

## 내진설계 기준의 개선

이 동 근\*

### 1. 머릿말

내진설계란 지진이 발생하였을 때 경제적인 부담이 지나치게 크지 않으면서 구조물에 발생하는 피해가 최소가 되도록 하는 적절한 구조설계를 의미한다. 세계 각국에서는 자기들 나름대로의 내진설계기준을 설정하여 구조설계에 적용하고 있으며 지진이 발생하여 구조물에 피해가 발생하게 되면 이를 연구, 분석하여 내진설계기준을 보완, 개선해 나가고 있다. 내진설계기준이 강화되면 지진에 의한 피해가 감소되는 반면에 건설공사비가 증가하게 되고 내진설계기준의 약화는 그반대 현상을 초래하게 된다. 따라서 내진설계기준에서 규정하는 적절한 구조설계에 의한 "최소한의 피해"라는 의미를 다시 한번 생각해 볼 필요가 있다. 일반적으로 내진설계기준은 다음의 기본철학에 의해 정해진다.

첫째: 자주 일어날 수 있는 약한 지진에 의해서는 구조물에 아무런 피해가 발생하지 않아야 한다.

둘째: 가끔 일어날 수 있는 중간정도의 지진에 의해서 비구조적인 피해는 좀 발생하더라도 구조체는 피해가 없어야 한다.

셋째: 매우 드물게 일어나는 대규모 지진에 의해서는 구조적 피해가 상당히 발생하더라도 구조물이 붕괴되어서는 안된다.

이러한 세가지 기본철학에 대해서는 누구나 동감하며 세계 각국은 나름대로 이러한 철학에 의해 내진설계기준을 정하여 구조물의 설계에 적용시키고 있으나 실제로 지진이 발생하였을때 구조물은 예상했던 것보다 더 큰 피해를 입는 경우가 허다하다. 그러면 현재 세계 각국에서 사용되는 내진설계 기준들은 어떠한 문제점을 가지고 있으며 어떻게 개선이 되어질 수 있을 것인가 하는 것을 생각해 볼 필요가 있다.

세계 각국에서 사용되고 있는 내진설계들은 대개가 미국의 기준인 UBC와 비슷한 방법을 사용하고 있으며 근래에 대폭 개정되었거나 새로 제정된 기준들은 ATC3-06의 내진설계 기법을 부분적으로 도입하고 있다. 지난 1986년에 제안되어 1988년 부터 시행되는 우리나라의 내진설계 기준은 UBC85를 바탕으로하여 ATC3-06에서 제시된 새로운 내진설계기준을 가미하여 작성되었으므로 형식은 UBC85에 가깝고 근본 원리는 ATC의 가까우므로 앞으로 ATC의 내용을 점차적으로 확대 수용할 수 있을 것이다. 지난 1988년 5월 1일에 새로 발표된 UBC88도 과거 50년간의 틀을 깨고 ATC의 원리를 도입하여 전면개정되었으며 앞으로 ATC의 내용을 점차 확대시켜 나가게 될 것으로 보인다.

### 2. 내진설계기준의 기본원리

지진이 발생하였을때 구조물의 거동을 분석해

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

봄으로써 지진에 대해 안전한 구조물을 설계하는 기본원리를 이해할 수 있게 된다. 지반운동에 의한 구조물의 거동을 알아내기 위하여 사용되는 동적평형 방정식은 다음과 같다.

