

철근콘크리트 벽식 구조물에서 전단벽의 탄소성 해석용 모델화 방법의 검토

On Modeling for Nonlinear Analysis of Shear Wall Element in Shear Wall Structures

전 대 한*

Jun, Dae-Han

ABSTRACT

In this paper a relatively simple and reliable wall models are investigated, which are suitable to be efficiently incorporated in a practical nonlinear seismic analysis of reinforced concrete shear wall structural systems. Four types of analogous frames have been selected for the elastic stress analysis. Three types of macro-elements model which include wide-column model, truss model and Kabeyasawa model, are chosen for the use in nonlinear analysis. A numerical analysis is carried out for six stories plane coupled wall structure.

Analysis results indicate that macro-elements wall model is effective and suitable for simulating stress in elastic analysis. In inelastic analysis, the yielding strength have little effect on different wall model, and the effect on post-yielding stiffness in story shear-drift relationship depend on force-deformation properties of macro-elements.

1. 서론

건축물의 고층화에 따라 건물의 내부 코아에 철근콘크리트 전단벽이 많이 사용되고 있으며, 또한 현재 국내에서 건설되고 있는 아파트 건물의 대부분은 벽식구조로 되어 있다. 수평하중에 대한 전단벽이 갖는 역학적 거동의 우수성은 많은 연구와 실무 적용을 통하여 이미 입증되었다.^{4,6)} 그러나 지진과 같은 동적하중에 대한 고층건물의 내진성능을 확보하기 위해서는 전단벽의 탄소성 거동에 대한 연구가 필요하며, 특히, 전단벽을 포함한 고층건물의 탄소성 지진응답해석을 위한 전단벽의 모델화 방법은 매우 복잡하고, 어려운 문제이다. 또한 최근 내진설계분야에서 성능설계법(Performance-based earthquake engineering)으로의 이행에 따라 구조물의 비선형 해석은 필수적 요소이다.

본 연구에서는 전단벽을 갖는 철근콘크리트 구조물의 탄성 및 탄소성 해석에 적합한 전단벽의 모델화 방법을 검토하고, 그 타당성을 검증하는 것이 목적이다. 전단벽에 대한 적절한 마크로 모델 방법을 알아보고, 탄소성 해석을 통한 해석결과를 비교·분석하여, 철근콘크리트 구조물의 탄소성 해석에 적용하는 방법을 제시한다.

* 정회원, 동서대학교 건설공학부 교수

2. 전단벽의 모델화 방법

2.1 기둥 부재 치환법(CM 모델)

그림 1과 같이, 전단벽을 부재의 축 중심에 위치하는 기둥부재로 치환하여 기둥부재의 단면력인 휨모멘트, 전단력 및 축력에 의해 저항할 수 있게 하는 방법이다. 이와 같은 방법은 해석이 비교적 간단하고, 입·출력 데이터의 작성이 쉬운 것이 장점이며, 벽체 상부의 슬래브는 강체로 간주하고, 강역으로 취급하여 해석한다.

치환된 기둥부재의 단면 성질은 식(1)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{t \cdot l_w^3}{12} + \frac{A_o \cdot l_w^2}{2} \\ A_c &= t \cdot l_w + 2A_o \\ A_s &= (t \cdot l_w) / \kappa \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, I_c : 치환 기둥의 단면2차모멘트

A_c : 치환 기둥 전단면적

A_s : 치환 기둥의 전단 단면적

t : 벽체 두께

l_w : 전단벽 길이

A_o : 측면기둥 단면적

κ : 단면 형상 계수

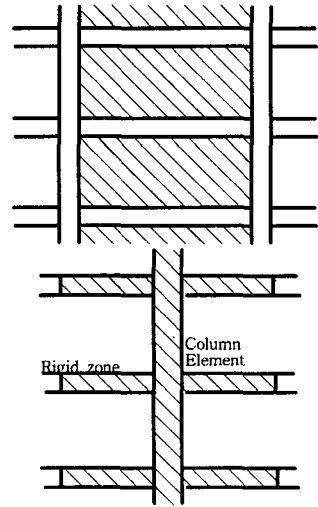


그림 1. 기둥부재 치환 모델(CM)

2.2 트러스 부재 치환 모델(TM 모델)

전단벽에 작용하는 전단력, 휨모멘트 및 축력을 그림 2와 같이, 전단력은 브레이스 부재로, 휨모멘트와 축력은 기둥 부재가 부담하도록 치환하는 방법이다.

