

피조콘을 이용한 토성분류시스템의 특성연구

Characteristics of Piezocone-based Soil Classification Systems

윤길림¹, Yoon, Gil Lim, 이용길², Lee, Young Gil, 이영남³, Lee, Young Nam

¹선임연구원, 현대건설연구소, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

²연구원, 현대건설연구소, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

³연구위원, 현대건설연구소, Research Fellow, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS: This paper reviews the soil classification system based on cone penetration test and compares its results with unified soil classification system(USCS) using piezocone test results obtained at marine clay site located in South and West marine region of Korean. A total of 13 soil samples identified by USCS were compared with piezocone-based soil classifications; Robertson's method and SGI method. The comparison results showed that two piezocone-based soil classification methods were reasonably in good agreements with USCS.

Key Words: Piezocone, CPT, Soil classification, Marine clay, USCS

1. 서론

콘관입시험의 유용성과 정확성은 이미 선진국에서 잘알려져 지반조사로서 자리를 잡았다. 콘관입시험은 지반의 특성을 거의 연속적으로 측정하여 지반의 역학적 특성 및 토성과라미터를 유추할 수 있는 장비이나 샘플링이 일반적으로 어려워 간접적으로 토성분류도표를 개발하여 이용하고 있다. 국내에서도 최근 콘관입시험을 현장지반조사에 활발히 적용하고 있으나 각각의 현장에서 얻은 콘시험 자료를 이용하여 토성을 파악할 경우에 이미 선진국에서 개발된 다양한 토성분류표를 사용하고 있다. 그러나 선진국에서 개발된 토성분류표를 현장의 특성 및 공학적인 판단없이 이용하는 것은 합리적인 방법이 아니다. 본 논문에서는 콘관입시험중에서 가장 활발히 이용되고 있는 피조콘시험의 자료를 가지고 이미 개발된 토성분류표를 이용하여 토성을 분류한 결과와 실내시험을 통해서 통일분류법에 의한 분류결과를 상호비교하여 선진국에서 개발된 토성분류표의 국내적용가능성을 타진하고 최적의 분류방법을 제안하고자 한다.

2. 콘관입시험(Cone Penetration Test)과 토질분류시스템

지반조사의 중요한 목적은 지반의 역학적 특성을 가능한 정확히 파악하여 구조물이 경제적이며 과학적으로 설계/시공되어 안전하게 유지되도록하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 지반의 특성과파악 상 지반을 이루는 토질을 파악하여야하는데 일반적으로 통일분류법이 가장 일반적으로 이용되고 있다. 통일분류법은 일찌기 카사그랜드교수가 2차대전시에 공항건설공사에 사용하기 위해서 연구한 결과로 탄생했으며 토립자의 입경가적곡선과 애틀버그한계의 수치로 토성을 분류하는데 균등계수, 유효입경, 액성지수, 활성도등과 토성의 역학적 특징인 전단강도, 압축성, 투수성과의 상관관계로 개발된 것이다. 콘관입시험의 실용성, 유용성과 경제성등으로 인하여 지반조사장비로 세계적으로 인기를 얻으면서 콘관

입시험결과를 이용해서 흙의 종류 및 특성을 분류하는 분류도표가 선진국을 중심으로 많은 연구자에 의해 제안되어왔다. 대부분의 제안된 분류도표는 콘선단저항치, q_c , 와 마찰력비, F_r , 을 이용하여 토질을 분류하여왔는데 이러한 분류법은 연약한 점토, 느슨한 실트 및 모래에서 정확성이 떨어지며 토질분류상 다양한 불확실성이 존재하는 것으로 연구결과 알려졌다. 최근에 들어 계측기술의 발전에 따라 콘관입중에 지반내의 간극수압의 변화를 측정하는 피조콘(Piezocoen)시험이 출현하면서 어느정도 불확실성이 줄었으나 완벽한 방법은 되지못하고있다.

