

반복하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 비선형거동에 대한 예측

Predicting the Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements Subjected to Reversed Cyclic Loading

이 정 윤*
Lee, Jung Yoon

국문요약

지진하중을 받는 철근콘크리트 패널의 이력거동을 힘의 평형조건, 변형의 적합조건 및 재료의 구성법칙을 이용한 재료메카니즘을 이용하여 예측하였다. 해석에서는 7단계의 압축응력-변형률곡선과 6단계의 인장응력-변형률곡선으로 구성된 콘크리트의 응력-변형률 모델을 이용하였다. 콘크리트의 응력-변형률 모델에는 균열이 발생한 콘크리트의 연화효과에 의한 압축강도 저감효과가 고려되었다. 해석에 적용된 반복하중을 받는 철근의 평균 응력-변형률관계에는 바우싱거효과 및 철근과 콘크리트의 부착작용을 고려한 인장경화효과가 고려되었다. 해석에 의하여 예측된 패널의 이력거동은 철근비가 다른 3개의 철근콘크리트 패널시험에 의하여 검증되었다. 해석법은 패널의 이력곡선을 추적하여 철근비가 점차 증가하는 시험체의 최대전단응력을 매우 정확히 예측하였다. 또한, 해석에 의하여 예측된 수직 및 수평변형률은 실험에서 관찰된 변형률과 잘 일치하였다.

주요어 : 철근콘크리트 막요소, 반복하중, 전단응력, 전단변형률, 응력-변형률관계

ABSTRACT

The behaviors of the reinforced concrete membrane elements are expected by Navier's three principles of the mechanics of materials. The adopted cyclic stress-strain curves of concrete consist of seven different unloading and loading stages in the compressive zone and six other stages in the tensile zone. The curves took into account the softening of concrete that was influenced by the tensile strain in the perpendicular direction of cracks. The stress-strain relationships for steel bar embedded in concrete subjected to reversed cyclic forces considered the tension stiffening effect and Baushinger effect. The predicted results of the analysis based on Navier's principles were in good agreement with the observed shear stress-strain relationships as well as transverse and longitudinal strains.

Key words : reinforced concrete membrane, reversed cyclic loading, shear stress, shear strain, stress-strain curves

1. 서 론

지진하중을 받는 철근콘크리트 원통셀, 전단벽, I형보 등의 비선형 거동을 평가하기 위한 방법으로 그림 1과 같이 각 구조물의 임의의 요소를 절단하여, 그 요소의 거동을 예측함으로써 전체구조물의 성능을 평가할 수 있다. 이러한 면내응력을 받는 철근콘크리트 막요소에 대한 연구는 Collins 등⁽¹⁾, Hsu 등⁽²⁾에 의하여 활발히 이루어졌다. Collins 등은 순수전단을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단응력-전단변형률 관계를 수정압축장이론(modified compression field theory, MCFT)에 의하여 예측하였고, 이를 철근 및 프리스트레스 콘크리트 보의 전단강도 예측⁽³⁾에 적용하였다. Hsu 등은 회전각연화트러스모델(rotated angle softened truss model, RASTM)을 제안하여 철근콘크리트 막요소의 전단거동을 예측하였다. 그러나, MCFT와 RASTM는 단조하중을 받는 재료의 응력-변형률관계를 적용하고 있기 때문에 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단응력-전단변형률 관계를 예측할 수 없다.

지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 비선형 거동은

지금까지 주로 유한요소법에 근거하여 예측되었다. Ohmori 등^{(4),(5)}은 Collins 등에 의하여 제안된 재료의 응력-변형률관계를 이용하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 막요소 거동

