

콘관입시험결과를 이용한 흠분류차트의 적용성에 관한 연구

Study on the Applicability of CPT Based Soil Classification Chart

김찬홍* · 임종철** · 김영상***

Kim, Chan-Hong · Im, Jong-Chul · Kim, Young-Sang

Abstract

Soil profiling is one of the most important work among geotechnical engineering practice. Generally, soil profile is estimated from the observation of soil samples during subsurface exploration but such estimation also includes some experiencing aspects such as flushed water from the borehole, slime colour, boring speed and so on. In addition, since the capacity of hydraulic drill rig is significantly increased, thin layers might be easily missed. So, continuous soil profile is almost impossible over all depth to be bored from conventional subsurface exploration. While CPT or CPTu can serve continuous soil profile information over all depth generally in 5cm interval. Many charts or methods for soil profile from CPT result have been proposed during last several decades over the world. However they have not been verified in local ground condition in Korea. In this research, CPT results and soil classification results based on USCS were compiled from 17 sites over the Korea. Soil classification results by using 7 CPT soil classification charts were compared with those of USCS for the compiled database. Most proper CPT soil classification chart for Korean soil characteristics was evaluated and effective parameters for the soil classification from CPT were discussed. Finally interrelationship between CPT soil classification chart and USCS soil classification was evaluated.

Keywords : piezocone, soil classification, USCS

요 지

지반을 대상으로 하는 일련의 활동에서 지층의 구성에 관한 정보는 필수적인 요소이다. 일반적으로 시추를 통해 지층 구성을 알 수 있으나, 배출되는 작업수와 슬라임, 굴진속도, SPT 시료 등을 참고하여 작성되는 다소 경험적인 면이 있다. 더욱이 최근 시추장비의 고성능화로 인해 얇은 토사층의 경우 구분이 점점 어려워지고 있는 것이 현실이다. 피에조콘관입시험은 주로 점토층을 대상으로 시행되었으나 최근 모래층 및 실트층으로 사용이 확대되고 있는 실정이다. 연속적인 데이터를 확보할 수 있다는 이점이 있어 흠분류에 적용하기 위한 연구가 많이 진행되었고 다양한 도표가 제안되어 사용되고 있다. 하지만, 국내에서는 이에 대한 검증 없이 적용하고 있는 것이 현실이며, 이에 대한 검증을 바탕으로 국내지반과 현실에 맞는 새로운 흠분류 시스템의 개발이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 국내 17개 지역에서 수행된 피에조콘 관입시험 결과와 채취된 시료들에 대한 흠분류 결과를 데이터베이스화하였고, 피에조콘 결과를 이용하도록 제안된 국·내외 흠분류차트 7종류들의 국내지반에 대한 적용성을 토질 종류별로 검토하였다. 또한 종합적으로 국내지반의 흠분류에 가장 적합한 흠분류차트와 사용 변수들을 도출하였고 선정된 도표의 영역별 설명과 국내 기술자들에게 익숙한 통일분류결과와의 상관성에 대하여 고찰하였다.

핵심용어 : 피에조콘, 흠분류, 통일분류법

1. 서 론

대상지반을 구성하는 지층정보는 건설공사의 각 단계에서 중요한 인자로 작용한다. 특히 대부분의 공사가 기반암 상단의 토사층에서 진행된다는 점을 감안하면 정확한 지층정보의 제공은 필수적이다. 기존의 지층정보는 과업구간을 따라 일정간격 또는 주요구조물에 시추조사를 실시하여 지층정보에 해당하는 주상도를 작성하고 이를 토대로 단면도를 작성

한다. 일반적인 주상도는 시추장비를 설치하여 지반을 굴착하면서 비트의 굴진속도와 작업수와 함께 배출되는 토사 등을 종합적으로 판단하여 작성하게 된다. 개정된 표준관입시험에 따라 1m 마다 채취되는 교란시료와 불규칙적으로 채취되는 불교란시료도 지층을 판단하는데 중요한 역할을 한다. 전자의 경우 작업자의 경험 및 사전지식 등에 따라 동일한 지반이라도 상이한 주상도가 작성되며, 후자의 경우 표준관입시험만을 기준으로 했을 때 1m 간격의 시료로 그 사이를

*정회원 · (주)동이지질 과장 (E-mail : chahkim@dage.co.kr)

**정회원 · 교신저자 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : jcim@pusan.ac.kr)

***정회원 · 전남대학교 건설환경공학부 조교수 (E-mail : geoykim@jnu.ac.kr)

미루어 짐작하는 문제가 있다. 그러므로 연속적인 데이터를 확보하는 것이 불가능하기 때문에 정확한 지층구성을 작성하는 것이 불가능하며 이 점은 시추조사 회수를 늘린다고 해서 해결되는 문제가 아니다. 지층의 변화가 심한 지반일 경우 이 점은 더욱 부각된다.

반면, 피에조콘관입시험은 일정간격으로 데이터를 취득하여 연속성이 확보된다는 장점이 있어서 활용가치가 높다고 할 수 있으며, 이를 흠분류에 적용하려는 연구가 국내·외에서 많이 수행되었다. 국외에서는 Begemann(1965)의 연구를 시작으로 Douglas와 Olsen(1981), Robertson 등(1986, 1990), Jefferies와 Davis(1991), Eslami와 Fellenius(1997), Zhang과 Tumay(1999) 등이 다양한 차트 또는 방법들을 개발하였으며 국내에서는 이선재(1997)의 연구가 거의 유일하다. 하지만, 국내에서 개발된 이선재 도표의 활용도가 매우 낮으며 일반적으로 국외에서 개발된 흠분류 차트 및 방법들이 주로 적용되고 있다. 그러나 국외에서 제안된 방법들에 대한 국내지반의 적용성은 세밀히 평가된 적이 없어 각 도표들에서 제공하는 흠분류 결과에 대한 국내 기술자들의 국내지반에 대한 인식과 상이한 점이 나타나는 등 사용상에 어려움이 있으며 이는 피에조콘시험결과를 이용한 흠분류차트로 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 Robertson 등(1986)이 개발한 차트 역시 그러하다. 이에 본 연구에서는 국내 17개 현장에서 수행된 피에조콘관입시험 결과를 바탕으로 국내외에서 제안된 7종류의 피에조콘 흠분류차트에 대한 국내지반의 적용성을 평가하고, 통일분류법과의 연계성을 제시하고자 하였다.

