

한계평형해석을 사용한 Soil Nailing 보강사면의 설계도표의 제안

김학문¹, 장경준^{1*}, 서진원¹
¹단국대학교 토목환경공학과

The Design Charts for Soil Nailing Slopes Through Limit Equilibrium Method

Hak-Moon Kim¹, Kyung-Jun Jang^{1*} and Jin-Won Seo¹

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

요 약 Soil Nailing 공법은 사면보강과 지반굴착시 많이 사용되고 있는 공법이다. 일반적인 Soil Nailing의 해석은 복잡한 컴퓨터해석을 필요로 하지만 본 연구에서는 한계평형 해석을 이용하여 단순사면에 Soil Nailing 보강검토시 간편하게 사용할 수 있는 설계도표를 제안하였다. 3가지 사면형태와 네일의 길이비, 입사각을 선택하여 한계평형해석에 근거한 Bishop법과 French Method를 적용하여 해석하였으며 신속한 설계가 요구되는 경우나 예비설계단계, 그리고 설계에 대한 최종 검토시 간편하게 사용할 수 있는 안정도표로 정리하였다. 본 연구에서 제안한 도표를 Taylor의 도표와 비교한 결과 유사한 안전율을 계산할 수 있었으며 Soil Nailing 보강도표를 네일의 길이비와 입사각의 선택시 활용한다면 해석에 따른 시간을 많이 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Soil nailing method is widely used in reinforcing slopes and excavating earth. The analysis of nail-reinforced slopes, generally require complicated computer programs. The purpose of this paper is suggest, Soil stability Chart for nailed slopes which are very useful for pre-design, rapidly design, and final check. Three slope types, three nail lengths and three nail angles are selected for the stability analysis by using limit equilibrium method form Bishop and French. From the above results, this study propose the reinforced design charts for examine the necessity of reinforcement can be examined. The suggested stability chart and Taylor's Slope Stability Chart, showed similar safety factors. This Soil Nailing design charts can provide the solutions for necessity of reinforcement, economical of nail's length ratio and installation angle as well.

Key Words : Soil nailing, slope stability chart, Bishop, Design Charts

1. 서론

Soil Nailing 공법에 대한 연구는 외국의 여러 학자들에 의하여 모형실험, 현장실험 및 유한요소법을 이용한 수치해석등을 통한 연구가 진행되어 왔으며, 해석방법으로는 한계평형해석에 근거를 둔 Schlosser(1982)방법, Shen(1981)방법, Stocker(1979)방법과 운동학적 한계평형 개념을 바탕으로한 Juran(1990)방법등의 연구가 있다. 모형실험과 현장계측을 통한 연구로 Stocker와 Riedinger(1990), Guilloux와 Schlosser(1982) 등 많은 연구가 이루어졌다.

우리나라에서는 1992년 이후 Soil Nailing 보강에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 전성곤(1999)은 Soil Nailing 벽체의 변위와 네일의 인장력을 분석 하였다. 이후 다양한 프로그램과 해석기법의 활용으로 최근에 김홍택(2002)등은 Soil Nailing공법에 압력분사 그라우팅을 적용하였으며 이후 FRP Soil Nailing시스템(2006)에 대한 연구와 천병식(2004)등은 유한요소해석을 이용하여 네일의 경사각의 영향에 대한 연구를 진행 하였다. Soil Nailing공법에 대한 연구는 옹벽의 보강, 터널의 지보체 계분야가 주류를 이루고 있었으나, 최근에는 사면에 대한

본 논문은 단국대학교 대학원 연구보조 장학금의 지원으로 수행되었음.

*교신저자 : 장경준(kyoungjun@dankook.ac.kr)

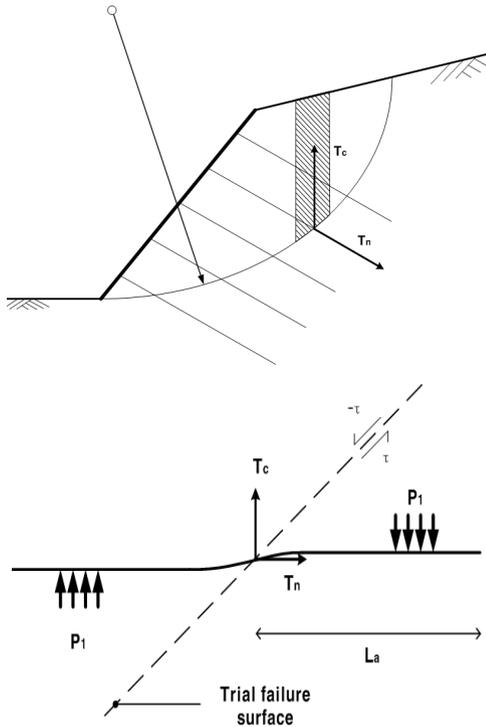
접수일 09년 06월 25일

수정일 09년 09월 25일

게재확정일 09년 10월 14일

Soil Nailing 보강효과에 대하여 관심이 커지고 있으며 연구도 활발히 진행되고 있다.

