수 없으므로 식 (6)과 같은 모평균 μ 의 100(1- α)% 신뢰구간을 구할

수 있다(Benjamin과 Cornell, 1970; Ang과 Tang, 1975; Baecher와 Christian, 2003; Fenton과 Griffiths, 2008).

$$\bar{X} - t_{\alpha/2}s / \sqrt{n} < \mu < \bar{X} + t_{\alpha/2}s / \sqrt{n} \quad (6)$$

여기서, s는 측정된 지반조사자료의 표준편차이며, $t_{\alpha/2}$ 는 자유도가 (n-1)인 t 분포의 오른쪽 면적이 $\alpha/2$ 인 t 값이다. 100(1- α)% 신뢰구간은 여러 번 표본을 추출하여 여러 개의 신뢰구간을 만들면 그 중 95%는 미지의 지반정수의 모평균을 포함하게 되고 나머지 5%에 해당하는 구간들은 그렇지 못할 것이라는 의미이다.

표 2는 지반정수들의 95%, 99% 신뢰구간을 산정한 것이며, 변동성이 작은 γ_t , γ_b , e_0 는 다른 지반정수들에 비하여 신뢰구간이 작고 변동성이 가장 큰 c_v , k_v 의 신뢰구간이 가장 크다. γ_t 평균값의 95% 신뢰구간은 (18.59, 18.81)과 같이 매우 작으므로 γ_t 의 표본평균은 실제평균과 유사할 가능성이 크다. 그러나 c_v 평균값의 95% 신뢰구간은 (1.57E-3, 9.34E-3)으로 γ_t 평균값의 신뢰구간에 비하여 매우 크다. 따라서 c_v 의 평균값으로 표본평균을 사용할 경우에는 γ_t 보다 모평균과 상이할 가능성이 클 것이다. 이와 같이 지반정수 평균값의 신뢰구간을 이용하여 측정값으로 산정한 표본평균의 신뢰성을 평가할 수 있다. 송도국제도시 내에 지반조사결과가 없는 구간을 개발할 경우 이러한 결과를 이용하여 초기 설계 지반정수 결정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 특성값 산정

Eurocode 7 등의 설계기준에서는 특성값(characteristic value)에 부분계수(partial factor)를 적용하여 설계값(design value)을 결정하고 있다(Schneider, 1997; Van Aalboom과 Menge, 1999; Schneider, 1999; Frank 등, 2005; Bond

표 2. 각 지반정수들 평균의 신뢰구간

Soil properties	Mean ¹⁾	s	(n-1) ²⁾	95% confident interval	99% confident interval
γ_t (kN/m ³)	18.7	0.53	99	18.59 - 18.81	18.56 - 18.84
γ_b (kN/m ³)	8.9	0.53	99	8.79 - 9.01	8.76 - 9.04
e_0	0.87	0.1	199	0.856 - 0.884	0.852 - 0.888
C_d/C_c	0.034	0.0087	60	0.0318 - 0.0362	0.0310 - 0.0370
$C_d/(1+e_0)$	0.133	0.045	399	0.1286 - 0.1374	0.1271 - 0.1389
C_v (cm ² /sec)	-5.565	0.447	69	1.57E-3 - 9.34E-3	1.17E-3 - 1.25E-2
K_v (cm/sec)	-16.396	0.522	63	2.67E-8 - 2.15E-7	1.89E-8 - 3.04E-7

주 1) 암말계수와 투수계수는 대수정규분포를 따르므로 로그변환하여 평균의 신뢰구간을 산정하였음

2) (n-1)은 자유도(degrees of freedom)을 의미함

와 Hariss, 2008, 윤길립 등, 2008). 우리나라와 같이 부분계수를 사용하지 않을 경우에도 특성값은 설계에 직접적으로 사용될 수 있는 값이다. 본 절에서는 지반정수들의 변동계수 산정결과를 이용하여 특성값을 결정하는 방법 및 예제를 제시하였다.

지반정수들의 특성값은 설계대상 지반구조물의 한계 상태에 영향을 미치므로 시험결과 및 사용할 수 있는 모든 정보들을 이용하여 선택되어야 한다(Bond와 Hariss, 2008). 강재 및 콘크리트와 같은 구조부재들은 특성값으로 분위수(quantile) $q(0.05)$ 와 $q(0.95)$ 를 사용한다(Frank 등, 2005; Bond와 Hariss, 2008, 조효남 등, 2008). 측정값이 $q(0.05)$ 와 $q(0.95)$ 보다 작을 확률은 각각 5%와 95%가 된다. 일반적으로 $q(0.05)$ 를 하한특성값(lower characteristic value), $q(0.95)$ 를 상한특성값(upper characteristic value)이라고 하며, 각각의 위치는 그림 3과 같다.

