

국내해성점토의 수평압밀계수 특성

Characteristics of Coefficient of Consolidation in Horizontal Direction of Korean Marine clays

전 상 현^{*} 김 창 섭^{**} 유 남 재^{***}
Jun, Sang-Hyun Kim, Chang-Seop Yoo, Nam-Jae

Abstract

Reports about coefficients of consolidation in horizontal direction of marine clays located at seven different sites on western and southern coast area in Korea were reviewed and characteristics of them were investigated. As results of analyses, for relation between the depth of ground and coefficients, any trend and correlation between them can not be found since they are more influenced by the nature of geological formation rather than the depth of ground. Dissipation time t_{50} , one of important factors in estimating value of coefficient of consolidation in horizontal direction, was found to be quite related to them. For the correlation between the maximum pore pressure developed and coefficients, coefficient of consolidation in the horizontal direction tend to decrease with increase of the maximum pore pressure whereas the ground water level or static pore pressure do not have any specific correlation with those coefficients.

Values of coefficient tends to increase with values of liquid limit, plastic limit and plastic index and thus they are found to be directly influenced by the contents of fines. Values of coefficient of consolidation in horizontal direction are also increased with increases of permeability in horizontal direction and coefficient of consolidation in vertical direction. They were highly correlated between coefficient of consolidation and permeability in horizontal direction while values of coefficient of consolidation in horizontal direction have a relatively low correlation with values of coefficient of consolidation in horizontal direction. Sometimes, coefficient of consolidation in horizontal direction obtained from field tests were estimated 2-3 times greater than those from laboratory tests.

키워드 : 수평압밀계수, 국내해성점토, 영향인자

Keywords : *coefficient of consolidation in horizontal direction, Korean marine clays, influencing factors*

1. 서론

* 세경대학 건설환경과 전임강사

** (주)에드백트 설계팀 사원

*** 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

연약지반 개량공법 중 연직배수 공법은 배수거리 단축에 의한 압밀속도 증가로 압밀시간을 단축하여 공사기간을 줄일 수 있는 매우 효율적인 공법이다. 이러한 공법에서 가장 중요한 인자는 수평방향의 배수거동을 결정하는 수평압밀계수이다. 수평압밀계수는 투수계수, 체적변화율에 따라 결정되

며 그들 영향인자에 따라 다양한 범위로 값들이 변화할 수 있다.

다양한 연약점토의 기본물성이나 특성에 따라서 수평압밀계수의 변화에 대하여 자료조사를 실시하고 결과를 분석함으로써 연직배수공법 설계시 기본 자료로 활용할 수 있다.

본 논문에서는 기존에 발표된 논문과 서남해안 7구역의 지반조사 보고서를 토대로 현장시험결과 및 실내실험 결과를 분석하여 국내해성점토의 수평압밀계수에 영향을 주는 인자에 대해 상관관계를 연구하므로써 그의 특성을 조사하였다.

2. 조사지역 및 실험방법

2.1 조사지역

본 연구를 위하여 그림 1~5에 나타난 바와 같이 시화 MTV5공구(S5), 시화 MTV1공구(S1), 청라지구(CL), 부산신항남컨(BS), 마산항(MS), 부산신항 배후철도 4공구(B4), 광양항 배후부지(GB)등 7구역의 연약해성점토 지반에 대하여 수행한 지반조사보고서를 토대로 현장의 Piezocone 시험 또는 실내 수평압밀시험 등에 의해 산정된 수평압밀계수의 특성에 대해 조사했다.

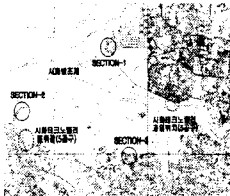


그림 1. 시화MTV5 공구지역 조사위치도(S5)

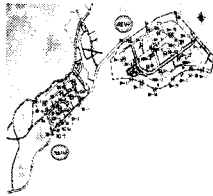


그림 2. 마산항지역 조사위치도(MS)

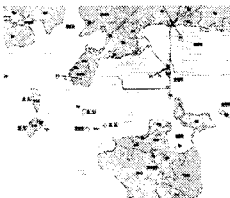


그림 3. 부산신항남컨 조사위치도(BS)

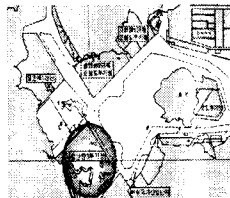


그림 4. 광양항 배후부지(GB)

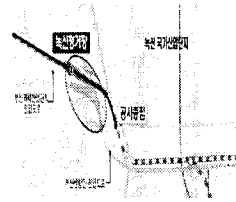


그림 5. 부산신항배후철도 4공구 조사 위치도

2.2 현장실험방법

1) 피에조콘 관입시험

피에조콘 관입시험(Piezocene Penetration Test, CPTu)은 지반 내부에 원추형 관입체를 관입 후 특정깊이에서 콘의 관입을 멈춘 후 간극수압의 소산을 측정함으로써 수평압밀계수를 산정하는 방법이다.

