

하계해석을 이용한 수직방향 지진계수 영향에 따른 비탈면의 안정성 평가 연구

A Study on the Estimation of Slope Stability under the Influence of the Vertical Direction Seismic Coefficient Using Lower Bound Analysis

최 상 호¹ Choi, Sang-Ho

김 종 민² Kim, Jong-Min

김 용 수³ Kim, Yong-Soo

Abstract

Recent earthquake records indicate that the vertical component of earthquake loading, generally neglected in seismic slope stability analysis, has a significant influence on the stability. This is particularly true for the earthquakes originating inside the continent, not from its boundaries. Therefore the design of geotechnical structures without consideration of vertical component of earthquake loading may result in unsafe design. In this study, with a consideration of the effect of vertical seismic loading, the horizontal yield seismic coefficients under various slope conditions are estimated, using the lower bound limit analysis. In addition, the equation for the determination of the critical direction (either upward or downward) of vertical seismic loading is proposed.

요 지

최근에 발생한 아이티지진, 칠레지진의 지진파 기록에서 일반적으로 비탈면 안정해석에서 무시되었던 수직방향 지진가속도 성분이 크게 나타났다. 특히, 수직방향 지진성분은 진원이 내륙에 위치한 경우 더욱 뚜렷하게 나타난다. 그러므로 설계에 수직방향 지진성분을 고려하지 않은 지반 구조물들은 많은 인명과 재산 피해를 가져올 수 있다. 따라서, 본 연구는 지진계수비에 따른 수평방향 항복지진계수의 하계해를 산정하였고, 비탈면 안정성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 한계상태 수직방향 지진계수의 방향(상향, 하향)을 결정할 수 있는 관계식을 제안하였다.

Keywords : Lower bound analysis, Seismic coefficient ratio, Vertical Seismic Coefficient, Critical friction coefficient, Pseudo-Static analysis

1. 서 론

강진으로 분류되는 고베지진(Kobe earthquake)의 지진가속도 성분을 방향성으로 구분하여 살펴보면 Fig. 1

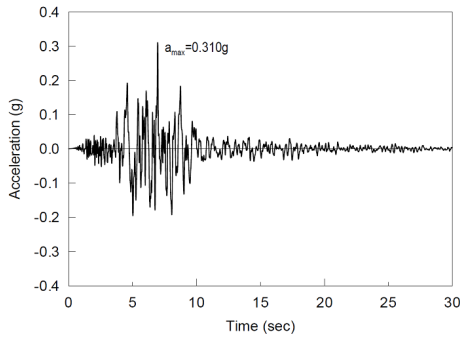
과 같이 수평방향의 지진가속도 성분보다 수직방향의 지진가속도 성분이 상당히 크게 작용하는 것을 알 수 있다(www.rev.seis.sc.edu). 최근에 발생한 아이티지진(M7.0), 칠레지진(M=8.8)에 경우에도 수직방향 지진가

¹ 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 연구원 (Member, Ph.D., Infrastructure Safety Research Ins., Korea Infrastructure Safety Co.)

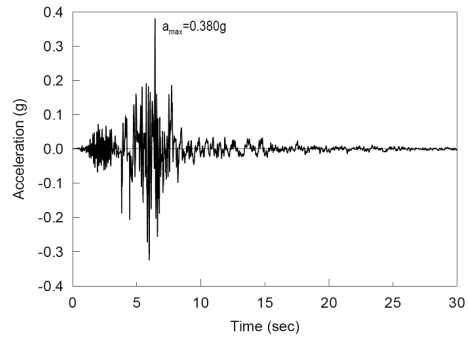
² 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Construction & Environmental Engrg., Sejong Univ., Tel: +82-2-3498-3293, Fax: +82-2-3498-3332, jongmin@sejong.ac.kr, 교신저자)

³ 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 차장 (Member, Ph.D., Infrastructure Safety Research Ins., Korea Infrastructure Safety Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



(a) Component of horizontal seismic wave (North-South)



(b) Component of vertical seismic wave (Up-Down)

Fig. 1. Component of seismic acceleration (Kobe earthquake, 1995)

속도가 상당히 크게 나타났다. 이러한 직하형 지진사례로부터 일본, 유럽, 미국 등의 건설분야에 내진설계가 강화되었으며, 특수구조물에 대한 설계기준에는 수직방향의 지진하중을 고려할 수 있도록 제시되어 있다.

구조물의 내진해석에서 고려되는 지진하중의 방향은 대상구조물의 파괴거동 특성에 따라 다르게 적용되어야 하며 건축구조물과 같이 파괴면이 지표면과 동일한 경우에는 수직방향 지진성분중이 수평방향 지진성분보다 구조물 안정성에 지배적이지 않기 때문에 무시할 수 있다. 그러나 비탈면, 옹벽과 같은 지반구조물의 경우, 파괴면의 형상이 지표면과 동일하지 않기 때문에 파괴면에 작용하는 수직방향 지진성분은 비탈면 안정성에 영향을 미치게 된다(Robert, 2008). 따라서, 수직방향 지진성분에 의해 안정성에 영향을 받는 지반구조물에 대해서는 수직방향 지진하중이 무시되어서는 안 된다. 또한 비탈면의 내진해석에 관련해서 많은 연구가 보고되고 있으며, 해석기법으로는 유한요소를 이용한 고급수치해석과 한계평형해석을 포함한 다양한 간편해석법이 적용되고 있다(Baker, 2006). 고급수치해석은 지진파력을 고려한 안정해석이 가능하나 이것은 속련도에 따라 적용이 제한될 수 있다. 그리고 지반의 비선형 거동 특성 때문에 해석적 최적해에 접근하는데 어려움이 있다. 한계평형해석은 적용이 간편하여 비탈면의 안정해석에 광범위하게 사용되고 있으나 파괴면에 작용하는 힘의 평형조건을 고려하고 있어 역학적으로 엄밀성이 보장되지 않는 단점이 있다(Kim, 2002).

