

한계해석을 이용한 토사면의 항복지진계수 산정도표 제안 연구

A Study on the Development of a Stability Chart for Yield Seismic Coefficient of Soil Slope Using Limit Analysis

최 상 호¹ Choi, Sang-Ho

김 중 민² Kim, Jong-Min

Abstract

Yield seismic coefficient plays an important role in the estimation of permanent displacement of a soil slope subjected to earthquake using Newmark's sliding block theory. However, yield seismic coefficients currently used in practices are not mechanically rigorous since most of them are estimated using limit equilibrium methods considering equilibrium condition only. Therefore, estimation of permanent displacement of a soil slope based on existing yield seismic coefficient may cause problems. Limit analysis estimating the range of mechanically rigorous solution is thought to be effective in evaluating the validity of existing yield seismic coefficient. In this study, a simple stability chart for yield seismic coefficient useful in practices is proposed by considering various slope conditions including stability number, slope inclination, strength parameters, etc.

요 지

Newmark 활동블록법을 이용하여 지진시 토사면의 영구변위를 산정할 경우 항복지진계수의 결정은 매우 중요하다. 그러나 기존에 제안된 항복지진계수는 일반적으로 한계평형해석에 기초하고 있어 역학적조건 중 평형조건만을 만족하므로 역학적으로 엄밀하지 못하다. 따라서 기 제안된 항복지진계수를 이용하여 토사면의 영구변위를 산정할 경우 문제점을 야기할 수 있다. 한계해석은 역학적으로 엄밀한 해의 범위를 산정하는 해석기법으로 항복지진계수의 역학적 엄밀성을 판단하는데 유용하다. 본 연구에서는 안정수, 사면경사, 지반물성 등에 따른 다양한 해석조건을 고려하여 실무적용에 유용한 항복지진계수 산정도표를 제안하였다.

Keywords : Limit analysis, Soil slope, Performance based design, Yield seismic coefficient, Stability chart

1. 서 론

최근 동남아 국가를 비롯한 주요국가에서 지진활동의 빈도와 규모가 점차 증가되고 있는 추세이다. 이러한 지진경향은 국내의 비탈면 내진설계의 변화에도 적지 않은 영향을 주고 있다. 과거의 내진설계는 안전을

기준의 하중기반설계가 대부분이 였으나 최근에는 변위기준의 성능기반설계(performance-based design)로 점차 변하고 있다. 최근까지 비탈면의 지진 안정성 평가와 영구변위 산정에 관련된 많은 연구가 보고되고 있다. 특히, 수치해석 측면의 연구는 유한요소를 이용한 고급수치해석과 한계평형해석을 포함한 다양한 해석법

1 학생회원, 세종대학교 토목환경공학과 박사수료 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sejong Univ.)

2 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sejong Univ., jongmin@sejong.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

등이 적용되고 있으며 고급수치해석은 지진에 의한 시간-가속도관계의 고려가 가능하나 이것은 속련도에 따라 적용상 제한이 발생할 수 있으며, 지반의 높은 비선형 거동 때문에 수치해석의 최적해 접근에 많은 어려움이 있다. 한계평형해석은 적용이 간편하고 해석결과가 간단하여 비탈면 안정해석에 광범위하게 사용되고 있으나 파괴면에 작용하는 힘의 평형조건만을 고려하고 있어 역학적 엄밀성이 보장되지 않는 단점을 갖고 있다.

Newmark(1965)는 지진활동에 의한 무한사면의 영구변위를 산정하기 위해 항복가속도를 고려한 활동블럭법(sliding block method)을 제안하였다. 활동블럭법은 강성블럭의 활동에 대한 안전율이 1.0이 되는 순간의 강성블럭에 작용하는 가속도를 항복가속도로 정의하고 지반가속도의 크기가 이 항복가속도를 초과할 때 영구변위가 발생한다는 개념이다. 영구변위 산정은 지반가속도와 항복가속도의 차이를 시간에 대해 두번 산정하며, Wilson 등(1983)이 제안한 수치적분 방법이 널리 사용되고 있다(Randall, 1993). Goodman과 Seed(1966)는 실험적으로 활동블럭법의 적용성을 검증하였으며, Franklin과 Chang(1977)은 Newmark법을 이용하여 항복가속도에 따른 영구변위를 예측할 수 있는 도표를 제안하였다. Kutter(1984)는 활동블럭법을 수정하여 점탄소성 활동저항을 갖는 모델을 제시하였고 Sarma(1981)는 과잉간극수압을 고려한 수정모델을 제시하였다. 또한 Chang 등(1984)과 Sawada 등(1994)은 한계해석의 상계정리에 대수나선 파괴면을 적용하여 항복가속도를 산정하고 변위해석을 수행하였다. 항복가속도와 활동블럭이론을 이용한 변위해석은 단시간에 양방향으로 작용하는 지진력 요소들을 안정성에 불리한 단방향으로 작용하는 것으로 가정하기 때문에 전체적으로 보수적인 결과를 보이게 된다.

본 연구에서는 한계해석을 이용하여 균질 단순사면에 대해 역학적으로 엄밀한 항복지진계수 산정하고 다양한 사면형상을 고려한 안정도표를 제안하고자 한다. 산정된 항복지진계수를 Prater(1979)의 제안값 및 한계평형법(Bishop method)에 의한 해석결과와 비교 평가하여 본 연구의 한계해석으로 산정된 항복지진계수의 적용성을 판단하였다. 또한 해석법에 따라 산정된 항복지진계수를 Newmark 활동블럭이론에 적용하여 영구변위를 산정하였으며, 이에 따른 비탈면 안정성 평가에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 수치한계해석

2.1 한계해석

한계해석은 소성이론에 근거한 상·하계정리를 이용하여 안정문제의 상·하한값을 도출하는 해석기법이다. 한계해석의 하계해석은 해석대상 토체의 모든 절점에서 Mohr-Coulomb의 항복규준, 평형조건, 응력경계조건을 만족하는 정적허용응력장을 가정하여 역학적으로 엄밀한 파괴조건(파괴하중, 안전율 등)의 범위를 산정한다. 반면, 상계해석은 해석대상 토체의 모든 절점에서 가상일의 정리, 적합조건, 재료의 흐름조건, 속도경계조건을 만족하는 운동학적 허용속도장을 가정하여 역학적으로 엄밀한 파괴조건(파괴하중, 안전율 등)의 범위를 산정해내며, 하한값의 최대값과 상한값의 최소값을 산정하게 되어, 보다 최적화된 해를 찾을 수 있다. 한계해석 경계이론의 가정사항들을 수치해석화하기 위해 선형형상함수를 갖는 유한요소를 이용하여 해석대상 사면을 모델링하였고, 최적해를 산정하기 위해 선형계획법 알고리즘인 Steepest edge active set algorithm을 적용하였다(Sloan, 1988, 1989; Sloan 과 Kleeman, 1995).

