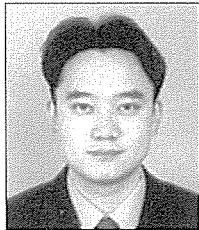


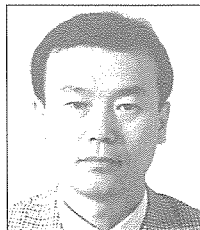
상향식 쏘일네일 공법의 안정성 평가에 관한 연구



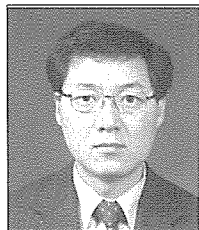
(주)아이콘텍 ENC 기술이사
토질및기초기술사
오 중 근



(주)아이콘텍 ENC 기술연구소 책임연구원
정 중 기



대진대학교 건설시스템공학과 교수
이 강 일



대림산업(주) 기술연구소 차장
송 치 용

1. 개요

현재 국내에서 사용되어지는 쏘일네일은 하향식의 시공만이 이루어지고 있다. 일반적으로 쏘일네일 설계시 지반강도 정수, 사면의 기울기, 그라우트와 원지반의 마찰력 등만을 주로 고려하고 있으며, 네일의 설치각도에 대한 민감성은 다루어지지 않고 있다. 따라서, 위에서 언급한 설계 변수 외에 최적의 네일 설치각도를 도출한다면 기술적인 측면에서 보다 완벽한 설계를 이룰 수 있다.

또한, 쏘일네일과 가상 파괴면과의 교차각도를 최적화 시킴으로서 전체적인 사면의 안정성 증대를 유도함으로써 기술적인 발전과 보다 합리적인 설계가 이루어져 사면 안정을 위한 보강기술의 발달을 도모할 수 있다.

이에 네일의 설치각도를 하향으로만 국한하지 않고, 상향으로도 적용하여 기존 쏘일네일 및 보강공법 등에 대한 적용성을 검증해보고자 하였다.

2. 상향식 쏘일네일의 이론적 배경

현재까지 국내에 보강재의 상향식 설치각도에 대한 문헌과 배수를 고려한 설계 자료는 없는 실정으로 자료수집을 하는데에 한계가 있는 것이 사실이다. 더욱이 국외의 경우도 이론적인 문헌 발표 사례만이 있을 뿐이었다.

문헌을 발표한 사람은 이스탄불에 위치한 Bogazici University의 Prof. Dr. Erol Güler와 Dr. Cemal F. Bozkurt 이며, 연구 제목은 『The Effect of upward nail inclination to the Stability of Soil Nail structures』이다. 이 연구에서는 유한요소해석과 한계평형해석 프로그램인 Talren을 이용하여 비교 분석하였으며, 실제 현장 계측을 통해 검증한 것으로 나타났다.

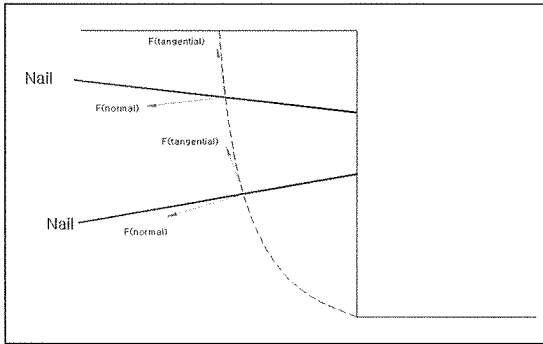


그림 1. 네일에 작용하는 인장력 개요도

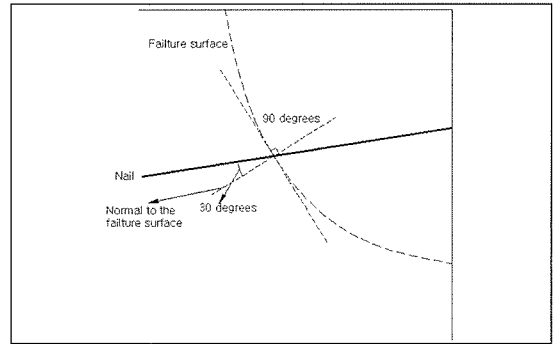


그림 2. 네일의 효율적인 설치각도(Jewell, 1980)

