

## 중약진 지역에서의 내진설계 개념의 발전동향

### Progress in Seismic Design Concept in Moderate Seismicity Regions

장승필\*                      김재관\*\*  
Chang, Sung Pil          Kim, Jae Kwan

---

#### Abstract

Seismic design in low to moderate seismic regions has to be based on the characteristics of seismic risk, ground motion and structural response in that region. The characteristics of seismic hazard in low to moderate seismic regions are reviewed briefly. The recent findings on the dynamic behavior subjected to the moderate intensity level of ground motion are summarized. The seismic design considerations in Eastern America, China, Australia, Thailand and Hong Kong will be introduced. The effort to adopt the limited ductility design in low to moderate seismicity regions will be reported. Finally research works that are required for the implementation of the limited design concept will be proposed.

---

#### 1. 서 론

1998년 12월 7-8일 기간동안 Hong Kong에 있는 Hong Kong University of Science & Technology에서는 미국 Mid-American Earthquake Engineering Research Center와 Hong Kong의 Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong University, Hong Kong Polytechnic University의 주관으로 "Earthquake Engineering for regions of moderate Seismicity"를 주제로 Workshop [1]이 개최되었다. 이 학술대회의 주요 성과 중 하나는 중약진 지역에 적합한 내진설계개념으로서 한정연성도 내진설계법이 건의된 것이다.

중약진 지역에서의 내진설계시에 강진지역에서 발전한 연성도 설계개념이 무비판적으로 적용이 되어왔다. 그러나, 중약진 지역에서는 지진지반운동의 특성과 구조물의 지진응답 특성이 강진지역과는 매우 다름이 확인되면서 실제 거동에 근거한 설계법을 확립하고자 하는 연구가 가속되고 있다. 이 논문에서는 현재 중약진 지역에 속하는 국가들에서 진행되고 있는 새로운 내진설계에 대한 연구 현황을 조사하고 분석한 결과를 요약하였다. 끝으로 앞으로 한정연성도 내진설계의 본격적인 적용에 선행하여 필수적으로 요구되는 연구내용을 제시하였다.

---

\* 서울대학교 교수, 정회원

\*\* 서울대학교 교수, 정회원

## 2. 중약진 지역에서의 지진지반운동의 특성 [2]

최근까지 내진설계개념과 규범은 Active Tectonic Regions (ATRs)에 속하는 강진지역 (일본, 미국, New Zealand)을 중심으로 ATRs에서의 지진재해의 특성과 지반운동의 특성에 근거하여 발전되어 왔다. 그러나 지진재해의 특성과 지반운동의 특성에 있어서 Stable Continental Regions (SCRs)과 Active Tectonic Regions (ATRs)은 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 SCRs에 속하는 중약진 지역의 내진설계에서는 SCRs에서의 지진재해와 지반운동의 특성이 반영되어야 할 필요가 있다. 여기서는 SCRs에서의 지진재해와 지반운동의 특성을 요약 기술하고 그것들이 내진설계에 주는 의미를 살펴보기로 한다.

### 2.1 SCRs에서의 지진재해와 지반운동의 특성 [2]

- 지진원이 뚜렷하게 드러나지 않고 정의하기 어렵다.
- 단층자료에 의거하여 MCE를 결정하기 어렵다.
- 지진의 발생 빈도는 지진기록에 주로 의존해야 한다.
- 거리에 따른 지반운동의 감쇠는 ATRs에서 보다는 느리다.
- 경암의 분포는 지반운동의 단주기 성분을 상대적으로 증가시킨다.

### 2.2 내진설계 개념에 대한 의미 [2]

- 설계지진을 결정함에 있어서 결정론적 접근법보다 확률론적 방법이 더 적합하다.
- 설계지반운동의 수준은 ATRs에 비하여 재현주기가 긴 지진이 사용되어야 한다. 그 이유는 SCRs에서는 재해도 평가에 있어서 불확실성의 정도가 높고 재현주기가 긴 지진의 세기와 주기가 짧은 지진의 세기의 비가 크기 때문이다.
- 설계응답스펙트럼의 형상에서는 단주기 성분이 ATRs의 표준 스펙트럼보다도 풍부하고 장주기 영역에서는 감소 속도가 빠른 특성을 보인다.
- 지반운동의 특성에 미치는 부지지반의 영향은 ATRs에서 보다는 현저하게 된다. 그 원인은 지반운동의 세기가 낮기 때문에 흙에서의 감쇄가 작고 비선형적 거동의 정도가 낮기 때문이다.

