JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS MAR. 2003, pp. 96-106

한국농공학회지
제45권 제2호

연약지반에 대한 더치콘과 피에조콘 관입시험 비교 연구

Comparative Study of Dutch Cone and Piezocone Penetration Test on Soft Ground

원 정 윤* · 장 병 욱* · 우 철 웅* · 윤 상 묵**

Won, Jeong Yun · Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Yun, Sang Muk

Abstract

134 Dutch cone (mechanical cone) and 9 piezocone (electronic cone) penetration tests have been performed in the southwestern part of Korea. In general, Dutch cone results may be different from that of piezocone due to the difference in structure of the cones. 6 Dutch cone and piezocone test data which were obtained at the same point respectively, were analyzed and plotted in soil classification chart proposed by Robertson et. al.(1986, 1990). Cone factors of Dutch cone and piezocone test empirically have been determined using laboratory and field vane test results. Using this cone factors, it was shown that there was good correlation between shear strength estimated using cone resistance and that of laboratory test and field vane tests.

It was found that there was a good correlation between cone resistance from Dutch cone and that from piezocone. Relationship formula was also suggested. Dutch cone test provides a useful means for stratigraphic profiling in large project and has some advantage over piezocone in particular situations, such as very soft clay ground and dredged area.

Keywords : Dutch cone, Piezocone, Site characterization, Soft clay, Shear strength

I. 서 론

콘 관입시험은 유럽과 북미, 일본뿐만 아니라 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 지반조사 방법의 하나이며, 국내에도 1962년 영산강 조사에서 외국 기술자들에 의해 도입[4),11)]된 이후 적용범위와 빈도가 급속히 확산되어 있다. 콘관입시험의 최초 형태가 1910년대 초반 스웨덴과 덴마크 철도청에서 개발된 후 이중관, 맨틀콘, 마찰슬리브가 설치된 마찰맨틀콘으로 발전되어 현재에 이르고 있다. 이 형태의 콘관입시험 형태를 흔히 더치콘(기계식 콘)관입시험이라 부른다.[7)] 피에조콘(전자식 콘)은 1948년에 처음 소개된 후, 전자 측정장치의 발달과 함께

* 서울대학교 농업생명과학대학
** (주)쏘일테크엔지니어링
* Corresponding author. Tel.: +82-31-290-2370
fax: +82-31-294-1816
E-mail address: jy9007@hanmail.net

콘 내부의 다양한 측정장치들이 결합되어 관입저항력, 주변마찰력, 간극수압 등을 측정할 수 있게 발전되었으며, 피에조콘 외에 탄성파탐사콘, 전기전도율 측정콘, 콘 프레셔미터 등 다양한 형태로 응용되어 활용되고 있다.

더치콘관입시험은 원추와 마찰슬리브가 분리되는 이중관 사이에 미세입자가 끼는 현상, 지반심도에 따라 연속적인 결과를 얻을 수 없는 점(20 cm 간격 측정), 그리고 인력에 의한 관입 등의 단점들로 인해 점차 퇴조하여 피에조콘으로 대체되고 있는 실정이지만, 더치콘관입시험은 전기적 장치와 간극수압 측정장치가 없다는 것을 제외하고는 정적콘관입시험이 가지는 일반적인 장점을 그대로 가지고 있기 때문에 최근까지도 농업기반공사를 중심으로 간척지반과 방조제의 조사에 많이 사용되고 있다.

국내에서 피에조콘에 대한 연구는 전국 각지에서 수행된 자료를 이용하여 체계적인 연구가 진행되고 있지만, 더치콘에 대한 연구는 현재까지 수행된 더치콘관입시험 결과 자료를 수집하여 발간되어 있는 수준[4]이며, 더치콘관입시험 결과의 분석방법이나 활용, 그리고 최근 널리 사용되고 있는 피에조콘관입시험과의 비교 사례는 찾아보기 힘들다. 본 논문에서는 영산강 하구 간척지에서 수행된 더치콘 관입시험 결과를 이용하여 다양한 분석방법에 대한 사례를 제시하고 피에조콘관입시험 결과와 비교분석하여 각 시험방법의 장단점을 평가하여 더치콘관입시험을 재평가하고자 한다. 또한 콘 형상의 차이로 인한 더치콘과 피에조콘의 관입저항값을 분석하여 상관관계를 제시하고자 한다. 이를 위하여 더치콘과 피에조콘 관입시험을 동일한 지점에서 수행하고 현장베인시험을 실시하였다. 또한 자연시료를 채취하여 실내에서 역학시험을 실시하였다.

