

Piezocone 시험을 이용한 해성점토의 수평압밀 특성 연구

Horizontal Consolidation Characteristics of Marine Clay Using Piezocone Test

이 강 운*¹ Lee, Kang-Woon

윤 길 림*² Yoon, Gil-Lim

채 영 수*³ Chae, Young-Su

Abstract

Horizontal consolidation characteristics of Busan marine clay were investigated by computing coefficient of horizontal consolidation from Piezocone data and comparing their results with those of standard consolidation test. It is well known that current prediction models of c_h for high plastic soils have large uncertainties, and show a great difference between the predicted and the measured values. However, the spherical models and expanding cavity theory of Torstensson(1977), and Burns & Mayne(1998) based on modified Cam-Clay model with critical limit state concepts have relative reliability in estimating c_h and good applicability in highly plasticity soils. In this paper, a normalization technique was used to evaluate c_h using the Burns and Mayne's method based on the dissipation test, and their normalized consolidation curves give 0.015 of time factor(T_h) when 50% degree of consolidation is completed. Comparison study using Piezocone data obtained at other similar ground site shows 1.5 times less systematicity than that of standard consolidation test, which indicates considerable approximation with the measured values because standard consolidation test gives the difference of three to four times compared with the measured values. In addition, design chart for estimating c_h based on the chart from Robertson et al.(1992) and using the other method of the direct prediction from the of dissipation test was newly proposed. It is judged that new proposed chart is very applicable to Korean marine soils, especially in very high plastic soils.

요 지

국내 남해안 해성점토 지반의 압밀특성을 파악하고자 Piezocone 시험으로 평가한 수평방향 압밀계수와 표준압밀 시험결과를 비교하였다. 기존에 제안된 수평방향 압밀계수 추정 방법들은 상호간의 편차가 클 뿐만 아니라 실내 압밀 시험값과 비교해도 그 차가 커서 사용하기에는 많은 불확실성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 제안된 방법중에서 Torstensson(1977)의 구형모델과 공동확장이론, 수정 Cam-Clay모델의 한계상태이론을 적용한 Burns and Mayne의 방법(1998)은 본 연구지역과 같은 고소성 지반에서 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 이중 Burns and Mayne의 방법(1998)을 사용하여 소산시험결과를 정규화한 분석결과에 따르면 50% 압밀시의 시간계수(T_{50})는 0.015로 추정되었다. 또한 본 연구 지반조건과 유사현장의 시험성과를 활용하여 비교 분석한 결과 새롭게 제안한 Burns and Mayne의 방법(1998)은 실내시험값에 비해 약 1.5배 작은 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 표준압밀시험 결과차가 상호간에 3~4배 차를 보이는 것을 감안할 때 상당히 양호한 것으로 나타났다. 이외에도 또 다른 차원에서 소산시험결과로부터 압밀계

*1 정회원, (주)동성엔지니어링 전무 (Member, Managing Director, Dept. of Geotechnical Engrg., Dongsung Eng. Co. Ltd., kangwoon@korea.com)

*2 정회원, 한국해양연구원, 연안항만공학본부, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Harbour Engrg., Div., KORDI, Ph.D.)

*3 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Suwon Univ.)

수를 직접 산정하는 방법으로서 국내에서 널리 사용중인 Robertson 등(1992)의 제안방법을 이용하여 새로운 도표를 제안하였다. 제안된 도표는 Burns and Mayne(1998)의 이론적 방법을 활용한 방법으로서 소성이 높은 지반에서 활용할 경우 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

Keywords : Coefficient of consolidation, CPT, Dissipation, Marine clay, Piezocone

1. 서론

지반의 공학적 특성치중에서 가장 중요한 상수중의 하나인 압밀계수는 건설공사의 규모와 시공방법에 미치는 영향력이 대단히 크다. 그러나 현장 및 실내실험 결과로 지반특성을 파악하는 과정에서 발생하는 다양한 불확실성은 신뢰성 있는 자료를 얻는데 한계가 있다. 일반적으로 적용하는 표준압밀실험으로 실시한 결과라 할지라도 그 결과를 해석하는 방법에 따라 3배에서 4배까지 차이를 보이기 때문에 압밀계수산정은 그 결과를 해석하는 방법에 따라 잠재적 불확실성 요인을 근본적으로 지니고 있다. 따라서 불확실성을 최소화하기 위해 원위치 시험을 실시하게 되는데, 원위치 시험의 일종인 콘관입시험(CPT)은 현장에서 관입저항과 간극수압 소산시험을 통해 지반의 지층상태와 전단저항, 압밀계수 등의 다양한 지반 물성치를 신속히 얻을 수 있는 유용한 장비이다. 그러나 CPT를 활용하여 수평압밀계수를 산정한다해도 제안방법에 따라 큰 차이를 보이므로 지반 조건에 부합된 모델링 기법을 개발하여 신뢰성 있는 자료를 얻고자 지속적인 연구가 국내외적으로 진행되고 있다.

본 연구에 사용한 전기식 콘관입장비는 ISSMFE (1989)와 ASTM(1979) 표준 규격에 준한 장비로서 콘의 선단각이 60° 이고, 단면적이 10cm^2 , 선단면적이 150cm^2 인 표준 장비이다. 콘관입시험과 관련한 연구는 1962년부터 전 세계적으로 꾸준히 진행되었으며, 특히 1975년 이후부터는 집중적으로 발전되어 Baligh and Lavadoux (1986), Campanella 등(1985)과 Robertson 등(1986)에 의해 활발히 수행되므로서 연약지반 시험방법으로서 그 활용성이 높아졌다. 시험방법은 각 지역별, 국가별로 표준화 기준이 다를 수 있으므로 시험결과 값이 상이할 수 있는데, 압밀시험 측정결과에 영향을 주는 가장 큰 요소는 소산시험 측정위치이다. 이에 대해 국내 도입장비는 주로 콘 선단부 뒤에서 측정된 값을 사용하고 있으며, 본 연구의 소산시험도 이같은 시험기준에 따라 실시

된 시험결과이다. 소산시험과 관련하여 Jamiolkowski 등(1985)은 많은 연구결과를 발표한 실적이 있으며, 그의 연구결과에 따르면 콘 선단부 배면위치에서 실시한 시험결과가 다공질판(porous stone)의 마모나 지반교란(smear) 효과가 적고, 모래질인 경우도 압축성에 따른 간극수압의 변화가 크지 않은 것으로 나타나 소산시험 활용성이 큰 것으로 나타났다. 한편 본 연구는 매우 연약한 해성점토지반의 정규압밀상태에서 실시한 소산시험 결과를 이용하여 현장 상태의 압밀특성을 찾고자 실내 표준압밀시험과 소산시험 자료를 비교 평가하였다. 기 제안된 적용이론 중에서 활용성이 큰 변형률 경로법(strain path method), 그리고 공동확장이론을 발전시킨 Baligh and Lavadoux(1980)방법과 Teh and Houlsby(1991) 등의 방법을 이용하여 압밀특성을 파악하였다. 그러나 기존에 제안된 예측방법은 지반조건과 적용모델에 따라 예측결과 값의 편차가 크므로 실무 적용상 한계가 있다. 이같은 차원에서 본 연구는 남해안의 해성점토 지반에서 실시한 콘관입시험 결과를 이용하여 수평압밀계수를 산정하는 접근방법에 대하여 다양한 모델(model)을 사용하여 비교 검토하였으며, 특히 최근에 발표된 Burns and Mayne(1998)의 공동확장이론과 한계상태이론을 혼용한 모델을 사용하여 국내 점토지반의 소산시험모델의 검증을 통하여 압밀특성을 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 콘 관입시 과잉간극수압 및 소산거동

