

피에조 콘 시험과 실내시험을 이용한 양산점토의 투수특성 평가

Evaluation of Permeability Characteristics of Yangsan Clay using Piezocone Penetration Tests and Laboratory Tests

구 남 실¹⁾ · 김 영 민[†] · 박 재 환²⁾

Gu, Namsil · Kim, Youngmin · Park, Jaehwan

ABSTRACT : Consolidation behavior of soft clay is generally to be affected by its compressibility and deformation characteristics. Especially, soil permeability depends on soil characteristics including its type of anisotropy. Coefficient of permeability of soft clay is mostly estimated by using laboratory(Oedometer test) and in-situ piezocone test. The permeability characteristics of soft clay is estimated by excess pore pressure dissipation test results. In this study, the tests were performed to find out the validity of the existing theoretical formula in clay by pore pressure dissipation test and laboratory test results. After grasping of variation the coefficient of permeability ratio(k_h/k_v) in different clay soils, it was found out adequate solution of in-situ permeability ratio(k_h/k_v). Piezocone tests and laboratory tests were performed at the site of pilot project of ground improvement at Yangsan-Mulgeum, Gyeongsangnam-do. Comparisons of the estimated values of k_h/k_v using piezocone tests results and those from laboratory consolidation tests were carried out. Test results show that values of k_h/k_v by piezocone test result(5.85) is similar of its laboratory test(5.28).

Keywords : Coefficient of consolidation, Coefficient of permeability, Dissipation test

요 지 : 점성토 지반의 거동은 압축성뿐만 아니라 투수특성에 크게 영향을 받으며, 특히, 투수특성은 흙의 특성, 이방성에 따라 다르게 나타난다. 투수계수는 주로 실내 압밀시험과 현장 피에조 콘 시험으로부터 산정이 가능하다. 피에조 콘에 의한 투수계수 산정방법은 과잉간극수압의 소산시험 결과로부터 추정할 수 있다. 본 논문에서는 간극수압 소산시험 및 실내시험결과(Oedometer test)를 이용하여 기존의 투수성 평가에 이용되는 이론 해들의 적용성을 검토하고자 하며, 점성토지반 특성에 따른 k_h/k_v 의 변화를 파악하여 원위치 k_h/k_v 를 합리적으로 추정할 수 있는 적합한 해를 선정하였다. 연구대상지반은 경남 양산물금 지역의 점성토층이며 원위치 시험인 피에조 콘 소산시험과 비교란 시료에 대한 실내압밀시험(Oedometer test)을 실시하고 각 투수계수 추정해 별로 비교분석을 실시하였다. 연구결과 피에조 콘 소산시험으로 산정된 투수계수비가 5.85로 나타나 실내시험(Rowe cell/Oedometer)으로 산정된 투수계수비 5.28과 매우 유사한 값을 나타냈다.

주요어 : 압밀계수, 투수계수, 소산시험

1. 서 론

일반적으로 흙은 생성 과정과 응력조건에 의해 퇴적되면서 수평방향으로 조직적 입자 배열을 하여 이방성을 가지게 된다. 이방성은 흙의 강도, 투수성, 변형특성에 나타나며, 이 중에서 변형 특성은 압밀속도 및 투수속도에 영향을 주는데 이는 압밀계수가 압축성 뿐만 아니라 투수계수와 관련이 있기 때문이다. 이러한 지반을 효율적으로 활용하기 위해서는 지반에 대한 압밀계수나 투수계수 등의 특성을 정확하게 파악해야 한다. 이 중에서 투수계수는 지반의 압밀특성 평가와 차수를 필요로 하는 구조물 시공에 있어 매우 중요하게 다루어지고 있다. 지반의 투수특성을 평가하는 시험방법은 실

내시험과 현장시험이 있으며, 실내시험으로는 Oedometer test, Rowe cell 압밀시험과 현장시험으로는 피에조 콘 소산 시험이 있다. 여러 방법 중 주로 Oedometer test와 피에조 콘 소산시험을 이용하는데 피에조 콘 소산시험으로 추정하는 방법은 관입 시험 중 콘을 일시 중지하고 관입 시 발생된 과잉간극수압이 시간에 따라 소산된 결과로부터 c_h 를 산정하여 k_h 를 추정한다. 본 연구는 연약지반에 대한 투수특성을 평가하기 위하여 점성토 지반 개량공법 시험시공을 실시한 양산물금 지역에서의 피에조 콘 간극수압 소산시험과 실내시험 결과(Oedometer test)를 이용하였다. 그리고 추정된 k_h 와 k_h/k_v 를 이용하여 연구지반 특성과의 관계를 분석한 후 가장 적합한 k_h/k_v 추정해를 제안하였다.

1) 정희원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 차장, 공학박사, 토질및기초기술사(E-mail : gooo@lh.or.kr)

† 정희원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 과장

2) 비희원, 부산대학교 사회환경시스템공학부(토목공학전공) 박사과정

2. 피에조콘을 이용한 압밀계수 및 투수계수 결정법

본 장에서는 기존에 여러 연구자들이 피에조 콘 소산시험으로부터 압밀계수 추정을 위하여 제안한 이론해들과 수평투수계수 추정을 위하여 제안한 방법들에 대하여 정리하였다.