Ⅱ. 조사현장 및 시험장치

1. 조사현장의 지반특성

본 논문에서 사례로 제시한 현장은 Fig. 1과 같

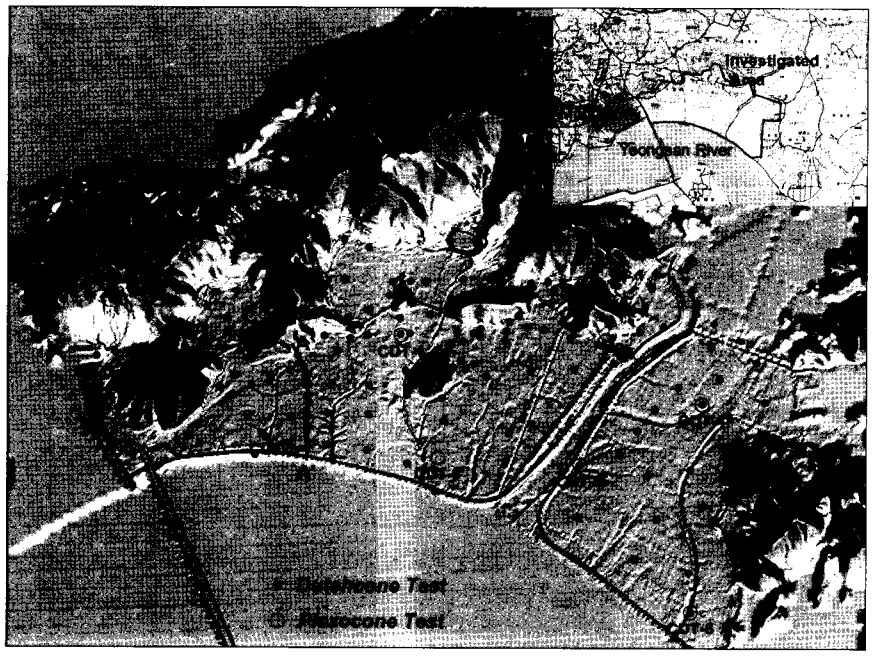


Fig. 1 Map of investigated area

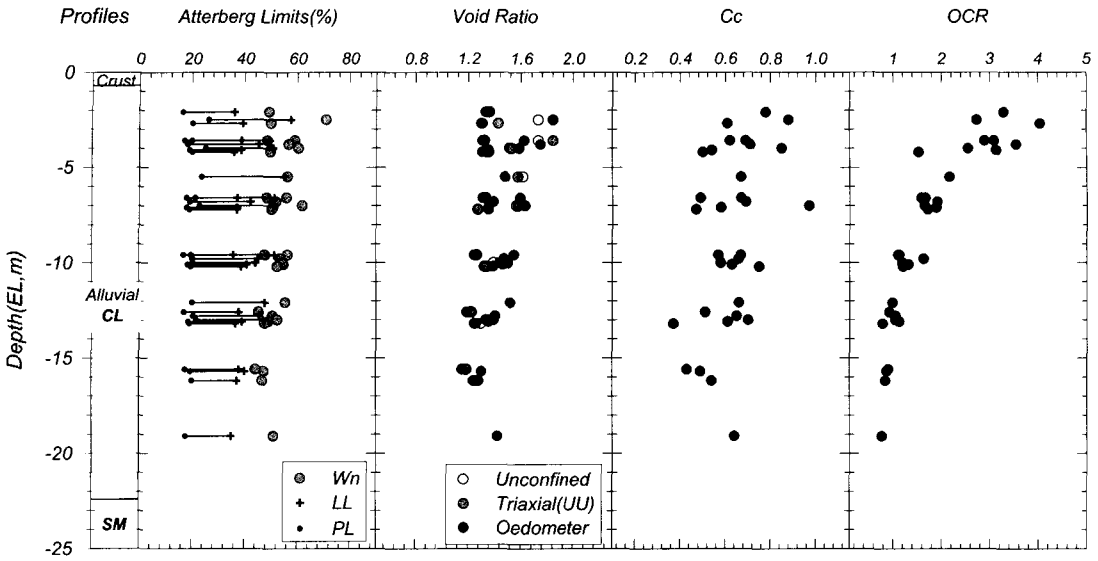


Fig. 2 Physical and mechanical properties of the soft clay layer

이 전라남도 영산강 하구언 주변에 위치하고 있으며, 행정구역상 전라남도 목포시와 무안군에 포함된 지역으로 "남악신도시 택지개발 예정지구"이다. 본 현장은 과거 영산강 하구언 건설 이전에는 해수와 담수가 교차했던 전형적인 하구 지형이며, 하구언과 함께 건설된 대죽방조제로 내부에 형성된 간척지는 현재 농지로 사용되고 있다.

Fig. 1에서 조사지역의 지형과 함께 더치콘/피에조콘관입시험의 조사위치를 나타내었다. 본 현장의 연약층은 최대 25.0 m로서 사업부지 내에서 평균 11.9 m의 연약층 두께를 보이고 있다.[3] 연약층 두께를 파악하기 위하여 134개소에서 더치콘 관입시험을 수행하였는데, 그 중 피에조콘 관입시험(9개소)과 동일한 지점에서 수행한 6개 지점의 데이터를 분석하였다. 이 지점에서는 시추조사와 더불어 자연시료채취, 현장베인시험을 실시하였다. Fig. 2에서 6개 지점 지반의 물리적, 역학적 특성을 심도에 대해 나타내었다. 조사지점에서의 자연함수비(평균 52.5%)는 액성한계(평균 42.7%)보다 같거나 크게 나타나고 있으며, 소성지수는 평균 22.9로서 연약지반은 통일분류상 CL 또는 CH로 분류된다. 간극비는 평균 1.39이며, 전단강도는 평균 2.68 tf/m^{2}으로 심도에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 압밀특성을 보면, 상부층에서 과압밀비(OCR)가 1보다 크게 나오고 있다. 해남만에 대한 퇴적학적 연구결과를 참조하면 연구지역의 연약층은 제4기 Holocene에 형성된 지층으로 판단된다.[6]

2. 더치콘/피에조콘시험장치

사용된 더치콘장비의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 더치콘시험은 인력으로 운반하게 되어 있어 많은 번거로움이 있었는데, 궤도주행장치를 장착하여 신속한 이동과 함께 정치의 정확성과 편리를 도모하였다. 시험에 사용한 콘의 형상은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 선단각 60° 콘저면적 10 cm^2, 마찰슬리브 표면적 145 cm^2 의 맨틀콘으로 관입저항과 마찰력을 2 cm/s 속도로 관입하면서 측정하였다. 피에조콘장비는 Hogentolgler사 제품으로 선단각 60° 선단면적 10 cm^2, 마찰슬리브 표면적 150 cm^2 의 10 ton 용량의 콘과 간극수압 측정 장치를 가지고 있으며, ASTM D5778-95

규정에 따라 2 cm/s의 속도로 관입하였다.

