

활선강성을 이용한 직접 비선형 스트럿-타이 모델

Direct Nonlinear Strut-Tie Model Using Secant Stiffness

김 윤 곤* 엄 태 성** 박 홍 근***
Kim, Yun Gon Eom, Tae Sung Park, Hong Gun

ABSTRACT

A new Direct Nonlinear Strut-Tie Model design method performing iterative calculations using secant stiffness was developed. Since basically the proposed design method uses elastic analysis, it has the advantages of convenience and stability in numerical analysis. At the same time, the proposed design method can accurately estimate the strength and ductility demands on the members because it analyzes 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. 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. Through iterative calculations on the structure preliminary designed with member sizes, the strength and ductility demands of each member can be estimated so that they satisfy the given design strategy, and as the result economical and safe design is achieved.

1. 서 론

스트럿-타이 모델은 비선형성이 큰 전단지배거동에서 쉽게 강도를 추정하여 설계하는 방법으로 ACI 318-02 기준을 비롯하여 보편적으로 사용되고 있으나, 다음과 같은 단점을 갖고 있다. 먼저 해석의 용이성을 위하여 정정 트러스구조로 구성하는 것이 일반적이지만, 이는 실제 부재의 비선형 거동을 표현하는데 한계가 있다. 또한 변위의 적합조건을 고려하지 않기 때문에 변형형상을 알 수 없다. 그리고 스트럿의 압축강도등에 대하여 경험적인 값을 사용하는데, 기존의 연구에 의하면 스트럿의 압축강도는 직각방향의 인장변형률과 관계가 있으며, 따라서 이러한 콘크리트의 강도변화를 고려하기 위해서는 각 스트럿의 변형을 정확히 산정할 수 있어야 한다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 비선형거동을 고려할 수 있는 비선형 스트럿-타이 모델이 개발되었다. 그러나 이 비선형 스트럿-타이 모델은 기존의 비선형해석방법을 이용하므로 사용하기 복잡하고, 초기설계가 이루어진 스트럿-타이 모델의 구조성능 평가방법으로는 사용할 수 있으나, 타이부재의 강도, 연성요구량을 결정하는 직접설계방법으로는 사용할 수 없다. 따라서 설계자의 설계전략을 직접적으로 반영하기 어려우므로 경제적인 설계를 실현하기 위해서는 재설계와 평가의 반복작업을 실시하여야 하는 불편함이 있다.

본 연구에서는 이러한 기존의 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델의 문제점을 개선하기 위하여 각 요소의 강도와 연성요구량을 결정하는 직접설계방법으로 사용할 수 있으며, 부재의 비선형거동을 고려하여 변위의 적합조건을 고려할 수 있는 실용적인 비선형 스트럿-타이 모델을 개발하고자 한다.

2. 설계개념

본 연구에서 제안하는 설계방법의 기본 개념은 부재의 비선형 거동으로부터 나타나는 부재의 강도와 변형요구량을 그에 관계된 활선강성(secant stiffness)에 대한 선형해석을 사용하여 구하는 것이다.

* 정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

*** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

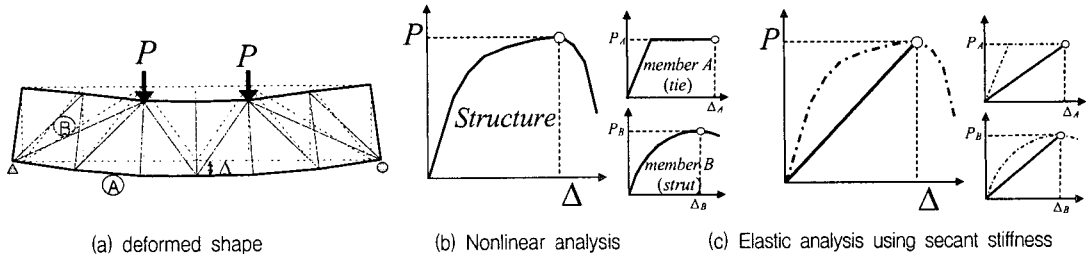


Fig. 1 Nonlinear behavior of deep beam ; nonlinear analysis vs. equivalent elastic analysis with secant stiffness