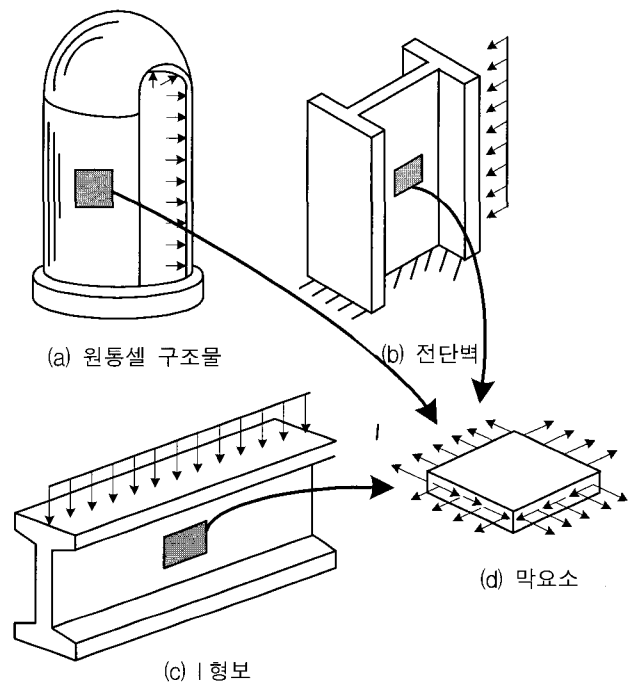


그림 1 철근콘크리트 원통셀, 전단벽, I형보

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수(대표저자 : jylee@yurim.skku.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2002년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 3. 29 / 심사종료일 : 2002. 6. 11)

의 포락선(envelope cover)을 예측하였다. 또한, Steven 등⁽⁶⁾은 철근콘크리트 패널의 실험결과에 근거하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의 응력-변형률관계를 제안한 후, 유한요소법을 이용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 거동을 예측하였다. 그러나, 이와 같이 유한요소법을 이용하여 막요소의 비선형 거동을 예측하는 해석법은 재료메카니즘(Navier's principles)만을 이용하여 부재의 거동을 예측하는 해석법보다 계산과정이 훨씬 복잡하다.

근년 Lee 등⁽⁷⁾에 의하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의 응력-변형률관계가 제안되었다. 제안된 철근의 응력-변형률관계에서는 Steven 등의 제안식에서 무시된 콘크리트에 묻혀있는 철근의 평균응력-평균변형률의 개념이 적용되었고, 균열수직방향에서의 콘크리트변형률에 의한 강도연화효과가 고려되었다. 이 논문에서는 Lee 등⁽⁷⁾에 의하여 제안된 재료의 구성법칙을 이용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 비선형 거동을 예측하고자 한다.

2. 지배방정식

이 논문에서는 힘의 평형조건, 변형의 적합조건 및 재료의 구성법칙을 이용한 재료메카니즘만을 이용하여 면내응력을 받는 콘크리트 막요소의 거동을 예측하고자 한다. 따라서, 이 연구에서 사용되는 지배 방정식은 재료메카니즘을 이용한 Hsu 등⁽²⁾의 RASTM에서 사용된 지배 방정식과 동일하다. 그림 2(a)는 면내 응력 $\sigma_l, \sigma_t, \tau_{lt}$ 을 받아 균열이 발생한 철근콘크리트 판요소를 나타낸다. 철근은 l 방향과 t 방향에 배근 되어 있으며 콘크리트 판요소의 주응력 방향은 1과 2 방향이다. RASTM에서는 외력에 의한 주압축 응력 각도가 균열 각도 α 와 일치한다고 가정한다. 그림 2(b)는 그림 2(a)

의 철근콘크리트 판요소의 콘크리트의 응력 상태를 나타내고 있다. 그림 2(b)에서 σ_2^c 와 σ_1^c 은 콘크리트의 주압축, 주인장 응력이며, 주응력각도는 균열 각도 α 와 일치한다. 따라서, 그림 2(b)로부터 다음과 같은 평형 조건식을 구할 수 있다.

$$\sigma_l = \sigma_2^c \cos^2 \alpha + \sigma_1^c \sin^2 \alpha + \rho_l f_l \tag{1}$$

$$\sigma_t = \sigma_2^c \sin^2 \alpha + \sigma_1^c \cos^2 \alpha + \rho_t f_t \tag{2}$$

$$\tau_{lt} = (-\sigma_2^c + \sigma_1^c) \sin \alpha \cos \alpha \tag{3}$$

변형의 적합 조건은 다음과 같다.

