

점토의 압밀계수에 대한 이방성

Anisotropy in Coefficient of Consolidation of Clay

강 병 희*¹

Kang, Byung-Hee

이 윤 규*²

Lee, Yun-Gyu

김 경 태*³

Kim, Kyung-Tae

Abstract

In order to investigate the anisotropy in the coefficient of consolidation of the clay deposit, a series of consolidation tests were carried out on the artificially deposited clay sample by both Rowe-type and conventional consolidometers.

The results of the tests showed that the coefficient of consolidation for radially inward drainage by Rowe-type consolidometer was about two times larger than that for vertical drainage by the conventional consolidometer. The smear effect caused by vertical sand drain installation was found to be significant, especially in the overconsolidated region, but smaller with the increase in consolidation pressure.

요 지

점토지반의 압밀계수에 대한 이방성을 연구하기 위하여 인공퇴적점토시료로서 Rowe형 압밀시험기와 재래식 일반 압밀시험기를 이용하여 일련의 압밀시험을 수행하였다.

시험결과 Rowe형 압밀시험기에 의해서 구한 내향수평압밀계수는 일반 압밀시험기에 의한 연직 압밀계수의 약 2배이었다. 또한, 연직모래배수재의 설치로 인한 스미어 영향은 과압밀응력범위에서 특히 크며 압밀응력이 증가할수록 감소하였다.

Keywords : Anisotropy, Smear effect, Artificially deposited soft clay, Rowe-type consolidometer.

*1 정회원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 안동정보대학 토목공학과 전임강사

*3 정회원, (주)한진건설 ENG.사업부 토목설계팀

1. 서 론

연약한 퇴적점토지반의 개량공법으로서 연직배수재를 사용하는 배수공법이 널리 이용되고 있으며 이 경우 개량속도는 주로 수평압밀계수에 의하여 좌우된다. 판상미립의 점토입자는 퇴적과정 중에 불규칙한 배열의 면모구조로 퇴적되고 오랜 기간의 지질학적인 시간을 거치는 동안 압밀이 진행되면서 입자의 길이 방향이 수평 가까운 배열을 갖는 구조적 이방성을 나타내게 된다. 이로 인해서 퇴적점토의 투수계수 및 압밀계수는 일반적으로 수평방향이 연직방향보다 큰 값을 가지게 된다.

불교란 퇴적점토의 수평과 연직투수계수비(K_h/K_v)에 대하여 Olsen과 Daniel(1981)은 1.0~1.5, Tavenas등(1983)은 0.91~1.42라 하였고 Shogaki 등(1995)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 보였다. 점토 종류에 따라 차이는 있으나 이 투수계수비는 1.0보다 적은 값으로 부터 7.0보다 큰 값의 범위에 있으며 평균값은 약 2.0정도라고 하였다 (Mitchell, 1976). 또한 투수성과 비례관계를 갖는 압밀계수비(C_h/C_v) 역시 1.0보다 크며 Rowe(1959)는 1.0~4.0정도, Shogaki 등(1995)은 0.78~2.6 범위의 실험결과를 얻었다. 이와같이 수평압밀계수는 연직압밀계수보다 일반적으로 크게 나타나는데도 불구하고 연직배수공법 적용지반의 침하속도를 예측하는데 있어서 배수재 설치에 따른 스미어(smear)영향 등을 고려하여 일반압밀시험기를 통해서 구한 연직압밀계수를 수평압밀계수로서 사용하여 설계하는 일이 많다.(장 등, 1995; 中堀和英, 1982)

본 연구에서는 퇴적점토지반 내에서의 모래배수재 시공에 따른 스미어의 영향과 교란시료 및 불교란시료에 대한 압밀계수비에 관해서 Rowe 압밀시험기를 이용하여 연구점토하였다. 또한 일반압밀시험기를 사용하여 퇴적점토의 수평 및 연직압밀계수를 구하고 Rowe형 압밀시험기에 의해서 구한 압밀계수와 비교하므로써 압밀시험기 종류 및 시험방법에 따른 압밀

속도를 평가하였다.

