

유효콘계수를 이용한 포화점토의 비배수전단강도 평가

Estimation of Undrained Shear Strength for Clays Using Effective Cone Factor

김 창 동¹ Kim, Chang-Dong

김 수 일² Kim, Soo-Il

이 준 환³ Lee, Jun-Hwan

Abstract

In this study, a new method for estimating the undrained shear strength s_u of saturated clays using piezocone penetration test (CPTu) result is proposed. This is to develop more effective CPTu-based s_u estimation method at lower cost with less uncertainty. For this purpose, a marine clay deposit is selected and tested through extensive experimental testing program including both in-situ and fundamental laboratory tests. The proposed method is based on a correlation between the undrained shear strength s_u and the cone resistance q_t , without introduction of the total overburden stress into the s_u - q_t correlation. As a result, no additional testing procedure for collecting undisturbed soils samples is required, which can reduce overall testing cost. To verify the proposed method, 4 test sites, which consist of a variety of soil conditions, are selected and used for comparison between measured and predicted undrained shear strength. From comparison, it is seen that predicted values of s_u using the proposed method match well those from measured results.

요 지

본 연구는 피에조콘관입시험(CPTu) 결과를 이용한 점토의 비배수전단강도 평가에 관한 것으로서, CPTu 시험결과로부터 발생할 수 있는 불확실성을 최소화하고 보다 경제적이고 효과적인 비배수전단강도 평가법 개발을 목적으로 한다. 이를 위하여 국내 남해안 지역의 해성 점토지반을 대상으로 하여, 다양한 현장 및 실내시험을 수행하였다. 제안된 방법에서는 기존 방법에 포함되어 있는 상재압(σ_{v0})의 보정절차가 요구되지 않으며, CPTu 결과인 콘지지력(q_t)과 초기간극수압(u_i)의 측정만으로 비배수전단강도의 추정이 가능하도록 하여, 조사과정에서의 추가비용이나 시간소모를 최소화하도록 하였다. 제안된 방법의 적용성 평가를 위하여 국내의 다양한 토질특성을 나타내는 4개 지역에서 수행된 피에조콘관입시험 결과를 수집하였으며, 이를 토대로 제안된 방법에 의한 결과와 실측된 결과와의 비교분석을 실시하였다. 분석결과, 예측된 결과는 측정된 결과와 유사함을 확인할 수 있었다.

Keywords : Cone factor, Cone penetration test, Site investigation, Undrained shear strength

1. 서 론

피에조콘관입시험(Piezocone penetration test: CPTu)

은 연약지반의 연속적인 지층파악, 강도 및 압밀 특성 등 다양한 지반특성을 파악하는 데 매우 효과적인 현장 원위치시험으로 알려져 있다. 특히, 연약지반 설계 시

1 정회원, (주)이제이텍 엔지니어링 사업본부 이사 (Member, Director of Geotechnical Design Division, EJTECH Co., Ltd)

2 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가장 중요한 고려요소인 비배수전단강도와 압밀특성을 단일 관입시험을 통해 얻을 수 있으므로, 국내 및 해외에서 사용빈도가 점차로 증대되고 있으며 장비의 개선과 해석법의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 연약지반에서의 비배수 전단강도 산정과정은 비교란 시료를 채취하여 삼축 또는 일축압축시험 등의 실내시험을 수행하거나 현장베인시험을 통하여 현장에서 직접 측정하는 것이 일반적이다. 실내시험의 경우, 시료채취 및 시험과정에 수반되는 시료의 교란이 시험결과의 신뢰성에 큰 영향을 미치게 되며, 특히 최근까지 지속적으로 개발되고 있는 남해안 지역의 대심도 점토퇴적층에서는 시료교란 문제가 더욱 크게 부각되고 있다. 현장베인 시험(Field vane test: FVT)은 지반교란의 문제점을 최소화할 수 있어 현재까지 알려진 현장시험 중에 가장 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있으나, 관입 심도가 증가할 경우에는 장비관입에 의한 지반교란, 시험로드변형 및 베인 회전력의 저감 등의 문제도 내포되어 있다. 이에 반하여 피에조콘관입시험(CPTu)은 대심도 퇴적층에 대해서도 일관성 있는 시험결과를 얻을 수 있어 매우 효과적인 시험법이라 할 수 있으며, 시험방법 및 절차가 자동화되어 있어 시험과정의 불확실성을 최소화할 수 있다.

CPTu 결과를 이용한 점토질 흙의 비배수 전단강도 평가는 일반적으로 콘지지력 혹은 과잉간극수압과 콘계수로 정의되는 지지력 상관계수를 통해 이루어진다. 콘지지력의 경우 실제 시험성과로부터 얻어지는 측정치이므로, 비배수 전단강도 평가결과의 실질적인 신뢰도와 정확도는 평가에 적용되는 콘계수의 값에 크게 좌우된다. 현재까지 콘계수(N_k)에 관한 연구는 이론적 접근이나 경험적 접근방법을 통해 상당히 오랫동안 진행되어 왔으며, 다양한 이론적 해도 제안되어 왔다(Vesic 1972; Baligh 1975, 1985; Teh and Housby 1991; Yu and Mitchell 1998). 이러한 연구성과에도 불구하고, 콘계수의 값은 이론해에 따라 큰 차이를 보여주고 있으며 지역별 편차 또한 상당하여, 실제 적용에 있어서는 많은 예비시험과 검증을 통해 콘계수 값에 대한 보정작업이 이루어져야 한다.

이에 본 연구에서는 CPTu 기반의 비배수전단강도 평가법에 대한 고찰과 함께, 기존 콘계수 적용 시 내포되어 있는 불확실성과 시료채취 및 예비시험에 따른 추가 비용을 배제할 수 있는 보다 합리적이고 간편한 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 국내 남해안 지역의 해성 점토지반을 대상으로 하여 CPTu 및 FVT 시험을 수행

하였으며, 삼축압축시험 및 일축압축시험을 비롯하여 기타 토질 물성치 시험을 병행하였다. 또한, 제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 다양한 토질특성을 나타내는 지역에서 수행한 콘 관입시험 결과를 이용하여 예측값 및 실측값을 비교, 분석하였다.

