한국지반공학회논문집 제19권 5호 2003년 10월 pp. 163 ~ 173

억지말뚝-사면의 상호작용 효과

Coupled Effect of Pile/Slope Systems

정 상 섬[*1] Jeong, Sang-Seom
유 광 호[*2] You, Kwang-Ho
이 선 근[*3] Lee, Sun-Keun

Abstract

In this paper, 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 3D. 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. In this study, by using these methods, the failure surfaces and factors of safety were compared and analyzed in several cases, such as toe, middle and top of the slope, respectively. Furthermore, the coupled method based on shear strength reduction technique was verified by the comparison with other analysis results.

요 지

본 연구에서는 억지말뚝으로 보강된 사면에서 한계평형 해석법과 3차원 해석 결과를 비교 분석하였다. 특히, 유한차분법을 이용한 FLAC 3D를 바탕으로 하는 커플링 해석에 주안점을 두었으며, FLAC을 이용하여 전단강도감소기법에 따른 보강사면의 안전율을 계산하기 위해 FLAC의 내장언어인 FISH를 이용하여 작성하였다. 커플링 해석에서 억지말뚝에 의한 안정화된 사면을 해석하기 위해 말뚝의 거동과 사면안정을 동시에 고려하였다. 따라서 본 연구에서는 이 두 방법을 적용하여 일렬 억지말뚝이 사면선단, 중앙부, 정부에 위치할 경우에 있어서 각각의 활동 파괴면 및 안전율을 비교 분석 하였으며 강도정수 감소법을 적용한 해석기법의 적용성과 타당성에 대한 분석을 수행하였다.

Keywords : 3-D analysis, Coupled/uncoupled analysis, Factor of safety, Limit equilibrium analysis, Pile-slope system, Shear strength reduction

1. 서 론

억지말뚝의 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. 일반적으로 이 방법에서 일렬 군말뚝에 작용하는 횡방향 토압은 Ito & Matsui(1975)에 의해 제안된 토압론을 주로 사용한다. 이 모델에서 말뚝은 무한한 길이를 갖는 강성말뚝으로, 지반은 완전소성체로 가정하였기 때문에, 이 방법은 현장조건하에서 실제말뚝의 거동을 나타낸다고 볼 수 없다. 특히 유한한 연성말뚝, 아칭 효과, 초연약지반 등을 제대로 고려할 수 없다. 또한 토압법과 병행하여 원지반의 변위를 추정하는 변위법의 주요한 문제점은 횡방향 변위의 정확한 측정이 매우 어렵다는 것이다. 이와같이 측방토압 또는 변위를 고려하는

*1 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)
*2 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Suwon Univ.)
*3 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student. Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., sunroot@yonsei.ac.kr)

첫 번째 방법의 경우에서, 말뚝으로 보강된 사면 해석은 한계평형법을 이용하지만, 이 방법은 지반과 말뚝의 상호작용을 명확하게 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

반면에 두 번째 방법의 경우는 유한요소법이나 유한차분법을 적용하여 말뚝으로 보강된 사면을 연속된 탄성체 혹은 탄소성 매질로서 해석한다. 이 방법은 말뚝과 사면의 안정성을 동시에 고려하는 커플링 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 말뚝의 저항력에 의해 보강 사면의 활동파괴면 분포형태나 위치변화를 추정할 수 있다.

유한요소해석 혹은 유한차분법으로 안전율을 산정하기 위한 방법인 전단강도 감소법은 파괴가 일어날 때까지 지반의 전단강도를 점진적으로 감소시켜가며 안전율을 반복 계산하는 방법으로, 지반의 실제적인 전단강도와 파괴 상태에서의 감소된 전단강도의 비로서 안전율을 계산한다. 전단강도 감소기법은 일찍이 Zienkiewicz(1975)에 의해서 사용되었고, Naylor(1981), Donald & Giam(1988), Matsui & San(1992), Ugai & Leshchinsky(1995), Cai & Ugai(2000), You(2000) 등에 의해 적용되었다. 본 연구에서도 이러한 전단강도감소 기법을 사용하여 해석을 하였다. 이 기법은 기존의 절편법에 비해 여러 가지 장점이 있는데, 가장 큰 장점은 임계파괴면을 자동적으로 찾을 수 있다는 데 있다.

따라서 본 연구에서는 균질한 사면에 일렬 군말뚝을 설치하여 전단강도 감소기법에 의해 안전율을 계산하였고, 커플링을 고려하지 않은 경우는 한계평형법을 적용하였다. 이어서 임계면의 변화를 고려하기 위해 전단강도 감소법에 기초한 말뚝/사면의 커플링을 고려한 해석을 수행하였다. 최종적으로 해석결과를 커플링의 유·무에 따라 비교·분석하였다.

본 연구에서는 억지말뚝의 저항력으로 실제 사면의 활동파괴면이 말뚝의 유·무에 따라 바뀔 수 있다는 사실을 커플링의 효과로 나타냈다. 기존에 수행하였던 한계평형해석에 의한 억지말뚝해석은 일단 Bishop method 등을 사용한 사면 해석을 하여 고정된 활동파괴면을 산정하되, 이 파괴면상에 말뚝을 설치하여 말뚝해석을 하므로 말뚝과 사면을 각기 해석하여 조합하는 해석이다. 반면에 본 연구에서 고려한 전단강도 감소기법을 적용한 사면의 3차원 수치해석은 연속체해석을 수행하므로 말뚝으로 인한 활동파괴면의 변화정도를 자동적으로 고려할 수 있다.

2. 한계평형해석 (커플링을 고려하지 않은 해석)

2.1 말뚝 해석

파괴면 상의 활동지반은 일렬 군말뚝에 의해 보강되는 것으로 가정하였다. 여기서 지반은 활동층(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)

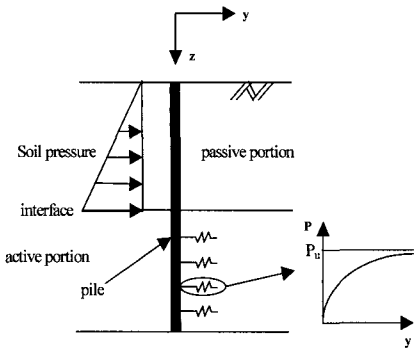


Fig. 1. A pile subjected to lateral soil pressure

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

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

여기서 y = 말뚝의 횡방향 변위, p = Ito & Matsui(1975)에 의해 제안된 말뚝에 작용하는 측방토압, K_i = 지반반력관련계수, EI = 말뚝의 강성도이다. 입력변수로 사용되는 p-y 곡선은 활동면 하부에서는 극한하중(P_u)과 초기접선계수(E_s)로 표현되는 쌍곡선 함수로, 활동면 상부는 지반의 저항력이 없는 한계상태로 가정하였다. 또한 본 연구에서는 말뚝 두부와 선단조건으로 ① free head(변위와 회전 허용), ② hinged head(변위없이 회전만 허용), ③ unrotated head(회전없이 변위만 허용), ④ fixed head(변위와 회전 구속)을 모두 고려할 수 있도록 하였다.

