

# 건축구조물의 탄소성 지진응답 해석용 입력지진동

전 대 한\*

## 1. 서 론

건축물의 내진설계는 건물의 건설예정지역에서 장래 발생할 것으로 예상되는 지진외란군에 대하여 건축물의 각 부재의 지진응답이 내진안전성 범위내에서 안전하도록 구조설계 되어야 한다. 따라서, 건물의 내진설계는 건물의 동적거동을 전제로 성립한다고 할 수 있다. 건물의 동적거동을 파악하기 위해서는 구조물을 적절한 동력학 모델로 이상화 할 필요가 있으며, 또한 지진동에 의한 구조물의 지진응답특성을 파악하여 내진안전성을 검토할 필요가 있다.

건물의 지진응답특성은 부재의 탄성한계 범위내에서 생기는 동적거동 특성과 부재의 탄성한계를 초과한 탄소성 상태에서의 동적거동 특성으로 분류할 수 있다. 또한 구조물의 내진설계도 구조물의 탄성 지진응답을 전제로 설계된 구조물의 내진안전성과 탄소성 지진응답을 고려한 구조물의 내진안전성으로 나눌 수 있다. 따라서, 구조물의 탄성지진 응답해석에서 얻어지는 내진안전성 평가 척도와 탄소성 지진응답해석에서 얻어지는 내진안전성 평가척도도 각각 달라질 것이다.

지진응답해석용 입력지진동은 경제성과 공학적 합리성을 고려하여 구조물의 설계목적에 맞추어, 탄성해석용 입력지진동과 탄소성해석용 입력지진동으로 나누어 생각할 수 있다. 일반적으로 탄성

설계용 입력지진동은 구조물의 내용년한중에 1번이상 발생할 가능성이 있는 지진동으로서, 구조부재의 지진응답치가 탄성한도내에 머물도록 하는 것이 설계 목표이다. 탄소성설계용 입력지진동은 구조물의 건설예정지에서 과거 발생했거나 장래 발생 가능성이 있는 최강의 지진동으로서, 구조물의 각부재가 탄성한계를 넘어 항복상태에 달하는 것을 허용한다.

여기서는 현재 각국의 내진설계 규정에서 설정하고 있는 입력지진동의 현황과 입력지진동의 문제점, 탄소성 응답특성과 입력지진동 문제에 대하여 알아 보기로 한다.

## 2. 지진하중 설정의 흐름

지진동에 의한 건물의 동적거동이 파악되기 이전에는 지진동이 구조물에 미치는 동적효과를 진도라는 개념을 도입하여 구조물에 직접 작용하는 정적인 수평력으로 치환하여 표시했다. 진도의 개념은 구조물을 강체로써 간주할 경우 지진에 의해 표층지반에 발생하는 최대 지반가속도와 구조물의 진중량과의 비로서 나타내어지는 관성력에 해당한다. 즉 지진동이 갖는 파괴력을 관성력으로 표현하고 구조물이 갖는 내진성능을 내력으로 생각할 때, 허용응력도 설계법에서는 지진동에 의한 관성력이 구조물의 허용한계내력내에 머물도록 하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 진도의 개념에 의한 내진설계법은 입력지진동이 갖는

\* 정희원, (주)해동메쉬 건축구조연구실, 공학박사

여러 특성을 모두 무시하고, 최대 관성력을 발생시키는 최대 지반가속도에만 주목하여 간편성을 추구한 것이 그 특징이라고 할 수 있다.

전자계산기의 발달과 더불어 지진동에 의한 구조물의 동적거동이 파악되기 시작하면서 입력지진동특성과 구조물의 지진응답특성을 고려한 지진하중의 설정법이 각국의 내진규정에 도입되기 시작했다. 즉 입력지진동이 갖는 주기특성과 구조물의 고유주기와 관계를 고려한 지진하중의 설정 및 지진관측 데이터의 축적에 따라 지반의 특성 및 지진발생 빈도를 고려한 지진하중의 설정이 그 예이다. 이와 같은 지반과 지진동의 특성 및 구조물의 동적거동 특성이 지역계수와 지반중별계수의 형식으로 내진규정에 도입되었다. 이러한 내진규정은 탄성 지진응답해석에서 얻어진 구조물의 지진응답을 기초로 하여 얻어진 것이다.

