교량의 내진성능 평가를 위한 역량스펙트럼 적용 연구

A study on the Capacity Spectrum for Seismic Performance Evaluation of Bridge

박연수† 이병근* 김응록** 서병철*** 박선준**** 최선민*

Park,Yeon-Soo Lee,Byung-Geun Kim,Eung-Rok Suh,Byung-Chul Park,Sun-Joon Choi,Sun-Min

ABSTRACT

In this study, We examine closely the capacity spectrum method which a kind of displacement-based method evaluated by displacement of structure as an alternative to the load-based analysis method. The displacement-based method can easily review the strength of structure, seismic performance, ductility. Seismic performance by using capacity spectrum method is divided into design response spectrum and capacity spectrum. We can diagram design response spectrum by deciding the design seismic factor depending on performance target, site classification, seismic level, return period as UBC-97. Capacity spectrum is a load-displacement curve obtained by Push-over analysis considering the geometric parameter and the material parameter. We execute the seismic performance evaluation by using the capacity spectrum method to reinforced concrete pier which has been seismic design. As a result, We confirmed that there is a yield point and a ultimate point close by design response spectrum of UBC-97.

1. 서 론

지진재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위해서는 신설교량을 합리적으로 내진설계 하는 것이 매우 중요하다. 그러나 내진설계를 하고 있는 나라들에서도 내진설계기준에 근거하여 설계되지 않거나 구조물이 노후화된 교량이 많으므로 미국, 일본 등의 지진 빈발국 에서는 신설교량의 내진설계 뿐만 아니라 기존교량의 내진성능향상에도 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 우리나라의 경우에는 총 교량수가 22,386개 정도이고 이중에서 내진설계기준이 제정된 1992년 이전에 건설된 교량수가 22,386개 이므로 전체 교량의 48%정도는 내진설계기준이 제정되기 전에 설계된 것이다. 또한 1992년 이후에 설계된 교량이라 하더라도 이들 중의 상당수는 내진설계가 합리적으로 고려되지 않았을 것으로 추정된다. 우리나라의 경우에는 진도 6이상 규모의 지진은 발생하지 않지만 6이하 규모의 지진은 간헐적으로 발생하고 있다. 앞으로 발생하게 될 지진재해의 위험을 감소시키기 위해서는 내진설계 못지 않게 기존 교량의 합리적이고 실제 발생할 수 있는 피해를 예측할 수 있는 적절한 내진성능평가 기술이 매우 중요하다. 본 연구에서 제시한 평가방법을 π형 R.C교각을 대상으로 내진성능을 평가하였으며 내진성능평가는 크게 설계응답스펙트럼과 공급역량스펙트럼을 구분하여 두 스펙트럼의 평가 과정에 고려되는 여러가지 변수 및 수식에 대해 고찰하였다.

† 책임저자 : 정회원, 전남대학교, 토목공학과, 교수
E-mail : parkys@jnu.ac.kr
TEL : (062)530-1657 FAX : (062)530-1659
* 비회원, 전남대학교, 토목공학과, 박사과정
** 정회원, 송원대학, 토목공학과, 교수
*** 비회원, 광양만권UIT연구소, 박사
**** 비회원, 동신대학교, 토목공학과, 교수

2. 내진성능평가

2.1 설계응답스펙트럼의 작성

(1) 내진성능목표

교량구조물의 구성요소인 교각의 주요기능은 교량상부구조물의 하중을 지지하여 구조적으로는 압축재이며 지진하중 작용시 상부구조물에 전달되는 지진력을 감쇠 시키는 역할을 수행한다. 지진하중 작용시 교각에 발생한 변형이나 손상이 교각의 기능을 차질 없이 수행할 수 있는 범위내로 제한되는 성능수준을 소위 기능 수행수준이라 한다. 하지만 재현주기가 500년,1000년인 지진하중에 기능 수행 수준을 적용시키면 큰 지진에도 교각이 기능을 수행하게 하는 엄격한 평가가 되므로 실질적으로 내진성능이 확보된 교각에도 불필요한 내진보강을 하게된다. 그러므로 지진하중 작용시 교각에 상당한 변형이나 손상이 발생 할 수 있지만 그 수준과 범위는 교각이 붕괴 되거나 또는 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지할 수 있는 성능수준을 붕괴 방지수준 이라 한다. 여기서 기능수행수준은 역량스펙트럼의 항복점과 비교되는 수준이고 붕괴방지수준은 역량스펙트럼의 극한점과 비교되는 수준이다. 기능수행수준과 붕괴방지수준사이의 지진력이 작용하면 해당교각의 구조적인 기능수행 여부확인을 위한 재료, 기하적 검토가 필요하며 관리검토 구간이라 한다.

