

KR C-02040

Rev.1, ?. January 2014

내진설계

2014. 1. ?



한국철도시설공단

경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.

목 차

1. 용어의 정의	1
2. 내진설계일반	2
2.1 기본방침	2
2.2 설계일반	2
2.3 품질보증 요구사항	7
3. 지하구조물 내진설계	7
3.1 내진설계의 방침	7
3.2 설계지반운동의 결정	7
3.3 내진해석 및 설계에 대한 규정	9
3.4 내진해석 방법	10
3.5 철근콘크리트 구조부재의 내진 설계	10
4. 교량 내진설계	11
4.1 일반사항	11
4.2 내진설계의 기본방침	11
4.3 설계 일반사항	12
4.4 해석 및 설계에 대한 규정	13
4.5 해석방법	18
4.6 기초 및 교대의 내진설계	21
4.7 강교 설계	23
4.8 콘크리트교 설계	23
4.9 지진격리교량의 설계	34
5. 터널 내진설계	41
5.1 내진설계 일반	41
5.2 성능수준에 기초한 내진설계	41
5.3 내진설계 방법	42
5.4 액상화 평가법	42
5.5 내진설계 시 주의사항	43
5.6 내진설계 품질관리	43
해설 1. 지하구조물 내진설계	45
1. 내진설계	45
1.1 내진등급 및 내진성능목표	45



1.2 설계지반운동의 결정	46
1.3 설계지진 응답스펙트럼의 설정	49
1.4 해석방법	51
1.5 철도 지하구조물의 내진설계 방법	55
해설 2. 교량하부 및 기초 내진설계	56
1. 일반사항	56
1.1 적용범위	56
2. 내진설계 기본방침	56
2.1 목적	56
2.2 내진설계의 기본개념	57
2.3 내진성능의 확보방안	57
3. 내진설계의 일반사항	59
3.1 설계지반의 운동	59
3.2 내진등급과 설계지진수준	60
3.3 지반의 종류	61
4. 내진해석 및 설계	64
4.1 내진설계	64
4.2 내진해석	70
5. 내진설계과정	74
해설 3. 터널 내진설계	85
1. 내진설계 일반	85
2. 내진설계 방법	85
2.1 해석방법	86
2.2 내진설계를 위한 조사 및 시험	97
2.3 입력 지반운동의 선택	97
2.4 내진설계상의 기반면(基盤面) 설정	98
2.5 설계하중의 조합	98
2.6 내진성능 평가	98
2.7 설계상세	99
3. 내진설계의 품질관리	99
RECORD HISTORY	100

1. 용어의 정의

- (1) 가속도계수(acceleration coefficient, A) : 내진설계에 있어서 설계지진력을 산정하기 위한 계수로서 지진구역과 재현주기에 따라 그 값이 다르다. 즉 지진구역계수(Z)에 지진위험도 계수(I)를 곱한 값(무차원량).
- (2) 고유주기(natural period) : 자유진동하는 구조물의 진동이 반복되는 시간 간격(second).
- (3) 고유진동수(natural frequency) : 감쇠효과가 무시된 구조물의 자유진동에서 시간당 발생 진동수(Hz).
- (4) 내진등급(seismic importance classification) : 내진등급은 중요도에 따라서 철도교량을 분류하는 내진설계상의 등급으로서 내진Ⅱ등급, 내진Ⅰ등급으로 구분된다.
- (5) 단경간교(single span bridge) : 경간이 하나인 철도교량.
- (6) 다중모드 스펙트럼 해석법(multi-mode spectral analysis method) : 여러 개의 진동 모드를 사용하는 스펙트럼해석법 .
- (7) 단일모드 스펙트럼 해석법(single-mode spectral analysis method) : 하나의 진동모드만을 사용하는 스펙트럼해석법.
- (8) 연성(ductility) : 비탄성응답을 허용하는 부재나 접합부의 성질.
- (9) 응답수정계수(response modification factor) : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 설계지진력을 산정하기 위한 수정계수.
- (10) 응답스펙트럼(response spectrum) : 어떤 일정한 감쇠비를 가진 구조물의 고유주기나 진동수에 따른 지진의 최대 응답을 나타낸 그래프.
- (11) 정규철도교량(regular railroad bridge) : 경간을 따라 질량, 강성이나 기하학적 특성에 특별한 변화가 없는 철도교량.
- (12) 지반계수(site coefficient) : 지반상태가 탄성지진응답계수에 미치는 영향을 반영하기 위한 보정계수.
- (13) 지반종류(soil profile type) : 지진시 지반의 응답특성에 따라 공학적으로 분류하는 지반의 종류.
- (14) 지진구역계수(zone factor, Z) : 우리 나라의 지진재해도 해석결과 근거한 각 지진 구역에서의 평균재현주기 500년에 해당하는 암반상의 지진 지반운동의 세기인 최대 지반가속도 값을 중력가속도(g)로 나눈 값(무차원량).
- (15) 지진위험도 계수(seismic risk factor) : 500년 재현주기를 기준으로 한 지진의 위험도를 나타내는 계수(무차원량).
- (16) 최대지진지반가속도(peak seismic ground acceleration) : 지진에 의해 발생하는 최대의 지반가속도로 가속도계수에 중력가속도를 곱한 값으로 정의(m/sec²).



- (17) 탄성지진응답계수(elastic seismic response coefficient) : 모드 스펙트럼 해석법에서 등가정적 지진하중을 구하기 위한 무차원량.
- (18) 평균재현주기(mean return period) : 어떤 크기나 특성을 가진 지진이 발생하는 평균시간간격.

2. 내진설계일반

2.1 기본방침

- (1) 인명피해를 최소화 한다.
- (2) 지진 시 시설물 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지해야 한다.
- (3) 지진 시 가능한 한 시설물의 기본적인 기능은 발휘할 수 있게 해야 한다.
- (4) 시설물의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.
- (5) 설계기준은 남한 전역에 적용될 수 있다.
- (6) 이 설계기준을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

2.2 설계일반

- (1) 내진등급 - 철도 구조물은 구조물의 중요도를 고려하여 <표 1> 과 같이 내진등급을 분류한다.

표 1. 철도의 내진등급

내진등급	구분 내용	설계지진의 평균재현주기
내진 1등급	설계지진 발생 후에도 교통수단을 유지하기 위한 중요시설물	1000년 (단 열차주행안전성 검토는 100년)
내진 2등급	내진1등급에 속하지 않는 철도구조물	500년

- (2) 철도의 내진설계 시 검토해야 할 사항

① 기본적인 검토사항

- 가. 내진등급 여부
- 나. 철도가 있는 지역 및 지반의 분류
- 다. 지진계수 결정
- 라. 재현주기별 지진 위험도계수결정
- 마. 설계지진의 응답스펙트럼 결정

② 전반적인 검토 사항

가. 열차 주행안전성 검토

- (가) 설계지진 발생 시 감속된 상태로 운행하는 열차의 주행안전성을 보장하는 것으로 철도 구조물의 변형, 응력, 진동 및 궤도 틀림 등이 열차의 안전성을 위협해서는 안 되며, 탄성영역의 거동이 지배적이어야 함. 또한 기초지반의 영구적인 침하나, 액상화를 검토하여 열차주행안전성을 확보해야 한다.
- (나) 구조물 진동에 의한 열차의 탈선을 방지하기 위하여 열차 속도별 허용침하량을 만족해야 하며 교축 직각 방향에 대한 충분한 강성을 확보토록 탄성설계를 해야 한다.
- (다) 재현주기는 100년을 기준으로 한다.
- (라) 하중조합 $U = 1.0(D+L/2+E+Q+H)$ 이며 이 경우 $L/2$ 는 단선활하중을 의미한다. 다만, 하중기호는 「제8장 교량 일반사항」에 따른다.

나. 구조물 설계

- (가) 설계지진 발생 후의 피해 정도를 최소화하고 구조물을 구성하는 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 구조물의 전체적인 붕괴는 방지해야 한다.
- (나) 기초지반 및 말뚝의 극한지지력, 기초 및 구조물의 설계지진력으로 적용해야 한다.
- (다) 구조물은 <표 1> 내진등급에 따라 설계하며 비탄성 변형을 허용하는 경우에는 구조물의 연성거동을 확보해야 한다.
- (라) 하중조합 $U = 1.0(D+L/2+E+Q+H)$ 을 사용한다. 여기에서 $L/2$ 는 단선활하중을 의미한다.
- (마) 교량의 내진설계에서는 연성 확보를 위해서 교각에 소성힌지를 형성시키거나, 필요한 경우 합리적이고 타당성 있는 지진격리장치를 사용할 수 있다. 소성힌지의 형성 위치는 유지관리와 보수, 보강이 가능한 곳을 선택하는 것으로 한다.

다. 철도구조물별 검토사항

- (가) 구조물별 내진설계기준에 따라 검토한다.
- (나) 별도의 내진 기준이 언급되지 않은 경우 지진하중을 고려하지 않는다.

③ 궤도, 정거장, 신호 및 통신체계 관련 고려사항

- 가. 궤도 - 모든 유형의 궤도에 있어서 각 궤도구성품(레일, 체결장치, 침목, 도상 등)은 모든 수준의 지진하중에 견딜 수 있다고 인식되고 있기 때문에 궤도 구조 자체에 대해서는 별도의 내진설계를 수행할 필요는 없다.
- 나. 전차선주 및 전차선 - 고가교 상에 건설되는 전차선주의 경우에는, 지지되는 구조물과의 동적 상호작용을 고려한 내진설계법을 적용해야 한다.
- 다. 신호 및 통신설비 - 신호 및 통신설비가 설치된 기준에 대한 내진설계의 기본방침과 그 설계 방법은 전차선주 및 전차선의 경우와 동일하며, 지중 또는 궤도상에



설치된 신호 및 통신설비는 별도의 내진설계를 수행하지 않는다.

(3) 설계지반운동

① 수준분류

가. 설계지반운동의 수준은 다음과 같이 분류해야 한다.

나. 평균재현주기 100년 지진지반운동(10년 내 초과확률 10%)

다. 평균재현주기 500년 지진지반운동(50년 내 초과확률 10%)

라. 평균재현주기 1,000년 지진지반운동(100년 내 초과확률 10%)

② 표현방법

설계지반운동은 그 지역의 지반조건을 고려한 5% 감쇠비를 적용한 표준설계응답 스펙트럼으로 표현해야 한다. 그러나 지역특성을 잘 나타내는 합리적인 근거가 있는 응답스펙트럼의 사용도 가능하다.

(4) 지진구역

① 지진재해도 해석결과에 근거하여 남한 전지역을 2개의 지진구역으로 설정 하며, 각 지진구역별 구역계수(Z)는 <표 2>에 표시된 값과 같다.

② 구역계수는 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년에 해당하는 지진지반운동의 최대지반가속도 값을 중력가속도(g)로 나눈 값으로 무차원량으로 표시된다.

③ 다만, <표 2>의 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 시설물에는 상위 지진구역계수를 적용해야 한다.

표 2. 지진구역구분

지진구역	행정구역		구역계수, Z
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

주) ① 강원도 북부(시, 군) : 춘천시, 속초시, 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 인제, 고성, 양양, 양구

② 강원도 남부(시, 군) : 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시, 영월, 정선

③ 전라남도 북동부(시, 군) : 광양시, 나주시, 여수시, 순천시, 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 화순

④ 전라남도 남서부(시, 군) : 목포시, 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평

(5) 가속도계수

- ① 지진위험도계수(I)는 각 내진등급에 따른 평균재현주기별로, 500년 평균재현주기에 대한 최대지진지반가속도의 비를 나타내며 <표 3>과 같다.

표 3. 지진위험도계수, I

재현주기(년)	100	500	1,000
지진위험도계수	0.57	1.0	1.4

- ② 가속도계수(A)는 지진구역별로 내진등급에 따른 최대지진지반가속도의 크기를 나타내기 위한 계수로서 구역계수(Z)에 지진위험도계수(I)를 곱함으로써 구할 수 있으며, 무차원으로 표시된다.

$$A = Z \cdot I \quad (1)$$

- ③ 따라서 내진등급과 지진구역에 따른 최대지진지반가속도의 크기는 가속도계수(A)에 중력가속도(g)를 곱한 값과 같다.

- (6) 지반의 영향을 고려하기 위하여 지반의 특성에 따라 지반을 분류하고 이에 따른 지반계수를 설정하여 설계응답스펙트럼에 반영해야 한다.

① 지반의 분류

가. 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 <표 4>와 같이 I, II, III, IV, V의 5종류로 분류한다.

나. 지반종류 V는 별도로 부지에 대한 특성조사를 할 필요가 있는 지반으로서 다음의 경우에 속하는 지반으로서 전문가가 작성한 부지종속 설계응답스펙트럼을 사용해야 한다.

(가) 액상화가 일어날 수 있는 지반, 매우 민감한 점토지반, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 지반과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반, 이탄이나 유기성이 매우 높은 점토지반.

(나) 매우 높은 소성을 가진 점토지반

(다) 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간정도로 단단한 점토

다. 지반종류를 결정할 만큼 지반의 물성치를 충분히 알 수 없는 경우에는 III종류가 사용된다. 발주자가 해당 지역의 지반종류를 IV 혹은 V로 판정하거나, 지질학적 자료에 의해 IV나 V로 판정되는 경우를 제외하고는 IV나 V로 가정할 필요가 없다.



표 4. 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30.0m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도 $\overline{V_s}$ (m/s)	평균표준관입시험, \overline{N} ($\overline{N_{CB}}$ 비점착성 점토) (타격횟수/0.3m)	비배수전단강도, $\overline{S_u}$ (kN/m ²)
I	경암지반 보통암지반	> 760	-	-
II	매우 조밀한 토사, 또는 연암지반	360 ~ 760	> 50	> 100
III	견고한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 0	50 ~ 100
IV	연약한 토사지반	< 180	< 15	< 50
V	부지 고유의 특성 평가가 요구되는 지반			

② 지반계수

「1.2 (6)」지반의 분류의 지반종류에 따른 지반계수는 <표 5>과 같다.

표 5. 지반계수

지반종류 지반계수	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

(7) 탄성지진 응답계수

설계하중의 결정에 쓰이는 탄성지진응답계수(C_s)는 <식 2> 같은 무차원의 식으로 구해야 한다.

$$C_s = \frac{1.2 AS}{T^{2/3}} \leq 2.5 A \quad (2)$$

여기서, A : 「2.1.2 (5)」에서 규정된 가속도계수

S : 「2.1.2 (6)」에서 규정된 지반 특성에 대한 무차원의 지반계수

T : 대상시설물의 주기

다중모드 스펙트럼해석법을 사용할 경우, m번째 진동모드에 대한 탄성지진응답계수(C_{sm})는 <식 3>에 따라 구해야 한다.

$$C_{sm} = \frac{1.2 AS}{T_m^{2/3}} \leq 2.5 A \quad (3)$$

여기서, T_m : m번째 진동 모드의 주기

T_m 값이 4.0초를 넘는 구조물에 대해서 m번째 진동모드에 대한 C_{sm} 값은 <식 4>에 따라 결정할 수 있다.

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad (4)$$

2.3 품질보증 요구사항

- (1) 내진시설물의 적절한 품질보증요건을 만족시키기 위하여 설계, 시공, 완공 후 공용기간의 단계별로 이루어져야 한다.
- (2) 설계는 시설물 부재 재료의 특성과 세부사항 및 치수를 제시해야 하며, 특별한 장치가 도입될 경우에는 이에 대한 특성도 포함해야 한다.
- (3) 시공중에 특별한 검토를 요구하는 중요한 시설물의 부재는 설계도면에서 확인이 되어야 하고, 이에 대한 검토방법이 제시되어야 한다.

3. 지하구조물 내진설계

3.1 내진설계의 방침

3.1.1 내진설계의 개념

내진설계란 지진이나 지진이 발생된 후에도 구조물이 안정성을 유지하고 그 기능을 발휘할 수 있도록 설계시에 지진하중을 추가로 고려하여 설계를 수행하는 것을 의미한다. 지하철도 구조물 내진설계는 성능에 기초한 내진설계개념을 도입하였으며 설계 기본원칙은 비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 구조물의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안 되며 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해조사와 보수를 위해 현장접근이 가능하도록 설계를 해야 한다.

3.1.2 내진등급 및 내진성능 목표

내진설계의 대상으로 선정하고 있는 지하철도 구조물은 내진 1등급의 내진성능을 갖도록 하며 등급별 내진성능 목표에서 고려하는 설계지진강도는 평균재현주기 1000년에 해당되는 지진지반운동으로 한다.

3.2 설계지반운동의 결정

(1) 3.2.1 일반사항

지하철도 구조물에 대한 내진설계를 위한 설계지반운동 결정시 고려해야 할 사항을 서술하고 설계지반운동의 수준을 정의한다. 본 기준은 지하철도 구조물의 내진성 확보에 필요한 최소 설계요구조건을 규정한 것으로서, 지진시 지하철도의 기능을 유지하여 대중교통에 중대한 지장을 초래하지 않도록 하는 것을 목적으로 한다.

3.2.2 설계지진 응답스펙트럼의 작성

(1) 표준 설계응답스펙트럼

- ① 지반운동의 공간적 변화 특성 고려 방법



가. 구조물의 모든 위치에서 똑같은 지반운동으로 가진되는 것이 비합리적으로 판단되는 구조물에 대해서는 지반운동의 공간적 변화를 고려할 수 있는 모델을 사용해야 한다.

나. 지반운동의 공간적 변화에 관한 구체적인 내용은 필요한 경우에는 관련 기술기준에서 규정한다.

② 가속도시간이력

가. 지반운동은 지반가속도의 시간이력으로 표현될 수 있다.

나. 공간적인 모델이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분(수평2방향, 수직방향)으로 구성되어야 한다.

다. 필요시에는 「다.항」에 기술되어 있는 인공가속도시간이력을 사용할 수 있다.

③ 인공가속도시간이력

가. 인공가속도시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다.

나. 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 발진기구 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성해야 한다.

다. 인공가속도시간이력의 지속시간은 지진의 규모와 발진기구특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.

라. 3방향성분의 인공가속도시간이력 상호간에는 통계적 독립성이 유지되어야 한다.

(2) 설계지진 응답스펙트럼

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

가. 지반적용위치에 대한 보정

(가) 지상구조물의 내진설계에는 지반분류를 고려한 지표면의 설계응답스펙트럼을 이용하지만 지하구조물의 내진설계의 경우 응답변위를 산정하기 위하여 기반암면에서의 설계 속도응답스펙트럼을 이용한다.

(나) 기반면의 설계 속도응답스펙트럼

기반암면에서의 설계 속도응답스펙트럼은 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 사용한다.

나. 감쇠율에 대한 보정

성능수준별 감쇠율을 적용하며 표준 설계응답스펙트럼에 감쇠율에 대한 보정계수를 곱한 값으로 정의된다.

(가) 성능수준별 감쇠율(h) : $h = 0.2$

(나) 감쇠율에 대한 보정계수, C_D

$$C_D = \frac{1.5}{(40h+1)} + 0.5 \quad (5)$$

단, 별도의 합리적인 해석에 의하여 구한 값을 적용할 수 있다.

3.3 내진해석 및 설계에 대한 규정

3.3.1 일반사항

지하철도 구조물의 내진설계는 지진 발생시 지반 변위의 영향을 고려하여 구조물이 소요의 내진성능을 만족할 수 있도록 하는 것이다.

3.3.2 내진해석 방법

- (1) 지하철도 구조물의 내진해석은 지반 조건, 구조 조건 등을 고려하여 “응답변위법” 혹은 “시간이력해석법”을 사용하여 수행할 수 있다.
- (2) “응답변위법”은 지하철도 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) 지하철도 구조물의 내진해석은 2차원 횡단면해석을 원칙으로 하되 지반상태가 급격히 변화하는 구간 통과 등의 경우에는 종방향에 대한 내진구조해석을 추가로 수행해야 한다.

3.3.3 응답수정계수

- (1) 설계지진하중은 구조물에서 발생하는 소성변형을 허용한다.
- (2) 구조물이 비탄성 거동을 하게 되면 탄성거동을 하는 경우보다 부재력이 작아진다.
- (3) 일반 구조물의 경우 이를 고려하기 위하여 부재 설계시 탄성해석으로 구한 탄성부재력을 응답수정계수(R , 연성계수)로 나눈 값이 지진에 대한 설계부재력이 되며 설계자는 이 설계 부재력을 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토해야 한다. 이때 응답수정계수는 모멘트 부재력에 대하여만 적용한다.

표 6. 응답수정계수(R)

구분	기둥	보	비고
철근콘크리트 부재	3	3	
강 부재 또는 합성부재	5	5	

※특기사항 : 내진 성능을 갖도록 탄성해석과 소성해석을 필요에 따라 선택할 수 있다.

- ① 탄성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 응답수정계수로 나눠줌으로써 탄성해석만으로 소성변형까지도 고려할 수 있다.
- ② 소성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 그대로 사용하고 응답수정계수는 고려하지 않아야 한다.



3.4 내진해석 방법

3.4.1 응답변위법

지진 발생시에 생기는 지반변위에 의한 지진 토압과 지하철도 구조물과 주변지반 관계에서의 경계조건을 모델링하여 정적으로 계산하는 방법인 응답변위법을 적용한다.

3.4.2 시간이력해석법

설계지진하중(가속도)의 시간이력은 내진 I 등급에 해당하는 평균재현주기를 가진 지반운동이 되어야 한다.

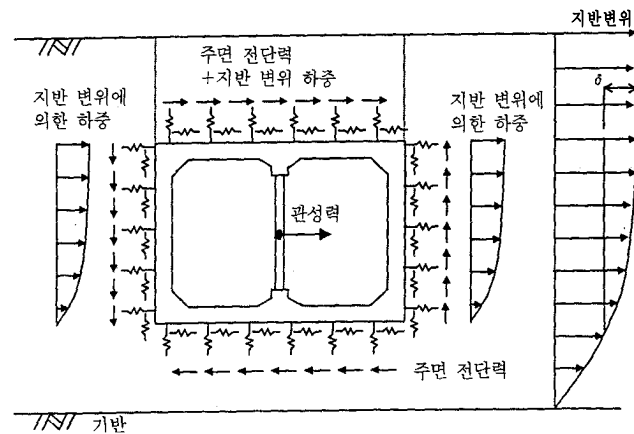


그림 1. 응답변위법의 개념도

3.5 철근콘크리트 구조부재의 내진 설계

3.5.1 일반사항

- (1) 설계 방법은 강도설계법으로 한다.
- (2) 내진설계는 설계 지진하중에 대하여 안전하도록 설계해야 한다.

3.5.2 하중조합

- (1) 상시 상태의 설계

상시상태에 대한 설계는 「KR C-08020」에 따른다.

- (2) 지진시 상태의 설계

지진시 상태에 대한 하중조합은 <식 (6)>으로 구한다.

$$U = 1.0D + 1.0E + 1.0H + 1.0Q \quad (6)$$

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중

H : 토압

Q : 수압 및 부력

3.5.3 내진설계 구조상세

(1) 적용범위

지하철도 구조물 중 지하에 건설되는 정거장 구조물 본체 등 주요 구조물에 적용한다.

(2) 관련 설계기준

지하철도의 내진설계에 있어서 구조상세는 「4.8 콘크리트교 설계」에 따른다.

(3) 부재 접합부

구조적 성능이 현저하게 다른 두 구조물의 접합부는 특별한 경우를 제외하고 분리 구조로 한다. 접합부는 보강하여 안정성을 확보해야 한다

4. 교량 내진설계

4.1 일반사항

4.1.1 적용범위

이 기준은 신설되는 교량의 내진설계에 적용한다. 특수한 형식의 교량(아치교, 사장교, 현수교 등)은 이 설계개념 및 기준을 준수하고 합리적인 보정을 한 내진설계 기준을 작성하여 설계할 수 있다.

4.2 내진설계의 기본방침

4.2.1 목적

이 설계기준의 목적은 지진에 의해 교량이 입는 피해의 정도를 최소화 시킬 수 있는 내진성 확보를 위해 필요한 최소 설계요구조건을 규정하는데 있다.

4.2.2 내진설계기준의 개념

이 설계기준은 건설교통부의 연구과제 「내진설계기준연구(II)(1997. 12.)」에서 제시된 내진설계성능기준 및 기타 연구결과 중 현재 수준에서 인정할 수 있는 일부 규정을 기존 설계기준의 체계에 맞도록 채택하여 제정되었다. 따라서 현재의 설계기준은 다음의 개념에 기초를 두고 있다.

- (1) 인명피해를 최소화 한다.
- (2) 지진시 교량 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지한다.
- (3) 지진시 가능한 한 교량의 기능은 발휘할 수 있게 한다.
- (4) 교량의 정상수명 기간 내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.
- (5) 설계기준은 남한 전역에 적용될 수 있다.
- (6) 이 규정을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.



이러한 개념을 구현하기 위해서는 낙교방지가 확보되어야 하며, 낙교방지는 가능한 교각의 연성거동에 의한 연성파괴메커니즘을 유도하여 확보하고, 그렇지 않은 경우 낙교방지 대책(전단키, 변위구속장치 등)을 제시하여 확보해야 한다. 또한, 필요한 경우 지진격리시스템을 설치할 수 있다.

4.2.3 품질보증 요건

내진설계에 관한 품질보증 요건은 「2.3 품질보증 요구사항」의 해당규정에 따른다.

4.2.4 지진응답 계측

(1) 일반사항

내진 I 등급교와 내진 II 등급교에 대해서는 유지관리, 내진설계기술 개발 및 개선에 필요한 자료 확보를 위하여 관계기관은 지진계와 가속도계를 설치하고 운영하도록 요구할 수 있다.

(2) 계측기기의 설치와 관리

교량의 지진응답을 계측하기 위한 계측기기의 설치 위치와 종류, 개수와 관리는 이 설계기준의 목적을 달성할 수 있도록 결정되어야 한다.

4.3 설계 일반사항

4.3.1 설계지반운동

설계지반운동 일반사항과 가속도계수는 「2.3 (3), (5)항」에 따른다.

4.3.2 내진등급과 설계지진수준

내진등급과 설계지진수준은 「2.3 (1)항」에 따른다.

4.3.3 지반의 분류

지반의 분류는 「2.3 (6)항」에 따른다.

4.3.4 응답수정계수

- (1) 「4.6항」과 「4.7항」에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건과 「4.8항」에서 규정한 소성힌지구역에 관련된 모든 설계요건을 충족시키는 경우, 교량의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 「4.4 (7)항」에서와 같이 규정된 탄성지진력을 <표 7>의 응답수정계수로 나눈 값으로 한다. 다만 하부구조의 경우 축방향력과 전단력은 응답수정계수로 나누지 않는다.
- (2) 철근콘크리트 기둥형식의 교각(단일기둥, 다주가구)과 말뚝가구의 소성힌지구역에 「4.8.3 (4)항」에서 규정한 심부구속철근량을 배근하지 않는 경우에는 「부록 I 철근콘크리트 기둥의 연성도 내진설계」에 따라 설계해야 하며, <표 7>의 하부구조에 대한 응답수정계수는 적용하지 않는다. 이때 철근콘크리트 기둥형식의 교각과 말뚝가구는 「4.8.3 (4)항」의 심부구속철근량을 제외한 모든 설계요건을 만족시켜야 하며, 기초와 연결부분은 「4.4.7 (1) ⑤항」과 「4.8.2 (5)항」에 따라 설계해야 한다.

- (3) 응답수정계수 R은 하부구조의 양 직교축방향에 대해 모두 적용한다.
- (4) 벽식교각의 약축방향은 「4.8항」의 기둥규정을 적용하여 설계할 수 있다. 이때 응답수정계수 R은 단일 기둥의 값을 적용할 수 있다.

표 7. 응답수정계수, R

하부구조	R	연결부분 ¹⁾	R
벽식 교각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝 가구(Bent)			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3	상부구조의 한 지간내의 신축이음부	0.8
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2		
단일 기둥	3	기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부 구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구		기둥 또는 교각과 기초	1.0
1. 수직말뚝만 사용한 경우	5		
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3		
다주 가구	5		

주) 1) 연결부분은 부재간에 전단력과 압축력을 전달하는 기구를 의미하며, 교량받침과 전단키 등이 이에 포함된다. 이 때, 응답수정계수는 구속된 방향으로 작용하는 탄성지진력에 대해서만 적용된다.

4.4 해석 및 설계에 대한 규정

4.4.1 일반사항

- (1) 탄성지진력은 「4.5항」에 규정한 값으로 한다.
- (2) 재료 및 기초 설계조건은 「4.6항」, 「4.7항」, 「4.8항」에 따른다.
- (3) 교량의 내진설계절차는 모든 내진등급의 교량에 대하여 동일하게 적용한다. 다만 단경간교에 대한 내진설계는 「4.4.5항」과 「4.4.8항」에 따른다. 또한 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교의 내진설계는 「4.4.6항」과 「4.4.8항」에 의해서 수행될 수 있다.

4.4.2 해석방법

- (1) 교량의 지진해석방법은 「4.5항」에서 규정된 단일모드스펙트럼해석법을 사용하는 것으로 한다.
- (2) 정밀한 해석을 요한다고 판단되는 교량에 대해서는 다중모드스펙트럼해석법 또는 발주자가 인정하는 검증된 정밀 해석법을 사용할 수 있다.
- (3) 단경간교 및 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교는 상세한 지진해석을 할 필요가 없다.



4.4.3 탄성력 및 탄성변위

- (1) 탄성력과 탄성변위는 「4.4.2항」에 규정한 해석방법을 사용하여 두 개의 직교축에 대하여 독립적으로 해석하고 「4.4.4항」에 규정한 방법으로 조합해야 한다.
- (2) 두 개의 직교축은 교량의 종방향축과 횡방향축으로 하는 것이지만 설계자가 임의로 정할 수 있다. 곡선교는 양측 교대를 연결하는 현을 종방향으로 정할 수 있다.

4.4.4 직교 지진력의 조합

부재의 각각의 주축에 대한 설계지진력은 「4.4.3항」에 규정한 방법으로 구한 지진력을 다음과 같이 조합하여 사용한다.

하중경우 1...종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.

하중경우 2...횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.

4.4.5 단경간교의 설계규정

- (1) 상부구조와 교대 사이의 연결부에 대하여 고정하중반력에 「4.3.1 (2)항」에서 규정된 가속도계수와 「4.3.3항」에서 규정된 지반계수를 곱한 값의 수평지진력이 작용한다고 보고 종방향 및 횡방향에 대하여 안전하도록 설계해야 한다.
- (2) 낙교방지를 위한 최소받침지지길이는 「4.4.8항」에 규정한 값으로 한다.

4.4.6 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교의 설계지진력

- (1) 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교에서 상부구조와 하부구조를 연결하는 교량받침이나 기계장치는 고정하중의 20%에 해당되는 수평지진력이 구속방향으로 작용한다고 보고 이에 저항하도록 설계해야 한다.
- (2) 방향으로 구속되어 있을 경우 종방향의 수평지진력에 사용되는 고정하중은 상부구조의 각 세그먼트의 자중으로 정의된다.
- (3) 횡방향으로 구속되어 있을 경우 횡방향의 수평지진력에 사용되는 고정하중은 그 교량받침에서의 고정하중 반력으로 정의된다.

4.4.7 지진력

- (1) 구조부재 및 연결부의 설계지진력

① 이 절에서 구하는 설계지진력은 다음의 각 경우에 대하여 적용한다.

가. 상부구조, 상부구조의 신축이음 및 상부구조와 하부구조상단 사이의 연결부

나. 하부구조 상단으로부터 기둥이나 교각의 하단까지(단 기초, 말뚝머리 및 말뚝은 포함하지 않는다.)

다. 상부구조와 교대의 연결요소

② 「가.항」의 설계지진력은 「4.4.4항」의 하중경우 1과 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 「4.3.4항」에 규정한 응답수정계수 R 로 나눈 값으로 한다. 철근콘크리트

트 기둥형식의 교각(단일기둥, 다주가구, 말뚝가구)을 「부록 I」에 따라 설계하는 경우에는 이 항에 따라 기둥의 설계지진력을 결정할 필요가 없다.

- ③ 「나.항」의 각 설계지진력은 다른 설계력과 함께 전체 하중조합식에 조합해야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 <식 (7)>로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음 중 불리한 경우를 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0(D + L/2 + H + Q + E) \quad (7)$$

여기서, D : 고정하중

L/2 : 단선 활하중

H : 횡토압

Q : 유체압 및 부력

E : 「(나)」항의 설계지진력

- ④ 구조물의 각 요소에서 단면의 설계강도는 「KR C-08020」의 하중조합에 따라 구한 소요강도 이상이어야 하며, 「4.6항」, 「4.7항」, 「4.8항」의 설계규정을 만족해야 한다.
- ⑤ <표 7>의 응답수정계수가 적용되지 않은 경우, 교각과 상부구조 또는 하부구조와의 연결부분의 설계지진력은 「4.8.2 (5)항」에 따라 결정된 교각의 최대소성힌지력과 응답수정계수를 적용하지 않은 탄성지진력 중 작은 값으로 한다.
- ⑥ <식 (7)>은 「KR C-08020」의 하중조합과 함께 사용해야 한다. 강구조물의 설계에 허용응력설계법을 사용할 경우 허용응력은 규정된 허용응력에 허용응력 증가계수 (=1.5)를 곱한 값으로 한다.