벽체의 휨강성은 양측 기둥의 축강성으로 계산하고, 벽체의 전단 강성은 브레이스의 축강성으로 계산한다. 기둥부재는 벽체의 단면 2차모멘트와 동일하게 되도록 기둥의 단면적을 환산한다. 브레이스는 전단력에 저항한다고 생각하기 때문에, 벽의 전단변형과 브레이스에 의한 수평변형이 동일하도록 단면적을 산정한다. 치환 부재의 단면 성질은 식(2)와 같다¹⁾.

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{t \cdot l_w}{6} \\ A_B &= \frac{G}{E} \frac{t(\sqrt{h^2 + l_w^2})^3}{2 \kappa h l_w} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, A_c : 측면 기둥 부재의 단면적

A_B : 브레이스 부재의 단면적

E : 탄성계수

G : 전단탄성계수

l_w : 전단벽의 길이

h : 전단벽의 높이

t : 전단벽의 두께

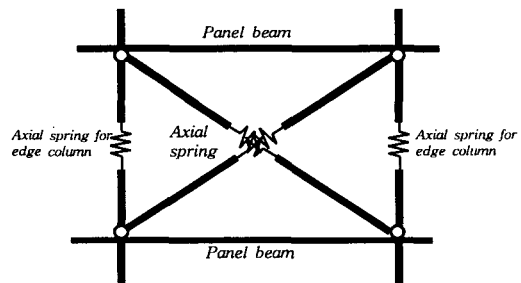


그림 2. 트러스 치환 모델(TM)

2.3 벽 요소법(WM 모델)

벽 요소법은 기둥부재 치환법을 건물의 3차원 탄소성 해석에 적합하도록 개선한 모델화 방법이다^{8,10,12)}. 벽체는 평면내에 휨, 전단 및 축변형이 동시에 발생하는 부재이다.

그림 3과 같이 벽판의 중심에 휨, 전단 및 축변형을 나타내는 하나의 요소를 배치하고, 양단부는 벽체와 함께 붙어 있는 기둥의 축변형을 나타내는 요소로 배치한 모델화 방법이다⁷⁾. 벽체의 면의 강성은 고려하지 않지만, 벽체 양측면의 기둥 요소를 이용하여, 면의 강성과 직교하는 가구에 대한 기둥의 기여분을 나타낼 수 있다.

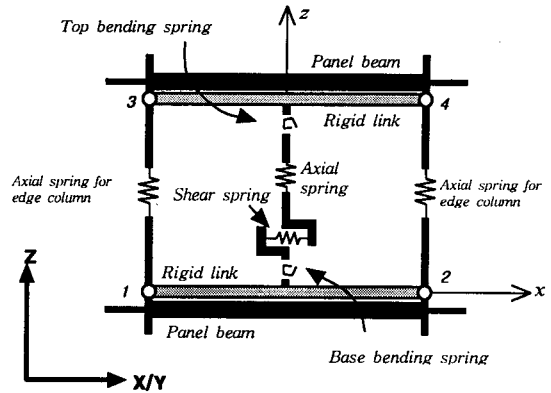


그림 3. 벽 요소 모델

3. 해석대상 모델

3.1 해석모델

여기서는 병렬 전단 벽식 평면 골조구조물을 설정하여, 벽체의 모델화 방법에 따른 탄성해석의 결과를 비교하고, 탄소성해석을 수행하여 탄소성에서 모델화 방법의 타당성을 검토한다.

대상모델은 건물 높이 21.6m(층고 3.6m), 6층 건물로서 전층에 동일하게 40ton의 수평하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 벽체의 양 단부에는 단부 보강근 4-D16으로 기둥과 같이 배근하고, 벽판의 수평 및 수직 보강근은 D10 보강근을 25cm 간격으로 양단 배근한 것으로 가정한다. 연결보의 보강근은 상, 하단부 모두 4-D19로 2단 배근된 것으로 한다.

