

## 수치해석을 이용한 점성토 지반의 아이소크론 영향 분석

## Analysis of Isochrone Effect of Clayey Soils using Numerical Analysis

이윤식<sup>1</sup> · 이종호<sup>2</sup> · 이강일<sup>3\*</sup>Yun-Sic Lee<sup>1</sup>, Jong-Ho Lee<sup>2</sup>, Kang-Il Lee<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Representative Director, Jeongmin Geo Tech, Seoul, Republic of Korea<sup>2</sup>Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University, Gyeonggi-do, Republic of Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Daejin University, Gyeonggi-do, Republic of Korea\*Corresponding author: Kang-Il Lee, [kilee@daejin.ac.kr](mailto:kilee@daejin.ac.kr)

## ABSTRACT

**Purpose:** The consolidation settlement of soft ground is dependent on the distribution of pore water pressure which is also affected by hydraulic conductivities (boundary condition) of layers, thickness of clayey soil layer and surcharge. **Results:** However, the current consolidation analyses are mostly based on Terzaghi's consolidation theory that assumes the initial pore water pressure ratio with depth to be constant. In this study, numerical analysis are carried out to investigate the variation of pore water pressure dissipation with depth and thickness of clayey soil layer, time, surcharge as well as drainage conditions. **Conclusion:** Comparative study with Terzaghi's consolidation theory is also conducted. The result shows that Terzaghi's consolidation theory should be used with caution unless it is ideally corresponded to the isochrone.

**Keywords:** Soft ground, Consolidation theory, Pore water pressure, Drainage condition, Isochrone

## 요약

**연구목적 :** 연약지반의 압밀침하는 연약 점토층 상하부에 분포하는 지층의 투수성(경계조건), 점토층의 두께, 그리고 하중 재하 폭에 따라 간극수압 분포특성이 달라짐에도 불구하고, 현재 설계의 대부분은 점토층의 깊이에 따른 초기간극비가 일정하다는 가정 하에 제안된 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 아이소크론(Isochrone)을 이용하여 압밀시간을 산정하고 있다. **연구방법 :** 따라서 본 연구에서는 하중 재하 폭, 점토층의 두께, 그리고 점토층 하부의 배수조건이 변화할 때 발생하는 과잉간극수압 소산형태를 수치해석적 방법으로 점토의 깊이별로 시간에 따른 과잉간극수압 변화를 체크하고, 이를 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 아이소크론과 비교·분석하여 합리적인 압밀시간 결정방법을 제시하고자 한다. **연구결과 :** 본 연구 결과, Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선에 가장 이상적인 경우가 아닌 경우에는 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 압밀도-시간계수 곡선, 압밀시간 산정에 유의해야 하며, 가능한 수치해석에 의한 압밀도-시간계수 곡선을 사용하여 압밀시간을 산정하여야 한다.

**핵심용어:** 연약지반, 압밀이론, 간극수압, 배수조건, 아이소크론

Received | 29 December, 2018

Revised | 2 January, 2019

Accepted | 27 February, 2019

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

연약 점토층의 압밀침하하는 흙에 가해진 하중에 의해 발생된 과잉간극수압의 소산과정을 통해 발생하며, 그 소산속도는 점토층 상, 하부 경계면에 분포하는 지층의 투수성에 따라 달라진다. 그러나 점토층의 두께가 두껍고, 하중 재하 폭이 작은 경우에는 지표면 부근에 과잉간극수압이 크게 발생하며, 하부로 갈수록 과잉간극수압이 작아진다. 또한, 점토층이 두껍고, 하중 재하 폭이 작으며, 하부에 불투수층이 존재할 경우에는 초기에는 양면배수의 거동을 보이지만 시간이 경과함에 따라 배수방향 하향에서 상향으로 바뀌는 현상이 발생하기도 한다. 이와 같이 연약지반의 과잉간극수압 소산형태(Isochrone)는 하중 재하 폭, 점토층의 두께, 그리고 점토층 상, 하부 흙의 배수조건(Boundary condition)에 따라 달라지지만, 현재 설계의 대부분은 점토층의 깊이에 따른 초기간극비가 일정하다는 가정 하에 Terzaghi가 제안한 아이소크론을 사용하여 압밀시간을 결정하고 있다.

Richat(1957)은 Terzaghi 압밀이론을 검토하였고, 간극비의 영향이 수직적 흐름을 갖는 압밀-시간특성의 변화는 중요하지 않은 것으로 결론지었고, Davis and Raymond(1965)가 제안한 비선형 1차원 압밀이론은 선형  $e-\log\sigma'$  관계를 고려할 때 얇은 점토층에서만 유효한 것으로 알려져 있다. Gibson et al.(1981)은 1967년 유한변형이론에 근거하여 투수성과 압축성을 고려하고, 압밀지반의 불균질성, 시간효과, 간극수의 압축성을 고려할 수 있는 1차원 비선형 압밀이론을 제안하였다. Lee and Sills(1981)은 Gibson의 유한변형이론에 의한 비선형 압밀이론을 적용하여 준설지역의 자중 압밀거동을 해석하였다. Vaid(1985)는 자중과 일정 하중재하 속도를 무시한 수직적 비선형 압밀의 해결법을 제시하였고, Xie et al.(2002)은 유효응력이 깊이에 대하여 일정할 경우 두 개의 토층으로 구성된 지반에 비선형 1차원 압밀을 이용한 해법을 제안하였다. 또한 Lekha et al.(2003) 흙의 압축성과 투수성의 변화를 고려하여 유한 두께의 수직 압밀에 대한 해법을 제시하였다. Xie and Leo(2004)는 점토층의 1차원 압밀에 대하여 대변형을 이용한 해법을 도출하였고, Abbasi et al.(2007)은 다양한 압축성, 투수성 및 압밀계수를 갖는 유한차분 접근법을 제안하였다. 국내에서는 준설토 지반의 대변형을 분석하기 위해 Lee et al.(1993)이 Gibson 등이 제안한 유한변형 압밀이론과 준설토의 침강과 자중압밀에 대한 모형시험을 결과를 이용하여 준설토 지반의 압밀거동을 분석하였으며, Yoo et al.(1995)은 Terzaghi의 선형 압밀이론과 Gibson의 비선형 압밀이론에 대하여 유한차분해석을 실시하여 각 이론의 차이점과 현장 적용성에 대하여 비교 하였다.

상기와 같이 압밀이론에 대한 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 현재 설계나 시공과정에서는 이론이 간단하고, 적용이 편리하다는 이유로 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 적용하고 있으나, 실제 현장에서 나타나는 압밀 경향과의 차이에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석으로 하중 재하 폭, 점토층의 두께, 점토층 상, 하부의 배수조건을 조합하고, 각 수치해석 조건에 대하여 심도별 시간경과에 따른 간극수압 변화를 측정하여 각각의 아이소크론을 결정하였다. 또한 수치해석을 통해 얻어진 아이소크론은 Terzaghi 1차원 선형 압밀이론에 의한 아이소크론과 비교·분석을 실시하여 하중 재하 폭, 점토층의 두께, 그리고 점토층 상하부의 배수조건에 따른 합리적인 압밀시간 결정방법을 제시하였다.

