

탄소성 이론을 이용한 복합지반의 등가특성치 예측

Determination of Equivalent Properties of Composite Foundation Using Elasto-plastic Theory

이 주 형*1 Lee, Joo-Hyoung

이 상 익*2 Lee, Sang-Ik

김 영 옥*3 Kim, Young-Uk

김 병 일*4 Kim, Byoung-II

Abstract

Vertical reinforcement of soft ground using granular column is a very effective ground improvement technique which is being used for increasing bearing capacity and decreasing settlement. In this study, the theories of elasticity and plasticity including the upper bound theorem of limit analysis were used to derive the equations for obtaining elastic properties and shear strength parameter of equivalent ground of composite foundation. The developed equations were verified using the finite element computer program, SAGE CRISP. For validation, finite element analyses were conducted for the various different cases including different type of soil and replacement ratios. The results of the analysis show that the proposed equation could determine the properties of equivalent ground material for practical application effectively.

요 지

모래다짐말뚝과 쇠석말뚝 등 연직방향의 보강재를 이용한 방법은 지반의 지지력을 증가, 침하를 감소 등을 기대할 수 있는 효과적인 연약지반 개량공법이다. 이번 연구에서는 지반거동 특성을 이해함에 있어 탄소성이론을 이용하여 복합지반의 등가특성치(E, μ, ϕ, c)를 얻을 수 있는 이론식을 제시하였으며, 이론식을 토대로 사례별 등가특성치들을 산정하였다. 또한 산정된 등가특성치를 지반 해석프로그램인 SAGE CRISP을 사용하여 2차원 해석을 수행하여 그 결과를 원지반 특성치로 수행한 해석결과와 비교 분석하였다. 연구결과 원지반 특성치를 대신하여 이론식을 통해 얻은 등가특성치를 이용하여도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 결과적으로 탄소성이론을 근거로 한 이론식에서 얻은 등가특성치들이 예비설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있음을 제시하였다.

Keywords : Composite ground, Elasticity, Equivalent property, Plasticity, SAGE CRISP

1. 서 론

사회 및 기반시설의 급속한 발전과 더불어 공업용지 및 주거용지의 수요가 점점 증가되고 있으나 지반조건이 양호한 부지의 확보가 점점 힘들어져 가고 있는 실정이다. 국토의 효율적이고 균형적인 발전을 위하여 지

반이 양호한 지역뿐만 아니라 지반이 연약한 지역까지 새로운 공간개발이 진행되고 있다. 이로 인하여 지반 특성이 불량하고, 개발여건이 열악한 연약지반의 개발 전환이 불가피하므로 이에 대한 적극적인 대처방안이 요구되고 있다. 연약지반은 지반의 공학적 성질이 복잡한 특성을 가지고 있으며, 지반의 강도가 작고 특히

*1 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 석사, (주)도담E&C 사원 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ.)

*2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ.)

*3 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof. Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ., younguk@mju.ac.kr)

*4 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof. Dept. of Civil & Environmental Engrg., Myongji Univ.)

심도가 깊을 때는 침하 등의 변형이 크기 때문에 안정적이고 경제적인 설계 및 관리를 위하여 해당되는 연약지반의 공학적 성질을 정확히 분석하여 개량시 필요한 제반 대책들이 강구되어야 한다.

연약지반상의 건설공사 시에는 시공전 연약지반 처리를 필히 실시하여야 하는데 Karmon과 Bergado(1991)에 의하면 크게 4가지의 개량방법으로 분류될 수 있다. 즉 보강법, 고화법, 다짐법, 그리고 탈수법 등을 들 수 있다. 특히 연직방향의 Column을 시공하여 연약지반을 보강하는 방법이 최근 많이 사용되고 있는데 이는 시공이 비교적 간단하고 연약지반의 안정성과 극한지지력 증가, 그리고 지반의 침하 감소 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 집중되어 있다. 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 Omine 등(1999)은 탄성론을 이용하여 복합지반의 거동을 해석하였다. 그들은 탄성론에 근거하여 두 가지의 다른 물성을 가진 지반을 대표할 수 있는 탄성계수 및 Poisson 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 등가지반 탄성계수 및 강도정수를 구할 수 있는 방법을 이론적으로 도출하였다. 도출된 대표 강도정수를 이용한 수치해석을 실시하여 연약지반과 보강재의 거동특성과 비교·분석하여 이론식을 검증하였다.

2. 등가지반

이론적인 방법을 통해 원지반과 보강재로 이루어진 복합지반을 하나의 균질한 물성치를 가지고 있는 등가지반으로 나타낼 수 있고 등가지반의 특성치를 이용하여 연약지반의 안정해석을 비교적 쉽게 수행 할 수 있다. 복합지반의 특성치를 탄성론, 소성론, 일반적인 지반의 파괴 매커니즘 그리고 여러 경계조건 등을 이용하여 등가지반의 탄성계수, Poisson 비, 내부마찰각, 점착력을 구할 수 있다.

2.1 등가지반의 탄성계수

보강재와 연약지반, 복합지반을 대표할 수 있는 탄성계수를 구하기 위하여 이번 연구에서 사용되는 모든 재료는 등방(isotropic)하다는 가정하에 방정식을 수립하였다. 등가지반의 이차원적인 표현을 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1(a)에서 column으로 표시된 부분이 보강재를 나타내고 있으며, 그림 1(b)는 보강재와 연약지반을 대표할 수 있는 등가지반의 모형을 나타내고 있다.

등가지반의 탄성계수 산출을 위한 탄성론 적용시 가해진 상부의 하중에 의해 침하되는 침하량이 연약지반

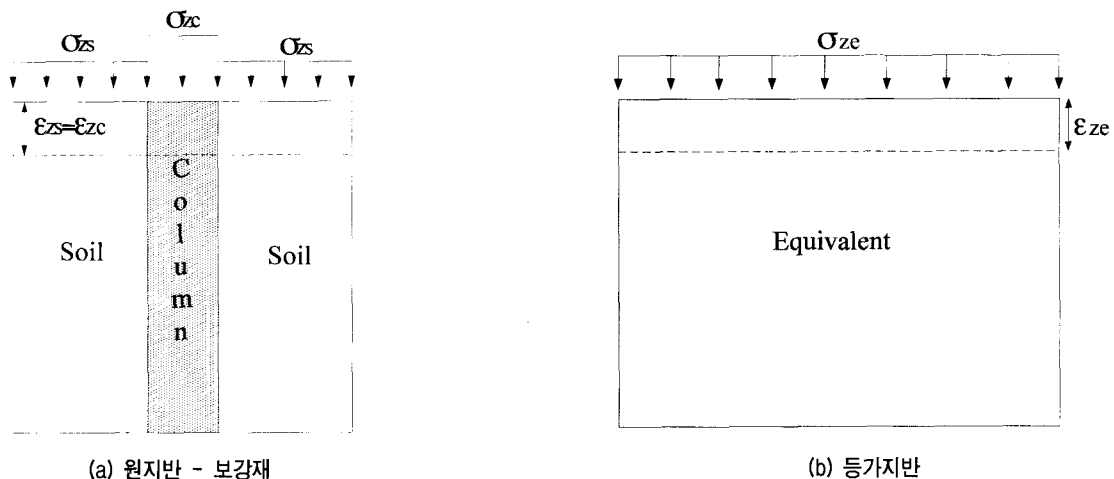


그림 1. 복합지반과 등가지반의 균등침하

및 보강재와 복합지반에서 동일하다는 조건(그림 1)을 식 (1)과 같이 적용하였다.

$$\epsilon_{zs} = \epsilon_{zc} = \epsilon_{ze} \quad (1)$$

여기서, ϵ_{zs} , ϵ_{zc} , ϵ_{ze} : 연약지반(s), 보강재(c), 등가지반(e)의 연직방향 변형률

연직방향의 변형률은 후크의 법칙과 평면변형을 조건을 적용하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2-a)$$

$$= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu^2\sigma_x - \mu^2\sigma_z] \quad (2-b)$$

$$= \frac{\sigma_z}{E} [1 - \mu^2 - K\mu(\mu + 1)] \quad (2-c)$$

$$= \frac{\sigma_z}{E} [(\mu + 1)(1 - \mu - K\mu)] \quad (2-d)$$

여기서, K : 횡방향 토압계수

$$(\mu + 1)(1 - \mu - K\mu) = \alpha \text{로 놓으면}$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \alpha \quad (3)$$

가 된다.

$\epsilon_{zs} = \epsilon_{zc}$ 와 $\epsilon_{zs} = \epsilon_{ze}$ 로부터 보강재와 원지반에 작용하는 응력을 구하면 식 (4), (5)와 같다.

$$\sigma_{zc} = \sigma_{ze} \frac{E_c}{E_e} \frac{\alpha_e}{\alpha_c} \quad (4)$$

$$\sigma_{zs} = \sigma_{ze} \frac{E_s}{E_e} \frac{\alpha_e}{\alpha_s} \quad (5)$$

상부에서의 연직방향 힘의 평형을 고려하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{ze} \cdot A_e = \sigma_{zs} \cdot A_s + \sigma_{zc} \cdot A_c \quad (6)$$

여기서, A_e , A_s , A_c : 각각 등가지반, 원지반, 보강재의 단면적

식 (4), (5)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음 식 (7)을 구할 수 있다.

$$\frac{E_e}{\alpha_e} = R \cdot \frac{E_c}{\alpha_c} + (1-R) \cdot \frac{E_s}{\alpha_s} \quad (7)$$

여기서, R : 면적비, $\left(\frac{A_c}{A_s + A_c}\right)$

복합지반의 접촉면에서 횡방향 토압은 힘의 평형법칙에 의하여 보강재와 원지반의 수평토압은 같고 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{xs} = \sigma_{xc} = K_s \sigma_{zs} = K_c \sigma_{zc} \quad (8)$$

여기서, σ_{xs} , σ_{xc} : 원지반과 보강재의 수평방향 응력

식 (4), (5)를 위의 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$K_c \frac{E_c}{\alpha_c} = K_s \frac{E_s}{\alpha_s} \quad (9)$$

$$K_e \frac{E_e}{\alpha_e} = K_c \frac{E_c}{\alpha_c} \quad (10)$$

$$K_e \frac{E_e}{\alpha_e} = K_s \frac{E_s}{\alpha_s} \quad (11)$$

마지막조건으로 등가지반에 Poisson 비를 적용하면,

$$\mu_e = \frac{\epsilon_{xe}}{\epsilon_{ze}} \quad (12)$$

여기서, ϵ_{xe} , ϵ_{ze} : 등가지반의 수평, 연직방향 변형률

등가지반의 Poisson 비를 나타낸 위의 식 (12)는 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$\mu_e = \frac{\epsilon_{xe}}{\epsilon_{ze}} = \frac{\sigma_{xe} - \mu_e(\sigma_{ye} + \sigma_{ze})}{\sigma_{ze} - \mu_e(\sigma_{xe} + \sigma_{ye})} \quad (13-a)$$

$$= \frac{K_e - \mu_e^2 K - \mu_e^2 - \mu_e}{1 - \mu_e K_e - \mu_e^2 K_e - \mu_e^2} = \frac{K_e - K_e \mu_e - \mu_e}{1 - \mu_e - K_e \mu_e} \quad (13-b)$$

식 (13)을 등가지반의 축방토압계수 K_e 에 대하여 정리하면 식 (14)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$K_e - K_e \mu_e - \mu_e = \mu_e - \mu_e^2 - K_e \mu_e^2 \quad (14-a)$$

$$K_e = \frac{2\mu_e - \mu_e^2}{\mu_e^2 - \mu_e + 1} \quad (14-b)$$

식 (7), (9), (10), (11), (14)를 연립하여 이용하면 등가지반의 탄성계수 E_e , Poisson 비 μ_e 를 구할 수 있다.

2.2 등가지반의 강도정수

등가지반의 강도정수 즉, 점착력과 내부마찰각을 구하기 위하여 그림 2와 같은 파괴형상을 가정하였다. 실선으로 나타낸 부분이 가정파괴면이며, 파괴면을 따라서 발생하는 전단강도의 총합은 복합지반이나 등가지반이 같다고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e \overline{DE} = S_s \overline{AB} + S_c \overline{BC} \quad (15)$$

여기서, S_i : 전단강도 (shear resistance)

\overline{AB} , \overline{BC} , \overline{DE} : 각 파괴면 (연약지반, 보강재, 등가지반)의 길이

흙 속에서 한 평면상의 한 점에서 전단응력이 흙의 전단강도와 같아지면 그 점에서 파괴가 발생한다. Coulomb은 한 평면상의 한 점에서 흙의 전단강도를 같은 지점에 있는 평면의 수직응력의 일차함수로 나타냈다. 그 식은 다음과 같다.

$$S_s = c_s + \sigma_s \tan \phi_s \quad (16)$$

$$S_c = c_c + \sigma_c \tan \phi_c \quad (17)$$

$$S_e = c_e + \sigma_e \tan \phi_e \quad (18)$$

여기서, c_i : 점착력 (cohesion)

ϕ_i : 내부마찰각 (internal friction)

σ_i : 파괴면에 작용하는 응력 (normal stress)

그림 2에 나타난 파괴면 길이 \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{DE} 는 다음과 같다.

$$\overline{AB} = l_s / \cos \theta_s \quad (19)$$

$$\overline{BC} = l_c / \cos \theta_c \quad (20)$$

$$\overline{DE} = l_e / \cos \theta_e \quad (21)$$

여기서, l_i : 원지반, 보강재 및 등가지반의 길이

$$(l_s \cong \sqrt{1-R} l_e, l_c \cong \sqrt{R} l_e)$$

$$\theta_i : \text{파괴각}, \theta_i = 45 + \phi_i/2$$

각 지반의 normal stress를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s \cong \sigma_{zs} \cos \theta_s \quad (22)$$

$$\sigma_c \cong \sigma_{zc} \cos \theta_c \quad (23)$$

$$\sigma_e \cong \sigma_{ze} \cos \theta_e \quad (24)$$

위에서 제시한 일련의 식 (16)~(24)를 식 (15)에 대입하고 정리하면 식 (25)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{c_e}{\cos \theta_c} + \sigma_{ze} \tan \phi_c &= \frac{\sqrt{R} c_c}{\cos \theta_c} + \sqrt{R} \sigma_{zc} \tan \phi_c \\ &+ \frac{\sqrt{1-R} c_s}{\cos \theta_s} + \sqrt{1-R} \sigma_{zs} \tan \phi_s \end{aligned} \quad (25)$$

Limit analysis를 이용하여 파괴형상을 고려하면 또 다른 방정식을 구할 수 있는데 이는 외부에 의해서 가해진 일은 파괴면을 따라 일어나는 에너지의 소멸과 동일

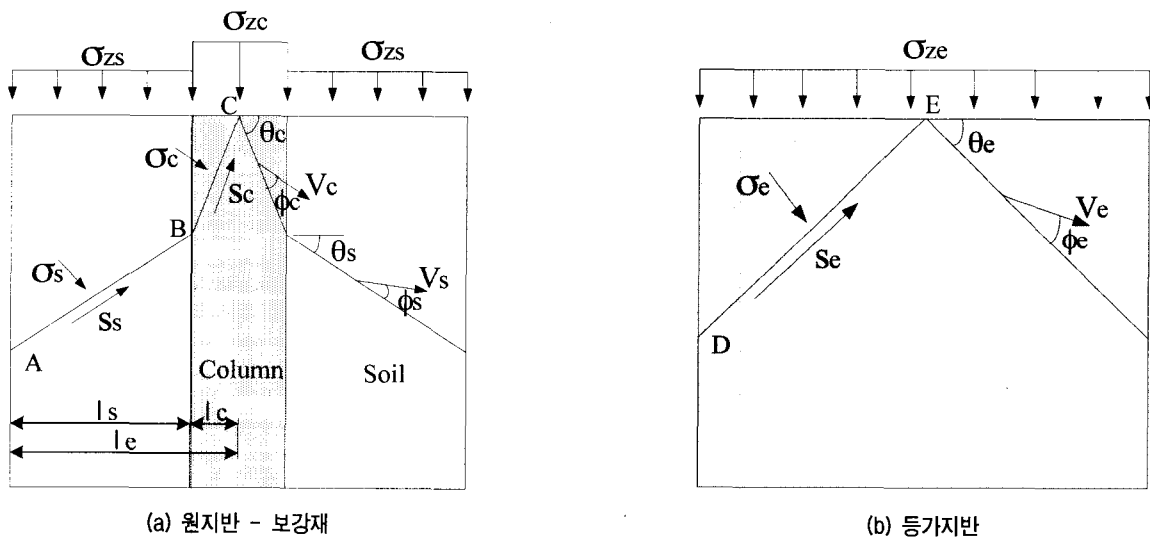


그림 2. 파괴형상, 수직 및 전단응력, 침하속도

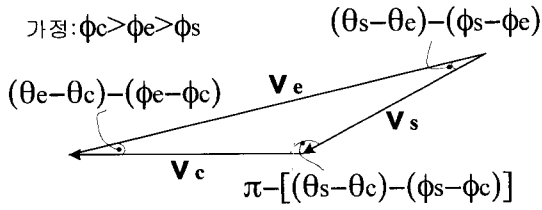


그림 3. V_s, V_c, V_e 사이의 관계

하다는 이론을 이용한 것이다. 에너지 소산은 파괴면을 따라 점착력과 속도항의 곱으로 나타낼 수 있으며 그림 2를 참조하여 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & (V_e \cos \phi_e) c_e \cdot \overline{DE} \\ &= (V_s \cos \phi_s) c_s \cdot \overline{AB} + (V_c \cos \phi_c) c_c \cdot \overline{BC} \quad (26) \end{aligned}$$

여기서, V_i : 침하 속도벡터, V_s, V_c, V_e 사이의 관계는 아래와 같이 정의할 수 있다.

그림 3에 나타난 속도벡터들의 관계를 삼각함수의 sin 법칙을 이용하여 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{V_e}{\sin\{\pi - [(\theta_s - \theta_c) - (\phi_s - \phi_c)]\}} \\ &= \frac{V_c}{\sin[(\theta_s - \theta_e) - (\phi_s - \phi_e)]} \\ &= \frac{V_s}{\sin[(\theta_e - \theta_c) - (\phi_e - \phi_c)]} \quad (27) \end{aligned}$$

V_s, V_c, V_e 사이의 관계식 (27)을 식 (26)에 대입하여 정리하면 식 (28)을 이끌어 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & c_e \cdot \frac{\cos \phi_e}{\cos \theta_c} \cdot \sin[(\theta_s - \theta_c) - (\phi_s - \phi_c)] \\ &= \sqrt{R} c_c \cdot \frac{\cos \phi_c}{\cos \theta_c} \cdot \sin[(\theta_s - \theta_e) - (\phi_s - \phi_e)] \\ &+ \sqrt{1-R} c_s \cdot \frac{\cos \phi_s}{\cos \theta_s} \cdot \sin[(\theta_e - \theta_c) - (\phi_e - \phi_c)] \quad (28) \end{aligned}$$

식 (25), (28)로부터 등가지반의 강도정수 c_e, ϕ_e 를 구할 수 있다.

3. 유한요소법을 이용한 이론의 검증

앞장에서 탄성론 및 소성론에 의해 유도된 공식들의 검증을 위하여 유한요소법(finite element method)을 이용하여 보강재-원지반과 등가지반의 거동특성의 고찰 및 검증을 실시하였다. 해석은 상용프로그램인 SAGE

CRISP를 이용하였으며 보강재가 가지는 면적비 및 지반의 물성치를 달리한 9가지의 경우를 고려하였다. (표 1~표 6 참조)

3.1 지반 모델링

그림 4는 유한요소해석을 위하여 2차원으로 모형화된 유한요소망과 경계조건을 나타내고 있다. 유한요소망에 사용된 8절점 등대개 요소수는 480개이며, 절점수는 528개이다. 경계조건 중에서 변위는 양측면에서 수평변위만 구속하였고, 바닥면에서는 수평 및 연직방향에 대해서 구속을 하는 조건으로 하였다.

3.2 해석에 사용된 재료의 물성치

Column으로 보강된 복합지반의 해석에 사용된 지반 물성치는 설계시 일반적으로 사용되고 있는 값(Bowles, 1996)을 사용하였으며, 복합지반의 압축성을 고려하여 강성비(E_s/E_e)를 5와 10, 그리고 20으로 나누어 실시하였다.

Case 1은 매우 연약한 점토지반(very soft clay)를 case 2는 중간정도의 굳기의 점토지반(medium clay), 그리고 Case 3은 연약한 점토지반(soft clay)의 물성치를 사용하였다. Column의 탄성계수는 모래와 쇄석의 상대밀도 60~80%정도 일 때 탄성계수, 강도정수를 사용하였다.

보강재가 가지는 면적비 및 지반의 물성치를 달리한

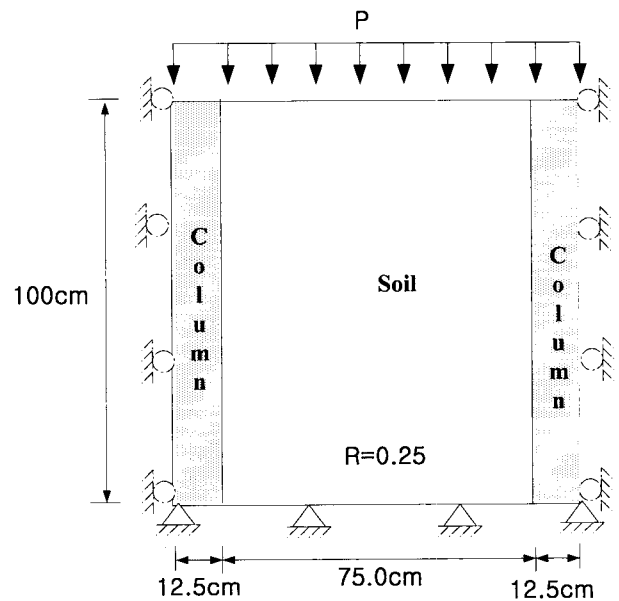


그림 4. 유한요소해석 모델 및 경계조건

표 1. Case 1의 보강재와 원지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
Soil	5,000	0.45	10	5
Column	25,000	0.35	40	30

표 2. Case 2의 보강재와 원지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
Soil	20,000	0.45	20	10
Column	200,000	0.30	60	35

표 3. Case 3의 보강재와 원지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
Soil	7,500	0.45	10	5
Column	150,000	0.33	50	32

9가지의 경우를 고려하였으며, 해석에 사용된 case별 물성치는 다음 표 1, 2, 3과 같다.

보강재와 원지반의 특성치들을 앞에서 제시한 식들을 이용하여 등가지반의 탄성계수, Poisson 비, 점착력, 그리고 내부마찰각을 구하였다. 다음 표 4, 5, 6은 case 1과 case 2 그리고 case 3의 면적비에 따른 등가지반의 특성치를 구하여 정리하였다.

표 1부터 표 6까지 보면 계산된 등가지반의 특성치가 보강재와 원지반의 특성치 사이에 존재하며, 면적비가

커질수록 원지반의 특성치에서 보강재의 특성치로 가까워짐을 알 수 있다. 즉 면적비가 커질수록 탄성계수와 점착력, 그리고 내부마찰각은 증가하며, Poisson 비는 감소하는 것으로 나타났다.

3.3 해석결과

3.3.1 하중-변형 거동

앞의 표에서 제시한 특성치를 사용하여 유한요소해

표 4. Case 1 등가지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
R=0.15	10589.8	0.408	13.8	22.6
R=0.25	13449.2	0.392	17.8	24.5
R=0.57	21437.9	0.367	27.7	26.9

표 5. Case 2 등가지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
R=0.15	60126.3	0.396	22.8	32.4
R=0.25	85340.5	0.381	29.4	33.6
R=0.57	153377.5	0.340	44.7	34.5

표 6. Case 3 등가지반의 특성치

	Elastic Modulus (E) kPa	Poisson's Ratio (ν)	Cohesion (c) kPa	Friction Angle (ϕ) °
R=0.15	20379.2	0.409	16.7	22.4
R=0.25	38658.3	0.382	20.8	25.1
R=0.57	71383.4	0.354	34.9	28.7

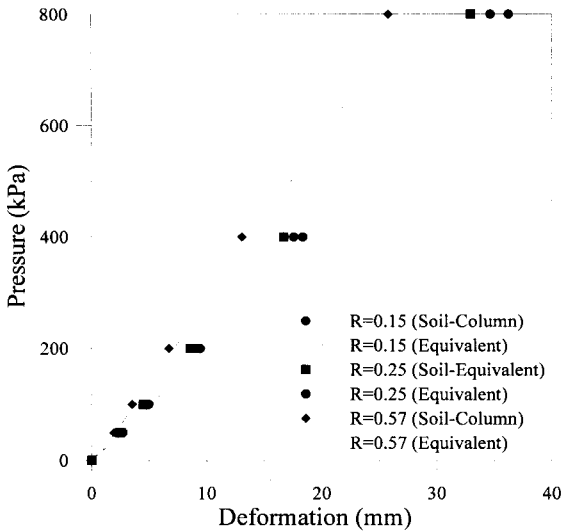


그림 5. Case 1의 하중-변형곡선

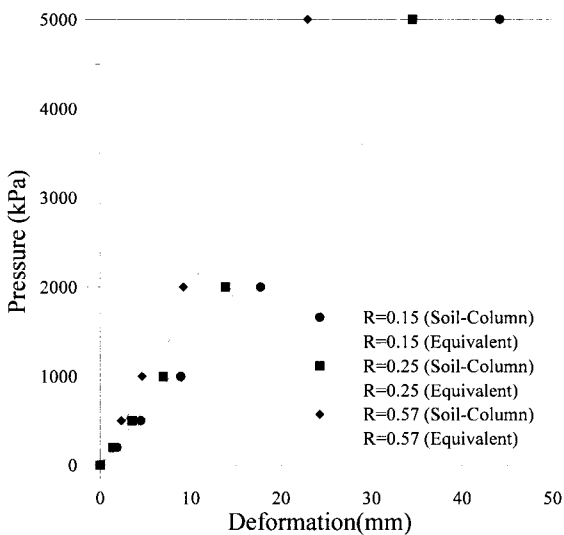


그림 6. Case 2의 하중-변형곡선

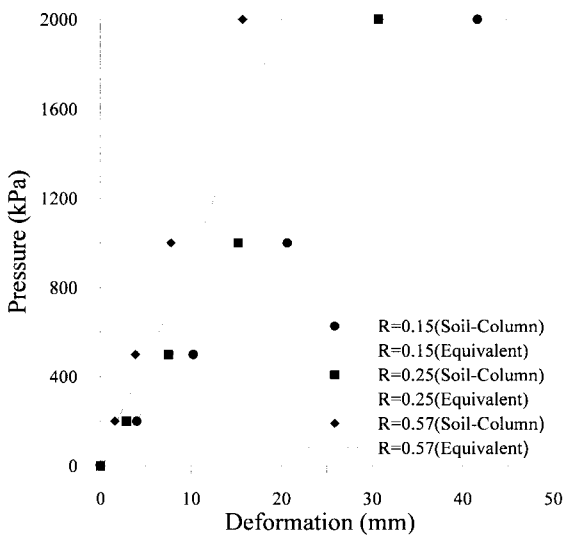


그림 7. Case 3의 하중-변형곡선

석을 수행하여 보강재-원지반과 등가지반의 하중-변형 관계를 그림 5~7에 나타내었다. 그림을 보면 보강재-원지반과 등가지반의 침하특성이 매우 유사하며, 하중이 증가하면서 조금씩 차이를 보이고 있다. 그러나 차이는 매우 작으며, 등가지반이 더 크게 침하 되는 현상을 나타내고 있다. 이는 실제문제 적용에 있어서도 안전측으로 설계가 가능하다는 것을 보여주고 있다.

