

탄소성이론을 이용한 복합지반의 대표 강도정수 예측 Determination of Composite Strength Parameter Using Elasto-Plastic Theory

이주형¹⁾, Joo-Hyoung Lee, 김영욱²⁾, Young-Uk Kim, 박용원³⁾, Yong-Won Park

¹⁾ 명지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

²⁾ 명지대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

³⁾ 명지대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

SYNOPSIS : Vertical reinforcement of soft soils using the deep mixing method has received increasing applications. In this study, the theory of elasticity and plasticity including the upper bound theorem of limit analysis were used to derive the equations for obtaining composite elastic properties and shear strength parameters. The developed equations were validated using the finite element computer program SAGE CRISP. The analysis involved 4 different cases—two different type of soil and replacement ratios. The results of the analysis show that the proposed equations could determine the properties of composite material for practical applications.

Key words : Composite Material, Elasticity, Limit Analysis, Plasticity, SAGE CRISP

1. 서 론

사회 및 기반시설의 급속한 발전으로 인하여 필요한 부지의 확보가 점점 힘들어져 가고 있는 실정이다. 따라서 최근까지 매우 꺼려왔던 연약지반상의 건설공사가 필수 불가결하게 되었으며 시공사례도 점차 증가하고 있다. 연약지반상의 건설공사 시에는 시공전 연약지반 처리를 필히 실시하여야 하는데 Karmon과 Bergado(1991)에 의하면 크게 4가지의 개량법으로 분류될 수 있다. 즉 보강법, 고화법, 다짐법, 그리고 탈수법 등을 들 수 있는데 특히 연직방향의 column을 시공하여 연약지반을 보강하는 방법이 최근 많이 사용되고 있는데 이는 시공이 비교적 간단하고 연약지반의 안정성과 극한지지력 증가, 그리고 지반의 침하감소 및 사면파괴저항에 큰 영향을 미치고 있기 때문이다.

Column을 이용한 연직보강법 시공사례가 많이 늘어나면서 이에 대한 연구가 활발한데 주로 보강재료에 따른 거동 특성과 시공법 등에 관하여 집중되어있다. 연직 보강재와 주변지반의 상호작용을 고려한 구성거동(constitutive behavior)에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 보다 정확하며 이론적인 연직보강법의 설계법 개발을 위하여 Omine과 Ohno(1997) 그리고 Omine등(1999)은 탄성론을 이용하여 복합지반의 거동을 해석하였다. 그들은 탄성론에 근거하여 두 가지의 다른 물성을 가진 지반을 대표할 수 있는 탄성계수 및 포아송 비를 구하였고 복합지반의 대표 탄성계수로 사용될 수 있음을 보였다. 그러나 그들은 지반의 강도정수인 점착력과 내부마찰각을 고려하지 않았고 지반을 탄성거동체로 보았다.

따라서 이번 연구에서는 두 지반(연약지반과 보강재) 각각에 탄성론, 소성론 및 흙의 강도정수를 적용하고, 이를 대표 할 수 있는 하나의 복합지반 탄성계수 및 강도정수를 구할 수 있는 방법을 이론적으로 도출하였다. 도출된 대표강도정수를 이용한 수치해석을 실시하여 연약지반과 보강재의 거동특성과 비교 분석하여 이론식을 검증하였다.

2 연구내용 및 방법

2.1 대표 탄성계수 산출

보강재와 연약지반, 복합지반을 대표할 수 있는 탄성계수를 구하기 위하여 이번 연구에서 사용되는 모든 재료는 isotropic한 조건을 가지고 있다는 가정 하에 방정식을 수립하였다. 복합지반의 이차원적인 표현을 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 (a)에서 해칭 된 부분이 보강재를 나타내고 있으며, 그림 (b)는 보강재와 연약지반을 대표할 수 있는 복합지반의 모형도를 나타내고 있다.

