

## RC 교각의 내진성능 평가

### Seismic Performance Assessment of RC Bridge Columns



김익현\*  
Ick-Hyun Kim



박창규\*\*  
Chang-Kyu Park



손혁수\*\*\*  
Hyeok-Soo Son

#### 1. 머리말

최근 들어, 우리나라에서도 비교적 강한 진동을 동반한 지진이 자주 발생하고 있다. 지난 1월 20일에 발생한 오대산지진에서는 계측된 가속도의 최대치가 도로교설계기준에서 고려하고 있는 최대지반가속도 0.154g에 근접하였다(그림 1, 2). 다행스럽게 에너지가 집중된 진동수 영역이 고진동수인 관계로 구조물에 큰 피해가 발생하지는 않았다. 또한, 2004년 5월에는 경북 울진 동쪽 약 80km 해역에서 규모 5.2의 비교적 큰 지진이 발생하였다. 이 지진으로 경북 울진에서 건물이 심하게 흔들리는 등 전국적으로 진동이 감지되었다. 이 지진은 1978년 기상청에서 계기지진을 관측한 이후 한반도 남반에서 일어난 지진 중 가장 큰 지진으로 보고되고 있다. 한편, 2005년 초에는 부산 및 울산지역에서 강한 진동이 발생하였다. 이 진동은 국내가 아닌 일본의 후쿠오카현 바다 겡카이시마 부근을 진원으로 하는 규모 7.0의 지진에 의한 것이었다. 비록 일본에서 발생한 지진이지만 진원지가 지각판 경계가 아닌 우리나라가 속해 있는 유라시아판 내부의 활성단층이라는 점에서 우리에게 시사하는 바가 매우 큰 지진이라고 할 수 있다. 중국도 우리나라와 같은 유라시아판 내부에 위치하고 있지만 1976년의 당산(唐山)지진에 의해 20만명이 넘는 사망자가 발생하는 지진피해를 경험한 바 있다. 특히 일본 규슈의 중·북부와 일본의 남서 지역의 지진 활성기가 우리나라의 지진 활성기와 유사하다는 점을 고려한다면 더욱 충실하게 지진에 대비하는 것이 필요하다.

도로의 교량 구조물은 철도 구조물과 함께 인적, 물적 자원을 수송하는 국가의 기간 시설물로서 지진에 의한 피해를 입게

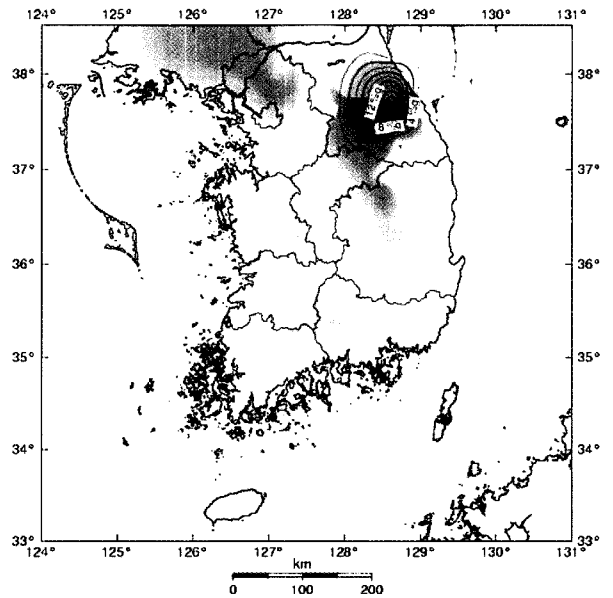


그림 1. 오대산지진의 가속도분포도

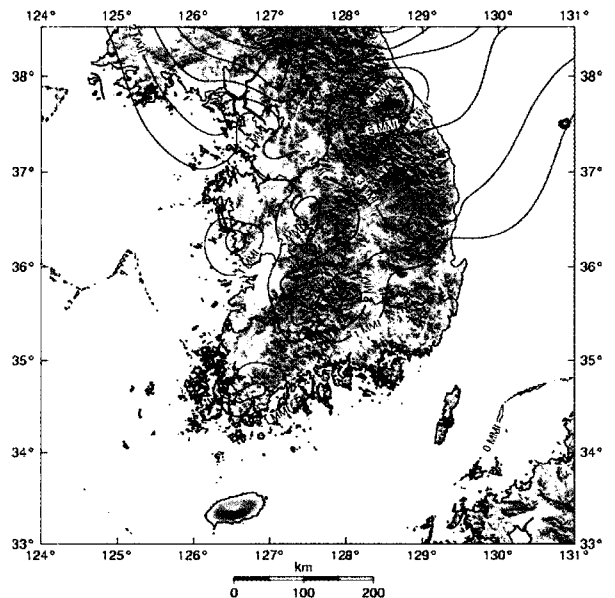


그림 2. 오대산지진의 진도도

\* 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수  
ickhyun@mail.ulsan.ac.kr

\*\* 정회원, 현대건설(주)기술개발원 과장

\*\*\* 정회원, (주)서영엔지니어링 구조설계실 차장

되면 국가경제에 지대한 영향을 미치게 된다. 또한, 지진 후에는 소방 활동 및 구급 활동 등에도 큰 영향을 받아 피해가 확대된다. 따라서 지진시에도 그 기능을 확보할 수 있는 적절한 대책이 필요하다. 교량 시스템은 다양한 구성 요소로 구성되어 있어 지진시의 피해 부위와 피해 상태는 다양한 형태로 나타나게 된다. 따라서 교량 전체 시스템의 내진성능을 확보하기 위해서는 이들 구성 요소에 대한 내진성능 평가가 적절하게 수행되어야 하고 이를 기본으로 하여 적절한 내진성능 확보 방안이 강구되어야 한다. 본 기사에서는 기존 교량의 내진성능 평가 기법에 대하여 기술하였다.

## 2. 교량의 내진성능 평가

### 2.1 내진성능 평가 개요

시설물 내진성능 평가의 최종 목표는 내진성능이 부족한 시설물에 대해서는 적절한 보강 작업을 수행하여 소요 내진성능을 확보함으로써 지진으로부터 시설물을 보호하는 것이다. 교량 구조물과 같이 그 수량이 많은 경우에는 이 모든 구조물에 대해 동일한 방법의 내진성능 상세 평가 작업을 수행하는 것은 매우 비합리적이다. 우선 내진성능 평가 작업이 필요한 교량의 범주를 설정하는 것이 효율적으로 작업을 수행할 수 있게 한다. 또한, 내진성능 평가가 필요한 범주에 속하는 교량에 대해서도 평가의 우선순위를 결정하여 두는 것이 효율적으로 내진성능평가 작업을 수행할 수 있다. 이렇게 대상 교량의 범주를 분류하고 우선순위를 설정하기 위해서는 교량 구조의 상세 정보보다는 교량이 위치한 지역의 지반가속도의 크기, 교량의 제원 및 구조적 특성, 교량의 중요도 등의 비교적 간단한 정보로부터 지진 취약도를 산정하고 교량을 둘러싼 주위 환경, 사회적, 경제적 영향 등을 종합적으로 판단하여 설정하는 것이 보편·타당하다. 이렇게 예비 평가 작업에서 상세 내진성능 평가가 필요하다고 판단되는 구조물에 한해서만 상세 평가를 실시하게 된다. 상세 내진성능 평가 작업에서는 지진시 피해가 빈번하게 발생하는 구성 요소 또는 부재에 대해서 소요 내진성능을 확보하고 있는지를 검토하게 된다.

### 2.2 예비 평가

#### 2.2.1 미국 연방도로관리국의 예비 평가 방법

1995년 미국 연방도로관리국(Federal Highway Administration)에서는 기존 도로교의 합리적인 내진성능 평가와 보강을 위한 매뉴얼<sup>1)</sup>을 발간하였으며, 도로교의 우선순위를 결정하기 위한 예비 평가 방법이 포함되어 있다. 기존 교량들을 효율

적으로 평가·보강하기 위해서는 교량의 등급화가 필요하다. <그림 3>은 예비 평가 절차를 나타낸 것으로서 교량의 내진성능 범주에 따라서 다르게 적용하고 있다.

