공학 연구논문집 제30권 1호 pp. 463~480, 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 30, No. 1, pp. 463~480, 1999
University of Ulsan.

Cone Penetration Test를 이용한 울산 삼산지역의 지반특성에 관한 연구

민덕기 · 김용웅[1)]
토목환경공학부

<요 약>

본 논문에는 피에조콘관입시험을 이용하여 울산 삼산지역 흙의 특성과 거동을 평가하였고, 또한 피에조콘관입시험의 결과들을 불교란 시료를 채취하여 행한 실내 시험결과들과 비교하였다.

울산 삼산지역의 흙은 유기물을 다량 함유하고있으며 소성이 작은 점토로 나타났다. 과압밀비(O.C.R, overconslidation ration)는 약 1 또는 1보다 작은 값으로 나타났으며 삼산지역의 흙은 정규압밀토 또는 미압밀토인 것으로 밝혀졌다. 또한 피에조콘관입시험과 표준관입시험 사이의 관계는 Kulhaway & Mayne이 제안한 경험공식과 도표가 적합한 것으로 나타났다. 간극수압소산시험에 의하여 구해진 수평압밀계수와 K_h/K_v는 각각 1.0~6.24 × 10^{-3} cm^2/sec 와 1.8~2.58 이었다.

A Study on Soil Properties by Cone Penetration Test in Ulsan Samsan Area

Min, tuk-ki · Kim, young-woong
Dept. of Civil & Environmental Engineering

<ABSTRACT>

In this paper, the properties of Samsan soil in Ulsan were evaluated by the

1) 김용웅 - 도화종합기술공사 전무이사

piezocone test. The results of the piezocone test were compared with the laboratory test results of the undisturbed sample.

Samsan soil that contains various kind of organic was found out the low plastic clay. The overconsolitaion ratio(O.C.R) was carried out about 1 or less than 1. Hence it is provided that the soil is the normally consolidated clay or under consolidated clay. In addition, The correlations between the piezocone test and the standard penetration test were conformed to the charts and the empirical formulas by Kulhaway & Mayne. The coefficient of consolidation in horizontal direction and K_h/K_v were estimated at 1.0~6.24 $\times 10^{-3}$ cm^2/sec and 1.8~2.58 by the pore pressure dissipation test, respectively.

Conclusively, it can be evaluated out the properties of Samsan soil by piezocone test and suggested several values of empirical parameters.

1. 서 론

구조물의 기초나 지하구조물의 설계와 시공에 있어서 그 지반의 특성과 거동을 예측하는 것은 매우 중요하다. 그래서 설계와 시공 이전에 그 지반의 특성과 거동을 파악하여야만 한다. 특히, 울산광역시 남구의 삼산지역은 개발이 한창 진행 중인 지역으로 울산광역시의 신 시가지를 형성해 가고있다. 그러나 삼산지역은 매우 연약한 지반으로 점토층의 깊이가 약 30~40m이고 지하수위가 높은 편이며 또한 10% 내외의 유기질을 함유한 지역으로써 많은 문제점을 내포하고 있다. 현재 시공중인 구조물도 지반 침하와 같은 안전에 많은 문제점을 야기하고 있으며 이에 대한 대책을 수립하고 있는 중이다. 특히, 매우 연약한 지반에서 얻어진 표준관입시험의 결과를 구조물의 설계와 시공에 직접 이용할 경우 구조물의 시공과 안전에 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 지반의 특성과 거동을 예측하기 위한 조사방법 중 현재 그 활용 범위가 점차적으로 확대되고 있는 피에조콘관입시험(Piezocone Penetration Test, C.P.T.U)과 간극수압소산시험(Pore Pressure Dissipation Test)을 통하여 얻은 시험결과와 불교란 시료(Undisturbed Sample)를 채취한 후 행한 실내시험결과를 토대로 하여 삼산지역의 지반특성과 거동을 예측하고자한다. 또한 삼산지역의 축적된 표준관입시험 결과를 이용하기 위하여 콘관입시험과 표준관입시험의 상관 관계를 찾고자 한다.

2. 피에조콘관입시험(Piezocone Penetration Test) 시험결과

2.1 지형 및 현장위치

본 연구를 위한 콘관입시험(C.P.T.) 위치는 행정구역상 울산광역시 남구 삼산동 이며, 오랜 세월에 걸쳐서 퇴적된 해성퇴적층으로, 현재 토지 구획 정리를 하여 상부 5m는 평탄부지로 모래, 자갈등의 매립층으로 이루어져 있다.

콘관입시험의 실행에 있어서 상부 매립층에는 콘 관입이 불가능함으로 5.20m까지 4인치

케이싱을 굴착한 후에 콘관입시험을 실시하였다. 그리고, 간극수압소산시험을 2개소에 각각 1회씩 실시하였다.

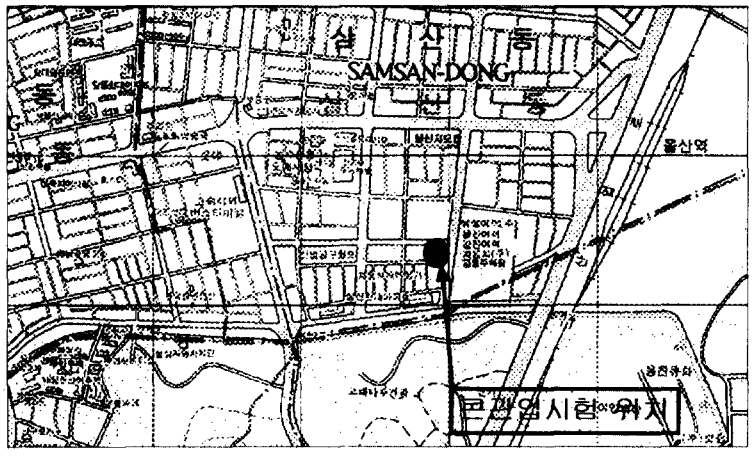

그림 1. 피에조콘관입시험(C.P.T.) 시행 위치

2.2 콘 선단지지력 (q_C)

삼산지역에서 행한 시험의 심도별(0.05m 간격) 콘의 선단지지력은 사질토층과 점성토층에서 큰 차이를 보였다. 콘의 선단지지력을 통하여 점토층 내에서 분포하는 모래 Seam의 분포 유무 상태를 알아낼 수 있으며, 또한 점토층에서의 연속적인 심도별 강도 추이를 알아낼 수 있다.