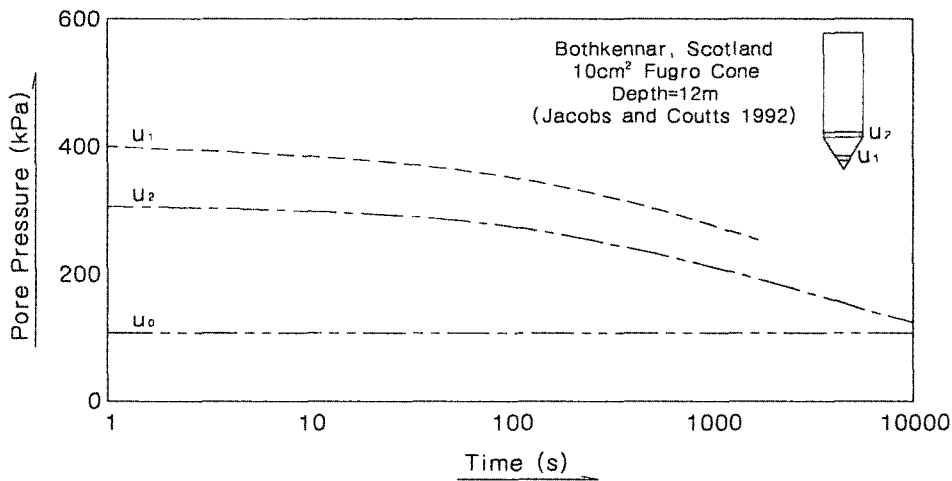
정수압상태의 지반에 원추형 콘을 지중에 삽입할 경우 콘 선단부와 콘 슬리브 주변은 마찰저항과 함께 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이 같은 현상은 불투수성 지반에서의 간극수압이 소산되지 못하기 때문에 발생하는 현상으로 비배수 상태의 지반조건에서 발생한다. 이때 발생한 과잉간극수압은 콘 선단부와 주변부에서 동시에 발생한 값으로서 측정시 이를 정량적인 값으로 구

분하여 나타내는 것은 어려운 문제로 알려져 있다. 따라서 이를 극복하고자 국제적으로 많은 연구가 수행되었으며, Baligh 등(1986)은 콘관입으로 발생하는 과잉간극수압을 수직응력(normal stress)으로 나타내는 방법을 제안하였고, Wroth(1984)와 Campanella 등(1986)은 콘 슬리브(cone sleeve)축의 주변에서 발생한 간극수압이 전단응력(shear stress)에 지배받는다라는 연구결과를 발표함으로써 콘 주변에서 발생하는 간극수압의 예측치를 정량적으로 나타내는 이론적 근거를 마련하였다. 이러한 이론적 배경에 의거 Baligh and Lavadoux(1986) 등은 발생 과잉간극수압을 변형률 경로법(strain path method)을 이용하여 지반변위에 따른 수직응력과 전단응력의 조합으로 제안하였으며, 이에 대해 정수압과의 관계로 나타내면 식 (1)과 같다.

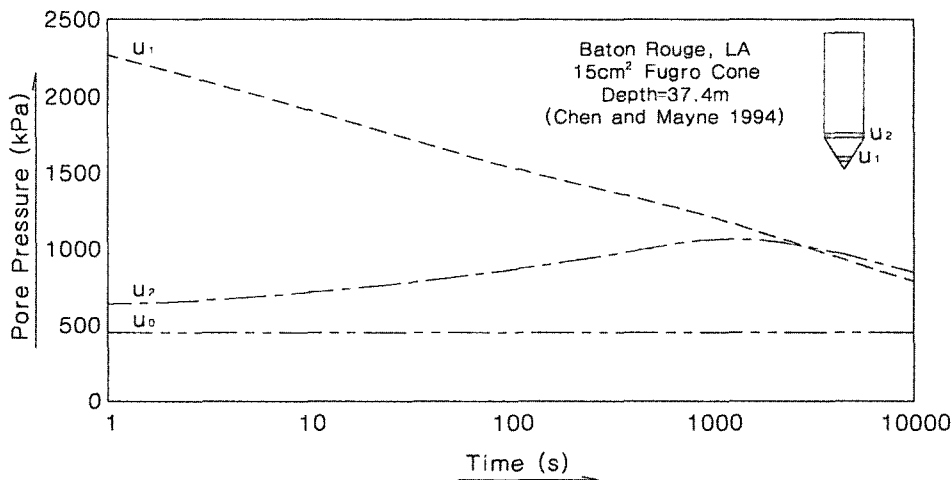
$$\Delta u_m = u_m - u_o = \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear} \quad (1)$$

여기서 u_o 는 정수압이고, u_m 은 측정 과잉간극수압이며, Δu_{oct} 는 수직응력내에서의 과잉간극수압, Δu_{shear} 는 전단응력내의 과잉간극수압이다.

콘관입 소산시험에서 발생한 과잉간극수압은 관입을 중지하면 시간에 따라 점차 소산되면서 그 크기가 점점 감소하여 정수압 값에 수렴한다. 이러한 메카니즘(mechanism)은 정규압밀이나 과압밀 등의 지반 구성 조건 등에 따라 차이를 보인다. 그림 1은 Burns and Mayne(1998) 등이 실시한 연구자료의 소산시험 결과를 나타낸 것으로서 지반조건, 즉 과압밀 지반과 정규압밀 지반에 따라 나타나는 소산특성을 보여주고 있다. 그림 1(a)는 정규압밀점토의 경우 과잉간극수압의 측정위치에서 발생한 과잉간극수압이 정수압에 비교하여 약 3배



(a) 정규압밀점토



(b) 과압밀점토

그림 1. 간극수압 소산도

에서 4배정도 크게 측정초기에 발생하여 시간에 따라 매우 작은 크기로 점점 소산되는 과정을 표현하고 있으며 과잉간극수압이 콘 선단뒤(behind the cone tip, u_2) 보다 콘의 전면부위(face on the cone tip, u_1)에서 비교적 큰 과잉간극수압이 발생하고 비슷하게 소산되는 모습이다. 그러나 그림 1(b)는 과압밀점토의 경우 소산시험 측정위치에 따라 다르게 과잉간극수압이 발생하고 소산경향이 측정위치별로 매우 다른 특징을 보여주고 있다. 특히 콘 선단뒤에서 측정된 시험결과는 초기에 비교적 작은 과잉간극수압이 발생하나 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보여 주고 있어 정규압밀상태의 결과와 매우 다른 소산특성을 보여주고 있다. 이러한 경향은 정규압밀점토에서 콘 자체가 시험전에 완전 포화되지 않을 경우에도 유사한 경향을 보이므로 측정시 포화를 충분히 시킨다는 점에 주의를 요한다. 따라서 콘관입시험 소산모델은 지반조건과 제안방법에 따라 그 차이가 있으므로 현장특성에 적합한 경험식을 개발하여 이용하고 있는 실정이다. 이와 관련하여 Sully and Campanella(1994)와 Teh(1987)는 경험적 방법에 의한 소산모델을 제안하였으며, 이론적 방법으로 Burns and Mayne(1998)은 공동확장과 수정 Cam-Clay모델을 통해 소산거동을 제안하였다.

한편 과잉간극수압의 소산시험 결과를 정규화하여 지반의 압밀도로 나타낸 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\bar{U} = 1 - \frac{\Delta u}{\Delta u_i} = 1 - \frac{u - u_o}{u_i - u_o} \quad (2)$$

여기서, \bar{U} 는 정규화한 압밀도이고, u 는 임의의 시간 t 에서 관측된 간극수압을 나타내며, u_o 는 정수압 그리고 u_i 는 초기 간극수압을 의미한다.