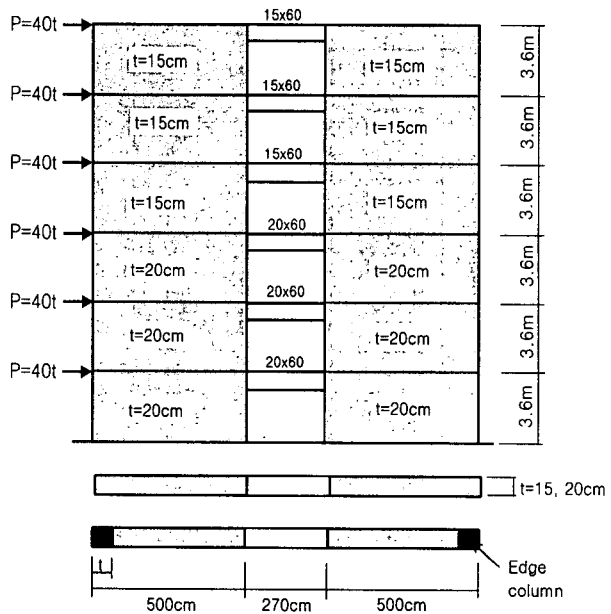


그림 4. 평면해석 모델

탄성해석에 대한 모델방법을 검토하기 위해 2절에서 기술한 모델화 방법 중에서, 기둥부재 치환법(CM), 트러스부재 치환법(TM), 벽요소법(WM) 및 유한요소법(SW)으로, 탄성해석결과를 비교한다.

본 해석에서 사용한 해석프로그램은 탄성해석의 경우 건축물의 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS-BDS³⁾를 사용하고, 탄소성 해석의 경우 비선형 해석 프로그램인 CANNY-99¹¹⁾를 사용하여 벽식 구조물의 모델 방법에 따른 해석 결과를 비교·분석하였다.

3.2 부재요소의 복원력 특성

탄소성해석을 수행하기 위해서는 부재의 단면 내력을 산정하여 탄소성 복원력 모델을 설정하여야 한다. 본 논문에서는 휨강도는 보의 휨 이론을 적용하여 연결 보 및 벽체의 휨 균열강도, 휨극한강도

를 산정하였다. 전단강도는 일본 건축학회 표준식⁵⁾을 사용하여 산정 하였다. 휨 부재 및 전단 부재에 대한 복원력 모델의 골격 곡선은 그림 5와 같은 곡선을 사용하였다. 전단변형 요소의 전단균열 후의 강성 저하율(α)은 0.3으로 하고, 항복 후의 강성비(β)은 초기 강성의 0.01로 가정하였다.

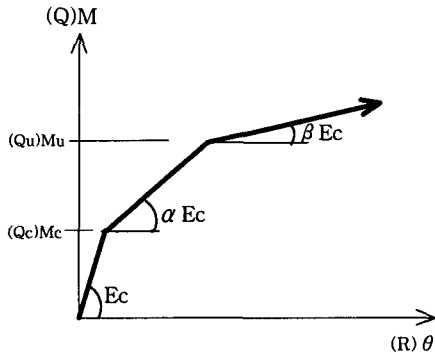


그림 5. 휨 및 전단 요소의 복원력 모델

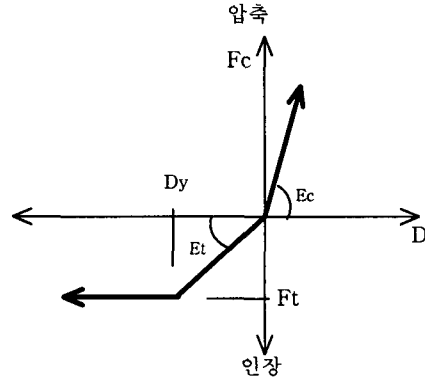


그림 6. 인장, 압축 부재의 복원력 모델

벽요소 치환 모델(WM)은 벽체를 벽기둥과 측면 부착기둥으로 치환하고, 측면 부착 기둥은 벽체의 두께 크기의 단면을 가지는 기둥요소로 모델화하였다. 기둥 요소의 축 내력은 식(3), 식(4)와 같이 산정한다.

$$\text{인장강도} : P_t = A_{st} \times f_y \quad (3)$$

$$\text{압축강도} : P_c = 0.85 f_{ck} A_B \quad (4)$$

여기서, A_{st} = 벽체의 인장철근(수직근) 단면적

f_y = 철근의 항복강도,

f_{ck} = 콘크리트 압축강도

A_B = 벽체의 전 단면적

트러스부재 치환 모델(TM)에서 브레이스 부재의 축 인장강도(P_t)는 식(3)과 같고, 축 압축강도(P_c)는 사인장 균열의 영향을 고려한 전단강도식을 응용하여 식(5)와 같이 계산한다. 축 부재에 대한 복원력 모델의 골격곡선은 그림 6과 같이 가정하였다. 복원력 모델의 인장강성(E_t)은 인장철근만 유효하게 작용하므로 압축강성(E_c)의 0.5배로 가정한다⁷⁾.

