

다양한 변형 조건하에서 직교 이방성 지반의 압밀계수에 관한 연구

A Study on the Coefficients of Consolidation of the Cross-anisotropic Foundation under the Various Deformation Modes

정 영 훈* Jung, Young-Hoon

정 충 기** Chung, Choong-Ki

Abstract

Consolidation behavior in clayey soil is generally known to be determined by its permeability, but it is also strongly related to its deformation characteristics. Soil deformation depends on deformation mode chiefly determined by loading conditions and soil characteristics including its anisotropy. In this study, the influences of anisotropic deformation characteristics of clayey soil on consolidation behavior were studied. Under the various deformation modes, the consolidation equations were established and the coefficients of consolidation were derived, based on cross-anisotropic elastic theory. Estimations of coefficients of consolidation in both anisotropic and isotropic soils reveal that anisotropic ratio of elastic modulus has a strong effect on the rate of consolidation and coefficients of consolidation increase as the horizontal deformations are allowed and vertical deformation is constrained. Consequently, it is proposed that the soil anisotropy and the possible deformation modes should be taken into account for more accurate estimation of the rate of consolidation.

요 지

점성토의 압밀거동은 투수성뿐만 아니라 변형 특성에 따라 크게 영향을 받으며, 변형 특성은 재하 방법에 따른 변형조건과 흙의 특성, 특히 이방성에 따라 다르게 나타난다. 이 논문에서는 점성토의 이방적 변형 특성이 압밀거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 변형 조건에 대한 압밀방정식과 압밀계수를 직교 이방성 탄성이론을 이용하여 유도하였다. 다양한 변형 조건에서 등방과 이방적 변형 특성하의 압밀계수를 평가하였으며, 그 결과 탄성계수의 이방성이 압밀계수에 미치는 영향이 매우 크고, 특히 수평방향의 변위가 허용되고, 수직방향의 변위가 구속될수록 크게 나타났다. 따라서 점성토 지반에 대한 하중 재하시 압밀소요시간의 정확한 예측을 위해서는 발생 가능한 변형 조건과 이방적 변형 특성에 대한 적절한 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다.

Keywords : Coefficient of consolidation, Consolidation, Cross-anisotropy, Strain condition

1. 서 론

일반적으로 흙은 생성 과정과 응력 조건에 의해 이방성(anisotropy)을 띄게 된다. 퇴적 과정을 통해 생성되는 흙은 수평 방향의 조직적 입자 배열을 가지게 되

는데, 이 때문에 흙은 조직 이방성(fabric anisotropy)을 가지게 된다. 생성시 발생된 조직 이방성은 흙이 이방적 응력 상태를 가지게 하며, 이를 통하여 응력 유도 이방성(stress induced anisotropy)을 유발하여 이방성을 심화시킨다. 흙에서 나타나는 이방성은 이 두 가지 원인

* 1 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사과정

** 2 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 부교수

이 결합되어 나타나게 되지만 실제적으로 이를 분리하여 평가하는 것은 불가능하다. 이러한 이방성은 흙의 강도, 투수성, 변형 특성에 나타나며, 이 중에서 변형 특성에 대한 연구는 상대적으로 미흡하며 불확실하다.

변형 특성에서 나타나는 흙의 이방성은 일반적으로 연직 방향과 그에 수직인 수평 방향의 역학적 성질이 서로 다르게 나타나게 하며, 수평 방향에서는 방향에 관계없이 같은 성질을 가지게 된다. 이는 탄성론의 관점에서 직교 이방성(cross-anisotropic elasticity)으로 나타낼 수 있으며, 직교 이방성에서는 연직(z)방향과 수평(x 또는 y)방향의 탄성계수와 이에 따른 포아송비를 이용하게 된다. 이러한 직교 이방성을 이용하여 여러 지반공학

적 문제에 이방성을 적용한 사례가 있다(Kirkgard, 1991; Becker, 1989; Conte, 1998). 직교 이방성을 이용하여 지반공학 문제를 해결하기 위해 여러 종류의 흙에 대한 실험적 연구(Schmertman, 1978; Roesler, 1979; Stokoe 등, 1985; Bellotti 등, 1996)가 이루어 졌으며, 이에 대해 Jamiolkowski(1995)가 정리한 바가 있다. 직교 이방성으로 흙의 이방성을 표현하기 위해서는 6개의 매개변수가 필요하며 Becker(1989)와 Jamiolkowski(1995)는 문헌 조사를 통해 각 변수에 대한 값들을 정리하였다. 필요한 6개의 변수는 아래와 같으며 본 논문에서는 Becker와 Jamiolkowski의 자료를 다시 정리하여 표 1에 제시하였다.

표 1. 다양한 흙에서의 cross-anisotropic parameter (Becker, 1989; Jamiolkowski, 1995)

Ref.	Soil /Location	Test	Strain level (%)	E_h/E_v	ν_{hh}	ν_{vh}	ν_{hv}	G_{vh}/E_v
Ward et al.(1959)	London clay (England)	TX(CIU) V-H	0.2 0.6	1.4** 2.4**	-	-	-	-
Lo et al.(1971)	Nanticoke clay (Canada)	TX(CIU)	-	1.4**	-	-	-	0.29
Lo and Morin(1972)	St. Vallier clay (Canada)	TX(CIU)	-	0.8**	-	-	-	0.30
Kirkpatric et al.(1972)	Reconstituted Kaolin	PS-TX(CID-U) V-H-I	very large	0.6 0.84	-	-	-	-
Franklin et al.(1972)	Reconstituted Kaolin	Compression wave velocity	very small	1.8 4.0	-	-	-	-
Saada et al.(1973)	Reconstituted Edgar Kaolin Hydrite 10 Grundite	THCS V-H	large	0.99 1.35	-	-	-	-
Loh et al.(1974)	Winnipeg clay (Canada)	TX(CIU)	-	1.8**	-	-	-	0.28
Gibson(1974)	London clay (England)	TX(CIU)	-	1.35**	-	-	-	0.35
Atkinson(1975)	London clay (England)	PS-TX(CID-U) V-H	≈ 1	2	-	0	0.19	-
Lo et al.(1977)	Gloucester clay (Canada)	TX(CIU)	-	0.86**	-	-	-	0.33
Lo et al.(1977)	Leda clay (Canada)	TX(CID-U) cubic specimen V-H-I	0.4 0.6	0.55** -	0.10 -	0.08 -	0.08 -	0.42 -
Saada et al.(1978)	Reconstituted Edgar Kaolin	Longitudinal RC(V-H)	0.0001 0.007	1.25 1.35	-	-	-	-
Yong et al.(1979)	Champlain clay	TX(CID) V-H	0.5 1.0	0.62 -	0.20 -	0.35 -	0.24 -	-
Graham et al.(1983)	Winnipeg clay (Canada)	TX(CKoD)* V	≈ 3	1.78	-	0.22	-	-
Becker(1989)	Wallaceburg (Canada)	TX(CIU)	-	0.5** 1.6**	-	-	-	0.31 0.28
Kirkgard et al.(1991)	S. Francisco Bay Mud	TX(CIU) cubic specimen V-H	large	1.2 1.8**	-	-	-	-