2. 기존의 연구

콘관입시험 결과를 이용한 흠분류는 Begemann(1965)을 시작으로 주로 다양한 형태의 차트 형식으로 개발되었으며, 이후 장비의 지속적인 개량으로 전기식콘이 개발되었고 간극수압의 측정이 가능한 피에조콘이 개발되었다. 전기식콘으로 개발된 차트는 Douglas와 Olsen(1981)을 시작으로 다양한 방법들이 개발되었다. 대표적인 방법들의 내용과 차트들을 정리하면 다음과 같다.

2.1 Douglas와 Olsen(1981)의 차트

전기식콘을 이용한 최초의 흠분류차트로 그림 1과 같다.

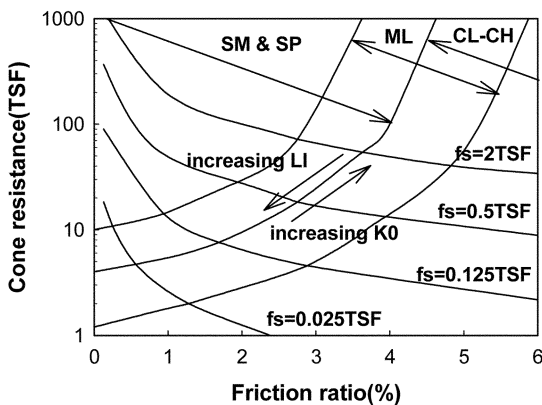


그림 1. Douglas와 Olsen(1981)이 제안한 흠분류차트

미서부지역에서 수행된 콘관입시험 결과를 통일분류법에 근거하여 지층 구분을 시도하였다. 그러나, “MH”로 분류되는 토질은 고려되지 않았으며 각 토질영역이 겹쳐지는 특징이 있다. 액성지수와 정지토압계수 등의 경향도 대략적으로 추정이 가능하다. 여기서 세로축은 불균등 면적비를 보정하지 않은 원추관입저항력(q_c)이며, 가로축은 마찰비($R_f = f_s/q_c \times 100$)로 정의된다.

2.2 Robertson 등(1986)의 차트

Robertson 등(1986)은 간극수압의 측정이 가능한 피에조콘 시험결과를 토대로 식 (1)의 보정원추관입저항력 q_t 과 식 (2)의 간극수압비 B_q , 그리고 마찰비 R_f 를 도입한 흠분류차트를 개발하였다.

$$q_t = q_c + u_{br}(1-a) \quad (1)$$

여기서, q_t : 보정원추관입저항력, q_c : 측정원추관입저항력, u_{br} : 콘 선단부 바로 뒤에서 측정된 관입간극수압, a : 불균등 면적비

$$B_q = (u_{br} - u_0)/(q_t - \sigma_{v0}) \quad (2)$$

여기서, B_q : 간극수압비, u_0 : 콘 관입 전 지반정수압, σ_{v0} : 전상재응력

Robertson 등(1986)의 차트는 흠의 거동형태를 중심으로 그림 2와 같이 두 차트를 이용하여 토질을 구분하며 동일한 심도에서 측정된 데이터에 대해 두 차트의 결과가 상이하게 제공되는 경우도 있어 적용 시 주의를 요한다. 한편 Robertson(1990)은 1986년도에 개발한 도표를 30m 이상의 대심도지반에 적용할 경우 상재압력의 영향을 무시할 수 없다는 점을 보완하여 상재압력을 고려한 정규화 된 Q_t 와 B_q , R_f 를 이용한 별도의 차트를 제안하였다.

2.3 Jefferies와 Davis(1991)의 차트

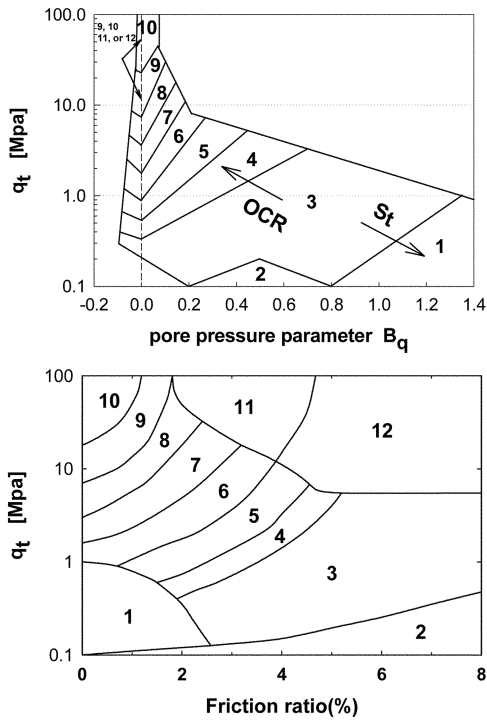
Jefferies와 Davis(1991)는 Robertson(1990)이 제안한 2개의 차트를 통합하여 새로운 차트를 제안하였다. 식 (3)에 정의된 정규화 된 원추관입저항력 Q 와 간극수압비 B_q 로부터 식 (4)와 같이 정의된 재료지수 I_c 를 이용하여 흠을 분류한다.

$$Q = (q_t - \sigma_{v0})/(\sigma_{v0} - u_0) \quad (3)$$

$$I_c = \sqrt{[3 - \log_{10}(Q(1 - B_q))]^2 + [1.5 + 1.3(\log_{10} R_f)]^2} \quad (4)$$

2.4 이선재(1997)의 차트

이선재(1997)는 국내의 13개 현장에서 피에조콘관입시험을 실시하고 채취된 시료에 대해 통일분류법을 기준으로 국내지반에 적합한 흠분류차트를 제안하였다. 적용된 변수는 Robertson 등(1986)의 차트와 동일한 보정된 원추관입저항력 q_t , 마찰비 R_f 와 간극수압비 B_q 이며 소성지수, 세립분 및 D_{50} 과 과압밀비에 대한 대략적인 추정이 가능하다. 이선재 차트의 장점은 국내지반에 대한 데이터베이스를 이용한 최초의 피에조콘 흠분류차트로 분류된 흠이 국내 기술자들에게 익숙한 통일분류법 기준으로 제공된다는 점이다.

