

국토교통부 고시 제2017-446호

도시철도건설규칙 제73조 규정에 의하여 「도시철도 내진설계 기준」을 다음과 같이 개정 고시합니다.

2017년 7월 1일

국토교통부장관

도시철도 내진설계 기준

제 1 장 일반사항

1.1 목적 및 적용범위

1.1.1 목적

이 기준은 도시철도 구조물의 내진설계를 수행함에 있어 상위개념인 “내진설계 기준 준칙(1998. 2. 건설교통부)”에서 규정하고 있는 내진설계기준을 만족할 수 있도록 도시철도 구조물의 특성을 고려한 하위 개념의 내진설계기준을 제시함에 있다.

1.1.2 적용범위

- 1) 본 기준은 지하에 건설되는 개착식 본선BOX 구조물, 정거장 본체 구조물과 같은 지하에 건설되는 주요한 도시철도 구조물의 내진설계에 적용한다.
- 2) 도시철도 구조물중 지하와 지상의 경계부 혹은 지상에 건설되는 경우는 “철도 설계기준(철도교편)(2004, 건설교통부)의 제5편, 내진설계” 관련규정을 적용한다.
- 3) 토피가 10 m 이상 확보되고, 표준관입시험치(SPT) N값이 30이상인 주변지반을 갖는 1층 구조로 이루어진 본선 구조물은 책임기술자의 판단에 따라 지진에 대

한 안정성 검토를 생략할 수 있다.

1.1.3 관련기준

도시철도 구조물의 내진설계에 있어 본 기준에 기술되지 않은 사항은 다음의 기준을 참조하여 적용한다.

- 내진설계기준 준칙(1998, 건설교통부)
- 콘크리트 구조설계기준(2003, 건설교통부)
- 도로교 설계기준(2005, 건설교통부)
- 철도 설계기준(2004, 건설교통부)

1.2. 용어 및 기호의 정의

1.2.1 용어의 정의

- ① 가속도 계수(acceleration coefficient, A) : 지진구역계수(Z)에 위험도계수(I)를 곱한 값(무차원량)
- ② 고유주기(natural period, T) : 자유진동하는 구조물의 진동이 반복되는 시간 간격(sec)
- ③ 고유 진동수(natural frequency, f) : 감쇠효과가 무시된 구조물의 자유진동에서 시간당 발생 진동수(H_z)
- ④ 내진등급(seismic importance level) : 구조물의 중요도에 따라서 정해지는 내진 설계상의 등급
- ⑤ 연성(ductility) : 비탄성응답을 허용하는 부재나 접합부의 성질
- ⑥ 위험도계수(I) : 평균 재현주기별 지진의 위험도를 나타내는 계수(무차원량)
- ⑦ 응답수정계수(response modification factor) : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 설계지진력을 산정하기 위한 수정계수
- ⑧ 응답스펙트럼(response spectrum) : 어떤 일정한 감쇠비를 가진 구조물의 고유주기나 진동수에 따른 지진의 최대응답을 나타낸 그래프
- ⑨ 지반계수(site coefficient) : 지반상태가 탄성지진응답계수에 미치는 영향을 반영하기 위한 보정계수(무차원량)

- ⑩ 지반종류(soil profile type) : 지진 시에 지반의 진동특성에 따라 공학적으로 분류하는 지반의 종류
- ⑪ 지진구역계수(zone factor, Z) : 우리나라의 지진재해도 해석결과에 근거한 지진구역에서 평균 재현주기 500년에 해당되는 암반상 지진지반운동의 세기를 나타내는 계수(무차원량)
- ⑫ 최대지반가속도(peak ground acceleration) : 지진에 의해 발생하는 최대의 지반가속도로 가속도계수에 중력가속도를 곱한 값으로 정의(m/sec^2)
- ⑬ 탄성지진응답계수(elastic seismic response coefficient, " C_s ") : 모드 스펙트럼 해석법에서 지진하중을 구하기 위한 계수(무차원량)
- ⑭ 평균 재현주기(mean return period) : 어떤 크기나 특성을 가진 지진이 발생하는 평균 시간간격

1.2.2 기호의 정의

A : 가속도 계수(무차원량)

C_a, C_v : 지진계수

E_D : 지반의 동적탄성계수

G_D : 지반의 동적전단탄성계수

I : 위험도계수, 500년 재현주기를 기준으로 한 지진의 위험도를 나타내는 계수
(무차원량)

K_b : 지표면에서의 설계수평지진계수

K'_b : 기반표면에서의 설계수평지진계수

K_H : 측벽에 대한 수평지반반력계수 ($K_H = P_H / \delta_H$)

K_V : 상판 및 저판에 대한 연직지반반력계수 ($K_V = P_V / \delta_V$)

K_{SS} : 측벽에 대한 전단지반반력계수 ($K_{SS} = P_{SS} / \delta_{SS}$)

K_{SB} : 상판 및 저판에 대한 전단지반반력계수 ($K_{SB} = P_{SB} / \delta_{SB}$)

P_H : 측벽에 가해지는 수평방향의 단위하중

P_V : 상판 및 저판에 가해지는 연직방향의 단위하중

P_{SS} : 측벽에 가해지는 전단방향의 단위하중

P_{SB} : 상판 및 저판에 가해지는 전단방향의 단위하중

- p_0 : 구조물 상판의 지진토압
- $p(z)$: 지진시 구조물의 측벽토압
- R : 응답수정계수(무차원량)
- S_v : 기반면에서의 속도 응답스펙트럼
- T_s : 표층지반의 고유주기
- T_G : 표층지반의 특성값
- V_s : 지반의 전단파속도
- Z : 지진구역계수, 어떤 지진구역의 500년 재현주기에 대한 최대지반가속도의 값을 중력 가속도(g)로 나눈값(무차원량)
- δ_H : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 수평방향의 변위(mm)
- δ_V : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 연직방향의 변위(mm)
- δ_{SS} : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 전단방향의 변위(mm)
- δ_{SB} : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 전단방향의 변위(mm)
- v_D : 동적 포아송비
- $\tau(z)$: 주면 전단력

제 2 장 내진설계의 기본 방침

2.1 내진설계의 기본 개념

내진설계란 지진이나 지진이 발생된 후에도 구조물이 안전성을 유지하고 그 기능을 발휘할 수 있도록 설계시에 지진하중을 추가로 고려하여 설계를 수행하는 것을 의미한다. 도시철도 구조물 내진설계는 성능에 기초한 내진설계개념을 도입하였으며, 성능수준은 『기능수행수준』과 『붕괴방지수준』으로 구분하고, 각 성능수준에서의 설계 기본 원칙을 다음과 같이 설정하였다.

- 1) 기능수행수준 : 중간 이하의 규모를 가진 지진에 대해서는 구조부재들이 탄성 영역 내에서 저항하여 심각한 손상을 입지 않아야 한다.
- 2) 붕괴방지수준 : 비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 구조물의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안되며, 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해조사와 보수를 위해 현장접근이 가능하도록 설계를 하여야 한다.

2.2 내진등급 및 내진성능 목표

본 내진설계기준에서 내진설계의 대상으로 선정하고 있는 도시철도 구조물은 『내진 1등급』의 내진 성능을 갖도록 하며, 등급별 내진성능 목표에서 고려하는 설계지진강도는 기능수행수준에서는 평균재현주기 100년, 붕괴방지수준에서는 평균재현주기 1000년에 해당되는 지진지반운동으로 한다.

제 3 장 설계지반운동의 결정

3.1 일반사항

본 장에서는 도시철도 구조물에 대한 내진설계를 위한 설계지반운동 결정시 고려하여야 할 사항을 서술하고 설계지반운동의 수준을 정의한다.

본 기준은 도시철도 구조물의 내진성 확보에 필요한 최소 설계요구조건을 규정한 것으로서, 지진시 도시철도의 기능을 유지하여 대중교통에 중대한 지장을 초래하지 않도록 하는 것을 목적으로 한다.

3.2 설계지반운동 결정시 고려사항

지반운동의 특징을 반영하기 위하여 설계지반운동은 다음과 같은 사항을 고려하여 결정한다.

- 1) 설계지반운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- 2) 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다.
- 3) 설계지반운동은 흔들림의 세기, 주파수 내용 및 지속시간의 세 가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다.
- 4) 설계지반운동은 수평 2축 방향과, 수직방향 성분으로 정의된다.
- 5) 설계지반운동의 수평 2축 방향 성분은 세기와 특성이 동일하다고 가정한다.
- 6) 설계지반운동의 수직 방향 성분은 지하 도시철도구조물의 경우 고려하지 않아도 좋다.

3.3 설계지반운동 수준의 결정

3.3.1 설계지반운동 수준

설계지반운동 수준은 다음과 같이 분류한다.

- 1) 평균재현주기 100년 지진지반운동 (내진1등급 기능수행수준)
- 2) 평균재현주기 500년 지진지반운동 (표준설계 응답스펙트럼)
- 3) 평균재현주기 1000년 지진지반운동 (내진1등급 붕괴방지수준)

3.3.2 행정구역을 이용한 설계지반운동 수준 결정

우리나라 지역에 따라 설계지반운동 수준을 결정한다. 설계지반운동 수준은 기본적으로 『내진설계기준준칙 1998. 2., 건설교통부』에서 제시하고 있는 방법에 의하며, 설계지반운동 수준 결정을 위한 지진구역의 구분, 재현주기별 지진구역계수 및 지반종류별 지진계수는 각각 표 3.3.1, 표 3.5.1, 표 3.5.2 및 표 3.5.3과 같다.

표 3.3.1 지진구역의 구분(1998, 건설교통부)

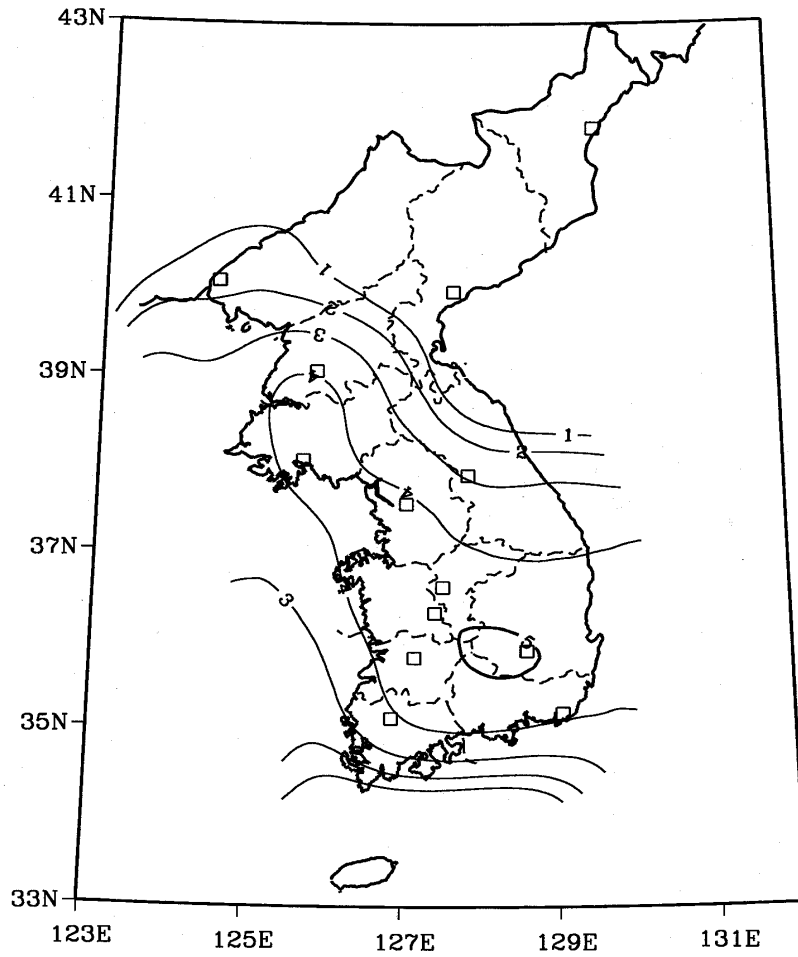
지진구역	행정구역	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

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

3.3.3 지진재해도를 이용한 설계지반운동 수준 결정

지진재해도는 어느장소에서 일어날 수 있는 재현주기에 해당하는 최대가속도 값을 중력가속도($1.0g=980gal(1gal=1\text{ cm/sec}^2)$)의 퍼센트 값으로 나타낸 것으로 각 지역에서의 가속도 값을 등고선으로 연결해 놓은 것이 지진재해도 분포도이다. 해당지역별 설계지반운동 수준은 지진재해 분포도를 이용하여 구하여도 좋다.

