

반복하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 비선형 해석 Nonlinear Analysis of RC Shear Walls under Cyclic Loadings

곽 효 경* 김 도 연**
Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Do-Yeon

ABSTRACT

This paper describes an extension of a numerical model, which was developed to simulate the nonlinear behavior of reinforced concrete (RC) structures subject to monotonic in-plane shear. While maintaining all the basic assumptions adopted in defining the constitutive relations of concrete under monotonic loadings, a hysteretic stress-strain relation of concrete, which crosses the tension-compression region, is defined. In addition, curved unloading and reloading branches inferred from the stress-strain relation of steel considering the Bauschinger effect are used. Modifications of the stress-strain relation of concrete and steel are also introduced to reflect a pinching effect depending on the shear span ratio and to represent an average stress distribution in a cracked RC element, respectively.

1. 서 론

철근콘크리트(RC) 구조물은 강 구조물에 비해 상대적으로 큰 강성을 갖는 이점으로 인해 전단 벽과 같이 지진하중이나 풍하중과 같은 수평하중에 저항하기 위한 구조부재에 널리 사용되고 있다. 그러나 지진하중 등 파다한 하중이 구조물에 작용할 경우 상대적으로 큰 변위를 동반하게 되므로 구조부재의 설계를 위해서는 구조물이 저항할 수 있는 극한하중의 예측은 물론 하중-변위 관계에 의해 정의되는 에너지 소산능력의 산정 등 구조물의 거동특성을 나타내는 여러 요인들에 대한 정확한 평가가 선행되어야 한다.

전단벽은 2축응력의 조합에 따른 평면응력상태의 하중이 작용하므로 수치해석을 위한 구성모델을 정의함에 있어 2축응력상태에 따른 강도포락선, 균열과 부착슬립의 영향 등 재료의 비선형 거동 특성을 효과적으로 모사할 필요가 있다. 특히 대변형을 동반한 반복하중이 구조계에 작용하게 되면 하중 이력으로서 인한 전단강성의 변화가 나타나므로 비선형 구조거동을 정확히 산정하기 위해서는 변형 이력에 따른 재료성질의 변화를 효과적으로 정의할 필요가 있다.

이 논문은 단조증가하중 하에서 철근콘크리트 전단벽의 거동을 해석하기 위해 회전균열모델을 토대로 제안된 바 있는 수치해석 모델⁽²⁾을 반복하중 하에서 구조거동 해석을 위한 해석모델로의 확장에 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 Stevens 등⁽⁶⁾이 실험한 전단 판넬 실험결과를 토대로 반복하중에 따른 콘크리트의 응력-변형률 이력곡선을 정의하였고, 분산균열모델에 따라 평균응력-변형률 관계로 가정되는 콘크리트와 동일한 변위장을 갖는 철근을 모델링하기 위해 구조물의 전단지간 비에 따른 전단변형의 영향을 철근의 응력-변형률 이력곡선의 수정을 통해 반영하고자 하였다.

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 콘크리트 재료모델

응력상태에 따른 콘크리트의 재료성질을 모사하기 위해 기본적으로 추가적인 전단응력-변형률 곡선에 대한 정의가 필요하지 않은 회전균열모델로써 균열각의 변화를 고려하였다. 전단벽의 해석을 위한 콘크리트의 재료모델과 관련한 보다 구체적인 내용은 참고문헌⁽²⁾에서 살펴볼 수 있으며, 이 논문에서는 반복하중에 대한 전단벽 해석 시 요구되는 응력-변형률 이력곡선을 중심으로 콘크리트의 재료성질을 언급하고자 한다.