2.2 기존 이론의 고찰

콘관입 소산시험을 이용한 압밀계수 추정은 Schmertmann(1974)과 Janbu and Senneset(1974)이 처음으로 콘관입시 발생하는 간극수압을 측정함으로써 시작되었다. 이같은 측정자료는 Torstensson(1975, 1977), Baligh and Lavadoux(1980), Gupta and Davidson(1986), Houlsby and Teh(1988) 등의 연구를 통해 이론적으로 전개되었다. 이론적 방법은 크게 Vesic(1972)의 공동확장이론을 응용한 방법(Torstensson 1975, 1977)과 변형률 경로법을 응용한 방법(Baligh and Lavadoux 1986, Houlsby and

Teh 1988)으로 구분된다. 이중 공동확장이론은 말뚝관입 형태를 모방하여 기본이론 형태로 전개되었고, Baligh and Lavadoux(1980) 등에 의해 제안된 변형률 경로기법은 콘 관입현상을 유사정적(quasi-static)으로 가정하여 콘 주변에 발생하는 속도장으로부터 변형률장을 구함으로써 초기 과잉간극수압을 예측하였으며, 그 기본이론은 일차원 축대칭 비선형 비혼합(uncoupled) 압밀방정식이다.

이상과 같이 간극수압 소산에 따른 원위치 압밀계수 추정 모델은 해석방법에 따라 단순 비배수 공동확장이론(Torstensson 1977)과 전단요소를 고려한 공동확장이론(Battaglio 등, 1981), 그리고 변형률 경로 이론(Baligh 1985; Baligh and Lavadoux 1986), 유한 요소해석(Houlsby and Teh 1988), 전위이론(dislocation theory; Elsworth 1990, 1993) 등으로 구분된다. 이들 해는 초기 과잉간극수압이 평형조건에 도달될때까지의 곡선으로부터 추정한다. 한편 Baligh(1986), Baligh and Lavadoux (1986), Houlsby and Teh(1988), 그리고 Teh and Houlsby (1991)에 의해 제안된 변형률 경로 해석은 지난 10여년 이상 피에조콘 관입시험시 발생하는 과잉간극수압 소산해석에 주로 사용되었다. 변형률 경로 해석은 첫째, 지반이 등방이고 균질하며 완전소성, 탄성체로서 정적 흐름(steady flow)인 경우, 콘 선단주변의 전응력과 간극수압은 Teh and Houlsby(1991) 등이 제안한 전단변위와 초기 간극수압의 항으로 나타낼 수 있다. 둘째 초기 과잉간극수압이 Terzaghi의 비혼합 압밀이론으로부터 연속적인 소산 시험을 통해 추정이 가능한 두 가지 특징의 간편성이 있기 때문에 널리 사용하였다.

가. Torstensson의 모델

Torstensson(1977)은 초기 등방응력 분포 조건에서 이상적인 탄소성 재료에 발생하는 일차원 비배수 공동확장을 고려하여 초기 과잉간극수압을 산정하였으며, 전단에 의한 간극수압과 탄성 영역에서의 간극수압은 고려하지 않았다. 이때의 초기 과잉간극수압은 모델형태에 따라 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\Delta u_i = s_u [4/3 (\ln I_r)] : \text{구형공동의 경우} \quad (3)$$

$$\Delta u_i = s_u [(\ln I_r)] : \text{원통형 공동인 경우} \quad (4)$$

여기서, $I_r = \frac{G}{s_u}$: 강성지수, s_u : 비배수 전단강도, G : 전단탄성계수

기본 이론식은 Terzaghi and Rendulic 선형 비혼합 (liner-uncoupled) 압밀이론을 유한차분 형태의 구형공동과 원통형 형태의 간극수압 소산을 모사하였다. 이로부터 산정된 압밀계수는 실측곡선과 예측곡선의 50% 소산도를 기준으로 가정하여 식 (5)와 같이 제안되었다.

$$c_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} R^2 \quad (5)$$

여기서, R : 콘의 반경, t_{50} : 압밀도 50%의 간극수압 소산시간, T_{50} : t_{50} 에서의 시간계수

나. Gupta 모델

Gupta(1983)는 수정 공동 확장이론을 기준으로 초기 간극수압 분포를 가정한 뒤 축대칭 선형-비혼합 압밀이론을 유한차분법을 사용함으로써 소산과정을 모사하였다. 이를 활용하여 과잉간극수압 소산도가 50% 일 때의 압밀계수를 구하는 방법을 제안하였다. Gupta의 제안 방법은 콘 관입시 지반을 부분배수(partial drain)로 가정하여 모사하였는 바 실트 또는 모래질 점토의 소산거동을 보다 현실적으로 모사할 수 있는 특징을 갖고 있다 (Kabir and Lutenegeger, 1990). 이때 초기 과잉간극수압은 식 (6)과 같다.

$$\Delta u_i = \frac{(\Delta u_a - \Delta u_{oa}) [0.943 \alpha_f + 4 \ln(\frac{R_b}{r_a})]}{0.943 \alpha_f + 4 \ln(\frac{R_b}{r_a})} \quad (6)$$

여기서 Δu_a 는 선단에서의 과잉간극수압, Δu_{oa} 는 피조콘 관입전 임의의 점 a에서의 간극수압이고, R_b 는 소성지역 반경 ($r_o I_r^{1/3}$), α_f 는 Henkel의 간극수압계수이며, r_a , r_b 는 소성지역내에서 공동의 중심으로 부터 임의의 a점과 b점까지 각각의 반지름이다.

다. Baligh and Lavadoux 모델

Baligh and Lavadoux(1986)는 콘 관입형태를 2차원 축대칭 형태의 변형률 경로법을 이용하여 초기 간극수압분포를 추정하고, 이차원 압밀이론에 의거한 유한요소해석으로부터 수평방향 압밀계수를 제안하였다. 그들이 제안한 가정조건은 "i) 소산과정의 예측은 단순 비혼합 해이며, ii) 압밀은 50%이하의 소산곡선에서 지배를 받고, iii) 초기 과잉간극수압은 소산곡선에 절대적인 영향을 준다."라는 가정하에 산정하였으며, 이에 따른

관계식은 식 (7)과 같다.

$$c_h = \frac{R^2 T}{t} \quad (7)$$

라. Teh and Houlsby 모델

Teh and Houlsby(1991)는 Baligh and Lavadoux(1980)의 변형률 경로법을 기본으로 대변형 유한요소법을 도입함으로써 콘관입시 발생하는 초기 과잉간극수압 분포를 보다 엄밀히 산정하는 모델을 제시하였다. 이를 초기조건으로 Terzaghi-Rendulic 비혼합 압밀이론을 유한차분 형태로 표현하여 간극수압 관측 요소 위치별 지반의 강성지수에 따른 이론-시간계수를 제안함으로써 간극수압의 소산곡선은 주로 흙의 강성지수에 의해 영향 받음을 주장하였다. 한편 임의 초기간극수압을 시간의 함수로서 나타낼 경우, 압밀과정상의 무차원 시간계수로 치환하여 나타내면 식 (8)과 같으며 압밀곡선으로 표현하면 그림 2와 같다.

$$c_h = T_h \frac{R^2 I_r^{0.5}}{t} \quad (8)$$

여기서, T_h 는 수정 시간계수

표 1은 지금까지 제안된 소산 해석모델과 지반의 강성지수를 이용하여 압밀도 20%에서 80%까지 변화시키면서 시간계수를 계산한 결과이다. 수평압밀에 따른 시간계수는 Torstensson의 구형방법(spherical analysis)과 원통형방법(cylindrical analysis), 그리고 Baligh and Lavadoux방법, 그리고 Teh and Houlsby의 방법을 적용