콘관입시험의 결과를 이용한 토성분류에 대한 연구는 Douglas and Olson(1981)의 연구결과가 대표적이며 그들은 USCS를 분류기준으로 참고했다. 일반적으로 콘시험의 토성분류표는 콘을 관입하면서 발생하는 주변토질의 거동과 동일분류법의 결과를 상관관계로서 규명한 것이다. 콘시험의 중요한 역할은 지반의 수직적 특성을 파악하는 것이다. 콘관입시험은 이러한 지반의 수직적 변화 정도를 표준관입시험이나 타오기(샘플링)를 이용한 것보다 상당히 정확하게 파악하는데 유효하다. 왜냐하면, 콘관입시험은 거의 연속적으로 (5 cm 간격)지반의 역학적 특성을 측정하기 때문이다. 이러한 특징은 콘관입시험이 최근 각광을 받고있는 이유중의 하나이지만 콘관입저항인 콘선단저항치 q_c 는 콘선단주위의 응력변화를 콘직경의 상하로 5 - 10배 정도의 영역의 변화를 감지하는데 이러한 거리는 토질의 강성이 크면 더욱 증가하여 정확히 영향거리를 파악하는 것은 어려우며 다만 많은 실내모형토조나 현장시험을 통해 경험적으로 콘관입시험 측정자료로 지반의 특성을 파악하는 실정이다.

지금까지 세계적으로 많이 이용되고있는 분류도표는 Robertson(1990)에 의해서 제안되었으며 실제 콘저항값, 간극수압 계수 그리고 마찰비를 근거로 하여 만들어진 흙의 분류도표이다. 그후 Robertson은 흙의 분류도표를 상재하중의 영향을 반영할 수 있는 정규화 된 콘저항값(Q_c), 간극수압계수(B_q) 그리고 정규화 된 마찰비(F_r)를 근거로 재구성하였다. Robertson에 의하면 피조콘시험 결과를 이용한 흙의 분류도표는 흙의 입도 분포를 근거로하여 흙의 종류를 예측하기 보다는 흙의 거동에 초점을 두고있다고 하였다.

Robertson의 도표는 그림 1에 있는 것처럼 2가지 경우에 대하여 정리되어 있다. 하나는 그림 1의 왼쪽에 있는 것으로 콘저항치(q_c)와 마찰저항력(f_s)의 비를 정규화하여 분류한 경우와 그림 1의 오른쪽에 나타나 있는 간극수압비(B_q)를 이용한 경우이다. 그는 간극수압자료가 없는 경우에는 왼쪽도표를 사용하도록 추천하고있으며 보정콘저항치 q_c 대신에 q_c 를 사용해도 큰 무리는 없는 것으로 말하고 있다³⁾. 하지만 콘저항치가 작고 간극수압이 큰 연약점토나 실트질인 경우에는 분류에 상당한 불확실성이 존재하므로 보정콘저항치를 사용하도록 제시하고있다³⁾.

최근 SGI(Swedish Geotechnical Institute, Larsson et al, 1995)는 스웨덴의 점성토에 대해서 콘관입시험 자료를 이용한 토질분류에 대한 연구결과를 제안했는데 그림 2에 있다. 분류도표의 하나는 주로 콘저항치와 콘마찰력으로 사질토, 실트질과 세립질의 점성토로 구분하는 것이며, 다른 하나는 연약한 점토의 경우는 콘마찰력이 작고 불확실성이 크며 과압밀토에서의 콘저항치가 연약한 조립토와 비슷한 수치를 보이므로 간극수압을 측정된 경우는 점성토를 더욱 세분하여 상당히 과압밀된 흙, 과압밀흙 및 실트질 점토(Heavily overconsolidated, Overconsolidated or very silty clay), 정규압밀토나 과압밀토(Normally consolidated clays or overconsolidated silty clay), 저소성토와 민감도가 높은 점성토(Low plastic and/or highly sensitive clays)로 분류했다. 이들을 다시 콘저항치 q_c 에 따라 상당히 딱딱한 정도에서 매우 연약한 점성토까지(very stiff, stiff, medium stiff, soft, very soft)로 구분하는 체계이다.

그림 1과 2에 나타나 있는 현장 A, B에 대한 분류는 다음장에서 구체적으로 설명하기로 한다.

