

피에조콘을 이용한 국내 지반 흙의 분류

Soil Classification from Piezocone Penetration Test in Korea

이 선 재*¹

Lee, Sun - Jae

정 충 기*²

Chung, Choong - Ki

김 명 모*³

Kim, Myoung - Mo

Abstract

To apply piezocone test to soil classification, several classification charts based on correlations between its results and basic characteristics of soils have been developed. However, it is necessary to investigate their applicability to Korean soil, since they were the results obtained from the limited number of foreign sites. In this study, 41 piezocone penetration tests for various sites spreading widely over Korean territory were carried out. Correlations between piezocone test results and basic characteristics and the applicability of existing classification charts were investigated. Conclusively, new classification charts based on Unified Soil Classification System were developed with a local confidence.

요 지

피에조콘 관입시험을 흙의 분류에 활용할 목적으로 그 결과와 흙의 기본적 특성치와의 상관관계를 이용한 여러 분류도표들이 개발되었다. 그러나, 이 도표들은 외국의 제한된 지역의 시험결과들을 토대로 만들어졌기 때문에 검증없이 국내 지반에 적용하기에는 무리가 있다. 이 연구에서는 국내 여러 지역에서 총 41회의 피에조콘 관입시험을 실시하였으며, 그 결과와 흙의 종류별 특성과의 상관관계를 분석하고 기존 분류도표에 대한 적용성을 검토한 후, 이를 보완하여 국내 지반의 지역성에 맞는 피에조콘 시험을 위한 새로운 분류도표를 통일분류법에 근거하여 개발하였다.

Keywords : Piezocone test, Classification chart

*1 동부엔지니어링(주) 지반공학부 과장

*2 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*3 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

지반조사를 위하여 가장 많이 시행되고 있는 현장시험방법의 하나인 피에조콘 관입시험은 결과의 정확성 및 시험의 신속성과 경제성에 있어서 매우 우수한 방법으로 인정받고 있다. 특히, 이 시험은 흙을 육안으로 관찰할 수 없다는 단점을 가지고 있음에도 불구하고 원추관입 저항력, 마찰저항력, 그리고 간극수압을 이용하여 지반내 흙의 분류를 비교적 근사하게 시행할 수 있고, 지반 심도에 따라 연속적인 결과를 얻기 때문에 다른 현장시험에서는 확인하기 어려운 지반내 얇은 층을 정확히 찾을 수 있는 등 아주 유용한 지반조사 방법의 하나이다.

현재 피에조콘 관입시험 결과를 이용한 몇 가지의 흙의 분류도표가 개발되어 지반공학적인 문제의 해결에 이용되고 있으나, 이것들은 주로 북미나 유럽 등지에서서의 경험을 토대로 만들어진 것으로서 검증없이 국내 지반에 적용하는 데는 무리가 있다. 따라서, 이 연구에서는 국내 여러 지역에서 시행한 41회의 피에조콘

관입시험 결과를 바탕으로 흙의 종류에 따른 원추관입 저항력 및 마찰력과 간극수압계수의 상관관계를 파악하고, 이로 부터 해외에서 개발된 흙의 분류차트의 국내 지반에 대한 적용성을 검증한 다음, 마찰력과 간극수압계수를 이용한 국내지반에 맞는 새로운 흙의 분류도표를 개발하고자 한다.

2. 연구 대상 지반

피에조콘 관입시험은 경기, 충남, 전남, 경남, 강원 등지의 총 13개 현장에서 이루어 졌다. 표 1에는 흙의 종류를 결정하기 위한 시험지역, 시험횟수, 그리고 시험이 이루어진 깊이와 그 깊이까지의 대표적 토질을 수록하였고, 그림 1은 시험위치를 나타내고 있다.

3. 콘 관입시험을 통한 흙의 분류 방법

콘 관입시험을 통한 지반내 흙의 분류는 마찰 맨틀콘이 개발된 이후로 가장 먼저 시작된 연구 중의 하나이다. 마찰 맨틀콘을 이용한 콘

표 1. 피에조콘 관입시험 위치 및 시험횟수

시험지역		시험횟수	시험깊이	대표적 토질(통일분류기호)
경기	평택	4회	15m	CL, SP, SW
	시흥	4회	5m	CL, SM, SP
	일산	2회	20m	SM, SP
	영종도	3회	20m	CL, SM, SP
충남	서천	4회	30m	CL, SM, SP
	아산	3회	20m	CL, SM
전남	영암	3회	20m	CH, SP, SW
	광양	2회	30m	CL, CH, ML, SP
경남	양산	4회	30m	CL, SM
	창원	2회	10m	SM, SC
	하동	4회	30m	CL, CH, MH, SP
강원	강릉 내곡동	3회	15m	CL, MH, SP, SW
	강릉 경포대	3회	15m	SP, MH, SW

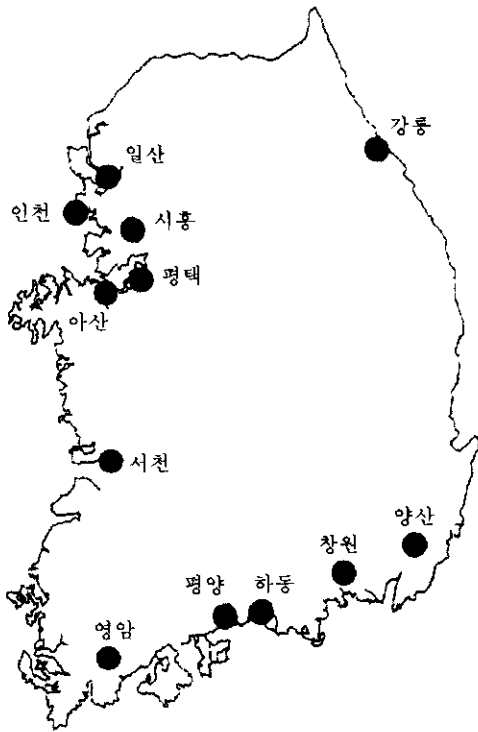


그림 1. 피에조콘 관입시험 위치

관입시험의 경우 콘이 관입될 때 원추면에서의 저항력인 원추관입 저항력(q_c)과 마찰슬리브에서의 저항력인 마찰저항력(f_s)을 측정할 수 있다.

