

사면녹화 보강토공법의 보강재길이 산정에 관한 연구

The Computation of Reinforcement Length of Afforestation Slope

박춘식¹⁾, Sik-Choon Park, 남광온²⁾, Kwang-On Nam, 김종환³⁾, Jong-Hwan Kim, 이수양⁴⁾, Soo-Yang Lee

¹⁾ 창원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Changwon

²⁾ 건안기술원 대표이사, The president of Kun An Engineering

³⁾ 창원대학교 토목공학과 박사과정, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Changwon

⁴⁾ 창원대학교 토목공학과 석사과정, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Changwon

SYNOPSIS : This study the change of the safety factor before and after the reinforcement were compared by performing the parameter research based on the limit equilibrium analysis regarding the same cross section after carrying out the safety factor before the reinforcement on the virtual section in order to observe the change of the safety factor of the slop reinforced with the slope planting reinforced earth, and the variation of the safety factor according to the increase of the length of the reinforcement materials and the change of the slope height was analyzed. As the result, the reinforcement effect was insignificant at no more than 0.6 of L/H, the reinforcement length ratio when the reinforcement length was increased, as the increase of the safety factor was slow comparing with the non-reinforced slope. At 3.0m of the slope height, reinforcement on the slope is not necessary, and at 3.0m to 5.0m of the slope height, the inclination was not influencing at no less than 0.6 of L/H. At 5.0m to 9.0m of the slope height, the safety factor was mostly secured on the slope at 0.8 of L/H and the over-reinforced slope appeared at no less than 1.0 of L/H. Also, the safety factor increased as the slope height increases and the slope gets steeper till 0.8 of L/H, but the slope steepness affects more on the increase of the safety factor than the reinforcement material, as the reinforcing force by the reinforcement material became steady.

Keywords : Limit equilibrium analysis, Reinforcement effect, Reinforcement length ratio, Slope height

1. 서 론

보강토 구조물의 강도증가는 급사면을 가지는 구조물의 축조를 가능하게 하며, 특히 토목섬유로 보강된 구조물은 경제성과 지진에 대한 안정성을 가지고 있어 사용이 증가하고 있는 추세이다. 사면녹화 보강토공법은 보강토공법 중의 하나로 전면의 식생을 통한 친환경적인 공법으로 최근 개발되었으나 매개변수에 따른 안전율의 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사면녹화 보강토가 많이 적용되고 있는 사면기울기인 1:0.6, 1:0.8, 1:1.0, 1:1.2에 대하여 사면높이 3.0m, 5.0m, 7.0m, 9.0m의 해석단면을 가정하여, 가정된 단면에 대하여 한계평형해석에 근거한 사면안정해석 프로그램인 SLOPE/W를 사용하여 무보강시의 안정성 해석을 수행하였으며, 동일 단면에 대하여 사면녹화 보강토로 보강을 한 후에 재해석을 실시하여 안전율의 변화를 살펴보았다. 보강사면의 해석 시에는 사면의 높이와 사면녹화 보강토의 보강길이의 비를 달리하여 해석을 실시하였다.

또한 사면의 파괴형상은 선단활동으로 인한 내부파괴만 발생하는 것으로 가정하였으며, 보강재의 길이에 따른 안전율의 변화를 관찰함으로써 높이별로 적절한 사면녹화 보강토의 보강길이를 제시하고자 하였다.

2. 연구 대상

사면녹화 보강토의 사면기울기는 실제 적용이 많은 1:0.6, 1:0.8, 1:1.0, 1:1.2에 대하여 실시하였으며, 사면의 높이는 3.0m, 5.0m, 7.0m, 9.0m를 가정하였다. 또한 사면녹화 보강토의 보강길이는 사면의 높이(H)와 보강재의 보강길이(L)의 비로 나타내었으며, $L/H =$ 무보강, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2에 대하여 안정해석을 실시하였다. 사면녹화 보강토의 토목섬유의 강도는 6tf를 적용하였으며, 토목섬유 설치간격은 0.5m로 하였다.

