

## R. C. 건축물의 지진해석에서의 원칙과 특성



이 한 선\*

### 1. 서 언

여기에서는 지진해석과 관련하여 생소한 독자들에게 가장 중요한 원칙과 해석법에 대한 개략을 제시하여 철근콘크리트 구조물의 지진해석과 관련된 용어 및 특수과제를 언급하고자 한다.

이 해석의 위력이나 매력적인 점에도 불구하고 지진응답에 대한 해석은 항상 많은 불확실성에 부딪칠 수 있다는 것을 강조하고자 한다. 해석은 설계과정의 한 단계에 불과하여 수많은 컴퓨터 출력 페이지수가 빈틈없는(sound) 기술적 판단을 대신하여서는 안된다.

구조물에 있어서의 지진력은 외부에서 가해진 하중으로부터 발생하는 것이 아니다. 구조물에 압력 및 흡입력으로 작용하는 풍하중과는 달리, 구조물의 기저(base)에서의 주기적 운동에 의한 응답으로서 상부구조물은 가속도를 받게 되고 따라서 관성력으로서 지진력이 얻어지게 된다. 지진응답은 기본적으로 동적인 성질을 가지며 고유

주기와 감쇠와 같은 동적 특성은 이 응답을 결정하는데 결정적인 역할을 한다. 만약 지진해석이 실제적인 것이 되자면, 단순화된 방식으로라도 이러한 동적 특성을 고려할 수 있는 것이어야 한다.

이러한 동적 성질이 복잡성의 한 요인이며, 다른 요인으로서 해석적 장애가 존재한다. 대부분의 구조물은 최대지진에 대하여 상당한 항복현상을 나타냄으로써 저항하도록 설계하고 있다. 따라서 설계자는 최대지진에 대한 구조물의 비선형 동적 거동에 대하여 어느 정도 이해를 하고 있어야 한다. 원칙적으로 이것은 매우 복잡하고 어려운 해석적 문제를 제기하게 된다. 실제로는 매우 단순화된 해석법, 적절한 설계 및 상세의 조합만으로도 만족스러운 거동을 얻는 것에 부족함이 없다. 어쨌든 이러한 해석기법의 바탕과 한계를 이해하는 것은 필수적이다.

\* 정회원·고려대학교 건축공학과, 부교수

## 2. 공 명

바퀴에 불균형이 있는 자동차를 운전할 때 어느 특정한 속도에 다다르면 심하게 진동하는 현상을 느낀 적이 있을 것이다. 이것은 공명(Resonance)이라는 현상으로서 구조물의 고유주기와 외부진동의 주기가 서로 일치할 때 발생하게 된다.

Fig. 1은 일정한 상현과 기저운동에 대한 간단한 시스템의 steady-state 응답의 곡선을 보여주고 있다. 지반가속도를 기준으로 하였을 때 시스템의 최대(응답)가속도를 나타내는 응답이 이 그림에 나타나 있으며 입력운동의 고유주기와 시스템의 고유주기가 같을 때 두드러진 최대값을 보여주고 있다. 이에 반하여 매우 짧은 고유주기를 가진 견고한(rigid) 시스템의 경우 지반운동을 근접하게 따라가게 된다. 따라서 응답비는, 시스템의 고유주기가 0에 접근하거나 1에 수렴하게 된다. 지반운동의 주기가 매우 길어질 경우, 반대로 매우 플렉서블한 스프링의 경우 입력운동으로부터 질량을 분리시키는(isolate) 경향이 있어 긴 고유주기의 구조물 응답(혹은 짧은 주기의 입력운동에 대해서)은 0에 수렴하는 경향이 있다.

Fig. 1은 일정한 진폭의 단일 주기운동에 대한 steady-state 응답을 나타내고 있다. 그러나 지진은 시간의 흐름에 따라 소멸되는 transient 현상이며 관련 지진동은 어떤 범위의 주기를 보유하고 있다. 이 주기들 중에서 지진의 크기와 거리 및 대지의 지반조건 등에 따라 어느 일부분의 주기가 지배적이 되는 경향이 있다.

Fig. 2는 어떤 전형적인 지진에 대한 "응답스펙트럼"을 나타내고 있다. 이 그림과 Fig. 1과는 거시적인 외곽선 측면에서 짧은 점이 주목할 만하다.

단단한 지반에서의 지배적인 주기는 보통 0.2~0.4초이며, 이 주기는 부드러운 지반에서는 2초에 도달할 수 있다. 건축구조물의 경우 고유주기가 대체로 0.1N (N : 층수)이므로 공명에 의한 증폭현상이 일어날 가능성이 크다.

이것의 가장 좋은 예는 1985년 멕시코 시티 지진에서 찾아볼 수 있다. 지진동이 가지는 2초 주기에 접근하는 10~20층의 중층건물에서 막대한 손상이 발생한 반면, 인접한 보다 짧은 고유주기의 건물들은 훨씬 적은 손상을 받았다.

