

# 할선강성을 이용한 직접비탄성내진설계

## Direct Inelastic Earthquake Design Using Secant Stiffness

박 홍 군\*                      엄 태 성\*\*  
Park, Hong Gun              Eom, Tae Sung

### 국문요약

본 연구에서는 할선강성을 사용하여 반복계산을 수행하는 새로운 내진설계법을 개발하였다. 개발한 설계법은 탄성해석을 수행하므로 수치해석의 안정성과 용이성을 갖추고 있으며, 동시에 반복계산으로 구조물의 비탄성 거동을 해석할 수 있으므로 각 부재의 강도 및 연성 요구량을 정확히 예측할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 설계법의 절차를 정립하였고, 이를 고려한 컴퓨터 해석/설계 프로그램을 개발하였다. 또한, 제안된 설계법을 사용한 설계예제를 제시하였고, 탄성 혹은 비탄성 해석을 이용한 기존 설계법과의 비교를 통하여 그 장점을 검증하였다. 해석과 설계를 통합적으로 수행하는 제안된 설계법은 설계자의 의도에 따라 부재의 강도 및 연성능력, 강기둥-약보 등과 같은 내진설계전략을 효과적으로 구현할 수 있으며, 초기설계단계에서 각 부재의 크기만이 가정된 구조물에 대하여 반복계산을 수행함으로써 주어진 설계전략을 만족하는 비탄성 강도 및 연성 요구량을 직접적으로 계산할 수 있으므로, 경제적이고 안전한 내진설계가 가능하다.

주요어 : 내진설계, 할선강성, 탄성해석, 비탄성해석, 철근콘크리트, 성능기초설계

### ABSTRACT

A new earthquake design method performing iterative calculations using secant stiffness was developed. The proposed design method has the advantages of convenience and stability in numerical analysis because it uses elastic analysis. At the same time, the proposed design method can accurately estimate the strength and ductility demands on the members because it performs the analysis on the inelastic behavior of structure using iterative calculation. In the present study, the procedure of the proposed design method was established, and a computer program incorporating the proposed method was developed. Design examples using the proposed method were presented, and its advantages were presented by the comparisons with existing design methods using elastic or inelastic analysis. The proposed design method, as an integrated method of analysis and design, can address the earthquake design strategy devised by the engineer, such as ductility limit on each member, the design concept of strong column - weak beam, and etc. In addition, through iterative calculations on the structure preliminarily designed only with member sizing, the strength and ductility demands of each member can be directly calculated so as to satisfy the given design strategy. As the result, economical and safe design can be achieved.

Key words : seismic design, secant stiffness, elastic analysis, inelastic analysis, reinforced concrete, performance-based design

## 1. 서 론

현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 반응수정계수를 사용하는 등가정적 내진설계방법은 해석과 설계상의 용이성에도 불구하고 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

- 1) 구조형식에 따라 미리 규정된 반응수정계수를 사용하고 있는데, 동일한 구조형식을 지닌 건물일지라도 내진거동 특성에 따라 강도와 연성도 요구량이 크게 차이가 있을 수 있다. 따라서 이러한 방법은 성능기초 내진설계에 적합하지 않다.
- 2) 탄성해석을 사용할 경우, 구조물 및 각 부재의 비선형거동에 의하여 발생하는 변형요구량 및 그 분포를 정확히 파악하는 것이 불가능하므로 구조물 및 각 부재의 내진 안전성을 확보하기 어렵다.
- 3) 이러한 연성요구량의 불확실성으로 인하여 우리나라와 같이 대부분의 건물에 제한적 연성도(limited ductility)만

이 요구되는 중저진 지역에서도 안전측으로 내진상세를 구조물 전체에 걸쳐 사용할 수 밖에 없으며, 따라서 경제적인 설계를 실현하기 어렵다.

최근에 들어와 이러한 정적선형해석법을 사용하는 등가정적해석의 단점을 보완하기 위하여 능력스펙트럼해석법(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM)<sup>(1)</sup>, 직접변위기초설계법(Direct Displacement-Based Design, 이하 DDBD)<sup>(2)</sup>, 역량설계법(Capacity Design Method) 등 정적비선형해석을 사용하는 다양한 내진 해석/설계 방법이 도입되고 있다. 비선형해석법을 사용하는 이러한 방법들은 기존의 탄성해석을 사용하는 등가정적설계에 비하여 비선형거동을 수반하는 구조물의 내진성능을 보다 정확히 예측할 수 있으므로, 구조물의 내진안전성을 보다 명확히 확보할 수 있다. 그러나, 이러한 비선형해석을 사용하는 설계방법들은 그 적용에 있어서 몇가지 문제점을 안고 있다.

- 1) 능력스펙트럼법은 구조물을 구성하고 있는 각 부재의 비선형모델이 결정되어야 사용이 가능하다. 따라서 기존구조물이나 설계가 이루어진 구조물의 내진성능 평가방법으로 사용할 수 있으나, 구조물의 강도, 연성요구량을 결

\* 정회원 · 서울대학교 공과대학 건축학과, 조교수(대표저자 : hgpark@gong.snu.ac.kr)

\*\* 학생회원 · 서울대학교 공과대학 건축학과 건축구조시스템 연구실, 박사과정  
본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 8. 12 / 심사종료일 : 2004. 1. 20)

정하는 직접설계방법으로는 사용할 수 없다. 또한 설계자의 내진설계전략을 설계에 직접적으로 반영하기 어렵고, 내진안전성을 확보하고 경제적인 설계를 실현하기 위해서는 재설계와 평가의 반복작업을 실시하여야 하므로 불편하다.

- 2) 직접변위기초설계법은 실제 구조물을 1자유도의 대체구조(substitute structure)로 단순화하는 방법으로서 이 대체구조에 대하여 강도 및 연성요구량을 결정할 수 있으나 이를 이용하여 다자유도 구조물의 강도 및 연성요구량을 계산하기 어렵다. 따라서 직접변위기초설계법은 소성파괴 메커니즘이 명확히 나타나는 강진지역의 중저층 구조물이나 교량구조물의 설계에 적합하며, 파괴시 완전한 소성메커니즘이 형성되지 않고 제한적 연성도만이 요구되는 중저진지역의 구조물이나 고층 건축물의 내진설계에는 적합하지 않다.

기존의 비선형설계방법들은 이러한 기술적인 문제점으로 인하여 그 적용범위의 한계를 나타내고 있으며, 따라서 여전히 탄성해석을 사용하는 등가정적설계방법이 널리 이용되고 있다. 특히 내진설계의 중요성이 상대적으로 적은 우리나라의 경우에는 결과의 부정확성에도 불구하고 편리한 탄성해석이 상당기간 사용될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 이러한 기존의 정적비선형 방법들의 문제점을 개선하기 위하여 각 부재의 강도와 연성요구량을 결정하는 직접설계방법으로 사용할 수 있으며, 제한적 연성능력이 요구되는 구조물을 포함하는 다양한 내진성능을 갖는 구조물의 설계에 적용이 가능한 실용적인 직접비탄성설계방법을 개발하고자 한다.

## 2. 설계 개념

본 연구에서 제안하는 해석/설계방법의 기본 개념은 비선형 거동으로부터 나타나는 구조물 및 부재의 비탄성강도와 변형 요구량을 그에 관계된 할선강성(secant stiffness)에 대한 선형해석을 사용하여 구하는 것이다.

