

지반조사결과에서 설계변수의 결정문제

-지반특성치 산정을 중심으로-

Determination of Design Parameters from Ground Investigation Results

-Focus on geotechnical characteristic values-

윤길립¹⁾, Gil-Lim Yoon, 윤여원²⁾, Yeo-Won Yoon, 김홍연³⁾, Hong-Yeon Kim

¹⁾ 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원, Principal Researcher, Costal Engineering & Ocean Energy Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute(KORDI)

²⁾ 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

³⁾ 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 연구원(인하대학교 박사과정), Researcher, Costal Engineering & Ocean Energy Research Dept., KORDI

SYNOPSIS : Geotechnical limit state design methods; LRFD of North America is an approach that estimates resistance using design model and then multiplies resistance factor by calculated resistance to reflect the uncertainty of geomaterials and design models; whereas, Eurocode of the Europe employs the partial resistance factor applied directly to each variable in the resistance equation that individual soil properties such as cohesion and angle of internal friction are applied. This discussion paper is a study on characteristic value which has globally been argued through processing of development of Eurocode 7 for geotechnical design even to the present. Estimating the characteristic value of soil properties affects not only determination of design value applied directly to design of geotechnical structures, but also economic feasibility and stability of the structures.

Key words : LRFD, Eurocode, Limit state design, Characteristic value, Reliability design

1. 서 론

북미의 LRFD 및 유럽의 Eurocode를 중심으로 최근 일본 및 중국 등 동북아시아 국가에서도 한계상태이론(limit state theory) 및 성능설계이론(performance based design theory)에 기초한 신 개념의 설계기준이 연구개발되고 있다. 이러한 추세는 과거 오랫동안 사용되어온 허용응력설계법이 설계변수로 산술평균치 또는 설계자 의도에 입각한 대표치를 채택한데 반하여 지반의 불확실성(uncertainty)을 설계에 고려함으로써 보다 합리적이고 안정성 및 경제성 측면에서 최적화된 기준을 수립하는 방법이 국제적인 흐름이라 할 수 있다. 구조공학 분야를 선두로 개발된 북미의 LRFD 설계법은 설계모델에 의해 저항을 계산하고 재료와 설계모델의 불확실성을 반영하기 위하여 계산된 저항에 저항계수(resistance factor)를 곱해주는 방식이다. 반면, 유럽의 Eurocode는 점착력이나 내부마찰각과 같은 각각의 토질강도 특성치(characteristic value)에 부분계수가 적용되는 저항식에서 각 변수에 직접 가해지는 부분저항계수(partial safty factor)를 채택하고 있다. 본 토론논문에서는 지반공학 설계를 위한 Eurocode 7이 개발되는 과정에서 현재까지도 논란이 되고 있는 토질의 특성치 결정에 대한 문제를 한국의 토질을 대상으로 토론해논란의 대상인 지반 특성치 산정이 지반구조물 설계에 직접 적용되는 설계치(design value) 결정에 영향을 미치며, 설계결과에 뒤따르는 경제성 및 안정성을 좌우하는 중요한 절차 중 하나

이므로 매우 신중을 기해야 하기 때문이다.

2. 지반의 불확실성과 특성치 문제

지반공학에서는 흙의 성질을 균질한 층으로 모델화 하는 것이 일반적이다. 결정론적 개념의 토질 단면에서 층의 심도와 성질은 대개 편차가 없는 단일 값으로 대표된다. 그러므로 흙이 수평 및 연직방향에서 공간적 변동성 없이 국부적으로 균질함을 의미한다. 그러나 실제로 흙의 퇴적은 위치에 따라 그 성질이 매우 다양하게 변화한다. 일반적으로 확률론적 개념의 토질 단면에서 흙의 성질은 심도에 따라 변하는 무작위 변수(random variable)로 취급된다. 토질 불확실성의 주된 원인은 고유변동성(inherent variability), 측정오차(measurement error) 및 변환 불확실성(transformation uncertainty) 등으로 알려져 있다. 첫째, 고유변동성은 원위치에서 생성되는 흙의 자연적, 지질학적 과정에서 발생된다. 둘째, 측정오차는 장비, 운용자의 절차 및 무작위 샘플링에 의한 시험의 영향에서 기인한다. 이 두 가지는 자료의 분산(data scatter)으로 표현된다. 원위치에서의 측정은 또한 제한된 정보에서 발생되는 샘플링 오차 또는 통계학적 불확실성에 의해 영향을 받는다. 이러한 불확실성은 더 많은 샘플을 얻음에 의해 최소화할 수 있으나, 여기서는 대개 측정오차를 포함하게 된다. 셋째, 변환 불확실성은 현장이나 실내시험이 경험적 또는 다른 상관모델에 의해 흙의 설계특성으로 변환될 때 발생한다.