그러나 지진작용에 의한 각부재의 최대응답이 탄성설계법에서 추구하는 구조물의 최대내력 이내에 머물도록 하는 것은 구조설계면에서 뿐만 아니라 구조물의 경제성에 있어서도 매우 곤란한 점이 많다. 또한 탄소성 지진응답해석법의 발달로 강지진에 대하여 구조부재의 항복을 허용함으로써, 구조물에 작용하는 지진력을 크게 줄일 수 있다는 것이 명백해졌다. 이들의 연구성과를 바탕으로 구조물의 소성변형을 허용하는 설계법이 일반화되었다. 따라서 현재의 내진설계 규정은 2단계로 분리하여 내진안전성을 검토하는 것이 일반적이다. 구조물의 내용년한중에 1번이상 겪게 되는 지진동에 대해서는 구조물의 각부재가 항복내력 이하에 머물도록 설계하는 1단계 설계와, 구조물의 건설예정지역에서 과거 발생한 지진중에서 최강의 지진동 또는 장래 발생가능성이 있는 최강의 지진동에 대해서는 건물의 소성변형을 허용하지만 인명 및 재산의 손실에 막대한 지장을 초래하는 구조물의 붕괴는 피한다는 내진설계 사상으로 구조설계 되고 있다.

### 3. 입력지진동과 구조물의 파괴척도

구조물의 파괴척도는 내진설계법의 기본성격을

부여하는 것으로서 입력지진동 설정에 중요한 역할을 한다. 내진설계법에서 지진동에 의한 구조물의 최대 응답내력이 부재강도 범위내에 머물도록 설계하는 탄성설계법에서는 구조부재의 최대내력 또는 최대강도가 구조물의 파괴척도가 된다. 따라서 이 경우 입력지진동은 관성력의 최대치에 대응하는 최대 지반가속도값에 의해 그 성질이 결정된다.

그러나 지진과 같은 가속도에 의해 생기는 관성력은 지속적으로 작용하는 하중이 아니고 순간적인 시간 의존성의 외란이기 때문에, 구조체가 갖는 감쇠 및 강성 등에 따라 하중효과가 크게 감소된다. 따라서 지진동과 같은 관성력에 의해 생기는 외력에 대한 구조설계에서는 구조물의 소성변형능력을 구조물의 파괴척도로써 채택할 수 있다. 따라서 이 경우의 입력지진동은 지진동 본래의 성질보다 구조물의 구조적특성의 영향에 좌우되는 성질이 있다.

지진동을 구조물에 작용하는 pulse로써 간주하여 지진의 파괴력은 지진동의 최대속도의 2승에 비례하고 구조물의 내진성능은 구조물에 축적되는 potential 에너지로 생각하여, 구조물의 파괴척도를 지진동에 의한 속도에너지와 구조물의 내부변형에너지의 대소 관계로써 나타내는 방법이 있다. 이 경우의 입력지진동은 최대 속도응답 또는 최대 운동에너지의 형식으로 그 특성이 결정된다.

이와 유사한 개념으로 Housner는 지진동에 의한 에너지 입력과 구조물의 에너지 흡수 능력을 대치시켜 구조물의 내진성능을 평가하는 설계법을 제안하였다. 또한 秋山은 구조물의 파괴는 구조물의 복원력이 상실될 때 일어난다고 간주하여 반복하중에 의한 누적소성변형량이 어느 일정한도에 도달하여 붕괴에 이르기 까지 구조물에 축적되는 소성변형에너지와 지진동에 의한 입력에너지를 대치시켜 내진안전성을 검토하는 설계법을 제안하고 있다. 이 경우의 입력지진동은 지진입력에너지(Input Energy)의 형식으로 주어진다. 기왕의 연구결과에 의하면 지진입력에너지는 하나의 지진에 대해서 구조물의 강성분포, 강도분포, 복원력특성의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다.

이상에서 본 바와 같이 구조물의 파괴척도에 따라서 내진설계법의 형식이 달라지고 입력지진동의 개념도 달라진다. 이것은 구조물의 파괴척도가 내진공학에서 중요한 역할을 담당하게 되며, 내진설계법에 따라 지진동의 성질을 결정짓는 중요한 인자의 역할이 달라지는 것을 의미한다. 따라서 입력지진동의 문제는 자연현상으로서의 지진동의 실제 파악만으로는 설계용 입력지진동의 특성을 결정하기는 매우 어렵고, 구조물의 응답특성 및 내진설계 사상과 연관지어 생각해야 할 문제이다.

