

수정진도법에 의한 지진시의 사면안정해석에 관하여 Slope Stability Analysis Using Modified Seismic Intensity Method During Earthquake

오 병 현* 신 동 훈** 박 성 진*** 황 성 춘****

Oh, Byung-Hyun Shin, Dong-Hun Park, Sung-Jin Hwang, Seong-Chun

ABSTRACT

Numerical analysis of slope stability is carried out using seismic intensity, modified seismic intensity, and response seismic coefficient methods. It is found by comparing each of methods that minimum safety factor precedes the required safety factor. It is also proved during analysis that most conservative method is the earthquake response analysis method, next is the response seismic coefficient method, and last one is the seismic intensity method. Usually, seismic intensity method is applied in analysis of slope stability. However, in view of safety factor, modified seismic intensity method is more conservative than seismic intensity method. Also modified seismic intensity method is appropriate when height of structure analyzed is high enough.

1. 서론

종래에 있어서 내진에 대한 사면의 안정성 평가는 거의 고려하지 않거나, 또는 지진 하중을 유사 정적 하중으로 간주하여 해석하는 것이 대부분이었다. 또한, 여기서 언급한 유사 정적 하중에 의한 해석은 사면의 관용 해석에 있어서는 정적 한계 평형상태에 지진 계수를 도입하여 지진 하중에 대한 사면의 거동을 해석하는 것을 의미하며, 유한 요소법과 같은 수치 해석법에 있어서는 지진 하중을 관성력으로 치환하여 해석하는 것을 의미한다. 혼히들, 이 해석 방법들을 진도법 또는 수정 진도법이라고 하고 있다. 이 둘 진도법, 혹은 수정 진도법이 지진 응답해석법에 비하여 여러 가지 한계점을 가지고 있는 것 또한 사실이나, 해석의 편리성, 적용 원리의 간편성 및 경제적, 시간적 비용의 절약 등과 같은 여러 요인에 의해 내진 설계에 빈번히 사용되어져 온 것에 비하여 그 개념의 적용 한계 및 지진 응답해석법에 의한 해석 결과와의 비교 등에 대해 비교 연구가 거의 이루어지고 있지 않는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 정적 해석에 의한 내진 해석 기

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

*** 창원대학 토목환경과 겸임교수

**** 경주대학교 토목공학과 전임강사

법과 동적 해석에 의한 내진 해석 기법을 OO댐의 실제 제체에 적용시켜 해석한 결과를 보고하고자 한다.

2. 내진 해석 일반

서론에서 언급한 것과 같이, 지진 하중이 작용할 때의 사면의 활동면에 대한 내진 안정성을 해석하는 경우에 있어서 지진 하중의 해석 방법에 따라 지진 하중을 유사 정적 하중으로 치환하여 해석하는 방법과 실제로 지진응답해석에 의해 수행되어지는 2 가지 방법이 있다. 사면의 관용 해석법에 진도(진도계수 kh)를 도입하여 사용하는 해석 및 지진하중을 유사 정적 하중 즉, 관성력으로 바꾸어 해석하는 유사 정적 해석법 등은 많은 해석 결과에 의해 설계에의 빈번한 도입 및 수많은 사례에 의한 계측 결과와의 비교 등에 의해서 이미 하나의 타당한 실무적 해석 체계로서 정비되어 있는 방법이라고 할 수 있다. 일반적으로 이들 각 방법에 의해 수행되어진 해석 결과에 대한 사면의 활동에 대한 안전율은 일반적으로 진도법에 의한 한계상태 평형법 < 관성력에 의한 유사 정적 FEM해석 < 지진 응답 해석의 경향을 나타낸다고들 한다.