따라서, 본 연구는 앞서 언급한 해석적인 한계를 보완할 수 있는 하계해석을 적용하였으며, 지진계수비에 따른 수평방향 항복지진계수의 하계해 산정이 가능하도록 하계해석 프로그램을 수정·보완하였다.

2. 복합지진하중을 고려한 하계해석의 수식화

2.1 하계해석

하계해석은 한계해석의 하계정리를 이용하여 안정문제의 하한값을 도출하며, 해석대상 토체의 모든 절점과 요소에서 정적허용응력장을 가정하여 역학적으로 엄밀한 해석기법이다(Sloan, 1988). 정적허용응력장은 토체내의 요소에서 소성이 발생하지 않고 ①요소의 평형조건, ②불연속면의 평형조건, ③응력경계조건, ④항복조건을 만족한다. 따라서, 해석모델을 구성하는 모든 절점과 요소에서 정적허용응력장을 만족하면 파괴가 발생하기 전의 응력상태를 나타내는 것을 의미한다.

2.2 하계해석의 수식화

하계해석은 정적허용응력장의 평형조건만을 고려하므로, 수직방향 지진하중이 고려된 비탈면의 작용하중은 자중(W), 수직·수평방향 지진하중이 있다(Loukidis, 2003). 비탈면내 한 점의 미소 요소에 작용하는 응력은 Fig. 2와 같다.

대상 토사면의 파괴시 또는 파괴직전의 상태를 의미하는 하계해는 적허용응력장으로 가정하여 얻어진다. 정적허용응력장은 비탈면을 구성하는 모든 요소의 평형조건, 응력불연속면의 평형조건, 응력경계조건 그리고 비항복규정($F \leq 0$; F =항복함수)이 만족되어야 한다.

수직방향 항복지진계수의 영향을 고려하기 위해서 수직방향 항복지진계수와 수평방향 항복지진계수의 비를 적용하였다. 따라서, 하계해석의 토체내 응력평형조건은 식 (1)과 같이 지진계수비가 고려된 응력형태의 절점변수로 표현되어진다. 이러한 정적허용 응력조건들은

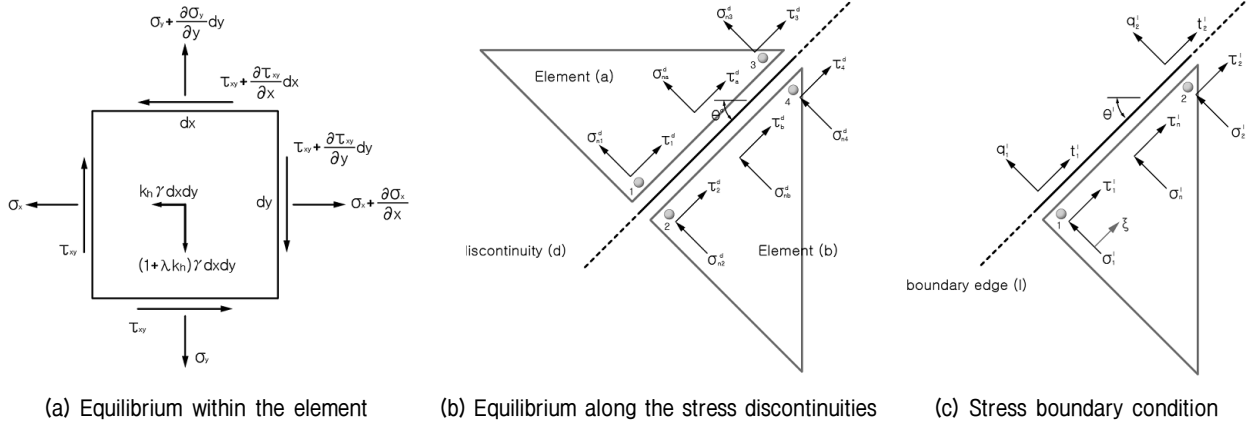


Fig. 2. Equilibrium condition for a statically admissible stress field

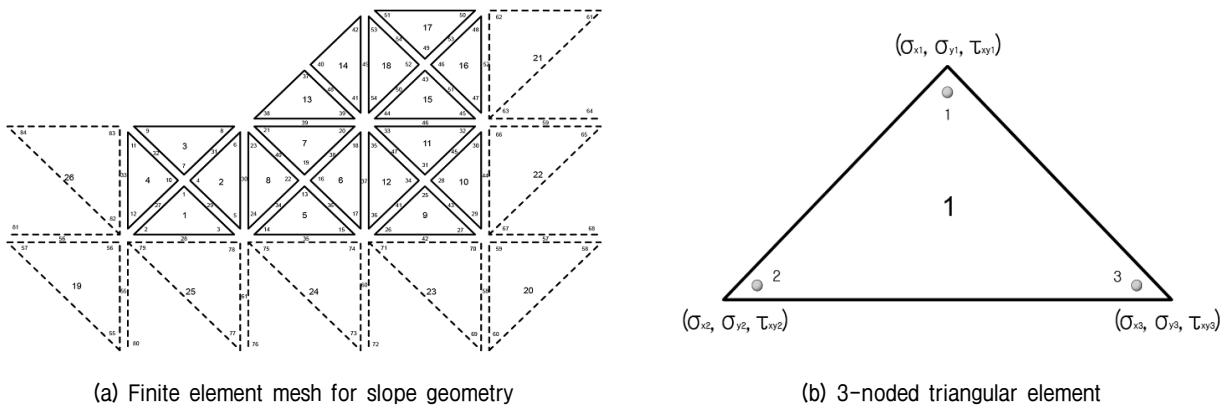


Fig. 3. Finite element for lower bound analysis

식 (1)~식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = k_{yh} \gamma ; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = (1 + \lambda k_{yh}) \gamma \quad (1)$$

