

## The Influence of Deformation Modes on the Coefficient of Consolidation in the Normally Consolidated Clay

<sup>1)</sup>, Jaehyeon Park, <sup>2)</sup>, Young-Hoon, Jung, <sup>3)</sup>, Choong-Ki, Chung

<sup>1)</sup> , Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> , Graduate Student, School of Civil, Urban and Geosystem Eng. Dept., Seoul Nat'l. University

<sup>3)</sup> , Associate Professor, School of Civil, Urban and Geosystem Eng. Dept., Seoul Nat'l. University

**개요(SYNOPSIS)** : Consolidation tests under various deformation modes were performed to investigate the effect of deformation modes on the coefficient of consolidation in the normally consolidated clay in remolded and undisturbed clay. The degree of soil anisotropy was evaluated using cross-anisotropic elasticity theory suggested by Graham et al.(1983). Experimental results showed that the vertical compressibility was larger than the horizontal compressibility by 12~21% for the remolded clay and by 23~60% for the undisturbed clay, respectively. The results of a series of consolidation tests under the specific deformation modes showed that the coefficient of consolidation under 1 dimensional vertical strain condition was larger than that under 3 dimensional strain condition due to different deformation mode. Furthermore, the coefficient of consolidation under 1 dimensional vertical strain condition was larger than that under 1 dimensional horizontal strain condition by 40~60% in undisturbed clay, which clearly emphasized the significant effect of soil anisotropy on the rate of consolidation. Consequently, it can be concluded that the anisotropic deformation modes of soils, especially naturally deposited clays, should be taken into account for more accurate evaluation of the coefficient of consolidation.

**주요어(Key words)** : *deformation mode, deformation characteristic, soil anisotropy, coefficient of consolidation, normally consolidated clay*

### 1. 서론

점성토 지반의 압밀 문제를 해결함에 있어 가장 중요한 문제 중의 하나는 압밀속도를 정확히 예측하는 것이다. 압밀방정식의 정의에 의해 압밀속도는 압밀계수를 통해 평가되며, 압밀계수는 투수계수와 체적압축계수에 의해 정의된다. 따라서 정확한 압밀속도 예측을 위해서는 토체의 흐름에 대한 고려와 함

계 압밀 중 나타나는 흙의 변형특성을 고려해야 한다. 흙의 변형특성은 재하 방법에 따른 변형형상과 흙의 이방성에 의해 결정된다. 등방재료로 가정된 흙에서도 변형형상에 따라 압밀계수는 다르게 정의될 수 있으며(Davis, 1972), 이러한 변형형상에 의한 압밀계수의 차이는 재료가 이방적 변형특성을 가질 경우 더욱 두드러지게 됨이 해석적으로 밝혀진 바 있다(정영훈 등, 2001).

## 2. 이론적 배경

### 2.1 직교 이방성

일반적으로 흙은 생성 과정 중의 퇴적 과정을 통해서 수평방향의 조직적 입자 배열을 가지게 되며 이로 인해 연직방향과 그에 수직인 수평방향의 역학적 성질이 서로 다르게 나타나는 직교 이방성(cross-anisotropic elasticity)을 띠게 된다. Graham 등(1983)이 밝힌 바와 같이 일정 응력수준 하에서 정규압밀 점성토는 선형의 응력-변형을 관계를 가지며, 따라서 변형에 관한 점성토의 이방성은 다음과 같은 직교 이방 탄성으로 모델링하는 것이 가능하다.

$$\begin{pmatrix} \Delta\epsilon_x \\ \Delta\epsilon_y \\ \Delta\epsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_h & -\nu_{hh}/E_h & -\nu_{vh}/E_v & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{hh}/E_h & 1/E_h & -\nu_{vh}/E_v & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{hw}/E_h & -\nu_{hw}/E_h & 1/E_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{hh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{hw} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{hw} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, x와 y는 흙의 수평방향을, z는 연직방향을 나타내며,  $E_h$ 와  $E_v$ 는 각각 수평방향, 연직방향의 탄성계수(Young's modulus)이다.  $\nu_{hh}$ 는 수평면에서의 포아송비,  $\nu_{vh}$ 는 연직방향의 응력에 의해 발생한 수평면의 변형과 관계된 포아송비,  $\nu_{hw}$ 는 수평방향의 응력에 의해 발생한 연직방향의 변형과 관계된 포아송비,  $G_{hw}$ 는 연직면에서의 전단탄성계수,  $G_{hh}$ 는 수평면에서의 전단탄성계수이다. 식 (1)의 행렬은 열역학의 법칙에 따라 대칭성을 가지며(Pickering, 1970), 다음 식과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{\nu'_{hw}}{E_h} = \frac{\nu'_{vh}}{E_v} \quad (2)$$