Fig. 1(a)는 건물의 비탄성 변형형상을, (b)는 정적비선형 해석을 이용하여 구한 횡방향의 하중-변위곡선과 한 부재의

소성힌지에서의 모멘트-회전변형 관계를 나타낸다. 그림 (b)는 구조물과 각 부재의 비선형거동에 의하여 발생하는 최대 강도 및 변형으로 정의되는 성능점(또는 요구량, performance point)을 나타내고 있는데, 그림 (c)에 나타낸 바와 같이 이 성능점에 의하여 정의되는 할선강성을 사용하여 선형해석을 수행하더라도 비선형 해석과 동일한 성능점을 정의할 수 있다. 그 이유는 외력인 지진하중의 크기나 분포가 동일하다면, 거동 경로가 다르더라도 동일한 변형에 대하여 하나의 강도만이 존재하기 때문이다. 이러한 원리가 성립하기 위해서는 구조물의 비선형거동시 층지진하중의 분포가 동일하고, 각 부재에서 제하(unloading)가 일어나지 않아야 한다. 이는 일반적으로 정적비선형해석에서 사용되는 가정이다.

반면, 지진하중을 받는 구조물에 대하여 임의의 할선강성에 대한 선형해석을 사용하여 강도 및 최대변형을 나타내는 성능점을 결정할 수 있다. 각 부재에서 이 성능점을 통과하도록 비선형 거동을 정의한다면, 정적비선형해석에 의해서도 동일한 성능점에 도달하게 된다. 이는 성능점을 결정하는데 있어서 비선형해석이 아닌 할선강성을 사용하는 선형해석을 사용하여 비선형해석의 효과를 나타낼 수 있음을 가리키고 있다.

기존구조물의 내진성능평가에서와 같이 이미 내진성능이 결정되어 있는 경우에는 임의의 할선강성을 사용한 단일 선형해석에 의하여 비선형해석과 동일한 성능점을 구할 수 없다. 그러나 성능점(혹은 강도 및 연성 요구량)을 결정하는 설계시에는 구조물의 성능점은 정해져 있지 않고 설계자의 의도에 따라서 다양한 값을 취할 수 있으므로, 임의의 할선강성을 사용하여 성능점을 결정할 수 있다. 이 성능점에 관계된 강도 및 연성도 요구량을 만족하도록 각 부재가 설계된다면, 위에서 설명한 바와 같이 이 부재들의 비선형거동에 의하여 나타나는 강도 및 변형은 할선강성에 의하여 결정된 성능점의 값과 동일하게 된다. 이는 구조물의 설계시에는 할선강성에 대한 선형해석을 이용하여 편리하게 성능점을 결정할 수 있음을 가리키고 있다.

구조물의 설계시에는 원칙적으로 임의의 할선강성을 사용할 수 있으나, 구조물의 내진안전성을 확보하고 경제적으로 설계하기 위해서는 각 부재의 소성힌지에서 설계자의 내진설계전략에 맞는 적절한 할선강성을 선택하여야 한다. 이를 위하여 할선강성에 대한 한계를 설정할 필요가 있다. Fig. 2

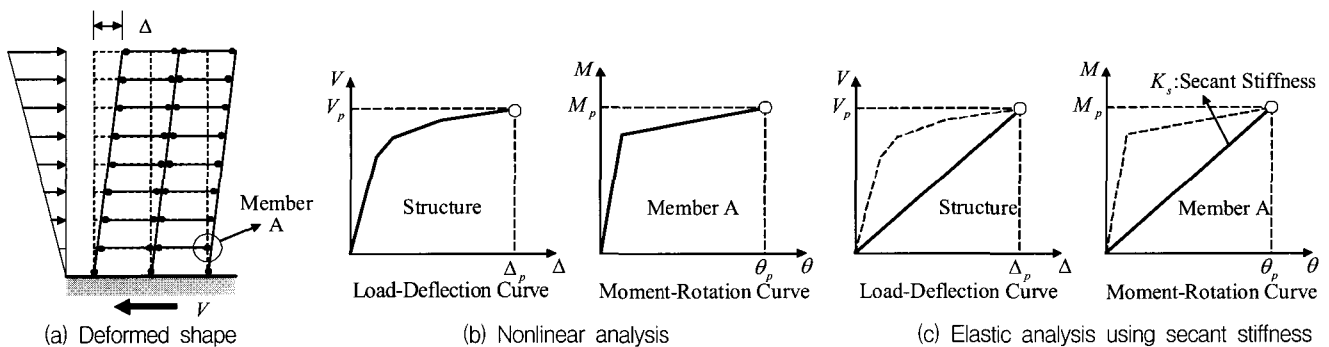


Fig. 1 Nonlinear static analysis vs. equivalent elastic analysis using secant stiffness

는 일반적으로 생각할 수 있는 성능점  $(M_p, \theta_p)$  및 할선휨강성  $K_s (= M_p/\theta_p)$ 에 대한 한계조건을 나타내고 있다. 이 한계조건은 다음과 같다.

1) 할선휨강성은 탄성휨강성보다 작은 값이어야 한다.

$$K_s \leq K_e \tag{1-1}$$

여기서,  $K_e$  : 탄성상태의 휨강성

2) 비선형거동에 의하여 요구되는 강도는 중력하중에 의하여 요구되는 최저한계강도이상이어야 한다.

$$M_p \geq K_p(\theta_p - \theta_{my}) + M_{my} \tag{1-2}$$

여기서,

$M_{my}, \theta_{my}$  : 최저한계 항복 휨모멘트 및 변형각

$K_p$  : 항복 이후의 휨강성

3) 내진설계기준<sup>(3)</sup> 또한 콘크리트구조설계기준<sup>(4)</sup>에서 정의하는 연성상세를 사용하는 부재는 일정한 최대변형능력  $\theta_u$ 를 갖고 있으며, 성능점은 이 최대한계변형보다 작은 값이어야 한다.

$$\theta_p \leq \theta_u \tag{1-3}$$

위의 한계조건을 만족하는 성능점의 존재 영역은 Fig. 2(a)의 음영 부분에 해당한다. 구조물에 대한 초기 해석시에는 각 부재의 성능점이 이 유효영역에 존재하는지 알 수 없으므로, 임의의 할선강성을 가정하여 해석을 수행한다. 해석결과 성능점이 유효영역에 존재하지 않을 경우에는 할선강성을 수정하여, 구조물을 구성하는 모든 부재의 소성힌지 영역에서 성능점이 유효영역에 포함될 때까지 반복계산을 수행한다. 만약 Fig. 2(a)와 같이 할선강성을 이용한 반복계산으로 성능점이 결정되었다면, 실제 설계된 부재는 Fig. 2(b)와 같은 비탄성거동을 보인다.

각 부재의 최저한계강도와 최대한계변형에 대한 조건은 설계자의 내진설계개념에 따라서 임의로 설정할 수 있다. 예를 들어서 약보-강기둥의 설계개념을 도입하고자 한다면 기둥에 대하여 최저한계강도를 증가시키거나 소성힌지의 발생을 억제한다. 또한 연성상세가 현실적으로 가능하지 않다면 최대한계변형을 저감시킬 수 있다. 이와같이 설계자에 의하여 의도된 내진설계개념을 한계조건으로 이용한다면, 제안된 방법을 사용하여 설계개념을 만족하도록 성능점을 결정할 수 있다.

