

설계기준에 제시된 사면 표준경사에 대한 해석적 검증

이승현¹, 김병일^{2*}

¹선문대학교 토목공학과, ²명지대학교 토목환경공학과

Analytical Verification of the Standard Inclinations of Slope in the Design Criteria

Seung-Hyun Lee¹, Byung-II Kim^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Sunmoon University

²Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

요약 설계기준에 제시되어 있는 사면 표준경사의 적용한계와 소단폭이 사면의 안정성에 미치는 영향을 살펴보고자 사면안정 해석을 수행하고 그 결과를 비교분석해보았다. 해석에서 고려한 기본 성토단면 및 절토단면과 유사한 조건의 단면에 대해서는 설계기준에 제시된 표준경사를 적용하더라도 문제는 없을 것으로 보이며 지하수가 있는 상태에서는 지하수위를 고려한 별도의 사면안정해석을 수행되어야 할 것으로 판단된다. 소단을 두는 경우와 그와 동등한 해석단면적을 갖도록 경사를 완화한 경우에 대한 사면 안전율을 비교해 볼 때 소단을 두는 경우의 안전율이 경사를 완화한 경우보다 크게 계산되었으며 소단폭이 커질수록 안전율의 차이 또한 컸다. 해석에서 고려한 모든 단면에 대하여 기본 검토단면에 대한 사면안전율 증분값은 소단폭에 대체적으로 비례하는 결과를 보였는데 소단폭이 7m인 성토사면과 절토사면의 경우 안전율 증분값은 각각 34.5%와 48% 정도였다.

Abstract Slope stability analyses were conducted to investigate the limitations of application of the standard inclination of slope and the effects of the berm width on the slope stability. The standard slope inclination could be applied to the basic slope sections that were considered for the analyses, whereas additional slope stability analysis should be performed for the case of considering ground water. A comparison of the factors of safety between the case of installing a berm and the case of letting the grading have an equivalent section area with the case of installing the berm, the factors of safety in the case of installing a berm were greater than those for the case of allowing grading, and the differences between the factors of safety increase with increasing berm width. For all the sections considered in the analyses, the increments of the safety factor were proportional to the width of the berm and those corresponding to the embankment slope and cut slope with a berm width of 7m were 34.5% and 48%, respectively.

Key Words : Slope stability analysis, Standard inclination of slope, Width of berm, Grading, Increment of safety factor

1. 서론

사면안정공법은 크게 안전율 유지법과 안전율 증가법으로 나눌 수 있는데 안전율 유지법에는 배수공, 블록공, 식생공 그리고 표층안정공 등이 있으며 안전율 증가법에

는 절토공, 압성토공, 억지말뚝공, 앵커공, 옹벽공 그리고 고압분사주입공 등이 있다. 안전율 증가법 중에서 안정성을 담보하는 가장 확실한 공법은 특별한 지반조건을 제외하고는 경사완화법이라 할 수 있다. 여기서 특별한 지반조건이란 황토(loess)로 구성된 완만한 사면의 경우

이 논문은 2014년도 명지대학교 교내연구비 지원사업에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Byoung-II Kim(Myongji Univ.)

Tel: +82-31-330-6415 email: bikim@mju.ac.kr

Received April 29, 2014

Revised June 12, 2014

Accepted August 7, 2014

강수에 노출되는 면적이 커서 흙입자 사이의 결합력이 강수에 의해 저하되어 사면안정에 불리하게 되는 조건을 말한다[1]. 특별한 경우를 제외하고 사면의 경사를 소정의 값 이하로 규정함으로써 사면안정 목적을 달성하고자 국내에서도 여러 설계기준에 표준경사가 제시되어 있다. 제시된 설계기준에는 성토높이가 큰 경우 소단규정도 마련되어 있다. 소단은 사면의 안정성을 높이고 비탈면에 흘러내리는 물의 유속을 늦추는 한편 우수의 집수면적을 줄여 침식이 심하게 되는 것을 사전에 방지하기 위하여 설치하도록 되어 있다. 본 연구에서는 국내에서 사면해석 및 설계시 많이 참조되고 있는 도로설계요령과 국토해양부제정 건설공사 비탈면 설계기준에 나타나 있는 표준경사를 적용한 사질토사면에 대하여 사면안정해석을 수행하여 표준경사의 적용한계를 확인하고자 하였다. 또한 높은 사면에 대하여 설치하도록 규정되어 있는 소단의 폭에 따른 안전율을 계산하고 그 결과를 비교해 봄으로써 소단이 사면 안전율을 얼마나 증가시키는지 알아보려고 하였다.

