

포화된 사질토에서 비배수 공극수압거동에 대한 탄성해석모델의 개발

Elastic Modeling for the Behavior of Undrained Pore Water Pressure in Saturated Sand

임 성 훈*

Eam, Sung Hoon

Abstract

In this study, it was suggested that the elastic model to analyze the behavior of pore water pressure in saturated sand specimen on the condition of non-drainage. The model based on the experiments which were performed for the relationships between the pore water pressure and the grain size of specimen, and effective stress, respectively. The suggested model embodied the pore water and soil grain as separate elastic springs of different stiffness. The springs were joined parallel and the axial strains were restricted to the same deformation. The suggested model was well consistent with the experiments.

Keywords : Pore water pressure, B value, Effective stress, Sand, Modelling

I. 서 론

흙의 응력-변형 해석에 관한 많은 연구들 중 일부는 흙에 대한 강도시험으로부터 유변학적인 모델을 구성하고 포화토에서 압밀해석이나 유효응력해석이 요구될 경우에는 구성 모델을 흙 속에서 물의 흐름에 대한 이론들과 결합시켜(coupled) 해석하

고 있다. 공극수의 흐름을 유발하는 재하에 의한 공극수압의 발현은 재하 직후에 나타나는 공극수압의 크기가 흙에 재하된 응력과 같다는 전제조건으로부터 도출되지만 몇몇 실험에서는 공극수압계수가 1보다 작은 경우들이 나타나고 있다.

본 연구에서는 유효응력을 받고 있는 포화된 모래에 대해서 공극수와 흙 구조체를 강성이 서로 다른 탄성체로 고려하여 재하에 의한 비배수 공극수압거동에 대한 모델을 제안하고 적용성을 검증하고자 하였다.

* 공주대학교 산업과학대학 생물산업공학부
농업토목공학전공

* Corresponding author. Tel.: +82-41-330-1264
Fax: +82-41-330-1269

E-mail address: geotechkor@kongju.ac.kr

II. 사질토에서 공극수압계수에 대한 탄성 모델

공시체에서 응력을 받고 있는 공극수와 흙 구조체를 단순화시키기 위해서 Fig. 1과 같이 각각 다른 탄성계수를 갖는 A와 B가 서로 결합되어 있고, 등방재하에 의한 변형량이 같은 것으로 고려한다.

힘을 받고 있는 전체 단면적에 대한 A의 단면적의 비를 n' 라고 표시하면 $n' = \frac{A_A}{A_A + A_B} \times 100 (\%)$ 가 된다. 여기서 A_A, A_B 는 각각 A, B의 재하 단면적이다. A, B결합체에 작용하는 외력을 $\Delta\sigma$ 라 하면 하중 P 는 다음과 같다.

$$P = E_{AB} \cdot (A_A + A_B) \cdot \Delta\varepsilon \dots\dots\dots (a)$$

A, B가 받는 응력을 각각 $\Delta\sigma_A, \Delta\sigma_B$ 라면 A, B가 받는 힘 P_A 와 P_B 는 다음과 같다.

$$P_A = \Delta\sigma_A \cdot A_A = E_A \cdot A_A \cdot \Delta\varepsilon \dots\dots\dots (b)$$

$$P_B = \Delta\sigma_B \cdot A_B = E_B \cdot A_B \cdot \Delta\varepsilon \dots\dots\dots (c)$$

외부와 내부에서 작용하는 전체 합력은 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{AB} \cdot (A_A + A_B) \cdot \Delta\varepsilon = (E_A \cdot A_A + E_B \cdot A_B) \cdot \Delta\varepsilon \dots\dots\dots (d)$$

$$\begin{aligned} \therefore E_{AB} &= \frac{E_A \cdot A_A + E_B \cdot A_B}{A_A + A_B} \dots\dots\dots (e) \\ &= E_A \cdot \frac{n'}{100} + E_B \cdot \left(1 - \frac{n'}{100}\right) \end{aligned}$$