상부 매립층에서는 자갈의 함유로 5.25m(A, B 지점)까지 케이싱 굴착으로 나공상태이므로 선단지지력 값은 나타나지 않는다. 그림 2는 콘관입시험을 통하여 얻은 A, B 지점의 콘 선단지지력이다. A 지점의 콘관입시험은 지표면으로부터 약 30m까지 행한 것으로 그림 2에 나타나있으며, B지점 또한 지표로부터 약 30m정도까지 관입한 것을 알 수 있다. A 지점에서 콘의 선단지지력 값은 상층부(약10.0~22.0m)까지 값의 큰 변화가 없이 일정하게 6.0~9.0kg/cm^{2}으로 나타나고있으며, 하층부(약 22.0m 이후)에서는 8.0~15.0kg/cm^{2}으로 나타났다. B지점에서의 지층상태는 A지점과 동일한 것으로 보이며, 선단지지력 값은 상층부(약 8.0~25.0m)에서 6.5~9.8kg/cm^{2}으로 나타났고, 하층부(약 25.0m이후)에서는 9.5~17.0kg/cm^{2}으로 나타났다. 또한 두 지점 모두 깊이가 깊어질수록 선단지지력은 조금씩 증가하였고 약 30m 부근에서는 상당히 큰 값을 보이고 있다.

2.3 마찰력 (F_S)

마찰력은 모래지반과 점토층과 비교할 때 큰 차이의 결과값을 보인다. 즉 모래 및 모래심이 협재되어 있는 지점에서는 마찰력이 매우 크게 나타난다. 본 시험의 결과에서는 A와 B지점 모두 매우 작은 값의 마찰력이 깊이에 따른 변화 없이 거의 일정함으로 점토층을

형성하고 있는 것으로 판단되었다. 단지 지층 최하부에서 매우 큰 마찰력이 생기는 것으로 보아 모래나 자갈층이 약 30m 깊이에 있는 것으로 예측된다.

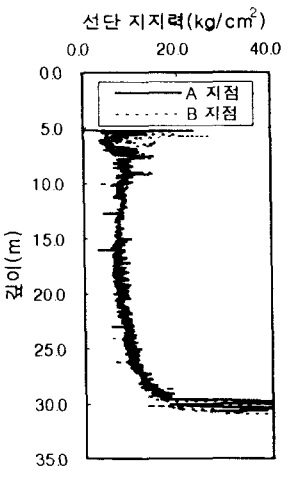

그림 2. 깊이에 따른 선단지지력

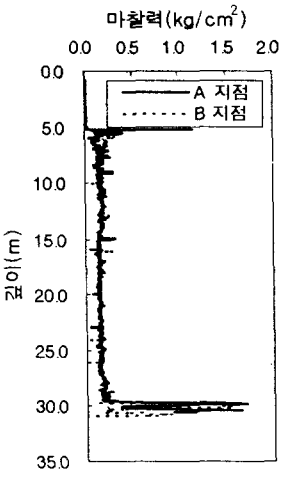

그림 3. 깊이에 따른 마찰력

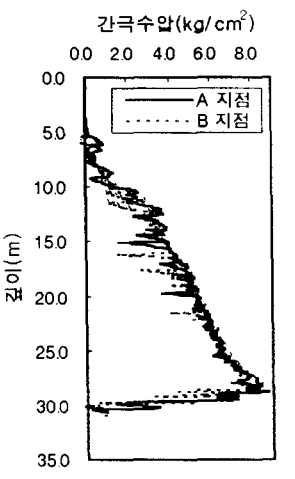

그림 4. 깊이에 따른 간극수압

2.4 간극수압 (P_u)

간극수압의 측정은 피에조메타 엘리먼트를 완전 포화시켜 실시한다. 엘리먼트가 불포화되게 되면 피에조콘 장치의 간극수압 반응은 부정확하고 둔하게 된다. 최대간극수압과 소산시간은 공기입자에 의해 계속 영향을 받는다. 일반적으로 간극수압 측정을 함으로써 얻을 수 있는 것은 연약한 점토지반에 대해서 지반 공학적인 매개변수들을 추정하는 데 큰 도움을 준다.

특히 지반에 대해서 흐름특성 및 압밀특성을 파악할 수 있으며 보다 개선된 지층 구분 능력, 지반에 대하여 배수 및 비배수 등의 조건을 구분할 수 있다.

본 시험의 결과인 그림 4를 보면 두 지점의 간극수압의 추이변화는 심도가 깊어질수록 증가하는 추세를 보였으며. 부분적으로 간극수압이 감소하는 현상은 그 곳에 모래 및 실트층 또는 모래 Seam이 협재된 지층이 존재하고 있다는 것을 추측할 수 있다. 각 시험 지점의 심도에 따라 A, B 두 지점 모두 하부층에 모래 Seam이 소량 분포하고 있으며. 하부층에 대해서는 모래질 실트 및 점토질 실트에 소량의 실트 및 점토가 협재하여 호층을 이루어 분포하고 있으므로 간극수압의 변화폭이 크게 나타난다.

2.5 간극수압소산시험

점성토에서 콘의 관입시 콘 선단부 주변의 간극수압은 콘의 관입으로 인해 증가하게되며 이는 원 지반의 간극수압과는 크게 차이가 있다. 따라서 원지반의 간극수압을 측정하기 위해서는 콘의 관입으로 인해 발생한 과잉간극수압이 소산될 때까지 측정하여야 한다. 그

러나 지반의 투수성에 따라 간극수압의 완전한 소산은 수 일간 계속되기도 하므로 이를 측정하는 것은 시간적, 경제적으로 매우 어려운 작업이다.

본 시험에서 각각 A, B 지점에서 각각 15m와 16m에 콘을 관입하여 과잉간극수압이 정수압의 50%정도로 감소할 때까지 측정하였으며, 과잉간극수압과 소산 시간의 그래프를 그림 5에 나타내었다.

