

연약지반에 대한 기계식 및 전자식 콘관입시험 비교 연구

Comparative study of Dutchcone and piezocone test on soft ground

장병욱¹⁾, Pyoung-Wuck Chang, 김재현²⁾, Jae-Hyun Kim, 김동범³⁾, Dong-Beom Kim, 윤상묵⁴⁾, Sang-Muk Yun, 원정윤⁵⁾, Jeong-Yun, Won

¹⁾ 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 교수, Professor, School of Biological Resources & Materials Engineering, Seoul Nat'l Univ.

²⁾ 삼안건설기술공사 토질부 전무이사, Executive Managing Director, Saman Engineering Co. Ltd.

³⁾ 삼안건설기술공사 토질부 이사, Managing Director, Saman Engineering Co. Ltd.

⁴⁾ (주)쏘일테크엔지니어링 대표이사, President, Soiltech Engineering Co. Ltd.

⁵⁾ (주)쏘일테크엔지니어링, Soiltech Engineering Co. Ltd.

개요(SYNOPSIS) : A comparative study of 134 mechanical (Dutch cone) and 9 electronic cone (Piezocone) penetration data from the southern part of Korea has been performed. In general, Dutch cone results may be different from piezocone results due to the difference in structure of the cones.

Cone penetrometer test data were analyzed and plotted in soil classification chart proposed by Robertson et. al.(1986,1990). Cone factors of Dutch cone and piezocone test have empirically 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. 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.

Key Words : Dutchcone test, Piezocone test, Site Characterization, Soft Clay, Shear Strength

1. 서론

콘 관입시험은 유럽과 북미, 일본뿐만 아니라 전세계적으로 널리 사용되고 있는 지반조사 방법의 하나이다. 콘관입시험의 최초 형태는 1910년대 초반 스웨덴과 덴마크 철도청에서 개발되었으며, 최근 사용되는 것과 유사한 형태는 1930년대 초반 네덜란드에서 개발되었다. 그후 이중관과 맨틀콘이 개발되었고 마찰슬리브가 설치된 마찰맨틀콘으로 이어져 현재에 이르고 있다. 이 형태의 콘관입시험 형태를 흔히 기계식 콘관입시험 또는 더치콘관입시험이라 부른다. 전자식콘(일명 피에조콘)은 1948년에 처음 소개된 후, 전자 측정장치의 발달과 함께 콘 내부의 다양한 측정장치들이 개발되어 관입저항력, 주변마찰력, 간극수압 등을 측정할 수 있게 발전되었으며, 피에조콘 외에 탄성파탐사콘, 전기전도율 측정콘, 콘 프레스 미터 등 다양한 형태로 응용되어 활용되고 있다.

국내에도 1960년대 초 목포-영산강 사업지구 조사를 위하여 유엔 식량농업기구에서 외국기술자들이 갯벌에서의 지반조사를 위하여 이중관식 콘관입시험기를 사용한 이후 최근 그 적용 빈도 및 범위가 급속히 확산되고 있다. 기계식콘(더치콘)관입시험은 원추와 마찰슬리브가 분리되는 이중관 형태 사이에 미세입자가 끼는 현상, 지반심도에 따라 연속적인 결과를 얻을 수 없는 점(20cm 간격 측정), 그리고 시험

결과의 정확성이 시험자의 숙련 정도에 크게 의존한다는 등의 단점들로 인해 점차 퇴조하여 전자식콘(피에조콘)으로 대체되고 있는 실정이다.

하지만, 국내에서 더치콘 시험결과의 다양한 분석방법에 대한 사례 제시와 함께 더치콘과 피에조콘관입시험의 비교, 분석을 통해 각 시험방법이 가지는 장단점을 비교 평가한 사례는 찾기 힘들다. 본 논문에서는 대단위 연약지반 조사에 적용된 더치콘관입시험 결과를 다양하게 분석하고 피에조콘관입시험과 비교 분석함으로써 더치콘관입시험을 재평가하였다.

2. 조사현장 및 시험장치

2.1 조사현장의 지반특성

본 논문에서 사례로 제시한 현장은 남악신도시 택지개발 예정지구로서, 행정구역상 전라남도 목포시와 무안군에 걸쳐 있다. 본 현장은 Fig.1에서 보여지듯이 과거 영산강 하구언 건설 이전에는 해수와 담수가 교차하는 전형적인 하구언에 위치하고 있다. 영산강 하구언의 건설과 함께 건설된 대죽방조제로 내부에 형성된 간척지는 현재 농지로 사용되고 있다.

