

현장·실내 시험에 의한 연직 및 수평 압밀계수의 상관관계 분석

Correlation of Vertical and Horizontal Coefficient of Consolidation by Laboratory test and Field Test

구남실¹⁾, Nam-Sil Gu, 이재식¹⁾, Jae-Sik Lee, 윤일형²⁾, Il-Hyung Yoon, 노영목³⁾, Young-Mok Roh

1) 한국토지공사 기술관리처 시험연구실 대리, Korea Land Corporation

2) 한국토지공사 기술관리처 시험연구실 과장, Korea Land Corporation

3) 한국토지공사 기술관리처 시험연구실 실장, Korea Land Corporation

SYNOPSIS : Laboratory and field investigations of the coefficient of vertical and horizontal consolidation for Yangsan clay deposit were carried out using the conventional oedometer, Rowecell and piezocone test. Correlation among these test methods were also studied. In this paper, the relationship between vertical and horizontal consolidation were suggested such as $C_{h(Oed)}=0.75\sim 1.46 C_{v(Oed)}$, $C_{h(Rowecell)}=1.95\sim 2.93 C_{v(Oed)}$, $C_{h(piezocone)}=1.0\sim 5.0 C_{v(Oed)}$. As a result, a fair approximate estimations of C_h can be made by simple test using the conventional oedometer tests.

Key words: coefficient of consolidation, oedometer, Rowecell, piezocone

1. 서론

최근 경제 및 도시의 발달로 인하여 용지의 수요가 확대됨에 따라 공학적으로 입지조건이 불량한 연약지반의 활용이 불가피하다. 이러한 연약지반을 활용하기 위하여 연약지반의 개량으로 프리로딩공법이 많이 사용되고 있으며 배수시간을 단축하고자 연직배수공법이 이용된다. 연직배수공법의 경제적이고 효율적인 설계 및 시공을 위하여는 정확한 압밀계수 산정은 필수적이다. 연약지반을 구성하고 있는 점토광물은 관상구조로 이루어져 있어 수평방향의 투수계수는 연직방향의 투수계수보다 2~9배 정도 큰 것으로 보고되고 있다. 이러한 흙의 투수성으로 인하여 수평방향의 압밀계수는 연직방향의 압밀계수보다 그 값이 크게 나타난다. 일반적으로 압밀계수는 표준압밀시험, Rowecell시험, 피에조콘(CPTU)에 의한 간극수압 소산시험, 현장침하량을 이용한 예측기법 등에 의하여 산정될 수 있다.

본 연구에서는 실내 및 현장시험에 의한 압밀계수의 상관관계를 분석하기 위하여 최대주응력 방향과 최대주응력의 직각방향으로 시료를 성형하여 표준압밀시험을 실시하여 연직압밀계수와 수평압밀계수를 산정하고, 외향방사형으로 배수를 시키면서 자유변형 조건으로 Rowecell시험과 피에조콘조사를 실시하여 수평압밀계수를 산정하여 표준압밀시험의 연직압밀계수와 상관관계를 산정하고자 한다. 연구대상 지역은 양산지역 택지조성공사 현장에 위치한 시험시공부지이고, 시험에 사용된 시료는 시험성토체 주변의 원지반 상태에서 채취한 불교란시료를 이용하였다.

2. 지반개요

조사지역은 30m 정도 깊이의 연약지층이 균일하게 형성되어 있으며, 30m이하에서는 N치 11~13정도의 모래질 실트층이나 모래층이 존재한다. 시험시공 이전의 지반물성은 200번체 통과량이 90%이상으로서 대

부분 세립질로 구성되어 있고 USCS에 준하여 흙을 분류하면 CL, CH로 분류된다. 본 지역의 소성한계는 10~20%, 액성한계는 30~55%의 분포를 보이고 있고 자연함수비는 40~80%의 분포를 보이고 있어 액성한계보다 함수비가 높아 불안정한 상태를 보이고 있다.