2. 콘계수를 이용한 비배수전단강도 평가

콘관입시험으로부터 비배수전단강도(s_u)를 평가하는 방법은 소성이론에 바탕으로 둔 지지력 이론에 따라 다음과 같은 관계로부터 구할 수 있다.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (1)$$

여기에서 s_u = 비배수 전단강도; q_t = 부등 단면적비를 사용하여 수정 간극수압을 고려한 콘 지지력; σ_{v0} = 콘 선단에서의 전 상재압; N_k = 콘계수이다. 식 (1)에서 콘계수 N_k 는 Terzaghi(1943)의 지지력공식에서 비배수상태를 가정한 지지력계수 N_c 에 상응하는 값으로 간주될 수 있으나, 관입특성의 차이로 인해 실질적인 값 자체는 지지력계수 N_c 와 상이한 값을 나타내게 된다(Lunne et al. 1997).

전통적 지지력이론에 의한 방법(Bearing capacity analysis)이외에도 N_k 값의 해석적 평가를 위해 공동확장 해석(Cavity expansion analysis), 정적상태해석(Steady state analysis), 그리고 수치해석적 방법(Numerical analysis) 등과 같은 다양한 방법들이 적용되어 왔다. 지지력이론에 의한 N_k 값의 범위는 대체로 9 - 11 정도의 범위를 나타내고 있으나(Meyerhof 1951; Housby and Wroth 1982), 공동확장이론과 정적상태해석의 경우, N_k 값은 지반의 탄성계수와 강도의 비로 정의되는 강성비의 함수로부터 주어지는 변수로 나타난다. 따라서 강성비의 범위에 따라 N_k 값은 크게 달라질 수 있으며, 적절한 강성비의 평가는 비배수전단강도 평가를 위한 선행과정으로 간주될 수 있다(박영환 등 2007). 공동확장이론과 정적상태이론에 따른 N_k 의 평가식은 다음과 같은 대수관계식으로 나타낼 수 있다(Yu and Mitchell 1998).

$$N_k = a + b \cdot \ln \frac{G}{s_u} \quad (2)$$

여기에서, a 와 b = 상관계수; G = 전단탄성계수; s_u = 비배수 전단강도이다. 식 (2)에서 a 와 b 는 각 연구자 별

로 달리 제안되어 있어, 이에 따른 N_k 값 또한 달라지게 된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 연구자들에 의해 제안된 N_k 값은 강성비에 따라 크게 변함을 알 수 있으며, 연약한 점토와 같이 강성비가 작은 경우 N_k 의 변화량은 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

강성비 G/s_u 의 경우, 대부분의 연구자들은 값의 범위로만 제시하고 있으며, 정량적 평가를 위한 전단탄성계수와 비배수전단강도의 산정기준은 제시되어 있지 않아, 실험결과에 근거한 강성비의 값은 많은 가변성을 내재하고 있다. 실제로 전단탄성계수는 흙의 비선형 응력변형을 관계로 인해 단일 값으로 제시될 수 없으며, 가장 일반적인 평가기준으로 파괴상태의 50% 응력조건에 해당하는 값이 실무에서 흔히 사용되고 있다.

N_k 값의 지역적 편차 또한 CPTu를 이용한 비배수전단강도 평가에 있어 고려되어야 하는 중요한 불확실성에 포함된다. 표 1에서 보는 바와 같이 각 지역별로 얻어진 N_k 값은 5 - 30의 범위에서 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, 이러한 편차에 대해서는 현재까지도 다양한 영향인자를 대상으로 연구가 수행되고 있다. N_k 방법에 관련하여 또 다른 중요한 불확실성은 식 (1)에서 보여지

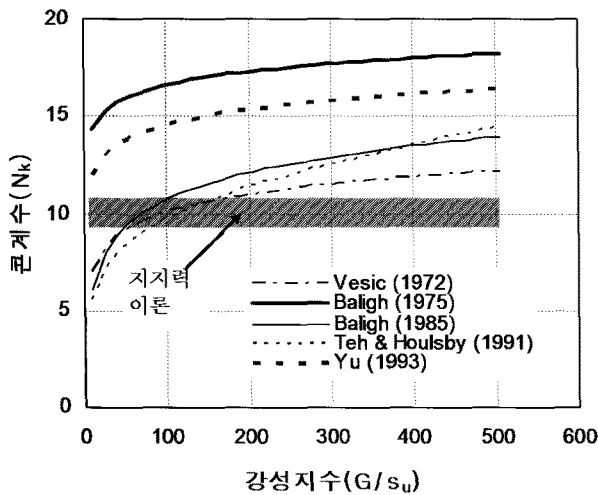


그림 1. 강성비 G/s_u 에 따른 N_k 값의 변화(박영환 등 2007)

표 1. 지역별 콘계수(N_k) 값

국 가	콘계수(N_k)	참고 문헌
브라질	10 - 15	Rocha-Filho and Schnaid (1995)
이탈리아	14	Pane et al. (1995)
일 본	8 - 16	Tanaka and Tanaka (2004)
말레이시아	5 - 13	Chang (1995)
노르웨이	5 - 9	Sandven et al. (2004)
싱가폴	12 - 14	Chang (1995)
영 국	17 - 30	Marsland (1974)

는 바와 같이 상재압(σ_{v0})에 대한 보정과정이다. 상재압(σ_{v0})은 일반적으로 특정 심도에서 채취된 비교란 시료에 의해 결정되며, 채취간격 및 시험과정 중의 오차 등에 의해 많은 영향을 받을 수 있다. 특히, 매립성토 지역에서는 단위중량 산정이 현실적으로 매우 어려우므로 일반적인 범위 내에서 가정된 값이 적용되는 경우도 빈번하여, 이에 따른 오차도 상당할 수 있으며 전반적인 강도평가에 큰 영향을 미치게 된다.