전체 변형은 각각의 탄성체의 변형과 같으므로

$$\Delta\sigma_A = \frac{E_A}{E_{AB}} \cdot \Delta\sigma \dots\dots\dots (f)$$

$$\Delta\sigma_B = \frac{E_B}{E_{AB}} \cdot \Delta\sigma \dots\dots\dots (g)$$

Fig. 1에서 높이를 단위높이라 하고, A를 공극수, B를 토립자로 치환하면 $\Delta\sigma_A = \Delta u, \Delta\sigma_B = \Delta\sigma_3'$,

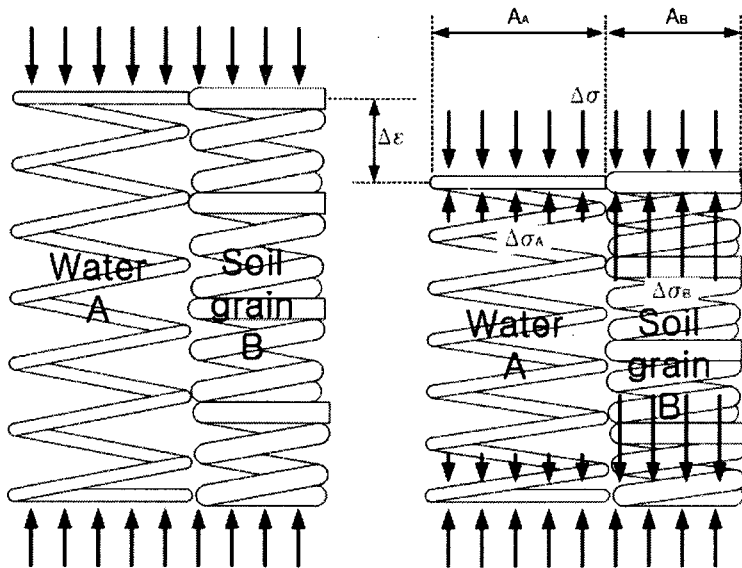


Fig. 1 Diagram of elastic soil water composition body

$E_A = K_w$, $E_B = K_s$, $E_{AB} = K_{bulk}$, 및 $\Delta\sigma = \Delta\sigma_3$ 로 생각할 수 있다. 여기서 Δu 는 공극수압의 변화량, $\Delta\sigma_3$ 는 전응력 변화량, $\Delta\sigma_3'$ 는 유효응력 변화량, K_w 를 물의 체적탄성계수, K_s 는 단순화한 토립자의 체적탄성계수, K_{bulk} 는 포화된 공시체의 체적탄성계수이다.

따라서 식 (f)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있고

$$\Delta u = \frac{K_w}{K_{bulk}} \cdot \Delta\sigma_3 \dots\dots\dots (h)$$

식 (g)는 토립자가 받는 유효응력에 대해서 다음과 같이 된다.

$$\Delta\sigma_3' = \frac{K_s}{K_{bulk}} \cdot \Delta\sigma_3 \dots\dots\dots (i)$$

여기서, K_{bulk} 는 물로 완전히 포화된 공시체의 비배수 상태에서의 체적탄성계수로 식 (e)로부터 다음과 같이 된다.

$$K_{bulk} = K_w \cdot \frac{n}{100} + K_s \cdot \left(1 - \frac{n}{100}\right) \dots\dots\dots (j)$$

여기서 n 은 공극률이다.

