

불균질지반의 압밀에 미치는 투수계수와 압밀계수의 영향

이승현^{1*}

¹선문대학교 토목공학과

Influences of Coefficient of Permeability and Coefficient of Consolidation on Consolidation of Nonhomogeneous Soils

Seung-Hyun Lee^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Sunmoon University

요 약 불균질지반의 압밀에 미치는 투수계수와 압밀계수의 영향을 살펴보고자 해석목적에 맞게 자체적으로 코딩한 프로그램을 사용하였다. 두 개의 압밀층으로 구성된 해석대상지반에 대하여 투수계수와 압밀계수를 달리한 다양한 조건을 가정하여 압밀해석을 수행하였다. 해석결과에 따르면 불균질지반에서의 과잉간극수압분포 및 압밀침하량에 미치는 영향에 있어서는 압밀계수의 영향이 크음을 알 수 있었고 투수계수의 영향은 미미하였다.

Abstract In order to find out the influences of the coefficient of permeability and the coefficient of consolidation on the consolidation of nonhomogeneous soils, self-developed program was used. For the purpose of analysis, nonhomogeneous soils of two layers which have various values of coefficient of permeability and coefficient of consolidation were assumed and analyzed by the developed program. According to the results obtained by the analysis, coefficient of consolidation has great effect on the distribution of excess pore water pressure and the consolidation settlement whereas coefficient of permeability has little effect on the characteristics of consolidation of nonhomogeneous soils.

Key words : Coefficient of permeability, Coefficient of consolidation, Nonhomogeneous soils, self-developed program

1. 서론

유한차분법(FDM)에 의한 일차원 압밀이론 해석의 장점은 임의의 분포를 갖는 초기 과잉간극수압에 대한 해를 구할 수 있다는 점과 시간에 의존하는 하중분포에 대해 해를 구할 수 있다는 점이다. 압밀지반이 불균질층으로 구성된 경우에는 해석해(closed form solution)를 구하기가 쉽지 않은데 이러한 어려움은 지층에 따른 투수계수와 지층의 두께 그리고 압밀계수가 달라지기 때문이다 [2]. 불균질지반에 대한 압밀해석을 위해 유용한 수단으로서 수치해석을 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 불균질지반의 압밀해석을 위한 해석기법을 자체적으로 코딩

하여 해석시 가정한 지반조건에 대해 압밀해석을 실시하여 불균질 지반의 압밀특성을 살펴보고자 하였다. 특히, 지반의 불균질성을 결정짓는 투수계수와 압밀계수가 압밀특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 균질지반에 대한 유한차분화

지반의 투수계수 및 압밀계수가 깊이 및 시간에 무관한 경우의 일차원 압밀이론식은 식 (1)과 같이 유도된다 [4].

*교신저자 : Seung-Hyun Lee

Tel: +82-10-7278-1080 e-mail: shlee02@sunmoon.ac.kr

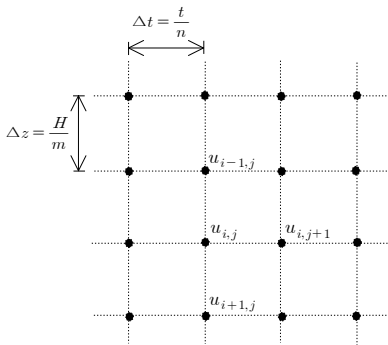
접수일 11년 12월 22일

수정일 12년 02월 07일

게재확정일 12년 03월 08일

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 c_v 는 압밀계수를 의미하고 z 는 압밀층 상단으로부터의 깊이, t 는 압밀소요시간 그리고 u 는 압밀층에서의 과잉간극수압을 나타내는데 식 (1)로부터 u 는 깊이 z 와 시간 t 의 함수임을 알 수 있다. 일차원 압밀이론에 있어 유한차분법은 [그림 1]에 나타낸 깊이-시간 격자에 근거한다.



