

지오셀로 보강된 모래의 응력-변형 거동

Stress-strain Behavior of Sand Reinforced with Geocell

윤여원* · 김재윤** · 김방식***

Yoon, Yeo-Won · Kim, Jae-Youn · Kim, Bang-Sik

Abstract

In this research stress-strain behavior of composite geocell-soil systems under triaxial condition and the influence of strength due to the presence of geocell were studied. For the research a series of triaxial tests were carried out on sand specimens confined by flexible-walled single rubber cell. The diameter of all rubber cells placed at the center of the soil sample were 50 mm. Three rubber sizes, i.e. 35, 50 and 70 mm height, were applied to the soil specimen and the size of soil specimen was 50 mm in diameter and 100 mm in height. Three different densities of soil were used for the tests.

In general, it was observed that the sand specimen develops an apparent cohesion due to the confinement by the geocell. The magnitude of this cohesion seemed to be dependent to the properties of the geocell material.

The test results have shown that the geocell material for this research not only develops the apparent cohesion but also increases the angle of friction whereas geosynthetic material in the references showed only the increase of apparent cohesion.

From the application of geocell-soil composites to the hyperbolic model, it was recognized that the determination of the peak strength influences the behavior of the geocell-soil composites.

Keywords : Geocell, Triaxial test, Stress-strain, Equivalent cohesion, Hyperbolic model

요 지

본 연구에서는 삼축 조건하에서 지오셀-흙 복합체의 응력-변형 거동과 지오셀에 의한 강도증가를 고찰하였다. 연구를 위하여 직경 50mm, 높이 100mm인 시료 중앙에 직경 50mm, 높이는 각각 35, 50, 70mm인 연성의 모형셀을 넣고 3개의 밀도 변화에 따른 일련의 삼축시험을 수행하였다.

시험결과 지오셀의 구속은 모래의 등가점착력을 유발시키는 것으로 나타났으나 점착력은 지오셀 재료의 특성에 관계되는 것으로 나타났다. 기존의 지반보강재에 의한 강도증가가 등가점착력의 유발만 나타난 것과는 달리 본 연구에서 사용된 탄성의 고무지오셀 재료는 등가점착력의 유발뿐만 아니라 내부마찰각도 증가시키는 것으로 나타났다.

지오셀-모래 복합체의 강도를 쌍곡선 모델에 적용시킨 결과 지오셀 복합재료의 거동이 일반 흙과는 거동이 다르므로 적용된 설계허중 범위에서의 침투강도 결정이 거동을 묘사하는데 중요한 것으로 인식되었다.

주요어 : 지오셀, 삼축압축시험, 응력-변형, 등가점착력, 쌍곡선모델

* 정희원 · 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 032-860-7568(E-mail:yoonyw@inha.ac.kr)

** 정희원 · (주)평원엔지니어링 과장 · 02-522-1161(E-mail:ys90210@pweng.co.kr)

*** 정희원 · 국립충주대학교 교수 · 인하대학교 박사과정 · (E-mail:baskim@nail.chungju.ac.kr)

1. 서론

지오셀(geocell)은 1970년대 미육군 공병대에서 사용한 이후 일반 토목공사에 널리 사용되고 있다. 지오셀(geocell)의 지반공학적 제반 특성에 대하여는 그 동안 여러 연구자들(Jamnejad 등, 1986; Bathurst와 Jarrette, 1988; Crowe 등, 1989; Mhaiskar와 Mandal, 1992; Bathurst와 Crowe, 1994; Vito 등, 1998; 김진만 등, 1999; 김풍식, 2000)에 의하여 연구된 바 있다. Bathurst와 Karpurapu(1993)은 지오셀로 인한 지반의 보강효과는 주로 등가점착력의 발현에 기인한다고 밝힌 바 있다. 그럼에도 불구하고 지오셀로 인한 지반의 거동을 해석하는데 있어서 보강지반을 단순히 등가점착력의 증가분으로 모델링하는데는 지오셀의 3차원 형상과 거동특성 등으로 인하여 여러 어려움을 수반하고 있다(Mhaiskar와 Mandal, 1992).

지오셀 보강효과를 연구하기 위한 삼축압축시험의 경우 일반적인 단부구속의 원인으로 인해 전단강도의 측정에 문제가 발생함과 동시에 Bathurst와 Karpurapu(1993)와 같이 지오셀을 직접 삼축시험기의 가압판에 접촉시키게 되면 지오셀 재료와의 마찰로 인해 또 다른 구속효과가 발생될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 삼축압축시험에서 공시체의 단부영향을 배제하기 위하여 모형 지오셀을 공시체내에 설치하고 지오셀의 높이비에 따른 지반의 응력-변형 거동을 삼축압축시험을 통하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 후프텐션이론

Henkel과 Gilbert(1952)는 일반적인 삼축압축시험에서 사용되는 고무멤브레인이 전단강도의 결정에 미치는 영향을 측정하고 보정방법을 구하기 위해 후프텐션(hoop tension) 이론을 제안하였다. 삼축압축시험의 공시체가 축차응력을 받으면 축방향의 시료높이가 감소하면서 횡방향의 변위 즉, 공시체의 직경이 증가하게 된다. 이로 인해 고무멤브레인의 둘레에 인장응력이 작용하게 되어 최소주응력이 증가하게 된다. 만약 전단변형이 발생하는 동안 공시체의 체적이 일정하다면, 공시체의 전단변형후 직경, d 와 원래의 직경 d_0 , 그리고 축방향 변형률, ϵ_a 와의 관계를 다

음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 L_0 = \frac{\pi}{4} d^2 L \quad (1)$$