실제 설계에서 Soil Nailing보강사면에 대한 해석은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 해석하고 있으나 Soil Nailing의 적절한 길이와 입사각을 찾기 위해서는 해석을 여러 번 수행해야 하는 번거로움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 가장 많이 사용되고 있는 해석방법인 Bishop간편법에 근거한 French Method를 이용하여 Soil Nailing의 길이비와 입사각을 조절하여 안전율의 변화를 분석하였으며 Soil Nailing보강 사면설계도표로 정리 하였다.



[그림 1] French Method의 개념도

2. 해석 방법과 조건

2.1 해석이론

Soil Nailing의 외적 안전을 해석하는 방법으로 본 해석 프로그램에 사용된 French Method를 적용하였다. French Method는 Schlosser(1982)에 의해서 제시된 일반적인 안정 해석법으로 절편법을 이용하며 원호 및 비원호 파괴면에 적용시킬 수 있는 방법이다. 이 방법은 Mohr-Coulomb파괴기준과 Tresca 파괴기준에 따라 네일이 발휘하는 힘을 평가하게 된다.

Mohr-Coulomb파괴기준,

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

최대 일의 원리와 Tresca 파괴기준으로부터 파괴시 네일에 발생하는 전단력과 인장력은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

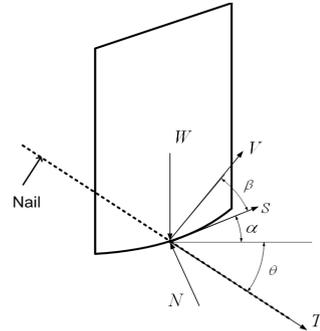
$$V_f = \frac{R_c}{\left[1 + 4 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right]^{0.5}} \quad (2)$$

$$T_f = 4 V_f \tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (3)$$

V_f, T_f : 파괴시 네일에서 발생하는 전단력, 인장력

R_c : 네일의 전단강도

여기서 α 는 임계 활동면과 네일 사이의 상대각도다. $\alpha = 0^\circ$ 면 네일에 인장력만 발생하고, $\alpha = 90^\circ$ 면 전단력만 발휘된다.



[그림 2] 절편에 작용하는 힘

$$M_D = \gamma \sum W \sin \alpha - \gamma \sum V \cos \beta - \gamma \sum T \cos (\theta + \alpha) \quad (4)$$

$$M_R = \gamma \sum (c' l + \sum \sigma' \tan \phi) = \gamma \sum (c' l + \sum N' \tan \phi) \quad (5)$$

네일이 설치된 사면의 안정해석을 위해서 Bishop의 간편법을 이용하면 연직방향에 대한 평형방정식은 식 (6)과 같으며, 이를 식 (4)와 (5)에 대입하면 식 (7)와 같은 안전율에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$W - N' \cos \alpha - V \sin (\theta + \alpha) + T \sin \theta - S \sin \alpha - u l \cos \alpha = 0$$

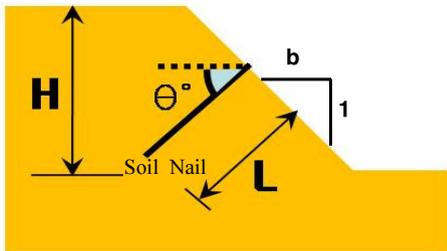
$$N' = \frac{W + T \sin \theta - V \sin (\theta + \alpha) - \frac{c' l}{F} \sin \alpha - u l \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi \cdot \sin \alpha}{F}} \quad (6)$$

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum \{c'l + \tan \phi [W + T \sin \theta - V \sin (\beta + \alpha) - ul]\}}{\sum W \sin \alpha - \sum V \cos \beta - \sum T \cos (\theta + \alpha)} \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F}} \quad (7)$$

2.1 해석 조건 및 방법

2.1.1 해석조건

본 연구에서는 토질정수, 사면경사, Soil Nailing 길이비, Soil Nailing 입사각의 조건이 사면안전율에 미치는 영향을 알기 위하여 가장 기본적인 단순 균질사면을 대상으로 안정해석을 실시하였다. Soil Nail의 보강효과를 최대로 하기 위하여 사면전면보강이 되도록 하였으며 간격은 최대간격과 최소간격의 중간인 2m를 적용하였다. 해석은 Talren 97프로그램을 사용하였다.