10년 내에 발생할 확률 10%의 최대가속도



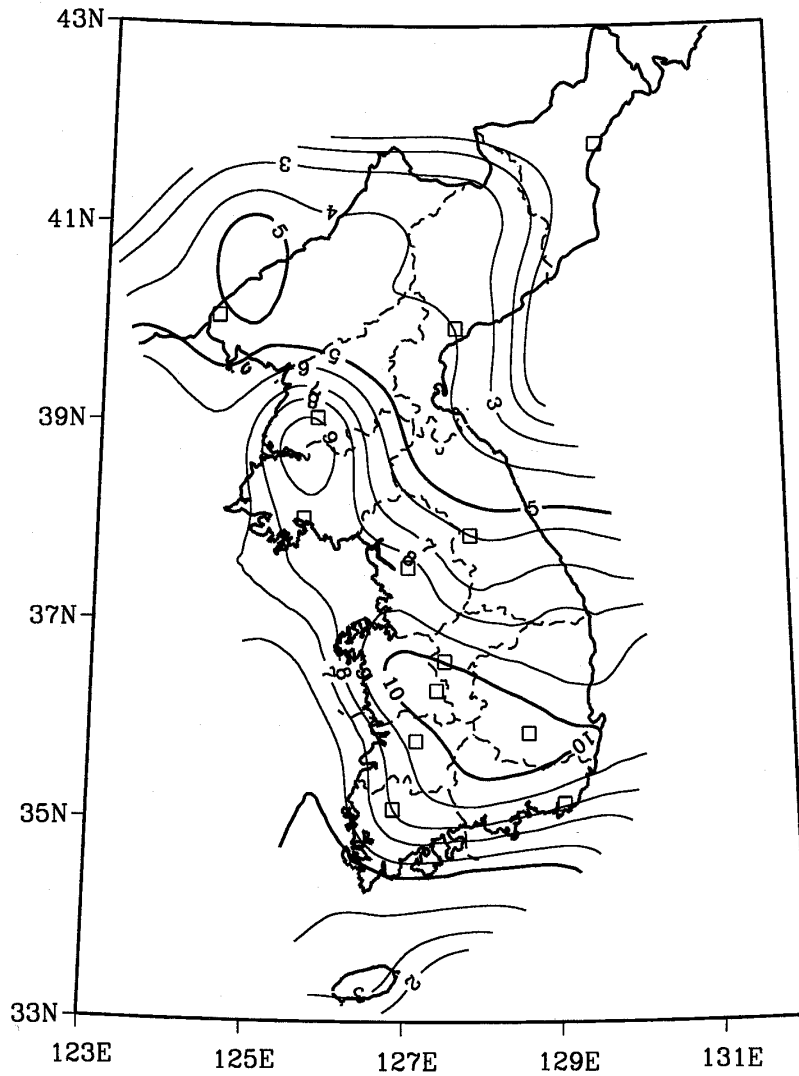
점 선 : 도경계

□표시 : 대도시 (청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천, 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)

도 법 : UTM

그림 3.3.1 100년 재현주기 지진재해도 (기능수행수준)

50년 내에 발생할 확률 10%의 최대가속도



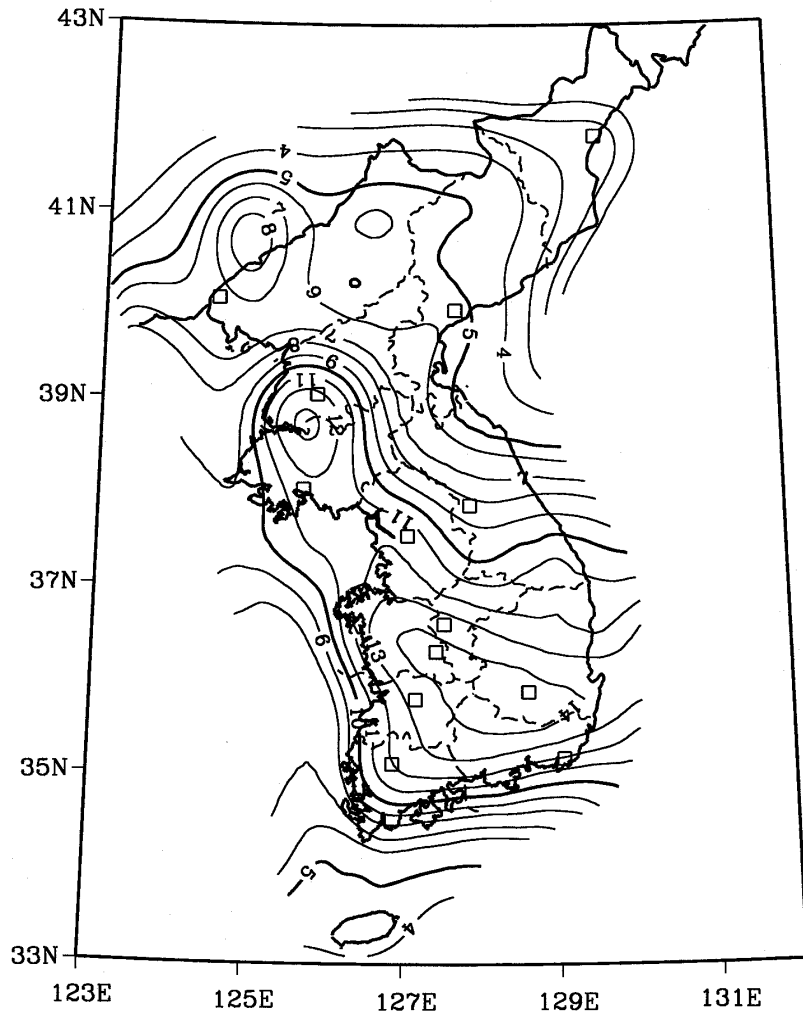
점 선 : 도경계

□표시 : 대도시 (청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천, 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)

도 법 : UTM

그림 3.3.2 500년 재현주기 지진재해도 (표준)

100년 내에 발생할 확률 10%의 최대가속도



점 선 : 도경계

□표시 : 대도시 (청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천, 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)

도 법 : UTM

그림 3.3.3 1000년 재현주기 지진재해도 (붕괴방지수준)

3.4 지반의 분류

- 1) 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 표 3.4.1에서와 같이 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 의 6종으로 분류한다.
- 2) 지반종류 S_F 는 부지 고유의 특성 조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반을 일컫는다.
 - ① 액상화가 일어날 수 있는 흙, 퀵클레이(Quick Clay)와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
 - ② 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반
 - ③ 매우 높은 소성을 갖는 점토지반
 - ④ 층이 매우 두꺼우며, 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토

표 3.4.1 지반의 분류

지반종류	지반상태	상부 30.0 m에 대한 평균 지반 특성 ¹⁾		
		평균전단파속도 V_{s30} (m/s)	평균표준관입시험 ²⁾ \bar{N} (타격수)	평균비배수전단강도 \bar{s}_u (kPa)
S_A	경암지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760초과 1500이하		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360초과 760이하	50초과	100초과
S_D	단단한 토사지반	180이상 360이하	15이상 50이하	50이상 100이하
S_E	연약한 토사지반	180미만	15미만	50미만
S_F	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주 : 1) 상부 30.0 m 이내에 기반암층이 있는 경우는 지표층(기반암 상부 토층)의 평균지반특성을

고려한다. 상부 30 m의 평균 전단파속도는 아래 식을 이용한다.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n d_i / V_{si}}$$

여기서, V_{S30} = 상부 30 m 평균 전단파 속도

d_i = 각 층의 두께

V_{si} = 각 층의 전단파속도

상부 30 m의 평균 SPT-N값은 아래 식을 이용한다.

$$\overline{N} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n d_i / N}$$

여기서, \overline{N} = 상부 30 m 평균 전단파 속도

d_i = 각 층의 두께

N = 각 층의 SPT-N값

상부 30 m의 평균 비배수강도(S_u)는 아래 식을 이용한다.

$$\overline{S_u} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n d_i / S_u}$$

여기서, $\overline{S_u}$ = 상부 30 m 평균 비배수강도

d_i = 각 층의 두께

S_u = 각 층의 비배수강도

- 2) 전단파속도 또는 표준관입시험치는 현장시험 결과치를 이용하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 전단파속도와 표준관입시험치를 모두 측정할 경우는 전단파속도에 의해 분류한다.

3) 기반면의 선정

- ① “내진설계기준연구(1997.11., 건설교통부)”의 지반분류(표 3.4.1) S_B 에 해당되는 전단파속도가 1500 m/sec를 초과하는 지반과 상부층과의 경계면
- ② 물성변화가 적고 해석대상 구조물의 아래면에 걸쳐 넓게 존재하는 지반과 보통암과의 경계면
- ③ 주상도에 보통암이 나타나지 않을 경우, 구조물 저면의 10~15 m 이하인 심도 GL-30 m인 면을 기반면으로 간주한다. 이때, 그 지반은 사질토인 경우 SPT-N값 50이상이어야 하고, 점성토인 경우에는 SPT-N값 30이상이어야 한

다.

- ④ 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우는 구조물 저면을 기반면으로 설정한다.

3.5 설계지진 응답스펙트럼의 작성

3.5.1 표준 설계응답스펙트럼

1) 표준 설계응답스펙트럼은 그림 3.5.1과 같이 표현한다.

그림 3.5.1 표준 설계응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

- 2) 표준 설계응답스펙트럼은 5% 감쇠비 및 지표면에서의 자유장 운동으로 정의된다.
- 3) 그림 3.5.1의 표준 설계응답스펙트럼의 결정을 위해 요구되는 지진구역의 구분, 지진계수 C_a , C_v 와 위험도 계수 I 는 표 3.5.1, 표 3.5.2, 표 3.5.3 및 표 3.5.4를 적용한다.

표 3.5.1 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수, $Z(g)$	0.11	0.07

표 3.5.2 지진계수 C_a

지반종류	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

표 3.5.3 지진계수 C_v

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.18	0.11
S_D	0.23	0.16
S_E	0.37	0.23

표 3.5.4 위험도계수, I

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

4) 지반운동의 공간적 변화 특성 고려 방법

- ① 구조물의 모든 위치에서 똑같은 지반운동으로 가진되는 것이 비합리적으로 판단되는 구조물에 대해서는 지반운동의 공간적 변화를 고려할 수 있는 모델을 사용해야 한다.
- ② 지반운동의 공간적 변화에 관한 구체적인 내용은 필요한 경우에는 관련 기술 기준에서 규정한다.

5) 가속도시간이력

- ① 지반운동은 지반가속도의 시간이력으로 표현될 수 있다.
- ② 공간적인 모델이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분 (수평2방향, 수직방향)으로 구성되어야 한다.
- ③ 필요시에는 6)에 기술되어있는 인공가속도시간이력을 사용할 수 있다.

6) 인공가속도시간이력

- ① 인공가속도시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다.
- ② 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 발진기구 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다.

- ③ 인공가속도시간이력의 지속시간은 지진의 규모와 발진기구특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.
- ④ 수직 3방향성분의 인공가속도시간이력 상호간에는 통계적 독립성이 유지되어야 한다.

3.5.2 설계지진 응답스펙트럼

1) 설계지진 응답스펙트럼은 표준 설계응답스펙트럼에 성능수준에 대한 보정, 지반적용 위치에 대한 보정, 감쇠율에 대한 보정 등을 고려하여 결정한다.

가) 성능수준에 대한 보정

성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분되며, 각각은 위험도계수의 재현주기에 의하여 다음과 같이 분류된다.

- 기능수행수준 : 재현주기 100년 ($I=0.57$)
- 붕괴방지수준 : 재현주기 1000년 ($I=1.4$)

나) 지반적용위치에 대한 보정

① 지상구조물의 내진설계에는 표3.4.1의 지반분류를 고려한 지표면의 설계응답스펙트럼을 이용하지만 지하구조물의 내진설계의 경우 응답변위를 산정하기 위하여 기반면에서의 설계 속도응답스펙트럼을 이용한다.

② 기반면의 설계 속도응답스펙트럼

기반면에서의 설계 속도응답스펙트럼은 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 사용한다. 기반면에 대한 설계속도응답스펙트럼 작성법에 대한 자세한 내용은 3.5.2절의 3)항을 참조한다.

다) 감쇠율에 대한 보정

성능수준별 감쇠율을 적용하며 표준 설계응답스펙트럼에 감쇠율에 대한 보정계수를 곱한값으로 정의된다.

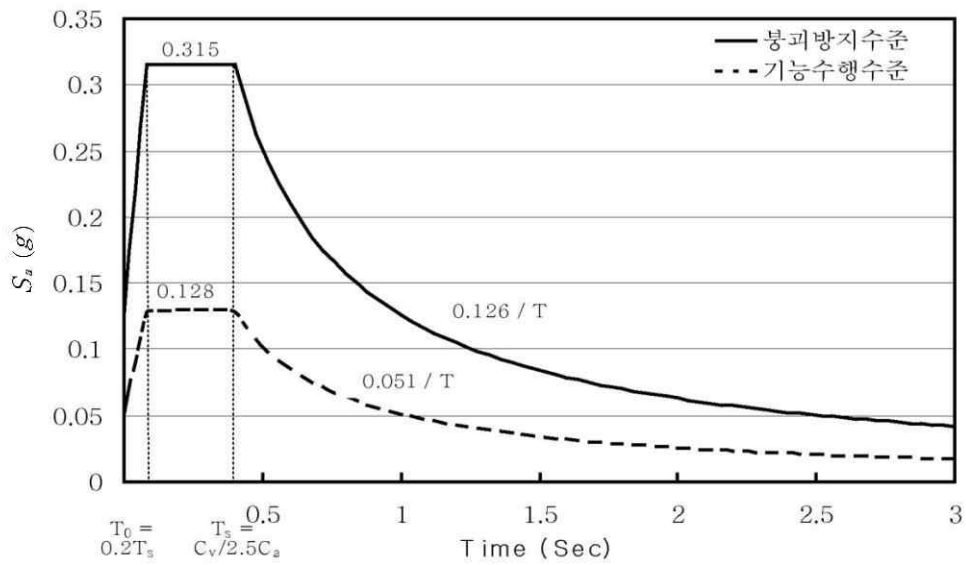
- 성능수준별 감쇠율(h)
 - 기능수행수준 : $h=0.1$
 - 붕괴방지수준 : $h=0.2$
- 감쇠율에 대한 보정계수, C_D

$$C_D = \frac{1.5}{(40h+1)} + 0.5$$

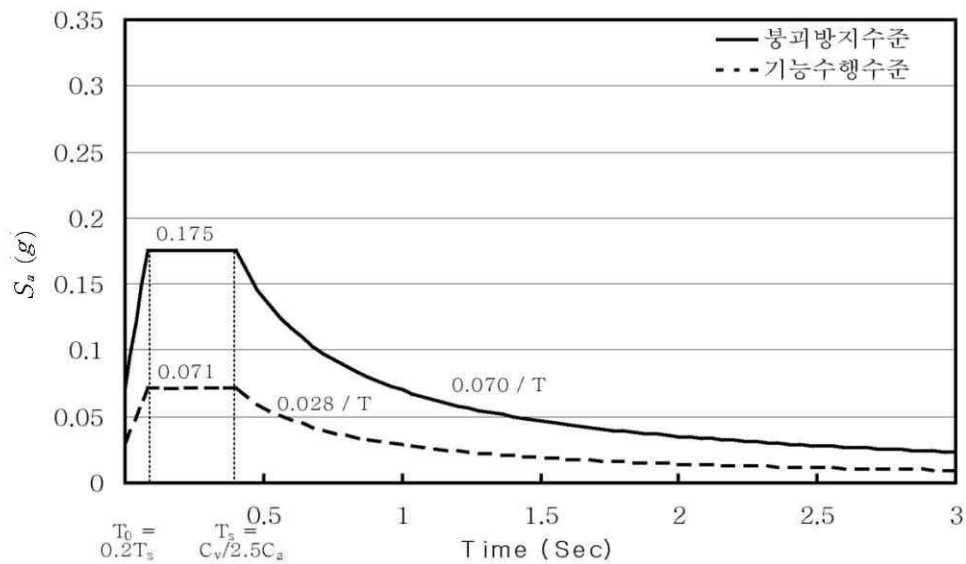
단, 별도의 합리적인 해석에 의하여 구한 값을 적용할 수 있다.