또한, 수평면에서의 등방 조건에 의해  $G_{hh}$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$G_{hh} = \frac{E_h'}{2(1+\nu'_{hh})} \quad (3)$$

따라서, 식 (1)의 직교 이방성 행렬은 식 (2)와 식 (3)에 의해 5개의 독립 매개변수로 정의할 수 있다. 연직방향의 탄성계수에 대한 수평방향의 탄성계수의 비를 n으로 정의한다면 포아송 비  $\nu'_{hw}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\nu'_{hw} = n \cdot \nu'_{vh} \quad (4)$$

직교 이방성을 가지는 재료에 대해서 삼축압축시험을 실시할 경우 재하축과 연직방향의 축이 동일하

다면 전단응력과 전단변형률은 생기지 않는다. 또한 수평방향(x-y 평면)의 응력과 변형률은 동일하므로 식 (1)의 행렬은 다음과 같은 2x2 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & 2B^* \\ B^* & C^* + D^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $E^* = E_v$ ,  $E_h = \alpha^2 E^*$ ,  $\nu_{hh} = \nu^*$ ,  $\nu_{vh} = \nu^*/\alpha$ ,  $2G_{vh} = \alpha E^*(1 + \nu^*)$ ,  $n = \alpha^2$ ,  $A^* = \frac{E^*(1 - \nu^*)}{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}$ ,  $B^* = \frac{\alpha E^* \nu^*}{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}$ ,  $C^* = \frac{\alpha^2 E^*(1 - \nu^*)}{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}$ ,  $D^* = \frac{\alpha^2 E^* \nu^*}{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}$  이다. 식 (5)의 행렬은 평균응력( $p'$ ), 축차응력( $q'$ ), 체적변형률( $v$ ) 및 전단변형률( $\varepsilon$ )로써 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Graham 등, 1983).

$$\begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^* & J \\ J & 3G^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 삼축압축시험 조건에서는 3개의 독립 매개변수로 직교 이방체를 정의할 수 있으며, 이 때 각 변수는  $K^* = [A^* + 4\alpha B^* + 2\alpha^2(A^* + B^*)]/9$ ,  $G^* = [A - 2\alpha B^* + \alpha^2(A^* + B^*)]/3$ ,  $J = [A^* + \alpha B^* - \alpha^2(A^* + B^*)]/3$ 이다. 한 번의 응력경로 시험으로부터 평균응력( $p'$ ), 축차응력( $q'$ ), 체적변형률( $v$ ) 및 전단변형률( $\varepsilon$ )에 관한 두 쌍의 방정식을 얻을 수 있으므로, 두 가지 이상의 응력경로 시험을 행할 경우 필요한 독립 매개변수(즉  $K^*$ ,  $G^*$ ,  $J$ )를 모두 구할 수 있고 이로부터 재료의 이방성을 정량적으로 평가할 수 있다.

## 2.2 직교 이방성 조건에서의 압밀 계수

압밀 소요 시간의 문제에서 토체의 체적 압축성(즉 압축지수)은 압밀계수에 직접 영향을 미친다. 흙을 등방 재료로 가정한 경우 변형 구속 조건이 1차원, 2차원 또는 3차원 조건인가에 따라 재하 하중과 체적 변형의 관계를 구분할 수 있으며, 이 때 1차원 또는 2차원 조건에서 변형의 방향성은 무시된다. 하지만 표 1과 같이 흙을 직교 이방성 재료로 가정한다면 변형 방향에 따라 조건을 보다 세분할 수 있다. 직교 이방성 재료의 2차원 변형 조건은 구속된 변위의 방향이 연직 방향인 경우(2차원 수평 평면 변형률 조건)와 두 개의 수평 방향 중 하나의 방향에 대한 변위를 구속한 경우(2차원 수직 평면 변형률 조건)로 나눌 수 있다. 마찬가지로 1차원 변형 문제의 경우 변형이 일어나는 방향이 연직 방향인 경우(1차원 수직 변형률 조건)와 하나의 수평 방향에서만 변형이 일어나는 경우(1차원 수평 변형률 조건)로 나눌 수 있다. 따라서 흙을 직교 이방성 재료로 가정한 경우 압밀 중 나타날 수 있는 변형형상은 5가지로 나눌 수 있다.