2.1 압밀계수 결정법

표 1에는 피에조 콘 소산시험으로부터 압밀특성을 규명할 수 있는 기존의 이론해 및 가정사항, 사용되는 추정식 등이 정리되어 있다. 이러한 이론해들은 기존에 국내·외에서 꾸준히 사용되어 왔으며, 박용원 등(2003)에 의하면 Torstensson (1975, 1977)과 Teh 와 Houlsby(1991)의 해가 국내지반에 적합한 것으로 평가되고 있다.

2.2 투수계수 결정법

흙과 같이 간극을 가지고 있는 재료의 투수계수는 흙 자체의 고유한 값이 아니고 흙을 구성하고 있는 점토광물이나 간극비, 흡입자의 모양, 입도분포 그리고 물의 점성 등에 따라 영향을 받아 달라지며, 이 중에서도 간극의 크기가 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

피에조 콘을 이용한 점성토 지반의 투수특성을 평가하는 방법을 여러 연구자들이 제안하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

2.2.1 Becker 등(1989)에 의한 방법

Terzaghi(1943)는 식 (1)과 같은 1차원 압밀이론을 유도하였으며, 이에 따라 수평투수계수(k_h)는 식 (1)를 바탕으로 수평압밀계수(c_h)와 수평 체적압축계수(m_h)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (1)$$

$$k_h = c_h \cdot m_h \cdot \gamma_w \quad (2)$$

여기서, k : 투수계수, c_h : 수평압밀계수, c_v : 연직압밀계수, e : 간극비, a_v : 압축계수, γ_w : 물의 단위중량, m_v : 연직 체적압축계수, m_h : 수평 체적압축계수

또한, 식 (2)에 구속압축계수 M 을 포함하여 나타낸 식 (3)을 이용하여 k_h 를 추정할 수 있으며, 구속압축계수는 Oedometer test나 콘 선단 저항력으로부터 산정할 수 있다.

$$k = \frac{c \cdot \gamma_w}{M} \quad (3)$$

여기서, M : 구속압축계수($1/m_v = \alpha_m q_c$), q_c : 콘 선단 저항력, α_m : 콘 선단 저항력과 흙의 종류에 따라 변하는 계수이다. 한편, Becker 등(1989), Jamiolkowski(1995) 및 정영훈 등(2001)은 등방 압축성을 갖는 점성토의 경우 변형 양상에 따라 체적 변화계수가 크게 영향을 받아 피에조 콘 시험을 실시하는 경우와 같이 연직방향 및 수평방향의 변형이 함께 발생하는 3차원 개념의 체적변화인 경우, 수평방향 체적변화가 연직방향 체적변화에 비하여 1.4~2.0(평균 1.7배) 정도 크게 나타난다고 제안하였다. 따라서 식 (2)로부터 m_h 는 m_v 에 비하여 약 1.4~2.0(평균 1.7배) 정도 크게 적용하면 수평압밀계수로부터 식 (4)와 같이 수평투수계수를 산정할 수 있다.

$$k_h = 1.7 \cdot c_h \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (4)$$

2.2.2 Baligh와 Levadoux(1980)에 의한 방법

Baligh 와 Levadoux(1980)는 식 (5)를 이용하여 k_h 를 추

표 1. 이론해 및 가정사항

연구자	지반구성 모델	초기과잉간극수압 분포이론	간극수압 소산이론	추정식	해석방법
Torstensson (1975, 1977)	등방응력 분포, 탄성·완전소성체	구형 또는 원통형 공동팽창이론	선형 비혼합 1차원 압밀이론	$c = \frac{T_{50}}{t_{50}} R^2$	유한차분법
Baligh 와 Levadoux(1980), Levadoux 와 Baligh(1986)	선형등방 재료	변형률 경로법	선형 비혼합, 비선형 혼합 압밀이론	$c_h = \frac{T r_o^2}{t}$	유한요소법
Teh(1987), Teh 와 Houlsby(1991)	탄성·완전소성체	변형률 경로법	비혼합 압밀이론	$c_h = \frac{T^* r_o^2}{t} \sqrt{I_r}$	대변형 유한요소법

여기서, c ; 압밀계수, c_h ; 수평압밀계수, t_{50} ; 압밀도 50%까지의 소요시간, R ; 공동 등가반경(콘의 반경), r_o ; 콘의 반경, T ; 시간계수, T^* ; 수정된 시간계수, T_{50} ; 압밀도 50%일 때의 시간계수, t ; 압밀 소요시간, I_r ; 강성지수이다.

정할 것을 제안하였고, 재압축비(RR)는 Oedometer test에서 재압축 시 과압밀 영역의 유효연직 압력과 변형의 비(e-log p'상의 reloading 곡선의 기울기)로부터 얻어지며, RR은 0.005~0.02 사이에 있음을 제시하였다. 또한, 이들은 피에조 콘에 의한 k_h 추정 결과가 기존의 다른 현장 투수 시험 결과와 비교할 때 매우 만족할 만하다고 하였고, 적합한 재압축비의 선택은 k_h 추정 결과의 오차범위를 감소시키는 요인이며, 재압축비는 투수계수비의 선택에 따라 달라질 수 있는 값이라고 하였다.

$$k_h = \frac{\gamma_w}{2.3 \cdot \sigma'_{vo}} \cdot RR \cdot c_h \quad (5)$$

여기서, RR: 재압축비(0.005~0.02), σ'_{vo} : 유효상재압력, c_h : 수평압밀계수로 Baligh와 Levadoux해에서 얻어진 결과를 적용한다.