Eigenbrod 등(1999)은 등방압축을 받는 공시체에 대한 탄성론적 정해를 구하는 것은 매우 복잡하므로 간단한 3차원적인 모델링은 곤란하다고 하였다. 본 연구에서도 전술한 과정과 같이 포화된 흙 구조체를 축방향력에 대한 고려로 단순화시켰다. 따라서 공극수압계수 B 는 식 (h) 및 (j)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} = \frac{K_w}{K_{bulk}} \dots\dots\dots (1)$$

$$= \frac{K_w}{K_w \cdot \frac{n}{100} + K_s \cdot \left(1 - \frac{n}{100}\right)}$$

여기서 $K_s < K_w$ 이라고 가정이면 B 값이 1보다 커지게 된다. 이것은 외부에서 받는 단위면적당 압력보다 더 큰 공극수압이 발생한다는 것을 의미한다. Skempton(1954)의 공극수압계수에 대한 개념과는 일치하지 않지만 Fig. 1에서와 같이 단순화시킨 구조에서는 강성이 큰 재료가 외력의 상당부분을 지지하게 되므로 이러한 결과가 나타날 수 있다. Terzaghi 등(1996)은 섬유질 이탄토와 같은 포화된 유기질 흙에서 1보다 큰 공극수압계수 값이 반복적으로 측정되었다고 하였다. 이러한 현상은 Skempton의 공극수압계수로는 설명이 곤란하다. 또한 Eam(2005)의 실험에서도 외력이 유효응력에 비해서 매우 큰 경우에는 공극수압계수가 1보다 크게 나타날 수 있는 것으로 유추하였다.

Fig. 2는 위 식에서 $K_w=2,100$ MPa이고, $K_s=36,000$ MPa와 $69,000$ MPa인 경우(Terzaghi et. al 1996)에 대해서 각각 공극률의 변화에 따른 공극수압계수의 변화를 나타낸 것이다. 공극률이 100%이면 공시체의 내부는 완전히 공극수로만 이루어져 있는 경우로 공극수압계수는 1이 된다. 공극률이 작아지면서 공극수압계수는 급속하게 감소하여 공극률이 0이 되면 공극수압계수도 0이 된다.

Fig. 1과 같은 조건은 토립자가 외력을 받는 동안 초기의 구조를 유지하고 있을 때 성립한다. 그러나 실제의 흙은 작은 토립자들이 서로 접촉하여 이루어져 있기 때문에 Bishop 등(1950)과 Keedwell(1984)은 토립자는 접촉 면적이 없고 압축성도 전혀 없는 가상의 물질로 서로 연결되어 있어야 기존의 공극수압계수에 대한 논의들이 성립한다고 하였다.

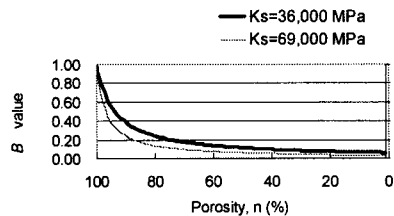


Fig. 2 Porosity vs B value

Fig. 1은 실제의 흙 구조를 매우 단순화한 것이다. 단순화한 설정으로부터 유도된 식 (1)을 적절하게 적용하기 위해서는 토립자의 성분 및 형상, 입경의 크기 흙의 압축특성 등 공극수압의 거동에 영향을 주는 다양한 요소들을 포함시켜야 한다. 이와 같은 인자들을 직접적으로 고려하여 정량적 해석을 시도하는 것은 각각의 인자들에 대한 특성값을 산정해야 하는 어려움이 따르므로 본 연구에서는 두개의 인자만을 추가하였다.

식 (1)은 공극률이 0~100%까지의 경우를 대상으로 한다. 그러나 공시체가 성형될 수 있는 가장 느슨한 공극률의 한계가 있으므로 이 공극률을 a 라고 하고 최대로 압축되었을 때의 최소 공극률을 설정하여 b 라고 하면 공시체의 공극률은 $b < n < a$ 의 범위에 있게 된다. b 와 a 사이의 범위는 모래의 압축성을 나타내므로 압축지수를 산정하는데 이용될 수 있다.