식 (1)을 다시 표현하면

$$d = \frac{d_0}{\sqrt{L/L_0}} = \frac{d_0}{\sqrt{1-\epsilon_a}} \quad (2)$$

여기서, L_0 : 초기길이

L : ϵ_a 변형 발생시의 길이

또한 멤브레인의 횡방향 변형길이, ϵ_c 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_c = \frac{\pi - \pi d_0}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0} \frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon_a}}{\sqrt{1 - \epsilon_a}} \quad (3)$$

그러므로 멤브레인으로 인한 구속응력의 증가량($\Delta \sigma_3$)은 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta \sigma_3 = \frac{2M \epsilon_c}{d} \frac{1}{(1 - \epsilon_a)} = \frac{2M}{d_0} \left[\frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon_a}}{1 - \epsilon_a} \right] \quad (4)$$

여기서, ϵ_a : 축방향 변형률

d_0 : 멤브레인의 초기 직경

M : 멤브레인의 탄성계수

2.2 지오셀 보강효과

Bathurst와 Karpurapu(1993)는 지오셀로 보강된 사질토의 대형삼축압축시험을 실시한 결과, Mohr-Coulomb의 강도식으로 표현하면 무보강 시료에 비해 지오셀로 보강된 모래의 경우 보강효과는 내부마찰각의 변화 없이 등가점착력의 발생으로 나타난다고 제안하였다. 또한 지오셀 보강에 의해 발생된 등가점착력을 고무멤브레인이론(Henkel과 Gilbert, 1952)을 적용시킴으로써 보강재료의 탄성계수를 이용해서 예측이 가능하도록 수식화하였다.

등가점착력의 계산 내용을 설명하면 아래와 같다. 지오셀 내부에 채워진 모래가 수직응력을 받으면 횡방향의 변

위가 발생하는데, 이 때 발생하는 횡방향 변위가 지오셀에 의해 억제됨으로써 발생하는 구속응력의 증가가 강도의 증진효과를 나타낸다. 이는 일반적인 사질토의 전단거동에서 같은 조건의 상대밀도를 가진 재료가 유효구속압이 증가함에 따라 최대주응력값이 증가하는 현상과 유사함을 알 수 있다. 그림 1에서와 같이 가장 작은 Mohr원이 구속압 σ_3 가 작용했을 때 무보강시료의 Mohr원이라면, 가장 큰 Mohr원은 무보강시료와 같은 구속압 σ_3 가 작용했을 때 지오셀 보강시료의 Mohr원이라 할 수 있다. 즉, 무보강 모래의 경우 구속압이 $\sigma_3 + \Delta \sigma_3$ 일 때 발생하는 최대주응력 σ_1 이 지오셀 보강에 의해 $\Delta \sigma_3$ 의 증가 없이도 같은 구속압 σ_3 에서 최대주응력 σ_1 이 발생한다. 이러한 이유로 마찰각의 변화없이 등가점착력 c_r 이 발생함으로써 Mohr-Coulomb의 강도식 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 에서 새로운 등가점착력, c_r 를 발생시키고 이로 인해 전체적인 모래의 전단강도가 증가된다.

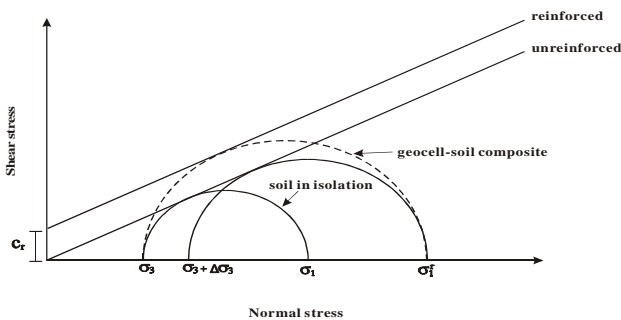


그림 1. 지오셀 보강에 의한 등가점착력 발생과 원리

이때 발생하는 등가점착력 c_r 는 수식에서 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 + 2 c_r \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \\ &= K_p \sigma_3 + 2 c_r \sqrt{K_p} \end{aligned} \quad (5)$$

또한 무보강시료의 경우 구속압이 $\sigma_3 + \Delta \sigma_3$ 일 때 발생하는 최대주응력 σ_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = K_p (\sigma_3 + \Delta \sigma_3) \quad (6)$$

그러나 위의 두가지 최대주응력 σ_1 은 같은 값이므로 다

시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_r = \frac{\Delta \sigma_3}{2} K_p \quad (7)$$

그리고 지오셀 보강에 의해 증가된 $\Delta \sigma_3$ 는 고무멤브레인이론(Henkel 과 Gilbert, 1952)에 의해 계산할 수 있다.

2.3 응력-변형율의 비선형 해석

2.3.1 응력-변형 곡선 모델

일반적으로 탄성, 등방인 재료에 있어서 구성법칙(constitutive law)은 2개의 강성매개변수, 즉 탄성계수와 포이송비를 포함한다. 그러나 흙의 시험결과에서 보듯이 응력-변형률 거동은 비선형적이고 구속응력에 의존한다는 것을 알 수 있다. 여기서 흙 거동의 비선형성과 응력 의존성을 고려하는 간단하고도 실용적인 응력-변형률 관계로 제안된 것이 쌍곡선 응력-변형률 관계이다(그림 2, 그림 3). 이러한 쌍곡선 함수 모델은 비선형 거동을 일련의 강성 거동의 조각들로 나누어 근사화하는 일종의 의사선형(quasi-linear) 모델이라고 말할 수 있다.

이 쌍곡선 함수 모델은 Kondner(1963)가 여러 종류의 흙을 시험하여 본 결과로부터, 흙의 비선형 응력-변형률 관계를 쌍곡선 형태로 근사시킬 수 있음을 제안하였고, 이후 Duncan과 Chang(1970)은 하중 재하시에 비선형 응력-변형률 관계를 부분적인 선형관계로 변환하기 위한 접선변형률계수(tangent modulus)의 사용과 응력변화에 따른 흙의 체적변화 예측을 위한 체적변형률계수(bulk modulus)의 도입 등을 통하여 이 모델을 더욱 발전시켜, 현재 유한요소법에 의한 지반의 응력-변형률해석에 많이 활용되고 있다.