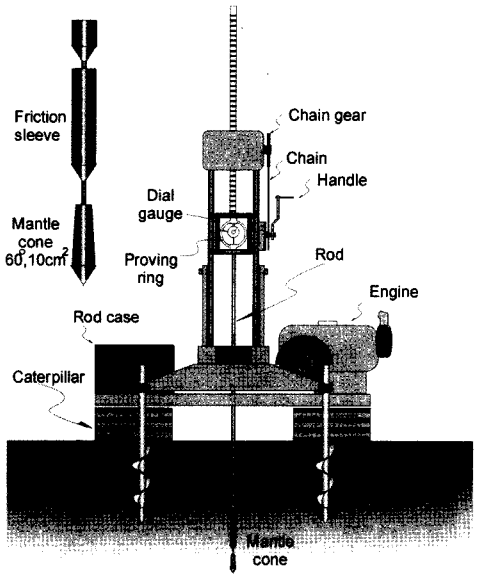


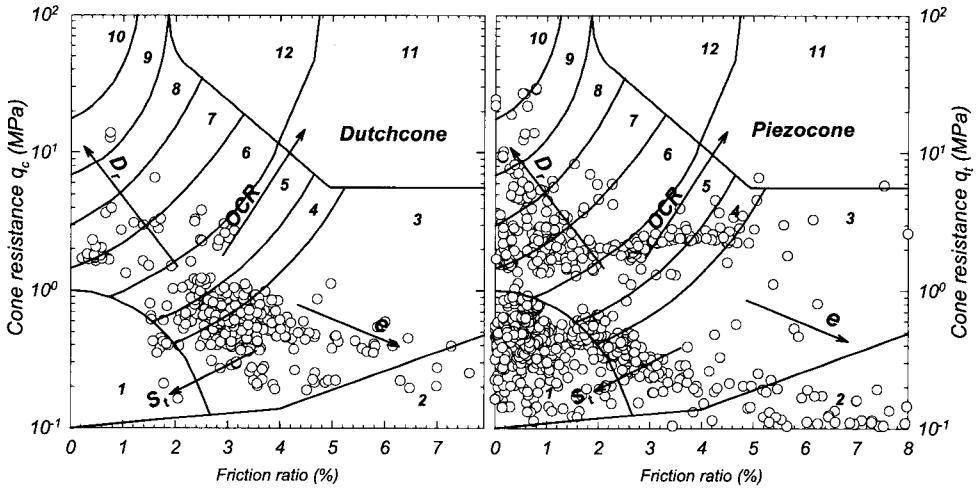
Fig. 3 Schematical figure of the Dutchcone penetrometer

Ⅲ. 더치콘/피에조콘관입시험 결과의 분석 및 비교

1. 지층분류

더치콘/피에조콘 관입시험 과정에서 측정된 콘관입저항과 마찰력, 간극수압을 이용하여 연약층을 대상으로 지층분류를 수행하였다. 콘관입시험으로 지층을 분류할 때 가장 일반적으로 사용되는 Robertson 등(1986, 1990)의 분류차트를 이용한 지층분류 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

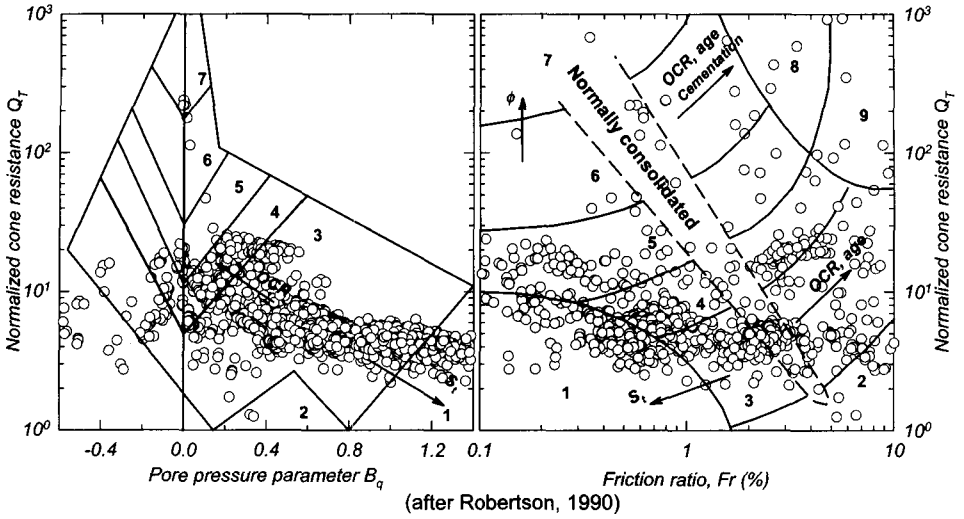
연약층에 대한 지층분류결과 더치콘을 이용한 경우 대부분 Zone 3 "Clay"와 Zone 4의 "Silty clay to clay"로 분류할 수 있는 반면, 피에조콘을 이용한 경우 Zone 1의 "Sensitive fine grained"과 Zone 3의 "Clay"로 분류되었다. Fig. 5에서는 피에조콘 결과만을 이용한 분류결과로서, 대부분 Zone 1, 3, 4로 분류되었다. 이러한 분류상의 차이



