

제 11 장 내 진 설 계

11.1 내진 설계의 기본 개념

11.1.1 내진설계의 기본 방침

(1) 목적

지진에 의해 교량이 입는 피해의 정도를 최소화 시킬 수 있는 내진성 확보를 위해 필요한 최소 설계요구조건을 규정한다.

(2) 내진설계기준의 기본개념

- ① 인명피해를 최소화한다.
- ② 지진시 교량 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적으로 붕괴는 방지한다.
- ③ 지진시 가능한 한 교량의 기본 기능은 발휘할 수 있게 한다.
- ④ 교량의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.
- ⑤ 설계기준은 남한 전역에 적용될 수 있다.
- ⑥ 본 지침을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

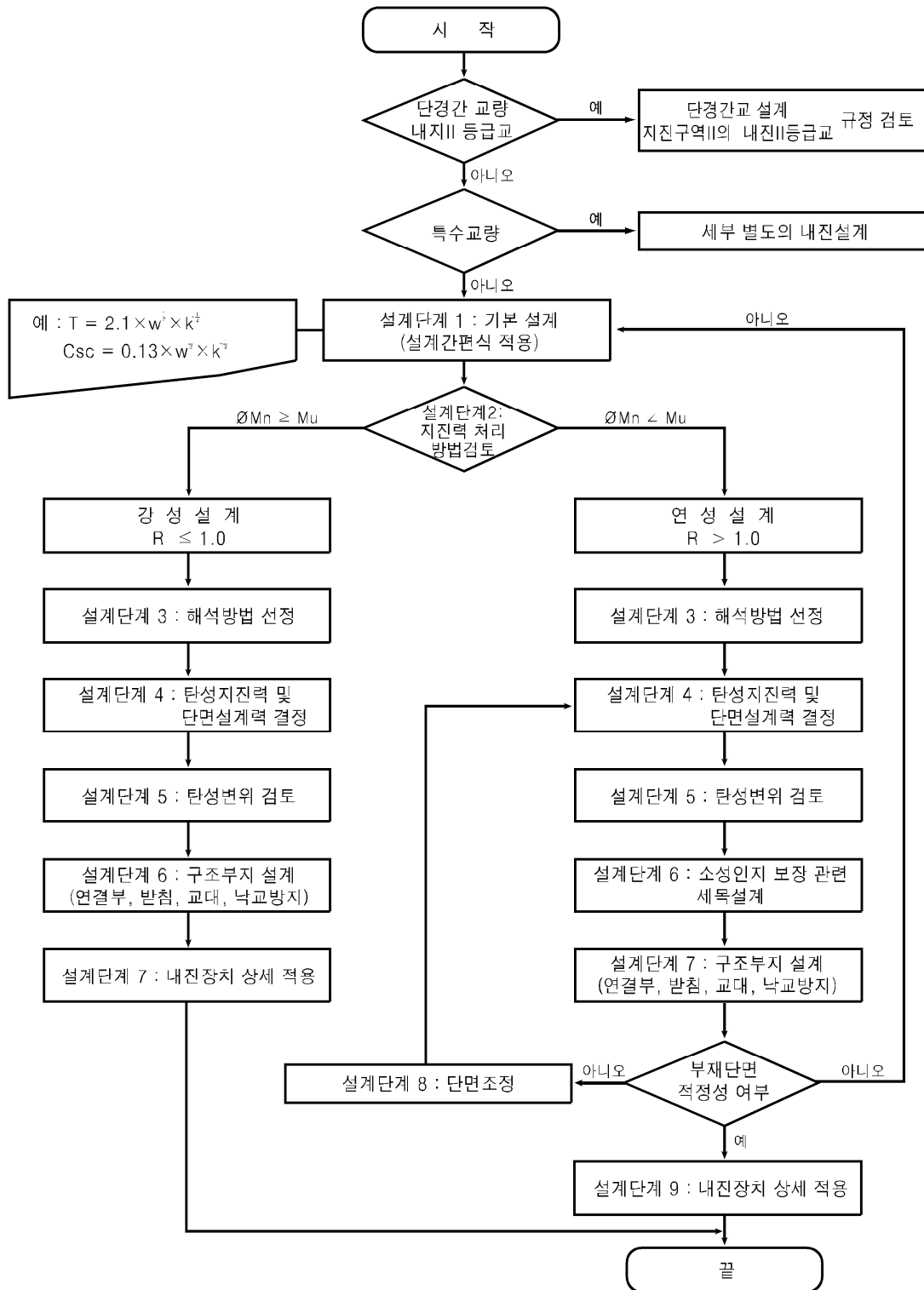
11.1.2 내진설계 기본조건

- (1) 단순성(Simplicity)
- (2) 대칭성(Symmetry)
- (3) 완전성(Completeness)
- (4) 연속성(Continuity)

11.1.4 부재의 허용 피해

교량 구조물의 허용피해 부재는 교각 연결부의 소성모멘트에 의한 항복과 이탈부재로 설계된 교대의 종벽 및 신축 이음부 등의 국부 부재에 국한하며, 어떠한 경우에도 주요 부재의 파괴 및 붕괴가 발생하지 않도록 하여야 한다.

11.1.5 내진 설계과정 흐름도



<그림 11.1> 신설교량의 내진 설계 흐름도

11.2 일반사항

11.2.1 가속도 계수

- (1) 지진재해도 해석 결과에 근거하여 우리나라의 지진구역을 [표 11.2.1]과 같이 설정한다. 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수는 [표 11.2.2]에 수록된 바와 같이 구역 I에서 0.11, 구역 II에서는 0.07이다.
- (2) 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수는 [표 11.2.3]과 같다. 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이다.
- (3) 교량이 위치할 부지에 대한 지진지반운동의 가속도계수 A는 [표 11.2.2]에서 규정된 내진등급별 설계지진의 재현주기에 해당되는 위험도계수를 지진구역에 따른 지진구역계수에 곱하여 계산한다.

[표 11.2.1] 지진구역 구분

지진구역	행정구역(5)	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부(1), 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부(2)
II	도	강원도 북부(3), 전라남도 남서부(4), 제주도

주 : (1) 강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
(2) 전라남도 북동부(군, 시) : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
(3) 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
(4) 전라남도 남서부(군, 시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시
(5) 행정구역의 경계를 통과하는 교량의 경우에는 구역계수가 큰 값을 적용한다.

[표 11.2.2] 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

[표 11.2.3] 위험도계수

재현주기(년)	500	1000
위험도계수, I	1	1.4

11.2.2 내진등급과 설계지진수준

- (1) 교량의 내진등급은 [표 11.2.4]와 같이 교량의 중요도에 따라서 내진등급과 내진III등급으로 분류한다.
- (2) 교량은 [표 11.2.4]에서 내진등급별로 규정된 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 설계되

어야 한다.

[표 11.2.4] 도로교의 내진등급과 설계지진

내진등급	교 량	설계지진의 평균재현주기
내진 I 등급교	- 고속도로, 자동차전용도로, 특별시도, 광역시도 또는 일반국도상의 교량 - 지방도, 시도 및 군도 중 지역의 방재계획상 필요한 도로에 건설된 교량, 해당도로의 일일계획교통량을 기준으로 판단했을 때 중요한 교량 - 내진 I 등급교가 건설되는 도로위를 넘어가는 고가교량	1000년
내진 II 등급교	내진 I 등급교에 속하지 않는 교량	500년

11.2.3 지반의 분류

- (1) 지반의 분류는 교량의 지진하중을 결정하는데 고려되어야 한다. [표 11.2.5]에 명시된 지반 계수 S는 [표 11.2.6]에서 정의된 지반종류에 근거를 두고 있다.

