

역량스펙트럼을 이용한 교량의 내진성능평가

Evaluation of Seismic Performance for Bridge Using Capacity Spectrum Method

박연수* · 최선민** · 김응록*** · 서병철****
Park, Yeon Soo Choi, Sun Min Kin Eung Rok Suh, Byoung Chul

ABSTRACT

In 1992, the first design standard of quake proof bridge was established. However, most bridge structures which were constructed without considering earthquake in former times need performance of quakeproof property. Quakeproof analysis in current bridges, is based on analysis of load base which just has strength over the load of simple structures but is not checked through simple comparison of strength performance of structures so that we would like to check that ADRS method is reasonable or not using ADRS method(Acceleration-Displacement Response Spectrum Method), a analysis method based on displacement of object of performance test. As the result of that, the capacity spectrum method can avoid complex dynamic analysis in analysis based on loads and it efficiently applies to design verification with normal checking for quakeproof performance and aimed performance of new structures. However we can not consider effects of high modes and it has problem that does not consider falling of performance in structures by repeated load.

요 지

1992년 개정된 도로교표준시방서에 최초의 교량내진설계기준이 제정되었다. 하지만 그 이전에 건설된 대부분의 교량구조물은 지진에 대한 고려 없이 설계되어 있으므로 내진성능평가를 수행하여야하며 성능이 부족할 시 내진보강이 필요하다. 현재 도로교의 내진해석은 단순히 구조물의 하중 이상의 강도만을 갖도록 하는 하중기반해석에 근거하고 있으나, 단순한 강도의 비교만을 통해서 구조물의 성능이 파악되지 않을 수 있으므로 성능평가 대상을 변위로 하는 변위기반해석법인 ADRS방법(Acceleration-Displacement Response Spectrum Method)과 시간이력해석법을 이용하여 ADRS방법의 타당성 여부를 판단하고자 한다. 그 결과, 역량스펙트럼법은 하중기반해석에서의 복잡한 동적해석을 피할 수 있어서, 간편하고 신속하게 내진성능을 평가할 수 있으며, 정량적으로 산출된 성능점을 통하여 기존구조물의 내진성능이나 신설 구조물의 목표성능에 대한 설계 검증에 효율적으로 적용이 가능하나 고차 모드의 효과를 고려할 수 없었으며 또한 반복 주기 하중에 의한 구조물의 성능저하를 고려할 수 없는 문제점이 있었다.

1.서론

전세계적으로 해마다 많은 사상자를 내고 있는 지진은 도시인구의 고밀도화와 산업 및 사회기반시설의 복잡-대형화로 인해 더욱 위협적인 존재로 부각되고 있다. 특히 고도의 산업도시를 대표하는 건설구조물 중 교량구조물은 지진에 의해 비교적 쉽게 손상 받을 수 있다. 우리나라에서는 1992년에 개정된 도로교표준시방서에 최초의 교량내진설계기준이 제정되었다. 1996년에 영월에서 전례 없이 강한 유감지진이 발생

*정회원. 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사 E-mail : parkys@chonman.ac.kr

**비회원. 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 E-mail : csm6700@hanmail.net

***정회원. 송원대학 철도시설토목계열 교수 E-mail : erok@songwon.ac.kr

****비회원. 전남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사 E-mail : suh-b-c@hanmail.net-발표자

함에 따라, 국내 교량구조물에 대한 보다 높은 신뢰성과 일관성을 가진 내진설계기준이 연구되었다. 그리고 이에 따른 결과로 1997년 말 교량구조물에 대한 상위개념의 내진설계사항을 추가하였다. 하지만 현재 국내에 건설된 15,000여개의 각종 교량구조물 중 1992년 이전에 건설된 대부분의 교량구조물이 지진에 대한 고려 없이 설계되어 있으며 내진보강이 필요한 실정이다.

