

원위치 관입시험을 이용한 비배수 점토의 유효응력 산정

Estimation of Effective Stress for Undrained Clays using In-situ Penetration test

조성환¹⁾, Sunghwan Cho, 서경범²⁾, Kyungbum Seo, 이준환³⁾, Junhwan Lee

1) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

2) 연세대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

3) 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, a method for estimating the effective stress of clays using in-situ penetration test(PCPT) result is proposed. The proposed method is based on a correlation between the PCPT results and strength increment ratio. According to proposed method, no additional testing procedure for collecting undisturbed soil sample is required, which can reduce overall testing cost. To verify this method, for analysis, various analytical solutions were adopted and used. Measured and predicted effective stress are compared on the test results. The verification sites consist of a variety of soil condition. From comparison, it is seen that predicted value of effective stress using the propose method match well those from measured results.

Key words : Cone Penetration Test, Cone Factor, Effective Stress, Site Investigation.

1. 서 론

본 연구에서는 정규압밀지반에서 PCPT 결과를 이용하여 유효응력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 유효응력은 흙의 압축성 및 강도특성을 좌우하는 핵심 상태변수이며, 지반해석과 설계에서 가장 기본적이고 중요한 물성치로 간주된다. 지반설계 과정에서 유효응력의 평가는 불교란 시료를 채취한 후 단위중량 시험을 토대로 이루어지는 것이 통상적이다. 실내시험에 있어서 시료채취 및 시험과정에 수반되는 시료 교란이 시험결과의 신뢰성에 큰 영향을 미치게 되며, 대상 심도가 깊을 경우에는 시료교란의 가능성이 증가할 뿐만 아니라 채취 자체가 불가능한 경우도 빈번하다.

본 연구에서는 불교란 시료 채취과정과 단위중량 결정을 위한 별도의 실험과정이 요구되지 않으며, PCPT 시험결과를 통한 유효응력 산정 방법을 제안하고자 한다. 이를 통해, 조사과정에서 발생할 수 있는 지반교란을 최소화 하고자 하며, 이는 깊이에 따라 연속된 지반정수를 산출할 수 있어서 시간적 비용적 측면에서 유리 할 것으로 판단된다. 제안된 방법의 적용성 평가를 위하여 국내의 다양한 점성토 지반에서 수행된 PCPT 시험결과를 수집하였으며, 이를 토대로 제안된 방법에 의한 결과와 기존방법의 결과와의 비교분석을 실시하였다. 분석결과, 예측된 결과는 측정된 결과와 유사함을 확인할 수 있었다.

2. 콘계수

점토지반에서 콘계수는 PCPT 콘지지력과 강도특성의 상관관계를 나타내는 변수이며, 적용 방법에 따

라 크게 4가지(N_{kt} , N_{ke} , $N_{\Delta u}$, N_e)로 구분된다. 본 연구에서는 N_{kt} 와 N_e 의 상관관계를 통해 새로운 모델을 제안하며 각 방법은 다음과 같다.

2.1 전단 선단저항치를 이용한 방법

Schmertmann (1978)은 말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다고 생각하여, 소성이론을 바탕으로 한 지지력 이론으로 부터 비배수 전단강도(s_u)를 산정하는 방법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k} \quad (1)$$

여기서, q_c =콘지지력; σ_{vo} = 연직응력; N_k = 콘계수이며 이 값은 보통 10~20사이에 분포하고 있는 것으로 나타났으며, Robertson and Campanella (1988)는 N_k 값으로 평균 15를 사용하는 것이 바람직하다고 제안하였다. 그러나, 간극수압 측정용 필터가 콘 선단부(cone tip) 바로 뒷면에 위치한 피에조콘을 사용할 경우, 간극수압의 영향을 받기 때문에 그림 1과 같이 부등 단면적비를 고려해야 한다. Lunne et al. (1985)은 그림 1에 나타난 바와 같이 부등단면적비를 고려한 q_t 를 이용하여 식 (2)와 같이 비배수 전단강도를 산정할 것을 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (2)$$

여기서, q_t =부등 단면적 효과를 고려한 원추관입 저항력; N_{kt} =부등단면적비에 의해 수정된 콘계수 값이다.

