

내·외향류 방사형 압밀/투수 특성에 관한 연구

The characteristics of radial consolidation & permeability on the inflow & outflow condition

천홍래¹⁾, Hong-Rae Chon, 김지용²⁾, Ji-Young Kim, 김수삼³⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Eng. Chung-Ang University

²⁾ 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chuna-Ang University

³⁾ 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Eng., Chung-Ang University

SYNOPSIS : This study is to make clear for the characteristics of radial drainage consolidation/permeability. At the result of the radial drainage consolidation / permeability test, the permeability of outflow drainage condition is higher than Inflow drainage condition and the time for the end of consolidation, outflow drainage condition is shorter than inflow drainage condition. So drainage area ratio test and control of hydraulic gradient test are carry out to analysis this result. Finally, compared with the characteristics on the condition of inflow and outflow permeability and consolidation.

Key words : radial drainage consolidation, inflow & outflow permeability, radial permeability

1. 서론

배수거리를 단축하여 연약지반의 압밀을 촉진시키기 위한 방안으로 연직배수공법의 사용이 널리 이용되고 있다. 이에 따라 연직배수공법이 사용된 지반에 대하여 정확한 수평압밀계수 C_h 와 수평투수계수 K_h 산정이 점차 중요하게 대두되고 있다. 최근에는 Rowe cell을 이용하여 변형방향과 간극수 배수방향이 현장과 일치하는 수평배수 압밀시험을 실시하고 있다. C_h 나 k_h 의 산정은 수평 배수조건으로 시료를 setting하여 사용하는 데 Rowe cell을 이용한 시험방법은 압밀시 간극수가 중앙의 porous stone으로 배수되는 내향류 배수와 외주면의 porous material로 배수되는 외향류 배수의 두 가지로 나눌 수 있다. 그러나 대개의 경우 시험의 편의성을 위하여 주로 간극수의 배수가 시험기의 외주면으로 발생하는 외향류 시험을 실시하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 내향류/외향류 배수조건을 모두 재현할 수 있는 방사형 배수 압밀시험기를 이용하여 배수조건에 따른 압밀시험과 투수시험을 실시한 결과 내·외향류 배수 압밀/투수시험시 압밀종료 시점에 도달하는 시간과 투수계수에 있어서 차이가 발생하는 것을 확인하였으며 내·외향류 배수/압밀 투수시험의 결과 나타난 압밀종료 시점까지 지속시간과 투수계수에서 나타난 차이점의 원인 및 특성에 관하여 알아보려고 한다.