지반공학분야에서 극한상태에 영향을 미치는 영역, 즉 파괴면은 수 m 에서 수백 m 에 이른다. 따라서 지반공학분야에서는 큰 영역에서 발생하는 극한상태를 대표하는 지반특성의 공간적 평균이 구조공학분야에서 사용되는 분위수보다 특성값으로 더 적합하다. 지반공학분야에서도 그림 3과 같이 평균보다 작은 하한특성값, $X_{c,low}$ 와 평균보다 큰 상한특성값, $X_{c,upp}$ 를 정의할 수 있으며, 상황에 따라서 안전측 설계가 될 수 있도록 특성값을 선택한다. 신뢰구간 산정에서 언급하였듯이 대부분 지반정수의 분산은 알 수 없고 측정자료의 수가 작기 때문에 t 분포의 개념을 적용하며, 식 (7)로 하한특성값, $X_{c,low}$ 과 상한특성값, $X_{c,upp}$ 을 산정한다.

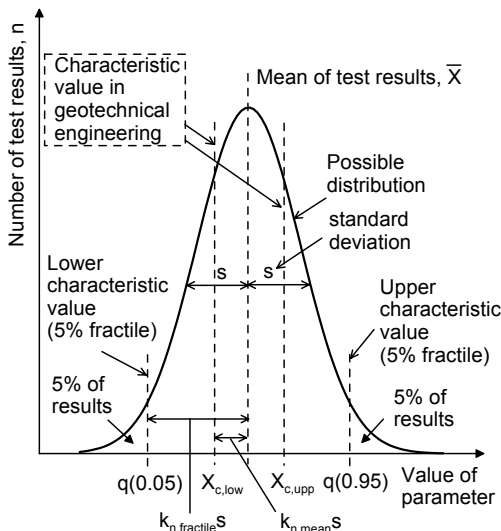


그림 3. 5%, 95% 분위수 및 특성값의 정의

$$\left. \begin{matrix} X_{c,low} \\ X_{c,upp} \end{matrix} \right\} = \bar{X} \mp k_{n,mean} s = \bar{X} (1 \mp k_{n,mean} COV) \quad (7)$$

여기서, \bar{X} 는 X 의 평균, s 는 표본의 표준편차, COV 는 변동계수를 의미하며, $k_{n,mean}$ 은 식 (8)과 같이 산정할 수 있다.

$$k_{n,mean} = t_{n-1}^{95\%} \sqrt{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

식 (8)에서 $t_{n-1}^{95\%}$ 은 95% 신뢰수준에서 자유도 $(n-1)$ 에 대한 Student의 t -value이며, n 은 표본의 크기이다. $X_{c,low}$ 와 $X_{c,upp}$ 는 분산이 알려져 있지 않은 경우 평균에 대한 95% 단측 신뢰하한(lower one-sided bound)과 95% 단측 신뢰상한(upper one-sided bound)을 각각 의미한다.

대부분의 지반공학적인 문제에서는 조사자료가 충분하지 않기 때문에 식 (7)과 같은 통계적인 방법을 적용할 수 없는 경우가 있다. 자료의 수가 2~9개인 경우에도 이론적으로는 통계적 방법을 사용하여 특성값을 결정할 수 있으나 $k_{n,mean}$ 값이 너무 커 일반적인 지반정수의 범위를 벗어날 가능성이 높다. 지반정수의 변동계수 COV 가 큰 경우에는 특성값을 과소평가하는 경향은 더욱 커질 것이다. Schneider(1997, 1999)는 자료의 수에 관계없이 지반정수의 특성값을 산정할 수 있는 식 (9)를 제안하였다. 식 (9)는 자료 수에 관계없이 $k_{n,mean}$ 값으로 0.5를 사용하며, Schneider(1997, 1999)는 많은 수의 지반정수를 확보할 수 없는 실무현장에서 효과적으로 사용할 수 있는 방법이라고 하였다.

