

역지말뚝-사면의 상호작용을 고려한 사면안전을 분석

Stability Analysis of Pile/Slope Systems Considering Pile-slope Interaction

김병철¹⁾, Byung-Chul Kim, 유광호²⁾, Kwang-Ho You, 정상섭³⁾, Sang-Seom Jeong

¹⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Course, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ.

²⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon.

³⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ.

개요(SYNOPSIS) : A numerical comparison of predictions by limit equilibrium analysis and 3D analysis is presented for slope/pile system. Special attention is given to the coupled analysis based on the explicit-finite-difference code, FLAC. To this end, an internal routine (FISH) was developed to calculate a factor of safety for a pile-reinforced slope according to shear strength reduction technique. The case of coupled analyses was performed for stabilizing piles in slope in which the pile response and slope stability are considered simultaneously and subsequently the factors of safety are compared to uncoupled analysis (limit equilibrium analysis) solution for a homogeneous slope. Based on a limited parametric study, it is shown that in the free-head condition the factor of safety in slope is more conservative for a coupled analysis than for an uncoupled analysis and a definitely larger value represents when piles are installed in the middle of the slopes and are restrained in the pile head.

1. 서론

역지말뚝의 해석을 위해 제안된 기존의 경험적·수치적 방법들은 크게 ①토압법/변위법과 ②유한요소법/유한차분법에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 이중 첫 번째 방법은 횡방향 토압과 횡방향 지반변위를 이용한 수동말뚝의 해석에 기초한 방법이다. 이 방법에서 일렬말뚝에 작용하는 횡방향 토압은 Ito & Matsui에 의해 제안된 토압론을 주로 사용하고 있기 때문에 이 모델은 무한한 길이를 가지는 강성말뚝과 지반은 완전소성체로 가정하였다. 따라서 이 방법은 현장말뚝 거동을 대표한다고 볼 수 없으며, 유한연성말뚝, 아칭 효과, 연약지반 등을 제대로 고려할 수 없다. 또한 원지반의 변위를 추정하는 변위법의 주요한 문제점은 횡방향 변위의 정확한 측정이 매우 어렵다는 것이다. 이와같이 축방토압 또는 변위를 고려하는 첫 번째 방법의 경우 말뚝으로 보강된 사면의 해석은 한계평형법을 이용하며, 그 결과 이 방법은 지반과 말뚝의 상호작용을 명확하게 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

반면에 두 번째 방법의 경우는 말뚝으로 보강된 사면을 유한요소법이나 유한차분법을 적용하여 연속된 탄성체 혹은 탄소성 매질로서 해석하였다. 이 방법은 말뚝과 사면의 안정성을 동시에 고려하는 커플링해석이 가능한 장점을 가지고 있다. 즉 보강된 말뚝의 저항력으로 사면의 활동과피면의 분포형태나 위치가 변할 수 있다는 것이다.

사면의 안전율 F_s 는 실제적으로 지반내 발생하는 전단응력과 활동을 방지하기 위해 필요한 최대전단강도의 비로서 정의된다. 유한요소해석 혹은 유한차분법으로 안전율을 산정하기 위한 전단강도 감소법은 파괴가 일어날 때까지 지반의 전단강도를 점진적으로 감소시켜가며 F_s 를 반복 계산하는 방법으로 지반의 실제적인 전단강도와 파괴 상태에서의 감소된 전단강도의 비로서 안전율이 도출된다. 전단강도 감소기법은 일찍이 Zienkiewicz(1975)에 의해서 사용되어졌고, Naylor(1981), Donald & Giam(1988),

Matsui & San(1992), Ugai & Leshchinsky(1995), Cai & Ugai(2000), You(2000) 등에 의해 적용되었다. 본 연구에서는 이러한 전단강도감소 기법을 사용하였다. 이 기법은 기존의 절편법에 비해 임계과괴면을 자동적으로 찾을 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 안정화된 균질한 사면에 일렬 군말뚝을 설치하여 전단강도감소 기법에 의해 안전율을 구하였다. 커플링을 고려하지 않은 경우는 한계평형법을 적용하였고, 이어서 임계면의 변화를 고려하기 위해 전단강도 감소법에 기초한 커플링을 고려한 해석을 수행하였다. 최종적으로 해석결과를 커플링의 유·무에 따라 비교·분석하였다.