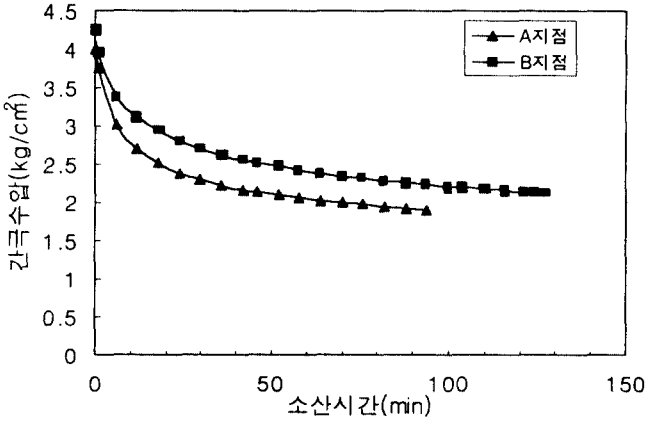

그림 5. 소산시간에 따른 간극수압 그래프

3. 불교란 시료를 이용한 실내시험결과

본 논문에서는 삼산지역의 지반 특성을 연구하기 위하여 비교적 신뢰성이 높은 실내시험을 행하여 콘관입시험과 비교 분석했다. 본 논문에서의 실내시험은 현재까지 삼산지역에서 행하여 왔던 시험과는 달리 깊이에 따른 불교란 시료를 채취한 후 실내시험을 통하여 깊이에 따른 특성을 파악하였다.

실내에서 행하여진 시험은 먼저 가장 기본적인 입도 시험부터 비중시험, 밀도시험, 함수비시험, 액·소성한계시험을 행하였고, 역학적인 특성을 파악하기 위하여 직접전단시험, 압밀시험, Pocket Penetrometer 시험, Toevane 시험을 깊이 별로 행하였다. 특히 삼산지역의 점토가 해성점토인 것을 고려하여 흙내의 유기물함량시험과 염분함량시험 그리고 pH시험 등을 하였다. 실내시험을 통하여 얻은 결과는 콘관입시험으로 구한 깊이별 자료들과 비교, 분석 했으며, 실내시험은 약 10m부터 약 28m까지 1m 간격으로 실행하였고 그 결과 중 11m, 13m, 16m, 20m와 23m의 결과를 깊이에 따라 표와 그래프로 나타내었다.

표 1. 입도시험 결과

심도(m)	11m	13m	16m	20m	23m	26m
Sand(%)	3.86	2.32	1.70	1.02	1.64	1.74
Silt(%)	64.18	64.42	51.49	51.03	53.81	50.76
Clay(%)	31.96	33.26	46.81	47.95	44.55	47.50
D_{60}(mm)	0.0161	0.0119	0.0087	0.0073	0.0085	0.0093
D_{30}(mm)	0.0044	0.0043	0.0022	0.0021	0.0028	0.0016
D_{10}(mm)	-	-	-	-	-	-
자연함수비(%)	55.3	57.8	64.3	74.9	70.2	52.1
액성한계 LL(%)	53.7	67.2	65.8	75.9	70.3	48.5
소성지수 PI(%)	20.6	29.4	23.0	28.3	26.8	17.7
유기물함량(%)	10.0	10.0	11.4	11.0	14.1	8.2
통일분류법	OH			OL		

실내시험에서 확인된 삼산 흙의 입도 특성을 평균치로 나타내면 모래가 2%, 실트는 56%, 점토는 42%로 분류 되였고 95%이상이 #200체를 통과하는 세립분으로 구성되어 있으며, 15~30%가 콜로이드 상태로 침강이 이루어지지 않았다. 그리고 소성지수가 17.7 ~ 29.4 % 의 큰 범위를 나타내고있으며 유기물 함량시험을 통하여 약 10%내외의 유기물을 함유하고 있는 것을 확인하였다. 여러 시험에서 구한 결과를 종합하면 울산 삼산지역의 흙은 통일 분류법상 OH 또는 OL로 분류되었으며 대체적으로 OL에 가깝게 나타났다.

울산 삼산의 지반에 대한 압밀특성을 파악하기 위하여 깊이에 따른 불교란 시료를 사용하여 약 3개월에 거쳐 압밀시험을 수행하였고 그 결과를 아래의 표 2에 나타내었다.

표 2. 압밀시험 결과

심도	11 m	13 m	16 m	20 m	23 m
C_c	0.623	0.597	0.797	0.885	0.712
C_v	0.002318	0.004097	0.003496	0.001825	0.001107
P_o (kg/cm^2)	0.738	0.837	0.965	1.102	1.32
P_c (kg/cm^2)	1.4	1.0	1.0	0.93	0.75
O.C.R	1.897	1.195	1.036	0.844	0.568

울산시 삼산, 달동 지역에서 채취한 비교란 시료를 통하여 얻은 깊이별 C_c값과 OCR값은 표 2와 그림 6과 그림 7에 나타난 것과 같으며, C_c값은 전체적으로 0.486~1.030 사이에 분포하며 값의 분포가 비교적 넓게 나타났으며 중간 깊이까지 C_c값이 증가하였고 중간층을 지나 하부 층으로 갈수록 C_c의 값이 점차 감소하고 있는 경향을 보이 있다. OCR값은 상부 층에서는 1보다 큰 값을 보이고 있으며 중간 깊이부터 1에 가깝거나 1보다 작은 값을 갖는 정규압밀 또는 미압밀상태를 보이고 있다.

실내 시험에서 구한 C_v값은 그림 8과 같이 나타났다. 표 2와 그림 8에 나타난 C_v값은 각각의 하중단계에서 구한 C_v값의 평균을 취한 값이며, 표 2에 나타난 값은 square-root-time법을 사

용하여 구한 결과이다. 그림 8에는 square-root-time법과 Hyperbola 방법을 이용한 구한 결과들을 나타내었다.

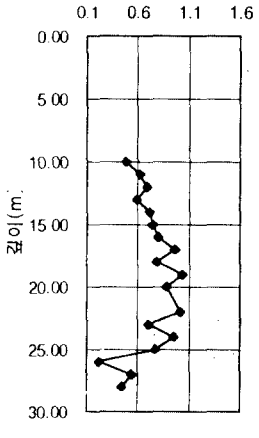

그림 6. 깊이에 따른 C_c값

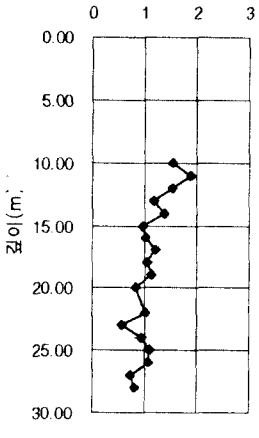

그림 7. 깊이에 따른 OCR

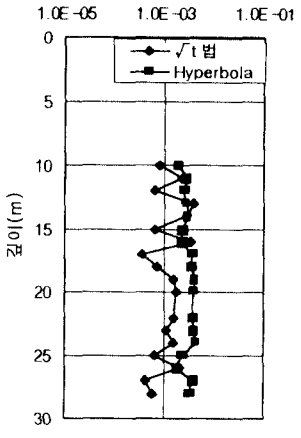

그림 8. 깊이에 따른 C_v값

hyperbola방법으로 구한 C_v값은 깊이에 관계없이 일정한 분포를 보였고 square-root-time법으로 구한 C_v값은 hyperbola방법으로 구한 결과보다 조금 작은 경향을 보이며 값의 분포는 조금 넓게 나타나고 있다.

