

해성점토의 강도특성에 대한 불확실성 분석

Uncertainty Analysis of Shear Strength Characteristics of Marine Soils

이강운¹⁾, Kang-Woon Lee, 채영수²⁾, Young-Su Chae, 윤길립³⁾, Gil-Lim Yoon 백세환⁴⁾, Sae-Hwan Bak

¹⁾ : (주)동성엔지니어링 상무, Senior Director, Dongsung Consultant Engineering

²⁾ : 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suwon

³⁾ : 한국해양연구원, 연안항만공학본부, 선임연구원, Senior Researcher, Coastal and Harbor Eng. Lab. KORDI,

⁴⁾ : (주) 도화지질 대표이사, President, Do-Wha Geotechnical Engineering Co. Ltd.

SYNOPSIS : Uncertainty study of shear strength characteristics of the marine clays was carried out based on in-situ tests and laboratory tests on the south-east coastal region of the Korean peninsula. Theoretical analyses were studied using both the spherical cavity expansion theory in finite soil mass and the strain path method to determine the cone factor using the undrained shear strengths obtained by in-situ tests, and the empirical methods in accordance with the ultimate resistance theory were also discussed. Analysis show that the empirical methods suggest more reasonable value than that of theoretical methods in terms of comparing the cone factor estimated using linear regression and frequency distribution analyses. The cone factors obtained by the empirical methods are 18, 15, and 6 respectively, from the results of total cone resistance, effective cone resistance, and excess porewater cone resistance method, and the estimated were similar to those of previous researcher's.

Key words : Cone factor, Spherical cavity expansion, Strain path method, Undrained shear Strength Empirical method, Linear regression, Frequency distribution

1. 서론

현재 국내에서 수행되고 있는 피조콘 관입시험에 의한 비배수 전단강도의 산정은 콘계수가 지역별, 위치별 및 깊이별로 다르기 때문에 실제 설계에 적절히 활용하기 위해서는 합리적인 기준값의 설정이 필요하다. 그러나 대부분의 설계 및 시공 기술자가 사용하고 있는 콘계수는 기존이론이나 경험치로 부터 외국의 사례를 근거로 추천된 값을 가정하여 사용하고 있으므로 이의 신뢰성은 낮은 편이다.

그 이유는 콘관입시 선단부의 파괴유형이 지반의 이방성과 비균질성, 주변지반의 변형, 간극수압의 변화 등에 따라 다르며 이러한 조건을 고려한 이론적인 지반모델링기법을 찾는 것이 쉽지 않다. 또한 지반자체의 응력이력과 지반특성, 소성지수, 예민비 그리고 강성지수 등을 정량적으로 산정하여 적용하는 것이 현실적으로 거의 불가능한 일이기 때문이다.

본 연구는 국내 동남해안 지역에서 실시된 원위치 지반조사 결과(시추조사/162개소, 불교란 시료채취를 통한 실내시험, 현장시험 그리고 심도별 연속적인 콘관입시험)를 직접 이용하여 이론적, 경험적 방법으로부터 그 결과를 다양한 분석기법을 통해 종합 분석하여 합리적인 콘계수를 추정하고, 그에 따른 불확실성을 평가하였다. 콘관입시험은 현재 국내에서 사용 빈도가 급증하고 있으며, 시험결과의 활용성이 커서 그 중요성에 의거 지역 대표값을 설정하여 실무에 적극 활용하는 방안이 필요한 상황이다 따라서 다양한 시험자료를 분석하여 한반도 동남해안 해성점토를 대표하는 콘계수를 산출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경험적 방법(말뚝의 극한저항이론)을 이용한 콘계수결정

흙의 점성과 관성효과를 무시한 유사정적단순파일로 가정하여 단순화한 말뚝관입개념의 콘관입계수(N_c)로 나타내면 식(1)과 같다.

$$N_c = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{S_u} \quad (1)$$

여기서 q_c 는 $\frac{P_c}{\pi R^2}$, P_c 는 콘선단저항값, q_c 는 총선단저항력, σ_{vo} 는 총수직응력, S_u 는 비배수전단강도이다. 위의 식(1)을 응용하여 경험적방법으로 콘계수를 추정하는 방법은 다음의 세가지 방법으로 구분되는데, 일반적으로 전응력개념의 선단저항치(total cone resistance)를 이용하여 콘의 총선단 지지력결과로부터 비배수 전단강도 S_u 를 추정하는 방법은 아래와 같다. 여기서, σ_{vo} 는 총수직응력이고, N_{kt} 는 전응력콘계수이다.