TX = Triaxial Test
 PS = Plane Strain Test
 RC = Resonant Column Test
 THCS = Torsional shear test on Hollow Cylinder Specimens
 CID = Isotropically consolidated drained test
 CIU = Isotropically consolidated undrained test
 CKoD = Ko consolidated drained test
 I = inclined specimen
 H = specimens cut with the vertical bedding planes

V = specimens cut with the horizontal bedding planes
 * = TX and PS test performed
 under conditions of $\sigma_3 = \text{constant}$
 ** = undrained moduli ratio

E_v = 연직(z)방향의 탄성계수(Young's modulus)
 E_h = 수평(x 또는 y)방향의 탄성계수(Young's modulus)
 ν_{hh} = 수평면(x-y 평면)에서의 포아송비
 ν_{vh} = 연직(z)방향의 응력에 의해 발생한 수평면(x-y 평면)의 변형과 관계된 포아송비
 ν_{hv} = 수평(x 또는 y)방향의 응력에 의해 발생한 연직(z)방향의 변형과 관계된 포아송비
 G_{vh} = 연직면(x-z 또는 y-z 평면)에서의 전단 탄성계수 (Shear modulus)

흙의 변형 특성은 압밀 속도에 영향을 주는데, 이는 압밀계수가 투수계수 뿐만 아니라, 압축성과 관련되어 있기 때문이다. Davis(1972)가 제시한 바와 같이 등방적 재료로 가정된 흙에서도 각 차원의 변형 양상(deformation mode)에 따라 압밀계수는 다르게 정의될 수 있는데, 이는 압밀 속도가 변형 조건에 영향을 받음을 나타낸다. 이러한 변형 조건에 의한 압밀 속도의 차이는 재료가 이방적 변형 특성을 가질 경우 더욱 두드러질 것이다. Conte(1998)의 연구에서 직교 이방성으로 표현된 점성 토 지반이 평면 변형을 조건의 띠기초 하중을 받았을 때 이방적 변형 특성에 의해 압밀 침하량과 속도의 차이가 발생할 수 있음을 유한 요소 해석 결과를 통해 밝힌 바가 있다. 하지만 압밀 해석이 필요한 지반의 변형 조건은 지반 내의 각 위치에서 재하 중에 나타나는 응력 상태 및 구속 상태에 따라 다양하게 나타날 것이다. 따라서 이방성 지반의 압밀 해석을 위해서는 각 차원에 대한 다양한 변형 조건(deformation mode)과 지반의 변형 특성을 모두 고려해야 하며, 이를 위해서는 변형 조건에 따라 이방적 변형성을 고려할 수 있는 압밀계수의 결정이 필요하다.

본 논문에서는 이방성 지반에서 정의할 수 있는 다양한 변형 조건에서의 압밀 속도 추정을 위해, 직교 이방성(cross-anisotropic elasticity)으로 표현된 재료의 5가지 변형 조건에 대한 압밀계수를 해석적으로 유도하였다. 유도된 압밀계수를 이용하여 이방성 재료의 압밀 속도가 등방 재료의 압밀 속도와 어떠한 차이가 나타나는지 그리고 변형 조건이 압밀계수에 얼마나 영향을 미치는지 정량적으로 평가하고 비교해 보았다.

2. 압밀 계수의 유도

물로 포화된 다공질 재료에서 투수계수가 등방이고 그 흐름이 Darcy의 법칙을 따른다면, 체적의 감소율과

물의 유출 속도간의 관계는 연속 조건에 의해 다음의 식으로 정의될 수 있다.

$$\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서,

k = 투수계수
 γ_w = 물의 단위 중량
 u = 과잉 간극 수압
 ε_v = 유효응력 변화에 따른 흙의 체적 변형률

Davis(1972)는 일정한 선형 탄성계수(E, ν')를 가지는 균질하고 등방적인 탄성 지반에 대해 식(1)을 이용하여 1차원/2차원/3차원 변형 조건에 대한 압밀계수(c_1, c_2, c_3)를 유도하였으며, 이 때 각 차원에서의 압밀 방정식과 압밀계수는 아래와 같다. 여기서 E' 과 ν' 은 유효응력에 관한 탄성계수와 포아송비이며 등방 재료에 대한 값이다.

3차원 변형/배수 조건

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_3 \nabla^2 u + \frac{1}{3} \frac{\partial(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{\partial t} \quad (2)$$

$$c_3 = \frac{kE'}{3\gamma_w(1-2\nu')} \quad (3)$$

2차원 변형/배수 조건

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial(\sigma_x + \sigma_z)}{\partial t} \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{kE'}{2\gamma_w(1-2\nu')(1+\nu')} \quad (5)$$

1차원 변형/배수 조건

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_1 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (6)$$

$$c_1 = \frac{kE'}{\gamma_w} \frac{(1-\nu')}{(1-2\nu')(1+\nu')} \quad (7)$$

식 (2)~(7)에서 각 압밀계수는 각 차원의 변형 조건에 따라 다르게 정의된다. 또한 과잉 간극 수압의 소산 속도($\partial u / \partial t$)는 시간에 따른 전응력(total stress)의 변화율에 영향을 받는다. 유도된 압밀계수 c_1, c_2, c_3 는 포아송비의 값에 의해 식 (8)과 같은 관계를 가진다. 식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이, 포아송비 ν' 가 0.5에 접

근하면 c_1, c_2, c_3 은 거의 같은 값이 되며, $\nu' = 0$ 이면 $c_1 = 2c_2 = 3c_3$ 이 된다.

$$c_1 = 2(1 - \nu')c_2 = 3 \frac{(1 - \nu')}{(1 + \nu')} c_3 \quad (8)$$

Davis(1972)가 제시한 압밀계수는 유효응력으로 표현된 체적 변형률 ϵ_v 을 이용하여 유도되며 이때 응력-변형률의 관계는 등방 선형 탄성(isotropic linear elastic)으로 가정된다. 체적 변화에 기여하지 않는 전단 응력-변형률의 관계를 제외한다면 Davis가 이용한 3차원 응력-변형률 상태에서의 일반적인 등방 선형 탄성 구성식은 다음의 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' \\ -\nu' & 1 & -\nu' \\ -\nu' & -\nu' & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

이러한 등방 선형 탄성 구성식을 이용하는 대신 직교 이방성(cross-anisotropic elasticity) 재료의 구성식을 사용하면, 응력-변형률 관계를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다(Poulos and Davis, 1974)

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E'_h & -\nu'_{hh}/E'_h & -\nu'_{vh}/E'_v \\ -\nu'_{hh}/E'_h & 1/E'_h & -\nu'_{vh}/E'_v \\ -\nu'_{hv}/E'_h & -\nu'_{hv}/E'_h & 1/E'_v \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서 사용된 모든 탄성계수와 포아송비는 유효응력에 관한 계수이다.