## 3. 감 쇠

구조물에 대한 주기적인 외부진동(cyclic excitation)이 멈출 경우, 그의 응답은 시간이 흐름에 따라 사그라들게 된다. 이것이 감쇠라고 알려진 현상이다. Fig. 1과 Fig. 2는 감쇠의 수준이 구조물의 고유주기만큼이나 중요하게 응답에 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

만약 이 감쇠가 점성(viscous)일 경우, 즉 감쇠력이 지반에 대한 시스템의 속도에 따라 변하

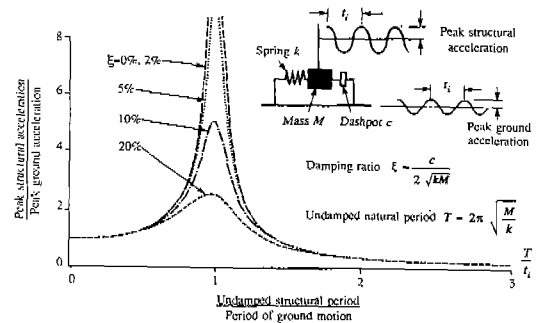


Fig. 1 Steady-state response to sinusoidal ground motion

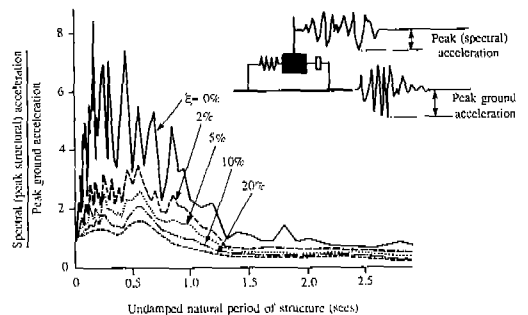


Fig. 2 Acceleration response spectrum for el centro earthquake of 1940

는 경우, 이를 위한 수학적 모델은 풀기가 상당히 쉬워진다. 이러한 이유로 인하여, 실제 건물에서의 감쇠 메카니즘은 다소 이와 다르지만 점성감쇠의 가정이 자주 해석에서 사용되고 있다. 점성감쇠는 보통 기준감쇠(critical damping)  $\xi$ 의 백분율로 나타내며  $\xi=100\%$ 는 시스템이 외부작용에 대해 정적인 상태에서 진동없이 곧장 평형상태로 되돌아가는 경우이다(Fig. 3). 상현과 지반운동(sinusoidal excitation)에 대해서  $\xi$ 는 해당 최대 변형시의 축적된 탄성에너지에 대한 한 사이클당 감쇠에 의해 소산된 에너지의 비와 관련이 있다.(Fig. 4). 이는  $\xi$ 의 물리적 의미를 이해하는데 유용하다.

단일 주기로 가해지는 외부진동에 대한 공명시의 최대 steady-state 응답이 입력진동 최대치의 약  $\frac{1}{2\xi}$ 이 됨을 보일 수 있다. 따라서 감쇠율( $\xi$ )

이 0으로 줄어 들면 공명시의 최대 응답은 무한대로 증가하게 된다. 지진동과 같은 일과성 조건(transient condition)에서는 Fig. 2는 공명시에 보다 낮은 증폭 수준을 보여주고 있다; 즉  $\xi=10\%$ 일 경우 입력에 대한 최대 응답의 비는 보통 2(Fig. 1의 경우<sup>3)</sup>),  $\xi=0\%$ 일 경우 5~8(Fig. 1의 경우 무한대). 따라서 공명시나 그에 접근하여 있을 때 지진응답은 steady-state sine 파에 대한 응답시보다 감쇠수준에 대해 덜 민감하다. 그러나 Fig. 2는 고유주기가 공명과 멀리 떨어진 상태일 때 반대의 현상이 일어남을 보여주고 있다.

건물에 있어서의 감쇠는 여러 가지 원인에 의하여 발생하게 된다. 기체동역학적인 흡인력(보통 적은 양), 접합부와 외장재 등에서의 마찰(항복이 일어나는 변위수준보다 훨씬 아래의 진폭에 대해서 보통 1/3~1%), 지반과 기초와 관련된 감쇠(큰 지반 변형을 동반하는 진동모드일 경우 중요), 그리고 철근콘크리트에서는 부착 미끄러짐(bond slip)과 균열 등. 이러한 요인들은 응력이 항복응력보다 일반적으로 아래에 있을 때 지배적이다.

소성항복은 하나의 다른 에너지 소산 발생원을 제공하고 있다. 해석적으로 이 현상은 이력감쇠(hysteretic damping)로 모델할 수 있는데, 이때 운동에 저항하는 감쇠력은 속도보다 최대변위에 따라 변한다. 큰 소성변형의 경우, 응답에 있어서의 감소는 점성감쇠로 볼 때 64% 감쇠율에 해당될 수 있음을 보여줄 수 있다. 이는 건축 구조물에 있을 수 있는 실제 점성감쇠보다 훨씬 큰 값이다. 지진시 항복현상이 일어나는 구조물에 있어서, 점성감쇠비는 탄성으로 응답하는 구조물에 비해서 보통 그 영향이 대폭적으로 줄어든다.

#### 4. 건물의 고유주기 결정

이미 언급하였듯이, 구조물의 고유주기와 감쇠는 지진동에 대한 그의 응답을 결정하는데 있어서 매우 중요하다. 다음 두 절에서는 이들을 결정하는 방법에 대해서 언급한다.

한 스프링에 지지된 한 질량의 무감쇠 고유주

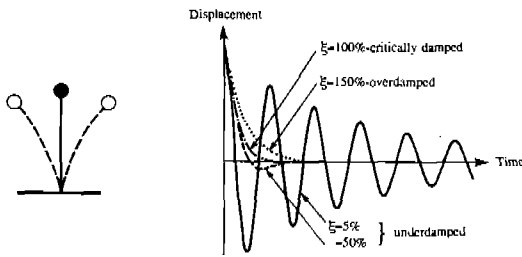
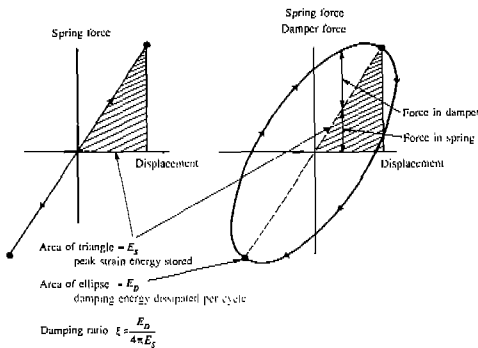


Fig. 3 Effect of viscous damping level on the decay of free vibrations



(a) Undamped system (b) damped system

Fig. 4 Energy stored and dissipated in damped and undamped systems

기는  $2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$  와 같다 (Fig. 1). 질량을 두 배로 하거나 강성을 반으로 줄일 경우 고유주기는 약 40% 증가하게 된다.