$$\epsilon_l = \epsilon_2 \cos^2 \alpha + \epsilon_1 \sin^2 \alpha \tag{4}$$

$$\epsilon_t = \epsilon_2 \sin^2 \alpha + \epsilon_1 \cos^2 \alpha \tag{5}$$

$$\frac{\gamma_{lt}}{2} = (-\epsilon_2 + \epsilon_1) \sin \alpha \cos \alpha \tag{6}$$

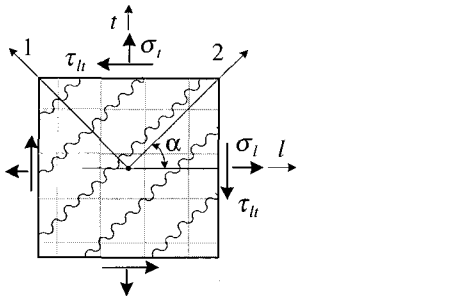
여기서 σ_l, σ_t 는 l 과 t 방향의 축응력, τ_{lt} 는 l 과 t 방향의 전단 응력, σ_2^c, σ_1^c 는 2와 1방향의 콘크리트의 주응력, f_l, f_t 는 l 과 t 방향의 철근의 평균 인장 응력, ρ_l, ρ_t 는 l 과 t 방향의 철근비, ϵ_2, ϵ_1 는 l 과 t 방향의 변형률, γ_{lt} 는 l 과 t 방향의 전단 변형률, ϵ_2, ϵ_1 는 2와 1방향의 콘크리트 변형률이다.

3. 반복하중을 받는 재료의 구성법칙

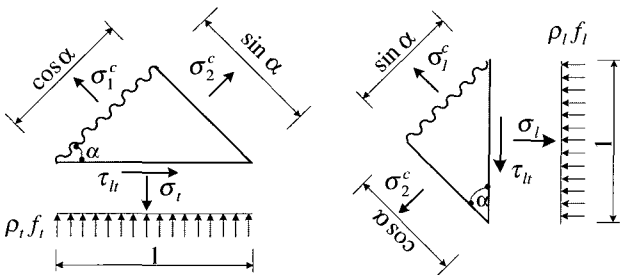
식 (1)에서 식 (6)을 이용하여, τ_{lt}, γ_{lt} 관계를 구하기 위해서는 4개의 재료의 구성 법칙이 요구된다. 즉, 콘크리트 압축응력-변형률 $\sigma_2^c - \epsilon_2$ 관계, 콘크리트 인장응력-변형률 $\sigma_1^c - \epsilon_1$ 관계, l 과 t 방향의 철근의 응력-변형률 $f_l - \epsilon_l$ 관계, $f_t - \epsilon_t$ 관계이다. Collins 등의 MCFT와 Hsu 등의 RASTM에서는 단조하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률관계를 적용하였기 때문에 지진하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 거동을 예측할 수 없었다. 근년 Lee 등⁽⁷⁾은 철근콘크리트 패널실험에 근거하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의 응력-변형률관계를 제안하였다. 제안된 철근의 응력-변형률관계에서는 Steven 등⁽⁶⁾의 제안식에서 무시된 콘크리트에 묻혀있는 철근의 평균응력-평균변형률의 개념이 적용되었고, 균열수직방향에서의 콘크리트변형률에 의한 강도연화효과가 고려되었다.

3.1 콘크리트의 응력-변형률관계

균열이 발생한 콘크리트에 압축력이 작용할 경우 콘크리트의 압축강도 및 변형률은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공사체의 압축강도 및 변형률과 큰 차이를 나타내며, 이와 같은 현상을 연화효과에 의한 콘크리트의 압축강도 및 변형



(a) 철근콘크리트 막요소



(b) 콘크리트의 응력상태

그림 2 철근콘크리트 막요소의 응력상태

률의 변화라 한다. Robinson과 Demorieux⁽⁶⁾, Collins 등⁽¹⁾, Hsu 등⁽⁹⁾은 실험을 통하여 연화효과는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률과 밀접한 관계가 있음을 지적하였다. Lee 등⁽⁷⁾은 균열수직방향의 변형률이 상이한 철근콘크리트 패널실험에 근거하여 그림 3과 같은 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 모델은 C1에서 C7까지의 7단계의 압축응력-변형률곡선과 T1에서 T6까지의 인장응력-변형률곡선으로 구성되어 있다.