2. 커플링을 고려하지 않은 해석 (한계평형법)

2.1 말뚝 해석

과괴면 상의 활동지반은 일렬 군말뚝에 의해 보강되는 것으로 가정하였다. 여기서 지반은 불안정층(수동말뚝 부분)과 안정층(주동말뚝 부분)으로 구분하였다. 따라서 말뚝의 휨에 대한 지배방정식은 활동면 상부는 (1) 식으로 하부는 (2) 식으로 나타낼 수 있다.(그림 1)

$$EI\left(\frac{d^4 y}{dz^4}\right)_i = p \quad (1)$$

$$EI\left(\frac{d^4 y}{dz^4}\right)_i + K_i y_i = 0 \quad (2)$$

여기서 y = 말뚝의 횡방향 변위, p = Ito & Matsui의 말뚝에 작용하는 측방토압, K_i = 지반의 탄성계수, EI = 말뚝의 강성도이다. 탄성계수는 지반반력계수와 관련이 있고, 입력변수로 사용되는 p - y 곡선은 극한하중(P_u)과 초기접선계수(E_s)로 표현되는 쌍곡선 함수로 가정하였다.

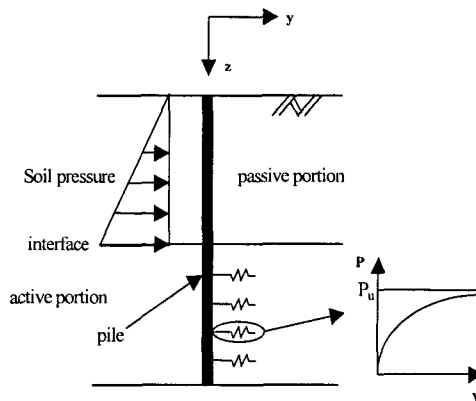


그림 1. A pile subjected to lateral soil pressure.

또한 본 연구에서는 다음과 같이 말뚝 두부조건을 4가지로 고려하였다. ① free head(변위와 회전 허용), ② hinged head(변위없이 회전만 허용), ③ unrotated head(회전없이 변위만 허용), ④ fixed head(변위와 회전 구속).

2.2 사면의 안전율

그림 2는 일렬 군말뚝에 의해 보강된 사면을 나타낸다. 본 연구에서는 Bishop의 간편법을 적용하여 원호활동면을 가지는 보강된 사면의 안전율을 다음과 같이 계산하였다.

$$F = F_i + \Delta F = \frac{M_R}{M_D} + \frac{V_{cr} \cdot R \cdot \cos \theta - M_{cr} + V_{head} \cdot Y_{head}}{M_D} \quad (3)$$

여기에서, F_i = 보강전 사면의 안전율, ΔF = 말뚝으로 보강된 사면의 증가된 안전율, M_{cr} = 임계면에서의 휨모멘트, V_{cr} = 임계면에서의 전단력, V_{head} = 말뚝 두부에서의 전단력을 나타낸다. 이를 토대로 억지말뚝 해석프로그램 (Reinforced Slope Stability Program: RSSP)을 개발하여 말뚝/사면의 커플링을 고려하지 않은 경우에 대하여 안정해석을 수행하였다.

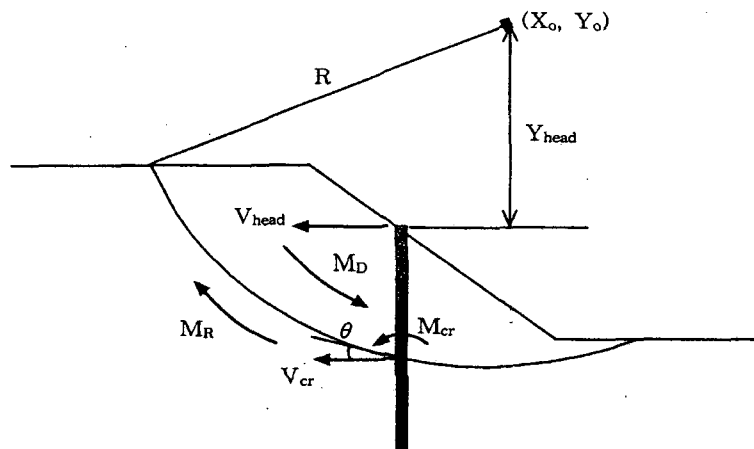


그림 2. Forces on stabilizing piles and slope.

