

중진지역에서의 다경간연속교의 내진설계 방향

Seismic Design Strategies of Multi-Span Continuous Bridges in Moderate Seismicity Region

김재관*

김익현**

KIM, Jae-Kwan

KIM, Ick-Hyun

ABSTRACT

It has been realized that the design codes and underlying design concept of high seismicity region may not be appropriate to low and moderate seismicity regions. The aim of this paper is to search seismic design strategies that are appropriate to moderate seismicity regions. The characteristics of seismic hazard in moderate seismicity regions are reviewed. The seismic responses of multi-span continuous bridges subjected to the ground shaking of moderate intensity are examined. The present code on seismic design of bridges is briefly reviewed. Based on these observations, design principles and strategies appropriate to the moderate seismicity regions are proposed for the multi-span continuous bridge

1. 서론

우리나라 도로교의 내진설계는 1992년 지진하중이 도로교시방서에 처음으로 도입되면서 시작되어 1996년 1차개정과 2000년 2차개정을 통하여 현재에 이르고 있다. 기본개념은 미국의 AASHTO의 기본개념을 전적으로 수용한 것으로서 설계지진에 대하여 교각의 비선형 거동을 유도하고 있다. 만약 구조물이 충분한 연성과 에너지 흡수능력을 확보하고 있다면 설계지진 이상의 강한 지진에 대해서도 붕괴되지 않게 될 것이다. AASHTO에서는 이러한 개념을 응답수정계수를 도입하여 구현하고 있다. 그러나, 여러 연구에서도 지적되었듯이 중약진지역에서의 구조물의 지진응답특성은 강진지역과는 상당한 차이를 나타내고 있다^{(1),(2)}. 즉, 지진하중을 고려하지 않고 설계된 일반구조물이 설계지진시 큰 소성변형을 경험하지 않을 가능성이 매우 크다. 이런 경우에는 설계지진 시대상구조물의 큰 소성변형을 가정한 강진지역의 내진설계 개념은 중약진지역에서는 적합하지 않게 된다. 한 예로서 지름이 3.5m인 원형교각을 내진설계하는 경우 큰 변위연성도를 확보하기 위하여 필요한 횡철근량은 약 1%로서 D19mm의 철근으로 배근하는 경우에도 간격이 3.5cm가 되어

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

** 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

현실적으로 시공에 큰 어려움이 있게 된다. 국내외에서 수행된 많은 연구결과에 의하면 지진하중을 고려하지 않고 설계된 일반교각도 상당히 큰 수평저항력을 보유하고 있어 이러한 역학적특성을 고려한 내진설계 개념의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 거동특성을 고려하여 중약진지역에서의 다경간연속교의 내진설계에 적합한 기본방향을 제시하였다. 이를 위하여 중약진지역의 지진을 경험하게 되는 다경간연속교의 지진응답특성을 파악하고 현행 도로교설계기준의 내진규정⁽³⁾을 조사하였다.

2. 중약진지역의 다경간연속교의 지진응답 특성

지진하중을 고려하지 않고 설계한 교각도 상당히 큰 수평내하력을 보유하고 있다는 것이 실물 크기의 실험과 1/3 축소모델실험에서 보고되고 있다[NCEER]. 우리나라에서 설계, 시공되고 있는 전형적인 교각의 내진성능을 파악하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 대상교량은 3.5m 지름의 중실원형단면 교각에 의하여 지지되는 것으로 하였다. 교각의 높이는 17.5m이고 주철근비는 0.858%이다. 교각에 재하되는 압축력은 축강도의 10%($0.1f_{ck}A_g$)이며 상부구조의 1경간의 중량은 2,310tf이다.

