입상재료의 지오셀 보강효과 분석을 위한 재료모형 거동연구

A Study of Material Model Behavior for the Analysis of Reinforcing Effect of Geocell on Granular Material

이수형* · 이창준** · 김제원*** · 유인균****

Lee, Soo Hyung · Lee, Chang Joon · Kim, Je Won · Yoo, In Kyoong

Abstract

Geocell is one of the effective tools for reinforcing geotechnical materials such soil, sand, and so on. In this study, we investigated the reinforcing effect of geocell on unbounded granular material (UGM), which is used for subbase of pavement structures. For this purpose, a mathematical model for UGM reinforced with cylindrical geocell was formulated. A MATLAB program code for the mathematical solution was developed. In order to investigate the reinforcing effect of geocell on the UGM, a parametric study was conducted using the MATLAB code. The parameters used for the study were Young's modulus of geocell ($E_G=800, 1600, 2400$ MPa), radius of geocell ($R=50, 100, 150, 200$ mm), and thickness of geocell ($t=1.2, 2.4, 3.6$ mm). The results showed that the reinforcing effect increased with the increase of Young's modulus and the thickness, and with the decrease of the radius. In addition, lower stress level showed a better reinforcing effect of geocell compared to higher stress level in terms of relative strain reduction ratio.

Key words : Geocell, Granular Material, Reinforcing Effect, Mathematical Model

요 지

지오셀은 지반재료의 보강을 위한 효과적인 도구중의 하나이다. 본 연구에서는 도로포장구조의 보조기층으로 사용되는 입상재료의 지오셀 보강효과를 이론적으로 고찰하였다. 이를 위해 원통형 지오셀로 보강된 입상재료의 거동을 모사할 수 있는 수학적 모형을 정식화 하였으며, 수치적 해석을 위해 MATLAB 프로그램 코드를 개발하였다. 지오셀이 보강된 입상재료의 역학적 거동 영향인자로서 지오셀의 탄성계수($E_G=800, 1600, 2400$ MPa), 지오셀의 반지름($R=50, 100, 150, 200$ mm), 지오셀의 두께($t=1.2, 2.4, 3.6$ mm)를 설정하였다. 수치적 해석결과를 바탕으로 지오셀의 보강효과는 지오셀의 탄성계수와 두께가 증가하고, 지오셀의 반지름이 감소할수록 그 효과가 증가하며, 동시에 채움재인 입상재료의 재료적 비선형성으로 인해 보강효과의 증가가 비선형적임을 알 수 있었다. 특히, 입상 채움 재료의 응력상태가 낮은 경우가 응력 상태가 높은 경우에 비해 지오셀 보강효과가 상대적으로 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지오셀, 입상재료, 보강효과, 수학적 모델

1. 서 론

지오셀은 채움재로 사용되는 재료의 수직방향의 응력에 의한 수평방향 팽창을 구속함으로써, 채움재의 강성 및 강도를 증가시킨다(Henkel and Gilbert, 1952). 지오셀의 이러한 구속효과는 전통적으로 지반공학 분야에서 연약지반 개량을 위해 많이 사용되어 왔으며, 지반공학적 특성에 대한 다양한

연구가 진행되어 왔다 (Jamnejad et. al., 1986; Crowe et. al. 1989; Mhaiskar and Mandal, 1992; Rajagopal et. al., 1999; Yoon et. al 2003). 주로 지반공학분야에서 사용되어 오던 지오셀을 최근 도로포장공학 분야에 적용하려는 시도가 국내에서 진행되고 있으며, 특히 투수성포장 등의 하부구조 보강을 위한 지오셀 활용 연구가 시도되고 있다(Yoo et. al, 2011).

*정회원. 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원(E-mail: shlee1@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**경북대학교 건축토목공학부 연구교수

Research Professor, School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University

***한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원

Research Specialist, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원(Tel: +82-31-910-0167, Fax: +82-31-910-0161, E-mail: ikyoo@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Fellow, Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology

지오셀을 도로포장 하부구조에 적용할 경우, 도로포장공학 측면에서 얻을 수 있는 긍정적인 효과는 크게 두 가지를 예상할 수 있다. 하나는 하부구조의 항복강도 증가로 인한 포장 구조체 전체의 내구성 증가이며, 다른 하나는 재료의 탄성계수의 증가로 인한 하부구조의 변형을 감소와 이에 따른 표층의 처짐 감소이다. 본 연구에서는 이들 중 탄성계수 증가에 관한 효과를 수학적 재료모형을 바탕으로 평가한다.