이론적으로 유도된 고유주기는 항상 주의깊게 사용되어야 한다. 건축 구조물의 질량은 어느 정도 쉽게 결정할 수 있지만 그의 강성은 보통 훨씬 더 불확실하다. 외장재 및 간막이와 같은 비구조요소는 강성을 증가시키는 경향이 있으며 따라서 고유주기를 감소시키게 된다. 더욱이, 이 강성과 그에 따른 고유주기는 응답의 진폭에 달려 있다; 이 진폭이 항복을 넘어서는 경우 구조강성은 곧 감소하게 된다. Ellis에 의한 논문<sup>8)</sup>은 건물높이에 근거한 간단한 경험식이, 기본고유주기로서 그보다 더 복잡한 해석을 통해 얻은 값보다 더 정확하게 예측함을 보여주고 있다. 대부분의 실제 설계기준은 이런 종류의 경험식을 제시하고 있다; 예를 들어 UBC는 만약 경험식에 의한 고유주기가 해석적으로 유도된 고유주기보다 훨씬 큰 지진하중을 줄 경우, 해석적 고유주기에 근거한 지진하중을 증가시킬 것을 요구하고 있다.

### 5. 건물에서의 감쇠수준 결정

Fig. 1 과 Fig. 2는 감쇠수준이 응답에 크게 영향을 주는 것을 보여주고 있다. 고유주기와 달리, 감쇠는 경험적으로만 결정될 수 있으며, 건물에 대해 실측해 보면, 그 수준은 실제로 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있는 것을 알 수 있다<sup>10)</sup>. 이것은 또한 진폭에 따라 크게 달라진다는 것도 발견되었다; (사용성 수준에 적용할 수 있는 것으로서) 저 내지 중 수준의 진동에 대해서 감쇠수준은 일반적으로 기준감쇠의 0.5~2%인 반면, 항복에 이르는 응력수준에서는 감쇠가 3~10%에 이를 수 있다. 콘크리트와 조적조 건물은 각 범위에서 높은 쪽을 강구조에서는 낮은 쪽 값을 가지는 경향이 있다.

전 세계적으로 사용되는 가정은, 지진에 의해 진동을 받는 건물의 감쇠는 5%라는 것이다. 이

값을 쓸 때, 2가지 조건을 명심하여야 한다.

- (1) 이것은 극심한 지진에만 적합하며 항복이 일어나지 않는 증진에 대해서는 보통 비안전측이다.
- (2) 5%감쇠는 탄성영역에서의 에너지 손실과 관련한 응답감소를 나타낸다; 이 감소는 공명주위에서 가장 커지는데 특정지진에 따라 다르기는 하나 무감쇠일 경우 발생하는 응답을 약 2.5배 감소시킨다. 후탄성응답이 허용될 경우 이 감소는 훨씬 더 커지게 된다.

### 6. 지진응답스펙트럼

지진응답을 계산하는 것은 선형스프링/질량/감쇠기구 시스템으로 이상화된 단순한 구조물의 경우에도 매우 복잡하다. 응답스펙트럼 해석은, 지진에 대한 각 시점에서의 응답을 계산할 필요 없이, 시스템의 최대응답만을 계산하는데 훨씬 간편한 방법이다. 보통 최대값이 가장 중요한 공학적 관심대상이므로 이것은 유용하며 간편한 방법이다. 이 방법은 여러 수준의 감쇠와 단주기와 장주기에 걸친 일련의 고유주기를 가진 단순시스템의 최대응답을 사전에 계산해 두는 것에 의존한다. Fig. 2와 같이 응답스펙트럼을 만들기 위해 시스템의 고유주기에 대해 그때의 응답최대값이 그려지게 된다. 이러한 스펙트럼은 가속도, 속도 혹은 변위에 대해서 그려질 수 있다.

같은 고유주기와 감쇠계수를 가진 모든 이상화된 선형시스템의 최대응답(가속도, 속도 혹은 변위)은 주어진 지진동에 대하여 동일하다는 것을 보여주는 것은 용이하다. 즉 1940년 El Centro 지진에서 기록된 지진동에 대하여 5%감쇠와 1초의 고유주기를 가진 10t질량은, 같은 감쇠와 고유주기를 가진 10kg질량과 동일한 양만큼 치지게 된다. 따라서 응답스펙트럼은 강력하고 다용도의 설계수단이 되고 있다. 한 구조물의 질량, 감쇠 및 고유주기를 알고 (간단한 선형스프링/질량/감쇠기구 시스템으로 이상화될 수 있다면) 가속도 응답스펙트럼이 주어지면 설계자에게 관심이 있는 다음 값을 도출해 낼 수 있다.