## 아이소크론에 대한 이론적 고찰

### Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의한 아이소크론 분석

Terzaghi 1차원 압밀이론은 점토층 상부에 하중이 작용할 경우 점토층에 발생하는 과잉간극수압은 깊이에 관계없이 일정

하게 분포한다는 가정하에 제안 되었으며, 점토층의 상, 하부의 배수조건에 따라 Fig. 1과 같은 아이소크론을 갖는다. 점토층의 한쪽 면에만 모래와 같은 투수층이 있을 때에는 배수길이 H는 그 층의 두께와 동일하나, 상하면에 투수층이 있을 때에는 점토층의 중앙을 중심으로 상하 양면으로 배수되기 때문에 H는 점토층의 두께의 반이 된다.

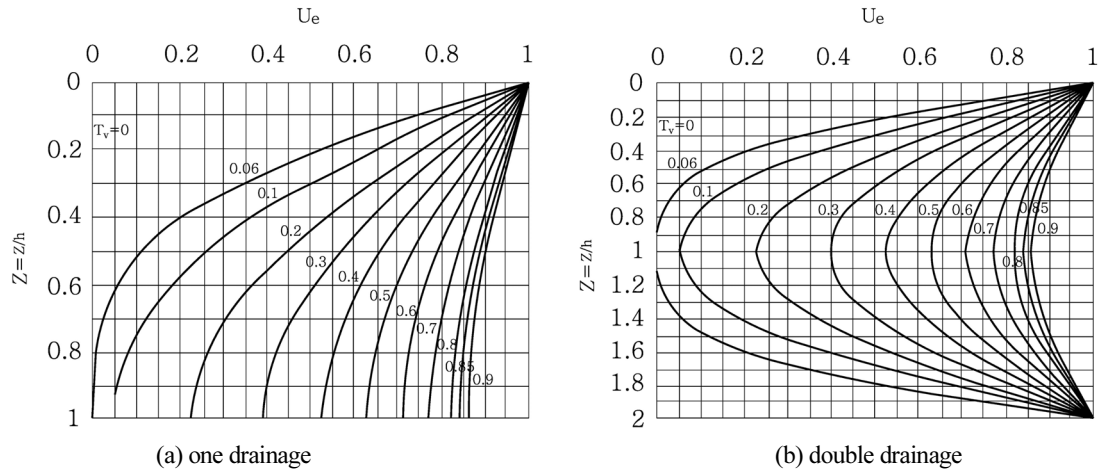


Fig. 1. Terzaghi 1-D Consolidation theory of isochrone (Terzaghi, 1943)

평균 압밀도와 시간계수 및 아이소크론 분포형태

임의 시간 t에서 지층의 깊이에 따른 과잉간극수압의 분포는 Table 1 및 Fig. 2와 같이 Sine곡선을 보이므로 압밀도는 지층의 깊이에 따라 달라진다. 그러나 공학적 관점에서는 각 깊이에서의 압밀도보다 점토층 전체의 압밀도가 필요하며, 이때의 압밀도를 평균 압밀도라고 한다. 평균 압밀도는 시간계수 T의 함수로서 표시되며, 과잉간극수압이 깊이에 따라 일정하게 분포된 경우, Fig. 2의 곡선(1)로 나타낼 수 있고, 곡선(2)와 곡선(3)은 경계조건이 다른 경우에 대해 얻어진 것이다. 평균 압밀도와 시간계수와의 관계는 다음과 같이 근사적인 공식으로 표시할 수 있다.

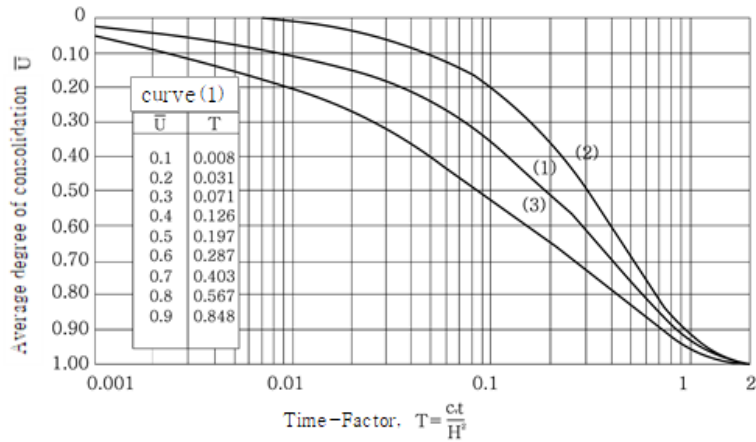
$$0 < \bar{U} < 53\% : T = \frac{\pi}{4} \left( \frac{\bar{U} (\%)}{100} \right)^2 \tag{1}$$

$$54\% < \bar{U} < 100\% : T = 1.781 - 0.933 \{ \log [100 - \bar{U} (\%)] \} \tag{2}$$

Fig. 2의 (1)곡선은 점토층이 얇고 지표면에 작용하는 하중이 점토층 하부까지 일정하게 전달되는 경우나 재하폭에 비해 점토층이 두꺼워 초기 과잉간극수압이 지표면에서는 크나 하부층으로 내려갈수록 작아져 삼각형이나 사다리꼴 형태를 보이는 경우에 적용된다. 또한 Fig. 2의 (3)곡선은 점토층이 두꺼워 상부에 작용하는 하중이 점토층 바닥면까지 전달되지 않아 초기 과잉간극수압이 “0”에 가까운 경우로 삼각형 형태를 보이는 경우에 적용된다. Fig. 2의 (2)곡선은 준설 지역과 같이 자중 압밀에 의한 흙 자체의 무게뿐 압밀층 상부에 발생하는 과잉간극수압이 “0”인 경우로 압밀층 하부가 불투수층인 경우에 적용하며, 만약 압밀층 하부가 배수층인 경우에는 (1)곡선을 적용하여야 한다.