q_c, f_s and σ_{vo}' in bars or tsf

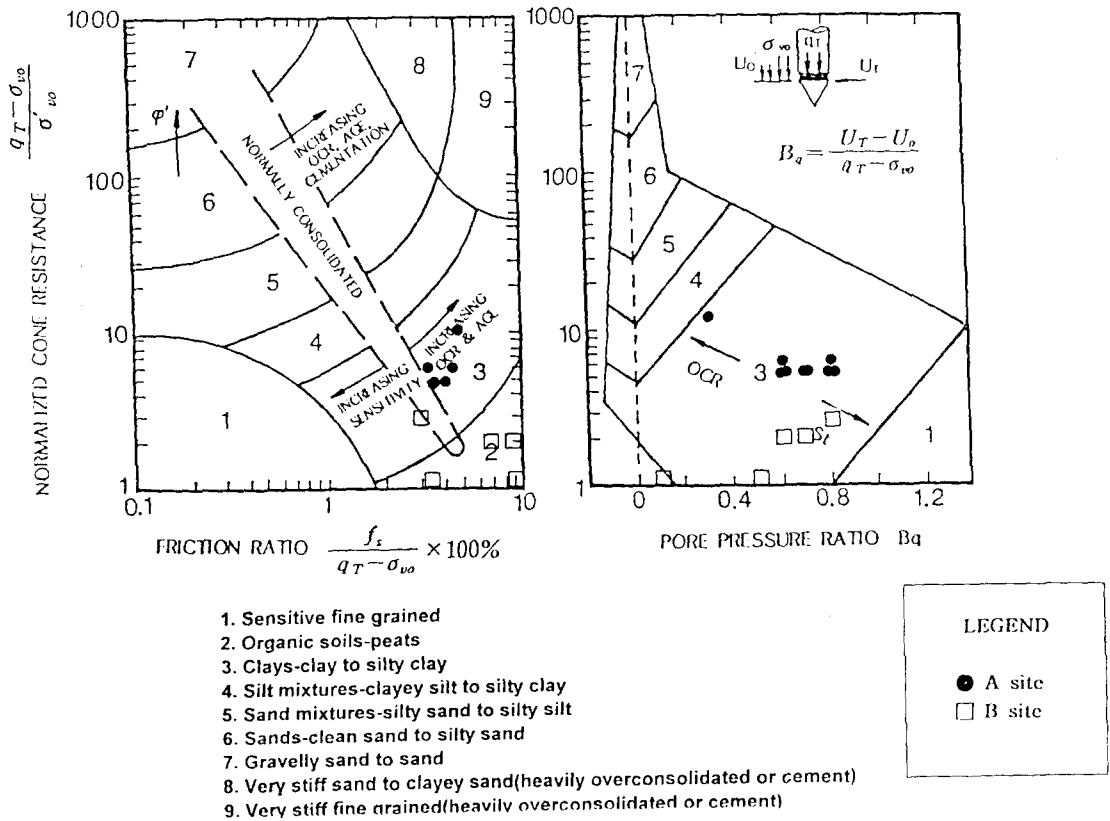


그림 1. Robertson의 토질분류표

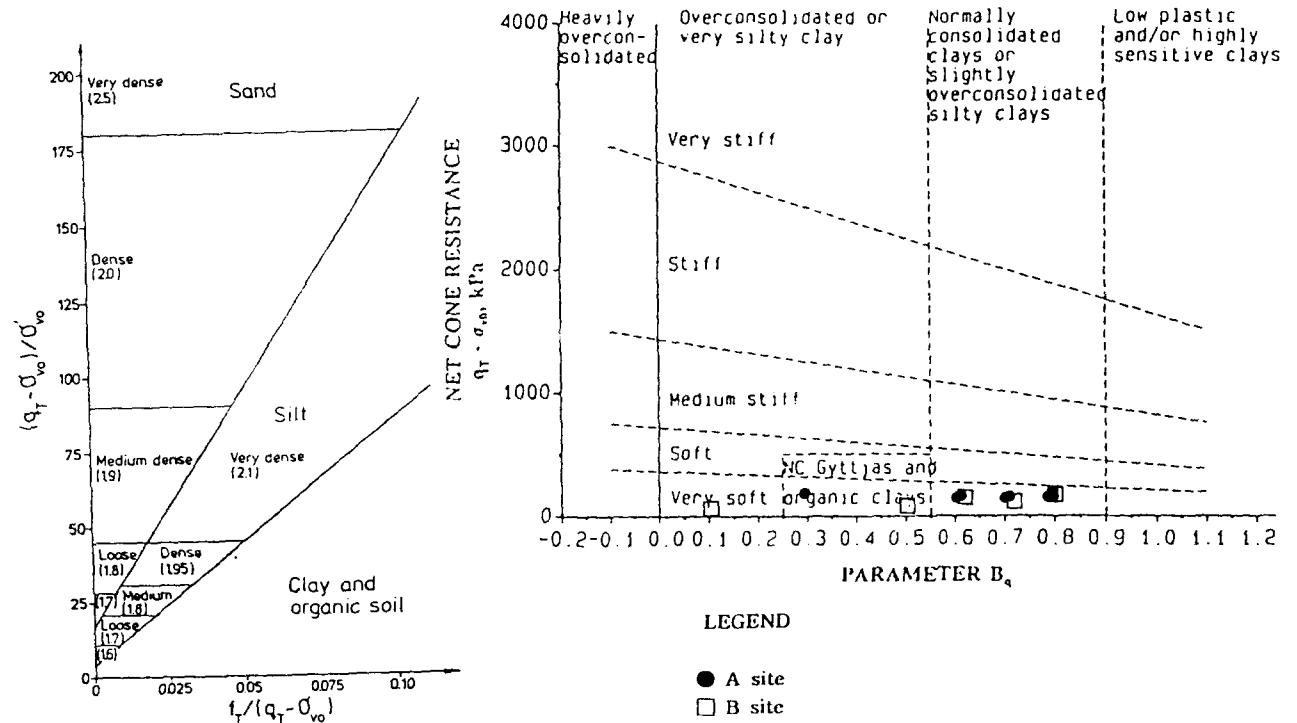


그림 2. SGI의 토질분류도표

3. 조사지역 및 콘관입시험 자료

연구대상 지역은 국내의 남해안에 위치한 울촌의 지방공단 조성공사 현장과 서해안에 위치한 아산지역이다. 울촌지역은 광양만에 위치하여 광양제철소와 여천국가공단 사이에 위치한 지역으로 그림 3a에 표시되어있으며 콘시험자료의 신뢰도를 기준으로 BH-3를 연구대상위치로 하였다. 조사지반은 굴 및 조개양식장으로 사용한 지역으로 토질 특성을 살펴보면 상부에 약간의 모래층과 패석등이 존재하며 그하부에 해성 퇴적층이 약 11m 정도 존재한다. 해성퇴적층 하부에는 자갈섞인 모래층이 2m정도 나타나며, 풍화대, 연암층이 차례로 이어진다. 