

지진을 고려한 비탈면 설계 방안

Earthquake Resistant Design Methods on the Slopes

김 주 형* / 이 용 수** / 조 삼 덕***
Kim, Ju Hyong / Lee, Yong Su / Cho, Sam Deok

Abstract

A significant development has been made on earthquake resistant designs on many structures since the Korean government has begun modern earthquake hazard reduction programs after recognizing potential disastrous consequences of seismic events following the Kobe earthquake in 1995. However, some structures such as slope structures still haven't get ready for their own seismic design guidelines in Korea. Therefore, only a few organizations of Korea adopt seismic design for slopes relying on designers' judgments at present.

This paper introduces domestic and foreign research activities on seismic slope stability and an idea of Korean earthquake resistant design method for slopes including alternatives of earthquake resistant design application according to designers' judgment considering construction budget, importance, restoration and so on. Afterwards, seismic data accumulation on slope stability of Korea is necessary to induce a more definite Korean earthquake resistant design method.

key words : slope design, aseismic design, earthquake

요 지

1995년 일본 고베 대지진 발생 이후 한국정부는 국내 시설물에 대한 내진설계분야 및 지진피해 최소화 방안에 대한 연구를 지속적으로 진행해왔으며, 현재까지 괄목할 만한 많은 성과를 내고 있다. 그렇지만, 국내 비탈면과 같은 구조물들은 여전히 내진설계가 적용되지 않고 있으며, 일부 기관에서만 설계자의 판단에 의해 비탈면 내진설계가 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내의 비탈면 내진설계에 대한 연구 결과를 소개하고 국내비탈면에 적용할 수 있는 내진설계 방안을 제시하였다. 비탈면 내진설계 적용범위는 경제성, 비탈면의 중요도 및 복구의 용이성 등을 고려하여 공학자가 내진설계 여부를 판단하도록 하는 것이 바람직하며, 우리나라 비탈면의 내진설계 적용 범위 및 관련 기준도 지진관련 자료를 축적하여 향후 단계적으로 정립하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 비탈면 설계, 내진설계, 지진

1. 서 론

최근 동남아 일대에 발생한 큰 지진으로 인해 인명 파 재산에 막대한 피해를 입었다. 국내에서도 작거나 중간규모의 지진이 빈번하게 발생하고 있는데, 최근 발생한 지진 관측 결과를 보면 한반도에서 2000년에 29회, 2001년도에 43회, 2002년도에 49회, 2003년도에 38

회의 지진이 발생한 것으로 보고가 되었으며, 2004년도에도 크고 작은 지진이 42회나 발생한 것으로 보고되고 있다(기상청 <http://www.kma.go.kr>). 특히, 2004년 5월 29일 19시경 경북 울진 동쪽 약 80km 해역에서는 규모 5.2의 지진이 발생하여 경북 울진에서 건물이 심하게 흔들리는 등 전국적으로 진동이 감지되었으며, 이 지진은 1978년 기상청에서 계기지진을 관측한 이후 한

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (e-mail : haitink@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

*** 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

반도 남한에서 일어난 지진 중 가장 큰 지진으로 확인된 바 있다. 최근 한반도 및 주변 지역에서 발생하는 큰 지진 발생으로 미루어보아 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아닌 것이 증명되고 있다. 1995년 일본 고베(Kobe) 대지진 이후 국내에서도 많은 구조물의 내진설계방법에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 아직 내진설계방법이 마련되어 있지 않거나 적용하기가 애매한 구조물들이 많이 있는데 비탈면이 대표적이라 할 수 있다. 실제로 지진시의 비탈면에 대한 안정성 평가 방법에 대해서는 명확하지 않은 점이 많고, 내진설계를 명확하게 규정할 수 없다는 기술적인 제약 및 시공시 경제성 문제 등이 있는 것도 사실이다. 본 연구에서는 국내외의 현재 비탈면 내진 설계 현황과 이를 바탕으로 한 내진 설계 순서도를 제안하였다.

2. 국내외 비탈면 내진설계 기준 현황

지진에 의한 비탈면의 파괴 메카니즘은 지진하중으로 인한 토력의 재분포, 지반의 간극수압 변화로 인한 액상화 및 지반의 전단강도 변화로 인한 파괴로 요약할 수 있다. 이 중 액상화로 인한 파괴는 Seed 등(1983)이 제안한 기존의 액상화 평가 방법을 이용하여 비탈면 파괴를 예측할 수 있으며, 지반의 전단강도 변화에 의한 비탈면 파괴는 지진시의 반복전단변형 크기를 고려한 전응력해석을 적용할 수 있으나 현재 이에 대한 적용사례가 그리 많은 편은 아니다.

2.1 국외 현황

2.1.1 일본

일본도로협회에서는 “道路土工 のり面工・斜面 安定工 指針”(1999)에 도로 비탈면의 내진 설계 방법을 수록하고 있는데, 이 지침서에서는 지진과 비탈면 붕괴, 낙석, 토석류 발생과의 상관도 예측이 불명확하며,

지진에 대한 비탈면의 안정성에 대해 아직 해명되지 않은 점이 많고, 내진 설계를 명확하게 규정할 수 없다는 제약이 있다고 언급하고 있다.