[그림 3] 해석사면 형상

[표 1] 해석조건

구 분	건 기 조 건	우 기 조 건
지 반 조 건	$\phi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ $c = 5, 10, 15, 20, 25, 30(\text{kPa})$	
사 면 경 사	1:1, 1:1.5, 1:2	
Nail 길이비 ($R_L=L/H$)	0.6, 0.8, 1.0	
Nail 입사각 (θ°)	$10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$	
네일간격	2m	

2.1.2 해석방법

먼저 미보강 사면에 대하여 해석을 수행하여 그 결과를 공학적으로 안전하다고 판단하고 있는 안전율 1과 실제 설계에서 적용하고 있는 안전율기준에 근거하여 사면 파괴 구간, 보강 필요 구간, 사면안정 구간을 표 2와 같이 안전율을 기준으로 구분하였다.

[표 2] 구간별 안전율 기준

구 분	사면파괴 구간 (안전율)	보강필요 구간 (안전율)	사면안정 구간 (안전율)
건 기 시	$SF < 1$	$1 \leq SF < 1.5$	$1.5 \leq SF$
우 기 시	$SF < 1$	$1 \leq SF < 1.2$	$1.2 \leq SF$

보강이 필요한 구간에 대해서 다시 Soil Nail을 보강하여 입사각과 길이비를 변화시켜 안전율의 변화를 분석하였다. 미보강 사면이 이미 안정구간(건기:1.5이상, 우기:1.2이상)에 있는 경우 해석에서 제외하였다.

3. 해석 결과 및 분석

Soil Nail보강 후 안전율의 증가는 내부마찰각 별로 다르게 나오며 안정수가 같더라도 내부마찰각에 따라서 안전율의 변화량은 다르게 나타난다. 이러한 결과를 내부마찰각에 따라 그래프로 표시하였다.

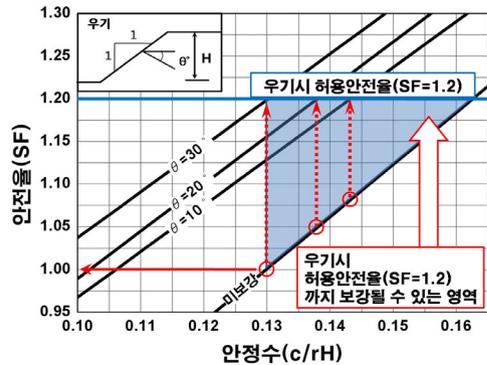
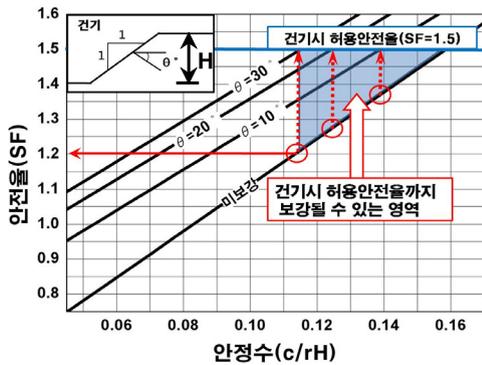
3.1 입사각 변화와 길이비 변화에 대한 안전율

각 경사에 대한 미보강사면을 안정수에 대한 안전율로 표시한 뒤 같은 조건에서 Nail의 입사각과 길이비를 변화시켜 해석하였다. 입사각은 길이비 0.8인 상태에서 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 로 변화시켜 해석하였으며, 길이비는 입사각 30° 인 상태에서 길이비를 0.6, 0.8, 1.0으로 점점 증가시키면서 해석하였다.

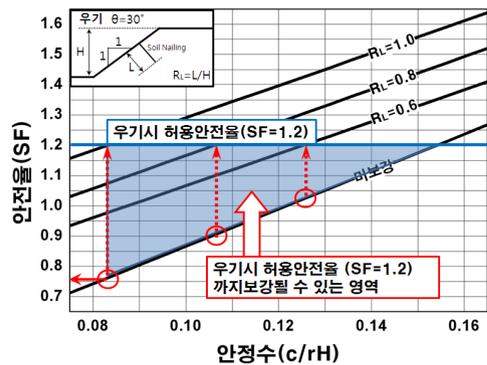
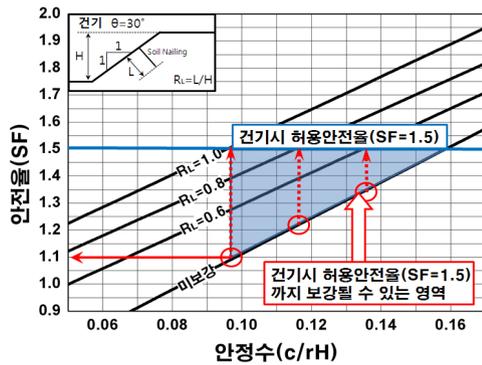
Soil Nail을 설치한 뒤 해석한결과 보강필요구간에 있는 모든 사면조건이 사면안정구간에 해당하는 허용안전율까지 안전율이 증가하지는 못했으며 각 각의 조건(건기,우기)에서 허용안전율까지 보강될 수 있는 영역이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 입사각만을 조절한 것과 길이비만을 조절한 것 모두 동일한 경향을 보였다.