교각의 공급역량곡선(Capacity Curve)은 파이버모델을 도입한 비선형 푸쉬오버해석을 수행하여 얻었으며 연속경간수가 다른 다양한 다경간연속교의 내진성능은 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)의 방법을 응용하여 평가하였다. 그림 1은 본 연구에서 내진성능 평가를 수행한 다경간연속교의 개념도로서 1개의 고정단 교각을 갖고 있다. 그림 2는 2경간, 3경간, 5경간 7경간 연속교를 대상으로 하여 교축방향에 대하여 내진성능을 평가한 그림이다. 그림 2의(c)에서 알 수 있듯이 5경간 연속교의 경우에도 설계지진(최대유효지반가속도=0.154g)에 대한 소요변위연성도는 크지 않다. 이는 지진하중을 고려하지 않는 일반설계 교각도 적절한 철근상세에 의하여 주철근 겹침이음부에서의 부차파괴와 같은 초기파괴를 방지한다면 상당히 큰 수평내하력을 확보할 수 있다는 것을 시사한다. 한편, 교축직각방향에 대해서는 상부구조는 모든 교각에 대하여 고정지지되고 있어 단경간 교량과 매우 유사한 내진성능을 나타내게 된다. 그림 2의 (a)로부터 유추 가능하듯이 교축직각방향에 대해서는 탄성거동 또는 매우 한정적인 연성거동을 하게 된다. 이와 같이 다경간 연속교의 경우에는 교축방향 및 교축직각방향의 내진성능은 상당히 다르게 된다. 만약 연속경간수가 많은 다경간연속교에서 1개의 고정단 교각이 교축방향의 지진하중에 전부 저항하는 경우에는 상당히 큰 변위연성도가 필요하게 될 것이다. 따라서, 이러한 고정단 교각은 큰 연성도가 확보되도록 설계되어야 한다.

3. 현행 내진상세 규정

전술한 바와 같이 우리나라 도로교의 내진설계는 미국 AASHTO기준을 근간으로 하고 있다. AASHTO기준에서는 설계지진세기에 따라 미국 전역을 4개의 구역으로 구분하여 다른 내진상세를 규정하고 있다. 중약진지역으로 분류 가능한 II 구역에 대해서는 소성현지역에서의 주철근의 겹침이음을 방지하는 명시적인 규정이 없어 이를 허용하고 있다. 그러나, 횡철근에 대해서는 강진 구역에서 규정한 상세규정(횡철근량 및 단부 갈고리)과 동일한 규정을 채택하고 있다. 이는 소성

한지역내에 주철근의 겹침이음이 있더라도 횡철근에 의하여 심부콘크리트가 상당히 구속되어
 소요연성도가 확보될 것으로 기대하기때문이다. 그러나, 기준에서는 중약진 구역에서의 이러한 횡
 철근의 상세가 소성한지 영역에서의 주철근의 겹침이음을 허용하기때문이라는 것을 명시하고 있
 지는 않다. 이러한 내진상세 규정에 의하여 내진성능을 확보할 수 있는 다른 다양한 내진상세의
 적용이 원천적으로 배제되고 있는 것이 현실이다.

