

스마트 건설기반의 강봉앵커 수동저항 효과를 고려한 단기 안전율

The Short-term Safety Factor Considering Passive Resistance Effect of Bar Anchor Based on Smart Construction

이 동 혁[†] · 백 두 현¹⁾
Donghyuk Lee · Duhyun Baek

Received: February 29th, 2024; Revised: March 7th, 2024; Accepted: March 19th, 2024

ABSTRACT : This is an analytical study to confirm the passive resistance effect before post-tensioning of steel bar anchors. When using a steel bar as a permanent anchor, if displacement occurs within the slope even before the head load is applied, the displacement is suppressed by the passive resistance caused by the interaction between the steel bar, grout, and surrounding soil. Accordingly, the shape of the failure surface and changes in the safety factor were examined using limit equilibrium analysis and finite element analysis targeting sites where steel bar anchors were actually applied. It was found that the safety factor of the slope reinforced with steel bar anchors is 2.02 using finite element analysis, which is about 5.9% smaller than 2.14 using limit equilibrium analysis. Also, the location of the failure surface was found to be deeper compared to the unreinforced slope. Likewise, the factor of safety has a 153% and 163% increase using finite element method and limit equilibrium analysis, respectively. In addition, the maximum displacement occurs in the lower unreinforced section within the slope, and the displacement is found to be reduced by 42 to 83% at the location where the steel bar anchors are installed.

Keywords : Bar anchor, Passive resistance, Limit equilibrium analysis, Finite element analysis, Strength reduction method, Short-term, Factor of safety

요 지 : 본 연구는 강봉앵커의 프리스트레스 도입 전 수동저항 효과를 확인하기 위한 해석적 연구이다. 영구앵커로 강봉을 사용하는 경우 두부 하중 재하 전에도 비탈면 내 변위 발생 시 강봉, 그라우트, 주변 지반사이 상호작용에 따른 수동저항효과로 변위가 억제된다. 이에 실제 강봉앵커가 적용된 현장을 대상으로 한계평형해석 및 유한요소해석을 이용하여 파괴면의 형상 및 안전율 변화를 검토하였다. 검토결과, 강봉앵커가 보강된 비탈면의 안전율은 유한요소해석결과 2.02이며, 한계평형해석결과 2.14에 비해 약 5.9% 작게 발생하였고 활동면의 위치도 더 깊게 발생하였다. 이는 보강 전 비탈면에 비해 안전율이 한계평형해석은 163%, 유한요소법은 153% 증가된 것이다. 또한, 최대발생 변위는 비탈면 내 하부 무보강구간에서 발생하였으며, 강봉앵커가 설치된 위치에서는 변위가 42~83% 감소되는 것으로 나타났다.

주요어 : 강봉앵커, 수동저항, 한계평형해석, 유한요소법, 강도감소법, 단기, 안전율

1. 서 론

영구앵커 공법은 비탈면의 안전율을 증가시키기 위해 널리 사용되는 보강공법이다. 국내에서는 일반적으로 SWPC 7BL 12.7mm, 15.2mm의 P.C Strand를 긴장재로 사용하고 있으나 국외의 경우 시공의 편의성, 관리 용이성, 단순한 구조 등으로 고강도 강봉을 현장여건 및 지층조건에 따라 병행하여 사용하고 있다. 이 공법에 대한 시공성 및 상품성을 개선하기 위하여 다양한 연구(Xu et al., 2007; Wang et al., 2010; Wang et al., 2013; Xu et al., 2016; Liu et al., 2017; Wang et al., 2019; Montero-Cubillo et al., 2021)가 활발히

수행되고 있다.

또한, 강봉앵커의 경우 두부 하중 재하 전 비탈면 내 변위 발생 시 강봉, 그라우트, 주변 지반사이의 상호작용에 따른 수동저항에 의해 안전율이 증가하는 장점이 있으나, 국내에서는 강봉앵커의 외적 유사성에 의해 소일네일과 혼동하거나 강봉앵커 시스템의 이해가 부족한 실정이며, 이와 관련하여 보강비탈면과 관련된 강봉앵커의 연구는 많이 이루어지지 않았다.

다만 비탈면의 안전율 변화와 관련된 연구로 Park & Ahn (2019)은 비탈면의 안전율에 영향을 미치는 인자로 비탈면 높이, 비탈면 기울기, 점착력 및 내부마찰각을 고려하여

[†] Lecturer, Department of Fire Engineering, Sanji University (Corresponding Author : idonghyuk@hanmail.net)

1) Director of Engineering, Icontec E&C Corporation

안전율 증가비의 관계를 규명하였고, Park et al.(2005)은 개별요소법과 유전자 알고리즘을 조합한 최소임계단면을 결정하는 해석방법을 제안하였다.