Strain Path Solution for Type 2 CPTu Dissipation (After Teh & Houlsby, 1991)

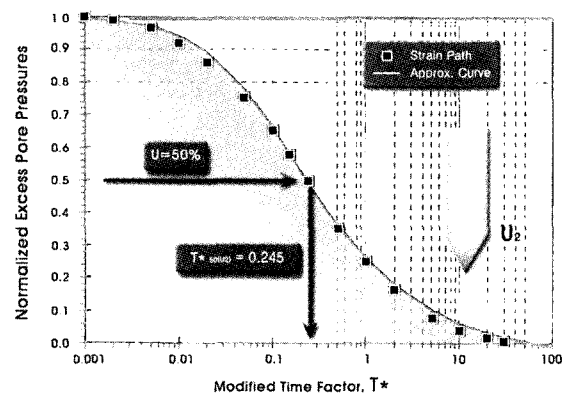


그림 2. 변형률 경로법에 의한 압밀도(Teh and Houlsby, 1991)

표 1. 해석방법에 따른 압밀도별 시간계수

U(%)	T_h								C	D
	A				B					
	$I_r=30$	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=70$	$I_r=30$	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=130$		
20	0.044	0.065	0.081	0.097	0.120	0.190	0.240	0.280	0.038	0.690
40	0.180	0.260	0.340	0.400	0.740	1.140	1.480	1.780	0.142	3.000
50	0.290	0.440	0.580	0.690	1.470	2.190	2.900	3.550	0.245	5.600
60	0.460	0.730	0.980	1.170	2.490	3.830	5.360	6.630	0.439	10.000
80	1.210	1.790	2.220	2.660	9.970	18.650	25.160	31.670	1.600	39.000

A: Torstensson's (1977) spherical analysis, B: Torstensson's(1977) cylindrical analysis
 C: Teh and Houlsby(1991), D: Baligh and Lavadoux(1986), U(%): degree of consolidation

하여 산정하였다.

이상과 같이 이론해는 가정과 적용모델에 따라 추정 방법과 결과값의 차이가 있을 수 있으며, 제반 요소중 응력비 (σ_{vc}'/σ_p')와 파괴시의 간극수압계수 (A_v), 그리고 강성지수 (I_r), 소산도 등의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 피에조콘 관입시 콘 선단주변에 나타나는 응력 및 변형특성을 이용하여 초기 과잉간극수압

을 나타내거나 소산시험으로부터 압밀거동을 나타내는 이론적 방법은 다양한 지반정수의 불확실성과 해석방법, 그리고 소산시험 위치차로 인해 예측치와 시험치가 불일치하는 현상이 발생하게 된다. 동일소산도 50%에서조차도 제안방법에 따라 약 10배 이상의 차가 발생하기도 한다. 따라서 현재까지의 기존 제안방법으로는 지반조건에 부합되게 사용하기에는 한계성을 극복하기 어려운 상황이다. 이를 단순히 압밀곡선을 통해 비교하면 그림 3과 같이 압밀도 50%에서의 시간계수는 연구자에 따라 10배 이상의 차이가 발생하며, 그이상의 다른 압밀도에서는 40배 이상의 차를 보이기도 한다. 따라서 단순히 압밀곡선만으로 수평방향 압밀계수 산정의 신뢰성을 판단하기는 곤란하다. 하지만 Teh and Houlsby (1991)는 또 다른 차원에서 과압밀비(OCR)가 4이하인 남아프리카와 유럽, 그리고 남/북아메리카 지반에서 실시한 시험자료를 이용하여 강성지수에 따른 Torstensson (1977) 이론해의 신뢰성을 분석하였으며, 그 결과 그림 4와 같이 강성지수의 영향력은 미약한 것으로 나타났다. 단 Torstensson(1977)의 이론모델은 원통형 모델이다.

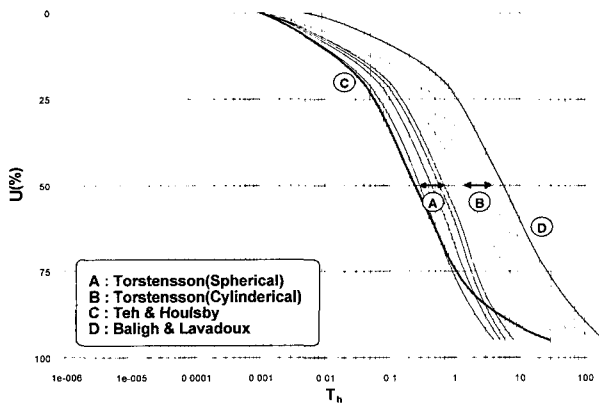


그림 3. 해석방법별 압밀도에 따른 시간계수

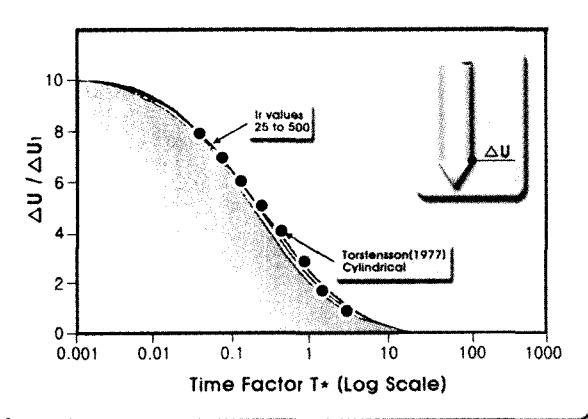


그림 4. Torstensson(1977)과 Teh and Houlsby(1991)의 해석결과

2.3 Burns and Mayne의 공동확장과 한계상태 개념

콘관입시 발생하는 과잉간극수압을 이해하기 위하여 수직응력과 전단응력 두 영역으로 구분할 경우 그림 5와 같이 Burns and Mayne(1998)의 방법을 통한 수직응력은 공동확장이론으로, 전단응력은 수정 Cam-clay모델의 한계상태이론으로 나타낼 수 있다. 이것은 변형률 경로방법(Baligh 1985)과 변형장을 활용한 방법(Acar and Tumay 1986)과 달리 단순모델을 사용하기 때문에 연약한 점토지반에서 단단한 점토지반까지 다양한 지반조건 의 간극수압을 나타낼 수 있다(Mayne 1991, 1993; Lunne

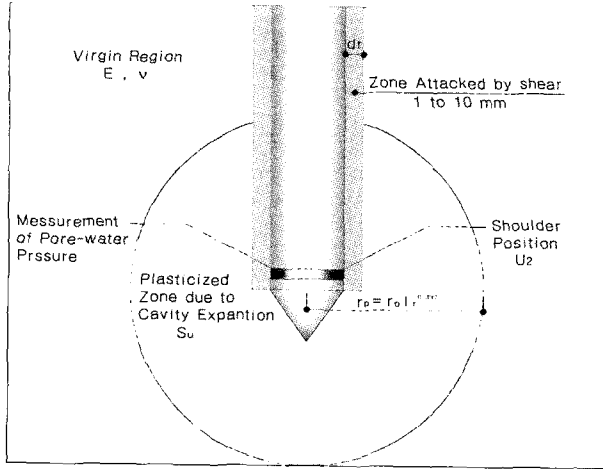


그림 5. 콘관입시험 영향 Zone (Burns and Mayne, 1998)

