

앵커 하중전이에 따른 사면의 안전을 비교 연구

Comparison of Safety Factor for an Anchored Slope in Accordance with the Effects of Load Transfer

김 성 규¹ Kim, Sung-Kyu

김 낙 경² Kim, Nak-Kyung

박 종 식³ Park, Jong-Sik

주 용 선⁴ Joo, Yong-Sun

김 태 훈⁵ Kim, Tae-Hoon

Abstract

This paper presents how the load transfer mechanism of the ground anchor affects on the stability analysis of anchored slope. The finite element analysis and the conventional limit equilibrium analysis on the anchored slope were performed and compared. The limit equilibrium analysis of the anchored slope is widely used in design practice due to the easiness of the analysis. However, the load transfer mechanism is not considered properly for the analysis. When the failure surface passes through the bonded length of an anchor, the anchor load is disregarded and the factor of safety for the anchored slope is smaller than it should be. In this study, the load transfer distribution was incorporated into the limit equilibrium stability analysis of the anchored slope and the results were compared with those of finite element analysis.

요 지

본 논문에서는 앵커로 보강된 사면에 대한 안정해석시 앵커의 하중전이가 메커니즘이 사면의 전체 안전율에 어떻게 영향을 미치는지를 알아보았다. 사면안정해석 방법에는 한계평형해석법, 유한요소해석법 및 스프레드시트를 이용하는 방법이 있으며 각각의 방법을 통해 안전율을 산정하여 서로 비교하였다. 앵커로 보강된 사면의 안정해석을 위해 가장 널리 사용되고 있는 방법은 한계평형해석법으로 사용이 간편하다는 특징을 가지고 있다. 그러나 한계평형해석방법에서는 사면의 파괴면이 정착장을 통과하거나 정착장 바깥쪽을 지날 때에는 사면의 전체 안전율에 아무런 영향을 주지 못 하기 때문에 실제보다 보수적인 설계가 이루어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각각의 해석방법을 이용하여 앵커로 보강된 사면의 안정해석을 수행하고 안전율을 비교하였다.

Keywords : Anchored slope stability, Finite element analysis, Ground anchors, Limit equilibrium analysis, Load transfer

1. 서 론

사면의 안정성을 평가하기 위한 방법으로 한계평형

해석법 및 유한요소해석법 등이 있다. 한계평형해석은 사면의 안정해석 및 설계를 위한 방법으로 가장 널리 사용되고 있으며 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까

1 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Architectural & Environmental, System Eng., Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil, Architectural & Environmental, System Eng., Sungkyunkwan Univ.)

3 한화건설 기술연구소 토목연구팀 선임연구원 (Senior Researcher, Hanwha Institute of Construction Technology, Hanwha E&C Co, Ltd.)

4 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Architectural & Environmental, System Eng., Sungkyunkwan Univ.)

5 (주)대우건설기술연구소 선임연구원 (Senior Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C Co, Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 한계평형방법에 의한 사면안정해석은 부정정의 문제로 미지수의 수가 방정식의 수보다 많다. 따라서 해를 얻기 위해서는 미지수의 수와 방정식 수의 차이를 보완할 수 있는 개수만큼의 가정이 필요하다. 그리고 한계평형해석의 가장 큰 단점은 변위해석이 불가능하고 사면의 파괴면을 따라 분포하는 변형율을 알지 못한다는 것이다.

유한요소해석은 응력-변형을 관계를 이용하여 지반 내부의 응력을 계산할 수 있고 계산된 응력을 이용하여 안전율을 산정할 수 있다. 또 유한요소해석법을 이용하여 파일, 앵커 및 네일 등으로 보강된 사면의 안정성 또한 해석이 가능하다.

한계평형해석법은 운용 및 해석이 쉽기 때문에 실제 설계에 가장 널리 사용되고 있는 해석방법이나 앵커보강 사면의 안정 해석시 앵커의 하중전이 메커니즘을 적절하게 고려하지 못한다. 만약 사면의 파괴면이 앵커의 정착장을 통과할 경우에는 앵커 하중이 사면의 안정 해석에 고려되지 않으므로 보수적인 해석이 이루어지게 된다. 따라서 한계평형해석법에서 앵커의 하중전이 분포를 고려하여 사면의 안정성을 평가할 수 있는 스프레드시트를 작성하여 안정해석을 수행하였으며 한계평형 해석 및 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. 하중전이분포를 고려한 앵커보강 사면의 안정 해석