Fig.1에서 사업지구의 주변 지형과 함께 더치콘/피에조콘관입시험의 조사위치를 나타내었다. 본 현장의 연약층은 최대 25.0m로서 사업부지 내에서 평균 11.9m의 연약층후를 보이고 있다. 본 현장에서 수행한 더치콘관입시험은 총 134개소이며, 피에조콘은 9개소에서 수행하였다. 두 시험 방법에 의한 결과를 비교하기 위하여 시추조사와 자연시료채취, 피에조콘, 더치콘관입시험을 동일한 지점 9개소에서 수행하였다. Fig.2에서는 본 현장에서의 대표적인 조사공에서의 심도에 따른 지수특성을 보여주고 있다. Fig.2에서 보여지듯이, 본 현장의 연약지반은 자연함수비(평균 55.9%)가 액성한계(평균 49.1%)보다 같거나 크게 나타나고 있으며, 소성지수는 평균 27.8으로 중간내지 높은 소성상태에 있다.

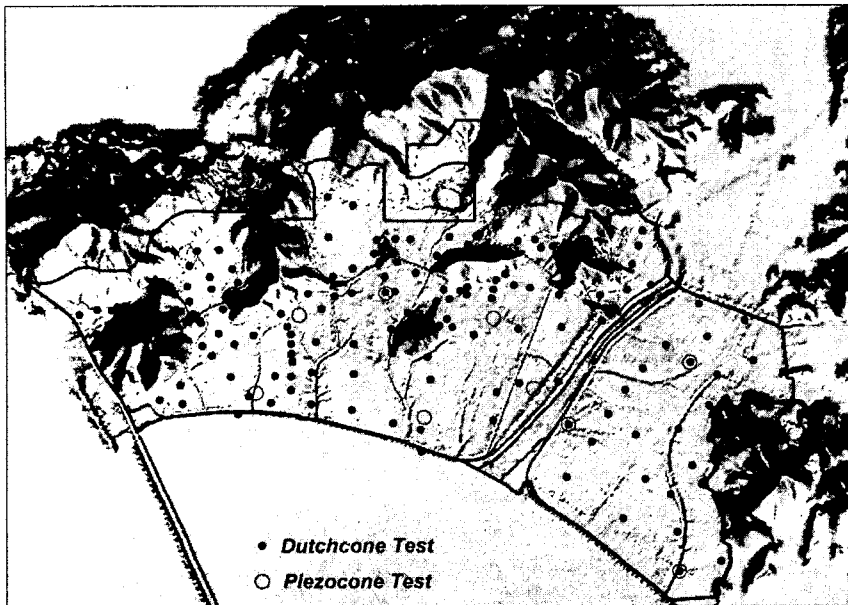


Fig. 1 Site investigation layout
(Dutchcone and piezocone test locations)

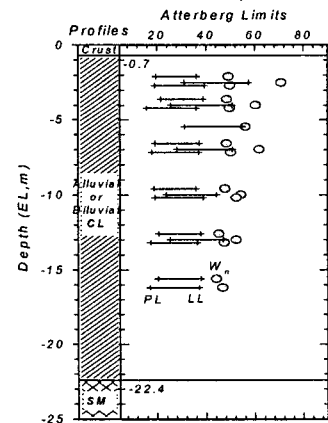


Fig. 2 Index properties in tested site

2.2 더치콘/피에조콘시험장치

사용된 더치콘장비의 모식도를 Fig.3에 나타내었는데, 일반적으로 더치콘시험은 인력으로 운반하게 되어 있어 많은 번거로움이 있었는데, 무한궤도를 장착한 소규모 경량 주행장치에 더치콘시험장비를 장착하여 Fig.4에 보여지는 바와 같이 신속한 이동과 함께 정치의 정확성과 편리를 도모하였다. 시험에 사용한 콘의 형상은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 선단각 60°콘저면적 10 cm², 마찰슬리브 표면적 145 cm²의

맨틀콘으로 관입저항과 마찰력을 2cm/s 속도로 관입하면서 측정하였다. 피에조콘장비는 Hogentolger사 제품으로 선단면적 10 cm², 마찰슬리브 표면적 150 cm²의 콘과 간극수압 측정 장치를 가지고 있다.