[표 11.2.5] 지반계수

지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

[표 11.2.6] 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치(1))	비배수전단강도(kPa)
I	경암지반 보통지반	760 이상	-	-
II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
III	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
IV	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주 : (1) 비점착성 토층만을 고려한 평균 N치

- (2) 지반종류 V는 부지의 특성조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반으로서, 전문가가 작성한 부지종속 설계응답스펙트럼을 사용하여야 한다.

- ① 액상화가 일어날 수 있는 흙, 키클레이와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- ② 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반
- ③ 매우 높은 소성을 갖는 점토지반
- ④ 층이 매우 두꺼우며, 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토

11.2.4 응답수정계수

- (1) 제 11.5, 11.6, 11.7에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건을 모두 충족시키는 경우, 교량의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 11.3.7에서와 같이 규정된 탄성지진력을 [표 11.2.7]의 응답수정계수로 나눈 값으로 한다. 다만 하부구조의 경우 축방향력과 전단력은 응답수정계수로 나누지 않는다.
- (2) 제 11.5, 11.6, 11.7에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건을 충족시키지 못하는 경우, 하부구조와 연결부분에 대한 응답수정계수는 각각 1.0과 0.8를 넘지 못한다.
- (3) 응답수정계수 R은 하부구조의 양 직교축방향에 대해 모두 적용한다.
- (4) 벽식교각의 압축방향은 11.8의 기둥규정을 적용하여 설계할 수 있다. 이때 응답수정계수 R은 단일 기둥의 값을 적용할 수 있다.

[표 11.2.7] 응답수정계수, R

하 부 구 조	R	연 결 부 분(1)	R
벽식교각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝 가구 (Bent)			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3	상부구조의 한 지간내의 신축이	0.8
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2		
단일 기둥	3	기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	5	기둥 또는 교각과 기초	1.0
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3		
다주 가구	5		

* 주 : (1) 연결부분은 부재간에 전단력과 압축력을 전달하는 기구를 의미하며, 교량받침과 전단키가 이에 해당된다. 이 때, 응답수정계수는 구속된 방향으로 작용하는 탄성지진력에 대하여 적용된다.

11.3 해석 및 설계에 대한 규정

- (1) 탄성지진력은 '11.4 해석방법'에 규정한 값으로 한다.
- (2) 재료 및 기초 설계조건은 '11.5 기초 및 교대의 내진설계, 11.6 강교 설계 및 11.7 콘크리트 교 설계'에 따른다.

- (3) 교량의 내진설계절차는 모든 내진등급의 교량에 대하여 동일하게 적용한다. 다만 단경간교에 대한 내진설계는 11.3.5과 11.3.8에 따른다. 또한 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 내진설계는 11.3.6과 11.3.8에 의해서 수행될 수 있다.

11.3.1 일반 사항

이 절의 내용은 선형 탄성해석의 결과를 수정하여 얻은 내력에 의한 교량의 설계법에 관한 것이다. 이 절의 규정들은 지진시에 기둥은 항복하지만, 연결부분과 기초는 손상을 거의 받지 않는다고 가정한다.

11.3.2 해석방법

- (1) 교량의 지진해석방법은 ‘11.4 해석방법’에 규정된 단일모드스펙트럼해석법(Single Mode Spectral Method)을 사용하는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 정밀한 해석을 요한다고 판단되는 교량에 대해서는 다중모드스펙트럼해석법 또는 공인원 해석법을 사용할 수 있다.
- (3) 단경간교 및 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교는 상세한 지진해석을 할 필요가 없다.

11.3.3 탄성력 및 탄성변위

- (1) 탄성력과 탄성변위는 ‘11.3.2 해석방법’에 규정한 해석방법을 사용하여 두 개의 직교축에 대하여 독립적으로 해석하고 ‘11.3.4 직교 지진력의 조합’에 규정한 방법으로 조합하여야 한다.
- (2) 두 개의 직교축은 교량의 종방향축과 횡방향축으로 하는 것이 표준적이지만 설계자가 임의로 정할 수 있다. 곡선교는 양측 교대를 연결하는 현을 종방향으로 정할 수 있다.

11.3.4 직교 지진력의 조합

- (1) 교량의 모든 부재는 자중 및 부속시설물을 고려한 연직방향 고정하중과 수평방향 지진력이 조합된 설계하중에 저항하도록 설계되어야 한다.
- (2) 부재의 각각의 주축에 대한 설계지진력은 ‘11.3.3 탄성력 및 탄성변위’에 규정한 방법으로 구한 지진력을 다음과 같이 조합하여 사용한다.
 - ① 하중 경우 1
종방향축의 해석으로부터 탄성지진력(절대값)에 횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.
 - ② 하중 경우 2
횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.

11.3.5 단경간교의 설계규정

- (1) 상부구조와 교대 사이의 연결부에 대하여 고정하중반력에 ‘11.2.2 내진등급과 설계지진수준’에 규정된 가속도 계수와 ‘11.2.3 지반의 분류’에 규정된 지반계수를 곱한 값의 수평지진력이 작용한다고 보고 종방향 및 횡방향에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다.

(2) 낙교방지를 위한 최소 받침 지지길이는 '11.3.8 설계변위'에 규정한 값으로 한다.

11.3.6 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 설계지진력

- (1) 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교에서 상부구조와 하부구조를 연결하는 교량받침이나 기계 장치는 고정하중의 20%에 해당되는 수평지진력이 구속방향으로 작용한다고 보고 이에 저항하도록 설계하여야 한다.
- (2) 종방향으로 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.

11.3.7 설계지진력

(1) 구조부재 및 연결부의 설계지진력

- ① 본항에서 구하는 설계지진력은 다음의 각 경우에 대하여 적용한다.
 가. 상부구조, 상부구조의 신축이음 및 상부구조와 하부구조상단 사이의 연결부
 나. 하부구조 상단으로부터 기둥이나 교각의 하단까지 (단 후텁, 말뚝머리 및 말뚝은 포함하지 않는다.)
 다. 상부구조와 교대의 연결요소
- ② ①의 설계지진력은 '11.3.4 직교지진력의 조합의 하중경우 1 또는 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 '11.2.4 응답수정계수에 규정한 응답수정계수 R로 나눈 값으로 한다.
- ③ ②의 설계지진력은 다른 설계력과 함께 독립적으로 전체 하중조합식에 조합하여야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 식(11.3.1)로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음중 불리한 경우를 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0(D+B+F+H+EM) \quad [\text{식 11.3.1}]$$

여기서, D = 고정하중

B = 부력

F = 유체압

H = 횡토압

EM = ②의 설계지진력

- ④ 구조물의 각 요소에서 단면의 설계강도는 도로교 설계기준 제2장 설계일반사항의 강도설계법 하중조합에서 지진하중이 포함된 하중조합의 모든 종류의 하중에 하중계수 1.0을 사용하여 구한 소요강도 이상이어야 하며, 11.5, 11.6, 11.7의 설계규정을 만족하여야 한다. 단, 11.5, 11.6, 11.7에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건을 충족시키지 못할 경우 11.2.4 (2)에서 규정한 응답수정계수를 적용한 지진하중을 사용한다.
- ⑤ 식(11.3.1)은 도로교설계기준 [표 2.2.1] 및 [표 2.2.2]와 함께 사용하여야 하며 본 하중조합에 대한 허용응력은 규정된 허용응력에 [표10.3.1]에 주어진 증가계수를 곱한 값으로 한다.

