

무작위성을 보이는 지반정수의 확률분포 및 변동성

Probabilistic Distribution and Variability of Geotechnical Properties with Randomness Characteristic

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee

이 주 형² Lee, Ju-Hyoung

이 우 진³ Lee, Woo-Jin

Abstract

To determine the reliable probabilistic distribution model of geotechnical properties, outlier and randomness test for analysis data, parameter estimation of probabilistic distribution model, and goodness-of-fit test for model parameter and probabilistic distribution model have to be performed in sequence. In this paper, the probabilistic distribution model's geotechnical properties of Songdo area in Incheon are estimated by the above proposed procedure. Also, the coefficient of variation (COV) representing the variability of geotechnical properties is determined for several geotechnical properties. Reliable probabilistic distribution model and COV of geotechnical properties can be used for probability-based design procedure and reasonable choice of design value in deterministic design method.

요 지

지반정수의 신뢰성 높은 확률분포형을 결정하기 위해서는 분석자료에 대한 이상치 및 무작위성 검정, 적용한 확률 분포형의 매개변수 추정 및 매개변수 적합성 검정, 마지막으로 확률분포형의 적합성 검정의 과정이 필요하며, 위의 순서로 지반정수의 확률분포형을 산정할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 제안한 절차에 따라 분석대상 지반으로 선정된 인천 송도지역 지반정수들의 확률분포형을 추정하였으며, 추가로 지반정수들의 변동성을 나타내는 변동계수를 산정하였다. 이와 같이 신뢰성 높은 지반정수들의 확률분포형과 변동계수는 확률론적 설계방법에 사용될 수 있을 뿐만 아니라 결정론적 설계에 사용될 지반정수의 합리적인 결정에 사용될 수 있는 중요한 자료로 판단된다.

Keywords : Probability distribution model, Randomness, Statistical estimation, Variability

1. 서 론

지반공학분야에서의 확률변수는 설계에 사용되는 압축지수, 압밀계수, 비배수전단강도, 투수계수 등의 모든 지반정수가 될 수 있다. 이러한 지반정수들의 모수

(parameter)와 확률분포형을 추정하기 위해서는 충분한 조사자료가 필요하며, 추정된 지반정수들의 모수와 확률분포형은 설계대상 지반의 지반정수들에 대한 합리적인 평가뿐만 아니라 신뢰성 분석에 직접적으로 사용될 수 있는 매우 유용한 자료이다. 즉, 신뢰성 설계 또는

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

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

3 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 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

분석에서는 특정 지반정수에 의해서 정의되는 사건의 확률을 계산할 수 있으며, 이 계산된 확률은 확률분포형의 모수뿐만 아니라 형태에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 확률분포형의 모수와 적절한 분포형을 결정하는 것은 공학적으로 매우 중요한 문제이다.

지반정수들의 적절한 모수와 확률분포형을 추정하는 것은 통계적 추론(statistical inference)의 방법에 속한다. 예를 들어 현장 및 실내시험으로 산정한 어느 특정지반의 압축지수 자료들은 압축지수의 특성을 평가하기 위하여 수집된 표본(sample)이며, 이러한 압축지수의 표본을 사용하여 그 지반이 가지고 있는 압축지수의 평균, 분산 등의 모수들과 분포형태를 추정하게 된다. 이러한 통계학적인 추론방법은 확률론적 분석에서 규정되었거나 가정된 이상화된 확률모델들과 현실세계를 이어주는 연결고리 역할을 한다. 지반정수들에 대한 통계적 추론에 관한 연구는 국외에서는 Lee 등(1983), Baecher(2003), Phoon과 Kulhawy(1999), Lacasse와 Nadim(1996) 등의 연구자들에 의해서 수행되었다. 국내에서는 김창동 등(2008)이 얇은기초의 신뢰성 설계를 수행하기 위하여 풍화도 강도정수의 확률분포를 결정하였으며, 이규환과 윤길림(2008)은 지반조사자료의 통계처리기법을 제시하고 있다. 이 외에도 많은 연구자들에 의해 지반정수의 확률분포가 제시되고 있다. 또한, 깊이의 차이는 있으나 연구목적으로 수행된 지반조사결과와 설계목적으로 수행된 거의 모든 지반조사결과에 대하여 통계적 추론이 수행되고 있다고 할 수 있다. 지반정수들에 대한 통계적 추론을 통한 확률분포형을 결정하기 위해서는 조사자료들의 이상치(outlier)에 대한 검정, 무작위성(randomness)에 대한 검정, 확률분포형의 매개변수 추정 및 매개변수 적합성 검정, 가정한 확률분포형의 적합성 검정의 과정을 거쳐야 한다. 이와 같은 절차는 토목분야 중 확률론적 수문분석기법 분야에서 광범위하게 채택되고 있다(윤용남, 2007). 지반공학분야에서도 이러한 과정을 통하여 산정된 신뢰성 높은 지반정수들의 확률분포형은 지반공학에서의 신뢰성 분석의 활용도를 높일 것으로 판단된다.

본 논문에서는 토목공학의 타 분야에서 적용되고 있는 확률분포형을 결정하는 과정을 살펴보고 지반공학 분야에 적합한 확률분포형 결정과정을 제시하고자 하며, 제시한 절차에 따라서 인천 송도지역 지반정수들에 대한 확률분포형을 산정하고자 한다. 또한, 추정된 확률분포형의 매개변수를 이용하여 지반정수의 변동성을

나타낼 수 있는 변동계수를 산정하고자 한다.

2. 지반정수에 대한 확률분포형의 통계적 추정

지반공학적 문제에서 실내 및 현장시험을 통해 특정 지반에 대하여 추정하고자 하는 것은 확률변수로 표현할 수 있는 지반정수의 분포이다. 확률분포형은 특정 실험이나 모집단(population) 전체의 모든 정보를 포함하고 있기 때문에 특정 지반정수의 확률분포를 안다는 것은 그 지반정수의 모든 정보를 안다는 것이다. 그러나 이러한 지반정수의 정확한 확률분포는 지반전체에 대한 지반조사결과 즉, 모집단을 완전히 알 경우에만 정확히 추정할 수 있으며, 실제 현장에서 수행된 제한된 지반조사 수량으로는 완전한 확률분포형을 알기는 어렵다. 따라서 현실에서는 제한된 지반조사결과를 이용하여 지반정수의 확률분포에 대한 모수 및 형태를 추정하게 된다. 특정 지반정수의 확률분포형에 대한 모수의 추정은 일반적으로 표본 즉, 시험결과로 정의되는 함수 또는 공식을 통해 이루어지므로 표본(시험결과)이 달라지면 추정된 결과도 달라지게 된다. 따라서 추정에 사용되는 통계량 또는 추정량(estimator)은 하나의 확률변수이다. 확률변수인 추정량의 확률분포는 표본이 추출된 모분포에 의존한다. 그러나 한번 표본이 추출되면 우리는 이 결과를 추정량이라는 공식을 통해 하나의 추정치(estimate)를 얻게 되며, 표본을 반복해서 여러 번 뽑아 추정치를 각각 계산해 내면 이들은 추정량의 분포형태를 따르게 된다. 그림 1은 표본을 추출하는 과정과 표본으로 산정한 통계량으로 모수를 추정하는 과정을 나타내고 있다.

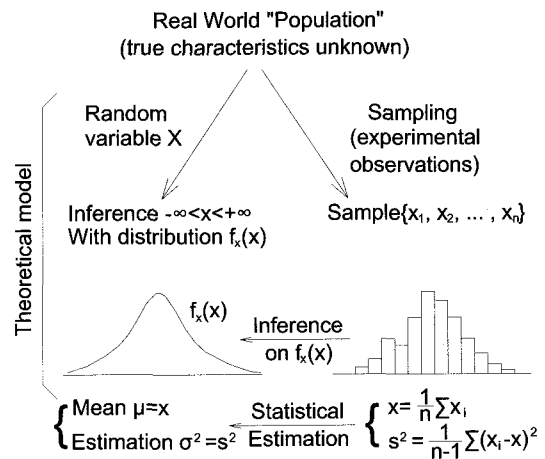


그림 1. 통계적 추론에서의 표본의 역할(Ang과 Tang, 2007)

Lee 등(1983), Phoon과 Kulhawy(1999) 등은 지반정수들의 변동성을 평가하기 위하여 변동계수를 사용하였다. 변동계수는 지반정수들의 평균과 표준편차의 비로 확률변수의 변동성을 표현하는 유용한 도구라고 할 수 있다. 그러나 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)과 같은 기법을 사용하여 신뢰성 분석을 수행할 경우에는 지반정수의 변동계수뿐만 아니라 정확한 확률분포형이 필요하게 된다. 관심 있는 지반정수들의 확률분포형을 결정하기 위한 빈도분석을 수행하기 전에 지반조사결과에 대한 이상치 검정, 무작위성 검정을 수행해야 한다. 이러한 검정을 통하여 관심 있는 지반정수들이 빈도분석 수행이 가능한 자료라고 평가되면 확률분포형의 매개변수 추정 및 매개변수 적합성 검정, 확률분포형의 적합성 검정을 통하여 최종적으로 가장 적합한 확률분포형을 결정하게 된다. 이와 같이 지반정수의 확률분포형을 결정하는 과정을 요약하면 그림 2와 같다.