최대 지진력 = 질량 × 최대 가속도 (또는 스펙트

럼 가속도)

$$\text{최대 처짐} = \frac{\text{최대지진력}}{\text{스프링 계수}}$$

각 지진동의 시간이력은 그 자신의 독특한 응답스펙트럼을 생성하게 되는데 그 형상은 해당 지진동의 주파수 내용(frequency content)을 반영하고 있다. 설계에서는 특정한 대지에서 예견되는 여러 개의 다른 지진동을 포용하기 위해 Fig. 5와 같이 외곽스펙트럼(envelope spectrum)이 사용되고 있다.

지진공학에서 일어나는 혼돈의 한 근원은 구조물뿐만 아니라 지반도 움직인다는 사실이다. 그러므로 운동을 지반에 대한 상대적인 값으로 할 것인지 아니면 절대적인 값으로 할 것인지 결정하여야 한다. 스펙트럼 가속도는 항상 절대값을 말하지만 스펙트럼 속도 및 변위는 상대적인 값, 즉 질량과 지반 사이의 운동에서의 차이를 지칭한다는 것을 기억하는 것은 특히 중요하다. 또한 스프링과 감쇠기구(dashpot)에 발생하는 힘은 각각 상대 처짐 및 상대 속도로부터 계산되지만 질량에 생기는 절대 가속도는 스프링과 감쇠기구의 힘을 질량으로 나눈 값과 같다는 사실을 유념하는 것이 도움이 될 수 있다. 또 하나의 혼돈은 유사(pseudo)와 진(true) 스펙트럼 값 사이의 차이이며(낮은 감쇠 시스템의 경우 이 차이는 작음), 가속도, 속도 및 변위가 같은 스펙트럼 위에 그려진 삼각 좌표계(tripartite plot)를 읽는 것이다. 이러한 사항들은 참고문헌 3과 같은 정규 교재를 참조하기 바란다.

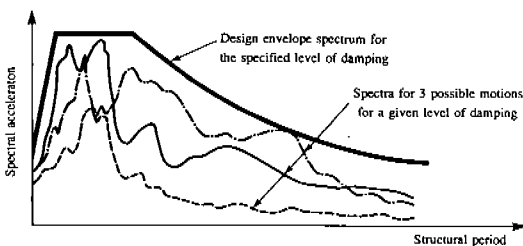


Fig. 5 Envelope response spectrum for design

## 7. 다자유도 시스템

대부분의 모든 실제 구조물은 지금까지 언급된 단자유도(Single Degree Of Freedom : SDOF) 시스템보다 훨씬 더 복잡하다. 어쨌든 많은 구조물을 단자유도 시스템으로 이상화할 수 있다. 상대적으로 경량의 골조에 의해 지지된 물저장 탱크타워 같은 것이 한 예이다. 많은 건물의 지진 응답은 그의 기본주기 모드에 의해 지배되며, 이 사실은 단자유도로 이상화시키는데 이용된다. Irvine<sup>11)</sup>은 동역학에 대한 그의 뛰어난 저서에서 실무에서 부딪치는 많은 시스템이 어떻게 이런 방법으로 해결될 수 있는지를 보여주고 있다.

보다 복잡한 구조물은 진동의 기본모드 뿐만 아니라 고차모드도 고려하여 해석할 수 있다. 이 고차모드는 구조물의 강성과 질량분포특성을 나타낸다. 가력진동과는 별개인 이 고유모드형상이, 한 전형적인 10층 건물에 대하여 Fig. 6과 같이 나타난다. 이러한 계산을 하기 위해 많은 컴퓨터 프로그램이 사용되고 있다.

선형 구조물의 응답은 일반적으로 그 구조물의 각 모드를 별도로 하여 응답을 고려함으로써 계산할 수 있다(Fig. 6). 구조물은 각 모드에 대해 단자유도로 보고 일련의 단자유도 시스템으로 해석된다. 따라서 응답스펙트럼의 사용이 가능하다; 예로서 전체 질량이  $M$ 인 건물이  $N$ 차 모드에 있어서의 밀면전단력  $V_N$ 은 식(1)과 같이 주어진다.

$$V_N = X_N \times M \times (S_A)_N \quad (1)$$

여기서  $(S_A)_N = N$ 차 모드의 주기에 대한 스펙트럼 가속도;

$X_N \times M = N$ 차 모드의 유효질량 ;

그리고  $X_N$ 은 모드형상에 의해 결정되는 수이다(항상 1보다 작음). 큰 비틀림 응답이 없는 골조 건물에 대한 보통의 값은 다음과 같다.

$$X_1 = 0.75 \text{ (일차 혹은 기본모드)}$$

$$X_2 = 0.10 \sim 0.15 \text{ (이차모드)}$$

모든 모드에 대해 값을 합하면 1이 된다. 이 사실은 충분한 수의 모드가 고려되었는지 결정하는데 유용하다.

이들 모드가 동시에 발생하는 것이 아니기 때문에 최대응답은 항상 각 모드별 응답의 합보다 작다. 제공된 값의 합에 대한 제곱근(SRSS : square root sum square)의 값으로 근사한 값을 보통 얻을 수 있다. 즉 :

$$\text{최대 밀면전단력} \approx (V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (2)$$

모드들이 비슷한 고유주기를 가지거나 지진운동의 지배적인 주기에 비해 매우 짧을 때, SRSS는 불안전축이 되며 다른 방법(Booth에 의해 예 참조<sup>4)</sup>)이 필요하다.