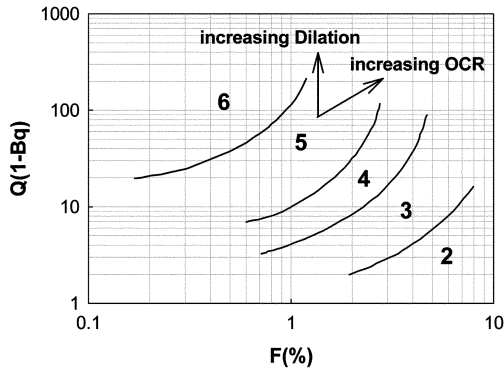


Zone Soil Behaviour Type

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

* overconsolidated or cemented

그림 2. Robertson 등(1986)이 제안한 흠분류 차트

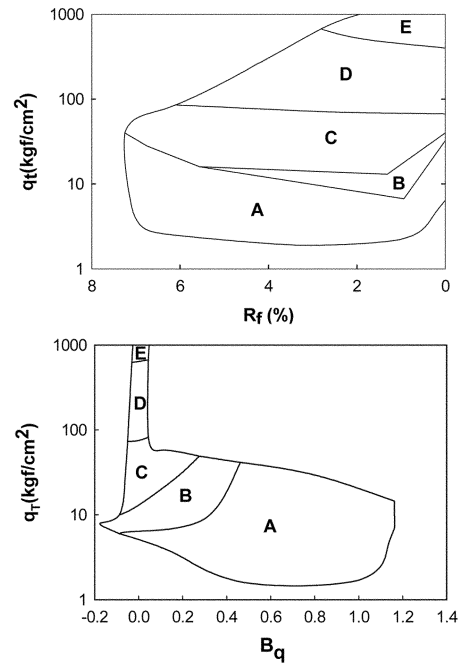


Material Index, Ic	Zone	Soil Behaviour Type
Ic < 1.80	6	Clean Sand to Silty Sand
1.80 < Ic < 2.40	5	Sand Mixtures-Silty Sand to Sandy Silt
2.40 < Ic < 2.76	4	Silt Mixture-Clayey Silt to Silty Clay
2.76 < Ic < 3.22	3	Clays-Clay to Silty Clay
3.22 < Ic	2	Organic Soils-Peats
Q(1-Bq) < 10 & F < 1%	1	Sensitive Fine Grained Soils

그림 3. Jefferies와 Davis(1991)가 제안한 흠분류 차트

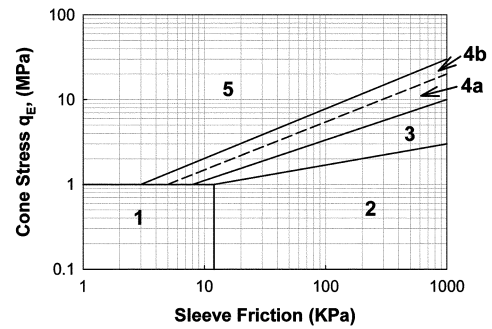
2.5 Eslami와 Fellenius(1997)의 차트

Eslami와 Fellenius(1997)는 말뚝설계에 피에조콘관입시험 데이터를 적용할 목적으로 흠분류 차트를 개발하였다. 5개국의 20개 현장에서 자료를 수집하였으며, 식 (5)로 정의되는 유효콘저항(q_E)을 사용하였다. 굳은 점토 또는 고결점토는 포함되지 않았으며 모래층의 경우 관입간극수압을 정수압으로 가정하여 흠분류 차트를 작성하였다.



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

그림 4. 이선재(1997)가 제안한 흠분류 차트



Zone	Soil Behaviour Type
1	Sensitive and Collapsible Clay and/or Silt
2	Clay and/or Silt
3	Silty Clay and/or Clayey Silt
4a	Sandy Silt
4b	Silty Sand
5	Sand to Sandy Gravel

그림 5. Eslami와 Fellenius(1997)가 제안한 흠분류 차트

$$q_E = q_t - u_{bt} \quad (5)$$

2.6 Tumay 교수의 확률론 및 Fuzzy분류법

LSU의 Tumay교수는 통일분류법에 기초한 확률론적 영역 추정법과 Fuzzy분류법을 제안하였다(Zhang과 Tumay, 1999; Tumay와 Farsakh, 2008). 확률론적 영역추정법은 Douglas와 Olsen(1981)이 제안한 차트를 기반으로 원추관입저항력과 마찰비에 근거해 식 (6)과 같이 정의되는 흠분류지수(U)와 그림 6의 확률함수를 이용하여 “Clayey”, “Silty”, “Sandy”의 세 영역에 포함될 확률을 계산한다. 세 영역에 속할 확률의 합은 1이며 이때 사용되는 흠분류지수(U)는 식 (7), 식 (8)과 같이 마찰비와 보정되지 않은 원추관입저항력 q_c 의

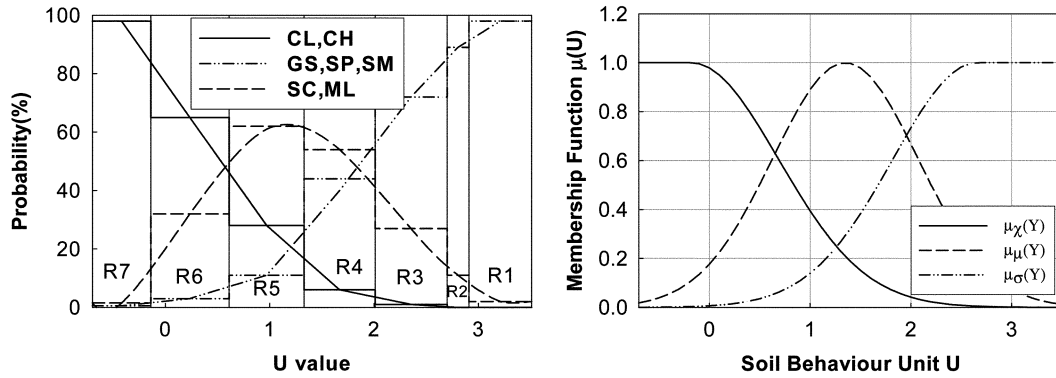


그림 6. 확률론 및 Fuzzy 분류에 의한 흙분류 차트(Zhang과 Tumay, 1999; Tumay와 Farsakh, 2008)

로 정의된다.

$$U = \frac{(a_1x - a_2y + b_1)(c_1x - c_2y + d_1)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} \quad (6)$$

$$- \frac{(a_2x + a_1y + b_2)(c_2x + c_1y + d_2)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2}$$

$$X = 0.1539R_f + 0.8870 \log q_c - 3.35 \quad (7)$$

$$y = -0.2957R_f + 0.4617 \log q_c - 0.37 \quad (8)$$

여기서, $a_1 = -11.345$, $a_2 = -3.795$, $b_1 = 15.202$, $b_2 = 5.085$, $c_1 = -0.296$, $c_2 = -0.759$, $d_1 = 2.960$, $d_2 = 2.477$