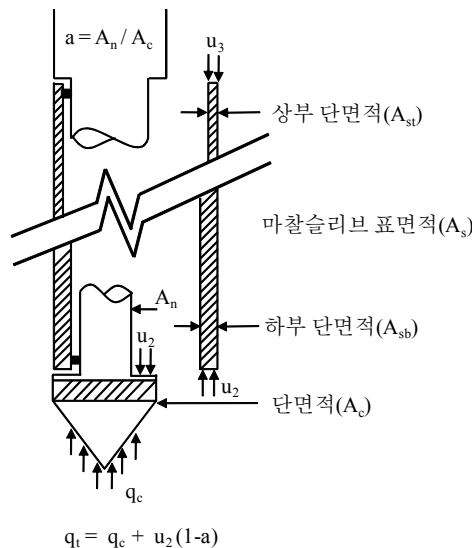


그림 1. PCPT의 부등 단면적비

2.2 유효콘계수를 이용하는 방법

Lee et al. (2010)은 PCPT 유효콘지지력으로부터 비배수전단강도를 평가할 수 있는 방법을 식 (3)와 같은 형태로 제안하였으며, 비배수 전단강도 산정 시 콘지지력(q_t)과 초기간극수압(u_o)만을 이용하였다.

$$s_u = \frac{q_t - u_o}{N_e} \quad (3)$$

제안된 방법은 상재압(σ_{vo})의 산정과정에서 필요치 않아 기존 콘계수(N_{kt})값 산정 시 발생할 수 있는 많은 불확실성을 해소할 수 있다. 또한, 콘지지력(q_t)과 초기상태 간극수압(u_o)의 측정치는 PCPT시험만으로 획득이 가능하여 비용이나 시간적 측면에서 유리한 방법이라고 할 수 있다. Lee et al. (2010)에 의하면 N_e 값은 16 ± 3 의 값으로 나타났다.

3. PCPT 결과를 이용한 유효응력 평가

3.1 기본모델

식 (2)에서 전 상재압 값을 유효상재압과 간극수압의 관계를 도입하여 재구성하면 식 (4)과 같다.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} = \frac{q_t - (\sigma'_{vo} + u_o)}{N_{kt}} \quad (4)$$

여기서, s_u = 비배수 전단강도; q_t = 부등 단면적비를 사용하여 수정 간극수압을 고려한 콘 지지력; σ_{vo} = 콘 선단에서의 전 상재압; N_{kt} = 콘계수; u_o = 초기간극수압이다. 식 (3)과 식 (4)로부터 콘계수의 상관관계를 도입하면 식 (5)와 같이 표현 할 수 있으며, 기존 콘계수를 유효콘계수(N_e)에 대해 나타내면 식 (6)과 같다.

$$q_t - u_o = (q_t - u_o) \frac{N_{kt}}{N_e} + \sigma'_{vo} \quad (5)$$

$$N_e = N_{kt} \cdot \frac{q_t - u_o}{q_t - u_o - \sigma'_{vo}} \quad (6)$$

식 (6)에서 SHANSEP(Ladd et al. 1977) 이론에 따른 강도증가율(s_F)을 도입하면 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_e = N_{kt} \cdot \frac{N_e \cdot s_u}{N_e \cdot s_u - (s_u / s_F)} \quad (7)$$

여기서, s_F =비배수전단강도 와 유효응력의 비(s_u/σ'_{vo})를 나타낸다. 따라서 콘계수 비(N_{kt}/N_e)는 식 (7)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{N_{kt}}{N_e} = 1 - \frac{1}{s_F \cdot N_e} \quad (8)$$

식 (8)로 주어진 콘계수비를 식 (5)에 적용하면 유효응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma'_{vo} = (q_t - u_o) \frac{1}{s_F \cdot N_e} \quad (9)$$

여기서, q_t =콘지지력; u_o =정수압; s_F =강도증가율; N_e =유효콘계수이다.

4. 제안된 방법의 적용성 평가

4.1 대상지반과 시험결과

본 절에서는 국내 점토층에서 대하여 본 연구에서 제안한 PCPT 결과를 이용하여 유효응력을 평가하였으며, 현장 시험을 통해 얻은 결과값을 이용하여 기존의 연구방법과 비교분석을 수행하였다. 본 연구에서는 광양지역과 부산지역에서 수행된 현장 및 실내시험 결과를 활용하였다(현대건설 2006, 부산지방해양수산청 1999).

광양의 현장지반은 최상부에 실트질 점토층이 13.8~18.1m정도까지 위치하고 모래질 자갈층 및 기반암의 풍화대 순으로 구성되어 있다. 최상부의 실트질 점토층은 주로 실트와 점토로 구성되어 있고, 약간의 유기물이 함유되어 있으며, 포화상태는 젖음 ~ 포화상태를 보인다.

