

## 교량의 제진과 내진

김영석·김두기  
(유니슨산업 기술연구소)

### 1. 머리말

오늘날 교량의 설계개념은 단순한 정적인 구조물에서 지진하중이나 풍하중에 대한 고려를 하는 동적인 구조물로 설계개념이 바뀌고 있다. 이러한 경향은 미국이나 일본 등의 선진국에서는 오래 전부터 있었던 경향으로 국내에서도 최근 다양한 하중에 대한 안전성 문제가 점점 중요하게 부각되어 다양한 형태의 제진과 내진설계에 대한 기술 및 장치 등이 교량설계에 도입되고 있다.

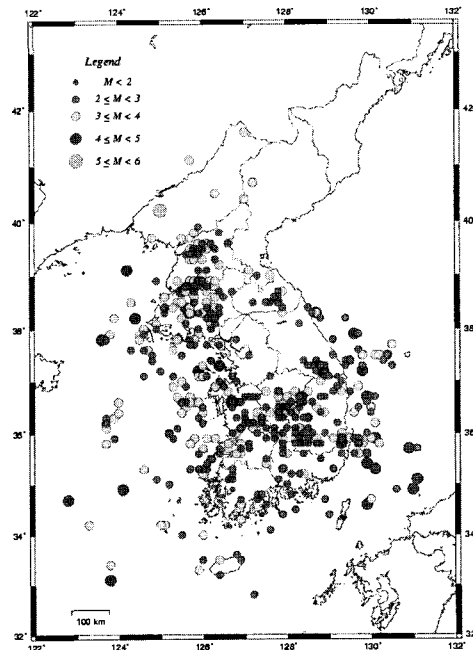
### 2. 교량의 내진설계

우리나라는 활동성 판 경계로부터 멀리 떨어져 있어 지진에 대해서는 안전할 것으로 많은 사람들이 생각하고 있으나, 역사적 지진기록과 근래의 계측 지진기록을 살펴보면 우리나라도 결코 지진의 안전지대가 아님을 알 수 있다.(그림 1) 따라서 신설 교량의 내진설계는 물론, 기존 교량의 내진보수 및 보강이 실시되고 있다.

국내에서는 1991년에 제정된 '고속전철용 설계시방서'의 '하중'편에 지진력이 도입되었고, 1992년 11월 개정된 '도로교 표준시방서'에 '내진설계'편이

신설되면서, 국내 교량에 대한 내진설계가 도입되었다. 그 이후 도로교의 내진설계는 1996년 4월과 1999년 7월 두 번의 개정을 통해 현재의 '도로교 설계기준'의 '내진설계'로 수정/보완되었다.

도로교 설계기준의 내진설계의 목적은 지진에 의해 교량이 입는 피해의 정도를 최소화시킬 수 있는 최소 설계요구조건을 규정하는 것이다.



(1978~2001년 기상청 관측자료)

그림 1 한반도 계측지진 분포도

\* E-mail : kim2kie@hotmail.com

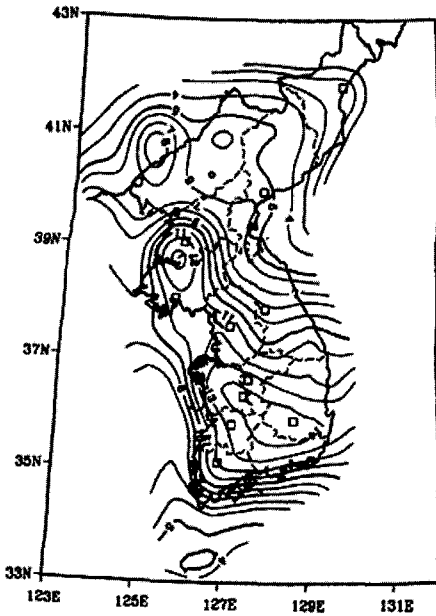


그림 2 지진위험도 지도(재현주기 : 1000년)

내진설계의 중요한 설계인자는 구조물의 변형과 단면력으로 이들은 서로 상반되는 관계에 있다. 즉, 외부에서 전달되는 지진에너지는 구조물의 내부에너지와 동일하고 보존되므로, 변형을 제한하면 단면력이 증가하고, 단면력을 제한하면 변형이 증가한다. 따라서 개념상 내진설계의 목적은 지진발생시에 교량에 적절한 변형과 부재력을 유발시켜 전술한 내진설계의 기본개념을 충족시키는 것이다.

설계지진하중은 교량의 중요도, 예상되는 지진의 발생빈도, 지반조건, 구조부위 및 경제성 등을 종합적으로 고려하여 결정한다. 그러나, 고정하중과 활하중 등과 달리 설계하중의 크기나 발생빈도를 예측하고 설정하기가 곤란하므로, 불확실성이 포함될 수 밖에 없는 상황이다. 또한, 내진설계기준 제정 당시의 기술수준의 제한성 때문에 관련 기준을 만족하도록 내진설계가 된 교량이라도 지진발생시 피해를 받을 수 있다.

도로교 설계기준에서는 설계지진의 가속도 크기

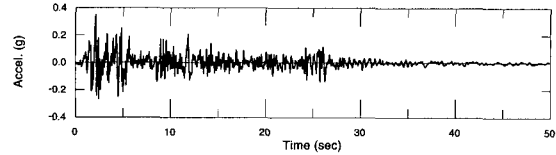


그림 3 지진하중의 형태  
(El Centro지진, 1940, 미국)

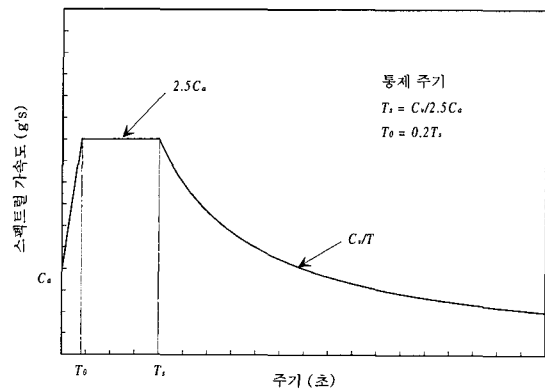


그림 4 표준 설계응답스펙트럼(내진설계기준연구(III))

를 지진구역계수와 위험도계수를 곱하여 가속도계수로 나타낸다. 여기서 지진구역계수는 평균재현주기 500년에 해당하는 지진의 구역별 가속도 크기이며, 위험도계수는 교량의 중요도에 따른 가중치이다.(그림 2)

교량에 가해지는 지진하중의 크기는 지진파의 탁월주기 특성과 교량의 고유주기에 따라 다르다.(그림 3) 즉, 교량의 고유주기가 지진의 탁월주기와 일치하면 공진(共振)현상이 발생하여 큰 지진하중이 교량에 가해지므로, 지진하중의 크기의 결정에는 전술한 가속도계수 이외에도 지진파의 탁월주기도 매우 중요하다. 그러나, 우리나라에서 계측된 강진자료가 매우 부족하여, 도로교 설계기준에서는 미국의 ATC(applied technology council)에서 많은 지진 실측자료를 근간으로 구한 응답스펙트럼으로 지진의 탁월주기 성분을 나타내었다.(그림 4)

내진설계의 방향은 크게 내진, 면진 및 제진으로 구분할 수 있다. 내진은 지진력에 대한 부재의 강성을 증가시켜 구조물 자체로서 지진하중에 저항하도록 설계하는 개념이며, 우리나라와 같은 중약진 지역에서 가장 보편적인 설계개념이다. 면진은 지진파가 장주기 성분이 적다는 특성을 이용하여 교량의 고유주기를 길게 함으로써 지진력을 줄이는 개념이다.

제진은 댐퍼, 강재 및 납 등의 제진장치를 사용하여 지진에너지를 소산시키는 개념이다. 제진장치에는 매우 다양한 기술들이 있으나 본 고에서는 지면관계로 소개를 하지 않겠다.

발생빈도가 매우 작은 지진에 대해서도 교량을 탄성한계 내에서 거동하도록 설계하는 것은 비경제적이므로, 내진설계는 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하여 설계한다. 기능수행수준이란 구조물의 설계수명 이내에 발생의 빈도가 상당히 큰 지진이 작용시 구조물이나 시설물에 발생한 변형이나 손상은 그 구조물이나 시설물의 기능을 차질없이 수행할 수 있는 범위내로 제한되는 성능수준을 의미한다. 붕괴방지수준이란 그 발생빈도가 매우 작은 지진이 작용시 구조물이나 시설물에 상당한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이 붕괴되거나 또는 구조물이 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지될 수 있는 성능수준을 의미한다. 각 성능수준의 구체적인 정의는 해당 시설물에 따라 다르게 규정한다.

### 3. 교량의 내진보강

교량이 지진시에 탄성한계를 벗어났다고 해서 곧바로 붕괴되는 것은 아니며, 고정단 교각 하단부에 소성힌지가 형성되어 어느 정도의 연성(延性)을 발휘한다. 현재의 도로교 설계기준에서도 탄성해석으로 구한 단면력을 구조부재별 연성도에 따라 감소시키도록 하고 있다. 따라서, 교각이 어

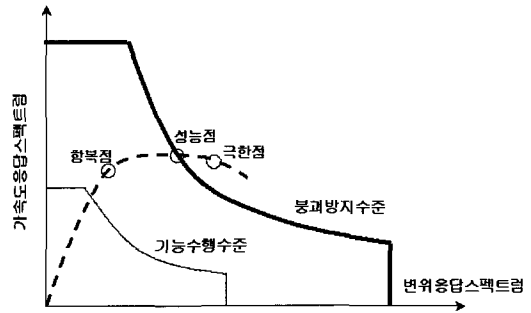


그림 5 내진 가속도-변위 응답스펙트럼(ADRS)

느 정도의 연성을 발휘하느냐는 교각의 내진성과 직결되는 문제이다. 교각의 연성은 교각의 역량곡선으로부터 구할 수 있으며, 역량곡선은 준정적실험(push-over test) 또는 비선형 해석을 통해 구할 수 있다. 최근에는 교량의 비선형 거동을 고려한 실제적인 내진성능을 파악하기 위한 방법으로 가속도응답스펙트럼과 변위응답스펙트럼을 조합한 가속도-변위 응답스펙트럼(ADRS: acceleration-displacement response spectrum)을 사용한다.(그림 5)

내진보강방법은 크게 교각의 보강, 면진받침 및 damper를 이용한 하중제어, 전단파괴를 통한 하중분산의 방법의 3가지 형태로 분류할 수 있다.

#### 3.1 교각의 보강

지진하중에 대응하기 위한 가장 실질적인 방법으로 교각의 단면확대를 통한 지진하중에 대한 지지능력 및 연성을 크게 하는 방법을 들 수 있다. 지진하중에 의해서 붕괴되는 교량의 모습을 보면 그림 6, 그림 7과 같이 교각하부에서 주로 파괴가 나타난다. 이를 파괴형태별로 분류하면 그림 8에서 나타난 것과 같이 휨파괴, 전단파괴와 두 가지가 중첩된 휨-전단파괴로 나눌 수 있다.

교각의 보강방법으로 그림 9와 같은 보강철근을 덧대는 방법과 그림 10과 같은 보강철판을 설치하는 방법이 있으며 교각의 휨이나 전단력에 대한



그림 6 고베지진

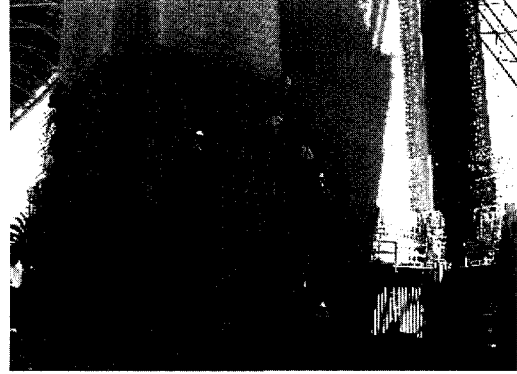


그림 9 철근보강

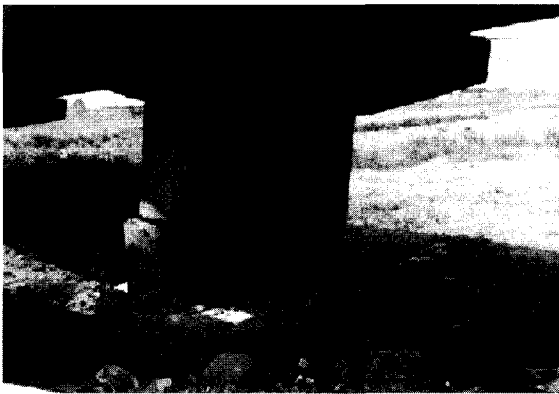


그림 7 대만지진

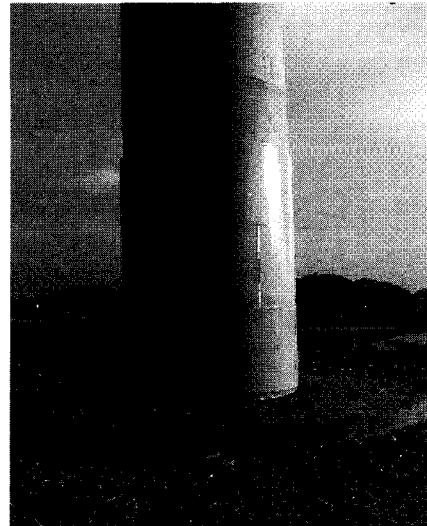
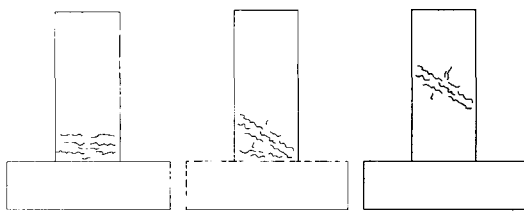


그림 10 철판보강



(a) 휨파괴 (b) 휨-전단파괴 (c) 전단파괴

그림 8 교각파괴형상

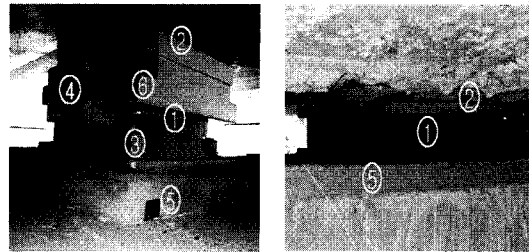


그림 11 교량받침  
(스페리컬 받침과 탄성받침)

내진성능을 크게 하는 방법으로 비교적 간편한 방법이다.

3.2 면진받침/Damper에 의한 하중제어

면진받침은 교량의 고유주기를 지진의 탁월주기보다 크게 변화시켜서 지진하중이 작아지는 면진 효과가 있으므로, 기초부가 내진설계 기준에 부합하지 않을 경우 많이 사용한다. 참고로 교량받침에는 매우 다양한 종류가 있으며, 상판의 하중을 교각에 전달하는 매우 중요한 구조부재이다.(그림 10)

Damper는 고정단에 집중하는 하중을 각 교각에 분배하고 damper의 지진에너지 소산기능에 의한 지진하중 감소효과를 목적으로 한다. 그림 12는 교각과 상판 사이에 viscous damper를 설치한 경우이며, 그림 13은 steel의 소성 이력감쇠를 이용하는 steel damper의 모습이다.



그림 12 교량상판과 교각사이에 viscous damper를 설치한 교량

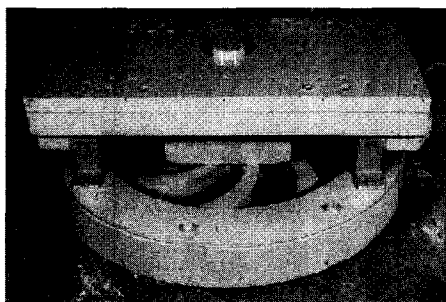


그림 13 Steel damper

3.3 전단키를 이용한 내진보강

전단키를 이용한 내진보강의 경우는 지진하중을 모든 교각에 전달시키는 방법으로 교각의 내진성능이 충분할 경우 사용된다. 교축방향의 경우 고정단에 집중하는 지진하중을 여러 교각에 고르게 분산시키고 교축 직각방향의 경우 기존받침의 교축직각 방향 지지능력이 충분하지 못한 경우 사용된다. 그림 14와 그림 15에 나타난 것처럼 철재 전단키와 콘크리트 전단키가 있으며, 같은 개념으로 사용되는 충격전달장치(shock transmitting unit)가 있다. 충격전달장치의 경우 거동은 상시의 온도팽창과 같은 아주 느린 속도의 하중에 대해서는 변형을 허용하나 지진이나 차량의 제동하중과 같은 충격하중에 대해서는 장치가 lock상태로 전환되어 장치에 재하 되는 모든 동적하중이 교각으로 전달되며 이 경우 모든 교각과 상판이 hinged support의 경계조건이 된다.



그림 14 철재 전단키

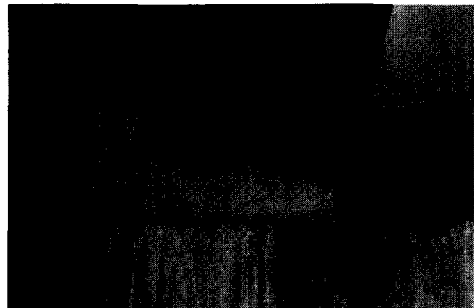


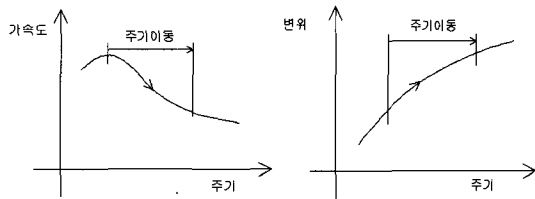
그림 15 콘크리트 전단키

4. 면진설계

교량의 지진하중에 대한 진동제어로 가장 많이 사용되고 있으며, 면진설계 기본개념은 그림 16과 그림 17에 나타난 것과 같다.

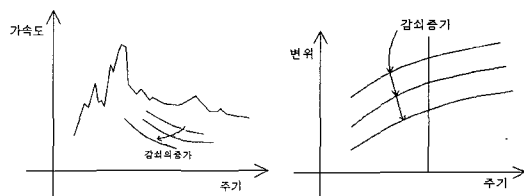
면진장치는 감쇠장치의 종류에 따라 분류할 수 있다. 가장 많이 사용하는 LRB(lead rubber bearing)는 그림 18과 같이 장치의 중앙부에 납심을 넣어 이를 감쇠장치로 이용하며, 적층고무로 수평강성을 조절한다. 마찰감쇠를 사용하는 면진

장치로 FPS(friction pendulum system)(그림 19와 20), FPB(friction pot bearing)(그림 21)등이 있다. 마찰감쇠에 사용되는 주요소재로는 PTFE계열의 수지가 사용된다. FPB를 이용한 면진장치는 별도의 적층고무를 이용하여 수평강성을 조절한다. 이외에도 면진설계와 damper의 중간의 개념에 속하는 강제 damper가 있으며 강재의 소성이력에 의한 감쇠를 이용한다.(그림 22)



(a) 응답가속도 (b) 응답변위

그림 16 주기이동효과



(a) 응답가속도 (b) 응답변위

그림 17 감쇠효과

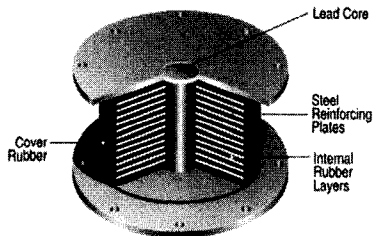


그림 18 LRB

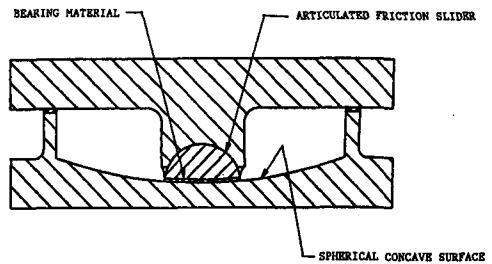
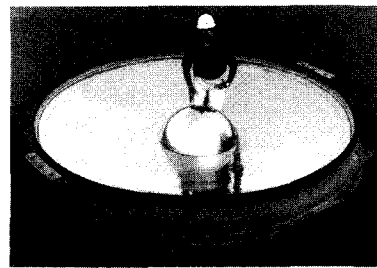
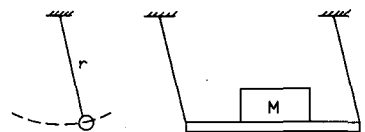
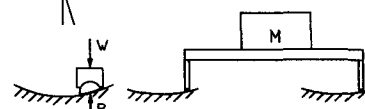


그림 19 FPS의 형태 및 단면



PENDULUM MOTION



SLIDING PENDULUM MOTION

EQUATIONS: PERIOD  $T=2\pi\sqrt{r/g}$   
STIFFNESS  $k = W/r$

그림 20 FPS의 원리

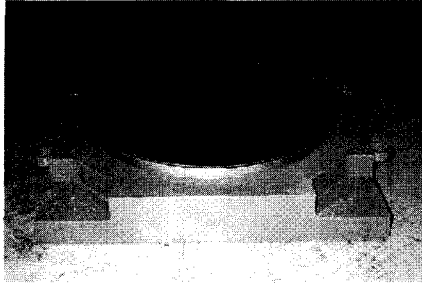


그림 21 FPB

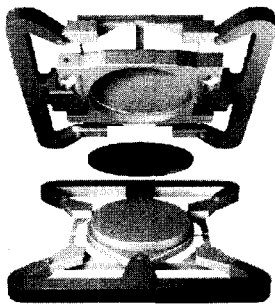


그림 22 강재 damper

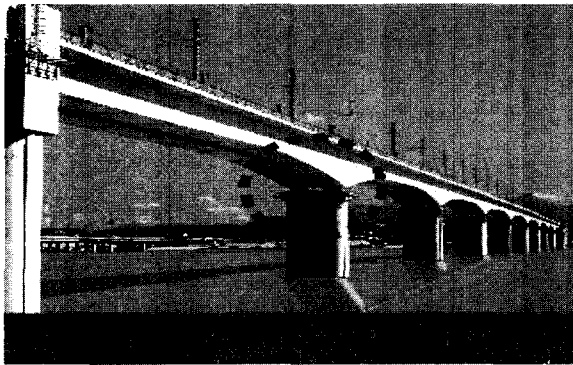


그림 23 당산철교 및 LRB설치위치

위와 같은 면진장치를 설치한 교량은 국내에 매우 많아 현재 30개 이상의 중대형 규모의 교량에 설치되었으며, 설계에 반영된 수만 해도 30개 이상이 되어 점점 더 많은 교량에 적용될 것으로 예상된다. 그림 23은 LRB를 적용한 대표적인 철교인 당산철교이다.

### 5. 맺음말

지진하중은 발생확률은 작으나 일단 발생하면 커다란 피해가 예상되는 하중이다. 따라서 국내에 적합한 지진하중에 대한 적정설계는 매우 중요한 개념이다. 최근 다행히 내진 및 면진기술이 국내에 도입되어 활성화되어 비용과 안전성이 고려된 기술이 국내의 여건에 맞게 적용되기 시작하였다. 본 고에서 국내에 적용되고 있는 내진설계에 관한 간략한 설명 및 다양한 진동제어 기술을 소개하였다.

### 참고 문헌

- (1) 김일곤 외, 기존 시설물에 대한 내진성 평가 기법개발, 한국시설안전기술공단 보고서, 99SOC17-01, 2001.
- (2) 한국도로공사, 고속도로 교량의 내진설계 지침, 1996.12.
- (3) 한국교통협회, 도로교 설계기준, 1999.12.
- (4) 한국지진공학회, 철근콘크리트 교각의 내진설계, 제 10 회 기술강습회, 2002. 7.