

# 거시적 방법(Macroscopic Approach)을 이용한 전단벽체의 비선형 해석모델

이 영 옥\*

## 1. 서 론

일본에서 1968년에 발생한 Tockaki-Oki 지진 및 1971년도의 California의 San Fernando의 지진의 발생은 지진의 위험성과 지진에 대한 구조물의 안정성평가의 문제를 대두시켰고, 구조공학자들로 하여금 철근콘크리트 구조물의 비선형거동을 파악하려는 동기를 제공하였다. 많은 연구자들에 의하여 부재의 비선형거동의 능력의 분석 및 평가에 대한 실험이 수행되었으며 또한 비선형 해석을 통하여 구조물의 거동을 파악하고자 하였다. 내진설계와 관련하여 철근콘크리트 구조물의 비선형거동을 파악하려는 주요 목적은 구조물의 확보하여야 하는 연성도와 공급할 수 있는 연성거동의 능력의 파악이다.

철근콘크리트 구조요소 중 주로 휨력에 대하여 저항하는 전단벽의 거동은 구조물의 거동에 큰 영향을 미치므로, 전단벽의 거동을 이해하기 위하여 많은 실험적연구와 수치적연구들이 진행되었다. 즉, 독립벽체의 거동, 이중골조구조, 개구부가 있는 전단벽체등을 정적 또는 동적실험을 많은 연구자들이 수행하고 그 결과를 수치해석과 비교하여 발표하였다.

일반적으로 구조물 또는 전단벽체를 수치모델화하는 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다.

- (1) 철근과 콘크리트의 재료적 성능으로 부터 유도된 모델(미시적 모델 : Microscopic Model)
- (2) 특정한 전체구조물의 거동을 예측하기 위한 모델(거시적모델 : Macroscopic Model)

미시적모델은 재료의 특성이 주어지면 FEM기법으로 수치모델화 할 수 있다. 구조물이 탄성의 경우 미시적모델을 사용하여 3차원까지 해석가능하다고 할 수 있지만, 구조물이 비선형거동을 한다면 많은 계산시간과 계산기 용량의 한계에 따라 이 방법의 사용은 거의 불가능하게 된다. 계산에 드는 막대한 시간과 노력 이외에도 철근과 콘크리트의 상호작용과 휨과 전단시 접촉면의 미끄러짐은 수치모델화하기에 매우 어렵다. 또한 구조물이 반복이력거동을 한다면 재료적 성질의 반복이력모델의 설정도 어려우며 많은 가정들을 포함하여야 한다. 따라서 미시적모델의 정확도가 충족되지 않는 상태에서 구조물을 비선형해석한다는 것은 실용성에 있어서 문제점을 안고 있다.

반대로 거시적모델에서는 계산시간상 경제성을 제공하며 구조물의 수치모델화 방법에도 여러가지 다양한 방법들을 제공할 수 있다. 즉 등가치환의 방법으로 해석 구조물의 거동에 부합하는 거시적 모델을 선택하여 사용할 수 있다. 그러나 이 방법은 실험 및 기존의 고찰로부터 구조물의 모델을 선택하는 것이므로 해석모델이 구조물의 거동과 부합하는 경우에만 일치한다는 부담감을 안고 있다.

위의 두 모델은 각기 장단점이 있으며 어떠한 방법들을 사용하여도 정확한 계산을 빠르게 하여야 하는 구조모델화 방법이 숙제로 남아 있다. 전단벽체의 경우 고려하여야 하는 거동은 전단변형과 휨변형 그리고 인장철근의 미끄러짐으로 인한 고정단의 회전이다. 그 밖에 휨이나 미끄러짐 전단 또는 웨브의 할열·압괴 등의 파괴양상으로부터 야기되는 전단벽의 거동도 예상하여야 한다.

\* 정희원, 서울대학교 건축학과, 공학박사

위와 같은 전단벽의 복잡한 거동문제를 고려하여 하나 실제적으로 모델화하고 이를 해석하는 계산기의 능력을 감안하면 현재까지는 전단벽체를 포함한 구조물의 비선형해석은 거시적 모델의 방법이 타당하다고 하겠다. 본 기고에서는 전단벽체의 실험은 제외하고 전단벽체를 비선형 수치해석모델하는 방법 중 거시적모델을 사용한 기존의 연구를 정리하고자 한다.