보강사면에서의 파괴는 파괴면이 보강재를 통과하는 내부파괴, 파괴면이 보강토체 외부를 통과하는 외부파괴, 보강재층과 보강토체 후미를 동시에 통과하는 복합파괴의 3가지로 대별될 수 있다. 본 연구에서는 사면내의 보강재를 통과하는 복합파괴, 내부파괴에 대하여 해석을 실시하였으며, 안전율 평가 시에는 사면에 설치되어 있는 보강재의 포설길이, 사면의 높이에 따른 안전율의 변화를 살펴보았다.

허용안전율에 대한 기준은 지역과 공사내용에 따라 상이하나 대체로 1.1~1.5 정도를 채택하고 있으며, 성토사면의 경우 성토재의 특성과 성토단면 상태를 비교적 명확하게 추정 가능하므로 1.3을 적용하나 사면녹화보강토의 경우 절토사면의 붕괴부 복구에 사용이 많으므로 건기시 절토사면의 안전기준인 1.5를 적용하였다.

표 1에는 안정해석에 사용된 지반정수를 나타내었으며, 사면하부의 기반층과 성토층으로 구분하였고, 그림 1에는 사면 높이 5.0m에 대한 해석단면을 대표적으로 나타내었다.

표 1. 해석사면의 토질정수

토 층	단위중량(tf/m ³)	집착력(tf/m ²)	내부마찰각 (°)
기반층	2.0	3.0	30.0
성토층	1.7	1.0	25.0

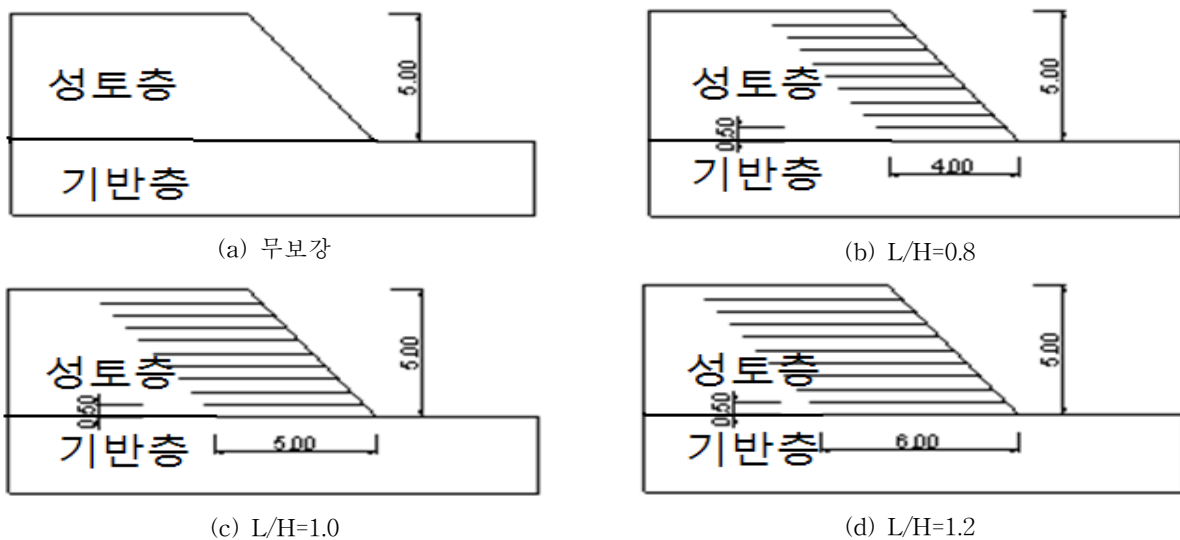


그림 1. 보강길이의 변화에 따른 해석단면 (H=5.0m)

3. 사면녹화 보강토 공법

본 공법은 활동사면에 대해서 일부 절토를 병행하여 성토층 내에 횡방향 저항력이 크고 흙과의 마찰각이 큰 보강재를 넣어 횡방향 변위를 억제하고 성토체 자중으로 외력에 대한 안정성을 확보하는 공법

이다. 보강재가 인장력을 발휘함으로써 일반 사면에서 자연안식각 보다 큰 구배에 대해서도 원하는 현상 구배에 맞추어 성토 할 수 있는 장점이 있다. 사면 보강 공법의 표준 구배는 1:0.5, 1:0.6, 1:0.8, 1:1로서 기존의 보강토 옹벽보다 자연스러운 구배를 줄 수 있으며, 식생토체가 후면 받아하여 녹화됨으로써 자연 친화적인 공법을 가지는 큰 특징이 있다.