## 3. 중약진 지역에서의 구조물의 지진거동 특성 [1,3,4,5,6]

### 3.1 모멘트 저항구조

철골 구조, 철근콘크리트 구조 또는 전단벽 구조 등과 같이 횡하중에 의해서 발생하는 모멘트에 저항역량을 보유한 구조물은 비록 지진하중이 고려되지 않았고 내진상세가 제공되지 않았다고 할 지라도 상당한 크기의 지진하중에 대하여 어느 정도 연성거동을 보인다. 그리고, 지진하중을 고려하고 강진지역에서 요구하는 완전 연성거동을 보장하기 위해서 내진상세가 강화된 구조의 경우에는 비록 강도에 있어서 증가를 보이지만 중약진 지역에서 기대되는 지진하중하에서는 한정된 연

성도 내에서만 비선형적 거동을 보이므로 보유한 연성역량을 충분히 발휘하기 어렵다. 그러므로 중약진 지역에서 완전 연성도에 근거한 설계는 과도한 설계로 귀착할 가능성이 높다고 할 수 있다. 그리고 장주기 특성의 구조물은 응답스펙트럼의 값이 작기 때문에 거의 탄성적으로 거동할 가능성이 높으나 단주기 특성의 구조물은 응답스펙트럼의 값이 높기 때문에 비선형 영역에서 거동할 것으로 기대된다.

### 3.2 모멘트 비저항구조

비보강 조적구조와 같이 횡하중에 의해서 발생하는 모멘트에 저항역량이 매우 낮은 구조체에는 낮은 수준의 지진하중 하에서도 손상이 발생하기 쉽고 좀더 높은 세기의 지진하중 하에서는 취성적으로 파괴될 가능성이 매우 높다. 특히 이러한 구조물은 손상이 발생하기 전에는 단주기 특성을 보일 것으로 예상이 되므로 낮은 수준의 지반운동의 세기에서 손상이 발생할 가능성이 높다. 이러한 측면에서 본다면 중약진 지역에서는 조적구조와 같은 구조물에 연성도를 증가시키는 방법을 채택하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

## 4. 중약진 지역에서의 내진설계에 관한 국제적 연구 동향 [1]

### 4.1 미국

미국의 서부는 판 경계에 놓여 있어서 강진이 자주 발생하고 있다. 이에 비하여 미국의 동부지역은 드물게 큰 지진이 발생하나 서부처럼 지진하중의 세기가 높지 않다. 미국의 중부와 남부는 New Madrid 지역을 제외하고는 약진 지역에 속한다고 할 수 있다. 그러나 내륙에 위치한 New Madrid에서는 미국 역사상 가장 규모가 큰 지진이 과거에 발생하였으며 지진활동이 활발하지는 않으나, 극히 드물게 매우 큰 지진이 발생하여 막대한 피해를 가져올 가능성이 상존하고 있다. 최근까지는 미국의 내진설계는 강진지역인 California에서 발달한 개념과 설계법을 채택하고 있었으나, Stable Continental Regions에서는 지진재해도와 지진하중의 특성이 Active Tectonic Regions과는 큰 차이가 있음이 밝혀짐에 따라서 중약진 지역에서의 지진하중과 내진설계성능수준 및 설계방법에 대한 연구가 미국 New York 주 북동부에 본부가 있는 National Center for Earthquake Engineering (NCEER)을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 작년에는 Mid-American Earthquake Center가 Illinois주 Urbana-Champaign에 설치가 되었으며 New Madrid를 포함한 미국 중부지역에 적합한 내진설계에 관하여 연구를 개시하였으며 세계적으로 중약진 지역에서의 내진설계에 대한 연구를 주도할 것으로 예상된다. NCEER (현재는 Multi-Disciplinary Center for Earthquake Engineering Research, MCEER)의 중약진 지역에 대한 연구 성과 중 하나는 미국 New York시의 내진설계규범의 작성이다.