식 (j)를 공극률 $n = a$ 일 때 $K_{bulk} = K_w$ 가 되고 공극률 $n = b$ 일 때 $K_{bulk} = \infty$ 가 되도록 수정하면 다음과 같이 된다.

$$K_{bulk} = K_w \cdot \left(\frac{n}{a}\right) + K_s \cdot \frac{(a-n)}{(n-b)} \dots\dots\dots (k)$$

따라서 공극수압계수 B 는 다음과 같이 된다.

$$B = \frac{K_w}{K_{bulk}} = \frac{K_w}{K_w \cdot \left(\frac{n}{a}\right) + K_s \cdot \frac{(a-n)}{(n-b)}} \dots (2)$$

III. 결과 및 고찰

1. 제안된 모델에 의한 공극수압계수와 실험결과와의 비교

비배수 상태에서의 공극수압 거동에 대한 제안 모델의 적용성을 검토하기 위해서 식 (2)에 의해서 계산된 공극수압계수와 Eam(2005)에 의해서 측정

된 공극수압계수를 비교하였다. 계수 a 값은 시험 결과에서 유효응력이 가장 작았을 때의 공극률보다 큰 값을 범위로 하고, 계수 b 값은 유효응력이 가장 클 때 측정된 공극률보다 작은 값을 범위로 하여, 각각의 공극비에서 측정된 공극수압계수와 계산된 공극수압계수가 가장 잘 일치하도록 시행착오 방법으로 조정하였다.

Fig. 3은 측정된 공극수압계수와 제안식으로 산출한 공극수압계수를 비교한 것이다. 식 (2)의 변수는 공극률이므로 실험에서 얻은 각각의 유효응력에 대응하는 공극률을 입력변수로 하고 결과는 유효응력과 공극수압계수의 관계로 나타내었다. case 1은 토립자의 체적압축계수를 36,000 MPa를 사용하여 a 와 b 를 조정한 경우이고, case 2는 69,000 MPa를 사용하여 조정한 것이다. 제안식에서 토립자의 체적탄성계수의 변화는 계수 a 와 b 의 조정에 의해서 상쇄되어 곡선의 형태가 근접하게 나타났다. 시료의 입경이 큰 S-1과 S-2에서는 유효응력이 작은 경우에 제안식과 실험의 오차가 나타났고, 시료의 입경이 작은 S-5와 S-6에서는 유효응력이 큰 경우에 오차가 나타났으나 그 크기는 수용될 수 있는 범위인 것으로 사료된다. 공극률과 유효응력의 반대수선형관계가 높은 S-3와 S-4에서 가장 잘 일치하였다. 이러한 원인으로는 입경이 큰 경우에 유효응력에 의한 토립자의 부서짐과 재배열이 나타나고, 입경이 매우 작은 경우에는 측정값이 매우 작은 범위에서 나타나므로 실험의 진행과정에 매우 세심한 주의가 필요하며 중간범위의 시료입경에서 상대적으로 실험의 진행이 용이하기 때문으로 판단된다.

2. 제안된 모델에 의한 압축지수와 실험결과와의 비교

검증단계에서 얻은 계수 a 와 b 는 흙이 주어진 조건에서 가장 느슨해질 수 있는 상태와 가장 조밀해질 수 있는 상태의 공극률을 나타낸다. 선행하중