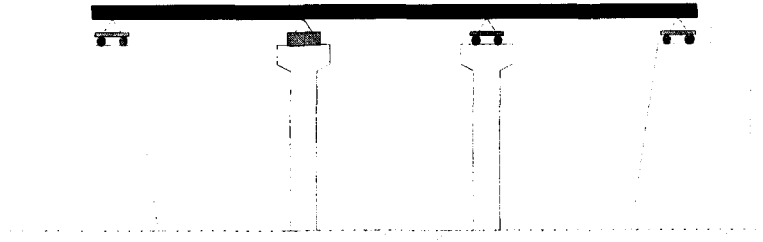


그림 1 다경간연속교 개념도

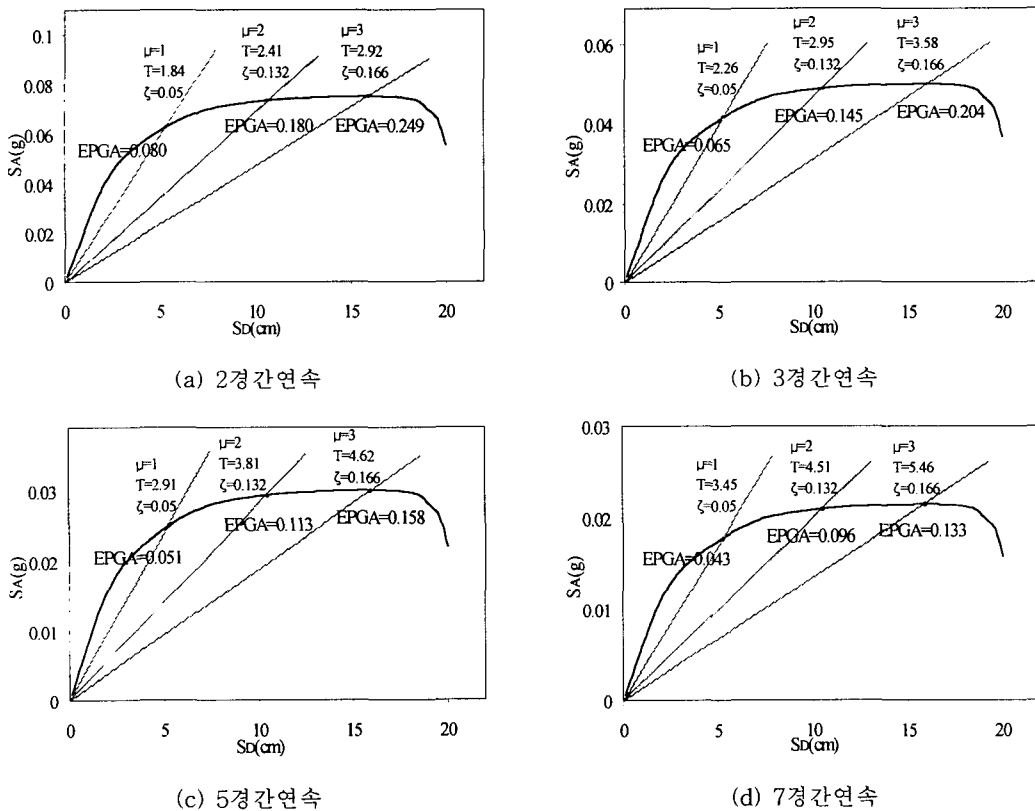


그림 2. 모델교량의 ADRS에 의한 내진성능 평가

최근 들어, 주철근의 겹침이음이 교각의 내진성능에 미치는 영향에 대한 다양한 실험적 연구가 수행되었다. 저자들은 중실원형단면 교각의 축소모델 실험을 수행하여 그 영향을 분석하였다⁽⁵⁾. 각기 다른 주철근 상세를 지닌 2기의 축소모델(지름 1.0m, 교각높이 5.0m)을 제작하여 준정적 재하 실험을 수행하여 비선형 거동특성을 연구하였다. 그림 3은 축소모델에 대한 주철근 상세를 나타낸 것으로 1기에서는 소성힌지영역에서 주철근이 겹침이음 되어 있고 다른 1기의 모델에서는 연속철근을 주철근으로 사용하였다. 두 모델의 횡철근은 동일하며 횡구속을 기대할 수 없는 상세가 적용되었다. 그림 4는 이들 모델의 힘-변위 이력곡선을 나타낸 것이다. 주철근의 겹침이음이 있는 모델의 변위연성도는 약 1.5 정도로 평가되었으나 연속철근을 사용한 모델의 변위연성도는 약 4.5 정도로 평가되었다. 이 실험결과는 소성힌지영역에서의 주철근의 겹침이음을 방지하는 것만으로도 상당한 변위연성도를 확보할 수 있다는 것을 보묘 주고 있다. 이러한 결과는 다른 연구자의 실험에 의해서도 확인되고 있다.

이러한 연구결과에 의거하면 현행 내진설계기준의 약점 중의 하나는 중약진지역의 내진설계에 적합한 내진규정이 아직 개발되어 있지 않은 점이라고 할 수 있다. 현행의 내진규정을 적용하면 어느 정도의 변위연성도가 확보되는 것인지 불확실하며, 설계자가 적용할 수 있는 다양한 내진상세도 개발되어 있지 않다. 예를 들어 연속철근을 주철근으로 사용하여 횡철근에 대한 상세규정을 대폭적으로 완화하여 시공성을 개선할 수 있는 내진상세와 같이 다양한 ;내진상세가 제공되어야 한다.

4. 다경간연속교의 내진설계 방향

4.1 설계응답 스펙트럼

안정된 대륙에서의 지반운동은 지각판의 운동이 활발한 지역의 지반운동과는 차이가 있다^{(1),(6),(7)}. 단주기 성분이 탁월하여 지각판의 운동이 활발한 지역에서 개발되어 사용되고 있는 설계 응답스펙트럼은 안정된 대륙 영역에 포함되는 중약진지역에서는 합리적이지 않다. 특히, 중약진지역에서는 지역효과(Site Effect)의 영향이 훨씬 크다. 따라서, 토질에 따른 증폭계수는 강진지역에서 보다 중진지역에서 크게 된다. 한편, 응답가속도는 지각운동이 활발한 지역에서 보다 안정된 대륙에서 훨씬 빠르게 감소되는 경향을 보이게 된다. 따라서, 중약진지역에서는 하나의 고정단 교각에 의하여 구속되는 다경간연속교와 같이 장주기 구조물이 지진에 대하여 훨씬 유리할 것이다. 설계응답스펙트럼은 이러한 지반운동의 특성을 고려하여 개발되어야 한다.