일본도로협회(1988)에서는 다른 기관과는 달리 지진하중에 대한 도로 주변 절토 비탈면과 성토 비탈면을 분리하여 내진평가를 수행하고 있다. 절토 비탈면은 성토 비탈면과 같이 풍화도가 높지 않고 촘촘하게 절리가 발달되지 않은 경우에는 가상파괴면을 간단히 정의하기 어려워 일반적인 지진해석 방법과 기준을 제시할 수 없기 때문에 표 1에 나타난 것과 같이 비탈면 높이, 비탈면 각, 오버행(overhang), 지질, 풍화된 토층두께, 물의 흐름, 낙석, 비탈면의 변형, 낙석으로 인한 교통문제, 비탈면의 절토 및 성토 정도 그리고 옹벽의 안정성 등의 12개 항목에 대한 안정성 평가 방법을 점수화 하여 표 2에 제시된 것과 같은 판정표를 이용하여 내진 안정성을 평가하고 있다. 일반적으로 성토 비탈면에 대해서는 식(1)과 같이 지진 하중에 대한 원호 활동면을 가정하여 안전율을 산정하는 등가정적해석방법을 사용하도록 하고 있으며, 최근에는 잔류강도를 고려한 탄소성 유한요소법을 상세 검토 방법으로 이용할 수 있도록 제시하고 있다. 지진시 성토 비탈면에 대한 최소 안전율은 1.0 이상이 되도록 설계하고, 지진과 호우가 중복되는 일은 많지 않기 때문에 지진시에는 호우로 인한 침투수를 고려하지 않는 경우가 일반적이다.

$$F_s = \frac{\Sigma(\tau_f \cdot l)}{\Sigma(W \cdot \sin\alpha + \frac{h}{r} \cdot k_h \cdot W)} \quad (1)$$

여기서, F_s : 안전율, τ_f : 전응력으로 나타낸 흙의 동적강도 (kN/m^2 (tf/m^2)) r : 활동원의 반경 (m), l : 절편호의 길이 (m), W : 절편의 중량 (kN/m (tf/m)),

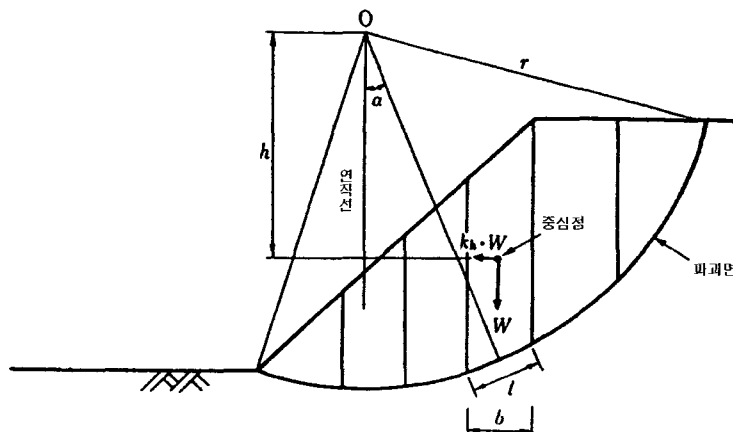


그림 1. 원호 파괴면을 이용한 지진시 안정성 평가법

표 1. 절토 비탈면의 안정성 평가(일본도로협회,1988)

항목	범주	등급	항목	범주	등급
(1) 비탈면높이 (m)	$50m \leq H$	10	(7) 낙석 횟수	1년에 1회 이상	5
	$30m \leq H < 50m$	8		1년에 1회 이하	3
	$10m \leq H < 30m$	7		없음	0
	$H < 10m$	3			
(2) 비탈면각 (a)	$1:0.6 \leq a$	7	(8) 비탈면의 변형	변형	I
	$1:1.0 \leq a < 1:0.6$	4		변형 없음	III
	$a < 1:1.0$	1			
(3) 오버행 (overhang)	옹벽이 없음	7	(9) 옹벽의 변형	변형	I
	옹벽이 있음	4		변형 없음	III
	오버행 없음	0			
(4) 지질	불안정한 상태의 돌 존재	10	(10) 낙석으로 인한 교통문제	유발 유발 안함	I III
	사면에 많은 돌 존재	7			
	매우 풍화된암	6			
	자갈이 많은 흙	5			
	풍화암	4			
	크랙이 있는 암	4			
	모래	4			
	점토	1			
경암	0				
(5) 풍화된 토층 두께	0.5m 이상	3	(11) 절토 및 성토 비탈면	많은 절토 또는 성토	I
	0.5m 이하	0		적은 절토 또는 성토	II
(6) 물의 흐름	흐름	2	(12) 옹벽의 안정성	없음	III
	흐름없음	0		불안정	I
				벽체 안정	II
				매우 안정	III

표 2. 안정성 평가

(a) 옹벽이 없는 경우 (1단계)

(1)~(7) 값의 합	13 이하	14~23	24 이상
(8)~(11) 합			
Class I ≥ 1	(A)	(A)	(A)
1개의 Class I, 나머지는 Class III	(B)	(A)	(A)
모두 Class III	(C)	(B)	(A)

(b) 옹벽이 있는 경우 (2단계)