Kim(2011) 및 Zhang et al.(2014)은 원심모형실험을 통해 네일의 보강 길이가 증가할수록 파괴면의 후퇴현상 발생으로 네일에 유발되는 저항력이 크게 작용하여 사면의 안정성이 향상되는 것을 확인하였다. 또한, Jeong(2019)은 앵커의 인장력 손실 시 비탈면의 안정성 변화를 확인하고자 한계평형해석을 통하여 단계별 안정성 확보가 가능한 손실한계를 분석하였다.

보강재가 사면안정에 미치는 영향과 관련하여 Joo et al.(2008)은 네일의 안정해석 시 인장력만 고려하는 경우 과다설계의 우려가 있어 휨강성을 고려한 수정 설계법을 제안하였으며, Kim et al.(2008)은 앵커의 하중전이분포를 앵커보강사면의 한계평형해석에 적용하여 유한요소해석 결과와 안전율 변화를 비교하였다.

이에 본 연구에서는 강봉앵커가 단기 비탈면의 안전율에 미치는 변화를 확인하기 위하여 기존 현장에 적용된 사례를 바탕으로 모델링을 실시하고 한계평형해석방법 및 유한요소해석방법으로 비탈면의 안정성을 검토하여 각각의 안전율을 비교하였다.

2. 이론적 배경

비탈면의 안정성을 검토하는 방법은 한계평형해석법과 유한요소해석법으로 구분된다. 국내에서는 일반적으로 한계평형해석법 중 Bishop의 절편법을 이용하여 단기 및 공용중의 안정성을 평가하고 있다. 본 연구에서는 강봉앵커의 시공 중 비탈면의 단기 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 한계평형해석법을 이용한 비탈면의 안전율 변화를 고찰하고 유한요소해석법 중 강도감소법을 통해 파괴 활동면의 거동 변화를 한계평형해석 결과와 비교하였다.

2.1 한계평형해석법(Limit Equilibrium Theory)

한계평형해석법은 비탈면 내에 활동면을 따라 파괴가 발생할 때 파괴토체에 작용하는 힘들의 평형을 해석하는 방법으로 가상의 활동면을 가정한 후 작용력과 저항력을 검토하고, 이 때 저항력과 작용력의 비를 안전율로 정의하여 비탈면의 안정성을 평가하는 방법이다.

한계평형해석법은 안전율 산정방식에 따라 선형법(linear method)과 비선형법(non-linear method)로 구분하며 실무에서는 일반적으로 비선형법 중 Bishop의 절편법(Bishop's simplified

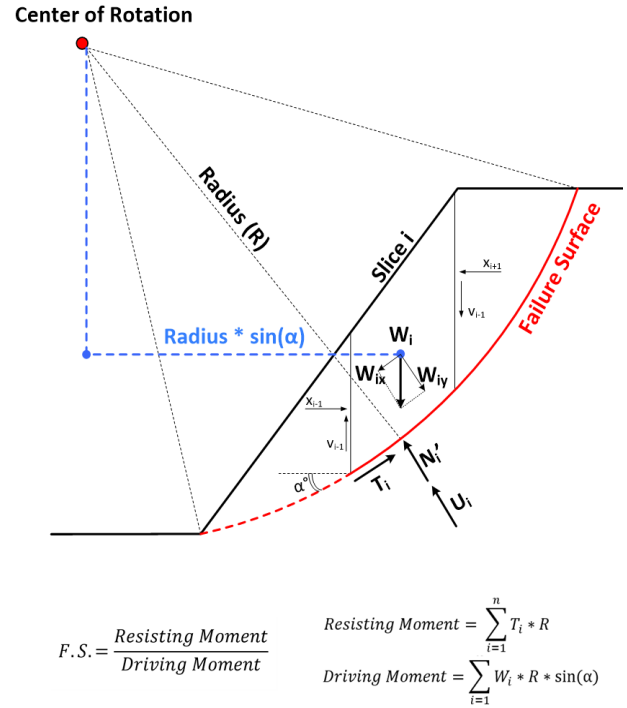


Fig. 1. Moments about the center of rotation generated by each slice i ($T_i * R$ and $W_i * R \sin(\alpha)$)

$$F.S. = \frac{\sum T_i * R}{\sum W_i * R * \sin(\alpha)} = \frac{\sum (c * L_i + N_i * \tan(\phi))}{\sum W_i * \sin(\alpha)} \quad (1)$$

method)을 적용하고 있다. 본 연구에서도 Bishop의 절편법을 적용하여 비탈면의 안정성을 검토하였으며, 각 절편에서 발생하는 저항력과 작용력의 관계는 Fig. 1에 도시하였고, 비탈면의 안전율은 Eq. (1)과 같으며, 해석프로그램은 Talren 97을 사용하였다.