3. 지반 설계변수의 결정과정

지반공학적 구조계산에 사용하기 위한 설계변수 값은 보통 설계자에 의해 결정된다. 그러나 어떻게 설계변수가 선정되는지, 그리고 측정된 설계변수를 얼마나 보수적으로 적용해야 하는지는 설계기준이나 규정에 거의 논의되지 않고 있다. 이는 Eurocode에서 설계치를 계산하기 위한 부분계수(partial factor)와 특성치의 결정이 매우 중요함을 의미할 뿐 아니라 특성치 산정방법이 쉽게 정의되기 어렵다는 사실을 단편적으로 나타낸다고 할 수 있다. Eurocode 7에서는 지반공학적 설계변수의 설계치를 얻기 위한 과정으로 측정치(measured value), 추론치(derived value), 특성치(characteristic value) 및 설계치(design value)의 4가지 단계의 값을 언급하고 있다. 이러한 값들의 기본적인 개념을 도시화하면 그림 1과 같다.

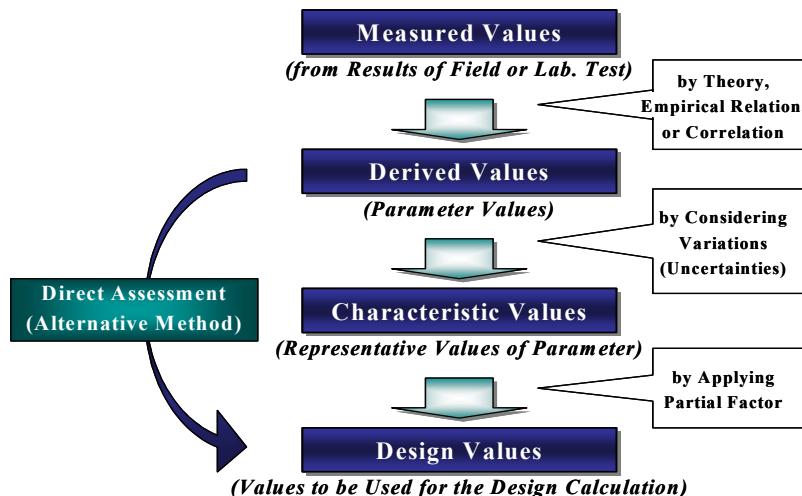


그림 1. 설계치 결정을 위한 절차 (Orr 등, 1999)

3.1 측정치(Measured Value)

측정치는 다양한 종류의 실내 및 원위치시험으로부터 측정된 값이다. 측정치의 예로써 지하수위, 표준

관입시험(SPT)의 N치 및 삼축압축시험에서 측정된 응력과 변형률 등이 있다.

3.2 추론치(Derived Value)

추론치는 이론 또는 경험적·통계적 상관관계에 기초하여 측정치로부터 산정된 지반재료의 특성을 나타내는 값이다. 추론치는 특성치의 선정을 위한 기틀을 제공한다. 추론치의 예로써 Mohr-Coulomb 이론을 이용하여 삼축압축시험에서 얻은 비배수 점착력 c' 및 유효마찰각 ϕ' 값, torque 이론을 이용하여 현장법인시험에서 추론된 비배수 전단강도 C_u 값, 그리고 경험적 상관관계를 이용하여 SPT 타격치로부터 얻어진 ϕ' , 변형계수 E 및 모래의 상대밀도 등이 있다.

