

# 철근콘크리트 구조물의 내진설계를 위한 할선강성해석법

## Secant Stiffness Analysis Method for Earthquake Design of Reinforced Concrete Structures

박 홍 근\*      김 창 수\*\*      엄 태 성\*\*\*

Park, Hong Gun    Kim, Chang Soo    Eom, Tae Sung

---

### ABSTRACT

A linear analysis method using reduced secant stiffness was developed for inelastic earthquake design of reinforced concrete structures. In the proposed method, the beam-column element and plane element, which are the same as used in conventional elastic analysis, are used for structural modeling. Based on the structural plastic mechanism intended by engineer, the distribution of inelastic members is determined. The secant stiffness of the inelastic members is determined based on the target ductility of the structure. Inelastic strengths of the members are calculated by using linear analysis on the structure modeled with secant stiffness. Plastic rotations in the inelastic members are calculated with the nodal rotations resulting from the secant stiffness analysis. For verification, the proposed method was applied to the inelastic earthquake designs of a moment-resisting frame and a dual system of two dimensions, and also a dual system of three dimensions.

### 요 약

철근콘크리트 구조물의 비탄성 내진설계를 위하여 할선강성을 사용한 선형해석법을 연구하였다. 제안된 방법에서는 기존의 탄성해석과 동일한 보-기둥 요소 및 면요소를 사용하여 구조물을 모델링하며, 비탄성거동의 영향을 반영하기 위하여, 비탄성변형이 예상되는 부재에 탄성강성 대신 할선강성을 사용한다. 할선강성을 사용하는 부재의 분포와 할선강성의 크기는 설계자가 의도하는 구조물의 소성메커니즘과 설계목표연성도에 의하여 결정된다. 이 구조해석모델에 대한 선형해석을 통하여 부재의 비탄성 설계강도를 직접 결정하고, 할선강성해석으로부터 구한 절점변위를 이용하여 할선강성비의 변형을 소성힌지에 발생된 회전변형으로 변환한 후 소성변형에 대한 안전성을 평가한다. 제안된 방법을 이용하여 2차원 모멘트골조 및 이중골조에 대한 내진설계를 수행하였으며, 3차원 골조에도 적용하였다.

---

\* 정회원, 서울대학교, 건축학과, 교수

\*\* 정회원, 서울대학교, 건축구조시스템연구실, 박사과정

\*\*\* 정회원, 대구가톨릭대학교, 건축학과, 전임강사

## 1. 서 론

일반적인 구조물은 지진발생시 일정한 연성도를 발휘하도록 요구되므로, 안전한 설계를 위해서는 구조해석시 설계자가 의도하는 소성메커니즘을 직접 고려하는 것이 바람직하다. 현재 대부분의 실무설계에서는 반응수정계수를 도입하여 비탄성지진하중을 평가하며, 이 하중에 대하여 탄성해석을 수행하는 등가정적방법이 주로 사용되고 있다. 하지만 탄성해석으로는 큰 비탄성변형을 겪는 구조물과 각 부재의 안전성을 정확히 평가할 수 없으며, 동일한 구조형식의 구조물이라도 소성메커니즘에 따라 다른 연성능력을 발휘할 수 있으므로, 구조형식에 따라 일률적으로 규정된 반응수정계수와 이를 이용해 산정된 설계지진하중으로는 구조물의 실제 연성능력을 정확히 반영하기 어렵다. 기존의 비탄성설계에서는 탄성해석을 사용하여 구조물을 설계한 다음, 정밀한 단계별 비선형해석을 이용하여 구조물의 안전성을 평가하고, 그 결과에 근거하여 재설계하는 방법을 사용하고 있다. 따라서 설계자의 의도된 소성메커니즘을 초기 구조설계에 직접 반영하기 어렵고, 안전하고 경제적인 설계를 위해서는 설계와 평가를 반복해야 한다. 특히, 비선형해석을 위해서는 복잡한 모델링 작업이 선행되어야 하며, 대부분의 상용 해석프로그램에서는 벽체요소 등에 대한 비선형해석이 불가하므로, 실제 3차원 구조물 설계의 적용은 제한된다. 이러한 비탄성설계의 적용한계와 탄성선형해석의 편리성으로 인하여, 기술적 결함에도 불구하고, 여전히 대부분의 실무에서는 탄성해석을 사용하는 등가정적방법이 주로 사용되고 있다. 비탄성거동의 영향을 설계에 직접 고려하기 위한 방법으로서, 활선강성을 이용한 해석/설계방법이 연구되어 왔다. 이 방법은 근사적으로 비탄성거동에 의한 하중재분배를 고려할 수 있지만, 단자유도로 치환된 구조해석모델이 요구되거나, 각 부재에 발생하는 소성변형을 평가하지 못하는 단점이 있다. Park and Eom은 별도의 요소로 모델링된 소성힌지에 활선강성을 사용함으로써, 각 부재의 비탄성 강도와 변형을 정확히 계산할 수 있는 직접비탄성설계법을 제안하였으나, 소성힌지를 모델링해야 하는 불편함이 있다. 본 연구에서는 비탄성설계에 대한 활선강성해석의 활용성을 확대하기 위하여, 탄성해석과 동일한 해석모델을 사용하여 부재들의 비탄성 강도와 변형을 평가할 수 있는 활선강성을 이용한 해석/설계법을 개발하였다.