2.1 한계평형해석

지반공학에서 한계평형해석법이 널리 사용되고 있으며 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험을 통하여 잘 알려져 있다. 사면안정해석시 가상파괴면에서의 안전율은 최소 안전율 보다 커야 하며 안전율은 다음과 같이 정의 된다.

$$FS = \frac{\text{shear strength of soil}}{\text{shear stress required for equilibrium}} \quad (1)$$

본 연구에서는 한계평형해석 방법으로 Bishop의 간편법을 사용하였고 사면에 작용하는 앵커 하중은 파괴면을 따라 작용하는 원호의 분포응력으로 치환하였다. 각 절편 작용하는 분포응력은 절편 중앙에 작용하는 하중으로 Plamant's Formula(Tenier and Morlier, 1982)를 이용하여 산정하였다.

$$\sigma_r = \frac{2 \times T \times \cos \theta_T}{\pi \times D} \quad (2)$$

여기서, σ_r 는 원호 응력, T 는 앵커 평균하중, θ_T 는 앵커 하중이 작용하는 선과 앵커가 작용하는 점과 절편 중앙 점을 이은 선 사이의 각이며 D 는 지표면에 앵커가 작용하는 점과 절편 중앙 사이의 거리이다. 사면의 안전율은 식 (3)과 같이 정의 된다.

2.2 앵커의 하중전이 메커니즘

앵커 사면의 통상적인 한계평형해석방법에서는 앵커 하중전이가 고려되지 않았기 때문에 만일 파괴면이 앵커의 정착장을 통과할 경우에는 앵커하중은 무시된다. 따라서 그림 2에서 앵커 No. 1 및 No. 2는 앵커 정착장이 파괴면에 걸쳐져 있거나 안쪽에 있으므로 사면의 안전을 계산에 영향을 주지 못한다. 앵커 두부에 가해지는 하중은 앵커와 지반 사이에서 발생하는 전단응력에 의해 지반으로 전이되며 파괴시 앵커의 하중분포는 정착장을 따라 일정하게 작용한다(Ostermyer and Sheele, 1977). 풍화토 지반에서의 그라우트와 지반 사이 하중전이분포는 김낙경(Kim, 2003)의 연구에 있으며, 본 연구에서 앵커에 작용하는 하중전이분포는 등분포로 가정하였다. 예를 들면 그림 2에서 No. 2의 앵커하중은 파괴면 바깥쪽 정착장을 따라 전이되는 등분포하중인 T_2 로 계산된다. 또 파괴면 바깥쪽에 정착장이 모두 위치한 앵커는 해석시 앵커하중이 $T(T_1 + T_2)$ 로 산정된다.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}, \quad m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{F_S} \quad (3)$$

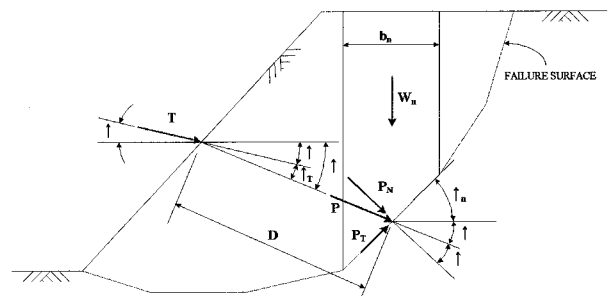


그림 1. 파괴면에서 집중하중으로 변환

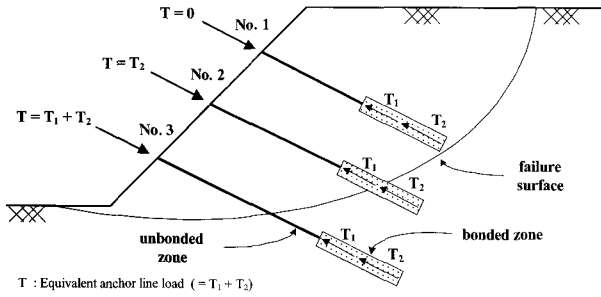


그림 2. 파괴면의 앵커 단면

2.3 유한요소해석

유한요소해석은 복잡한 사면형성, 두 개 이상의 지층 및 복잡한 3차원을 모델링할 때 주로 이용하며, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 등과 같은 다양한 지반 모델들을 적용할 수 있다. 일반적으로 유한요소해석법을 이용한 사면의 안정해석에는 두 가지 접근방법이 있다. 첫 번째는 사면이 불안정해질 때 까지 중력을 증가시키는 방법이며, 두 번째 방법은 사면이 불안정해질 때 까지 사면의 전단강도정수를 감소시키는 방법이다. 전단파괴 시 사면의 안전율은 다음과 같이 정의 된다.