그림 3의 포락선은 압축에 대하여 C1과 C2단계, 인장에 대하여 T1과 T2로 구별되며 평가식은 식 (7a)에서 식 (7d)와 같다. 식 (7a)와 식 (7b)는 유효계수 ν_o 와 ν_ϵ 를 함수로 하여 균열수직방향의 변형률이 압축응력과 압축변형률에 미치는 연화효과를 고려하고 있다.

$$\epsilon_o \leq \epsilon_c < 0 \quad (C1\text{단계})$$

$$\sigma_c = (\nu_o f_{ck} - f_{ctf}) \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right)^2 \right] + f_{ctf} \quad (7a)$$

$$\epsilon_c < \epsilon_o \quad (C2\text{단계})$$

$$\sigma_c = \nu_o f_{ck} \left[1 - \frac{\epsilon_c / \epsilon_o - 1}{4 / \nu_\epsilon - 1} \right] \quad (7b)$$

$$0 \leq \epsilon_c \leq 0.00008 \quad (T1\text{단계})$$

$$\sigma_c = E_{cr} \epsilon_c \quad (7c)$$

$$\epsilon_c > 0.00008 \quad (T2\text{단계})$$

$$\sigma_c = f_{cr} \left(\frac{0.00008}{\epsilon_c} \right)^{0.4} \quad (7d)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트의 평균응력, ϵ_c 는 콘크리트의 평균 변형률, E_{cr} 는 콘크리트의 탄성계수, f_{cr} 는 콘크리트의 균열 발생 강도, f_{ck} , ϵ_o 는 콘크리트의 실린더 압축 강도 및 변형률, f_{ctf} 는 T4단계에서 C1단계로 변환할 때의 콘크리트 응력(그림 3의 TD점), ν_o , ν_ϵ 는 연화효과에 의한 콘크리트의 유효 압축 응력 및 변형률 계수이다.

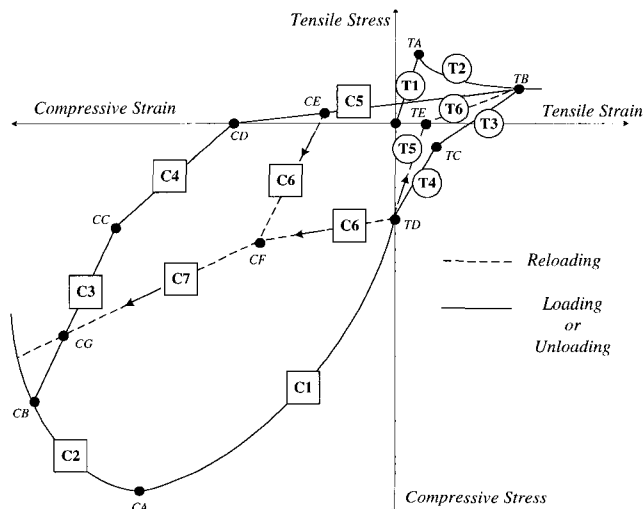


그림 3 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 곡선

제하(除荷) 및 재(再)가력시의 콘크리트의 압축응력-변형률관계는 C3에서 C7까지의 7단계로 구분할 수 있다. 하중이 압축방향에서 인장방향으로 변할 경우의 응력-변형률관계는 C3과 C4의 2개의 직선으로 표현되며, C3과 C4단계에서의 접선강성은 콘크리트 초기강성의 80%와 20%이다. 그림에서 C3에서 C7단계, T3에서 T6단계는 제하(除荷) 및 재(再)가력 단계이며 식 (7e)에서 구할 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} + E_{cc}(\epsilon_{ci} - \epsilon_c) \quad (7e)$$

여기서 σ_{ci} 와 ϵ_{ci} 는 제하(除荷)시의 콘크리트의 응력 및 변형률, E_{cc} 는 콘크리트의 접선강성을 나타낸다. E_{cc} 에 대한 상세한 내용은 문헌 (7)을 참고하기 바란다.

