

이동식 크레인 하중이 굴착사면 안정성에 미치는 영향 분석

김정곤* · 나예지** · 원정훈***†

Effect of Mobile Crane Load on Excavated Slope Stability

Jeong Kon Kim* · Ye Ji Na** · Jeong-Hun Won***†

†Corresponding Author

Jeong Hun Won

Tel : +82-43-261-2459

E-mail : jhwon@chungbuk.ac.kr

Received : January 14, 2021

Revised : September 10, 2021

Accepted : September 13, 2021

Abstract : The effect of heavy construction equipment on the excavated slope is investigated by slope stability analysis. A mobile crane with 500 kN capacity is applied as a working load to the background surface of the excavated slope, in both sandy soil and clay, designed to guarantee the safety of slope stability. Major parameters such as the distance between the edge of the slope and the mobile crane, groundwater level, and ground plate size of the mobile crane are considered. Only 23.8% and 14.3% of the analysis models with sandy soil and clay excavated slope, respectively, satisfied the slope stability. By changing the slope of the sandy soil from 1:1.0 to 1:1.2, the number of analysis models securing slope stability increased from 23.8% to 40.5%. For the clay excavated slope, the analysis models securing slope stability increased from 14.3% to 42.9% by changing slope inclination from 1:0.8 to 1:1.2. In addition, it is found that the increase in the size of the ground plate of the mobile crane increases the analysis models that secure slope stability. Therefore, it is an effective way to relax the excavated slope's inclination angle and simultaneously increase the ground plate size to guarantee stability.

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : excavated slope, slope stability, mobile crane, sandy soil slope, clay slope

1. 서론

굴착공사 시 굴착사면 배면에 공사용 차량, 콘크리트 펌프카, 이동식 크레인 등 중량의 건설장비를 배치한 작업이 빈번하게 이루어지고 있다. 특히 굴착사면 배면의 단부와 건설장비를 근접하여 작업하는 경우, 지반변형과 장비하중에 의한 응력증가로 사면붕괴 가능성과 작업자의 중대사고 가능성이 존재한다. 굴착공사 중 장비하중과 같은 상재하중에 의해 발생하는 사고를 방지하기 위한 연구들을 보면, 굴착에 따른 상재하중과 장비하중에 의한 굴착면 및 굴착배면지반의 거동이 문제되는 경우가 존재함을 알 수 있다^{1,2)}. 또한, 흙막이 벽체를 설치한 연약지반 굴착에 의한 인접도로의 침하가 문제되기도 한다³⁾.

건설현장에서 건설장비 하중에 의한 굴착사면의 붕

괴를 예방하기 위해 사면안정성 검토를 수행하는 사례는 많지 않다. 다만, 사면배면 단부로부터 3 m 이내에 중량물 적재와 건설장비를 위치하지 못하게 하는 정도가 대책으로 활용되고 있으나 모든 현장에 적용되지 않고 있는 실정이다. 안전보건공단에서 제공하는 “이동식 크레인 안전보건작업 지침”에서도 “절토 및 성토 선단부 등 토사 붕괴에 위험이 있는 장소에는 이동식 크레인의 거치를 금지하여야 한다”라고는 되어 있으나⁴⁾ 본 규정은 현장에 적용하는 포괄적인 규정으로 구체성은 부족한 규정이다.

본사의 기술지원이 가능한 일부 대형 건설현장에서는 도로교설계기준의 DB하중⁵⁾을 적용하여 굴착공사 진행 동안 건설장비 하중의 영향을 반영한 굴착사면의 안정성을 검토하여 작업 중 사면 붕괴를 예방하는 경우가 있다. 또한, 호남고속철도설계지침의 경우처럼 발

*지에스 건설 건축 QCS팀 BS담당 (QCS Team, GS Engineering and Construction)

**충북대학교 방재공학 학과간 협동과정 (Department of Disaster Prevention Engineering, Chungbuk National University)

***충북대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering / Department of Disaster Prevention Engineering & Department of Big Data, Chungbuk National University)

주차가 지표면과 증장비에 의한 추가 하중을 규정하여 굴착공사의 사면안정성을 검토하도록 적용한 사례도 존재한다⁶⁾. 흙막이를 설치하는 경우, 국토교통부의 가설흙막이기준(KDS 21 30 00:2016)⁷⁾에 따라 이론적 및 경험적 추정방법 중에서 설계자의 판단으로 굴착사면 안정성을 판단하도록 하고 있으나 현장에서 사용되는 건설장비의 영향을 구체적으로 적용하는 사례는 많지 않은 것이 현실이다.

건설현장에 사용되는 건설장비 하중의 증가와 함께 건설장비에 기인한 사고 위험성도 증가하고 있으므로 건설장비로 인한 사고의 위험성과 사고 예방 대책을 제시한 다양한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다. 건설장비에 관한 기존 국내 연구들은 주로 건설기계 기인한 재해사례와 실태 분석을 통한 안전관리 방향 제시 연구^{8,9)}, 사망 재해율이 높은 건설장비를 대상으로 작업별 위험성 평가를 실시한 연구¹⁰⁾, 건설기계 작업의 위험지수와 안전대책 적용을 통한 위험관리 방법 등을 제안하는 연구들이 수행되었다¹¹⁾. 또한, 대표적인 중량의 건설장비인 이동식 크레인을 대상으로 인간-기계 시스템의 관점에서 사고원인 분석을 실시하여 휴면에러 관점에서 사고원인을 파악하고자 한 연구¹²⁾, 개별 사고를 대상으로 작업 중 크레인 전도 사고의 원인 분석¹³⁾, 가설건설 기법을 활용한 크레인 운영의 안전성 연구¹⁴⁾ 등이 수행되었다.