피에조 콘 시험의 수평압밀계수 산정방법으로 Tortensson[1]은 지반을 등방응력 분포로 가정, 탄-소성재료에 발생하는 1차원 비배수 공동(구형,원통형) 팽창을 고려 후 초기 간극수압 가정 후 Terzaghi-Rendulic의 선형-비선형 압밀이론을 유한차분법으로 소산과정을 모사한 방법으로 압밀계수를 추정할 것을 제안하였다.

Baligh and Levadoux은 강성지수(I_R)가 500인 Boston Blue Clay를 대상으로 제안되었으며 변형률 경로법(Strain Path Method)을 이용해 초기 과잉간극수압 분포를 추정하여 이차원 압밀이론을 이용한 유한 요소해석을 통하여 압밀계수 산정법을 제안하였다.[2,3]

Teh and Houlsby[4]는 대변형 유한요소법을 사용하여 해석하여 유한차분법을 이용해 간극수압 소산과정을 해석한 후 2차원 압밀이론을 사용하여 강성지수와 시간계수를 구별할 수 있는 식을 제안하여 수평방향 압밀계수 결정방법을 제안했다.

2) 딜라토메터(DMT) 시험

DMT의 특성은 CPTu와 유사하며, Cone 대신 Blade를 이용하여 가스압에 의한 팽창과 수축에 의한 압력변형에 의해 제반지수 등의 상호관계를 파악할 수 있으며 흙의 분류(단위중량), 점성토의 비배수전단강도, 응력이력(과압밀비), 수평압밀계수의 토질정수를 산정할 수 있으며 수평압밀계수의 경우 DMT-C법(p_2 -logt법, $C = \sqrt{t}$ 법) 과 DMT-A법을 이용하여 수평압밀계수를 추정할 수 있다. 멤브레인에 공기압을 가하여 0.05mm 팽창시 A값, 1.1mm팽창시 B값, 공기를 감소시켜 멤브레인의 팽창두께가 다시 0.05mm로 감소될 경우의 압력을 C값이라 한다.

2.3 실내실험방법

1) Rowe-Cell 시험기

Rowe-Cell 시험장치는 자유변형률 실험을 할 수 없는 표준압밀(Oedometer)시험기의 단점을 보완하기 위하여 개발된 압밀시험기로서 수압을 이용해 다이어프램을 통한 압밀하중 재하로 미세한 하중제어가 가능하고 밀폐된 압밀링의 사용으로 배압의 조절이 가능하다. 재하판을 강성재 또는 연성재 사용 여부에 따라서 등변형률(Equal Strain) 방식과 자유변형률(Free Strain) 방식으로 하중제어가 가능하고 배수조건에 따라 외향(Outward)방사배수, 내향(Inward)방사배수, 수직배수 조건으로 시험이 가능하며 직경이 큰 공시체에 대해서도 압밀시험을 수행할 수 있다. 그리고 간극수압을 측정을 통해 압밀도를 산정할 수 있으며 투수시험도 수행할 수 있으며 연속하중을 가할 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 다양한 실험조건으로 정확한 압밀정수를 측정할 수 있는 장비이다.

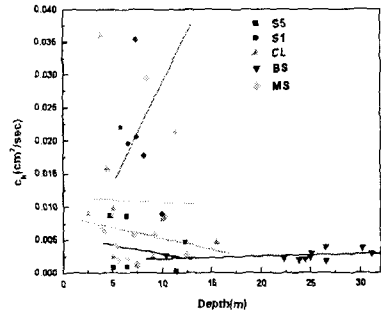


그림 6. 수평압밀계수(c_h)와 깊이의 관계 그래프

연관성이 없게 산정되었으며 수평압밀계수 평균값은 CPTu의 경우 $2.42 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$, DMT의 경우 $3.45 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 산정되어 DMT에 의한 수평압밀계수가 다소 크게 1.42배 정도 크게 산정되었다.