4. 피에조콘관입시험결과 해석을 통한 울산 삼산지역의 지반특성

4.1 콘관입시험(C.P.T)을 이용한 지반 거동형태의 분류와 토질의 분류

C.P.T.를 이용하여 지반의 거동형태를 추측하고, 그 지반의 토질을 분류하는 연구는 현재까지 많은 학자들에 의하여 연구되어 왔고 유럽에서 보다 많은 연구 논문이 발표되었다.

Douglas & Olsen(1981)[1]은 미국 서부지역에서 조사한 결과를 바탕으로 한 토질의 분류 도표를 제시하였고, 이 도표는 네덜란드에서 조사된 자료에 의해서도 검증되었다. 연약한 점토일수록 콘 저항은 작고 마찰 저항비는 큰 경향을 보이고 있다. 이 도표의 특징은 입경분류에 의한 정확한 흙 분류를 제시하는 것이 아니라 토질의 거동형태에 의한 분류기준을 제시한 것이다. Douglas & Olsen(1981)[1]이 제안한 토질거동에 의한 토질의 분류에 의하면 울산 삼산지역의 토질은 상부는 조금 예민한 clay층이고 하부는 실트층인 것으로 나타났다.

요즘 널리 이용되고 있는 토질거동에 대한 분류는 그림 9와 같이 Robertson et. al.(1986)[2]에 의하여 제안된 도표를 사용하고 있다. Robertson은 수정된 콘저항과 마찰저항비, 간극수압비를 다음 식. 1과 같이 정의하고 이 세가지 파라메타을 이용하여 토질의 거동형태를 12 zone으로 분류하였다.

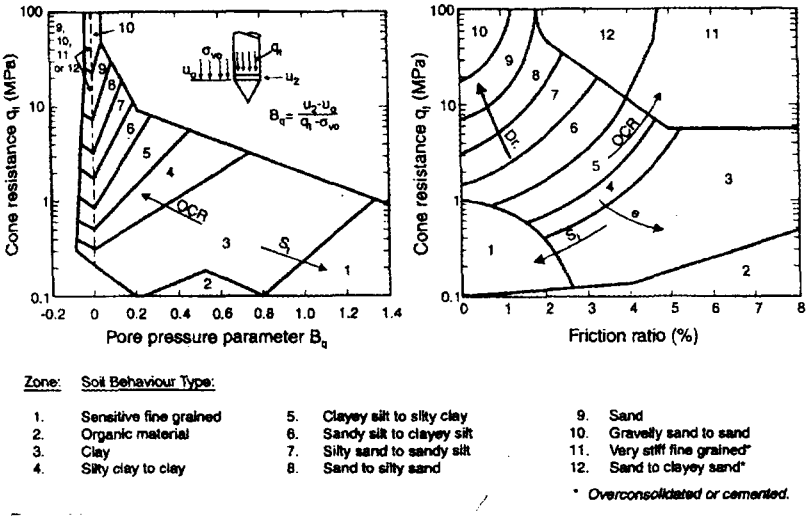

그림 9. 토질의 거동형태 분류(Robertson et al,(1986)

$$q_t = q_c + u_2(1-a)$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100 \qquad (식. 1)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}}$$

여기서 q_c : 측정된 콘저항, u_2 : 콘저면 바로 뒤에서 측정한 간극수압, a : 콘의 면적비(An/Ac), A_n : 하중셀의 단면적, A_c : 콘의 투영 단면적, f_s : 슬리브의 단위 마찰저항, u_0 : 정수압, σ_{v0} : 콘위치의 상재하중

Robertson[2] 등이 제안한 도표에 의한 삼산의 토질은 상부층이 Zone 3,4에 속하고 하부층은 Zone 5,6에 속한다. 여기서 Zone 3은 clay을 나타내고 Zone 4는 silty clay to clay, Zone 5는 clayey silt to silty clay 그리고 Zone 6은 sandy silt to clayey silt을 나타내는 것이다. 또한 분류 도표를 통하여 그 토질의 대략적인 압밀특성과 예민비를 볼 수있다. 그 결과, 조사된 지역은 약간의 과압밀 상태에 있고 크게 예민하지 않은 흙으로 나타났다. 본 분류방법의 문제점은 사용되는 파라메타 중 수정된 콘의 지지력(qc)과 마찰저항비(R_f)는 심도증가에 따라 증가하여 토질분류군의 형태에 변화를 줄 수도 있다. 특히 이 도표는 당초 심도 30m 이내의 시험자료를 기초로 한 것으로 그 이상의 심도에서는 큰 오차가 생길 수 있다. 따라서 여러 파라메타를 정규화시킬 필요성이 생겼고 Worth((1984,1988)[3),4)]는 콘관입시험 자료를 무차원의 량으로 정규화할 것을 제안하였다.

Robertson(1990)[5]은 Wroth(1984,1988)[3),4)]가 제한한 정규화된 파라메타를 사용하여 보다

확장된 분류도표를 제안하였다. 이 분류도표는 모래지반보다 점성토에서 보다 큰 신뢰성을 가진다. Robertson(1990)[5]이 제안한 정규화된 도표에 의하면 삼산과 달동지역은 Zone 3에 속하는 Clays-clay to silty clay이며, 정규압밀토에 가깝게 나타났다.

Jefferies & Davies(1991)[6]는 정규화된 콘저항에 과잉간극수압비를 고려한 파라메타로 분류하는 방안을 제안했으나 이는 연약한 예민점토와 같이 Bq > 1로 나타날 수 있는 지반에서는 적용할 수 없는 문제가 있다. Jefferies & Davies(1991)[6]가 제시한 분류도표에 의하면 삼산의 토질은 부분적으로 Zone 2에 속하고 대부분이 Zone 3에 해당한다. Zone 2는 유기질토-peats에 해당하는 것으로 다른 도표에서는 나타나지 않는 특징이다. 하지만 대부분이 Clays-clay to silty clay로써 Zone 3에 해당한다.