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (2)$$

또한, 간극수압측정을 위한 다공질 필터(porous filter)가 콘선단부(cone tip) 뒷면에서는 간극수압의 영향을 받기 때문에 부등단면적비를 고려해야 하는데, 수정된 선단저항력 q_t 는 다음 식(3)과 같다.

$$q_t = q_c + u_e(1-a) \quad (a = \text{부등단면적비} = \frac{A_n}{A_c}) \quad (3)$$

여기서, q_t 는 수정된 콘 관입저항치이고, u_e 는 간극수압 그리고 A_n 는 실제하중 전달면적이며, A_c 는 단면적이다. 또한 유효응력 개념의 선단저항치(effective cone resistance)를 이용한 방법은 콘관입저항치로부터 간극수압(콘선단부 바로 뒤에서 측정된 값(u_e))을 뺀 값으로 Campanella등(1982)에 따른 S_u 는 식(4)와 같다.

$$S_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_e)}{N_{ke}} \quad (4)$$

여기서 N_{ke} 는 유효응력 콘계수이다. 또한 초연약점토인 경우 비배수전단강도는 과잉간극수압으로 구하는 것이 보다 현실적일 수 있는데, 이때 S_u 는 과잉간극수압 Δu_o 로부터 구하는 방법으로서 다음 식(5)와 같다.

$$S_u = \frac{\Delta u_o}{N_{\Delta u}} \quad (5)$$

2.2 공동확장이론과 변형율경로이론을 이용한 콘계수결정

2.2.1 공동확장이론(Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass)

공동확장이론은 자중이 없는 균질하고 등방인 공동체에 대해 방사상으로 일정한 압력을 작용시킬 경우 내공이 확장하면서 발생하는 응력과 확장된 공동경을 일정한 평형방정식으로 나타낸 것으로 그 모식도는 그림 1.과 같으며 가정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + a \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (6)$$

여기서, r : 공동중심부터의 거리, σ_r : 반경방향응력, σ_θ : 접선방향응력, a : 상수(구형공동: 2, 원통형공동: 1)이며, 식(7)로부터 공동체의 극한압력방정식 나타내면 다음 식(7)과 같다.

$$P_u = c F_c + q F_q \quad (7)$$

여기서 P_u :극한압력, c :비배수전단강도, q :유효상재하중, F_c, F_q 는 확장계수이다. 이 이론에 근거한 제안자별 이론식은 다음 표 1.과 같다.

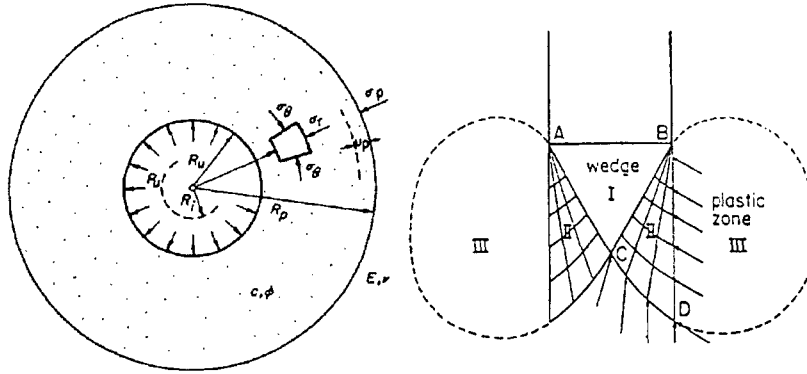


그림 1. 공동확장이론 및 모식도(Vesic, 1972, 1977)

표 1. 공동확장이론에 근거한 제안자별 콘계수 추정식

| 제안식 | 제안자 | 제안식 | 제안자 |
|---|--------------|--|-----------------------|
| $N_{kt} = \frac{4}{3} [1 + \ln(I_r)]$ | Vesic(1972) | $N_{kt} = 4.18 + 1.155 \ln \frac{\sqrt{3}}{2} I_r$ | Yu(1993), smooth cone |
| $N_{kt} = \frac{4}{3} [1 + \ln(I_r)] + 2.573$ | Vesic(1975) | $N_{kt} = 9.4 + 1.155 \ln \frac{\sqrt{3}}{2} I_r$ | Yu(1993), rough cone |
| $N_{kt} = [1 + \ln(I_r)] + 11$ | Baligh(1975) | $N_{\Delta u} = 4/3 \ln(I_r) + 0.67(3 A_f - 1)$ | Vesic(1972,1975) |

주) 여기서, A_f 는 파괴시 간극수압계수, $I_r = \frac{C_u}{S_u} = \frac{E_u}{3 S_u}$, $\sigma_c = \frac{\sigma_{vo} + 2 \sigma_{ho}}{3}$ 이다.