3.2 철근의 응력-변형률관계

콘크리트 안에 배근되어 인장력을 받는 철근은 철근과 콘크리트의 부착작용(tension stiffening effect)에 의해 보통철근과 상이한 응력-변형률 관계를 나타낸다. 콘크리트 안에 배근된 철근의 응력은 균열면에서 최대가 되지만, 균열 중간에서 최소가 된다. 따라서, 콘크리트에 의해 구속된 철근의 평균항복응력 f_n 은 보통철근의 항복응력 f_y 보다 작으며 철근의 평균응력-변형률관계는 균열사이의 철근 응력 및 변형률의 평균값에 의하여 정해져야 한다. Belarbi 등⁽¹⁰⁾의 실험결과에 의하면, f_n 값과 f_y 값의 차이는 철근비 ρ , 콘크리트 균열강도 f_{cr} , 주응력방향과 철근방향과의 각도에 좌우된다.

그림 4는 Lee 등⁽⁷⁾에 의하여 제안된 반복하중을 받는 철근의 평균 응력-변형률관계를 나타낸다. 그림의 접선은 콘크리트에 묻혀 있지 않는 보통철근(bare steel)의 응력-변형률 관계를 나타내며, 그림의 실선은 콘크리트에 묻혀 있는 철근(embedded steel)의 평균응력-변형률관계를 나타낸다. 반복하중을 받는 철근의 평균응력-변형률관계는, Stage 1 : 탄성영역, Stage 2T : 인장 항복영역, Stage 2C : 압축 항복영역, Stage 3 : 제하(除荷) 영역, Stage 4 : 재(再)가력 영역으로 구

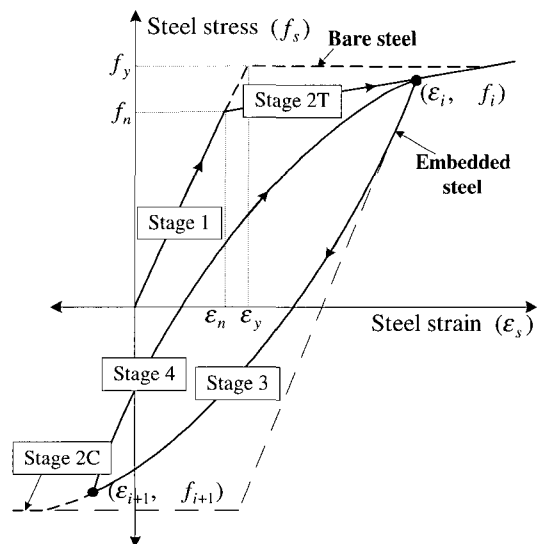


그림 4 반복하중을 받는 철근의 응력-변형률 곡선

별할 수 있다. Stage 1, Stage 2T와 Stage 2C는 단조하중을 받을 때의 철근의 평균응력-변형률관계와 동일하다.

$$\text{Stage 1 } (\epsilon_s \leq \epsilon_n) \quad f_s = E_s \epsilon_s \quad (8a)$$

$$\text{Stage 2T } (\epsilon_s > \epsilon_n) \quad (8b)$$

$$f_s = f_y \left[(0.91 - 2B) + \left(0.02 + 0.25B \frac{\epsilon_s}{\epsilon_y} \right) \right]$$

$$\text{Stage 2C } (f_s \leq -f_y) \quad f_s = -f_y \quad (8c)$$

여기서, f_s 와 ϵ_s 는 철근의 평균 응력 및 변형률, f_y 와 ϵ_y 는 콘크리트에 묻혀있지 않은 철근의 항복 응력 및 항복변형률, E_s 는 철근의 탄성 계수, $\epsilon_n = \epsilon_y(0.93 - 2B)$, $B = 1/\rho (f_{cr}/f_y)^{1.5}$, ρ 는 철근비이다.

제하(除荷) 및 재(再)가력 시의 영역 Stage 3 및 Stage 4는 마우싱거(Bausinger) 효과를 고려한 Ramberg-Osgood식에 근거하여 제안⁽⁷⁾되었다.