E'_v = 연직(z)방향의 탄성계수(Young's modulus)

E'_h = 수평(x 또는 y)방향의 탄성계수(Young's modulus)

ν'_{hh} = 수평면(x-y 평면)에서의 포아송비

ν'_{vh} = 연직(z)방향의 유효응력에 의해 발생한 수평면(x-y 평면)의 변형과 관계된 포아송비

ν'_{hv} = 수평(x 또는 y)방향의 유효응력에 의해 발생한 연직(z)방향의 변형과 관계된 포아송비

포아송비 ν'_{vh} 와 ν'_{hh} 는 다음과 같이 간단하게 표시할 수 있다.

$$\nu'_{vh} = \nu'_v, \quad \nu'_{hh} = \nu'_h \quad (11)$$

연직 방향의 탄성계수 E'_v 와 수평 방향의 탄성계수 E'_h 의 비를 탄성계수비 n 이라 정의하면 역학적 관계에 의해 ν'_{hv} 는 다음과 같이 탄성계수비와 ν'_v 로 표현될 수 있다.

$$\frac{E'_h}{E'_v} = \frac{\nu'_{hv}}{\nu'_{vh}} = n \quad (12)$$

$$\nu'_{hv} = n\nu'_{vh} = n\nu'_v \quad (13)$$

따라서 직교 이방성 재료에서는 네 개의 독립변수 ($E'_v, E'_h, \nu'_v, \nu'_h$)로 체적 변화에 대한 응력-변형률 관계를 정의할 수 있으며, 식(1)과 식(10)~(13)을 이용하여 다양한 변형 조건에 대한 압밀계수를 유도할 수 있다. 등방 재료에서 정의되었던 3가지 변형 조건(1차원/2차원/3차원 변형 조건)은 이방성 재료에서 1개의 3차원 조건, 2개의 2차원 조건과 2개의 1차원 조건, 즉 총 5가지 변형 조건으로 나눌 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 변형 조건 각각에 대해 압밀계수를 다음과 같이 유도하였다.

2.1 3차원 변형 조건에서의 압밀 계수 유도

직각 좌표계에서 3차원 변형 조건은 x, y, z 방향으로의 변형이 모두 허용된 상태이다. 압밀계수를 평가하기 위해서는 체적 변형률 ϵ_v 의 정의가 필요하며 다음의 식과 같다.

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (14)$$

$$\epsilon_x = \frac{1}{E'_h} \sigma'_x - \frac{\nu'_{hh}}{E'_h} \sigma'_y - \frac{\nu'_{vh}}{E'_v} \sigma'_z \quad (15)$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu'_{hh}}{E'_h} \sigma'_x + \frac{1}{E'_h} \sigma'_y - \frac{\nu'_{vh}}{E'_v} \sigma'_z \quad (16)$$

$$\epsilon_z = -\frac{n\nu'_v}{E'_h} \sigma'_x - \frac{n\nu'_v}{E'_h} \sigma'_y + \frac{1}{E'_v} \sigma'_z \quad (17)$$

$$\epsilon_v = \frac{1}{nE'_v} [\{ (1 - \nu'_h - n\nu'_v)(\sigma'_x + \sigma'_y) + (1 - 2\nu'_v)n\sigma'_z \}] \quad (18)$$

유효응력의 정의로부터

$$\sigma'_x + \sigma'_y = \sigma_x + \sigma_y - 2u \quad (19)$$

$$\sigma'_z = \sigma_z - u \quad (20)$$

식(18)의 유효응력을 전응력과 과잉 간극 수압의 항으로 표시하면,

$$\epsilon_v = \frac{1}{nE'_v} [\{ (1 - \nu'_h - n\nu'_v)(\sigma_x + \sigma_y) + (1 - 2\nu'_v)n\sigma_z \} - (2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v)u] \quad (21)$$

시간에 따른 체적 변화를 $\partial \epsilon_v / \partial t$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = & \frac{1}{nE'_v} \left[\left\{ (1 - \nu'_h - n\nu'_v) \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + (1 - 2\nu'_v)n \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right) \right\} - (2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v) \frac{\partial u}{\partial t} \right] \quad (22) \end{aligned}$$

식(22)을 식(1)에 대입하여 정리하면 직교 이방성을 따르는 재료에 대한 3차원 압밀 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \frac{knE'_v}{\gamma_w(2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v)} \nabla^2 u \\ & + \left\{ \frac{(1 - \nu'_h - n\nu'_v)}{(2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v)} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} \right) \right. \quad (23) \\ & \left. + \frac{(1 - 2\nu'_v)n}{(2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v)} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right\} \end{aligned}$$

식(23)으로부터 등방적인 흐름을 가지고 직교 이방성을 따르는 재료의 3차원 변형 조건에서의 압밀계수는 다음과 같이 정의된다.

$$c_{3(ani)} = \frac{knE'_v}{\gamma_w(2 + n - 2\nu'_h - 4n\nu'_v)} \quad (24)$$

2.2 2차원 변형 조건에서의 압밀계수 유도

2차원 문제의 경우 등방 조건과는 달리 직교 이방성 조건에서는 두 가지의 2차원 변형 조건이 있을 수 있다. 하나는 y 축 방향의 변형이 억제되어 ϵ_y 의 값이 영이 되는 경우로서 평면 변형률 조건(plane strain condition)에 해당하는 경우이고, 또다른 경우는 ϵ_z 의 값이 영이 되는 경우로서 수직(z)방향으로의 변형이 구속되고 수평면(x - y 평면)상의 변형만이 허용된 경우이다.

$\epsilon_y = 0$ 인 2차원 변형 조건을 수직 평면 변형률 조건(vertical plane strain condition)이라 하고, $\epsilon_z = 0$ 인 조건을 수평 평면 변형률 조건(horizontal plane strain condition)이라고 정한다면, 각 변형 조건에서의 압밀 방정식과 압밀계수를 2.1절과 같은 방법에 의해 유도할 수 있다.