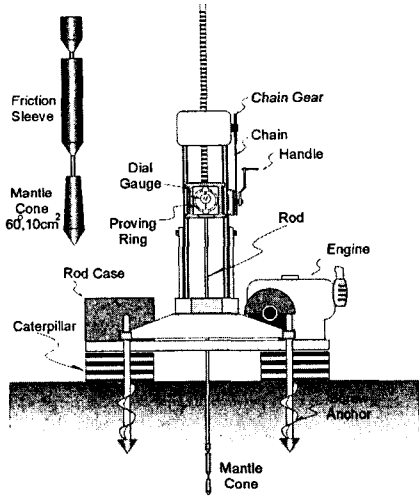


Fig.3 schematical figure of Dutchcone test

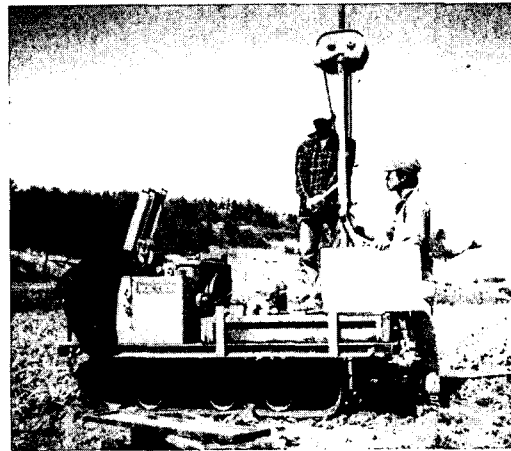
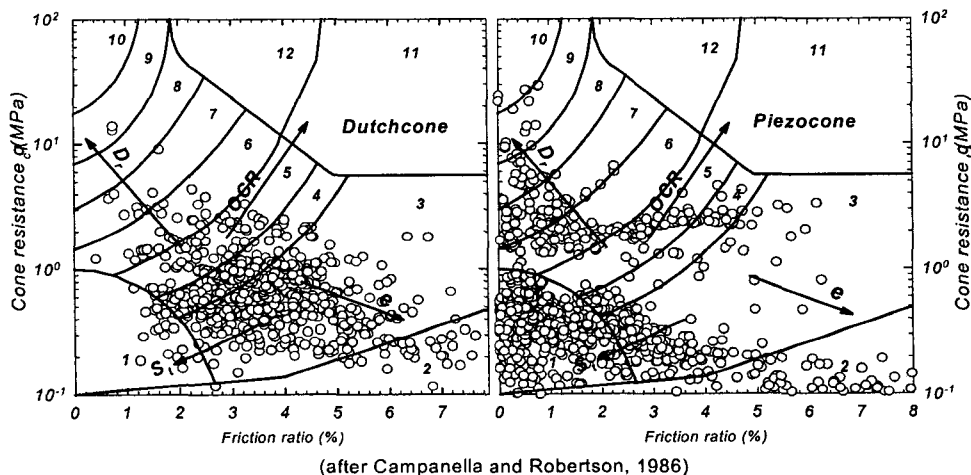


Fig. 4 Figure of Dutchcone test

3. 더치콘/피에조콘관입시험 결과의 해석 및 비교

3.1 지층분류

콘관입시험과정에서 측정된 콘관입저항과 마찰력, 간극비를 이용하여 Fig.5와 Fig.6에서와 같이 지반을 분류할 수 있는데, Fig.5에서는 더치콘관입시험 결과를 이용한 지층 분류 결과를 같이 나타내었다. 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 분류할 수 있었다. Fig.6에서는 피에조콘 결과만을 이용한 분류결과로서, Zone 3과 Zone 4로 대부분 분류되었다. 이러한 분류상의 차이는 피에조콘의 경우 간극수압을 이용한 분류를 수행하는 반면, 더치콘의 경우 간극수압을 반영하지 못하기 때문에 발생하는 차이로 판단된다. 본 조사현장에서는 sand seam이 확인되지 않았기 때문에 협재된 층을 파악하는 능력에 대한 비교는 할 수 없었다. Fig.5에서 보여지는 두 시험 방법간의 차



(after Campanella and Robertson, 1986)