2.2.2 변형율경로법(Strain Path Method)

Baligh(1975)가 제안한 변형율경로법은 콘의 깊은관입(deep penetration)시 유발되는 관입저항력이 기본적으로 흙의 변형을 통해 나타나는 응력-구속(stress-controlled)문제가 아니라 변형율-구속(strain-controlled)문제에 기초한 방법이다. 그러나 Teh & Houlsby(1991)는 이 방법이 콘주변의 potential함수를 현실성이 떨어지게 가정한 바 이로부터 발생하는 응력의 불균형 문제를 해결코자 유한요소해석을 도입하였고, 그로부터 제반조건을 감안한 다음의 식(8)을 제안하였다.

$$N_{kt} = N_s \left(1.25 + \frac{I_r}{2000} \right) + 2.4 \alpha_f - 0.2 \alpha_s - 1.8 \Delta \quad (8)$$

여기서, α_f, α_s : 거칠기계수, $\Delta = \frac{\sigma_{vo} - \sigma_{ho}}{2 C_u}$, C_u : 비배수전단강도, $N_s = \frac{4}{3} [1 + \ln(I_r)]$ 이다.

또한 Baligh(1985)의 제안방법과 Whittle (1992)의 구성식을 조합하여 제안된 방정식은 다음 식(9)와 같다.

$$N_{kt} = [1.51 + 2 \ln(I_r)] \quad (9)$$

2.3 콘계수결정을 위한 자료분석방법

실험치에 대한 자료분석은 변수들간의 함수식으로 표현하는 회귀분석과 대표값 산정을 위한 도수분포곡선이 널리 적용된다. 또한 실험자료에 대한 공간적 분포특성을 파악하는 방법으로 지구통계학적 기법이 있다. 회귀분석(regression analysis)은 심도에 따른 실험자료를 분석할 경우 종속변수(실험자료)의 분석방법은 자료에 포함된 변수들 간의 연관 관계를 적절한 함수식으로 표현하는 기법으로서 모형식은 다음 식(10)과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

여기서, ε_i : i 번째 측정된 y 의 오차항 잔차, y_i : 종속변수, x_i : 회귀변수, β_0, β_1 : 상수이다. 또한, 실험치에 대한 대표값은 도수분포(frequency distribution)에 의해 그 특성을 파악할 수 있는데, 이것을 Quetelet curve라 하며 곡선식은 다음과 같다. 여기서, x : 변수, m : 평균, σ^2 : 분산값이다.

$$f(x) = \exp\left(\frac{-(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2} \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}\right) \quad (11)$$

한편 다변량통계학은 이격된 거리의 상관관계를 정량화할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 거리별 분산에 따른 경중율을 고려한 방법이 지구통계적 기법(geostatistics method)이다. 이런 방법은 위치에 따라 달라지는 자료에 대한 공간적인 분포, 즉 지역변수들의 척도를 variogram과 공분산값으로 대상구간에 대한 site model을 찾아내 자료가 없는 위치에서의 예측값을 variogram에서 구해진 상수를 통해 kriging 기법으로 구한다. 그 모델은 다음의 식(12)과 같다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum (g_i - g_{i+h})^2 \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (12)$$

$$Cov(h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_{2i} \cdot x_{1i} - m_{-h} \cdot m_{+h})^2 \quad (13)$$

여기서, $\gamma(h)$: 거리에 대한 variogram, N : 수량, h : 거리, g 와 x 는 측정값이며, m 은 평균치이다.

상기의 분석방법 중 본 연구는 실내의 시험 결과치가 심도별, 위치별, 시험방법에 따라 상호 일정한 관계성을 갖기 때문에 본 분석방법을 상호 비교하는 것이 타당하나 1차적으로 콘계수의 심도별 추이를 보기 위해서는 선형회귀 분석방법을 적용하였고, 대표값은 도수분포도를 이용하여 본 현장의 콘계수를 추정하였다.