(요소내의 평형조건)

$$\sigma_n^a = \sigma_n^b ; \quad \tau^a = \tau^b \quad (2)$$

(응력불연속면의 평형조건)

$$q = \sigma_n = \text{constant} ; \quad t = \tau = \text{constant} \quad (3)$$

(응력경계조건)

$$F = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2 - \{2c \cos \phi - (\sigma_x + \sigma_y) \sin \phi\}^2 \leq 0 \quad (4)$$

(비항복조건)

여기서, γ 는 흙의 단위중량(Unit weight of soil), k_{yv} 는 토체에 작용하는 수직방향 항복지진계수(Vertical yield seismic coefficient), k_{yh} 는 토체에 작용하는 수평방향 항

복지진계수(Horizontal yield seismic coefficient), λ 는 수직방향 항복지진계수에 대한 수평방향 항복지진계수의 비(Rate of yield seismic coefficient)로서 지진계수비가 양(+)의 부호를 갖는다면 수직지진하중이 하향으로 작용하는 것을 의미하며, 음(-)의 부호는 수직지진하중의 상향으로 작용하는 것을 의미한다(Bandini et al., 2007). q 는 경계 연직응력, t 는 경계 전단응력, σ_n^a , σ_n^b , τ^a , τ^b 는 인접한 두 개의 응력장 a 와 b 의 경계면을 따라 발생하는 연직응력(σ_n)과 전단응력(τ)이다.

본 연구에서는 정적허용응력장의 조건을 수치해석식으로 표현하고 이에 최적화 기법을 적용하기 위해 Fig. 3 (a)와 같이 유한요소를 이용하여 비탈면을 모델링하였다. 요소 내 절점응력의 변화를 식 (5)와 같이 선형으로 가정하여 모든 정적허용응력 조건들이 선형방정식으로 표현되어질 수 있다.

$$\sigma_x = \sum_{I=1,3} N_I \sigma_{xI} ; \quad \sigma_y = \sum_{I=1,3} N_I \sigma_{yI} ; \quad \tau_{xy} = \sum_{I=1,3} N_I \tau_{xyI} \quad (5)$$

여기서, N_j = 절점좌표의 변수로 표현되는 선형형상 함수

수평방향 항복지진계수를 목적함수로 하는 하계해석의 수식화를 위해서 정적허용응력장을 만족하는 평형조건과 비항복조건을 앞서 언급하였다. 또한 삼각형 요소에 Fig. 3(b)와 같이 주어진 강도정수, 절점응력과 요소의 관계를 기하학적인 함수로 표현함으로써 수치해석을 가능하게 하였다. 그리고, 최적화 기법(Sloan, 1998)으로 Steepest Active Set Algorithm을 사용하여 $F \leq 0$ 의 파괴조건을 만족할 때의 수평방향 항복지진계수(k_{yh})를 찾을 수 있다. 목적함수는 식 (6)과 같이 미지수의 항으로 표현되어지며 하계해석의 절점응력은 벡터 x 로 나타내어지고, 목적함수의 벡터(c)는 마지막 요소를 제외한 모든 요소는 0(zero)으로 지정한다.

$$\text{최 적 화} \quad -c^T x \quad (6)$$

(Minimize)

$$\text{목적함수} \quad [A_1][x] = B_1$$

(Subject function) $[A_2][x] \leq B_2$

여기서, $[A_1] = \sum_{e=1}^E [A_{equil}^e] + \sum_{d=1}^D [A_{equil}^d] + \sum_{l=1}^L [A_{bound}^l] ;$

$$[A_2] = \sum_{n=1}^N [A_{yield}^n] ;$$

$$B_1 = \sum_{e=1}^E [b_{equil}^e] + \sum_{d=1}^D [b_{equil}^d] + \sum_{l=1}^L [b_{bound}^l] ;$$

$$B_2 = \sum_{n=1}^N [b_{yield}^n] ;$$

$$x = \{ \sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_{xy1}, \dots, \sigma_{xN}, \sigma_{yN}, \tau_{xyN}, k_y \}^T$$

3. 수치해석결과

3.1 해석법에 따른 하계해석 결과 검증

앞 절에서 언급한 하계해석을 이용하여 산정된 수평방향 항복지진계수의 적정성을 검증하기 위해 유사정적해석에 의해 산정된 수평방향 지진계수를 비교하였다. 유사정적해석은 「건설공사 비탈면 설계기준(국토해양부, 2011)」에서 제안하고 있는 한계평형해석을 적용하였으며, 해석법에 따른 비교를 위한 대상 비탈면의 재원과 지반물성은 Fig. 4와 같이 결정하였다.