일반적으로 구조물 내진보강의 기본원칙은 내진설계의 기본원칙과 동일하며 두 가지 측면으로 나눌 수 있다. 첫째, 소규모의 지진에 대해서는 구조물이 손상을 입지 않아야 하고 둘째, 소규모의 지진에 대해서는 구조물의 손상을 피할 수는 없으나 최소한 구조물의 붕괴로 인한 인명피해는 막아야 한다는 것이다. 이를 위하여 내진성능을 확보하는 방법으로는 지진하중에 적절히 대항할 수 있도록 주요부재나 구조세목에 대해 강성을 증가시키는 수동적인 방법과 지진격리장치 및 감쇠장치를 이용하여 지진하중을 감소시키거나 소산시킴으로써 구조물의 내진성능을 높이는 능동적인 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 구조물에 가해질 지진력을 구조부재가 직접 감당할 수 있도록 부재를 설계하는 방법으로써 적용할 수 있는 지진과 상부하중의 규모에 따라 한계가 있고, 지진시 구조물의 구조부재가 소성영역에까지 도달할 수 있는 단점이 있다. 이에 반해 후자는 구조물에 가해진 지진하중을 지진격리 장치 및 감쇠기를 이용하여 지진력 자체를 감소시키거나 소산시킴으로써 설계지진 수준에서 구조물이 탄성영역내에서 거동하도록 함으로써 지진 후에도 별다른 보수 없이 기능을 수행할 수 있게 한다.

본 논문은 기존 교량의 대부분이 내진설계 도입되기 이전에 건설된 교량으로 내진설계가 수행되지 않아 내진성능 확보를 위해서는 무엇보다 합리적인 내진성능평가 기법을 확립하는 것이 중요하다. 이에 대한 대응책으로 내진성평가 기법인 변위기반해석인 ADRS방법을 제시하여, 이를 정확히 평가하기 위하여 역량스펙트럼의 결과를 이용하여 최적의 보강수준을 밝혀내고 검증하는데 목적이 있다.

2. ADRS로의 변환

역량스펙트럼 방법을 이용하기 위해서는 구조물의 공급역량과 소요역량을 동일한 스펙트럼 상으로 변환해야 한다. 즉, 밀면전단력과 상대변위의 관계식으로 주어지는 공급역량곡선을 응답스펙트럼의 주파수 영역의 동적특성을 이용하여 응답가속도와 응답변위의 관계식으로 변환해야 한다. 일반적인 다자유도계를 역량스펙트럼으로 변환하기 위해서 요구되는 동적특성 관계식은 다음과 같다. 보유역량스펙트럼의 경우, 탁월모드에 근접한 거동을 한다는 가정에 근거한 접근이다.

$$S_A = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (2-1)$$

$$S_D = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{1,roof}} \quad (2-2)$$

여기서, S_A : 스펙트럴 가속도계수
 S_D : 스펙트럴 변위
 α_1 : 모달질량계수
 Δ_{roof} : 최상단 변위
 PF_1 : 탁월모드 기여도
 $\phi_{1,roof}$: 탁월모드의 최상단 모드벡터

반면에 교각과 같은 단자유도계를 역량스펙트럼으로 변환하기 위해 요구되는 동적 특성 관계식은 다음과 같다.

$$S_A = V/W \quad (2-3)$$

$$S_D = \Delta \quad (2-4)$$

여기서, V : 밀면전단력

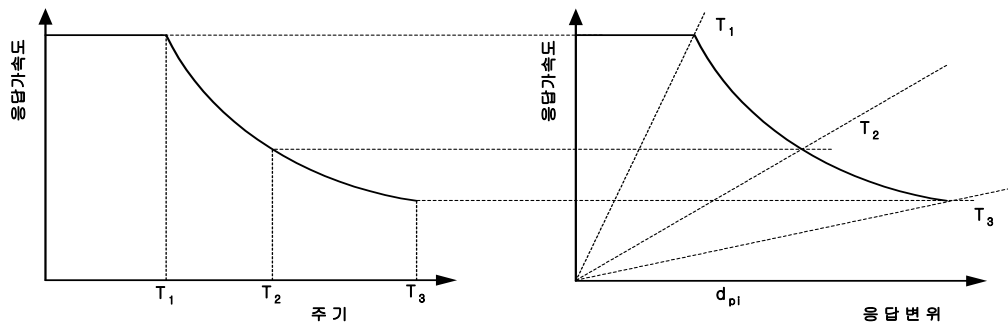
W : 자중

Δ : 관성력이 작용하는 위치에서 상대변위

일반적인 구조물의 응답스펙트럼은 가속도와 주기의 관계식으로 주어지지만 역량스펙트럼 방법에 의한 해석을 위해서는 ADRS 형식으로 좌표를 변환해야 한다. 즉, 가속도계수와 상대변위 관계식으로 변환하여 표현해야 한다.

그림 2.1은 일반적인 다자유도계의 보유역량곡선과 소요역량곡선을 하나의 ADRS 형식으로 표현하는 과정을 단순화하여 보이고 있다.

