

앵커 시공 간격에 따른 비탈면 안전율 변화 연구

김진환¹ · 이종현² · 권오일³ · 김우석^{4*}

¹한국건설기술연구원 복합재난대응연구센터 수석연구원,

²한국건설기술연구원 복합재난대응연구센터 연구위원,

³한국건설기술연구원 건설사업추진단 연구위원,

⁴한국건설기술연구원 건설산업진흥본부 수석연구원

A Study on the Change of Slope Safety Factor according to the Anchor Construction Interval

Jinhwan Kim¹ · Jonghyun Lee² · Oil Kwon³ · Wooseok Kim^{4*}

¹Senior Researcher, Multi Disaster Countermeasures Research Center, KICT

²Research Fellow, Multi Disaster Countermeasures Research Center, KICT

³Research Fellow, Construction Project Task Force, KICT

⁴Senior Researcher, Construction Industry Promotion Department, KICT

Abstract

If the safety factor does not secure the safety factor suggested in the design standard at the slope design stage, the safety factor is secured by installing an anchor. Stability analysis is used to verify the effect of reinforcing the slope of the anchor, but in this process, most of the anchor construction intervals are assumed to be equal and analyzed. For economical and effective slope reinforcement, stability analysis is required by adjusting the anchor construction interval. In this study, the effect of the anchor construction interval on the change of the safety factor of the slope was identified. Stability analysis was performed by setting a virtual slope with two berms and different anchor construction intervals. As a result of the analysis, the stability of the slope is secured when the anchor spacing of the lower surface is narrowed and the anchor gaps of the upper and middle surfaces are wider than when anchors are installed at the same intervals on the upper, middle, and lower surfaces of the slope. The result was a 15% reduction in the amount of anchors. This means that, rather than reinforcing anchors at the same intervals, it is economical and effective to have an economical and effective reinforcement effect to vary the anchor construction intervals according to the slope characteristics.

Keywords: slope, stability analysis, anchor construction interval, factor of safety

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Wooseok Kim
E-mail: kws@kict.re.kr

Received: 9 November, 2020
Revised: 24 November, 2020
Accepted: 25 November, 2020

© 2020 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

비탈면 설계 단계에서 안전율이 설계기준에서 제시하고 있는 안전율을 확보하지 못할 경우, 앵커를 시공하여 안전율을 확보하게 된다. 안정해석을 통해 앵커의 비탈면 보강 효과를 검증하고 있으나 이 과정에서 앵커 시공 간격은 대부분 등간격으로 가정하여 해석을 한다. 경제적이면서 효과적인 비탈면 보강을 위해 안정해석 대상 비탈면 내에서 앵커 시공 간격을 조정할 안정해석이 필요하다. 본 연구에서는 앵커 시공 간격이 비탈면의 안전율 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 가상의 2소단 비탈면을 설정하고 앵커 시공 간격을 다르게 하여 안정해석을 수행하였다. 해석 결과, 비탈면의 상단면, 중단면, 하단면에 동일한 간격으로 앵커를 시공한 경우 보다 하단면 앵커 간격을 좁게하고 상단면, 중단면의 앵커 간격을 넓게 경우에 비탈면의 안정성을 확보하면서도 약 15%의 앵커 물량을 절감하는 결과가 나타났다.

이는 동일한 간격으로 앵커보강을 하기 보다는 비탈면 특성에 맞게 앵커 시공 간격을 다르게 하는 것이 경제적이면서 효과적인 보강효과가 있음을 의미한다.

주요어: 비탈면, 안정해석, 앵커 시공 간격, 안전율

서론

도로 및 철도 개설, 택지 개발 등 다양한 건설공사 과정에서 비탈면이 조성된다. 비탈면의 안정성을 확보하기 위하여 설계 단계에서 비탈면에 대한 안정해석을 수행하고 기준 안전율을 확보하지 못할 경우, 록볼트, 쏘일네일링, 옹벽 등 다양한 보강공을 활용하여 안전율을 높여 비탈면의 안정성을 확보한다. 특히 앵커의 경우, 고강도 강재에 높은 인장력을 도입하여 구속력 또는 선행 하중을 적용하는 공법으로 가설토류벽의 지보공, 비탈면 보강 등에 사용되고 있다(KECRI, 2016; Yang et al., 2016).