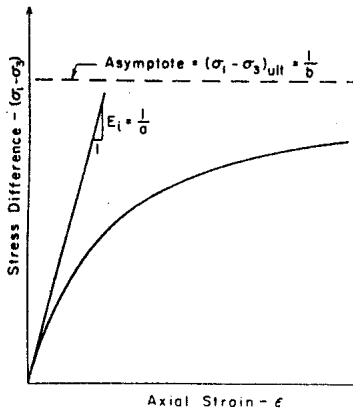


그림 2. 쌍곡선함수로 나타낸 응력-변형 곡선

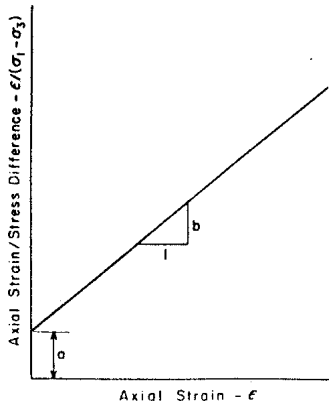


그림 3. 변형 쌍곡선함수 응력-변형 곡선

Kondner(1963)는 일정한 구속응력 하에서 삼축압축 시험을 실시했을 때 얻어지는 비선형 응력-변형 곡선이 근사적으로 쌍곡선으로 나타낼 수 있다는 것을 보였으며, 제안된 쌍곡선 함수는 다음과 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon}{\left[\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \right]} \quad (8)$$

여기서, $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 축차응력
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: 극한상태 축차응력
 ϵ : 축방향 변형률
 E_i : 초기접선계수

위 식은 그림 2와 같이 비선형으로 나타나므로 수치해석

을 위하여 응력-변형률 곡선을 아래 식과 같이 선형화하여 그림 3과 같이 표시할 수 있으며, 여기서 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 는 변형율이 무한대일 때 응력-변형률 곡선에 접근하게 되는 점근선 값으로 표현된다.

$$\frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (9)$$

2.3.2 쌍곡선 모델

(1) 접선계수

접선계수(tangent modulus)는 쌍곡선 모델(hyperbolic model)에서 하중의 재하시에 비선형 응력-변형 관계식을 부분적인 선형관계식 형태로 변화하는데 사용된다. 즉, 완전히 포화된 흙을 비압밀비배수 상태로 시험하는 경우를 제외하고는 거의 모든 흙이 구속응력의 증가에 따라 응력-변형률 곡선이 급하게 되며, 강도가 커짐에 따라 곡선의 기울기와 극한주응력의 차이도 커지게 된다. 이와 같이 응력과 변형률은 구속응력에 따라 변화하므로 Janbu(1963)는 이러한 응력에 의존하는 초기접선변형계수(initial tangent modulus) E_i 를 다음과 같이 제안하였다.

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (10)$$

여기서, K : 변형계수정수(a modulus number)
 n : 변형계수지수(a modulus exponent)
 p_a : E_i 와 같은 단위로 표시된 대기압

또한 토질의 상태에 따라 극한상태의 주응력차와 파괴상태의 주응력차의 비가 다르므로 이를 나타내는 파괴비(failure ratio) R_f 는 다음 식으로 정의한다.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (11)$$

위의 식에서 파괴시의 주응력차는 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 이용하여 구할 수 있으며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (12)$$

일반적으로 점착력과 내부마찰각은 Mohr원을 이용하여 구하거나 파괴시의 주응력을 이용하여 구할 수 있다. 그러나 대부분의 흙에 있어서 내부마찰각은 구속응력의 함수이므로 각각의 Mohr원의 파괴포락선이 원점을 통과한다고 가정하여 구속응력이 변화함에 따라 다음식을 이용하여 각각의 구속응력 상태에서의 내부마찰각을 구한다.

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log_{10} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (13)$$

여기서, ϕ_0 : 구속응력이 대기압과 같을 때의 내부마찰각
 $\Delta\phi$: 구속응력의 10배 증가에 따른 내부마찰각의 감소 값

또한 응력비 혹은 응력수준은 다음 식으로 표현된다.

$$S = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (14)$$

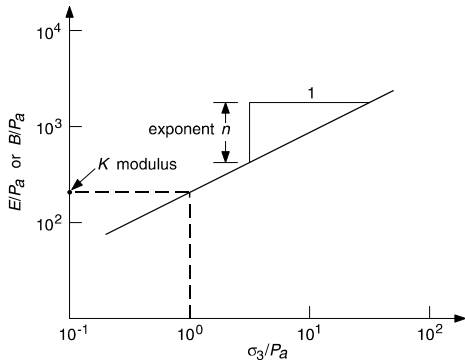


그림 4. 비선형 계수의 결정

응력-변형률 곡선에서 각 응력에 해당하는 접선변형계수, E_t 는 구속응력과 응력수준(stress level)의 변화에 따라 다음과 같이 유도한다.

$$E_t = (1 - R_f S) K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (15)$$

위 식에서 n 과 K 값은 그림 4에 보인 바와 같이 시험결과를 대수지에 나타내어 결정한다.

흙이 제하(unloading) 또는 재하(reloading)상태에 있을 때의 응력-변형률의 관계는 제하-재하시의 접선변형계수(unloading reloading modulus number) K_{ur} 의 값이 이용되며 이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (16)$$

(2) 체적변형계수

응력의 변화에 따른 흙의 체적변화를 정확히 예측하는 것은 어려운 문제이다. Duncan 등(1980)은 체적변형계수(bulk modulus), B 를 이용하여 이를 구속응력의 함수로 표시하였다.

