

# 지반의 불확실성과 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Soil Uncertainty

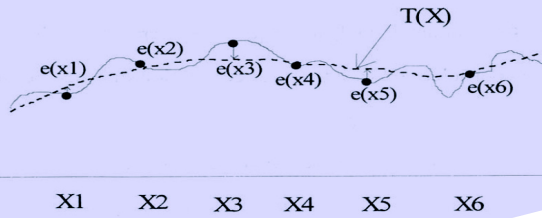


Fig. 2. Spatial Variability of Soil Properties

## 1. 서론

지반은 보통 퇴적기원 및 이력에 따라 위치별, 심도별로 불균질하며 일정한 연속성이나 반복성, 그리고 방향성이 존재한다. 따라서 실내의 실험 및 조사결과로 공간적 특성을 반영한 지반 특성값(soil characteristic value)을 얻는 것은 쉽지 않다. 더구나 지반을 이루는 흙이나 암반은 인위적으로 생산되는 콘크리트나 강재와 같은 구조재료에 비해 실험과 조사방법 및 분석, 평가방법 등에 따라 특성값이 다양하므로 정밀한 방법을 통해 지반 자료를 얻었다고 하더라도 그 신뢰성에는 한계가 있기 마련이다. 즉 자연 상태에서 위치 조건에 따라 그 특성이 달라지는 지반재료는 원위치 지반특성에 부합되는 지반재료값을 정량적으로 얻는데 한계가 있다. 특히 지반정수는 구조물 설계 시 직접적으로 이용되는 주요 설계변수로서 구조물의 안정성과 경제성에 미치는 영향력은 대단히 크다. 지반정수의 불확실성은 결국 설계의 신뢰성을 좌우하며, 과대설계나 과소설계의 주요 원인으로 작용한다. 따라서 합리적인 구조물 설계를 위해서는 지반정수의 불확실성을 최소화하고 지반 특성값 결정에 신중을 기하여야 한다.

이러한 맥락에서 본 기사에서는 지반조사 및 시험, 분석과정 등에서 발생하는 다양한 토질의 불확실성과 이를 정량화하는 방법에 대해 살펴보고, 한계상태설계 시 요구되는 지반 특성값을 산정하는 방법에 대해 소개하고자 한다. 아울러 독자의 이해를 돕기 위하여 지반특성치가 구조물 설계에 미치는 영향에 대한 해석사례도 함께 소개한다.

## 2. 지반의 불확실성

현장지반조사를 통해 정량적으로 분석된 설계자료라 해도 그 조사방법과 빈도, 지반의 공간적 특성 변화 및 실험절차, 그리고 자연적, 인위적인 다양한 요인으로 지반조사 결과에는 불확실성이 존재하기 마련이다. Asoake와 Grivas(1982)는 지반의 비배수 전단 강도가 가지는 불확실성이 상당하다는 사실을 밝혔으며 실제 측정자료를 가지고 분석하여 지반설계 시 이러한 불확실성을 반드시 반영해야 한다고 주장했으며 이를 위한 다양한 방법을 제시하였다. 이러한 불확실성 요소를 제거하기 위해 각종 통계적 기법을 활용하는 해석방법에 대한 연구가 진행되고 있으나 아직도 불확실성을 완전히 제거할 수 있는 방법은 없으며, 그나마 국내에서 수행되고 있는 지반조사 결과는 이러한 통계적 기법을 적용하는 것조차도 불가능할 정도로 충분치 못한 경우가 대부분이다. 그러므로 기존의 설계방법은 지반자체의 불확실성이 존재함에도 불구하고 이를 적절하게 반영하지 못하여 매우 비경제적인 설계가 유도되는 경우가 많은 것이 현실이다.



윤길림

한국해양과학기술원  
연안공학연구본부 책임연구원



김선빈

한국해양과학기술원  
연안공학연구본부 연구원



이진학

한국해양과학기술원  
연안공학연구본부 책임연구원

## 2.1 불확실성 요소

불확실성이라는 용어는 그 단어 자체를 해석하는 방법과 목적에 따라 적용범위가 다양해질 수 있다. 지반공학 분야에서의 불확실성은 대체로 지반의 특성값을 나타내는 토질 시험값을 선정하는 과정에서 발생하는 불확실성으로 국한할 수 있다. Chiasson 등(1995)는 지반분야에서의 불확실성에 대해 정의를 내리면서 불확실성은 단지 위험요소를 평가하기 위한 상대적 개념의 의미일 뿐, 그 적용범위를 명확히 구분하는 것은 쉽지 않다고 주장하였다. 다만 지반공학의 통계분석은 원위치 특성과 평가 그리고 위험요소의 평가, 허용한계, 건설시공관리 및 지반 특성 등으로 국한하여 실시할 뿐이라고 주장하였다. 대부분의 통계분석에 대한 신뢰성은 샘플의 수와 평가기술에 따라 달라지게 되는데, 평가 과정에서 발생하는 불확실성은 자료의 분산(data scatter)과 조사결과의 시스템 오차(systematic errors)로 구분하여 설명할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