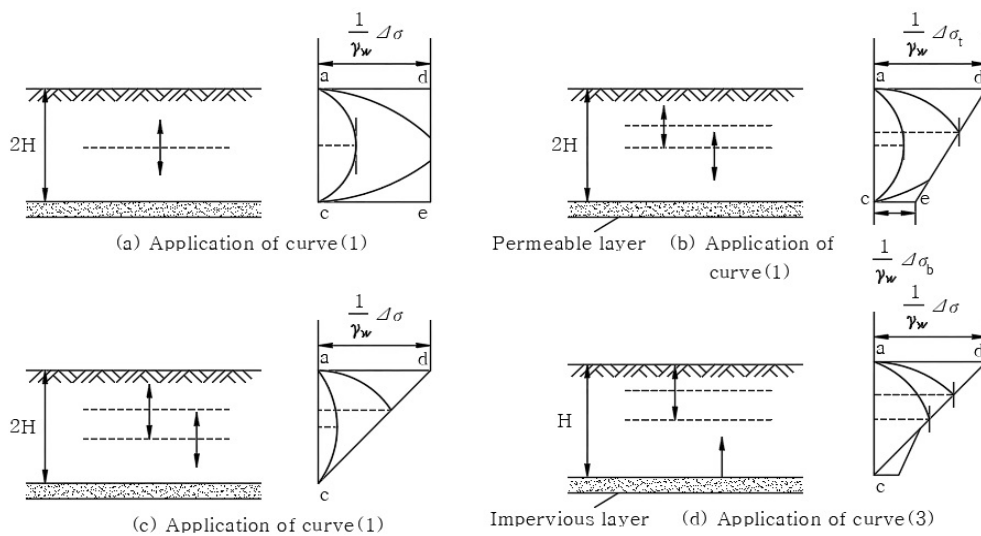
**Table 1.** Average degree of consolidation-time factor

Division		Average degree of consolidation(U)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Time factor (T)	curve (1)	0.008	0.031	0.071	0.126	0.197	0.287	0.403	0.567	0.848
	curve (2)	0.045	0.097	0.162	0.232	0.300	0.395	0.514	0.668	0.942
	curve (3)	0.002	0.009	0.024	0.047	0.086	0.158	0.269	0.416	0.700



**Fig. 2.** Average degree of consolidation-time factor(Terzaghi, 1943)

Terzaghi 평균압밀도-시간계수 곡선은 Fig. 3과 같이 압밀층이 비교적 얇아서 깊이에 따른 초기 과잉간극수압의 분포가 일정한 경우에 적용되지만(Fig. 3(a)) 실제 현장조건은 깊이에 따른 초기 과잉간극수압이 일정하지는 않아 아이소크론의 형태가 사다리꼴이나 삼각형의 형태를 나타내기도 한다(Fig. 3(b),(c),(d)).



**Fig. 3.** Isochrone form according to boundary conditions (Terzaghi, 1943)

## 수치해석

### 해석개요

본 연구에서는 과잉간극수압 소산 형태에 대한 영향을 분석하기 위해 Table 2와 같이 수치해석 CASE별 아이소크론 형태 및 압밀도-시간계수와의 상관관계를 표로 나타내었으며 Table 3은 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 아이소크론과 하중 재하 폭, 점토층의 두께 그리고 점토층 하부의 배수조건에 따라 달라지는 아이소크론을 비교·분석하기 위한 비교 방법을 나타내었다.

**Table 2.** Numerical analysis and isochrone correlation

Division	Case of numerical analysis					
	A	B	C	D	E	F
Isochrone form (Fig. 3)	(a)	(c)	(b)	(d)	(d)	(d)
Degree of consolidation-time factor curve (Fig. 2)	(1)	(1)	(1)	(3)	(3)	(3)

**Table 3.** Isochrone analysis method using numerical analysis

Clayey sub-condition	Clayey thickness	Loading width
Permeable layer	Terzaghi Vs CASE A	Terzaghi Vs CASE B
	Terzaghi Vs CASE B	Terzaghi Vs CASE C
Impervious layer	Terzaghi Vs CASE D	Terzaghi Vs CASE E
	Terzaghi Vs CASE E	Terzaghi Vs CASE F

### 수치해석 조건

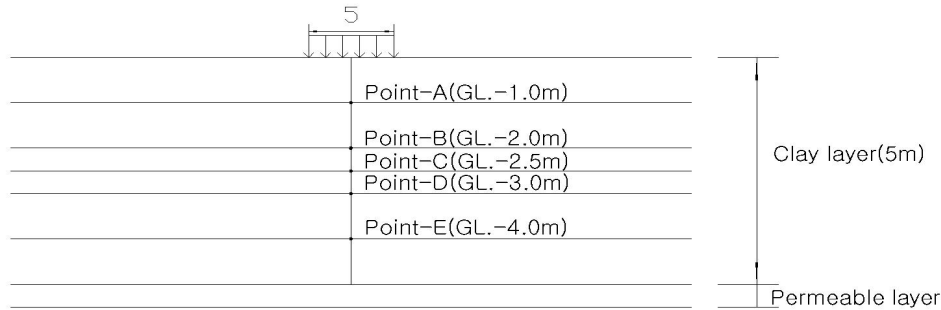
#### 해석단면

수치해석에 사용된 프로그램은 네덜란드 Technical University에서 개발된 국내 연약지반 설계에 일반적으로 사용되고 있는 범용 프로그램인 PLAXIS-2D를 사용하였다. 수치해석 단면은 하중 재하 폭, 점토층 두께 그리고 점토층 하부의 배수조건이 간극수압 소산에 미치는 영향을 확인하기 위해 Table 4와 같이 6개의 CASE 단면을 계획하였다. 첫 번째 요소인 하중 재하 폭(B)은 재하하중이 지중에 전달될 때 미치는 영향 범위(1B, 2B)와 전달되지 않는 경우(4B)를 고려하여 5m와 10m로 결정하였다. 두 번째 요소인 점토층의 두께는 상재하중이 점토층 바닥까지 전달되는 경우와 전달되지 않는 경우, 그리고 하중 재하 폭을 고려하여 5m와 20m로 계획하였다. 마지막으로 점토층의 배수조건은 상부는 배수조건, 하부는 투수층과 불투수층으로 경계조건을 계획하였다. 점토층에 작용하는 성토하중은 효율적인 시물레이션을 위하여 20kN/m의 등분포하중을 적용하였다.

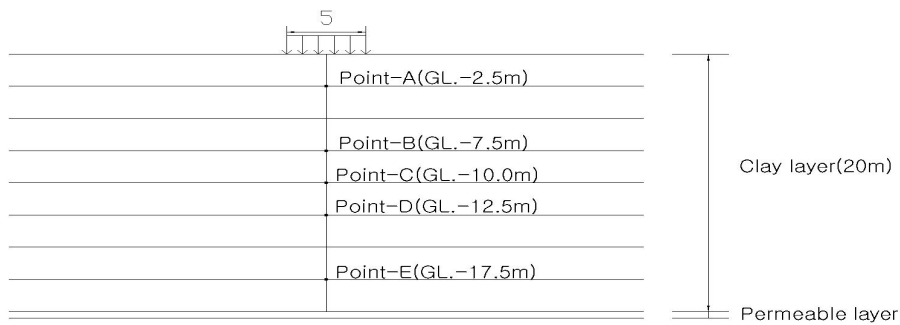
Fig. 4는 수치해석에 적용한 단면 중 대표적으로 CASE A와 CASE B를 나타낸 것이며 성토하중 재하시 각 지층별 과잉간극수압의 변화를 측정하기 위해 0.5m~5.0m 간격으로 간극수압 측정지점을 지정하고 시간경과에 따른 과잉간극수압 소산 경향을 분석하여 각 조건별 아이소크론에 미치는 영향을 검토하였다.