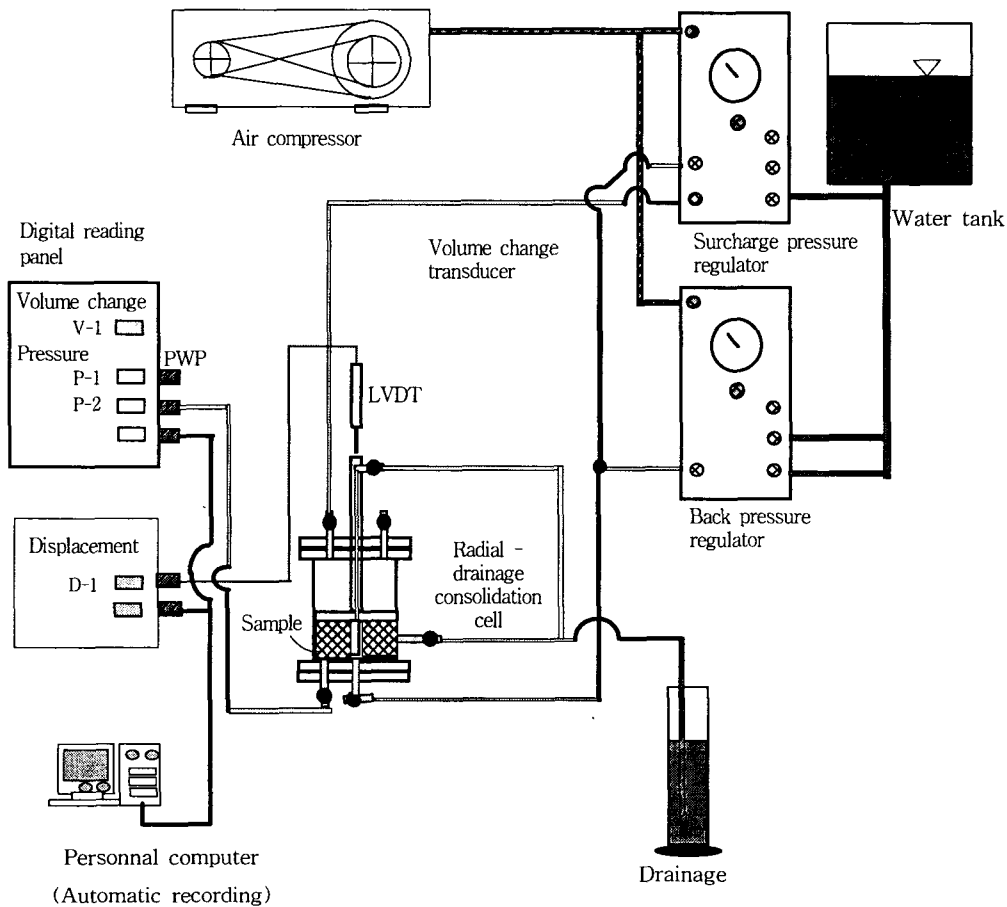
2. 실험 방법 및 조건

2.1. 시료의 기본 물성과 재조성 조건 및 방법

시험에 사용한 시료는 남해안 지역의 녹산 지역에서 채취한 해성점토로서 <Table. 1>에 제시된 바와 같이 액성한계 54.49%, 소성지수 24.22%, 비중은 2.71이다. 교란상태로 현장에서 채취한 후 #140 체를 통과시킴으로서 시료내의 불순물을 제거하여 액성한계의 약 2배정도의 슬러리 상태로 만든 후 특수 제작한 재조성용 압밀셀에 넣어 시료를 24시간 방치한 후 0.5kg/cm²의 압력을 가하여 1차압밀 종료시점까지 예압밀 시켰다.

<Table. 1> 토질의 특성

토질의 분류	CH	소성한계(PL)	30.27%
# 200 통과량	94.93%	소성지수(PI)	24.22%
자연함수비(Ws)	54.22%	비중(Gs)	2.71
액성한계(LL)	54.49%	단위중량(γ_t)	1.698 g/cm ³

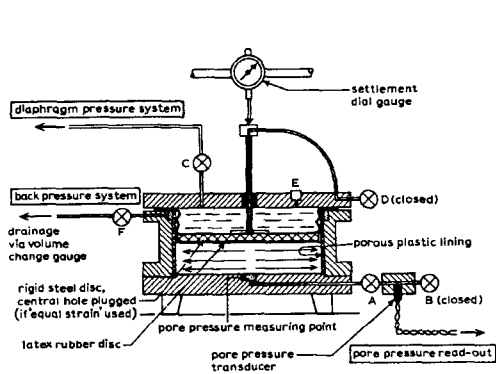


<Fig. 1> 방사형 배수 압밀/투수 시험기의 전체적인 모식도

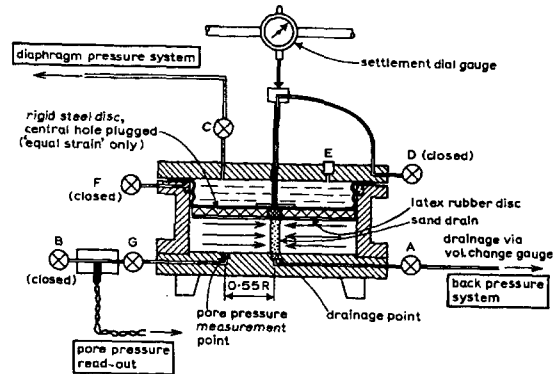
실험기의 전체적인 모식도를 <Fig. 1>에 제시하였으며 시료의 상부면의 재하판에 추를 이용한 하중을 전달하여 일정변형을 조건에서의 압밀이 발생되도록 제작한 것으로 시료내부의 응력발생에 의한 과잉 간극수압의 소산은 가장 짧은 유로를 따라 발생하기 때문에 수평방향으로만 배수가 이루어 진다고 가정하였고, 하중재하에 의해 발생하는 시료내 과잉간극수압의 소산이 수평방향으로만 이루어 지도록 하기 위하여 시료와 접촉되는 상부면과 하부면을 불투수면으로 만들어주었다.