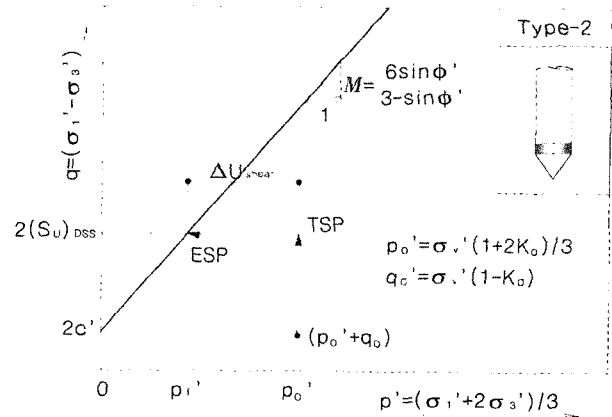


그림 6. 콘관입 간극수압 측정시 지반요소의 응력경로 해석(Chen and Mayne, 1993)

등, 1997). 이때 일차적으로 수직응력으로 인해 발생하는 과잉간극수압은 공동확장 이론을 응용한 Torstensson (1975, 1977)의 방법을 통해 나타낼 수 있으며, 이로부터 등방조건의 탄소성재료를 일차원 비배수 공동확장으로 가정하고, Terzaghi-Rendulic 선형-비혼합 압밀이론을 유한차분 형태로 표현하면 구형과 원통형의 수직응력을 모사할 수 있다. 이에 따른 수평방향 압밀방정식은 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) : \text{구형 공동인 경우 (9)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) : \text{원통형 공동인 경우 (10)}$$

여기서, c_h : 수평방향 압밀계수, u : 간극수압, r : 반경, t : 시간

또한 콘관입시 발생하는 간극수압을 공동확장 이론 (Vesic, 1972)과 삼축압축 전단시험시 일정응력비에서 소성변형이 지속되는 것을 나타내는 한계상태개념(Scofield and Wroth, 1968)을 적용한 수정 Cam-Clay 모델을 이용하여 정규압밀되거나 약간 과압밀된 점토지반의 특성을 예측할 수 있다.

이에 대해 Wroth(1984), Chen and Mayne(1993)과 Burns and Mayne(1998) 등은 콘관입시 발생하는 과잉간극수압을 일정한 관계식으로 나타냈으며, 이 중 Chen and Mayne(1993)은 전단응력에 의해 발생하는 과잉간극수압을 그림 6과 같은 응력경로로부터 다음 식 (11)을 제안하였다.

$$\Delta u_{shear} = P'_0 - \frac{2(s_u)_{DSS}}{M} + c' \cot \phi' \quad (11)$$

여기서, $(s_u)_{DSS}$ 는 직접전단 시험시의 비배수 전단강도이고, c' 는 겔보기 점착력, 그리고 ϕ' 는 유효마찰각, M 은 한계상태선의 기울기 $\frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$ 이다.

이로부터 Burns and Mayne(1998)은 전단시 발생하는 과잉간극수압을 초기 비등방 응력상태 효과를 무시하여 식 (12)와 같이 나타냈다.

$$\Delta u_{shear} = \sigma'_{vo} \left[1 - \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \right] \quad (12)$$

여기서, Λ 는 소성체적 변형비로서 $1 - \frac{C_s}{C_c}$ 과 같으며, C_s 는 팽창지수, C_c 는 압축지수이다.

식 (12)는 전단응력의 변화로 인해 발생하는 과잉간극수압의 증가량이 콘축으로부터의 거리에 따라 감소하는 것으로 가정된 것이며, 이때의 비배수 전단강도는 식 (13)과 같다.

$$s_u = \sigma'_{vo} M/2 \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \quad (13)$$

이상과 같이 비배수상태에서 간극수압으로 유도되는 전단응력과 수직응력을 응력경로로부터 발생 초기 과잉간극수압으로 산정하는 일반식은 다음 식 (14)와 같이 제안할 수 있다.

$$\Delta u_i = u_m - u_o = 4/3 \left[\sigma'_{vo} M/2 \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \right] \ln I_r + \sigma'_{vo} \left[1 - \frac{OCR}{2} \right]^\Lambda \quad (14)$$

즉 소성지역내에서 발생한 과잉간극수압의 초기분포는 수평방향으로 일차원 비혼합 조건에서 압밀방정식을 사용하였으며, 수직응력으로 유도된 팔면체의 초기응력은 구형공동확장으로 가정하였다. 이것은 수평방향 배수 상태는 콘관입 프로브(prove) 주변 압밀에 영향을 받는다는 가정하에 적용한 것이다(Bjerrum and Johannessen 1961; Koizumi and Ito 1967; Randolph and Wroth 1979). 이를 이용하여 임의의 시간에 대한 과잉간극수압은 수정 시간계수 T_h 의 함수를 사용하면 식 (15)와 같다.

$$\Delta u = \frac{(\Delta u_{oct})_i}{1+50 T_h} + \frac{(\Delta u_{shear})_i}{1+5000 T_h} \quad (15)$$

여기서, 수정 시간계수 T_h 는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$T_h = c_h \frac{t}{R^2 I_r^{0.75}} \quad (16)$$

본 방정식의 경계조건은 구형공동 확장지역 외부에서는 과잉간극수압의 증가가 없는 것으로 가정하며, 콘 자체는 불투수성 재료로 가정한 것이다.

3. 지반조건 및 시험결과

3.1 조사위치 및 수량

본 연구를 위해 실시된 조사 현장은 남해안 해상지역

으로서 조사시험 수량은 표 2와 같다. 그리고 시험중 피에조콘 관입시험은 시추조사와 동일한 위치에서 실시하였고, 동일 심도에서 비교란 시료를 채취한 후 콘 소산시험을 실시하였다.

소산시험은 초기 과잉간극수압이 50% 소산되었을 때의 시간을 t_{50} 으로 가정하여 실시하였으며, 실내 압밀시험은 표준압밀시험으로 실시하였고, 수평방향 압밀계수는 수직방향으로 채취된 불교란 시료를 수평방향으로 절단하여 공시체를 제작하여 실시하였다.

3.2 지반조사 시험성과

현장 지반상태는 그림 7에 나타난바와 같이 연경도에서 해수면 아래 지반심도 25m까지 심도에 관계없이 액성한계와 자연함수비는 60%~80%를 보이며, 비배수 전단강도는 심도에 따라 비례하여 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 대체로 그 상한치는 0.4kg/cm^2 이고, 과압밀비(OCR)는 해저 20m까지 1.0이상을 유지하는 것으로 나타났다.

그리고 압밀특성을 평가하기위해 연구 대상지역의 각 시추조사 위치별 현장 및 실내시험성과를 집계한 결과는 다음 표 3과 같다. 시험성과중 간극수압 소산시간은 압밀도 소산곡선 50%에 해당하는 시간으로 가정된 값이며, 초기 과잉간극수압은 관입에 의해 발생한 과잉간극수압으로서 소산시험 초기값에서 정수압을 뺀 값이다.