(2) 기초의 설계지진력

- ① 확대기초, 말뚝머리 및 말뚝을 포함하는 기초의 설계지진력은 다음 중 하나의 방법으로 결정한다.

가. 기초의 설계지진력은 「4.4.4항」의 하중경우 1과 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 「4.3.4항」에 따라 하부구조(기둥 또는 교각)에 적용한 응답수정계수 R 값의 1/2로 나눈 값으로 한다. 단, 이 규정은 기둥 또는 교각의 휨설계강도가 탄성지진모멘트를 「4.3.4항」의 해당 응답수정계수 R 값으로 나눈 소성설계모멘트와 유사하도록 설계된 경우에 적용해야 한다. 말뚝가구의 설계지진력은 탄성지진력을 해당 구조의 응답수정계수 R로 나눈 값으로 한다.

나. 기초의 설계지진력은 「4.8.2 (5)항」에 따라 결정된 교각의 최대 소성힌지력과 응답수정계수를 적용하지 않은 탄성지진력 중 작은 값으로 한다.

- ② 「가.항」의 각 설계지진력은 다른 설계력과 함께 전체 하중조합식에 조합해야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 <식 (8)>로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음 중 불리한 경우를 취한다.



$$\text{최대하중} = 1.0(D + L/2 + H + Q + E) \quad (8)$$

여기서, D : 고정하중

L/2 : 단선 활하중

H : 횡토압

Q : 유체압 및 부력

E : 「(가)」항의 설계지진력

- ③ 기초의 각 요소에서 단면의 설계강도는 「제8장 교량 일반사항」의 강도설계법 하중 조합에서 지진하중이 포함된 하중조합의 모든 종류의 하중에 하중계수 1.0을 사용하여 구한 소요강도 이상이어야 하며, 「4.6항」의 설계규정을 만족해야 한다.

(3) 교대 및 옹벽

- ① 상부구조와 교대의 연결부(받침, 전단연결재 등)는 「4.4.7 (1)항」의 설계지진력에 저항하도록 설계해야 한다.

- ② 교대는 「4.6.3항」의 규정에 따라 설계해야 한다.

4.4.8 설계변위

- (1) 이 절에서 정한 최소받침지지길이는 모든 거더의 단부에서 확보해야 한다.
- (2) 최소받침지지길이의 확보가 어렵거나 낙교방지를 보장하기 위해서는 변위구속장치를 설치해야 한다.
- (3) 단경간교와 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교의 최소받침지지길이(N)는 <식 (9)>에 규정한 값보다 작아서는 안 된다.

$$N = (200 + 1.67L + 6.66H)(1 + 0.000125\theta^2) \text{ (mm)} \quad (9)$$

여기서,

L : 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m).

다만, 지간 내에 힌지가 있는 경우의 L은 힌지 좌·우측방향의 거리인 L1과 L2의 합으로 한다(<그림 2>참조).

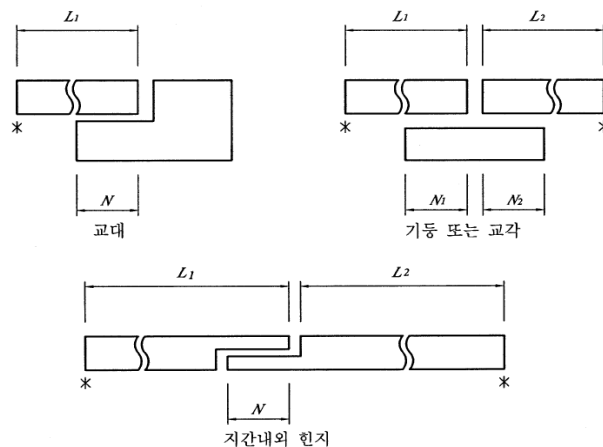
H : 다음 각 경우에 대한 평균 높이(m)

교대 : 인접 신축이음부의 교량상부를 지지하는 기둥의 평균 높이. 단경간교의 평균 높이는 0으로 한다.

기둥 또는 교각 : 기둥 또는 교각의 평균높이

지간 내의 힌지 : 인접하는 양측 기둥 또는 교각의 평균높이

θ : 받침선과 교축직각방향의 사잇각(도)



* 신축이음 또는 교량 상판의 단부

그림 2. 최소 받침지지길이 규정에 관한 치수

- (4) 단경간교와 지진구역 II에 위치하는 내진II등급교를 제외한 모든 교량의 설계지진변위는 「4.4.3항」에 규정된 값과 「4.4.8항」에 규정된 값 중 큰 값으로 한다.

4.4.9 지반의 액상화 평가

- (1) 교량의 액상화 피해가 예상되는 경우에는 지반의 액상화 발생 가능성을 검토해야 한다.

(2) 액상화 평가 기준

- ① 액상화 평가시 설계 지진가속도는 「4.3 설계 일반사항」의 구조물 내진등급에 따라 결정한다.
- ② 설계 지진 규모는 지진구역 I, II모두 리히터규모 6.5를 적용한다.
- ③ 내진 I등급 교량인 경우에는 현장 및 실내시험 결과를 이용한 부지특성 평가 방법을 사용하여 지진응답해석을 수행하고, 액상화 전단저항응력은 실내 반복시험 결과를 이용한다.

(3) 액상화 평가 방법

- ① 액상화 평가방법은 교량의 내진등급에 따라 표준관입시험의 N 값, 콘관입시험의 q_c 값과 전단파 속도 V_s 값 등과 같은 현장시험 결과를 이용한 간편예측법 또는 실내 반복시험을 이용한 상세예측법 등을 적용한다.
- ② 액상화 발생 가능성은 대상 현장에서 액상화를 유발시키는 전단저항응력비(CRR)를 지진에 의해 발생하는 반복전단응력비(CSR)로 나눈 값으로 정의되는 안전율(FSL)로 평가한다.
- ③ 간편예측법을 통해 획득한 안전율이 1.5보다 작을 경우에는 상세예측법을 실시한다. 상세예측법을 통해 획득한 안전율이 1.0 미만인 경우에는 대책공법을 마련하며, 1.0



이상인 경우에는 액상화에 대해 안전한 것으로 판정한다.

4.5 해석방법

4.5.1 일반사항

- (1) 이 절의 규정은 「4.4.2항」에서 규정한 교량의 지진해석에 대한 규정이며 다음과 같은 두 가지의 해석방법을 제시한다.

- ① 단일모드스펙트럼해석법
- ② 다중모드스펙트럼해석법

- (2) 두 가지 방법 모두에 있어서 모든 고정된 기둥과 교각 또는 교대지점들은 동일 시점에 있어서 동일한 지반운동을 한다고 가정한다. 가동지점에서는 이 절에서 기술된 해석으로부터 구한 변위가 「4.4.8항」에서 규정된 최소 요구치보다 큰 경우 이 값을 사용해야 한다.

4.5.2 탄성지진응답계수

- (1) 단일모드스펙트럼해석 시 설계하중의 결정에 쓰이는 탄성지진응답계수 C_s 는 <식 (10)>과 같은 응답스펙트럼으로부터 구한다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (10)$$

여기서, A : 가속도계수

S : 지반 특성에 대한 무차원의 계수

T : 교량의 주기

다만, C_s 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

- (2) 다중모드스펙트럼해석 시 m번째 진동모드에 대한 탄성지진응답계수 C_{sm} 은 <식 (11)>과 같은 응답스펙트럼으로부터 구한다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (11)$$

여기서, T_m : m번째 진동모드의 주기

다만, C_{sm} 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

- (3) T_m 값이 4.0초를 넘는 구조물에 대해서 m번째 진동모드에 대한 C_{sm} 값은 <식 (12)>에 따라 결정할 수 있다.

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad (12)$$

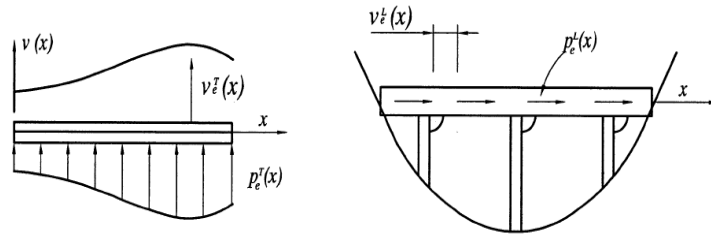
4.5.3 단일모드스펙트럼해석법

종방향 및 횡방향 지진에 의한 부재의 단면력과 처짐을 계산하는 등가정적 지진하중 $p_e(x)$ 는 <식 (13)>으로 산정할 수 있다.

$$p_e(x) = \frac{\beta C_s}{r} w(x) v_s(x) \quad (13)$$

여기서, $p_e(x)$: 등가정적 지진하중이며 진동의 기본모드를 대표하기 위해 가하는 단위길이당 하중강도(<그림 3>)

C_s : <식 (10)>으로 주어지는 탄성지진 응답계수



(a) 평면도, 횡방향하중

(b) 입면도, 종방향하중

그림 3. 횡방향 및 종방향으로 등가하중을 받는 교량 상판

여기서 교량의 주기 T 는 <식 (14)>과 같다.

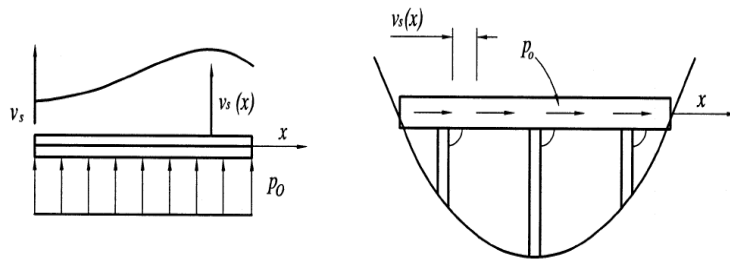
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{p_o g \alpha}} \quad (14)$$

g : 중력가속도, 9.81m/s^2

$w(x)$: 교량상부구조와 이의 동적거동에 영향을 주는 하부구조의 단위길이당 고정하중

$v_s(x)$: 균일한 등분포하중 p_o 에 의한 정적처짐 (<그림 4>)

$$\alpha = \int v_s(x) dx \quad (15)$$



(a) 평면도, 횡방향하중

(b) 입면도, 종방향하중

그림 4. 횡방향 및 종방향으로 가정된 하중을 받는 교량 상판

$$\beta = \int w(x) v_s(x) dx \quad (16)$$

$$r = \int w(x) v_s(x)^2 dx \quad (17)$$



4.5.4 다중모드스펙트럼해석법

(1) 일반사항

다중모드스펙트럼해석법은 비정형 교량의 3방향 연계효과와 최종응답에 대한 다중 모드의 기여 효과를 결정하기 위해 공인된 공간뼈대 선형 동적해석 프로그램을 사용하여 수행해야 한다.

(2) 수학적 모형

- ① 교량은 그 구조물의 강성과 관성효과를 실제에 가깝게 모형화하기 위해 연결부와 절점으로 구성된 3차원 공간 뼈대 구조물로서 모형화해야 한다.
- ② 각 연결부와 절점은 6개의 자유도, 즉 3개의 이동 자유도와 3개의 회전 자유도를 가진다.
- ③ 구조 질량은 최소한 3개의 이동 관성향을 갖는 집중질량으로 모형화해야 하며, 구조 질량은 하부 구조를 포함하여 관련된 모든 요소들을 고려해야 한다.
- ④ 지진시에도 교량에 큰 활하중이 재하되어 있을 가능성이 많은 경우에는 그 활하중의 관성효과를 고려해야 한다. **열차활하중의 수평방향 관성력에 고려하는 질량은 열차하중 특성값에 0.3을 곱한 값으로 한다.**
- ⑤ 상부구조는 최소한 각 경간단부의 연결부와 지간의 1/4 지점마다 절점을 가진 공간 뼈대부재의 집합체로 모형화해야 한다. 신축이음부와 교대의 불연속 부분도 상부구조에 포함해야 하며, 이 때 집중질량의 관성효과를 분배시켜야 한다.
- ⑥ 하부구조에서 중간 기둥 또는 교각들은 일반적으로, 인접 지간의 1/3보다 짧은 길이를 갖는 짧고 강성이 강한 기둥에 대해서는 중간 절점이 불필요하나, 길고 유연한 기둥은 기둥단부의 연결부 외에 2개의 1/3지점을 중간 절점으로 모형화해야 한다. 하부구조의 모형은 상부구조에 대한 기둥의 편심을 고려해야 한다. 기둥 또는 교각 하부와 교대에서의 지반은 등가의 선형 스프링계수를 이용하여 모형화 할 수 있다.

(3) 진동모드의 형상과 주기

고려중인 방향에 대하여 해석에 필요한 교량의 주기와 모드형상은 고정지반 조건에 대해서 지진에 저항하는 전체 시스템의 질량과 강성을 고려하여 이론적으로 확립된 방법에 의해 계산해야 한다.

(4) 다중모드스펙트럼 해석

응답해석 시 고려되는 모드의 수는 지간 수의 3배 이상이어야 한다. 이 때, 잔여모드를 모두 포함하여 해석하더라도 응답이 10% 이상 증가하지 않는 개수의 모드를 고려해야 한다.

(5) 부재력과 변위

부재의 단면력과 변위는 개별 모드들로부터 각각의 응답성분(예를 들면, 힘, 변위 또는 상대변위)은 CQC방법(Complete Quadratic Combination)으로 조합함으로써 계산한다.

4.6 기초 및 교대의 내진설계

4.6.1 적용범위

이 지침에서는 교량의 기초 및 교대의 내진설계에 대해 규정한다. 이 설계기준은 지진 하중이외의 수직 및 수평 하중에 대해 지지할 수 있도록 설계된 것을 전제로 한다. 이런 전제 조건은 기초를 위한 조사의 범위, 성토, 사면안정, 기초지반의 지지력 및 수평토압, 배수, 침하, 말뚝기초의 요건 및 지지력 등에 대한 기준을 포함한다.

4.6.2 기초

(1) 조사

지진구역 I에서는, 평상시 설계에 필요한 조사 이외에 지진에 대한 (1)사면의 불안정, (2)액상화, (3)성토지반의 침하, (4)수평토압 증가와 관련된 지진 피해 가능성 판단과 내진설계에 필요한 조사를 추가해야 한다. 이때 최대 지반가속도는 가속도계수 A 또는 부지고유의 지반응답해석결과를 사용한다.

(2) 기초설계를 위한 해석과 검토

기초는 등가정적 또는 동적해석을 수행하여 기초 구조체의 최대응력 또는 단면력, 상부 구조의 최대 변위 그리고 기초의 전도, 활동, 침하 및 지지력을 검토한다.

① 얕은기초에 대한 등가정적해석

- 가. 얕은기초에 작용하는 등가정적하중은 기초 지반과 상부구조물의 응답특성을 고려하여 결정한다.
- 나. 얕은기초는 미끄러짐, 지지력, 전도에 대하여 안전해야 하고, 변형 및 침하량이 허용치를 넘지 않아야 된다.
- 다. 기초지반이 액상화가 발생할 수 있는 지반이라면 액상화 대책공법을 적용해야 한다.

② 말뚝기초에 대한 등가정적해석

- 가. 말뚝기초 등가정적해석에서는 기초지반과 상부구조물의 특성을 고려하여 지진하중을 말뚝머리에 작용하는 등가정적하중으로 환산한 후 정적해석을 수행한다.
- 나. 등가정적하중을 말뚝머리에 작용시키고 균말뚝 해석을 수행하여 각 말뚝에 작용하는 하중을 산정하고, 가장 큰 하중을 받는 말뚝을 내진성능평가를 위한 말뚝으로 선정하고, 등가정적해석을 수행한다.
- 다. 내진성능평가 대상 말뚝에 대해서는 말뚝 본체 및 두부의 응력 또는 단면력, 말뚝의 변위량 및 모멘트를 검토한다.

③ 동적해석

- 가. 기초에 대한 동적해석이 필요한 경우에는 기초와 지반, 구조물의 상호작용을 고려하는 동적해석방법을 사용할 수 있다.
- 나. 현장시험과 실내시험으로부터 얻은 지반의 물성치와 기초의 제반사항을 고려하여 기초를 스프링으로 모델링 한 후, 설계지진하중으로 전체 구조물에 대한 응답해석



을 실시하여 기초에 작용하는 하중을 결정하고 이를 사용하여 기초의 안정성을 검토한다.

(3) 말뚝설계시 특별히 요구되는 사항

지반과 교량의 불확실한 응답특성들을 고려하여 말뚝의 내진설계에서는 일반 설계에서의 요구조건 이외에 다음의 요구조건을 만족시켜야 한다.

- ① 말뚝의 내진설계에서는 극한지지력 개념을 사용하며 설계지진하중에 대하여 지지력을 확보해야 한다.
- ② 말뚝은 파일캡에 연결해야 한다.
- ③ 콘크리트로 채운 말뚝에 특별한 정착장치를 설치하지 않는 경우에는 말뚝으로 인발력이 전달될 수 있는 길이의 철근을 매립하여 정착해야 한다.
- ④ 속채움이 없는 강관말뚝, 나무말뚝, 강말뚝은 말뚝의 허용지지력의 10% 이상인 인발력이 전달될 수 있도록 정착해야 한다.
- ⑤ 보강철근은 말뚝과 파일캡을 일체로 하며 하중전달을 용이하게 하기 위해서 파일캡까지 연장되어야 한다.
- ⑥ 말뚝의 내진설계에서는 기둥이 지표면 위에서 휨모멘트에 의하여 항복하기 이전에 말뚝이 지표면 아래에서 파괴되지 않도록 해야 한다.

4.6.3 교대

(1) 일반사항

지진 시 교대의 파괴나 변위로 인한 교량의 손상 또는 파괴가 발생할 수 있으므로 교대의 설계는 신중하게 수행해야 한다.

(2) 독립식 교대

- ① 독립식 교대의 설계에서는 지진에 의한 수평토압과 교대의 관성력을 고려한다. 상부 구조물이 자유롭게 미끄러질 수 없는 고정단 받침으로 지지되는 경우에는 상부구조물로부터 전달되는 지진력을 함께 고려해야 한다.
- ② 지진시에 독립식 교대에 작용하는 토압은 Mononobe-Okabe에 의해 개발된 등가정적하중법으로 계산할 수 있으며 이때 토압은 교대의 배면에 균등하게 분포하고 그 합력은 교대 높이의 1/2에 작용하는 것으로 가정한다.
- ③ 구조물의 경제성을 도모하기 위해 교축방향 변위를 허용하는 독립식 교대를 설계할 수 있다. 이 때, 교대는 지진시에 미끄러짐만 허용하고 전도가 발생하지 않아야 하며, 교대받침의 손상을 최소로 하기 위하여 미끄러짐에 의한 교축방향 변위를 수용할 수 있도록 설계되어야 한다.
- ④ 교축방향 변위를 구속하는 독립식 교대에는 Mononobe-Okabe의 등가정적하중법에 의한 토압보다 큰 수평토압이 작용하므로 이를 고려해야 한다.

(3) 일체식 교대

- ① 일체식 교대는 지진 시 큰 상부관성력이 뒷채움흙에 전달되므로 과도한 상대변위가 발생하지 않도록 하기 위하여 수동저항력을 갖도록 설계되어야 한다.
- ② 일체식 교대는 교대-뒷채움흙 구조와 기초의 강성을 계산하여 구조물의 내진설계 과정에 따라 설계할 수 있다.

4.7 강교 설계

(1) 일반사항

- ① 구조용 강재 기둥과 연결부의 설계와 시공은 도로교설계기준과 이 절의 추가 요구조건을 만족시켜야 한다.
- ② 허용응력설계법의 적용시에는 「4.4.1항」에 따라 허용응력 증가계수를 사용한다.

(2) P-Δ 효과

P-Δ 효과(지진변위로부터 발생하는 편심과 기둥 축력에 의한 모멘트)로 인한 2차 휨을 고려하여 축방향 응력과 휨응력을 계산할 때, 모든 축방향 하중을 받는 부재는 「KR C-09 강교 및 강합성교」에 따라 설계하여도 된다.

4.8 콘크리트교 설계

4.8.1 일반사항

- (1) 일체로 현장타설 되는 교각, 확대기초, 연결부의 내진설계는 강도설계법을 사용해야 하며, 이 절의 추가 요구조건을 만족시켜야 한다.
- (2) 이 지침에서의 교각은 기둥 형식의 교각(단일기둥과 다주가구), 벽식 교각, 말뚝가구를 총칭한다.
- (3) 단일기둥, 다주가구, 말뚝가구를 설계할 때, 소성힌지구역에 배근되는 심부구속철근은 「4.3.4항」의 응답수정계수와 「4.8.3 (4)항」의 심부구속철근량에 대한 규정을 적용하는 대신 「부록 I 철근콘크리트 기둥의 연성도 내진설계」를 적용하여 설계할 수 있다.

4.8.2 교각의 해석 및 설계강도

(1) 일반사항

- ① 철근콘크리트 교각에 대한 구조해석과 단면강도해석에는 균열의 영향과 축방향력의 영향 등 구조적 거동에 영향을 주는 요소를 고려해야 한다.
- ② 철근콘크리트 교각의 축방향철근은 설계기준항복강도가 500MPa을 초과하지 않아야 하며, 인장강도가 항복강도의 1.25배 이상이어야 한다. 철근콘크리트 교각의 횡방향 철근은 설계기준항복강도가 500 MPa을 초과하지 않아야 한다.



(2) 교각의 휨강성

- ① 지진하중에 대한 구조해석으로 탄성해석을 수행할 때, 교각의 축방향철근이 항복할 것으로 예상되는 경우에는 <식 (18)>으로 결정되는 항복강성을 적용하여 단면력과 변위를 구해야 한다. 단 지진하중에 의한 단면력을 구하기 위한 구조해석에서는, <식 (18)>의 항복강성 대신 철근을 무시한 콘크리트교각 전체 단면의 중심축에 대한 단면2차모멘트와 콘크리트의 탄성계수로 표현되는 휨강성을 적용할 수 있다.

$$EI_y = \frac{M_y}{\varphi_y} \quad (18)$$

여기서,

EI_y : 축방향력을 고려한 교각의 항복강성(최 외단 축방향철근의 항복)

M_y : 축방향력을 고려한 교각의 항복모멘트(최 외단 축방향철근의 항복)

φ_y : 축방향력을 고려한 교각의 항복곡률(최 외단 축방향철근의 항복)

- ② <식 (8.8.12)>로 정의되는 교각의 항복강성을 구하기 위하여 교각단면에 대한 비선형해석을 수행하지 않는 경우에는, 콘크리트의 탄성계수와 <식 (19)>으로 계산되는 항복유효 단면2차모멘트를 사용할 수 있다.

$$I_{y,eff} = \left(0.16 + 12 \rho_l + 0.3 \sqrt{\frac{P_u}{f_{ck} A_g}} \right) I_g \quad (19)$$

여기서,

A_g : 교각의 총단면적

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준압축강도

I_g : 철근을 무시한 교각 전체 단면의 중심축에 대한 단면2차모멘트

P_u : 계수 축력

ρ_l : 교각의 축방향철근비

- ③ 지진하중에 대한 구조해석으로 탄성해석을 수행할 때, 교각의 축방향철근이 항복하지 않을 것으로 예상되는 경우에는 철근을 무시한 콘크리트 교각 전체 단면의 중심축에 대한 단면2차모멘트와 콘크리트의 탄성계수로 표현되는 휨강성을 적용해야 한다. 단, 교각의 축방향철근이 항복하지 않을 것으로 예상되는 경우에도 변위를 구할 때에는 교각의 항복강성을 적용해야 한다.

(3) 교각의 P-Δ효과

- ① 철근콘크리트 교각의 총모멘트는 P-Δ효과를 고려하여 결정해야 한다. 구조해석에 선형탄성해석을 수행하는 경우는, 지진해석에 의한 1차모멘트에 횡방향 지진변위와 축력에 의한 2차모멘트를 추가하여 총모멘트를 결정해야 한다.
- ② 엄밀한 해석에 의하여 P-Δ효과를 고려하지 않는다면 「다.항」와 「라.항」에 따라 근사적으로 2차모멘트를 구할 수 있다.

- ③ 캔틸레버로 거동하는 교각에 대하여 「4.8.2 (2)항」의 휨강성으로 탄성지진해석을 수행한 경우에는 기둥 상단과 하단의 횡방향 최대상대변위의 1.5배에 축력을 곱한 값을 2차모멘트로 취할 수 있다.
 - ④ 골조로 거동하는 교각에 대하여 「4.8.2 (2)항」의 휨강성으로 탄성지진해석을 수행한 경우에는 모멘트가 0인 위치를 기준으로 상단과 하단의 횡방향상대변위를 각각 구한 후 1.5배를 취한 각각의 횡방향상대변위에 축력을 곱하여 상단과 하단의 2차모멘트로 취할 수 있다.
 - ⑤ 「4.3.4 항」의 응답수정계수를 적용하여 설계할 때에는 응답수정계수를 1차모멘트에만 적용하며 2차모멘트에는 적용하지 않는다.
- (4) 교각의 설계휨강도
- ① 지진하중에 대한 철근콘크리트 교각의 축력-휨강도를 검토할 때에는, 공칭휨강도에 1.0의 강도감소계수를 적용하여 설계휨강도를 결정한다.
 - ② 철근콘크리트 교각의 휨강도는 콘크리트의 등가직사각형 응력분포를 이용한 휨강도 해석이나 콘크리트와 축방향철근의 응력-변형도 곡선을 이용한 모멘트-곡률 해석에 의하여 결정되어야 한다.
 - ③ 철근콘크리트 교각의 휨강도 해석에는 축력의 영향이 고려되어야 하며, 「4.8.3 (5)항」의 철근상세를 갖는 횡방향철근이 배근되는 구간에는 횡방향철근에 의한 심부구속 효과를 고려할 수 있다.
- (5) 교각의 최대 소성한지력
- ① 이 지침의 규정은 교각과 연결된 기초, 교각과 일체로 시공된 상부구조, 교각의 전단설계, 그리고 교각과 상부구조 또는 기초의 연결부분에 적용한다.
 - ② 기둥 형식의 교각(단일기둥과 다주가구), 벽식 교각의 약축방향, 말뚝가구의 설계전단력은 「4.3.4 (1)항」에 따라 R계수를 1.0으로 하여 결정된 탄성전단력과 이절에 규정된 교각의 최대 소성한지력 중 작은 값으로 할 수 있다.
 - ③ 확대기초, 말뚝머리 및 말뚝을 포함하는 기초의 설계지진력은 「4.1.7 (2) ②항」에 명시된 바와 같이 교각에 대한 응답수정계수 R의 1/2로 나눈 값으로 하거나, 이절에 규정된 교각의 최대 소성한지력과 응답수정계수를 적용하지 않은 탄성지진력 중 작은 값으로 할 수 있다.
 - ④ 교각의 최대 소성한지력은 휨 초과강도에 해당하는 전단력으로 결정해야 한다. 캔틸레버로 거동하는 교각의 최대 소성한지력은 교각 하단의 휨 초과강도를 교각의 길이로 나누어 결정한다. 다주가구에서 골조로 거동하는 방향에 대하여는 기둥 상단과 하단의 휨 초과강도 합을 교각의 길이로 나누어 결정한다. 이때 교각의 길이는 캔틸레버로 거동하는 방향에 대하여는 기둥 하단에서 수평하중이 작용하는 위치까지의 길이로 하며 다주가구에서 골조로 거동하는 방향에 대하여는 기둥 순높이로 한다.



- ⑤ 교각 단면의 휨 초과강도는 다음 두 가지 방법 중 하나를 적용하여 결정해야 한다.
- 가. 설계기준 압축강도의 1.7배인 콘크리트 압축강도와 설계기준 항복강도의 1.3배인 축방향철근 항복강도를 적용하고, 소성힌지구역 횡방향철근의 심부구속 효과와 축하중의 영향을 고려한 단면의 휨강도로서, 모멘트-곡률 해석을 수행한다.
- 나. 콘크리트 설계기준압축강도가 60MPa 이하이고, 계수 축하중이 $0.3f_{ck}A_g$ 이하이며, 축방향철근비가 0.03 이하인 교각의 경우에는, 모멘트-곡률 해석을 수행하는 대신, 콘크리트의 등가직사각형 응력분포를 이용한 축력-휨강도 해석으로 구한 공칭휨강도에 <식 (20)>로 계산되는 휨 초과강도계수 λ_o 를 곱하여 휨 초과강도를 결정할 수 있다. 여기서 R은 설계에 사용한 응답수정계수이다.

$$\lambda_o = 1.25 + 0.05 R \quad (20)$$

(6) 교각의 설계전단강도

- ① 지진하중에 대한 철근콘크리트 교각의 전단강도를 검토할 때에는, 공칭전단강도에 1.0의 강도감소계수를 적용하여 설계전단강도를 결정한다.
- ② 휨 설계에서 <표 7>의 응답수정계수가 적용된 교각에 대하여는, 소성힌지구역의 전단강도를 검토할 때 콘크리트에 의한 공칭전단강도를 다음 식으로 결정해야 한다. 여기서 최소 계수축력 P_u 가 $0.1f_{ck}A_g$ 이하인 경우에는 <식 (21)>를, $0.1f_{ck}A_g$ 를 초과하는 경우에는 <식 (22)>을 적용한다. 여기서 A_e 는 전단 유효단면적으로 사각형단면은 $b_w d$, 원형단면은 $0.8A_g$ 를 사용한다.

$$V_c = \frac{1}{6} \left(\frac{10P_u}{f_{ck}A_g} \right) \left(1 + \frac{P_u}{14A_g} \right) \sqrt{f_{ck}} A_e \quad (21)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{P_u}{14A_g} \right) \sqrt{f_{ck}} A_e \quad (22)$$

- ③ 전단철근에 의한 공칭전단강도를 결정할 때 사각형 띠철근단면에 대해서는 <식 (23)>, 원형단면의 나선철근 또는 원형 후프띠철근에 대해서는 <식 (24)>을 적용한다. 원형 후프띠철근에 보강띠철근이 추가된 경우에는 <식 (25)>로 계산되는 보강띠철근에 의한 공칭전단강도를 추가할 수 있다.

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} d}{s} \quad (23)$$

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sp} f_{yh} D_c}{s} \quad (24)$$

$$V_s = \frac{\Sigma A_{ct} f_{yh} l_{ct}}{s} \quad (25)$$

여기서,

A_v : 전단철근으로 작용하는 띠철근의 단면적(mm^2)

A_{sp} : 나선철근 또는 원형 후프띠철근의 단면적(mm^2)

A_{ct} : 원형단면에 배근되는 보강띠철근의 단면적(mm^2)

d : 사각형단면의 유효깊이(mm^2)

D_c : 원형 후프띠철근이나 나선철근 중심 간의 심부콘크리트 지름(mm)

f_{yh} : 띠철근 또는 나선철근의 항복강도(MPa)

l_{ct} : 원형단면에 배근되는 보강띠철근의 길이(mm)

s : 띠철근 또는 나선철근의 수직간격(mm)

4.8.3 기둥

(1) 일반사항

- ① 최대단면치수에 대한 순높이의 비가 2.5 이상인 교각은 일반 기둥으로 간주하여 단일기둥과 다주가구에 대한 「4.3.4항」의 응답수정계수를 적용한다. 기둥상단에서 단면이 커지는 기둥의 경우에는 단면이 커진 부분을 무시하고 최대단면치수를 결정한다.
- ② 최대단면치수에 대한 순높이의 비가 2.5 미만인 교각은 짧은 기둥으로 간주하여 벽식 교각에 대한 「4.3.4항」의 응답수정계수를 적용한다.
- ③ 벽식 교각은 강축방향에 대하여 「4.3.4항」의 벽식 교각에 대한 응답수정계수를 적용하고 「4.3.4항」에 따라 벽체로 설계해야 한다. 벽식 교각의 약축방향은 일반 기둥으로 설계할 수 있다.
- ④ 이 지침의 규정은 말뚝가구에도 적용된다.

