

교량의 내진해석 및 설계



조 대 연*

1. 서 론

지진이란 지구내부에 존재하는 단층에서 축적된 탄성에너지가 순간적으로 이완(release)되면서 지구표면에 발생하는 강력한 진동현상을 의미한다. 지진은 발생위치와 지반상태, 지속시간에 따라 구조물에 미치는 영향이 다르며, 교량구조물과 같이 넓은 영역에 펼쳐진 구조물의 경우에는 피해양상이 더욱 복잡하다.

우리나라는 다행히 지진피해가 적은 지역이기 때문에 내진설계에 대한 인식이 다소 저조하지만, 1995년 일본 고베지진의 경우에서 알 수 있듯이 지진으로 인한 교량구조물의 피해는 그 어떤 영향보다 크며, 지진으로 인해 손상되는 구조물의 복구를 위해서는 막대한 예산이 소요된다. 현재 세계적으로 지진의 발생이 잦은 미국, 일본, 뉴질랜드, 이태리, 멕시코 등은 이러한 지진에 대비한 구조물의 설계가 무척 엄격하게 이루어지고 있다.

교량구조물의 지진피해형태는 상부구조물에 비해 대개의 경우 하부구조물과 기초 및 교좌부 등의 교량연결부에서 많이 발생하는데, 일반구조물의 설계와 달리 구조물의 형태와 지반특성에 따라 별도의 적용을 하는 경우가 많다. 따라서, 교량에 대한 내진설계는 구조물의 설계수명동안에 발생가능한 지진에 대해서 피해를 최소화하고 가능성을 유지시키도록 이루어지고 있다.

이러한 내진설계를 각 나라에서는 별도의 시행서를 마련하여 안전한 구조물설계가 이루어지도록 하고 있다. 우리나라에서는 1992년에 도로교 표준시방서에 내진설계규정이 처음으로 도입되어 1996년 도로교 표준시방서의 개정에서 약간의 수정을 가하여 적용하고 있다. 실제로 한반도에는 지진발생기록이 드물며, 과거에 발생한 지진의 규모도 상대적으로 작기 때문에 구조물에 적용되는 지진하중의 크기는 지배적인 하중이라고 볼 수는 없다. 하지만 지진하중에 의한 수평력의 가산으로 인하여 하부구조물과 연결부에 대

* 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실, 책임연구원

한 기준이 엄격해 졌으며, 이에 대한 적절한 보강이 필요하게 되었다. 본 고에서는 일반적인 지진의 특성 및 지진에 대한 교량구조물의 피해형태를 알아보고, 지진에 대한 구조해석 방법을 정리하였으며, 마지막으로 교량의 내진설계에 대한 기본적인 사항을 정리하였다.

2. 지진의 영향을 받는 교량의 거동 특성

2.1 지진의 운동 특성

지구내부에는 많은 에너지가 보존되어 있으며, 이러한 에너지의 변화에 따라 지표면에 많은 영향을 끼치게 된다. 지진은 그 변화 중의 하나로서 지각내 또는 맨틀 상부에서 급격한 변동이 발생하며, 짧은 기간 동안에 많은 에너지가 방출되므로 지상에 급격한 진동을 발생시킨다. 일반적으로 진원(epicenter)로부터 방출된 에너지는 종파와 횡파의 두종류의 파동으로 전파되는데, 지표면에 도달되면서 다시 표면파로 전달되게 된다.

지반에서 전달되는 파동의 영향으로 단시간에 지상에 있는 구조물은 심각한 영향을 받는데, 지진활동을 정량적으로 분석하기 위해서는 지진의 크기 또는 발생에 수반된 에너지에 대한 분석이 필요하다. 지진의 크기는 보통 진도(intensity)와 규모(magnitude)로 구분한다. 진도는 지진에 의한 지면 진동의 효과에 의하여 몇 개의 등급으로 구분하며, 일본 기상청의 JMA (Japan Meteorological Agency)와 수정머캘리진도계급이 있다. 규모는 지진이 발생했을 때 지진파의 파동으로 방출된 총 운동에너지와 연관되어 있으며, 대표적으로 리히터에 의한 지진계를 들 수 있다.

지진의 특성을 공학적으로 표현하는 요소에는 가속도, 속도, 변위진폭, 주기특성, 지속시간, 가속도응답스펙트럼을 들 수 있다. 이는 지진의 규모, 진원의 메카니즘, 진앙거리, 지진의 영향을 받는 지역의 지형 및 지반조건의 특성에 따라 복잡하게 변화한다. 그림 2.1은 가장 많이 이용되는 1940년 El Centro 지진의 가속도-시간이력이다.