앵커를 시공할 경우, 실제 현장에서 시공하기 전에 보강 효과를 검증하기 위하여 다양한 조건을 가정하여 비탈면 안정해석이 진행된다. 그런데 이 과정에서 앵커 간격 특성을 고려한 해석은 많이 이루어지지 않고 있다. 대부분의 비탈면 안정해석 과정에서 일률적인 앵커 간격으로 안정해석을 수행하고 있으며 현장에서 쉽게 관찰할 수 있다(Fig. 1).

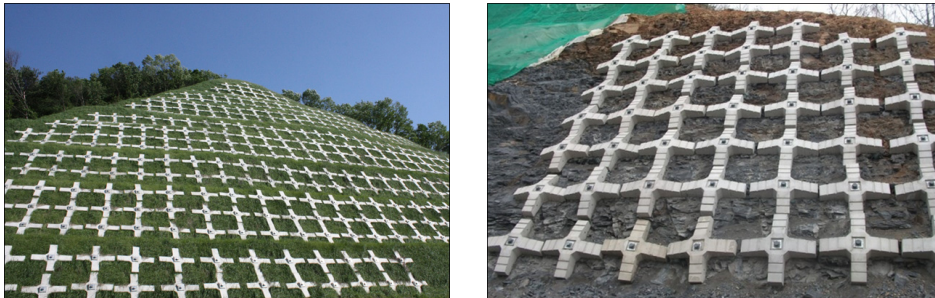


Fig. 1. Slope with anchors installed at equal intervals.

국내에서 비탈면에 시공하는 앵커와 관련하여 시공 간격의 특성을 고려한 연구는 많지 않다. 앵커는 그라우트체에 작용하는 응력특성에 따라 인장형과 압축형으로 나뉘는데 Gu et al.(2019)은 단일 내하체(anchor body)를 사용하는 압축형 앵커의 단점을 보완하기 위해 복수의 내하체를 사용하는 분산형 앵커의 내하체의 간격을 최적화하는 연구를 진행하였다. 압축형 앵커는 강연산을 긴장하면 앵커체 끝단에 위치한 내하체에 의해 그라우트에 압축 응력이 발생하는데, 내하체가 앵커체 끝단 및 중간에 위치한 분산형 앵커에 대하여 압축응력이 중첩되면서 인장응력 발생을 최소화할 수 있는 최적간격을 제시하였다. Kim et al.(2014)은 비탈면에 사용하는 그라운드 앵커는 아니지만 해저 모래지반에 설치한 석션앵커의 앵커 간격에 따른 인발지지력에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 단일앵커 사용과 더블 및 트리플 앵커를 사용하는 경우에 대한 인발지지력의 증가율에 대해서 논의하였으며 앵커 그룹효과에 의한 지지력 감소 효과에 대해서 언급하였다. 해외에서는 앵커의 배열이 비탈면의 안전율에 미치는 영향, 앵커 케이블의 최적 설계에 대한 연구가 진행되었다(Yang et al., 2015; He et al., 2019). He et al.(2019)은 비탈면에 시공되는 앵커의 길이를 변화시켜 안정해석을 수행하였는데, 비탈면의 상단에서 하단으로 앵커를 보강할 경우, 앵커 길이를 늘려가면서 보강할 경우, 안전율 개선 효과가 크다고 보고하였다. Yang et al.(2015)은 앵커 케이블 최적 설계를 위해서 비탈면 보강 전후의 안전율과 응력장을 비교하여 응력과 변위가 큰 부분에 강한 보강을 하는 방식으로 접근하였다. 국내외적으로 앵커 시공 간격에 따른 안전율 변화 연구는 미흡한 편이다.

본 연구에서는 비탈면 안정해석을 통해 앵커시공 간격 조건에 따라 안전율 변화를 검토하였다. 이를 위해 높이 30 m, 경사 55°, 2개의 소단을 갖는 가상의 사질토 비탈면을 설정하였고 앵커 시공 간격을 다르게 하여 안정해석을 수행하였다. 시공 간격이 다른 비탈면에서 산출된 안전율을 비교하였으며 이를 통해 동일한 간격으로 시공되고 있는 앵커 시공의 문제점에 대해서 논의하였다.