3. 대상지반과 시험결과

3.1 대상지반과 시험결과

본 연구를 위하여 남해안의 낙동강 하구 퇴적층을 대상지반으로 선정하였다. 상부는 연약한 실트질 점토층으로 약 20 - 30m의 두께로 분포하고 있으며, 수심은 약 3m로 점토층은 포화조건을 유지하고 있다. SEP(Self elevating platform) Barge를 이용, 해상 18개소에서 피에조콘관입시험(CPTu)이 수행되었으며 총106회의 현장배인시험이 동일한 위치에서 수행되었다. 또한, 각각의 위치에서 비교란 시료를 채취하여 삼축, 일축시험 및 물성시험을 실시하였다.

대상지반의 점토층은 통일 분류상 주로 CL 및 CH로 구성되어 있으며, 200번체 통과량은 대부분 90% 이상으로 연약한 해성 퇴적점토층으로 이루어져 있다. 그림 2는 심도별 실내시험결과와 피에조콘관입시험(CPTu) 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 함수비와 전체단위중량은 각각 40 - 70%와 15.0 - 17.0kN/m³에 분포하고 있으며, 간극비는 1.3 - 1.9에 분포하여 압축성이 크며, 상부로부터 7m 이후에는 정규압밀상태를 유지하고 있다.

또한 그림 2에 나타난 바와 같이 피에조콘관입시험 결과는 정규압밀된 점토에서 나타나는 전형적인 예를 보여주고 있으며, 비교적 균일한 지반상태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림에서 u_2 는 피에조콘 배면에 설치된 간극수압계로부터 얻어진 간극수압을 나타내며, 해당 지점의 정수압과 콘의 관입에 의해 발생하는 과잉 간극수압의 합으로 주어진다. 또한 u_1 값은 관입이전에 존재하는 간극수압으로 정수압에 해당된다.

그림 3은 각 시험방법에 따른 비배수전단강도의 심도별 분포를 나타내고 있다. 본 연구에서 적용된 시험은 현장배인시험(FVT), 비배수삼축압축시험(TX-UU), 일축

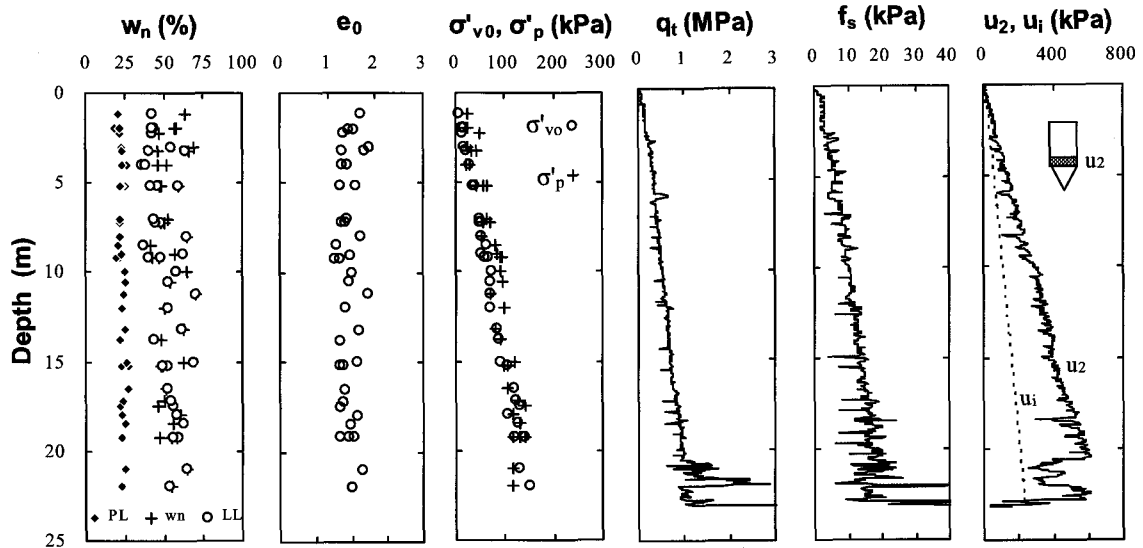


그림 2. 깊이 별 물성치 및 CPTu 시험결과

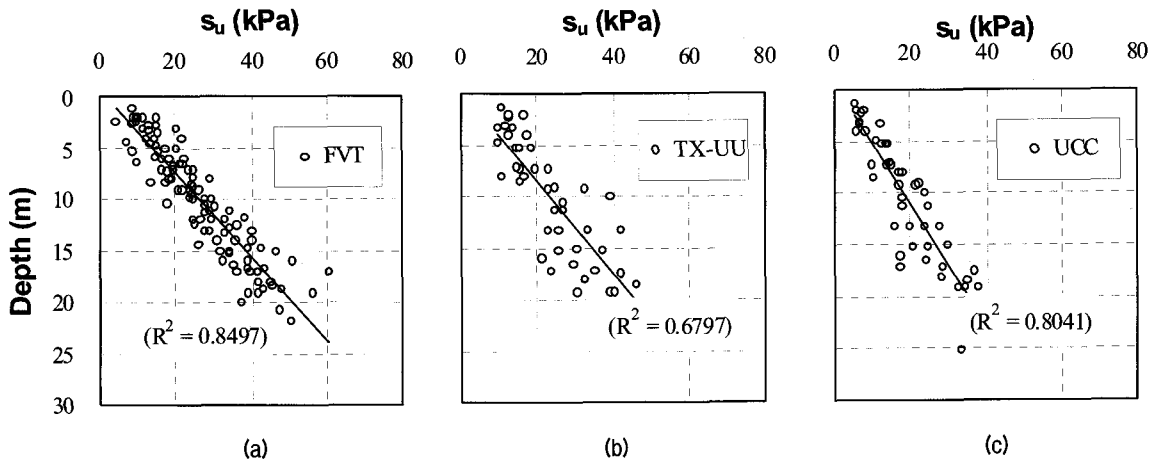


그림 3. 시험종류에 따른 비배수전단강도의 깊이 별 분포

압축시험(UCC) 등이며 각각 그림 3(a), (b), 및 (c)에 도시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 TX-UU와 UCC에 의한 결과는 FVT로부터 얻어진 결과와 비교해 볼 때, 다소 작은 값으로 평가되어 있음을 알 수 있다. 회귀 분석으로부터 얻어진 분산도 또한 FVT시험에 의한 결과에 비해 큰 것으로 나타났으며 이러한 결과는 시료샘플링과정에서 발생하는 교란 및 시험오차 등에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 측정결과에 의한 콘계수 평가