[표 11.3.1] 허용응력의 증가계수

구조물의 종류	허용응력 증가계수
강 구조물	1.5
철근콘크리트 구조물	1.33

(2) 기초의 설계지진력

- ① 확대기초, 말뚝 머리 및 말뚝을 포함하는 기초의 설계지진력은 '11.3.4 직교지진력의 조합'의 하중경우 1 또는 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 '11.2.4 응답수정계수'에 규정한 하부구조(기둥 또는 교각)에 대한 응답수정계수R의 1/2로 나눈 값으로 한다. 단 말뚝 가구의 설계지진력은 탄성지진력을 해당 구조물의 응답수정계수 R로 나눈 값으로 한다.
- ② ①의 설계지진력은 다른 설계력과 함께 전체 하중조합식에 조합하여야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 식(11.3.2)로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음 중 불리한 경우를 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0 (D + B + F + H + EF) \quad [\text{식 11.3.2}]$$

여기서, D = 고정하중

B = 부력

F = 유체압

H = 횡토압

EF = ①의 설계지진력

- ③ 기초의 각 요소에서 단면의 설계강도는 도로교 설계기준 제2장 설계일반사항의 강도설계법 하중조합에서 지진하중이 포함된 하중조합의 모든 종류의 하중에 하중계수 1.0을 사용하여 구한 소요강도 이상이어야 하며 11.6의 설계규정을 만족하여야 한다.

(3) 교대 및 옹벽

- ① 상부구조와 교대의 연결부(받침, 전단연결재)는 (1)의 설계지진력에 저항하도록 설계하여야 한다.
- ② 교대는 '11.5.4 교대(2)'의 규정에 따라 설계하여야 한다.

11.3.8 설계변위

- (1) 이 절에서 정한 최소 받침 지지길이는 모든 거더의 단부에서 확보하여야 한다.
- (2) 최소 받침 지지길이의 확보가 어렵거나 낙교방지를 보장하기 위해서는 변위구속장치를 설치해야 한다.
- (3) 단경간교와 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 최소 받침 지지길이(N)는 식(11.3.3)에 규정한 값보다 작아서는 안된다.

$$N = (200 + 1.67L + 6.66H)(1 + 0.000125\theta^2) \text{ (mm)} \quad [\text{식 11.3.3}]$$

여기서,

L: 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m)

다만, 지간내에 힌지가 있는 경우의 L은 힌지 좌·우측방향의 거리인 L₁과 L₂의 합으로 한다(<그림 11.3.1> 참조).

H: 다음 각 경우에 대한 평균 높이(m)

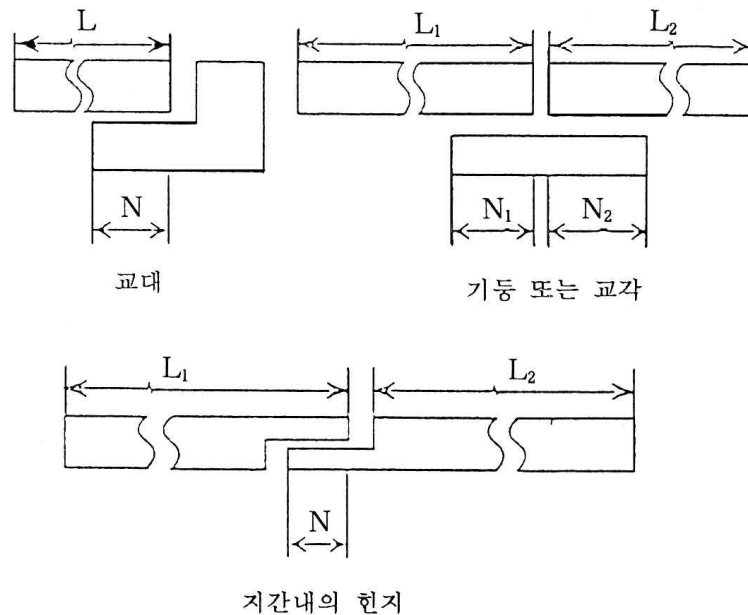
교대 - 인접 신축이음부의 교량상부를 지지하는 기둥의 평균 높이, 단경간교의 평균 높이는 0으로 한다.

기둥 또는 교각 - 기둥 또는 교각의 평균 높이.

지간 내의 힌지 - 인접하는 양측 기둥 또는 교각의 평균 높이.

θ: 받침선과 교축직각방향의 사이각(도)

- (4) 단경간교와 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교를 제외한 모든 교량의 설계지진변위는 11.3.3에 규정된 값과 11.3.8에 규정된 값 중 큰 값으로 한다.



* 신축이음 또는 교량 상판의 단부

<그림 11.3.1> 최소 받침 지지길이 규정에 관한 치수

- (5) 상부구조의 여유간격

- ① 지진시에 상부구조와 교대 혹은 인접하는 상부구조간의 충돌에 의한 주요구조부재의 손상을 방지하고, 설계시 고려된 내진성능이 충분히 발휘될 수 있도록 하기 위하여 상부구조의 단부에는 <그림 11.3.2>에 나타낸 바와 같이 여유간격을 설치한다.

$$\Delta l_i = d + \Delta l_s + \Delta l_c + 0.4 \Delta l_t \quad [\text{식 11.3.4}]$$

여기서, Δl_i : 상부구조의 여유간격 (mm)

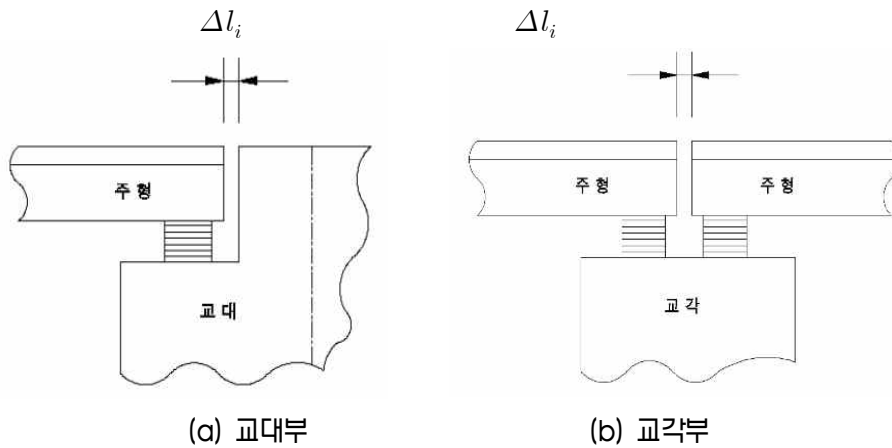
d : 지반에 대한 상부구조의 총 변위($d_i + d_{sub}$) (mm)

Δl_s : 콘크리트의 건조수축에 의한 이동량 (mm)

Δl_c : 콘크리트의 크리프에 의한 이동량 (mm)

Δl_t : 온도변화로 인한 이동량 (mm)

- ② 단, 상부구조의 여유간격은 가동받침의 이동량보다는 커야 하며 교축직각방향의 지진시 변위에 의한 인접상부구조 및 주요구조부재간의 충돌 가능성이 있을 때는 이를 방지하기 위한 여유간격을 설치한다.



<그림 11.3.2> 교량의 여유간격

11.3.9 받침 배치방법

- (1) 받침을 사용할 경우, 받침 배치방법은 가능한 한 고정받침과 일방향받침의 축선이 상부구조의 질량중심을 통과하도록 배치하여야 한다.
- (2) 전단키는 고정받침의 수평력 보강방법으로 받침의 이동에 지장을 초래하지 않도록 한다.

11.3.10 받침의 수평 지지력 계산

- (1) 교량의 안전성 확보를 위해 받침의 수평지지력 계산을 수행하여야 한다.
- (2) 받침의 수평지지력은 고정받침 극한상태 지지력(Ultimate limit state), 전단키의 극한 상태 지지력 합으로 정적 수평변위에 의한 수평력과 동적 계산결과에 의한 수평력 보다 작지 않아야 하며, 극한 수평지지력은 계산서 및 도면에 명시하여야 한다.
- (3) 받침의 수평저항력은 보강한 경우, 보강받침의 규격 및 배치에 대해 별도의 계산서 및 도면을 첨부하여야 한다.

11.4 해석방법

11.4.1 일반사항

- (1) 교량의 내진해석은 다음과 같은 두 가지의 해석방법 중 하나를 사용하여야 한다.
- ① 단일모드스펙트럼해석법
 - ② 다중모드스펙트럼해석법
- (2) 두 가지 방법 모두에 있어서 모든 고정된 기둥과 교각 또는 교대 지점들은 동일 시점에 있어서 동일한 지반운동을 한다고 가정한다. 가동지점에서는 이 장에서 기술된 해석으로부터 구한 변위가 '11.3.8 설계변위에서 규정된 최소 요구치보다 큰 경우 이 값을 수정없이 사용하여야 한다.

11.4.2 탄성지진응답계수

- (1) 설계력의 결정에 쓰이는 탄성 지진응답계수 C_s 는 다음과 같은 무차원의 식으로 구한다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad [\text{식 11.4.1}]$$

여기서,

A : 11.2.1 가속도 계수'로부터 구하는 가속도 계수

S : 11.2.3 지반의 영향'에 규정한 지반특성에 대한 무차원의 계수

T : 11.4.3 단일모드스펙트럼해석법' 또는 다른 적합한 방법에 의하여 결정된 교량의 주기

다만, C_s 값은 $2.5A$ 보다 크게 취할 필요는 없다.

- (2) m 번째 진동모드에 대한 탄성 지진응답계수 C_{sm} 은 다음 공식에 따라 구한다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad [\text{식 11.4.2}]$$

여기서,

T_m : m 번째 진동모드의 주기

다만, C_{sm} 값은 $2.5A$ 보다 크게 취할 필요는 없다.

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

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad [\text{식 11.4.3}]$$

11.4.3 단일모드스펙트럼해석법

- (1) 특수교량을 제외한 일반교량의 내진해석에서 부재의 단면력과 처짐을 계산하는 등가 정적 지진하중 $P_e(x)$ 는 다음 식으로 산정한다.

$$P_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) V_s(x) \quad [\text{식 11.4.4}]$$

여기서,

$P_e(x)$: 등가정적 지진하중이며 진동의 기본모드를 대표하기 위해 가하는 단위 길이당 하중강도(<그림 11.4.1>)

C_s : 식(11.4.1)로 계산하는 탄성지진 응답계수

- (2) 여기서 교량의 주기 T 는 다음과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{P_o g a}} \quad [\text{식 11.4.5}]$$

여기서,

g : 중력 가속도 9.81m/sec^2

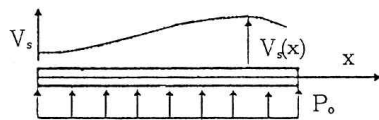
$w(x)$: 교량 상부구조와 이의 동작가동에 영향을 주는 하부구조의 단위길이당 고정하중

$v_s(x)$: 균일한 등분포하중 p_o 에 의한 정적 처짐(<그림 11.4.1>)

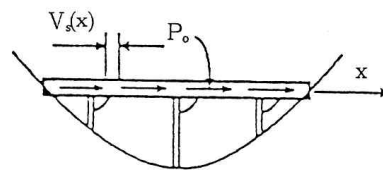
$$a = \int v_s(x) dx \quad [\text{식 11.4.6}]$$

$$\beta = \int w(x) v_s(x) dx \quad [\text{식 11.4.7}]$$

$$\gamma = \int w(x) v_s(x)^2 dx \quad [\text{식 11.4.8}]$$

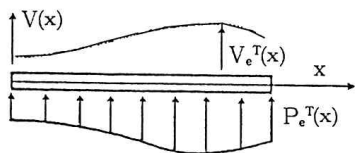


(a) 평면도, 횡방향 하중

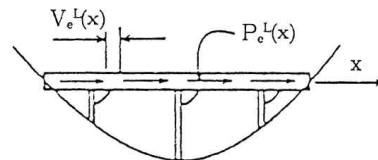


(b) 입면도, 종방향 하중

<그림 11.3> 횡방향 및 종방향으로 가정된 하중을 받는 교량 상판



(a) 평면도, 횡방향 하중



(b) 입면도, 종방향 하중

<그림 11.4.1> 횡방향 및 종방향으로 등가하중을 받는 교량 상판

11.4.4 다중모드스펙트럼해석법

(1) 일반사항

다중모드스펙트럼해석법은 비정형 교량의 3방향 연계 효과와 최종 응답에 대한 다중모드의 기여 효과를 결정하기 위해 공인된 공간뼈대 선형 동적해석 프로그램을 사용하여 수행하여야 한다.

(2) 수학적 모형

- ① 교량은 그 구조물의 강성과 관성효과를 실제로 가깝게 모형화하기 위해 적절한 절점으로 구성된 3차원 공간뼈대 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 모형화하여야 하며, 구조 질량은 하부 구조를 포함하여 관련된 모든 요소들을 고려하여야 한다.
- ④ 지진시에도 교량에 큰 활하중이 재하되어 있을 가능성이 많은 경우에는 그 활하중의 관성효과를 고려하여야 한다.
- ⑤ 상부구조는 최소한 각 경간단부의 연결부와 지간의 1/4지점마다 절점을 가진 공간 뼈대부재의 집합체로 모형화해야 한다. 신축이음부와 교대의 불연속 부분도 상부구조에 포함하여야 하며, 이 때 집중질량의 관성효과를 적절하게 분배시켜야 한다.
- ⑥ 하부구조에서 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. 하부구조의 모형은 상부구조에 대한 기둥의 편심을 고려해야 한다. 기둥 또는 교각하부와 교대에서의 지반은 등가의 선형 스프링계수를 이용하여 모형화할 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 계산하여야 한다.

(4) 다중모드 스펙트럼 해석모형의 정확도

다중모드 스펙트럼 해석결과는 해석모형의 집중질량의 자유도 선정과 고려된 고유 진동모드의 개수에 따라 달라지므로 해석모형의 정확도를 확보하기 위해서 질량 기여도(Mass Participation Factor) 합이 90% 이상을 확보하는 것이 좋다.

(5) 부재의 단면력과 변위의 조합 방법

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

11.5 기초 및 교대의 내진설계

11.5.1 적용범위

본 절은 기초 및 교대의 내진설계에 관해서만 다룬다. 따라서 구조물들은 지진으로 인한 하중 이외의 일반적인 수평 및 수직하중에 대해서는 충분히 견딜 수 있도록 설계된 것으로 간주한다.

11.5.2 기 초

(1) 조사

지진구역 I 에서는 평상시 설계에 필요한 조사 이외에 지진에 대한 (1)사면의 불안정, (2)액상화, (3)성토의 침하, (4)수평토압 증가와 관련된 지진 피해 가능성 판단과 내진설계에 필요한 조사를 추가하여야 한다. 이 때 최대지진지반가속도는 가속도계수 A 를 사용할 수 있다.

(2) 액상화

① 액상화 검토에 필요한 기본적인 자료는 다음과 같다.