#### 4. 입력지진동 설정상의 문제

건축물의 내진설계의 목표는 건물의 건설예정지에 장래 발생할 가능성이 있는 지진동에 대하여 구조부재의 지진응답치가 규정된 안전성 범위내에 머물도록 해야 한다. 이와 같은 내진설계 목표를 달성하기 위해서는 건축물의 건설예정 지역에 발생할 가능성이 있는 지진동특성을 예측하는 것이 필요하다.

현재 건축물의 지진응답해석용 입력지진동으로는 과거의 지진에서 기록된 강지진동파형을 사용하는 것이 일반적이다. 이들 기록지진동은 지진의 발생기, 지진규모, 진원위치, 지진파의 전파경로 등의 여러 요인에 의해 기반에 있어서의 스펙트럼 특성만을 주목하여도 매우 복잡한 특성을 가지고 있으며, 지표면 혹은 지표부근의 지중에서 관측된 지진동은 관측점 부근의 국부적인 지하구조의 영향도 포함되어 있어 더욱 복잡한 특성을 나타낸다. 또한 현재 고층건축물의 지진응답해석에 사용되고 있는 대부분의 기록지진동은 구조물 또는 구조물 근방의 지반에서 관측된 지진동파형이기 때문에, 주변건물의 영향 및 구조물과 지반의 상호작용에 의한 영향도 포함되어 있다.

그림 1은 미국 및 일본에서 기록된 대표적인 강지진 기록지진동파형의 탄성응답스펙트럼을 표시한 것이다. 여기서 각 기록지진동의 입력강도는 주기  $T=0.5\sim 5.0$  sec, 감쇠정수  $h=10\%$  일 때의 스펙트럼강도( $SI_{10}$ )가 일정하게 되도록 각 입력지진동의 최대 가속도진폭값을 조절하여 입력한

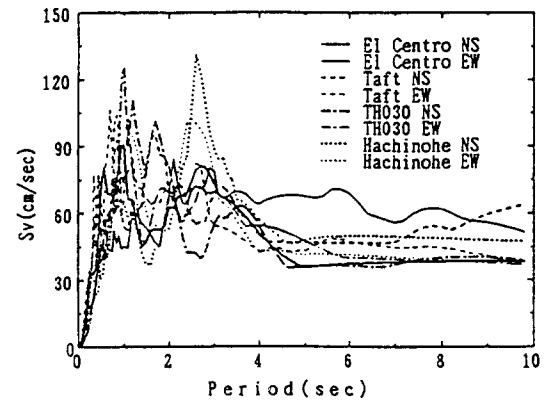
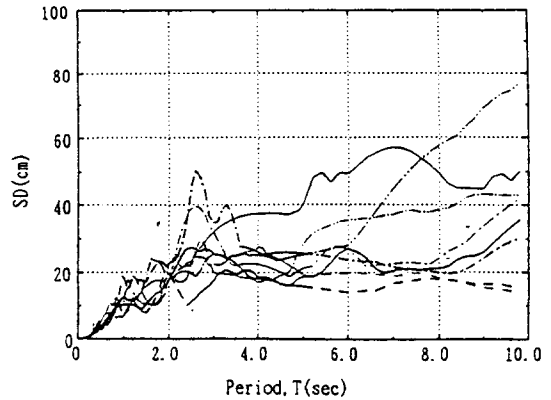


그림 1. 기록지진동파형의 탄성응답 스펙트럼

것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 입력지진동에 따라 각 주기마다의 응답스펙트럼의 변동은 매우 크며, 구조물의 동일한 동역학모델에 대해서도 입력지진동에 따라 응답치의 변동이 매우 클 것이 예상된다.