**Table 4.** Numerical analysis condition

Division	Loading width(m)	Clayey thickness(m)	Drainage condition	Top load(kN/m <sup>2</sup> )
CASE A	5.0	5.0	Permeable layer	20
CASE B	5.0	20.0	Permeable layer	20
CASE C	10.0	20.0	Permeable layer	20
CASE D	5.0	5.0	Impervious layer	20
CASE E	5.0	20.0	Impervious layer	20
CASE F	10.0	20.0	Impervious layer	20



(a) Pore water pressure measurement point (clay layer 5.0m, CASE A)



(b) Pore water pressure measurement point (clay layer 20.0m, CASE B)

**Fig. 4.** Pore water pressure measurement point according to depth

**수치해석 입력상수**

수치해석을 통해 점토층 상부에 가해지는 재하하중으로 인해 발생하는 과잉간극수압의 소산 형태를 시뮬레이션하기 위해서는 점토의 압밀거동을 재현할 수 있는 Cam-Clay Model이나 Soft Soil Model이 사용되며, 본 연구에 사용된 Plaxis 프로그램에는 점토의 압밀침하 해석과 간극수압 소산을 분석할 수 있는 Soft Soil Model이 내장되어 있어 이 모델을 적용하였다. 점토층의 프로그램 입력상수는 전라북도 군산시 새만금 내부도로 건설공사 설계시 조사된 점토의 압밀특성을 Table 5와 같이 적용하였다.

**Table 5.** Consolidation characteristics of clay layer

Division	Unit weight(kN/m <sup>3</sup> )		Over Consolidation ratio(OCR)	Lamda ( $\lambda$ )	Kapa ( $\kappa$ )	Coefficient of permeability (cm/s)	Coefficient of consolidation (cm <sup>2</sup> /sec)
	wet	Saturation					
Clay	15.0	18.0	1.0	0.41	0.02	$1.1 \times 10^{-7}$	$1.14 \times 10^{-4}$

## 점성토 지반의 아이소크론 영향 분석

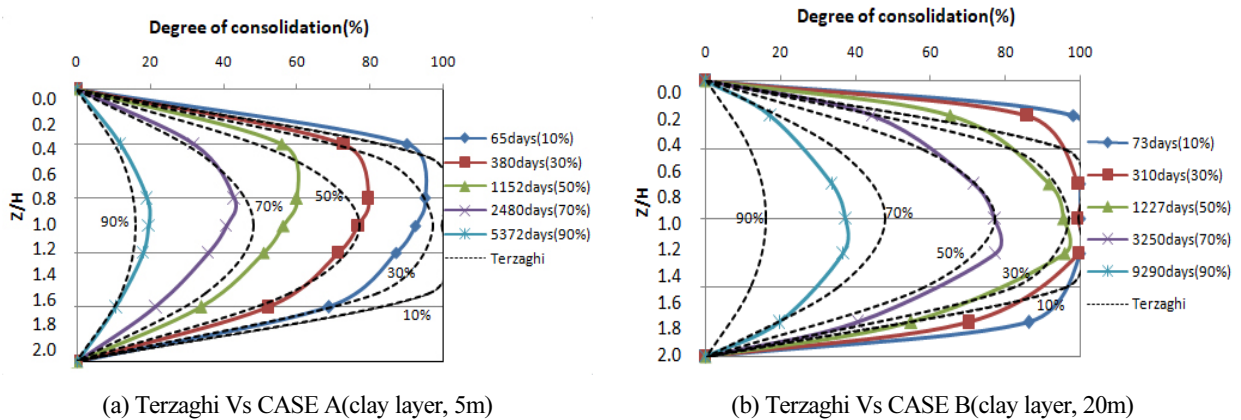
### 점토층의 두께가 아이소크론에 미치는 영향

투수층 조건인 경우 (Terzaghi Vs CASE A, CASE B)

동일한 상재하중과 재하 폭, 그리고 점토층 하부에 투수층이 분포할 경우 점토층의 두께가 아이소크론에 미치는 영향을 비교한 결과는 Table 6 및 Fig. 5와 같다. 점토층의 두께가 5m인 CASE A의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사한 형태와 압밀시간을 보이고 있으나 상재하중의 재하폭에 비해 연약층의 두께가 20m로 두꺼운 CASE B의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사하지만, 압밀시간이 상당히 느려지는 경향을 보였다.

**Table 6.** Average degree of consolidation of Terzaghi, CASE A and B

Division	Depth ratio(z/H)	Average degree of consolidation (%)				
		90	70	50	30	10
Terzaghi	0.2	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
	0.4	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.6	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.8	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
CASE A	0.2	89.95	72.72	55.81	31.97	11.92
	0.4	94.89	79.40	59.96	42.87	19.12
	0.6	86.91	71.19	50.84	35.78	18.00
	0.8	68.81	52.31	33.88	21.50	10.71
CASE B	0.2	98.07	91.50	76.95	55.30	22.72
	0.4	99.72	98.54	93.35	74.12	35.10
	0.6	99.90	98.68	97.21	78.86	37.88
	0.8	95.05	83.85	69.54	53.95	26.10