[그림 1] 깊이-시간 격자
[Fig. 1] Depth-time grid

그림 1에 나타나 있듯이 압밀층의 두께는 m 개의 동일한 요소 두께 Δz 로 구성되고 고려하고자 하는 시간은 n 개의 동일한 시간간격 Δt 로 구성된다. 격자내의 임의의 점은 아래첨자 i, j 로 규정되는데 깊이는 i ($0 \leq i \leq m$)로 규정되고 경과시간은 j ($0 \leq j \leq n$)로 규정된다. 따라서 임의의 깊이에 대하여 임의의 시간이 경과된 후의 과잉간극수압은 $u_{i,j}$ 로 표시된다. 식 (1)의 우변과 좌변을 유한차분형태로 나타내면 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i,j+1} - u_{i,j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} (u_{i-1,j} + u_{i+1,j} - 2u_{i,j}) \quad (3)$$

식 (2) 및 식 (3)은 유한차분형태 표기법 중 각각 전진차분(Forward differences)과 중앙차분(Central differences)의 형태로 나타낸 것이다[3]. 따라서 식 (1)을 유한차분식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{c_v \Delta t}{(\Delta z)^2} (u_{i-1,j} + u_{i+1,j} - 2u_{i,j}) \quad (4)$$

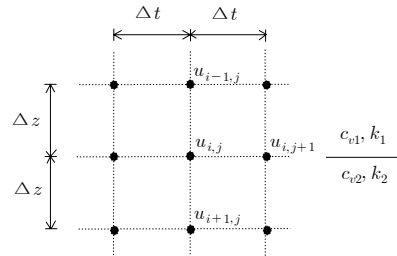
편의상 식 (4)에 대하여 연산자(operator)로서 β 를 도입하여 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\beta = \frac{c_v \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (5)$$

해의 수렴을 위해서는 연산자 β 값이 0.5를 초과하지 않아야함이 증명된 바 있다[1]. 불균질 지반에 있어서 지층의 경계면에서의 과잉간극수압의 계산에 있어서는 식 (4)로 표현되는 차분식의 수정이 필요하다.

3. 불균질지반 지층 경계면에 대한 유한차분화

불균질 지반에 대한 유한차분 격자망은 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] 불균질 경계면에서의 격자
[Fig. 2] Grid for boundary of nonhomogeneous layers

불균질지반 지층 경계면에서의 과잉간극수압 결정을 위한 유한차분식 유도에 있어 투수계수와 압밀계수의 영향을 고려하기 위해 식 (1)을 식 (6)과 같이 표현할 필요가 있다[2].

$$\frac{k}{c_v} \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

식 (6)은 균질지반에 대한 식이므로 그림 2의 경계면 하부의 지반을 경계면 상부지반으로 대체하면 동일 유속을 갖기 위해 식 (7)이 만족되어야 한다.

$$k_1 \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta z} = k_2 \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta z} \quad (7)$$

따라서 식 (7)로부터 대체 수두 $h_{i+1,j}'$ 은 식 (8)과 같다.

$$h_{i+1,j}' = h_{i,j} + \frac{k_2}{k_1}(h_{i+1,j} - h_{i,j}) \quad (8)$$

그림 2에서 $h_{i+1,j}$ 를 $h_{i+1,j}'$ 로 대체하고 물의 단위중량, γ_w 를 곱한 다음 식 (6)의 우변을 차분식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{k_1 + k_2}{(\Delta z)^2} \left[\frac{k_1}{k_1 + k_2} u_{i-1,j} + \frac{k_2}{k_1 + k_2} u_{i+1,j} - u_{i,j} \right] \quad (9)$$

식 (6)의 좌변은 식 (10)과 같이 차분화할 수 있다.