Schmertmann(1978)은 미국 Florida 북부 부근에서의 마찰멘틀콘을 이용한 콘 관입시험 결과를 바탕으로 식 (1)과 같이 정의되는 마찰률을 이용한 흙의 분류차트를 제안하였다.

$$R_f = \frac{f_s}{q_T} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, R_f 는 마찰률, q_T 는 간극수압으로 인한 부등단면적 효과에 대하여 보정한 원추관입 저항력, 그리고 f_s 는 마찰저항력이다.

그러나, 마찰멘틀콘을 이용하는 경우에 시험상의 큰 번거로움이 있고, 마찰슬리브와 원추 사이에 흙이 끼는 현상 등으로 인한 마찰저항

력 측정상의 문제점들이 인식되고 전자식 콘의 이용이 증대되면서 전자식 콘의 결과로부터 마찰률을 이용한 도표들이 개발되었다(Douglas and Olsen, 1981; Robertson and Campanella, 1983). 한편, Mohr 파괴포락선이 구속응력이 증가함에 따라 곡률을 가진 지수함수의 형태로 나타난다는 점에 착안하여, 유효 연직응력에 Mohr 파괴포락선의 곡률을 지수로 취한 값으로 정규화 시킨 원추관입 저항력과 유효 연직응력으로 정규화 시킨 마찰저항력을 이용한 분류도표들이 제안되었다(Olsen and Farr, 1986; Olsen, 1988). 그러나, 이 경우에 Mohr 파괴포락선 곡률을 결정하는 것이 매우 어렵기 때문에 이러한 도표를 이용하기에는 현실적으로 많은 어려움이 있다.

피에조콘이 개발된 이후로는 간극수압을 이용한 흙의 분류도표들이 제안되기 시작하였다. 콘 관입시험시 간극수압은 흙의 종류에 따라 매우 민감하게 발생하므로 흙의 분류에 효과적으로 활용될 수 있다. 기존의 마찰저항력의 경우 그 측정치가 매우 작아서 현재 이용되고 있는 스트레인 게이지로도 정확한 측정이 어려운 점이 문제점으로 제기되었으며, 이를 감안하여 상대적으로 측정의 정확도가 높은 간극수압이 흙의 분류에 활용되기 시작하였다. 이에 대한 연구는 미국 Boston과 Louisiana 지역에 대해서 처음 시도되어, 간극수압을 이용한 흙의 분류방법에 대한 신뢰성이 인식되었다(Baligh et al., 1980). 이 후 남아프리카 지역에서의 시험 결과로부터 원추관입 저항력과 과잉간극수압을 이용한 흙의 분류도표가 제안되었다(Jones and Rust, 1982).

Senneset과 Janbu(1985)는 보다 체계적인 분류를 위하여 식 (2)로 정의되는 간극수압계수 B_q 를 매개변수로 이용하여 싱가포르 지역에 대한 흙의 분류도표를 제안하였다.

$$B_q = \frac{u_{bt} - u_0}{q_T - \sigma_{vo}} \quad (2)$$

여기서, B_v 는 간극수압계수, u_{bv} 는 측정된 간극수압, u_v 는 정수압, q_{rv} 는 원추관입 저항력, 그리고 σ_{vm} 는 전체 연직응력이다.

Campanella와 Robertson(1988)은 북미 여러 지역에서의 시험결과를 토대로 원추관입 저항력, 간극수압계수, 그리고 마찰률을 동시에 사용하는 보다 체계적인 흙의 분류도표를 제안하였으며, 특히 간극수압 소산시험을 통한 흙의 분류가 상당한 도움을 줄 수 있다고 강조하였다. 그러나, 그들의 연구에 의하면, q_{rv} , f , 그리고 u_{bv} 값들은 지반심도가 깊어질 수록 구속압의 영향으로 그 값이 증가하는데, 지금까지 제안된 분류도표들은 거의가 지반심도 30m 이내인 토질에 대한 결과들을 근거로 하였기 때문에 상재하중이 매우 큰 대심도 지반에 있어 적용이 어렵다고 밝히고 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 심도 30m 이상의 대심도 지반에 대하여 정규화된 원추관입 저항력과 정규화된 마찰률 및 간극수압

계수를 이용한 흙의 분류도표들이 제안되기도 하였다(Robertson, 1990; Jefferies and Davies, 1991).

4. 흙의 종류에 따른 피에조콘 시험결과 분석

이 연구에서는 피에조콘 시험 결과를 흙의 분류에 활용하기 위하여 시행된 모든 피에조콘 시험결과를 각 시험 현장의 다양한 심도에서 채취된 시료의 기본 특성치 시험결과와 통일분류법(Unified Soil Classification System)을 토대로 하여 비교 분석하였다. 그림 2와 그림 3은 그 결과로서, 그림 2는 흙의 종류 및 기본적인 특성치에 따른 마찰률과 원추관입 저항력의 분포를 나타내며 그림 3은 흙의 종류 및 기본적인 특성치에 따른 간극수압계수와 원추관입 저항력의 분포를 나타내고 있다.