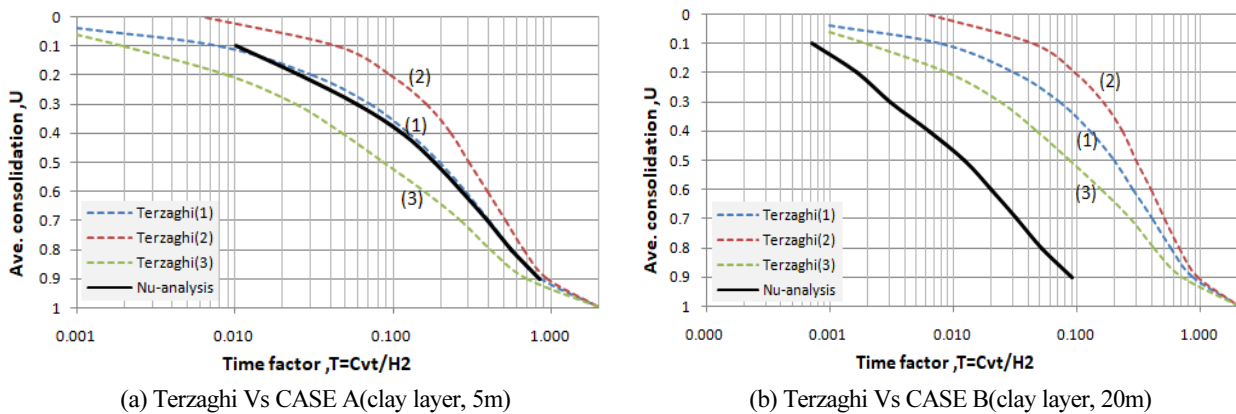


**Fig. 5.** Comparison of isochrone type according to thickness of clay layer (Permeable layer condition)

또한 수치해석을 통해 얻어진 시간-침하량 결과를 바탕으로 점토층 두께(5~20m)와 압밀계수( $1.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ )를 적용하여 압밀도에 따른 시간계수를 산정한 결과는 Table 7 및 Fig. 6과 같다. 그림과 같이 점토층이 얇은 경우(CASE A)에는 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선(1)과 유사한 것으로 나타났지만, 재하폭에 비해 연약층의 두께가 두꺼운 경우(CASE B)에는 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선(3)보다도 시간계수가 작아지는 것으로 나타나 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선(1)을 적용할 경우에는 압밀시간 산정에 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 상재하중이 점토층 하부까지 충분히 전달되는 경우에는 Terzaghi 압밀도-시간계수 곡선(1)을 이용하여 압밀시간을 산정할 수 있지만, 점토층 두께가 두꺼워 상재하중에 의한 영향범위가 작은 경우에는 수치해석에 의한 압밀도-시간계수 곡선을 사용하거나 Terzaghi 압밀도-시간계수 곡선(3)을 적용하는 것이 압밀시간 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 7.** Average degree of consolidation of CASE A and B

Division		Average degree of consolidation(U)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Time factor	CASE A	0.010	0.026	0.060	0.115	0.182	0.272	0.392	0.563	0.848
	CASE B	0.001	0.002	0.003	0.006	0.012	0.020	0.032	0.052	0.092



**Fig. 6.** Degree of consolidation-time factor according to thickness of clay layer(Permeable layer condition)

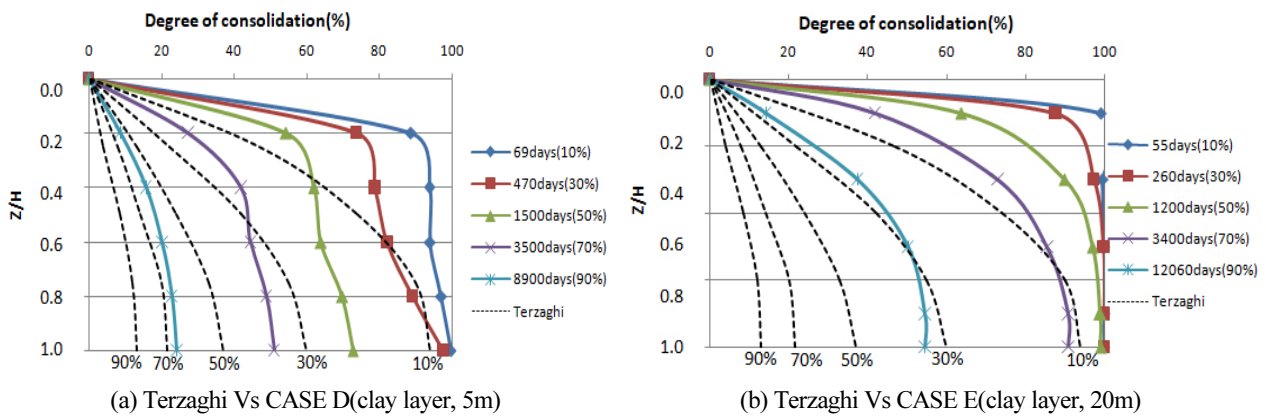
**불투수층 조건인 경우 (Terzaghi Vs CASE D, CASE E)**

동일한 상재하중과 재하 폭이 작용하고, 점토층 하부에 불투수층이 분포할 경우, 점토층의 두께가 아이소크론에 미치는 영향을 비교한 결과는 Table 8 및 Fig. 7과 같다. 그림에서와 같이 점토층의 두께가 5m인 CASE D의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사한 형태를 보이며, 압밀시간은 Terzaghi가 제안한 시간보다 조금 느리게 압밀이 진행되는 것으로 나타났으며, 특히 점토층 상부에서는 초기 과잉간극수압 소산이 Terzaghi가 제안한 소산속도보다 느리지만 시간이 경과할수록 Terzaghi가 제안한 소산속도에 근접하게 변화하는 경향을 보였다. 반면 재하 폭에 비해 연약층의 두께가 20m로 두꺼운 CASE E의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사한 형태를 보이고 있지만 압밀시간이 CASE D보다 급속히 느려지는 것으로 나타났다.



**Table 8.** Average degree of consolidation of Terzaghi, CASE D and E

Division	Depth ratio (z/H)	Average degree of consolidation(%)				
		90	70	50	30	10
Terzaghi	0.2	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
	0.4	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.6	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.8	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
CASE D	0.2	88.69	73.70	54.33	27.39	8.65
	0.4	93.81	78.80	61.85	41.90	15.63
	0.6	94.02	82.18	63.94	44.57	20.20
	0.8	97.09	89.12	69.78	48.94	22.89
CASE E	0.2	99.08	98.45	76.01	53.55	21.83
	0.4	99.55	99.12	91.55	75.35	38.45
	0.6	99.90	99.55	96.85	84.76	49.03
	0.8	99.98	99.89	98.90	89.24	53.86



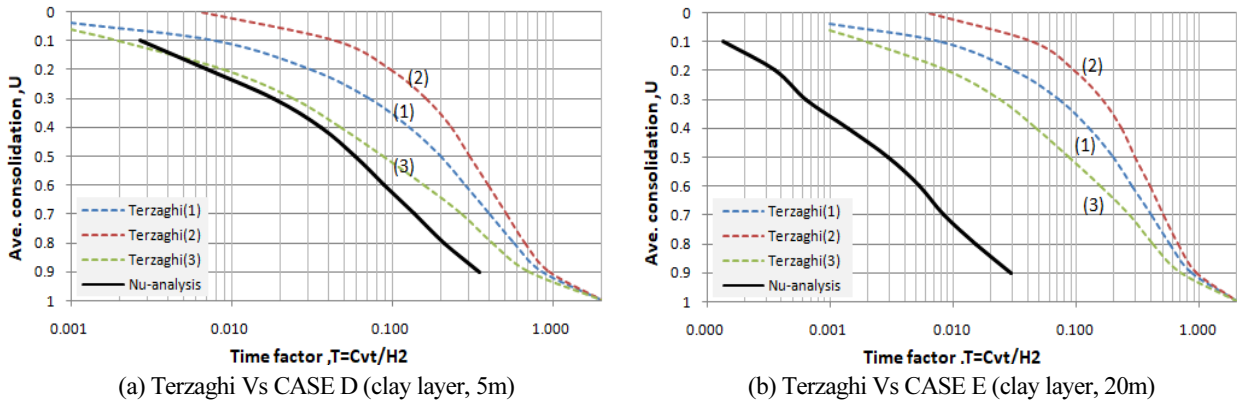
**Fig. 7.** Comparison of isochrone type according to thickness of clay layer (Impervious layer condition)