수직 평면 변형 조건(vertical plane strain condition, VPS / $\epsilon_y = 0$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \frac{knE'_v}{\gamma_w(1 + n - 2n\nu'_v - 2n\nu'_v\nu'_h - \nu'^2_h - n^2\nu'^2_v)} \nabla^2 u \\ & + \left[\frac{(1 - n\nu'_v - n\nu'_v\nu'_h - \nu'^2_h)}{(1 + n - 2n\nu'_v - 2n\nu'_v\nu'_h - \nu'^2_h - n^2\nu'^2_v)} \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \right. \\ & \left. + \frac{n(1 - \nu'_v - \nu'_h\nu'_v - n\nu'^2_v)}{(1 + n - 2n\nu'_v - 2n\nu'_v\nu'_h - \nu'^2_h - n^2\nu'^2_v)} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right] \quad (25) \end{aligned}$$

$$c_{2(VPS)} = \frac{knE'_v}{\gamma_w(1 + n - 2n\nu'_v - 2n\nu'_v\nu'_h - \nu'^2_h - n^2\nu'^2_v)} \quad (26)$$

수평 평면 변형 조건(horizontal plane strain condition, HPS / $\epsilon_z = 0$)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{knE'_v}{2\gamma_w(1 - \nu'_h - 2n\nu'^2_v)} \nabla^2 u + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \quad (27)$$

$$c_{2(HPS)} = \frac{knE'_v}{2\gamma_w(1 - \nu'_h - 2n\nu'^2_v)} \quad (28)$$

2.3 1차원 변형 조건에서의 압밀계수 유도

2차원 변형 조건에서와 마찬가지로 직교 이방성으로 정의된 재료의 1차원 변형 조건은 2가지로 나눌 수 있다. 하나는 일반적인 1차원 압밀 이론과 같이 수평방향의 변위가 구속되고 수직방향의 변위만이 허용되는 조건이다. 또 하나는 수평방향의 1차원적 변위만이 허용되는 조건이 있을 수 있다. 첫 번째 조건($\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = 0$)을 수직 변형 조건(vertical strain condition)이라 정하고 두 번째 조건($\epsilon_y = 0$, $\epsilon_z = 0$)을 수평 변형 조건(horizontal strain condition)이라 정한다면, 이 두 변형률 조건에 대한 직교 이방성 재료의 압밀 방정식과 압밀계수는 다음과 같이 유도된다.

수직 변형 조건(vertical strain condition, VS / $\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = 0$)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left[\frac{knE'_v(1 - \nu'_h)}{\gamma_w(1 - \nu'_h - 2n\nu'^2_v)} \right] \nabla^2 u + \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (29)$$

$$c_{1(VS)} = \frac{knE'_v(1 - \nu'_h)}{\gamma_w(1 - \nu'_h - 2n\nu'^2_v)} \quad (30)$$

수평 변형 조건(horizontal strain condition, HS / $\epsilon_y = 0$, $\epsilon_z = 0$)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{knE'_v}{\gamma_w} \frac{(1 - n\nu'^2_v)}{(1 - \nu'^2_h - 2n\nu'^2_v - 2n\nu'_h\nu'^2_v)} \nabla^2 u + \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \quad (31)$$

$$c_{1(HS)} = \frac{knE'_v(1-n\nu'_v)}{\gamma_w(1-\nu'_h{}^2-2n\nu'_v{}^2-2n\nu'_h\nu'_v)} \quad (32)$$

3. 직교 이방성 재료의 압밀계수 변화

3.1 탄성계수비 n과 두 개의 포아송비 ν'_v 와 ν'_h 의 일반적인 범위

2.1절에서 2.3절까지 여러 변형 조건에서 이방성 재료의 압밀계수를 유도하였으며 이를 표 2에 정리하였다. 다양한 변형 조건에서 압밀계수의 변화를 살펴보기

위해서는 직교 이방성을 정의하기 위한 변수의 일반적인 범위를 알아야 할 필요가 있다.

Pickering(1970)과 Gibson(1974)은 직교 이방성을 정의하기 위한 각 변수의 이론적인 범위를 다음과 같이 제시하였다.

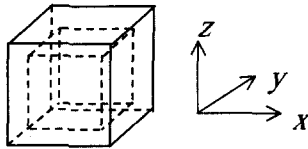
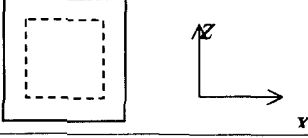
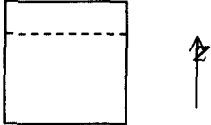
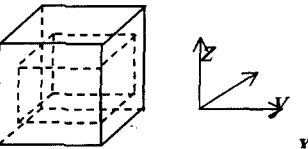
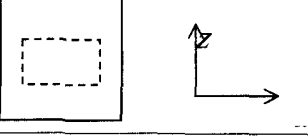
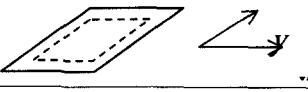
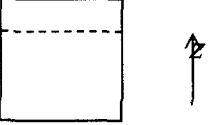
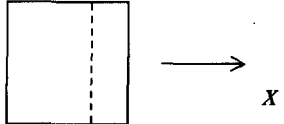
$$0 \leq n \leq 4 \quad (33)$$

$$E'_v, E'_h \geq 0 \quad (34)$$

$$G_{vh} > 0 \quad (35)$$

여기서 n은 탄성계수비(E'_h / E'_v)이며 E'_v, E'_h 는 각 방

표 2. 각 변형 조건에서의 압밀계수

변형률 조건	압밀계수
3차원 (등방) 	$c_3 = \frac{kE'_v}{3\gamma_w(1-2\nu')}$
2차원 (등방) 	$c_2 = \frac{kE'_v}{2\gamma_w(1+\nu')(1-2\nu')}$
1차원 (등방) 	$c_1 = \frac{kE'_v(1-\nu')}{\gamma_w(1+\nu')(1-2\nu')}$
3차원 (이방) 	$c_{3(ani)} = \frac{knE'_v}{\gamma_w(2+n-2\nu'_h-4n\nu'_v)}$
2차원 (이방) Vertical Plane Strain condition (VPS) 	$c_{2(VPS)} = \frac{knE'_v}{\gamma_w(1+n-2n\nu'_v-2n\nu'_v\nu'_h-\nu'^2_h-n^2\nu'^2_v)}$
2차원 (이방) Horizontal Plane Strain condition (HPS) 	$c_{2(HPS)} = \frac{knE'_v}{2\gamma_w(1-\nu'_h-2n\nu'_v)}$
1차원 (이방) Vertical Strain condition (VS) 	$c_{1(VS)} = \frac{kE'_v(1-\nu'_h)}{\gamma_w(1-\nu'_h-2n\nu'_v)}$
1차원 (이방) Horizontal Strain condition (HS) 	$c_{1(HS)} = \frac{knE'_v(1-n\nu'_v)}{\gamma_w(1-\nu'^2_h-2n\nu'_v{}^2-2n\nu'_h\nu'_v)}$

