

제 8-4 편 내진설계



목 차

1. 내진설계 일반	659
1.1 총 칙	659
1.1.1 적용 범위	659
1.1.2 기 호	660
1.1.3 용어의 정의	661
1.2 내진설계의 기본 방침	662
1.2.1 목 적	662
1.2.2 내진 설계기준의 기본 개념	663
1.2.3 내진설계 기본조건	664
1.2.4 품질보증 요건	665
1.2.5 부재의 허용 피해	666
1.2.6 내진 설계과정 흐름도	667
1.3 일반 사항	668
1.3.1 가속도 계수	668
1.3.2 내진등급과 설계지진수준	669
1.3.3 지반의 분류	669
1.3.4 응답수정계수	670
1.4 해석 및 설계에 대한 규정	672
1.4.1 일반 사항	672
1.4.2 해석방법	672
1.4.3 탄성력 및 탄성변위	673
1.4.4 직교 지진력의 조합	674
1.4.5 단경간교의 설계규정	675
1.4.6 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 설계지진력	676
1.4.7 설계지진력	676
1.4.8 설계 변위	678
1.4.9 받침 배치방법	681
1.4.10 받침의 수평 지지력 계산	681
1.5 해석방법	682
1.5.1 일반 사항	682
1.5.2 탄성지진응답계수	684
1.5.3 단일모드 스펙트럼 해석법	685
1.5.4 다중모드 스펙트럼 해석법	686

1.6 기초 및 교대의 내진설계	692
1.6.1 적용 범위	692
1.6.2 기 초	693
1.6.3 연직 방향의 설계 기준면의 결정	696
1.6.4 교 대	697
1.6.5 기초와 교대의 강성 계산	700
1.7 강교 설계	701
1.7.1 일반 사항	701
1.7.2 P- Δ 효과	701
1.8 콘크리트교 설계	701
1.8.1 일반 사항	701
1.8.2 최소 횡방향 철근	702
1.8.3 철근 콘크리트 기둥의 축방향 철근에 관한 최소규정	705
1.9 지진격리 교량의 설계	705
1.9.1 일반 사항	705
1.9.2 지진 격리 설계의 기본 방침	705
1.9.3 지진 격리 교량의 가속도 계수	707
1.9.4 지진 격리 교량의 내진 등급과 설계 지진 수준	707
1.9.5 지진 격리 교량의 지반 계수	707
1.9.6 지진 격리 교량의 응답 수정 계수	708
1.9.7 해석 방법	709
1.9.8 지진 격리 받침	712
1.10 낙교 방지 시설의 설치	715
1.10.1 일반사항	715
1.10.2 낙교 방지 구조	716
1.10.3 낙교방지 장치의 종류	717
1.10.4 낙교 방지 장치의 설치교량	717
1.10.5 이탈장치의 설계	718
참 고 자 료	720



1. 내진설계 일반

1.1 총 칙

1.1.1 적용 범위

- (1) 신설되는 고속도로 교량의 내진 설계의 적용은 200m 이하의 지간장을 갖는 것을 원칙으로 한다. 200m를 넘는 경우에도 장대 교량의 종류, 구조형식, 지질 지반 등의 조건, 교량의 동적 구조특성, 중요도 및 기하학적 조건 등을 고려한 설계자의 판단에 따라 준용할 수 있다.
- (2) 이 규정은 도로교 설계기준을 준수하며, 규정에서 고려되지 않은 이론 및 실험에 의하여 입증된 설계방법 및 재료의 특성을 고려한 설계자의 창의적 설계방법을 허용한다.
- (3) 이 규정에서 규정하고 있지 않은 사항에 대해서는 국토해양부 관련 기준과 규정 등에 따른다.

이 규정은 고속도로 교량의 내진설계 적용범위를 정한 것이다. 적용범위는 진동단위로서 연속장 200m 이하인 신설되는 교량의 탄성응답스펙트럼(elastic response spectrum)에 의한 내진설계로서 연속장이 200m를 넘는 교량에 대해서는 지형, 지질, 지반 등의 조건, 교량의 동적 구조특성, 중요도 및 기하학적 조건 등에 따라 지진에 대하여 안전을 확보할 수 있는 경우에는 이 규정을 준용할 수 있다. 기존교량을 단순확장하는 경우 이 규정을 적용하지 않으며 향후 내하력 평가방법 및 보수 방법에 대한 연구결과가 나오면 보완한다. 또한 이 규정은 고속도로 교량 중에서 지진에 대한 방재대책으로 기계적인 설비나 장치를 추가하지 않은 교량에 대하여 지진에 대한 안전을 확보하기 위한 목적으로 설계 및 해석법을 규정하기 위한 것으로, 교각의 재료에 대한 비선형 물성치와 지반-구조물의 상호작용(soil-structure interaction) 및 연약지반의 액상화(liquefaction), 지진격리장치 등에 대한 연구는 미흡한 실정으로 계속적인 연구결과에 따라 보완되어야 할 것이다. 내진설계의 목적은 부분적인 파괴를 허용하되 전체 구조의 붕괴나 인명의 손상을 방지하고, 피해복구가 용이한 부재에 파괴를 유발시킴으로써 신속한 피해 복구 및 교통 소통 확보에 있다. 그러나, 지진에 의한 수평 관성력과 변형을 강성으로 지지하는 내진설계는 한계가 있으며, 특수 조건의 교량에 대해서는 연속장 분할 및 다고

정 방식과 기초분리 방식 등이 있으므로 적절한 지진력 처리방안은 설계자의 판단에 의하여야 한다. 따라서, 구조물의 거동 특성을 고려한 내진 구조계획으로 최적설계 방안을 모색하지 않고 일률적인 단면의 확대 및 소성힌지에 대한 철근세목을 적용함으로써 공사비 증가 및 시공성, 품질관리를 저해하는 방법은 부적절하다.

1.1.2 기 호

내진설계 편에서 사용하는 기호와 정의는 다음과 같다.

- A : '1.3.1 가속도 계수'에서 결정하는 가속도 계수(무차원량)
- A_c : 철근콘크리트 기둥 심부의 면적(mm^2)
- A_g : 철근콘크리트 기둥의 총단면적(mm^2)
- A_{sh} : 직사각형 철근콘크리트 기둥에 사용한 횡방향 철근(후프 또는 스테럽)의 총 단면적(mm^2)
- α : 직사각형 철근콘크리트 기둥에서 횡방향 철근(후프 또는 스테럽)의 수직 간격(mm)
- B : 식(1.1)과 식(1.2)의 그룹 하중조합 시에 사용되는 부력으로 인한 하중
- C_s : 식(1.4)에서 정의되는 탄성 지진응답계수(무차원량)
- C_{sm} : 식(1.5)에서 정의되는 탄성 지진응답계수(무차원량)
- D : 식(1.1)과 식(1.2)의 그룹 하중 조합 시에 사용되는 고정하중으로 인한 하중
- E_F : 1.4.7에서 정의된, 식(1.2)의 그룹 하중조합 시에 사용되는 기초 설계지진력
- E_M : 1.4.7에서 정의된, 식(1.1)의 그룹 하중조합 시에 사용되는 설계지진력
- F : 식(1.1)과 식(1.2)의 그룹 하중조합 시에 사용되는 유체압으로 인한 하중
- FS_L : 액상화에 대한 안전율
- f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도(MPa)
- f_y : 철근의 항복강도(MPa)
- g : 식(1.8)에서 교량의 주기를 계산하는데 사용되는 중력 가속도(m/sec^2)
- H : 1.4.8에서 정의된 기둥 또는 교각의 높이(m), 식(1.1)과 식(1.2)의 그룹하중 조합 시에 사용되는 토압으로 인한 하중
- h_c : 직사각형 철근콘크리트 기둥 심부의 단면치수(mm)
- I : 위험도계수(무차원량)
- K_h : 1.6.4에서 정의된 횡토압 계산 시에 사용되는 수평지진계수(무차원량)
- L : 1.4.8에서 정의된 교량 상부구조의 길이(m)
- N : 1.4.8에서 정의되는 주거더의 최소 지지 길이(mm)
- $p_e(x)$: 1.5.3에서 진동의 기본모드를 나타내기 위하여 작용된 등가 정적 지진하중의 강도(힘/단위길이)

p_o	: 1.5.3에서 주기를 계산하기 위하여 사용된, 가정한 균일하중(힘/단위길이)
R	: 1.3.4에서의 응답수정계수(무차원량)
S	: <표 1.3.1>에서의 지반계수(무차원량)
T	: 1.5.3에서 결정된 교량의 기본주기(초)
T_m	: 1.5.2에서 사용된 교량의 m 번째 진동모드의 주기(초)
ν_d	: 설계지진에 상응하는 등가의 평균반복전단응력
ν_1	: 설계지진(지진규모)에 상응하는 등가의 반복횟수에서 액상화를 일으키는 평균반복 전단응력
$\nu_s(x), \nu_e(x)$: 1.5.3에 사용된, 각각 작용된 하중 p_o 와 p_e 로 인한 정적 처짐형상(길이)
$\omega(x)$: 1.5.3에 사용된 교량 상부구조와 이에 부착된 하부구조의 단위 길이 당의 고정하중 (힘/길이)
α	: 1.5.3에서 교량의 주기를 계산하는데 사용되는 계수(길이 ²)
β	: 1.5.3에서 등가정적지진하중을 계산하는데 사용되는 계수(힘×길이)
γ	: 1.5.3에서 교량의 주기를 계산하는데 사용되는 계수(힘×길이 ²)
θ	: 식(1.3)에서 최소 받침 지지길이를 계산하는데 사용되는 받침선과 교축직각 방향의 사잇각(도)
ρ_s	: 1.8.2에서 횡방향철근을 계산하는데 사용되는 원형기둥의 나선철근비(무차원량)

1.1.3 용어의 정의

내진설계편에서 사용하는 용어의 의미는 다음과 같다.

- (1) 가속도 계수(acceleration coefficient) : 내진설계에 있어서 설계지진력을 산정하기 위한 계수로서 지진구역과 재현주기에 따라 그 값이 다르다.
- (2) 지진구역계수 : 우리나라의 지진재해도 해석결과에 근거한 지진구역에서의 평균재현주기 500년에 해당되는 암반상 지진지반운동의 세기를 나타내는 계수
- (3) 지반계수(site coefficient) : 지반상태가 탄성지진응답계수에 미치는 영향을 반영하기 위한 보정계수
- (4) 위험도계수 : 평균 재현주기별 지진구역계수의 비
- (5) 지반 종류(soil profile type) : 지진 시에 지반의 응답특성에 따라 공학적으로 분류하는 지반의 종류
- (6) 응답수정계수(response modification factor) : 탄성해석으로 구한 각 요소의 내력으로부터 설계지진력을 산정하기 위한 수정계수

- (7) 내진등급 : 내진등급은 중요도에 따라서 교량을 분류하는 범주로서 내진Ⅱ등급, 내진Ⅰ등급으로 구분된다.
- (8) 단경간교(single span bridge) : 경간이 하나인 교량
- (9) 탄성지진응답계수(elastic seismic response coefficient) : 모드스펙트럼해석법에서 등가정적 지진하중을 구하기 위한 무차원량
- (10) 단일모드스펙트럼해석법(single mode spectral analysis) : 하나의 진동모드만을 사용하는 스펙트럼해석법
- (11) 다중모드스펙트럼해석법(multimode spectral analysis method) : 여러 개의 진동모드를 사용하는 스펙트럼해석법
- (12) 액상화 : 진동하중에 의하여 간극수압 상승과 유효응력 감소로 전단하중에 대한 전단저항을 상실하는 현상
- (13) 평균반복전단응력 : 불규칙한 지진하중을 일정한 반복하중으로 치환할 때, 등가의 전단응력
- (14) 지반응답해석 : 토층의 저면에 입사되는 지진하중이 지표면으로 진행될 때 토층의 동적거동에 대한 해석
- (15) 말뚝의 p-y곡선 : 말뚝의 근입깊이 내에서 발생하는 말뚝의 수평변위 대 단위길이 당 지반반력의 상관곡선

1.2 내진설계의 기본 방침

1.2.1 목 적

이 규정에 사용되는 설계 지진하중은 도로교 설계기준의 내진설계 편에 준한다. 설계 지진하중에 저항하기 위한 설계는 방법 및 해석과정이 다양하고, 설계하중 및 해석방법과 해석 모형작성에 따른 결과의 편차가 심하여 혼란이 발생되고 있는 실정이다. 따라서 이 규정은 도로교 설계기준을 준수하며, 고속도로 교량의 내진설계에 적용되는 설계방법 및 해석모형의 적용성을 제시한다. 또한, 정형교량(regular bridge)의 설계세목에 대한 기준을 규정하여 설계실무자들과 관계자들의 기준에 대한 이해를 도모하고, 기술자의 창의적 기술개발 고양과 설계방법 적용의 단순화와 효율화를 위한 자료로서 활용되고자 한다. 이 규정은 지진특성과 규모 및 고속도로의 중요성을 감안하여, 허용 파괴부재를 교대 흥벽 및 신축이음장치를 포함한 바닥판 슬래브에 한하였다. 또한, 응답 수정계수(R)의 사용을 이원화하였으며, R값을 1.0 이하로 사용한 경우, 콘크리트 및 도로교 설계기준의 상시설계기준에 준하도록 하였으며, R값을 1.0 이상 사용한 경우에는 소성힌지의 발생에 대비하고, 안전

성을 확보하기 위하여 심부구속철근을 규정하였다. 이 때 원형기둥에서는 적절한 정착 및 이음을 확보한 원형띠(circular hoop)철근은 나선(spiral)철근으로 간주하여도 좋다. 낙교방지 시설은 설계 규모 이상의 지진에 대한 인명피해 및 교량의 붕괴를 방지하기 위한 보조부재로 적절한 유간을 확보하여야 한다. 또한 보 규정은 설계방법 선정 및 기준의 실무적용 상의 규정을 제시하고, 고속도로 교량의 내진설계 기술발전을 위한 단계별 연구의 기초자료 제시를 목적으로 한다. 이 규정에서 정형교량은 상로교 및 직선교를 대상으로 지진에 대하여 일체 거동하는 3차로 폭 이하의 교량으로 연속장 200m이하인 고속도로상의 슬래브 및 거더형식의 교량으로 양측 신축 이음부 중심을 연결하는 현이 상부 슬래브를 이탈하지 않는 경우로 한정하였으며, 제1.1.1의 적용 범위에 준하는 교량에 한한다. 그러나, 3차로 폭원 또는 연속장 200m를 초과하는 교량에 대해서도 강성 및 지랑 중심 간의 편심이 크지 않거나, 하부구조가 균일하여 회전관성의 영향이 작은 경우, 지형, 지질, 지반 등의 조건, 교량의 동적특성, 중요도 및 기하학적 조건 등에 따라 안전을 확보할 수 있는 경우에는 설계자의 판단에 따라 이 규정을 준용할 수 있다.

1.2.2 내진 설계기준의 기본 개념

이 설계기준은 다음의 기본 개념에 기초를 두고 개발되었다.

- (1) 인명피해를 최소화한다.
- (2) 지진 시 교량 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적으로 붕괴는 방지한다.
- (3) 지진 시 가능한 한 교량의 기본 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.

이 설계기준은 건설교통부의 연구과제 “내진설계기준연구(II)” (1997. 12)에서 제시된 내진설계성능 기준 및 기타 연구결과 중 현재 수준에서 인정할 수 있는 일부 규정을 기존 설계기준의 체계에 맞도록 채택하여 제정되었다. 이 연구에서 제시된 내진설계 개념의 특징은 지진의 발생빈도와 지반운동의 세기, 교량의 중요도 등에 따라 요구되는 내진성능을 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하여 만족시키도록 규정하고 있으며, 이를 설계에 반영하기 위한 조사연구를 거쳐 향후 설계기준에 적절히 적용될 것으로 예상된다. 따라서, 현재의 설계기준은 향후 개정될 설계기준의 전환을 위한 중간단계이며, 위의 기본개념에 기초를 두고 있다.

1.2.3 내진설계 기본조건

교량의 내진설계는 설계 지진력에 대하여 안전 및 통행을 보장할 수 있는 구조형식이어야 하며, 내진 저항구조의 효율성을 높이기 위한 구조계획의 기본 조건은 다음과 같다.

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| (1) 단순성(simplicity) | (2) 대칭성(symmetry) |
| (3) 완전성(completeness) | (4) 연속성(continuity) |

구조물의 지진피해는 모든 지진에 대해서 절대적으로 안전하다고 보장될 수 있는 구조형태는 존재하지 않음을 전제로 하였으며, 설계기준에서 제시된 재현 주기를 갖는 설계지진력에 대하여 과거의 지진피해 교량의 비교 분석 및 국·내외의 내진설계 관련문헌을 통한 적용성이 제시된 것이다. 따라서 구조거동의 기본조건으로서 위의 조건이 만족될 경우 교량의 내진성능이 극대화될 수 있다.

- (1) 단순성(simplicity) : 단순한 형태의 구조물에 발생하는 피해가 경미하다는 지진피해의 분석결과에 의한 것으로 단순성이란 구조물의 질량중심에 작용하는 수평관성 지진력이 직접적인 경로로 지반에 전달되는 하중전달 경로를 유지함을 의미하며, 단순한 구조형식 선정이 좋은 내진구조 형태를 유지하는 단계라 할 수 있다. 따라서 복잡한 하중경로가 예상되거나, 수중 또는 하상부나 접근이 어려운 고가교 등에 대해서는 파괴부재(fuse element)를 설치하여 하중 경로를 제어함으로써, 피해 발생 시 원활한 피해 복구 및 교통소통을 확보하는 방법이 사용되기도 한다.
- (2) 대칭성(symmetry) : 구조물에는 전단 또는 수평강성의 중심과 질량중심이 존재하며, 구조물의 대칭성은 질량중심과 강성중심의 편심에 따라 회전 비틀림 피해를 최소화하기 위한 기본조건으로 기하학적 대칭, 강성대칭 및 질량중심과 강성중심의 대칭이 있다.
- (3) 완전성(completeness) : 완전성은 교량의 구조요소가 과도한 상대변형을 분배시킬 수 있도록 완전히 연결된 상태를 유지함을 의미한다. 부재 간의 연결은 관성력이 지반 또는 연결장치(connection)로 전달될 수 있도록 충분한 강성을 가져야 한다. 즉, 받침장치는 거더의 낙교를 방지하기 위한 충분한 받침 지지길이를 확보하여야 하며, 받침은 상부고주에서 전달되는 하중을 파괴없이 하부구조에 전달할 수 있는 여유강도를 가져야 하고, 하부구조는 지진하중을 소성변형에 의한 에너지 소산(dissipation)에 필요한 연성도(ductility)와 하중을 기초에 전달하기 위한 적절한 강성(stiffness)을 보유하여야 한다.