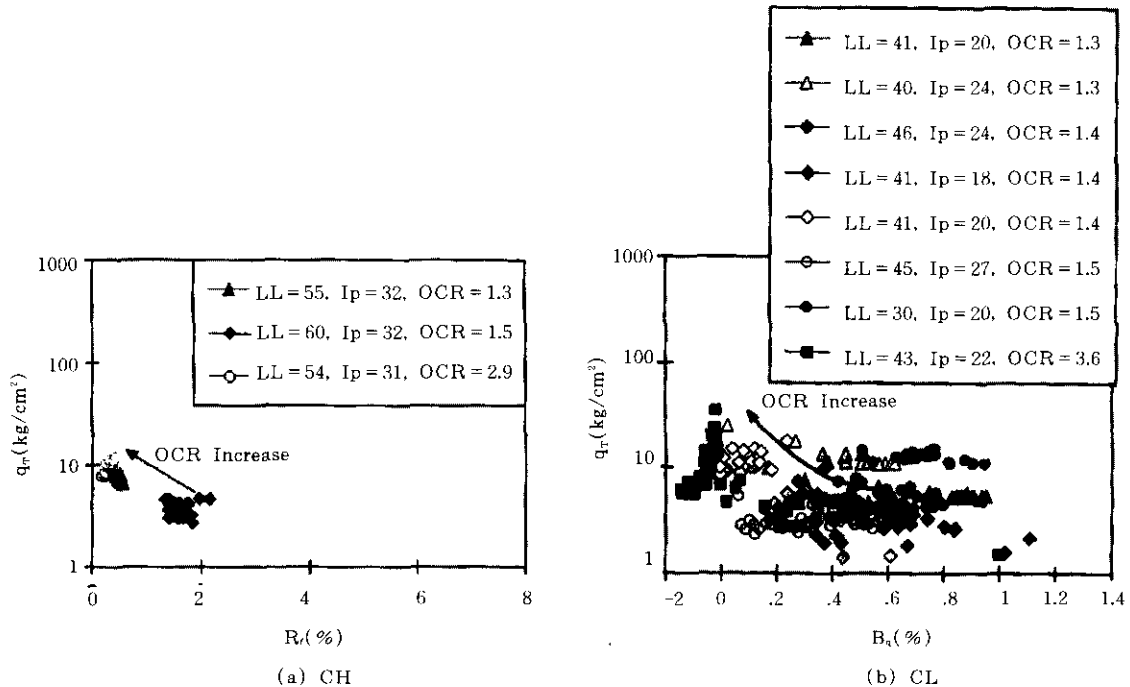
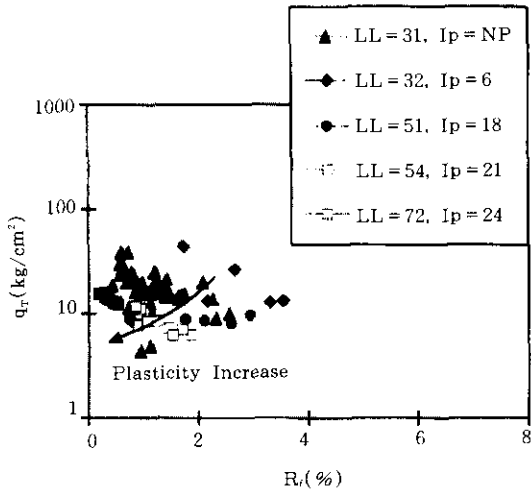
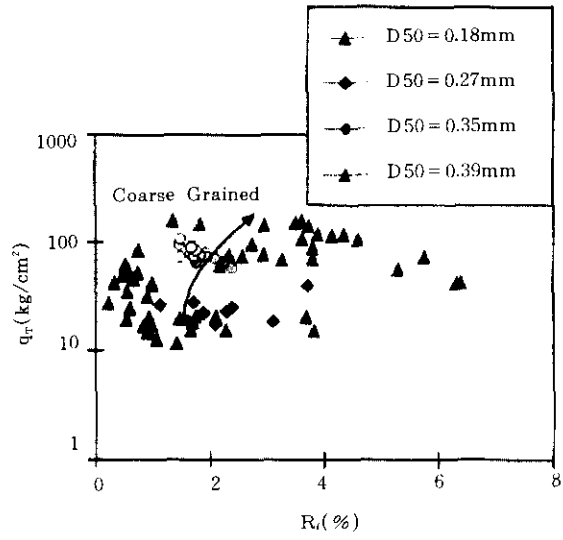


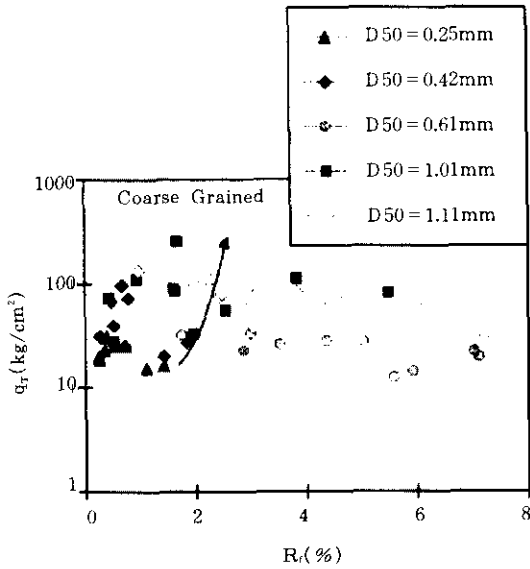
그림 2. 흙의 종류에 따른 마찰률과 원추관입 저항력(계속)