3.3.2 등가지반의 특성치 변화

앞에서 제시한 3가지 case외에 탄성계수, Poisson 비, 점착력, 그리고 내부마찰각을 변화시키면서 등가지반의 탄성계수와 강도정수를 각각 산정 하였다. 해석에 사용된 탄성계수, Poisson 비, 강도정수들은 일반적인 특성

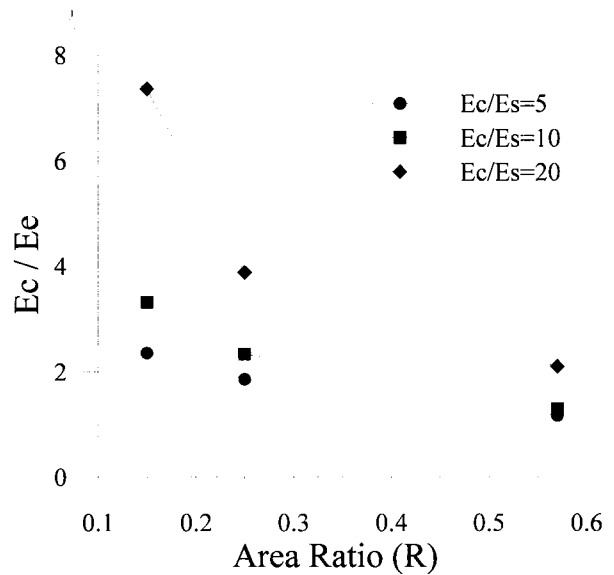


그림 8. E_c/E_s 의 변화에 따른 E_c/E_e 의 변화

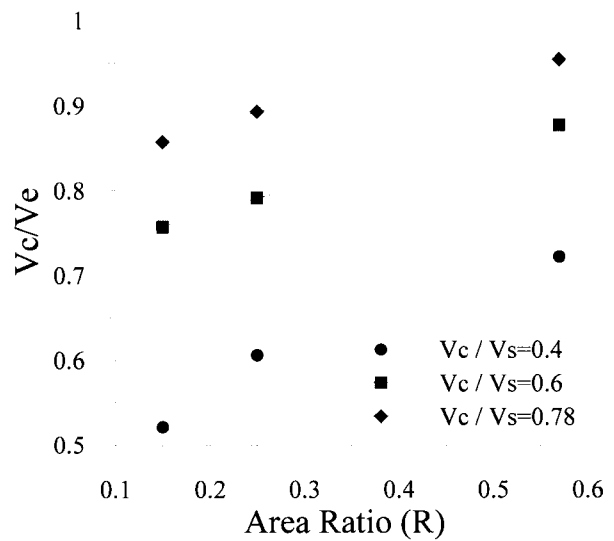


그림 9. μ_c/μ_s 의 변화에 따른 μ_c/μ_e 의 변화

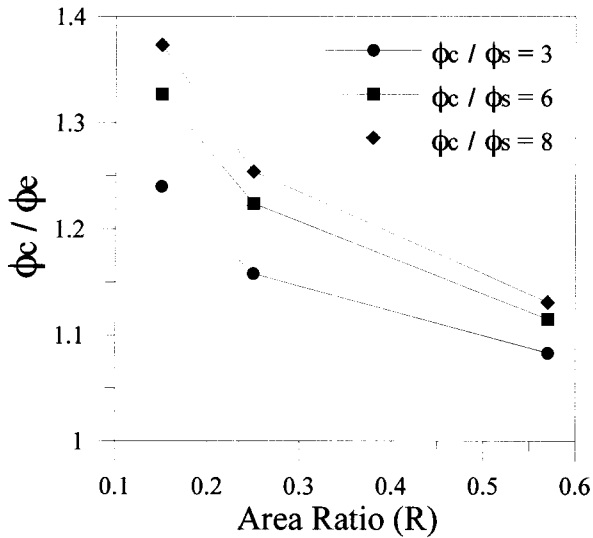


그림 10. ϕ_c / ϕ_s 의 변화에 따른 ϕ_c / ϕ_e 의 변화

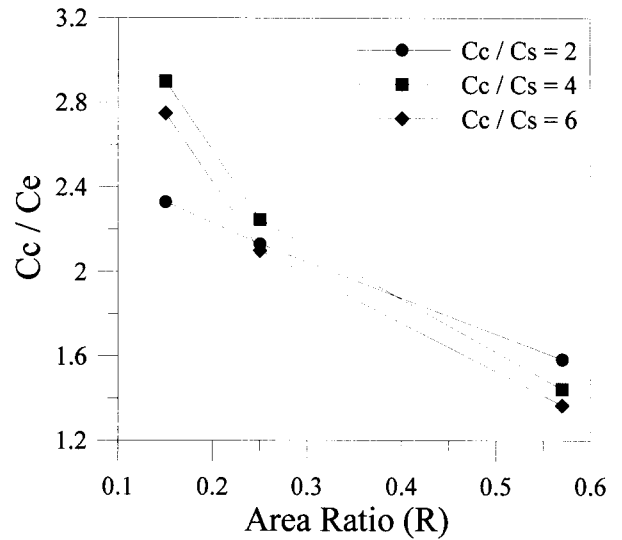


그림 11. c_c / c_s 의 변화에 따른 c_c / c_e 의 변화

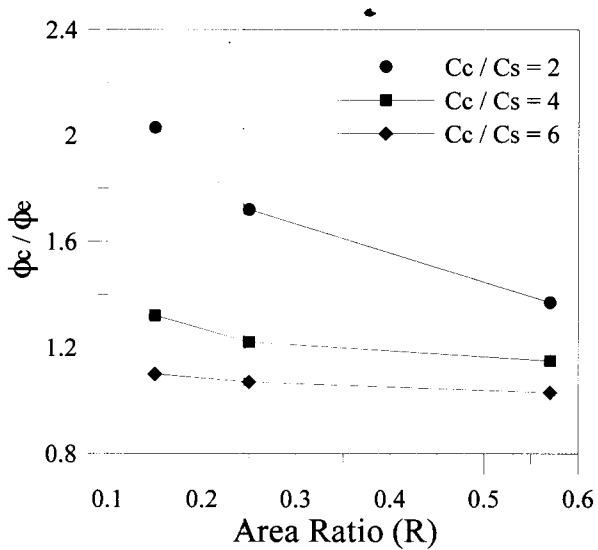


그림 12. c_c / c_s 의 변화에 따른 ϕ_c / ϕ_e 의 변화

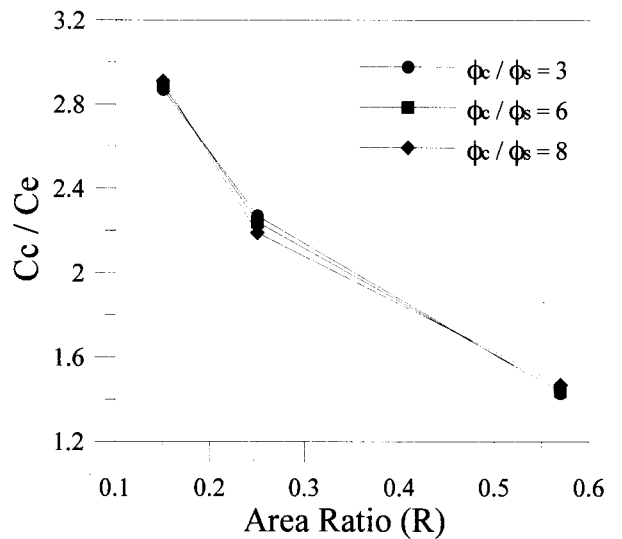


그림 13. ϕ_c / ϕ_s 의 변화에 따른 c_c / c_e 의 변화

치를 사용하여 계산하였다.

그림 8~13은 E_c / E_s , μ_c / μ_s , ϕ_c / ϕ_s , c_c / c_s 의 변화에 따른 E_c / E_e , μ_c / μ_e , ϕ_c / ϕ_e , c_c / c_e 의 변화 곡선을 나타내고 있다. 면적비가 작을 때는 변화가 크지만, 면적비가 커지면서 변화율이 점점 둔화되면서 1에 근접하고 있음을 알 수가 있다.

그림 12는 모든 조건은 동일할 때 c_c / c_s 의 변화에 따른 ϕ_c / ϕ_e 의 변화를 나타내고 있으며, 그림 13은 ϕ_c / ϕ_s 의 변화에 따른 c_c / c_e 의 변화를 나타내고 있다. 결과 곡선을 보면 c_c / c_s 의 변화에 따른 ϕ_c / ϕ_e 의 변화는 뚜렷하지만, ϕ_c / ϕ_s 의 변화에 따른 c_c / c_e 의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