구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

사면의 파괴를 유도하는 주요인으로는 토체의 자중과 상재하중이라 할 수 있다. 그와 반면에 파괴를 저지하려는 힘은 흙의 전단강도이다. 그러므로 네일의 설치는 흙의 전단강도를 증대시키는 것이며 네일에 작용하는 힘을 그림 1에 나타나 있듯이 크게 수직방향($F_{normal} \cdot \tan \phi$)과 접선방향($F_{tangential}$)으로 나눌 수 있다.

Jewell(1980)은 최적의 네일의 설치각도는 임계파괴면과 접선사이의 약 30° 라고 제시한 바 있다. 또한 Shafiee(1986)는 유한요소해석을 통하여 네일의 설치각도가 안정해석 시 하나의 함수로 작용함을 제시하였다. 네일의 적용은 파괴를 유도하려고 하는 힘에 대한 저항하려고 하는 힘을 증대시키는 것이다. 즉, $F_{normal} \cdot \tan \phi$ 과 $F_{tangential}$ 의 합을 극대화시키는 것을 말한다.

$$\text{Factor of Safety} = \frac{\text{resisting forces}}{\text{driving forces}} \quad (3.1)$$

$$F_s = \frac{C \cdot L + (W^* \cos \theta + T^* \sin \theta) \cdot \tan \phi}{W^* \sin \theta - T^* \cos \theta} \quad (3.2)$$

$$F_s = \frac{C \cdot \frac{H}{\sin \theta} + \frac{H^2}{2 \cdot \tan \theta} \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi + T^* \cdot \sin \theta \cdot \tan \phi}{\frac{H^2}{2 \tan \theta} \cdot \gamma \cdot \sin \theta - T^* \cos \theta} \quad (3.3)$$

여기서, L = 파괴면의 길이

W = 파괴면 내의 토체의 자중

c = 흙의 점착력

ϕ = 흙의 내부 마찰각

T = 네일에 작용하는 인장력

β = 파괴면에 대한 네일의 각도

H = 벽체의 높이

γ = 흙의 단위중량

위의 인자들 중 대표적인 것은 흙의 점착력, 내부마찰각 그리고 네일에 작용하는 인장력이다. 가장 큰 안전율을 얻기 위해서는 식 (3.3)에 파괴면에 대한 네일의 각도 (β) 대하여 편미분을 취한 후 최적의 β 각도를 구하기 위해서 $d(F_s)/d\beta=0$ 으로 한다.

$$\frac{d(F_s)}{d\beta} = \frac{\frac{T \cdot H^2 \cdot \tan \phi \cdot \gamma_{soil}}{2 \cdot \tan \theta} (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) - \frac{T \cdot \sin^2 \beta \cdot c \cdot H}{\sin \theta} - T^* \cdot \tan \phi}{\frac{H^2 \cdot \gamma}{2 \cdot \tan \theta} \cdot \sin \theta - T^* \cos \beta} \quad (3.4)$$

위식을 이용한 계산의 단순성을 위하여 하나의 네일만 설치한 경우를 예를 들어 안전율을 산정하고자한다. 네일 간격은 1m, $\gamma_{soil} = 19\text{KN/m}^3$, $\theta = 45 + \phi/2$, 그리고 벽체의