그동안 지반공학자들은 조사 및 시험 시 발생하는 불확실성은 불가피하다고 인식해 왔으며, 이를 최소화하기 위하여 조사 및 분석방법을 개선하는 등의 노력을 해왔다. Ravi 등(1992)은 불확실성이 발생하는 요소에 대해 일정한 모델을 통해 설명하였다. 즉, 그 내용은 ① 측정값이 편향되었는지 여부와 ② 오차발생이 체계적인 것인지와 무작위적 우연(random)인지의 여부, 그리고 ③ 공간적인 변동성이 고려되었는지, 평균으로 다루어졌는지 등에 대해 구분하였다. 이중 첫 번째 요소인 편향성은 지반이 이방성을 나타내는 상황에서는 필연적으로 발생하며, 균질한 지반의 경우에도 발생할 수 있고, 측정위치의 공간적 위치에 따라 그 정도가 다르게 나타나는 요소이다. 두 번째 요소는 지반 조사의 제한된 정보에 의거 발생하는 요소로서 조사 시 얻어진 샘플의 빈도수나 현장 및 실내시험 시 부가적으로 발생할 수 있는 오차이다. 그리고 세 번째 요소는 측정값과 현장 위치조건과의 차이로 발생하는 오차이다. 이러한 지반의 불확실성을 포함하여 다양한 설계변수의 불확실성을 설계에 반영하기 위하여

북미의 하중저항계수설계법(LRFD)과 유럽의 유로코드(Eurocode) 등이 개발되어 적용되고 있다. 이들 설계법은 기본적으로 신뢰성 이론을 근간으로 하고 있으며, 지반공학적 측면에서는 자연상태의 지반이 갖고 있는 불확실성을 지반 특성값과 부분안전계수 혹은 저항계수에 반영하여 설계에 적용하도록 하고 있다.

## 2.2 지반자료의 공간적 변이성

서로 다른 위치에서 얻어진 지반 특성값의 공간적인 변화는 공간적 위치에 따른 변동성 관계에 지배되는 반면, 무작위 시험에서 발생된 오차(random testing error)는 측정 위치에 따라 통계적으로 독립적인 요소이다. 즉 서로 다른 위치에서 발생하는 지반 특성값의 차이는 채취한 샘플 위치간 상호관계를 통하여 통계적으로 분석할 수 있는 요소이지만, 샘플 채취 시 무작위로 실시한 시험과정에서 발생한 오차는 통계분석이 매우 어려운 오차이다. 이같은 차원에서 Wu와 El-Jandali(1985)는 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)이 지반 특성값의 추정 과정에서 공간적 변화에 따라 서로 다르게 나타나는 불확실성을 통계학적으로 유추할 수 있는 대표적인 시험법 중의 하나로 소개하였다. 한편 Baecher(1982)는 가정된 선상에서 일정한 이격거리별 측정값에 대해 지반 물성값의 상관관계를 도출하였다. 자연지반이 갖는 이방성, 조사자료의 한계성, 그리고 측정오차는 현장조사로부터 각 지층별 특성을 모사하는데 있어 불확실성의 기본 요소들이다. 이러한 불확실한 요소들을 극복하는 방법으로 통계학적 모델링이 지반공학분야에 필요하다. 이와 같은 이유에서 지반공학자들은 "autocorrelation"을 이용하여 지반공학 자료들에 대한 공간적 상관관계 모델을 사용해 왔다. 이러한 기법을 소위 확률론적 현장특성(stochastic site characterization)이라 하는데, 이것은 확률적인 차원에서 이방성을 갖는 토질 자료들을 정량화 하는데 유용하다.

통계학적으로 임의의 지반특성을 모델화한 원위치우연모델(random field model)은 공간적으로 서로 다른 불확실한 재료의

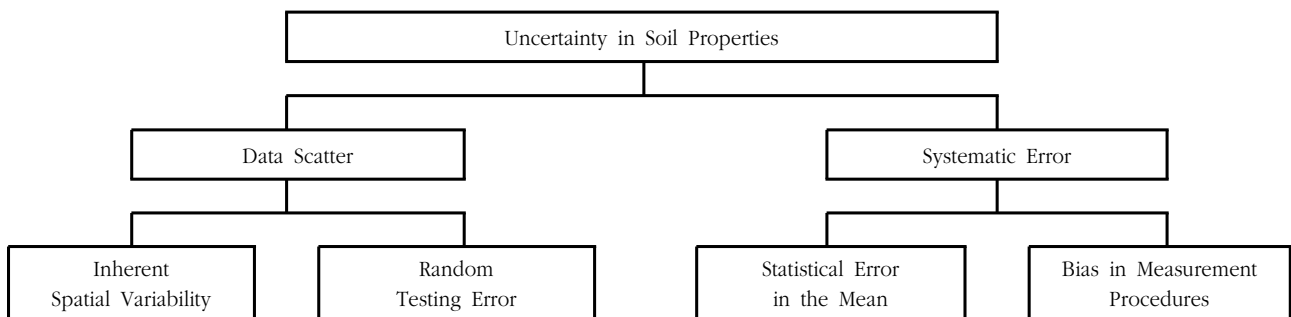


그림 1 지반의 불확실성 원인(윤길림, 2000)

특성을 형상화한 기본자료이다. 실질적으로 모든 위치에서의 샘플채취는 비현실적이고, 비경제적이며, 측정과 시험오차는 정보의 가치를 희석시킬 수 있는 경향이 있다. 이러한 이유에서 예측과 해석, 그리고 판정은 항상 지반에 대해 불완전한 정보를 제공하게 되며, 이것은 결국 확률적 모델을 갖게 한다. 서로 다른 위치에서 얻어진 지반 특성값의 상관성은 변동값(fluctuation value)으로 나타낼 수 있는데, 확률적으로 연관성을 높게 하기 위해서는 기준거리 보다 작은 범위 내에서 시험이 실시되어야 한다.

한편 지반공학적 해석은 유사 지반상태라 할지라도 위치별로 서로 다르기 때문에, 변화정도와 거리별 상관관계수인 통계적 변수로서 현장고유의 특성값(site-specific values)을 요구한다. 근본적으로 자료수가 충분하면 지표 아래 모든 지점에서의 지반 특성값은 정확한 시험값을 얻을 수 있으나, 이는 실질적으로 불가능하므로, 전단강도, 압축성 그리고 투수성과 같이 통상적으로 접하는 지반 특성값들은 평균과 분산, 그리고 공간적인 상호관계 등이 고려되어야 한다. 그리고 지반 특성값은 각 지점에서의 값이며, 각 지점 사이의 값은 보간법이나 경중율을 고려하여 추정한다.