4.2 내진성능 목표

일반적으로 설계지진은 재현주기 475년의 지진으로 규정된다. 이것은 설계지진에 견디도록 설계된 구조물은 최대잠재지진이 대해서도 붕괴되지 않고 견뎌낼 것이라는 가정에서 출발하기 때문이다. 이러한 개념은 강진지역에서는 최대잠재지진의 지진위험도계수가 1에 가깝기 때문에 상당히 설득력을 지니게 된다. 그러나, 안정된 대륙지역의 지진위험도계수는 1보다 훨씬 큰 값이 될 것이다. 이는 재현주기 475년 지진에 대하여 설계된 구조물은 최대잠재지진에 대해서 붕괴될 가능성이 높다는 것을 의미하게 된다. 따라서, 안정된 대륙지역에서는 현행의 설계개념에 의거하여 구조물

을 내진설계한다면 설계지진의 재현주기를 475년 이상으로 할 필요가 있다.

일반적으로 중약진지역에서는 지진하중 이외의 일반하중에 의하여 설계가 좌우된다. 이러한 일반하중에 비례하여 설계된 부재는 상당히 큰 수평내하력을 보유하게 된다. 따라서, 조기파괴가 일어나지 않는다면 최대잠재지진에 대한 소요연성도도 크지 않게 된다. 성능기초 내진설계 개념에서는 다단계의 내진성능을 정의하게 된다. Bertero⁽²⁾가 지적한대로 현행설계 개념에서는 부재가 최대내하력을 발휘하기 전에 매우 큰 소성변형을 경험하도록 유도된다. 따라서, 비록 구조물이 강한 지진에 대하여 붕괴되지 않더라도 상당히 큰 피해가 발생하기 때문에 많은 보수, 보강비용이 동반된다. 따라서, 큰 소성변위를 허용하는 현행 설계개념은 강진지역에서 조차 합리적이지 않을 수 있다. 이러한 관점에서 보면 중약진지역에서의 내진설계는 큰 소성변형을 허용하도록 하는 것이 아니라 제한된 피해가 유도되도록 내진성능목표를 설정할 필요가 있다.

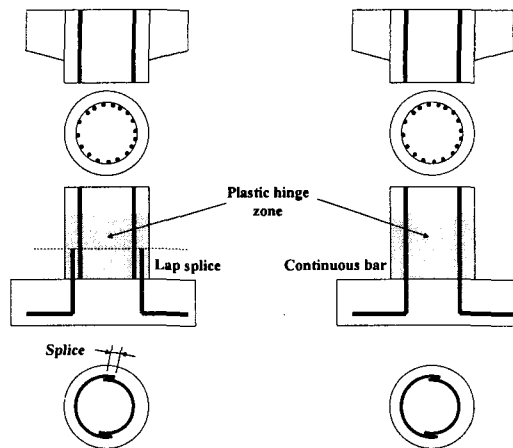
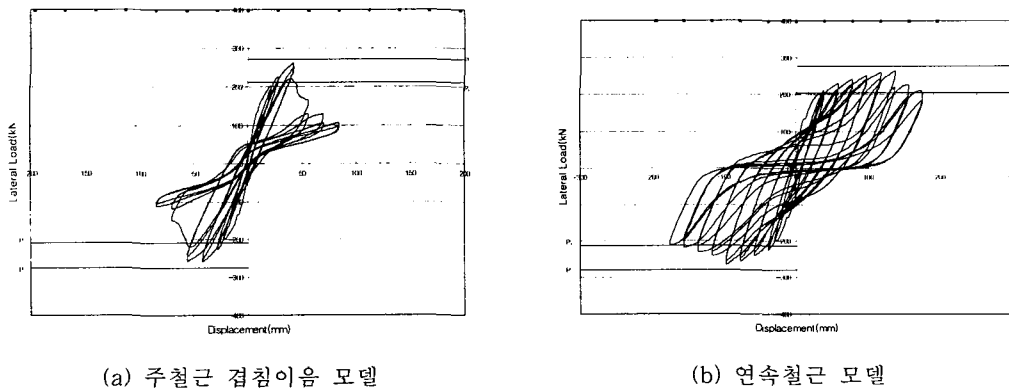