3.1 사면녹화 보강토 공법의 기본 개념

성토층 내에 수직하중을 증가시키면 성토 지반은 수평으로 변위를 일으키려 한다. 이때 수평 변위는 흙과 보강재의 마찰력에 의하여 억제되며 보강재가 인장력을 받게 된다. 이러한 상호 작용에 의해 감소된 수평응력의 효과는 내부 마찰각 및 겉보기 점착력의 증가로 볼 수 있다. 성토층 내에 보강재를 넣고 25cm 수직 높이로 다짐을 실시하므로 지반 자체의 밀도 증가와 더불어 수직응력의 증가에 따라 발생한 횡방향 변위를 보강재와 흙과의 마찰력이 억제한다. 이러한 횡방향 변위를 억제함으로써 정지토압 이론에서와 같이 성토체 내부의 토립자가 보강재와의 마찰력에 의하여 완전히 구속되어 마치 지중의 흙이 주변의 흙에 의하여 팽창이 억제된 것과 같으므로 종래의 흙 구조물이 갖는 결속력 부족을 보완한다.

3.2 사면녹화 보강토 공법의 특징

경사면 안정 및 보강 녹화공법으로 불안정한 경사면의 안정성이 입증된 보강 구조물로서 풍화암 및 발파암 등 녹화가 어려운 절토사면 그리고 각종 성토사면의 녹화까지 가능한 신개념의 공법이다.

- (1) 사면 보강의 벽면은 초목, 목본식물 등으로 완성되기 때문에 공사를 한 느낌을 느끼지 못하고 벽면의 경관을 아름답게 조성한다.
- (2) 사면 보강은 경사면 1 : 0.5까지 시공이 가능하다.
- (3) 현장의 흙을 유용토로서 이용하므로 경제적이다.
- (4) 사면 보강 시공법은 작업이 용이하므로 공기단축이 가능하다.
- (5) 내·외곡선, 타원형 또는 어떠한 형태의 곡선도 우수한 시공성으로 시공이 용이하다.
- (6) 시공은 보통 인부로서도 가능하다.
- (7) 부지확보가 용이하다.

