

피에조콘 소산시험을 통한 해성연약지반의 압밀특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Consolidation Characteristics of Soft Marine Deposit by Piezocone Dissipation Test

박 찬 국*¹ Park, Chan-Kuk
송 정 락*² Song, Chung-Rak
김 수 일*³ Kim, Soo-Il

Abstract

Field piezocone dissipation tests are performed, and the results are compared to the Rowe cell consolidation tests results to investigate the consolidation characteristics of soft marine deposit at the same location in Korea. From these results, statistical formula for the relation between the coefficients of horizontal consolidation(c_h) from Rowe cell consolidation tests and t_{50} from pore pressure dissipation tests by Piezocone is suggested through the regression analysis. The results are also compared to the existing theoretical formula. It is also shown that suggested formula is similar to Torstensson's(1977) formula based on cylindrical cavity expansion theory and Houlsby and Teh's(1988) formula based on strain path method.

요 지

본 연구에서는 국내 해성퇴적 연약지반의 압밀특성을 실험적으로 규명하기 위하여 현장에서의 피에조콘을 이용한 간극수압소산시험을 수행하고 동일한 위치와 심도에서 채취한 비교관시료를 이용하여 실내에서 Rowe cell 압밀시험을 포함한 역학시험과 물성시험을 수행하였다. 이를 근거로 Rowe cell 압밀시험으로부터 구한 수평압밀계수(c_h)와 피에조콘 소산시험으로부터 구한 압밀도 50%에 해당하는 소산시간(t_{50})의 관계를 회귀분석을 통하여 실험식을 제안하였으며 이 실험식과 기존의 여러 학자들에 의해 제안된 이론해와의 관계를 비교하였다. 이에 의하면 실린더형 공동팽창이론에 근거한 Torstensson(1977)의 이론해와 변형물경로법에 근거한 Houlsby와 Teh(1988)의 이론해에 비교적 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Keywords : Cavity expansion theory, Coefficient of horizontal consolidation, Piezocone dissipation test, Rowe cell consolidation test

1. 서 론

공항이나 항만 등의 대규모부지를 필요로 하는 시설

물을 건설하기 위해 필수적으로 접하게 되는 해성퇴적 토층과 같은 연약한 점성토지반의 압밀특성과 강도특성에 대한 연구는 국내에서도 활발히 진행되고있다

*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., coolsoup@orgio.net)

*2 정회원, 삼보기술단 상무 (Member, Vice President, Geotechnical Engrg., Div., Sambo Engineering)

*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

(김영상 1999, 이선재 1997). 특히 연약지반의 압밀특성 중 수평압밀계수(c_r)는 연약지반개량공법 적용시 배수재의 설계 및 공사기간을 결정하는 중요한 설계정수이므로 설계시에 적절한 값을 적용하여야 공사의 경제성 및 안정성을 확보할 수 있다. 피에조콘 관입시험장비는 연약지반의 강도특성뿐만 아니라 간극수압소산시험을 통하여 압밀특성을 산정할 수 있는 사운드장비로서 연약지반이 넓게 분포하고 있는 지역에서의 설계조사 및 지반개량확인조사이 활발하게 사용되고 있으며 향후에는 관입장비의 대형화와 함께 점성토지반뿐만 아니라 사질토지반에서도 활용빈도가 폭넓게 증가할 것으로 판단된다.

정규압밀된 점성토지반의 경우 피에조콘 관입시험시 관입에 의한 지반의 변형에 따른 간극수압이 발생하고 관입의 깊이에서 관입을 중지하고 간극수압을 관측하면 관입에 의해 발생한 응력증가가 과잉간극수압으로 나타나고 응력이 해방되면서 과잉간극수압의 소산이 시작되며 이는 시간이 경과할수록 현장지하수위로부터 산정된 정수압(hydrostatic pore water pressure)에 수렴하게 된다. 이 원리를 이용하여 시간경과에 따른 간극수압의 변화형상 및 소산속도를 도식화하면 지반의 압밀특성 및 투수특성을 파악할 수 있다. 소산시험으로부터 압밀계수를 산정할 수 있는 방법은 현재까지 Torstensson (1975, 1977), Baligh와 Levadoux(1980), Levadoux와 Baligh (1986), Houlsby와 Teh(1988) 그리고 Teh와 Houlsby (1991)등의 여러 학자들에 의해 연구되었는데 이들은 피에조콘시험으로부터 얻어진 규준화된 현장의 과잉간극수압 소산곡선으로부터 일정한 압밀도에 도달하는 시간을 결정하고 이론적으로 제안된 시간계수로부터 압밀계수를 구하는 방법들을 제안하였다. 그리고 Battaglio등 (1981)은 규준화된 소산곡선과 이론적인 소산곡선을 비교할 때 차이가 압밀도 10%에서 90%구간까지의 표준편차가 가장 적게 보이는 압밀계수를 구하는 방법을 제시

하였으며 Gupta(1983), Gupta와 Davidson(1986)은 실제소산곡선과 해석프로그램에서 산정한 소산곡선이 50% 압밀도에서 일치하도록 압밀계수를 구하는 방법을 제안하였다. 또한 Robertson 등(1992)이 전 세계에 걸쳐 30개 지역에서의 피에조콘 소산시험결과와 실내시험결과를 이용하여 소산시간과 수평압밀계수 또는 수평투수계수의 관계를 제안하였으며 이는 표준압밀시험으로부터 구한 연직압밀계수와 지반의 이방성을 이용하여 제안하였다.