지반조사 결과의 신뢰성이라 함은 지반조사 과정에서 수행되는 각종 실내 및 현장시험으로부터 얻어지는 지반정수가 참값(true value)에 얼마나 근접하고 있는가를 의미한다. 이는 정확성(accuracy)에 대한 개념으로 이해되어야 하며, 시험장비와 방법 개선을 통해 이러한 정확성을 확보하고자 한다. 이것은 참값과 측정값 사이의 오차를 얼마나 최소화하느냐에 달려있다. 그러나 이같은 정확성의 개념은 또 다른 개념에서의 정밀성(precision) 또는 반복성(repeatability)과는 구분할 필요가 있다. 물론 이러한 정확성과 반복성(정밀성)을 동시에 확보하는 것이 각종 지반 조사에서 추구하고 있는 궁극적인 목표이겠지만 현재의 기술 수준으로 이 두 가지를 완벽하게 확보하는 것이 현실적으로 어려우므로 기술자의 입장에서는 주어진 조건 하에서 최적의 지반조사 수량과 종류 등을 계획하고 얻어진 자료를 해석함에 있어서 오차 유발 원인을 정확히 파악하고 제거하여 가장 양질의

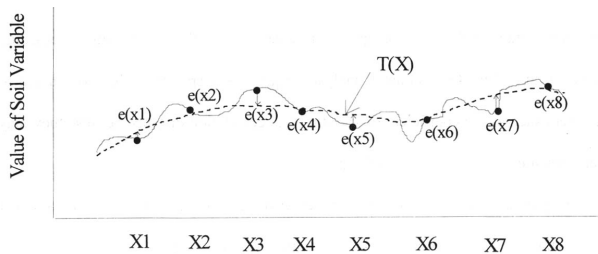


그림 2 지반의 공간적 변동성을 정량화하는 기법(윤길림, 2000)

데이터를 설계에 반영하는 것이 중요한 역할이라 할 수 있겠다.

### 3. 지반자료의 변동성 추정방법

#### 3.1 통계적 방법

지반조사 자료의 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. 통계학에서는 자료 수가 30개 이상이면 통계분석 결과의 신뢰성이 높다고 한다(Walpole et al., 2007). Schneider(1997)는 지반공학 분야에서는 자료의 수가 대략 10개 이상이면 통계적 방법을 사용할 수 있다고 주장하였으나 통계분석 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(Baccher & Christian, 2003). 이 경우에는 자료값에서 경향성분을 뺀 변동성분들의 표준편차를 산정하여 지반정수의 변동성을 평가해야 한다.  $x, y$  방향으로서는 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.

지반정수의 변동성을 나타내는 효과적인 지표는 표준편차  $s_w$ 를 평균지반정수의 경향성분인  $t$ 로 정규화시킨 변동계수이며, 식 (3)과 같이 산정할 수 있다. 만약, 지반정수가 공간적 경향성을 보이지 않는다면 식 (3)에서 경향함수  $t$ 는 일정한 상수인 평균  $x$ , 표준편차  $s_w$ 는  $s$ 로 나타낼 수 있다.

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

### 3.2 Three-Sigma Rule

표준편차를 통계적 방법으로만 산정할 수 있다면, 조사자료가 적은 지반공학분야의 신뢰성 분석은 상당한 어려움이 있다 (Duncan, 2000). 따라서 지반조사 자료의 개수가 부족할 경우에도 표준편차를 산정하는 방법들이 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 et al., 1997; Duncan, 2000).

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

식 (4)에서 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)을 의미한다. 측정된 자료의 HCV와 LCV를 이용하여 산정한 표준편차는 일반적으로 실제 보다 작은 경향을 보인다. 따라서 Duncan(2000)은 지반조사 자료의 표준편차를 Three-Sigma Rule로 결정 시 인근 지역의 연구 결과 또는 발표된 연구결과와 비교한 후 사용할 것을 권고하였다.

### 3.3 Graphical Three-Sigma Rule

이 방법은 심도에 따라서 증가하는 비배수전단강도와 같은 지반정수의 표준편차를 추정하는데 적절하다. Graphical Three-Sigma Rule의 원리는 기본적으로 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 지반조사 자료의 표준편차를 산정할 경우에는 자료값에서 경향성분을 제거해야 한다. 그러나 이 방법은 지반조사 자료와 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.

## 4. 지반 특성화

### 4.1 지반 특성값 정의 및 산정방법

지반 특성화(ground characterization)는 그림 3과 같이 현장

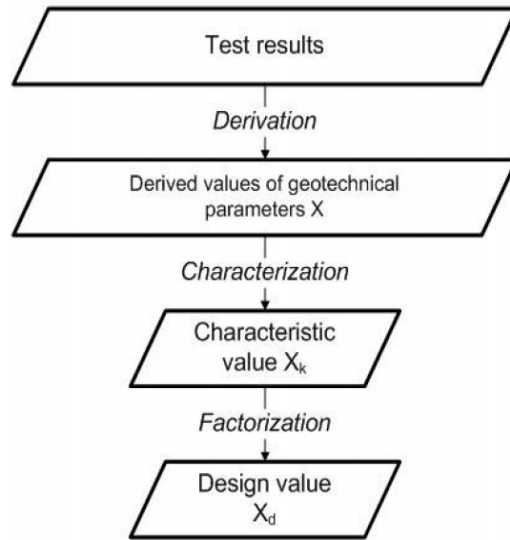
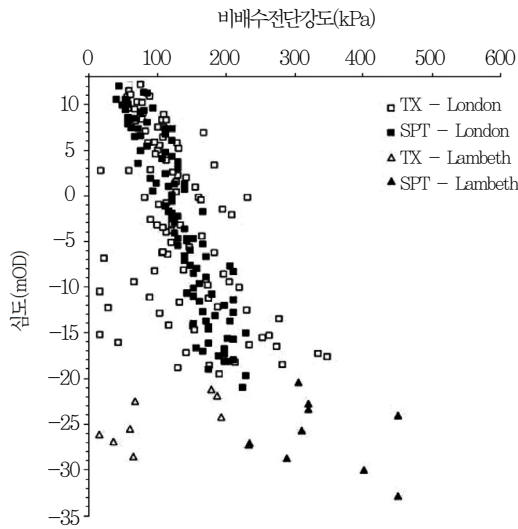