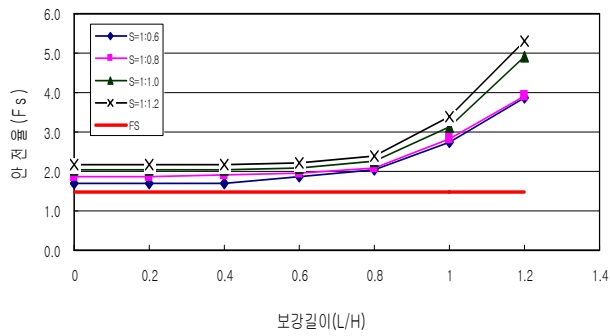
4. 해석결과 및 고찰

4.1 보강길이 변화에 따른 안전을 변화

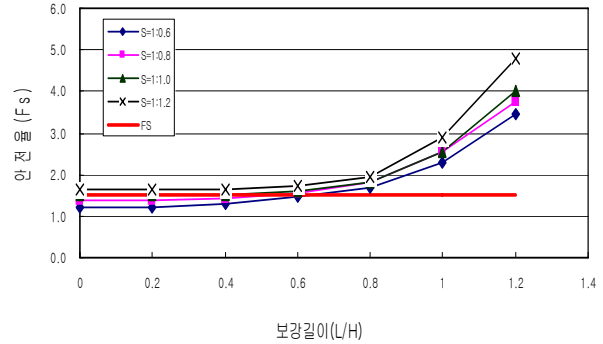
그림 2에서 알 수 있듯이 사면의 안전율은 보강길이 $L/H = 1:0.6$ 까지 보강재가 부담하는 추가적인 인장력의 발현이 없거나 매우 적으므로 완만한 증가를 보이며 보강길이 $L/H=0.8$ 부터 보강재의 인장력 발현이 시작되어 사면의 안전율증가에 영향을 주어 안전율의 증가가 지수곡선의 형태로 증가한다.

사면 높이 3.0m에서는 사면의 기울기에 관계없이 허용안전율 이상의 안전율을 확보 되지만, 사면 높이가 $H=5.0m$ 일 때 사면의 안전율은 $L/H=0.6$, $S=1:0.6$ 에서만 허용안전율 1.5를 만족하지 못하였으며 $L/H=0.8$ 에서는 허용안전율 이상의 안전율을 나타내었다. $H=7.0m$ 일 때 모든 가상단면의 무보강 사면의 안전율이 허용안전율 이하로써 사면의 보강이 필요하며, 보강에 의한 사면의 안전율은 $L/H=0.6$ 일 경우 가상단면 전체에서 허용안전율 1.5를 만족하지 못하였으며, $L/H=0.8$ 에서는 허용안전율 이상의 안전율을 나타내었다. $H=9.0m$ 일 때 사면의 안전율은 $L/H=0.8$ 일 경우 $S=1:0.6$, $S=1:0.8$ 에서 허용안전율 1.5를 만족하지 못하였으며, $L/H=1.0$ 에서는 허용안전율 이상의 안전율을 나타내었다.

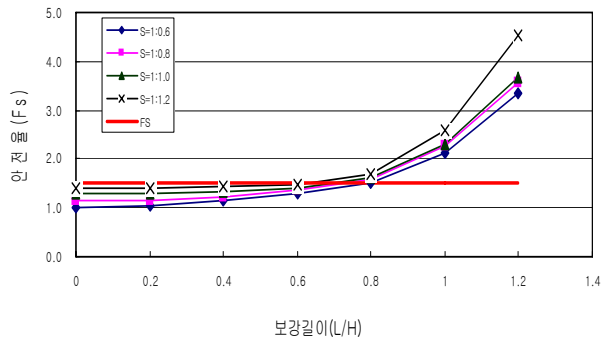
따라서 사면의 높이가 높아지면서 무보강 사면의 안전율은 점차로 낮아지고, 허용안전율을 만족하기 위한 보강길이는 점차 커지는 경향을 보이고 있다.