2. 실험

2.1 점토시료

사용한 점토시료는 경기도 안산시에서 채취한 점성토와 벤토나이트를 2:1의 중량비로 혼합한 시료로서 0.1N의 염화칼슘 용액속에서 충분히 교반시켜 3일간 수화하였다. 이렇게 준비된 현탁액을 퇴적조(30cm×120cm×60cm)에 넣고 단계적으로 하중을 증가하여 약 125kPa의 압력하에서 2개월 정도 압밀시켜 준비한 시료로서 물리적 성질은 표 1과 같다.

Table 1. Physical properties of clay sample

Liquid limit (%)	53
Plasticity index (%)	25
Water content (%)	45
Degree of saturation (%)	97~100
Specific gravity	2.71
Sensitivity	3.1
Clay content (%)	50
USCS	CH

2.2 Rowe 형 압밀시험기

본 연구에서 사용한 Rowe형 압밀시험기는 직경 75mm, 두께 30mm인 공시체에 대해서 수평 및 연직배수를 시킬 수 있는 압밀시험기이다. 배압과 하중증가를 위해 두개의 독립된 항압장치를 이용하였으며, 연직변위는 LVDT에 의해서, 그리고 간극수압과 체적변화는 각각 수압트랜스듀스 및 체적트랜스듀스에 의해서 측정하고 ADU(autonomous data acquisition unit)에 접속되어 자동입력되고 컴퓨터 모니터에 출력되는 장치가 이용되었다.

연직배수압밀시험장치는 그림 1과 같으며 내향수평배수압밀시험기 및 외향수평배수압밀시험기의 압밀셀에 대한 개요도를 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다. Rowe형 압밀시험기

에 의한 압밀시험 방법 및 압밀계수의 산정 방법은 Head(1985)의 저서인 Manual of soil laboratory testing에 따랐다.

2.3 시험종류 및 방법

2.3.1 일반압밀시험기에 대한 시험

배수방향이 퇴적방향($\beta=0$)과 퇴적방향과 직각($\beta=90^\circ$)이 되도록 회전시켜서 직경 60mm, 높이 20mm크기의 불교란 공시체를 준비하여 표준압밀시험인 SUV 시험과 SUV-90 시험을 시행하여 연직압밀계수와 수평압밀계

수를 각각 구하였다. 각 시험에 대한 공시체의 초기조건을 표 2(a)에 수록하였다.

2.3.2 Rowe형 압밀시험기에 의한 시험

연직배수시험(RUV, RDV, RUV-90), 내향수평배수시험(RUI, RDI) 및 외향수평배수시험(RUO, RDO)을 실시하였으며 배압은 200kPa을 가하고 내향수평배수시험의 연직배수재는 모래를 사용하였다. 각 시험 공시체의 초기조건은 표 2(b)와 같다. 압밀계수는 Taylor의 \sqrt{s} 법을 이용하여 연직변위에 의한 압