가. 지질 및 지형에 대한 자료

나. 입도분포, 밀도, 지하수위

다. 현장 시험(예, 표준관입 시험치)이나 실내시험(반복전단시험) 자료

라. 설계 지진 규모(최대 지반가속도와 지속시간)

② 액상화에 대한 안전율은 다음과 같이 정의되며, 안전율은 실내시험(반복전단시험)을 수행할 시는 1.0 이상, 현장시험(표준관입시험)을 수행할 시는 1.5 이상이 되어야 한다.

$$FS_L = \frac{v_l}{v_d} \quad [\text{식 11.5.1}]$$

여기서,

v_l : 설계지진(지진규모)에 상응하는 등가의 반복횟수에서 액상화를 일으키는 평균반복전단응력

v_d : 설계지진에 상응하는 등가의 평균반복전단응력

③ v_l 은 불교란시료의 실내 반복전단시험이나 현장시험(예: 표준관입시험)결과로부터 결정할 수 있다.

④ v_d 는 지반응답해석으로 계산하거나, 지진규모 6.5를 적용하여 Seed와 Idriss (1971)의 간편법으로 산출한다.

(3) 기초설계

지진에 대한 기초설계는 등가정적하중법을 이용한다. 등가정적하중법에서 지진으로 인한 기초하중은 구조물의 평형조건에 필요한 반력과 모멘트로부터 결정한다. 기초설계시 다음을 고려하여야 한다.

① 지진이 발생하는 동안에 일어나는 지반의 강도와 강성의 변화

② 기초의 상승

지진의 반복하중에서 지반의 강도가 심하게 감소하지 않는 경우에는 선단지지 균말뚝수의 1/2까지, 기초 바닥판 접촉면적의 1/2까지는 일시적으로 지반과 분리되는 것을 허용한다.

③ 말뚝의 횡하중

수평방향의 강성을 계산할 때는 말뚝을 탄성체로 간주하고, Winkier의 탄성기초 해석법 또는 탄성연속체 해석방법 및 등가 캔틸레버개념을 이용한다. 그러나 연약점토와 사질토에서 큰 수평력이 발생하는 경우에는 지반의 비선형 반력을 고려할 수 있는 말뚝의 p-y곡선을 사용한 설계를 하여야 한다.

- ④ 지반과 말뚝의 상호작용
자유장 지진의 지반운동과 말뚝사이의 상호작용결과 나타나는 교량 구조물의 관성효과로 인한 횡하중을 고려한다.
- ⑤ 기초의 침하량
구조물 설계시에는 기초가 침하하더라도 교량 구조물이 지진에 견딜 수 있도록 하여야 한다.
- (4) 말뚝설계시 특별히 요구되는 사항
지반과 교량의 응답 특징들이 불확실하기 때문에 내진설계시 말뚝의 일반설계시 요구 조건 이외에 부수적인 요구조건들을 만족시켜야 한다.
- ① 말뚝의 요구조건
가. 내진설계에서는 말뚝의 극한지지력 개념을 사용하여야 한다.
나. 모든 말뚝은 기초의 바닥 콘크리트의 캡에 적절히 정착되어야 한다.
다. 콘크리트로 채운 말뚝은 특별한 결합부가 없다면, 기초의 바닥 콘크리트로부터 말뚝으로 상승력이 전달될 수 있도록 충분한 길이의 철근을 매설하여 정착하여야 한다.
라. 속채움이 없는 강관말뚝, 나무말뚝, 강말뚝은 정착장치를 설치하여야 한다. 그러나 어떤 경우라도 상승력은 말뚝의 허용지지력의 10% 이상이 되도록 설계하여야 한다.
- ② 보강철근은 말뚝과 바닥판 콘크리트를 일체로 하기 위해서 그리고 말뚝에서 말뚝캡으로 하중전달을 용이하게 하기 위해서 콘크리트 바닥판까지 연장되어야 한다.
- ③ 기초 콘크리트 바닥판 바로 밑의 말뚝 머리가 완전히 부서지거나 힌지와 같은 거동을 방지하기 위해서, 띠철근 간격을 줄이는 것이 좋다. 기성말뚝에서는 적당한 전단강도를 확보하기 위해 나선철근을 사용하여 만들어야 하고, 항복곡률의 허용치는 지반 또는 구조물 응답에 의해 분배되어야 한다. 말뚝은 지표면 아래에서 파괴되지 않고, 기둥의 휨 항복을 지표면 위에서 발생하도록 하여야 한다.

11.5.3 교 대

- (1) 일반사항
지진시에 교대의 파괴나 변위에 의한 교량의 손상 또는 파괴가 빈번히 발생하므로 지진지역 내에 설치되는 교대의 설계 및 세부설계는 신중하게 실시되어야 한다.
- (2) 독립식 교대
① 독립식 교대의 설계에서는 지진에 의한 수평토압, 교대의 관성력과 더불어서, 상부 구조물이 자유롭게 미끄러질 수 없는 받침으로 지지되는 경우에는 상부구조물로부터 전달되는 지진력을 함께 고려하여야 한다.
② 지진시에 독립식 교대에 작용하는 토압은 Mononobe-Okabe에 의해 개발된 등가정적해석법으로 계산할 수 있으며 이 때 토압은 교대의 배면에 균등하게 분포하고 그 합력은 교대 높이의 1/2에 작용하는 것으로 가정한다.
- 가. 주동토압

$$P_{AE} = 1/2 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v) \cdot K_{AE} \quad [\text{식 11.5.2}]$$

여기서, K_{AE} 는 지진시 주동토압계수로써

$$K_{AE} = \frac{\cos(\varnothing - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta + \beta + \theta) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varnothing + \delta) \cdot \sin(\varnothing - \theta - i)}{\cos((\delta + \beta + \theta) \cdot \cos(i - \beta))}}\right)^2} \quad [\text{식 11.5.3}]$$

나. 수동토압

$$P_{PE} = 1/2 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v) \cdot K_{PE} \quad [\text{식 11.5.4}]$$

여기서, K_{PE} 는 지진시 주동토압계수로서

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\varnothing - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta - \beta + \theta) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varnothing - \delta) \cdot \sin(\varnothing - \theta + i)}{\cos((\delta - \beta + \theta) \cdot \cos(i - \beta))}}\right)^2} \quad [\text{식 11.5.5}]$$

여기서, γ : 흙의 단위체적중량

H : 교대 높이

$\varnothing$: 흙의 내부마찰각

$$\theta : \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right)$$

δ : 흙과 교대사이의 마찰각

K_h : 수평 지진 계수

K_v : 연직 지진 계수

i : 뒷채움흙의 경사각

β : 교대배면이 수직에 대한 각

③ 교축방향 변위를 허용하는 독립식 교대

가. 구조물의 경제성을 도모하기 위해서는 교대를 교축방향 변위가 전혀 발생하지 않도록 설계하기 보다는 작은 변위를 허용하는 조건에 대해 설계하며 이 때 적용할 수평지진계수 K_h 는 $0.5A$ 가 권장되고 예상되는 변위는 $250A$ mm로 볼 수 있다.

나. 교대는 지진시에 미끄러짐만 허용하고 전도가 발생하지 않아야 하며 교대받침의 손상을 최소로 하기 위하여 미끄러짐에 의한 교축방향 변위를 감당할 수 있도록 설계되어야 한다.

④ 교축방향 변위를 구속하는 독립식 교대는 Mononobe-Okabe의 등가정적하중법에 의한 토압보다 큰 수평토압이 작용되지만 이 토압은 수평지진계수 K_h 를 $1.5A$ 로 적용하여 Mononobe-Okabe의 방법으로부터 개략적으로 계산할 수 있다.

(3) 일체식 교대

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

11.5.4 기초와 교대의 강성 계산

내진설계시 기초와 교대의 강성을 계산하여 일반적인 구조물 설계와 같이 설계한다.

(1) 근입된 기초의 강성

$$K = \alpha \cdot \beta \cdot K_o \quad [\text{식 11.5.6}]$$

여기서, α : 흙의 단위체적 중량

β : 교대 높이

K_o : 흙의 내부마찰각

(2) 교대의 수평변위와 회전에 의한 강성

① 수평변위에 의한 강성

$$K_s = 0.425 \cdot E_s \cdot B \quad [\text{식 11.5.7}]$$

② 회전에 의한 강성

$$K_r = 0.072 \cdot E_s \cdot B \cdot H^2 \quad [\text{식 11.5.8}]$$

여기서, E_s : 뒷채움 흙의 동적 탄성계수

B : 교대의 폭

H : 교대 높이

11.6 강교 설계

11.6.1 일반사항

(1) 구조용 강재 기둥과 연결부의 설계와 시공은 '도로교설계기준'과 이 절의 추가 요구조건을 만족시켜야 한다.

(2) 허용응력 설계법 적용시 허용응력을 50% 증가시킨다.

11.6.2 P- Δ 효과

P- Δ 효과(지진변위로부터 발생하는 편심과 기둥 축력에 의한 모멘트)로 인한 2차 힘을 고려하여 축방향 응력과 휨응력을 계산할 때는 모든 축방향 하중을 받는 부재는 '도로교설계기준 강교편 3.4.3 축방향력 및 휨모멘트를 받는 부재'에 의거하여 설계하여도 된다.

11.7 콘크리트교 설계

11.7.1 일반사항

- (1) 일체로 현장타설되는 기둥, 교각의 확대기초와 연결부 등의 설계와 시공은 '도로교설계기준'과 본 절의 추가 요구조건을 따라야 한다.
- (2) 허용응력 설계법 또는 강도설계법을 사용할 수 있으며 허용응력 설계법에 따를 경우 허용응력을 33% 증가시킨다.

11.7.2 최소 횡방향철근

- (1) 기둥의 상부와 하부에서 최소 횡방향철근에 대한 요구사항은 (2)에 횡방향철근의 간격에 대한 요구사항(3)에 규정한다.
 - (2) 소성힌지에서의 심부 구속을 위한 횡방향철근
 - ① 일반적으로 소성영역이 예상되는 기둥과 말뚝기둥의 상부와 하부의 심부(Core)는 이 절의 규정에 따라 횡방향철근으로 구속해야 한다. 이 때 횡방향 철근의 항복강도는 축방향 철근의 항복강도를 초과할 수 없다.
- 가. 원형기둥의 나선철근비 ρ_s 는 다음 값들 중 큰값을 취한다.

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad [\text{식 11.7.1}]$$

또는

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \quad [\text{식 11.7.2}]$$

원형후프띠철근을 용접 또는 기계적 연결장치 등으로 연결하거나, 보강띠철근을 추가하여 정착단에서 슬립이 발생하지 않게 함으로써 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있다면, 원형띠철근량의 계산은 나선철근식을 사용할 수 있다.

나선 또는 원형띠철근을 사용한 경우, 결속철근(Cross-Ties)은 심부구속 철근으로 계산하여서는 안된다.

나. 사각형기둥에서 횡방향 띠철근의 총 단면적 A_{sh} 는 다음 값들 중 큰 값을 취한다.

$$A_{sh} = 0.30 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \quad [\text{식 11.7.3}]$$

$$A_{sh} = 0.12 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad [\text{식 11.7.4}]$$

여기서,

a : 띠철근의 수직간격, 최대 150mm

A_c : 기둥 심부의 면적 (m^2)

A_g : 등의 총단면적 (m^2)

A_{sh} : 수직간격이 a 이고, 심부의 단면치수가 h_c 인 단면을 가로지르는 보강띠철근(cross ties)을 포함하는 횡방향철근의 총 단면적(m^2), 직사각형 기둥의 두 주축 모두에 대하여 별도로 계산해야 한다.

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도 (MPa)

f_y : 띠철근 또는 나선철근의 항복강도 (MPa)

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

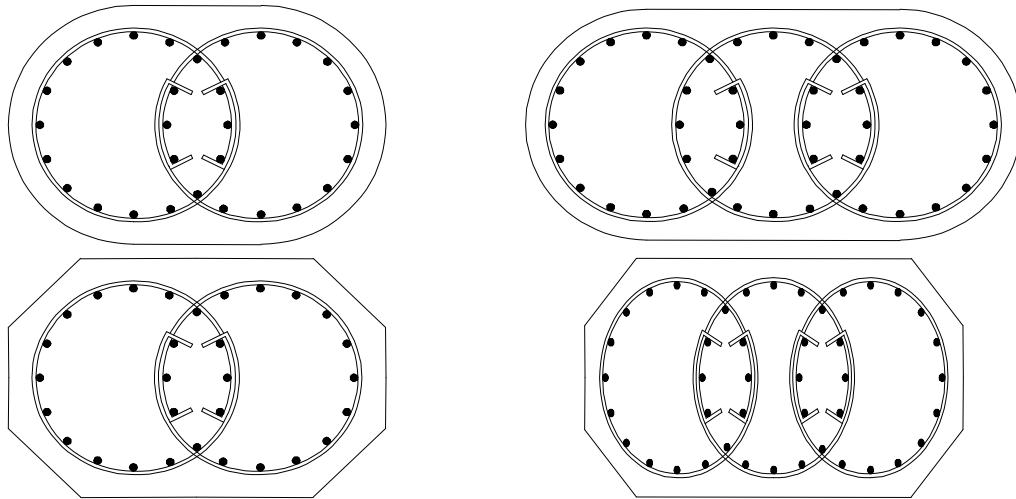
ρ_s : 콘크리트 심부 전체의 부피에 대한 나선철근의 부피의 비(나선철근의 끝에서 끝까지)

- ② 횡방향 철근으로는 하나 또는 중복된 후프띠철근을 사용할 수 있으며, 후프띠철근과 같은 크기의 보강띠철근을 사용할 수 있다. 보강띠철근은 그 양단이 외측 축방향 철근에 걸리게 하여야 한다.
 - ③ 보강띠철근은 하나의 연속된 철근으로 한쪽 단에 135° 이상의 갈고리를 갖고, 다른 쪽 단에 90° 이상의 갈고리를 갖도록 하여야 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. 갈고리는 외측 축방향 철근에 걸리게 하여야 하며, 보강띠철근을 연속적으로 같은 축방향 철근에 걸리게 할 경우 90° 갈고리가 연달아 걸리지 않도록 연속된 보강띠철근의 양단을 바꿔주어야 한다.
 - ④ 후프띠철근은 외측 축방향 철근들을 감싸는 폐합띠철근 형태이거나 또는 나선철근과 유사하게 연속적으로 감은 연속띠철근 형태로 사용할 수 있다. 폐합띠철근 형태는 양단에 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 갖는 135° 갈고리를 가져야 한다. 연속띠철근 형태는 양단에 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 갖는 135° 갈고리를 가져야 하며 이 갈고리는 축방향 철근에 걸리게 하여야 한다.
- (3) 심부 구속을 위한 횡방향 철근의 간격
- ① 심부구속을 위한 횡방향 철근은 기둥의 상부와 하부에 설치하며 설치구간은 기둥의 최대 단면치수, 기둥 순높이의 1/6, 450mm 중 가장 큰 값 이상이어야 한다. 횡방향 철근은 인접부재와의 연결면으로부터 기둥 치수의 0.5배까지 연장해서 설치해야 하나 그 길이가 380mm 보다 작아서는 안된다.
 - ② 말뚝가구의 말뚝 상단에서의 구속을 위한 횡방향 철근은 기둥에 대해 규정된 것과 같은 구간에 설치한다. 말뚝하단에서는 모멘트 고정점에서 말뚝지름의 3배 길이만큼 내려간 위치로부터 진폭선에서 말뚝지름과 450mm 중 큰 값 이상의 길이만큼 올라간 위치까지의 구간에 횡방향 철근을 설치해야 한다.
 - ③ 철근의 최대 간격은 부재 최소 단면치수의 1/4 또는 축방향철근지름의 6배중 작은 값을 초과해서는 안된다.
 - ④ ①②에서 규정된 횡방향으로 구속된 부분에서는 나선철근 겹이음은 허용되지 않는다. 이 부분의 나선철근 연결은 완전 용접 또는 기계적 연결장치로 해야 한다.

(4) 결합형 심부 구속 방법¹⁾

결합형 심부구속방법을 교각의 설계 및 시공에 적용하는 경우에,

- ① 기존배근방법에 비해 동등이상의 내진성능을 가져야 한다.
- ② 형하공간 확보에 유리하고, 미관이 수려하여 도로 및 하천 교량에 효율적인 장방형 단면 교각을 합리적으로 설계할 수 있어야 한다.
- ③ 동일 단면적 대비 장방형의 40%, 원형의 30%의 심부 구속 철근량을 절감할 수 있다.



<그림 11.7.1> 장방형 단면의 결합원형 띠철근 배근 상세 예

11.8 철근콘크리트 기둥의 축방향 철근에 관한 최소 규정

탄성설계시 소성영역이 예상되는 기둥의 상부와 하부에서 기둥의 최대단면치수, 기둥순높이의 1/6, 450mm 중 가장 큰 값으로 결정되는 구간에 배근되는 축방향 철근은 전체 철근 중 1/2 이상이 연속철근(단일철근, 기계적이음 또는 용접이음된 철근)이어야 한다.

11.9 지진격리교량의 설계

11.9.1 일반사항

(1) 적용범위

이 절은 신설되는 지진격리교량의 설계에 적용한다. 적용하는 교량 및 준공의 방법은 1.1에 규정한 바와 같으며, 특수한 형식의 교량(아치교, 사장교, 현수교 등)은 이 절의 설계개념 및 원칙을 준수하고 적절한 보정을 한 지진격리교량 설계기준을 작성하여 설계할 수 있다. 이 절의 설계 규정들은 수평방향으로 지진격리시키는 시스템에 대해서만 고려되었으며, 수직방향에 대해서는 강제라고 가정한다. 또한 이 절의 규정들은 외부에너지를 이용하지 않는 지진격리시스템에만 적용된다.

1) 교각기둥의 결합형 심부구속 방법 설계적용방안 검토 (설계처 3521, 07.12.7)

11.9.2 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. 이 때, 지진격리받침은 교량의 고유주기를 길게 함으로써 교량에 작용하는 지진력을 줄여주고, 지진에너지흡수능력 향상을 통하여 지진시 응답을 감소시키는 역할을 한다. 그 적용에 있어서 다음 사항을 충분히 검토하여야 한다.

- ① 지진격리설계의 적용은 교량의 장주기화 혹은 지진에너지흡수능력 향상효과를 상시와 지진시의 양측면에서 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 공진가능성이 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 사용하여야 한다. 또한 지진시의 반복적인 횡변위와 상하진동에 대하여 안정적으로 거동하여야 한다.
- ④ 이 절에서 규정하고 있는 지진격리받침 이외에도 그 특성의 안정성이 확인된 각종 감쇠기, 낙교방지장치, 지진보호장치 등에 의하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

11.9.3 지진격리교량의 가속도계수

11.2.1의 일반교량의 내진설계에 사용되는 가속도계수가 지진격리교량의 내진설계에도 동일하게 사용된다.

11.9.4 지진격리교량의 내진등급과 설계지진수준

지진격리교량의 내진등급과 설계지진수준은 11.2.2에서 규정된 일반교량의 규정과 동일하다.

11.9.5 지진격리교량의 지반계수

지진격리교량의 지진하중을 결정하는데 사용되는 지진격리교량의 지반계수 S_i 는 [표 11.9.1]와 같으며, 지반종류는 표 11.6에서 정의된 일반교량의 지반종류를 동일하게 사용한다.

[표 11.9.1] 지진격리교량의 지반계수 S_i

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

11.9.6 지진격리교량의 응답수정계수

- (1) 11.5, 11.6, 11.7에서 내진설계를 위해 추가로 규정된 설계요건을 모두 충족시키는 경우, 지진격리교량의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 11.9.7에서 규정된 등가지진력을 [표 11.9.2]의 지진격리교량의 응답수정계수로 나눈 값으로 한다. 다만 하부구조의 경우, 축방향력과 전단력은 응답수정계수로 나누지 않는다.
- (2) 11.5, 11.6, 11.7에서 내진설계를 위해 추가로 규정한 설계요건을 충족시키지 못하는 경우, 하부구조와 연결부분에 대한 응답수정계수는 각각 1.0과 0.8을 넘지 못한다. 이 때, 지진응답 해석을 통하여 설계지진시에 하부구조가 탄성범위 내에서 거동함을 확인하여야 하고, 철근콘크리트 기둥의 철근상세는 11.8를 만족시켜야 한다.

[표 11.9.2] 지진격리교량의 응답수정계수, R_i

하 부 구 조	R_i	연 결 부 분	R_i
벽식 교각	1.5	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝 가구(Bent)			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	1.5	상부구조의 한 지간내의 신축 이음	0.8
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5		
단일 기둥	1.5	기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구		기둥 또는 교각과 기초	1.0
1. 수직말뚝만 사용한 경우	2.5		
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5		
다주 가구	2.5		

11.9.7 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 원칙적으로 식 (11.9.1) 및 (11.9.2)에 의해 산출한다. 해석에 사용되는 지진격리받침의 유효강성은 설계변위에서 계산되어야 한다.

$$k_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n} \quad [\text{식 11.9.1}]$$

$$\beta_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{전체 EDC 면적}}{\Sigma(k_{eff} d_i^2)} \times 100(\%) \quad [\text{식 11.9.2}]$$

여기서,

F_n : 지진격리장치의 원형 시험시, 한 cycle 동안의 최대부변위량 발생시의 수평력

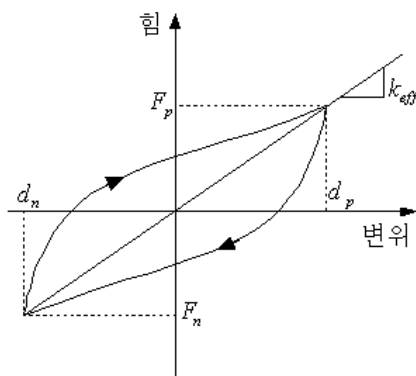
F_p : 지진격리장치의 원형 시험시, 한 cycle 동안의 최대양변위량 발생시의 수평력

d_n : 지진격리장치의 원형 시험시, 한 cycle 동안의 최대부변위

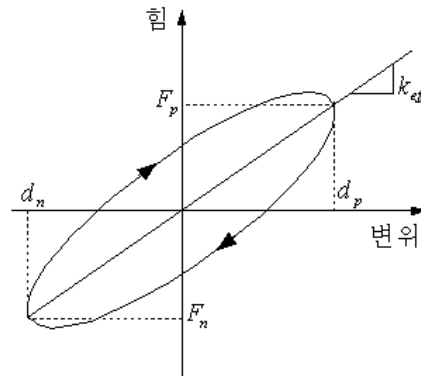
d_p : 지진격리장치의 원형 시험시, 한 cycle 동안의 최대양변위

d_i : 고려하고 있는 방향에 대한 강성 중심에서의 등가지진력에 의한 지진시 설계변위

EDC: 한 cycle 당 소산된 에너지이다.