이동식 크레인 사고에 대한 국외 연구결과를 보면, Milazzo 등¹⁵⁾은 2011-2015년의 미국 OSHA와 이탈리아 등의 사이트에 게재된 사고 분석 자료를 근거로 크레인 중에는 이동식 크레인의 사고가 높으며, 이동식 크레인 관련 사고의 45%는 전도 사고이며, 전도의 주요 원인은 아우트리거에 기인한 구조적 파괴, 사면 붕괴, 과하중으로 분석하였다. Hamid 등¹⁶⁾의 연구결과에서는 크레인 사고의 15%는 지반 조건의 문제임이 분석되었으며, Zhao¹⁷⁾는 26%가 지반 조건의 문제임을 밝혔다. 국내의 연구결과도 이동식 크레인의 전도에 관한 주요 사고 원인은 아우트리거 거치상태 불량과 지지력 미확보로 인한 침하로 분석하였다¹⁸⁾. 즉, 크레인 전도사건의 주요 원인은 아우트리거 부분의 지반 침하에 의한 것이며¹⁹⁾, 지반의 지지력을 확보하기 위한 연구가 주로 진행되었다고 할 수 있다^{20,21)}.

그러나 굴착공사를 대상으로 지하수위, 굴착사면 배면의 건설장비 위치, 건설장비 하중 크기 등 다양한 변수를 매개로 한 굴착사면의 안정성에 관한 국내의 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 사질토 또는 점토 지반으로 이루어진 굴착사면을 대상으로 사면배면에 중량의 건설장비 운영으로 발생하는 굴

착사면의 안정성 변화를 해석적으로 분석하였다. 대상 건설장비는 대표적인 중량 건설장비인 이동식 크레인이다. 적용된 변수로는 사면 선단으로부터의 장비하중 이격거리, 지하수위 위치, 굴착 경사, 이동식 크레인의 접지면 크기를 고려하였다.

2. 연구 방법

건설장비 운영으로 인한 사면안정성을 분석하기 위해 대상 굴착지반은 사질토와 점토인 2가지 경우로 구분하였으며, 지반의 안정성 해석은 SLOPE/W 프로그램을 활용하여 분석하였다. SLOPE/W 프로그램은 사면의 불포화 특징을 반영하지 못하는 한계가 존재하나, 실무적으로 사면안정 해석에 널리 활용되며 지하수위의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있다. 기본 해석 모델은 Fig. 1과 같으며, 굴착 깊이는 5 m, 사질토의 경사 1:1, 점토의 경사 1:0.8이다. 굴착지면 하부는 굴착지반의 종류와 관계없이 공통적으로 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성하였다(각 토층 깊이 3 m).

대상 사면에 대한 안정성 해석은 2차원 해석으로 수행하였다. 사면은 3차원 형상과 지질구조로 구성되어 2차원 해석은 한계가 존재한다. 그러나 3차원 해석은 단부효과를 고려하므로 2차원 해석에 의한 사면 안전율이 3차원 해석보다 작게 평가되므로 2차원 해석이 보수적인 결과를 나타내고^{22,23)} 사용의 편의성과 모델의 단순함으로 2차원 해석 방법이 실무에 주로 적용되므로 본 연구에서도 2차원 해석을 적용하였다. 이동식 크레인에 의한 사면안정성 연구에 2차원 해석이 활용되는 사례들이 존재하며^{20,21)}, 특히, 이동식 크레인의 아우트리거 하중은 집중하중 형태가 되어 2차원 해석으로 접지면의 하중 재하를 충분히 고려할 수 있음을 사례 연구들로부터 확인할 수 있다^{18,20,21)}.

해석에 가정한 지반 물성과 적용 하중, 굴착사면 경사 등에 대한 상세한 내용은 Table 1과 같다. 사면안정에 대한 판정기준은 국토교통부 쌓기·깎기 설계기준

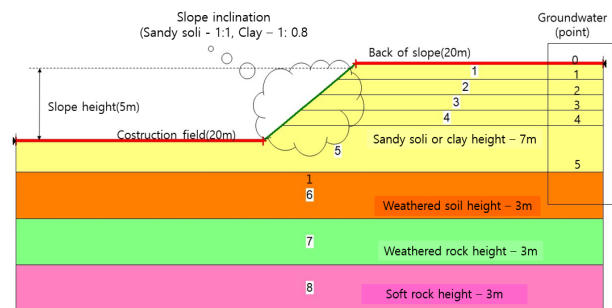


Fig. 1. Basic stability analysis model.

Table 1. Information for slope stability analysis

Division		Application model		
Property	Classification	Unit volume weight(kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Internal friction angle(°)
	Sandy soil	19	7	30
	Clay	18	12	25
	Weathered soil	19	15	30
	Weathered rock	21	30	33
	Soft stone	25	50	35
Slope	Sandy soil	1:1		
	Clay	1:0.8		
Load	Self weight	Soil weight		
	Load weight	DB	13 kN/m ²	
Separation distance from slope edge	Crane	135 N/m ² / 29 kN/m ² (0.7 W / 0.15 W)		
	DB	Uniform load		
	Crane load	0m, 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 3 m, 4 m Ground plate size - 1.5 m × 1.5 m		
Ground water height from surface		0 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 7 m		
		Required safety factor F>1.1		

(KDS 11 70 05:2020)에서 제시된 단기 안전율인 1.1을 적용하였다²⁴⁾. 사면설계 시 필요한 자연지반의 토질정수는 일반적으로 이용 가능한 설계편람에서 제시하는 자연지반의 토질정수와 지반강도정수를 기준으로 산정하였다. 또한, 사면의 경사는 쌓기·깎기 설계기준의 토사 원지반 깎기 비탈면 표준경사를 적용하였다.

장비하중은 이동식 크레인을 사면단부에 이격거리에 따라 위치시킨 것으로, 안전보건공단의 KOSHA GUIDE C-2015 방법의 양중작업 시 넘어짐에 대한 안정성 검토, 인양능력, 지지지반의 안정성에 규정된 내용을 하중으로 적용하였다²⁵⁾. 해석 시 최대 상재 하중을 재하하기 위해 아우트리거에 배분되는 하중은 45도 경사일 때를 고려하였다(Fig. 2). 다만, 가이드에 적용된 최대 접지하중은 충격하중 고려 여부, 회전을 고려한 반력 증가, 좌우측 아우트리거의 평균 값 등을 적용하고 있어 본 연구에서 2차원 해석을 통해 최대 아우트리거 접지하중을 재하하는 것과는 차이가 있으므로 가이드라인의 제안 식을 적용하지 않고 해외의 관련 규정의 사례²⁶⁾를 따라 아우트리거에 배분되는 하중을 접지면적으로 나누어 적용하였다. 또한, 차량 등에 의한 DB하중은 13 kN/m²의 등분포 하중을 적용하였다.