2.2. 방사형 배수 압밀/투수시험

<Fig. 2>와 <Fig.3>은 각각 외향류 배수 압밀 시험기와 내향류 배수 압밀 시험기의 형태를 나타낸 것이다.

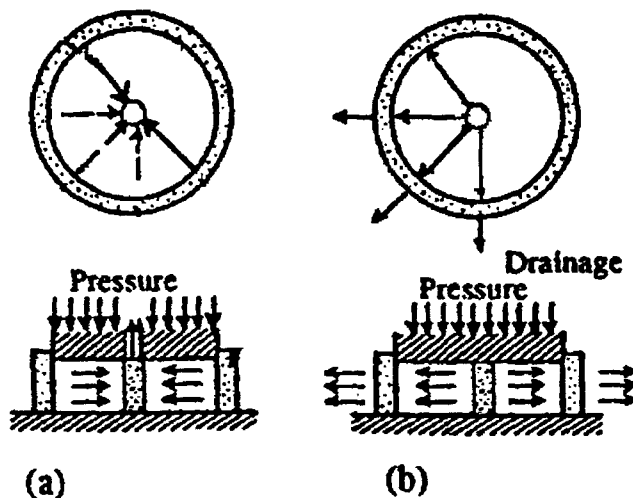


<Fig. 2> 외향류 배수 압밀 시험기



<Fig. 3> 내향류 배수 압밀 시험기

본 연구에서 투수 시험은 위에서 제시된 압밀셀을 사용하였으며 각 투수시험은 압밀이 종료된 후에 실시하였다. 방사형배수 시험기를 이용한 투수시험은 외향류 투수시험과 내향류 투수시험의 두 종류로 실시되었고 우선, 내향류 배수 압밀시에는 중앙의 Porous stone을 통하여 간극수가 중앙으로 배수될 수 있도록 하였으며, 외향류 배수압밀시에는 외곽의 porous material을 통하여 간극수가 외주면으로 배수될 수 있도록 하였다.



<Fig. 4> 투수시험시 간극수 흐름의 형태 ; (a) 내향류 투수시험, (b) 외향류 투수시험

투수시에는 하부를 통한 물이 중앙의 porous stone을 통하여 외주면으로 흐르는 외향류 투수시험과 외주면의 porous material을 통하여 물이 중앙의 porous stone을 향하는 내향류 투수 흐름이 일어날 수 있도록 하였으며 <Fig. 4>에 모식도를 제시하였다.