따라서 측방토압이 작용하는 사면내 말뚝해석을 수행하여 말뚝에 작용하는 부재력(휨모멘트, 전단력)을 계산하여 사면의 안전율 산정시 고려하였다.

2.2 사면의 안전율

그림 2는 일렬 군말뚝에 의해 보강된 사면을 나타낸다. 원호 활동면을 결정하기 위해 저항모멘트 M_R과 전도모멘트 M_D를 적용하였다. 말뚝해석 결과 산정된 활동사면의 측방토압 영향에 의한 전단력과 모멘트를 고려하였다. 이를 토대로 본 연구에서는 Bishop의 간편법에 의한 원호 활동면을 갖는 보강 사면의 안전율을 다음과 같이 계산하였다.

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

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 커플링을 고려하지 않은 경우에 대해서는 억지말뚝 해석프로그램인 RSSP (Reinforced Slope Stability Program, 1999)를 적용하여 말뚝/사면의 안전율해석을 수행하였다.

3. 커플링을 고려한 해석(전단강도 감소법)

3.1 전단강도 감소기법

전단강도 감소기법에 의한 사면안정해석은 실제지반의 점착력 c와 내부마찰각, ø를 시험 안전율 F^{trial}로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반물성치는 그림 3에 나타난 바와

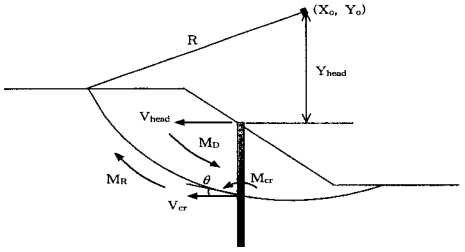


Fig. 2. Forces on stabilizing piles and slope

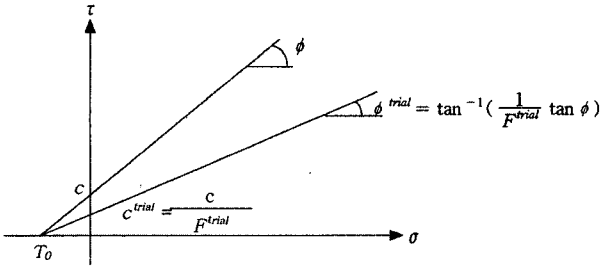


Fig. 3. A relationship between the actual strength and a strength reduced by a trial factor of safety

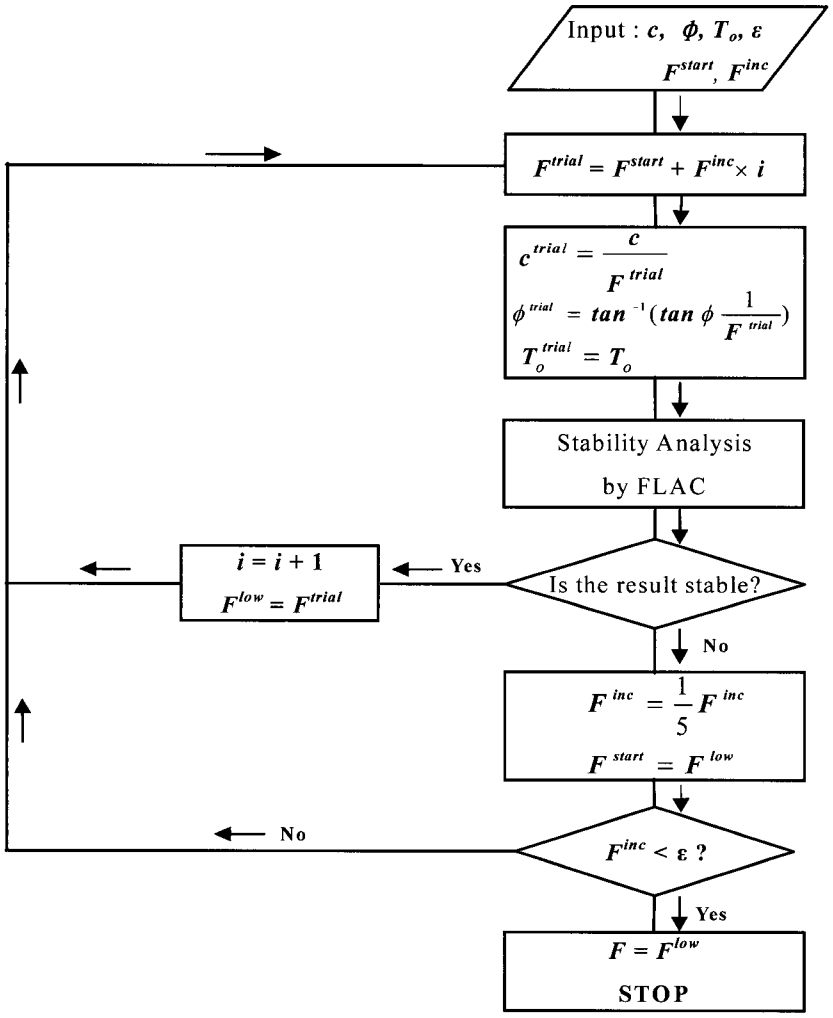


Fig. 4. Flowchart of the calculation routine for factor of safety

같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며 원래의 물성과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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

본 연구에서는 한계상태를 찾기위해, 점진적으로 전단강도를 낮추어 가며 찾는 방법(incremental search method)을 사용하였다. 여기서, F^{trial}은 시험안전율을 의미한다. 즉, 초기 시험안전율을 1.0으로 정하고 이 결과가 수렴하면 시험안전율을 0.2 간격으로 증가시켜 가며(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, 실제 안전율은 1.2에서 1.4의 값을 가지게 되므로 다시 1.2에서부터 0.1 간격으로 시험안전율을 증가시켜가면서 해석을 수행하며, 1.3에서도 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 동일하다. 그러나 주지할 것은 유한요소법과 유한차분법에 의한 방법은 어느 지점에서나 국부적인 평형조건을 만족하지만, 한계평형해석법은 해석에서 고려한 활동지반 전체에 대한 평형조건만을 만족한다. 이상과 같은 안전율을 구하는 과정은 그림 4에 나타나 있다.