한계평형해석의 다양한 해석법으로 수평방향 항복지진계수를 산정하기 위해 지반범용해석 프로그램(Geostudio 2007)를 이용하여 Ordinary법, Bishop법, Spencer법으로 각각 안정해석을 수행하였다. 전술한 해석조건과 해석법에 따라 수평방향 항복지진계수를 산정한 결과를 Table 1과 같이 정리하였다.

해석결과에 따르면 지진계수비가 1.0일 때, 하계해석에 의해 산정된 수평방향 지진계수는 0.093이고, 한계평형해석에 의해 산정된 수평방향 항복지진계수는 0.096~0.098의 범위로 나타났다. 특히, 수평방향 항복지진계수의 크기는 한계평형해석보다 하계해석이 작게 산정되었으며, 각각의 해석법과 비교하면 5.0% 내외로 다소 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 수평방향 항복지진계수는 지진계수비와 해석법에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다. 하계해석에 의한 수평방향 항복지진계수는 파괴시점의 하한값을 의미하기 때문에 한계평형해석 보다 작게 산정되었다. 일반적으로 하계해석을 기준으로 해석법에 따른 수평방향 항복지진계수의 차이를 비교 했을 때, 5.0% 내외의 차이는 수

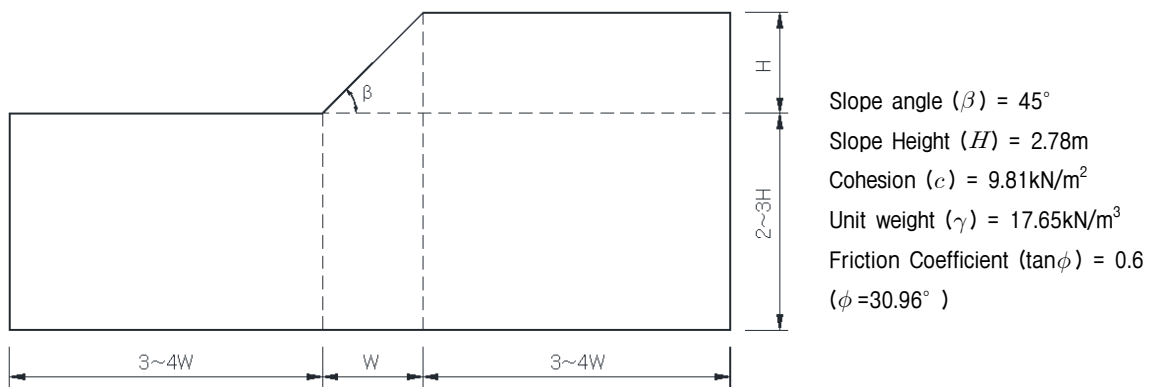


Fig. 4. Geometry and strength parameter of slope used in analysis

Table 1. Comparison of the horizontal yield seismic coefficient for analysis method

Analysis method		$\lambda = 1.0$		$\lambda = 0.0$		$\lambda = -1.0$	
		k_{ygh}	Ratio (%)	k_{ygh}	Ratio (%)	k_{ygh}	Ratio (%)
Lower bound analysis		0.093	—	0.121	—	0.167	—
LEA*	Bishop method	0.098	5.38	0.128	5.79	0.177	5.99
	Ordinary method	0.096	3.23	0.124	2.48	0.173	3.59
	Spencer method	0.097	4.30	0.127	4.96	0.177	5.99

*LEA : Limit equilibrium analysis

정·개발된 하계해석의 적정성을 검증하는데 적절한 결과가 산정되었다고 판단된다.

3.2 매개변수에 따른 해석결과

3.2.1 해석조건

비탈면의 제원은 비탈면의 기울기(β)와 안정수의 함수(γ, c, H)를 역산하여 결정하였다. 지반물성은 단위 중량(γ), 내부마찰각(ϕ), 점착력(c)을 고려하였으며, 내부마찰각은 마찰계수($\tan \phi$)로 표현하여 0.1~0.9 범위의 값을 적용하였다. 수직방향 지진계수가 비탈면 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 지진계수비의 범위

를 $-1.0 \leq \lambda \leq 1.0$ 으로 하였다. 그리고 Fig. 5와 같이 매개변수($\beta, N_c, \tan \phi$)를 조합하여 1,016개의 해석조건을 설정하고 수평방향 지진계수의 하한값을 산정하였다.

3.2.2 안정수에 따른 수평방향 항복지진계수 산정

앞서 해석법에 따라 산정된 수평방향 항복지진계수를 검증 결과, 하계해석에 의한 수평방향 항복지진계수가 적절하게 산정되었다고 판단되었다. 따라서 균질한 단순비탈면에 대한 수평방향 항복지진계수 산정도표를 제안하기 위해 Fig. 5의 해석조건에 따라 다양한 조합으로 하계해석을 수행하였다.