2) S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼

S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼은 그림 3.5.2와 같이 나타난다. 감쇠율에 대한 보정을 실시할 경우 그림 3.5.2에 감쇠율 보정 계수를 곱하여 적용한다.



(a) 지진구역 I



(b) 지진구역 II

그림 3.5.2 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼

3) 기반면의 설계 속도 응답스펙트럼

가) 해석대상 부지의 공진주기가 0.4초 이하일 경우, 기반면에서 응답속도는 S_A 지반의 지표면 응답 가속도를 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 식 (3.5.1)을 이용한다. 그러나, 해석대상 부지가 S_C 지반 또는 그 보다 연약한 층이 깊게 발달되어 있어 공진주기가 0.4초 이상일 경우, 본 기준에서는 지진 응답해석을 이용하여 기반면의 속도응답스펙트럼을 구하는 방법을 추천한다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} \cdot S_a \quad (3.5.1)$$

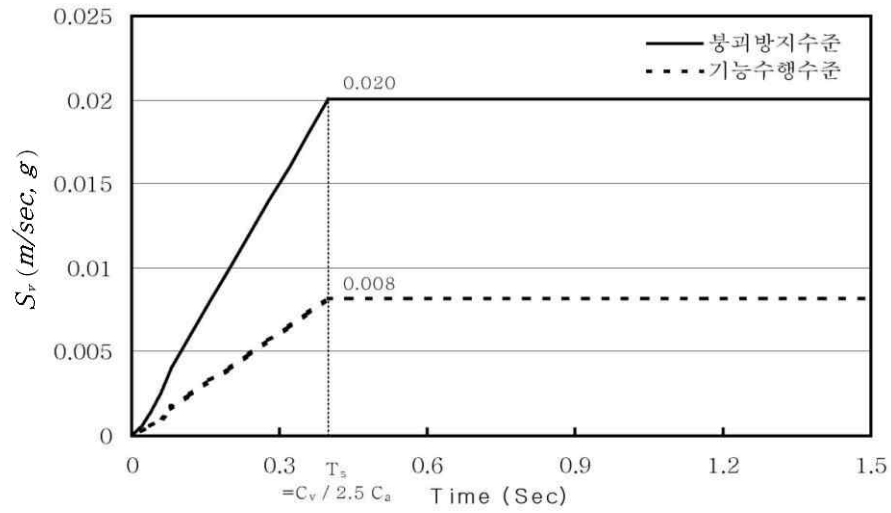
여기서, S_v : 기반면 응답속도

S_a : S_A 지반의 지표면 응답 가속도

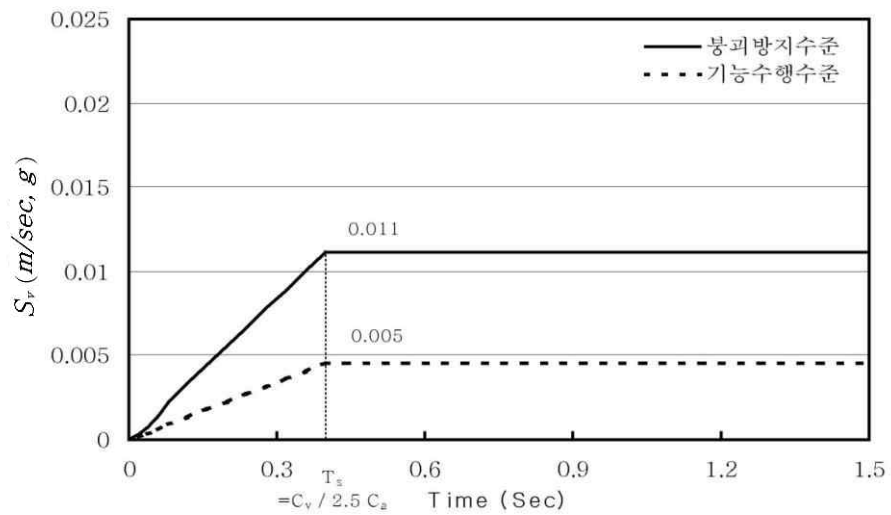
$T (= \frac{1}{f})$: 지반의 고유주기

나) 기반면에서의 설계 속도 응답스펙트럼

기반면에서의 설계 속도 응답스펙트럼은 다음 값에 감쇠율에 대한 보정 계수를 곱하여 적용한다.



(a) 지진구역 I



(b) 지진구역 II

그림 3.5.3 S_A 지반의 지표면 속도 응답스펙트럼

제 4 장 지반조사 및 액상화 평가방법

4.1 총 칙

4.1.1 적용 범위

이 기준은 도시철도 구조물의 내진설계를 위한 지반조사에 적용된다. 단, 기존 구조물에 대한 내진성능 평가를 위한 지반조사는 이 기술기준의 개념 및 원칙을 준수하는 범위 내에서 적절한 보완을 거쳐 별도의 기준을 작성하여 사용할 수 있다.

이 기준은 도시철도 구조물의 내진성 확보에 필요한 최소 설계요구조건을 규정한 것으로서, 지진 시 도시철도의 기능을 유지하여 대중교통에 중대한 지장을 초래하지 않도록 하는 것을 목적으로 한다.

4.1.2 기호의 정의

사용하는 기호와 정의는 다음과 같다.

C_N : 유효상재압 보정 계수(SPT-N)

C_q : 유효상재압 보정 계수(CPT- q_c)

D : 재료의 감쇠비

G/G_{\max} : 지반의 정규화 전단탄성계수비

G_{field} : 현장 지반의 전단탄성계수

G_{lab} : 실내실험으로 결정된 지반의 전단탄성계수

G_{\max} : 지반의 최대 전단탄성계수

N : 표준관입시험(SPT) N값

N_{60} : 에너지 효율 60%로 보정한 표준관입시험(SPT) N값

$(N_1)_{60}$: 에너지 효율 60%와 상재하중(100kPa)으로 보정된 표준관입시험(SPT) N값

P_a : 대기압(100kPa)

V_s : 지표층의 평균전단파속도

V_{s1} : 유효상재압에 대해 보정된 V_s

V_{si} : 지표층 지반의 i 번째 토층의 평균전단파속도

q_c : CPT 콘의 관입저항값

τ_d/σ'_v : 액상화 진동 전단응력비

τ_l/σ'_v : 액상화 저항 전단응력비

γ : 지반의 전단변형률(shearing strain)

4.2 내진설계를 위한 입지조건 및 지반조사

내진설계를 위한 지반조사에는 깊이에 따른 지반의 전단파 속도 및 감쇠비 등 지반의 동적특성을 파악하는 것이 목적이다. 내진설계를 위한 입지조건의 일반사항은 아래와 같다.

- 1) 지진 시 과도한 지반 침하, 액상화 및 사면파괴 등의 가능성이 현저한 곳은 가급적 피하고 부득이한 경우에는 지반을 개량하여 발생 가능성을 저하시킨다.
- 2) 지진 시 작용되는 반복하중에 의해, 지하수위 상부에 느슨한 사질토 지반에서는 조밀화 현상이 발생하고, 연약 점토지반에서는 지반 강도의 반복연화 현상이 발생하여 과도한 지반 침하의 가능성이 있다. 이러한 현상은 대표성 있는 시료를 이용한 실내시험을 통하여 평가하고, 예측되는 침하량이 허용침하량을 상회하거나 지진시 액상화가 의심될 경우 지반을 개량하여야 한다.

4.2.1 지반조사 계획

- 1) 지반조사는 지층의 구성, 각 지층의 역학적 특성 파악 및 실내시험용 시료채취 등을 수행하는 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내시험을 포함한다.
- 2) 설계지반운동 결정에 필요한 지반조사 자료는 시추를 통한 지반의 층상구조 및 지하수위 확인, 탄성파시험을 이용한 전단파속도 주상도 결정, 실내시험을 수행하여 결정된 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화 등이다.

4.2.2 시추위치 및 깊이

1) 시추공 배치

설계 단계의 지반조사의 범위는 필요로 하는 정확도, 시간, 경비 등에 따라 결정된다. 본선 및 정거장 등 도시철도 시설물의 내진설계를 위한 시추공 간격은 지층 구조의 복잡성, 일반 또는 상세 조사 등을 고려하여 사업 주체가 범위를 결정한다.

2) 시추깊이

- ① 내진설계를 위한 지반조사는 설계지반운동 수준 결정을 위한 기반면의 위치를 확인할 수 있는 깊이까지 수행한다. 본 기준에서는 국내 내진설계 상위 개념인 "내진설계 기준연구 (1998. 2., 건설교통부)"에 의하여, 전단파속도를 기준으로 $1,500\text{ m/s}$ 이상인 보통암 지반을 기반면으로 정의한다.
- ② 도시철도 시설물의 설계를 위해서 풍화암 지역을 통과하여 보통암 지반까지 시추 및 지반조사가 수행되어야 한다. 상세지반조사 초기에 대표적 시추 위치를 선정하고 기반면 깊이까지 지반조사를 실시하여 전단파속도 주상도를 획득해야 한다.
- ③ 액상화 평가를 위한 시추조사는 GL -20 m까지 시행하며 액상화 평가시 설계지반운동 산정을 위하여는 기반면 깊이까지의 자료가 필요하다.

4.2.3 조사항목 및 빈도

1) 도시철도 시설물의 내진설계에서는 다음의 사항을 검토하기 위하여 필요한 지반 조사를 실시해야 한다.

- 내진 설계상의 기반면의 설정
- 내진 설계상의 지반분류별 물성치 산정
- 지반의 동적 해석을 위한 설계변수의 설정
- 액상화 및 측방 유동의 판정
- 연약 점성토의 판정

- 2) 설계지반운동 결정을 위하여 지반의 층상구조, 기반암까지의 깊이, 각 층의 밀도, 전단파속도, 전단탄성계수와 감쇠비의 비선형 특성, 지하수위 및 지반응력상태 등에 대한 정보를 획득해야 한다.
- 3) 각 조사 항목에 대한 깊이별 조사 빈도는 표 4.2.1를 참고하여 결정한다. 액상화 평가를 위한 시료 채취는 1.5~2 m간격이 적절하다.

표 4.2.1 지반조사시 항목 및 간격

조사방법	조사 항목		지반 종류	조사간격	조사 목표
사운드링	표준관입 시험	SPT-N값	사질토 풍화토	1~1.5 m	입도분포와 SPT N값을 이용한 액상화 예측
		교란시료 채취	사질토 풍화토	1~1.5 m	층상구조 및 입도분포 획득
현장 조사	탄성과 탐사	P파 속도 S파 속도	사질토 풍화토 점성토	1~2 m	지진응답해석 저변형률에서의 전단탄성계수
비교란 시료	액상화 시험	액상화 강도	사질토 매립토	1.5~2 m	진동삼축시험에서 액상화 강도 ¹⁾
	동적변형 시험	전단탄성 계수 감쇠비	사질토 매립토 풍화토 점성토	각 층	지진응답해석 중간-대변형률에서 변형특성
	밀도 시험	단위중량	사질토 풍화토 점성토	각 층	유효상재하중의 계산

1) 액상화평가를 위한 비교란 시료는 SPT-N값이 가장 작은 곳이 액상화에 취약한 곳이므로 이를 고려하여 시료를 채취할 수 있다. 비교란 시료의 채취가 어려울 경우 현장 밀도와 지반형성이력을 고려하여 재성형 시료를 사용할 수 있다.

4.2.4 지반조사기법

- 1) 지반조사기법은 지반의 층상구조와 관입저항치를 획득하는 관입시험법, 전단파 속도 주상도를 획득하는 탄성파시험법, 변형특성 평가를 위한 실내시험법, 액상화

평가를 위한 실내시험법 등이 있다.

