

Generalized Plane Strain 개념을 이용한 뿌리말뚝공법의 준 3차원적 유한요소해석 Simplified 3D Finite Element Analysis of Root Pile System using Generalized Plane Strain Concept

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang, 박사원³⁾, Sa-Won Park

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik University

²⁾ (주)브니엘컨설팅 선임연구원, Senior Researcher, Vniel Consultant Co., Ltd

³⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik University

SYNOPSIS : Using the finite element method of analysis based on the generalized plane strain concept, basic approach to analyze the approximate three dimensional analysis of reticulated root pile structure has been made. This paper presents the fundamentals of the analytical approach and the results of a parametric study related to the behaviors of the reticulated root pile structure.

Key words : Generalized Plane Strain, Root Pile System, Knot Effect

1. 서론

뿌리말뚝공법(Root Pile System, RPS)은 그 중심에 보강재가 들어있는 직경 75~250 mm인 소구경 현장타설말뚝을 나무뿌리와 같이 그물식으로 배치하여 지반을 보강하는 공법으로, 기초지지력이 약화된 기존구조물의 보강 등에 사용되어 왔다. 뿌리말뚝공법은 쏘일네일링 공법과 마찬가지로 원지반 내부에 보강재를 추가로 삽입하여 원지반 강도를 증가시킴으로써 사면안정이나 지하굴착시 지반보강 수단으로 폭넓게 활용될 수 있으며, 국내에서도 이에 대한 관심도 및 적용사례가 점차로 증가하고 있는 추세이다.

그러나, 실제의 설계에 있어서 흙-보강재간의 상호작용, 즉 무리효과(group effect) 및 매듭효과(knot effect) 등의 규명이 어렵기 때문에 뿌리말뚝의 배치, 형태, 설치간격, 삽입각도 및 길이 등에 관하여 아직까지는 경험에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 뿌리말뚝공법을 사면보강에 적용할 경우, 이에 대한 해석을 위해 Bang등(1990)이 제시한 Generalized Plane Strain 개념을 이용한 준3차원적인 유한요소 해석을 시도하였다. Generalized Plane Strain 개념은 일반적인 2차원 평면변형을 조건에, 사면 길이방향의 변위는 고려하고 대신 변형율을 무시함으로써 뿌리말뚝공법과 같이 일정한 형태를 유지하면서 3차원적으로 배치되는 보강재의 저항력 및 지반의 거동을 신속히 해석할 수 있는 장점이 있다.

또한, 본 연구에서 제시된 준3차원적인 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해 대표단면을 설정하여 FLAC^{3D} 프로그램을 이용한 3차원적인 해석결과와 비교·분석하였으며, 뿌리말뚝의 흙-보강재 사이의 상호작용효과를 고려하기 위한 변위중첩방법과 이를 이용한 뿌리말뚝구조체의 보강효과를 분석하였다.

2. Generalized Plane Strain 조건에서의 유한요소해석

Generalized Plane Strain 개념을 이용한 유한요소해석은 Bang등(1990)이 Skew Reinforcement System의 거동을 해석하기 위해 제시한 바 있으며, 비교적 빠른 시간 내에 준3차원적인 해석이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 여기서, Generalized Plane Strain 개념을 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

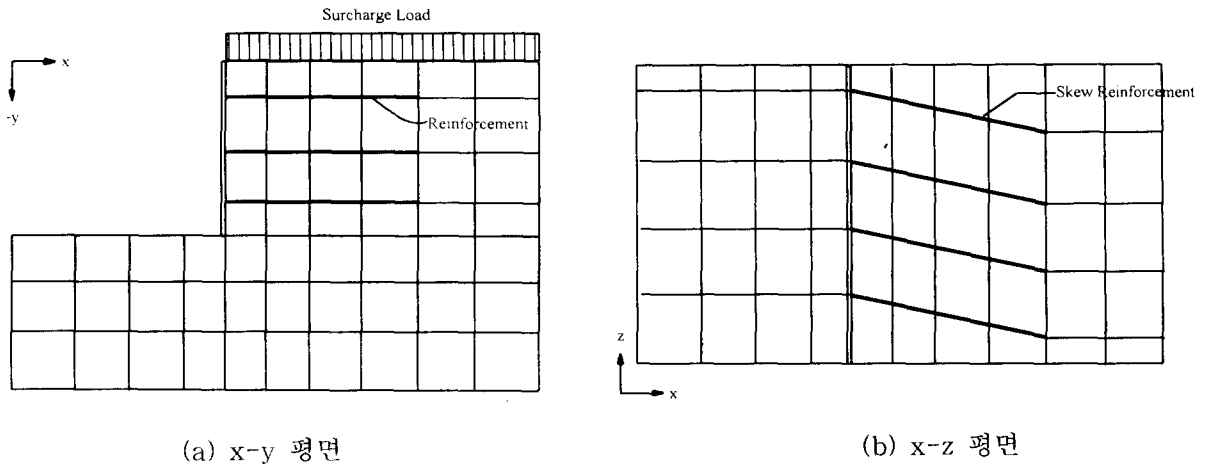


그림 1. Skew Reinforcement System의 개요도

일반적인 평면변형을 조건하에서는 x-y평면에 대한 변위와 변형율만을 고려하지만, Generalized Plane Strain 조건하에서는 x-y평면에 직각방향인 z방향에 대한 변위는 고려하고 대신 z방향에 대한 변형율을 무시하여 해석한다. 따라서 Skew Reinforcement System이나 뿌리말뚝공법과 같이 보강재가 일정형태로 배치될 경우 준 3차원적인 거동을 개략적으로 해석할 수 있다.

Generalized Plane Strain 조건에서의 4변형 요소에 대한 변위 및 변형율은 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 u &= u(x, y) = \sum_{i=1}^4 N_i \cdot u_i \\
 v &= v(x, y) = \sum_{i=1}^4 N_i \cdot v_i \\
 w &= w(x, y) = \sum_{i=1}^4 N_i \cdot w_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

변위는 x-y평면에 직각방향인 z방향에 대해 상호 독립적(즉, z방향에 대한 상대변위가 “영”)이므로 변형율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{ \varepsilon \} = \{ \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz} \}^T \tag{2}$$

$$\text{여기서, } \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 F_i \cdot u_i, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \sum_{i=1}^4 G_i \cdot v_i, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 [G_i \cdot u_i + F_i \cdot v_i]$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 F_i \cdot w_i$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \sum_{i=1}^4 G_i \cdot w_i$$

u_i, v_i, w_i : 각 절점의 근사적인 변위

$$F_i = \frac{\partial N_i}{\partial x}, \quad G_i = \frac{\partial N_i}{\partial y}, \quad N_i : 1\text{차 형상함수}$$

따라서, 4변형 요소의 강성매트릭스는 다음과 같다.

$$[K] = \int_{V_e} [B]^T [C] [B] dV_e \quad (3)$$

여기서,

$$[B] = \begin{bmatrix} \{F\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T \\ \{0\}^T & \{G\}^T & \{0\}^T \\ \{0\}^T & \{0\}^T & \{0\}^T \\ \{G\}^T & \{F\}^T & \{0\}^T \\ \{0\}^T & \{0\}^T & \{F\}^T \\ \{0\}^T & \{0\}^T & \{G\}^T \end{bmatrix}_{6 \times 12}$$

$$\{F\}^T = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}, \{G\}^T = \{G_1, G_2, G_3, G_4\}, \{0\}^T = \{0, 0, 0, 0\}$$

$[C]$ = 구성매트릭스, V_e = 요소의 체적

3. 뿌리말뚝의 흙-보강재 상호작용

3.1 개요

원지반 보강공법으로는 그림 2와 같이 Soil Nailing공법, 뿌리말뚝공법 및 Soil Dowelling공법 등이 있으며, 뿌리말뚝공법은 주로 역사적 유적구조물의 기초보강용으로 사용하고 있다.

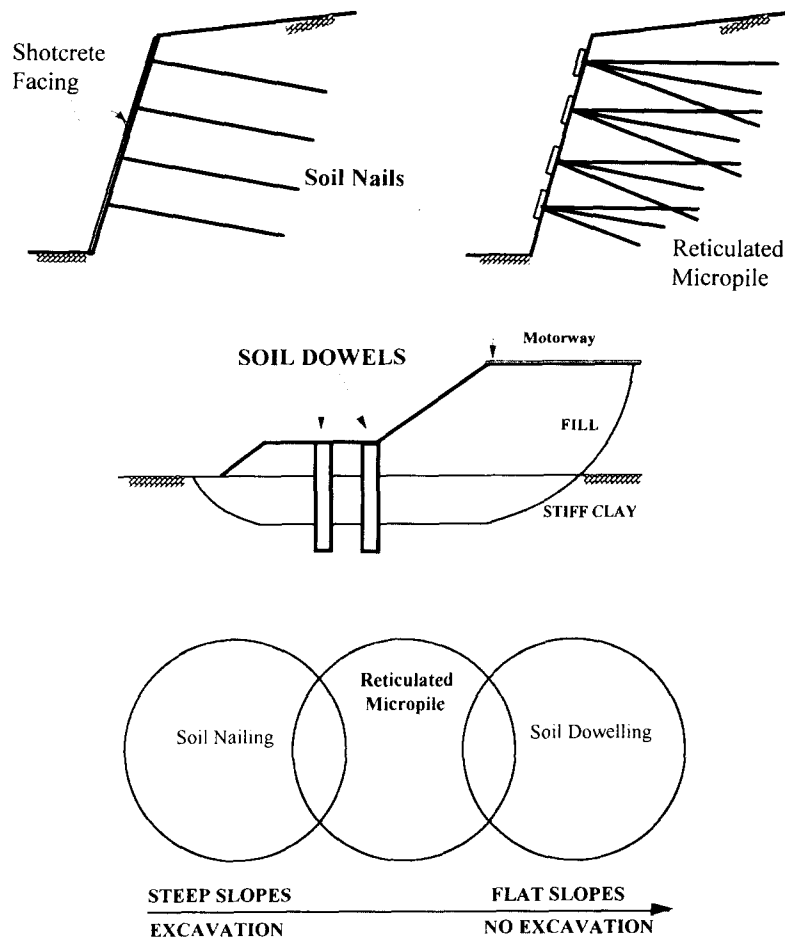


그림 2. 원지반 보강공법

흙-뿌리말뚝 사이의 상호작용은 무리효과, 말뚝의 기하학적 특성 및 타설각도, 배열 등에 따른 매듭효과(knot effect)등으로 인하여 그물효과(network effect)가 발생하게 된다. Lizzi와 Carnevale 등은 실내 모형실험을 통해 기초지반 보강에 사용된 뿌리말뚝공법의 그물효과를 확인한 바 있다. 그러나, 이러한 메카니즘을 정량화시키기란 현실적으로 거의 여의치 않은 실정이다.

3.2 무리효과(group effect)

본 논문에서는 skew angle을 갖는 보강재의 거동을 합리적으로 해석하기 위하여 다음과 같은 방법을 채택하였다. 먼저 그림 3과 같이 뿌리말뚝이 배치될 경우, 수평간격 S 인 말뚝 열에 대해서 변위(δ_S)를 계산한 후, 다시 수평간격이 s_h 로 조밀한 경우에 대한 변위(δ_{sh})를 계산한다. 이러한 계산결과를 토대로 수평간격의 영향에 따른 변위비(Displacement Ratio, DR)를 계산할 수 있으며, 이를 적용하여 뿌리말뚝의 무리효과를 근사적으로 반영할 수 있다

$$DR = \frac{\delta_{sh}}{\delta_S} \leq 1 \quad (4)$$

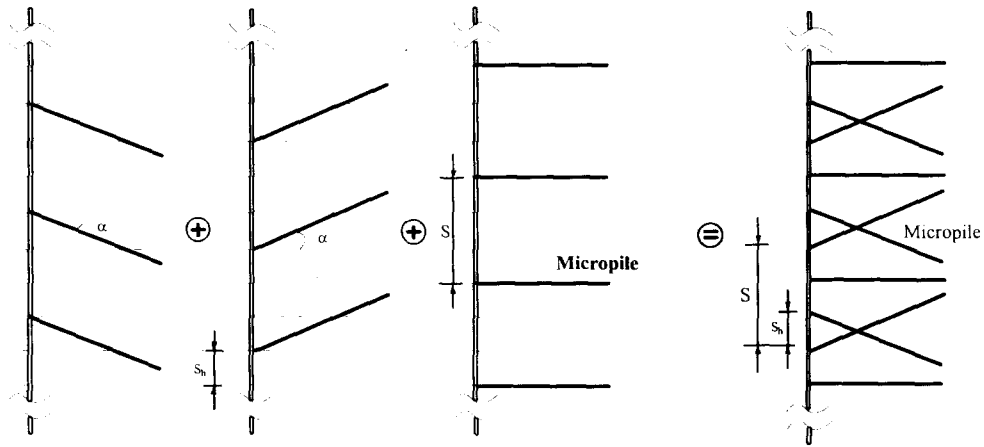


그림 3. 무리효과에 의한 변위계산

3.3 매듭효과(knot effect)

그림 2에 도시된 바와 같이 뿌리말뚝의 기하학적 특성은 쏘일네일링 혹은 군항(group pile)과는 다소 차이가 있으며, 본 연구에서는 뿌리말뚝의 매듭효과에 의한 변위감소계수(k)를 가정한 후, 식(5)와 같이 뿌리말뚝공법에서 발생하는 흙-보강재의 상호작용에 의한 최종변위(δ_{set})를 계산하였다.

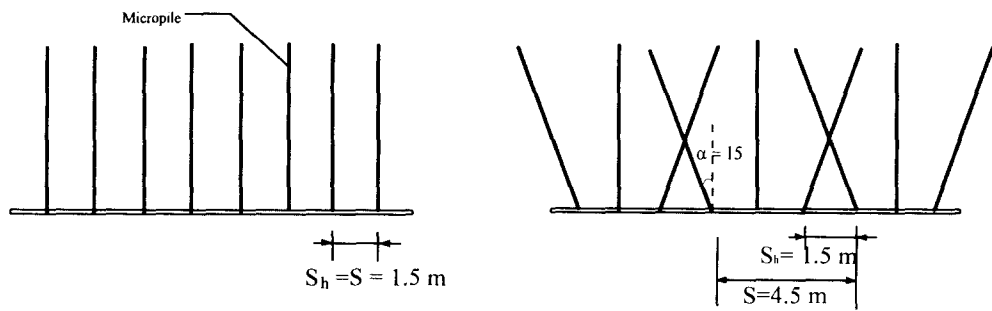
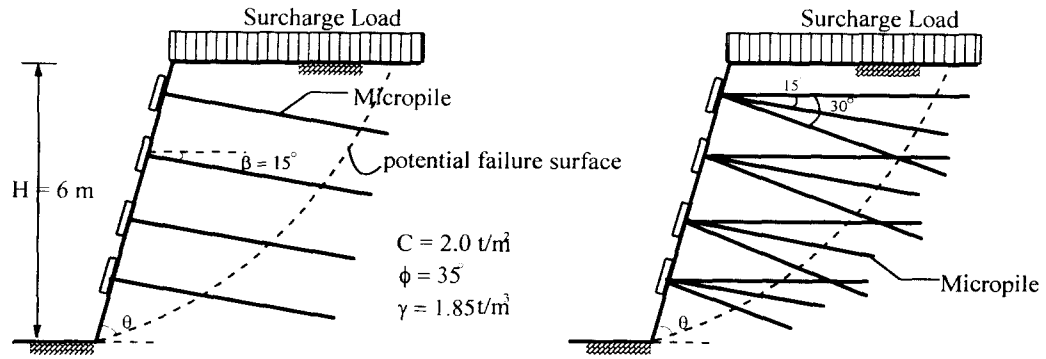
$$\delta_{set} = k \cdot \frac{\sum_{i=1}^n DR_i}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_S)_i \quad (5)$$

여기서, k : 매듭효과(knot effect)에 의한 변위감소계수(reduction factor)
 n : 중첩단면의 수를 나타낸다.

4. 분석 및 고찰

4.1 분석개요

본 연구에서 제시된 준3차원적인 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해 대표단면을 설정하여 FLAC^{3D} 프로그램을 이용한 3차원적인 해석결과와 비교·분석하였으며, 흙-뿌리말뚝 사이의 상호작용효과를 고려하기 위한 변위중첩방법을 이용하여 뿌리말뚝구조체의 보강효과를 분석하였다.



(a) 쏘일네일링공법

(b) 뿌리말뚝공법

그림 4. 분석에 사용된 대표단면

4.2 3차원 해석과의 비교

분석에 사용된 설계변수는 표 1과 같으며, 지반은 탄성모델을 적용하였다.

표 1. 3차원 해석과의 비교에 사용된 변수

구분	해석조건
사면	높이 : 10 m 경사 : 60°
지반	탄성계수 : 50000 kPa 포아손비 : 0.4
보강재	길이 : 10 m 직경 : 15 cm 설치간격 : $S_H = S_V = 1.5$ m

FLAC^{3D} 프로그램에 의한 유한차분해석에 사용된 격자망은 그림 5와 같으며, 본 연구에서 제시된 해석법과 비교한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6은 지표상부 지반의 침하량과 이 때의 하중을 도시한 것으로 뿌리말뚝의 매듭효과에 의한 변위감소계수 k값이 0.8일 경우 FLAC^{3D} 프로그램에 의한 해석결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

뿌리말뚝의 매듭효과에 의한 변위감소계수 k 가 1.0일 경우는 쏘일네일링 형태로 보강재가 배치된 경우를 의미하며, k 값이 1보다 작을수록 뿌리말뚝의 그물효과로 변위가 억제되는 현상이 나타나게 된다.