3. 커플링을 고려한 해석 (전단강도 감소법)

3.1 전단강도 감소기법

전단강도 감소기법에 의한 사면안정해석은 실제지반의 점착력 c 와 내부마찰각, ϕ 를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반물성치는 그림 3에 나타난 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며 원래의 물성과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (4)$$

$$\phi^{trial} = \arctan \left(\frac{1}{F^{trial}} \right) \tan \phi \quad (5)$$

본 연구에서는 한계상태를 찾기위해, 점진적으로 전단강도를 낮추어 가며 찾는 방법(incremental search)을 사용하였다. 여기서, F^{trial} 는 시험안전율을 의미한다. 즉, 초기 시험안전율을 1.0으로 정하고 이 결과가 수렴하면 시험안전율을 0.2 간격으로 증가시켜 가면(즉 1.0, 1.2, 1.4) 해석을 수행한다. 이 때 해석에 사용되는 지반의 강도는 점차 감소하게 된다. 만일 해석결과가 1.4에서 수렴하지 않을 경우, 실

제 안전율은 1.2에서 1.4의 값을 가지게 되므로 1.2에서부터 0.1 간격으로 다시 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 수행하며, 1.3에서 결과가 수렴하지 않으면 실제 안전율은 1.2에서 1.3 사이에 존재하므로 1.2에서부터 0.02의 간격으로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 수행한다. 이러한 절차는 F^{inc} 가 사용자가 정의한 허용오차(ϵ)보다 작아질 때까지 되풀이 된다. F^{low} 의 최종값은 한계평형해석에서의 것과 동일하지만 유한요소법과 유한차분법에 의한 방법은 어느 지점에서나 국부적인 평형조건을 만족한다. 그러나 한계평형해석법은 오직 해석에서 고려한 활동지반 전체에 대한 평형조건만을 만족한다.

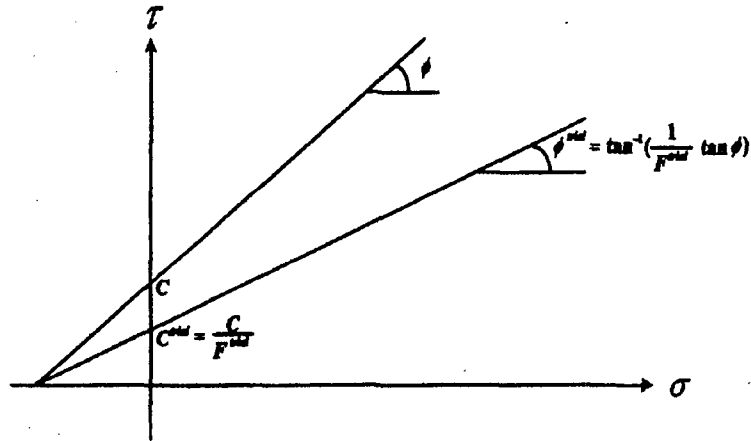


그림 3. A relationship between the actual strength and a strength reduced by a trial factor of safety

3.2 유한차분법

사면과 말뚝 사이의 상호작용을 알아보기 위하여 3차원 유한차분법인 FLAC 3D를 사용하여 해석하였다. 3차원으로 구성된 mesh는 8개의 절점을 갖는 solid element가 단단한 층위에 놓인 것으로 가정하였다. 왼쪽과 오른쪽면의 경계조건은 지반의 변위를 허용하기 위해 롤러로 하였으며, 말뚝요소는 탄성체, 지반 주변은 Mohr-Coulomb의 탄소성 매질로 가정하였다. 이 모델은 FLAC 3D의 지반 모델에서 선택하였고, 사면의 안전율은 FLAC의 fish를 이용하여 계산하였다. 주어진 요소의 형상함수에서 FLAC 해석에 의한 대수방정식은 유한요소법에 의해 해석한 것과 동일하나 FLAC 해석에서는 dynamic relaxation을 사용하였다.

FLAC 해석에 있어서 수렴을 판단하는 기준은 모든 점에 작용하는 평균력에 대한 최대 불균형력의 비로써 결정된다. 만일 모델이 평형상태라면, 그 비율은 0에 가까워지는데 그 비율이 10^{-6} 보다 작을 때 수렴하는 것으로 간주하였다.