2.2 강도 감소법(Strength Reduction Method)

비탈면 안정성 해석을 수행하는 유한요소해석방법(FEM)은 크게 2가지로 직접법과 간접법으로 분류되며(Naylor, 1999), 본 연구에서는 직접법인 강도감소법을 적용하였다. Matsui & San(1992)에 의해 제안된 강도감소법은 전단강도를 점진적으로 감소시키며 계산된 결과가 발산할 때까지 해석을 실시하여 최소안전율로 정의하는 수치해석기법이다. 전단강도의 감소과정은 Fig. 2와 같으며, 최대 전단응력 작용 시 안전율이 반영된 전단강도 정수는 Eq. (2)로 계산된다.

수치해석 기법은 각 요소별 힘의 평형조건, 경계조건 및 구성방직식, 제한 조건 등을 고려한 정밀 근사해석 방법으로 실제 현장 상황과 유사한 파괴형태를 도출하는 것으로 알려져 있다(Griffith & Lane, 1999; Matsui & San, 1992).

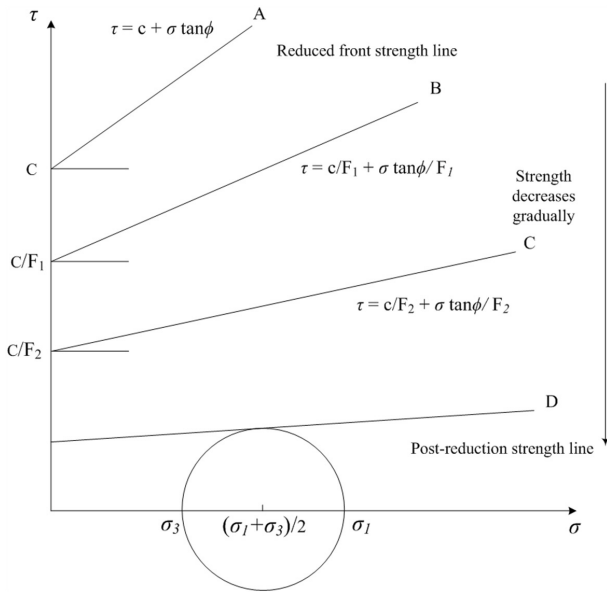


Fig. 2. Solving process of strength reduction method

$$C_r = \frac{C}{F.S}, \tan \phi_r = \frac{\tan \phi}{F.S} \quad (2)$$

수치해석을 위하여 지반분야 유한요소프로그램인 MIDAS GTS NX를 사용하였다.

3. 강봉앵커 시스템의 특징

강봉앵커는 비탈면의 안전율을 증가시키는 대표적인 비탈면 보강공법 중 하나인 영구앵커공법이다. 국내에서는 일반적으로 P.C Strand를 긴장재로 사용하는 영구앵커를 많이 사용하고 있으나 외국의 경우 인장 시 강연선의 편심에 의한 파단 및 공용중 부식 등의 문제로 인하여 재료의 수밀성 및 긴전성이 우수한 강봉을 많이 사용하고 있다.

또한, 프리스트레스 도입 전에도 비탈면 내 변위 발생 시 강봉앵커와 그라우트의 마찰저항에 의해 활성화되는 수동 저항 효과가 있기 때문에 다양한 현장조건에 적용되고 있으며, 본 연구에서는 강봉앵커의 긴장 전 수동효과에 따른 비탈면의 안전율 증가 효과를 수치해석을 통해 확인하고자 한다.

3.1 강봉앵커 시스템의 구성

강봉앵커 시스템은 지압효과를 위한 선단부 엔드콘, 긴장재로인 고강도 강봉(Φ32~36mm, 1,080N/mm²), 자유장 확보를 위한 주름관 및 PE 파이프, 두부의 프리스트레스 및 정착을 위하여 앵커 플레이트 및 너트 그리고 기타 부속 자재로 커플러, 간격재, 보호캡 등으로 구성되며 시스템의

구성도는 Fig. 3에 도시하였다.