국내 앵커 시공 관련 기준

비탈면 앵커 시공과 관련된 기준으로 국토교통부에서 발행한 건설공사 비탈면 설계기준과 그라운드 앵커 설계·시공 및 유지관리 매뉴얼이 있다(Table 1). 이외에 각종 토공사와 관련된 기준 등이 있으나 그 내용은 건설공사 비탈면 설계기준과 크게 다르지 않다. 건설공사 비탈면 설계기준의 앵커 편에서는 앵커 적용기준에 대하여 다음과 같이 기술하고 있다. 앵커의 간격과 길이에 대하여 비탈면의 전체적인 안정성을 고려하여 결정하도록 하고 있으며 앵커를 적절하게 분산 배치하여 고른 저항력이 발휘되도록 설계하도록 제안하고 있다. 또한 앵커보강 비탈면의 안정해석 수행할 때는 앵커의 길이와 간격을 조정하여 해석하도록 되어 있다(MOLIT, 2016).

Table 1. Domestic anchor construction standards

Sources	Chapter	Remarks
Design criteria of construction slope (MOLIT, 2016)	6.3.2 Anchor application criteria	- The anchor spacing and length are determined in consideration of the overall stability of the slope. - Designed to exhibit even resistance to the ground by appropriately distributed arrangement.
	6.4.4 Anchor reinforcement slope stability analysis	- Performed repeatedly while adjusting the length and spacing of the anchor.
Guide of road design (MLTM, 2011)	2.3.1 Anchor installation interval	- The installation interval is determined by the design anchor force, the thickness of the anchor body, and the anchor specifications such as anchorage. - If the anchor installation distance is too narrow, it affects adjacent anchors or decreases pull-out resistance due to group effect. - Group effect is not considered if the anchor body's installation interval is more than 4 times the diameter of the anchor body or 1.5 m or more from the previous experience.

그라운드 앵커 설계·시공 및 유지관리 매뉴얼에서는 앵커 설치간격을 고려할 때, 앵커 설치간격, 앵커 정착장 및 앵커체의 굽기 등이 지반과의 관계에 의해 나타나는 앵커의 그룹효과를 최소화 하도록 제안하고 있다. 그룹효과가 발생하면 앵커의 인발저항력이 저하되기 때문에 적절한 보강 효과를 볼 수 없다. 경험적으로 앵커체의 설치간격이 앵커체 직경의 4 배 이상 혹은 1.5 m 이상이 확보되면 일반적인 경우 그룹효과를 고려하지 않는다(MLTM, 2011).

건설공사 비탈면 설계기준에서 앵커 설계 시 간격과 길이를 고려하고 안정해석을 수행할 때도 간격과 길이를 조정하도록 제안하고 있다. 하지만 앵커의 간격을 조정하여 설계, 안정해석을 수행하는 의미는 현장에서 조금 다르게 나타나고 있다. 앵커를 적용한 비탈면의 설계 및 안정해석을 수행할 때, 앞서 본 시공 사례에서 볼 수 있듯이 ‘동일한’ 간격으로 비탈면 설계 및 안정해석을 수행하는 경우가 빈번하다. 즉 한 개의 비탈면에서 다른 간격으로 앵커 보강을 하는 경우는 관찰하기 어렵다.

앵커 시공 위치를 고려한 안정해석

비탈면에 시공되는 앵커의 위치에 따라 안전율의 변화를 파악하기 위하여 가상의 비탈면을 설정하여 안정해석을 수행하였다. 안정해석은 Rocscience사에서 개발한 SLIDE 5.0 프로그램을 이용하였다. 임의의 사질토 특성을 갖는 지반조건에 대하여 2개의 소단을 갖는 비탈면을 가정하여 안정해석을 수행하였다. 본 해석에서는 Bishop의 간편법(Bishop, 1955)을 적용하였으며 파괴형상은 원호활동으로 가정하여 비탈면 안정해석을 실시하였다. Bishop의 간편법으로 계산된 안전율은 유한요소 해석방법을 이용하여 계산된 안전율과 약 5% 이내의 오차에서 비교적 잘 일치하는 것으로 Wright et al.(1973)에 의해 보고된 바 있다. 또한 Bishop의 간편법은 안전율을 다소 과소평가하지만 대개의 경우 오차가 2% 이하로 보고되고 있어 정확도가 충분한 것으로 평가되고 있으며 전응력 해석법과 유효응력 해석법에서 널리 적용할 수 있으므로 비탈면 안정해석에 널리 쓰이는 방법이다(Lee et al., 2002).