3. 현장실험의 자료분석

3.1 수평압밀계수와 깊이의 상관성

그림 8은 깊이-수평압밀계수에 대한 그래프로써 상관계수(R^2)는 S5의 경우 0.048, S1은 0.146, CL은 0.071, BS는 0.082, MS는 0으로 산정되어 깊이에 따라 수평압밀계수의 큰 영향을 없는 것으로 나타났으며 S1의 조사지역을 제외하고는 대체적으로 깊이가 증가할수록 수평압밀계수는 작은 크기로 감소하는 경향을 나타냈다. S1의 12.5m 지점과 MS의 4m와 7.5m 지점에서 상대적으로 빠른 배수가 진행됨을 알 수 있다. 이상의 정황을 종합할 때 S1 12.5m 지점은 부분적으로 실트 또는 모래질 Seam이 존재할 가능성이 큰 것으로 판단되며 완전 비배수 조건이 아닌 것으로 나타났다. MS의 경우 지표면으로부터 암회색-흑색 실트질 점토층 대부분으로 나타났다. S5, S1, CL, BS, MS의 강성지수(I_p)는 각각 42, 50, 15.3, 50, 100이며 시간계수(T_v)는 3.4, 3.4, 0.245, 0.245, 0.245이다. S1과 MS의 경우가 강성지수(I_p)와 시간계수(T_v)가 다른 지역에 비해 대체적으로 커서 수평압밀계수(c_h)가 깊이에 비해 크게 산정된 것으로 파악된다.

3.2 CPTu(피에조콘)와 DMT(딜라토미터) 실험 결과 비교분석

시화 MTV 1구역의 깊이의 변화에 따른 수평압밀계수 산정값을 피에조콘(CPTu)와 DMT(딜라토미터)의 두 가지의 현장실험 장비를 이용하여 그림 9와 같이 비교해 보았다. 상관계수(R^2)는 CPTu 시험의 경우 위와 같이 0.146으로 산정되었으며 DMT의 경우 0.002로 산정되어 CPTu와 DMT시험기 모두 깊이와 수평압밀계수와의 깊은

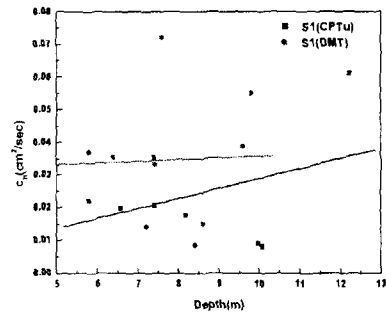


그림 7. 시화 MTV 1공구지역의 깊이의 변화에 따른 CPTu와 DMT로 산정된 수평압밀계수 값 비교

3.3 수평압밀계수에 대한 강성지수의 영향

시화 MTV 1공구(S1)의 경우 강성지수 (I_p)의 변화양상에 따라 압밀도 50%에 해당하는 시간계수(T_v)를 그림 8과 같이 이론적 과잉간극수압 소산곡선을 이용하여 산정할 수 있다.

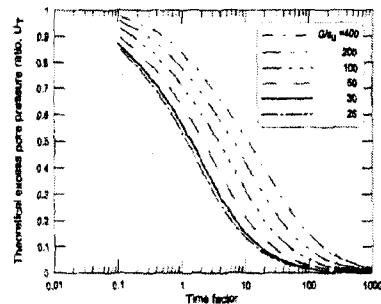


그림 8. 강성지수 I_p 의 변화에 의한 이론적 과잉간극수압 소산곡선

같은 깊이의 조건에서 시간계수(T_v)와 강성지수(I_r)가 증가할 경우 수평압밀계수의 변화 양상에 대해 알아보았다. 수평압밀계수 산정방법은 Battaglio[5]의 A계수(A_f)와 강성비($I_R=G/S_v$)를 Stiffness Ratio의 변화에 따른 이론적 간극수압 소산곡선으로부터 가정하여 식 (1)과 같이 산정되었으며 재압축비와 압축비의 비를 이용하여 식 (2)의 방법으로 수정되었으며 RR/CR은 0.15로 산정되었다.

$$c_h = \frac{R^2 \cdot T}{t} \quad (1)$$

여기서, T : 이론적 시간계수,
R : 콘의 반경,
t : $\Delta u(t)/\Delta u$ 의 주어진 소산율에 소요되는 시간

$$c_h^* = \frac{RR}{CR} \times c_h \quad (2)$$

여기서, RR : Recompression Ratio = $C_v/(1+e_v)$,
CR : Compression Ratio = $C_c/(1+e_0)$.

수평압밀계수와 깊이와의 상관관계(R^2)는 시간계수(T_v)와 강성지수(I_r)를 변화시켰을 경우 3가지의 경우 모두 0.15정도로 매우 작게 산정되었으며 시간계수(T_v)와 강성지수(I_r)가 증가함에 따라 수평압밀계수가 크게 산정되는 경향을 그림 11을 통해 확인 할 수 있다.