2.1 이상치 검정(test of outlier)

이상치는 전체 지반조사자료의 경향에서 현저하게 벗어난 자료를 의미한다. 이러한 이상치를 수정하거나 기각하는 등의 처리에 따라 적합한 분포형태가 변화되며, 이에 따른 빈도해석 결과도 변하게 된다. 이상치 검정은 일반적인 지반정수 값의 경향보다 상당히 큰 고이상치(high outlier)와 상당히 작은 저이상치(low outlier)에 대한 검정을 수행한다. 일반적으로 연구 및 설계를 위한 지반공학적 자료들은 그 수가 많지 않기 때문에 통계적 방법을 이용하여 이상치를 판단하기는 쉽지 않

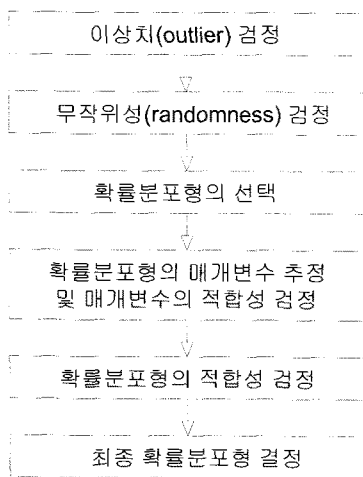


그림 2. 확률분포형의 결정 순서

다. 또한, 측정된 지반정수 값들 중 다른 값들보다 크거나 작은 값은 실제 지반의 특성일 수도 있으며, 현장 또는 실내시험의 측정오차, 시료의 교란, 지반에 국부적으로 존재하는 연약한 층 또는 강한 층 등으로 인해 발생할 수 있다. 이 중 지반에 국부적으로 존재하는 연약층은 실제로 현장의 안정성에 큰 영향을 미치는 요인이므로 빈도분석 시 이러한 값을 포함해야 하며, 이러한 매우 작은 값 또는 큰 값들을 별도로 분석하여 극한값의 확률분포형을 결정할 수도 있다. 지반공학적 자료들의 이상치 검정은 통계적 기법뿐만 아니라 시험의 측정오차와 시료교란 정도를 고려하여 신중하게 결정해야 할 것이다. 본 논문에서는 시험결과, 시추조사자료 및 표준관입시험 등을 면밀하게 분석하여 고이상치와 저이상치를 제거한 후 빈도분석을 수행하였다.

2.2 무작위성 검정(test of randomness)

지반설계를 위한 특정 지역 지반정수의 대표 값은 어느 일정 면적 내의 여러 위치에서 채취된 시료를 이용한 실내시험을 통해 결정되거나 여러 위치에서의 현장시험을 통해 결정된다. 지반조사에 대한 분석결과 지반정수가 위치에 따라 일정한 경향을 보일 경우에는 즉, 지반정수를 산정한 지반이 무작위성을 보이지 않을 경우에는 이 영역에서 산정한 모든 자료들을 이용하여 빈도

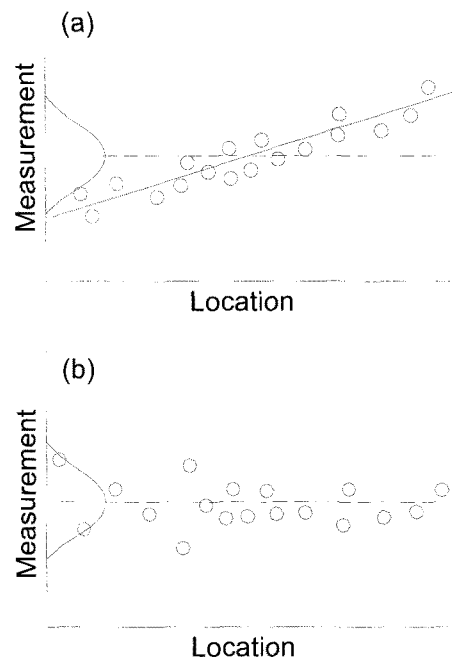


그림 3. 동일한 평균, 분산과 다른 공간적 분포특성을 보이는 자료 (Baecher, 2003)

분석을 통한 확률분포형을 추정할 수 없다. 그림 3(a), (b)의 두 경우에 대하여 공간적 경향성을 고려하지 않고 전체 자료를 이용하여 평균, 분산, 확률분포형을 산정할 경우에는 동일한 결과를 얻게 된다. 그러나 그림 3(a)와 같은 공간적 경향성을 보이는 자료들을 모두 이용하여 산정한 지반정수의 통계량으로 특정 위치에서의 값을 예측할 경우에는 오차가 발생하게 된다. 따라서 경향성을 보이는 자료를 이용하여 빈도분석을 수행할 수는 있으나 분석대상지역을 대표하는 분석결과가 아닌 의미상으로 완전히 다른 결과를 얻게 됨에 유의해야 한다. 따라서 지반정수가 일정 공간 내에서 특정한 경향을 보일 경우에는 그 경향성을 고려하여 위치에 따른 값을 추정해야 한다.

조사자료들의 무작위성을 정량적으로 분석하는 방법으로는 Run 검정, Turning Point 검정 등이 있으며, 본 논문에서는 Run 검정을 사용하였다. 일반적으로 빈도 분석에서는 자료의 무작위성 가정이 성립된다고 가정하지만 무작위성이 의심되는 경우 이 가정을 검정하는 방법이 Run 검정이며, Run 검정은 무작위성 검정의 가장 일반적인 방법이다. Run 검정의 자세한 방법은 이재창(1993) 등의 문헌을 참조할 수 있으며, 본 논문에서는 Run 검정의 기준으로 신뢰계수 95%(유의수준 $\alpha=0.05$) 일 때의 값인 1.96을 적용하였다.

2.3 확률분포형의 매개변수 추정

2.3.1 확률분포형

본 연구에서는 지반정수의 확률분포형으로 정규분포(Normal distribution), 대수정규분포(Log-normal distribution), 감마분포(Gamma distribution), 와이블분포(Weibull distribution), 겐벨분포(Gumbel distribution)의 5가지 분포를 사용하였으며, 표 1에 각각의 확률분포형의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF), 확률변수의 범위 및 매개변수의 적합성 조건을 나타내었다. 정규분포는 통계학에서 가장 많이 사용되는 분포형이며, 자료의 분포가 대칭이거나 왜곡도계수가 0에 가까운 경우에 적합하다. 대수정규분포는 확률변수가 양수일 경우에 많이 사용되며, 표 1에서와 같이 3개의 매개변수 즉, 위치매개변수(location parameter, x_0), 규모매개변수(scale parameter, α), 형상매개변수(shape parameter, β)를 가지며 위치매개변수 $x_0=0$ 으로 놓으면 2변수 대수정규분포형이 된다. 확률변수가 왜곡되어 있을 경우에는 감마분포를 많이 사용하며, 대수정규분포와 같이 위치매개변수 $x_0=0$ 으로 놓으면 2변수 감마분포형이 된다. 와이블분포에서 형상매개변수 $\beta=0$ 일 경우에는 지수분포(exponential distribution)가 되며, $x_0=0$ 인 경우에는 2변수 와이블분포가 된다. 겐벨분포는 왜곡도계수를 1.1396

표 1. 확률분포형의 확률밀도함수(PDF), 확률변수범위 및 매개변수 적합성 조건

확률분포	확률밀도함수	확률변수 범위 및 매개변수 적합성 조건	매개변수
Normal	$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$-\infty < x < \infty$	$\mu(x_0)$: location parameter (mean of X) $\sigma(\alpha)$: scale parameter (standard deviation of X)
Log-normal	$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(x-x_0)\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]$	$x_0 < x < \infty$	$Y = \ln(x-x_0)$ x_0 : location parameter $\mu_y(\alpha)$: scale parameter (mean of Y) $\sigma_y(\beta)$: shape parameter (standard deviation of Y)
Gamma	$f_x(x) = \frac{1}{ \alpha \Gamma(\beta)} \left[\frac{x-x_0}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha}\right]$	$x_0 < x < \infty$ for $\alpha > 0, \beta > 0$ $-\infty < x \leq x_0$ for $\alpha < 0, \beta > 0$	x_0 : location parameter α : scale parameter β : shape parameter
Weibull	$f_x(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{x-x_0}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta\right]$	$x_0 \leq x < \infty, \alpha > 0, \beta > 0$	x_0 : location parameter α : scale parameter β : shape parameter
Gumbel	$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]\right\}$	$-\infty < x < \infty$	x_0 : location parameter α : scale parameter β : shape parameter

으로 고정시킨 후 분포형을 구하며, 극치현상을 표현하는 분야에 널리 사용되고 있다. 확률분포형에 대한 자세한 내용은 Ang과 Tang(2007), Baecher(2003), Fenton과 Griffiths(2008) 등의 자료를 참조할 수 있다.

2.3.2 매개변수 추정

확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법은 모멘트법(method of moments, MOM), 최대우도법(method of maximum likelihood, ML) 등이 있으며, 본 논문에서는 모멘트법을 이용하여 확률분포형의 매개변수를 추정하였다. 모멘트법은 가장 간단하여 널리 사용되어 온 매개변수 추정 방법으로 모집단의 모멘트(population moments)인 확률밀도함수의 모멘트와 표본자료의 모멘트(sample moments)가 같다고 보고 확률분포형의 매개변수를 추정하는 방법이다. 모멘트법 등의 매개변수 추정방법에 대한 자세한 내용은 윤용남(2007), Ang과 Tang(2007), Fenton과 Griffiths(2008) 등의 자료를 참조할 수 있다.

2.4 적합도 검정(goodness of fit test)

지반정수의 분포를 설명해주는 확률분포형이 적합하다는 가설을 검정하기 위하여 확률분포형에 대한 적합도 검정을 수행한다. 이 적합도 검정 결과를 바탕으로 지반정수에 대한 최적 확률분포형을 선정하게 된다. 적합도 검정방법에는 Chi-Square(χ^2) 검정, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정 등이 있으며, 본 논문에서는 지반조사자료를 계급구간으로 나눌 필요가 없는 K-S 검정을 이용하여 지반정수들에 대한 확률분포형의 적합성을 검정하였다. K-S 검정은 지반정수 측정자료의 누가확률분포와 가정된 이론확률분포의 누가확률분포함수를 비교하여 최대편차가 지반정수 자료의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계편차보다 적으면 적합성이 인정되고 크면 기각하는 방법이다. K-S 검정에는 지반조사자료를 확률이론에 맞출 필요가 없으므로 계급구간으로 나눌 필요가 없고 이론확률분포형의 매개변수를 계산할 필요가 없는 비매개변수 방법(nonparametric method)이다. K-S 검정에서는 계산된 검정통계량 D_{max} 가 한계값 D_n^α 보다 작아야 가정된 분포는 유의수준 α 로 적합성이 인정되며 그렇지 못하면 기각된다. 여기서, 한계값 D_n^α 는 유의수준과 자료의 표본의 크기(자료 수)에 따라서 결정되며, 본 논문에서도 ML, CL 및 두 자료를 합한 경우가 자료의 수가 다르기 때문에 각각 다른 한계값 즉, 검정기준을 사

용하였다. 적합도 검정방법 및 검정기준에 대한 자세한 내용은 윤용남(2007), Ang과 Tang(2007) 등의 문헌을 참고할 수 있다.