$X_1=0.75$ 라는 대표적인 값에 의하여, 기본모드가 밀면전단력 대부분을 기여할 수 있다는 사실을 발견할 수 있다(물론 다른 모드의 스펙트럼 가속도가 훨씬 더 크지 않는 한). 이것은 많은 경우에 건물은 기본모드에 해당하는 단자유도 시스템으로 처리할 수 있다는 이전 주장을 뒷받침하고 있다. 어쨌든 1차모드가 지진동과의 공명과는 멀리 떨어져 있으나 2차 및 3차 모드 주기와는 공명에 매우 가까울 때(20층 이상 되는 건물에서 일반적인 상황임.), Fig. 7에 나타난 것과 같이 상부층에서의 전단력은 고차모드에 의해 지배될 가능성이 높다. 따라서 고층건물에 대해서는 기본모드해석만 수행하는 것보다 항상 복수모드해석을 수행할 필요가 있다.

구조물의 높이에 따라 다른 모드가 다른 기여를 한다는 중요한 사실에 주목해야 한다. 즉 어떤 층에서의 최대 전단력은 다른 층에서의 최대 값과 동시에 일어날 가능성이 적다는 것이다.(최대 모멘트도 마찬가지이다.) 따라서 응답스펙트럼해석으로 얻은 전단력 및 휨모멘트 다이어그램은 외곽 최대값(envelope maxima)를 나타내지만 각 작용에 대해 평형상태가 되지 못한다. 보통의 정적해석에서와는 달리 특히 최대 전단력은 최대 휨모멘트의 변화율과 같지 않다.

이상은 일본을 제외한 모든 지역에서 현재 설

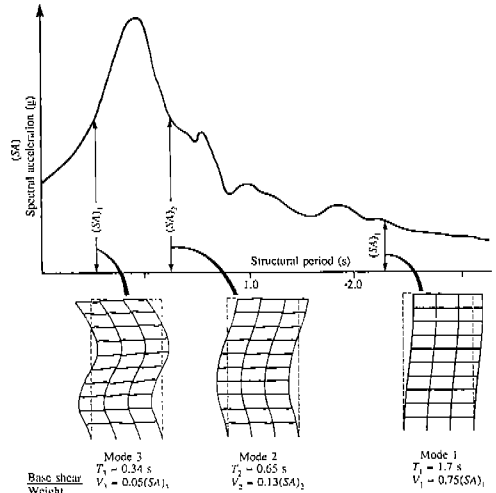


Fig. 6 Modal response spectrum analysis

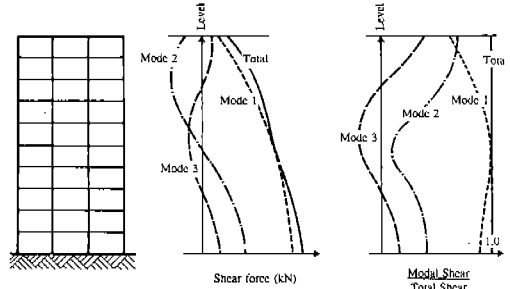


Fig. 7 Modal contributions to shear force in a typical frame building

계 실무에 사용되고 있는 가장 보편적인 동적해석 방법으로서 복수모드 응답스펙트럼해석에 대해 매우 단순화시켜 설명한 것이다.

### 8. 비틀림 응답

지진 지반운동은 회전운동보다는 횡이동이 지배적이다. 그러나 어떤 구조물의 질량중심과 강성중심이 일치하지 않으면 복합된 횡이동-비틀림 응답이 발생하게 된다(Fig. 8). 상당한 비틀림 편심을 가진 구조물은 지진에 대해 훨씬 열악한 거동을 보여줌을 발견하였다<sup>12)</sup>.

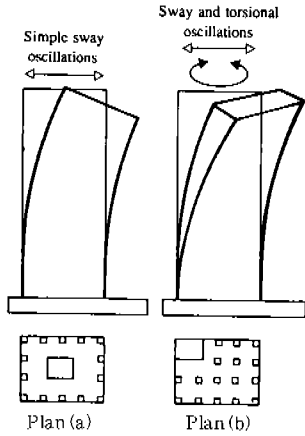


Fig. 8 Coupled lateral-torsional response

물론 횡이동과 비틀림이 복합된 응답은 3차원 거동이 포함되어 있어 2차원 모델로서 해석할 수 없다. 질량의 중심에 설계기준에서 요구하는 하중을 적용시킴으로써 수행하는 정적해석은 Chandler<sup>13)</sup>가 언급하였듯이 동적 효과에 의한 거동을 과소평가할 수 있다; 왜냐하면 상대적으로 작은 강성을 가진 축이 먼저 항복함으로써 더 유연하여지고 따라서 편심을 더 증가시켜 주기 때문이다<sup>14)</sup>.

현재의 설계기준은 비틀림을 다음과 같은 방식으로 다루고 있다.

1. 해석에서 나타난 값보다 더 큰 강도를 요구한다. (일본에서는 50%까지, 미국에서는 10%까지)
2. 편심이 주어진 한계를 넘어설 경우 좀 더 정확한 해석을 요구함. 예로서 일본설계기준에서는 명확한 비선형 동적해석이 요구되며 미국설계기준에서는 3차원 모드 응답스펙트럼해석이 요구된다.
3. 정적해석이 허용될 경우, UBC 기준은 편심이 어느 일정 값을 초과할 경우 횡하중 가력위치와 강성중심 사이의 거리가 증가될 것을 요구하고 있다.
4. 기준에서 가끔 우발모멘트를 규정하고 있다. 즉 횡하중 가력위치를 질량중심으로부터 건물치수의 5~10% 정도 어긋나게 적용시키는 것이다.