2.2 하계해석의 공식화

하계해석은 정적허용응력장의 평형조건만을 고려하므로, 지진시 토사면에 작용하는 하중인 토체의 중량(W) 및 붕괴시 관성력($k_y W$; k_y =항복지진계수)과 토사면내 한 점의 미소 요소에 작용하는 응력은 그림 1과 같다.

대상 토사면의 파괴시 또는 파괴직전의 상태를 의미하는 하계해는 정적허용응력장으로부터 얻어진다. 정적허용응력장은 토체 내 모든 점과 응력불연속면에서의 평형조건, 응력경계조건 그리고 비항복규정($F \leq 0$; F =항복함수)이 만족되어야 한다. 이러한 정적허용 응력조건들은 다음과 같이 식 (1)~식 (4)로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = k_y \gamma ; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \gamma$$

(토체내의 평형조건) (1)

$$\sigma_n^a = \sigma_n^b ; \quad \tau^a = \tau^b$$

(응력불연속면의 평형조건) (2)

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

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

여기서, γ = 흙의 단위 중량, k_y = 항복지진계수, q = 경계 연직응력, t = 경계 전단응력, $\sigma_n^a, \sigma_n^b, \tau^a, \tau^b$ = 인접한 두 개의 응력장 a와 b의 경계면을 따라 발생하는 연직응력(σ_n)과 전단응력(τ)

본 연구에서는 정적허용응력장의 조건을 수치해석식으로 표현하고 이에 최적화 기법을 적용하기 위해 그림 2와 같이 유한요소를 이용하여 사면을 모델링 하였다. 요소 내 절점응력의 변화를 식 (5)와 같이 선형으로 가정하여 모든 정적허용응력 조건들이 선형방정식으로 표현되어질 수 있다.

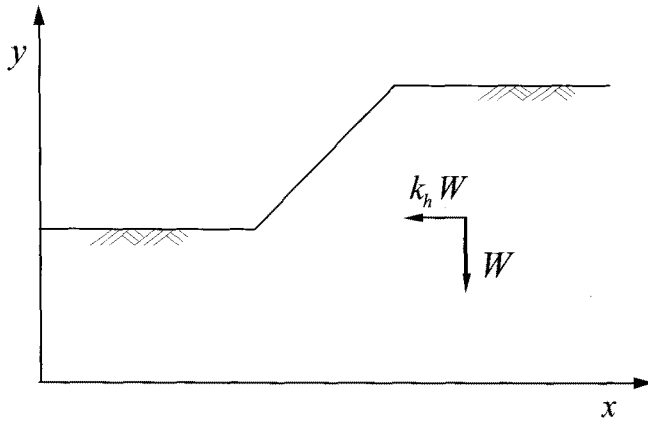
$$\sigma_x = \sum_{I=1,3} N_I \sigma_{xI}; \sigma_y = \sum_{I=1,3} N_I \sigma_{yI}; \tau_{xy} = \sum_{I=1,3} N_I \tau_{xyI} \quad (5)$$

여기서, N_I = 절점좌표의 변수로 표현되는 선형형상 함수

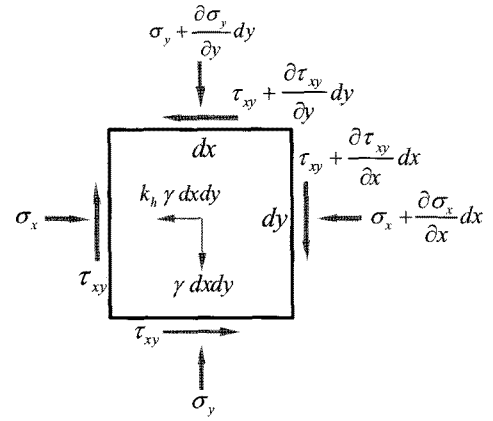
따라서, 정적허용응력조건을 만족하는 하계해석 해의 최대값은 선형계획법을 적용하여 산정할 수 있으며, 본 연구에서는 지진시 토사면의 붕괴를 유발하는 항복지진계수를 최적화의 목적함수로 설정하였다. 항복지진계수의 하한값을 최적화(최대화)하기 위해 선형계획법은 아래의 식 (6)과 같이 쓸 수 있으며, 식 (6)에서 목적함수와 구속조건은 각각 항복지진계수와 정적허용 응력조건을 나타낸다.

$$\text{목적함수} \quad c^T x \quad (6a)$$

$$\text{구속함수} \quad A_1 x = B_1, \quad A_2 x \leq B_2 \quad (6b)$$

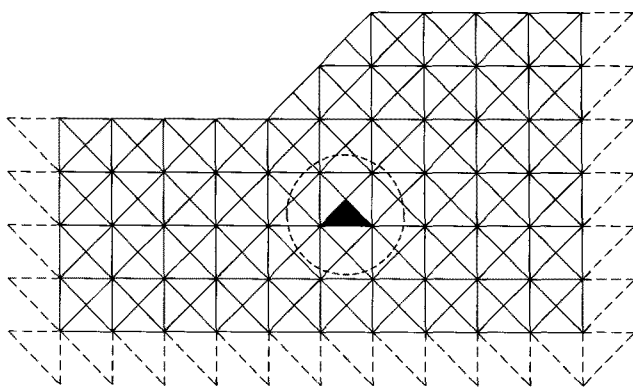


(a) 토사면에 작용하는 지진하중

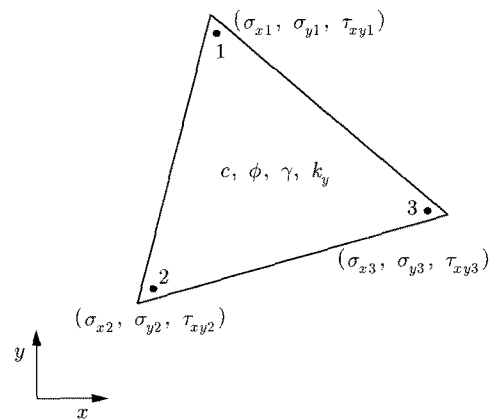


(b) 임의 요소의 응력조건

그림 1. 지진시 토사면에 작용하는 지진하중과 응력조건



(a) 유한요소망 및 경계조건



(b) 유한요소의 응력성분

그림 2. 토사면의 모델링(하계해석)