### 4.2 중국

중국 지진국의 Dr. Hu는 Performance-Based Design을 한단계 더 발전시킨 Consequence-Based Design을 제안하였다. 중국은 3 Level 설계지진을 채택하고 있고 목표하는 내진성능수준은 2 단계

이다.

중국의 과거 역사지진 피해분석 결과에 의하면 피해의 90%이상이 중진지역으로 분류된 곳에서 발생하였다고 한다. 그 원인 중 하나는 앞서 언급하였듯이 안정된 대륙지역 (Stable Continental Regions)에서의 지진활동의 불확실성에 있다. 중국에서의 지진피해는 중국에서는 현재 중약진 지역에서는 건물을 강진지역에서의 설계와는 차등을 두고 있으며 지진해석을 요구하지 않고 구조물의 종류에 따라서 개별적인 내진상세를 규정하고 있다.

#### 4.3 Australia

Australia 는 Indo-Australia 판내부에 위치하고 있으며 우리나라와 유사 중진 지역에 속한다. 1989년에 발생한 규모 5.0의 Newcastle 지진에 의해서 11명이 사망하였고 광범위한 피해를 초래하였다. Australia 는 현재 UBC91에 근거하여 제정된 내진설계 기준을 채택하고 있으나 최근 강진지역에서의 구조물의 거동에 근거하여 발전한 설계개념을 지진특성과 구조물의 거동특성이 상이한 Australia 에 적용이 가능한가에 대한 의문이 제기되고 있고 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

#### 4.4 태국

태국은 Indo-Australia 판과 Eurasian 판의 경계로부터 떨어져 있으며 북부지역이 남부지역보다 지진활동이 활발하나 전체적으로 중약진 지역에 속한다고 판단된다. 태국은 극히 최근에 내진설계가 도입되고 있다. 현재 채택하고 있는 규범은 1984년 UBC에 근거하고 있다. 태국의 지진활동측면에서 MCE와 재현주기 500년 지진의 세기의 비가 매우 큰 특성을 보이고 있다. 따라서, 500년 재현주기 지진을 설계기준지진으로 채택하였을 경우 MCE 발생시에는 건물이 붕괴할 위험이 매우 높다고 한다.

#### 4.5 Hong Kong

Hong Kong 은 중약진 지역에 속하고 있으며 교량은 내진설계가 적용되고 있으나 현재 건축물의 설계에 있어서는 지진하중이 고려되지 않고 있다. 교량의 내진설계에 대해서는 그 개선 방법에 대한 검토가 진행되고 있다. 건물에 대해서는 고층 건물과 저층 건물의 대한 지진하중의 영향을 분석하고 있다. 그 잠정적인 연구 결과에 의하면 고층빌딩은 일반적으로 풍하중이 설계를 지배하나 중저층 건물은 지진하중의 영향이 더욱 현저한 것으로 밝혀지고 있다. Hong Kong 에서 일부 연구자들이 제안하는 내진규범은 미국 New York 시가 채택할 예정인 내진규범에 근거를 하고 있다. 설계스펙트럼은 중약진 지역의 특성을 반영하였고 구조물의 연성도는 동일한 값을 채택하고 있다. 즉,실제적으로 건물이 탄성적으로 거동하거나 한정된 연성거동을 하는 것에 근거하고 있다. Hong Kong 은 해안에 연하여 있기 때문에 부지의 영향이 현저할 가능성이 높으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

## 5. 한정연성도 내진설계에 관한 연구

### 5.1 New Zealand 에서의 연구 실적

NZS 3101 [7] 의 17. Seismic Requirements for Elements of Limited Ductility 은 연성도  $\mu$ 가 1.25 보다는 크고 3.0 보다는 작은 범위에 있는 경우를 한정연성도 (Limited Ductility)로 정의하고 이러한 거동을 보장할 수 있는 내진상세를 규정하고 있다. 이 조항들은 T. Paulay 와 M.J.N. Priestly [8] 및 S. Waston 과 R. Park [9] 등의 연구에 기초하여 작성되었다고 한다. 그러나, 이 Standard 에서는 소요 연성도에 따른 철근상세에 대한 조항은 주어져 있지 않다. 그리고 또한 NZS 3101 [7]의 한정 연성도에 대한 완화된 내진상세 요건은 교량의 내진설계에는 직접 적용되지 않는다고 [7, 10].