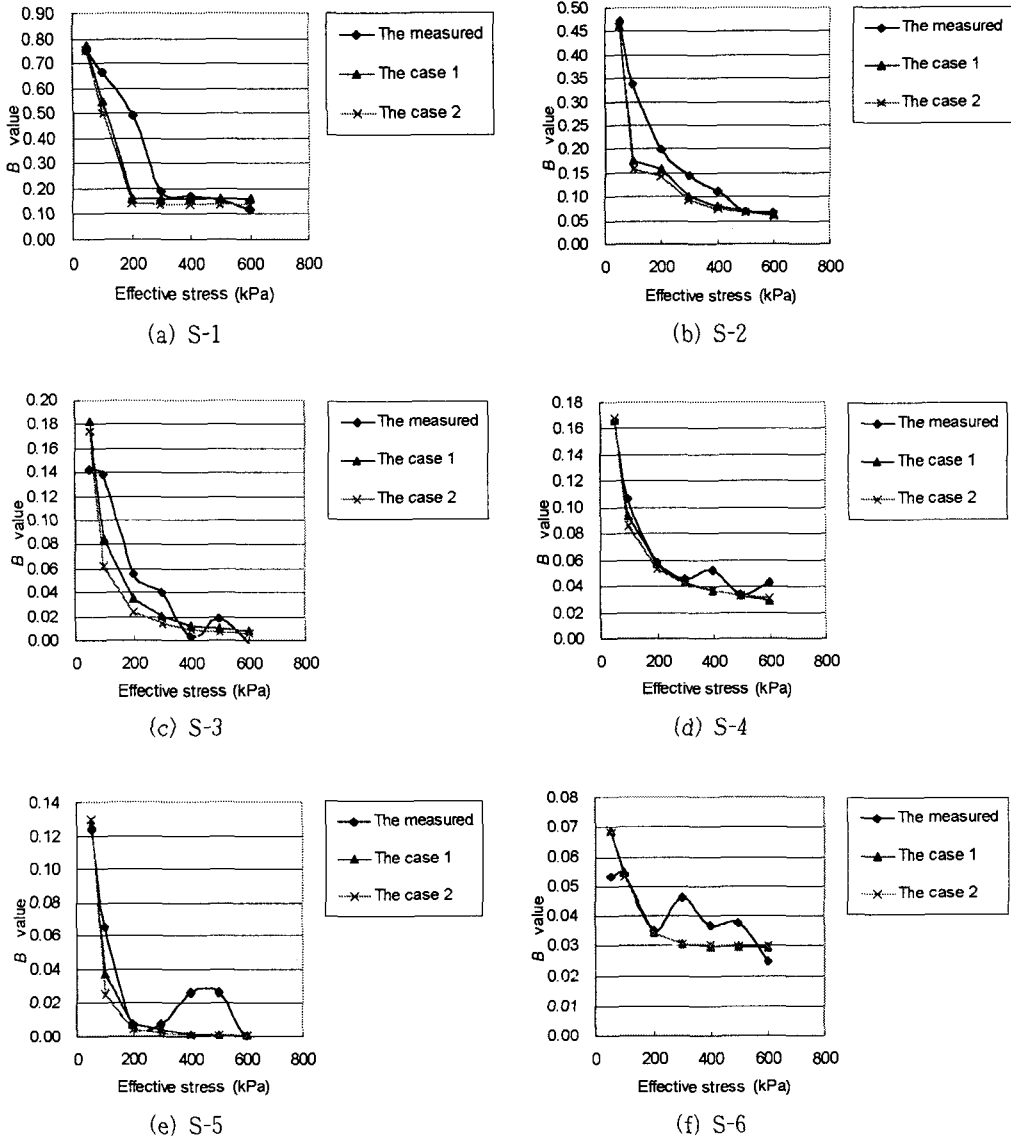


Fig. 3 The comparison of the calculated and the measured B values

을 무시할 때 유효응력과 공극률과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 공극률 a 에서의 유효응력을 아주 작은 값을 취하고 공극률 b 에 대응하는 유효응력을 알 수 있다면 압축지수 C_c 를 구할 수 있다.

Fig. 4는 제안식을 적용하여 B value를 산출하는 과정에서 얻은 공극률 a 와 b 값으로부터 계산

된 압축지수 (C_c)와 공시체의 등방압밀실험으로부터 얻은 압축지수 (C_c)를 비교한 것이다. 이 때 a 에서의 유효응력은 1 kPa를 사용하였고, b 에서의 유효응력은 일률적으로 600 kPa를 사용하였다. 등방압밀로부터 얻은 압축지수 C_c 는 시험에서 유효응력이 50 kPa일 때와 600 kPa일 때의 공극비

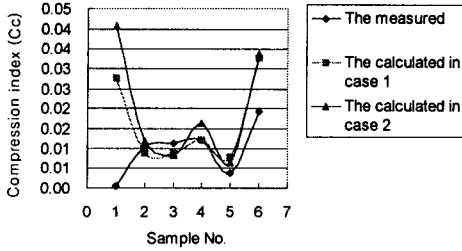


Fig. 4 The calculated and the measured compression index

를 각각 사용하였다.

