

**교량구조물의 내진 해석 및 설계****Seismic Analysis and Design of Bridge Structures****황 의 승\*****1. 서 론**

최근들어 국내에서 건물, 교량, 발전소 등 주요 구조물의 내진설계가 점차 의무화되고 있다. 원자력발전소의 경우에는 오래전부터 내진설계가 되어지고 있으며 건축구조물의 경우 1988년 이후에 6층 이상 건물의 내진설계가 의무화되었고 교량의 경우 1922년 개정된 도로교 표준시방서<sup>(1)</sup>에 내진 설계편이 새로이 추가되었다.

외국의 경우, 미국에서는 1971년 San Fernando 지진시 많은 교량에 피해를 입어 교량에 대한 내진기준의 제정을 가속화하였고 일본에서는 1923년 관동대지진 이후 교량 내진 기준이 1926년에 처음 제정되었고 1971년에 현재와 같은 내진설계 규정이 마련되었다.

이러한 내진설계 기준의 주목적은 도로교통의 안전성이며 일정 규모 이하의 지진에서는 교량이 탄성변형하여 구조물체의 건전성이 확보되게 하며 최소하게 일어나는 큰 지진에 대해서도 국부적인 피해가 있더라도 전체붕괴 또는 낙교 등이 생기지 않도록 하는 것이다. 특히 낙교 등이 발생하

면 경제적 손실뿐만 아니라 도로 교통의 마비로 지진피해에 따른 인명 피해는 더 늘어나게 된다.

본 글에서는 지진에 대한 교량 거동 해석방법과 도로교 표준시방서에 의한 내진설계의 주안점에 대해 다루고자 한다.

**2. 교량의 모델과 내진 해석****2.1 교량모델**

교량의 내진 또는 동적해석에 따라 교량의 응답을 구하기 위해서는 교량을 적절하게 모델화 하여야 한다. 교량의 강성과 질량은 분토 질량계 또는 이산질량계로 모델할 수 있는데 이산계의 모델방법으로는 집중질량계, 유한요소법, 경계요소법 등을 사용할 수 있다. 교량의 경우에는 모델화가 용이한 이산계가 사용되는 경우가 많다.

교량은 질량이 큰 상부구조가 하부구조에 지지된 위가 무거운 시스템이다. 상부구조의 단면은 사하중, 활하중, 풍하중 등으로 결정되며 지간이 긴 교량을 제외하고는 지진에 의해 단면이 결정되는 경우는 거의 없다. 그러나 하부구조는 일반적으로 지진에 의해 단면이 결정되는 경우가 많다.

\* 한국건설기술연구원 구조연구실 선임연구원, 공박

따라서 하부구조는 그 응력 및 변형을 충분히 파악할 수 있도록 여러 요소로 분할하는 것이 좋다. 일반적으로 교량은 교축방향으로 가늘고 긴 구조로 여러개의 교각 및 교대에 의해 지반에 지지되고 있기 때문에 구조해석상 휨, 인장, 압축을 받는 골조구조로서 모델화 되는 경우가 많다.

교량을 지지하는 지반은 교축방향으로 변화하기 때문에 교량 동적해석시 지반의 진동 특성을 충분히 평가할 필요가 있다. 특히 연약지반에 건설된 교량의 경우 교량의 거동이 지반의 거동에 크게 영향을 받기 때문에 이를 충분히 고려하여야 한다.

교량의 모델화가 수행되면 다음식과 같은 구조시스템의 운동방정식이 세워진다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

여기서,  $[M]$  : 질량 Matrix

$[C]$  : 댐핑 Matrix

$[K]$  : 강성 Matrix

$\{f\}$  : 외력 Vector이다.

## 2.2 동적해석

교량의 모델화에 따라 식(1)과 같은 운동방정식이 세워지면 외력으로 지진파를 입력시켜 응답을 구할 수 있다. 이러한 응답을 구하는 방법으로는 크게 반응 스펙트럼 해석법(Response Spectrum Analysis Method)과 시각이력응답해석법(Time History Response Analysis Method)으로 나눌 수 있다. 또 시각이력응답해석법은 다시 모드중첩법(Mode Superposition Method)과 직접적분법(Direct Integration Method)으로 나누어진다. 반응 스펙트럼법과 모드 중첩법은 교량과 지반의 거동이 탄성범위에 있을 경우(또는 복원력이 선형일 경우)에 이용되며 비선형 거동의 경우에는 직접적분법에 의하여야 한다.

동적해석은 일반적으로 교축방향과 교축직각방향의 2방향으로 나누어져 행해지며 양방향에 따라 모델이 다를 수도 있다. 2방향 해석후 이를 조합하여 최종 설계지진력 및 변위가 구해진다.

### 2.2.1 반응 스펙트럼법

반응스펙트럼법은 구조물의 동적특성을 고려할 수 있고 계산이 지나치게 복잡하지 않으며 설계용 스펙트럼 형식으로 지진을 고려하기 때문에 간편하고 경제적이어서 실제 내진설계에 많이 이용되고 있다. 그러나 시간에 따른 거동의 변화를 알 수 없으며 비선형 해석 등을 수행할 수 없는 단점이 있다.

설계용 스펙트럼은 같은 지역일지라도 다양한 지진기록이 관측되므로 어느 한 지진기록을 사용하지 않고 여러 지진의 자료를 통계적으로 처리하여 지진의 특성을 나타내게 된다. 이 스펙트럼(그림 1)은 주어진 지진기록에 대해 단자유도 시스템(single degree of freedom system)의 주기에 따른 각 감쇠효과별 최대변위 및 최대가속도를 나타내고 있다. 다자유도 시스템의 경우에도 단자유도 시스템에 의한 스펙트럼을 근사적으로 그대로 적용하여 사용하고 있다.

기하학적 형상이 불규칙하거나 진동의 여러 모드들이 구조물의 전체 응답에 기여할 경우 각 모드별로 그 진동주기와 모드를 구하여야 하는데 주로 선형 진동해석 컴퓨터 프로그램이 사용된다. 각 모드별로 구조물의 반응이 구해지면 구조물의 전체 응답을 구하기 위하여 결합하여야 하는데 정확하게 최대치가 나오도록 결합하기는 불가능하며 SRSS(Square Root of the Sum the Sgure) 법이나 Direct Summation Method를 사용한다.

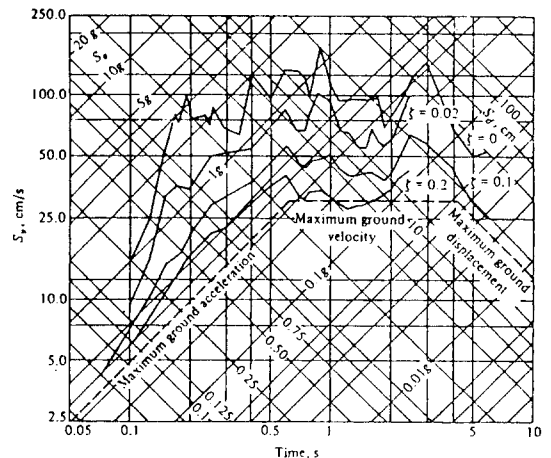


그림 1 EL Centro(1940) 지진의 반응 스펙트럼

## 2.2.2 시각이력응답 해석법

### (1) 직접 적분법

직접적분법은 식(1)과 같은 구조시스템의 운동 방정식을 수치적인 방법으로 직접 적분하여 그 거동을 해석하는 방법이다. 즉 입력하중이 지진의 가속도 기록인 운동방정식을 매우 짧은 시간간격에 대해 단계적으로 시간에 따른 구조물의 거동을 구하는 방법이다. 입력지진동으로는 EI Centro (1940), Taft(1942)등이나 설계용으로 인공지진파를 만들어 사용하기도 한다.

수치적으로는 직접 적분하는 방법은 implicit한 방법과 explicit한 방법이 있다. Implicit한 방법에는 Houbolt법, Newmark  $\beta$ 법, Wilson- $\theta$ 법 등이 있고 explicit한 방법에는 Central Difference Method등이 있다. 일반적으로 implicit한 방법은 시간간격을 크게 할 수 있는 반면 한 단계에서 계산량이 많아지고 explicit한 방법은 한 단계의 해를 적은 량의 계산으로 구할 수 있으나 시간간격이 작아져야만 한다. 각 방법에 대한 상세한 절차는 문헌<sup>(3)</sup>을 참고하기 바란다.

### (2) 모드중첩법

식(1)을 직접 적분법으로 풀 경우 많은 계산량과 그에 따른 컴퓨터 계산시간이 많이 필요하다. 이 식의 해를 효율적으로 구하기 위해 모드 중첩법이 쓰인다.

구조시스템의 각 모드는 서로 직교이며 따라서 각 모드에서의 반응을 다른 모드들과 독립적으로 구할 수 있고 각 모드에서의 반응을 조합(중첩)하여 전체 반응을 결정할 수 있다. 따라서 이 방법은 각 모드의 최대치를 직접 구하는 반응 스펙트럼법에도 응용된다.

모드중첩법으로 시각이력을 구하려면 식(1)을 서로 독립인 각 모드별 방정식으로 분리(decoupling)하여 각 모드별 단자유도 방정식을 풀어 반응 시각력을 구하고 다시 조합하여 전체 반응 시각력을 구한다. 모든 모드(모드의 갯수는 자유도의 갯수와 같다)들을 중첩하면 정확한 해가 나오나 동적거동을 지배하는 몇개의 저차 진동 모드만을 조합하여도 매우 근사한 해를 얻을 수 있는 것이 모드 중첩법의 또 하나의 장점이다.

이 모드 중첩법은 반응 스펙트럼과 같이 선형

탄성 해석에서만 한정되며 비선형 해석에는 직접 적분법으로 풀어야 한다.

## 3. 내진설계

### 3.1 개요

우리나라에서는 1992년에 개정된 도로교 표준시방서에 내진설계 규정이 추가되었다. 내진 설계를 하려면 먼저 설계지진력과 설계변위, 즉 지진에 의한 하중 및 변위를 산정하여야 한다.

이 산정된 설계지진력에 따라 부재설계를 하며 낙교방지를 위해 설계변위를 검토한다. 교량의 상부구조는 지진하중에 의해 결정되는 경우가 거의 없으므로 부재의 설계는 상·하부구조 연결부 및 교대, 교각, 기초에 대해 행해진다. 또한 부재응력이 충분하다 하더라도 변위가 너무 커지면 낙교 등의 위험이 있으므로 충분한 지지길이를 확보하거나 낙교방지 장치를 설치해야 한다.

설계지진력을 산정하기 위해 시방서에서 내진 해석 방법을 규정하고 있다. 시방서에서 채택된 내진해석 방법은 크게 3가지로 나누어진다. - (1) 지진계수를 이용한 해석방법, (2) 단일모드 스펙트럼 해석방법, (3) 복합모드 스펙트럼 해석방법. (1)방법은 1등급, 2등급교에 상관없이 단경간교에 사용되며 교량의 주기를 계산할 필요가 없는 방법이다. (2)방법은 단경간교이상의 1등급교에 사용되며, 기하학적 형상이 복잡한 특수 교량에 대해서는 (3) 방법을 사용하여 해석한다.

교량전체 시스템은 설계진동단위라 불리는 단위별로 해석해야 한다.

### 3.2 설계진동단위

설계진동단위는 지진시에 동일한 진동을 하는 구조시스템을 의미한다. 예를 들어 그림 2와 같은 3경간 연속교를 생각하면 교축방향으로 보와 A<sub>1</sub> 교대에 고정받침으로 연결되어 있기 때문에 같은 진동단위에 속하게 된다. 그러나 P<sub>1</sub>교각, P<sub>2</sub>교각, A<sub>2</sub>교대에서는 가동받침으로 연결되어 있기 때문에 보나 A<sub>1</sub>교대와는 다른 진동단위가 된다. 따라서

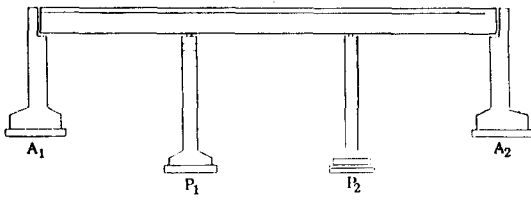


그림 2 3경간 연속교

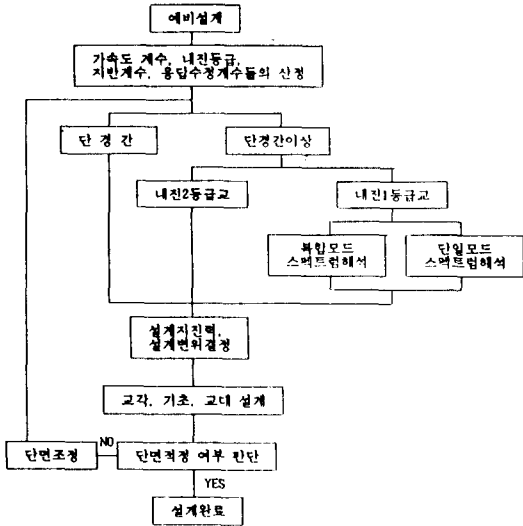


그림 3 내진설계 흐름

교축방향으로 보아 A<sub>1</sub>교대가 하나의 설계진동단위, P<sub>1</sub>교각, P<sub>2</sub>교각, A<sub>2</sub>교대가 각각 하나의 설계진동단위가 되어 4개의 설계진동단위가 있게 된다.

그러나 교축직각방향으로는 고정받침이든 가동받침이든간에 상대변위가 생기지 않으므로 보와 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>교대 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>교각 전체가 하나의 진동단위가 된다.

이것이 설계진동단위를 취급하는 원칙이나 시방서상에는 계산의 복잡성을 피하기 위해 시방서해설 표 4.3.1에서와 같이 규정하고 있다.

내진설계의 적절한 순서는 그림 3과 같다.

### 3.3 설계일반

#### 3.3.1 단경간교

단경간교의 내진설계는 상부구조와 교대사이의

연결부에 수평지진력이 작용한다고 보고 종방향, 횡방향에 대해 설계한다. 이 수평지진력은 상부구조부터의 사하중 반력에 가속도 값을 곱함으로 얻어진다. 또한 낙교방지를 위한 받침지지길이는 시방서 4.8절의 최소받침지지길이가 규정에 따른다.

즉 설계지진력=사하중 반력 x 가속도 계수(0.7 또는 0.14)

설계변위=최소받침지지길이(시방서 4.8)

#### 3.3.2 내진이등급교(단경간교 제외)

내진이등급의 내진설계는 교량받침 등 하부구조와 상부구조의 연결부에 수평지진력이 작용한다고 보고 설계한다. 이 수평지진력은 사하중 반력의 20%이다. 즉

설계지진력=사하중반력 x 0.2

설계변위=최소받침지지길이(시방서 4.8.1)

#### 3.3.3 내진 일등급교(단경간교 제외)

내진 일등급교는 그림 3에서 보인바와 같이 단일모드 스펙트럼 해석법 또는 복합모드 스펙트럼 해석법을 사용한다.

##### (1) 단일모드 스펙트럼 해석법

단일모드 스펙트럼 해석법은 구조물의 기본주기(T)만을 구하여 설계지진력과 변위를 구하는 비교적 간단한 방법이다. 설계지진력과 설계변위를 구하기 위해 등가정적 지진하중 P<sub>e</sub>(x)를 산정하며 그 식은 다음과 같다.

$$P_e(x) = \frac{\beta C_s}{\gamma} \omega(x) v_s(x)$$

여기서, P<sub>e</sub>(x) : 등가정적 지진하중(단위길이 당 하중강도)

C<sub>s</sub> : 탄성지진응답계수(시방서 식(5.2.1))

ω(x) : 교량 상부구조와 하부구조의 사하중 강도

v<sub>s</sub>(x) : 균일한 등분, 하중에 의한 정적 처짐

$$\alpha : \int v_s(x) dx$$

$$\beta : \int w(x) v_s(x) dx$$

$$\gamma : \int w(x) (x) dx$$

$P_e(x)$ 를 구한 후 이를 구조시스템에 작용시켜 각 부위들의 응력과 변위 즉 설계지진력과 설계변위를 구할 수 있다.

이상과 같은 방법은 교량의 교축방향 및 교축직각방향에 대해 적용한 후 시방서 4.4절의 조합방법에 따라 조합하여 부재를 설계한다.

#### (2) 복합모드 스펙트럼법

교량의 기하학적 형상이 불규칙하면 3개의 좌표축 방향으로서 진동이 복합되어 단순히 종방향, 횡방향으로 분류하기 어렵고 진동의 여러 모드들이 구조물의 전체 응답에 대해 영향을 미치므로 이런 경우에는 복합모드 스펙트럼법을 이용하여야 한다. 이 방법은 적절한 선형 진동해석 컴퓨터 프로그램으로 수행하여야 하며 프로그램 입력시 구조물의 모델에 세심한 주의를 하여야 한다. 구조물의 강성과 탄성효과를 실제에 가깝게 모형화하기 위해 3차원 공간뼈대 구조물로 모형화 한다.

교량의 응답은 최소 지간 갯수의 3배로 부터 25개까지의 진동모드의 영향을 고려하여야 하며 각 모드의 진동수와 모드형상은 고정지반 조건에 대해 전체 시스템에 대해 고유치 해석을 통해서 구할 수 있다. 응답의 최대치는 모드별 최대치를 SRSS법에 의해 조합함으로써 계산된다.

#### 3.3.4 철근콘크리트 교각

내진설계의 기본 개념은 강진의 경우에 교각이 연성적으로 거동하는 성질에 기초하고 있다. 또한 약진의 경우에는 탄성거동을 하여야 한다. 교각의 내진설계시 교각의 연성을 계산하지는 않으나 충분한 연성을 확보하기 위해 다음과 같은 점이 고

려되어야 한다.

(1) 휨에 의한 항복이 예상되는 부분의 충분한 구속철근

(2) 취성형태의 전단파괴를 막기위한 충분한 횡방향 철근

(3) 교각의 휨항복을 허용하기 위한 종방향 철근의 적절한 정착

(4) 파일의 파괴를 방지하기 위한 기초설계

## 4. 결 론

그 동안의 지진발생과 규모를 볼 때 우리나라는 결코 지진에 대해 안전하지 않다. 따라서 지진에 대비하여 여러 구조물들에 대한 내진설계 기준 등이 마련되었다. 교량 구조물은 국가 기간시설물의 중요한 위치를 차지하고 있는 만큼 지진이 발생하더라도 그 기능을 발휘하여야 하므로 이런 취지에서 교량의 내진설계가 매우 중요하다 하겠다. 본 글이 교량 공학자들에게 내진설계의 이해에 조금이라도 도움이 되길 바란다.

## 참 고 문 헌

1. 도로교 표준 시방서, 건설부, 1992
2. 動的解析と耐震設計, 日本土木學會篇, 岐報堂, 1989
3. Dynamics of Structures, J. L. Humar, Prentice Hall, 1990
4. 도로교의 내진설계 계산예, 건설도서, 1992 □