여기서, $x = \{\sigma_{x1}, \sigma_{y1}, \tau_{xy1}, \dots, \sigma_{xN}, \sigma_{yN}, \tau_{xyN}, k_y\}^T$; k_y =항복지진계수; $c = [0, 0, \dots, 0, 1]$; A_1, B_1 = 평형조건과 응력경계조건을 만족하는 선형방정식의 함수행렬, A_2, B_2 = 비항복조건을 나타내는 선형방정식의 함수행렬

식 (6)의 목적함수에 대한 최적화를 위해 희소행렬 (Sparse matrix)문제에 효율적인 Steepest- edge active set algorithm이 사용되었다.

2.3 상계해석의 공식화

상계해석에서는 운동학적 허용속도장의 적합조건과 구성조건만을 고려하므로 속도를 절점변수로 그리고 소성변형을 증분의 크기를 나타내는 소성증가율(plastic multiplier rate)을 요소변수로 채택하였다. 상계해는 운동학적 허용속도장으로부터 얻어지며 운동학적으로 허용되는 속도장은 토체 내 모든 점과 속도불연속면에서의 관련 유동법칙, 속도 경계조건, 그리고 항복규정($F = 0$) 이 만족되어야 한다. 이를 식 (7)~식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 수치하계해석과 동일하게 상계해석의 운동학적 허용속도조건들을 수치모형화 하기 위해서 식 (10) 과 같이 절점속도의 변화를 선형으로 가정하였다.

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_y},$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \quad (\text{적합방정식 및 유동법칙}) \quad (7)$$

$$\Delta u^d = u^b - u^a, \quad \Delta v^d = v^b - v^a$$

(속도불연속면에서의 유동법칙) (8)

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

(항복조건) (9)

$$u = \sum_{I=1,3} N_I u_I; \quad v = \sum_{I=1,3} N_I v_I \quad (\text{절점속도}) \quad (10)$$

여기서, $\dot{\lambda}$ =소성 증가율(소성 변형이 일어날 때 양수); $\Delta u^d, \Delta v^d$ =각 경계면(불연속면)에서 접선방향 및 연직 방향의 속도점프

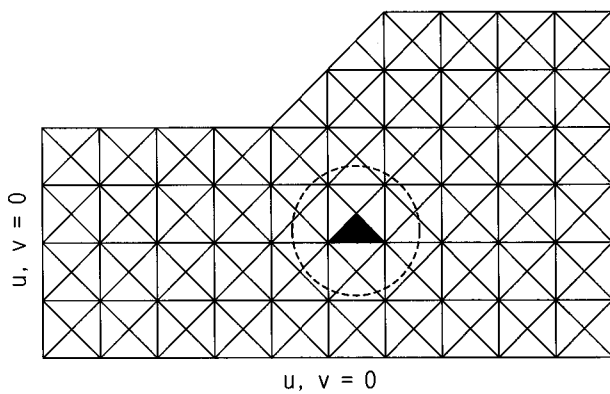
운동학적 허용속도장의 조건 식 (7)~식 (10)의 공식화에 대한 자세한 설명은 Sloan과 Kleeman(1995) 그리고 Kim(1998)에서 알 수 있다. 상계해석에서 최적화하기 위한(항복지진계수) 목적함수는 식 (11)과 같이 가상일의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{외력이 한일} = \text{내부에너지 소산} \\ & \equiv \int_V \gamma u dV + \int_V k_y \gamma u dV \\ & = \int_A c |\Delta u| dA + \int_V (\sigma_x \dot{\epsilon}_x + \sigma_y \dot{\epsilon}_y + \tau_{xy} \dot{\gamma}_{xy}) dV \quad (11) \end{aligned}$$

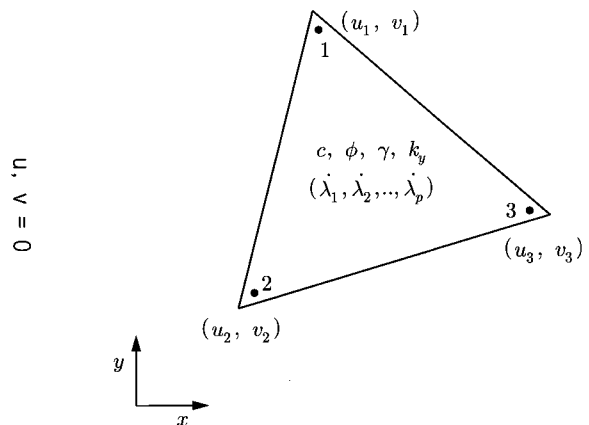
여기서, γ =토체내의 절점에서 흙의 단위중량; u, v =수평방향 및 수직방향 속도; Δu =속도경계면에서의 접선방향 속도점프

식 (11)을 정리하면 붕괴를 일으키는 항복지진계수는 다음의 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$k_y = \frac{\int_L c |\Delta u| dL + \int_A (\sigma_x \dot{\epsilon}_x + \sigma_y \dot{\epsilon}_y + \tau_{xy} \dot{\gamma}_{xy}) dA - \int_A \gamma^e v dA}{\int_A \gamma^e u dA} \quad (12)$$



(a) 유한요소망 및 경계조건



(b) 유한요소의 응력성분

그림 3. 토사면의 모델링(상계해석)

항복지진계수의 상한값을 최적화(최소화)하는 문제는 식 (7)~식 (9)로 표현되는 운동학적 허용조건 구속 조건으로 하고 식 (12)를 목적함수로 하는 최적화 문제로 표현할 수 있으며, 이를 선형형상함수를 이용한 식 (10)의 유한요소식과 결합하면 다음의 식 (13)과 같은 선형계획법 문제가 된다.