본 연구에서는 국내 해안지역에 위치한 연약지반의 압밀특성을 규명하고자 피에조콘 관입시험기를 이용하여 계획한 심도에서의 과잉간극수압소산시험(pore pressure dissipation test, PPD Test)을 수행함과 동시에 동일심도와 위치에서 비교란시료를 채취하여 수평압밀계수를 산정할 수 있는 Rowe cell 압밀시험 등의 실내시험을 수행하였다. 이를 통하여 피에조콘소산시험으로부터 얻어지는 간극수압소산시간과 수평압밀계수의 관계를 제안함으로써 향후 현장에서 피에조콘 소산시험을 통하여 용이하게 수평압밀계수를 산정하여 연약지반개량설계에 반영할 수 있는 방안을 제안하는 데 중점을 두었다.

2. 기존의 제안된 이론해

피에조콘 소산시험을 통하여 수평압밀계수를 산정하는 데 있어서 중요한 인자는 강성지수와 같은 지반의 강도특성에 지배되는 초기과잉간극수압과 압밀특성에 지배되는 과잉간극수압소산곡선이다. 초기과잉간극수압은 공동확장이론(cavity expansion theory)과 변형률경로법(strain path method) 등을 이용한 이론에 의해 표현될 수 있으며 과잉간극수압소산곡선은 Terzaghi-Rendulic의 비혼합(uncoupled) 압밀이론이 주류를 이루고 있다.

과거의 많은 학자들은 이들과 같은 여러 이론을 적용하여 피에조콘 소산시험을 통한 압밀특성을 규명하였

표 1. 시간계수를 결정하는데 사용된 이론해 및 가정사항

연구자	지반모델	초기과잉간극수압	간극수압소산이론	공식	수치해석법
Torstensson (1977)	등방 탄성-완전 소성체	구형 또는 실린더형 공동확장이론 (cavity expansion theory)	선형 비혼합 일차원 압밀이론	$c_r = \frac{T_{50} R^2}{t_{50}}$	유한차분법
Levadoux와 Baligh (1986)	선형등방 재료	변형률경로법 (strain path method)	비혼합 이차원 압밀이론	$c_r = \frac{T r_o^2}{t}$	유한요소법
Gupta와 Davidson (1986)	등방 또는 비등방 재료	수정된 구형 공동확장이론	선형 비혼합 축대칭 압밀이론	-	유한차분법
Houlsby와 Teh (1988)	-	변형률경로법	비혼합 일차원 압밀이론	$c_r = \frac{T^* r_o^2}{t} \sqrt{I_r}$	유한요소법

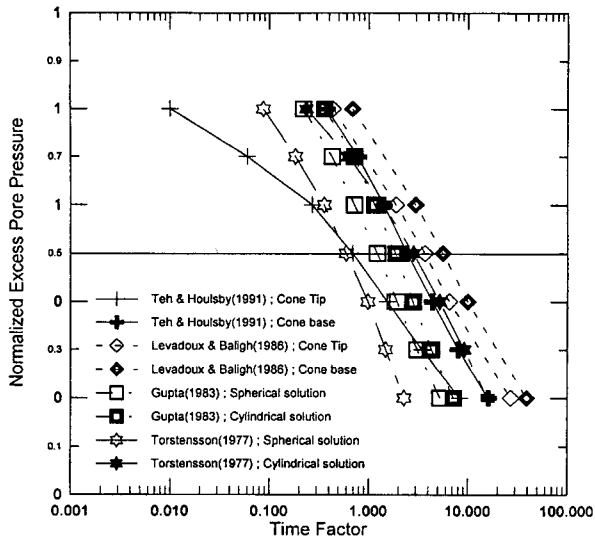


그림 1. 여러 연구자들에 의해 제안된 이론적인 시간계수의 비교(김영상, 1999)

는데 이를 요약하여 정리하면 표 1과 같다.

그림 1과 같이 시간계수(T)는 압밀도 50%인 경우에도 연구자에 따라 약 10배까지 차이가 발생하고 다른 압밀도의 경우 크기는 약 100배까지 차이가 나타남을 알 수 있다. 국내에서 사용하고 있는 장비(U₂형, 간극수

표 2. 여러 학자들에 의해 제안된 압밀도별 시간계수 T(U₂형, I_r=100)

압밀도(%)	제안자	Torstensson (구형)	Torstensson (실린더형)	Levadoux와 Baligh	Houlsby와 Teh
10		-	-	0.18	-
20		0.085	0.24	0.69	0.38
30		0.18	0.62	-	0.78
40		0.35	1.38	3.00	1.42
50		0.61	2.81	5.60	2.45
60		0.98	5.37	10.00	4.39
70		1.48	9.19	-	8.04
80		2.36	16.29	39.00	16.00
90		4.01	26.98	104.70	-

표 3. 시험대상지역의 시험항목 및 시험물량

시험지역	시험공수	피에조콘 관입시험	간극수압 소산시험	실내시험			
				Rowe cell 압밀시험	표준 압밀시험	일축압축 시험	물성시험
PH	1	1	1	1	-	1	1
KS	4	2	4	4	-	4	4
YJA	4	4	4	4	4	4	4
KHA	12	10	12	12	12	12	12
YJB	4	4	4	4	4	4	4
KHB	5	5	5	5	-	5	5
계	30	26	30	30	20	30	30

압축정요소가 콘선단부 바로 뒤에 위치하는 형태)에 준하는 내용의 시간계수를 정리하였는데 이는 표 2와 같다. 단, 표 2에 표현된 시간계수는 초기과잉간극수압에 미치는 중요한 요인인 지반의 강성지수(I_r)가 100일때를 기준으로 제안한 값이다.

이상에서 보는 바와 같이 피에조콘 소산시험을 이용하여 수평압밀계수를 산정하는데 있어 시간계수가 제안자에 따라 크게 차이가 나타나 적절한 수평압밀계수산정에 어려움이 있으므로 기존의 문제점을 극복하고 보다 신뢰성있는 수평압밀계수를 제안하고자 현장에서의 원위치시험과 이에 부합하는 실내시험을 수행하였다.