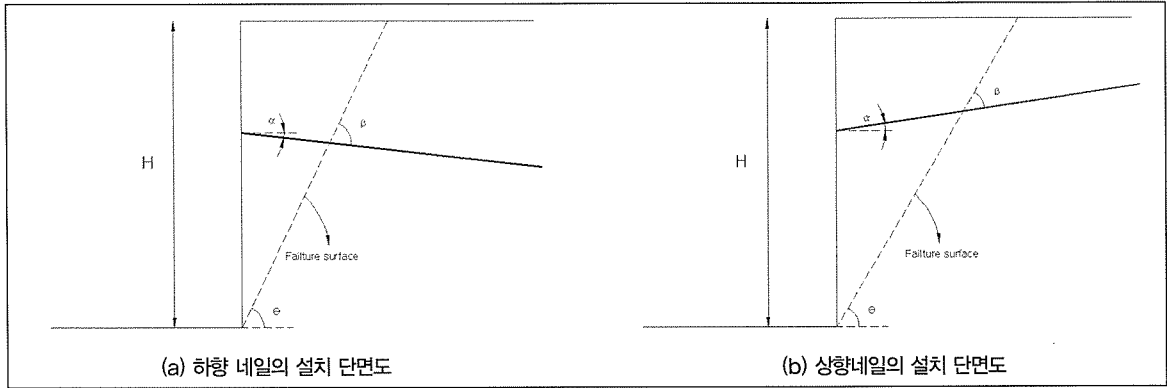


그림 3. 네일의 설치 단면도

표 1. c, φ, T 값에 따른 네일의 최적 각도

c	φ	T	β	α	Fs
cohesion (kN/m ²)	internal friction angle(°)	nail tension (kN)	optimum nail inclination angle(°)	angle of nail with respect to horizontal(°)(α = β - θ)	factor of safety
5	25	20	40	-17.5	0.57
5	25	40	36	-21.5	0.67
5	35	20	45	-17.5	0.69
5	35	40	43	-19.5	0.85
50	10	20	5	-45	2.15
50	10	40	4	-46	2.39

표 2. 네일의 설치각도에 따른 안전율의 비교

c (kN/m ²)	φ (°)	Fs for nails inclined below horizontal(Fs1)	Fs for nails inclined above horizontal(Fs2)	% difference (Fs2-Fs1)/(Fs1)
5	20	0.68	0.77	13%
5	30	0.94	1.07	13%
100	10	4.99	5.66	13%
150	10	7.41	8.41	13%

높이는 6m이다. 계산된 결과는 다음 표 1과 같다.

위와 같은 변수값으로 Talren 프로그램을 이용하여 하향 15°와 상향 5°의 네일 경사각을 각각 비교 분석한 결과는 다음 표 2와 같다.

표 2에 나타나 있듯이 상향 네일이 하향 네일보다 13%의 안전율이 증가되었다. 즉, 하향의 네일 설치각도보다 상향의 네일의 설치각도가 전체적인 안정성에 있어서 우수하다는 것을 말한다.

3. 상향식 쏘일네일의 한계평행해석 프로그램을 이용한 안정해석

한계평형 해석프로그램인 Slide를 이용하여 임의의 검토단면에 대해 쏘일네일의 설치각도에 따른 안정성 평가를 실시하였다. 검토단면은 그림 4과 같으며, 안정해석에 적용되는 지반의 강도정수는 다음 표 3과 같다.