$$\text{목적함수 } c_2^T x_2 + c_3^T x_3 \quad (13a)$$

$$\text{구속조건 } A_{11}x_1 + A_{12}x_2 = 0 \quad (13b)$$

$$A_{21}x_1 + A_{23}x_3 = 0 \quad (13c)$$

$$A_{31}x_1 = B_3 \quad (13d)$$

$$x_2, x_3 \geq 0 \quad (13e)$$

여기서, $x_1 = \{u_1, v_1, \dots, u_N, v_N\}^T$; $x_2 = \{\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{P1}, \dots, \lambda_{PE}\}^T$; $x_3 = \{|\Delta u_1|, |\Delta u_2|, \dots, |\Delta u_L|\}$; $c_2, c_3 =$ 목적함수 계수의 벡터; $A_{ij}(i=1,2,3; j=1,2,3)=$ 구속방정식의 계수 행렬

2.4 해석법에 따른 항복지진계수와 파괴형태의 비교

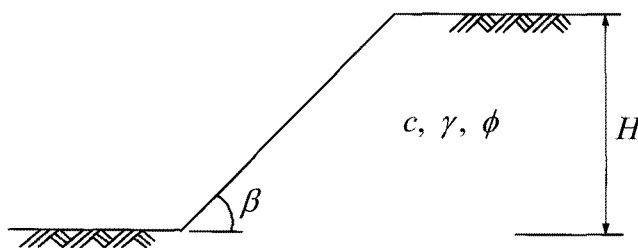
앞 절에서 기술한 수치한계해석 프로그램을 이용하여 산정된 항복지진계수의 적정성을 검증하기 위해 기존 해석방법에 의해 산정된 항복지진계수와 비교를 수행하였다. 기존해석법으로는 국내 비탈면 내진설계지침

(건설교통부, 2006)에서 제안하고 있는 간편해석법인 한계평형해석법을 적용하였으며, 항복지진계수와 파괴형태를 산정하였다. 해석법에 따른 비교를 위한 대상사면의 재원과 지반물성은 그림 4와 같이 결정하였다.

한계평형해석의 다양한 해석법으로 항복지진계수를 산정하기 위해 범용프로그램인 Slope/w(Geostudio 2004)를 이용하여 Ordinary법, Bishop법, Spencer법 해석을 수행하였다. 또한 건설공사 비탈면 설계지침(건설교통부, 2006)에 적용되어 있는 Prater(1979)의 제안값과 함께 비교하였다. 전술한 해석조건과 해석법에 따라 항복지진계수를 산정한 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1에서 보듯이 한계해석에 의해 산정된 항복지진계수는 하계해 0.629, 상계해 0.717이고 한계평형법에 의해 산정된 항복지진계수는 한계해석의 범위내에 존재하는 것을 확인 할 수 있었으며, Ordinary법에 의한 항복지진계수를 제외하고 모두 상계해에 다소 근사하였다. 따라서, 수치한계해석으로 산정된 항복지진계수의 상하한 범위는 적절한 것으로 판단된다.

또한 한계해석에 의해 산정된 파괴시점의 변위도와 소성도는 그림 5와 같으며 해석법에 따른 비교를 위해 한계평형해석으로부터 산정된 예상파괴면을 함께 도시하였다. 임의로 파괴면을 가정하여 사면안정성을 평가하는 한계평형해석과 달리 파괴면을 가정하지 않는 한계해석의 변위도와 소성도는 한계평형해석의 해석결과와 비교적 잘 부합하였다. 한계해석에 의해 산정되는 소



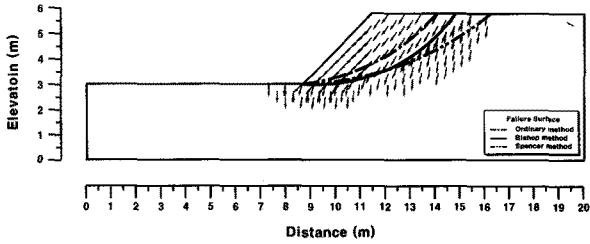
사면경사(β) = 45°
 사면고(H) = 2.78m
 점착력(c) = 9.81kN/m²
 단위중량(γ) = 17.65kN/m³
 내부마찰각(ϕ) = 31°

그림 4. 해석조건

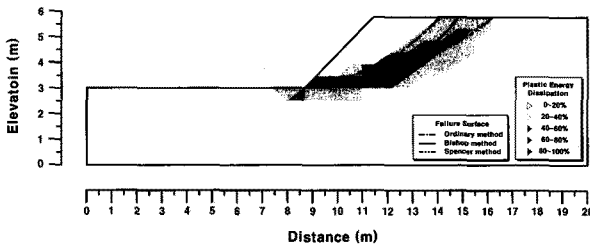
표 1. 해석법에 따른 항복지진계수 비교

해석법		파괴메커니즘	항복지진계수 (k_y)
한계평형해석	Ordinary법*	원호활동	0.640
	Bishop법*	원호활동	0.671
	Spencer법*	원호활동	0.688
	Prater(1979)	대수나선활동	0.670
한계해석	상계해석**	동적허용속도장	0.717
	하계해석**	정적허용응력장	0.629

Slope/W*, 한계해석**



(a) 변위도



(b) 소성도

그림 5. 한계해석에 의한 해석결과와 해석법에 따른 파괴활동면

성도는 요소의 음영정도에 따라 소성에너지의 크기를 의미하며 이로부터 역학적 취약부를 판단할 수 있다.

3. 항복지진계수 산정도표

3.1 해석조건

수치한계해석을 이용하여 실무에서 간편하게 사용할 수 있는 항복지진계수 산정도표를 제안하기 위해 다양한 사면조건에 대한 해석을 수행하였다. 해석대상은 균질단순사면으로 제한하였고, 해석조건은 그림 6과 같다. 사면의 제원은 주어진 사면경사와 안정수에 따라 흙의 단위중량과 점착력을 고려하여 결정하였다. 지반물성은 흙의 단위중량, 내부마찰각, 점착력이 있으며 내부마찰각은 $\tan \phi$ 로 표현하여 0.1~0.9의 범위의 값을 적용하였다.