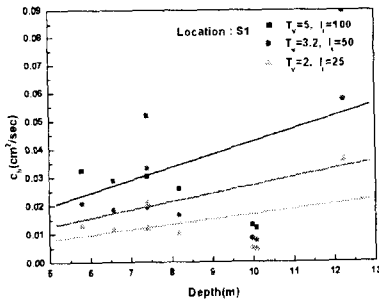


그림 9. 시간계수(T_v), 강성지수(I_r)의 조건을 달리 할 경우의 깊이 변화에 의한 수평압밀계수 변화양상

지반의 비배수 전단탄성계수(G)와 비배수 전단강도(S_v)의 비로 나타내는 강성지수(I_r)는 공동확장이론, 변형률 경로이용, 압밀계수, 비배수 전단강도 해석등 다양한 분야에 적용되고 있으며 그림 10는 수평압밀계수(c_h)와 강성지수(I_r)의 연관성을 나타낸 그래프이다. 강성지수(I_r)가 높아질수록 수평압밀계수가 증가하는 경향을 확인할 수 있으며

같은 강성지수에 대해 CP(19-2)구간의 수평압밀계수가 다른 구간의 수평압밀계수보다 크게 산정된 경향이 나타났으며 조사결과 실트질과 모래질 흙의 비율이 높은 것으로 파악되었다.

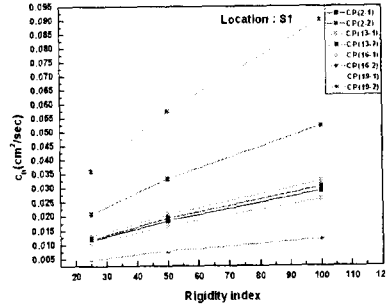


그림 10. 수평압밀계수(c_h)와 강성지수(I_r)의 관계

3.4 수평압밀계수와 간극수압 소산시간(t_{50})의 관계

Robertson 등[6]은 연약지반의 압밀특성을 규명하기 위해 피에조 콘 소산시험과 실내에서의 표준압밀시험 결과를 바탕으로 간극수압증정요소의 위치에 따른 수평압밀계수와 t_{50} 의 관계를 제안하였으며 그 결과, t_{50} 이 클수록 수평압밀계수는 감소하며 회귀분석을 통해 관계식을 제안하였으며 그림 13을 통해 상관관계(R^2)는 S5의 경우 0.149, S1의 경우 0.643, CL은 0.403, BS는 0.948, MS는 0.526으로 산정되어 R^2 는 0.4~0.7범위에 속하면 상당히 관계가 있다고 간주되므로 수평압밀계수와 시간 t_{50} 은 밀접한 관련이 있다고 판단된다.

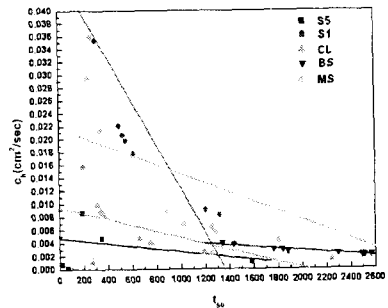


그림 11. 수평압밀계수- t_{50} 관계

그림 12~15은 소산도 50%를 선정 후 기존의 제안된 이론해와 비교·분석하였다. 부산신항남편(BS)의 시간계수는 0.245, 강성지수는 50으로 산정하였으며 마산항(MS)의 경우 시간계수는 0.245, 강성지수는 100으로 산정한 후 비교해 보았다. Torsetensson가 가장 크게 산정되었으며 Houlsby

and Teh, Teh 순으로 수평압밀계수 크기가 산정되었으며 그림 8과 마찬가지로 수평압밀계수와 깊이에 대한 상관도는 거의 없는 것으로 나타났으나 수평압밀계수와 시간에 대한 상관계수(R2)를 비교하면 부산신항남컨(BS)의 경우 Torsetensson은 0.963, Houlsby and Teh는 0.962, Teh는 0.846으로 산정되었고 마산항(MS)의 경우 Torsetensson은 0.99, Houlsby and Teh는 0.99, Teh는 0.74로 나타났다. 마산항의 경우가 부산신항남컨 보다 신뢰성이 더 높게 산정되었고 깊이에 의한 수평압밀계수 비교분석에 비해 높은 신뢰도를 나타냈다. 특히 Torstenson[1]의 원통형 해석법과 Houlsby and The[4]방법에 의한 압밀계수 값들이 매우 유사하게 산정되어 기존의 논문들과 유사한 경향을 나타냈다.