$$P_c = v_0 f_{ck} A_B \quad (5)$$

여기서, v_0 : 콘크리트의 강도 감소 계수 ($= 3.68/3\sqrt{f_c} 0.592$)

A_B : 브레이스 부재 단면적

f_{ck} : 콘크리트 압축강도

4 해석결과 및 고찰

4.1 탄성해석

본 연구에서는 2절에서 제시한 4가지 모델에 대한 탄성 해석을 수행하였다. 1층의 휨모멘트의 크기를 비교하기 위하여 벽체의 상, 하단부 휨모멘트 값을 표 1에 나타내었다. 또한 최상층의 수평변위 값을 표 2에 나타낸다.

표 1에서 트러스 치환 모델(TM)에서 응력이 가장 크고, CM, SW, WM 모델 순으로 작게 나타났다. 또한, 최상층의 변위를 비교하면, 표 2에 나타낸 바와 같이 부재 치환방법에 따른 변위의 차는 매우 작으며, 특히 CM 모델과 WM 모델은 유한요소법(SW)의 해석결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 유한 요소법이 상당한 정밀도를 갖는 것으로 가정한다면, 전단벽을 기둥 부재와 벽 요소로 치환한 모델과 동일한 효과를 내며, 유한 요소법의 정밀도와 일치함을 보여준다.

4.2 탄소성 해석

탄성해석을 기초로 하여 그림 4의 내진벽을 갖는 평면골조 구조물에 대하여 비교적 모델화 방법이 간단하고, 탄소성 해석이 가능한 3가지 모델화 방법(CM, TM, WM)을 선택하여 정적 수평하중에 의한 증분 해석법을 이용하여 탄소성 해석을 수행하였으며, 최상층변위-밀면전단력 관계를 그림 7에 나타낸다. 그림 8에는 각 모델에 대한 층간변위-층전단력 관계를 각 층별로 나타낸 것이다.

그림으로부터 항복 밀면전단력과 각층의 항복 층전단력은 각 모델이 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 항복 후의 강성 변화는 모델화 방법에 따라 강성 저하율에 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 각 모델화 방법에 따라 각 부재 요소의 재료적 성질에 영향을 받는 것으로 단순화 된 기둥부재 치환 모델(CM)의 경우 항복 후 강성 저하가 많고, 측면 기둥부재를 갖는 벽 요소 모델(WM)의 경우 항복 후 강성 저하율이 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 벽 요소 모델의 경우 압축측 단부 기둥부재의 압축변형에 의한 것으로 간주된다. 그러므로 마크로 모델을 적용한 탄소성해석에서는 마크로 모델을 구성하는 각 부재 요소의 복원력 모델 설정에 주의가 요구된다.

5. 결론

최근 건물의 고층화에 따라 내부 코아에 전단벽을 갖는 구조형식이 많이 적용되고 있으며, 전단벽의 사용은 수평강성 증대에 매우 효과적이다. 지진과 같은 동적하중에 대한 구조물의 설계시 탄소성 상태에서의 안전성을 확인할 필요가 있다.

본 논문에서는 정적 및 동적 탄소성 해석에 효율적인 전단벽의 마크로 모델에 대하여 기존의 탄성해석 연구에서 제시된 여러 가지 모델화 방법을 탄소성 해석에도 확장하여 적용할 수 있는 방법을 검토하였다. 고층 건물에 대한 탄소성 해석에는 여러 가지 영향인자가 내포되어 있지만, 무엇보다 구조물을 구성하는 주요 구조부재를 탄소성해석에 타당하게 모델화 하는 것이 중요하다고 생각한다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같

표 1. 모델화 방법에 따른 휨모멘트의 비교

모델명		SW	CM	WM	TM
1층휨 모멘트 (t·m)	상단부	538.5	565.0	434.1	593.1
	하단부	970.5	981.4	850.5	1025.1

표 2. 모델화 방법에 따른 최상층 변위의 비교

모델명	SW	CM	WM	TM
변위(cm)	2.23	2.17	2.24	2.45

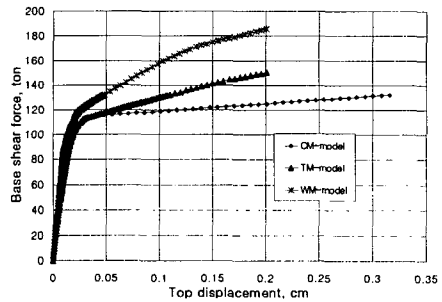


그림 7. 최상층 변위와 밀면 전단력 관계

다.