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

Fig.5 Soil classification chart based on cone penetration resistance

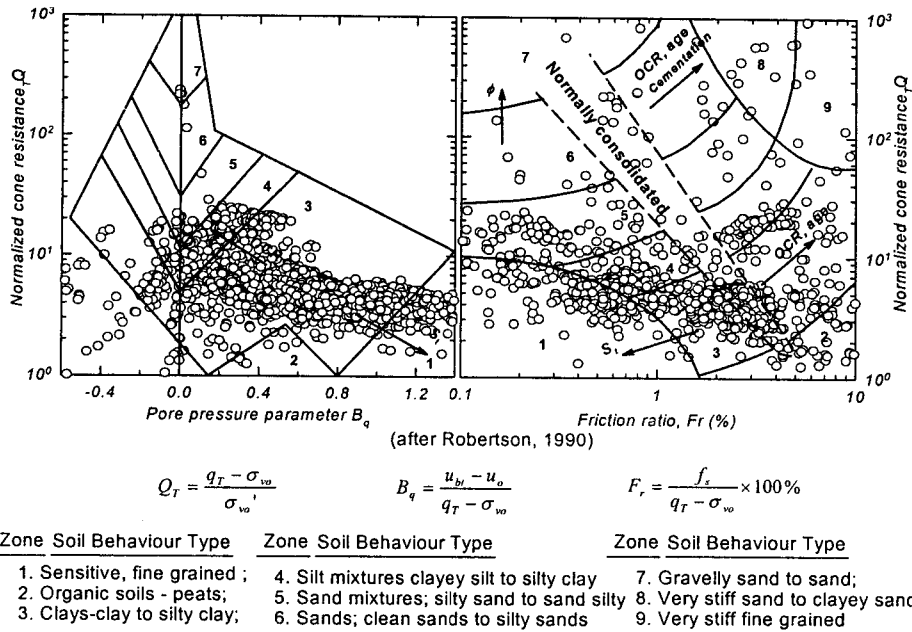


Fig. 6 Soil classification chart based on normalized data(Piezocone)

3.2 연약층후 파악

대단위 사업지구의 지반조사에서는 연약층의 분포를 충분히 파악할 수 있을 정도로 충분한 수량의 시추조사를 수행하기 어렵기 때문에, 콘관입시험을 활용하면 시추조사와 더불어 연약층후를 파악할 수 있다. 콘관입시험에서는 콘관입저항을 연속적으로 측정할 수 있는데, 이를 이용하여 연약지반의 층후를 파악할 수 있기 때문이다. 본 현장에서는 연약지반 기준을 SPT N<10/30, 더치콘관입저항 $q_c < 20 \text{ kg/cm}^2$ 로 적용하였다. Fig.7에서는 시추조사와 함께 더치콘관입시험으로 파악한 지층단면의 예를 보여주고 있다. Fig.7에서와 같이 결정한 연약층후를 이용하여 Fig.8에서는 사업지구의 연약층 분포를 등고선으로 작성하였다. Fig.8의 연약층후는 연약지반 시추조사 118공, 더치콘관입시험 134회 결과를 이용하여 작성한 것이다. 이로부터 시추조사는 실내시험을 위한 시료채취, 지층단면의 토질구성 파악, 구조물 설치 예정지점의 암반분포 등을 결정하기 위하여 최소한으로 배치하고 더치콘과 같은 콘관입시험을 이용하여 지층분포를 결정하는 것이 합리적이라는 것을 알 수 있다.