(after Robertson et al., 1986)

Zone	Soil behaviour type			* overconsoildated or cemented	
1.	Sensitive fine grained	5.	Clayey silt to silty clay	9.	Sand
2.	Organic material	6.	Sandy silt to clayey silt	10.	Gravelly sand to sand
3.	Clay	7.	Silty sand to sandy silt	11.	Very stiff fine grained*
4.	Silty clay to clay	8.	Sand to silty sand	12.	Sand to clayey sand*

Fig. 4 Soil classification results using classification chart (Robertson, et al., 1986)



$$Q_T = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}'} \qquad B_q = \frac{u_{bt} - u_o}{q_T - \sigma_{vo}} \qquad F_r = \frac{f_s}{q_T - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

Zone	soil behaviour type	Zone	soil behaviour type	Zone	soil behaviour type
1.	Sensitive, fine grained ;	4.	Silt mixtures clayey silt to silty clay	7.	Gravelly sand to sand;
2.	Organic soils - peats;	5.	Sand mixtures; silty sand to sand silty	8.	Very stiff sand to clayey sand
3.	Clays-clay to silty clay;	6.	Sands; clean sands to silty sands	9.	Very stiff fine grained

Fig. 5 Soil classification chart based on normalized data (Piezocone)

는 두 시험방법에서 콘 형상의 차이로 인한 콘관입 저항의 차이와 함께, 피에조콘의 경우 간극수압을 이용한 분류를 수행하는 반면, 더치콘의 경우 간극수압을 반영하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 4, Fig. 5에서 보여지듯이 두 시험방법 모두 지층분류 결과 점토~실트질 점토로 분류되고 있는데, 이를 통해 피에조콘과 더치콘을 이용한 지층분류 결과는 연약지반에 대한 조사에서는 동등하다고 판단할 수 있으며 더치콘관입시험으로도 실용적인 지층분류가 가능하다는 것을 알 수 있다.

2. 연약층 두께 파악

대단위 사업지구의 지반조사에서는 연약층의 분포를 충분히 파악할 수 있을 정도로 충분한 수량의 시추조사를 수행하기 어렵기 때문에, 콘관입시험을 활용하면 연약층 두께와 함께 지반의 강도를 효과적으로 파악할 수 있다. Fig. 6에서는 시추조사와 함께 더치콘 관입시험으로 파악한 연약지반 지층단면(Fig. 1에서 A-A' 단면)의 예를 보여주고 있다. Fig. 6에서와 같이 시추조사(118공)와 함께 더치콘관입시험(134개소)을 이용하여 결정한 연약층 (SPT N<10/30, 더치콘 q_c< 20 kg/cm^2) 분포를 등고선으로 작성하여 Fig. 7에 나타내었다. 이로부터 대단위 사업지구에 대한 지반조사에서, 시추조사는 실내시험을 위한 시료채취, 지층단면의 토질구성 파악, 구조물 설치지점의 암반분포 등을 결정하기 위하여 최소한으로 배치하고 더치콘관입시험과 같은 경제적인 방법으로 지층분포를 결정하는 것이 합리적이라는 것을 알 수 있다.

3. 전단강도 추정

더치콘/피에조콘관입시험은 연속적인 콘관입저항

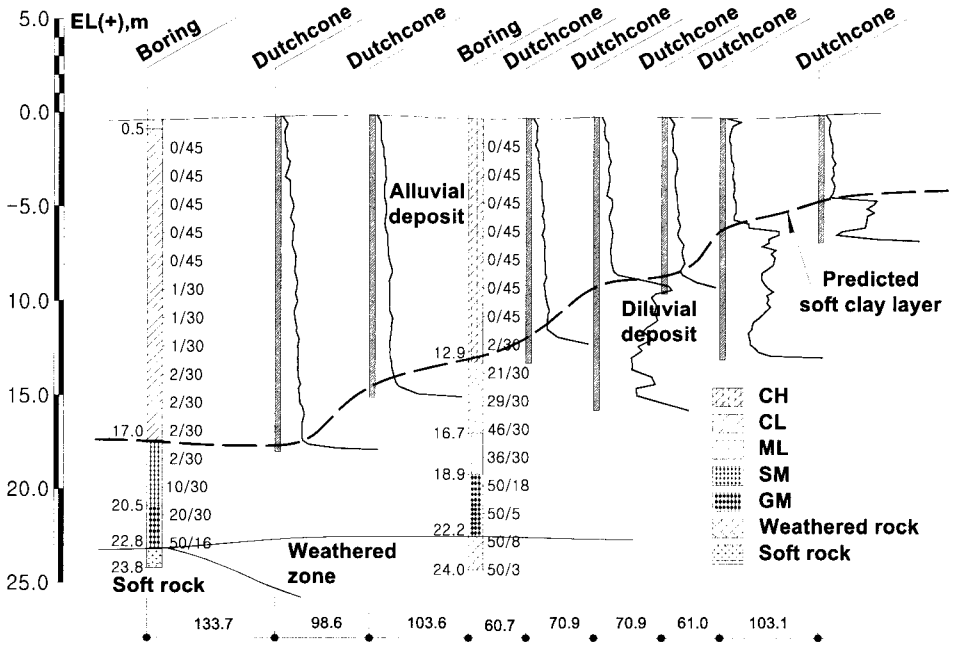


Fig. 6 Typical cross section (A-A' in Fig. 1) using Dutch cone results and boring data