그림 3 모델의 주철근 상세



(a) 주철근 겹침이음 모델

(b) 연속철근 모델

그림 4. 모델의 힘-변위 이력곡선

4.3 변위연성도에 기초한 설계개념

지진 시 한정된 피해를 유도하기 위해서는 큰 소성변형을 허용하여서는 안된다. 따라서, 구조물이 제한적인 연성도를 확보하도록 설계하는 한정연성도 개념을 도입하는 것이 바람직하다. 최소한의 횡철근으로 조기파괴를 방지하여 소요연성도를 확보하는 것이 가능하기 때문에 중앙진지역에서는 한정연성도 설계가 매우 경제적인 설계방법이 된다. 그러나, 특별한 구조형식을 갖는 다경간 연속교의 경우에는 상당히 큰 변위연성도가 요구되는 경우도 있으므로 이것이 확보되도록 내진설계 되어야 할 것이다. 따라서, 연성도에 입각한 내진설계는 탄력적으로 적용할 필요가 있다. 즉, 소요연성도를 확보할 수 있는 내진상세를 설계자가 선택할 수 있도록 많은 자유도가 부여되어야 할 것이다.

RC 구조물의 경우 소요연성도를 확보하기 위해서는 철근상세가 매우 중요하다. 현행의 상세는 강지진역에서 개발된 것으로서 소요연성도는 한정연성도(Limited Ductility)에서 완전연성도(Full Ductility) 영역까지 폭 넓게 존재한다. 따라서, 중앙진지역에 적합한 다양한 철근상세가 개발되어야 하고 이는 설계자가 철근상세의 선정에 보다 많은 자유도를 가질 수 있는 기회를 제공하게 된다. 이를 위해서는 우선, 소요연성도와 이에 대응하는 철근상세의 관계가 확립되어야 하고 특히 설계자가 쉽게 적용할 수 있는 철근상세가 제공되어야 할 것이다.

4.4 구조시스템

다경간연속교의 구조형식은 크게 2가지 범주로 분류 가능하다. 하나는 교축방향의 거동이 다수의 고정단 교각에 의하여 구속되는 경우로서 극단적인 예로서는 모든 교각에 의하여 구속되는 경우를 고려할 수 있다. 다른 하나는 소수의 고정단 교각에 의하여 구속되는 경우로서 단 하나의 고정단교각을 갖는 경우가 이 범주의 극단적인 예에 해당한다.

전술한바와 같이 중앙진지역의 소요내진성능은 크지 않다. 따라서, 소수의 고정단교각을 갖는 교량시스템이 선호되고 있으며 이는 전술한 중앙진지역의 지반운동의 특성을 고려하여도 유리하다. 그러나, 극단적인 경우에는 매우 큰 소요연성도가 요구되므로 특별한 내진상세가 요구되거나 특별한 조치가 요구되기도 한다. 만약 다수의 교각이 지진하중을 분담하는 교량시스템에서는 소요연성도가 매우 제한적이 되므로 한정연성도 설계개념이 적합하다. 그러나, 시공성을 고려한다면 다경간연속교의 지진하중을 하나의 고정단교각이 분담하고 이 때 요구되는 소요연성도가 한정되는 교량시스템이 바람직하다. 이러한 교량시스템은 그림 5와 같은 충격전달장치(Shock Transmitter)나 그림 6과 같은 기계적 지진하중전달장치(Mechanical Seismic Loading Transmitting Device)와 같은 지진보호장치를 도입함으로써 구현할 수 있다.

모든 교각이 지진하중에 저항하는 교량시스템의 특별한 경우는 그림 7과 같이 일반적인 교량받침 대신 지진격리받침을 도입하는 경우이다. 마찰받침(Friction Bearing), 마찰진자받침(Friction Pendulum Bearing) 또는 다양한 적층고무받침(Laminated Rubber Bearing) 등이 적용될 수 있다. 이러한 지진격리받침은 교각으로 전달되는 지진하중을 최소화할 수 있어 작은 횡저항력을 보유한 교각이라도 피해를 방지할 수 있다는 잇점이 있다.