3. 현장시험 및 실내시험

3.1 시험대상지역 및 시험범위

국내의 해안지역에 분포한 해성퇴적층으로 구성된 연약지반을 시험대상지반으로 선정하였으며 서해안과 남해안을 대상으로 6개 지역에서 30개소의 피에조콘 관입시험과 간극수압소산시험을 실시하였으며 동일 위치와 동일심도에서 thin wall tube sampler를 이용하여 비

표 4. 시험대상지반의 물리적 특성

시험지역	통일분류법	액성한계(LL)	소성지수(PI)	200번체 통과량(%)	점토함유율(%)
PH	CH	91.2	55.4	99.1	59.5
KS	ML	34.2~45.4	13.3~27.2	98.9~99.5	17.7~27.0
YJA	ML	28.4~29.7	5.4~6.7	89.0~96.7	11.0~14.5
KHA	CL	30.7~54.4	12.5~30.9	68.4~96.3	15.0~37.0
YJB	ML-CL	32.0~34.2	6.9~14.1	86.2~99.8	7.4~19.0
KHB	CH	81.0~89.9	49.6~68.5	96.6~98.8	44.0~62.0

교란시료를 채취한 후 Rowe cell을 포함한 실내시험을 실시하였다. 시험항목 및 물량은 표 3과 같다.

시험지역으로 선정한 국내 6개 지역의 해성연약지반의 물리적 특성을 파악하고자 기본물성시험을 수행하였으며 이는 요약하면 표 4와 같다.

3.2 피에조콘 소산시험

과거의 피에조콘 관입시험기는 다양한 형태로 사용

되어 왔으나 1989년 ISSMFE(국제 토질 및 기초공학회)에서 제안한 형태가 표준형으로 일반화되어 현재의 형태를 나타낸다. 이는 콘선단부각이 60°이고 단면적이 10cm²이며 주변마찰부의 면적은 150cm²이다. 또한 일반적으로 많이 사용되는 U₂형의 경우 간극수압측정 요소가 콘선단부의 바로 뒤부터 15mm이내의 주변마찰부에 위치하는 것을 추천하고 있으며 국내에서 사용되고 있는 대부분의 콘은 이 형태이다. 피에조콘 관입시험기는 로드(rod)내부로 케이블을 연결하여 데이터를 수신

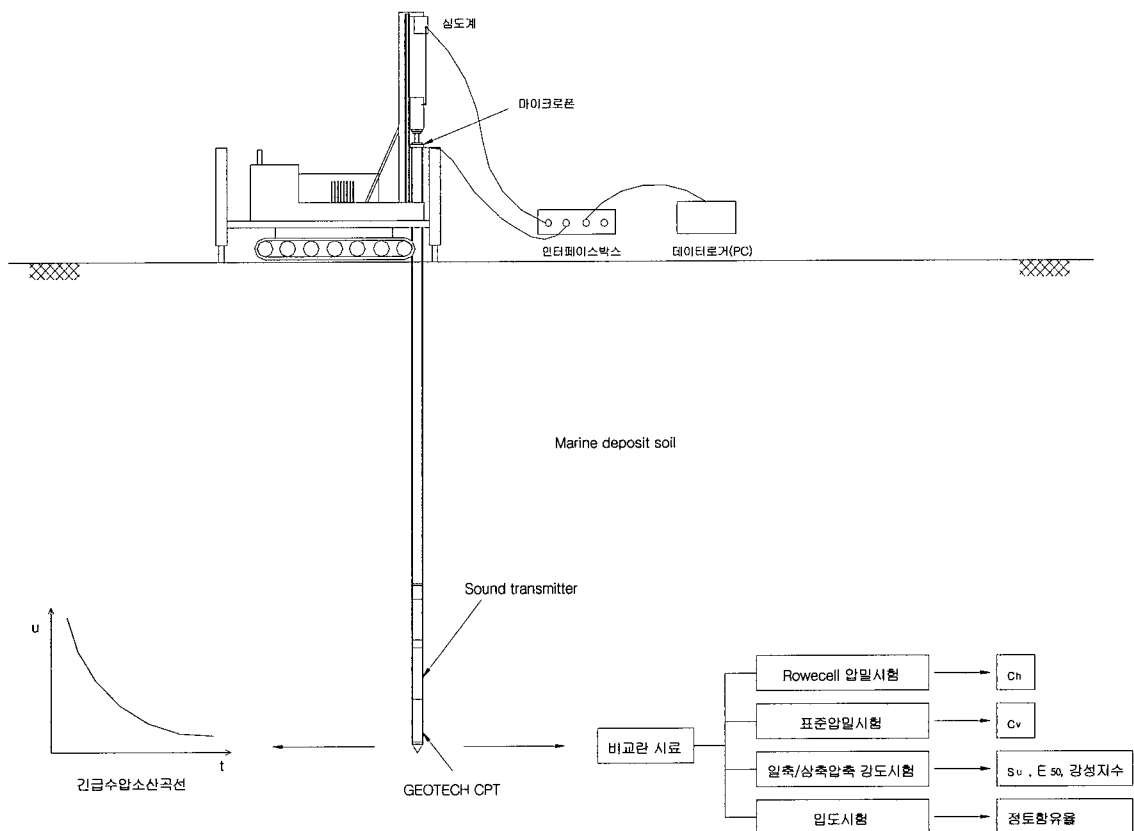


그림 2. 현장 및 실내시험개요도

하는 유선방식이 일반적이거나 최근에 개발된 장비는 케이블이 없이 로드차체로부터 데이터를 수신하는 무선방식이 개발되어 활용빈도가 증가하고 있다. 본 연구에서는 Sweden의 Geotech사에서 개발한 무선방식의 시험장비를 사용하였는데 Geotech Cordless CPT(Geotech, 1998)는 크게 다섯가지의 장치로 구성되어 관입, 측정 및 분석을 수행할 수 있다. 이 장치의 구성요소는 아래와 같으며 시험개요도는 그림 2와 같다.