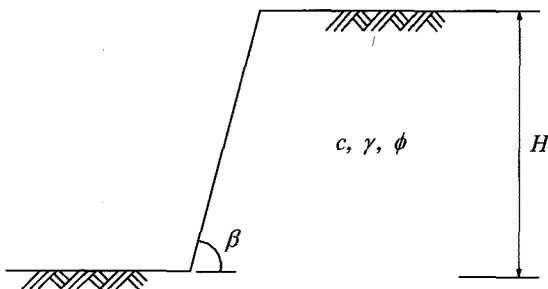


그림 6. 해석조건

3.2 항복지진계수 산정도표

균질단순사면에 대한 내진 설계시 항복지진계수를 간편하게 산정하기 위해 그림 7~그림 9와 같이 도표를 제안하였다. 산정도표는 사면경사, 안정수, 내부마찰각의 다양한 조합에 따라 한계해석을 수행하여 사면조건에 따른 항복지진계수의 상·하한값을 산정하였다. 또한 Prater(1979)의 제안값과 한계평형법(Bishop method)으로부터 최소안전율이 1.0일 경우의 항복지진계수를 함께 도시하였다. 산정도표에서 음영 처리된 영역은 역학적으로 엄밀한 항복지진계수의 상·하한계 범위를 나타낸다.

그림에서 보듯이 한계평형해석에 의해 제안된 항복지진계수는 사면경사가 낮을 경우 상한값에 근사하게 나타났으며 사면경사가 증가할수록 하한값에 근사하게 나타났다. 상한계는 파괴시점의 최소값을 나타내기 때문에 한계평형해석에 의해 제안된 항복지진계수를 간편내진설계에 적용할 경우 불안전측면 비탈면 설계가 우려된다. 그러나 하한계에 근사한 항복지진계수는 파괴직전 또는 파괴시를 의미하므로 안전측 비탈면 설계가 가능할 것으로 판단된다.

3.3 영구변위 산정 및 비교

본 절에서는 항복지진계수가 토사면의 영구변위 산정에 미치는 영향을 평가하였다. 영구변위 산정은 비탈면 설계 지침(건설교통부, 2006)에서 제안하고 있는 Newmark 강성변위법을 적용하였으며 지진자료는 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파를 적용하였다. Hachinohe 지진파는 지진시 장주기 성분이 우세하고 Ofunato 지진파는 단주기성분이 우세한 지진파로 국내 내진설계시 장·단주기 해석에 가장 많이 이용되는 자료이다.

본 절에서는 해석법에 따른 영구변위를 비교하기 위

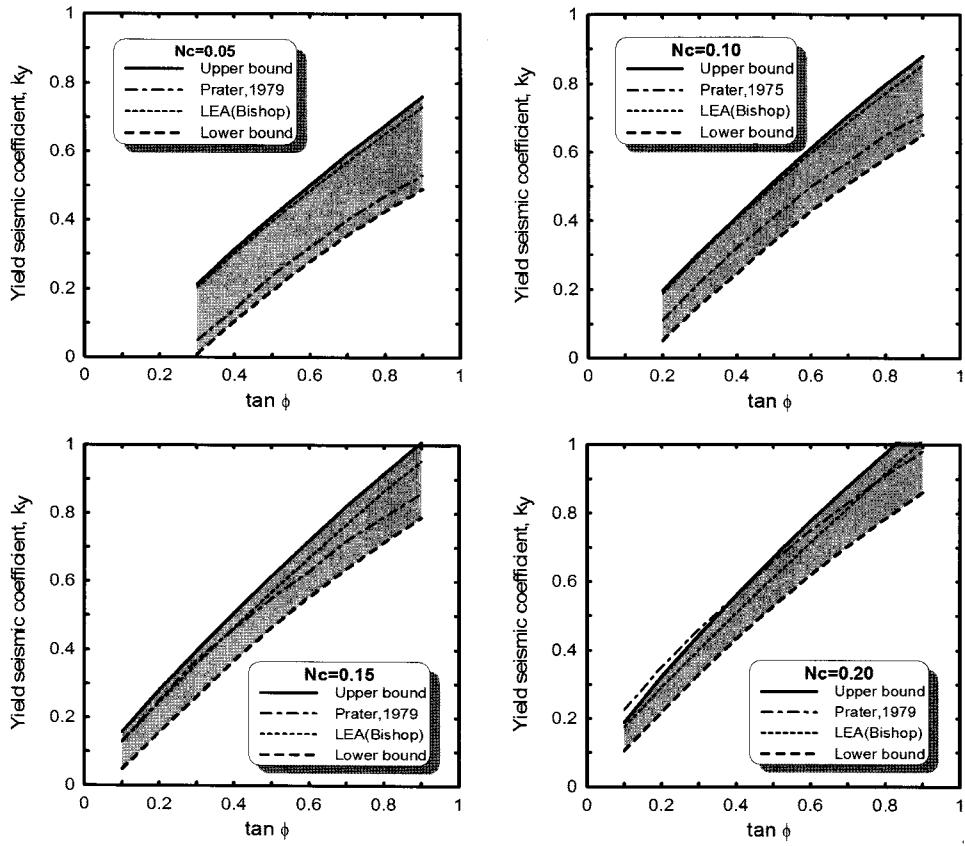
$$\text{사면경사}(\beta) = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$$

$$\text{안정수 } N_c = \frac{c}{\gamma H} = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$$