$$FS = \frac{\tau}{\tau_f} \quad (4)$$

$$c_f = \frac{c}{FS} \quad (5)$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{FS}\right) \quad (6)$$

여기서, τ 및 τ_f 는 각각 지반의 전단강도 및 파괴면에 작용하는 전단응력이며 안전율이 고려된 전단강도 정수 c_f 및 ϕ_f 는 각각 식 (5) 및 (6)과 같으며 전단강도 감소기법이다(Matsui & San, 1992).

사면의 파괴는 사면이 부풀어 오를 때(Snitbhan & Chen, 1976), 파괴면의 전단응력이 한계에 도달했을 때(Huncan & Dunlop, 1969) 또는 정해에 수렴하지 않을 때(즉 발산할 때)(Zienkiewicz & Taylor, 1989)로 정의하며 본 연구에서는 해석시 발산할 때를 사면이 파괴된 것으로 정의하였다. 이것은 어떠한 응력 분포도 Mohr-Coulomb 파괴 기준과 전체 평형을 만족시키지 못 하는 것을 의미

표 1. 유한요소해석시 지반정수

Material	γ (kN/m ³)	ν	E_s (kPa)	ϕ (degree)	ψ (degree)	c (kPa)
Weathered Soil	21.0	0.3	105	30	0	20

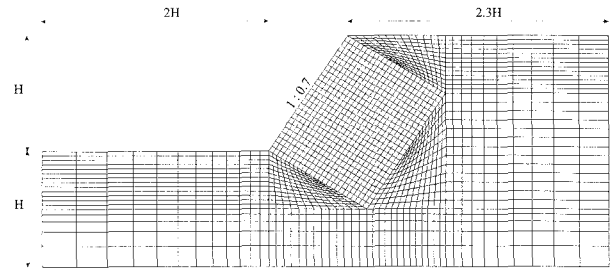


그림 3. 유한요소 격자

한다. 사면의 파괴와 수치적 발산은 동시에 발생하며 사면 파괴시 파괴면에서 급격한 변위가 발생한다.

본 연구에서는 무보강 및 앵커보강사면의 유한요소 해석을 위해 상용프로그램인 ABAQUS(2004)가 이용되었다. 무보강 사면의 경우 5365개의 절점과 1736개의 요소를 가지며 앵커보강사면의 경우 5479개의 절점과 1775개의 요소로 구성되었다. 좌 및 우측의 경계는 롤러, 바닥은 힌지로 고정시켰다.

본 연구에서는 해석결과를 안전율과 무차원 변위 (dimensionless displacement, $E_s \delta_{\max} / \gamma H^2$) 그래프로 표현 하였다. 여기서 δ_{\max} 는 최대 절점변위, H 는 사면의 높이이다.

2.3.1 지반모델

유한요소해석시 지반은 2차원 평면변형을 조건이며 8절점 요소의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용한 탄성성모델을 사용하였다. Mohr-Coulomb 모델은 지반의 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)인 전단강도정수와 탄성계수(E), 포아송비(ν), 단위중량(γ) 및 팽창각(ψ) 총 6개의 지반 정수가 필요하다. 내부마찰각과 팽창각이 같은 경우 관련흐름, 다른 경우 비관련흐름이며 풍화토 지반에서 내부마찰각과 점착력을 각각 30도 및 20kN/m²으로 가정하였다. 또 탄성계수와 포아송비는 사면파괴시 변위 계산에 필요하나 안정해석시 안전율에는 크게 영향을 주지 않는다(Griffiths, 1999). 사면안정해석은 구속압이 크게 작용하지 않으므로 팽창각의 영향은 적다(Griffiths, 1999). 따라서 비관련흐름 비팽창($\psi=0$) 조건으로 가정하였으며 유한요소해석을 수행하였으며 유한요소해석에 사용된 지반정수들은 표 1과 같다.