또한 수치해석을 통해 얻어진 시간-침하량 결과를 바탕으로 점토층 하부가 불투수층이고, 점토층 두께(5~20m)와 압밀계수( $1.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ )를 적용하여 압밀도에 따른 시간계수를 산정한 결과는 Table 9 및 Fig. 8과 같다. 그림과 같이 점토층이 얇은 경우(CASE D)에는 평균 압밀도-시간계수 곡선이 Terzaghi가 제안한 일 방향 배수조건에서 상부하중에 의해 점토층에 발생하는 과잉간극수압은 깊이에 관계없이 일정하게 분포할 때의 압밀도-시간계수 곡선 (3)과 유사한 것으로 나타났지만 연약층의 두께가 두꺼운 경우(CASE E)는 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (3)보다도 시간계수가 상당히 작아지는 것으로 나타나 점토층 하부가 불투수층일 경우, Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (3)을 사용하여 압밀시간을 산정하는 경우에는 큰 오차를 유발할 수 있다.

따라서, 점토층 하부가 불투수층이고, 점토층이 얇으며, 상재하중이 점토층 하부까지 충분히 전달되는 경우에는 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (3)의 시간계수를 사용하여 압밀시간을 산정할 수 있지만, 점토층 하부가 불투수층이고, 하중 재하 폭에 비해 점토층의 두께가 두꺼워 상재하중에 의한 영향범위가 작은 경우에는 수치해석에 의해 얻어지는 압밀도-시간계수 곡선을 사용하여야 압밀시간의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

**Table 9.** Average degree of consolidation of CASE D and E

Division		Average degree of consolidation (U)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Time	CASE D	0.0027	0.007	0.0183	0.0357	0.0583	0.0893	0.136	0.2098	0.3457
factor	CASE E	0.0001	0.0004	0.0006	0.0014	0.003	0.0053	0.0084	0.0154	0.0297



**Fig. 8.** Degree of consolidation-time factor according to thickness of clay layer(Impervious layer condition)

**하중 재하 폭이 아이소크론에 미치는 영향**

투수층 조건인 경우 (Terzaghi Vs CASE B, CASE C)

동일한 상재하중과 점토층 두께 H=20m이고, 점토층 하부에 투수층이 분포할 때, 하중 재하 폭(B)이 아이소크론에 미치는 영향을 비교한 결과는 Table 10 및 Fig. 9와 같다. 그림과 같이 하중재하 폭이 5m인 CASE B(H=4B)의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사한 형태이나 압밀시간이 상당히 느려지는 경향을 보이고 있는 반면, 하중재하 폭이 10m인 CASE C(H=2B)의 과잉간극수압 분포는 CASE B(H=4B)에 비해 Terzaghi의 아이소크론과 더욱 유사한 형태를 보이는 것으로 나타났다.

**Table 10.** Average degree of consolidation of Terzaghi, CASE B and C

Division	Depth ratio (z/H)	Average degree of consolidation (%)				
		90	70	50	30	10
Terzaghi	0.2	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
	0.4	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.6	99.75	95.11	73.12	45.88	15.55
	0.8	79.84	69.95	48.05	28.93	9.54
CASE B	0.2	98.07	91.50	76.95	55.30	22.72
	0.4	99.72	98.54	93.35	74.12	35.10
	0.6	99.90	98.68	97.21	78.86	37.88
	0.8	95.05	83.85	69.54	53.95	26.10
CASE C	0.2	98.35	85.94	69.19	43.96	17.11
	0.4	96.74	96.75	81.33	55.42	25.35
	0.6	98.21	96.06	81.74	54.45	24.87
	0.8	85.32	68.86	52.05	33.45	15.32

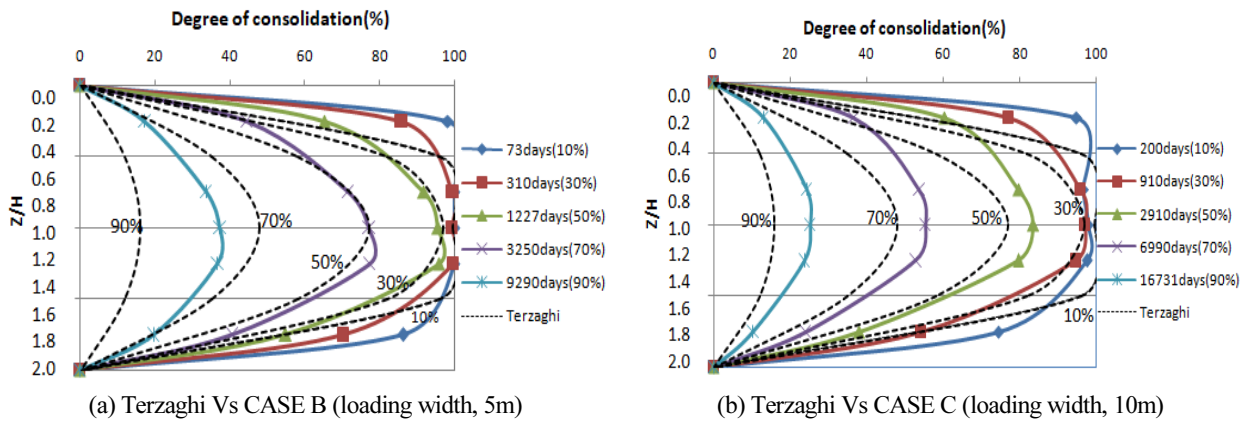


Fig. 9. Comparison of isochrone type according to loading width (Permeable layer condition)

수치해석을 통해 얻어진 시간-침하량 결과를 바탕으로 동일한 점토층 두께(20m)와 압밀계수( $1.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ )를 적용하여 압밀도에 따른 시간계수를 산정한 결과는 Table 11 및 Fig. 10과 같다. 그림과 같이 점토층(H=20m) 하부에 투수층이 위치하고, 하중재하 폭이 5m인 경우(CASE B)에는 평균 압밀도-시간계수 곡선이 Terzaghi가 제안한 양방향 배수조건에서의 압밀도-시간계수 곡선(1)과는 큰 차이를 보이고, 점토층 하부에 불투수층이 분포할 때 사용되는 압밀도-시간계수 곡선(3)보다도 압밀시간이 더 느려지는 것으로 나타났다. 그러나 하중 재하 폭이 10m인 CASE C(H=2B)에서는 하중재하 폭이 5m인 CASE B(H=4B)보다 압밀도-시간계수 곡선(3)에 근접한 것으로 나타났다. 따라서 하중 재하 폭과 점토층 두께의 비가 충분히 작아져야 Terzaghi가 제안한 양방향 배수조건에서의 압밀도-시간계수 곡선(1)에 근접하게 된다는 것을 알 수 있다.