- (1) 선단저항력과 주면마찰저항력 및 간극수압을 측정하는 피에조콘 탐침자(probe)
- (2) 측정된 값을 수신하는 마이크로폰(microphone)
- (3) 측정심도와 관입속도를 측정할 수 있는 심도계(depth guage)
- (4) 수신한 신호를 물리적으로 환산하는 인터페이스박스(computer interface box)
- (5) 측정치를 수집, 저장 및 인쇄하는 데이터로거(data logger)

지중에 피에조콘을 관입하다가 임의의 깊이에서 관입을 정지하면 지반의 변형에 의해 유발된 과잉간극수압이 소산하기 시작한다. 관입을 멈추고 소산이 시작될 때의 시점($t=0$)은 압밀도로 표현할 때 0%이고 이상적인 상태지만 소산이 완료된 시점($t=$ 무한대)은 압밀도로 표현할 때 100%라 할 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 시간에 따른 소산곡선을 정수압에 대해 정규화하여 나타내면 지반의 압밀계수 및 투수계수 등의 압밀특성을 구할 수 있는 자료가 된다.

본 연구에서는 피에조콘 소산시험을 통하여 정규화 과잉간극수압(normalized excess pore water pressure)이 0.5(압밀도=50%)인 시간을 PPD- t_{50} 으로 규정하여 값을 산정하였다. 정규화 과잉간극수압을 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$u_{nor} = \frac{u(t) - u_o}{u_i - u_o} \quad (1)$$

- 여기서, u_{nor} : 정규화 과잉간극수압(0~1)
 $u(t)$: 관입을 멈춘 후 임의의 시간 t 에서의 측정된 간극수압
 u_o : 지하수위로부터 산정되는 정수압
 u_i : 관입을 멈춘 후 소산시험을 시작할 때 ($t=0$) 측정된 간극수압
 $u_i - u_o$: 관입에 의해 발생한 과잉간극수압

3.3 Rowe cell 압밀시험

영국 맨체스터대학의 P. W. Rowe교수가 1966년에 개발한 Rowe cell 압밀시험기는 배수방향을 임의로 조절할 수 있어 연직방향과 수평방향의 압밀계수 및 투수계수를 측정할 수 있고 압밀과정중에 간극수압을 측정할 수 있는 장점을 지니고 있는 장비이다.

피에조콘 소산시험을 실시한 동일위치에서의 수평압밀계수를 실험적으로 산정하기 위하여 비교란시료를 채취하여 Rowe cell 압밀시험을 실시하였으며 Rowe cell의 직경은 thin wall tube sampler의 직경과 일치하는 3인치규격의 압밀용 cell을 사용하였다(그림 3 참조).

표준압밀시험이나 Rowe cell 압밀시험은 가해지는 하중단계에 따라 압밀계수가 다르게 나타나므로 대상지반의 압밀계수를 결정하는데 어려움이 있다. 그리하여 본 연구에서는 표 6에서 보는 바와 같이 3단계에 걸쳐 압밀시험을 수행하였는데 1단계로 시료를 포화시키기 위하여 배압을 Skempton의 간극수압계수 B 가 0.98 이상이 될 때까지 가하여 포화도를 최대한 유지하고 2단계로 구속압과 배압을 조절하여 현장지반의 유효응력상태까지 가하여 현장의 원지반상태를 재현하였다. 그리고 3단계로 현장에서의 피에조콘 소산시험의 분석결과를 근거로 과잉간극수압소산시험이 시작되는 단계에서의 관입에 의해 발생하는 과잉간극수압(=관입간극수압-정수압)을 Rowe cell 압밀시험에서의 압밀하중으로 가함으로써 외향(outward)의 방사방향으로의 압밀배수에 따른 간극수압변화를 측정하여 이를 정규화간극수압이 0.5인 PPD- t_{50} 을 산정하여 공식에 근거하여 수평압밀계수를 산정하였다.

Rowe cell 압밀시험을 통하여 압밀계수를 구하는 방법은 표준압밀시험에 의해 구하는 방법과 같은 개념이지만 Rowe cell 압밀시험의 배수방향이 재하방식이 다양하므로 이에 따른 각각의 시간계수들이 제안되었다. 이에 대한 내용은 표 5와 같다.

본 연구에서는 수평압밀계수를 산정하기 위한 시험이므로 그림 3과 같이 외향방사배수방식(outward radial drainage condition)으로 연직방향으로의 배수밸브는 닫고 수평방향의 배수밸브만을 열어 시험을 수행하였으며 시료상부에 강판(steel disc)을 설치하여 등변형률(equal strain)재하방식을 채택하였다.