## 2. 전단벽체 Modelling

일반적으로 전단벽체의 거시적해석 모델방법은 크게 4가지로 정리할 수 있다. 등가보 모델(Equivalent Beam Model) 또는 등가보부재를 나누어 미소부재를 사용하는 방법, 등가트러스모델(Equivalent Truss Model), 수직-삼부재모델(Three Vertical Line Element Model) 등이다.

### 2.1 등가보 모델

벽체를 중심선을 따라 하나의 선요소로 치환하여 해석을 하는 보편적인 모델방법이 '등가보 모델'이다. 즉 벽체를 모멘트를 받는 기둥으로 모델화하는 방법으로 벽체를 휨부재로 가정한 것이다.

보를 선부재로 치환하는 모델은 1960년대 초 Heidebrecht에 의하여 제안되었다. 그후 기존의 모델을 보완하여 Clough(1965)는 two-component 모델을 사용하여 부재의 Elasto Plastic 거동을 표현하고자 하였으며, 이러한 개념을 확장하여 Aoyama와 Sugano(1968)는 multi-component 모델을 제안하여 사용하였다. 위의 모델은 철근콘크리트보의 비탄성거동(비탄성거동의 부재길이와 강성의 저하)을 표현하지 못하므로 Giberson(1969)는 양단의 비탄성 회전스프링과 중앙부의 탄성부재요소로 구성되는 일반적인 one-component 모델을 제안하였다. 이러한 방법을 적용하여 만든 컴퓨터 프로그램으로는 DRAIN-2D(Kannan과 Powell, 1973)와 ANSR(Mondkar와 Powell, 1975)이 있으며 이와 비슷한 ANSR(Otani, 1975)가 Illinois에서 개발되었다.

One-component 모델에서 비선형 모멘트-회전 관계는 가정된 변곡점의 위치에 따라 결정되

로 양단부의 휨모멘트가 비선형 단부의 회전에 의해 결정된다. 이 모델의 장점은 어떠한 모멘트-회전 관계의 모델이라도 스프링의 특성으로 채용될 수 있다는 점이다. 그러나 이 모델은 부재를 따라 비선형의 전파와 실제의 모멘트의 분포를 고려하지 못하는 단점을 지니고 있다.

Wen과 Janssen(1985)은 부재의 비선형전파를 고려하기 위하여 부재를 one-component를 이용하여 미소부재로 나누어 사용하려는 방법을 제안하였다. Powell(1975)은 이러한 결하는 부재를 사용하였다. 또 Takayanagi와 Schnobrich는 부재의 강성이 구간마다 변하는 모델을 사용하기도 하였다.

Takayanagi와 Schnobrich(1977)는 위의 방법을 사용하여 전단병렬벽체를 해석모델화하였다. 상층부보다 모멘트가 비탄성거동을 크게 나타내는 저층부의 벽체에 회전스프링을 촘촘히 배치하였다. 그러나 벽체의 강성은 축력과 회전변형에 따라 변하므로 이러한 점을 보완하여 Saaticio glu(1980)는 전단병렬벽체를 해석하였다. 그후 Keshavarzian과 Schnobrich(1984)는 column element 모델(그림1)을 제안하여 축력과 모멘트의 영향에 의한 강성의 저하현상을 고려하였다. 그러나 이러한 모델에서 한 부재를 나누어 여러 부분요소를 사용하므로 다층의 구조시스템을 해석하는데 필요한 시간이 증가되는 단점을 지니고 있다. 이러한 방법 이외에 Mahin과 Bertero(1976), 또 Aktan(1980)은 개선된 two-component를 사용하여 전단병렬벽의 벽체를 수치모델하였다. 이

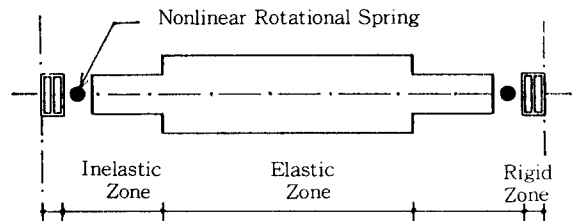


그림 1. Column Element Model  
(Keshavarzian, Schnobrich, 1984)

해석모델에서는 Bilinear 반복이력모델을 사용하여 강성의 저하현상은 고려하지 못하였다.

