

## 할선강성을 이용한 직접내진설계 Direct Earthquake Design Using Secant Stiffness

박홍근\*  
Park, Hong-gun

엄태성\*\*  
Eom, Tae-sung

---

### 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. 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.

---

### 1. 서론

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 건물 일지라도 내진거동특성에 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 내진안전성을 확보하기 어렵다.
- 3) 이러한 연성요구량의 불확실성으로 인하여 우리나라와 같이 대부분의 건물에 한계연성도 (limited ductility)만이 요구되는 중저진 지역에서도 안전측으로 내진상세를 구조물 전체에 걸

\* 서울대학교 건축학과 조교수, 정회원

\*\* 서울대학교 건축학과 대학원

처 사용할 수 밖에 없으며, 따라서 경제적인 설계를 실현하기 어렵다.

최근에 들어와 이러한 정적선형해석법을 사용하는 등가정적해석의 단점을 보완하기 위하여 능력스펙트럼해석법(이하 CSM)<sup>3)</sup>, 변위기초설계법(이하 DDBD)<sup>4)</sup>, 역량설계법 등 정적비선형해석을 사용하는 다양한 내진해석/설계방법이 도입되고 있다. 비선형해석법을 사용하는 새로이 개발된 방법들은 기존의 탄성해석을 사용하는 등가정적설계에 비하여 구조물의 비선형거동에 수반되는 내진성능을 보다 정확히 예측할 수 있으므로 구조물의 내진안전성을 보다 명확히 확보할 수 있다. 그러나, 이러한 비선형해석을 사용하는 설계방법들은 그 적용에 있어서 몇 가지 문제점을 안고 있다.

- 1) 능력스펙트럼법은 구조물을 구성하고 있는 각 부재의 비선형모델이 구성되어야 사용이 가능하다. 따라서 기존구조물이나 설계가 이루어진 구조물의 내진성능 평가방법으로 사용할 수 있으나, 구조물의 강도, 연성요구량을 결정하는 직접설계방법으로는 사용할 수 없다. 또한 설계자의 내진설계전략을 설계에 직접적으로 반영하기 어려우므로 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 다자유도의 구조물의 강도 및 연성요구량을 계산하기 어렵다. 따라서 직접변위기초설계법은 소성 파괴 메커니즘이 명확히 나타나는 강진지역의 중저층 구조물이나 교량구조물의 설계에 적합하며, 파괴시 완전한 소성메커니즘이 형성되지 않고 한계연성도만이 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, 한계연성능력이 요구되는 구조물을 포함하는 다양한 내진성능을 갖는 구조물의 설계에 적용이 가능한 실용적인 정적 비선형설계방법을 개발하고자 한다.

## 2. 설계 개념

본 연구에서 제안하는 해석/설계방법의 기본 개념은 구조물의 비선형 거동으로부터 나타나는 구조물 및 부재의 강도와 변형 요구량을 그에 관계된 활선강성(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-회전변형의 관계를 나타낸다. 그림 (b) 는 구조물과 각 부재의 비선형거동에 의하여 발생하는 최대 강도 및 변형으로 정의되는 성능점(또는 요

구량, 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.

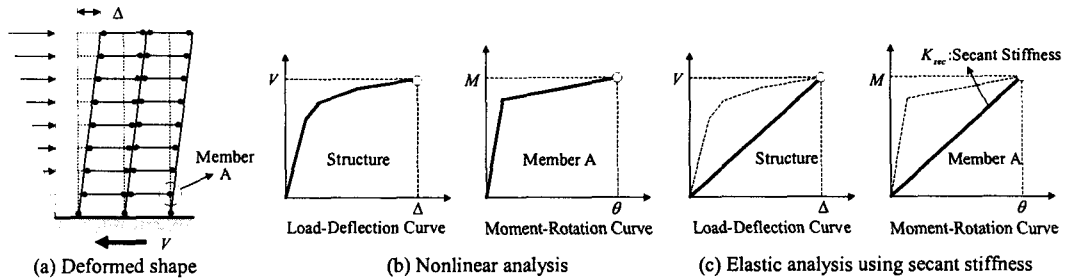


Fig. 1 Nonlinear static analysis vs. equivalent elastic analysis using secant stiffness

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

- 1) 할선강성은 탄성강성보다 작은 값이어야 한다.
- 2) 비선형거동에 의하여 요구되는 강도는 중력하중에 의하여 요구되는 최저한계강도이상이어야 한다.
- 3) 내진설계기준5) 또한 콘크리트구조설계기준6)에서 정의하는 연성상세를 사용하는 부재는 일정한 최대변형능력  $\theta_u$  를 갖고 있으며, 성능점은 이 최대한계변형보다 작은 값이어야 한다.

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 소성한지 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.

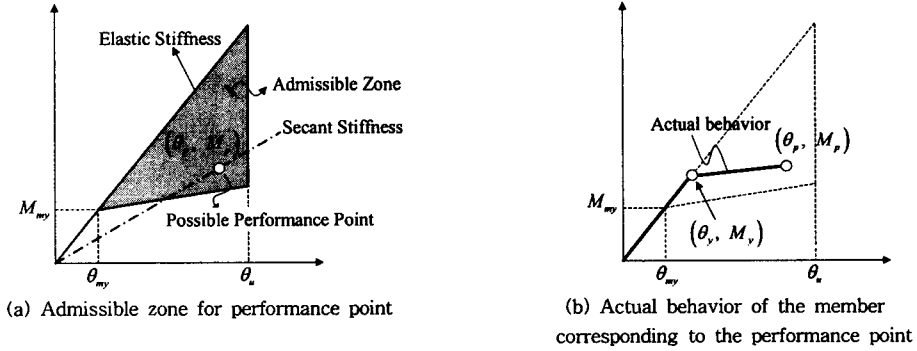


Fig. 2 Determination of inelastic strength and deformation of the member using secant stiffness

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

### 3. 해석 및 설계 방법의 절차

본 연구에서 제안된 할선강성을 이용한 직접내진설계법의 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>4)</sup> 등 기존의 설계기준이 정의하거나 또는 실험 결과에 따라서 각 부재의 최대한계회전각  $\theta_u$ 를 정의한다.(Fig. 2)
- 3) 각 부재의 단부에 소성한지를 가정하고, 소성한지부재를 구성한다. 부재의 중앙부에서 소성한지 발생이 예상될 경우에는 집중하중의 위치 등에 소성한지를 둘 수 있다. 일반적인 범용탄성해석방법을 사용하는 경우에는 소성한지영역을 탄성거동을 하는 다른 영역과 구분하여 별도의 요소로 모델링할

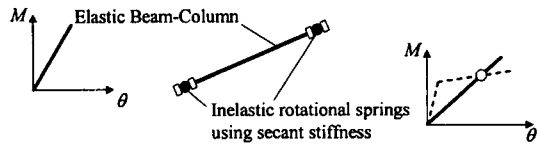
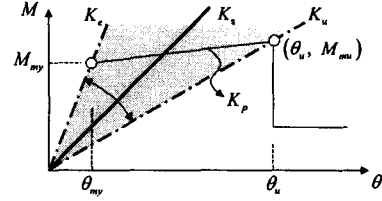


Fig. 3 Beam-column element with plastic hinge at two ends

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.

$$K_e = \frac{M_{my}}{\theta_{my}}, K_u = \frac{M_{mu}}{\theta_u} \quad (1)$$



여기서,  $M_{mu}$  = 최저한계강도에 해당하는 종곡모멘트 Fig. 4 Admissible range of secant stiffness

- 5) 내진설계기준에 따라서 지진하중을 산정하고, 이 지진하중에 대하여 할선강성을 사용하여 선형 해석을 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. 5 에 나타난 바와 같이, 성능점의 위치에 대한 4가지 경우에 대하여 할선강성의 수정방법을 제안한다.

- ①  $\theta_{pi} < \theta_{my}$  인 경우

$$K_{s,i+1} = K_e \quad (2-1)$$

- ②  $\theta_{my} < \theta_{pi} < \theta_b$  인 경우

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

- ③  $\theta_b < \theta_{pi} < \theta_u$  인 경우

$$K_{s,i+1} = K_{s,i} \quad (2-3)$$

- ④  $\theta_{pi} > \theta_u$  인 경우

$$K_{s,i+1} = \frac{M_{pi}}{\theta_u} \quad (2-4)$$

여기서,  $\theta_{pi}$ ,  $M_{pi}$  = 현재의 소성힌지 회전각과 휨모멘트,  $K_{s,i}$  = 현재 상태의 할선강성.

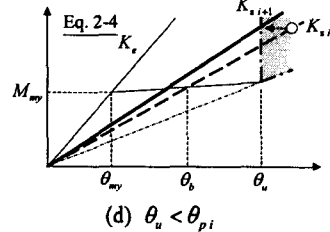
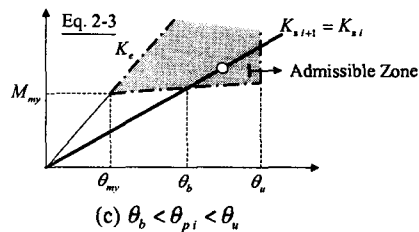
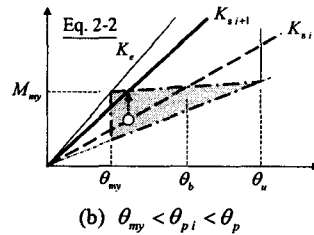
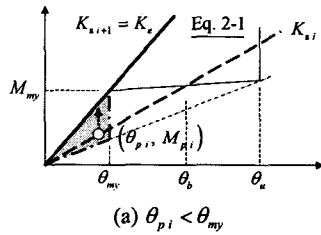


Fig. 5 Strategy for Updating secant stiffness at plastic hinge

$K_{s,i+1}$  = 갱신할 할선강성,  $\theta_b$  = 현재의 할선강성과 유효영역의 하부경계인 최저한계강도가 만나는 교점의 변형량으로 다음과 같이 구한다.

$$\theta_b = \frac{K_p \theta_{my} - M_{my}}{K_p - K_{s,i}} \quad (3)$$

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

#### 4. 성능기초설계

3 장에서는 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 할선강성을 사용하여 예측된 구조물의 비선형 거동특성을 반영하여 지진하중이 적절히 보정되어야 한다. 구조물의 비탄성 요구량을 수정하는 다양한 방법이 있으나, 여기서는 ATC-40<sup>3)</sup> 과 FEMA-273<sup>4)</sup>에서 채택하고 있는 CSM과 Priestley 등이 개발한 DDBD에서 사용하는 방법을 채택한다. CSM과 DDBD를 사용하는 경우 비탄성 지진요구량  $V_T$ 는 변형능력 및 에너지소산능력에 따라 변한다. 본 연구에서는 이러한 기존의 방법에 따라서 강도요구량이 추정되었을 때, 이를 만족하도록 할선강성을 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, 3 장의 할선강성을 사용한 반복계산을 이용하여 비탄성 변형량  $\Delta$ 를 구한다. 이때 예측된 비탄성 변형량은 내진설계기준에서 정의하는 허용층간변형각을 만족하도록 설정되어야 한다.(Fig. 6 step 1)
- 2) CSM과 DDBD 등과 같은 기존의 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. 6 은 3 장에 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. 6 의 성능곡선은 부재강도가 고정되어 있지 않은 상태에서 가상성능점의 변형에 따라 부재강도가 서로 다르게 결정되는 존재 가능한 여러 설계안을 나타낸다.

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. 6 에 나타난 성능기초설계는 다양한 성능수준에 대한 설계에 적용될 수 있다. FEMA -273 에 즉시거주(IO), 인명안전(LS), 붕괴방지(CP) 등의 성능수준에 해당하는 소성힌지에서의 변형량을 제한하고 이 한계변형량을 만족시키도록 성능곡선을 구하여 성능점을 찾을 수 있다. 따라서 제안된 설계방법을 사용하여 다양한 성능수준에 대한 내진설계가 가능하다.

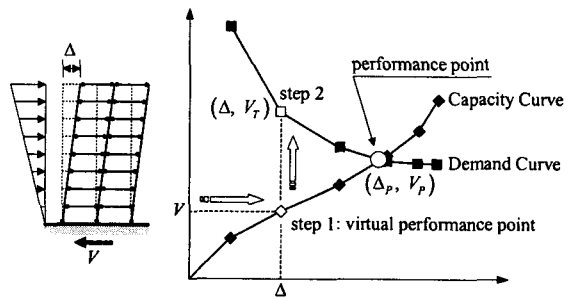


Fig. 6 Determination of performance points

## 5. 결론

기존의 정적비선형해석방법들은 다층 건축물등의 복잡한 구조물의 직접내진설계법으로 사용하기에는 여러 가지 단점을 가지고 있다. 성능스펙트럼법은 기설계된 구조물의 평가방법으로서 직접설계방법으로 사용하기 어려우며, 직접변위기초설계법은 소성파괴메카니즘을 가정하여야 하므로 한계변형능력만이 요구되는 고층건축물이나 중저진 지역의 건축물에는 사용하기 어렵다.

본 연구에서는 탄성해석과 같이 구조물의 단면가정과 하중조건만을 가지고 구조물의 비선형 거동을 고려하여 내진설계를 수행할 수 있는 직접내진설계법을 개발하였다. 제안된 직접내진설계

법은 활선강성을 사용하는 반복해석방법을 사용하는데, 선형해석을 사용함으로써 해석이 편리하고 활선강성을 이용함으로써 하중 및 변형 요구량에 대한 비탄성거동특성을 고려할 수 있다.

제안된 설계법은 설계자의 의도에 따라 부재의 한계연성능력, 강기등-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 지진공학센터(KEERC)와 두뇌한국 21 사업의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
2. Building Seismic Safety Council, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA-273, Federal Emergency Management Council, Washington, D.C, 1997
3. 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, January, 1976
4. M.J.N Priestley, "Performance Based Seismic Design", Paper No. 2831, 12th World Conference on Earthquake Engineering(WCEE), 2000
5. 건축물 하중기준, 건설교통부, 2000
6. 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2000
7. Rakesh Allahabadi and Graham H. Powell, "DRAIN-2DX User Guide", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/06, March, 1988
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, November, 1993
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, December, 1993