

도시철도 내진설계기준 주요 내용 검토

Review for Main Contents of Earthquake Resistance Design Regulations for Subway Structures

유 제남* 이 성민**

Yoo, Jenam Lee, Sungmin

ABSTRACT

Recently "Earthquake Resistance Design Regulations for Subway structures" has been established. It is the first time in our country.

In this paper the regulations is reviewed and explained briefly.

Contents for the Performance Based Design Criteria and the estimation method for the design earthquake response spectrum in underground structures are reviewed.

Earthquake resistance design for the evaluation of liquefaction, boundary spring coefficients for structural analysis modelling and soil response displacements are investigated and described also. Earthquake resistance design details shall be explained.

1. 개요

최근 지중에 건설되는 도시철도 구조물에 대한 내진 설계기준이 국내 최초로 제정되었다. 본 기준은 도시철도 구조물중 지하구조물에 대한 내진설계 기준이며, 본고에서는 이중 주요 내용에 대하여 기술하였다.

성능에 기초한 내진설계 기본방침의 내용, 지중에서의 도시철도 구조물에 작용하는 지진력을 결정함에 있어서 성능수준에 따른 감쇠효과보정, 지중 지진력의 크기결정에 중요한 인자인 기반암의 선정, 응답 변위의 산정 등이 종합적으로 반영된 설계지반운동 및 설계지진응답스펙트럼의 결정에 대하여 검토하였다. 또한 구조해석을 위한 모델링 시 구조물과 지반의 경계부 지반스프링 상수의 성능 수준별 산정방법과 지진 시의 지반변위의 산정방법에 대하여 검토하였다.

또한 지반의 액상화에 대한 평가기준에 대하여 검토하였으며, 구조해석을 위한 수준별 하중조합 및 하중계수, 붕괴방지수준 시 비선형 거동에 대한 응답수정계수, 내진설계 상세 등에 대하여 검토하였다.

2. 설계일반사항

2.1 내진설계 관련기준

* 유 제남 : 정회원, (주)삼안, 철도구조부 상무이사

** 이 성민 : 정회원, (주)삼안, 사장, 공학박사

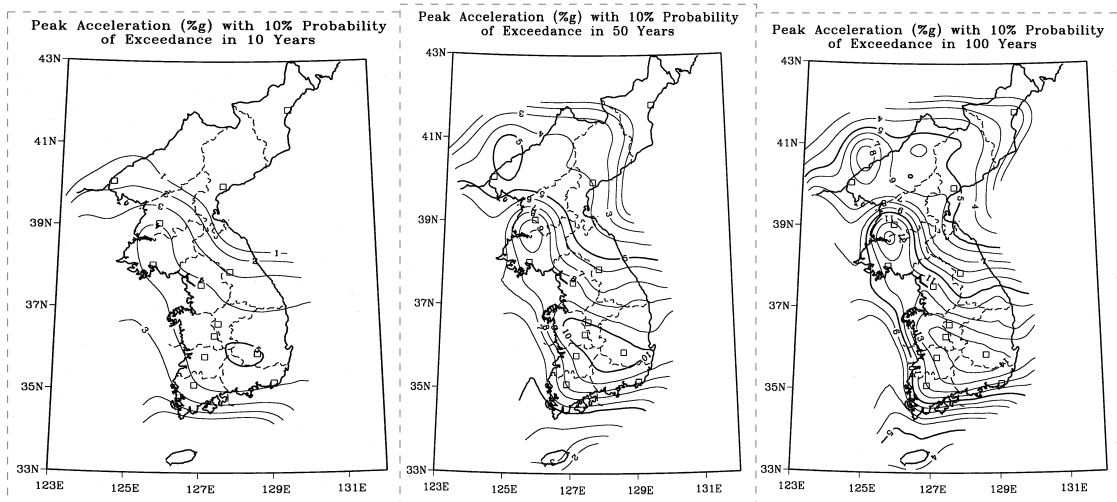
- 내진설계기준준칙(1998, 건설교통부)
- 도시철도내진설계기준(2005, 건설교통부)
- 지하공동구내진설계기준(2004, 건설교통부)
- 콘크리트구조설계기준(2005, 건설교통부)
- 도로교설계기준(2003, 건설교통부)
- 철도교설계기준(2001, 건설교통부)

2.2 내진설계 생략 조건

- 토피가 10m 이상 확보되고, 표준관입시험치(SPT) N값이 30이상인 주변지반을 갖는 1층 구조로 이루어진 본선 구조물은 책임기술자의 판단에 따라 지진에 대한 안정성 검토를 생략할 수 있다.

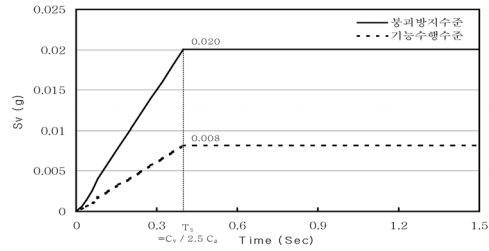
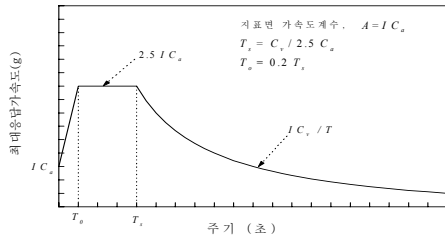
2.3 내진설계 기본개념

- 성능에 기초한 내진설계개념
- 기능수행수준 : 중간 이하의 규모를 가진 지진에 대해서는 구조부재들이 탄성영역 내에서 저항하여 심각한 손상을 입지 않아야 한다.
지진재현주기100년(10년내에 10%초과 확률의 지진)
- 붕괴방지수준 : 비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 구조물의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안되며, 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해 조사와 보수를 위해 현장접근이 가능하도록 설계를 하여야 한다.
지진재현주기1000년(100년내에 10%초과 확률의 지진)
- 지진재해도 : 어느 장소에서 일어날 수 있는 재현주기에 해당하는 최대가속도 값을 중력가속도($1.0g=980gal(1gal=1cm/sec^2)$)의 퍼센트 값으로 나타낸 것으로 각 지역에서의 가속도 값을 등고선으로 연결해 놓은 것이 지진재해도 분포도이다. 해당 지역별 설계지반운동 수준은 지진재해 분포도를 이용하여 구하여도 좋다.



2.4 응답스펙트럼

- 표준설계응답스펙트럼 (지진재현주기 500년)
 - 5% 감쇠비 및 지표면에서의 자유장 운동으로 정의



◦ 속도응답스펙트럼

- 해석대상 부지의 가속도 응답스펙트럼을 직접 적분하여 산정
- 기반면의 속도응답스펙트럼이 지하구조물에서의 내진해석에 사용됨.

2.5 기반면의 산정

- ① “내진설계기준연구(1997.11., 건설교통부)”의 지반분류(표 3.4.1) SB에 해당되는 전단파속도가 1500m/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 10~15m 이하인 심도 GL-30m인 면을 기반면으로 간주한다. 이때, 그 지반은 사질토인 경우 SPT-N값 50이상이어야 하고, 점성토인 경우에는 SPT-N값 30이상이어야 한다.
- ④ 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우는 구조물 저면을 기반면으로 설정한다.

3. 설계지진 응답스펙트럼의 작성

표 3.1 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 3.2 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

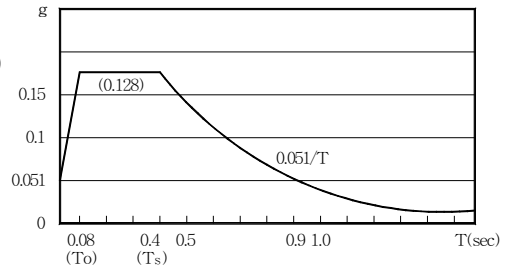
표 3.3 위험도계수, I

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

$T_0 = 0.2T_s$

$T_s = C_v / (2.5 * C_a)$

- 예) 지반종류 S_A , 지진구역 I, 기능수행 수준
 $\Rightarrow C_a = 0.09, C_V = 0.09, T_S = 0.09/(2.5 \cdot 0.09)$
 $= 0.4, T_0 = 0.2T_S = 0.08$
 $\circ 2.5 I C_a = 2.5 \cdot 0.57 \cdot 0.09 = 0.128$
 $\circ I C_a = 0.57 \cdot 0.09 = 0.051$
 $\circ I C_V / T = 0.57 \cdot 0.09 / T = 0.051 / T$



4. 설계지진응답스펙트럼의 산정

4.1 성능수준에 대한 보정

- 성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분되며, 각각은 위험도계수의 재현주기에 의하여 다음과 같이 분류된다.
 - 기능수행수준 : 재현주기 100년 ($I=0.57$)
 - 붕괴방지수준 : 재현주기 1000년 ($I=1.4$)

4.2 지반적용위치에 대한 보정

- 기반면의 설계 속도응답스펙트럼
 기반면에서의 설계 속도응답스펙트럼은 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 사용한다. 기반면에 대한 설계속도응답스펙트럼 작성법에 대한 자세한 내용은 4.4절을 참조한다.

4.3 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

$$C_D = \frac{1.5}{(40h+1)} + 0.5 = \frac{1.5}{(40 \cdot 0.1 + 1)} + 0.5 = 0.80(\text{기능수행수준}), 0.667(\text{붕괴방지수준})$$

4.4 설계속도 응답스펙트럼의 산정

- 기반면의 설계속도응답스펙트럼

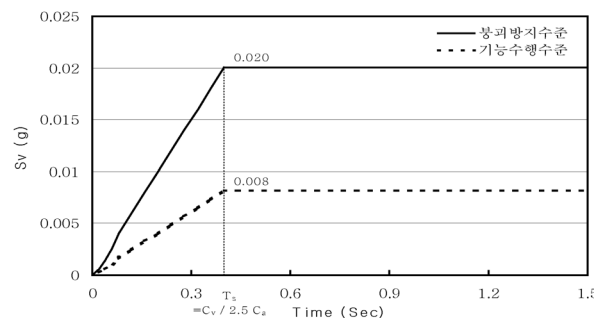
해석대상 부지의 공진주기가 0.4초 이하일 경우, 기반면에서 응답속도스펙트럼은 S_A 지반의 지표면 응답 가속도를 직접 적분하여 구할 수 있다. 이때, 환산식은 식(4.1)을 이용한다. 그러나, 해석대상 부지가 S_C 지반 또는 그 보다 연약한 층이 깊게 발달되어 있어 공진주기가 0.4초 이상일 경우, 본 기준에서는 지진응답해석을 이용하여 기반면의 속도응답스펙트럼을 구하는 방법을 추천한다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} \cdot S_a$$

여기서, S_v : 기반면 응답속도

S_a : S_A 지반의 지표면 응답 가속도

$T (= \frac{1}{f})$: 지반의 고유주기



5. 액상화 평가기준

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

6. 내진해석 및 설계에 대한 규정

6.1 내진해석방법

- 1) 도시철도구조물의 내진 해석은 지반 조건, 구조 조건 등을 고려하여 “응답변위법” 혹은 “시간이력해석법”을 사용하여 수행할 수 있다.
- 2) “응답변위법”은 도시철도구조물의 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.

6.2 응답수정계수

붕괴방지 수준의 지진은 구조물에서 발생하는 소성변형을 허용한다. 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.

7. 내진해석방법

7.1 지반의 전단탄성계수의 산정

$$\circ G_D = (\gamma/g) \cdot V_S^2 \quad \text{여기서, } G_D: \text{지반의 동적전단계수}(kN/m^2)$$

$$\gamma : \text{지반의 단위중량}(kN/m^3) \quad g: \text{중력가속도}(m/sec^2)$$

$$V_S : \text{해당구조물을 포함하는 지층의 전단탄성과 속도}(m/sec) = C \cdot V_{0i}$$

(해당구조물이 여러 층에 걸칠 경우 그 평균치를 사용한다.)

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

V_{0i} : 해당구조물을 포함하는 i 번째 지층의 전단탄성과속도

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

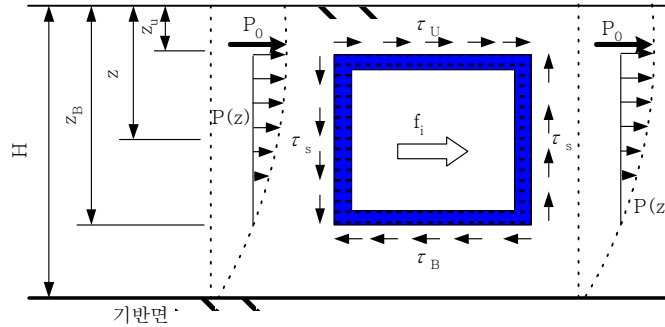
$C = 0.5$ (붕괴방지구준)

$$\text{또한 } E_D = 2(1 + \nu_D) G_D$$

동적 포아송비 ν_D 의 경우에는 해당 지반에 탄성파시험 등을 수행하여 그 결과로부터 산출되는데, 보통 이는 0.40~0.50정도의 값을 나타낸다.

7.2 구조물에 작용하는 지진하중

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



< 지진하중 산정 >

$$p_0 : \text{상판 지진토포압} = K_{SB} \cdot u(z_u) \quad p(z) : \text{지진시 측벽토포압} = K_H \cdot \{u(z) - u(z_B)\}$$

$$\tau(z) : \text{주면 전단력} = G_D / (\pi H) \cdot S_v \cdot T_s \cdot \sin(\pi z / 2H) \quad f_i : \text{관성력} = m_i \cdot a_i = w_i \cdot K_{hi}$$

7.3 지반변위의 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)를 이용한다.

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2H_s} x\right) \quad (7.1)$$

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)

8. 철근콘크리트부재 내진설계

8.1 하중조합

1) 상시 상태의 설계

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

2) 기능수행수준

지진시 기능수행수준에 대한 하중조합은 다음식에 준한다.

$$U = 0.75 (1.1 \times 1.4 D + 1.7 L + 1.8 H + 1.8 E) \quad (8.1)$$

$$U = 0.9 D + 1.4 E \quad (8.2)$$

여기서, D : 고정하중

L : 활하중

H : 토포 및 수압

E : 지진하중

3) 붕괴방지수준

지진시 붕괴방지수준에 대한 하중조합은 다음식에 준한다.

$$U = 1.00 (D + L + H + E) \quad (8.3)$$

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

8.2 내진설계 구조상세

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

8.3 부재접합부

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

9. 맺음말

지진에 의한 지반과 구조물의 복잡한 상관관계에 따른 거동으로 인하여 지하에 건설되는 도시철도 구조물에 대한 내진설계는 국내·외적으로 적용사례가 많지 않은 가운데에 국내에서는 최초로 설계기준이 제정되었다. 이는 지하 구조물의 내진해석 및 설계에 대한 연구개발이 더욱 많이 필요함을 의미한다고 볼수 있으며, 현재의 설계기준을 기초자료로 활용하여 보다 정확하고 상세한 발전적인 지하구조물의 내진설계를 위하여 많은 연구와 검토가 뒷받침 되어야 할 것으로 사료된다.