대표적으로 비탈면 경사각(β) 45°, 안정수(N_c) 0.10

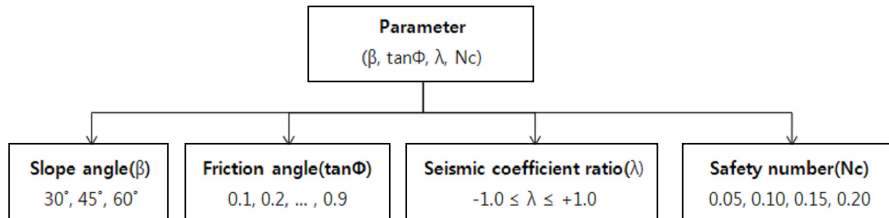
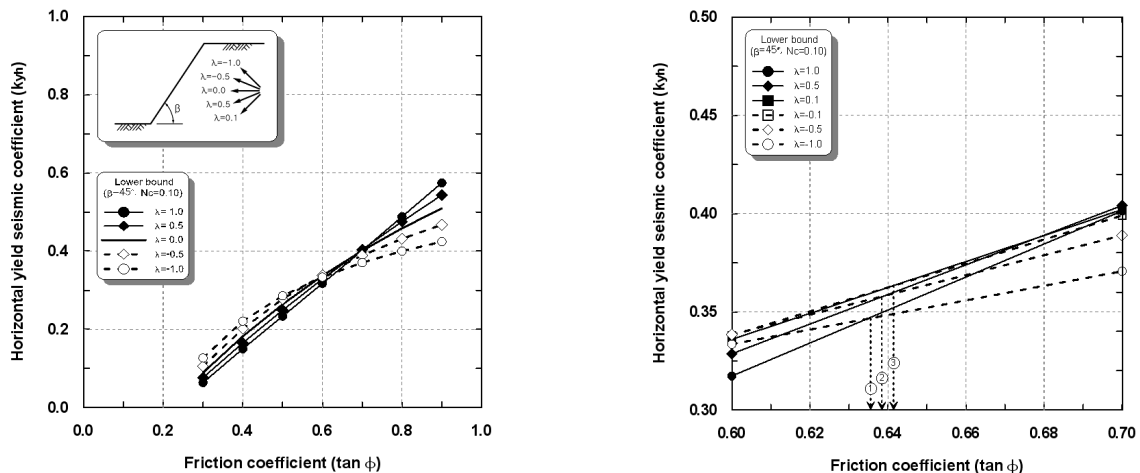


Fig. 5. Combination condition of parameter analysis



(a) Safety number 0.10

(b) Computation of critical friction coefficient

Fig. 6. Computation of critical friction angle for seismic coefficient ratio ($\beta = 45^\circ, N_c = 0.10$)

에 대한 결과를 살펴보면 Fig. 6(a)와 같이 수평방향 항복지진계수와 마찰계수는 양(+)의 기울기 나타내며, 비선형적으로 증가하였다. 그리고 특정 마찰계수를 기준으로 상대적으로 임의의 마찰계수가 작은 경우에는 수직방향 항복지진계수가 하향($0 < \lambda < 1.0$)으로 작용할 때, 수평방향 항복지진계수가 작게 산정되었다. 반면에 임의의 마찰계수가 상대적으로 클 경우에는 수직방향 항복지진계수가 상향($0 < \lambda < -1.0$)으로 작용할 때, 수평방향 항복지진계수가 작게 산정되었다. 이러한 경향은 Fig. 7과 같이 절편에 작용하는 지진하중 방향성분을 세가지 경우로 구분하여 평가할 수 있으며, 식 (7)과 같이 수직방향 항복지진계수가 고려된 안전율 산정 식으로 간단하게 증명이 가능하다.

첫째, 수평방향 지진계수만을 고려할 경우에는 활동력이 증가하고 저항력은 감소하기 때문에 비탈면 안정성이 감소한다. 둘째, 수평방향 지진계수와 수직방향 지진계수가 하향 작용하게 되면 활동력과 저항력이 모두 증가하기 때문에 비탈면 안정성에 미치는 영향이 일정하지 않다. 셋째, 수평방향 지진계수와 수직방향 지진계수가 상향 작용하게 되면 활동력과 저항력이 모두 감소하기 때문에 비탈면 안정성에 미치는 영향이 일정하지 않다. 따라서, 수직방향 지진계수가 고려된 두 번째, 세

번째 경우처럼 활동력과 저항력의 두 항이 같이 감소하거나 증가하게 되면 비탈면 안정성에 취약한 수직방향 지진하중의 방향이 일정하지 않다는 것을 의미한다.

이러한 경향은 특정 이러한 마찰계수를 기준으로 주어진 마찰계수가 작으면 수직방향 지진하중이 하향 작용할 때, 비탈면 안정성에 취약하고 주어진 마찰계수가 크면 수직방향 지진하중이 상향으로 작용할 때, 비탈면 안정성을 취약한 공통적인 경향이 뚜렷하다.

$$F.S = \frac{\Sigma(W \cos \alpha - k_{yh} \sin \alpha \pm k_{yv} \cos \alpha) \tan \phi}{\Sigma(W \sin \alpha + k_{yh} \cos \alpha \pm k_{yv} \sin \alpha)} \quad (7)$$

이러한 기준이 되는 마찰계수를 산정하기 위해서 크기가 동일하고 방향이 서로 다른 두 개의 지진계수비에 대해서 선형회귀분석을 수행하여 교차점을 산정하였다. 이 교차점을 한계마찰계수로 정의하였고 이 점을 기준으로 좌측은 수직방향 지진하중이 하향 작용하면 비탈면 안정성이 취약해지고 우측은 수직지진하중이 상향으로 작용하면 비탈면 안정성이 취약해진다. 따라서, 마찰계수, 수평항복지진계수, 지진계수비의 관계로 부터 수직방향 항복지진계수의 영향을 효과적으로 분석하였다.