표 5. Rowe cell 압밀시험의 배수방향과 재하방식에 따른 시간계수(Head, 1992)

배수방향	경계조건	압밀도 측정위치	측정요소	시간계수(T_r)		적용식
				T_{50}	T_{90}	
외향방사	자유변형	평균	체적(연직변위)	0.0632	0.335	$c_v = 0.131 \frac{T_r D^2}{t}$
		중앙	간극수압	0.200	0.479	
	일정변형	평균	체적(연직변위)	0.0866	0.288	
		중앙	간극수압	0.173	0.374	
내향방사	자유변형	평균	체적(연직변위)	0.771	2.631	
		$r=0.55R$	간극수압	0.765	2.625	
	일정변형	평균	체적(연직변위)	0.781	2.595	
		$r=0.55R$	간극수압	0.778	2.592	
연직일면	-	평균	체적(연직변위)	0.197	0.848	$c_v = 0.526 \frac{T_r H^2}{t}$
		중앙	간극수압	0.379	1.031	
연직양면	-	평균	체적(연직변위)	0.197	0.848	$c_v = 0.131 \frac{T_r H^2}{t}$

R : Rowe cell의 반경
 r : 간극수압측정요소의 위치
 H : 시료의 두께
 D : 시료의 직경
 단위: $c_v, c_r(m^2/yr)$, t(minute), H(mm), D(mm)

표 6. 수평압밀계수 산정을 위한 Rowe cell 압밀시험의 재하단계

1 단계	원지반의 포화도를 유지하기 위하여 셀압과 배압을 동시에 조절하면서 시료를 포화시키는 재하과정
2 단계	응력상태를 재현하기 위하여 현장에서 측정된 자료를 근거로 유효응력을 산정하여 일정한 배압상태에서 셀압을 조절하여 압밀시키는 과정
3 단계	현장에서의 간극수압소산시험결과를 근거로 산정한 과잉간극수압을 셀압을 통하여 발생시킴으로써 현장시험을 모사화하여 압밀시키는 과정

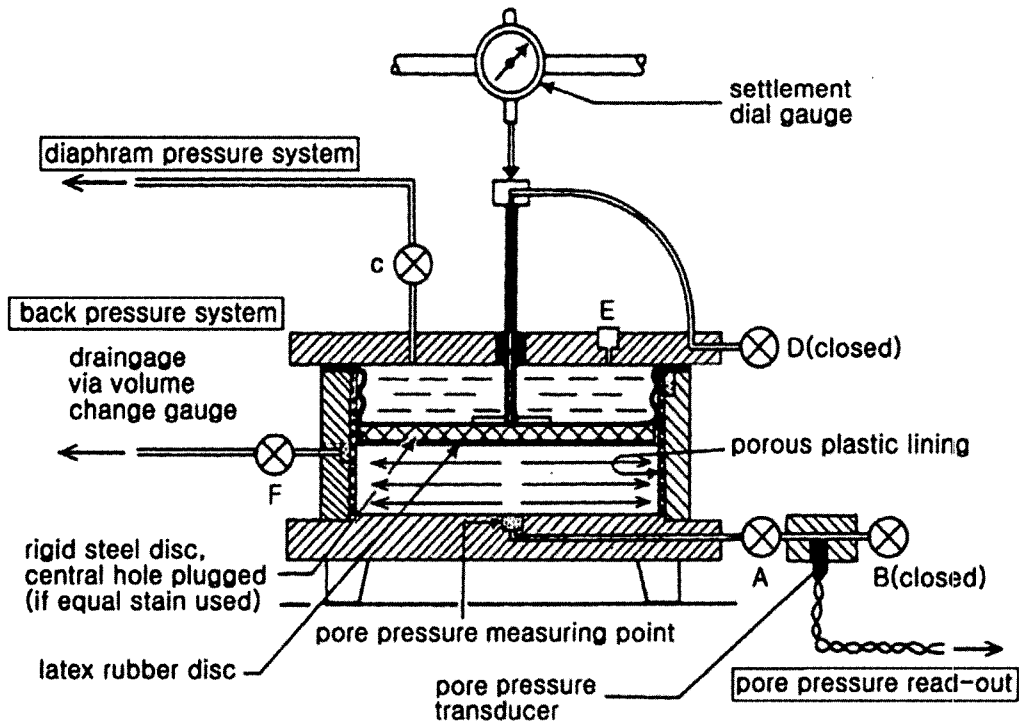


그림 3. Rowe cell 압밀시험기(직경 3인치 규격)

3.4 실내시험

기존의 연구결과에 의하면 피에조콘 소산시험을 통해 산정한 지반의 압밀특성은 지반의 강도특성에도 지배되는 것으로 나타났는데 이는 강도특성중에 지반의 강성지수(I_R)가 클수록 초기과잉간극수압은 상대적으로 크게 발생하고 이는 압밀소요시간에 영향을 주어 강성지수에 따라 피에조콘 소산시험에서의 시간계수가 달라지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 지반의 강성지수를 구하기 위해 과잉간극수압소산시험을 수행한 심도에서 비교란 시료를 채취하여 일축압축시험(unconfined compression test)을 수행하였고 이와 더불어 표준압밀시험과 물성시험을 병행하여 수행하였다.

4. 시험성과

서해안과 남해안의 6개 지역에 분포하는 30개소의 연약지반을 대상으로 실시한 피에조콘 소산시험과 Rowe cell 압밀시험을 포함한 실내시험성과를 정리하여 나타내면 표 7과 같다. 간극수압소산시험과 Rowe cell 압밀시험에서 나타난 소산곡선을 압밀도를 기준으로 정규화하였으며 50%에 해당하는 시간을 산정하였다. 초기과잉간극수압은 관입에 의해 발생한 과잉간극수압으로서 소산시험을 시작하는 시점에서의 측정된 간극수압에서 지하수위를 고려한 정수압(hydrostatic pore water pressure)을 뺀 값이다. 강성지수는 비배수전단강도(s_u)와 전단탄성계수(G)의 관계식으로 일축압축시험에서