- (4) 연속성(continuity) : 교량구조물은 일반적으로 다양한 구속 지지조건을 갖고 있어 강성중심(center of stiffness)과 질량중심(center of mass)이 편재되어 있다. 따라서 교량은 강성과 질량의 분포가 급격하게 변하는 경우 교량 부재별로 소성변형의 발생기기가 상이하여 부재 간의 강성분포가 변화하며, 이는 횡력의 분배기구를 변화시킴으로서 예측 불가능한 파괴 및 연속파괴를 유발할 수 있다. 따라서 설계지진 이상의 지진 또는 가정하지 못한 하중경로에 의한 부재의 파괴를 방지하기 위한 안전설비인 최소받침 지지길이의 확보와 이탈부재 또는 낙교방지 장치로 연결선 등에 대한 설계에는 충분한 안전율을 확보하여야 한다.

1.2.4 품질보증 요건

- (1) 구조물의 적절한 품질보증요건을 만족시키기 위하여 설계자는 공사품질에 관한 특별시방서를 작성하여야 하며, 도급자는 품질요건을 만족시키도록 품질관리를 실시하고, 구조물 소유주는 도급자의 직접고용자가 아닌 자로 감리 또는 감독체제를 구성하여 공사 과정을 철저히 감독하여야 한다.
- (2) 품질보증활동과 관련된 수행과정과 결과는 기록으로 보존되어야 한다.
- (3) 기본설계, 실시설계의 각 단계에서 설계품질관리를 위한 검토가 이루어져야 한다.

구조물의 지진피해 중 시공 시 품질이 불량하여 파손된 경우로 추적 조사된 경우는 부지기수이며, 적절한 검사를 했을 경우 붕괴를 막을 수 있었다고 보고한 자료도 많다. 따라서 적절한 감리 및 감독체제를 통하여 공사에 관련된 각 기관은 각자의 책임을 인식하고 공사를 원활히 수행할 수 있도록 협력체제를 구축하여야 한다. 공사와 품질관리는 일반적으로 도급자에 의하여 수행되므로 검사는 도급자의 직접 고용자가 아닌 자로서 구조물 소유주가 인정한 제3자에 의하여 이루어져야 한다. 품질관리 요건은 내진설계에만 국한되는 경우가 드물기 때문에 이 장에서는 별도로 취급하지 않는다.

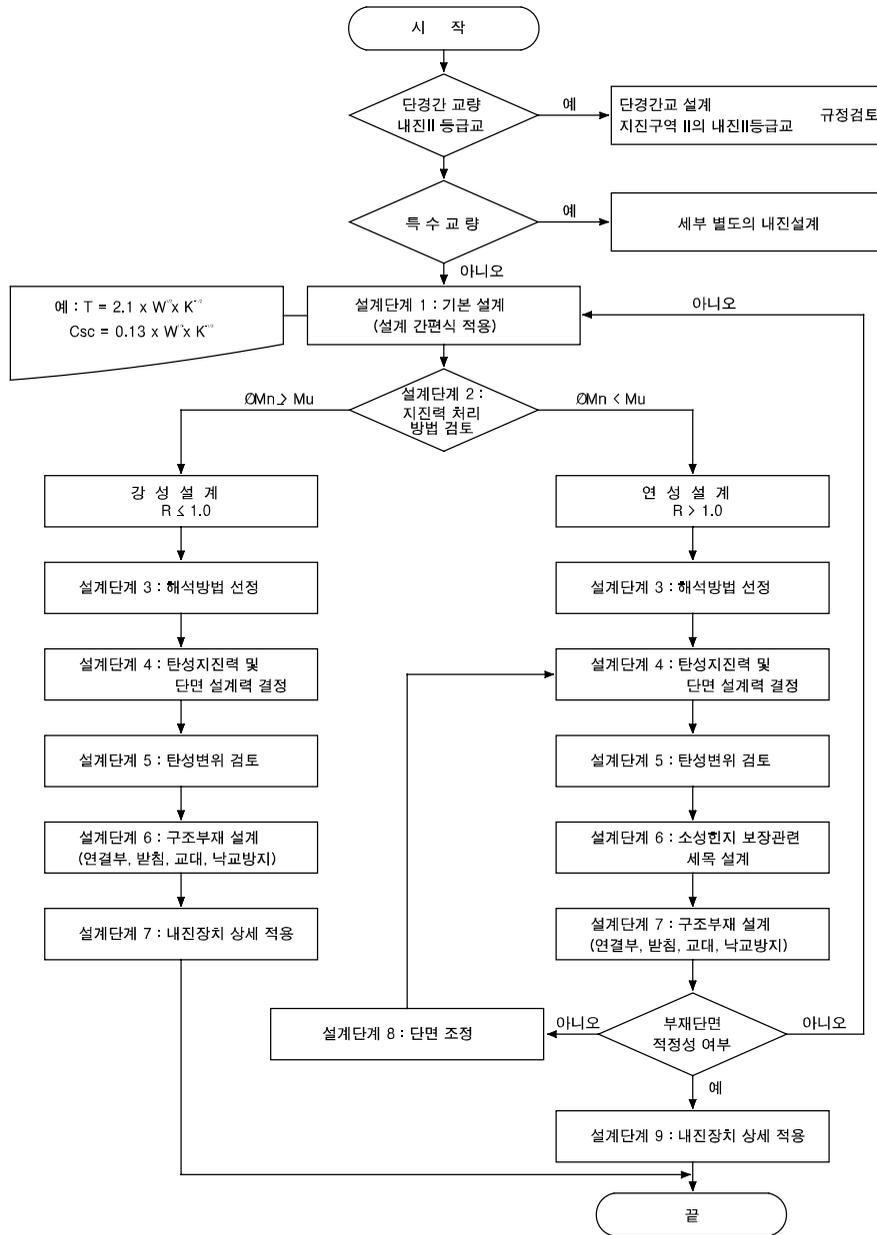
1.2.5 부재의 허용 피해

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

이 절은 도로교 설계기준 제6장 내진설계편의 6.2.2 내진설계 기준의 기본개념 (2)항의 부분적인 피해에 대하여 구체화한 것으로 피해의 종류는 항복응력 이상의 항복(yielding)변형과 부재의 파괴(failure)로 구분하여 항복은 허용하되, 붕괴는 방지하자는 기본개념을 고속도로 교량의 중요성을 감안하여 교량 부재별로 구체화 한 것이다. 이탈부재로 설계된 교대 흥벽은 1.10의 낙교방지 장치의 일종으로서 교량의 유간거리를 초과하는 지진변위가 발생하였을 경우 교대 배면의 흙쌓기부 지반의 수동토압을 이용하여 과도한 변위발생에 의한 낙교를 방지하기 위한 보강재이다. 즉 과도한 지진변형에 의한 충격을 완화하기 위한 충분한 유간을 설치하여야 하나 온도에 의한 변위와 지진변위를 동시에 고려할 경우 과도한 신축장치가 필요하게 되며 설계지진을 초과하는 지진 발생 시 부재의 항복 변형이 유간을 초과하는 변형이 예상된다. 따라서 상부 부재가 배면토 방향으로 이동을 허용하여 충격을 완화시키는 방법으로 New Zealand에서 규정되어 있으며, 1993년 일본의 도로교의 면진 설계법(안)에서 채택하고 있는 보강부재로 지진 시 신축이음장치의 손상은 낙교 등 교량에서의 치명적인 피해와 관계가 없고 복구가 용이하므로 허용하였다.

1.2.6 내진 설계과정 흐름도

내진설계 과정은 이 장의 규정 중에서 필요한 조항들을 효율적이고 적절하게 배열한 순서에 따라야 한다.



〈그림 1.1〉 신설교량의 내진 설계 흐름도

1.3 일반 사항

1.3.1 가속도 계수

- (1) 지진재해도 해석 결과에 근거하여 우리나라의 지진구역을 <표 1.1.1>과 같이 설정한다. 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수는 <표 1.1.2>에 수록된 바와 같이 구역 I에서 0.11, 구역 II에서는 0.07이다.
- (2) 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수는 <표 1.1.3>과 같다. 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이다.
- (3) 교량이 위치할 부지에 대한 지진지반운동의 가속도계수 A는 <표 1.1.2>에서 규정된 내진등급별 설계지진의 재현주기에 해당되는 위험도계수를 지진구역에 따른 지진구역계수에 곱하여 계산한다.

<표 1.1.1> 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, 화순, 광양시, 나주시, 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 1.1.2> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

<표 1.1.3> 위험도계수

재현주기(년)	500	1000
위험도계수, I	1	1.4

1.3.2 내진등급과 설계지진수준

- (1) 교량의 내진등급은 <표 1.2>와 같이 교량의 중요도에 따라서 내진I등급과 내진 II등급으로 분류한다. 단, 교량의 관할기관에서 교량의 내진등급을 별도로 정할 수 있다.
- (2) 교량은 <표 1.2>에서 내진등급별로 규정된 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 설계되어야 한다.

<표 1.2> 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	1,000년
내진 II 등급교	내진 I 등급교에 속하지 않는 교량	500년

1.3.3 지반의 분류

- (1) 지반의 영향은 교량의 지진하중을 결정하는데 고려되어야 한다. <표 1.3.1>에 명시된 지반 계수 S는 <표 1.3.2>에서 정의된 지반종류에 근거를 두고 있다.

<표 1.3.1> 지반계수

지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

<표 1.3.2> 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치 ⁽¹⁾)	비배수전단강도(kPa)
I	경암지반 보통암 지반	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 부지중속 설계응답스펙트럼을 사용하여야 한다.
- (가) 액상화가 일어날 수 있는 흙, 키클레이와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
 - (나) 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반
 - (다) 매우 높은 소성을 갖는 점토지반
 - (라) 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토

1.3.4 응답수정계수

- (1) 제 1.6, 1.7, 1.8에서 내진설계를 위하여 추가로 규정한 설계요건을 모두 충족시키는 경우, 교량의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 1.4.7에서와 같이 규정된 탄성지진력을 <표 1.4>의 응답수정계수로 나눈 값으로 한다. 다만 하부구조의 경우 축방향력과 전단력은 응답수정계수로 나누지 않는다.
- (2) 제 1.6, 1.7, 1.8에서 내진설계를 위하여 추가로 규정한 설계요건을 충족시키지 못하는 경우, 하부구조의 응답수정계수는 1.0을 넘지 못하며, 기초와 연결부분의 응답수정계수는 0.8을 넘지 못한다. 이때, 철근콘크리트 기둥의 철근상세는 1.8.3을 만족시켜야 한다.
- (3) 응답수정계수 R은 하부구조의 양 직교축방향에 대하여 모두 적용한다.
- (4) 벽식교각의 약축방향은 1.8의 기둥규정을 적용하여 설계할 수 있다. 이때 응답수정계수 R은 단일 기둥의 값을 적용할 수 있다.

<표 1.4> 응답수정계수, R

하 부 구 조	R	연 결 부 분 ⁽¹⁾	R
벽 식 교 각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝 가구 (bent)			
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3	상부구조의 한 지간 내의 신축이음	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		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 부재 간에 전단력과 압축력을 전달하는 기구를 의미하며, 교량받침과 전단키가 이에 해당된다. 이 때, 응답수정계수는 구속된 방향으로 작용하는 탄성지진력에 대하여 적용된다.

- (1) <표 1.4>의 응답수정계수(R)는 탄성해석으로 얻은 설계지진력을 수정하는데 사용된다. R값은 설계지진력에 의하여 기둥은 항복하나 연결부위 및 기초부분은 극히 적은 손상을 입는다는 가정으로부터 얻어진다.

기둥, 교각 또는 말뚝 가구에 대한 R 계수는 다양한 지지조건에 의한 여유력 및 연성을 고려함으로써 구할 수 있다. 벽식교각은 강도가 큰 방향에 대하여 가장 작은 연성능력과 여유력을 갖는 것으로 판정하여 R 계수값을 2로 정하였다. 잘 설계된 기둥으로 된 다주가는 '9.8 콘크리트교 설계'에 정한 바와 같이 가장 큰 연성능력과 여유력을 갖는 것으로 판정하여 가장 큰 R 계수값인 5로 정하였다. 단일기둥의 연성능력은 다주가 기둥의 연성능력과 비슷하지만 여유력이 없기 때문에 R 계수값을 3으로 하였다. 말뚝 가구 기초의 지진에 대한 거동에 관한 자료가 거의 없기 때문에 R 계수값은 기타 세 가지 하부구조와 비교하여 결정하였다. 경사파일을 포함한 말뚝 가구는 연성능력이 감소되며 따라서 이러한 시스템에 대하여는 감소된 R 계수값을 적용하였다.

연결부위에 해당하는 R 계수값이 1.0 및 0.8인 것은 연결부분의 경우 탄성지진력과 같은 힘에 대해서 그리고 교대의 경우는 탄성지진력보다 큰 힘에 대해서 설계하여야 한다는 것을 의미한다. 이것은 교량이 비탄성적 거동을 할 때 발생하는 힘의 재분배의 영향을 부분적으로 고려하기 위한 것이며, 또한 지진 시에 중요한 연결부는 완전한 강도를 유지하게 하기 위한 것이다. 연결부를 이와 같은 하중에 대하여 설계함으로써 보다 적은 공사비용의 증가로 보다 큰 안전성을 확보할 수 있게 된다.

- (2) 응답수정계수는 설계지진력에 의하여 교각하단에 소성한지를 유도하고 연결부 및 기초의 피해를 방지하기 위한 설계방침에 의한 것으로 설계력 중에서 설계모멘트에만 적용토록 규정하고 있다.

그러나 설계 과정상 정적축력과 정적수평력에 의한 모멘트로 결정된 기둥 또는 교각단면에 지진 시의 응답수정계수를 적용하기 위해서는 설계지진 모멘트에 의한 단면에 소성한지가 발생함을 확인하여야 하며, 응답수정계수 사용단면에는 심부구속철근을 배치하여야 한다. 따라서 이 규정에서는 우리나라의 지진규모와 고속도로의 중요성을 감안하여 지진력에 의한 소요강도가 부재의 설계강도보다 작은 경우에는 응답수정계수를 1.0으로 하였으며, 소요강도가 설계강도를 초과하는 경우에 스펙트럼을 사용한 비선형 해석방법으로 응답수정계수를 사용하기로 하였다. 응답수정계수는 여유력과 부재의 연성 및 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 AASHTO에서 채택한 방법으로, 부재의 크기와 진동의 특성 및 소성이력 거동(inelastic-hysteretic-behavior)을 고려하지 못하는 등의 문제점과 적정성이 ATC-32, 34에서 지적되었으며 차세대 내진설계 기준 정립방법이 Vision2000, FEMA 273, ATC40에서 검토되고 있으나, 현재 도로교 설계기준에서 채택하고 있으므로 이 규정에서도 이를 적용하기로 하였다. 지

진 시 교량의 비선형 거동의 근사적인 선형해석 접근방법으로 Newmark-Hall이 제시한 연성계수와 항복력의 관계로부터 유도된 비탄성 응답스펙트럼방법 또는 변화 구조물방법 등이 제시되고 있다.

1.4 해석 및 설계에 대한 규정

- (1) 탄성지진력은 '1.5 해석방법'에 규정한 값으로 한다.
- (2) 재료 및 기초 설계조건은 '1.6 기초 및 교대의 내진설계, 1.7 강교 설계 및 1.8 콘크리트교 설계'에 따른다.
- (3) 교량의 내진설계절차는 모든 내진등급의 교량에 대하여 동일하게 적용한다. 다만 단경간교에 대한 내진설계는 1.4.5과 1.4.8에 따른다. 또한 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 내진설계는 1.4.6과 1.4.8에 의해서 수행될 수 있다.

1.4.1 일반 사항

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

1.4.2 해석방법

- (1) 교량의 지진해석방법은 '1.5 해석방법'에 규정된 단일모드 스펙트럼 해석법(Single Mode Spectral Method)을 사용하는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 정밀한 해석을 요한다고 판단되는 교량에 대해서는 다중모드 스펙트럼 해석법 또는 발주자가 인정하는 검증된 정밀 해석법을 사용할 수 있다.
- (3) 단경간교 및 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교는 상세한 지진해석을 할 필요가 없다.

구조부재의 내력분포 및 상대변위 등의 지표를 얻기 위한 교량의 내진설계에는 탄성해석을 이용한다. 그러나 설계지진운동과 같이 큰 진동하중을 받는 교량은 비탄성적으로 거동하기 때문에 교량의 실제 내력과 변위는 탄성해석으로부터 얻은 결과와 큰 차이를 보일 수 있다. 탄성해석은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 먼저 단일모드 스펙트럼 해석법은 기본 주기(T)만을 구하여 교량의 탄성지진력과 변위를 예측하는 비교적 간단한 방법이지만 질량·강도 또는 시간을 따라 기하학적인 형상 등이

급격히 변화하지 않는 보통의 교량형식에 적용할 수 있으며, 이를 만족하지 않는 교량에 대하여는 해석의 정확도가 떨어지는 약점이 있다. 이러한 교량에 대하여는 어떠한 진동에 대하여도 정확한 탄성 응답을 얻을 수 있는 다중모드 스펙트럼 해석법을 적용하여야 하는데 컴퓨터의 사용이 요구되는 보다 복잡한 방법이다. 우리나라는 지진의 발생확률이 적고 지진의 강도 또한 작은 점을 감안하여 해석의 정확도는 떨어지나 비교적 간단한 방법인 단일모드 스펙트럼 해석법을 사용하는 것을 원칙으로 하였다.

그러나 설계자가 위의 방법으로는 불충분하다고 판단되는 교량에 대하여는 보다 엄밀한 해석법을 사용할 수 있도록 하였다.

1.4.3 탄성력 및 탄성변위

- (1) 탄성력과 탄성변위는 '1.4.2 해석방법'에 규정한 해석방법을 사용하여 두 개의 직교축에 대하여 독립적으로 해석하고 '1.4.4 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.