표 3. 콘관입시험과 실내시험을 통한 흙의 분류 및 흙의 거동

지층	실내시험	Douglas & Olsen (1981)	Robertson(1986)	정규화된 Robertson (1990)	Jefferies & Davies (1991)
상부층 (5~18m)	OH	CL-CH	Clay or Silty clay to clay 비교적 작은 OCR	Clays-clay to silty clay	Clays-clay to silty clay 부분적으로 Organic soils-peats
하부층 (18~30m)		ML	Silty clay to clay or Clayey silt to silty clay	Normally consolidated or 비교적 작음 OCR	

위에서 구한 여러 도표의 결과와 실내시험의 결과를 정리, 비교하면 다음 표 3과 같으며 , 삼산지역의 실내시험 결과를 종합하면 삼산, 달동의 토질은 상부층은 clay층이고 하부층은 clay 또는 silt층인 것으로 나타났으며 부분적으로 유기질토를 포함하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 흙의 거동 측면에서는 정규 압밀토 또는 OCR이 작은 과압밀토인 것으로 분류되었다. 도표를 이용하여 구한 흙의 거동은 Jefferies & Davies[6]의 도표가 가장 적합함을 알 수 있다.

4.2 과압밀비(OCR)

과압밀비(OCR)는 현재 지반이 받고 있는 유효 응력에 대하여 과거에 받았던 최대 유효 응력의 비로 나타낸다. 현재 받고 있는 유효 응력이 과거에 받았던 최대 유효 응력인 경우, 이 상태를 정규압밀(normally consolidation)상태라고 하며, 과거에 받던 최대 유효응력보다 작은 경우를 과압밀(over consolidation)상태라고 하며, 특히 과거에 받던 유효 응력이 현재의 유효응력보다 작은 경우는 압밀이 진행중인 미압밀상태(under consolidation)라고 한다.

콘관입시험을 이용하여 OCR를 구하는 방법은 아래와 같이 크게 세가지를 들 수 있다.

1) 비배수전단강도로 구하는 방법
2) 피에조콘관입 주상도로부터 구하는 방법
3) 콘관입시험결과를 직접 이용하는 방법

4.2.1 비배수전단 강도를 이용하여 과압비(OCR)를 구하는 방법

Schmertmann(1975)[7]은 그림 10과 같이 콘관입시험으로부터 유효수직응력(σ'_{v0})을 구한 후 Su/σ'_{v0} 를 구하여 소성지수(PI)와의 관계곡선을 통하여 OCR을 구하는 방법을 제안하였다.

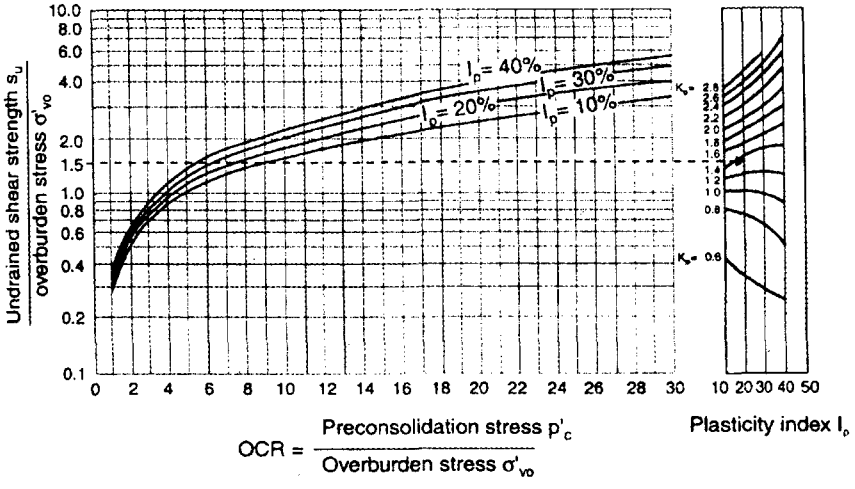

그림 10. Su/σ'_{v0} PI로부터 OCR과 K_0을 구하는 도표

삼산지역의 콘관입시험으로부터 얻은 Su/σ'_{v0} 결과는 상부층(20m)이 0.45~0.8이고 하부층(30m)은 평균적으로 약 0.3이며, 수성지수(PI)는 평균적으로 20이다. Schmertmann(1975)[7]이 제안한 관계 곡선에 의하면 상부층의 OCR을 대략 1~3이고 하부의 값은 1이다 그러므로 결과를 정리하면 상층부는 과압밀 상태이고 깊이가 깊어질수록 정규압밀토라는 것을 알 수 있다.

4.2.2 피에조콘관입 주상도로부터 과압밀비(OCR)을 구하는 방법

피에조존관입시험을 통하여 얻어진 콘의 저항을 이용하여 OCR를 구하는 방법은 정규화된 콘저항이 소성지수에 따라 다르지만 대체적으로 2.5~5.0의 범위에 존재한다. 그러므로 이보다 큰 값을 가지면 과압밀토라고 판단 할 수 있다.

수정된 콘저항이 $(2.5\sim5.0)\sigma'_{v0}$ 인 범위에 접근하면 정규압밀토의 거동을 나타내며, 이보다 큰 값을 가지면 과압밀 지반이고, 이보다 작은 범위를 가지면 미압밀 지반이다. 그림 11과 그림 12는 삼산의 피에조콘관입시험을 통해 얻은 깊이에 따른 콘저항을 $(2.5\sim5.0)\sigma'_{v0}$ 와 비교하여 놓은 것이다. 그림 11과 그림 12에서 두 지점 모두 깊이 10m 이후부터 정규압밀토의 거동을 보이고 있다.

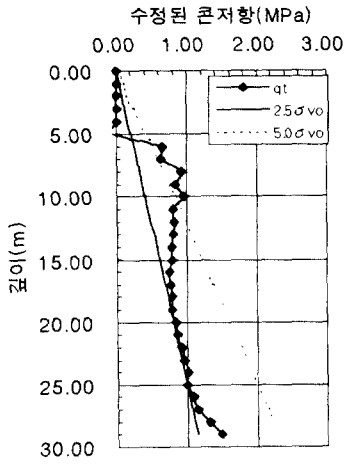

그림 11. A 지점에서 심도에 따른콘저항

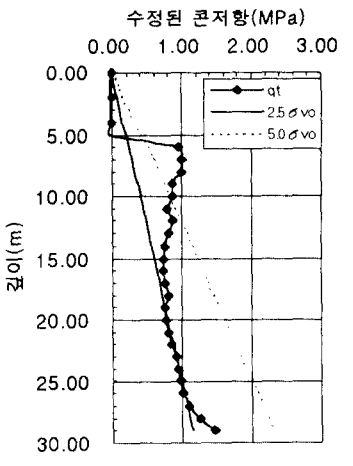

그림 12. B 지점에서 심도에따른 콘저항

4.2.3 콘관입시험결과를 직접 (OCR)을 구하는 방법

Lunne et al.(1989)[8] 정규화된 파라메타를 사용하여 OCR를 경험적으로 구하는 도표를 제안 하였고 Lunne(1989)[8]의 도표에 의하여 구해진 OCR은 대략적으로 1~2까지의 값을 보이고 있다.