### 3. 해석 및 설계 방법의 절차

본 연구에서 제안된 할선강성을 이용한 직접비탄성내진설계법(DIED)의 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 각 부재의 크기를 가정하고 중력하중에 대한 선형해석을 실시하여, 각 부재의 최저한계 휨모멘트를 구한다. 이때, 최저한계 휨모멘트는 중력하중에 의한 값 이외에 내진설계기준에서 정의하는 최소 휨철근량 등 임의의 내진설계개념에 의하여 결정할 수 있다.
- 2) 사용하고자 하는 연성상세에 대하여 FEMA-273<sup>(5)</sup> 등 기존의 설계기준이거나 혹은 실험 결과 등에 따라서 각 부재의 최대한계회전각  $\theta_u$ 를 정의한다.(Fig. 2)
- 3) 각 부재의 단부에 소성힌지를 가정하고, 소성힌지부재를 구성한다. 부재의 중앙부에서 소성힌지발생이 예상될 경우에는 집중하중의 위치 등에 소성힌지를 둘 수 있다. 일반적인 범용탄성해석방법을 사용하는 경우에는 소성힌지영역을 탄성거동을 하는 다른 영역과 구분하여 별도의 요소로 모델링할 수 있다. 구조해석시 소성힌지 요소에서는 비탄성 거동을 나타낼 수 있도록 할선강성을 사용한다(Fig. 3).
- 4) 각 소성힌지에서 할선강성을 가정한다. 할선강성의 크기는 최대값인 탄성강성  $K_e$ 와 한계변형  $\theta_u$ 에 해당하는 최소강성  $K_u$  사이의 값을 취한다(Fig. 4). 이때  $K_e$ 와  $K_u$ 는 다음과 같이 구한다.

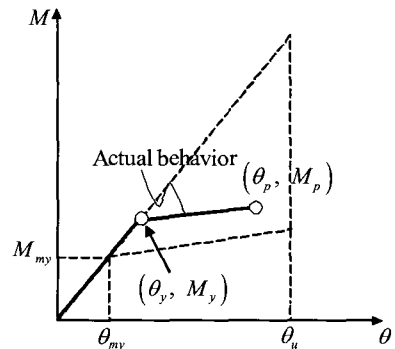
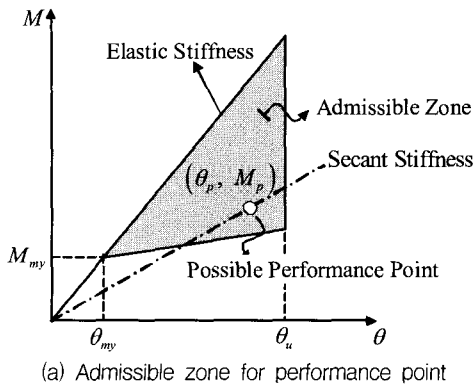


Fig. 2 Determination of inelastic strength and deformation of the member using secant stiffness

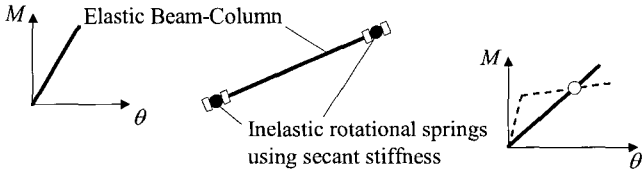


Fig. 3 Beam-column element with plastic hinges at both ends

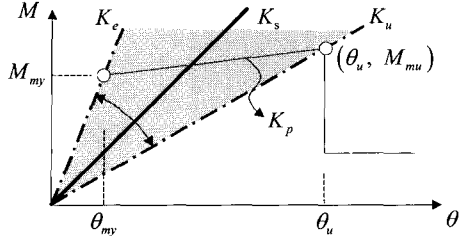


Fig. 4 Admissible range of secant stiffness

$$K_e = \frac{M_{my}}{\theta_{my}}, \quad K_u = \frac{M_{mu}}{\theta_u} \quad (2)$$

여기서,

$M_{mu}$  : 최저한계 강도에 해당하는 종국휨모멘트

Priestley<sup>(2)</sup> 등의 연구에 의하면, 철근콘크리트 부재의 경우  $\theta_{my} = \theta_y$ 로 강도에 관계없이 거의 일정하며  $\theta_y$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_y = \left( \alpha_{ST} \frac{\epsilon_y}{h} \right) \left( \frac{h}{2} \right) = \frac{1}{2} \alpha_{ST} \epsilon_y \quad (3)$$

여기서,

$h$  : 단면의 깊이

$\epsilon_y$  : 주철근의 항복변형률

$\alpha_{ST}$  : 부재의 종류와 단면의 형태에 따른 보정계수로, 직사각형 단면의 기둥은 2.35, 원형단면의 기둥은 2.12, 장방형단면의 벽체는 2.00, 보는 1.70을 사용한다.

- 5) 내진설계기준에 따라서 지진하중을 산정하고, 이 지진하중에 대하여 할선강성을 사용하여 선형해석을 실시한다.
- 6) 선형해석결과 각 소성영역에서의 성능점이 유효영역을 벗어난 경우에는 할선강성을 수정한다. 설계자 임의의 방법으로 할선강성을 수정할 수 있으나, 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 제안한다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이, 성능점의 위치에 대한 4가지 경우에 대하여 할선강성의 수정방법을 제안한다.

- ①  $\theta_i < \theta_{my}$  인 경우

$$K_{s\ i+1} = K_e \quad (4-1)$$

- ②  $\theta_{my} < \theta_i < \theta_{bp}$  인 경우

$$K_{s\ i+1} = \frac{M_{my} + K_p(\theta_i - \theta_{my})}{\theta_i} \quad (4-2)$$

- ③  $\theta_{bp} < \theta_i < \theta_u$  인 경우

$$K_{s\ i+1} = K_{s\ i} \quad (4-3)$$

- ④  $\theta_i > \theta_u$  인 경우

$$K_{s\ i+1} = \frac{M_i}{\theta_u} \quad (4-4)$$

여기서,

$\theta_i, M_i$  : 현재의 소성힌지 회전각과 휨모멘트

$K_{s\ i}$  : 현재 상태의 할선강성

$K_{s\ i+1}$  : 갱신할 할선강성

$\theta_{bp}$  : 현재의 할선강성과 유효영역의 하부경계(식 (1-2))인 최저한계강도가 만나는 교점의 변형량으로 다음과 같이 구한다.