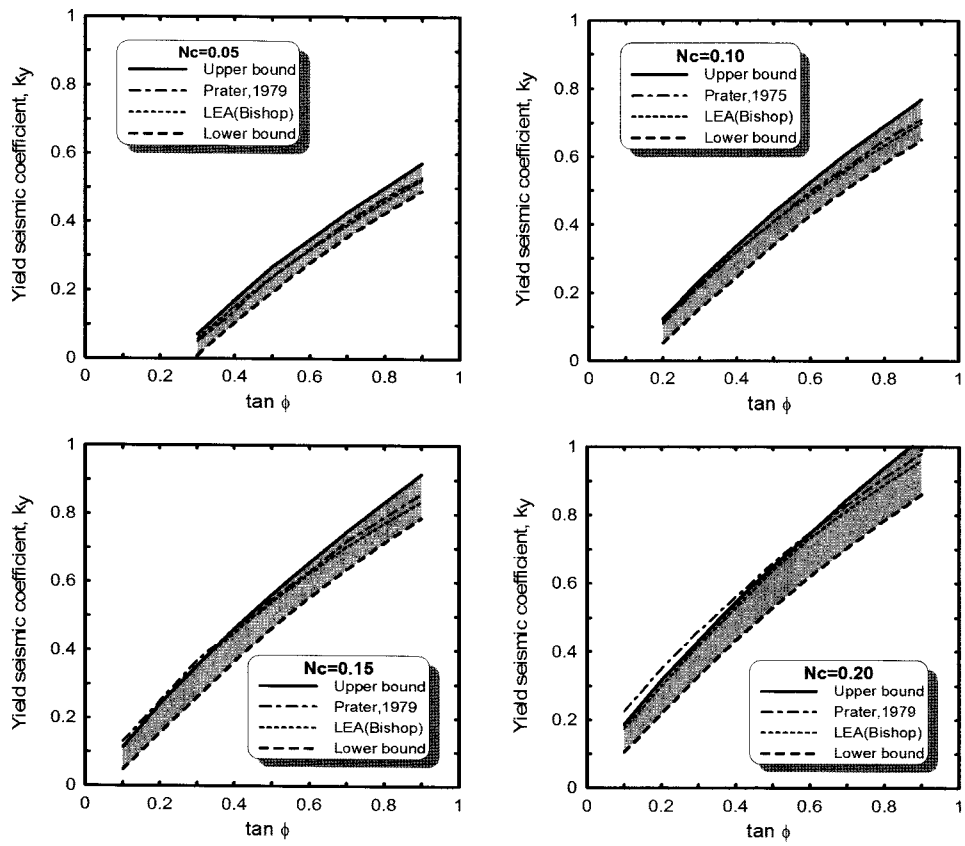
$$\text{마찰계수}(\tan \phi) = 0.1 \sim 0.9; \phi = \text{내부마찰각}$$

$$\text{단위중량}(\gamma) = 17.65 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{점착력}(c) = 9.81 \text{ kN/m}^2$$