Fig.1 (a)는 스트럿-타이 모델의 비탄성 변형형상을, (b)는 하중에 대한 모델과 각 요소의 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 하중의 크기나 분포가 동일하다면, 거동 경로가 다르더라도 동일한 변형에 대하여 하나의 강도만이 존재하기 때문이다. 이러한 원리가 성립하기 위해서는 하중의 분포가 동일하고, 각 요소에서 제하(unloading)가 일어나지 않아야 한다. 일반적으로 하중의 제하시에 각 부재에서 제하가 일어나는 경우는 거의 없다. 반대로 하중을 받는 모델에 대하여 할선강성에 대한 선형해석을 사용하여 강도 및 최대변형을 나타내는 성능점을 구할 수 있다. 각 부재에서 이 성능점을 통과하도록 비선형 거동을 정의한다면, 비선형해석에 의해서도 동일한 성능점에 도달하게 된다. 이는 비선형해석이 아닌 할선강성을 사용하는 선형해석을 사용하여 비선형해석의 효과를 나타낼 수 있음을 가리키고 있다.

기준에 설계된 모델의 성능평가에서와 같이 이미 구조성능이 결정되어 있는 경우에는 임의의 할선강성에 대한 선형해석에 의하여 비선형해석과 동일한 성능점을 구할 수 없다. 그러나 성능점(혹은 강도 및 연성 요구량)을 결정하는 설계시에는 각 부재의 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.

원칙적으로 부재의 설계시에는 임의의 할선강성을 사용할 수 있으나, 경제적인 설계를 위해서는 각 요소의 설계 전략에 맞는 적절한 할선강성을 선택하여야 한다. 이를 위하여 할선강성에 대한 한계를 설정할 필요가 있다.

Fig. 2는 일반적으로 생각할 수 있는 성능점 및 할선강성에 대한 유효영역을 나타내고 있다. 스트럿의 한계조건은 다음과 같다. 1) 콘크리트의 압축강도에 해당하는 변형율(ϵ_{ck})을 초과하지 않아야 한다. 2) 스트럿의 압축강도는 직각방향의 한계인장변형율(ϵ_1)에 의하여 결정되는 압축강도(P_m)보다 큰 값이어야 한다. 3) 1축 압축응력-변형을 곡선에 의하여 정의되는 최대한계응력($P_u = f_{ck} \times A$)보다 작아야 한다. 타이요소의 한계조건은 다음과 같다. 1) 철근의 파단이 발생하는 최대변형(Δ_{fr})을보다 작아야 한다. 2) 스트럿의 압축강도를 결정하는 한계인장변형(Δ_{ci})을보다 작아야 한다. 3) 기준에 제시된 최소철근비에 해당하는 최저강도한계(P_m)보다 큰 값이어야 한다. 4) 기준에 제시된 최대철근비에 해당하는 최대강도한계(P_u)보다 작은 값이어야 한다.

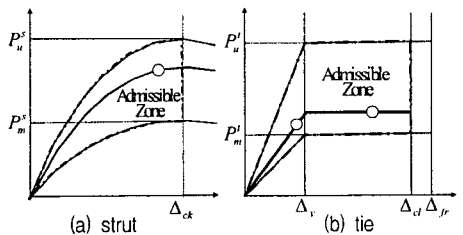


Fig. 2 Admissible zone for performance point

3. 스트럿 타이 모델의 구성, 해석 및 설계 절차

시스템의 비선형거동을 표현하는 데 있어 기존의 정정 스트럿 타이 모델은 부재의 힘이 강성과 무관하게 결정되어 항복 이후의 강성에 의한 하중의 재분배 효과를 표현하지 못한다. 따라서 부정정 구조물로 스트럿 타이 모델을 구성하는 것이 적합하지만, 몇 가지 문제점이 있다. 부정정 구조물을 해석하려면 변형적합조건을 만족해야 하며, 실제 변형형상을 고려하려면 시스템 전체를 모델링해야 한다. 또한 절점을 공유하는 각 부재의 강성비로 하중을 분배하기 때문에, 각 부재의 강성, 즉 단면적, 탄성계수를 결정하는 것이 중요한 과정이 된다. 하지만 지금까지의 스트럿타이 모델은 각 부재의 하중이 결정되면, 이로부터 단면을 결정하므로, 단면을 먼저 산정해야만 하는 부정정 스트럿 타이 모델에 그 방법을 적용할 수 없다.