그러나 등가보 모델의 주요 한계점은 벽체의 중심선에 회전이 발생한다는 가정에 있다. 이러한 가정에 의하여 철근콘크리트의 주요거동-벽체 중심선의 이동, 벽체의 회전 등-을 적절하게 설명하지 못하는 단점을 지니고 있다.

## 2.2. 등가트러스 모델

또다른 벽체의 모델 방법으로 등가트러스 모델(Equivalent Truss Model)이 있다. 등가보 모델과 달리 이 모델은 사선방향의 균열에 의하여 발생하는 응력의 재분배를 설명할 수 있다. 사선방향의 균열이 발생하면 벽체주변의 부재응력은 가스팬에서 일정하게 되므로 트러스 해석이 가능하게 된다. Vallenás, Bertero, Popov(1979)가 철근콘크리트 전단벽의 반복이력 거동의 실험 후, 해석의 한 방법으로 사용하였다. Hiraishi(1983)는 인장력을 받는 벽체주변 보강부재의 응력의 변화를 고려하여 단면을 결정한 Nonprismatic 성질을 갖는 트러스 부재를 도입하였다. 그러나 이 모델은 하중을 가하는 동안 균열의 전파에 따른 구조체의 형상을 결정하기 어려운 단점을 지니고 있다.

## 2.3 수직-3부재 모델(TVLEM)

Kabeyasawa와 Shioara(1984) 등이 미-일 공동 지원연구 프로그램으로 수행한 2중골조시스템인 실물크기의 철근콘크리트 7층 구조물 실험을 한 후, 이를 분석하기 위한 전단벽 모델이 수직-삼부재 모델(Tree Vertical Line Element : TVLEM, 그림2)이다.

벽체의 상하층 슬라브와 보를 합하여 무한강성보로 가정하고, 내부의 벽체를 3개의 선요소를 사용하여 표현하였다. 양단의 두 트러스부재는 벽체 보강부재(Boundary Column)를 표현한 것이고, 중앙의 부재는 단일-구성요소로 지지면 하단에 수직, 수평, 회전스프링으로 구성되어 있다. 중앙의 3개의 스프링은 한 점에 집중되어 있다고 가정한다. 이 절점은 상층과 하층의 상대적 회전의 중심점이 되므로, 등분포 휨모멘트에 의하여 벽체의

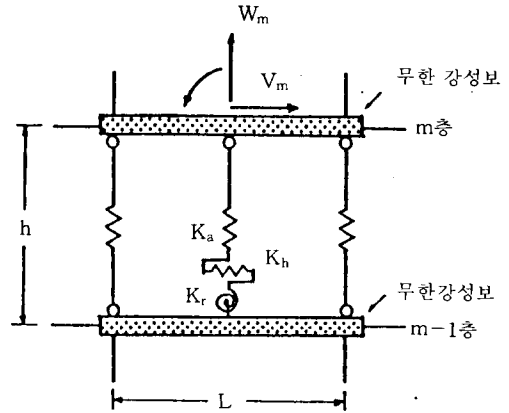


그림 2. 수직-삼부재 모델(kabeyasawa, 1994)

변형이 발생함을 가정하였다.

이 모델은 단순하면서도 실험과 해석결과가 잘 일치함을 보여주었다. 또한 앞의 등가보 모델이 실패한 벽체단면에서의 중심선의 이동과 벽체의 회전 등의 거동을 잘 표현하고 있다. 그러나 이 모델은 휨과 전단변형을 고려할 수 있으나, 고정단의 회전에 의한 변형은 고려할 수가 없다. 또한 이 모델로 휨과 미끄러짐 전단파괴는 설명할 수 있으나, 웨브의 할렬-압괴 파괴는 설명할 수 없다. 이 모델은 실험결과와 경험으로부터 제안되었으므로 다분히 모델이 갖는 여러형상의 변수는 경험적 식이나 값에 의존하고 있거나 임의성을 지니고 있다.