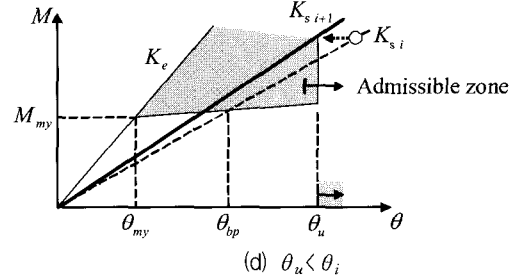
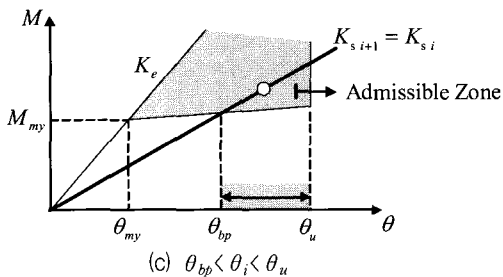
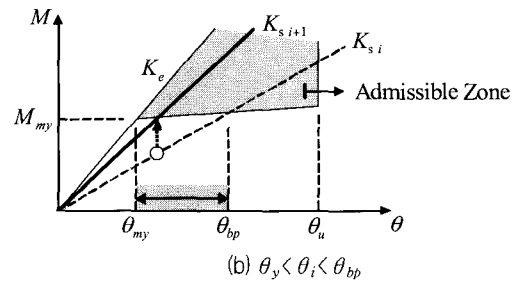
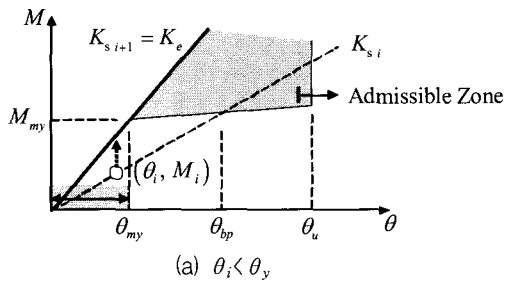


Fig. 5 Strategy for updating secant stiffness at plastic hinge

$$\theta_{bp} = \frac{K_p \theta_{my} - M_{my}}{K_p - K_{si}} \quad (5)$$

- 7) 모든 소성힌지에서 성능점이 유효영역에 포함될 때까지 활선강성을 수정하여 반복계산을 수행한다.
- 8) 모든 부재에 대하여 해석결과 산출된 강도와 변형요구량을 만족시키도록 강도설계와 연성설계를 실시한다.

#### 4. 성능기초설계

3장에서는 지진하중의 크기와 분포가 하중기준에서 정의하는 값으로 일정하다는 가정을 사용하고 있으므로 전통적으로 사용하는 강도기초설계(force-based design)라고 할 수 있다. 그러나 구조물의 강도 및 변형요구량을 나타내는 성능점은 구조물의 비선형거동특성에 따라 변화한다. 따라서 합리적인 내진설계를 위해서는 활선강성을 사용하여 예측된 구조물의 비선형 거동특성을 반영하여 지진하중이 적절히 보정되어야 한다. 비탄성 거동에 따라 구조물의 강도요구량을 수정하는 다양한 방법이 있으나, 여기서는 ATC-40<sup>(6)</sup>과 FEMA-273<sup>(5)</sup>에서 채택하고 있는 CSM과 Priestley 등이 개발한 DDBD에서 사용하는 방법을 채택한다. CSM과 DDBD를 사용하는 경우 비탄성 지진강도요구량  $V_T$  는 변형능력 및 에너지소산능력에 따라 변하는데, 자세한 강도요구량 산정 방법은 부록 A, B에 나타내었다. 본 연구에서는 이러한 방법에 따라서 강도요구량이 추정되었을 때, 이를 만족하도록 활선강성을 사용하여 구조물을 해석/설계하는 방법에 대하여 소개하고자 한다.

지진발생시 유효주기와 에너지소산능력에 의하여 대표되는 구조물의 동적특성에 따라서 구조물에 발생하는 관성력과 변형이 결정된다. 따라서 일정한 변형능력을 갖는 구조물에는 그에 해당되는 강도요구량이 주어지며 이를 만족하도록 내진설계가 이루어져야 한다. 구조물에 지진하중  $V$ 가 주어지고 이에 대한 해석결과 변형  $\Delta$ 가 예측되었을 경우, CSM 혹은 DDBD의 강도요구량 추정방법에 의하여 변형  $\Delta$ 에 해당하는 강도요구량  $V_T$ 를 구할 수 있다. 만약 가정한  $V$ 가 예측된 강도요구량  $V_T$  보다 작거나 큰 경우, 이 강도와 변형은 실제 성능점의 값과는 다르다는 것을 의미한다. 따라서 가정한  $V$ 가 강도요구량  $V_T$ 와 같도록 지진하중을 조정하여야 한다. 성능점을 구하는 방법을 나타내면 다음과 같다.

- 1) 지진하중  $V$ 를 가정하고, 3장의 활선강성을 사용한 반복계산을 이용하여 비탄성 변형량  $\Delta$ 를 구한다. 이때 예측된 비탄성 변형량은 내진설계기준에서 정의하는 허용층간변형각을 만족하도록 설정되어야 한다(Fig. 6 step 1).
- 2) 부록 A, B에 나타난 강도요구량 추정방법을 사용하여 구조물의 비탄성 변형량  $\Delta$ 에 대하여 추정되는 강도요구량  $V_T$ 를 구한다(Fig. 6 step 2).
- 3)  $V = V_T$ 를 만족하는지를 확인하며, 이를 만족하지 않는 경우에는 새로운 지진하중을 가정하여 1) - 3)의 과정을 반복한다.

Fig. 6은 3장에 소개된 활선강성을 이용한 반복계산으로 성능기초설계를 수행하여 지진하중을 구하는 과정을 보여준다. 가정한 지진하중에 대하여 반복계산으로 구한 점은 성능점이 될 가능성이 있는 가상성능점(virtual performance point)이고, 이러한 가상성능점 ( $\Delta, V$ )을 연결한 도형은 구조물의 잠재적인 성능을 나타내는 성능곡선(capacity curve)이다. 반면 각 가상성능점의 변위에 대하여 구한 비탄성 강도요구량 ( $\Delta, V_T$ )을 연결한 도형은 지진에 의해 요구되는 하중을 나타내는 요구곡선(demand curve)이다. 다만 주의하여야 할 사항은 이미 모든 부재의 강도가 고정된 하나의 설계안에 대하여 비탄성해석을 통해 구하는 CSM의 성능곡선과 달리, Fig. 6의 성능곡선은 부재강도가 고정되어 있지 않은 상태에서 가상성능점의 변형에 따라 부재강도가 서로 다르게 결정되는 존재 가능한 여러 설계안을 나타낸다는 점이다.

성능곡선과 요구곡선이 교차하는 점이 지진에 의한 요구량과 성능이 일치하는 실제 성능점(performance point)이고, 이때의 비탄성 강도량과 변형량이 각각 설계 지진하중과 목표변위이다. 일반적으로 지진하중이 증가하면 해석결과 산출되는 변형량은 증가하며, 예측된 비탄성 변형량이 증가하면 강도요구량은 감소한다. 따라서 반복계산시  $V < V_T$ 인 경우에는 지진하중을 증가시키며,  $V > V_T$ 인 경우에는 지진하중을 감소시킨다.

Fig. 6에 나타난 성능기초설계는 다양한 성능수준에 대한 설계에 적용될 수 있다. FEMA-273에 즉시거주(IO, Immediate Occupancy), 인명안전(LS, Life Safety), 붕괴방지(CP, Collapse Prevention) 등의 성능수준에 해당하는 소성힌지에서의 변형량을 제한하고 있다. 제안된 설계방법을 이용할 경우 각 성능수준의 한계변형량을 만족시키도록 성능곡선을 구하여 성능점을 찾음으로 다양한 성능수준에 대한 내진설계가 가능하다.

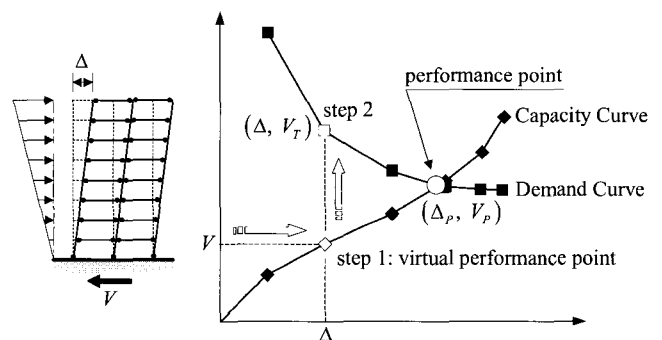


Fig. 6 Determination of performance point

#### 5. 설계 예제

본 연구에서는 3과 4장에서 제시한 활선강성을 사용하는 내진설계방법을 구현할 수 있도록 철근콘크리트 골조의 내진설계를 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램에서는 각 부재의 비선형거동을 적절히 나타내기 위하여 양단에 회전스프링을 설치한 휨 요소를 사용하였다. 비선형해석과 같이 특별한 비선형 해석 알고리즘없이 단순한 반복

계산을 위한 알고리즘만 필요하므로 일반적인 선형해석프로그램을 수정하여 쉽게 프로그램을 개발할 수 있다.

예제 건물은 철근콘크리트 연성모멘트골조이다. Fig. 7은 설계대상 골조를, Table 1은 사용재료의 성질을, Table 2는 지진하중 산정을 위한 조건을 각각 나타낸다. 본 예제에서는 보다 명확한 비교를 위하여 지역계수를 강진지역에 해당하는 0.4로 증가시켰다. 각 층의 고정하중  $D$ 와 적재하중  $L$ 은 각각 600kN과 270kN 이다. 가정된 각 부재의 크기는 Fig. 7에 나타나 있다. 현행 내진설계기준<sup>(3)</sup>에 의한 건물의 기본진동주기는  $T=0.79\text{sec}$  이고 건물의 총중량은  $W=4800\text{kN}$  이므로, 등가정적방법에 의한 건물의 밀면전단력  $V$ 는 648kN 이다. 총지진하중의 분포는 등가정적방법에 따라 각 층의 높이에 선형으로 비례하는 분포를 갖는다(Fig. 7).

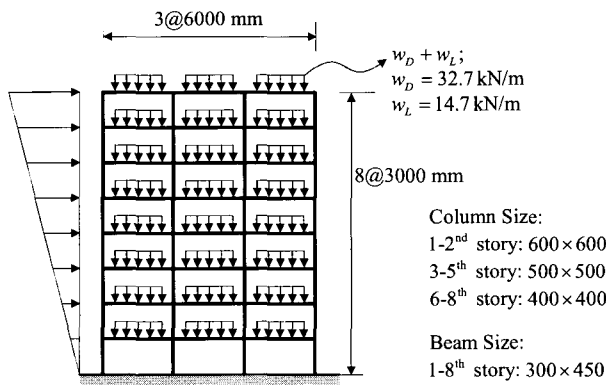


Fig. 7 Configuration and load profiles for seismic design of 8-story frame

Table 1 Material properties

| Concrete                  |                                  | Steel                    |                               |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Elastic Modulus ( $E_c$ ) | Compressive Strength( $f_{ck}$ ) | Yield Strength ( $f_y$ ) | Yield Strain ( $\epsilon_y$ ) |
| 23.5GPa                   | 27MPa                            | 400MPa                   | 0.002                         |

Table 2 Seismic properties

| 지역계수 | 지반계수 | 중요도계수 | 기본진동주기 | 반응수정계수 |
|------|------|-------|--------|--------|
| A    | S    | I     | T      | R      |
| 0.4  | 1.2  | 1.5   | 0.79   | 5      |

### 5.1 등가정적해석

등가정적 지진하중에 대하여 탄성해석을 실시하여 각 부재의 요구강도를 구하였다. 각 부재에 대하여 요구강도를 항복강도로 갖는 비탄성 휨모멘트-회전각 모델을 정하고, DRAIN-2DX를 이용하여 변위제어를 통한 비탄성해석을 실시하였다. 이때, 최상층에서의 해석목표 비탄성변형량은 건축물하중기준<sup>(3)</sup>에서 규정하고 있는 등가변형량의 원리에 의하여  $\Delta_T=765\text{mm}$  이다. Fig. 8은 해석결과 나타나는 소성힌지의 발생위치와 변형의 크기를 나타낸다. 해석결과, 중간

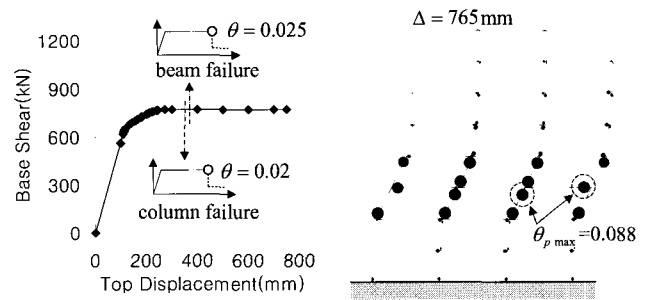


Fig. 8 Existing elastic design for equivalent static seismic load

층에서 약층현상이 발생하며 기둥과 보에 0.088rad의 최대 소성변형이 동일하게 발생하였다. 이러한 소성변형량은 FEMA-273에서 기둥과 보에 대하여 각각 제안하는 최대의 한계소성변형량 0.02rad과 0.025rad을 크게 상회하는 값이다. Fig. 8의 해석결과는 기존의 탄성설계법의 한계를 명확히 보여준다. 기존의 탄성해석에 의한 설계를 수행하는 경우 설계자가 소성힌지의 발생위치와 각 부재의 비탄성 변형량을 제어하는 것이 불가능하다. 따라서 중간층의 기둥이나 보에서 소성변형이 과도하게 집중발생하며 약층현상이나 국부 파괴 메커니즘이 발생할 수 있으므로, 구조물의 내진안전성을 확보할 수 없다.

### 5.2 활선강성을 이용한 내진설계-강도기초설계

3장에 제시된 설계방법을 따라 강도기초설계를 실시한다. 골조에 작용하는 지진하중은 등가정적법에 따라서 구한다. 미리 정해진 지진하중에 대하여 3장에 제시된 방법에 따라 활선강성을 이용한 탄성해석을 실시한다. Fig. 7에 나타난 골조의 해석을 위하여 다음과 같은 가정 및 내진설계전략을 적용하였다.

- 1) 중력하중에 대한 탄성해석시 사용하는 기둥과 보의 균열 강성은 ATC-40과 FEMA-273에 제시된 것과 같이 균열이 없는 강성의 0.7배와 0.5배를 사용한다. 다만, 보의 경우 바닥슬래브의 강성을 고려하여, 균열강성의 두배를 탄성해석을 위한 강성으로 사용하였다.
- 2) 중력하중조합  $1.4D + 1.7L$ 에 대하여 탄성해석을 실시하여, 각 부재의 정(+)과 부(-)방향 최저한계 휨강도를 결정한다. 중력하중에 의한 최저한계 휨강도가 최소철근비에 의한 휨강도 보다 작은 경우에는 후자를 최저한계 휨강도로 정하였다. 또한, 한 방향의 최저한계 휨강도 크기는 다른 방향 최저한계 휨강도 크기의 1/2 이상으로 정한다.
- 3) 약보-강기둥의 설계개념을 적용한다. 기둥의 경우 지면에 접지된 1층하부에서만 소성힌지가 발생하고, 보의 경우 모든 보의 단부에서 소성힌지가 발생할 수 있도록 가정하였다.
- 4) 각 부재의 소성힌지영역에서의 한계변형량을 정한다. 이 예제에서는 IO, LS, CP 세 성능수준에 해당하는 한계소성변형량을 Table 3과 같이 가정하였다(FEMA-273).

- 5) 소성힌지에서의 항복이후강성  $K_p$ 는 탄성강성  $K_e$ 의 5%로 가정하였다.
- 6) 소성힌지를 모델링하기 위하여 추가한 회전스프링요소는 탄성변형이 발생하지 않고, 부재항복 이후에 소성변형만 발생하는 소성강체(rigid plastic element)로 가정하였다.

실제로는 성능수준에 따라 지진하중이 달라져야하지만 여기서는 비교를 위하여 모든 성능수준에 대하여 동일한 지진하중을 사용하였다. Table 4는 소성힌지의 한계변형능력을 IO, LS, CP 등 각 성능수준으로 제한하였을 경우 해석결과를 나타낸다. 해석결과는 지진하중이 일정하더라도 각 부재의 한계변형능력이 커짐에 따라 성능점의 변형량이 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 9는 CP 성능수준에 대하여 구조물의 변형형상, 소성힌지의 발생위치, 각 소성힌지에서 요구되는 비탄성 강도 및 변형요구량 등을 나타낸다.

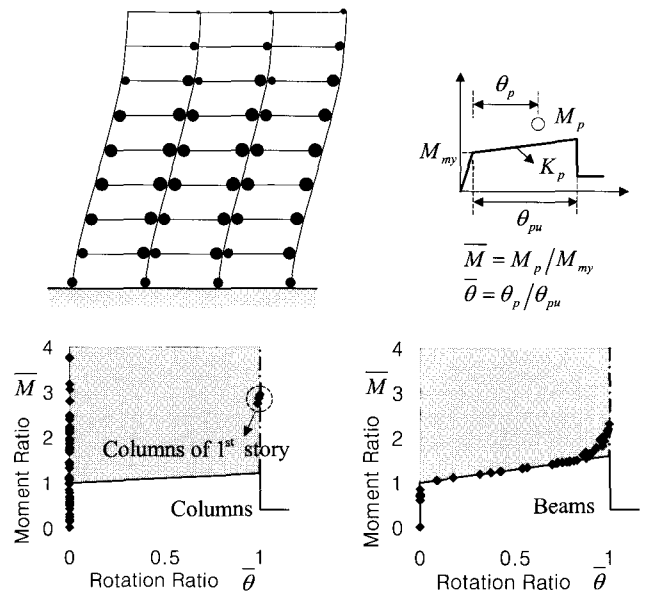


Fig. 9 Force-based design results : CP

Table 3 Limitation on ductility at plastic hinges(radians)

| Member                         | Performance Level   |                      |                    |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
|                                | IO                  | LS                   | CP                 |
| Columns(1 <sup>st</sup> story) | 0.005 <sup>1)</sup> | 0.0075 <sup>1)</sup> | 0.01 <sup>1)</sup> |
| Beams                          | 0.005 <sup>1)</sup> | 0.01 <sup>1)</sup>   | 0.02 <sup>1)</sup> |

1) plastic rotation  $\theta_{pu} = \theta_u - \theta_y$

기존의 탄성설계법과 달리 제안된 설계법은 각 부재의 비탄성 강도 및 변형요구량을 정확히 산정할 수 있으므로 이를 만족하도록 각 부재에 대하여 철근배근과 상세설계를 수행할 수 있다.

### 5.3 활선강성을 이용한 내진설계-성능기초설계

주어진 변형량에 대한 강도요구량 산정을 위하여 DDBD에서 제안된 방법을 사용한다. 이 경우에도 앞서의 해석과 동일한 내진설계전략을 사용한다. 각 가상성능점에서의 강도요구량 산정방법은 부록 B에 자세히 기술하였다. 구조해석시 가정한 강도가 강도요구량과 같을 때까지 지진하중을 증가시켜 가며 반복계산을 수행한다.

Fig. 10은 성능점을 찾는 과정을 보여준다. 각 부재의 한계변형능력이 커질수록 비탄성 요구지진하중을 나타내는 요구곡선이 아래방향으로 이동하고 성능곡선의 기울기는 완만해지므로 성능점의 설계지진하중은 작아진다. 이는 Table 5에 잘 나타나 있다.

Table 4 Results of force-based design

| Performance Point | IO  | LS  | CP  |
|-------------------|-----|-----|-----|
| $\Delta_p$ (mm)   | 249 | 332 | 466 |
| $V_p$ (kN)        | 857 |     |     |

Fig. 11은 CP 성능수준에 대하여 성능점에서 구조물의 변형형상, 소성힌지의 발생위치, 각 소성힌지에서의 비탄성 강도 및 변형 요구량 등을 보여준다. 그림에서 보 양단의 소성힌지의 변형량이 비대칭으로 발생하는데, 이는 중력하중의 영향에 의하여 나타나는 현상이다. 활선강성을 이용한 탄성 해석법은 구조물의 내진설계시 각 부재에 요구되는 비탄성 강도 및 연성요구량을 정확히 산정할 수 있으므로, 이에 대하여 연성설계를 실시한다면 구조물의 내진안전성을 확보한 설계가 가능하다. 또한, 2층 이상의 기둥에서는 소성힌지가 발생하지 않는데, 이는 기둥에서 비탄성거동이 일어나지 않도록 소성힌지의 활선강성을 탄성강성으로 고정시켰기 때문이다. 따라서, 지진거동시 발생할 수 있는 약층현상을 사전

Table 5 Results of performance-based design

| Performance Point | IO  | LS  | CP  |
|-------------------|-----|-----|-----|
| $\Delta_p$ (mm)   | 272 | 303 | 342 |
| $V_p$ (kN)        | 969 | 763 | 652 |

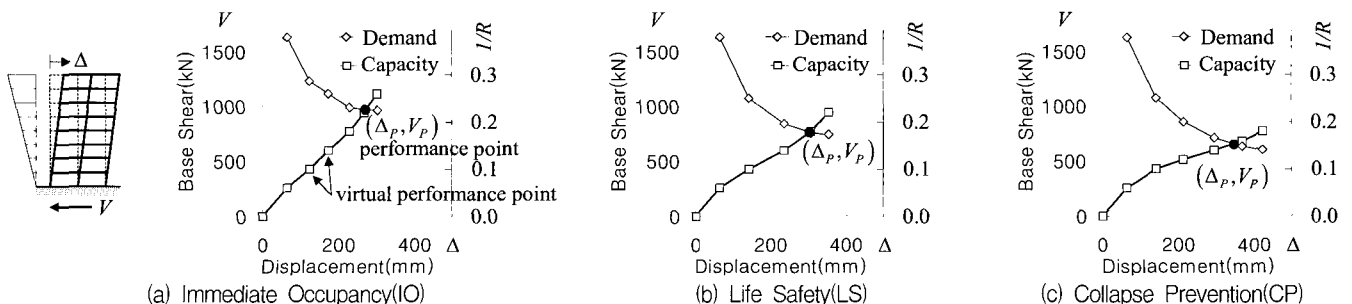


Fig. 10 Determination of performance points(design examples)

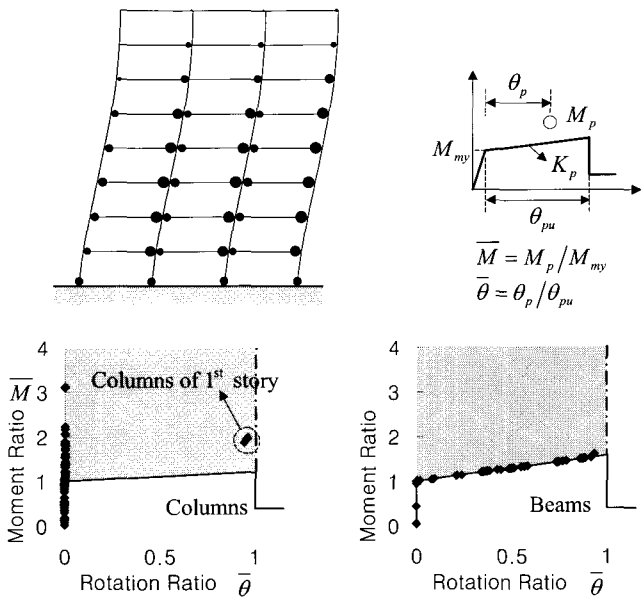


Fig. 11 Performance-based design results: CP

에 설계단계에서 억제할 수 있는 내진설계가 가능하다. 이러한 약보-강기동 설계개념을 적용할 경우 Fig. 11의 (b)에 나타난 바와 같이 보의 경우 전층에서 소성힌지가 발생하는데, 이는 지진거동시 많은 소성힌지를 통하여 에너지소산량을 극대화할 수 있음을 나타낸다. 따라서 좋은 에너지 소산효율을 갖는 건물의 설계가 가능하다.

Fig. 12는 제안된 해석법의 검증을 위하여 DRAIN-2DX<sup>(7)-(9)</sup>의 해석결과와 비교하고 있다. CP 성능수준에 대하여 반복계산으로 구한 각 부재의 비탄성 강도와 변형량으로 기동과 보 부재를 모델링하여 DRAIN-2DX로 재해석하였다. Fig. 12(a)는 밀면전단력-최상층변위 관계곡선으로, 활선강성의 선형해석과 비선형해석에 의한 경로가 다르지만 최종적으로 같은 성능점에 도달하는 모습을 보여준다. (b)는 탄성해석과 비탄성해석에 의한 각 소성힌지에서의 비탄성 변형을 비교한 것으로, 반복계산에 의한 탄성해석법과 비탄성해석법에 의한 해석결과가 정확히 일치함을 잘 나타낸다.

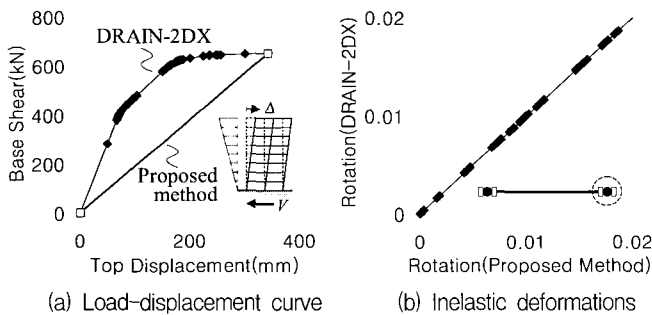


Fig. 12 Verification of the proposed method (CP)

### 6. 기존 설계법과의 비교

해석연구를 통하여 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안하는 설계방법은 기존의 설계방법에 비교하여 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 1) 능력스펙트럼법과는 달리 기존의 탄성해석에 사용하는 입력정보인 부재단면크기와 하중조건만을 사용하여 구조물의 비선형거동을 고려한 각 부재의 강도 및 변형각 요구량을 직접적으로 구할 수 있으므로, 설계가 편리하다.
- 2) 직접변위기초설계법과는 달리 소성과피메카니즘을 가정할 필요가 없으므로 제한적 연성도가 요구되는 고층건축물이나 중저진지역 건축물의 내진설계에 활용할 수 있다.
- 3) 설계자의 내진설계전략을 해석 및 설계에 직접 반영할 수 있으므로 내진안전성과 경제성을 확보할 수 있다.
- 4) 각 부재에서 비탄성 변형에 대한 제어가 가능하므로, 과도한 변형요구량에 의한 국부파괴 및 약층(soft-story) 현상을 방지할 수 있으며, 소성힌지의 고른 분배를 통하여 지진거동시 하중의 재분배와 에너지 소산에 매우 효율적인 거동을 보이도록 최적화된 설계가 가능하다.

본 연구에서 제안된 활선강성을 이용하는 직접내진설계법은 기존의 강도기초설계법, 변위기초설계법들과 쉽게 접목하여 사용할 수 있으므로 그 적용범위를 보다 넓힐 수 있다.

### 7. 결 론

기존의 정적비선형해석방법들은 다층 건축물등의 복잡한 구조물의 직접내진설계법으로 사용하기에는 여러 가지 단점을 가지고 있다. 성능스펙트럼법은 기설계된 구조물의 평가 방법으로서 직접설계방법으로 사용하기 어려우며, 직접변위기초설계법은 소성과피메카니즘을 가정하여야 하므로 한계 변형능력만이 요구되는 고층건축물이나 중저진 지역의 건축물에는 사용하기 어렵다.

본 연구에서는 탄성해석과 같이 구조물의 단면가정과 하중조건만을 가지고 구조물의 비선형거동을 고려하여 내진설계를 수행할 수 있는 직접비탄성내진설계법을 개발하였다. 제안된 직접비탄성내진설계법은 활선강성을 사용하는 반복해석방법을 사용하는데, 선형해석을 사용함으로써 해석이 편리하고 활선강성을 이용함으로써 하중 및 변형 요구량에 대한 비탄성거동특성을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 제안된 설계방법의 순서를 정립하였으며, 이를 적용하여 해석과 설계를 통합적으로 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 제안된 방법을 이용한 설계예제를 소개하였으며, 기존의 탄성설계 및 비탄성해석과의 비교를 통하여 제안된 설계법의 우수성을 검증하였다.

제안된 설계법은 설계자의 의도에 따라 부재의 제한적 연성능력, 강기동-약보 등과 같은 설계전략을 반영할 수 있으며, 이 설계전략에 맞는 부재의 비탄성 강도 및 연성 요구량을 정확히 산정할 수 있다. 따라서, 안전성을 확보한 경제적인 내진설계가 가능하고, 특히 우리나라와 같은 한계변형량이 요구되는 중저진 지역의 내진설계법으로서 사용될 수 있다.