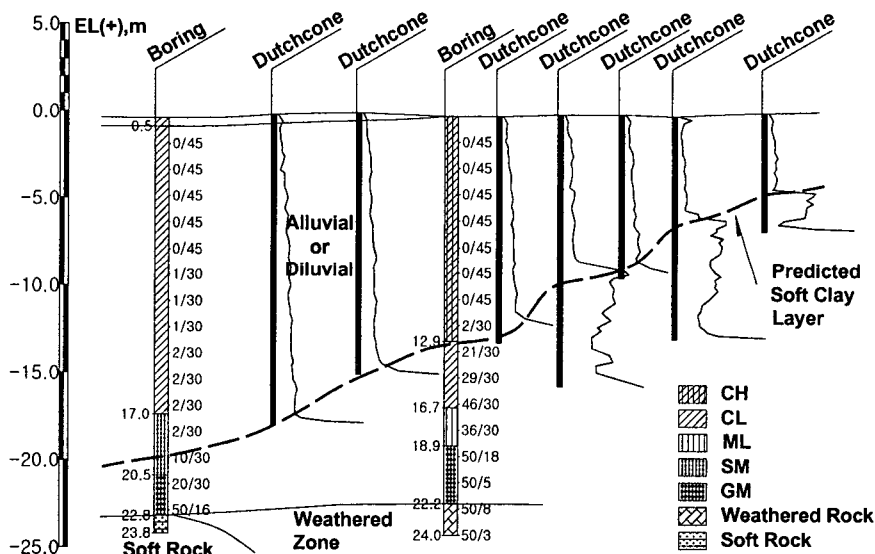


Fig.7 Typical cross section using Dutchcone results

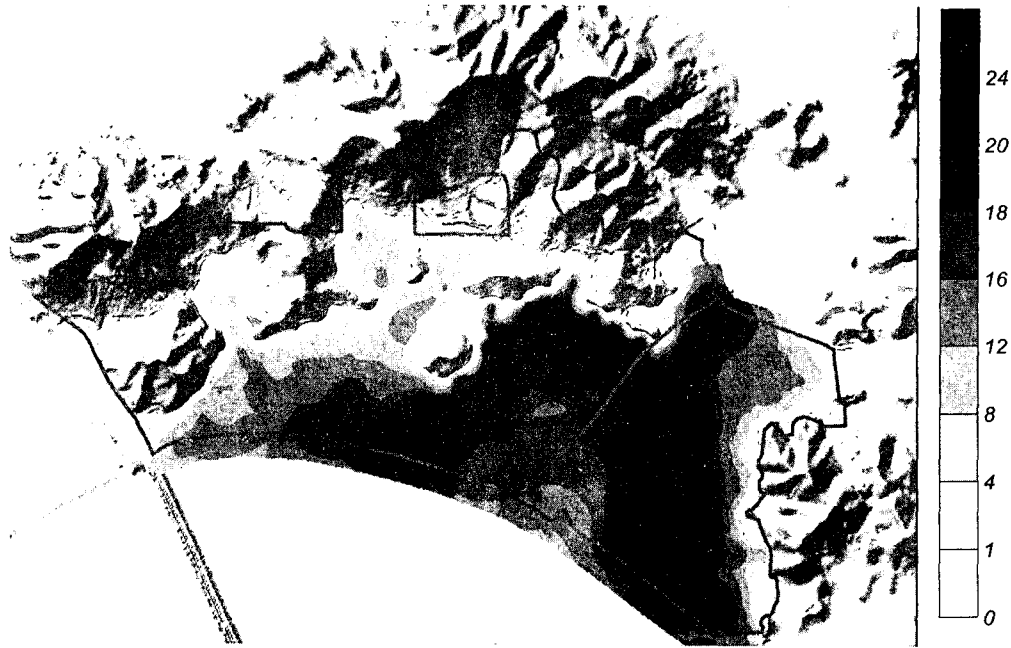


Fig.8 Contours of soft clay layer

3.3 전단강도 추정

더치콘/피에조콘관입시험은 연속적인 콘관입저항값으로 지반의 강도를 표현할 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 상재하중을 고려한 전단강도 추정식(식(1))을 위주로 연약층의 전단강도를 추정하였다. 식(2)는 더치콘관입시험에 대하여 간단하게 전단강도를 구하기 위해 제시되어 있는 식으로서 피에조콘에는 적용하지 않았다.

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

$$S_u = \frac{q_c}{N_k} \quad (2)$$

여기서, q_c 는 콘관입저항, σ_{vo} 는 연직전응력, γ 는 습윤 또는 포화단위중량, z 는 심도, N_k 는 무차원 콘계수로서 해석적 방법과 경험적 방법으로 구할 수 있다. 해석적 방법에 의한 콘계수의 결정과정에는 많은 가정이 도입되기 때문에 실내시험결과를 이용하여 콘계수를 산정하는 방법이 많이 사용되고 있다.

Fig.9에서 실내시험으로 구한 연약층의 전단강도와 콘관입저항의 상관관계를 이용하여 콘계수를 산정한 결과를 나타내었다. 더치콘관입시험의 콘계수 $N_k=21$ 이며 피에조콘관입시험의 콘계수 $N_k=14$ 로 산정되었는데, 이와 같은 콘계수의 차이는 두 시험방법에서 측정된 관입저항의 차이로 인한 것으로 판단되며, 두 시험방법에서의 콘관입저항의 차이는 Fig.12에서 자세히 다루고 있다. Fig.9에서 더치콘과 피에조콘 결과로부터 각각 구한 전단강도는 모두 실내시험, 현장배인시험(FVT)에서 구한 전단강도와 높은 상관관계를 보여주고 있음을 알 수 있으며, 더치콘의 경우 식(1)과 식(2)를 이용한 전단강도 추정 결과는 서로 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig.10에서는 Fig.9에 산정한 콘계수 N_k 와 식(1)을 이용하여 더치콘/피에조콘으로 추정된 지반 강도를 실내시험, 현장배인시험으로 구한 비배수전단강도와 비교하여 나타내었다. Fig.10을 통하여 더치콘과 피에조콘 모두 합리적으로 연약층의 비배수 강도를 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 현장배인시험에 의한 전단강도가 다른 실내시험에 비해 콘관입시험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