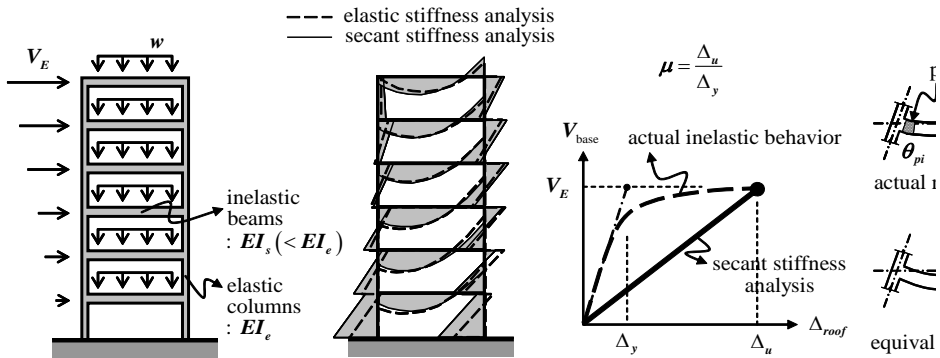


그림 1. Concept of secant stiffness analysis method

## 2. 활선강성해석법의 개념

그림 1은 본 연구에서 제안하는 활선강성해석법의 개념을 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이, 비탄성 거동이 예상되는 부재(각 층의 보)에 대하여 감소된 활선강성  $EI_s$ 를 사용하여 모델링한 다음, 선형해석을 통하여 구조물과 부재에 요구되는 비탄성 강도 및 변형을 구한다. 활선강성해석으로부터 구한 부재의 비탄성 요구강도에 대하여 부재설계를 실시하고, 연성도와 부재소성변형 등 구조물 및 부재에 요구되는 비탄성변형에 대하여 안전성을 검토한다. 비탄성 거동을 보이는 실제 부재에서는 소성힌지에서 소성변형이 집중적으로 발생하는 반면, 제안된 방법에서는 단순히 부재의 탄성강성을 저감시킨 활선강성을 사용하므로 변형이 부재 전체에 고르게 분포된 이상화된 선형거동을 보인다. 따라서 이 등가선형부재는 소성힌지를 갖는 실제 부재의 비탄성거동을 근사적으로 나타내며, 본 연구에서는 설계의 안전성을 평가하기 위하여 활선강성해석으로 구한 등가선형부재의 변형을 실제 부재의 소성변형으로 변환시키는 방법을 사용한다. 소성변형 평가방법은 3장에 나타내었다. 활선강성해석 결과로부터 계산되는 각 부재의 비탄성 강도 및 변형, 그리고