따라서 Fig. 3과 같이 시스템을 수직철근을 배근할 위치나 철근비 변화를 목적을 가지는 위치를 기준으로 나누고, 각 절점에서 스트럿과 타이를 구성하고, 각 부재의 유효면적을 산정한다. 수직, 수평 타이의 경우에는 단면이 일정하다고 생각할 수 있지만, 스트럿의 경우에는 단면적이 변화하므로 중심위치의 평균단면을 기준으로 가정할 수 있으며, 이는 Paulay의 1971년의 연결보의 강성추정 방법과 동일하다.

수평부재의 경우 일반적인 시스템에서 해석없이 부재의 인장/압축을 알 수 없어, 동일 위치에 스트럿과 타이를 배근하여 해석한다. 해석 결과가 인장인 경우, 콘크리트는 재료 모델에 의해 강성이 작아 영향이 없고, 철근 타이는 설계 과정 중에 그 단면이 결정된다. 반면 압축인 경우, 콘크리트 스트럿은 시스템에서 요구되는 모멘트를 받을 수 있는 유효압축면적으로 재산정할 수 있으나, 그 영향이 작다고 보고 기결정된 단면을 그대로 사용하고, 철근은 최소 철근비로 배근하여 스트럿 강성에 더해준다. nodal zone은 기존 방법에서는 절점에서의 힘의 분배상태를 나타내고, 스트럿의 단면을 결정하는 중요한 요소였다. 하지만, 실제로 nodal zone에 의해 시스템이 좌우되는 것은 아니므로, 본 연구에서는 절점 이상의 의미를 두지 않았다. 물론 시스템이 유지될 수 있는 절점의 기능을 할 수 있는 상세 설계가 요구된다. 위의 과정을 통해 각 부재의 단면을 결정하여 성능강도가 결정되면 이를 한계변형으로 나누어 값으로 할선강성을 가정하여 일차적인 해석을 한 후 그 결과가 각 부재의 유효영역에서 벗어난 경우 할선강성을 수정한다.

Fig. 4는 각각의 경우 철근의 할선강성을 수정하는 방법을 제시하고 있다. 가정한 할선강성으로 해석한 결과가 한계인장변형보다 커서 유효한 영역에 있지 않은 (a)의 경우, 시스템에서 그 강도가 요구되므로 같은 강도를 한계변형이하에서 발휘하도록 할선강성을 수정해야 한다. (b)의 경우, 해석결과는 유효영역에 존재하지만, 단면의 경제성을 생각한다면, 아직 인장변형에 여유분이 있기 때문에 설계결과 산출되는 단면이 아니라 강성을 낮추어 더 낮은 단면으로 설계하기 위해 할선강성을 수정하는 경우이다. (c)의 경우, 마찬가지로 유효영역에 존재하지만, 해석결과 부재에 걸리는 강도가 성능강도보다 낮기 때문에 해석강도만 발휘하는 성능강도로 단면을 줄일 수 있다. 이 때의 할선강성은 바뀌지 않지만, 탄성계수에 해당하는 값은 단면이 줄어든 비율만큼 커지게 된다. (d)의 경우는 해석결과가 유효영역 아래쪽에 존재해서 최소철근의 성능보다도 낮은 경우이다. 기준에서 최소철근비는 배근해야 하므로, 성능강도를 최소성능강도로 수정하여 해석변위에서의 할선강성으로 수정한다. 한편 같은 단면을 가지는 부재의 경우에는 독립적인 유효영역 뿐 아니라, 각각이 동일 단면으로 결정되는 비선형 경로위에 있어야 한다. 따라서 Fig. 4 (e)와 같이 부재의 단면적을 각각 산정한 후에 그룹 중에서 가장 큰 단면적을 가지는 부재의 비선형경로상으로 다른 것들이 재이동하도록 할선강성을 수정해야 한다.