특히, 고강도 강봉의 경우 영구적 부식방지를 위해 전장에 에폭시 코팅처리가 되어 있으며, 커플러는 강봉과 강봉을 연결하기 위한 자재로서 인장강도는 569N/mm², 직경 60~68mm, 길이 200~210mm, 단면적은 약 615.7~804.2mm²이며 강봉앵커 시스템의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

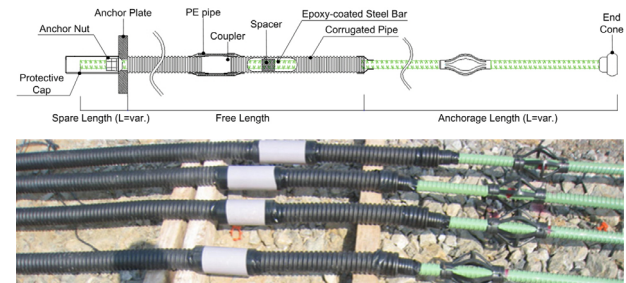


Fig. 3. Components of bar anchorage system

Table 1. Mechanical properties of materials

Material	Standard	Tensile Strength (N/mm ² , min)	Yield Strength (N/mm ² , min)	Elongation (% min)	Hardness (HB)	Bend Test
Thread Bar (Φ32~36mm)	KSD 3505	1,080	930	5	-	-
Anchor Nut	KSD 3752	569	343	20	167-299	-
Bar Coupler	KSD 3752	569	343	20	167-299	-
Anchor Plate	KSD 3503	410-550	245	23	-	-

3.2 강봉앵커 시스템의 장·단점

강봉앵커는 최대 단위길이 11m인 고강도 강봉 및 시스템 모듈(Module)을 현장 반입한 후 Fig. 4와 같이 조립, 설치하는 영구앵커 공법이다. 일정한 규격의 직선형 강봉이기 때문에 협소한 구간에서 보관, 운반, 삽입 등이 용이하다. 또한, 현장에서 정착층의 변화가 발생하는 경우 커플러를 사용하여 길이를 변경할 수 있어 시공 중 현장여건 변경에 유연한 대처가 가능한 장점들이 있다.

반면, 일반적인 강연선 앵커의 경우 Fig. 5와 같이 설계 길이로 제작된 강연선 다발을 롤(Roll) 형태로 말아서 현장에 운반, 설치하는 앵커공법으로 부피가 커서 일정 면적의 보관 공간이 요구되고 공장에서 제작된 완성 제품이다. 그로 인하여 시공 중 현장에서 정착지반의 심도가 깊어지는 경우 앵커의 길이변경이 불가능하여 폐기 후 재제작이 요구되는 단점이 있다.



Fig. 4. View of bar anchors in storage



Fig. 5. View of strand anchors rolled in bundles

4. 현장 시험 조건

본 연구의 모사대상 비탈면은 경상북도 경주시에 위치한 높이 27.5m 이상, 연장 300m의 대절토 비탈면으로 설계 시 Soil Nail 공법을 적용하고자 하였으나 시공 중 보강면적 증가로 인하여 경제성이 불리한 것으로 검토되어 영구앵커 공법으로 변경된 현장이다.

4.1 현장개요

본 현장은 시공 중 지반조사결과 원설계 지층 추정선에 비하여 토사층은 1.1m 상향으로 분포하고, 연암의 경우 9.0m 하향 분포하여 풍화암 심도 증가로 설계변경이 요구되는 현장이며, 대상 비탈면 및 보강공법의 개략적인 현황은 Table 2와 같다.

Table 2. Slope overview

Section	Height (m)	Length (m)	Reinforcement (Initial)	Reinforcement (Change)	Slope Gradation
STA.1+760-2+060	28.9 (Max)	300	Soil Nail 1.5×1.5 L=8~14m	Anchor 2.2×2.5 L=17~21m	Soil 1:1.0~1:1.2 Weathered Rock 1:1.0 Bed Rock 1:0.7

4.2 지반조사현황

비탈면의 풍화상태는 전반적으로 완전 풍화(C.W)에서 풍화잔류토(R.S)상태로 발달하였으며, 일부 구간에서 국부적으로 차별풍화를 받은 암편이 노출되어 있으며, 전반적으로 비탈면은 건조한 상태를 보이는 것으로 조사되었다. 비탈면의 지층구성은 매립층(사질토), 풍화토(사질토), 풍화암, 연암 순으로 조사되었다. 각 지층별 설계지반정수는 Table 3에 정리하였다(실시설계 지반조사보고서 인용).