여기서 V는 기초전단력 W는 유효중량(상부구조 및 교각 1/2의 중량을 포함)는 관성력 작용위치의 구조물의 변위이다.



$$S_d = \frac{1}{4\pi^2} S_a T^2$$

일반스펙트럼 (S_a -T)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}}$$

역량스펙트럼 스펙트럼 (S_a - S_d)

그림 2.1 구조물에서의 일반적인 응답변위 스펙트럼과 역량스펙트럼

일반적인 구조물의 응답스펙트럼은 가속도(S_a)와 주기(T)의 관계식으로 주어지지만, 역량스펙트럼 (Acceleration-Displacement Response Spectrum)에서는 이를 가속도(S_a)-변위(S_d)의 관계식으로 변환하게 된다. 그림 2.1와 같이 역량스펙트럼에서는 원점을 통과하는 방사형태의 직선상의 점은 주기가 동일하다. 이때 주기 T는 $T=2\pi\sqrt{S_d/S_a}$ 의 관계식으로 할 수 있으며 동일한 개념으로 일반적인 응답스펙트럼 상에서 응답변위 S_d 는 $S_d=S_a T^2/4\pi^2$ 으로 계산 할 수 있다.

그림 2.2은 그림 2.1의 응답스펙트럼 상에 동일한 역량 스펙트럼을 얹은 그림이다. 점 A까지의 주기는 T_1 으로 일정하며 점 B 이르게 되면 주기는 T_2 가 된다. 즉, 비선형 거동이 진행되면서 주기가 길어지는 것을 확연히 확인할 수 있다.

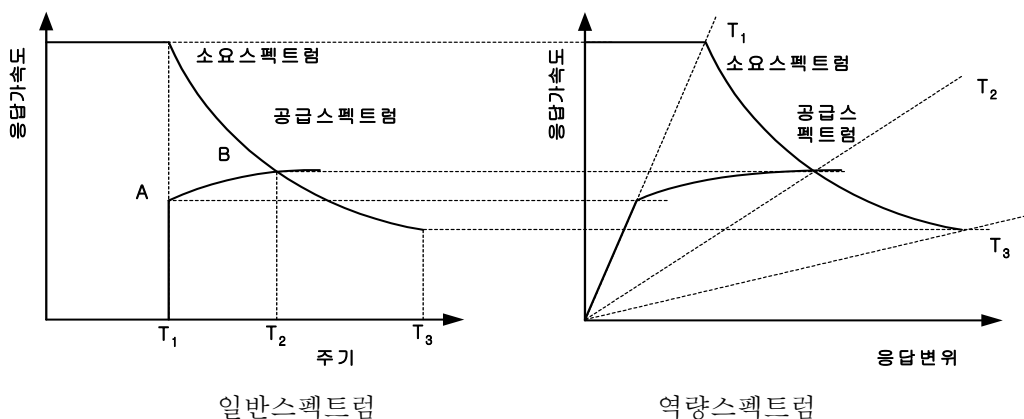


그림 2.2 응답스펙트럼 상에 공급스펙트럼을 중첩한 그림

2.1 성능점의 결정

성능 점은 아래와 같이 2가지 점을 만족하여야 한다.

첫째는 주어 진 변위에서 구조물의 역량을 나타내기 위하여 반드시 구조물의 역량 스펙트럼 상에 위치하여야 하며, 둘째는 소요 스펙트럼 곡선 위에 존재하여야 한다.

이 때 스펙트럼 곡선은 구조물의 비선형 거동에 따른 감쇠효과를 고려하여야 한다. 이러한 감쇠에 따른 응답의 감소는 유효감쇠(Effective Damping)를 도입하여 수행할 수 있으며 유효감쇠는 역량곡선의 형태에 따라 개략적으로 산출할 수 있다.

일반적으로 상기의 조건을 만족하는 성능점의 결정은 Try and Error 방법으로 결정할 수 있으며 여기에서는 이를 결정하는 한가지 방법에 대해 소개한다.

계산 순서는 아래와 같다.

1단계 : 현장조건 등을 고려하여 그림 2.3과 같이 5% 감쇠(탄성)의 응답스펙트럼을 작성한다.