향의 탄성계수이고, G_{vh} 은 연직면에서의 전단 탄성계수이다. 표 1에서 탄성계수비 n 의 값은 약 0.5~4.0의 범위에 걸쳐 나타나고 있다. Becker(1989)의 실험 결과에서 n 은 0.5~2.4의 범위로 나타나 있고, 일반적인 값은 1.4~2.0의 범위로 제시되어 있다. 이는 그의 실험 자료 중 약 85%의 n 값이 1.0을 넘고, 15%만이 1.0이하의 값으로 나타났기 때문이다. 1.0이하의 n 값이 나타난 이유는 상부 지층에서 상대적으로 큰 OCR에서 나타나는 연직 압축성의 상대적인 감소와 낮은 심도에서 나타나는 연직 방향의 절리(joint) 또는 층리(fissure)의 영향을 들 수 있다(Gibson, 1974). Becker(1989)는 Wallacerg clay에 대한 실험을 통해 n 이 1.0이하로 나타나는 것은 주로 절리 또는 층리의 영향 때문으로 결론지었다. 이러한 기존 연구에 비추어 볼 때, 탄성계수비 n 의 값은 이론적으로는 0에서 4까지의 값을 가질 수 있으나, 흙이 정규 압밀 또는 약간 과압밀 상태인 경우 n 은 대부분 1.0~2.0 정도의 범위에서 나타남을 알 수 있다. 2개의 독립적인 포아송비(ν'_v 와 ν'_h)의 경우, 이론적으로는 -1.0에서 0.5까지의 값이 될 수 있지만(Pickering, 1970), 표 1의 실험 결과에 비추어 볼 때 포아송비는 대체로 0.05~0.4의 범위에서 정해짐을 알 수 있다.

3.2 탄성계수비(n)에 따른 압밀계수의 변화

3.1절에 제시된 탄성계수비 n 의 가능한 범위를 고려하여 이방성 재료의 압밀계수를 구하기 위해, 계산에 필

표 4. n 에 따른 압밀계수의 변화

Material	Dimension	State(표 2 참조)	Coefficient of Consolidation($\times 10^{-7}$ m ² /sec)							
			n	0.1	0.5	1	1.5	2	3	3.5
Isotropic	3-D	-	1.449							
	2-D	-	1.712							
	1-D	-	2.499							
Anisotropic			0.1	0.5	1	1.5	2	3	3.5	4
	3-D	ANI	0.138	0.704	1.449	2.239	3.077	4.918	5.932	7.018
	2-D	VPS	0.209	0.938	1.712	2.430	3.165	4.944	6.174	7.862
	2-D	HPS	0.140	0.761	1.712	2.934	4.562	10.253	15.931	27.248
	1-D	VS	2.041	2.222	2.499	2.855	3.330	4.990	6.645	9.946
	1-D	HS	0.219	1.155	2.499	4.115	6.137	12.615	18.687	30.398

ANI = Cross-anisotropic elasticity
VPS = Vertical plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
HPS = Horizontal plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
VS = Vertical strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
HS = Horizontal strain condition (Cross-anisotropic elasticity)

표 3. n 의 변화에 따른 압밀계수의 비교를 위한 각 재료의 입력치

Isotropic material	Anisotropic material
$E' = 1000$ kPa	$E'_v = 1000$ kPa
$\nu' = 0.27$	$E'_h = n \times E'_v = 100 \sim 4000$ (kPa) ($0.1 \leq n \leq 4$)
$k = 2.0 \times 10^{-9}$ m/sec	$\nu'_v = \nu'_h = 0.27$
$\gamma_w = 10$ kN/m ³	$k = 2.0 \times 10^{-9}$ m/sec, $\gamma_w = 10$ kN/m ³

요한 입력치를 표 3과 같이 정하였다. 표 3의 입력치는 일반적인 점성토에서 나타날 수 있는 값이며 이 값들을 이용하여 얻은 각 변형 조건에 대한 압밀계수를 서로 비교하였다. 압밀계수를 평가하고 비교하기 위해서는 각 방향의 탄성계수 값이 필요하다. 일반적으로 실내시험을 통해 얻을 수 있는 탄성계수는 수직방향의 값이므로, 수직방향과 수평방향의 탄성계수 차이에 의한 이방성의 영향을 평가하기 위해서는 수직방향의 탄성계수(E'_v)를 기준으로 정하는 것이 타당할 것이다. 따라서 등방 재료의 압밀계수를 계산하기 위한 탄성계수는 $E'_{(isotropic)} = E'_{v(isotropic)}$ 으로 정하였으며, 이방인 경우 $E'_h = n \times E'_v$ 로 정하여 탄성계수비 n 에 따라 E'_h 가 변하도록 하였다. 포아송비의 경우 등방과 이방 재료에서 모두 0.27로 동일하게 가정하여 포아송비 차이에 따른 영향은 배제하였다. 투수계수는 재료에 관계없이 등방의 값으로 가정하였다. 표 3의 입력치를 이용하고 3.1절에서 언급한 탄성계수비의 범위를 고려하여 n 을 0.1~4로 변화시켰을 때 압밀계수의 변화를 표 4에 제시하였다.

표 4에서 등방 재료(isotropic material)에 대한 압밀계

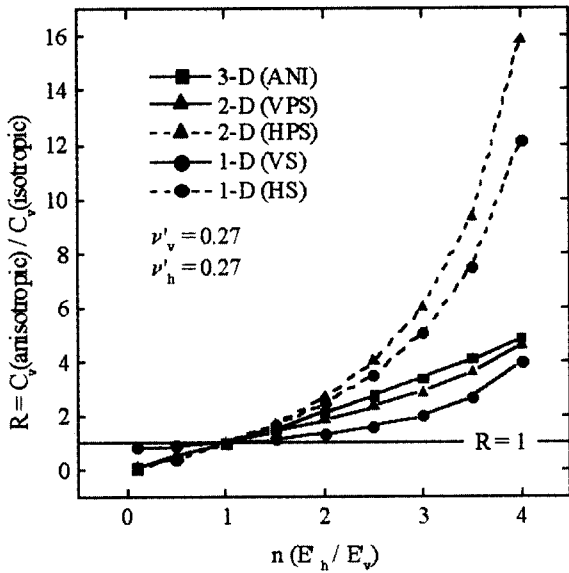


그림 1. n의 변화에 따른 압밀계수비의 변화

수를 살펴보면, 각 차원의 변형 조건에서 서로 다른 압밀계수가 평가되었으며, 그 값의 관계는 식(8)으로 정해짐을 이미 2절에서 밝힌 바 있다. 등방 재료의 경우 1차원 변형 조건에서 가장 큰 압밀계수를 가지며 3차원 변형 조건에서 가장 작은 값을 가진다. 이방성 재료인 경우 2절에서 언급한 바와 같이 각 차원과 이방성에 의해 구분되는 5가지의 변형 조건을 가지게 되며, 각각의 조건에서 압밀계수는 서로 다르게 평가된다.