### 5.2 미국에서의 연구 실적

ACI 318-95 의 21.8- Requirements for frames in regions of moderate seismicity risk 에는 강진지역에 비하여 철근상세를 대폭 완화할 수 있도록 허용되어 있다. 예를 들어서 최대 띠철근 간격이 (a) 주철근 직경의 8 배; (b) 띠철근 직경의 24 배; (c) 최소 단면치수의 1/2; 또는 (d) 30cm 를 초과하지 않을 것을 요구하고 있다. 이러한 규정은 내진상세가 제공되지 않은 콘크리트 구조물도 상당한 연성도를 보유하고 있다는 것을 인정하고 있다는 것을 의미하며, 약간 강화된 띠철근 배근상세는 전단에 의한 취성 파괴의 확률을 저감시키는데 그 목적이 있다. 그러나, ACI 318-95 에서는 소요 연성도에 따른 철근상세에 대한 조항은 주어져 있지 않으며, 특히 ACI 318-9 의 21.8 규정을 따랐을 경우 보장될 수 있는 연성도에 대한 정보도 제공되어 있지는 않다. 그러나 CALTRANS 의 교량의 내진설계에서는 비록 한정 연성거동은 인정하되 내진상세는 완전 연성설계에서와 동일하게 요구하고 있다 [10, 11]

그러나, 소요 연성도에 따라서 내진상세 요구에 대한 연구가 발표되고 있다 [12]. 이 연구의 결과로서 장방형 교량 기둥의 구속에 대한 철근상세가 소요연성도의 함수로서 제시되었다.

## 6. 중약진 지역에서의 내진설계에 관한 앞으로의 연구 방향

중약진 지역에서의 지진지반운동의 특성과 지진시 구조거동특성에 적합한 내진설계법을 개발하고 실제로 적용하기 위해서는 다음에 열거한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

- SCR 에서의 설계지반운동 특성 규명
- 설계지반운동의 수준 결정
- 내진성능목표 설정
- 한정연성도 내진설계절차 개발
- 한정연성도 확보를 위한 설계상세 개발
- 기존 시설과 구조물의 지진 취약도의 실험과 해석에 의한 도출

이러한 연구를 단기간에 시행착오 없이 달성하기 위해서는 기술 선진국 뿐 아니라 지진환경이 유사한 국가간의 국제적 연구협력이 필수 불가결한 것으로 판단된다.

## 7. 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고 문헌

1. Proceedings of the International Workshop on the Earthquake Engineering in Regions of Moderate Seismicity, 7-8 December 1988, Hong Kong, Organized by Department of Civil Engineering of Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil Engineering of Hong Kong University of Science and Technology, Department of Civil Engineering of University of Hong Kong and the Mid America Earthquake Center (to be Published).
2. 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
3. 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
4. Kim, J.K. and Kim, I.H. (1998a), "Seismic design in low or moderate seismicity regions: suggested approaches," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 2, September 1998.
5. Kim, J.K. and Kim, I.H. (1998b), "Limited ductility seismic design in moderate seismicity regions," *Proceedings of EESK Conference-Fall, 1998*, Vol. 2, No. 2, *Earthquake Engineering Society of Korea*
6. Lee, H.-S., Woo, S.-W., Heo, Y.-S. (1998), "Inelastic behaviors of a 3-story reinforced concrete frame with nonseismic details," *Proc., of KCI Conference-Spring 1998*, 10(1), 429-432.
7. Standards New Zealand (1995), *Concrete Structures Standard, Part 2-Commentary on the Design of Concrete Structures*, NZS 3101: Part 2: 1995.
8. T. Paulay and M.J.N. Priestly (1992), *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley and Sons, Inc.
9. S. Watson and R. Park (1989), *Design of Reinforced Concrete of Limited Ductility*, Research Report 89-4, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
10. ATC (1997), *Seismic Design Criteria for Bridges and Other Structures*, ATC-18, Applied Technology Council.
11. ATC (1996), *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: provisional Recommendations*, ATC-32, Applied Technology Council.
12. N. I. Wehbe, M. Saiidi, D. H. Sanders (1998), *Confinement of Rectangular Bridge Columns for Moderate Seismic Areas*, NCEER Bulletin Vol. 12, No. 1, NCEER.