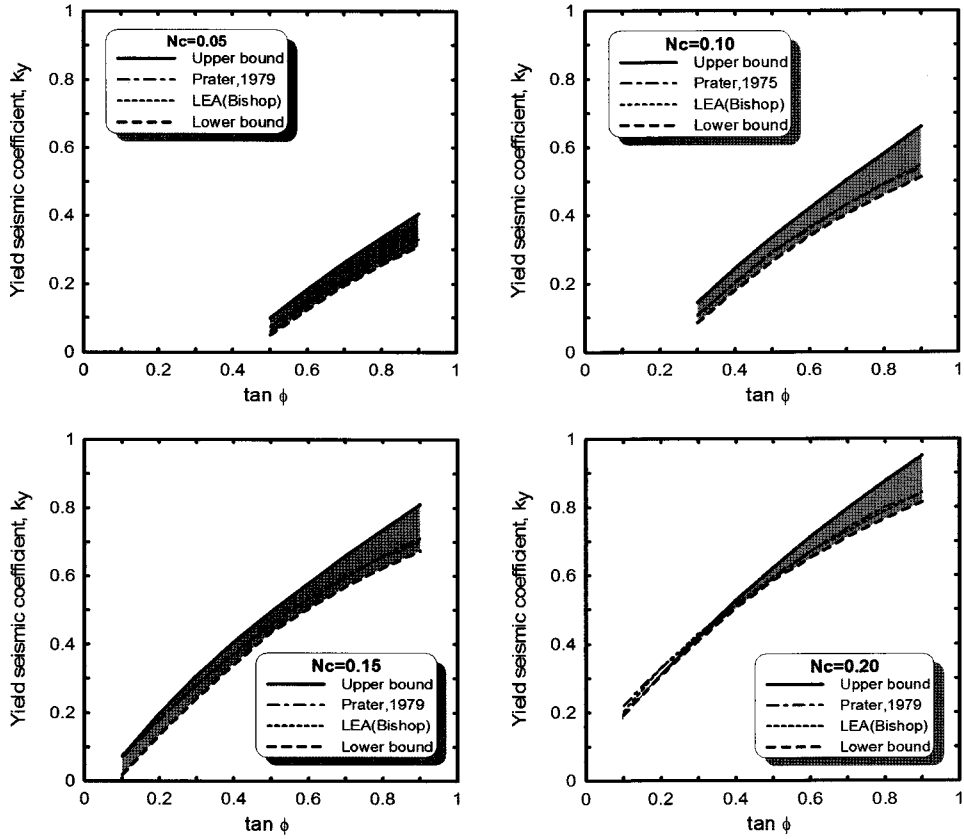


(a) 사면경사 15° 경우

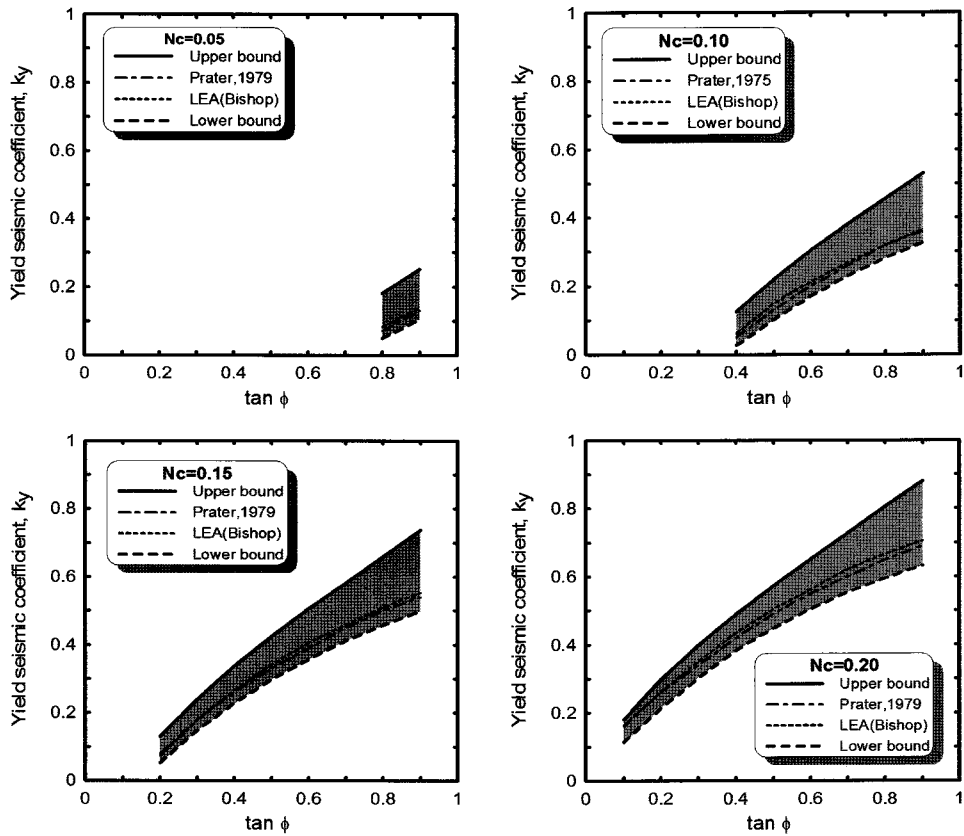


(b) 사면경사 30° 경우

그림 7. 사면경사와 안정수에 따른 항복지진계수 산정도표(계속)



(c) 사면경사 45° 경우



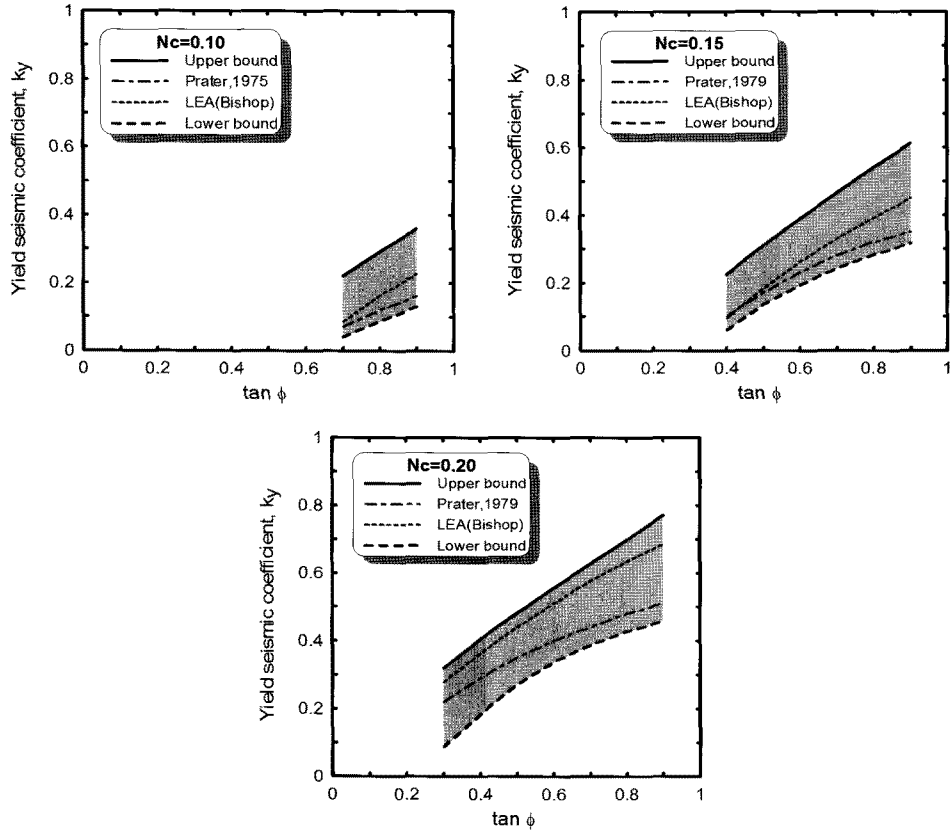
(d) 사면경사 60° 경우

그림 8. 사면경사와 안정수에 따른 항복지진계수 산정도표(계속)

해 그림 8의 사면경사(β)= 60° , 안정수(N_c)= 0.15 , 마찰계수($\tan \phi$)= 0.2 일 경우의 항복지진계수를 적용하였다. 또한 도로구조물의 내진등급 1등급, 재현주기 1000년 일 경우의 최대지반가속도 $0.154g$ 를 적용하였으며, 각각의 시간-지진가속도 이력은 그림 10과 같다.

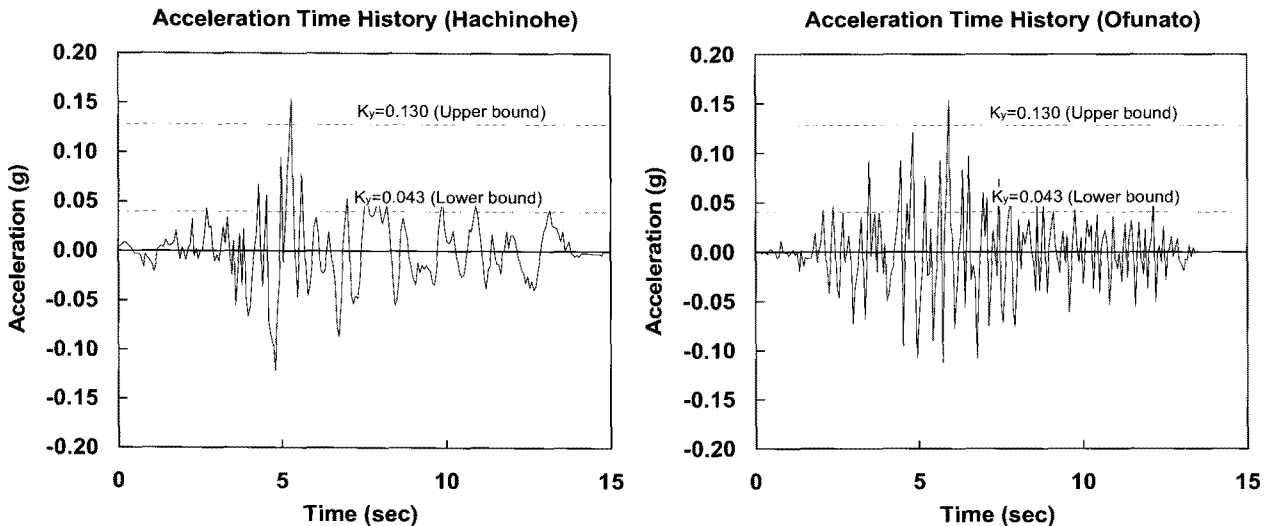
앞 절에서의 해석법에 따라 산정된 항복지진계수를 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파에 적용하여 영구변위를 산정하였으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다.