지오셀 보강효과를 모사하기 위한 수학적 모형으로서 Henkel과 Gillbert(1952)에 의해서 개발된 후프텐션(hoop tension)이론 모형이 주로 사용되고 있다. 이 모형에서는 지오셀 채움재가 압력을 받기 전후의 부피변화가 발생하지 않음을 가정하고 있다. 이는 채움재료의 포아송비가 0.5인 비압축성 재료라는 가정을 사용하는 것으로, 포화점성토 등과 같은 한정적인 재료에 유효한 가정이다. 그러나 본 연구에서 채움재로 사용하는 포장 하부층 입상재료의 경우 포아송비가 0.5 이하인 압축성 재료로 취급되고 있다(Huang, 1993). 따라서 포장 하부층 입상재료의 지오셀 보강효과 분석을 위해서는 채움재의 비압축성 가정을 포함하지 않은 지오셀 보강모형의 개발이 필요하다.

입상재료에 대한 지오셀의 보강효과 평가를 위한 수학적 재료모형의 개발에 있어서 또 다른 중요한 요소는, 입상재료 자체가 가지는 비선형 응력-변형률 응답의 고려이다. 입상재료의 경우 응력상태에 따라 탄성계수(회복탄성계수)의 값이 변화하는 성질을 보이며, 이를 모사하기 위해서 다양한 재료 모형이 개발되어 왔다(Dunlap, 1963; Seed, et. al, 1967; Moossazadeh and Witzak, 1981; Uzan, 1985). 이들 모형에서 탄성계수는 구속응력, 축차응력, 1차응력불변값 등의 함수로 표현되고 있다. 입상재료 자체의 비선형성은 지오셀 보강 이후에도 유효하며, 보강효과 정도가 응력상태에 따른 비선형성을 보일 수 있음을 내포하고 있다. 따라서, 입상 채움재의 지오셀 보강효과의 합리적인 분석을 위해서는 입상재료의 비선형성이 포함되어야만 한다.

본 논문에서는 입상 채움재의 지오셀 보강효과 분석을 위해서 원통형 지오셀과 비선형 입상재료 거동을 모사하기 위한 $k-\phi$ 모형(Seed et. al. 1967)을 사용하고, 입상재료의 압축성 가정을 포함한 수학적 모형을 개발하였다. 개발된 수학적 모형거동을 바탕으로 지오셀의 반경, 두께, 탄성계수 등에 따른 보강효과를 분석하였다.

2. 지오셀로 보강된 입상재료 모형거동 정식화

지오셀을 보조기층에 설치할 경우 포장구조의 외부하중의 의한 수직변형의 증가와 이에 따른 보조기층재료의 포아송비에 의한 수평변형의 증가로 인해 지오셀은 면내 방향으로 변형하게 되며, Hoop 응력이 발생하게 된다. 이때 발생한 Hoop 응력은 보조기층의 입상재료는 재료를 구속해 주는 힘으로서 작용하며, 따라서 보조기층 재료의 탄성계수를 증가시킨다. 이러한 역학적 거동을 해석적으로 분석하기 위해서 아래 Fig. 1과 같은 원통형 지오셀의 채움재에 압력 $-P_z$ 를 받는 경우를 고려한다. 여기서 지오셀의 지름은 $2R$, 두께는 t ,

Fig. 1. Cylindrical geocell with elastic filler subject vertical pressure P_z

그리고 높이는 h 이다.