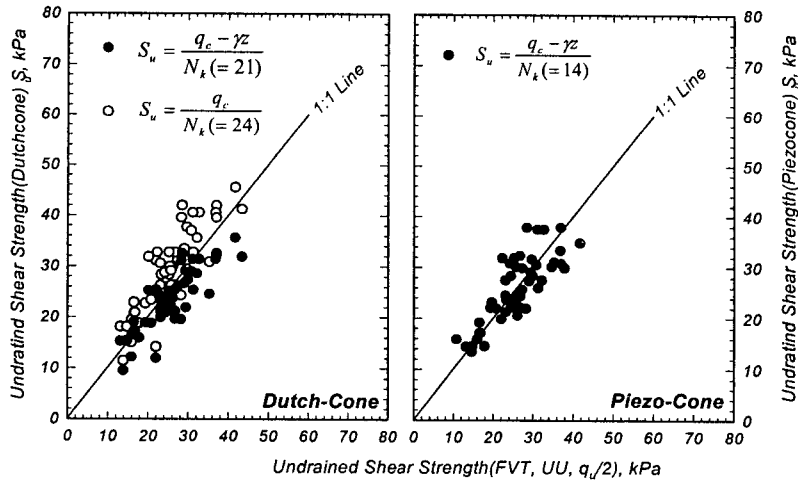


Fig. 9 Empirical cone factor determination using filed vane and laboratory test results

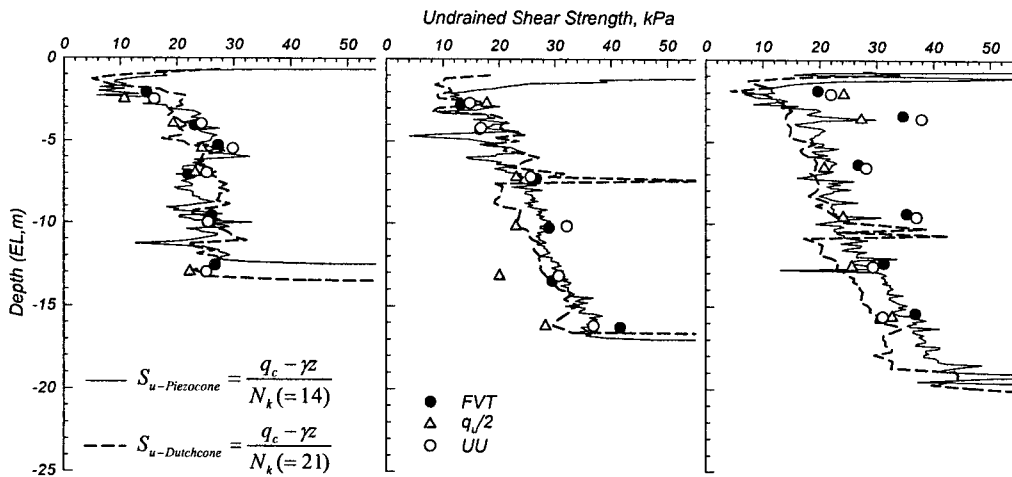


Fig. 10 Undrained shear strength predicted by cone penetration tests

3.4 콘관입저항값의 비교

더치콘과 피에조콘의 콘 형상은 Fig.11에서 보여지는 바와 같이 약간 다르다. 더치콘 형상은 콘 배면의 면적이 콘면적보다 다소 작게 형성되어 있다. 콘의 저면적은 동일하게 10 cm^2 이고, 콘 선단각도는 60° 이다. 콘 형상의 차이로 인하여 더치콘과 피에조콘의 콘관입저항은 다르게 나타나는데, 점성토 지반에서는 더치콘(기계식콘)의 관입저항이 피에조콘(전자식콘)보다 다소 크게 나오며 모래질 지반에서는 그 반대의 경향을 보인다.

Rol(1982)는 Holland의 모래질 현장에 대한 결과를 바탕으로 기계식 콘관입저항 q_{cm} 과 전자식 콘관입저항 q_{ce} 간의 관계에 대해 다음의 식을 제안하였다.

$$\frac{q_{cm}}{q_{ce}} = 0.85 + 0.00035(D+2)q_{ce} \quad (3)$$

여기서, q_{cm} 은 기계식콘의 관입저항, q_{ce} 는 전자식콘의 관입저항(MPa), D =관입깊이(m)이다. $(D+2)q_{ce}$ 항은 기계식콘의

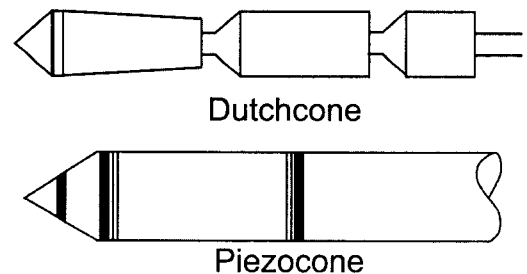


Fig. 11 Comparison of the shape of Dutchcone and that of piezocone

경우 내관에 의해 발생하는 마찰을 고려하기 위해 도입된 것이다.