### 9. P-Δ 효과

횡변위는 중력하중에 의한 모멘트를 발생시킨다 (Fig. 9). 보통 이 모멘트는 양이 작지만, 중력하중(P)과 횡변위(Δ)의 곱한 값이 지진 전도모멘트의 상당한 부분을 차지하게 되면 P-Δ 효과를 반드시 고려하여야 한다. 이것은 비선형 해석에는 쉽게 포함시킬 수 있으나 선형탄성 해석시에는 특별한 기법을 필요로 한다; 대부분의 일반 선형해석 컴퓨터 프로그램은 이를 고려하지 않고 있다.

UBC<sup>9)</sup>는 이 기준의 처짐 조건을 만족시키면 P-Δ 효과를 무시하여도 좋다고 본다.

### 10. 비선형 응답

#### 10.1 연성

지금까지의 언급은 선형탄성응답에 관한 것이었다. 대부분의 구조물은 지진시 항복하도록 설계되어 있으며 따라서 후-항복 응답은 매우 중요하다.

비선형 효과를 언급하기 이전에 연성(ductility)의 정의가 필요하다. 연성이란 구조물이 강도의 큰 상실 없이 후-탄성에 이르는 반복 사이클을 견뎌내는 능력을 뜻한다. 이것은 소성변형의 정도와 관련하여 정량화 할 수 있다. Fig. 10은 단순한 항복시스템에 대한 변위 연성비를 정의하고 있다. 또한 국부 소성변형의 정도를 휨철근의

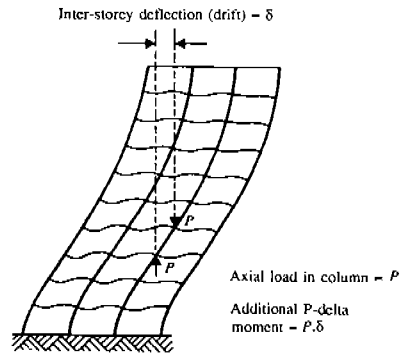


Fig. 9 P-Delta moments

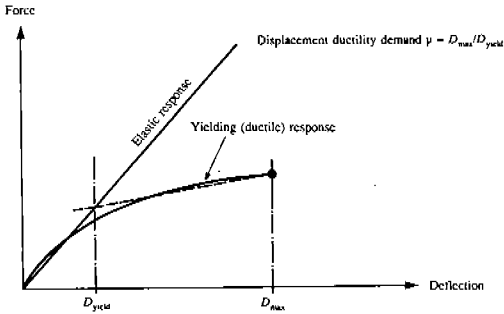


Fig. 10 Quantifying deflection ductility in a simple system

첫 항복시의 곡률에 대한 보의 최대 곡률의 비인 "곡률 연성"과 관련하여 정의내리는 것도 유용하다. Fig. 11은 공칭 항복변위  $D_{yield}$ 가 일어나기 훨씬 전에 구조물의 일부분에서 항복이 시작할 수 있음을 보여주고 있다. 더욱이 항복의 시작 이후 증가된 변형이 구조물의 탄성으로 남아 있는 부분에서보다도, 기 항복부분에 집중되는 경향이 있다. 따라서 항복하는 보의 곡률 연성은 전체 변위 연성의 수 배가 될 것이다.

선형응답스펙트럼이 탄성시스템에 대해 계산될 수 있는 것처럼, 여러 가지 수준의 최대 연성 수요에 대해서 연성을 고려한 스펙트럼을, 항복이 일어나는 스프링을 가진 단순한 단자유도 시스템에 대하여 수립할 수 있다. 지진동의 지배적인 주기(암반지반에서는 0.3초 이내, 부드러운 지반에서는 1초 이상)를 초과하는 주기에서는 스펙트럼 가속도는 대개 5% 점성감쇠에 대한 탄성응답을 변위연성비  $\mu$ 로 나눈 값과 같다. 대조적으로, 매우 큰 강성을 가진 시스템에 대해서는 이 감소계수는 훨씬 작아지게 되며, 아무리 연성이 크다고 할 지라도 0.03초 보다 작은 고유주기에 대해서는 1에 접근하게 된다(Fig. 12).

지진동의 지배적인 주기와 0.03초 사이의 고유주기 구조물은 연성에 의해 그 사이 중간 정도의 감소를 나타내게 된다. 같은 이유에 의해 매우 강성이 큰 구조물의 응답은 점성감쇠수준에 의해 영향을 받지 않는다(Fig. 1 과 Fig. 2).

선형 응답스펙트럼의 경우와 달리, 연성을 고

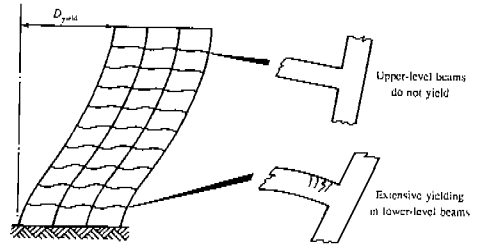


Fig. 11 Relation between curvature and deflection ductility in a building

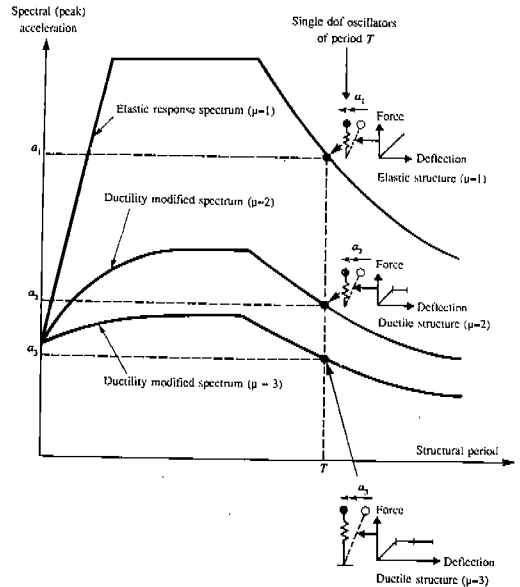
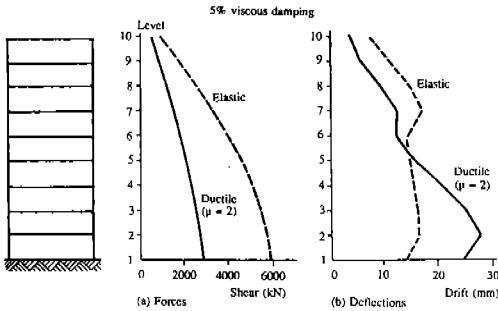