3.3 특성치(Characteristic Value)

특성치는 설계상 구조물-기초-지반시스템에 근거한 문제에서 한계상태의 발생을 예측하기 위해 가장 타당한 값으로써 평가되는 대표치이다. 원칙적으로 특성치는 추론치의 평균에 대하여 신중하게 평가된 값이다. 여기서 평균치는 직접적인 산술평균을 의미하는 것이 아니라 평균치를 얻고자 할 때 통계학적 평가오류(statistical estimation error)가 고려되어야 한다는 것이다. 또한 평균치의 이러한 신중한 평가는 지질학적·지반공학적 이론, 유사현장의 경험뿐 아니라 가능하다면 일부 다른 결과에 근거한 값의 일관성 및 교차검증을 고려한다.

3.4 설계치(Design Value)

설계치는 구조계산에 사용되는 설계변수의 값이다. 보통 설계치는 특성치에 부분계수를 곱함으로써 결정된 값이다.

4. 지반공학적 특성치의 결정

지반공학적 정수나 파라미터의 지표적인(characteristic) 수치는 설계목적으로 이용되는 특성치에 대한 지반 파라미터의 확률밀도함수(probability density function) 평균치의 비로써, 편향계수(bias factor) k_r 값에 의해 정의할 수 있다. 그럼 2는 특성치를 도식적으로 정의하고 있다. $k_r=1.0$ 일 때 특성치는 확률밀도함수의 평균치와 같게된다. 지반 파라미터의 특성치는 일반적으로 한계상태의 발생에 영향을 끼치는 값을 주의깊게 산정한 결과이다. 또는 통계학적 개념을 도입하여 한계상태의 발생을 지배하는 가장 불리한 값의 확률이 5%를 넘지않는 값으로써 정의하기도 한다. 따라서 특성치는 실제 설계가 수행될 때 특정한 한계상태와 지반의 불확실성 조건을 고려하여 선정되어야 한다.

특성치의 통계학적 정의는 현장 토질정수의 평균치와 연관되며, 시험결과에서 얻어진 추론치가 5% 신뢰수준이 아닌, 한계상태의 발생에 영향을 미치는 값이다. 다시 말해, 특성치는 채택된 특성치 보다 현재의 평균치 $\mu(X)$ 가 크게되는 95% 신뢰수준에 해당된다. 현재의 평균치 $\mu(X)$ 가 이 값보다 크게 되는 95% 신뢰수준에 해당하는 토질상수의 특성치 X_k 는 통계이론을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_k = \mu(X)[1 - k_r \cdot V(X)] \quad (1)$$

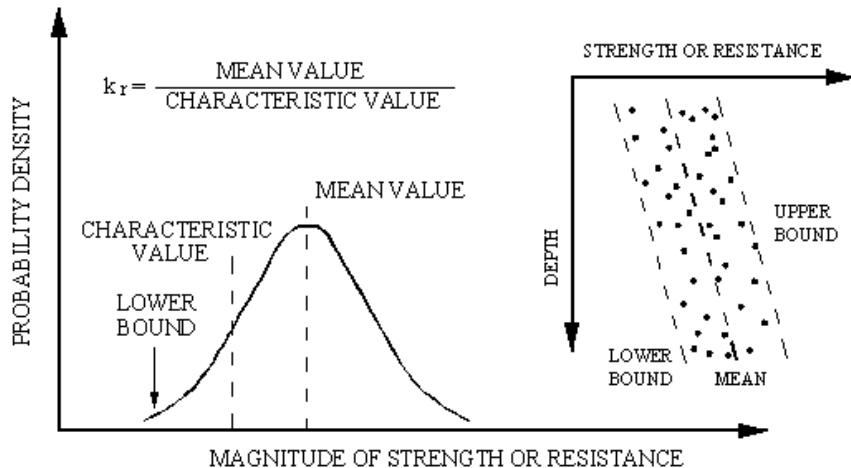


그림 2. 특성치의 정의 (Becker, 2006)