3. 연구지역의 지반특성

본 연구는 남해안 OO지역에서 크게 3개의 지역으로 나누어 조사된 결과를 바탕으로 수행하였다.

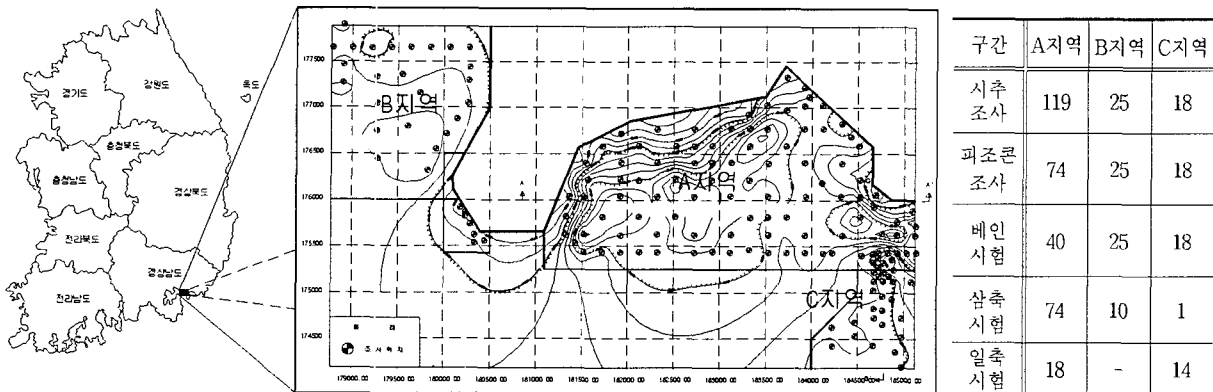


그림 2. 조사위치 및 조사수량

해성퇴적층은 40m이상의 두께로 분포하고 연경도에 따라 상·하부층으로 구분하였으며, 그 대표적인 분포 현황은 다음 그림 3과 같다.

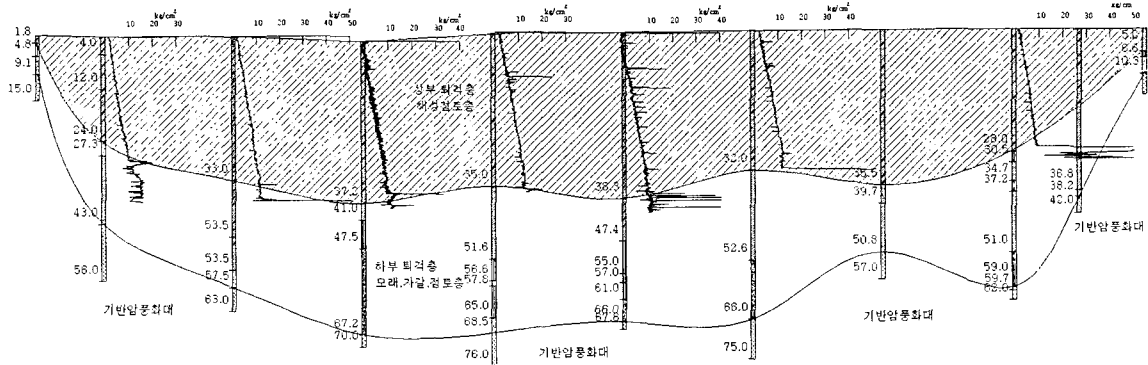


그림 3. 지층단면도

2개층으로 구분된 해성점토층의 consistency는 자연함수비가 대체로 액성한계를 초과하여 매우 연약한 상태로 소성지수는 20~50을 보이며, 액성한계와 점토함유율이 선형적으로 증가한다. 점토는 CL~CH로써 Illite가 주구성광물(활성도 0.75~1.25)이다. 비배수 전단강도는 심도에 따라 선형으로 증가하는 특성을 보인다.