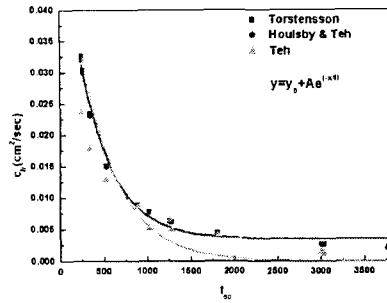


그림 15. 마산항(c_h -시간)관계

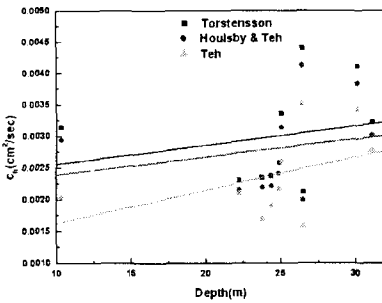


그림 12. 부산신항남컨(c_h -깊이)관계

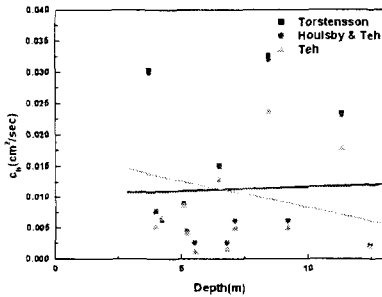


그림 13. 마산항(c_h -깊이)관계

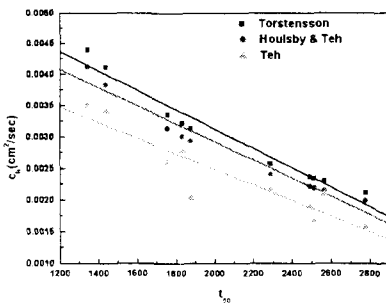


그림 14. 부산신항남컨(c_h -시간)관계

3.5 수평압밀계수에 대한 간극수압의 영향

그림 16의 최종간극수압과 수평압밀계수의 관계에서는 최종간극수압이 증가하며 수평압밀계수는 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이는 비배수 전단강도의 증가에 주로 영향을 받기 때문에 판단된다. 피에조 콘과 같이 관입 후 일시적으로 관입을 중지한 후 과잉간극수압을 소산시켜 압밀계수를 추정함으로써 시험 당시 지점의 지반의 배수 조건을 완벽히 파악하는 것은 불가능하다. Baligh and Levadoux[3]를 통해 최초의 과잉간극수압 크기와 분포는 소산과정에도 많은 영향을 주며 이러한 조건에서 기존의 이론해에서 제시된 방법을 따라 50%의 특정 소산도에서 산정된 수평압밀계수는 실제현장의 수평압밀계수와 매우 다르게 나타날 수 있다고 하였다. 관측 소산곡선과 이론적 소산곡선이 해석전에 선행되어야 하며 초기 간극수압의 분포가 다를 시 이론해로부터 추정된 압밀계수가 실제와 다를 수 있으며 관측된 소산곡선의 형태와 이론곡선의 형상이 다르지 않은지 해석에 앞서 확인하는 작업이 필요하다.

현장의 정수압(u_0)은 콘 관입 이전과 콘 관입 후 간극수압이 모두 소산된 수압상태를 말하며 식 (3)에서 제시한 것처럼 압밀도를 산정하는데 매우 중요한 값이다. 하지만 지반의 투수성에 따라 예상치 못한 많은 시간이 소요될 수 있기 때문에 시추공을 통한 정수압으로부터 u_0 를 구하는 경향이 있다. 그러나 시추공의 지하수위 측정은 오차 및 많은 소요시간과 대상 지층내의 피압대수층 존재시 정확하게 산정하기는 어렵다. 이와 같이 피압대수층이 존재할 경우 과잉간극수압이 완전히 소산될 때까지 시간을 두고 u_0 를 결정해야 하며 최대간극수압이 클수록 수평압밀계수가 작게 산정되는 경향을 확인할 수 있었으며 수평압밀계수와 지하수위 또는 정수위와는 큰 연관성이 없는 것으로 나타났다.

$$u^* = 1 - U = \frac{\Delta u}{\Delta u_i} = \frac{u - u_0}{u_i - u_0} \quad (3)$$

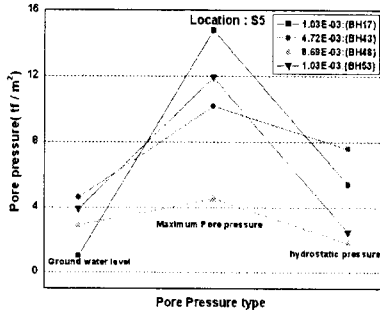


그림 16. 간극수압종류(지하수위, 최대간극수압, 정수압)의 크기변화

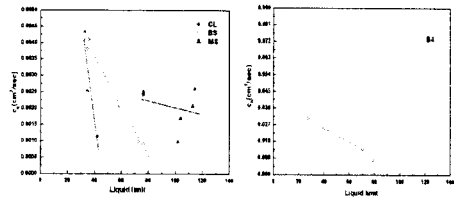


그림 17. 실내에서 산정된 수평압밀계수와 액성한계(LL)의 상관관계

계수가 감소하는 경향을 보이고 있으며 이는 점토의 함유율이 높을수록 수평압밀계수가 감소하고 있음을 간접적으로 확인할 수 있으나 그의 연관성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