여기서, k_r 은 통계적 확률분포와 시험결과의 수량에 의존하는 계수(factor)이고, $V(X)$ 는 변동계수(표준 편차/평균치)이다. EN 1990에서는 특성치를 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, 5% 신뢰수준 개념으로 정의해야 한다고 언급하고 있다. 이러한 조건을 정규분포로 가정하여 특성치를 다음과 같이 나타내고 있다.

$$X_k = \mu(X) - 1.645\sigma(X) = \mu(X)[1 - 1.645 V(X)] \quad (2)$$

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

상기 언급한 EN 1990의 특성치 정의와 식은 구조재료와 관련되는 설계에 대하여 적합한 반면, 지반 공학적 설계에는 적절치 못하다. 그러한 주된 이유는 지반공학적 파라미터를 좌우하는 변수의 특성 때문이다. 예를 들어, 지반내에서 파괴는 어느 한 개별적 시험요소의 강도가 아니라 파괴면에 대한 평균강도이다. 따라서, 그것은 시험결과의 5% 신뢰수준이 아닌 평균강도의 95% 신뢰값에 해당하는 요구된 파괴면을 따라 일어나는 평균강도의 5% 신뢰수준이다. 또 다른 이유는 일반적으로 지반공학적 설계에서 단지 제한된 수량의 시험결과만이 적용하므로 통계적으로 주의가 요구된다는 것이다.

Student(1908)는 평균치의 95% 신뢰에 대하여 다음과 같이 제안하였다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{t}{\sqrt{N}}\sigma(X) \quad (3)$$

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 (4)는 식 (3)에서 시험결과 수량 N 이 무수히 많은 경우의 파라미터 t 를 적용한 결과이다.

$$X_k = \mu(X) - \frac{1.645}{\sqrt{N}}\sigma(X) \quad (4)$$

한편, Schneider(1997)는 식 (4)를 보다 더 단순화하여 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$X_k = \mu(X) - 0.5\sigma(X) \quad (5)$$

Schneider는 비교연구에 의하여 $k_n=0.5$ 즉, 식 (4)에서 시험결과의 수량 N이 11일 때 X_k 에 대한 양호한 근사치가 산정됨을 보였다. 식 (5)는 특성치가 평균치에서 표준편차의 50%만큼 작게 채택되는 경우를 의미한다. 상기 제안된 방법들은 보다 합리적인 특성치의 산정을 위하여 여러 연구자에 의해 제안되었으나 방법에 따라 설계의 결과가 다소 경제적이기도, 다른 한편으로는 보수적이기도 하여 특정 방법의 적용성을 논리적으로 합당화하기에는 어려움이 있는 것이 현실이다.

5. 국내 토질의 특성치 산정

EN 1990, Student(1908), Ovesen(1995) 및 Schneider(1997) 등에 의해 제안된 특성치 산정방법을 이용하여 국내의 주요한 해양토질 특성치를 산정하고 분석하였다. 토질 설계변수를 강도특성 및 압밀특성으로 구분하고 그 평균치 및 각 산정방법들 사이의 상호관계를 나타내었다.

5.1 연약지반 강도정수의 특성치 결정

국내의 부산 및 광양지역으로부터 수집, 통계 처리된 시험자료를 이용하여 강도 특성에 대한 파라미터의 특성치를 계산하고 비교한 결과를 표 1에 정리하였다. 특성치 산정방법 중 Student 및 Ovesen에 의한 방법이 가장 평균치와 근사하여 경제적이며, 부산지역의 강도증가율은 그 변동계수가 매우 작아 평균치에 거의 근접하는 것으로 나타났다. 다음으로 Schneider 및 EN 1990에 의한 방법 순으로 평균치를 기준으로 매우 보수적인 값이 산정되었으며, 특히 EN 1990에 의한 방법은 변동계수가 큰 시험의 경우 0보다 작은 값이 산정되었다.