(2) 재현주기

지진의 특성상 규모가 큰 지진은 몇 백면을 주기로 발생하며 규모가 작은 지진은 주기적으로 발생한다. 50년만에 발생하는 지진보다 100년만에 발생하는 지진의 규모가 크므로 지진의 재현주기가 커질수록 증가계수를 곱하여 설계응답스펙트럼에 적용하게 된다. 지진이 발생하는 주기를 크게 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년으로 6단계로 구분하여 50년, 100년, 200년은 기능수행수준으로 500년, 1000년, 2400년은 붕괴방지수준으로 분류하였다.

(3) 내진등급

규모가 큰 지진은 몇 백면을 주기로 발생하며 규모가 작은 지진은 주기적으로 발생한다. 50년만에 발생하는 지진보다 100년만에 발생하는 지진의 규모가 크므로 지진의 재현주기가 커질수록 증가계수를 곱하여 설계응답스펙트럼에 적용하게 된다. 지진이 발생하는 주기를 크게 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년으로 6단계로 구분하여 50년, 100년, 200년은 기능수행수준으로 500년, 1000년, 2400년은 붕괴방지수준으로 분류하였다.

(4) 지반분류

진앙지에서 동일한 진동이 발생하더라도 파장을 전달하는 지반의 물성치에 따라 구조물에 직접 작용하는 지진력은 다르게 나타날 수 있다. 이러한 점을 고려하기 위하여 KBC2005에서는 지반의 종류를 6개로 분류하여 검토하도록 명시되어 있다. 지반이 연약지반이면 지진하중의 증폭이 커지므로 이에 대해 지진계수를 증가시킨다.

도표 1. 설계응답스펙트럼 작성을 위한 파라미터

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30.486m 에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 N치 (blow/foot)	비배수전단강도 Su(kPa)
S_a	경암지반	1500초과		
S_b	보통암지반	760~1500		
S_c	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
S_d	단단한 토사지반	180~360	15 ~ 50	50 ~ 100
S_e	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S_f	부지 고유의 특성평가가가 요구되는 지반			

(5) 지진구역

우리나라의 지진구역을 제 I구역, 제 II구역으로 구분하여 I구역에는 구역계수값으로 0.11을 적용하고 구역 II에는 구역계수 0.07을 사용한다. 지진구역 II로 분류되는 강원도 북구, 전라남도 남서부, 제주도를 제외한 모든 구역이 지진구역 I에 속한다.

(6) 지진계수

내진성능목표는 붕괴방지수준과 기능수행수준을 동시에 검토하였으며 재현주기는 붕괴방지수준일때 1000년 기능수행수준 일때 100년으로 적용하였다. 내진등급은 일반국도상의 교량으로 내진1등급을 적용하였으며 지반의 분류는 상부 30.480m에 대한 평균지반 특성으로 표준관입시험의 N치를 조사한 결과 N치가 15이하로 산정되어 S_E지반을 적용하였으며 지진구역은 서울특별시로 고려하여 0.11을 적용하였다. 설계응답스펙트럼 작성조건을 표로 나타내면 다음과 같다. 즉, 서울특별시에서 연약지반위에 가설되어 있는 1등급 교량의 교각을 재현주기 100년과 1000년에 대해 설계응답스펙트럼을 작성하였다.

도표 1. 설계응답스펙트럼 작성을 위한 파라미터

해 석 조 건		
항 목	붕괴방지 수준	기능수행 수준
위험 계수	1.4(재현주기 1000년)	0.57(재현주기 100년)
내진등급	1등급	
지진구역 계수	0.11 (I 구역)	
지반 계수	1.2 (지반종류 Ⅱ)	
C_a	0.224	0.091
C_v	0.322	0.131

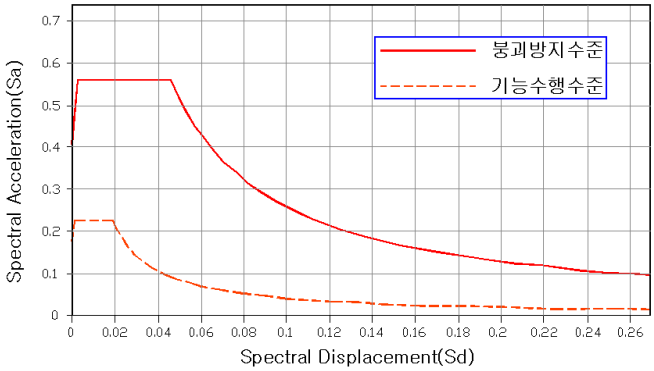


그림 1. 설계응답스펙트럼(붕괴방지수준, 기능수행수준)