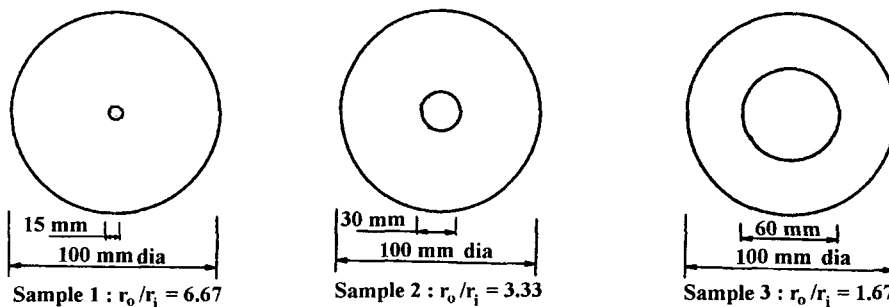
2.3. 면적비 실험

각각 같은 압력을 적용시킨 내·외향류 배수 압밀시험에서 투수계수의 차이와 압밀의 종료후 함수비의 분포에 있어서 내향류 배수 압밀의 경우에만 발생하는 특징과 내·외향류 배수의 압밀속도의 차이가 발생하는 것은 시료의 간극수가 배수되기 위한 배수면의 면적과 관계가 있다고 사료되어 다음과 같은 배수면적을 변화시킨 면적비 실험을 실시하였고 실험형태는 중앙의 porous stone의 직경을 변화시킴으로써 배수면적을 변화를 유도하였다.

이러한 porous stone 직경의 변화로 인하여 배수거리의 차이가 발생하기 때문에 물이 시료를 통과할 때의 시료내에 발생하는 동수경사를 일정하게 유지되도록 하기 위해서 <Table. 3>에 제시한 것과 같이 시료에 적용되는 압력을 조절하였다. <Table. 2>에 본 면적비 실험에 있어서의 중앙의 porous stone(inner drainage)과 외주면의 배수재(outer drainage)의 직경과 porous stone(inner drainage)의 직경이 변화함에 따른 배수정의 내·외경의 비를 나타내었으며 <Fig. 5>에 세부적인 모습을 함께 나타내었다.

<Table. 2> 면적비 실험을 위한 중앙 배수재의 직경

Type of Cells	Inner drainage	Outer drainage	r_o/r_i
Sample 1	φ 15mm	φ 100mm	6.67
Sample 2	φ 30mm	φ 100mm	3.33
Sample 3	φ 60mm	φ 100mm	1.67



<Fig. 5> 직경을 달리한 중앙 배수재의 배치 형태

<Table. 3> 면적비 실험시 셀내에 적용되는 조건

Condition		Type	Sample 1	Sample 2	Sample 3
		Constant	Water pressure	0.2	0.17
Gradient	Gradient, i (hydraulic)		47	47	47

2.3. 동수경사 조절시험

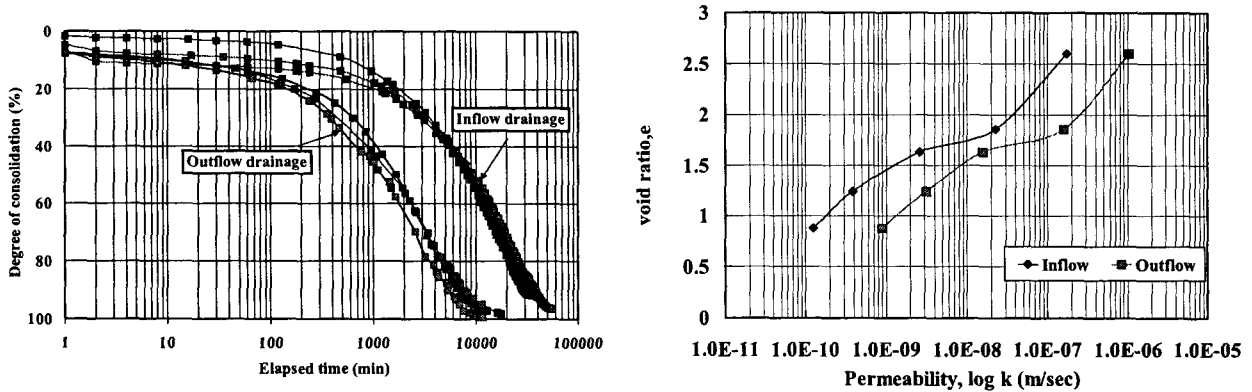
동수경사 조절시험은 내향류 배수 압밀이 외향류 배수 압밀에 비해서 간극수의 배수시간이 지연되는 원인이 간극수의 병목현상에 의한 것이라고 판단되었고 이러한 간극수의 병목현상을 인위적으로 유발시켜 실제로 투수계수와 투수량의 감소를 확인함에 그 목적이 있다.