K-S 검정과 같은 정량적 검정의 단점 중의 하나는 자료수가 많을 경우에 자료가 특정 확률분포형에 공학적인 관점에서 어느 정도 적합함에도 불구하고 확률분포에 적합하다는 가설을 기각하는 경우가 종종 발생한다는 것이다. 따라서 최종적인 확률분포형 결정에서는 정량적인 검정결과뿐만 아니라 육안으로 조사자료에 가장 적합한 확률분포형을 선택할 필요가 있다(Fenton과 Griffiths, 2008). 본 논문에서도 정량적 검정결과 해당 유의수준에서 기각된 확률분포형일지라도 실제 자료의 분포와 유사할 경우에는 적합한 분포로 사용해도 무방할 것으로 판단된다.

3. 지반정수의 변동성

지반의 변동성은 많은 불확실성들로부터 기인하며 복잡한 속성을 가지고 있다(Kulhawy, 1992). 지반정수의 불확실성은 지반에 내재되어 있는 고유 변동성(inherent variability), 측정오차(measurement error)에 영향을 받는다. 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. 측정된 지반정수의 불확실성을 확실하게 평가하기 위해서는 위 두 가지 불확실성 요인들을 독립적으로 분석하는 것이 필요하며, 그 결과를 이용하여 특정 지반에 대한 고유 변동성을 알 수 있다.

지반특성은 지질학적, 환경적 그리고 물리·화학적 과정들에 의해서 연직 및 수평방향으로 지속적으로 변하고 있으며, 이러한 특징을 지반정수의 공간적 변동이라고 한다. 이러한 공간적 변동은 지반정수 변화의 특정 경향을 나타내는 경향함수 $I(z)$ 와 경향선 주위에 자료분산으로 표현되는 변동 성분 $w(z)$ 로 구분될 수 있으며, 현장의 지반정수 ξ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(DeGroot와 Baecher, 1993; Phoon과 Kulhawy, 1999).

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

여기서, z 는 심도이다. 만약, 지반정수가 공간적 경향성을 보이지 않는다면 식 (1)에서 경향함수 $t(z)$ 는 일정한 상수인 평균 m 으로 나타낼 수 있으며, 변동계수, COV 는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$COV = \frac{SD}{m} \quad (2)$$

여기서, SD 는 자료의 표준편차를 의미한다.

4. 분석지반의 선정 및 지반특성

빈도분석을 수행하기 위해서는 충분한 지반조사자료가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 최근 광범위한 지반조사가 수행된 인천 송도지역의 자료를 이용하여 그림 2에서 제시한 분석순서 및 방법에 따라서 무작위성 검정 등을 수행하였다. 또한, 무작위성을 보이는 지반정수에 대해서는 빈도분석을 수행하여 확률분포형을 결정하였다. 본 논문에서는 송도신도시의 지반조사자료 중 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. 또한, 김동

휘 등(2009)에 따르면 본 논문에 사용한 시험자료들은 압밀도 80~90% 이상의 자료로 시간에 따른 지반정수의 변동성은 크지 않을 것으로 판단된다. 그림 4는 분석지반으로 선정된 인천 송도지역 위치 및 공구분할현황을 나타내고 있다. 인천 송도지반에 대한 자세한 지반특성은 김동휘 등(2009)의 논문에 자세하게 소개되어 있으므로 참조할 수 있다.

5. 지층별 지반정수의 확률분포형

5.1 점토 및 실트층

5.1.1 압축지수와 재압축지수의 확률분포형

인천 송도지반은 점토와 실트가 섞여 있는 지반으로 압밀층을 점토 및 실트층으로 상세하게 구분하기는 매우 어렵다. 따라서 실제 압밀침하량을 추정할 경우에는 실트와 점토의 특성이 모두 고려된 압축지수를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 만약, 압밀층 전체가 점토 또는 실트일 경우에는 점토와 실트의 시험결과를 구분하여 분석한 값을 사용해야 할 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 지반을 ML과 CL로 구분하지 않고 압축지수를 분석한 결과 송도지반의 압축지수는 깊이 및 공간적으로 특정한 경향성을 보이지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 정성적으로는 무작위성을 보이는 것으로 판단되나 빈도분석을 수행하기 위해서는 추가적으로 정량적인 무작위성 검정을 수행해야 한다. 본 논문에서는 압축지수의 정량적인 무작위성을 검정하기 위하여 전술한 바와 같이 Run 검정을 사용하였다. Run 검정을 X, Y, Z 방향에 대하여 수행한 결과 표 2에서 볼 수 있듯이 흙의 종류를 CL과 ML로 구분했을 경우와 CL, ML을 구분하지 않고 압축지수에 대한 무작위성 검정을 수행한 결과 유의수준(α) 0.05에서 모두 무작위성 판정 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 송도지반의 압축지수는 Run 검정방법을 통하여 무작위성을 보이는 것으로 나타나 압축지수에 대한 빈도분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 표 2에서 O는 채택, X는 기각을 의미하여, 본 논문의 모든 검정결과에서 동일한 의미로 사용된다.

무작위성 검정 후에는 가정한 확률분포형의 추정된 매개변수가 각각의 확률분포형 매개변수 적합성 조건을 만족하는지를 검토해야 한다. 본 논문에서는 전술한 바와 같이 확률분포형으로는 정규분포, 대수정규분포,

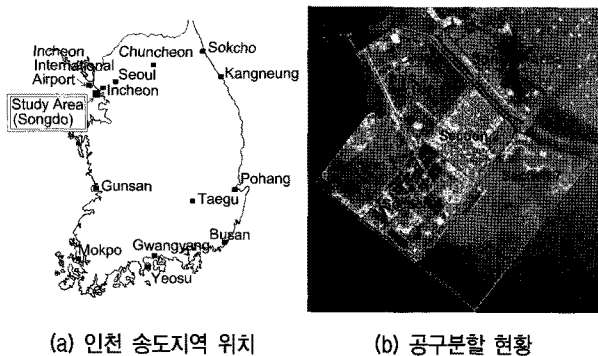
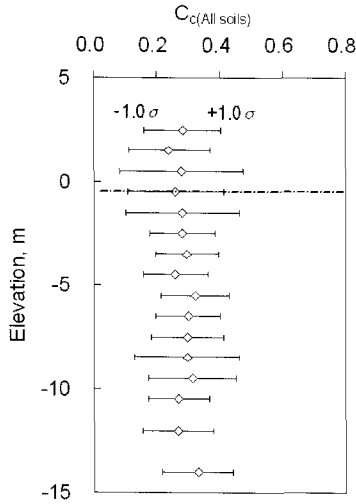


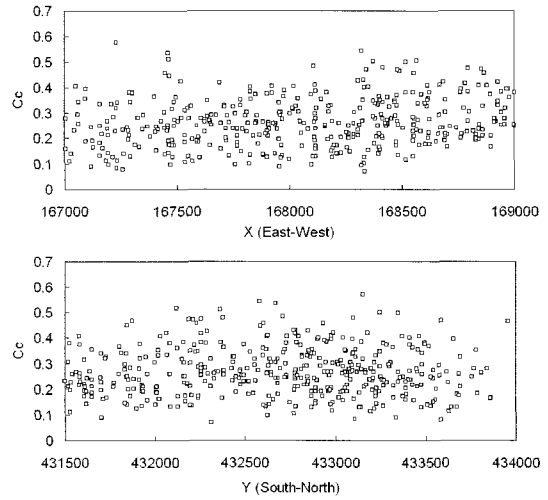
그림 4. 인천 송도지역 위치 및 공구분할 현황

감마분포, 와이블분포, 검벨분포를 사용하였으며, 매개변수 추정방법으로는 모멘트법을 사용하였다. 매개변수 적합성 판정결과 표 3에서 볼 수 있듯이 압축지수 추정에 사용된 모든 확률분포형이 매개변수 적합성 조건을

만족하는 것으로 나타났다. CL, ML의 자료를 합하여 확률분포형의 매개변수를 산정할 경우에는 두 자료의 개수가 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 두 종류의 흙에 대한 압축지수가 무작위성을 보이므로 현장



(a) 깊이에 따른 압축지수



(b) 동-서 및 남-북 방향에 따른 압축지수

그림 5. 깊이 및 공간적인 압축지수 분포

표 2. 압축지수자료의 무작위성 검정 결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류(자료수)	방향	X(East-West)		Y(South-North)		Z(Vertical)		판정 기준
		계산치	판정	계산치	판정	계산치	판정	
ML(n=200)		0.971	O	0.875	O	0.261	O	1.96
CL(n=275)		1.334	O	0.614	O	1.341	O	
All soils(ML, n=200 CL, n=200)		0.947	O	1.956	O	0.038	O	

표 3. 압축지수 확률분포형 매개변수 추정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류(자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
ML (200)	Normal	0.201	0.070	-	O	0.07	0.09	O	4
	Log-normal	- (-0.229)	-1.660(-0.856)	0.337(0.161)	O(O)	0.06(0.05)		O(O)	3(2)
	Gamma	- (-0.072)	0.024(0.018)	8.293(15.245)	O(O)	0.05(0.05)		O(O)	2(2)
	Weibull	- (0.054)	0.225(0.167)	3.156(2.231)	O(O)	0.06(0.04)		O(O)	3(1)
	Gumbel	0.170	0.054	-	O	0.07		O	4
CL (275)	Normal	0.304	0.087	-	O	0.08	0.07	X	3
	Log-normal	- (-0.206)	-1.231(-0.689)	0.282(0.170)	O(O)	0.04(0.05)		O(O)	1(2)
	Gamma	- (-0.023)	0.025(0.023)	12.068(13.927)	O(O)	0.05(0.05)		O(O)	2(2)
	Weibull	- (0.123)	0.336(0.204)	3.888(2.180)	O(O)	0.09(0.04)		X(O)	4(1)
	Gumbel	0.264	0.068	-	O	0.05		O	2
All soils (ML, 200; CL, 200)	Normal	0.252	0.092	-	O	0.06	0.06	O	4
	Log-normal	- (-0.367)	-1.442(-0.492)	0.353(0.147)	O(O)	0.06(0.03)		O(O)	4(1)
	Gamma	- (-0.149)	0.033(0.021)	7.528(19.107)	O(O)	0.04(0.03)		O(O)	2(1)
	Weibull	- (0.052)	0.282(0.226)	2.991(2.313)	O(O)	0.05(0.03)		O(O)	3(1)
	Gumbel	0.210	0.071	-	O	0.06	O	4	