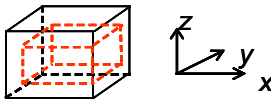

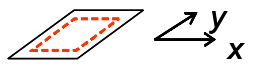
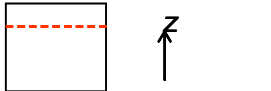
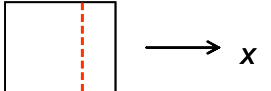
물로 포화된 다공질 재료에서 투수계수가 등방이고 그 흐름이 Darcy의 법칙을 따른다면, 체적의 감소율과 물의 유출속도간의 관계는 연속 조건에 의해 다음의 식으로 정의될 수 있다.

$$\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

여기서,  $k$ =투수계수,  $\gamma_w$ =물의 단위 중량,  $u$ =과잉간극수압,  $\varepsilon_v$ =유효응력 변화에 따른 흙의 체적변형률이다. Davis(1972)는 식 (7)로부터 균질하고 등방적인 탄성 지반에 대해 1차원, 2차원, 3차원 변형조건에 대한 압밀계수를 유도하였다. Davis(1972)가 제시한 압밀계수는 유효응력으로 표현된 체적 변형률

$\epsilon_v$ 을 이용하여 유도되며 이때 응력-변형률의 관계는 등방 선형 탄성으로 가정된다. Davis의 등방체에 대한 압밀계수 유도 과정과 유사한 방법을 통해 직교 이방체에 대한 압밀계수를 각각의 변형형상에 대해 정의하면 표 1과 같다 (정영훈 등, 2001).

표 1. 직교 이방 변형형상에서의 압밀계수

변형형상	압밀계수
3차원 변형률 조건 	$c_3 = \frac{knE'_v}{\gamma_w(2+n-2\nu'_h-4n\nu'_v)}$
2차원 수직 평면 변형률 조건 	$c_{2(vfs)} = \frac{knE'_v}{\gamma_w(1+n-2n\nu'_v-2n\nu'_v\nu'_h-\nu'_h{}^2-n^2)}$
2차원 수평 평면 변형률 조건 	$c_{2(hfs)} = \frac{knE'_v}{2\gamma_w(1-\nu'_h-2n\nu'_v{}^2)}$
1차원 수직 변형률 조건 	$c_{1(vs)} = \frac{knE'_v(1-\nu'_h)}{\gamma_w(1-\nu'_h-2n\nu'_v{}^2)}$
1차원 수평 변형률 조건 	$c_{1(hs)} = \frac{knE'_v(1-n\nu'_v{}^2)}{\gamma_w(1-\nu'_h{}^2-2n\nu'_v{}^2-2n\nu'_h\nu'_v{}^2)}$

### 3. 실험 내용

본 연구에서는 카올리나이트(kaolin)을 이용한 성형시료와 불교란 시료에 대해서 실험을 실시하였다. 두 재료에 대한 기본 물성치는 표 2와 같다. 카올리나이트 성형시료는 액성한계의 약 2배 정도 되는 100%의 함수비로 슬러리를 만들어 안정화시킨 뒤 대형 시료 성형기( $\phi=30\text{cm}$ )에 주입하여 상태로 하중을 가하여 성형하였다. 성형시료의 최종 성형 하중은 130kPa 이며, 전체단위중량은 1.69~1.72  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 함수비는 45.8~48.0% 이었다. 불교란 시료의 전체단위중량은 1.57~1.60  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 함수비는 69.9~71.5% 이다.