풍화대층은 원위치에서는 조밀하나 굴진시 모래로 분해되는 특성을 보인다. 해성점토층의 함수비는 74~95%, 단위중량은 1.47~1.65 t/m³, 액성한계는 62~77%, 소성한계는 30~35%, 비중은 2.63~2.69정도이며, 흙의 통일분류는 CH이다.

아산지역(그림 3b)은 원지반위에 모래질로 성토층이 3 -4 m로 원지반의 표층은 점토층으로 그 두께는 5 - 15 m로 위치별로 변화가 심했으며 표층밑으로 실트질 모래층 및 풍화잔류층이 형성되어있었다. 총 5공의 피조콘시험을 수행했으며 타오기한 시료를 실내시험한 결과, 함수비가 25 - 50 %, 액성한계는 35 - 50 %, 소성한계는 17 - 22 %로 변화가 심했다. 표층은 정규압밀에서 약간 과압밀된 층으로 규명되었다²⁾.

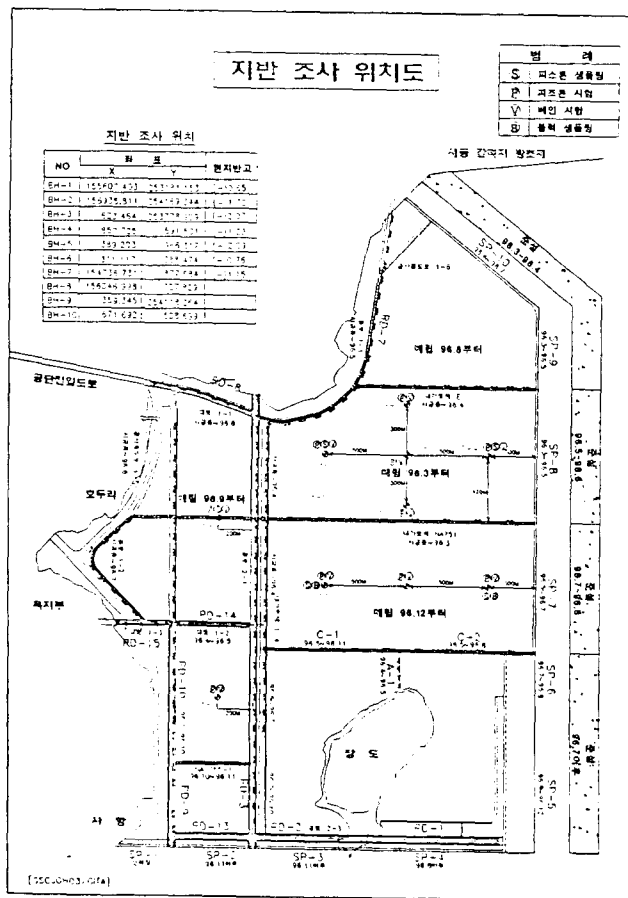


그림 3a. 남해안의 울촌지구(현장 A)