안정해석에 앞서 언급되어야 할 사항으로, Talren 및

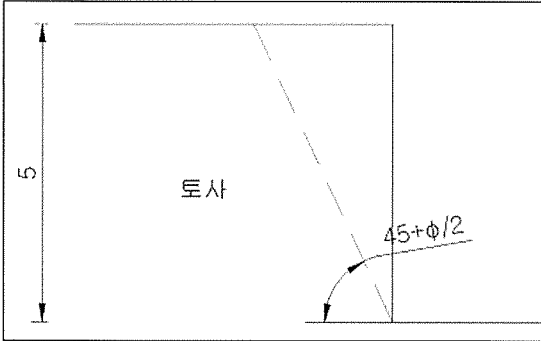


그림 4. 안정해석 검토단면

표 3. 적용지반 강도정수

구분	단위중량(kN/m³)	점착력(kN/m²)	내부마찰각(°)
토사	19	5	20

Slide 등 범용해석프로그램은 안전을 해석시 최소안전율을 찾도록 되어있기 때문에 보강전과 보강후의 예상활동면을 살펴보면 보강 후의 예상활동면이 사면 심층부로 밀려나거나 보강이 이루어지지 않은 곳에서 나타날 수 있다는 것을 알 수 있다(그림 5~그림 6 참조). 이러한 현상은 Talren 및 Slide의 많은 프로그램상에서도 발생한다. 이는 안정검토시 내적검토, 외적검토, 복합검토 중 가장 안전율이 최소인 것을 나타낸다고 말할 수 있다. 그러나 이로 인해 사면안정해석에 전문적인 지식이 없거나 프로그램에 대한 이해가 부족한 사용자는 이러한 해석결과에 맹신하여 설계시 오류를 범할 수 있으므로 충분한 주의가 요구된다. 본 해석에서는 보강전 예상활동면을 프로그램을 통해 일정 범위를 산정한 후 고정시킨 상태에서 상향식 및 하향식 등의 네일 설치 각도를 변화시켜 안전율을 비교하였다(그림 7~그림 18 참조). 이러한 방법은 전산프로그램의 도입 전 설계자가 수계산으로 예상활동면을 구한 후 보강재의 정착장 및 길이를 산정하는 방법과 동일하다고 할 수 있다.

Slide 프로그램의 연산방법을 Bishop의 간편법과 Janbu의 간편법으로 하여 해석을 실시하였으며, 설치각

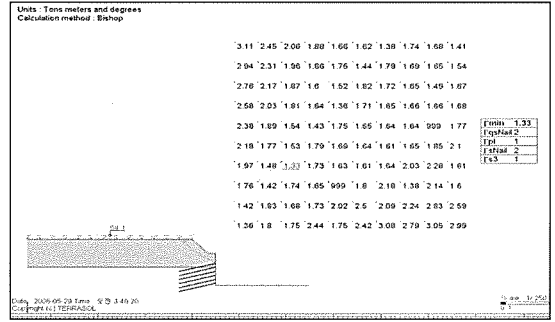


그림 5. 보강후(건기시) 예상활동면(Talren)

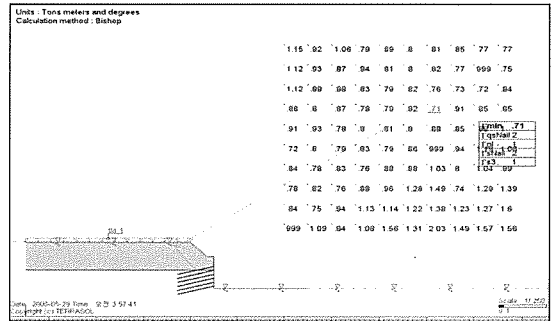


그림 6. 보강후(우기시) 예상활동면(Talren)

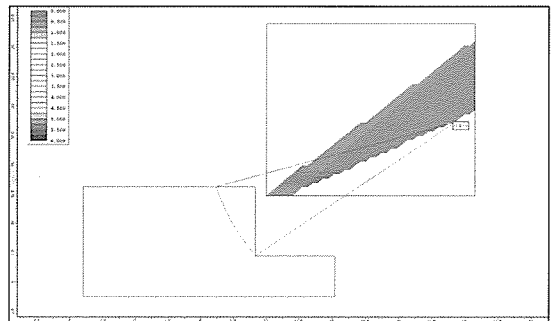


그림 7. 보강전 건기(Fs=0.41)

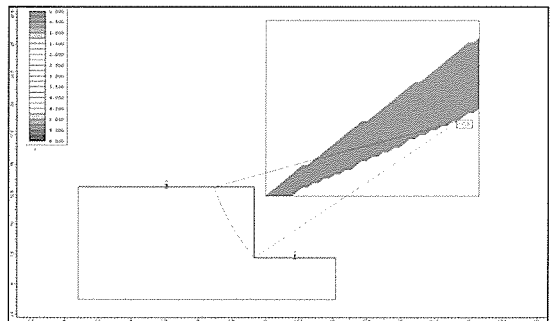


그림 8. 보강전 우기(Fs=0.03)