(1)~(7) 값의 합	13 이하	14~23	24 이상
(8)~(11) 합			
Class I ≥ 1	(A)	(A)	(A)
1개의 Class I, 나머지는 Class III	(B)	(A)	(A)
모두 Class III	(C)	(B)	(A)

(A) 비탈면 파괴위험 큼, (B) 비탈면 파괴위험 있음, (C) 비탈면 파괴위험 적음

k_h : 설계수평지진계수 (무차원), a : 각 절편의 활동면의 중점과 활동원의 중심을 잇는 직선과 연직을 이루는 각도, h : 각 분할편의 중심과 활동원 중심과의 연직거리(m)

2.1.2 미국

미국의 도로시설물에 관한 설계관련 기준은 대부분이 연방정부차원 및 각 주의 DOT(Department of Transportation) 차원의 비정부기관 표준을 사용하거나 산업표준(Industry Standards)인 AASHTO 표준을

적용하고 있으며, 추가적으로 각 기관 자체에서 운영하는 설계매뉴얼 및 가이드라인 등을 활용하는 것이 일반적이다. 모든 설계관련 업무는 모든 법률들과 연방정부의 규정, 각 주별 규정 및 적용가능한 지역 코드 그리고 지역 법령들을 선택적으로 따르고 있다. 비탈면의 내진평가방법은 FHWA와 ASCE에서 제안한 것이 대표적이다.

가. FHWA (Federal Highway Administration)

Federal Highway Administration에서는 도로 비탈면의 내진평가방법으로 등가정적해석방법과 변위평가방법을 통합한 해석방법을 사용하도록 제안하고 있다. 이 통합 해석 방법은 기본적으로 정적인 해석방법을 이용한 비탈면 해석 모델을 기본으로 하고 있다. 이 방법은 먼저, Hynes와 Franklin의 연구(1984)를 근거로 하여 최소 안전율 1.0에 대한 지진계수 k_h 를 산정하는데, 만약 약 30cm의 영구 변형을 허용한다면 지진계수 k_h 는 $0.5 \cdot a_{max}/g$ 로 나타낼 수 있다. 이 때, a_{max} 는 지표면의 최대가속도를 의미한다. 지반응답해석을 실시하여 파괴토체에 작용하는 최대평균가속도를 구한 경우나 자연 또는 절토 비탈면과 같이 증폭효과가 최소로 발생하는 경우에 지진계수 k_h 는 $0.17 \cdot a_{max}/g$ 의 식을 이용하여 등가정적해석을 수행한다. 만약, 최소안전율(F_{Smin})이 1.0 이상이면 지진에 대해 안정한 것으로 간주한다. 그러나 비탈면의 등가정적해석에서 안전율이 1.0 미만으로 산정되면 변위평가방법으로 Newmark 강성블록해석(1965)을 수행한다. 이 해석방법은 먼저 안전율이 1.0일 때의 항복가속도 k_y 를 시행착오법으로 산정하고, 이를 이용하여 지진으로 인한 비탈면의 영구변위를 산정한다. 영구변위는 간단한 설계도표를 이용하거나 평균가속도 이상의 항복 가속도를 두 번 적분하여 구하는 시간이력해석을 수행하여 구한다. 산정한 영구변위는 허용최대변위 d_{max} 와 비교하여 비탈면의 내진 안전성을 평가하도록 하고 있다.

이와 더불어 지반의 액상화로 인한 유동파괴 가능성은 액상화 가능성이 있는 지역의 잔류전단강도를 극한 평형해석법에 적용하여 해석하는데, 액상화 해석의 경우에는 지진계수를 영(0)으로 하고 해석하도록 제안하

고 있다(Marcuson 등, 1990). 만약, 액상화 발생 가능성이 있는 지층에서 잔류전단강도를 SPT로 구한 최소 N값 (또는 CPT 콘선단저항력)을 이용하여 보수적으로 평가하는 경우 안전율을 1.1로 사용하도록 하고 있다. Hynes와 Franklin(1984)이 제안한 지진발생지역의 비탈면 안정성 평가 방법은 표 3에 제시된 것과 같다.

나. American Society of Civil Engineers (ASCE)

California Department of Conservation, Division of Mines and Geology에서는 지진에 의한 피해를 감소시키기 위해 1997년에 캘리포니아 지진재해도 평가 및 대책 수립을 위한 법령인 Special Publication(SP) 117을 발간하였다. 이 후 ASCE의 로스엔젤레스 지부 소속의 여러 연구자들이 위원회를 구성해 연구 및 토의를 거쳐 "Recommended Procedure for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California"(2002)가 작성되었는데, 이 자료는 비탈면의 내진해석에 대한 지침서의 개념으로 작성된 것이 아니고 단지 검증되지 않은 진보한 기술을 사용하여 안전한 내진성능평가를 수행하는데 있다고 밝히고 있다. 여기에서 제안하고 있는 비탈면에 대한 내진 설계방법은 다음과 같다.