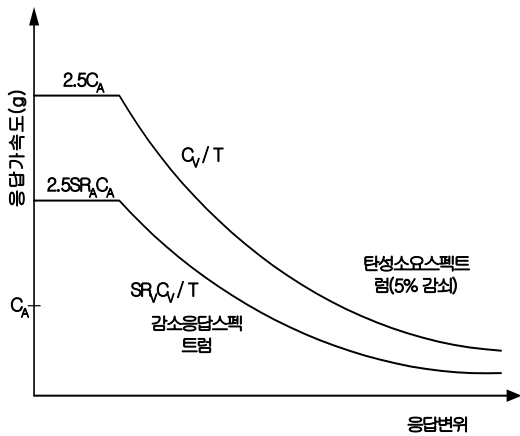


그림 2.3 1단계에서의 역량 스펙트럼

2단계 : 공급역량곡선을 역량스펙트럼으로 변환한다. 그림 2.4와 같이 동일한 차트상에 5% 감쇠시의 소요응답스펙트럼을 함께 도시한다.

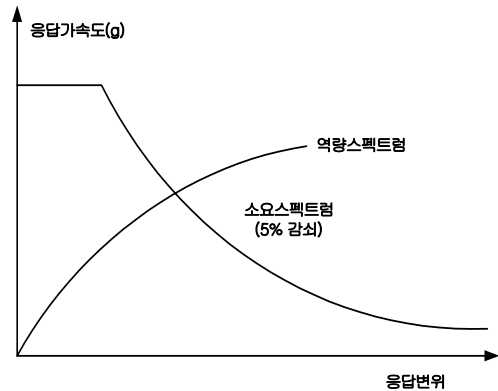


그림 2.4 2단계에서의 역량 스펙트럼

3단계 : 그림 2.5과 같이 초기 성능 점, a_{pi} , d_{pi} 를 선정한다.

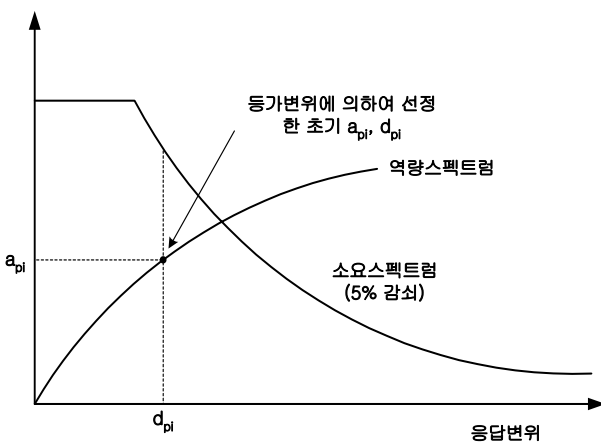


그림 2.5 3단계에서의 역량 스펙트럼

4단계 : 상기의 Bilinear 이상화 방법으로 역량스펙트럼을 그림 2.6과 같이 이상화한다.

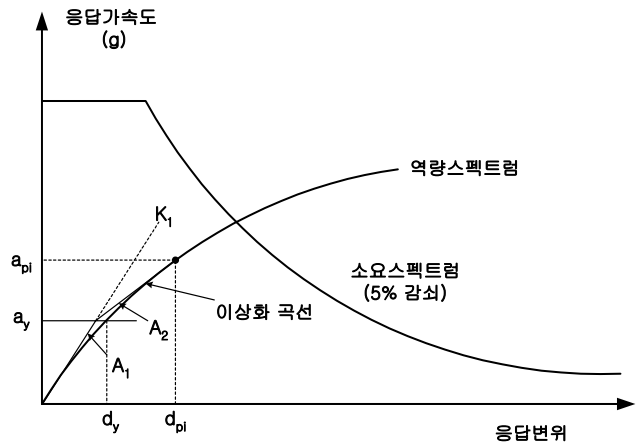


그림 2.6 4단계에서의 역량 스펙트럼

5단계 : 그림 2.7의 방법으로 소요스펙트럼을 작성한다. 그림 2.8와 같이 역량스펙트럼을 동일한 차트 상에 작성한다.

