

# 쏘일네일링의 세 가지 파괴모드를 고려한 설계 최적화에 대한 연구

## Optimization of Soil-Nailing Designs Considering Three Failure Modes

서 형 준<sup>1</sup> Seo, Hyung-Joon

이 강 현<sup>2</sup> Lee, Gang-Hyun

박 정 준<sup>3</sup> Park, Jeong-Jun

이 인 모<sup>4</sup> Lee, In-Mo

### Abstract

Soil-nailing is the most popular method of reinforcing for slope stability. In general, two factors are considered as failure modes during the soil-nailing design stages: pullout failure mode and shear failure mode that will occur on the most probable failure plane. In many cases, however, shallow failure can also occur when the ground near the slope face is swept away by the horizontal stress release during the staged top-down excavation. In this paper, an optimized soil-nailing design methodology is proposed by considering the three failure modes mentioned above: pullout failure; shear failure; and shallow failure. The variables to be optimized include the bonded length and number of soil-nailings, and the confining pressure that should be applied at the slope face. The procedure to obtain the optimized design variables is as follows: at first, optimization of soil-nailings, i.e. bonded length and number, against pullout and shear failure modes; and then, optimization of confining pressure at each excavation stage that is needed to prevent shallow failure. Since the two processes are linked with each other, they are repeated until the optimized design variables can be obtained satisfying all the constrained design requirements in both of the two processes.

### 요 지

쏘일네일링 공법은 흙막이 또는 사면안정을 위해서 가장 많이 사용되는 공법이다. 일반적으로 쏘일네일링 공법의 설계에서는 인발에 의한 파괴와 전단에 의한 파괴를 고려한다. 쏘일네일링의 파괴거동은 인발파괴와 전단파괴와 같이 파괴면을 가지면서 사면이 무너지는 경우도 발생하지만 굴착에 의해서 사면 표면의 수평응력이 감소함에 따라 점점 표면이 쓸려가는 얇은 파괴에 의해서 파괴에 이르는 경우가 실제 현장에서 자주 발생하게 된다. 따라서 쏘일네일링의 파괴거동을 크게 인발파괴, 전단파괴, 그리고 얇은파괴로 나누어 정의하였다. 본 논문에서는 각각의 파괴모드에 대한 제약조건을 이론적으로 산정하였다. 또한 각각의 파괴를 막기 위한 설계 최적화를 실시하였으며, 네일링의 정착길이, 개수, 그리고 얇은파괴를 막기 위한 전면에서의 최소 구속압을 설계변수로 두어 최적화 과정을 진행하였다. 최적화 과정은 먼저 네일링의 정착길이와 인장력을 설계변수로 하여 인발파괴 및 전단파괴에 대하여 최적화를 실시한다. 다음으로 각 굴착단계별 사면의 표면에서 얇은파괴를 막기 위한 최소의 구속압을 산정한 후 최적화를 반복수행하여 각각의 설계 변수를 산정하게 된다. 이와 같은 설계 최적화 프로그램을 통해서 인발파괴와 전단파괴만을 고려하는 기존의 설계 시스템에서 프리스트레스까지 산정할 수 있게 되었다.

1 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

3 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3314, Fax: +82-2-926-2993, inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서 론

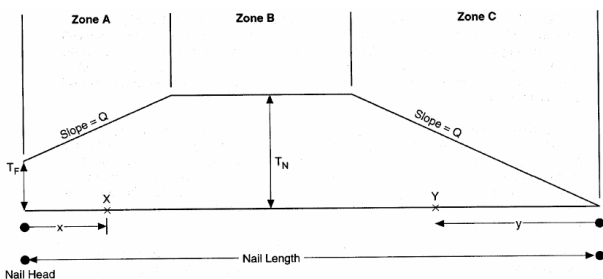
쏘일네일링 공법은 지반에 네일을 삽입한 후 그라우팅을 수행하여 지반과 일체화함으로써 원지반의 전단 저항력 및 네일의 인발저항력을 활용하는 보강공법이다. 따라서 지반의 변위가 발생하면 저항을 하게 되는 수동적인 공법이다. 반대로 앵커공법은 프리스트레스를 가하면서 초기의 지반변위를 억제하게 된다. 이 두공법의 설계는 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력과 삽입된 보강재의 항복하중을 주요 설계변수로 하고 있다. Tan과 Chow(2004)는 지반의 파괴모드를 인발파괴, 전단파괴, 그리고 얇은파괴로 구분하여 파괴메커니즘을 분류하였으며, John과 Wayne(2005)은 세 가지 파괴모드를 바탕으로 현장시험을 실시하였다. 미국의 Federal Highway Administration(FHWA, 1998)에서는 네일의 길이에 따른 세 가지 파괴모드 양상을 Fig. 1a와 같이 나타내었다. 이와 같은 기존연구에 의하면 인발파괴는 주면마찰력의 부족으로 발생하게 되고, 전단파괴는 보강재의 인장력 부족으로 발생하게 된다. 현 설계기준은 설계 주요인자로 인발파괴와 전단파괴에 따른 요소만을 고려하고 있다. 하지만 실제 현장에서는 다단굴착을 실시하며 굴착 표면의 구속응력이 감소함에 따라 얇은파괴가 발생하게 된다. 이러한 얇은 파괴는 표면에서부터 지반이 쏠려 나가기 시작하면서 결국 최종 파괴면까지 이르게 된다. 따라서 이러한 경우 굴착면에서 구속압을 가할 수 있는 공법이 필요하며, 앵커공법 같은 경우 프리스트레스를 가하게 된다. 따라서 사면 보강공법의 설계에서 얇은파괴

에 기인하는 요소를 포함하는 것이 필수적이며, 본 논문에서는 인발파괴와 전단파괴 뿐만 아니라 얇은파괴에 대한 거동을 이론적으로 규명하였다. 또한 세 가지 파괴 모드에 대한 최적화 프로그램을 개발하여 지반조건 및 시공조건 변화에 따른 최적의 설계변수를 선정하였다.

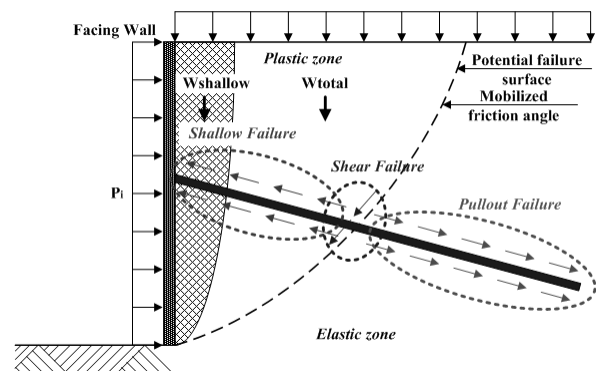
## 2. 세 가지 파괴모드의 제약조건

쏘일네일링의 파괴모드는 Fig. 1b에서 보는 것과 같이 전체 파괴면에서의 인발파괴, 전단파괴, 그리고 얇은 파괴면에서의 얇은파괴로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 흙막이공과 같이 연직사면과 같은 곳에서 세 가지 파괴모드를 모두 적용할 수 있는 설계 최적화 프로그램을 제안하고자 한다. 따라서 각각의 파괴모드에 대한 제약 조건을 마련하기 위해 이론적 검토를 실시하였다. 인발 파괴와 전단파괴는 사면에서 작용하는 가상의 파괴면에 대해서 저항하는 요소(주면마찰력, 보강재의 인장력)가 버틸 수 있는지에 대한 여부를 이론적으로 검토하였다. 하지만 얇은파괴의 경우 굴착에 따라 파괴면이 변경되기 때문에 전체파괴면이 아닌 굴착 단계별 파괴면에 대한 설계변수(굴착면 구속압)를 산정하였다. 또한 연직 사면에 대해 파괴면을  $45+2\phi$ 로 가정하였다. 따라서 본 논문에서는 각각의 파괴모드에 대한 이론을 바탕으로 제약조건을 산정하였으며, 설계변수인 네일링의 정착장길이( $X_1$ )와 네일링의 개수( $X_2$ )를 목적함수로 두어 최적화 과정을 수행하였다(Fig. 2 참조).