적용한 이동식 크레인의 용량 500 kN이며, 제원표로부터 총 작업 하중 434 kN을 가정하였다(작업반경 22 m, 붐 길이 30.4 m)²⁷⁾. 접지판의 규격 1.5 m × 1.5 m의 경우, 최대접지압(0.7 W)은 135 kN/m²(=0.7×434/

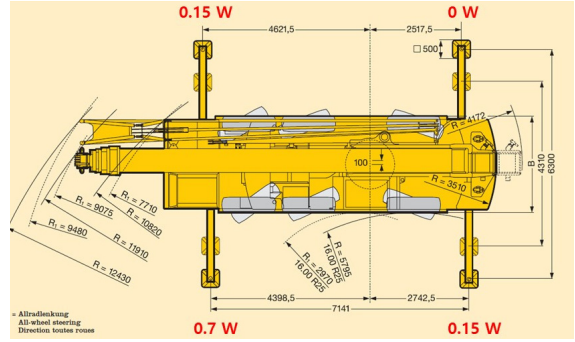


Fig. 2. Mobile crane with maximum grounding load of 500 kN.

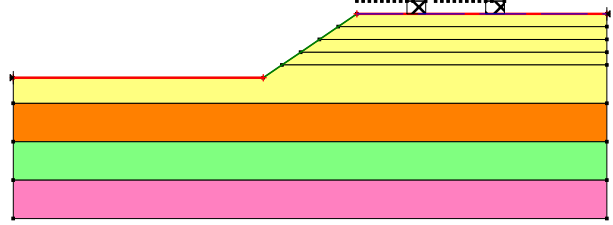


Fig. 3. Example of model with mobile crane load.

(1.5×1.5)), 최소접지압(0.15 W)은 29 kN/m²(=0.15×434/(1.5×1.5))를 적용하였다(Fig. 2 참조). 이동식 크레인 하중이 재하된 해석모형의 예는 Fig. 3과 같다.

3. 결과 분석

3.1 기본 안전율 확보 여부 확인

해석 대상 굴착사면은 이동식 크레인 하중이 재하되기 전에 사면안정성을 확보하여야 한다. 지하수위가지표면에 있으며, 자중만 고려한 경우와 자중과 DB 하중(13kN/m²의 등분포 하중을 사면 배면의 전 구역에 재하)을 동시에 고려한 경우를 대상으로 사면안정성 해석을 실시하고 결과를 Table 2에 나타내었다. 사질토 지반의 경우에 대한 해석결과 예는 그림은 Fig. 4와 같다. 모든 경우에 기준 안전율 1.1을 모두 초과하므로 크레인 하중이 재하되지 않은 경우 사면안정성을 확보한 것이 확인되었다.

자중과 DB 하중이 재하된 경우를 대상으로 지하수위 위치를 변경시키며 굴착사면의 안정성을 검토한 결과 모든 지반에 대해 기준 안전율 1.1을 만족하는 것으로 분석되었다(Fig. 5). 그러므로 해석 대상 굴착사

Table 2. Slope stability results without crane load

Classification	Only self-weight of soil	Self-weight of soil + DB load
Sandy soil	1.223	1.132
Clay	1.503	1.142

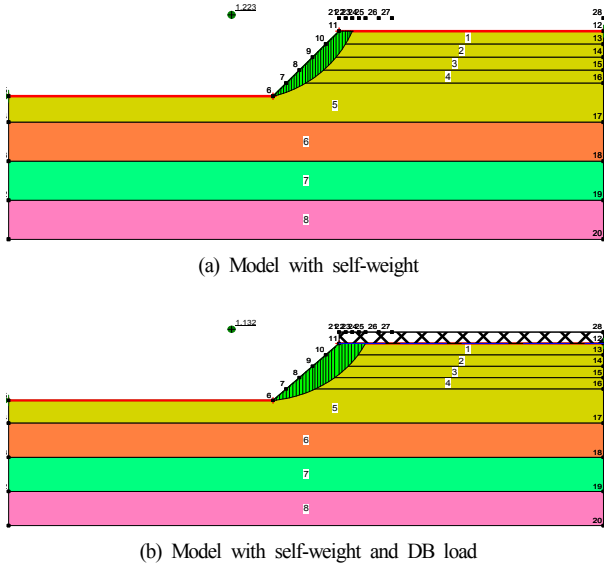


Fig. 4. Results of stability analysis in sandy soil.

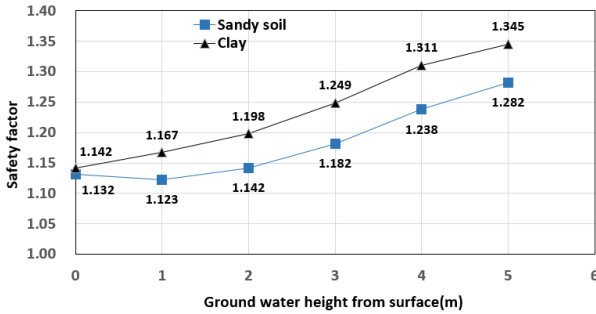


Fig. 5. Results of stability analysis in sand model with self-weight and DB load according to groundwater level.

면은 이동식 크레인 하중이 굴착사면 배면에 위치하기 전에 사면안정성을 확보한 것을 확인할 수 있다.