부산의 현장지반은 두 개의 다른 층으로 나눌 수 있으며, 상부층은 부드러운 해저층으로, 하부층은 단단한 암반층으로 구분된다. 상부층은 약 30m정도까지 분포되어 있으며 퇴적 실트질 점토 지반으로 구성되어 있다. 상부층이 해수면 아래에 존재하고 있으므로 전체 지반은 완전 포화 상태로 간주 될 수 있다. 두 개의 현장 모두 No.200체를 90%이상 통과하고, 통일 분류법에 따라 CH와 CL로 분류되었다. 그림 2는 채취된 시료를 통해 얻어진 애터버그 시험 결과를 나타내고 있다.

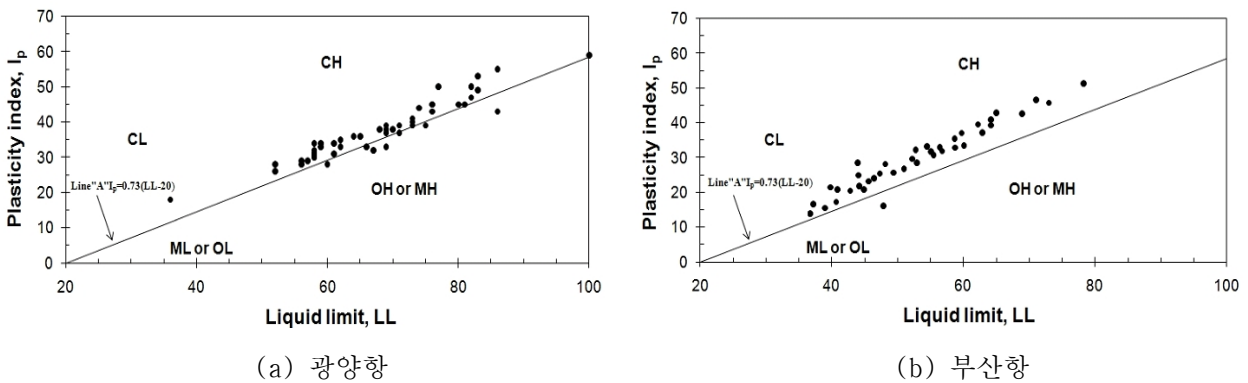


그림 2. 시험 지반의 소성도표

그림 3는 각 시험 위치에서 채취된 시료를 통해 얻어진 각종 물성치의 깊이 별 분포를 나타내고 있으며, 그림 4에서 볼 수 있듯이, 함수비와 총 단위 중량은 비교적 균일한 값을 보이고 있다. 광양항의 경우 함수비가 60~90%, 단위 중량이 13.5~16.5kN/m³의 범위이고 간극비는 1.8~2.7정도를 나타내고 있다. 또한 부산신항의 경우 함수비는 50~70%, 단위중량은 15.5~16.5kN/m³의 범위임을 알 수 있고, 간극비는 1.3~2.2정도로 압축성이 매우 높은 것으로 나타났다.