여기서,  $l_1$ 에서  $l_n$ 은 각 굴착 단계별 파괴면 안쪽의 네일



(a) Failure modes along the length of soil-nailing (FHWA, 1998)



(b) Failure modes each failure plane

Fig. 1. Overview of three failure modes

길이,  $s_{min}$ 은 네일의 최소 설치간격,  $W_{tot}$ 는 파괴면에서의 전체 토체 하중,  $L$ 은 굴착 종방향 길이,  $H$ 는 굴착깊이, 그리고  $D$ 는 상부에서 파괴 깊이를 나타낸다.

## 2.1 인발파괴에 대한 제약조건

쏘일네일링은 지반을 천공한 후 그라우팅을 실시하여 Fig. 3a에서 보는 것과 같이 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력에 의해서 사면안정을 이루게 된다. 하지만 보강재의 인장하중이 충분한 가운데 주면마찰력보다 과도한 토체하중이 발생하게 되면 네일이 지반에서 빠져

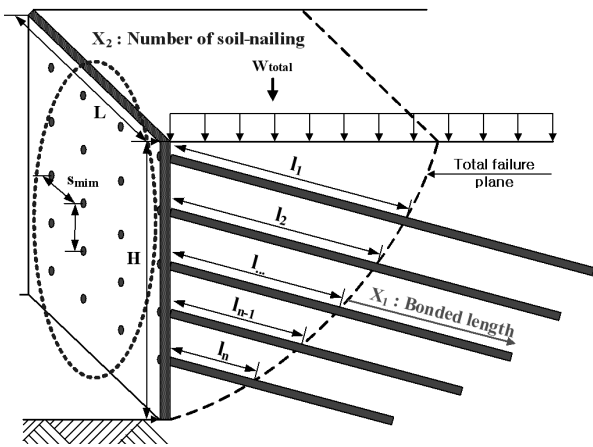


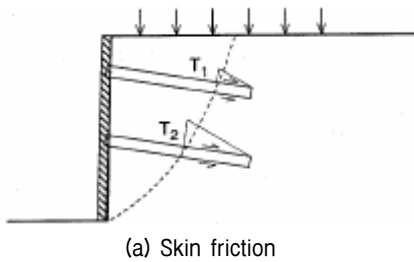
Fig. 2. Design variables in optimization of soil-nailing designs

나오게 되는 인발파괴가 발생하게 된다(Fig. 3b 참조).

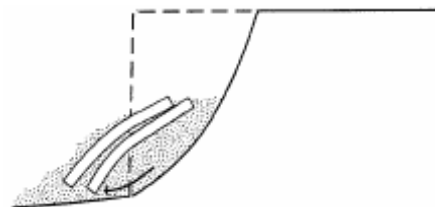
인발파괴를 이론적으로 규명하기 위해서 파괴면에서의 거동특성을 분석하였으며, 인발파괴는 크게 세 단계로 나누어서 진행된다. 먼저 Fig. 4a에서 보는 것과 같이 토체에 작용하는 하중에 대해 지반이 자체적으로 저항하게 된다. 만약 지반이 자체적으로 사면안정을 이루게 되면 별도의 보강이 필요하지 않게 되며, 그렇지 않을 경우 쏘일네일링 또는 앵커와 같이 보강공법이 적용된다. 쏘일네일링으로 보강을 실시하게 되면 Fig. 4a에서 보는 것과 같이 지반의 저항성분( $c, \phi$ )에 의해 남은 잔여토체 하중에 대해 주면마찰력이 저항하게 된다. 본 논문에서는 Wang과 Richwien(2002)이 제안한 주면마찰 이론을 적용하였으며, 주면마찰력( $\tau_f$ ) 식은 (1)과 같다.

$$\tau_f = \frac{f}{1 - [2(1 + \nu)/(1 - 2\nu)(1 + 2K_0)]f \tan \psi} \sigma_m \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 마찰계수로  $\tan \phi$ ,  $\nu$ 는 포아송비,  $K_0$ 는 토압계수,  $\psi$ 는 팽창각, 그리고  $\sigma_m$ 은 그라우팅에 수직으로 작용하는 평균연직응력을 나타낸다. 마지막으로 Fig. 4b에서 보는 것과 같이 네일링이 설치되는 각도를 고려하게 된다. 세 가지 단계를 모두 고려하게 되면 전체 파괴면에서의 토체하중과 인발저항과의 관계식이 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2)는 인발파괴의 제약조건( $g_1(X)$ )

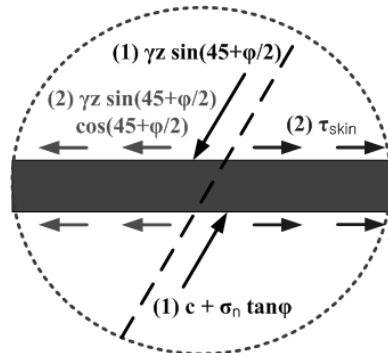


(a) Skin friction

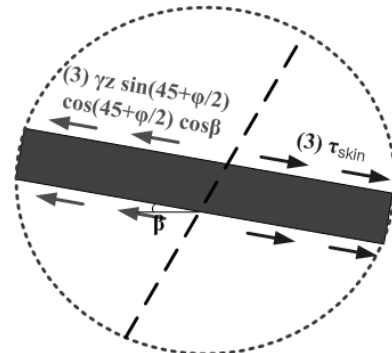


(b) Pullout failure

Fig. 3. Behavior of pullout failure



(a) Resistance factors of ground itself and skin friction



(b) Constructing angle of soil-nailing

Fig. 4. Analysis of pullout failure in total failure plane

이 된다. 여기서,  $F.S.$ 는 안전율,  $\beta$ 는 네일 설치각도를 나타낸다.

$$g_1(X) = \left( W_{tot} \sin(45 + \frac{\phi}{2}) - \frac{cL \frac{H}{\sin(45 + \frac{\phi}{2})} \tan\phi + W_{tot} \cos(45 + \frac{\phi}{2}) \tan\phi}{F.S.} \right) \times \cos(45 + \frac{\phi}{2}) \times \cos\beta - \frac{f}{1 - [2(1+\nu)/(1-2\nu)(1+2K_0)] f \tan\psi} \sigma_m \frac{D\pi X_1 X_2}{F.S.} \leq 0 \quad (2)$$