표 2. 조사시험 수량

구 분	시험공수	피에조콘시험	간극수압 소산시험	실내 시험			
				삼축압축	일축압축	연직압밀	수평압밀
시험수량	25 개소	25 개소	11회	75 회	75회	75 회	8회

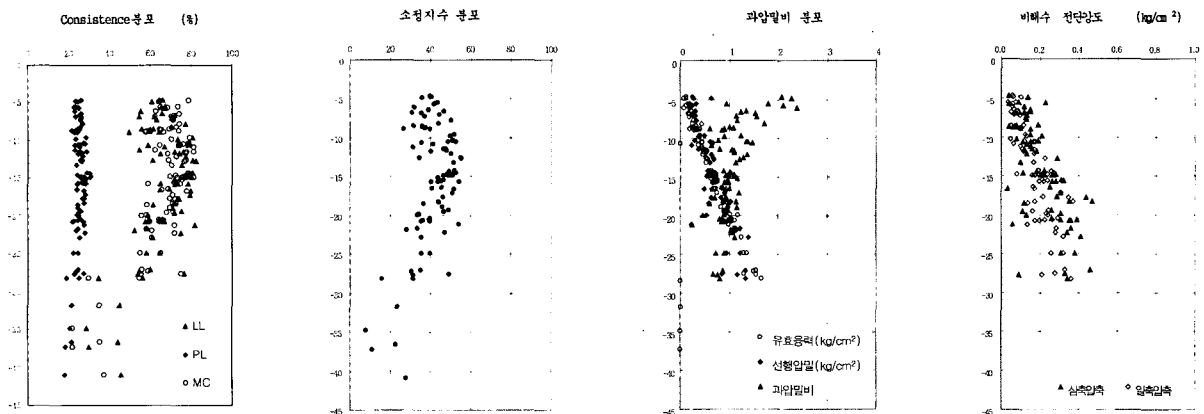


그림 7. 심도별 물리역학 시험결과

표 3. 현장 및 실내시험 성과

구분	심도 m	소성 지수 PI	액성 한계 LL	통일 분류 (USCS)	초기 간극수압 kPa	소산시간 - t_{50} sec	과압밀비 OCR	강성 지수 (I_p)	압밀계수		#200이하 %	점토 함유율 %
									C_v $10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$	C_h $10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$		
①	14.5	43.7	72.3	CH	418	1,900	1.18	123	1.36	-	95.7	34
②	9.5	34.6	61.3	CH	279	-	0.90	44	0.69	0.40	91.5	28
③	23.0	30.8	54.7	CH	616	1,320	0.64	11	1.55	-	95.6	30
④	6.0	40.2	65.0	CH	202	2,665	1.66	200	1.01	-	98.0	43.5
⑤	19.4	39.5	64.3	CH	367	-	0.87	17	1.61	0.55	93.5	33
⑥	16.7	46.3	71.1	CH	443	1,645	1.06	49	0.85	0.58	97.6	47.5
⑦	8.0	46.4	71.8	CH	250	2,775	0.82	43	1.12	0.72	97.2	40.5
⑧	10.5	43.7	71.7	CH	347	3,715	1.23	22	0.59	-	90.9	44
⑨	18.0	28.4	52.3	CH	444	565	1.05	32	0.59	0.32	96.1	42
⑩	12.0	41.0	65.1	CH	334	2,860	0.68	73	0.55	0.44	98.3	41
⑪	15.0	46.0	72.9	CH	385	1,590	1.48	81	1.39	0.93	95.3	29
평균	-	40.1	65.7	-	371.4	1,730.5	1.05	63	1.03	0.71	95.43	-

주) c_v : 수직방향 압밀계수, c_h : 수평방향 압밀계수

4. 수평방향 압밀특성

피에조콘의 소산시험으로부터 압밀계수를 산정할 경우, 시험결과에 영향을 주는 주요소는 소산모델이다. 소산모델은 원위치 시험 소산곡선과 가장 유사한 해석결과를 적용해야 시험값의 신뢰성을 높일 수 있으므로 소산곡선의 모사정도가 대단히 중요하다. 기존 연구자들은 다양한 이론적 방법을 통해 적용모델을 제안함으로써 피에조콘 시험을 통한 압밀계수 산정의 신뢰성을 향상시켰다. 그러나 이미 제안된 Torstensson(1975, 1977) 외 여러 소산모델은 해석결과 차가 크기 때문에 신뢰성의 한계를 극복하기 어려웠다. 따라서 다양한 이론모델 중 본 연구는 Burns and Mayne(1998)이 제안한 한계상태이론을 통해 원위치 조건을 비교하였다. 소산시험 결과 그림 8과 같이 조사 위치별로 소산정도는 다소 차이가 있는 경향을 보여 주었으며, 초기 과잉간극수압은 최대 2.5배의 편차를 보이기도 했다. 이에 대해 본 현장의 최적 모델을 찾고자 예측값과 실측값을 비교분석하기 위해 식 (14), (15), (16)을 이용하여 시행착오법(trial and error)에 의한 최적의 압밀계수에 대한 소산곡선을 추정하였다. 이때 예측값은 각 조사 위치별로 구분하여 구하였으나, 각 조사공별 예측치와 실측치의 편차가 크기 때문에 지역특성을 대표하는 모델이 요구되었다.

따라서 연구결과 본 현장의 경우에는 그림 8중 9번공 위치에서 실시한 결과가 비교적 예측치와 실측치가 가장 유사할 뿐만 아니라 소산곡선 중 대표값을 갖기에 적절한 것으로 판단되어 본 연구모델로 적용하였다. 한

편 분석시 응력비(σ_{vc}'/σ_p)와 강성지수(I_p)는 각 조사공별 시험값을 적용하였으며, 소산도는 50%, 간극수압계수(A_v)는 1.0으로 가정하여 적용하였으며, 압밀계수

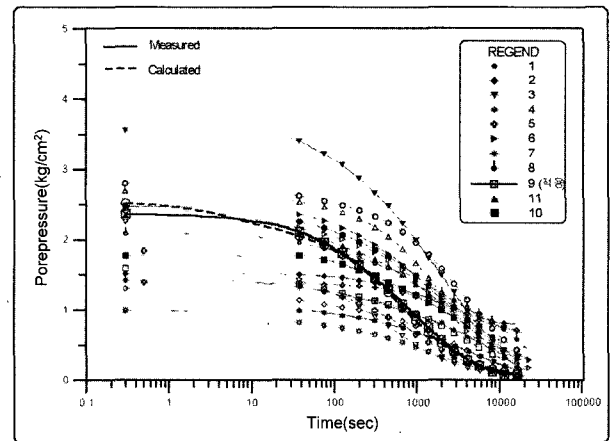


그림 8. 조사공 별 이론값과 시험값의 소산 비교도

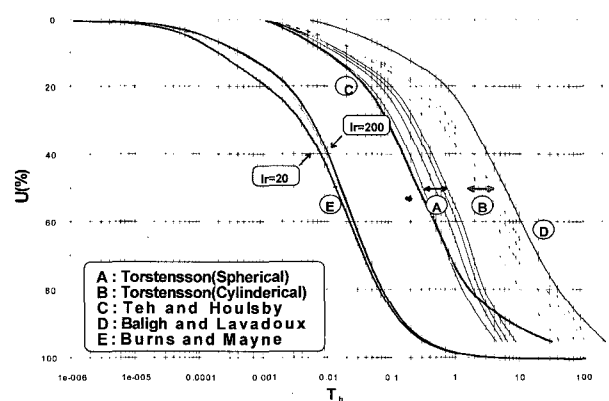


그림 9. 정규화 소산곡선

는 시행착오법에 의한 최적의 값을 적용하였다.

그림 8의 대표 소산모델을 이용하여 정규화한 압밀곡선과 기재안된 Torstensson(1975, 1977)의 여러 소산 압밀도를 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9에서 Burns and Mayne(1998)의 압밀곡선은 압밀도 50%에서 시간계수 0.015를 나타냈으며, 이를 정량화하여 압밀도별로 나타내면 표 4와 같다.

또한 분석된 압밀곡선을 이용하여 제안된 모델별로 수평압밀계수 값 편차를 검증하고자 인천 신공항 관련 자료(박찬국 외 2002)를 이용하여 산정한 압밀계수를 표 5에 수록하였다. 표 5와 같이 제안 방법별 적용모델로부터 산정된 압밀계수는 해석방법에 따라 그 편차가 대단히 큰 것을 알 수 있으며, 지반조건에 따라서도 그 편차가 큰 것으로 나타났다. 따라서 시험자료의 평가는 소성이 크며, 균질한 A-Group 지역 시험자료를 중심으로 평가하였다.