- ① 시추조사와 샘플링 또는 CPT 등의 관입시험을 수행하여 현장의 지형과 지층 특성을 파악하고 흙의 동적물성치를 평가한다.
- ② 해석 대상 지반 노두의 최대수평가속도 분석을 475년 주기의 지진에 대해 수행한다.
- ③ 액상화에 대한 위험에 대해 분석을 수행한다. 만약, 흙이 액상화가 발생한다면 액상화후의 잔류강도를 흙의 강도로 사용한다.
- ④ 비탈면의 지진거동에 대한 적합성 해석(Screening Analysis)을 수행한다.
- ⑤ 적합성 해석(Screening Analysis)에서 만족할만한 결과를 얻지 못한 지역의 경우에는 지속시간의 중간값과 (\bar{M}) 그리고 (\bar{r})에 관련한 평균주기를 평가한다.

표 3. k_y 와 a_{max} 를 이용한 비탈면 안정성 판정(Hynes와 Franklin, 1984)

상태	판정
$k_y < 1/2 a_{max}$	설계 지진에 대해 안정
$1/2 A_{peak} < k_y < a_{max}$	경미 또는 주요 피해가 예상
$k_y < a_{max}$	전체적인 피해가 예상, 비탈면 안정해석시 동해석 필요

⑥ 적합성 해석(Screening Analysis)에서 만족할만한 결과를 얻지 못하는 현장에 대해서는 비탈면 변위해석을 수행한다.

여기서 말하는 적합성 해석(Screening Analysis)이란 지진으로 인한 비탈면 파괴 발생 가능성 여부를 1차적으로 판단하는 것을 목적으로 하는 평가방법으로, 등가정적해석법을 적합성 해석방법으로 이용하도록 제안하고 있다. 적합성 해석을 통과한 비탈면에 대해서는 더 이상 내진에 대한 해석을 수행하지 않는 반면에 적합성 해석을 통과하지 못한 경우에는 추가적으로 변위해석을 정량적으로 수행하도록 하도록 규정되어 있다. 변위해석방법으로는 명확한 산정방법이 없어 세 가지 방법을 사용하도록 제안하고 있는데, $u/(k_{max} \cdot D_{5-95})$ 로 정규화된 변위와 k_y/k_{max} 관계로부터 비탈면 변위를 산정하는 방법과 Makdisi와 Seed(1984)가 제안한 변위, u 와 k_y/k_{max} 와 관계를 이용한 방법 그리고 Newmark 강성블록 해석법으로 시간 이력에 대해 가속도를 두 번 적분하여 변위를 산정하는 방법이 그것이다. 여기서 D_{5-95} 는 Abrahamson과 Silva(1996)이 제안한 중간지속기간이다. 또한, 변위해석방법과 더불어 비탈면의 위험정도를 판단할 수 있는 허용변위의 범위 결정이 중요한데, 구조물의 피해 정도에 대한 관련 자료를 축적하여 허용 변위를 결정해야 하지만, 불행히도 이와 같은 관련 자료는 거의 없다. 따라서, 허용범위는 공학자의 판단에 의해 결정되는 것이 현실이다. 단, 대상지반에 따라 허용 변위량을 5cm~15cm로 규정하는 경우도 있다.

2.1.3 유럽

현재 유럽의 건설분야 기준은 structural eurocode로 규정하고 있다. 이 기준은 기본적으로 코드를 구성하는 다양한 세부내용들에 관한 유럽표준 (EN : European Standards)을 규격화 하고자 하는 것이며, 현재의 적용단계는 EN(European Standard) 단계보다는 하위인 ENV(European Pre-standards) 단계로 설정되어 있는 상태이다. 현재 ENV상태는 설계단계에서 현재 활용되는 국가별 코드가 여전히 사용되는 것을 의미한다. Eurocode는 건설산업의 다양한 분야에서 설계자, 시공자, 교육자를 포함한 모든 기술자들을 위해 작성된 기술 문서로 건설이나 설계조건의 특별한 형식들은 상세하게 다루지 않고 있으며, 특별한 형식에 대해서는 설계자가 추가적인 전문 검토를 수행하도록 하고 있다. 이 중 지진에 대한 내용을 포함하고 있는 Eurocode 8(1996)에서는 지진시 비탈면의 극한상태를

구조적으로나 기능면에서 토체의 변위가 허용치보다 큰 경우로 정의하고 있다. 흩비탈면의 내진설계응답은 등가정적해석법과 유한요소 또는 강체블럭모델 방법과 같은 동해석 방법을 사용하도록 제안하고 있다. Eurocode에서는 비탈면에 대한 내진 해석시 다음과 같은 사항들을 반드시 고려하여 해석하도록 제안하였다.

- ① 흩 거동의 역학적 모델은 변형률 레벨의 증가에 따른 연화현상과 반복하중으로 인한 간극수압 증가를 고려한 것이어야 한다.
- ② 지표면과 지층이 매우 급격하게 변화하지 않는 지역에 대해서는 등가정적해석방법을 이용하여 비탈면의 안전율을 평가할 수 있다.
- ③ 등가정적해석에서 사용하는 설계지진관성력은 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현된다.

$$F_H = 0.5a W \quad (\text{횡방향}) \quad (2)$$

$$F_V = \pm 0.5F_H \quad (\text{연직방향}) \quad (3)$$

여기서, a : 설계지반가속도비 (설계가속도 a_g 와 중력가속도 g 비), W : 파괴토체 중량

- ④ 사용성에 대한 극한상태는 마찰력을 고려한 강성블럭이 비탈면 위에서 미끄러지는 단순 동적 모델을 이용하여 미끄러지는 질량의 영구 변위를 산정함으로써 확인할 수 있다. 이 경우에는 반드시 시간이력을 고려하여야 하며 설계 가속도의 감소는 고려하지 않는다.
- ⑤ 등가정적해석과 같은 단순 해석방법은 높은 간극수압이 발생하거나 반복하중으로 인해 심각한 강성 저하를 나타내는 흩에는 적용할 수 없다.
- ⑥ 간극수압 증가는 적절한 시험으로 평가해야 하는데, 초기 설계시 간극수압 증가에 대한 시험 자료가 없는 경우에는 경험식을 이용할 수도 있다.

2.2 국내 현황

2.2.1 대한주택공사(1999)

대한주택공사에서는 비탈면의 내진설계 방법을 설계자의 판단에 의해 결정하도록 하며, 내진 2등급 붕괴방지 수준으로 설계하는 것을 원칙으로 정하고 있다. 다만, 설계자의 판단으로 비탈면의 변위해석이 필요할 때에는 변위해석을 수행하는 것으로 규정하고 있다. 비탈면의 내진해석은 우선 정적하중하에서 설계기준을

만족하는 것에 대해서만 실시하고, 중요 도로, 매립지 반 그리고 구조물 및 시설물과 인접된 비탈면 등 비탈면 파괴로 인하여 인명 및 재산에 큰 피해가 발생되리라 예상되는 곳에 대하여 실시하도록 하고 있다. 대한주택공사에서는 동적 비탈면 안정기준으로 우선 모든 내진설계 적용 비탈면은 정적설계기준을 만족해야 하며 액상화에 대해 안전하도록 규정하고 있다. 또한, 등가정적해석시 비탈면의 안전율은 1.1 이상으로 규정하고 있다. 대한주택공사에서는 비탈면의 내진해석방법으로 등가정적해석법(pseudo-static analysis), Newmark의 강성블록해석법, 수치해석법 그리고 액상화에 따른 유동파괴해석법 등의 여러 해석방법을 나열식으로 제안하고 있으며, 각 해석방법에 대한 유기적인 사용 체계를 갖추고 있지는 않다.

2.2.2 한국토지공사(2001)

한국토지공사에서도 지진 하중으로 인한 비탈면 안정 해석 방법으로 지진하중을 파괴토체에 작용하는 등가정적 하중으로 치환하여 안정성을 해석하는 등가정적 해석법과 파괴토체의 변형을 산정하여 안정성을 평가하는 Newmark 강성 블록 해석법을 제안하고 있다. 또한, 비탈면 토체가 액상화 발생 가능성이 있는 포화된 느슨한 사질토로 되어 있는 경우, 추가적으로 액상화 발생 여부를 검토하도록 하고 있다. 비탈면 구조물에 대한 내진 설계 기준에서 구조물의 등급 및 기능수행수준 역시 2등급 붕괴방지 수준으로 규정하고 있다. 암반 비탈면의 경우 풍화도가 높고 절리가 촘촘히 발달된 경우에는 원호파괴를 가정하여 흙 비탈면과 동일

하게 취급할 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 가상 파괴면을 간단히 정의하기 어렵기 때문에 일반적인 지진 해석 방법과 기준을 제시할 수 없다. 다만, 가상 파괴면이 주어지면 가상 파괴토체에 대하여 흙 비탈면과 동일하게 등가정적 하중 개념을 이용하여 지진하중을 고려하도록 하고 있다. 한국토지공사에서도 비탈면의 내진해석방법으로 등가정적해석과 변위해석을 기본 해석 개념으로 사용하고 있으나, 이 방법들을 체계적으로 설계에 적용하도록 하고 있지는 않다.

국내외 비탈면 내진설계방법의 대표적인 방법들을 표 4와 표 5에 요약하였다.

3. 국내 비탈면 내진 설계방법 제안

국내외 비탈면 내진해석 및 설계 방법을 분석한 결과, 대부분 기관에서 참고기술서나 참고매뉴얼 등의 형태로 비탈면 내진설계 방법을 제안하고 있으며, 공학자가 비탈면의 중요도나 복구의 용이성 등을 직접 판단하여 내진설계를 수행하도록 하고 있다. 이를 종합하여 판단하면 국내 비탈면에 대해서는 정적인 비탈면 해석을 기본으로 수행하고, 정적 안전율을 만족하지만 지진에 의한 비탈면 파괴로 인해 인적 물적 손실이 막대하여 복구가 어려운 일부 중요 비탈면에 한해 토목 및 재해 관련 전문가 등이 경제성 평가, 도로의 중요도 및 위험도 판단을 위한 다양한 자료 평가 등의 예비평가를 통해 대상 비탈면의 내진설계 필요 여부를 신중히 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 특히, 국내 기관에서 제안하고 있는 비탈면의 내진해석 방법은 나열식으로만 제안되어 있어, 실무자가 체계적

표 4. 국내 비탈면 설계기준

단체 내용	대한주택공사	한국토지공사
적용범위	대한주택공사에서 발주하는 비탈면	한국토지공사에서 발주하는 비탈면
기준명	지침	지침
절·성토 구분	없음	없음
설계방법	등가정적해석, Newmark 강성블록해석 수치해석, 유동파괴해석법	등가정적해석, Newmark 강성블록해석
수평지진계수	$0.5 \times a_{max} / g$	$0.5 \times a_{max} / g$
변위계산	$d_{max} = \frac{v_{max}^2}{2 a_y} \frac{a_{max}}{a_y}$ 수치해석을 이용한 변위계산	$d_{max} = \frac{v_{max}^2}{2 a_y} \frac{a_{max}}{a_y}$
안전률	1.1	1.1 정적안전해석 안전율의 75%
발행년월	1999년	2001년
액상화고려	고려	고려

표 5. 국외 비탈면 설계기준

단체 내용	일본도로협회	FHWA	NAVFAC	Eurocode	ASCE
적용범위	도로 비탈면	도로 비탈면	해군시설에 관련된 비탈면	일반 비탈면	일반 비탈면
기준명	지침 (참고지침)	Design Guidance (참고기술서)	Design Manual (설계 요령)	Pre-standard	Recommended Procedure (제안서)
짜기와 쌓기 구분	있음	있음	없음	없음	없음
설계방법	· 등가정적해석 · 유한요소법	· 등가정적해석 · 변위해석	· 등가정적해석 · Newmark 강성블록 해석	· 등가정적해석 · Newmark 강성블록 해석 · 유한요소법	· 등가정적해석 · 변위해석
수평 지진계수 (kh)	· 지진가속도가 120~180 gal 인 경우, : 0.08~0.12 · 지진가속도가 500~800 gal인 경우, : 0.16~0.24	· 영구변위 1m 허용시 $0.5 \times a_{max} / g$ (성토) · 지진응답해석시 $0.17 \times a_{max} / g$ (성토) · 자연비탈면 또는 깎기 $0.17 \times a_{max} / g$ 0.1~0.2(미국) 0.15~0.25(일본)	$k_{ch} = (F_{30} - 1) \tan \theta$	$0.5 \times a_{max} / g$	· 지진 규모 (M) 와 진원지까지의 거 리(r)에 따라 변 화하는 수평지진 계수 사용
변위계산	· 상세설계시에는 유한 요소법을 사용할 수 있다고만 언급	· Newmark 강성블록해 석과 변위와 k_y/k_{max} 관계를 이용한 표 사용	$d = \frac{v_{max}^2}{2gk_{cs}} \cdot \frac{a_{max}}{k_{cs}}$	· 강성블록해석법 또는 유한요소법을 이용할 수 있다고만 언급	· Newmark 강성을 록해석과 변위 - k_y/k_{max} 관계를 이용한 표 사용
안전율	최소 1.0	지진계수 $0.5 \times a_{max} / g$ 를 사용하는 경우 1.0 액상화 고려시 1.1	허용 1.15~1.2	없음	최소 1.0
발행연도	1999년	1997년	1982년	1994년	2002년
액상화	고려	고려	고려하지 않음	고려	고려

여기서, k_{cs} : 극한수평지진계수, θ : 사면각, d : 변위, v_{max} : 최대지반속도,
 a_{max} : 최대지반가속도, g : 중력가속도, k_{cs} : 극한지진계수

으로 비탈면 내진 설계를 수행하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 절에서는 미국 및 일본 등의 여러 기관에서 제안하고 있는 비탈면 내진설계방법을 근거로 하여 체계적인 국내 비탈면 내진설계를 위한 평가 흐름도를 그림 2와 같이 제시하였다.

3.1 설계 기본 사항

지진으로 인해 비탈면이 불안정해지거나 지반의 지내력이 심각하게 감소할 가능성이 있는 지반에 대해서는 붕괴방지 수준의 내진등급을 고려한 비탈면의 내진설계를 수행한다. 이 때, 지진에 의한 비탈면 붕괴시 복구비용과 내진설계 비용에 대한 경제적인 측면도 추가적으로 고려해야 한다. 내진설계 대상 비탈면은 먼저 정적하중하의 설계 기준을 만족해야 한다.

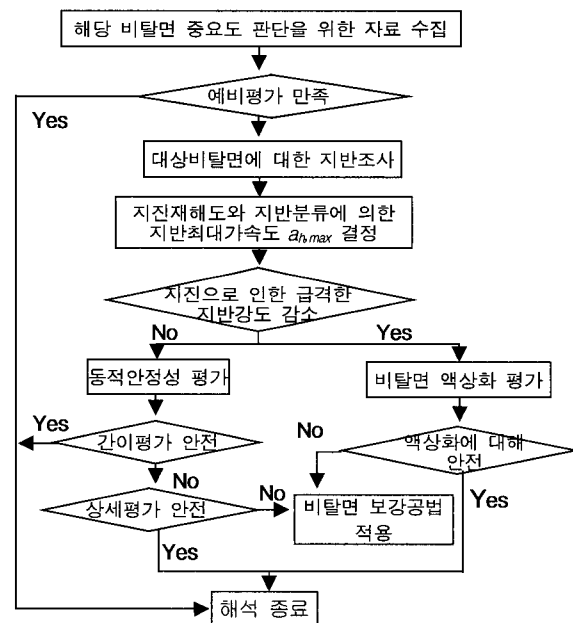


그림 2. 비탈면의 내진해석 및 설계 흐름도

3.2 비탈면의 내진 안정성 검토

비탈면의 내진설계는 해당 위치의 중요도 및 위험도 판단을 위한 자료를 수집하여 예비평가를 먼저 실시하고, 예비평가 결과 내진설계가 필요하다고 판단된 경우에 대해 동적안정성 평가 그리고 액상화 평가를 수행한다. 동적 안정성 평가는 지반 강도가 지진에 의해 급격하게 변하지 않아 액상화의 우려가 없는 경우에 적용하며, 간이평가와 상세평가 단계로 구분하였다. 간이평가에서는 등가정적해석법을 이용하여 비탈면의 안전율을 산정하고, 간이평가 결과가 안전에 대한 요구량에 미치지 못할 경우에는 상세평가를 수행하도록 한다. 상세평가는 지진으로 인해 발생하게 되는 비탈면의 변위를 산정하는 방법으로, 산정한 변위가 설계허용변위량보다 큰 경우에는 비탈면 보강공법을 적용하도록 한다.

비탈면의 액상화 평가는 지진으로 인해 지반강도가 현저하게 감소하는 경우에 적용하는 방법이며, 평가 방법은 구조물 기초설계기준(한국지반공학회, 2002)을 따르도록 한다.

3.3 예비평가

비탈면에 대한 예비평가는 비탈면의 내진해석 수행 여부를 판단하는 것으로 1) 내진 특등급 구조물 등과 같은 중요시설 존재 여부, 2) 우회도로 존재 여부, 3) 지진재해 발생시 복구의 용이성, 4) 차량 소통량, 5) 비상시 피난, 치안, 구조 및 국방에 필요한 구조물인지 여부, 6) 대상 비탈면의 재해 이력, 7) 기존에 수행된 지반조사 결과, 8) 비탈면 건설과 피해 복구에 따른 경제성 등과 같이 직간접적으로 비탈면과 관계된 항목들에 대한 검토가 필요하다. 각 예비평가 항목에 대한 구체적인 평가방법은 해당 위치의 중요도 및 위험도 등에 대한 광범위한 실측 자료를 근거로 제시되어야 하지만, 현재까지 국내에는 이와 같은 자료가 거의 없는 실정이다. 따라서, 예비평가에서는 기본적으로 토목 및 재해 전문가들의 판단으로 평가를 수행한다. 단, 절토 비탈면의 경우에는 일본도로협회(1988)에서 경험적으로 제안한 점수제 평가 방법을 참고하여 예비평가를 수행할 수 있다.

3.4 간이평가

간이평가방법에서는 극한평형법에 근거한 등가정적 해석법을 사용하여 비탈면에 대한 내진해석을 수행한다. 등가정적해석은 지표면에서 지진파의 최대수평가속도의 일부를 파괴토체의 무게에 곱한 하중을 등가정하중으로 치환하여 안정성을 검토하는 방법이다. 지진

에 의하여 파괴토체에 추가로 작용하는 횡방향력은 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있으며, 이 횡방향력을 파괴토체 중심에 작용시켜 활동과피에 대한 안정성을 검토한다. 일정량의 변위를 허용하는 비탈면의 최소 안전율 (FS_{min})은 1.0 이상으로 한다.

3.5 상세평가

상세평가는 간이평가에서 최소 안전율을 만족하지 못하는 비탈면에 대한 허용변위량을 산정하는 방법으로, Newmark의 강성블록해석법과 수치해석법 등의 변위해석법을 이용하도록 한다. 변위해석법에는 Newmark 방법, 항복가속도와 최대가속도 (k_y/k_{max}) 관계를 이용하는 Franklin과 Chang 방법(1977), Makdisi와 Seed 방법(1984) 그리고 Bray와 Rathje 방법(1996) 등의 여러 방법들을 사용할 수 있으며, 이들이 제안한 비탈면의 변위는 하나의 특정 값으로 나타나는 것이 아니라, 여러 조건에 따라 비탈면 변위가 일정 범위로 나타나게 되므로 각 방법의 결과를 종합적으로 검토하여야 한다. 비탈면내에 강도 감소가 크지 않은 경우에는 간단히 식 (4)를 이용하여 변형량을 예측할 수도 있다. 전단강도의 감소는 반복삼축압축시험이나 반복순수전단시험 등을 통하여 확인할 수 있다.

$$d_{max} = \frac{V_{h,max}^2}{2a_y} \frac{a_{h,max}}{a_y} \left(\frac{a_y}{a_{h,max}} > 0.17 \right) \quad (4)$$

여기서, d_{max} : 수평변위

$V_{h,max}$: 지표면 최대수평속도

$a_{h,max}$: 지표면 최대 수평가속도

$a_{y,max}$: 항복가속도

허용변위량은 기본적으로 실제 파괴된 구조물의 피해와 이와 관련된 비탈면 변위와의 관계를 종합해 결정해야 하며 설계자가 경험을 토대로 하여 공학적인 판단에 의해 결정하도록 한다. 참고로 Hynes와 Franklin(1984)의 연구에서는 안전율이 1.0이 될 때 지진계수가 최대가속도의 절반 ($0.5 \cdot a_{max}/g$)에 해당하며 30cm이하의 제한적인 영구변위가 발생하는 것을 기본가정으로 하고 있으며, ASCE에서 발간한 "Recommended Procedure for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California"(2002)에서는 빌딩 등과 같은 단단한 구조물과 비탈면 파괴면이 만나는 경우 5cm 이하, 그렇지 않은 경우에 대해서

는 15cm이하의 허용변위를 제안하고 있다.

3.6 액상화 평가

액상화가 발생하는 비탈면을 해석하는 경우에는 과잉간극수압을 고려한 유효응력강도를 사용하거나, 지진이 종료한 시점에서의 잔류강도를 사용하여 비탈면의 내진해석을 수행한다. 지반의 액상화에 대한 평가 및 대책공법은 구조물 기초설계기준((사)한국지반공학회, 2002)과 구조물 기초설계기준 해설((사)한국지반공학회, 2003)을 따른다.

4. 결론

일본, 미국 그리고 유럽 등의 여러 기관에서 제안한 비탈면 내진 설계 방법을 수집하여 분석한 결과 대부분 참고 지침이나 참고 기술서, 매뉴얼 등의 형태로 설계 방법이 제안되어 있으며 공학자가 판단하여 비탈면 내진설계를 수행하도록 되어 있다. 각 기관들은 현재 수준으로 비탈면 내진평가 방법에는 한계가 있음을 지적하고 있으며, 적용 및 평가기준도 설계자의 경험을 바탕으로 판단하도록 하고 있으며, 특히 국내에서는 비탈면 내진 평가방법이 체계적으로 갖추어져 있지 않은 실정이다. 지진을 고려한 비탈면 설계 실시 여부는 구조물 계획시 경제성 평가 및 유지관리 측면에서 매우 중요한 사항이므로 토목 및 재해 관련 전문가들이 정적안전율을 만족하는 비탈면 중 중요도가 높다고 판단되는 비탈면에 대해 경제성 평가 등의 예비평가를 통해 대상 비탈면의 내진설계 필요 여부를 신중히 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나, 현재 까지 비탈면 내진평가에 대한 많은 자료가 축적되어 있지 않아 비탈면의 내진설계 적용 범위 및 관련 기준을 향후 단계적으로 추가 정립하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

건설교통부 (2003) 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침연구.
 기상청 <http://www.kma.go.kr/>.
 대한주택공사 (1999) 대한주택공사 토목구조물 내진 설계지침.
 한국지반공학회 (2002) 구조물 기초설계기준.
 한국지반공학회 (2003) 구조물 기초설계기준해설.
 한국토지공사 (2001) 단지조성에 따른 시설물의 내진 연구, 내진설계 지침서.

日本道路協會 (1988) 道路震災便覽 (震前對策編).
 日本道路協會 (1999) 道路土工 のり面工・斜面 安定工 指針.
 Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. (1996) Empirical Ground Motion Models, report prepared for Brookhaven National Laboratory, New York, NY, May, pp. 144.
 ASCE Los Angeles Section Geotechnical Group (2002) Recommended Procedure for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California, Southern California Earthquake Center.
 Bray, J.D., Rathje, E.M., Angello, A.J. and Merry, S.M. (1998) Simplified Seismic Design Procedure for Geosynthetic-Lined, Solid-Waste Land fills, Geosynthetic International, Vol. 5, No.1-2, pp. 203-235.
 BSI (1996) Eurocode 8 : Design Provision for Earthquake Resistance of Structures.
 Division of Mines and Geology (1997) Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards in California, Special Publication 117. Department of Conservation, Division of Mines and Geology, California.
 Federal Highway Association (1997) Design Guidance : Geotechnical Earthquake Engineering for Highways, Geotechnical Engineering Circular No. 3, Publication No. FHWA-SA-97-076.
 Franklin, A.G. and Chang, F.K. (1977) Earthquake Resistance of Earth and Rockfill Dams; Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Rigid Block Analysis, Miscellaneous Paper S-71-17, Department of Army, Waterway Station. Vicksburg, Mississippi.
 Hynes, M. E. and Franklin, A.G. (1984) Rationalizing the Seismic Coefficient Method, Miscellaneous paper GL-84-13, U.S. Army Engineer's Waterway Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, pp. 34
 Makdisi, F. I. and Seed, H. B. (1984) Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake induced Deformations, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No. GT6, pp. 565-588.
 Marcuson, W.F.III, Hynes, M.E. and Franklin, A.G. (1990) Evaluation and Use of Residual Strength in

Seismic Safty Analysis Embankments, Earthquake Spectra, Vol.6, No.3, pp. 529-572.

NAVFAC (1982) Design Manual 7.1, Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command.

Newmark, N.M. (1965) Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.

Seed, H., Idriss, I. and Arnago, I. (1983) Evaluation of

Liquefaction Potential Using Field Performance Data, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 109(3), pp. 458-482.

◎ 논문접수일 : 2005년 01월 05일

◎ 심사의뢰일 : 2005년 01월 13일

◎ 심사완료일 : 2005년 02월 21일