압밀 속도의 변화에 대한 이방성의 영향을 알아보기 위해서는 이방성 재료의 압밀계수와 등방 재료의 압밀계수를 동일한 차원의 변형 조건에서 비교할 필요가 있다. 이를 위해 이방성 재료의 압밀계수를 각 차원에 대응하

표 5. ν'_v 또는 ν'_h 값의 변화에 따른 압밀계수의 비교를 위한 입력치

Isotropic material	Anisotropic material
$E' = 1000 \text{ kPa}$	$E'_v = 1000 \text{ kPa}$
$\nu' = 0.27$	$E'_h = 1000 \text{ kPa} (n = 1)$
$k = 2.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$	$\nu'_h = 0.27, \nu'_v = 0.05 \sim 0.4$
$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$	(or $\nu'_v = 0.27, \nu'_h = 0.05 \sim 0.4$)
	$k = 2.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec},$
	$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

는 등방 재료의 압밀계수의 값으로 나눈 압밀계수비(R : ratio of the coefficient of consolidation; $C_v(\text{anisotropic}) / C_v(\text{isotropic})$)를 그림 1에서 도시하였다.

그림 1에서 살펴보면 탄성계수비 n이 1보다 큰 값일 때, 압밀계수비 R은 1보다 큰 값을 가지며, 이는 이방성 재료의 수평방향의 탄성계수(E'_h)가 수직방향의 탄성계수(E'_v)보다 클 때, 이방성 재료에서 등방 재료보다 빠르게 압밀이 진행됨을 의미한다. 이와 반대로 수평방향의 탄성계수가 수직방향의 탄성계수보다 작을 때($n < 1$), 압밀계수비는 1보다 작은 값을 가진다. 3.1절에서 언급한 바와 같이 정규 압밀 또는 약간 과압밀 점토에서의 n은 1보다 큰 값이므로 연약한 점성토에서 압밀계수비는 1보다 큰 값(즉 이방성 재료에서 빠른 압밀진행)으로 보는 것이 타당하다.

각 변형 조건에서 n에 따른 압밀계수비 R의 변화를 살펴보면, 2차원 수평 평면 변형을 조건(HPS)에서 가장 큰 폭의 변화가 나타나며 1차원 수직 변형 조건(VS)에서 가장 작은 변화가 나타난다. 수평 방향의 변위가 허용될수록 그리고 수직 방향의 변위가 구속될수록 압밀

표 6. ν'_v 에 따른 압밀계수의 변화

Material	Dimension	State(표2참조)	Coefficient of Consolidation($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$)							
			ν'_v	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
Isotropic	3-D	-	1.449							
	2-D	-	1.712							
	1-D	-	2.499							
Anisotropic	3-D	ANI	0.885	0.971	1.075	1.205	1.370	1.587	1.887	2.326
	2-D	VPS	1.113	1.203	1.313	1.450	1.627	1.860	2.184	2.663
	2-D	HPS	1.379	1.408	1.460	1.538	1.653	1.818	2.062	2.439
	1-D	VS	2.014	2.056	2.131	2.246	2.413	2.655	3.010	3.561
	1-D	HS	2.167	2.196	2.247	2.326	2.440	2.606	2.849	3.226

ANI = Cross-anisotropic elasticity
 VPS = Vertical plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 HPS = Horizontal plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 VS = Vertical strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 HS = Horizontal strain condition (Cross-anisotropic elasticity)

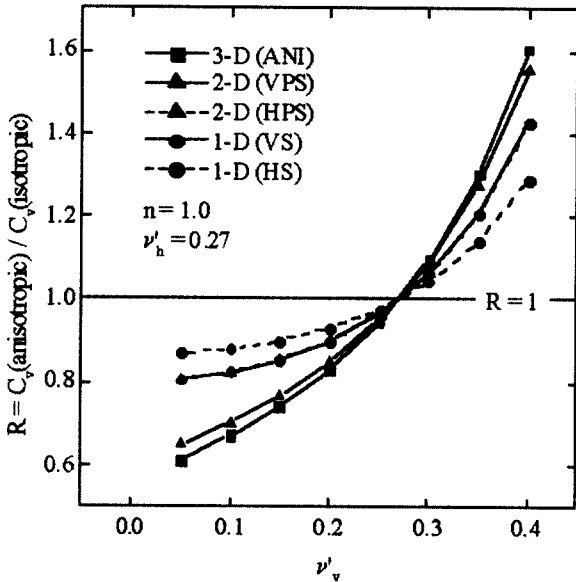


그림 2. ν'_h 의 변화에 따른 압밀계수의 변화

계수비의 변화가 크다. 즉 수직 변형 조건(VS)보다 수평 방향의 변위가 허용되는 수평 변형 조건(HS) 또는 수평 평면 변형을 조건(HPS)에서 압밀계수비의 n 에 따른 변화가 크며 압밀 속도에 대한 이방성의 영향이 더욱 크게 나타난다.