원통형 지오셀 채움재의 중앙부 하단을 원점으로 하는 원통좌표계 $r-\theta-z$ 를 고려하고, 각 방향의 변위를 각각 u, v, w 로 설정한다. 이때 등방성 탄성재료(선형 또는 비선형)의 원통형 좌표계에서의 변형률-응력 관계는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{rr} &= \frac{1}{E}\sigma_{rr} - \frac{\nu}{E}\sigma_{\theta\theta} - \frac{\nu}{E}\sigma_{zz} \\ \epsilon_{\theta\theta} &= \frac{\nu}{E}\sigma_{rr} + \frac{1}{E}\sigma_{\theta\theta} - \frac{\nu}{E}\sigma_{zz} \\ \epsilon_{zz} &= \frac{\nu}{E}\sigma_{rr} - \frac{\nu}{E}\sigma_{\theta\theta} + \frac{1}{E}\sigma_{zz} \\ \gamma_{rz} &= \frac{1}{G}\tau_{rz}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$ 는 축대칭 좌표계의 각 축에 해당하는 축응력 및 전단응력을 나타내며, 유사하게 $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \gamma_{rz}$ 는 축변형률 및 전단변형률을 나타낸다. 응력 및 변형률의 아래첨자 r, θ, z 는 각각 방사방향(radial), 회전방향(circumferential), 수직방향(vertical)을 나타낸다. 또한 E, ν, G 는 각각 채움재의 탄성계수, 포아송비, 전단계수이다.

Fig. 1에서 채움재에 가해지는 외부압력이 등분포 하중이고, 채움재의 외곽에서 지오셀이 구속하고 있기 때문에, 채움재 응력상태는 좌표에 대한 함수가 아닌 상수이며, 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\sigma_{zz} = P_z, \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta}, \epsilon_{rr} = \epsilon_{\theta\theta}, \tau_{rz} = \gamma_{rz} = 0 \quad (2)$$

따라서, 식 (1)은 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{rr} = \frac{1-\nu}{E}\sigma_{rr} - \frac{\nu}{E}\sigma_{zz} \quad (3)$$

$$\epsilon_{zz} = -2\frac{\nu}{E}\sigma_{rr} + \frac{1}{E}\sigma_{zz} \quad (4)$$

식 (3)에서 σ_{zz} 값을 알고 있으므로, σ_{rr} 을 구하면 지오셀 채움재의 탄성 역학적 거동을 알 수 있다.

지오셀이 존재하지 않는 경우는 $\sigma_{rr}=0$ 이며, 지오셀이 존재하는 경우는 σ_{rr} 만큼의 압력이 지오셀 내벽에 가해져서 팽창하게 된다. 이때, 팽창하는 정도를 구하기 위해서 Fig. 2와

Fig. 2. Cross section of cylindrical geocell subject to internal pressure

같이 지오셀 1/4 단면의 내부에 압력 P_R 을 받는 경우를 고려한다. 여기서 $P_R = -\sigma_{rr}$ 의 관계를 가진다.

지오셀에 압력이 가해지기 이전의 반지름이 R 이며, 압력이 가해진 이후의 반지름은 $R+u$ 이다. 이때 지오셀의 곡면내방향 후프(hoop) 변형률 ε_G 는 다음식과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_G = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\pi(R+u) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{u}{R} \quad (5)$$

r 방향 변위 u 를 구하기 위해서 다음과 같은 가상일의 원리를 사용한다. 먼저 지오셀 내부에서 발생하는 내부가상일은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W_I = 2ht \int_0^{2\pi} \sigma_G \delta \varepsilon_G d\theta \quad (6)$$

여기서,

h = 지오셀의 높이 (Fig. 1 참조),

t = 지오셀의 두께,

σ_G = 지오셀의 후프응력,

$\delta \varepsilon_G$ = 가상변위 δu 에 대응하는 가상변형률.

지오셀을 선형탄성 재료라고 가정하고 탄성계수를 E_G 라고 두고, $\sigma_G = E_G \varepsilon_G$ 와 식 (5)를 식 (6)에 대입하면, 내부가상일은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$W_I = 4\pi ht E_G \varepsilon_G \delta \varepsilon_G = 4\pi ht E_G \frac{u}{R^2} \delta u \quad (7)$$

한편, 지오셀의 외부가상일 W_E 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W_E = 2h \int_0^{2\pi} P_R \delta u d\theta = -4\pi h \sigma_{rr} \delta u \quad (8)$$

가상일의 원리에 의해서 $W_I = W_E$ 라고 두며, 식 (7)과 식 (8)로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$4\pi ht E_G \frac{u}{R^2} \delta u = -4\pi h \sigma_{rr} \delta u \quad (9)$$