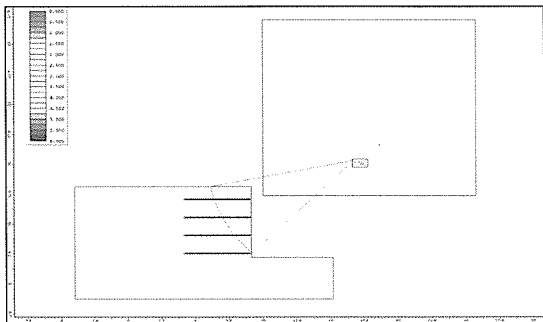


그림 9. 수평 보강후 건기($F_s=1.56$)

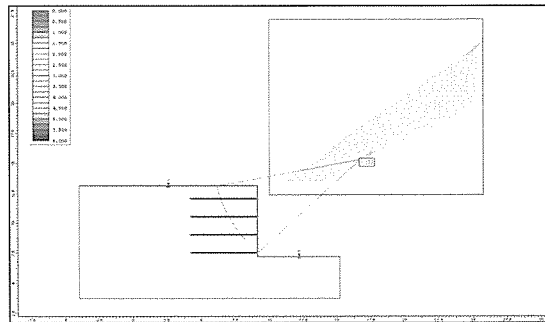


그림 10. 수평 보강후 우기($F_s=1.22$)

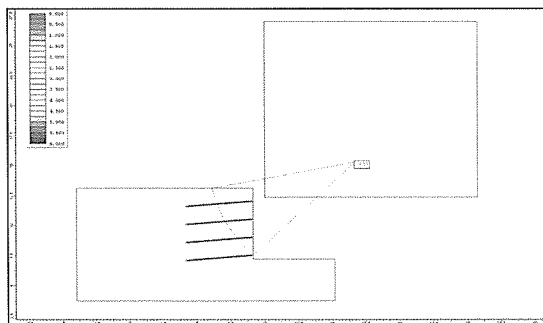


그림 11. 하향5° 보강후 건기($F_s=1.53$)

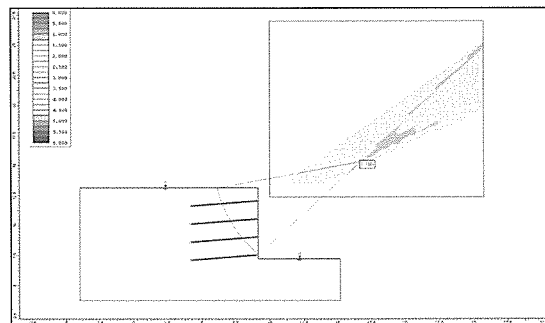


그림 12. 하향5° 보강후 우기($F_s=1.18$)

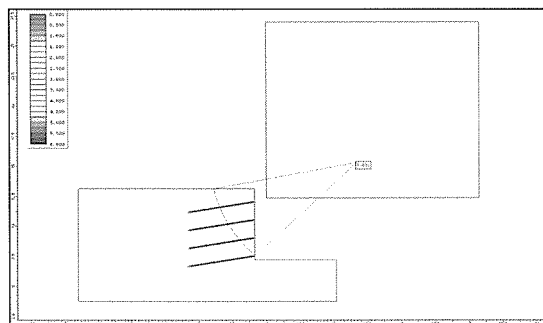


그림 13. 하향10° 보강후 건기($F_s=1.48$)

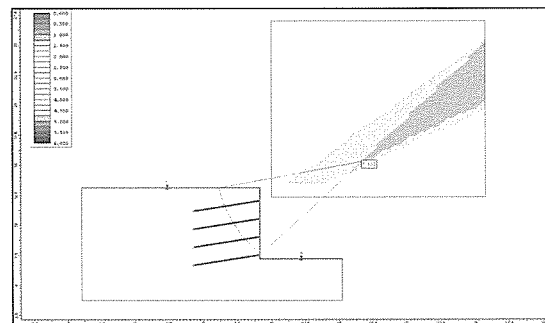


그림 14. 하향10° 보강후 우기($F_s=1.13$)

