

다양한 조건을 고려한 사면안전율에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Slope Safety Factor Considering Various Conditions

박 춘 식¹ Park, Choon-Sik

안 상 진² Ahn, Sang-Jin

Abstract

This paper demonstrates safety factor for effective planning at initial stage by utilizing results on changes of safety factor according to various conditions of slop and examines impacts of factors that affect slope safety factors as well. Firstly, it describes shear strength which satisfies minimum allowable safety factor: 1.20 depending on height and slope. As the height increases by 5.0 m, the safety factors decrease by 0.04 while it tends to consistently reduce by approximately 20%, 30% and 40% after height goes to 10.0 m. As slope reduces by about 0.3, the safety factors increases by 0.4, which shows the rate of safety factors on slope grows by about 10%, 20% and 30% on lowering slope. When cohesion goes up by 10.0 kPa the safety factors increases by around 40% respectably while the angle of internal friction grows by 5°, it increases by about 8%. The rate of safety factors is identified as $F_s = 3.86 H^{-0.59}$, $F_s = 0.43 s$, $F_s = 0.04 c$, $F_s = 0.02 \phi$ depending on height, slope and shear strength. The safety factor with rainfall infiltration tends to increase by 18% compared to the condition of saturated surface on earth.

요 지

본 연구는 다양한 조건에 대한 사면 안정성 검토에 따른 안전율 변화 결과를 활용하여 초기 설계단계에서부터 참고하여 효율적인 설계가 될 수 있는 안전율을 제시하였으며, 사면안전율에 영향을 주는 인자들에 대한 영향성을 검토하였다. 우선 사면 높이 및 사면 기울기에 따라 최소 허용안전율 1.20을 만족하는 지반 전단강도를 제시하였다. 사면높이가 5.0m씩 증가함에 따라 안전율은 0.04씩 감소하는 것으로 나타났고, 사면높이에 따른 안전율은 사면높이 10.0m에 비해 높이가 높아질수록 약 20%, 30%, 40%씩 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 사면 기울기가 약 0.3씩 완만해질수록 안전율은 0.4 정도씩 증가하는 것으로 나타났고, 사면기울기 증가에 대한 안전율 증가비는 기울기가 완만해질수록 약 10%, 20%, 30% 증가하는 것으로 나타났다. 점착력이 10.0kPa씩 증가할수록 안전율은 약 40%씩 증가하는 것으로 나타났고, 내부마찰각은 5°씩 증가할수록 약 8%씩 증가하는 것으로 나타났다. 또한 사면 높이, 사면 기울기, 전단강도에 따른 안전율 변화비는 각 영향인자에 따라 $F_s = 3.86 H^{-0.59}$, $F_s = 0.43 s$, $F_s = 0.04 c$, $F_s = 0.02 \phi$ 의 증가비 관계를 나타내었다. 강우침투 시는 지표면 포화 시의 안전율보다 약 18% 정도 크게 나타났다.

Keywords : Shape factor, Slop, Cohesion, Angle of internal friction, Rainfall infiltration

1 정회원, 창원대학교 공과대학 토목환경화학융합공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Chemical Engr., Changwon National Univ., Tel: +82-55-213-3772, Fax: +82-55-285-9491, pcs@changwon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 공학박사, 명성종합건설 이사 (Doctor of Engr., Myeongsung Construction, Director)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 기후변화로 인해 우기 시 단기간에 많은 양의 비가 내리는 경향이 뚜렷해지고 있으며, 그로 인한 집중호우는 사면의 붕괴원인으로 작용하여 인명 및 재산상의 피해를 유발하고 있다. 단기간에 발생하는 집중호우는 지반의 포화능력 이상으로 지하수위를 형성하여 지반의 전단강도 저하를 유발하여 사면의 직접적인 붕괴원인으로 작용한다. 이 이외에도 사면의 붕괴는 인위적인 절토, 침식 등에 따른 기하학적 변화, 외적 하중 증가 등 그 붕괴 원인이 다양하지만, 사면붕괴는 지하수위 상승에 따른 간극수압 증가에 의해서 가장 많이 발생하고 있다. 지하수위 상승에 따른 지반의 전단강도 감소에 의한 사면붕괴는 대규모로 발생하게 되며 그 피해가 특히 심각하다. 사면에 대한 안정성을 확보하도록 사면의 구배 및 높이 등의 사면형태에 대하여 여러 설계기준에서 제시하고 있지만 그에 따른 다양한 사면조건에 대하여 활용할 수 있는 사면안전율에 대한 제시는 없는 상황이다.

사면안정해석에서 합리적인 전단강도 산정을 위해 붕괴가 발생한 사면에 대하여 최대강도와 잔류강도를 이용한 수치해석을 통해 잔류강도를 사용한 경우가 붕괴발생이 예상되는 결과를 얻어 흙의 전단강도 산정 시 현장조건, 지반특성, 시험결과 등을 충분히 고려해야 한다(Lee, 2008).

최근까지 사면의 안정에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, Oh et al.(2008)은 실제 풍화토 사면에 대하여 침투해석과 안정해석을 수행하였다. 6개월 기간의 실제 강우량을 적용하여 선행강우효과를 발생시킨 후 침투해석을 수행한 결과, 토사층과 암층 경계부를 중심으로 모관흡수력이 감소하고 간극수압이 증가하는 경향을 나타내었고, 안전율이 1.0 미만으로 감소하여 실제 사면의 붕괴를 재현할 수 있었다. 또한 실무적용 시 48시간 강우강도 적용보다 선행강우 및 강우기간 효과를 고려해야 한다고 하였다. Kim(2009)는 불포화 사면지반에서 사면의 지반물성, 형상 등의 지반적 특성뿐만 아니라 침투특성에 의해서도 복합적으로 발생하기 때문에 사면의 안정성 평가 시 강우침투를 고려한 접근이 필요하다고 하였다. 침투 및 사면 안정해석을 수행하여 강우에 따른 사면의 안전율의 변화를 비교하였으며, 투수계수/강우강도 비가 중요한 역할을 한다고 하였다. 또한 상한 함수특성곡선의 경우 그 비가 1~2 사이에 있을

때 안전율 감소가 가장 크다고 하였다.

Rahimi et al.(2010)은 선행강우를 Advanced rainfall, Normal rainfall, Delayed rainfall로 구분하고 지반의 투수에 따라 불포화 사면의 안정성을 분석하였고, Oh et al.(2010)은 사면안정에 대한 강우침투의 영향을 알아보기 위해 포화상태, 포화상태에 따른 유출상태, 불포화상태에 대한 단기 및 장기 안정성의 여러 가지 조건에 대하여 각 조건에 따른 삼축압축시험을 실시하여 적절한 전단강도를 산정하였고, 침투에 의한 각 조건에 대한 사면안정성 검토를 실시하였다. Kim et al.(2013)은 전통적인 사면의 건기와 우기 시 사면안정해석과 불포화지반의 침투해석을 연계한 사면안정해석을 이론식과 수치해석의 검증을 통하여 포화토와 불포화토의 차이점을 실제 현장사면에 적용하여 비교분석하였다. Cho(2014)는 사면의 안정해석에서 원 지반 조건과 특성을 반영한 전단강도를 구하기 위하여 실내시험 및 현장시험을 실시하였고, 침투해석으로 붕괴층 토사 사면의 안정성 검토를 실시하였다. 그 결과로부터 포화에 따라 간극수압 증가에 따라 점착력은 50%, 내부마찰각은 약 4°가량 감소한다고 하였다. Whang(2015)은 사면기울기 및 표면상태에 따른 침투를 고려하기 위하여 토양의 수리특성을 고려한 모형을 사용하고, 토사비탈면에 대한 불포화해석을 수행하여 비탈면 안정해석 시 동일한 강우조건 하에서도 비탈면 경사에 따른 침투율이 고려되어야 한다고 하였다.