한편, Fuzzy 분류법 역시 식 (6)으로 정의된 흙분류지수 (U)를 이용하며 식 (9)~(11)로부터 토질별 [“HPC(Highly Probable Clay)”, “HPM(Highly Probable Mixed soil)”, “HPS(Highly Probable Sand)”] 퍼지멤버십함수 값을 결정한다. 각 영역에 속하는 퍼지 멤버십함수 값의 합은 확률적 방법과 달리 1 이상이 될 수 있다.

$$\mu_c(U) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U+0.1775}{0.86332}\right)^2\right] \quad U \geq -0.1775 \quad (9)$$

$$\mu_c(U) = 1.0 \quad U < -0.1775$$

$$\mu_m(U) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-1.35}{0.724307}\right)^2\right] \quad -\infty < U < \infty \quad (10)$$

$$\mu_s(U) = 1.0 \quad U > 2.6575$$

$$\mu_s(U) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-2.6575}{0.834586}\right)^2\right] \quad U \leq 2.6575 \quad (11)$$

3. 검증을 위한 피에조콘 관입시험 데이터베이스 구축

피에조콘 관입시험은 그림 7과 같이 국내 17개 현장의 퇴적층을 대상으로 수행되었다. 동일한 위치에서 시추조사와 특정심도에서 토질에 따라 자연시료 및 SPT시료를 채취하였고, 시료를 추출하여 물리시험 및 역학시험을 실시하였다. 피에조콘 관입시험은 관입시 5cm~10cm 간격으로 데이터를 취득하였으며, 자연시료와 SPT시료의 채취심도와 일치하는 심도의 데이터만을 대상으로 총 5173개의 데이터베이스를 구축하였다. 또한 데이터베이스의 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 심도라 하더라도 시추결과와 피에조콘 관입시험 결과를 비교하여 지층의 변화가 심해 데이터의 일관성이 나타나지 않는 경우 자료에서 제외하였다. 구축된 데이터베이스



그림 7. 피에조콘 관입시험 위치

표 1. 피에조콘 관입시험 횟수 및 USCS 결과

시험지역	관입시험횟수	USCS	
경기	평택	2회	CL, SP, SW
	시흥	3회	CL, SM, SP
	일산	1회	SM, SP
	인천	3회	CL, ML
충남	서천	4회	CL, SM, SP
	아산	1회	CL, SM
전남	영암	1회	CH, SP, SW
	광양	1회	CL, CH, ML, SP
전북	군장	9회	CH, CL, ML
	양산	4회	CL, SM
경남	통영	2회	CH
	하동	2회	CL, CH, MH, SP
	울산	2회	SM, SP-SC
	용원	4회	CH
	천성	4회	CH
	가덕	4회	CH
	가덕	4회	CH
강원	내곡	2회	CL, MH, SP, SW

는 최종적으로 통일분류법(USCS)을 기준으로 6개의 그룹으로 분류되었다. 표 1은 본 연구에서 데이터베이스에 포함된

표 2. 구축된 데이터베이스의 그룹별 자료수와 피에조콘 관측값 범위

USCS	데이터수(개)	q_t (MPa)	f_s (MPa)	u_{br} (MPa)
CH	2746	0.108~1.250	0.0001~0.030	0.051~0.683
CL	1861	0.028~6.520	0.0001~0.052	0.002~1.088
MH	36	0.608~1.640	0.003~0.028	0.018~0.255
ML	284	0.436~6.818	0.004~0.096	-0.092~0.562
SM, SP-SC	148	0.217~160.328	0.006~5.740	-0.960~3.256
SP, SW	98	1.232~36.263	0.005~0.857	-0.168~0.528

시험지역과 각 지역별 피에조콘 시험회수 및 통일분류법에 의한 대표토질을 정리한 것이다.

표 2는 데이터베이스 전체를 통일분류법 기준으로 6개 그룹으로 나누었을 때 각 그룹의 자료 수와 피에조콘 관측값의 범위를 정리한 것이다. 모래는 #200체 통과량을 기준으로 5% 이상이 포함된 “SM”, “SP-SC”를 한 그룹으로 하고 5% 미만인 “SP”, “SW”를 한 그룹으로 정리하였다.

4. 기존방법에 의한 국내지반의 흠분류 평가 결과

17개 국내현장의 5173개 전체 시험결과를 토대로 작성된 데이터베이스를 앞서 기술한 7개의 기존 흠분류 방법에 따라 흠분류를 수행하고 통일분류 결과와 비교하여 분류결과와 성공여부를 판정하였다. 이때 제안된 기존의 차트와 방법들이 제공하는 흠분류 방식이 서로 다르고 또한 본 연구에서 그룹화한 6개 그룹의 통일분류 결과와도 상이하므로 4.1절과 같이 유사한 그룹들을 통합하여 평가하였다.

4.1 흠분류 차트 또는 방법별 평가방법

제안된 차트 또는 방법별로 국내지반의 적용성을 평가하기 위한 방법은 다음과 같다.

1) Douglas와 Olsen(1981)이 제안한 차트는 통일분류법을 근간으로 하고 있으므로 차트에서 표기한 영역에 따라 분석하였다. 구축된 자료의 “CH” 토질그룹 경우 Olsen차트의 “CL-CH” 영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다. “CL” 토질의 경우는 “CL-CH & ML”, “ML” 토질 그룹의 경우는 “CL-CH & ML”과 “SM-SP & ML” 영역, “SM” 및 “SP-SC” 토질과, “SP-SC” 및 “SW”는 “SM & SP”영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다. 단, “MH” 토질의 경우 별도의 영역이 제안되지 않으므로 “CL-CH” “ML”의 중첩영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다.

2) Robertson 등(1986)이 제안한 차트 중 q_t - R_f 차트의 경우 “CH” 토질그룹의 경우 1번(sensitivie fine grained) 영역에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하고 “CL” 토질의 경우 1, 3, 4, 5번 영역, “MH” 토질의 경우 5, 6번 영역, “ML” 토질의 경우 3, 4, 5, 6번 영역, “SM”과 “SP-SC” 토질의 경우 9, 10번 영역, “SP”와 “SW” 토질의 경우 6, 7, 8번 영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다. 또한, q_t - B_q 차트의 경우 “CH” 토질은 3번 영역, “CL” 토질의 경우 3, 4번 영역, “MH” 토질의 경우 4, 5번 영역, “ML” 토질의 경우 3, 4, 5, 6, 7번 영역, “SM”

과 “SP-SC”, “SP” “SW” 토질의 경우 7, 8, 9 영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다.