표 1. 연약지반 강도정수 특성치 비교

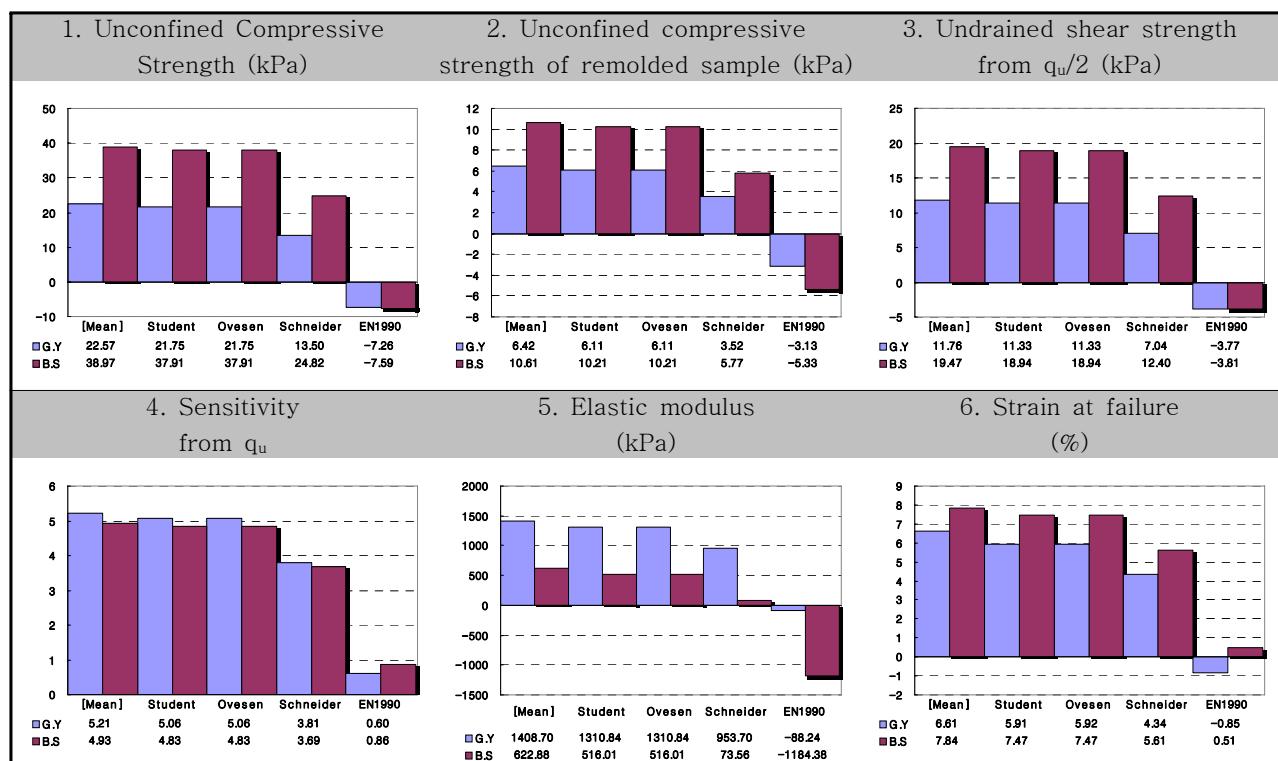


표 1. 연약지반의 강도정수의 특성치 비교(계속)



5.2 연약지반의 압밀정수의 특성치 결정

연약지반에 구조물을 설계시공하는 경우에 원지반의 압밀특성에 관련된 설계변수를 결정하여야 한다. 본 연구에서 사용한 연약한 해성점토지반인 부산항과 광양항의 지반조사결과를 활용하여 압밀특성치를 산정하였다. 원지반의 특성은 대체로 부산지역에 비해 광양지역의 변동성이 다소 큰 경향이 있다. 4가지 특성치 산정방법으로 산정한 특성치를 표 2에 나타냈다. 강도특성과 마찬가지로 Student에 의한 방법이 가장 평균치와 근접하여 경제적인 것으로 나타났으며, Schneider와 EN 1990 순으로 보수적인 값을 나타내었다.