3.2 유한차분법

사면과 말뚝 사이의 상호작용을 알아보기 위하여 3차원 유한차분법인 FLAC 3D를 사용하여 해석하였다. 3차원으로 구성된 mesh는 8개의 절점을 갖는 solid element가 견고한 경계층위에 놓인 것으로 가정하였다. 왼쪽과 오른쪽 면의 경계조건은 지반의 하향 변위를 허용하기 위해 롤러로 가정 하였으며, 말뚝요소는 탄성체, 주변 지반은 Mohr-Coulomb의 탄소성 매질로서 가정하였다. 이 모델은 FLAC 3D의 지반 모델에서 선택하였고, 사면의 안전율은 FLAC의 fish 옵션을 이용, 전단강도 감소기법을 구현하여 계산하였다. FLAC 해석시 대수방정식은 유한요소법에 의한 방법과 동일하나 FLAC 해석에서는 mechanical damping을 위해 dynamic relaxation 기법이 사용되었다.

FLAC 해석시 수렴 기준은 모든 점에 작용하는 평균력에 대한 최대 불균형력의 비로써 판단하였다. 만일 모델이 평형상태라면, 그 비율은 0에 가까워지는데 그 비율이 10^{-5}보다 작을 때 수렴하는 것으로 간주하였다.

4. Coupling의 유 · 무에 따른 차이

본 연구에서 커플링을 고려한 방법은 전단강도 감소기법에 근거한 유한차분 해석인 FLAC 3D를, 커플링을 고려하지 않은 방법은 한계평형법에 근거한 억지말뚝 해석프로그램(RSSP)을 사용하여 커플링의 유 · 무에 따른 결과를 비교 · 분석 하였다. 여기에 사용된 억지말뚝 해석프로그램(RSSP)의 흐름도는 그림 5에 나타

Table 1. Material properties and geometries

Soil	unit weight (kN/m^3)		20.0
	plastic (Mohr-Coulomb)	cohesion (Pa)	1.0×10^4
		friction angle (°)	20°
		dilation angle (°)	0
	elastic	elastic modulus (Pa)	2.0×10^8
		poisson's ratio	0.25
Steel pile	unit weight (kN/m^3)		78.5
	elastic modulus (Pa)		2.0×10^{11}, 6.0×10^{10}
	poisson's ratio		0.2
	diameter (m)		0.8
	thickness (mm)		30
Interface	normal stiffness (Pa)		2.0×10^9
	shear stiffness (Pa)		2.0×10^9
	cohesion (Pa)		1.0×10^4
	friction angle (°)		20
	dilation angle (°)		0

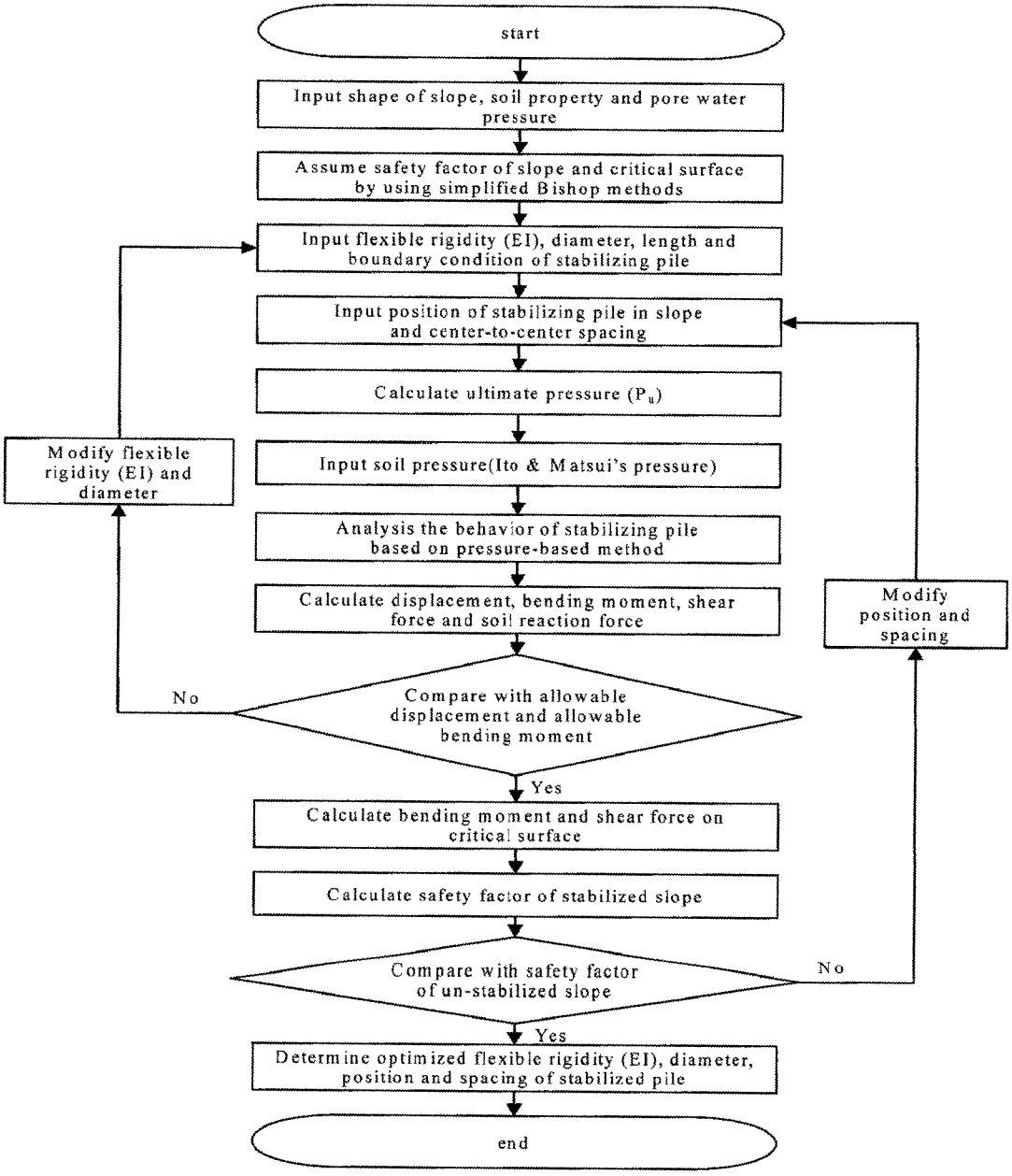


Fig. 5. Flow chart of computer program(RSSP)