(1) 이력 거동



(2) 점탄성 거동

<그림 11.9.1> 지진격리받침의 유효강성 및 지진격리시스템의 등가감쇠비 산출

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

(2) 등가정적하중법

등가지진력은 다음과 같다.

$$F_e = C_s W \quad [\text{식 11.9.3}]$$

여기서, F_e : 등가지진력

W : 상부구조물의 총중량이다.

등가지진력을 결정하기 위해서 사용되는 탄성지진응답계수 C_s 는 다음의 무차원식으로 구할 수 있다. 단, C_s 값은 $2.5A$ 보다 크게 취할 필요는 없다.

$$C_s = \frac{K_{eff} \times d}{W} = \frac{AS_i}{T_{eff}B} \quad [\text{식 11.9.4}]$$

지반에 대한 상부구조의 총변위 d 는 아래의 식으로 구한다.

$$d = \frac{250AS_iT_{eff}}{B} (\text{mm}) \quad [\text{식 11.9.5}]$$

여기서, B 는 [표11.9.3] 으로부터 구한다.

유효주기 T_{eff} 는 아래의 식으로 구한다.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}g}} \quad [\text{식 11.9.6}]$$

여기서, K_{eff} 는 지진격리교량의 유효강성이다.

[표 11.9.3] 지진격리교량의 감쇠계수 B

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

(3) 단일모드스펙트럼해석법

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

$$p_e(x) = w(x)C_s \quad [\text{식 11.9.7}]$$

여기서, $p_e(x)$: 등가정적 지진하중의 단위길이당 하중강도

$w(x)$: 상부구조의 단위길이당 고정하중

C_s : 식(11.9.4)에 의하여 계산되는 탄성지진응답계수이다.

(4) 다중모드스펙트럼해석법

탄성지진응답계수는 그림 6.10.2와 같이 해당모드주기 T_i 가 $0.8 T_{eff}$ 를 초과하는 경우에만 B 에 의해 감소된 값이 적용된다.

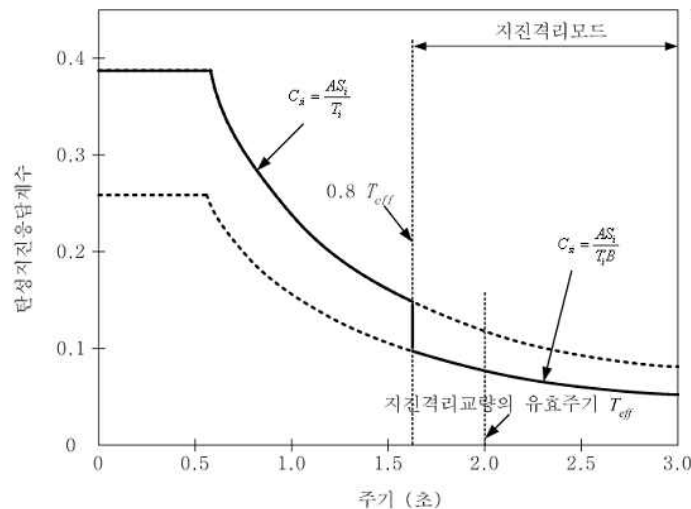
$$C_{si} = \frac{A S_i}{T_i} (T_i \leq 0.8 T_{eff}) \quad [\text{식 11.9.8}]$$

$$C_{si} = \frac{A S_i}{T_i B} (T_i > 0.8 T_{eff}) \quad [\text{식 11.9.9}]$$

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 직교 지진력의 조합에 의한다.



<그림 11.9.2> 지진력리교량의 탄성지진응답계수

(5) 시간이력해석법

시간이력해석이 요구되는 지진력리교량의 경우에는 다음 조건들을 적용하여야 한다.

- ① 지진력리반침의 비선형 특성을 고려하여야 한다.
- ② 시간이력해석을 위한 지진입력 시간이력은 그림 11.9.2에 나타난 감쇠율 5%에 대한 설계지반응답스펙트럼에 부합되도록 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 최소한 4개 이상의 지진운동을 작성하여 사용해야 한다.
- ③ 작성된 시간이력이 설계지반응답스펙트럼에 부합되기 위해서는 작성된 시간이력의 평균 응답스펙트럼이 다음 요건을 만족해야 한다.

가. 시간이력의 응답스펙트럼 값이 설계지반응답스펙트럼 값보다 낮은 주기의 수는 5개 이하이고 낮은 정도는 10% 이내이어야 한다.

나. 시간이력의 응답스펙트럼을 계산하는 주기의 간격은 스펙트럼 값의 변화가 10%이상 되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다.

- ④ 시간이력의 지속시간은 10~25초 또 강진구간 지속시간은 6~10초가 되도록 하여야 한다.
- ⑤ 두방향 이상의 시간이력을 동시에 고려할 경우, 각 직교방향의 시간이력은 통계학적으로 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 해석 결과로부터 얻어진 응답치의 최대값 혹은 7쌍 이상의 해석결과로부터 얻어진 평균값을 설계값으로 한다.

11.9.8 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 최대전단변형율은 상시 70%, 지진시 200% 이내 이어야한다.

(2) 수직력 안정성

- ① 지진격리받침은 수평변위가 없는 상태에서 고정하중과 활하중을 더한 수직하중에 대하여 최소한 3 이상의 안전율을 제공하여야 한다.
- ② 또한 1.2배의 고정하중, 지진하중으로 인한 수직 하중, 그리고 횡방향 변위로 인한 전도하중의 합에 대하여 안정적으로 거동하도록 설계하여야 한다. 여기서 전도하중을 계산할 때의 횡방향 변위는 옴셋변위와 설계지진에 의한 설계변위의 2.0배와 같다.

(3) 회전 성능

지진격리받침의 회전성능은 고정하중, 활하중, 시공오차의 영향을 포함하여야 하고, 여기서 고려되는 시공오차의 설계회전각은 0.005 rad보다 작아서는 안된다.

(4) 품질 기준

지진격리받침과 그 재료는 화학적, 물리적, 기계적 성질이 충분히 안정적이어야 하며, 다음의 조건을 만족하여야 한다.

- ① 다수의 지진격리받침을 대상으로 측정한 평균 유효강성은 설계값의 $\pm 10\%$ 이내이어야 하고, 각각의 유효강성은 설계값의 $\pm 20\%$ 이내이어야 한다. 또한, 평균 EDC 값은 설계값의 -15% 이상이어야 하고 각각의 EDC 값은 설계값의 -25% 이상이어야 한다.

[표 11.9.4] 지진격리받침 유효강성과 EDC 의 품질 기준

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

- ② 지진격리받침의 유효강성 및 등가감쇠비는 지진설계변위에 의한 연속반복재하에 대해 안정적이어야 한다.
 - ③ 지진격리받침은 원칙적으로 지진후에 교량의 기능에 악영향을 주는 잔류변위가 발생하지 않도록 설계해야 한다.
 - ④ 지진격리받침의 유효강성 및 등가감쇠비는 도로교설계기준 2.1.12의 온도범위에서 안정적이어야 한다.
 - ⑤ 지진격리받침은 지진설계변위 범위에서는 항상 양의 접선강성을 가져야 한다.
- (5) PSC I형 거더 교각높이 약 20m 이상에서 면진받침을 사용할 경우²⁾
- ① 기둥단면(직경) 축소로 충실형 단면을 사용할 수 있으며,
 - ② 신축이음 규격 축소로 주행의 안정성을 확보할 수 있으며,
 - ③ 경제적인 시공을 할 수 있다.
 - ④ 중소지간 PSC I형 거더교 교각(약 20m이상) 교량받침 설계시에는 면진받침과 탄성받침의 경제성 및 안정성 등을 비교·검토하여 적용한다.

2) 중소지간 PSCI형 거더교량의 면진받침 적용성 검토 (설계처 3241, 06.12.12)