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (17)$$

여기서, K_b : 체적계수정수(bulk modulus number)

m : 체적계수지수(bulk modulus exponent)

3. 보강재 인장시험 및 삼축압축시험

지오셀의 재료로 사용된 포입고무판의 인장시험은 ASTM D 638 (type-4)의 방법에 의해 변형속도 50mm/min로 시험하였다. 또한 보강시료의 삼축압축시험을 위하여 우선 외경 50mm, 두께 1.6mm, 35, 50, 70mm인 지오셀을 제작하였다(그림 5). 지오셀은 재봉이나 본드 등의 접합이 어려워 드릴로 천공후 작은 리벳을 이용, 3개소에 접합하여 제작하였다. 제작된 지오셀은 공시체를 소정의 높이까지 다진 후 몰드내에 조심스럽게 삽입한 후 시료를 넣어 다져 조성하였다. 삼축압축 시험용 공시체의 높이를 100mm로 고정하여 지오셀의 높이 대 폭 비(h/d ratio)를 0.7, 1.0, 1.4로 변화하여 시험하였으며(그림 6) 이는 각각 시료의 높이대 폭비(h/d) 2.86, 2.0, 1.43에 해당된다. 삼축압축시험에 사용될 공시체의 전체 높이 대 폭 비는 지오셀의 높이 대 폭 비에 상관없이 일정한 비가 되도록 유지하고 모래의 상대밀도 느슨(Dr=40%), 중간(Dr=55%), 조밀(Dr=70%) 각각의

시료에 대하여 구속압력 50, 100, 150 kPa 로 변화시켜 가면서 배수전단시험을 수행하였다. 시험결과로부터 지오셀의 높이 대 폭 비, 상대밀도 변화에 따른 전단거동과 포입고무판을 재료로 사용한 지오셀로 보강된 사질토의 보강 효과에 대해 고찰하였다.

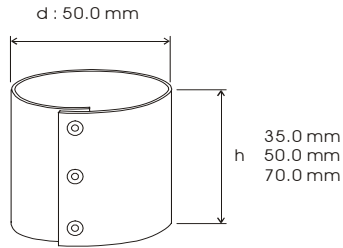


그림 5. 지오셀 모형

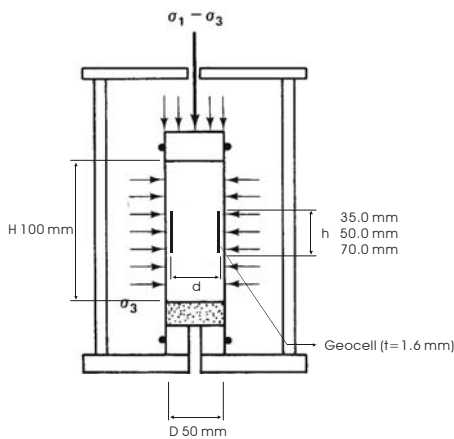
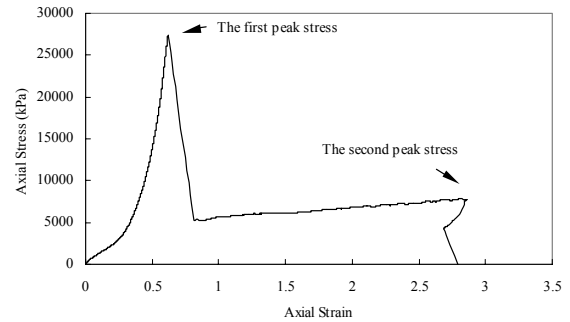


그림 6. 삼축압축시험 공시체내의 지오셀

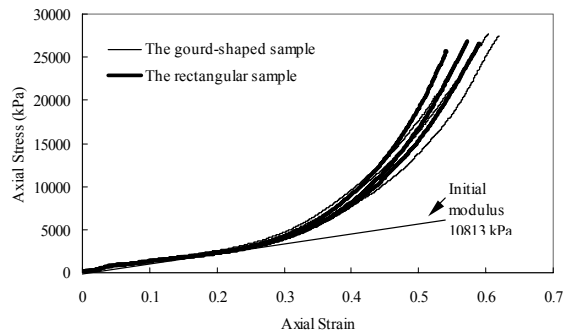
4. 시험 결과 및 고찰

4.1 지오셀 보강재료의 인장강도

지오셀의 재료로 사용된 포입고무판의 인장시험은 ASTM D 638 (type-4)의 방법에 의해 변형속도 50mm/min로 시험하였다. 포입고무판은 고무와 섬유의 복합재료이므로 초기에 섬유가 끊어지면서 첫번째 첨두응력(peak stress)을 보이고, 그 후 고무가 찢어지면서 두 번째 첨두응력(그림 7(a))을 나타내었다. 그림 7(b)는 지오셀의 초기변형부분을 보인 것이다.



(a) 전체 거동



(b) 초기첨두강도 거동

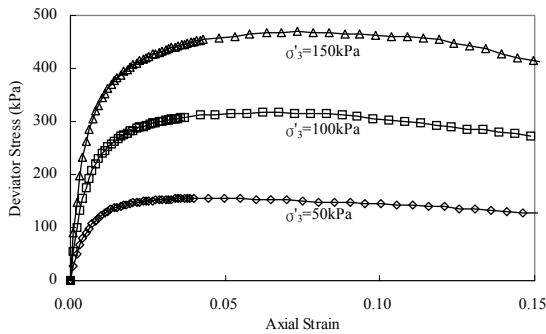
그림 7. 고무 지오셀 보강재료의 응력-변형률 거동

첫번째 첨두응력 발생 이후의 변화는 지오셀 보강효과와는 크게 관계되지 않으므로 그림 7(b)에서와 같이 첫번째 첨두응력이 발생할 때까지의 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