에 실제로 분포하는 흙의 비를 알 수 있다면 간단하게 자료 개수의 비를 조정하여 확률분포형을 구하면 현장을 대표할 수 있는 확률분포형을 산정할 수 있을 것이다. 그러나 현실적으로 연구대상지반에 분포하는 CL, ML의 비를 파악한다는 것은 매우 어려운 일이므로 본 논문에서는 두 종류의 흙이 동일한 비로 혼재되어 있다고 가정하였다. 따라서 두 종류의 흙에 대하여 동일한 개수의 자료를 사용하여 압축지수의 대표 확률분포형을 추정하였다. 만약, 설계하고자 하는 지반이 CL이 우세할 경우에는 CL의 자료에 가중치를 더 부여한 후 대표 확률분포형을 결정해야 할 것이다. 이와 같은 분석방법은 압축지수뿐만 아니라 본 논문에서 분석한 모든 지반정수에 적용하였다. 표 3의 괄호 안의 값은 3변수분포의 매개변수를 의미하며, 본 논문의 모든 매개변수 산정 결과 표에서 동일한 의미로 사용되었다.

압축지수의 확률분포형을 추정하기 위해 적용한 5가지 확률분포형에 대한 적합성을 K-S 방법을 이용하여 검정하였다. 그 결과 ML과 모든 흙을 사용한 경우는 유의수준(α) 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로

평가되었으며, CL은 유의수준(α) 0.05에서는 정규분포형과 2변수 와이블분포형은 적합하지 않은 것으로 나타났으나 유의수준(α) 0.01에서는 모든 확률분포형이 적합한 것으로 나타났다. 확률분포형에 대한 적합성 평가 결과를 요약하면 표 3과 같으며, 단순하게 검정통계치의 크기에 따라서 산정한 적합성 순위(rank)도 함께 나타내었다. 또한, 실제 자료와 확률분포형을 함께 도시한 결과는 그림 6과 같으며, 확률분포형 이름 옆의 숫자는 확률분포형의 매개변수개수, Mean은 평균, SD는 표준편차, COV는 변동계수, Skewness Coefficient는 왜곡도계수를 의미한다. ML, CL 및 두 종류의 흙을 합하여 산정한 확률분포형의 왜곡도계수는 각각 0.49, 0.52, 0.45로 확률분포형이 약간 왼쪽으로 치우진 경향을 보이니 그 값이 작아 거의 대칭인 분포로 판단된다. 따라서 가장 일반적인 대칭분포인 정규분포와 함께 추정에 사용한 모든 확률분포형을 사용하여 압축지수의 분포를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 평균, 표준편차를 이용하여 지반정수의 변동성을 나타내는 지수인 변동계수를 계산할 수 있으며, 인천 송도지반 압축지수의 변동계수는 ML

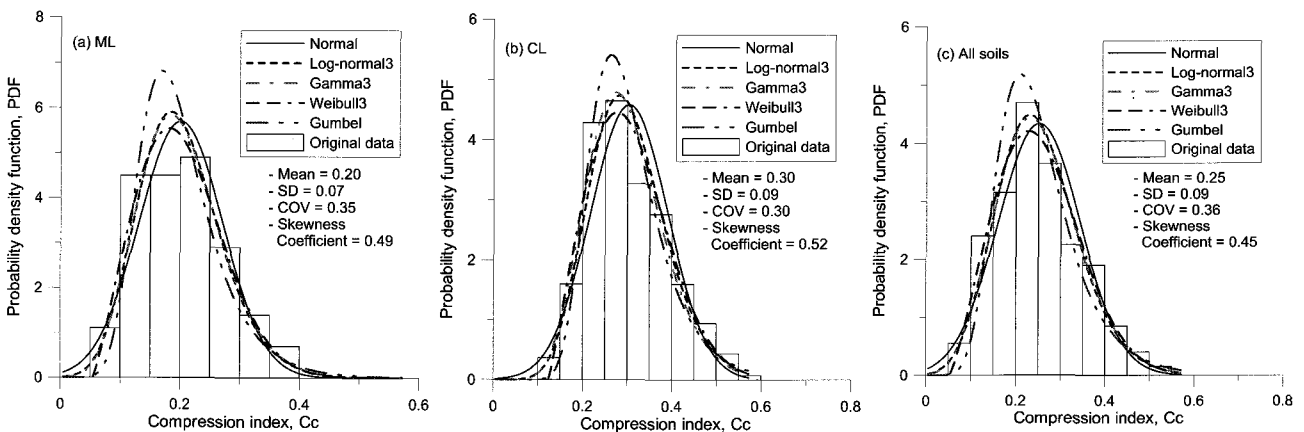


그림 6. 압축지수의 확률분포형

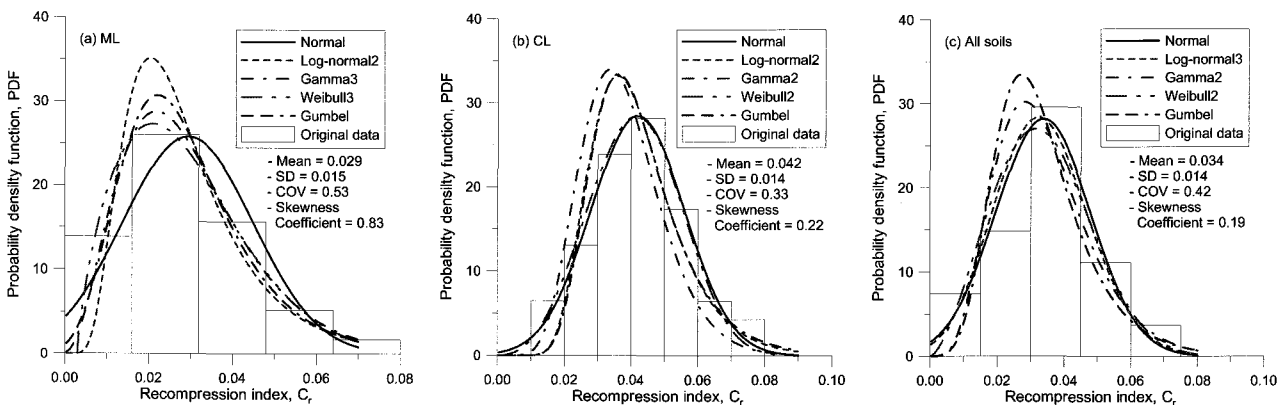


그림 7. 재압축지수의 확률분포형

이 35%, CL이 30%, 두 종류의 흙을 합한 경우 36%인 것으로 나타났다. 이는 Lee 등(1983)과 Lumb(1974)이 여러 가지 흙에 대하여 제시한 압축지수의 변동계수 18~73%, 25~30%의 범위와 유사한 것으로 나타났으며, 방콕점토에 대하여 Zhu 등(2001)이 제시한 20%와 멕시코 점토에 대하여 Baecher와 Ladd(1997)가 제시한 25~28% 보다는 약간 큰 것으로 나타났다. 인천 송도지반은 한가지 종류의 흙으로 분류되는 것이 아닌 실트와 점토가 섞여 있으며, 경우에 따라서는 모래성분까지 포함되어 있기 때문에 한가지 성분이 우세적인 지반의 변동계수에 비하여 상대적으로 변동계수가 큰 것으로 판단된다.

본 연구에서는 압축지수뿐만 아니라 과압밀상태 지반의 압밀침하량을 산정할 경우 필요한 재압축지수에 대한 확률분포형도 압축지수와 동일한 방법으로 그림 7과 같이 추정하였으며, 유의수준(α) 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 평가되었다. 따라서 대칭분포인 정규분포를 포함한 추정에 사용한 모든 확률분포형을 사용하여 재압축지수의 분포를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 재압축지수의 변동계수는 ML이 53%, CL이 33%, 두 종류의 흙을 합한 경우 42%로 나타났다. 재압축지수에 대한 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과는 부록 표 1에 제시하였다.

5.1.2 압밀계수 및 투수계수의 확률분포형

인천 송도지역에서 수행된 압밀시험결과를 이용하여 수직방향 압밀계수 및 투수계수를 깊이에 따라 나타낸 결과는 그림 8과 같다. 깊이에 따른 압밀계수와 투수계

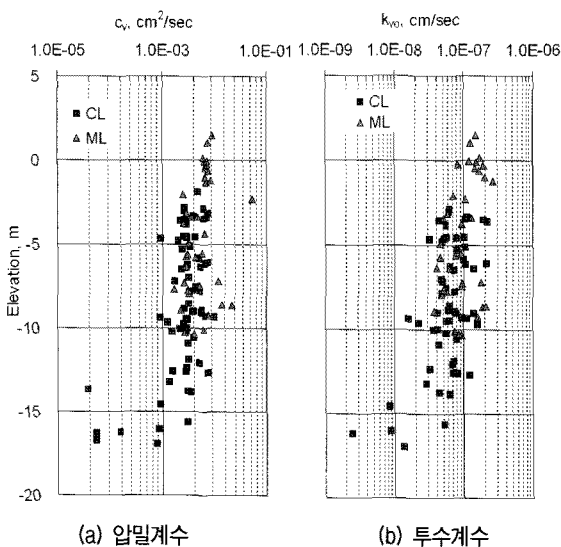


그림 8. 깊이에 따른 압밀계수와 투수계수 분포

수 분포 경향은 그림 8에서 볼 수 있듯이 CL, ML 모두 깊이가 약 E.L-13m까지는 깊이에 관계없이 거의 일정한 경향을 보인다. 그러나 E.L-13m 이하의 시험자료가 있는 CL의 경우에는 약 E.L-13m 이하부터는 상부층보다 상대적으로 매우 작은 압밀계수분포를 보이는 것으로 나타났다. 송도지반에서는 약 E.L-15m 내외부터 매우 견고한 점토층이 출현하기 시작할 뿐만 아니라 심도가 증가할수록 세립분의 함유량이 증가하여 압밀계수 감소 현상이 나타나는 것으로 판단된다. 본 논문에서는 실제로 하중증가에 의한 압밀침하가 발생할 수 있는 E.L-13m까지의 자료를 이용하여 압밀계수와 투수계수에 대한 빈도분석을 수행하였다.