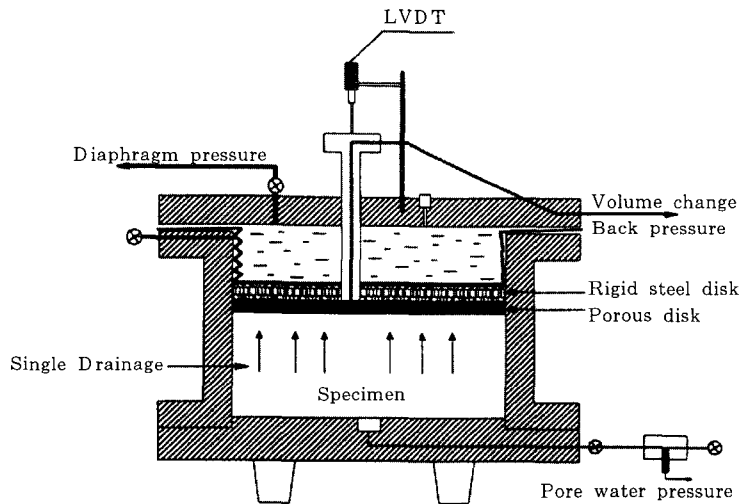


Fig.1 Rowe-type consolidometer for one way vertical drainage

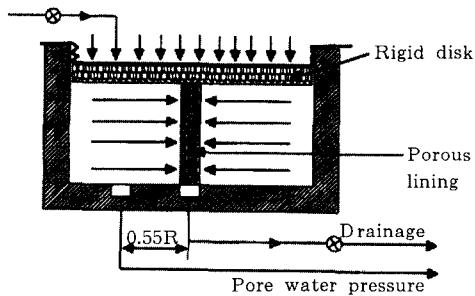


Fig.2 Schematic diagram of Rowe-cell for inward drainage

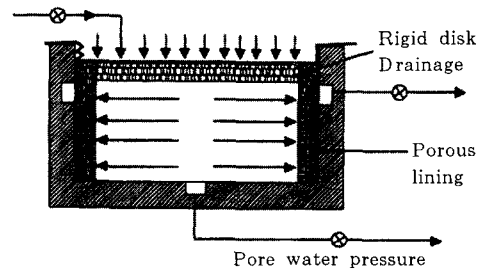


Fig.3 Schematic diagram of Rowe-cell for outward drainage

Table 2. List of tests and its initial conditions of specimen

Test no.	Drainage conditions	Initial condition				Remarks
		w (%)	γ_d (g/cm ³)	S (%)	e	
(a) by conventional consolidometer						
SUV	vertical, single drainage	45.7	1.19	99	1.32	
SVU-90		41.3	1.26	98	1.14	$\beta = 90$
(b) by Rowe-type consolidometer						
RUV	vertical, single drainage	45.8	1.19	97	1.29	
RUV-90		44.8	1.22	100	1.31	$\beta = 90$
RUI	radial, inward	46.0	1.22	99	1.22	
RUO	radial, outward	45.3	1.20	100	1.27	
RDV	vertical, single drainage	46.5	1.23	100	1.21	
RDI	radial, inward	45.6	1.24	100	1.18	
RDO	radial, outward	45.1	1.17	95	1.23	

밀도가 90%인 시점에 대한 계수를 산정하였다 (Head, 1985). 불교란시료와 교란시료의 수평 압밀계수는 RUI, RUO, RUV-90 및 RDI, RDO, RDV-90에 의해서 각각 구하였으며 연직압밀계수 역시 RUV 및 RDV에 의해서 각각 구하였다.

2.3.3 맨드릴 형태 및 시공방법에 따른 스미어 영향

연직배수재는 점토에 대한 필터재의 입도를 가지며 투수계수가 8×10^{-5} m/s 정도인 비교적 균등한 가는 모래이다. 연직배수재를 점토지반 내에 설치하기 위하여 맨드릴(mandrel)을 물리적으로 강제 관입시키므로써 배수재 주변지반이 교란되는 스미어가 발생된다. 이때 발생된 스미어 영역의 투수성은 현저히 감소하여 배수기능에 영향을 미치게 된다. 본 연구의 Rowe형 압밀시험기에 의한 내향수평배수시험에서 이용할 맨드릴 형태를 결정하기 위해서 2가지 형태의 맨드릴을 제작하고 2가지의 삽입 방법에 의한 시험을 수행하였다. 맨드릴 선단부는 관입시 교란을 고려하여 그림 4에서 보이고 있는 바와 같이 배수비가 6인 단면을 갖는