Kulhawy and Mayne(1990)은 14개 모래질 현장과 10개의 점토와 실트질 현장에 대한 자료를 바탕으로 다음과 같은 관계식을 제안하였다. 여기서, P_a 는 대기압이다.

$$\left(\frac{q_{ce}}{P_a}\right) = 0.47 \left(\frac{q_{cm}}{P_a}\right)^{1.19} \quad (4)$$

Fig.12에서 더치콘과 피에조콘 관입저항값을 식(4)를 이용하여 환산하고 그 결과를 비교하였다. 비교 결과, 식(4)를 이용하면 기계식콘(더치콘)관입저항을 전자식콘(피에조콘)관입저항으로 변환할 수 있음을 알 수 있었다.

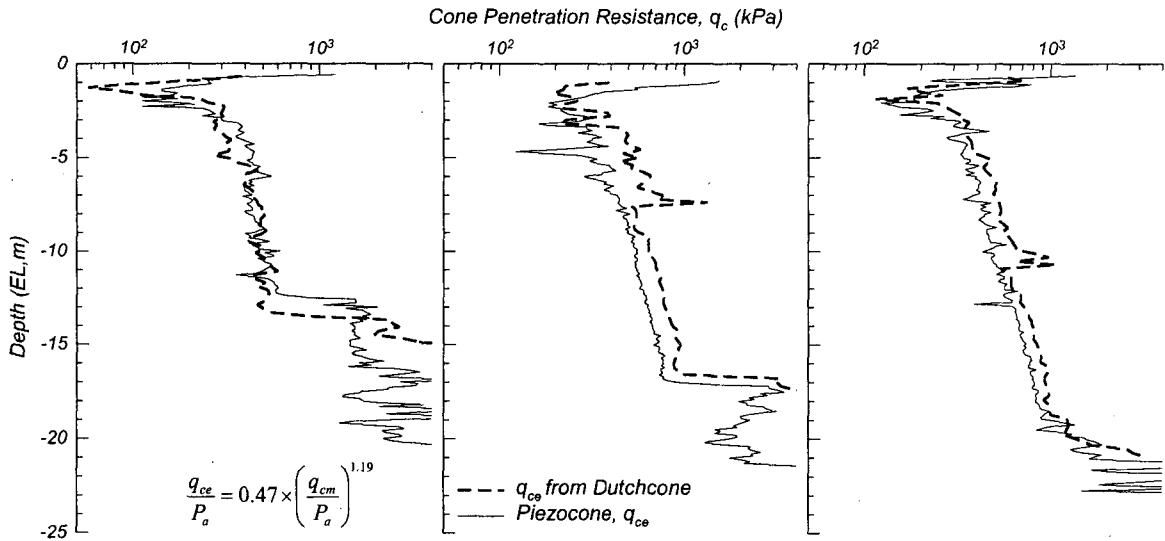


Fig.12 Relationship between q_c derived from piezocone and Dutchcone test

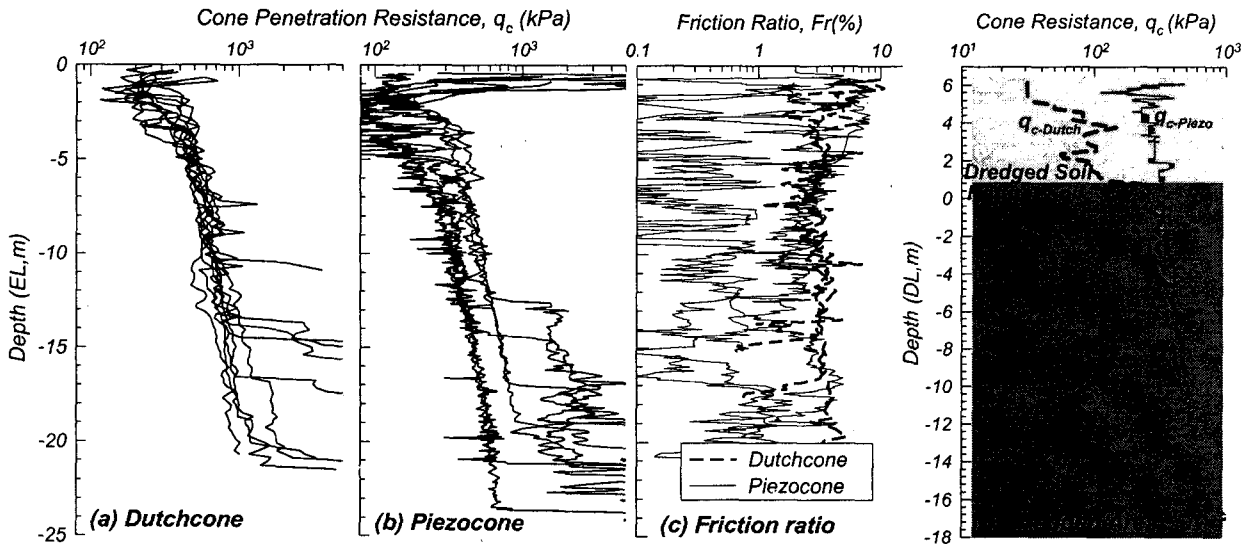


Fig. 13 Sensitivity of Dutchcone and piezocone tests in soft clay layer (a) Dutchcone (b) piezocone (c) friction ratio (d) Dutchcone and piezocone results in dredged area

본 조사현장과 같이 매우 연약한 점토지반에서, 더치콘과 피에조콘의 관입저항과 마찰비를 비교해보면, Fig.13(b),(c)에서와 같이 피에조콘은 분산이 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 더치콘의 경우 지반의 연

경에 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 현상이다. 이러한 현상은 특히 마찰비(Fig.13(c))에서 확연히 드러나고 있다. Fig.13(d)는 광양항 지역에서 수행한 별도의 자료로서, 연약한 점토질 원지반 위에 점토질 흙을 준설한 현장에 대한 더치콘, 피에조콘시험 결과를 보여주고 있다. Fig.13(d)의 경우 준설토와 원지반은 분명한 강도의 차이를 보임에도 불구하고 피에조콘으로는 그 차이를 명확히 보여주지 못하였다. 하지만 더치콘관입시험에서는 검력계의 용량을 조정함으로써 준설토와 원지반의 강도 차이를 명확하게 측정할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 연약지반조사에 널리 사용되고 있는 콘관입시험 중 기계식콘(더치콘)과 전자식콘(피에조콘)관입시험 결과를 비교하기 위하여 동일한 지점에서 두 시험을 실시하고, 실내시험과 현장배인시험으로 구한 전단강도와 비교하였다. 더치콘과 피에조콘 결과를 이용하여 지층을 분류한 결과 더치콘의 경우 간극수압을 측정하지 못하기 때문에 피에조콘의 분류결과와 차이를 보이고 있지만 심각한 차이를 보이지는 않고 있다. 연약지반으로 구성된 대단위 사업지구에 대한 지반조사에서 시추조사와 함께 콘관입시험, 특히 더치콘관입시험을 대량으로 실시함으로써 연약층후의 공간적 분포를 정밀하게 파악할 수 있었다.