측정된 비배수전단강도를 기준으로 콘계수 N_k 값의 분포범위를 정량적으로 분석하기 위하여, 그림 3에 나타난 시험종류별 비배수 전단강도와 동일한 위치에서 수행된 CPTu 시험결과를 직접 적용하여 N_k 값을 산정

하였다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 시험결과로부터 N_k 값을 산정하기 위해서는 상재압(σ_{v0})이 필요하며, 이를 위해 비교란 시료로부터 얻어진 단위중량(γ)값을 사용하였다. 그림 4는 이러한 과정을 통해 얻어진 N_k 값의 깊이 별 분포를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 전체적인 N_k 값의 범위는 7 - 30 정도로 상당히 광범위하게 나타났으며, 분산도의 경우 시험의 종류에 따라 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 그림 3에 나타난 바와 같이 측정된 비배수전단강도의 깊이 별 분산도가 각 시험종류별로 차이가 나기 때문이며, 따라서 이로부터 얻어진 N_k 값의 분산도 또한 그림 3에 나타난 s_u 값의 분산도와 유사한 것으로 간주될 수 있다. 각 시험결과에 의한 N_k 값의 평균값은 FVT, TX-UU, UCC에 대해 각각 14.1, 14.5, 19.5의 값으로 산정되었다. FVT 시험결과에서는 N_k 값이 10-18 사이에

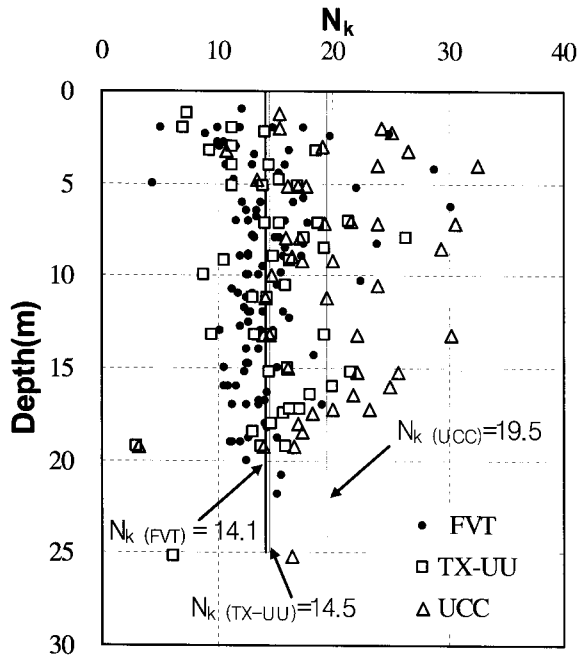


그림 4. 시험종류에 따른 깊이 별 N_k 값

분포하고 있으며 다른 시험결과에 비해 작은 N_k 값을 나타내고, 분산도가 상대적으로 작은 범위를 나타내고 있다. 이는 실내역학시험에 비하여 시료교란의 영향을 받지 않은 데에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 이인모와 이명재(1987)는 콘 관입시험결과를 활용하여 비배수 전단강도 산정을 위해서는 실내시험보다는 현장베인시험 결과를 활용하는 것이 신뢰성이 크다는 연구결과를 발표하였으며 이선재와 김명모(1996)는 국내 10개 지역의 다양한 지반조건에서 산정한 콘계수는 현장베인시험결과를 이용하는 것이 합리적이라고 제안하였다. 따라서 기존 연구결과 및 본 연구에서 얻어진 시험결과로부터 신뢰성 높은 N_k 값의 산정을 위해서 비배수전단강도의 측정값은 FVT의 결과를 이용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

4. 유효콘계수를 이용한 비배수전단강도 평가

4.1 비배수전단강도와 콘슬리브마찰력의 상관관계

재하조건과 역학적인 측면에서 수직하중을 받는 말뚝과 콘은 유사한 관입 및 파괴특성을 나타낸다고 가정할 수 있으며, 이에 따른 지지력의 발휘 또한 밀접한 유사성을 나타내고 있다. 이러한 가정하에 콘관입시험결과를 이용한 말뚝의 지지력평가법 개발에 관한 연구도 지금까지 활발히 진행되어 왔다. 일반적으로 점토지반

에서의 말뚝지지력 평가는 주변지반의 비배수전단강도 s_u 를 바탕으로 이루어지며, 주변마찰력의 경우 다음과 같은 관계식으로부터 산정된다.

$$q_s = \alpha \cdot s_u \quad (3)$$

여기서 q_s = 말뚝의 주변마찰력, α = 주변마찰력 상관계수이다. 식 (3)은 흔히 α 방법으로 지칭되기도 하며, α 값은 상수가 아닌 s_u 의 범위에 따라 달라지는 특성치로 주어진다. 앞서 언급된 바와 같이, 말뚝과 콘의 유사성으로부터 말뚝의 주변마찰력 q_s 는 콘의 슬리브마찰력 f_s 와 상응한 값으로 간주될 수 있다. 따라서 식 (3)으로부터 콘의 슬리브마찰력 f_s 와 s_u 의 관계를 나타내면 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$s_u = \lambda_s \cdot f_s \quad (4)$$

여기서 λ_s 는 s_u 와 f_s 의 상관계수를 나타낸다.