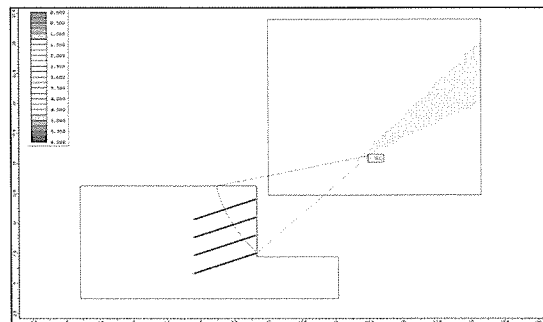


그림 15. 하향20° 보강후 건기($F_s=1.36$)

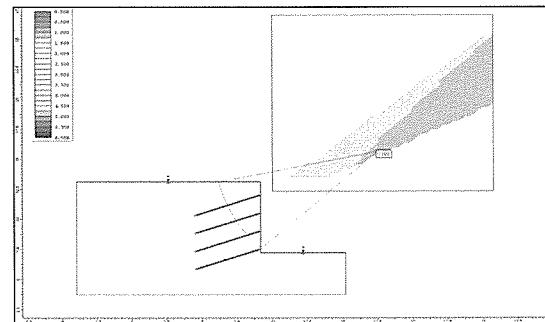


그림 16. 하향20° 보강후 우기($F_s=0.98$)

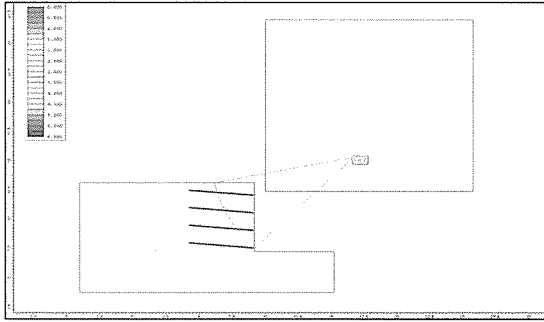


그림 17. 상향5° 보강후 건기(Fs=1.61)

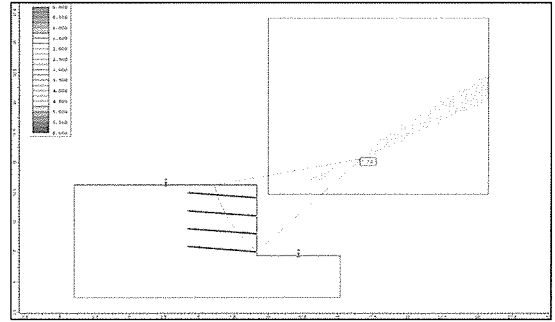


그림 18. 상향5° 보강후 우기(Fs=1.29)

표 4. 설치각도에 따른 해석결과

구분	무보강	하향20°	하향10°	하향 5°	수평	상향5°
건기시	0.41	1.36	1.48	1.53	1.56	1.61
우기시	0.03	0.98	1.13	1.18	1.22	1.29

도에 따른 안정해석결과를 정리하면 다음 표 4와 같다.

표 4의 해석결과를 살펴보면 상향 5°일 경우의 안전율이 건기시 1.61, 우기시 1.29로 하향 20°의 건기시 1.36, 우기시 0.98에 비해 건기시에는 약 18%, 우기시에는 약 31%정도 안전율이 상승한 것으로 나타났다.

4. 결론

현재 국내외적으로 쏘일네일링 공법의 적용범위가 광범위해지면서, 쏘일네일의 그라우팅 주입방법 및 네일의 성능 향상 등의 기술개발이 활성화되어가고 있는 실정이다. 더욱이 쏘일네일의 설계시 지반강도 정수, 사면의 기울기, 그라우트와 원지반의 마찰력 등이 주로 고려되어지고 있으나, 네일의 설치각도에 대한 민감성은 다루어지지 않고 있다. 이에 본 연구는 네일의 설치각도에 따른 안정해석을 실시하여 쏘일네일과 예상활동면의 교차각도를 최적화시킴으로 전체 안정성 증대를 유도하기 위해 진행된 것으로,

가. 안정해석시 지반을 토사로 가정하였으며, 적용된

강도정수는 단위중량(γt)=19kN/m³, 점착력(c)=5kN/m², 내부마찰각(ϕ) = 20°이다.