## 2.2 전단파괴에 대한 제약조건

쏘일네일링은 철근 및 기타 인장력을 가진 다양한 재료를 보강재로 사용한다. 사면의 전체 파괴면에서 전단 파괴가 발생할 때 보강재는 Fig. 5a에서 보는 것과 같이 인장저항을 하게 된다. 하지만 주면마찰력이 충분한 가운데 보강재의 인장력보다 과도한 토체하중이 발생하게 되면 보강재가 끊어지게 되는 전단파괴가 발생하게 된다(Fig. 5b 참조). 전단파괴는 Fig. 5c에서 보는 것과

같이 가상의 파괴면에서 작용하게 된다. 토체의 하중이 네일에 작용하게 되면 가상의 파괴면에서 지반의 변위가 발생하게 된다. 만약 적용되는 지반이 암반과 같이 취성적인 거동을 보이는 지반이라면 보강재는 전단에 의해서 파괴가 발생하지만 일반적으로 쏘일네일링이 시공되는 지반은 유동성이 있는 토사지반이기 때문에 흙이 쓸려 내려오면서 보강재를 잡아당기는 거동을 하게 된다. 따라서 본 논문에서는 전단파괴에 의한 보강재의 거동을 전단거동으로 보지 않고 인장거동으로 본다.

전단파괴의 거동은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 크게 두 단계로 나누어서 해석할 수 있다. 먼저 Fig. 6a에서 보는 것과 같이 지반에 의해서 저항하게 된다. 여기서 잔여 토체 하중 만큼을 보강재의 인장력에 의해서 저항하게 되며, 이를 나타내면 식 (3)과 같다. 식 (3)은 전단파괴에 의한 제약조건이 된다.

$$g_3(X) = \left( W_{tot} \sin(45 + \frac{\phi}{2}) - \frac{cL \frac{H}{\sin(45 + \frac{\phi}{2})} \tan\phi + W_{tot} \cos(45 + \frac{\phi}{2}) \tan\phi}{F.S.} \right) - \frac{T_{yield} X_2}{F.S.} \leq 0 \quad (3)$$

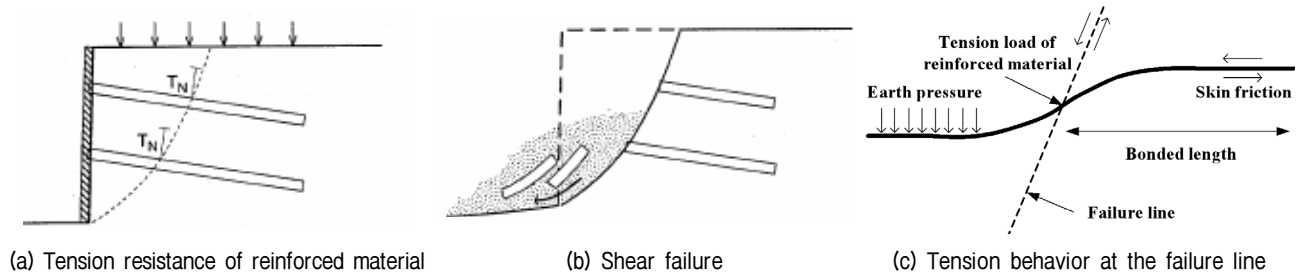


Fig. 5. Behavior of shear failure

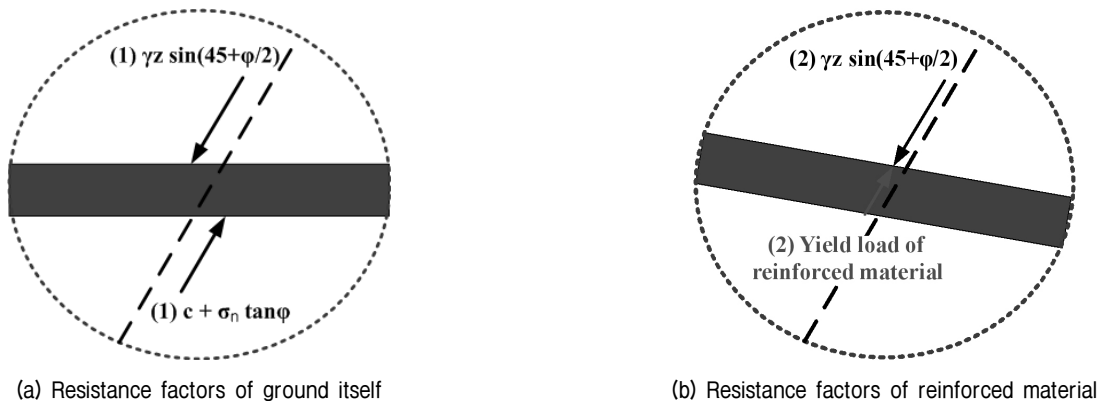


Fig. 6. Analysis of shear failure in total failure plane

여기서,  $T_{yield}$ 는 보강재의 항복하중이다.

### 2.3 얇은파괴에 대한 제약조건

인발파괴와 전단파괴는 전체 굴착 후 파괴면에서의 안정성을 검토하게 되지만 얇은파괴는 Fig. 7a와 7b에서 보는 것과 같이 굴착하는 과정에서 얇은파괴면이 변화하게 된다. 굴착을 함과 동시에 굴착면에서의 수평응력은 '0'이 되고 이에 따라 굴착면에서는 얇은파괴가 발생하게 된다. 따라서 얇은파괴면 안에서 작용하는 네일링의 부착력이 얇은파괴면의 안에서 발생하는 토체의 하중 성분보다 더 커야 한다. 만약 부착력이 얇은파괴의 토체하중보다 작을 경우는 프리스트레스와 같이 전면에서 구속을 할 수 있는 별도의 구속압이 필요하게 된다. 각각의 굴착단계마다 이러한 프리스트레스 하중을 따로 산정해 주어야 하며, Fig. 7c에서 보는 것과 같

이 최종굴착이 끝난 후에는 얇은파괴 뿐만 아니라 인발파괴 및 전단파괴도 고려하여 사면의 안정성을 판단해야 한다.

얇은파괴를 방지하기 위해서는 네일링의 부착력뿐만 아니라 추가적으로 굴착면에서 구속압을 가해야 한다. 일반적으로 얇은파괴와 지반의 초기변위를 억제하기 위해서 쏘일네일링 또는 앵커 공법에서는 프리스트레스를 가하게 된다. 하지만 각각의 프리스트레스 하중을 지반 및 시공조건을 고려하지 않고 일괄적으로 보강재의 항복하중의 절반정도로 적용하기 때문에 실제 가해주어야 하는 구속압보다 더 큰 하중을 주는 경우가 많다. 따라서 본 논문에서는 적절한 프리스트레스 하중을 산정할 수 있도록 이론적인 검토를 실시하였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 먼저 첫 번째 굴착을 실시하게 되면 굴착깊이에 따라 얇은파괴면이 발생하게 된다. 먼저 얇은파괴면에서 지반 자체성분에 의해 저항하게 되며, 잔여 토체하