그림 1에서 보는 바와 같이 자연함수비, 초기간극비, 압축지수 및 팽창지수는 지표에서부터 심도가 깊어질수록 증가하여 10m 부근에서 최대치를 보이며 이후 그 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 단위중량의 경우 지표에서부터 심도가 깊어질수록 감소하여 10m 부근에서 최소치를 보이며 이후 다시 증가하는 경향을 보인다. 일축압축강도의 경우 5m 부근에서 최소치를 보이며 이후 심도에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.

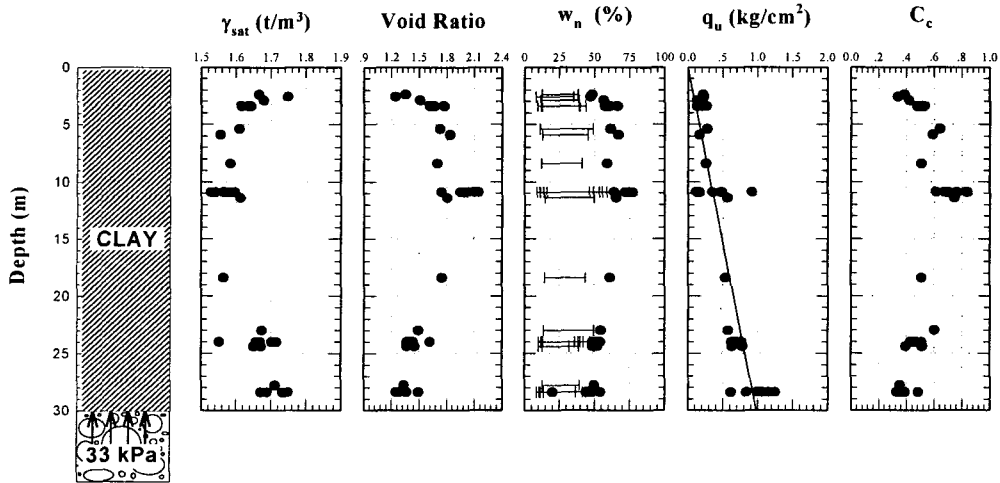


그림 1. 지층구조 및 지반특성

3. 시험방법

3.1 Rowe cell 시험

Rowe cell 시험은 표준압밀시험기를 보완한 장비로서, 자연상태의 조건대로 연직방향, 수평방향 및 드레인 방향으로 배수가 가능하고 셀압과 배압을 이용하여 시료를 포화 또는 압밀시킬 수 있으며 자유변형율과 등변형율조건으로 압밀압력을 자유롭게 조정하여 수평압밀계수 등을 산정한다. 본 지역 Rowe cell 시험의 수평방향 압밀계수는 내경 75mm 시험장비를 사용하여 자유변형(free-strain) 조건에 외향 방사형의 배수 조건으로 압밀시험을 수행하였으며, 수직하중은 0.08~5.12 kg/cm²까지로 $\Delta P/P = 1$ 관계를 유지하였다. 수평압밀계수는 다음과 같이 산정하였다.

$$C_h = \frac{0.131 T_{ro} D^2}{t}$$

여기서, T_{ro} : 시간계수
 D : 시료직경
 t : 과잉간극수압 소산시간

3.2 피에조콘 조사

피에조콘은 CPT 장비에 간극수압을 측정할 수 있도록 트랜스듀서를 부착한 장비로, 콘은 선단각 60°, 콘 단면적 10cm², 주변마찰면적 150cm²이고 초당 2cm의 관입속도로 유지시키면서 연속적이며 자동적으로 시험을 실시하여 콘에서 측정되는 q_c , f_r , u 를 전달받아 비배수전단강도 및 수평압밀계수 등을 산정한다. 본 지역에서 사용한 피에조콘 장비는 화란 Fugro사에서 제작되었으며 cone의 분해능은 10kPa이며 연약지반

조사에 적합하도록 낮은 응력 범위에서 교정되었고 간극수압은 U_2 위치에서 측정하였다. 수평압밀계수 산정 방법은 피에조콘 조사중에 소정의 심도에서 콘 관입을 중지하면 과잉간극수압이 시간의 경과에 따라 소산된다. 이 과잉간극수압의 소산 속도로 수평압밀계수를 산정하며 Houlby와 Teh(1988)가 제안한 수평압밀계수식을 사용하여 산정하였다.

