

피에조콘을 이용한 연약지반의 압밀특성에 관한 연구

A Study of Consolidation property on Soft ground Using Piezocone

김봉문¹⁾, Bong-Moon Kim, 박성재²⁾, Sung-Zae Pak 정경환³⁾, Gyeong-Hwan Jeong,
김찬홍⁴⁾, Chan-Hong Kim, 이길환⁵⁾, Gil-Hwan Lee

- ¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan Nat'l Univ.
²⁾ 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan Nat'l Univ.
³⁾ 부산대학교 공과대학 박사수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan Nat'l Univ.
⁴⁾ (주) 동아지질 전문이사, 공학박사, Executive Managing Director, Dong-A Geological Eng. Co., Ltd.
⁵⁾ (주) 동아지질, Engineering, Dong-A Geological Eng. Co., Ltd.

SYNOPSIS : Based on the results obtain from the investigation of Nak-Dong River District, it was classified as very thick, soft soil deposit. Furthermore, during the construction of structures large settlements are expected. Since large settlement affects the structures life, it is very important to accurately determine the consolidation of soil based on the obtained results. In this study piezocone test and laboratory test were performed to determine the consolidation properties of Nak-Dong River District Pusan, Gyeong-Nam province. Degree of consolidation and the coefficient of consolidation obtained from the data of piezocone test and the results of the Oedometer test were compared and analyzed. Using the results the porewater pressure coefficient(B_q) was obtained and the relationship with the Plasticity Index was also determined. From the results of this study the effects of the degree of consolidation and consolidation coefficient, and the porewater pressure coefficient and the Plasticity Index was determined.

주요어(Keywords) : 낙동강 하구지역, 피에조콘 시험(CPTU), 간극수압계수(B_q), 과압밀비, 소성지수, 압밀계수

1. 서론

낙동강 하구 지역은 국내뿐만 아니라 세계적으로도 층적층이 두껍게 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 지반 상에 구조물을 축조할 시, 잔류침하나 부등침하 등에 의한 실패 사례가 상당히 많으므로, 압밀침하를 정확하게 예측하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 낙동강 하구 지역인 부산, 경남 일원의 현장에서 피에조콘시험과 불교란시료를 이용한 실내시험을 수행하여 연약지반의 압밀특성을 비교하고자 한다. 현장시험으로 최근 각광받고 있는 피에조콘 시험 데이터를 이용하여 압밀도와 압밀계수를 산정한 후, 이를 오에도미터 시험결과와 비교·분석하였으며, 아울러 산정한 결과를 간극수압계수(B_q), 소성지수와 연관하여 상호간의 영향을 파악하고자 한다. 연구결과에 의하면 압밀

도와 압밀계수가 간극수압계수와 소성지수에 영향받는 것을 알 수 있었다.

1.1 연구현장

<표 1> 연구지역의 지반조사 내용과 특성

지역	구분	수량	액성한계	소성한계	자연함수비	소성지수
김해 내외지구	피에조콘관입시험	5개소	31.9~91.9	15.5~25.9	15.2~76.3	13.2~67.4
	소산시험	3회				
	시추조사	11개소				
	표준관입시험	41회				
양산물금지구	피에조콘관입시험	20개소	18~73.9	29~63	25~97.3	11.1~45.6
	소산시험	12회				
	시추조사	36개소				
	표준관입시험	755회				
감천항	피에조콘관입시험	2개소	33.57~80.13	36.7~81.4	15.5~29.6	21.2~51.8
	시추조사	35개소				
	표준관입시험	183회				
부산지하철313공구	피에조콘관입시험	6개소	28.05~49.48	36.9~55.8	16.7~20.5	16.7~20.6
	소산시험	2회				
	시추조사	10개소				
	표준관입시험	178회				
부산항4단계	피에조콘관입시험	2개소	25.1~70.1	32.3~72.8	18.4~34.1	21.4~31.6
	시추조사	58개소				
	표준관입시험	900회				
부산부두	피에조콘관입시험	2개소	60.7~70.3	70.5~83	23.8~29.3	44.9~53.7
	시추조사	36개소				
	표준관입시험	298회				