2. 사면해석의 이론적 배경

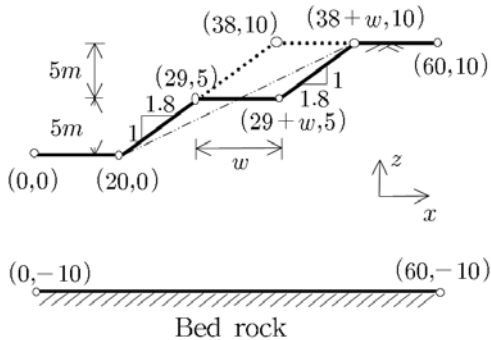
사면안정해석 방법을 대별하면 한계평형해석법(Limit equilibrium analysis)과 수치해석법(Numerical analysis)으로 나눌 수 있다. 한계평형해석법은 수치해석법에서 가능한 지반변형문제를 다룰 수 없는 단점이 있으나 해석방법이 비교적 간단하고 과거부터 현재까지 적용사례가 많아 신뢰성이 확보된 방법이라 할 수 있다. 한계평형해석법 중에서도 활동토체를 다수의 절편으로 나누어 해석을 수행하는 절편법(Method of slice)이 가장 많이 이용되고 있으며 절편법의 장점으로는 복잡한 사면형상을 고려할 수 있고 다양한 지반조건을 고려할 수 있으며 사면 경계에 작용하는 외적하중(external boundary load)를 고려할 수 있다는 데 있다. Whitman & Bailey (1967)와 Duncan & Wright (1980)는 절편법을 적용하는 다양한 사면해석방법들을 비교분석한 바 있다[2,3]. 절편법에서는 각각의 절편에 대하여 힘의 평형조건과 모멘트 평형조건을 고려하게 되는데 힘의 평형조건과 모멘트 평형조건을 동시에 만족하는 Spencer 방법과 Morgenstern & Price 방법 그리고 Sarma 방법에 의한 안전율은 정해와 $\pm 5\%$ 이내의 오차를 보인다고 한다[4-6]. 모멘트 평형

조건을 만족하는 Fellenius 방법은 안전율을 과소평가하는 것으로 알려져 있는데 간극수압을 고려한 유효응력해석시 간극수압비(r_u)가 클수록 50~60%에 달하는 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다[7]. 모멘트 평형조건을 채택하고 있는 Bishop 간편법은 그동안의 많은 적용사례 등을 통해 충분히 정확한 정도로 적용가능함이 밝혀져 현재 가장 많이 적용되고 있다[8].

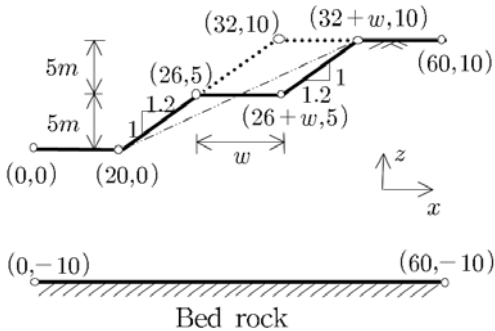
3. 해석계획

소단폭이 사면의 안전율에 미치는 영향을 알아보기 위해 먼저 성토사면과 절토사면에 대한 기본 검토단면을 결정하고자 하였다. 건설공사비탈면설계기준(2011)에서는 성토높이가 5~10m 인 경우 표준경사를 흙의 종류에 따라 1:1.8~1:2.0으로 하고 있고 도로설계요령(2001)에 따르면 성토높이가 6m 이상인 경우 표준경사는 1:1.8로 규정하고 있다[9,10]. 이를 참고하여 성토사면에 대하여 해석시 고려할 기본 검토단면의 사면높이는 10m로 하였고 사면경사는 1:1.8로 하였다. 성토사면 해석을 위한 기본 검토단면을 구성하는 흙의 물성은 도로설계요령을 참고하여 결정하였는데 사질토로 가정하여 단위중량, 내부마찰각 그리고 점착력을 각각 $19kN/m^3$, 25° 그리고 $15kN/m^2$ 로 보았으며 균질한 지반으로 고려하였다. 절토사면에 대하여 건설공사비탈면설계기준에서는 사질토의 밀실한 정도에 따라 사면높이가 10m인 경우 표준경사를 1:1.0~1:1.5를 취하도록 하고 있다. 본 해석에서는 절토사면을 구성하는 흙을 사질토로 보고 기본 검토단면의 사면높이를 10m로 하였고 사면경사는 1:1.2로 하였다. 절토사면 해석을 위해 고려한 기본 검토단면을 구성하는 흙의 물성과 관련해서는 건설공사 비탈면 설계기준 및 도로설계요령에 따르면 자연상태 사질토의 경우 밀실한 정도에 따라 단위중량은 $17\sim 19kN/m^3$ 이고 점착력은 $0\sim 30kN/m^2$ 이며 내부마찰각은 $25^\circ\sim 30^\circ$ 인데 본 해석에서는 단위중량과 점착력 그리고 내부마찰각을 $18kN/m^3$ 와 $15kN/m^2$ 그리고 27.5° 로 보았으며 균질한 지반으로 고려하였다. 소단설치와 관련해서는 도로설계요령에 따르면 성토높이가 6m 이상인 사면에서는 사면의 중간에 원칙적으로 소단을 설치하도록 되어 있으며 건설공사비탈면설계기준에서는 높이 5m 이상인 사면에 대하여 사면중간에 소단을 두도록 규정하고 있다. 사면