비교적 경험이 부족한 경우에 정규화된 콘 저항을 이용하여 OCR을 구할 경우 다음의 식. 2를 사용하면 된다. 이 식. 2는 정규화된 콘저항과 Lunne et al.(1989)[8]가 제안한 도표와의 관계를 간략화한 식이다.

$$OCR = k \cdot \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \qquad (\text{식. 2})$$

k의 범위는 2에서 5까지며 평균적으로 3을 사용며 과입밀토일수록 큰 k값을 사용한다. 본 논문에서는 평균값인 3을 사용하였고 식. 2를 통하여 구한 OCR는 대체적으로 1과 2 사이의 값을 보이고 있으며, 깊이에 따라 OCR이 1 보다 작은 미압밀토도 부분적으로 나타나고 있다. 이 결과는 실내시험을 통하여 구한 결과치와 비교적 잘 일치하며, 실내시험과 비교한 결과 삼산지역에서는 k값을 약 2로 사용하는 것이 적합하다고 생각된다

4.2.4 실내시험과 도표를 사용하여 구한 OCR값의 비교

표 4. 콘관입시험으로 구한 OCR과 실내시험과의 비교

	Over Consolidation Ratio				
	실내시험	비배수전단강도로 구한 COR (Schmertmann)	피에존콘관입 주상도로 구한 OCR	콘관입시험를 직접이용한 경우	
				Lunne	경험공식
상부	1~2	1~3	과압밀토	1~2	1~3
하부	1 미만	1	정규압밀토		

여러 가지 방법으로 구한 OCR값과 실내시험으로 구한 값들을 비교하면 표 4와 같다. 실내 압밀시험으로 구한 상부층의 OCR의 값은 1에서 2사이인 정규압밀토에 가깝고 하부층은 OCR이 1미만인 미압밀상태 이며, Schmertmann[7]이 제안한, 비배수 전단강도로 구한 OCR 값과 콘관입시험을 직접이용한 Lunne[8]와 경험공식을 통하여 얻은 OCR의 값은 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 콘관입 주상도를 이용하는 경우는 구체적인 OCR의 값을 알 수는 없지만 그 지반의 OCR값의 대략적인 평가는 가능하였다.

콘관입시험을 통한 OCR값의 산정은 제안된 대부분의 방법과 식들이 실내시험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

4.3 피에조콘관입시험과 표준관입시험(Standard Penetration Test)과의 관계

표준관입시험(Standard Penetration Test)은 원위치에 대한 경연, 다짐정도를 아는 지표가 되는 N값을 구하기 위하여 행하는 시험이다. 표준관입시험(S.P.T.)는 동적 사운딩의 대표적인 것으로 현장의 토질조건에 영향을 많이 받지 않으므로 세계적으로 사용되고 있으며, N치를 통하여 그 지반의 특성을 구하는 연구가 많이 되어왔으나 관입 깊이, 상재하중과 에너지의 전달율등에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 그 결과로 표준관입시험에 대한 신뢰성에 많은 문제를 갖게 되었다. 현재는 외국에서는 N치를 그대로 사용하기 보다는 여러 영향을 고려하여, 램머의 에너지 전달율을 60%로 적용시킨 N_{60}을 사용하고 있다. 그래서 많은 연구자들은 신뢰성에서 많은 문제를 가진 표준관입시험(S.P.T.)을 비교적 높은 신뢰성을 가진 피에조콘관입시험과의 상관관계에 대한 연구를 하고 있다.

Robertson et al.(1983)[7]은 여러 시험결과로부터 평균입경인(D_{50})과 N_{60}에 대한 콘저항비($(q_a/P_a)/N_{60}$, P_a : 대기압)의 관계로 나타내었다. Robertson이 제안한 도표에 의하여 구해진 삼산 달동의 N_{60} = 3~5정도이다. 또한 Robertson et al.(1990)[5]은 토질거동지수(Ic)를 사용하여 N_{60}을 구하는 식. 3과 4를 아래와 같이 제시하였고 삼산지역에 적용한 경우는 약 3~5정도의 N값을 얻었다.

$$I_c = ((3.47 + \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22^2))^{0.5} \qquad (식. 3)$$

$$\frac{(q_c / P_a)}{N_{60}} = 8.5(1 - I_c / 4.6) \qquad (식. 4)$$

Kulhaway & Mayne(1990)[10]은 그림 13과 같이 평균입경과 No.200체 통과율에 대한 $((q_a/P_a)/N)$의 상관관계를 정리하였다. 삼산의 경우 평균입경인(D_{50})을 사용한 경우 N치는 4~5이고, No. 200체의 통과율을 사용한 경우도 평균입경인(D_{50})을 사용한 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

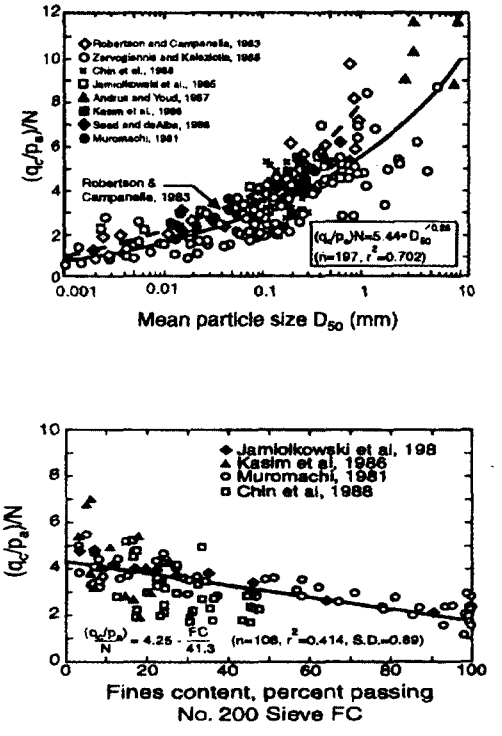

그림 13. 평균입경에과 No. 200체 통과율에 대한 $((q_a/P_a)/N)$의 상관관계

다음의 표 5는 Robertson et. al.(1983)[9]과 Kulhaway & Mayne(1990)[10]이 제안한 결과와 S.P.T을 통하여 얻은 결과를 비교한 것이다.