$$\left. \begin{matrix} X_{c,low} \\ X_{c,upp} \end{matrix} \right\} = \bar{X} \left(1 \mp \frac{COV}{2} \right) \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 이용하여 송도국제도시 지반정수에 대한 특성값을 산정한 결과는 표 3과 같다. 본 논문에서 사용한 인천 송도지반 지반정수의 자료 수는 모두 10개 이상이므로 $k_{n,mean}$ 값으로 0.5 이하의 값을 사용한다. 따라서 식 (9)를 사용하여 산정한 특성값은 식 (7)을 사용하여 산정한 특성값보다 하한값은 작게 상한값은 크게 산정하는 것으로 나타났다. 그러나 두 방법으로 산정한 결과가 큰 차이를 보이지는 않는다. 따라서 식 (9)는 Schneider(1997, 1999)가 말한 바와 같이 자료의 수가 많지 않을 경우 효과적으로 사용할 수 있는 방법이라고 판단된다. 표 3의 맨 마지막 열에 지반정수들의 $q(0.05)$

표 3. 지반정수들의 특성값 산정결과

Soil properties	Mean	s	n	Eq. (7)		Eq. (9)		5%, 95% quantile value	
				$X_{c,low}$	$X_{c,upp}$	$X_{c,low}$	$X_{c,upp}$	$q(0.05)$	$q(0.95)$
γ_t (kN/m ³)	18.7	0.53	100	18.61	18.79	18.44	18.97	17.81	19.59
γ_b (kN/m ³)	8.9	0.53	100	8.81	8.99	8.64	9.17	8.01	9.79
e_0	0.87	0.1	200	0.858	0.882	0.820	0.920	0.70	1.04
C_d/C_c	0.034	0.0087	61	0.0321	0.0359	0.0296	0.0384	0.0193	0.0487
$C_d/(1+e_0)$	0.133	0.045	400	0.1293	0.1367	0.1105	0.1555	0.0586	0.2074
C_v (cm ² /sec)	-5.565	0.447	70	3.50E-3	4.19E-3	3.06E-03	4.79E-03	1.81E-3	8.11E-3
K_v (cm/sec)	-16.396	0.522	64	6.79E-8	8.45E-8	5.83E-08	9.83E-08	3.14E-8	1.82E-7

주) 압밀계수와 투수계수는 대수정규분포를 따르므로 로그변환하여 $X_{c,low}$, $X_{c,upp}$, $q(0.05)$, $q(0.95)$ 산정하였음

표 4. 베이지안 방법을 이용한 지반정수의 평균 및 표준편차, 특성값 산정

Soil properties	Estimated a priori value			Test values			A posteriori value		Characteristic value	
	Mean	SD	n	Mean	SD	n	Mean	SD	$X_{c,low}$	$X_{c,upp}$
γ_t (kN/m ³)	18.7	0.53	100	18.6	0.65	14	18.61	0.165	18.53	18.69
γ_b (kN/m ³)	8.9	0.53	100	8.8	0.65	14	8.81	0.165	8.73	8.89
e_0	0.87	0.10	200	0.82	0.13	14	0.825	0.033	0.809	0.842
$C_d/(1+e_0)$	0.133	0.045	400	0.129	0.055	14	0.1294	0.0140	0.1224	0.1364
C_v (cm ² /sec)	-5.565*	0.447	70	-4.846*	1.203	14	-5.091*	0.261	5.40E-03	7.01E-03
K_v (cm/sec)	-16.396*	0.522	64	-16.824*	0.883	14	-16.751*	0.215	4.77E-08	5.91E-08

주)* 압밀계수와 투수계수의 평균과 표준편차는 로그변환한 값의 평균과 표준편차임

와 $q(0.95)$ 를 제시하였다. $q(0.05)$ 와 $q(0.95)$ 는 평균값보다 매우 작거나 크므로 이 값을 설계에 사용할 경우에는 안정성을 과소 또는 과대 평가할 것으로 판단된다. 따라서 지반공학분야에서는 평균개념을 사용하여 결정한 특성값이 설계에 더 적합한 것으로 판단된다.

4.3 베이지안 기법의 활용

본 절에서는 지반정수의 변동계수와 베이지안 방법(Bayesian updating techniques)을 이용하여 특성값을 추정하는 방법 및 예제를 제시하였다. Tang(1971), Spry 등(1988), Filippas 등(1988), Schneider(1997) 등에 의해 소개된 베이지안 방법은 실험에 의해 얻어지는 시험결과(test value)와 기존 문헌에서 제시된 신뢰성 높은 사전분포(a priori value or information)를 결합하여 보다 합리적인 최종 추론 결과(a posteriori value)를 도출하는 방법이다(박재현 등, 2010). 이 방법은 대부분 실험에 의해서 얻어지는 자료의 수가 부족할 경우에 적용되는 방법으로 본 논문에서는 기존 문헌의 사전분포로 본 논문에서 산정한 1~4공구의 지반정수 추정결과(표 1)를 사용하였다. 베이지안 방법에서는 기존 자료의 신뢰성이 높아야 한다는 전제조건이 있다. 베이지안 방법은 지반