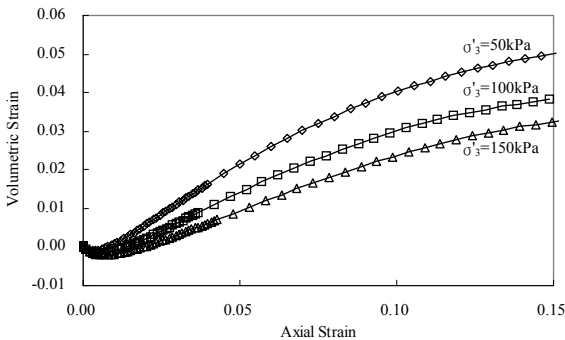
4.2 무보강 시료의 응력변형 거동

무보강시료의 배수전단시험의 결과는 그림 8에서 보는 바와 같이 구속압이 증가될수록 변형률 초기에 더욱 큰 응력값을 나타내다가 일정한 변형률 발생 후 첨두응력(peak stress)을 보이고, 그 후 응력-연화 현상(strain-softening)을 보이는 전형적인 사질토의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 또한 첨두변형률(peak strain)은 낮은 구속압에서는 작은 변형 발생시에 첨두응력을 보이고, 점차 구속응력이 증가할수록 큰 변형의 발생에서 첨두응력을 보였다. 체적변화는 초기의 탄성적인 변형의 발생 후 낮은 구속응력에서는 큰

체적변화를 보이고, 큰 구속응력에서는 작은 체적변화를 보였다. 또한 상대밀도에 따른 응력-변형율은 높은 상대밀도일수록 큰 침투응력과 침투변형을 그리고 체적변화를 보였다. 이와 같은 체적변화는 이미 잘 알려진 바와 같이 구속압, 밀도와 관계된다.



(a) 응력-변형 거동



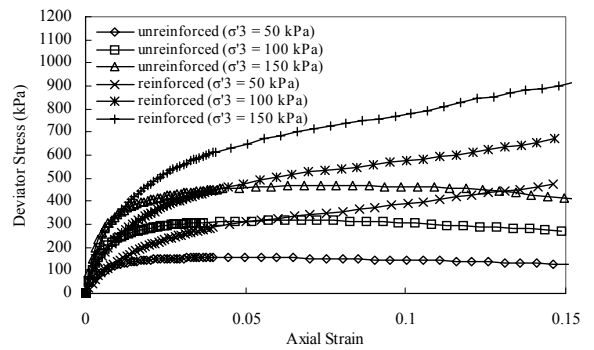
(b) 체적변형 거동

그림 8. 무보강 공시체의 전단거동($D_r=55\%$)

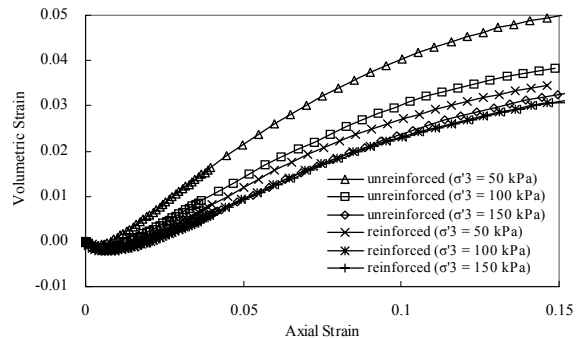
4.3 지오셀 보강 시료의 응력변형 거동

그림 9(a)에는 지오셀로 보강된 시료의 응력-변형율 거동 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 보강시료는 무보강시료의 침투축차응력을 훨씬 초과하여 변형이 15%에 이른 상태에서도 침투값을 보이지 않고 있다. 또한 그림 9(b)에 나타난 체적변형 거동에서는 보강시료의 체적변형이 무보강시료에 비하여 훨씬 작음을 알 수 있다. 이는 보강셀이 횡방향 구속에 의하여 시료의 다일러턴시에 의한 체적변형을 억제하기 때문이다. 또한 보강셀의 높이 대 폭 비(aspect ratio, h/d)에 의한 응력-변형율 거동은 그림

10에서와 같이 $h/d = 0.7$ 과 $h/d = 1.4$ 에서는 거의 같은 정도의 강도증가를 나타내었으나, $h/d = 1.0$ 에서는 다른 높이와 폭의 비(h/d)에 비해 큰 강도증가 효과를 나타내고 있다. 이와 같은 강도 증가는 Webster(1979, 1981)의 현장시험 결과와 일치함을 알 수 있다.

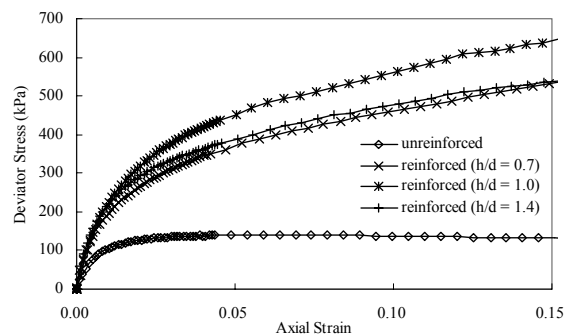


(a) 응력-변형 거동

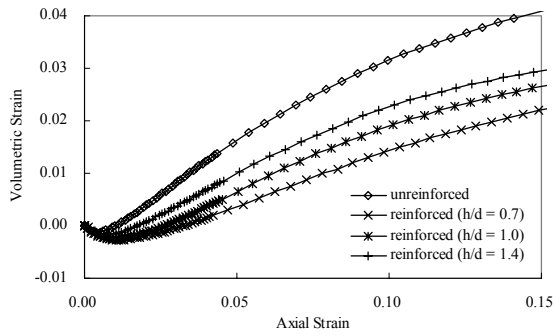


(b) 체적변형 거동

그림 9. 지오셀 보강 공시체의 구속압력 변화에 따른 전단거동($h/d = 1$, $D_r = 55\%$)