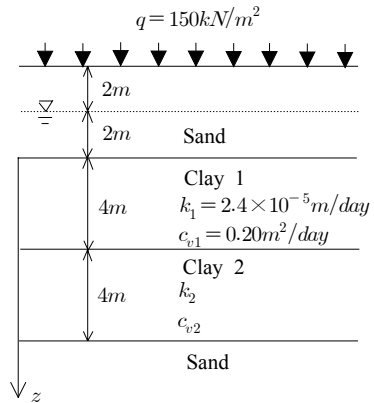
$$\frac{k}{c_v} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{c_{v1}} + \frac{k_2}{c_{v2}} \right) \frac{1}{\Delta t} (u_{i,j+1} - u_{i,j}) \quad (10)$$

식 (9),(10)을 식 (6)에 대입하면 불균질지반의 지층 경계면에서의 과잉간극수압을 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{k_1 + k_2}{k_1 c_{v1} + k_2 c_{v2}} c_{v1} c_{v2} \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \times \left[\frac{2k_1}{k_1 + k_2} u_{i-1,j} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} u_{i+1,j} - 2u_{i,j} \right] \quad (11)$$

4. 불균질지반에 대한 압밀해석

불균질 지반에서의 압밀특성을 살펴보고자 그림 3과 같은 지반조건을 가정하였다. 그림 3에 나타난 지반의 투수계수와 압밀계수에 있어서는 등방조건을 가정하였다. 편의상 불균질지반의 지층경계면은 압밀층 중앙이 되도록 하였는데 압밀층 중앙 상부 지반은 Clay 1으로 나타내었으며 하부지반은 Clay 2로 나타내었다. 또한 해석시 지표면에 가해지는 상재하중에 의한 압밀층내 초기 과잉간극수압분포에 있어서는 상재하중과 동일한 크기의 과잉간극수압이 깊이에 상관없이 유발되는 것으로 가정하였다. 해석은 그림 3에 나타난 지반조건에 대하여 Clay 2의 투수계수와 압밀계수를 변화시켜 수행하였는데 해석계획은 표 1에서와 같다.

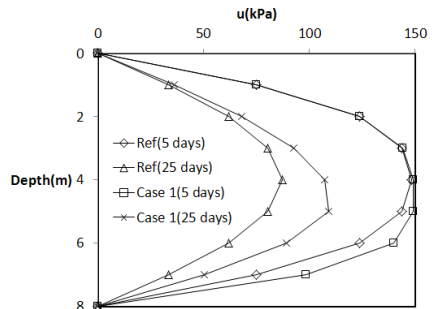


[그림 3] 해석대상 불균질 지반
[Fig. 3] Nonhomogeneous soil for analysis

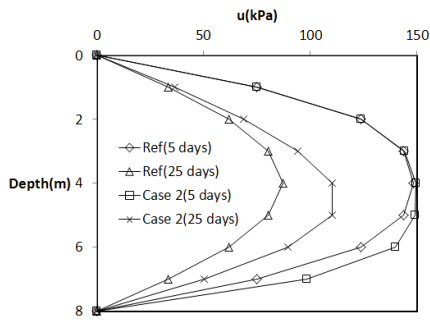
[표 1] 해석계획
[Table 1] Analysis scheme

Clay 1		$k_1 = 2.4 \times 10^{-5} \text{ m/day}$ $c_{v1} = 0.20 \text{ m}^2/\text{day}$
Clay 2	Case 1	$k_2 = 0.5k_1, c_{v2} = 0.5c_{v1}$
	Case 2	$k_2 = k_1, c_{v2} = 0.5c_{v1}$
	Case 3	$k_2 = 2k_1, c_{v2} = 2c_{v1}$
	Case 4	$k_2 = k_1, c_{v2} = 2c_{v1}$
	Case 5	$k_2 = 2k_1, c_{v2} = 0.5c_{v1}$