3.2 입사각(θ°)과 길이비(R_L)에 따른 안전율의 변화

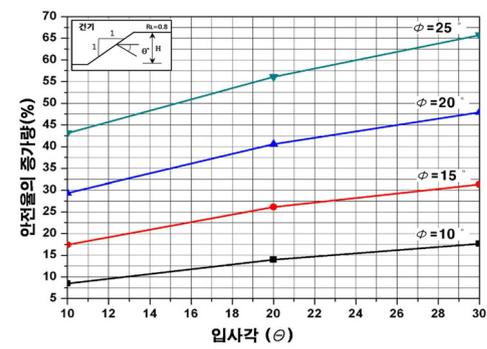
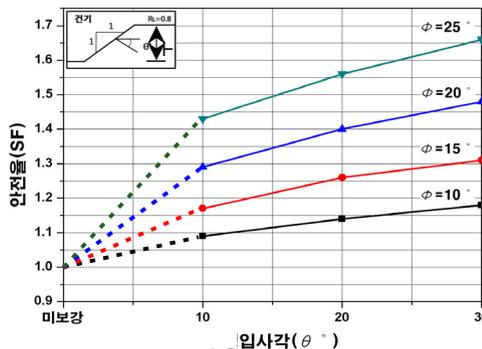
미보강시 안전율 1.0에서 입사각과 길이비를 변화하였을 때, 내부마찰각 별로 안전율의 변화를 표시하였다. 본 연구에서는 입사각변화 해석시 미보강에서 10° 까지, 길이비변화 해석시 미보강에서 0.6까지 변화시켰을 때의 해석은 포함하지 않기 때문에 점선으로 표시하였으며 입사각조건은 $10^\circ \sim 30^\circ$, 길이비 조건은 0.6~1.0에서의 안전율 변화를 실선으로 표시하였다.



[그림 4] 입사각 조절 1:1건기 $\phi = 15^\circ$ (좌), 1:1우기 $\phi = 20^\circ$ (우)의 해석결과



[그림 5] 길이비 조건 1:1건기 $\phi = 15^\circ$ (좌), 1:1우기 $\phi = 20^\circ$ (우)의 해석결과



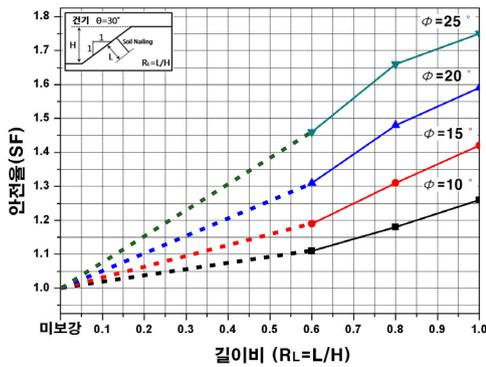
[그림 6] 미보강시 안전율=1.0 상태에서 입사각 조절시 안전율의 변화

Soil Nail설치시 안전율의 증가를 알아보기 위하여 내부마찰각 별로 안전율의 변화를 분석한 결과 동일한 안정수(c/rH)에 내부마찰각만 다른 지반조건에서 내부마찰각이 클수록 안전율이 크게 증가하며 입사각과 길이비가 증가할수록 안전율이 증가되는 것으로 분석된다.

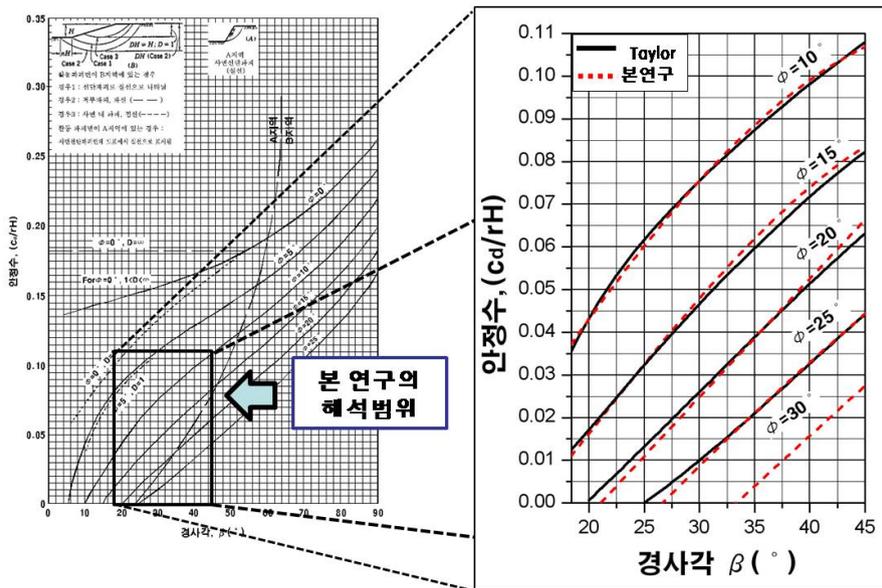
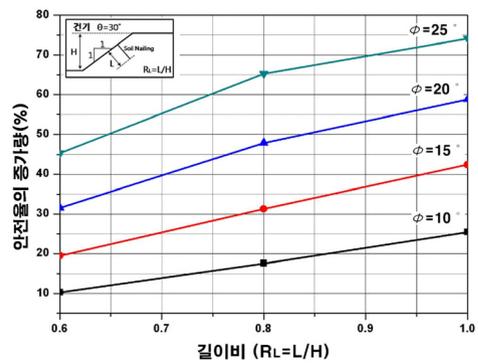
본 연구에서 가정한 최대 입사각 30°에서 가장 큰 안전율의 증가를 보이고 있으며 길이비 역시 최대 길이비