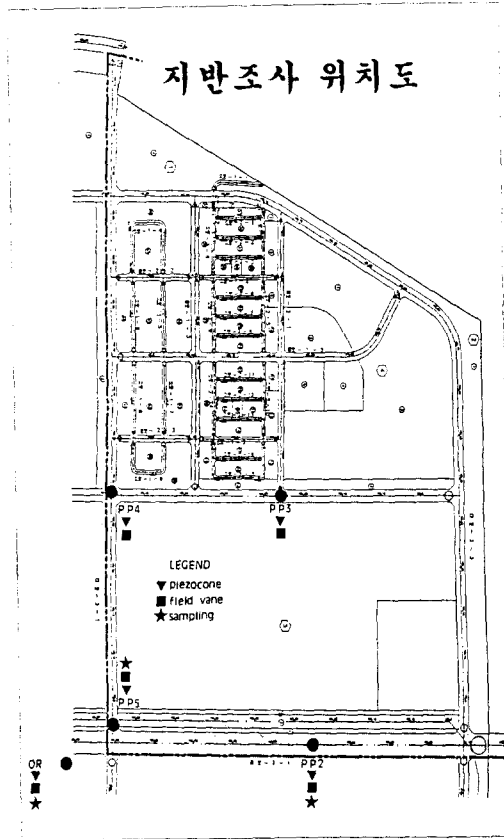
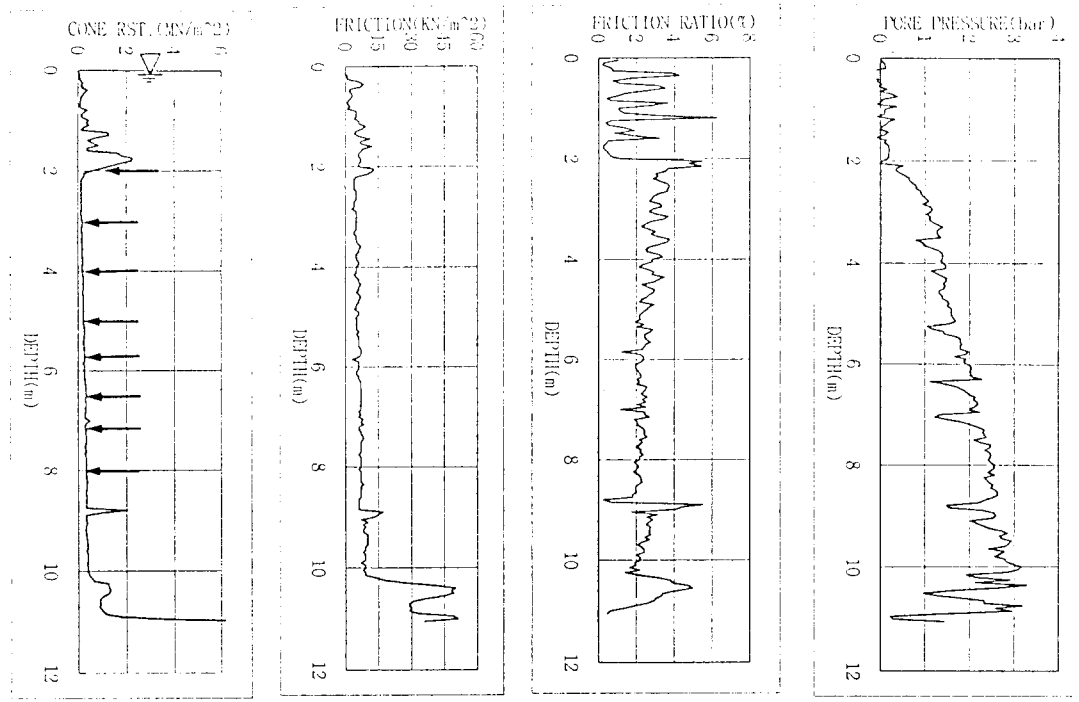