Fig. 8은 비탈면 경사 45°, 안정수 0.10에 대한 마찰계

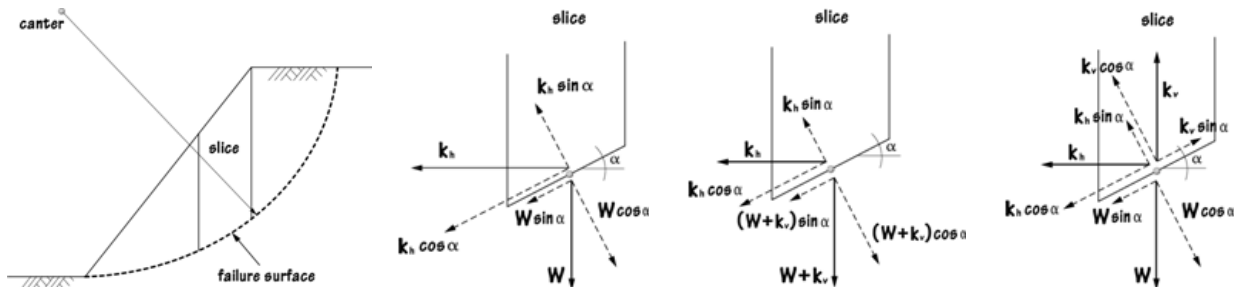


Fig. 7. Comparison of component of seismic loads in the slice

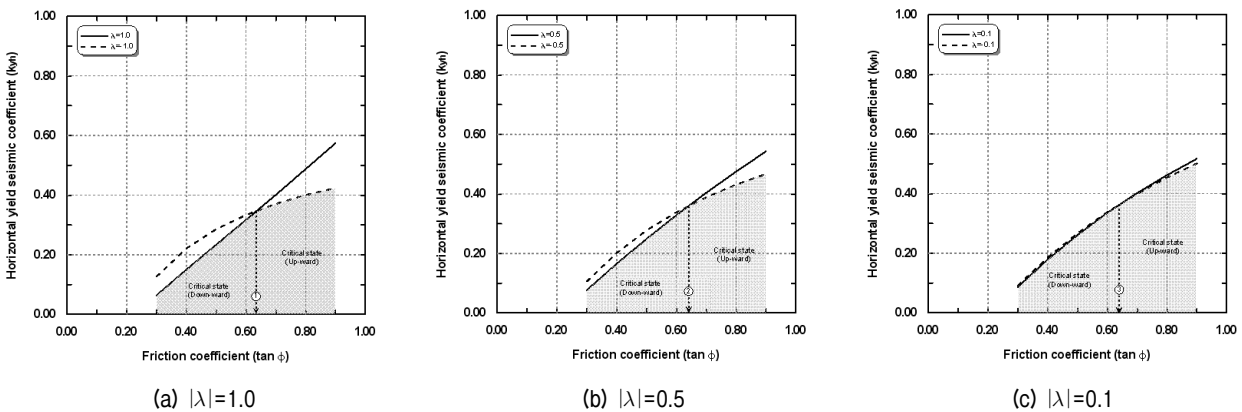
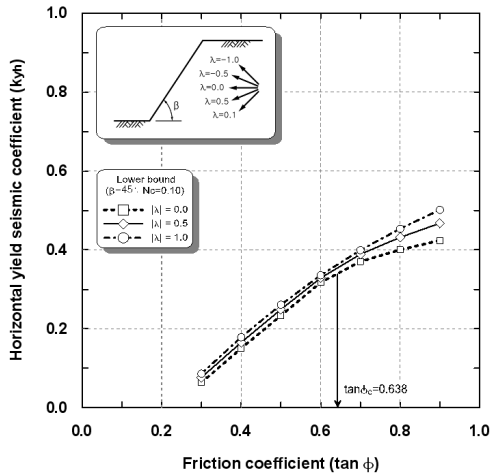


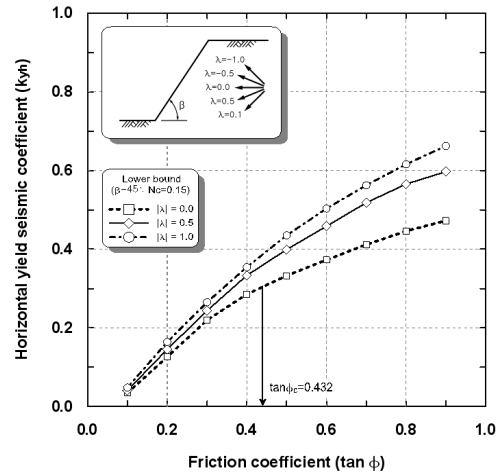
Fig. 8. Computation of critical friction coefficient for the seismic coefficient ratio

Table 2. linear regression analysis of the horizontal yield seismic coefficient and the friction coefficient with the seismic coefficient ratio

No.	linear regression analysis	R^2	$\tan\phi_c$	
1	$k_{yh} = -0.4943(\tan\phi)^2 + 1.0407(\tan\phi) - 0.1140$	0.978	0.647	1.0
	$k_{yh} = 0.1126(\tan\phi)^2 + 0.6982(\tan\phi) - 0.1461$	0.983	($\phi = 32.5$)	-1.0
2	$k_{yh} = -0.5802(\tan\phi)^2 + 1.2873(\tan\phi) - 0.2244$	0.952	0.651	0.5
	$k_{yh} = -0.2060(\tan\phi)^2 + 1.0235(\tan\phi) - 0.2113$	0.986	($\phi = 33.1$)	-0.5
3	$k_{yh} = -0.3767(\tan\phi)^2 + 1.1658(\tan\phi) - 0.2283$	0.973	0.656	0.1
	$k_{yh} = -0.4551(\tan\phi)^2 + 1.2227(\tan\phi) - 0.2319$	0.989	($\phi = 33.3$)	-0.1



(a) Safety number 0.10



(b) Safety number 0.15

Fig. 9. Relation of the horizontal yield seismic coefficient and the seismic coefficient ratio