각각의 실험 조건은 다음과 같다. 먼저 중앙의 배수정으로 직경 15mm의 porous stone을 사용하였고, 투수시험을 실시하기 위하여 재하하중을 1.6kg/cm^2 까지 단계재하하였으며, 이때의 상재압에서 90%의 압밀이 끝난후 투수시험을 실시하였다. 작용된 동수경사는 20 에서 단계적으로 80 까지 증가시켰다.

3. 실험결과 및 분석

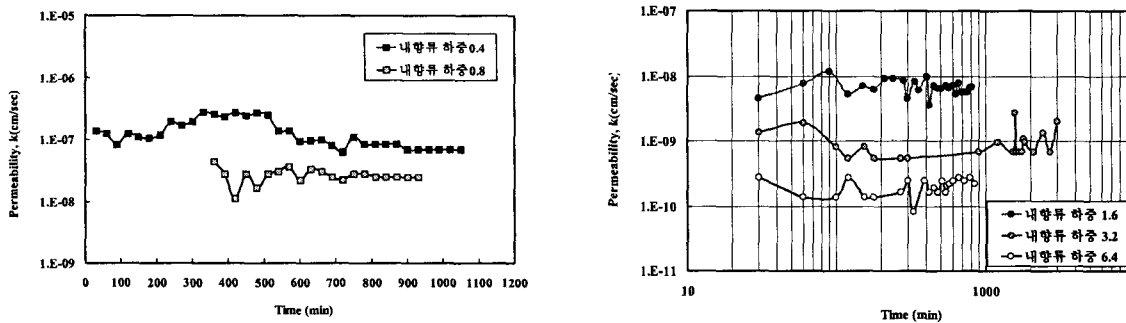
3.1. 내·외향류 배수 압밀 / 투수 시험결과

<Fig. 6>은 내향류 배수 압밀시험과 외향류 배수 압밀시험의 결과를 경과시간에 따른 압밀도로 나타낸 것이다. 대체적으로 내향류 배수 압밀시험의 경우가 외향류 배수 압밀시험의 경우보다 같은 지속시간에 대한 압밀도가 작게 나타난 것을 볼 수 있다. <Fig. 7>은 내·외향류 투수계수를 간극비에 대해서 나타낸 것이다. 각각의 간극비의 감소에 대하여 투수계수가 같이 감소하는 것을 알 수 있으며 내향류와 외향류의 투수계수차이는 약 6~7배 정도로 나타났다. 그러나 간극비 - 투수계수 관계의 기울기인 투수계수 상수(C_k)는 일정하게 나타나 배수조건에 대하여 C_k 는 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.



<Fig. 6> 내·외향류 배수 압밀조건에서의 압밀도와 지속시간과의 관계

<Fig. 7> 간극비와 투수계수와와의 관계(내향류 & 외향류 투수)

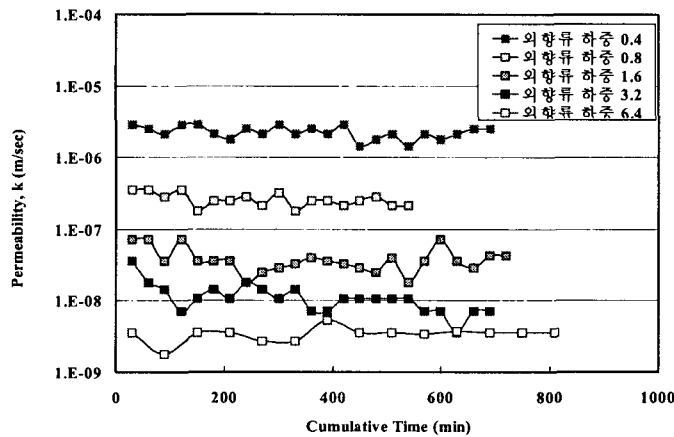


<Fig. 8> 내향류 투수시험(단계하중 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4 kg/cm²)

<Fig. 8>과 <Fig. 9>는 투수시험의 결과를 나타낸 것으로 내향류 투수시험의 결과를 <Fig. 8>에 외향류 투수시험의 결과를 <Fig. 9>에 제시하였다. <Fig. 8>은 내향류 투수시험의 결과를 경과시간에 따른 투수계수로 도시하였다. 투수시험은 하중 단계 0.4에서 6.4까지 단계하중 압밀을 실시한 후 90%의 압밀이 종료된 후 투수시험을 실시하였다. 이 때에 적용된 수압은 0.2kg/cm^2 으로 동수경사는 40이 적용되었다.