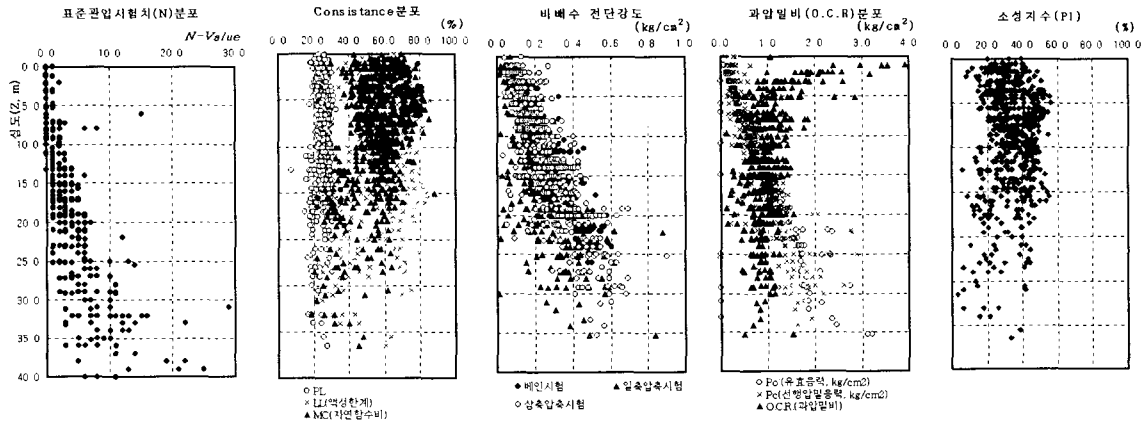


그림 4. 해성점토층의 물리·역학적 특성

4. 콘계수 산정

4.1 이론적방법(공동확장이론, 변형률경로법)을 이용한 콘계수산정

한계평형해석법을 적용한 Meyerhof(1961)의 산정방법은 가정조건이 현위치조건에 부적절하여 1972년 Vesic의 공동확장이론이 발표되면서 다양한 방법으로 콘관입해석 관련 연구가 이루어져 변형률경로법과 대변위 유한요소해석기법으로 발전해 왔고 이들 해석법의 주요소는 다음의 강성지수(I_r)이다.

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{3S_u} \quad (14)$$

여기서, G : 전단탄성계수, S_u : 비배수전단강도이다. 즉 강성지수(I_r)는 전단탄성계수와 비배수전단강도에 지배를 받게되므로 무엇보다 신뢰성있는 콘지수를 산정하기 위해서는 전단탄성계수의 결정이 중요하다. 이에 대해 Baligh 와 Lavadoux등(1980)은 각종 시험으로 부터 원통형 공동확장의 반경비와 변형율에 따른 전단계

수를 나타내었는데, 그의 실험결과에 따르면 전단계수는 시험종류와 방법, 변형율수준, 변형율 속도 그리고 응력경로에 따라 값의 편차가 큰 것으로 나타났으며, 관입시 콘주변에 형성되는 넓은 변형율 범위에 대해 하나의 상수로 결정하는 것은 쉬운 일이 아닌 것을 보여주었다. 따라서 연구자들은 대체로 변형계수로부터 전단탄성계수를 간접적으로 추정하는 방법을 활용하고 있으며, 본연구에서도 전단탄성계수를 직접 구하기에는 다소 무리가 따르므로 현위치 시험값과 실내시험 변형계수를 병행 사용하여 적용하였다. 강성지수 결정의 또 하나의 중요한 변수는 전단강도이며, Vesic(1972)에 따르면 강성지수는 연약한 점토로부터 Stiff한 점토에 따라 10 ~ 300 까지 넓은 범위로 분포하고 전단탄성계수와 비배수전단강도는 변형율속도와 시험법에 따라 배 이상의 차이가 난다고 주장하고 있다. 따라서 현위치조건에 부합된 강성지수의 정확한 도출을 위해서는 비배수전단강도(S_u)와 변형계수(E)의 신뢰성을 높여야 하는데, 이에 대해 심도별 선형 회귀분석방법으로 나타난 결과는 그림 5와 같다.