평가결과 본 연구모델을 적용한 Burns and Mayne (1998)의 방법은 실내시험값에 비해 약 1.5배 이하의 편차를 보이는 것으로 나타났으나 기존이론을 적용한 Torstensson의 구형 방법을 제외하고는 5~15배 이상의 편

차를 보였다. 따라서 신뢰성면에서 실내시험 값 대비 본 연구결과와 Torstensson의 구형 방법이 가장 높은 적용성을 보이는 것으로 평가되었다. 그리고 기존 표준압밀 실내 시험 조차도 분석방법에 따라 3~4배의 차를 보이는 것에 비하면 시험 자체가 갖고 있는 불확실성 등을 감안할 때 그 신뢰성은 대단히 높은 것으로 예측되었다. 이것은 본 연구 적용모델이 소성이 높은 지반에서 실시하였으며, 대체로 지반상태가 균질하기 때문인 것으로 추정되었다. 하지만 소성이 낮은 B-Group 지역 지반(CL)에서의 적용성은 원지반의 불균질성과 절대치면에서 시험값의 불확실성으로 인해 신뢰성은 낮은 것으로 평가되었다. 따라서 고소성 지반에서 콘관입시험을 통한 소산시험의 적용성은 Burns and Mayne(1998)의 방법이나 Torstensson의 구형 방법을 이용한 추정방법이 가장 뛰어난 것으로 평가되었다.

한편 압밀계수를 또다른 차원에서 추정하는 방법으로서 원위치 소산시험 결과를 직접 이용하는 Robertson 등(1992)의 제안방법을 적용하였다. 본 방법은 Teh and Houlby(1991) 등이 제안한 추정식을 이용하여 원위치에서 실시한 소산 시험결과로부터 압밀계수를 직접 산정하는 방법으로서, 현장에서 시험 즉시 시험결과를 얻

표 4. 해석방법별 압밀도에 따른 시간계수

U(%)	Torstensson		Teh and Houlby	Baligh and Lavadoux	Burns & Mayne
	구형	원통형			
20	0.081	0.240	0.038	0.690	0.002
40	0.340	1.480	0.142	3.000	0.008
50	0.580	2.900	0.245	5.600	0.015
60	0.980	5.360	0.439	10.000	0.025
80	2.220	25.160	1.600	39.000	0.065

주) 단 Torstensson의 방법은 강성지수 (I_p)가 100인 경우

표 5. 기존 연구자료(박찬국 등, 2002)의 압밀계수추정 결과(cm²/sec)

구분	실내시험	Torstensson		Baligh & Lavadoux	Teh & Houlby	Burns & Mayne	
		Spherical	Cylindrical				
A-Group (CH)	PH-1	0.48	0.36	1.78	3.82	1.62	0.31
	KNB-1	2.24	1.55	7.71	17.81	7.10	1.31
	KNB-2	1.78	1.31	6.50	14.16	5.91	1.12
	KNB-3	2.09	1.43	7.09	16.62	6.54	1.20
	KNB-4	1.95	1.85	9.08	15.47	7.75	1.60
	KNB-5	1.33	1.40	6.85	10.52	5.65	1.21
평균	0.53	1.32	6.50	13.06	5.76	1.13	
B-Group (CL)	평균	4.91	2.17	10.69	20.44	9.33	1.86

주) 본 결과중 실내시험 성과는 Rowe cell 압밀시험의 수평압밀계수이며, 지반조건중 A-Group은 통일 분류상 CH이며, B-Group은 CL로 분류된 성과로서 결과값의 편차가 커서 평균값으로 나타냈음.

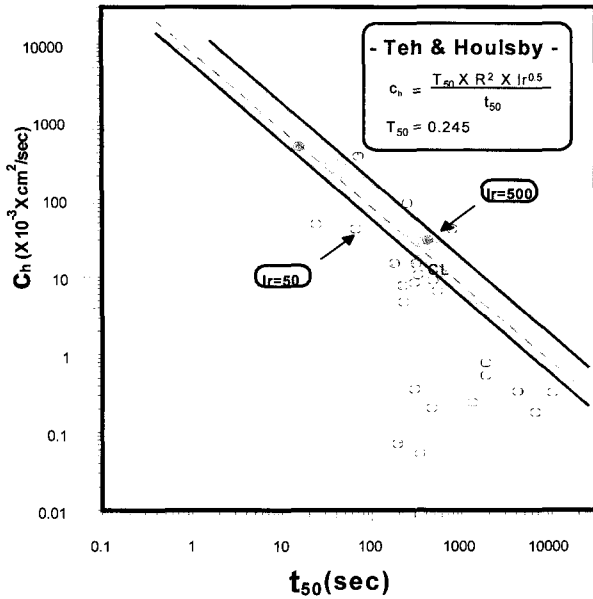


그림 10. 기존 연구결과(Robertson 등, 1992)

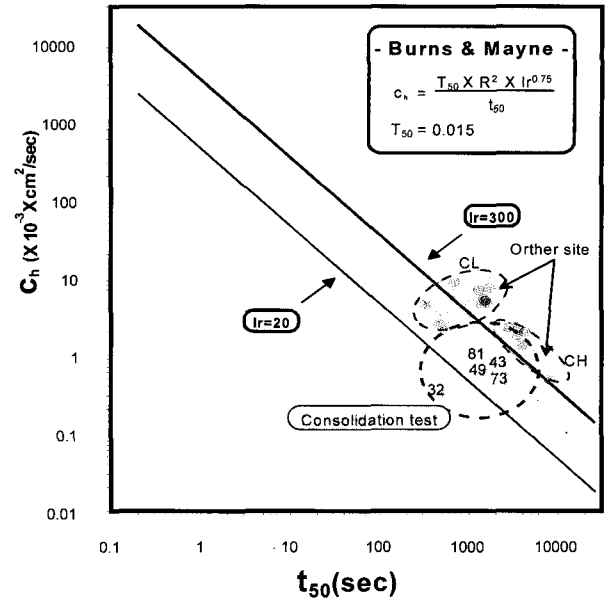


그림 11. 본 연구결과(Burns and Mayne의 방법)

을 수 있는 장점을 갖고 있다. 이같은 개념에 의거 기 제안된 연구결과 도표는 그림 10이다. 본 도표는 소산시험 측정자료중 50% 압밀시 측정되는 t_{50} 상태에서의 값을 사용하는 방법이다. 동일한 원리에 의해 본 연구에서 제안한 식 (16)을 사용하여 본 연구지역에 적용한 결과를 보면 그림 11과 같다. 그림 11에서 강성지수 20~300 범위에서는 대체로 이론추정선과 유사한 것으로 나타났으며, 기 연구자료로부터 추정된 시험값도 다소 벗어나기는 하나 본 도표를 활용하는 데는 무리가 없는 것으로 나타났다. 따라서 고소성 지반에서 이론적 방법과 도표를 이용한 반경험적 방법을 사용하여 적용하면 신뢰성 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

5. 결론

국내 남해안 고소성 해성점토 지반에서의 압밀특성에 적합한 예측모델을 찾고자 피에조콘 시험방법으로 실시한 시험결과에 대해 기 제안된 여러소산모델링 방법과 실내에서 실시한 표준압밀시험 결과를 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 여러 적용 모델중 본 연구현장에는 Torstensson (1975, 1977)의 구형모델과 공동확장이론, 수정 Cam-Clay모델의 한계상태이론을 적용한 Burns and Mayne의 방법(1998) 등이 비교적 높은 신뢰성을 보이는 것으로 나타났다.