압축지수 분석에서와 같이 압밀계수에 대하여 흙의 종류를 CL과 ML로 구분했을 경우와 CL, ML의 자료를 동일한 개수로 합한 경우에 대하여 무작위성 검토를 수행한 결과 모두 Run 검정의 무작위성 판단 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 압밀계수에 대한 확률분포형의 매개변수 적합성을 평가한 결과 표 4에서 볼 수 있듯이 검토에 사용한 모든 확률분포형이 매개변수 적합성 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 CL, ML 뿐만 아니라 CL과 ML의 자료를 동일한 개수로 합한 경우에 대한 압밀계수의 확률분포형을 추정하였다. 확률분포형 추정결과 표 4에서 볼 수 있듯이 ML의 경우에는 유의수준(α) 0.05에서 모든 확률분포형이 적합한 것으로 나타났다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이 ML의 자료들은 왼쪽으로 약간 치우친 경향을 보이고 있으나 분석에 사용한 자료의 수가 35개로 많지 않아 검정기준이 엄격하지 않기 때문에 대칭분포인 정규분포도 적합하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 ML의 확률분포형으로 정규분포보다는 왼쪽으로 치우친 분포를 나타낼 수 있는 대수정규분포 등의 확률분포형을 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. CL의 자료는 왜곡도 계수가 0.92이며, 그림 9(b)에서 보는 것처럼 왼쪽으로 치우친 경향을 보이고 있다. 따라서 왼쪽으로 치우친 분포를 나타낼 수 있는 대수정규분포, 감마분포, 와이블분포 등이 적합한 것으로 나타났다. CL과 ML의 자료를 합한 압밀계수 자료는 왜곡도 계수가 0.47이며, 그림 9(c)에서 볼 수 있듯이 왼쪽으로 치우친 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 압밀계수의 분포가 왼쪽으로 치우친 분포를 보이는 것은 압밀계수가 큰 층들이 존재하기 때문이며, 이는 인천 송도 연약지반에 분포하고 있는 실트 또는 모래 성분 때문인 것으로 판단된

표 4. 압밀계수의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
ML (35)	Normal	0.005	0.002	-	O	0.17	0.22	O	3
	Log-normal	- (-0.022)	-5.387(-3.612)	0.426(0.082)	O(O)	0.17(0.17)		O(O)	3(3)
	Gamma	- (-0.009)	0.001(0.000)	5.038(42.251)	O(O)	0.16(0.17)		O(O)	2(3)
	Weibull	- (-0.001)	0.006(0.006)	2.390(2.772)	O(O)	0.15(0.16)		O(O)	1(2)
	Gumbel	0.004	0.002	-	O	0.17		O	3
CL (58)	Normal	0.004	0.002	-	O	0.20	0.16	X	6
	Log-normal	- (-0.002)	-5.673(-5.211)	0.428(0.290)	O(O)	0.12(0.15)		O(O)	1(4)
	Gamma	- (0.001)	0.001(0.001)	4.978(3.626)	O(O)	0.14(0.13)		O(O)	3(2)
	Weibull	- (0.001)	0.004(0.003)	2.374(1.646)	O(O)	0.17(0.13)		X(O)	5(2)
	Gumbel	0.003	0.001	-	O	0.14		O	3
All soils (ML, 35; CL, 35)	Normal	0.004	0.002	-	O	0.16	0.14	X	4
	Log-normal	- (-0.009)	-5.484(-4.342)	0.431(0.155)	O(O)	0.13(0.15)		O(X)	1(3)
	Gamma	- (-0.003)	0.001(0.001)	4.891(14.211)	O(O)	0.13(0.14)		O(O)	1(2)
	Weibull	- (0.000)	0.005(0.005)	2.351(2.265)	O(O)	0.14(0.13)		O(O)	2(1)
	Gumbel	0.004	0.002	-	O	0.14		O	2

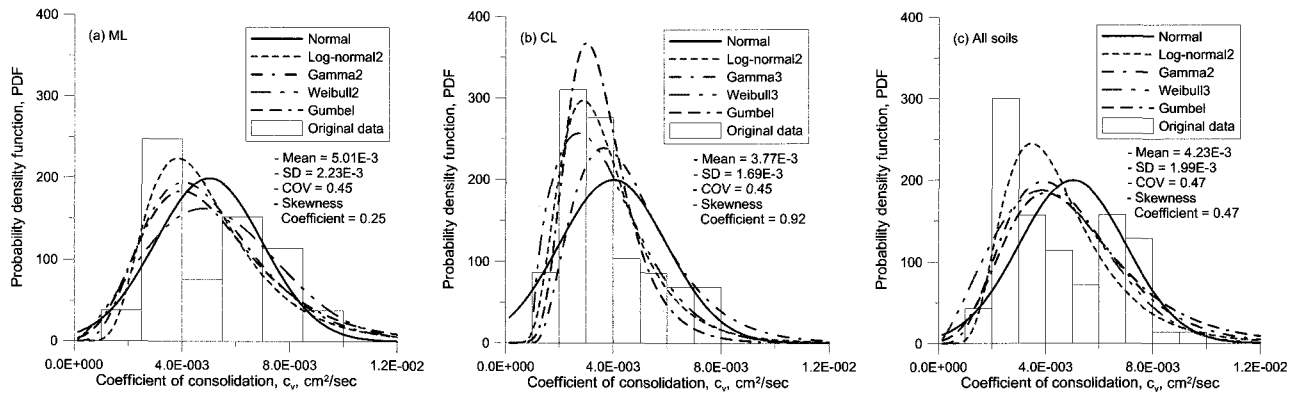


그림 9. 연직방향 압밀계수의 확률분포형

다. 따라서 CL과 ML의 자료를 합한 압밀계수자료는 2 변수 대수정규분포, 감마분포 등이 유의수준(α) 0.05에서 적합한 것으로 나타났다. 압밀계수의 변동계수는 ML이 45%, CL이 45%, ML과 CL의 자료를 합한 경우 47%로 나타났다. 이는 Lee 등(1983)과 Lumb(1974)이 여러 가지 흙에 대하여 제시한 압밀계수의 변동계수 25~100%, 25~50%의 범위와 유사한 것으로 나타났으며, 방콕, 아리아케(Ariake) 및 싱가포르 점토에 대하여 Tanaka 등(2001)이 제시한 16%, 10%, 17% 보다는 큰 것으로 나타났다.

투수계수에 대한 확률분포형 산정결과 대칭 분포인 정규분포를 제외한 모든 확률분포형이 적합한 것으로 나타났다. 이는 그림 10(b), (c)에서 볼 수 있듯이 자료가 1.73, 1.37의 큰 왜곡도계수를 보이고 있기 때문에 대칭분

포인 정규분포는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 이와 같이 투수계수의 분포가 대칭분포가 아닌 것은 투수계수가 큰 부분이 존재하기 때문이며, 이는 압밀계수에서 설명하였듯이 인천 송도 연약지반에 분포하고 있는 실트 또는 모래 성분 때문인 것으로 판단된다. Benson(1993)과 Marsily(1986)의 연구결과에 의하면 투수계수는 일반적으로 비대칭인 대수정규분포를 보이며, 인천 송도지반의 투수계수도 전술한 바와 같이 대수정규분포 등의 비대칭분포가 적합한 것으로 나타났다. 투수계수의 변동계수는 ML이 54%, CL 및 ML과 CL의 자료를 합한 경우 56%로 나타났다. 이는 Lee 등(1983)과 Lumb(1974)이 여러 가지 흙에 대하여 제시한 투수계수의 변동계수 200~300% 보다 작은 것으로 나타났다. 또한, Benson(1993)이 인위적으로 다진 점토층에 대하여 제시한 50~

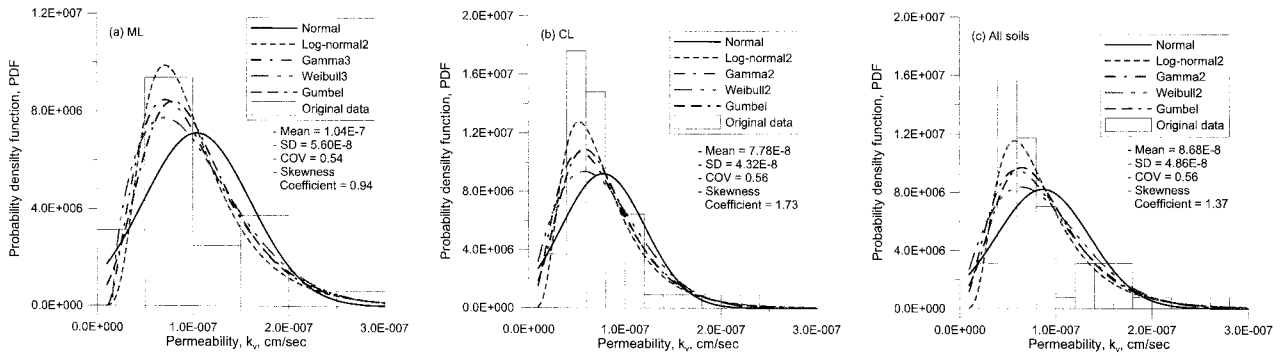


그림 10. 연직방향 투수계수의 확률분포형

200% 보다도 작은 것으로 나타났다. 투수계수에 대한 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과는 부록 표 2에 제시하였다.