높이가 10m 이상인 절토사면에서는 사면 유지관리를 위한 점검, 배수시설의 설치공간으로 활용하기 위하여 원칙적으로 소단을 설치하도록 하고 있다. 본 연구에서는 사면해석시 성토 및 절토에 대해 고려한 기본 검토단면에 대하여 5m 높이에 소단(berm)을 설치하는 것으로 하였고 소단폭은 1m에서부터 7m까지 1m씩 증가된 7개의 값들을 고려하였다. 또한 소단을 두는 경우와의 비교를 위해 경사를 완화(grading)한 경우도 고려하였는데 성토 및 절토사면해석에서 고려한 해석단면은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.



[Fig. 1] Embankment slopes for analyses



[Fig. 2] Cut slopes for analyses

Fig 1과 Fig. 2에서 w 는 소단폭을 의미하며 그림에 나타나 있는 좌표는 사면해석을 위해 필요한 값들이다. Fig 1과 Fig. 2에서 실선과 은선의 조합으로 구성되는 단면이 기본 검토단면이 되고 실선만으로 된 단면이 소단(berm)을 설치한 단면이 되며 실선과 2점쇄선의 조합으로 구성되는 단면이 경사를 완화(grading)한 단면이 된다. 소단을 설치한 단면과 경사를 완화한 단면에 대하여 사면을 구성하는 토량은 같음을 알 수 있다. Fig 1과 Fig. 2에 나

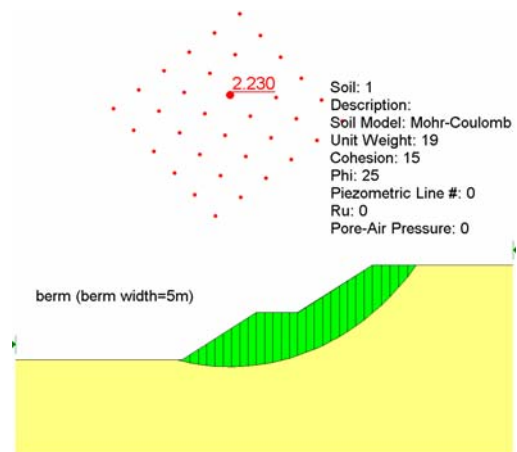
타낸 사면은 건조사면을 나타낸 것인데 지하수가 존재하는 사면에 대해서도 해석을 수행하도록 하였다. 지하수의 고려는 건조사면으로 고려한 모든 단면에 대하여 지하수위를 지표면에 일치시키는 것으로 하였다. 해석계획을 요약하면 Table 1과 같다.

[Table 1] Analysis scheme

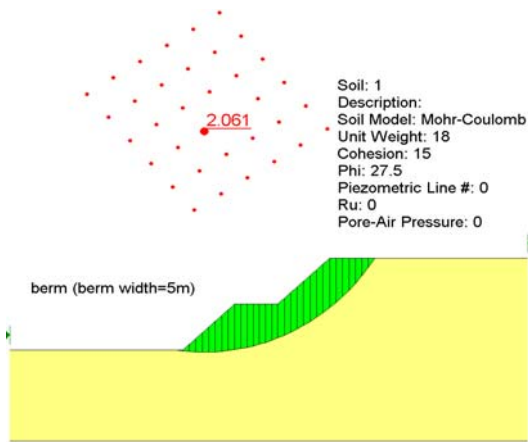
Types of slope		Section details
Embankment slope	dry	Basic section Sections with berm (7 cases) Sections with grading (7 cases)
	wet	"
Cut slope	dry	Basic section Sections with berm (7 cases) Sections with grading (7 cases)
	wet	"