그림 3b. 서해안의 아산지구(현장 B)

두현장에서 측정된 콘시험자료는 그림 4에 있으며 타오기한 위치는 그림 4에서 화살표로 표시했다. 일반적으로 콘관입자료는 깊이로 매 50 mm마다 기록되지만 본 연구에서는 연구목적에 따라 타오기를 한 위치의 지점을 중심으로 타오기깊이에 해당하는 콘저항치 및 콘마찰력을 전체자료를 합산한후 평균치를 구했다. 왜냐하면 콘관입측정지점의 부위는 아주 미소하나 타오기를 한 지점은 이에 비하여 상당히 크고 또한 지반공학에서 토질의 특성분류시 관심있는 것은 층을 구성하고 있는 토질의 대표값을 필요로 하기 때문이다. 그리고 중요한 것은 토성분류도표는 토질의 입도구성과 역학적인 거동과의 상관관계를 규명할 때 각각의 평균치를 기준으로 하여 얻은 결과이다⁵⁾.

표 1과 2에는 연구대상 두현장(A, B)에서 수행한 콘관입시험의 측정치를 연구목적상 심도별 평균치와 통일분류법상의 토질분류를 제시했다.

BH-3 (시공일 - 2.07)



pp2

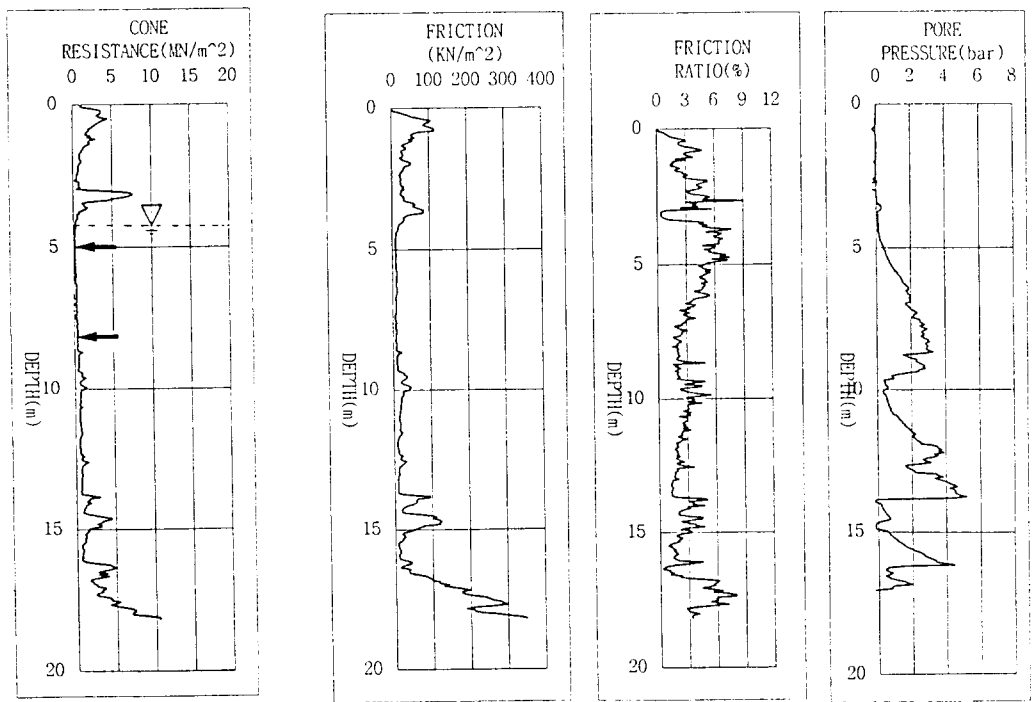


그림 4. 현장 A, B에서 콘관입시험한 전형적인 결과

표 1. A 현장의 피조콘 자료와 토성자료

위치	심도 (M)	피조콘 자료			USCS
		콘저항력, qc (MPa)	마찰저항력, fs (kPa)	간극수압, U (bar)	
BH-3	2-2.5	0.196	6.5	0.46	CH
	3-3.5	0.168	4.8	1.22	CH
	4-4.5	0.203	5.5	1.40	CH
	5-5.5	0.237	5.4	1.51	CH
	5.7-6.2	0.263	5.7	1.92	CH
	6.4-6.9	0.309	7	1.96	CH
	7-7.9	0.319	7	2.15	CH
	8-8.5	0.336	7	2.48	CH