직교 이방 탄성행렬의 매개변수를 구하여 시료의 변형 이방성을 정량적으로 확인하기 위해서 삼축시험기를 이용하여 일련의 응력경로시험을 행하였다. 표 3에서는 응력경로시험 시 초기 및 재하 하중에 대해 정리하였다. 성형시료의 경우 먼저 연직압 200kPa의 압밀을 실시하여 초기응력상태를 구현한 후, 0.57, 1.0의 두 가지 유효응력 증분비( $d\sigma'_h/d\sigma'_v$ )에 대한 응력경로로 실험하였다. 불교란 시료의 경우 연직압 150kPa의  $K_0$ 압밀을 가하여 초기응력상태를 구현한 뒤 0.59와 1.0의 유효응력 증분비( $d\sigma'_h/d\sigma'_v$ )에 대한 응력경로로 실험하였다. 성형시료의 경우, 동일한 평균 유효응력( $p'$ ) 상태에 대한 직교 이방 매개변수를 구하기 위해서, 각 응력경로시험 시 동일한 평균 유효응력 증분량( $\Delta p'$ )을 5단계에 걸쳐 재하하였다. 불교란 시료의 유효응력의 증분 단계는 3단계이며, 이 경우 역시 평균 유효응력 증분량( $\Delta p'$ )을 일정하게 유지하며 재하하였다. 그림 1과 2는 성형 및 불교란 시료에 대한 단계별 유효응력경로를 보여 준다.

표 2. 성형 시료와 불교란 시료의 기본 물성치

비고	비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)	200번체 통과율(%)	통일 분류
성형 시료	2.60	45.12	29.90	15.22	98.00	CL
불교란 시료	2.63	47.28	28.22	19.06	99.87	CL

표 3. 응력경로 시험

비고	초기 연직압	응력증분비 ( $d\sigma'_h/d\sigma'_v$ )	응력 증분 단계 ( $\Delta p'$ )
성형시료	200 kPa	0.57 , 1.0	10kPa, 20kPa, 40kPa, 70kPa, 100kPa
불교란 시료	150 kPa	0.59 , 1.0	30kPa, 60kPa, 120kPa

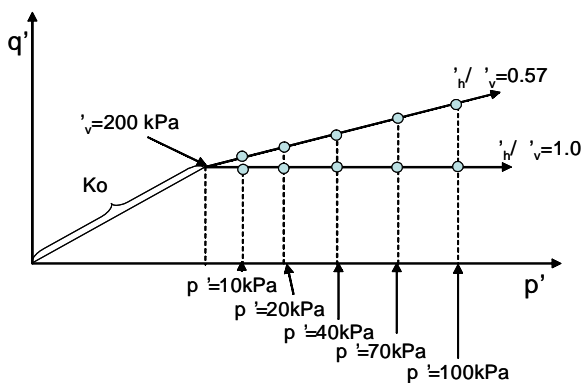


그림 1. 성형시료의 유효응력경로시험

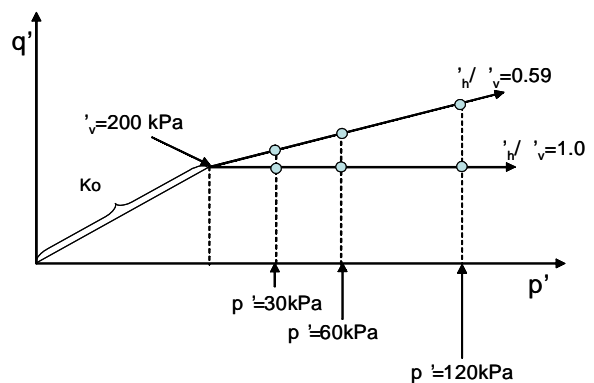


그림 2. 불교란 시료의 유효응력경로시험

직교 이방 재료의 변형형상에 따른 압밀계수의 변화를 살펴보기 위해, 응력경로시험에서 이용한 시료와 동일한 시료를 이용하여 다양한 변형조건에 대한 압밀시험을 수행하였다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이 직교 이방 재료가 가질 수 있는 변형형상은 모두 5가지이지만, 본 연구에서는 실험 제원의 한계로 인해 3차원 변형률 조건, 1차원 수직 변형률 조건, 1차원 수평 변형률 조건에 대해서 압밀시험을 실시하였다. 두 가지의 1차원 변형률 조건에 대한 압밀시험은 표준압밀시험기를 이용하였으며, 3차원 변형률 조건에 대한 압밀시험은 삼축시험기를 이용하였다. 1차원 수평 변형률 조건에 대한 압밀시험은 퇴적 방향에 수직인 방향으로 절단된 시료를 이용하였고, 1차원 수직 변형률 조건에 대한 압밀시험은 일반적인 표준압밀시험의 경우와 같은 방향으로 시료를 절단하여 실시하였다. 변형 조건이 압밀계수에 미치는 영향을 파악하기 위해서 압밀시험 중에 독립적으로 변수위 투수시험(Head, 1994)을 실시하였다. 이를 통해 투수계수의 이방성에 의해 발생하는 압밀계수의 차이와 변형 이방성에 의해 발생하는 차이를 독립적으로 평가하였다. 압밀시험에서도 유효응력경로시험과 마찬가지로 성형시료, 불교란 시료 각각  $K_0$  상태에서 200kPa, 150kPa의 연직압을 가하여 초기응력상태를 구현하였다.