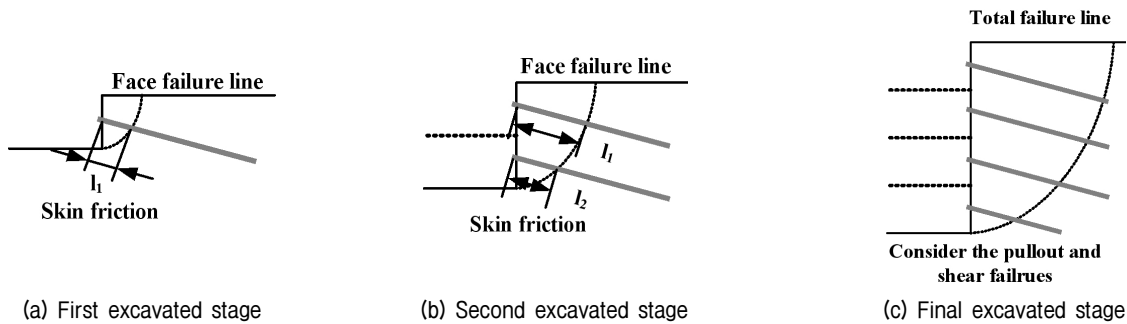


Fig. 7. Change of face failure line at each excavated stage

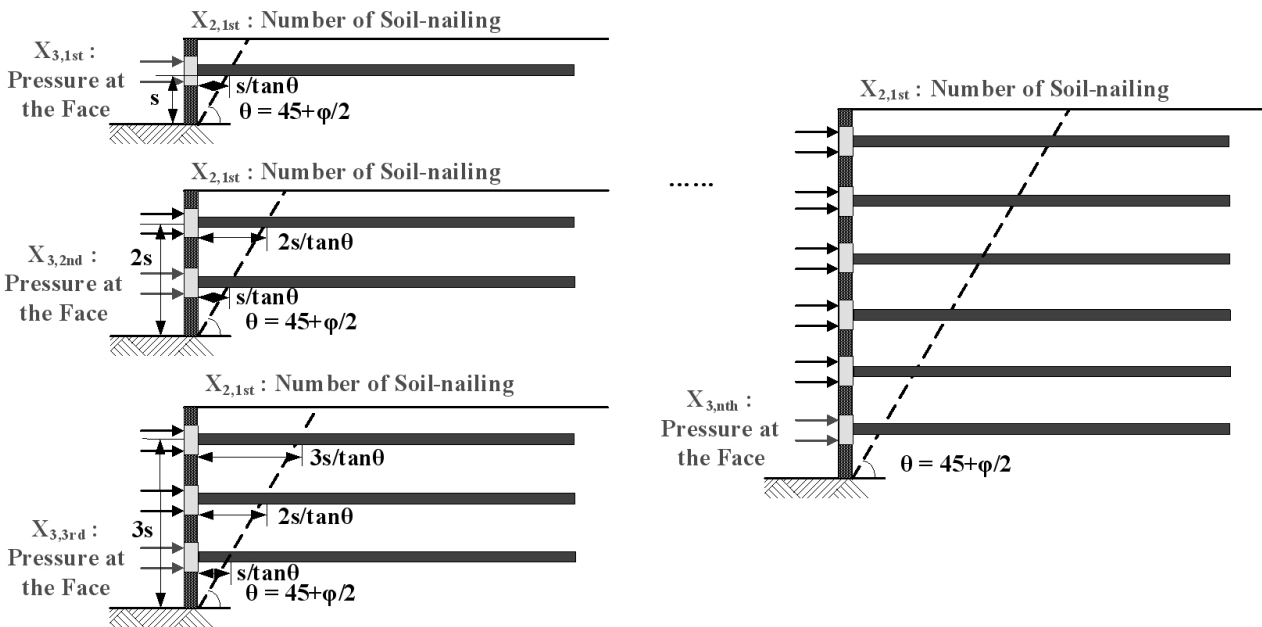


Fig. 8. Estimation of confining stress at each excavated stage

중은 네일의 파괴면 안쪽의 부착력에 의해서 저항하게 된다. 만약 지반저항성분과 네일링의 부착력에 의해서 얇은파괴를 방지할 수 있으면 별도의 구속압이 필요하지 않지만 그렇지 않은 경우 잔여 토체하중에 대해 저항하기 위한 구속압이 필요하다. 1단계 굴착에 의한 구속압 산정식은 다음과 같다.

$$h_1(X) = \left( W_{tot} \sin \theta - \frac{cL \frac{H}{\sin \theta} \tan \phi + W_{tot} \cos \theta \tan \phi}{F.S.} \right) \times \cos \theta \times \cos(\beta) - \frac{\tau D \pi \frac{s}{\tan \theta} X_{2,1st}}{F.S.} - X_{3,1st} \times X_{2,1st} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $X_{3,1st}$ 는 1단계 굴착에서의 구속압,  $X_{2,1st}$ 는 1단계 굴착에서의 네일링 개수로 인발파괴와 전단파괴의 최적화 과정에서 산정되며,  $s$ 는 시공 간격을 나타낸다. 1단계에서의 구속압이 산정되면 2단계에서는 얇은파괴면에서 발생하는 토체하중에 지반의 저항성분, 1단계와 2단계에서의 파괴면 안쪽에 작용하는 네일의 부착력, 그리고 1단계에서 가해진 구속압을 뺀 후 잔여 하중이 발생하게 되면 이에 대응하는 구속압을 2단계에서 가해 주어야 한다. 이러한 과정을 반복수행하여  $n$ 단계까지 거치게 되면 각 굴착단계별로 구속압을 산정할 수 있게 되며, 이를 나타내는 일반식은 식 (5)에 나타나 있다.

$$h_n(X) = \left[ \left( W_{tot} \sin \theta - \frac{cL \frac{H}{\sin \theta} \tan \phi + W_{tot} \cos \theta \tan \phi}{F.S.} \right) \times \cos \theta \times \cos(\beta) - \frac{\tau D \pi \frac{\left( \frac{n(n+1)}{2} - 1 \right) s}{\tan \theta} X_{2,1st}}{F.S.} - \sum_{(n-1)}^1 X_{3,nth} \times X_{2,1st} - \frac{\tau D \pi \frac{s}{\tan \theta} X_{2,nth}}{F.S.} - X_{3,nth} \times X_{2,nth} = 0 \quad (5)$$

본 논문에서는 얇은파괴를 막기 위한 구속압을 굴착 단계별로 산정하였다. 따라서 각 굴착 층별로 프리스트레스와 같은 구속압이 다르게 산정된다. 하지만 시공상의 용이성을 생각하여 구속압을 평균하여 각 층에서 동일하게 주는 것이 적당하다. 이는 일반적으로 상층에서 하층으로 갈수록 구속압이 증가하기 때문에 가능하다. 따라서

구속압은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{3,avg} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} \quad (6)$$

프리스트레스 하중은 반드시 보강재의 항복하중보다는 작게 산정되어야 한다. 과한 프리스트레스 하중을 가하게 되면 초기의 지반변위억제에는 도움이 되겠지만 가한 하중만큼 보강재의 인장력이 감소하여 장기적으로 전체 사면의 안정성에 있어서는 불안전 요소로 작용한다. 따라서 본 논문에서 제안한 프리스트레스 하중만을 가하게 되면 얇은파괴를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 최소한의 보강재의 인장력을 사용하게 되어 장기적인 사면의 안정성에도 도움이 된다.