표 7. 현장시험 및 실내시험성과

시험 지역	시험 개소	심도 (m)	지하 수위 GL(-)	초기과잉 간극수압 (kPa)	PPD-t ₅₀ (sec)	Rowe cell t ₅₀ (sec)	C _r (cm/sec ²)	S _u (t/m ²)	E ₅₀ (t/m ²)	강성지수 (I _R)
PH	PH-1	14.4	4.6	291	8049	4750	4.81 × 10 ⁻⁴	1.45	136	94
KS	KS-1	10.7	0.5	235	620	262	8.73 × 10 ⁻³	2.54	127	50
	KS-2	15.5	0.5	268	331	20	1.14 × 10 ⁻¹	3.38	206	61
	KS-3	3.5	0.5	84	981	141	1.62 × 10 ⁻²	1.60	222	139
	KS-4	6.1	0.5	145	1096	125	1.83 × 10 ⁻²	1.78	119	67
YJA	YJA-1	10.1	0.0	50	590	46	4.97 × 10 ⁻²	1.66	46	28
	YJA-2	10.4	0.0	78	243	37	6.18 × 10 ⁻²	2.12	55	26
	YJA-3	10.1	0.0	56	198	20	1.14 × 10 ⁻¹	1.48	53	36
	YJA-4	10.4	0.0	60	133	7	3.27 × 10 ⁻¹	2.00	58	29
KHA	KHA-1	16.9	0.0	386	1709	316	7.23 × 10 ⁻³	4.46	379	85
	KHA-2	13.5	0.8	286	678	264	8.66 × 10 ⁻³	3.69	277	75
	KHA-3	16.8	0.8	366	3098	822	2.78 × 10 ⁻³	4.82	569	118
	KHA-4	16.9	0.7	418	1537	462	4.95 × 10 ⁻³	2.20	54	72
	KHA-5	17.6	0.5	400	1633	493	4.64 × 10 ⁻³	3.65	260	71
	KHA-6	21.0	0.4	504	1477	431	5.30 × 10 ⁻³	4.52	376	83
	KHA-7	22.0	0.7	500	1379	501	4.56 × 10 ⁻³	2.84	657	142
	KHA-8	19.0	0.7	460	1304	335	6.82 × 10 ⁻³	4.60	354	77
	KHA-9	24.0	0.3	553	329	51	4.48 × 10 ⁻³	5.46	575	105
	KHA-10	14.0	0.4	254	540	112	2.04 × 10 ⁻²	2.85	355	124
	KHA-11	13.5	0.4	298	463	92	2.48 × 10 ⁻²	3.35	522	155
	KHA-12	19.0	0.6	378	1524	453	5.05 × 10 ⁻²	1.31	225	171
YJB	YJB-1	14.2	1.1	199	223	21	1.09 × 10 ⁻¹	2.67	267	100
	YJB-2	6.0	0.4	86	85	10	2.29 × 10 ⁻¹	2.25	103	46
	YJB-3	13.4	1.1	165	233	87	2.63 × 10 ⁻²	4.44	634	142
	YJB-4	7.5	0.1	156	822	225	1.02 × 10 ⁻²	4.10	132	33
KHB	KHB-1	7.4	3.3	169	2760	1019	2.24 × 10 ⁻³	1.20	100	83
	KHB-2	7.4	3.3	197	3495	1281	1.78 × 10 ⁻³	1.45	132	91
	KHB-3	7.9	1.0	118	3515	1092	2.09 × 10 ⁻³	1.05	85	81
	KHB-4	10.8	0.4	189	4233	1173	1.95 × 10 ⁻³	1.15	151	131
	KHB-5	11.4	3.2	223	3955	1725	1.33 × 10 ⁻³	1.85	280	151

나오는 일축압축강도(q_u)와 응력-변형률관계로부터 나오는 지반의 변형계수로부터 산정하였다. 본 연구의 시험지반은 연약한 점성토지반이므로 초기접선탄성계수를 구하는 데는 어려움이 많아 일축압축강도(파괴점)의 1/2에 해당하는 압축강도인 비배수 전단강도 s_u 에 해당하는 축변형률(axial strain)을 구하여 이 점에서의 할선탄성계수(secant modulus, E_{50})를 구하여 비배수강도와 관계를 이용하여 강성지수를 산정하였다. 할선탄성계수 E_{50} 은 접선탄성계수(E_u)의 1/3로 가정하였다(이선재, 1997). 이를 근거로 산정한 강성지수는 식 (2)와 같이 표현된다.

여기서 $G=E/2(1+\nu)$ 이며 ν 는 포아송비로 비배수조건에서 0.5로 가정하였다.

$$I_R = \frac{G}{s_u} = \frac{E_u}{3s_u} = \frac{E_{50}}{s_u} \quad (2)$$

5. 성과분석

본 연구는 피에조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 압밀특성을 규명하기 위하여 간극수압소산시험결과로부터 산정한 $PPD-t_{50}$ 과 동일한 위치에서 채취한 비교란 시료로 Rowe cell 압밀시험을 통해 구해진 수평압밀계수(c_r)의 관계를 분석하였다. 그 결과, 전대수그래프상에서 간극수압소산시간이 클수록 수평압밀계수가 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며 이를 근거로 회귀분석을 통하여 관계식을 제안하였는데 이는 식 (3)과 같이 나타났고 상관계수(R^2)는 0.924로 비교적 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