3.2 이동식 크레인 하중 영향 분석

500 kN 용량의 이동식 크레인이 굴착사면 배면에 위치하여 작업하는 경우의 사면안정성 해석 분석하였다(접지판 크기 1.5 m×1.5 m). 사면 경사 1:1의 사질토 굴착지반의 지하수위와 사면단부에서의 장비 이격거리 변화에 따른 안전율 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 초록색 격자 평면 윗부분은 안전율 1.1보다 커서 사면안정성을 확보하는 경우를 나타낸다. 그림으로부터 이동식 크레인 하중과 굴착사면 단부 이격거리가 증가할수록 안전율이 증가됨을 알 수 있다. 또한, 지표면에서부터의 지하수위 거리가 증가할수록(지하수위가 낮아짐) 사면붕괴 안전율이 증가됨을 알 수 있다. 이동식 크레인의 단부 이격거리와 지하수위 위치 조합에 따른 해석 모델은 총 42개이며, 모델 중 10개의 경우

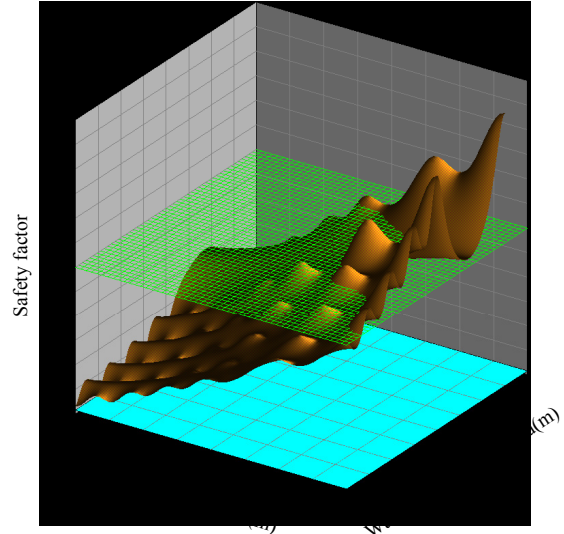


Fig. 6. Safety factor of sandy soil with change of separation distance and water level(slope inclination 1:1).

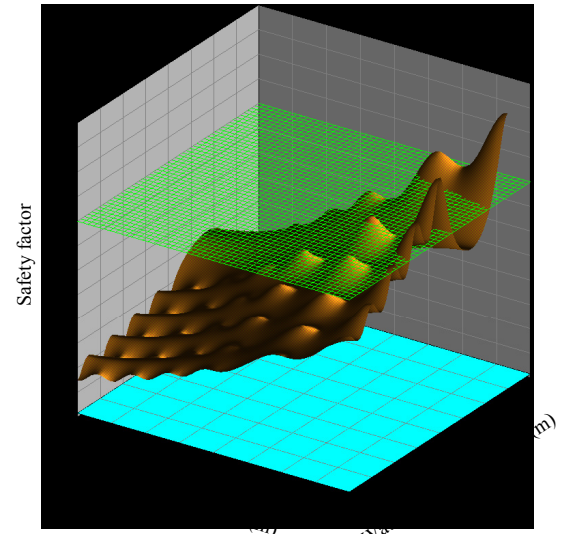


Fig. 7. Safety factor of clay with change of separation distance and water level(slope inclination 1:0.8).

(23.8%)가 기준 안전율 1.1을 만족하는 것으로 분석되었다. 이격거리 2 m의 경우, 지하수위가 지표면에서 5 m일 때 기준 안전율을 만족하였으며, 이격거리 3 m의 경우 지하수위 3 m 이상에서, 이격거리 4 m의 경우 모든 지하수위에서 기준 안전율을 만족하였다.

사면 경사 1:0.8의 점토 굴착지반의 이동식 크레인 하중을 고려한 사면안정성 결과는 Fig. 7과 같다. 기준 안전율 1.1보다 큰 경우(초록색 격자 윗부분)는 총 42개의 해석 모델에서 6개이며(14.3%), 이격거리 3 m에서 지표에서 지하수위까지 거리 4 m 이상, 이격거리 4 m에서 지하수위까지 거리 2 m 이상인 경우가 사면안정

성을 확보한 것으로 분석되었다. 따라서 굴착사면 배면에 중량 건설장비가 운영될 경우, 굴착사면의 사면안정성이 확보되지 못하는 경우가 발생하므로 중량 건설장비 운영 시 사면안정성 해석을 실시하여야 된다.

3.3 사면 경사 변화와 접지판 크기 변화

3.2절에서 분석된 것과 같이 500 kN의 이동식 크레인이 굴착사면 배면에서 작업함에 따라 사질토 사면 경사 1:1에서는 해석 모델 중 23.8%만이 기준 안전율을 만족한 것으로 나타났다. 또한, 점토지반(사면경사 1:0.8)에서는 해석 대상 중 14.3%만이 기준 안전율을 만족한 것으로 나타났다. 굴착사면의 안정성을 증가시키기 위해 사면 경사를 완만하게 변화시킨 경우와 크레인 작업 하중이 지반에 전달되는 접지판의 크기를 변화시키는 경우를 대상으로 사면안정성 해석을 수행하였다.

3.3.1 사면 경사 변화를 고려한 사면안정성 분석

사질토의 사면 경사는 1:1.0에서 1:1.2로 변화시킨 후 지하수위와 이동식 크레인의 단부 이격거리 변화에 따른 사면안정성 해석결과를 Fig. 8에 나타내었다. 1:1.2의 기울기의 경우 42개 해석 모델 중 17개(40.5%)가 기준 안전율을 만족하는 것으로 분석되었다. 이격거리 3 m 이상에서는 지하수위와 상관없이 모두 안전율을 만족하며, 이격거리 2 m에서는 지표에서 지하수위까지 거리 3 m 이상, 이격거리 1.5 m에서는 지하수위까지 거리 4 m 이상에서 안전율을 만족하였다. 사질토 굴착사면의 경우 사면 경사를 1:1.0에서 1:1.2로 변화시킴으로 사면안정성을 확보하는 해석 대상이 23.8%에서 40.5%로 증가하였다.