식 (4)는 기본적으로 식 (3)과 동일한 형태를 나타내고 있으나, 정량적인 상관관계는 상이함에 유의하여야 한다. 말뚝의 경우, 실질적인 주변마찰력의 발휘는 말뚝 시공에 따른 과잉간극수압이 모두 소산되어 압밀이 종료된 이후를 기준으로 하고 있으나, 콘의 경우에는 관입에 따른 과잉간극수압의 발생시점과 슬리브마찰력 f_s 의 발현시점이 동일하다는 특성을 나타낸다. 결과적으로 기하학적 형상과 역학적인 유사성에도 불구하고 지지력과 비배수전단강도 사이의 정량적 상관관계는 말뚝과 콘의 경우가 다르다는 것을 의미하게 된다.

4.2 시험결과를 통한 유효콘계수 분석

식 (4)에 나타난 상관계수 λ_s 를 정량적으로 분석하기 위하여 대상지반에서 얻어진 시험결과를 적용하였으며, 산정된 λ_s 값을 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 λ_s 산정에 적용된 s_u 값은 FVT로부터 얻어진 결과를 기준으로 하였으며, 동일 심도에 해당하는 f_s 값을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 λ_s 값은 대략 2에서 8 정도의 범위를 나타내고 있으며, 대부분 3근처에서 λ_s 값이 집중되어 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 4에 나타난 N_k 와 마찬가지로 λ_s 또한 상당한 변화 범위를 보이고 있어, 일관된 값의 선정이나 기존방법에 비해 신뢰성 있는 비배수전단강도의 평가를 기대하기는 어려운 것으로 나타나고 있다.

그림 5에서 보여지는 λ_s 값의 분산도와 이에 대한 영향인자를 보다 세부적으로 분석하기 위해 CPTu 시험결과치인 q_t , f_s , 및 R_{ef} 를 대상인자로 선정하여 상관관계를 검토하였다. 일반적으로 마찰력비 R_f 는 콘지지력과 슬리브마찰력의 비로 정의되어 사용되나, 비배수 상태의 관입인 경우에는 식 (1)에서 보는 바와 같이 유효응력이 아닌 전응력의 함수로 주어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 지반의 전단강도를 지배하는 유효응력상태만을 반영하기 위해 다음과 같이 유효콘지지력과 유효마찰력비를 도입하여 분석에 적용하였다.

$$R_{ef} = \frac{f_s}{q_t - u_i} \times 100\% \quad (5)$$

여기에서 R_{ef} = 유효마찰력비; f_s = 콘슬리브마찰력; q_t

= 콘지지력; u_i = 현장초기간극수압; $q_t - u_i$ = 유효콘지지력을 나타낸다.

그림 6은 그림 5에 나타난 λ_s 값과 각 CPTu 시험결과와의 상관관계를 나타내고 있다. 그림 6(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 λ_s 는 q_t , f_s 와 근사적인 반비례 관계를 보이고 있으나, 분산도의 측면에서 상관도는 크지 않은 것으로 관찰되고 있다. 반면에 그림 6(c)에 나타난 R_{ef} 와의 상관관계는 비교적 높은 상관성을 보이고 있으며, 그림에 나타난 상관관계는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\lambda_s = 6.164 \cdot R_{ef}^{-0.9866} \quad (6)$$

식 (6)에서 R_{ef} 에 포함된 지수 값은 실질적으로 1로 간주될 수 있으므로, 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_s = 6.16 \cdot R_{ef}^{-1.0} = 6.16 \cdot \left(\frac{q_t - u_i}{100 \cdot f_s} \right) \quad (7)$$

또한 식 (4)로부터 식 (7)은 식 (8)과 같이 정리될 수 있으며, 콘계수와 같은 방식으로 나타내면 식 (9)와 같이 나타내게 된다.

$$s_u = 6.16 \cdot \left(\frac{q_t - u_i}{100} \right) \quad (8)$$

$$s_u = \frac{q_t - u_i}{16.2} = \frac{q_t - u_i}{N_e} \quad (9)$$

식 (9)에서 N_e 는 유효콘계수로 정의되며, 값은 식에 나타난 바와 같이 16.2와 같다.