표 4에서 압밀계수의 절대량을 비교해 보면, n 이 1보다 클 때 1차원 수평 변형 조건(HS)에서 가장 큰 압밀계수 값을 가지게 되며 3차원 조건(ANI)에서 가장 작은 값을 가지게 된다. 이방성 재료에서 1차원 수직 변형 조건(VS)과 수평 변형 조건(HS)의 압밀계수를 서로 비교해보면, $n = 2$ 일 때 수평 변형 조건의 압밀계수가 약

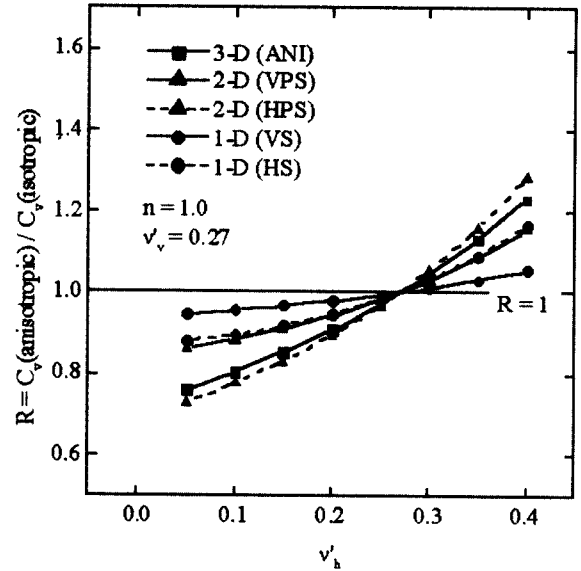


그림 3. ν'_h 의 변화에 따른 압밀계수비의 변화

2배 정도 큰 값을 가진다. 즉 수평 방향의 탄성계수가 수직방향의 탄성계수보다 2배가 큰 이방성 흙에서 횡방향으로 압력을 가하고 변형시키는 프레스미터 시험과 같은 현장 시험(수평 변형 조건, HS)으로부터 추정된 압밀계수는 표준 압밀 시험(수직 변형 조건, VS)으로부터 구한 압밀계수보다 2배 정도 큰 값이 될 수 있음을 보여준다.

이러한 변형 조건에 따른 압밀 속도의 차이는 성토 하중을 받는 이방성 지반의 압밀에서도 고려해 볼 필요가 있다. 성토 하중의 중심부에서는 수평 방향의 변위가 상대적으로 구속된 상태일 것이며, 성토 어깨 부분에서는

표 7. ν'_h 에 따른 압밀계수의 변화

Case	Dimension	State(표 2 참조)	Coefficient of Consolidation($\times 10^{-7}$ m ² /sec)							
			ν'_h	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
Isotropic	3-D	-	1.449							
	2-D	-	1.712							
	1-D	-	2.499							
Anisotropic	3-D	ANI	1.099	1.163	1.235	1.316	1.408	1.515	1.639	1.786
	2-D	VPS	1.473	1.512	1.558	1.614	1.681	1.762	1.859	1.978
	2-D	HPS	1.243	1.326	1.420	1.529	1.655	1.804	1.983	2.202
	1-D	VS	2.363	2.387	2.414	2.446	2.483	2.526	2.578	2.642
	1-D	HS	2.196	2.235	2.290	2.362	2.455	2.574	2.724	2.916

ANI = Cross-anisotropic elasticity
 VPS = Vertical plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 HPS = Horizontal plane strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 VS = Vertical strain condition (Cross-anisotropic elasticity)
 HS = Horizontal strain condition (Cross-anisotropic elasticity)

수평 방향 변위가 중심부보다는 크게 허용될 것이다. 이러한 위치에 따른 변위 구속 조건의 차이는 이방성 지반에서 압밀 속도의 차이를 유발시킬 것이다. 만약 성토 하중의 중심부를 1차원 수직 변형 조건(VS)으로, 성토 어깨 부분은 1차원 수평 변형 조건(HS)으로 가정한다면 탄성계수비가 2인 지반에서 성토 어깨 부분의 압밀은 중심부보다 2배 정도 빠르게 진행될 것이다. 이와 같이 이방성과 변형 조건에 의해 위치에 따라 압밀 진행 속도가 다르다면 일반적인 1차원 수직 변형 조건에 의해 예측된 압밀속도는 실제의 속도와 크게 다를 수 있다.

3.2 포아송비(ν_v, ν_h)에 따른 압밀계수의 변화

2 절에서 언급한 바와 같이 직교 이방성을 따르는 재료의 압밀계수를 정의하기 위해서는 세 개의 포아송비(ν_v, ν_h, ν_{hv})가 필요하지만, 독립적인 값을 가지는 포아송비는 두 개로서 수평 변형률에 대한 수직 응력의 포아송비 ν_v 와 수평 변형률에 대한 또다른 방향의 수평 응력의 포아송비 ν_h 이다. ν_{hv} 는 수직 변형률에 대한 수평 응력의 포아송비로서 탄성계수비 n 과 ν_v 로 정의되는 종속변수이다. 따라서 직교 이방성 재료의 압밀계수는 두 개의 포아송비 ν_v 와 ν_h 에 의해 영향을 받는다.

포아송비 변화에 따른 압밀계수의 변화를 알기 위해 수직 방향의 탄성계수와 수평 방향의 탄성계수가 동일한 상태($n = 1$)에서 각각의 포아송비를 0.05~0.4로 변화시키면서 압밀계수를 구하여 보았다. 계산에 필요한 입력치는 표 5에 정리하였다. 표 6과 그림 2에서 ν_v 에 따른 압밀계수와 압밀계수비(R)의 변화를 나타내었으며, 표 7과 그림 3에서 ν_h 에 따른 압밀계수와 압밀계수비(R)의 변화를 나타내었다.

그림 2와 3을 살펴보면 모든 변형 조건에서 포아송비의 증가에 따라 압밀계수비가 증가함을 알 수 있다. ν_v 를 변화시켰을 때, 2차원 수평 평면 변형률 조건(HPS)과 1차원 수직 변형률 조건(VS)의 압밀계수 값은 다르지만 압밀계수비는 동일하게 나타났다. ν_v 의 변화에 대해 가장 큰 폭의 압밀계수비 변화를 보이는 조건은 3차원변형률 조건(ANI)이며, 가장 작은 변화를 보이는 조건은 1차원 수평 변형률 조건(HS)이다.

ν_h 의 변화에 대한 압밀계수비의 변화는 2차원 수평 평면 변형률 조건(HPS)에서 가장 크게 나타났으며, 가

장 작은 변화는 1차원 수직 변형률 조건(VS)에서 나타났다. 고려된 포아송비 범위에서 ν_v 가 ν_h 보다 압밀계수비에 더 큰 영향을 미쳤으나, 그 차이는 크지 않았다. ν_v 의 변화에 따른 압밀계수비는 0.6~1.6 사이에 나타났고 ν_h 에 대해서는 압밀계수비가 0.7~1.3 사이에 나타났다.