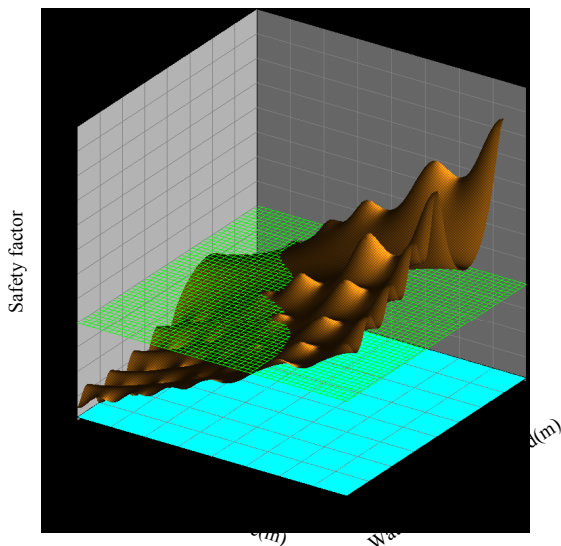


Fig. 8. Safety factor of sandy soil with change of separation distance and water level(slope inclination 1:1,2).

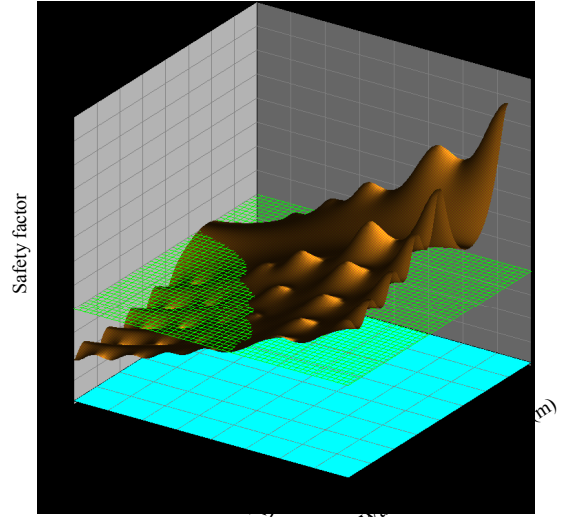


Fig. 9. Safety factor of clay with change of separation distance and water level(slope inclination 1:1,2).

사면 경사를 1:0.8에서 1:1.2로 변화시킨 점토 사면의 안전율을 분석한 결과는 Fig. 9와 같다. 1:1.2의 점토 사면의 경우 지하수위와 이동식 크레인 이격거리 조합에 따른 42개의 해석 모델 중 18개(42.9%)에서 사면안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 즉, 점토 굴착사면의 사면 경사를 1:0.8에서 1:1.2로 완만하게 하여 사면안정성을 확보하는 경우가 14.3%에서 42.9%로 증가되는 것으로 분석되었다. 따라서 중량의 장비 하중으로 굴착사면의 사면안정성이 문제되는 경우, 경사면의 기울기를 완화시키는 것이 효과적임을 정량적으로 확인할 수 있다.

3.3.2 접지판 크기 변화를 고려한 사면안정성 분석

크레인 하중으로 발생하는 굴착사면 안정성의 문제에 대한 대책으로 크레인 아웃트리거 접지판의 크기를 증가시키는 방법의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 접지판 크기를 변화시켜 사면안정성 해석을 수행하였다. 앞 절에서 적용한 접지판 크기 1.5 m×1.5 m 외에 1.3 m×1.3 m, 2.0 m×2.0 m를 고려하였으며, 사질토 굴착 경사 기울기 1:1.0, 1:1.2의 경우와 점토 굴착사면 경사 기울기 1:0.8, 1:1.2를 대상으로 해석을 수행한 결과 Table 3과 Table 4와 같이 해석 모델별 안전율을 도출하였다.

경사 1:1인 사질토 지반의 경우, 안전율을 확보하는 경우가 접지판의 크기가 증가함에 따라 해석 모델 42개 중 4개(1.3 m×1.3 m), 10개(1.5 m×1.5 m), 17개(2.0 m×2.0 m)로 증가되었다. 접지판의 크기가 2.0 m×2.0 m인 경우 이격거리 3 m부터는 모든 지하수위에 대해 안전율이 확보된 것을 알 수 있다. 접지판의 증에 따

Table 3. Slope stability results according to ground plate size in sandy soil

Classification	Separation distance(m)	Sandy soil(slope 1:1)						Sandy soil(slope 1:1.2)					
		Ground water height from surface(m)						Ground water height from surface(m)					
		0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Ground plate size 1.3 m×1.3 m	0	0.740	0.730	0.732	0.745	0.768	0.787	0.838	0.821	0.817	0.828	0.852	0.879
	0.5	0.808	0.764	0.770	0.778	0.816	0.839	0.903	0.855	0.855	0.870	0.900	0.933
	1	0.803	0.801	0.811	0.834	0.867	0.895	0.903	0.892	0.895	0.915	0.949	0.989
	1.5	0.837	0.839	0.854	0.882	0.919	0.954	0.938	0.930	0.938	0.962	1.001	1.047
	2	0.874	0.879	0.899	0.931	0.974	1.015	0.974	0.970	0.982	1.010	1.054	1.108
	3	0.951	0.965	0.994	1.035	1.088	1.135	1.051	1.054	1.074	1.111	1.165	1.229
Ground plate size 1.5 m×1.5 m	4	1.033	1.056	1.093	1.144	1.208	1.254	1.133	1.143	1.171	1.217	1.281	1.346
	0	0.816	0.804	0.807	0.824	0.853	0.876	0.927	0.907	0.903	0.917	0.948	0.981
	0.5	0.844	0.837	0.846	0.869	0.903	0.932	0.958	0.941	0.942	0.961	0.998	1.037
	1	0.877	0.874	0.888	0.917	0.957	0.992	0.991	0.978	0.983	1.008	1.050	1.097
	1.5	0.912	0.915	0.934	0.968	1.014	1.055	1.026	1.018	1.028	1.058	1.106	1.161
	2	0.949	0.957	0.982	1.022	1.073	1.116	1.064	1.060	1.075	1.110	1.163	1.221
Ground plate size 2.0 m×2.0 m	3	1.031	1.049	1.084	1.135	1.199	1.236	1.145	1.150	1.174	1.219	1.284	1.341
	4	1.103	1.148	1.194	1.255	1.327	1.364	1.216	1.246	1.281	1.336	1.410	1.467
	0	0.905	0.890	0.895	0.917	0.952	0.981	1.031	1.006	1.002	1.020	1.059	1.099
	0.5	0.928	0.920	0.932	0.961	1.002	1.037	1.056	1.036	1.038	1.063	1.108	1.155
	1	0.957	0.956	0.974	1.009	1.058	1.099	1.087	1.072	1.080	1.110	1.162	1.218
	1.5	0.992	0.996	1.021	1.062	1.118	1.160	1.121	1.112	1.125	1.162	1.219	1.279
Ground plate size 2.0 m×2.0 m	2	1.029	1.040	1.071	1.119	1.181	1.218	1.158	1.155	1.174	1.216	1.280	1.336
	3	1.100	1.137	1.180	1.240	1.310	1.344	1.228	1.249	1.279	1.333	1.409	1.460
	4	1.173	1.216	1.224	1.260	1.333	1.396	1.299	1.340	1.370	1.395	1.469	1.544