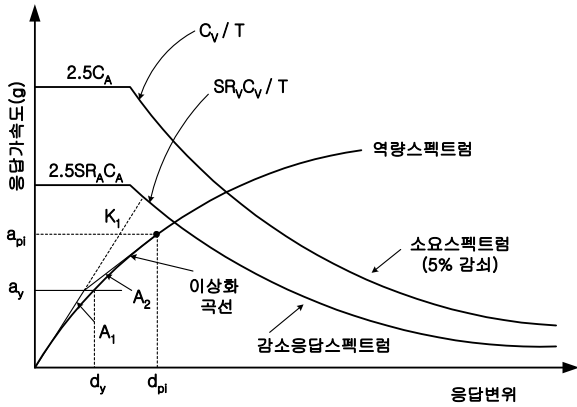


그림 2.7 5단계에서의 역량 스펙트럼

6단계 : 그림 2.8과 같이 처음에 가정한 초기 성능점(a_{pi} , d_{pi})과 허용치 이내로 접근하는지를 확인한다. 교차점의 응답변위를 d_{pi} 로 하면 수렴 허용범위는 아래와 같다.

$$0.95d_{pi} \leq d_i \leq 1.05d_{pi} \quad (2-5)$$

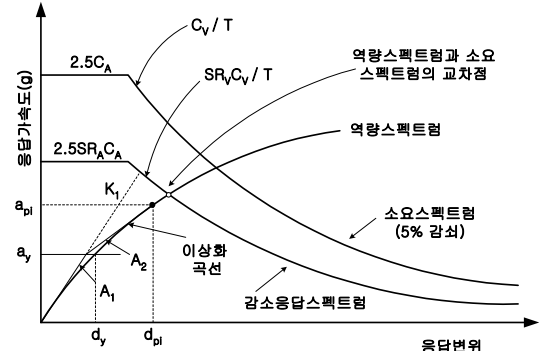


그림 2.8 6단계에서의 역량 스펙트럼

7단계 : 만약 상기의 교차점이 수렴 허용치 내에 들어오지 않은 경우, 새로운 a_{pi} , d_{pi} 를 선정하고 4 단계에서 반복한다.

8단계 : 만약 허용치 내에 들면 임시로 선정한 임시 성능점은 성능점 a_{pi} , d_{pi} 가 되고, 이 때 변위 d_{pi} 는 구조물의 최대 응답변위를 나타내게 된다.

3. 역량스펙트럼법에 의한 내진성능 평가

3.1 대상교량의 재원

대상교량은 3경간 연속교로 2개의 교각을 가지고 있으며, 한 교각은 고정단이고 다른 한 교각 및 교대는 이동단으로 되어 있다. 교각은 사각단면의 다주형태이고 상부구조는 steel 거더이며 질량은 약 866ton 이다. 교각 하나에 재하되는 상부구조의 고정하중은 약 3,900kN이다. 위 사항을 정리하면 다음 표와 같다.

표 3.1 교량의 제원

교장	17.5m + 35m + 17.5m
교각고	고정단 6.6m, 이동단 6.6m
형식	3경간 연속 plate 거더교
상부질량	866 ton

3.2 공급역량스펙트럼으로의 변환과 내진성능 평가

3.2.1 공급역량스펙트럼으로의 변환

역량스펙트럼을 사용하기 위해서는 공급역량곡선(Capacity Curve)을 공급역량스펙트럼으로 변환시켜야 한다. 공급역량곡선은 상부구조의 수평변위에 대한지점의 전단력을 도시하는 반면, 공급역량스펙트럼은 이 공급역량곡선을 ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum) 형식으로 나타내게 된다.

식 $S_a=V/W$ 과 $S_d=\Delta$ 상부를 이용하여 Push Over 해석에 의한 각 Case별 공급곡선을 공급역량스펙트럼으로 변환하면 다음과 같다.