$$[M] \ddot{X} + [C] \dot{X} + [K] X = -[M] \{1\} \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서  $\ddot{X}$ ,  $\dot{X}$  및  $X$ 는 지반에 대한 구조물의 상대 가속도, 속도 및 변위 벡터이며  $\ddot{x}_g$ 는 가속도인데 이 식에서 지반 가속도가 주어지면 질량  $[M]$ , 감쇠  $[C]$  및 강성  $[K]$ 를 이용하여  $\ddot{X}$ ,  $\dot{X}$  및  $X$ 를 알아낼 수 있게 된다. 약한 지진이 발생하여 지반가속도가 크지 않을 경우에는  $[M]$ ,  $[C]$  및  $[K]$ 가 거의 일정하므로 위의 평형 방정식은 선형방정식이 되고 구조물의 거동을 선형해석으로 알아낼 수가 있게 된다. 그러나 일반적인 구조물의 거동을 위의(1)식을 사용하여 알아내는 것은 전자계산기를 이용한 동적해석을 통해서만이 가능하므로 실제 구조기술자가 내진설계를 수행할 때는 상당한 어려움을 겪게 된다. 뿐만 아니라 구조물의 거동은 구조물의 기본 진동모드에 의하여 절대적으로 지배 받게되는 경향이 있으므로 동력학 이론을 사용하여 기존 진동모드에 대한 거동을 뽑아내어 얻게되는 다음과 같은 단 자유도 구조물에 대한 동적 평형방정식을 이용하여 손쉽게 구조물의 거동을 대략적으로 알아낼 수가 있게 된다.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = -\Gamma\ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  및  $x$ 는 기본진동모드의 가속도, 속도 및 변위이며  $\xi$ 는 감쇠율,  $\omega$ 는 기본진동수에  $2\pi$ 를 곱한 기본 회전진동수(angular frequency)이며  $\Gamma$ 는 모드참여계수이다. 이식을 이용하여 얻어진  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  및  $x$ 에 기본 진동모드 형상을 곱해주면 앞의(1)식을 이용하여 알아낼 수 있는  $\ddot{X}$ ,  $\dot{X}$  및  $X$ 에 대한 기본 진동모드의 성분을 알아낼 수 있게 된다. 그러나 구조기술자가 관심을가지는 것은 구조물이 경험하는 최대의 거동이므로 내진설계절차를 더욱 간소화 할 수 있게된다. 단자유도 구조물은 위의식(2)에서 모드참여계수가 1.0이 되므로 감쇠율  $\xi$ 와 회전진동수  $\omega$ (또는 진동주기  $T=2\pi/\omega$ )가 일정하면 주어진 지반가속도에 의한 단자유도 구조물의 거동은 항상 같게 된다. 이러한 성질을 이용하여 지반가속도에 대해 여러가지의 감쇠율과 진동주기를 가지는 단자유도 구조물의 최대거동을 미리 알아 두면 구조기술자가 일일이 동적해석을 수행하지 않고도 구조물의 최대 거동을 손쉽게 알아 낼 수가 있게 된다. 이러한 목적으로 우리는 반응 스펙트럼(response spectrum)을 사용한다.

반응 스펙트럼은 주어진 지진에 대해 일정한 감쇠율을 가진 여러가지 단자유도 구조물의 최대 거동을 미리 알아내어 가로축을 진동주기(또는 진동수)로 하고 세로축을 최대거동(주로 가속도)

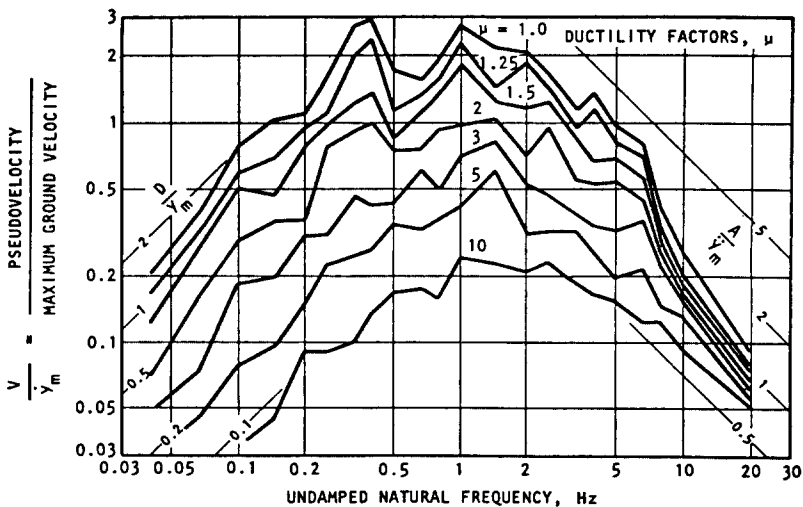


그림1. 비선형속도 스펙트럼의 예(2% Critical Damping, E1 Centro, 1940)

으로 하여 그림으로 나타낸 것을 말하는데 구조물의 기본 진동주기를 알면 바로 최대기동을 읽을 수 있게된다. 또 각각의 지진마다 반응 스펙트럼이 다르게 되므로 어떤 지역(또는 나라)에서 예상되는 여러가지의 지진에 대한 반응 스펙트럼을 종합하고 약간의 수정을 가하여 설계용 스펙트럼(design spectrum) 을 작성하게 된다. 이때 진동주기가 긴 구조물에 대해서는 스펙트럼의 값을 높여주는 방법을 이용하여 고층 구조물에서 예상되는 P- $\Delta$  효과 등을 고려하게 되므로 설계용 스펙트럼은 반응 스펙트럼과 상당히 다른 형상을 가질 수 있다.