Table 3. Parameters of soil layer

Layer	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kpa)	Friction Angle (°)	Modulus of Deformation	Poisson's Ratio	Coefficient of Permeability
Backfill	19.0	5.0	30.0	17.0	0.34	2.2×10 ⁻⁴
Weathered Soil	19.0	30.0	30.0	30.0	0.33	2.9×10 ⁻⁴
Weathered Rock	20.0	17.0	32.0	300.0	0.30	1.8×10 ⁻⁴
Bed Rock	23.0	220.0	33.0	2,000.0	0.23	5.0×10 ⁻⁵

5. 안정해석 결과 및 고찰

5.1 해석모델 및 가정

강봉앵커로 보강된 비탈면의 단기 해석에서 한계평형해석 시 강봉앵커는 네일로 가정하여 Bishop의 절편법으로 해석하였으며, 사용된 강봉앵커의 정수는 Table 4와 같다.

강도감소법 해석에서는 정밀도를 높이기 위하여 지반의 요소망을 저차요소, 고차요소로 구분하여 검토하였다.

검토결과, Table 6과 같이 고차요소로 지반 요소망을 형성하는 경우가 저차요소망으로 형성한 경우보다 무보강 시 7.7%, 보강 시 11.05% 낮게 안전율이 나타나는 것으로 확인되어 단기 안전율 비교 시 유한요소해석의 기준 안전율로 정하였다. 강도감소법에 의해 해석된 단면의 요소망도는 Fig. 6에 도시하였으며, 사용된 강봉앵커 정수는 Table 5와 같다.

Table 4. Parameters of bar anchor (LEM)

Reinforcement Type	Tensile strength (kN)	Length (m)	Angle (°)	Horizontal spacing (m)
Nail	422.87	17.0~21.0	20	2.5

Table 5. Parameters of bar anchor (SRM)

Model Type	Cross-sectional area (mm ²)	Unit Weight (kN/m ³)	Modulus of Elasticity	Poisson's Ratio
Elastic	804	78.5	2.15×10 ⁶	0.28

Table 6. Results of LEM and SRM

Classification	F.S in case of Unreinforced (1)	F.S in case of Reinforced (2)	Remarks (2)/(1)
LEM	1.31	2.14	1.63
SRM (High-order factor)	1.32	2.02	1.53
SRM (Low-order factor)	1.43	2.27	1.59

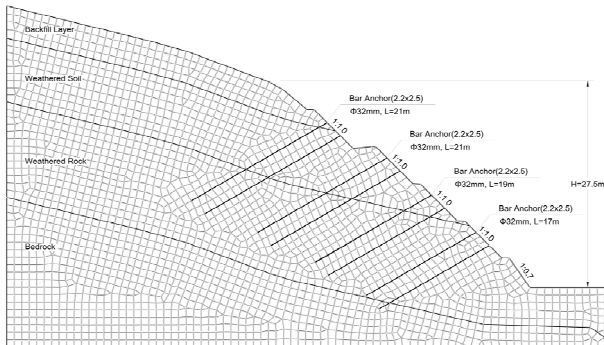
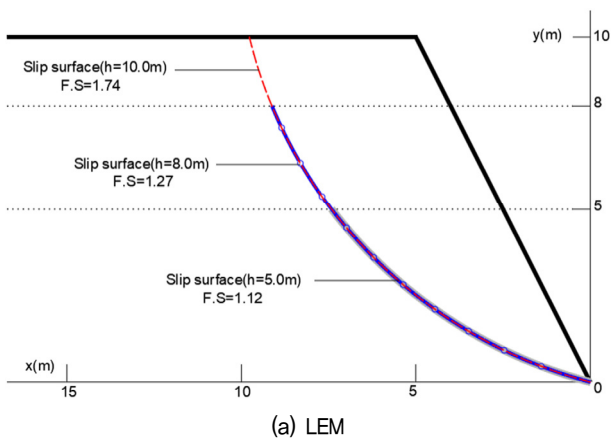