그림 3 지반특성화의 개요(Bond와 Hariss, 2008)

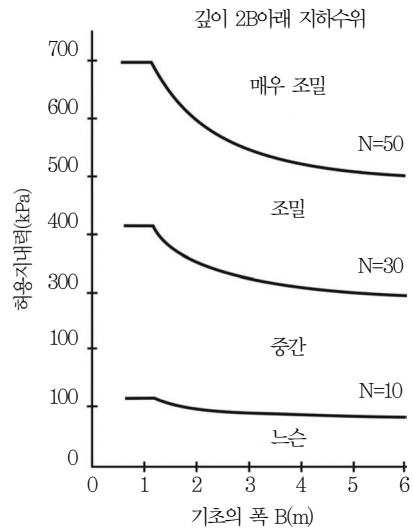
또는 실내시험 결과로부터 적절한 지반정수를 추출해 내는 과정이며, 신뢰성 설계 시 이들 값은 불확실성이 반영된 적절한 부분 계수 혹은 저항계수를 적용하여 설계 계산에 이용된다. 유로코드 7에서는 지반정수의 유도값(derived value)을 이론, 상관관계 또는 시험을 통한 경험에 의해서 얻어지는 값으로 정의한다. 시험결과는 상관관계(예: 모래에서 콘관입저항값과 전단저항 각의 관계), 이론(예: 점토에서 삼축압축 조건의 결과를 평면 변형을 조건의 강도로 변환) 또는 경험규칙(예: 점토에서 표준 관입시험값과 비배수전단강도와와의 관계) 등을 사용하여 지반 정수 X로 유도가 가능하며, 이 값은 인근 현장의 자료 또는 기존 연구결과 등 비교가 가능한 자료를 상호 검토하여 보완할 수 있다(Bond & Hariss, 2008). 그림 4(a)는 2가지 시험에서 얻은 점토(clay)에 대한 지반정수의 산정 예이며, 그림 4(b)는 Terzaghi와 Peck이 제시한 모래(sand) 지반에서 기초의 허용지력과 표준관입시험값(N)과의 경험적 상관관계의 예를 나타낸다. 이같은 방법으로 유도된 지반정수는 설계 적용을 위해 특성화(characterization) 과정을 거쳐 지반 특성값으로 결정된다. 특성값의 통계학적 정의는 현장 지반정수의 평균값과 연관되며, 시험 결과에서 얻어진 추론값이 5% 신뢰수준이 아닌, 한계상태의 발생에 영향을 미치는 값이다. 즉, 특성값  $X_k$ 는 평균값  $\mu(X)$  보다 크게 되는 95% 신뢰수준에 해당되는 값이 되며, 통계이론을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_k = \mu(X)[1 - k_n \cdot V(X)] \tag{5}$$

여기서,  $k_n$ 은 통계적 확률분포와 시험결과와 수량에 의존하는



(a) SPT와 삼축압축시험으로 유도된 비배수강도



(b) 모래지반에서 N값과 허용지내력 상관관계

그림 4 지반정수 유도 예(Bond와 Hariss, 2008)

계수(factor)이고,  $V(X)$ 는 변동계수(표준편차/평균값)이다.

유럽기준인 EN 1990에서는 특성값을 가설적인(hypothetical) 무제한의 시험에서 얻어지지 않는 규정된 확률을 가지는 재료나 제품성질의 값으로서, 이 값은 일반적으로 특정한 성질로 가정된 통계학적 분포에서 어떤 지정된 신뢰수준에 해당한다고 정의하면서, 작은 값이 불리한 경우 특성값은 5% 분위수(quantile)로 정의되고, 큰 값이 불리한 경우 95% 분위수로 정의한다. 작은 값이 불리한 경우로 가정하여 5% 분위수에 대한 특성값을 정규 분포로 가정하여 나타내면 다음과 같다.

$$X_k = \mu(X) - 1.645\sigma(X) = \mu(X) [1 - 1.645 V(X)] \quad (6)$$

여기서,  $\mu(X)$ 는 평균값,  $\sigma(X)$ 는 표준편차이고,  $V(X)$ 는 무제한 시험의 변동계수이다.  $X$ 와 계수 1.645는 5%의 신뢰수준을 나타낸다.

유럽설계기준인 EN 1990의 특성값 정의와 식은 강재나 콘크

리트와 같은 인공재료에서는 잘 적용이 되지만, 지반재료와 같이 변동성이 매우 크거나 관련 물성값을 직접 측정하기 어려운 경우에는 적용하기 어렵다(표 1 참조). 또한 지반공학적 설계에서는 단지 제한된 수량의 시험결과만이 가용하므로 통계적으로 주의가 요구되기도 한다.