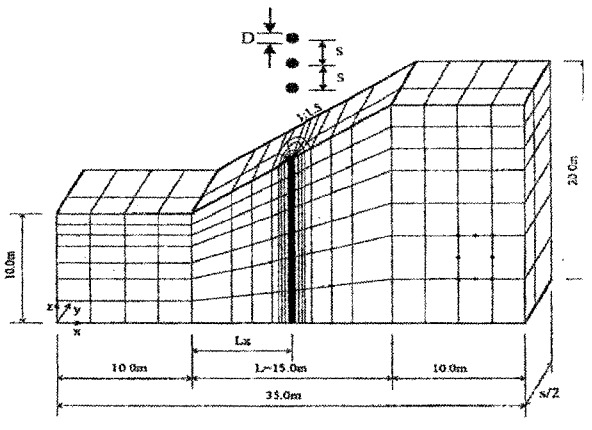


Fig. 6. Model slope and finite element mesh

나 있다.

그림 6에 나타난 것처럼 3차원 유한요소 해석시 사면의 높이는 10m, 경사는 1V:1.5H, 사면의 깊이는 10m의 제원으로 모델링 하였으며, 해석에 사용된 지반 및 말뚝의 물성은 표 1과 같다. 말뚝은 선형 탄성체로서 가정하였고, 사면의 중앙지점(사면 선단과 정부 사이의 거리는 15m로 그 중 7.5m에 말뚝을 설치하였다)에 위치하며, 말뚝의 중심간격은 3D(D:말뚝직경)로 두고서 해석하였다. 또한 말뚝의 두부조건을 고정단과 자유단으로, 휨강성은 60GPa와 200GPa의 서로 다른 강성에 대하여 해석하였다.

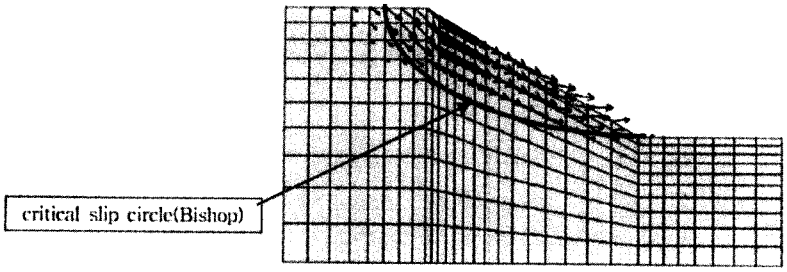


Fig. 7. Nodal velocity vectors induced by Flac 3D and critical slip circle located by Bishop's simplified method for slope without piles

해석 결과 말뚝으로 보강되지 않은 사면의 안전율은 FLAC에 의한 방법이 1.15, Bishop의 간편법에 의한 방법이 1.13이었다. FLAC 3D를 이용한 유한차분 해석은 전단강도 감소법을, Bishop의 간편법은 RSSP를 이용하여 안전율을 산정하였으며, 안전율은 임계 깊이에서의 활동면에 발생하는 전단강도를 고려하여 산정하였다. 그 결과 전단강도 감소기법을 이용한 유한차분 해석에서 node의 velocity에 의한 파괴 메카니즘은 Bishop 간편법에서의 임계면과 거의 일치함을 알 수 있다(그림 7 참조).

표 2는 서로 다른 휨강성을 갖는 말뚝에 대해 두부조건을 달리하여 해석한 안전율을 나타낸다. 여기서 임계

Table 2. Comparison of numerical method on safety factor

Youngs Modulus of piles(GPa)	Flac 3D		Bishop(RSSP)
	Free	Fixed	
60	1.46	1.56	1.49
200	1.55	1.56	1.49

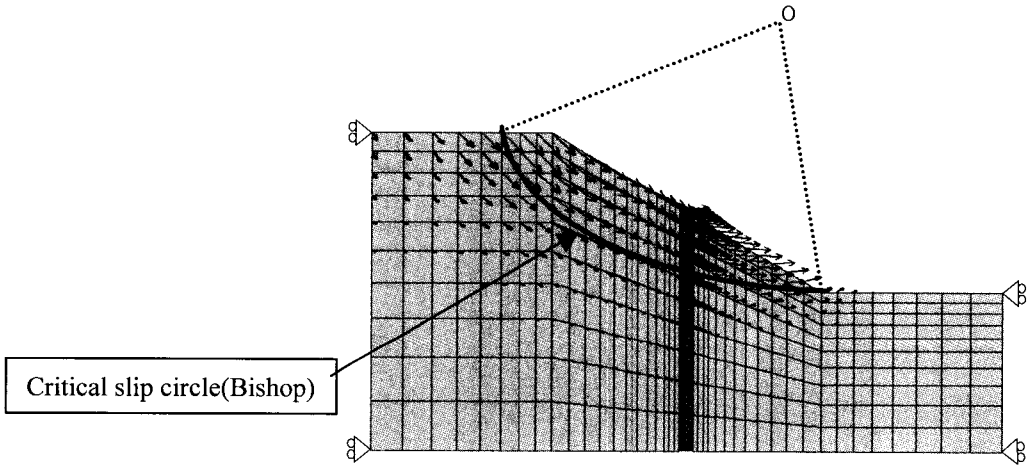


Fig. 8. Nodal velocity vectors by Flac 3D and critical slip circle by Bishop's simplified method