수와 수평방향 항복지진계수의 관계도표로서 절대값으로 표현되는 지진계수비에 따라 $|\lambda|=1.0$, $|\lambda|=0.5$, $|\lambda|=0.1$ 로 구분하였다. 그리고 각각의 지진계수비에 대해 한계마찰계수를 표현하였다

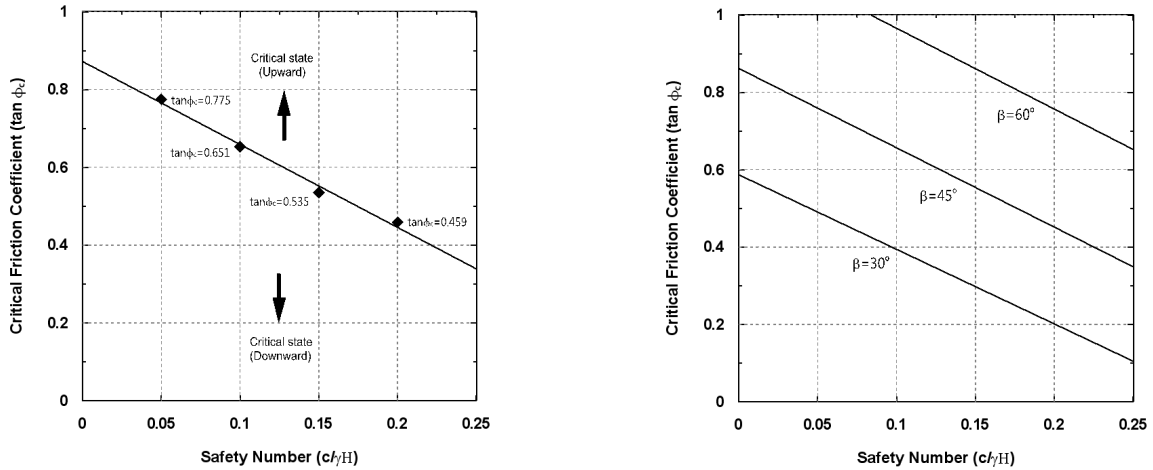
Table 2은 지진계수비에 따른 마찰계수와 수평방향 지진계수의 단일회귀분석 결과로서 지진계수비에 대한 관계식과 한계마찰계수($\tan\phi_c$)를 정리하였다. 한계마찰계수는 다소 차이가 있지만, 내부마찰각으로 표현하면 약 1.0° 의 변화를 보이기 때문에 각각의 비탈면 경사각과 안정수에 따른 한계마찰계수를 평균값을 적용하였다. 그리고 평균값의 적용은 수직방향 지진계수의 전체적인 경향을 평가하는데 영향이 없을 것으로 판단된다.

Fig. 9은 절대값(absolute value)으로 표현되는 동일한 지진계수비에 대해서 한계상태의 마찰계수와 수평방향 지진계수 관계를 표현하였다. 이 관계로부터 주어진 비탈면 경사각, 마찰계수와 안정수로부터 한계상태의 수평방향 지진계수를 산정 할 수 있다.

3.3 한계상태의 수직방향 지진하중 방향성 결정

지진계수비에 따른 수평방향 항복지진계수의 경향을 살펴보면, 수직방향 지진하중의 방향(상향, 하향)에 따라 비탈면의 안정성이 증가하거나 감소하는 상이한 경향이 있다. 따라서, 지진계수비에 따른 수평방향 항복지진계수를 단일회귀분석을 수행하여 한계상태의 지진하중 방향을 결정 가능한 도표를 도출하였다. Fig. 10는 한계상태의 수직방향 항복지진계수 방향을 결정할 수 있는 안정수와 마찰계수의 관계를 나타내며, 주어진 조건이 한계마찰계수 이상이면 한계상태의 수직방향 지진하중이 상향으로 존재하는 것을 의미한다. 이러한 경우 수평·수직방향 항복지진계수를 하향으로 비탈면 안정해석에 적용하게 되면 수평방향 항복지진계수를 고려하였을 때 보다 비탈면 안전율이 증가하게 된다.

Table 3와 같이 비탈면 경사각에 따라 안정수에 대한 단일회귀분석의 한계마찰계수 관계식은 기울기가 유사하게 나타내기 때문에 비탈면 경사각과 안정수를 매개 변수로 하는 다중회귀분석을 수행하여 식 (8)와 같이 표



(a) Relation of critical friction coefficient and safety number for slope angle 45° (b) Relation of critical friction coefficient and safety number for slope angle (30° ~ 60°)

Fig. 10. Chart of critical friction coefficient for slope angle

Table 3. Equation of critical friction coefficient by linear regression analysis

Slope angle (β)	Equation of critical friction coefficient ($\tan \phi_c$)	R^2
30°	$\tan \phi_c = -1.928N_c + 0.587$	0.999
45°	$\tan \phi_c = -2.132N_c + 0.872$	0.989
60°	$\tan \phi_c = -2.090N_c + 1.175$	0.982

현하였다.

$$\tan \phi_c = 0.019\beta - 1.954N_c + 0.016 \quad (8)$$

그리고 다중회귀분석 관계식의 신뢰성을 확인하기 위해서 예측값과 계산값을 선형회귀분석을 통해 결정계수 (R^2)를 산정하였고 그 결과 0.991로 산정되어 매우 적절한 결과를 도출하였다고 판단하였다(Fig. 11). 그리고 위