Vulcano, Bertero (1987)는 새로운 축력강성모델(그림6)을 제안하여 TVLEM에 적용하였다. 이는 Kabeyasawa의 축강성 모델이 실험결과로부터 유도하였으므로, 일반적 벽모델의 구성에 어려움을 주기 때문이다. 따라서 이들은 콘크리트와 철근의 재료적 성질을 고려하여 새로운 압축강성모델을 제안하였다.

Mertz(1989)는 TVLEM에서 중앙의 요소 즉, 축력과 휨과 전단스프링으로 구성되는 내부벽체요소를 이용하여, 저층의 전단벽을 수치모델화하였다. 내부벽체의 강성을 벽체의 4단부의 강성으로 치환하여 3차원적 부재로 사용하였다. 비슷한 방법으로, Kunnath와 Reinhorn(1989)은 3차원화

석 프로그램 IDARC-3D에서 전단벽체 모델을 위하여 TVLEM중 내부벽체 부재를 사용하였다.

#### 2.4 수직-다부재 모델(MVLEM)

Charney(1986)는 벽체를 평행하는 여러개의 축력 스프링 (LINKS모델)을 사용하여 1/5 축소 모델 실험의 결과를 분석하였다. 이 개념을 발전시켜 Vulcano, Bertero와 Colotti(1989)는 벽체의 휨거동을 더욱 정확하게 설명하기 위하여 87년에 제안한 모델을 수정하였다.

수정된 축력-강성 반복이력특성을 표현하는 두 개의 부재요소의 반응을 설명하기 위하여 보다 엄격한 응력-변형도 관계식을 사용하였고, 철근의 점차적인 항복을 고려하기 위하여 수직의 다부재를 이용하여 전단벽체모델을 모델하였다.

수직-다부재 모델(Multi Vertical Line Element Model)은 그림3과 같이 상하층의 무한 강성보를 연결하는 평행한 여러개의 축력부재와 전단에 저항하는 전단스프링으로 구성되어 있다.

해석을 위하여 균열이 발생한 콘크리트와 발생하지 않은 콘크리트에 대하여 서로 다른 일축응력-변형도 관계를 사용하였다. 또한 인장강성(Tension-Stiffening)을 고려하여 해석을 수행하였다. 실험과 비교분석한 결과로, 최소 축력 부재 4개를 사용하여도 정확한 부재의 거동을 계산할 수가 있

었으며, 축력부재의 수가 증가할 수록 실험결과에 접근함을 보여 주었다.

#### 3. 반복이력(Hysteresis)모델

앞의 서론에서 언급한 바와 같이 거시적모델에서는 구조물의 거동특성과 부합되는 모델을 선택을 하여야 하는데 반복이력의 모델의 경우도 마찬가지이다. 전단벽체의 경우는 비선형거동이 커지면서 나타나는 반복이력의 특성이 일반적인 보나 기둥의 경우와 다르게 나타나므로 이러한 벽체의 전단 및 회전 그리고 축강성 스프링의 반복이력모델의 선정은 적합하게 되어야 한다.

2.1절에서 언급한 등가보모델을 사용한 Takayanagi와 Schnobrich는 개선된 Tadedo모델을 사용하였다. 이러한 모델은 강성의 저하는 고려할 수 있었으나 prinching의 효과는 고려할 수 없었다.

Kabeyasawa는 TVLEM을 제안하면서 각 스프링의 반복이력모델을 제안하였다. 전단과 회전스프링의 반복이력 모델로 OOHM(Origin-Oriented Hysteresis Model)과 축강성반복이력모델(Axial Stiffness Hysteresis Model : ASHM)을 제안하였다.

OOHM(그림4)은 적은 반복이력 에너지를 발산하는 특성이 있다. 이 모델은 전단과 휨거동에 사용이 되었으며, Trilinear 모델이 사용되었다. 반응점의 거동은 부재가 압축이나 인장의 균열강도( $V_c$ )를 초과한 후, 하중이 다시 감소 할 때에는 원점을 향하게 된다. 즉 최대변위와 원점을 잇는 직선의 기울기를 따라 거동하다가 이전의 최대반응점을 초과하게 되면 전단변형의 뼈대곡선을 따라 거동을 하게 된다. 위와 같은 가정때문에, 축력과 휨에 의한 균열의 발생으로 인한 강도저감을 고려하지 못한다.