식 (6) - (9)는 콘슬리브마찰력 f_s 으로부터 비배수전단

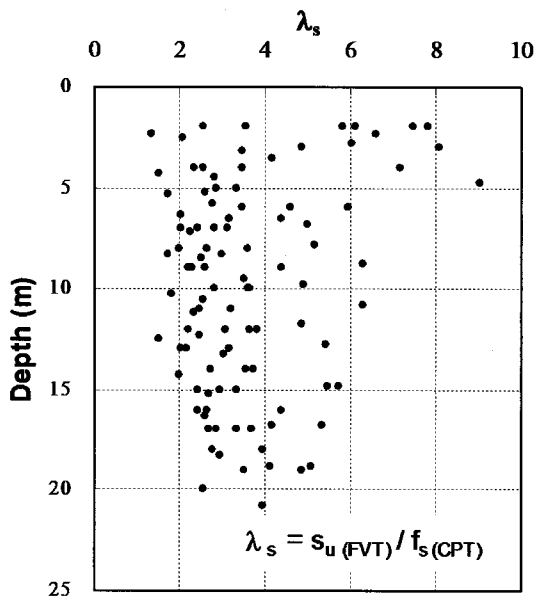


그림 5. λ_s 의 깊이 별 변화

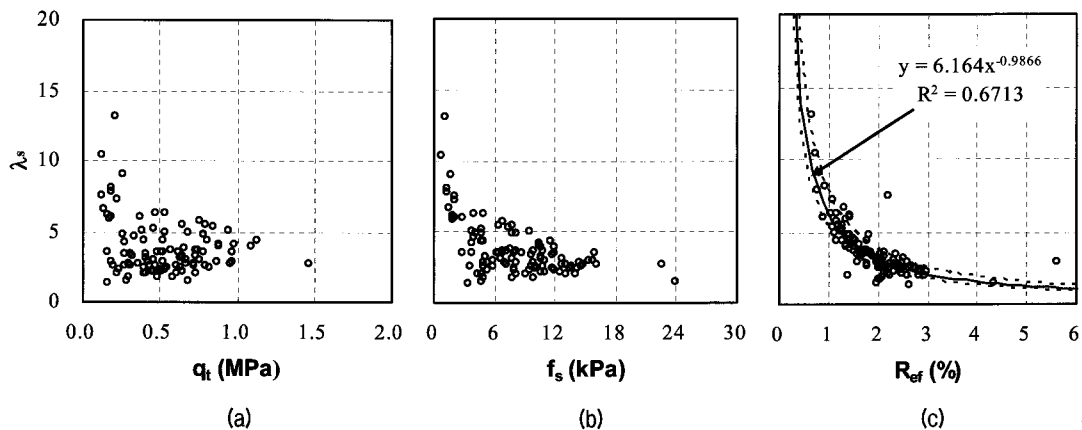


그림 6. λ_s 와 CPTu 시험결과와의 상관관계

강도 s_u 를 평가할 수 있는 상관관계식의 전개과정을 나타내고 있으나, 실질적으로 다음과 같은 결론이 도출됨을 알 수 있다. 첫째, CPTu 시험결과 중 점토의 비배수 전단강도에 직접적인 상관관계를 나타내는 측정치는 콘지력 q_t 이다. 슬리브마찰력 f_s 와 s_u 와의 상대적인 무관성은 q_t 에 비해 f_s 값 자체가 매우 작아, 장비의 측정 정확도에 비해 측정값 변화범위의 예민도가 떨어지기 때문일 수 있으며, f_s 값이 슬리브표면의 마찰특성에 크게 좌우되기 때문인 것으로 판단된다. 둘째, 점토의 비배수 전단강도는 콘지력과의 유일한 함수로 표현될 수 있으며, 이는 기존의 콘계수와는 구별되는 유효콘계수 N_e 를 통해 정의될 수 있다.

그림 7은 시험결과로 얻어진 N_e 값의 깊이 별 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 그림 4와 5에 나타난 N_k 와 λ_s 에 비해 낮은 분산도를 보이고 있으며, 이는 평가결과의 신뢰성이 증대될 수 있음을 의미하고 있다. 그림으로부터 대부분의 N_e 값은 16 ± 3 정도의 범위를 나타내고 있으며, 평균적으로 $N_e = 16$ 으로 적용될 수 있는 것으로 보여지고 있다. 그러나 이와 같은 결과

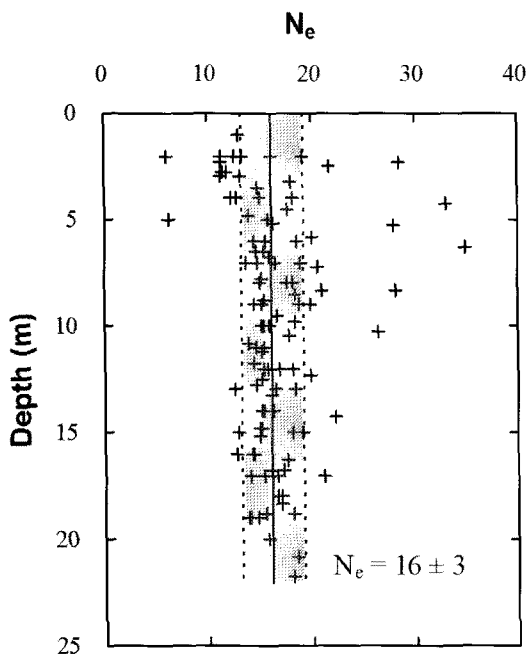


그림 7. 유효콘계수(N_e)의 깊이 별 분포

는 특정지역을 대상으로 도출된 값이므로, 보다 다양한 지반상태에 대한 추가검증과 실측값과의 비교분석이 이루어져야 한다.

4.3 유효콘계수(N_e)의 적용성 평가

제안된 유효콘계수(N_e)의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 서로 다른 지반특성을 나타내는 4개의 현장(화전, 송도, 광양, 포항지역)에서 수행한 CPTu 시험결과를 분석하였다. 표 2 및 그림 8은 4개 지역에 대한 지층현황 및 지반특성에 대해서 보여주고 있으며, 그림 9에서는 CPTu의 시험결과를 보여준다. 지하수위는 화전, 송도, 광양 및 포항에서 각각 0.75, 0.8, 0.0, 1.8m 이다.

표 2와 그림 8에서 보여지는 바와 같이 검증대상지역은 서로 다른 지반특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 부산시 강서구에 위치하는 화전지역은 시험대상지반과 근접하여 있으며, 낙동강 하구의 대심도 퇴적점토층으로 구분될 수 있다. 이 지역은 5 - 10m의 상부매립층이 존재하고 있으며 주로 CL 및 CH로 구분되는 퇴적 점토층이 20 - 45m의 범위로 분포하고 있다. 인천 송도지역은 주로 ML 및 CL로 구성되어 있으며 서해안의 점토 특성으로 알려진 샌드심(sand seam)이 혼재되어 있다. 국내 서남권역의 광양지역은 고 압축특성을 나타내는 지역으로 알려져 있으며, 활성도가 1.2 이상으로 매우

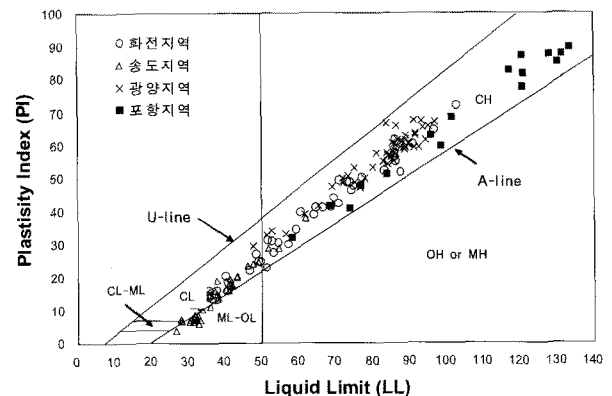


그림 8. 검증대상지역의 소성도표

표 2. 검증 대상지역의 지반조건

지역	점토층의 깊이 (m)	분류 (USCS)	함수비 (%)	액성한계 (%)	γ_t (kN/m ³)	e_0
화전	20 - 45	CL/CH	35 - 60	40 - 90	16 - 18	1.4 - 1.8
송도	10 - 17	CL/ML	20 - 35	26 - 41	18 - 20	0.8 - 1.2
광양	20 - 25	CH	75 - 95	75 - 95	14.5 - 15.8	1.8 - 2.5
포항	10 - 18	CH/OH	120 - 180	100 - 160	12.5 - 14.0	3.5 - 4.4

크게 나타나고 있다. 포항지역은 아주 특이한 지반특성을 나타내고 있는데 액성한계는 100이상으로 함수비를 초과하고 있으며, 초기 간극비는 3이상으로 매우 큰 팽창특성(high swelling potential)을 나타내고 있다.