4. 해석결과 및 분석

수립된 해석계획에 따라 사면해석을 수행하였는데 해석에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 SLOPE/W 이다[11]. 사면해석을 통해 결정되는 안전율 계산방법은 Bishop 간편법을 적용하도록 하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 폭 5m의 소단을 갖는 건조상태의 성토사면 및 절토사면에 대한 해석결과 예를 나타내고 있다.



[Fig. 3] Example of analysis(embankment slope)

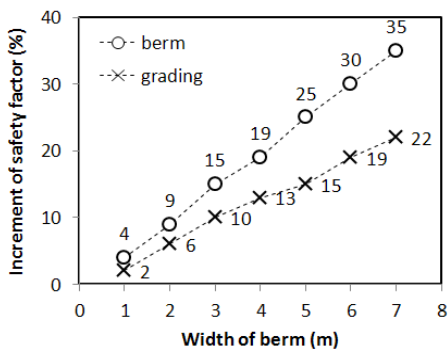


[Fig. 4] Example of analysis(cut slope)

건조상태에 있는 기본 성토단면에 대한 해석을 통해 구한 안전율은 1.79였다. 건조상태에 있는 성토사면 중 소단설치단면과 경사완화단면에 대한 해석결과를 소단폭에 따라 나타내면 Table 2와 같고 Table 2에 나타난 안전율 값들이 기본 성토단면에 대한 안전율값에 비해 얼마나 더 증가했는지를 나타내는 안전율 증분값을 Fig. 5에 나타내었다.

[Table 2] Results of embankment slope stability with width of berm (dry state)

Width of berm (m)	Factor of safety	
	Berm	Grading
1	1.86	1.83
2	1.96	1.89
3	2.05	1.97
4	2.13	2.03
5	2.23	2.06
6	2.32	2.13
7	2.42	2.19

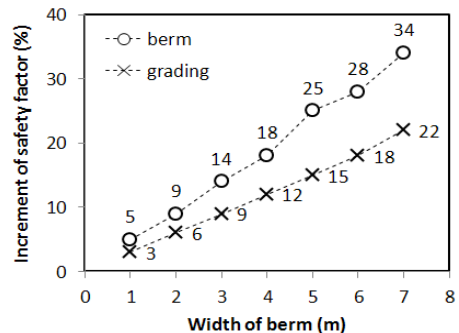


[Fig. 5] Increment of safety factor for dry embankment slope

건조상태에 있는 기본 성토단면에 대해 계산된 안전율과 소단설치사면 및 경사완화사면에 대한 안전율 모두 건조상태일 때의 기준안전율인 1.5보다 큼을 알 수 있다. 이로부터 본 해석에서 고려한 조건에 대해서는 설계기준에 따른 사면경사를 적용하더라도 문제가 없을 것으로 판단된다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 소단폭에 따라 사면안전율도 대체적으로 선형적으로 증가한다. 소단을 두는 경우와 사면경사를 완화하는 경우를 비교해 보면 소단을 두는 경우의 안전율 증가량이 사면경사를 완화하는 경우에 비해 큼을 알 수 있다. 소단폭이 7m인 경우 소단을 두는 경우와 경사를 완화한 경우의 사면안전율 증가량은 기본 검토단면의 경우에 비해 각각 35%와 22% 증가했음을 알 수 있다. 또한 소단폭이 증가함에 따라 소단을 두는 경우의 안전율과 경사를 완화한 경우의 안전율 사이의 차이도 커짐을 알 수 있다. 지하수가 존재하는 경우 사면안전율의 변화양상을 살펴보기 위해 Fig. 1에 나타난 사면에 대하여 지하수위를 지표면에 위치시켜 기본 검토단면과 소단설치단면 그리고 경사완화단면에 대하여 안전율을 계산해 보았는데 Table 3과 같고 기본 검토단면에 대한 안전율의 증분량을 소단폭에 대하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 지하수가 있는 경우의 기본 성토단면에 대한 안전율은 1.10이었다.