표 5. 콘관입시험과 표준관입시험으로 구한 N치 비교

Robertson et. al.(1983)		Kulhaway & Mayne(1990)		S.P.T 시험
평균입경을 사용하여 구한 N_{60}	경험공식으로 구한 N_{60}	평균입경으로 구한 N	No200체 통과량으로 구한 N	
3~4	3~4	4~5	4~5	4~6

Robertson et. al.(1983)이 제안한 도표와 식. 4에 의해 구해진 N_{60}과 Kulhaway & Mayne(1990)이 제안한 도표를 사용하여 구한 N치를 비교하면 Kulhaway & Mayne(1990)에 의해 구한 값은 표준관입시험(S.P.T.)으로 구한 값과 거의 일치하며 표준관입시험으로

구한 N치의 60%만 취할 경우는 Robertson et. al.(1983)이 제안한 값들과 일치함을 알 수 있다. 하지만 N치가 너무 작은 연약한 지반이므로 결과의 비교에 어려움이 있다. 따라서 여러 조건에 대하여 수정을 해야하는 표준관입시험보다 콘관입시험을 사용할 경우 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4.4 간극수압 소산시험을 이용한 수평압밀계수(Ch) 산정

일반적으로 점성토에서 간극수압 소산시험을 할 경우 지반의 투수성에 따라 과잉 간극수압이 완전히 소산될 때까지 수일에서 수주간 계속될 수 있다. 그러므로 대체적으로 과잉 간극수압이 정수압의 50%정도로 감소할 때까지만 간극수압을 측정한다. 현재, 여러 연구자들은 보다 정확한 수평압밀계수(C_h)를 구하기 위한 최적화기법들을 소개하고 있다. 여러 방법 중 Torstensson(1977)[11]은 지반을 탄소성 재료로 보고 원주의 공동팽창이론에 기초하여 압밀계수를 구하는 방법을 식. 5와 같이 제안하였다.

$$C_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} r^2 \qquad (\text{식. } 5)$$

여기서 T_{50} : 압밀도 50%에 해당하는 시간계수 t_{50} : 압밀도 50%에 해당하는 시간
r : 구 또는 원주의 반경

Baligh & Lavedoux(1986)[12]는 응력-경로법을 사용하여 정규압밀토의 초기 간극수압 소산을 예측하고, 유한요소법을 사용하여 압밀을 해석하였다. Baligh & Lavedoux(1986)가 제안한 수평압밀계수의 추정은 시간 대수항에 대한 간극수압소산시험 곡선을 도시한 후 도시된 그림과 이론적인 곡선과 비교하고, 이와 유사한 결과가 도출되면 식. 7을 이용하여 수평압밀계수(C_h)를 구하는 방법이다. 본 논문에서는 울산 삼산지역의 흙이 정규압밀토의 특성을 보이므로 시간계수를 구하기 위하여 I_R = 100, A_f = 0.8(정규압밀상태)로 가정하여 이론적인 소산곡선과 만나는 지점을 시간계수로 정하여 구하였다.

Baligh & Lavedoux(1986)[12]가 제안한 방법으로 구한 수평압밀계수(C_h)는 다음 표 6과 같다.

$$U_t = \frac{u(t) - u_0}{u_t - u_0} = \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_t} \qquad (\text{식. } 6)$$

$$C_h = R^2 \frac{T}{t} \qquad (\text{식. } 7)$$

여기서 U_t : 정규화된 과잉간극수압 $u(t)$: 시간 t에서의 간극수압
u_t : 초기의 최대 간극수압 R : 콘의 반지름
t : 특정 압밀도까지의 간극수압 소산시간 T : 시간 t에 대한 시간계수

표 6. Baligh & Lavedoux(1986)[12]의 방법으로 구해진 수평압밀계수

위치	소산시간 (sec)	정규화된간극수압 (kg/cm^2)	시간계수 Tv	수평압밀계수 (cm^2/sec)	콘의 반경 (cm)
A 지점	5820	0.26	11.4	6.241×10^{-3}	1.785
B 지점	7740	0.29	11.1	4.569×10^{-3}	1.785

또한 Houlsby & Teh(1988)[13]는 관입간극수압을 변형이 큰 유한요소해석과 간극수압소산을 유한 차분법으로 해석하는 방법을 제안하였다. 그들은 Baligh & Lavedoux(1986)[12]가 제안한 방법과 유사 접근 방식을 사용하였지만 그들은 해석에 강성지수((rigidith index), Ir(Gs/Su))의 영향을 고려하여 해석하였다. Houlsby & Teh(1988)[13]가 제안한 식은 다음 식 8.과 같으며 제안 식에 의하여 구해진 수평 압밀계수(C_h)는 $1.341 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$과 $1.009 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$이며, Baligh & Lavedoux(1986)[12]가 제안한 방법보다 약 6배가 작게 나타났다. 표 7에서 두 방법의 결과치를 비교하여 나타내었다.

$$C_h = \frac{T \times r_2 \sqrt{I_r}}{t} \qquad (식. 8)$$

표 7. Houlsby & Teh[13]방법과 Baligh & Lavedoux[12]방법의 비교

	Houlsby & Teh방법	Baligh & Lavedoux방법
A 지점 (Ch)	$1.341 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$	$6.241 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$
B 지점 (Ch)	$1.009 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$	$4.569 \times 10^{-3}(cm^2/sec)$

간극수압 소산시험으로 구한 수평압밀계수(C_h)와 수직압밀계수(C_v)의 관계에 대해서도 많은 학자들이 연구하여왔으며, 수평압밀계수와 수직압밀계수사이의 관계를 투수계수를 통하여 구하는 방법이 많이 사용되고 있다. 이때 압밀계수와 투수계수와의 관계는 다음 식들과 같다.

$$C_v = k_v \cdot \frac{M}{\gamma_w} \qquad (식. 9)$$

$$C_h = k_h \cdot \frac{M}{\gamma_w} \qquad (식. 10)$$

식. 9와 10에서 흙의 압축성이 같은 등방성($m_v = m_h$) 흙이라며 식.9와 10를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_v = C_h \cdot \frac{k_v}{k_h} \qquad (식. 11)$$

k_h/k_v는 연구자들에 따라 다양한 범위를 보이고 있으며 Jamiolkowski(1985)[14] 등은 2~4, Baligh & Leavadoux는 2~5정도의 범위를 제시하고 있으며 울산 삼산지역에서 구한 k_h/k_v값은 다음 표 8과 같다.