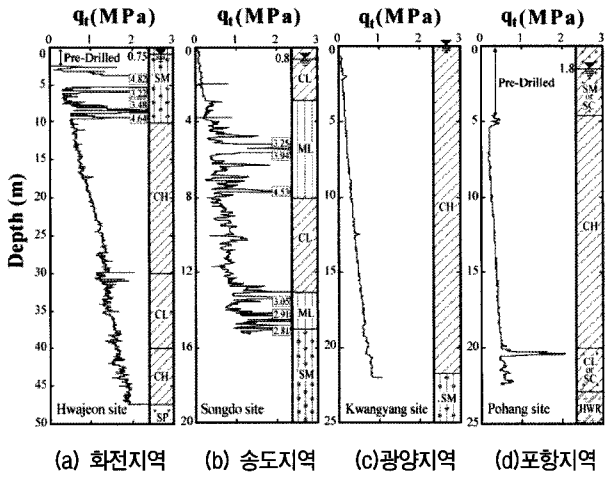


그림 9. 검증대상지역의 CPTu 시험결과

본 연구의 4개 대상지반에서 실시된 CPTu 시험결과로부터, 앞서 제안된 유효콘계수 $N_e = 16$ 을 적용하여 비배수전단강도 s_u 를 산정하였으며, 이를 동일 깊이에서 수행된 FVT로부터의 s_u 값과 비교하였다. 그림 10은 각 대상지역에 대해 측정된 s_u 값과 제안된 방법으로부터 산정된 s_u 값을 비교하여 나타내고 있으며, 제안된 방법에서 N_e 값은 동일하게 16이 적용되었다. 그림에서 보여지는 바와 같이, 측정된 값과 유효콘계수로부터 산정된 비배수 전단강도는 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 특히 포항지역(high swelling potential)에서는 매우 특수한 지반조건임에도 불구하고 예측치와 실측치는 잘 부합함을 알 수 있었다. 따라서, 유효콘계수 N_e 를 이용한 방법은 다양한 지반조건에 대해서도 일관된 계수값의 적용이 가능할 것으로 판단되며, 특히 상재압의 고려가 요구되지 않아 추가시험에 따른 비용을 절감할 수 있는 효과적인 방법인 것으로 판단된다.