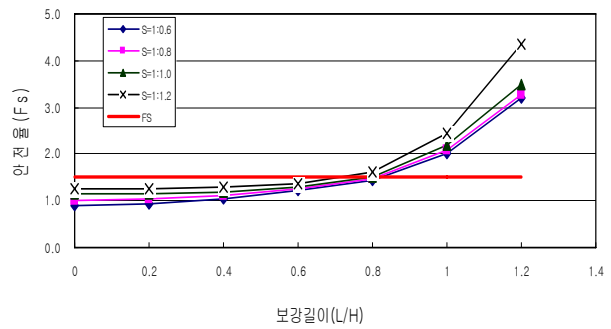
(a) 사면높이(H) = 3.0m



(b) 사면높이(H) = 5.0m



(c) 사면높이(H) = 7.0m

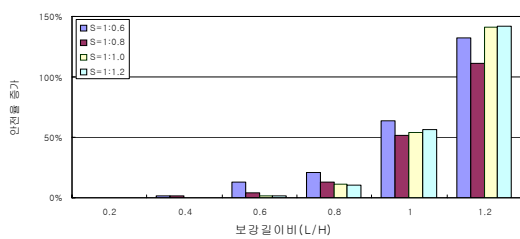


(d) 사면높이(H) = 8.0m

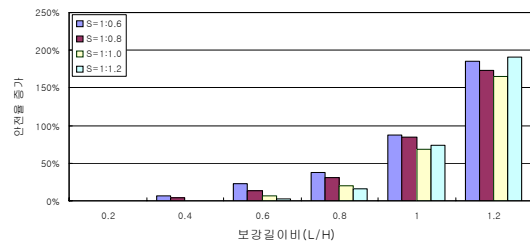
그림 2. 보강길이 변화에 따른 사면 높이별 안전율 변화

4.2 보강길이 변화에 따른 안전율 증가비율

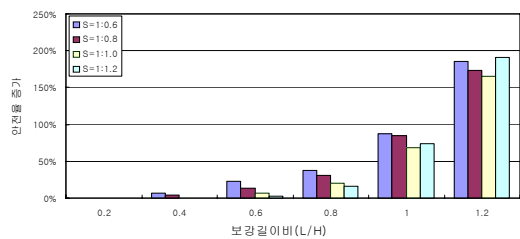
그림 3에 보강길이 변화에 따른 안전율 증가비율을 나타내었다. 보강길이별 안전율도 보강길이 L/H=0.6까지는 완만한 증가를 하다 L/H=0.8 이후 지수곡선의 형태로 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 보강길이 L/H=0.8 과 1.0 사이에서 사면의 기울기와 관계없이 50%이상의 안전율 증가를 보였다. 보강길이 L/H=1.2의 경우 사면높이, 사면기울기별로 다르지만, 111.0~257.8%의 증가된 값을 나타냈다.