구조물의 소성메커니즘은 활선강성요소의 분포와 활선강성의 크기에 의하여 결정된다. 따라서 활선강성요소의 분포와 활선강성의 크기는 설계자의 설계전략과 설계기준의 요구사항 등을 고려하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 부재의 활선강성 결정시 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- 1) 지진하중에 의하여 양단부에 소성힌지가 발생하는 부재는 활선강성요소를 사용하며, 활선강성의 크기는  $EI_s = EI_c/\mu_m$ 로 정의한다. 여기서  $\mu_m$ 은 부재수준의 연성도로서, 시스템연성도  $\mu_s$ 보다 작은 값을 사용한다.
- 2) 활선강성해석으로 계산된 부재의 모멘트가 중력하중과 풍하중 등 다른 하중조합에서 요구되는 휨강도보다 작은 경우에는 탄성강성을 사용한다.
- 3) 한쪽 단부에서만 소성힌지가 예상되는 보의 경우에는 탄성강성을 사용한다. 이는 일반적으로 한쪽 단부에서만 소성힌지가 발생한 보의 강성이 양단부에 소성힌지가 발생한 보의 경우보다 상대적으로 매우 크고, 활선강성보로는 양단부에 비대칭변형이 발생한 보의 변형을 정확히 나타낼 수 없기 때문이다. 1층 기둥하부 또는 벽체하부와 같이 한쪽 단부에서만 큰 소성변형이 발생하는 경우에는, 활선강성  $k_s = M_u/\theta_p$ 를 갖는 별도의 회전스프링요소로 모델링한다. 만약 벽체를 면요소로 모델링하는 경우, 소성힌지구간의 벽체두께를 부재연성도로 나눈 값을 사용하여 활선강성을 설정한다.

### 3. 소성힌지 변형의 평가

부재의 안전성을 평가하기 위해서는, 활선강성해석으로 구한 등가선형부재의 변형으로부터 실제 부재의 소성힌지 변형을 평가하여야 한다. 등가선형부재와 실제 비탄성부재는 절점의 변형 및 하중을 공유하지만, 부재 내부의 강성분포가 다르므로 소성 변형의 분포가 서로 다르다. 따라서 다음과 같은 방법으로 부재 소성힌지의 소성변형을 평가한다. 등가선형부재에 휨모멘트를 발생시키는 순회전변형은 식(1)과 같고, 탄성보이론에 의하여 양단부 탄성회전변형은 식(2)와 같으므로, 실제 비탄성부재의 소성힌지 변형은 등가선형부재의 순회전변형에서 탄성변형을 감하여 식(3) 또는 (4)와 같이 계산할 수 있다.

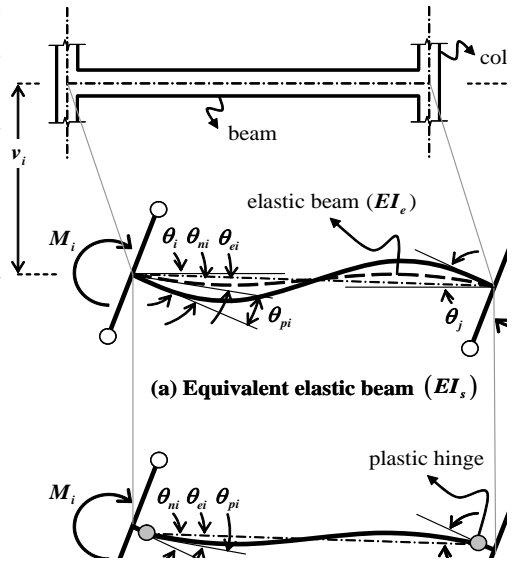


그림 2. Prediction of inelastic rotation at plastic hinge

$$\theta_{ni} = \theta_i - \frac{v_j - v_i}{L}, \quad \theta_{nj} = \theta_j - \frac{v_j - v_i}{L} \quad (1) \quad \begin{Bmatrix} \theta_{ei} \\ \theta_{ej} \end{Bmatrix} = \frac{L}{6EI_c} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_i + M_i^F \\ M_j + M_j^F \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \theta_{pi} \\ \theta_{pj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{-1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{-1}{L} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} - \frac{L}{6EI_c} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_i + M_i^F \\ M_j + M_j^F \end{Bmatrix} \quad (4)$$

### 4. 설계절차

활선강성해석법을 사용하여 내진설계를 수행하는 방법을 정립하였다. 여기서는 설계목표연성도에 따라 지진하중이 결정되는 성능기반설계에 적용한다. 활선강성해석법을 이용한 활선강성해석/설계 절차는 그림 3과 같다.