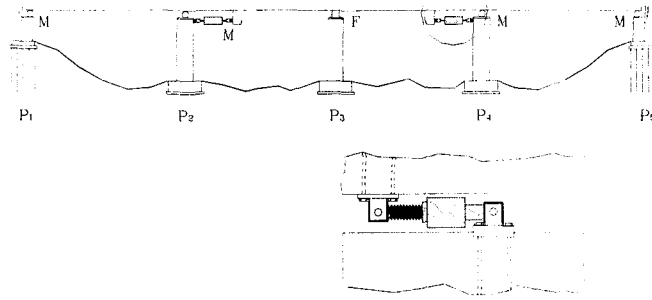


그림 5. 충격전달장치(Shock Transmitter)

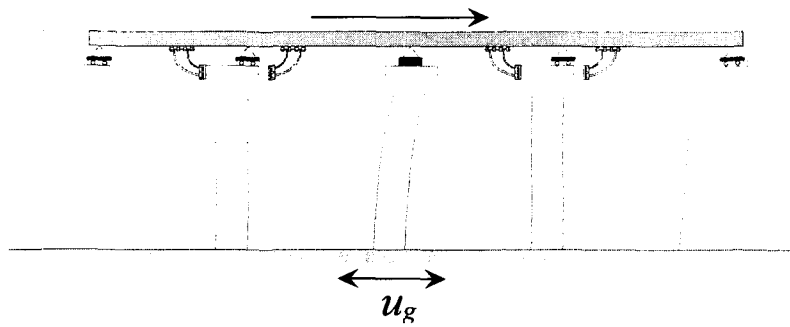


그림 6. 기계적 지진하중전달장치
(Mechanical Seismic Loading Transmitting Device)

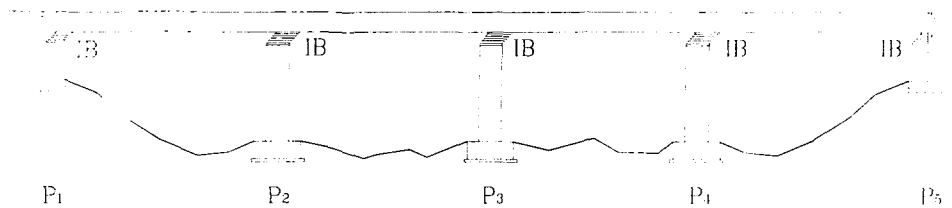


그림 7. 지진격리받침 장착 교량

5. 결론

우리나라는 중약진지역에 속한다. 이에 적합한 내진설계 방법을 확립하기 위하여 중약진지역의 지진위험도특성과 구조물의 지진응답특성을 조사하였다. 또한 현행의 내진규정에 대해서도 조사를 실시하였다. 연구결과에 따른 내진설계 기본방향을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 설계응답스펙트럼은 지반운동의 특성이 반영되어야 한다.
- 2) 설계지진의 재현주기를 보다 크게 하여 설계지진 또는 최대잠재지진에 대해서도 소성변형이

제한되도록 할 필요가 있다.

3) 한정연성도설계 또는 완전연성도설계와 같이 단일 내진설계개념으로 제한하지 않고 소요연성도에 기초한 탄력적인 설계개념을 도입하는 것이 바람직하다. 이를 위한 내진상세의 개발이 필요하다.

4) 중약진지역에서는 하나의 고정단교각에 의하여 지지되는 다경간연속교가 유리하다. 그러나, 다양한 지진격리시스템을 도입하는 대안을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 조사내용, 실험결과 및 수치해석에 기초하여 중진지역의 다경간연속교의 새로운 내진설계방법을 위한 일반적이고 포괄적인 제안을 하였다. 따라서, 보다 구체적인 설계방법 제안을 위해서는 향후 많은 연구가 진행되어야 한다. 또한, 합리적인 내진설계 방법을 확립하기 위해서는 체계적인 연구가 수행되어야 하고 이를 위해서 관련 연구기관 및 연구자간의 긴밀한 협조, 공조체제가 절실하게 요구된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비와 BK21사업단의 연구비 지원에 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Beavers, J. E. and Hunt, R. J. (1998), 'Building seismic safety council project '97 final conclusions', *Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, May 29-June 4, Seattle USA.
2. Bertero, V. V. (1996), 'State-of-the-art report on design criteria,' Paper No. 2005, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.
3. 건설교통부, 도로교설계기준, 서울, 2000.
4. NCEER (1996), 'Seismic Performance of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit,' *Technical Report NCEER-96-0009*, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, 1996.
5. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현 (2001), 수평반복하중을 받는 비내진상세 RC 중실원형교각의 거동특성, *한국지진공학회 논문집*, 제5권 제4호, pp83-95
6. ATC (1995a), 'A critical review of current approaches to earthquakeresistant design,' *ATC-34 report*, Applied Technology Council, Redwood City California.
7. Power, Maurice S. (1996), 'Characteristics of seismic hazard in stable continent regions and active tectonic regions: relevance for developing seismic design criteria', Paper No. 2155, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico.