

## 비탈면의 높이가 쏘일네일 위상최적화에 미치는 영향

### Effect of the Height of the Slope on the Topology Optimization of Soilnail

조 충 식<sup>†</sup> · 송 영 수<sup>1)</sup>

Chungsik Cho · Youngsu Song

Received: October 19<sup>th</sup>, 2018; Revised: November 5<sup>th</sup>, 2018; Accepted: November 19<sup>th</sup>, 2018

**ABSTRACT** : In this paper, we introduced phase optimization techniques in the Soil-Nail design to optimize the reinforcement required for each grade level. The optimal design results at the maximum slope height were further amplified to allow for phase optimization of the horizontal spacing of the Nail in accordance with the change in the height of the slope. The limit equilibrium analysis was performed by step-by-step sloping height, and the safety factor exceeded when the horizontal spacing of four days was fixed. The process of optimization was effectively carried out by densifying the required reinforcement depending on the slope elevation. Also limited to reflect the axial force of the nail into the reinforcement details. Using the method, the members' strength was reflected. When phase optimization technique is applied for each slope height by calculating the stiffening precision, it is judged that it will be more economical to optimize horizontal intervals by effectively reducing the repeated reinterpretation process that satisfies the reference safety ratio for each slope height.

**Keywords** : Limit equilibrium analysis, Finite element method, Soil-Nail, Horizontal spacing, Shape density, Topology optimization

**요 지** : 본 논문에서는 쏘일네일 설계에 위상최적화 기법을 도입하여 비탈면 높이별로 필요로 하는 보강력을 최적화하였다. 최대 비탈면 높이에서의 최적설계 결과를 보강형상밀도화하여 비탈면의 높이 변화에 따라 적용 시 쏘일네일의 수평간격의 위상최적화가 가능하였다. 단계별로 비탈면 높이를 달리하여 한계평형해석을 수행하고 쏘일네일의 수평간격이 고정값일 때 초과되는 안전율을 확인하였다. 비탈면 높이에 따른 필요 보강력을 밀도화 함으로써 최적화의 과정을 효율적으로 수행할 수 있었다. 또한 쏘일네일의 축력을 보강형상밀도에 반영하기 위하여 유한요소법을 이용하여 부재력을 반영하였다. 보강형상밀도를 산정하여 비탈면 높이별로 위상최적화 기법을 적용 시 비탈면 높이마다 기준안전율을 만족하는 반복적인 재해석과정을 효과적으로 감소시킬 수 있어 수평간격을 위상 최적화하는 방법이 경제적인 설계에 활용도가 높을 것으로 판단된다.

**주요어** : 한계평형해석, 유한요소해석, 쏘일네일, 수평간격, 형상밀도, 위상최적화

## 1. 서 론

쏘일네일공법은 경제성 및 시공성 측면에서 국내 사용빈도와 적용성이 확대되고 있는 공법이다. 쏘일네일링의 효과적인 최적설계는 가능하면 보강재가 가지는 인장력을 최대한으로 활용할 수 있는 설계로 정의할 수 있다.

최적설계란 최적의 형상 및 크기, 배열위치 등을 디자인하는 방법으로 제약조건을 만족하는 범위 내에서 설계변수를 변화시켜 목적함수를 최대화 또는 최소화하여 최적의 설계변수를 구하는 것을 최적 설계라 정의할 수 있다. 이러한 최적 설계는 크게 치수 최적화, 형상 최적화, 위상 최적화의 3가지 분야로 구별할 수 있다(Han, 2001).

공학적으로 최적설계는 설계에 필요한 제한조건을 만족하는 가격이 가장 낮은 설계 결과를 찾는 과정을 의미한다.

최적화는 성능을 최대로 하면서 가격이 가장 낮은 설계가 좋은 설계이므로 네일의 인장력을 최대한으로 활용할 수 있는 연구가 진행되어왔다.

Shen et al.(1978)와 Juran et al.(1990)은 최적의 쏘일네일 설치각도를 검토하였고, Juran et al.(1990)은 쏘일네일의 인장력 계산을 진보시킬 수 있는 일반화 방법을 제안하였다. 국내에서는 쏘일네일의 길이 및 간격과 설치각도에 대한 연구가 활발히 검토되어 여러 학자들에 의하여 네일 재료의 물리적 성질 변화 없이 설치각도나 설치길이에 대한 최적화가 검토되었다(Kim & Kang, 1995; Yoo et al., 2001; Kim et al., 2003; Chun et al., 2004; Kim et al., 2008).

초기 최적화 연구는 재료 물성을 최대화하기 위하여 재료의 물리적 성질 변화 없이 설치각도나 설치길이를 최적화하는 형상최적화에 대하여 다양한 방법으로 연구되었다. 비탈면의

† Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Seoul (Corresponding Author : csjoh@naver.com)

1) CEO, Geotech Engineering Co., Ltd.

높이가 변화하지 않는 조건일 때 보강재의 밀도(reinforcement density) 개념은 쓰일네일이 동일한 길이, 단면, 각도로 균질한 지반에 설치하여 수식화를 수행한 연구(Chun & Lim, 1998). 네일의 밀도(nailing density)와 쓰일네일 두부에서 유발되는 최대인장력으로 정의하고, 단위면적당 1개의 쓰일네일의 밀도로 정의된 쓰일네일의 면적비가 0.7%인 경우 역지효과가 가장 크다는 연구결과(Hong & Song, 2006)들은 쓰일네일의 설치간격에 대한 최적화 연구이나 형상최적화에 그치고 있어 비탈면의 높이 변화에 대하여 적용성의 한계를 가진다.

최근까지의 연구된 비탈면의 높이가 동일한 조건에서 보강재의 능력을 최대한 활용하기 위한 최적화에 대한 연구가 대부분이며 연구결과를 이용하여 비탈면의 높이가 변화를 고려한 효과적인 최적화 형상최적화 연구가 주를 이루고 있다. 비탈면의 높이나 기울기 등 기하학적 형상이 안전율에 미치는 영향에 대한 다수의 연구(Kim et al., 2007; Park et al., 2015)결과 사면의 높이에도 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

쓰일네일링은 비탈면의 높이에 따라 작용하는 활동하중이 안전율에 대한 가장 큰 영향인자임에도 불구하고 최대 높이의 단면에 대한 설계 결과를 비탈면의 높이가 낮은 구간에도 일괄적으로 적용하고 있어 설계 최적화보다는 과대 설계의 문제점이 대두됨에 따라 비탈면 전체에 대상으로 하는 보강 최적화의 필요성이 요구된다.

이와 같이 쓰일네일 최적설계에 관한 연구는 쓰일네일의 설치각도나 길이에 대한 것이 대부분이며, 보강대상 비탈면의 높이 변화에 따라 최적화하려는 시도는 부족하며, 대표단면에 대한 최적설계 결과를 일률적으로 배치하게 되어 비탈면의 높이가 낮은 구간에서는 과도한 안전율을 보이게 된다.

따라서 본 연구에서는 쓰일네일 최적 설계 시 비탈면의 높이에 따라 쓰일네일의 수평간격을 위상 최적화할 목적으로 비탈면 높이 변화에 따라 필요한 보강형상밀도를 한계평형법을 이용하여 분석하고 강도감소법으로 보강재의 축력을 확인하는 방법으로 위상최적화 연구를 수행하였다.

## 2. 위상 최적설계(Topology Optimization)

### 2.1 최적설계의 종류

일반 설계과정에서는 설계변수와 제약조건만을 고려하기 때문에, 목적함수를 추가로 정의해야 최적설계문제를 구성할 수 있다. 이 세 가지 구성요소를 사용하여 최적화 문제를 정의할 수 있다(Eq. (1), Table 1).

$$\begin{aligned} \text{Minimize} & : f(x) \\ \text{Subject to} & : h_i(x) \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

- 여기서,  $f$  : 목적함수(Objective Function)
- $h_i$  : 제약조건(Constraints)
- $x$  : 설계변수(Design Variable)
- $M$  : 설계변수와 제약조건 개수

최적설계의 분류는 설계변수를 Size로 취급하는 치수최적화와 Shape를 변수로 하는 형상최적화로 구분할 수 있으며 형상밀도를 이용하는 위상최적화가 있다. 최적설계 종류별 설계변수는 다음 표에 나타내었다(Table 1).