$$C_h = \frac{r^2 \sqrt{I_r} T^*}{t}$$

여기서, T^* : 과잉간극수압 50% 소산시 시간계수(0.245)

I_r : 강성지수(25~500, 25적용)

t : 과잉간극수압 50% 소산시간

r : 콘의 반경

4. 표준압밀시험에 의한 연직 및 수평 압밀계수 산정

본 연구에서는 시험방법에 따른 압밀계수의 상관관계를 구하기 위하여 시료성형 방향을 조절하면서 표준압밀시험을 수행하여 연직 및 수평 압밀계수를 산정하였다. 표준압밀시험에 사용된 시료는 그림 2에서 보는바와 같이 블록샘플러를 이용하여 채취한 블록시료를 이용하였다.

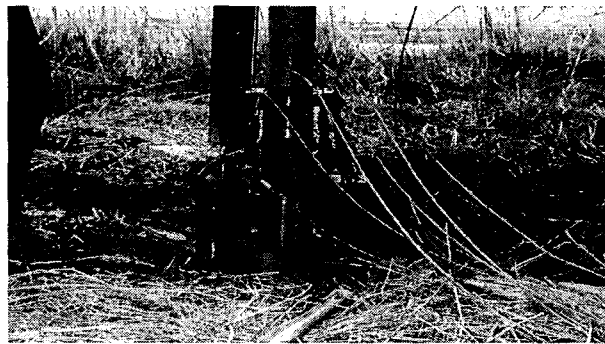


그림 2 블록샘플러

표준압밀시험은 연직압밀계수를 구하기 위하여 최대주응력 방향으로 시료를 성형하였고, 수평압밀계수를 구하기 위하여 최대주응력의 직각방향으로 시료를 성형하여 시험을 실시하였으며 각 하중단계별로 시간-침하량 관계를 산정하였다. 압밀계수 산정은 시험으로부터 산정한 시간-침하량 관계에서 $\log t$ 법을 이용하여 연직압밀계수($C_{v(Oed)}$)와 수평압밀계수($C_{h(Oed)}$)를 산정하였다.

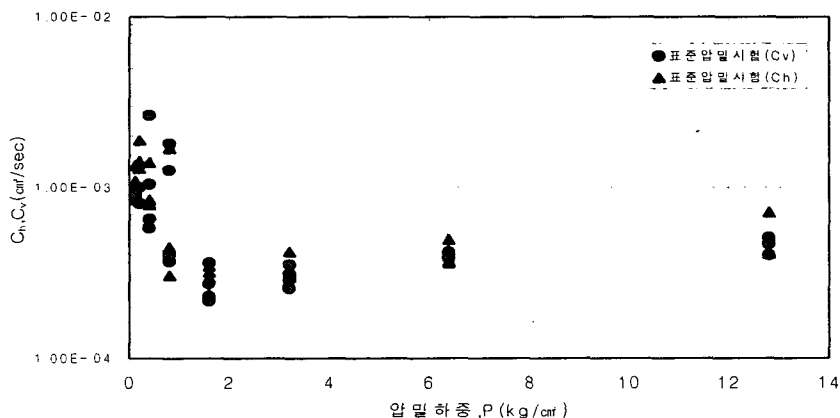


그림 3 표준압밀시험에 의한 연직 및 수평 압밀계수 비교

하중단계별에 따라 표준압밀시험의 연직 및 수평압밀계수는 그림 3과 같은 경향으로 나타났으며 수평 압밀계수($C_{h(Oed)}$)는 $7.2E-04 \sim 1.54E-03$ 의 범위, 연직압밀계수($C_{v(Oed)}$)는 $9.62E-04 \sim 1.24E-03$ 의 범위로 산정되었다. 본 지역의 압밀계수는 압밀하중이 증가함에 따라 선행압밀하중 이전에서 감소하였다가 선행압밀하중 이후에 약간 증가하고 연직압밀계수와 수평압밀계수는 유사한 경향으로 나타났다. 표준압밀시험에 의한 평균 수평압밀계수와 연직압밀계수의 비는 비교적 일정한 크기의 상관관계를 나타냈으며 그림 4와 같다.