#### 2.4 시공조건에 따른 제약조건

전체파괴면에 의해서 인발파괴와 전단파괴에 대한 제약조건을 선정하였으며, 또한 시공조건에 따라 추가적인 제약조건이 발생하게 된다. 먼저, 네일링을 시공할 때 적어도 네일링의 가상의 파괴면 바깥쪽으로 시공이 되어야 한다. 즉, 식 (7)에서 보는 것과 같이 정착장 길이가 적어도 '0'보다는 커야된다.

$$g_2(X) = X_1 > 0 \quad (7)$$

쏘일네일링은 그라우팅 방식에 따라 1공당 보강영역이 달라지게 된다. 즉, 압력식 쏘일네일링과 같이 가압그라우팅을 실시하게 되면 가압에 의해 영향을 주는 반경이 증가하게 되어 설치간격(C.T.C)이 증가하게 된다. 반대로 중력식 그라우팅을 실시하게 되면 1공당 보강영역이

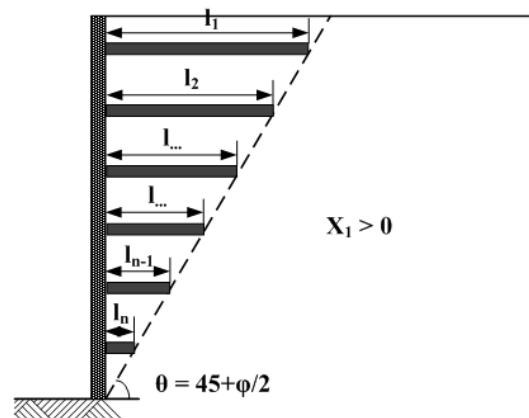


Fig. 9. Constrained condition of minimum bonded length

압력식 쏘일네일링에 비해 줄어들기 때문에 설치간격이 감소하게 된다. 따라서 이에 대한 제약조건이 필요하며, 이를 나타내면 식 (8)과 같다.

$$g_4(X) = X_2 \leq L/s_{\min} \times H/s_{\min} \quad (8)$$

### 3. 세 가지 파괴모드에 대한 설계 최적화

본 논문에서는 전체파괴면에 의해서 인발파괴와 전단 파괴에 대한 제약조건을 산정하였으며, 또한 시공조건에 따라 추가적인 제약조건을 산정하였다. 주어진 네 가지의 제약조건을 통해서 전체파괴면에 대한 최적화를 실시할 수 있으며, 쏘일네일링 설계 최적화의 과정은 Fig. 10에 나타나 있다. 설계변수는 네일링의 정착장 길이( $X_1$ )와 개수( $X_2$ )로 목적함수를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(X) = \left( \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + l_n}{n} + X_1 \right) X_2 \quad (9)$$

목적함수를 제약조건을 통해서 최적화를 실시하게 되면 Fig. 11a와 같이 전체파괴면에 대한 설계변수의 상

한경계(Upper Boundary)와 하한경계(Lower Boundary)를 나타낼 수 있다. 따라서 네일링의 정착장 길이와 개수를 경계상에서 설계자는 선정할 수 있으며, 전체 굴착지반에 맞게 배치하게 되면 설치간격 또한 설계할 수 있다. 따라서 여기서 정해진 설치 간격과 개수를 통해 각 굴착 단계별 설치 개수를 산정할 수 있다. 전체파괴면의 최적화 과정에서 산정된 네일링의 개수를 식 (5)에 대입하게 되면 각 굴착 단계별 프리스트레스를 산정할 수 있게 된다. 프리스트레스 하중은 삽입된 보강재의 인장하중보다는 작게 산정되어야 하며, 만약 인장하중보다 큰 하중이 산정된다면 앞단계로 돌아가서 앞단계에서 가해지는 프리스트레스 하중을 증가시켜야 한다. 이러한 과정을 반복수행하게 되면 각각의 굴착단계에서 프리스트레스 하중을 산정할 수 있다.

프리스트레스는 보강재를 인장하여 지반을 다지는 방식으로 프리스트레스를 가하는 만큼 저항할 수 있는 보강재의 인장력은 감소하게 된다(Fig. 12 참조). 따라서 전단파괴의 제약조건이 변화하게 되며, 식 (3)에서 보강재의 인장하중( $T_{yield}$ )이 보강재의 잔여하중( $T_{residual}$ )으로 바뀌게 된다(식 (10) 참조). 전체파괴면에 대한 제약조건

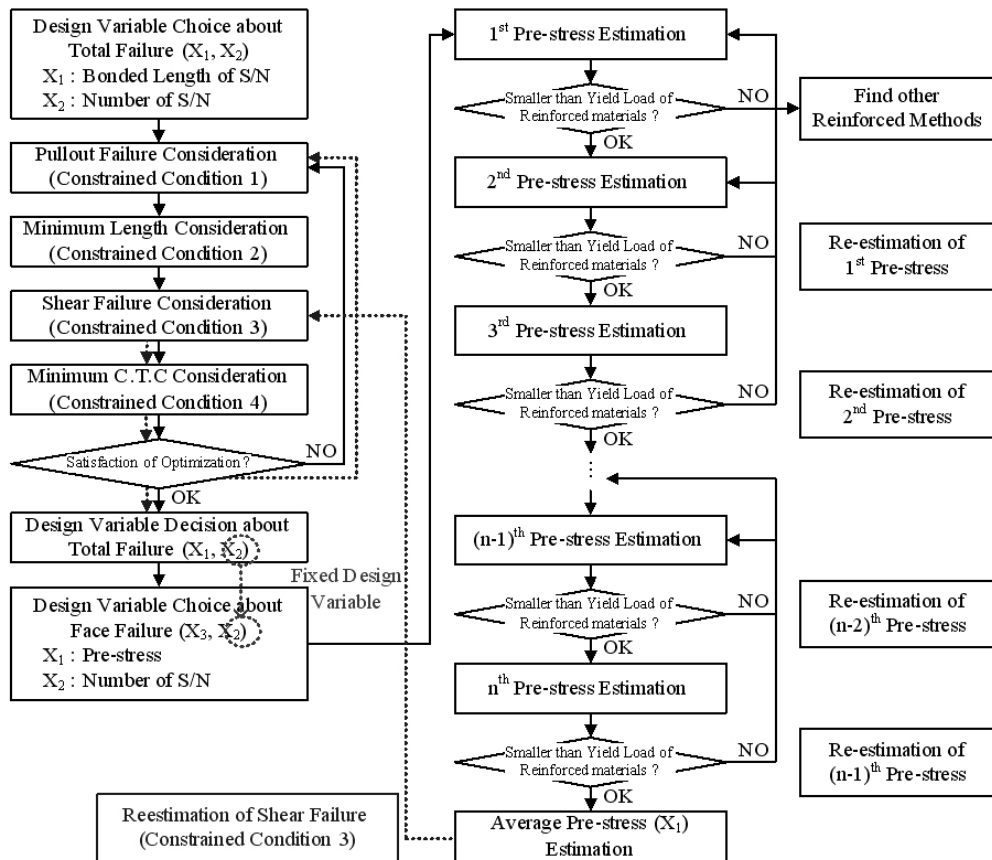


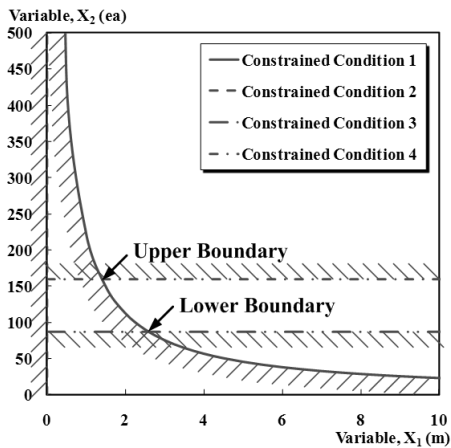
Fig. 10. Flow chart of optimization of soil-nailing design