Robertson 등(1992)은 세계 각지에서 수행한 피에조

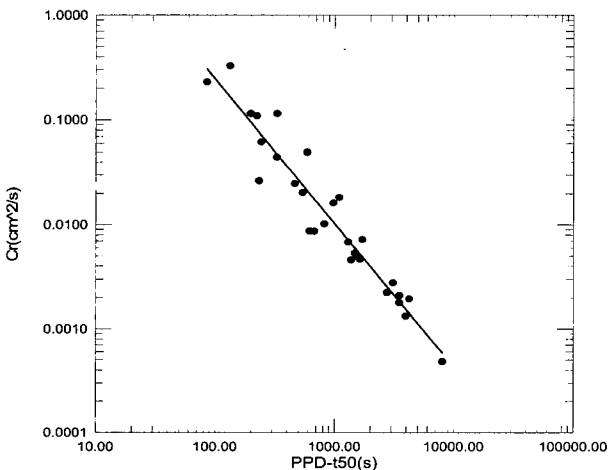


그림 4. 시험치의 회귀분석을 통한 c_r 과 $PPD-t_{50}$ 의 관계

콘 소산시험과 실내에서의 표준압밀시험성과를 바탕으로 간극수압축정요소의 위치에 따른 c_r 과 $PPD-t_{50}$ 의 관계를 제안하였는데 U_2 형이 U_1 형이나 U_3 형보다 시험치의 분산도가 작은 것으로 나타났으며 본 연구의 시험성과를 U_2 형에 대해 Robertson 등이 분석한 시험성과와 비교한 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 저압밀계수범위($10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$)를 제외하고는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

$$c_r = \frac{137.58}{(PPD-t_{50})^{1.38}} \quad (3)$$

여기서, c_r 의 단위는 cm^2/sec ,

$PPD-t_{50}$ 의 단위는 sec.

Rowe cell 압밀시험과 더불어 일축압축강도시험 및 물성시험을 실시하였으며 물성시험성과와 수평압밀계수의 관계를 규명하기 위하여 점토함유율과 소성지수 (PI)에 따른 압밀특성을 고찰하였는데 이는 각각 그림 6과 그림 7과 같으며 점토함유율과 소성지수가 클수록 수평압밀계수가 작아지는 것을 알 수 있었다.

또한 이들 물성시험치와 수평압밀계수를 회귀분석을 통하여 관계식을 제안하였는데 이는 각각 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$c_r = \frac{52.22}{(\text{점토함유율})^{2.60}} \quad (4)$$

$$c_r = \frac{2.05}{(PI)^{1.78}} \quad (5)$$

또한 식 (3)의 실험식과 기존 문헌(Torstensson, 1977; Levadoux와 Baligh, 1986; Houlsby 와 Teh, 1988)에서 제

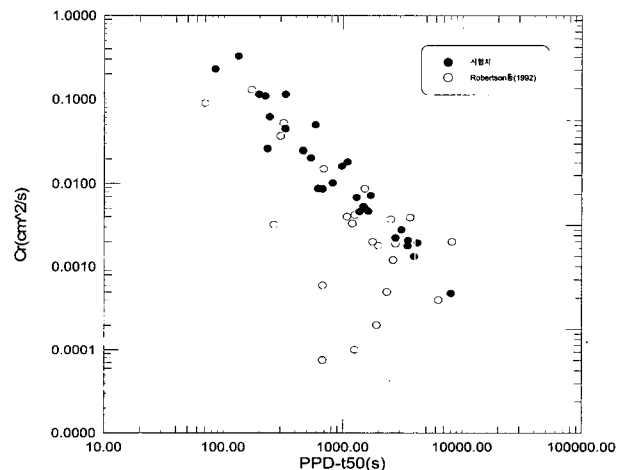


그림 5. Robertson 등(1992)이 제안한 연구결과와의 비교

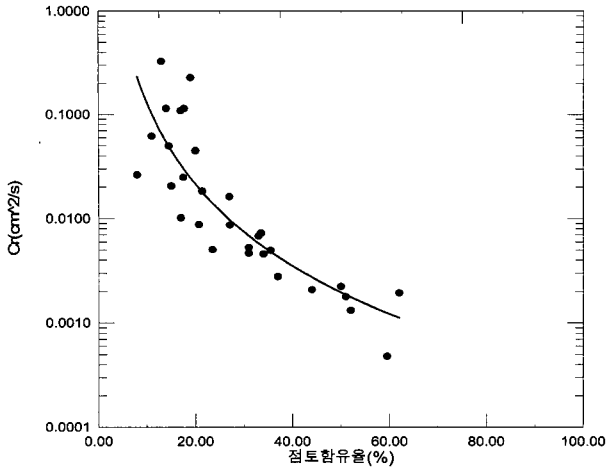


그림 6. 점토함유율과 수평압밀계수의 관계

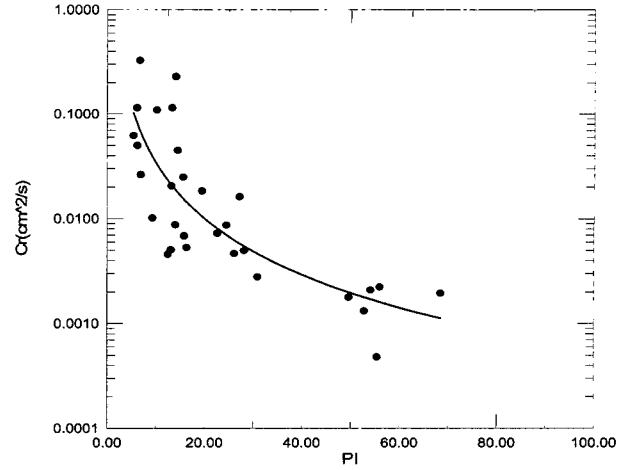


그림 7. 소성지수와 수평압밀계수의 관계

안된 이론해로부터 산정한 식을 그림 8에서 비교하였는데 이론해들은 압밀도 50%의 시간계수를 적용하여 수평압밀계수와 간극수압소산시간의 관계와 비교하였다. 이에 의하면 국내 연약지반의 일반적인 수평압밀계수범위 ($10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)에서 실험식은 실린더형 공동확장이론에 근거한 Torstensson(1977)의 이론해와 변형률경로법에 근거하여 강성지수를 고려한 Hously와 The (1988)의 이론해와는 비교적 유사한 관계를 보이거나 변형률경로법에 근거한 Levadoux와 Baligh(1986)의 이론해와 구형 공동확장이론에 근거한 Torstensson(1977)의 이론해와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 Torstensson의 이론해에서 제안한 시간계수가 다른 연구자들의 이론해에서 제안한 시간계수에 비해 비교적 작기 때문인 것으로 판단되며 Levadoux와 Baligh가 제안한 이론해의 경우 지반의 강성지수(I_R)가 500으로 견고한 점토인 boston blue clay를 대상으로 제안된 이론이