2.2.3 Robertson 등(1992)에 의한 방법

Robertson 등(1992)은 Schmertmann(1974)이 실시한 실내 시험 결과로부터 k_h 를 산정하여 k_h 와 피에조 콘 소산시험에서 얻어지는 t_{50} 과의 관계로부터 k_h 추정해를 제안하였으며, 이 식으로부터 산정되는 k_h 는 개략적인 값으로 단지 참고 자료로만 활용할 수 있다고 하였다. 또한, Robertson 등(1986)은 CPT를 이용한 흙 분류 차트에서 구역(zone)별로 분류되는 흙의 형태에 따른 투수계수의 개략적인 분포범위를 표 2와 같이 제안하였으나 투수계수의 종류(k_h 또는 k_v)를 명확하게 나타내지 못했다.

표 2. Robertson 등(1986)의 CPT를 이용한 흙 분류에 따른 투수계수 범위

Zone	Soil behaviour type	Range of soil permeability, k(m/s)
1	Sensitive fine grained	$3 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8}$
2	Organic soils	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$
3	Clay	$1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$
4	Silty clay to clay	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-8}$
5	Clayey silt to silty clay	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$
6	Sandy silt to clayey silt	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$
7	Silty sand to sandy silt	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$
8	Sand to silty sand	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$
9	Sand	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
10	Gravelly sand to sand	$1 \times 10^{-3} \sim 1$
11	*Very stiff fine-grained soil	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
12	*Very stiff sand to clayey sand	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$

주) *Overconsolidated or cemented

$$k_h = 0.0002(t_{50})^{-0.7785} \quad (6)$$

2.2.4 Parry와 Wroth에 의한 방법

Parry 와 Wroth(1977)는 지반을 등방 압축성($m_v = m_h$)이라고 가정하였고 이에 따라 연직 및 수평압밀계수의 비를 체적 압축계수의 영향을 배제하고 식 (7)과 같이 투수계수 비로 나타내어 k_h 를 추정할 것을 제안하였다.

$$k_h = \frac{c_h \cdot k}{c_v} \quad (7)$$

여기서, k_h : 수평투수계수, c_h : 수평압밀계수, k : 연직투수계수, c_v : 연직압밀계수이다.

2.2.5 Lacerda에 의한 방법

Lacerda 등(1977)은 여러 지반조건에 대한 투수시험을 실시하여 수평과 연직투수계수가 간극비에 따라 차이가 있음을 그림 1과 같이 제안하였다. 그림 1에 의하면 이 연구대상 지반과 같이 점성토층이 대부분인 경우에는 간극비가 일정할 때 투수계수비가 대략 1.0~23.0(평균 12.0)배 정도의 값을 나타낼 것으로 판단된다.

3. 지반 조건

피에조 콘 시험은 네덜란드 Fugro 사의 콘으로 선단면적은 10cm^2 과 15cm^2 , 슬리브 표면적 150cm^2 과 200cm^2 , 선단 각 60° , 로드셀 용량 50kN 과 75kN인 2종류의 콘을 사용하

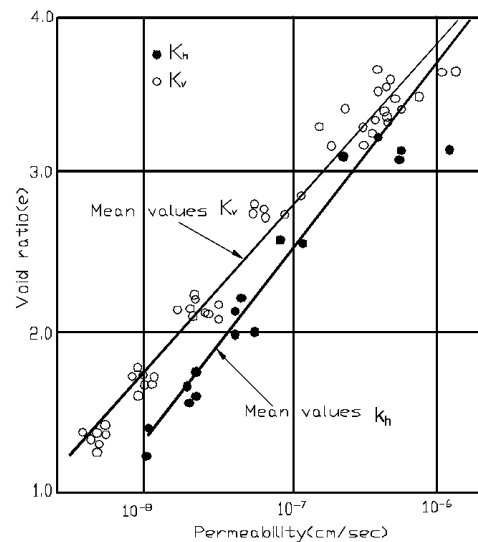


그림 1. 간극비와 투수계수 관계(Lacerda et al., 1977)

여 ASTM(1979)에 따라 단계(I, II, III)별로 각 공법별 대표 지점에서 실시하였다.