정수가 정규분포를 따를 때 식 (10), (11)을 이용하여 보다 합리적인 최종 지반정수의 평균과 표준편차를 산정할 수 있다(Tang, 1971; Ang과 Tang, 1975; Schneider, 1997, 1999).

$$\bar{X}_3 = \frac{\bar{X}_2 + \frac{\bar{X}_1 \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2}{n}}{1 + \frac{1 \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2}{n}} \quad (10)$$

$$s_3 = s_2 \sqrt{\frac{1}{n + \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^2}} \quad (11)$$

여기서, \bar{X}_1 과 s_1 , \bar{X}_2 과 s_2 , \bar{X}_3 과 s_3 은 각각 기존 문헌에서 제시된 신뢰성 높은 추정결과, 시험결과 및 베이지안 방법으로 추정된 결과의 평균과 표준편차이며, n은 최근 시험자료의 개수이다.

인천 송도국제도시 1공구에 위치한 H블록 설계를 위해 수행한 지반조사자료의 수가 14개로 많지 않아 H블록 지반정수들의 변동성 및 특성값 결정의 신뢰성이 저하 될 수 있다. 따라서 본 절에서는 H블록을 포함하는 송도국제도시 1~4공구에서 측정된 비교적 많은 자료

로 추정된 송도지반정수들의 추정값(estimated a priori value, 표 1)과 최근 H블록에서 수행된 14개의 조사자료(test value)를 이용하여 베이지안 방법으로 H블록의 최종 설계값(a posteriori value)의 평균과 표준편차를 산정하였다. 김동휘 등(2009b)에 따르면 본 절에서 분석한 지반정수들은 송도국제도시 1~4공구 내에서 공간적인 경향성을 보이지 않아 1공구에 위치한 H블록의 지반정수자료는 1~4공구 자료들과 동일한 모집단에서 추출된 자료로 볼 수 있을 것으로 판단된다. 베이지안 방법으로 산정한 H블록 지반정수들의 최종 추정값의 평균과 표준편차와 식 (9)를 이용하여 추정된 특성값을 표 4에 제시하였다. 표 4에서 압밀계수와 투수계수의 초기 추정값, 최근 시험값 및 최종 설계값의 평균이 음의 값으로 표시된 이유는 식 (10), (11)을 사용하기 위해서 측정값들을 로그변환했기 때문이다.

5. 요약 및 결론

설계지반정수의 합리적인 결정과 확률론적 방법에 의한 지반구조물의 안정성 평가를 위해서는 신뢰성 있는 지반정수 변동성의 추정이 필요하다. 본 논문에서는 지반공학분야에서 사용되고 있는 변동성 추정방법을 살펴보았으며, 그 적용성을 인천 송도지반조사자료를 이용하여 평가해 보았다. 또한, 이러한 지반정수의 변동성 추정결과를 간단한 예제에 적용하여 지반정수의 변동성을 활용할 수 있는 방안을 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반조사자료의 수가 충분한 경우에는 통계적인 방법을 이용하여 신뢰성 있는 표준편차를 추정할 수 있었다. 분석된 송도지반의 지반정수들의 자료 수는 61~400개로 통계적인 방법을 이용하여 산정한 변동계수는 실제값과 유사할 것으로 판단된다. 지반조사자료의 수가 충분치 않은 경우에는 지반정수의 변동성을 추정하기 위하여 Three-Sigma Rule, Graphical Three-Sigma Rule, 기존 연구결과 활용방법 등을 사용한다.
- (2) Three-Sigma Rule과 통계적인 방법을 이용하여 산정한 표준편차를 비교한 결과 Three-Sigma Rule에서 $N_0=6$ 을 사용하면 표준편차를 과소평가하는 것이 관찰되었으며, 신뢰성 높은 표준편차를 얻기 위해서는 N_0 값으로 4.2~5.3을 사용해야 하는 것으로 분석되

었다. 이러한 결과는 500개 이하의 자료를 이용할 경우 $N_0 < 6$ 의 값을 권장한 Tippett(1925)과 Burlington과 May(1970)의 결과와 일치하며, Duncan(2001)이 지반공학분야 적용 시 $N_0=4$ (Two-Sigma Rule)를 추천한 것과는 유사하였다.