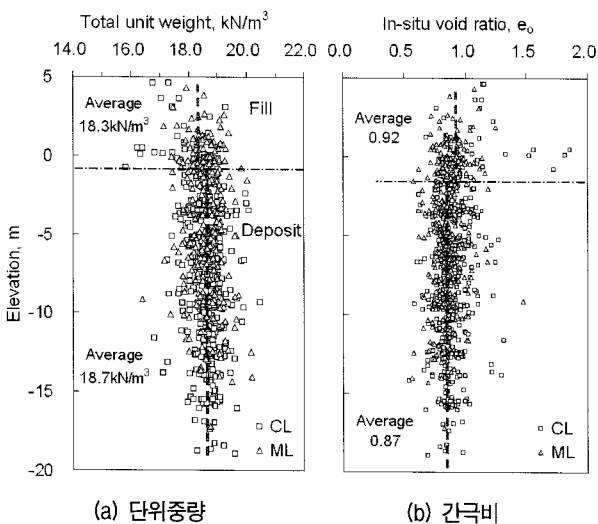
5.1.3 단위중량과 간극비의 확률분포형

인천 송도지역의 CL과 ML의 단위중량과 간극비는 그림 11에서 볼 수 있듯이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 매립층은 준설패립에 의하여 형성된 지반으로 원지반 퇴적층보다 상대적으로 느슨하므로 단위중량은 원지반 퇴적층이 매립층에 비하여 상대적으로 크고 간극비는 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 단위중량과 간극비의 차이가 있는 매립층과 퇴적층으로 구분하여 본 논문에서 제시한 절차에 따라서 각각의 단위중량과 간극비에 대한 확률분포형을 제시하였다.

매립층 단위중량에 대한 확률분포형의 적합성 검정을 수행한 결과 그림 12(a)에서 볼 수 있듯이 매립층 단

위중량 분포의 왜곡도계수가 -1.032로 오른쪽으로 치우친 분포를 보이고 있으므로 이러한 경향을 잘 나타내주는 3변수 감마분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이와 같이 매립층의 단위중량분포에서 작은 부분이 존재하는 이유는 느슨하게 매립된 부분이 존재하기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 부분에서 큰 침하량 및 파괴가 발생할 수 있으므로 확률분포형을 결정할 경우에 이러한 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다. 퇴적층 단위중량의 경우 그림 12(b)에서 볼 수 있듯이 대칭인 분포를 보이고 있어 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. Lacasse와 Nadim(1996)은 일반적으로 단위중량은 정규분포를 보인다고 하였으며, 이는 인천 송도지반의 퇴적층의 결과와도 일치하는 것으로 나타났다. 단위중량의 변동계수는 매립층이 4%, 퇴적층이 3%로 나타났다. 이는 Lee 등(1983), Lacasse와 Nadim(1996), Lumb(1974)이 여러 가지 흙에 대하여 제시한 단위중량의 변동계수 1~10%, 0~10%, 5~10%와 유사한 범위를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 단위중량의 변동계수가 다른 지반정수들보다 상대적으로 매우 작은 이유는 단위중량에 큰 영향을 미치는 비중의 범위가 매우 작을 뿐만 아니라 단위중량의 측정오차가 작기 때문이다(Baecher, 2003).

매립층 간극비 분포의 왜곡도계수는 그림 13(a)에서 볼 수 있듯이 0.89로 왼쪽으로 약간 치우친 것으로 나타났으며, 이는 단위중량 분석에서 설명하였듯이 매립층에 분포하고 있는 느슨한 지층의 영향으로 큰 간극비를 보이는 지층이 부분적으로 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 매립층 간극비의 확률분포형은 이러한 특성을 고려해야 할 것으로 판단되며, 왼쪽으로 치우친 경향을 나타낼 수 있는 대수정규분포 또는 감마분포가 적합한 것으로 판단된다. 퇴적층 간극비의 경우에는 분석에 사용한 자료가 392개로 매우 많아 적합성 검



(a) 단위중량

(b) 간극비

그림 11. 깊이에 따른 단위중량과 간극비 분포

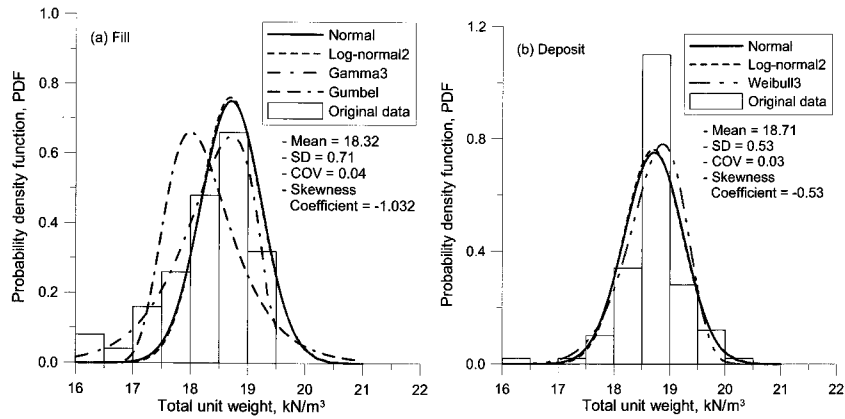


그림 12. 단위중량의 확률분포형

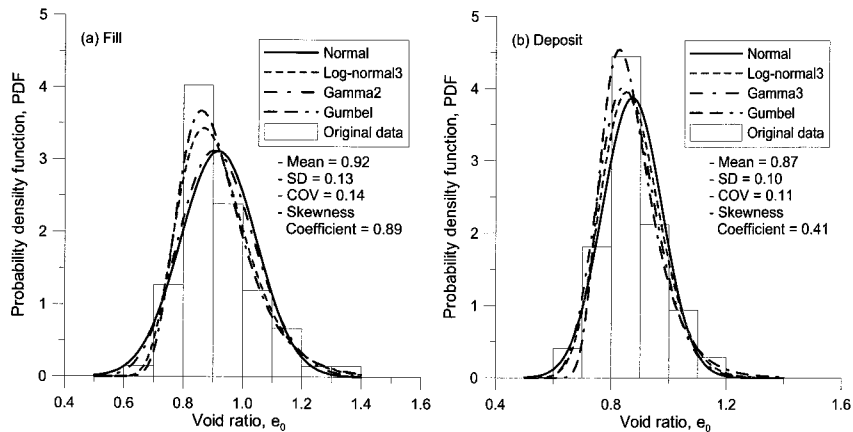


그림 13. 간극비의 확률분포형

정기준이 매우 엄격하게 설정되어 유의수준(α) 0.05에서는 통과하지 못하였으나 검정기준이 약간 느슨해진 유의수준(α) 0.01에서는 정규분포가 적합성 검정기준을 통과한 것으로 나타났다. Lacasse와 Nadim(1996)은 일반적으로 간극비는 정규분포를 보인다고 하였으며, 이는 인천 송도지반 퇴적층의 분포와도 일치하는 것으로 나타났다. 간극비의 변동계수는 매립층이 14%, 퇴적층이 11%로 나타났다. 이는 Lee 등(1983), Lacasse와 Nadim(1996), Lumb(1974)이 여러 가지 흙에 대하여 제시한 간극비의 변동계수 13~42%, 7~30%, 15~30%보다 작은 값을 보이는 것으로 나타났다. 단위중량과 간극비에 대한 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정 결과는 각각 부록 표 3, 4에 제시하였다.

5.2 풍화암

앞에서 분석한 점토 및 실트층과 달리 풍화암은 풍화암의 요건 즉, N값이 50/10 이상의 조건을 만족하는 지층일 경우에 대하여 시험을 수행하였으므로 특별히 공

간적인 무작위성을 검증할 필요가 없을 것으로 판단된다. 본 논문에서 사용한 풍화암 강도정수 자료에 대한 자세한 시험방법 및 결과는 김동휘 등(2009)을 참조할 수 있다. 풍화암의 내부마찰각의 왜곡도계수는 0.799로 그림 14에서 볼 수 있듯이 약간 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있으나 그 경향이 작아 대칭분포인 정규분포도 풍화암의 내부마찰각 분포특징을 적절하게 표현할 수

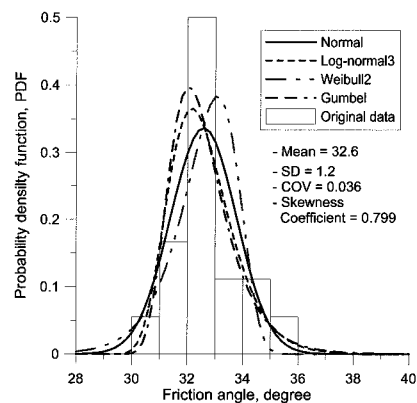


그림 14. 풍화암 내부마찰각의 확률분포형

표 5. 풍화암 내부마찰각 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

지반정수 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
Friction Angle (°) (18)	Normal	32.576	1.186	-	O	0.21	0.31	O	4
	Log-normal	- (28.022)	3.483(1.483)	0.036(0.256)	O(O)	0.20(0.16)		O(O)	3(2)
	Gamma	- (30.560)	0.043(0.697)	754.609(2.892)	O(X)	0.67		X	6
	Weibull	- (30.539)	33.103(2.290)	34.523(1.776)	O(X)	0.27		O	5
	Gumbel	32.042	0.925	-	O	0.14		O	1

있는 것으로 나타났다. 풍화암 내부마찰각 변동계수는 3.6%로 다른 지반정수에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다. 풍화암 내부마찰각에 대한 매개변수 추정결과 및 확률분포형 적합성 검정결과는 표 5와 같다.

5.3 암반

암반의 일축압축강도는 암반지 지 말뚝의 지지력을 예측하는 자료로 직접적으로 활용할 수 있으므로 암반의 풍화 정도에 따른 일축압축강도에 대한 확률분포형을 제시하였다. 기반암은 절리 분포 및 풍화 정도에 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 압축강도 및 단위중량을 분석하였다. 또한, 앞에서 분석한 연약한 퇴적지반과 달리 암반은 풍화 정도에 따라서 종류를 구분하므로 특별히 공간적인 무작위성을 검증할 필요 없이 각각의 암반종

류에 대하여 수행된 일축압축강도 및 단위중량 자료를 이용하여 빈도분석을 수행하였다.