비탈면 안정해석에 사용된 토질정수는 도로설계요령의 자연지반 사질토에 대한 개략적인 토질정수를 참고하여 결정하였다(KEC, 2001). 도로설계요령에 따르면 자연지반 사질토의 경우에는 흙의 밀실한 정도에 따라 17~19 kN/m³의 단위중량, 25~30°의 내부마찰각(ϕ), 0~30 kN/m²의 점착력(c)을 갖는 것으로 나타나 있다. 이와 같은 자연지반 사질토의 토질정수 범위를 고려하여 안정해석에 적용된 비탈면의 제원 및 흙의 물성은 Table 2에 나타내었다. 사질토 물성을 갖는 지반에 대하여 안정해석에 사용한 비탈면 경사는 55°를 고려하였으며 상부 자연사면의 경사는 20°로 가정하였다. 본 안정해석은 앵커 시공 간격에 따라 안전율의 변화를 보기 위한 것으로 건기, 우기 상태는 중요하지 않은 것으로 판단하여 강우조건은 고려하지 않았다.

Table 2. Slope size and ground properties conditions

Slope angle	Upper natural slope angle	Unit weight	Cohesion	Friction angle	Remark
55°	20°	17 kN/m ³	30 kN/m ²	30°	Sandy soil properties

2개의 소단을 갖는 비탈면은 세 개의 법면을 갖게 된다. 본 연구에서는 1소단 아래의 법면을 하단면(lower surface), 1소단 위쪽, 2소단 아래의 법면을 중단면(middle surface), 2소단 위쪽의 법면을 상단면(upper surface)으로 명명하였다(Fig. 2).

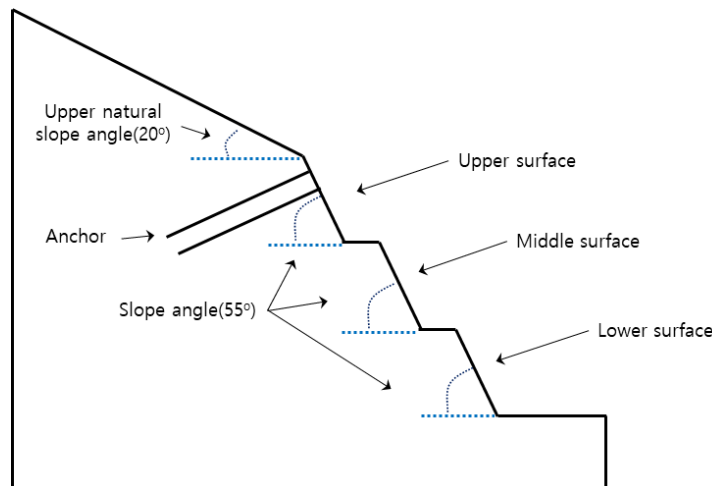


Fig. 2. Slope analysis cross section of this study.

안정해석을 위한 앵커 시공은 크게 두 가지 경우로 구분하여 진행하였다. 첫 번째는 상단면, 중단면, 하단면에 동일한 간격으로 앵커시공을 하여 안정해석을 하였으며(Case 1~Case 5), 두 번째는 각각의 법면에 앵커 시공간격을 다르게 하여 안정해석을 하였다(Case 6~Case 15). Case 6부터 Case 10의 경우에는 하단면에 앵커 간격을 조금 더 촘촘하게 배치하였고 Case 11~Case 15의 경우에는 중단면에 앵커 간격을 촘촘하게 배열하여 안정해석을 수행하였다. 안정해석에 사용한 앵커 시공 간격 및 앵커의 특성은 Table 3에 나타내었다. 앵커 길이는 15 m로 가정하였으며 앵커 간의 간격이 가장 좁은 경우는 1.5 m, 가장 넓은 경우는 5.5 m로 설정하였다.