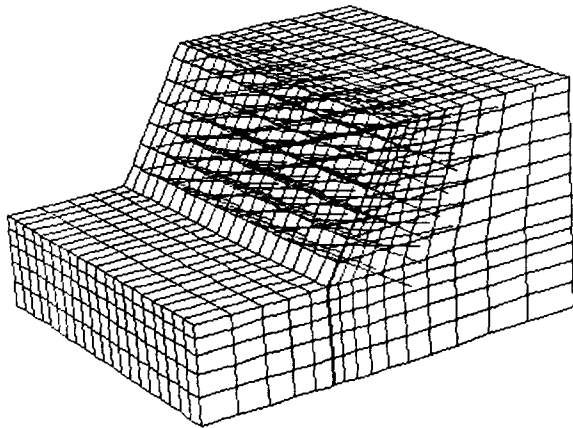


그림 5. FLAC^{3D}프로그램 해석격자망

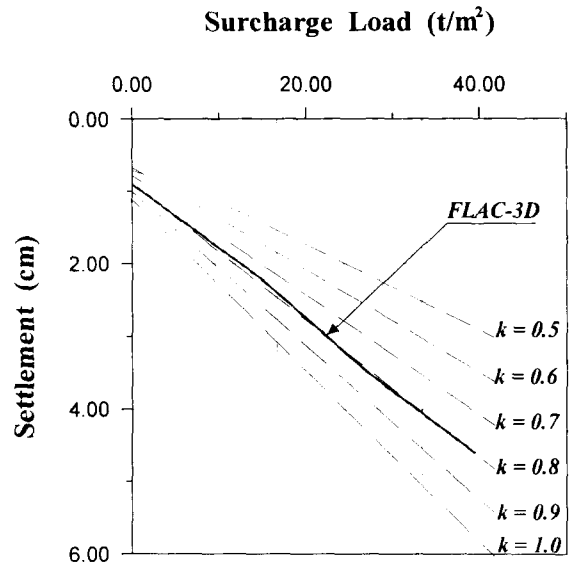


그림 6. 3차원 해석결과와 비교한 하중-침하량 곡선

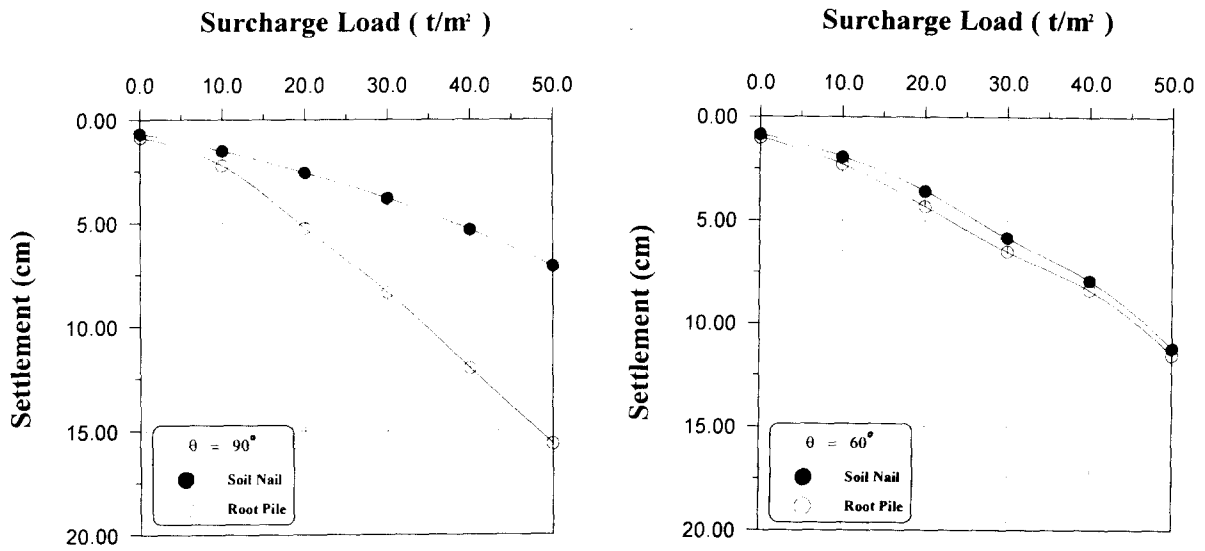
4.3 뿌리말뚝공법의 보강효과 분석

뿌리말뚝공법을 그림 4와 같이 사면에 적용할 경우, 사면보강에 널리 사용하고 있는 쏘일네일링공법과 비교하여 사면의 경사도에 따른 뿌리말뚝공법의 보강효과를 분석하였다. 지반은 Duncan의 쌍곡선 모델(hyperbolic model)을 사용하였으며, 지층은 단일지층으로 가정하였다. 분석에 사용된 변수는 표 2와 같다.