므로 강성지수가 일반적으로 100내외인 국내의 해성연약지반과는 압밀특성의 차이가 있는 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 피에조콘 소산시험을 통한 연약지반의 압밀특성을 규명하기 위하여 기존에 제안된 이론해를 근거로 산정하는 방법을 극복하고자 국내 6개의 현장에서 30개소의 피에조콘 소산시험과 Rowe cell 압밀시험을 포함한 실내시험성으로부터 간극수압소산시간(PPD- t_{50})과 수평압밀계수(c_r)의 관계식을 연구하였다. 그 결과, $c_r = 137.58 / (\text{PPD}-t_{50})^{1.38}$ 의 관계를 얻을 수 있었다. 또한 제안한 실험식과 기존의 이론해에 근거한 식과의 비교를 수행한 바에 의하면 국내 연약지반에 대한 수평압밀계수의 일반적인 범위($10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)에서 제안한 실험식은 실린더형 공동확장이론에 의한 Torstensson (1977)의 해와 강성지수를 고려하여 변형률경로법을 이용한 Hously와 Teh(1988)의 해와 비교적 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 도출한 시험성 결과가 Robertson 등(1992)이 제안한 연구성과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며 실내시험으로부터 얻어낸 물성시험 중에서 점토함유율과 소성지수에 따른 수평압밀계수도 비교적 일정한 관계식을 보이는 것으로 나타났다. 단, 본 연구성과는 U_2 형(간극수압측정요소가 콘선단부의 바로 뒤에 위치하는 형태)의 피에조콘 시험기를 이용하여 간극수압을 측정된 결과를 바탕으로 제안한 것이므로 간극수압측정요소가 다른 형태의 경우(U_1 형, U_3 형)에 대해서는 적용에 제한이 따를 수 있을 것으로 판단된다.

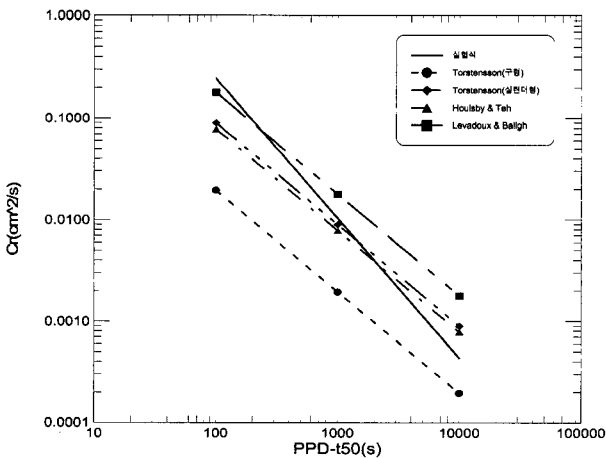


그림 8. 제안한 실험식과 기존 이론식의 비교결과

감사의 글

본 연구의 실내시험을 위해 물심양면으로 협조해 주신 NESGEO의 최명진 사장님께 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. 김영상(1999), 피에조 콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정, 박사학위논문, 한국과학기술원, p.71.
2. 이선재(1997), 피에조 콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구, 박사학위논문, 서울대학교, p.75.
3. Badling, M. M. and Levadoux, J. N.(1980), *Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration*, MIT. Dept. of Civil Engineering, Report R.80-1, Cambridge, MA, p.367.
4. Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Maniscalco, R.(1981), "Piezometer Probe Test in Cohesive Deposits", *ESOPT*, pp.264~302.
5. Geotech AB(1998), *Geotech cone penetration test(CPTU) equipment user manual*, pp.5~6.
6. 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, 303.p.
7. Gupta, R. C. and J. L. Davidson(1986), "Piezoprobe Determination Coefficient of Consolidation", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.12~22.
8. Head, K. H.(1992), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol.3, Pentech Press, London.
9. Houlsby, G. T. and Teh, C. I.(1988), "Analysis of the Piezocone in Clay", *ISOPT I*, Orlando, Florida, Vol.2, pp.777~783.
10. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M.(1986), "Consolidation After Undrained Piezocone Penetration I : Prediction", *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.7, pp.707~725.
11. Robertson, P. K., Sully, J. P., Woeller, D. J., Lunne, T., Powell, J. J. M. and D. G. Gillespie(1992), "Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Tests", *Canadian Geotechnical Journal*. 29, pp.539~550.
12. Rowe, P. W. and Barden, L.(1966), "A new consolidation cell", *Geotechnique*, pp.162~169.
13. Teh, C. I. and Houlsby, G. T.(1991), "An Analytical study of Cone Penetrometer Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17~34.
14. Torstensson, B. A.(1975), "The Pore Pressure Sounding Equipment", *ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, NC, pp.48~55.
15. Torstensson, B. A.(1977), "The Pore Pressure Probe", *Proceedings. Geoteknikkdagen*, Tapir Foreleg, Oslo, No.34, pp.1~15.

(접수일자 2002. 2. 4, 심사완료일 2002. 4. 2)