Fig. 12 Ductility-modified response spectra

려한 (ductility-modified) 응답스펙트럼을 복수모드 시스템에 적용하는데 있어서 어떤 이론적인 정당성은 없다. 그 분명한 이유는 모드형상은 기본적으로 탄성적 현상이며 항복한 상태에서는 더 이상 적용될 수 없고, 또 모드 연성의 개념은 측정하는 것은 고사하고, 정의하기도 불가능하기 때문이다. 그럼에도 불구하고, UBC 91과 같은 설계기준에서는 복수모드 응답스펙트럼이 선형 시스템에 대해서와 마찬가지로 다자유도의 항복이 일어나는 시스템에도 적용할 수 있는 것으로 암시되고 있다. 이러한 해석은 1개 모드 이상이 거동을 지배할 때는 사용에 있어서 주의를 요한다.





Note: Analysis assumes the ductile and elastic structure have the same geometry, mass and initial stiffness. They are subjected to the same ground motion.

Fig. 13 Comparison of deflections and forces in ductile and elastic response of typical ten-story building

## 10.2 항복응답의 결과

항복에 따라 유념하여야 할 많은 중요한 사항들이 있다.

1) 부재력은 구조물 전체가 탄성일 경우 부재가 도달하게 되는 수준보다 훨씬 아래에 머물게 된다. 이 감소된 응답은 항복과 관련된 이력감쇠에 기인한 것이다. 초기 고유주기가 지진동의 지배주기보다 큰 구조물에 있어서 항복에 의해 야기된 구조물의 고유주기의 증가는 응답을 감소시키는데 또한 도움을 준다. 그러나 매우 강성 큰 구조물에는 적용되지 않으며 이 구조물에는 또한 높은 감쇠수준도 별 도움이 되지 못한다.

2) 후-항복 횡처짐 형상은 탄성상태와는 눈에 띄게 다르다(Fig. 13(b)). 항복이 일어나는 부분에서는 (보통 건물의 하부), 횡처짐이 탄성시의 값보다 큰 한편, 다른 부분에서는 작아지는 경향이 있다. 대부분의 설계기준에 내재해 있는 가정은 후-항복 처짐이 5% 감쇠에 해당하는 탄성처짐과 같게 된다는 것이다; 건물의 하부층에서는 이 가정이 불안전축이 될 가능성이 있음을 염두에 두어야 한다.

3) 부재가 손상을 입게 된다; 이것은 일종의 저-사이클 피로 현상으로 간주할 수 있다. 따라서 항복 사이클의 크기뿐만 아니라 수도 중요하다.

4) 골조와 같은 부정정 구조물에 있어서 중력 하중에 의한 모멘트는 크게 재분배된다. 이것은 또한 골조의 내진특성에 현격하게 영향을 줄 수 있다.

5) 복원력에 대한 처짐의 비가 증가하는 것은 P- $\Delta$ 효과(Fig. 9)가 상대적으로 좀 더 중요하게 됨을 의미한다.

이러한 영향을 다루기 위하여 여러 가지 접근법이 사용될 수 있다.

1) 가용한 연성에 따라 간단한 계수(예로서 UBC 기준의  $R_w$ )에 의해 탄성부재를 감소시킴으로써 부재력 감소가 일반적으로 허용된다. 이미 언급하였듯이, 이것은 매우 강성이 크고 짧은 주기의 구조물에는 불안전축이 될 수 있다.

2) 위에서 언급한 이유에 의하여 탄성해석으로부터 계산된 후 항복 처짐은 주의를 가지고 다루어야 한다.

3) 저-사이클 피로효과는 일반적으로 직접적인 해석보다도 적절한 상제로써 해결되고 있다. 예로서 철근콘크리트 보의 소성힌지 가능위치에서의 횡보강 철근에 관한 설계기준은 반복되는 항복 사이클에서도 횡강성과 강도가 크게 저하되는 것을 방지하도록 하는 필요성에 의해 크게 영향을 받고 있다.

4) 중력하중이 항복모멘트의 상당한 부분을 차지하는 모멘트를 가지는 골조에서는 모멘트 재분배가 큰 영향을 가질 수 있다<sup>16)</sup>. 대부분의 설계기준은 재분배현상을 고려하지 않거나(예: UBC 91<sup>9)</sup>), 오직 부분적으로만 고려하고 있다(예: 뉴질랜드 기준 NZS 3101<sup>17)</sup>).

5) P- $\Delta$ 효과는 위에서 언급하였듯이 고려하도록 거의 요구하지 않고 있으나 불안전축이 될 가능성이 있다<sup>15)</sup>.