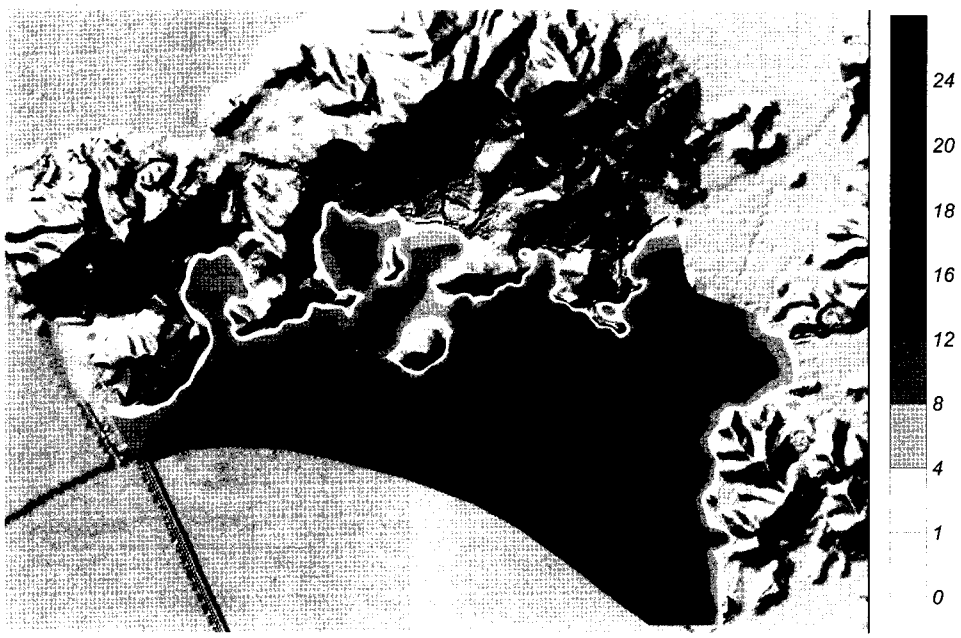


Fig. 7 Contours of soft clay layer

값으로 지반의 강도를 추정할 수 있다. 콘관입시험 결과를 이용하여 지반의 전단강도를 추정하는 방법은 콘관입저항만을 이용하는 경우, 상재하중을 고려한 경우, 간극수압을 이용하는 경우 등으로 다양한 식들이 제시되어 있다. 본 연구에서는 식(1)과 같이 전응력 개념의 전단강도 추정식을 이용하여 연약층의 전단강도를 추정하였다.

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

여기서, q_c는 콘관입저항, σ_{vo}는 연직전응력, N_k는 무차원 콘계수이다. 피에조콘에서는 다공질 필터 면적을 고려하여 q_c 대신에 q_T를 이용하여 계산하며, 피에조콘의 콘계수는 q_T를 이용하여 계산하였기 때문에 N_{kT}로 표시하였다. 콘계수는 해석적 방법과 경험적 방법으로 구할 수 있는데, 해석적 방법은 콘계수의 결정 과정에 많은 가정을 도입하기 때문에 실내시험결과를 이용하여 경험적으로 콘계수를 결정하는 방법이 많이 사용되고 있다.[2),11)]

Fig. 8에서 실내시험(일축압축시험, 비압밀비배수 삼축시험)과 현장베인시험으로 구한 연약층의 전단강도를 이용하여 콘계수를 결정한 결과를 나타내었다. 실내시험과 현장베인시험 결과 중 심도에 따른 증가경향을 고려하여 68% 신뢰영역(평균±표준편차)에 대한 결과만을 이용하였다(Fig. 8a). 이렇게 결정된 더치콘 관입시험의 콘계수 N_k=18.7이며 피에조 콘관입시험의 콘계수 N_{kT}=10.3이었다(Fig. 8b). 피에조콘 콘계수는 국내 남부지역에 대해 제시된 N_{kT}=11.62)보다 다소 낮은 값을 보이고 있지만, 지역적인 차이로 판단된다. 더치콘과 피에조콘 콘계수의 차이는 두 시험방법에서 측정된 콘관입저항의 차이 때문으로 판단된다.

Fig. 8에 결정한 콘계수를 이용하여 더치콘/피에조콘으로 추정한 지반 강도를 실내시험, 현장베인시험으로 구한 비배수전단강도와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9를 통하여 더치콘과 피에조콘 모두 합리적으로 연약층의 비배수 강도를 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 현장베인시험에 의한 전단강도가 다른 실내시험에 비해 콘관입시험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 콘관입저항값의 비교

더치콘과 피에조콘의 콘은 Fig. 10에서 보는 바

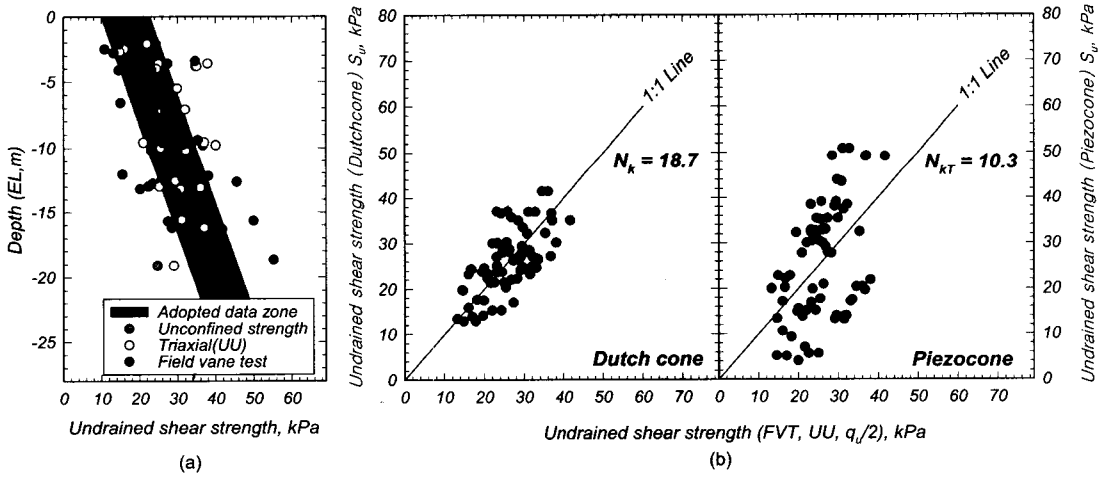


Fig. 8 Empirically determined cone factors using field vane and laboratory test results