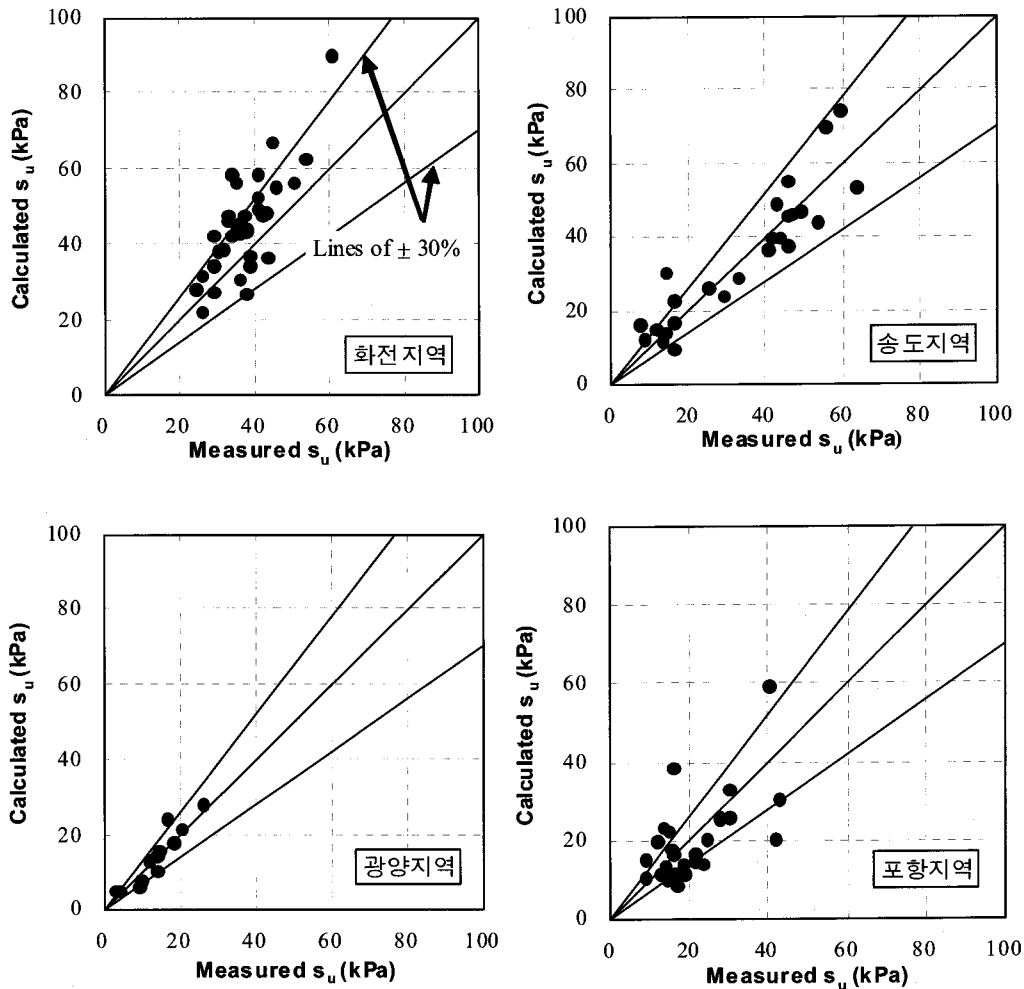


그림 10. 유효콘계수를 이용한 대상지역에서의 s_u 산정 결과

5. 결론

본 연구에서는 CPTu 유효콘지지력으로부터 비배수 전단강도를 평가할 수 있는 새로운 방법을 제안하였으며, 이에 대한 적정성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 남해안 지역의 퇴적점토층을 대상지반으로 선정하였으며 피에조콘 관입시험을 비롯한 다양한 현장 및 실내시험을 수행하였다. 또한, 제안된 방법의 적정성 평가를 위하여 국내의 다양한 토질특성을 나타내는 4개의 지역에서 수행한 콘 관입시험 결과를 비교, 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 현재까지 연구된 결과에 의하면 기존의 콘계수(N_k) 값의 범위는 지역특성에 넓게 분포하고 있으며, 비배수 전단강도 산정시 수행되는 시험방법의 차이 등에 의해 차이가 발생할 수 있다. 또한 콘계수(N_k) 값의 산정을 위해서는 s_u - q_t 관계식으로부터 상재압(σ_{vo})이 요구되므로 별도의 비교란시료 채취과정이 병행되어야 하며, 특히 대심도 연약지반의 경우, 시료의 교란도에 따라 많은 불확실성을 나타낼 수 있다.
- (2) 제안된 유효콘계수(N_e) 방법은 콘계수 산정 시 콘지지력(q_t)과 초기간극수압(u_i)만을 이용하는 방법으로 상재압(σ_{vo})의 산정과정이 필요치 않아 기존 콘계수(N_k)값 산정 시 발생할 수 있는 많은 불확실성을 해소할 수 있다. 또한, 콘지지력(q_t)과 초기상태 간극수압(u_i)의 측정치는 CPTu 시험만으로 획득이 가능하며 비용이나 시간적 측면에서 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다.
- (3) 시험결과로부터 얻어진 유효 콘계수(N_e) 값은 16 ± 3 의 값으로 나타났으며, 실무적 차원에서 $N_e = 16$ 의 적용이 제안될 수 있음을 확인하였다.
- (4) 제안된 유효콘계수(N_e)의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 서로 다른 지반특성을 나타내는 4개의 현장의 CPTu 시험결과를 분석한 결과 측정된 값과 유효콘계수(N_e)로부터 산정된 비배수전단강도 s_u 는 잘 일치하는 결과를 보여주고 있으며, 대표값의 적용성 측면에서도 만족스러운 결과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통 기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 지역기술혁신사업

(B04-01)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이선재, 김명모 (1996), "국내 점성토지반의 피에조콘 계수 결정", *KGS Fall '96 National Conference*, Seoul, Korea, pp.237-248.
2. 이인모, 이명재 (1987), "콘관입시험을 이용한 해양토질의 전단강도 산정에 대한 신뢰도 연구", *대한토목학회 논문집*, 3권 2호, pp.17-27.
3. 박영환, 김민기, 김창동, 이준환 (2007), "부산지역 점토의 비배수 전단강도 평가를 위한 CPT 콘 계수 해석 및 평가", *한국지반공학회 논문집*, 23권 8호, pp.77-85.
4. Baligh, M. M. (1975), "Theory of deep static cone penetration resistance", *Rep. No. R75-56, Dept. of Civ. and Envir. Eng., Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, Mass.
5. Baligh, M. M. (1985), "Strain path method", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 111(9), 1108-1136.
6. Chang, M. (1995), "Cone penetration testing in Singapore and Malaysia", *Proc. Int. Sym. on Cone Penetration Testing CPT'95*, Linkoping, Sweden, Vol.1, 193-200.
7. Houlsby, G. T. and Wroth, C. P. (1982), "Determination of undrained strength by cone penetration tests", *Proc., 2nd Eur. Symp. on Penetration Testing*, Vol.2, 585-590.
8. Lunne, T., Robertson, P. K., and Powell, J.J.M. (1997), *Cone Penetration Testing*. E&FN SPON, London, UK.
9. Marsland, A. (1974), "Comparison of the results from static penetration tests and large in situ plate tests in London clay", *Proc. Eur. Sym. on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, 245-252.
10. Meyerhof, G. (1951), "The ultimate bearing capacity of foundations", *Geotechnique*, 2(4), 301-331.
11. Pane, V., Brignoli, E., Manassero, M., and Soccodato, G. (1995), "Cone penetration testing in Italy", *Proc. Int. Sym. on Cone Penetration Testing CPT'95*, Linkoping, Sweden, Vol.1, 101-114.
12. Rocha-Filho, P. and Schnaid, F. (1995), "Cone penetration testing in Brazil - National report", *Proc. Int. Sym. on Cone Penetration Testing CPT'95*, Linkoping, Sweden, Vol.1, 29-42.
13. Sandven, R., Orbech, T., and Lunne, T. (2004), "Sample disturbance in highly sensitive clay", *Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC'2*, Porto, Portugal, Vol.2, 1861-1868.
14. Tanaka, M. and Tanaka, H. (2004), "An examination of the engineering properties and the cone factor of soils from East Asia", *Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC'2*, Porto, Portugal, Vol.1, 1019-1024.
15. Teh, C. I. and Houlsby, G. T. (1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay", *Geotechnique*, 41(1), 17-34.
16. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, US.
17. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", *J. Soil Mech. and Fond. Div., ASCE*, 98(3), 265-290.
18. Yu, H. S. and Mitchell, J. K. (1998), "Analysis of cone resistance: Review of methods", *J. Geotech. And Geoenv. Eng.*, ASCE, 124(2), 140-149.

(접수일자 2008. 9. 29, 심사완료일 2008. 10. 29)