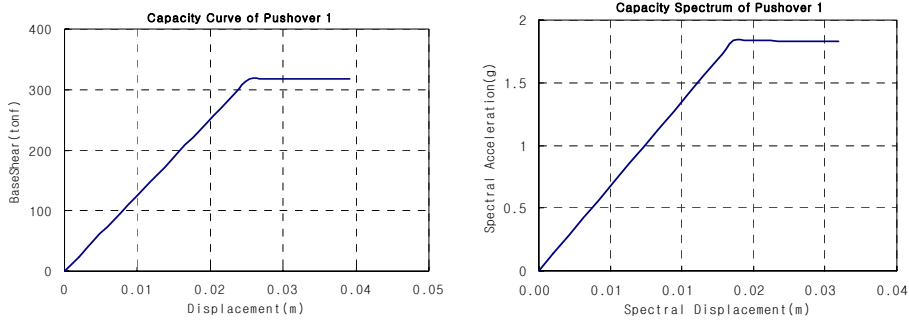


그림 3.1 Push-Over 1(Load Type : Mode1) Case에 대한 공급곡선 및 공급스펙트럼

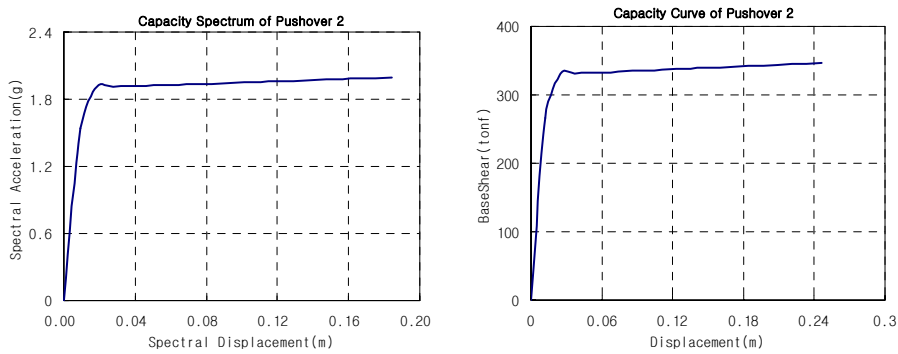


그림 3.2 Push-Over 2(Load Type:U1 Acceleration) Case에 대한 공급곡선 및 공급스펙트럼

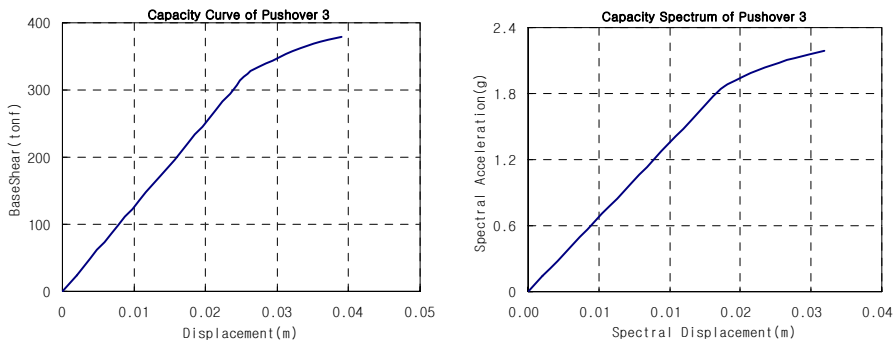


그림 3.3 Push-Over 3(Load Type : Mode2) Case에 대한 공급곡선 및 공급스펙트럼

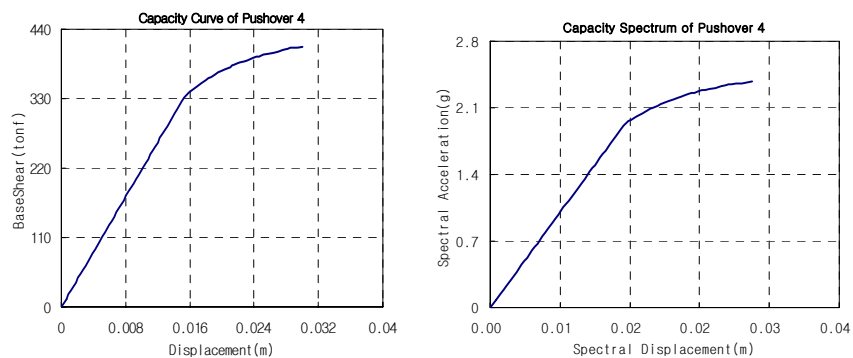


그림 3.4 Push Over 4(Load Type : U2 Acceleration) Case에 대한 공급곡선 및 공급스펙트럼

3.3 내진성능 평가

소요역량스펙트럼과 공급역량스펙트럼을 동일 좌표상에 도시하여 공급역량스펙트럼의 극한점이 소요역량스펙트럼 외부에 놓이게 된다면 목표성능을 확보하고 있는 것이 된다.

감쇠의 영향을 고려한 스펙트럼 감소계수(SR_A , SR_V)에 의해 소요역량스펙트럼을 감소시키고 공급역량과 함께 도시하여 교차한 점이 비탄성 응답변위측, 성능점이 된다. 공급역량곡선의 임의의 점을 초기 성능점으로 결정하고 초기 성능점에서 구한 스펙트럼 감소계수를 이용하여 감소된 스펙트럼을 작성한후에 감소된 스펙트럼과 공급역량곡선과 교차하는 점이 초기 성능점과 5%이내에 접근하지 않으면 다시 초기 성능점을 다시 선정하여 위 과정을 반복한다. 5% 이내로 접근하면 임시로 선정한 초기 성능점이 성능점 a_p , d_p 가 되고 이때 변위 d_p 는 대상 지진레벨에 대한 구조물의 최대응답변위를 나타내게 된다.

가) 횡하중 형태를 1차 고유모드에 비례하여 교축 방향으로 적용하는 경우 그림 3.5는 5%감쇠된 소요역량스펙트럼, 감소된 스펙트럼 그리고 공급역량스펙트럼을 도시한 것이다. 이 때의 성능점 $S_a=0.2012g$, $S_d=0.0021m$ 이며, 기초 전단력Base Shear=312.12tonf 이다.

다) 횡하중 형태를 2차 고유모드에 비례하여 교축 직각방향으로 적용하는 경우그림 3.7는 5%감쇠된 소요역량스펙트럼, 감소된 스펙트럼 그리고 공급역량스펙트럼을 도시한 것이다. 이 때의 성능점 $S_a=0.2012g$, $S_d=0.0025m$ 이며, 기초전단력Base Shear=334.51tonf 이다.

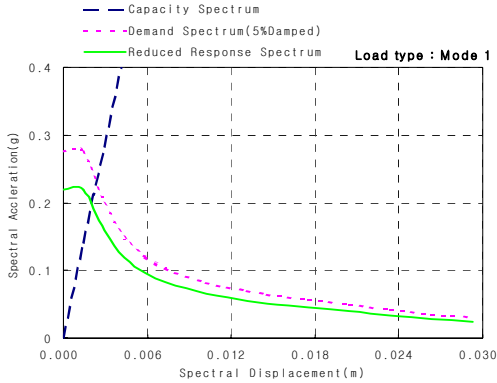


그림 356 Capacity Spectrum of Load Type Mode 1

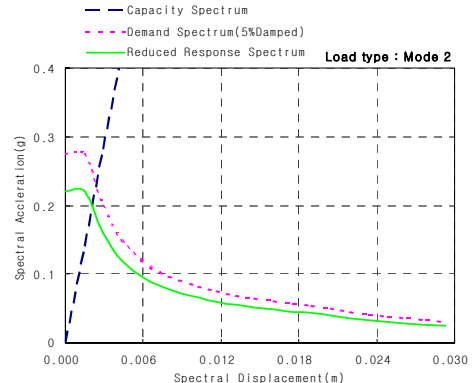


그림 3.7 Capacity Spectrum of Load Type Mode 2

나) 횡하중 형태를 각층의 질량에 비례하여 교축 방향으로 적용하는 경우 그림 3.6는 5%감쇠된 소요스펙트럼, 감소된 스펙트럼 그리고 공급역량스펙트럼을 도시한 것이다. 이 때의 성능점 $S_a=0.2235g$, $S_d=0.0018m$ 이며, 기초 전단력Base Shear=341.05tonf 이다.

라) 횡하중 형태를 각층의 질량에 비례하여 교축 직각방향으로 적용하는 경우그림 3.8는 5%감쇠된 소요역량스펙트럼, 감소된 스펙트럼 그리고 공급역량스펙트럼을 도시한 것이다. 이 때의 성능점 $S_a=0.2235g$, $S_d=0.0019m$ 이며, 기초 전단력Base Shear=339.21tonf 이다.