(a) 응력-변형 거동



(b) 체적-변형 거동

그림 10. 지오셀 보강 공시체의 높이/폭 비 변화에 따른 전단거동(구속압력 100kPa, $D_r = 40\%$)

4.4 지오셀 재료의 특성에 의한 보강 효과

Bathurst와 Karpurapu(1993)에 의하면 지오셀에 의한 시료의 구속은 점착력 발생의 효과로 나타나며, 이러한 등가점착력은 보강재료의 성질에 의한 구속응력의 크기와 상관된다. 그림 11은 Bathurst와 Karpurapu가 시료의 높이와 지오셀의 높이 즉 $H/d = 1$ 인 시료에 대하여 삼축 압축시험한 결과이다. 본 연구의 시험결과인 그림 9, 10은 $H/d > 1$, 즉 시료의 높이가 지오셀의 높이보다 큰 상태여서 이러한 경우에는 시료에 축차응력이 가해지게 되면 먼저 지오셀 외부시료와 셀내부시료가 먼저 변형되기 시작하고 그 후에는 시료를 구속하는 지오셀이 구속효과를 발휘하게 되어 변형이 증가함에 따라 전단응력이 점차적으로 증가하는 형태를 나타내게 된다. 반면에 $H/d = 1$ 인 시료는 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이 축차응력 재하 초기부터 지오셀과 시료가 동시에 하중을 받게 되어 응력-변형 곡선이 급격히 증가하는 형태를 나타내게 된다. 그림 9와 그림 10에서와 같이 $H/d > 1$ 인 시료는 초기접선탄성계수가 무보강시료와 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 즉, 초기의 변형발생에 의한 강도 증가량보다는 무보강시료의 초기 탄성변형 특성을 나타내면서 응력-변형을 곡선에서 선형적으로 변화하는 탄성구간을 연장시켜서 강도의 증가를 발생시킨다. 반면, 그림 11의 시료, 즉 $H/d = 1$ 인 시료는 변형 초기부터 보강된 복합재료의 응력-변형을 나타내게 되어 곡선이 가파르게 상승함을 알 수 있다. 이러한 결과에 의해 흙과 토목섬유의 복합재료인 지오셀 시스템의 거동을 각각의 재료 성질과 H/d 에 따라 전체의 거동이 다르게 됨

을 알 수 있다.

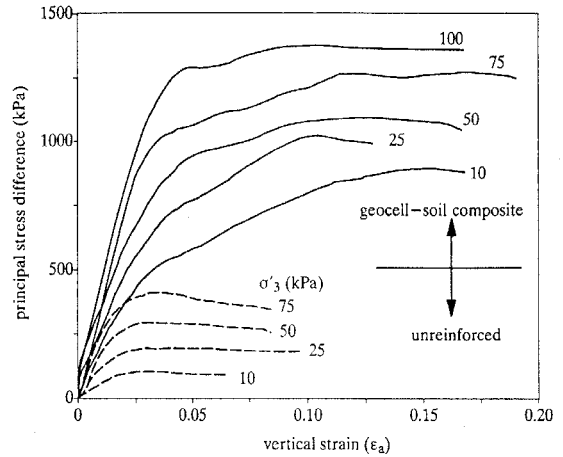


그림 11. 지오셀 보강에 의한 시료의 응력-변형 거동(Bathurst와 Karpurapu, 1993)

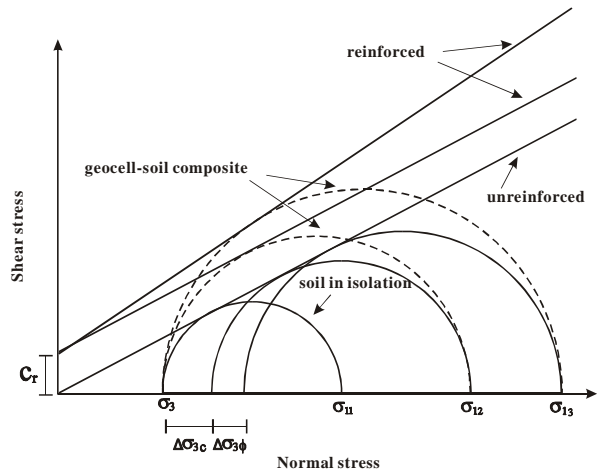


그림 12. 지오셀 보강에 의한 등가점착력 발생과 마찰각 증가

4.5 등가점착력의 계산

그림 13은 삼축압축 시험 결과를 p - q 도에 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있는 바와 같이 보강효과는 등가점착력의 발생뿐만 아니라 내부마찰각의 증가현상이 발생되는 것으로 나타났다. 마찰각 증가현상은 그림 12로 설명할 수 있으며 이 그림에서 등가점착력의 발생은 구속응력 증가에 의한 것임을 알 수 있으며 본 시험 결과에서는 모어원이 더 커져 등가점착력의 발생외에 마찰각을 증가시키는 추가적인 구속응력 증가분이 발생한 것으로 생각할 수 있다. 이러

한 현상은 Bathurst와 Karpurapu(1993)가 수행한 시험 결과와 본 연구의 시험 결과를 비교해 봄으로써 알 수 있다.

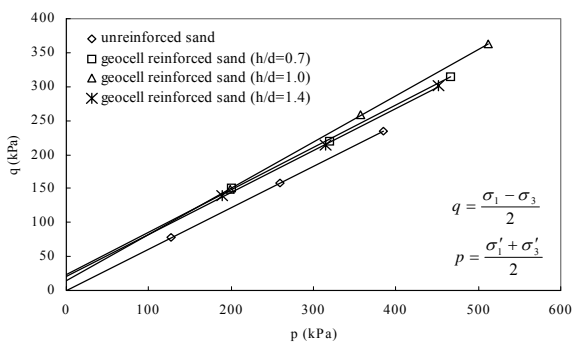
Bathurst와 Karpurapu(1993), Rajagopal 등(1999)은 보강재료의 활선계수(secant modulus)를 적용시켜 그들의 시험 결과와 비슷한 등가점착력의 계산 결과를 보여준 바 있다. 본 연구에서는 등가점착력의 발생 이 외에 내부마찰각의 증가가 발생하는 것으로 나타났으며(그림 13, 표 1) 이러한 내부마찰각 증가를 p-q도에 나타낸 것이 그림 13이다. 표 1에는 무보강 시료의 내부마찰각, Bathurst와 Karpurapu(1993)가 제안한 멤브레인 보정 이론을 이용한 등가점착력, 삼축압축시험 결과에 의한 점착력을 나타내었다. 표에서 무보강시료와 보강시료를 비교해 보면 지오셀 보강은 모든 밀도에서 등가점착력발생 뿐만 아니라 내부마찰각이 증가함을 알 수 있다. 이 중 지오셀의 높이가 시료의 높이에 가까운 경우일수록 등가점착력과 내부마찰각이 계산 결과에 근접해 짐을 알 수 있다. 이는 Bathurst와 Karpurapu(1993)가 제안한 멤브레인 보정 이론이 $H/h = 1$ 인 단부구속인 경우에 대한 결과를 바탕으로 했기 때문이다.

표 1. 지오셀 보강시료의 등가점착력

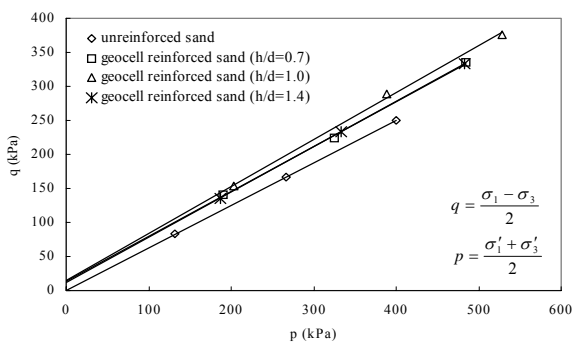
Dr, %	형상비 (h/d)	높이비 (h/H)	등가점착력, kPa		내부마찰각 ϕ
			시험결과	계산결과	
40	무보강	—	—	—	35.3
	0.7	0.35	11.4	30.1	40.7
	1.0	0.5	22.2	27.9	42.2
	1.4	0.7	32.1	27.5	37.3
55	무보강	—	—	—	37.3
	0.7	0.35	29.8	21.4	38.6
	1.0	0.5	19.4	24.7	42.9
	1.4	0.7	27.3	22.5	38.2
70	무보강	—	—	—	38.7
	0.7	0.35	17.9	19.8	41.3
	1.0	0.5	20.7	21.2	43.8
	1.4	0.7	15.5	20.3	41.7

4.6 비선형 해석방법에 의한 계수결정

그림 14(a)는 비선형 모델링을 위한 파라미터의 결정을 나타낸 것이며 그림 14(b)는 비선형모델링에 의한 무보강 시료의 응력-변형 예측곡선을 시험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 시료의 탄성계수는 초기접선탄성계수의 1/2인 값에 해당하는 활선계수를 사용하였다. 그림에서 보인 바와 같이 침투강도를 보이기 전까지의 구간에서는 비교적 잘 일치하는 결과를 나타냈다. 그러나 지오셀 보강시료의 경우는 초기 변형의 발생 후에 거의 직선적으로 증가하는 거동을 보이기 때문에 쌍곡선 방법을 사용하는 비선형 해석방법을 복합재료인 지오셀의 거동에 그대로 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 생각된다.



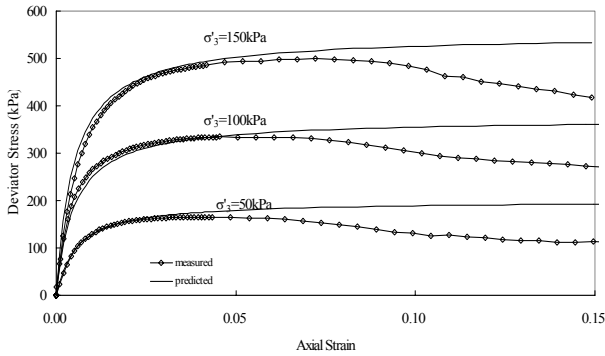
(a) Dr=55%



(b) Dr=70%

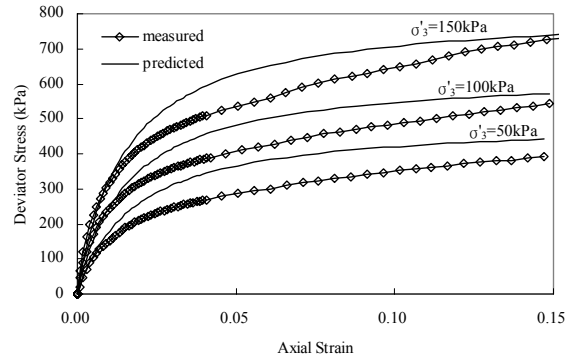
그림 13. 지오셀 보강과 무보강 공시체의 파괴포락선

(a) 쌍곡선 파라미터 결정



(b) 응력-변형 곡선

그림 14. 무보강 공시체의 응력-변형 곡선 모델링(Dr=70%)



(b) 등가강도 적용에 의한 응력-변형 곡선

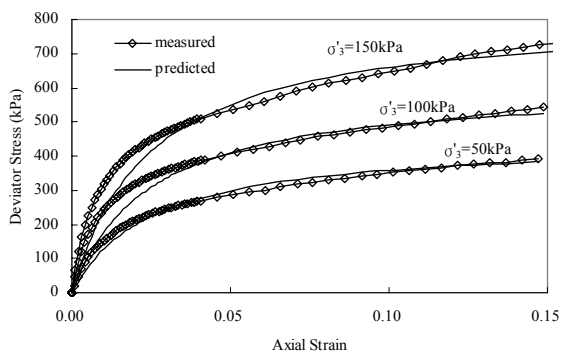
그림 15. 지오셀 보강 공시체의 시험결과와 계산결과의 응력-변형을 곡선(h/d=1.4, Dr=70%)