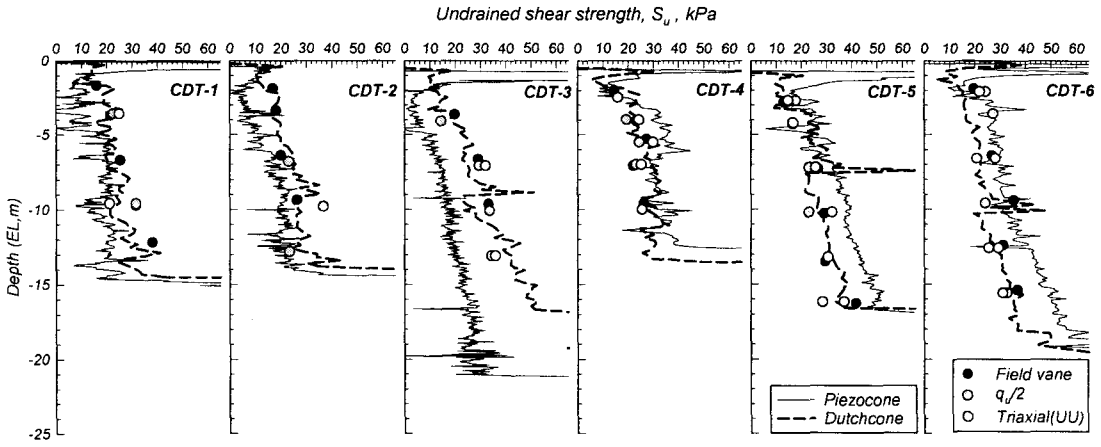
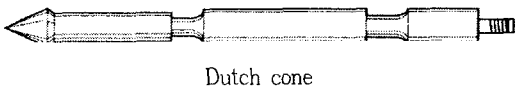
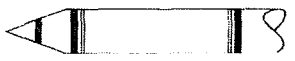


Fig. 9 Undrained shear strength estimated by cone penetration tests

와 같이 형상과 구조가 다르다. 더치콘 형상은 콘 배면의 면적이 콘면적보다 다소 작게 형성되어 있다. 더치콘과 피에조콘의 선단각과 저면적은 동일하다. 콘 형상의 차이로 인하여 더치콘과 피에조콘의 콘관입저항은 다르게 나타나는데, 점성토 지반에서는 더치콘의 관입저항이 피에조콘보다 다소 크게 나오며 모래질 지반에서는 그 반대의 경향을 보인다.[7] 또한, 더치콘은 마찰슬리브에서 마찰력을 측정하며, 피에조콘은 일반적으로 마찰력을 간접적으로 측정한다.[7]



Dutch cone



Piezocone

Fig. 10 Comparison of the cone shape of Dutchcone and that of piezocone

Rol[10]은 Holland의 모래질 현장에 대한 결과를 바탕으로 기계식 콘관입저항 q_{cm}과 전자식 콘관입저항 q_{ce}간의 관계에 대해 다음의 식을 제안하였다.

$$\frac{q_{cm}}{q_{ce}} = 0.85 + 0.00035(D+2)q_{ce} \cdots\cdots (2)$$

여기서, q_{cm}은 기계식콘의 관입저항, q_{ce}는 전자식콘의 관입저항(MPa), D=관입깊이(m)이다. $(D+2)q_{ce}$ 항은 기계식콘의 내관에 의해 발생되는 마찰을 고려하기 위해 도입되었다.

Kulhawy and Mayne[6]은 14개 모래질 현장과 10개의 점토와 실트질 현장에 대한 자료를 바탕으로 다음과 같은 관계식을 제안하였다. 여기서, P_a는 대기압이다.

$$\left(\frac{q_{ce}}{P_a}\right) = 0.47\left(\frac{q_{cm}}{P_a}\right)^{1.19} \cdots\cdots (3)$$

본 연구에서 동일한 지점에서 수행한 피에조콘/더치콘시험 6개 결과를 이용하여, 두 시험법간의 콘관입저항의 상관성을 분석하였다. 먼저 각 지점에서의 q_c의 경향을 분석하여 Fig. 11a의 예제와 같이 몇 개의 선형구간으로 구분하고, 각 구간별로 두 시험결과의 중앙값을 각각 선정하였다. 6개 지점에 대해 이 과정으로 구한 두 시험방법의 콘관입저항값을 Fig. 11(b)에서와 같이 상관 분석하여 식 (4)를 구하였다.