본 연구의 대상 지반은 남해안의 양산물금에 있으며 연직배수공법(팩드레인, 메나드 드레인, 페이퍼 드레인, 프리로딩)으로 지반개량공사가 수행된 점성토 지반으로서 상부에 매립층, 하부에 점성토층 및 모래 섞인 자갈, 기반암층으로 구성되어 있다. 점성토층은 해성 퇴적층으로서 매우연약한 상태로 색조는 짙은 암회색이며, 확인된 층 두께는 18.8~30m를 나타내고 있다. 그리고 실내시험과 피에조 콘 소산시험은 개량공법 시공 전(단계 I), 공법시공 5개월 후의 압밀 진행 중(단계 II), 90% 압밀 진행 후(단계 III)의 순으로 실시하였으며, 개량공법 시공 전의 원지반 토질시험 결과는 표 3 및 그림 2와 같고, 적용된 개량공법은 표 4와 같다. 개량공법 시공 전(단계 I)의 실내시험 결과에 의하면 자연함수비, 액성한계, 소성지수, #200 통과율은 모두 약 10m까지는 증가하며, 이후에는 감소하거나 또는 일정한 깊이까지 변함이 없다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 일축압축강도와 비배수 강도는 깊이가 증가함에 따라 계속 증가하고 있고, 전체적으로 볼때 일부구간에 대하여는 깊이에 따라 교란된 경향을 보이기도 하며, 과압밀비는 약 0.3~1.7사이에 분포하고 있다. 이 연구대상 지반에서 실시한 피에조 콘 관입시험 및 간극수압 소산시험 수량은 표 5와 같다. 표 5를 보면 공법별, 지반개량 단계별로 간극수압 소산시험을 실시하였음을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 개량단계에서 표 3에 정리된 바와 같이 소산 및 관입시험을 수행

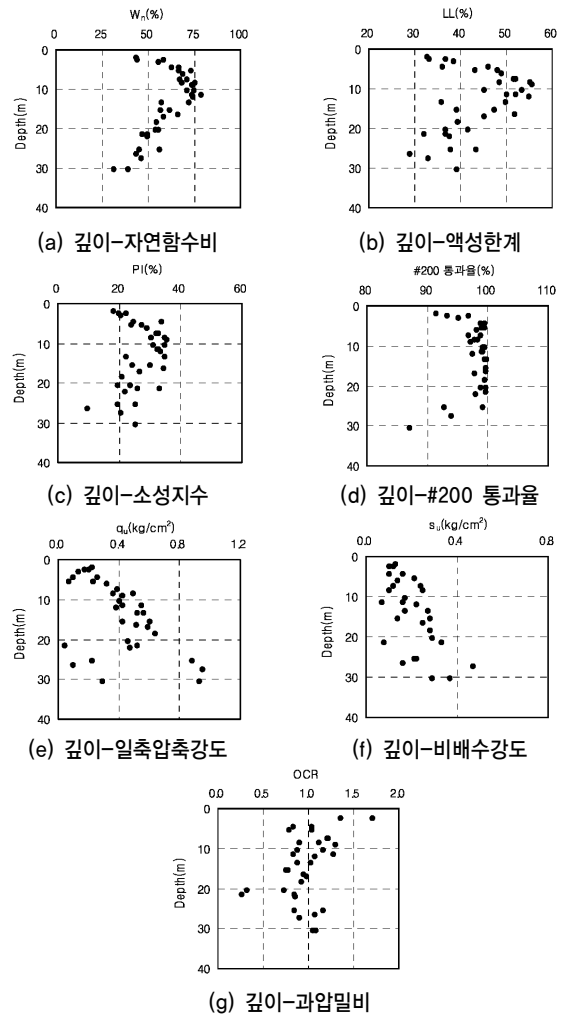


그림 2. 원지반 깊이별 시험결과

표 3. 원지반(단계 I) 토질시험 결과

구분	$w_n(\%)$	G_s	LL(%)	PI(%)	#200 통과율(%)	q_u (kg/cm ²)	s_u (UU) (kg/cm ²)	USCS	OCR
범위	31.5~78.7	2.56~2.73	28.8~55.5	10~35	15.0~99.8	0.04~0.95	0.07~0.47	SM, CL, CH	0.3~1.7

표 4. 적용된 개량 공법

공법명	타입심도(m)	타입간격(m)	개량 기간(개월)	최종 성토고(m)
Pack Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Menard Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Paper Drain	25.5	1.0×1.0	12	8.0
Preloading	-	-	12	8.0

표 5. 피에조 콘 시험 수량

공법명	단위	단계 I(공법 시공 전)		단계 II(개량 확인)		단계 III(개량 완료)	
		관입시험	소산시험	관입시험	소산시험	관입시험	소산시험
Pack Drain	회	14	4	34	8	4	1
Menard Drain	“	14	4	34	8	4	1
Paper Drain	“	14	5	34	14	4	1
Preloading	“	14	1	34	4	4	1
계	“	56	14	136	34	16	4

하였으며, 간극수압 소산시험 및 강성지수가 표 6에 정리되어 있다. 표 6에서 시험시공 지역은 샌드 매트가 지표면에 있으므로 지하수위고는 샌드매트 내에 존재하고 있으며, 소산도(0, 10, 50%)에 따라 측정된 간극수압을 나타냈다. 소산 시험 지반이 과압밀 점토인 경우는 소산시험을 실시하기 위하여 관입을 정지하였을 때와 소산 시작 시의 간극수압이 매우 빠르게 변화하여 수평압밀계수 추정 시 소산 시작점(소산도 0%)의 선정이 어려우나 이 연구 대상지반에서 얻은 간극수압 소산곡선은 이와 같은 현상이 발생되지 않아 일반적인 방법으로 소산도를 산정하였다.

4. 수평압밀계수 추정

k_h 를 추정하기 전에 먼저 기존 이론해에서 추정된 단계별(단계 I, II, III) c_h 와 Rowe cell 시험에서 얻어진 c_h 를 비교하여 이 연구대상 지반에 가장 적합한 c_h 추정 이론해를 선정하였다.