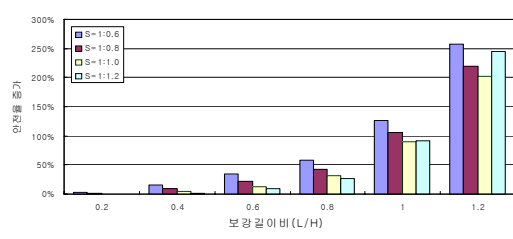
(a) 사면높이(H) = 3.0m



(b) 사면높이(H) = 5.0m



(C) 사면높이(H) = 7.0m

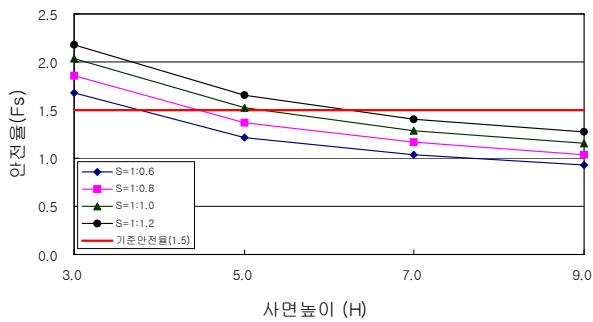


(d) 사면높이(H) = 9.0m

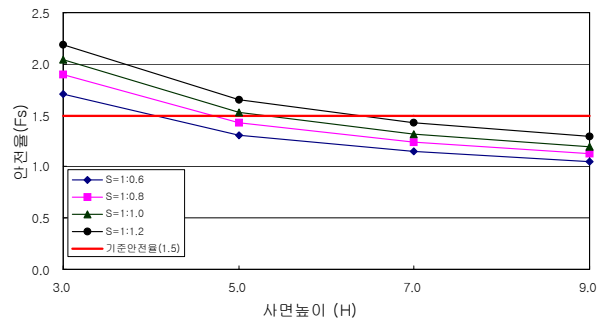
그림 3. 보강길이 변화에 따른 사면 높이별 안전율 증가비율 변화

4.3 보강높이 변화에 따른 안전율 변화

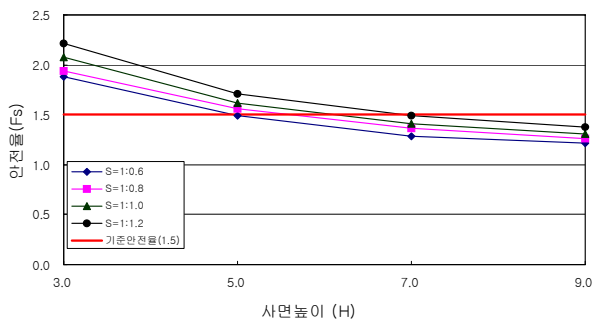
그림 4에 보강높이에 따른 안전율 변화를 나타내었다. 사면의 높이가 높아지면서 사면의 안전율은 감소하는 경향을 보이고 있으며 보강길이 $L/H=0.2$ 일 때 사면 높이별로 무보강 사면의 안전율과 비교하였을 때 보강재를 통과하는 원호활동이 발생하지 않거나 약간 통과하였다. 안전율 증가는 3.6%이하로써 보강재에 의한 안전율 증가효과는 미세하였다. 보강길이 $L/H=0.6$ 에서 사면높이 $H=5.0\text{m}$ 이하, $S=1:0.6$ 의 경우 허용안전율에 안전율이 0.012부족하였으나 사면경사에 영향을 받지 않고 사면녹화 보강토에 의한 안전율 확보가 가능한 보강재 길이라 판단된다. 보강길이 $L/H=0.8$ 일 때 사면 높이 $H=9.0$ 에서 사면경사가 높은 경우를 제외하고 기준안전율을 만족하였다. 보강길이 $L/H=1.0$ 이상은 사면의 높이별로 기준안전율을 이상이 확보되므로 보강길이 $L/H=1.0$ 이상은 과보강으로 판단된다.