표 2. 유한요소해석시 사용된 앵커 정수

F (kN)	L_u (m)	A (m ²)	E (kN/m ²)	K (kN/m)
240	4.0	2.96×10^{-4}	2.0×10^8	1.48×10^4

$$F = K\delta = \left(\frac{AE}{L_u}\right)\delta \quad (7)$$

여기서, F는 앵커 정착하중, L_u 는 앵커 자유장, A는 앵커 긴장재 단면적, E는 앵커 긴장재 탄성계수, K는 긴장재 스프링계수이다. 앵커 모사에 사용된 정수는 표 2와 같다.

앵커 블록은 2×2×0.3m로 2차원 8절점 평면변형을 조건의 빔요소로 모델링 하였다. 블록은 선형탄성이며 탄성계수 및 포아송비는 각각 $2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 0.2이다. 본 연구에서는 앵커와 지반사이의 경계면 요소는 사용하지 않았으므로 앵커와 지반사이에 슬립은 발생하지 않는다.

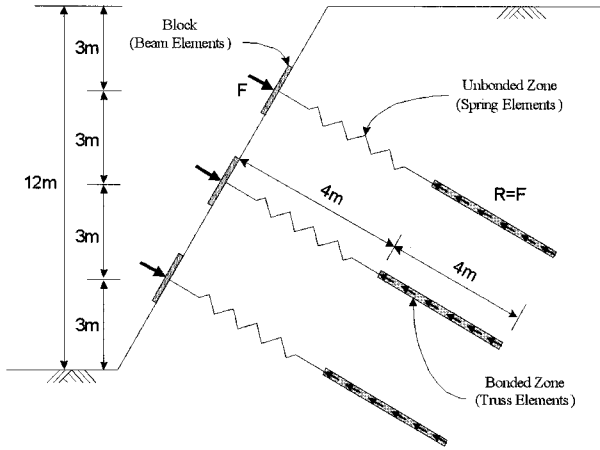


그림 4. 앵커보강사면의 개요도

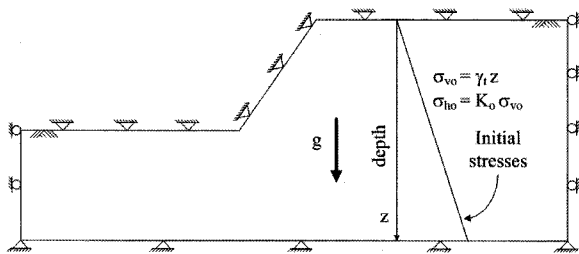
2.3.2 앵커 및 블록 모델

앵커보강사면에서 앵커는 평면변형을 조건으로 2차원 3절점 트러스요소로 모사했으며 하중은 정착장 시작 부위와 사면에 설치된 블록에 집중하중으로 재하 하였다. 앵커는 12.7mm 강연선 3가닥으로 구성되어 있으며 단면적은 2.96mm², 탄성계수는 $2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, 항복강도는 477kN(159kN/1가닥)이며, 앵커 자유장은 스프링으로 모사하였다. 스프링 계수(K)는 다음과 같이 계산된다.

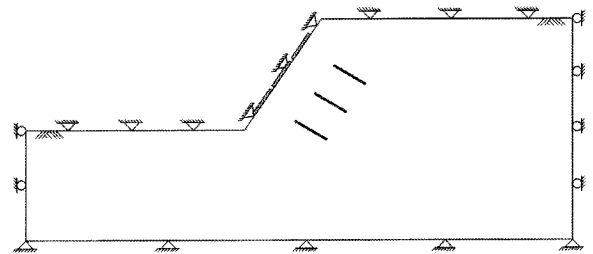
2.3.3 앵커보강사면 모사

일반적으로 유한요소해석에서 사면은 2차원 평면변형을 조건으로 가정하며 다음과 같은 4단계로 해석이 수행된다.

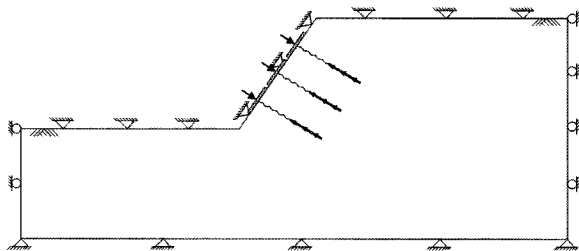
- Step 1 : 유한요소격자생성, 초기지중응력상태 구현 및 경계조건 설정
- Step 2 : 앵커 블록 및 정착장 생성
- Step 3 : 앵커 정착장에 집중하중 재하 및 자유장 생성
- Step 4 : 사면표면의 경계조건 제거