Stage 3 및 Stage 4

$$\epsilon_s - \epsilon_i = \frac{f_s - f_i}{E_s} \left\{ 1 + A^{-R} \left| \frac{f_s - f_i}{f_y} \right|^{R-1} \right\} \quad (8d)$$

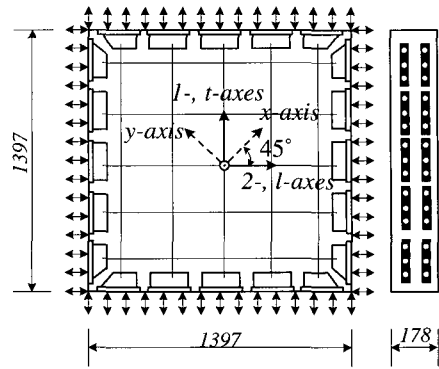
여기서 f_i 와 ϵ_i 는 철근의 평균 응력 및 변형률, $A = 1.9k_p^{-0.1}$, $B = 10k_p^{-0.2}$, $k_p = \epsilon_p/\epsilon_n$, ϵ_p 는 소성변형률이다.

4. 철근콘크리트 패널실험 및 계산순서

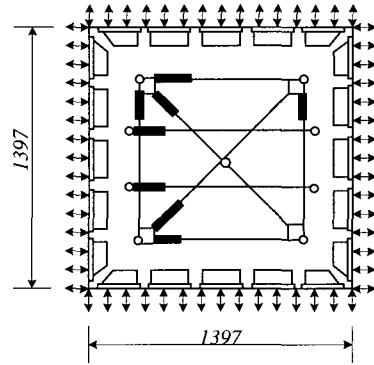
반복하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단응력-변형률 관계는 2, 3장에서 설명된 재료메카니즘을 이용하여 예측할 수 있다. 이 논문에서는 예측된 결과를 Lee 등⁽⁷⁾의 패널실험 결과를 이용하여 검증하고자 한다.

그림 5(a)는 패널시험체⁽⁷⁾의 철근배근형상과 단면크기를 나타낸다. 시험체의 크기는 1397×1397×178mm로 제작되었고, 철근은 가로방향(l -방향)과 세로방향(t -방향)에 2열씩 서로 직교하도록 배근되었다. 시험체 CE2, CE3, CE4의 철근비는 각각 0.0054, 0.0120, 0.0188이며 철근은 양방향에 동일하게 배근되었다. 세 시험체의 콘크리트의 평균 압축강도는 496kgf/cm² 이었다. 시험체의 재료 특성은 표 1에 정리되어 있다.

시험체는 그림 5(b)와 같이 각 면에 설치된 8개의 변위측정기(LVDT)를 통해 수직, 수평 및 전단변형이 측정되었다. 이 실험에서는, 반복하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동을 측정하기 위하여 그림 6과 같이 가로방향(l -방향)과 세로방향(t -방향)에 동일한 힘을 가력하여, 주응력방향과 철근의 배근방향이 일치하게 하였다. 실험이 행해진 만능 패널 실험기^{(9),(10)}는 하중제어와 변형률제어가 가능한 실험기로서, 용량 100ton의 면내(in-plane) 유압잭 40개와 용량 60ton의 면외(out-of-plane) 유압잭 20개로 구성되어 있다. 철골 프레임에 연결된 각 유압잭은 요크를 통해 시험체에 직접 하중을



(a) 패널의 크기 및 철근배근



(b) LVDT 설치위치

그림 5 철근콘크리트 패널 시험체

표 1 시험체의 재료 특성

Panel	Concrete	Steel			
	f_{ck} (kgf/cm ²)	l -direction		t -direction	
		ρ_l	f_{ly} (kgf/cm ²)	ρ_t	f_{ty} (kgf/cm ²)
CE2	500	0.0054	4325	0.0054	4325
CE3	510	0.0120	4335	0.0120	4335
CE4	479	0.0188	4621	0.0188	4621

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도, ρ_l : l 방향 철근비,
 f_{ly} : l 방향 철근 항복강도, ρ_t : t 방향 철근비,
 f_{ty} : t 방향 철근 항복강도