### 2.2 형상밀도를 이용한 위상 최적화 이론

등방성의 밀도 특성을 가진 재료를 이용하여 구조물의 위상최적설계는 밀도법을 이용하는 최적설계방법 중 하나로 설계변수로 재료의 밀도를 취하여 위상최적설계를 진행한다. 일반적인 위상최적화 진행 과정은 Fig. 1과 같다(Bendsoe & Sigmund, 2004).

위상최적화의 유일한 설계변수는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 요소의 형상밀도이며, 쓰일네일의 배치를 수직간격과 수평간격을 이용하여 보강형상밀도로 표현하였다. 재료가 배치되지 않아야 할 부분의 요소들은 밀도가 0(혹은 0에 가까운 작은 값), 재료를 배치해야 하는 부분은 1의 값을 가진 형상밀도로 표현할 수 있다. 모든 요소에 대해서 형상밀도

Table 1. Types of optimum design

Types of optimum design	Design variable	A general outline
Size optimization	- Values that can be expressed by property Beam section / Plate thickness / Mass / Elastic factor, etc.	
Shape optimization	- Everything that is geometrically relevant Hole location / Size / number of animals, etc.	
Topology optimization	- Shape density (Material density)	

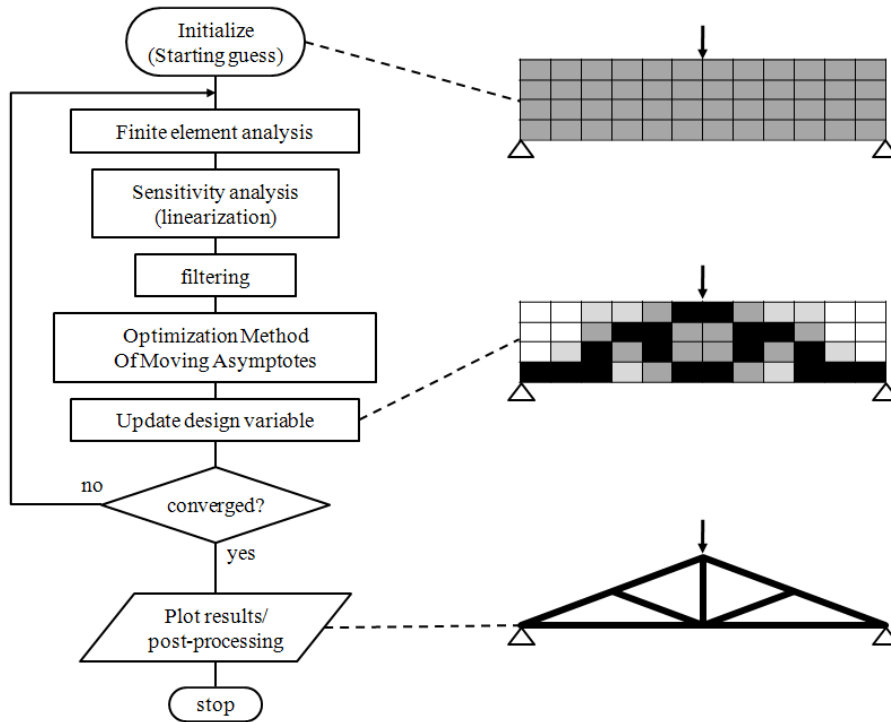


Fig. 1. Topology optimization process for a structure with equivalent material properties (Bendsoe & Sigmund, 2004)

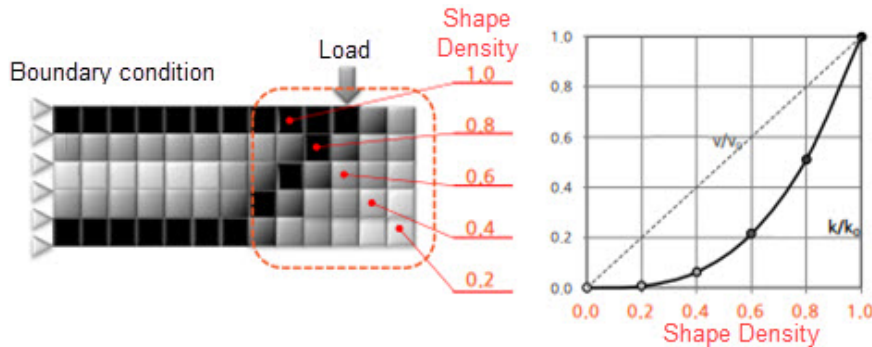


Fig. 2. Concept of shape density (MIDAS IT, 2013)

가 0~1로 정해지면 전체적인 재료 분포 혹은 레이아웃이 결정된다(Fig. 2).

쏘일네일링에서의 위상최적화는 비탈면의 높이가 연속적으로 변할 때 각각의 비탈면 높이에 대한 최적의 보강형상밀도를 제시해 주는 방법이다.

### 3. 단순사면 모델에 대한 형상최적화

본 논문에서는 한계평형해석을 이용하여 비탈면 높이와

수평간격의 상관도를 분석하고 유한요소방법을 이용하여 보강재의 축력을 보강형상밀도로 활용할 수 있는 방법에 대하여 검토하였다. 본 모델사면에 적용한 지반정수값과 비탈면의 검토 조건 및 보강재의 설치제원은 Table 2, 3, 4와 같다.

한계평형법(LEM)에 의한 해석방법은 Bishop의 간편법으로 계산하였다(Bishop, 1995; Duncan, 1996). 사용된 프로그램은 Slide 프로그램으로 모델사면의 높이와 경사별로 최소안전율을 확인하였다.

먼저 경사조건을 달리하여 최대 사면 높이에 대한 건기 시 및 우기 시 조건에 대하여 건설공사 비탈면 설계기준(Ministry

Table 2. Soil parameters by analysis application

Material	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Internal friction angle (°)	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Gradient of slope (°)
Soil	19	30	15	10,000	0.3	45, 55, 64

Table 3. Model slope case

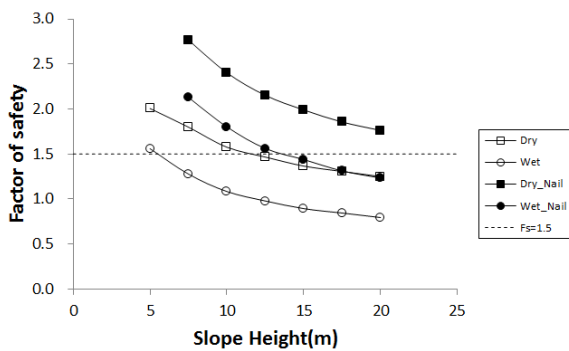
Case	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
Slope height (m)	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

Table 4. Dimensions of reinforcement

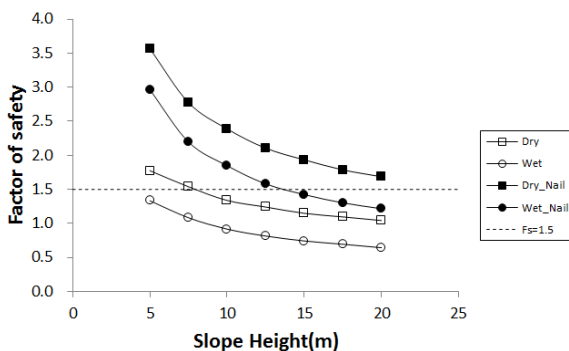
Soil-nail	Diameter (m)	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic factor (GPa)	Poisson's ratio	Installation angle (°)
deformed bar	0.029	77	210	0.2	20

Table 5. Factor of safety by LEM

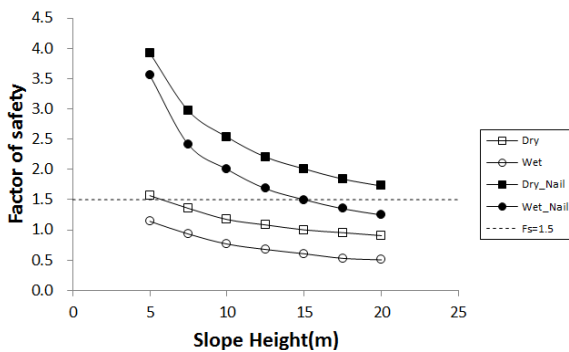
Slope angle (°)	Slope height (m)	Current condition		Reinforcement condition		Nail's horizontal spacing (m)
		Dry conditions	Wet conditions	Dry conditions	Wet conditions	
45	20	1.2500	0.7950	1.263	1.234	1.5
55	20	1.0420	0.6430	1.685	1.216	1.2
64	20	0.9060	0.5060	1.726	1.247	0.9



(a) Slope angle = 45 degree



(b) Slope angle = 55 degree



(c) Slope angle = 64 degree

Fig. 3. Factor of safety by LEM (Bishop)

of Land, Transport and Maritime Affairs, 2016)의 기준안전을 만족하는 쏘일네일의 설치단수와 수평간격을 산정한 이후 비탈면의 높이가 감소되는 구간에 설치간격을 적용 시에 초과되는 보강력의 총합과 초과안전을 검토하였다(Table 5, Fig. 3).