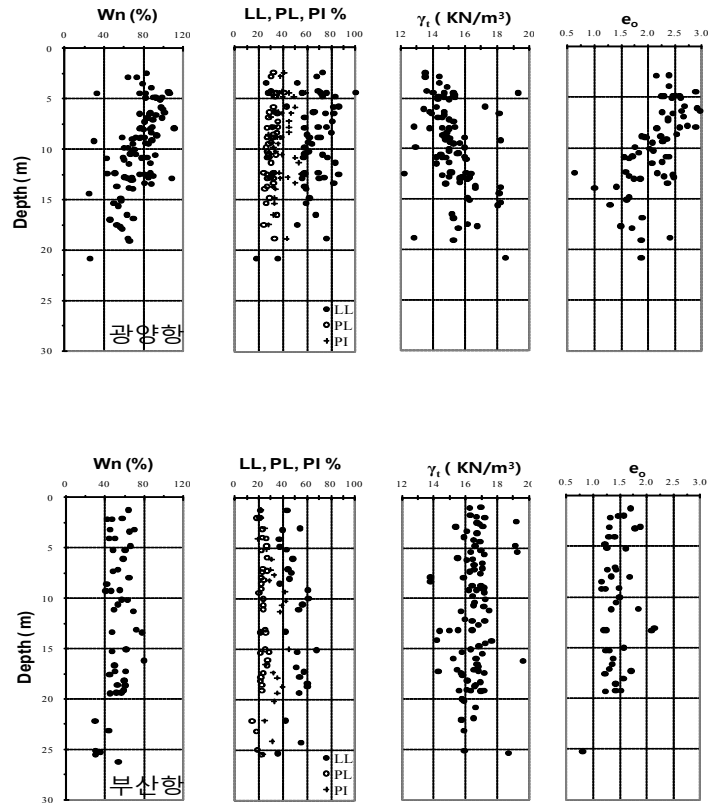


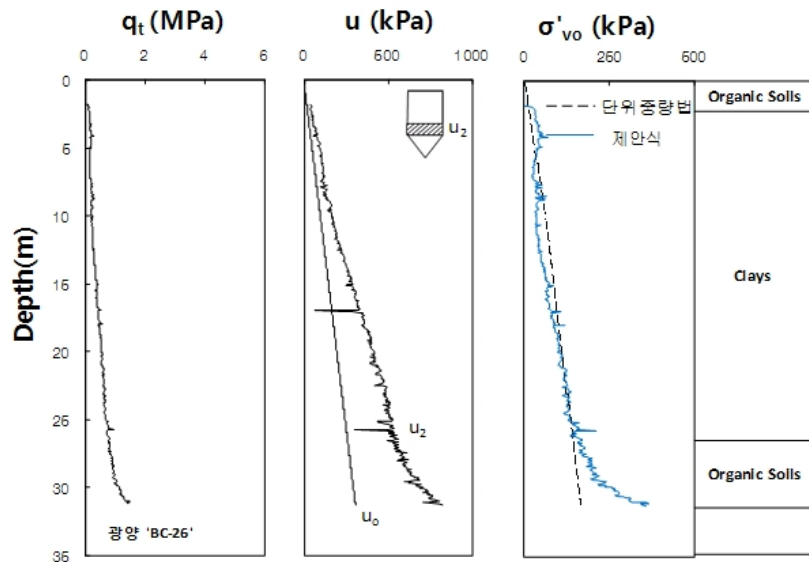
그림 3. 시험 지반의 깊이에 따른 물성치 분포

4.2 비교분석

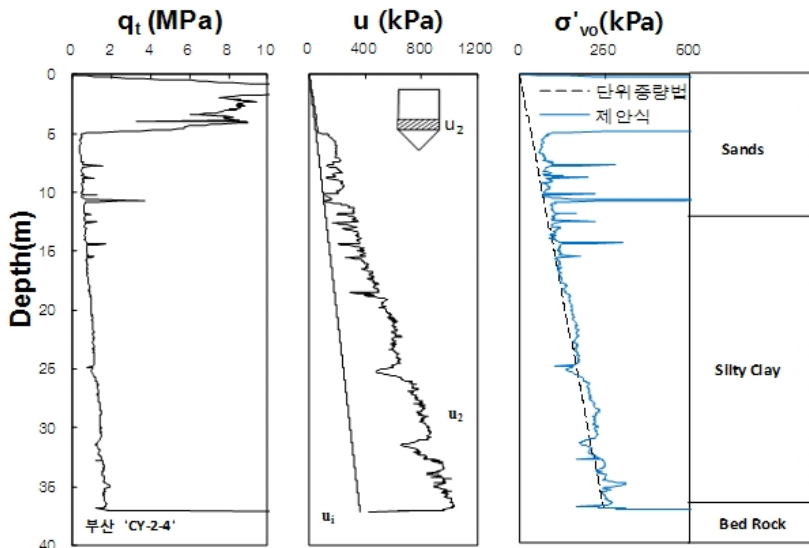
제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 광양항 및 부산신항에서 수행한 PCPT 시험결과를 분석하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 콘지저력(q_t)과 간극수압(u_0)은 시험에서 얻은 결과값을 사용하였고, 유효콘계수(N_e)값은 16을 사용하였으며, 강도증가율 값은 Skempton(1957)이 제안한 소성지수를 이용하는 식(6)의 방법을 사용하였다.

$$s_F = 0.11 + 0.0037 \cdot PI \quad (6)$$

광양지역의 소성지수(PI)값은 35~45%의 범위를 보였고 이 경우 강도증가율 값은 0.24~0.27의 값을 가지게 되며, 부산지역의 소성지수(PI)값은 25~40%의 범위를 보였으며 강도증가율 값은 0.2~0.26의 값을 가진다. 이에 현장시험 지반에 깊이에 따른 적절한 강도 증가율 값을 제안식에 대입하여 유효응력을 산정하였다. 그림 4는 광양지역과 부산지역에서 수행한 PCPT 결과값을 이용하여 적용성 평가를 실시한 모습을 보여주고 있으며, 각 현장마다 콘지저력(q_t)과 과잉간극수압(u_2)을 비롯하여 초기 간극수압(u_0)을 함께 도시하였다.