## 11. 기타 고려사항

### 11.1 비구조재의 영향

외장벽과 간막이와 같은 비구조 요소는 해석시 보통 명확히 고려되지 않으나 응답에 대해 중요하면서도, 항상 유익한 영향을 주는 것은 아니다. 예를 들면 외장벽은 구조물의 강성을 증가시킬 수 있고 지진의 지배주기와 공명에 보다 가까운 고유주기를 생성시킬 수 있다. 다른 하나의 예

로서, 전 높이에 걸쳐 채워지지 않은 채움블록벽은 그의 전단강도가 휨강도보다 작은 단주를 만들고 따라서 취성파괴의 위험을 가지게 된다.

보통 비구조 요소가 내진구조와 상호작용하지 않도록 하기 위해 분리조인트를 가진 비구조 요소를 설계하는 것이 낫다. 그러나 이것이 이행되지 않으면 해석시 이를 반드시 고려하여야 한다.

### 11.2 지반효과


지반의 특성은 그 대지에서의 지진동에 지배적인 영향을 미칠 수 있으며, 또한 기초의 유연성 (flexibility)을 증가시킴으로써 그 곳에 건설된 구조물의 동적 특성에 상당한 영향을 끼칠 수 있다.

### 12. 결 언

본 특집 기사는 구조물의 지진해석에 있어서 다른 해석과 달리 고려하여야 할 사항들을 항목별로 열거하며 상세히 설명하였다. 이러한 고려사항과 함께 구조물의 지진해석에 대한 구체적인 방법론은 지면관계상 추후에 다루고자 한다. 본 기사는 참고문헌 18을 주요하여 편집한 것임을 밝혀둔다.

### 참 고 문 헌

1. Clough. R. W, Penzien. J. 1993 Dynamics of Structures, McGraw-Hill
2. Dowrick. D. J. 1987 Earthquake Resistant Design John Wiley, New York
3. Gupta. A. K. 1990 Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures Blackwell Scientific Publications, Cambridge, MA
4. Booth. E. D, Pappin. J. W, Evans. J. J. B 1988 Computer based analysis methods for the design of earthquake resistant structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 1 84 (August): 671-691
5. Fenwick. R. C, Davidson. B. J 1989 Dynamic Behaviour of Multistory Buildings Report No 463, University of Auckland, New Zealand
6. Fenwick. R. C, Davidson. B. J 1991 The Seismic Response of Multistory Buildings Report No 495, University of Auckland, New Zealand
7. Warburton. D. (general editor) Earthquake Engineering and Structural Dynamics published monthly by John Wiley, Chichester, UK
8. Ellis. B. R 1980 Determining the natural periods of buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 69: 763-776
9. ICBO 1991 UBC:91. Uniform Building Code International Conference of Building Officials, Whittier, CA
10. Hill-Carroll. P 1985 The Prediction of Mean Structural Damping Values and their Coefficients of Variation MSc thesis, University of Western Ontario, Canada
11. Irvine. J. M 1986 Structural Dynamics for the Practising Engineer Allen & Unwin, London
12. Tiedemann. H 1981 Quantification of factors contributing to earthquake damage in buildings. Seventh Symposium on Earthquake Engineering Roorkee, India, Vol 1, pp 203-207
13. Chandler. A 1990 Parametric earthquake response of torsionally coupled buildings and comparison with building codes. Proceedings, Ninth European Conference on Earthquake Engineering, Moscow
14. Bruneau. M, Martin. S 1990 Inelastic torsional response of initially symmetric systems with lateral load resisting elements having dissimilar yield strength. Proceedings, Ninth European Conference of

- Earthquake Engineering, Moscow
15. Fenwick. R. C, Davidson. B. J, Chung. B. T 1992 P-delta actions in seismic resistant structures. Proc. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering 25: 56-69
16. Fenwick. R. C, Davidson. B. J 1987 Moment redistribution in seismic resistant concrete frames. Pacific Conference on Earthquake Engineering New Zealand, Vol 1, pp 95-106
17. SANZ 1982 NZS 3101:1982 Code of Practice for the Design of Concrete Structures Standards Association of New Zealand, Wellington
18. Booth. E. D, Fenwick. R. C, 1994 Concrete Structures in Earthquake Regions, John Wiley, New York 

## 한국전산구조공학회 광고게재 안내

한국전산구조공학회에서는 학회지 '전산구조공학'을 정기적으로 연 4회 발행하고 있습니다. 저희 학회지에 광고를 게재하고자 하시는 분을 위하여 다음과 같이 안내합니다.

1. 학회지는 매년 3, 6, 9, 12월에 발행하며 학회지에는 전산구조공학 분야에 관련되는 건설분야, 전산기기, 계측기기, 소프트웨어, 전산해석 및 설계용역, 전산자료 및 서적 등의 광고를 게재해 드리고 있습니다.
2. 광고게재료(1면 1회당)
  - 1) 전산구조공학회지 : 표 1(앞표지 내면) 1,000,000원  
표 2(뒤표지 내면) 1,000,000원  
표 3(뒤표지) 1,500,000원  
간지 1,000,000원  
내지(본문 여백) : 행사안내 및 도서광고 300,000원
  - 2) 연 4회 이상 게재할 경우 우대내용(특별회원이사가 아닌 경우)  
연 4회 이상 광고를 게재할 경우는 상기 광고게재료의 20% 할인혜택을 드립니다.
  - 3) 특별회원사 우대내용  
본 학회의 특별회원이사가 게재하는 광고는 상기 광고게재료의 10%를 연간으로 광고를 게재할 경우는 30%를 할인해 드립니다.
  - 4) 기타사항  
본 학회 사무국(전화 : (02)565-0035~6)으로 연락을 주시면 자세한 안내말씀을 드립니다.