[Table 3] Results of embankment slope stability with width of berm (wet state)

Width of berm (m)	Factor of safety	
	Berm	Grading
1	1.15	1.13
2	1.20	1.17
3	1.25	1.20
4	1.30	1.23
5	1.37	1.27
6	1.41	1.30
7	1.47	1.34



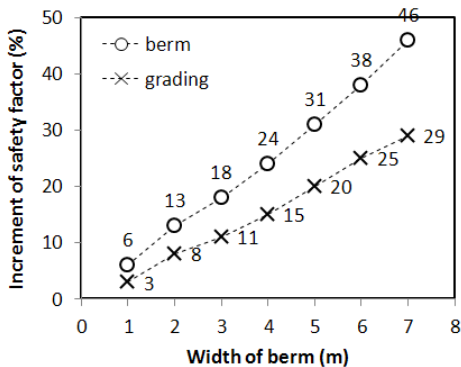
[Fig. 6] Increment of safety factor for wet embankment slope

지하수가 있는 경우 기본 성토단면에 대한 안전율은 강우시 기준안전율인 1.3보다 작으며 Table 3에 나타나 있는 소단설치사면에 대한 안전율도 소단폭이 4m 보다 작은 경우 기준안전율보다 작다. 따라서 지하수가 있는 성토사면의 경우 본 연구에 언급된 설계기준에 따라 표준경사를 그대로 채택하기에는 무리가 있으며 지하수위를 고려한 사면안정해석을 별도로 고려해야 할 것으로 판단된다. 지하수가 있는 성토사면의 경우에도 소단폭에 따라 안전율증분은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 소단폭이 7m인 경우 소단을 두는 경우와 경사를 완화한 경우의 사면안전율 증가량은 기본 검토단면의 경우에 비해 각각 34%와 22% 증가했음을 알 수 있다.

건조상태에 있는 기본 절토단면에 대한 사면해석결과 얻은 안전율은 1.57이다. 건조상태에 있는 절토단면에 대하여 해석을 통해 구한 소단폭에 따른 안전율은 Table 4에 나타나 있고 기본 절토단면의 안전율에 대한 안전율 증분값을 소단폭에 따라 나타내면 Fig. 7과 같다.

[Table 4] Results of cut slope stability with width of berm (dry state)

Width of berm (m)	Factor of safety	
	Berm	Grading
1	1.67	1.62
2	1.77	1.70
3	1.86	1.75
4	1.94	1.81
5	2.06	1.88
6	2.17	1.96
7	2.29	2.03



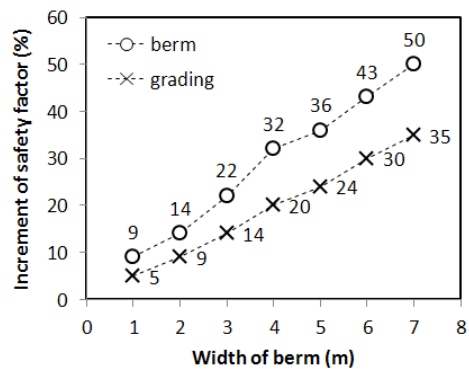
[Fig. 7] Increment of safety factor for dry cut slope

건조 기본 절토단면의 안전율과 Table 4에 나타나 있는 안전율은 건조사면에 대한 기준안전율인 1.5보다 큼

을 알 수 있다. 따라서 본 해석에서 고려한 조건에 대해 설계기준에 나타나 있는 표준경사를 적용하여도 건조 절토사면의 안정성은 대체적으로 확보될 것으로 판단된다. Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 절토사면에 대한 해석결과 또한 성토사면에 대한 해석결과와 유사한 결과를 보여준다. 즉, 건조 절토사면의 안전율 증분값은 소단폭에 따라 거의 선형적으로 증가하는데 소단폭이 7m인 경우 안전율 증분값은 소단을 설치한 경우와 경사를 완화한 경우 각각에 대하여 46%와 29% 증가함을 알 수 있다. 지하수가 지표면에 위치하는 경우의 기본 절토사면에 대하여 구한 안전율은 0.88이었다. 지하수가 지표면에 걸쳐 있는 경우의 절토단면에 대하여 소단을 두는 경우 그리고 경사를 완화한 경우에 대하여 안전율을 계산해 보았는데 Table 5와 같고 기본 절토단면에 대한 안전율 증분량을 소단폭에 대하여 나타내면 Fig. 8과 같다.