그림 2는 탄소성 복원력 모델(Bi-linear model)을 사용하여, 대표적인 강지진동에 의한 소요내력계수 스펙트럼을 표시한 것이다. 소요내력계수 스펙트럼은 각 입력지진동에 대하여 주기마다 최대 응답소성율이 거의 동일하게 얻어지도록 항복내력을 설정하는 계수이다. 따라서 소요내력계수  $\eta$ 은 입력지진동의 최대 지반가속도진폭값으로 무차원화하여 동일한 최대 응답소성율이 얻어지도록 입력지진동의 입력강도를 표준화한 것이라고 볼 수 있다. 그림에서 동일한 최대응답 소성율이 얻어지는 소요내력은 지진동의 특성에 따라

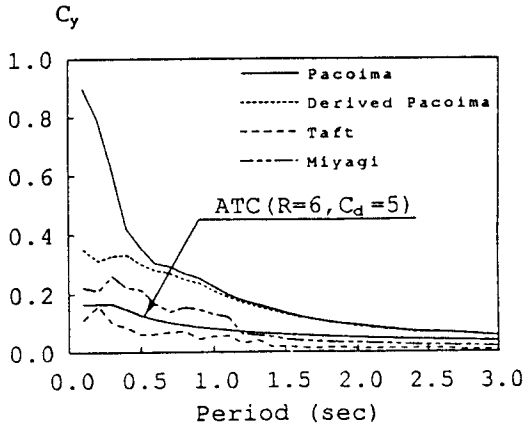
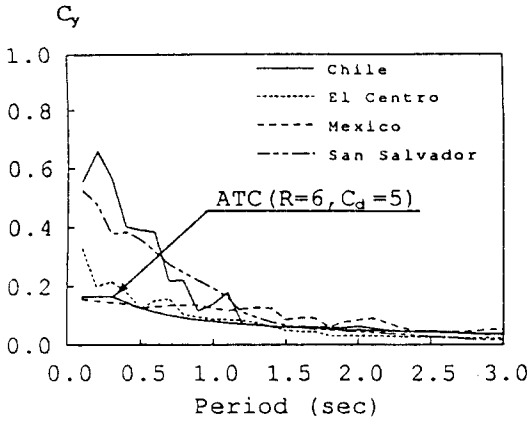
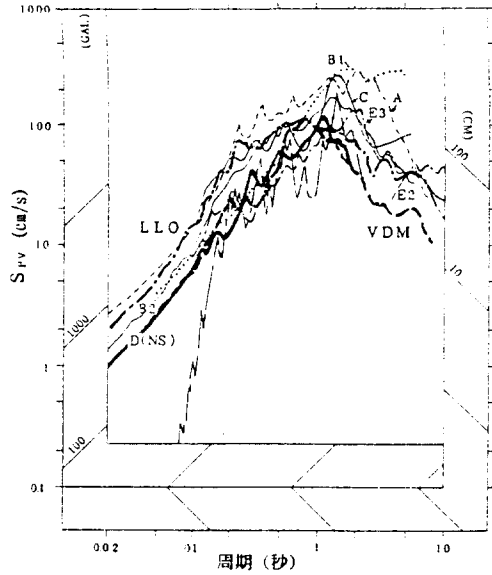


그림 2. 소요내력계수 스펙트럼(Bi-linear model)

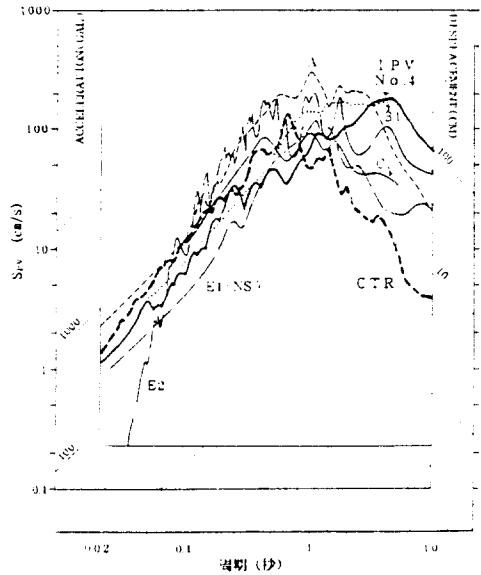
큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 즉 이것은 입력지진동의 특성이 탄소성 응답량에도 큰 영향을 미친다는 것을 보여 주는 것이다.

이와 같이 기록지진동은 지진고유의 특성 때문에 일반적인 건축물의 탄소성 지진응답해석용 입력지진동으로는 한계가 있다. 따라서 내진설계법이 발달한 선진 각국에서는 보다 광범위하고 일반성을 갖는 모의지진동의 작성 및 예상되는 지진 또는 건설예정지반에 적합한 모의지진동을 작성하여 설계용 지진동으로 활용하는 방안이 많이 연구되고 있다.