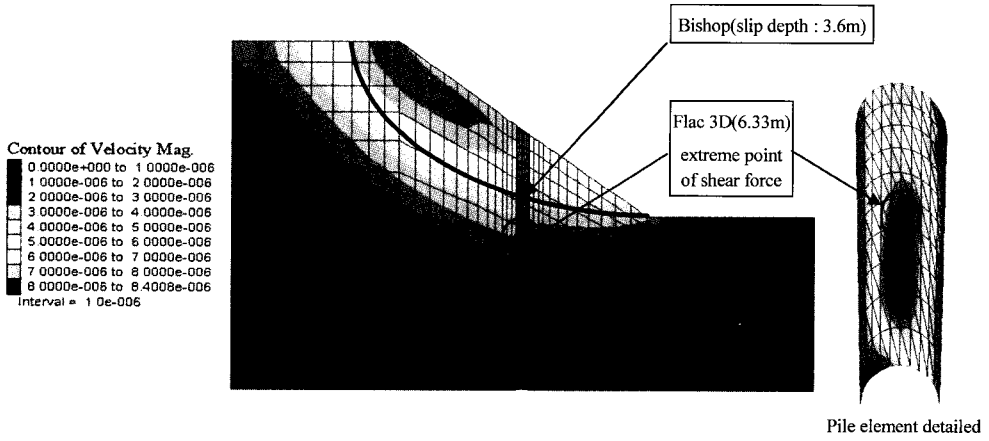
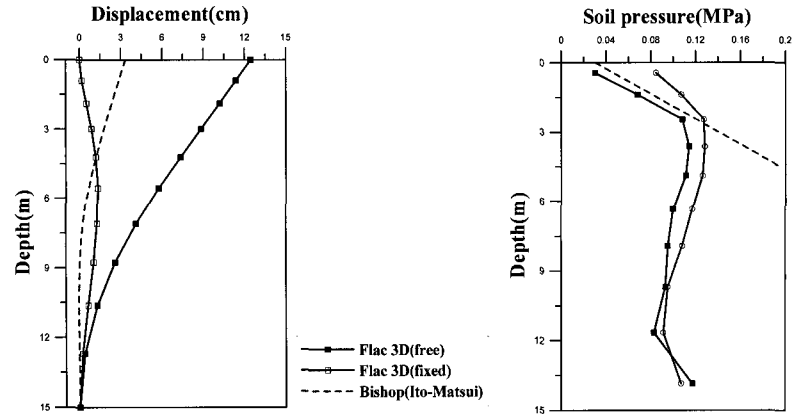
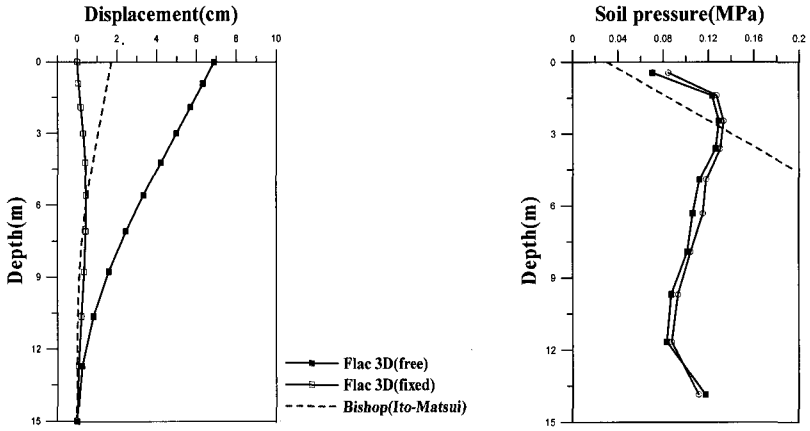


Fig. 9. Comparison of the depth and shape of critical slip surface



(a) Pile Modulus, E_p = 60GPa



(b) Pile Modulus, E_p = 200GPa

Fig. 10. Pile behavior characteristics by Flac 3D

깊이는 최소 안전율과 관련된 사면내 활동면상에 존재하는 것으로 하였다. 그림 8은 nodal velocity를 보여주고 있다. 사면내의 velocity의 크기를 비교해 볼 때 그 크기가 확연히 차이나는 궤적(contour)을 확인할 수 있으며, nodal velocity의 크기와 말뚝에서의 전단응력 분포를 고려하여 임계깊이를 산정하였다.

FLAC 3D에 의한 활동사면의 임계깊이는 그림 9에서 보듯이 Bishop의 간편법에 의한 임계 깊이보다 깊다. 또한 Bishop의 간편법에서는 활동면이 하나의 특정한 원호로 되어 있는 반면, FLAC에 의한 활동면은 말뚝 주변에서 서로 다른 두 부분으로 나뉘어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 활동면의 분포와 깊이를 볼 때 말뚝으로 보강된 사면에서 Bishop의 간편법에 의한 방법은 실제적인 파괴 mechanism을 나타낸다고 볼 수 없다.

한편, Bishop의 간편법은 강성 말뚝으로 계산되는 Ito-Matsui 방정식의 한계 때문에 안전율 계산에 있어서 말뚝의 두부 조건을 고려할 수가 없다. 표 2는 말뚝 두부가 고정된 경우에 있어서 FLAC 3D의 안전율이 Bishop의 간편법에 의해 얻어진 안전율 보다 크다는 것과, 안전율은 고정단의 경우 말뚝의 강성이 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다. 이는 그림 10에 나타난 것처럼 토압의 크기가 고정단 일때가 Ito-Matsui 방법에 의한 토압보다 크기 때문이다.

5. Coupling을 고려한 다른 연구와의 비교 · 분석

5.1 사면의 모델링

Hassiotis(1997) 등은 일렬말뚝으로 보강된 사면을 설계하는 방법론을 제시하였다. 말뚝에 작용하는 토압은 Ito-Matsui(1975)의 토압론을 사용하였으며, 사면내에 설치되는 말뚝으로 변화하는 임계면을 고려하기 위해 마찰원법에 의한 안정수를 사용하여 커플링을 고려하였다. 이때, 지하수위는 고려하지 않았다. 이 경우 말뚝으로 보강되지 않은 원 사면의 안전율은 1.08이었다.