(a)



(b)

그림 4. 광양 및 부산지역 피에조콘관입시험 결과 및 유효응력 적용성 평가

그림 4 (a)에 나타난 바와 같이 광양지역은 콘지력이 1MPa 이하인 매우 연약한 점토지반이 균질한 상태로 두껍게 존재하며, 이 점토층에서 단위중량을 이용하여 유효응력을 측정된 값과 PCPT를 이용하여 유효응력을 측정된 값을 비교해 보면 상당히 잘 일치하는 모습을 보여준다. 또한, 그림 4 (b)를 살펴보면 부산지역은 약 5m까지 모래층이 존재하며, 그 아래로 실트질 점토층이 균질하게 분포하고 최하층에는 단단한 암반층으로 구성되어 있다. 부산지역의 유효응력 측정값은 상부 5m의 모래층에서 큰 오차를 보인다. 이와 같은 오차 발생 원인은 본 연구에서 도출된 제안식이 점토지반에서 콘계수를 이용하여 비배수전단강도를 산정하는 공식들의 상관관계를 통해 도출되었기 때문에 점토지반에서만 사용이 가능하기 때문이다. 따라서, PCPT를 이용하여 유효응력을 산정하는 방법은 점토외의 지반에서 사용이 제한된다. 반면, 5~30m 깊이에 분포한 점토층에서는 예측값과 측정값이 상당히 잘 일치하는 모습을 보여준다.

5 결론

본 연구에서는 PCPT 결과값으로부터 유효응력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이에 대한 적정성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 국내의 대표적인 연약 점토지반이라 할 수 있는 광양지역과 부산지역을 비롯하여 국내 다양한 지역을 대상으로 하였으며, 피에조콘 관입시험과 실내시험 결과를 수집하여 제안된 방법의 적용성 평가에 적용하였다. 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다..

1. 본 연구에서 제안된 방법은 PCPT 결과값을 이용하는 방법으로 비교란 시료채취를 수행하여 단위중량 산정과정에서 필요치 않아 시료가 교란되어 발생할 수 있는 불확실성을 해소 할 수 있으며, 비용이나 시간적 측면에서 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다.

2. 제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 대표적인 연약 점토지반인 광양과 부산지역에서 실시한 PCPT 시험을 분석한 결과, 측정된 값과 PCPT 결과값으로부터 산정된 유효응력 값은 잘 일치하는 결과를 보여주었다.

3. PCPT 결과를 이용한 원위치 응력상태 평가법은 점토지반에서 콘계수를 이용하여 비배수 전단강도를 산정하는 공식들의 상관관계를 통해 도출되었기 때문에, 본 연구의 제안식의 사용을 점토지반에 제한하며, 적용성 평가를 통해 모래 및 자갈 지역에서는 큰 오차값을 가지는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0016807).

참고문헌

1. 부산지방해양수산청 (1999), 부산신항투기장 실시설계보고서: 해상지반조사편, 부산지방해양수산청.
2. 현대건설 (2006) “광양항 3-2차 컨테이너 터미널 축조공사 재하성토 제거 검토보고서”
3. Ladd C.C., Foott R., Ishihara K., Schlosser F. and Poulos H. G. (1977), “Stress-deformation and strength characteristics” *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1977, 2*, pp.421-494.
4. Lee, J. H., Seo, K. B., Kang, B. J. and Cho, S. H. (2010), “Application of effective cone factor for strength characterization of saturated clays” *Geo Florida 2010*, Westpalmbeach, Florida, USA.
5. Lunne, T., Christofferen, H.P. and Tjelta, T. I. (1985), “Engineering use of Piezocone Data in North Sea Clays” *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sanfrancisco, Vol.2*, pp.907-912.
6. Robertson, P.K., and R.G. Campanella. (1988), “Design Manual for Use of CPT and CPTu”, *Pennsylvania Department of Transportation (PennDot)*, pp.200.
7. Schmertmann, J. H. (1978a), “Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and design”, *Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209*, Washington, pp.145.
8. Skempton, A.W. (1957), “ Discussion : The Planning and Design of New Hong Kong Airport”, *Proc.Inst Civil.Eng.,Vol.7*,pp.305-307.