표 2. B 현장의 피조콘 자료와 토성자료

위치	심도 (M)	피조콘 자료			USCS
		콘저항력, qc (MPa)	마찰저항력, fs (kPa)	간극수압, U (bar)	
PP2	5-5.5	0.187	9.1	0.59	CH
	8-8.5	0.400	8.0	2.84	CL
PP5	6-6.5	0.260	13.5	1.63	CL
	9-9.5	0.378	15.1	2.21	CL
OR	4-4.5	0.153	2.7	0.79	CL

4. Robertson과 SGI분류도표와 통일분류법의 비교

그림 1과 2 그리고 표 3에서 보인 것과 같이 울촌지구 현장 A에서 콘마찰저항치, f_s ,와 콘선단저항치, q_c ,를 이용한 것과 간극수압비, B_q ,를 이용한 두가지의 로버트슨도표로 분류한 결과, 조사대상층의 거의 대부분을 차지하는 3번흙, 점토 에서 실트질 점토(clays - clay to silty clay)으로 구성된 것으로 판단되었다. 이는 토질을 육안으로 살펴본 것과 일치하며, 통일분류법에 의한 토성결과와도 잘 일치한다고 생각된다.

아산지구 현장 B에서는 3공에서 콘마찰저항치와 콘선단저항치를 이용한 경우, 2공(PP5, OR)에서는 2번 흙, 유기질흙에서 피트(Organic soils - Peats)로 분류되며 PP2에서는 3번흙, 점토에서 점토질의 실트(clays - clay to silty clay)로 분류되었다. 간극수압비 B_q 를 이용한 결과 또한 3공 모두 3번흙, 점토에서 점토질의 실트(clays - clay to silty clay)로 분류되었다. 이러한 결과는 통일분류법에서 CL(inorganic clays of low to medium plasticity, sandy clay, silty clay, lean clay)로 구분한 것과 차이가 있다.

Robertson 도표를 이용시 주의할점은 마찰저항력, f_s ,을 이용하여 분류할 때, 과압밀비(OCR)가 크거나 예민비가 작은 연약점토는 오류를 범하기 쉽다. 왜냐하면 이런 흙은 마찰저항력이 아주 작기 때문에 작은 보정오차에도 크게 영향받기 때문이다. 따라서 과압밀비가 크거나 예민비가 적은 연약점토는 간극수압비(B_q)를 이용한 오른쪽 분류표를 이용하는 것이 더 타당한 것으로 알려져있다.

본 연구에서 분류한 대상의 토질의 대부분의 점들은 정규압밀토에서 약간 과압밀된 흙(Normally consolidated clays or slightly overconsolidated silty clay)로 분류되었으며 컨시스턴시 정도는 아주연약(very soft), 연약(soft)한 정도를 보여주며 일부는 과압밀토에서 실질점토(Overconsolidated or very silty clay)로 아주연약, 연약한 상태의 토질로 존재함을 보여준다. 이러한 결과는 통일분류법에서 분류한 곳과 실내시험결과와도 상당히 일치하는 것이었다. 그러므로 본 도표는 특히 연약하거나 OCR이 적거나, 예민비가 큰 연약점토의 분류에 상당히 유용한 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 국내의 대표적인 해성점토지반의 토성분류를 피조콘을 기초로한 방법과 통일분류법에 의한 것과 상호비교하였는데, 해성점토의 토성분류를 위해 피조콘 시험을 이용하는 경우, Robertson 도표를 이용하여 지반의 토질분포를 개략적으로 분류하는데에는 큰 문제는 없는 것으로 판단되나 SGI분류 방법을 이용하여 국내의 해안점토를 분류하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단되었다. 그러므로 국내에서 해성토를 분류시 Robertson도표를 가지고 개략분류에 이어 점성토의 분류를 SGI도표를 이용하면 보다 정확하게 토성분류가 가능하다고 생각된다. 하지만 본 연구는 극히 일부의 정해진 현장에서 얻은 결론이므로 본 현장과 유사한 위치에서는 참조가 되겠지만 지반조건이 상이한 다른 현장에서는 적절한 공학적 판단과 연구를 통해서 사용해야겠다.