Table 11. Average degree of consolidation of CASE A and C

Division	Average degree of consolidation (U)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
Time factor	CASE B	0.001	0.002	0.003	0.006	0.012	0.020	0.032	0.052	0.092
	CASE C	0.002	0.005	0.009	0.017	0.029	0.045	0.069	0.105	0.165

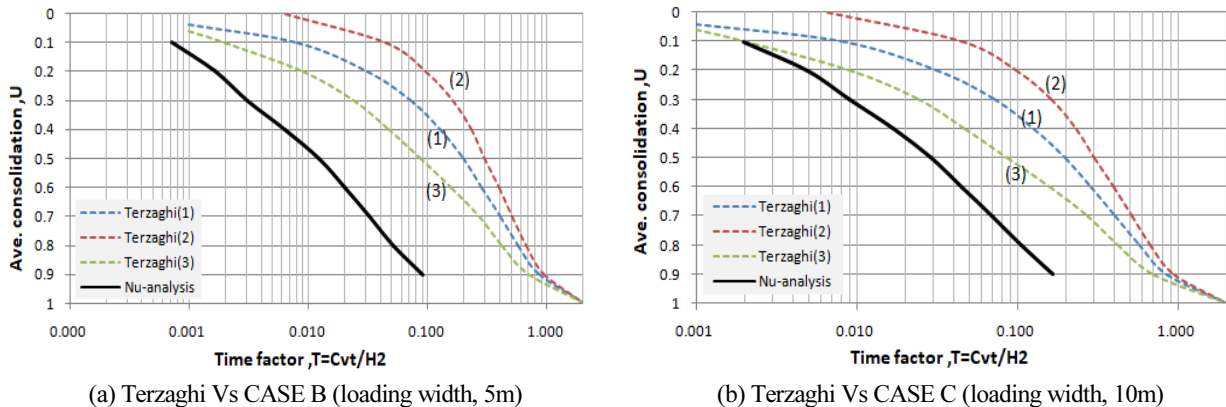


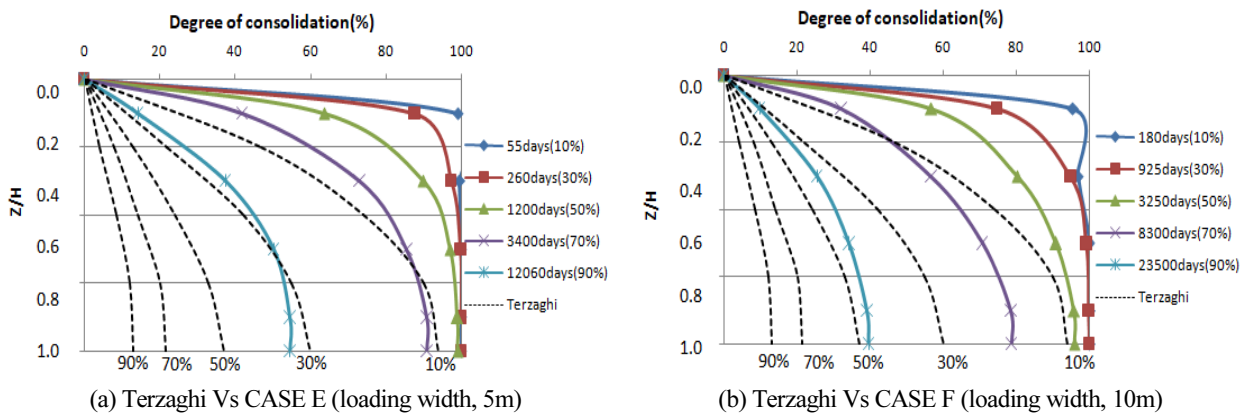
Fig. 10. Degree of consolidation-time factor according to loading width (Permeable layer condition)

**불투수층 조건인 경우 (Terzaghi Vs CASE E, CASE F)**

동일한 상재하중과 점토층 두께  $H=20\text{m}$ 이고, 점토층 하부에 불투수층이 분포할 때, 하중재하 폭(B)이 아이소크론에 미치는 영향을 비교한 결과는 Table 12 및 Fig. 11과 같다. 그림과 같이 하중재하 폭이 5m인 CASE E( $H=4B$ )의 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론과 유사한 형태이나 압밀시간이 상당히 느려지는 경향을 보였다. 또한 하중재하 폭이 10m인 CASE F( $H=2B$ )의 경우에도 과잉간극수압 소산형태는 Terzaghi의 아이소크론 형태와 유사하지만 압밀시간이 느려지는 경향이 동일하게 나타났다. 그러나 하중 재하 폭과 점토층 두께의 비가 작아질수록 Terzaghi의 아이소크론과 더욱 유사한 형태를 보이고, 압밀시간도 빨라지는 경향을 보이고 있다.

**Table 12.** Average degree of consolidation of Terzaghi, CASE E and F

Division	깊이비 (z/H)	Average degree of consolidation (%)				
		90	70	50	30	10
Terzaghi	0.2	95.2	93.1	88.1	81.0	65.1
	0.4	91.0	86.2	77.4	64.3	36.6
	0.6	85.1	76.9	70.0	50.8	17.9
	0.8	84.2	72.8	64.9	42.1	8.30
CASE E	0.2	99.08	98.45	76.01	53.55	21.83
	0.4	99.55	99.12	91.55	75.35	38.45
	0.6	99.90	99.55	96.85	84.76	49.03
	0.8	99.98	99.89	98.90	89.24	53.86
CASE F	0.2	99.02	84.34	67.52	40.34	15.12
	0.4	96.73	95.65	81.42	58.25	26.12
	0.6	99.46	99.04	89.41	69.12	33.54
	0.8	99.58	99.25	94.23	76.72	37.63