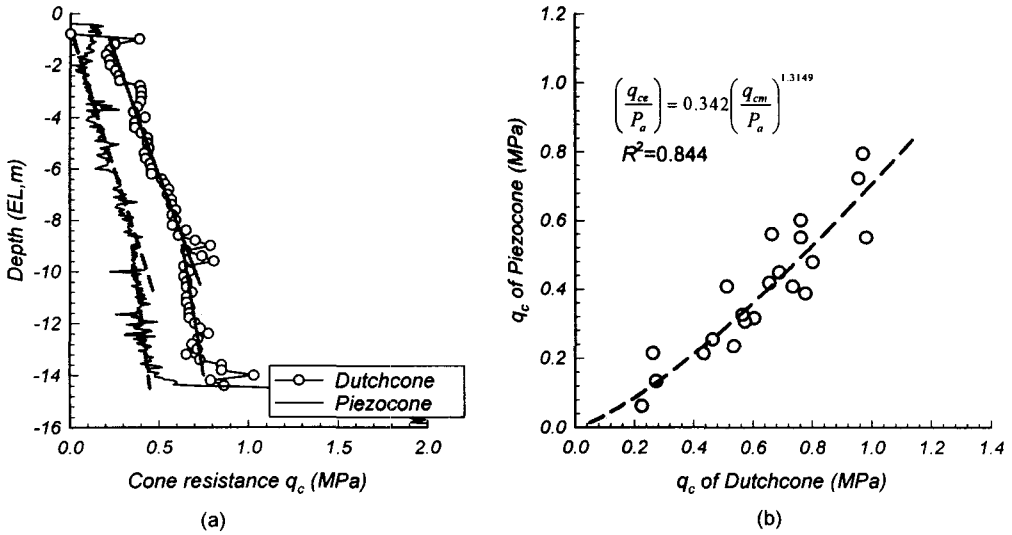


Fig. 11 Analysis of q_c obtained from different test method ; (a) example of q_c zoning, (b) relationship between q_c derived from piezocone and Dutchcone tests

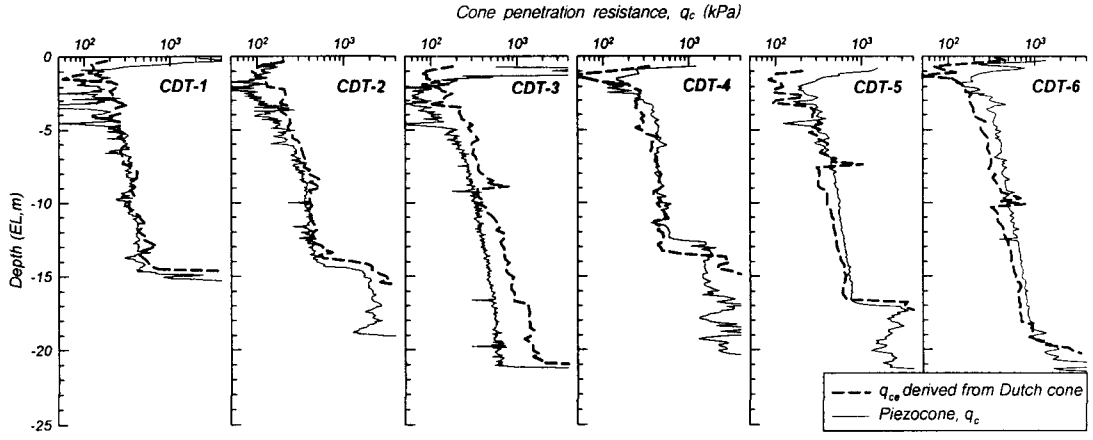


Fig. 12 Relationship between q_{ce} derived from Dutch cone and piezocone test q_c

$$\left(\frac{q_{ce}}{P_a}\right) = 0.342\left(\frac{q_{cm}}{P_a}\right)^{1.315} \quad \cdots\cdots (4)$$

식(4)를 이용하여 더치콘 관입저항을 피에조콘 관입저항으로 환산하고 그 결과를 Fig. 12에서 실제 측정된 피에조콘 관입저항과 비교하였다. 식(4)를 이용하여 더치콘 q_c로 계산한 q_{ce}는 피에조콘의 q_c와 연약층 범위에서 잘 일치하고 있으며, Kulhawy and Mayne[5]가 제시한 식(3)과는 그래프상에서 구분되지 않을 정도로 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서 제안한 식(4)는 연구대상지역에서 더치콘 q_c가 1MPa 이내인 점토질 흙에 대한 식으로서 모래질 흙에 적용하기 위해서

는 추가적인 연구를 통해 수정되어 사용되어야 할 것이다.

본 조사현장과 같이 매우 연약한 점토지반에서, 더치콘과 피에조콘의 콘관입저항과 마찰비를 비교해보면, Fig. 13(a), (b)에서와 같이 피에조콘은 다소 분산이 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 더치콘의 경우 지반의 연경에 따라 검력계 용량을 기술자가 현장에서 조정하여 측정함으로써 감도를 쉽게 조절할 수 있음에 반해, 피에조콘의 경우는 콘의 용량이 대부분의 경우 결정되어 있으며, 관입과정에서 콘을 교환할 수 없는 한계를 가지고 있기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 특히 Fig. 13(b)의 마찰비에서 확연히 드러나고 있다. Fig. 13(c)는 광양항 지역에서 수행한 별도의 자료로서, 연약한 점토질 원지반 위에 원지반 흙을 준설한 현장에 대한 더치콘, 피에조콘시험 결과를 보여주고 있다. Fig. 13(c)의 경우 준설토와 원지반은 분명한 강도의 차이를 보임에도 불구하고 피에조콘으로는 그 차이를 명확히 보여주지 못하였다. 이러한 지반에서는 피에조콘의 용량을 조정함으로서 이러한 차이를 측정할 수 있을 것이다. 더치콘관입시험에서는 기술자가 현장에서 검력계의 용량을 조정함으로써 준설토와 원지반의 강도 차이를 명확하게 측정할 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 연약지반조사에 널리 사용되고 있는 피에조콘(전자식 콘)과 더치콘(기계식 콘) 관입시험 결과를 비교분석하기 위하여 동일한 지점에서 두 시험을 실시하고, 실내역학시험과 현장베인시험으로 구한 전단강도와 비교하였다. 더치콘과 피에조콘 결과를 이용한 지층분류는 다소 차이를 보이고 있지만, 실용적으로 동일한 분류 결과를 얻을 수 있었다. 연약지반으로 구성된 대단위 사업지구에 대한 지반조사에서 시추조사와 함께 콘관입시험, 특히 더치콘관입시험을 실시함으로서 연약층후의 공간적 분포를 경제적으로 정밀하게 파악할 수 있었다.

현장베인시험과 실내시험에서 구한 전단강도를 이용하여 더치콘/피에조콘관입시험의 콘계수를 각각 결정하였는데 콘관입저항의 차이로 인하여 두

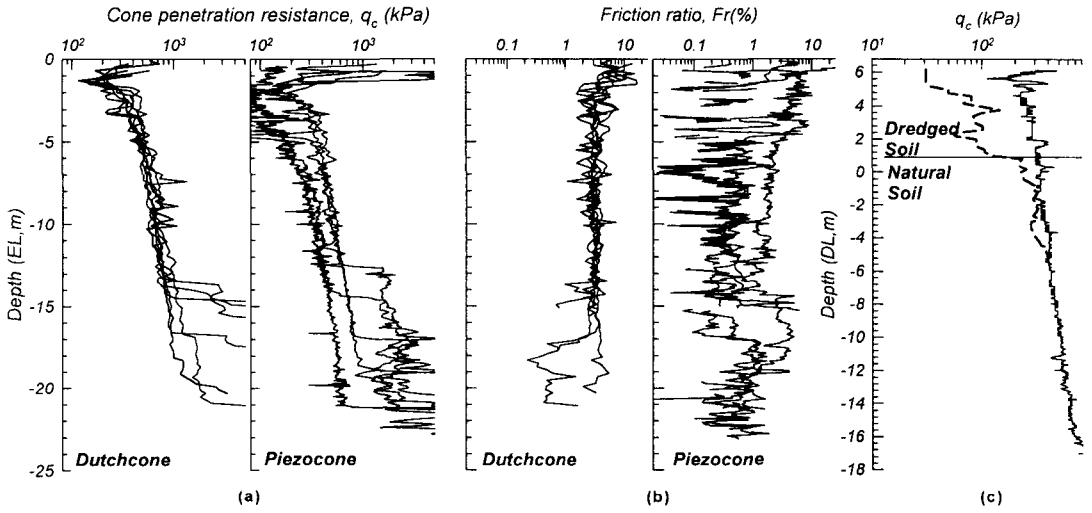


Fig. 13 Comparisons of Dutch cone and piezocone tests in soft clay layer ; (a) cone resistances (b) friction ratios (c) Dutch cone and piezocone results in dredged area

시험방법의 콘계수는 차이를 보이고 있다. 콘관입 시험으로부터 추정한 전단강도를 현장베인, 실내시험결과의 전단강도와 비교한 결과 두 시험방법 모두 잘 일치하고 있다. 더치콘/피에조콘 콘형상의 차이로 인하여 콘관입저항값은 차이를 보이는데, 6개소 데이터를 이용하여 두 시험법의 콘관입저항의 상관관계식을 구하였다. 이 식을 이용하여 환산한 결과 피에조콘 관입저항과 잘 일치하고 있다. 또한 준설토와 같이 매우 연약한 지층에 두 시험방법을 적용한 사례를 제시하고 연약지반 조사에서 더치콘 관입시험의 유연성을 평가하였다.

이로부터 연약지반에 대한 조사계획 수립시 피에조콘관입시험은 수평방향압밀계수 등의 특수한 목적을 위해 필요개소에서 수행하고, 연약지반의 분포심도와 지층의 분류, 그리고 전단강도의 평가를 위해서는 상대적으로 경제적인 더치콘시험을 적극 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

References

1. ASTM. *Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. ASTM D 5778-95
2. Jang, I. S., Lee, S. J., Chung, C. K. and Kim, M. M.. 2001. Piezocone factors of Korean clayey soils. *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol. 17, No. 6, 15-24 (in Korean)
3. JeollaNamdo. 2002. *Soils Report for Nam-Ak New Town*. (in Korean)
4. Kim, J. P.. 1999. *Collection of mechanical cone penetration test for civil engineers*.(in Korean)
5. Kulhawy, F. H. and Mayne, P. H.. 1990. Manual on estimating soil properties for foundation design. *Electric Power Research Institute* EPRI.
6. Lim D. I.. 2001. Late Quaternary Stratigraphy and Sedimentology of Tidal-Flat Deposits: Kyunggi Bay, Namyang Bay, Chonsu Bay, Hampyung Bay and Haenam Bay, Western Coast of Korea. Ph. D. Diss. : Seoul National University.
7. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M.. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie academic and Professional, UK.
8. Robertson, P. K.. 1990. Soil classification using the cone penetration tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 27(1). 151-158.
9. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. and Greig, J.. 1986. Use of piezometer cone data. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86:Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksberg. 1263-1280. ASCE.
10. Rol, A. H.. 1982. Comparative study on cone resistance measured with three types of CPT tips. *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*. ESOPT II. Amsterdam. 2. 813-819. Balkema pub., Rotterdam.
11. Rural Development Corporation. 1998. *Practical Application of Cone Penetration Testing*. (in Korean)