Fig. 3은 동일한 설치간격으로 보강 시에는 보강 후 안전율과 비탈면 높이가 반비례 관계임을 보여준다. 비탈면의 높이가 감소할수록 활동하중이 경감되므로 필요로 하는 보강밀도는 감소될 수 있으며 최적화 방법은 수평간격을 조정하는 방식으로 보강밀도를 인위적으로 조정하여 최적화할 수 있다.

### 3.1 보강형상밀도 산정

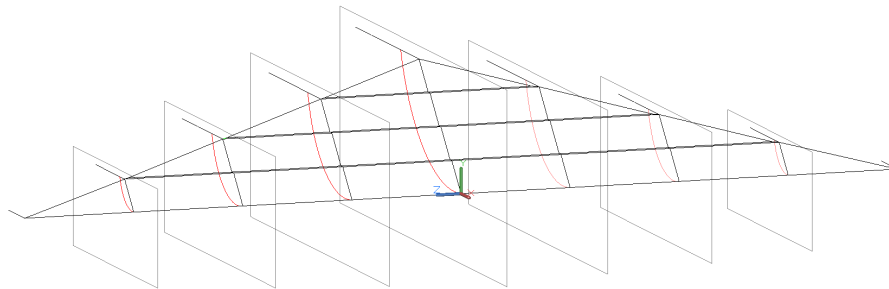
보강재의 축력을 산정하기 위해서 유한요소해석을 이용하였으며 계산에 사용한 FEM 프로그램은 미이다스 아이티에서 개발한 GTS NX 프로그램을 사용하였다(MIDAS IT, 2013). 적용된 경계조건은 사면모델 양 옆면은 틀러지지, 바닥면은 힌지지로 가정하였다.

보강재인 쏘일네일은 임베디드 트러스 요소로 정의하였다. 보강재의 축력은 비탈면의 높이별로 검토하였으며 보강재 설치길이 중 최대값을 보강력으로 선정하였다(Table 6, Fig. 4).

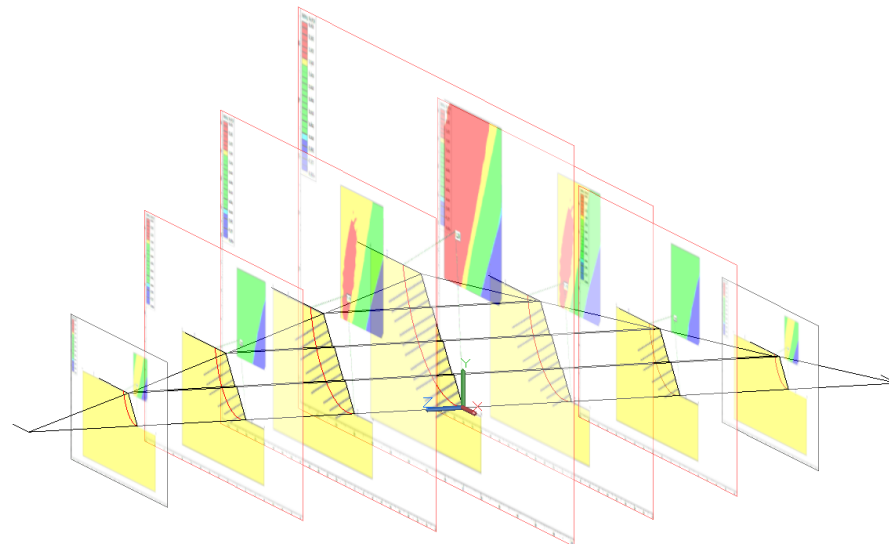
비탈면의 경사를 고정시키고 비탈면의 높이 감소에 따른 보강재의 수평간격의 최적화를 검토하였다. 비탈면 경사가 45도인 경우 비탈면 높이가 20.0m인 경우 최적 수평간격은 0.9m, 높이 15.0m인 경우 수평간격은 1.8m, 높이 10.0m인 경우 수평간격은 2.0m, 높이 5.0m인 경우 보강이 필요하지 않았다.