## 감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(KEERC)와 초고층 연구단(건교부)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Akenori Shibata and Meta A. Sozen, "Substitute-Structure Method for Seismic Design Method in R/C," *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 102, No. ST1, 1976. 1.
2. M. J. N Priestley, "Performance Based Seismic Design," Paper No. 2831, *12th World Conference on Earthquake Engineering(WCEE)*, 2000.
3. 건축물 하중기준, 건설교통부, 2000.
4. 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2000.
5. Building Seismic Safety Council, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *FEMA-273*, Federal Emergency Management Council, Washington, D.C, 1997.
6. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," *ATC-40 Report*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
7. Rakesh Allahabadi and Graham H. Powell, "DRAIN-2DX User Guide," Earthquake Engineering Research Center, *Report No. UCB/EERC-88/06*, 1988. 3.
8. V. Prakash, G. H. Powell, and S. Campbell, "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide-Version 1.10," University of California, *Report No. UCB/SEMM-93/17*, 1993. 11.
9. G. H. Powell, "DRAIN-2DX Element Description and User Guide for Element Type01, Type02, Type04, Type06, Type09, and Type15-Version 1.10," University of California, *Report No. UCB/SEMM-93/17*, 1993. 12.

**부록 A : 능력스펙트럼법에 의한 강도요구량의 산정**

지진하중을 가정하여 3 장에 소개한 방법을 따라 반복계산을 통하여 가상성능점을 구했다고 가정하자. 이때의 밀면전단력은  $V$  이고, 가상성능점에서의 최고층 변위는  $\Delta$  이다. 가상성능점의 변위에 대하여 강도요구량을 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 가상성능점의 밀면전단력  $V$ 와 최고층 변위  $\Delta$ 를 스펙트럼가속도  $a_d$ 와 변위  $\Delta_d$ 로 치환한다.

$$a_d = \left( V \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^2 \right) / \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i \right)^2 \tag{A1}$$

$$\Delta_d = \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^2 \right) / \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i \right) \tag{A2}$$

여기서,

$m_i$  :  $i$ 번째 층의 총질량

$n$  : 총층수이다.

- 2) 모든 부재의 소성힌지에서 탄성거동을 가정하고, 가상성능점의 지진하중  $V$ 에 대한 탄성해석을 실시하여 각 층의 항복변위  $\Delta_{y,i}$ 를 구한다. 이로부터 구조물의 항복스펙트럼변위  $\Delta_y$ 를 구한다.

$$\Delta_y = \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_{e,i}^2 \right) / \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_{e,i} \right) \tag{A3}$$

- 3) 앞서 구한 스펙트럼가속도와 변위값을 이용하여 등가감쇠비  $\zeta_{eq}$ 를 구한다.

$$\zeta_{eq} = \frac{63.7x(a_y \Delta_d - a_d \Delta_y)}{a_d \Delta_d} + 5 \geq 5 \tag{A4}$$

여기서,

$a_y$  : 항복스펙트럼가속도

$x$  : 감쇠보정계수

- 4) 등가감쇠비  $\zeta_{eq}$ 에 의한 응답감소계수를 구한다.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.681 \ln \zeta_{eq}}{2.12} \tag{A5-1}$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln \zeta_{eq}}{1.65} \tag{A5-2}$$

- 5) 가상성능점의 유효탄성주기  $T_e$ 를 구한다.

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta_d}{a_d}} \tag{A6}$$

- 6) 유효주기  $T_e$ 에 대한 동적계수  $C$ 를 구한다.

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T_e}} \leq 1.75 \tag{A7}$$

여기서,  $S$  : 지반계수

- 7) 등가감쇠비  $\zeta_{eq}$ 로 인하여 감소된 비탄성 스펙트럼가속도  $a_T$ 를 구한다.

$$a_T = SR_V A I C \leq SR_A 1.75 A I \tag{A8}$$

여기서,

$A$  : 지역계수

$I$  : 중요도계수로 참고문헌 5에 제시된 값을 이용한다.

- 8) 밀면전단력  $V_T$ 를 구한다.

$$V_T = a_T W \tag{A9}$$

여기서,  $W$  : 건물의 총중량

**부록 B : 직접변위기초설계법에 의한 강도요구량의 산정**

지진하중을 가정하여 3 장에 소개한 방법을 따라 반복계산을 통하여 가상성능점을 구했다고 가정하자. 이때의 밀면전단력은  $V$ 이고, 가상성능점에서의 각 층의 변위는  $\Delta_i$ 이다.

- 1) 식 (A2)를 이용하여 다자유도 구조물을 등가의 단자유도 기구조로 치환할 경우의 스펙트럼변위  $\Delta_d$ 를 구한다.
- 2) 모든 부재의 소성힌지에서 탄성거동을 가정하고, 가상성능점의 지진하중  $V$ 에 대한 탄성해석을 실시하여 각 층의 항복변위  $\Delta_{y,i}$ 를 구한다. 이로부터 식 (A3)을 이용하여 구조물의 항복스펙트럼변위  $\Delta_y$ 를 구한다.

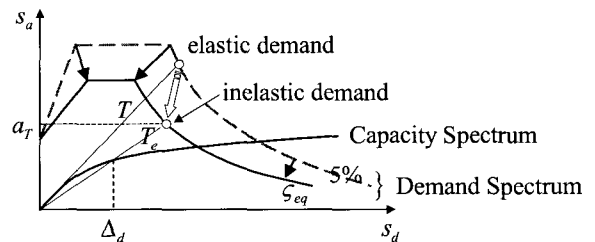


Fig. A1 Reduced strength demand(CSM)

- 3) 구조물의 연성도  $\mu$ 는 다음과 같다.

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \tag{B1}$$

- 4) 구조형식과 연성도에 따라 정의되는 등가감쇠비  $\zeta_{eq}$ 를 구한다(Fig. B1(a)).
- 5)  $\Delta_d$ 와  $\zeta_{eq}$ 를 이용하여 설계변위스펙트럼으로부터 유효주기  $T_e$ 를 구한다(Fig. B1(b)).

6) 유효주기를 이용하여 구조물의 유효강성  $K_e$ 를 구한다.

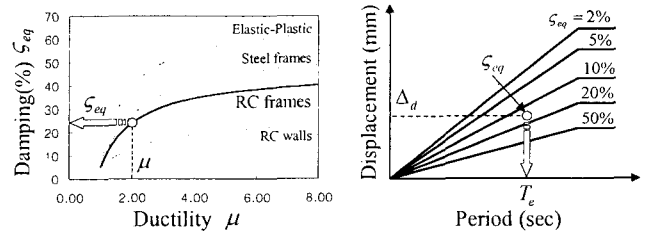
$$K_e = 4 \pi^2 \frac{M_e}{T_e^2} \quad (B2)$$

여기서,  $M_e$  : 유효질량으로 다음과 같이 구한다.

$$M_e = \left( \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i \right) / \Delta_d \quad \text{or} \quad 0.7 \sum_{i=1}^n m_i \quad (B3)$$

7) 유효강성을 이용하여 요구강도량  $V_T$ 를 구한다.

$$V_T = K_e \Delta_d \quad (B4)$$



(a) Equivalent damping vs. ductility (b) Design displacement response spectra

Fig. B1 Reduced strength demand (DDBD)