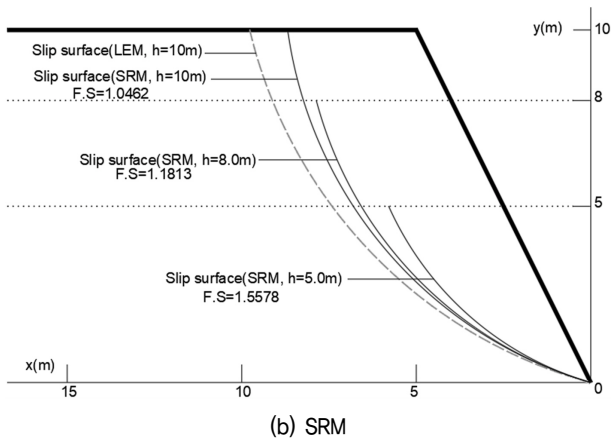
Fig. 6. Cross section of cut slope reinforced with bar anchor

5.2 해석 결과 및 고찰

해석방법에 따른 파괴면의 특징을 확인하기 위한 사전 검토로서 토사 비탈면의 높이가 5m, 8m, 10m 증가할 때 파괴면



(a) LEM



(b) SRM

Fig. 7. Change in slip surface and safety factors with slope height (unreinforced)

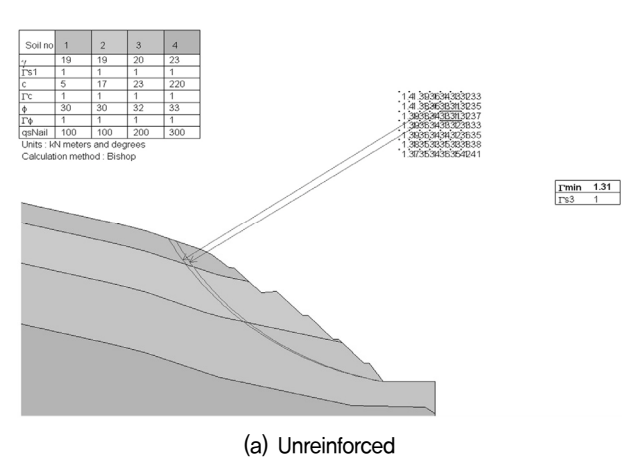
형상 및 안전을 변화를 비교하였다. 그 결과 한계평형해석의 경우 Fig. 7(a)와 같이 파괴면의 심도는 증가하지 않고 비탈면의 높이만큼 파괴면의 길이가 상향으로 연장되는 특성을 보이며 안전율은 증가하였다.

반면, 강도감소법의 경우 Zhang et al.(2014)의 실험연구와 동일하게 Fig. 7(b)와 같이 비탈면의 높이가 증가할수록 파괴면의 심도가 조금씩 깊어지며 안전율은 한계평형해석 결과와 반대로 감소되었다.

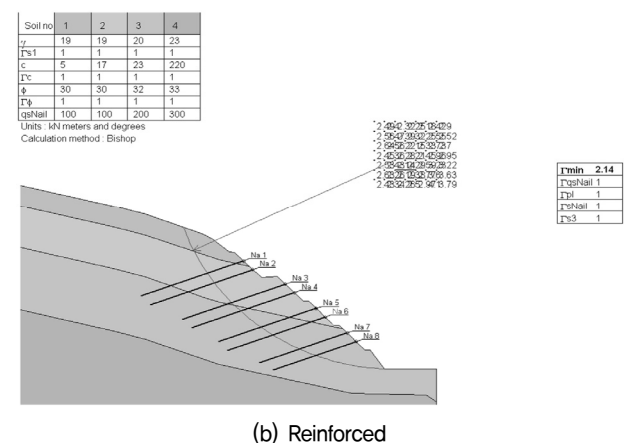
모사대상비탈면의 한계평형해석 및 강도감소법 검토 결과는 Table 6과 같으며, 무보강 시와 보강 시의 안전율 차이에 대한 비를 비교에 정리하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 보강 시 한계평형해석결과 보강 전 안전율 1.31에서 보강 시 안전율 2.14로 안전율이 약 1.63배 증가하였다. 유한요소해석의 경우도 보강 전 안전율 1.32에서 보강 시 안전율 2.02로 안전율이 약 1.53배 증가하였다.

파괴면의 형상은 한계평형해석의 경우 보강재가 비탈면을 통과하여 무보강 시의 파괴형상과 유사하였으나, 유한요소해석의 경우 무보강 시의 파괴형상(Fig. 9(a))과 달리 비탈면 하단의 일부를 제외하고는 Fig. 10(a)와 같이 보강재 외측에 인접하여 더 깊은 파괴면이 발생하는 것으로 나타났다.