## 4. 결과

### 4.1 변형 이방성

성형시료와 불교란 시료에 대해서 실시한 응력경로시험들을 통해 측정된 연직압, 횡방향압, 연직 변형률, 횡방향 변형률을 이용하여 평균응력( $p'$ ), 축차응력( $q'$ ), 체적변형률( $w$ ) 및 전단변형률( $\epsilon$ )을 구하여

식 (6)에 대입하면 매개변수  $K^*$ ,  $G^*$ ,  $J$ 를 통해 이방적 탄성계수와 포아송비를 구할 수 있으며, 그 결과는 표 4와 같다. 연직 방향과 횡 방향의 탄성계수비( $n = E_h/E_v$ )는 재료의 이방성 정도를 나타낸다. 표 4에서  $n$ 값을 살펴보면, 성형시료의 경우 연직방향의 압축성이 수평방향보다 12~21% 정도 크며, 불교란 시료의 경우 연직방향 압축성이 23~60% 정도 크음을 알 수 있다. 즉 성형시료보다 불교란 시료가 더욱 큰 이방적 구조를 지니고 있다. 성형시료의 경우와 달리 불교란 시료에서  $\nu_{hw}$ 가  $\nu_{hh}$  또는  $\nu_{vh}$ 의 값보다 상당히 큰 값이 나타나는 점 역시 이러한 사실을 확인시켜 준다. 또한 압밀압이 커지면서  $n$ 의 값은 감소하며, 재료의 이방성이 감소함을 알 수 있다.

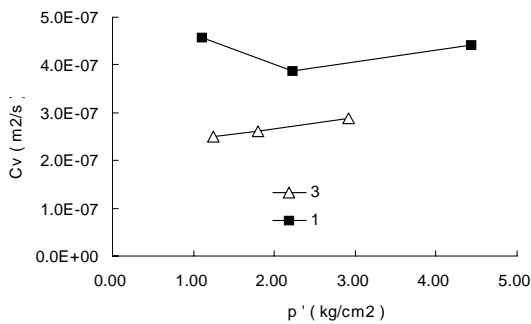
표 4. 직교 이방탄성 매개변수 값

비교	$\Delta p'$ (kPa)	$E_v$ (kPa)	$E_h$ (kPa)	$\nu_{vh}$	$\nu_{hv}$	$\nu_{hh}$	$n(E_h/E_v)$
성형시료	10	4903.1	5939.1	0.25	0.30	0.28	1.21
	20	4866.3	5842.6	0.25	0.30	0.28	1.21
	40	4793.6	5655.2	0.26	0.31	0.28	1.18
	70	4686.1	5386.8	0.27	0.31	0.29	1.15
	100	4580.4	5132.6	0.28	0.31	0.29	1.12
불교란 시료	30	2138.4	3415.4	0.25	0.40	0.32	1.60
	60	2263.8	3530.7	0.25	0.39	0.32	1.56
	120	4246.3	5230.0	0.29	0.36	0.32	1.23