강우에 대한 현장계측을 통한 사면안정성 연구로 Gasmol et al.(2000)과 Ryu(2003)이 강우 시 침투로 인한 사면의 파괴 매카니즘을 규명하기 위하여, 현장계측을 통해 모관흡수력과 지하수위의 변화를 관찰하여 불포화 사면 거동을 살피고, 수치해석을 수행하여 계측결과와 비교하였고, Rahardjo et al.(2008)은 현장 함수비 및 간극수압의 실시간 모니터링을 통해서 5일의 선행강우가 사면의 안전에 가장 큰 영향을 미친다고 제시하였다.

Lee and Chang(1996)은 2종의 가상사면과 4개소의 실제 파괴사면사면에 대하여 일반 한계평해석과 유한차분법을 이용한 해석을 실시하여 그 결과를 비교하여 두 해석 결과가 동일하게 파괴되는 것으로 그 신뢰성을 확인하였고, Lee and Yoo(2003)과 Kim(2012)도 한계평형법과 유한요소해석에 의한 강도 감소법으로 안전율을 비교하여 비교적 유사한 안전율이 산출된다고 하였다.

Kim(2004)은 지하수위를 고려한 FEM 사면안정해석

연구를 통해 유한요소해석법이 절편법보다 안전측으로 계산되는 것으로 일반적으로 알려져 있으나 그 반대의 경우도 발생할 수 있으므로 사면 안정해석 시 기존의 절편법과 유한요소법을 함께 검토하는 것이 필요하다고 하였다. 또한 Hammah(2005)는 30개의 사면에 대하여 일반적으로 많이 사용되는 한계평형해석에 비교하여 강도감소법에 대한 효율성과 활용성에 대하여 언급하였고, Cheng et al.(2006)은 내부마찰각 “0”인 경우를 제외하고 한계평형해석과 강도 감소법에 의한 유한요소해석법이 비교적 잘 일치한다고 하였으며, 강도 감소법은 내부마찰각, 탄성계수, 요소크기 등의 여러 인자에 대하여 비교적 민감하지 않다고 하였다. Yang et al.(2010)은 강도 감소법에 의한 사면파괴에 대하여 사면 파괴는 사면의 전요소의 강도감소에 의한 파괴보다는 국부적인 강도감소에 의한 파괴가 발생한다고 하여 이에 대한 다양한 모듈 탄소성 모델을 사용하여 실제적인 예제에 대하여 보여주었다. Won(2008)은 사면구배의 변화에 따른 안전율 변화를 알아보기 위하여 사면높이, 구배, 점착력, 내부마찰각을 변화시켜 안정해석을 수행하여 회귀분석을 통해 안전율 추정식을 각 경우에 따라 산정하였다. 본 연구는 Won(2008)의 연구에 사면높이 25m를 추가하였고, 사면 구배도 1:2.0을 추가하여 안전율 추정식 보다는 다양한 사면조건에 따라 안전율을 산정하여 각 조건에 적절하고 합리적으로 적용할 수 있는 개략적인 사면 안전율 기준을 제시하였고, 강우침투에 대한 사면안전율과 지표면 포화 시의 사면안전율을 구체적으로 비교하였다.

위와 같은 연구들은 대부분 강우에 따른 포화 및 불포화토의 특성, 침투에 따른 전단강도, 모관흡수력 등 영향인자에 의한 강우침투에 대한 사면안정성 연구와 한계평형해석과 강도감소법에 의한 사면해석방법에 대한 해석적 비교연구 등으로 설계자가 초기 설계단계에서 바로 활용할 수 있는 사면안전율에 대한 실용적인 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실무에서 활용할 수 있도록 다양한 사면조건에 따라 안전율을 산정하여 각 조건에 적절하고 합리적으로 적용할 수 있는 개략적인 사면 안전율 기준을 제시하고, 사면높이, 사면기울기, 전단강도의 영향인자들과 사면안정해석 방법들에 따른 사면의 안전율 변화특성을 알아보고자 하였다.

2. 해석 방법 및 조건

2.1 해석 방법

본 연구는 사면안정 해석방법 중 일반적으로 사용되는 한계평형해석법을 이용하였다. 한계평형해석법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려고 할 때 파괴체에 작용하는 힘들의 평형을 해석하는 것으로 활동면을 가정한 후 활동력과 저항력을 검토하여 저항력과 활동면의 비를 안전율로 정의함으로써 안정해석을 수행하는 방법이다. 한계평형이론의 특징은 각 방법에 있어 안전율의 정의가 동일하고, 파괴 활동면 상의 모든 점에서는 안전율은 동일하다. 또한 파괴체를 수개의 연직 절편으로 분할하고 각 절편에 대한 평형을 고려하며, 한계평형법에 의한 사면안정 해석은 부정정 문제이므로 부정정차수 만큼의 가정을 도입하여야 한다.

절편법에서는 한 절편에 작용하는 힘들은 Fig. 1에 나타나 있다. 힘과 모멘트 평형조건을 모두 만족시키는 한계평형법에서는 각 절편마다 3개 방정식을 세울 수 있으므로 절편의 수가 n 개이면 $3n$ 의 방정식이 세워진다. 한편, 미지수의 수는 힘의 평형조건으로부터 절편의 바닥면에 수직으로 작용하는 n 개의 수직력(P), 절편 측면에 작용하는 각각 $n-1$ 개의 전단력(X)과 수평력(E), 1개의 안전율을 포함해 $3n-1$ 개의 미지수가 있다. 또한, 모멘트 평형조건으로부터 n 개의 절편바닥면에 작용하는 수직력(P)의 작용위치(a), $n-1$ 개의 절편 측면에 작용하는 수직력과 수평력의 합력(Z)의 위치(k)가 있다. 따라서 전체 미지수는 $5n-2$ 개이고 방정식의 수는 $3n$

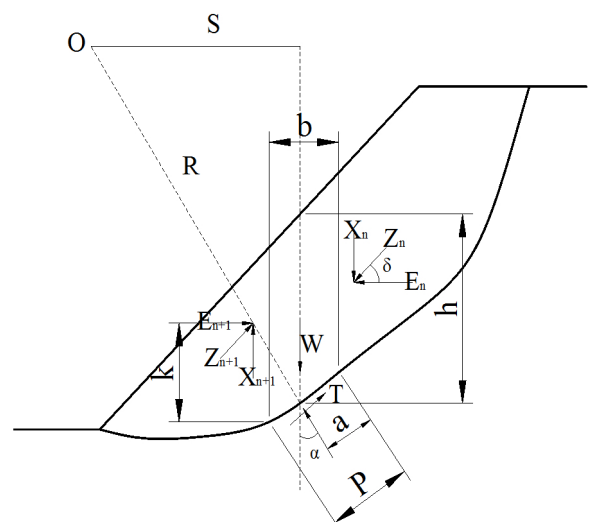


Fig. 1. Forces for one slice

개가 되어 $2n-2$ 차 부정정이 된다. 여기서, 수직력(P)의 작용위치(a)가 절편바닥면 길이의 반이라고 하면 $n-2$ 차 부정정 문제가 된다. 따라서 부정정 차수 $n-2$ 개의 가정을 세워야 정정문제가 된다.