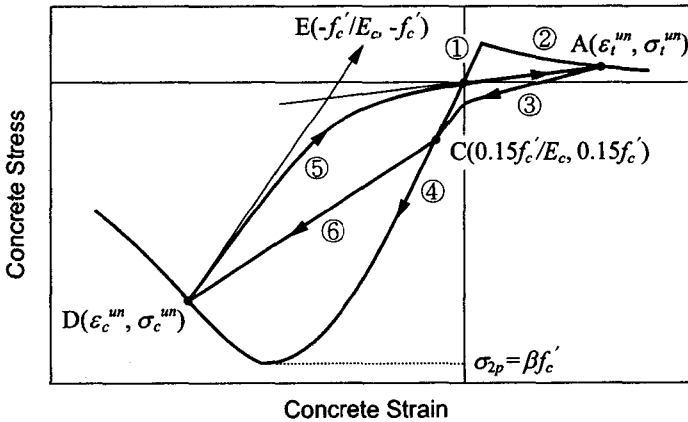
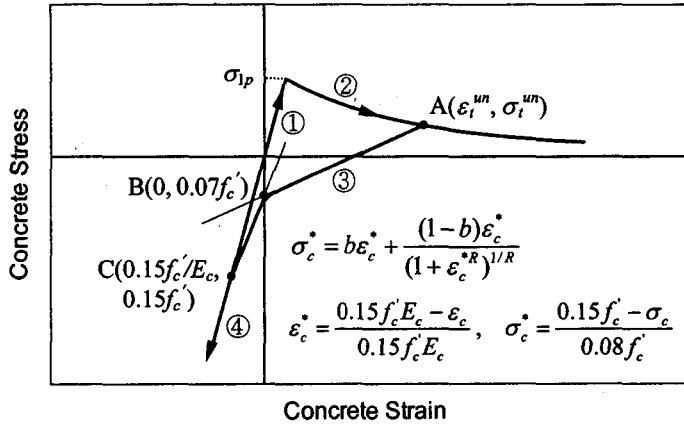


그림 1. 콘크리트의 응력-변형률 이력곡선

그림 1에서 균열이 발생하기 전의 응력-변형률 관계를 나타내는 구간 ①의 경우 Kupfer 등이 제안한 관계식으로부터 인장-압축응력 하의 인장강도 σ_{1p} 를 사용하여 선형의 응력-변형률 관계를 정의하였으며, 균열 발생 후 인장경화효과를 고려하기 위해 앞의 연구⁽²⁾에서 제안한 인장경화모델을 토대로 구간 ②의 응력-변형률 곡선을 정의하였다. 또한 압축측 응력-변형률 곡선의 경우 기본적으로 Collins 등이 제안한 모델식을 사용하여 단조증가 상태의 응력-변형률

관계를 정의하여 이력곡선의 포락선을 규정하였다 (구간 ④ 참조). 특히 콘크리트의 응력상태가 인장-압축영역에 놓이게 되면 주인장변형률에 따라 압축강도가 감소하게 되는데 이 논문에서는 Vecchio 등이 제안한 식을 사용하여 압축강도 감소효과를 고려하였다.

한편, 반복하중의 작용에 따라 제하(unloading)가 발생하고 하중이 역전될 경우 열렸던 균열이 닫히거나 압축파쇄 상태에서 응력상태가 바뀌어 인장 균열이 다시 유발될 수 있다. 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 변형연화영역 상태에 있는 콘크리트에 제하(unloading)가 일어나면 인장변형이 감소함에 따라 인장응력 또한 감소하게 된다. 이 논문에서는 그림 1(a)의 콘크리트 인장측에서 나타난 바와 같이 제하가 유발되는 점 $A(\epsilon_i^{un}, \sigma_i^{un})$ 와 $B(0, 0.07f_c')$ 를 연결하는 직선과 점 $B(0, 0.07f_c')$ 와 $C(0.15f_c'/E_c, 0.15f_c')$ 를 연결하는 직선의 두 직선을 점근선으로 하여 정의되는 천이 곡선(그림 1(a)의 식 참조)을 따라 제하가 발생하는 것으로 가정하였다 (그림 1(a)의 ①→②→③→④ 참조).

나아가 압축변형이 증가하게 되면 응력-변형률 이력곡선은 구간 ④의 포락선을 따르게 되는데, 그림 1(b)는 인장에서 압축으로 천이된 후 압축변형이 지속적으로 유발됨에 따라 콘크리트의 압축강도를 초과하여 압축측의 변형연화영역에 이르기까지 변형이 증가한 상태를 나타내고 있다. 이 논문에서는 Karsan 등의 실험 결과를 바탕으로 제하가 되는 점 $D(\epsilon_c^{un}, \sigma_c^{un})$ 와 인장측에 위치하는 가상 점인 점 $E(f_c'/E_c, -f_c')$ 를 잇는 직선 및 인장측에서 이전에 최대 경험한 점 $A(\epsilon_i^{un}, \sigma_i^{un})$ 와 원점을 잇는 직선을 각각 점근선으로 사용하여 인장측에서 응력 제하가 발생할 경우 응력-변형률 관계를 정의한 방법과 동일하게 압축에서 인장으로 천이하는 영역인 구간 ⑤를 곡선으로 정의하였다. 한편 압축측 변형이 계속 감소하여 인장변형이 커지게 되면 이력곡선이 점 $A(\epsilon_i^{un}, \sigma_i^{un})$ 를 지나 새로운 인장변형을 경험하게 된다. 이 상태에서 다시 제하가 일어날 경우 추가적인 손상에 따라 새로이 결정되는 점 $A(\epsilon_i^{un}, \sigma_i^{un})$ 로부터 새롭게 정의된 구간 ③을 따라 앞에서 언급한 인장에서 압축으로의 천이영역을 따르게 된다.

계속하여 추가적인 압축변형이 발생할 경우 압축측에서 압축강도를 초과한 손상을 경험한 관계로 초기의 압축측 단조증가 포락선을 그대로 따르지 않고 앞에서 경험한 최대변형률에 의해 영향을 받게 된다. 이를 고려하기 위해 균열이 닫히는 점 $C(0.15f_c'/E_c, 0.15f_c')$ 와 점 $D(\epsilon_c^{un}, \sigma_c^{un})$ 를 직선으로 연결하는 그림 1(b)에 나타난 구간 ⑥에 따라 인장측에서 압축측으로의 재제하 곡선을 정의하였으며, 점 $D(\epsilon_c^{un}, \sigma_c^{un})$ 를 지나 추가적인 압축 변형이 있을 경우 앞에서와 마찬가지로 압축측 포락선에 따라 이력곡선이 정의된다.

3. 철근모델

3.1 철근의 단조증가(monotonic) 응력-변형률 곡선

철근의 응력-변형률 곡선은 그림 2에 점선으로 나타난 바와 같이 일반적으로 탄성, 변형경화(strain hardening)의 형태를 갖는 탄·소성재료로 가정되지만, 철근콘크리트 패널이나 벽체에서와 같이 콘크리트 내에 묻혀있는 철근의 응력-변형률 관계는 그림 2에 실선으로 나타난 바와 같이 순수하게 철근만 있을 경우와는 다른 응력-변형률 관계를 나타낸다. 즉, 콘크리트 내에 묻힌 철근이 균열 위치에서 항복하게 되면 균열 사이의 영역에서는 콘크리트가 인장력의 일부분에 대해 여전히 저항하고 있는 관계로 철근의 응력이 균열 부위의 항복응력보다 작게 된다. 따라서 균열 면에서 최대이고 균열 사이로 갈수록 감소하며 변화하는 철근의 응력분포에 대해

분산균열모델의 개념을 적용하기 위해서는 평균응력-평균변형률 관계를 도입할 필요가 있으며, 이를 위해 이 논문에서는 Belarbi 등⁽¹⁾이 제안한 다음의 두 직선 식을 사용하여 철근의 평균응력-변형률 곡선을 정의하였으며, 이를 통해 철근의 항복에 따른 구조물의 거동을 보다 효과적으로 고려하고자 하였다.

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = f_y \left[(0.91 - 2B) + \left(0.02 + 0.25B \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \right) \right], \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_n \quad (2)$$

여기서 σ_s 와 ε_s 는 각각 철근의 평균응력, 평균변형률을 나타내고, f_y 와 ε_y 는 각각 순수 철근의 항복응력과 항복변형률, E_s 는 철근의 탄성계수를 나타내며, $\varepsilon_n = \varepsilon_y(0.93 - 2B)$ 의 관계식에 의해 정의된다. 특히 재료상수 $B = (f_t/f_y)^{1.5}/\rho$ 로 정의되는데 ρ 는 철근비로서 0.5%보다 커야 한다.

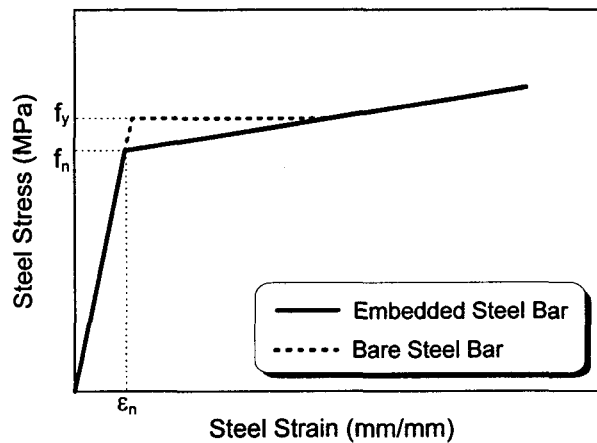


그림 2. 철근의 인장응력-변형률 곡선

3.2 철근의 응력-변형률 이력곡선

단조증가하중에 따른 철근의 응력-변형률 관계의 포락선이 결정되고 나면 철근의 하중 이력에 따라 나타나는 비선형 거동의 대표적인 특징인 항복과 응력의 제하(unloading), 재재하(reloading), 나아가 변형경화(strain hardening) 영역, Bauschinger 효과 등을 모사하게 되는데, 이 논문에서는 반복하중에 대한 철근콘크리트 구조물의 해석에 가장 널리 사용되고 있는 Pinto 등이 제안한 해석모델을 사용하여 철근의 거동 특성을 정의하였다 (그림 3 참조). 모델에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌에서 살펴볼 수 있다.

3.3 전단효과를 고려한 이력곡선의 수정

철근콘크리트의 거동 특성이 단면의 모멘트-곡률 관계로부터 직접 정의되어 이를 통해 핀칭효과를 반영할 수 있는 보 요소와는 달리 평면응력요소의 경우 철근과 콘크리트 각각의 응력-변형률 관계가 주축에 대해 정의되기 때문에 추가적인 전단이력 곡선이 도입되지 않는 한 요소

단계에서 정의되는 응력-변형을 관계만을 토대로 구조물 단계에서 발생하는 편칭현상을 모사하는데는 한계가 있다.

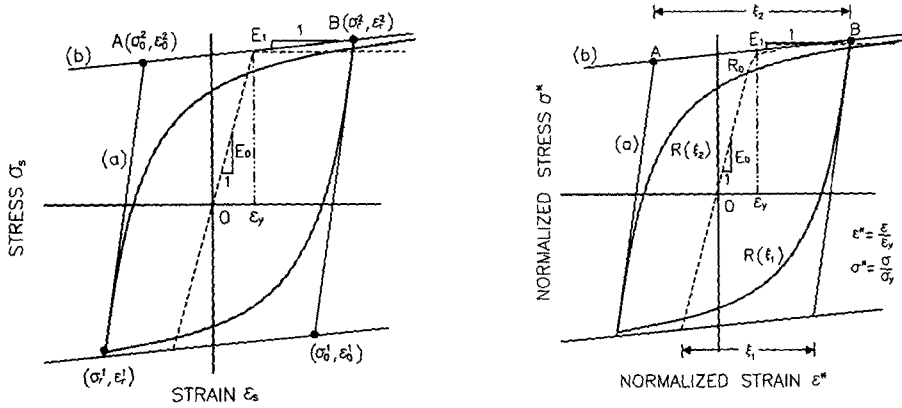


그림 3. 철근의 응력-변형을 이력곡선 및 R값의 정의

이러한 문제점을 극복하고 나아가 전단에 의한 편칭현상을 고려하기 위해 이 논문에서는 Roufaiel 등⁽⁴⁾이 모멘트-곡률 곡선에 적용한 모델식을 토대로 철근의 응력-변형을 관계에서 이력곡선의 재재하 시 항복 점근선을 전단지간 비에 따라 보정함으로써 편칭효과를 반영하고자 하였다.

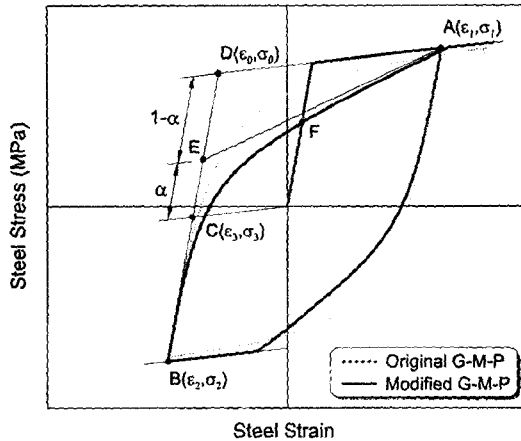


그림 4. 전단효과 고려를 위한 수정된 철근의 응력-변형을 이력곡선

그림 4에 나타난 바와 같이 기존의 G-M-P 모델에서 초기 탄성기율기 E_0 를 갖는 점근선 (선분 BD)과 소성영역의 기율기 E_1 을 갖는 또 다른 점근선 (선분 DA)의 교점 $D(\epsilon_0, \sigma_0)$ 를 전단지간 비인 단면의 높이(h)와 길이(l)의 비(h/l)에 따라 수정하게 된다. 즉, Roufaiel 등이 다양한 규격의 보-기둥 접합부 실험 결과를 통해 제시한 다음 식에 따라 전단지간 비에 따른 새로운 교차점 $E(\epsilon'_0, \sigma'_0)$ 를 계산하게 된다.

$$\sigma'_0 = \sigma_3 + \alpha \cdot f_n, \quad \epsilon'_0 = \epsilon_3 + \alpha \cdot \epsilon_n \quad (3)$$

여기서 $h/l < 1.5$ 일 때 $\alpha=0$, $1.5 < h/l < 4.0$ 일 때 $\alpha=0.4(h/l)-0.6$, 그리고 $h/l > 4.0$ 일 때 $\alpha=1$ 이며, h 는 전단벽의 높이이고, l 은 전단벽의 폭을, (ϵ_n, f_n) 은 철근의 평균항복점(그림 2 참조)을 각각 나타낸다.

4. 수치해석

4.1 전단벽 (h/l=2.5)

반복하중 하에서 해석모델을 검증하고 하중-변형 관계를 살펴보기 위해 PCA⁽³⁾에서 실험한 전단벽 시험체 중 B1 시험체의 수치해석을 수행하였다.

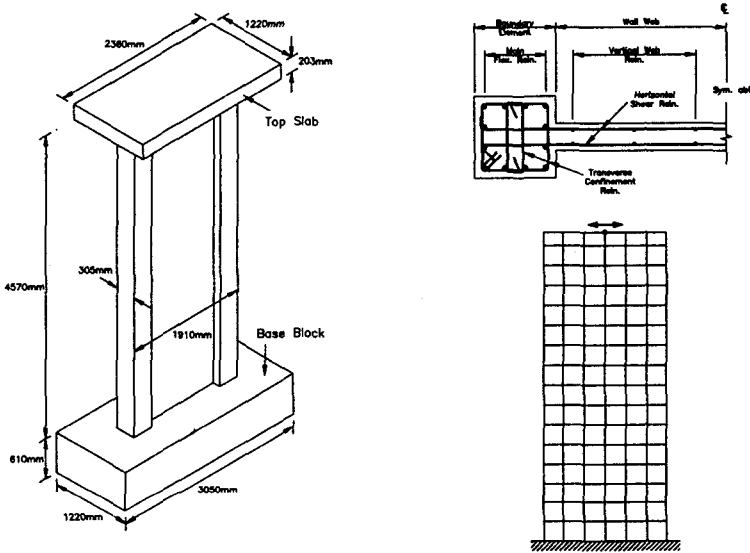
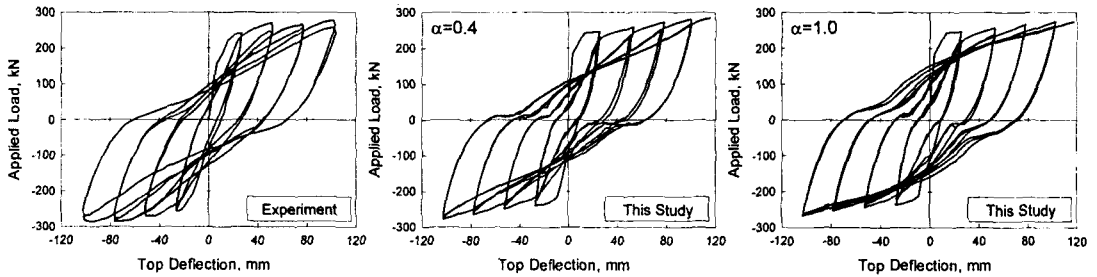


그림 5. 전단벽 B1 시험체의 제원 및 유한요소 모델링

지지점 역할을 하는 저면 기초와 하중전달이 목적인 강성이 큰 상부 슬래브와 함께 구성된 전단벽 B1은 102mm의 두께를 갖는 웨브와 스티럽으로 보강된 305mm의 두께를 갖는 경계요소로 이루어져 바벨형태(barbell-shaped)의 단면을 갖고, 기초 블록으로부터 높이가 4570mm이며, 1910mm의 폭을 갖는 높이 대 폭의 비가 2.5:1인 벽체이며, 구체적인 치수, 철근 배근형태 등은 그림 5에 나타난 바와 같다. 시험체는 그림 5에 나타난 바와 같이 저면 기초를 제외하고, 96개의 유한요소를 사용하여 모델링하였으며, 전단벽의 하부를 고정단으로 두어 해석을 수행하였다. 하중 이력은 상부 슬래브의 중앙점에서의 횡방향 변위를 규정하여 가하였는데, 부과된 하중은 25mm의 변위 단계에서 시작하여 파괴에 도달할 때까지 25mm씩 증가시켰으며, 각 단계마다 3차례 사이클의 하중을 가하였다.

그림 6은 해석된 하중-변위 이력곡선을 실험 결과와 비교하여 나타내고 있다. 전단벽 B1 시험체의 경우 높이 대 폭의 비가 2.5:1로서 다소 큰 전단지간 비를 가지므로 콘크리트의 압축파쇄와 더불어 철근의 항복이 전체 거동을 지배하는 관계로 철근의 이력곡선에서 전단효과의 고려 유무에

다른 해석 결과를 살펴보기 위해 기존의 G-M-P 모델($\alpha=1.0$)과 전단효과를 고려한 철근모델($\alpha=0.4$)에 대한 수치해석을 수행하여 그림 6에 해석 결과를 비교하였다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 전단효과를 고려하지 않은 철근모델을 사용하여 해석한 경우 변형이 작은 상태에서의 이력곡선은 전단효과를 고려한 경우와 차이가 거의 없으나, 변형이 커짐에 따라 철근의 항복으로 인해 휨 거동이 전체 거동을 지배하게 되므로 실험 결과에 비교하여 편칭효과가 일어나지 않음을 볼 수 있다.



(a) 실험결과 (b) 해석결과 (전단효과 고려) (c) 해석결과 (전단효과 미고려)

그림 6. 전단벽 B1 시험체의 유한요소 모델링

4.2 전단벽 (h/l=1.0)

짧은 전단지간 비를 갖는 전단벽의 이력 거동을 살펴보기 위해 Salonikios 등⁽⁵⁾이 실험한 시험체 중 전단지간 비가 1인 시험체 LSW1을 채택하여 수치해석을 수행하였다. 시험체의 형상 및 철근 배근은 그림 7에 나타낸 바와 같고, 124개의 4절점 요소를 사용하여 모델링하였고, 벽체 하단부분을 고정시킨 상태에서 상부 슬래브의 중앙 부분에 수평하중을 반복적으로 가하였다.

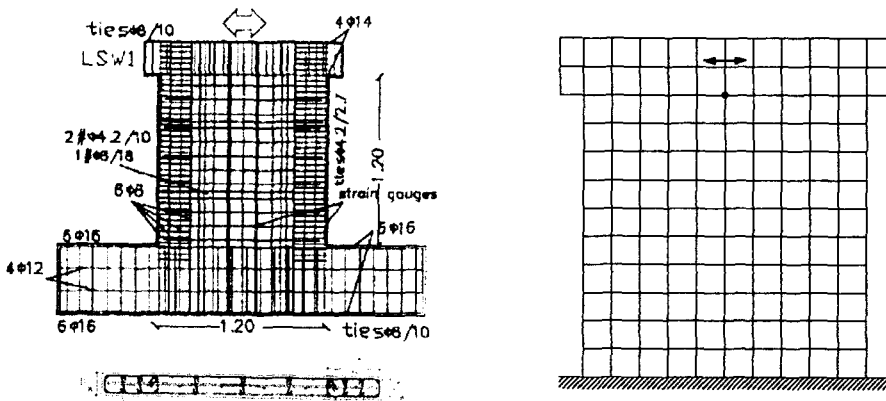


그림 7. 시험체의 제원, 단면형상 및 유한요소 모델링

벽체상단 부분의 변위를 구하여 하중-변위 이력곡선에 대한 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 이 시험체의 경우 그림 8에서 볼 수 있듯이 전단지간 비가 짧은 관계로 변

위의 크기가 반복적으로 증가함에 따라 제하 및 재제하 강성이 감소함을 볼 수 있으며, 이력곡선의 편칭현상 또한 두드러지게 나타나고 있으며, 이 논문에서 제안한 전단효과와 구속효과를 고려한 수치해석 결과가 편칭현상을 효과적으로 모사함을 볼 수 있다(그림 8(b) 참조).

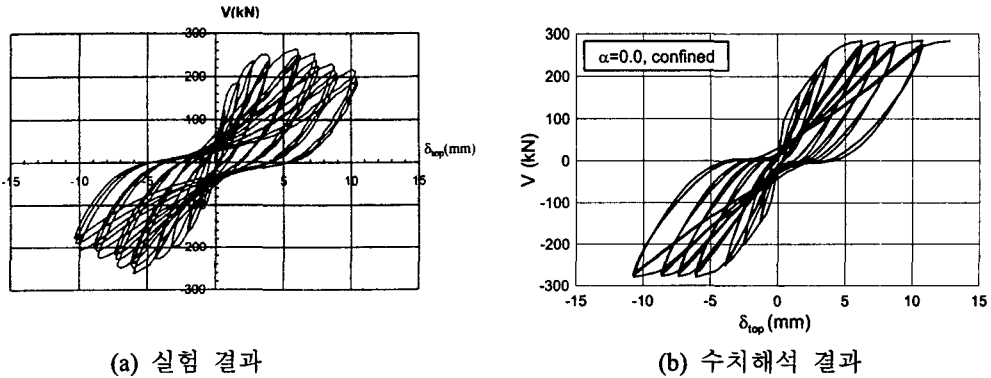


그림 8. 전단벽 시험체 LSW1의 하중-변위 이력곡선

5. 결 론

철근콘크리트 판넬 및 전단벽과 같이 평면응력 상태에 놓인 구조물의 비선형 해석을 위한 해석 모델을 제안하였다. 콘크리트의 경우 단순하면서도 인장과 압축이 교번하는 이력특성을 효과적으로 모사할 수 있는 이력곡선을 정의하였으며, 철근의 경우 기존의 이력곡선에 전단-지간비에 따른 전단효과를 반영하여 전단이 지배적으로 작용하는 구조물의 해석을 위해 효과적으로 사용할 수 있도록 하였으며, 실험결과와의 비교를 통해 제안된 해석모델의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

1. Belarbi, A., and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, Jul.-Aug. 1994, pp. 465-474.
2. Kwak, H. G., and Kim, D. Y., "Nonlinear Analysis of RC Shear Walls Considering Tension-Stiffening Effect," *Computers & Structures*, Vol. 79, Issue. 5, 2001, pp. 499-517.
3. Oesterle, R. G., Fiorato, A. E., Johal, L. S., Carpenter, J. E., Russell, H. G., and Corley, W. G., "Earthquake Resistance Structural Walls-Tests of Isolated Walls," *Report to National Science Foundation, Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, Skokie, Ill.*, Oct. 1976, 315 pp.
4. Roufaiel, M. S. L., and Meyer, C., "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, Mar. 1987, pp. 429-444.
5. Salonikios, T. N., Kappos, A. J., Tegos, I. A., and Penelis, G. G., "Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Design Basis and Test Results," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, Jul.-Aug. 1999, pp. 649-660.
6. Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P., "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear - Experiments and Constitutive Model", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 2, Mar.-Apr. 1991, pp. 135-146.