

발간등록번호

AN01145-000145-12

도로설계요령

제2권 토공 및 배수

2020

 한국도로공사

제2권

...

토공 및 배수

제5편 토공
제6편 배수시설
제7편 암거

제5편 토 공





12. 비탈면 내진설계 기준

12.1 설계 기본사항

비탈면의 내진설계는 지진에 의하여 비탈면에서 발생 가능한 파괴와 그로 인하여 주변 구조물에 발생하는 피해 및 경제적 손실을 최소화시키기 위하여 필요한 최소한의 내진설계 요구 조건을 규정하는데 있다.

비탈면 내진설계는 건설교통부(현, 국토교통부)의 내진설계기준연구(II)(1997. 12)에서 제시된 내진설계 성능 기준을 바탕으로 하고, 국내외에서 비탈면의 지진 시 안정 해석을 위하여 사용하는 방법을 바탕으로 기존의 설계 기준의 체계에 맞도록 제정되었다.

이 장의 목적은 지진에 의하여 비탈면에서 발생 가능한 파괴와 그로 인하여 주변 구조물에 발생하는 피해 및 경제적 손실을 최소화시키기 위하여 필요한 최소한의 내진설계 요구 조건을 규정하는데 있다. 비탈면의 내진설계는 간편해석법으로 유사정적해석과 Newmark 방법을 적용하고, 상세해석방법으로 동적해석방법을 적용한다.

- (1) 1997년 건설교통부(현, 국토교통부)에서 성능 기반의 상위 기준 내진설계기준을 제시한 이후 많은 시설물에 대한 내진설계기준이 제정되었다. 지반분야에서도 이에 맞추어 내진설계에 대한 연구가 수반되었으며 구조물기초 설계기준(건설교통부, 2003)에 내진설계부분이 반영되었고, 비탈면에 대한 내진설계기준도 일부 반영되어 있으나 안정해석부분에서는 구체적인 해석기준을 제시하지 않고 있다. 이 내진기준은 건설교통부(현, 국토교통부)의 내진설계기준연구(1997. 12)와 구조물기초설계기준(건설교통부, 2002)을 근간으로 하고, 국내외의 비탈면에 대한 안정해석기법들에 대한 내용검토를 통하여 제정하였다.
- (2) 지진이 많이 발생하는 국외(미국 서부와 알래스카 지역)에서는 지진으로 유발된 비탈면 붕괴 사례가 빈번하며, 이로 인한 도로와 가옥의 피해 사례도 적지 않게 보고된 바 있다. 국내에서는 아직 지진으로 인한 비탈면 붕괴 사례가 공식적으로 보고된 바는 없지만, 외국의 사례를 볼 때 지진 시의 붕괴 가능성을 완전히 배제하기는 어려우므로 상위 기준 내진설계기준에 맞추어 내진설계를 고려하는 것이 필요하다.

12.2 비탈면의 내진등급 및 성능목표

12.2.1 비탈면의 내진등급

비탈면의 내진등급은 상위 개념 내진설계기준을 준용하여 비탈면이 속하여 있는 주 구조물의 내진등급에 따라 I 등급, II 등급으로 구분한다.

- 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미치는 경우에는 비탈면의 내진등급은 주 구조물의 내진등급을 적용한다.
- 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미치지 않지만, 주 구조물의 기능 또는 정상적 운영상에 상당한 영향을 미치는 경우에는 주 구조물 보다 한 등급 아래의 내진등급을 적용한다.
- 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미치지 않으며, 주 구조물의 정상적인 운영이 가능한 상태에서 비탈면의 복구가 가능한 경우에는 내진설계 여부를 발주자와 협의하여 결정한다.

비탈면의 붕괴로 인하여 비탈면 상부 또는 하부의 영향 범위 내에 주 구조물이 없어 영향을 받지 않는 경우는 비탈면 내진설계를 적용하지 않는다.

- (1) 국내 대부분의 토목 및 건축 구조물의 내진등급은 내진설계 상위 기준(건설교통부, 1997)에 규정되어 있으나 비탈면의 경우는 규정되어 있지 않다. 다만, 쌓기 비탈면에 해당하는 댐 및 제방에 대해서만 중요 구조물로서 내진등급이 규정되어 있다.
- (2) 비탈면들은 도로, 철도, 교량, 건축물 등의 주 구조물에 부속되어 있는 것으로 볼 수 있으므로 이러한 비탈면의 내진등급은 주 구조물의 내진등급을 따르는 것으로 보는 것이 합당할 것이다. 「자연재해대책법」제34조에 따라 관계 중앙행정기관의 장은 각 시설에 대한 내진설계기준을 정하여 관계 법령에 규정하고 내진설계기준을 설정해야 할 시설 등의 범위를 설정하도록 한다. 국토교통부의 내진설계기준에서는 각 구조물에 대하여 내진등급을 제시하였으며, 내진 등급에 관련된 내용을 정리한 것은 다음 표 12.1과 같다.

〈표 12.1〉 구조물의 등급 분류와 등급별 적용 대상 (내진설계기준연구, 1997)

구조물 분류	등급 구분	적용 대상
도로교	내진 특등급	• 내진 I 등급 중 복구 난이도가 높고 경제·사회적으로 특별한 교량(장대교량)
	내진 I 등급	• 고속국도, 자동차전용도로, 특별시도, 광역시도, 일반국도 상의 교량 • 지방도, 시도, 군도 중 방재계획 상 필요한 도로에 건설된 교량 • 내진 I 등급교가 건설되는 도로 위를 지나가는 고가 교량
	내진 II 등급	• 내진 특등급, 내진 I 등급에 포함되지 않는 교량
고속철도	내진 특등급	• 내진 I 등급중 복구 난이도가 높고, 경제적·사회적으로 특별히 중요한 구조물
	내진 I 등급	• 교량, 고가 역사, 지하터널 역사, 터널, 전차선 및 전주
	내진 II 등급	• 이외의 구조물
공항구조물	내진 특등급	• 관제탑, 구조 및 소방시설
	내진 I 등급	• 교량, 지하구조물, 비행장시설, 도로, 건축물 등
	내진 II 등급	• 하수도, 화물창고, 화물터미널
항만구조물	내진 I 등급	• 항구의 입지적·전략적 요건에 의하여 주관적으로 분류
	내진 II 등급	• 안벽, 제방 등 I 등급으로 할 필요가 없는 구조물
지중구조물	내진 특등급	• 특별한 안전이 요구되는 시설 • 긴급구조, 국방 및 치안유지에 필요한 구조물
	내진 I 등급	• 사회적 혼란이 야기되고 많은 인명, 재산피해를 주는 구조물
	내진 II 등급	• 내진 특등급, 내진 I 등급에 포함되지 않는 일반적인 구조물
댐	내진 특등급	• 중규모 이상으로서 파괴 시 하류에 중규모 이상의 피해가 야기되는 댐
	내진 I 등급	• 소규모로서 파괴 시 하류에 낮은 수준의 피해가 야기되는 댐
터널	내진 특등급	• 긴급 구조, 구호, 국방 및 치안유지에 필요한 터널 • 내진 특등급 구조물과 연계된 터널
	내진 I 등급	• 내진 I 등급 구조물과 연계된 터널
	내진 II 등급	• 그 외의 일반적인 터널
도로	내진 I 등급	• 고속국도, 자동차전용도로, 특별시도, 광역시도, 일반국도
	내진 II 등급	• 지방도, 시도, 군도
철도구조물	내진 특등급	• 내진 I 등급 구조물 중 복구 난이도가 높고 경제적·사회적으로 중요한 구조물
	내진 I 등급	• 국방, 치안 유지 및 국가산업활동에 중요한 역할을 하는 철도선 상이나 도시지하철 상의 교량, 고가역사, 지하철터널역사, 터널, 전차선 및 전주
	내진 II 등급	• 내진 특등급, 내진 I 등급에 포함되지 않는 구조물
건축물	내진 특등급	• 방송국, 유독 폭발성 물질을 다량 보관하는 구조물
	내진 I 등급	• 소방서, 경찰서, 종합병원, 통신시설, 발전소, 바닥 면적이 5000 m ² 이상인 집회시설, 바닥 면적 10,000 m ² 이상인 판매시설, 내진 특등급 구조물을 지원하기 위하여 필요한 시설물, 교육용 건물, 교도소 및 구급시설, 6층 이상의 아파트나 숙박시설, 공공건물 중 지진 전후로 가동되어야 하는 건축물
	내진 II 등급	• 내진 특등급, 내진 I 등급에 포함되지 않는 건축물

(3) 비탈면의 내진등급은 다음의 원칙에 따라 결정하도록 한다.

(가) 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미치는 경우에는 주 구조물의 내진등급을 적용한다.

(나) 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미치지 않으나 기능성 혹은 운영상에 일시적인 영향을 미치는 경우에는 주 구조물 보다 한 등급 아래의 내진등급을 적용한다.

예를 들어 교량에 부속된 비탈면이나 비탈면 상에 도로나 철도가 놓여있는 경우 비탈면의 붕괴가 교량, 도로, 철도 등의 안정성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 주 구조물의 내진등급을 적용해야 한다. 한편 도로 및 철도에 접한 깎기 비탈면의 경우라 하더라도 비탈면의 붕괴가 주 구조물의 안정성에 직접적인 영향을 미치지 않으나 안전사고 유발이나 일시적인 통행제한 등의 간접적인 영향을 미치게 되므로 주 구조물 보다 한 등급 아래의 내진등급을 적용할 수도 있다. 또한 도로 및 철도에 인접한 땅깎기 비탈면의 경우 붕괴가 발생하더라도 차량이나 기차가 정상적인 운행이 정상적으로 가능한 상태에서 비탈면 복구가 가능한 경우에는 내진설계 적용 여부를 발주자와 협의하여 결정한다.