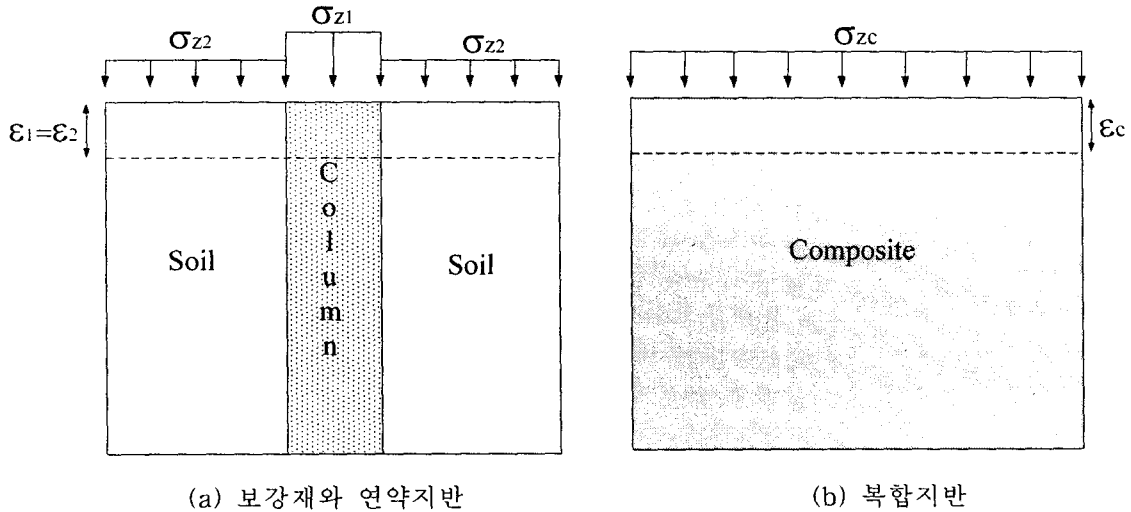


그림 1 복합지반의 모식도

복합지반의 대표 탄성계수 산출을 위한 탄성론 적용시 가해진 상부의 하중에 의해 침하되는 침하량이 연약지반 및 보강재와 복합지반에서 동일하다는 조건(그림 1)을 다음과 같이 적용하였다

$$\epsilon_{z1} = \epsilon_{z2} = \epsilon_{zc} \quad (1)$$

여기서 $\epsilon_{z1}, \epsilon_{z2}, \epsilon_{zc}$ = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 연직방향의 변형률

탄성론에 의하여 변형률은 다음과 같은 식으로 응력과 연관 지을 수 있으며

$$\epsilon_{z1} = \frac{\sigma_{z1}}{E_1} (1 - 2K_1 \mu_1) \quad (2)$$

$$\epsilon_{z2} = \frac{\sigma_{z2}}{E_i} (1 - 2K_2 \mu_2) \quad (3)$$

$$\epsilon_{zc} = \frac{\sigma_{zc}}{E_i} (1 - 2K_c \mu_c) \quad (4)$$

여기서 $\sigma_{z1}, \sigma_{z2}, \sigma_{zc}$ = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 연직방향의 응력
 E_{z1}, E_{z2}, E_{zc} = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 탄성계수
 $\mu_{z1}, \mu_{z2}, \mu_{zc}$ = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 Poisson 비
 K_{z1}, K_{z2}, K_{zc} = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 측방토압계수

식(2),(3),(4)를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 관계식들을 구할 수 있다.

$$\sigma_{z1} = \sigma_{zc} \frac{E_1}{E_c} \left(\frac{1 - 2K_c \mu_c}{1 - 2K_1 \mu_1} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{z2} = \sigma_{zc} \frac{E_2}{E_c} \left(\frac{1 - 2K_c \mu_c}{1 - 2K_2 \mu_2} \right) \quad (6)$$

그리고 연직방향 힘의 평형법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\sigma_{zc} A_c = \sigma_{z1} A_1 = \sigma_{z2} A_2 \quad (7)$$

여기서 A_1, A_2, A_c = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 단면적

식(5),(6)을 식(7)에 대입하고 $R = A_1/A_2$ (면적비)의 관계를 적용하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$E_c = \left(\frac{1 - 2\mu_c K_c}{1 - 2\mu_1 K_1} \right) \cdot R \cdot E_1 + \left(\frac{1 - 2\mu_c K_c}{1 - 2\mu_2 K_2} \right) \cdot (1 - R) \cdot E_2 \quad (8)$$

복합지반의 접촉면에서 횡방향 토압은 힘의 평형법칙에 의하여 보강재와 연약지반의 수평토압은 같고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{x1} = \sigma_{x2} = K_1 \sigma_{z1} = K_2 \sigma_{z2} \quad (9)$$