식 (9)를 σ_{rr} 에 대해서 정리 하며,

입상재료의 지오셀 보강효과 분석을 위한 재료모형 거동연구

$$\sigma_{rr} = -E_G t \frac{u}{R^2} \quad (10)$$

따라서, $\sigma_{zz} = P_Z$, $\varepsilon_{rr} = u/R$, 그리고 식 (10)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{u}{R} = \frac{1}{E} \left[-(1-\nu) E_G t \frac{u}{R^2} - \nu P_Z \right] \quad (11)$$

식 (11)은 결국, 지오셀 채움재에 작용하는 외부 수직 압력이 주어지고, 지오셀의 물리적 특성(두께 t , 반경 R , 탄성계수 E_G) 및 채움재의 물리적 특성(탄성계수 E , 포이슨비 ν)를 알 때, 지오셀의 팽창변위 u 를 구할 수 있다는 것을 의미한다. 식 (11)을 정리하면 다음과 같이 u 에 대해 풀 수 있다.

$$u = \frac{\nu R^2}{(1-\nu) E_G t + E R} P_Z \quad (12)$$

채움재의 재료특성을 선형 탄성모형으로 정의할 수 있다면, 식 (12) 자체로 쉽게 지오셀 보강구조의 역학적 거동을 분석할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 고려하는 입상재료의 탄성계수를 정의하는 k - ϕ 모형을 사용할 경우 식 (12)에서 채움재의 탄성계수가 응력상태의 함수로 제공되기 때문에, 이 식은 지오셀 보강구조의 역학적 거동 분석을 위한 최종 해가 될 수 없다. 즉, 채움재의 탄성계수 E 는 σ_{rr} 과 σ_{zz} 의 함수이고, 식 (10)을 보면 σ_{rr} 은 지오셀의 팽창 변위 u 의 함수이다.

k - ϕ 모형을 입상재료인 채움재의 재료모형으로 사용할 경우,

$$E = k_1 \phi^{k_2} \quad (13)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 재료상수이며 ϕ 는 3축 방향 응력의 합, 즉 제1응력 불변값(1st stress invariant)이다.

Fig. 1에 보인 문제해결을 위해서 $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta}$ 와 식 (10)을 식 (13)에 대입하여 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} E &= k_1 \phi^{k_2} = k_1 (2\sigma_{rr} + \sigma_{zz})^{k_2} \\ &= k_1 \left(-2E_G t \frac{u}{R^2} + P_Z \right)^{k_2} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 식 (12)에 대입하면,

$$u = - \frac{\nu R^2}{(1-\nu) E_G t + \left[k_1 \left(-2E_G t \frac{u}{R^2} + P_Z \right)^{k_2} \right] R} P_Z \quad (15)$$

식 (15)는 좌변과 우변 모두에 지오셀의 팽창변위 u 가 나타나는 비선형 방정식이며, 이는 팽창변위 u 에 대해서 해석적으로 정리할 수 없는 형태이다. 결국 팽창변위 u 를 주어진 인자들에 대해서 구하기 위해서는, 비선형 방정식의 해를 구할 수 있는 수치적인 기법이 필요하다.

비선형 방정식의 해를 구하기 위한 수치해석적 방법은 여러 가지가 존재하나, 본 연구에서는 해의 범위 알고 있을 때 가장 간단히 해를 구할 수 있는 이분법(Bisection Method)을 사용 하였다. k - ϕ 모형을 적용한 입상재료의 지오셀 보강 거

동의 해를 구하기 위해서 MATLAB 프로그램 코드를 개발하였으며 MATLAB 코드는 부록에 첨부한다.

식 (15)의 비선형 방정식의 해 u 를 구하고 나면, 식 (10)으로부터 σ_r 을 알 수 있다. 따라서 식 (4)로부터 지오셀 채움재에 가해진 수직응력 σ_z 에 대해 수직변형률 ε_z 를 구할 수 있으며, 이는 지오셀 보강구조의 수직방향 응력-변형률의 관계를 나타내는 수치적 구성방정식을 구할 수 있다는 것을 의미한다.

3. 입상재료의 지오셀 보강에 따른 거동변화

개발된 Matlab 프로그램 코드를 이용하며, 입상재료 채움재의 재료특성과 지오셀의 기하학적, 재료적 특성에 따른 대한 응력-변형률 응답을 도출하였다.