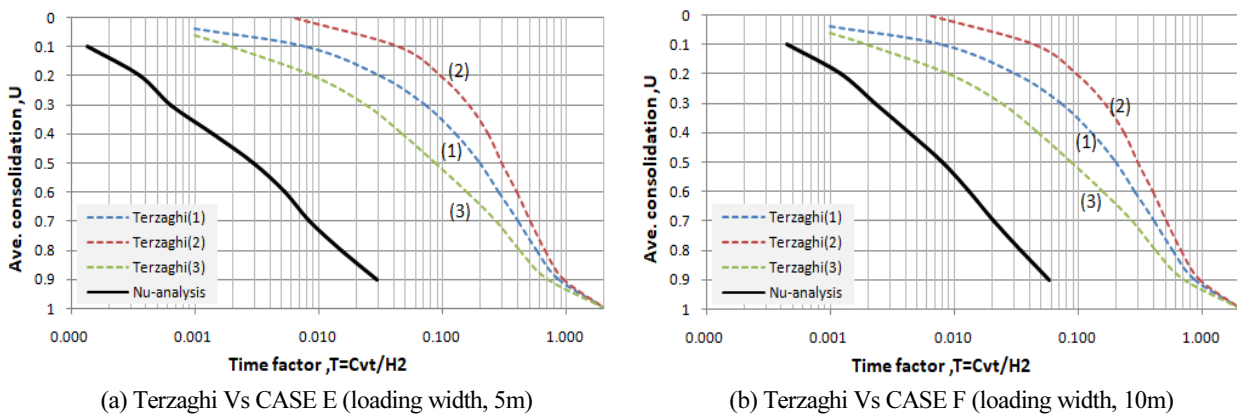


**Fig. 11.** Comparison of isochrone type according to loading width (Impervious layer condition)

또한 수치해석을 통해 얻어진 시간-침하량 결과를 바탕으로 동일한 점토층 두께(20m)와 압밀계수( $1.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ )를 적용하여 압밀도에 따른 시간계수를 산정하였으며, 그 결과는 Table 13 및 Fig. 12와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 점토층(H=20m) 하부에 불투수층이 위치하고, 하중 재하 폭이 5m인 CASE E(H=4B)에는 평균 압밀도-시간계수 곡선이 Terzaghi가 제안한 점토층 하부가 불투수층 조건에서의 압밀도-시간계수 곡선 (3)과도 큰 차이를 보이며, 압밀시간이 상당히 느려지는 것으로 나타났으며, 하중 재하 폭이 10m인 CASE F(H=2B)에서도 하중재하 폭이 5m인 CASE E(H=4B)보다 압밀도-시간계수 곡선 (3)에 근접하지만 압밀시간이 느려지는 경향이 동일하게 나타났다. 그러나 하중재하 폭과 점토층 두께의 비가 작아져야 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (3)에 근접하게 된다는 것을 알 수 있다.

**Table 13.** Average degree of consolidation of CASE E and F

Division		Average degree of consolidation (U)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Time factor	CASE E	0.0001	0.0004	0.0006	0.0014	0.003	0.0053	0.0084	0.0154	0.0297
	CASE F	0.0004	0.0012	0.0023	0.0043	0.0080	0.0131	0.0205	0.0343	0.0580



**Fig. 12.** Degree of consolidation-time factor according to loading width(Impervious layer condition)

## 결론

본 연구는 연약지반의 과잉간극수압 소산형태(Isochrone)가 하중 재하 폭, 점토층 두께 그리고 점토층 하부에 위치한 흙의 배수조건에 따라 달라진다는 점에 착안하여 수치해석적 방법으로 Terzaghi의 아이소크론에 대한 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 상재하중과 재하 폭(B=5m)이 작용하고, 점토층의 두께와 하중재하 폭이 동일(B=H)한 경우에는 Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (1) 및 (3)의 시간계수를 적용하여 압밀시간을 산정할 수 있지만, 상재하중이 작거나 점토층의 두께가 두꺼워 상재하중에 의해 발생하는 지중응력이 점토층 하부까지 전달되지 않는 경우에는 수치해석에 한 압밀도-시간계수 곡선을 사용하여 압밀시간을 산정하는 것이 압밀시간의 오차를 줄일 수 있다.

2. 동일한 상재하중과 점토층 두께  $H=20\text{m}$ 이고, 하중 재하 폭에 대한 점토층 두께의 비가 작아질수록 Terzaghi 아이소크론과 유사한 형태를 보이고, Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선 (1) 및 곡선 (3)에 근접하는 반면, 하중 재하 폭과 점토층 두께의 비가 큰 경우에는 수치해석에 의한 압밀도-시간계수 곡선을 사용하여 압밀시간을 산정하여야 압밀시간의 오차를 줄일 수 있다.
3. Terzaghi가 제안한 압밀도-시간계수 곡선에 가장 이상적인 점토층 두께와 하중재하 폭의 비는 2배 이하이며, 점토층의 두께( $H$ )가 하중 재하 폭( $B$ )보다 2배 이상 큰 경우에는 상재하중에 의한 지중응력이 점토층 하부까지 전달되지 않을 수 있으므로 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 압밀도-시간계수 곡선, 압밀시간 산정에 유의해야 하고, 가능한 수치해석에 의한 압밀도-시간계수 곡선을 사용하여 압밀시간을 산정하여야 한다.

## References

- [1] Abbasi, N., Rahimi, H., Javadi, A.A. and Fakher, A. (2007). "Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability." *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, No. 1, pp.41-52.
- [2] Davis, E.H., Raymond, G.P. (1965). "A Non-linear theory of consolidation." *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp.161-173.
- [3] Gibson, R.E., Schiffman, R.L., Cargill, K.W. (1981). "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 280-293.
- [4] Lee, K., Sills G. C. (1981). "The consolidation of a soil stratum, including self-weight effects and large strains." *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 5, pp. 405-428.
- [5] Lee, S., Bae, Y.-H., Yang, T.-S., Hwang, K.-H. (1993). "A Study on the Characteristics of Self-weight Consolidation in Dredged and Reclaimed Clays." *Journal of the University Seoul*, Vol. 27, pp. 173-191.
- [6] Lekha, K.R., Krishnaswamy, N.R., Basak, P. (2003). "Consolidation of clays for variable permeability and compressibility." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, Vol. 129, No. 11, pp. 1001-1009.
- [7] Richart, F.E. (1957). "Review of the theories for sand drains." *Transactions of ASCE*, Vol. 124, No. 2999, pp.709-736.
- [8] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York.
- [9] Vaid, Y. P. (1985). "Constant rate of loading nonlinear consolidation." *Soils and Foundation*, Vol. 25, No. 1, pp. 105-108.
- [10] Xie, K.H., Leo, C.J. (2004). "Analytical solutions of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays." *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, pp. 301-314.
- [11] Xie, K.H., Xie, X.Y., Jiang, W. (2002). "A study on one-dimensional nonlinear consolidation of doublelayered soil." *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 151-168.
- [12] Yoo, N.-J., Lee, M.-W., Lee, J.-H. (1995). "Estimation of Consolidation Settlement of Soft Clay due to Selfweight by the Finite Strain Consolidation Theory." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.15, No.5, pp.1417-1427.