일반적으로 구조물은 3개 직교축으로 동시에 발생하는 지반운동을 받는다. 대다수의 교량에 있어서 운동의 연직방향 성분에 의한 영향은 그다지 크지 않으므로 연직방향의 상세한 해석은 필요 없다. 운동의 2방향 수평성분에 의한 영향을 고려하기 위하여 일반적으로 교량의 종방향 및 횡방향의 두 직교방향에 대하여 별도의 해석을 하여야 한다. 각각의 해석으로부터 얻어진 힘과 모멘트를 '1.4.4 직교 지진력의 조합'에 규정한 방법으로 조합함으로써 두 수평방향으로 동시에 발생하는 운동의 영향을 고려할 수 있다. 탄성해석으로부터 구한 교량의 응답(힘과 변위 등)은 교량이 탄성적으로 거동하고 설계지반운동의 특성이 실제 지반운동에 근접할수록 교량의 실제 응답에 근접하게 된다. 따라서 탄성해석에서 얻은 변위는 설계변위에 대한 하한값으로서 사용된다.

1.4.4 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 '1.4.3 탄성력 및 탄성변위'에 규정한 방법으로 구한 지진력을 다음과 같이 조합하여 사용한다.
- 하중 경우 1
종방향축의 해석으로부터 탄성지진력(절대값)에 횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.
 - 하중 경우 2
횡방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.

(1) 지진해석 시 고정하중에 의한 연직방향 이동관성질량을 고려한 해석과 고려하지 않은 해석결과가 상이하며, 탄성수평 변위와 연직력에 의한 교각의 추가모멘트 효과를 고려하기 위해서는 교량에 부착된 모든 시설물을 포함한 고정하중을 포함한 지진 해석이 수행되어야 한다.

(2) 직교(orthogonal) 지진력의 조합은 지진운동의 2방향 수평성분에 의한 영향을 고려하기 위한 것으로 단일모드 스펙트럼방법에서는 교량의 종·횡방향의 두 직교방향에 대하여 별도의 해석을 하여야 한다. 이때 지진력은 절대값을 사용하며 종방향 지진해석에 의한 지진력에 횡방향 해석에 의한 지진력의 30%를 합한 하중 경우 1과 횡방향 지진해석에 의한 지진력에 종방향 해석에 의한 지진력의 30%를 합한 하중 경우 2에 대하여 검토하여야 한다.

직선교이며 직교인 경우 1축 방향 구조해석에 의한 2축방향 분력이 발생하지 않더라도 2축응력을 구하기 위해서 조합하여야 한다. 사교 및 곡교의 경우에 대한 지진 시 거동에 대해서는 아직 연구된 실적이 미흡한 실정으로 기하학적 비정형성에 의한 영향을 고려한 해석방법은 이 규정의 범위에 포함되지 않았으며, 추가적인 연구가 필요한 분야이다.

각각의 하중경우에 대해서 여러 힘들을 조합하는 방법은 예를 들면 다음과 같다.

- 하중 경우 1

$$V_{zD} = 1.0 | V_{zL} | + 0.3 | V_{zT} |$$

$$V_{yD} = 1.0 | V_{yL} | + 0.3 | V_{yT} |$$

$$M_{zD} = 1.0 | M_{zL} | + 0.3 | M_{zT} |$$

$$M_{yD} = 1.0 | M_{yL} | + 0.3 | M_{yT} |$$

$$PD = 1.0 | PL | + 0.3 | PT |$$

• 하중 경우 2

$$V_{zD} = 0.3 | V_{zL} | + 1.0 | V_{zT} |$$

$$V_{yD} = 0.3 | V_{yL} | + 1.0 | V_{yT} |$$

$$M_{zD} = 0.3 | M_{zL} | + 1.0 | M_{zT} |$$

$$M_{yD} = 0.3 | M_{yL} | + 1.0 | M_{yT} |$$

$$PD = 0.3 | PL | + 1.0 | PT |$$

여기서, z축 및 y축은 기둥, 교대, 교각 등을 두 방향(일반적으로는 종방향 및 횡방향)의 직교축으로 정의하였을 때 각각의 축이다. V_{zT} , V_{yT} , M_{zT} , M_{yT} 및 PT 는 횡방향의 하중에 대한 해석으로부터 구한 전단력(V), 모멘트(M), 축력(P)이며, V_{zL} , V_{yL} , M_{zL} , M_{yL} 및 PL 은 종방향의 하중에 대한 해석에서 구한 전단력(V), 모멘트(M), 축력(P)이다. V_{zD} , V_{yD} , M_{zD} , M_{yD} 및 PD 는 각각 탄성전단력, 모멘트 및 축력이다. 또한 탄성지진력은 둘 중 어느 방향으로도 작용할 수 있으므로 부호에 상관없이 힘이나 모멘트의 크기 또는 절대값(기호)으로 표현된다. 직교에 대하여는 횡방향의 하중은 주로 구조부재의 z 방향의 모멘트와 전단력을 발생시키며 종방향의 하중은 주로 y 방향의 모멘트와 전단력을 발생시키기 때문에 위의 조합식은 매우 간단하게 된다.

1.4.5 단경간교의 설계규정

- (1) 상부구조와 교대 사이의 연결부에 대하여 고정하중반력에 '1.3.2 내진등급'과 설계지진 수준에 규정된 가속도 계수와 '1.3.3 지반의 영향'에 규정된 지반계수를 곱한 값의 수평 지진력이 작용한다고 보고 종방향 및 횡방향에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다.
- (2) 낙교방지를 위한 최소 받침 지지길이는 '1.4.8 설계변위'에 규정한 값으로 한다.

단경간교(single span bridge)는 지진하중에 대한 거동에 있어서 2경간 이상의 교량과 분리하여 해석방법이나 설계규정을 적용하여야 한다. 단경간교는 과거의 예로부터 거더의 받침부가 종방향 및 횡방향의 지진하중에 대하여 충분히 견딜 수 있으며 안전한 것으로 판단된다.

연결부분에 대한 설계규정들은 구조물의 손상이나 과도한 처짐을 막기 위해서 필요하다. 설계지진력을 산정하는데 있어서 교량은 강성이 매우 크다고 가정한다. 이는 교대와의 상호작용의 영향을 무시

할 수 없기 때문에 정확한 진동주기를 구하기가 어렵기 때문이다. 위의 가정으로부터 설계 수평지진력은 고정하중반력에 가속도 계수와 지반계수를 곱한 값으로 된다.

1.4.6 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교의 설계지진력

- (1) 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교에서 상부구조와 하부구조를 연결하는 교량받침이나 기계장치는 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.

1.4.7 설계지진력

- (1) 구조부재 및 연결부의 설계지진력
 - (가) 이 항에서 구하는 설계지진력은 다음의 각 경우에 대하여 적용한다.
 - (a) 상부구조, 상부구조의 신축이음 및 상부구조와 하부구조상단 사이의 연결부
 - (b) 하부구조 상단으로부터 기둥이나 교각의 하단까지 (단 후팅, 말뚝머리 및 말뚝은 포함하지 않는다.)
 - (c) 상부구조와 교대의 연결요소
 - (나) (가)항의 설계지진력은 ‘1.4.4 직교지진력의 조합’의 하중경우 1 또는 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 ‘1.3.4 응답수정계수’에 규정한 응답수정계수 R로 나눈 값으로 한다.
 - (다) (나)항의 설계지진력은 다른 설계력과 함께 전체 하중조합식에 조합하여야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 식(1.1)로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음중 불리한 경우를 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0(D+B+F+H+E_M) \quad (1.1)$$

여기서, D : 고정하중

B : 부력

F : 유체압

H : 횡토압

E_M : (나)항의 설계지진력

- (라) 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, 1.6, 1.7, 1.8의 설계규정을 만족하여야 한다. 단, 1.6, 1.7, 1.8에서 내진설계를 위하여 추가로 규정한 설계요건을 충족시키지 못할 경우 1.3.4 (2)에서 규정한 응답수정계수를 적용한 지진하중을 사용한다.
- (마) 식(1.1)은 도로교설계기준 강교의 하중조합 및 증가계수 <표 2.2.1> 및 콘크리트교의 하중조합 및 증가계수 <표 2.2.2>와 함께 사용하여야 한다. 허용응력 설계법을 사용할 경우 허용응력은 규정된 허용응력에 <표 1.5>에 주어진 증가계수를 곱한 값으로 한다.

<표 1.5> 허용응력의 증가계수

구조물의 종류	허용응력 증가계수
강 구조물	1.5
철근콘크리트 구조물	1.33

(2) 기초의 설계지진력

- (가) 확대기초, 말뚝 머리 및 말뚝을 포함하는 기초의 설계지진력은 '1.4.4 직교지진력의 조합의 하중경우 1 또는 하중경우 2로부터 구한 탄성지진력을 '1.3.4 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.
- (나) (가)항의 설계지진력은 다른 설계력과 함께 전체 하중조합식에 조합하여야 하며 각 요소에 대한 최대하중은 식(1.2)로부터 구한다. 이때 설계지진력의 부호는 양 또는 음 중 불리한 경우를 취한다.

$$\text{최대하중} = 1.0 (D + B + F + H + E_F) \tag{1.2}$$

여기서, D : 고정하중
 B : 부력
 F : 유체압
 H : 횡토압
 E_F : (가)항의 설계지진력

- (다) 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 1.6의 설계규정을 만족하여야 한다.

(3) 교대 및 옹벽

(가) 상부구조와 교대의 연결부(받침, 전단연결재)는 (1)의 설계지진력에 저항하도록 설계하여야 한다.

(나) 교대는 '1.6.4 교대(2)'의 규정에 따라 설계하여야 한다.

(1) 이 규정은 내진등급교에 대한 것으로 설계지진력을 비교적 간단하지만 일관된 방법으로 구할 수 있도록 하였다.

첫 번째 단계에서 '1.4.4 직교지진력의 조합'의 하중경우 1과 2의 탄성력들은 '1.3.4 응답수정계수'의 해당 R 값으로 나누어지며 이 힘들은 다른 하중에 대해서 얻은 힘들과 조합되고 전체 하중조합은 '도로교설계기준 제2장 설계일반사항의 강도설계법 하중조합'에서 지진하중을 고려하는 하중조합을 대신한다. 이 규정에서 각 요소를 '1.4.4 직교지진력의 조합'의 하중경우 1 및 하중경우 2의 조합에 대하여 각각 저항하도록 설계하여야 한다는 점은 한 방향의 하중만을 고려하는 "AASHTO Interim Specification"의 규정과 다른 점이다. 이것은 기둥의 2축 방향의 설계 등에 대하여는 중요한 사항이다. 지진의 운동은 어느 방향으로든지 작용하기 때문에 각 요소에 대한 설계하중을 구할 때 '1.4.4 직교지진력의 조합'에서 얻어진 지진력이나 모멘트의 부호는 음 또는 양의 값 중 설계하중의 절대값이 커지는 방향으로 취하여야 한다.

(2) 확대기초, 말뚝 머리 및 말뚝을 포함하는 기초에 대한 설계지진력을 규정하고 있다. 기초에 대한 설계지진력은 근본적으로 기둥의 설계지진력의 2배를 취하도록 하였다. 일반적으로 이것은 안전측의 결과를 주지만 내진 I 등급교의 설계방법을 단순화시킬 수 있다.

1.4.8 설계 변위

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

(2) 최소 받침 지지길이의 확보가 어렵거나 낙교방지를 보장하기 위해서는 변위구속장치를 설치하여야 한다.

(3) 단경간교와 지진구역 II에 위치하는 내진 II 등급교의 최소 받침 지지길이(N)는 식(1.3)에 규정한 값보다 작아서는 안된다.

$$N = (200 + 1.67L + 6.66H)(1 + 0.000125\theta^2) \text{ (mm)} \quad (1.3)$$

여기서, L : 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m)

다만, 지간 내에 힌지가 있는 경우의 L 은 힌지 좌·우측방향의 거리인 L_1 과 L_2 의 합으로 한다(〈그림 1.2〉 참조).

H : 다음 각 경우에 대한 평균 높이(m)

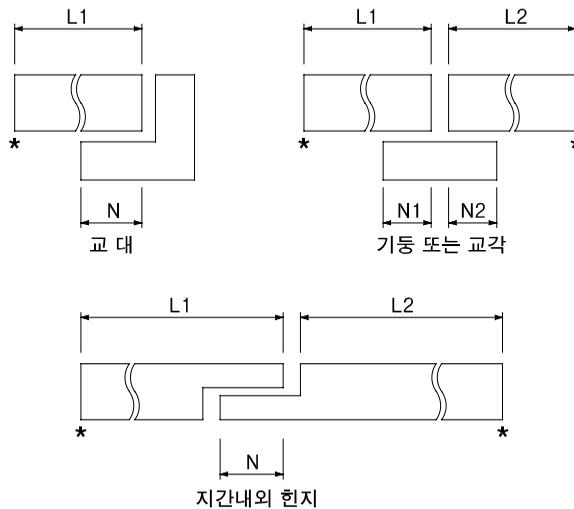
교대 - 인접 신축이음부의 교량상부를 지지하는 기둥의 평균 높이, 단경간교의 평균 높이는 0으로 한다.

기둥 또는 교각 - 기둥 또는 교각의 평균 높이.

지간 내의 힌지 - 인접하는 양측 기둥 또는 교각의 평균 높이.

θ : 받침선과 교축직각방향의 사잇각(도)

(4) 단경간교와 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ등급교를 제외한 모든 교량의 설계지진변위는 1.4.3에 규정된 값과 1.4.8에 규정된 값 중 큰 값으로 한다.



* 신축이음 또는 교량 상판의 단부

〈그림 1.2〉 최소 받침 지지길이 규정에 관한 치수

(5) 상부구조의 여유간격

지진 시에 상부구조와 교대 혹은 인접하는 상부구조 간의 충돌에 의한 주요 구조부재의 손상을 방지하고, 설계 시 고려된 내진성능이 충분히 발휘될 수 있도록 하기 위하여 상부구조의 단부에는 〈그림 1.3〉에 나타난 바와 같이 여유간격을 설치한다. 상부구조의 여유간격은 식 (1.4)에 의한 값보다 작아서는 안 된다.

$$\Delta l_i = d + \Delta l_s + \Delta l_c + 0.4\Delta l_t \text{ (mm)} \tag{1.4}$$

여기서, Δl_i : 상부구조의 여유간격(mm)

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

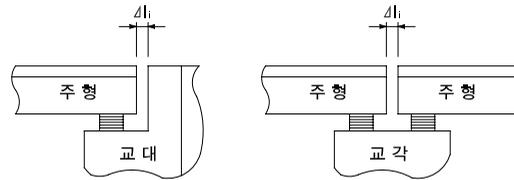
Δl_s : 콘크리트의 건조수축에 의한 이동량 (mm)

Δl_c : 콘크리트의 크리프에 의한 이동량 (mm)

Δl_t : 온도변화로 인한 이동량 (mm)

단, 상부구조의 여유간격은 도로교 설계기준의 2.4.1.3 가동받침의 이동량보다는 커야 한다.

또한, 교축직각방향의 지진 시 변위에 의한 인접 상부구조 및 주요 구조부재 간의 충돌 가능성이 있을 때는 이를 방지하기 위한 여유간격을 설치한다.



〈그림 1.3〉 교량의 여유간격

- (1) 지진구역II에 위치하는 내진II등급교에 대해서는 탄성해석을 하지 않아도 좋으므로 이 항에서 정한 값이 유일한 설계변위 조건이 된다.
- (2) 설계변위는 '1.4.3 탄성력 및 탄성변위'의 탄성해석으로부터 구한 최대 변위값과 식 (1.3)에 규정한 최소 받침 지지길이 중 큰값을 취하도록 하였다. 탄성해석에 의한 변위는 교량의 비탄성응답의 결과인 실제변위에 대하여 적당한 예측이 될 수 있다. 그러나 변위는 기초의 유연도에 매우 민감하여, 탄성해석에 기초가 포함되지 않았고 연약지반에 가설된 교량이라면 규정된 변위를 증가시켜야 한다. 그 증가량은 50% 또는 그 이상이 될 수 있으나 어떠한 일반화 작업도 주의 깊은 판단이 필요하다. 이 보다 좋은 방법은 탄성해석에 기초의 유연도를 함께 고려하여 변위의 상한치 및 하한치를 결정하는 것이다. 높은 교각을 갖는 교량에 대해서는 기초의 유연도에 대하여 특별한 주의를 기울일 필요가 있다.

1.4.9 받침 배치방법

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

받침장치의 배치방법은 1.2.3의 내진설계 기본조건에 적합하도록 상부구조의 절점과 하부구조의 강성 중심 간의 대칭성 확보를 위하여 종·횡 방향 수평력을 지지하는 고정지점의 축선이 상부구조의 질량중심을 통과함으로써 대칭성을 확보하도록 하였다. 이는 편심에 의한 상부구조의 회전을 방지하기 위한 것으로, 특히 고속도로 교량의 경우와 같이 광폭의 교량으로 상·하행선 교량을 분리한 교량의 경우, 기존의 받침배치 방법과 상이하므로 주의하여야 한다. 이때 상부 슬래브의 횡방향 온도신축량의 처리하기 위하여 상·하행선이 분리된 경우는 종방향으로 신축이음장치를 설치하여야 한다. 그러나 상부구조의 특성상 질량중심과 강성중심이 일치하지 않은 경우, 가능한 편심거리가 최소가 되도록 배치하는 것이 좋다.

1.4.10 받침의 수평 지지력 계산

- (1) 교량의 안전성 확보를 위하여 받침의 수평지지력 계산을 수행하여야 한다.
- (2) 받침의 수평지지력은 고정받침 극한상태 지지력(ultimate limit state)과 전단키의 극한상태 지지력의 합으로 정적 수평변위에 의한 수평력과 동적 계산결과에 의한 수평력보다 작지 않아야 하며, 극한 수평지지력은 계산서 및 도면에 명시하여야 한다.
- (3) 받침의 수평저항력은 보강한 경우, 보강받침의 규격 및 배치에 대하여 별도의 계산서 및 도면을 첨부하여야 한다.

교량받침은 상부와 하부구조의 연결부로서 설계지진력에 대하여 탄성적으로 지지되어야 하며, 교량의 일체성 및 안전성을 확보하기 위한 중요부재이다. 따라서 받침은 상시의 정적 수평변위에 의한 수평력과 동적 수평력에 대하여 안전하여야 하며 필요에 따라 수평지지력이 보강된 받침을 사용할 수 있다. 이러한 경우에는 주문 제작된 받침에 대하여 별도의 설계를 수행하여야 하고, 받침에 대한 도면을 첨부하여야 한다.

1.5 해석방법

1.5.1 일반 사항

- (1) 교량의 내진해석은 다음과 같은 두 가지의 해석방법 중 하나를 사용하여야 한다.
 1. 단일모드 스펙트럼 해석법
 2. 다중모드 스펙트럼 해석법
- (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 '1.4.8 설계변위'에서 규정된 최소 요구치보다 큰 경우 이 값을 사용하여야 한다.
- (3) 정밀한 해석이 요구되는 교량에 대해서는 비탄성 해석을 사용할 수 있다.
- (4) 다중모드 또는 비선형 해석에 사용되는 감쇠 비(damping ratio)는 경험치 또는 실험치에 의하지 않는 경우, 5% 감쇠비 또는 이에 상응하는 Rayleigh 감쇠를 적용한다.
- (5) 정밀 해석결과를 위하여 개선된 모드별 감쇠 비를 사용할 경우 이를 인정한다.
- (6) 교각에 작용하는 수직력과 수평변형에 의한 추가 모멘트 효과를 고려하기 위하여 연직방향 고정하중의 영향을 고려하여야 한다.

- (1) 해석법의 적용범위는 해당 구조물의 설계에 대한 요구사항, 내진설계구조의 수준 및 경제성 등에 따라 변하므로 특정 방법을 제시할 수 없다. 그러나 소형 구조물에서 대형 구조물로, 단순 구조물에서 복잡 구조물로, 구조물의 중요도 증가에 따라 정밀한 해석이 적용되는 것이 일반적인 원칙이다. 물론 특수교량이나 중요한 교량은 도로교 설계기준 및 이 지침에서 규정하고 있지 않지만 지역적 특성과 지질 및 구조 특성을 고려한 이론을 바탕으로 해석방법을 적용하는 것이 바람직하다. 시간이력 해석법(time-history analysis)은 지진에 의한 지반운동(ground motion)의 시간에 따른 이력에 대하여 구조물의 거동을 정확하게 예측할 수 있는 해석방법이나, 기존의 지진기록을 사용하거나 인공 지진기록을 사용하여야 하는 번거로움과 계산량이 증가하는 단점이 있다. 그러므로 시간이력 해석법은 설계를 위한 해석방법보다는 극히 중요한 구조물의 설계나 비선형 응답 등의 정밀 해석이 요구되는 경우나 비구조 설비의 지진에 대한 영향을 고려하기 위하여 사용되는 응답 스펙트럼을 구하기 위해서 주로 사용된다.
- (2) 일반적으로 정형 구조물의 동적해석에 사용되는 방법은 모드해석법이다. 다중모드 해

석법은 구조물의 동적특성을 고려할 수 있고 계산량이 적정하며 지진을 고려하기 위한 설계용 스펙트럼의 사용으로 설계의 간편성이 있으나 비선형 응답이나 피로해석 및 잔류 변형량 등을 계산할 수 없으며 공인된 공간뼈대 선형 동적해석 프로그램을 사용하여야 하는 단점이 있다. 단일모드 해석법은 단순하고 전체적으로 계산량이 적은 장점이 있으나, 해석자에 의한 계산과정이 많고 구조물의 동적특성 고려가 미흡하며 비선형 해석이 불가능한 점이 있다.

- (3) 정밀한 해석이 요구되거나 하부구조의 영구변형 또는 잔류변형으로 교량 구조물이 자체적으로 복원하지 못하는 경우의 구조물에 대해서는 비탄성 해석을 수행하여야 한다.(AASHTO, 1991) 이때의 비탄성 해석은 직접 적분법에 의한 시간이력 해석법을 적용하여야 한다.
- (4) 교량구조의 감쇠비는 부재의 재료종류, 연결 상태, 지진동의 중심 주파수(dominant frequency)성분 및 지진동의 크기(amplitude)에 따라 달라지며, 해석 모드별로 일정치 않다. 그러나 부재의 감쇠비를 변수별로 세분하여 설계과정에서 적용하기란 곤란하나, 고속도로 교량의 하부구조가 일반적으로 콘크리트 교각이며, 현재 도로교 설계기준에서 제시하고 있는 설계 스펙트럼이 5% 감쇠 비에 대하여 작성되어 있으므로 이 규정에서도 일반적인 설계과정에서 적용하고 있는 Rayleigh 감쇄에 의한 5% 감쇠비를 적용하기로 하였다. <표 1.6>은 비선형 시간이력 해석을 사용할 경우 구조물 형식 및 사용재료와 지진등급에 따라 ASCE에서 제시하고 있는 감쇠비로서 자세한 자료는 ASCE를 참고하기 바란다. ASCE에서 실험적 연구에 의하여 제시하고 있는 임계 감쇠(critical damping)에 대한 감쇠비는 다음과 같다.

<표 1.6> ASCE의 구조물별 감쇠비(%)

구조 또는 구조 요소	기능수행 수준	붕괴방지 수준
용접 알루미늄 구조	2	4
용접강구조, H.T.B연결 강구조	2	4
일반 볼트 강구조	4	7
프리스트레스 콘크리트 구조	2	5
철근 콘크리트 구조	4	7

- (5) 기초분리장치(base-isolation) 및 감쇠장치의 사용 필요성이 증가하며, 재료 및 지진동 특성에 따른 감쇠비의 산정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정을 고려하여, 이 지침에서는 개선된 방법 및 실험에 의하여 제시된 감쇠비의 사용은 허용하나, 사용된 방법 및 실험자료에 대하여 객관적으로 입증된 자료의 제출이 요구된다.

1.5.2 탄성지진응답계수

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

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (1.5)$$

여기서, A : '1.3.1 가속도 계수'로부터 구하는 가속도 계수

S : '1.3.3 지반의 영향'에 규정한 지반특성에 대한 무차원의 계수

T : '1.5.3 단일모드 스펙트럼 해석법' 또는 다른 적합한 방법에 의하여 결정된

교량의 주기

다만, C_s 값은 2.5A 보다 크게 취할 필요는 없다.

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

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (1.6)$$

여기서, T_m = m번째 진동모드의 주기

다만, C_{sm} 값은 2.5A 보다 크게 취할 필요는 없다.

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

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{4/3}} \quad (1.7)$$

지진은 교량의 여러 가지 진동을 유발시킬 수 있으며, 따라서 탄성지진응답계수는 각각의 관련된 모드에 대하여 구하여야 한다.

1.5.3 단일모드 스펙트럼 해석법

특수교량을 제외한 일반교량의 내진해석에서 종방향 및 횡방향 지진에 의한 부재의 단면력과 처짐을 계산하는 등가정적 지진하중 $P_e(x)$ 는 다음 식으로 산정한다.

$$P_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) V_s(x) \tag{1.8}$$

여기서, $P_e(x)$: 등가정적 지진하중이며 진동의 기본모드를 대표하기 위하여 가하는 단위 길이 당 하중강도(<그림 1.5>)

C_s : 식(1.4)로 계산하는 탄성지진 응답계수

여기서 교량의 주기 T 는 다음과 같다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{P_o g \alpha}} \tag{1.9}$$

여기서, g : 중력 가속도 9.81m/sec^2

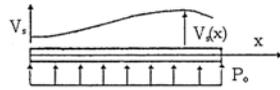
$w(x)$: 교량 상부구조와 이의 동적거동에 영향을 주는 하부구조의 단위길이 당 고정하중

$v_s(x)$: 균일한 등분포하중 p_o 에 의한 정적 처짐(<그림 1.4>)

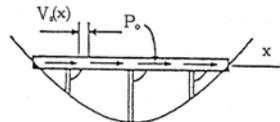
$$\alpha = \int v_s(x) dx \tag{1.10}$$

$$\beta = \int w(x) v_s(x) dx \tag{1.11}$$

$$\gamma = \int w(x) v_s(x)^2 dx \tag{1.12}$$

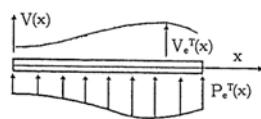


(a) 평면도, 횡방향 하중

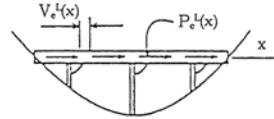


(b) 입면도, 종방향 하중

<그림 1.4> 횡방향 및 종방향으로 가정된 하중을 받는 교량 상판



(a) 평면도, 횡방향 하중



(b) 입면도, 종방향 하중

<그림 1.5> 횡방향 및 종방향으로 등가하중을 받는 교량 상판

‘도로교설계기준 내진설계 편 6.5.3 단일모드 스펙트럼 해석법’에 따른다.

1.5.4 다중모드 스펙트럼 해석법

(1) 일반사항

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

(2) 수학적 모형

(가) 교량은 그 구조물의 강성과 관성효과를 실제에 가깝게 모형화하기 위하여 적절한 절점으로 구성된 3차원 공간뼈대 구조물로서 모형화하여야 한다.

(나) 각 연결부와 절점은 6개의 자유도, 즉 3개의 이동 자유도와 3개의 회전 자유도를 가진다.

(다) 구조 질량은 최소한 3개의 이동 관성 항을 갖는 집중질량으로 모형화하여야 하며, 구조 질량은 하부 구조를 포함하여 관련된 모든 요소들을 고려하여야 한다.

(라) 지진 시에도 교량에 큰 활하중이 재하되어 있을 가능성이 많은 경우에는 그 활하중의 관성효과를 고려하여야 한다.

(마) 상부구조는 최소한 각 경간 단부의 연결부와 지간의 1/4지점마다 절점을 가진 공간 뼈대부재의 집합체로 모형화하여야 한다. 신축이음부와 교대의 불연속 부분도 상부 구조에 포함하여야 하며, 이 때 집중질량의 관성효과를 적절하게 분배시켜야 한다.

(바) 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 고려하여야 한다. 기둥 또는 교각하부와 교대에서의 지반은 등가의 선형 스프링계수를 이용하여 모형화할 수 있다.

(사) 상부와 하부가 탄성보강 고무받침이 아닌 받침장치로 지지된 경우에는 상부 질량점과 교각Coping부의 연결은 강제연결 요소를 사용한다. 강제연결 요소는 받침을 나타내며 부재의 길이와 단부자유도를 이용하여 질량중심과 지지점의 수직편심 및 고정힌지, 활동지점을 고려하여야 한다.

(아) 탄성보강 고무받침을 사용한 경우 탄성고무받침의 수평전단 저항계수를 이용한 등가의 스프링 계수를 갖는 스프링으로 모형화하거나 교각의 강성과의 직렬 연결된 수개의 병렬 스프링으로 모형화 할 수 있다.

(자) 상부구조의 교축직각방향 모형은 상부구조의 중심위치로 하되, 받침에서는 연직방향 회전에 대하여 구속시켜서는 안 된다.

(차) 신축이음으로 분리된 연속교량은 단일모드해석에 의한 교량의 진동단위별 진동주기비가 1.5를 초과할 경우 신축이음부와 불연속 부분도 상부에 포함시켜야 하며 신축이음의 충돌 및 구조의 비대칭성에 의한 영향을 고려하여야 한다.

- (카) 깊은기초의 교량에서 말뚝기초를 포함하여 모형을 작성하는 경우, 설계모형에 고려되는 말뚝길이는 내진설계 기준면까지를 최소로 한다.
- (3) 재료 모형
- (가) 재료모형은 탄성재료 및 점성감쇠기로 가정한다.
- (나) 상부구조의 재료 및 연결부의 감쇠 비는 고려치 않으며, 전체 감쇠 비는 ‘1.5 해석 방법’에 따른다.
- (다) 기초 및 토질에 재료에 따른 동적 지반특성치는 전단탄성계수, 탄성계수와 포이슨 비, 감쇠비 등으로 실험 또는 경험에 의한 역학적 특성치를 사용할 수 있다.
- (4) 진동모드의 형상과 주기
고려중인 방향에 대하여 해석에 필요한 교량의 주기와 모드형상은 고정지반 조건에 대해서 지진에 저항하는 전체 시스템의 질량과 강성을 고려하여 이론적으로 확립된 방법에 의하여 계산하여야 한다.
- (5) 다중모드 스펙트럼 해석모형의 정확도
다중모드 스펙트럼 해석결과는 해석모형의 집중질량의 자유도 선정과 고려된 고유 진동모드의 개수에 따라 달라지므로 해석모형의 정확도를 확보하기 위해서 질량 기여도 합이 90% 이상을 확보하는 것이 좋다.
- (6) 부재의 단면력과 변위의 조합 방법
부재의 단면력과 변위는 개별모드들로부터 각각의 응답성분을 조합하여 계산하여야 한다. 다중모드 해석결과와 조합방법은 제곱합평방근법(Square Root of the Sum of the Squares : SRSS)으로 하며, 다만 고유진동수가 10% 이내로 근접하는 모드에 대하여는 완전 2차 조합법(Complete Quadratic Combination Technique : CQC)을 사용하는 것이 좋다.

- (1) 기하학적 형상이 불규칙하여 진동의 각 모드 내에서 3개의 좌표축 방향으로 진동이 연계되는 교량은 이러한 복합된 효과로 인하여 각 모드를 진동의 단순한 종방향 또는 횡방향 모드로 분류하기가 어렵고 진동의 여러 모드들이 구조물의 전체적 응답에 기여하게 된다. 이러한 연계 효과와 최종 응답에 대한 다중모드의 기여분을 결정하기 위해서는 공간 뼈대의 동적해석을 할 수 있는 전산 프로그램을 사용하여야 한다. 지점에서 수평의 두 방향 중 어느 한 방향으로 작용하는 운동은 연계효과 때문에 각 부재의 두 주축 모두를 따라서 힘을 발생시킬 것이다. 곡선 형태의 구조물에 대해서 종방향 운동은 교대들을 연결하는 현(Chord)을 따라서 작용되고, 횡방향 운동은 이 현에 수직인 방향으로 작용된다. 종방향 및 횡방향 운동에 의하여 발생하는 힘은 ‘1.4.4 직교 지진력의 조합’에 규정한 바와 같이 합성하여야 한다.

다중모드 스펙트럼 해석은 적절한 선형 진동해석 컴퓨터 프로그램으로 수행하여야 한다. 이러한 해석을 할 수 있는 일반적으로 사용할 수 있는 프로그램에는 STRUDL, SAP90, SAP2000, ANSYS, STARDYN, NASTRAN, EASE, MARC, LUSAS 등이 있다.

(2) 각 연결부(joint)와 절점은 6개의 자유도, 즉 3개의 이동 자유도와 3개의 회전 자유도를 가진다. 구조 질량은 최소한 3개의 이동 관성항을 포함하는 집중질량으로 모형화하여야 한다.

구조 질량은 구조요소와 교각 덮개, 교대, 기둥과 확대기초 등을 포함하는 다른 관련된 하중들을 고려하여야 하나 이에 국한할 필요는 없다. 활하중 같은 다른 하중들도 고려하여야 한다. 일반적으로 활하중의 관성 효과는 해석 시에 포함시키지 않는다. 그러나 교통의 밀집 현상이 발생하기 쉬운 대도시 지역에서 활하중 대 고정하중 비가 큰 교량의 설계에 있어서는 지진 시 교량에 큰 활하중이 가해질 가능성에 대해서 고려하여야 한다.

모형의 형태와 정밀도는 실제 구조물의 복잡성과 해석에서 요구되는 정확도에 의존한다. 현재 진동해석에 대한 교량의 모형화는 과학이라기 보다는 기술에 가깝다. 전반적인 목적은 구조물의 진동 특성을 나타내는 수학적 모형을 도출하는 것이고, 또 입력 매개변수와 일치하는 실제적인 결과를 도출하여야 한다. 이 절의 목적은 대부분의 교량 구조물에 대한 실제적인 결과를 얻을 수 있는 몇가지의 기본 지침을 제공하는 것이다. 집중 질량 모형은 구조물의 관성 효과의 손실을 방지하기 위해서 주의를 기울여 사용하여야 한다.

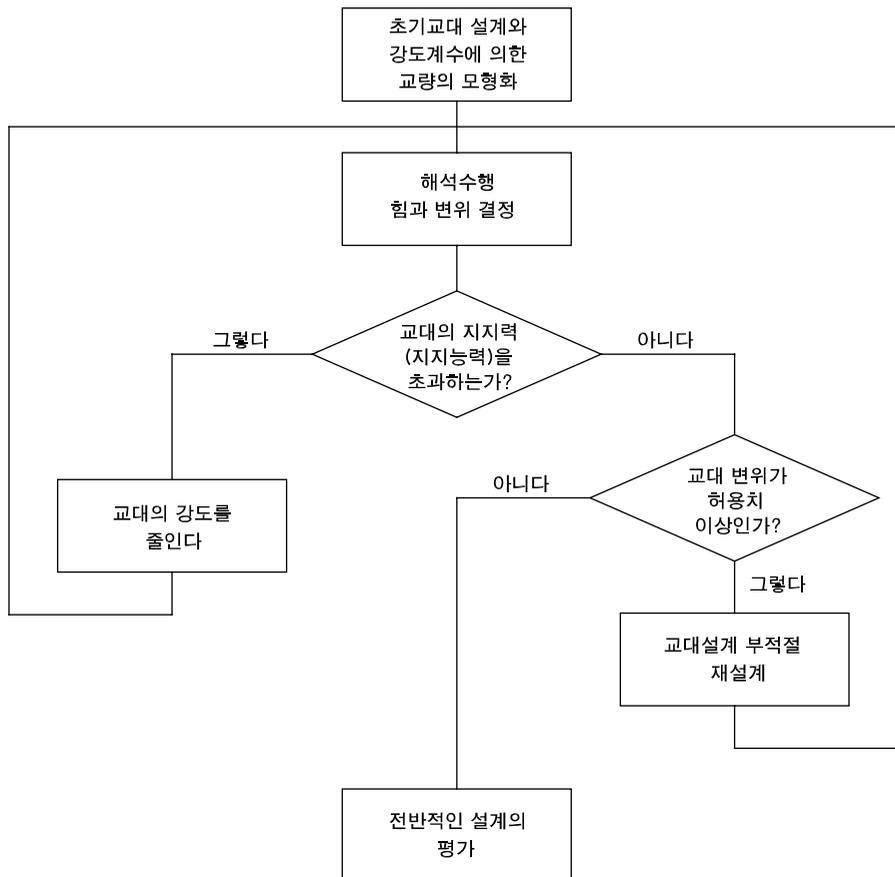
받침장치는 받침장치의 수평전단 탄성계수를 갖는 고무계받침(elastomeric rubber bearing)과 수평전단 저항계수가 매우 큰 황동주물 받침과 Pot계의 받침으로 구분하여 각각의 경우에 대한 모형화 지침을 구분하였다. 여기서 탄성고무받침의 특성은 받침의 형상계수에 따른 함수로 받침의 높이에 따라 전단탄성계수 및 최대허용 변형량이 상이하므로 사용상에 주의가 필요하다.

신축이음으로 분절된 연속교량의 경우 신축이음부 교각은 상부구조의 수평 회전강성의 영향을 고려하며, 단일모드해석에 의한 진동단위별 진동주기가 상이한 2개의 교량이 동일지점에서 지지된 경우 독립된 진동단위에 의한 해석결과와 상이한 결과가 예상되므로 연속교량의 모형은 신축이음부와 불연속부를 포함하여 전체교량을 모형화하여야 한다.

교량의 교대에서 힘과 변위의 관계는 매우 복잡한 비선형 문제이고, 교대의 설계에 영향을 받는다. 더 정확한 정보가 없을 때에는 다음의 반복적 기법을 일반적인 교량 구조물의 해석에 사용할 수 있다. 그 과정을 <그림 1.6>에 흐름도로 나타냈으며 다음의 단계들로서 기술할 수 있다.

(a) 교대의 초기 설계와 강도를 가정한다.

- (b) 교량을 해석하고 교대에서의 힘을 결정한다. 다음 중 적절한 단계를 수행한다.
- ① 힘의 수준이 교대 지반과 말뚝이 허용할 수 있는 능력을 초과한다면, 해석에서 허용되는 능력 이하의 힘의 수준을 얻을 때까지 교대의 강도를 감소시킨다.
 - ② 힘의 수준이 교대가 허용할 수 있는 이하가 된다면 다음 단계 (c)를 수행한다.
- (c) 해석에 의한 교대의 변위를 관찰하고 다음 중 적절한 단계를 취한다.
- ① 만약 변위가 허용수준을 초과하면, 가정된 교대 설계는 부적절하다. 교대를 재설계하고 단계 (a)로 돌아간다.
 - ② 만약 변위가 허용수준 이내이면, 교대강도와 교대 설계는 적합한 것이다.



〈그림 1.6〉 교량의 내진 해석 시 교대지반의 영향을 고려하기 위한 반복적 기법

(3) 교량의 내진해석에 사용되는 해석은 탄성 및 비탄성 해석법이 사용되고 있으나 슬래브교 및 거더교의 경우 교량구조의 특성상 상부구조가 하부구조에 비하여 교축직각방향 강성 및 교축방향 강성이 매우 크므로 지진동에 의한 상부의 거동은 탄성범위에 있으므로 상부구조의 재료모형은 탄성재료로 가정하였다. 또한 상부구조의 감쇠는 임계감쇠(critical damping)에 대한 구조감쇠의 비(damping ratio)로서 표시되며, 구조감쇠는 사용재료의 감쇠 및 연결부의 감쇠와 구조체의 진동에 대한 공기감쇠 등의 합으로 표시된다. 구조감쇠는 진동수와 진폭 및 속도에 따라 달라지며 조화진동(harmonic excitation)일 경우 상수로 표시되나 지진과 같은 random vibration에 대해서는 상수로 나타내기 곤란하며 일반적으로 강도와 질량에 비례하지도 않는다. 그러나 감쇠비는 실험적인 방법 외에는 구할 수가 없으며, 진동수 및 진폭과 진동모드에 따른 감쇠비를 각각 산정하여 사용하기가 곤란하여 일반적으로 제1차 진동모드의 감쇠비를 강도와 질량에 비례하는 전체구조 감쇠비를 사용하도록 하였다. 전체구조에 대한 감쇠비는 '1.5 해석방법'의 Rayleigh 감쇠비를 적용하되 실험에 의한 감쇠비나 발전된 해석 방법에 의하여 구한 감쇠값의 사용은 허용하였다.

(4) 적절한 선형 진동해석 프로그램을 사용하여 다중모드 스펙트럼 해석법에 대한 모드형상, 진동수, 최종적인 부재 단면력과 변위를 계산해낼 수 있다. 다음 방정식은 그러한 해석에 사용되는 방정식을 요약한 것이다.

모드형상과 진동수는 표준 고유치 컴퓨터 프로그램(standard eigenvalue computer program)을 사용하여 다음 방정식으로부터 계산하여야 한다.

$$[k - \omega^2 m] v = 0 \quad (1.13)$$

여기서, k 와 m 은 각각 수학적 모형의 알고 있는 강도 행렬과 질량 행렬이며, v 는 변위의 진폭 벡터이고, ω 는 진동수이다. 이 해석으로부터 무차원의 모드형상, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 과 이에 상응하는 회전 진동수 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 을 산출한다. 그러므로 각 진동모드의 주기는 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.14)$$

모드 상호간 복합되지 않은 표준모드의 운동방정식은 다음과 같은 형태이다.

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\omega_i \xi_i \dot{Y}_i(t) + \omega_i^2 Y_i(t) = \frac{P_i(t)}{M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.15)$$

여기서, 첨자 i 는 진동모드 번호에 대한 것이고, Y_i, ω_i, ξ_i 는 각각 진동모드의 진폭, 진동수, 감쇠비이다. 그리고 유효모드 하중 $P_i(t)$ 와 일반화된 질량 M_i 는 다음과 같다

$$P_i(t) = \phi_i^T m B v_g(t) \tag{1.16}$$

$$M_i = \phi_i^T m \phi_i$$

여기서 B 는 운동가속도 $v_g(t)$ 의 방향으로의 성분과, 그에 수직인 방향으로의 성분에 대응하는 1과 0으로 구성되는 벡터이다.

$$Y_i(t)_{max} = \frac{T_i^2 Sa(\xi_i, T_i)}{4\pi^2} \cdot \frac{\phi_i^T m B}{\phi_i^T m \phi_i} \tag{1.17}$$

여기서 $Sa(\xi_i, T_i)$ 는 규정된 지진운동에 대한 가속도 스펙트럼 값이다. $Sa(\xi_i, T_i)$ 는 다음의 방정식으로부터 계산한다.

$$Sa(\xi_i, T_i) = g C_{sm} \tag{1.18}$$

여기서 C_{sm} 은 식(1.6), 식(1.7)에 의한 경험식으로 구한다. 어떤 특정한 응답량 $z(t)$ (예를 들면 전단력, 모멘트, 변위 또는 상대변위)의 최대값을 결정하기 위해서, 그것이 고유진동모드의 진폭과 선형적인 관계를 갖고 있다는 사실을 이용한다. 즉,

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n A_i Y_i(t) \tag{1.19}$$

여기서 계수 A_i 는 알고 있는 값이다. 지진 지속기간 동안의 $Z(t)$ 의 최대치는 진동모드가 잘 분산된 시스템에 대한 제곱합 평방근(square root of the sum of the squares : SRSS) 방법을 이용하여 산정할 수 있다. 즉,

$$|Z(t)|_{max} = \sqrt{\sum A_i^2 Y_i(t)^2}_{max} \tag{1.20}$$

- (5) 고유진동 모드의 응답해석에서 각각의 진동모드의 전체질량에 대한 보합을 나타내는 지수로 유효질량비(participation mass)가 사용된다. 이것은 구조물 전체질량에 대한 각 고유진동모드별 유효 질량비이다. 즉 유효질량비가 큰 고유진동 모드일수록 구조물의 진동응답에 대한 기여가 크다. 모드해석법에 의한 해석을 실시하는 경우에는 해석 모형의 작성 및 진동모드의 고려범위가 중요하다. 도로교 설계기준에서는 최소3개소에서 최대 25개를 규정하고 있으나, 종 · 횡방향 진동해석을 동시에 실시한 결과의 진동모드의 합이 매우 작은 경우에는 해석결과의 정도가 떨어지므로 해석모형을 수정하거나(SEAOC.1988), 해석에 사용되는 고유 vector를 RITZ vector로 변경(Wilson, E.L.1983)하여 질량기여도의합을 증가시킬 필요가 있다.

따라서 집중질량 모형은 구조물의 관성효과의 손실을 방지하기 위하여 해석모형 작성에 주의를 필요로 하며 숙련된 기술자의 경험 및 해석결과의 분석에 따라 해석모형의 수정 및 재 해석 등의 필요한 조치를 하는 것이 좋다. 단, 구조응답에 영향을 주는 지진동 입력의 진동수 성분을 최대 10~15Hz 범위이므로 유효질량 기여도의 누적 값이 90%에 도달하지 않더라도 10Hz 이상의 진동수를 갖는 모드는 고려할 필요가 없다는 연구결과가 기준에 채택된 경우(일본 도로교 표준시방서 V 내진설계 편 6장)도 있으므로 해석모형의 정확도를 확보하는 것이 바람직하다. 각 모드별 유효질량 기여도의 합이 90%보다 작은 경우 손실된 유효관성력은 구조의 강제운동에 기인한 것으로 부분구조 해석법에 의한 기초구조 해석을 수행할 경우 상부구조 해석에 의한 수평반력과 누락된 상부질량에 지진 가속도를 곱한 추가수평 관성력을 합한 수평력을 기초의 수평 설계력으로 하여야 한다.

- (6) 지진에 의한 지진동의 영향은 3개의 직교축에 동시에 작용한다. 부재에 작용하는 최대의 변위 및 부재력(또는 응력)을 구하기 위해서는 우선 각 모드의 직교축별 응답을 구하고 축방향별 응답을 완전 2차 조합법(CQC Technique)으로 조합하여 구한다. 다중모드 해석에 의한 최대응답치는 동일시간에 발생하지 않으므로 일반적으로 SRSS법에 의하여 조합된다. SRSS법은 구조물 전체 응답값의 결정에는 만족할 만한 결과를 제공하나 몇 개의 모드가 고유진동수의 10%이내에 조밀하게 배치된 경우와 감쇠를 고려할 경우에 구조물 전체의 최대응답값을 과대 또는 과소하게 평가하는 적용성에 문제가 보고되고 있으며 이에 대한 대안으로 CQC법이 채택되고 있다.(Wilson, E.L. & Kiureghian, A.D. and Bayo, E.P. 1981) 또한 다중모드 중첩법의 경우 범용에 의한 해석이 일반화되어 있고, 해석 결과의 조합법이 선택조항으로 다양한 조합법이 제시됨에 따라 도로교 설계 기준의 SRSS법과 개선된 CQC법을 혼용할 수 있도록 하였다.

1.6 기초 및 교대의 내진설계

1.6.1 적용 범위

이 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.

이 절에서는 교량의 기초 및 교대의 내진설계에 대한 규정을 다룬다. 지진구역Ⅱ에 위치하는 내진Ⅱ 등급교에 대한 별도의 내진설계 규정은 없다. 이 설계 기준은 지진 하중이외의 수직 및 수평 하중에 대하여 충분하게 지지할 수 있도록 설계된 것을 전제로 한다. 이런 전제 조건은 기초를 위한 조사의 범위, 흙쌓기, 사면안정, 기초지반의 지지력 및 수평토압, 배수, 침하, 말뚝기초의 요건 및 지지력 등에 대한 기준을 망라한다.

1.6.2 기 초

(1) 조사

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

(2) 액상화

(가) 액상화 검토에 필요한 기본적인 자료는 다음과 같다.

- (a) 지질 및 지형에 대한 자료
- (b) 입도분포, 밀도, 지하수위
- (c) 현장 시험(예, 표준관입 시험치)이나 실내시험(반복전단시험) 자료
- (d) 설계 지진 규모(최대 지반가속도와 지속시간)

(나) 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.

$$FS_L = \frac{v_l}{v_d} \quad (1.21)$$

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

v_d : 설계지진에 상응하는 등가의 평균반복전단응력

- (다) v_l 은 불교란시료의 실내 반복전단시험이나 현장시험(예: 표준관입시험)결과로부터 결정할 수 있다.
- (라) v_d 는 Seed와 Idriss(1971)의 간편법으로 산정한다. 이때, 지반응답해석을 이용하며, 지진규모는 6.5로 한다.
- (마) 현장시험을 이용한 액상화 평가의 안전율이 1.5미만일 경우에만 실내시험을 이용한 액상화 평가를 추가로 수행한다.

(3) 기초설계

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

- (가) 지진이 발생하는 동안에 일어나는 지반의 강도와 강성의 변화
- (나) 기초의 상승
- (다) 말뚝의 횡하중
- (라) 지반과 말뚝의 상호작용
- (마) 기초의 침하량

(1) 말뚝 설계 시 특별히 요구되는 사항

지반과 교량의 응답 특징들이 불확실하기 때문에 말뚝 기초 체계에는 내진설계 시 말뚝의 일반 설계 시 요구조건 이외에 부수적인 요구조건들을 만족시켜야 한다.

(2) 지진에 의한 흙살기 또는 땅깍기 비탈면의 불안정은 교대의 이동, 상당한 부등침하 및 구조적 피해를 초래한다. 수평토압의 증가로 발생한 뒤채움의 침하와 교대의 이동은 접속기능 상실과 구조적 피해를 유발한다. 포화된 모래질의 뒤채움이나 기초지반에서 액상화가 일어나면, 비탈면과 교대가 불안정하게 되고 기초의 지지력과 말뚝의 수평 저항력이 상실되어 교량 파괴를 초래하게 된다.

(3) 등가정적하중법에서 지진으로 인한 기초하중은 구조물의 평형조건에 필요한 반력과 모멘트로부터 결정된다. 반면 전통적인 지지력 설계방법에 지진하중의 동적특성과 관련된 여러 가지 요인들을 고려하여 적당한 지진력 감소계수를 사용하여 파괴에 대한 안전율을 산정하기도 한다.

(가) 기초의 상승

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

(나) 말뚝의 횡하중

수평방향의 강성을 계산할 때는 말뚝을 탄성체로 간주하고, Winkler의 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.

(다) 지반과 말뚝의 상호작용

자유장 지진의 지반운동과 말뚝사이의 상호작용결과 나타나는 교량 구조물의 관성효과로 인한 횡하중을 고려한다.

(라) 액상화

말뚝기초 설계 시 기초지반의 액상화에 대한 안전율이 1.0 미만인 구역 내에서는 지반의 강성(p - y 곡선)을 무시하도록 한다.

(마) 기초의 침하량

구조물 설계 시에는 기초가 침하하더라도 교량 구조물이 지진에 견딜 수 있도록 하여야 한다.

(4) 지진으로 인한 곡률과 전단 하에서는 인성이 요구되기 때문에 지진위험 지역에서는 H형 강말뚝과 콘크리트로 채워진 강관말뚝을 사용하는 것이 좋다. 무근콘크리트 말뚝은 원래 부서지기 쉬우므로, 종방향 철근이 설계된 철근콘크리트 말뚝을 사용하는 것이 좋다.

(가) 말뚝의 요구조건

- (a) 내진설계에서는 말뚝의 극한지지력 개념을 사용하여야 한다.
- (b) 모든 말뚝은 기초의 바닥 콘크리트의 캡에 적절히 정착되어야 한다.
- (c) 콘크리트로 채운 말뚝은 특별한 결합부가 없다면, 기초의 바닥 콘크리트로부터 말뚝으로 상승력이 전달될 수 있도록 충분한 길이의 철근을 매설하여 정착하여야 한다.
- (d) 속채움이 없는 강관말뚝, 나무말뚝, 강말뚝은 정착장치를 설치하여야 한다. 그러나 어떤 경우라도 상승력은 말뚝의 허용지지력의 10% 이상이 되도록 설계하여야 한다.

(나) 보강철근은 말뚝과 바닥판 콘크리트를 일체로 하기 위해서 그리고 말뚝에서 말뚝캡으로 하중전달을 용이하게 하기 위해서 콘크리트 바닥판까지 연장되어야 한다. 또한 최소 보강철근은 다음을 만족시켜야 한다.

- (a) 현장콘크리트 말뚝(cast-in-place concrete piles)
 - 축방향 보강철근은 최소 4개, 최소 철근비 0.005, 말뚝상반부에 말뚝길이의 1/3 이상이어야 한다. 나선 보강철근 또는 등가 띠철근은 지름이 6.3mm 또는 그 이상으로, 최대 중심간격은 230mm로 한다. 말뚝 머리로부터 610mm까지는 중심간격이 최대 76mm가 되도록 보강한다.
- (b) 기성말뚝(precast concrete piles)
 - 축방향 보강철근은 최소 4개, 최소 철근비 0.01로 기성콘크리트 말뚝을 보강한다. 나선 보강철근 또는 등가 띠철근은 지름이 10mm 또는 그 이상으로, 최대 중심간격이 230mm로 한다. 말뚝 머리로부터 610mm까지는 중심간격이 최대 76mm가 되도록 보강한다.

(c) 기성 프리스트레스트 말뚝

기성 프리스트레스트 말뚝의 띠철근은 기성말뚝의 요구 사항을 만족시켜야 한다.

(다) 기초 콘크리트 바닥판 바로 밑의 말뚝 머리가 완전히 부서지거나 힌지와 같은 거동을 방지하기 위해서, 띠철근 간격을 줄이는 것이 좋다. 기성말뚝에서는 적당한 전단강도를 확보하기 위하여 나선 철근을 사용하여 만들어야 하고, 항복곡률의 허용치는 지반 또는 구조물 응답에 의하여 분배되어야 한다. 말뚝은 지표면 아래에서 파괴되지 않고, 기둥의 휨 항복을 지표면 위에서 발생하도록 하여야 한다.

1.6.3 연직 방향의 설계 기준면의 결정

- (1) 연직방향의 설계기준면은 지반과 부재 간의 상대변위가 없는 면으로 한다.
- (2) 직접기초는 기초의 중심을, 우물통 기초는 기초상면을 설계기준면으로 한다.
- (3) 횡방향 강성이 작고 유연성이 큰 기초를 갖는 경우에 설계기준면은 지반과의 상대변위가 없는 곳을 설계기준면으로 하되, 기초의 비탄성 거동을 고려할 경우 기초지반의 변형의 영향을 지반스프링으로 대치할 수 있다.
- (4) 연약한 점성토 및 실트질층 또는 액상화된 사질토 층으로 내진설계상 토질정수를 고려할 수 없는 지층이 있는 경우, 설계기준면은 그 층의 하단으로 한다.

설계지반면이란 지진력으로 관성력이 구조물에 외력으로 작용되는 가상적인면이다. 내진설계는 상대 변위(relative displacement), 속도(Pseudo-velocity), 가속도(Pseudo-accel)에 의한 부재의 힘- 변위 관계를 이용한 설계로, 연직방향 해석범위인 가상적인 경계면 즉, 설계기준면은 지반과 부재 간의 상대변위가 없는 면으로 하였다. 따라서 직접기초는 기둥 순간격 내의 질량 고려를 위하여 기초중심을 설계기준면으로 하며, 우물통 기초와 같이 기초부의 횡방향 강성이 기둥 또는 교각의 강성보다 현저히 큰 경우는 분리해석 방법을 적용하여 설계기준면을 기둥과 기초의 연결부로 하고, 기둥하단에 1:30이상의 헨치가 있는 경우는 헨치상단을 설계기준면으로 한다. 또한 연약지반 또는 지반액상화가 예상된 지층은 무시하고 설계기준면을 산정한다. 이때 기초는 지지층에 충분한 근입깊이를 확보하여야 한다.

1.6.4 교 대

(1) 일반사항

지진 시에 교대의 파괴나 변위에 의한 교량의 손상 또는 파괴가 빈번히 발생하므로 지진 지역 내에 설치되는 교대의 설계 및 세부설계는 신중하게 실시되어야 한다.

(2) 독립식 교대

(가) 독립식 교대의 설계에서는 지진에 의한 수평토압, 교대의 관성력과 더불어서, 상부 구조물이 자유롭게 미끄러질 수 없는 받침으로 지지되는 경우에는 상부구조물로부터 전달되는 지진력을 함께 고려하여야 한다.

(나) 지진 시에 독립식 교대에 작용하는 토압은 Mononobe-Okabe에 의하여 개발된 등가정적해석법으로 계산할 수 있으며 이 때 토압은 교대의 배면에 균등하게 분포하고 그 합력은 교대 높이의 1/2에 작용하는 것으로 가정한다.

주동토압

$$P_{AE} = 1/2 \cdot K_{AE} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v) \tag{1.22}$$

여기서, K_{AE} 는 지진 시 주동토압계수로서

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta + \beta + \theta) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cdot \cos(i - \beta)}}\right)^2} \tag{1.23}$$

수동토압

$$P_{PE} = 1/2 \cdot K_{PE} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (1 - K_v) \tag{1.24}$$

여기서, K_{PE} 는 지진 시 수동토압계수로서

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta + \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta - \beta + \theta) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \cdot \sin(\phi - \theta + i)}{\cos(\delta - \beta + \theta) \cdot \cos(i - \beta)}}\right)^2} \tag{1.25}$$

여기서, γ : 흙의 단위체적 중량

H : 교대 높이

K_h : 수평 지진 계수

K_v : 연직 지진 계수

ϕ : 흙의 내부마찰각

i : 뒤채움흙의 경사각

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

δ : 흙과 교대사이의 마찰각

β : 교대배면의 수직에 대한 각

(다) 교축방향 변위를 허용하는 독립식 교대

(a) 구조물의 경제성을 도모하기 위해서는 교대를 교축방향 변위가 전혀 발생하지 않도록 설계하기 보다는 작은 변위를 허용하는 조건에 대하여 설계하며, 이 때 적용할 수평지진계수 K_h 는 0.5A가 권장되고 예상되는 변위는 250A mm로 볼 수 있다.

(b) 교대는 지진 시에 미끄러짐만 허용하고 전도가 발생하지 않아야 하며 교대받침의 손상을 최소화 하기 위하여 미끄러짐에 의한 교축방향 변위를 감당할 수 있도록 설계되어야 한다

(라) 교축방향 변위를 구속하는 독립식 교대는 Mononobe-Okabe의 등가정적하중법에 의한 토압보다 큰 수평토압이 작용되지만 이 토압은 수평지진계수 K_h 를 1.5A로 적용하여 Mononobe-Okabe의 방법으로부터 개략적으로 계산할 수 있다.

(3) 일체식 교대

(가) 일체식 교대는 지진 시 큰 상부관성력이 뒤택움흙에 전달되므로 과다한 상대변위가 발생하지 않도록 하기 위하여 적절한 수동저항력을 갖도록 설계되어야 한다.

(나) 일체식 교대는 교대-뒤택움흙 구조와 기초의 강성을 계산하여 구조물의 내진설계 과정에 따라 설계할 수 있다.

(1) 지진으로 인한 큰 수평토압과 교량구조물 자체의 큰 종횡의 관성력 전달에 의한 교대 뒤택움흙의 침하, 그리고 교대의 변위에 의한 교대의 피해 또는 교량상판의 피해 때문에 교량의 기능이 상실되기도 한다. 그러므로 교대는 교량의 내진설계 과정 전체에 걸쳐서 중요한 과정이다. 교대의 설계요소들은 교량지반, 교량경간, 하중크기에 좌우된다. 또한 교대의 형태는 독립식중력벽, 캔틸레버벽, 타이백벽 및 일체식 칸막이(diaphragm)가 있다. 교량을 지지하는 기초는 연속기초나, 연직말뚝 또는 경사말뚝을 사용한다. 상부구조물과의 연결은 로울러 지지 탄성 베어링 받침장치 및 볼트로 고정된 연결이 있다. 또한 지진과정에서의 지반-교대-상부구조물의 복잡한 상호작용과 함께 수많은 가능한 설계변수들을 고려할 때 교대의 내진설계는 많은 단순화된 가정들이 필요하다.

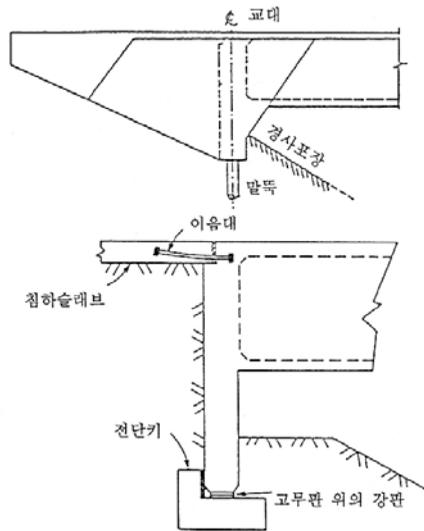
- (2) Mononobe-Okabe 해석은 지반에 작용하는 수평 및 수직 관성력을 고려한 Coulomb의 미끄럼, 뺨기이론의 확장이다. 그러므로 교대 뒤의 흠뻐기에 평형조건을 고려하여 교대에 의하여 토체에 가하여지는 주동토압 P_{AE} 값의 계산은 식(1.21)을 이용하여 구한다. 이때 교량은 파괴직전 상태이다.

독립식교대에서 지진하중이 가하여질 때 수평의 주동토압을 계산하기 위하여 등가정적 방법인 Mononobe-Okabe 공식을 이용한다. 지진계수는 가속도 계수의 1/2을 사용한다($K_n=A/2$). 이때 연직가속도의 영향은 고려하지 않는다. 단 정착장치와 경사말뚝에 의하여 수평변위가 구속된 독립식교대에서는 지진으로 인한 수평토압의 크기가 Mononobe-Okabe 해석방법으로 구한 값보다 훨씬 크다. 그러므로 1차적인 가정으로 최대 수평토압을 Mononobe-Okabe 해석방법 적용 시 $K_n=1.5A$ 로 간주한다.

독립식교대에서 일반적인 형태로서의 변위는 바깥쪽으로의 움직임과 상부구조물과 연결되어 변위가 없는 교대에서의 전도로 나타난다. 매우 잦은 지진 지역에서의 독립식교대 설계 시 침투 지반가속도하에서 변위를 0으로 하는 것은 실질적이지 못하기 때문에 약간의 수평변위를 허용한다. 교대 수평변위의 최대 허용범위는 250Amm이고, 흠뻐기 침하는 원래높이의 10~15% 정도이다. 독립교대 또는 좌대형 교대는 흠의 하중을 조절할 수 있는 반면, 이음부 부분이 구조물 전체의 붕괴위험을 가지고 있다.

- (3) <그림 1.7>에서 보는 바와 같이 일체식 또는 다이어프램 교대가 일경간 또는 이경간 교량에 종종 쓰이며, 상부구조와 일체로 된 다이어프램 교대는 말뚝으로 지지되기도 한다. 다이어프램은 교대 간 버팀목과 같은 역할을 하는 상부구조물을 가진 옹벽과 같은 작용을 한다.

일체식 교대는 상부구조물의 높은 중형 관성력이 직접 뒤통흠에 전달되므로, 과도한 상대변위가 발생하지 않도록 뒤통흠의 적절한 수동저항력이 필요하다. 이때 일체식 교대에 작용하는 최대토압은 상부구조물로부터 교대로 전달되는 최대 수평지진력과 같다고 가정한다. 지진하중이 가해질 때 수평 주동토압은 상부구조물의 지진하중보다 작은 것으로 가정할 수 있다. 또한 수평지진력을 기둥과 교각도 지지할 수 있는 경우, 교대로 전달되는 지진하중의 비율을 계산하기 위하여 교대의 축방향 강성을 추정하는 것이 필요하다.



〈그림 1.7〉 전형적인 일체식 교대

1.6.5 기초와 교대의 강성 계산

내진설계 시 기초와 교대의 강성을 계산하여 일반적인 구조물 설계와 같이 설계한다.

(1) 근입된 기초의 강성

$$K = \alpha \cdot \beta \cdot K_0 \quad (1.26)$$

여기서, α : 기초의 형상계수

β : 기초의 근입계수

K_0 : 등가반지름으로 계산된 강성

(2) 교대의 수평변위와 회전에 의한 강성

(가) 수평변위에 의한 강성

$$K_s = 0.425 \cdot E_s \cdot B \quad (1.27)$$

(나) 회전에 의한 강성

$$K_r = 0.072 \cdot E_s \cdot B \cdot H^2 \quad (1.28)$$

여기서, E_s : 뒤채움 흙의 동적 탄성계수

B : 교대의 폭

H : 교대 높이

1.7 강교 설계

1.7.1 일반 사항

- (1) 구조용 강재 기둥과 연결부의 설계와 시공은 ‘도로교설계기준’과 이 절의 추가 요구조건을 만족시켜야 한다.
- (2) 허용응력 설계법 적용 시 허용응력을 50% 증가시킨다.

(1) 허용응력 설계법에 있어서 허용응력을 50% 증가시키는 것을 다음 사항에 근거를 두고 있다.

- (가) 단주의 항복강도와 허용응력 사이의 안전 여유
- (나) 항복강도와 허용 인장강도 사이의 안전 여유
- (다) 약 1.7에서 약 1.9 사이의 값을 갖는 압축부재의 안전 여유

1.7.2 P- Δ 효과

P- Δ 효과(지진변위로부터 발생하는 편심과 기둥 축력에 의한 모멘트)로 인한 2차 휨을 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.

1.8 콘크리트교 설계

1.8.1 일반 사항

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

이 절에서 추가되는 설계 요구조건들의 목적은 교량 구성요소의 설계가 전체 설계원리와 일관성을 유지하게 하고, 과거 지진에서 관찰된 파괴가능성이 최소가 되도록 보장하는데 있다. 교각에 대하여 추가된 설계 요구조건들은 다소의 비탄성 능력을 요구한다. 비록 하중계수설계법이 설계력 수준을 결정하는데 사용되는 극한하중 응력개념과 일치하기 때문에 추천되고는 있지만, 허용응력 설계법과 하중계수 설계법 둘 다 허용된다. 허용응력 설계에서는 33%의 허용응력의 증가를 허용하였다.

1.8.2 최소 횡방향 철근

(1) 기둥의 상부와 하부에서 최소 횡방향철근에 대한 요구사항은 (2)에, 횡방향철근의 간격에 대한 요구사항(3)에 규정한다.

(2) 소성힌지에서의 심부 구속을 위한 횡방향철근

(가) 일반적으로 소성영역이 예상되는 기둥과 말뚝가구의 상부와 하부의 심부(core)는 이 절의 규정에 따라 횡방향철근으로 구속하여야 한다. 이 때 횡방향 철근의 항복강도는 축방향 철근의 항복강도를 초과할 수 없다.

(a) 원형기둥의 나선철근비 ρ_s 는 다음 값들 중 큰 값을 취한다.

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (1.29)$$

또는

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (1.30)$$

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, 결속철근은 심부구속 철근으로 계산하여서는 안 된다.

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

$$A_{sh} = 0.30 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (1.31)$$

또는

$$A_{sh} = 0.12 a h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (1.32)$$

여기서, a : 띠철근의 수직간격, 최대 150mm

A_c : 기둥 심부의 면적 (mm^2)

A_g : 기둥의 총 단면적 (mm^2)

A_{sh} : 수직간격이 a 이고, 심부의 단면치수가 h_c 인 단면을 가로지르는 보강띠철근(cross ties)을 포함하는 횡방향철근의 총 단면적 (mm^2), 직사각형 기둥의 두 주축

모두에 대하여 별도로 계산하여야 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)

(나) 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.

(다) 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.

(라) 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

(가) 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 설치하여야 하나 그 길이가 380mm보다 작아서는 안 된다.

- (나) 말뚝가구의 말뚝 상단에서의 구속을 위한 횡방향 철근은 기둥에 대하여 규정된 것과 같은 구간에 설치한다. 말뚝하단에서는 모멘트 고정점에서 말뚝지름의 3배 길이만큼 내려간 위치로부터 진흙선에서 말뚝지름과 450mm 중 큰 값 이상의 길이만큼 올라간 위치까지의 구간에 횡방향 철근을 설치하여야 한다.
- (다) 철근의 최대 간격은 부재 최소 단면치수의 1/4 또는 축방향 철근 지름의 6배 중 작은 값을 초과해서는 안 된다.
- (라) (가), (나)에서 규정된 횡방향으로 구속된 부분에서는 나선철근 겹이음은 허용되지 않는다. 이 부분의 나선철근 연결은 완전한 용접겹이음으로 하여야 한다.

- (1) 내진 I 등급교는 기둥의 항복을 일으키는 지진력을 받을 수 있는 가능성을 가지고 있다. 따라서 기둥은 약간의 연성능력을 갖는 것이 필요하다. 다소간의 연성을 확보하는데 가장 중요한 것은 횡방향철근에 대한 요구조건의 규정이다. 이것은 종방향철근의 좌굴을 방지하고 기둥의 심부(core)에 대한 구속력을 제공한다.
- (2) ‘도로교설계기준 내진설계편 6.8.2.1 소성힌지에서의 구속을 위한 횡방향 철근’에 따르며 이 절에서 규정되는 기둥이 지지하는 축방향력이 덮개가 부서지기 이전의 하중과 최소한 동일하도록 하며 종방향철근의 좌굴을 방지하게 하는 것이다. 그러므로 이렇게 구속하여 주는 횡방향철근이 간격이 또한 중요하다.
- (3) 원형띠철근량의 계산 및 배치방법에 대해서 국내기준 및 AASHTO의 규정 부재로 사각띠철근에 대한 규정을 적용함으로써 많은 문제가 발생하였으나 ACI · UBC · Caltran · FWHA 및 일본의 규정을 조사한 결과, 원형단면에 대한 원형띠철근의 심부구속효과는 나선철근과 유사하므로 원형띠철근의 계산식은 나선철근계산식을 적용키로 하였다. 다만 나선철근 또는 원형띠철근과 보강철근의 결합은 원환응력상태를 유지하기 곤란하므로 나선 또는 원형띠 철근과 보강철근의 병행사용을 금하였다. 그러므로 보강철근은 철근가공 및 간격유지를 위한 결속철근으로만 사용하여야 하며, 띠철근의 겹이음에서 연직철근과 띠철근을 동시에 결속하는 135° 갈고리로 설치되어야 한다. 따라서 하부구조의 최대 골재규격과 심부구속철근의 순간격, 원형 교각 단면직경 및 구속철근 단면적을 검토한 결과 나선철근 또는 원형띠철근을 사용할 수 있는 원형단면의 규격이 제한되나, 이는 단면의 증가보다 다주식 하부구조를 유도하여 구조물의 여유력을 증가를 유도하기 위함이다.

1.8.3 철근 콘크리트 기둥의 축방향 철근에 관한 최소규정

소성영역이 예상되는 기둥의 상부와 하부에서 기둥의 최대 단면치수, 기둥 순높이의 1/6, 450mm 중 가장 큰 값으로 결정되는 구간에 배근되는 축방향 철근은 전체 철근 중 1/2 이상이 연속철근(단일철근 또는 기계적으로 연결된 철근)이어야 한다.

1.9 지진격리 교량의 설계

1.9.1 일반 사항

- (1) 이 절의 설계 규정들은 수평방향으로 지진 격리시키는 시스템에 대해서만 고려되었으며, 수직방향에 대해서는 강제라고 가정한다.
- (2) 이 절의 규정들은 외부 에너지를 이용하지 않는 지진 격리 시스템에만 적용한다.

이 절은 신설되는 지진 격리 교량의 설계에 적용한다.

도로법에서 규정하는 도로상에 건설하는 지간 200m 이하의 교량에 적용하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 지간이 200m가 넘는 경우의 특수한 형식의 교량(아치교, 사장교, 현수교 등)은 이 절의 설계 개념 및 원칙을 준수하고 적절한 보정을 한 지진 격리 교량 설계 기준을 작성하여 설계할 수 있다.

1.9.2 지진 격리 설계의 기본 방침

1.9.2.1 목 적

지진에 의하여 교량이 입는 피해의 정도를 최소화 시킬 수 있는 내진성의 확보를 위하여 지진 격리 받침을 적용한 경우에 필요한 최소 설계 요구 조건을 규정한다.

지진에 의하여 교량이 입는 피해를 방지하는 방법은 내진·면진·제진 등의 방법이 있는데, 이 절의 내용은 면진개념의 설계로 지진에 의한 교량의 피해를 최소화하기 위하여 지진 격리 받침을 사용하여 지진에 의한 상부 구조의 수평력을 하부 구조에 최소로 전달시킴으로 교량의 안전성을 확보하는 설계 방법에 대한 설명이다.

1.9.2.2 기본 개념

지진 격리 받침을 적용 시 다음 사항을 충분히 검토하여야 한다.

- (1) 지진 격리 받침의 적용은 교량의 장주기화 혹은 지진 에너지 흡수 성능 향상 효과를 상시와 지진 시의 양 측면에서 검토하여야 한다.
특히, 다음의 조건에 해당하는 경우에는 지진 격리 받침을 적용하지 않는 것으로 한다.
 - ① 하부 구조가 유연하여 고유 주기가 긴 교량
 - ② 기초 주변의 지반이 연약하고, 지진 격리 받침의 적용에 따른 교량 고유 주기의 증가로 지반과 교량의 공진 가능성이 있는 경우
 - ③ 받침에 부반력이 발생하는 경우
- (2) 교량의 장주기화로 인한 지진 시 상부 구조의 변위가 교량의 기능에 악영향을 주지 않도록 하여야 한다.
- (3) 지진 격리 받침은 단순한 구조로 작동하면서 역학적 거동이 명확한 범위에서 사용하여야 한다.
또한, 지진 시의 반복적인 횡변위와 상하 진동에 대하여 안정적으로 거동하여야 한다.
- (4) 지진 격리 받침을 적용 시 에너지 흡수성능의 향상에 의한 감쇠성의 향상과 지진력의 분산에 중점을 두어야 하고, 과도한 장주기화를 도입해서는 안 된다.
- (5) 지진 격리 받침은 앵커 볼트에 의해서 확실하게 하부 구조에 정착되어야 하며, 교체가 가능한 구조로 설치하여야 한다.
- (6) 지진 격리 교량은 설계에서 제시된 변위가 허용될 수 있도록 하부 구조 등 주요 구조물 사이에 충분한 유간이 설치되도록 한다.

지진 격리 설계는 수평 지진력에 의한 지진 시 교량의 응답을 줄일 목적으로 주로 상부 구조와 하부 구조 사이에 지진 격리 받침을 적용하여 요구되는 내진성을 확보하는 방법이다.

이때 지진 격리 받침은 교량의 고유 주기를 길게 함으로서 교량에 작용하는 지진력을 줄여주고, 지진 에너지 흡수 성능 향상을 통하여 지진 시 응답을 감소시키는 역할을 한다.

지진 격리 설계 시 사용되는 지진 격리 장치는 이 절에서 규정하고 있는 지진 격리 받침 이외에도 그 특성의 안전성이 확인된 각종 감쇠기, 낙교 방지 장치, 지진 보호 장치 등에 의하여 보다 발전된 설계를 할 수 있다.

지진 격리 교량의 구조는 다음의 3가지 조건을 동시에 만족하는 것을 대상으로 한다.

- (1) 어느 일정 값 이상의 지진력에 대해서 고유 주기를 길게 하는 것에 의하여 지진력을 감소하는 것을 목적으로 아이소레이터를 이용하여 교량을 유연하게 지지한다.
- (2) 장주기화 하는 것만으로는 지진 시 교량에 발생하는 변위가 과도하게 되기 때문에 댐퍼를 적용하여 사용상 문제가 되지 않도록 변위를 저감한다.

(3) 풍하중이나 제동하중 등에 의하여 교량의 사용성에 영향을 미치는 진동이 발생하지 않도록 저항력을 갖게 하기 위하여 아이소레이터 또는 댐퍼에 필요한 강성을 갖도록 한다.

지진 격리 교량은 상부구조와 하부구조 간 또는 기초와 교각 본체 간을 유연하게 결합하여 양자 간에 상대 변위가 생기기 쉽게 하는 것에 의하여 교량에 작용하는 지진력의 저감을 얻는다. 따라서, 기초 주변 지반이 지진 시에 불안정하다는 것이 예측되는 경우에는 지진 격리 효과를 얻을 수 없는 경우도 발생되므로 지진 격리 교량 형식을 채택하면 안 된다.

일반적으로 지진 격리 교량 형식에 적합한 조건은 아래와 같다.

- ① 지반이 견고하고, 기초 주변 지반이 지진 시에 안정한 경우
- ② 하부 구조의 강성이 크고 교량의 고유 주기가 짧은 경우
- ③ 다경간 연속교

1.9.3 지진 격리 교량의 가속도 계수

지진 격리 설계 시에 사용하는 가속도 계수는 일반 교량의 내진 설계에 사용되는 가속도 계수를 사용한다.

1.9.4 지진 격리 교량의 내진 등급과 설계 지진 수준

지진 격리 교량의 내진 등급과 설계 지진 수준은 일반 교량의 규정과 동일한 규정을 적용한다.

1.9.5 지진 격리 교량의 지반 계수

지진 격리 교량의 지진 하중을 결정하는데 사용되는 지진 격리 교량의 지반 계수 S_i 는 아래 <표 1.7>과 같다.

<표 1.7> 지진 격리 교량의 지반 계수 S_i

지진 격리 교량의 지반 계수	지반 종류			
	I	II	III	IV
S_i	1.0	1.5	2.0	2.7

지반의 영향은 교량의 지진 하중을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

지진 격리 교량의 경우 지반 계수의 값이 내진 설계 시 적용하는 지반 계수보다 더 큰 값을 사용하고 있다.

지반의 종류는 일반 교량의 지반 종류와 동일하게 사용한다.

1.9.6 지진 격리 교량의 응답 수정 계수

(1) 지진 격리 교량의 각 부재와 연결 부분에 대한 설계 지진력은 1.9.7에서 산출된 등가 지진력을 <표 1.8>의 지진 격리 교량의 응답 수정 계수로 나눈 값으로 한다.

<표 1.8> 지진 격리 교량의 응답 수정 계수, R_i

하부 구조	R_i	연결 부분	R_i
벽식 교각	1.5	상부 구조와 교대	0.8
철근 콘크리트 말뚝 가구(Bent) 1. 수직 말뚝만 사용한 경우	1.5	상부 구조의 한 지간 내의 신축이음	0.8
2. 한개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5		
단일 기둥	1.5	기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부 구조	1.0
강재 또는 합성 강재와 콘크리트 말뚝가구 1. 수직 말뚝만 사용한 경우	2.5	기둥 또는 교각과 기초	1.0
2. 한개 이상의 경사 말뚝을 사용한 경우	1.5		
다주 가구	2.5		

(2) 하부 구조의 경우 축방향력과 전단력은 응답 수정 계수로 나누지 않는다.

(3) 앞 절의 내진 설계를 위하여 추가로 규정한 설계 요건을 충족시키지 못하는 경우에는 하부 구조와 연결 부분에 대한 응답 수정 계수는 각각 1.0과 0.8을 넘지 못한다.

이때, 지진 응답 해석을 통하여 설계 지진 시에 하부 구조가 탄성 범위 내에서 거동함을 확인하여야 하고, 철근 콘크리트 기둥의 철근 상세는 6.9를 만족시켜야 한다.

1.9.7 해석 방법

1.9.7.1 일반 사항

- (1) 지진 격리 교량의 지진해석에 사용하는 해석법은 아래의 네 가지 해석법 또는 발주처가 인정하는 검증된 정밀 해석법을 사용할 수 있다.
- ① 등가 정적 하중법
 - ② 단일 모드 스펙트럼 해석법
 - ③ 다중 모드 스펙트럼 해석법
 - ④ 시간 이력 해석법
- (2) 교량 해석은 지진 격리 받침의 특성을 고려하여 수행한다.
- (3) 지진 격리 받침의 비선형 거동을 단순화하기 위해서 이중 선형 모델을 사용할 수 있다.

지진 격리 받침의 유효 강성 K_{eff} 및 지진 격리 시스템의 등가 감쇠비 β 는 원칙적으로 식(1.33) 및 식(1.9.2)에 의하여 산출한다.

해석에 사용되는 지진 격리 받침의 유효 강성은 설계 변위에서 계산되어야 한다.

$$K_{eff} = (F_p - F_n) / (d_p - d_n) \tag{1.33}$$

$$\beta = (\text{전체 EDC 면적}) / \{2\pi \times \sum (K_{eff} \times d_i^2)\} \times 100\% \tag{1.34}$$

여기서, F_n : 지진 격리 장치의 원형 시험 시, 한 cycle 동안의 최대 부변위량 발생 시 수평력

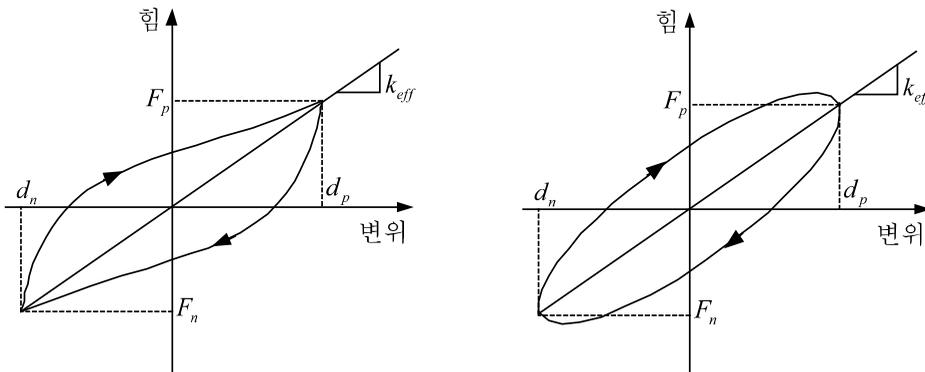
F_p : 지진 격리 장치의 원형 시험 시, 한 cycle 동안의 최대 양변위량 발생 시 수평력

d_n : 지진 격리 장치의 원형 시험 시, 한 cycle 동안의 최대 부변위

d_p : 지진 격리 장치의 원형 시험 시, 한 cycle 동안의 최대 양변위

d_i : 고려하고 있는 방향에 대한 강성 중심에서의 등가 지진력에 의한 지진 시 설계변위

EDC : 한 cycle 당 소산된 에너지



<그림 1.8> 지진 격리 받침의 유효 강성 및 지진 격리 시스템의 등가 감쇠비

유효 주기가 3초보다 긴 교량 또는 등가 감쇠비가 30%를 초과하는 지진 격리 받침을 사용하는 경우에 지진 격리 받침의 비선형성을 고려한 시간 이력 해석을 수행하여야 한다.

1.9.7.2 등가 정적 하중법

등가 지진력은 다음과 같다.

$$F_e = C_s \times W \tag{1.35}$$

여기서, F_e : 등가 지진력

W : 상부 구조물의 총중량

등가 지진력을 결정하기 위해서 사용되는 탄성 지진 응답 계수 C_s 는 식(1.36)에 의해서 구할 수 있다.

단, C_s 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

$$C_s = (K_{eff} \times d) / W = (A \times S_i) / (T_{eff} \times B) \tag{1.36}$$

지반에 대한 상부 구조의 총 변위 d 는 식(1.37)에 의해서 구할 수 있다.

$$d = (250 \times A \times S_i \times T_{eff}) / B \text{ (mm)} \tag{1.37}$$

여기서, B 는 <표 1.9>로부터 구한다.

유효주기 T_{eff} 는 식(1.38)에 의해서 구할 수 있다.

$$T_{eff} = 2\pi \times \sqrt{\{W / (k_{eff} \times g)\}} \tag{1.38}$$

여기서, K_{eff} 는 지진 격리 교량의 유효 강성이다.

<표 1.9> 지진 격리 교량의 감쇠 계수 B

지진격리교량의 감쇠 계수	지진 격리 시스템의 등가 감쇠비 β (%)				
	≤2	5	10	20	30
B	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7

1.9.7.3 단일 모드 스펙트럼 해석법

등가 정적 지진 하중 $P_e(x)$ 는 다음과 같다.

$$P_e(x) = \omega(x) \times C_s \tag{1.39}$$

여기서, $P_e(x)$: 등가 정적 지진 하중의 단위 길이 당 하중 강도

$\omega(x)$: 상부 구조의 단위 길이 당 고정 하중

C_s : 식(1.36)에 의해서 계산되는 탄성 지진 응답 계수

종방향 및 횡방향 지진에 의한 부재의 단면력과 처짐을 계산하는 등가 정적 지진 하중은 지진 거리 받침의 변위에 의하여 1.9.7.2에 따라 결정된 등가 지진력을 사용하여 수평 2축 방향을 따라 구하고, 직교 지진력의 조합 방법을 사용한다.

1.9.7.4 다중 모드 스펙트럼 해석법

탄성 지진 응답 계수 C_{si} 는 다음과 같다.

$$C_{si} = (A \times S_i) / T_i \quad (T_i \leq 0.8T_{eff}) \quad (1.40)$$

$$C_{si} = (A \times S_i) / (T_i \times B) \quad (T_i > 0.8T_{eff}) \quad (1.41)$$

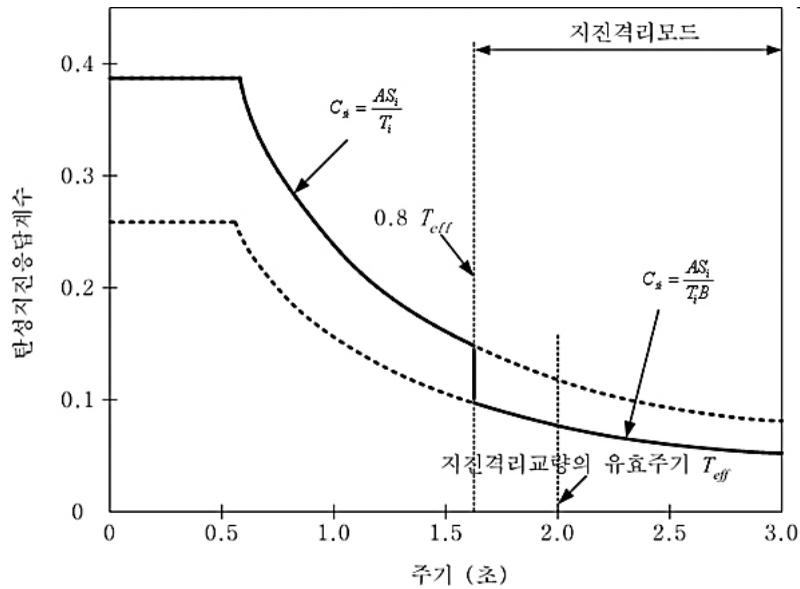
여기서, C_{si} : i번째 모드의 탄성 지진 응답 계수

T_i : I번째 모드의 주기

단, C_{si} 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

직교하는 지진력의 조합은 직교 지진력의 조합 방법을 사용한다.

지진 거리 교량의 탄성 지진 응답 계수는 아래 그림과 같다.



(그림 1.9) 지진 거리 교량의 탄성 지진 응답 계수

1.9.7.5 시간 이력 해석법

지진 이력 해석이 요구되는 지진 격리 교량의 경우에는 다음의 조건들을 적용하여야 한다.

- (1) 지진 격리 받침의 비선형 특성을 고려하여야 한다.
- (2) 시간 이력 해석을 위한 지진 입력 시간 이력은 <그림 1.9>에 나타난 감쇠율 5%에 대한 설계 지반 응답 스펙트럼에 부합되도록 실제 기록된 지진 운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 최소한 4개 이상의 지진 운동을 작성하여 사용하여야 한다.
- (3) 작성된 시간 이력이 설계 지반 응답 스펙트럼에 부합되기 위해서는 작성된 시간 이력의 평균 응답 스펙트럼이 다음 요건을 만족하여야 한다.
 - ① 시간 이력의 응답 스펙트럼 값이 설계 지반 응답 스펙트럼 값보다 낮은 주기의 수는 5개 이하이고, 낮은 정도는 10% 이내이어야 한다.
 - ② 시간 이력의 응답 스펙트럼을 계산하는 주기의 간격은 스펙트럼 값의 변화가 10% 이상 되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다.
- (4) 시간 이력의 지속 시간은 10~25초 또는 강진 구간 지속 시간은 6~10초가 되도록 하여야 한다.
- (5) 두 방향 이상의 시간 이력을 동시에 고려할 경우에는 각 직교 방향의 시간 이력은 통계학적으로 독립되어야 한다.
여기서, 두 시간 이력 사이의 시작 시간 차이를 고려하여 계산된 상관 계수 함수의 최대 절대값이 0.3을 넘지 않는다면 두 시간 이력은 통계학적으로 독립이라고 간주할 수 있다.
- (6) 7쌍 미만의 지반 운동 시간 이력에 의한 해석 결과로부터 얻어진 응답치의 최대값 혹은 7쌍 이상의 해석 결과로부터 얻어진 평균값을 설계값으로 한다.

1.9.8 지진 격리 받침

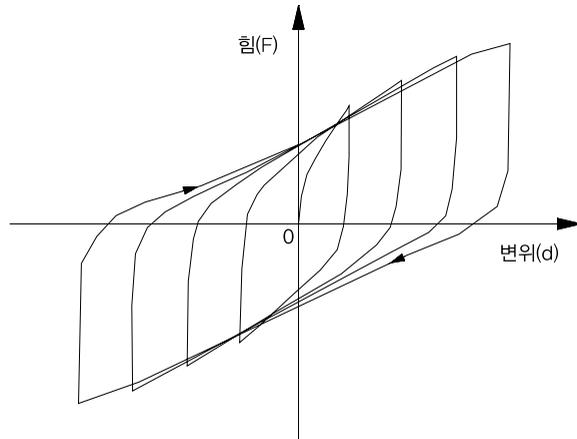
1.9.8.1 일반 사항

지진 격리 받침은 비선형 이력 특성을 갖는 비선형 부재로 모델링 한다.
지진 격리 받침을 비선형 부재로서 모델화하는 경우는 1.9.8.2의 규정에 의한다.

지진 격리 받침은 일반적으로 비선형인 이력 특성을 갖기 때문에 이것을 적절하게 나타내는 것이 가능한 비선형 부재 로 모델화할 필요가 있다.

1.9.8.2 지진 격리 받침의 비선형 이력 모델

지진 격리 받침을 비선형 부재로서 모델화하는 경우에는 <그림 1.10>에서 나타낸 형식으로 모델화하는 것이 좋다. 단, 이 경우에는 사용한 지진 격리 받침의 특성에 기초하여 1차 강성 및 2차 강성을 적절하게 정하는 것으로 한다.



<그림 1.10> 지진 격리 받침의 비선형 복원 모델

지진 격리 받침은 일반적으로 비선형인 이력 특성을 갖기 때문에 지진 격리 교량의 시간 이력 해석법이나 그 검토에 있어서 지진 격리 받침의 비선형 이력 특성을 적절하게 나타내는 것이 가능한 모델을 사용할 필요가 있다.

사용 실적이 많은 LRB (lead rubber bearing, 납블럭 삽입 적층 고무 받침)나 고감쇠 적층 고무 받침 등에 대해서는 일반적으로 비선형성은 <그림 1.10>의 형태로 나타내는 것이 가능하다.

단, 이 경우에는 지진 격리 받침의 특성에 대응하는 적절한 강성을 주어야 한다. 즉, <그림 1.10>의 형태로 나타나지 않는 지진 격리 받침의 경우에는 이 형태로 적절하게 모델화하여야 한다.

1.9.8.3 상시 수평력 안전성

- (1) 지진 격리 받침은 풍하중, 원심력, 제동력, 온도 변화에 의한 하중을 포함하는 모든 상시 수평력 조합에 안정적으로 거동하도록 설계하여야 한다.
- (2) 지진 격리 받침 탄성 중합체의 최대 전단 변형율은 상시 70%, 지진 시 200% 이내이어야 한다.

1.9.8.4 수직력 안정성

- (1) 지진 격리 받침의 수평 변위가 없는 상태에서 고정하중과 활하중을 더한 수직하중에 대하여 최소한 3이상의 안전율을 갖도록 한다.
- (2) 1.2배의 고정하중, 지진하중으로 인한 수직 하중, 그리고 횡방향 변위로 인한 전도 하중의 합에 대하여 안정적으로 거동하도록 설계하여야 한다.
- (3) 전도 하중을 계산할 때의 횡방향 변위는 옅셋 변위와 설계 지진에 의한 설계 변위의 2배와 같다.

1.9.8.5 회전 성능

지진 격리 받침의 회전 성능은 고정하중 · 활하중 · 시공 오차의 영향을 포함하여야 하고, 여기서 고려되는 시공 오차의 설계 회전각은 0.005rad보다 작아서는 안 된다.

1.9.8.6 품질 기준

지진 격리 받침과 그 재료는 화학적, 물리적, 기계적 성질이 충분히 안정적이어야 하며, 다음의 조건을 만족하여야 한다.

- (1) 다수의 지진 격리 받침을 대상으로 측정한 평균 유효 강성은 설계값의 $\pm 10\%$ 이내이어야 하고, 각각의 유효 강성은 설계값의 $\pm 20\%$ 이내이어야 한다. 또한, 평균 EDC값은 설계값의 -15% 이상이어야 하고, 각각의 EDC값은 설계값의 -25% 이상이어야 한다.

〈표 1.10〉 지진 격리 받침 유효 강성과 EDC의 품질 기준

구 분	K_{eff}	EDC
개체차	$\pm 20\%$	-25%
평균값	$\pm 10\%$	-15%

- (2) 지진 격리 받침의 유효 강성 및 등가 감쇠비는 지진 설계 변위에 의한 영속 반복 재하에 대하여 안정적이어야 한다.
- (3) 지진 격리 받침은 원칙적으로 지진 후에 교량의 기능에 악영향을 주는 잔류 변위가 발생하지 않도록 설계하여야 한다.
- (4) 지진 격리 받침의 유효 강성 및 등가 감쇠비는 도로교 설계 기준 2.1.12의 온도 범위에서 안정적이어야 한다.
- (5) 지진 격리 받침의 지진 설계 변위 범위에서는 항상 양의 접선 강성을 가져야 한다.

1.9.8.7 지진의 영향을 저감시킬 수 있는 기타 구조

지진 격리 교량 이외의 구조 또는 장치를 이용하여 지진의 저감을 기대할 수 있는 경우에는 교량의 진동 특성 등 지진 시의 거동에 대하여 검토하여 낙교 등에 대한 안전성을 충분히 확보한다.

지진 격리 설계이외에도 각종의 새로운 에너지 흡수 장치나 받침구조 등 새로운 진동 제어 기술이 개발되고 있다. 이러한 구조나 장치들은 아직 현장에 일반화되어 적용되고 있지 않으므로 구체적인 설계 세목에 대해서 규정될 수 없지만 차후 이러한 기술 개발과 적용 사례가 충분할 것을 예상하여 지진의 영향을 저감을 기대할 수 있는 구조 또는 장치를 사용하는 경우에는 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

- ① 간단한 구조로 역학적인 거동이 명확하여야 한다.
- ② 지진 진동에 안정한 기능을 발휘할 수 있어야 한다.
- ③ 동적 해석 시 교량 전체 구조의 진동 특성을 평가한 내진 성능 검토를 시행하여야 한다.

1.10 낙교 방지 시설의 설치

1.10.1 일반사항

내진구조의 효과를 발휘하고, 설계지진력 이상의 지진에 대한 교량의 안전을 확보하기 위하여, 고속도로 교량은 신축이음부의 설계 및 낙교 방지 시설을 설치하여야 한다.

도로교의 내진설계는 하부구조의 연성과 강성에 의하여 교량에 발생하는 지진력과 변위를 지지하는 설계방법이다. 도로교의 하부구조는 대부분 콘크리트로 이루어져 있으며, 하부구조에는 항복이 발생할 가능성이 있다. 따라서 하부구조는 연성능력을 확보하여야 하며, 횡방향 철근에 의한 구속여건에 따라 주철근의 좌굴을 방지하고 기둥의 심부(core)에 대한 구속력을 제공한다. 때문에 도로교 설계기준의 내진설계 편 3.4 응답수정계수와 8장 콘크리트교에 있어서의 구조세목에 의하여 기둥의 소성힌지 발생에 필요한 횡방향 구속철근에 대한 구조세목을 규정하고 있다. 또한 기준에서는 연성설계에 의한 변위증가를 고려하기 위하여 1.4.8 설계변위에 의하여 최소 받침 지지길이를 규정하고 있으나 하부구조의 소성힌지 발생 및 과도한 잔류변형에 의한 낙교방지책으로는 부족한 실정으로, 이 장에서 낙교방지 시설에 대한 규정을 추가하여 내진설계에서 가정한 조건을 만족하도록 구조적인 배려를 하도록 하였다.

낙교방지 시설은 주요 구조물의 충돌에 의한 파괴나 비정상 진동을 방지하기 위한 구조물 간의 최소 이격거리 확보와 과도한 변위방지를 위한 받침의 최소 지지길이 확보 및 교대 뒤택음 흙의 수동토 압을 이용한 이탈장치와 보의 연결선 등의 이동 제한 장치 등으로 낙교 방지 시설을 설치함으로써 교량의 낙교에 의한 인명의 손상이나 교통의 차단을 방지하기 위한 목적의 보강재이다.

1.10.2 낙교 방지 구조

여기서 규정하는 사항은 지진 시에 상부구조가 교각 또는 교대에서 낙하하지 않도록 받침부 또는 거터의 단부에 설치하는 구조에 적용하며, 낙교 방지 장치의 종류선정은 책임기술자의 판단에 따른다. 단, 낙교 방지 장치는 다음 4가지 항목을 만족하도록 구성된 구조이어야 한다.

- (1) 주요 구조물 간의 유격의 확보에 지장이 없는 구조
- (2) 최소 받침 지지길이의 확보에 지장이 없는 구조
- (3) 초과변위를 제한할 수 있는 이동제한 기능을 할 수 있는 구조
- (4) 받침의 원상태 복원에 지장이 없는 구조

교량의 지진 시 거동을 감안하여 낙교 방지 장치를 설치하도록 하였다. 낙교 방지 장치는 설계지진 보다 과대한 지진에 대한 대책으로, 주요부재 상호간의 상시 및 지진 시 거동을 허용하는 유격이 설치되어야 하며, 지진 시 발생하는 상부구조의 과도한 이동을 고려하여 상부구조의 단부가 연직방향의 지지를 상실하지 않을 최소 받침 지지길이를 확보하여야 한다. 또한, 설계지반 가속도에 의해서 구하여진 설계변위를 초과하는 변위를 억제하기 위한 이동제한 기능을 보유하여야 하며, 지진 시 또는 지진 후에 과도한 잔류변위 또는 상대변위가 발생하여도 상부구조가 원위치로 복원되는 것을 방해하지 않는 구조이어야 한다. 그러나 이 규정은 신설교량을 대상으로 하며 기존교량, 연속 지간장 200m 이상의 장대교량 및 특수한 교량에서는 이 조항을 따르기 어려운 경우가 많으므로 별도로 검토하는 것을 원칙으로 한다. 교량설계 시 지진 시의 동적 거동, 상하부 구조의 연결부와 단면변화부의 응력집중 등을 명확히 파악할 수 없고, 시공상의 품질 및 강도의 차이가 있으므로 구조세목으로 낙교방지를 특별히 고려한다.

1.10.3 낙교방지 장치의 종류

낙교 방지 구조는 다음과 같이 구분한다.

- (1) 받침부 상부가 하부에서 이탈되지 않게 설치된 이동제한 장치
- (2) 최소 받침 연단거리를 확보한 경우
- (3) 거더와 거더를 연결한 구조
- (4) 교대 또는 교각과 거더를 연결한 구조
- (5) 교대나 교각 또는 거더에 돌기를 설치한 경우

1.10.4 낙교 방지 장치의 설치교량

낙교 방지 구조는 다음 교량에 설치하는 것을 원칙으로 한다.

- (1) 받침의 이동제한 장치 및 받침의 최소 지지거리는 모든 교량에 설치하는 것을 원칙으로 한다. 단, 강재 교각인 경우 받침의 최소 지지거리 확보는 거더 간의 연결장치, 교대 또는 교각과 거더 연결장치 및 교대, 교각 또는 거더에 돌기를 설치한 장치 중 1가지를 설치하면 「도로교 설계 기준 4.8 설계 변위에 의한 규정을 만족시키지 않아도 좋다.
- (2) 거더 간의 연결 장치, 교대 또는 교각과 거더를 연결한 것 및 교대, 교각 또는 거더에 돌기를 설치한 것 중에서 다음 교량에 해당되면 이중낙교 방지 장치를 가동단에 설치하는 것으로 한다.
 - (가) 구조상 비교적 낙교하기 쉬운 교량
 - (나) 낙교 할 경우 피해 및 영향이 큰 교량

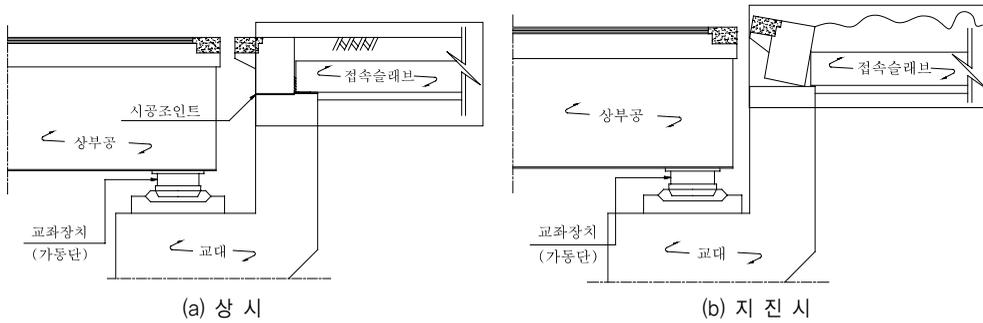
(1) 가동받침에 지진에 의한 변위를 억제하는 이동제한 장치를 설치하고, 고정, 가동 받침에서 최소 받침 지지거리를 확보하는 것은 도로교 설계기준 내진편의 6.4.8 설계변위에 규정되어 있으므로, 모든 교량에 적용하는 것을 원칙으로 하였다. 단, 강재교각에서는 교각의 두께가 제한되어 있으므로 최소 지지거리를 만족하지 않아도 된다.

(2) 는 낙교하기 쉬운 교량으로 심한 편경사 또는 종경사를 갖는 교량과 횡단육교와 같이 낙교할 경우 피해와 영향이 큰 교량에 대해서는 이중방지 구조로 한다.

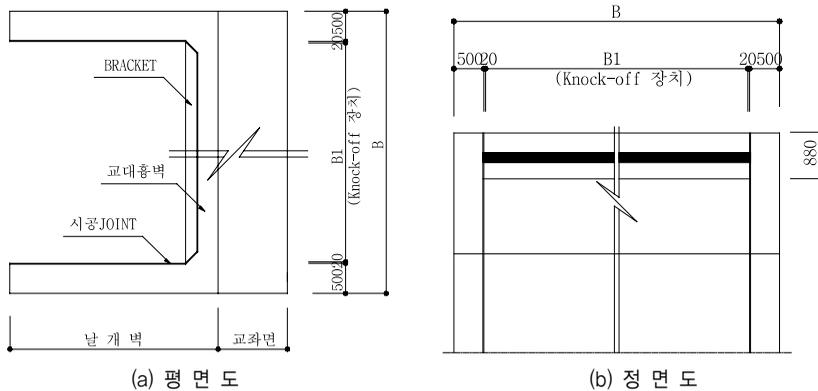
1.10.5 이탈장치의 설계

- (1) 지진 시 상부구조의 과도한 변위를 억제하기 위하여 교대에 이탈장치를 설치하여야 한다.
- (2) 이탈장치에 작용하는 충돌하중은 교대에 작용하는 고정하중 반력에 가속도계수를 곱한 값의 수평지진력으로 한다.
- (3) 이탈장치는 미끄럼 마찰과 앵커철근의 전단저항 및 뒤채움 흙의 수동토압 및 포장체의 저항하중으로 지지되어야 한다.
- (4) 이탈장치는 지진 시 항복하여도 교통을 소통하면서 복구를 실시할 수 있는 구조이어야 한다.

거더와 교대 간의 유간을 감소하기 위한 방법으로 뉴질랜드에서는 <그림 1.11>, <그림 1.12>에서 나타내는 것과 같은 이탈장치(knock-off)가 실용화 되어 있다. 지진 시 교량 하부구조의 항복 및 파괴 등이 발생하여 상부구조가 교대와 충돌하였을 경우에 이탈장치의 교대의 뒤채움 흙의 방향으로 이동을 허용하여 교대 뒤채움토의 수동토압과 지반의 소성변형으로 충돌에 의한 영향을 완화하고자 하는 것이다. 이탈장치구조 설치 시 아래의 점에 유의하여야 한다.



<그림 1.11> 이탈장치 구조의 개념도



<그림 1.12> 이탈장치와 날개벽 접속부 상세도

- ① 이탈장치(knock-off) 구조에는 충격을 포함한 교통하중이 직접 작용하므로 떠오르거나 활동을 일으키지 않도록 설계되어야 한다.
- ② 이탈장치 구조는 내진설계의 효과를 손상시키지 않도록 제어된 지지력을 확보하고 항복 또는 활동되어야 한다.
- ③ 응급조치에 의하여 교통을 소통하면서 복구공사를 실시할 수 있는 구조이어야 한다.

(1) 장치의 기능과 구조 개요

이탈장치란 지진에 의하여 상판이 교대와 충돌할 경우, 교대의 이탈장치 부분이 교대 뒤채움 흙으로 이동할 수 있도록 하여 교량 상부구조와 교대의 충돌에 의하여 과도한 변형 및 낙교방지 등의 영향을 완화하는 것을 말한다. 이탈장치는 상판이 교대에 충돌했을 때에 교대 뒷채움 흙 방향으로 이동하는 이탈장치 부분과, 윤하중에 의한 이탈장치 부분의 회전을 방지하기 위한 앵커철근으로 구성된다. 미끄럼면 중앙부근에는 이탈장치 부분이 교량측으로 미끄러지는 것을 방지하기 위한 돌기가 설치되어 있다. 돌기에는 이탈장치의 안정과 물의 체류를 막기 위하여 양측으로 경사를 둔다. 이탈장치의 기구는 상판이 이탈장치와 충돌하였을 경우 수평면위에 저항하는 요소로서는 이탈장치의 미끄럼 마찰, 앵커철근의 전단저항력, 교대 뒤채움 흙 및 포장층을 생각할 수 있다. 따라서 4개에 대해서 저항하중을 산출하여 이들의 합을 활동 저항력으로 한다.

(2) 이탈장치의 충돌하중(H)의 산정

이탈장치의 충돌하중은 교대에 작용하는 고정하중 반력에 가속도계수를 곱한 값으로 한다.

(3) 이탈장치의 시공법과 복구방법

이탈장치의 미끄럼 면에는 이탈장치가 소정의 미끄럼 저항력으로 활동하도록 분리재 등을 이용하여 가장자리 자르기를 하여 두는 것이 필요하다. 앵커철근의 주변의 콘크리트는 인발력 때문에 일부가 파괴된다. 이 때문에 교대 뒤채움흙 측의 앵커철근의 근입부분에서는 균열방지용 철근을 설치할 필요가 있다. 이탈장치 부분이 이동하여 뒤채움흙에서 에너지를 흡수할 수 있도록 설계하면 교대 본체의 피해를 방지하기 때문에 지진재해 직후는 응급복구대책으로 교통을 소통할 수 있을 것으로 생각된다. 이탈장치를 새로 만들 필요가 있으나 지진 시에는 교대 배면의 교대 뒤채움흙 및 흙쌓기부가 침하여 보수공사가 필요한 경우가 많으며, 이탈장치의 공사도 그 일부로 생각 할 수 있다.



참 고 자 료

1. 도로교설계기준, 건설교통부, 2005
2. 도로교설계기준 · 해설, 대한토목학회, 2008
3. 콘크리트구조설계기준 · 해설, 한국콘크리트학회, 2004
4. 구조물기초설계기준, 건설교통부, 2003
5. 도로공사표준시방서, 국토해양부, 2009
6. 철근콘크리트설계편람, 건설교통부, 1996
7. 콘크리트표준시방서, 국토해양부, 2003
8. 도로설계편람, 국토해양부, 2008
9. 도로의 구조 · 시설 기준에 관한 규칙, 해설, 지침, 국토해양부, 2009
10. 도로교시방서 · 동해설, 일본도로협회, 2002
11. 동적해석과 내진설계, 일본토목학회, 2003
12. 설계요령, 동 · 중 · 서일본고속도로주식회사, 2006
13. Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges, AASHTO, 2004
14. 고속도로 교량의 내진설계편람, 한국도로공사, 2000