나. 해석시 임계활동면은 무보강시의 것을 기준으로 쏘일네일 보강시에도 동일하게 적용하였다.

다. 해석결과 네일의 설치각도가 하향 20°일 경우 안전율은 건기시 1.36, 우기시 0.98이며, 하향 10° 건기시 1.48, 우기시 1.13, 하향 5° 건기시 1.53, 우기시 1.18, 수평 건기시 1.56, 우기시 1.22, 상향 5° 건기시 1.61, 우기시 1.29로 나타났다.

라. 해석결과 네일의 설치각도가 상향으로 갈수록 안전율이 증가되는 경향을 나타내고 있으며, 하향 20°에 비해 상향 5°의 경우 건기시는 18%, 우기시에는 31%정도로 안전율이 상승되었다.

상향식 쏘일네일은 그라우팅의 역류와 천공장비 등의 제약으로 인해 시공성이 떨어져 국내외적으로 널리 활성화되지 못하고 있는 실정이며, 더욱이 연구수행도 미비한 것이 사실이나, 국내 쏘일네일의 다양한 기술 등과 견주어 충분히 독창적이고, 개발의 여지가 많은 것도 사실이므로 보다 적극적인 연구개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

[참고문헌]

1. (주)공인기술(2003) "가압 그라우팅을 이용한 쏘일네일링 공법" 한국지반공학회 지반공학회지 Vol.18, No.13
2003년 1월, pp. 26-28
2. 김두준, "사면해석에 있어서 토성치의 최정추정에 관한 연구" 인덕전문대학 토목과 부교수
3. 김상규, "강우로 인한 절취사면의 불안정" 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수.
4. 김영목, "강우시 도로 성토사면의 불안정성 해석 및 대책" 대전산업대학교 토목공학부 부교수.
5. 김영민, "강도 감소법에 의한 지하수위를 고려한 FEM 사면안정해석" 전주대학교 토목환경공학과 부교수.
6. 김준모, "사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수 영향의 완전 연동된 수리지질역학적 수치 해석" 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 부교수.
7. 김홍택, "무한사면에서의 강우시 간극수압의 변화에 관한 연구" 홍익대학교 토목공학과 교수.
8. 박시삼(2002), "프리텐션 쏘일네일링 시스템의 적용성 및 안정해석에 관한 연구", 박사학위논문, 홍익대학교.
9. 이승호, "강원지역 도로절개사면의 파괴유형분석 및 대책에 관한 연구" 상지대학교 토목공학과 교수.
10. 이승래, "유한요소법을 이용한 지하수 흐름을 갖는 사면의 안정성 해석" 한국과학기술원 교수.
11. 이인모, "풍화토 사면에서의 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구" 고려대학교 토목환경공학과 부교수.
12. 정상섭, "강우시 국내 불포화 풍화토 사면에서의 습윤영향 분석" 연세대학교 토목환경공학부 교수
13. 홍원표, "강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측" 중앙대학교 부교수.
14. Ali R. Zolfaghari "Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis" Department of Architecture & Civil Engineering, UK.
15. B. Kentli, "Assessment of rock slope stability for a segment of the Ankara-ozant i motorway, Turkey" Department of Geological Engineering, Middle East Technical University, Turkey.
16. B.S. Bak i r, "Analysis of a highway embankment failure associated with the 1999 Du `zce, Turkey earthquake" Department of Civil Engineering, Geotechnical Engineering Division, Middle East Technical University, Turkey.
17. C.L. Liu, "Development of a computer program for inhomogeneous modeling using 3-D BEM with analytical integration and its application to rock slope stability evaluation" Shandong University of Science and Technology, Japan.
18. Cantoni, R., Collotta, T., and Ghionna, V. (1989), "A Design Method for Reticulated Micropile Structures in Sliding Slope", Ground Engineering, May, pp41-47