Table 4. Slope stability results according to ground plate size in clay

Classification	Separation distance(m)	Clay(slope 1:0.8)					Clay(slope 1:1.2)						
		Ground water height from surface(m)					Ground water height from surface(m)						
		0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Ground plate size 1.3m×1.3m	0	0.679	0.678	0.685	0.698	0.714	0.724	0.869	0.856	0.854	0.864	0.884	0.905
	0.5	0.702	0.705	0.716	0.734	0.754	0.767	0.893	0.883	0.884	0.898	0.922	0.948
	1	0.728	0.736	0.751	0.773	0.797	0.813	0.920	0.913	0.918	0.934	0.963	0.994
	1.5	0.757	0.768	0.788	0.814	0.842	0.862	0.950	0.945	0.953	0.973	1.005	1.042
	2	0.788	0.804	0.827	0.857	0.890	0.914	0.980	0.978	0.990	1.014	1.050	1.093
	3	0.855	0.879	0.911	0.949	0.990	1.024	1.045	1.050	1.068	1.100	1.144	1.202
Ground plate size 1.5m×1.5m	4	0.928	0.960	1.000	1.046	1.097	1.143	1.115	1.126	1.151	1.190	1.243	1.317
	0	0.774	0.773	0.783	0.801	0.822	0.834	0.992	0.976	0.975	0.987	1.013	1.039
	0.5	0.792	0.797	0.812	0.834	0.859	0.876	1.013	1.000	1.003	1.020	1.050	1.081
	1	0.816	0.826	0.846	0.873	0.903	0.923	1.037	1.029	1.035	1.057	1.092	1.129
	1.5	0.843	0.858	0.884	0.916	0.951	0.975	1.065	1.060	1.070	1.096	1.136	1.180
	2	0.874	0.895	0.925	0.962	1.002	1.031	1.095	1.094	1.108	1.139	1.183	1.235
Ground plate size 2.0m×2.0m	3	0.944	0.975	1.014	1.061	1.111	1.152	1.162	1.169	1.191	1.230	1.284	1.352
	4	1.023	1.063	1.112	1.168	1.229	1.270	1.236	1.251	1.281	1.329	1.392	1.480
	0	0.887	0.882	0.894	0.921	0.950	0.966	1.139	1.120	1.118	1.135	1.168	1.199
	0.5	0.899	0.905	0.925	0.954	0.986	1.006	1.151	1.136	1.140	1.162	1.199	1.237
	1	0.916	0.930	0.955	0.989	1.027	1.051	1.169	1.159	1.168	1.195	1.238	1.283
	1.5	0.940	0.960	0.992	1.031	1.074	1.103	1.192	1.187	1.201	1.233	1.281	1.334
Ground plate size 2.0m×2.0m	2	0.970	0.995	1.033	1.078	1.127	1.161	1.220	1.220	1.238	1.275	1.329	1.390
	3	1.041	1.078	1.126	1.183	1.243	1.285	1.286	1.295	1.323	1.370	1.434	1.514
	4	1.123	1.172	1.231	1.298	1.370	1.403	1.362	1.380	1.418	1.474	1.549	1.642

라 기준 안전율을 확보하는 것은 Fig. 10(1.3 m×1.3 m), Fig. 6(1.5 m×1.5 m), Fig. 11(2.0 m×2.0 m)로부터 가시적으로 확인할 수 있다.

경사 1:1.2인 사질토 지반 굴착의 경우, 접지판의 크

기가 증가함에 따라 해석 모델 중 21.4%, 40.5%, 69.0%가 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 접지판 2.0 m×2.0 m를 적용할 경우, 이격거리 1.5 m에서도 기준 안전율이 확보됨을 알 수 있다. 점토 굴착(경사 기

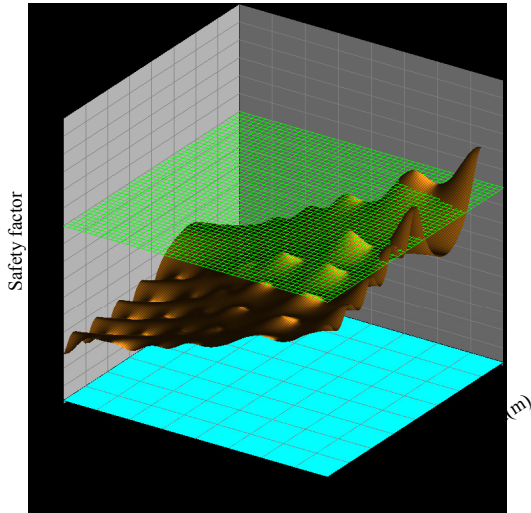


Fig. 10. Safety factor of sandy soil with ground plate size of 1.3 m × 1.3 m (slope inclination 1:1.0).