Table 3. Material properties and geometries

soil	unit weight (kN/m^3)		19.63
	plastic (Mohr-Coulomb)	cohesion (Pa)	2.4×10^4
		friction angle (°)	10
		dilation angle (°)	0
	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
	thickness(mm)		90

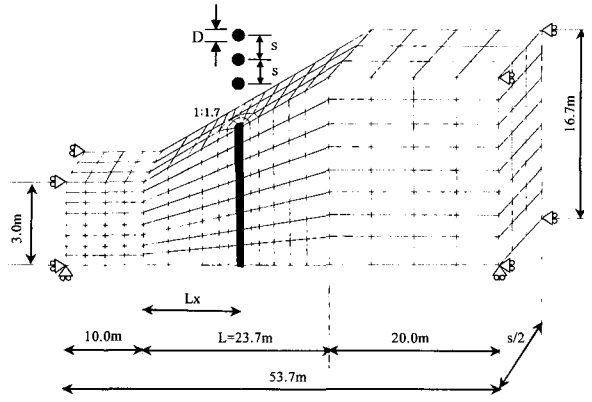
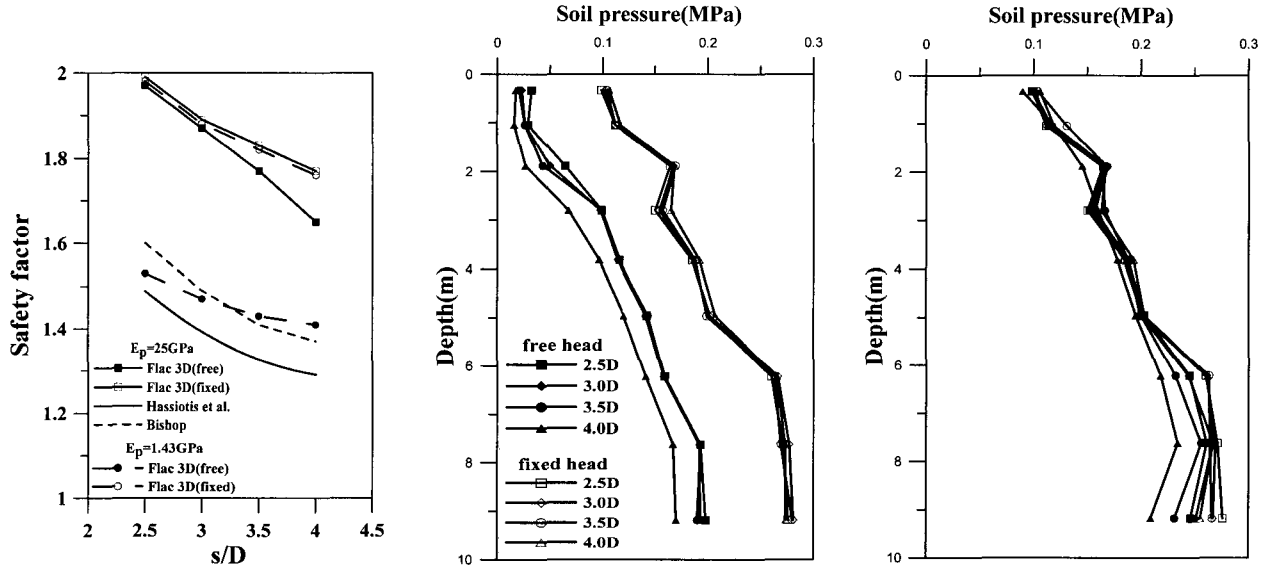


Fig. 11. Model slope and element mesh

그림 11에 나타난 것처럼 사면은 FLAC 3D로 모델링 하였고 두 개의 대칭 경계조건을 사용하여 실제 일렬 군말뚝 조건으로 묘사하였다. Mesh의 크기는 말뚝의 길이와 관련이 있으며, 저부는 말뚝 선단과 같은 깊이에서의 강성 경계조건을 사용하였고, 측면 경계조건은 영향거리인 $r_m=2.5L(1-\upsilon)$(Randolph 등, 1978)을 고려하여 경계조건이 해석의 결과에 영향을 미치지 않게 하였다. 해석에 사용된 물성은 표 3과 같다.

5.2 말뚝 휨강성의 영향

휨강성의 영향은 말뚝의 등가탄성계수(E_p)에 의해 분석하였다. 말뚝은 사면 선단과 말뚝사이의 거리, L_x=12.2m에 위치시키고, 중심간 간격을 2.5D, 3.0D 3.5D, 4.0D로 변화시키면서 해석하였다. 그림 12(a)는 두가지의 서로 다른 휨강성에 따른 보강된 사면의 안전율을 나타내고 있다. 말뚝의 두부조건은 말뚝이 연성(E_p=1.43 GPa)일 때 안전율에 더 큰 영향을 준다는 것을



(a) (b) E_p=1.43GPa (c) E_p=25GPa

Fig. 12. Effect of pile bending stiffness and soil pressure

알 수 있다. 그러나 말뚝이 강성(E_p=25 GPa)일 경우에는 두부조건에 상관없이 거의 같은 안전율을 나타내고 있다. 이것은 작은 휨강성[그림 12(b) 참조]의 경우, 자유단에 작용하는 토압이 고정단일 경우의 토압보다 작으며, 반면에 더 큰 휨강성을 갖는 말뚝의 경우[그림 12(c) 참조], 두부조건에 상관없이 거의 동일한 토압분포를 갖기 때문이다. 또한 말뚝의 두부가 고정단일 경우 서로 다른 두 강성에 대한 토압 역시 거의 같음을 알 수 있다.

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

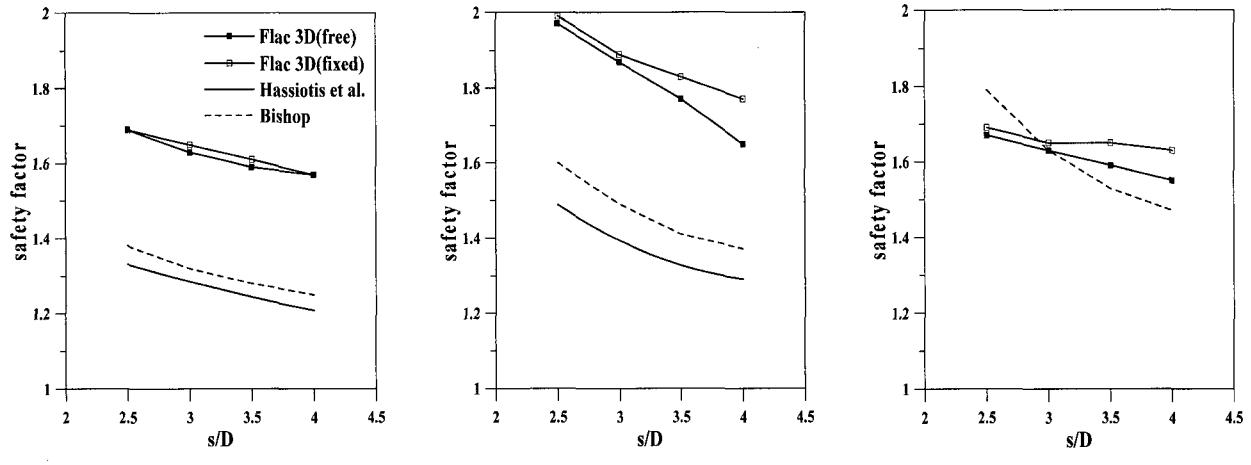
5.3 말뚝 중심간격의 영향(s/D)