특성값을 구하는 또 다른 방법으로 Student(1908)는 평균치의 95% 신뢰도에 대하여 다음과 같이 제안하였다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{t}{\sqrt{N}}\sigma(X) \quad (7)$$

여기서,  $t$ 는 시험결과의 수량  $N$ 에 의해 좌우되는 파라미터이다.

Ovesen(1995)은 수많은 전단강도 결과의 특성치를 얻기 위하여 다음과 같이 보다 단순화된 식을 사용하였다. 식 (8)은 식 (7)에서 시험결과 수량  $N$ 이 무수히 많은 경우의 파라미터  $t$ 를

표 1 지반재료와 인공재료의 변동계수(Bond와 Hariss, 2008)

Material	Parameter	COV(%)	
Soil	coefficient of shearing resistance	$\tan\phi$	5 ~ 15
	effective cohesion	$c'$	30 ~ 50
	undrained strength	$c_u$	20 ~ 40
	coefficient of compression	$m_v$	20 ~ 70
	weight density	$\gamma$	1 ~ 10
Concrete	resistance of beams and columns		8 ~ 21
Steel			11 ~ 15
Aluminium			8 ~ 14

적용한 결과이다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{1.645}{\sqrt{N}} \sigma(X) \quad (8)$$

한편, Schneider(1997)는 식 (8)을 보다 더 단순화하여 식 (9)와 같이 나타내었다.

$$X_k = \mu(X) - 0.5\sigma(X) \quad (9)$$

Schneider는 비교연구에 의하여  $k_n=0.5$  즉, 식 (8)에서 시험 결과의 수량  $N$ 이 11일 때  $X_k$ 에 대한 양호한 근사치가 산정됨을 보였다. 식 (9)는 특성값이 평균값에서 표준편차의 50%만큼 작게 채택되는 경우를 의미한다. 상기 제안된 방법들은 보다 합리적인 특성값의 산정을 위하여 여러 연구자에 의해 제안되었으나 방법에 따라 설계의 결과가 다소 경제적이기도, 다른 한편으로

는 보수적이기도 하여 특정 방법의 적용성을 논리적으로 합당화 하기에는 어려움이 있는 것이 현실이다.

유로코드 7에서 지반정수에 대한 특성값은 한계상태 발생에 영향을 미치는 신중하게 추정된 값으로 정의하고 있으며, 통계학적 개념을 도입하여 한계상태의 발생을 지배하는 가장 불리한 값의 확률이 5%를 넘지 않는 값으로 정의되기도 한다. 그리고 지반 특성값은 각 한계상태에 대해서 하나의 특성값이 존재하지 않고 가능성 있는 여러 개의 특성값이 존재하므로 설계 시에는 설계대상 구조물의 한계상태와 지반의 불확실성 조건 등이 종합적으로 고려되어 결정된다(Bond & Hariss, 2008).

### 4.2 국내 해양지반의 고유특성값 산정 예

EN 1990, Student(1908), Ovesen(1995) 및 Schneider(1997) 등에 의해 제안된 특성값 산정방법을 이용하여 국내 주요지역의 해양지반 특성값을 산정하고 이를 비교·분석하였다. 흙의 물리적