4. 기존연구와의 비교 · 분석

4.1 사면의 모델링

Hassiotis 등은 일렬말뚝으로 보강된 사면을 설계하는 방법론을 제시하였다. 말뚝에 작용하는 토압은 Ito-Matsui 토압론을 사용하였으며 말뚝이 사면내에 추가되면서 변화하는 임계면을 고려하기 위하여 마찰원법에 의한 안정수를 사용하였다. 커플링을 고려한 토압법을 사용하였으며 이때, 지하수위는 고려하지 않았다. 이 경우 말뚝에 의해 보강되지 않은 원 사면의 안전율은 1.08이었다.

그림 4에 나타난 것처럼 본 연구에서는 사면을 FLAC 3D로 모델링 하였고 두 개의 대칭 경계조건을 사용하여 간편하게 실제 일렬 군말뚝 조건을 모사하였다. Mesh의 크기는 말뚝의 길이와 관련이 있으며, 저부는 말뚝 선단과 같은 깊이에서 강성 경계조건을 사용하였고, 측면 경계조건은 영향거리인

$r_m=2.5L(1-u)$ 을 고려하여 경계조건이 해석의 결과에 영향을 미치지 않게 하였다. 해석에 사용된 물성은 표 1과 같다.

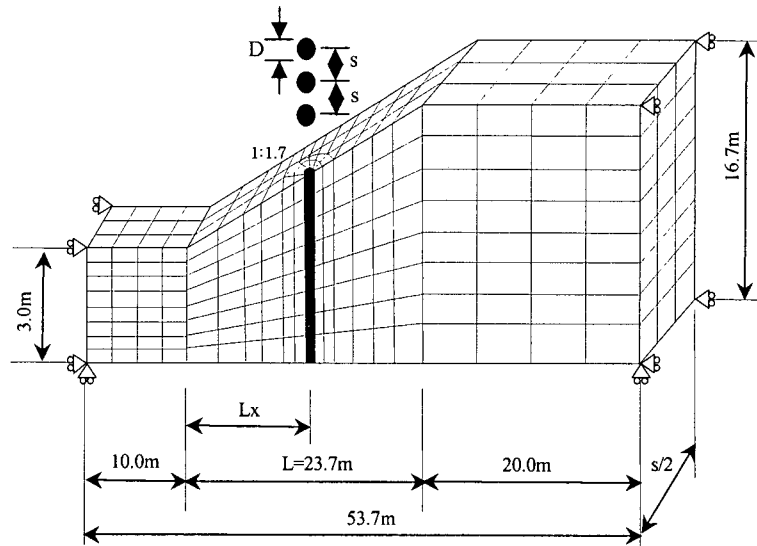


그림 4. Model slope and element mesh

표 1. Material Properties and Geometries

soil	unit weight (kN/m^3)		19.63
	plastic (Mohr-Coulomb)	friction angle ($^\circ$)	10
		dilation angle ($^\circ$)	
	elastic	elastic modulus (Pa)	4.79×10^6
poisson's ratio		0.35	
pile	unit weight (kN/m^3)		23.0
	elastic modulus (Pa)		2.5×10^{10}
	poisson's ratio		0.2
	diameter (m)		0.62

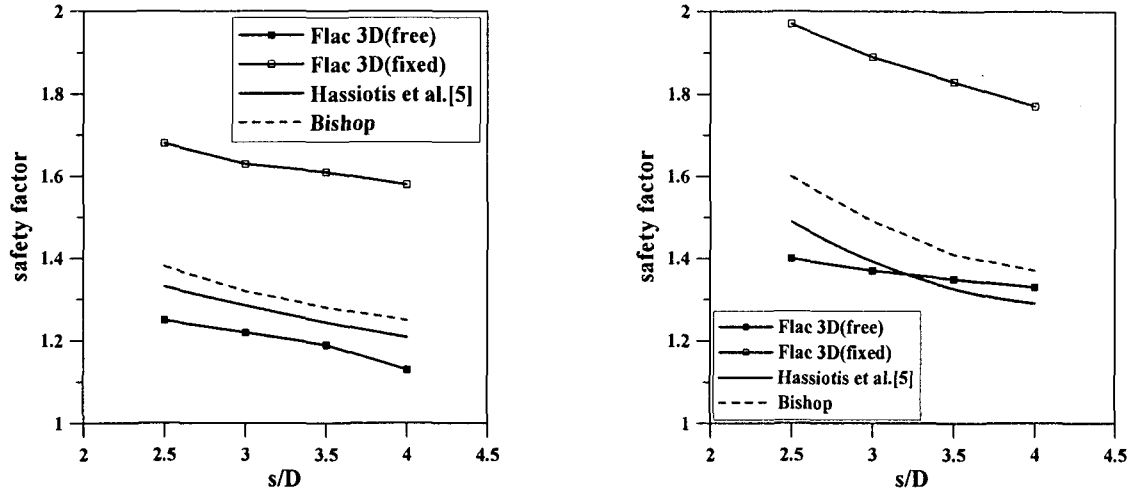
4.2 말뚝 중심 간격의 영향(s/D)