12.2.2 내진성능목표

비탈면의 내진성능수준은 붕괴방지수준으로 한다.

붕괴방지수준은 비탈면에 인장균열, 부분적 탈락, 배부름 등의 파괴징조는 나타나지만 이로 인하여 주 구조물의 구조적 성능과 기능적인 역할에 피해를 유발시키지 않는 성능수준이다.

비탈면은 표 12.2에 규정한 평균재현주기를 갖는 설계지반운동에 대하여 성능수준을 만족할 수 있도록 설계한다.

〈표 12.2〉 설계지반운동 수준

성능목표 \ 내진등급	특 등급	I 등급	II 등급
붕괴방지수준	평균재현주기 2,400년	평균재현주기 1,000년	평균재현주기 500년

12.3 설계 지반운동의 결정

12.3.1 지반가속도계수 결정

지반가속도계수는 지진구역도를 이용하는 방법과 지진재해도를 이용하는 방법을 사용할 수 있다.

- 지진구역도를 이용하는 방법 : 비탈면의 지역적 위치에 따른 지진구역계수와 비탈면의 내진 등급에 따른 재현주기를 고려한 위험도계수를 곱하여 산정한다.
- 지진재해도를 이용하는 방법 : 비탈면의 내진 등급에 따른 재현주기와 재현주기별 지진재해도를 참조하여 구한다.

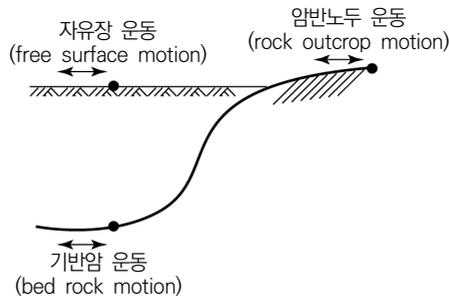
지진구역도 및 지진재해도에서의 지반가속도계수는 보통암 노두를 기준으로 평가하므로 지표면에서의 지반가속도계수는 국지적인 토질조건, 지질조건, 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려해야 한다. 땅깁기 비탈면의 경우 보통암 상태의 노두가 노출되는 경우에는 지진재해도 및 지진구역도에서 제시하는 지반가속도계수를 직접적으로 이용할 수 있다.

(1) 지진운동에는 그림 12.1에 나타낸 바와 같이 자유장 운동, 기반암 운동, 암반노두 운동 등으로 나눌 수 있다.

(가) 자유장 운동(free surface motion) : 지표면에서의 지진운동

(나) 기반암 운동(bedrock motion) : 기반암 표면에서의 지진운동

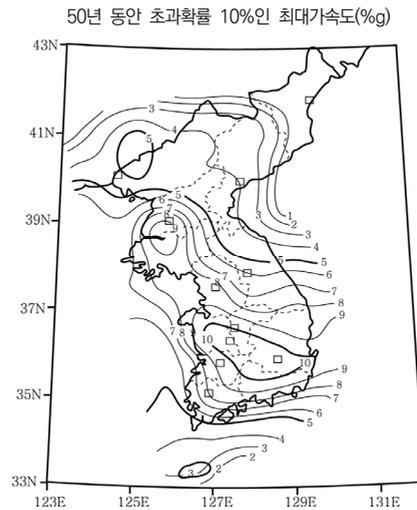
(다) 암반노두 운동(rock outcrop motion) : 기반암이 지표면 상에 노출되어진 노두에서의 지진운동



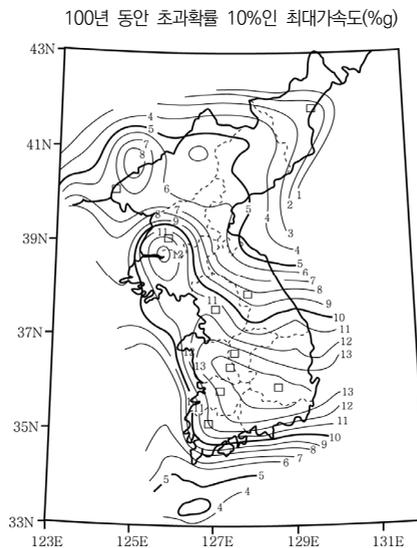
〈그림 12.1〉 지반운동의 정의

(2) 설계 지반 운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의된다. 국토교통부에서 제정한 지진재해도는 보통암 지반의 암반노두 운동으로 정의되어 있으며, 이를 바탕으로 국지적 토질조건(부지 특성)을 고려하여 지표면 자유장 운동을 예측해야 한다.

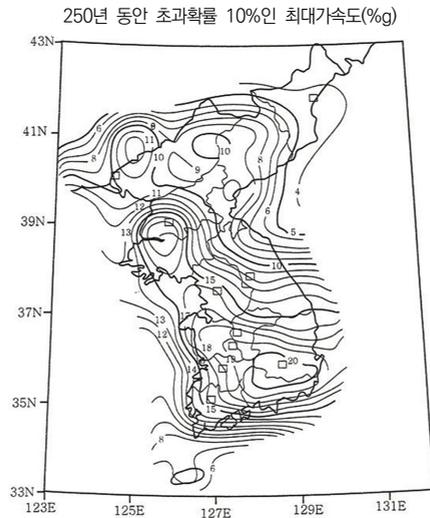
(3) 지진재해도를 이용한 지반가속도계수의 산정방법은 비탈면이 위치한 부지에 대하여 지반가속도계수를 정밀하게 평가하고자 할 경우 적용할 수 있으며, 지진의 평균 재현주기별로 작성된 지진재해도를 활용하여 비탈면의 내진 등급에 따른 지반가속도계수를 산정할 수 있다. 내진등급에 따른 재현주기는 표 12.2와 같고, 재현주기별 지진재해도는 그림 12.2와 그림 12.3을 참조한다.



〈그림 12.2〉 평균재현주기 500년 지진재해도
(지도 안의 숫자는 최대 지반가속도를 %로 나타낸 것임)



〈그림 12.3〉 평균재현주기 1000년 지진재해도
(지도 안의 숫자는 최대 지반가속도를 %로 나타낸 것임)



〈그림 12.4〉 평균재현주기 2500년 지진재해도
(지도 안의 숫자는 최대 지반가속도를 %로 나타낸 것임)

- (4) 지진구역도를 이용하여 지반가속도계수를 산정하는 방법은 지진재해도를 적용하기 어려운 경우에 적용하며, 비탈면이 위치한 지역의 지진구역계수(Z)와 내진등급별 재현주기에 따른 위험도 계수(I)의 곱으로 지반가속도계수를 산정한다.
- (5) 행정구역별로 지진구역을 설정하여 지진의 평균 재현주기별로 지진재해도를 작성하고, 이를 기초로 설계에 반영할 수 있도록 조정된 지진구역계수(Z)는 표 12.3과 같다. 표 12.3은 평균 재현주기 500년을 기준으로 결정되었으며, 표 12.4의 위험도계수(I)에 곱하면 다른 재현주기에서의 설계 지반운동 수준도 결정할 수 있다.

〈표 12.3〉 지진구역 구분 및 지진구역계수(재현주기 500년)

지진구역		행정구역	지진구역계수 Z(g)
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.11
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부	
II	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07

※ 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
 강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시,
 전라남도 북동부(군, 시) : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
 전라남도 남서부(군, 시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

〈표 12.4〉 위험도계수(I)

재현주기	50년	100년	200년	500년	1000년	2400년
위험도 계수, I	0.4	0.57	0.73	1.00	1.40	2.0

(6) 국지적인 토질조건, 지질조건, 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 표 12.5와 같이 S_A , S_B , S_C , S_D , S_E , S_F 의 6종류로 분류하고, 분류된 지반 조건에 따라 지표면 지반가속도계수를 산정한다. 지반은 표 12.5에서와 같이 상부 30.480 m의 평균 지반 특성에 따라 분류한다.

(7) 지역에 따라 산정된 지반가속도계수는 해당 지역의 보통암 노두에서 발생할 수 있는 최대 가속도로써 곧바로 내진해석에서 사용할 수 있는 가속도계수가 아니다. 지진운동은 사업대상지역의 지반특성에 따라서 진동이 감소 또는 증폭될 수 있으므로 표 12.5의 지반분류 기준에 따라 노두에서의 지반가속도와 대상 부지의 지층별 전단파속도와 밀도를 이용하여 1차원 지진응답해석을 실시하고 지표면에서의 지반가속도로 재산정하여 설계에 이용해야 한다. 사업 대상 부지가 경암 지반(S_A)이면 지진동은 보통암 지반에 비하여 감쇠특성이 지배적이며, 그 외 지반(S_C , S_D , S_E)에서는 증폭특성이 지배적으로 나타난다. 중요 구조물에 인접한 비탈면에서는 부지특성을 고려한 지반응답해석을 실시하고 설계 지반가속도계수를 결정하는 것을 추천한다.