[Table 5] Results of cut slope stability with width of berm (wet state)

Width of berm (m)	Factor of safety	
	Berm	Grading
1	0.96	0.92
2	1.00	0.96
3	1.07	1.00
4	1.15	1.06
5	1.20	1.09
6	1.26	1.14
7	1.32	1.19



[Fig. 8] Increment of safety factor for wet cut slope

지하수가 있는 경우의 기본 절토단면에 대한 안전율과 Table 5에 나타나 있는 안전율을 통해 볼 때 지하수가 있는 절토사면의 경우 본 연구에 언급된 설계기준에 의한 표준경사를 적용하는 데는 무리가 따르며 지하수위를

고려한 해석이 별도로 수행되어야 할 것으로 판단된다. Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 지하수위가 있는 절토사면의 안전을 증분값은 대체로 소단폭에 비례하며 소단폭이 7m인 경우 안전을 증분값은 소단이 있는 경우와 경사가 완화된 경우에 비해 각각 50%와 35%임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 도로설계요령과 건설공사 비탈면 설계기준에 제시되어 있는 표준경사의 적용한계와 소단폭이 사면의 안정성에 미치는 영향을 살펴보고자 사질토로 가정된 검토단면에 대해 사면안정해석을 수행하였는데 해석결과 유도된 결론은 다음과 같다.

- 1) 해석에서 고려한 건조상태의 기본 성토단면 및 기본 절토단면과 유사한 조건의 단면에 대해서는 설계기준에 제시된 표준경사를 적용하더라도 문제는 없을 것으로 보인다.
- 2) 지하수가 있는 상태에서는 기본 성토단면과 기본 절토단면의 해석결과 얻어진 안전율이 기준 안전율인 1.3보다 작아 표준경사만 고려함은 충분치 않으며 지하수위를 고려한 별도의 사면안정해석을 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 전체 높이 10m인 균질사면에 대하여 5m 높이에 소단을 두는 경우와 그와 동등한 토량을 갖도록 경사를 완화한 경우에 대하여 소단폭에 따른 사면 안전율을 비교해 볼 때 본 연구에서 고려한 모든 경우에 대하여 소단을 두는 경우의 안전율이 경사를 완화한 경우보다 크게 계산되었는데 소단폭이 커질수록 안전율 차이 또한 크게 나타났다.
- 4) 전체 높이 10m인 균질사면에 대하여 5m 높이에 소단을 두는 경우 기본 검토단면에 대한 사면안전율 증분값은 소단폭에 대체적으로 비례하는 결과를 보였는데 소단폭이 7m인 경우 건조상태일 때의 성토사면과 절토사면에 대한 안전율 증분값은 각각 35%와 46%였으며 지하수위가 지표면에 존재하는 경우의 성토사면과 절토사면에 대한 안전율 증분값은 각각 34%와 50%였다.
- 5) 본 연구는 한정된 사면의 제원과 흙의 물성을 바탕으로 수행되었으나 연구를 통해 얻은 결과는 설계시 표준경사를 적용함에 있어 그 적용한계를 가늠

할 수 있는 자료로 의미가 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Lee W. A., Thomas S. L., Sunil Sharma, Glenn M. B. (2002) Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, Inc., pp. 38.
- [2] Whitman, R. V. and Bailey, W. A. (1967) "Use of computers for slope stability analysis", ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 93 (SM4).
- [3] Duncan, J. M. and Wright, S. G. (1980) "The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis", Proceedings of the International Symposium on Landslides, New Delhi, Vol. 1, pp. 247-254.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(80\)90003-4](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(80)90003-4)
- [4] Spencer, E. (1967) "A method of analysis of the stability of embankment assuming parallel inter-slice forces", Geotechnique, Vol. 17, pp. 11-26.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>
- [5] Morgenstern, N. R., and V. E. Price (1965) "The analysis of the stability of general slip surfaces", Geotechnique, Vol. 15, No. 1, pp. 77-93.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- [6] Sarma, S. K. (1973) "Stability analysis of embankments and slopes", Geotechnique, Vol. 23, No. 3, pp. 423-433.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1973.23.3.423>
- [7] Fellenius, W. (1936) "Calculation of stability of earth dams", Transactions, 2nd Congress Large Dams, Vol. 4, 445pp. Washington, D.C.
- [8] Bishop, A. W. (1995) "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes" Geotechnique, Vol. 10, No. 1, pp. 129-150.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- [9] Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Design Criteria of Slopes for Construction
- [10] Korea Expressway Corporation (2001) Road Design Method
- [11] GEO-SLOPE (2002) SLOPE/W Manual, GEO-SLOPE International, Canada

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-Il Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학