선단비확장개단 맨드릴(a)와 선단확장개단 맨드릴(b)을 제작하였다. 맨드릴 삽입방법은 맨드릴을 30mm 두께의 공시체에 밀어넣어

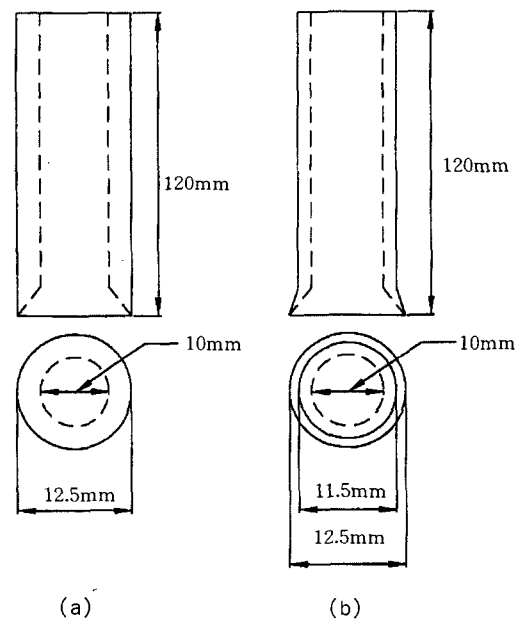


Fig.4 Types of mandrel for sand drain
(a) Nonexpanded open-end mandrel
(b) Expanded open-end mandrel

Table 4.3 Tests for the effect of mandrel type on smear and its initial condition of specimen

Test no.	Type of drainage	Type of mandrel	Initial condition of specimen			
			w (%)	γ_d (g/cm ³)	S (%)	e
RUINE-1	inward drain	nonexpanded open-end mandrel	44.4	1.21	98	1.23
RUINE-2			46.5	1.20	98	1.26
RUIE-1		expanded open-end manel	46.0	1.22	99	1.22

Note-1: for passing the whole length of the mandrel through the specimen

2: for penetrating and pulling out the mandrel from the specimen

12cm전 길이를 통과시켜서 구멍을 뚫는 방법 (확장개단맨드렐 경우 RUIE-1, 비확장개단맨드렐 경우 RUINE-1)과 비확장개단맨드렐을 공시체에 밀어 넣어 구멍을 뚫고 다시 위로 빼어내는 방법(RUINE-2)을 적용하므로써 스미어영역을 다르게 발달시켜서 스미어 영향을 검토하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 모래배수재 시공에 따른 스미어 영향

그림 5는 두가지 형태의 맨드렐을 이용하여 모래배수재를 공시체의 중심에 설치하고 시행하는 내향수평배수시험에 의한 수평압밀계수를 맨드렐 형태 및 삽입된 맨드렐의 제거방법 별로 비교해서 나타내었다. 그림에서 스미어영역이 비교적 적게 발생된 것으로 예상되는 선단확장개단맨드렐의 경우(RUIE-1)가 선단비확장개단맨드렐(RUINE-1, RUINE-2)보다 수평압밀계수가 크게 측정되므로써 스미어영향이 비교적 적음을 볼 수 있다. 또한, 그 차이는 낮은 응력범위 즉, 과압밀응력범위에서 더 크고 압밀응력이 증가할수록 감소한다. 이는 스미어 영향은 정규압밀응력 범위보다 과압밀응력 범위에서 훨씬크며 또한, 압밀응력이 증가할수록 교란된 점토의 구조가 압밀응력방향에 대하여 안정화되어 교란영향이 감소되기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 내향수평배수시험의

연직배수재 시공시 스미어 영향이 가장적게 나타나는 선단확장개단맨드렐(그림 4(b))을 이용하였다.

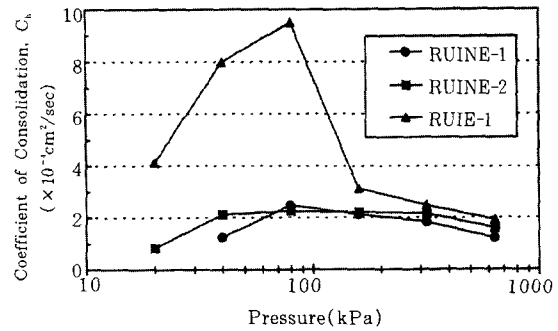


Fig. 5 Comparison of the coefficients of consolidation in horizontal direction by mandrel type

3.2 압밀속도

3.2.1 시험방법에 따른 압밀계수

그림 6에서 불교란공시체에 대한 내향수평배수시험(RUI), 외향수평배수시험(RUO) 및 90도 회전공시체의 연직배수시험(RUV-90)에 의한 수평압밀계수를 비교하였다. 압밀응력이 선형압밀응력(약100kPa)보다 큰 정규압밀응력 범위에서는 응력이 증가함에 따라 모든 시험의 수평압밀계수는 감소하며 그 크기는 RUO, RUI, RUV-90의 순서로 감소한다.