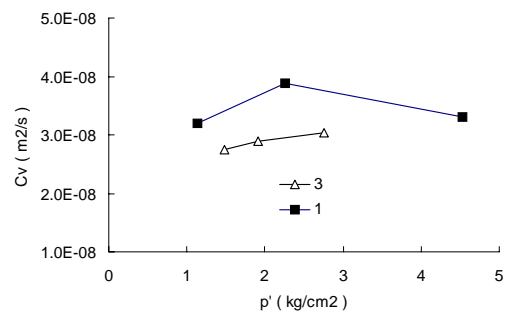
## 4.2 압밀 계수

동일한 연직배수 조건에서의 변형형상에 따른 압밀계수의 변화를 알아보기 위해서 1차원 수직 변형률 조건에서의 압밀계수와 3차원 변형률 조건에서의 압밀계수를 측정하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 성형시료와 불교란 시료 모두 1차원 수직 변형률 조건에서의 압밀계수가 3차원 변형률 조건에서의 압밀계수보다 20~60%정도 크다. 두 변형률 조건에서 압밀시험은 동일한 연직배수조건으로 실시하였으므로 투수계수 이방성이 압밀계수에 영향을 주지 않으며, 따라서 그림 3에 나타난 압밀계수의 차이는 변형형상의 차이에 의해 나타난다.

보다 구체적으로 이방적 변형특성이 압밀계수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 1차원 수직 변형형상과 1차원 수평 변형형상에 대한 압밀시험을 행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 압밀시험 중에 독립적으로 변수위 투수시험을 실시하였고, 이로부터 각 압밀 단계에서 투수계수를 실측하였다(표 6 참조).



(a) 성형 시료



(b) 불교란 시료

그림 3. 동일한 배수 조건에서의 변형형상에 따른 압밀계수

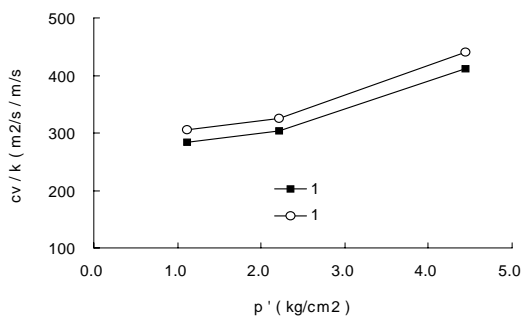
표 6. 1차원 변형형상에서의 투수계수

성형 시료			불교란 시료		
변형형상	연직구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	투수계수(m/s)	변형형상	연직구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	투수계수(m/s)
수직 변형	1.60	1.61e-09	수직 변형	1.60	2.86e-10
	3.20	1.28e-09		3.20	1.21e-10
	6.40	1.07e-09		6.40	7.25e-11
수평 변형	1.60	2.08e-09	수평 변형	1.60	3.02e-10
	3.20	1.82e-09		3.20	1.52e-10
	6.40	1.38e-09		6.40	8.92e-11

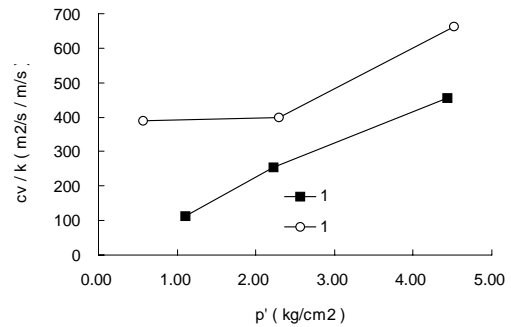
1차원 변형률 조건에서 변형 이방성에 의한 압밀계수 차이를 정량적으로 확인하기 위해, 각 압밀시험 단계에서 얻은 압밀계수를 해당 방향의 투수계수로 정규화하여 서로 비교하였다. 각 변형형상에 대해 정규화된 압밀계수를 표 7과 그림 4에 정리하였다. 정규화된 압밀계수를 비교해 보면, 불교란 시료의 경우 1차원 수평 변형률 조건에서의 압밀계수가 1차원 수직 변형률 조건에서의 압밀계수보다 40~60% 이상 크다. 하지만 성형시료의 경우 불교란 시료와 달리 그 차이가 7% 정도로 상당히 작다. 이는 불교란 시료가 가지고 있는 이방적 구조가 성형시료보다 뚜렷하기 때문이다. 이상의 결과로부터 정도의 차이가 있지만 변형 이방성이 변형조건에 따라 압밀계수의 값에 큰 영향을 준다는 사실을 확인하였으며, 이러한 결과는 실제 현장 조건에서의 압밀 속도를 정확히 추정하기 위해서는 변형 이방성을 반드시 고려해야 한다는 점을 말해준다.