여기서 σ_{x1}, σ_{x2} = 보강재(1), 연약지반(2)의 수평방향의 응력

식(2),(3)을 식(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{E_1 K_1}{1 - 2\mu_1 K_1} = \frac{E_2 K_2}{1 - 2\mu_2 K_2} \quad (10)$$

마지막 조건으로 복합지반에 포아송 비를 적용하면,

$$\mu_c = \frac{\epsilon_{xc}}{\epsilon_{zc}} \quad (11)$$

여기서 $\epsilon_{xc}, \epsilon_{zc}$ = 복합지반의 수평, 연직방향의 변형률

식(4)를 위의 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$K_c = \frac{2\mu_c}{1 - \mu_c + 2\mu_c^2} \quad (12)$$

그리고 횡토압이론을 보강재와 연약지반 그리고 복합지반에 적용하면 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$K_c = \frac{K_1 E_1}{E_c(1 - 2\mu_1 K_1) + 2\mu_c K_1 E_1} \quad (13)$$

식(8), (10), (12), (13)을 이용하면 복합지반의 대표 탄성계수 E_c, μ_c, K_c 를 구할 수 있다.

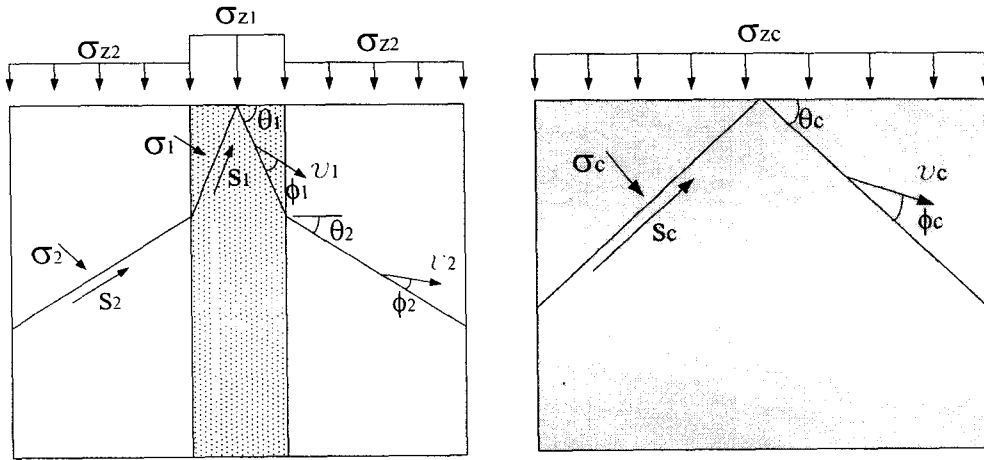
2.2 복합지반의 대표 강도정수 산정

복합지반의 대표 강도정수 즉, 점착력과 내부마찰각을 구하기 위하여 그림 2와 같은 파괴형상을 가정하였다. 실선으로 나타낸 부분이 가정 파괴면이며, 파괴면을 따라서 발생하는 전단강도의 총합이 보강재 - 연약지반과 복합지반이 같다고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_c A_{fc} = s_1 A_{f1} + s_2 A_{f2} \quad (15)$$

여기서 A_{f1}, A_{f2}, A_{fc} = 보강재(1), 연약지반(2), 복합지반(c)의 파괴면 단면적

$$s_1 = c_1 + \sigma_1 \tan \phi_1, \quad s_2 = c_2 + \sigma_2 \tan \phi_2, \quad s_c = c_c + \sigma_c \tan \phi_c, \quad \theta = 45 + \phi/2$$



(a) 보강재 - 연약지반

(b) 복합지반

그림 2 파괴형상, 연직 및 전단응력, 침하속도

각지반의 Normal Stress를 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 \cong \sigma_{z1} \cos \theta_1, \quad \sigma_2 \cong \sigma_{z2} \cos \theta_2, \quad \sigma_c \cong \sigma_{zc} \cos \theta_c \quad (16)$$

위의 식 (16)을 식 (15)에 대입하면,

$$c_c = \frac{s_1 A_{f1} + s_2 A_{f2}}{A_{fc}} - \sigma_c \tan \phi_c \quad (17)$$

한계상태이론(Limit Analysis)을 이용하여 파괴형상을 고려하면 또 다른 방정식을 구할 수 있는데 이는 외부에 의해서 가해진 일은 파괴면을 따라 일어나는 에너지의 소멸과 동일하다는 이론을 이용한 것이다. 에너지 소산은 파괴면을 따라 점착력과 속도항의 곱으로 나타낼 수 있으며 위의 그림2에 v 항으로 나타나있다.

$$(v_c \cos \phi_c) c_c A_{fc} = (v_1 \cos \phi_1) c_1 A_{f1} + (v_2 \cos \phi_c) c_2 A_{f2} \quad (18)$$

여기서 v_1, v_2, v_c = 보강재(1) 및 연약지반(2), 복합지반(c)의 침하 속도벡터 이고 이를 정리하면

$$c_c = \frac{c_1 A_{f1} \cdot \cos \phi_1 \cdot \sin[(\theta_2 - \theta_c) - (\phi_2 - \phi_c)] + c_2 A_{f2} \cdot \cos \phi_2 \cdot \sin[(\theta_c - \theta_1) - (\phi_c - \phi_1)]}{\cos \phi_c \cdot \sin[(\theta_2 - \theta_1) - (\phi_2 - \phi_1)]} \quad (19)$$

식 (17), (19)로부터 복합지반의 대표 강도정수 c_c, ϕ_c 를 구할 수 있다.

3 유한요소법을 이용한 이론의 검증

앞장에서 탄성론 및 소성론에 의해 유도된 공식들의 검증을 위하여, 유한요소법(Finite Element Method)를 이용하여 보강재 - 연약지반과 복합지반의 거동특성을 고찰 및 검증을 실시하였다. 해석은 상용프로그램인 SAGE CRISP를 이용하였으며 보강재가 차지하는 면적비 및 지반의 물성치를 달리한 4가지의 경우를 고려하였다.

3.1 모델

해석에 사용된 모델은 그림3과 같다. 정사각형 요소를 가지고 있으며 모델의 저면은 힌지고정, 양면은 롤러 고정의 경계조건을 가지고 있다.

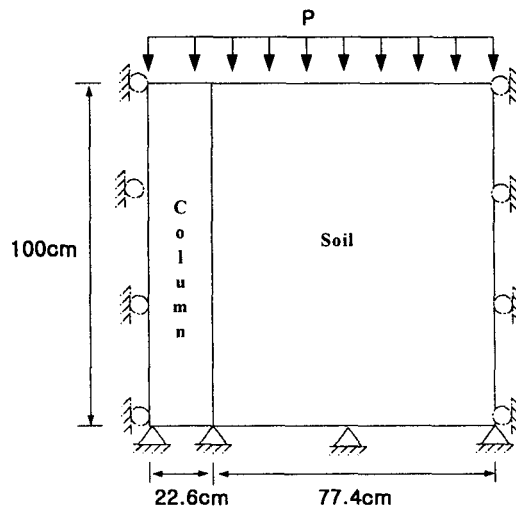


그림 3 유한요소해석 모델

3.2 해석에 사용된 재료의 물성치

보강재와 연약지반으로 이루어진 복합지반의 유한요소해석은 복합지반의 압축성을 고려하여 강성비

(E_1/E_2)를 5와 10으로 나누어 실시하였다. 해석에 사용된 Case 1과 Case 2의 물성치는 다음 표 1, 2와 같다.

표 1. : Case 1의 보강재와 연약지반의 물성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (μ)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
연약지반	6000	0.40	10	5
보강재	30000	0.30	50	30

표 2. : Case 2의 보강재와 연약지반의 물성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (μ)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
연약지반	20000	0.45	50	10
보강재	200000	0.30	200	30

보강재와 연약지반의 물성치를 앞에서 제시한 식들을 이용하여 복합지반의 탄성계수, 포아송비, 점착력, 그리고 내부마찰각을 구하였다. 다음 표 3, 4는 Case 1과 Case 2의 면적비에 따른 대표 물성치를 나타내고 있다.

표 3. Case 1, 2의 복합지반 물성치

		Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (μ)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
Case 1	R = 0.145	11264.9	0.332	20.657	34.93
	R = 0.226	13793.6	0.307	23.665	29.80
Case 2	R = 0.145	72205.5	0.337	89.664	40.67
	R = 0.226	89515.8	0.310	111.309	37.40

표1부터 표 3까지 보면 계산된 복합지반의 물성치가 보강재와 연약지반의 물성치 사이에 존재하며, 면적비가 커질수록 보강재의 물성치에 가까워짐을 알 수 있다. 즉 면적비가 커질수록 탄성계수와 점착력은 증가하고 포아송비는 감소한다.

3.2 해석 결과

위의 표에서 제시한 물성치를 사용하여 유한요소해석을 수행하여 보강재-연약지반과 복합지반의 하중-변형 관계를 그림 4, 5, 6, 7에 나타내었다.

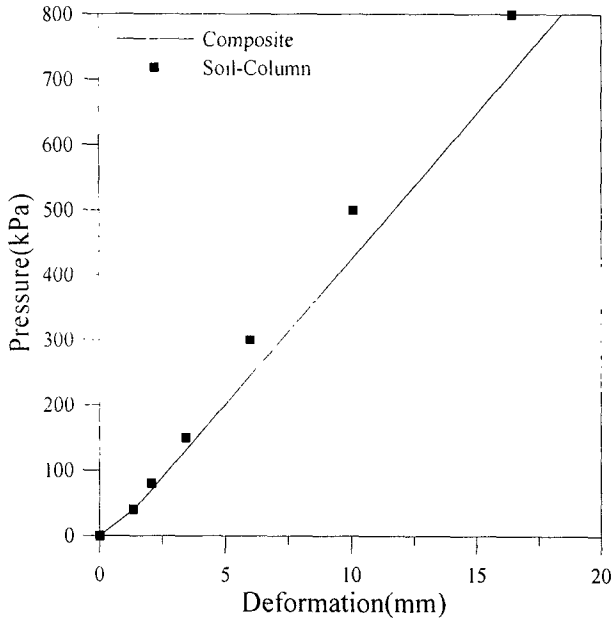


그림 4. Case 1, $R = 0.145$ 의 하중-변형곡선

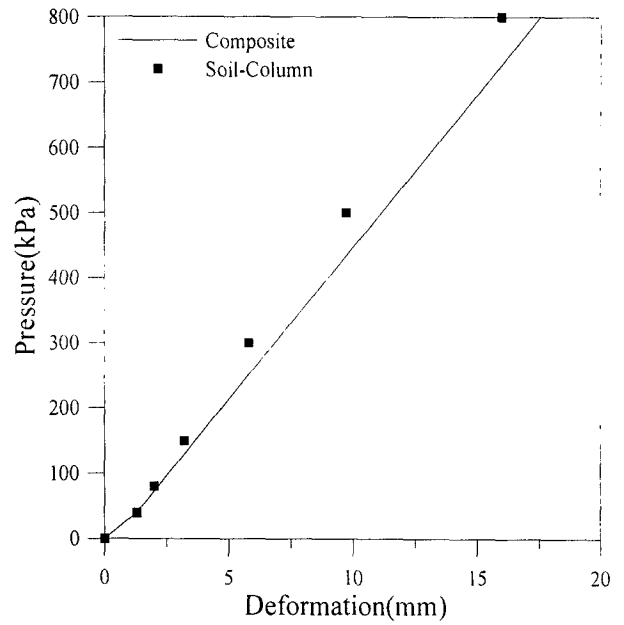


그림 5. Case 1, $R = 0.226$ 의 하중-변형곡선

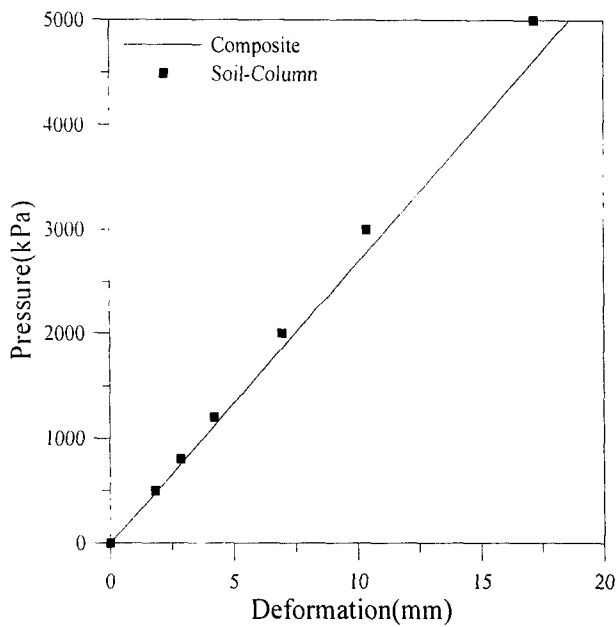


그림 6. Case 2, $R = 0.145$ 의 하중-변형곡선

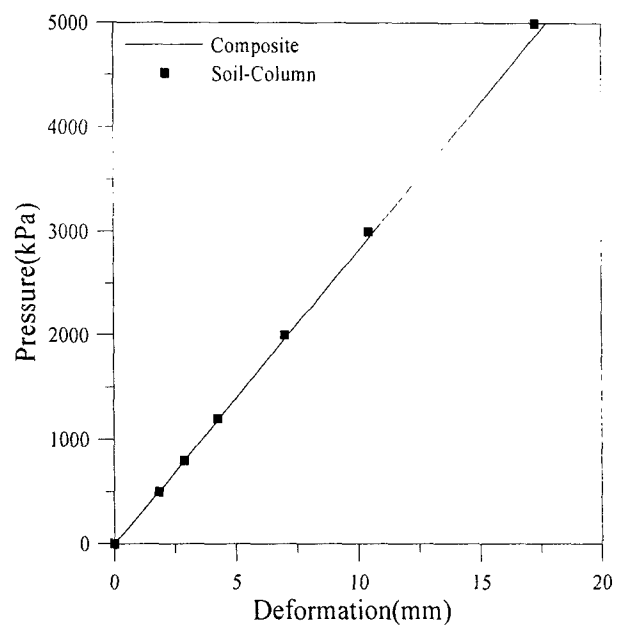


그림 7. Case 2, $R = 0.226$ 의 하중-변형곡선

그림을 보면 보강재-연약지반과 복합지반의 침하특성이 유사하며, 하중이 증가하면서 조금씩 차이를 보이고 있다. 그러나 차이는 무시할 정도를 작고, 복합지반이 더 크게 침하 되므로, 실제문제 적용에 있어서도 안전측으로 설계가 가능하다는 것을 그림을 통해 알 수 있다.

4 결론

이번 연구는 최근 많이 시공중인 연직보강지반의 거동 특성변화에 대하여 알아보았다. 탄성론 및 소성론을 이용하여 보강재 - 연약지반을 대표할 수 있는 복합지반의 강도정수를 구하고 이를 유한요소해석법을 이용 검증하였다. 대표 강도정수를 구하기 위하여 일련의 방정식을 도출하였고, 이를 연립하여