평가 방법에서는 정책적, 경제적 고려, 행정상의 문제 및 기술적 견해를 고려하지만 기술 요소에 의한 교량의 지진 등급 산정이 가장 중요하다. 내진평가 시스템은 지진 위험 지역에 있는 교량의 독립된 내진 등급을 산정하는 것으로, 구조적 취약성, 지진 및 토질공학적 취약도, 그리고 중요도를 고려(사회, 경제적 이유)하며 교량 보수의 우선순위를 결정한다. 평가 시스템은 두 부분으로 구성되며 첫째는 정량적 평가, 둘째는 정성적 평가이다. 정량적 평가(교량 등급)는 구조적 취약도 및 지진재해도에 기초하며 내진 등급을 결정한다. 정성적 평가는 중요도, 네트워크 대체, 비지진 관련 결함, 잔여 사용 기간 및 다른 유사한 문제점을 고려하여 우선순위를 수정하는 주관적인 평가이다. 따라서 기술적, 사회적 결정은 평가 과정의 둘째 단계에서 중요한 역할을 한다. 이에 따라 등급, 중요도 및 다른 항목과 상관관계가 있는 우선순위 지표를 결정한다. 우선순위 지표( $P$ )는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며,  $R$ 은 구조적 취약도와 지진도에 기초한 등급을 나타낸다.

$$P = f(R, \text{중요성}, \text{비지진 관련 요인}, \text{기타 항목}) \quad (1)$$

#### 2.2.2 NCEER의 우선순위 선정 방법

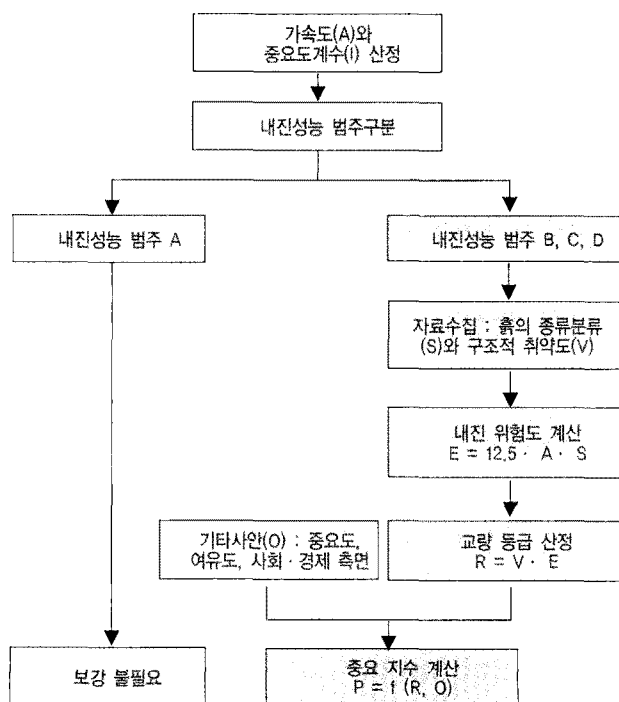


그림 3. 예비 평가 절차

미국의 National Center for Earthquake Engineering Research(NCEER)는 교량의 합리적인 내진보강을 위하여 우선순위 선정방법을 개발하였다(1995년)<sup>2)</sup>. 개발된 우선순위 선정방법은 내진 보강이 필요한 교량을 선정하고 이들 교량의 지진 취약도와 교량의 중요도를 평가하여 등급화 하는데 사용된다(그림 4). 지진취약도 평가에는 교량 건설 지점의 지진 재해도 평가, 교량의 등급 구분 및 취약도 분석 등이 포함된다. 교량의 지진취약도는 교량 피해에 직접적으로 영향을 주는 지반 운동의 함수로 표현하였으며, 교량의 등급을 평가하기 위한 새로운 전문가 시스템(expert system)을 개발하였다.

2.2.3 우리나라 도로교 예비 평가 방법

내진성능 향상을 위한 우선순위 대상 교량 결정은 다음과 같은 세가지 요인으로 결정되며, 교량의 지진도는 지진 구역과 지반계수 및 권역별 특성에 따라 <표 1>과 같이 구분한다.

- 1) 지진도(seismicity) : 지진의 규모 및 발생 환경에 의해 결정.
- 2) 사회, 경제적인 영향(impact) : 교통량, 교량의 중요성 등에 의해 결정.
- 3) 구조물의 위험도(vulnerability) : 구조물의 취약성, 기하학적 형상 및 형식에 의해 결정.

교량의 위험도는 지진으로 인해 교량이 붕괴되거나 손상이 입기 쉬운 형태를 구분하는 것으로서 위험도지수, VI (vulnerability index)를 산출할 수 있다.

$$VI = 0.2 \left( \frac{CONT_{\text{경간수}}}{3} \right) + 0.15 \left( \frac{LENGTH}{100} \right)^{0.1} \cdot \left( \frac{WIDTH}{WIDTH_{\text{기준}}} \right)^{0.3} + 0.05 \left( \frac{AGE_{\text{현재}}}{AGE_{\text{기준}}} \right) \quad (2)$$

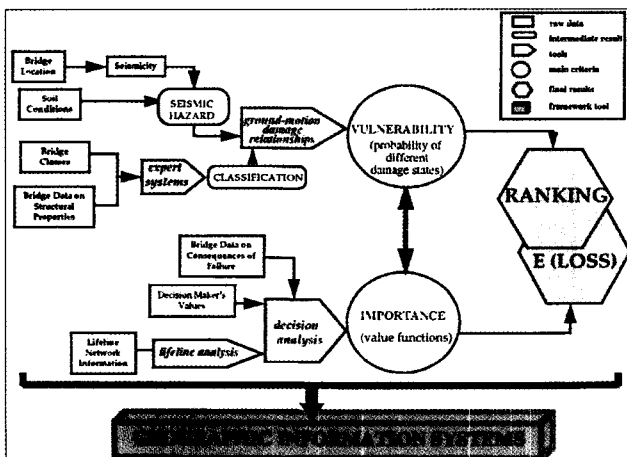


그림 4. 우선순위 결정법의 구성 요소(NCEER)

표 1. 지진도 등급 기준

지진구역	구분	지반종류			
		IV	III	II	I
I	도시	1그룹		2그룹	
	기타지역	1그룹	2그룹	3그룹	3그룹
II	도시	1그룹		4그룹	
	기타지역	2그룹	3그룹	4그룹	

$$+ 0.2(PIER_{\text{지수}}) + 0.1(EARTH_{\text{지수}})(PILE_{\text{지수}}) + 0.1(LIQ_{\text{지수}}) + 0.05(DETIOR_{\text{지수}}) \quad (2)$$

$$+ 0.1 \sqrt{\sum_{\text{지점수}} \left( 1 - \frac{SUPPORT_{\text{결어}}}{SUPPORT_{\text{기준}}} \right)^2} + 0.05(SKEW_{\text{지수}})$$

여기서,

$CONT_{\text{경간수}}$  = 최대 연속경간수(신축이음장치 사이 경간수)

$LENGTH$  = 연속된 교량의 총연장(m)  
= 최대연속경간장(m)

$WIDTH$  = 교량의 총폭원(m)

$WIDTH_{\text{기준}}$  = 교량의 폭원 기준(m)

$AGE_{\text{현재}}$  = 현재 교량의 수명(년)

$AGE_{\text{기준}}$  = 교량의 형식에 따른 기준 평가설계수명(년)

$PIER_{\text{지수}}$  = 교각의 형태에 따른 지수

$EARTH_{\text{지수}}$  = 토압영향 가능 유무

$PILE_{\text{지수}}$  = 지반구조물 상호작용 및 기초의 위험유무

$LIQ_{\text{지수}}$  = 액상화 가능여부

$DETIOR_{\text{지수}}$  = 교량의 노후화 등급지수

$SUPPORT_{\text{결어}}$  = 지점당 교량받침 지지길이(mm)