\*G.Y: 광양/B.S: 부산

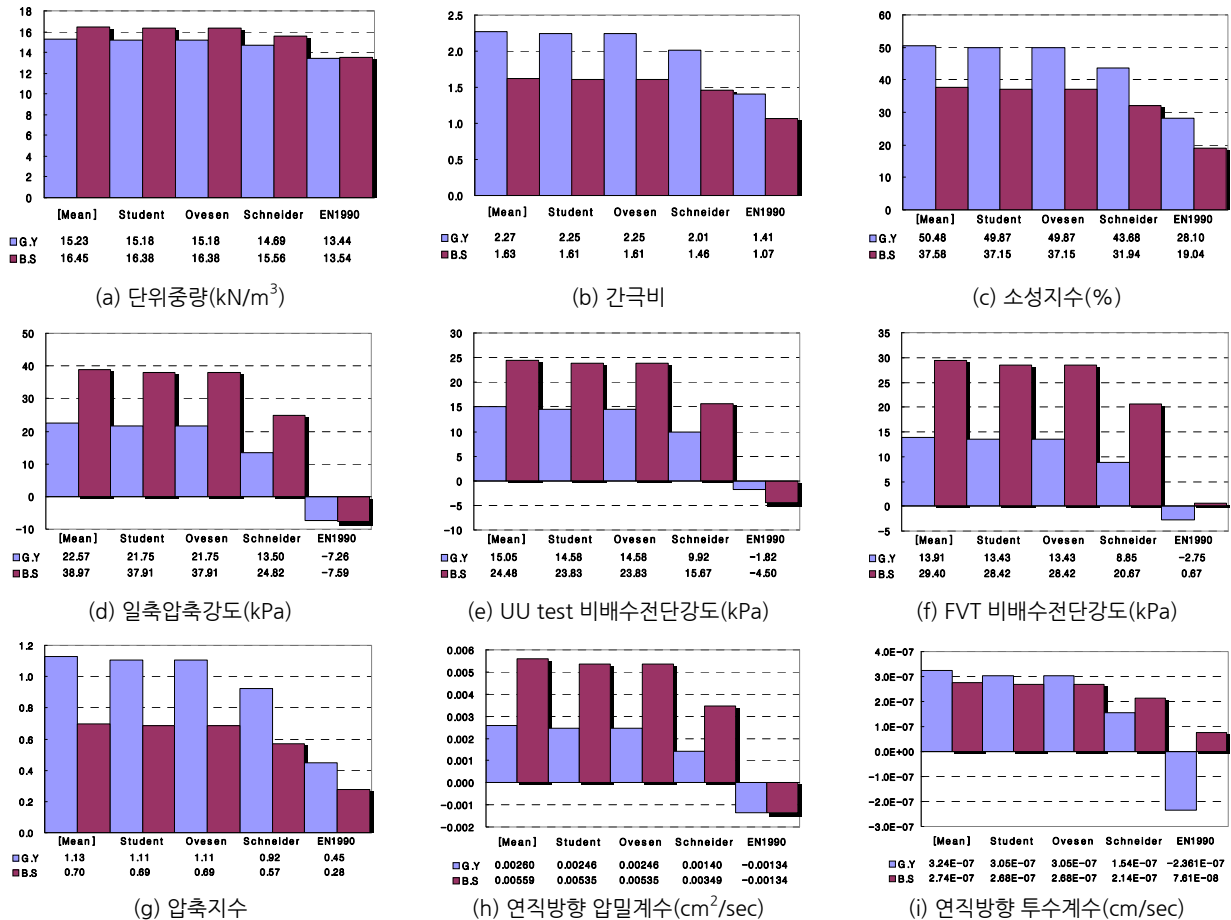


그림 5 국내 해양지반 대표적인 지반 특성값 비교(Yoon 등, 2010)

표 2 극한한계상태에 대한 부분재료계수(Orr and Farrell, 1999)

Parameter	Factor	Case A	Case B	Case C	Case C2	Case C3
$\tan\phi'$	$\gamma_{\tan\phi'}$	1.10	1.00	1.25	1.00	1.20
Effective cohesion, $c'$	$\gamma_c$	1.30	1.00	1.60(1.25)	1.00	1.20
Undrained shear strength, $c_u$	$\gamma_{c_u}$	1.20	1.00	1.40	1.00	1.40
Compressive strength, $q_u$	$\gamma_{q_u}$	1.20	1.00	1.40	1.00	1.40
Pressuremeter limit pressure, $p_{lim}$	$\gamma_{p_{lim}}$	1.40	1.00	1.40	1.00	1.40
CPT resistance	$\gamma_{CPT}$	1.40	1.00	1.40	1.00	1.40
Unit weight of ground, $\gamma$	$\gamma_g$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Values in bold are partial factors either given or implied in the ENV version of EC7.

Values in italics are proposed partial factors not in the ENV that may be in the EN version.

특성, 강도특성 및 압밀특성에 해당하는 지반 특성값 산정결과 중 일부를 그림 5에 나타내었다.

검토한 4가지 특성값 산정방법 중 Student에 의한 방법이 평균값에 가장 근접하였고, Student 방법과 Ovesen 방법 간 차이는 거의 발생하지 않았다. 본 사례의 경우 시험자료의 수가 광양 1,259개, 부산 1,897개 이상으로 충분하여 식 (7)에서의  $t$ 값이 95% 신뢰수준에서 1.645에 수렴하게 되고, 이에 따라 Ovesen (1995)과 Student(1905)의 제안식이 같아지는데 기인한다. 반면, EN 1990에 의한 방법은 모집단의 분산도에 따라 다르나 대체로 평균값과 비교하여 매우 작은 값을 나타내며, 특히 변동계수가 큰 시험의 경우 0보다 작은 값이 산정되었다.

### 4.3 설계 시 지반 특성값의 영향

각 제안방법에 따라 산정된 특성값과 산술평균값을 이용하여 실제 해성점토 기초지반의 지지력 및 침하 설계 시 미치는 영향 정도를 파악하였다. 이를 위하여 유로코드에 제안된 부분계수(재료계수)를 적용하여 설계값을 결정하고, 임의의 방과제 하중이 작용하는 광양 및 부산의 해성점토 지반에 대하여 지지력과 침하량을 비교하였다.

유로코드의 재료계수 접근방법(Material Factor Approach: MFA)에서 지반정수의 설계값( $X_d$ )은 식 (10)과 같이 특성값( $X_k$ )을 적절한 부분계수( $\gamma_m$ )로 나누어 줌으로써 얻어진다. 여기서, 부분계수는 추론값의 변동성과 특성값에 대한 신뢰성을 고려하여 결정된다. 표 2는 유로코드 7에서 제시하고 있는 극한한계상태의 부분계수중 부분재료계수만을 나타낸 것이다.

$$X_d = X_k / \gamma_m \quad (10)$$

Case A는 주로 구조물과 지반의 강도가 불충분한 경우에

불리한 변동하중과 유리한 영구하중의 불확실성을 다루며, 부력, 수리학적 파괴 및 구조물의 전도 등 큰 침하와 관련되는 문제에 대하여 안전한 지반공학적 크기결정과 구조계산을 제공함이 목적이다. Case B는 주로 하중의 불확실성을 다루며, 대개 기초와 옹벽 등 부재의 구조설계에 중요하다. Case C는 주로 재료성질의 불확실성을 다루며, 지반성질의 부분계수가 1.0보다 큰 MFA 방법으로서 대개 기초의 크기와 옹벽의 근입깊이 등 지반 내에서 부재 크기의 결정에 중요하다.

본 사례에서는 표 2의 극한한계상태의 부분계수 중 Case A를 고려하였으며, 제안되어 있지 않은 파라미터의 부분계수는 1.0으로 간주하였다. 한편, 앞서 산정된 특성값 결과 중 샘플 수가 비교적 많아 Student 방법과 차이가 크지 않은 Ovesen 방법과 0보다 작은 값이 산정되어 지반공학적 설계에 부적합한 EN 1990 방법에 의한 특성값은 제외하였다. 지반의 지지력 및 침하량 계산을 위한 광양 및 부산지역의 주요 설계값은 표 3과 같다.