일반적으로 지진에 의한 피해의 유형은 지반의

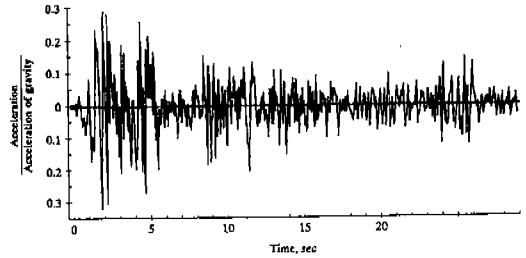


그림 2.1 1940년 El Centro 지진의 가속도-시간 이력

침하와 부등침하에 의한 피해, 연약지반위에 놓인 구조물과 지반사이의 상호작용, 지반액화현상 및 산사태, 사면조성지 등의 활동으로 인한 피해 등을 들 수 있다. 이 중에서 교량구조물의 피해 형태를 다음 절에 기술하겠다.

2.2 지진에 의한 교량구조물의 피해

2.2.1 개요

일반적으로 교량구조물은 상부구조물, 하부구조물, 기초, 교좌부 및 신축이음부, 그리고 부속장치로 구성되어 있다. 지진이 발생하면, 사실상 지표면이 움직이므로, 기초와 상부구조물에 상대운동이 발생하며, 이로 인해 하부구조물에 과도한 변형이 일어나거나, 혹은 구조물의 질량에 따른 관성력이 발생하여 연결부등에 심각한 손상을 입힐 수도 있다. 과거의 지진의 영향으로 교량에 발생한 피해를 정리하면 다음과 같다.

2.2.2 상부구조물의 지진피해

지진하중은 주로 수평방향으로 작용하는 성분이 지배적이기 때문에 사실상 상부구조물 자체는 지진에 대한 저항성이 뛰어나다. 따라서, 상부구조물에 발생하는 손상은 대부분 하부구조물이나 교좌부에 의한 간접적인 영향을 받는 경우가 대부분이다. 과도한 지반운동으로 인해 하부구조물 즉 교각이나 교대 등이 손실될 수도 있으며, 적절한 받침길이가 확보되지 않으면 상부구조물의 낙괴현상이 발생할 수도 있다. 또한 하부구조물의 지지력 확보는 상부구조물의 안정에 결정적인 영향을 미치게 되는데, 연약지반 같은 경우에 지

진으로 인한 액상화 현상이 발생하면 하부구조물이 손실될 수 있으므로, 지반에 대한 지지강도의 확보 또한 상부구조물의 지진저항성에 대단히 중요한 요인이라고 볼 수 있다.

2.2.3 하부구조물의 지진피해

하부구조물은 상부구조물의 하중을 지반에 전달하는 역할을 하는 교량구조물의 중요한 부분인데, 지진이 발생할 경우에는 상부구조물과 기초의 상대운동으로 인하여 교각 등의 단면에 과도한 수평력이 작용하게 되어 이에 대한 저항성이 충분히 확보되지 않으면 전체교량구조물이 붕괴되는 현상이 발생하기도 한다.

① 교대의 피해

교대의 피해 중에서 가장 많이 일어나는 것은 교대의 침하, 경사 또는 전단파괴이다. 이밖에 국부적으로 거더의 충돌에 의해 토류벽이 균열을 일으키기도 하며, 거더 받침부의 콘크리트가 파괴되는 경우도 있고, 교대의 기초지반이 심부에서 활동을 일으키는 경우도 있다.

② 교각의 피해

교각의 피해에는 전단파괴, 균열발생, 좌굴파괴 등이 있다. 교각의 피해는 교각의 지점부의 강진에 의한 파괴, 교각 코퍼부의 교좌부 균열발생, 기둥의 전단파괴등이 발생할 수 있다. 사진 2.1 은 1995년 1월 일본 효고현에서 발생한 고베 지진의 영향으로 교각의 휨파괴에 의한 한신고속도로 상부구조물의 붕괴모습이다.