$$C_{h(Oed.)} = 0.75 \sim 1.46 C_{v(Oed.)} \quad (1)$$

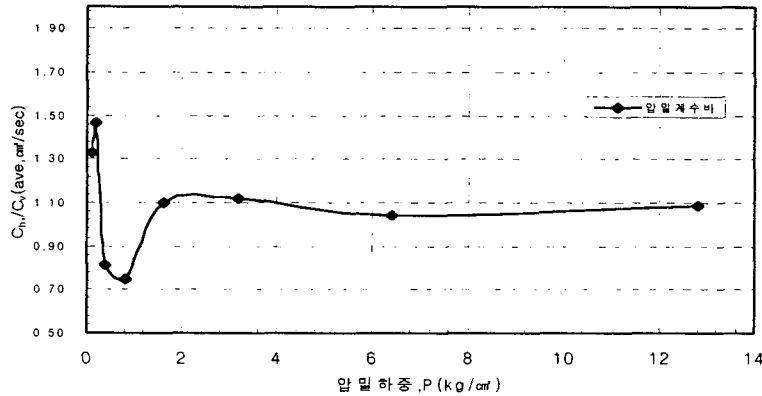


그림 4 표준압밀시험에 의한 평균압밀계수비 (C_h/C_v)

5. 표준압밀시험과 RoweceII시험에 의한 압밀계수 산정

표준압밀시험과 RoweceII시험에 의해 압밀계수를 산정하기 위하여 시험성토체 주변의 무처리영역에서 피스톤 샘플러를 이용하여 채취한 불교란시료를 사용하였다. 표준압밀시험은 수직하중 $0.1 \sim 6.4 \text{ kg/cm}^2$ 까지 압밀시험을 실시하였으며 시험을 통해 산정된 시간-침하량 관계로부터 $\log t$ 방법을 이용해 연직압밀계수를 산정하였다. RoweceII시험에서 압밀계수 산정은 각 하중단계별로 측정된 간극수압 소산 측정자료와 체적변화량 측정자료를 이용하여 압밀계수를 산정하였다.

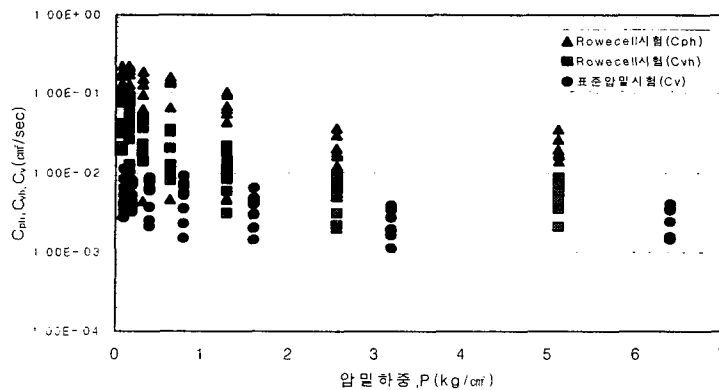


그림 5 표준압밀시험과 RoweceII시험에 의한 연직 및 수평 압밀계수 산정결과

그림 5는 하중단계별 표준압밀시험과 RoweceII에 의한 연직 및 수평 압밀계수에 대한 관계를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 RoweceII시험에서 간극수압 소산자료를 이용하여 구한 수평압밀계수(C_{ph})가 $2.00E-03 \sim 2.31E-01$ 로, RoweceII시험에서 체적변화량을 이용하여 구한 수평압밀계수(C_{vh})는 $2.14E-03 \sim$

1.07E-01로 나타났으며 표준압밀시험에 의해 산정된 연직압밀계수($C_{v(oed)}$)는 1.12E-03~1.12E-02로 Rowe cell 시험보다 작게 나타났다. 또한, 압밀계수는 압밀하중이 증가함에 따라 감소하다 선행압밀하중 근처에서 거의 일정한 크기의 경향으로 나타났다.