MWR과 SWR 일축압축강도의 경우에는 그림 15(a), (b)에서 볼 수 있듯이 왜곡도계수가 각각 1.413, 1.407로 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있어 정규분포는 적합하지 않는 것으로 나타났으며, 왼쪽으로 치우친 분포를 나타낼 수 있는 대수정규분포, 감마분포, 와이블분포 및 검벨분포 등이 적합한 것으로 나타났다. FR의 일축압축강도는 그림 15(c)에서 볼 수 있듯이 거의 대칭인 분포를 보이고 있어 정규분포도 적합한 것으로 나타났다. MWR과 SWR의 단위중량은 유사한 것으로 나타나 두 자료를 합하여 단위중량 분포를 분석하였으며, 그림 16(a)에서 볼 수 있듯이 대칭인 분포를 보이고 있으므로 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. FR의 단위중량의 경우도 그림 16(b)에서 볼 수 있듯이 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. MWR, SWR, FR의 일축압축강도에 대한 변동계수는 각각 76%, 68%, 38%로 암반의 풍화가 많이 진행될수록 변동계수가 큰 것으로 나타났다. 암반의 단위중량에 대한 변동계수는 MWR과 SWR이 2.2%, FR이 1.7%로 일축압축강도에 비하여 매우 작으며, 단위중량도 풍화가 많이 진행될수록 변동계수가 큰 것으

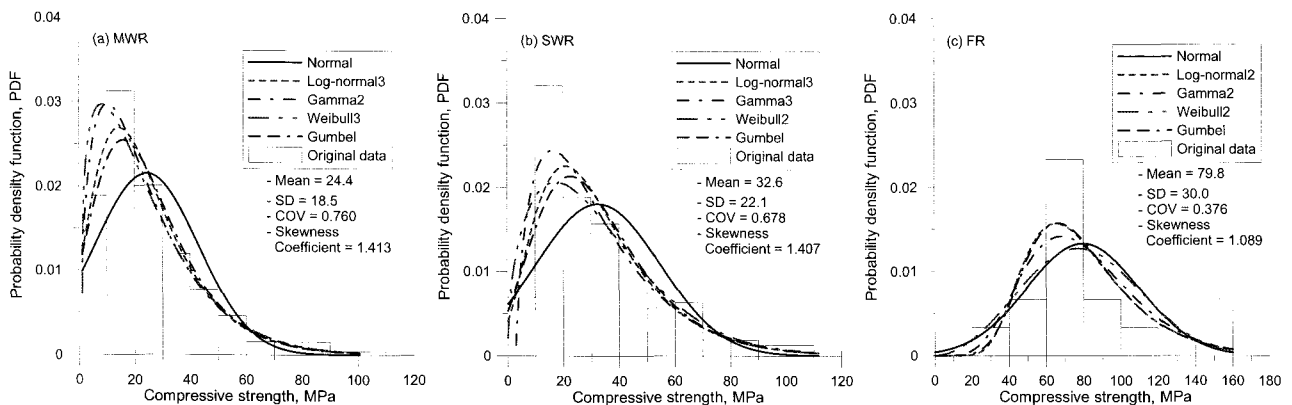


그림 15. 암반 일축압축강도의 확률분포형

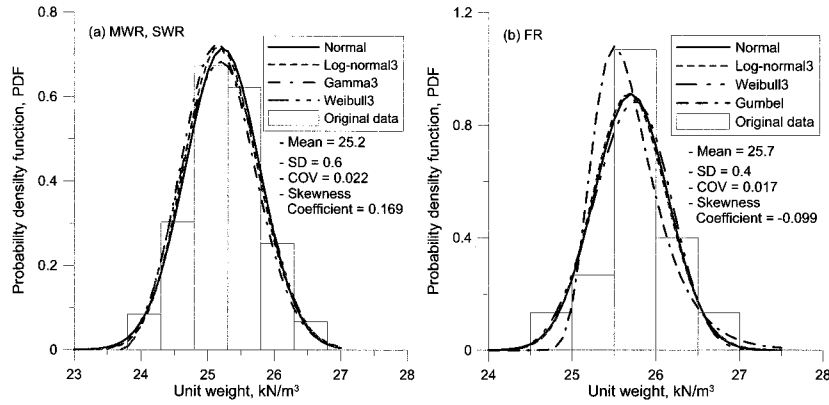


그림 16. 암반 단위중량의 확률분포형

로 나타났다. 암반의 일축압축강도와 단위중량에 대한 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과는 부록 표 5, 6에 제시하였다.

6. 확률분포형의 활용

본 논문에서는 점토와 실트층, 풍화암, 암반에 대한 지반정수 확률분포형을 제시한 절차에 따라서 추정하였으며, 본 절에서는 이러한 확률분포형 추정결과의 활용방안에 대하여 간단하게 언급하고자 한다. Zhou 등(1999)은 암밀계수의 확률분포형을 이용하여 연약지반의 암밀시간에 대한 확률분포, 즉 불확실성을 분석하였다. 본 논문에서는 암밀계수와 함께 1차 암밀침하량 추정에 사용되는 압축지수, 재압축지수 및 간극비 대한 확률분포형을 제시한 절차에 따라 산정하였으므로 Zhou 등(1999)이 분석한 암밀시간에 대한 불확실성뿐만 아니라 1차 암밀침하량에 대한 불확실성을 추가로 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 풍화암 강도정수의 확률분포형은 풍화암을 지지층으로 사용하는 말뚝의 선단지력에 대한 불확실성 분석에 사용할 수 있을 것이다. 또한, 암반의 일축압축강도 확률분포형은 일축압축강도를 이용하여 말뚝의 선단지력을 추정하는 방법(한국지반공학회, 2003)을 사용할 때 암반지지 말뚝의 선단지력에 대한 불확실성을 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 지반정수의 확률분포형을 확률론적 설계 방법(probability-based design method)에 직접적으로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 결정론적 설계방법에 사용하는 지반정수를 좀더 합리적으로 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 지반정수의 확률분포형이 한쪽으로 치우친 경향을 보일 경우에는 지반정

수의 평균, 중앙값 및 최빈값(mode)이 다르므로 어떠한 값을 결정론적 설계의 대표 값으로 사용할 것인가를 결정해야 한다. 이러한 경우 확률분포형과 이러한 확률분포형이 도출된 공학적인 원인을 분석하여 대표 값을 결정할 경우에는 단순히 평균값을 대표 값으로 사용할 경우보다 대표 값의 특성을 더 잘 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시한 절차에 따라 산정한 신뢰성 높은 지반정수의 확률분포형은 확률론적 설계뿐만 아니라 결정론적 설계에서 지반정수의 합리적인 결정에 사용될 수 있는 중요한 자료인 것으로 판단된다.

7. 요약 및 결론

지반정수들의 확률분포형을 결정하기 위해서는 분석 자료에 대한 이상치 검정, 무작위성 검정, 확률분포형의 매개변수 추정 및 매개변수 적합성 검정, 확률분포형의 적합성 검정의 절차를 거쳐야 한다. 본 논문에서는 이와 같은 확률분포형 추정절차를 제시하였으며, 제시한 절차에 따라서 분석대상 지반으로 선정된 인천 송도지역 지반정수들의 확률분포형을 추정하였다. 먼저, 실트 및 점토층 지반정수들의 확률분포형을 추정하였으며, 압축지수, 재압축지수, 단위중량, 간극비는 거의 대칭인 분포를 보이므로 정규분포를 포함한 대부분의 확률분포형이 사용될 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 암밀계수와 투수계수의 분포는 왼쪽으로 치우친 경향을 보이므로 이러한 경향을 나타낼 수 있는 대수정규분포 등이 적합한 것으로 나타났다. 풍화암의 강도정수인 내부마찰각은 대칭분포를 보이므로 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. MWR, SWR의 일축압축강도는 왼쪽으로

치우친 분포를 보여 대수정규분포 등의 치우친 분포를 나타낼 수 있는 확률분포형이 적합한 것으로 나타났으며, FR은 대칭분포를 보여 정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 또한, MWR, SWR, FR의 단위중량은 대칭인 분포를 보이므로 정규분포가 적합한 것으로 나타났다.

확률분포형을 추정하는 과정에서 각각의 지반정수들에 대한 평균, 표준편차를 산정할 수 있으므로 이를 이용하여 지반정수의 변동성을 평가할 수 있는 변동계수를 산정해 보았다. 산정결과 인천 송도지역 지반정수들의 변동계수는 Lee 등(1983), Lumb(1974), Lacasse와 Nadim (1996), Baecher(2003) 등이 제시한 변동계수와 유사한 범위에 존재하거나 약간 큰 것으로 나타났다. 이는 송도 지반은 동일한 성분의 흙으로 구성된 것이 아니라 실트와 점토성분이 혼합되어 있기 때문에 하나의 균질한 성분으로 구성된 지반보다 변동계수가 큰 것으로 판단된다. 이와 같이 본 논문에서 제시한 절차에 의해서 산정된 지반정수들의 확률분포형과 변동계수는 분석대상 지반에 건설되는 구조물의 신뢰성해석에 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. 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”, *한국지반공학회논문집*, 제24권, 1호, pp.119-130.
3. 이규환, 윤길림 (2008), “지반조사 데이터의 통계처리방법”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 광주, pp.85-110.
4. 이재창 (1993), *최신통계학*, 법경출판사, 서울, pp.271-274.
5. 윤용남 (2007), *수문학 기초와 응용*, 청문각, 경기도, pp.821-972.