이 재산정되었기 때문에 설계 최적화를 다시 실시하게 된다. 만약 처음에 산정하였던 설계변수( $X_1, X_2$ )가 재산정된 제약조건을 만족한다면 초기의 설계변수가 설계변수로 결정된다. 만약 초기에 산정된 설계변수가 재산정된 제약조건을 만족하지 못한다면 설계변수를 다시 산정하여 제약조건을 만족시킬 수 있도록 최적화 과정을 반복수행 해야 한다. 이와 같은 과정을 통해 설계변수인 쏘일네일링의 정착장 길이( $X_1$ ), 개수( $X_2$ ), 그리고 프리스트레스 하중( $X_3$ )을 산정할 수 있다.

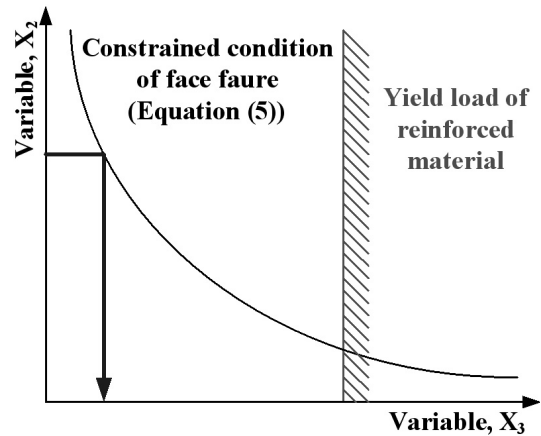
$$g_3(X) = \left( \begin{array}{l} W_{tot} \sin(45 + \frac{\phi}{2}) \\ cL \frac{H}{\sin(45 + \frac{\phi}{2})} \tan\phi + W_{tot} \cos(45 + \frac{\phi}{2}) \tan\phi \\ \text{---} \\ \text{F.S.} \\ \text{---} \\ - \frac{T_{residual} X_2}{F.S.} \leq 0 \end{array} \right) \quad (10)$$

#### 4. 세 가지 파괴모드에 대한 설계 최적화 예시

본 논문에서는 세 가지 파괴모드에 대한 제약조건을 이론적으로 검토하였으며, 각각의 파괴조건에 대한 설계변수를 찾아가는 최적화 과정에 대해서 전개하였다. 본 절에서는 앞서 전개한 세 가지 파괴모드에 대한 설계 최적화에 대해 특정 지반 및 시공 조건을 대입하여 최적화되는 과정 및 결과를 도시화하고자 한다. 설계지반 및 시공 조건은 Table 1 및 Fig. 13에 있다. 지반 정수는 일반적인 사면의 물성치를 적용하였고, 철근의 항복하중은 일반적으로 쏘일네일링에서 사용되는 직경 25mm의 물성치를 적용하였다. 시공조건에서 구근의 직경을 천공홀의 직경으로 가정하였으며, 최소 설치간격을 일반 중력식 쏘일네일링의 최소 설치 간격 1.5m로 가정하였다. 또한 적용된 안전율은 비탈면 설계기준(2006)을 바탕으로 적용하였다.



(a) Optimization concerned with total failure plane



(b) Estimation of prestress to prevent face failure

Fig. 11. Optimization of soil-nailing design

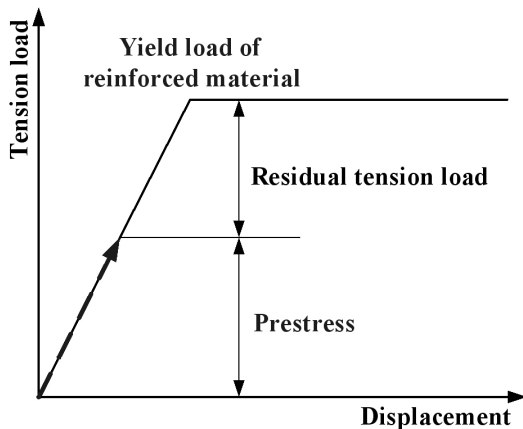


Fig. 12. Decrease of tension load of reinforced material caused by prestress

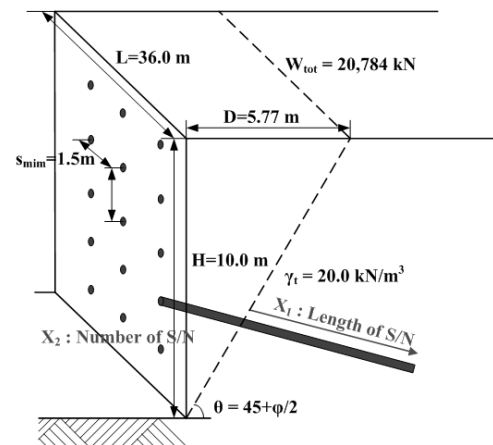


Fig. 13. Ground and constructed conditions of designed ground



Table 1에서 제시한 지반 및 시공조건을 각각의 제약 조건인 식 (2), (3), (7), (8)에 대입하게 되면 Fig. 14a와 같이 각각의 제약 조건에 따른 목적함수의 상한경계와 하한경계가 나타나게 된다. 따라서 설계자는 두 경계 사이에서 안정성과 경제성을 판단하여 적절한 설계변수를 산정하여야 한다. 본 예시에서는 정착장 길이를 2.5m, 그리고 네일링 개수 90개를 5단계로 굴착하였으며, 설치 간격을 2.0m로 산정하였다(Fig. 14b 참조).

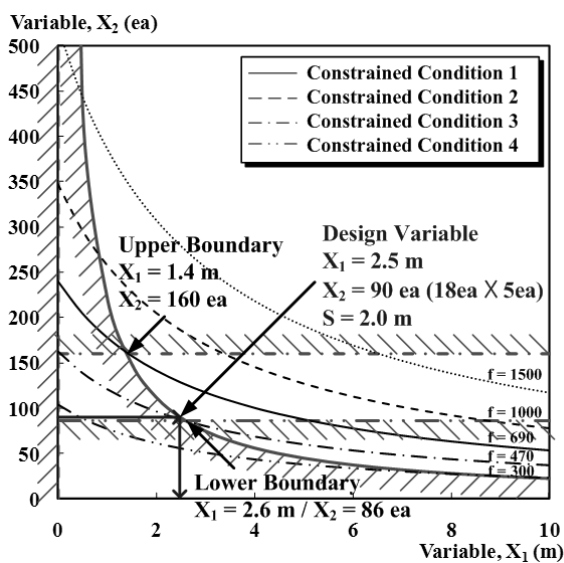
Fig. 10에서 보는 것과 같이 전체파괴면에 대한 설계 최적화를 실시한 후에 각 층별 구속압을 산정하게 된다. 본 예시에서는 구속압을 보강재를 이용한 프리스트레스를 가하는 것으로 하였다. 프리스트레스는 각 층별로 산정하게 되며, 먼저 첫 번째 층의 프리스트레스 하중은 식 (5)를 통해서 산정할 수 있다. Fig. 15에서 보는 것과 같이 식 (5)에 전체 파괴면의 최적화에서 산정한 1층당

네일링 개수 18개를 대입하게 되면 프리스트레스 하중을 산정할 수 있다. 하지만 Fig. 15에서 보강재의 항복하중을 나타내는 제약조건(Constrained Condition) 보다는 작은 프리스트레스 하중이 산정되어야 한다.