그림 7에서 내향수평배수시험과 외향수평배수시험에 의한 수평압밀계수비 $C_{h(RUI)}/C_{h(RUO)}$ 는 전응력 범위에서 0.23~0.88으로서 1.0보다 작

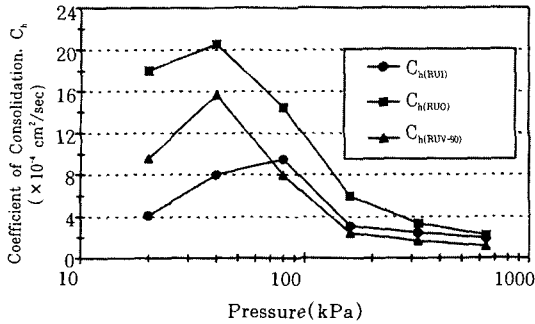


Fig.6 Comparison of coefficients of consolidation in horizontal direction for different test methods by Rowe-type consolidometer

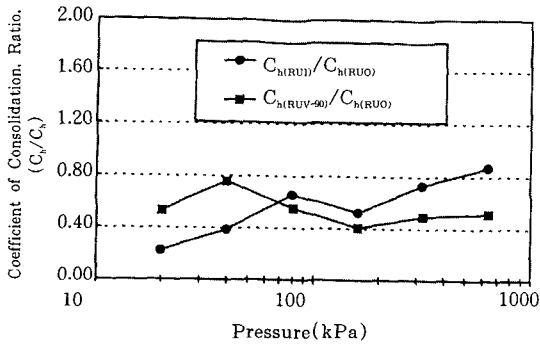


Fig.7 Comparison of coefficients of consolidation ratio by Rowe-type consolidometer tests

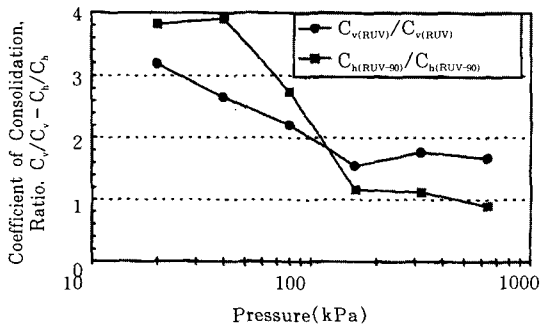


Fig.8 Comparison of coefficients of consolidation ratio between Rowe-type and conventional consolidometer tests

다. 이는 내향수평배수시험에서 연직배수재를 설치할때 맨드릴에 의해서 발생한 스미어 때문이다. 이 비는 과압밀응력에서는 대단히 작으나 압밀응력이 증가 할수록 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 스미어 영향은 과압밀응력범위에서 크고 과압밀비가 클수록 크다는 사실을 나타내어 주고 있다. 또한, 90도회전연직배수시험에 의한 수평압밀계수 $C_{h(RUV-90)}$ 는 $C_{h(RUO)}$ 보다 작게 측정되며 그 차이는 압밀응력이 증가할수록 감소한다. 이는 90도회전연직배수시험에서는 압밀응력이 증가함에 따라 연직방향의 압밀응력에 의해서 토립자의 구조적 이방성이 감소되는 반면 수평배수시험에서는 구조적 이방성이 더욱 더 발달되기 때문이다.

한편 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 Rowe형 압밀시험기에 의한 압밀계수 $C_{h(RUV-90)}$ 및 $C_{v(RUV)}$ 는 일반압밀시험기에 의한 $C_{h(SUV-90)}$ 및 $C_{v(SUV)}$ 보다 각각 0.8~3.8배 및 1.7~3.2배 정도 크게 측정되며 이 비는 압밀응력이 커질수록 감소하는 경향을 보여준다.

3.2.2 압밀속도의 이방성

여러 가지 시험에 의한 수평 및 연직압밀계수비(C_h/C_v)를 그림 9에 나타내어 시험종류에 따른 압밀속도의 이방성을 나타내었다. $C_{h(RUO)}/C_{v(RUV)}$ 는 전응력 범위에서 대략 1.5~2.2로서 이정도 크기의 구조적 이방성을 나타내고 있다. 또한 $C_{h(RU1)}/C_{v(RUV)}$ 는 과압밀응력범위로부터 정규압밀응력범위에 걸쳐 응력이 증가함에 따라 0.5로부터 1.4까지 증가함을 나타내어 주고 있으며, 이는 스미어 영향이 과압밀응력범위에서 크게 작용하고 정규압밀응력범위에서는 응력이 증가할수록 점점 감소함을 보여 준다. 그림 10에서 $C_{h(RU1)}/C_{v(SUV)}$ 는 압밀응력이 20kPa에서 640kPa까지 증가함에 따라 1.6에서 2.4정도까지 증가하는 경향을 보여주며 전응력 범위에 대한 평균치는 약 2.0정도이다. 또한 $C_{h(RU1)}/C_{h(SUV-90)}$ 은 전응력 범위에서 1.5~3.3정도이고 $C_{h(RUO)}/C_{h(SUV-90)}$ 은 1.7~7.2 정도이다.

따라서 일반압밀시험기에 의해서 공시체를

90도 회전시켜서 구한 수평압밀계수는 실제보다 지나치게 적게 측정되므로 수평압밀계수를 일반압밀시험기에 의해서 직접 측정하고자 하는 것은 무리이다. 그러나 연직배수공법에 의한 연약점토지반의 개량시에는 맨드럴에 의한 스미어 영향을 고려하여 설계에 적용하는 수평압밀계수 $C_{h(RU)}$ 는 일반압밀시험기에 의한 연직압밀계수 $C_{v(SUV)}$ 의 2.0배 정도로 함이 타당하나 현장의 시공성을 고려하여 그대로 적용해도 무방할 것으로 판단된다.

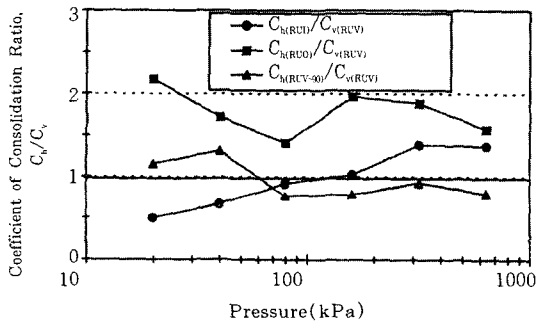


Fig.9 Coefficient of consolidation ratio(C_h/C_v) by Rowe-type consolidometer test

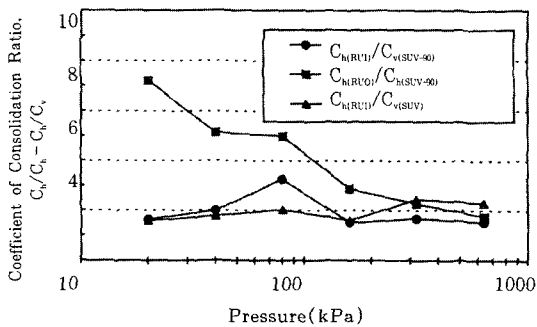


Fig.10 Comparison of coefficients of consolidation between Rowe-type and conventional consolidometer tests

3.2.3 교란시료의 압밀계수

그림 11에서 재생형공시체에 대한 내향 및 외향수평배수시험과 연직배수시험에 의해서 구한 압밀계수를 나타내었다. 재생형공시체는 불교란공시체와는 달리 과압밀응력에 의해서 발달한 구조가 교란에 의해서 모두 파괴되었으므로 이들 시험에 의한 압밀계수는 압밀응력이 증가할수록 모두 감소하고 이들 계수들 간의 차이는 대단히 적게 측정되므로서 교란시료의 압밀계수는 토립자의 구조적 이방성과 스미어 영향이 비교적 적다는 사실을 엿 볼 수있다.