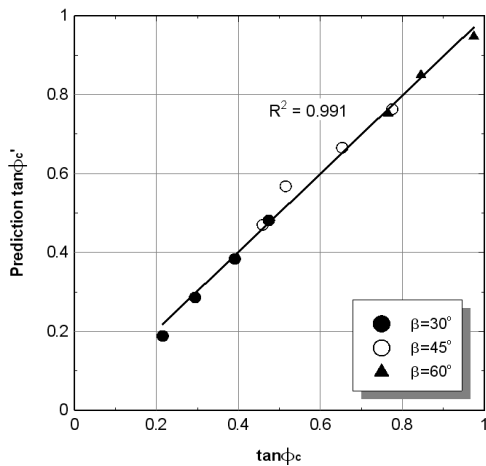


Fig. 11. Comparison of critical friction coefficient by linear and multiple regression analysis

결과로부터 직하형 지진을 고려할 경우, 유사적정하중으로 고려한 비탈면 안정해석에서 일반적으로 무시하고 있는 수직방향 지진하중이 방향성(상향, 하향)에 따라 안정성 평가에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 수직·수평방향의 항복지진계수는 미지수로 가정하였기 때문에 두 개의 대상변수를 단일변수로 고려하기 위해서 지진계수비를 이용하였으며, 주어진 지진계수비에 따른 수평방향 항복지진계수의 하한값을 산정할 수 있는 하계해석 프로그램을 수정·개발하였다. 또한 다양한 매개변수 해석조건에 균질한 단순비탈면에 대해 역학적으로 엄밀한 수평방향 항복지진계수를 간편하게 산정할 수 있는 도표를 제안하였다. 하계해석에 의해 제안된 수평방향 항복지진계수의 적용성을 검증하기 위해 한계평형해석법에 의해 산정된 수평방향 항복지진계수와 비교·분석하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수직방향 지진하중이 작용하는 비탈면의 수평방향 항복지진계수(k_{yh})를 최적화 대상변수로 고려한 하

계해석 프로그램을 수정·개발하였다. 하계해석에 의해 산정된 수평방향 지진계수는 한계평형법에 의해 산정된 수평방향 항복지진계수의 역학적 엄밀성을 판단하는데 이용될 수 있다.

- (2) 하계해석으로 산정된 수평방향 지진계수의 적용성을 평가하기 위해 한계평형해석(Ordinary법, Bishop법, Spancer법)에 의해 산정된 수평방향 항복지진계수를 비교·분석하였다. 하계해석으로 산정된 수평방향 항복지진계수는 파괴시점의 하한값을 의미하기 때문에 한계평형해석의 수평방향 항복지진계수보다 작게 산정되었기 때문에 적절한 것으로 판단된다.
- (3) 수평방향 항복지진계수 산정도표를 제안하기 위해 안정수(N_c)와 마찰계수($\tan \phi$) 조건에 따른 하계해석을 수행하였다. 그 결과 수직방향 지진하중의 작용방향에 따라 비탈면 안정성에 영향이 없는 마찰계수를 도출하였고, 이러한 마찰계수를 한계마찰계수($\tan \phi_c$)라고 정의하였다.
- (4) 이러한 한계마찰계수를 기준으로 수직방향 지진하중이 비탈면 안정성 평가에 미치는 영향이 상이하기 때문에 주어진 해석조건에 대해 제시한 한계마찰계수 관계식을 이용하면 한계상태의 수직방향 지진하중의 방향(상향, 하향)을 결정할 수 있다.
- (5) 국내에 수직방향 지진성분이 우세한 지진이 발생할 확률은 매우 낮지만, 현행 원전구조물에 관련된 설계법에 따르면 수직방향 지진성분을 고려하여 구조물 안정해석을 수행하도록 되어 특수구조물에 인접한 비탈면 안정성 평가에 기초자료로서 적용 가능할 것으로 판단된다.
- (6) 향후, 본 연구에서 수행하지 못한 상계해석을 수행하여 역학적으로 엄밀한 수평방향 항복지진계수의

상·하계해의 범위를 제안하고, 영구변위 산정에 적용되는 항복지진계수의 적정성(안정측면, 불안정측면)을 평가하는데 이용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124030200050)입니다.

참고 문헌

1. D. Loukidis, P. Bandini and R. Salgado. (2003). "Stability of Seismically Loaded Slopes Using Limit Analysis", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 5, pp.463-479.
2. Jongmin Kim, Rodrigo Salgado and Junhwan Lee, (2002), "Stability Analysis of Complex Soil Slopes using Limit Analysis", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No 7, pp.546-556.
3. P. Bandini, D. Loukidis and R. Salgado. (2007), "Limit Analysis of Seismically Loaded Slopes", pp.457-464.
4. Prater, E. G. (1979). "Yield Acceleration for seismic Stability of Slopes", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No GT5, pp.682-687.
5. R. Baker, R. Shukha, V. Operstein and S. Frydman. (2006). "Stability Chart for Pseudo-Static Slope Stability Analysis", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp.813-823.
6. Robert Shukha and Rafael Baker. (2008). "Design Implications of the Vertical Pseudo-Static Coefficient in Slope Analysis", *computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp.86-96.
7. S. W. Sloan. (1988). "Lower Bound Limit Analysis Using Finite Elements and linear Programming", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 12, pp.61-77.
8. S. W. Sloan. (1998). "A Steepest Edge Active Set Algorithm for Solving Sparse Linear Programming Problems", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, pp.2671-2685.

(접수일자 2012. 11. 14, 심사완료일 2012. 12. 13)