1.0에서 가장 큰 안전율의 증가를 보이고 있다.

입사각과 길이비를 계속해서 증가할 경우 안전율은 감소할 것으로 보이지만 이는 사면경사와 미보강상태에서 파괴면과 관계있을 것으로 생각되며 최대안전율에 대한 최적의 입사각과 길이비 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.



[그림 7] 미보강시 안전율=1.0 상태에서 길이비 조절시 안전율의 변화



[그림 8] Bishop법을 사용해 정리한 도표와 Taylor 도표의 비교

3. Soil Nailing보강사면 설계도표

Soil Nailing 보강사면 설계도표에 대한 검증은 위하여 미보강 사면에 대한 건기시 안정도표를 만들어 기존의 Taylor도표와 비교하였다. 비교한 결과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 같은 방법으로 계산없이 단순균질 토사사면의 지반물성치와 기울기를 이용하여 보강필요 여부를 알고자 할 경우 건기시 1.5, 우기시 1.2를 만족여부를 손쉽게 판단할 수 있는 보강기준 도표를 제안하며 Soil Nailing 공법을 적용하고자 할 때 사용할 수 있는 Soil Nailing 보강 설계도표를 제안한다.

안전율 1에 기준한 기존 도표에서 건기상태 안전율 1.5에 기준, 우기상태에서 안전율 1.2에 기준한 도표를 정

리하면 그림 9와 같다. 그림 9는 직접적인 안전율의 계산 보다는 내부마찰각, 사면경사와 안정수를 알고 있을 때 보강이 필요한지 여부를 손쉽게 알 수 있다. 만약 어떠한 사면의 내부마찰각이 $\phi = 10^\circ$ 일 경우 $\phi = 10^\circ$ 선을 기준으로 하단에 사면경사에 대한 안정수가 존재한다면 허용안전율을 만족하지 못하는 것이므로 보강이 필요한 것이 되며 $\phi = 10^\circ$ 선보다 상단에 있을 경우 허용안전율을 만족하고 있는 상태임을 예측할 수 있다.

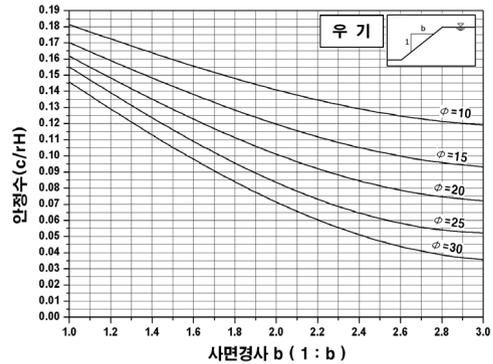
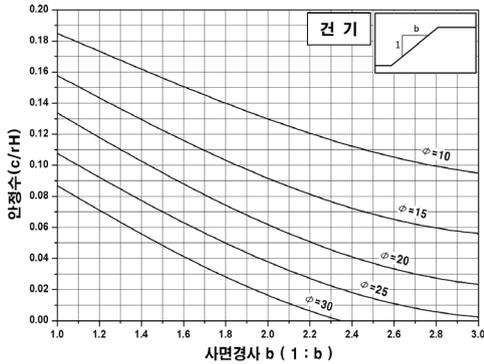
Soil Nail보강에 대한 안전율의 증가는 사면경사, 지반정수에 따라 다르게 나타났다. 본 연구에서는 지반정수를 알 경우 10m높이에 대한 1:1경사, 1:1.5경사, 1:2경사를 갖는 토사사면에서의 Soil Nailing보강설계도표를 제안한다. 건기상태SF=1.5, 우기상태 SF=1.2를 기준으로 정리

한 미보강선을 기준선으로 할 때 입사각과 길이비의 변화에 대하여 기준선이 변화하는 것을 나타냈다.