표 8. 수평 압밀계수와 수직 압밀계수의 비교

콘관입시험으로 구한 수평압밀계수(C_h)		$\sqrt{t}$법으로 구한 수직압밀계수(C_v)		Hyperbola 방법으로 구한 수직압밀계수(C_v)	
		C_v	k_h/k_v	C_v	k_h/k_v
A 지점	6.241×10^{-3}	6.908×10^{-4}	9.04	2.419×10^{-3}	2.58
B 지점	4.569×10^{-3}		6.61		1.89

$\sqrt{t}$ 법을 사용하여 구한 수직압밀계수와 간극수압 소산시험을 통하여 얻은 수평압밀계수 사이에는 k_h/k_v가 A,B 지점에서 각각 9.04와 6.61인 관계를 보였고, Hyperbola으로 사용한 얻은 수직 압밀계수에 대해서는 k_h/k_v가 약 2.58과 1.89인 관계를 보였다. 삼산지역에서 얻은 k_h/k_v은 $\sqrt{t}$ 법에서 구한 C_v값을 사용한 경우 보다 Hyperbola 방법을 통하여 구한 C_v값을 사용한 경우가 여러 학자들이 제안한 k_h/k_v값과 유사함을 보였다. 이 결과로 울산 삼산지역에서 간극수압소산 시험을 통하여 구한 수평 압밀계수를 사용하여 수직압밀계수를 예측할 경우 k_h/k_v값은 1.89~2.58사이의 값을 사용하고 이 결과로 얻어진 값은 Hyperbola 방법으로 구한 수직압밀계수와 유사할 것이라는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

아주 연약한 지반으로 알려진 울산 광역시 남구 삼산지역 지반의 특성과 거동을 연구하기 위하여 행한 콘관입시험(Cone Penetration Test)과 표준관입시험(Standard Penetration Test) 그리고 불교란 시료를 채취한 후 행한 실내시험의 결과들를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 삼산과 달동의 토질의 분류를 살펴보면 지층 상부는 CL-CH층으로 이루어져 있고 하부는 CL또는 ML로 이루어져 있으며, 유기질을 다량 포함한 것으로 밝혀졌다.

2. 콘관입시험으로 구해진 OCR의 값이 대부분 1보다 조금 크거나 1미만의 결과를 보였다. 이 결과는 실내시험을 통하여 얻은 결과와 일치함을 보였다. 그러므로 삼산과 달동지역의 상부지반은 정규압밀토이고 하부지반은 현재도 압밀이 진행중인 미압밀토인 것을 확인했다.

3. 표준관입시험과 콘관입시험의 상호관계는 Robertson et al.(1983)이 제안 한 도표와 제안식이 삼산과 달동에 지역에 잘 일치하였고, Kulhaway & Mayne(1990)이 제안한 도표와 식도 잘 일치하였다.

4. 간극수압소산시험을 이용하여 측정한 삼산과 달동의 수평압밀계수(C_h)는 1.0~6.24 $\times 10^{-3}(cm^2/sec)$ 의 값을 갖는 것으로 나타났다.

5. 수평압밀계수(C_h)를 이용하여 수직압밀계수(C_v)를 구할 경우 k_h/k_v값은 1.89~2.58사이의 값이 적합한 것으로 나타났고, 이때 얻어진 수직압밀계수(C_v)값은 Hyperbola 방법으로 구한 수직압밀계수(C_v)와 유사한 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] Douglas,B.J. and Olsen, R.S.(1981) " Soil classification using eletric con penetrometer. Cone Penetration Testing and Experience", Processing of the ASCE national Convention, St. Louis, 209-27,American Society of Engineers(ASCE)

[2] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie,D. and Greig, J. (1986) "Use of piezometer cone fata",Proceeding of the ASCE Specialty Conference In Situ ' 86: Use of In Site Tests in Geotechnical Engineering, Blackburg, 1263-80, American Society of Engineers (ASCE).

[3] Worth, C.P. (1984) "the interpretation of in situ soil test",24th Rankine Lecture, Geotechnique,34(4)449-89.

[4] Wroth, C.P.(1988) "Penetration testng - a more rigorous approach to interpretation".Proceeding of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1,Orlando, 1,303-11, Balkema Pub., Rotterdam.

[5] Robertson, P.K.,(1990),"Soil classification using the cone penetrationtest", Canada Geotechnical Journal,27(1),151-8

[6] Jefferies, M.G. and Davies, M.P.(1991) " Soil calssification By the cone penetration test"; Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 28(1),173-6.

[7] Schmertman, J.H. (1975) "Measurement of in situ shear strength". Processing of the ASCE Specialty Conference on in Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, 2, 57-138, American Society of Engineers(ASCE).

[8] Lunne, T., Lacasse,S. and Rad, N.S. (1989) "SPT, CPT, pressuremeter testing and recent development on in site testing of soils". General report from the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 4, 2339-403, Balema Pub., Rotterdam

[9] Robertson, P.K., Campanlla, R.G. and Wightman, A.,(1983)" SPT-CPT correlations". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109(11), 1449-59

[10] Kulhawy, F.H. and Mayne, P.H.(1990)"Manual on estimating soil properties for foundation design". Electric Power Research Institute, EPRI, August, 1990.

[11] Torstensson, B.A. (1977) "The pore pressure probe". norskjord- og fjelltekni나, Oslo, Foredrag, 34.1-34.15, Trondheim, Norway, Tapir.

[12] Baligh, M.M and Leavaqoux, J.N.(1986) "Consolidation after undrained piezocone penetration. II: Interpretation". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112(7), 727-45.

[13] Houlsby, G.T. and Teh, C.I.(1988) " Analysis of the piezocone in clay". Proceedings of the international Symposium on Pentration Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, 777-83, Balkema Pub., Rotterdam

[14] Jamiolkowski, M., and Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R.(1985) " New Developments in field and laboratory testing of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1, 57-153, Balkema Pub., Rotterdam.

[15] T. Lunne, P.K Rpbertson and J.J.M Powel, "Cone Penteration Testing", Blackie academic & Professional