6. 감사의 글

본 논문은 현대건설기술연구소 토질실험실에서 근무하는 이종섭씨와 장수영씨의 헌신적인 노력의 결과임을 밝히며 본 논문의 연구발표를 허락해준 연구소 소장님 이하 연구원과 임직원께 감사를 드린다.

표 3. 토성 분류 종합

지역 구분	공번	심도 (M)	피조콘 자료					USCS	분류		
			콘저항력, qc (MPa)	수정 콘저항력, qt (MPa)	마찰저항력, fs (kPa)	간극수압, U (bar)	Bq		Robertson		Lasson
									마찰율에 의한 분류	Bq에 의한 분류	
A	BH-3	2-2.5	0.196 ± 0.129	0.196 ± 0.129	6.5 ± 3.5	0.46 ± 0.27	0.3	CH inorganic clays of high plasticity, fat clays	Clays - Clay to silty clay	Clays - Clay to silty clay	Overconsolidated or very silty clay(Very soft)
		3-3.5	0.168 ± 0.016	0.168 ± 0.016	4.8 ± 0.4	1.22 ± 0.12	0.8	상동	Clays - Clay to silty clay	Clays - Clay to silty clay	Normally consolidated clays or slightly overconsolidated silty clays(Very soft)
		4-4.5	0.203 ± 0.016	0.203 ± 0.016	5.5 ± 0.8	1.40 ± 0.11	0.7	상동	상동	상동	상동
		5-5.5	0.237 ± 0.018	0.238 ± 0.018	5.4 ± 0.5	1.51 ± 0.23	0.6	상동	상동	상동	상동
		5.7-6.2	0.263 ± 0.021	0.263 ± 0.021	5.7 ± 1.1	1.92 ± 0.12	0.8	상동	상동	상동	상동
		6.4-6.9	0.309 ± 0.014	0.309 ± 0.014	7.0 ± 0.0	1.96 ± 0.23	0.6	상동	상동	상동	상동
		7-7.9	0.319 ± 0.041	0.319 ± 0.041	7.0 ± 0.7	2.15 ± 0.39	0.7	상동	상동	상동	상동
		8-8.5	0.336 ± 0.016	0.336 ± 0.016	7.0 ± 0.4	2.48 ± 0.08	0.8	상동	상동	상동	상동
B	PP2	5-5.5	0.187 ± 0.187	0.187 ± 0.188	9.1 ± 9.1	0.59 ± 0.11	0.1	상동	Ogranic soils - peats	상동	Overconsolidated or very silty clay(Very soft)
		8-8.5	0.400 ± 0.400	0.401 ± 0.028	8.0 ± 8.0	2.84 ± 0.15	0.8	CL inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays.	Clays - Clay to silty clay	상동	Normally consolidated clays or slightly overconsolidated silty clays(Very soft)
	PP5	6-6.5	0.260 ± 0.050	0.260 ± 0.050	13.5 ± 1.7	1.63 ± 0.14	0.7	상동	Ogranic soils - peats	상동	Normally consolidated clays or slightly overconsolidated silty clays(Very soft)
		9-9.5	0.378 ± 0.068	0.378 ± 0.068	15.1 ± 2.3	2.21 ± 0.57	0.6	상동	Ogranic soils - peats	상동	Normally consolidated clays or slightly overconsolidated silty clays(Very soft)
	OR	4-4.5	0.153 ± 0.015	0.153 ± 0.015	2.7 ± 0.47	0.79 ± 0.084	0.5	상동	Ogranic soils - peats	상동	Overconsolidated or very silty clay(Very soft)

7. 참고문헌

1. 윤길림, 지성현, 이용길, 이영남, 1996, "CPT를 이용한 비배수전단강도의 평가," *한국지반공학회 가을 학술발표회*, October.
2. 현대건설기술연구소, 1997, "아산포승지구 사면안정 및 압밀침하 분석보고서.
3. Douglas, B. J., and Olsen, R. S., 1981, "Soil Classification Using Electric Cone Penetrometer," ASCE, *Special Technical Publication*, St. Louis, Missouri.
4. Larsson, R, Moller, B, and Lofroth, B, 1995, "Processing of data from CPT tests," *Proceeding of international Symposium on Cone Penetration Test*, Sweden, September, Vol. II.
5. Robertson, P. K., 1990, "Soil Classification Using Cone Penetration Test," *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp. 151-158.