2.1 진도법과 수정진도법에 의한 지진력

동적 하중 즉, 지진 하중에 대한 사면의 응답도 당연히 동적으로 반응하기 때문에 지진 하중에 대해서 동적 응답 해석법이 사면의 내진 해석에 가장 적합한 방법이라고 할 수 있을 것이다. 그러나, 해석 이론의 복잡성, 적용 방법의 다양성, 입력 데이터 및 출력 데이터의 방대함, 경제적 및 시간적 비용의 팽대화 등으로 인해 비교적 간단히 수행되어질 수 있는 여러 가지 방법에 의해서 지진 하중을 고려하는 것이 가능하도록 한 정적 해석법에 의해 사면의 내진 평가를 수행하는 경우가 대부분이라고 할 수 있다.

지진 하중에 의해 사면의 활동면에 발생되어지는 거동은 지반움직임의 가속도에 의해 그 사면의 활동면의 각 부분에 생기는 관성력을 고려하는 것이 가능하다. 사면에 작용하는 관성력은 가속도에 질량을 곱하는 것으로 되고, 이 가속도를 중력가속도로 나누어 준 것을 진도라 부른다. 사면의 활동면에서 발생하는 진도는 시간과 함께 변동하는 지반움직임의 가속도를 무차원화하는 것이 아니고, 지반움직임에 대한 사면의 활동면의 가속도 응답값을 무차원화한 것으로서, 이들도 시간적에 따라서 변동되어진다. 그러나, 실제의 내진 해석에 있어서, 이들을 어느 일정 값으로 고려하여 해석하는 경우가 대부분이며, 이런 방법들을 정적해석이라 한다.

위에서도 언급한 바와 같이, 진도법은 가장 간단한 방법의 하나로서 사면의 활동면의 어느 부분의 중량에 활동면의 특성에 관계되지 않은 진도를 곱한 것을 그 부분의 지진 하중으로 한다. 현재에도 실무에서는 대부분이 이 방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 지진 하중은 사면의 특성, 특히 강성과 감쇄에 의해 지배되는 것이 명확한 사실이기 때문에, 그 특성을 도입한 방법으로 이루어진 것이 수정 진도법이다. 진도법은 강성이 높고 고유주기가 짧은 사면 내진 해석에, 수정 진도법은 비교적 강성이 낮고 고유주기가 긴 사면의 내진 해석에 주로 이용된다.

1) 진도법

지진동의 주요부분의 진동주기가 사면의 고유주기에 비교하여 상당히 길 때에는, 사면의 대부분에 있어서, 응답가속도는 지반 진동 가속도와 거의 비슷하고, 지진력은 지반 움직임에 의한 관성력과 거의 같다. 이 힘에 의해 생기는 지진시 단면력의 크기는 상술한 관성력과 같은 크기의 힘이 정적으로 사면에 작용하는 경우에 생기는 단면력과 같은 값을 가진다. 따라서 그림 1 (a)에 나타낸 것과 같이 관성력의 최대값을 외력으로 가하여 정적 응력을 구하고, 이것을 바탕으로 지진응력으로 간주하는 것이 보통이다. 이 방법을 이용할 때에는 사면의 지진시 응력의 계산은 정역학에 의해 행해지고, 모든 종류의 사면에 대하여 원리적으로는 통상의 해석과 같은 방법으로 행한다. 진도법은, 설계지진력=(사면의 중량)×(설계진도)의 관계를 이용하여 사면의 내진 해석을 수행한다. 간편함이 그 특징이기 때문에, 통상의 사면에서는 진도법이 많이 이용되고 있다.

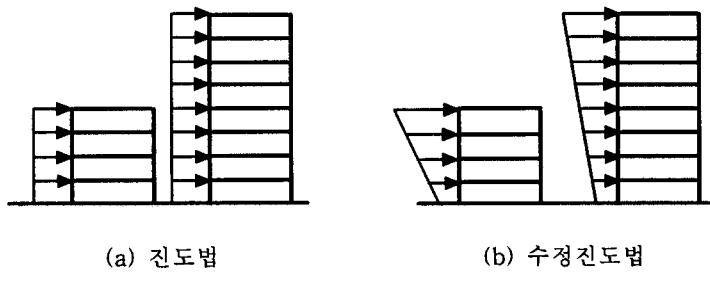


그림 1 정적해석

또, 연직방향의 지진력은 진도법에 있어서는 일반적으로 고려되지 않는다. 이것은 해석에 부여하는 영향이 일반적으로 작은 값을 가지며, 강진 관측결과로부터 수평가속도의 최대값과 연직 가속도의 최대값이 동시에 발생하는 경우는 매우 작은 것에서 연유한다. 또한, 연직 가속도는 수평가속도의 1/2이하인 경우가 많으며, 설계계산이 번잡해지는 것 등도 고려된 것이다.

진도법에 의하면, 선택해야만 되는 설계진도는 그림 2에 나타낸 것과 같이 ① 자중과 수평 지진력을 고려하는 경우, ② 자중, 수평·연직의 두 가지 지진력을 고려하는 경우, ③ 자중과 합한 지진력을 수평방향으로 고려하는 경우가 있다. 그림중에 R은 지진력과 자중의 합력을 나타낸다.

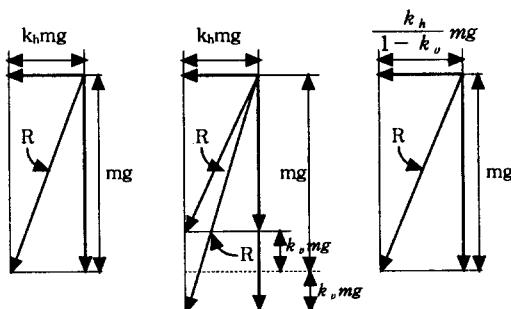


그림 2 설계진도와 지진력

2) 수정진도법

사면에 생기는 진도(가속도)는 같은 지진동에 대해서도 사면의 형식, 높이 등에 의해 변화한다. 또, 장래에 예상되는 지진동은, 지역과 지반종별에 따라 다르다고 생각되어진다.

더욱이, 같은 사면 내에서도 그 진도는 변화하고, 또 설계용 진도는 사면의 점착력에도 관계되어져야만 한다고 하는 사고가 점차로 확립되어져 왔다. 이와 같이 경우에 따라서는 예상되는 지진동이나 사면의 동적 특성을 고려하여 설계용 진도(그림 1 (b))가 정해져야만 한다고 하는 생각으로부터 수정 진도법이 사용되어지게 되었다.

수정 진도법에 있어서도 시간적으로 변화하는 지진력을 정적인 힘으로 치환하여 해석하는 것으로서 정적해석의 일종이다. 다만, 지진동과 사면의 동적 성질을 입력하여 정적인 힘을 결정하기 때문에 등가정적해석에 의한 내진 해석법이라고 부르는 경우도 있다. 진도법이 가지는 간편성을 유지하기 위하여, 사면에 일정의 설계진도를 설정하는 것은 진도법과 다르지 않으나, 설계진도만을 보다 합리적으로 결정하는 것이 수정 진도법이라고 할 수 있다.

사면의 응답가속도는 구조물의 고유주기에 따라 다르지만, 그 변화 양상은 입력 지진동에 의해 서로 영향을 받는다. 그 정도는 지진의 규모, 진양거리와 지반의 영향을 가미한 응답 스펙트럼 그림으로서 표시되어진다. 게다가, 사면의 기본 고유주기를 구하고 그 주기에 대응하는 응답 배율을 응답스펙트럼 그림으로부터 구하여 이것을 지반 진도에 곱한 값을 설계 진도라 하면 사면의 동특성을 고려한 설계진도를 결정하는 것이 가능하다. 그리거, 이 진도를 결정한 후에는 진도법과 같은 순서로 단면력과 용력 등을 구하는 것이 가능하다. 수정 진도법은 응답을 고려한 진도법이라도 불리워지며 비교적 장주기의 구조물에 적용한다.

2.2 등가정적해석법(관성력을 적용한 지진해석)

사면에 작용하는 지진 하중에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법을 등가정적해석법이라고 한다. 이러한 방법에서는 설계 지진계수의 산정이 중요한 역할을 하는데 설계지진계수의 선정을 위해서는 다음의 가정이 필요하다.

- (1) 지진은 정적외력으로서 사면의 각부분의 질량에 작용한다.
- (2) 지진 하중의 크기는 질량에 비례한다. 수평방향 지진 하중의 크기를 중량으로 나눈 값을 지진 계수라고 한다. 따라서 구하는 수평방향 지진 하중은 지진계수를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_h = kh \cdot m \cdot g \quad (1)$$

여기서, F_h : 수평방향 지진력

kh : 지진계수

m : 질량

g : 중력가속도

지진계수 kh 는 위험도 계수와 지진계수 Ca 를 곱하여 구할 수 있다. $m \cdot g$ 는 이 질량이 갖는 중량이므로 지진력은 중량에 지진계수를 곱하여 구한다.

(3) 지진계수의 값은 각 질량에 대하여 같은 크기이다.

(4) 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 사면에 대해서는 연직방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다.

이상의 가정을 기초로 한 해석기법을 등가정적해석법이라고 한다.

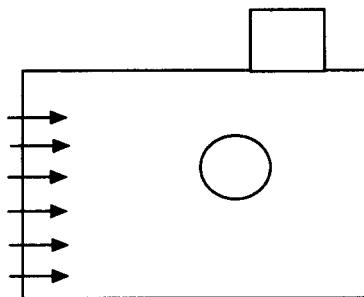


그림 3 관성력의 적용법

2.3 지진응답해석법

같은 지반상에 있어서 동시에 지진동을 받아도 사면에 작용하는 힘 즉, 지진력은 사면의 동특성에 따라 다르다. 사면의 특성을 극단적으로 표현하여 직접 지진력에 반영할 수 있는 가장 적절한 특성값은 사면의 고유주기와 감쇠정수 등이 있다. 지진동에 대한 구조물의 응답은 입력 지진동의 과정에 의해서도 좌우되어지고, 역으로 동일한 지진기록에 대해서도 구조물에 의해 다른 응답을 나타낸다.

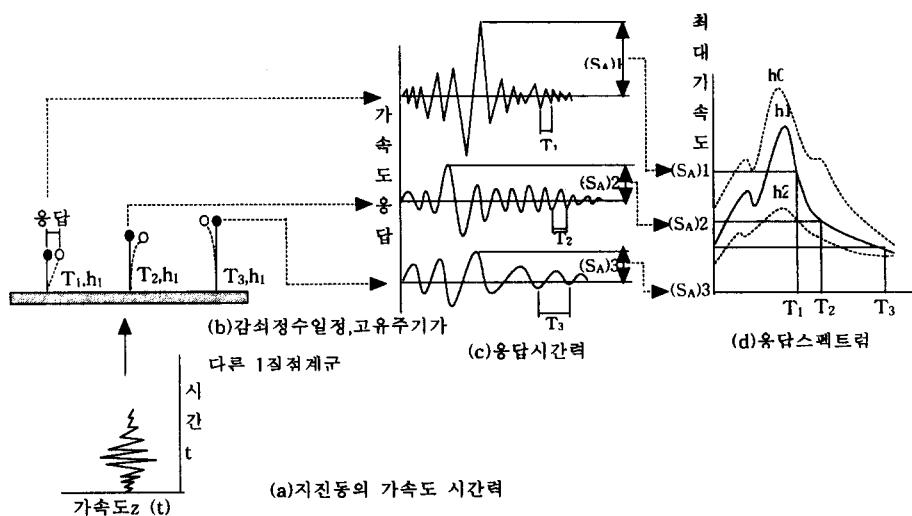


그림 4 응답스펙트럼의 모식적설명

3. 해석모델링

본 논문에서 수행되어진 OO댐은 높이 67.0m, 길이 437m, 댐마루 표고는 EL.69.2m이며 댐형식은 중앙 차수벽형 롤필댐이다. 상류부의 최고 만수위는 EL.64m이며 하류면의 수위는 EL.11.65m이다. 이 댐의 횡방향에 대하여 담수에 의한 수압을 가장 많이 받고 있어 지진시 수평방향의 지진력에 의한 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 단면을 상정하여 모델링하였다. 검토한 해석법으로는 한계 평형 상태법, 지진력을 고려한 한계 평형 상태법, 정적 FEM, 관성력을 고려한 정적 FEM, 지진 응답 해석법 등을 수행하였다.

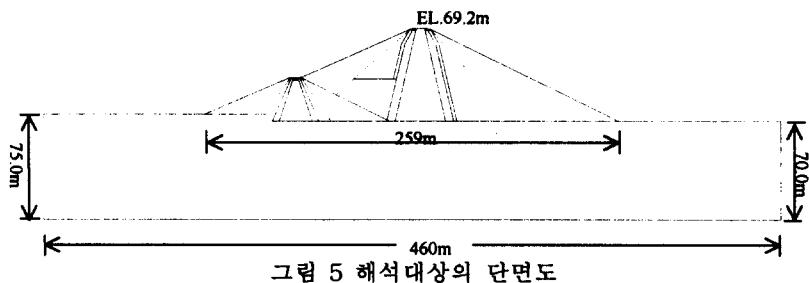


그림 5 해석 대상의 단면도

3.1 입력 물성값

한계 평형 상태법 및 정적FEM과 등가정적FEM해석에서는 비선형모델인 Duncan-Chang모델을 사용하였으며, 이 때에 적용한 물성값은 표-1과 같다. 또 지진응답해석은 Hachinohe파를 적용하였으며, 입력물성값은 표-2와 같다.

표 1 입력 물성값

항 목	댐기초 암 반	Core	Fine Filter	Coarse Filter	Sand & Gravel	Inner Rock	Outer Rock
탄성계수(t/m^2)	1500000	2860	2550	2550	2550	2040	2040
포아슨비	0.25	0.4	0.35	0.35	0.35	0.4	0.4
점착력(t/m^2)	200	1.244	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
내부마찰각(ϕ)	45	33	33	33	33	43	43
단위체적중량(t/m^3)	2.6	2.081	2.122	2.122	2.122	1.795	1.795
파괴비(R_f)	0	0.62	0.7	0.7	0.7	0.77	0.77
Janbu's K	0	280	250	250	250	200	200
Janbu's n	0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.63	0.63
Janbu' Kur	0	560	500	500	500	500	500

표 2 동적해석 입력물성값

항 목	댐기초 암 반	Core	Fine Filter	Coarse Filter	Sand & Gravel	Inner Rock	Outer Rock
전단탄성계수(t/m^2)	600,000	1,021	944	944	944	944	944
단위체적중량(t/m^3)	2.6	2.081	2.122	2.122	2.122	1.795	1.795
감쇠비	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

본 해석에 사용한 지진동의 원파형은 아래와 같으나 실제 해석에 적용한 최대 가속도는 117.6 (Gal)로 조정하여 사용하였다.

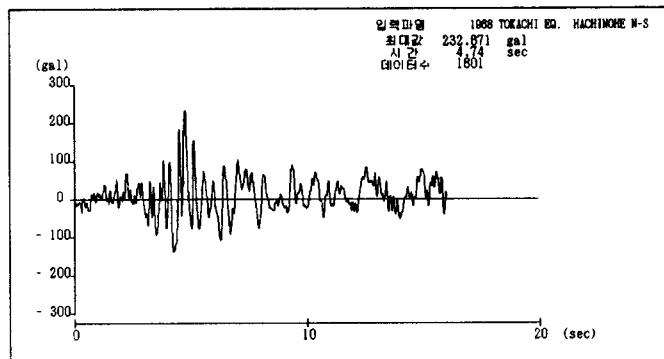


그림 6 지진동의 원파형

4. 해석 결과

4.1 한계평형해석 결과

제체의 각 경우에 대한 안전율은 다음과 같다.

표 3 한계상태해석에 의한 안전율 계산결과

해석방법 대상	Bishop법		Tschebotarioff법	
	상류사면	하류사면	상류사면	하류사면
정적해석법	1.945	1.735	1.90	1.702
진도법	1.473	1.338	1.510	1.390



그림 7 예상 활동면

수정진도법은 아래의 식으로 계산하였으며, 그 결과는 최소안전율이 상류사면에 대해서는 1.219이고, 하류사면에 대해서는 1.201이었다.

$$F_S = \frac{r \sum (W' \cdot \cos \theta - k \cdot W \cdot \sin \theta)}{\sum (W' \cdot r \cdot \sin \theta + k \cdot W \cdot h)} \quad (3)$$

4.2 유한요소법에 의한 해석결과

유한요소법을 이용하여 제체를 정적, 동적해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

표 4 FEM해석에 의한 안전율값

해석방법	상류사면	하류사면
등가정적해석, 수평진도(0.12g)	2.839	1.404
지진응답해석	2.406	1.518

표 4에서 보듯이 안전율의 결과가 요구하는 안전율 이상을 확보하고 있고, 안전율값은 한계평형 법보다 약간 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또 이때 생긴 변위는 표 5와 같다.

표 5 FEM해석에 의한 댐마루부의 변위결과(cm)

절점번호 해석방법	1198		1200		1202	
	X축변위	Y축변위	X축변위	Y축변위	X축변위	Y축변위
수평진도(0.12g)	47.0	29.25	45.92	36.06	45.56	35.71
지진응답해석	65.98	8.82	65.02	3.61	65.33	6.09

이상의 결과에서 보듯이 사면의 안전율이나 용력 그리고 변위 등으로 평가할 때 사면은 지진(본 해석에서 적용한 지진강도)에 대한 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 진도법을 이용한 등가정적해석과 지진응답해석을 수행하여 결과를 비교하였고, 실제의 지진파를 적용하여 지진응답해석을 한 결과에 비하여 진도법으로 적용한 결과가 어느 정도의 차이를 보이는가에 대하여 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 정적인 상태에서의 최소안전율은 1.5이상을 요구하고 있는데, 본 구조물에서 안전율을 계산한 결과 모두 1.5이상을 확보하고 있다. 진도를 적용한 경우에는 1.2이상을 요구하고 있는데 본 대상 구조물에서는 그 이상을 확보하고 있다. 따라서 한계 평형 상태법과 지진응답해석으로 계산한 결과 본 사면은 2 가지 해석 방법 모두에 의해 안전하다고 평가할 수 있다.
2. 지진응답해석에 의한 최소안전율은 하류사면의 경우에 1.5인데 등가정적FEM에 의한 결과는 1.4이고, 한계 평형 상태법에 의한 결과는 진도법은 1.4이고 수정 진도법에서는 1.2이었다. 즉, 한계 평형 상태법<등가정적 FEM해석<동적 FEM해석의 관계가 성립하고 있음을 증명하였다.
3. 일반적으로 빈번히 적용하는 진도법보다 수정진도법으로 적용하는 경우가 안전율이 더 낮게 산출되었다. 즉, 진도법보다 수정진도법으로 적용하는 것이 안정성을 확보하는 데에 유리한 것으로 나타났으며, 실제 사면의 높이가 높은 경우에는 수정진도법으로 적용하여 안정성을 평가하는 것이 가장 보수적인 방법임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 일본土木學會(1989), 動的解析と耐震設計(地震動·動的物性) Vol. 1
2. 佐原研而(1976), 土質動力學の基礎
3. Kokusho, T.(1987), In-situ dynamic soil properties and shear evaluations, Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2
4. Drnevich, V. P. and Massarsch, K. R.(1979), Sample disturbance and stress-strain behaviour, Proc ASCE, Vol. 105, No. GT9, pp. 1001 - 1016
5. Hardin, B. O. and Black, W. L.(1968), Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE. Vol. 94, No. SM2, pp 353 - 369