콘크리트는 아래와 같이 할선강성을 수정한다. Fig. 5과 같이 스트럿의 압축강도를 결정하는 한계인장변형률은 스트럿의 중심 위치에서 스트럿의 압축력, 같은 위치에서의 수직방향 타이의 인장력과 스트럿이 이루는 각도를 주응력방향이라고 생각하고

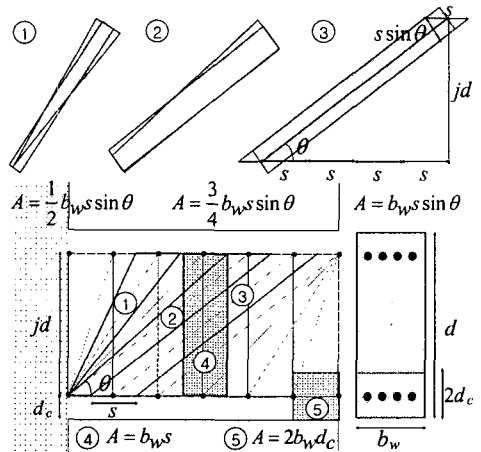


Fig. 3 Determination of member's section area

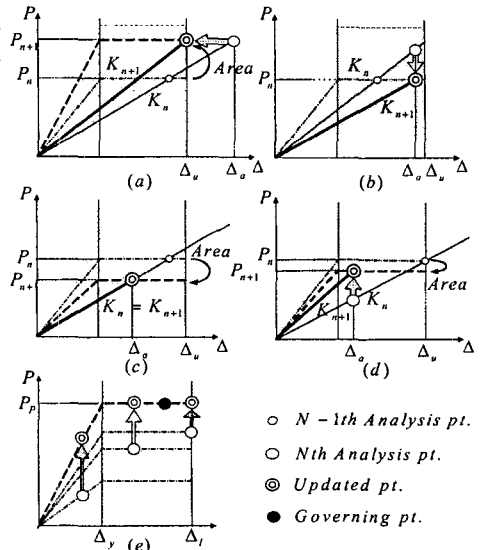


Fig. 4 Stiffness updating strategies for steel member

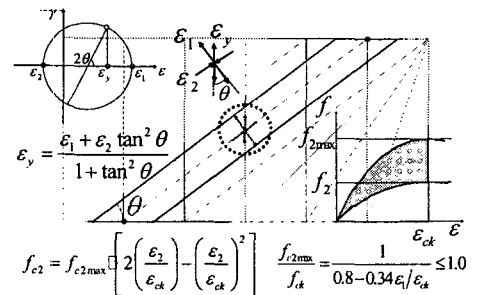


Fig. 5 The effective stress of strut applied to M.C.F.T.

Mohr's Circle을 구성하여 스트럿의 주인장방향 변형을 구하고 Collins와 Vecchio의 제한식을 이용하여 압축응력 저감 효과를 고려한 후 콘크리트의 비선형 경로를 결정하고, 압축변형율을 통해 결정되는 압축강도를 찾을 수 있다. 그 값이 유효영역에 있는 경우에는 Fig. 6 (a)와 같이 산출된 값으로 할선강성을 수정하면 된다. 하지만 해석결과가 한계인장변형율보다 커서 유효영역 아래부분에 위치하는 경우 (b)와 같이 한계인장변형율에 의해 결정되는 콘크리트 비선형 경로로 이동하도록 하며, 최대 압축 변형율을 넘을 경우 (c)와 같이 한계인장변형율을 재산정하여 유효영역을 줄이도록 하였다. 여기서 (d)와 같이 해석강도가 1축 압축강도보다 크면, 현재의 단면으로는 설계가 불가능한 것으로 보고, 해석을 마친다.