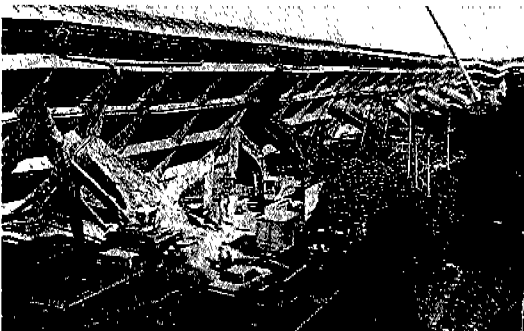


사진 2.1 한신고속도로의 붕괴

2.2.4 교량기초의 피해

교량구조물의 기초형태는 다양하다. 교량이 위치하는 지역적인 특색에 따라 달라질 수 있는데, 대개의 경우 하부에 견고한 지반이 위치한 경우에는 확대기초를 많이 사용하고 있다. 만약, 연약지반이 위치할 경우에는 파일 기초등을 사용하게 되는데 파일기초를 사용하는 경우에도 지반구조물의 상호작용이 발생하기 쉽다. 또한, 기초의 부분침하 및 들림등으로 인하여 하부구조물에 전도가 발생할 수 있다.

2.2.5 교좌부 및 신축이음부의 피해

교좌부는 상부구조물의 영향을 하부구조물에 전달하는 역할을 하며, 교좌부 자체의 감쇠효과로 인하여 진동을 흡수하는 능력을 가지고 있다. 하지만, 지진에 의하여 발생한 수평력이 과도할 경우에는 교좌부 혹은 교좌부를 고정하는 부분에서 파손이 발생할 수 있다. 따라서, 필요한 경우에는 충격을 흡수할 수 있는 진동감쇠장치(base isolation system)을 도입하기도 하고, stopper등을 설치하기도 한다.

신축이음장치는 상부구조물의 수평이동범위를 고려하여 설치되므로, 지진으로 인하여 상부구조물에 수평이동이 과대할 경우에는 신축이음장치가 파손될 수 있으며, 이로 인하여 상부구조물이 낙괴될 수도 있다. 따라서, 이러한 경우에는 발생 가능한 지진에 대하여 충분한 내구성이 확보될 수 있도록 설계가 이루어져야 한다.

3. 교량의 내진해석

3.1 개요

교량은 여러개의 지지점이 있고 단면에 비해 길이가 긴 형식을 갖고 있으며, 차량의 통행을 주요한 목적으로 하는 구조물이다. 따라서, 구조물의 동적인 효과를 결정하는데 있어서는 교량위를 통행하는 차량의 활하중특성을 위주로 설계가 이루어지게 된다. 반면에 교량이 지진의 영향을 받는 경우에는 교량의 상부구조물등에 대한 직접적인 효과를 파악하기 보다는 교량이 지지되어

있는 지반의 진동에 의한 상대적인 운동효과를 파악하는데 중점을 두고 있다.

3.2 교량의 해석 모델

교량의 내진해석을 위해서는 일반적으로 교량에 대한 수학적 모델링을 하게 된다. 일반적으로 유한요소 구조해석모델을 사용하게 되지만, 동적인 거동을 파악하기 위해서는 보다 단순한 모델을 사용하게 된다. 대표적인 동적모델로서는 집중-질량 모델(lumped-mass model)과 이산-질량모델(distributed-mass model)을 들 수 있다. 또한, 교량의 자유도를 구분하여 일자유도계 시스템(single DOF system), 다자유도계시스템(multi DOF system)으로 분류하기도 한다. 그림 3.1은 하나의 교량을 해석하기 위한 다양한 해석모델의 유형을 나타내고 있다.

3.3 교량의 내진해석 방법

그림 3.2는 N개의 자유도를 갖는 구조물이다. 이 구조물의 지면이 지진에 의해서 \ddot{u}_g 의 영향에 의해서 $P_{eff}(t)$ 의 효과를 받는다고 할 때 다음과 같은 기본방정식이 정의될 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]u = \{P_{eff}(t)\} \quad (3.1)$$

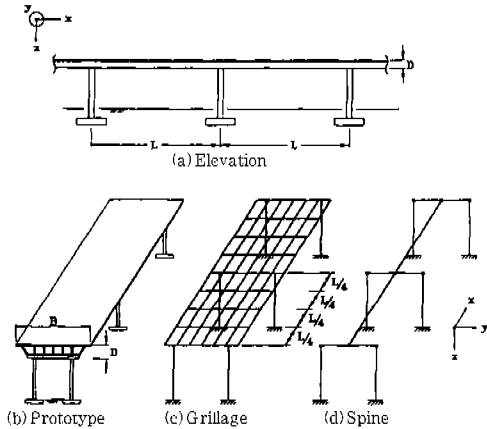


그림 3.1 교량의 내진해석 모델

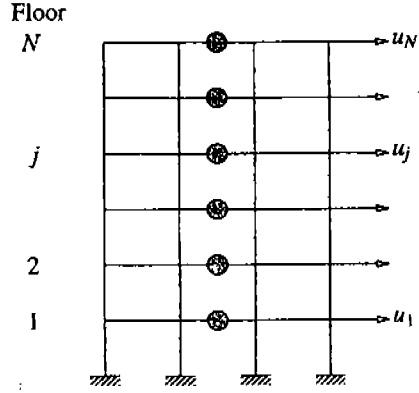


그림 3.2 구조모델 (N개의 자유도)

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 구조물의 질량(mass), 감쇠(damping) 및 강도(stiffness) 매트릭스이며, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ 는 각각 구조물의 가속도, 속도 및 변위벡터이다. 이 방정식을 해석하기 위해서 직접적분법, 모드해석법으로 구별되는 시간이력 해석법과 응답스펙트럼 해석법으로 구분할 수 있다. 시간이력 해석법은 시간증분을 고려하여 각 시간의 경과에 따른 가속도, 속도 및 변위등을 구하는 방법인데 보다 복잡한 구조물에 대하여 정확한 결과를 얻고자 할 때 흔히 수행되는 방법이다. 이 방법은 계산시간이 많이 걸리고, 해석결과를 분석하는데 어려움이 있으며, 특히, 이 중에서 직접적분법은 구조물의 비선형 특성을 파악하는데 용이하다. 반면에 응답스펙트럼 해석법은 지진입력을 스펙트럼으로 정의하여 이에 대한 근사해석을 수행하는 방법인데, 설계에서 많이 적용되는 방법이다. 각각의 방법에 대하여 해석절차를 설명하면 다음과 같다.

① 시간이력법

(가) 직접적분법

직접적분법에서는 각 시간단계에서 중분평형 방정식을 세우게 되는데, 전단계에서의 가속도, 속도 및 변위를 어떻게 정의하느냐에 따라, 중앙차변법(central difference method), houbolt 법, Wilson θ 방법, Newmark β 법으로 구분할 수 있다. 이 중에서 중앙차변법의 기본적인 과정을 정리하면 다음과 같다.

$$\textcircled{1} [M]\{\ddot{u}_o\} + [C]\{\dot{u}_o\} + [K]\{u_o\} = \{P_{eff}(t_o)\} \quad \{u_n(t)\} = \phi_n q_n(t) \quad (3.3)$$

에서 $\{\ddot{u}_o\}$ 을 구하고, 시간 증분 Δt 를 정함.

이때, 전체 변위 $\{u(t)\}$ 는

$$\textcircled{2} \{u_{-1}\} = \{u_o\} - \Delta t\{\dot{u}_o\} + \frac{(\Delta t)^2}{2}\{\ddot{u}_o\} \quad \{u(t)\} = \sum_{n=1}^N \{u_n(t)\} \quad (3.4)$$

$$\textcircled{3} [\hat{K}] = \frac{1}{(\Delta t)^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C]$$

로 구할 수 있다.

$$\textcircled{4} a = \frac{1}{(\Delta t)^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C],$$

② 응답스펙트럼 해석법

응답스펙트럼 해석법은 입력지진을 스펙트럼 값으로 치환해주는 과정과 이 값을 토대로 구조물의 응답을 구하는 두 단계로 구분할 수 있다.

$$b = [K] - \frac{2}{(\Delta t)^2} [M]$$

(가) 스펙트럴 특성치의 계산

$$\textcircled{5} \hat{P}_i = P_i - a\{u_{i-1}\} - b\{u_i\}$$

일반적인 1자유도계 시스템에 지진하중 $p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$ 를 작용시켜서 구조물의 상대변위를 계산하면, Duhamel 적분에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\textcircled{6} [\hat{K}]\{u_{i+1}\} = \hat{P}_i \text{를 해석함.}$$

$$\textcircled{7} \{\dot{u}_i\} = \frac{1}{2\Delta t} (\{u_{i+1}\} - \{u_i\}),$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t -m\ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin\omega_D(t-\tau) d\tau \quad (3.5)$$

$$\{\ddot{u}_i\} = \frac{1}{(\Delta t)^2} (\{u_{i+1}\} - 2\{u_i\} + \{u_{i-1}\}),$$

① i를 i+1로 변환하여 ②부터 ⑦까지 반복 수행.

(나) 모드해석법

질량 매트릭스와 강도 매트릭스의 직교성을 이용하여 다자유도계 시스템을 다음과 같은 1자유도계시스템으로 분리하여 해석을 수행한다. n번째 모드에 대해서 기본적인 방정식은 지반의 가속도를 고려할 때 모드 변위 q_n 에 대해서 다음과 같이 정리된다.

이를 바탕으로 감쇠시스템에 대한 총가속도를 계산하여 구해지는 최대값을 스펙트럴 상대변위 (spectral relative displacement), 스펙트럴 상대 속도 (spectral relative velocity), 스펙트럴 총가속도 (spectral total acceleration)이라 하고 각각 $S_d(\xi, \omega)$, $S_v(\xi, \omega)$, $S_a(\xi, \omega)$ 라고 쓴다. 여기서, 다음과 같은 유사-속도 스펙트럴 응답 (pseudo-velocity spectral response) $S_{pv}(\xi, \omega)$ 를 정의하면, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

$$\omega S_d(\xi, \omega) = S_{pv}(\xi, \omega) \approx \frac{1}{\omega} S_{pa}(\xi, \omega) \quad (3.6)$$

이 식에서 $\Gamma_n = \frac{\phi_n^T \sum_{n=1}^N \Gamma_n [M] \phi_n}{\phi_n^T [M] \phi_n}$ 이다.

그림 3.3은 El Centro 지진의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 일반적으로 교량의 내진설계를 위해서는 이러한 지진의 특성을 설계응답스펙트럼으로 규정하여 사용하고 있다. 이러한 설계응

전체 변위 $\{u(t)\}$ 의 n번째 모드에 관계된 변위 $\{u_n(t)\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

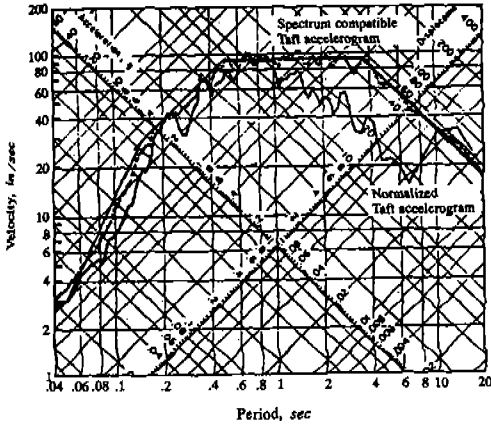


그림 3.3 설계응답스펙트럼

답스펙트럼은 많은 요인들에 의해 영향을 받는데, 진원에서의 에너지 이완 매카니즘, 지표면으로부터 진원의 깊이, 진동전파 경로를 따라 변화되는 지리적인 변화, 리히터 규모 및 극부적인 지반조건등의 영향을 받는다.

(나) 응답스펙트럼을 이용한 해석

모드중첩법을 이용한 해석법에 의한 운동방정식 (3.2)에서 n 번째 모드에서 응답의 최대 값은 다음과 같이 결정된다.

$$\{u_{n, \max}\} = \{\phi_n\}^T \frac{\{\phi_n\}^T \sum_{n=1}^N \Gamma_n [M] \{\phi_n\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} S_d(\xi, \omega) \quad (3.7)$$

최대 전체 응답은 일반적으로 이러한 각 모드의 응답의 합으로 구하지 않는다. 왜냐하면, 각각의 모드의 최대값이 동시에 일어나는 일은 절대로 발생하지 않기 때문이다. 따라서, 보다 합리적인 결정방법으로서 제시되고 있는 경우가 SRSS (Square Root of the Sum of the Squares) 와 CQC (Complete Quadratic Combination) 등이다. 각각의 방법에서 최대 응답을 구하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

(i) SRSS 방법

$$u_{\max} = \sqrt{(u_1)_{\max}^2 + (u_2)_{\max}^2 + \dots} \quad (3.8)$$

(ii) CQC 방법

$$u_{\max} \cong \left(\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^n \rho_{in} u_{i, \max} u_{n, \max} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

여기서, ρ_{in} 은 i 번째 모드와 n 번째 모드의 상관 계수이다.

이상의 최대응답을 바탕으로 교량에 작용하는 최대탄성력을 계산할 수 있다. 하지만, 교량의 경우에는 교량의 길이에 따라서 각 지점에 작용하는 입력지진이 차이가 있을 경우에는 다중입력 지진 방법을 통한 해석이 이루어져야 한다.

4. 교량의 내진설계

4.1 교량의 내진설계 원칙

교량의 내진설계를 수행하기 위하여 각 나라에서는 시방서에 자제한 설계기준을 제시하고 있다. 우리나라에서도 1992년도부터 도로교 표준시방서에 교량의 내진설계에 대한 기준이 제시되고 있다. 시방서에 의하면 교량의 내진설계를 위한 기본개념은 다음과 같다.

- (1) 지진발생시에 인명피해를 최소화한다.
- (2) 지진시 교량부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적으로 붕괴는 방지한다.
- (3) 교량은 지진시에도 교량의 기본기능은 발휘한다.
- (4) 교량의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.

이를 위하여 기본적인 내진설계과정이 제시되어 있는데, 이를 설명하면 다음과 같다.

4.2 내진설계 과정

교량의 내진설계를 위해서는 일반적으로 다음

과 같은 과정을 거친다.

표 4.1 가속도 계수 및 내진등급

| 지역 | 가속도 계수(A) | 내진등급 |
|----------------|-----------|---------|
| 강원도, 전라남도, 제주도 | 0.07 | 내진 1등급교 |
| 기타지역 | 0.14 | 내진 2등급교 |

표 4.2 지반 계수

| 지반계수 | 지반종류 | | | |
|------|------|-----|-----|-----|
| | I | II | III | IV |
| S | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 2.0 |

4.2.1 가속도 계수 결정

4.2.2 지반계수 결정

교량의 지진하중을 결정하기 위하여 다음 표와 같은 지반계수를 결정한다.

4.2.3 교량의 내진해석 방법

교량의 내진해석은 지진하중에 의한 각 부재의 힘의 분포를 파악하며, 구조물에 발생하는 최대 응답을 산정하기 위하여 수행된다. 도로교표준시방서에는 교량의 진동 특성 및 중요도에 따라 단일모드 스펙트럼 해석법과 다중모드 스펙트럼 해석법을 사용하여 해석하도록 규정하고 있다. 이외에도 필요한 경우에는 별도의 해석방법을 채택하여 사용할 수 있도록 하고 있다.

① 단일모드 스펙트럼 해석법

첫 번째 진동모드가 진동응답을 지배하는 교량의 설계지진력을 계산하는데 사용한다. 이 방법은 구조진동론에 의한 해석방법을 판성력을 도입한 이후의 정력학적인 문제로 치환하여 보다 단순화 시킨 방법이다.

(가) 탄성지진응답계수

설계력의 결정에 쓰이는 탄성지진응답계수 C_s 는 다음과 같은 무차원의 식으로 구한다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (4.1)$$

여기서, A 는 가속도계수, S 는 지반특성에 따른 지반계수, T 는 교량의 기본주기이다.

(나) 교량의 주기

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\gamma}{p_0ga}} \quad (4.2)$$

여기서, $v_s(x)$ 는 균일한 등분포하중 p_0 에 의한 교량 상부구조물의 정적변위이며, a 는 다음과 같이 구해진다.

$$a = \int v_s(x) dx \quad (4.3)$$

(다) 이때, 등가정적 지진하중 $p_e(x)$ 는 다음과 같이 산정된다.

$$p_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x)v_s(x) \quad (4.4)$$

여기서,

$$\beta = \int w(x)v_s(x) dx \quad (4.5)$$

$$\gamma = \int v_s(x)^2 dx \quad (4.6)$$

이다.

② 다중모드 스펙트럼 해석법

다중모드 스펙트럼 해석법은 3장에서 언급한 응답스펙트럼해석법을 의미한다. 이 해석법을 적용하기 위해서는 설계응답스펙트럼이 결정되어야 하는데, 도로교 표준시방서에 의하면 경험식에 의한 탄성 지진응답계수를 이용하여 지반가속도와와의 계산에 적용하도록 하고 있다.

(가) 진동모드에 따른 탄성 지진응답계수의 계산

① m 번째 진동모드에 대한 탄성지진응답계수 C_{sm} 은 다음 공식에 따라 구한다.

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (4.7)$$

여기서, T_m 은 m 번째 진동 모드의 주기이며, C_{sm} 의 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

㉠ T_m 값이 4.0초를 넘는 구조물에 대해서 m 번째 진동모드에 대한 C_{sm} 값은 다음 식에 따라 결정할 수 있다.

$$C_{sm} = \frac{3AS}{T_m^{3/4}} \quad (4.8)$$

(나) 수학적 모형

교량은 구조물의 강성과 관성효과를 실제에 가깝게 모형화하기 위해 적절한 연결부와 절점으로 구성된 3차원 공간뼈대 구조물로 모형화해야 한다. 수학적 모형에 대한 구체적인 사항은 도로교 표준시방서에 제시되어 있다.

(다) 부재력의 계산

지진에 대한 교량의 동적인 응답을 정확하게 산정하기 위해서는 해석의 정확성을 높일 수 있는 진동모드의 선정범위를 설정하여야 하며, 부재의 단면력과 변위는 개별 모드들로부터 각각의 응답성분의 SRSS를 조합함으로써 계산할 수 있도록 하고 있다. 다만, 진동수의 간격이 좁은 모드(10%이내)를 갖는 교량에 대해서는 전체의 최종응답을 구하기 위해서 각 모드의 기여도를 조합하거나 가중치를 부여함에 있어서 더 적절한 다른 방법을 고려하여야 한다.

4. 2. 4 설계지진력의 결정

부재의 각각의 주축에 대한 탄성지진력은 종방향의 해석과 횡방향의 해석에 대한 조합을 통해서 구조물에 가장 큰 영향을 줄 경우에 대하여 산정된다. 이를 위해서 도로교 표준시방서에서는 직교지진력의 조합방법을 제시하고 있다. 또한, 교량의 각 부분에 대한 설계지진력의 적용범위를 결정한다.

① 직교지진력의 조합

(가) 하중 경우 1 - 종방향 축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 횡방향축의 해석으로부터

구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우.

(나) 하중 경우 2 - 횡방향 축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)에 종방향축의 해석으로부터 구한 탄성지진력(절대값)의 30%를 합한 경우

② 구조부재 및 연결부의 설계 지진력 적용범위

(가) 상부구조, 상부구조의 신축이음 및 상부구조와 하부구조상단 사이의 연결부

(나) 하부구조상단으로부터 기둥이나 교각의 하단까지(단 기초, 말뚝머리 및 말뚝은 포함되지 않음)

(다) 상부구조와 교대의 연결요소

③ 응답수정계수

교량의 취성효과를 방지하고 경제적인 교량건설을 추구하기 위하여 교량의 연성거동 성능이 요구되는데, 이를 위해서 탄성해석으로부터 계산된 교각등의 기둥에 작용하는 휨모멘트를 하부구조의 형태, 소성변형의 허용정도에 따라 결정되는 응답수정계수 R로 나누어 각 방향의 지진성분에 대한 설계지진력을 구하도록 하고 있다.

(가) 내진 1등급교의 각 부재와 연결부분에 대한 설계지진력은 표 4.3에 제시되어 있는 적절한 응답수정계수로 나눈 값으로 한다.

(나) 응답수정계수 R은 하부구조의 양 직교축 방향에 대해서 모두 적용한다.

(다) 벽식교각의 약축방향은 기둥규정을 적용하여 별도로 설계할 수 있다. 이 경우에 응답수정계수 R은 단주의 값을 적용한다.

4. 2. 5 낙교방지

도로교 표준시방서에서는 지진발생시에 인명 손실 피해를 막고 지진후에 복구작업이 단 기간 내에 이루어 질 수 있도록 최소 받침지지길이 확보 및 전단키 등을 설치하는 낙교방지대책을 마련하고 있다. 교각 및 교대에 적용되는 최소 받침지지길이는 교량의 단부에서 인접신축이음부까지의 길이, 교각의 평균높이등에 의한 최소받침길이 산정식과 지진시 발생하는 최대변위를 비

표 4.3 응답수정계수 R

| 하부구조 R | 연부분 R |
|--|--|
| 벽식 교각 2 | 상부구조와 교대 0.8 |
| 철근콘크리트 말뚝 기구 ① 수직말뚝만 사용한 경우 3 ② 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우 2 | 상부구조와 한 지간 내의 신축 이음 0.8 |
| 단주 3 | 기둥, 교각 또는 말뚝기구와 캡빔(Cap Beam) 또는 상부구조 1.0 |
| 강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 기구 ① 수직말뚝만 사용한 경우 5 ② 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우 3 | 기둥 또는 교각과 기초 1.0 |
| 다주 기구 5 | |

교하여 낙교가 방지될 수 있도록 받침연단길이가 결정되어야 한다.

4.3 기타 내진설계사항

교량의 내진설계를 위해서는 설계지진력의 산정 및 낙교방지책 이외에도 감진받침을 적용하거나 교각의 연성효과를 극대화한 설계, 또는 교각의 철근배근상세의 제시, 기초의 내진설계 등 많은 요소들이 포함된다. 이 중에서 교각의 연성효과 및 감진받침에 대해서 간략히 기술하겠다.

4.3.1 교각의 연성설계

도로교 표준시방서의 내진설계개념은 설계지진시 하부구조의 연성거동 성능과 강성에 의해 교량에 작용하는 지진력을 지반에 전달하는 것이다. 이를 위해서 기둥에 소성힌지 발생이 허용되도록 설계가 이루어져야 하는데, 이에 필요한 구조상세는 기둥을 보-기둥개념을 도입함으로써 가능해진다. 횡방향으로는 충분한 구속효과를 발생시키도록 하여야 하며, 휨철근을 타당성있게 배근함으로써 축철근의 좌굴을 방지하고, 또한

기둥의 심부콘크리트에 대한 구속력을 보강시켜 심부콘크리트의 압축변형에 대한 저항능력을 효과적으로 높여 소성힌지 발생을 할 수 있도록 보장하는 것이다.

4.3.2 특수받침의 적용

교량의 내진에 대한 성능을 강화시키는 방법으로 최근에 많이 제시되고 있는 방법이 감진장치 혹은 지진격리장치의 적용이다. 감진장치는 구조물의 진동에 대한 응답을 줄이기 위해서 순간적으로 에너지를 흡수하는 장치로서 damper등을 적용하는 방법이며, 받침의 재료적인 감쇠특성을 활용한 방법이다. 지진격리장치는 감진장치에 대하여 보다 확실하게 지반의 운동을 상부구조물에 전달하지 않는 장치로서 최근에는 납과 고무를 활용한 LRB (Lead Rubber Bearing)이 가장 많이 알려져 있다. 그림 4.1은 LRB에 대한 상세도이다.

이외에도 FBI(Friction Base Isolation) 시스템 혹은 SRF(Sliding Resilient Friction)시스템이 제시되고 있다. 또한 온도나 크라이프, 건조수축등과 같이 장시간에 걸쳐서 발생하는 변위에는 저항하지 않지만, 지진같은 충격에는 고정단 역할을 하는 장치로서 STU (Shock Transmission Units)등을 들 수 있다.

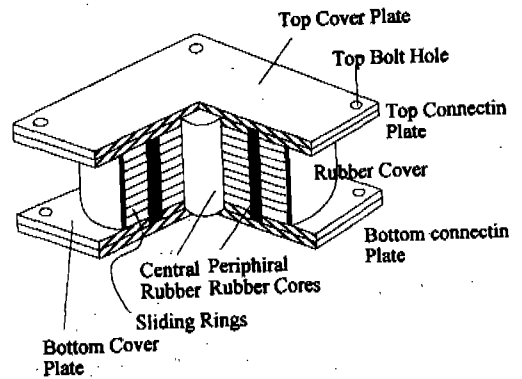


그림 4.1 LRB의 구조상세도

5. 결 론

지금까지 최근에 발생한 미국 로스앤젤레스 북부지진, 일본의 고베지진과 국내에서 발생한 영월, 경주지진의 영향으로 관심이 고조되고 있는 교량의 내진해석 및 설계에 대한 개괄적인 내용을 정리하였다. 아직까지는 국내에서 지진에 대한 피해사례가 경미하기 때문에 이에 대한 대비를 소홀히 하는 면도 있으나, 교량구조물과 같이 국가의 중요시설물의 경우에는 자그마한 피해가 발생하더라도 국가경제에 미치는 영향은 상당하다고 할 수 있다. 따라서, 향후 발생할 수 있는 지진의 영향에 적절히 대비하는 것이 필요하다. 내진설계를 위해서는 무엇보다도 확률론적으로

발생가능한 지진의 규모를 예측하여 이에 대한 구조물의 적절한 강도를 확보하는 것이 우선시되며, 구조물의 강도를 확보하기 위해서는 정확한 해석이 필수적이다. 하지만, 내진해석의 경우에는 많은 불확실성이 내재되어 있으므로, 가능하다면 단순하게 계산하되 충분한 안전도를 확보하는 방법으로 설계가 이루어져 왔으며, 이는 주로 탄성설계개념에 기인한 바 크다. 향후에는 하부구조물의 연성개념이 보다 보편화되고, 교량받침의 고성능화등으로 인해 내진설계가 보다 복잡해지고 고도화될 전망이다. 따라서, 앞으로 보다 향상된 내진설계가 수행되기 위해서 내진설계에 대한 시방규정들이 보다 다각화되고 이에 대한 설계자료가 많이 보급되어야 할 것이다. [N]