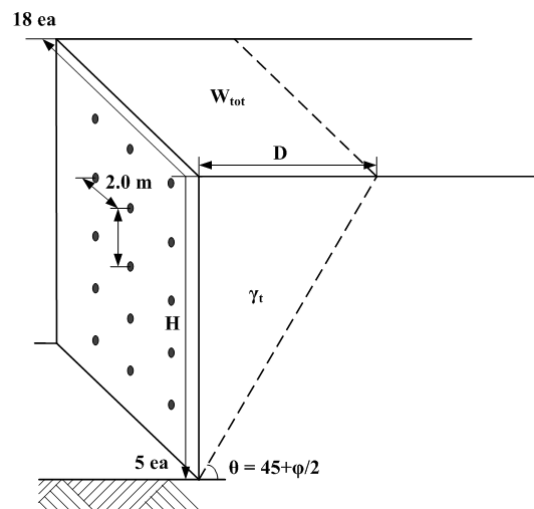
Fig. 15a에서 보는 것과 같이 1단계 굴착에서는 토체의 하중이 작기 때문에 굳이 프리스트레스를 가하지 않아도 얽은파괴가 발생하지 않게 된다. Fig. 15에서 보는 것 같이 굴착 단계가 증가하게 되면 각 층에서 파괴면 안쪽의 토체하중이 증가하기 때문에 전면에서 가해줘야 하는 프리스트레스 하중이 증가하게 된다. 즉, 식 (5)에 의해 도시화된 그래프가 우측으로 이동하게 되어 각 층에서의 네일링 개수 18개에 해당하는 프리스트레스 하중이 증가하게 된다. 각 층에서 산정된 프리스트레스 하중은 Fig. 15f에 나타나 있다. 산정된 프리스트레스 하중은 식 (6)에서 보는 것과 같이 평균 프리스트레스 하중

Table 1. Ground and constructed conditions

Ground properties		Nail properties		Constructed condition		Safety factor	
Cohesion (kPa)	30	Yield load of steel bar (kN)	203	Diameter of grouted body (m)	0.105	Slope	2.0
Internal friction angle (°)	30	Yield load of PC strands (kN)	0	Diameter of grouted body (m)	10	Shear failure	2.0
Dilatancy angle (°)	10	Yield load of other reinforced materials (kN)	0	Longitudinal length of excavated plane (m)	36	Shear failure	2.0
Dilatancy angle	0.3			Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	20		
Coefficient of earth pressure	0.5			C.T.C. (m)	1.5		
				Constructed angle (°)	10		

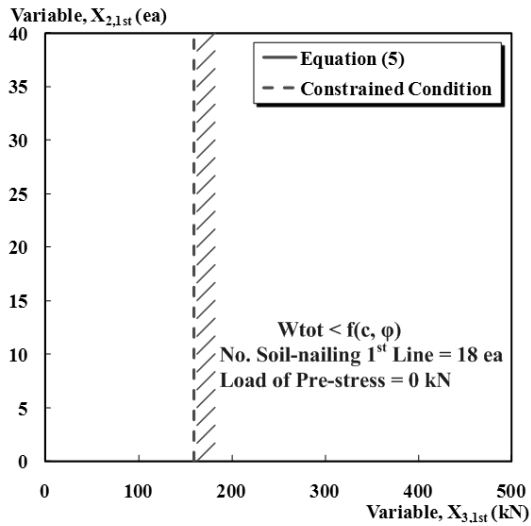


(a) Result of optimization

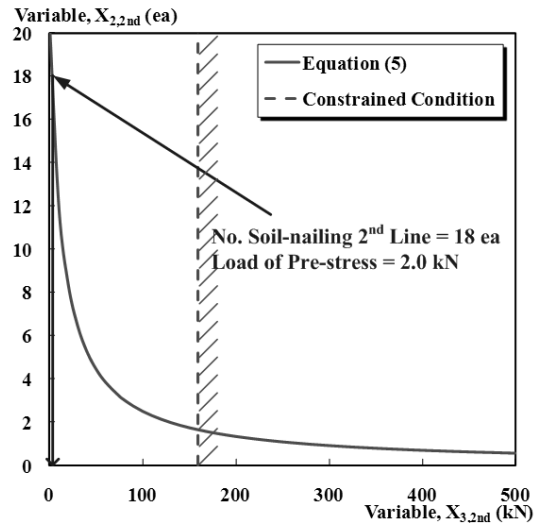


(b) Overview of selecting design variable

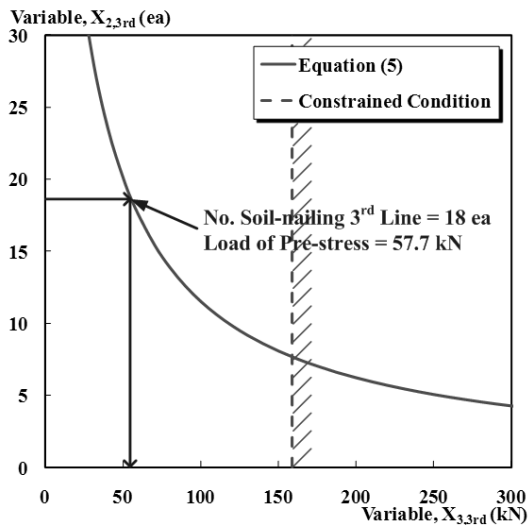
Fig. 14. Result of optimization about total failure plane