이 변화의 폭은 3.2 절에서 탄성계수비 n 의 변화에 대한 압밀계수비의 변화 폭(약 0.1 ~ 16.0)보다 크게 작은 값이며, 이는 압밀계수의 절대값을 표 4~6에서 비교해도 확인할 수 있다. 따라서 탄성계수비(n)의 변화가 포아송비(ν_v, ν_h)의 변화보다 이방성에 의한 압밀 속도의 차이에 더 큰 영향을 준다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

흙이 갖고 있는 이방적 특성, 특히 점성토의 이방적 변형특성이 압밀거동에 미치는 영향을 평가, 분석하기 위하여 직교 이방성 탄성이론(cross-anisotropic elasticity)을 이용하여 다양한 변형 조건에 대한 압밀 방정식과 압밀계수를 유도하였다. 등방 재료의 경우 방향에 관계없이 1차원/2차원/3차원의 3가지 변형조건으로 압밀거동을 구분할 수 있는 반면에 일반적인 이방적 지반 재료의 경우 수평의 두 방향은 동일한 특성을 갖게 되므로 1개의 3차원, 2개의 2차원 그리고 2개의 1차원 조건에 대하여 압밀거동을 구분, 해석하게 되며, 각 조건에 대한 압밀계수를 유도하였다.

기존 연구에서 제시된 일반적인 이방성의 범위와 점성토에 대한 입력치를 이용하여, 각 변형조건에서 등방 조건과 이방조건의 압밀계수를 평가하고 그 결과를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점성토의 압밀계수 또는 압밀속도는 흙의 이방성 특히 탄성계수의 이방성에 따라 크게 영향을 받으며, 수평 평면 변형률 조건하에서 탄성계수비(n)가 0.1에서 4로 증가함에 따라 압밀계수는 등방 조건의 0.1배에서 16배로 증가한다.
- (2) 이방성을 고려할 때 수평방향 탄성계수가 더 큰 경우($n > 1$) 등방적인 경우보다 압밀계수를 더 크게 그리고 수평방향 탄성계수가 더 작은 경우($n < 1$) 압밀계수를 더 작게 평가한다. 따라서 수직방향 탄성계수(E_v)가 수평방향 탄성계수(E_h)보다 작게 나타나는 정규압밀 또는 약간 과압밀된 점성토인 경우의

압밀계수는 등방적 압축성(수직방향 압축성을 토대로)에 의한 압밀계수보다 모든 변형조건에서 큰 값을 가지며, 압밀이 빠르게 진행된다.

- (3) 이방적 변형특성이 압밀계수에 미치는 영향은 수평 방향의 변위가 허용될수록, 수직방향의 변위가 구속될수록 크게 나타난다.

위의 결과를 종합할 때 흙의 이방적 변형특성은 변형 조건에 따라 압밀 속도에 매우 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그러나 실제 흙의 응력 변형을 관계에서 나타나는 비선형성 또는 소성적 거동에 대하여 그리고 압밀 진행 중의 응력경로에 따라 변화하는 이방적 특성에 관해서는 관련 연구가 아직은 미흡하여 본 연구에 포함하지 못하였으며, 향후 이러한 점을 고려한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 BK21 서울대/한양대 사회기반 및 건설기술 인력 양성 사업단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

- Atkinson, J.H.(1975), "Anisotropic elastic deformations in laboratory tests on undisturbed London Clay", *Geotechnique*, Vol.25, No.2, pp.357-384.
- Becker, D.E.(1989), "The significance of anisotropic considerations for settlement prediction of foundations on clays", *Proc. of the 42nd Canadian Geotechnical Conference*, Winnipeg, Canada, pp.83-91.
- Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.C.F. and O'Neill, D.A.(1996), "Anisotropy of small strain stiffness in Ticino Sand", *Geotechnique*, 46, No.1, pp.115-131.
- Conte, E.(1998), "Consolidation of anisotropic soil deposits", *Soils and Foundations*, Vol.38, No.4, pp.227-237.
- Davis, E.H. and Poulos, H.G.(1972), "Rate of settlement under two- and three-dimensional conditions", *Geotechnique*, 22, No.1, pp.95-114.
- Franklin, A.G. and Mattson, P.A.(1972), "Directional variation of elastic wave velocities in oriented clay", *Clays and Clay Minerals*, Vol.20, pp.285-293.
- Gibson, R.E.(1974), "The analytical method in soil mechanics", *Geotechnique*, 24, No.2, pp.115-140.
- Graham, J. and Houlsby, G.T.(1983), "Anisotropic elasticity of a natural clay", *Geotechnique*, 33, No.2, pp.165-180.
- Jamiolkowski, M., Lancellota, R. and Lo Presti, D.C.F.(1995), "Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays", *Proc. of Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Mitachi and Miura, Shibuya, Japan, pp.817-836.
- Kirkgard, M.M. and Lade, P.V.(1991), "Anisotropy of normally consolidated San Francisco Bay Mud", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.14, No.3, pp.231-246.
- Kirkpatrick, W.M. and Rennie, I.A.(1972), "Directional properties of consolidated kaolin", *Geotechnique*, 22, No.1, pp.166-169.
- Lo, K.Y. and Morin, J.P.(1972), "Strength anisotropy and time effects of two sensitive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.9, No.3, pp.261-277.
- Lo, K.Y., Leonards, G.A. and Yuen, C.(1977), "Interpretation and significance of anisotropic deformation behaviour of soft clays", *Norwegian Geotechnical Publication*, No.117, Oslo, pp.1-16.
- Lo, K.Y., Seychuk, J.L. and Adams, J.I.(1971), "A study of the deformation characteristics of a stiff fissured clay", *ASTM Symposium on Sampling of Soil and Rock*, STP 483, pp.60-76.
- Loh, A.K. and Holt, R.T.(1974), "Directional variation in undrained shear strength and fabric of Winnipeg upper brown clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.11, pp.430-437.
- Pickering, D.J.(1970), "Anisotropic elastic parameters for soil", *Geotechnique*, Vol.20, No.3, pp.271-276.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H.(1974), *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley and Sons, INC., pp.9-10.
- Roesler, S.K.(1979), "Anisotropic shear modulus due to stress-anisotropy", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, No.GT7, pp.871-880.
- Saada, A.S., Bianchini, G.F. and Palmer, S.L.(1978), "The dynamic response of anisotropic clay", *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena CA, Vol.1, pp.777-801.
- Saada, A.S. and Ou, C.D.(1973), "Stress-strain relations and failure of Anisotropic clays", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.99, No.12, pp.1091-1111.
- Schmertman, J.H.(1978), "Effect of shear stress on dynamic bulk modulus of sand", *U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station*, Technical Report S-78-16.
- Stokoe, K.H.II, Lee, S.H.H. and Knox, D.P.(1985), "Shear modulus measurement under true triaxial stresses", *Proc. Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Loading Conditions*, ASCE Convention, Detroit.
- Ward, W.H., Samuels, S.G. and Gutler, M.E.(1959), "Further studies of the properties of London Clay", *Geotechnique*, Vol.9, No.2, pp.321-344.
- Yong, R.N. and Silvestri, V.(1979), "Anisotropic behavior of a sensitive clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, No.2, pp.335-350.

(접수일자 2001. 1. 29)