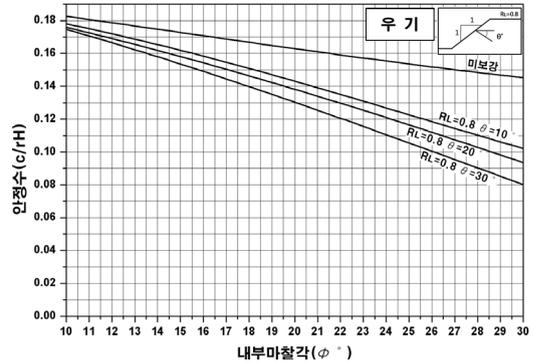
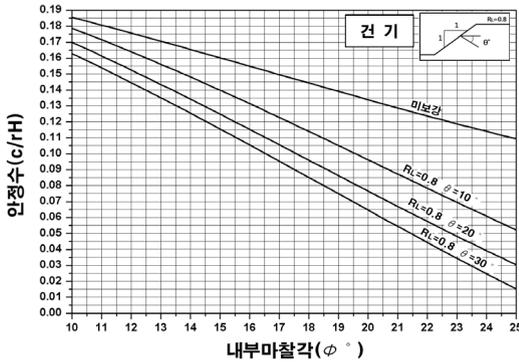
3.2 네일 입사각에 대한 보강설계 도표

Soil Nailing보강에서 입사각이 클수록 설계기준이 되는 안전율선(건기상태 SF=1.5, 우기상태 SF=1.2)이 점점 아래로 내려가는 것을 알 수 있다. 이는 미보강시보다 좀

더 작은 내부마찰각과 안정수로도 설계안전율을 만족할 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 사면경사가 완만해질수록 기준선의 하향 폭이 좁아지는 것으로 해석되는 결과를 볼 때 사면경사가 1:1사면보다 완만할 수록 Soil Nailing보강 효과가 감소하는 것으로 예측되며 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.



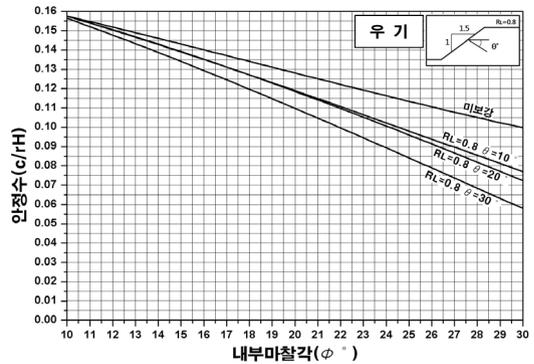
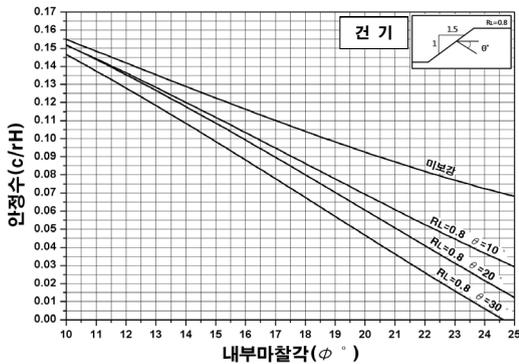
[그림 9] 보강필요여부를 판단할 수 있는 도표 (건기SF=1.5, 우기SF=1.2)



입사각변화 건기시 안전율 1.5

입사각변화 우기시 안전율 1.2

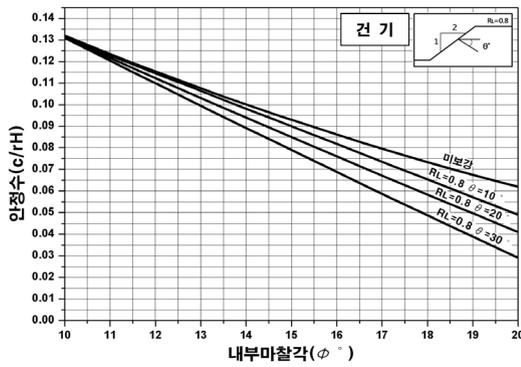
[그림 10] 1:1사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(길이비 0.8조건)



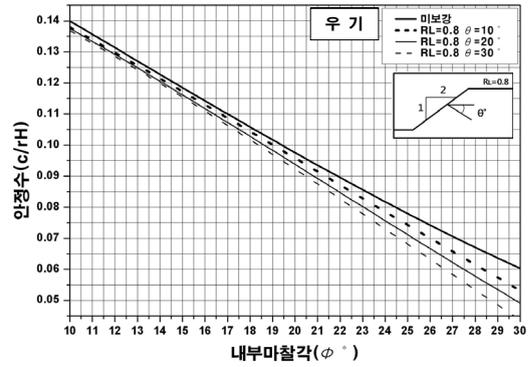
입사각변화 건기시 안전율 1.5

입사각변화 우기시 안전율 1.2

[그림 11] 1:1.5사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(길이비 0.8조건)