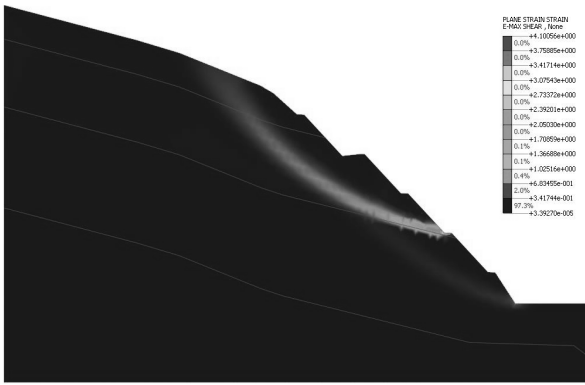


(a) Unreinforced

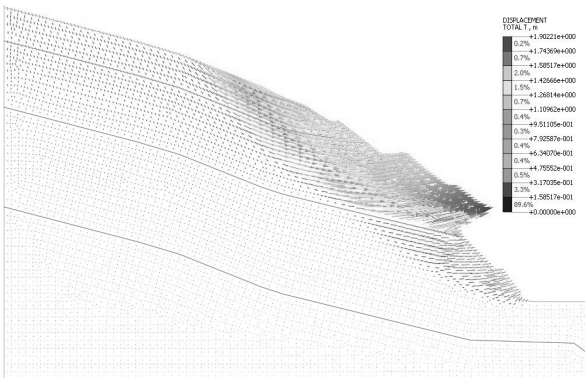


(b) Reinforced

Fig. 8. Analysis results (LEM)

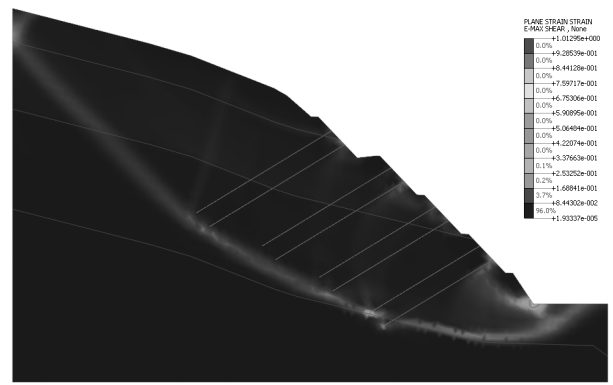


(a) Shape of failure surface

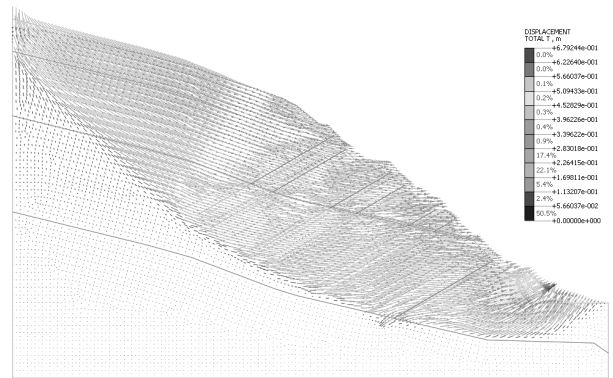


(b) Displacement

Fig. 9. Analysis results (SRM, unreinforced)



(a) Shape of failure surface



(b) Displacement

Fig. 10. Analysis results (SRM, reinforced)

특히, 변위 발생 검토결과 Fig. 10(b)와 같이 비탈면의 변위가 보강되지 않은 최하단부에서 약 679mm로 가장 컸으며, 강봉앵커 주변지반에서는 185~432mm가 발생하였다. 이는 최대발생변위의 약 17~58% 수준이다. 또한, 강봉앵커의 심도가 깊어질수록 주변 지반 변위는 감소하였다.

이러한 결과는 비탈면 내 변위 발생 시 강봉앵커의 수동저항효과로 보강재와 주변지반과의 상호작용에 의해 변위가 억제된 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 강봉앵커의 포스트 텐션 도입 전 수동저항 효과를 확인하기 위하여 한계평형해석 및 유한요소해석을 통해 단기 비탈면의 안전율을 비교하였다. 얻어진 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 대상 현장의 경우 비탈면 높이 27.5m, 비탈면 경사 1:0.7~1.1.0 및 붕적층, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성된 지층조건으로 이루어져 있다.
- (2) 강도감소법(SRM) 해석의 경우 지반의 강도정수 값을

감소시켜 가며 지반의 최소안전율을 찾는 해석기법으로 지반 변형 및 부재에 작용하는 응력이 과도하게 출력되는 특성이 있었다.