4.1 시험결과

단계별, 제안자별로 피에조 콘시험 및 Oedometer 시험결과를 바탕으로 수평과 연직압밀계수를 산정하여 나타낸 것이 표 7이다. 표 7에서 c_h 값은 소산도 50%의 결과이고 Oedometer test로 산정한 c_v 는 선형압밀압력 전후의 평균값을 나타낸다. c_h 를 추정하는 데 있어 시간계수 선정은 표 6에 나타난 강성지수에 적합한 값을 사용하였다.

4.2 수평압밀계수와 연직압밀계수의 관계

표 7을 보면 단계 I, II 및 단계 III에서 c_h 는 원통형 공동 팽창의 Torstensson해와 강성지수를 고려한 Teh 와 Houslyby 해가 유사하게 나타났다. 그리고 Rowe cell 압밀시험으로 얻어진 c_h 는 단계 I, II, III 모두 원통형 공동팽창의 Torstensson 해와 강성지수를 고려한 Teh 와 Houslyby 해와 유사한 경향을 보였다. 따라서 이 연구 대상지반에 적합한 c_h 추정 해는 이 두가지 해이나 다양한 강성지수에 대하여 사용하기 쉬운 Teh 와 Houslyby의 해를 5절에서 k_h 추정 시 기준으로 적용하였다. 각 제안자별로 제시한 식을 이용하여 추정한 c_h 를 Oedometer test에서 얻은 c_v 와 비교하여 압밀계수비(c_h/c_v)를 산정한 결과가 표 8이다. 표 8의 평균한 결과를 보면, Torstensson(구형 공동)해는 약 0.35로 압밀계수비를 가장 작게 평가하고, Torstensson(원통형 공동) 해는 약 1.66으로 약간 크게 평가하며, Levadoux 와 Baligh 해는 약 6.83으로

표 6. 과잉간극수압 및 강성지수 산정 결과

공법명	위치	단계별	소산 시험 깊이(m)	지하 수위 (m)	간극수압(MPa)			강성 지수 (I_r)
					소산도 (0%)	소산도 (10%)	소산도 (50%)	
팩드 레인	A	단계 I	24.016	0	0.573	0.539	0.404	8.5
		단계 II-1	17.731	0	0.485	0.454	0.329	56.0
		단계 II-2	26.022	0	0.643	0.604	0.451	9.0
		단계 III	12.671	0	0.501	0.463	0.313	44.0
	B	단계 I	24.016	0	0.573	0.539	0.404	8.5
		단계 II-1	11.824	0	0.422	0.391	0.269	66.5
		단계 II-2	20.121	0	0.591	0.552	0.394	10.5
	C	단계 I	24.016	0	0.573	0.539	0.404	8.5
		단계 II-1	17.877	0	0.424	0.399	0.300	56.0
		단계 II-2	26.268	0	0.612	0.576	0.435	9.0
	D	단계 I	24.016	0	0.573	0.539	0.404	8.5
		단계 II-1	17.919	0	0.473	0.444	0.325	56.0
단계 II-2		26.221	0	0.618	0.582	0.438	9.0	
메나드 드레인	A	단계 I	24.019	0	0.590	0.555	0.413	8.5
		단계 II-1	18.726	0	0.516	0.483	0.350	26.0
		단계 II-2	25.729	0	0.646	0.606	0.449	15.5
		단계 III	12.564	0	0.513	0.474	0.318	29.0
	B	단계 I	24.019	0	0.590	0.555	0.413	8.5
		단계 II-1	19.319	0	0.470	0.442	0.330	24.5
		단계 II-2	26.212	0	0.603	0.569	0.430	15.0
	C	단계 I	24.019	0	0.590	0.555	0.413	8.5
		단계 II-1	19.322	0	0.472	0.444	0.331	24.5
		단계 II-2	26.404	0	0.611	0.575	0.435	15.0
	D	단계 I	24.019	0	0.590	0.555	0.413	8.5
		단계 II-1	19.027	0	0.479	0.449	0.333	24.5
단계 II-2		26.031	0	0.589	0.556	0.422	15.0	
Paper Drain	A	단계 I	28.017	0	0.646	0.609	0.460	42.0
		단계 II-1	20.317	0	0.529	0.497	0.364	21.0
		단계 II-2	25.922	0	0.624	0.587	0.439	19.0
		단계 II-3	20.323	0	0.533	0.500	0.366	21.0
		단계 II-4	26.122	0	0.610	0.575	0.433	19.0
	단계 III	13.564	0	0.500	0.463	0.332	7.2	
	B	단계 I-1	24.029	0	0.600	0.564	0.418	8.5
		단계 I-2	28.017	0	0.646	0.609	0.460	42.0
		단계 II-1	20.520	0	0.541	0.507	0.372	21.0
		단계 II-2	26.018	0	0.609	0.574	0.434	19.0
		단계 II-3	20.823	0	0.565	0.529	0.384	21.0
	단계 II-4	26.228	0	0.655	0.616	0.456	19.0	
C	단계 I	24.022	0	0.571	0.538	0.404	8.5	
	단계 II-1	12.213	0	0.276	0.261	0.198	50.5	
	단계 II-2	12.428	0	0.314	0.294	0.218	50.5	
D	단계 I	24.028	0	0.587	0.552	0.411	8.5	
	단계 II-1	20.722	0	0.498	0.469	0.350	21.0	
	단계 II-2	26.222	0	0.598	0.564	0.428	19.0	
	단계 II-3	20.629	0	0.466	0.439	0.334	21.0	
단계 II-4	26.337	0	0.613	0.577	0.436	19.0		
Pre loading	A	단계 I	24.019	0	0.590	0.555	0.413	8.5
		단계 II-1	19.321	0	0.448	0.423	0.319	22.5
		단계 II-2	28.722	0	0.646	0.610	0.464	40.6
		단계 II-3	18.327	0	0.447	0.421	0.314	24.5
		단계 II-4	27.218	0	0.645	0.608	0.456	42.7
단계 III	19.397	0	0.733	0.679	0.462	22.5		