한계해석에 의한 산정된 항복지진계수를 Hachinohe 지진파에 적용할 경우, 영구변위는 상계해석 $14.5mm$, 하



(e) 사면경사 75° 경우

그림 9. 사면경사와 안정수에 따른 항복지진계수 산정도표



(a) Hachinohe 지진파($a_{max}=0.154g$)

(b) Ofunato 지진파($a_{max}=0.154g$)

그림 10. 장·단주기성분에 따른 지진파

표 2. 해석법에 따른 영구변위 비교

해석법		항복지진계수 (k_y)	영구변위(mm)	
			Hachinohe 지진파	Ofunato 지진파
한계평형해석	Ordinary법	0.076	78.5	10.2
	Bishop법	0.074	83.5	10.9
	Spencer법	0.077	76.1	97.4
	Prater(1979)	0.080	69.3	86.8
한계해석	상계해석	0.130	14.5	11.2
	하계해석	0.043	111.5	140.8

계해석 111.5mm로 산정되었으며 한계평형해석에 의해 산정된 항복지진계수를 적용할 경우 69.3mm~83.5mm로 나타났다. 그리고 Ofunato 지진파에 적용할 경우, 영구변위는 상계해석 11.2mm, 하계해석 140.8mm로 산정되었으며 한계평형해석은 10.2mm~97.4mm로 산정되었다.

Hachinohe 지진파의 경우 한계평형법은 하계해에 근사하게 산정되어 안전측 설계가 예상되며, Ofunato 지진파의 경우 Ordinary법과 Bishop법은 상계해에 근사하게 산정되어 과소평가가 우려되고 Spencer법과 Prater의 경우 하계해에 근사하여 안전측 설계가 예상된다.

4. 결론

본 연구는 수평방향의 지진력을 고려하여 항복지진계수의 상·하한값의 범위를 산정할 수 있는 수치한계해석 프로그램을 개발하였다. 또한 다양한 해석조건의 균질단순사면에 대해 역학적으로 엄밀한 항복지진계수를 간편하게 산정할 수 있는 도표를 제안하였다. 수치한계해석에 의해 제안된 항복지진계수의 적용성을 검증하기 위해 한계평형해석법에 의해 산정된 항복지진계수와 비교·분석하였다. 또한 제안된 항복지진계수가 비탈면 안정성 평가에 미치는 영향을 비교하기 위해 Newmark 활동블록법으로 영구변위를 산정하였으며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지진시 토사면에 작용하는 지진하중에 대한 항복지진계수를 최적화 대상변수로 고려한 수치한계해석 프로그램을 개발하였다. 수치한계해석에 의해 산정된 항복지진계수는 한계평형법에 의해 기 제안된 항복지진계수의 역학적 엄밀성을 판단하는데 이용될 수 있다.
- (2) 수치한계해석으로 산정된 항복지진계수의 적용성

을 평가하기 위해 한계평형해석법(Ordinary법, Bishop법, Spencer법)에 의해 산정된 항복지진계수(안전율=1.0)와 비교·분석하였다. 또한 한계평형해석 결과인 예상파괴면과 한계해석의 소성도 및 변위도는 잘 부합하는 것을 확인하였으며, 수치한계해석으로 산정된 항복지진계수의 상·하한 범위는 적절한 것으로 판단된다.

- (3) 실무에서 간편하게 사용할 수 있는 항복지진계수 산정도표를 제안하기 위해 다양한 조건의 균질단순사면에 대한 해석을 수행하였다. 한계평형해석에 의해 제안된 항복지진계수는 사면경사가 낮을 경우 상한값에 근사하기 때문에 불안전측 설계가 예상되며 사면경사가 증가할수록 하한값에 근사하기 때문에 안전측 비탈면 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 또한, Newmark 활동블록법을 이용하여 영구변위를 산정한 결과, 상한계에 근사한 Bishop법과 Spencer법은 영구변위를 과소평가할 우려가 있으며 Ordinary법과 Prater(1975)의 제안값은 파괴직전의 상태를 의미하는 하한값에 근사하므로 안전측의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 세종대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2006), *건설공사 비탈면 설계기준*, pp.405-440.
2. Chang, C. J., Chen, W. F. and Yao, J. T. P. (1984), "Seismic Displacement in slopes by Limit Analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.7, pp.860-874.
3. Fmakin, A. G. and Chang, F. K. (1977), "Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis", *Miscellaneous Paper S-71-17, Soil and pavement Laboratory, U.S.*

- Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
4. Goodman, R. E. and Seed, H. B. (1966), "Earthquake-induced displacements in sand embankments", *J. Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.92, No.2, pp.125-146.
 5. Kim, J. M. (1998), "Limit Analysis of Soil Slope Stability Using Finite Element and Linear Programming", Ph. D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.A.
 6. Kleeman, P. W. and Sloan, S. W. (1995), "Upper Bound Limit Analysis using Discontinuous Velocity Fields", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.127, pp.293-314.
 7. Kutter, B. L. (1984), "Earthquake deformation of centrifuge model banks", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.110, No.12, pp.1697-1714.
 8. Newmark, N. M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-159.
 9. 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.
 10. Randall, W. J. (1993), "Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's sliding Block Analysis", *Transportation Research Record* 1411, pp.9-17.
 11. Sarma, S. K. (1981), "Seismic displacement analysis of earth dams", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.107, No.12, pp.1735-1739.
 12. Sawada, T., Nomachi, S. G. and Chen, W. F. (1994), "Stability analysis and model test for seismic displacement of a slope", *Prefailure Deformation of Geomaterials*, Shibuya, Mitachi and Miura (eds), Balkema, pp.665-671.
 13. Sloan, S. W. (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.
 14. Sloan, S. W. (1989), "Upper Bound Limit Analysis using finite Elements and Linear Programming", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.13, pp.263-282.
 15. Wilson, R. C. and Keefer, D. K. (1983), "Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California", *Earthquake Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.73, No.3, pp.863-877.

(접수일자 2010. 2. 16, 심사완료일 2010. 3. 24)