더치콘/피에조콘 콘형상의 차이로 인하여 콘관입저항값은 차이를 보이고 있는데, 이러한 차이는 기존의 연구사례에서 제시된 식으로 변환하여 비교한 결과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 현장배인시험과 실내시험에서 구한 전단강도를 이용하여 더치콘/피에조콘관입시험의 콘계수를 결정하였다. 콘관입저항의 차이로 인하여 두 시험방법의 콘계수는 차이를 보이고 있으나, 콘관입시험으로부터 추정된 전단강도를 현장배인, 실내시험결과의 전단강도와 비교한 결과 두 시험방법 모두 잘 일치하고 있다.

이상의 결론에서 연약지반에 대한 조사계획 수립시 연약지반의 분포심도와 지층의 분류, 그리고 전단강도의 평가를 위해서는 상대적으로 경제적인 더치콘시험을 적극 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. 김주범(1999), 토목기술자를 위한 이중관식원추관입조사자료집
2. 농어촌진흥공사(1998), 콘관입시험 결과의 해석 및 실무적용
3. 동부건설, 서울대학교 공과대학(1998), 피에조콘 관입시험 활성화를 위한 동부건설(주)-서울대학교 공과대학 산학협동연구보고서
4. 전라남도(2002), 남악신도시 택지개발계획수립 지반조사보고서
5. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.H.(1990), "Manual on estimating soil properties for foundation design", *Electric Power Research Institute, EPRI*, August, 1990
6. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J. J. M (1997) *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie academic and Professional, UK
7. Robertson, P.K.(1990), "Soil classification using the cone penetration tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158
8. 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
9. 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.