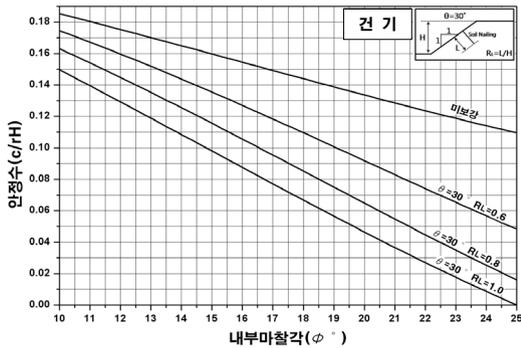


입사각변화 건기시 안전율 1.5

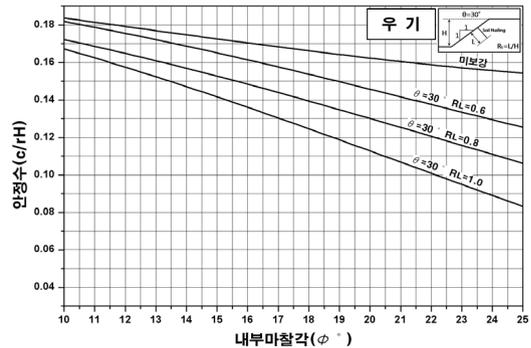


입사각변화 우기시 안전율 1.2

[그림 12] 1:2사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(길이비 0.8조건)

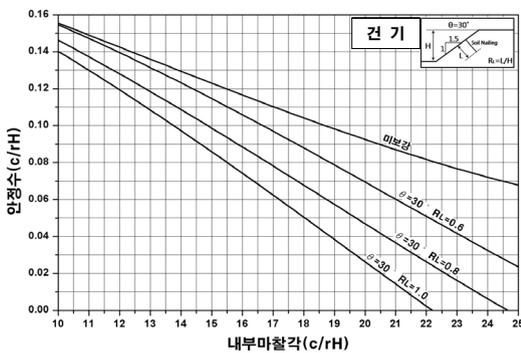


길이비변화 건기시 안전율 1.5

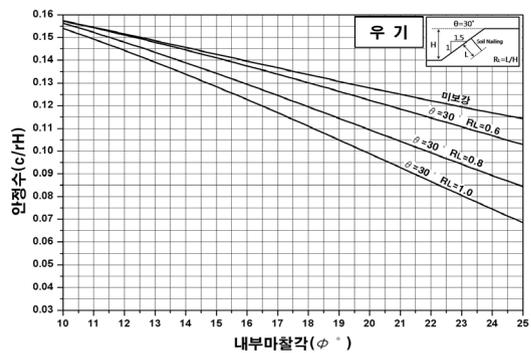


길이비변화 우기시 안전율 1.2

[그림 13] 1:1사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(입사각 30도 조건)



길이비변화 건기시 안전율 1.5



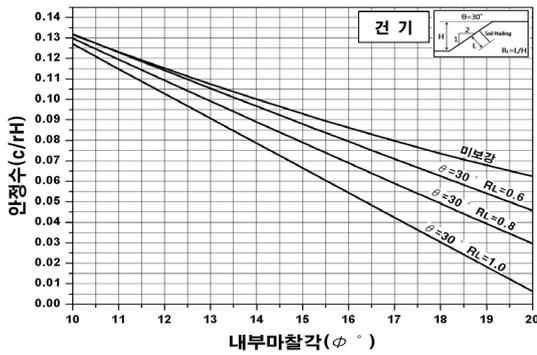
길이비변화 우기시 안전율 1.2

[그림 14] 1:1.5사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(입사각 30도 조건)

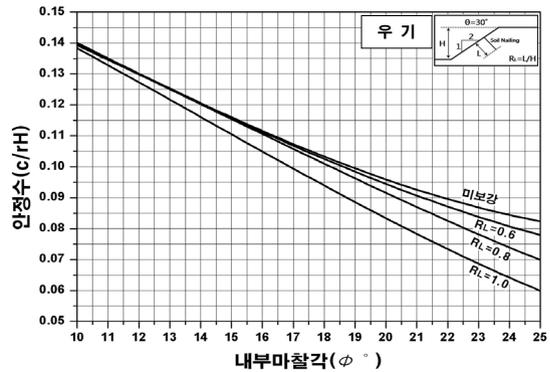
3.2 네일 길이비에 대한 보강 도표

모든 조건이 동일하고 Soil Nail의 길이비만 증가할 때에도 미보강기준선이 점점 하향하고 있다. 위의 Soil Nailing보강 설계도표를 활용한다면 지반정수와 사면경사만으로 보강필요여부를 알 수 있을 뿐만 아니라 내부

마찰각과 안정수를 이용하여 해당 사면을 점으로 표시한다면 점의 위치와 기준선의 위치를 고려해 신속히 경제적인 Soil Nail의 입사각과 길이비를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.