(2) 단부구역과 소성힌지구역의 설계

- ① 캔틸레버로 거동하는 기둥의 하단과 골조로 거동하는 기둥의 하단과 상단을 단부구역으로 한다. 기둥 하단의 단부구역은 기초의 상면에서부터의 길이로 결정되며, 골조로 거동하는 기둥의 상단 단부구역은 기둥과 연결된 부재의 하면에서부터의 길이로 결정한다. 기둥에서 단부구역의 길이는 기둥의 최대 단면치수, 기둥 순높이의 1/6, 450mm 중 가장 큰 값으로 해야 한다.
- ② 말뚝가구의 상단 단부구역은 기둥의 상단 단부구역과 동일하게 결정해야 한다. 말뚝가구의 하단 단부구역은 모멘트고정점에서 말뚝지름의 3배 길이만큼 내려간 위치로부터 지표에서 말뚝지름과 450mm 중 큰 값 이상의 길이만큼 올라간 위치까지의 구간으로 한다.
- ③ 「가.와 나.항」에서 정의된 단부구역은 「4.8.3 (3) ③항」과 「4.8.3 (3) ④항」의 규정을 만족해야 한다.
- ④ 기둥과 말뚝가구의 단부구역 중 설계휨강도보다 큰 탄성지진모멘트가 작용하는 소성힌지구역은 <표 7>의 응답수정계수를 적용하고 「4.8.3 (3) ③항」에서 「4.8.3 (3) ⑤항」



까지의 규정을 만족하도록 설계해야 한다. 단 기둥은 <표 7>의 응답수정계수를 적용하는 대신 「부록 I」에 따라 연성도 내진설계를 수행한다. 단부구역이 아닌 구역이라도 소성거동이 예측되는 구역은 소성힌지구역으로 설계해야 한다.

(3) 축방향철근과 횡방향철근

- ① 축방향철근 단면적은 기둥 전체 단면적의 0.01배 이상, 0.06배 이하로 해야 한다.
- ② 단부구역에 배근되는 횡방향철근은 D13 이상으로서, 지름이 축방향철근 지름의 2/5 이상이어야 한다.
- ③ 소성힌지구역에서는 축방향철근을 겹침이음하지 않아야 한다. 소성힌지구역에서 축방향철근의 연결은 완전 기계적이음을 사용할 수 있다.
- ④ 소성힌지구역 이외의 구역에서 전체 축방향철근 중 1/2을 초과하여 겹침이음하지 않아야 한다. 기둥의 종방향으로 측정한 이웃하는 겹침이음 사이의 거리는 600mm 이상으로 해야 한다. 이때 겹침이음 사이의 거리는 겹침이음의 끝 지점에서부터 기둥의 종방향으로 측정하여, 이웃하는 새로운 겹침이음이 시작되는 지점까지로 한다.
- ⑤ 소성힌지구역의 심부구속 횡방향철근은 「4.8.3 (3) ④항」의 철근량과 「4.8.3 (3) ⑤항」의 철근상세를 만족해야 하며, 최대 간격은 부재 최소 단면치수의 1/4 또는 축방향철근지름의 6배 중 작은 값을 초과하지 않아야 한다.
- ⑥ 심부구속 횡방향철근과 단부구역의 횡방향철근은 인접부재와의 연결면으로부터 기둥 치수의 0.5배와 380mm 중 큰 값 이상까지 연장해서 설치해야 한다.
- ⑦ 소성거동이 예측되지 않는 단부구역은 모든 축방향철근이 겹침이음 없이 연속될 필요는 없으나, 횡방향철근은 「4.8.3 (3) ⑤항」의 철근상세를 만족해야 하며, 간격은 부재 최소 단면치수의 1/4 또는 축방향철근지름의 6배 중 작은 값을 초과하지 않아야 한다.
- ⑧ 단부구역 이외의 위치에 배근되는 횡방향철근은 「4.8.3 (3) ⑤항」의 철근상세를 만족할 필요가 없으나, 축방향철근이 겹침이음된 구간은 횡방향철근의 간격이 100mm, 또는 부재 단면 최소치수의 1/4을 초과하지 않아야 한다.
- ⑨ 나선철근에 대하여는 최대 수직 순간격을 75mm로 규정한 나선철근의 일반규정을 적용하지 않는다.

(4) 소성힌지구역에서의 심부구속 횡방향철근량

- ① 기둥과 말뚝가구에서 소성힌지구역의 콘크리트 심부는 이 절에서 규정하는 철근량과 「4.8.3 (3) ⑤항」의 철근상세를 만족하는 심부구속 횡방향철근으로 구속해야 한다.
- ② 원형기둥의 나선철근비 ρ_s 는 <식 (26)>으로 정의되는 체적비로서, <식 (27)>과 <식 (28)>의 값 중 큰 값을 취한다.

$$\rho_s = \frac{4 A_{sp}}{d_s s} \quad (26)$$

여기서,

- ρ_s : d_s 를 기준으로 결정된 콘크리트 심부 부피에 대한 나선철근 체적비
 A_{sp} : 나선철근의 단면적(mm²)
 d_s : 나선철근 외측표면을 기준으로 한 콘크리트 심부의 단면 치수(mm)
 s : 나선철근의 수직간격(mm)

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (27)$$

또는

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (28)$$

여기서,

- A_c : 나선철근 외측표면을 기준으로 한 기둥 심부의 면적(mm²)
 A_g : 기둥의 총단면적(mm²)
 f_{ck} : 콘크리트의 설계기준 압축강도(MPa)
 f_{yh} : 횡방향철근의 설계기준 항복강도(MPa)

- ③ 원형기둥에서 심부구속철근으로 원형띠철근을 사용하는 경우, 원형 후프띠철근을 용접 또는 기계적 연결장치 등으로 연결하거나, 보강띠철근을 추가하여 정착단에서 슬립이 발생하지 않게 함으로써 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있다면, 완전원형후프로 인정하여 나선철근식을 사용할 수 있다.
- ④ 사각형기둥에서 심부구속 횡방향철근의 총 단면적 A_{sh} 는 <식 (29)>과 <식 (30)>값들 중 큰 값을 취한다.

$$A_{sh} = 0.30 a h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (29)$$

또는

$$A_{sh} = 0.12 a h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (30)$$

여기서,

- a : 띠철근의 수직간격(mm)
 A_{sh} : 수직간격이 a 이고, 심부의 단면치수가 h_c 인 단면을 가로지르는 보강띠철근을 포함하는 횡방향철근의 총 단면적(mm²), 직사각형 기둥의 두 주축 모두에 대하여 별도로 계산해야 한다.



h_c : 띠철근 기둥의 고려하는 방향으로의 띠철근 외측표면을 기준으로 한 심부의 단면 치수(mm)

(5) 심부구속 횡방향철근상세

- ① 나선철근은 소성힌지구간에서 겹침이음 하지 않아야 한다. 소성힌지구간에서 나선철근의 연결은 기계적 연결이나 완전 용접이음으로 해야 한다.
- ② 사각형 심부구속 횡방향철근으로는 하나의 사각형 후프띠철근 또는 중복된 사각형 폐합띠철근을 사용할 수 있으며, 후프띠철근과 같은 크기의 보강띠철근을 사용할 수 있다.
- ③ 사각형 후프띠철근은 외측 축방향철근들을 감싸는 폐합띠철근 형태이거나 또는 나선철근과 유사하게 연속적으로 감은 연속띠철근 형태로 사용할 수 있다. 사각형 폐합띠철근 형태는 양단에 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 갖는 135°갈고리를 가져야 한다. 사각형 연속띠철근 형태는 양단에 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 갖는 135°갈고리를 가져야 하며 이 갈고리는 축방향철근에 걸리게 해야 한다.
- ④ 보강띠철근은 하나의 연속된 철근으로 한쪽 단에 135° 이상의 갈고리를 갖고, 다른 쪽 단에 90° 이상의 갈고리를 갖도록 해야 한다. 이 때, 135°갈고리는 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 가져야 하며 90°갈고리는 띠철근 지름의 6배 이상의 연장길이를 가져야 한다.
- ⑤ 사각형 후프띠철근에 추가되는 보강띠철근의 갈고리는 외측 축방향철근에 걸리게 해야 하며, 보강띠철근을 연속적으로 같은 축방향철근에 걸리게 할 경우 90°갈고리가 연달아 걸리지 않도록 연속된 보강띠철근의 양단을 바꿔주어야 한다.
- ⑥ 사각형 심부구속 횡방향철근은 후프띠철근과 보강띠철근의 수평간격과 보강띠철근 간의 수평간격이 350mm를 초과하지 않도록 해야 한다.
- ⑦ 원형 띠철근 중에서 양단에 90°갈고리를 갖고 1개소 또는 2개소에서 철근 지름의 40배 이상으로 겹침이음된 원형 후프띠철근에 2개의 보강띠철근이 후프띠철근의 겹침이음 구간을 감싸는 경우에는 완전원형후프로 간주할 수 있다. 이때 후프띠철근의 90°갈고리는 축방향철근에 걸리게 해야 하며, 2개의 보강띠철근은 후프띠철근의 겹침이음 구간의 양쪽 끝부분에 배치해야 한다. 또 교각의 종방향과 단면 평면방향으로 보강띠철근의 90°갈고리가 연달아 걸리지 않도록 보강띠철근의 양단을 바꿔주어야 하며, 원형 후프띠철근의 겹침이음 부분이 교각의 종방향으로 연달아 위치하지 않도록 배치해야 한다.

(6) 결합나선철근

- ① 기둥의 횡방향철근으로 2개 이상의 나선철근을 결합한 결합나선철근(Interlocking Spirals)을 사용할 수 있다.

- ② 소성힌지부에서의 결합나선철근량은 「4.8.3 (3) ④항」 규정을 적용하여 각각의 나선철근에 대해 독립적으로 계산해야 한다.
- ③ 소성힌지부에서의 결합나선철근량은 「4.3.4 (1)항」의 응답수정계수와 「4.8.3 (3) ④항」의 심부구속 철근량에 대한 규정을 적용하는 대신 「부록 I 철근콘크리트 기둥의 연성도 내진설계」를 적용하여 설계할 수 있다.
- ④ 축방향철근 중심간 수평간격은 200mm 이하로 해야 하며, 결합부분에는 최소한 4개 이상의 축방향철근을 배근해야 한다.
- ⑤ 결합나선철근의 나선철근간의 중심간격(d_{int})은 심부단면치수(d_s)의 0.75배 이하로 해야 한다.
- ⑥ 원형 후프띠철근을 용접 또는 기계적 연결장치 등으로 연결하거나, 보강띠철근을 추가하여 정착단에서 슬립이 발생하지 않게 함으로써 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있다면, 완전원형후프로 인정하여 결합원형띠철근을 사용할 수 있으며 결합나선철근과 동등하게 취급할 수 있다.
- ⑦ 이의 규정에 따라 설계된 결합나선철근 또는 결합원형띠철근의 배근구간과 철근상세는 「4.4.8항」의 해당 규정을 따라야 한다.
- ⑧ 결합나선철근 및 결합원형띠철근의 경우, 널리 알려진 이론이나 최신의 연구문헌, 실험 또는 해석적으로 안전성을 검증할 수 있는 경우에는 본 규정을 적용하지 않는다.

4.8.4 벽식 교각

- (1) 벽식 교각의 약축방향은 일반 기둥으로 설계할 수 있다. 벽식 교각의 강축방향은 「4.3.4 (1)항」의 벽식 교각에 대한 응답수정계수를 적용하고 이 절에 따라 벽체로 설계해야 한다.
- (2) 벽체의 양면에는 수평방향 및 수직방향철근을 배치해야 하며, 인접하는 수평방향철근의 겹침이음이 동일한 위치에 있지 않도록 엇갈리게 배치해야 한다.
- (3) 벽체의 수평방향 및 수직방향 철근비 ρ_h 와 ρ_v 는 0.0025 이상으로 해야 하며, 철근의 수평 및 수직 간격은 450mm 이하로 해야 한다.
- (4) 벽체의 전단철근은 연속되어야 하고 균일하게 배치되어야 하며, 공칭전단강도 V_n 은 <식 (31)>과 <식 (32)>의 값 중 작은 값을 취한다.

$$V_n = 0.66 \sqrt{f_{ck}} b d \quad (31)$$

$$V_n = (0.165 \sqrt{f_{ck}} + \rho_h f_y) b d \quad (32)$$



4.8.5 중공 원형 교각

(1) 일반사항

- ① 중공원형 교각은 일반적인 원형기둥에 적용하는 규정 이외에, 이 절의 규정을 추가로 적용하여 설계하여야 한다.
- ② 중공원형 교각에서 중공치수비는 단면의 최대지름에 대한 중공지름의 비율로 정의한다.
- ③ 중공원형 교각의 축력비는 콘크리트 설계기준압축강도와 콘크리트 단면적의 곱에 대한 축력의 비율로 정의한다.

(2) 중공원형 교각의 단면 구분

- ① 중공원형 교각의 단면은 극한상태에서의 중립축의 위치에 따라 <그림 5>와 같이 압축 지배단면과 휨 지배단면으로 구분한다.
- ② 극한상태에서 중립축의 위치가 중공단면의 중공부에 존재하여, 벽체두께에 걸쳐 압축응력을 받는 단면을 압축 지배단면으로 정의한다.
- ③ 극한상태에서 중립축의 위치가 벽체두께의 내부, 즉 단면의 외측 면과 내측 면 사이에 존재하는 단면을 휨 지배단면으로 정의한다.
- ④ 극한상태에서의 중립축 위치는 일반적인 축력-휨 강도해석이나 모멘트-곡률 해석 등 엄밀한 해석에 의하여 결정할 수 있다.
- ⑤ 단면의 분류를 해석에 의하지 않는 경우, 축력비가 0.1 이하이고 중공치수비가 0.5 이하인 경우에는 휨 지배단면으로 분류할 수 있다.

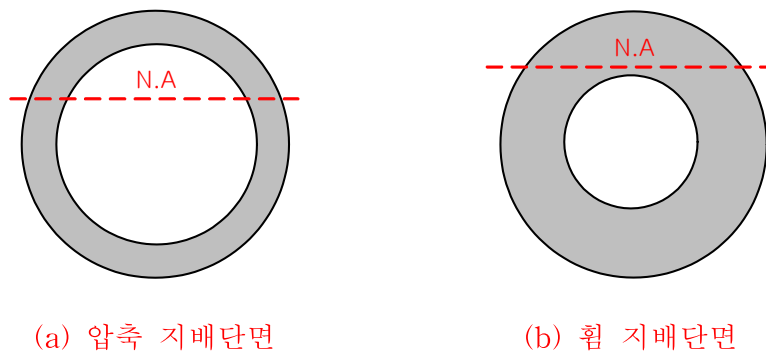


그림 5. 극한상태에서의 중립축 위치에 따른 단면구분

(3) 축방향철근과 횡방향철근의 배치

- ① 중공원형 교각의 압축 지배단면은 벽체단면의 외측 면과 내측 면에 인접한 위치에 축방향철근과 횡방향철근을 배치하여야 한다.
- ② 중공원형 교각의 휨 지배단면은 벽체단면의 외측 면과 내측 면에 인접한 위치에 축방향철근과 횡방향철근을 배치하거나, 벽체단면의 외측 면에 인접한 위치에만 축방향철근과 횡방향철근을 배치할 수 있다.

- ③ 중공원형 교각의 횡방향철근은 벽체단면에서 콘크리트 단면의 심부와 축방향철근을 감싸도록 배치하여야 한다.
- ④ 벽체단면 외측과 내측의 축방향철근을 감싸는 보강띠철근의 배치는 「4.8.5 (4)항」에 따른다.
- (4) 소성힌지구역에서의 심부구속 횡방향철근량 및 철근상세
 - ① 중공원형 교각의 심부구속 후프철근은 나선철근이나 완전원형후프, 또는 「4.8.3(5) ⑦항」을 만족하는 띠철근을 사용하여야 한다.
 - ② 「4.3.4(4)항」 <표 7>의 응답수정계수를 적용한 완전연성설계에서는 <식 (28)>에 따라 소요 나선철근비를 계산하여 벽체단면 외측의 축방향철근을 감싸도록 심부구속철근을 배치하여야 한다.
 - ③ 「철도설계기준(노반편) 부록 I」을 적용한 연성도 내진설계에서는 「부록 I.2」와 「부록 I.3」의 규정에 따라 소요 나선철근비를 계산하여 벽체단면 외측의 축방향철근을 감싸도록 심부구속철근을 배치하여야 한다.
 - ④ 벽체단면 외측의 축방향철근을 감싸는 심부구속철근은 <식 (26)> 또는 「부록 I」의 <식 (I.6)>에 따라 심부구속철근의 지름과 수직간격을 결정하여야 한다. 단, 중공원형 교각에서는 <식 (26)> 또는 <식 (I.6)>의 d_s 를 외측 심부구속철근의 외측표면을 기준으로 형성되는 원형의 지름으로 하여야 한다.
 - ⑤ 휨 지배단면에서 단면의 내측에 축방향철근이 배치되지 않은 경우에는, 내측의 축방향철근을 감싸는 심부구속철근을 배치할 필요가 없다.
 - ⑥ 휨 지배단면에서 단면의 내측에도 축방향철근이 배치된 경우에는, 내측의 축방향철근을 감싸는 횡방향구속철근을 「철도설계기준(노반편) 제10장 콘크리트교」의 규정에 따라 배치하여야 한다.
 - ⑦ 압축 지배단면은 외측의 축방향철근을 감싸는 심부구속철근과 동일한 지름과 간격으로 내측의 축방향철근을 감싸는 심부구속철근을 배치하여야 한다. 단, 외측 심부구속철근 수직간격의 2배가 내측 축방향철근 지름의 6배 이하인 경우에는, 내측 심부구속철근의 수직간격을 외측 심부구속철근 간격의 2배로 배치할 수 있다.
 - ⑧ 중공원형 교각의 심부구속 횡방향철근상세는 「4.8.3(5)항」의 「①」과 「⑦」의 규정 외에 「4.8.5(4)항」의 「⑨~⑬」의 규정을 따라야 한다.
 - ⑨ 중공원형 교각에서 심부구속철근의 호칭지름이 「4.8.5(4)항」의 「④」에 정의된 d_s 의 1/125배 이상인 경우에는 벽체단면 외측과 내측의 축방향철근을 감싸는 보강띠철근을 배치할 필요가 없다.
 - ⑩ 중공원형 교각에서 심부구속 후프철근의 호칭지름이 「4.8.5(4)항」의 「④」에 정의된 d_s 의 1/125배 미만인 경우에는 벽체단면 외측과 내측의 축방향철근을 감싸는 보강띠철근을 배치하여야 한다. 이때 보강띠철근은 심부구속 후프철근과 동일한 지름의 철근을 사용하여야 한다.



- ⑪ 심부구속 보강띠철근 상세는 「4.8.3(5)항」의 「④」에 따르며, 중공원형 교각에서는 보강띠철근 간의 수평간격이 외측 심부구속철근의 위치에서 심부구속 후프철근 호칭지름의 30배를 초과하지 않도록 하여야 한다.
- ⑫ 심부구속 보강띠철근은 축방향철근을 감싸도록 배치하여야 하며, 단면 내측에 축방향철근이 배치되지 않은 경우에는 보강띠철근의 배치를 위한 조립용 철근을 축방향으로 배치하여야 한다.
- ⑬ 보강띠철근을 연속적으로 같은 축방향철근에 걸리게 할 경우에는 압축지배 단면의 경우에는 90°갈고리가 연달아 걸리지 않도록 연속된 보강띠철근의 양단을 바꿔주어야 하며, 휨지배단면의 경우에는 90°갈고리가 내측축방향철근에만 걸리도록 배치하는 방법과 90°갈고리가 연달아 걸리지 않도록 연속된 보강띠철근의 양단을 바꿔주는 방법 중 하나를 적용하여야 한다

(5) 중공원형 교각의 설계전단강도

- ① 중공원형 교각의 설계전단강도는, 「4.3.4(4)항」 <표 7>의 응답수정계수를 적용한 완전연성설계나 「부록 I」을 적용한 연성도 내진설계의 구분 없이, 모두 「4.8.2(6)항」의 규정에 따른다.
- ② 「4.8.2(6)②항」의 <식 (21)>과 <식 (22)>에서, 중공원형 교각의 전단유효단면적 A_e 는 $(D_o - D_i)D_i$ 로 계산한다. 여기서, D_o 는 단면의 최대지름, 즉 외측지름이고, D_i 는 중공지름, 즉 단면의 내측지름이다.
- ③ 「4.8.2(6)③항」의 <식 (24)>에서, D_c 는 외측 원형후프철근의 중심을 기준으로 형성되는 원형의 지름으로 하여야 한다. 단면의 내측에도 원형후프철근이 배치된 경우에는 <식 (33)>에 따라 계산하여야 한다. 여기서 D_{ci} 는 내측 원형후프철근의 중심을 기준으로 형성되는 원형의 지름이고, s_i 는 내측 원형후프철근의 수직간격이다.

$$V_s = \frac{\pi}{2} \left(\frac{A_{sp} f_{yh} D_c}{s} + \frac{A_{sp} f_{yh} D_{ci}}{s_i} \right) \quad (33)$$

4.9 지진격리교량의 설계

4.9.1 일반사항

(1) 적용범위

이 지침은 신설되는 지진격리교량의 설계에 적용한다. 적용하는 교량 및 준용의 방법은 「4.1.1항」에 규정한 바와 같으며, 특수한 형식의 교량(아치교, 사장교, 현수교 등)은 이 절의 설계개념 및 기준을 준수하고 합리적인 보정을 한 지진격리교량 설계 기준을 작성하여 설계할 수 있다. 이 절의 설계 규정들은 수평방향으로 지진 격리시키는 시스템에 대해서만 고려되었으며, 수직방향에 대해서는 강체라고 가정한다. 또한 이 절의 규정들은 외부에너지를 이용하지 않는 지진격리시스템에만 적용된다.

4.9.2 지진격리설계의 기본방침

(1) 목적

이 설계기준의 목적은 지진에 의해 교량이 입는 피해의 정도를 최소화 시킬 수 있는 내진성의 확보를 위해 지진격리받침을 적용한 경우에 필요한 최소 설계요구조건을 규정하는데 있다.

(2) 기본개념

지진격리설계는 수평지진력에 의한 지진시 교량의 응답을 줄일 목적으로, 주로 상부구조와 하부구조 사이에, 지진격리받침을 적용하여 설계기준에서 요구하는 내진성을 확보하는 방법이다. 이때, 지진격리받침은 교량의 고유주기를 길게 함으로써 교량에 작용하는 지진력을 줄여주고, 지진에너지흡수능력 향상을 통하여 지진시 응답을 감소시키는 역할을 한다. 그 적용에 있어서 다음 사항을 검토해야 한다.

- ① 지진격리설계의 적용은 교량의 장주기화 혹은 지진에너지흡수능력 향상효과를 상시와 지진시의 양 측면에서 검토한 후에 판단해야 한다. 특히, 다음의 조건에 해당되는 경우에는 지진격리설계를 적용하지 않는 것으로 한다.

가. 하부구조가 유연하고 고유주기가 긴 교량

나. 기초주변의 지반이 연약하고 지진격리설계의 적용에 따른 교량 고유주기의 증가로 지반과 교량의 공진 가능성이 있는 경우

다. 받침에 부반력이 발생하는 경우

- ② 교량의 장주기화로 인한 지진시 상부구조의 변위가 교량의 기능에 악영향을 주지 않도록 해야 한다.

- ③ 지진격리받침은 역학적 거동이 명확한 범위에서 사용해야 한다. 또한 지진시의 반복적인 횡변위와 상하진동에 대하여 안정적으로 거동해야 한다.

라. 이 지침에서 규정하고 있는 지진격리받침 이외에도 그 특성의 안정성이 확인된 각종감쇠기, 낙교방지장치, 지진보호장치 등에 의하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

4.9.3 지진격리교량의 가속도계수

「4.3.1항」의 일반교량의 내진설계에 사용되는 가속도계수가 지진격리교량의 내진설계에도 동일하게 사용된다.

4.9.4 지진격리교량의 내진등급과 설계지진수준

지진격리교량의 내진등급과 설계지진수준은 「4.3.2항」에서 규정된 일반교량의 규정과 동일하다.

4.9.5 지진격리교량의 지반계수

지진격리교량의 지진하중을 결정하는데 사용되는 지진격리교량의 지반계수 S_i 는 <표 8>과 같으며, 지반종류는 「2. 내진설계일반」에서 정의된 일반교량의 지반종류를 동일하게 사용한다.

표 8. 지진격리교량의 지반계수 S_i



지진격리교량의 지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S_i	1.0	1.5	2.0	2.7

4.9.6 지진격리교량의 응답수정계수

- (1) 「4.6항」과 「4.7항」에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건과 「4.8항」에서 규정한 소성힌지구역에 관련된 모든 설계요건을 충족시키는 경우, 지진격리교량의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 「4.9.7항」에서 규정된 등가지진력을 <표 9>의 지진격리교량의 응답수정계수로 나눈 값으로 한다. 다만 하부구조의 경우, 축방향력과 전단력은 응답수정계수로 나누지 않는다.

표 9. 지진격리교량의 응답수정계수, R_i

하부구조	R_i	연결부분	R_i
벽식 교각	1.5	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝가구(Bent) 1. 수직말뚝만 사용한 경우 2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5 1.5	상부구조의 한 지간내의 <u>신축이음부</u>	0.8
단일 기둥	1.5	기둥, 교각 또는 말뚝가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝가구 1. 수직말뚝만 사용한 경우 2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2.5 1.5	기둥 또는 교각과 기 초	1.0
다주 가구	2.5		

- (2) 「4.6항」과 「4.7항」에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건과 「4.8항」에서 규정한 소성힌지구역에 관련된 모든 설계요건을 충족시키지 못하는 경우, 하부구조와 연결부분에 대한 응답수정계수는 1.0을 넘지 못한다. 이때, 지진응답해석을 통하여 설계지진시에 하부구조가 축방향철근이 항복하지 않는 탄성범위 내에서 거동함을 확인해야 하고, 철근콘크리트 기둥 형식의 교각과 말뚝가구의 철근상세는 「4.8.3항」의 해당요건을 만족시켜야 한다.

4.9.7 해석방법

(1) 일반사항

- ① 이 항의 규정은 지진격리교량의 지진해석에 대한 규정이며 다음과 같은 네 가지 해석법 또는 발주자가 인정하는 검증된 정밀해석법을 사용할 수 있다.

가. 등가정적하중법

나. 단일모드스펙트럼해석법

다. 다중모드스펙트럼해석법

라. 시간이력해석법

- ② 교량해석은 지진격리받침의 특성을 고려하여 수행한다. 지진격리받침의 비선형거동을 단순화하기 위해서 이중선형모델을 사용할 수 있다. 지진격리받침의 유효강성 k_{eff} 및 지진격리시스템의 등가감쇠비 β_i 는 <식 (34)> 및 <식 (35)>에 의해 산출한다. 해석에 사용되는 지진격리받침의 유효강성은 설계변위에서 계산되어야 한다.

$$k_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n} \quad (34)$$

$$\beta_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{전체EDC면적}}{\sum (k_{eff} d_i^2)} \times 100(\%) \quad (35)$$

여기서, F_n : 지진격리장치의 원형시험시, 한 cycle 동안의 최대부변위량 발생시의 수평력

F_p : 지진격리장치의 원형시험시, 한 cycle 동안의 최대양변위량 발생시의 수평력

d_n : 지진격리장치의 원형시험시, 한 cycle 동안의 최대부변위

d_p : 지진격리장치의 원형시험시, 한 cycle 동안의 최대양변위

d_i : 고려하고 있는 방향에 대한 강성중심에서의 등가지진력에 의한 지진시 설계변위

EDC : 한 cycle 당 소산된 에너지이다.

유효주기가 3초보다 긴 교량 또는 등가감쇠비가 30%를 초과하는 지진격리받침을 사용하는 경우에는 지진격리받침의 비선형성을 고려한 시간이력해석을 수행해야 한다.

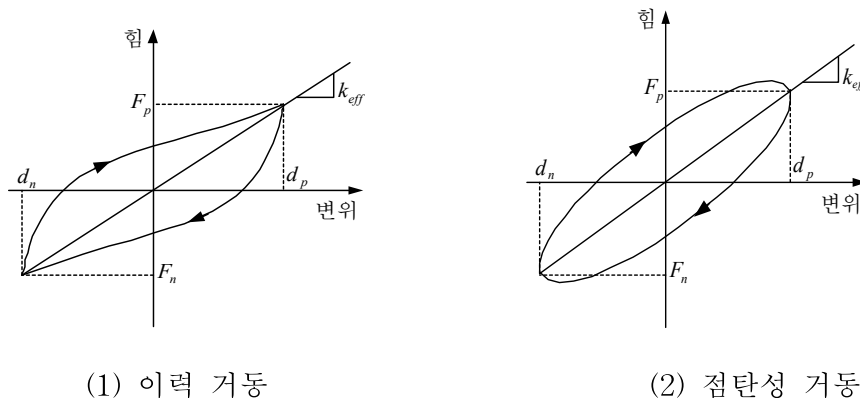


그림 6. 지진격리받침의 유효강성 및 지진격리시스템의 등가감쇠비 산출

(2) 등가정적하중법

등가지진력은 <식 (36)>와 같다.



$$F_e = C_s W \quad (36)$$

여기서, F_e : 등가지진력

W : 상부구조물의 총중량이다.

등가지진력을 결정하기 위해서 사용되는 탄성지진응답계수 C_s 는 <식 (37)>의 무차원식으로 구할 수 있다. 단, C_s 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

$$C_s = \frac{K_{eff} \times d}{W} = \frac{AS_i}{T_{eff}B} \quad (37)$$

지반에 대한 상부구조의 총변위 d 는 <식 (38)>으로 구한다.

$$d = \frac{250AS_iT_{eff}}{B} \text{ (mm)} \quad (38)$$

여기서, B 는 <표 10>로부터 구한다.

표 10. 지진격리교량의 감쇠계수 B

지진격리교량의 감쇠계수	지진격리시스템의 등가감쇠비 β (%)				
	≤ 2	5	10	20	30
B	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7

유효주기 T_{eff} 는 <식 (39)>으로 구한다.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}g}} \quad (39)$$

여기서, K_{eff} 는 지진격리교량의 유효강성이다.

(3) 단일모드스펙트럼해석법

종방향 및 횡방향 지진에 의한 부재의 단면력과 처짐을 계산하는 등가정적 지진하중 $p_e(x)$ 는, 지진격리받침의 변위에 의하여 「4.9.7(2)항」에 따라 결정된 등가지진력을 사용하여 「4.9.7항」에 기술된 대로 수평2축 방향을 따라 구하고, 그 값을 「4.4.4항」에 기술된 대로 조합하여 사용한다.

$$p_e(x) = w(x)C_s \quad (40)$$

여기서,

$p_e(x)$: 등가정적 지진하중의 단위길이당 하중강도

$w(x)$: 상부구조의 단위길이당 고정하중

C_s : <식 (38)>에 의하여 계산되는 탄성지진응답계수이다.

(4) 다중모드스펙트럼해석법

탄성지진응답계수는 <그림 7>과 같이 해당모드주기 T_i 가 $0.8T_{eff}$ 를 초과하는 경우에만 B 에 의해 감소된 값이 적용된다.

$$C_{si} = \frac{AS_i}{T_i} \quad (T_i \leq 0.8T_{eff}) \quad (41)$$

$$C_{si} = \frac{AS_i}{T_i B} \quad (T_i > 0.8T_{eff}) \quad (42)$$

여기서,

C_{si} : i 번째 모드의 탄성지진응답계수

T_i : i 번째 모드의 주기이다.

다만, C_{si} 값은 $2.5A$ 보다 크게 취할 필요는 없다. 직교하는 지진력의 조합은 「4.4.4항」에 의한다.

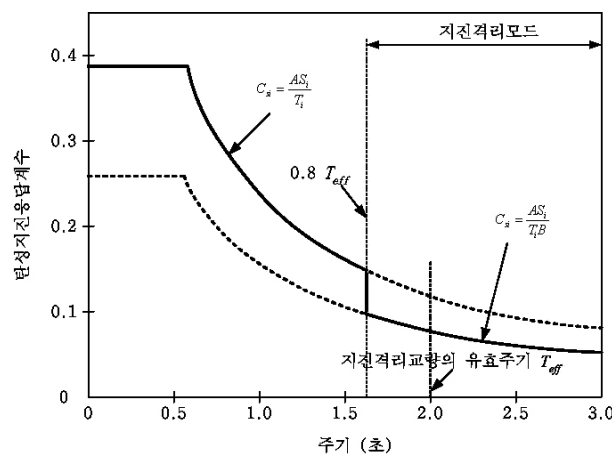


그림 7. 지진력리교량의 탄성지진응답계수

(5) 시간이력해석법

시간이력해석이 요구되는 지진력리교량의 경우에는 다음 조건들을 적용해야 한다.

- ① 지진력리반침의 비선형 특성을 고려해야 한다.
- ② 시간이력해석을 위한 지진입력 시간이력은 <그림 7>에 나타난 감쇠율 5%에 대한 설계지반응답스펙트럼에 부합되도록 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 최소한 4쌍 이상의 지진운동을 작성하여 사용해야 한다.
- ③ 작성된 시간이력이 설계지반 응답스펙트럼에 부합되기 위해서는 작성된 시간이력의 평균 응답스펙트럼이 다음 요건을 만족해야 한다.
 - 가. 시간이력의 응답스펙트럼 값이 설계지반 응답스펙트럼값보다 낮은 주기의 수는 5쌍 이하이고 낮은 정도는 10% 이내 이어야 한다.
 - 나. 시간이력의 응답스펙트럼을 계산하는 주기의 간격은, 주기의 간격을 축소할 경우, 계산된 스펙트럼 값의 변화가 10% 이하가 되도록 작아야 한다.
- ④ 시간이력의 지속시간은 10~25초 또 강진구간 지속시간은 6~10초가 되도록 해야 한다.
- ⑤ 두 방향 이상의 시간이력을 동시에 고려할 경우, 각 직교방향의 시간이력은 통계학



적으로 독립되어야 한다. 여기서, 두 시간이력 사이의 시작시간 차이를 고려하여 계산된 상관계수함수의 최대절대값이 0.3을 넘지 않는다면 두 시간이력은 통계학적으로 독립이라고 간주할 수 있다.

- ⑥ 7쌍 미만의 지반운동시간이력에 의한 해석결과로부터 얻어진 응답치의 최대값 혹은 7쌍 이상의 해석결과로부터 얻어진 평균값을 설계값으로 한다.

4.9.8 기타 요구조건

(1) 상시 수평력 안정성

- ① 지진격리받침은 풍하중, 원심력, 제동력, 온도변위에 의한 하중을 포함하는 모든 상시 수평력 조합에 안정적으로 거동하도록 설계되어야 한다.
- ② 지진격리받침 탄성중합체의 최대전단변형률은 상시 70%, 지진시 200% 이내 이어야 한다.

(2) 수직력 안정성

지진격리받침은 수평변위가 없는 상태에서 고정하중과 활하중을 더한 수직하중에 대하여 최소한 3 이상의 안전율을 제공해야 한다. 또한 1.2배의 고정하중, 지진하중으로 인한 수직하중, 그리고 횡방향 변위로 인한 전도하중의 합에 대하여 안정적으로 거동하도록 설계해야 한다. 여기서 전도하중을 계산할 때의 횡방향 변위는 읍셋 변위와 설계지진에 의한 설계변위의 2.0배와 같다.

(3) 회전 성능

지진격리받침의 회전성능은 고정하중, 활하중, 시공오차의 영향을 포함해야 하고, 여기서 고려되는 시공오차의 설계회전각은 0.005rad보다 작아서는 안 된다.

(4) 지진격리시스템의 성능확인

지진격리시스템에 사용되는 지진격리받침 및 각종 지진보호장치는 설계시 상정한 성능기준과 품질기준을 확보하고 있는지 다음 각 항의 시험을 행한다.

- ① 성능시험 : 온도의존성, 주기의존성, 압축피로, 전단피로 시험 등을 통하여 해당 지진격리시스템이 신뢰할 수 있는 성능을 가지고 있는지 확인한다.
- ② 원형시험 : 설계와 해석에 사용되는 지진격리시스템의 주기특성과 감쇠특성 등의 성능은 원형 혹은 축소모형시험에 의해 확인한다.
- ③ 품질시험 : 해당 받침 혹은 장치가 품질기준을 만족하고 있는지 전수 시험을 실시한다.
지진격리받침의 축소모형 및 시험에 대한 세부사항은 국내외에서 인정되고 있는 지진격리장치 관련 기준에 따른다.

(5) 품질 기준

지진격리받침과 그 재료는 화학적, 물리적, 역학적 성질이 안정적이어야 하며, 전수 품질시험을 실시하여 다음의 조건을 만족해야 한다.

- ① 다수의 지진격리받침을 대상으로 측정한 평균 유효강성은 설계값의 $\pm 10\%$ 이내이어야 하고, 각각의 유효강성은 설계값의 $\pm 20\%$ 이내이어야 한다. 또한, 평균 EDC값은

설계값의 -15% 이상이어야 하고 각각의 EDC값은 설계값의 -25% 이상이어야 한다.

- ② 지진격리받침의 유효강성 및 증가감쇠비는 지진설계변위에 의한 연속반복재하에 대해 안정적이어야 한다.
- ③ 지진격리받침은 지진 후에 교량의 기능에 악영향을 주는 잔류변위가 발생하지 않도록 설계해야 한다.

표 11. 지진격리받침 유효강성과 EDC의 품질 기준

	k_{eff}	EDC
개체차	$\pm 20\%$	-25%
평균값	$\pm 10\%$	-15%

- ④ 지진격리받침의 유효강성 및 증가감쇠비는 「도로교설계기준 2.1.12항」의 온도범위에서 안정적이어야 한다.
- ⑤ 지진격리받침은 지진설계변위 범위에서는 항상 양의 접선강성을 가져야 한다.

5. 터널내진설계

5.1 내진설계 일반

- (1) 터널의 내진설계는 지진 시 구조물의 기능 마비로 인한 사회적 간접피해 및 재산피해를 최소화해야 한다.
- (2) 내진설계 시 국내의 중약지진특성에 맞는 설계지진규모를 반영하도록 한다.
- (3) 개착터널이 아닌 굴착터널에 대하여는 내진설계를 수행하지 않는 것을 원칙으로 하나, 다음의 경우에는 터널의 안정성 증진을 위하여 내진설계를 수행해야 한다.
 - ① 토피가 작고 지반이 연약한 터널의 갱구부 및 주요 접속부
 - ② 갱구부 사면의 불안정에 따른 편압 발생구간
 - ③ 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간
 - ④ 액상화가 우려되는 연약지반 내 터널구간

5.2 성능수준에 기초한 내진설계

- (1) 철도터널의 내진설계는 설계지진하중 발생 후 터널에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 터널의 전체적인 붕괴는 허용하지 않고 긴급보수를 통해 터널의 기능을 회복할 수 있는 수준이며 내진설계는 「5.1 (3)항」에 정리된 조건에 부합하는 경우만 수행한다.
- (2) 철도터널은 「2. 내진설계일반」규정에 의해 내진 1등급 또는 2등급으로 설계해야 한다.
- (3) 구조물의 응답을 등가선형 또는 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석방법을 이용하여 설계해야 한다.



5.3 내진설계 방법

- (1) 터널 내진설계절차는 각호와 같은 주요 절차를 따라야 한다.
 - ① 터널 설치구간의 중요도에 따른 내진등급결정
 - ② 건설지점의 지반조사 및 액상화 가능성 평가
 - ③ 등급에 따른 내진안정성 해석법 결정
 - ④ 설계지진계수의 산정
 - ⑤ 내진안정성 검토
 - ⑥ 단면설계
- (2) 터널의 내진설계에 필요한 지반물성은 제반 동적 지반조사 및 실내시험결과와 기존 자료를 종합적으로 분석하여 선정해야 한다.
- (3) 기반면은 평균 전단파속도가 760m/sec 이상인 견고한 암반으로 하는 것을 원칙으로 하되 현장조건에 따라 변경할 수 있다. 기반면이 철도터널의 위치보다 상당히 깊이 발달되어 있을 경우는 지반의 종류에 대한 표준설계 응답스펙트럼을 이용하여 사용할 수 있다.
- (4) 터널은 설계지진 계수 산정시 지진재해도 또는 지진 재현 주기에 따른 지진구역계수(Z)와 위험도계수(I)를 따르는 것을 원칙으로 하되, 상세내용은 「2. 내진설계일반」을 따른다.
- (5) 터널의 내진설계 대상 지반특성을 파악하기 위한 조사항목은 지층의 구성 및 각 지층별 공학적 특성 파악, 지하수위 측정 등을 포함해야 하며 필요시 지반의 동적특성 시험을 실시해야 한다.
- (6) 내진해석의 지반운동은 철도터널의 길이방향과 횡방향의 지반운동 영향을 고려해야 한다.
- (7) 지반운동의 공간적 변화특성을 고려해야 한다.
- (8) 지형 및 지반조건의 변화가 지반운동에 미치는 영향을 고려해야 한다.
- (9) 터널의 내진설계해석 방법은 응답변위법, 동적해석법, 유사정적해석법을 다음 각 호와 같이 적용한다.
 - ① 터널은 그 내공부(內空部)를 포함한 단위체적중량이 주변 지반의 단위체적중량과 비교하여 일반적으로 같거나 가벼우므로 주변지반에 발생하는 변위, 변형 등을 중요하게 고려하여 응답변위법을 적용해야 한다.
 - ② 내진 1등급 동적해석법에서의 입력지진파는 터널시공지역, 지반특성, 구조물의 고유주기 등을 고려하여 유추한 인공지진 시간이력곡선을 적용해야 한다.
 - ③ 유사정적해석법은 옹벽형식의 터널 갱구부에 국부적으로 적용하며, 동적인 시간이력 특성을 정적인 하중으로 단순화 시켜 보다 간편하고 보수적인 설계가 되도록 해야 한다.

5.4 액상화 평가법

- (1) 터널 내진설계 시 액상화 평가는 터널의 입출구부 및 연약지반이 광범위하게 분포한 지역을 통과하는 터널에 있어서 지하수의 영향을 받는 구간에 대하여 실시하는 것을 원칙으로 하되 현장조건에 따라 조정할 수 있다.
- (2) 액상화 가능성 평가는 예비평가, 간편평가 및 상세평가의 3단계로 구분하여 실시하는 것을 원칙으로 하되 현장조건에 따라 조정할 수 있다.
- (3) 토사터널의 액상화 예비평가에 있어서 아래 열거한 사항 중 하나 이상이 되는 경우에는 액상화 평가를 생략할 수 있다.
 - ① 지하수위 위의 지반
 - ② 주상도상의 표준 관입 저항치(N 값)가 20 이상인 지반
 - ③ 대상지반 심도가 20m 이상인 지반
 - ④ 소성지수(PI)가 10 이상이고 점토성분이 20% 이상인 지반
 - ⑤ 세립토 함유량이 35% 이상인 경우
상대밀도가 80% 이상인 지반
- (4) 액상화 간편평가법은 국내 연약지반 내진설계에서 널리 사용되는 합리적인 방법으로 한다. 이때의 평가안전율은 1.5 이상으로 한다.
- (5) 간편평가 결과 안전율이 1.5 미만인 경우 현장 시료를 채취하여 액상화 상세평가법을 실시한다. 이때의 평가 안전율은 1.0이다

5.5 내진설계 시 주의사항

- (1) 콘크리트라이닝이 지진력에 저항하도록 두께를 증가하는 것은 지진력을 증대시키는 역효과를 가져올 수 있으므로 콘크리트라이닝 두께를 증가시키는 대신에 철근을 넣어 인성을 증가시키도록 해야 한다.
- (2) 기둥단면의 내진설계는 지진에 의한 수평력에 따라 기둥단면의 압축파괴나 전단파괴, 휨인장 파괴가 발생하지 않도록 보강하여 압축파괴나 전단파괴보다 휨인장파괴가 먼저 발생하도록 설계해야 한다.
- (3) 갱구부는 표토의 활동붕괴를 방지하기 위하여 입구부의 절취면에 적당한 기울기를 확보하여 토류공을 설치해야 한다.
- (4) 내진설계를 고려하는 구간의 신축이음부는 철도터널의 이음부에 강성이 작은 이음장치 설치하여 구조물에 작용하는 지지력을 감소시킬 수 있도록 하며 강성이 작은 이음장치 설치에 따른 구조적인 약점에 대하여 검토해야 한다.
- (5) 액상화 방지는 지반개량을 통하여 지반 액상화를 방지 또는 억제시키도록 해야 한다.

5.6 내진설계 품질관리

- (1) 활성단층지역에는 터널을 건설하지 않는 것이 바람직하다. 단, 이를 피하기 어려운 경우에는 지진 발생에 따른 손상이 최소화되도록 설계해야 한다. 또한 기능 손상이



발생할 경우에 대비하여 보수·보강이 용이하도록 설계해야 한다.

- (2) 내진설계를 고려하는 구간의 경우에는, 내진설계 요구사항의 만족성, 내진설계기법 및 가정사항의 적절성, 법규요건에 대한 만족성, 내진설계 결과의 시공성 등의 검증을 실시해야 한다

해설 1. 지하구조물 내진설계

1. 내진설계

1.1 내진등급 및 내진성능목표

1.1.1 내진등급

지하구조물의 내진등급은 내진1등급, 내진2등급의 2가지로 분류되며 분류기준은 구조물의 중요도, 인명피해여부 및 피해 규모정도를 기준으로 하며 다음표와 같이 분류된다.

표 12. 내진등급별 시설분류기준

내진등급	구분 내용	설계지진의 평균재현주기
내진 1등급	설계지진 발생 후에도 교통수단을 유지하기 위한 중요시설물	1000년
내진 2등급	내진1등급에 속하지 않는 구조물	500년

참고적으로 건설교통부의 연구과제 「내진설계기준연구(Ⅱ)(1997. 12.)」에서 제시된 내진설계성능기준 및 기타 연구결과에서 제시한 지중구조물의 내진등급은 다음과 같다.

표 13. 지중구조물의 내진등급

구조물 등급	내진 I등급	내진 II등급
주거 문화시설	지하박물관, 지하음악당, 도서관, 지하상가	지하사무실, 스포츠센터
교통시설	지하철(도시철도), 철도·도로 터널	지하주차장, 지하보도
라이프라인 시설	가스·석유시설, 상수도, 전력·통신관로	하수도, 도수터널
산업시설	식수·정수 처리장, 지하발전시설, 핵폐기물 처리시설	폐하수 처리장, 산업폐기물 처리장
에너지 저장시설	전력시설, 전력공급시설, 열저장·지역냉난방 공급시설, 지하원유·LNG·LPG 비축시설	곡물·식품 저온저장소, 수산물 냉장·냉동 저장소, 압축공기 저장시설
방어시설	지하대피소, 지휘·통신시설, 군사기지	

1.1.2 내진성능목표

비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 구조물의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안 되며, 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해 조사와 보수를 위해 현장 접근이 가능하도록 설계되어야 한다.



구조물 종류	피해 세부사항
수평공간 구조물	<ul style="list-style-type: none"> 가동성 이음부에서는 파괴 미발생 주변지반 액상화에 의한 시설물의 파괴 방지 지반조건이 현저하게 변하는 지역에서 과도한 상대변위로 인한 파괴 미 발생
수직지중 구조물	<ul style="list-style-type: none"> 2차부재의 부분적 파괴는 허용되나, 신속한 복구가 가능해야 하며 과도한 상대변위에 의한 구조물의 파괴는 일어나서는 안 된다. 지진시 증분 토압에 의한 구조물의 거동은 소성변형 한계 내에 있어야 한다.
선상 지중·지하구조물	<ul style="list-style-type: none"> 가동성 이음부에서는 파괴 미발생 주변지반 액상화에 의해 관체의 파괴방지

1.2 설계지반운동의 결정

1.2.1 설계지반 운동수준

지하철도 구조물은 「내진1등급」의 내진성능이 보장되어야 하며, 설계지반운동의 수준은 다음과 같이 분류해야 한다.

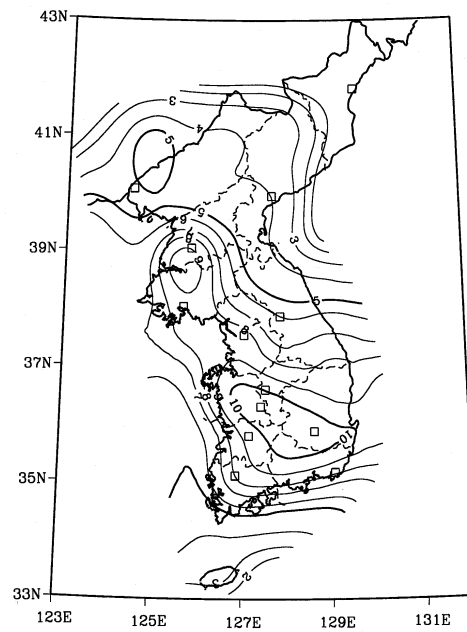
표 14. 설계지반운동 수준

평균재현주기	초과확률
100년	10년 내 초과확률 10%
500년	50년 내 초과확률 10%
1,000년	100년 내 초과확률 10%

1.2.2 지진재해도를 이용한 설계지반운동 수준결정

지진재해도는 어느장소에서 발생할 수 있는 재현주기에 해당하는 최대 가속도값을 중력가속도($1.0g=9.8m/sec^2$)의 백분율 값으로 나타낸 것으로 각 지역에서의 가속도 값을 등고선으로 연결해 놓은 것이 지진재해 분포도이다. 해당지역별 설계지반운동 수준을 지진재해도를 이용하여 구하여도 좋다.

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 50 Years



- 점 선 : 도경계
- 표 시 : 대도시 (청진, 신의주, 함흥, 평양, 해주, 춘천, 서울, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)
- 도 법 : UTM

그림 8. 500년 재현주기 지진재해도 분포도(표준)

1.2.3 지진구역구분 및 구역계수(z)

지진재해도를 근거로 하여 우리나라 전지역을 2개의 지진구역으로 구분하여 설계 지반운동 수준을 설정하고 있으며 이때 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 경우에는 상위 설계지반운동수준을 적용한다. 지진구역계수는 평균재현주기 500년에 해당하는 지진지반운동의 최대지반 가속도의 값을 중력가속도(1.0g)로 나눈 값으로 표시한다. 행정구역별 지진구역 구분 및 구역별 지진구역계수는 다음과 같다.

표 15. 지진구역 및 지진구역계수

지진구역	행정 구역		지진구역계수 Z
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.11
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부	
II	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, 화순, 광양시, 나주시, 여수시, 순천시
 전라남도 남서부(군,시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시



1.2.4 지반의 분류

국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 SA, SB, SC, SD, SE, SF 의 6종류로 분류하며 이중 SF는 부지고유의 특성조사가 요구되는 다음과 같은 지반에 속한다.

- (1) 액상화 가능성이 있는 토사지반. Quick Clay와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 토사지반과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- (2) 이탄 또는 유기성이 높은 점토지반
- (3) 매우 높은 소성을 갖는 점토지반
- (4) 층이 매우 두꺼우며, 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토

표 16. 지반의 분류

지반 종류	지반상태	상부 30.0m에 대한 평균 지반 특성 ¹⁾		
		평균전단파속도 \bar{v}_s (m/s)	평균표준관입시험 ²⁾ \bar{N} (타격수)	평균비배수전단강도 \bar{s}_u (kN/m ²)
S _A	경암지반	1500 초과	-	-
S _B	보통암 지반	760 초과 1500 이하		
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 초과 760 이하	50 초과	100 초과
S _D	단단한 토사지반	180 이상 360 이하	15 이상 50 이하	50 이상 100 이하
S _E	연약한 토사지반	180 미만	15 미만	50 미만
S _F	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			

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

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

1.2.5 기반면의 설정

- (1) “내진설계기준준칙(1998. 2), 건설교통부”의 지반분류 <표 16> SB에 해당되는 전단파속도 760m/sec 이상인 지반
- (2) 물성변화가 적고 해석대상 구조물의 아래면에 걸쳐 넓게 존재하는 지반으로 충분히 강성이 큰 암반과의 경계면을 갖는 지반
- (3) 주상도에 보통암이 나타나지 않을 경우, 구조물 저면의 10~15m 이하인 30m 정도를 기반면으로 간주한다.

(4) 기반암이 구조물 저면보다 높은 경우는 구조물 저면을 기반면으로 정의한다.

1.3 설계지진 응답스펙트럼의 설정

1.3.1 표준설계 응답스펙트럼

(1) 표준응답스펙트럼의 정의

표준설계 응답스펙트럼은 감쇠비 5%를 가진 지표면에서의 자유장 운동으로 정의되며 아래 <그림 9>과 같이 표현된다.

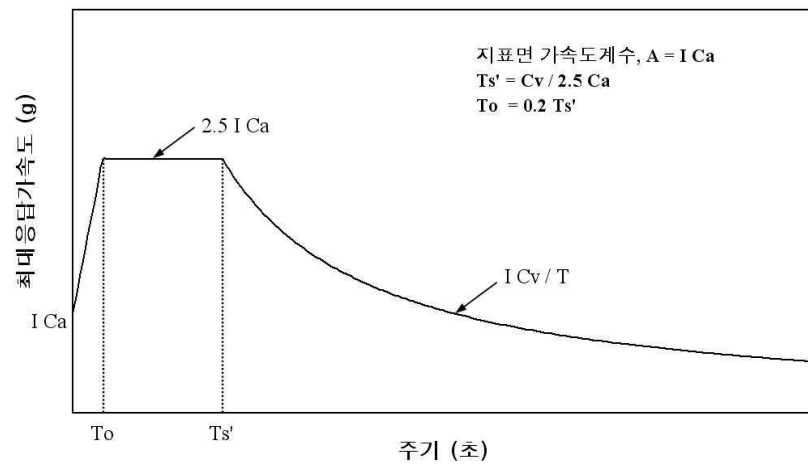


그림 9. 표준설계응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

- 표준설계 응답스펙트럼의 작성을 위해 요구되는 지진 구역의 구분, 위험도 계수 I 와 지진계수 Ca, Cv는 다음 <표 17~19>과 같다

표 17. 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진 구역	I	II
구역계수, Z(g)	0.11	0.07

표 18. 위험도계수 I

재현 주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도 계수, I	0.40	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

표 19. 지진계수 Ca, Cv

지진 계수	지진 구역	지 반 종 류				
		SA	SB	SC	SD	SE
Ca	I	0.09	0.11	0.13	0.16	0.22
	II	0.05	0.07	0.08	0.11	0.17
Cv	I	0.09	0.11	0.18	0.23	0.37
	II	0.05	0.07	0.11	0.16	0.23



(2) 가속도 시간이력

- ① 지반운동은 지반가속도의 시간이력으로 표현할 수 있으며 필요시에는 인공가속도 시간이력을 사용할 수 있다.
- ② 인공가속도 시간이력은 응답스펙트럼과 잘 부합되게 생성되어야 한다.
- ③ 인공가속도 시간이력의 지속시간은 지진의 규모, 발진기구특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.

1.3.2 설계지진 응답스펙트럼

(1) 설계지진 응답스펙트럼 작성시 고려사항

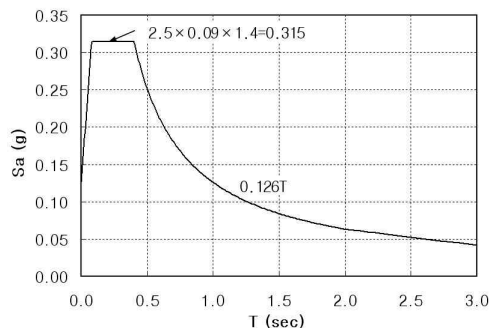
설계지진 응답스펙트럼은 표준설계 응답스펙트럼에 지반종류, 감쇠율에 대한 각각의 보정을 적용하여 작성한다.

표 20. 설계지진응답스펙트럼 작성시 보정계수 적용방법

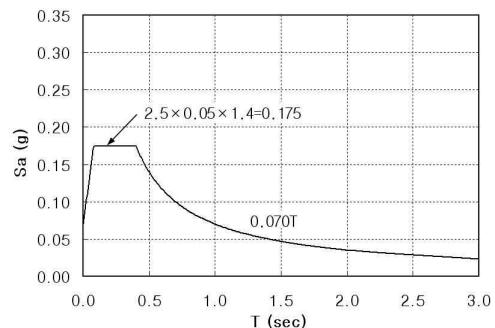
구분	보정계수 적용방법
지반적용 위치에 대한 보정	<ul style="list-style-type: none"> • 지상구조물 : 지표면의 설계응답스펙트럼 적용 • 지중구조물 : 기반암에서의 설계응답스펙트럼 적용 • 기반암에서의 설계응답스펙트럼 : 감쇠율에 대한 보정을 적용하여 S_A지반의 응답스펙트럼으로 정의
감쇠율에 대한 보정	<ul style="list-style-type: none"> • 표준설계 응답스펙트럼에 감쇠율에 대한 보정계수를 곱한 값으로 정의됨 • 감쇠율, $h = 0.2$ • 감쇠율에 대한 보정계수, C_D $C_D = 1.5/(40h+1) + 0.5$ 단, 별도의 합리적인 해석에 의하여 구한값을 적용할 수도 있다.

(2) 설계가속도 응답스펙트럼

기반면에서의 설계가속도 스펙트럼은 다음 <그림 10>에서 나타내는 값에 보정계수를 곱하여 적용한다.



(a) 지진구역 I



(b) 지진구역 II

그림 10. 기반암에서의 설계가속도 응답스펙트럼(S_A 지반)

(3) 설계속도 응답스펙트럼

① 속도응답스펙트럼 작성방법

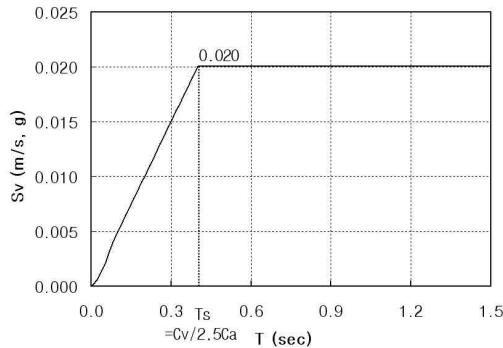
해석대상 부지의 공진주기에 따라 <표 21> 에 따라 작성한다.

표 21. 속도응답스펙트럼 작성방법

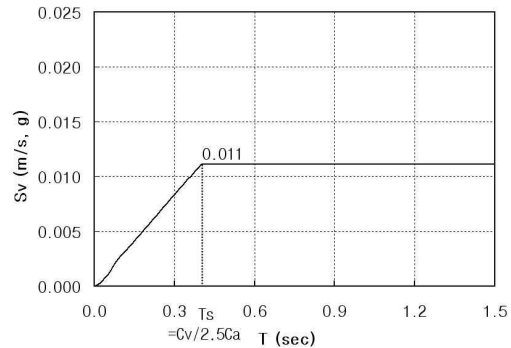
공진주기가 0.4초 이하인 경우	<ul style="list-style-type: none"> 기반면에서의 속도응답스펙트럼은 S_A지반의 가속도 응답스펙트럼을 직접 적분하여 구할 수 있으며 다음 환산식을 이용한다. $S_V = \frac{T}{2\pi} \cdot S_a$ 여기서, S_V : 기반면 속도스펙트럼 S_a : S_A지반의 가속도 응답스펙트럼 T : 지반의 고유주기
공진주기가 0.4초 이상인 경우	<ul style="list-style-type: none"> 해석 대상 부지가 연약층이 깊게 발달된 경우와 같이 공진주기가 0.4초 이상인 경우에는 지진응답해석을 이용하여 기반면의 가속도 응답스펙트럼을 구하는 것이 바람직하다.

② 기반면에서의 설계속도 스펙트럼

기반면에서의 설계속도 스펙트럼은 다음 <그림 11>에서 나타내는 값에 보정계수를 곱하여 적용한다.



(a) 지진구역 I



(b) 지진구역 II

그림 11. 기반면 설계속도 응답스펙트럼

1.4 해석방법

1.4.1 개요

내진해석방법은 동적하중을 정적하중화하여 계산하는 유사정적해석법과 동적해석법으로 구분된다. 지중구조물 내진해석에 있어서 유사정적해석법중 대표적인 해석방법은 「응답변위법」이 있으며 동적해석법중에서는 「시간이력해석법」이 있다. 해석은 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하되 지반변화가 급변하는 경우에는 종방향에 대해서도



검토할 필요가 있다. 지중구조물에서의 대표적인 해석법인 「응답변위법」과 「시간이력 해석법」에 대한 흐름도는 다음 <그림 12>와 같다.

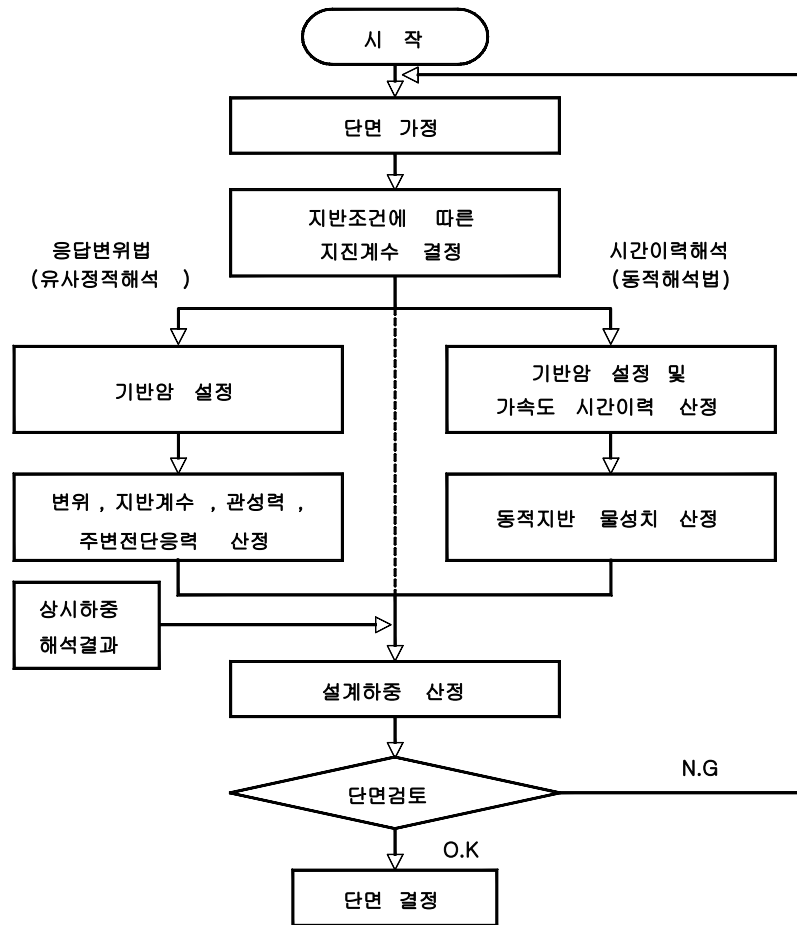


그림 12. 지중 구조물의 내진해석절차

1.4.2 내진해석 및 설계에 관한 규정

(1) 일반사항

- ① 지하구조물의 내진설계를 위한 구조해석은 지진 발생시 지반 변위의 영향을 고려하여 구조물이 소요의 내진 성능을 만족할 수 있도록 하는 것이다.
- ② 지하구조물은 관성력의 영향을 크게 받는 지상의 일반 구조물과 달라서 관성력의 영향은 작고, 주변의 변형에 따라 그 거동이 지배되기 때문에 내진 설계에 있어서는 지진시 지반 변위의 영향을 고려할 수 있어야 한다.

(2) 내진해석방법

- ① 지하구조물의 내진해석은 지반조건, 구조조건 등을 고려하여 “응답변위법” 혹은 “시간이력해석법”을 사용하여 수행할 수 있다.
- ② 일반적인 지하구조물의 경우 지중구조물이라는 특성상 “응답변위법”을 사용할 수 있다.

- ③ “응답변위법”은 지하구조물의 내진해석을 위한 표준해석법으로 사용하고, “시간이력 해석법”은 상세한 검토를 필요로 하는 경우나 구조조건, 지반조건이 복잡한 경우, 지반과 구조물의 상호작용을 고려하는 경우에 사용하는 것이 좋다.
- ④ 2차원 횡단면해석을 원칙으로 하되 지반상태가 급격히 변화하는 구간 통과 등의 경우에는 종방향에 대한 내진구조해석을 추가 수행 할 필요가 있다.
- (3) 응답수정계수

설계지진하중은 구조물에서 발생하는 소성변형을 허용한다. 구조물이 비탄성 거동을 하게 되면 탄성거동을 하는 경우보다 부재력이 작아지므로 일반 구조물의 경우 이를 고려하기 위하여 부재 설계시 탄성해석으로 구한 탄성부재력을 응답수정계수로 나눈 값이 지진에 대한 설계부재력이 되며 설계자는 이 설계 부재력을 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토해야 한다.

표 22. 응답수정계수(R)

구분	기둥	보	비고
철근콘크리트 부재	3	3	
강 부재 또는 합성부재	5	5	

- 내진 성능을 갖도록 설계하는 경우에는 탄성해석과 탄소성해석을 필요에 따라 선택할 수 있다.
- 탄성해석을 수행하는 경우에는 계산 결과를 응답수정계수로 나눠줌으로써 탄성해석만으로 소성변형까지도 고려할 수 있다.
- 탄소성해석을 수행하는 경우에는 계산결과를 그대로 사용하고 응답수정 계수는 고려하지 않아야 한다.

1.4.3 응답변위법

(1) 개요

지진 발생시에 생기는 지진변위에 의한 지진토폰 및 지하 지중구조물과 주변지반관계에서의 경계조건을 적절히 모델링하여 정적으로 계산하는 방법을 「응답변위법」이라고 한다. 구조물의 모델링은 지반반력계수로 지지된 뼈대구조요소를 사용하며 지진하중은 지하구조물 구체에 가장 불리한 응력, 변위 그 밖의 영향이 발생되도록 작용시킨다.