그림 12에서 교란시료와 불교란시료의 압밀계수비가 전응력범위에서 0.12~0.51 정도를 나타내고 있어 시료교란에 의해서 수평 및 연직압밀계수가 크게 감소함을 보이고 있다. 그러나 이 압밀계수비는 정규압밀응력범위 내에서 압밀응력이 증가함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보여주므로서 압밀계수에 대한 교란영향이 감소됨을 알 수 있다. 정규압밀응력 범위에서는 압밀시험종류에 관계없이 재생형공시체의 압밀계수는 불교란공시체의 약20~35% 정도로서 Shogaki와 Kaneko(1994)의 연구에서 주장한 약 70%보다 훨씬 적다.

그림 13에서 나타낸 재생형공시체에 대한 수평 및 연직압밀계수비 $C_{h(RD)}/C_{v(RDV)}$ 는 1.1~1.5정도로서 토립자의 구조적 이방성으로 인한 압밀계수의 이방성이 비교적 적음을 구체적으로 보여주고 있다. 그러나 교란된 토립자구조 일지라도 압밀응력이 증가함에 따라 압밀계수의 이방성이 증가하고 있어서 시험중 선행압밀응력에 의해서 구조적이방성이 발달되고 있음을 알 수 있다.

한편 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 $C_{h(RD)}/C_{h(RD)}$ 는 0.76~0.97으로서 초기의 낮은 응력하에서는 거의 1.0에 가까우므로 스미어 영향을 거의 나타내지 않았으나 압밀응력이 증가함에 따라 이 압밀계수비가 점차 감소함을 보여주므로서 교란된 시료일지라도 스미어 영향이 있음을 보여주고 있다.

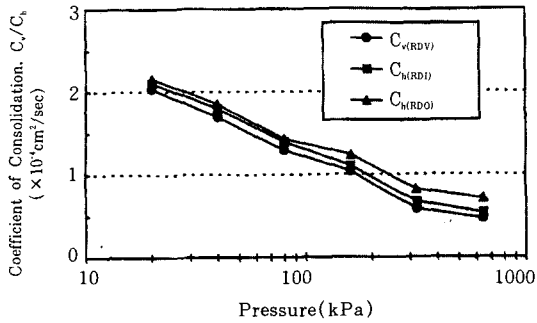


Fig.11 Coefficients of consolidation of the remolded clay

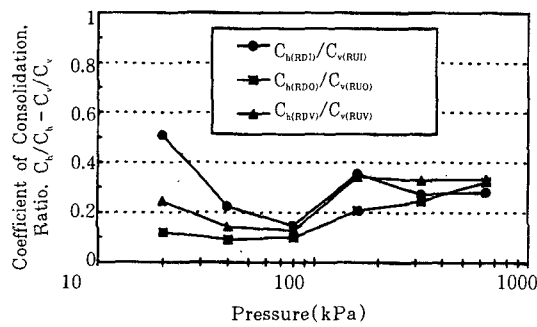


Fig.12 Comparison of coefficient of consolidation between undisturbed clay and remolded clay

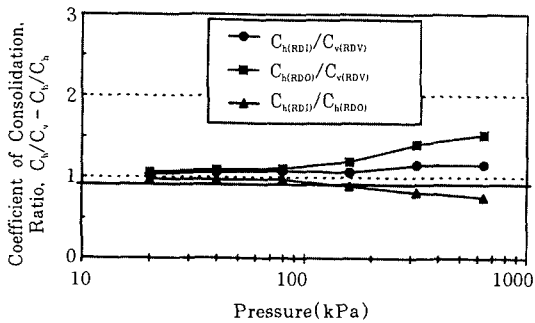


Fig.13 Coefficient of consolidation ratios for remolded clay

4. 결 론

퇴적점토지반의 압밀속도에 관한 이방성을 연구하기 위하여 실험실에서 인공적으로 퇴적시켜 준비한 시료를 사용하여 Rowe형 압밀시험기와 일반압밀시험기에 의해서 연직배수 및 수평배수 압밀시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정규압밀응력 범위에서 Rowe형 압밀시험기에 의해서 구한 수평압밀계수의 크기는 외향수평배수시험, 내향수평배수시험 및 90도회전연직배수시험의 순서로 감소하고 압밀응력의 증가에 따라 이들 압밀계수는 모두 감소하고 그 차이도 감소한다.