### 5. 설계예제

본 연구에서 제안하는 활선강성해석법을 이용하여 2차원 모멘트골조 및 이중골조의 설계에 적용하였으며, 설계결과 는 기존의 비탄성해석을 사용하여 비교·검증하였다. 또한 실무적용의 예로서 3차원 철근콘크리트구조물에 대한 내진

설계도 실시하였다.

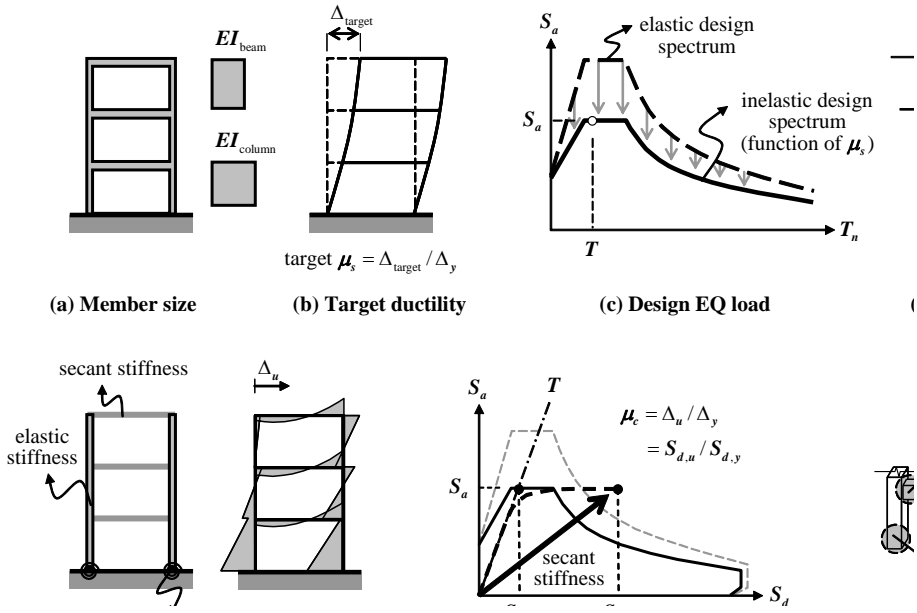


그림 3. Procedure of proposed design method (performance-based design)

## 6. 결 론

할선강성을 이용하여 구조물의 비탄성내진설계를 수행하는 선형해석법을 연구하였다. 설계자가 의도하는 비탄성거동과 설계목표연성도에 따라 할선강성요소의 분포와 할선강성의 크기가 정해지며, 이 구조모델에 대한 선형해석을 수행하여 각 부재의 비탄성 요구 강도 및 변형을 계산한다. 제안된 할선강성해석법의 장점은 다음과 같다.

- 1) 기존의 선형탄성해석과 동일한 구조해석모델을 사용하여 편리하게 비탄성설계가 가능하다. 따라서 복잡한 모델링작업과 단계별 비선형해석이 필요하지 않고, 특히 3차원 구조물의 설계에 유용하다.
- 2) 기존의 할선강성해석법과 달리, 선형해석모델을 사용함에도 불구하고, 소성변형에 근거하여 안전성을 평가할 수 있으므로 비탄성설계결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 “건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제(06기반구축A01)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 대한건축학회, “건축구조설계기준”, 2005.
2. Applied Technology Council, “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, Rep. No. ATC-40, Redwood City, CA, USA, 1996.
3. Priestley, M. J. N., “Performance-based Seismic Design”, Proc., 12th World Conf. on Earthquake Eng. (CD-ROM, Paper No. 2831), Auckland, New Zealand, 2000.