- (3) 따라서, 단순한 지반의 변형이나 부재력을 확인하기 위해서는 비선형 정적해석(FEM)을 수행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 파괴면의 경우 한계평형해석 결과가 유한요소해석 결과보다 깊게 발생하는 것으로 확인되었으며, 이는 하중 전이를 고려하지 않고 지중만을 고려하였기 때문으로 사료된다.
- (5) 무보강 시 안전율 비교·결과 한계평형해석과 유한요소해석 결과 모두 유사한 안전율을 보이는 것으로 확인되었다.
- (6) 보강 시 해석결과, 유한요소해석 시 안전율이 한계평형해석에 비하여 약 5.9% 정도 작게 발생하는 것으로 나타났으며, 활동면의 위치도 더 깊게 발생하는 것으로 확인되었다.
- (7) 한계평형해석 시 안전율은 보강 전 1.31에서 보강 시 2.14로 안전율이 약 1.63배 증가하였다.
- (8) 유한요소해석의 경우도 안전율이 보강 전 1.32에서 보강 시 2.02로 안전율은 약 1.53~1.59배 증가하였다.

- (9) 단기 기준안전율이 1.10임을 감안할 때 보강 전에 비하여 한계평형해석은 1.94배, 유한요소해석은 1.84배 안전율이 증가한 것으로 확인되며, 이는 강봉앵커가 단기 시 비탈면 안전을 증가에 기여하는 것으로 사료된다.
- (10) 프리스트레스 도입 전 비탈면 내 변위 발생 시 강봉앵커와 주변지반과의 상호작용에 의한 수동저항효과로 보강재 주변지반의 변위는 약 42~83% 감소하는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

References

- Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999), "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp. 387~403.
- Jeong, E.S. (2019), Analysis of slope stability through tensile force loss of installed permanent anchors. Department of Civil Engineering Graduate School, Inje University.
- Joo, Y.S., Kim N.K., Kim, S.K. and Park, J.S. (2008), "Study of the soilnail-slope design method considering bending resistance of soil nail", *Proceedings of the Society of Civil Engineering*, Vol. 28 (6C), pp. 331~338.
- Kim, S.K., Kim, N.K., Park, J.S., Joo, Y.S. and Kim, T.H. (2008), "Comparison of safety factor for an anchored slope in accordance with the effects of load transfer", *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 55~60.
- Kim, Y.G. (2011), "A study on the behavior and failure mechanism of soil nailing walls using centrifuge model tests", *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12 No. 12, pp. 5963~5973.
- Liu, X., Wang, J., Huang, J. and Jiang, H. (2017), "Full-scale pullout tests and analyses of ground anchors in rocks under ultimate load conditions", *Engineering Geology*, Vol. 228, pp. 1~10, ISSN 0013-7952.
- Matsui, T. and San, K. (1992), "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 59~70.
- Montero-Cubillo, N.S., Galindo, R.A., Olalla, C. and Muñiz-Menéndez, M. (2021), "Pull-out creep laboratory test for soft rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 144. ISSN 1365-1609.
- Naylor, D.J. (1999), "Filling space with tetrahedra", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 44, No. 10, pp. 1383~1395.
- Park, C.S. and Ahn, S.J. (2019), "An analytical study on the slope safety factor considering various conditions", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 35, No. 5, pp. 31~41.
- Park, H.I., Park, J., Hwang, D.J. and Lee, S.R. (2005), "Development of slope stability analysis method based on discrete element method and genetic algorithm I. estimation", *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 115~122.
- Wang, D., Hu, Y. and Randolph, M.F. (2010), "Three-dimensional large deformation finite element analysis of plate anchors in uniform clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 2, pp. 355~365.
- Wang, D., Merifield, R.S. and Gaudin C. (2013), "Uplift behaviour of helical anchors in clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, No. 6, pp. 575~584.
- Wang, D., Cui, K., Wu, G., Feng, F. and Yu, X. (2019), "Performance and working mechanism of tension-compression composite anchorage system for earthen heritage sites", *Heritage Science*, Vol. 7, No. 52. pp. 1~17.
- Xu, H., Wang, F. and Cheng, X. (2007), "Pullout creep properties of grouted soil anchors", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 14, pp. 474~477.
- Xu, D. and Yin, J. (2016), "Analysis of excavation induced stress distributions of GFRP anchors in a soil slope using distributed fiber optic sensors", *Engineering Geology*, Vol. 213, pp. 55~63.
- Zhang, G., Cao, J. and Wang, L. (2014), "Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions", *Soils and Foundations*, Vol. 54, Issue 6, pp. 1175~1187.