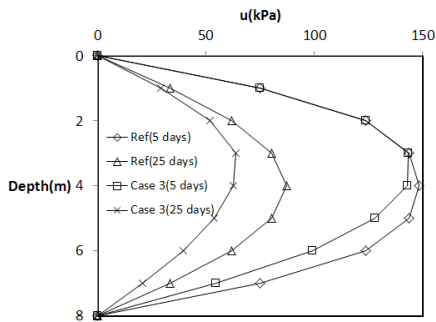
표 1에 나타난 계획에 따라 해석을 함에 있어 압밀소요시간은 25일로 하였는데 깊이간격, Δz 를 1m로 하고 시간간격, Δt 를 1 day로 하면 m 과 n 은 각각 8 및 25가 되고 β 의 최대값은 0.4가 된다. 그림 4에는 표 1에 나타난 Case 1, Case 2, Case 3 그리고 Case 4에 대하여 해석을 통해 구한 과잉간극수압분포(u)가 나타나 있는데 비교를 위해 압밀층 전체를 Clay 1으로 가정하고 계산한 결과도 함께 나타내었으며 Ref로 표시하였다.



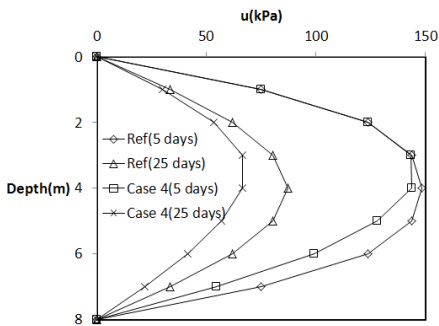
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

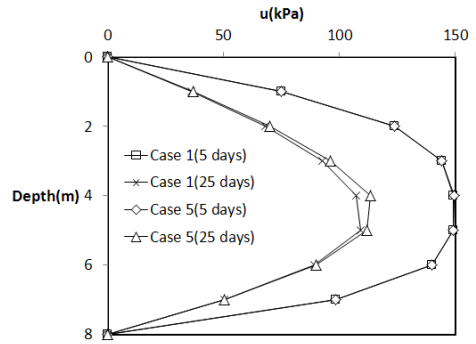


(d) Case 4

[그림 4] 깊이별 과잉간극수압분포
[Fig. 4] Excess pore pressure with depths

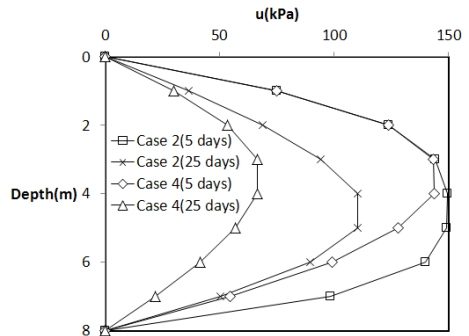
그림 4를 통해 알 수 있듯이 압밀층 전체를 균질지반으로 본 경우의 깊이에 따른 과잉간극수압분포는 압밀층 중앙에 대하여 대칭이 되나 불균질층의 경우에는 비대칭이 된다. 그림 4a와 그림 4b 각각에 대하여 Clay 2의 압밀계수가 Clay 1의 압밀계수의 0.5배이므로 과잉간극수압 소산속도가 느림을 알 수 있다. 그림 4a와 그림 4b의 경우 Clay 2의 압밀계수가 같고 투수계수가 2배 차이가 있지만 과잉간극수압분포에 있어 별 차이는 없다. 따라서 과잉간극수압의 소산속도는 압밀계수의 상대적 크기에

영향을 크게 받고 투수계수에 의한 영향은 작다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 그림 4c와 그림 4d의 비교를 통해서도 알 수 있다. 그림 4c와 그림 4d의 경우 Clay 2의 압밀계수가 Clay 1의 압밀계수의 2배가 되므로 과잉간극수압의 소산속도가 압밀층 전체를 균질지반으로 고려한 경우에 비해 빠름을 알 수 있다. 압밀속도에 미치는 압밀계수와 투수계수의 영향을 좀 더 파악해 보기 위해 먼저 표 1의 Case 1과 Case 5에 대하여 해석을 수행하였는데 그 결과는 그림 5와 같다.