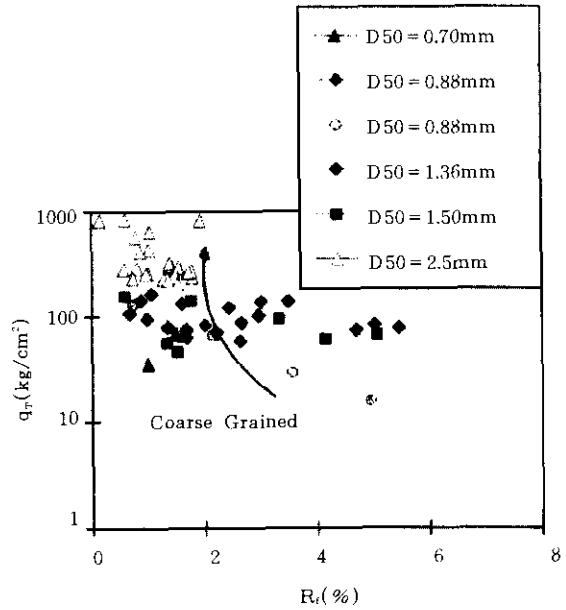
(c) ML, MH



(d) SM



(e) SP



(f) SW

그림 2. 흙의 종류에 따른 마찰률과 원추관입 저항력

그림 2(a)에서 CH의 경우 원추관입 저항력과 마찰률은 각각 3~11kg/cm²과 0~2%의 범위에 존재하며 과압밀비가 증가할수록 원추관입 저항력은 증가하나 마찰률은 뚜렷한 경향은 없지만 대체로 감소하는 것으로 나타났다. 그림 2(b)의 CL의 경우도 과압밀비에 따른 원추관입 저항력과 마찰률의 경향은 CH와 같게 나타났으며, 원추관입 저항력과 마찰률의 범위는 각각 2~25kg/cm²과 0~7%의 범위로 나타났다. 또한, CH와 CL의 마찰률의 범위에서 판단해 보면 점토는 대체로 소성성이 증가할수록 마찰률은 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 2(c)의 실트의 경우 마찰률은 4%이하로 나타났으며 원추관입 저항력은 5~50kg/cm²으로 나타났다. 또한, 소성성이 증가할수록 원추관입 저항력과 마찰률이 모두 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 사질토의 경우 그림 2(d), (e), (f)에서 볼 수 있듯이 매우 넓은 범위의 마찰률과

원추관입 저항력을 가지는 것으로 나타났다. 그림 2(c)의 SM의 경우 마찰률은 6%이하이고 원추관입 저항력은 10~200kg/cm²으로 나타났으며 평균입경이 증가할수록 원추관입 저항력이 증가하는 것으로 나타났다. 그림 2(d)의 SP의 경우 마찰률은 7%이하이고 원추관입 저항력은 10~400kg/cm²으로 나타났으며, SM과 마찬가지로 평균입경이 클수록 원추관입 저항력이 큰 것으로 나타났다.

그림 2(e)의 SW의 경우 마찰률은 6%이하이고 원추관입 저항력은 20~900kg/cm²으로 SP에 비교하여 크게 나타났고, SM이나 SP와 마찬가지로 평균입경이 클수록 원추관입 저항력이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 사질토의 경우 마찰률로는 흙의 종류(통일분류법상 2차기호)를 판단하기 힘들고, 다만 원추관입 저항력이 클수록 대체로 입도분포가 양호하고 평균입경이 증가하며 동시에 미세입자의 함유율이 감소한다는 것을 알 수 있다.

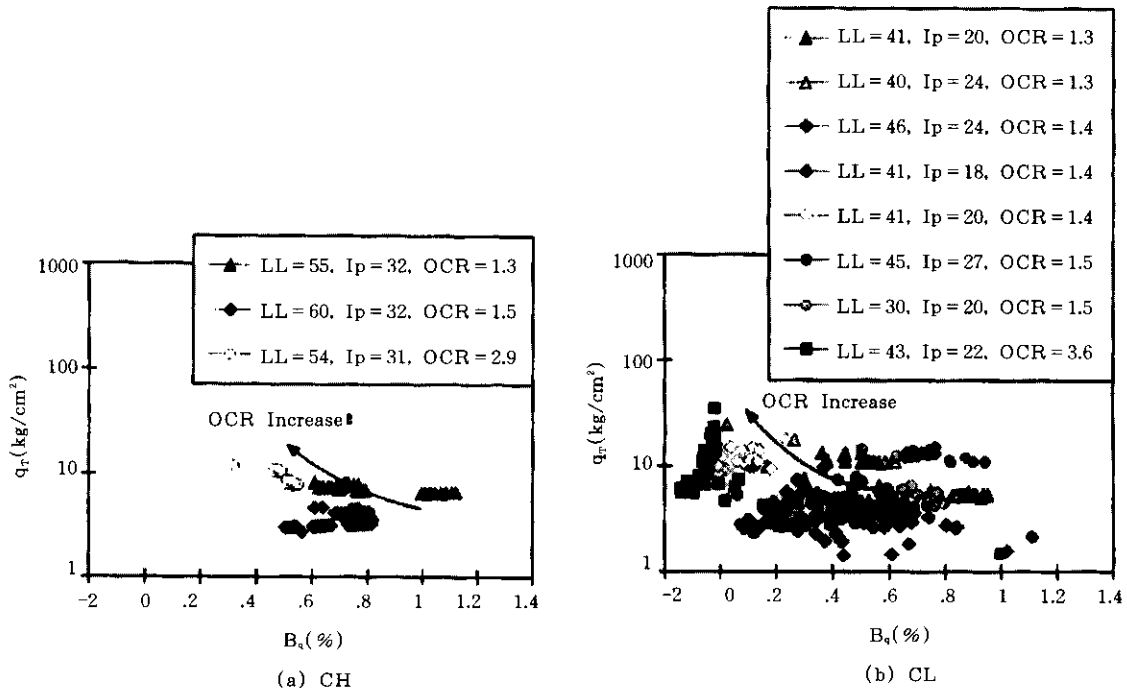
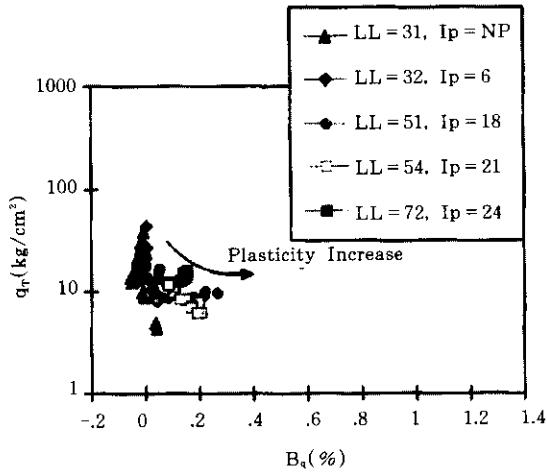
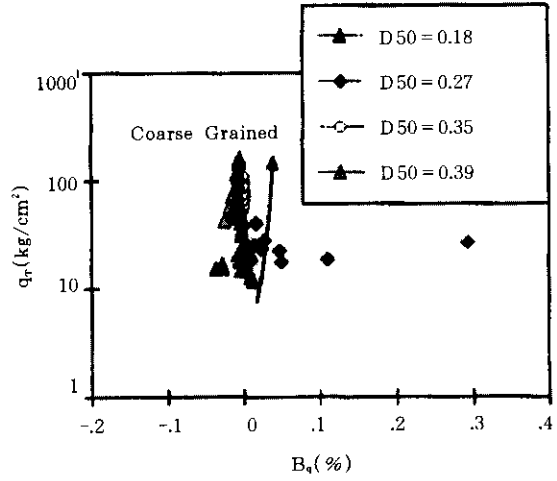