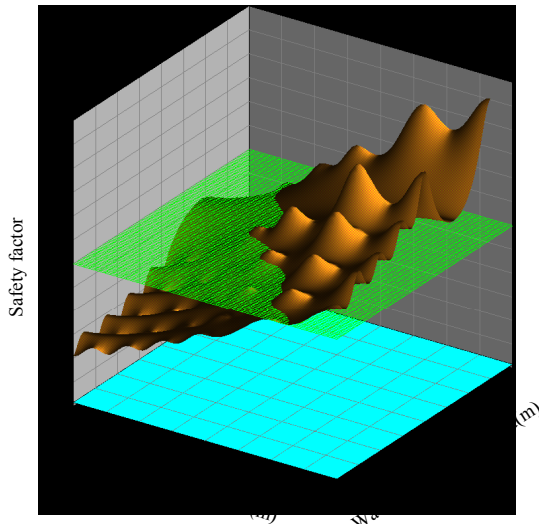


Fig. 11. Safety factor of sandy soil with ground plate size of 2.0 m × 2.0 m (slope inclination 1:1.0).

울기 1:0.8)의 경우에도 접지판의 크기가 증가함에 따라 이격거리가 3 m 이상에서 사면안정성을 확보한 것을 알 수 있다. 특히, 지반 경사를 완화하고(1:1.2) 접지판을 증가한 경우에는 모든 해석 대상에서 기준 안전율을 확보한 것으로 분석되었다. 따라서 접지판의 면적 증가는 중량 장비 하중으로 인한 굴착사면 안정성 확보 방법으로 적용할 수 있으며, 굴착사면의 경사 기울기 완화와 접지판 면적 증가를 동시에 적용하는 것이 효과적인 사면안정성 확보 방안이라고 판단된다.

본 연구 결과와 이동식 크레인의 사면단부 이격거리에 대한 해외 규정을 비교하였다. 홍콩 노동부에서 제시한 이동식 크레인의 이격거리는 Fig. 12와 같이

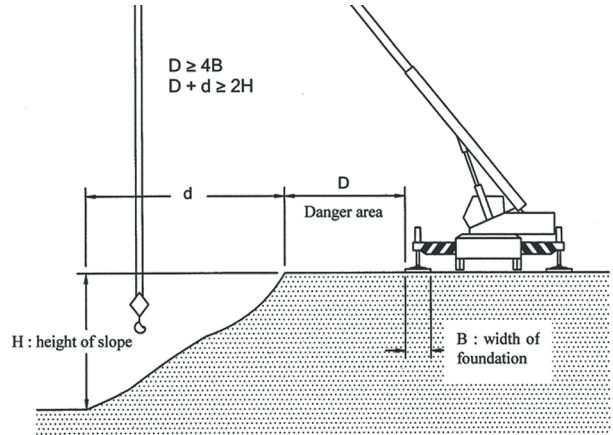


Fig. 12. Safe distance for crane location prescribed in Code of practice(Hong Kong)⁽²⁸⁾.

이격거리(D)를 접지판 폭(B)의 4배 이상, 사면 수평거리(d)와 이격거리의 합이 굴착깊이(H)의 2배 이상으로 하고 있다⁽²⁸⁾. Table 3과 Table 4로부터 D가 4B 이내, D+d가 2H이내부터 안전한 경우가 존재함을 알 수 있으며, 홍콩 규정에 해당되는 경우는 모두 사면안정성을 확보할 것으로 유추할 수 있다. 그러므로 사면단부에서 아우트리거 끝단까지의 이격거리를 접지판 폭의 4배 이상으로하고 사면 수평거리와 이격거리의 합을 굴착깊이 2배 이상으로 할 경우 사면안정성을 충분히 확보할 수 있다고 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 사면배면에서 중량의 건설장비 작업이 실시되는 경우에 대해 사면안정성을 해석적으로 분석하였다. 자중과 DB 하중을 고려하여 기준 안전율 1.1을 만족하도록 검토된 사질토 및 점토 굴착사면을 대상으로 용량 500 kN의 이동식 크레인을 대상으로 굴착사면 단부와 장비의 이격거리, 지하수위 및 이동식크레인의 접지판 크기 등을 고려하여 사면안정성 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 굴착사면 배면에 이동식 크레인 하중을 고려한 결과, 사질토 굴착사면(경사 1:1)의 경우 이동식 크레인의 단부 이격거리와 지하수위 위치 조합에 따른 42 개 해석 모델 중 23.8%만이 기준 안전율 1.1을 만족하며, 이격거리 4 m의 경우만 모든 지하수위에서 기준 안전율을 만족하는 것으로 분석되었다. 점토 굴착사면(경사 1:0.8)의 경우, 해석 모델 중 14.3%만 안전율을 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서 자중과 DB 하중 고려하여 사면안정성을 확보한 굴착사면도 굴착사면

배면에 중량 건설장비 운영으로 사면안정성이 확보되지 못하는 경우가 다수 발생하므로 중량 건설장비 운영 시 사면안정성 해석을 반드시 실시하여야 한다.

(2) 사질토 굴착사면의 경사를 1:1.0에서 1:1.2로 변화시킨 결과 사면안정성을 확보하는 해석 대상이 23.8%에서 40.5%로 증가하였으며, 이격거리 3 m 이상에서는 지하수위와 상관없이 모두 안전율을 만족하는 것으로 분석되었다. 사면 경사를 1:0.8에서 1:1.2로 변화시킨 점토 굴착사면의 경우, 사면안정성을 확보하는 해석 모델이 14.3%에서 42.9%로 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 굴착사면 배면에 중량의 장비 하중 운영이 예상될 경우 경사면의 기울기를 완화시키는 것이 효과적이라고 판단된다.