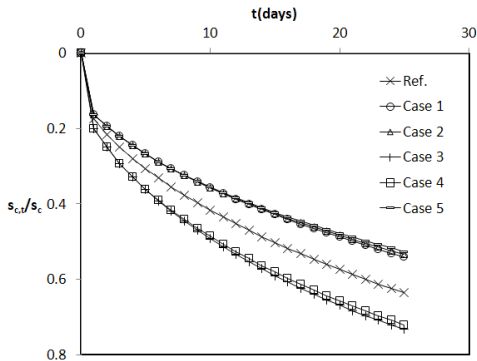
[그림 5] 투수계수의 영향
[Fig. 5] Influence of coefficient of permeability

표 1에 나타낸 바와 같이 Case 1과 Case 5 사이의 차이는 압밀계수는 동일하나 투수계수가 4배 차이가 난다. 이러한 차이에도 불구하고 그림 5를 통해 알 수 있듯이 압밀속도에 미치는 투수계수의 영향은 미미하다고 볼 수 있다. Case 2와 Case 4 사이의 차이는 투수계수는 일정하나 압밀계수가 4배 차이가 난다. Case 2와 Case 4에 대한 해석결과를 그림 6에 나타내었다.



[그림 6] 압밀계수의 영향
[Fig. 6] Influence of coefficient of consolidation

그림 6을 통해 알 수 있듯이 압밀속도는 압밀계수의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 그림 4로부터 시간에 따른 평균압밀도는 초기 과잉간극수압분포면적과 시간에 따른 과잉간극수압분포면적으로부터 구할 수 있는데 면적계산시에는 사다리꼴법칙을 적용하였다. 평균압밀도는 압밀침하량(s_c)에 대한 특정시간의 압밀침하량($s_{c,t}$)의 비($s_{c,t}/s_c$)로서 정의할 수 있으므로 그림 4에 나타난 과잉간극수압분포로부터 시간에 따른 무차원 압밀량($s_{c,t}/s_c$)을 그림으로 나타내면 그림 7과 같다.



[그림 7] 시간에 따른 무차원 압밀량
[Fig. 7] Nondimensional consolidation settlement with time

그림 7을 통해서도 알 수 있듯이 균질지반으로 가정된 경우에 대한 침하량에 비해 불균질지반에서의 침하량에 차이가 있다. 즉 불균질지반에 있어 Clay 2의 압밀계수가 Clay 1에 비하여 작은 경우에는 침하량 또한 균질지반에 비하여 작음을 알 수 있고 Clay 2의 압밀계수가 Clay 1에 비하여 큰 경우의 침하량은 균질지반에 비하여 큼을 알 수 있다. 또한 불균질지반에서 Clay 2의 압밀계수가 같고 투수계수가 다른 경우에는 침하량에 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

5. 결론

불균질지반에 대한 압밀해석을 위해 해석 목적에 맞게 유한차분식을 유도하고 프로그램화 하였다. 불균질지반의 압밀특성에 영향을 미치는 투수계수와 압밀계수의 영향을 유한차분법에 의한 결과를 통해 살펴보고자 해석지반을 가정하고 해석을 수행하였다. 해석결과에 따르면 불균질지반에서의 과잉간극수압분포 및 압밀침하량에 미치는 영향에 있어서는 압밀계수의 영향이 큼을 알 수 있었고 투수계수의 영향은 미미하였다. 또한 본 연구에 적용

한 해석기법을 적용해 다양한 불균질 지반조건을 갖는 압밀층에 대한 해석이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Craig, R. F., Soil Mechanics, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., pp. 280-283, 1983.
- [2] Das, B. M., Advanced soil mechanics, McGraw Hill book company, 1983.
- [3] Kreyszig, E., Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Son, Inc., pp. 769-773, 1984.
- [4] Terzaghi, K., Theoretical soil mechanics, New York, Wiley, 1943.

이 승 현 (Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학