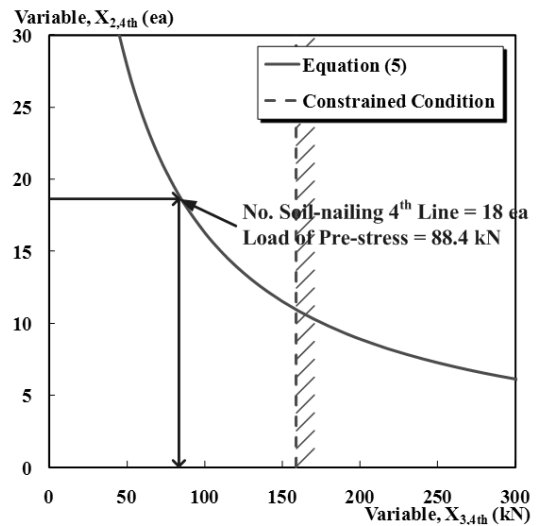
(a) Prestress at first excavated stage



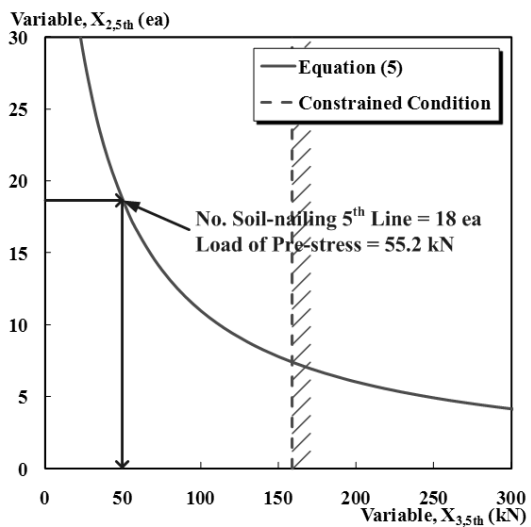
(b) Prestress at second excavated stage



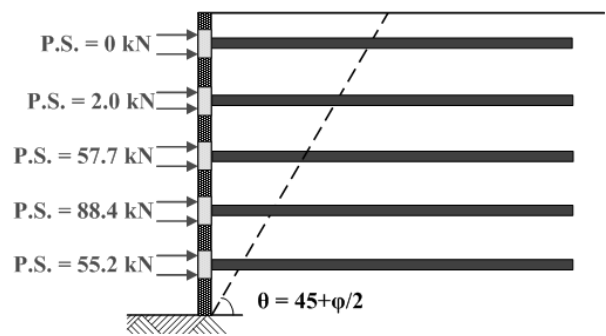
(c) Prestress at third excavated stage



(d) Prestress at fourth excavated stage



(e) Prestress at fifth excavated stage



(f) Estimation of prestress at each excavated stage

Fig. 15. Estimation of prestress

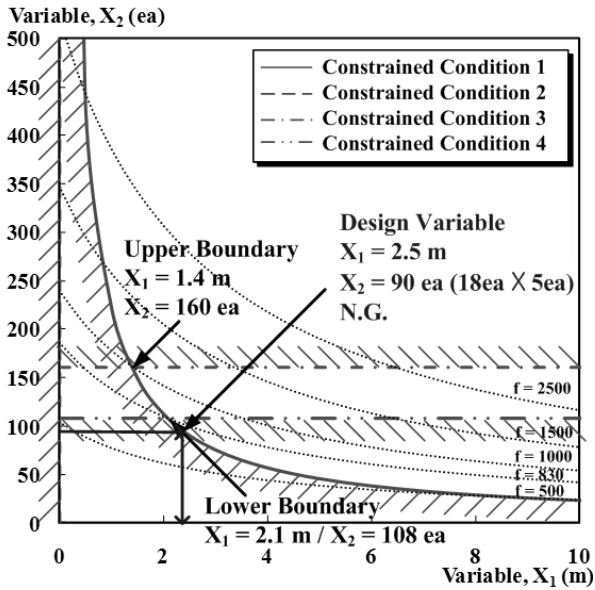


Fig. 16. Result of reestimated optimization

으로 나타낼 수 있다. 따라서 평균 프리스트레스 하중은 약 40kN으로 나타났다. Fig. 10의 순서도에서 나타나 있듯이 프리스트레스 하중을 산정하게 되면, 다시 전체파괴면에 대한 설계 최적화를 실시하여야 한다. 이는 프리스트레스를 가하게 되면 사용한 프리스트레스 하중만큼 보강재의 인장하중이 감소하기 때문이다. 따라서 보강재의 잔여 인장하중은 보강재의 항복하중에서 프리스트레스 하중을 뺀 163kN이 된다. 식 (10)을 통해서 전단파괴에 대한 제약조건을 재산정하게 되면 Fig. 16에서 보는 것과 같이 초기에 산정한 설계변수가 전단파괴에 대한 제약조건을 벗어나는 것을 알 수 있다. 즉, 사용된 프리스트레스 하중에 의해 보강재의 인장력 감소가 전단파괴에 이르게 된 것이다.

전단파괴에 대한 제약조건을 만족시키기 위해서 설계자는 새로 산정된 상한경계와 하한경계에서 설계변수를 재산정하는 것, 보강재의 인장력을 증진시키기 위해서 보강재의 직경 증가 또는 기타 보강재를 추가로 삽입하도록 하는 것, 그리고 보강재를 이용하여 프리스트레스를 가하는 방법이 아닌 기타 구속압을 가할 수 있는 방법을 제안하는 것 중 한가지 방법을 선택하여야 한다. 이를 통해서 세 가지 파괴모드에 대한 네일링의 안정성을 확보할 수 있게 된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 쏘일네일링의 세 가지 파괴모드를 이

론적으로 규명하였으며, 설정된 제약조건에 따라 목적함수를 변화시켜가며 설계변수를 산정하는 최적화 과정을 진행하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 전체파괴면에서는 설계 최적화를 위해 크게 네 가지의 제약조건을 제시하였다. 인발파괴는 보강재의 인장하중이 충분한 가운데 주면마찰력보다 과도한 토체하중이 가해지면 발생하게 된다. 반면 전단파괴는 주면마찰력이 충분한 가운데 보강재의 인장력보다 과도한 토체하중이 가해지면 발생하게 된다. 두 파괴모드 모두 지반 자체의 저항성분에 의해 저항한 후 남은 잔여 토체 하중에 대해 각각 주면마찰력과 보강재의 인장력이 견딜 수 있는 정도를 판단하였으며, 이를 이론적으로 검증하였다. 추가적으로 전체파괴면에는 시공조건에 따라 최소길이에 따른 제약 조건과 최소간격에 따른 제약조건을 마련하였다.
- (2) 얇은파괴는 탑-다운 방식으로 다단 굴착할 때 굴착면에서 수평하중이 감소함에 따라 발생하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위해 굴착면에서 구속압을 가해야 한다. 쏘일네일링이나 앵커 공법 같은 경우 프리스트레스를 가하게 되며, 일괄적으로 프리스트레스를 가하는 것이 아니라 각 굴착단계별로 필요한 하중만을 가할 수 있도록 이론식을 제안하였다.
- (3) 세 가지 파괴모드를 고려한 쏘일네일링의 설계위한 최적화 과정을 진행하였다. 전체파괴면에 대한 제약조건 네 가지를 통해서 설계변수인 네일링의 정착장 길이( $X_1$ )와 개수( $X_2$ )를 목적함수로 두어 최적화를 실시한다. 산정된 네일링의 개수를 통해 얇은파괴의 제약조건을 고려하여 굴착단계별 프리스트레스를 산정할 수 있다. 마지막으로 가해진 프리스트레스는 보강재의 인장력을 감소시키므로 전단파괴에 대한 제약조건을 재산정하여 설계 최적화를 반복수행하면 원하고자 하는 설계변수를 산정하게 된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(과제번호: 10 기술혁신E04)의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. 한국시설안전기술공단 (2006), 비탈면 설계기준, 건설교통부, 대한민국
2. FHWA. (1998). "Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls." *Federal Highway Administration*, US Department of Transportation, USA.
3. John, P. T. and Wayne, G. J. (2005). "Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No.2, pp.141-150.
4. Tan, Y., and Chow, C. (2004). "Slope Stabilization Using Soil Nails: Design Assumption and Construction Realities." *Malaysia-Japan Symposium on Geohazards and Geoenvironmental Engineering*, Bangi, Malaysia.
5. Wang, Z. and Richwien, W. (2002). "A study of soil-reinforcement interface friction." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.92-94.

(접수일자 2012. 5. 9, 심사완료일 2012. 6. 27)