6. 최현길 (2009), “송도 국제도시 개발계획에 대한 개관”, *인천 특별 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, 인천광역시, pp.3-27.
7. 한국지반공학회 (2003), *구조물기초설계기준 해설*, 구미서관, 서울, pp.291.
8. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (2007), *Probability Concepts in Engineering, Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons, pp.278-305.
9. Baecher, G. B. (2003), *Reliability and Statistical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., pp.177-203.
10. Baecher, G. B., and Ladd, C. C. (1997), “Formal Observational approach to staged loading”, *Transportation Research Record* (Dec).
11. Benson, C. H. (1993), “Probability Distribution for Hydraulic Conductivity of Compacted soil liners”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 119(3), pp.471-486.
12. 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.
13. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V. (2008), *Risk Assessment*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, pp.161-201.
14. 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.
15. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), “Uncertainties in characterizing soil properties”, *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp.49-75.
16. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman, pp.57-88.
17. 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.
18. Marsily, G. de (1986), *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*, Orlando, FL, Academic Press.
19. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), “Characterization of geotechnical variability”, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp.612-624.
20. Tanaka, H., Loat, J., Shibuya, S., Soon, T. T., and Shiwakoti, D. (2001), “Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.378-400.
21. Zhou, W., Hong, H. P., and Shang, J. Q. (1999), “Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(8), pp.659-664.
22. Zhu, G., Yin, J.-H., and Graham, J. (2001), “Consolidation modeling of soils under the test embankment at Clek Lap Kok International Airport in Hong Kong using a simplified finite element model”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.349-363.

(접수일자 2009. 9. 1, 심사완료일 2009. 10. 27)

부록 표 1. 재입축지수의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
ML (17)	Normal	0.02936	0.01548	-	O	0.18	0.22	O	4
	Log-normal	- (-0.028)	-3.651(-2.889)	0.495(0.264)	O(O)	0.14(0.15)		O(O)	2(3)
	Gamma	- (-0.001)	0.008(0.008)	3.596(3.839)	O(O)	0.14(0.14)		O(O)	2(2)
	Weibull	- (0.003)	0.033(0.029)	1.981(1.744)	O(O)	0.14(0.13)		O(O)	2(1)
	Gumbel	0.022	0.012	-	O	0.15		O	3
CL (46)	Normal	0.042	0.014	-	O	0.09	0.18	O	4
	Log-normal	- (-0.142)	-3.226(-1.698)	0.318 (0.074)	O(O)	0.06(0.08)		O(O)	1(3)
	Gamma	- (-0.061)	0.004(0.002)	9.428 (57.438)	O(O)	0.07(0.08)		O(O)	2(3)
	Weibull	- (0.006)	0.046(0.040)	3.390 (2.840)	O(O)	0.09(0.09)		O(O)	4(4)
	Gumbel	0.036	0.011	-	O	0.07		O	2
All soils (ML, 17; CL, 17)	Normal	0.03369	0.01414	-	O	0.11	0.14	O	3
	Log-normal	- (-0.187)	-3.472(-1.514)	0.403(0.064)	O(O)	0.13(0.11)		O(O)	5(3)
	Gamma	- (-0.098)	0.006(0.002)	5.679(86.231)	O(O)	0.11(0.11)		O(O)	3(3)
	Weibull	- (-0.004)	0.038(0.043)	2.555(2.926)	O(O)	0.09(0.10)		O(O)	1(2)
	Gumbel	0.027	0.011	-	O	0.12		O	4

부록 표 2. 투수계수의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
ML (32)	Normal	1.043e-7	5.600e-8	-	O	0.19	0.23	O	5
	Log-normal	- (-7.94e-8)	-16.213(-15.552)	0.504(0.298)	O(O)	0.11(0.13)		O(O)	1(3)
	Gamma	- (1.04e-8)	3.01e-8(3.35e-8)	3.463(2.804)	O(O)	0.12(0.11)		O(O)	2(1)
	Weibull	- (1.58e-8)	1.18e-7(9.88e-8)	1.940(1.618)	O(O)	0.14(0.12)		O(O)	4(2)
	Gumbel	7.91e-8	4.37e-8	-	O	0.12		O	2
CL (54)	Normal	7.78e-8	4.32e-8	-	O	0.20	0.16	X	6
	Log-normal	- (-4.10e-9)	-16.491(-15.696)	0.519(0.496)	O(O)	0.10(0.11)		O(O)	2(3)
	Gamma	- (3.46e-8)	2.40e-8(4.33e-8)	3.238(0.997)	O(O)	0.13(0.07)		O(O)	4(1)
	Weibull	- (3.02e-8)	8.76e-8(4.93e-8)	1.869(1.101)	O(X)	0.15		O	5
	Gumbel	5.84e-8	3.37e-8	-	O	0.13		O	4
All soils (ML, 32; CL, 32)	Normal	8.68e-8	4.86e-8	-	O	0.18	0.15	X	5
	Log-normal	- (-2.65e-8)	-16.395(-16.071)	0.523(0.411)	O(O)	0.08(0.10)		O(O)	1(2)
	Gamma	- (2.40e-8)	2.73e-8(3.77e-8)	3.183(1.667)	O(X)	0.11		O	3
	Weibull	- (2.47e-8)	9.77e-8(6.71e-8)	1.851(1.287)	O(X)	0.13		O	4
	Gumbel	6.49e-8	3.79e-8	-	O	0.11		O	3

부록 표 3. 단위중량의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

흙 종류 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
Fill (100)	Normal	18.318	0.713	-	O	0.12	0.12	O	2
	Log-normal	- (16.169)	2.907(0.713)	0.039(0.323)	O(O)	0.12(0.18)		O(X)	2(3)
	Gamma	- (19.592)	0.028(-0.399)	659.527(3.189)	O(O)	0.12(0.05)		X(O)	2(1)
	Weibull	- (15.141)	18.947(3.790)	44.515(7.984)	X(X)	-		-	-
	Gumbel	17.997	0.556	-	O	0.19		X	4
Deposit (100)	Normal	18.711	0.531	-	O	0.11	0.12	O	1
	Log-normal	- (15.692)	2.929(1.090)	0.028(0.174)	O(O)	0.11(0.13)		O(X)	1(2)
	Gamma	- (20.547)	0.015(-0.153)	1243.638(11.974)	O(O)	0.54(0.13)		X(X)	4(2)
	Weibull	- (15.141)	18.947(3.790)	44.515(7.984)	O(O)	0.15(0.13)		X(X)	3(2)
	Gumbel	18.472	0.414	-	O	0.15		X	3

부록 표 4. 간극비의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

총 종류 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
Fill (134)	Normal	0.918	0.128	-	O	0.10	0.10	O	5
	Log-normal	- (0.471)	-0.096(-0.845)	0.139(0.281)	O(O)	0.08(0.05)		O(O)	3(2)
	Gamma	- (0.645)	0.018(0.060)	51.169(4.518)	O(X)	0.09		O	4
	Weibull	- (0.708)	0.972(0.235)	8.525(1.679)	O(X)	0.14		X	6
	Gumbel	0.860	0.100	-	O	0.04		O	1
Deposit (392)	Normal	0.872	0.103	-	O	0.07	0.06	X	3
	Log-normal	- (0.106)	-0.144(-0.275)	0.118(0.134)	O(O)	0.05(0.04)		O(O)	2(1)
	Gamma	- (0.375)	0.012(0.021)	71.245(23.156)	O(O)	0.05(0.04)		O(O)	2(1)
	Weibull	- (0.640)	0.916(0.262)	10.164(2.396)	O(X)	0.11		X	4
	Gumbel	0.826	0.081	-	O	0.04		O	1

부록 표 5. 일반 일축압축강도의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

암종 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
MWR (259)	Normal	24.351	18.516	-	O	0.13	0.08	X	5
	Log-normal	- (-17.518)	2.964(3.645)	0.675(0.423)	O(O)	0.08(0.05)		X(O)	4(2)
	Gamma	- (-1.021)	14.079(13.513)	1.730(1.878)	O(O)	0.04(0.05)		O(O)	1(2)
	Weibull	- (1.186)	26.476(24.915)	1.328(1.259)	O(O)	0.06(0.05)		O(O)	3(2)
	Gumbel	16.019	14.437	-	O	0.06		O	3
SWR (159)	Normal	32.566	22.085	-	O	0.15	0.10	X	5
	Log-normal	- (-17.575)	3.294(3.826)	0.615(0.421)	O(O)	0.08(0.07)		O(O)	4(3)
	Gamma	- (2.762)	14.977(16.365)	2.174(1.821)	O(O)	0.06(0.05)		O(O)	2(1)
	Weibull	- (4.858)	36.080(29.820)	1.502(1.263)	O(X)	0.08		O	4
	Gumbel	22.628	17.220	-	O	0.08		O	4
FR (15)	Normal	79.793	29.995	-	O	0.26	0.34	O	5
	Log-normal	- (-6.221)	4.313(4.397)	0.364(0.339)	O(O)	0.19(0.20)		O(O)	1(2)
	Gamma	- (44.617)	11.275(25.577)	7.077(1.375)	O(X)	0.21		O	3
	Weibull	- (35.996)	89.499(48.460)	2.889(1.486)	O(X)	0.24		O	4
	Gumbel	66.296	23.387	-	O	0.20		O	2

부록 표 6. 일반 단위중량의 확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정결과(유의수준 $\alpha=0.05$)

암종 (자료수)	확률분포형 매개변수 산정 및 적합성 검정					확률분포형 적합성 검정			
	확률 분포형	x_0	α	β	적합성 결과	검정 통계치	검정 기준	검정 결과	적합성 순위
MWR SWR (358)	Normal	25.224	0.559	-	O	0.05	0.06	O	2
	Log-normal	- (15.290)	3.228(2.294)	0.022(0.056)	O(O)	0.05(0.05)		O(O)	2(2)
	Gamma	- (18.762)	0.012(0.048)	2036.054(133.636)	O(O)	0.53(0.05)		X(O)	5(2)
	Weibull	- (23.687)	25.474(1.721)	57.154(2.997)	O(O)	0.11(0.04)		X(O)	4(1)
	Gumbel	24.973	0.436	-	O	0.09		X	3
FR (15)	Normal	25.702	0.438	-	O	0.12	0.34	O	2
	Log-normal	- (12.455)	3.246(2.583)	0.017(0.033)	O(O)	0.12(0.11)		O(O)	2(1)
	Gamma	- (31.337)	0.007(-0.034)	3448.829(165.785)	O(O)	0.40(0.12)		X(O)	5(2)
	Weibull	- (24.121)	25.898(1.743)	74.599(4.060)	O(O)	0.13(0.13)		O(O)	3(3)
	Gumbel	25.505	0.341	-	O	0.15		O	4