4. 실내실험 자료분석

4.1 기본물성치의 상관관계

Rowe-Cell 압밀시험과 더불어 물성시험을 실시하였으며 흙의 고유의 물성치와 수평압밀시험의 연관성을 비교 분석하였다. 실내실험(Rowe-Cell)으로 산정된 수평압밀계수(c_h)와 액성한계(LL)의 관계 그래프를 그림 19와 같이 나타냈다. 각 조사 지역끼리의 액성한계 범위와 수평압밀계수의 범위가 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있으며 청라지구(CL), 부산신항남권(BS), 마산항(MS), 부산신항 배후철도4공구(B4)의 경우 모두 액성한계가 증가함에 따라 수평압밀계수는 감소하는 경향을 나타내고 있으며 상관계수는 CL은 0.872, BS의 경우 0.986, MS는 0.077, B4는 0.179로 청라지구(CL)와 부산신항남권(BS)의 경우는 높게 산정되었지만 마산항(MS)와 부산신항 배후철도4공구(B4)의 경우는 낮게 산정되어 언제나 상관계수가 높게 산정되는 것은 아님을 확인할 수 있었다. 평균적인 경향으로는 액성한계가 증가할수록 수평압밀계수는 감소하는 경향으로 나타났다.

이러한 경향은 액성한계는 세립질 함유율이 증가할수록 증가하는 경향이 있으며 두수계수의 감소경향은 수평압밀계수의 감소로 직접적인 영향이 있는 것으로 판단된다.

소성한계는 부산신항남권(BS)의 경우 상관계수(R^2)는 0.587, 부산신항 배후철도 4공구의 경우 0.323으로 산정되어 비교적 낮은 연관성을 나타냈으며 청라지구(CL)와 마산항(MS)의 경우 상관계수가 상당히 낮게 산정되어 부산신항남권(BS)의 회귀분석 신뢰도를 바탕으로 소성한계가 증가함에 따라 수평압밀계수가 감소함을 확인할 수 있다. 전반적인 경향에서 소성한계가 증가할수록 수평압밀

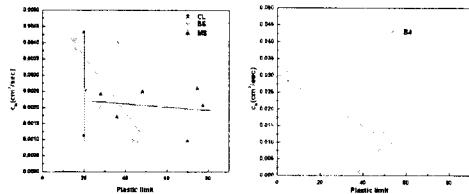


그림 18. 수평압밀계수와 소성한계의 상관관계

청라지구(CL)와 부산신항남권(BS)의 경우 소성지수가 증가할수록 수평압밀계수가 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며 마산항(MS)의 경우 수평압밀계수는 일정한데 비해 소성지수는 작은 기울기로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 부산신항 배후철도4공구(B4)의 경우 다른 지구와 다르게 수평압밀계수가 크게 산정되어 별도로 그래프를 작도하였고 부산신항 배후철도 4공구(B4)도 소성지수가 증가함에 따라 수평압밀계수(c_h)가 감소하는 경향을 나타냈다.

청라지구(CL)의 상관계수(R^2)는 0.8, 부산신항남권(BS)의 상관계수(R^2)는 0.608, 마산항(MS)는 0.002, 부산신항 배후철도4공구(B4)는 0.214로 산정되어 상관계수의 신뢰성이 높은 지역과 낮은 지역으로 구분되어 일정한 경향을 나타내지는 않지만 선형적 회귀분석에서 나타난 결과, 모든 구역에서 (-)의 경향을 나타내고 있으므로 소성지수의 증가에 따라 수평압밀계수가 감소하는 경향이 옳다고 판단된다.

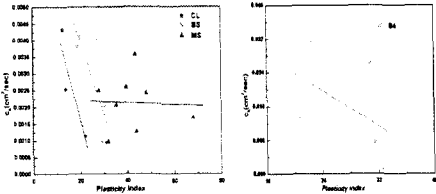


그림 19. 수평압밀계수와 소성지수의 상관관계

그림 20은 흙의 분류에 따른 수평압밀계수의 영향을 나타낸 그래프이다. 저소성 점토나 고소성 점토에 따라 수평압밀계수에 대한 차이는 크게 없으며 같은 종류의 흙에 대해서도 차이가 크므로 직접적인 관련성은 없는 것으로 판단된다. 그림 24에는 나타나 있지 않지만 그림 8과 같이 점토질 흙과의 구분이 아닌 실트질 이나 모래질 흙이 많이 포함되어 있는 경우 수평압밀계수가 급격히 증가할 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다, 따라서 수평압밀계수는 투수계수, k 와 압축계수, m_v 에 직접적인 영향을 받기 때문에 흙의 분류상 CH가 CL보다 수평압밀계수가 작을 가능성은 있을 수 있으나 경향성을 나타낼 수는 없음을 확인할 수 있었다.