$SUPPORT_{\text{기준}}$  = 도로교 설계기준에 의한 받침 지지길이(mm)

$SKEW_{\text{지수}}$  = 교량의 받침선과 교축직각방향의 사잇각(θ)에 의한 영향지수

교량의 영향계수, IC는 교량이 지진으로 인해 피해가 발생할 경우에 이로 인한 사회 및 경제적인 영향을 고려하는 결정 인자로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$IC = 0.30 \log \left( 1 + \frac{ADT}{5000} \right) + 0.35(LEVEL) + 0.10(CATEGORY) + 0.15(UTILITY) + 0.10(FACILITY) + 0.10 \left( \frac{DETOUR}{50} \right)^{0.25} \quad (3)$$

- 여기서, *ADT* = 일 평균교통량(대)
- LEVEL* = 교량설계등급
- CATEGORY* = 시설물 종별
- UTILITY* = 교량하부를 통행하는 기간망
- FACILITY* = 중요시설물 부착 여부
- DETOUR* = 교량통행이 차단되었을 때 우회로 길이(km)

지진도, 취약도, 영향도를 산정하여 <그림 5>와 같은 결정과정을 통하여 기존 시설물을 “내진 보강 핵심 시설물”, “내진 보강 중요 시설물”, “내진 보강 관찰 시설물”, “내진 보강 유보 시설물”의 내진 등급으로 그룹화 한다. “내진 보강 핵심 시설물”, “내진 보강 중요 시설물”에 대해서는 우선적으로 내진 성능 상세 평가를 실시하고, “내진 보강 관찰 시설물”과 “내진 보강 유보 시설물”에 대해서는 관찰 기관의 정책적 판단에 의거하여 내진 성능 상세 평가 실시 여부를 결정한다.

### 2.3 상세 평가

RC 교각의 내진성능 평가는 신설 교량에 대해서는 설계 지지력 작용시 충분한 내진성능을 보유하고 있는지 그리고 내진설계가 수행되지 않은 기설 교량에 대해서는 내진 보강 여부 판별의 기준을 제시하는 근본적인 자료가 된다. RC 교각의 내진성능 평가는 구조물의 성능과 지진하중의 요구도를 종합적으

로 분석하여 수행되어야 하며 내진성능을 평가하기 위한 정량적인면서도 합리적인 방법이 필요하다. 현행 설계기준에서는 RC 교각의 내진성능 평가를 위한 구체적인 규정이 정립되어 있지 않으나 내진설계 분야의 많은 연구 성과를 바탕으로 다양한 내진성능 평가법이 보고되고 있다.

#### 2.3.1 보유 내하력과 소요 내하력의 비를 이용하는 방법

지금까지 가장 널리 이용되어 온 내진성능 평가 방법은 ATC(Applied Technology Council)에 의해 1980년대 중순에 개발된 보유 내하력과 소요 내하력의 비를 이용하는 방법(ATC-6-2 방법)<sup>3)</sup>이다. 탄성해석에서 구할 수 있는 복원력, 즉 교량에 요구되는 소요 내하력을 구조물의 보유 내하력과 비교하여 구조물의 여러 개소에서 소요 내하력/보유 내하력 비를 구한다. 간단한 평가에서는 이 비가 1.0 이상이면 파괴로 간주한다. 좀 더 상세한 평가를 실시할 경우에는 소성변형이 확보되어 있으면 이 비가 1.0을 넘는 것도 허용한다. 모멘트가 중요한 경우(즉, 전단력은 고려하지 않아도 되는 경우)에는 2.0~3.0 정도의 소요 내하력/보유 내하력 비를 허용한다.

#### 2.3.2 푸쉬오버(push-over) 해석

푸쉬오버 해석에서는 교량을 가동 받침에서 인접부와 떨어진 단독의 설계 진동 단위를 고려하고 상부 구조를 수평면 내에 강제로 취굴하여 교축과 교축 직각 방향에 대해서 개개의 교각

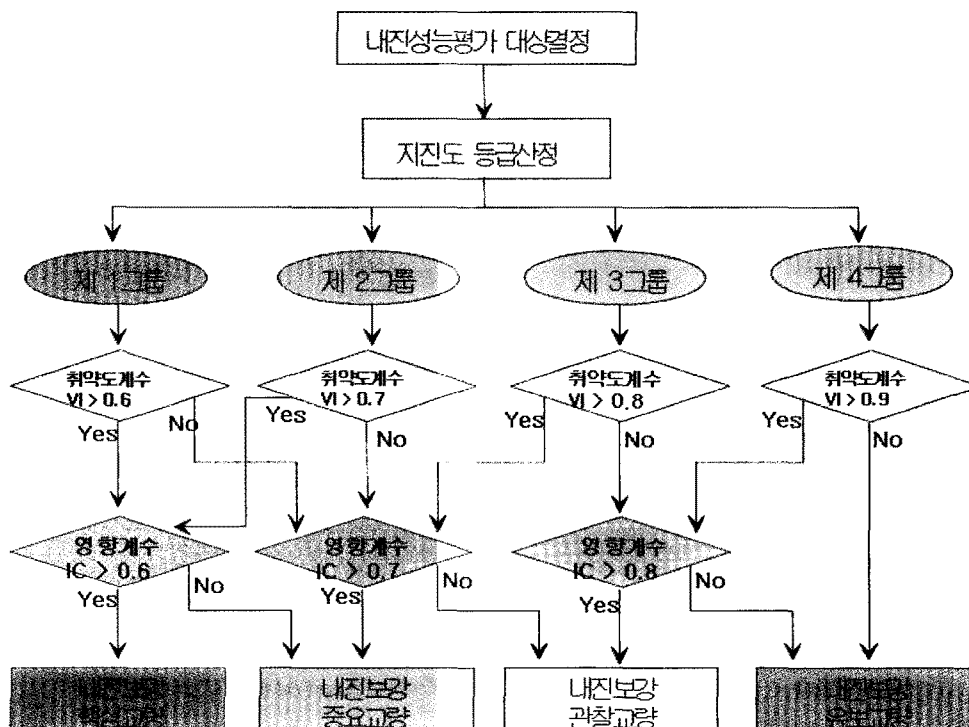


그림 5. 내진 등급 그룹화 방법

을 독립하여 탄소성 붕괴 해석을 수행한다. 교각에 증분 변위를 재하하여 소성힌지의 형성 과정, 전단강도의 저하, 받침의 열화, 소성회전 등을 구한다. 부재의 내진성능평가는 아래와 같이 수행한다. 우선, 각 교각에 대해서 수평하중-수평변위의 관계를 구하고 이를 간단한 비선형 스프링으로 모델화하여 골조 모델을 구성한다. 중심 위치, 수평강성, 회전강성을 구하고 또한 중심에서의 유효강성을 계산한다. 교각의 수평변위나 회전변위를 항복변위나 극한변위 등의 보유 변위 등과 비교하여 한계에 이른 교각이나 파괴 모드 등을 정의한다.

〈그림 6〉의 기호를 이용하면 질량 중심 위치의 유효강성  $K$ 는,

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\sum K_i} + \frac{\bar{x}^2}{\sum K_i x_i^2} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{x}$ 는 강성 중심과 질량 중심 사이의 거리이다. 설계 진동 단위의 고유주기는,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (5)$$

여기서,  $M$ 은 설계 진동 단위 전체의 질량이다. 질량 중심점에 단위 관성력을 주면 교각의 변위는,

$$\delta_i = \frac{1}{\sum K_i} + \frac{\bar{x} x_i}{\sum K_i x_i^2} \quad (6)$$

$\Delta_i$ 를 교각의 보유 변위라고 하면 식(7)로 주어지는  $V_E$ 의 값은 변위일정법칙(equal displacement)에 의거하여 계산되는 구조물의 등가탄성관성력을 나타내게 되고 이것은 어느 교각이 탄성 한계에 달하는가를 나타내는데 이용할 수 있다.

$$V_E = \min \left| \frac{\Delta_i}{\delta_i} \right| i \quad (7)$$

한편, 비선형 응답이 생기는 경우, 관성력은 식 (7)보다 작게

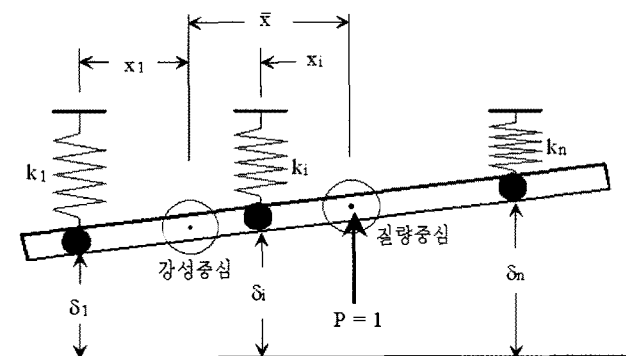


그림 6. 질량중심에 축방향 단위 하중이 가해질 때 프레임의 변형 모습

된다. 이 경우에는 교각이 순차적으로 소성화 되기 때문에 각 교각의 강성과 강성의 중심 위치를 수정해 나가면서 설계진동 단위의 푸쉬오버 해석을 증분 형태로 수행해야만 한다. 등가탄성응답은 대상으로 하는 한계상태에 있어서의 변위 연성도를  $\mu_\Delta$ , 고유주기를  $T$ , 가속도 응답스펙트럼이 최대가 되는 고유주기를  $T_0$ 라고 하면 식 (8) 과 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$V_E^* = V_E \frac{Z}{\mu_\Delta} \quad (8)$$

$$Z = 1 + 0.67(\mu_\Delta - 1) \frac{T}{T_0} \leq \mu_\Delta \quad (9)$$

$T \geq 1.5 T_0$ 에서는  $Z = \mu_\Delta$ 가 되어  $V_E^* = V_E$ 가 된다. 한편,  $T < 1.5 T_0$ 에서는 등가탄성응답은  $T$ 와 함께 감소하여  $T$ 가 0에 가까워지면  $V_E^* = V_E / \mu_\Delta$ 에 접근한다. 한계상태에 있어서 등가탄성가속도응답  $S_{ar(g)}$ 는 식 (10)으로 구할 수 있으며,  $W$ 는 설계진동 단위의 유효중량을 나타낸다.

$$S_{ar(g)} = \frac{V_E^*}{W} \quad (10)$$

전술한 과정을 〈그림 7, 8〉에 나타내었으며, 이와 같이 구한

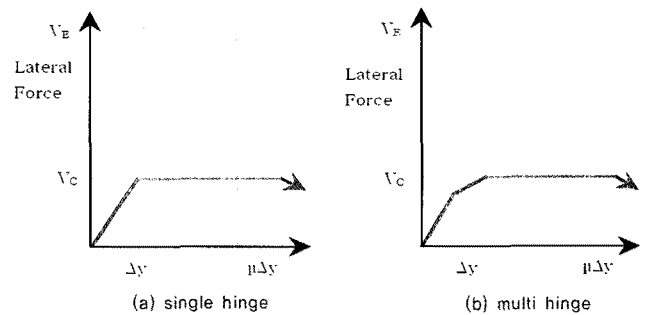


그림 7. 프레임 구조물의 등가탄성강도

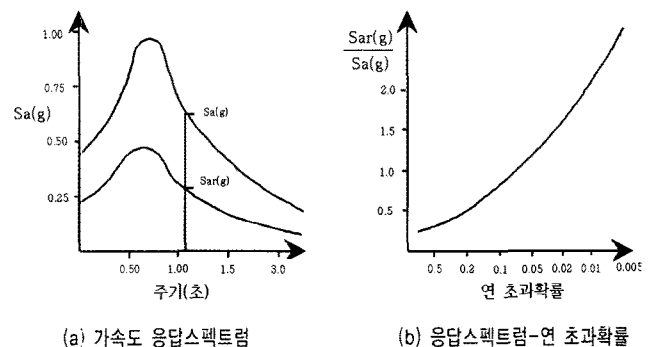


그림 8. 한계상태 응답가속도를 이용한 지진 위험도 결정

등가탄성가속도응답  $S_{ar(g)}$ 이 지닌 위험도는 <그림 8(a)>에 나타난 것과 같이 특정 년의 초과확률을 갖는 대상 지진의 응답스펙트럼과 비교하여 <그림 8(b)>에 나타난 것과 같이 연초과확률과  $S_{ar(g)}/S_{a(g)}$ 의 관계를 구하여 알 수 있다. 그러나 푸쉬오버 해석의 적용성은 한계가 있다. 인접하는 설계 진동 단위의 강성이 해당 설계 진동 단위의 강성과 크게 다르거나 가동 받침의 고정도가 큰 경우 단독 설계 진동 단위로서 구한 응답은 연성인 구조물에서 과대평가 되고 상대적으로 강성인 구조물에서는 과소평가 된다. 또, 비탄성 시간이력해석과 비교하면 푸쉬오버 해석은 구조계의 비틀림 응답 변위를 과대평가 하는 경향이 있다. 또한, 이 해석법에서는 상부 구조의 강성을 고려하는 것이 불가능하지는 않지만 매우 어렵다. 또, 개개의 교각에 대한 푸쉬오버 해석으로 구한 강성은 전체 구조계의 강성을 평가하기에는 부적절하다.

### 2.3.3 비선형 시간이력응답해석 방법

시간이력응답해석법은 특정 입력 지진 운동에 대한 교량의 응답을 시간이력으로 구하는 방법이다. 이 방법은 정적, 유사정적해석과 같이 선형모델, 비선형모델,  $P-\Delta$  효과와 같은 기하학적 비선형성이 생기는 모델, 대변형 비선형 모델을 취급할 수 있다. 시간이력해석 방법에는 ① 시간 영역에서의 단계별 적분, ② 모드중첩법, ③ 주파수 응답함수를 구하여 시간영역으로 변환하는 3가지의 방법이 있다. ②와 ③의 방법은 선형해석에 한정되는 방법으로 선형 영역의 시간이력응답해석을 수행하는 것은 설계 레벨에서는 그다지 중요하지 않다고 할 수 있다. 단계별 적분법은 시간이력응답해석법 중에서 가장 일반적인 방법으로 각 타임 스텝  $\Delta t$ 의 외력 펄스에 대한 구조물의 동적응답을 계산하는 방법이다. 외력의 시간계열  $P_{eff}(t)$ 는 시간폭  $\Delta t$ 의  $n$ 개의 타임 스텝으로 분할되고 충격력  $P_{eff}(t_i - t_{i+1})$ 에 대한 교량의 응답은 절점변위  $u(t_i)$ , 속도  $\dot{u}(t_i)$ , 가속도  $\ddot{u}(t_i)$ 의 초기조건이 주어지면 풀 수가 있다. 비선형 시간이력해석은 특정한 입력 지진 운동에 대한 응답을 구하는 것으로 대상 지점에 있어서의 지진 운동의 세기, 지속 시간, 주기 특성, 시공간적인 변화와 같이 불확정적인 요소를 많이 포함하고 있다. 따라서 비선형 시간이력응답해석을 이용하여 교량의 내진성능을 조사하기 위해서는 복수의 입력 지진 운동을 이용할 필요가 있다. 일반적으로 몇 개의 지진 단층을 선정하여 구한 지진 운동을 지반 조건을 고려하여 수정하여 다수의 입력 지진 운동을 준비한다. 예를 들면 UBC(uniform building code)<sup>41</sup>에서는 3개의 입력 지진 운동에 대한 응답의 최대치 또는 7개 입력 지진 운동에 대한 응답의 평균치를 설계에 고려하도록 권장하고 있다. 이외에 특정한 응답스펙트럼 특

성을 지닌 시간이력 파형을 이용하는 것도 가능하다. 입력 지진 운동은 구조물의 동 특성이나 동적 상호작용과 같은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 시간이력응답해석은 내진성능 평가의 마지막 단계에서 이용하는 것이 바람직하다.

### 2.3.4 역량스펙트럼(capacity spectrum) 방법

<그림 9>는 역량스펙트럼 방법의 개념을 나타낸 것으로, 역량스펙트럼 방법은 비선형해석(push-over analysis)으로 얻을 수 있는 대상 구조물 전체의 성능곡선(capacity curve)과 구조물의 설계 지진 레벨에 대한 응답스펙트럼을 동일한 그래프 상에서 도식적으로 비교함으로써 내진성능을 평가하는 방법이다. 즉, 구조물의 비선형 거동에 따른 소요 응답스펙트럼과 구조물의 성능 곡선을 가속도-변위 응답스펙트럼(acceleration displacement response spectrum, ADRS) 상에 함께 도시하여 내진성능을 평가하는 방법으로 구조물의 전체적인 하중-변위 곡선(capacity curve)과 설계 지진에 대한 응답스펙트럼(demand curve)을 동일한 그래프(capacity spectrum)상에 변환시켜 비교함으로써 내진성능을 평가한다. 이때 구조물의 하중-변위 곡선은 비선형정적해석으로 얻을 수 있고 설계응답스펙트럼은 구조물의 목표 성능에 따라 주어진다. 여기서, 역량스펙트럼(capacity spectrum)이 소요스펙트럼(demand spectrum)을 상회하면 구조물의 내진성능이 확보된 것으로 간주할 수 있다. 역량스펙트럼 평가 방법에 대해서는 3장에 상세하게 기술하였다.

## 3. 역량스펙트럼(capacity spectrum) 평가 방법

### 3.1 공급역량(capacity)

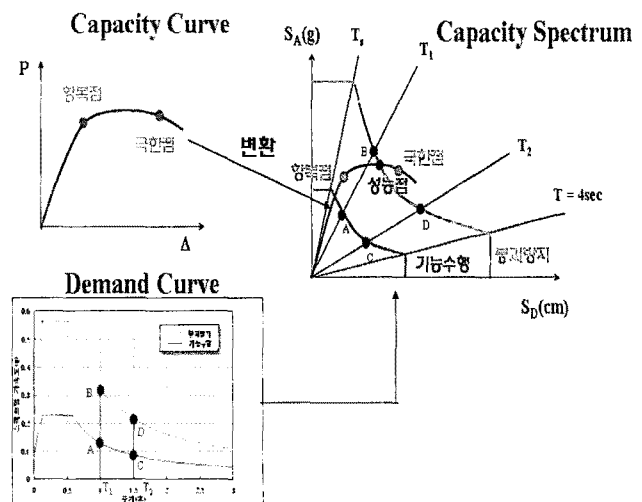


그림 9. 역량스펙트럼 방법의 개념

공급역량스펙트럼은 교각의 단면 강도 및 수평 변위를 식 (11)과 식 (12)를 이용하여 응답가속도( $S_a$ )-응답변위( $S_d$ )의 관계식으로 변환하여 구할 수 있다.  $P_n$ 은 단면강도,  $W$ 는 유효중량,  $\Delta_{상부}$ 는 교각 상부 위치에서의 변위이다.

$$S_a = P_n / W \quad (11)$$

$$S_d = \Delta_{상부} \quad (12)$$

교각의 단면 강도-변위 관계식은 푸쉬오버 해석으로 구할 수 있다. 교각 구조물과 같이 단일 질점계로 이상화 할 수 있는 구조물에서의 공급역량은 기초 전단력( $P$ )-상부 변위( $\Delta$ )의 관계식으로 직접적으로 표현할 수 있다. 상부 질점에 하중을 단조 증가시켜 대응하는 기초 전단력을 얻어 도시하면 된다. 비선형해석 프로그램(예를 들어 DRAIN-2DX)을 사용하면 반복 계산 없이 푸쉬오버 해석을 직접 수행할 수 있으며, 비선형해석 프로그램을 이용하지 않고 <그림 10>과 같이 단면 해석을 수행하여 모멘트-곡률 곡선을 구성하고 경험식을 이용하여 <그림 11>과 같이 공급역량(힘-변위) 곡선을 결정할 수도 있다.

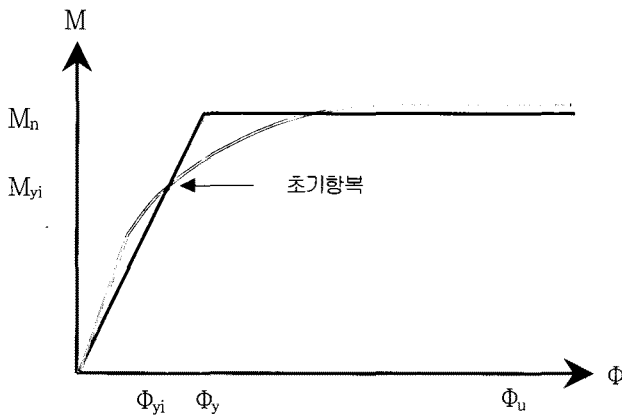


그림 10. 모멘트-곡률 관계 곡선

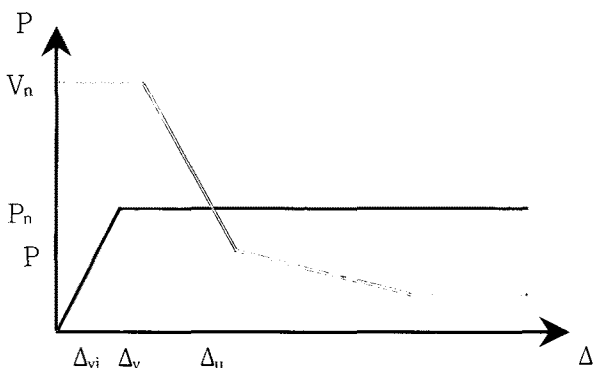


그림 11. 힘-변위 관계 곡선

### 3.1.1 휨강도 산정(초과강도 고려)

교각의 최대 수평 저항력은 교각의 휨강도를 교각의 높이로 나누어 산정할 수 있다. 내진성능 평가를 위한 교각의 휨강도는 설계시와 달리 재료의 실제 예상강도(expected strength)를 고려하여 산정한다. 이는 교각 자체가 보유하고 있는 강도를 현실적으로 평가할 뿐만 아니라 교각의 초과강도(over-strength)에 의해서 다른 부재로 전달되는 지진력을 과소평가하지 않기 위해서이다. <그림 12>는 초과강도의 개념을 나타낸 것으로, 교각 하부로 전달되는 상부구조의 관성력은 교각이 발휘할 수 있는 최소소성모멘트에 해당하는 전단력을 초과하지 못한다. 즉 지진하중 작용에 의해 교각에 소성힌지가 발생하는 경우 설계전단력은 <그림 12>에 나타낸 것과 같이  $V_o^{pl}$ 을 사용하는 것이 합리적이며  $V_o^{pl}$ 은 소성힌지 구역 단면의 최대소성모멘트  $M_o^{pl}$ 에 의해 결정된다. AASHTO LRFD<sup>5)</sup>를 비롯한 외국의 설계기준에서는 최대소성모멘트  $M_o^{pl}$ 에 관한 구체적인 조항을 명시하고 있으나 국내 도로교설계기준<sup>6)</sup>에서는 그 규정이 없는 상태이다. 따라서 국내의 경우 우리나라에서 사용하는 철근의 인장강도 측정치 3,407개와 콘크리트 압축강도 측정치 5,405개의 분석을 통하여 이재훈 등<sup>7)</sup>이 제안한 다음의 두 가지 방법을 사용하여 최대소성모멘트  $M_o^{pl}$ 를 결정할 수 있다.

- 방법 1 : 설계기준 압축강도의 1.7배인 콘크리트 압축강도와 설계기준 항복강도의 1.3배인 축방향철근 항복강도를 적용하고 소성힌지 구역 횡방향철근의 심부구속 효과와 축하중의 영향을 고려한 단면의 휨강도로서 모멘트-곡률 해석을 수행한다.
- 방법 2 : 콘크리트 설계기준압축강도가 60 MPa 이하이고 계수축하중이  $0.3f_{ck}A_g$  이하이며, 축방향철근비가 0.3 이하인 교각의 경우에는 모멘트-곡률 해석을 수행하는 대신 콘크리트의 등가직사각형 응력분포를 이용한 축력-휨강도 해석으로 구한 공칭휨강도의 1.5배를 휨 초과강도로

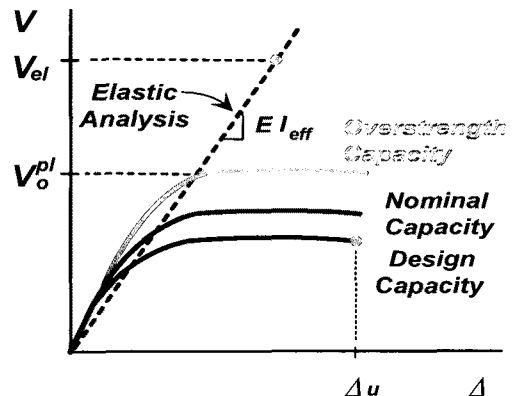


그림 12. 초과 강도 개념

취할 수 있다.

### 3.1.2 항복 변위 및 유효강성

대상 교각의 항복 변위,  $\Delta_y$ 는 다음 식(13)에 따라 산정한 다.  $\phi_y$ 는 최외단 인장철근의 항복시 곡률,  $L$ 은 교각 길이,  $E_c I_{eff}$ 는 항복유효강성이다.

$$\Delta_y = \frac{\phi_y \times L^2}{3} = \frac{M_o^pl \times L^2}{3 \times E_c I_{eff}} \quad (13)$$

지진하중 작용에 따라 기둥에 소성힌지가 발생하여 응답수정계수를 적용하는 경우에는 <그림 13>과 같이 전단면강성보다 RC 교각의 항복점을 연결한 항복유효강성을 사용하는 것이 합리적이다. 유효강성은 모멘트-곡률 비선형해석을 수행하여 합리적인 방법으로 산정할 수 있으나 콘크리트 구조에 관한 전문적인 지식이 요구되고, 특히 실무에서 매번 이러한 비선형해석을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 유효강성 산정은 축방향철근비와 축력비를 변수로 이재훈 등<sup>10</sup>이 제안한 항복유효강성식(식 (14))을 사용하는 것을 추천하며 경우에 따라서는 ATC-32<sup>9</sup>, Eurocode 8 Part 2<sup>10</sup>와 같은 외국 기준과 Priestley 등<sup>11</sup>이 제안한 <그림 14>의 유효강성 도표를 참고할 수 있을 것이다.

$$E_c I_{eff} = \left( 0.16 + 12\rho + 0.3 \sqrt{\frac{P}{f_{ck} A_g}} \right) E_c I_g \quad (14)$$

### 3.1.3 휨과괴에 대한 극한변위

대상 교각의 휨과괴에 대한 극한변위( $\Delta_{uf}$ ) 계산은 변위연성도( $\mu_\Delta$ )와 항복변위( $\Delta_y$ )의 곱인 식 (15)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$\Delta_{uf} = \mu_\Delta \times \Delta_y \quad (15)$$

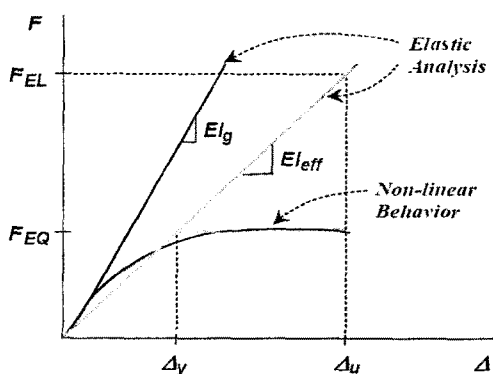


그림 13. 항복유효강성 개념

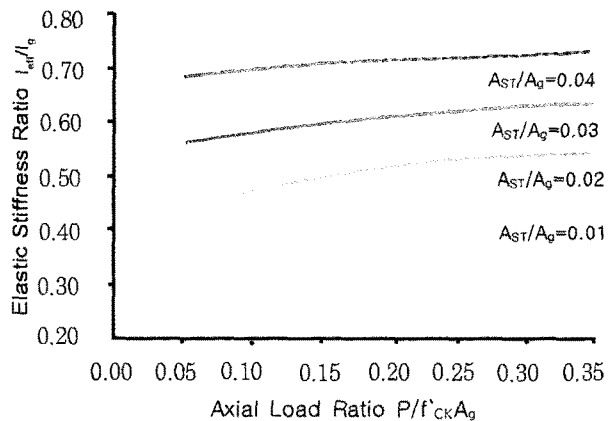


그림 14. 항복유효강성 도표(원형기둥)

변위연성도,  $\mu_\Delta$ 는 대상 교각의 소성힌지영역 심부구속철근비와 관련이 있으며 연성도를 주요 변수로 제안된 다음의 대표적인 제안식을 사용하여 결정할 수 있다. 본 기사에서는 내진성능평가를 위한 제안식을 소개하는데 중점을 두고 있으므로 보다 자세한 내용과 주요 변수들의 설명은 참고문헌을 참고하기 바란다.

#### 1) 손혁수와 이재훈의 제안식

손혁수와 이재훈은 RC 교각의 준정적실험 결과와의 검증을 통해 개발한 비선형해석 프로그램(NARCC)<sup>12</sup>를 이용하여 RC 교각의 내진성능에 영향을 미치는 변수들을 조합한 7,200개의 기둥에 대한 21,600개의 해석 결과를 비교, 분석하여 식 (16)과 같은 변위연성도와 곡률연성도 상관관계 제안식<sup>13</sup>과 식 (17) ~ (20)과 같은 곡률연성도를 고려한 심부구속철근비 산정식<sup>14</sup>을 제안하였다. 사각형 단면 기둥에 대해서는 식 (21)을 적용할 수 있다.

$$\mu_\Delta = 0.20 \left( 1.1 + \frac{D}{L} \right) \mu_\phi + 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left( \frac{D}{L} \right) \right\} \quad (16)$$

$$\rho_s = 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \cdot \alpha \cdot \beta + \gamma \quad (17)$$

$$\alpha = \left[ 3(\mu_\phi + 1) \frac{P_u}{f_{ck} A_g} + 0.8\mu_\phi - 3.5 \right] \quad (18)$$

$$\beta = \frac{f_y}{350} - 0.12 \quad (19)$$

$$\gamma = 0.1(\rho_l - 0.01) \quad (20)$$

$$A_{sh} = 0.9 \cdot a \cdot h_c \left[ 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \alpha \cdot \beta + \gamma \right] \quad (21)$$



2) 박창규와 정영수의 제안식

박창규와 정영수<sup>15-17)</sup>는 RC 교각에 대한 국내의 실험 결과를 토대로 RC 교각의 내진성능 평가를 위해 실험 결과들의 평균값으로부터 유도된 소요심부구속철근비에 따른 요구변위연성도 산정식을 제안하였다. 식 (22)는 원형 RC 교각의 내진성능 평가를 위한 제안식을, 식 (23)은 사각 단면 RC 교각의 내진성능 평가를 위한 제안식을 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라서 콘크리트의 탄산화에 따른 강도 감소나 피복콘크리트 균열 및 유실에 따른 총단면적 감소, 주철근 및 심부구속철근의 노출로 인한 부식으로 강도 감소 및 철근 단면적 감소를 고려하여 식 (22)와 식 (23)을 적용할 때에는 성능 평가 시점에 보유하고 있는 물성값을 반영하는 것이 바람직하다. 제안식의 아래첨자 "r"은 성능 평가 시점에 보유하고 있는 값을 의미한다.

$$\mu_{\Delta,R} = 1 + \frac{\rho_{s,r}}{0.42 \frac{f_{c,r}}{f_{yh,r}} (A_r - 1) \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} + 0.46 (\rho_{\ell,r} - 0.01) \left( \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} \right)^{1.5}} \quad (22)$$

$$\mu_{\Delta,R} = 1 + \frac{\rho_{s,r}}{0.28 \frac{f_{c,r}}{f_{yh,r}} (A_r - 1) \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} + 0.73 (\rho_{\ell,r} - 0.01) \left( \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} \right)^2} \quad (23)$$

3.1.4 전단 성능 곡선

RC 교각의 파괴 형태는 <그림 15>에 나타낸 것과 같이 휨 파괴, 휨-전단파괴 및 전단파괴로 구분할 수 있다. 일반적으로 전단지간-두께 비율(캔틸레버 교각은 형상비와 동일함)이 1.5~3.0 내외인 교각의 경우는 초기에는 휨 거동을 보이다가 최종 단계에서는 전단에 의해 파괴되는 휨-전단 거동을 보인다. 이러한 형상비의 교각이 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995) 등에서 전단 또는 휨-전단 복합거동에 의하여 파괴된 사례가 보고 된 후, 전단파괴, 휨-전단 파괴, 휨파괴 등으로 구분되는 파괴 형태를 예측하고, 휨-전단

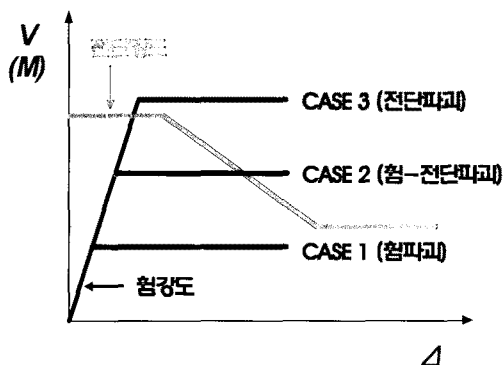


그림 15. RC 교각의 파괴 형태

작용에 의한 극한변위를 예측하기 위한 모델이 개발되었다. 이러한 모델은 변위연성도에 따른 전단강도의 변화를 나타내는 전단 성능 곡선 모델로서, 휨거동 해석(모멘트-곡률 해석 또는 push-over 해석)에 의한 휨 성능 곡선(휨하중-변위 성능 곡선)에 적용하여 RC 교각의 내진성능(연성 능력 및 극한 변위)을 평가하는데 이용된다. 전단강도만을 검토하는 기존의 전단 설계법과는 다른 이런 새로운 개념과 모델이 필요한 이유는 다음과 같이 두 가지로 정리될 수 있다.

- ① 지진하중에 의하여 소성힌지가 발생하는 경우에는 반복 하중 작용에 따라 심부 콘크리트의 손상이 증대되어 단조 증가 하중이 작용하는 경우보다 전단강도가 감소하기 때문에 기존의 일반 하중에 대한 전단강도 계산법으로는 오차가 크다.
- ② 휨-전단파괴가 발생하는 경우 휨작용과 전단작용 간의 지배거동의 정도에 따라 극한(파괴)변위가 다르므로 변위를 고려하지 않고 전단강도만을 검토하는 기존의 전단설계법으로는 합리적인 내진 전단설계법으로의 발전이 제한적이다.

따라서 변위연성도를 고려하여 전단강도가 변화하는 전단 성능곡선 모델이 개발되어왔으며, 현행 도로교설계기준이나 AASHTO에는 채택되어 있지 않지만, 미국 캘리포니아주 교통국(CALTRANS)의 Seismic Design Criteria<sup>18)</sup>에는 Priestley 등<sup>11)</sup>이 제안한 모델을 채택하고 있으며, 이와 같은 모델은 교각의 내진설계뿐만 아니라 기존 교각의 내진성능 평가에도 유용하게 적용되고 있다.

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (24)$$

$$V_c = k \sqrt{f_c'} A_e \quad (25)$$

$$\left( \begin{array}{l} \mu_{\Delta} \leq 2 : k = 0.3 \\ 2 \leq \mu_{\Delta} \leq 5 : k = 0.3 - \frac{1}{10}(\mu_{\Delta} - 2) \\ 5 \leq \mu_{\Delta} : k = 0 \end{array} \right) \quad (26)$$

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sp} f_{yh} D_{sp}}{s} \cot 40^\circ \quad (27)$$

$$V_p = 0.85 P \tan \alpha = 0.85 P \frac{D}{3L} \quad (28)$$

식 (24) ~ (28)은 Priestley 등이 제안한 모델을 기본 형태로 이재훈 등이 제안한 수정 전단 성능곡선모델<sup>19)</sup>을 나타낸 것이다. <그림 16>은 전단성능곡선 모델 제안식과 정영수 등<sup>20)</sup>

에 의해 수행된 실험 결과(직경 1.2m의 실물 시험체)를 비교하여 나타낸 것으로서, 특히 교각의 형상비가 상대적으로 작은 경우, 현행 설계기준의 전단강도설계법은 RC 교각의 내진성능을 과대평가할 우려가 있으므로 합리적이며 보다 정확한 내진성능 평가를 위해서는 전단성능곡선 모델을 이용한 성능 평가가 수행되어야 할 것이다.

### 3.2 소요역량(demand)

일반적으로 가속도( $S_a$ )와 주기( $T$ )의 관계식으로 주어진 설계응답스펙트럼을 <그림 17>과 같이 가속도( $S_a$ )-변위( $S_d$ )의 관계식으로 변환한다. 이때, 원점을 통과하는 방사 형태의 직선상의 점은 주기가 동일하며, 주기  $T = 2\pi\sqrt{S_d/S_a}$ 의 관계식으로 표현된다.

### 3.3 성능점 산정

소요역량스펙트럼은 교각의 소성 변형이 커져 이력 감쇠가 증가하면 감소하게 된다. 이력 감쇠는 교각이 한 사이클의 하중을 받을 경우 내부 면적으로부터 산정할 수 있지만, 간편하게 교각의 거동이 다케다 모델을 따른다고 가정하는 경우 식 (29)와 같이 변위연성도에 따라 산정할 수 있다.

$$\beta_{eff} = 0.05 + \frac{1 - (1 - r)/\sqrt{\mu} - r\sqrt{\mu}}{\pi} \quad (29)$$

여기서, 0.05는 구조물 본래의 점성감쇠비,  $\mu$ 는 변위연성도를 의미한다.  $r$ 은 초기강성에 대한 항복 후의 2차 강성비로 전

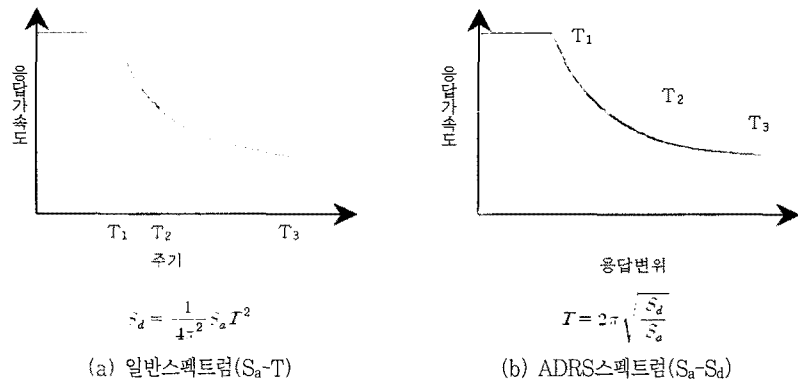


그림 17. 구조물에서의 일반적인 응답변위스펙트럼과 ADRS

형적인 구조물에서는 대략 0.05 정도의 값을 나타낸다. 감쇠의 증가에 따른 스펙트럼의 감소는 식 (30)과 같이 감소계수  $SR_A$ ,  $SR_V$ 를 도입하여 <그림 18>과 같이 소요역량에 곱함으로써 구할 수 있다.

$$SR_A \approx \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (30a)$$

$$SR_V \approx \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (30b)$$

### 3.4 내진성능 평가

<그림 19>는 역량스펙트럼법에 의한 내진성능 평가 예를 나타낸 것으로 다음과 같이 평가할 수 있다.

- 1) Case A : 역량스펙트럼의 항복점이 기능 수행 수준의 소요스펙트럼을 상회하고, 역량스펙트럼의 극한점이 붕괴 방지수준의 소요스펙트럼을 상회하고 있으므로 기능 수행 수준과 붕괴 방지 수준의 목표 내진성능 모두 만족함.
- 2) Case B : 역량스펙트럼의 항복점은 기능 수행 수준의

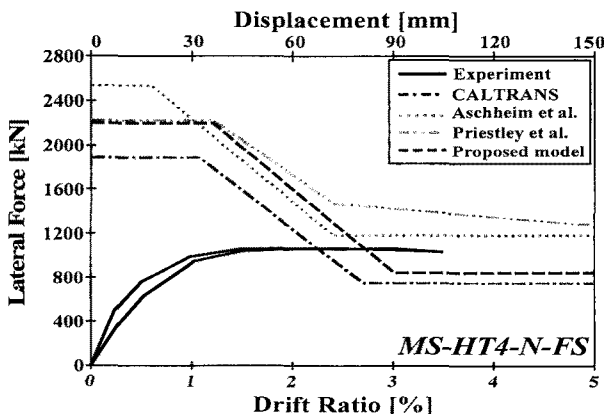


그림 16. 전단 성능 곡선 모델 비교

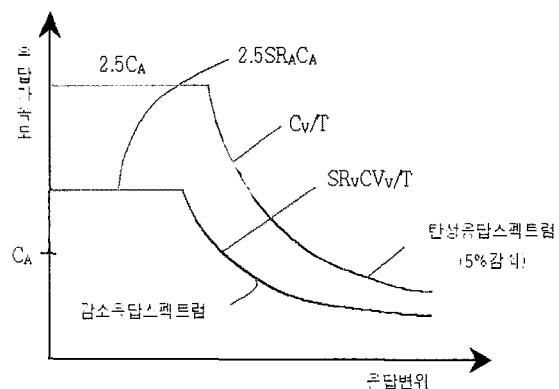


그림 18. 감소된 응답 스펙트럼

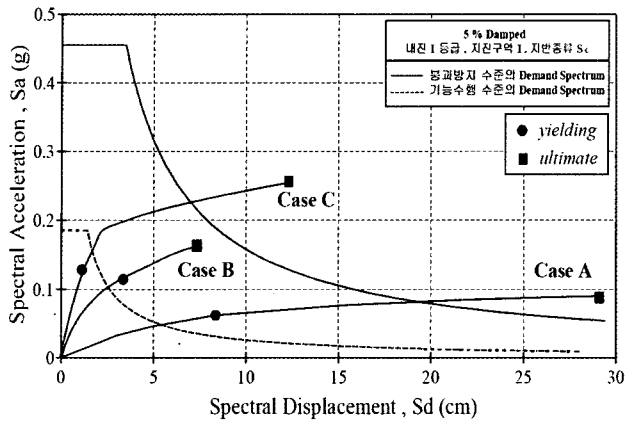


그림 19. 역량스펙트럼 방법을 이용한 내진성능 평가 예

소요스펙트럼을 상회하나, 역량스펙트럼의 극한점이 붕괴 방지수준의 소요스펙트럼에 미치지 못하므로 붕괴 방지 수준의 목표 내진성능을 만족하지 못함. 즉, 소요 지진력에 대해 요구되는 연성 능력이 충분하지 못한 경우이므로 연성 능력을 향상시키기 위한 대책이 필요함.

- 3) Case C : 역량스펙트럼의 극한점은 붕괴 방지 수준의 소요스펙트럼을 상회하나, 역량스펙트럼의 항복점이 기능 수행 수준의 소요스펙트럼에 미치지 못하므로 기능 수행 수준의 목표 내진성능을 만족하지 못함. 즉, 소요 지진력에 대해 요구되는 연성 능력은 충분하나 단면의 강도가 부족한 경우로 단면강도를 증가시키기 위한 대책이 필요함.

#### 4. 맺음말

RC 교각은 재료 강도, 단면 상세 및 교각의 구조 형식 그리고 교량 전체 시스템의 형식 등 많은 변수들에 의해서 교각의 내진성능이 좌우된다. 내진성능 평가 방법에 있어서도 기술적인 분야와 함께 사회적, 경제적 및 정책적 분야를 종합적으로 고려한 내진성능 평가 시스템이 요구된다. 특히 지진하중에 대한 정량적 크기와 특성을 정확하게 예측할 수 없는 불확실성과 RC 교각의 내진 거동에 관해 명확히 구명되지 않은 부분이 존재하는 한 내진 설계와 내진성능 평가 분야의 연구는 현재에도 그리고 향후에도 지속적으로 수행될 것이다. 본 기사에서는 RC 교각의 내진성능 평가에 관한 국내외에서 수행된 최근의 연구 결과들에 대한 소개와 함께 RC 교각의 내진성능 평가를 위해 필요한 기술적 내용에 대해 중점적으로 기술하였다. 본 기사가 국내 RC 교각의 내진성능 평가에 관한 기술 향상에 도움이 되기를 기대하며, 아울러 실무 기술자들이 좀 더 쉽고 명확하게 RC 교각의 내진성능 평가에 관해 이해하고 실무에 적용하는데 도움이 되기를 희망한다. □

#### 참고문헌

1. *Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges*, U.S. Department Transportation Federal Highway Administration Report No.FHWA-IP-87-6, 1987.
2. *Prioritization of Bridges for Seismic Retrofitting*, NCEER-95-0007 Report, 1995.
3. ATC-6-2, *Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges*, Applied Technology Council, 1983, 220pp.
4. ICBO, *Uniform Building Code, International Conference of Building Officials*, Whittier, CA, 1997.
5. AASHTO, *AASHTO LRF Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 4th edition, Washington, D.C., USA, 2007.
6. 한국도로교통협회, 건설교통부 제정, 도로교설계기준, 2005.
7. 이재훈, 고성현, 최진호, "철근콘크리트 교각의 성능보장설계를 위한 휨 초과강도", 한국지진공학회논문집, 10권 5호, 2006, pp.85~97.
8. 이재훈, 배성용, "철근콘크리트 원형교각의 설계지진력 해석시의 항복 유효강성", 대한토목학회 논문집, 21권 5-A호, 2001, pp.719~728.
9. ATC-32, *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, Applied Technology Council, California, USA, 1996.
10. Eurocode 8 Part 2, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures-Bridges*, European Committee for Standardization, 1996.
11. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
12. 손혁수, 이재훈, "철근콘크리트 교각의 연성도 평가를 위한 비선형해석", 한국지진공학회논문집, 7권 4호, 2003, pp.39~49.
13. 손혁수, 이재훈, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 연성도 상관관계", 한국지진공학회논문집, 7권 4호, 2003, pp.51~61.
14. 손혁수, 이재훈, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 소요연성도에 따른 심부구속철근량", 콘크리트학회 논문집, 15권 5호, 2003, pp.715~725.
15. 박창규, 이대형, 이범기, 정영수, "원형철근콘크리트 교각의 내진성능(II)-심부구속철근비 제안", 콘크리트학회 논문집, 17권 5호, 2005, pp.775~784.
16. 박창규, 정영수, 이대형, "변위연성도 기반 철근콘크리트 교각의 한정연성 내진설계법과 성능평가 방법", 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp.19~26.
17. 박창규, 정영수, 윤상철, "사각단면 철근콘크리트 교각의 심부구속철근비 제안", 콘크리트학회 논문집, 18권 6호, 2006, pp.749~757.
18. Caltrans, *Seismic Design Criteria V.1.4*, California Department of Transportation, Sacramento, 2006.
19. 이재훈, 고성현, 정영수, "지진하중을 받는 철근콘크리트 원형교각의 전단성능곡선 모델", 한국지진공학회논문집, 10권 5호, 2006, pp.85~97.
20. 정영수, 이재훈, 김재관, "고속도로 기준 교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구", 한국도로공사 연구보고서, 2001, 397pp.