2) Rowe형 압밀시험기에 의해서 구한 압밀계수는 일반압밀시험기에 의한 값보다 약 1.0~4.0 배 정도 크게 측정되며 그 차이는 압밀응력이 커지게 되면 감소하는 경향을 보인다.

3) 본 연구에서 인공퇴적에 의해서 준비한 연약점토에 대해서 외향수평배수시험과 연직배수시험에 의해서 구한 압밀계수의 비 $C_{h(RUO)}/C_{v(RUV)}$ 는 전응력범위에서 대략 1.5~2.2로서 이 정도 크기의 이방성을 나타낸다.

4) 한편 Rowe형 압밀시험기에 의한 내향수평배수시험과 일반압밀시험기에 의한 연직배수시험에 의한 압밀계수비 $C_{h(RUI)}/C_{v(SUV)}$ 는 압밀응력이 증가함에 따라 1.6에서 2.4정도까지 증가하는 경향을 보여주나 전응력범위에 대한 평균치는 약 2.0정도이다. 따라서 연직배수공법에 의한 연약점토지반의 개량시에는 설계에 적용하는 수평압밀계수 ($C_{h(RUI)}$)는 재래식 일반압밀시험기에 의한 연직압밀계수 ($C_{h(SUV)}$)의 2.0배 정도로 함이 타당하다.

5) 교란시료와 불교란시료의 압밀계수비가 전응력범위에서 0.12~0.51 정도로서 시료교란에 의해서 수평 및 연직압밀계수가 크게 감소하나 압밀응력이 증가함에 따라 정규압밀응력 범위에서는 서서히 증가하는 경향을 보여준다.

감사의 글

이 연구는 1996년도 인하대학교 연구비 지원에 의해서 수행되었음, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 장연수의 4인(1995). "배수공법의 적정 산정 기술개발 ." 해안매립기술 산학 공동 세미나, Vol.2, No.5, pp.1-87.
2. 中堀和英(1982), 土木特殊工法 シリーズニ ; ベ-チカル ドレーン工法, 森北出版社, pp.16-17.
3. Bergado, D., Asakami, H., Alfaro, M. and Balasubramaniam, A.(1991). "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay," JSMFD, ASCE., Vol. 117, No.10, pp. 1509-1529.
4. Head, K. T.(1985), *Manual of Soil Laboratory Testing*, ELE International Limited, Vol. 3, pp.1129-1196.
5. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamental of Soil Behavior*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, pp. 131-160, pp. 197-198, pp. 228-246.
6. Rowe, P. W.(1959). "Measurement of the Coefficient of Consolidation of Lacustrine Clay." *Geotechnique*, Vol. 9, No. 3, pp. 107-118.
7. Rowe, P. W.(1966), "A New Consolidation Cell." *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, pp. 162-170.
8. Scott, R. F.(1990), "Radial Consolidation of a Phase-Change Soil." *Geotechnique*, Vol. 40, No. 2, pp. 211-221.
9. Seraphim, L. A.(1995). "Coefficient of Consolidation in Radial Drainage," *International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils.(IS-Hiroshima' 95)*, pp. 165-170.
10. Shogaki, T. and Kaneko, M.(1994), "Effect of Sample Disturbance on Strength and Consolidation Parameters of Soft Clay," *Soils and Foundations*, Vol. 34, No.3, pp. 1-10.
11. Shogaki, T., Moro, H., Mihara, M., Kaneko, M., Kogure, K., and Sudho, T.(1995), "Effect of Sample Disturbance on Consolidation Parameters of Anisotropic Clay," *International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils.(IS-Hiroshima' 95)*, pp. 561-566
12. Tavenas, F. Jean, P. Leblond, P. and Leroueil, S.(1983), "The Permeability of Natural Clays. part II: Permeability Characteristics," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 4, pp. 645-660
(접수일자 1998. 11. 21)