표준압밀시험과 Rowe cell 시험 결과를 이용한 상관관계분석은 압밀계수의 응력 의존적 영향을 고려하기 위하여 압밀하중 단계별로 압밀계수비를 산정하였다. 표 1은 표준압밀시험과 Rowe cell 시험의 결과에 대하여 평균 압밀계수비를 나타냈다.

표 1. 상관관계 산정결과

구 분	과압밀영역		정규압밀영역	
	범위	평균	범위	평균
압밀계수비($C_{ph}/C_{v(oed)}$)	14.64~25.04	21.34	6.19~6.8	6.49
압밀계수비($C_{vh}/C_{v(oed)}$)	4.04~9.61	6.5	1.95~2.93	2.36

그림 6와 같이 각 Rowe cell 시험에서의 하중조건을 기준으로 산정한 하중단계별 압밀계수비는 선행압밀 이전의 압밀하중단계에서 분산 폭이 큰 경향을 보이며, 선행압밀하중 이후의 정규압밀영역에서는 압밀계수비가 비교적 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 또한, Rowe cell 시험에서 간극수압 측정자료를 이용해 산정한 압밀계수비는 하중단계별로 평균 6.19~25.04의 범위로 분산 폭이 크며 체적변형 측정자료보다 크게 나타났다. 따라서, 본 연구의 압밀계수비는 표준압밀시험의 연직압밀계수가 변형률 관계에서 산정하였으므로 Rowe cell 시험의 수평압밀계수는 체적변형 측정자료를 이용하여 상관관계를 분석하는 것이 상대적으로 현실성 있는 상관관계를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. Rowe cell 시험에서 체적변형 측정자료에 대한 정규압밀영역의 평균 압밀계수비($C_{vh}/C_{v(oed)}$)는 다음과 같은 분포를 보인다.

$$C_{h(Rowe cell)} = 1.95 \sim 2.93 C_{v(Oed.)} \quad (2)$$

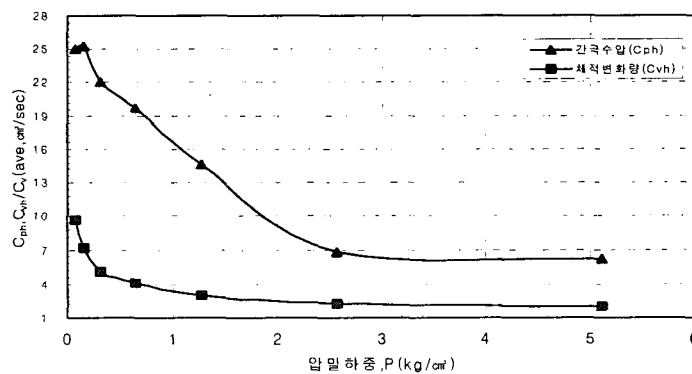


그림 6 표준압밀시험과 Rowe cell 시험에 의한 평균압밀계수비 (C_h/C_v)

6. 표준압밀시험과 피에조콘조사에 의한 연직 및 수평압밀계수 산정

현장 Piezocone 소산시험과 실내 표준압밀시험을 동일한 위치 및 심도에서 실시하여 연직 및 수평압밀계수를 구하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 여기서, 표준압밀시험은 유효상재하중에 해당하는 압밀계수를 사용하였으며 이 결과 수평압밀계수는 연직압밀계수보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. Piezocone 소산시험에 의한 수평압밀계수와 표준압밀시험에 의한 연직압밀계수는 다음과 같은 상관관계를 보이고 있었다.