이번 연구는 최근 많이 시공 중인 연직보강지반의 거동 특성변화에 대하여 알아보았다. 탄성론 및 소성론을 이용하여 보강재-원지반을 대표할 수 있는 등가지반의 특성치를 구하였으며, 이 특성치가 복합지반을 대표할 수 있는 특성치임을 유한요소해석법을 이용 검증하였다. 복합지반의 등가특성치를 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 결론을 도출할 수가

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 비교적 쉽고 간편하게 구할 수 있었다. 검증결과 복합지반의 거동 특성이 보강재-연약지반의 거동 특성과 매우 흡사하였다. 침하특성과 하중증가와 의 관계에서는 두 개의 다른 지반과 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.

감사의 글

이 연구는 명지대학교 신입교수 교내연구비 지원사업에 의해 수행되었습니다. 동 학교에 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Kamon, M. and Bergado, D. T. (1991), "Ground Improvement Techniques", *Proceedings of the North Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand. Vol.2, pp.521-546.
2. Bowles, J. E. (1996), "Foundation Analysis and Design", *McGraw-Hill Higher Education*, New York, pp.121-165.
3. 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.
4. 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.
5. SAGE Engineering Ltd. (1999), SAGE CRISP USER MANUAL.

(접수일자 2003. 1. 7, 심사완료일 2003. 4. 4)