서로 다른 말뚝 두부조건(자유단과 고정단)에 대하여 말뚝간격에 의한 사면의 안전율은 그림 5와 같다. 예측하였던 대로 안전율은 말뚝의 간격이 감소함에 따라 증가하였다. 본 연구에서는 말뚝 사이의 간격이 말뚝 직경의 2.5배 이하일 경우 시공성이 떨어지므로 말뚝의 간격은 2.5D 이상만을 고려하였다. s/D가 2.5 일 때 사면의 안전율은 최대값을 나타낸다. 이것은 말뚝 간격이 작아짐에 따라 말뚝 사이의 횡방향 지반변위가 더욱더 구속되는 사실로 설명할 수 있다.

이 그림은 또한 말뚝 간격에 따른 안전율에서 커플링을 고려한 효과를 보여준다. FLAC에 의한 해석 방법은 말뚝의 두부조건이 사면의 안전율에 큰 영향을 주고 있으며, 두부가 고정된 말뚝에 의해 보강된 사면의 안전율은 Hassiotis 등에 의한 커플링을 고려한 해석적인 방법과 Bishop의 간편법에 의해 얻어진 안전율보다는 상대적으로 크게 나타났다. 커플링을 고려한 방법과 커플링을 고려하지 않은 해석적인 방법 사이의 안전율의 차이는 말뚝에 작용하는 토압에 의해 설명 될 수 있다. 말뚝에 작용하는 토압이

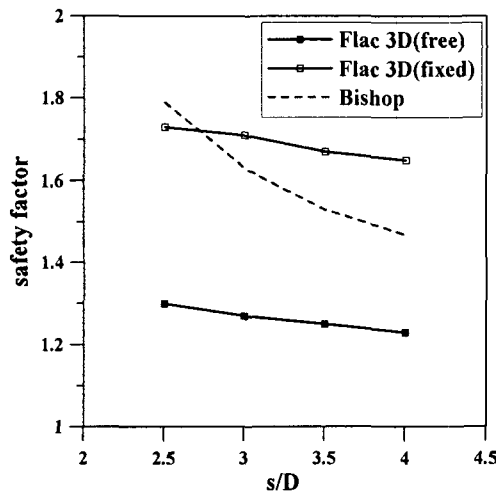
클수록 말뚝에 의해 활동지반에 작용하는 반력도 크며, 말뚝으로 보강된 사면의 안전율은 더욱 더 커지기 때문이다.

FLAC의 해석적인 방법에 의해 얻어진 수치해석 결과를 볼 때 두부가 고정된 말뚝을 갖는 사면의 안전율은 말뚝 두부가 고정되지 않은 말뚝(free-head condition)으로 보강된 사면의 안전율보다 크기 때문에 가능한 두부가 구속된 말뚝(hinged- or fixed-head)을 사용하여 사면보강을 하는 것이 유리함을 알 수 있었다.



(a) $L_x = 7.6\text{m}$ ($L_x/L=0.32$)

(b) $L_x = 12.2\text{m}$ ($L_x/L=0.51$)



(c) $L_x = 17\text{m}$ ($L_x/L=0.72$)

그림 5. Effect of pile spacings on safety factor

4.3 사면내 말뚝 위치의 영향

그림 6은 사면에서 말뚝의 중심간 간격이 $2.5D$ 인 일렬 균말뚝에 대하여 상대적인 위치에 따른 안전율을 나타낸다. 여기에서 말뚝의 위치는 사면 선단과 말뚝 사이의 수평거리 L_x 와 사면 선단과 사면 정부의 수평거리 L 과의 비로 무차원이다. 전단강도감소법을 이용하여 커플링을 고려한 FLAC의 결과는 말뚝에 의해 보강된 사면의 안전율이 보강되지 않는 사면의 그것보다 증가함을 보여주고 있으며, 말뚝 두부 조건에 상관없이 말뚝이 사면의 중앙부에 있을 때 가장 큰 안전율이 나타남을 알 수 있다. 반면에

Bishop과 Hassiotis의 결과에서는 사면의 정부 쪽에서 최대 안전율이 나타난다. 그 이유는 FLAC 3D 해석에서 말뚝이 사면의 중앙부에 위치할 때 말뚝에 작용하는 토압은 Ito-Matsui의 방적식에 의해서 얻어진 것보다 크기 때문이다. 왜냐하면 지반-말뚝사이에 전단강도가 충분히 발현되었기 때문인 것으로 판단된다.