Kabeyassawa의 ASHM(그림5)은 양단의 벽체 보강부재의 반복이력을 나타내며 강성은 콘크리트의 재료적 성질에 따라 결정하였다. 탄성압축강성  $K_a = (A_c E_c) / h$ 로 나타내었다. 단,  $A_c$ 는 벽체 보강부재의 단면적을,  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수를,  $h$ 는 벽체의 높이로 나타낸다. 이부재가 인장

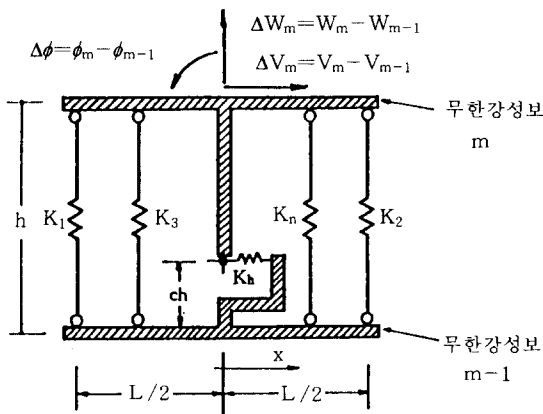


그림 3. 수직-다부재 모델  
(Vulcano, Bertero, 1989)

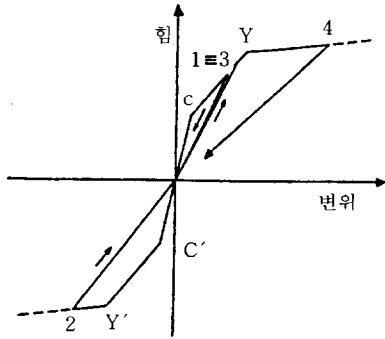


그림 4. OOHM(Kabeyasawa)

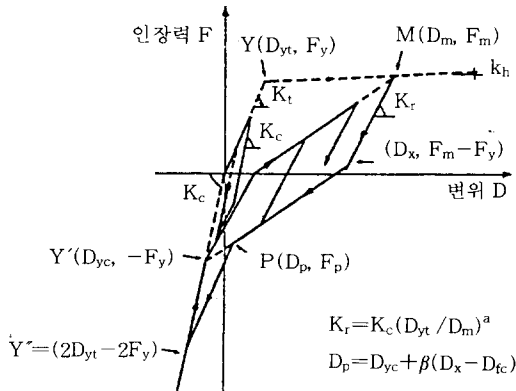


그림 5. ASHM(Kabeyasawa)

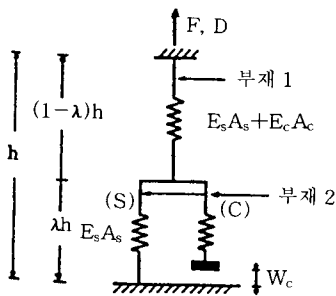


그림 6. 축강성모델(Vulcano, Bertero)

을 받을 때의 강성은 압축강성의 90%로, 인장력에 의한 항복강도는 부재의 철근이 모두 항복이 발생할 때의 값으로, 인장항복후의 강성은 압축강성의 0.1%로 가정하였다. 점  $Y=(D_{yt}, F_y)$ 에 도달하기전까지의 점Y와 점Y'사이에서 이중곡선(Bilinear) 반복하중이력을 따른다. 부재에 인장항복이 발생하면 점Y'와 최대변형점  $M=(D_m, F_m)$ 사이에서 이중곡선 반복이력특성을 따른다.

앞의 2.3절에서 언급한 바와 같이 Vulcano, Bertero(1987)는 Kabeyasawa의 ASHM대신 새로운 모델(그림6)을 제안하였다. 즉, 수직 벽체보강 보재를 다음의 두가지 요소로 나누어 표현하였다. 1) 한 부재는 접착력이 손실되지 않은 부분으로 부재의 전체 축력강성을 나타내고, 2) 다른 부분은 균열이 발생한 콘크리트와 철근의 축력강성을 표현한다. 이 모델을 사용하면, 철근의 항복(Yielding)과 강성증가(Hardening)과 바우싱거(Bauschinger) 영향, 콘크리트의 균열, 균열의 닫힘으로 발생하는 접촉응력(contact stress)의 시작, 콘크리트와 철근의 부착강도의 약화 등을 표시할 수 있다. 그러기 위해서는 적절한 철근과 콘크리트의 응력-변형도의 곡선이 사용되어야 하며 또한 접착력-저감 계수  $\lambda$ 에 의하여 인장부분의 강도가 결정되므로 적절한 값을 사용하여야 하는 부담을 안고 있다.