Table 3. Anchor construction conditions

Classification	Anchor			
	Construction space (m)	Length (m)	Capacity (kN)	
Equal spacing (ES)	Case 1	Upper : 1.5, Middle : 1.5, Lower : 1.5		
	Case 2	Upper : 2.0, Middle : 2.0, Lower : 2.0		
	Case 3	Upper : 3.0, Middle : 3.0, Lower : 3.0		
	Case 4	Upper : 4.0, Middle : 4.0, Lower : 4.0		
	Case 5	Upper : 5.0, Middle : 5.0, Lower : 5.0		
Differential spacing (DS)	Case 6	Upper : 2.0, Middle : 2.0, Lower : 1.0		
	Case 7	Upper : 2.5, Middle : 2.5, Lower : 1.5		
	Case 8	Upper : 3.5, Middle : 3.5, Lower : 2.5	15	140
	Case 9	Upper : 4.5, Middle : 4.5, Lower : 3.5		
	Case 10	Upper : 5.5, Middle : 5.5, Lower : 4.5		
	Case 11	Upper : 2.0, Middle : 1.0, Lower : 2.0		
	Case 12	Upper : 2.5, Middle : 1.5, Lower : 2.5		
	Case 13	Upper : 3.5, Middle : 2.5, Lower : 3.5		
	Case 14	Upper : 4.5, Middle : 3.5, Lower : 4.5		
	Case 15	Upper : 5.5, Middle : 4.5, Lower : 5.5		

각각의 해석 Case에 해당하는 안전율과 안전율이 산출될 때 사용한 앵커의 총 개수를 Table 4에 나타내었다. 안정해석에 사용된 앵커의 개수는 최소 9공에서 최대 27공이다. 안정해석 결과 중, 결과를 비교할 만한 동일한 개수의 앵커가 사용된 경우와 안전율이 같게 나타난 경우에 대하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다. 동일한 간격으로 시공한 Case 1과 하단면을 촘촘하게 시공한 Case 6은 앵커 시공 개수가 27공으로 동일하게 나타났다(Fig. 3). 또한 Case 3과 Case 8은 안정해석 결과 안전율이 1.399로 동일하게 산출되었다(Fig. 4). 참고로 앵커 보강을 하지 않은 비탈면의 안전율은 1.175이다.

안정해석 결과를 보면, Fig. 3과 같이 앵커 시공시 동일한 앵커 간격으로 비탈면을 보강한 경우보다 하단면에 앵커 간격을 조금 더 촘촘하게 보강하고 상단면과와 중단면에 앵커 간격을 넓게 보강할 경우에 같은 앵커 개수로 보다 높은 안전율을 확보하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4와 같이 동일한 안전율이 나타나는 경우에도 같은 간격으로 앵커를 시공하는 경우보다 하단면을 보다 촘촘하게 시공하는 경우에 소요되는 앵커 개수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 비탈면 내 응력집중이 하단부에 집중적으로 발생하기 때문에 하단면 보강은 비탈면의 안전율을 향상시키는데 밀접한 관계가 있으며 특히, 하단면에 시공한 앵커가 안정해석상의 원호파괴면에 보다 많이 관통하기 때문으로 볼 수 있다. 이런 결과는 비탈면에 대한 앵커 보강시 동일한 간격으로 일률적으로 시공하기 보다는 하단면 부분을 보다 촘촘하게 시공하는 것이 보다 효과적인 보강 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

Table 4. Results of slope stability analysis

Case	Factor of safety	Anchor quantities (ea)	Remark
1	1.508	27	Equal spacing (ES)
2	1.447	21	
3	1.399	15	
4	1.369	12	
5	1.339	9	
6	1.555	27	Differential spacing (DS)
7	1.466	19	
8	1.399	13	
9	1.358	10	
10	1.342	9	
11	1.504	27	
12	1.443	19	
13	1.382	13	
14	1.352	10	
15	1.317	9	