3) Jefferies와 Davis(1991) 차트의 경우 “CH” 토질의 경우 2, 3번 영역, “CL” 경우 2, 3, 4번 영역, “MH” 토질의 경우 4번 영역, “ML” 토질의 경우 3, 4, 5번 영역, “SM” “SP-SC”, “SP”와 “SW” 토질은 5, 6번 영역에 표시되는 경우를 성공한 것으로 간주하였다.

4) 이선재(1997)가 제안한 차트는 통일분류법을 기준으로 작성되어 차트의 영역을 기준으로 하여 “CH” 토질의 경우 A영역, “CL” 토질의 경우 A, B영역, “MH” 토질의 경우 B영역, “ML” 토질의 경우 B, C영역, “SM”, “SP”, “SP-SC”, “SW”는 C, D, E영역으로 평가하였다.

5) Eslami와 Fellenius(1997)의 차트는 “CH” 토질의 경우 1번 영역, “CL” 토질의 경우 1, 2번 영역, “MH”의 경우 2, 3, 4a번 영역, “ML”의 경우 3, 4a번 영역, “SM” 및 “SP-SC” 경우 5번 영역, “SP” 및 “SW” 경우 4, 5번 영역 내에 표시되는 경우를 성공한 것으로 평가하였다.

6) Zhang과 Tumay(1999)의 확률론적 추정법은 “점토질(Clayey)”, “실트질(Silty)”, “모래질(Sandy)” 3개 영역에 소속될 확률을 모두 계산하고 평가된 확률 중 가장 높은 값을 대표 흠 종류로 선정하였다. 선정된 대표 흠종류가 “CH” “CL” “Clayey”로, “MH” “ML” “Silty”, “SM”, “SP”, “SP-SC”, “SW” “Sandy” 분류하는 경우를 성공한 것으로 평가하였다.

7) Zhang과 Tumay(1999)의 Fuzzy분류법 역시 “HPC”, “HPM” “HPS” 3개 영역에 소속될 멤버쉽함수 값을 계산하고 가장 큰 멤버쉽함수 값을 제공하는 토질을 대표 토질로 선정하였다. 대표 토질이 “CH”와 “CL”을 “HPC”로, “MH”와 “ML”을 “HPM”로 “SM”, “SP”, “SP-SC”, “SW”를 “HPS”로 분류하는 경우를 성공한 것으로 평가하였다.

4.2 흠분류 방법별 평가결과

이상의 평가방법을 적용한 결과는 그림 8~그림 11과 같다. 평가는 4.1절의 평가방법을 기준으로 하며 입력 토질에 대한 각 분류법의 성공자료수를 해당 토질 전체 자료 수 기준의 백분율로 표기하는 성공률(success rate, %)로 나타내었다.

“CH”와 “CL” 토질은 평가된 방법들에서 전반적으로 높은 성공률을 나타내나 Douglas와 Olsen(1981)이 제안한 차트의 경우만 “CH” 토질에서 낮은 성공률을 나타내어 적용성이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 “CH” 토질에서 간극수압비 B_q 를 입력자료로 사용하는 Robertson 등(1986)과 이선재(1997) 방법들의 판정 성공률이 상대적으로 높아 간극수압비