Ozcebe와 Saaticioglu(1989)는 전단의 반복이력모델을 제안하여 독립벽체의 실험(Oesterle, 1979)과 해석한 결과를 비교하였다. 하중감소나 하중증가시 전단반복이력모델 형상은 동일하다. 이 모델은 하중의 방향이 바뀌는 점에서 전단계의 극대점까지 연결하는 선을 따라 pinching현상을 보이다가 균열발생 전단강도에서 강도가 회복함을 보인다. 강성이 저하되는 것을 수치적으로 계산하기 위하여 최대변위점 이상까지 가해진 반복하중의 회수가 변수로 채택하였다.

Mertz의 경우는 휨과 전단의 반복이력모델을 분리하여 사용하였다. 전단의 경우는 강성저하와 pinching현상을 고려할 수 있는 모델을 실험의 결과(National Cheng-Kung University Shear Walls)로 부터 유도하여 사용하였고, 휨의 모델에서는 강성의 저하만을 모델링하였다.

#### 4. 맺음말

앞에서 고찰한 바와 같이 거시적 모델을 사용하여 전단벽체를 수치모델하는 방법에는 여러가지의 방법이 있으며 각기 그 모델들에는 장점과 단점을 지니고 있음을 보았다. 거시적모델로 구조물을 해석하는 경우에 전단벽체의 모델과 그에 맞는 반복이력모델의 선정에 주의하여야 한다. 이는 전단벽체의 파괴양상과 비선형거동 등의 복잡한 거동을 한개의 모델을 가지고 일률적으로 적용하지 못한다는 거시적 모델의 한계점 때문이다.

그러나 아직까지 계산기의 발전과 미시적모델의 한계점을 고려한다면 구조물 비선형해석시 최선의 선택은 미시적방법보다는 거시적방법이라 하겠다. 거시적모델을 사용하여 구조물의 3차원 해석 프로그램을 개발한 예를 보았듯이, 3차원 비선형거동까지 고려한다면 거시적방법이 적당하리라고 판단된다.

#### 참고 문헌

Charney, F.A., "Correlation of the Analytical and Experimental Inelastic Response Of 1/5 Scale Seven-Story RC Frame Wall Structure", ACI SP-127, 1991

Hiraishi, H., "Evaluation of Shear and flexural Deformations of Flexural Type Shear Walls", Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 1984, pp 677-684

Keshvarzian, M. & Schnobrich, W.C., "Inelastic Analysis of RC Coupled shear Walls", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, 1985, pp427-448

Kunnath, S.K. and Reinhorn, A.M., "Inelastic Three Dimensional Response Analysis of Reinforced Concrete Building Structures (IDARC-3d)", Technical Report NCEER-89-0011, State University of New York at Buffalo, April, 1989.

Mertz, G.E., "Nonlinear Analysis of Low Rise Reinforced Concrete Shear Wall Buildings Subjected to Multicomponent Seismic Input", Ph.D. Dissertation, University of Missouri, Rolla, 1989.

Meyer, C., Roufaiel, M.S. and Arzoumanidis, S. G., "Analysis of Damaged Concrete Frames for Cyclic Loads", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, 1983, pp 207-228

Otani, S. and Sozen, M.A., "Simulated Earthquakes Tests of RC Frames", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 100, No. ST3, 1974, pp 687-701

Ozcebe, G., Saaticioglu, M., "Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members", Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 1, Jan, 1989, pp 132-148

Vallenas, J.M., "Bertero, V.V and Popov, E.P., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls", Report No. UCB/EERC-79/20, University of California, Berkeley, 1979, pp 234

Vulcano, A., Bertero, V.V., "Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of their Reliability", Report No. UCB/EERC-87/19, University of California, Berkeley, 1987.

Vulcano, A., Bertero, V.V., Colotti, V., "Analytical Modeling of RC Structural Walls", 9th world Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Vol. 4, 1988, pp 41-46