*피에조콘관입시험-표준형피에조콘, 시추조사-NX Size(76mm), 표준관입시험-KS F 2307 및 2318

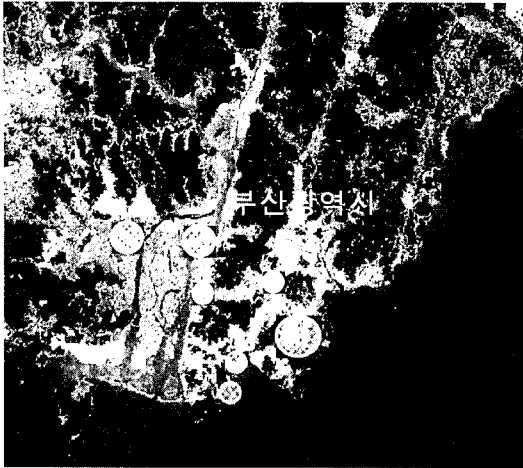
본 연구 대상지역은 낙동강 하구지역으로 다음과 같은 특성을 갖고 있다

감천항 공영수산물지역은 가호안 내·외측 지점에 심도 16.5m의 점토층에서 조사한 결과, 패각과 실트 및 모래를 함유하고 있으며 N치가 0~11회로 나타났고, 양산 지역은 0.4~2.5m정도의 매립층 아래 N=1~3의 연약한 점성토층이 최대 32m 깊이까지 분포한다.

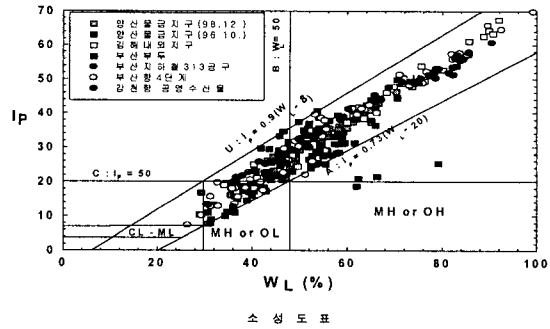
김해시 내외동 일대는 상부 점토가 2.1~3.5m정도이고, 하부점토가 5.3~10m인 곳에서 시험을 실시하였으며, N치가 12~21정도 범위이다.

부산 지하철 3호선 313공구에서는 점토가 6.8~10m에서 시험을 실시하였고, 부산부두는 심도 5~8m에 위치한 점성토층에서 시험하였다. 또한, 부산항 4단계 컨테이너 터미널 지역은 실트질 점토가 다양한 깊이에서 나타나고 있으므로, 두 지역으로 나누어 시험을 실시하였다.

간극수압소산시험은 비교적 균질한 점토층이 두껍게 형성된 지반을 대상으로 실시하였고, 실내시험과 함께 <표 1>에 나타내었다. 이들 현장의 시료에 대해서 액성한계(w_L)와 소성지수(I_p)로 정의되는 통일 분류법에 의한 소성도를 나타낸 것이 <그림 2>이며, CH, CL이 우세한 것을 알 수 있다.



<그림 1> 연구현장의 위치



<그림 2> 소성도 (지역별)

2. 피에조콘 시험

피에조콘시험 데이터를 이용하여 과압밀비를 평가하는 식은 주로 경험적인 상관관계를 이용하고 있으며, 압밀계수는 여러 연구자별로 많은 제안식이 개발되어 있으며, 현재까지 진행 중인 연구결과를 정리하면 <표 2>와 같다.

2.1 과압밀비(OCR)의 산정

<표 1> 과압밀비 산정식

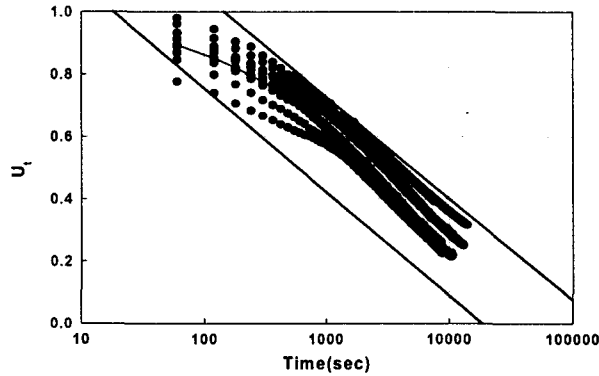
제안자	제안식	비고
Chang(1991)	$OCR = \frac{2.3B_q}{3.7B_q - 1}$	Wroth(1984)가 정의한 간극수압계수 B_q
Mayne(1987)과 Mayne & Holtz(1988)	$OCR = (0.317 \Delta u / \sigma'_{vo})^{1.79}$	$\Delta u = u_{bt} - u_o$
Mayne과 Bachus(1998)	$OCR = 0.38(\Delta u / \sigma'_{vo} - 1)^{1.33}$	등방 비배수삼축시험을 토대로 $G/S_u = 400$, $M=1.5$ $A=0.75$ 를 사용
Schmertmann(1978)	$OCR = (S/S_1)^{1.13 + 0.04(S/S_1)}$	$N_{kt}=10$ 을 적용(참고문헌 참조)
Sugawara(1988)	$OCR = \frac{(q_T - \sigma_{vo})}{K \cdot \sigma_{vo}}$	K값 4.5를 사용(참고문헌 참조)

2.2 압밀계수의 추정

피에조콘 관입시험에서 간극수압 소산시험을 통한 압밀계수의 측정은 특정 깊이에서 콘의 관입을 일시 정지하고 간극수압이 소산되는 정도를 시간에 따라 측정함으로써 수행한다. 이때, 일반적으로 간극수압 소산곡선은 아래의 식(1)로 정규화된 과잉간극수압을 대수시간에 대하여 나타낸다.

$$U_i = \frac{u(t) - u_o}{u_i - u_o} = \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_i} \quad (1)$$

여기서, U_i 는 정규화된 과잉간극수압, $u(t)$ 는 임의시간 t 에서의 간극수압, u_i 는 $t=0$ 일 때의 초기 간극수압, u_o 는 정수압이다. 계산결과를 다음에 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> 시간에 대한 소산도

<표 3> 압밀계수 산정식

제안자	제안식	비고
Torstensson(1977)	$c = \frac{R^2 \cdot T_{50}}{t_{50}}$	R은 콘의 반지름, t_{50} 는 50% 소산도까지의 간극수압 소산시간, T_{50} 는 시간 t_{50} 에 대한 시간계수, 강성지수 $I_R=100$ 으로 가정
Baligh & Levadox (1980, 1986)	$c_h = \frac{R^2 \cdot T}{t}$	
Teh & Houlsby(1991)	$c_h = \frac{R^2 \cdot T_{50}}{t_{50}} \sqrt{I_R}$	

이상에서 제안된 압밀계수를 추정하는 방법들을 <표 3>에 나타내었다.

<표 4> 50% 소산도에 따른 연구자별 시간계수

연구자	시간계수
Torstensson(1977)	2.9
Levadox & Baligh(1986)	5.6
Teh & Houlsby(1991)	0.245

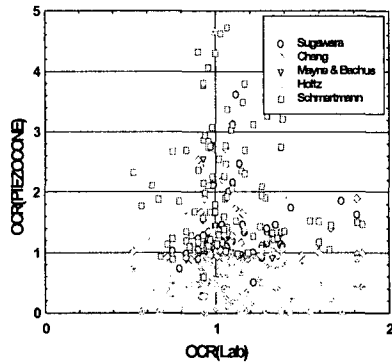
<표 4>를 이용하여 횡방향 압밀계수를 산정하고, 투수계수비를 이용하여 연직방향 압밀계수(c_v)를 추정한다. 이는 다음의 식에서 구해진다.

$$\frac{c_v}{c_h} = \frac{k_v}{k_h} \quad (2)$$

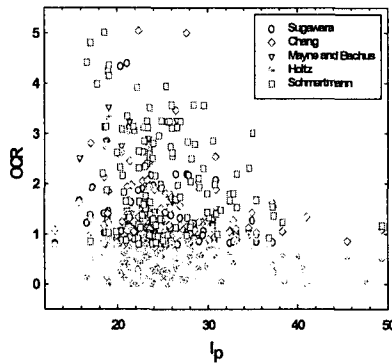
투수계수비는 Jamiolkowski(1985) 등에 의하면 2~5 범위의 값을 갖는데, 여기서는 평균치인 3.5를 적용하여 연직방향 압밀계수를 추정하였다.

3. 연구 및 분석결과

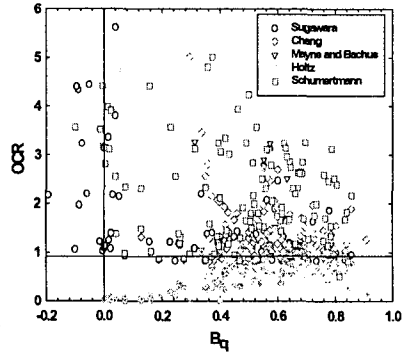
3.1 과압밀비



<그림 4> 과압밀비 비교



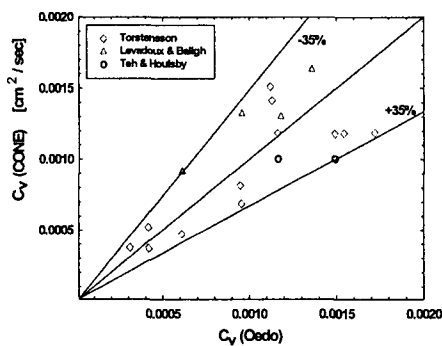
<그림 5> 소성지수와 과압밀비



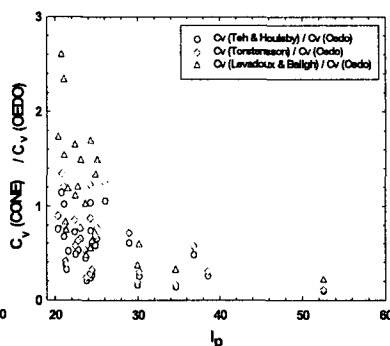
<그림 6> B_q와 과압밀비

<그림 4>는 실내시험으로 구한 과압밀비는 대체로 정규압밀 상태 범주에 있다 다만, 비배수전단강도를 이용한 Schmertmann의 산정식은 과압밀비가 과대평가되는 경향을 보이고 있고 Holtz를 이용한 과압밀비는 과소평가되는 것을 알 수 있다. <그림 5>는 실내시험으로 구한 소성지수가 증가할수록 피에조콘으로 산정한 과압밀비가 대체로 감소하는 경향을 보이고 있으며, <그림 6>은 피에조콘으로 소산시험으로 구한 간극수압계수가 0.5이상일 때 피에조콘으로 선정한 과압밀비와 비교할 때 과압밀비가 1에 수렴하는 경향을 보이고 있으며, 간극수압계수 (B_q)가 증가할수록 과압밀비가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

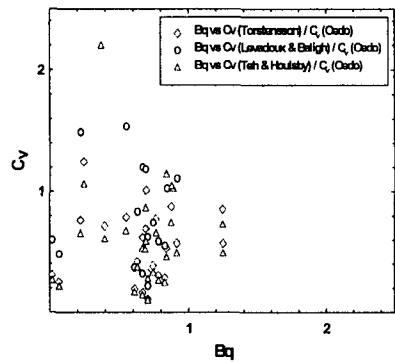
3.2 압밀계수



<그림 7> 압밀계수의 비교



<그림 8> 소성지수와 압밀계수



<그림 9> B_q와 압밀계수

<그림 7>은 오에도미터로 구한 압밀계수와 피에조콘으로부터 구한 압밀계수와와의 오차범위는 35%정도 이고, Teh & Houlsby는 다른 피에조콘으로부터 구한 압밀계수 산정식들 보다 상대적으로 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. <그림 8>은 실내시험에서 구한 소성지수가 증가할수록 압밀계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 소성지수가 낮은 곳에서 피에조콘의 구한 Levadoux & Baligh가 산정식으로 구한 압밀계수는 다른 피에조콘으로 구한 압밀산정식보다 압밀계수가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

4. 결론

낙동강 하구 지역에 퇴적된 점성토에 대해 피에조콘시험과 불교란 시료를 채취한 후 실내시험을 실시하였으며, 이를 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실내시험결과를 이용한 OCR은 대체로 정규압밀상태인 것으로 판단된다. 피에조콘 시험결과로 Holtz는 소성지수의 증가와 상관없이 일정한 과압밀비(OCR)를 보이고 있다. 비배수전단강도를 이용한 Schmertmann의 산정식은 과압밀비가 과대평가 되는 경향을 보이고 있다.
- 2) 실내시험으로 구한 소성지수가 증가할수록 피에조콘으로 산정한 과압밀비가 대체로 Schmertmann은 소성지수가 낮은 곳에는 오에도미터에 비해 과대평가 되고, 피에조콘으로 산정한 다른 이들의 과압밀비는 소성지수가 증가할수록 과압밀비(OCR)가 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다.
- 3) 피에조콘으로 산정한 과압밀비 Holtz가 과소평가 되고, Holtz는 소성지수의 변화와 상관없이 일정한 과압밀비를 나타내며, 간극수압계수(B_q)가 0.5이상일 때 과압밀비가 1에 가깝게 수렴되는 현상을 보이고 있다.
- 4) B_q 값이 0.5보다 작은 경우에, 그 값이 지반의 압밀계수에 따라 변하게 되며, B_q 값이 0.5보다 큰 경우에는 지반의 압밀계수에 대하여 B_q 값이 거의 변하지 않는 것으로 보인다. 이 경우는 압밀계수가 작은 투수성과는 무관하게 나타나므로, 소산시험에서 초기 과잉간극수압을 사용할 수 있으나, 그렇지 않을 경우는 초기 과잉간극수압 자체가 투수계수의 영향으로 저하된다.
- 5) 피에조콘의 측정치로 압밀계수를 산정하는 Torstensson, Levadoux & Bailgh, Teh & Houlsby의 제안식에 의한 결과는 실내압밀시험에서의 압밀계수에 비해 35%의 오차의 범위를 가지는 것으로 나타난다.
- 6) 간극수압(B_q)이 증가할수록 피에조콘의 압밀계수는 감소하는 경향을 보인다
- 7) 저소성 점성토에는 피에조콘을 이용한 압밀계수가 크게 나타나며, 소성지수가 커질수록 압밀계수는 감소하는 경향이 있다.

5. 참고문헌

1. 송정락(2001), "피에조콘 관입시 과잉간극수압을 이용한 투수계수 산정", ISSMGE ATC-7 Symposium, September 13, 2001, Pusan, Korea.
2. 이선재(1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구", 서울대학교 박사학위 논문.
3. 정승욱(2001), 부산대학교, "원위치시험을 이용한 점성토지반의 과압밀비 평가에 관한 연구".
4. 한국지반 공학회 특별강연회집, "PIEZOCONE 시험 결과의 해석 및 활용화 방안".
5. Tom Lunne & Peter K. Robertson & John J.M. Powell, "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice".
6. Chang, M. F.(1991), "Interpretation of Overconsolidation Ratio from In-Suit Test in Recent Clay Deposits in Singapore and Malaysia", Canadian Geotechnical Journal, 28, pp210-225