풀었다. 해석프로그램으로는 상용프로그램인 SAGE CRISP가 사용되었고 면적비를 달리한 여러 가지의 경우에 대하여 계산 후 검증하였다.

이번 연구를 통하여 다음과 같은 결론에 도달할 수 있다. 탄성론 및 소성론을 이용, 면적비 즉 보강재가 연약지반에 차지하는 비중을 알고 각각의 탄성 및 강도정수를 알고 있으면 두 지반을 대표하는 복합지반의 탄성 및 강도정수를 구할 수 있었다. 검증결과 복합지반의 거동 특성이 보강재 - 연약지반의 거동 특성과 매우 흡사하였다. 침하특성과 하중증가와의 연관에서는 두 개의 다른지반과 복합하여 해석한 지반의 결과가 매우 유사하게 나타났다. 따라서 보강재 - 연약지반의 거동을 해석함에 있어 이번 연구에서 도출한 공식을 이용 복합지반으로 변형 후 해석하는 것이 보다 단순하며 신뢰도가 매우 높은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kamon, M. and Bergado, D. T.,(1991), "Ground Improvement Techniques", Proceedings of the Nonth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand. Vol.2, pp. 521-546
2. Omine, K. and Ohno, S., (1997), "Deformation Analysis of Composite Ground by Homogenization Method", Proceedings of the fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, Vol.2, pp. 719-722.
3. Omine, K., Ochiai, H., and Bolton, M. D., (1999), "Homogenization Method for Numerical Analysis of Improved Ground with Cement-treated Soil Columns", Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Stockholm, Sweden, pp. 161-168.