그림 15의 (a)는 15%의 축방향 변형을 침두강도로 간주하여 모델링 한 것이며 그림 15(b)는 등가강도를 적용하여 예측한 곡선이다. 15%의 변형을 적용한 응력-변형 곡선은 초기에는 측정값보다 작은 강도를 보이며 정점에 가까워질수록 비교적 일치하는 값을 보인다. 여기서 측정값과 예측값의 차이는 주로 지오셀 보강재료의 변형이 15%일 때를 정점으로 간주함으로 인하여 나타난 것으로 보인다. 또한 그림 13에 보인 p-q도에서의 적용방법을 사용하여 무보강시료의 침두변형값과 일치하는 보강시료의 응력을 침두응력으로 적용시킬 경우의 결과는 그림 15의 (b)와 같다. 이 결과에서는 초기변형 발생시의 계산 값이 시험값과 거의 일치하지만 변형 후반에는 시험값에 비해 상당히 크게 나타났다. 그러므로 지오셀 시스템을 비선형 수치해석을 통해 재현하기 위해서는 새로운 모델을 개발하거나 지반구조물의 응력범위와 허용변형정도에 따라 보강시료의 침두강도 결정과 적용에 유의하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 포입고무판을 제작된 지오셀에 의해 보강된 모래의 전단강도 증가효과가 어떻게 달라질 것인가에 대해서 시험적으로 검토한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 지오셀의 보강효과는 등가점착력의 발생과 동시에 마찰각의 증가로 나타난다.
- (2) 지오셀의 응력-변형 거동은 크게 초기의 일정한 구속효과의 증가로 점착력을 발생시키는 부분과 일정한 변형 발생 이후의 지오셀의 탄성에 의한 계속된 구속응력의 증가효과로 얻어지는 마찰각 증가로 생각할 수 있다.
- (3) 고무 지오셀의 높이 대 폭 비에 의한 보강효과는 변형 초기에는 각각의 높이 대 폭 비에 상관없이 일정한 점착력의 증가량을 보이지만 변형 후반에는 h/d = 1.0의 경우 선형적인 응력의 급격한 증가효과에 의해 전체적으로 h/d = 1.0이 가장 우수한 것으로 나타났다.
- (4) 후프텐션(hoop tension)이론을 적용한 등가점착력의 계산결과 포입고무판을 재료로 사용한 지오셀의 응력-변형을 특성상 초기점선탄성계수의 1/2값을 적용하면 거의 일치하는 값을 계산할 수 있었다.
- (5) 지오셀의 응력-변형을 곡선은 비선형 응력-변형을 이론으로는 완벽하게 재현하기 어려운 거동을 보이기 때문에 지오셀 시스템의 적용여건에 따라 보강시



(a) 15% 변형을 적용한 응력-변형 곡선

료 침투응력의 결정과 비선형 응력-변형을 해석 적 필요할 것으로 생각된다.
용에 유의하여야 하며 추가적이고 지속적인 연구가

(접수일자 : 2003년 2월 4일)

참 고 문 헌

1. 김진만, 조삼덕, 윤수호, 정문경, 김영운(1999), 연약지반상 고속철도 노반축조시 지오셀 시스템의 효과, 1999년도 토목섬유 학술발표회 논문집, pp. 131~141.
2. 김풍식(2000), 사질토 지반에서의 지오셀 시스템의 보강 효과, 석사학위논문, 인하대학교, 54p.
3. Bathurst. R.J. and Crowe. R.E.(1994), Recent Case Histories of Flexible Geocell Retaining Walls in North America, Recent Case Histories of Permanent Geosynthetics-Reinforced Retaining Walls, pp.3~19.
4. Bathurst. R.J. and Jarrett. P.M.(1988), Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses over Peat Subgrades, Transportation Research Record 1188, pp.28~36.
5. Bathurst, R. J. and Karpurapu, R.(1993), Large-Scale triaxial compression testing of geocell-reinforced granular soils, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 3, pp. 296~303.
6. Crowe. R. E., Bathurst. R. J. and Alston. C.(1989), Design and Construction of a Road Embankment Using Geosynthetics, 42nd Canadian Geotechnical Conference, pp.266~271.
7. Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S., and Mabry, P.(1980), Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses. Report No. UBC/GT/80-01, 1980, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California.
8. Duncan, J.M. and Chang, C.Y.(1970), Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629~1654.
9. Henkel, D. J. and Gilbert, G. C.(1952), The effects of rubber membranes on the measured triaxial compression strength of clay samples, Geotechnique, Vol. 3, No. 1, pp. 20~29.
10. Jamnejad. G., Kazerani. B., Harvey. R. C. and Clarke. J. D.(1986), Polymer Grid Cell Reinforcement in Pavement Construction, 1986 International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.537~546.
11. Kondner. R. L.(1963), Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. SMI, Proc. Paper 3429, pp. 115~143.
12. Mhaiskar S. Y. and Mandal, J. N.(1992), Soft Clay Subgrade Stabilization Using Geocells, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical special Publication, No. 30, pp. 1092~1103.
13. Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R. and Madhavi Latha, G.(1999), Behaviour of sand confined with single and multiple geocells, Geotextiles and Geomembranes, 17(3), pp. 171~184.
14. Vito A. Gudino and Sotirakis N. Christou(1998), Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Geoweb-Reinforced Earth Slabs, ASCE 1988 Spring Meeting, pp.21~36.
15. Webster, S. L.(1979), Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concept, Report GL-79-20(1), Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, November.
16. Webster, S. L.(1979), Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concept, Report GL-79-20(2), Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Feb.