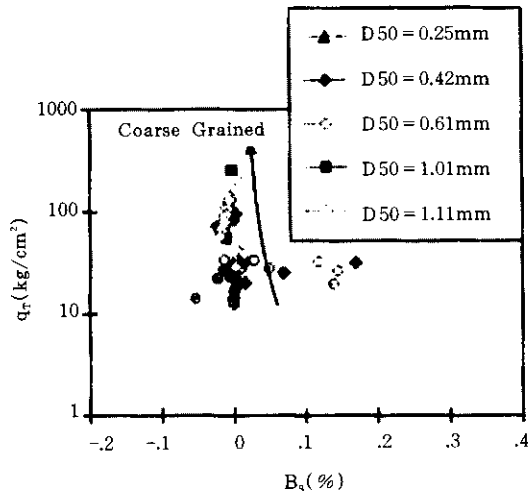
그림 3. 흙의 종류에 따른 간극수압계수와 원추관입 저항력(계속)



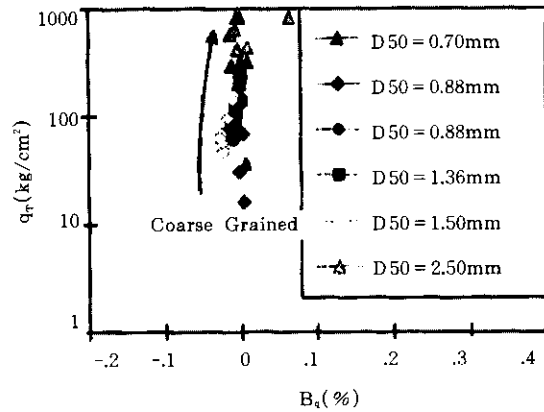
(c) ML, MH



(d) SM



(e) SP



(f) SW

그림 3. 흙의 종류에 따른 간극수압계수와 원추관입 저항력

그림 2를 종합적으로 분석해 보면 점토와 사질토 사이에는 원추관입 저항력의 차이로 인하여 그 구분이 비교적 명확하다고 할 수 있다. 그러나, 실트의 경우 점토 및 사질토와 중복되는 부분이 대부분이어서 원추관입 저항력과 마찰률을 이용한 실트의 판별이 용이하지 않다.

그림 3에서 흙의 종류에 따른 원추관입 저항력은 그림 2와 같으므로 간극수압계수에 대해서만 살펴보면, 먼저 그림 3(a)의 CH의 간극수압계수는 약 0.3~1.2의 값을 가지며, 과압밀비가 커질수록 간극수압계수가 작아지는 것으로 나타났고, 그림 3(b)의 CL의 경우 간극수압계수는 -0.2~1.1의 값을 가지며 CH와 마찬가지로 과압밀비가 커질수록 간극수압계수가 작아지는 것으로 나타났다. 또한, 과압밀비가 3이상인 경우 0보다 작은 값의 간극수압계수를 가질수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 점토의 경우 간극수압계수가 작을수록 과압밀비가 증가하며 CH와 CL의 간극수압계수를 비교해 보면 소성성이 클수록 간극수압계수가 크게 나타났다.

그림 3(c)에서 실트의 경우 간극수압계수는 -0.1~0.3의 값을 가지며 점토의 경우와 같이 소성성이 클수록 간극수압계수가 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 3 (d), (e)의 SM과 SP의 경우 간극수압계수의 크기는 각각 0.3이하와 0.17이하로 나타났고, 그림 3(f)의 SW의 경우 간극수압계수가 거의 0부근의 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, SM과 SP의 경우도 원추관입 저항력이 약 50kg/cm²이상일 때에는 간극수압계수가 거의 0부근의 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 사질토의 경우 원추관입 저항력이 약 50kg/cm²이하일 때에는 간극수압계수가 흙의 종류(통일분류법 상 2차기호)에 따라 약간의 차이를 보이지만, 50kg/cm² 이상일 때에는 거의 차이를 보이지 않는다.

그림 3을 종합적으로 분석해 보면 마찰률을 이용하는 경우와 마찬가지로 점토와 사질토 간

에는 간극수압계수와 원추관입 저항력이 명확한 차이를 나타내지만, 실트의 경우 점토 및 사질토와의 구분이 분명히 나타나지 않는다.

위의 분석 결과들로부터 흙의 종류, 소성성, 과압밀비, 그리고 입도분포와 피에조콘 시험결과 얻어지는 마찰률 및 간극수압계수와 원추관입 저항력이 다음과 같은 상관관계에 있음을 알 수 있다.