표 7. 현장 및 실내시험결과

시험 단계	소산 시험 깊이 (m)	점성 토층 깊이 (m)	c_h (cm ² /sec)					c_v (cm ² /sec)
			Torstensson (구형공동)	Torstensson (원통형공동)	Levadoux 와 Baligh	Teh 와 Houlby	Rowe cell	Oedometer
단계 I	24.6	25	1.55×10^{-3}	7.25×10^{-3}	2.99×10^{-2}	7.50×10^{-3}	8.83×10^{-3}	4.26×10^{-3}
단계 II	22.5	25	1.17×10^{-3}	5.47×10^{-3}	2.25×10^{-2}	5.66×10^{-3}	6.73×10^{-3}	2.33×10^{-3}
단계 III	14.6	25	1.75×10^{-4}	8.20×10^{-4}	3.38×10^{-3}	8.49×10^{-4}	1.13×10^{-3}	8.86×10^{-4}
평균	20.6	25	9.65×10^{-4}	4.51×10^{-3}	1.86×10^{-2}	4.67×10^{-3}	2.91×10^{-3}	2.49×10^{-3}

표 8. 압밀계수비와 체적압축계수비

시험 단계	c_h / c_v					m_h / m_v
	Torstensson (구형공동)	Torstensson (원통형 공동)	Levadoux 와 Baligh	Teh 와 Houlby	Rowe cell	Rowe cell/Oedometer
단계 I	0.36	1.70	7.02	1.76	2.07	6.7
단계 II	0.50	2.35	9.66	2.43	2.89	1.4
단계 III	0.20	0.93	3.81	0.96	1.28	2.1
평균	0.35	1.66	6.83	1.72	2.08	3.4

표 9. 현장 및 실내시험결과

시험 단계	소산 시험 깊이 (m)	점성 토층 깊이 (m)	k_h (cm/sec)							k_v (cm/sec)
			Baligh 와 Levadoux (1980)	Robertson 등(1992)	Jamiolkowski 등(1985)	Becker 등(1989)	Parry 와 Wroth (1977)	Lacerda (1977)	Rowe cell	Oedometer
단계 I	24.6	25	3.08×10^{-7}	1.09×10^{-6}	5.35×10^{-7}	6.86×10^{-7}	1.05×10^{-6}	7.89×10^{-6}	1.60×10^{-6}	3.56×10^{-7}
단계 II	22.5	25	1.25×10^{-7}	7.64×10^{-7}	2.68×10^{-7}	1.63×10^{-7}	7.96×10^{-7}	3.86×10^{-6}	1.02×10^{-6}	1.79×10^{-7}
단계 III	14.6	25	3.24×10^{-8}	2.45×10^{-7}	5.54×10^{-8}	8.70×10^{-8}	3.50×10^{-8}	8.17×10^{-7}	1.87×10^{-7}	3.69×10^{-8}
평균	20.6	25	1.55×10^{-7}	6.99×10^{-7}	2.86×10^{-7}	3.12×10^{-7}	6.27×10^{-7}	4.19×10^{-6}	9.38×10^{-7}	1.91×10^{-7}

가장 크게 평가하고 있다.

또한, Teh 와 Houlby 해는 약 1.72로 Torstenson(원통형 공동) 해와 유사하게 평가하고 있으며, 실내시험인 Rowecell 시험결과와는 약 2.08로 Torstenson(원통형 공동)과 Teh 와 Houlby 해와 비교해 약간 크게 평가되었다. 4.2절의 앞부분에서 나타낸 바와 같이 이 연구대상 지반에 c_h 가 가장 적합하게 평가되는 Torstenson(원통형 공동) 또는 Teh 와 Houlby 해는 압밀계수비가 1.66과 1.72로 나타내고 있다. 이는 지반의 투수특성이 이방성과 관련이 있기 때문에 c_h 가 c_v 보다 대부분 크게 나타나는 결과이다. 표 8에 나타낸 실내 시험(Rowe cell/Oedometer)으로 산정된 체 적압축계수비 (m_h / m_v)가 3.4이고 Teh 와 Houlby 해의 압밀계수비가 1.72이므로 식 (7)로부터 투수계수비는 체적압축계수비와 압밀계수비 만큼 크게하여 5절의 투수특성 분석 시 이 연구 대상 지반의 피에조 콘 소산시험으로 얻은 기준 투수계수비 ($1.72 \times 3.4 = 5.85$)로 적용하였다.