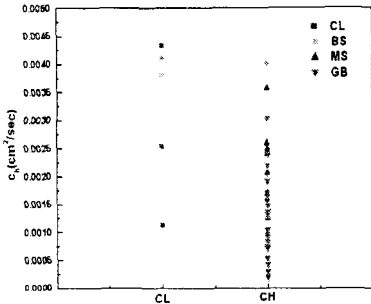


그림 20. 흙의 분류에 따른 수평압밀계수의 영향

4.2 투수성관련 정수와의 상관관계

로우셀시험의 수평압밀계수와 수평투수계수의 관계는 그림 23과 같이 수평압밀계수가 증가할수록 수평투수계수가 증가하는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 상관계수는 마산항(MS)의 경우 0.826, 광양항 배후부지(GB)의 경우 0.466으로 나타나 양호한 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

4.3 연직압밀계수와 수평압밀계수의 상관성

그림 22와 같이 수평압밀계수가 연직압밀계수보다 크게 측정되었으며 이는 퇴적 점성토 사이의 실트질 지반과 샌드심의 층상화 및 해성점토의 구조적 이방성으로 인해 토립자의 재배열과 지층상

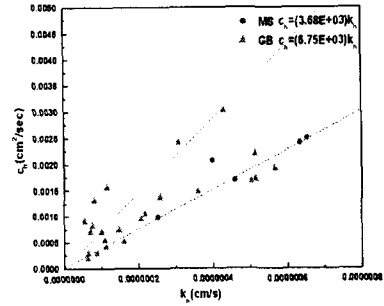


그림 21. 수평압밀계수와 수평투수계수의 상관관계 그래프

태, 시험방법 및 이론해에 따라 차이가 있는 것으로 판단된다. 마산 해양신도시 건설공사(MS)의 경우 1.5배, 광양항 배후부지의 경우 1.83배 평균적으로 크게 산정되었으며 상관계수(R2)은 마산항(MS)은 0.41, 광양항 배후부지(GB)의 경우 0.16로 산정되어 기존의 문헌(박용원 등[8],[9])과 같이 상관관계는 낮게 산정되었다.

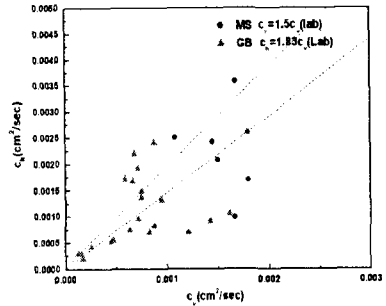


그림 22. 수평압밀계수와 연직압밀계수의 상관관계

4.4 실내실험방법과 현장시험방법의 상관성

국내 연약지반의 일반적인 수평압밀계수의 범위 ($10^2 \text{ cm}^2/\text{sec} \sim 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$)에 해당하는 현장수평압밀계수가 그림 25와 같이 산정되었다. 현장수평압밀계수는 실내실험(Rowe-Cell)시험에 의하여 산정된 수평압밀계수와 비교하였다. 실린더형 공동확장에 근거한 이론해(Torstensson[1])와 비교시 부산신항남컨(BS)의 경우 2.49배, 마산항(MS)과는 3.14배나 크게 산정되었으며 Hously and Teh의 변형을 경로법에 근거하여 강성지수를 고려한 이론해와 비교 시 부산신항남컨(BS)의 경우 2.33배, 마산항(MS)의 경우 3.1배 크게 산정되었다. Torstensson[1]과 Hously and Teh의 제안이 실내실험결과와 유사하다는 기존의 논문과 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었으나 앞으로 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다. Teh의 경우, 현

장수평압밀계수가 실내수평압밀계수보다 부산신항남컨(BS)의 경우 2.47배, 마산항(MS)의 경우 2.99배 크게 산정되었으며 실내시험의 수평압밀계수가 현장시험에 의한 수평압밀계수보다 작은 이유는 실내시험시 예상치 못한 교란이 큰 원인으로 파악되며 부산신항남컨(BS)의 경우 상관계수는 Torstensson[1]는 0.59, Houlsby and The[9]는 0.59, The[10]는 0.5로 산정되었으며 마산항(MS)의 경우 Torstensson[1]는 0.48, Houlsby and The[9]는 0.48, The[10]는 0.021로 산정되어 마산항(MS)의 The[10]에 의한 방식에 의한 상관계수를 제외하고 현장시험에 의한 수평압밀계수와 실내시험에 의한 수평압밀계수는 상당한 관계가 있다고 판단된다. 자료분석결과 기존의 문헌(장인성 등, [11])에서의 c_h/c_v 의 비보다 2배정도 크게 산정되어 더 많은 실험 데이터와 조사가 필요할 것으로 사료된다.