길이비변화 건기시 안전율 1.5



길이비변화 우기시 안전율 1.2

[그림 15] 1:2사면의 Soil Nailing 보강 설계도표(입사각 30도 조건)

4. 결론

본 연구에서는 Soil Nailing보강 사면설계도표를 제안 하였다. 균질한 단순 토사사면을 대상으로 하여 Soil Nailing공법과 한계평형해석을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Soil Nailing보강 후 안전율의 증가는 내부마찰각 별로 다르게 나오며 안전율이 같더라도 내부마찰각에 따라서 안전율의 변화량은 다르게 나타난다.
- (2) 입사각과 길이비를 계속해서 증가할 경우 안전율은 증가하다가 감소 할 것으로 보이지만 이는 사면경사와 미보강상태에서 파괴면과 관계있을 것으로 생각되며 최대안전율에 대한 최적의 입사각과 길이비 대한 연구가 좀 더 필요할 것으로 판단된다.
- (3) Bishop법을 이용하여 기존의 Taylor도표와 계산법이 동일한 안정도표로 나타낼 수 있으며 이를 비교한결과 유사한 도표를 얻을 수 있었다.
- (4) 사면경사가 완만해 질수록 Soil Nailing보강 효과, 즉 안전율의 증가량이 감소하는 것으로 예측되며 이를 현장에 작용하기 위한 실험적인 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 전성근, “단계별 굴착시 쏘일네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력 분석 한국지반공학회논문집” Vol.15 No.6, 1999.
 [2] 김홍택 강인규 권영호 김찬동 “압력분사 그라우팅 실내모형실험 유효경 쏘일네일” 대한토목학회 논문집 Vol.22 No.2-C, 2002.

[3] 천병식 김원철 윤창기 “유한요소해석에 의한 쏘일네일링의 네일 경사각의 영향에 관한 연구” 한국지반공학회 논문집 Vol.20 No.6, 2004.
 [4] 김종민, “역학적으로 엄밀한 사면안정도표의 제안”, 한국지반공학회논문집, 제20권 1호, pp.121-129, 2004.
 [5] 이혁진 고희선 한용희 김홍택 “FRP 쏘일네일링 시스템 제거식 쏘일네일링 시스템 수치해석” 대한토목학회 논문집 Vol.26 No.6C, 2006.
 [6] Cousins, B. F., “Stability chart for simple earth slopes”, Proc. ASCE J.Geotech. Engineering Div. Vol. 104. NO. GT2. February, pp.267-270. 1978.
 [7] Schlosser F., Recommendations Clouterre/Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Report No. FHWA-SA-93-026. 1991.
 [8] H. (Joanna) Chen and S. H. Liu, "Slope failure characteristics and stabilization methods", Can. Geotech. J. 44, pp.377-391, 2007.
 [9] Schlosser, F., “Behaviour and Design of Soil Nailing”, Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, Thailand, pp.399-413, 1982.
 [10] Shen, C.K., Bang, S., and Herrmann, L.R., “Ground Movement Analysis of an Earth Support System”, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.107, GT12., pp.512-374, 1981.
 [11] Juran, I. Baudrand, G. Farrag, K. Elias, V., “Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures” Journal of the Geotechnical Engineering vol. 116, GT1., pp.54-73 , 1990.
 [12] Guilloux, A. and Schlosser, F., “Soil Nailing : Practical Applications”, Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, Thailand, pp.389-397, 1982.

- [13] Stocker, M. F., Korber, G. W., Gässler, G. and Gudehus, G., "Soil Nailing", C. R. Coll. Int. Reinforcement Des Sois. Paris, pp.469-474, 1979.
-

김 학 문(Hak-Moon Kim)

[정회원]



- 1981년 9월 : (영국) Sheffield 대학교 (공학석사)
- 1985년 6월 : (영국) London 대학교 (공학박사)
- 1976년 12월 ~ 1980년 12월 : 대림 Engineering Co. 과장
- 1985년 4월 ~ 1988년 2월 : ICOS - INC.(KOREA) 기술고문
- 1988년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

도심지굴착과 정보화시공, 기초공학, 사면안정, 터널공학

장 경 준(Kyung-Jun Jang)

[정회원]



- 2003년 2월 : 단국대학교 단국대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 단국대학교 단국대학원 토목환경공학과 (박사수료)

<관심분야>

도심지굴착과 정보화시공, 사면안정, 기초공학

서 진 원(Jin-Won Seo)

[정회원]



- 2007년 2월 : 단국대학교 단국대학원 토목환경공학과 (공학석사)

<관심분야>

사면안정, 도심지굴착과 정보화시공