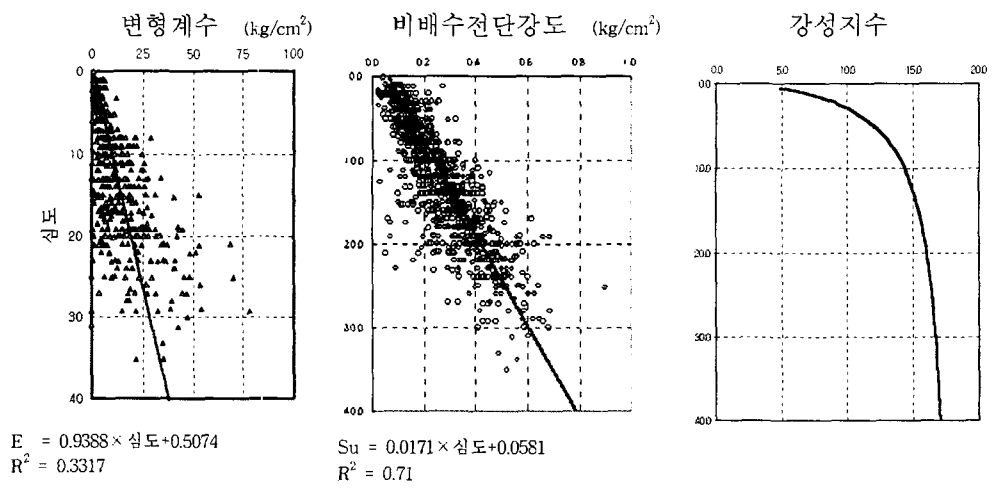


그림 5. 심도에 따른 변형계수와 비배수전단강도, 강성지수

상기 분석결과로부터 이론적방법으로 콘계수를 산정한 결과는 다음 그림 6과 같으며, 그 결과는 기존 제안 값에 비해 Baligh(1975)와 Yu(1993)-rough cone의 제안값을 제외하고는 대단히 낮게 나타났다.

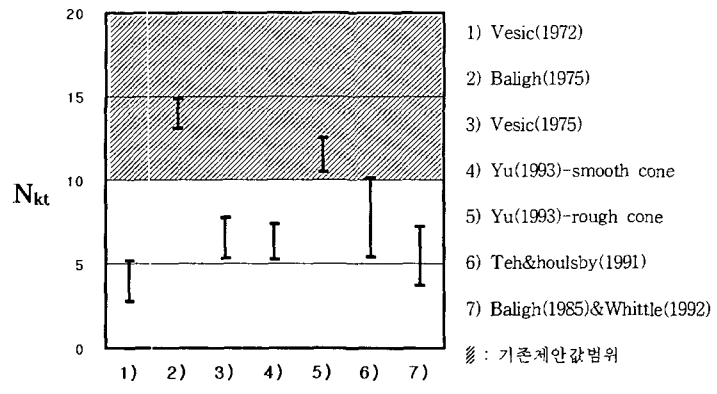


그림 6. 제안자별 콘계수 분포(N_{kt})

즉, 본 연구대상지역에서의 콘계수값은 일부를 제외하고 대체로 10이하의 값을 보이는데 이것은 낮은 강성지수(5~18)에 기인한다. 그러므로 이론적 방법에 의한 콘계수의 추정은 본 연구지역에서의 적용성에서 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 적용상의 문제가 있음에도 불구하고 이론적방법에 의한 콘계수의 추정은 국내외에서 지속적으로 연구 수행중에 있으며, 최근에는 Kirsten Luke(1995)의 공동확장해석과 Yu등(2000)의 유한요소해석에 의한 연구내용에 따르면 콘계수는 강성지수가 증가함에 따라 지수함수로 일정하게 증가하며 대체로 8~15 사이의 값을 나타내는 것으로 보이고 있다(그림 7, 8 참조).

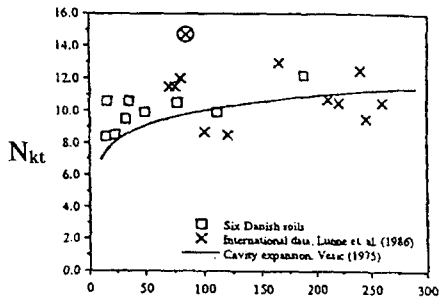


그림 7. Kirsten Luke의 콘계수와 강성지수의 관계

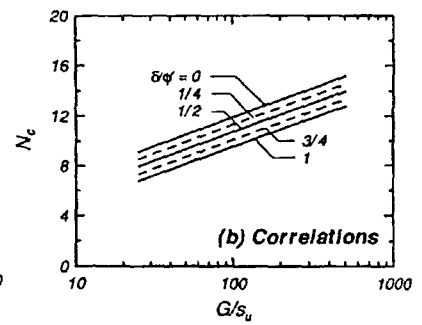
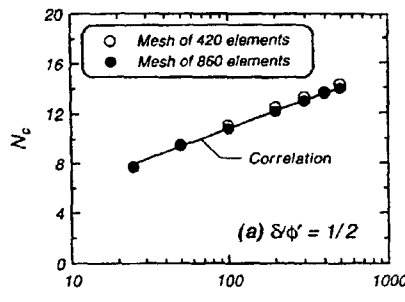


