

수정진도법에 의한 댐사면 안정해석

Slope Stability Analysis of Filldams by Modified Seismic Intensity Method

신동훈¹⁾, Dong-Hoon Shin, 이종욱²⁾, Jong-Wook Lee

한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation

한국수자원공사 수자원연구소 연구원, Researcher, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : The current slope stability analysis of a filldam is based on the limit equilibrium method, and in calculation of safety factor during earthquake, adopts the seismic intensity method in which it considers a uniform seismic force from dam foundation to crest. However the observed behaviour of filldam during earthquake shows some different behaviour in that at the crest the measured acceleration is usually several times the ground acceleration. In this study, slope stability calculations of a filldam are provided based on the modified seismic intensity method, which can take into account the amplification phenomena of acceleration in the upper part of dam. And also the results of calculations are compared with that of current seismic intensity method.

Key words : Filldam, slope stability, earthquake, safety factor, modified seismic intensity method

1. 서 론

현행 댐시설기준(건교부, 1993)상의 필댐 사면의 안정계산은 한계평형법(limit equilibrium method)에 근거한 원호활동면법을 사용하도록 규정하고 있다. 필댐사면의 안정계산시 하중조건(또는 저수위 조건) 및 안전율에 대한 규정은 표-1과 같으며, 지진시 활동과괴에 대한 안전검토시에는 진도법(Seismic Coefficient Method)에 따라서 활동토괴의 중량에 댐 지역의 지진위험도에 따른 지진계수를 적용하여 안전율을 계산하도록 하고 있다. 이때 지진계수는 댐의 기초지반으로부터 댐마루부까지 동일한 크기로 적용된다.

그러나 최근 현장계측 및 연구결과에 따르면 댐체의 실제거동은 기존의 진도법 개념과 달리 댐마루부에서의 응답가속도는 지반가속도 보다 크게 증폭되어 나타나고 있으며, 특히 지반가속도의 크기가 작을 경우 증폭율이 크므로 우리나라와 같이 중소규모의 지진이 발생하는 경우에는 이에 대한 검토가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지진시 댐마루부의 증폭현상을 고려한 수정진도법(Modified Seismic Intensity method)를 이용하여 댐체사면의 안정성을 검토하고 기존 방법에 의한 결과와 비교분석 하였다.

표-1 활동에 대한 안전율(댐시설기준, 1993)

구분	제체조건	저수상태	지진	안전율		비고
				상류	하류	
1	완성직후	바닥상태	없음	1.3	1.3	1)상류측비탈면의 하부준이 암석등으로 되어 있어 간극압이 발생하지 않을 경우에 한함
2	(간극압최대)	일부저수 ¹⁾	없음	1.3	-	
3		급강하(상시만수위→중간수위)	없음	1.2	1.2	
4	평상시	만수	있음	-	-	2)수위는 보통 댐높이의 45~50%를 취하여 계산함.
5		일부저수 ²⁾	있음	1.15	-	

2. 수정진도법에 의한 사면안정검토 방법

지진시 댐체 사면의 안정검토에 대한 수정진도법은 1991년 일본 건설성에서 『필댐의 내진설계지침(안)』으로 제시되었으며, 1996년 1월 고베지진 직후 반경 200km 이내에 있는 필댐의 피해현황 및 안정성을 이 방법으로 검토한 결과 100% 안정한 상태임이 밝혀진 바 있다. 수정진도법은 기존의 진도법과 달리 댐체의 높이에 따라 활동토괴에 적용하는 수평지진계수의 크기를 선형적으로 다르게 적용한다는 점이 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 따라서 여기서는 수정진도법에 의한 사면안정 검토방법을 간략히 소개하고자 한다.