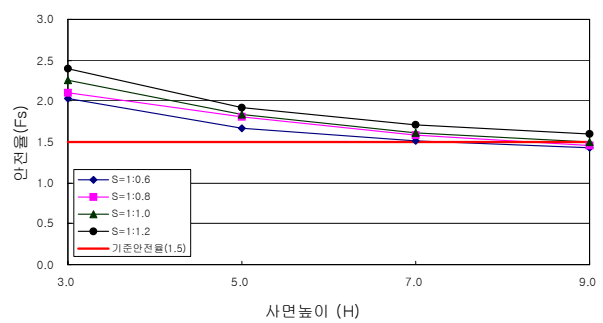
(a) 보강재 길이(L/H) = 0.2



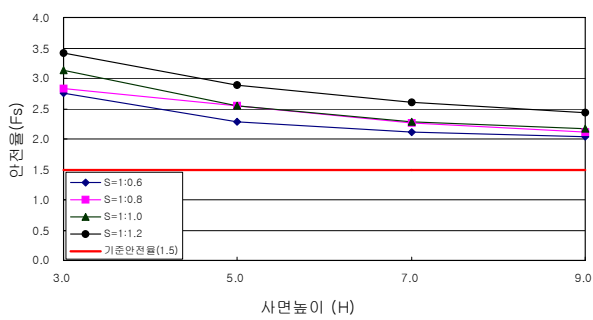
(b) 보강재 길이(L/H) = 0.4



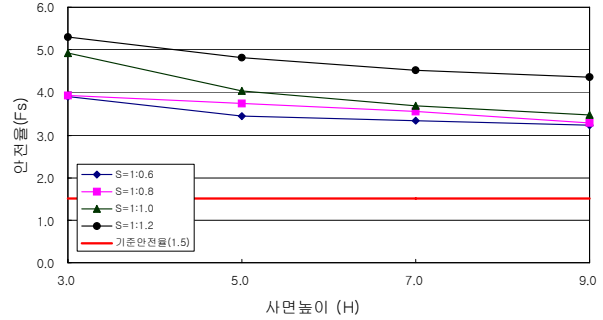
(c) 보강재 길이(L/H) = 0.6



(d) 보강재 길이(L/H) = 0.8



(e) 보강재 길이(L/H) = 1.0



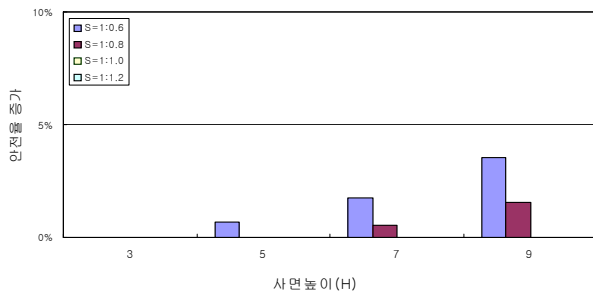
(f) 보강재 길이(L/H) = 1.2

그림 4. 보강높이 변화에 따른 안전율 변화

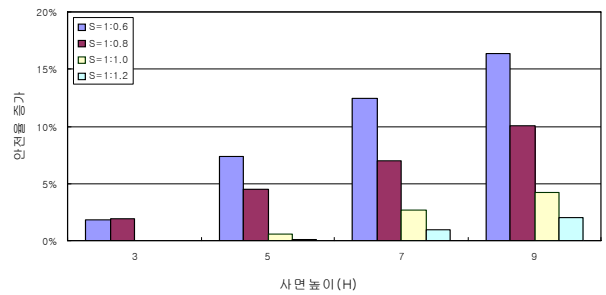
4.4 보강높이 변화에 따른 안전율 증가비율

그림 5에 보강높이 변화에 따른 안전율 증가비율의 변화를 나타내었다. $L/H=0.2$ 일 때 비보강 사면과 비교한 안전율의 증가는 극히 미세하다. 보강길이 $L/H=0.4 \sim 0.8$ 은 사면의 높이가 높을수록, 사면의 경사가 급할수록 안전율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 보강길이 $L/H=1.0$ 부터는 사면경사 $S=1:1.0$ 보다

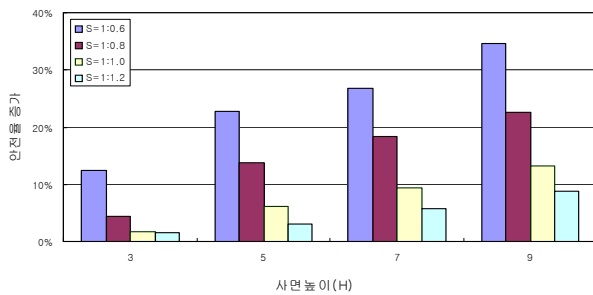
S=1:1.2에서의 안전율 증가가 큰 경우가 나타나고 있다. 따라서 보강재에 의한 보강력이 일정하게 되면 사면의 안전율증가에 보강재 보다 사면 기울기가 더 영향을 크게 주는 것으로 판단된다.