그림 8. Yu(2000)의 강성지수와 콘계수의 관계도

5.3 경험적 방법을 이용한 콘계수 추정

말뚝의 극한 지지력을 콘계수추정에 직접적으로 적용한 경험적 방법에 대한 연구는 약 20여년전부터 시작되었고, 현재까지 수많은 연구자들이 특정지역에 대한 연구결과로부터 지역 특성치를 밝히고 있는데, 최근 연구발표된 자료에 따르면 콘계수는 일정한 상수라기보다는 마찰과 강성지수의 함수관계로 나타내는 것이 타당하다고 밝히고 있다. 콘계수 추정을 위한 전단강도값은 회귀분석결과 vane시험과 삼축압축시험 결과값이 신뢰성이 높은 것으로 나타나 전단강도 분석값에 적용하여 콘계수값을 구하였으며, 심도별 콘계수의 분포현황과 통계분석결과는 다음 그림 9.와 같다.

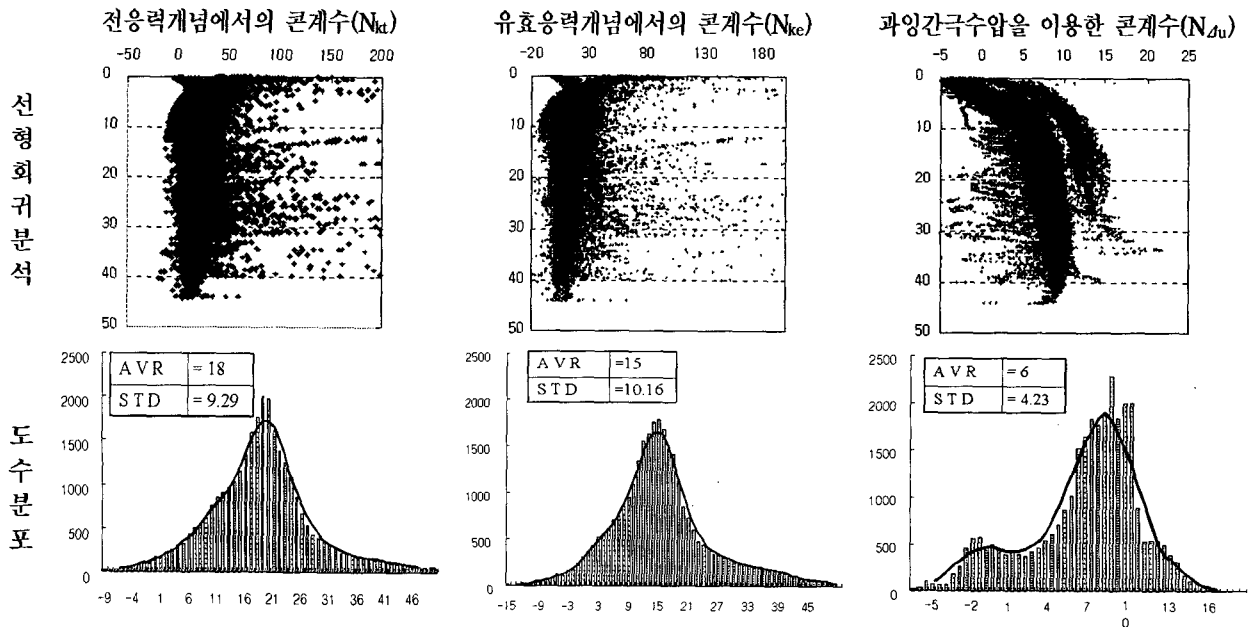


그림 9. 콘계수 분석결과

분석결과, 과잉간극수압을 이용한 콘계수를 제외하고는 심도와 무관하게 일정한 값을 형성하고 있으며, 이마저도 일부 음의 값을 갖기 때문에 일정한 함수 경향을 찾는 것은 어려운 것으로 나타났다. 따라서 도수분포로부터 빈도에 따른 대표성을 찾은 결과 도수분포는 대체로 정규분포의 경향을 보이므로 이의 평균값을 콘계수로 적용하였다. 그러나 큰편차로 지역 대표값으로 적용하기에는 다소 무리가 따르므로 심도별 지반조건(지층과 연경도)과 위치를 고려한 재분석이 필요하다. 따라서 보다 신뢰성있는 자료로 적용되기 위해서는 위치와 심도에 따른 변수를 고려한 대표값을 찾는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