표 10. 이론해 및 실내시험에 의한 양산지역의 k_h / k_v 비

시험 단계	k_h / k_v					
	Baligh 와 Levadoux	Robertson 등	Becker 등	Parry 와 Wroth	Lacerda	Rowe cell
단계 I	0.87	3.05	1.88	1.91	22.14	4.42
단계 II	0.70	4.28	0.91	2.40	21.59	6.24
단계 III	0.88	6.65	1.98	0.85	22.14	5.18
평균	0.82	4.66	1.59	1.72	21.96	5.28

- 주) 1. 투수계수비(k_h / k_v) 추정 시 k_h 는 피에조 콘 소산시험을 근거로 제안 자별로 추정된 결과를, k_v 는 Oedometer에서 산정된 결과를 적용하였다.
- 2. Baligh 와 Levadoux(1980)해에 의하여 수평투수계수 추정 시 $\sigma'_{vo} = (\gamma_{sub} - 1) \cdot z$ 식을 이용하였고, γ_{sut} 는 Oedometer test에서 얻어진 값을, z 는 소산시험 깊이를, 재압축비는 0.06을, c_h 는 Baligh 와 Levadoux해에서 얻어진 결과를 적용하였다.
- 3. Becker 등(1989)의 해로 k_h 추정 시 $m_h = 1.7 \cdot m_v$ 을 이용하여 m_v 는 Oedometer test에서, c_h 는 Teh와 j Houlby 해에서 얻어진 결과를 적용하였다.
- 4. Parry 와 Wroth(1977)의 해로 k_h 추정 시 c_h 는 Teh & Houlby해에서 얻어진 결과를 적용하였다.

5. 투수특성 분석

간극수압 소산시험 결과에 의하여 c_h 를 추정하고 이를 이용하여 투수계수 추정해별로 투수특성을 평가하였다.

5.1 시험결과

시험 단계별로 Oedometer 결과에 의한 k_v 그리고 기존 해별로 k_h , k_h/k_v 를 추정한 결과를 표 9에 나타냈다.

5.2 분석

이 연구 대상지반에서 투수특성을 평가하기 위하여 여러 연구자들이 제안한 해를 바탕으로 분석한 결과는 아래와 같다.

5.2.1 Baligh 와 Levadoux의 방법

Baligh 와 Levadoux(1980)의 이론으로 k_h 를 추정함에 있어서 사용되는 재압축비(RR)는 0.005~0.02범위이나 Oedometer 결과에서 도출된 값이 0.06으로 Baligh와 Levadoux(1980)가 제안한 범위보다 약간 크게 산정되었다.

5.2.2 Becker 등의 방법

Becker 등(1989)의 해를 이용하여 체적압축계수비(m_h/m_v) 변화에 따라 투수계수비를 나타낸 것이 표 12이다. 표 12에

표 11. RR 에 따른 k_h/k_v

RR	k_h (cm/sec)	k_h/k_v
0.060	1.55×10^{-7}	0.82

표 12. m_h/m_v 의 변화에 따른 k_h/k_v 의 변화

m_h/m_v	k_h (cm/sec)	k_h/k_v
1.4	2.59×10^{-7}	1.31
1.5	2.77×10^{-7}	1.40
1.6	2.96×10^{-7}	1.49
1.7	3.14×10^{-7}	1.59
1.8	3.33×10^{-7}	1.68
1.9	3.51×10^{-7}	1.77
2.0	3.70×10^{-7}	1.87

표 13. 간극비에 따른 k_h/k_v 의 변화

시험단계	e_0	k_h (cm/sec)	k_v (cm/sec)	k_h/k_v
단계 I	1.48	9.3×10^{-7}	4.2×10^{-8}	22.14
단계 II	1.47	9.5×10^{-7}	4.4×10^{-8}	21.59
단계 III	1.48	9.3×10^{-7}	4.2×10^{-8}	22.14
평균	1.47	9.5×10^{-7}	4.4×10^{-8}	21.96

서 체적압축계수비 1.7로 계산된 투수계수비는 1.59로 추정되었으며, 체적압축계수비의 증가에 따라 k_h 와 투수계수비도 함께 증가하고 있음을 알 수 있다. Becker 등(1989)이 제안한 체적압축계수비(1.4~2.0)를 적용한 투수계수비는 1.31~1.87로 산정되어 이 연구대상지반의 피에조 콘 소산시험으로 추정한 투수계수비인 5.85보다 매우 작은 값을 나타냈다. 이는 실내시험으로 산정된 체적압축계수비(Rowe cell/Oedometer=3.4)가 Becker 등이 제안한 값보다 크게 나타난 결과임을 알 수 있다.

5.2.3 Parry와 Wroth, Lacerda의 방법

Parry와 Wroth(1977)의 해에 의하여 추정된 투수계수비 약 1.72는 압밀계수비와 투수계수비를 동일하게 가정한 후 수평투수계수를 산정하여 나타낸 것으로 당연한 결과로 판단된다. 한편, Lacerda(1977)가 제안한 그림 1에 의하여 간극비에 따른 투수계수비의 변화를 나타낸 것이 표 13이다. 표 13을 보면 시험단계별 간극비의 변화는 거의 없으며, 마찬가지로 투수계수비도 거의 변화없이 평균 약 21.96을 나타내고 있다.