- 2) 관입시험으로는 표준관입시험과 콘관입시험을 사용할 수 있으며 표준관입시험을 통하여 관입저항값(N값), 입도분포 및 지반분류 등 물리적 시험을 위한 교란 시료 채취 등을 수행한다. 내진설계를 위하여 N값의 경험적인 상관관계를 사용할 수 있으나, N값이 상재하중과 에너지비에 대한 보정이 필요한지 확인하여 사용하여야 한다. 콘관입시험은 연속적인 지반주상도를 얻는 장점이 있으며, 시험장비에 진동감지기를 설치하여 다운홀시험이 가능한 Seismic Cone을 활용할 수 있다.
- 3) 지진시 지반거동평가를 위하여 각 층의 전단탄성계수, 감쇠비, 단위중량의 결정이 중요하다. 선형한계 변형률 이하의 저변형률 영역($\gamma < 10^{-4}\%$)에서 지반의 선형 거동을 측정하기 위하여 현장 탄성파기법이 사용되나, 비선형 거동 및 감쇠비 측정이 불가능하므로 변형률 변화에 따른 탄성계수의 비선형성과 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험을 수행한다.
- 4) 저변형률 영역의 지반의 전단파속도 주상도를 구하기 위하여 시추공내에서 수행되는 탄성파시험(크로스홀, 다운홀시험, 업홀, SPS 검층, 표면파시험 등)을 사용한다. 1등급 구조물의 경우에는 시추공내에서 수행되는 탄성파시험을 반드시 수행하여야 한다. 탄성파시험이 수행된 지반조사 이후에 구조물이나 성토체의 시공에 의해 지반의 유효상재하중의 변화가 예상되는 경우는 유효상재하중의 변화를 고려하여 전단파속도의 크기를 수정하여 사용한다.
- 5) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 얻기 위하여 공진주시험, 진동삼축압축시험, 비틀전단시험 등을 사용한다. 이들 시험은 현장에서 채취된 비교란 시료를 이용하여 수행하는 것이 원칙이나 비교란 시료 채취가 어려운 경우에는 현장 밀도를 고려하여 재성형된 시료를 사용할 수도 있다. 시험시 변형률 크기가 크지 않은 경우($\gamma < 10^{-4}\%$), 시료에 가해지는 교란 정도가 미미하므로, 1개의 시료를 이용하여 여러 개의 구속압 단계의 시험을 실시하는 단계적 시험(staged-testing)이 가능하다. 이때 변형률 범위는 $10^{-4}\% \sim 1\%$ 영역을 추천한다. 이때 시료가 채취된 깊이에서의 구속압 효과를 고려하기 위하여, 최

소 3가지 구속압단계(현장 지반 평균 주응력의 1/2, 현장 지반의 평균주응력, 현장 지반 평균주응력의 2배)에서 시험을 실시하고 시공후에 구속압 정도를 고려하여 선택 사용한다.

- 6) 현장 여건상 부득이하게 탄성과 시험을 수행하지 못하여 지반의 비선형 거동의 측정이 불가능할 경우에는, 전문가의 자문을 얻어 경험적 상관관계를 포함한 관계식을 적용할 수 있다.

4.3 설계지반운동 결정을 위한 부지특성 평가방법

건설되는 구조물의 중요도, 시험장비의 가용성, 지반조사 비용 등을 고려하여 지반 조사기법의 조합이 결정되므로, 현장여건에 따라 각 시험에서 결정된 지반물성치를 효과적으로 결합하여 대상지반의 부지특성을 평가하여야 한다. 본 기준에서는 현장 및 실내시험 결과의 이용, 현장시험 결과의 이용, 경험에 의한 방법 등을 제안한다.

4.3.1 현장 및 실내시험 결과 이용

- 1) 현장시험을 통하여 대상지반의 깊이별 전단파속도 (V_s) 주상도를 결정한다. 이때, 크로스홀시험, 다운홀시험, SPS 검층, 업홀시험, SASW 시험 등이 사용될 수 있으며, 2개 이상의 시험을 실시하였을 경우 결과를 분석하여 대표주상도를 결정한다.
- 2) 대상지반을 여러 층으로 나누고 각층의 질량밀도를 추정하여 현장시험에서 결정된 전단파속도로부터 저변형률 최대전단탄성계수(G_{max})를 결정한다.
- 3) 각층의 중앙에서 비교란시료를 채취한다. 이때 시료에 교란이 발생되지 않도록 시료채취 및 운반 시 주의하여야 한다.
- 4) 실내 변형특성 평가시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠

비를 얻는다. 이때, 공진주시험, 진동삼축압축시험, 비틀전단시험 등을 사용할 수 있으며 변형률 범위는 $10^{-4} \sim 1\%$ 를 추천한다.

5) 실내시험 결과로부터 현장 구속압 상태를 고려하여 각 층에 대표적인 변형률 크기에 따른 정규화전단탄성계수 (G/G_{\max}) 관계를 도출한다.

6) 현장에서의 최대전단탄성계수 (G_{\max})와 실내시험에서의 비선형관계 ($G/G_{\max} - \log \gamma$)를 결합하여 각 층에서의 현장 비선형 전단탄성계수를 식(4.3.1)과 같이 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{\max})_{\gamma, lab} \times (G_{\max})_{field} \quad (4.3.1)$$

7) 현장시험으로부터 감쇠비 측정이 불가능하므로, 실내시험에서 얻은 변형률 크기에 따른 감쇠비 ($D - \log \gamma$) 관계를 사용한다.

4.3.2 현장시험 결과 이용

시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여 현장시험만이 가능할 경우, 부지특성을 평가하기 위한 단계별 방법을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 위의 「4.3.1 현장 및 실내시험 결과 이용」의 1), 2) 단계를 수행한다.
- 2) 각 층의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 ($G/G_{\max} - \log \gamma$)을 구하기 위하여 대상 지반의 층상구조와 종류를 분류하여 문헌을 이용한 상관관계를 적용할 수 있다.
- 3) 현장에서 구한 최대전단탄성계수와 문헌에서 구한 지반의 비선형 관계를 결합하여 각 층에서의 비선형 전단탄성계수를 식(4.3.2)를 적용하여 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{\max})_{\gamma, literature} \times (G_{\max})_{field} \quad (4.3.2)$$

4) 변형률 크기에 따른 감쇠비 ($D - \log \gamma$) 관계를 결정하기 위하여 문헌에 나타나 있는 상관관계를 사용한다.

4.3.3 경험에 의한 방법

시험장비의 가용성 및 지반조사 비용의 제한 등으로 인하여 현장 탄성파시험 및 실내 변형특성시험을 수행할 수 없는 경우에는 경험적 방법에 의해 지반의 비선형 거동을 평가한다. 경험적 상관식은 대부분 외국지반에 대한 시험결과로부터 유도되어 있으므로 국내지반에 적용할 경우 상당히 큰 오차를 유발할 수 있다. 따라서, 적용시 지반 및 지진 전문가의 자문을 받는 것이 바람직하다

- 1) 지반조사 자료를 바탕으로 지반의 층상구조를 확인하고 각 층에서 지반자료 (SPT-N값, 단위중량, 지하수위, 간극비, 액·소성한계, 입도분포, 비중 등)를 얻는다.
- 2) 지반자료와의 경험적 상관관계를 이용하여 각 층의 최대전단탄성계수 (G_{max})를 결정한다.
- 3) 위의 「4.3.2. 현장시험 결과 이용」의 2), 3), 4) 단계를 수행한다.

4.4 내진설계를 위한 지반의 평가방법

4.4.1 지반의 평가방법

- 1) 지반의 전단파 속도를 획득하는 방법으로는 다음의 3가지 방법을 생각할 수 있다.
 - ① 지반에 전파하는 전단파 속도를 직접 측정하는 방법
 - ② 표준관입시험에서 얻은 SPT-N값을 이용하여 전단파 속도를 구하는 방법
 - ③ 현지 지반에 설치된 실물 기초 또는 모델 기초의 진동 실험에서, 기초를 지지하는 지반 스프링 특성 및 감쇠 특성을 직접 구하는 방법
- 2) 위에서 ①, ②에서 구한 지반의 전단파 속도는 지반의 전단변형률이 선형영역 ($10^{-4}\%$ 이하)에서의 값이다. 따라서, 지진시 지반의 변형량을 고려한 전단파 속도를 결정하기 위해서는, 설계지진력, 대상 지반의 변형특성을 고려한 지진응답 해석을 수행하여, 각 지층의 적정 전단변형율에 해당하는 전단파 속도를 사용한다

4.4.2 지반을 전파하는 S파 속도(V_s)를 직접 측정하는 방법

전단파 속도를 위하여 탄성과 기법인 크로스홀, 다운홀, 업홀, SPS 검층, SASW 기법 등을 적용할 수 있다. 각 탄성과 기법에서 얻는 깊이방향 속도 분포에는 오차가 발생할 수 있으므로, 지층 구조가 복잡한 지반에서는 두 가지 방법을 병용하여 대표 전단파속도 주상도를 결정하는 것이 바람직하다.

4.4.3 SPT-N값에서 전단파 속도를 추정하는 방법

현장 지반에서 탄성과시험 등의 지반의 전단파 속도를 직접 측정할 수 있는 시험을 수행하지 않았을 경우, SPT-N값을 이용하여 깊이에 따른 지반의 전단파 속도를 유추할 수 있다. 그러나, 국내지반의 SPT-N값과 전단파 속도 관계를 연구하여 정확한 상관관계를 정립하여 적용할 필요성이 있다.

4.4.4 진동 실험에 의한 방법

현장 지반에 있어서의 실제 기초 또는 모델 기초의 진동실험은 기초를 지지하고 있는 지반의 스프링 상수와 감쇠 상수를 직접 구하기 위한 방법이다. 실험에 있어서는 기진기, 계측기 및 해석이 필요하기 때문에, 다른 방법에 비하여 많은 비용과 시간이 필요하다. 그러나, 지층 및 지형의 영향도 포함한 값으로 구할 수 있기 때문에, 신중한 검토가 필요한 지점에서는 이 방법의 사용도 추천한다.

4.5 액상화 평가를 위한 지반조사

- 1) 액상화 평가 방법은 SPT-N값, 콘관입시험의 q_c 값, 전단파 속도와 입도분포에 의한 간편예측법과 진동삼축시험에 의한 상세예측법이 있다. 액상화 평가지 우선 지반 주상도와 지하수위를 결정하여야 하며, 간편예측법에서는 SPT-N값, CPT- q_c 값, 전단파 속도, 지층의 물리적 특성(입도분포, 소성지수, 밀도, 함수비 등)의 결정이 중요하다. SPT-N값은 에너지 효율 60%와 상재하중 100kPa에 대하여 보정된 값인 $(N_1)_{60}$ 을 결정할 필요가 있다. 상세예측법에서는 진동삼축 시험을 위한 시료의 채취가 필요하며, 비교란 시료를 사용하는 것이 바람직하나, 비교란 시료 채취가 불가능할 경우 현장의 밀도로 채성형한 시료를 사용할

수 있다. 이때 현장상황을 재현할 수 있는 시료 성형법을 채택하여야 한다.

- 2) 액상화 평가를 위한 실내시험으로 진동삼축시험, 순수전단시험, 비틀전단시험 등을 사용한다. 반복재하 횟수에 따른 액상화 저항 전단응력의 변화곡선을 구하기 위하여 최소한 세 점 이상의 응력비(τ_1/σ_v')를 변화시켜 시험을 실시한다.

4.6 지반의 액상화 평가

4.6.1 액상화 평가기준

1) 다음의 경우에는 액상화 평가를 생략한다.

- ① 지하수위 상부 지반
- ② 주상도상의 표준관입시험값(SPT-N값)이 20이상인 지반
- ③ 대상지반심도가 20 m 이상인 지반
- ④ 소성지수(PI)가 10이상이고 점토성분이 20%이상인 지반
- ⑤ 세립토 함유량이 35%이상인 경우
- ⑥ 상대밀도가 80%이상인 지반

2) 설계지진 규모는 지진구역 I, II 모두 리히터규모 6.5를 적용한다.

3) 대상지반의 주상도와 입도분포자료로부터 액상화 평가가 필요한 지역으로 판단되면 대상지반에 대해 지진응답해석을 수행한다. 지진응답해석은 변형률 수준별 전단탄성계수 (G/G_{max}) 및 감쇠비(D)를 이용하는 것을 원칙으로 하며 장주기 및 단주기를 포함한 실지진 및 인공지진 가속도 시간이력에 대하여 수행하여야 한다.

4.6.2 액상화 평가

액상화 평가는 대상지반의 주상도와 입도분포를 이용하여 액상화 가능성을 판단

한 후 그림 4.6.1의 흐름도를 따라 실시한다.

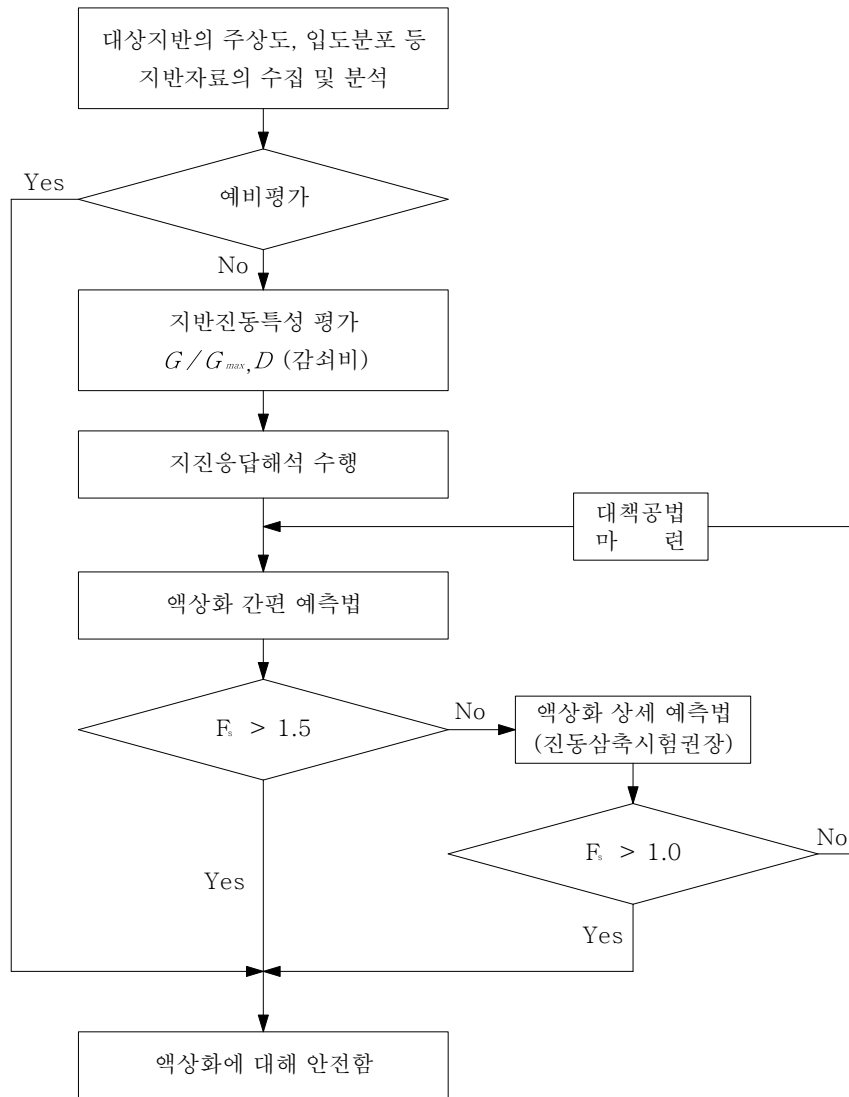


그림 4.6.1 액상화 평가 흐름도

1) 액상화 간편예측법

가) 표준관입시험값(SPT-N값)을 이용한 액상화 간편예측법

액상화 지역의 지반거동을 해석적이나 물리적으로 모형화하기 어려우므로 Seed와 Idriss(1971)의 간편법에 기초한 방법을 통해 액상화에 대한 안전율을 산정한다.

- ① 액상화에 대한 안전율은 지진시 발생하는 지반내 한 점의 진동전단응력, τ_d/σ'_v 와 지진시 액상화에 저항할 수 있는 지반의 전단응력, τ_l/σ'_v 과의 비로 정의된다.

② 지진력을 표현한 진동전단응력은 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (4.6.1)$$

여기서, a_{\max} : 액상화 평가 대상지반의 최대 지반 가속도. (지진응답해석 수행)

g : 중력가속도

σ_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효 상재압

③ 지반의 전단저항력을 산정할 때 표준관입시험(SPT) 결과인 N값을 이용하는 데 그 방법을 살펴보면 다음과 같다.

ㄱ. SPT 에너지비 60%에 대한 보정을 한다.

$$N_{60} = \frac{E_r}{60} \times N_m \quad (4.6.2)$$

여기서, E_r 은 SPT 장비의 에너지 효율, N_m 은 현장에서 측정된 타격회수이다.

ㄴ. 유효 상재압을 이용하여 보정계수(C_N)를 산정한다.

$$C_N = \left(\frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \quad (4.6.3)$$

여기서, C_N 은 보정계수이며 σ'_v 은 유효상재압(tsf 또는 kg/cm^2)이다.

ㄷ. 식(4.6.2)와 식(4.6.3)의 보정식을 이용하여 표준관입저항치를 보정한 $(N_1)_{60}$ 를 식(4.6.4)과 같이 산정한다.

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60} \quad (4.6.4)$$

여기서, $(N_1)_{60}$ 은 에너지 효율 60% 및 상재하중을 보정한 N 값이다.

ㄴ. 산정된 보정 $(N_1)_{60}$ 값으로부터 지진규모 7.5에 대한 액상화 저항전단응력비를 그림 4.6.2를 이용하여 산정하거나, 식 (4.6.5)를 이용하여 산정한다. 식 (4.6.5)의 경우 세립질 함유량이 5% 미만인 깨끗한 모래에 대한 식이며, 지진규모 7.5에 해당하는 값을 산정할 수 있다. 세립질 함유량이 5% 이상일 경우 그림 4.6.2에서 세립질 함유량을 고려하여 액상화 저항전단응력비 산정할 수 있다.

$$\left(\frac{\tau_{l'}}{\sigma_v}\right)_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4.6.5)$$

여기서, $\left(\frac{\tau_{l'}}{\sigma_v}\right)_{7.5}$ = 지진 규모 7.5인 경우에 대한 액상화 저항응력비

단, $(N_1)_{60} < 30$

ㄷ. 지진의 규모 $M=7.5$ 에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)를 곱하여 $M=6.5$ 로 환산한다. 이때 환산은 식(4.6.6)을 이용한다.

$$MSF = (M_w/7.5)^n \quad (4.6.6)$$

여기서, n 값은 지진규모에 따라 표 4.6.1을 이용하여 구한다. 본 설계기준에서는 국내 여건을 고려하여 지진규모 $M_w=6.5$ 를 사용할 것과 n 값은 Idriss(1995)가 제안한 값을 추천한다.

ㄹ. 지진의 규모 $M=6.5$ 에 해당하는 액상화 저항전단응력비 식(4.6.7)을 이용하여 계산한다.

$$\left(\frac{\tau_{l'}}{\sigma_v}\right)_{6.5} = MSF \times \left(\frac{\tau_{l'}}{\sigma_v}\right)_{7.5} \quad (4.6.7)$$

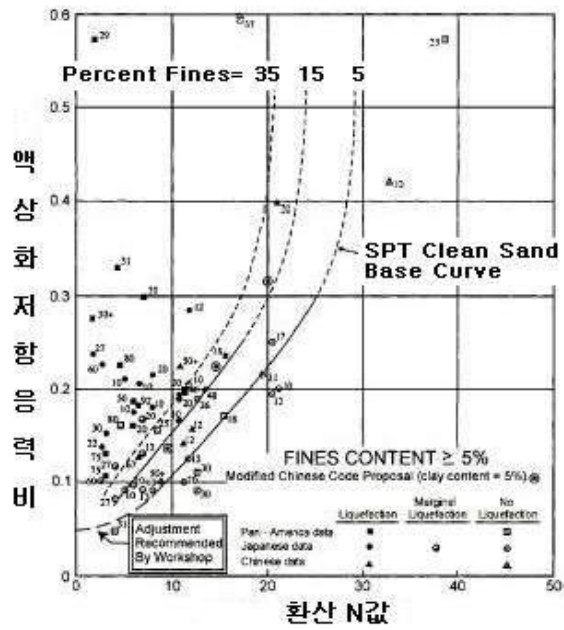


그림 4.6.2 현장의 액상화거동과 관입저항의 상관관계 (지진규모 = 7.5)

표 4.6.1 지진의 규모에 대한 보정을 위한 곡선 매개 변수 n

M_w	규모에 대한 보정계수, n				
	Seed and Idriss (1982)	Idriss (1995)	Ambraseys (1988)	Youd and Nobel $P < 32\%$	Arango (1996)
5.5	1.43	2.20	2.86	3.42	3.00
6.0	1.32	1.76	2.20	2.35	2.00
6.5	1.19	1.44	1.69	1.66	1.60
7.0	1.08	1.19	1.30	1.20	1.25
7.5	1.00	1.00	1.00	-	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67	-	0.75
8.5	0.89	0.72	0.44	-	

④ 지반의 액상화 저항전단응력비와 지진시 발생하는 전단응력비의 비교를 통해 식 (4.6.8)과 같이 안전율을 산정하여 액상화를 평가한다.

$$F = \frac{\tau_l / \sigma'_v}{\tau_d / \sigma'_v} \quad (4.6.8)$$

여기서, τ_d / σ'_v 는 진동전단응력비, τ_l / σ'_v 는 액상화 저항전단응력비이고, F 는 안전율로 다음의 기준이 사용된다.

$F \geq 1.5$: 액상화에 대하여 안전

$F < 1.5$: 액상화 상세예측 필요

나) CPT 시험결과를 이용한 액상화 간편예측법

액상화 평가 이전에 시료채취가 이루어져, 평가하고자 하는 흙에 대한 입도분포 및 세립분 함량에 대한 자료를 이미 가지고 있는 경우에 Stark and Olson(1995)의 방법을 이용하여 다음과 같은 순서로 액상화 저항전단응력비(CRR)를 산정한다. 액상화 안전율 평가방법은 SPT-N값 이용 평가방법과 동일하다.

- ① 유효상재압에 대한 보정을 위해 유효상재압 보정 계수를 식(4.6.9)를 이용하여 산정한다.

$$C_q = \frac{1.8}{0.8 + \sigma'_{v} / \sigma'_{ref}} \quad (4.6.9)$$

여기서, σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

σ'_{ref} : 대기압(100kPa)

- ② 보정계수를 사용하여 콘의 선단지지력 q_c 값을 보정한 q_{cl} 값을 다음과 같이 산정한다.

$$q_{cl} = C_q \cdot q_c \quad (4.6.10)$$

- ③ 주어져 있는 세립분 함유량 및 입도 분포 특성과 위에서 산정된 q_{cl} 값을 Stark and Olson(1995)의 도표에 적용하여 M=7.5에 대한 액상화 진단저항응력비를 산정한다. Stark and Olson(1995)의 도표는 그림 4.6.3과 같다.
- ④ 지진의 규모 M=7.5에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)를 곱하여 M=6.5로 환산한다. 이때 환산은 식(4.6.6)과 식(4.6.7)을 이용한다.
- ⑤ 액상화 안전을 평가 방법은 SPT-N값을 이용한 방법과 동일하다.

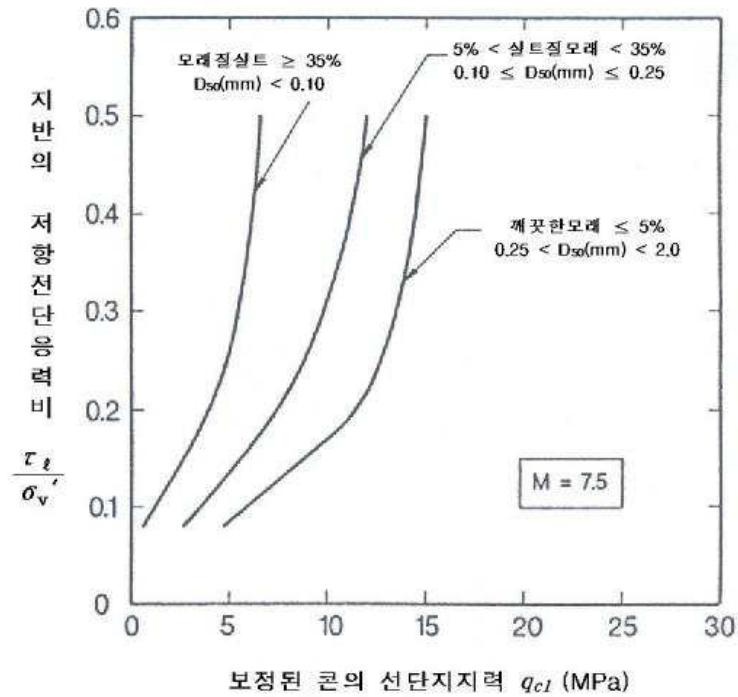


그림 4.6.3 CPT 시험결과를 이용한 액상화 평가 (Stark and Olson 방법, 1995)

다) 진단과 속도를 이용한 액상화 간편예측법

- ① 유효상재압에 대해 보정된 V_S 값인 V_{SI} 을 다음과 같이 계산한다.

$$V_{sl} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (4.6.11)$$

여기서, σ'_{v0} : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총유효상재압

P_a : 대기압(100 kPa)

② 주어진 세립분 함량을 바탕으로 V_{SIC} 값을 산정한다.

세립분 함유량 < 5% 인 경우, $V_{SIC} = 220 \text{ m/s}$

세립분 함유량 > 20% 인 경우, $V_{SIC} = 210 \text{ m/s}$

세립분 함유량 > 35% 인 경우, $V_{SIC} = 200 \text{ m/s}$

③ 다음의 식에 V_{Sl} 과 V_{SIC} 값을 대입하여 $M = 7.5$ 에 대한 액상화 전단저항응력 비를 산정한다.

$$CRR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = a \left(\frac{V_{sl}}{100} \right)^2 + b \left[\frac{1}{V_{SIC} - V_{sl}} - \frac{1}{V_{SIC}} \right] \quad (4.6.12)$$

여기서, a와 b는 곡선을 그리기 위한 매개변수이며 a=0.03, b=0.9를 사용한다.

④ 지진의 규모 $M=7.5$ 에서 구한 값에 지진의 규모에 대한 보정값(MSF)를 곱하여 $M=6.5$ 로 환산한다. 이때 환산은 식(4.6.6)과 식(4.6.7)을 이용한다.

⑤ 액상화 안전을 평가 방법은 SPT-N값을 이용한 방법과 동일하다.

2) 액상화 상세예측법

가) 진동삼축시험을 이용한 방법

대상지반의 액상화에 대한 안전율이 $F < 1.5$ 인 경우 그림 4.6.4와 같이 지진 응답해석과 실내 진동삼축시험으로 액상화를 평가한다.

- ① 최대진동전단응력은 지진응답해석 프로그램으로 지진응답해석을 수행하여 산정한다.
- ② 액상화 저항전단응력은 불교란 시료에 대하여 실내 진동시험을 수행하여 진동재하회수에 따른 액상화 저항전단응력(전응력치) 변화곡선을 작성하여 이로부터 구한다. 불교란시료의 채취가 불가능한 경우에는 현장조건을 재현한 재성형 시료를 사용할 수 있다. 진동재하회수에 따른 액상화 저항전단응력(전응력치)의 변화곡선은 실내 진동시험시 최소한 세 점이상의 전단응력비(τ_d/σ_v')을 구하여 작성한다.
- ③ 액상화 저항전단응력 특성곡선을 이용하여 지진규모 6.5에 해당하는 진동재하회수 10회의 액상화 저항전단응력을 산정하여 액상화를 평가한다.
- ④ 진동삼축압축시험 결과를 이용하여 액상화 상세예측을 수행할 경우, 지진의 방향성 및 현장응력상태에 대한 보정이 필요하다. 진동삼축압축시험을 이용할 경우 저항전단응력비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)는 식(4.6.13)를 이용하여 보정한 후 산정한다.

$$CRR = C_1 \cdot C_2 \cdot (CRR)_{TX} \quad (4.6.13)$$

여기서, $C_1 = 0.9$ (지진의 방향성에 대한 보정 상수)

$C_2 = (1+2K_o)/3$ (현장응력상태에 대한 보정 상수)

$K_o =$ 지진하중 작용전의 정지토압계수

$(CRR)_{TX} =$ 진동삼축압축 시험에서 얻어진 저항전단응력비

- ⑤ 상세예측법 평가시 기준안전율은 1.0이다. 이 때, 안전율이 1.0 미만인 경우, 대책공법을 마련하며, 1.0이상인 경우, 액상화에 대해 안전한 것으로 판정한다.

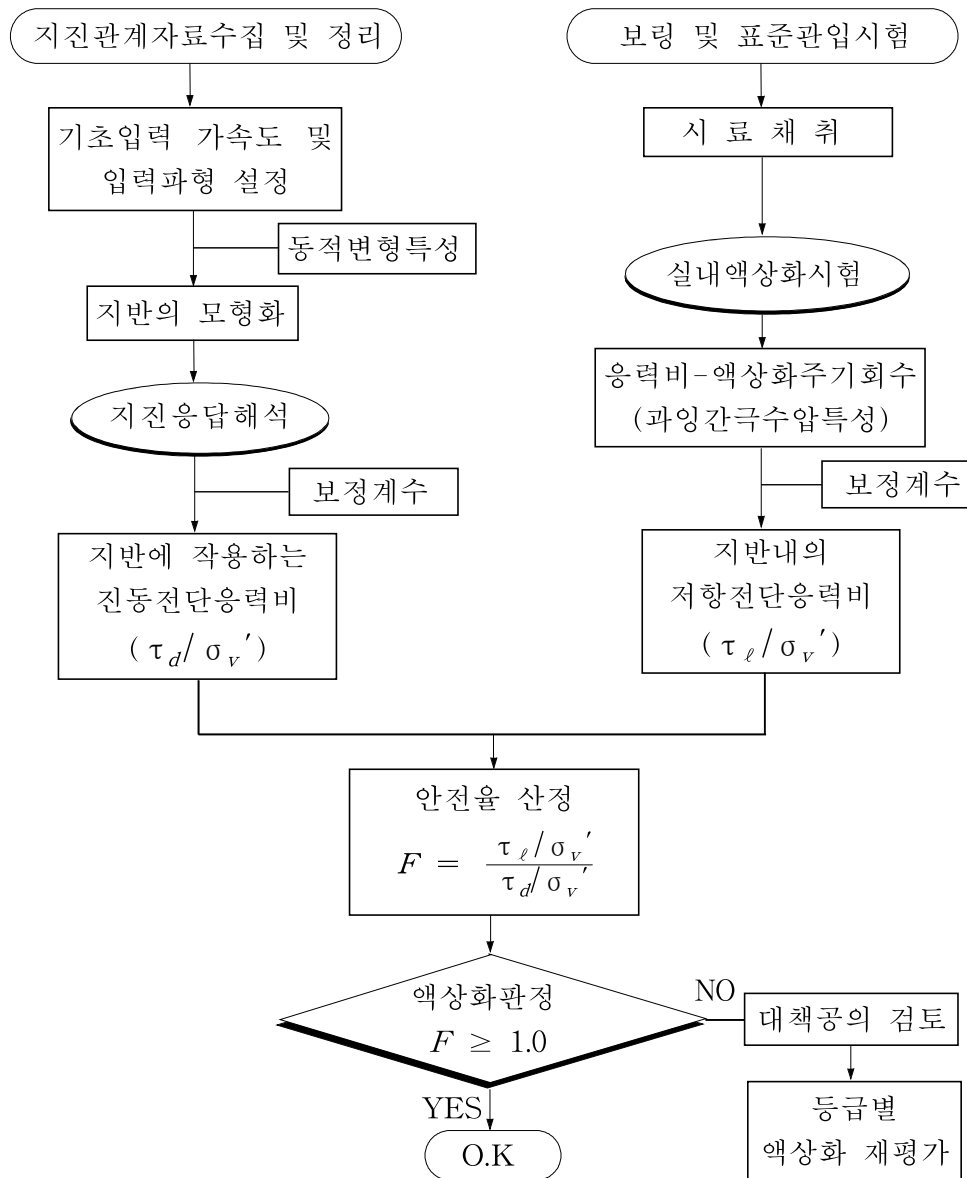


그림 4.6.4 상세예측법에 따른 액상화 평가방법의 순서도

나) 유효응력 해석을 이용한 방법

1차원 유효응력해석을 이용하여 액상화 상세예측을 할 경우 다음을 고려하여 해석한다.

- ① 액상화 평가 대상지반의 간극수압 증가모델과 해석입력변수를 실내시험을 바탕으로 결정한다.
- ② 액상화가 의심되는 깊이에서 유효응력 해석결과를 이용하여 최대 과잉간극

수압비를 바탕으로 액상화를 평가할 수 있다.

- ③ 기준안전율인 간극수압비($\Delta u/\sigma_v$)는 1.0이다. 이 때, 안전율이 1.0 미만인 경우, 대책공법을 마련하며, 1.0이상인 경우, 액상화에 대해 안전한 것으로 판정한다.

4.6.3 액상화 대책공법

- 1) 충적층 또는 매립층 지역은 지진시 사질토 지반의 액상화로 인한 큰 피해가 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 지반조사에 따라 액상화 예측과 대책을 검토하여야 한다. 지역 방재계획에 의한 광역적인 예측이 필요한 경우 지반조사 시료의 액상화 가능성 검토 이외에 과거 지진에 의한 액상화 이력 또는 지형 및 지질의 정보를 사전 조사하여야 한다.

- 2) 액상화에 대비한 대책공법을 세우기 위한 절차는 다음과 같다.
 - ① 액상화 가능성의 평가
 - ② 액상화에 대한 영향 평가
 - ③ 액상화에 대해 효과적인 개량 기술의 결정
 - ④ 효과적인 개선 기준 평가

- 3) 액상화에 대한 개량 기준은 다음의 세 가지 기준에 따른다.
 - ① 액상화가 발생할 수 있는 지반의 처리
 - ② 액상화 영향을 감소시키기 위해 구조물을 탄력적으로 만들거나 강도를 증가
 - ③ 예비시설의 준비

- 4) 액상화 현상은 느슨한 모래지반, 지하수위, 그리고 진동 등 세 가지 요소가 조합되어 발생하므로, 대책공법은 이 중 하나 또는 그 이상의 요소를 감소시켜 액상화 발생을 억제시키는 것이다. 따라서, 액상화 방지대책은 흙의 성질 개량, 지하수위의 저하(포화도의 저하), 응력, 변형 그리고 간극수압 등의 조건 개량으로 나눌 수 있다. 이러한 액상화 방지대책은 표 4.6.2를 참고한다.

표 4.6.2 액상화 대책공법 (한국지반공학회, 1997)

원리	공법	적용한계	효과	특징 및 공해성	비고
밀도 증가	바이브로 플로테이션	GL -20 m 정도	N치 15~20 까지	주로 수평진동, 비교적 적다	사용재료에 따라 배수성 기대
	모래다짐 말뚝	GL -35 m 정도	N치 25~30 까지, 한계 40	주로 연직진동, 비교적 있다.	사용재료에 따라 배수성 기대
	폭파	GL -20 m까지 가능	상대밀도 70~85% 정도까지	크다	시공관리 곤란
	동적압밀	GL -10 m 정도	-	충격	얕은층의 다짐
	바이브러 텀핑	GL -3 m 정도	-	연직진동, 비교적 적다	표층다짐, 병용이 많다.
	전압	20-30 cm 정도 지하수위 이상	상대밀도 95% 정도까지	비교적 적다	지하수위 이하는 지수대책
	무리 말뚝	GL -10~-12 m	-	햄머의 진동,소음	타입말뚝
	생석회 말뚝	GL -20 m 정도	-	적다, 먼지공해	생석회에 의한 흡수 팽창
입도 개량 또는 고결	치환	GL -5 m 정도까지	쇄석치환 등에 의해 유효	적다	
	주입 고화	보링깊이까지 가능	시공관리가 중요	부근구조물 주입압의 영향과 유출	시멘트 그라우팅 등 시공관리가 어렵다
	표층혼합 처리	GL -5 m 정도	배합량에 의함	적다	
	심층혼합 처리	GL -30 m 정도	배합량에 의함	적다	
포화도 저하	웰포인트	5~6 m 정도 지하	투수성의 불확실성에 의해 다름	인근 지하수위 저하	장기간의 운영, 유지관리
	깊은 우물	15~20 m 정도 지하	투수성의 불확실성에 의해 다름	인근 지하수위 저하	장기간의 운영, 유지관리
간극수 압소산	그레블드 라인	GL -20 m 정도	미도증가에 대한 차선택	적다	기설구조물에 적용
전단변형억제	널말뚝	GL -10 m 정도	구속의 정량화가 어렵다	널말뚝 타설에 의한 진동	지하연속벽, 지수벽으로 사용

제 5 장 내진해석 및 설계에 대한 규정

5.1 일반사항

- 1) 도시철도 구조물의 내진설계는 지진 발생시 지반 변위의 영향을 고려하여 구조물이 소요의 내진 성능을 만족할 수 있도록 하는 것이다.
- 2) 도시철도 구조물은 관성력의 영향을 크게 받는 지상의 일반 구조물과 달라서 관성력의 영향은 작고, 주변 지반의 변형에 따라 그 거동이 지배되기 때문에 내진 설계에 있어서는 지진 시 지반 변위의 영향을 적절히 고려하여야 한다.

5.2 내진해석 방법

- 1) 도시철도 구조물의 내진 해석은 지반 조건, 구조 조건 등을 고려하여 “응답변위법” 혹은 “시간이력해석법”을 사용하여 수행할 수 있다.
- 2) “응답변위법”은 도시철도 구조물의 내진해석을 위한 표준해석법으로 사용하고, “시간이력해석법”은 상세한 검토를 필요로 하는 경우나 구조 조건, 지반 조건이 복잡한 경우, 지반과 구조물의 상호작용을 고려하는 경우에 사용하는 것이 좋다.
- 3) 도시철도구조물의 내진해석은 2차원 횡단면해석을 원칙으로 하되 지반상태가 급격히 변화하는 구간 통과 등의 경우에는 종방향에 대한 내진구조해석을 추가로 수행하여야 한다.

5.3 응답수정계수

기능수행 수준의 지진은 대상구조물에 발생하는 변형을 탄성한도 내에서 거동하도록 규정하지만, 붕괴방지 수준의 지진은 구조물에서 발생하는 소성변형을 허용

한다. 구조물이 비탄성 거동을 하게 되면 탄성거동을 하는 경우보다 부재력이 작아진다. 일반 구조물의 경우 이를 고려하기 위하여 부재 설계 시 탄성해석으로 구한 탄성부재력을 응답수정계수(R , 연성 계수)를 사용하여 보정하게 된다. 즉, 지진에 의한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 설계부재력이 되며 설계자는 이 설계 부재력을 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토해야 한다.

표 5.3.1 붕괴방지 수준에서의 응답수정계수(R)

구 분	기 동	보	비 고
철근콘크리트 부재	3	3	
강 부재 또는 합성부재	5	5	

- ① 기능수행 수준의 내진 성능을 갖도록 설계하는 경우에는 탄성해석을 수행하게 되며, 응답수정계수(R)는 적용하지 않아야 한다.
- ② 붕괴방지 수준의 내진 성능을 갖도록 설계하는 경우에는 탄성해석과 탄소성 해석을 필요에 따라 선택할 수 있다.
 - 탄성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 응답수정계수로 나눠줌으로써 탄성해석만으로 소성변형까지도 고려할 수 있다.
 - 탄소성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 그대로 사용하고 응답수정계수는 고려하지 않아야 한다.

제 6 장 내진해석 방법

6.1 응답변위법

지진 발생시에 생기는 지반 변위에 의한 지진 토압과 도시철도 지하 구조물과 주변지반 관계에서의 경계조건을 적절히 모델링하여 정적으로 계산하는 방법을 응답변위법이라 한다. 그림 6.1.1은 응답변위법의 개념을 설명하고 있다.

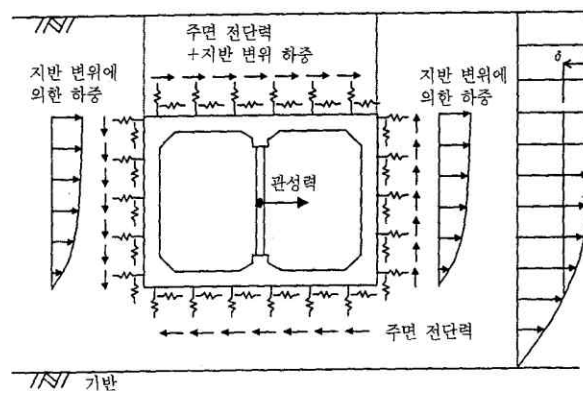


그림 6.1.1 응답 변위법의 개념도

6.1.1 구조물의 모델링

응답변위법을 사용한 내진 해석에서는 지진하중을 도시철도 구조물의 구체에 가장 불리한 응력, 변위, 그 밖의 영향이 생기도록 작용시킨다. 구조 계산 시에는 도시철도 구조물을 그림과 같이 지진시 지반반력계수로 지지된 Frame 요소 구조로 모델화 하고, K_H , K_V , K_{SS} , K_{SB} 를 지진시 지반반력계수로 이용한다.

그림 6.1.2 구조물의 모델링

6.1.2 내진해석을 위한 지반의 전단탄성계수의 산정

지반의 응력-변형률 관계는 변형률의 크기에 따라 탄성계수가 변하는 비선형 거동을 보인다. 따라서, 실내시험과 현장시험을 통하여 지반의 전단탄성계수 감소 현상을 평가하고 이를 해석에 이용해야 한다. 지반의 비선형성을 최대한 반영하기 위하여는 적합한 구성모델을 선정하여 비선형 해석을 수행하는 방법이 가장 합리적이거나, 현장에서는 매우 중요한 구조물 이외에는 선형해석을 수행하는 것이 일반적이다. 선형해석 시에는 하중수준에 따른 비선형특성을 감안하기 위해 지반의 전단탄성계수를 다음과 같이 보정하여 사용한다.

$$G_D = (\gamma_t / g) \cdot V_S^2 \quad (6.1.1)$$

여기서, G_D : 지반의 동적전단계수 (kN/m^2)

γ_t : 지반의 단위중량

g : 중력가속도 (m/sec^2)

V_S : 해당구조물을 포함하는 지층의 전단탄성과 속도 (m/sec)

(해당구조물이 여러 층에 걸칠 경우 그 평균치를 사용한다.)

$$V_{Si} = C \cdot V_{0i} \quad (6.1.2)$$

여기서, V_{Si} : 지반의 동적전단탄성계수 산출에 이용되는 i 번째 지층의 설계전단 탄성과속도

V_{0i} : 해당구조물을 포함하는 i 번째 지층의 전단탄성과속도

C : 성능수준별 지반변형에 대한 보정계수 $C = 0.8$ (기능수행수준)

$C = 0.5$ (붕괴방지수준)

또한 지반을 모델화할 때 적용하는 지반의 물성치, 즉 지반의 탄성계수(또는 전단 탄성계수)와 포아송 비는, 지진 시 지반에 동적하중이 가해지고 이에 따라 지반이 동적거동을 하므로, 지반의 동적변형계수 E_D 또는 동적전단계수 G_D 와 동적포아송 비 ν_D 를 적용한다. 이들 계수간의 상호관계는 다음과 같다.

$$E_D = 2(1 + \nu_D) \cdot G_D \quad (6.1.3)$$

지반의 동적탄성계수 E_D 는 성능수준을 고려한 지반의 전단파속도 V_s 로부터 산정된다. 동적 포아송비 ν_D 의 경우에는 해당 지반에 탄성과시험 등을 수행하여 그 결과로부터 산출되는데, 보통 이는 0.40~0.50정도의 값을 나타낸다. 단, 지하수위 이하에서는 동적 포아송비를 구할 수 없으므로 관련 문헌자료를 참조하여 구한다.

6.1.3 지반반력계수 산정

1) 관용적 방법

지반반력계수는 각종 조사, 시험 결과에 의해 얻어진 탄성계수를 이용하여, 기초의 재하폭 등의 영향을 고려해 정하는 것을 원칙으로 하며 상시 상태에 대한 계수값은 “도로교 설계기준” 혹은 “철도설계기준(철도교편)(2004, 건설교통부)”의 하부구조편의 지반반력계수의 산정 부분을 따른다. 여기서 사용되는 지반반력계수 혹은 전단지반반력계수는 지진의 세기와 관련된 기능수행수준 및 붕괴방지수준에 적합한 특성치를 적용한다.

$$K_H = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4} \quad (6.1.4)$$

$$K_V = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (6.1.5)$$

$$K_{SS} = \lambda K_H \quad (6.1.6)$$

$$K_{SB} = \lambda K_V \quad (6.1.7)$$

여기서, K_H : 구체측벽의 수평 지반반력계수 (KN/m^3)

K_V : 구체저판의 연직 지반반력계수 (KN/m^3)

K_{SS} : 구체측벽의 전단 지반반력계수 (KN/m^3)

K_{SB} : 구체저판의 전단 지반반력계수 (KN/m^3)

k_{h0} : 지름 30 cm의 강제원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평 지반반력계수

k_{v0} : 지름 30 cm의 강제원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직 지반반력계수

B_h : 수평 환산재하폭

B_v : 연직 환산재하폭

$\lambda = 1/3 \sim 1/4$

$$k_{v0} = \frac{1}{30} \cdot E_D, \quad k_{h0} = \frac{1}{30} \cdot E_D \quad (6.1.8)$$

여기서, E_D : 상시하중 상태 및 지진하중 상태의 성능수준을 고려한 지반의 탄성계수

$$E_D = 2 (1 + \nu) G_D \quad (6.1.9)$$

$$G_D = \gamma_t / g \times V_s^2 \quad (6.1.10)$$

$$V_s = 0.8 V_0 \quad (\text{기능수행수준}) \quad (6.1.10a)$$

$$V_s = 0.5 V_0 \quad (\text{붕괴방지수준}) \quad (6.1.10b)$$

여기서, V_0 : 초기전단파속도 (m/sec)

V_s : 성능수준별 전단파 속도

G_D : 동적전단탄성계수

2) 유한요소법에 의한 방법

단위하중을 이용한 지반반력계수를 구하는 방법이 있다. 개착식 본선 Box 구조물의 벽체 안쪽에 단위하중을 작용시켜 정적인 해석을 하는 것으로, 일반적으로 유한요소법(FEM)을 이용한다.

지진시 지반반력계수 K_H , K_V , K_{SS} , K_{SB} 를 구하기 위하여 다음과 같이 공동 지반의 2차원 유한요소 모델을 작성하고, 지반탄성의 방향에 단위하중 “1”을 구조물에 작용시켜 그 방향의 하중과 변위의 관계에서 지반반력계수 값을 산출한다. 이때 지하 구조물은 상판 및 저판의 강성을 고려하거나, 혹은 강체로 간주한다.

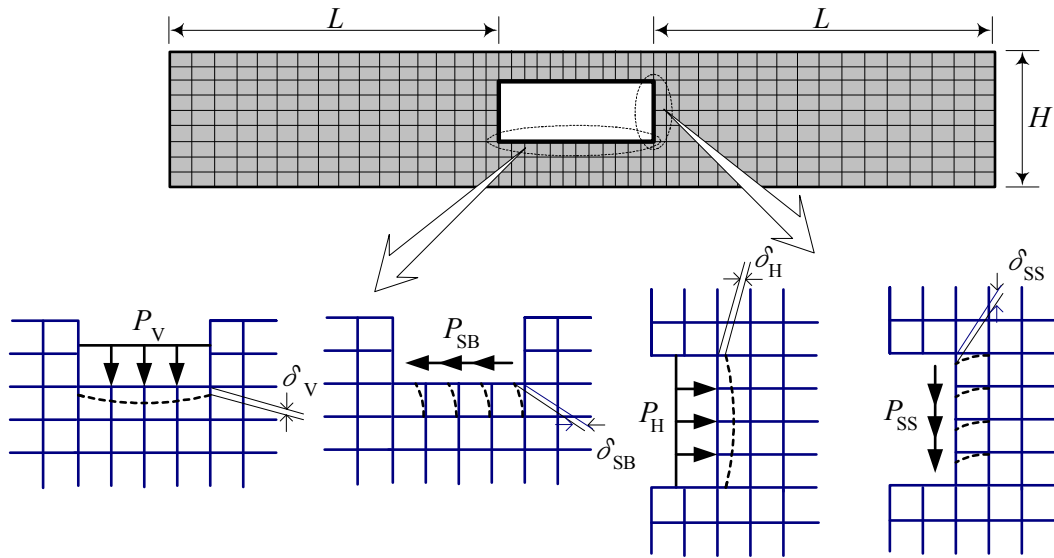


그림 6.1.3 지반반력계수 산정을 위한 유한요소 모델

여기서,

- K_H : 측벽에 대한 수평지반반력계수 ($K_H = P_H / \delta_H$, KN/m^3)
- K_V : 상판 및 저판에 대한 연직지반반력계수 ($K_V = P_V / \delta_V$, KN/m^3)
- K_{SS} : 측벽에 대한 전단지반반력계수 ($K_{SS} = P_{SS} / \delta_{SS}$, KN/m^3)
- K_{SB} : 상판 및 저판에 대한 전단지반반력계수 ($K_{SB} = P_{SB} / \delta_{SB}$, KN/m^3)
- P_H : 측벽에 가해지는 수평방향의 단위하중
- P_V : 상판 및 저판에 가해지는 연직방향의 단위하중
- P_{SS} : 측벽에 가해지는 전단방향의 단위하중
- P_{SB} : 상판 및 저판에 가해지는 전단방향의 단위하중
- δ_H : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 수평방향의 변위 (m)
- δ_V : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 연직방향의 변위 (m)
- δ_{SS} : 측벽에 단위하중을 부여한 경우에 발생하는 전단방향의 변위 (m)

δ_{SB} : 상판 및 저판에 부여한 단위하중에 의한 전단방향의 변위(m)

이때 주의할 점은 측방의 경계와 구조물 측벽과의 거리를 충분히 고려하지 않으면 지진시 지반반력계수를 정확히 구할 수 없으므로, 유한요소 모델의 경계는 구조물 측벽에서 다음 식(6.1.11)에서 나타난 거리 이상을 고려해야 한다.

$$L \geq 3H \quad (6.1.11)$$

여기서, H : 기반면까지의 깊이

6.1.4 구조물에 적용하는 지진하중

지진 하중으로서는 지진 시 측벽토압 $p(z)$, 상판에 작용하는 지진 시 주면전단력 τ_u , 저판에 작용하는 지진시 주면전단력 τ_B , 측벽에 작용하는 주면전단력 τ_s , 관성력 f_i 를 그림 6.1.4과 같이 작용시킨다. 각 하중은 다음과 같이 구한다.

그림 6.1.4 지진하중 산정

$$p_0 \quad : \quad \text{상판 지진토압} = K_{SB} \cdot u(z_u)$$

$$p(z) \quad : \quad \text{지진시 측벽토압} = K_H \cdot \{u(z) - u(z_B)\}$$

$$\tau(z) \quad : \quad \text{주면 전단력} = G_D / (\pi H) \cdot S_v \cdot T_S \cdot \sin(\pi z / 2H)$$

$$f_i \quad : \quad \text{관성력} = m_i \cdot a_i = w_i \cdot K_{hi}$$

여기서, $u(z)$: 지진시 깊이 z 에서의 지반변위 (m)

6.1.5절의 지반 변위의 산정 참조

- z : 지표면으로부터의 깊이 (m)
 z_U : 지표면으로부터 구조물 상판 상부까지의 깊이 (m)
 z_B : 지표면으로부터 구조물 저판 아랫면까지의 깊이 (m)
 K_{SB} : 상판에 대한 지반의 전단지반반력계수(KN/m^3)
 K_H : 측벽에 대한 지반의 수평지반반력계수(KN/m^3)
 K_n : 지진의 성능 수준별 수평진도(m/sec^2)
 K_{hi} : 해당깊이에 대해 보정한 수평진도 (m/sec^2) = $K_h \cdot C_U(z)$
 $C_U(z)$: 깊이에 대한 보정계수 = $1 - 0.015z$
 S_V : 기반면에서의 속도응답 스펙트럼 (m/s) (설계기준에는 가속도응답 스펙트럼 S_a 만이 주어져 있으므로, 이를 변환하여 사용한다. = $T_S/(2\pi) \cdot S_a$)
 T_S : 표층지반의 고유주기 (s) = $1.25 \cdot T_G$
 T_G : 표층지반의 특성값 (s) = $\sum(4H_i/V_{si})$
 $T_{S'}$: 설계응답스펙트럼에서의 통제주기 (s) = $C_v/(2.5C_a)$
 C_v, C_a : 지진구역 및 지반종류에 따른 지진계수
 H_i : 제 i 번째 토층의 두께(m)
 V_{si} : 제 i 번째 토층의 전단파속도(m/s)
 H : 기반면의 깊이(보통암 까지의 깊이 또는 구조물 저면 이하 10~15 m 정도, m)

6.1.5 지반 변위의 산정

응답변위법에 사용되는 지반의 수평 변위량의 연직방향분포는 지진응답해석을 이용하여 구하는 것이 좋다. 그러나 지층구성이 복잡하고 지반의 증폭 특성이 복잡한 지반이나 지진 시에 지반의 특성이 크게 변화하는 지반 등의 상세한 검토를 필요로 하는 지반 이외는 토층의 고유주기에서 지표면의 최대 변위를 구하고, 지반의 변형 모드를 가정하여 지반 변위의 연직방향분포를 구해도 된다.

그림 6.1.5과 같이 지반을 단일층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 식

(6.1.12)를 이용한다.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s} x\right) \quad (6.1.12)$$

여기서, S_v : 지표층(기반암 상부 토층) 지반의 고유주기에 해당되는 기반암

설계속도응답스펙트럼 (m/sec)

T_G : 지반의 고유주기 (sec)

H_s : 지표층 지반의 두께 (m)

지반을 두 층으로 가정하여 지중변위를 산정하는 방법은 식(6.1.13)~식(6.1.15)을 이용한다.

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi}{V_{s0d1}} x_1\right) \quad (6.1.13)$$

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{V_{s0d1}}\right) \cdot \left(\cos \frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}} - \frac{\sin \frac{\omega_0 x_2}{V_{s0d2}}}{\tan \frac{\omega_0 H_2}{V_{s0d2}}} \right) \quad (6.1.14)$$

$$(1 + \alpha) \cos\left\{\omega_0 \left(\frac{H_1}{V_{s0d1}} + \frac{H_2}{V_{s0d2}}\right)\right\} + (1 - \alpha) \cos\left\{\omega_0 \left(\frac{H_1}{V_{s0d1}} - \frac{H_2}{V_{s0d2}}\right)\right\} = 0$$

(6.1.15)

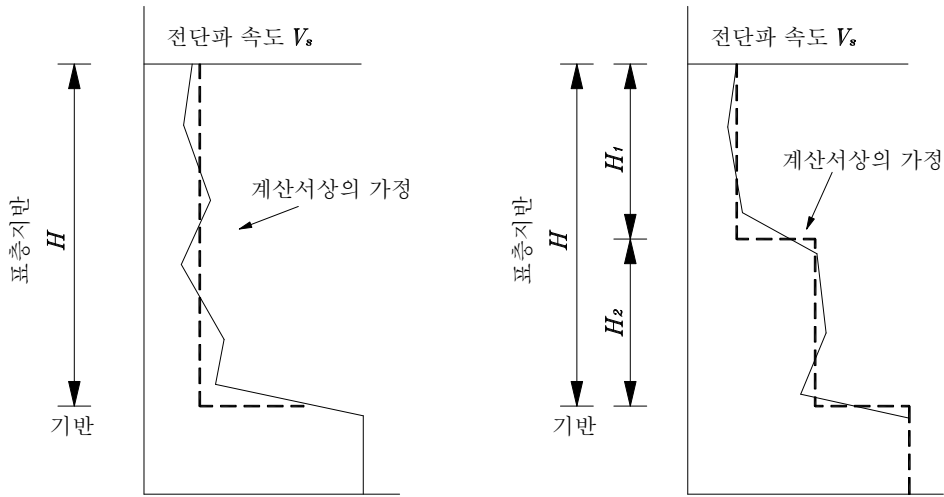
여기서, H_s : 전체 토층 지반의 두께 (m)

H_1, H_2 : 제1층, 제2층의 두께 (m)

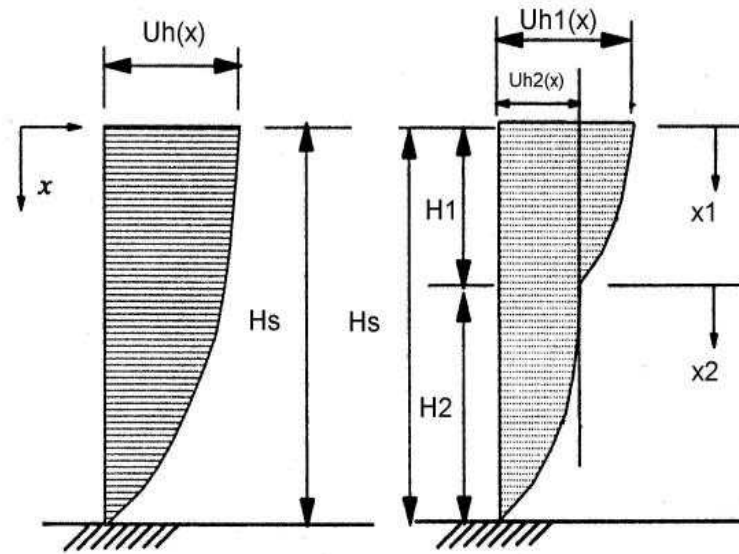
V_{s0d1}, V_{s0d2} : 제1층, 제2층의 평균 전단파속도 (m/sec)

ω_0 : 지반의 설계 고유 진동수, 식(6.1.15)에서 시행착오법으로 구함

α : 제1층과 제2층의 임피던스비, $\alpha = \frac{Y_1 V_{s0d1}}{Y_2 V_{s0d2}}$



(a) 전단파속도에 따른 지층의 분할 및 평균전단파속도 산정



(b) 변형형상(모드)

그림 6.15 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지층변위 산정법

기반면의 속도 응답스펙트럼을 산정할 경우, 해석대상 지반의 공진주기가 0.4초보다 작은 대부분의 국내지반에서는 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 사용하는 방법이 적절하다. 그러나, 공진주기가 0.4초 이상인 장주기 지반에서는 지진응답해석을 수행하여 결정하는 것이 바람직하다.

6.2 시간이력해석법

- 1) 도시철도 지하 구조물을 시간이력 해석법을 사용하여 해석하고 설계하기 위해서는 설계지진하중을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 설계지진하중(가속도)의 시간이력은 내진 I 등급에 해당하는 기능수행수준과 붕괴방지 수준을 만족할 수 있는 평균재현주기를 가진 지반운동이 되어야 한다.
- 2) 시간이력해석을 위한 구조물의 해석모델은 지반운동에 대한 구조물의 동적응답 크기와 특성을 충분히 고려할 수 있도록 구조물의 질량과 강성의 공간적인 분포를 적절하게 대표할 수 있어야 한다.
- 3) 지반의 유연성이 매우 높아서 구조물의 동적응답에 미치는 영향이 무시될 수 없는 경우에는 지반-구조물 상호작용을 적절하게 고려할 수 있도록 지반을 역학적으로 모델링하여야 한다.
- 4) 질량중심과 강성중심의 편차로 인하여 발생하는 비틀림의 효과를 적절히 모델링하여야 한다.
- 5) 시간이력해석시 구조물 혹은 지반의 감쇠특성이 적절히 모델링되어야 한다.
- 6) 해석방법
지진하중에 대한 구조물의 동적거동을 나타내는데 사용되는 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = -[M] \{I\} \ddot{u}_g \quad (6.2.1)$$

동적해석은 궁극적으로 식(6.2.1)과 같은 운동방정식의 해를 구하는 것이다. 이 방정식의 해를 구하기 위해서는 첫째로 직접 수치해석을 행하는 방법(직접적분법, Direct integration method)과 둘째로 식(6.2.1)을 서로 무관한(uncoupled) 모드별 미분방정식으로 변환(분리)시켜 풀고 각 모드별 해를 중첩하는 방법(모드중첩법, Mode superposition method) 등이 있다.

6.3 U-Type 구조물 및 옹벽의 해석방법

6.3.1 지진에 의한 토압

U-Type 구조물 및 옹벽에 작용하는 지진에 의한 토압계산은 Mononobe-Okabe에 의해 개발된 의사정적 해석 방법을 이용한다.

1) 주동토압

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - K_v) K_{AE} \quad (6.3.1)$$

여기서, K_{AE} : 지진시 주동토압계수로서

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2} \quad (6.3.2)$$

2) 수동토압

$$P_{PE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - K_v) K_{PE} \quad (6.3.3)$$

여기서, K_{PE} : 지진시 수동토압계수로서

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi - \theta + i)}{\cos(\delta - \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2} \quad (6.3.4)$$

γ : 흙의 단위체적중량

K_h : 수평지진계수

H : 옹벽높이

K_v : 수직지진계수

ϕ : 흙의 내부마찰각

i : 뒤채움흙의 경사각

θ : $\tan^{-1} \left(\frac{K_h}{1 - K_v} \right)$

β : 옹벽배면의 수직에 대한 각

δ : 흙과 옹벽사이의 마찰각

3) 토압의 합력이 U-Type 구조물 및 옹벽에 작용하는 높이 h_a 는 토압의 정적분력이 하면으로부터 $\frac{H}{3}$ 에 작용하고 지진에 의한 추가적인 동적영향이 $0.6H$ 의 높이에 작용한다고 가정하여 구할 수 있다. 그러나 대부분의 경우에는 토압이 균등하게 분포되어 있고 h_a 를 $\frac{H}{2}$ 로 가정하는 것으로 충분하다.

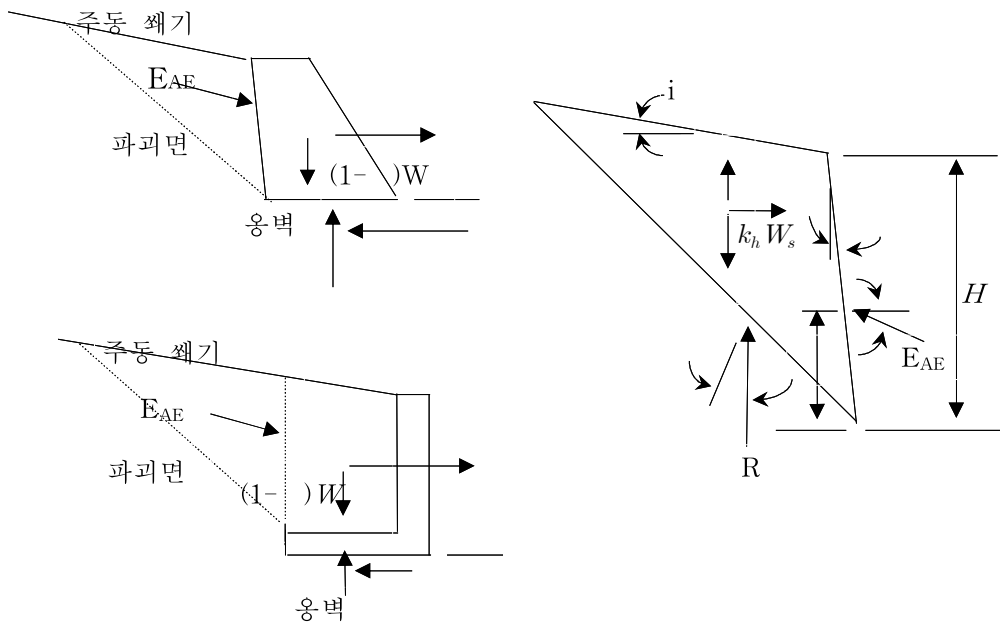


그림 6.3.1 주동췌기에 작용하는 힘의 도식도

6.3.2 수평지진계수 (K_h)의 결정

1) 영구변위를 허용하는 경우

경제적인 구조물이 되기 위해서는 변위가 전혀 발생하지 않도록 설계하기보다는 작은 허용변위에 대해 설계하는 것이 좋다. 일반적으로 U-Type 구조물 및 옹벽의 설계허용수평변위를 $254 C_a \cdot I (mm)$ 이내로 하는 경우에는 K_h 를 $0.5 C_a \cdot I$ 로 보고 Mononobe-Okabe 해석방법에 따라 토압을 산정하는 것이 권장된다.

2) 영구변위를 허용하지 않는 경우

영구변위를 허용하지 않는 경우의 U-Type 구조물 및 옹벽(기초가 경사말뚝이나

타이백으로 지지되어 있어 구속된 경우)에는 수평지진계수 (K_h)를 $1.5C_a \cdot I$ 로 적용하여 Mononobe-Okabe 해석방법으로 토압을 계산한다.

6.3.3 수직지진계수 (K_v)의 결정

특별한 요구가 없는 한 수직지진계수 (K_v)는 0으로 본다.

제 7 장 철근 콘크리트 구조 부재의 내진 설계

7.1 일반사항

- ① 설계 방법은 강도설계법을 표준으로 한다.
- ② 내진설계는 기능수행수준과 붕괴방지수준 모두에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다.

7.2 하중조합

1) 상시 상태의 설계

상시상태에 대한 설계는 “콘크리트 구조설계기준(2003, 건설교통부)”에 준한다.

2) 기능수행수준

지진시 기능수행수준에 대한 하중조합은 다음식에 준한다.

$$U = 0.75 (1.1 \times 1.4D + 1.7L + 1.8H + 1.8E) \quad (7.2.1)$$

$$U = 0.9D + 1.4E \quad (7.2.2)$$

여기서, D : 고정하중

L : 활하중

H : 토압 및 수압

E : 지진하중

3) 붕괴방지수준

지진시 붕괴방지수준에 대한 하중조합은 다음식에 준한다.

$$U = 1.00 (D + L + H + E) \quad (7.2.3)$$

여기서, D : 고정하중

L : 활하중

H : 토압 및 수압

E : 지진하중

탄성해석에 의한 붕괴방지수준의 부재력은 응답수정계수(5.3 응답수정계수, R)로 나눈 값을 사용한다. 소성해석을 수행한 경우는 계산결과를 그대로 사용한다.

7.3 내진설계 구조상세

7.3.1 적용범위

도시철도 구조물중 지하에 건설되는 정거장 구조물 본체등 주요 구조물에 적용한다.

7.3.2 관련 설계기준

도시철도의 내진설계에 있어서 구조상세는 "콘크리트 구조설계기준(2003, 건설교통부), 제 21장 내진설계 시 고려사항"을 적용한다.

7.3.3 부재 접합부

구조적 성능이 현저하게 다른 두 구조물의 접합부는 특별한 경우를 제외하고 분리구조를 원칙으로 한다. 접합부는 충분히 보강하여 안정성을 확보하여야 한다.

제 8 장 행정사항

1. 재검토기한

국토교통부장관은 「훈령·예규 등의 발령 및 관리에 관한 규정」에 따라 이 고시에 대하여 2017년 7월 1일 기준으로 매3년이 되는 시점(매 3년째의 6월 30일까지를 말한다)마다 그 타당성을 검토하여 개선 등의 조치를 하여야 한다.

부 칙 < 2005.6.29 >

이 도시철도 내진설계기준 관보 공고일(2005.6.29) 이전에 이미 시행중에 있는 설계 용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 필요하다고 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 내진설계기준을 그대로 사용할 수 있다.

부 칙 <2009.9.23>

이 고시는 고시한 날부터 시행한다.

부 칙 <2013.6.28>

이 고시는 고시한 날부터 시행한다.

부 칙 <2016.4. >

이 고시는 고시한 날부터 시행한다.

부 칙 <2017.7.1.>

이 고시는 고시한 날부터 시행한다.