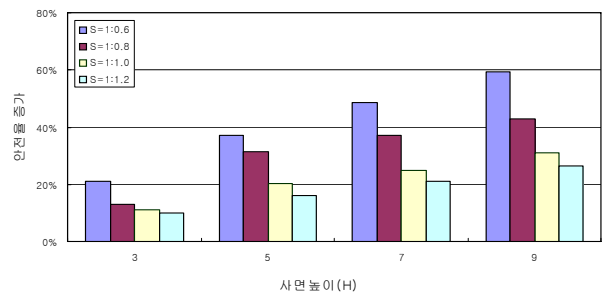
(a) 보강재 길이(L/H) = 0.2



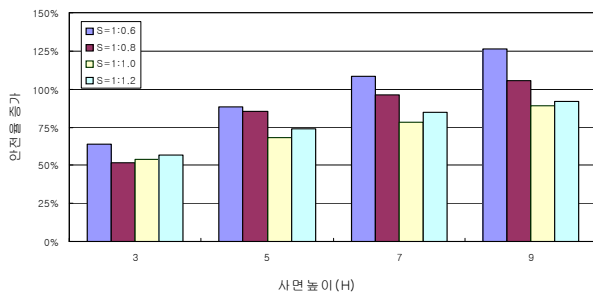
(b) 보강재 길이(L/H) = 0.4



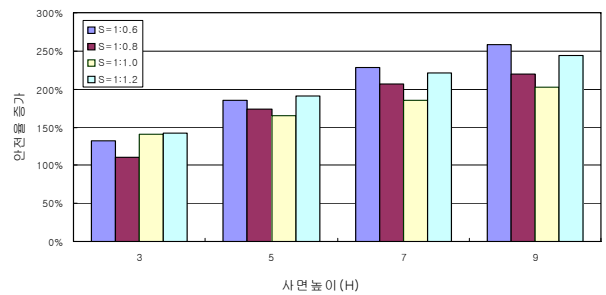
(c) 보강재 길이(L/H) = 0.6



(d) 보강재 길이(L/H) = 0.8



(e) 보강재 길이(L/H) = 1.0



(f) 보강재 길이(L/H) = 1.2

그림 5. 보강높이 변화에 따른 안전율 증가비율 변화

5. 결론

본 연구는 사면녹화 보강토로 보강한 사면에 대한 안전율의 변화를 관찰하기 위하여 가정된 해석단면에 대해 한계평형해석에 기초한 매개변수 연구를 수행하여 무보강시와 보강시의 안전율 변화를 비교하였으며, 보강재의 길이 증가와 사면높이변화에 따른 안전율의 증감을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 한계평형해석에 기초하여 보강길이에 따른 안전율 변화를 살펴본 결과, 보강길이를 증가시켰을 때 L/H=0.6이하에서는 무보강 사면과 비교하여 안전율의 증가가 완만하여 사면녹화 보강토에 의한 보강 효과가 미미하였으나 L/H=0.8이상에서는 보강재의 인장력 발현이 시작되어 안전율의 증가가 지수곡선의 형태로 나타나 사면의 안전성확보에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

2. 사면높이 $H=3.0\text{m}$ 에서는 사면의 보강이 필요 없으며, 사면높이 $3.0\sim 5.0\text{m}$ 에서는 보강길이비 $L/H=0.6$ 이상에서 사면경사에 영향을 받지 않고 사면녹화 보강토에 의한 안전율 확보가 가능하였으며, 사면높이 $5.0\sim 9.0\text{m}$ 에서는 보강길이비 $L/H=0.8$ 에서 대부분 사면에서 안전율이 확보됨을 확인하였다. 또한 $L/H=1.0$ 이상은 과보강 사면으로 나타났다.
3. 보강길이비 $L/H=0.8$ 까지 사면높이가 높을수록, 사면 기울기가 급할수록 안전율의 증가가 높게 나타났으나, $L/H=1.0$ 부터 보강재에 의한 보강력이 일정하게 되면서 사면의 안전율증가에 보강재보다 사면 기울기가 더 영향을 크게 주는 것으로 판단되었다.

본 연구는 제한된 형태의 가상단면을 통해 선단파괴가 발생하는 사면녹화 보강토의 간략적인 보강길이의 제시에 있으므로 향후, 본 연구와 다른 조건인 사면의 경우 및 우기시의 보강길이 산정을 연구할 필요가 있다.

참고문헌

1. 남광은, 2010, “사면녹화 보강토공법의 보강재 길이 산정에 관한 연구”, 창원대학교 석사학위 논문
2. 이한민, 2001, “토목섬유로 보강된 도로 제방사면의 안정성 해석”
3. 케이엔지건설(주), 2004, 슬라이드폼과 그린시트를 이용하여 보강성토체와 식생기반토체를 조성하는 보수 공법
4. 한국지반공학회, 1995, 사면안정(지반공학시리즈 5), 구미서관
5. 한국지반공학회, 1998, 토목섬유의 설계 및 시공요령, 구미서관
6. 한국지반공학회, 1998, 토목섬유(지반공학시리즈 9), 구미서관
7. Bishop, A. W., 1989, “The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis”, Proc. Int. symp. Landslides. New Delhi.
8. Jorge G. Zornberg., Nicholas Sitar., James K. Mitchell., 1998, “Performance of Geosynthetic Reinforced Slopes at Failure”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 8, pp.670~683
9. Radoslaw L. Michalowski, 1997, “Stability of Uniformly Reinforced Slopes”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 6, pp.684~698