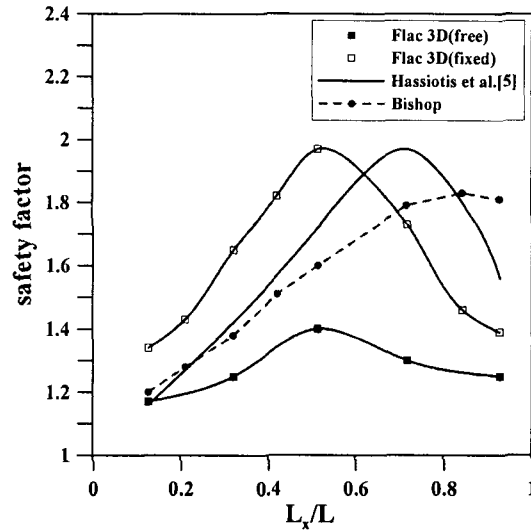


그림 6. Effect of pile positions on safety factor(s/D=2.5)

5. 결론

본 연구에서는 일렬군말뚝으로 보강된 사면과 말뚝간의 상호작용을 고려한 해석방법을 제시하고, 해석적인 연구와 수치적인 연구에 기초하여 분석하였다. 한계평형법을 이용한 사면안정 해석과 수치해석 결과와 비교하였으며, 말뚝과 사면 상호간에 커플링 효과를 알아보기 위하여 말뚝의 위치와 말뚝 중심 간격 및 두부조건을 변화시키면서 해석하였다. 본 연구를 통한 결과는 다음과 같다.

- (1) 말뚝과 사면의 상호작용을 고려한 FLAC 해석은 사면에 말뚝이 근입됨에 따라 활동 파괴면이 변화하는 말뚝/사면의 커플링 효과가 나타났다.
- (2) 말뚝의 두부조건이 자유단인 경우, 커플링을 고려한 안전율은 커플링을 고려하지 않은 것보다 상대적으로 작게 나타났으나 말뚝 두부가 고정단의 경우는 정 반대로 나타났다. 그러나 모든 해석결과는 커플링의 유·무에 상관없이 말뚝 중심간격이 감소함에 따라 안전율이 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 전단강도 감소법에 의한 수치해석 결과, 말뚝의 두부조건에 따라 사면의 안전율이 크게 영향을 받으며, 말뚝의 사면의 중앙부에 위치할 때와 말뚝의 두부가 구속될수록 사면의 안전율은 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Bishop, AW.(1955), "The use of slip circle in the stabilityanalysis of slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp7~17.
2. Cai, F. and Ugai, K.(2000) "Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles",

- Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 40, No. 1, pp73~84.
3. Chen, L.T.(1994.) "The effect of lateral soil movements on pile foundations", Ph. D. Thesis, University of Sydney
 4. Donald, I.B. and Giam, S.K.(1988) "Application of the nodal displacement method to slope stability analysis", Proc. 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Sydney, Australia, pp456~460.
 5. Duncan, J.M.(1996), "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No 7, pp577~596.
 6. Hassiotis, S., Chameau, J.L., and Gunaratne, M.(1997), "Design method for stabilization of slopes with piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No 4, pp.314~323.
 7. Ito, T., Matsui, T.(1975), "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", *Soils and Foundations*., Vol. 15, No. 4, pp.43~59.
 8. Matsui, T. and San, K.C.(1992) "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp59~70.
 9. Naylor, D.J.(1981) "Finite element and slope stability", *Numer. Meth. in Geomech. and Proc. NATO Advanced study Institute*, Lisbon, Portugal, pp229~244.
 10. Ugai, K. and Leshchinsky, D.(1995) "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis a comparison of result", *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 4, pp1~7.
 11. You, K.H., Park, Y.J. and Dawson, E.M.(2000) "Stability analysis of jointed/weathered rock slopes using the Hoek-Brown failure criterion", *Geosystem Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp90~97.
 12. Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C., and Lewis, R.W.(1975) "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 4, pp671~689.