$$C_{h(\text{Piezo})} = 1.0 \sim 5.0 C_{v(\text{Oed})} \quad (3)$$

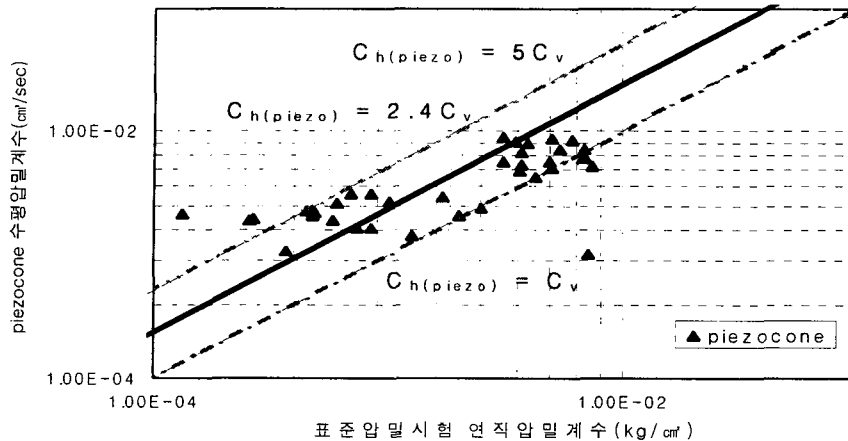


그림 7. $C_{v(\text{Oed})}$ - $C_{h(\text{Piezo})}$ 의 상관관계

7. 결론

실내 및 현장시험을 통하여 산정된 연직압밀계수와 수평압밀계수의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험시공지구에 존재하고 있는 점토지반의 이방성을 분석하기 위하여 최대주응력 방향과 최대주응력 방향의 직각방향으로 시료를 성형하여 표준압밀시험을 실시한 결과, 압밀계수비(C_h/C_v)의 경우 과압밀 영역에서는 압밀하중에 따라 0.75~1.46의 분포를, 정규압밀영역에서는 1.04~1.12의 분포를 보인다.
- 2) 표준압밀시험의 연직압밀계수가 변형률 관계에서 산정하였으므로 Rowcell시험의 수평압밀계수는 체적 변형 측정자료를 이용하여 상관관계를 분석하는 것이 적절하다고 판단된다. 과압밀영역에서는 압밀계수비(C_h/C_v)의 분산이 심하게 나타났고, 정규압밀영역에서는 비교적 일정한 비율의 압밀계수비(C_h/C_v)를 보이는 것으로 나타났다. 그 결과 정규압밀영역에서는 하중단계에 따라 평균 압밀계수비(C_h/C_v)는 1.95~2.93의 분포를 보인다.
- 3) 표준압밀시험과 피에조콘 조사를 비교한 결과 압밀계수는 대부분 $C_{h(\text{piezo})} = 1.0 \sim 5.0 C_{v(\text{oed})}$ 의 범위로 나타났으며 극단 데이터를 제외하면 평균 압밀계수는 $C_{h(\text{piezo})} = 2.4 C_{v(\text{oed})}$ 의 관계로 나타났다.
- 4) 표준압밀시험에 의해 수평압밀계수를 구하는 것은 시험시 시료의 최대주응력 작용방향의 변화 및 점토의 구조변화 등으로 인해 신뢰성있는 수평압밀계수를 산정하기 어렵기 때문에 Rowcell시험이나 피에조콘조사에 의해 수평압밀계수를 구하는 것이 바람직한 것으로 사료되나 이 분야에 대하여 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 한국토지공사(1997), "양산물금지구 시험시공연구공사 사전지반조사 보고서"
2. 한국토지공사(1997), "양산물금지구 시험시공연구공사 확인단계 Piezocone 관입시험 보고서"
3. 한국토지공사(1998), "양산물금지구 시험시공연구공사 확인지반조사 보고서"
4. Head, H. K.(1986), "Manual of soil laboratory testing", ELE Int. Limited.
5. Lee, P. K. K., Lam, Y. M. and Lock, Y. B.(1996), " Approximate estimation of horizontal consolidation characteristic of soft marine clay ", 2nd int. conf. on soil eng. Nanjing, pp. 151-156.
6. Tom Lunne, Peter K. Robertson, John. M. Powell(1997), " Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice"