# 역량스펙트럼법을 이용한 교량의 내진성능평가

# Evaluation of Seismic Performance for Bridge Structure Using Capacity Spectrum Method

이창수* 김승익** 김현겸***
Lee, Chang Soo Kim, Seung Ik Kim, Hyeon Kyeom

ABSTRACT

Evaluation method of seismic performance has mainly used elastic spectrum analysis. This method has simplicity of analysis but deficiency of accuracy. And evaluation method of seismic performance using inelastic dynamic analysis reflects accurately inelasticity of material but hardly reflects site effects.

This study suggested evaluation scheme of seismic performance for bridge structure using capacity spectrum method applied inelastic static analysis and standard design response spectrum of Korea Standard Specification for Highway Bridge.

Two results, capacity spectrum method and inelastic dynamic analysis method, are very similar. As a result, this study appropriately supply both simplicity of analysis and accuracy of result.

## 1. 서론

최근 여러나라에서 지진재해로 인한 수많은 피해가 발생하고 있으며, 다양한 조사로부터 우리나라 또한 지진의 안전지대라 할 수 없는 공감대의 확산으로 지진재해에 대비한 다양한 내진성능 평가방법 및 내진설계방법이 수행되고 있는 현실이다.

현재 많이 사용되는 탄성스펙트럼해석법을 이용한 내진성능 평가방법은 정적탄성해석을 수행하므로 성능평가가 단순하고 간편하지만, 지반운동 지속시간과 비탄성영역의 거동이 전혀 고려되지 않으므로 과잉평가가 이루어질 수 있는 문제점이 있다. 또한, 비탄성시간이력해석법에 의한 내진성능 평가방법은 재료의 비탄성 특성을 정확히 고려할 수 있으나, 특정지진에 대한 지반가속도를 사용하므로 대상부지의 특성을 적용하기가 곤란한 문제점이 있다.

*정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수
**정회원, 후레씨네 코리아 기술부 상무이사
***정회원, 서울시립대학교 대학원 석사과정

본 논문에서는 재료의 비탄성 특성을 고려한 정적비탄성해석과 대상부지의 특성을 고려한 시방규정의 표준설계응답스펙트럼을 이용하여 역량스펙트럼법으로 간편성과 정확성을 적절히 갖춘 합리적인 내진성능 평가방안을 제시한다.

## 2. 역량스펙트럼에 의한 내진성능평가

탄성이론에 의한 평가방법의 보완을 위하여 근래에 소개된 방법으로 전체구조계에 일방향 가력해석(push-over analysis)을 수행하여 붕괴될 때까지의 힘-변위곡선을 얻어 붕괴되지 않고 설계지진에 얼마만큼 저항할 수 있는가를 판단하는 방법이다. 이 방법은 비탄성영역의 거동을 충분히 고려할 수 있고 모든 성분의 하중도 고려할 수 있다.

역량스펙트럼은 일방향 가력해석에 의한 보유역량곡선과 설계지진에 의한 소요역량스펙트럼을 하나의 역량스펙트럼으로 변환하여 내진성능을 평가하는 방법이다. 이 스펙트럼의 특징은 방사형 주기축을 가지고 있다는 점이다. 또한, 가속도와 변위를 축으로 사용하므로 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)라고도 한다.

역량스펙트럼법에 의한 내진성능 평가방법의 흐름을 Fig. 2.1로 나타내었다.

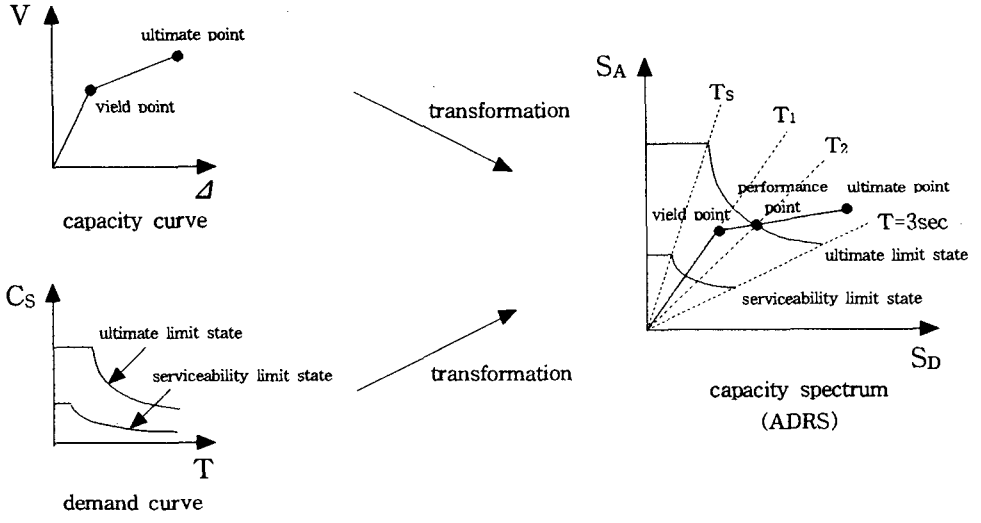


Fig. 2.1 Transformation process of capacity spectrum

보유곡선에서 밑면전단력은 ADRS에서 스펙트럴(spectral) 가속도($S_A$)로 변환되고, 변위는 스펙트럴 변위($S_D$)로 변환된다.

$$S_A = \frac{V}{W} \times g \quad (m/\sec^2) \quad , \quad S_D = \Delta \qquad \text{(Eq. 2.1)}$$

여기서, W : 자중

g : 중력가속도

소요곡선은 도로교표준시방서(1996)에서 제시하는 표준설계응답스펙트럼으로부터 얻어진다. 소요곡선을 역량스펙트럼으로 전환하는 과정에서 곱해지는 가속도 증폭계수는 입력지반가속도와 시간이력해석 결과의 교각상단 가속도의 비를 사용하였다.

$$S_A = C_S \times g \times mf \quad , \quad S_D = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \times S_A \qquad \text{(Eq. 2.2)}$$

여기서, $C_S$ : 탄성지진응답계수

mf : 가속도 증폭비

T : 고유주기

보유곡선(capacity curve)과 소요곡선(demand curve)은 위의 식들을 사용하여 ADRS로 변환된다.

ADRS에서 보유역량스펙트럼이 소요역량스펙트럼보다 상회하면 현재 내진성능은 만족되고 있다고 판단한다. 역량스펙트럼을 이용한 내진성능 평가기준을 Table 2.1로 나타내었다.

Table 2.1 Standard of evaluation of seismic performance

| | 기능수행 수준 | 붕괴방지 수준 | 성능평가 | | 기능수행 수준 | 붕괴방지 수준 | 성능평가 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 항복점 | 내부 | | 내하성능 불만족 내진성능 불만족 | 항복점 | 내부 | | 내하성능 불만족 내진성능 만족 |
| 극한점 | | 내부 | | 극한점 | | 외부 | |
| 항복점 | 외부 | | 내하성능 만족 내진성능 불만족 | 항복점 | 외부 | | 내하성능 만족 내진성능 만족 |
| 극한점 | | 내부 | | 극한점 | | 외부 | |

## 3. 해석예제

해석예제는 충청북도 단양군에 소재한 F.C.M.으로 시공된 총 연장 397m의 5경간 연속라멘교로서 1985년에 준공된 내하1등급 교량이다. 전체교량의 개요와 유한요소모델을 Fig. 3.1과 Fig. 3.2로 나타내었다.

본 연구에 사용된 역량스펙트럼법의 신뢰성을 알아보기 위하여 소요곡선에서 사용된 가속도계수와 동일한 크기의 최대지반가속도를 갖는 지반가속도 시간이력을 사용하여 비탄성시간이력해석을 수행하여 비교하였다.

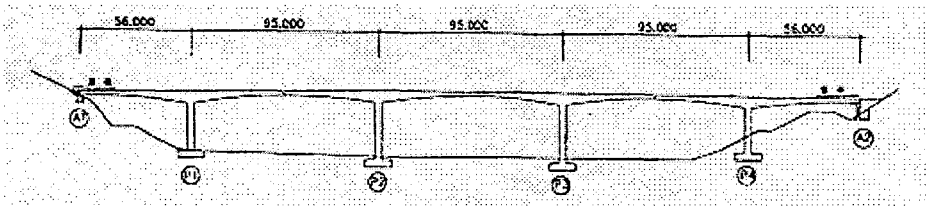


Fig. 3.1 Profile of the bridge

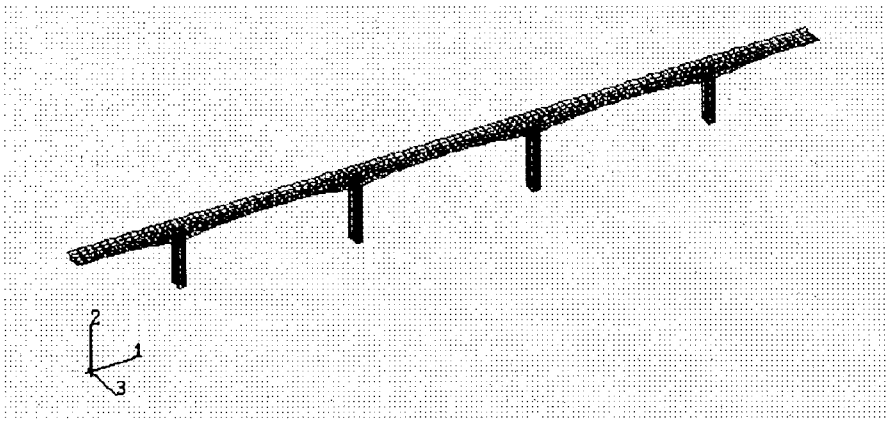


Fig. 3.2 Finite element model of the bridge

### 3.1 역량스펙트럼 작성

각각의 교각상단에 동일한 힘을 교축방향(이하 SJBR1)과 교축직교방향(이하 SJBR3)으로 재하하여 보유곡선들을 얻었다. 이들을 Fig. 3.3과 Fig. 3.4에 나타내었다.

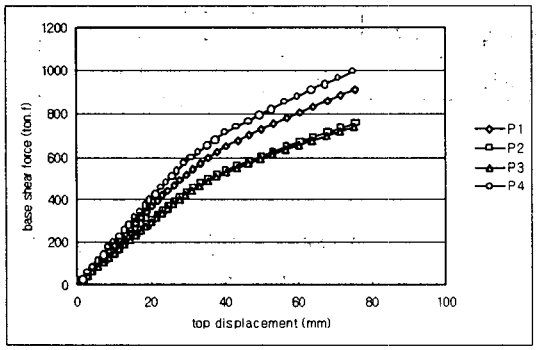


Fig. 3.3 Capacity curves about SJBR1

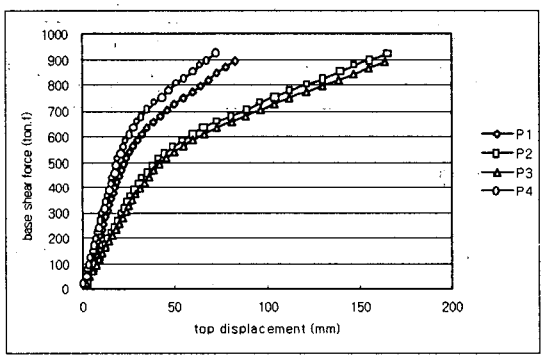


Fig. 3.4 Capacity curves about SJBR3

내진성능평가의 판단기준을 얻기 위하여 도로교표준시방서(1996)의 내진설계기준을 사용하여 소요곡선을 얻었다. 충청북도에 소재하고 중요국도상의 교량이므로 내진1등급교의 가속도계수 A=0.14를 적용하고, 지반은 type I 에 해당되어 지반계수 S=1.0을 적용하였다. 이를 Fig. 3.5로 나타내었다. 또한, 소요곡선을 역량스펙트럼으로 변환하는 과정에서 곱해지는 가속도 증폭비를 Table 3.1에 정리하였다.

Table 3.1 Acceleration magnification ratio

| | 교축방향 (SJBR1) | | 교축직교방향 (SJBR3) | |
|---|---|---|---|---|
| | P3 | P4 | P3 | P4 |
| 가속도 증폭비 | 1.49 | 1.38 | 2.33 | 2.30 |

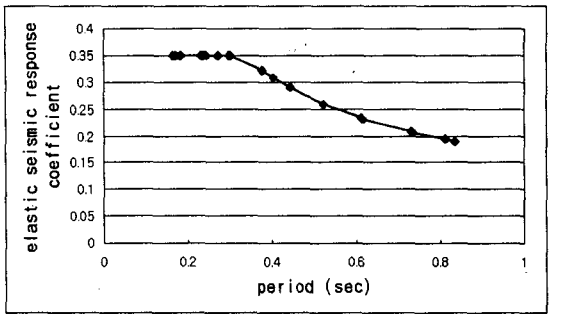


Fig. 3.5 Demand curve for evaluation of seismic performance for bridge

하중작용의 두 경우(SJBR1, SJBR3)에 대한 각각 4개의 교각에 대한 보유곡선들과 교량의 내진성능 평가의 판단기준이 되는 소요곡선들을 Eq. 2.1과 Eq. 2.2를 사용하여 역량스펙트럼으로 전환하였다. Fig. 3.3과 Fig. 3.4에서 최상단을 보이는 교각 P4와 최하단을 보이는 교각 P3에 대한 역량스펙트럼을 Fig. 3.6과 Fig. 3.7에 나타내었다.

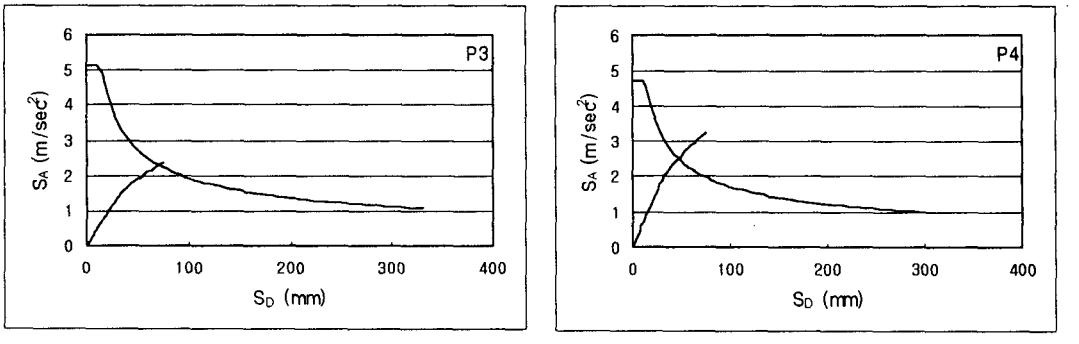


Fig. 3.6 ADRS about SJBR1

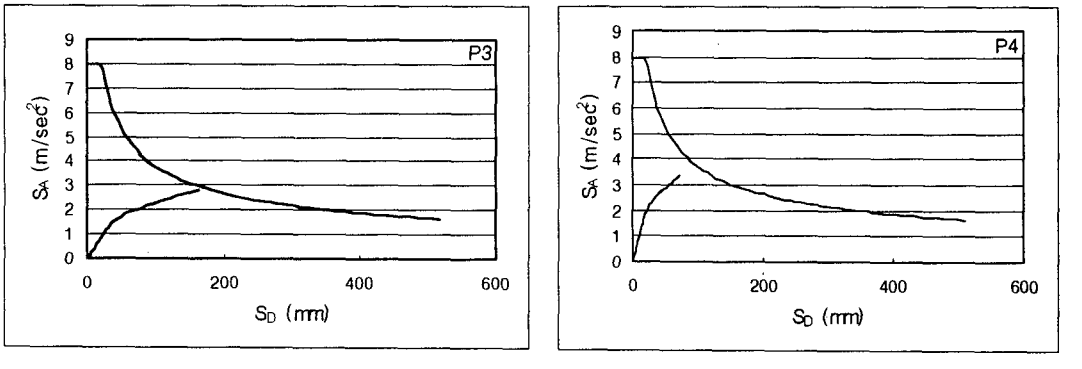


Fig. 3.7 ADRS about SJBR3

### 3.2 해석결과 및 검토

역량스펙트럼을 이용한 내진성능평가에서 SJBR1의 교각 P3은 소요의 내진성능을 만족하나 안전률이 매우 부족한 것으로 판단되었고, SJBR3의 교각 P4는 내진성능이 매우 부족한 것으로 판단되었다.

비탄성시간이력해석을 수행한 결과, SJBR1과 SJBR3 모두 입력지진하중 지속시간인 24초를 견디지 못하고 6.72초, 6.74초에 각각 해석이 종료되었고, 그 때까지의 지반가속도 최대값은 두 경우 모두 0.120g로 나타났다. SJBR1은 P3에서 첫번째 소성힌지가 발생하였고, SJBR3에서는 P4에서 발생하였다. 각각에 대한 소성힌지 발생을 Fig. 3.8에 나타내었다.

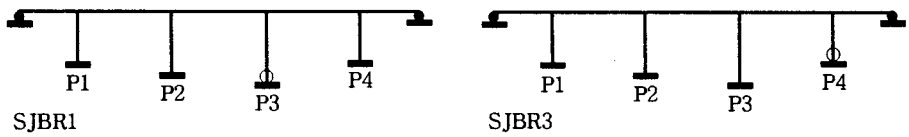


Fig. 3.8 Collapse mechanism by seismic load

## 4. 결론 및 추후연구과제

정적비탄성해석과 표준설계응답스펙트럼을 역량스펙트럼에 적용한 내진성능평가와 동일한 조건의 지반가속도를 주어 비탄성시간이력해석을 통한 내진성능평가가 서로 유사한 결과를 나타내었다. 결과적으로 해석과 결과분석이 복잡한 비탄성시간이력해석에 의한 내진성능평가 대신에 비교적 단순한 정적비탄성해석과 국내 환경에 적합한 표준설계응답스펙트럼을 역량스펙트럼 이론에 적용하여 수행한 내진성능평가가 해석의 단순성과 결과의 정확도를 적절하게 갖춘 평가방법으로 판단되었다.

추후연구과제로 사용자가 보다 간편하게 성능평가를 수행하도록 하기 위하여 소요곡선을 역량스펙트럼으로 변환하는 과정에서 곱해지는 가속도 증폭계수를 교각의 강성 및 상부구조의 질량, 그리고 지반가속도의 주파수성분을 고려하여 계수화하는 것이 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현 "비내진 상세 기존 RC 교각의 비선형 거동특성 및 내진성능", 한국지진공학회, 학술발표회 논문집, 제4권 제1호, 2000
2. 이창수, 김승익, 김현겸, "활절을 갖는 FCM형식 PSC교량의 연속화에 따른 동적거동에 관한 연구", 한국구조물진단학회, 학술발표회 논문집, 제4권 제1호, 2000
3. 한국지진공학회, "도로교의 내진설계", 한국지진공학회 제6회 기술강습회 자료집, 2000
4. 건설교통부, "도로교표준시방서", 1996
5. A. K. Chopra, R. K. Goel, "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures : SDF Systems", Report No. PEER-199/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of Califonia, Berkeley, 1999
6. ABAQUS Ver. 5.6, "Standard User's Manual", Hibbit, Karlson & Sorenson Inc., 1996