사면 안정검토를 위한 한계평형해석법을 위해 수많은 사례에서 실제로 그 적용성이 증명된 TALREN 97를 사용하였다. 또한 강우침투에 대한 안정성 검토를 위해서는 강우강도에 따른 침투에 의해 지하수위 변화에 대한 추정이 가능한 Seep/W를 사용하였고, Slope/w와 침투연계해석으로 해당 조건에 대하여 지하수위 변화를 고려하여 사면의 안정성 검토를 실시하였다.

2.2 해석조건

2.2.1 해석단면

다양한 사면조건에서 사면 안전율의 변화를 알아보기 위하여 사면높이는 10.0m, 15.0m, 20.0m, 25.0m로 한 단 5.0m 높이의 사면을 2단에서 5단으로 변화시켰고, 그 때의 사면경사는 1:1.2, 1:1.5, 1:1.8, 1:2.0으로 변화시켰다. 또한 소단은 높이 5.0m 마다 1.0m로 가정하였다. 지하수위는 지표면이 포화된 우기 시 상태와 지표 하 5.0m(초기 지하수위 지표면 하 5.0m는 사면 형상을 따라 5.0m 하부로 설정)에서 강우강도를 고려한 침투해석을 수행하여 강우지속시간에 상승한 지하수위를 고려하였다. 또한 사면은 단일 토층에 대한 검토로 가정하였다. 이는 다양한 토층이 있으면 사면 파괴형상과 안전율에 대한 명확한 기준을 제시할 수 없기 때문에 본 연구에서는 토층을 단일한 층으로 가정하여 해석을 수행하였다.

2.2.2 지반정수

한계평형해석에 적용된 토층의 전단강도는 실제 흙의 전단강도를 반영하기 위하여 단위중량은 18.0kN/m^3 , 점착력은 10.0~40.0kPa 범위에서 10.0kPa로 증가하는 것으로 가정하였고, 내부마찰각은 20°, 25°, 30°로 변화

시켰다. 이러한 지층은 일반 토사층, 풍화토층, 풍화암층에 해당되는 지층을 가정하여 모델링하였다. 토층의 전단강도는 Jung(2015)에 의해 수행된 연구에서 제시된 문헌을 참고하여 결정하였다. 점착력 10.0kPa 이하의 값은 차이가 작아 안전율 변화가 비교적 적을 것으로 판단하였고, 내부마찰각 30.0° 이상은 내부마찰각의 전단강도 지배효과가 크게 나타날 것으로 판단하였기 때문에 그 범위를 30.0° 이하로 가정하였다.

강우침투에 의한 지하수위 산정을 위해 토사층의 투수계수는 지반공학시리즈 5 사면안정(Korean geotechnical society, p.20, 1994)를 참고하여 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 결정하였다. 일반적으로 사면의 토사층은 모래질 성분이 포함되어 있는 경우가 많으므로 모래질의 특성을 반영하도록 투수계수를 결정하였다. 또한 투수계수가 작을 경우 지하수의 상승효과가 미비하게 되므로 본 연구에서는 토사층의 투수계수를 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 결정하였다.

2.2.3 적용 강우량 산정

본 연구에서 적용된 강우량은 국토교통부 한국확률강우량 정보(<http://www.k-idf.re.kr>)의 자료를 활용하여 창원지역의 확률강우강도를 적용하였다. 본 연구는 국지성 호우와 같이 극한조건에 대한 연구라기보다는 일반적인 사면 해석연구를 바탕으로 그 경향성을 연구하는데 목적이 있기에, 일반적인 강우강도를 적용하였고, 확률강우강도 중 72시간 지속시간의 100년 빈도의 강우강도를 적용하여 침투해석에 따른 지하수위 상승을 고려하였다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 한계평형해석 결과

한계평형해석을 수행한 지표면 포화 시에 대한 사면 안정검토 결과에 의해 사면 높이 및 사면 기울기에 따라

Table 1. Minimum shear strength with regard to height and slope

Minimum shear strength (cohesin and angle of internal friction)				
Height (m)	Slope			
	1:1.2	1:1.5	1:1.8	1:2.0
10.0	30.0kPa, 20°	20.0kPa, 25°	20.0kPa, 20°	20.0kPa, 20°
15.0	40.0kPa, 20°	30.0kPa, 25°	30.0kPa, 20°	20.0kPa, 30°
20.0	-	40.0kPa, 25°	30.0kPa, 30°	30.0kPa, 20°
25.0	-	-	40.0kPa, 25°	40.0kPa, 25°

최소 허용안전율 1.20을 만족하는 최소한의 지반 전단 강도를 Table 1에 나타내었다. 실무에서는 각 현장의 지반조건에 맞게 Table 1에 제시된 점착력 및 내부마찰각의 전단강도를 참고하여 개략적으로 사면 높이 및 사면 기울기를 결정할 수 있고, 또한 초기 사면계획에서 보다 효율적인 설계가 될 수 있도록 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

3.1.1 사면높이에 따른 변화

사면높이에 따른 평균안전율 변화를 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 나타내었다. 사면기울기별로 높이에 따른 안전율과 그에 따른 최대, 최소, 평균값을 나타내었다. 사면기울기가 완만해질수록 평균안전율은 크게 나

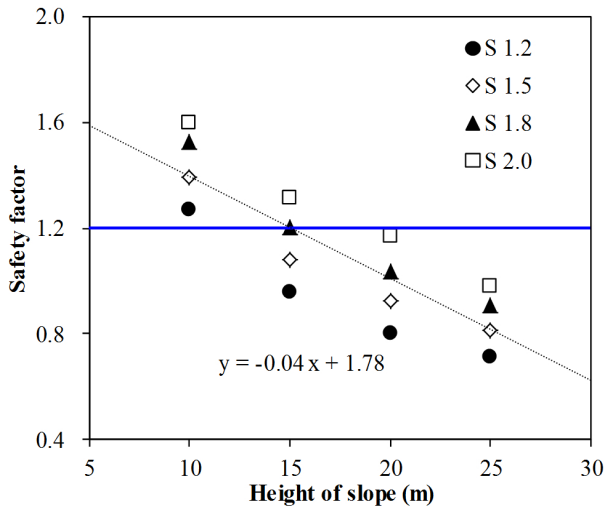


Fig. 2. Change of average safety factor with regard to height

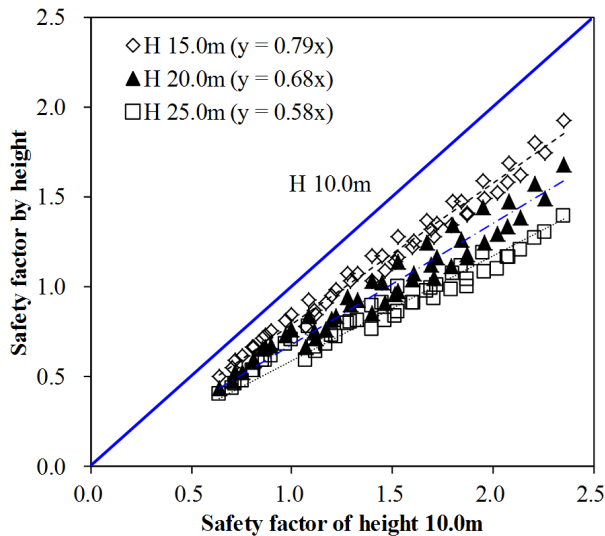


Fig. 3. Normalized safety factor on height 10.0m

타지만 사면높이 증가에 따른 안전율 감소는 평균적으로 높이가 5.0m 증가함에 따라 안전율은 약 0.04씩 감소하는 것을 알 수 있었다.

높이변화에 따라 안전율이 변화되는 비를 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 높이 10.0m에 대하여 정규화하여 그 변화를 살펴보았다. 사면기울기가 완만해질수록 높이 10.0m에 대한 안전율 감소비는 점차로 줄어드는 것을 알 수 있었고, 사면높이 15.0m는 10.0m에 비해 약 20.0% 감소하는 것으로 나타났고, 20.0m는 약 30.0%, 25.0m는 약 40.0% 씩 감소하는 것을 알 수 있었다. 즉 사면높이 15.0m까지는 10.0m에 비해 높이 1.0m에 대하여 약 4%씩 감소하며, 사면높이 20.0m는 약 3%, 25.0m는 약 2.67%로 사면높이가 높아질수록 사면높이 10.0m에 대한 안전율 감소비는 점차로 줄어드는 경향을 나타내었다. 안전율 감소비를 나타낸 Fig. 4에서는 사면높이가 낮을 경우 안전율 감소비가 비교적 급격하게 작아지고, 높이가 높아질수록 대체적으로 비슷한 경향으로 변화하는 $F_s = 3.86 H^{-0.59}$ 의 거듭제곱의 형태로 감소하는 것을 알 수 있었다. 각 결과에 대한 안전율 감소비를 Table 2와 같이 정리하였다.

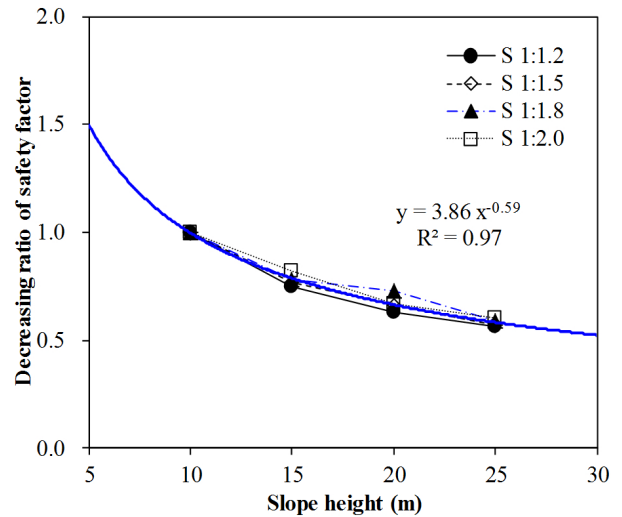


Fig. 4. Decreasing ratio of safety factor with regard to height

Table 2. Decreasing ratio of safety factor on height 10.0m

Height (m)	Slope				Total	Remarks
	1.2	1.5	1.8	2.0		
10.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
15.0	0.75	0.77	0.78	0.82	0.79	▽20%
20.0	0.63	0.66	0.73	0.67	0.68	▽30%
25.0	0.56	0.57	0.59	0.60	0.58	▽40%

3.1.2 사면기울기에 따른 변화

Fig. 5에는 기울기에 따른 평균적인 안전율 증가를 나타내었다. 사면기울기 증가에 따라 약 0.4의 안전율 증가를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 사면기울기 변화에 따른 안전율에 대한 영향을 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 각 사면높이별로 사면기울기에 대하여 기울기 1.20에 대하여 정규화하여 나타내었다. Fig. 6과 Table

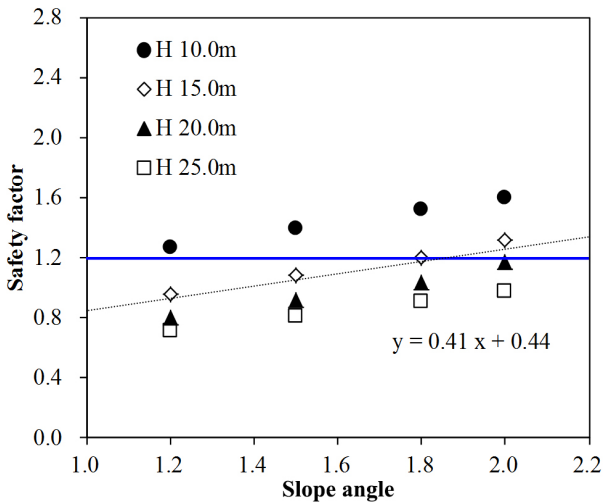


Fig. 5. Change of average safety factor with regard to slope

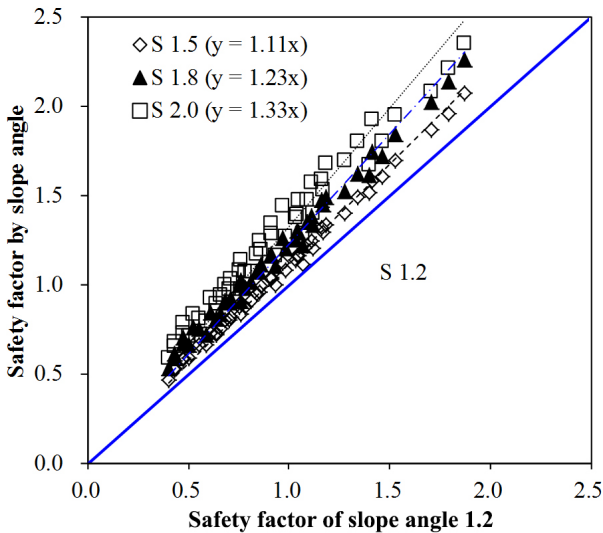


Fig. 6. Normalized safety factor on slope 1:1.2

Table 3. Increasing ratio of safety factor on slope 1:1.2

Slope	Height (m)				Total	Remarks
	10.0	15.0	20.0	25.0		
1:1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
1:1.5	1.10	1.12	1.14	1.13	1.11	△10%
1:1.8	1.20	1.24	1.26	1.28	1.23	△20%
1:2.0	1.25	1.36	1.45	1.35	1.33	△30%

3에서 사면기울기 증가에 대한 안전율 증가비는 기울기 1.2에 대하여 1.5의 경우는 약 10% 증가하는 것으로, 1.8의 경우는 약 20%, 2.0의 경우는 약 30% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 각 경우에 대하여 기울기가 증가할 경우 안전율 증가비가 약 3.33% 정도의 일정한 증가 경향을 나타내는 것을 의미한다.

사면기울기 증가에 따른 안전율 증가비는 Fig. 7에 나타내었다. 여기에서 사면기울기가 증가할수록 안전율 증가비는 $F_s = 0.43$ 로 일정한 증가경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 사면높이의 안전율에 대한 영향과 비교하면 대체적으로 안전율 변화에는 3~4% 정도의 비슷한 영향을 미치는 것을 알 수 있었지만, 사면높이는 높이가 높아질수록 영향이 다소 감소하는 것으로, 사면기울기는 기울기 변화에 따라 일정한 영향을 미치는 것으로 나타나 서로 다른 경향으로 사면 안전율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3.1.3 지반의 전단강도에 따른 변화

지반의 전단강도인 점착력과 내부마찰각에 대한 사면 안전율 변화의 영향을 알아보기 위하여 두 가지 요소에 대하여 각각 한계평형해석결과를 정리하였다. 우선 전체 해석결과에 대하여 점착력과 내부마찰각에 대하여 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 점착력은 10.0kPa, 내부마찰각은 20°에 대하여 각각 정규화 하여 나타내었다. 점착력 10.0kPa에 대하여 점착력이 10.0kPa씩 증가할수록 안전율은 약 40%씩 증가하는 것으로 나타났고, 내부마찰각은 5°씩 증가할수록 약 8%씩 사면안전율이 증가하

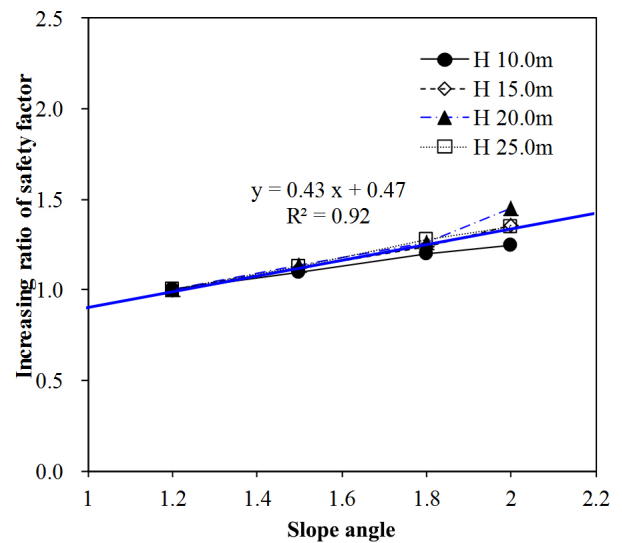


Fig. 7. Increasing ratio of safety factor with regard to slope

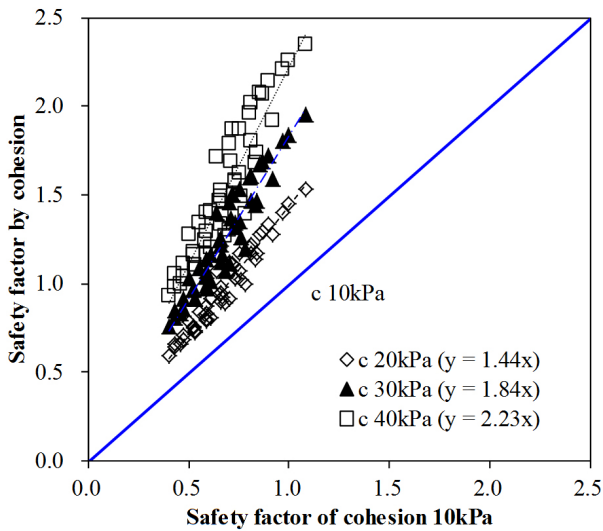


Fig. 8. Normalized safety factor on cohesion 10kPa

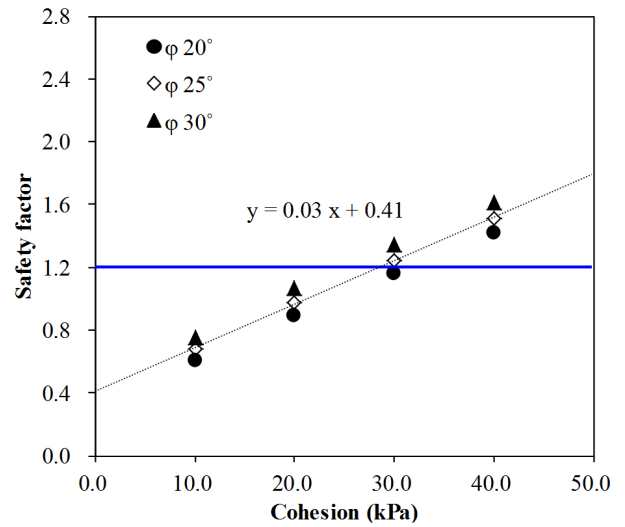


Fig. 10. Change of average safety factor with regard to cohesion

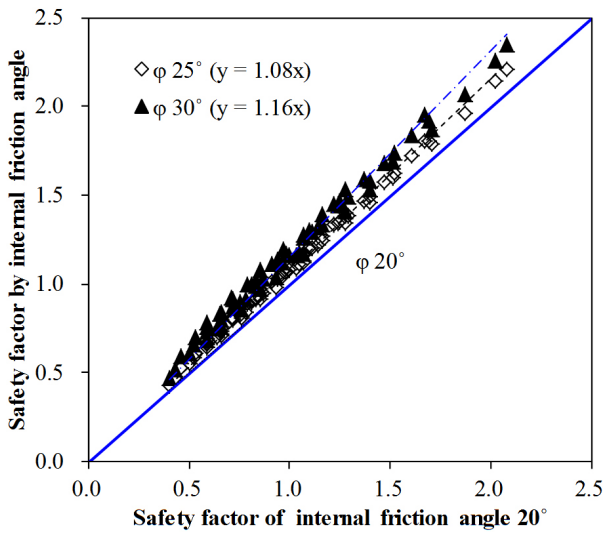


Fig. 9. Normalized safety factor on angle of internal friction 20°

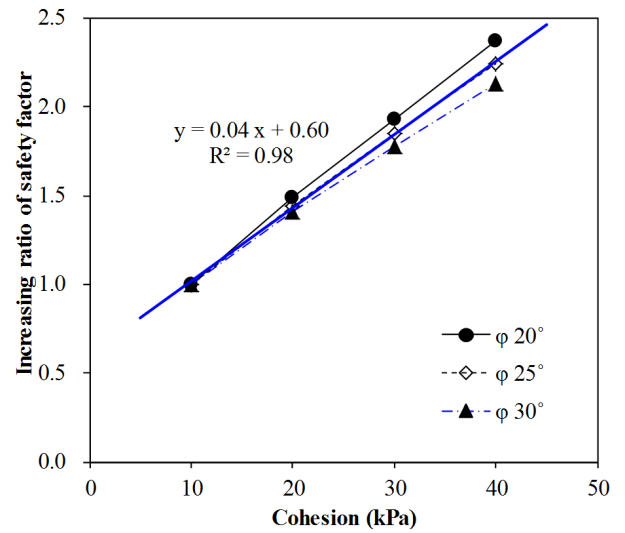


Fig. 11. Increasing ratio of safety factor with regard to cohesion

는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과에 의해 사면의 안전율에 점착력의 영향이 내부마찰각에 의한 영향보다 크게 작용한다고 할 수 있다.

1) 점착력

사면안전율에 대한 점착력의 영향을 알아보기 위해 Fig. 10에 나타내었다. 점착력이 증가할수록 안전율의 변화가 급격하게 발생하였고, 점착력이 클수록 안전율의 변화범위가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 점착력이 작을수록 파괴되는 양상이 파괴 기준안전율 1.0 이하에서 일정한 원호활동 파괴양상으로 파괴가 발생하기 때문에 나타난 결과라 사료된다. 또한 평균값의 점착력 증가에 따른 기울기가 0.03으로 나타나 점착력

Table 4. Increasing ratio of safety factor on cohesion 10.0kPa

Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (°)			Total	Remarks
	20	25	30		
10.0	1.00	1.00	1.00	1.00	-
20.0	1.49	1.44	1.41	1.44	△40%
30.0	1.93	1.85	1.78	1.84	△80%
40.0	2.37	2.24	2.13	2.23	△120%

10.0kPa 증가에 따라 안전율이 0.03 정도의 크기로 증가하는 것으로 나타났다. 한편 Fig. 11을 보면 점착력이 증가할수록 내부마찰각에 따른 안전율 증가비는 약간씩 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11과 Table 4는 점착력 변화에 따른 안전율 변화비를 나타낸 것으로 Fig. 11에서 $F_s = 0.04c$ 로 일정한

안전율 증가비를 나타내었고, 그 증가비는 Table 4에서 쉽게 알 수 있듯이 점착력 10.0kPa 씩 증가할수록 안전율이 40%씩 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과에 의해 점착력은 사면안전율에 일정한 증가 영향을 미친다고 판단할 수 있다.

2) 내부마찰각

점착력의 경우와 마찬가지로 사면안전율에 대한 내부마찰각의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 12와 같이 내부마찰각에 대한 안전율 변화를 나타내었다. 점착력 변화와 비교하여 안전율 증가양상이 비교적 작은 것을 알 수 있었고, 또한 내부마찰각 증가에 따른 안전율 분포 폭도 비교적 작은 것을 알 수 있었다. 이는 점착력에 대한 영향보다 사면안전율에 미치는 변화 양상이 작은 것을 의미한다고 할 수 있다. 한편 내부마찰각 증가에 따른 평균안전율 증가를 살펴보면 마찰각 5° 증가에 따라 약 0.02의 안전율 증가를 보였고, 점착력 변화에 따른 뚜렷한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 내부마찰각보다는 점착력 변화에 따라 안전율 변화가 크게 발생할 수 있다는 것을 의미한다고 생각할 수 있다.

내부마찰각에 따른 안전율 변화를 알아보기 위해 그림 Fig. 13과 같이 나타내었다. 점착력이 증가할수록 내부마찰각에 따른 안전율 증가비는 점차로 줄어드는 경향을 나타내었고, 안전율 증가비가 내부마찰각 증가에 따라 $F_s = 0.02\phi$ 로 일정한 증가비를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13 및 Table 5에서 안전율 증가비는 내부마찰각이 5°씩 증가할수록 약 8%씩 증가하는 경향

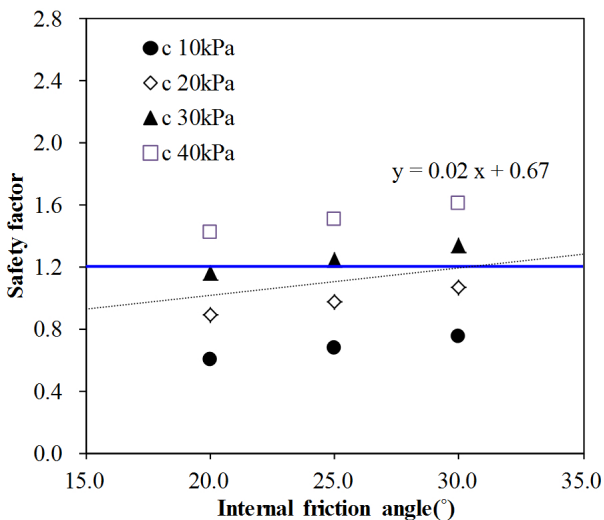


Fig. 12. Change of average safety factor with regard to angle of internal friction

Table 5. Increasing ratio of safety factor on angle of internal friction 20°

Angle of internal friction (°)	Cohesion (kPa)				Total	Remarks
	10.0	20.0	30.0	40.0		
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
25	1.12	1.09	1.07	1.06	1.08	△8%
30	1.26	1.19	1.15	1.13	1.16	△16%

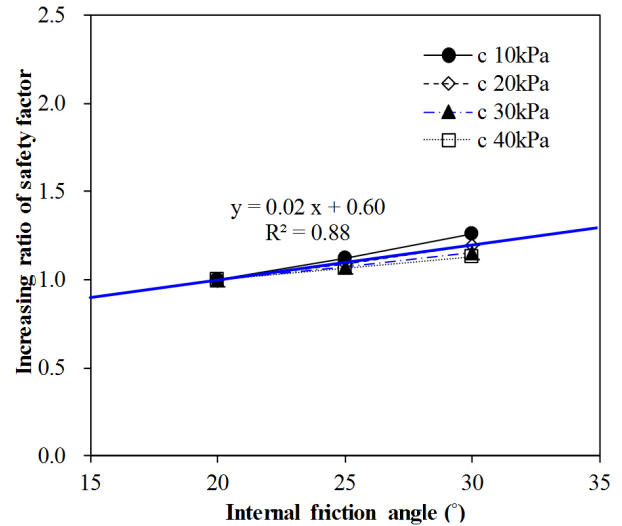


Fig. 13. Increasing ratio of safety factor with regard to angle of internal friction

을 나타내어 점착력의 증가경향보다는 작게 나타난다고 할 수 있다.

3.2 지하수위에 따른 비교·분석

지하수위에 따른 사면의 안전율 변화를 비교하기 위하여 지표면 포화 및 강우침투에 대한 사면해석결과를 비교하였다. 강우침투에 대한 검토는 각 사면높이 25.0m에 대하여 사면기울기를 1:1.2~1:2.0으로 변화시킨 경우와 사면기울기 1:2.0에 대하여 사면높이를 10.0~25.0m로 변화시킨 경우에 대하여 총 84개의 강우침투에 대한 경우를 추가적으로 해석하였다.

강우침투에 대한 지하수위 상승을 알아보기 위하여 대표적으로 사면높이 25.0m, 사면기울기 1:2.0에 대한 72시간 지속시간에 대한 100년 빈도 강우강도에 대한 지하수 상승을 Fig. 14에 나타내었다. 초기 지하수위는 지표 하 5.0m에 위치하는 것으로 가정하였고, 강우침투에 따른 지하수위는 사면하단으로 갈수록 지하수위 상승이 높게 나타나는 것으로 나타났다.

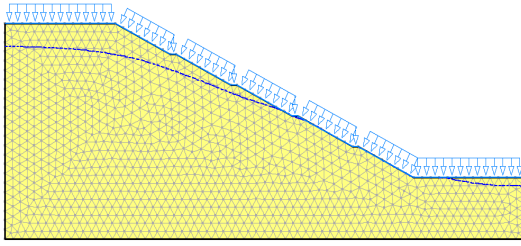


Fig. 14. Ground water level by rainfall infiltration (height=25.0m, slope=1:2.0)

강우침투에 의한 지하수위 상승에 따른 안전율 변화를 알아보기 위하여 Fig. 15와 같이 지표면 포화 시 안전율에 대하여 강우침투에 대한 안전율을 정규화하여 나타내었다. 강우침투에 대한 사면 안전율이 지표면 포화에 대한 안전율 보다 약 18%정도 크게 나타났다. 이는 강우침투에 의해 지표 하에 포화대가 형성되지만 지하수위가 지표면 포화 시 보다 낮게 형성되기 때문에 원호활동에 대한 깊은 파괴에 대한 영향은 비교적 적게 나타난 것으로 사료된다. 물론 포화대 형성에 따른 얕은 파괴가 발생되면 사면파괴의 양상이 다르게 나타날 수도 있을 것으로 생각된다.

사면높이, 사면기울기, 전단강도에 대한 영향인자에 대한 영향을 알아보기 위하여 각각의 인자에 대한 영향성 검토를 분석하였다. Fig. 16은 강우침투 해석 결과 사면높이 10.0m에 대한 안전율 감소비를 나타낸 것으로 사면높이 15.0m는 10.0m에 비해 약 20.0% 감소하는 것으로 나타났고, 20.0m는 약 30.0%, 25.0m는 약 40.0%씩 감소하는 것으로 나타나 지표면 포화 시와 거의 비슷한 경향을 나타는 것을 알 수 있었다.

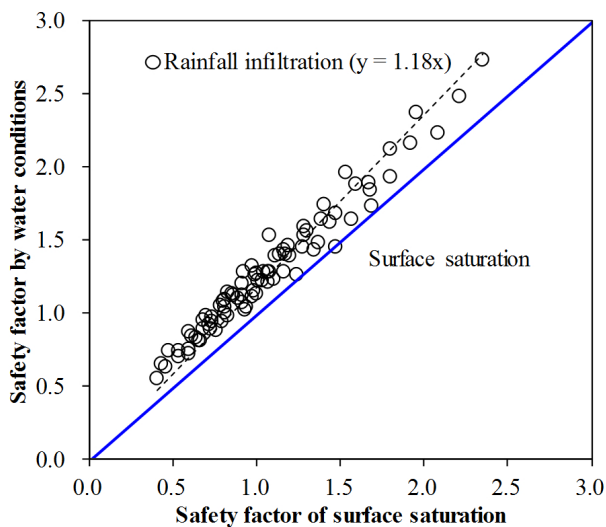


Fig. 15. Safety factor with regard to ground water level

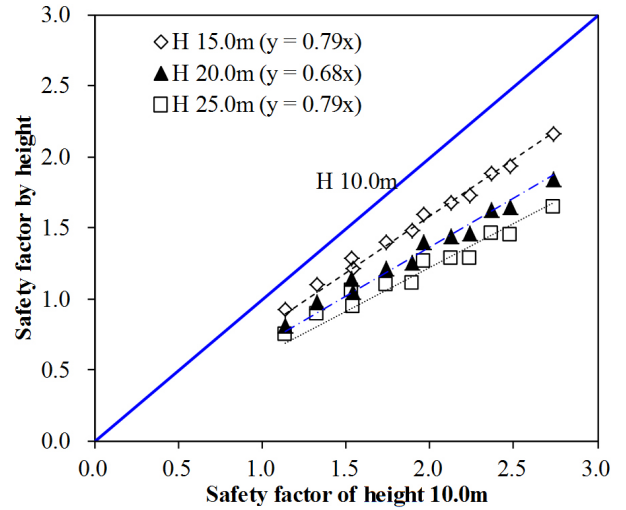


Fig. 16. Safety factor on height 10m

또한 Fig. 17의 사면기울기에 따른 안전율 비교에서 사면기울기 증가에 대한 안전율 증가비는 기울기 1.2에 대하여 1.5의 경우는 약 10% 증가하는 것으로, 1.8의 경우는 약 20%, 2.0의 경우는 약 30% 증가하는 것으로 나타나 이 또한 지표면 포화 시와 거의 유사한 증가비를 나타냈다. 따라서 단일 지층의 일정한 투수계수를 적용한 강우침투에 대한 사면의 안전율 변화는 사면의 높이, 기울기 등의 외적 요인에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 결론지을 수 있다.

Fig. 18의 점착력 10kPa에 대한 점착력의 정규화에 대한 결과에서 점착력이 10.0kPa씩 증가할수록 안전율 증가비는 약 25%, 50%, 70%씩 증가하여 Table 4의 지표면 포화시의 안전율 증가비 약 40%, 80%, 120%의 증

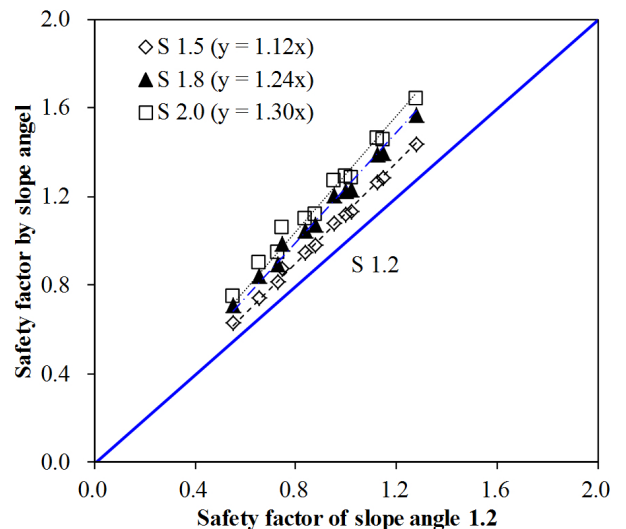


Fig. 17. Safety factor on slope 1:1.2

가을 보다는 약 40% 정도 작게 나타났다. 그리고 Fig. 19의 내부마찰각 20°에 대한 각 내부마찰각의 정규화에 대한 결과에서는 내부마찰각이 5°씩 증가할 때는 안전율을 증가시키는 약 15%, 30%로 Table 5의 지표면 포화시의 안전율 증가비 약 8%, 16% 보다는 두 배 정도 크게 나타났다. 이는 강우침투로 인해 지하수위가 상승하더라도 지하수위 위의 포화대 지반의 전단강도의 영향으로 파악할 수 있을 것으로 생각된다. 즉 이 부분의 지반에서는 내부마찰각의 영향이 크게 나타나 안전율 변화에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 완전포화 될 경우는 점착력의 영향이 크게 나타날 것으로 판단할 수 있고, 불포화토의 지반에서는 내부마찰각의 영향이 다소 크게 나타날 것으로 판단 할 수 있다.

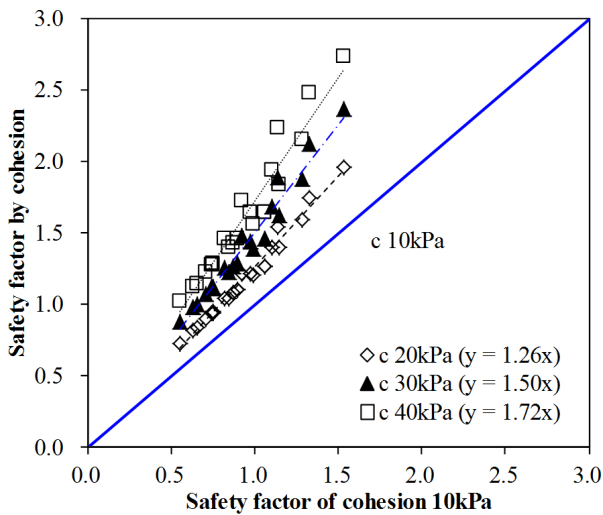


Fig. 18. Safety factor on cohesion 10kPa

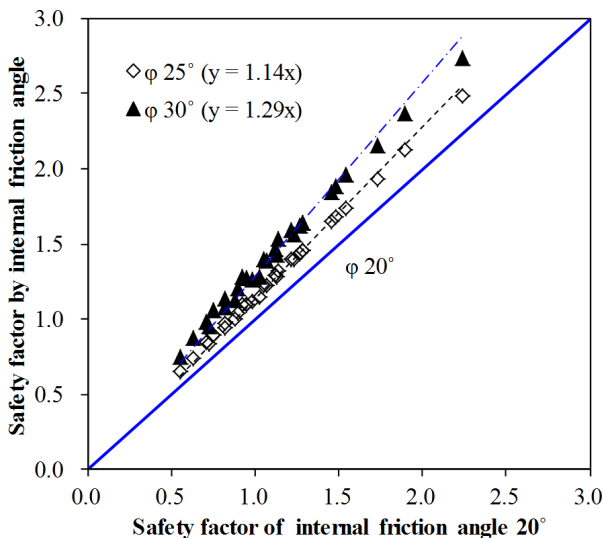


Fig. 19. Safety factor on angle of internal friction 20°

4. 결 론

본 연구는 다양한 조건에 대한 사면 안정성 검토에 따른 안전율 변화 결과를 활용하여 초기 설계단계에서부터 참고하여 효율적인 설계가 될 수 있도록 할 수 있는 안전율을 제시하고자 하였으며, 사면안전율에 영향을 주는 인자들에 대한 영향성을 검토하고자 하였다. 본 연구에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 설계 초기단계에서 활용할 수 있는 영향인자별 안전율을 제시하였으며, 또한 사면 높이 및 사면 기울기에 따라 최소 허용안전율 1.20을 만족하는 지반 전단강도를 나타내었다.
- (2) 지표면 포화 시 사면높이에 따라 평균적으로 사면 높이가 5.0m씩 증가함에 따라 안전율은 0.04씩 감소하는 것으로 나타났고, 사면높이에 따른 안전율은 사면높이가 10.0m에서 25.0m로 5.0m씩 높아질수록 약 20%, 30%, 40%씩 높이증가에 따라 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 사면안전율 감소비는 사면높이가 낮을 경우 비교적 급격하게 작아지고, 높이가 높아질수록 대체적으로 비슷한 경향으로 변화하는 $F_s = 3.86 H^{-0.59}$ 의 거듭제곱의 형태로 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 사면 기울기가 약 0.3씩 완만해질수록 평균적으로 안전율은 0.4 정도로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 사면기울기 증가에 대한 안전율 증가비는 기울기 1.2에 대하여 1.5의 경우는 약 10% 증가하고, 1.8의 경우는 약 20%, 2.0의 경우는 약 30% 증가하는 것으로 나타났으며, 사면기울기가 완만해질수록 안전율 증가비는 $F_s = 0.43 s$ 로 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 점착력이 증가할수록 안전율 변화가 급격하게 발생하였고, 점착력이 클수록 안전율 변화 범위가 크게 나타났다. 점착력이 10.0kPa씩 증가할수록 안전율은 약 40%씩 증가하는 것으로 나타났고, 내부마찰각은 5°씩 증가할수록 약 8%씩 증가하는 것으로 나타났다. 또한 평균값의 증가에 따라 점착력이 10.0kPa 증가할수록 0.03 정도의 안전율 증가를 나타냈고, 내부마찰각은 5° 증가에 따라 약 0.02의 안전율 증가를 나타내었다. 또한 전단강도에 따른 안전율 변화비는 점착력과 내부마찰각에 따라 $F_s = 0.04c$, $F_s = 0.02\phi$ 의 일정한 증가비 관계를 나타내었다.

(5) 강우침투에 대하여 사면높이 및 기울기의 영향은 지표면 포화 시와 거의 유사하게 나타났고, 지하수위 위 불포화토의 내부마찰각이 사면안전율에 크게 영향을 미쳐 지표면 포화시의 안전율보다는 약 18% 정도 크게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2015년 8월 창원대학교 박사학위 논문(안상진, 2015)에서 발췌하였습니다.

참고문헌 (References)

- Ahn, S. J. (2015), "An analytical study on the safety factor of slopes considering various condition", Changwon National University Doctoral Dissertation (in Korean).
- Chen, Y. M., Lansivaara, T., and Wei, W. B. (2007), "Two-dimensional Slope Stability Analysis by Limit Equilibrium and Strength Reduction Methods", *Computers and Geotechnics*, No.34, Vol.3, pp.137-150.
- Cho, S. B. (2014), "Research on slope stability analysis of colluvium", University of Seoul Master's Thesis (in Korean).
- Gasmo, J. M., Rahardjo, H., and Leong, E. C. (2000), "Infiltration Effects on Stability of a Residual Soil Slope", *Computers and Geotechnics*, Vol.26, No.2, pp.145-165.
- Hammah, R. (2005), "A Comparison of Finite Element Slope Stability Analysis with Conventional Limit-equilibrium Investigation", *In Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint IAHR-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences-GeoSask*.
- Jung, J. G. (2015), "A study on the characteristics of shear strength parameters of various soils", Changwon National University Doctoral Dissertation (in Korean).
- Kim, M. S. (2012), "Comparison of finite element method and limit equilibrium method for slope stability analysis", Chonbuk National University Master's Thesis (in Korean).
- Kim, Y. M. (2004), "Slope Stability Analysis Considering Seepage Conditions by FEM Using Strength Reduction Technique", *Journal of the Korean geotechnical society*, No.20, Vol.8, pp.97-102 (in Korean).
- Kim, Y. S., Kim, J. H., Lee, J. G., and Kim, S. S. (2013), "A Study on Soil Slope Stability Design Considering Seepage Analysis", *Journal of the Korean geotechnical society*, No.29, Vol.1, pp.135-147 (in Korean).
- Kim, Y. G. (2009), "Soil slope design and stability evaluation methodology considering hydraulic conductivity and rainfall characteristics", KAIST Doctoral Dissertation (in Korean).
- Korean geotechnical society (1994), *geotechnical engineering series 5*, Gumi company, pp.20 (in Korean).
- Lee, B. R. (2008), "A study on the application method of shear strength parameters for the cut-slope stability analysis", University of Seoul Master's Thesis (in Korean).
- Lee, D. Y. and Yoo, C. S. (2003), "Comparative Study between Finite Element Method and Limit Equilibrium Method on Slope Stability Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, No.19, Vol.4, pp.65-74 (in Korean).
- Lee, J. G. and Chang, S. M. (1996), "Comparative Study on Slope Stability of Analysis Methods Abstract", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, No.16, Vol.3-4, pp.359-368 (in Korean).
- Ministry of land, infrastructure and transport, *Korea precipitation frequency data sever*, <http://www.k-idf.re.kr> (in Korean).
- Oh, S. B., Moon, J. H., Kim, T. G., and Kim, Y. G. (2008), "Case Study of Rainfall-induced Slope Failures on the Effect of Unsaturated Soil Characteristics", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.3C, pp.167-178 (in Korean).
- Oh, W. T. and Vanapalli, S. K. (2010), "Influence of Rain Infiltration on the Stability of Compacted Soil Slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol.37, No.5, pp.649-657.
- Rahardjo, H., Leong, E. C., and Rezaur, R. B. (2008), "Effect of Antecedent Rainfall on Pore-water Pressure Distribution Characteristics in Residual Soil Slopes under Tropical Rainfall", *Hydrological Processes*, Vol.22, No.4, pp.506-523.
- Rahimi, A., Rahardjo, H., and Leong, E. C. (2010), "Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-induced Slope Failure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.137, No.5, pp.483-491.
- Ryu, J. Y. (2003), "Estimation of Slope Stability During the Change of Matric Suction", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.4C, pp.195-201 (in Korean).
- Whang, Y. C. (2015), "Change of Slope Stability due to Slope Inclination and Surface Conditions", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, No.31, Vol.2, pp.5-11 (in Korean).
- Won, I. G. (2008), "A study on an estimated of presumptive equation of safety factor according to the slope incline", Changwon National University Master's Thesis (in Korean).
- Yang, G. H., Zhong, Z. H., Zhang, Y. C., and Li, D. J. (2010), "Slope Stability Analysis by Local Strength Reduction Method", *Rock and Soil Mechanics*, Vol.31, No.2, pp.53-58.

Received : April 1st, 2019

Revised : April 24th, 2019

Accepted : April 27th, 2019