- 1) 점토의 경우 소성성과 과압밀비가 증가할수록 마찰률은 감소하며 원추관입 저항력은 과압밀비 증가와 함께 증가한다. 그러나, 기존 연구결과(Schmertmann, 1978; Olsen과 Farr, 1986; Olsen, 1988; Campanella와 Robertson, 1988; Robertson, 1990)에서는 과압밀비가 증가할수록 원추관입 저항력과 마찰률이 모두 증가하는 것으로 나타나 차이를 보인다. 따라서, 이에 대해서는 보다 많은 시험을 통한 추가 확인 작업이 필요하다.
- 2) 실트의 경우 소성성이 증가할수록 원추관입 저항력과 마찰률이 모두 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 점토 및 사질토와의 구분이 명확하지 않으므로 추가적인 확인 작업이 반드시 필요하다.
- 3) 사질토의 경우 마찰률로는 통일분류법 2차기호를 판단하기 힘들고, 다만 원추관입 저항력이 클수록 대체로 입도분포가 양호하고 평균 입경이 증가하며 동시에 미세 입자의 함유율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 Douglas와 Olsen(1981)의 결과와 일치한다.
- 4) 점토의 경우 소성성이 클수록 간극수압계수가 크게 나타났고, 과압밀비가 증가할수록 간극수압계수가 감소하는 것으로 나타나 기존 연구결과(Campanella와 Robertson, 1988; Robertson, 1990 등)와 일치하고 있다. 다만 본 연구에서는 과압밀비가 3이상일 경우에 간극수압계수가 음의 값을 갖는 결과를 얻었으며 이는

기존 연구에서는 나타난 바가 없다.

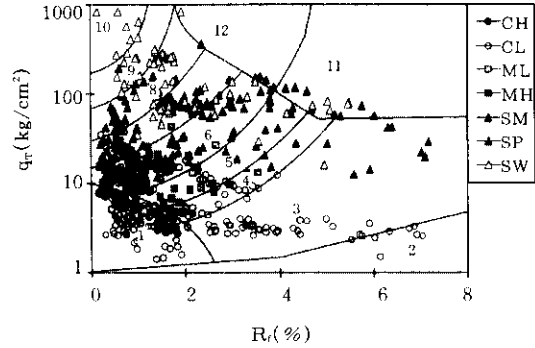
- 5) 실트의 경우 소성성이 클수록 간극수압계수가 크게 나타났으나, 마찰률을 이용하는 경우와 마찬가지로 점토 및 사질토와의 구분이 불명확하다.
- 6) 사질토의 경우 간극수압계수로도 통일분류법 2차기호의 구분이 용이하지 않다. 다만, 원추관입 저항력이 50kg/cm^2 이상일 때 간극수압계수는 거의 0에 가까운 값을 가지는 것으로 나타났다.

5. 기존 분류도표와의 비교

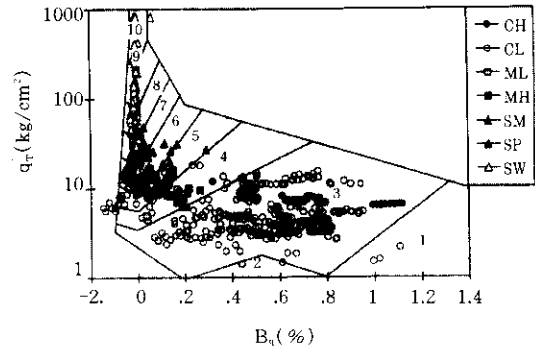
Campanella와 Robertson(1988)은 그 당시까지 제안되었던 흙의 분류도표들이 수직응력을 충분히 고려하지 못하였기 때문에 지반심도 30m 이상인 경우에는 신뢰성이 결여된다는 점을 확인하였고, 이에 Robertson(1990)과 Jefferies와 Davies(1991)는 수직응력을 고려하기 위해 정규화된 원추관입 저항력과 정규화된 마찰률 등을 이용한 흙의 분류도표를 개발하여 심도 30m 이상인 경우에는 이 분류도표를 이용할 것을 제안하였다. 그러나, 이 연구에서 시행한 피에조콘 관입시험은 그 심도가 거의 모두 30m 이내이기 때문에 Campanella와 Robertson(1988)이 제안한 분류도표를 그 비교 대상으로 하였다.

그림 4(a)와 (b)는 Campanella와 Robertson(1988)이 제안한 마찰률과 간극수압계수를 이용한 흙의 분류도표에 그림 2 및 그림 3의 결과를 각각 도시한 것이다.

그림 4(a)의 R_f 도표에서 점토의 경우 CH는 대부분 ①영역, 즉 예민한 세립토 영역에 존재하며 CL은 ①과 ③영역, 즉 예민한 세립토 내지 점토영역에 나타나고 있으며 과압밀비가 3 이상인 경우에는 모래질 실트 내지 점토질 실트 영역에도 나타나고 있다. 따라서, 점토의 경우 예민한 세립토나 점토에 위치하기 때문에 흙의 분류를 위한 두 번째 기호를 무시하면 Campanella와 Robertson(1988)의 기존 결과와



(a) 마찰률에 의한 흙의 분류



(b) 간극수압계수에 의한 분류

1. 예민한 세립토
2. 유기질 토질
3. 점토
4. 실트질 점토 내지 실트질 점토
5. 점토질 실트 내지 점토질 실트
6. 모래질 실트 내지 점토질 실트
7. 실트질 모래 내지 모래질 실트
8. 모래 내지 실트질 모래
9. 모래
10. 자갈질 모래 내지 모래
11. 매우 굳은 세립토
12. 모래 내지 모래질 점토

그림 4. 기존의 분류도표와의 비교

대체로 일치한다고 할 수 있으나 과압밀비가 비교적 큰 경우에는 잘 맞지 않는다. 실트의 경우 ML과 MH는 ④~⑦영역, 즉 실트질 점토에서 모래질 실트까지 존재하며 MH의 경우 ML에 비해 원추관입 저항력이 다소 작고 예민한 세립토 쪽에 가까운 분포를 나타내는 것으로 보아 비교적 일치된 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 그러나, 모래질 흙의 경우 매우 넓은 범위에 걸쳐 분포하기 때문에 마찰률을 이용하여 Campanella와 Robertson(1988)의 분류도표로 모래질 흙을 판단해내는 일은 상당히 어렵다.