2.1 재료의 강도

필댐 특히 록필댐의 안정성은 댐체의 대부분을 차지하는 Rock재료의 전단강도에 의해 크게 좌우되며, Rock재료의 전단강도는 대형삼축압축시험 또는 대형직접전단시험 등의 실내시험 결과를 토대로 결정하는 것이 일반적이다. 그러나 우리나라의 경우에는 아직까지 대형삼축압축시험장치가 단 1대도 없어 원석산에서 채취한 암석시료에 대한 일축압축강도로부터 축조될 암석재료의 전단강도를 추정하여 사용하거나 대형직접전단시험(전단상자의 크기=100×100×70cm)을 통해 얻어진 강도정수에 안전율을 감안한 보정계수를 곱한 값을 안정계산에 이용하고 있는 실정이다.

수정진도법에 의한 사면안정검토시에는 Rock재료의 전단강도식으로서 배수강도를 전제로 식(1)~식(3)을 적용하고 있다.

$$\tau_f = c + \overline{\sigma}_n \tan \phi \quad (\text{이하 } c, \phi \text{ 법}) \quad (1)$$

$$\tau_f = A(\overline{\sigma}_n)^b \quad (\text{이하 } Ab \text{ 법}) \quad (2)$$

$$\tau_f = \overline{\sigma}_n \cdot \tan \phi_0 \quad (3)$$

여기서, $\overline{\sigma}_n = \sigma_n - u$

c, ϕ : 재료의 전단강도를 Mohr-Coulomb의 식으로 표현했을 때의 강도정수로서 각각 점착력과 내부마찰각

A, b : 비점착성 재료의 전단강도에 관한 정수(대형삼축압축시험으로부터 구함). 변형률 수준에 따라서 다르나 대개 $A = 0.8 \sim 1.8, b = 0.75 \sim 1.0$ 정도의 값임.

ϕ_0 : 비점착성 재료의 내부마찰각=> 식(4-1) 및 (4-2)로 나타냄.

$$\phi_0 = \phi_{\max} - a \log(\overline{\sigma}_n / \overline{\sigma}_0) \quad (\overline{\sigma}_n > \overline{\sigma}_0) \quad (4-1)$$

$$\phi_0 = \phi_{\max} \quad (\overline{\sigma}_n > \overline{\sigma}_0) \quad (4-2)$$

식(1) 및 (4)에서 Φ_{max} 는 구속압이 작을 때의 내부마찰각 중 최대값, a 는 구속압이 증대함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 정도를 나타내는 계수이다.

한편, 식(2)와 (3)은 Rock재료에 대한 대형삼축압축시험 결과에 따르면 파괴포락선(failure envelop)이 직선이 아니라 원점을 통과하는 convex의 곡선으로 나타나는 것을 근사시킨 것으로서 Rock재료의 내부마찰각이 구속압의 증가에 따라서 점차 감소한다는 것을 의미한다.

2.2 진도보정계수를 적용한 원호활동의 계산

전술한 바와 같이 수정진도법에서는 댐체의 높이에 따라서 활동토괴에 작용하는 수평진도의 크기를 선형적으로 다르게 적용한다. 이때 원호활동에 대한 안전을 계산시 평균진도 및 진도보정계수의 개념이 다음과 같이 도입된다.

2.2.1 평균진도 및 진도보정계수의 정의

(1) 평균진도

임의의 활동원호에 대한 안전을 계산시 댐체의 높이에 따라서 적용하는 수평진도의 크기가 다르다고 할 때 평균진도는 식(5)와 같이 “ 활동원호의 총면적을 활동토괴에 작용하는 수평방향의 힘의 합력으로 나눈 값”으로 정의된다.(그림-1)

$$k_{mean} = \frac{F}{A} \quad (5)$$

여기서, $F = \Delta h \sum_{i=1}^n l_i k_i$ (활동원호의 토괴에 작용하는 수평방향 힘의 합력)

$$A = \Delta h \sum_{i=1}^n l_i \quad (\text{활동원호의 총면적})$$

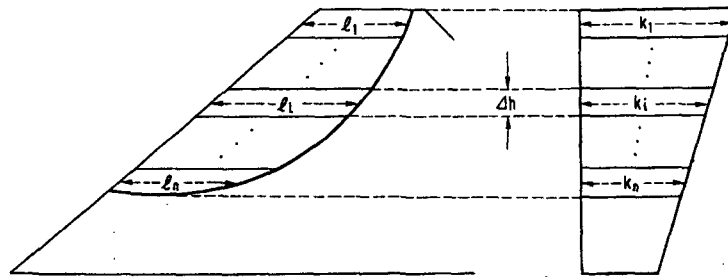


그림-1 평균진도의 개념

(2) 진도보정계수

진도보정계수는 원호의 깊이(y)/댐체의 높이(H)의 함수로서 “평균진도/설계지반진도”로 정의된다. 즉, 진도보정계수 k_h 는 식(6-1) 및 (6-2)와 같이 표현된다.

$$k_h = k_F \times \left\{ 2.5 - 1.85 \left(\frac{y}{H} \right) \right\} \quad (0 < y/H < 0.4 \text{ 일 때}) \quad (6-1)$$

$$k_h = k_F \times \left\{ 2.0 - 0.60 \left(\frac{y}{H} \right) \right\} \quad (0.4 < y/H < 1.0 \text{ 일 때}) \quad (6-2)$$

여기서, y : 댐마루에서부터 댐체의 임의 지점까지의 연직깊이
 H : 댐체의 높이

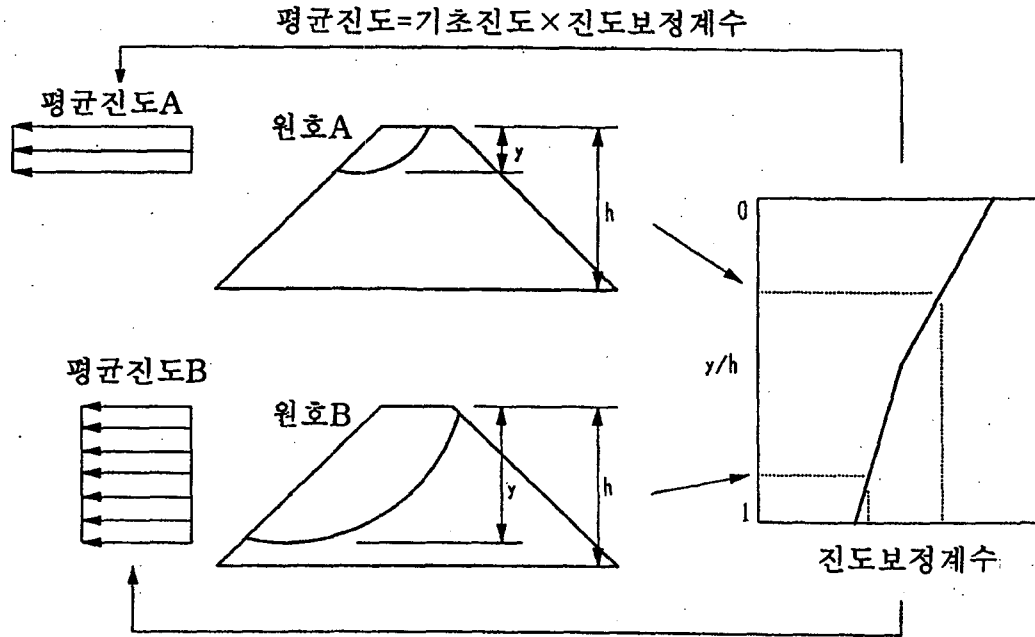


그림-2 진도보정계수의 정의

2.2.2 안전율의 계산

안전율의 계산은 한계평형개념과 위의 평균진도 및 진도보정계수를 적용하여 식(7)에 의하여 계산한다.

$$F_s = \frac{R \cdot \Sigma \{ C \cdot L + (W' \cos \alpha - k_h \cdot W \cdot \sin \alpha) \tan \phi \}}{\Sigma (R \cdot W' \sin \alpha + k_h \cdot W \cdot y)} \quad (7)$$

여기서, F_s : 안전율, R : 활동원호의 반경 (m), C : 점착력 (tf/m^2), L : slice 저면의 길이(m), W : slice의 전체중량 (tf/m), α : slice 저면이 수평면과 이루는 각도 (도), W' : slice의 중량 (수위선 이하 수중단위체적중량) (tf/m), k_h : 설계수평진도, ϕ : 내부마찰각 (도), y : slice의 중심과 활동원의 중심과의 연직거리(m)

3. 수정진도법에 의한 댐사면의 안정해석 예

수정진도법에 의한 댐사면 안정해석 결과와 기존의 진도법에 의한 안정해석 결과를 비교검토한 결과는 다음과 같다.

3.1 해석단면 및 입력데이터

해석대상 댐은 그림-3과 같이 중심코아형록필댐으로서 댐높이 약 125m이고, 성토재료에 따라서 Core, Filter, Sand & Gravel 및 Rock Zone 등의 4개 Zone으로 구성되어 있으며, 상·하류 사면의 기울기는 각각 1:2.3과 1:2.0 정도이다.

해석Case는 댐완성 직후, 상시만수위시 및 수위급강하시의 각각에 대하여 평상시와 지진시로 구분하여 기존의 진도법에 의한 방법과 수정진도법에 의한 방법으로 안전율을 계산하였다. 지진시에 대한 설

계(수평)지진계수는 $k_F=0.05$ 를 적용하였으며, 강도정수는 c,ϕ 법을 적용하였다.

표-2는 각재료별 입력물성치를 나타낸 것이다.

표-2 재료의 입력물성치

구분	포화단위중량 (t/m^3)	습윤단위중량 (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 ($^\circ$)	지진계수
Core	2.01	1.93	1.5	21.8	0.05
Filter	2.21	2.05	0	33.8	
Sand & Gravel	2.21	2.05	0	33.8	
Rock	2.12	1.84	0	38.7	
기초압반	2.30	2.0	0	40	

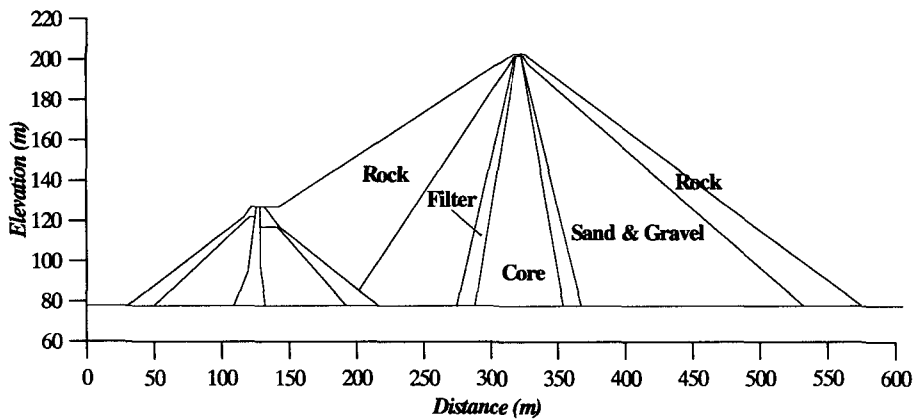


그림-3 해석대상댐의 단면도

3.2 해석결과

해석결과는 표-3에 나타낸 바와 같다. 표에서 보는 바와 같이 수정진도법에 의한 안전율이 다소 진도법에 의한 안전율 보다 작게 산정되는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 상시만수위 조건하에서 $kh=0.05$ 의 지진이 발생할 경우 안전율이 $F_s=1.19 < 1.2$ 로서 불안정한 것으로 나타났다.

그러나 이러한 해석결과는 설계자료를 토대로 산정된 것으로서 각 댐재료에 대한 대형삼축압축시험 결과를 토대로 한 해석결과와는 다소 차이가 있을 것으로 사료되며, 향후 Rock재료에 대한 대형삼축압축시험에 대한 연구가 요망된다.

표-3 해석결과 비교표

조건 \ 해석법	건설직후		상시만수위시		수위급강하시		비고
	정상시	지진시 ($kh=0.05$)	정상시	지진시 ($kh=0.05$)	정상시	지진시 ($kh=0.05$)	
진도법	1.751	1.53	1.755	1.390	1.655	1.375	
수정진도법	1.78	1.47	1.73	1.19	1.58	1.22	그림-4~ 그림-6 참조
안전율기준	1.3		1.2		1.2		

4. 결론

본 연구에서는 수정진도법에 의한 댐사면 안정해석방법 및 모델댐 단면에 대한 사면안정해석 결과를 비교검토 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 지진시 실제 댐의 거동은 기초지반에 입력된 것 보다 댐마루에서 크게 나타나므로 기존의 진도법에 의한 사면안정검토방법 보다는 수정진도법에 의한 사면안정검토 방법이 바람직할 것으로 사료된다. 특히 수정진도법의 경우 기존의 진도법이 갖는 개념이 이해하기 쉬워 적용이 간편하여 비용 및 시간이 현저하게 절약되는 장점을 그대로 갖고 있으면서도 지진시 댐의 거동을 실제와 가장 가깝게 반영하고 있다는 장점이 있다.

- 모델댐에 대한 사면안정해석 결과 지진시의 안전율은 기존의 진도법에 의한 안전율을 보다 다소 작게 산정되는 것으로 나타났다.

- 향후 댐재료에 대한 전단강도 특성(Ab법 등)에 대한 자료가 보완될 경우 보다 정밀한 안정검토가 가능할 것으로 판단된다.

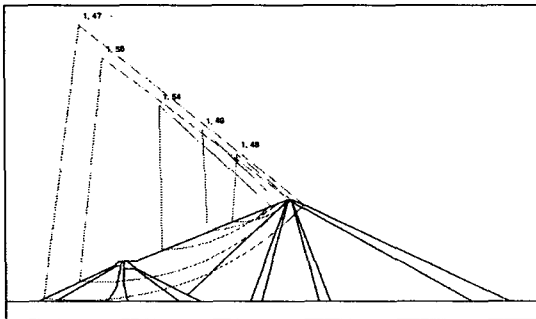


그림-4 축조후 (kh=0.05)

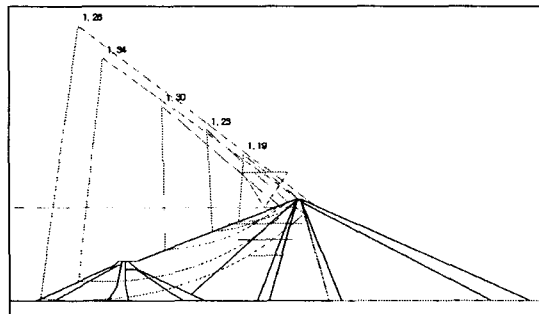


그림-5 상시만수위시 (kh=0.05)

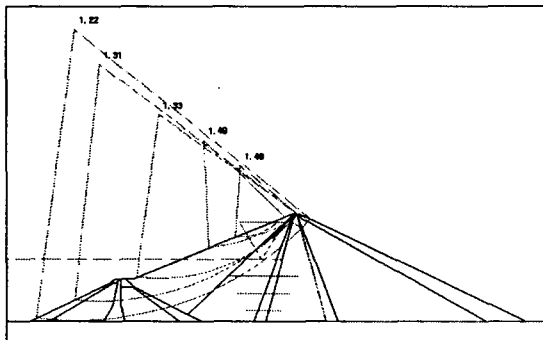


그림-6 수위급강하시 (kh=0.05)

참고문헌

1. 건교부(1993), 댐시설기준.
2. 日本建設省河川局開發課(1991), フィルダムの耐震設計指針(案)