지지력과 침하량 검토를 위해 가정된 하중은 해성점토로 이루어진 기초 지반 상에 흔히 계획되는 사석방파제 자중조건으로 고려하였다. 해상 구조물은 대개 모래다짐말뚝이나 지반개량 공법 등을 이용하여 지반을 처리한 후 시공됨이 일반적이지만, 여기서는 지반정수의 평균값과 특성값 산정 방법별 원지반 해성점토의 강도 및 압축특성에 미치는 영향을 살펴보기 위함이므로 미개량 시 지지력과 침하량을 산정·비교하였다. 검토를 위해 결정된 임의의 단면조건은 그림 6과 같다.

지지력 및 침하량의 계산은 항만 및 어항 설계기준에 제안된 방법 중 실무에서 가장 많이 이용되는 식을 채택하였다. 지지력 계산 시 안전율은 1.5를 적용하였으며, 단위면적당 작용하중( $Q$ )에 대한 허용지지력( $q_u$ )의 비( $q_u/Q$ )를 이용하여 허용지지력 산정결과를 그림 7과 같이 비교하였다. 각각의 계산결과를 평균값을 적용한 경우와 비교 시, Student 방법에 의한  $q_u/Q$ 는 평균값의 97~98%에 달하여 크 차이가 비교적 작은 반면, Schneider

표 3 주요 설계치 선정결과(Yoon 등, 2010)

Parameter	Area	Mean	Student	Schneider
$e$	Gwangyang	2.27	2.25	2.01
	Busan	1.63	1.61	1.46
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gwangyang	15.23	15.18	14.69
	Busan	16.45	16.38	15.56
$G_s$	Gwangyang	2.71	2.71	2.70
	Busan	2.70	2.69	2.68
$q_u$ (kPa)	Gwangyang	18.81	18.13	11.25
	Busan	32.48	31.59	20.68
$c_{UV}$ (kPa)	Gwangyang	12.54	12.15	8.27
	Busan	20.40	19.86	13.06
$C_c$	Gwangyang	1.13	1.11	0.92
	Busan	0.70	0.69	0.57
$c_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	Gwangyang	0.00260	0.00246	0.00140
	Busan	0.00559	0.00535	0.00349

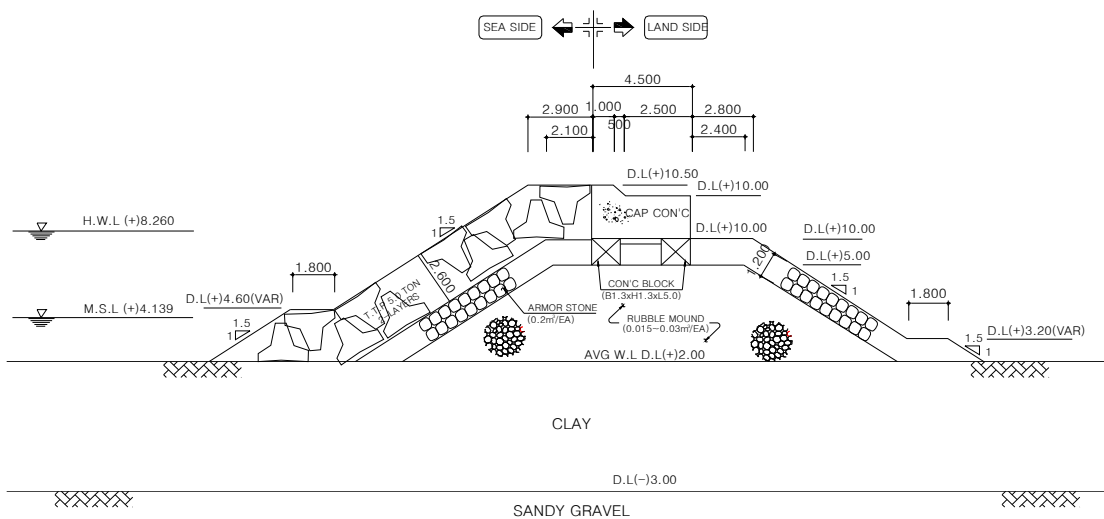


그림 6 지반 및 하중조건(Yoon 등, 2010)

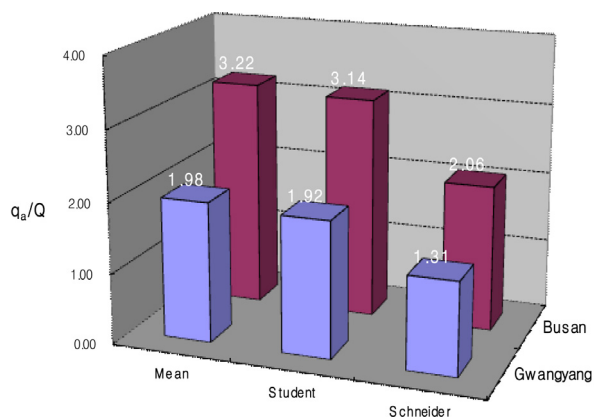


그림 7 설계치에 따른  $q_u/Q$ 의 비교(Yoon 등, 2010)

방법에 의한 값은 평균값의 64~66% 수준으로 평가되어 그 차이가 매우 커지는 것을 알 수 있다.

시간경과에 따른 최종압밀침하량과 잔류침하량 변화를 그림 8과 9에 나타내었다. 압축지수와 초기간극비가 주요 변수가 되는 최종압밀침하량은 광양지역의 경우 각각 1.821m(평균값), 1.803m(Student 특성값) 및 1.617m(Schneider 특성값)로 계산되어 Student 방법과 평균값 적용 시 결과가 거의 차이가 없는 반면, Schneider 방법은 평균값 대비 약 0.2m(12.6%) 작게 평가되었다. 부산지역에서의 최종압밀침하량 역시 1.40m(평균값), 1.396(Student 특성값) 및 1.222m(Schneider 특성값)로 산정되어 동일한 경향을 나타내었다.