표 7. 투수계수로 정규화한 압밀계수

비고	성형 시료		불교란 시료	
	연직구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	투수계수로 정규화한 압밀계수 [(m <sup>2</sup> /s)/(m/s)]	연직구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	투수계수로 정규화한 압밀계수 [(m <sup>2</sup> /s)/(m/s)]
1차원 수직	1.11	283.91	1.11	111.65
	2.22	302.97	2.22	255.78
	4.44	412.04	4.44	456.38
1차원 수평	1.11	305.21	1.11	388.69
	2.22	325.23	2.22	400.00
	4.44	441.31	4.44	661.76



(a) 성형 시료



(b) 불교란 시료

그림 4. 투수계수로 정규화한 1차원 변형률 조건에 대한 압밀계수

## 5. 결론

본 연구에서는 정규압밀 점성토의 변형형상에 따른 압밀계수의 변화를 살펴보기 위해 정규압밀 영역의 성형시료와 불교란 시료를 이용하여 다양한 변형형상으로 압밀실험을 수행하였다. 또한 일련의 응력경로시험을 이용하여 Graham 등(1983)이 제안한 방법을 이용하여 직교 이방성 계수를 평가하였고 이로 부터 대상 시료의 이방적 변형 상태를 정량적으로 확인하였다. 본 연구에서 실시한 시험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 일련의 응력경로시험을 통해 변형 이방성을 평가한 결과, 성형시료의 경우 연직방향의 압축성이 수평방향보다 12~21% 정도 크며, 불교란 시료의 경우 연직방향 압축성이 23~60% 정도 컸다.
2. 변형형상의 차이에 의한 압밀계수 차이를 확인하기 위해, 동일한 연직배수 조건에서 1차원 수직 변형률 조건과 3차원 변형률 조건의 압밀실험을 수행한 결과, 1차원 수직변형형상의 압밀계수가 3차원 변형형상의 압밀계수보다 20~60% 정도 컸다. 이는 변형조건이 압밀계수에 뚜렷한 영향을 줄을 확인시켜준다.
3. 이방적 변형특성이 압밀계수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 1차원 수직 변형률 조건과 1차원 수평 변형률 조건에 대한 압밀실험 결과를 비교하였다. 투수계수의 이방성을 배제하기 위해 압밀시험 중에 독립적으로 변수위 투수시험을 실시하여 각 압밀 단계에서 투수계수를 실측하였다. 해당 방향의 투수계수로 정규화한 압밀계수를 통해 이방적 압밀특성을 평가한 결과, 성형 시료의 경우 이방적 압축성이 압밀계수에 큰 영향을 주지 않았지만 불교란 시료에서는 이방적 압축성에 의해 1차원 수평 변형률 조건의 압밀계수가 1차원 수직 변형률 조건보다 40~60% 정도 큰 값이 나타났다. 이는 불교란 시료가 가지고 있는 이방적 구조가 성형 시료의 경우보다 뚜렷하기 때문이다. 변형조건에 의해 나타나는 압밀계수의 차이는 흙의 이방적 변형특성에 의해 더욱 뚜렷하게 나타난다.

따라서 실제 지반의 압밀계수를 정확히 산정하기 위해서는 대상 지반의 압밀 중 변형형상과 흙의 변형 이방성을 반드시 고려해야 할 필요성이 있다.

## 참고문헌

1. 정영훈, 정충기(2001), “다양한 변형 조건하에서 직교 이방성 지반의 압밀계수에 관한 연구,” **한국지반 공학회논문집**, 제 17권, 제 4호, pp.161~171
2. Chan, H.T., Cameron, K.T.(1973), “Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Soil,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.10, pp.453-472
3. Davis, E.H. and Poulos, H.G.(1972), “Rate of Settlement under Two- and Three- Dimensional Conditions,” *Geotechnique*, Vol.22, No. 1, pp.95-114
4. Graham, J. and Houlsby, G.T.(1983), “Anisotropic Elasticity of a Natural Clay,” *Geotechnique*, Vol.33, No.2, pp.165-180
5. Head, K.H.(1994), *Manual of Soil Laboratory Testing*, John Wiley and Sons, New York, pp.340-410
6. Pickering, D.J.(1970), “Anisotropic Elastic Parameters for Soil,” *Geotechnique*, Vol.20, No.3, pp.271-276