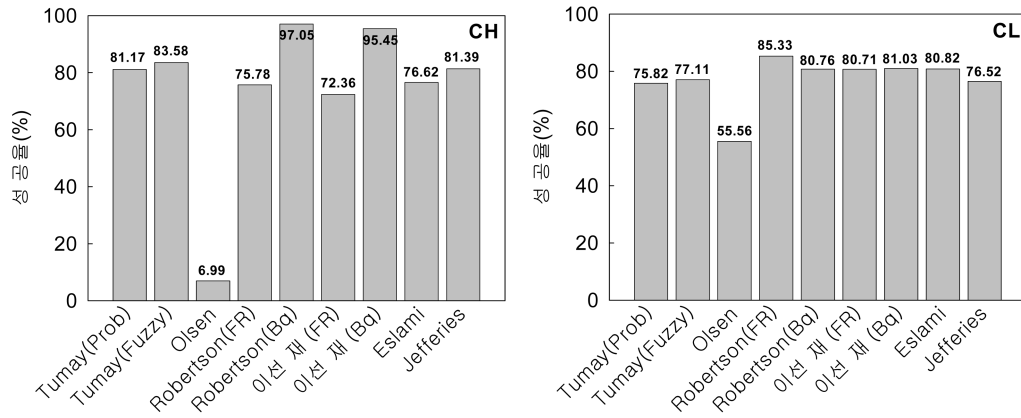


그림 8. “CH” 토질과 “CL” 토질의 성공률

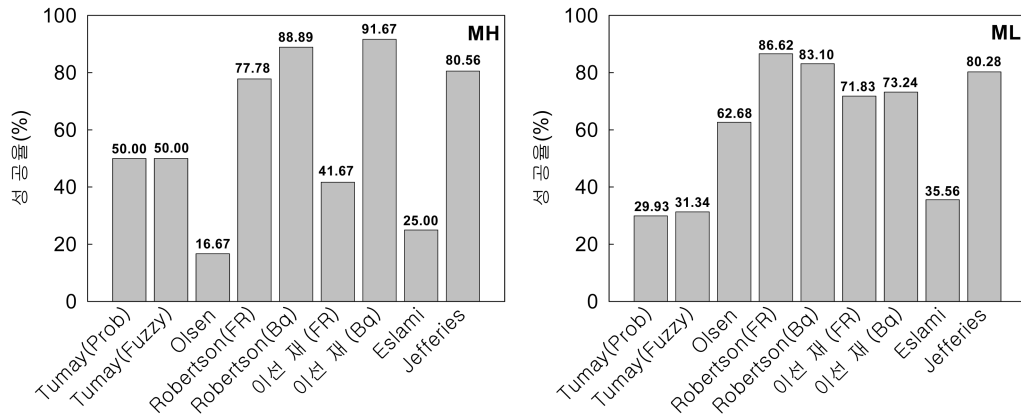


그림 9. “MH” 토질과 “ML” 토질의 성공률

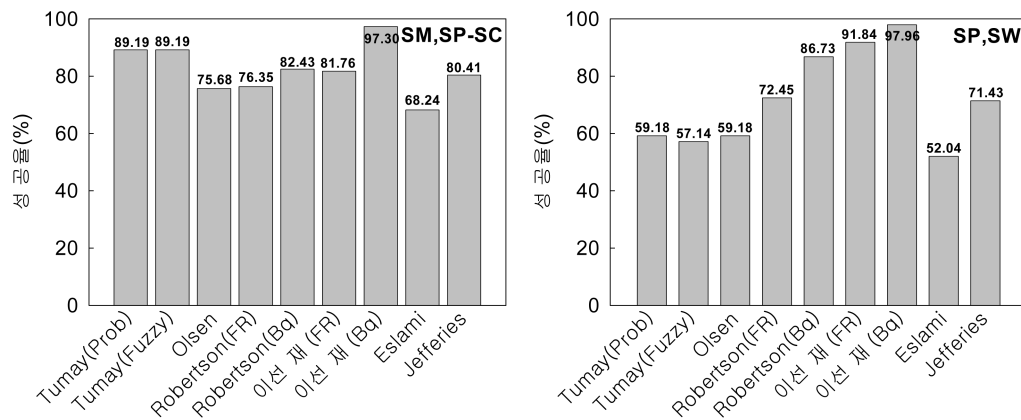


그림 10. “SM”, “SP-SC” 토질과 “SP”, “SW” 토질의 성공률

를 이용하는 차트의 판정이 국내지반에서 효과적인 것으로 판단된다.

“MH”와 “ML” 토질의 경우 방법들 간의 성공률이 큰 차이를 나타내고 있다. “MH” 토질의 경우는 특히 방법들 간의 성공률이 큰 차이를 나타냈으며 Robertson 등(1986)과 이선재(1997)방법중에서 간극수압비 B_q 를 사용하는 차트와 Jefferies와 Davis(1991)의 방법이 공통적으로 성공률이 높은 것으로 나타났다. “ML” 토질의 경우 Eslami와 Fellenius (1997)의 차트를 제외하고는 대부분 유사한 성공률을 나타냈으며 Robertson 등이 제안한 차트의 성공률이 높게 나타났다.

“SM”, “SP-SC” 토질과 “SP”, “SW” 토질의 경우 전체적으로 대부분의 방법들이 고르게 높은 성공률을 보였으며 특히 간극수압비 B_q 를 사용한 이선재 차트의 성공률이 가장

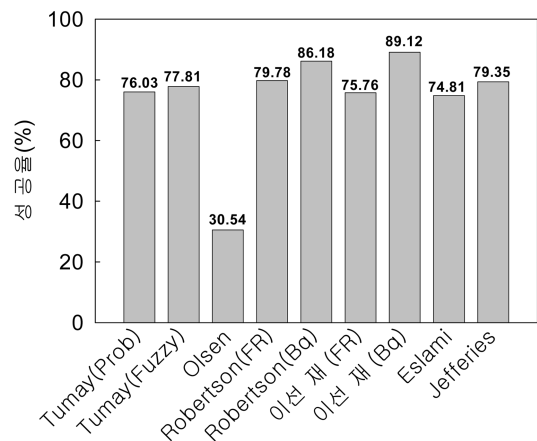


그림 11. 데이터베이스 전체에 대한 평균성공률

높은 것으로 나타났다.

전술한 결과를 종합하여 그림 11에 평균 성공률을 표시하였다. Robertson 등, 이선재, Jefferies와 Davis(1991) 방법이 상대적으로 높은 성공률을 나타냈으며 이들 차트 중에서도 간극수압비 B_q 를 사용하는 차트의 성공률이 공통적으로 높은 것으로 나타났다.

4.3 토론

전체 데이터베이스에 대한 국내외 7개 흠분류 차트 또는 방법의 평가결과, 입력변수 중 원주관입저항력과 슬리브마찰력(f_s) 또는 마찰비(R_f)만을 채택하고 있는 차트 또는 방법의 경우 간극수압비 B_q 를 추가적으로 사용하는 차트들에 비해 성공률이 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 동일한 연구자가 제안한 차트 내에서도 공통적으로 나타났으며 그림 11에 나타난 바와 같이 성공률이 전체적으로 우수한 방법 3가지를 보면 이선재(1997), Robertson 등(1986), 그리고 Jefferies와 Davis(1991)가 제안한 차트들이며 이들 차트 중에서도 간극수압비 B_q 를 이용한 q_r-B_q 차트가 q_r-R_f 차트에 비해 성공률이 높은 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 B_q 를 변수로 이용하는 차트의 성공률이 높은 이유는 “MH”와 “ML” 그룹에 대한 성공률의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그림 9에 나타난 바와 같이 q_r-R_f 또는 q_c-f_s 를 사용하는 Douglas와 Olsen(1981), Eslami와 Fellenius(1997), 이선재(1997)의 도표가 “MH” 토질에서 성공률이 공통적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 q_c-R_f 관계에 근거한 Tumay교수의 확률 및 퍼지 분류법은 비배수 상태인 점토질과 완전 배수 상태인 모래질에서는 비교적 높은 판정성공률을 보이거나 부분배수 상태일 것으로 판단되는 실트질(“MH”, “ML”)에서의 성공률이 낮은 것을 알 수 있어 간극수압비를 고려

한 새로운 퍼지 및 확률 분류법의 개발이 필요하다. 이상에서 국내 지반에 대한 피에조콘 흠분류의 성공여부는 실트질 지반의 분류 성공여부가 가장 중요한 요소이며 이를 위해서는 간극수압 비 B_q 를 이용한 분류법 등이 보다 효과적인 것으로 판단된다. 따라서 국내에서 마찰비 R_f 를 사용하는 차트와 B_q 를 사용하는 차트의 흠분류가 상이할 경우 간극수압비 B_q 를 사용하는 차트의 분류결과가 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

한편 표 3에는 전체자료 중에서 각 방법별로 판정이 불가능한 자료의 수가 정리되어 있다. 이선재(1997)의 도표는 국내 자료를 기준으로 제안되어 판정 성공률은 높게 나타났지만, “CH”와 “CL” 토질에서 제안된 평가영역 외에 존재하는 데이터가 다른 방법들과 비교해 상대적으로 많아(q_r-R_f 차트: 378개, q_r-B_q 차트: 267개) 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. Robertson 등(1986)의 방법은 이선재(1997)가 제안한 방법과 유사하게 평균적으로 우수한 성공률(82.98%)을 보이고 판정영역 외 자료가 현저히 적어(q_r-R_f 차트:0개, q_r-B_q 차트:108개) 국외 뿐 아니라 국내에서도 효과적으로 적용할 수 있는 방법으로 판단된다.