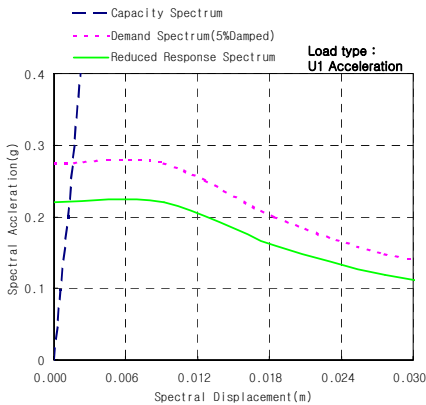


그림 3.6 Capacity Spectrum of Load Type U1 Acceleration

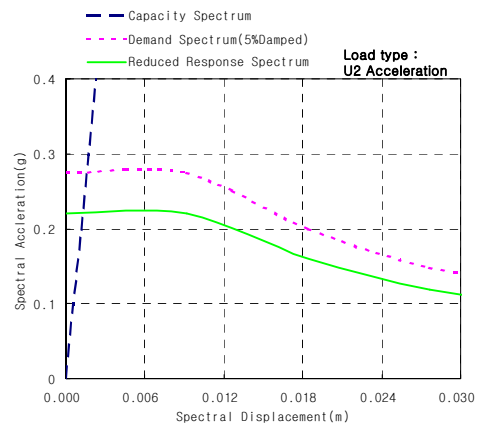


그림 3.8 Capacity Spectrum of Load Type U2 Acceleration

이상의 결과에서 각각의 해석 Case에 대한 공급역량스펙트럼의 극한점이 붕괴방지수준의 소요역량스펙트럼에 위치하므로, 연구대상 교량의 교각은 교축방향 및 교축직각방향에 대해 붕괴방지수준의 지진에 대해 안전할 것으로 판단되며, 도로교 설계기준에 따라 기능수준의 지진에 대해서도 내진성능이 확보되어 있다고 판단된다. 교축방향에서의 변형능력이 교축직각방향에서의 변형 능력보다 더 큼을 알 수 있다. 각각의 해석 Case에 대한 성능점 및 기초 전단력의 결과를 정리하면 다음 표 3.2와 같다.

표 3.2 횡하중 형태에 따른 S_a , S_d , Base Shear

Load Type		$S_a(g)$	$S_d(m)$	Base Shear(tonf)
교축방향	Model	0.2021	0.0021	312.12
	U1 Acceleration	0.2235	0.0018	341.05
교축직각방향	Mode2	0.2021	0.0025	334.51
	U2 Acceleration	0.2235	0.0019	339.21

6. 결론

본 논문은 내진설계가 고려되지 않은 기존 교량구조물 중 지진에 취약하다고 예상되는 교량에 대하여 ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) 방법을 이용하여 내진성 평가를 수행함으로써 내진보강 여부를 판정하기 위한 기초자료를 제시하였다. 특히, 역량스펙트럼의 결과와 지진에 대한 비탄성 시간이력해석법을 이용한 결과값을 비교분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 공급역량스펙트럼의 극한점이 붕괴방지수준의 소요역량스펙트럼에 위치하므로, 연구대상 교량의 교각은 교축방향 및 교축직각방향에 대해 붕괴방지수준의 지진에 대해 안전할 것으로 판단되며, 도로교 설계기준에 따라 기능수준의 지진에 대해서도 내진성능이 확보되어 있다고 판단된다.
2. 대상교량을 전산 해석한 결과 역량스펙트럼에 의한 기초전단력이 교축방향과 교축직각방향에서 횡하중의 형태와 관계없이 모두 시간이력법에 비해 큰 값을 나타냈고 변위는 주기에 관계 없이 시간이력해석법이 크게 나타났고 역량스펙트럼법은 정량적으로 산출된 성능점을 통하여 기존구조물의 내진성능이나 신설 구조물의 목표성능에 대한 설계 검증에 효율적으로 적용이 가능하였다.
3. 역량스펙트럼법은 비탄성 응답을 일으키는 다양한 지반운동 수준에 대해서 구조물에 발생하는 변위를 평가할 수 있으므로 기존 구조물의 내진성능 평가나 신설 구조물의 성능목표에 대한 설계 검증 등에 효율적으로 적용이 가능하나 고차 모드의 효과를 고려할 수 없었으며 또한 반복 주기 하중에 의한 구조물의 성능저하를 고려할 수 없는 문제점이 있었다.

참고 문헌

1. 김수만, 박영기, “토목구조설계”, 청문각, 1997
2. 건설교통부, “도로교설계편람(III)-교량편” 2001.3.
3. 한국건설기술연구원, 사회기반 시설물의 내진성능향상 기술개발, 2000. 123. 김상호·이한선, “능력스펙트럼법을 이용한 비정형 건축구조물의 2차원 지진성능평가 방법 연구”, 한국지진공학회 2001년도 춘계 학술대회 논문집,
4. 한국도로교통협회, “도로교 설계기준”, 2000.
5. 한국지진공학회, “기존교량의 내진성능평가 및 향상”, 2003. 7
6. 한국지진공학회, “철근콘크리트 교각의 내진설계”, 2002. 7.
7. 송종걸 “ 변위기반 설계를 위한 강성 및 강도 저하 시스템의 변위 응답 평가” 대한토목학회 논문집, 2000.712.
8. 건설교통부, 도시철도 내진설계 기준연구, 2001. 9.