그림에 나타난 바와 같이 토립자의 체적탄성계수는 압축지수 C_c 에 큰 영향을 나타내지 않는다. S-1 공시체에서는 차이를 나타내었으나 나머지 경우에는 근접한 결과를 나타내었다. a 와 b 는 이론상 가장 느슨해질 수 있는 한계치와 가장 조밀해질 수 있는 한계치이므로 b 에 대응하는 유효응력을 잘못 산정하면 실측된 압축지수와 다른 값을 나타내게 된다.

S-1과 S-6 공시체에서는 예측한 값이 실측한 값보다 크게 나타났으나 공극수압의 예측치와 실측치가 비교적 잘 일치하는 S-2, S-3, S-4 및 S-5 에서는 수치적으로 매우 작은 값을 고려할 때 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. S-4에서는 공극비와 유효응력이 상관성이 높은 반대수 선형관계이고 이것은 600 kPa보다 더 큰 압력에서도 좀 더 압축될 수 있다는 것을 나타내므로 계산에 사용된 유효응력 600 kPa는 실제 흙의 특성에 비해서 작은 값이다. 측정된 C_c 와 a 와 b 로부터 계산된 C_c 가 일치하도록 유효응력을 조정하면 1,435 kPa이다. 따라서 S-4는 이 압력까지 계속해서 압축이 일어나고 이때의 b 값 즉 공극률은 45.1%, 공극비는 0.860으로 유효응력 600 kPa에서 실측된 공극률 45.5%와 근접하게 나타났다. S-5 와 S-6에서도 계산된 값이 약간 크게 나타났는데 이것은 공극비의 감소율이 600 kPa에 도달하기 전에 이미 감소하기 시작하였으나, 실측치의 C_c 는 600 kPa를

기준으로 계산하였으므로 실제의 현상보다 작게 나타난 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서 포화된 사질토에서 등방재하에 의한 비배수 공극수압거동을 분석할 수 있는 탄성모델을 개발하여 실험결과와 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 기본 모델은 토립자의 입경이 크지 않은 범위에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.
2. 제안모델의 계수 a 와 b 로부터 압축지수를 산정하고 실험결과로부터 얻은 압축지수와 비교한 결과 근접하게 나타났다.

제안된 구성모델은 양 극단의 한계공극비를 나타내는 계수 a 와 b 및 재하되는 상태에서의 공극률 n 만을 입력변수로 사용하기 때문에 현재의 유효응력상태와 외력의 재하증분의 크기를 고려할 수 있도록 수정 보완 되고 정지토압상태에서의 적용성이 검증되어야 할 것으로 사료된다.

References

1. Bishop, A. W., and A. K. G. Eldin. 1950. Undrained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength. *Geotechnique*. ICE. 2(1): 13-32.
2. Eam, S. H. 2005. The Analysis of the Behavior of Undrained Pore Water Pressure in Saturated Sand by Isotropic Loading Test. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(4):43-52. (in Korean)
3. Eigenbrod, K. D., and W. H. Wurmnest. 1999. Pore-Water Pressure Response during Undrained Isotropic Load Changes in Layered Soils. *Canadian Geotechnical Journal*. CGS. 36(3): 544-555.

4. Keedwell, M. J., 1984, *Rheology and Soil Mechanics*, pp.67-131. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York.
5. Skempton, A. W. 1954. The Pore Pressure Coefficients A and B. *Géotechnique*. ICE. 4(4): 143-147.
6. Terzaghi, K., R. B. Peck, and G. Mesri. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice Third Edition*. 223-229. John Wiley & Sons.