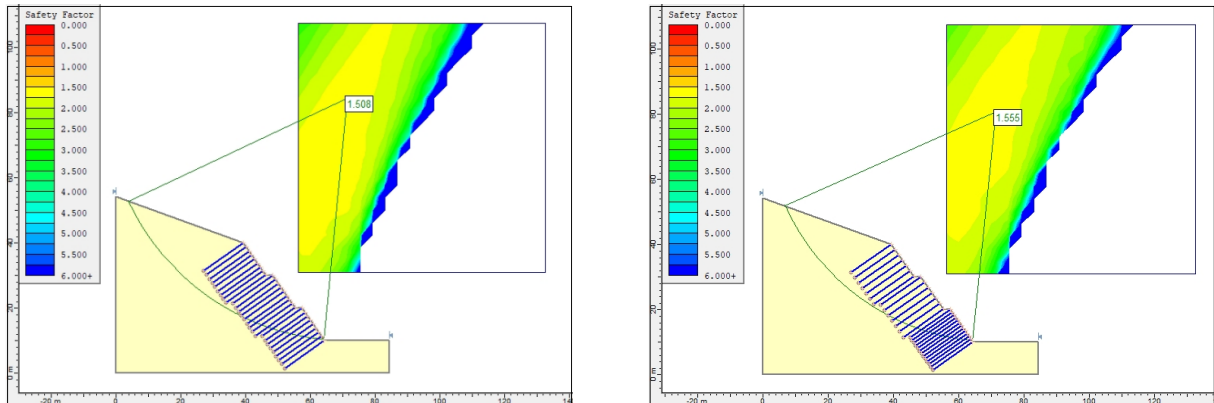


Fig. 3. Results of slope stability analysis for Case 1 (left) and Case 6 (right).

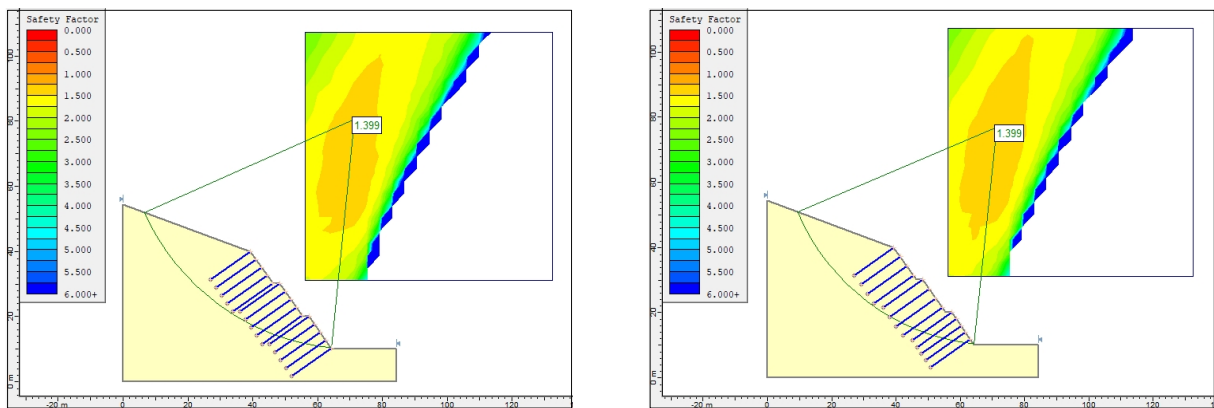
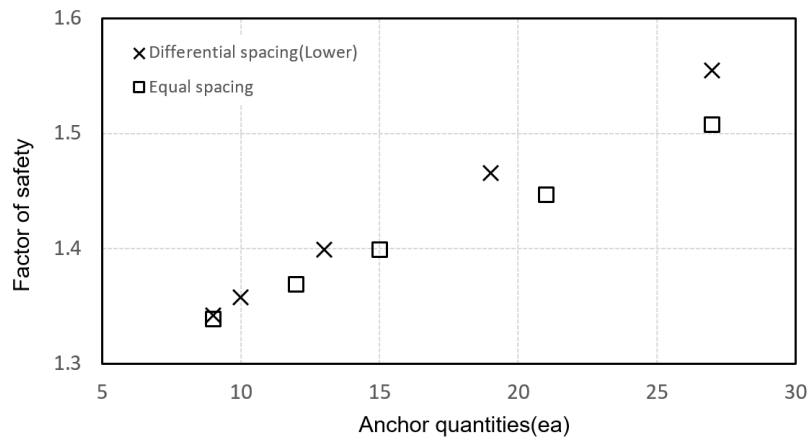


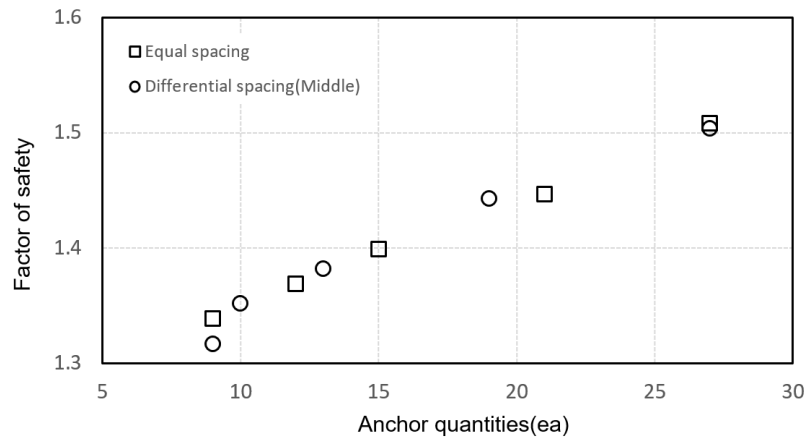
Fig. 4. Results of slope stability analysis for Case 3 (left) and Case 8 (right).

앵커간격을 다르게 시공한 두 가지 경우도 비교하였다. Case 6~Case 10은 상단면과 중단면은 넓은 간격으로 보강하고 하단면을 촘촘하게 보강한 경우이며, Case 11~Case 15는 상단면과 하단면을 넓은 간격으로 보강하고 중단면을 촘촘하게 보강한 경우이다. 두 경우의 안정해석 결과를 비교해 보면 하단면을 촘촘하게 보강한 경우에 보강효과가 좋게 나타났다. 중단면을 촘촘하게 보강한 경우는 동일한 간격으로 보강한 Case 1~Case 5의 결과와 크게 다르지 않거나 더 낮게 나오는 경우도 발생하였다.

Fig. 5는 앵커 보강 수에 따른 안전율의 변화를 정리한 것이다. 다른 간격으로 앵커를 설치한 경우 중, 하단면을 촘촘하게 설치한 경우를 Lower로 표기하였으며 중단면을 촘촘하게 시공한 경우는 Middle로 구분하였다. 앞서 설명한 바와 같이 동일 간격으로 앵커 보강을 하는 것 보다, 하단면을 좁은 간격으로 보강하는 것이 효과가 크며 중단면을 좁은 간격으로 보강하는 것은 동일한 간격으로 보강하는 것과 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.



(a) Comparison between equal and differential spacing (lower)



(b) Comparison between equal and differential spacing (middle)

Fig. 5. Safety factor according to the quantity of anchors.

앵커 시공 물량은 공사비에도 영향을 준다. 보다 적은 물량으로 안전율을 확보할 수 있다면 공사비 절감에 도움을 줄 수 있다. 각각의 범면에 동일 간격으로 앵커를 시공한 경우와 하단면에 보다 촘촘하게 앵커를 시공한 경우를 단순하게 비교하였다.

Fig. 5a로부터 앵커 수량에 대한 비탈면 안전율의 변화를 일차 함수로 가정하고 아래의 식 (1), 식 (2)를 도출하였다. DS_L slope은 하단면을 촘촘하게 보강한 비탈면을 의미하며 ES slope는 동일한 간격으로 보강한 비탈면을 의미한다.

$$DS_L \text{ slope} : F_s = 0.0117A + 1.2414 \quad (R^2 = 0.9979) \quad (1)$$

$$ES \text{ slope} : F_s = 0.0092A + 1.2575 \quad (R^2 = 0.9982) \quad (2)$$

여기서, F_s : 안전율, A : 앵커 수량

비탈면의 안전율 1.5를 확보하기 위해 필요한 앵커 개수를 위 식으로부터 계산하였다. 식 (1)의 경우 앵커 수량은 22공이 필요하며 식 (2)의 경우에는 26공이 필요하다. 비탈면의 하단부를 보다 촘촘하게 보강할 경우에 동일한 간격으로 시공하는 경우 보다 약 15% 앵커 시공수의 절감효과를 기대해 볼 수 있다.