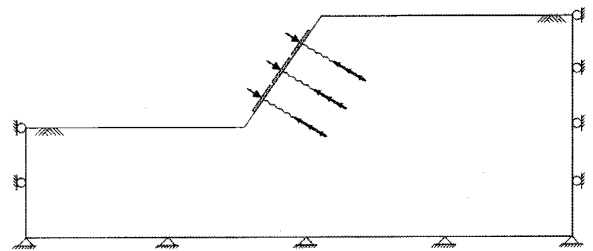
Step 1. 초기 지중응력상태 구현



Step 2. 앵커 및 블록 생성



Step 3. 하중재하 및 자유장 생성



Step 4. 경계조건 제거

그림 5. 앵커보강사면의 유한요소해석 절차

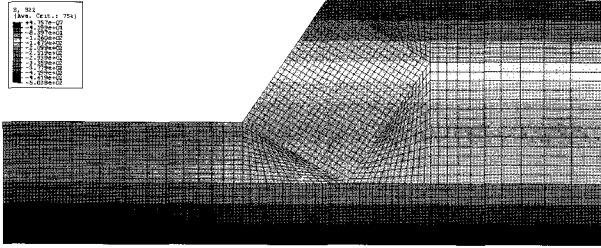


그림 6. 초기 중력재하시 연직응력 분포

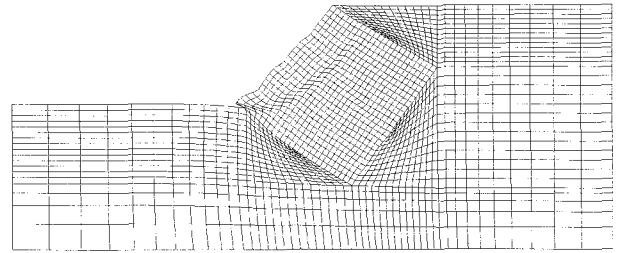
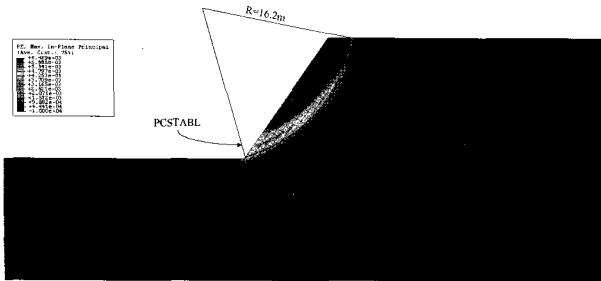
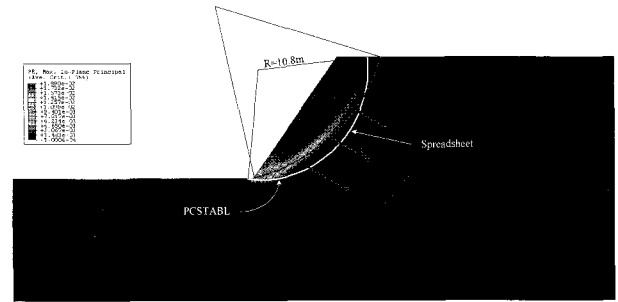


그림 7. 해석 후 변형된 격자



(a) 무보강사면



(b) 앵커보강사면

그림 8. 유한요소, 한계평형 및 스프레드시트 해석시 파괴면의 비교

표 3. 무보강 및 보강사면에서의 안전율

Slope	ABAQUS	PCSTABL	Spreadsheet	Remarks
Un-reinforced	1.186	1.216	-	
Anchored	1.565	1.392	1.495	