지반가속도가 증가하여 구조물이 비선형거동을 하게 되면 위에서 설명한 선형해석에 의한 스펙트럼을 사용하지 못하게 된다. 이러한 경우에는 단자유도구조물의 비선형해석을 통하여 반응 스펙트럼을 구하며, 예를 들면 1940년 EI Centro지진에 대한 비선형 속도 스펙트럼은 그림1과 같이 된다. 여기에서 눈여겨 보아야 할 것은 구조물이 경험하는 최대 연성도가 클수록 반응 스펙트럼이 감소하는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 비선형 반응스펙트럼을 얻기 위하여 선형 반응 스펙트럼을 연성도로 나누는 방법이 제안되었고 내진설계기준에는 이것이 반응수정계수로서 밀면전단력을 조정하는 형식으로 포함되었다. 그러므로 구조물의 기본 진동주기, 최대 허용연성도 등을 알면 비선형거동의 최대치를 알아낼 수 있어서 등가정적에 의한 내진설계가 가능하게 되는 것이다.

### 3. 내진설계 기준의 취약점

세계 각국에서 사용되고 있는 내진설계기준은 선형해석을 통하여 구조물의 비선형거동을 예측하는 방법을 사용하고 있는데 이 방법에는 크게 두가지 취약점이 따른다. 첫째는 단자유도 구조물의 비선형 거동을 알아내기 위하여 단자유도 구조물의 비선형 거동에 기본 진동 모드형상을 곱하는 방법에 큰 오차가 개입된다는 사실이다. 구조물의 일부가 비선형 거동을 하게 되면 기본 진동모드는 탄성 진동모드와 판이하게 되지만 현재의 구조설계방식으로는 이점을 개선하기가 지극히 어려워서 이 취약점을 알면서도 내진설계기준을 제대로 개정하

지 못하고 있는 실정이다. 또하나의 취약점은 한가지 해석결과로서 앞에서 언급한 내진설계의 기본철학 세가지를 동시에 만족시키기가 불가능하다는 점이다. 연성이 큰 재료와 구조방식으로 건설된 구조물은 충분한 소성거동을 할 수 있을 것으로 예상하고 큰 반응수정계수를 사용하여 설계지진하중을 대폭 감소시키지만 약한 지진에 의해 약간의 비선형거동이 발생할 때에는 연성에 의한 거동의 수정이 기대되기 어렵기 때문이다. 이러한 점을 고려하여 일본의 내진설계기준은 약한 지진에 대한 일차 설계와 강한 지진에 대한 이차 설계를 수행하도록 요구하고 있으므로 가장 정교한 내진설계기준이라고 평가할 수 있으나 구조물의 비선형거동의 특성이 제대로 고려되어 있지 않아서 대규모 지진에 대해서는 역시 취약점을 가지고 있다. 위에서 언급한 내진설계기준의 두가지 취약점은 건물에 발생하는 비선형변형의 분산이 제대로 이루어 지도록 하지 못하여 대규모 지진이 발생할 경우에는 건물의 아랫층부분에 피해가 집중되는 결과를 초래하며 경우에 따라서는 붕괴에 이르게 하기도 하여 재산과 인명의 피해를 증가시키는 주요 원인이 되고 있다.

### 4. 내진설계 기준의 개선

현재 세계각국에서 사용되고 있는 내진설계기준들이 가지는 취약점을 해결하기 위하여 앞으로 개선되어야할 점들을 간략히 정리하여 보면 다음의 몇가지로 요약될 수 있다.

가) 지진하중의 수직 분배 개선: 현재 사용되고 있는 방법들은 주로 구조물의 기본 진동 모드형상에 근거하며 고차 진동모드의 영향을 고려하기 위하여 UBC에서는 최상층에 집중된 하중을 분배하고 ATC에서는 진동주기가 긴 구조물에 대해 고차방정식으로 표시되는 하중 분배 방법을 채택하고 있다. 그러나 지진하중이 구조물에 미치는 영향을 더욱 정확히 나타내기 위해서는 관성력을 나타내는 진동모드 형상을 직접 사용하기 보다는 총 전단력의 형태로 변환시킨 후에 각층에 분배될 하중을 결정하는 방법을 사용하는 것이 필요하다. 왜냐하면 구조물의 각 요소에 작용하는 힘은 각 층에 작용

하는 전단력에 의해 주로 지배되기 때문이다.

나) 비선형 거동의 파악: 선형 진동모드 형상만을 이용하여 지진하중을 결정하는 것은 대규모 지진이 발생할 경우에 예상되는 비선형 거동의 파악에 크게 도움이 되지 않는다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 일본의 지진 설계기준에 정해진 바와 같이 약한 지진에 대한 해석과 강한 지진에 대한 해석을 병행해야 할 것이다.