Table 6. Shape density with slope height

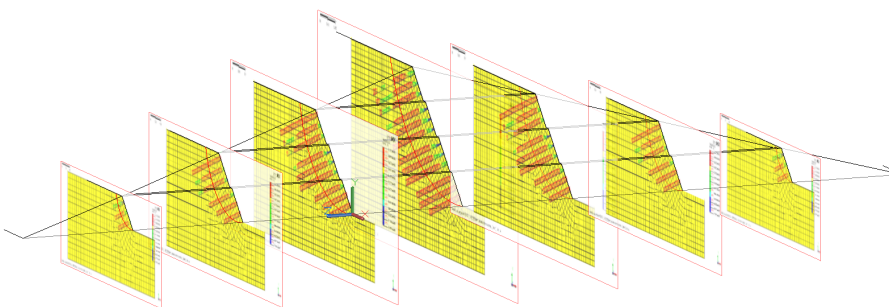
Slope angle (°)		Shape density with slope height (kN/m <sup>2</sup> )					
		h=7.5m	h=10.0m	h=12.5m	h=15.0m	h=17.5m	h=20.0m
45	sh=1.5m	ΣT = 40.09	ΣT = 45.10	ΣT = 42.09	ΣT = 45.10	ΣT = 42.95	ΣT = 45.10
	sh=opt	ΣT = 7.50	ΣT = 15.00	ΣT = 22.50	ΣT = 30.00	ΣT = 37.50	ΣT = 45.00
55	sh=1.2m	ΣT = 50.69	ΣT = 57.02	ΣT = 53.22	ΣT = 57.02	ΣT = 54.31	ΣT = 57.02
	sh=opt	ΣT = 9.50	ΣT = 19.00	ΣT = 28.50	ΣT = 38.00	ΣT = 47.50	ΣT = 57.00
64	sh=0.9m	ΣT = 66.67	ΣT = 75.00	ΣT = 70.00	ΣT = 75.00	ΣT = 71.43	ΣT = 75.00
	sh=opt	ΣT = 12.50	ΣT = 25.00	ΣT = 37.50	ΣT = 50.00	ΣT = 62.50	ΣT = 75.00



(a) Analysis section by slope height



(b) Limit equilibrium analysis result by slope height (by SLIDE)



(c) Axial force by slope height (by GTS NX)

Fig. 4. Analysis results of slope height changes

비탈면의 높이가 감소함에 따라 필요로 하는 총 보강력이 감소되어 필요보강력은 사면높이에 선형비례관계를 보인다. 비탈면 경사가 55도인 경우와 64도인 경우에도 Fig.

3과 같이 비탈면의 높이에 선형 비례함을 알 수 있다. 선형 비례관계를 수식화하였다.

여기서 비탈면의 높이별 기준안전율을 만족하는데 필요

한 보강력은 Fig. 4와 Table 6과 같다.

Table 6에서 구한 값들은 비탈면의 경사 조건별로 우기 시 기준안전율을 만족하는데 필요한 쏘일네일의 수평간격을 고정된 값으로 적용하였을 경우와 비탈면 높이에 따른 수평간격의 최적화 결과를 적용한 결과를 상호 비교하였다.

Fig. 4와 같이 수평간격을 최적화한 경우에도 기준안전율을 만족시키므로 안정성과 경제성을 만족하는 설계 최적화 결과를 보여준다.

### 3.2 수평간격의 최적화 방법

비탈면의 높이 감소에 무관하게 일정한 수평간격을 적용하는 경우에 대하여 비탈면의 높이별로 보강형상밀도로 도시하였다(Fig. 5).

Fig. 5는 비탈면의 경사 조건별로 45도, 55도, 64도로 구분하여 비탈면 높이에 대응하는 보강력을 비탈면 높이에 대하여 관계를 정의하였다.