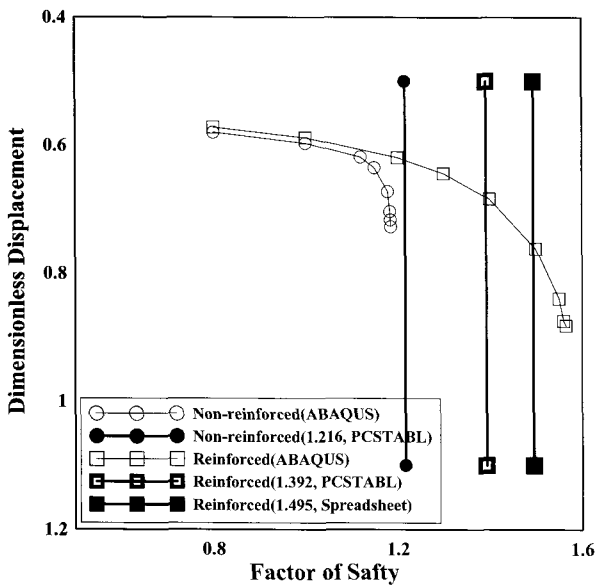


그림 9. 무보강 및 보강사면해석에서의 안전율

4. 결론

본 연구에서는 앵커의 하중전이분포를 앵커보강사면의 한계평형해석에 적용하여 유한요소해석 결과와 비

교하였으며 스프레드시트를 이용한 해석결과 또한 유한요소해석결과와 비교하였다. 그림 6에서와 같이 사면은 원호형태로 파괴되고 있으며 사면 단부에서 최대 변위가 발생하고 있다. 무보강 및 앵커보강사면 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 무보강 사면안정해석에서 유한요소해석에서의 안전율은 한계평형해석에서 얻은 안전율과 유사하였으며 파괴면의 위치는 한계평형해석 보다 약간 깊게 형성되는 것으로 나타났다.
- (2) 앵커보강사면의 경우 한계평형해석에서의 안전율이 유한요소해석의 안전율보다 약 10% 작게 산정되었으며 스프레드시트에서의 안전율이 한계평형해석의 안전율보다 약 8% 크게 산정되었다. 유한요소해석에서의 파괴면의 위치는 스프레드시트에서의 파괴면의 위치와 비슷하나 한계평형해석에서의 파괴면은 두 결과보다 깊게 발생하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 건설교통기술연구개발사업 건설핵심기술연구개발사업 자유공모과제(C106A1000012 - 06A060001211)의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. AASHTO (1990), "Permanent ground anchor specification In-situ soil improvement technique", AASHTO-AGC-ARTBA TF27 Rep., AASHTO, Washington, D.C.
2. ABAQUS, Version 6.4, Hibbit, Karlson & Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., 2004.
3. Briaud, J.L., Lim, Y. (1999), "Tieback walls in sand: numerical simulation and design implications", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.2, pp.101-110.
4. BSI (1989), "British standard code of practice for ground anchors", London, England.
5. Davis, E.H. (1968), "Theories of plasticity and the failure of soil masses", In: Lee, I. K., editor, *Soil mechanics: selected topics*, London UK : Butterworth, pp.341-380.
6. Duncan, J.M. (1996), "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", *J. Geotech. Engng*, ASCE, Vol.122, No.7, pp.577-596.
7. Duncan, J.M. and Dunlop, P. (1969), "Slopes in stiff fissured clays and soils", *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol.95, SM5, pp.467-492.
8. Fredlund, D.G. and Krahn, J. (1977), "Comparison of slope stability method of analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.13, No.3, pp.429-439.
9. Fredlund, D.G., Krahn, J. and Pufahl, D.E. (1981), "The methods", *Proceedings of Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Stockholm, Sweden, 3, pp.409-416.
10. Griffiths, D.V. (1985), "Numerical modeling of interfaces using conventional finite element", In: *Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech.*, Nagoya, pp.837-844.
11. Griffiths, D.V. and Lane. P.A. (1999), "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403.
12. Kim, N.K. (2003), "Performance of tension and compression anchors in weathered soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.2, pp.1138-1150.
13. Kondner, R.L. (1963), "Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.89, SM1, pp.115-143.
14. Matsui, T. and San, K.C. (1992), "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils Found.* Vol.32, No.1, pp.59-70.
15. Ostermayer, H. and Sheele, F. (1977), "Research on Ground Anchors in Non Cohesive Soils", *Special session 4, IXth ICSMFE*, Tokyo.
16. PCSTABL5 Manual, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
17. Snitbhan, N. and Chen, W. F. (1976), "Elastic-plastic large deformation analysis of soil slopes", *Comput. Struct.* 9, 567-577.
18. Tenier, P. and Molier, P. (1982), "Influence of Concentrated Loads on Slope Stability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, pp. 396-400, Feb.
19. Weerasinghe, R.B. and Littlejohn, G.S. (1977), "Load transfer and failure of anchorages in weak mudstone", In: *Proc., Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures*, Institution of Civil Engineers, London.
20. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., 1989, "The finite element method", Vol.1, 4th edn. London, New York: McGraw-Hill.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 10. 15)