지진동을 예측하는 수법으로는 지진학적 단층모델을 이용하는 수법과, 공학적 모의 지진동을 작성하는 수법으로 분류할 수 있다. 단층모델에 의한 경우는 지진의 진원에서 관측점까지 이르는



(a) Mexico City Earthquake(1985)와 예측지진동과의 비교



(b) Loma Prieta Earthquake(1989)와 예측지진동과의 비교

그림 3. 기록지진동과 모의지진동의 스펙트럼 비교

지진파의 발생전과과정을 모델화하여, 지진파의 진폭뿐만 아니라 위상특성을 포함하여 평가할 수 있다. 이것에 비하여 공학적 모의지진동 작성법은 진원에서의 지진파 발생전과과정을 무시하고 지진동의 진폭특성과 위상특성을 주요한 수학적 모델

화 대상으로 하여 모의지진동을 발생시키는 방법이다.

그림 3은 상기의 2방법에 의한 지진동 예측수법을 이용하여 작성한 모의지진동에 의한 응답스펙트럼 및 유사한 지진 및 지반 조건하에서 기록된 기록지진동의 응답스펙트럼을 비교하여 표시한 것이다. 그림에서 각종 모의지진동의 작성수법에 따라 응답스펙트럼의 차는 크지만, 기록지진동의 응답스펙트럼은 모의진동에 의한 응답스펙트럼과 거의 유사한 성질을 갖고 있다고 할 수 있다. 이것은 이와 같은 모의지진동 작성수법이 지진동 예측수법으로 타당성이 있다고 할 수 있다.

또한 설계용 목표 스펙트럼에 적합한 모의지진동을 작성하여 입력지진동으로 이용하는 경우도 있다. 이들 모의지진동에 의한 구조물의 응답특성은 특정의 입력지진동을 사용하는 것보다 안정된 응답특성이 얻어진다. 그러나 이렇게 작성된 모의지진동은 하나의 sample에 불과하기 때문에 구조물의 응답특성을 파악하기 어려운 단점이 있다. 따라서 설정된 설계용 스펙트럼에 평균적으로 대응하는 많은 sample의 모의지진동을 작성하여, 이들 지진동과평균에 의한 응답량을 통계적으로 평가하는 수법이 유용할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

구조물의 지진응답해석에 사용하는 입력지진동 특성을 구성하는 요소로서,

- (a) 지진동의 최대 지반가속도치
- (b) 지진동의 위상특성
- (c) 지진동의 계속시간
- (d) 지진동의 스펙트럼특성

등을 들 수 있다. 그러나 이들 지진동을 구성하는

각 요소들이 구조물의 응답 및 손상에 직접 관련되어 지진동의 강도를 나타내는 척도로써 나타나는 것은 아니다. 그리고 이들 지진동특성을 규정하는 각 인자와 구조물의 응답특성 및 구조물의 손상도와의 관계를 규명하는 것이 입력지진동의 설정에 있어서 매우 중요하다고 생각된다. 또한 탄성 응답특성과 탄소성 응답특성과의 관계를 규명하여, 탄성 응답스펙트럼이 구조물의 손상에 미치는 효과를 정량적으로 파악할 수 있다면 강지진에 대한 구조물의 내진설계는 보다 간편하게 할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 日本建築學會：地震荷重－その現状と將來の展望，1987.
- [2] 日本建築學會：地震動と地盤，1983.
- [3] 日本建築學會：地震荷重－地震動の豫測と建築物の應答，1992.
- [4] 秋山 宏：建築物の耐震極限設計，東京大學出版會，1985.
- [5] Housner, G.W., "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes", Proc. 1st WCEE, Berkeley, pp.5-1~13, 1956.
- [6] Veletsos, A.S. and Newmark, N.M., "Effect of Elastic Behaviour on the Response of Simple System to Earthquake Motions", Proc. 2nd WCEE, Tokyo, pp.895-912, 1961.
- [7] Uang, C.-M. and Bertero, V.V., "Implications of Recorded Earthquake Ground Motions on Seismic Design of Building Structures", Report No. UCB/EERC-88/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, November, 1988.