Table 1에는 분석을 위해 사용된 지오셀의 재료 및 기하학적 특성인자를 보인다. 재료특성 인자로서는 지오셀의 탄성계수(E_G)를 사용하였고, 기하학적 특성인자로서는 지오셀의 반지름(R)과 두께(t)를 사용하였다.

Table 1에 분석을 위한 기준값들은 진한숫자로 표시하였으며, 이들 값은 현재 상용제품의 재료 및 기하학적 특성값을 근거로 하여 결정하였다. 분석을 위한 입상재료 채움재 $k-\phi$ 모형의 재료특성 인자로서는 $k_1=5000$ 과 $k_2=0.6$ 을 기준으로 사용하였으며, 이 값들은 보조기층의 입상재료 $k-\phi$ 모형을 위해 사용되는 일반적인 값들을 참고(Huang, 1993)하여 결정하였다. 또한, 입상재료의 포아손비는 0.45로 고정하여 분석을 하였다.

3.1 지오셀 탄성계수의 영향

지오셀 탄성계수(E_G)의 변화가 입상재료 채움재의 역학적 거동에 미치는 영향을 보기 위해서, 지오셀 탄성계수를 800, 1600, 2400 MPa로 변화 시키고, 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률 거동을 계산하였다. 지오셀의 반경 R 은 100 mm, 두께 t 는 1.2 mm로 고정하였다. 이때 비교를 위한 기준 값으로 지오셀이 보강되지 않은 입상재료($k_1=5000$, $k_2=0.6$)만의 응력-변형률 거동을 고려하였다.

Fig. 3에 지오셀 탄성계수의 변화에 따른 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률을 보인다. 그림에서 Control은 지오셀을 보강하지 않은 입상재료 자체의 수직방향 응력-변형률이다. 그림에서 보듯이 지오셀의 탄성계수가 증가할수록 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률 곡선이 왼쪽으로 이동하며, 그 형태가 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 지오셀의 탄성계수가 증가할수록, 입상재료 채움재에 가해진 동일한 응력에 대한 변형률이 줄어들음을 의미한다.

Table 1. Material and geometric parameters for geocell

(MPa)	(mm)	(mm)
800	50	1.2
1600	100	2.4
2400	150	3.6
	200

Fig. 3. Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of elastic modulus of geocell

Fig. 4. Elastic modulus of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of elastic modulus of geocell and of vertical stress

Fig. 4에는 지오셀 탄성계수의 변화에 따른 입상재료 채움재의 탄성계수-응력(수직방향) 변화를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 지오셀의 탄성계수가 증가함에 따라 곡선이 전체적으로 왼쪽으로 이동하며 그 형태가 유사함을 알 수 있다. 이는 지오셀의 탄성계수가 증가함에 따라 동일한 응력에 대한 입상재료 채움재의 탄성계수 또한 증가함을 의미한다.

3.2 지오셀 반지름의 영향

지오셀 반지름 R 의 변화가 입상재료 채움재의 역학적 거동에 미치는 영향을 보기 위해서, 지오셀의 반지름을 50, 100, 150, 200 mm로 변화 시키고, 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률 거동을 계산하였다. 지오셀의 탄성계수 E_G 는 800 MPa, 두께 t 는 1.2 mm로 고정하였다. 비교를 위한 기준 값으로 지오셀이 보강되지 않은 입상재료($k_1=5000$, $k_2=0.6$)만의 응력-변형률 거동을 고려하였다.

Fig. 5에 지오셀의 반지름의 변화에 따른 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률을 보인다. 그림에서 Control은 지오셀을 보강하지 않은 경우의 수직방향 응력-변형률이다. 그림에서 보듯이 지오셀의 반지름이 감소할수록 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률 곡선이 왼쪽으로 이동하며, 그 형태

Fig. 5. Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of radius of geocell

Fig. 7. Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of geocell thickness

Fig. 6. Elastic modulus of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of geocell radius and of vertical stress

Fig. 8. Elastic modulus of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of geocell thickness and of vertical stress

가 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 지오셀의 반지름이 감소할수록, 입상재료 채움재에 가해진 동일한 응력에 대한 변형률이 줄어들음을 의미한다.

Fig. 6에는 지오셀 반지름의 변화에 따른 입상재료 채움재의 탄성계수-응력(수직방향) 변화를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 지오셀의 반지름이 감소함에 따라 곡선이 전체적으로 왼쪽으로 이동하며 그 형태가 유사함을 알 수 있다. 이는 지오셀의 반지름이 감소함에 따라 동일한 응력에 대한 입상재료 채움재의 탄성계수가 증가함을 의미한다.

3.3 지오셀 두께의 영향

지오셀 두께 t 에 따른 영향을 보기 위해서, 지오셀의 두께를 1.2, 2.4, 3.5 mm로 변화 시키면서, 지오셀 보강구조의 수직방향 응력-변형률 거동을 관찰하였다. 지오셀의 탄성계수 E_G 는 800 MPa, 반지름 R 은 100 mm로 고정하였다. 이때 비교를 위한 기준 값으로 지오셀이 보강되지 않은 채움재 ($k_1=5000$, $k_2=0.6$) 만의 응력-변형률 거동을 고려하였다.

Fig. 7에 지오셀의 두께변화에 따른 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률을 보인다. 그림에서 보듯이 지오셀의 두께가 증가할수록 입상재료 채움재의 수직방향 응력-변형률 곡

선이 왼쪽으로 이동하며, 그 형태가 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 지오셀의 두께가 증가할수록, 입상재료 채움재에 가해진 동일한 응력에 대한 변형률이 줄어들음을 의미한다.

Fig. 8에는 지오셀 두께변화에 따른 입상재료 채움재의 탄성계수-응력(수직방향) 변화를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 지오셀의 두께가 증가함에 따라 곡선이 전체적으로 왼쪽으로 이동하며 그 형태가 유사함을 알 수 있다. 이는 지오셀의 두께가 증가함에 따라 동일한 응력에 대한 입상재료 채움재의 탄성계수 또한 증가함을 의미한다.

4. 입상재료의 지오셀 보강 효과 고찰

지오셀의 재료적, 기하학적 특성변화에 따른 입상재료 채움재의 역학적 거동이 변화함을 알 수 있다. 즉 지오셀의 탄성계수(E_G)가 증가할수록, 반지름(R)이 감소할수록, 그리고 두께(t)가 증가할수록 입상재료 채움재의 강성이 증가함을 볼 수 있다. 이와 더불어 입상재료 채움재 자체의 비선형 응력-변형률 응답으로 인한 몇 가지 흥미로운 사실들을 다음과 같이 고찰 하였다.

Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7 에서 보듯이, 입상재료 채움재(지오셀을 보강 유무와 관계없이)의 응력-변형률 응답은 비선형적이며, 이들 응답의 비선형성이 재료에 가해진 응력이 낮을수록 더욱 심하며, 가해진 응력이 증가할수록 응력-변형률 응답의 비선형성이 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 응력-변형률 응답이 35 kPa 이하에서는 상대적으로 큰 비선형성을 보이고 있는 반면, 70 kPa 이상에서는 응력-변형률 응답이 비교적 선형적임을 알 수 있다.

가해진 응력크기에 따른 응력-변형률 응답의 비선형성 변화는, 지오셀 보강효과에도 영향을 미친다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 각각 기준(Control) 응력-변형률 곡선을 바탕으로 Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7의 응력-변형률 응답을 정규화 한 것으로서, 동일한 응력 정도에 대해서 상대적으로 얼마나 변형률을 감소시키는가에 대한 표현이다.

이들 그림에서 보이듯이, 낮은 응력상태에서 지오셀 보강효과가 상대적으로 크며(변형률 감소정도가 크며), 응력이 증가함에 따라 보강효과가 줄어들고 동시에 일정 값으로 수렴하려는 경향을 볼 수 있다. 응력상태에 따른 지오셀 보강효과 정도는, 지오셀의 탄성계수, 두께, 반지름 등의 변화에 따라 차이가 있지만, 공통적으로, 낮은 응력상태일 때 보강효과가 크고, 높은 응력상태일 때 그 보강효과가 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 9. Normalized Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of Elastic modulus of geocell

Fig. 10. Normalized Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of geocell radius

Fig. 11. Normalized Vertical stress-strain relationship of granular unbounded material reinforced with geocell; as a function of geocell thickness

일반적으로 알려진 도로포장 보조기층에 발생하는 응력범위가 35~140 kPa 임을 감안할 때(Huang, 1993), 현재 주로 생산중인 지오셀이($E_G=800$ MPa, $t=1.2$ mm, $R=100$ mm)으로는 실제 도로포장구조의 보조기층에 미치는 보강효과는 다소 미미할 것으로 예상된다. 예로, Fig. 9에서 $E_G=800$ MPa의 경우($t=1.2$ mm, $R=100$ mm)를 보면 응력이 35 kPa에서 변형률비가 0.92정도로 지오셀을 보강하지 않은 경우에 비해 대략 8%정도 보강효과를 보이고, 응력이 140 kPa일 때, 변형률비가 0.95정도로 지오셀을 보강하지 않은 경우에 비해 5% 정도의 미미한 보강효과를 보이고 있다. 따라서, 보조기층의 지오셀 보강효과를 높이기 위해서는 현재 생산중인 지오셀의 물성 및 기하학적 특성에 변화를 주어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

입상재료의 지오셀 보강으로 얻게 되는 탄성계수의 증가를 평가하기 위해서, 원통형 지오셀과 비선형 입상재료의 재료모형을 이용하여 지오셀 채움재의 탄성계수 증가를 정량적으로 평가할 수 있는 수학적 모형을 개발하였다. 이 수학적 모형에서 요구되는 비선형 방정식의 해를 구하기 위한 MATLAB 프로그램 코드를 개발하였으며, 이를 이용하여 지오셀의 반경, 두께, 탄성계수 등에 따른 보강효과를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지오셀의 탄성계수가 커질수록, 반경이 작아질수록, 두께가 커질수록 지오셀 보강효과가 증가 하는 것으로 나타났다.
- 2) 지오셀의 보강효과는 채움재의 응력상태가 낮을 때 보강효과가 크고, 높은 응력상태일 때 그 보강효과가 작아짐을 알 수 있었으며, 특히 채움재의 응력상태가 35kPa이하의 경우 강한 비선형 성을 보이는 것으로 나타났다.
- 3) 일반적으로 알려진 도로포장 보조기층에 발생하는 응력범위가 35~140 kPa 임을 감안할 때, 현재 주로 생산중인 지오셀이($E_G=800$ MPa, $t=1.2$ mm, $R=100$ mm) 실제 도로포장구조의 보조기층에 미치는 보강효과는 다소 미미할 것으로 판단되며, 보강효과 향상을 위해서는 지오셀의 물성 및 기하학적 특성의 변화를 주어야 될것으로

판단된다.

- 4) 입상재료의 지오셀 보강 효과를 높이기 위해서 지오셀의 탄성계수, 두께, 반경 등 세 가지 변수를 조정할 수 있으나, 지오셀의 탄성계수나 두께의 증가는 현실적으로 한계가 있으며, 지오셀의 반경을 줄이는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

References

- 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.
- Dunlap, W.S. (1963) A report on a Mathematical Model Describing the Deformation Characteristics of Granular Materials, Technical Report 1. Project 2-8-62-27, TTI, Texas A&M University
- Huang, Y.H. (1993) Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall.
- 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.
- Jamnejead, G., Kazerani, B., Harvey, R.C. and Clarke, J.D. (1986) Polymer grid cell reinforcement in Pavement Construction, *International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, pp. 537-546.
- Mhaikar, 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.
- Moossazadeh, J.M. and Witczak, W. (1981) Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior, *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R. and Madhavi Latha, G. (1999) Behaviour of sand confined with single and multiple geocells, *Geotextiles and Geomembranes*, No. 17, Vol. 3, pp. 171-184.
- Seed, H.B., Mitry, F.G., Monosmith, C.L. and Chan, C.K. (1967) Prediction of Pavement Deflection from Laboratory Repeated Load Test, NCHRP Report 35.
- Uzan, J. (1985) Characterization of Granular Materials, TRR 1022, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Yoo, I.K., Lee, S.H. and Kim, J.W. (2011) Final Report: Development of Pavement Technology for Temperature Reduction in Urban Area, Korea Institute of Construction Technology
- Yoon, Y.W., Kim, J. and Kim, B. (2003) Stress-strain Behavior of Sand Reinforced with Geocell, *Journal of the Korea Geo-Environmental Society*, Vol. 4, No. 2, pp. 27-37.

© 논문접수일 : 2012년 10월 29일

© 심사의뢰일 : 2012년 10월 31일

© 심사완료일 : 2012년 11월 15일