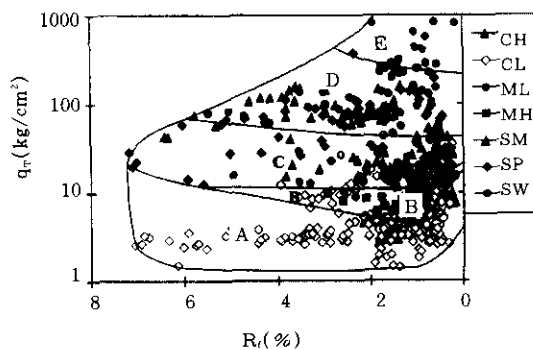
그림 4(b)의 B_r 도표에서 점토의 경우 CH와 CL은 거의 ③영역, 즉 점토영역에 분포하므로 흙의 분류를 위한 두 번째 기호를 무시하면 Campanella와 Robertson(1988)의 분류도표와 거의 일치하고 있으나 과압밀비가 3이상인 경우에는 점토질 실트 내지 실트질 점토의 영역에 나타나고 있다. 단, 그림 4(a)의 R_f 도표와는 다르게 예민한 세립토 영역에는 별로 나타나지 않으므로 점토의 경우 간극수압계수를 이용하면 보다 정확한 분류를 할 수 있을 것이다. 실트의 경우 ML과 MH는 ④~⑥영역, 즉 실트

질 점토 내지 모래질 실트 영역에 나타나 역시 두 번째 기호를 무시하면 Campanella와 Robertson(1988)의 분류도표와 잘 일치한다고 할 수 있다. 모래질 흙의 경우 ⑥~⑩영역, 즉 모래질 실트 내지 자갈질 모래영역에 분포하는 것으로 나타나 Campanella와 Robertson(1988)의 분류도표와 비교적 잘 일치한다.

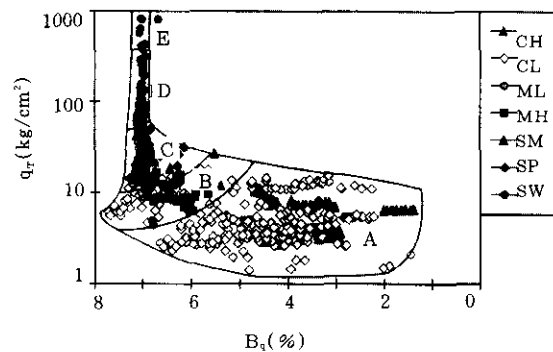
이상에서 분석한 바와 같이 그림 4의 결과는 흙의 분류를 위한 두 번째 기호를 무시한다면 대체로 좋은 비교를 보여주고 있으나 지나치게 세분되어 있고 국부적으로 다른 부분이 있기 때문에 이를 보완하기 위하여 국내 지반에서의 피에조콘 시험 결과로부터 마찰률과 간극수압계수를 이용한 분류도표를 각각 새로이 개발하고자 한다.

6. 흙의 분류도표 개발

앞에서 논의한 결과들을 이용하여 흙의 분류도표를 개발하기 위하여 먼저 그림 5와 같이 동일분류기호를 이용한 흙의 종류에 따라 마찰률 및 간극수압계수와 원추관입 저항력의 분포 영역을 도시하였다.



(a) 마찰률과 원추관입 저항력의 분포 영역



(b) 간극수압계수와 원추관입 저항력의 분포 영역

그림 5. 흙의 종류에 따라 마찰률 및 간극수압계수와 원추관입 저항력의 분포 영역

그림 5에서 모래, 실트, 점토 등 통일분류법 1차기호 각 영역의 중첩된 부분들을 실선의 경계선으로 하고 각 영역에 대하여 과압밀비, 소성성, 평균입경, 그리고 미세입자 함유율의 변화양상을 화살표로 나타내면 그림 6과 같은 흙의 분류도표를 얻을 수 있다.

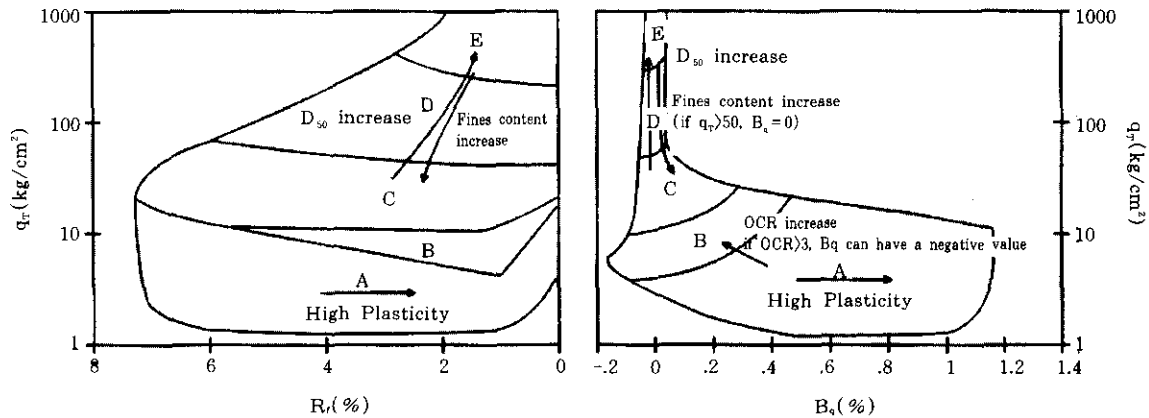
그림 5에서 A영역은 점토영역(CH, CL)으로서 소성지수가 증가할수록 마찰률은 감소하며 간극수압계수는 증가한다. 또한, 과압밀비가 증가함에 따라 간극수압계수는 감소하고 원추관입 저항력은 증가하는데, B_q 도표에서 과압밀비가 증가할수록(OCR<3) 점토 또는 실트 영역(주로 CL 또는 MH)인 B영역에 그 값이 존재한다.