<Fig. 9>는 외향류 투수시험에 대한 결과를 투수계수와 경과시간에 대해서 나타낸 것이다. 내향류 투수시험의 조건과 같이 단계하중을 0.4에서 6.4까지 단계하중을 실시한 후 90%의 압밀이 종료된 후 투수시험을 실시하였으며 적용된 수압은 0.2kg/cm^2 으로 40의 동수경사가 적용되었다.

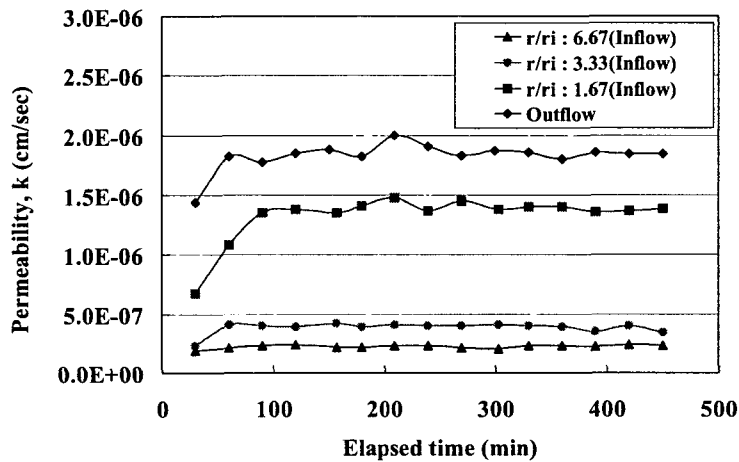
하중의 증가에 따른 간극비의 감소로 투수계수가 감소하는 경향을 나타내었으며 전체적으로보아 내향류 배수조건과 비교하여 외향류배수조건인 경우 투수계수가 더 크게 나타났다.



<Fig. 9> 외향류 투수시험(단계하중 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4 kg/cm^2)

3.2. 면적비 시험결과

<Fig. 10>은 배수면의 면적을 달리한 3가지 형태의 내향류 투수시험의 결과와 외향류 투수시험의 결과를 함께 도시한 것이다. Outflow로 제시되어 있는 것은 외향류 투수 시험이며 직경 15mm의 porous stone을 통하여 외주면으로 물이 배수되는 외향류의 시험결과이며 $r/ri=6.67, 3.33, 1.67$ 로 나타낸 것이 <Table. 2> 에서 제시한 조건을 이용한 내향류 투수시험이다. 내향류 시험과 외향류 시험의 경우 모두 같은 동수경사에 의해서 시험이 실시되었다.

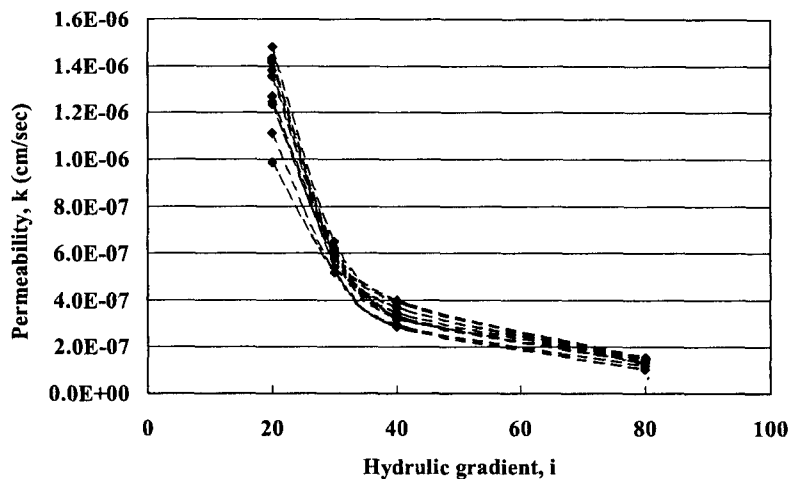


<Fig. 10> 지속시간에 따른 투수계수(일정 동수경사(i))