1)정적 수평하중에 대한 탄성해석에서는 마크로 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

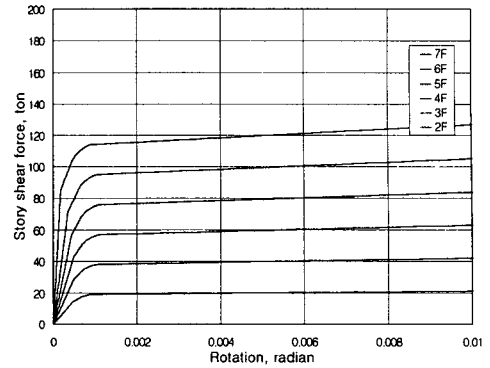
2)정적 수평 증분하중에 대한 탄소성 해석에서는 마크로 모델이 구조물의 층 항복하중을 파악하는데 충분한 신뢰성이 있다는 것이 확인되었다.

3)탄소성 해석결과 층간변위-층전단력 관계의 항복 후 강성 평가는 모델화 방법에 따라 약간의 차이를 나타내고 있으며, 이것은 마크로 모델을 구성하는 부재요소의 복원력 특성에 큰 영향을 받는 것으로 추정된다.

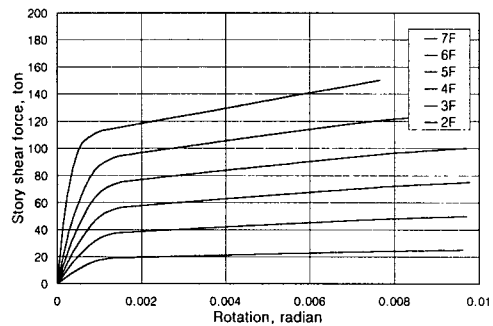
4)탄소성 해석용 마크로 모델은 모델을 구성하는 부재요소를 단순화시킨 모델화 방법이 유효하다고 사료된다.

참고문헌

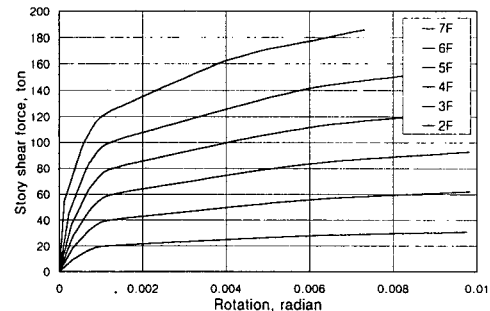
1. 문태섭 외 3인 공역(1999), 매트릭스 구조해석법, 기문당.
2. 전대환 외4인(1998), "벽식건물의 탄성해석에서 벽체의 모델화 방법 검토", 한국지진공학회 1998년도 춘계학술발표대회 논문집, Vol.2, No.1, pp.180-187.
3. 포스코 개발주식회사(1996). MIDAS-BDS User's Manual Vol. I.
4. 대한건축학회(1992). 철근콘크리트내력벽식 건축물 구조설계 지침(안).
5. 日本建築センター(1984). 壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針.
6. 日本建築センター(1987). 中高層壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説.
7. 松本和行, 壁谷澤壽海, 倉本洋(1993), "非線形骨組解析における耐震壁の部材モデル化," 日本建築學會, 構造工學論文集, Vol.39B, pp.245-254.
8. Smith, B. S. and Girgis, A.(1984). "Simple Analogous Frames for Shear Wall Analysis", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11.
9. Vulcano, A., Bertero, V.V., and Colotti, V.,(1988) "Analytical Modeling of R/C Structural Walls," Procs. 9WCEE, Tokyo-Kyoto, VI. 41-46.
10. AZZATO, F. and Vulcano, A.,(1996), "Modeling of RC Frame-Wall Structures for Nonlinear Seismic analysis.," Procs. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1411.
11. Li, Kang-Ning(1999). "CANNY99:Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package-Users Manual," CANNY Consultants PTE. LTD., Singapore.
12. Li, Kang-Ning(1999). "CANNY99:Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package-Technical Manual(Part I)," CANNY Consultants PTE. LTD., Singapore.
13. Vojko Kilar and Peter Fajfar(1996), "Simplified Push-Over Analysis of Building Structures," 11th WCEE, Paper No. 1011.



(a) CM 모델



(b) TM 모델



(c) WM 모델

그림 8. 층간변위-층전단력 관계