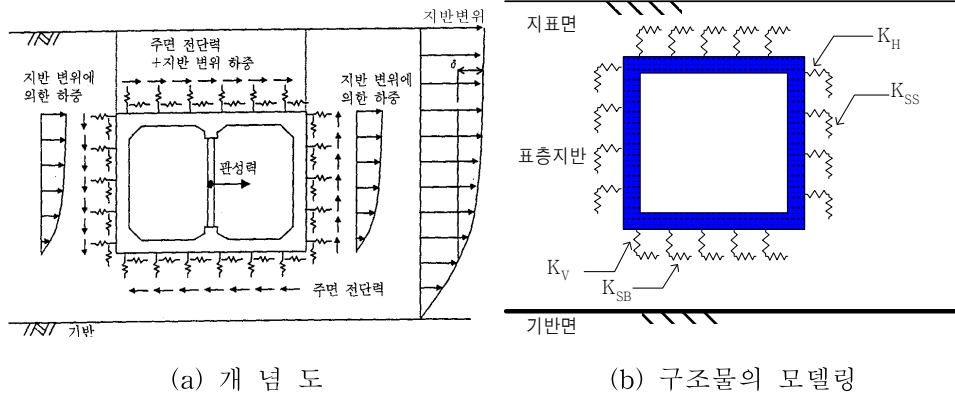


그림 13. 응답변위법의 개념도 및 모델링방법

(2) 해석절차

응답변위법을 사용하여 지하구조물의 내진설계를 위한 해석절차는 <그림 14>과 같다. 먼저 단면이 설정된 후 지반조건에 따른 지진계수를 산정하고 이에 따라 지반의 최대 변위진폭을 결정한다. 또한 지반조건에 따라 지반반력계수를 산정하고 설정된 단면의 상시하중과 지진시 하중에 의해 단면력을 계산한다. 계산된 단면력과 상시하중에 의한 설계 단면력의 비교를 반복함으로써 최적화된 단면을 산정한다.

지반의 변위진폭 산정시 이용되는 기반면에서의 설계응답속도는 기존의 가속도 응답스펙트럼을 속도 응답스펙트럼으로 변환시켜 사용한다.

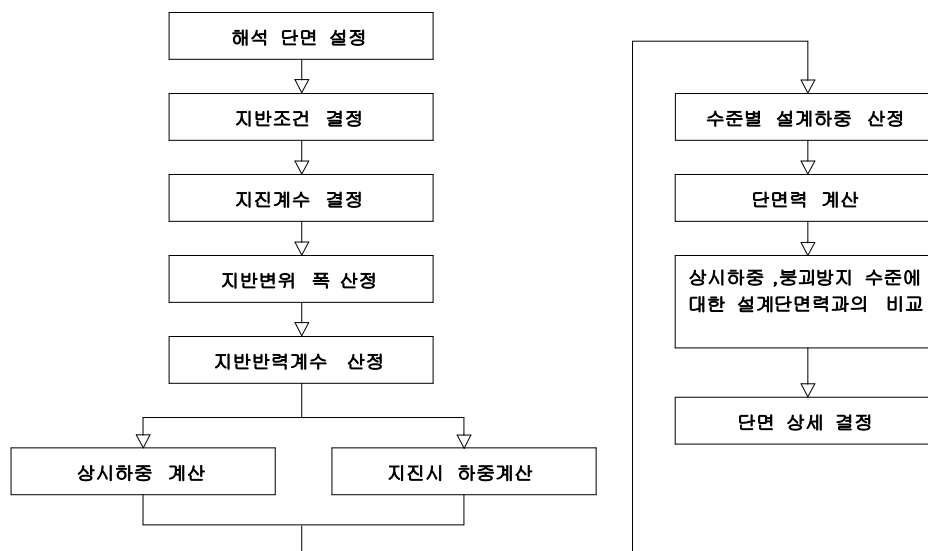


그림 14. 응답변위법의 해석절차

1.4.4 시간이력해석법

시간이력 해석법은 앞서 기술한 바와 같이 상세한 검토가 필요하거나 지반조건, 구조물 조건이 복잡한 경우 지반과 구조물의 상호작용이 필요한 경우에 사용되며 참고로 내진해석절차 적용 사례는 아래 <그림 15>와 같다.

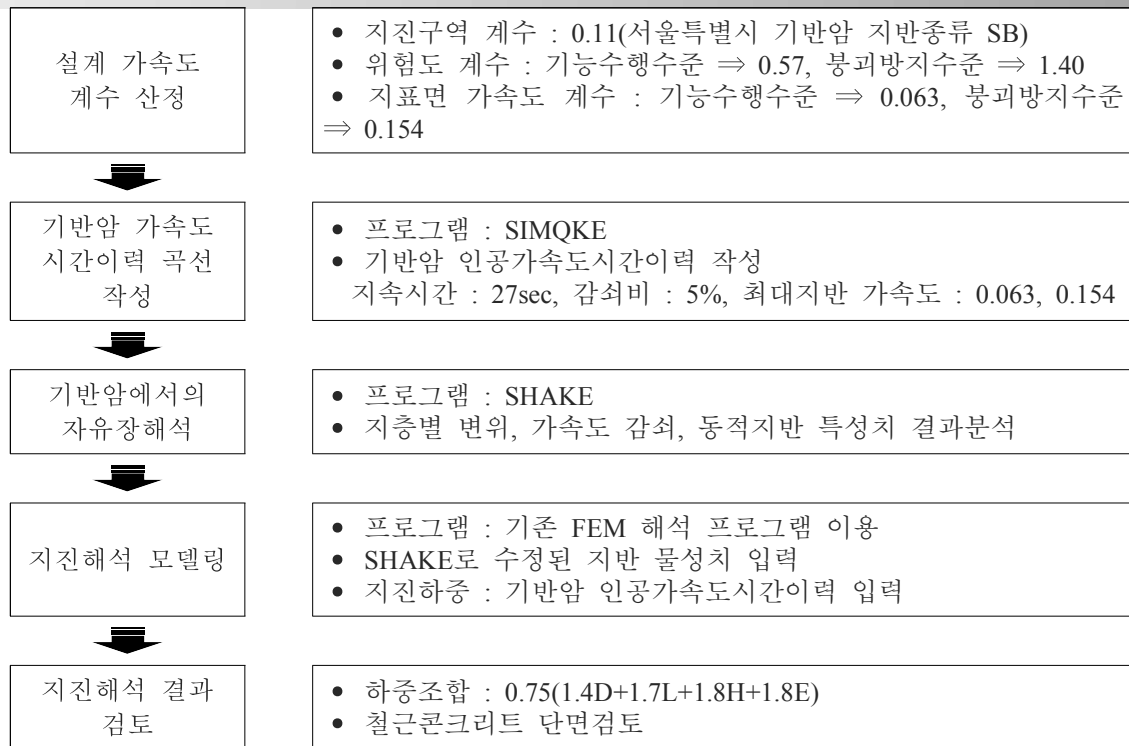


그림 15. 시간이력 해석법에 의한 내진해석절차(예)

1.4.5 하중조합

「철도설계기준(노반편) 제7장 지하구조물」 기준을 적용하다.

- 지진시 상태에 대한 하중조합은 다음과 같다.

$$U = 1.0(D + E + H + Q)$$

여기서, D : 고정하중

E : 지진하중

H : 토압

Q : 수압 및 부력

1.5 철도 지하구조물의 내진설계 개념

이전까지 지하구조물의 내진설계 개념은 대부분 「도시철도 내진설계기준(국토해양부, 2009)」에 제시된 대로 기능수행수준 및 붕괴방지수준으로 구분하여 하중조합계수를 적용하였으나 「제7장 지하구조물」에서는 내진설계시 기능수행수준은 반영하지 않고 붕괴방지수준에 기초를 두고 있으므로 본 해설에서는 붕괴방지수준으로만 적용하였다.



해설 2. 교량하부 및 기초 내진설계

1. 일반사항

1.1 적용범위

이 해설은 철도 선로상에 건설하는 지간 150m 이하의 철도교량설계에 적용하는 것을 원칙으로 하며, 이 편람에서 다루어지고 있는 철도교량의 형식에 국한하여 적용하지만 유사한 철도교량형식 또는 철도교량형식과 관계없이 공통으로 적용 가능한 범주에서 준용하도록 한다. 또한, 이 편람보다는 철도설계기준(노반편), 관련 시방서 및 지침이 더 우선하며, 여기에 기술된 내용은 설계실무자의 보조자료로서 활용함을 목적으로 한다.

2. 내진설계 기본방침

2.1 목적

본 해설에서 사용되는 설계지진운동 및 설계하중은 철도교량의 정상수명 동안 그 크기를 초과할 확률이 매우 낮도록 산정되어 있다. 이러한 설계하중에 견딜 수 있도록 설계되고 철도설계기준의 규정에 명시된 상세 설계지침에 따라 건설된 철도교 부재들은 지진에 의한 지반진동에 의해 일부 부재가 손상을 입을 수 있으나 전체적으로는 붕괴될 확률이 매우 낮아야 한다. 내진설계기준의 개발시 사용된 기본 원칙은 다음과 같다.

- (1) 국내의 경우와 같은 중·소규모의 지진 발생 시에는 구조부재들이 탄성영역 내에서 저항하여 심각한 손상을 받지 않아야 한다.
- (2) 설계과정에는 실제 지진에 의해 발생하는 지반진동이 사용된다.
- (3) 비교적 큰 규모의 지진에 의한 지반진동에 의해서도 철도교의 전부 또는 일부가 붕괴되어서는 안되며, 가능하면 지진에 의한 피해의 예측이 가능하고 피해조사와 보수를 위해 현장접근이 가능하도록 설계, 시공한다. 즉 내진설계 규정의 목적은 열차의 안정성을 확보하고 잠재지진에 의한 사용성의 손실과 피해를 최소화하는데 있다. 이를 위하여 지진의 위험도는 국내에서도 지역에 따라 차이가 나므로 설계 목적상 남한의 전지역은 가속도계수(acceleration coefficient, A)에 의거 2개의 지진위험구역으로 나누고 이에 따라 2개의 내진등급(seismic performance category)을 설정하고 각 내진등급에 적합한 해석 및 설계 기법을 적용하도록 하였다. 기본적으로 모든 철도교는 지진이 발생 동안이나 그 직후에도 정상적인 기능을 발휘하도록 설계하여야 한다.

2.2 내진설계의 기본개념

우리나라의 경우 내진설계기법은 그간 지진에 의한 파손시 큰 피해가 유발되는 댐이나 원자력 발전소 건물 등에 한해서 간헐적으로 사용되어 오다가 1978년 홍성지진 및 1995년 일본의 고베지진 이후 내진설계에 관한 관심이 급격히 증대되었다. 최근에는 한반도의 지진활동과 동적해석을 위한 최대 지반가속도값 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며 1988년에 건축구조물 설계시의 내진설계규정이 대한건축학회에서 처음으로 제정되었다. 토목분야에서는 1991년 고속전철 사업기획단에서 서울-부산간 고속철도 건설을 위하여 내진설계가 포함된 시방서를 처음 제정하였으며, 1992년 도로교 표준시방서에 철도교량의 내진설계 규정을 새로이 도입하였다. 한편, 1996년에는 콘크리트 표준시방서에 콘크리트구조물의 내진상세 규정을 새로이 도입하였으며, 1999년 철도설계기준(철도교편)에서 내진설계규정을 포함시켰다.

새로규정된 철도설계기준 노반편(2011)의 내진설계규정은 국토해양부의 연구과제 “내진설계기준연구(Ⅱ)”(1997. 12.)에서 제시된 내진설계성능기준 및 기타 연구결과 중 현재 수준에서 인정할 수 있는 일부 규정을 현재의 설계기준체계에 맞도록 채택하여 제정되었다. 따라서 현재의 내진설계지준은 다음의 개념에 기초를 두고 있다.

- (1) 인명피해를 최소화 한다.
- (2) 지진시 철도교량부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지한다.
- (3) 지진시 가능한 한 철도교량의 기본적인 기능은 발휘할 수 있게 한다.
- (4) 철도교량의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 매우 적다.
- (5) 설계기준은 남한 전역에 적용될 수 있다.
- (6) 내진설계규정을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

이러한 개념을 구현하기 위해서는 낙교방지가 확보되어야 하며, 낙교방지는 가능하면 교각의 연성거동에 의한 연성과피메커니즘을 유도하여 확보하고, 그렇지 않은 경우 낙교방지 대책(전단키, 변위구속장치 등)을 제시하여 확보하여야 한다. 또한, 필요한 경우 지진격리시스템을 설치할 수 있다.

2.3 내진성능의 확보방안

2.3.1 붕괴방지 방안

철도교의 내진설계는 구조물의 동적거동에 대하여 각 구조부재가 저항하여 전체적인 철도교의 붕괴를 방지하는 것으로 크게 두 가지 개념으로 구분할 수 있다.

첫째는, 구조물에 작용하는 지진력에 저항할 수 있도록 구속을 주거나 단면의 강성을 증가시키는 방안이며, 두 번째는 구조물의 주기를 크게 하거나 감쇠를 증가시켜서 지진하중의 영향을 감소시키는 방안, 즉 지진격리 방안(seismic isolation)을 사용하는 것이다.



구조물의 고유주기를 길어지게 하는 방법은 응답변위(displacement response)를 증가시키는 대신에 응답가속도(acceleration response)를 현저히 감소시켜 지진력의 크기를 줄이는 방법이 있으며, 이 경우 과도한 변위에 의한 사용성 확보 및 낙교나 이탈방지를 위한 대비가 강구되어야 한다. 인위적인 감쇠장치를 사용하는 방법은 구조물의 감쇠율을 증가시켜 응답변위와 응답가속도(acceleration response)를 동시에 감쇠시켜 지진력의 크기를 줄이는 방법으로 감쇠장치(damper)의 효과가 구조해석에 의해 확실히 검증되는 경우에 적용되며 감쇠 장치 자체의 사용성, 내구성 등에 대한 검토가 필요하다.

2.3.2 일반적인 방안

(1) 1점 고정단 사용법

고정단을 1개소에 두는 방안으로 철도교가 긴 경우에는 지진에 의한 수평력이 고정단 교각 1개소에 집중되므로 교각 및 기초가 비대해지므로 공사비가 증가된다. 고정단을 1개소 사용하기 위하여 철도교량의 연장을 작게 계획할 수 있다. 고정단 교량 받침으로 지진에 의한 수평력을 지지하지 못할 경우 전단키를 설치하여 수평력을 지지하게 된다.

(2) 다점 고정단 사용

고정단 1개소로 지진수평력을 저항하지 못하는 경우 다점 고정단을 적용할 수 있다. 교각의 높이가 작은 경우에는 온도, 크리프나 건조수축의 영향이 크기 때문에 적용하기 곤란하며 대부분 상대적으로 유연한 강성을 갖는 장대 교각에서 적용이 가능하다.

(3) 평상시는 1점 고정단, 지진시는 다점 고정단 사용

온도나 크리프, 건조수축등의 천천히 발생하는 변위에는 저항하지 않지만 지진같은 충격에는 고정단 역할을 하는 충격전달장치(STU, Shock Transmission Units)를 적용할 수 있다. 그러나, 기본적으로 지진시에는 개수가 많아져 주기가 짧아지므로 1점 지지 보다 전체 지진력은 커지므로 지진력 분산의 효율성은 경제성과 함께 검토되어야 한다.

(4) 상부와 교각을 일체로 계획

다점고정단을 사용하는 것과 마찬가지로 개념으로서 높이가 높은 장대교각에서 주로 적용가능하다. 교량의 시공법과 밀접한 관계가 있다.

2.3.3 주기나 감쇠조절방안

(1) 지진 격리받침

기초로부터 전달되는 지진력을 상부까지의 전달 경로를 분리하는 받침으로 받침의 고유기능에 주로 이력감쇠(hysteresis damping)나 마찰감쇠(frictional damping) 기능

이 추가된다. 대표적인 받침으로는 탄성고무받침(rubber bearing), 납고무받침(LRB, Lead Rubber Bearing), 고감쇠 고무받침(HDRB, High Damping Rubber Bearing), 기타 마찰판(P-FBI, R-FBI, EDF, SR-F 시스템등)을 이용한 받침 등이 이에 해당한다.

(2) 외부 감쇠장치(damper)

구조물의 진동응답을 줄이기 위해 지진으로부터 구조물에 들어오는 에너지를 흡수하는 장치로 받침과 별도로 설치하며 이력감쇠기(hysteresis damper), 점성감쇠기(viscous damper), 마찰감쇠기(frictional damper), 동조질량 감쇠장치(TMD, Tuned Mass Damper), 동조액체 감쇠장치(TLD, Tuned Liquid Damper), 능동질량 감쇠장치(AMD, Active Mass Damper) Hybrid 감쇠기(HMD=TMD+AMD) 등이 이에 해당한다.

3. 내진설계의 일반사항

3.1 설계지반의 운동

3.1.1 일반사항

- (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 방향 성분으로 정의되며, 그 세기와 특성은 동일하다고 가정할 수 있다.
- (5) 모든 점에서 똑같이 가지는 것이 합리적일 수 없는 특징을 갖는 철도교 건설부지에 대해서는 지반운동의 공간적 변화모델을 사용해야 한다.

3.1.2 지진구역

- (1) 지진재해도 해석결과에 근거하여 남한 전지역을 2개의 지진구역으로 설정하였으며, 각 지진구역별 구역계수(Z)는 <표 23>에 표시된 값과 같다.



표 23. 지진구역계수

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

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

- (2) 구역계수는 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년에 해당하는 지진지반운동의 최대 지반가속도 값을 중력가속도(g)로 나눈 값으로 무차원량으로 표시된다.
- (3) 단, <표 23>의 지진구역에서 구분된 행정구역의 경계를 통과하는 철도교에는 상위 지진구역계수를 적용한다.

3.2 내진등급과 설계지진수준

3.2.1 내진등급

철도교의 내진등급은 구조물의 중요도를 고려하여 <표 24>와 같이 분류한다.

표 24. 철도의 내진등급

내진등급	구분 내용	설계지진의 평균재현주기
내진 1등급	설계지진 발생 후에도 교통수단을 유지하기 위한 중요시설물	1000년 (단 열차주행안전성 검토는 100년)
내진 2등급	내진1등급에 속하지 않는 철도구조물	500년

3.2.2 철도의 내진설계 시 검토해야 할 사항

- (1) 기본적인 검토사항
- ① 내진등급 여부
 - ② 철도가 있는 지역 및 지반의 분류
 - ③ 지진계수 결정
 - ④ 재현주기별 지진 위험도계수결정
 - ⑤ 설계지진의 응답스펙트럼 결정

3.2.3 가속도 계수

- (1) 가속도계수(A)는 지진구역별로 내진등급에 따른 최대지진지반가속도의 크기를 나타내기 위한 계수로서 구역계수(Z)에 지진위험도계수(I)를 곱함으로써 구할 수 있으며, 무차원으로 표시된다. 내진등급과 지진구역에 따른 가속도계수는 <표 24>과 같다.
- (2) 따라서 내진등급과 지진구역에 따른 최대지진지반가속도의 크기는 가속도계수(A)에 중력가속도(g)를 곱한 값과 같다.
- (3) 지진위험도계수(I)는 각 내진등급에 따른 평균재현주기별로, 500년 평균재현주기에 대한 최대지진지반가속도의 비를 나타내며 <표 25>와 같다.

표 25. 지진 위험도계수, I

재현주기	100년	500년	1,000년
위험도 계수	0.57	1.0	1.4

- (4) 가속도계수(A)는 지진구역별로 내진등급에 따른 최대지진지반가속도의 크기를 나타내기 위한 계수로서 구역계수(Z)에 지진위험도계수(I)를 곱함으로써 구할 수 있으며, 무차원으로 표시된다.

$$A = Z \cdot I \quad (43)$$

- (5) 따라서 내진등급과 지진구역에 따른 최대지진지반가속도의 크기는 가속도계수(A)에 중력가속도(g)를 곱한 값과 같다.

3.2.4 지반운동 표현방법

- (1) 설계지반운동은 원칙적으로 그 지역의 지반조건을 고려한 5% 감쇠비를 적용한 표준 설계응답스펙트럼으로 표현한다. 그러나 지역 특성을 잘 나타내는 합리적인 근거가 있는 응답스펙트럼의 사용도 가능하다.
- (2) 건설부지에서 기록된 계측지진을 수정·보완한 가속도-시간이력곡선이나 설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공 가속도-시간이력곡선도 사용할 수 있다.

3.3 지반의 종류

지진시 구조물의 동적거동은 기초지반의 상태에 따라 응답특성이 달라지므로 지반의 영향을 고려하여야 한다. 지반의 영향을 고려하기 위하여 지반의 특성에 따라 지반을 분류하고 이에 따른 지반계수를 설정하여 설계응답 스펙트럼에 반영하여야 한다.

(1) 지반의 분류

- ① 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 <표 26>과 같이 I, II, III, IV, V의 5종류로 분류한다.



- ② 지반종류 V는 별도로 부지에 대한 특성조사를 할 필요가 있는 지반으로서 다음의 경우에 속하는 지반을 말한다.
- 가. 액상화가 일어날 수 있는 지반, 매우 민감한 점토지반, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 지반과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
 - 나. 이탄이나 유기질 점토층의 두께가 3m를 초과하는 지반
 - 다. 점토층의 두께가 8m를 초과하고 소성지수(PI)가 75보다 큰 경우의 매우 높은 소성을 가진 점토지반
 - 라. 연약 또는 중간굳기의 점토층의 두께가 35m를 초과하는 지반
- ③ 지반종류를 결정할 만큼 지반의 물성값을 충분히 알 수 없는 경우에는 III종류가 사용된다. 발주자가 해당 지역의 지반종류를 IV 혹은 V로 판정하거나, 지질학적 자료에 의해 IV나 V로 판정되는 경우를 제외하고는 IV나 V로 가정할 필요가 없다.

표 26. 지반특성

지반 종류	지반종류의 호칭	30.0 m에 대한 평균 지반 특성		
		평균전단파속도 ⁽²⁾ $\overline{V_s}$ (m/sec)	평균표준관입시험, \overline{N} (\overline{N}_{CH} 비점착성점토) (타격횟수/300 mm)	평균비배수 전단강도 ⁽⁴⁾ $\overline{s_u}$ (kN/m ²)
I	경암지반 보통암지반	>760	-	-
II	매우 조밀한 토사, 또는 연암지반	360~760	>50	>100
III	견고한 토사지반	180~360	15~50	50~100
IV	연약한 토사지반 ⁽¹⁾	<180	<15	<50
V	부지의 특성 평가가 필요한 지반			

※ (1) 지반종류IV에는 소성지수 $PI > 20$, 함수비 $w_{mc} \geq 40\%$, 그리고 비배수전단강도

$s_u < 24$ (kN/m²)의 연약점토층이 30m 이상인 지반도 포함된다.

(2) 평균전단파속도, $\overline{V_s}$ 는 다음의 공식에 따라 결정된다.

$$\overline{V_s} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

여기서, d_i : i 번째 토층의 두께, m

V_{si} : i 번째 토층의 전단파속도, m/sec

(3) 평균현장표준관입저항, \overline{N} 과 점착력이 없는 토층에 대한 평균표준관입저항, \overline{N}_{CH} 는 다음
식에 따라 정해진다.

$$\overline{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad \overline{N}_{CH} = \frac{d_s}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}}$$

여기서, d_i : i 번째 토층의 두께, m

d_s : 상부 30.0 m에 있는 비점착성 토층의 총 두께, m

N_i : 공인된 표준에 따른 토층의 표준관입저항

(4) 평균비배수전단강도, $\overline{s_u}$ 는 다음 공식에 따라 결정된다.

$$\overline{s_u} = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{s_{ui}}}$$

여기서, d_c : 상부 30.0 m에 있는 점착성 토층의 총 두께 (30.0- d_s) m

s_{ui} : 250 kN/m²를 초과하지 않는 공인된 표준에 따른 비배수전단강도



(2) 지반의 계수

<표 26>의 지반종류에 따른 지반계수는 <표 27>과 같다.

표 27. 지반계수

지반종류 지반계수	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

4. 내진해석 및 설계

4.1 내진설계

4.1.1 개요

(1) 탄성지진력은 「해설 2의 4.2 내진해석」에 규정한 값으로 한다.

- ① 설계지진력산정시에는 「4.1.5항」에 규정된 하중경우에 대하여 각각 저항하도록 설계하여야 한다.
- ② 필요에 따라서 낙교방지장치나 기타 지진력 저감장치의 사용을 허용한다. 그러나 이러한 장치의 설치를 위해서는 합리적인 해석을 통한 필요성의 입증과 자세한 설계 검토가 요구된다.
- ③ 기초 및 하부구조의 경우에는 규정을 추가적으로 만족하여야 한다.

4.1.2 해석 방법

- (1) 철도교교량의 내진해석방법은 「해설 2의 4.2 내진해석」의 규정된 단일모드 스펙트럼 해석법(single mode Spectral analysis method)과 다중모드 스펙트럼 해석법(multi mode spectral analysis method) 중에서 설계자의 판단에 따라 타당한 방법을 사용하여 선형탄성해석을 하는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 단일모드 스펙트럼 해석법은 철도교 길이가 길지 않고, 질량이나 강성의 분포변화가 심하지 않고, 기하학적 형상이 단순한 정교 철도교에 대해서 적용할 수 있다.
- (3) “나”항의 조건을 만족하지 않는 철도교에 대해서는 다중모드 스펙트럼 해석법을 사용하거나 보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있는 해석법을 사용하여야 한다.
- (4) 보다 정밀한 해석을 필요하다고 판단되는 철도교에 대해서는 시간이력해석법 또는 기타 공인된 해석법을 사용하여 선형 혹은 비선형 해석을 수행할 수 있다.
- (5) 수평방향의 설계지반운동은 두 개의 직교축에 따라 독립적으로 고려하여 조합하며, 각 방향성분은 세기와 특성이 동일하다고 가정한다.
- (6) 단경간교 및 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교는 상세한 내진해석을 수행하지 않을 수도 있다. 이 경우에 단경간교의 설계는 「4.1.7항」이 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교는 「4.1.8항」의 규정을 따른다.

4.1.3 입력 지반운동의 선택

해석 및 설계에 사용되는 입력지반운동은 「해설 2의 3.2항」에 제시된 내진등급별 평균재현주기를 가진 지반운동을 사용한다.

4.1.4 탄성력 및 탄성변위

- (1) 내진 I등급교와 지진구역I에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 탄성력과 탄성변위는 「4.1.5항」에 규정한 해석방법을 사용하여 두 개의 수평 직교축에 대하여 독립적으로 해석하고 「4.1.5항」에 규정한 방법으로 조합하여야 한다.
- (2) 두 개의 직교축은 철도교의 종방향축과 횡방향축으로 하는 것이 표준적이지만 설계자가 임의로 정할 수 있다. 곡선교는 양측 교대를 연결하는 현을 종방향으로 정할 수 있다.

4.1.5 직교지진력의 조합

부재의 각각의 주축에 대한 탄성응답은 「4.1.4항」에 규정한 방법으로 구한 탄성지진력을 다음과 같이 조합하여 사용한다.

- (1) 하중경우 1 ... 종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 횡방향축의 해석으로부터 구한 종방향탄성지진력(절대값)의 30 %를 합한 경우
- (2) 하중경우 2 ... 횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 종방향축의 해석으로부터 구한 횡방향 탄성지진력(절대값)의 30 %를 합한 경우

4.1.6 응답수정 계수

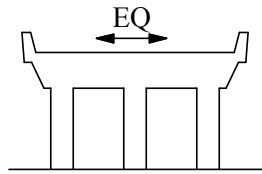
- (1) 구조물의 비탄성거동을 허용하기 위하여 응답수정계수를 사용할 수 있다. 그러나 응답수정계수를 적용하기 위해서는 구조물의 연성요구도를 만족시킬 수 있도록 설계하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 응답수정계수를 하부구조에는 1, 연결부에는 0.8을 넘지 않게 적용해야 한다.
- (2) 각 요소에 대한 응답수정계수 R 은 <표 28>에 표시된 값으로 한다. 단, 하부구조의 경우에는 모멘트에만 적용하며, 전단력과 축력에는 적용하지 않는다.
- (3) 응답수정계수 R 은 하부구조의 양 직교축방향에 대해 모두 적용한다.
- (4) 벽식교각의 약축방향은 철도설계기준(철도교편) 허용응력설계법의 설계규정을 적용하여 설계할 수 있다. 이때 응답수정계수 R 은 단주의 값을 적용한다.
- (5) 응답수정계수를 적용한 설계력을 대신하여 합리적인 소성힌지해석을 통한 해석결과가 사용될 수도 있다.



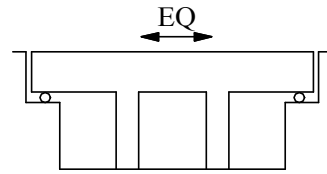
표 28. 응답수정계수, R

하부구조	R	연결부 ¹⁾	R
벽식교각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝가구(pile bent)		상부구조의 한 지간내의 신축이음	
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3		0.8
2. 한 개 이상의 경사 말뚝을 사용한 경우	2		
단주(single column)	3	기둥, 교각 또는 말뚝가구(pile bent) ²⁾ 와 코핑(cap beam) 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝가구(pile bent)		기둥 또는 교각과 기초	1.0
1. 수직말뚝만 사용한 경우	5		
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3		
다주가구(multi column bent)	5		

- ※ 1) 연결부는 어떤 구조성분에서 다른 구조성분으로 전단력과 축력을 전달시키는 기구를 의미하며, 전단키나 철도교받침으로 구성된다. 이 표에서 기술된 응답수정계수(R)은 구속된 방향으로 작용하는 탄성지진력에 대하여 적용한다.
- 2) 말뚝가구는 코핑에 말뚝이 직접 연결된 구조로서 교각과 기초의 역할을 동시에 수행하는 하부 구조를 말한다.

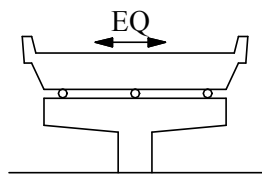


$R=5$ (교축직각 방향)

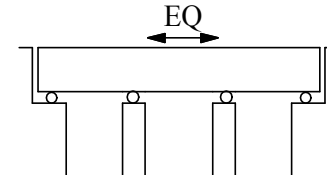


$R=5$ (교축방향)

(a) 종방향모멘트 저항시스템을 갖는 횡방향 다주

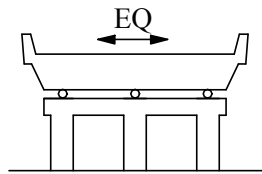


$R=3$ (교축직각 방향)

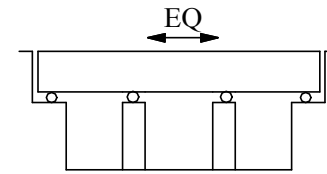


$R=3$ (교축방향)

(b) 종방향 편지지시스템을 갖는 횡방향 단주

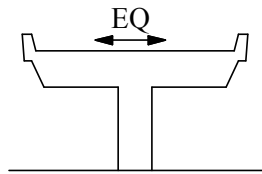


$R=5$ (교축직각 방향)

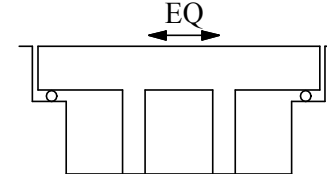


$R=3$ (교축방향)

(c) 종방향 편지지시스템을 갖는 횡방향 다주



$R=3$ (교축직각 방향)



$R=5$ (교축방향)

(d) 종방향모멘트 저항시스템을 갖는 횡방향 단주

그림 16. 방향별 응답수정계수

위의 <그림 16>의 (c)의 교축방향과 (d)의 교축직각방향에 대하여 $R=3$ 을 사용하는 것에 대하여 다수의 기둥의 캔틸레버로서 작용하는 경우에 지진하중이 작용하여도 다수의 기둥이 동시에 소성힌지가 발생하지 않을 것이며 기둥과 연결된 코핑 또는 상부구조의 횡방향 강성으로 부정정구조로 거동하게 되어 $R=5$ 를 사용하여도 좋다는 의견이 있을 수 있다. 그러나 아직 연구중인 사항으로 연구 결과에 따라 수정되어야 한다.



4.1.7 설계지진력

(1) 단경간교

이 규정은 단경간교의 상부구조와 하부구조의 연결부 설계에만 적용된다.

상부구조와 교대 사이의 연결부에 대하여 다음과 같이 산정되는 수평지진력이 작용한다고 보고, 종방향 및 횡방향에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다.

단경간교의 설계지진력

$$= \text{고정하중 반력} \times \text{가속도계수}(A) \times \text{지반계수}(S) \quad (44)$$

여기서,

A : <표 24>에 나타난 값으로 내진등급과 지진구역에 따른 가속도계수

S : <표 27>에 나타난 값으로 지반종류에 따른 지반계수

(2) 내진 I 등급교

① 구조부재 및 연결부의 설계지진력

가. 이 절에서 구하는 설계지진력은 다음의 각 경우에 대하여 적용한다.

- 상부구조, 상부구조의 신축이음 및 상부구조와 하부구조 상단 사이의 연결부
- 하부구조 상단으로부터 기둥이나 교각의 하단까지(단 기초, 말뚝머리 및 말뚝은 포함하지 않는다.)
- 상부구조와 교대의 연결부

나. “㉠”항의 설계지진력은 「해설 2의 4.1.5항」에서 구한 탄성지진력에 「해설 2의 4.1.6항」에 규정한 응답수정계수를 적용하여 나눈 값을 사용한다.

다. “㉡”항의 각 설계지진력은 다른 설계력과 함께 철도설계기준(철도편)의 제1㉢ 구조물의 각 요소는 철도설계기준(철도편)의 공통사항편에서 지진의 영향이 포함되지 않은 각 하중조합에 의한 설계력에 대하여도 안전하여야 하며 철도설계기준(철도편)의 제6, 7, 8장의 설계규정을 만족하여야 한다.

② 기초의 설계지진력

가. 확대기초, 말뚝머리 및 말뚝을 포함하는 기초의 설계지진력은 「해설 2의 4.1.5항」에서 구한 탄성지진력을 「해설 2의 4.1.6항」에 규정된 해당하부구조(기둥 또는 교각)에 대한 응답수정계수(R)의 1/2로 나눈 값으로 한다. 단, 말뚝가구의 설계지진력은 탄성지진력을 해당 구조의 응답수정계수(R)로 나눈 값으로 한다.

나. “㉠”항의 각 설계지진력은 다른 설계력과 함께 철도설계기준(철도교편)의 제1편 공통사항편에 제시된 전체하중 조합식에 따라 조합하여 사용하여야 한다.

다. 기초의 각 요소는 철도교설계기준(철도교편)의 공통사항편에서 지진의 영향이 포함되지 않은 각 하중조합에 의한 설계력에 대하여도 안전하여야 하며 설계규정을 만족하여야 한다.

③ 교대 및 옹벽

- 가. 상부구조와 교대의 연결부(받침, 전단연결재 등)는 「해설 2의 4.1.7 (2) ①항」의 설계지진력에 저항하도록 설계하여야 한다.
- 나. 교대설계시 토압은 상시토압과 지진에 의해 발생하는 동적영향에 의한 추가적인 토압의 합력으로 설계한다.
- 다. 교대는 철도설계기준(철도교편)의 제6장의 설계규정에 따라 설계하여야 한다.

(3) 내진 II등급교

- 가. 지진구역Ⅱ에 위치한 내진Ⅱ등급교의 경우, 교량받침 등 하부구조와 상부구조의 연결부는 고정하중 반력의 20 %에 해당되는 수평지진력이 구속된 방향으로 작용한다고 보고 이에 저항하도록 설계하여야 한다.
- 나. 이 규정은 설계력을 최대탄성응답계수를 토대로 하였으므로, 만약 이 설계력이 과다하다고 판단될 때는 「해설 2의 4.1.7 (2)항」에 규정된 설계방법대로 설계력을 구하여도 좋다.
- 다. 가. 항에 규정된 이외의 철도교량, 즉 지진구역Ⅰ에 위치한 내진Ⅱ등급 교량에 대해서는 「해설 2의 4.1.7 (2)항」의 규정을 따라 설계하여야 한다.

4.1.8 설계 변위

이 절에서 정한 최소 받침 지지길이는 모든 거더의 단부에서 확보하여야 한다.

(1) 내진Ⅱ등급교

지진구역Ⅱ에 위치한 내진Ⅱ등급교의 최소 받침 지지길이(N)는 <식 (45)>에 규정된 값보다 작아서는 안된다. 단, 지진구역Ⅰ에 위치하는 내진Ⅱ등급교는 「해설 2의 4.1.8 (2)항」의 규정을 따른다.

$$N = (200 + 1.67L + 6.66H)(1 + 0.000125S^2) \text{ (mm)} \quad (45)$$

여기서,

L : 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m)

단, 지간 내에 힌지가 있는 경우의 L은 힌지 좌·우측방향의 거리인 L_1 과 L_2 의 합으로 한다.

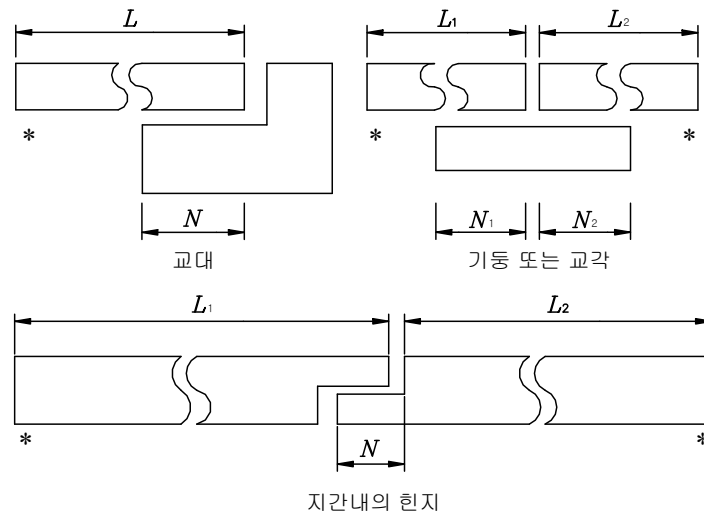
H : 다음 각 경우에 대한 높이(m)

교대 ... 인접 신축이음부의 교량상부를 지지하는 기둥의 평균높이 단경간교의 평균높이는 0으로 한다.

기둥 또는 교각 ... 기둥 또는 교각의 높이

지간 내의 힌지 ... 인접하는 양측 기둥 또는 교각의 평균높이

S : 경간의 직각방향에 대한 교각이나 교대의 사각 (。)



※ : 신축이음 또는 교량 상부구조의 단부

그림 17. 최소반침지지길이 규정에 관한 치수

(2) 내진 I 등급교

내진 I등급교의 설계지진변위는 「해설 2의 4.1.4항」에 규정된 값과 「해설 2의 4.1.8 (1)항」에 규정된 값 중 큰 값으로 한다.

4.2 내진해석

4.2.1 일반사항

(1) 이 장은 철도교의 내진해석에 대한 규정이며 다음과 같은 두 가지의 해석방법을 제시한다.

- ① 단일모드 스펙트럼 해석법
- ② 다중모드 스펙트럼 해석법

(2) 두 가지 방법 모두에 있어서 모든 고정된 기둥과 교각 또는 교대지점들은 동일시점에 있어서 동일한 지반운동을 한다고 가정한다. 가동지점에서는 이 장에서 기술된 해석으로부터 구한 변위가 「해설 2의 4.1.8항」에 규정된 최소 요구값 보다 큰 경우 이 값을 수정 없이 사용하여야 한다.

(3) 철도교의 내진해석시 같은 진동단위내에 있는 기초나 교대 등의 강성이 구조계의 동적거동에 미치는 영향이 있는 경우에는 이를 포함하여 구조해석을 실시하여야 한다.

4.2.2 탄성지진응답계수

(1) 설계하중의 결정에 쓰이는 탄성지진응답계수(C_s)는 다음과 같은 무차원의 식으로 구한다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (46)$$

여기서, A : 「해설 2의 3.2.3항」에서 규정된 가속도계수

S : 「해설 2의 3.3항」에 규정된 지반 특성에 대한 무차원의 지반계수

T : 「해설 2의 3.2.3항」이 방법인 단일모드 스펙트럼 해석법 또는 다른 적합한 방법에 의하여 결정된 철도교의 주기

다만, C_s 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

- (2) 다중모드 스펙트럼 해석법을 사용할 경우, m 번째 진동모드에 대한 탄성지진 응답계수 (C_{sm})은 다음 공식에 따라 구한다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (47)$$

여기서, T_m : m 번째 진동 모드의 주기

다만, C_{sm} 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

- (3) T_m 값이 4.0초를 넘는 구조물에 대해서 m 번째 진동모드에 대한 C_{sm} 값은 다음 공식에 따라 결정할 수 있다.

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad (48)$$

4.2.3 단일모드 스펙트럼 해석법

다음에 제시된 단일모드 스펙트럼 해석법의 절차는 교축방향과 교축직각방향 지진 운동에 대한 해석에 사용할 수 있다.

- (1) 가정된 등분포하중 P_0 에 의한 정적처짐 $v_s(x)$ 를 계산. <그림 18>

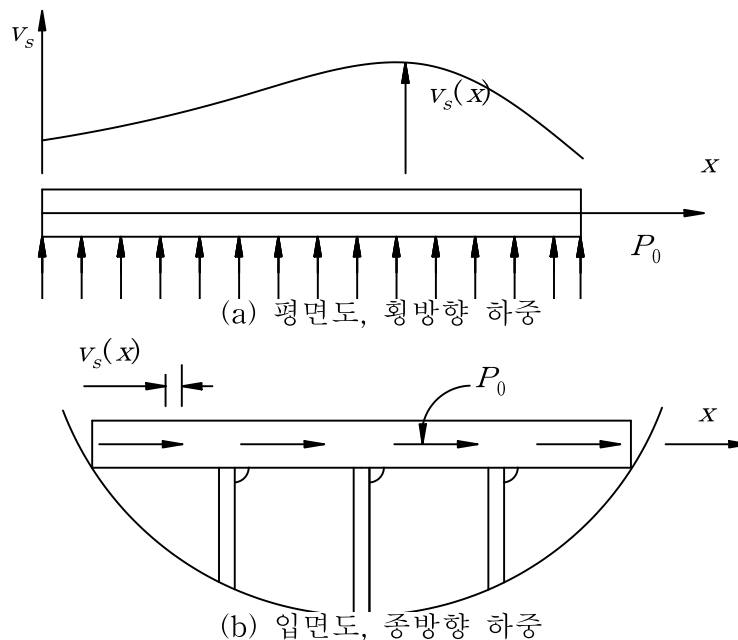


그림 18. 횡방향 및 종방향으로 가정된 등분포하중을 받는 교량



(2) [단계 2] : 다음과 같이 α, β, γ 를 계산한다.

$$\alpha = \int v_s(x) dx \quad (49)$$

$$\beta = \int w(x) v_s(x) dx \quad (50)$$

$$\gamma = \int w(x) v_s(x)^2 dx \quad (51)$$

여기서, $w(x)$: 철도교 상부구조와 상부구조의 동적거동에 영향을 주는 하부구조의 단위길이당 고정하중

(3) [단계 3] : 철도교량의 주기, T 를 계산한다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_0 g \alpha}} \quad (52)$$

여기서, g : 중력 가속도, 9.81 (m/sec²)

(4) [단계 4] : 등가정적 지진하중, $p_e(x)$ 를 계산한다.

$$p_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) v_s(x) \quad (53)$$

여기서, $p_e(x)$: 등가정적 지진하중이며 진동의 기본모드를 대표하기 위해 가하는 단위길이당 하중강도<그림 19>

C_s : 탄성지진 응답계수

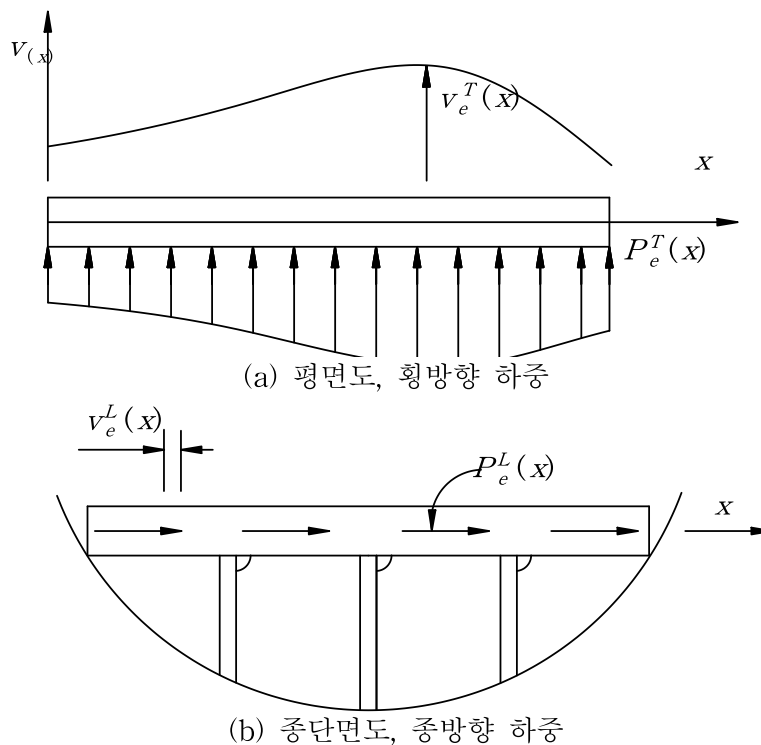


그림 19. 횡방향 및 종방향의 등가지진하중을 받는 철도교

4.2.4 다중모드 스펙트럼 해석법

(1) 일반사항

다중모드 스펙트럼 해석법은 기하학적 형상이 불규칙하여 진동의 각 모드 내에서 3개의 좌표축 방향으로 진동이 연계되는 철도교에 사용된다.

(2) 수학적 모형

철도교는 그 구조물의 강성과 관성효과를 실제에 가깝게 모형화하기 위해 적절한 연결부와 절점으로 구성된 3차원 공간 골조구조물로서 모형화해야 한다.

① 상부구조

가. 상부구조는 최소한 각 경간단부의 연결부와 지간의 1/4지점마다 절점을 가진 공간 골조 부재의 집합체로 모형화해야 한다.

나. 신축이음부와 교대의 불연속 부분도 상부구조에 포함하여야 한다.

다. 집중질량의 관성효과를 적절한 절점위치로 분배시켜야 한다.

② 하부구조

가. 중간 기둥 또는 교각들은 일반적으로, 인접 지간길이의 1/3보다 짧은 길이를 갖는 짧고 강성이 강한 기둥에 대해서는 중간 절점이 불필요하나, 길고 유연한 기둥은 기둥단부의 연결부 외에 2개의 1/3지점을 중간 절점으로 모형화하여야 한다.

나. 하부구조의 모형은 상부구조에 대한 기둥의 편심을 고려해야 한다.

다. 기둥 또는 교각하부와 교대에서의 지반은 등가의 선형스프링계수를 이용하여 모형화 할 수 있다.

③ 진동모드의 형상과 주기

고려중인 방향에 대하여 해석에 필요한 철도교량의 주기와 모드형상은 지진에 저항하는 전체 시스템의 질량과 강성을 고려하여, 이론적으로 확립된 방법에 의해 계산하여야 한다.

④ 다중모드 스펙트럼 해석

응답은 일반적으로 지간수의 최소 3배로부터 최대 25개까지의 진동모드의 영향을 고려해야 한다. 단, 해석모형의 정확도를 확보하기 위해서 질량기여도의 합이 90% 이상이 되도록 하는 것이 좋다.

⑤ 부재력과 변위

부재의 단면력과 변위는 개별 모드들로부터 각각의 응답성분(예를 들면 힘, 변위 또는 상대변위)은 CQC(complete quadratic combination)법으로 계산한다. 단, 진동수의 간격이 좁은 모드(10 %이내)를 갖는 철도교에 대해서는 전체의 최종응답을 구하기 위해서 각 모드의 기여도를 조합하거나 가중치를 부여함에 있어 더 적절한 다른 방법을 고려하여야 한다.



5. 내진설계과정

철도교의 내진설계과정은 철도교설계기준의 내진관련 규정들을 적절한 순서에 따라 적용해야 하며 다음은 내진설계 흐름도이다.

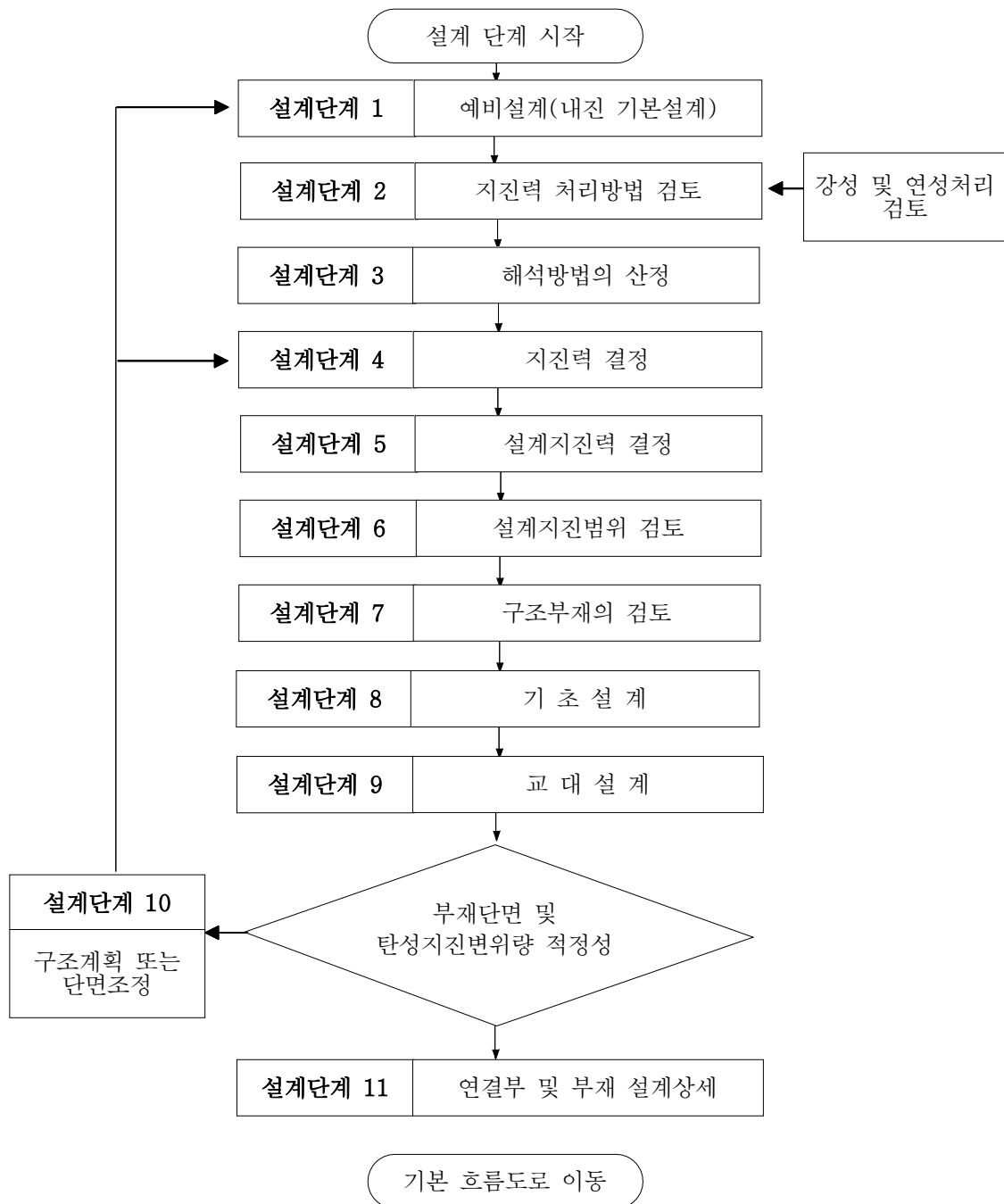


그림 20. (내진설계) 흐름도

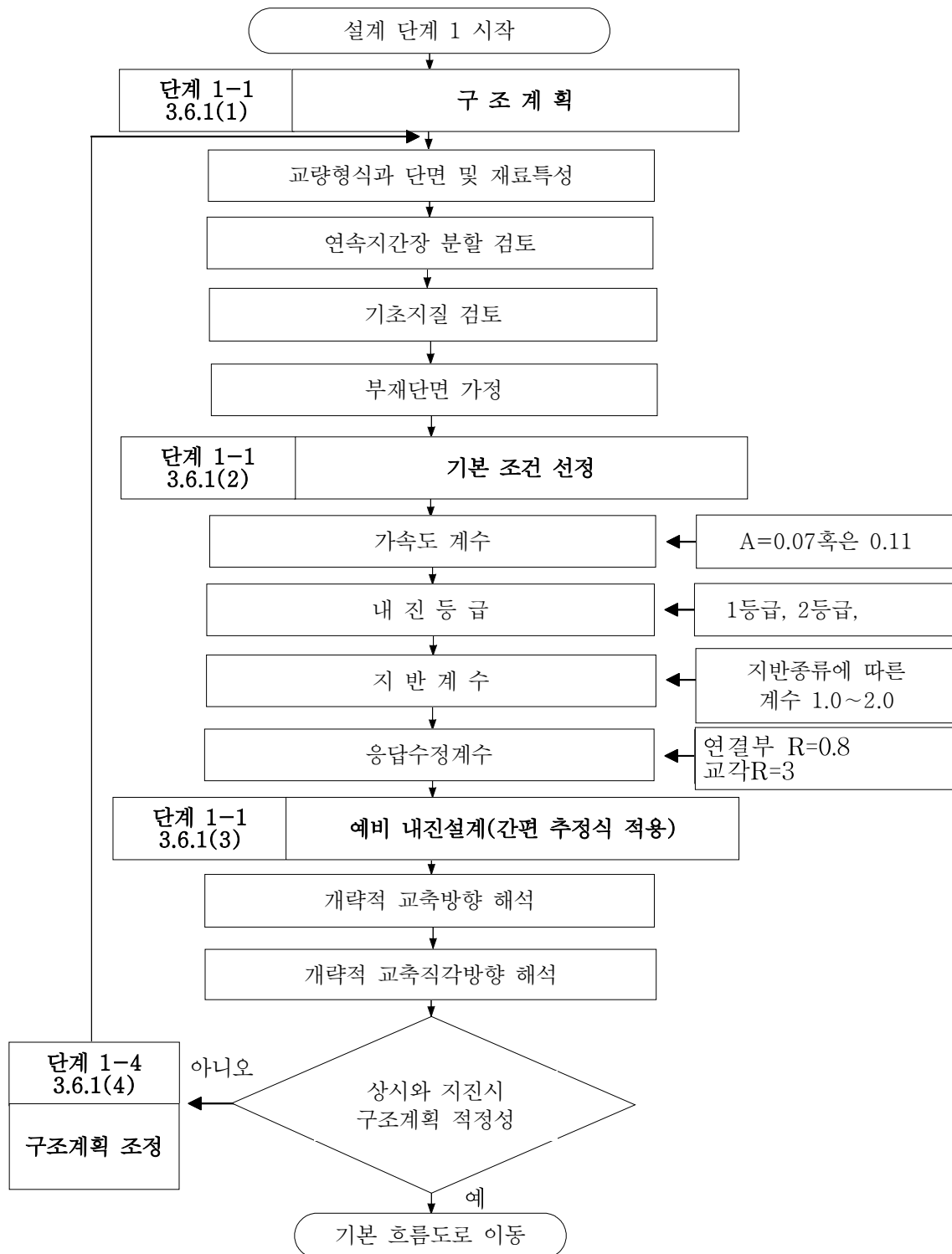


그림 21. 설계단계 1 (예비설계) 흐름도

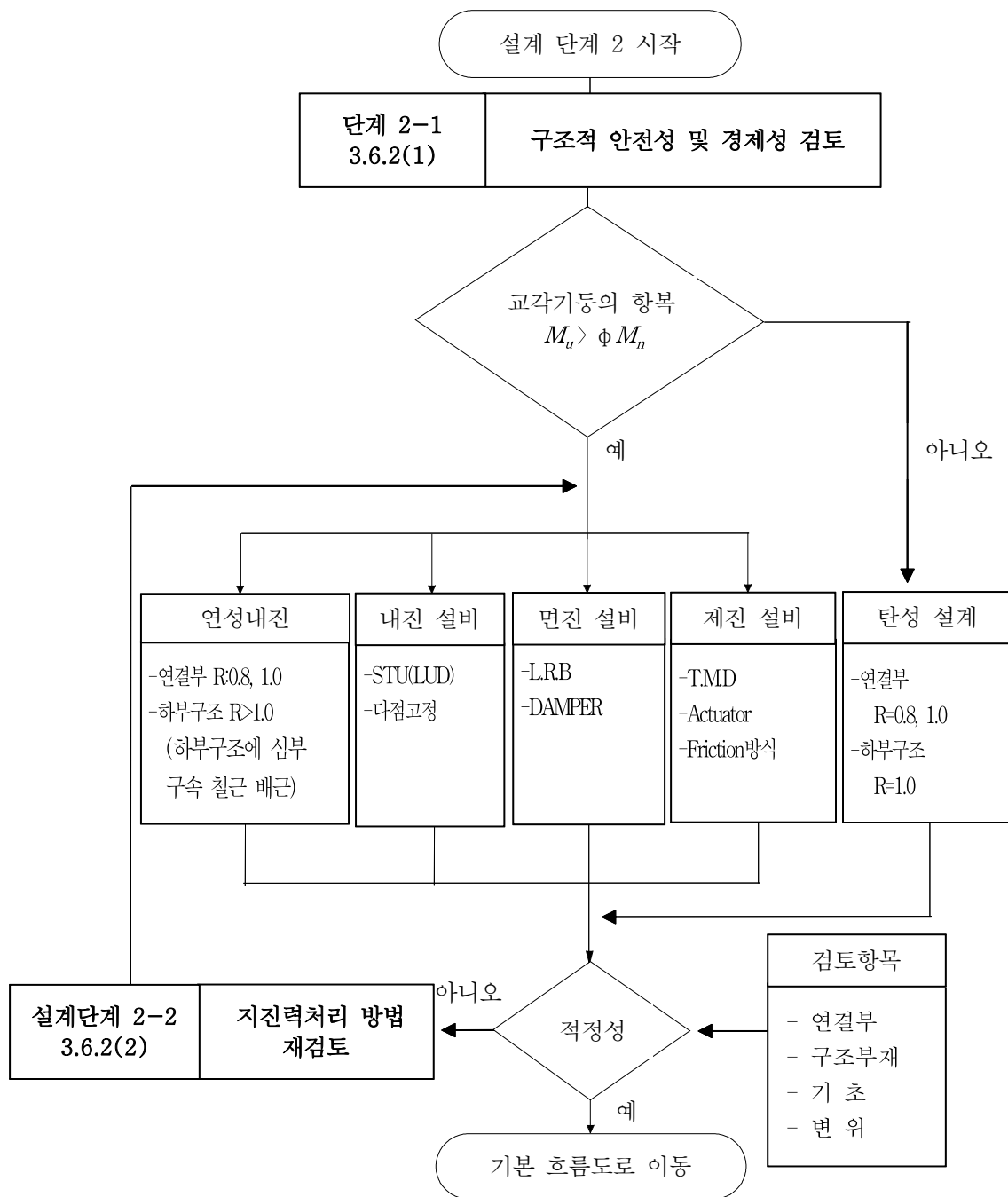


그림 22. 설계단계 2 (지진력 처리방법) 흐름도

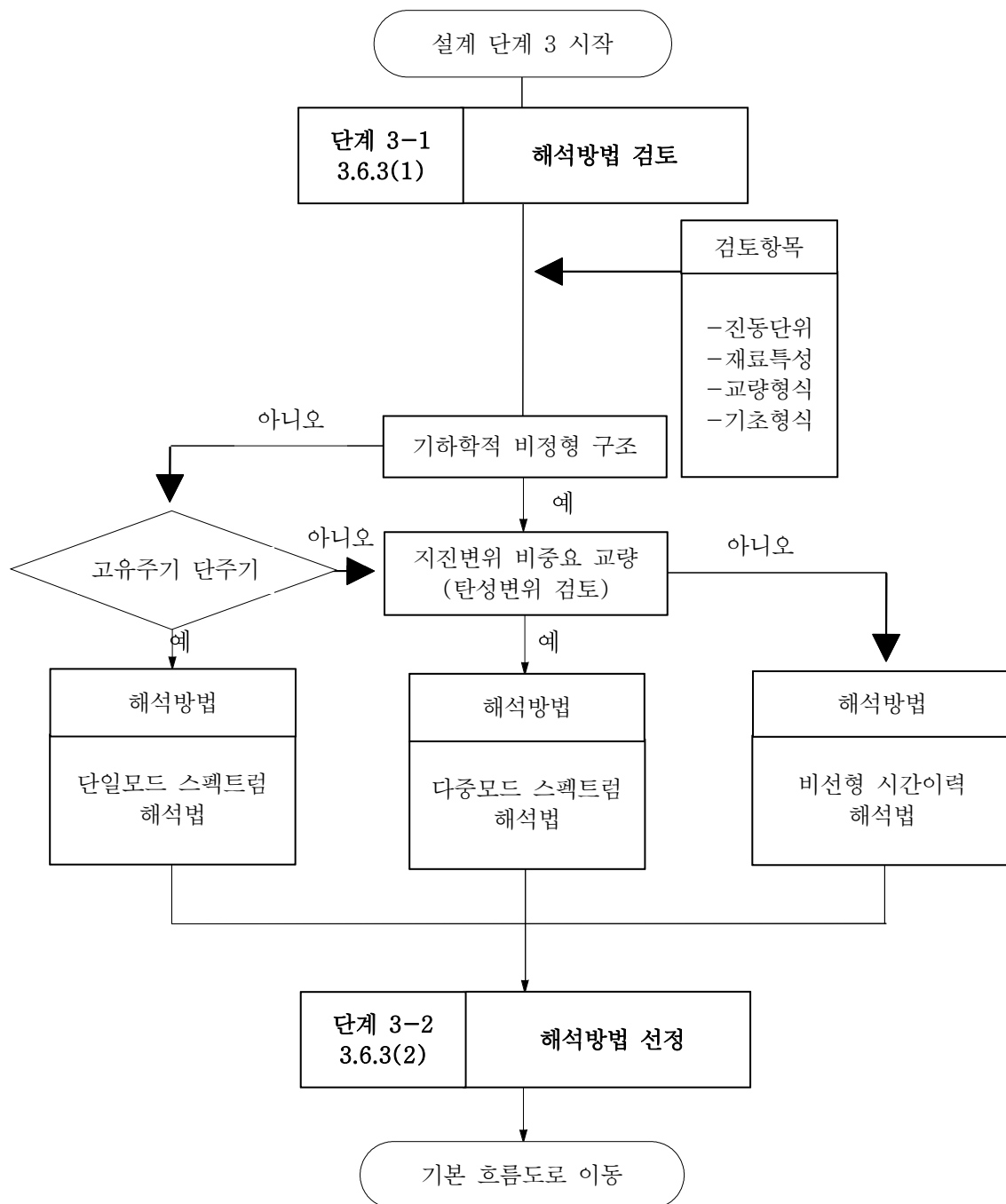


그림 23. 설계단계 3 (해석방법) 흐름도

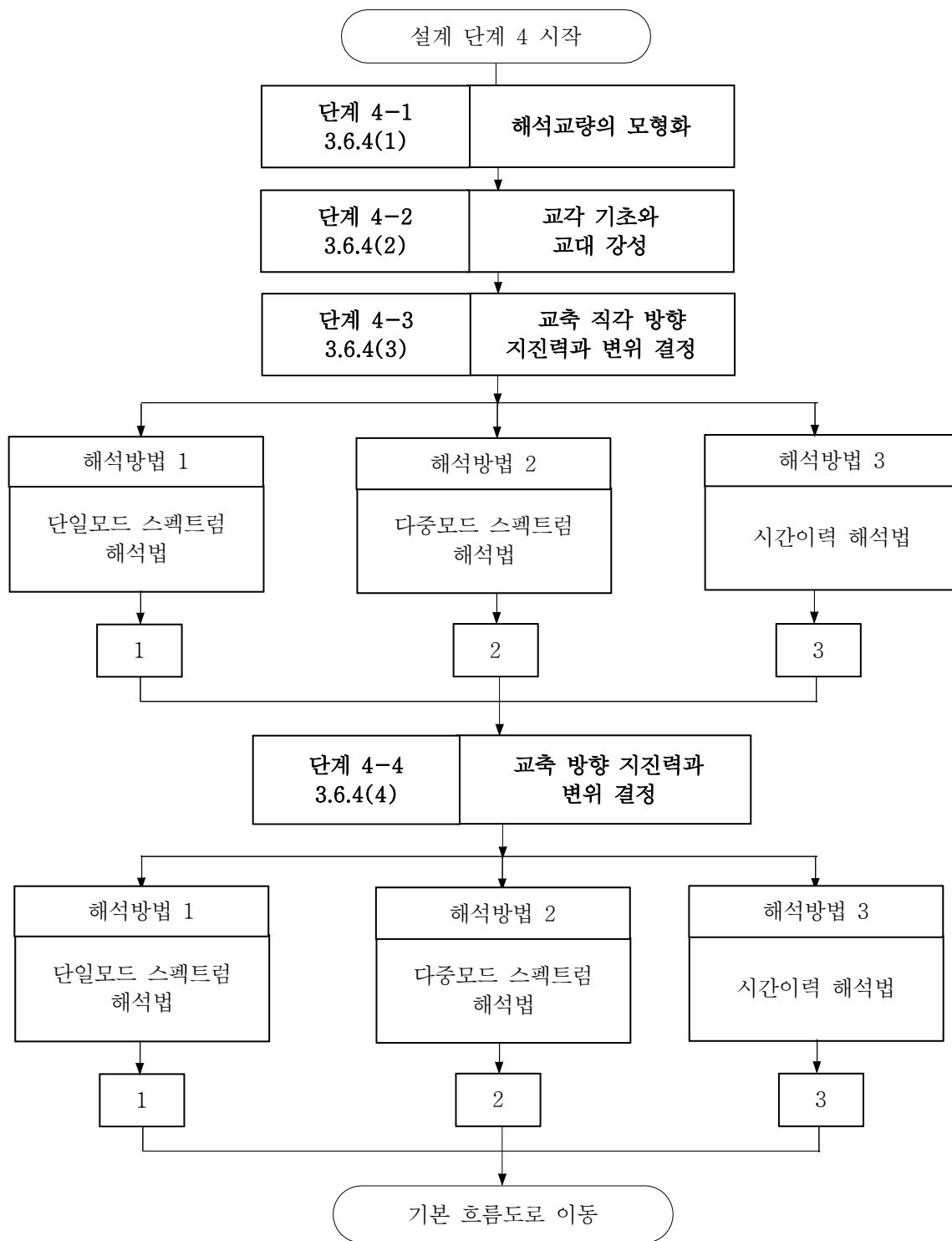


그림 24. 설계단계 4 (탄성 지진력) 흐름도

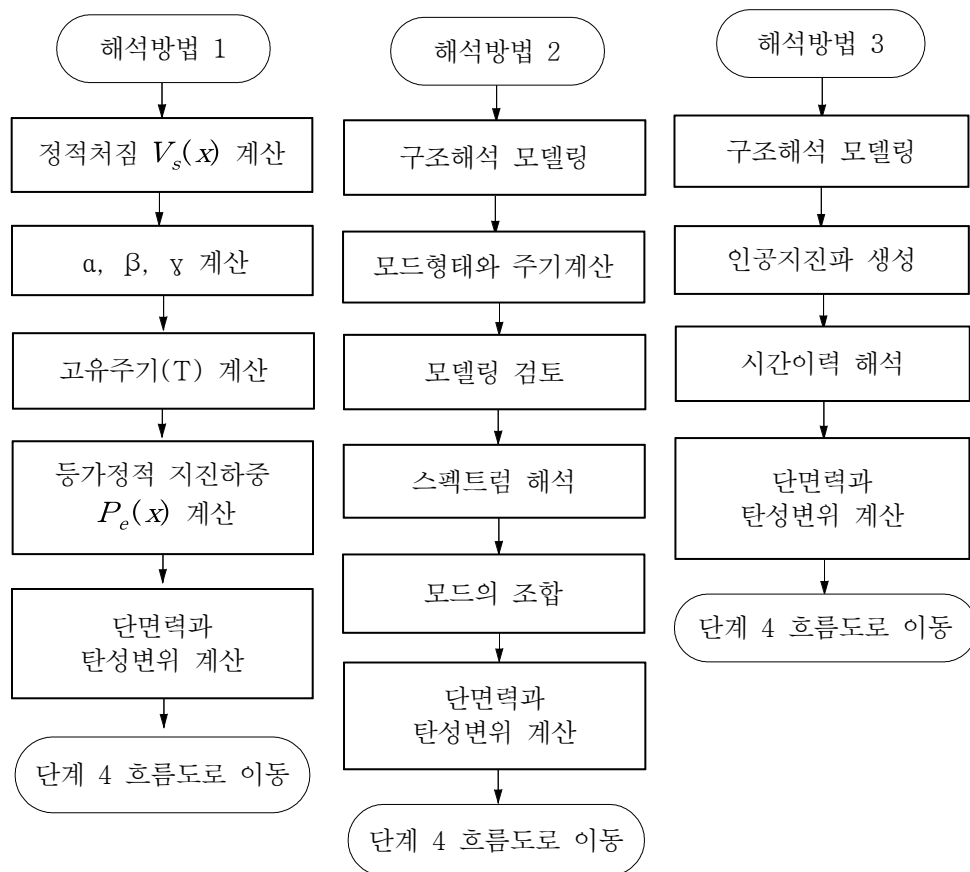


그림 25. 설계단계 4 (그림 23 ①, ②, ③) 세부흐름도

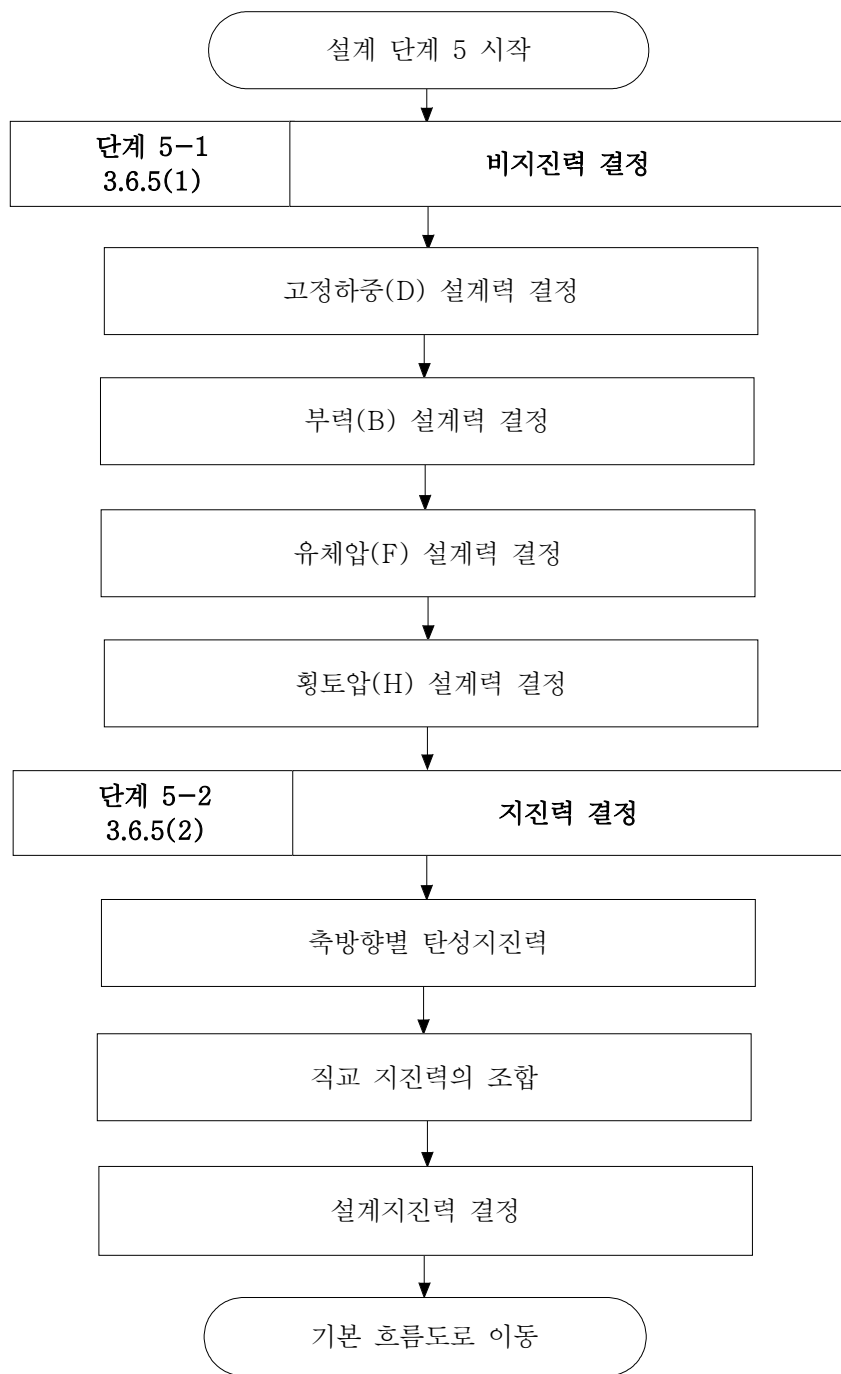


그림 26. 설계단계 5 (설계지진력) 흐름도

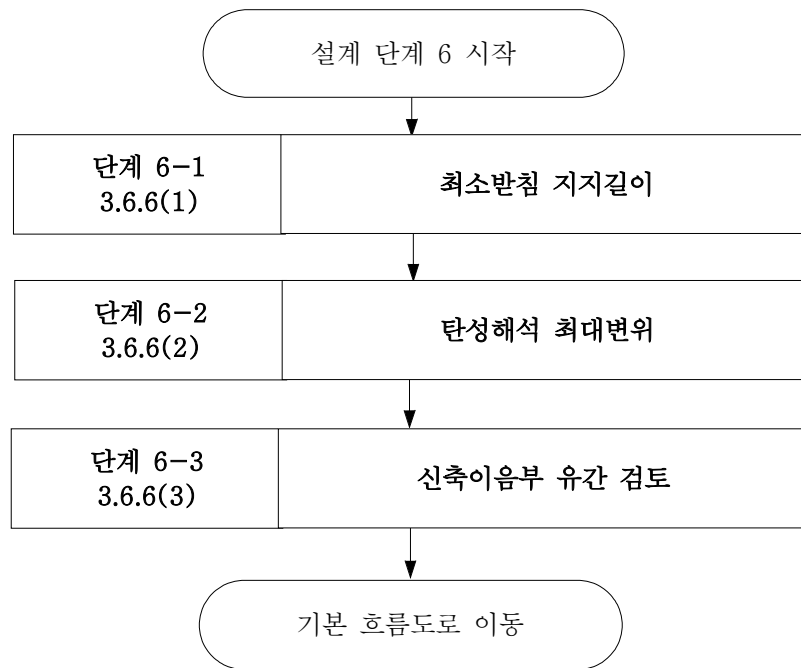


그림 27. 설계단계 6 (설계지진 변위) 흐름도

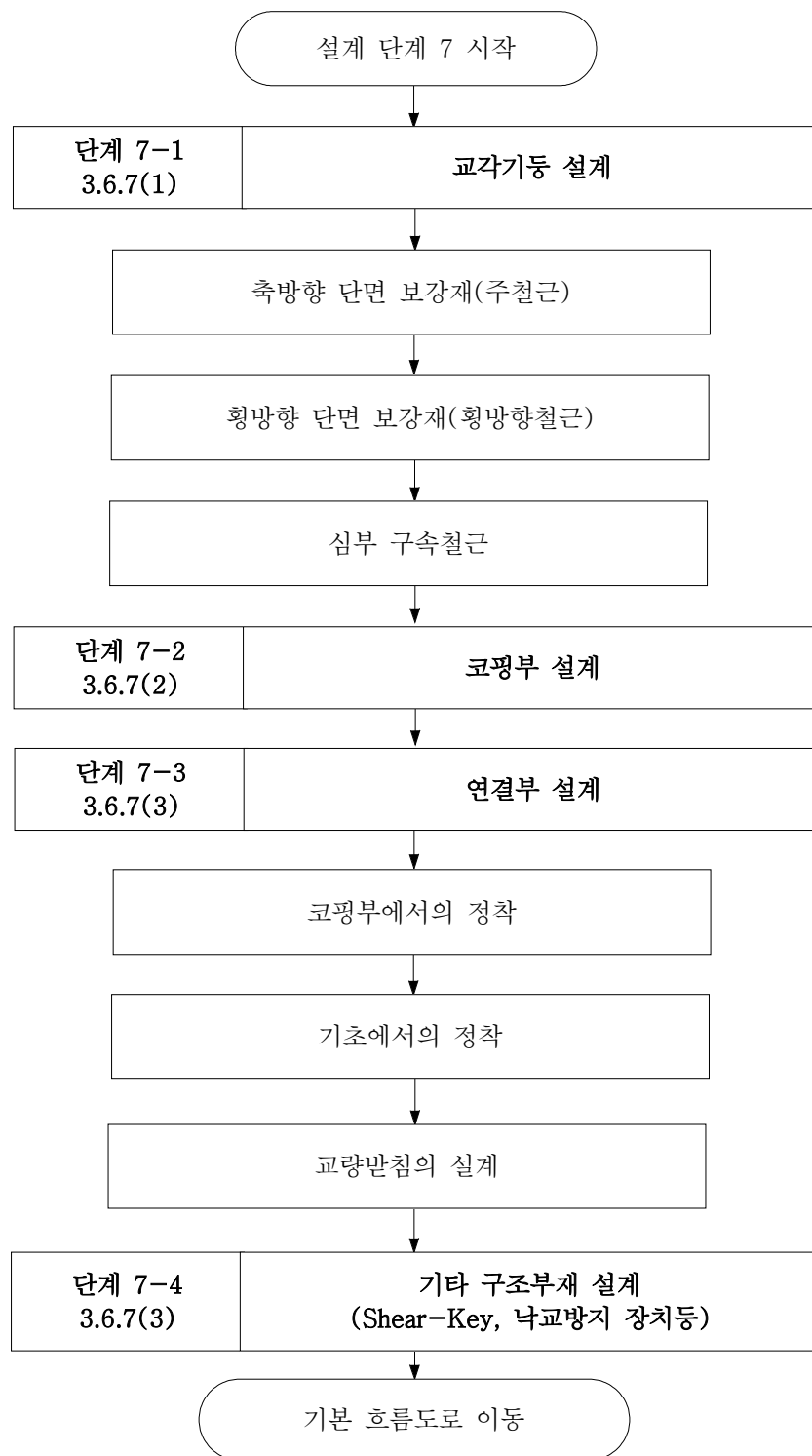


그림 28. 설계단계 7 (구조부재 설계) 흐름도

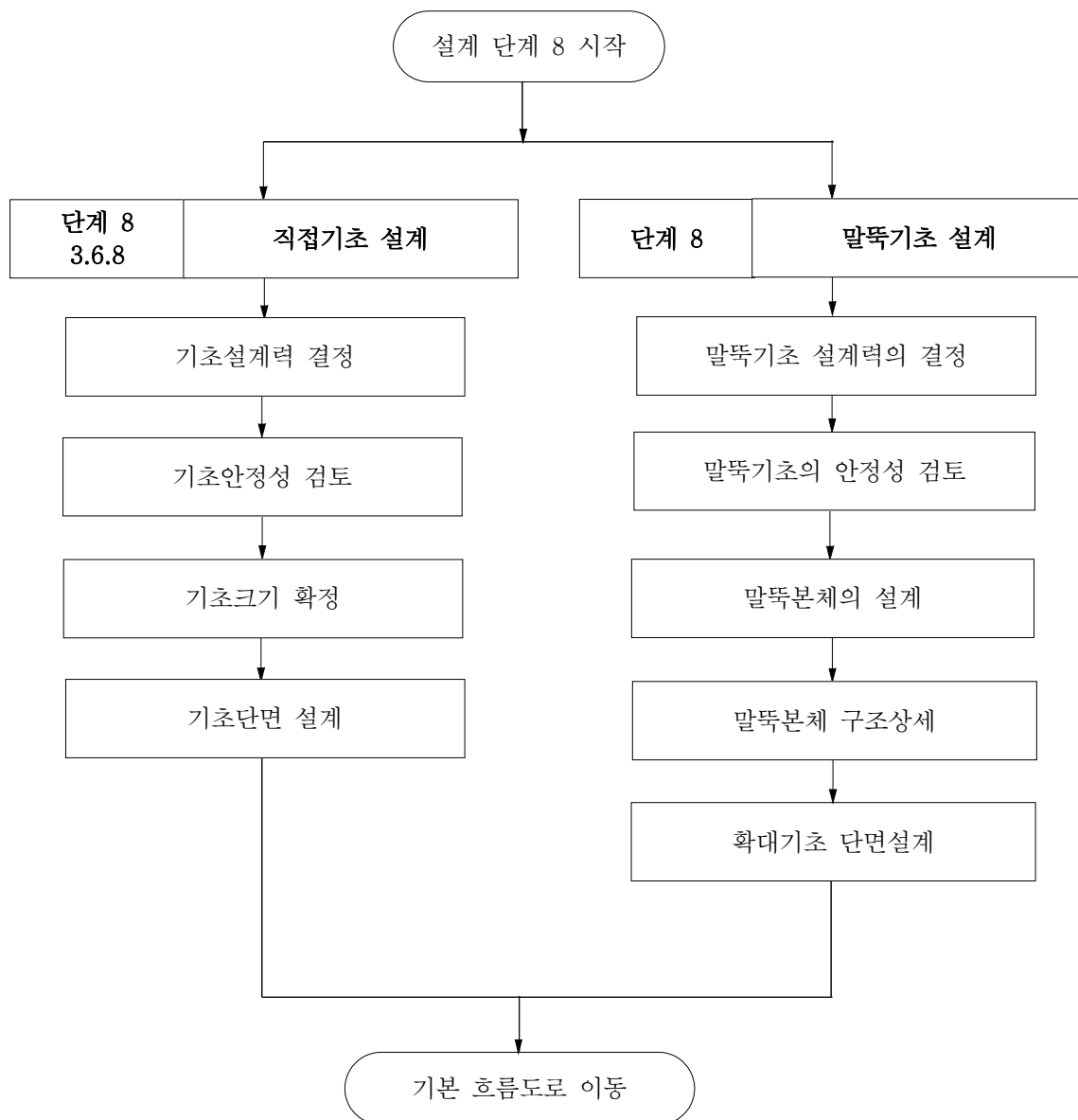


그림 29. 설계단계 8 (기초설계) 흐름도

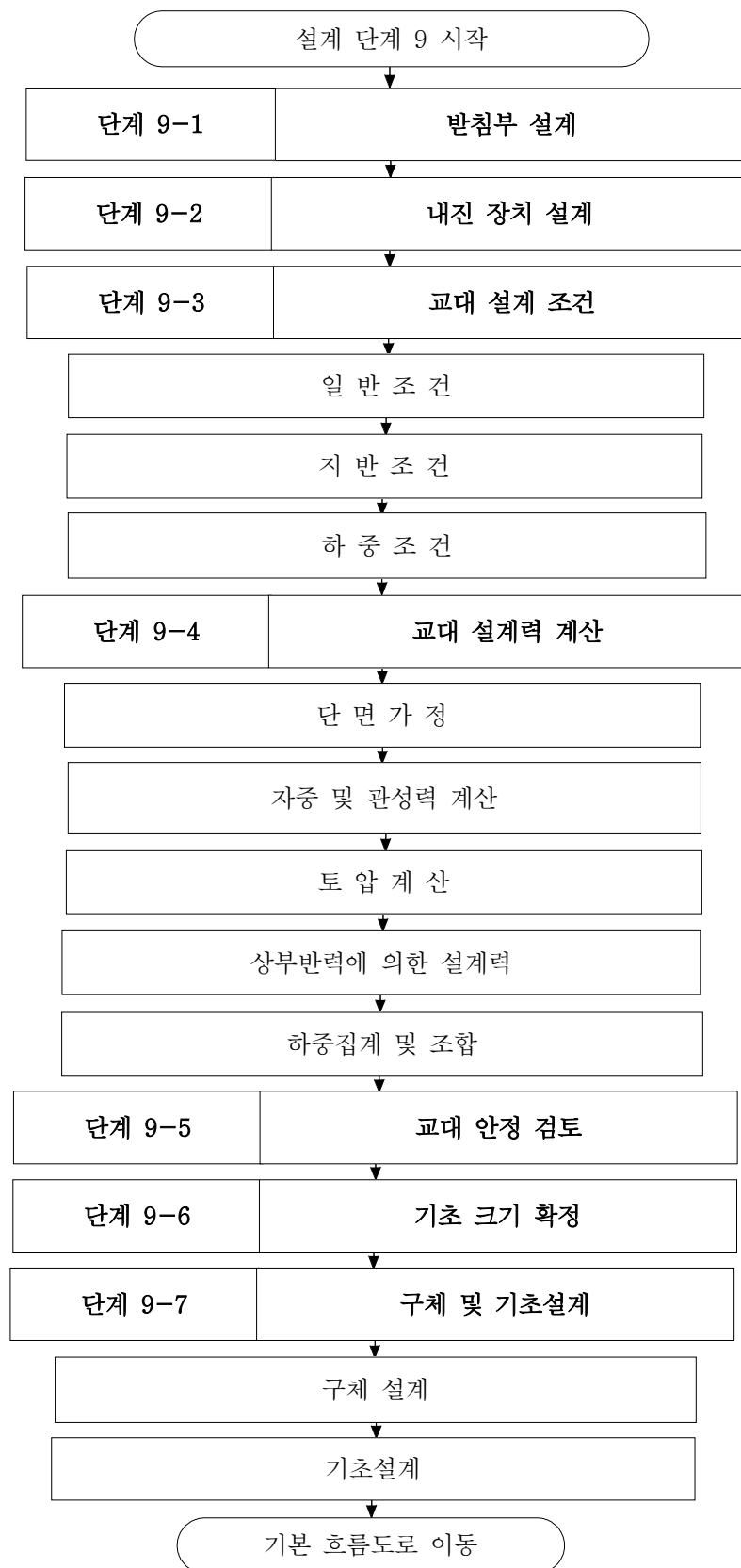


그림 30. 설계단계 9 (교대설계) 흐름도

해설 3. 터널 내진설계

1. 내진설계 일반

내진설계 일반 규정을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 터널의 내진설계는 지진 시 구조물의 기능 마비로 인한 사회적 간접피해 및 재산피해를 최소화해야 한다.
- (2) 내진설계 시 국내의 중약지진특성에 맞는 설계지진규모를 반영하도록 해야 한다.

터널은 지상구조물과는 다르게 지하의 풍화암 이상의 암질이 좋은 곳에 시공됨으로 대부분 일체 거동한다고 가정하여 지상구조물과는 다른 내진설계를 해야 한다. 터널의 내진설계에 대해서는 각 공종별 형태 및 지반의 특성, 지진파의 형태와 터널의 방향에 따른 구조물의 거동양상 등에 따라 지진의 영향을 받을 것으로 예상된다. 다음의 경우에는 철도터널의 안정성 증진을 위하여 내진설계를 수행해야 한다.

- ① 토피가 작고 지반이 연약한 터널의 갱구부 및 주요접속부
- ② 갱구부 비탈면의 불안정에 따른 편토압 발생구간
- ③ 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간
- ④ 액상화가 우려되는 연약지반 내 터널구간

따라서 활단층 지역은 구조물을 건설하지 않는 것이 바람직하나 이를 피하기 어려울 경우에는 지진발생에 따른 손상이 최소화되도록 설계해야 한다. 즉, 일정부분 인성을 확보하기 위한 강섬유보강 슛크리트, 록볼트 추가설치 등을 고려할 수 있으며 라이닝부에 대하여는 시공이음부 등을 추가하여 피해를 최소화할 수 있는 방안을 강구해야 한다. 또한 기능손상이 발생할 경우는 보수·보강이 용이하도록 설계하여야 하며 확폭 설계의 필요성도 검토할 수 있다. 대단면 장대터널인 경우, 설계요구사항의 만족성, 설계기법 및 가정사항의 적절성, 법규요건에 대한 만족성, 설계결과의 시공성 등의 검증을 위하여 터널에 대한 전문적 지식과 경험이 있는 기술자의 검토를 받아야 하며 영구계측의 필요성도 함께 고려해야 한다.

2. 내진설계 방법

철도터널의 내진설계는 설계지반운동 및 지진하중에 대해 지진시의 지반변위의 영향을 고려하여 구조물이 소요의 내진성능수준을 만족하도록 해야 한다. 한편, 내진설계 시 고려해야 할 주요 항목은 기반면에 작용하는 지반운동, 지반과 구조물의 거동 및 파괴조건 등이며, 이를 고려하여 소정의 안정성을 확보하도록 해야 한다.

성능수준 내진설계 방법의 기준을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 철도터널은 그 중요성 때문에 성능수준을 결정할 때 붕괴방지수준의 내진설계를 하도록 해야 한다. 여기서 붕괴방지 수준을 정의하면 다음과 같다. 설계지진하중 발생



후 터널에 붕괴가 발생하지 않는 정도의 제한적인 구조적 피해는 허용되나 터널의 전체적인 붕괴는 허용하지 않고 긴급보수를 통해 터널의 기능을 회복할 수 있는 수준이다. 내진설계는 「해설 3의 1항」에 정리된 조건에 부합하는 경우만 수행해야 한다.

- (2) 철도터널은 지진 시 그 중요성에 따라 내진 1등급 또는 2등급 붕괴방지수준을 만족하도록 설계되어야 한다.
- (3) 붕괴방지 수준에서는 구조물의 응답을 등가선형 또는 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석방법을 이용하여 설계해야 한다.

2.1 해석방법

터널의 내진해석 방법은 동적인 지반운동을 정적으로 변환하여 지진해석을 실시하는 진도법, 응답변위법, 간이응답변위법 등의 유사정적해석법과 구조물 및 주변지반을 적절히 모델링하고 해석대상의 내부 또는 경계면에 시간이력 지진운동을 입력하여 지반 및 구조물의 거동, 지보재에 발생하는 단면력 등을 동적으로 산정하는 동적해석법을 사용해야 한다. 이 때, 지반조건 및 구조가 단순한 경우에는 간이응답변위법을 적용할 수 있으며, 지반조건 및 구조조건이 복잡한 경우 또는 상세한 검토를 필요로 하는 경우는 지반과 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 시간이력의 동적등가선형해석 혹은 지반과 구조물의 비선형 거동을 모형화한 동적비선형해석을 적용할 수도 있다. 각 해석방법에 대한 개념적 내용은 <표 29> 및 <표 30>에 나타내었다.

표 29. 유사정적해석법

구 분	진 도 법	응 답 변 위 법
내 용	<ul style="list-style-type: none"> • 지진에 의한 하중을 구조물에 정적으로 작용시켜 계산하는 방법 • 지반에 따라 구조물에 발생하는 지진력은 지반의 가속도에 따라 구조물의 각 부분에 발생하는 관성력이라 가정할 수 있으며 이 가속도를 중력가속도로 제한한 것을 진도라 칭함 • 구조물에 발생하는 시간에 따라 변동하는 구조물의 가속도 응답치를 무차원화한 것이지만 간편함을 위하여 진도법에서는 이를 일종의 값으로 가정. 	<ul style="list-style-type: none"> • 지반의 전단진동에 따른 변위를 지반속에 위치한 터널에 입력함에 따라 터널의 변형과 응력을 산정 • 지진시 지층지반의 변위는 일반적으로 수평변위를 대상으로 하고 응답스펙트럼에서 계산식으로 구한 방법과 유한요소법 등의 진동모델에서 진동과형을 입력해서 구하는 방법이 있음

표 30. 동적해석법

구 분	시간이력응답해석	응답스펙트럼해석
내 용	<ul style="list-style-type: none"> 해석대상 구조물이나 지반을 포함한 진동계의 적절한 모델을 선정하고 대상내 입력점에 가속도의 시간이력을 입력. 시간이력 응답해석에서는 1/100~1/500초 정도의 시간간격에 따라 운동방정식을 해석하고 응답의 시간이력을 정함 보다 엄밀한 해석이 필요한 경우와 비선형응답해석을 수행하는 경우에 적용. 	<ul style="list-style-type: none"> 응답스펙트럼에 기초하는 설계 스펙트럼을 사용 구조물의 탁월 고유진동주기 뿐만 아니라 지반과의 상호작용을 고려한 전체 시스템의 탁월주기 등을 고려하고 복수의 모드에 대해 응답폭을 산정하여 각 모드에 대한 응답치 제곱 합의 평방근을 사용하는 경우가 많음

2.1.1 응답변위법

응답변위법에 의한 구조해석은 구조물 및 지반에 대한 모형화 과정을 거쳐 응답치를 산출한 후 내진성능 평가를 실시해야 한다. 일반적으로 지하구조물은 관성력의 영향의 큰 상부구조물과는 달리 주변지반의 거동에 지배되는 거동특성을 나타내기 때문에 주변지반의 동적인 거동만 정밀도 높게 예측할 수 있다면 응답변위법 등의 유사정적해석에 의해서도 응답치를 비교적 정확히 산정할 수가 있다.

구조가 복잡하지 않은 일반적인 지하구조물에 대해서는 응답변위법 등의 유사정적 해석방법이 적절하며, 응답변위법의 개념을 <그림 31>에, 설계 흐름도를 <그림 32>에 제시하였다. 이외에 지반탄성을 유한요소로 표현한 응답변위법도 개발되어 있어 적절한 검토 후에 이들을 사용할 수도 있다.

응답변위법을 철도터널에 적용하기 위해서 우선 <그림 31>과 같이 주변지반을 지반반력계수(혹은 지반탄성계수)로 모형화하고 터널구조물에 가장 불리한 응력 혹은 변형 등이 발생하도록 지진하중을 작용시킨다. 이 때 지반반력계수는 강제로 간주한 터널구조물의 내측에 단위하중을 가한 후 발생하는 변위로부터 구하며, 유한요소법 등을 이용하여 계산할 수 있다. 유한요소법의 적용시, 주변지반은 동적 물성값을 채택하며 관련 실험자료가 없는 경우에는 지반의 전단파 속도로부터 유추하거나 정적 탄성계수에 일정 상수를 곱하여 산정할 수도 있다. 한편, 경험식에 의한 지반반력계수는 다음을 따른다.



$$k_v = 1.7 E_o B_v^{-3/4} \quad (54)$$

$$k_{sv} = \frac{k_v}{3}$$

$$k_h = 1.7 E_o B_h^{-3/4}$$

$$k_{sh} = \frac{k_h}{3}$$

여기서, B_v 및 B_h 는 각각 상부 및 하부 슬래브의 폭과 측벽의 높이를 의미하고 k_v , k_{sv} , k_h 및 k_{sh} 는 각각 개착식 철도터널의 상부 및 하부슬래브에 작용하는 연직 지반반력계수, 상부 및 하부슬래브의 전단 지반반력계수, 측면의 수평 지반반력계수 및 측면의 전단 지반반력계수를 의미하며 지반의 변형계수 E_o 는 다음 식을 따를 수 있다.

$$E_o = 2G_d(1+\nu) \quad (55)$$

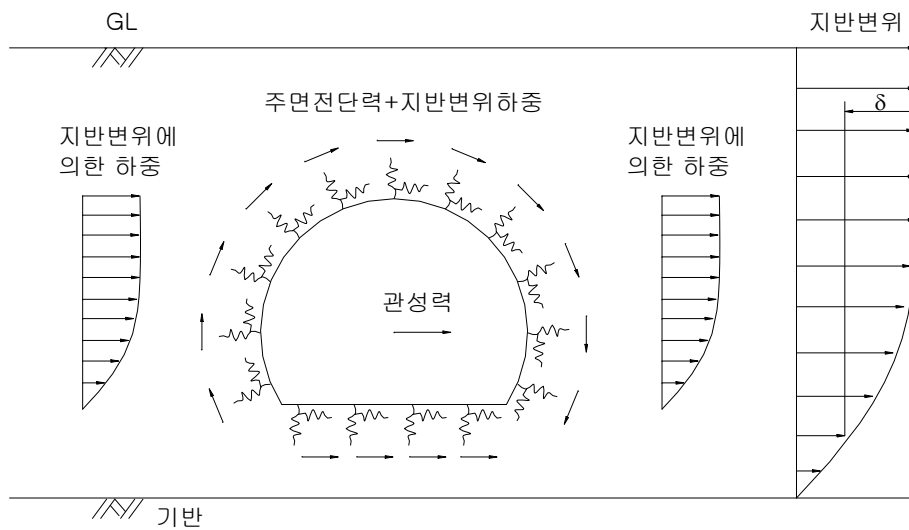


그림 31. 응답변위법의 개념도

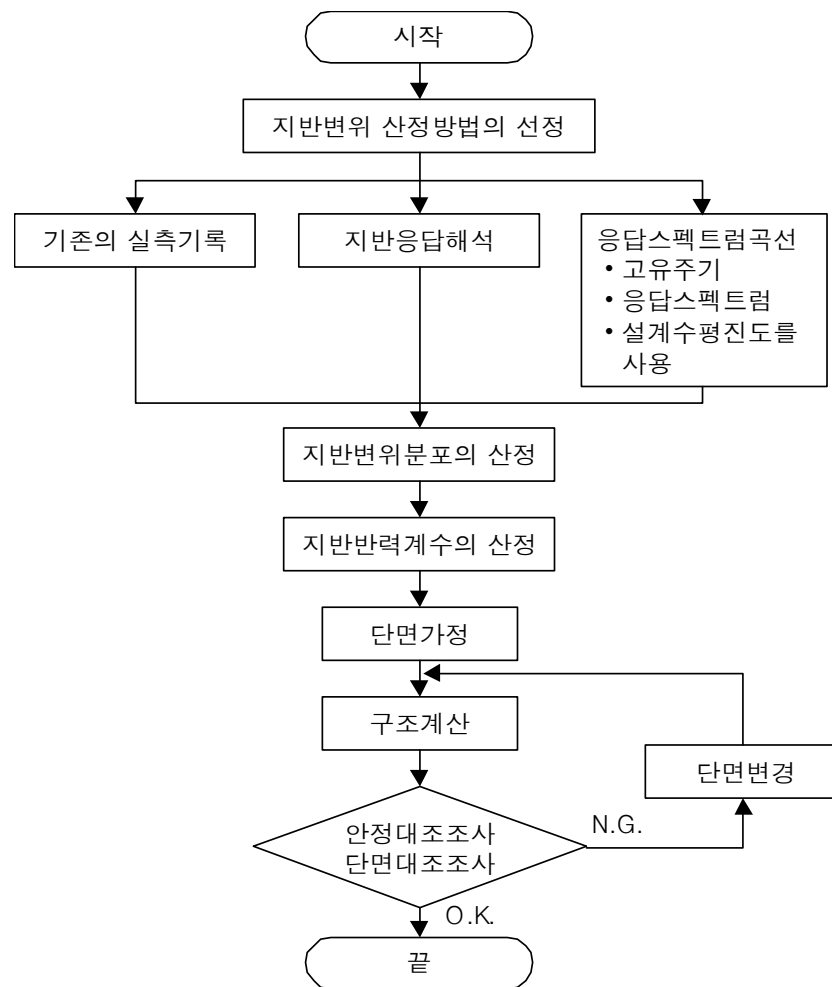


그림 32. 응답변위법의 설계흐름도 예

여기서, G_d 는 설계 전단탄성계수이고 ν 는 동적 포아송비로서 연암인 경우 0.4, 경암인 경우 0.3 정도를 채택할 수 있다.

한편, 설계 전단탄성계수 G_d 의 경우, 지진의 영향을 지반의 동적 해석으로 산출한 때에는 최대 전단변형 발생시의 전단력과 전단변형을 고려한 등가 전단탄성계수로 산출할 수 있고, 지진의 영향을 간편하게 산정하는 경우에는 다음 식과 같이 설계 전단 탄성과 속도에서 구할 수도 있다.

$$G_d = \frac{\gamma_t (\alpha_d V_{s0d})^2}{g} \quad (56)$$

여기서, γ_t , α_d , V_{s0d} 및 g 는 각각 단위중량, 지진시 변형 정도에 따른 지반의 강성저감계수(0.5~0.7), 설계 초기 전단 탄성과 속도 및 중력가속도를 의미한다.

터널구조물에 작용하는 지진하중은 지진에 의한 토압, 주변 전단력, 관성력 등이 있으며 기반면에서의 속도응답 스펙트럼, 속도응답 스펙트럼에서의 통제주기 및 지진계수, 지반의 고유주기 등을 이용하여 계산해야 한다.



2.1.2 간이응답변위법

일반적인 규모의 철도터널에 있어서 지반조건 및 구조가 단순한 경우에는 간이응답변위법에 의해 응답치를 산정할 수 있다. 예를 들어 일반적인 규모의 터널에서 구조물 측방이 균일하다고 간주되는 비교적 단순한 지반조건의 경우에는 간이응답변위법에 따라 내진성능 평가를 실시해야 한다. 철도터널의 간이응답변위법은 구조물의 응답변형량을 자연지반의 변형량에 일정 계수를 곱하여 예측하는 방법으로 이 계수를 응답계수(α_r)라 한다. 간이응답변위법의 응답계수의 개념을 <그림 33>에 제시하였고 설계흐름도를 <그림 34>에 도시하였다. <그림 33>의 응답계수를 구하는 방법의 하나로서 다음의 식을 고려할 수 있다.

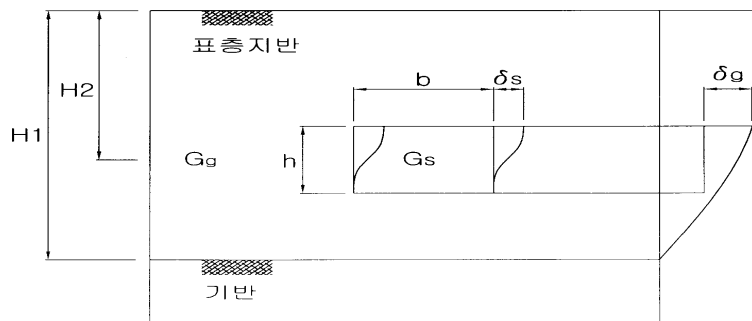
$$\alpha_r = 1.1 \times \left\{ a \ln \left(\frac{G_g}{G_s} \right) + b \right\} \quad (57)$$

여기서,

$$a = 0.091 \left(\frac{b}{h} \right) + 0.053 \left(\frac{H_1}{H_2} \right) - 0.07 \quad (58)$$

$$b = -0.036 \left(\frac{b}{h} \right) + 0.040 \left(\frac{H_1}{H_2} \right) + 0.92$$

이때 구조물 및 지반의 강성비, 형상비 및 심도비 등을 매개변수로 한 2차원 유한요소 해석을 통해 안전측으로 유추한 결과이다.



$$\delta_s = \alpha_r \delta_g$$

δ_s : 구조물의 응답측간 변형량

δ_g : 자연지반의 응답측간 변형량

α_r : 최상·하부의 상판간의 응답계수

$$\alpha_r = f(G_g/G_s, b/h, H_1/H_2, \text{etc})$$

G_g : 지반의 전단 탄성계수

G_s : 구조물의 등가 전단 탄성계수

H_1 : 지표면에서 기반까지의 거리

H_2 : 지표면에서 구조물 중심위치까지의 거리

그림 33. 간이응답변위법의 응답계수 개념도

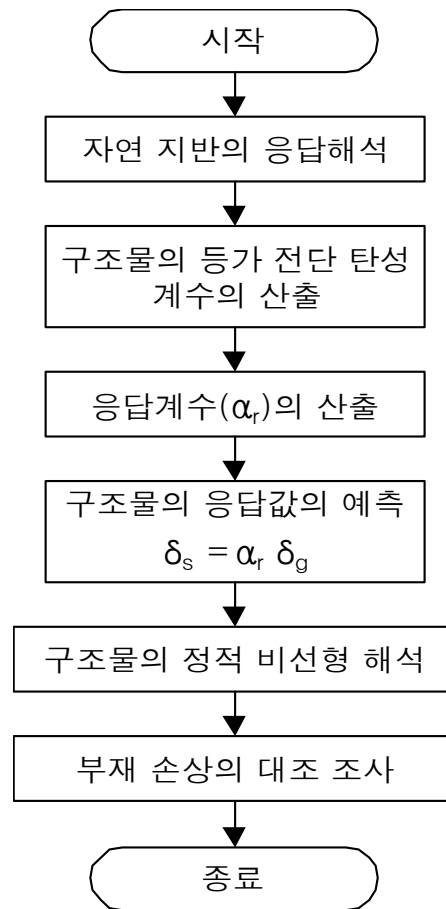


그림 34. 간이응답변위법의 설계흐름도의 예

응답계수를 산출할 때 필요한 구조물의 등가 전단탄성계수는 구조물을 단순지지로 가정해 산출해도 무방하고, 구조물의 변형량은 지반의 변형량과 동일하다고 가정하여 계산할 수도 있다. 재하하는 수평하중은 구조 및 지반조건에 따른 적절한 하중 형태를 고려하여야 하며 일반적으로 측벽의 양쪽 하부 슬래브가 0이고 위바닥면이 커지는 삼각형의 분포하중으로 가정할 수 있다. 다만, 구조물의 높이에 비해 폭이 넓은 개착식 터널 등에 대해서는 상부 슬래브 윗면에 작용하는 집중하중을 고려해도 된다. 개착식 터널의 지진시 거동에 영향이 큰 하중은 상부 슬래브 윗면의 주변 전단력과 측벽 법선 방향의 상호 작용력이며, 이들 하중의 크기 및 비율은 지반 및 구조 조건에 따라 변화한다. 실제 해석시 상기 하중을 고려하여 구조물의 층간 변형량이 응답계수로 구한 변형량이 될 때까지 하중을 재하하고 이때의 손상 정도를 검토해야 한다.

2.1.3 동적해석법

동적해석법에 의한 응답치는 구조물 및 지반을 일체로 한 해석 모델에 의해 산정하는 것을 말하며 구조물 및 지반의 비선형성을 함께 고려할 수도 있다. 지하구조



물이 교각과 건축물을 지지하는 경우와 단독이라도 극단적으로 폭이 넓은 경우 또는 다층구조에서 높이가 높은 경우 등의 복잡한 구조인 경우, 또는 지반구성이 복잡한 경우 등은 동적 해석에 의한 검토를 수행하는 것이 바람직하다. 동적 해석에는 크게 축차적분법에 의한 방법과 등가선형화법에 의한 방법이 있다. 지하구조물의 거동은 주변지반에 크게 영향을 받기 때문에 지반의 해석정밀도가 중요하다.

실제 해석시 구조물 및 지반의 모델링은 양쪽의 상호작용을 고려할 수 있도록 지반과 구조를 일체로 모델링하고 필요시 적절한 비선형성을 고려하는 것으로 해야 한다. 구조물은 지진시의 거동을 적절히 표현할 수 있도록 모형화 하는 것을 원칙으로 하며, 그 비선형성은 철근콘크리트부재 등과 동일하게 적용해야 한다. 기반면의 설정은 내진설계상의 기반면의 설정을 따르며 표층지반 및 그 비선형성은 지반의 동적해석법에 의한 것을 원칙으로 해야 한다. 지반은 지진시의 구조물에 가하는 영향을 적절히 표현할 수 있도록 모델링하고 지반의 반무한성에 대해서도 적절하게 고려하는 것으로 해야 한다. 다음에서는 실무에 간단히 적용할 수 있는 해석기법에 대하여 소개하였다. <그림 35>는 동적해석법의 설계흐름도의 예시이다.

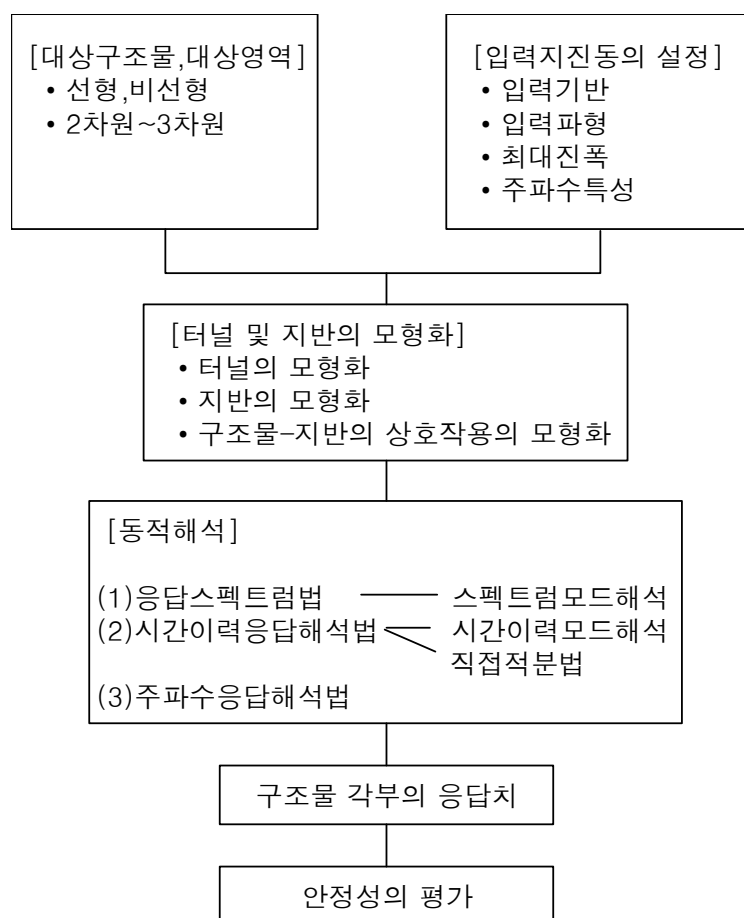


그림 35. 동적해석법의 설계흐름도 예

(1) 수치해석 프로그램

과전과이론을 사용하여 지진에 의한 동적거동을 파악하기 위한 수치해석적 기법은 ‘제7장 터널안정성해석’에서 기술한 정적인 해석기법과 마찬가지로 유한차분법, 유한요소법, 경계적분법 그리고 개별요소법 등이 이용되며 각 방법의 유용성은 해석하고자 하는 문제에 따라 달라지며 또한 이들을 혼합하여 사용하는 경우가 효율적일 수도 있다.

유한차분법은 유한요소법이 개발되기 전의 주된 해석 기법으로 지반-구조물의 운동을 표현하는 지배방정식을 사용하고 지배방정식의 연속적인 편미분을 작고 제한적인 증분상에서 변수의 변화율로 대체하는 것에 기초를 두고 있다. 미분방정식은 차분방정식으로 변환되며 시간에 따른 방정식의 해를 얻는 기법은 음해(Implicit) 법이나 양해(Explicit) 법 중 어느 것으로도 가능하다.

유한요소법에서는 지반전체가 유한요소라 불리는 작은 연속체들로 분할되며 각 요소들은 물성치가 부여되고, 상태방정식(Equation of State)이 구성된다. 각 요소들은 전체구조물의 방정식을 구성하기 위하여 결합되고 유한차분법의 경우와 마찬가지로 해를 구하는 방법은 음해법이나 양해법에 의존하게 된다. 어떤 방법을 사용하더라도 시간 차원을 나타내기 위한 유한차분법적인 기법이 이용된다. 유한요소법의 가장 큰 장점은 임의의 경계와 물성치의 비균질성을 쉽게 고려할 수 있다는 점이고 유한차분법의 경우와 마찬가지로 무한 매질 속의 파의 전달을 모사하기 위하여 에너지흡수경계를 사용해야 한다. 경계적분방정식방법은 경계와 표면 그리고 트랙션(Traction)을 경계변위(Boundary Displacement)에 연결시키는 한 세트의 적분방정식들에 대한 수치해석을 포함해야 한다. 이 방법은 미분방정식이 아닌 적분방정식을 기초로 하고 전체지반과 굴착면의 표면만을 몇 개의 조각이나 요소로 분할하게 된다. 수치적인 해는 우선 경계조건에서 구하여지고 그 해로부터 매질내의 서로 다른 점에서의 해를 구한다. 이 방법은 적분방정식이 무한 또는 반무한 매질상의 하중에 적용되기 때문에 무한매질에서의 공학적거동이 상대적으로 쉽게 다루어진다.

개별요소법은 절리가 많은 불연속매질에 적용되는 수치해석기법으로 무지보 암반상태에서의 거동 또는 불연속면의 활동 등에 의해 지보재에 발생하는 응력집중현상 등을 파악하는데 있어 매우 유용하다. 또한 지진하중에 의해 발생하는 암반의 변형뿐만 아니라 절리면의 변위 및 활동 상황 등의 거동을 폭넓게 파악할 수 있는 장점이 있다.

(2) 해석영역 및 경계조건

일반적으로 지하공동의 굴착 등에 따른 정적거동을 파악하는 경우, 해석영역은 굴착 폭의 약 3배 이상이면 충분하고 경계조건(Boundary Condition)은 양측면에서는 수평방향변위 하부경계면은 연직방향의 변위 등을 고정시켜 해석을 실시해야 한다.



그러나 동적해석시에는 파의 전파에 따른 굴절 및 반사에 의한 영향 및 지진하중의 재하위치 등에 따라 해석영역이 넓어지며 실제 설계조건에 적합한 경계조건을 설정하여야만 신뢰할 수 있는 지반 및 구조물의 동적거동을 파악할 수 있다.

① 자유장 경계조건(Free-Field Boundary Condition)

터널굴착 등에 대한 정적 해석이 완료된 상태가 동적해석의 초기조건이 되는 경우에는 지진하중을 재하하기 전에 경계조건의 변환이 필요하다. 정적해석시 설정된 측면의 수평방향에 대한 고정경계조건은 굴착에 따른 응력 및 변형에 영향을 미치지 않는 위치에 수치해석시간의 단축 등을 위해 설정된 것이며 실제의 지반조건을 나타낸 것은 아니다. 그러나 동적해석시에는 경계면에 도달한 지진파가 고정경계조건 때문에 변형이 억제되고 또한 입사된 지진파의 굴절 및 반사 현상이 발생하게 되어 실제거동과는 다른 해석결과를 도출하게 된다. 그러므로 평면파의 형태로 전파되는 지진파에 의한 측면에서의 변형을 파악하고 경계면에 도달한 파를 흡수하여 지진파의 반사현상을 방지하기 위한 경계조건이 필요하며 이를 위해 자유장 경계조건(Free-Field Boundary Condition)이 사용된다. 자유장 경계조건은 일종의 경계요소법의 수단을 해석영역의 측면에만 적용한 것으로 이전에 설정되어 있던 고정경계조건은 해제되며 평면지진파에 의한 지반의 자유장운동 즉, 같은 깊이에 있는 모든 점의 지반운동이 동일하게 계산된다.

② 감쇠 경계조건(Quiet or Viscous Boundary Condition)

자유장 경계조건과 함께 지하구조물의 동적해석을 사용되는 경계조건으로 감쇠 경계조건이 있으며 필요에 따라 해석영역의 상부 및 하부경계에 사용된다. 상부경계에서의 감쇠 경계조건은 지하구조물의 심도가 매우 깊어 상부 원지반을 해석영역에 포함시키지 못한 경우에 경계면에 도달한 지진파의 굴절 및 반사 현상이 발생하지 않고 상부로 발산되는 현상을 모형화하기 위해 설정된다. 지하구조물의 심도가 낮아 상부지반을 해석영역에 포함하게 되는 경우에는 감쇠 경계조건을 설정하지 않고 자유면에서의 굴절과 반사에 의한 영향이 반영되는 반무한 영역(Half Space)에 대한 모델링이 필요하다. 하부경계에서의 감쇠 경계조건도 마찬가지로 해석대상이나 지층 조건에 적절하게 설정해야 한다.

자유장 경계조건을 설정한 경계면에서는 역학적인 특성에 의해 자동적으로 감쇠 경계조건이 함께 설정된다. 감쇠 경계조건에 대한 수치해석적인 처리방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 경계면에 법선 및 접선방향의 Dashpot를 설치하여 경계면에 도달한 지진파를 흡수하는 방법이 사용되며 경계면에 입사되는 지진파에 의해 발생하는 하중과 같은 크기의 반력(Traction Force)을 반대방향으로 가함으로써 처리된다. <그림 36>은 하부에서 상부로 전파되는 지진파의 동적해석에 사용되는 경계조건을 나타내며 특히 <그림 36a>는 지진하중이 작용되는 기반면에서 변

형이 발생하는 경우이고 <그림 36b>는 지진하중이 작용되는 기반면이 강체인 경우에 대한 경계조건이다.

한편, 상부는 반무한 영역(Half Space)에 대한 경우로 별도의 경계조건이 필요하지 않고 지진에 대한 입력치는 속도, 가속도 또는 응력이나 하중의 시간이력 등이 이용된다. 그러나 <그림 36>에서 알 수 있듯이 속도, 가속도의 시간이력을 감쇠경계면에는 적용할 수 없으며 이때에는 다음과 같이 속도에 대한 시간이력을 응력에 대한 시간이력으로 변환하여 입력해야 한다.

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) V_n \quad (59)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_p) V_s$$

여기서, σ_n : 적용되는 법선응력

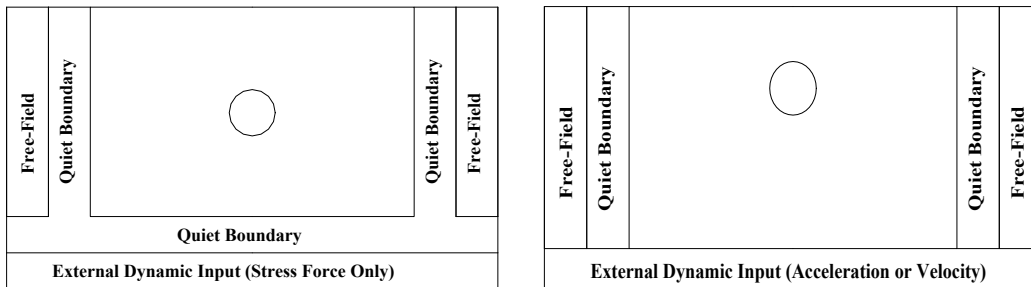
σ_s : 적용되는 법선응력

C_p : P파 속도

C_s : S파 속도

v_n : 수직지진파에 의한 입자속도

v_s : 전단지진파에 의한 입자속도



(a) 기반면에서 변형이 발생하는 경우

(b) 기반면이 강체인 경우

그림 36. 동적해석시 경계조건

③ 역학적인 감쇠비의 설정

동적해석 수행시, 경계면에서 발생하는 지진파의 흡수와는 달리 해석영역내에서 지반운동의 형상에 따른 기하학적 감쇠(Geometric Damping)나 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠(Material Damping)에 의해 지진파가 전파되면서 진폭이 감소하는 현상을 적절히 고려할 필요가 있다.

기하학적 감쇠는 응력파가 구형으로 전파됨으로 인한 진폭감소현상으로 일반적으로 해석 프로그램 내에서 별도의 설정 없이 감쇠효과가 반영되며 진원으로부터의 거리가 먼 지진파는 평면파의 형태를 보이는 경우가 많기 때문에 동적해석시 기하학적 감쇠현상이 나타나는 경우는 거의 없다.

그러나 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠 현상은 지진파가 전파되면서 열 또는 마찰 등에 의해 발생하는 에너지의 손실현상으로 재료감쇠를 고려하지 않으면 매질



내에서 자유진동(Free Vibration)이 발생하게 되고 지진파의 전파거리에 따른 감쇠 현상을 고려할 수 없기 때문에 합리적인 해석결과를 얻을 수 없다.

지진파의 전파거리에 따른 감쇠현상은 매질의 공학적 특성에 따라 그 크기가 달라지며 일반적으로 강성이 큰 암반매질을 통과하는 경우가 연약한 지반을 통과하는 경우에 비해 지진파의 감쇠가 작다. 또한 매질이 같은 경우에도 지반운동의 주파수에 따라 감쇠 정도가 달라진다.

연속체역학에 근거한 동적해석 수행시, 시스템의 자유진동을 감쇠시키고 거리에 따른 감쇠현상을 고려하기 위해 일반적으로 Rayleigh Damping이 사용되며 감쇠 정도를 나타내는 C 행렬은 질량(Mass)에 비례하는 성분과 강성(Stiffness)에 비례하는 성분으로 구성된다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (60)$$

여기서, α 는 질량에 비례하는 감쇠정수이고 β 는 강성에 비례하는 감쇠정수를 의미한다.

다중모드(Multiple Degrees of Freedom) 시스템에서의 한계감쇠비(Critical Damping Ratio)와 감쇠정수의 관계는 다음과 같다.

$$\alpha + \beta \omega^2 = 2\omega \xi_i \quad (61)$$

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (62)$$

여기서, ω_i 는 모드 i에서의 주파수이고 ξ_i 는 모드 i에서의 한계감쇠비를 의미한다. <식 (61)> 및 <식 (62)>에서 알 수 있듯이 감쇠비가 지반운동의 주파수에 따라 변화되므로 동적해석시에 필요한 입력치의 설정을 위해서는 매질의 공학적 특성 및 지반운동의 탁월주파수를 적절히 파악해야 한다. 그러므로 일반적인 동적 수치해석 코드에서는 감쇠 정도를 고려하기 위해 감쇠비와 탁월주파수를 입력치로 하여 지진에 의한 동적거동을 계산해야 한다.

(3) 철도터널의 내진설계 과정

동적해석 기법을 이용한 철도터널의 내진설계 과정은 앞서 설명한 <그림 36>과 같으며 이를 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

① 대상 구조물 및 해석 위치 선정

앞서 논의한 바와 같이 대상 구조물은 개착식 터널 혹은 지질학적 불연속면과 같은 특수한 경우에 대한 굴착터널에 한정하도록 하며 그 위치에서의 동적 물성치를 결정해야 한다. 동적 물성치는 실내시험 및 현장시험 결과를 토대로 해석에 필요한 입력값을 산정하며 일반적으로 동적시험에 의한 물성값은 정적시험에 비해 크다. 터널 지보재의 경우에는 정적 물성치와 동일한 값을 적용할 수 있다.

② 설계지반운동의 결정

내진설계를 위한 지반운동의 시간이력(Time History)을 고려하기 위하여는 당해지역의 과거 실측 지진기록을 이용하거나 응답스펙트럼을 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 지진에 대한 과거 실측기록이 없기 때문에 건설교통부 기준(1997)을 토대로 지표면에 설치된 1 자유도 시스템의 설계응답 스펙트럼을 작성하고 동적해석을 위한 가속도 시간이력곡선을 결정해야 한다. 지표면 지반운동을 결정하기 위해서는 지진구역계수 및 재현주기에 따른 보정계수, 지반종류에 따른 지진계수, C_a 및 C_v , 를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성하고 이에 부합하는 지표면 가속도 시간이력곡선은 인공지진과 생성프로그램 등을 이용하여 생성할 수 있다. 다음으로 철도터널의 내진설계를 위해 앞서 생성한 시간이력곡선을 기반면의 가속도 시간이력곡선으로 변환할 수 있으며 변환시 깊이에 따른 진폭의 감쇠현상을 적절히 모형화할 수 있어야 한다. 이때, 보정계수 등을 이용하여 입력 물성값을 조정할 수도 있다.

③ 철도터널 내진해석

앞서 설명한 경계조건과 지진하중을 재하하여 터널의 동적 해석을 실시하며 라이닝부에 발생하는 최대 단면력(축력, 전단력, 모멘트 등)을 산출해야 한다. 이때 터널의 횡단 및 종단방향 해석을 실시하여 허용응력을 초과하는 단면력이 발생하는지의 여부를 판단할 수 있다.

2.2 내진설계를 위한 조사 및 시험

해석과정 중 필요한 지반특성을 파악하기 위해 필요한 조사와 시험을 실시해야 한다. 조사의 항목에는 지층의 구성 및 각 지층별 공학적 특성 파악, 지하수위 측정 등이 포함되어야 하며 필요시 지반의 동적 특성 시험도 실시하는 등, 지형 및 지반조건의 변화가 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다. 한편, 내진해석을 위한 지반운동에 대해서는 터널의 길이방향과 횡방향의 지반운동 영향이 고려되어야 하며, 지반운동의 공간적 변화 특성도 함께 고려되어야 한다.

2.3 입력 지반운동의 선택

해석 및 설계에 사용되는 입력지반운동은 내진등급별 평균재현 주기를 가진 지반운동을 사용해야 한다. 설계지반운동은 응답스펙트럼해석법의 경우 설계 응답스펙트럼, 그리고 시간이력해석법의 경우 설계가속도 시간이력을 적용해야 한다. 설계응답 스펙트럼은 지표면 지반운동에 대한 단일 자유도 시스템의 가속도 응답스펙트럼으로 제시되어 있다. 이와 같은 표준설계 응답스펙트럼은 지상구조물의 내진해석을 위해 제시된 것으로 지하구조물의 경우, 지표면 지반운동이 아닌 기반면(基盤面)에 작용하는 지반운동에 의한 표층지반의 응답스펙트럼을 이용하며 이를 위해 적절한 변환 프로그램을 사용할 수 있다.



2.4 내진설계상의 기반면(基盤面) 설정

내진설계상의 기반면은 지층의 전단탄성파속도 또는 토질주상도에 기초하여 연속된 경질지층의 상면에 설정하는 것으로 해야 한다. 또한 지반운동을 설정하는 기반면은 진원지역에서 발생한 지반운동을 증폭영향이 적고 가능한 한 전단탄성파속도가 큰 지반의 상면에 설정하는 것이 바람직하나, 일반적인 설계업무에 있어서 토질조사의 수준을 고려하여 다음의 조건을 만족하는 기반면의 상면에 설정하는 것으로 해야 한다.

- (1) 사질토에서 N치가 50 이상, 점성토에서 N치가 30 이상인 연속지층
- (2) 지층의 전단탄성파속도(미소변형률의 경우)가 760m/s 이상의 연속지층

한편, 정밀도가 좋은 토질조사를 실시할 수 있는 경우에는 전단탄성파속도가 보다 큰 지반을 내진설계상의 기반으로 하는 것이 적절하다.

2.5 설계하중의 조합

터널의 내진설계에 사용되는 설계하중과 그 조합은 일반적인 하중 외에, 지진시의 지반 및 구조물의 상호작용을 적절히 고려할 필요가 있다. 또 액상화 지반에 있어서는 지반의 액상화에 의한 영향에 대해서도 고려해야 한다. 설계하중의 조합과 하중계수의 예는 <표 31>에 제시하였다

표 31. 설계하중 조합

하중의 종류	하중계수
고정하중	1.0
부가 고정하중	1.0
영구하중으로의 토압	1.0
변동하중으로의 토압	1.0
수압, 부력	1.0
지반의 측방이동 영향*	-
지진의 영향	1.0

주) *의 하중은 필요에 의해 고려한다.

2.6 내진성능 평가

터널의 내진성능은 부재의 손상 정도 및 안정에 대하여 평가해야 한다.

2.6.1 부재의 손상 정도

부재의 손상 정도에 관한 평가는 철근콘크리트부재, 철골철근콘크리트부재, 콘크리트충진

2.6.2 안정

터널에 있어서 통상 지반에서는 안정에 관해 문제가 되는 경우는 거의 없으나, 개착터널에 있어서는 지반이 액상화 가능성이 있는 경우에 구조물의 부상 및 침하에 대해 검토해야 한다.

2.7 설계상세

- (1) 설계상세는 지진시에 소요의 성능을 확보할 수 있도록 구조부재마다 적절하게 정하는 것을 원칙으로 해야 한다.
- (2) 선로방향의 변형에 저항할 수 있도록 선로방향의 축방향철근의 배치나 구조이음부의 세부항목을 정할 필요가 있다.
- (3) 소성힌지가 형성된다고 예측되는 부위나 우각부에 유의할 필요가 있다.
- (4) 측벽상하부의 이음부에서 힌지의 시점부와 측벽이 어긋난 피해가 확인되었다. 이와 같은 피해를 막기 위하여 시공상의 이음부가 힌지와 동일한 곳이 되지 않도록 해야 한다.
- (5) 지진후의 구체나 구조이음부의 누수에 대해서 충분한 대책을 강구하는 것이 좋다.
- (6) 콘크리트라이닝에 대하여는 지진력에 저항하도록 두께를 증가시키는 것은 지진력을 증대시키는 역효과를 가져올 수 있으므로 콘크리트 라이닝의 두께를 증가시키는 대신에 철근을 넣어 인성을 증가시키도록 해야 한다.
- (7) 기둥단면의 내진설계는 지진에 의한 수평력에 따라 기둥단면의 압축파괴나 전단파괴, 휨인장 파괴가 발생하지 않도록 보강하는 것으로 압축파괴나 전단파괴보다 휨인장 파괴가 먼저 발생하도록 설계해야 한다.
- (8) 갱구부에 대하여는 표토의 활동붕괴를 방지하기 위하여 입구부의 절취면에 적절한 기울기를 확보하여 토류공을 설치해야 한다.
- (9) 신축이음부는 터널의 이음부에 강성이 작은 이음장치를 설치하여 구조물에 작용하는 지진력을 감소시킬 수 있도록 하여야 하며 강성이 작은 이음장치의 설치에 따른 구조적인 약점에 대해서도 검토해야 한다.

3. 내진설계의 품질관리

- (1) 활단층 지역은 구조물을 건설하지 않는 것이 바람직하나 이를 피하기 어려울 경우에는 지진발생에 따른 손상이 최소화되도록 설계해야 한다. 또한 기능손상이 발생할 경우는 보수·보강이 용이하도록 설계해야 한다.
- (2) 중요 구조물의 경우, 설계요구사항의 만족성, 설계기법 및 가정사항의 적절성, 법규요건에 대한 만족성, 설계결과의 시공성 등의 검증을 위하여 터널에 대한 전문적 지식과 경험이 있는 기술자의 검토를 받아야 한다.



RECORD HISTORY

Rev.0('12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둔.

Rev.1('14.1.?) 철도설계기준(국토교통부고시제2013-757호, '13.12.5)이 개정 고시됨에 따라 개정내용을 반영