<Fig. 10>의 결과를 보면 내향류 투수시험의 경우는 크게 두가지의 형태로 나뉘어 지는 것을 확인할 수 있다. 먼저 Sample 1,2의 경우($r/ri=6.67, 3.33$)와 Sample 3의 경우는 투수계수에 있어서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Sample 1,2의 경우 다소의 차이가 발생하나 현저한 차이가 발생하는 Sample 3과 구별되는 것을 확인할 수 있다. 배수면적이 가장 큰 Sample 3($r/ri=1.67$)에 해당하는 경우는 Sample 1,2($r/ri=3.33, 6.67$)의 경우보다 큰 투수계수가 크게 나타나는 경향을 보이고 있고 이것은 배수면적이 증가함에 의해서 동수경사의 증가에 의한 간극수의 배수면(porous stone)근처에서의 적체 현상(병목현상)이 줄어들기 때문이라고 판단된다. 간극수의 배수시 Sample 1,2의 경우와 같이 작은 배수면적으로 인하여 간극유로내 발생된 간극수의 병목현상은 간극수 배수시간의 지연을 유발하며 이로 인하여 압밀시험시의 내향류와 외향류의 차이의 원인이라고 사료되며, 병목현상에 의한 간극수의 적체 현상은 배수 면적을 달리한 내향류 투수시험에서도 같은 영향을 미쳤으리라고 판단되며 따라서 투수계수에 있어서도 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 반면에 <Fig. 10>에 제시된 외향류 투수시험의 결과를 보면 내향류 투수시험의 결과와는 다른 양상을 띠는 것을 확인할 수 있다. 외향류 투수시험의 경우에 사용된 배수정은 가장 작은 배수 면적인 직경 15mm의 porous stone($r/ri=6.67$)이며 내향류 투수시험시 가장 작은 투수계수를 나타내었으나 외향류 투수시험시에는 가장 큰 배수면적인 면적비(r/ri) 1.67의 Sample 3보다도 큰 값의 투수계수를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 외주면으로의 투수시험이 실시될 때에는 간극수의 유로가 확장됨에 따라 시료내부의 병목현상이 발생하지 않은 것으로 사료되며 따라서 적체현상 역시 발생하지 않아 투수계수가 크게 나타난 것으로 사료된다.

3.3. 동수경사 조절시험 결과

<Fig. 11>은 동수경사를 변화에 따른 투수계수의 변화의 결과를 나타낸 것이다. 투수계수의 측정은 시료를 통과되어 나온 유량을 시료의 면적과 동수경사로 나누어 줌으로서 결정하였다. <Fig. 11>에서 나타난 결과에 따르면 동수경사가 증가할수록 투수계수가 감소하는 현상을 볼 수가 있으며 이는 동수경사의 증가에 의해 유속이 빨라지고 빠른 유속에 의해 단위 시간당 많은 간극수가 배수면으로 집중됨에 의해 토중내 간극수의 흐름시에 병목현상이 유발되어 적체된 유량에 의해 배수량이 감소하는 결과가 나타났고 이로 인하여 투수계수의 감소 현상이 발생하는 것으로 사료된다.