비탈면의 최대인 조건에서 만족하는 수평간격을 전체 비탈면 구간에 적용 시에는 기준안전율을 초과하는 양상을 보인다. 쏘일네일의 수평간격을 일정하게 하는 경우에 비하여 비탈면 높이에 따라 수평간격의 최적화 결과 비탈면 높이가 감소함에 따라 필요로 하는 보강력이 크게 감소함을 알 수 있다.

비탈면의 경사를 고정한 후 비탈면의 높이에 대한 보강 밀도는 Eq. (2)와 같이 수식화가 가능하다.

$$\begin{aligned} d_{45} &= 3 \cdot h - 15 \quad (R^2 = 1.0) \\ d_{55} &= 3.8 \cdot h - 19 \quad (R^2 = 1.0) \\ d_{64} &= 5 \cdot h - 25 \quad (R^2 = 1.0) \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (2)는 비탈면의 경사에 따른 비탈면의 높이별 보강형상밀도이며, 임의의 비탈면 높이에서 보강형상밀도를 구할 수 있도록 일반화하면 Eq. (3)과 같이 정리할 수 있다.

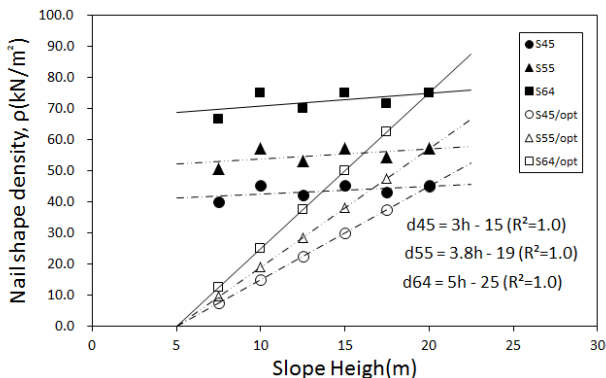


Fig. 5. Shape density with slope height

형상최적화 설계 결과로부터 산정된 보강형상밀도 최대 값은 비탈면의 경사각에 대한 쏘일네일의 형상최적화 결과를 반영하고 있다. 따라서 형상최적화 결과는 비탈면의 경사조건과 지반물성에 대하여 기준안전율을 만족하기 위한 쏘일네일의 설치 경사각, 설치간격 및 설치길이 등 보강재의 형상최적화 값을 의미한다. 비탈면의 높이가 낮은 구간에서는 최대 보강형상밀도를 이용하여 임의의 비탈면 높이에 필요한 보강형상밀도를 산정할 수 있다.

비탈면의 경사와 비탈면의 높이가 증가할수록 최대 보강 밀도는 증가하므로 최대 비탈면 높이 단면에서 얻어진 최적 설계 결과는 비탈면의 경사 변화와 연계하여 Eq. (3)과 같이 수식화하였다.

$$\rho_h = 0.2 \left( \frac{\rho_{\max}}{3} \right) h - \left( \frac{\rho_{\max}}{3} \right) \quad (3)$$

Eq. (3)은 보강형상밀도함수와 비탈면의 높이와의 관계를 나타내는데 이를 이용하면 비탈면의 높이에 따른 수평간격의 최적화 정식화는 다음 Eq. (4)와 같이 정리하였다.

$$Sh' = \frac{\sum T}{\rho_h \cdot h} \quad (4)$$

여기서 최적화 하려는 수평간격(Sh')은 쏘일네일의 1본당 설계 축력과 설치단수로부터 보강 총 축력을 최대 비탈면 높이에서 구한 보강형상밀도로 산정이 가능하다.

## 4. 결 론

일정한 연장을 가지는 비탈면이 최소 높이와 최대 높이를 가지는 기하학적 형상 조건에 대하여 각각의 비탈면 높이별로 활동하중의 차이에 의해 필요한 보강력은 상이하며 비탈면의 높이가 낮아질수록 보강밀도는 최적화가 필요하다.

한계평형법과 유한요소법을 이용하여 높이 변화별 전체 사면에 쏘일네일의 보강을 최적화하기 위한 형상밀도 산정 방법과 보강재의 수평간격 최적화 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 대표 단면에 대한 형상최적화 결과를 이용하여 전체 사면에 보강공 배치 시 최적화할 수 있음을 알 수 있었다. 분석한 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 쏘일네일 보강공의 수평간격을 고정하여 배치하는 방식에 비해 형상밀도를 이용하여 사면 높이별로 수평간격을 최적화하는 경우에 기존 방식에서 과도한 안전율

을 보이는 과대 보강의 문제를 최적화할 수 있었다.

- (2) 비탈면의 높이가 감소할수록 활동하중의 감소로 인해 필요한 보강형상밀도는 현저히 감소하였다. 형상최적설계 결과로부터 보강형상밀도는 아래와 같은 관계식을 보임을 확인하였다.

$$\rho_h = 0.2 \left( \frac{\rho_{\max}}{3} \right) h - \left( \frac{\rho_{\max}}{3} \right)$$

- (3) 형상최적설계를 통해 구한 보강형상밀도를 이용하여 각각의 비탈면의 높이(h)에 대한 수평간격은 아래와 같이 최적화할 수 있다.

$$Sh' = \frac{\sum T}{\rho_h \cdot h}$$

- (4) 절편법에 의한 최적설계 결과 값을 유한요소해석에서는 보강재의 축력 확인을 통해 비탈면 상단부에서의 보강공 배치가 유효함을 확인하였다.
- (5) 비탈면의 높이를 고려한 위상최적화 기법을 적용함으로써 초기 설계단계에서 보강형상밀도를 이용하여 최적의 수평간격을 결정하는 경우에 매우 경제적인 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

## References

1. Bendsoe, M. P. and Sigmund, O. (2004), Topology optimization; theory, methods, and applications, Springer, Berlin Heidelberg, Vol. 11, No. 4, pp. 355~388.
2. Bishop, A. W. (1955), The use of slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, Vol. 5, pp. 7~17.
3. Chun, B. S., Kim, W. C. and Yoon, C. K. (2004), The effects of nail inclination in soil nailing by finite element analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 20 No. 6, pp. 19~27 (In Korean).
4. Chun, B. S. and Lim, H. S. (1998), SOIL NAILING, Yurim publishers, 348p (In Korean).
5. Duncan, J. M. (1996), State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 7, pp. 577~596.
6. Han, S. Y. (2001), On topology optimization technique, Journal of the Korean Machine Tool Engineers Society, Vol. 10, No. 3, pp. 52~57 (In Korean).
7. Hong, W. P. and Song, Y. S. (2006), An experimental study on the stabilizing effect of nails against sliding, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 2, pp. 5~17 (In Korean).
8. Juran, I., Baudrand, G., Fraarag, K. and Elias, V. (1990), Kinematical limit analysis for design of soil naild structure, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, pp. 54~72.
9. Kim, H. T. and Kang, I. K. (1995), A study on the optimum design method for soil nailing system, Journal of the Korean Geotechnical Society, pp. V-13~V-18 (In Korean).
10. Kim, M. S., Sagong, M. and Kim, S. S. (2007), Slope stability analysis under rainfall condition by using multiple slip surfaces, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 8, No. 2, pp. 11~18 (In Korean).
11. Kim, N. K., Jung, J. H., Ju, Y. S. and Kim, S. K. (2008), Modified FHWA design method considering bending stiffness of soil nail, Journal of the Korean Geotechnical Society, pp. 1406~1416 (In Korean).
12. Kim, W. C., Chun, B. S. and Park, S. Y. (2003), A study on the design application of soil nailed wall analysis programs using field data, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 2003, pp. 233~240 (In Korean).
13. MIDAS IT (2013), Midas GTS NX manual-Analysis reference, MIDAS Information Technology co., Ltd (In Korean).
14. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2016), Design Criteria for Slope of Construction Projects, 122p (In Korean).
15. Park, C. S., An, S. J., Kim, J. H. and Park, J. T. (2015), A study on the safety factor of slopes by slope-heights, Journal of the Korean Civil Engineers Society, pp. 199~200 (In Korean).
16. Shen, C. K., Bang, S., Herrmann, L. R. and Rornstad, K. M. (1978), A reinforced lateral earth support system, Proc. of the Symposium on Earth Reinforcement, ASCE, Apr., pp. 764~793.
17. Yoo, N. J., Kim, Y. G. and Park, B. S. (2001), Centrifuge model tests on the behavior and failure mechanism of soil nailing systems under surcharges, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 17, No. 5, pp. 5~16 (In Korean).