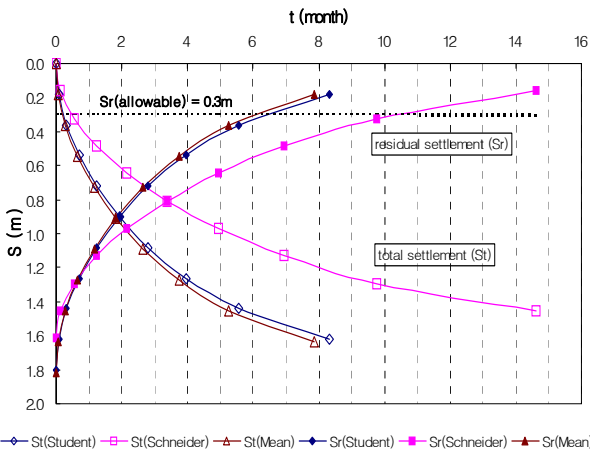


그림 8 광양점토 시간경과에 따른 총침하량과 잔류침하량 분포(Yoon 등, 2010)

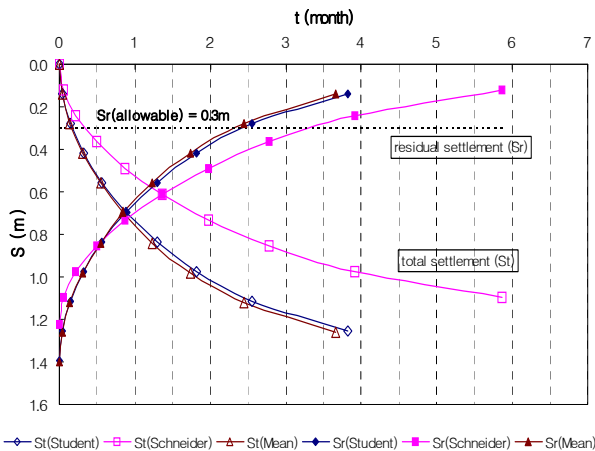


그림 9 부산점토 시간경과에 따른 총침하량과 잔류침하량 분포(Yoon 등, 2010)

### 5. 맺음말


본 고에서는 토질의 다양한 불확실성 요소와 지반공학 분야에서 사용되고 있는 변동성 추정방법 및 지반 특성값 산정방법을 소개하였다. 그리고 간단한 예제를 통하여 지반 특성값이 지반 구조물 설계에 미치는 영향을 정량적으로 확인하였다. 제시한 바와 같이 다양한 지반의 변동성 및 특성값 산정방법이 존재하고, 지반 특성값이 설계에 미치는 영향 또한 적지 않음을 알 수 있다. 이러한 점에서 설계 시 신뢰성에 기반한 지반구조물의 안정성 평가를 위해 설계지반정수의 합리적인 결정과 토질의 공간적 변이성을 포함한 지반의 불확실성에 대한 충분한 이해가 필요하며, 이를 토대로 변동성을 정량화하고 지반 특성값을 신중히 결정하여야

한다.

지반공학적 불확실성을 통계적으로 정량화할 때, 시험자료가 불충분한 경우 변동성이 매우 크게 되어 구조물의 비경제적인 설계가 발생할 수 있으므로 기본적으로 가능한 보다 많은 데이터를 확보하는 것이 유리하고, 모든 데이터는 필터링의 과정을 거쳐 신뢰수준이 높은 지반 특성값이 채택되도록 하여야 한다.

### 6. 참고문헌

1. 윤길림 (2000), “지반조사시 토질의 불확실성 분석”, 새로운 지반조사 및 평가 분석기술, 한국건설기술연구원 국제심포지엄 논문집, pp.101-130.
2. Akira Asoake and Dimitri A-Grivas (1982), “Spatial Variability of The Undrained Strength of Clays”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, pp.743-754.
3. Baecher, G., (1982), “Statistical Methods in Site characterization”, Proceedings of Engineering Foundation Conference on Updating Subsurface Sampling and testing, Santa barbara, USA, pp.463-491.
4. Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003), Reliability and Statistical in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons Ltd.
5. Bond, A. and Harris, A. (2008), Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis, London and New York.
6. Chiasson, Paul, Jean Lafleur, Michel Soulie, and K. Tim Law, (1995), “Characterizing spatial variability of a clay by Geostatistics”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32.
7. 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.
8. 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.
9. Ovesen, N.K., (1995), Eurocode 7 for geotechnical design. Proceedings of Bengt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering, Singapore, 1.
10. Ravi, V., (1992), “Statistical modelling of spatial variability of undrained strength”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29.
11. Schneider, H.R., 1997. Definition and determination of characteristic soil properties. Proceedings of XII International Con-

- ference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hamburg, Balkema, Rotterdam, 1.
12. Student, 1908. The probable error of a mean. *Biometrika*, 6.
  13. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967) *Soil mechanics in engineering practice* (2nd edition), John Wiley & Sons, Inc, pp.729.
  14. Trevor L.L. Orr and Eric R. Farrell(1999), *Geotechnical Design to Eurocode 7*, Springer
  15. Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., and Ye, K. (2007), *Probability & Statistics for Engineering & Scientists*, Eighth edition, Pearson Prentice Hall.
  16. 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.
  17. Wu and El-Jandali (1985), "Use of Time Series in Geotechnical Data Analysis", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 8, No.4, pp.151-158.
  18. Yoon, Gil Lim, Yoon, Yeo Won and Kim, Hong Yeon (2010), "Determination of geotechnical characteristic values of marine clay", *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 4, No. 4, pp.51-61. 

[섭외: 이진학 편집위원]