표 2. 국내·외 콘계수 비교표

| 콘지수 | 제안자 | 제안값 | 비고 | |
|---|-----|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| N _{kt} | 금번 | 금번연구 | 18 | 한반도 남해안 해성점토층, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | 국내 | 이선재(1997) | 10~25 | 한반도 해안지역 점토층 13개 지역, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | | 정충기등(2000) | 14.1 | 한반도 해안지역 점토층 17개 지역, Vane시험 |
| | 국외 | Lunne&Laccase(1982) | 12~19 | 노르웨이 |
| Kjekstad등(1978) | | 17 | 북해, 과압밀된 점토지반, 삼축압축 시험 | |
| Robertson&Companella(1988) | | 15 | 예민한 점토(St = 8~16)지반 | |
| Duffin(1982)&Marstrand(1974) Konrad(1985)&Dobie(1988)등 | | 12~30 8~16 | 영국 런던 북부 지역 캐나다 벤쿠버, 동남아시아 | |
| N _{ke} | 금번 | 금번연구 | 15 | 남해안 해성점토층, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | 국내 | 이선재(1997) | 8~17 | 한반도 해안지역 점토층 13개 지역, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | | 정충기등(2000) | 13.5 | 한반도 해안지역 점토층 17개 지역, Vane시험 |
| N _{du} | 금번 | 금번연구 | 6 | 남해안 해성점토층, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | 국내 | 이선재(1997) | 2~5 | 한반도 해안지역 점토층 13개 지역, Vane시험, 삼축압축시험 |
| | | 정충기등(2000) | 3.8 | 한반도 해안지역 점토층 17개 지역, Vane시험 |
| | 국외 | La Rochell 등(1988) | 7~9 | Canadian Clay |
| Karlsruud 등(1996) | | 6~8 | 영국 런던 | |

5. 결론 및 향후 연구방향

1. 공동확장이론과 변형률경로법등의 이론적 방법으로 추정된 콘계수는 Baligh(1975)의 제안방법을 제외하고는 기존값의 범위인 10~20을 크게 못미치므로 대표값으로 적용하기에는 무리가 있는 것으로 나타났고, 경험적 방법은 다소 편차를 보이므로 대표값으로 추천하기에는 무리가 따르나 기존 제안치와 비교 검토한 결과 유사한 것으로 나타나므로 대표값으로 적용해도 무리가 없는 것으로 판단된다.
2. 선형회귀분석과 도수분포를 통해 경험적방법에 의해 산정된 콘계수는 전응력 해석법인 경우 N_{kt}=18이고, 유효선단저항에 의한 경우는 N_{ke}=15이며, 과잉 간극수압으로부터 추정된 경우는 N_{du}=6으로 나타났다. 따라서 본 현장 인근지역이나 본 현장 지반조건과 유사한 현장에서 피조콘 시험을 실시할 경우 콘계수는 각각 N_{kt}는 18, N_{ke}는 15, 는 N_{du}는 6을 적용할 것을 추천한다.
3. 향후 본 연구에 적용된 분석방법이 단순선형회귀분석과 도수분포로부터 콘계수를 추정하였는 바 위치별, 심도별 변수를 감안한 지구통계기법을 적용하여 보다 신뢰성 있는 자료를 얻고자 한다.

참고문헌

1. 이선재(1997), 피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구: 서울대학교 공학 석사학위논문.
2. 정충기등(2000), CPTu 및 SBPT를 이용한 점성토의 비배수전단강도 산정, 한국건설기술연구원 국제심포지엄 논문집, 새로운 지반조사 및 평가, 분석기술.
3. 윤길림(2000), 지반조사시 토질의 불확실성분석 새로운 지반조사 및 평가 분석기술, 한국건설기술연구원 국제심포지엄 논문집, pp.101~130.
4. Aleksandar Sedmak Vesic(1972), Expansion of Cavities in Infinte Soil Mass, Proceeding of the American Society of Civil Engineers.
5. Kirsten Lube(1985), The Use of Cu from Danish Triaxial Tests to Calculation the Cone Factor, Proceeding CPT '95, pp 209~214
6. Teh C.I. and G.T. Houlsby(1991), An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay, Geotechnique 41, No. 1, pp.17~34.
7. Yu H.S. and J.K. Mitchell(1998), Analysis of Cone Resistance: Review of Methods, J.Geotech and Geoenviron. Engrg., ASCE, 124(2), pp.140~149.