다) 반응수정계수의 조정 및 세분화: 현재 비선형 거동을 가장 잘 고려한 것으로 알려진 ATC3-06에서도 철골 보통골조, 철골연성골조 등과 같이 개략적으로 구조재료와 구조방식에 대해 반응수정계수(연성계수)를 규정하고 있으나 이러한 방법의 의하면 구조기술자와 판단에 따라서 비슷한 구조물에 적용되는 지진하중의 크기가 대단히 큰 차이를 가지게 된다. 예를 들면 연성이 큰 철근콘크리트 골조인 경우에는 반응수정계수가 7.0이지만 보통의 철근콘크리트 골조에 대해서는 이보다 훨씬 작은 2.0을 반응수정계수로 선택하게 된다. 그러나 실제 구조물들은 분명하게 이들 중 어느 한가지 속하지 않고 “중간정도”라고 평가되는 경우가 많으므로 같은 구조재료를 사용하더라도 구조방식에 의해 좀 더 세분화 된 반응수정계수를 사용할 필요가 있다. 또 구조물을 구성하고 있는 각각의 구조요소의 허용연성도와 구조물 전체의 연성도는 밀접한 관계가 있으나 정확하게 정비례하지는 않으므로 앞으로 이에 대해 더욱 많은 연구결과를 포함하여 반응수정계수를 조정해나갈 필요가 있을 것이다.

라) 하중조합 방법의 조정: 구조물에 작용하는 고정하중, 적재하중, 풍하중, 적설하중 등과 지진하중을 조합하는 방법은 각각의 기준에 따라 약간의 차이가 있으며 설계방법이 허용응력법인 경우와 극한 강도법인 경우에 서로 다르게 된다. 현재 사용되는 기준들은 선형해석 결과에 의해 주로 영향을 받았으므로 구조물의 비선형 거동에 대한 세밀한 관찰이 이루어지지 않은 상태에서 결정되었다. 최근에 필자의 연구실에서 수행하고 있는 연구결과에 의하면 구조물이 비선형 거동을 하게 되면 연직하중과 수평하중이 미치는 영향이 크게 변하게 되는 경향이 있음이 밝혀졌고 이러한 효과를 고려하여 하중조합 방법을 조정하면 경제적인 부담을 증가시키지 않고 구조물의 내진성능을 크게 향상

시킬 수 있게 된다. 앞으로 이 분야의 연구에 더욱 많은 전문가들이 집중적으로 연구를 수행하면, 하중조합 방법의 조정을 통하여 더욱 효과적인 내진설계가 가능할 것이다.

마) 지역계수의 이원화: 이 글의 머릿말에서 소개한 내진설계의 기본철학에서 약한지진, 중간정도의 지진 또는 대규모의 지진이라고 언급한 대로 지진을 분류할 때 각 지역의 지진활동의 특성에 따라 내진설계의 목표가 되는 이들 세가지 지진의 규모가 일정한 비를 유지할 수 없게된다. 예를 들면 일본이나 북미의 서해안과 같이 지진이 많이 발생하는 지역에서 중간 정도의 지진은 대규모의 지진보다 규모가 2-3정도 작은 것을 의미하게 되지만 우리나라와 같이 지진활동이 심하지 않으나 과거에는 상당히 큰 지진이 발생한 기록이 있는 지역에서는 중간 정도의 지진보다는 훨씬 더 큰 대규모의 지진을 고려하여야 할 것이다.

## 5. 맺는말

내진설계를 위한 연구는 세계각국에서 많이 수행되어 왔으며 현재도 이에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. 국제연합에서는 금년부터 앞으로 10년간을 자연재해 방지 기간으로 정하여 내진설계 분야의 연구를 더욱 활성화 시키는데 크게 기여할 것이다. 우리나라에서도 최근 몇년 사이에 내진설계 분야의 연구가 활발해지고 있으며 내진설계 기준이 제정되어 시행되기도 하는 등 이분야에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 점들은 우리나라의 지진 위험도에 비추어 볼 때 앞으로 발생할 가능성이 있는 지진에 의한 피해를 줄일 수 있는 좋은 계기가 될 수 있다고 생각된다. 그러나 실제 구조설계에는 내진설계가 제대로 되지 않는 경우가 많은 것 같으며 형식적인 걸치레로 착각하는 사람들도 많은 경향이 있어서 약간의 아쉬움이 따른다. 이번에 한국전산구조공학회에서 내진설계에 관한 특집을 기획하였고 이분야의 전문가들이 좋은 글들을 많이 게재하게 되는 것은 앞으로 국내의 내진설계 기술 발전에도 크게 기여하게 될 것이라 생각하고 필자도 짧은 지식이나마 이 계획에 감히 참여하여 약간이나마 기여할 수 있었으면 하는 마음으로 잘 정리되지 못한 글을 마무리한다.