(3) 크레인 아웃트리거 접지판의 크기를 증가시키는 방법의 효과를 정량적으로 분석한 결과, 접지판의 크기 증가로 사면안정성을 확보하는 해석 모델이 증가되는 것으로 나타났다. 경사 1:1.2인 사질토 지반 굴착의 경우, 접지판의 크기가 증가함에 따라 해석 모델의 21.4%(1.3 m×1.3 m), 40.5%(1.5 m×1.5 m), 69.0%(2.0 m×2.0 m)가 안전율을 확보하는 것으로 나타났으며, 접지판 2.0 m×2.0 m 해석 모델에서는 이격거리 1.5 m부터 기준 안전율을 확보함을 알 수 있다. 기울기 1:1.2이며 접지판 2.0 m×2.0 m인 점토 굴착인 경우, 모든 해석 대상에서 기준 안전율을 확보한 것으로 분석되었다. 따라서 이동식 크레인의 접지판의 면적 증가는 굴착사면 안정성 확보 방법으로 고려될 수 있으며, 굴착사면의 기울기 완화와 접지판 면적 증가를 동시에 고려하는 것이 효과적인 사면안정성 확보 방안이라고 판단된다.

Acknowledgement: This paper was partially supported by Ministry of the Interior and Safety as “Human resource development Project in Disaster management”.

References

- 1) W. P. Hong, M. K. Lee, J. M. Yun, and J. H. Lee, “The Effects of Ground Deformation Caused by Surcharge Loads during Trench Excavation”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, Vol. 27, No. 3C, pp. 185-193, 2007.
- 2) J. U. Kim, J. J. Kim, J. H. Lee, T. H. Jaffri, and H. K. Yoo, “Analysis of Trench Slope Stability in Permafrost Regions According to the Equipment Load”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 21, No. 3, pp. 17-25, 2017.
- 3) J. H. Kim, “Model Test of Stabilizing Measures for Ground Failure Due to Soft Ground Excavation”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 907-917, 2014.
- 4) KOSHA, *Mobile Crane Safety and Health Work Guidelines (KOSHA GUIDE C-69-2012)*, 2012.
- 5) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Bridge Design Standard*, 2008.
- 6) Korea Rail Network Authority, *Design Guidance for Honam High Speed Railway*, 2007.
- 7) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *Design Standard for Earth Retaining Wall*, 2016.
- 8) D. H. Kee and W. K. Kim, “Status of Fatal Crane Accidents and Their Safety Measures”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 20, No. 1, pp. 137-142, 2005.
- 9) D. H. Son, D. H. Song, and S. S. Go, “A Study on the Accident Case and Analysis on the Actual Condition of Construction Machinery in Railroad Construction Sites”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 30, No. 5, pp. 20-28, 2015.
- 10) H. W. Jeon, I. S. Jung, and C. S. Lee, “Risk Assessment for Reducing Safety Accidents caused by Construction Machinery”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 6, pp. 64-72, 2013.
- 11) S. S. Yang and S. W. Paik, “Risk Management for Preventing Workers’ Deaths in Construction Machinery Work”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 35, No. 3, pp. 16-23, 2020.
- 12) J. H. Park, T. J. Park, H. K. Lim, and E. H. Seo, “Analysis of Crane Accidents by Using a Man-Machine System Model”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 22, No. 2, pp. 59-66, 2007.
- 13) J. H. Kim and E. S. Kim, “Forensic Engineering Study on the Evaluation of the Structural Stability of the Mobile Crane Accident”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 28, No. 3, pp. 11-17, 2013.
- 14) J. W. Park, S. H. Lee, S. H. Kim, J. H. Won, and Y. C. Yoon, “BIM-Based Virtual Construction Simulation for Steel Girder Installation Crossing the High-Speed Railway”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 33, No. 2, pp. 76-85, 2018.
- 15) M. F. Milazzo, G. Ancione, V. S. Brkic, and D. Valis, “Investigation of Crane Operation Safety by Analysing Main Accident Causes”, *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, September, pp. 74-80, 2016.
- 16) A. R. A. Hamid, R. Azhari1, R. Zakaria1, E. Aminudin1, R. P. Jaya, L. Nagarajan1, K. Yahya1, Z. Haron and R.

- Yunus, "Causes of Crane Accidents at Construction Sites in Malaysia", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 220, 2019.
- 17) Q. Zhao, Cause Analysis of U.S. Crane-related Accidents, Master thesis, University of Florida, 2011.
 - 18) J. K. Ho, J. M. Seo, and S. K. Kim, "Mobile Crane Ground-Fixing System", Journal of the KIEAE, Vol. 7, No. 6, pp. 83-90, 2007.
 - 19) S. Tamate, N. Suemasa, and T. Katada, "Analyses of Instability in Mobile Cranes due to Ground Penetration by Outriggers", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 131, No. 6, pp. 689-704, 2005.
 - 20) B. Zhang and C. Keepa, "Geotechnical Considerations in Safe Operation of Crawler Cranes", proceedings of the 12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, New Zealand, 22-25 February, 2015.
 - 21) X. Ai and A. M. Zaski, "Stability Assessment of Homogeneous Slopes Loaded with Mobile Tracked Cranes —An Artificial Neural Network Approach", Cogent Engineering, Vol. 4, No. 1, 1360236, 2017.
 - 22) Y. S. Seo, K. M. Lee, and K. Y. Kim, "Three-dimensional Slope Stability Analysis of a Dual-lithology Slope", The Journal of Engineering Geology, Vol. 21, No. 1, pp. 57-64, 2011.
 - 23) Y. M. Kim, "Parametric Studies of Slope stability Analysis by 3D FEM Using Strength Reduction Method", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 15, No. 4, pp. 25-32, 2016.
 - 24) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Construction Standard – Soil Embankment & Cut (KDS 11 70 05 : 2020), 2020.
 - 25) KOSHA, Guidelines for Stability Review of Mobile Crane Lifting Operations (KOSHA GUIDE C-99-2015), 2015.
 - 26) Workplace Health and Safety Queensland, Australia, Mobile crane - Code of Practice 2006, 2018.
 - 27) Liebherr, LTM 1050/1.
 - 28) Labour Department, Hong Kong, Code of Practice for Safe Use of Mobile Cranes, 2017.