<Fig. 11> 동수경사에 따른 투수계수의 변화

일반적인 내향류 압밀/투수시험에 있어서 이러한 병목현상에 따른 간극수의 적체 현상으로 인하여 압밀시험에 있어서 기존의 내향류 배수 압밀시험이 외향류 압밀시험에 비해서 압밀종료시간이 길게 나타나는 결과를 유발한다고 사료되며 투수시험에 있어서도 내향류 투수시험의 투수계수가 외향류 투수시

험의 투수계수에 비하여 작게 나타나는 원인이라고 판단된다. 또한 <Fig. 11>에 의하면 동수경사가 약 40정도까지 급격한 감소를 이루다가 40이후부터 완만한 형태를 띠는 것을 볼 수 있었다. 본 연구의 조건에서는 배수 거리가 5cm이므로 압밀시 상재하중 0.4kg/cm^2 이상의 정규 압밀 영역에서는 동수경사가 40이상이 되어 내향류 배수 압밀 시험시에 간극수의 적체 현상이 발생, 이로 인하여 압밀종료에 요구되는 시간이 외향류 배수 압밀시간보다 길게 나타난 원인이라고 사료되며 정규압밀영역내에서 간극수의 적체현상은 계속하여 발생되었으리라 판단된다. 이러한 간극수의 적체 현상이 내향류 배수 압밀시험시 외향류 배수 압밀시험에 비해 압밀이 종료되는 시점까지의 시간의 지연이나 작은 투수계수의 원인이라고 사료된다.

4. 결론

방사형 배수 압밀/투수 시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 내향류 배수 압밀과 외향류 배수 압밀시험의 비교에서 내향류 배수의 경우 압밀이 종료되는 데 걸리는 시간이 외향류 배수 압밀에 비하여 3~4 배 정도 더 걸리는 것으로 나타났다. 또한 투수계수의 비교에 있어서 내향류 조건의 투수계수가 외향류 조건의 투수계수에 비하여 약 6~7배 정도 작게 나타났다.
2. 내·외향류 배수의 차이를 알아보기 위한 면적비 실험에서 같은 동수경사에도 불구하고 배수 면적이 클수록 투수계수가 크게 나타나는 것을 알 수 있었으며 내향류와 외향류 배수 압밀/투수 시험에서의 병목현상으로 인한 적체현상이 내·외향류의 압밀/투수특성의 차이의 원인이라고 사료된다.
3. 배수 면적에 따른 압밀특성과 투수특성의 차이는 동수경사 조절시험을 통하여 확인할 수 있었으며 동수경사가 커질수록 많은 유량이 배수면으로 집중되어 시료내에 병목현상에 의한 간극수의 적체현상이 발생하였고 이러한 적체 현상으로 인하여 원활한 배수가 일어나지 못하여 압밀시험시 내향류 조건의 실험이 외향류 조건의 실험에 비해서 많은 시간이 요구되었으리라 판단된다.

참고문헌

1. 중앙대학교 생산공학연구소, 삼성중공업 건설 기술 연구소, "해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발", 연구논문집 Vol. 2, 1995
2. 천홍래, 김지용, 한상재, 김수삼(1999), "배수조건에 따른 점성토의 압밀 및 투수 특성", 중앙대 생산공학연구소 논문집, 제 8권, 제 1호, pp. 93~106.
3. A.Al-Tabbaa., "Consolidation and Swelling of clay with concentric inner and other drainage" Proc. HIROSHMA '95/JAPAN
4. Atkinson, M.S., P.J. Eldred, "Consolidation of Soil using Vertical Drains", Geotech. 31, No.1, 1981.
5. Barron. R. A., "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells", ASCE, Transaction, Paper No. 2346, pp.718~754, 1948.
6. G.Mesri et al., "Permeability characteristics of soft clays" XIII ICSMFE, 1994 New Delhi India
7. S.J.Trautwein et al., "Radial Flow Consolidation Testing" Proc. of 10th ICSMFE, Vol.1, pp.811-814, 1981
8. Tavenas, et al., "The permeability of natural soft clays part I : method of laboratory measurement", Can. Geotech. J. 20, 629-644, 1983
9. T.Ishida & Y.Nakagawa., "Consolidation apparatus with permeability test", Proc. HIROSHMA '95/JAPAN
10. V.Pane, et al., "Effect of consolidation on permeability measurements for soft clay" Geotech. 33, No.1.