그림 13은 서로 다른 말뚝 두부조건(자유단과 고정단)을 가지는 보강 사면에 대하여 말뚝 중심간격의 영향에 의한 사면의 안전율을 나타내고 있다. 예측된대로 안전율은 말뚝의 간격이 감소함에 따라 증가하였다. 본 연구에서는 말뚝 사이의 간격이 말뚝 직경의 2.5배 이하일 경우 시공성이 떨어지므로 말뚝의 중심간격은 2.5D 이상만을 고려하였다. 그림에서 보면 말뚝의 중심간격이 2.5D 일 경우에 사면의 안전율은 최대값을 나타내고 있다. 이것은 말뚝 간격이 작아짐에 따라 말뚝 사이의 지반의 측방 변위가 더욱더 제약을 받는다는 사실로 설명할 수 있다.

이 그림은 또한 말뚝 중심간격에 따른 안전율에서 커플링을 고려한 효과를 보여주고 있다. FLAC에 의한 해석방법은 말뚝의 두부조건이 사면의 안전율에 큰 영향을 주고 있으며, 고정된 말뚝으로 보강된 사면의 안전율은 커플링을 고려한 Hassiotis 등에 의한 해석적인 방법과 Bishop의 간편법에 의해 얻어진 안전율보다 상대적으로 크게 나타났다. 커플링을 고려한 방법과 커플링을 고려하지 않은 해석적인 방법 사이의 안전율 차이는 말뚝에 작용하는 토압에 의해 설명 될 수 있다. 즉, 말뚝에 작용하는 토압이 클수록 말뚝에 의해 활동지반에 작용하는 반력도 크게 되기 때문이다.

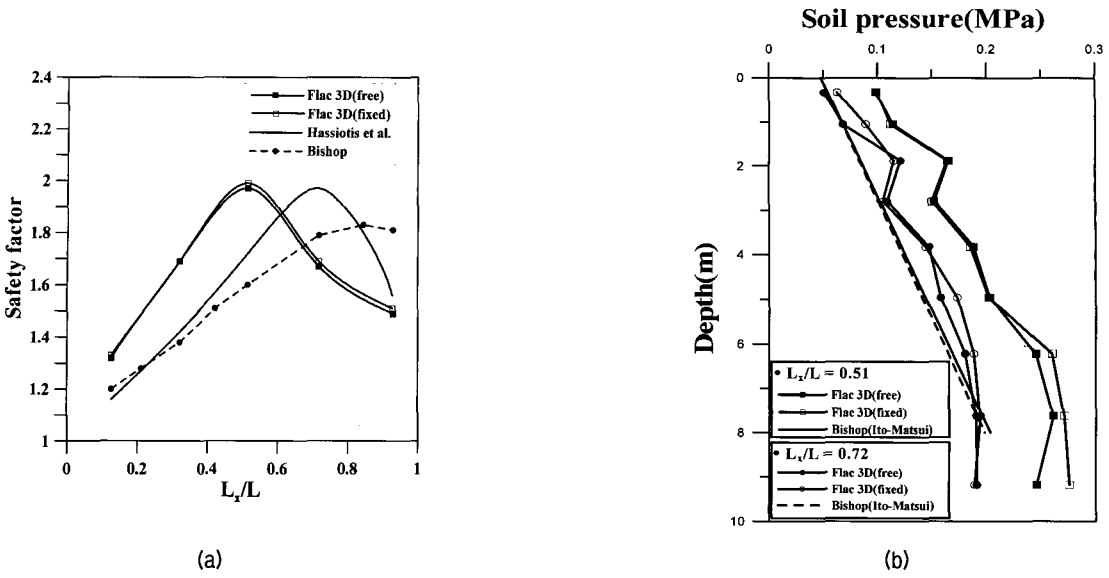
5.4 말뚝 위치의 영향

그림 14(a)는 사면에서 말뚝의 중심간 간격이 2.5D인 일렬 군말뚝일 경우에 대하여 말뚝의 상대적인 위치에 따른 안전율을 나타내고 있다. 여기에서 말뚝의 위치는 사면 선단과 말뚝 사이의 수평거리 L_x와 사면 선단과 사면 정부의 수평거리 L과의 비로 나타냈다. 전단강도 감소법을 이용한 커플링을 고려한 FLAC의 해석적인 결과는 말뚝으로 보강된 사면의 안전율이 보강되지 않는 사면의 안전율 보다 증가하는 것을 보여주고 있다. 또한, 말뚝 두부조건에 상관없이 말뚝이 사면의 중앙에 위치할 때가 가장 큰 안전율을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 반면, Bishop과 Hassiotis 등에 의한 결과에서는 사면의 정부 쪽에서 최대 안전율을 나타내고 있다. 그 이



(a) L_x=7.6m(L_x/L=0.32) (b) L_x=12.2m(L_x/L=0.51) (c) L_x=17m(L_x/L=0.72)

Fig. 13. Effect of pile spacing on safety factor(E_p=25GPa)



(a) (b)

Fig. 14. Effect of pile position on safety factor(s/D=2.5) and soil pressure(E_p=25GPa)

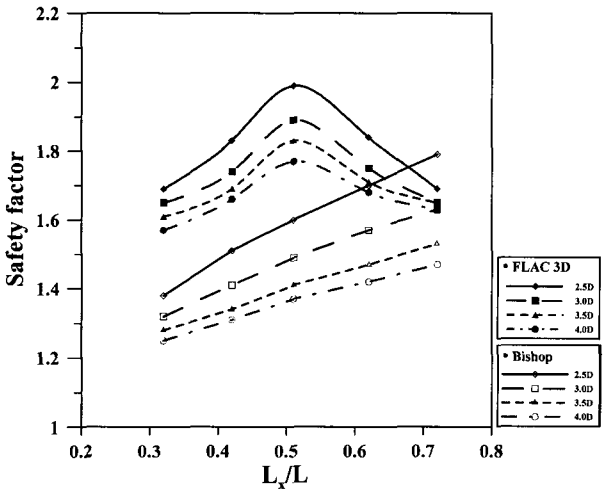


Fig. 15. Effect of pile position and pile spacing on safety factor

유는 FLAC 3D해석에서 말뚝이 사면의 중앙에 위치할 때 말뚝에 작용하는 토압은 Ito-Matsui의 방정식에 의해 얻어진 것보다 크기 때문이다. 왜냐하면 지반-말뚝사이에 충분한 전단강도가 발현되었기 때문이다[그림 14(b)].