- (2) 본 연구에 적용한 Burns and Mayne의 방법(1998)으로부터 정규화(normalization)하여 적용한 소산곡선상의 압밀도 50% 시간계수(T_{50})는 0.015로 나타났다.
- (3) 상기 모델을 사용하여 본 연구 지반조건과 유사현장의 시험성적을 활용하여 비교한 결과, 제안방법은 실내시험값에 비해 약 1.5배 작은 것으로 나타났다. 이같은 결과는 국내에서 수행중인 표준압밀시험의 분석방법에 따라 발생하는 편차 3~4배와 비교할 경우 신뢰성이 매우 높은 것으로 평가되었다.
- (4) 국내에서 사용중인 Robertson 등(1992)의 제안 도표를 활용하여 Burns and Mayne(1998)의 이론적 방법에 의한 새로운 도표를 제안하였다. 제안된 도표는 분석결과 적용성이 높은 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Acar, Y.B., Tumay, M.T.(1986), "Strain fields around cones in steady penetration", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(2), pp.207-213.
2. Acar, Y.B., Tumay, M.T., and Chan, A.(1982), "Interpretation of the dissipation of penetration pore pressure", *International symposium of numerical model in geomechanics*, Zurich, pp.13-17.
3. ASTM(1979), "Standard method for deep, Quasi-Static cone and penetration tests of soil", D3441, American Society for Testing and Materials.
4. Baligh, M.M. (1985), "Strain path method", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol.111, No.9, pp.1108-1136
5. Baligh, M.M. and Lavadoux, J.M.(1980), "Pore pressure dissipation after cone penetration", Research report R80-11, order No. 662, dept. of civil engineering, Massachusetts Institute of Technology,

Cambridge, Mass., pp.367.

6. Baligh, M.M. and Lavadoux, J.M.(1986), "Consolidation after undrained piezocone penetration. II: interpretation", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol 112, No.7, pp.727-745.
7. Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R.(1981), "Piezometer probe test in cohesive deposits", *ESOPT*, 264.
8. Bjerrum, L. and Johannessen, I.(1961), "Pore pressure resulting from driving piles in soft clay", *Pore pressure and suction in soils*, Butterworth, London.
9. Burns S.E. and Mayne P.W.(1998), "Monotonic and dilatatory pore-pressure decay during piezocone tests in clay", *Canadian geotechnical journal*, Vol.35.
10. Campanella, R.G., Gillespie, D.G. and Robertson, P.K.(1982), "Pore pressure during cone penetration testing", *Proceedings of 2nd European symposium on penetration testing*, Amsterdam, Vol.2, pp.507-512.
11. Campanella, R.G., Robertson, P.K., Gillespie, D.G. and Greig, J. (1985), "Recent developments in In-situ testing of soils", *Proceedings of 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, San Francisco, Vol.2, pp.894-854.
12. Campanella, R.G., Robertson, P.K., Gillespie, D.G. (1986), "Factors affecting the pore water pressure and its measurement around a penetrating cone", *In proceedings, 39th Canadian geotechnical conference*, Ottawa, pp.291-299.
13. Chen, B.S. and Mayne, P.W.(1993), "Piezocone evaluation of undrained shear strength in clays", *Proceedings of 11th southeast asian geotechnical conference*, Singapore, pp.91-98.
14. Elsworth, D.(1993), "Analysis of piezocone dissipation data using dislocation methods", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol.119, No.10, pp.1601-1623.
15. Gupta, R.C.(1983), "Determination of the in situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soil using electrical piezoprobe sounding", Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida.
16. Gupta, R.C. and J.L. Davison. (1986), "Piezoprobe determination coefficient of consolidation" *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3.
17. Houslyby, G.T. and Teh, C.I. (1988), "Analysis of the piezocone in clay", *ISORT I*, Orlando, Florida, Vol.2.
18. ISSMFE (1989), "Report of the ISSMFE technical committee on penetration testing of Soil-TC 16 with reference test procedures", *Swedish Geotechnical Institute*, information, No.7.
19. Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", State-of-the art report, *Proceedings of the 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, San Francisco, 1, pp.57-153.
20. Janbu, I. and Senneset, K.(1974), "Effective stress interpretation of In-situ static penetration test", *ESOPT-I*, Stockholm, Sweden, Vol.2.2, pp.181-195.
21. Kabir, M. G. and A. J. Lutenegeger.(1990), "In situ estimation of the coefficient of consolidation in clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp. 58-67.
22. Koizumi, Y., and Ito, K.(1967), "Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations", *Soils and Foundations*, 7(3):30-53.
23. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M.(1997), "Cone penetration testing in geotechnical practice", Black academic and professional and chapman and hall, London.
24. Mayne, P.W.(1991), "Determination of OCR in clays by piezocone tests using cavity expansion and critical state concepts", *Soils and Foundations*, 31(2):65-76.
25. Mayne, P.W.(1993), "In-situ determination of clay stress history by piezocone model", In predictive soil mechanics, proceedings of the wroth memorial symposium, Oxford university edited by G.T. Houslyby and A.N. Schofield. Thomas Telford, London, pp. 483-495.
26. Mayne, P.W.(1995), "Undrained plastic modulus from original camclay", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, 121(5):448-451 .
27. Mohammed G. Kabir and Alan J. Lutenegeger (1989), "In site estimation of the coefficient of consolidation in clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27.
28. Randolph, M.F. and Wroth, C.P.(1979), "An analytical solution for the consolidation around a driven piles", *Proceedings of the international journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 3(3), pp.217-229.
29. Robertson, P.K. and Campanella, R.G.(1983), "Interpretation of cone penetration tests, part II: clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20.
30. Robertson, P.K., and Hughes, J.M.O.(1986), "In situ testing and its application to foundation engineering", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, pp.573-594.
31. Robertson, P.K. Sully, J.P. Woeller, D.J. Lunne, T. Powel J.J.M. and Gillespie D.G.(1992), "Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29.
32. Schmertmann, J.H.(1974), "Penetration Pore Pressure Effects on Quasi-Static Cone Bearing", *Proceedings of the ESORT*, Stockholm, Vol.2, pp.345-351.
33. Scofield, A.N. and Wroth, C.P.(1968), *Critical state soil mechanics*, New York: McGraw-Hill.
34. Sully J. P., Campanella, R.G. and Robertson,P.K. (1988), "Over-consolidation ratio of clays from penetration pore water pressure", *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, Vol.114, No.2, pp.209-215.
35. Sully, J.P., and Campanella, R.G.(1994), "Evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidation fine-grained soils", *In proceedings, 13th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.1. New Delhi, pp.201-204.
36. Teh, C.I.(1987), "An analytical study of the cone penetration test", D.Phil.thesis, department of civil engineering, Oxford university, Oxford, U.K.
37. Teh, C.I. and Houslyby, G.T.(1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay", *Geotechnique*, 41(1):17-34.
38. Torstensson, B.A.(1975), "Pore pressure sounding instrument", *Proceedings of the conference on in-situ measurement of soil properties*, Raleigh, North Carolina, ASCE, Vol.II, pp.48-54.
39. Torstensson, B.A.(1977), "The pore pressure probe", *Geotechnical meeting, Norwegian geotechnical society*, Oslo, Paper 34, pp.34.1-34.15
40. Vesic, A.S.(1972), "Expansion of cavities in infinite soil masses", *Journal of the soil mechanics and foundation division*, ASCE, Nol. 98, SM3, pp.265-290.
41. Worth, C.P.(1984), "The interpretation of in situ soil tests", *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489.
42. 박찬국, 송정락, 김수일 (2002), "피에조콘 소산시험을 통한 해성 연약지반의 압밀특성에 대한 실험적 연구", 한국지반공학회논문집 제18권 2호, 2002년 4월, pp.137-146.

(접수일자 2003. 4. 21, 심사완료일 2003. 10. 10)