〈표 12.5〉 지반의 분류

지반 종류	지 반 종 류	상부 30.480 m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파속도 (m/sec)	표준관입시험 \bar{N} (N_{CH}) (blow/foot)	비배수전단강도 (kPa), \bar{s}_u
S_A	경암지반	1500 초과	-	-
S_B	보통 암지반	760 ~ 1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 ~ 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100
S_E	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성 평가가 요구되는 지반			

여기서, 지반종류 S_F 에 해당하는 지반을 종류는 다음과 같다.

- 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay, 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토 지반
- 매우 높은 소성을 갖은 점토 지반
- 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토 지반

(8) 내진설계의 상위기준인 내진설계기준연구 II(건설교통부, 1997)에서는 지반 종류와 지진구역에 따른 지진계수 C_a 를 표 12.6과 같이 제시하였다.

〈표 12.6〉 지반분류에 따른 지진계수

지반분류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08
S_D	0.16	0.11
S_E	0.22	0.17

(9) 내진등급, 지진구역, 지반분류를 고려한 지반가속도계수는 표 12.3 ~ 표 12.6을 이용하여 산정할 수 있으며, 이를 정리하면 다음의 표 12.7과 같다.

〈표 12.7〉 지반가속도계수 산정표

지반분류	지진구역	내진등급		
		특등급	1등급	2등급
S_A	I	0.18	0.13	0.09
	II	0.10	0.07	0.05
S_B	I	0.22	0.15	0.11
	II	0.14	0.10	0.07
S_C	I	0.26	0.18	0.13
	II	0.16	0.11	0.08
S_D	I	0.32	0.22	0.16
	II	0.22	0.15	0.11
S_E	I	0.44	0.31	0.22
	II	0.34	0.24	0.17

12.3.2 내진설계를 위한 조사

내진설계를 위한 지반조사는 크게 (1) 대상 부지의 지진응답특성 평가, (2) 지반 또는 구조물의 지진에 대한 저항성 평가로 나뉘며, 각각의 평가를 위하여 필요한 정보를 획득하기 위해서 다음 기준에 따라 지반조사를 실시한다.

- 대상 부지의 지진응답특성 평가를 위해서는 다음의 시험을 실시한다.
 - 시추조사 : 지층의 구성, 지하수위, 실내시험용 시료채취 등
 - 현장시험 : 각 지층의 탄성파 전파 특성을 얻을 수 있는 현장시험
 - 실내시험 : 각 지층별 물성시험 및 역학시험, 다양한 변형률 상태에서의 동적 물성치를 획득하기 위한 실내시험
- 지반 또는 구조물의 지진에 대한 저항성 평가를 위해서는 다음의 시험을 실시한다.
 - 현장시험 : 지반의 지층별 전단강도를 추정할 수 있는 시험(표준관입시험, 콘관입시험 등)
 - 실내시험 : 다양한 지진동을 모사하여 변형률 크기별 변형계수와 감쇠특성을 얻을 수 있는 시험(진동삼축시험 등)
 - 모형시험 : 진동대 시험

지진응답특성 평가를 통해 설계 지반가속도계수를 결정할 수 있으며, 이를 위해서는 지반의 층상 구조, 기반암의 깊이, 각 층의 밀도, 지하수위와 지반의 동적 물성치가 필요하며, 앞의 조사와 시험을 통하여 입력 자료를 획득하거나 또는 제반여건이 여의치 않은 경우에는 기존자료를 이용할 수도 있다.

(1) 내진해석에서 가장 중요한 것은 검토 대상 구조물이 설치될 위치 또는 비탈면 위치에서의 설계 지반가속도계수를 결정하는 것이며, 이를 결정하기 위해서는 지반의 층상 구조, 기반암까지의 깊이, 각 층의 밀도, 전단파속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형특성, 지하수위 그리고 지반응력상태 등에 대한 정보가 필요하다.

액상화 평가를 하기 위해서는 지반의 주상도와 지하수위를 알아야 한다. 간편한 액상화 예측을 위해서는 표준관입시험의 N 값, 콘관입시험의 q_c 값, 지반의 전단파속도(V_s) 그리고 지층의 물리적 특성(입도 분포, 소성지수, 밀도 및 함수비) 등을 결정해야 한다. 또한 상세한 액상화 예측을 위해서는 시료를 채취하여 실내반복시험을 실시해야 한다.

(2) 현장시험은 지반의 층상 구조와 관입저항치를 획득하는 관입시험(표준관입시험, 콘관입시험 등)과 전단파속도 주상도를 획득하는 탄성파시험(크로스홀 시험, 다운홀 시험, SASW 시험 등)이 있다.

(가) 크로스홀 시험 (crosshole test)

크로스홀 시험 방법은 지반에 두 개 이상의 구멍을 뚫어 한쪽은 발진자로, 나머지 홀은 감지기로 구성하여 발진자에서 유발되는 진동이 지반을 통과하여 감지기까지 도달되는 파의 전파 속도를 깊이별로 측정하여 깊이별 전단 탄성계수와 포아송 비를 추정하는 기법이다. 크로스홀 시험에서 홀 사이의 간격은 일반적으로 3~6 m로 하며, 홀이 3개 이상이면 하나는 발진자로 이용하고, 나머지 홀들은 감지기로 사용하여 지반 물성치 해석을 수행한다.

(나) 다운홀 시험(downhole test)

다운홀 시험은 지반의 압축파 속도, 전단파 속도 측정에 널리 사용하는 방법으로, 발진자를 지표위에 설치하고, 감지기는 검측공 내 계획된 측정 깊이에 설치한다. 발진자에 충격을 가하여 진동을 유발 시키는데 연직 방향으로 충격을 가하면 압축파 성분이 수평 방향으로 충격을 가하면 전단파 성분이 풍부한 진동을 발생한다. 직접 산출법에서는 발진자에서 출발한 탄성파가 발진자와 감지기 사이의 경사거리를 주파하는데 걸리는 시간을 측정하게 된다.

크로스홀 시험과 다운홀 시험의 장·단점은 다음의 표 12.8과 같다. 크로스 홀 시험은 다운홀 시험에 비하여 시험 장치의 구성이 복잡하고 많은 비용이 들지만 보다 좋은 시험 결과를 얻을 수 있다.

〈표 12.8〉 크로스홀 시험과 다운홀 시험 방법의 비교

크로스홀 시험	다운홀 시험
<ul style="list-style-type: none"> • 두 개 이상의 시추공 • 간단한 공 내 발진자 • 주로 P파와 S파 사용 • 전단파의 극성 특성 이용 • 파의 진행 경로 길이가 일정 • 시추공 Casing의 영향이 적다 • 모든 깊이에서 신호와 잡음의 비가 높다. • 파의 전파속도가 낮은 층 감지 가능 • 자세한 지층 구조 조사 가능 • 잡음이 많은 지역에서도 사용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 한 개의 시추공 • 간단한 표면 발진자 • 주로 P파와 S파 사용 • 전단파의 극성 특성 이용 • 깊이에 따라 진행 경로 길이 증가 • 시추공 Casing 영향 가능 • 신호와 잡음의 비가 깊이에 따라 감소 • 파의 전파 속도가 낮은 층 감지 가능 • 파의 굴절 문제가 적음 • 제한된 공간에서 작업 가능 • 비용이 비교적 적음

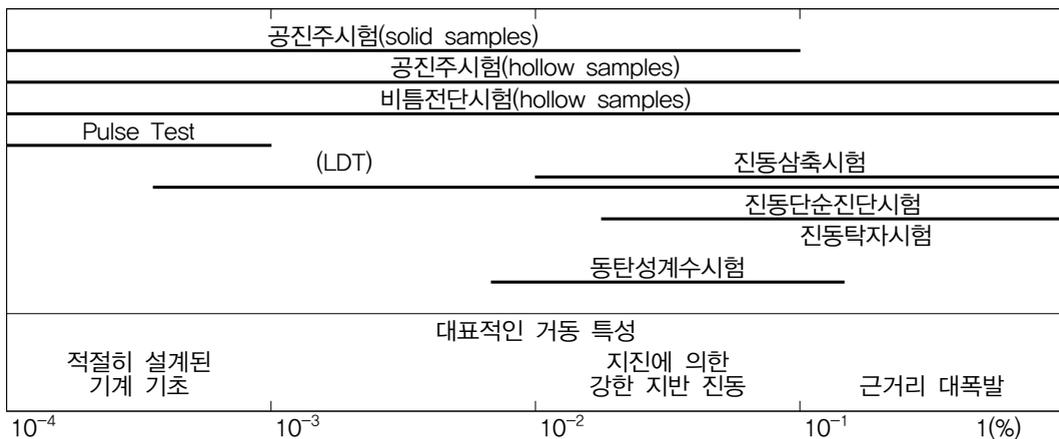
(다) SASW(spectral analysis of surface wave) 시험

SASW 시험 방법은 발진자와 감지기 모두를 지표면에 두고 시험하는 방법으로서, 표면파의 특성을 이용하여 지반 물성치를 결정한다. SASW 시험 방법은 일정한 주기의 표면파를 사용하는 정상진동 기법을 수정·보완한 시험방법으로 반 무한층에서 표면파의 분산 특성에 그 바탕을 두고 있다. 표면파의 분산 특성은 층상 구조의 매질에서 파의 전파 속도가 파의 주파수에 따라 변하는 것을 의미한다.

(3) 지반의 동적물성치를 획득하기 위하여 실내에서 수행하는 시험은 현장에서 채취한 불교란시료 또는 현장 조건과 동일하게 형성한 시료에 대해서 수행하게 되며, 공진주시험(resonant column test), 펄스시험(pulse tests), 진동삼축시험(cyclic triaxial test), 진동단순전단시험(cyclic simple shear), 비틀전단시험(torsional shear test) 및 진동탁자시험(shaking table test) 등이 있다. 각 시험 방법에서 신뢰성 있게 측정 가능한 변형률 범위는 그림 12.5와 같으며, 각 시험법으로 결정 가능한 지반 물성치는 표 12.9와 같다.

〈표 12.9〉 각 실내시험법별 측정 가능한 동적 지반 물성치

구분	전단탄성계수	탄성계수	감쇠비	반복 응력 작용 시 지반 특성	Attenuation
공진주시험	○	○	○		○
Pulse Test	○	○			○
진동삼축시험		○	○	○	
진동단순시험	○		○	○	
비틀전단시험	○		○	○	
진동탁자시험	○			○	



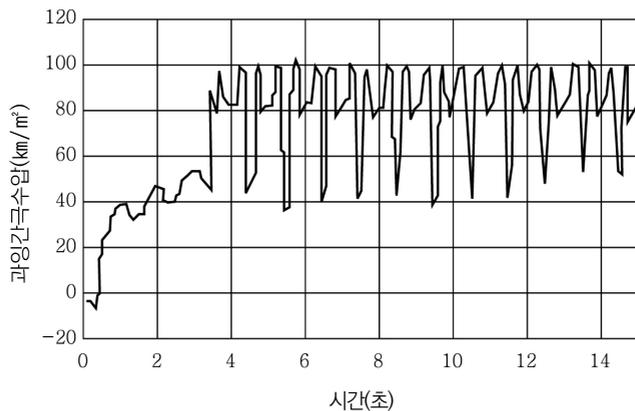
〈그림 12.5〉 실내 시험법의 변형률 범위

(가) 진동삼축시험

진동삼축시험은 Seed and Lee 에 의하여 처음으로 제시된 방법으로서, 액상화 포텐셜 측정에 가장 일반적으로 사용되어 왔다. 시험 장치의 간편성과 쉽게 적용할 수 있는 장점 때문에 응력 제어 방식의 시험 기법이 지반의 동적 전단강도를 구하기 위하여 주로 사용된다.

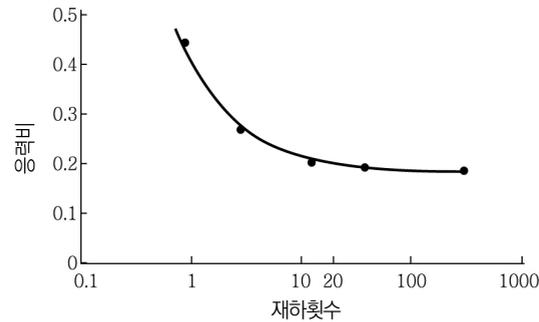
진동삼축압축시험 과정은 우선 완전 포화된 시료에 등방 압밀과정을 통하여 초기 유효구속압을 설정하여 주며, 체적 변형률이 일정해지는 시기까지 압밀 과정을 수행한다. 초기 유효구속압은 현장 지반의 지반 심도와 관련이 있으므로 현장성을 고려하여 적절히 산정하여 주어야 한다. 압밀 후 시료에 축응력을 반복적으로 가하여 지진력을 재현하게 된다. 이와 같은 시험 과정을 통하여 시료의 시간에 따른 간극수압, 변위, 응력 및 응력-변형률 관계 곡선 등에 대한 자료를 얻을 수 있다.

그림 12.6은 대표적인 진동삼축압축시험 결과를 나타낸 것이며, 진동 하중이 가해짐에 따라서 유발되는 과잉간극수압의 양상을 나타낸 것이다.



〈그림 12.6〉 시간에 따른 과잉간극수압의 발현

하중비를 변화시키면서 시험을 반복하며 3수준 이상의 하중 비를 변화시키며, 시험을 수행하여 재하 횡수-하중 비 관계곡선을 구해야 대상 지반의 지진에 대한 전단저항강도 비를 구할 수 있다(그림 12.7 참조).



〈그림 12.7〉 재하횟수에 따른 액상화 저항 강도비 곡선

(나) 비틀전단시험

진동삼축시험에서의 문제점을 극복하기 위하여 비틀전단시험이 개발되어 사용되고 있다. 불교란 시료를 이용하여 실험을 수행할 때는 원통형 시료를 사용하는데, 이 때 시료 내부에 발생하는 전단응력 및 전단변형의 크기가 일정하지 않은 문제점이 지적되고 있다. 시료 내부에 발생하는 전단변형의 변화를 줄이기 위하여 중공 시료가 사용되기도 하나, 불교란 시료 성형 시 상당한 교란이 유발된다.

(다) 공진주시험

공진주시험은 $10^{-5} \sim 10^{-1} \%$ 의 매우 작은 변형률 범위 하에서의 지반의 동적 특성치의 변화 양상을 파악할 수 있는 시험이다. 이 시험 결과로부터 전단 탄성계수와 전단 변형률, 감쇠비를 알 수 있다. 또한 이들 간의 관계 그래프를 통하여 지진 하중 작용 시 지반의 거동을 파악할 수 있다.

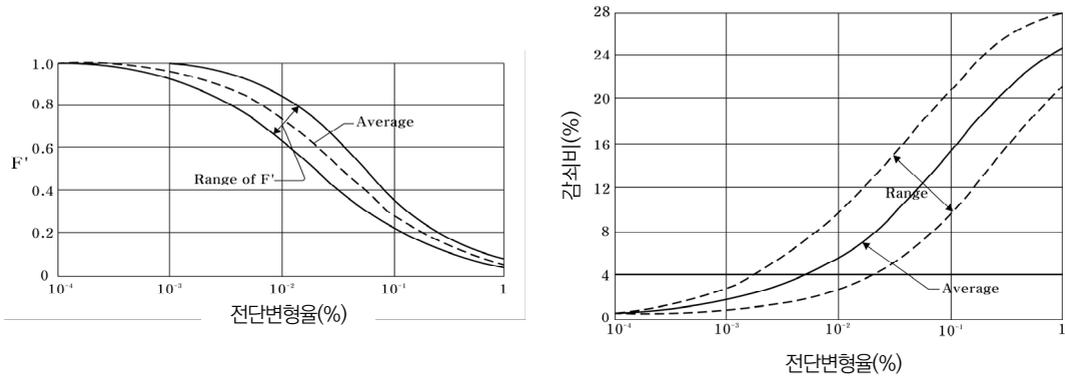
공진주시험은 탄성과 전달 이론에 근거하여 지반의 Young 계수 혹은 전단탄성계수와 감쇠 비를 구하는 시험이다. 공진주시험법은 다양한 시험기가 개발되어 사용되어 오고 있으며, 주로 전단력을 작용시켜 시험을 수행하며 자유단-자유단 및 고정단-자유단 단부 조건의 공진주시험이 주로 사용되고 있다.

(라) 펄스시험 (pulse test)

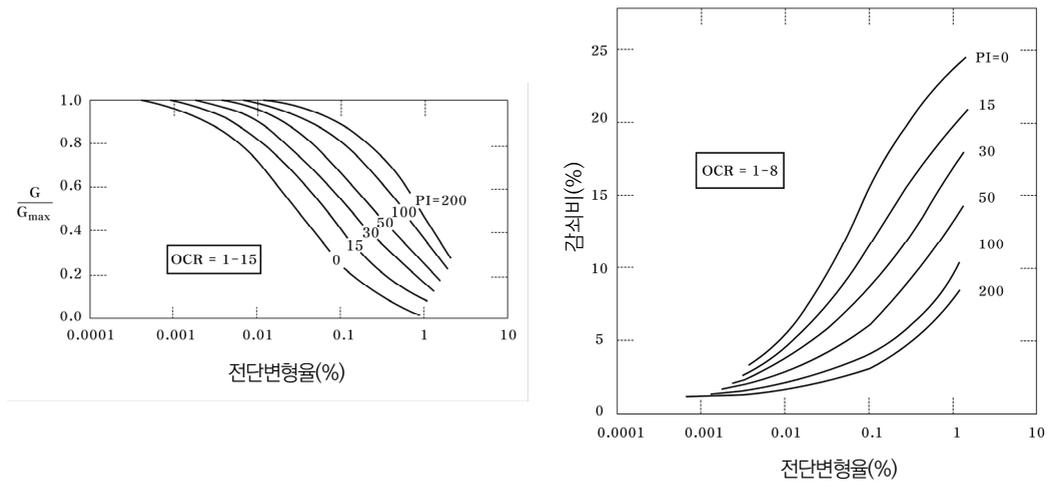
시료에 전단파 또는 압축파를 가하여 전달 속도를 측정하는 시험으로서, 파속으로부터 시료의 탄성계수 혹은 전단탄성계수를 구할 수 있다. 최근에 압전식 벤티 측정기 (Piezo-electric bender element)가 개발되어 발진자와 감지기로 사용되고 있다. 전달 속도 측정 방법은 시료의 길이가 짧아 파가 도달하는 정확한 시점을 측정하기 어렵고,

저변형을 하의 변형 특성을 측정함으로써 지반의 비선형 거동을 구할 수 없다.

(4) 조립토와 세립토의 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선은 일반적으로 그림 12.8과 그림 12.9에 도시된 범위의 값을 갖는다(그림에서 $F' = \frac{G}{G_{max}}$).



<그림 12.8>



<그림 12.9>

12.4 비탈면 내진설계

12.4.1 일반사항

비탈면이 속한 주 구조물이 활성단층이 지나가는 지역, 활성단층 인접지역, 지진 시 액상화 또는 과도한 침하가 예상되는 지역에 있고, 비탈면에도 그 영향이 있는 경우에는 지반을 보강 또는 개량하여 비탈면의 붕괴 가능성을 감소시켜야 한다.

비탈면의 내진설계는 설계 지반가속도에 대하여 내진성능수준을 만족시키도록 설계해야 한다.

비탈면의 내진설계는 다음의 항목에 대하여 검토한다.

- 비탈면 기초지반의 액상화 가능성
- 비탈면 자체의 활동에 대한 안정성

12.4.2 내진설계 절차

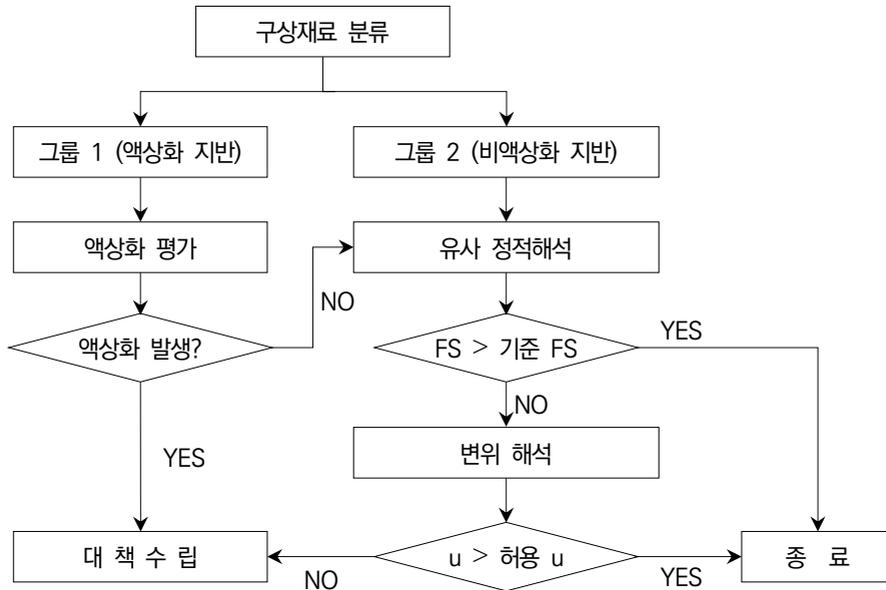
비탈면의 내진설계는 비탈면과 비탈면 하부 기초지반의 지반조건에 따라 우선적으로 액상화 발생 가능성을 검토하고, 비탈면 안정성 검토를 수행한다.

(1) 액상화 및 지진하중을 고려한 비탈면의 활동에 대한 기준안전율은 다음과 같다.

〈표 12.10〉 내진 설계 시 적용하는 기준안전율

구 분		기준안전율	참 조
액상화	간편법	$FS > 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> • $FS > 1.5$ 인 경우는 액상화에 대하여 안전 • $FS < 1.5$ 인 경우는 액상화 상세 검토 수행
	상세 검토	$FS > 1.0$	<ul style="list-style-type: none"> • 진동삼축압축시험 결과 이용하여 검토
지진 시 안정 해석		$FS > 1.1$	<ul style="list-style-type: none"> • 지진관성력은 파괴 토체의 중심에 수평방향으로 작용 • 지하수위는 실제 측정 또는 평상 시의 지하수위 적용

(2) 비탈면의 내진설계는 액상화 발생 가능성 검토, 안정 해석, 변위 해석으로 이루어진다. 우선 비탈면 구성 재료를 액상화 발생 가능성의 유·무에 따라 구분하여 액상화 지반에 대해서는 액상화 검토를 수행하여 액상화가 발생할 것으로 예상되는 경우 재설계를 실시하고, 그렇지 않을 경우에는 비액상화 지반으로 간주하여 비탈면 안정 해석을 수행한 후 기준 안전율 이하로 산정되는 경우 변위 해석을 수행하여 안정성을 검토한다. 비탈면의 내진설계 흐름도는 아래 그림 12.10과 같다.



〈그림 12.10〉 내진설계 흐름도

(3) 액상화 평가 수행 여부를 판단하기 위하여 비탈면 구성 지반을 아래와 같은 기준에 따라 액상화 발생 가능 지반과 그렇지 않은 지반으로 분류한다. 액상화 평가 수행 여부를 판단하기 위한 예비 평가방법으로는 비탈면 구성 지반의 입도분포곡선을 이용하거나 전단파속도를 측정하여 판별하는 방법 등이 있으나, 이 기준에서는 아래와 같이 통일분류법을 이용하는 방법의 적용을 제안한다.

(가) 비탈면 구성 지반을 통일분류법에 따라 다음의 2 그룹으로 구분한다.

(a) 그룹 1 : GW, GP, GM, SW, SP, SM, ML

(b) 그룹 2 : GC, SC, CL, OL, MH, CH, OH

(나) 비탈면 구성 지반이 그룹 1에 속하는 경우 : 액상화에 대한 평가를 수행하여 액상화 발생 가능성이 있으면 대책을 수립하고, 액상화 발생 가능성이 없으면 안정성·변위 평가를 수행한다.

(다) 비탈면 구성 재료가 그룹 2에 속하는 경우 : 액상화 발생 가능성은 없는 것으로 보고, 안정성·변위 평가를 수행한다.

(라) 위의 구분 외에도 다음에 해당하는 지반조건에서는 액상화 평가를 생략한다(항만 및 어항설계기준, 2005).

- (a) 지하수위 위의 지반
- (b) 주상도 상의 표준관입시험의 N 값이 20 이상인 지반
- (c) 대상 지반심도가 20 m 이하인 지반(단, 20 m 이상인 지반이더라도 액상화가 발생하는 경우에 구조물에 중대한 손상이 생긴다고 판단되거나, 분명히 상부 20 m 토층과 연관이 있는 층이라고 판단이 되는 경우는 액상화 예측·판정을 시행한다.)
- (d) 소성지수(PI)가 10 이상이고, 점토 성분이 20 % 이상인 지반
- (e) 세립토 함유량이 35 % 이상인 경우
- (f) 상대밀도가 80 % 이상인 지반
- (g) 토층 분류가 $S_A \sim S_D$ 인 지반

12.4.3 액상화 검토

비탈면의 액상화에 대한 검토는 표준관입시험의 N값을 이용한 수정 Seed와 Idriss의 간편법을 이용하여 수행한다.

- (1) 액상화 지역의 지반거동은 해석적인 방법이나 물리적인 방법으로 모형화 시키기 어려우므로 Seed와 Idriss(1971)가 제안한 방법에 기초한 액상화 간편 예측법을 통하여 액상화에 대한 안전율을 산정한다. 액상화에 대한 안전율은 지진에 의하여 발생하는 지반의 진동전단응력(τ_d)과 액상화에 저항할 수 있는 지반의 전단응력(τ_s)의 비로 정의된다.
- (2) 표준관입시험의 N값을 이용한 액상화 평가 방법은 다음과 같다.
 - (가) 지진력을 표현한 진동전단응력 비를 식 12.1과 같이 산정한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) r_d \quad (12.1)$$

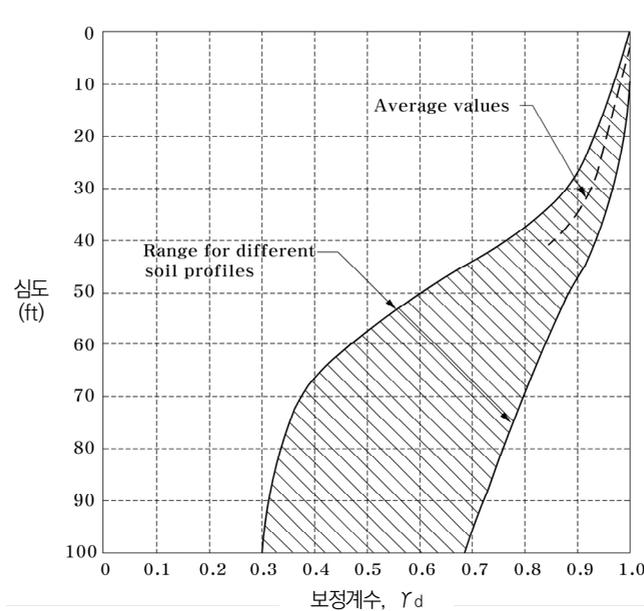
여기서, a_{\max} : 액상화 평가 지층의 최대 지반가속도(지진응답해석 수행)

g : 중력가속도

σ_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 총 상재압

σ_v' : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효 상재압

r_d : 심도보정계수(그림 12.11 참조)



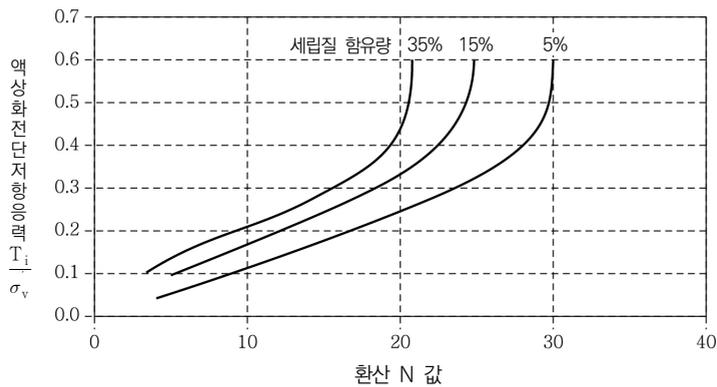
〈그림 12.11〉 심도보정계수 산정도표

(나) 전단저항응력 비는 표준관입시험(SPT) 결과인 N값을 이용하여 다음 순서를 따라 산정한다.

(a) 표준관입저항치 N으로부터 환산 N값인 N_1 을 다음 식으로 구한다.

$$N_1 = N \cdot \sqrt{\frac{10}{\sigma_v'}} \quad (12.2)$$

여기서, σ_v' : 유효 상재압 (단위 : tonf/m²)



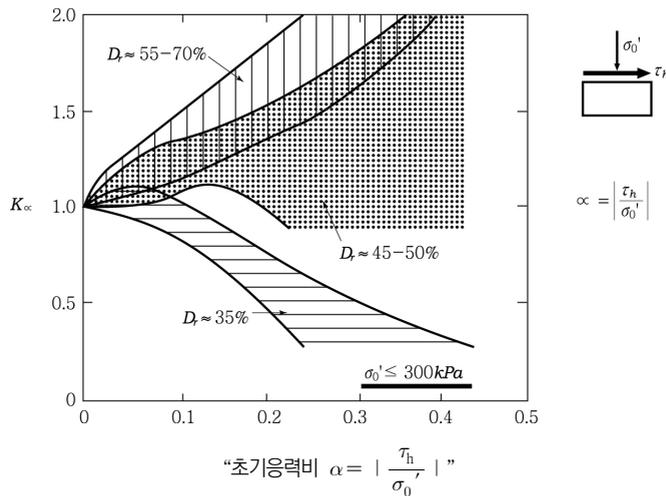
〈그림 12.12〉 환산 관입 저항치와 현장 액상화 거동의 상관 관계
(항만 및 여항시설의 내진설계표준서, 해양수산부, 1999)

(b) 산정된 환산 N값으로부터 그림 12.12를 이용하여 액상화 전단저항응력 비를 산정한다. 그림 12.12는 지진 규모 6.5를 기준으로 한 것이며, 세립질 함유량을 고려할 수 있다.

(c) ‘(b)’ 에서 산정한 전단저항응력 비는 지표면이 수평한 경우, 즉 지진동 발생 전의 초기응력이 주응력 상태인 경우에만 유효하다. 따라서 비탈면과 같이 경사진 지반에서는 ‘(나)’에서 구한 전단저항응력 비를 지진동 발생 전 초기전단응력의 영향을 고려하여 식 12.3과 같이 보정하여 주어야 한다.

$$\frac{\tau_1}{\sigma_v'} = \frac{\tau_1}{\sigma_v'} \cdot K_\alpha \tag{12.3}$$

여기서, 보정계수 K_α 는 초기응력비(τ_h/σ_v')와 상대밀도의 함수로서, 그림 12.13을 이용하여 산정하며, 초기전단응력(τ_h)은 정적응력해석(예 : 정적유한요소해석)을 수행하여 산정한다.



〈그림 12.13〉 보정계수 K_α 의 산정도표(After Seed and Harder, 1990)

(3) 액상화에 대한 안전율은 식 12.4와 같이 산정한다.

$$FS = \frac{\left(\frac{\tau_1}{\sigma_v'} \right)}{\left(\frac{\tau_d}{\sigma_v'} \right)} \tag{12.4}$$

(4) 산정된 안전율을 기준안전율과 비교하여 액상화 발생 여부를 판정한다.

(5) 간편 해석 결과 액상화 발생 구역에 대해서는 상세 해석을 수행하여 보다 신뢰성 높은 액상화 검토를 수행할 수 있다. 상세 해석은 전단저항응력 비를 진동삼축압축시험을 수행하여 산정한다는 점에서 간편 해석과 구분되며, 나머지 과정은 동일하다. 상세 해석에 있어 전단저항응력 비는 다음과 같이 산정한다.

진동전단응력비를 3수준 이상 변화시켜 진동삼축압축시험을 수행하여 액상화 전단저항응력 비 특성 곡선(그림 12.7)을 작성한다. 이 때, 특성곡선에 이용되는 진동삼축압축시험 결과는 현장지반조건 및 지진특성 등을 고려한 보정작업($c_r \times$ 진동전단응력 비)이 수행되어야 하며, 보정계수 c_r 은 다음 표 12.11을 이용하여 산정한다.

〈표 12.11〉 보정계수 c_r

제안자	산정식	K_0 에 따른 c_r 값	
		$K_0 = 0.4$	$K_0 = 1.0$
Finn et al	$c_r = \frac{1+K_0}{2}$	0.70	1.00
Seed and Peacock		0.55 ~ 0.72	1.00
Castro	$c_r = \frac{2(1+2K_0)}{3\sqrt{3}}$	0.69	1.15

12.4.4 지진 시 비탈면 안정 해석

지진 시 비탈면의 안정 해석 방법은 유사정적해석방법, Newmark방법, 동적 해석을 수행하여 구할 수 있다.

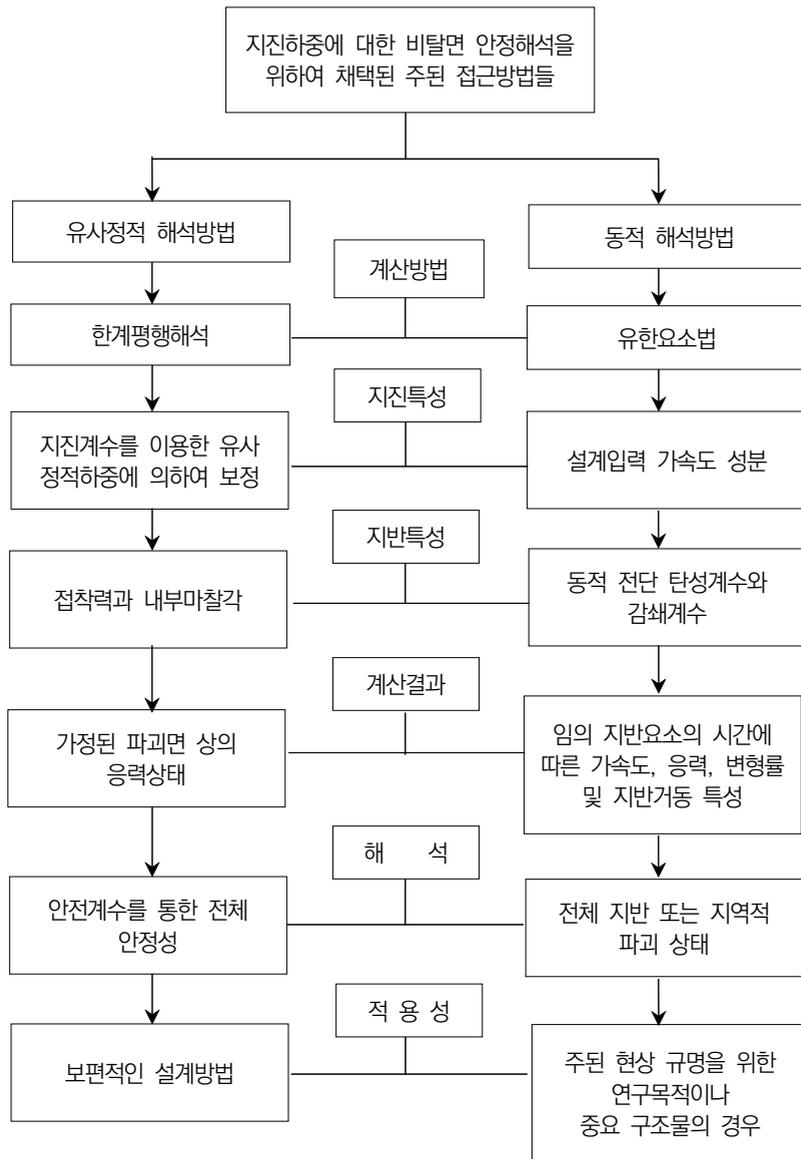
유사정적해석은 한계평형해석에서 파괴 토체의 중심에 지진계수를 적용한 등가의 지진관성력을 수평 방향으로 작용시키고, 정적인 방법과 동일한 방법으로 해석을 수행한다.

안정 해석에서 기준안전율을 확보하지 못하는 경우 Newmark의 변위해석법을 추가로 수행한다. 허용변위기준은 비탈면 어깨에서 비탈면 높이의 1% 변위 이내로 한다.

동적해석은 유한요소해석 또는 유한차분해석 프로그램을 이용하여 수행하며, 입력하중은 기반암에서의 가속도 시간이력을 이용한다.

(1) 유사정적해석방법은 기존 비탈면의 정적 초기응력 상태 이외의 지진 등으로 인한 동하중을 유사정적 하중으로 대처하여 정적 비탈면 해석방법으로 적용되고 있는 한계평형해석 방법이나 응력해석방법 등을 이용하여 해석하는 방법이다.

이와 반면에 동적 해석방법은 동하중의 시간에 따른 시간 이력을 고려함으로써 각 시간에 따라 발생하는 응력과 변형에 대한 변화를 해석하는 방법이다. Newmark 방법의 경우 유사정적해석방법을 바탕으로 동적 지반운동을 고려하여 지진 시 비탈면의 변위를 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 그림 12.14는 유사정적해석방법과 동적해석방법의 접근방법을 나타낸다.



〈그림 12.14〉 유사정적해석방법과 동적해석방법의 접근방법

(2) 유사정적해석에서 가장 중요한 값은 등가관성력을 계산하기 위한 지진계수이며, 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$K_h = \frac{a_{\max}}{2g} \quad (12.5)$$

여기서, K_h : 수평지진계수

a_{\max} : 지표면 최대가속도

지표면 최대가속도 a_{\max} 는 지반가속도계수의 결정에 제시된 방법으로 산정하는 것을 기본으로 하되, 해석대상 비탈면의 부지조건이 다음과 같을 때에는 지진응답해석을 수행하여 산정한다.

- 느슨한 모래질 층인 경우
- 층 두께가 30 m 이상인 경우
- 포화된 느슨한 혹은 중간 모래질 층인 경우

유사정적해석방법의 적용을 통한 비탈면의 안정해석 시 가장 중요한 고려사항으로 동하중의 효과를 고려하기 위한 유사정적 하중 산정 시 이용되는 지진계수 K_h 값의 결정과 동하중에 의한 지반 내의 응력 및 변형률을 적절히 고려해야 한다. 다음은 지진계수 값을 결정하기 위한 방법을 기술하였다.

(가) 경험적인 방법에 의한 결정

기존의 비탈면의 동하중에 대한 실제 거동 예를 바탕으로 결정되었으며, 미국의 경우 0.1 ~ 0.15, 일본은 0.15 ~ 0.25 범위의 K_h 값이 이용되고 있다.

(나) 동적해석방법에 의한 결정

최초의 동적해석방법의 적용은 흙 댐을 삼각형 모양의 일차원 수직 전단 빔으로 가정하고, 전단 변형이 수평면에 고르게 분포한다는 가정 하에 해석하였다. 지반이 무한히 얇은 수평요소로 이루어지고 점탄성 거동을 한다는 가정 하에 각 지반 요소는 전단 스프링과 점성을 가진 감쇠기구로 연결되고, 저면에 균등하게 분포하는 지반운동을 가정하여 각 깊이에 대한 K_h 값을 산정한다. 1962년 Inshizaki와 Hatakeyama는 유한차분법을 적용하였으며, 1966년 Clough와 Chopra는 유한요소법을 강성 기초지반에 놓인 균질한 흙 댐에 대한 동적해석을 위하여 확장 적용 하였다. 이후 많은 공학자들에 의하여 동적안정을 위한 해석방법들이 모색 되었다.

유한요소법의 경우, 동하중에 의한 임의의 시간 t 에서 얻어지는 요소 경계에서의 수직응력과 전단응력으로부터 각 요소의 연직 수평력 $F_v(t)$ 및 수평 관성력 $F_h(t)$ 를 다음 식으로 산정하게 된다.

$$K_h(t) = \frac{F_h(t)}{W}; K_v(t) = \frac{F_v(t)}{W} \quad (12.6)$$

여기서, W : 가상 파괴 토체의 무게

다음은 유한요소법을 적용한 일반적인 동적해석방법의 개략적인 순서이다.

- (a) 비탈면을 유한 요소화 한다.
- (b) 지반물성치를 결정하며, 실내실험 또는 현장실험을 통한 변형률에 따른 전단계수(G)와 감쇠계수(D)를 결정한다.
- (c) 실제 동하중의 속도성분이나 지역적 특성을 고려한 설계입력 가속도 성분 결정
- (d) 기본 운동방정식을 이용한 유한요소 해석방정식을 도출한다.
- (e) 기본 운동방정식의 해를 구한다.

동적해석방법은 많은 지진특성을 고려할 수 있으며, 동하중에 의하여 유발된 응력상태 및 변형률 상태를 고려한 강도계수를 사용함으로써 지반의 동적거동 특성을 적절히 고려할 수 있다. 또한 복잡한 비탈면 형상이나 지반조건을 고려할 수 있다. 그러나 계산 과정이 복잡하며, 지반 재료의 동적거동 특성을 나타내기 위한 지반계수를 산정하는데 어려움이 있다.

(다) 실제 동하중의 최대가속도에 의한 결정

지반체가 강체로서 거동한다는 가정 하에 지반에 작용하는 동하중의 최대가속도를 기준으로 결정하는 방법이며, 보수적인 결과를 나타낸다.

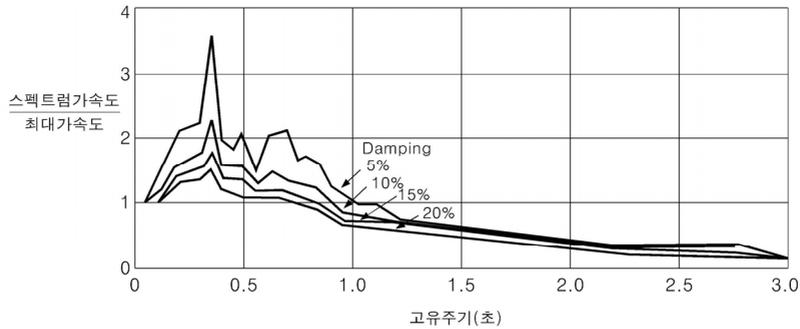
- (3) 비탈면의 변위는 Newmark 활동블록이론에 기초한 간편해석을 수행하여 산정하고, 허용변위 값과 비교하여 설계의 적정성을 판별한다. 비탈면의 변위에 관한 간편해석법은 안전율이 1이 될 때의 가속도, 즉 항복가속도를 산정하고 이를 2번 적분하여 변위를 산정하는 Newmark 활동블록이론을 기본개념으로 한다. 대표적인 변위간편해석법으로는 Makdisi-Seed 방법과 Newmark 방법이 있다.

(가) Makdisi-Seed 방법

Makdisi-Seed에 의한 변위해석방법의 수행절차는 다음과 같다.

- (a) G/G_{max} , D (damping ratio)와 전단변형률에 대한 그래프를 작성한다.

(b) 설계지진에 대해 그림 12.15와 같은 가속도 스펙트럼 그래프를 작성한다.



〈그림 12.15〉 가속도 스펙트럼 그래프

(c) 전단탄성계수 G 를 가정하여 G/G_{max} 값을 산정한다.

(d) ‘(a)’에서 작성된 그래프를 통하여 전단변형률과 Damping ratio를 구한다.

(e) $n = 1, 2, 3$ 일 때의 고유진동수를 산정한다.

$$\omega_1 = \frac{2.404}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (12.7)$$

$$\omega_2 = \frac{5.52}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (12.8)$$

$$\omega_3 = \frac{8.65}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (12.9)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (12.10)$$

여기서, ρ : 비탈면의 밀도 = $\frac{\gamma}{g}$, T_n : 고유주기

(f) ‘(b)’에서 작성된 그래프에서 Damping ratio와 고유주기에 대한 스펙트럴 가속도 S_{a1}, S_{a2}, S_{a3} 를 구한다.

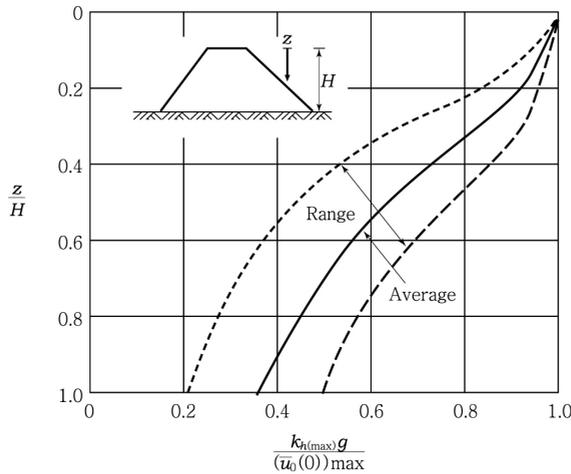
(g) 비탈면 마루에서의 최대가속도를 산정한다.

$$\begin{aligned} u''_{a(max)}(\text{at } z = 0) &= \sqrt{\sum_{n=1}^3 [u''_{an}(0)]_{max}^2} \quad (12.11) \\ &= \sqrt{(1.6S_{a1})^2 + (1.06S_{a2})^2 + (0.86S_{a3})^2} \end{aligned}$$

비탈면의 평균 등가 전단변형률을 산정한다.

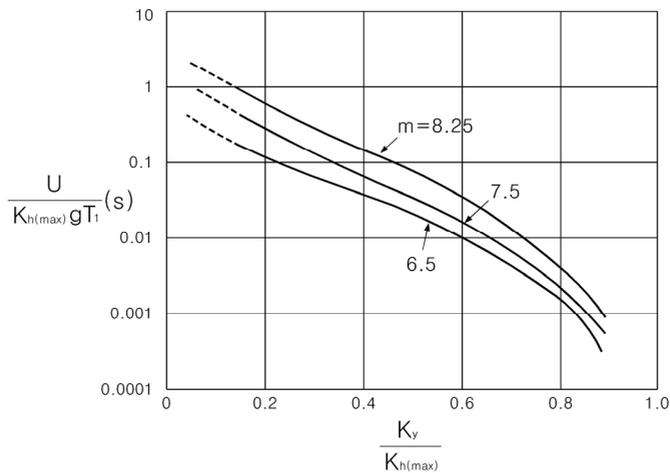
$$(\gamma'_{av})_{eq} = 0.195H \frac{\rho}{G} S_{a1} \quad (12.12)$$

- (h) 'd'에서 구한 전단변형률과 비교하여 차이가 클 경우 (c)부터의 과정을 반복하고 유사한 값일 경우 (g)에서 산정된 최대가속도 값을 사용한다.
- (i) 그림 12.16에서 최대수평가속도($k_{h(max)}g$)를 결정한다.



〈그림 12.16〉 비탈면의 높이에 따른 최대가속도 비

- (j) 항복가속도($k_y g$)은 일반적으로 한계평형해석 프로그램을 이용하여 안전율이 1일 때의 횡방향 지진가속도계수를 산정할 것을 권장하나, 만일 선단부를 통과하는 파괴가 예상될 시에는 표 12.12를 사용하여 간편하게 결정하여도 무방하다.
- (k) 그림 12.17에서 최대가속도 비에 따른 비탈면의 수평변위(U)를 결정한다.



〈그림 12.17〉 최대가속도 비에 따른 영구 변형

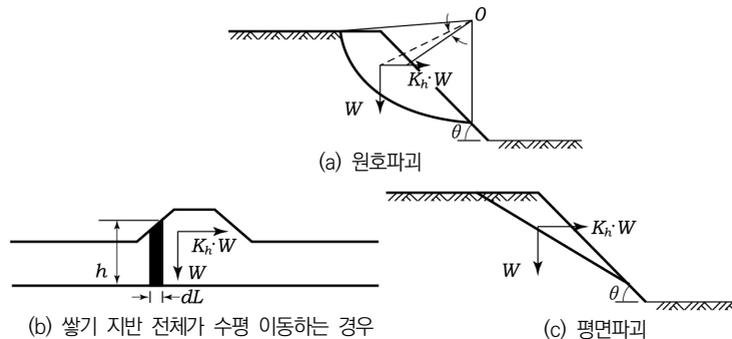
〈표 12.12〉 항복가속도

β	$\tan\phi$	$c/\gamma H$			
		0.05	0.10	0.15	0.20
15	0.1	0.00	0.08	0.15	0.20
	0.2	0.10	0.20	0.27	0.33
	0.3	0.20	0.31	0.39	0.44
	0.4	0.30	0.41	0.50	0.55
	0.5	0.40	0.51	0.60	0.66
	0.6	0.49	0.61	0.70	0.76
	0.7	0.58	0.70	0.80	0.87
	0.8	0.66	0.79	0.89	0.97
	0.9	0.74	0.87	0.98	1.07
30	0.1	-	0.00	0.13	0.20
	0.2	0.00	0.11	0.25	0.35
	0.3	0.05	0.22	0.37	0.46
	0.4	0.14	0.32	0.46	0.56
	0.5	0.24	0.41	0.55	0.66
	0.6	0.32	0.50	0.63	0.75
	0.7	0.40	0.57	0.72	0.83
	0.8	0.47	0.65	0.79	0.91
	0.9	0.53	0.71	0.86	0.98
45	0.1	-	-	0.07	0.22
	0.2	-	0.00	0.18	0.33
	0.3	-	0.11	0.28	0.42
	0.4	0.00	0.20	0.37	0.51
	0.5	0.06	0.29	0.46	0.59
	0.6	0.14	0.36	0.53	0.67
	0.7	0.21	0.43	0.59	0.74
	0.8	0.27	0.49	0.66	0.80
	0.9	0.33	0.54	0.71	0.84
60	0.1	-	-	0.00	0.16
	0.2	-	-	0.08	0.26
	0.3	-	0.00	0.18	0.34
	0.4	-	0.05	0.26	0.42
	0.5	-	0.13	0.33	0.49
	0.6	0.00	0.20	0.39	0.55
	0.7	0.01	0.26	0.45	0.60
	0.8	0.07	0.32	0.50	0.65
	0.9	0.13	0.36	0.54	0.69
75	0.1	-	-	-	0.04
	0.2	-	-	0.00	0.14
	0.3	-	-	0.02	0.22
	0.4	-	-	0.10	0.29
	0.5	-	0.00	0.17	0.35
	0.6	-	0.01	0.23	0.40
	0.7	-	0.07	0.28	0.44
	0.8	-	0.12	0.32	0.38
	0.9	-	0.16	0.35	0.51

c : 점착력 ϕ : 내부마찰각 H : 제체의 높이 β : 제체의 경사 γ : 단위중량

(나) Newmark 방법

Newmark는 정적 평형 상태를 고려함으로써 그림 12.18과 같은 세 가지 파괴 형태를 유발시키기 위하여 요구되는 최소 지진계수 K 를 산정하였으며, K 는 동하중에 의한 비탈면 안전율이 1일 때의 지진계수 값이다.



〈그림 12.18〉 동하중 작용 시 세 가지 파괴형태

(a) 원호 파괴의 경우[그림 12.18(a)]

안전율 F' 을 주는 지진계수 값 K' 과 안전율 1일 때의 지진계수 값 K 간의 관계식은 다음의 식과 같다.

$$K = K' F' + (F' - 1) \sin \beta \quad (12.13)$$

지진력에 의한 관성력이 수평방향으로 작용하는 경우 다음식과 같이 되며, 여러 가상 파괴면들을 대상으로 K' 값을 가정함으로써 상응되는 F' 값을 산정하고, 이들로부터 최소 지진계수 값 K 를 구한다.

$$K = K' F' + (F' - 1) \tan \beta \quad (12.14)$$

(b) 전체 흙쌓기 지반이 수평 이동하는 경우[그림 12.18(b)]

수평방향으로 작용하는 관성력 KW 가 기초 지반의 비배수 전단강도를 넘어서 거의 수평파괴면을 형성하며 흙쌓기 지반이 움직이는 경우이다.

$$AK = \frac{\Sigma S dL}{w} \quad (12.15)$$

여기서, S = 기초지반의 비배수 전단강도

dL = 파괴면에 대한 미소길이

점토 지반과 같이 비배수 전단강도가 깊이에 따라 선형 증가할 경우의 유효상재응력 σ 는 다음의 식과 같다.

$$K = \frac{S}{\sigma} \left(1 - \frac{\Sigma u d L}{\Sigma r h d L} \right) \quad (12.16a)$$

$$K = \frac{S}{\sigma} (1 - r_u) \quad (12.16b)$$

여기서, $\sigma = (r h - u)$

h : 지반요소의 연직높이

u : 간극수압

r_u : 평균간극수압비

(c) 비탈면 내 평균파괴의 경우[그림 12.18(c)]

$$K = (F - 1) \sin \theta \quad (12.17)$$

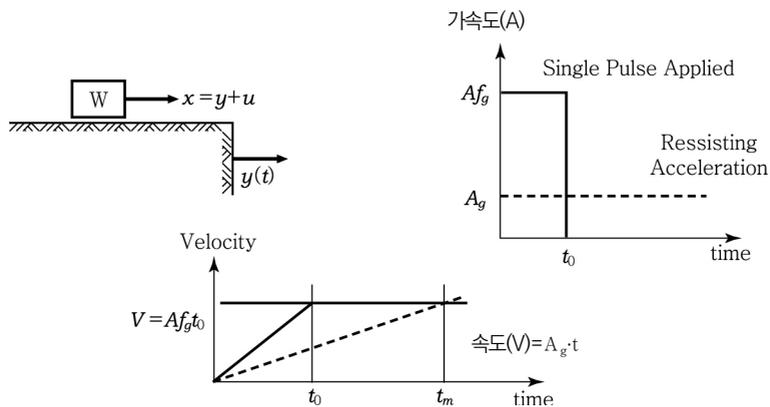
여기서, θ : 비탈면의 경사

F : 지진하중이 없는 경우의 안전율

위의 세 가지 방법에서 얻어진 최소 지진계수 값 K 를 기준으로 변위를 산정할 수 있으며, 예로써 해설 그림 12.19에서 t_0 시간동안 작용된 Kg 의 가속도 성분에 의하여 동하중을 받는 무게 W 의 강체에 대한 최대 변위는 아래의 식과 같다.

$$U = \frac{1}{2} V t_m - \frac{1}{2} V t_0 = \frac{V^2}{2gK} \left(1 - \frac{K}{K_1} \right) \quad (12.18)$$

여기서, U = 임의의 시간 $t_m = \frac{V}{Kg}$ 일 때 강체의 상대적인 최대변위이며 가속도에 의한 힘 V 의 최대속도는 시간 t_0 일 때 Kgt_0 의 값을 가지며 저항하는 가속도 성분 Kg 에 의한 속도는 Kgt 의 값을 가진다.



〈그림 12.19〉 가속도 성분 A_g 를 받는 강체의 변위

Newmark 방법은 건조한 비점성토 흩쌓기 지반의 변위를 예측하는데 성공적으로 이용되었지만 과잉간극수압이 발생하는 지반의 경우에는 간극 수압의 예측이 어려우므로 유효응력에 근거를 한 Newmark 방법의 적용이 어려운 단점이 있다.