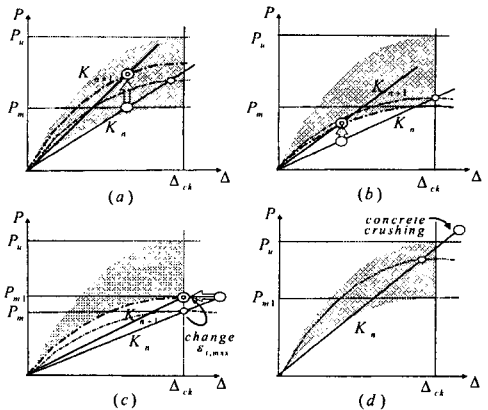


Fig. 6 Stiffness Updating Strategies for concrete member

이와 같은 과정을 통해서 모든 부재가 유효영역 및 비선형 경로 위에 있을 때까지 해석 및 할선강성 수정을 한다. 모든 부재에서 해석결과 산출된 강도와 변형요구량을 만족시키도록 강도설계와 연성설계를 실시한다.

본 연구에서 제안하는 설계방법은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 1) 기존의 극한소성모델에 비하여 변형적 합조건을 만족하는 부정정 스트럿타이모델을 해석함으로써 콘크리트의 아치거동과 철근의 트러스 거동의 조합을 표현할 수 있다. 아치거동의 기여분을 평가하고 이를 반영하여, 전단철근을 경제적으로 설계할 수 있다. 2) 부정정 시스템과 할선강성을 이용한 비선형거동을 고려하여 변형조건을 만족하면서 부재의 성능을 최대한 발휘하도록 하는 경제적인 설계가 가능하다. 3) 각 위치에서의 변형을 평가하여 주어진 변형상태에서의 스트럿의 유효압축강도를 평가하여 일괄적인 강도저감계수를 사용하는 것보다 현실적이다. 4) 설계로 산출된 단면에 강도저감계수를 사용한 실제 배근면적과의 차이로 인해 성능점이 바뀌어 설계와 해석을 반복해야 하는 기존 방법과는 달리 그룹 부재를 사용하여 실질적인 배근상태를 고려하여 이를 설계에 반영함으로써 설계단면으로 배근할 수 있도록 하였다. 5) 또한 설계자의 의도에 맞는 변형상태를 먼저 결정하고, 그 변형에서의 부재응력을 고려한 설계를 실시하므로, 다양한 설계목적에 반영할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 소성 정정 트러스모델을 변형을 고려하는 직접비선형스트럿타이모델(DNSTM)을 개발하였다. DNSTM은 부정정 스트럿타이모델로 일반화하여 아치거동과 트러스거동의 조합으로 하중전달이 가능하여 보강근의 경제적인 설계가 가능하다. 또한, 할선강성을 사용하여 탄성해석과 같이 구조물의 단면가정과 하중조건만을 가지고 구조물의 비선형거동을 표현할 수 있다. 제안된 방법은 탄성해석을 사용함으로써 해석이 편리하고 할선강성을 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. 제안된 설계법은 설계자의 의도에 따라 부재의 연성능력 제한, 설계전략을 반영할 수 있으며, 이 설계전략에 맞는 부재의 비탄성 강도 및 연성 요구량을 정확히 산정할 수 있다.

참고문헌

- Schlaich, J.; Schafer, K.; and Jennewein, M., "Toward a Consistent Design of Structural Concrete" PCI Journal, V.32, No. 3, May-June 1987, pp. 74-150.
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI318R-02)," American Concrete Institute.
- Examples for the Design of Structural concrete with Strut-and-Tie Models.
- Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete elements Subjected to Shear" ACI Journal, Proceedings V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp 219-231.
- Paulay, T., "Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls," Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Jang-Hoon Kim, "Seismic Evaluation of Shear-Critical Reinforced Concrete Columns and Their Connections," section 3.
- Cook, W. D., and Mitchell, D., "Studies of Discontinuities in Reinforced Concrete Members" ACI Structural Journal Mar.-Apr. 1988, pp. 206-216.