2.2 공급역량스펙트럼

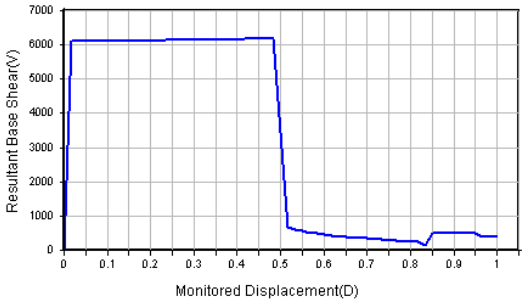
(1) 대상교각의 제원

교각의 모델링은 그림 2와 같이 기둥과 코핑부를 frame으로 모델링 하였다. 소성힌지 구간은 기둥아래에서 기둥길이의 10%를 계산하여 소성힌지길이를 적용하였다. Coping중앙부는 강성을 크게하여 모델링 하였고, 기둥상부와 coping중앙부는 일체거동 하게끔 강성연결(Rigid Link)하였다. 범용 유한요소해석 프로그램(MIDAS)을 이용하여 그림 2와 같이 모델링 하였다.

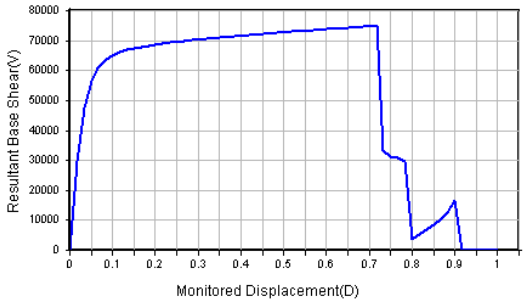
그림 2. 교각의 절점-프레임 모델링

(2) Push-Over해석

역량스펙트럼 해석법으로 대상 교각의 내진성능을 평가하기 위해서는 설계지진력에 대응하는 공급역량스펙트럼(가속도-변위 곡선)이 필요하다. 공급역량스펙트럼을 얻기 위해서는 먼저 공급역량곡선을 작성해야 한다. 공급역량곡선을 산정하기 위한 재료 비선형 해석인 Push-Over해석을 통해 얻어지는 곡선은 Y축이 전단력이고 X축이 변위인 곡선이다. 즉, 교각의 최상단을 단조증가 하중으로 가력하였을때 발생하는 최상단의 변위에 대한 곡선이다. 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 Push-Over 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음 그림과 같다.



(a) 교축방향

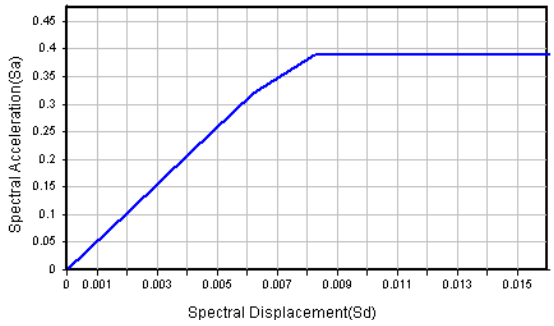


(b) 교축직각방향

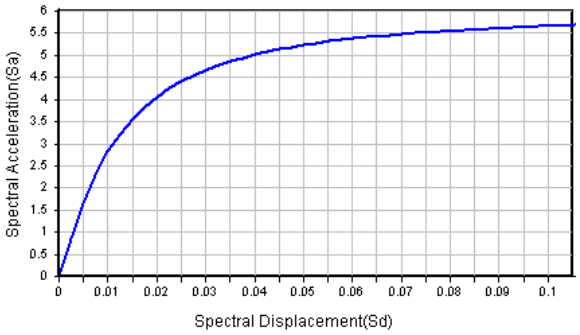
그림 3. 역량곡선(Capacity Curve)

(3) 공급역량스펙트럼 변환

역량스펙트럼법을 사용하기 위해서는 공급역량곡선을 공급역량스펙트럼으로 변환시켜야 한다. 앞절에서 언급한 바와 같이 공급역량곡선은 상부구조의 수평변위에 대한 지점의 전단력을 도시하는 반면, 공급역량스펙트럼은 가속도와 스펙트럴변위의 스펙트럼 즉, ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectrum)으로 표현하게 된다. 식$S_a=\frac{V}{W}$과$S_d=\triangle$을 이용하여 Push-Over해석에 의한 교축방향 및 교축직각방향에 대해 공급역량곡선을 공급역량스펙트럼으로 변환 하면 다음과 같다.