B영역은 소성성이 작은 실트(ML)가 일부

존재하지만 점토(CL)나 소성이 비교적 큰 실트(MH)가 주로 존재하는 영역으로 소성성이 증가할수록 원추관입 저항력은 감소하고 간극수압계수는 증가한다. 또한, 과압밀비가 3이상인 경우 간극수압계수가 음의 값을 가질 수도 있는 영역이다.

C영역은 소성이 작고 과압밀비가 비교적 큰 ($3 < OCR < 4$) 점토(CL), 소성이 작은 실트(ML), 그리고 모래(SM, SP)가 분포하는 영역으로 주로 실트영역 또는 세립토가 포함된 모래영역이라고 할 수 있다. 이 영역에 해당되는 값이 도출되었을 경우 세심한 주의를 요하며 필요시에는 추가적인 확인 작업을 요구하는 영역이다.

D영역은 모래영역으로 E영역에 비해 입도



(a) 마찰비에 의한 분류

(b) 간극수압계수에 의한 분류

- A) Clay (CH, CL)
- B) Clay(CL) or Silt(MH, ML) : CL, MH predominant
- C) Clay(CL), Silt(ML) or Sand(SM, SP) : ML, SM, SP predominant
- D) Sand(SM, SP, SW) : SW predominant
- E) Sand(SW)

• 점토의 경우 과압밀비 4이하인 경우에만 유효

그림 6. 국내 지반에 대한 흙의 분류도표

분포가 불량(SP)하며 세립토가 다소 포함된 (SM) 중간 정도 조밀한 모래영역이라고 할 수 있고, E영역은 세립토가 거의 없이 입도분포가 양호하며 매우 조밀한 모래(SW)영역이다. C, D, E영역에서는 평균입경이 증가하고 세립토 함유율이 작을수록 원추관입 저항력이 증가한다.

이상의 결과로부터 흙의 분류도표를 도시하면 그림 6과 같다. 그림 4에서와 마찬가지로 간극수압계수를 이용하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 그림 6의 분류도표를 이용할 때에는 우선 간극수압계수를 이용하여 흙을 분류하는 것이 바람직하다. 그리고, 그림 2 및 그림 3에서 보인 바와 같이 흙의 종류마다 중복되는 부분이 상당히 많기 때문에, 기존의 Campanella와 Robertson(1988)의 도표는 물론 그림 6에 제시한 흙의 분류도표도 흙의 대략적인 분류에만 이용해야 하며, 특히 통일 분류법 2차 기호의 분류는 정확하지 않다.

7. 결 론

이 연구에서는 피에조콘 시험결과와 흙의 기본적 특성과 비교하여 그 상관성을 분석하였으며, 기존의 분류도표에 시험결과를 적용한 결과 나타난 문제점을 보완하여 국내 지반의 지역성에 맞는 새로운 피에조콘 시험에 의한 분류도표를 통일 분류법에 의거하여 개발하였다. 개발된 도표는 원추관입 저항력에 대하여 마찰률 또는 간극수압계수의 관계로 이루어져 있으며, 간극수압계수에 의한 분류의 신뢰성이 더 높다고 판단된다. 다만, 실트의 경우 피에조콘 관입시험만으로 판별해 내기는 어려우며, 어느 종류의 지반이든지 정확한 분류를 위해서는 시료의 확인이 반드시 필요하다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 국립 건설시험소와 동부건설(주) 기술연구소의 경제적, 기술적 지

원하에 이루어진 것으로, 국립 건설시험소와 동부건설(주) 관계자 여러분께 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Baligh, M. M., Vivatrat, V. and Ladd, C. C. (1980), "Cone penetration in soil profiling", *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 106, pp. 447-461.
2. Campanella, R. G. and Robertson, P. K. (1988), "Current status of the piezocone test", *Invited Lecture, 1st International Conference on Penetration Testing, Disney World*, pp. 93-116.
3. Douglas, B. J. and Olsen, R. S. (1981), "Soil classification using electric cone penetrometer", *Cone Penetration and Experience, ASCE, G. M. Norris and R. D. Holtz, ed., New York*, pp. 209-227.
4. Jefferies, M. G. and Davies, M. P. (1991), "Discussion on soil classification by the cone penetration test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 151-158.
5. Jones, G. and Rust E. (1982), "Piezometer penetration testing", *Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam*, Vol. 2, pp. 607-613.
6. Olsen, R. S. and Farr, J. V. (1986), "Site characterization using the cone penetrometer test", *Proceedings of Insitu 86-Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Geotechnical Special Publication Number 6, S. P. Clemence, ed., ASCE, New York*, pp. 854-868.
7. Olsen, R. S. (1988), "Using the CPT for dynamic site response characterization", *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamic II Conference, Geotechnical Special Publication Number 2, J. Lawrence Von Thun, ed., ASCE, New York*, pp. 374-388.
8. Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1983), "Interpretation of cone penetration

- tests. Part II :Sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4, pp. 718-733.
9. Robertson, P. K.(1990). "Soil classification using the cone penetration test". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, pp. 151-158.
 10. Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for cone penetration test, Performance and Design", Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington, July, 145p.
 11. Senneset, K. and Janbu, N. (1985), "Shear strength parameters obtained from static CPT" , Strength Testing of Marine Sediments(STP 883), R. C. Chaney and K. R. Demars, ed., ASTM, Philadelphia, pp. 41-54.
 12. 이선재 (1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성연구", 서울대학교 공과대학원 박사학위 논문, p. 157.

(접수일자 1998. 5. 9)