그림 15는 말뚝의 위치와 말뚝의 간격에 따른 커플링을 고려한 안전율을 보여주고 있다. 말뚝의 간격이 감소하면서 커플링을 고려한 사면의 안전율은 커플링을 고려하지 않은 것보다 크다. 이는 말뚝이 설치됨에 따라 임계면이 변화하는 말뚝과 지반 사이의 커플링의 영향임을 명확하게 알 수 있다. 그러므로 고정 임계 파괴면을 갖는 커플링을 고려하지 않은 해석은 그 적용에 있어 한계가 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 일렬 군말뚝으로 보강된 사면과 말뚝간의 상호작용을 고려한 영향을 분석함에 있어서 해석적인 연구와 수치적인 연구를 병행하였다. 즉, 한계평형법을 이용한 사면안정 해석과 FLAC 3D를 이용한 수치해석 결과를 비교하였으며, 말뚝과 사면 상호간의 커플링 효과를 분석하기 위하여 말뚝의 강성, 말뚝의 위치, 말뚝의 중심간 간격 및 두부조건을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) FLAC 3D를 이용한 해석방법이 말뚝 설치로 활동파괴면이 변하는 커플링 효과를 명확하게 보여주고 있는데 반하여, 일정한 활동 파괴면을 갖는 한계평형 해석은 실제 파괴면의 형상을 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

(2) 말뚝의 두부조건이 자유단인 경우, 커플링을 고려한 해석방법의 안전율은 커플링을 고려하지 않은 것보다 상대적으로 크게 나타났으며, 말뚝의 간격이 작아질수록 말뚝에 작용하는 토압의 증가로 인해 커플링 효과가 명확하게 나타났다. 또한 고정단에서는 휨강성이 작을 경우 말뚝의 안전율이 다르게 나타나지만 휨강성이 큰 경우엔 말뚝의 두부조건에 관계없이 유사한 안전율이 나타남을 알 수 있었다.

(3) 전단강도 감소법에 의한 수치해석 결과 말뚝이 사면의 중앙부에 위치할 때와 말뚝의 두부가 구속될수록

사면의 안전율은 가장 크게 나타났다. 이는 말뚝과 지반사이에 작용하는 커플링의 영향으로 설명할 수 있는데, 말뚝이 사면의 중앙부에 위치하거나 말뚝의 두부가 제약될 수록 말뚝에 의해 활동지반에 작용하는 반력도 크기 때문이다. 결과적으로 사면의 안전율은 커플링을 고려한 해석이 커플링을 고려하지 않은 해석보다 크게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bishop, AW.(1955), "The use of slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17.
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, pp.73-84.
3. Cartier, G. and Gigan, J.P.(1983), "Experiments and observations on soil nailing structures", *Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, Finland.
4. Chen, L.T.(1994), "The effect of lateral soil movements on pile foundations", *Ph. D. Thesis, University of Sydney.*
5. Chen, L.T., Poulos, H.G. and Hull, T.S.(1997), "Piles subjected to lateral soil movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.9, pp.802-811.
6. Dawson, E.M. Roth, W.H. and Drescher, A.(1999), "Slope stability factors of safety by strength reduction", *Technical note submitted to Geotechnique.*
7. De Beer, E.E. and Wallays, M.(1972), "Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil round the piles", *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.325-332.
8. Donald, I.B. and Giam, S.K.(1988), "Application of the nodal displacement method to slope stablilty analysis", *Proc. 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Sydney, Australia, pp.456-460.
9. Ducan, J.M.(1996), "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.7, pp.577-596.
10. FLAC 3D(1997), Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimension, *Itasca Consulting Group*. Goh, A.T.C., The CI and Wong, K.S.(1997) "Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.123, No.4 pp.312-323.
11. 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.
12. Ito, T. and Matsui, T.(1975), "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 43～59.
13. Matsui, T. and San, K.C.(1992), "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp.59-70.
14. Naylor, D.J.(1981), "Finite element and slope stability", *Numer. Meth. in Geomech. and Proc.* NATO Advanced study Institute, Lisbon, Portugal, pp.229-244.
15. Oakland, M.W. and Chameau, J.L.A.(1984), "Finite-element analysis of drilled piers used for slope stabilization", *Laterally Loaded Foundation*, American Society for Testing and Materials, pp.182-193.
16. Otter, J.R.H., Cassell, A.C. and Hobbs, R.E.(1966), "Dynamic relaxation", *Proc. Instn Civ. Engrs 35*, Paper No.6986, pp.633-656.
17. Poulos, H.G.(1995), "Design of reinforcing piles to increase slope stability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, pp.808-818.
18. Poulos, H.G. and Chen, L.T.(1997), "Pile response due to excavation-induced lateral soil movement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.2, pp.94-99.
19. Randolph, M.F. and Wroth, C.P.(1978), "Analysis of deformation of vertically loaded piles", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, Vol.104, No.12, pp.1465-1488.
20. Reese, L.C., William, R.C. and Francis, D.K. "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Proc. 6th annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Paper No.2080.
21. Rowe, R.K. and Poulos, H.G.(1979), "A method for predicting the effect of piles on slope behavior", *Proc. 3rd ICONMIG*, Achen, Vol.3, pp.1073-1085.
22. Springman, S.M.(1989), "Lateral loading on piles due to simulated embankment construction", Ph. D. thesis, Univ. of Cambridge.
23. Tschebotarioff, G.P.(1973), "Lateral pressure of clayey soils on structures", *Proc. 8th ICSMFE Specialty Session 5*, Moscow, Vol.4, No.3, pp.227-280.
24. Ugai, K. and Leshchinsky, D.(1995), "Three-dimensional limit equilibrium and finite element anaysis a comparison of result", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.1-7.
25. 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, pp.90-97.
26. Won, J.H.(1999), "Stability analysis of slope with stabilizing piles considering group effect", Master Thesis, University of Yonsei.
27. 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, pp.671-689.

(접수일자 2003. 5. 16, 심사완료일 2003. 10. 13)