(a) 교축방향

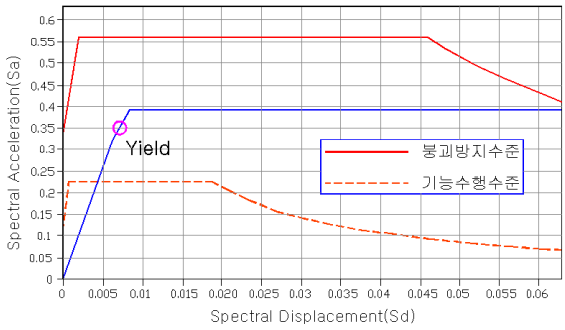


(b) 교축직각방향

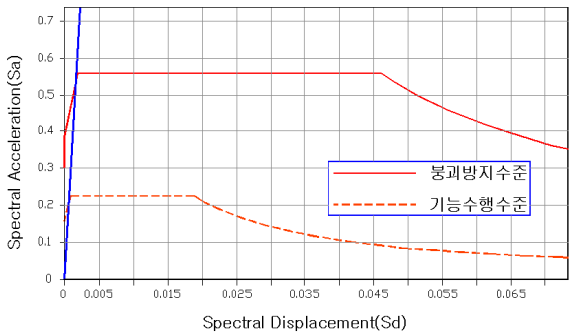
그림 4. 역량스펙트럼(Capacity Spectrum)

2.3 내진성능평가

역량스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 한 좌표상에 도식화 하여 항복점과 기능수행수준을 극한점과 붕괴방지수준을 비교하여 내진성능평가를 할 수 있다. 항복점은 기능수행수준 외부에, 극한점은 붕괴방지수준 외부에 놓이게 되면, 두 가지 목표성능을 모두 만족하는 것이 된다. 이때 항복점은 기능수행수준 외부에 있고 극한점이 붕괴방지수준 내부에 있게 된다면, 기능수행수준은 만족하지만 붕괴방지수준은 만족하지 못하는 경우가 된다. 이 경우에는 소성변위를 충분히 발휘할 수 있도록 연성보강에 관한 내진성능 향상방안을 적용해야 할 것이다. 반면에 항복점은 기능수행수준 내부에, 극한점은 붕괴방지수준 외부에 있는 경우에는 붕괴방지수준은 만족하나, 기능수행수준은 만족하지 못하는 경우가 된다. 이 경우에는 부재의 강성보강이나 지진격리에 관한 내진성능 향상방안을 적용해야 할 것이다. 그림 3을 보면 교축방향의 항복점은 붕괴방지수준 내부에 존재하지만 교축직각방향의 항복점은 붕괴방지수준 외부에 존재 하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 π형 교각의 기하적 강성이 교축방향 보다 교축직각방향의 크기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 교축방향



(b) 교축직각방향

그림 5. 역량스펙트럼(Capacity Spectrum)

3. 결 론

1. 교각의 단조증가 하중에 대한 저항능력을 평가하고 지진력이 되는 설계응답스펙트럼을 여러 가지 파라미터를 합리적으로 고려하여 두 스펙트럼을 한 좌표상에 도식화 함으로서 교각의 내진성능을 쉽게 파악할 수 있었다.
2. 향후 연구 과제로는 본 연구에서 적용한 하중인 단조 증가 하중은 실제 지진하중과 같이 좌우로 가속되는 하중이 아니므로 분명히 그 차이가 있다고 생각되는바 실제 지진력을 역량스펙트럼 해석에 적용할 수 있는 기법개발에 대한 연구가 필요하다.
3. 본 연구에서는 1차 소성해석을 하여 역량스펙트럼을 작성하였지만 실제 구조물의 거동은

그와 상이하게 반응할 수 있으므로 구조물 상황에 맞는 적절한 고등해석을 수행하여야 할것으로 판단되며 앞으로는 설계응답스펙트럼을 작성하기위해 고려되야 하는 6개의 파라미터에 대한 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “내진설계기준연구(II)″, 1997

2. 김재관 역, ″구조동역학″, 피어슨에듀케이션코리아, 2004

3. 박연수, 강대흥, 박철웅, 박선준, “변위기반해석에 의한 구조물의 내진성능 평가에 관한 연구”, 대한토목학회 2002년도 학술발표회 및 Civil Expo, 2002, pp.365-368

4. 이병근, “R.C교각의 구조특성 변화에 따른 내진성능 연구”, 석사학위논문, 전남대학교, 2008

6. 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조설계기준・ 해설”, 2000

7. M.J.N. Priestly, ″Seismic Design and Retrofit of Bridge″, Willey Interscience, pp.534-540, 1996