앵커 시공시 하단면을 보다 촘촘히 보강할 경우에 앵커 시공 물량을 절감할 수 있을 것이라는 결과가 모든 비탈면에 적용될 수는 없을 것이다. 본 연구는 균질한 지반조건을 갖는 비탈면을 가정하여 진행하였기 때문에 비탈면 형상 및 지반 특성이 다양할 경우에는 다른 결과가 나타날 수 있다. 특히, 기반암과 풍화토로 구성된 지질 조건에서는 지질경계 위치에 따라 안정해석 파괴면의 위치와 깊이가 달라 질 수 있기 때문에 이번 연구 결과와 차이가 있을 수 있다. 하지만 비탈면 설계 및 안정해석 단계에서 동일한 간격의 앵커를 적용하여 안정해석을 수행하는 관행에서 벗어나 비탈면 조건에 따라 앵커 간격을 다르게 적용하는 안정해석 과정을 거친다면 보다 합리적인 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 앵커 시공 간격이 비탈면의 안전율에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 2개의 소단을 갖는 비탈면에 앵커 시공간격을 여러 가지로 가정하여 안정해석을 수행하였다. 안정해석 결과를 통해 일률적인 간격으로 앵커를 시공할 경우, 최적의 보강효과를 발휘하기 어렵다는 것을 파악하였으며 최적의 보강효과를 얻기 위해서는 앵커 시공간격을 다르게 하여 안정해석을 하는 것이 타당하다는 결과를 얻었다.

본 연구에서 검토된 해석 조건에 따르면 1소단 하부 법면 즉 하단면에 앵커 보강을 촘촘히 할 경우에 보강 효과가 극대화되는 것으로 파악되었다. 또한 사용되는 앵커 수도 절감되어 등간격으로 앵커를 시공하는 경우보다 약 15%의 절감효과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 연구 결과를 실제 설계에 반영하기 위해서는 좀 더 다양한 조건을 고려한 안정해석 사례 제시 등 추가 연구가 있어야 하며 앵커 간격을 다르게 하여 해석할 수 있도록 비탈면 설계 관련 기준 및 지침 등의 개정이 필요하다.

사사

본 연구는 “국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발. 20SCIP-C151408-02)”의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Bishop, A.W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Gu, K.Y., Shin, G.B., Chung, C.K., Kim, S.R., 2019, Evaluation of optimum spacing between anchor bodies of distributive compression anchor using numerical simulation, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 35(7), 29-39 (in Korean with English abstract).
- He, D., Yang, W., Cheng, Y., Chen, B., 2019, Effect of anchor layouts on the safety factor and slip surface of slope, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 1073-1078.
- Kim, S.R., Choo, Y.W., Kwon, O.S., Kim, D.S., 2014, Numerical analysis of group suction anchor of parallel arrangement installed in sand subjected to pullout load, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(11), 61-69 (in Korean with English abstract).
- KEC (Korea Expressway Corporation), 2001, Road design method (Vol.2 Earthwork and Drainage, Chapter 5 Earthwork), 384p (in Korean).
- KECRI (Korea Expressway Corporation Research Institute), 2016, Investigation of application condition and making the performance improvement technique of permanent ground anchor, 4-12 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., Lee, K.H., Chae, J.S., 2002, Design and construction of slope, *Yeamoonsa*, 22-23 (in Korean).
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2016, Design criteria of construction slope, 38-40 (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Ground anchor design, construction and maintenance manual, 21p (in Korean).
- Wright, S.G., Kulhawy, F.H., Duncan, J.M., 1973, Accuracy of equilibrium slope stability analysis, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(10), 783-791.
- Yang, D.K., Park, H.K., Park, Y.C., Lee, H.S., Kim, N.H., 2016, Study on the behavioral characteristics by anchor fixation type, *Yooshin Technical Report*, 23, 152-164 (in Korean with English abstract).
- Yang, G., Zhong, Z., Zhang, Y., Fu, X., 2015, Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4), 411-420.