- (3) 지반정수들의 변동계수는 지반정수 평균값의 신뢰 구간 산정, 특성값 결정, 베이지안 방법을 이용한 특성값 결정에 활용될 수 있었다. 본 논문에서 제시한 송도국제도시 지반정수들의 특성값은 추가 개발되는 구간의 초기 설계값으로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진 (2009a), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 6호, pp.73-88.
2. 김동휘, 이주형, 이우진 (2009b), “무작위성을 보이는 지반정수의 확률분포 및 변동성”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 11호, pp. 87-103.
3. 김창동, 김병일, 김수일, 이준환 (2008), “확률변수의 분포특성을 고려한 알은기초 신뢰성 설계”, *한국지반공학학회논문집*, 제24권, 1호, pp.119-130.
4. 박재현, 김동욱, 박기석, 정문경, 김준영, 정충기 (2010), “베이지안 이론을 이용한 타입강관말뚝의 신뢰성 평가”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권, 7호, pp.161-170.
5. 이규환, 윤길림 (2008), “지반조사 데이터의 통계처리기법”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 광주, pp. 85-110.
6. 유진코퍼레이션 (2009), 고속국도 제551호선 남해고속도로 냉정~부산간 확장공사 제7공구 지반조사보고서, 서울.
7. 윤길림, 윤여원, 김홍연 (2008), “지반신뢰성 설계를 위한 설계변수의 특성치 연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제24권, 5호, pp.27-35.
8. 조효남, 지광습, 윤정현, 김이현, 최현호, 이광민, 이상윤, 선종환 (2008), *구조신뢰성공학*, 구미서관, 서울.
9. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol.1-Basic Principles*, New York, John Wiley & Sons.
10. 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.
11. Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistical in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd.
12. Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970), *Probability, Statistics, and Decision for Civil engineers*, McGraw-Hill Book Company,

- New York.
13. Bond, A. and Harris, A. (2008), *Decoding Eurocode 7*, Taylor & Francis, London and New York.
 14. Burington, R. S., and May, D. C., Jr. (1970), *Handbook of probability and statistics*, McGraw-Hill, New York.
 15. Cherubini, C. (1997), "Data and considerations on the variability of geotechnical properties of soils", *In Proceedings of the International Conference on Safety and Reliability*, ESREL 1997, Lisbon, Vol. 2, pp.1583-1591.
 16. Christian, J. T., and Baecher, G. B. (2001), "Factor of safety and reliability in geotechnical engineering, Discussion by John T. Christian, Fellow, ASCE, and Gregory B. Baecher, Member ASCE", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.8, pp.700-703.
 17. Duncan, J. M. (2000), "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.4, pp.307-316.
 18. Duncan, J. M. (2001), "Factor of safety and reliability in geotechnical engineering, Closure by J. M. Duncan", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.8, pp.717-721.
 19. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2008), *Risk Assessment*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
 20. 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).
 21. Foye, K. C., Salgado, R., and Scott, B. (2006), "Assessment of variable uncertainties for reliability-based design of foundation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.9, pp.1197-1207.
 22. Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Ovesen, N. K., Orr, T., and Schuppener, B. (2005), *Designers' Guide to EN 1997 -1 Eurocode 7: Geotechnical design-General rules*, Thomas Telford.
 23. Harr, M. E. (1984), Reliability-based design in civil engineering, 1984 Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
 24. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in characterizing soil properties", *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp.49-75.
 25. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
 26. 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.
 27. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Characterization of geotechnical variability", *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp. 612-624.
 28. Schneider, H. R. (1997), "Definition and determination of characteristic soil properties", *Proceedings of XII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hamburg, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.2271-2274.
 29. Schneider, H.R. (1999), "Determination of characteristic soil properties", *Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.273-281.
 30. 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).
 31. Tang, W. H. (1971), "A Bayesian evaluation of information for foundation engineering design", *International conference on applications of statistics and probability to soil and structural engineering*, Hong Kong, pp.173-185.
 32. Tippett, L. H. (1925), "On the extreme individuals and the range of samples taken from a normal population", *Biometrika*, 17(3/4), pp. 364-387.
 33. Van Aalboom, G., and Menge, P. (1999), "The derivation of characteristic values of shear strength parameters according to EC7", *Proceedings of 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.295-302.
 34. Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., and Ye, K. (2007), *Probability & Statistics for Engineering & Scientists*, Eighth edition, Pearson Prentice Hall.
 35. Withiam, J. L., Voytko, E. P., Barker, R. M., Duncan, J. M., Kelly, B. C., Musser, S. C., and Elias, V. (1997), Load and resistance design (LRFD) for highway bridge substructures, Federal Highway Administration, Washington, D. C.
 36. Won, J. Y. (2009), "A probabilistic approach to estimate one-dimensional consolidation settlements", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, pp.2012-2015.

(접수일자 2010. 6. 7, 심사완료일 2010. 10. 25)