4.4 기존 흠분류 차트와 통일분류법의 관계

국내자료 들에 대해 평균적으로 가장 우수한 성공률을 보이는 이선재(1997) 차트와 Robertson 등(1986)의 차트가 그림 13에 비교되어 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이선재(1997)가 제안한 차트가 Robertson 등(1986)이 제안한 차트와 비교해서 흠분류가 가능한 데이터 범위가 작아 표 3에 나타난 판정영역 외 자료 수가 많은 것을 알 수 있다. 그러나 Robertson 등(1986)의 도표는 이선재(1997) 도표에서 제공하는 통일분류에 의한 흠분류를 제공하지 않아

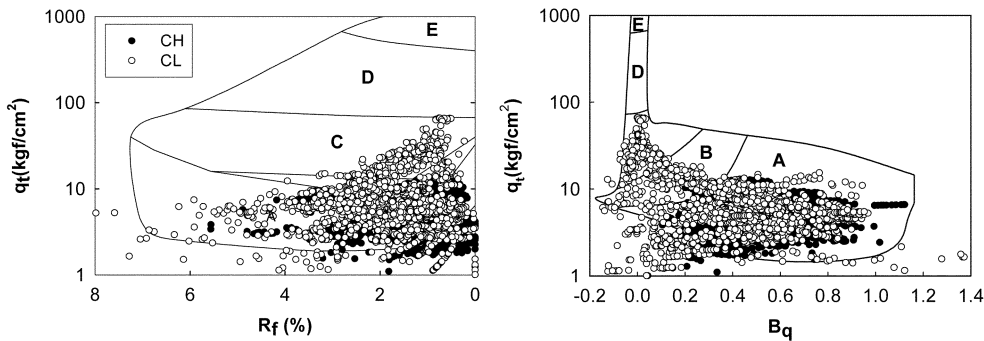


그림 12. 데이터베이스 중 이선재 차트의 평가영역 외 자료

표 3. 제안된 방법별 판정불가 데이터 개수

제안된 방법	USCS						합계
	CH	CL	MH	ML	SM, SP-SC	SP, SW	
Douglas와 Olsen(1981)	0	18	0	0	3	4	25
Robertson 등(1986)(q_r-R_f 차트)	0	0	0	0	0	0	0
Robertson 등(1986)(q_r-B_q 차트)	0	78	0	23	6	1	108
Jefferies와 Davis(1991)	183	17	0	0	1	0	201
이선재(1997)(q_r-R_f 차트)	243	133	0	0	2	0	378
이선재(1997)(q_r-B_q 차트)	89	174	0	4	0	0	267
Eslami와 Fellenius(1997)	379	115	0	0	46	0	540
토질별 전체 자료 수	2746	1861	36	284	148	98	-

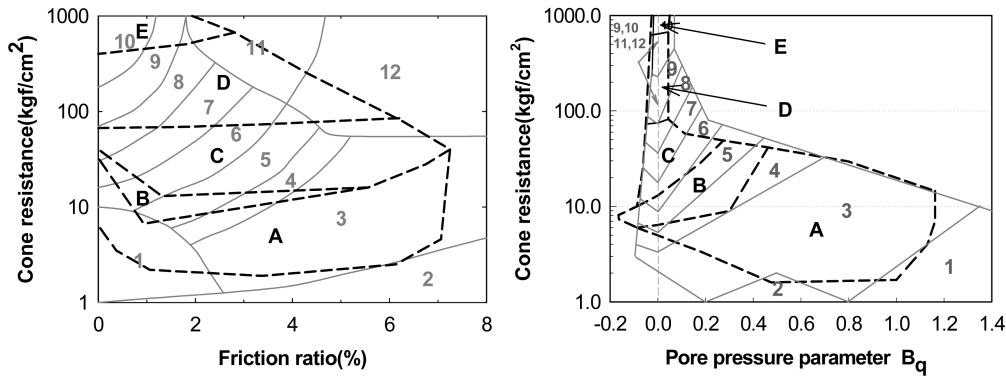


그림 13. 이선재(1997)와 Robertson 등(1986)의 흙분류 영역 비교

국내 기술자들에게 유용한 정보제공에 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서 구축된 데이터베이스를 바탕으로 Robertson 등(1986)의 차트와 이선재(1997) 차트를 비교하고 Robertson 등(1986)의 흙분류 영역과 통일분류법 간의 관계를 도출하고자 한다. 본 연구에서는 판정 성공률이 높은 것으로 평가되는 q_r - B_q 차트에 대한 상관관계를 도출하였다.

그림 14는 이선재와 Robertson 등(1986)의 q_r - B_q 차트에 구축된 국내 데이터베이스를 함께 나타낸 것으로 각 방법들의 흙분류 영역 범위를 고려하여 Robertson 등(1986)의 영역을 정리하면 다음과 같다.

1) “Sensitive fine grained” “Organic material”에 해당하는 1, 2번 영역과 “Gravelly sand to sand”인 10번, “Very stiff fine grained”인 11번, “Sand to Calyey sand(over-consolidated or cemented)”인 12번 영역은 국내지반에서 구축된 데이터베이스를 대입 결과, 데이터가 극히 일부만 분포하여 상관관계를 도출하기 어렵다.

2) “Clay”에 해당되는 3번 영역은 “CH” 토질의 약 97%, “CL” 토질의 약 70%가 대응한다. 따라서 3번 영역은 주로 “CH” 그리고 보조적으로 “CL” 해당한다. “ML” 13.7%로 일부 분포하는 것으로 나타난다.

3) “Stiff clay to clay”인 4번과 “Calyey silt to silty clay”인 5번 영역의 경우 “CL” 토질이 약 11%, “MH” 토질이 약 88%, “ML” 토질이 31.0% 정도 대응된다. 따라서 4, 5 영역은 “MH” 토질이 우세하며 보조적으로 “ML”과

“CL”이 포함된다.

4) “Sandy silt to clayey silt”인 6번과 “Silty sand to sandy silt”인 7번 영역은 “ML”, “SM”, “SP-SC”와 “SP, SW” 토질이 고르게 11.1~19.6% 정도 분포하는 영역으로 나타난다.

5) “Sand to silty sand”인 8번과 “Sand”인 9번 영역은 “SM, SP-SC” 토질이 62.8%, “SP, SW” 토질이 67.4%로 사질토 영역으로 평가된다.

5. 결 론

지반조사의 가장 기본적인 목적은 지층의 종류와 성질을 파악하는 것이라 할 수 있다. 국내 17개 현장에서 수행된 피에조콘관입시험과 채취된 시료에 대한 통일분류법 결과로부터 5173개의 데이터베이스를 구축하고 국내외에서 제안된 7개의 피에조콘 흙분류차트들로 흙분류를 수행한 뒤 통일분류 결과와 비교함으로써 각 방법의 국내지반 적용성을 평가하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전체 데이터베이스에 대한 국내외에서 제안된 7개 흙분류 차트 또는 방법의 평가결과, 입력변수 중 원추관입저항력과 슬리브마찰력(f_s) 또는 마찰비(R_f)만을 채택하고 있는 차트들보다는 간극수압비 B_q 를 사용하는 Robertson 등(1986)과 이선재(1997)의 q_r - B_q 차트, 그리고 Q_r - B_q - R_f 관계를 동시에 이용하는 Jeffereies의 차트가 성공률이 높게 나타났다.
2. 국내 지반에 대한 피에조콘 흙분류의 성공여부는 실트질 지반에 대한 분류 성공여부가 가장 중요한 요소이며 이러한 이유로 간극수압비를 B_q 를 이용한 분류가 마찰비를 이용한 경우보다 효과적인 것으로 판단된다. 따라서 국내에서 마찰비 R_f 를 사용하는 차트와 B_q 를 사용하는 차트의 흙분류가 상이할 경우 간극수압비 B_q 를 사용하는 차트의 분류결과가 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.
3. 국내지반의 자료를 바탕으로 제안된 이선재(1997)의 차트는 국내 데이터베이스에 대하여 일관성있게 높은 성공률을 나타냈다. 그러나 제안된 흙분류 평가 영역 외부에 존재하는 데이터가 다른 방법들에 비해 상대적으로 많아 이에 대한 차트의 보완 또는 수정이 필요할 것으로 판단된다.
4. Robertson 등(1986)이 제안한 차트는 이선재의 방법과 유사하게 국내 데이터베이스에 대해 평균적으로 우수한 판

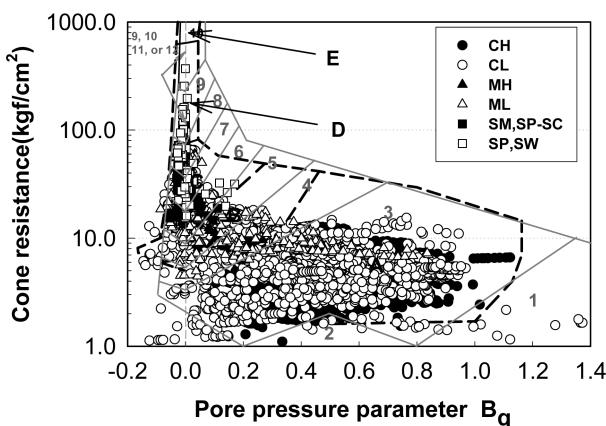


그림 14. Robertson 등(1986)의 흙분류 영역과 통일분류법의 상관도

정 성공률(82.98%)을 보이고 판단영역 외 자료가 현저히 적어 국외 뿐 아니라 국내에서도 효과적으로 적용할 수 있는 방법으로 나타났다.

5. 보정되지 않는 원추관입저항력 q_c 와 마찰비 R_f 만을 이용하는 Douglas와 Olsen(1981) 차트는 가장 낮은 평균 성공률이 산정되었다. 한편 이 차트를 바탕으로 개발된 Zhang과 Tumay(1999)의 확률적 방법 그리고 퍼지방법은 비배수 상태인 점토질 흙과 완전배수 상태인 모래질 흙에서는 비교적 높은 판정성공률을 보이거나 부분배수 상태인 실트질(“MH”, “ML”)에서의 성공률이 현저히 낮은 것을 알 수 있어 간극수압비를 고려한 새로운 퍼지 및 확률분류법의 개발이 필요하다. Eslami와 Fellenius(1997)가 제안한 차트 역시 유효원추관입저항력 q_E 과 마찰저항력 f_s 를 사용하고 있으며 비교적 낮은 성공률을 보였다.
6. 국내 데이터베이스의 통일분류결과와 이선재 차트를 Robertson 등(1986)의 q_r - B_q 차트와 비교함으로써 Robertson 등(1986) 차트의 흙분류 영역과 통일분류 결과와의 상관관계를 도출하였다. “Clay”에 해당되는 3번 영역은 주로 “CH” 그리고 보조적으로 “CL” 해당한다. “Stiff clay to clay”인 4번과 “Clayey silt to silty clay”인 5번 영역은 주로 “MH” 그리고 보조적으로 “ML” 토질이 대응된다. “Sandy silt to clayey silt”인 6번과 “Silty sand to sandy silt”인 7번 영역은 “ML”, “SM”, “SP-SC” “SP, SW” 토질이 고르게 대응되는 영역으로 나타난다. “Sand to silty sand”인 8번과 “Sand”인 9번 영역은 주로 “SP, SW” 토질이며 “SM, SP-SC” 토질도 유사한 정도로 대응된다.

감사의 글

저자들은 본 데이터베이스 구축에 이선재 박사께서 수행한 피에조콘 관입시험 및 실내시험 결과가 일부 포함되었음을

알리며 귀중한 자료를 제공해 주심에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

이선재(1997) 피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구. 공학박사학위논문, 서울대학교.

Begemann, H.K.S. Ph. (1965) The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Montreal, Vol. 1, pp. 17-20.

Douglas, B.j. and Olsen, R.S. (1981) Soil classification using electric cone penetrometer. Cone Penetration testing and Experience. *Proceedings of the ASCE National Convention*, St. Louis, pp. 209-217, American Society Engineers.

Eslami, A. and Fellenius, B.H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTU methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 886-904.

Jefferies, M.G and Davies, M.P. (1991) Soil classification by the cone penetration test: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 173-176.

Robertson, P.K. (1990) Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 151-158.

Robertson, P.K. Campanella, R.G., Gillespie, D. and Greig, J. (1986) Use of pizometer cone data. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, pp. 1263-1280, American Society of Engineers.

Tumay, M.T. and Farsakh (2008) From Theory to Implementation of a CPT-Based Probabilistic and Fuzzy Soil Classification. KGS spring national conference, 초청강연 II-1~초청강연II-18.

Zhang, Z. and Tumay, M.T. (1999) Statistical to fuzzy approach toward CPT soil Classification. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 179-186.

(접수일: 2008.4.23/심사일: 2008.5.20/심사완료일: 2008.6.29)