표 2. 압밀정수의 특성치 비교



6. 결론

- (1) 토질의 특성치 추정은 제안된 4가지 방법으로 추정한 결과 Student 및 Ovesen, Schneider, EN 1990의 제안방법 순으로 평균치와 근접하여 경제적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났다. EN 1990 방법의 경우에 특성치가 가장 작게 산정되고, 통계적 변동성에 따라 0보다 작은 값이 산정되어 지반공학의 설계치를 산정하는데 부적절한 것으로 나타났다.
- (2) 특성치 계산식이 유사한 Student와 Ovesen 방법을 비교해 보면, 시험자료의 수가 적은 경우 Ovesen의 방법이 다소 크게 산정되나 자료수가 많을수록 두 값은 일치하게 됨을 알 수 있다. 이는 Student 방법의 t값은 자료수가 증가함에 따라 감소하는데, 자료수가 커지면 커질수록 그 감소폭이 작아져 일정값에 수렴하는 경향이 있기 때문이다. Ovesen 방법은 N=11일 때 Schneider 방법과 동일식이 되어 같은 값이 산정되며, Schneider는 이때 특성치에 대하여 양호한 근사치가 산정된다고 하였다.
- (3) 특성치 산정에 제안된 모든 방법은 통계적 확률분포와 시험자료의 수에 따라 변하는 계수(k_n)를 표준편차에 곱한 일정비율의 변동성을 평균치에서 감하여 특성치를 산정하는 방식으로서, 평균치보다 항상 작게 산정되고 지반의 변동성이 커짐에 따라 특성치가 보수적으로 평가되는 경향이 있다. 특성치는 현행의 설계법에서 설계자가 불확실성의 고려없이 산술평균치를 설계치로 간주하거나 또는 하한경계(lower boundary)와 평균치 범위 내에서 개별적 경험 및 추정에 의해 임의로 산정해오던 대표치 산정방식을 통계학적 변동성을 토대로 보다 정량화하는데 기여하였다. 그러나 아직까지도 지반구조물의 안정성과 경제성 측면에서 설계를 최적화할 수 있는 합리적인 특성치 산정에 대한 명확한 방법이 규정되지 않고 있으므로 여러 가지 통계이론 및 경험에 근거한 더 많은 산정방법의 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 지반공학적 불확실성을 통계적으로 정량화할 때, 시험자료의 불충분으로 변동성이 매우 크게 평가되는 경우, 구조물의 비경제적인 설계가 발생될 수 있으므로 가능한 보다 많은 데이터를 확보하는 것이 유리하고 모든 데이터는 필터링의 과정을 거쳐 신뢰수준이 높은 평균치가 채택되어야 한다. Eurocode 7에서는 통계학적 방법을 이용하여 특성치를 결정할 경우에 비교 가능한 경험과 실제 설계여건을 고려하여 주의깊게 이용되어야 한다고 규정하고 있다. 한편, 시험결과와 평가된 값(a prior values)을 조합하여 보다 신뢰도 높은 평균과 표준편차를 얻을 수 있는 베이지안 기법(Bayesian approach) 등 다양한 통계학적 결정법을 통한 적절한 특성치의 채택은 매우 중요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 윤길립(2005), 차세대 항만설계 기술개발 (V), 한국해양연구원 연구보고서, 해양수산부.
2. 해양수산부(2005), 항만 및 어항 설계기준(상권).
3. Becker, D. E.(2006), "Limit State Design Based Codes for Geotechnical Aspects of Foundation in Canada", International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical Engineering Practice-Taipei 2006.
4. Poon, K. K. and Kulhawy, F. H.(1999), "Characterization of Geotechnical Variability", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36.
5. Orr, T. L. L. and Farrell, E. R.(1999), Geotechnical Design to Eurocode 7, Springer.