5.2.4 Rowe cell/Oedometer의 관계

Oedometer test 와 Rowe cell 압밀시험의 비로 구한 투수계수비는 단계 I에서 단계 III까지 4.42~6.24 범위와 5.28의 평균값을 보여 제안자 별로 구한 투수계수비와 비교할 때 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 이 연구대상 지반의 피에조 콘 소산시험으로 구한 투수계수비인 5.85와 유사한 값을 보이고 있다.

6. 결 론

경남 양산물금 지역의 점성토로 이루어진 연약지반 처리 공법을 적용한 시험시공지반을 대상으로 피에조 콘 소산시험 결과와 실내시험결과(Oedometer test, Rowe cell test)를 이용하여 투수특성 평가를 위한 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이 연구대상 지반의 압밀계수비(피에조 콘 소산시험/Oedometer)를 분석한 결과 Teh 와 Houlsby 해가 1.72로 추정되어, 수평과 연직 체적압축계수를 동일하게 가정할 경우 투수계수비도 마찬가지로 압밀계수비와 동일한 값을 얻을 수 있을 것이다. 또한, 실내시험으로 구한 투수계수비(Rowe cell/Oedometer)

는 4.42~6.24의 범위와 5.28의 평균값을 보여 타 제안자보다 가장 큰 값을 나타냈으며, 이 연구대상 지반의 피에조 콘 소산시험으로 산정된 투수계수비(5.85)와 매우 유사한 값을 보였다.

- (2) Becker 등(1943)의 해로 추정된 투수계수비(Piezocone/Oedometer) 약 1.68은 이 연구 대상지반의 투수계수비인 약 5.85와 비교할 경우 큰 차이를 나타냈으며, 이때의 체적압축계수비(m_h/m_v)는 약 1.8로 이들이 제안한 범위(1.4~2.0)내로는 산정되었으나 투수계수비와 마찬가지로 실내시험(Rowe cell/Oedometer)으로 산정된 값(3.4)보다 비교적 큰 차이를 보이고 있다.
- (3) Baligh 와 Levadoux(1980)의 해로부터 추정된 투수계수비(k_h/k_v) 약 0.82는 Oedometer로부터 재압축비(RR)가 0.06으로 산정되어 이 값을 적용한 결과로 재압축비 0.06은 이들이 제안한 범위(0.005~0.02)보다 약간 크게 산정되었다.

참 고 문 헌

1. 박용원, 구남실, 김영상(2003), 피에조콘 시험을 위한 국내 연약지반의 대표적 강성지수 도출과 수평압밀계수 산정 예의 적용, *대한토목학회논문집*, Vol. 23, No. 6C, pp. 389~398.
2. 정영훈, 정충기(2001), 다양한 변형 조건 하에서 직교 이방성 지반의 압밀계수에 관한 연구, *한국지반공학회지*, Vol. 17, No. 4, pp. 161~172.
3. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N.(1980), *Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration*, MIT Department of Civil Engineering, Report No. R80-115, Cambridge, MA, pp. 2~139.
4. Becker, D.E.(1989), The Significance of Anisotropic Considerations for Settlement Prediction of Foundations on Days, *Proceedings of the 42nd Canadian Geotechnical Conference*, Winnipeg, Canada, pp. 83~91.
5. Jamiolkowski, M., Lancellota, R. and Lo Presti, D.C.F.(1995), Remarks on the Stiffness at Small Strains of Six Italian Clays, *Proceedings of Prefailure Deformation of Geomaterials*, Mitachi and Miura, Shibuya, Japan, pp. 817~836.
6. Lacerda, W. A., Costa-Filho, L. M. and Duarte, A. E. R.(1977), Consolidation Characteristics of Rio de Janeiro Soft Clay, *Proceedings of International Symposium on Soft Clay*, Bangkok, pp. 231~243.
7. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M.(1986), Consolidation after Undrained Piezocone Penetration I : Prediction, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. GT7, pp. 707~726.
8. Parry, R. H. G. and Wroth, C. P.(1977), *Shear Properties of Soft Clay*, Report Presented at the Symposium on Soft Clay, Bangkok, Thailand, pp. 250~262.
9. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Greig, J.(1986), Use of Piezometer Cone Data, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86 : Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, pp. 1263~1280.
10. Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. and Gillespie, D.G.(1992), Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 551~557.
11. Schmertmann, J.H.(1974), Penetration Pore Pressure Effects on Quasistatic Cone Bearing, *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, ESOPT*, Stockholm, 2.2, pp. 345~351.
12. Teh, C. I.(1987), *An Analytical Study of the Cone Penetration Test*, D. Phil. thesis, Oxford University. pp. 917~926.
13. Teh, C. I. and Houlsby, G. T.(1991), An Analytical Study of the Cone Penetration Tests in Clay, *Geotechnique*, Vol. 41, No. 1, pp. 17~34.
14. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York. pp. 510.
15. Torstensson, B.A.(1975), The Pore Pressure Sounding Equipment, *Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, American Society of Engineers(ASCE). pp. 48~55.
16. Torstensson, B.A.(1977), The Pore Pressure Probe, *Proceedings. Geoteknikkdagen*, Tapir Foreleg, Oslo, No. 34, pp. 1~15.

(접수일: 2011. 9. 9 심사일: 2011. 9. 20 심사완료일: 2011. 10. 20)