표 2. 뿌리말뚝공법의 보강효과 분석에 사용된 변수

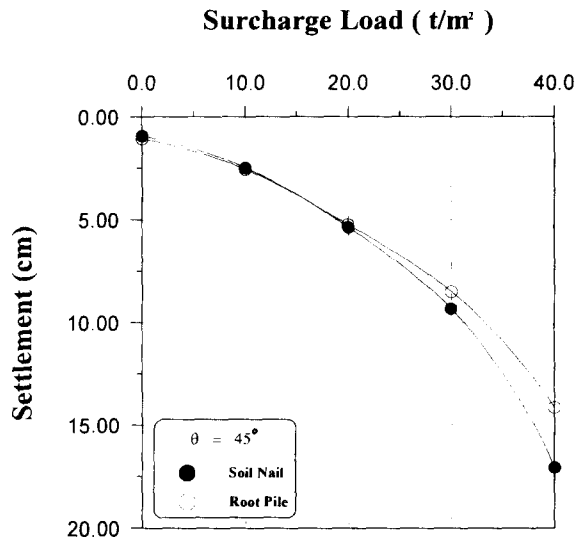
구 분	해 석 조 건
사 면	높이 : 6 m 경사 : 90°, 60°, 45°
지 반	Modulus number, $K = 700$ Modulus exponent, $n = 0.37$ Bulk modulus number, $K_b = 280$ Bulk modulus exponent, $m = 0.19$ Failure ratio, $R_f = 0.80$ 점착력, $c = 3 \text{ t/m}^2$ 내부마찰각, $\phi = 35^\circ$ 단위중량, $\gamma = 1.85 \text{ t/m}^3$
보강재	길이 : 10 m 직경 : 15 cm 설치간격 : $S_H = S_V = 1.5 \text{ m}$

본 연구에서 제시된 Generalized Plane Strain 조건에서의 유한요소해석을 토대로 사면의 경사에 따른 하중-침하량 곡선을 도시한 결과는 그림 7과 같다. 그림 7에서 뿌리말뚝의 매듭효과에 의한 감소계수 k 는 0.5로 가정하였으며, 그림 7의 결과로부터 사면의 경사가 완만할수록 뿌리말뚝형태의 보강재 배열이 기존의 쏘일네일링 형태의 보강유형보다 우수한 것으로 평가되었다.



(a) $\theta = 90^\circ$

(b) $\theta = 60^\circ$



(c) $\theta = 45^\circ$

그림 7. 하중-침하량 곡선

5. 결론

본 연구에서는 뿌리말뚝공법을 사면에 적용하는 경우, 이에 대한 효율적인 해석을 위해 Generalized Plane Strain 개념을 이용한 준3차원적 유한요소해석을 시도하였다. 뿌리말뚝의 무리효과 및 매듭효과를 반영하기 위한 근사적인 변위중첩방법을 제시하였으며, FLAC^{3D} 프로그램을 이용한 3차원적인 해석 결과와 비교·분석한 결과, 그림 4의 대표단면에 대해 뿌리말뚝의 매듭효과에 의한 변위감소계수 k 는 0.8로 계산되었다. 또한 사면의 경사도에 따른 보강효과를 분석한 결과, 사면의 경사가 완만할수록 쏘일네일링 형태로 뿌리말뚝을 배치하는 것 보다는 그물식으로 뿌리말뚝을 배치하는 것이 보강효과가 우수한 것으로 나타났다.

본 연구는 뿌리말뚝공법의 해석시 고려되어야 할 사항에 대한 한정적, 기초적인 연구 결과로 향후 추가적인 연구가 반드시 요구되며, 실험을 통해 또한 해석적으로 뿌리말뚝의 무리효과 및 매듭효과 등에 대한 정량적 체계화가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이승현, 김정환, 김병일, 김명모(1995), "그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각에 관한 실험연구", 한국지반공학회지, 제 11권, 제 2호, pp.29~36.
2. Bang, S. and Yeon, H.(1990), "Analysis of Retaining Structures with Skew Reinforcements", *Transportation Research Record*, No. 1288.
3. Berardi, R.(1996), "A Design Method for Reticulated Pile Structure for the Stabilization of Slopes and Excavations", *Proc. of the International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Balkema, pp.735~740.
4. 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
5. Lizzi, F.(1982), "The 'Pali Radice'(Root Piles)-A state of the art report-", *Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, Balkema, pp.417~450
6. Thorburn, S. and Littlejohn G. S.(1993), *Underpinning and Retention*, 2nd Ed., Blackie Academic & Professional pp.84~156.