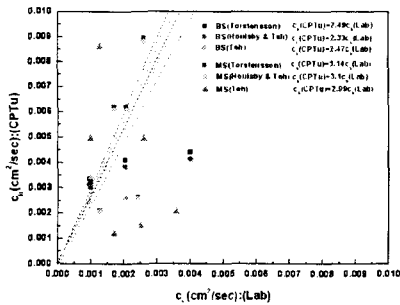


그림 23. 현장(CPTu)과 실내실험(Rowe Cell)에서 산정된 수평압밀계수 결과 비교

5. 결론

서남해안 연약점토 지반의 현장조사에 대한 관련 자료의 수집과 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수평압밀계수와 지반심도는 상관관계를 얻을 수 없었으며 지반의 형성 특성이 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- 2) 현장 피에조 콘 시험의 수평압밀계수 산정시 중요한 요소인 소산시간 t_{50} (압밀도 50%)은 수평압밀계수와 상당히 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었으며 t_{50} 이 증가할수록 수평압밀계수는 감소하는 경향을 확인하였다.
- 3) 수평압밀계수와 최대과잉간극수압의 상관관계에서 최대과잉간극수압이 클수록 수평압밀계수가 큰 경향을 확인할 수 있었으며 이는 최대과잉간극

수압이 클수록 압밀도 50%에 도달하는 시간이 길어지기 때문에 판단된다.

4) 실내시험을 통한 수평압밀계수와 연경도와와의 상관관계에 대하여 (액성한계, 소성한계, 소성지수) 액성한계, 소성한계, 소성지수가 증가할수록 수평압밀계수는 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이는 점토함유율이 많을수록 수평압밀계수는 증가한다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

5) 통일분류법(USCS)에서 고소성점토, 혹은 저소성점토에 의한 수평압밀계수 차이보다는 점토 혹은 실트나 모래질에 의한 수평압밀계수 차이가 훨씬 큰 것으로 나타났다.

6) 투수성관련 정수와의 관계에서 수평투수계수가 증가할수록 수평압밀계수가 증가하는 일반적인 경향으로 나타났다.

7) 수평압밀계수는 연직압밀계수의 증가에 따라 증가하는 경향이 있으며 수평압밀계수가 1.5~1.9 배 정도 큰 값을 나타내고 있다.

8) 현장시험방법에 의해 산정된 수평압밀계수와 실내시험방법에 의해 산정된 수평압밀계수의 비교 분석결과, 현장시험의 경우가 대체적으로 크게 산정되었다.

9) 보다 많은 실험데이터 획득과 연약지반의 실트질 층의 유무, 정확한 지반 특성파악을 통해 정확한 설계의 접근이 필요하다. 또한 현장시험과 실내시험을 병행하여 실시하는 것이 더욱 신뢰성 있는 결과를 가져올 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Torstensson, B. A., "The pore pressure probe", *Proceedings, Geoteknikkdoggen, Tapir Foreleg, Oslo, No. 34, pp. 1-15., 1977.*
- [2] Baligh, M. M. and Levadoux, J. N., "Pore pressure dissipation after cone penetration", *MIT Dept. of Civil Engineering, Report No. R80-115, Cambridge, MA, pp. 02-139., 1980.*
- [3] Baligh, M. M. and Levadoux, J. M., "Consolidation after undrained piezocone penetration II: interpretation", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.7, pp. 727-745., 1986.*
- [4] Teh, C. I and Houlsby, G. T., "An

- analytical study of the cone penetration test in clays”, *Geotechnical*, Vol.41, No.1, pp. 17-34., 1991.
- [5] Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Landcellotta, R., and Maniscalco, R., “Piezometer probe test in cohesive deposit”, *ESOPT*, pp. 264-302., 1981.
- [6] Robertson, P. K., Sully, J. P., Woeller, D. J., Lunne, T., Powel J. J. M., and Gillespie D. G., “Estimating coefficient of consolidation from piezocone test”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29., 1992.
- [7] 박용원, 구남실, 이상익, “피에조 콘 시험을 이용한 점성토의 압밀계수 추정”, *한국지반공학회논문집*, 제19권, 4호, pp. 311-320., 2003.
- [8] 박용원, 구남실, 김영상, “피에조콘 시험을 위한 연약지반의 대표적 강성지수 도출과 수평 압밀계수 산정에의 적용”, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제6C호, pp. 389-398., 2003.
- [9] Houlsby, G. T. and Teh, C. I., “Analysis of the piezopcone in clay”, *ISPOT I*, Orlando, Florida, Vol. 2, pp. 777-783., 1988.
- [10] Teh, C. I., “An analytical study of the cone penetration test”, D. Phil. thesis, department of civil engineering, Oxford university, Oxford, U. K., 1987.
- [11] 장인성, 이선재, 정충기, 김명모, “CPTu 를 이용한 국내 점성토 지반의 압밀계수 산정”, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제1-C호, pp. 67-79, 2002.