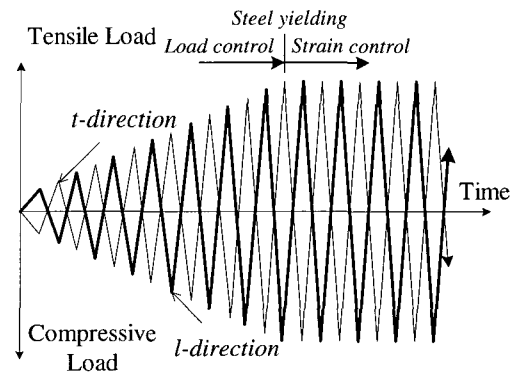


그림 6 가력 프로그램

전달한다. 시험체는 철근이 항복하기까지는 하중에 의하여 제어되었고 철근항복이후에는 변형률에 의하여 제어되었다. 패널시험체에 대한 하중가력방향과 철근배근방향이 일치하

므로 시험체의 주응력방향(2-방향, 1-방향)은 철근배근방향 (l-방향, t-방향)과 일치하게 된다. 따라서, 식 (1)-(6)에서의 주압축응력각도 α 는 0° 가 되어 평형조건 및 적합조건식은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\sigma_t = \sigma_2^c + \rho_l f_l \quad (9)$$

$$\sigma_l = \sigma_1^c + \rho_t f_t \quad (10)$$

$$\varepsilon_l = \varepsilon_2 \quad (11)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 \quad (12)$$

여기서 철근배근방향 (l-방향, t-방향)은 주응력방향이 되므로 l-방향, t-방향에서의 전단응력 τ_{lt} , 및 전단변형률 γ_{lt} 는 없어진다. 따라서, 최대 전단응력 및 전단변형률은 주응력방향에서 45° 기울어진 x-방향, y-방향에 존재하며 식 (13), 식 (14)에서 구할 수 있다.

$$\tau_{xy} = \frac{-\sigma_l + \sigma_t}{2} \quad (13)$$

$$\gamma_{xy} = -\varepsilon_l + \varepsilon_t \quad (14)$$

그림 7은 해석법의 계산 과정을 나타낸다. 계산에서는 먼저 주압축 변형률 ε_2 의 값이 주어지고 지배 방정식 (7)에서 식 (14)를 이용하여 부재 최대전단응력 τ_{lt} 및 전단변형률 γ_{lt} 를 구한다.

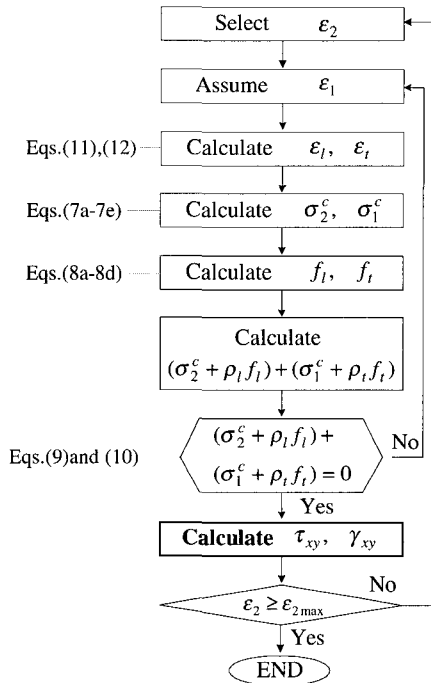


그림 7 계산순서

여기서, $\varepsilon_2 \max$ 는 패널하중이력에 의하여 도달할 수 있는 최대 ε_2 값을 나타낸다.

5. 반복하중을 받는 철근콘크리트 막요소의 비선형거동예측

5.1 전단응력-전단변형률 관계

그림 8(a)-8(c)는 실험 및 해석에서 구해진 철근콘크리트 패널의 전단응력-전단변형률관계를 나타낸다. 그림에서 점선은 그림 5(b)의 철근콘크리트 패널 시험체의 각 면에 설치된 8개의 변위측정기(LVDT)를 통해 얻어진 평균전단응력-변형률관계를 나타내며, 실선은 해석에 의하여 계산된 전단응력-전단변형률관계를 나타낸다. 시험체 CE2, CE3, CE4의 철근비는 각각 0.0054, 0.0120, 0.0188이며 철근은 양방향에 동일하게 배근되었다. 시험체 CE2는 콘크리트에 균열이 발생함과 거의 동시에 철근이 항복하였다. 그림 8(a)-(c)에서 반복하중을 받는 재료구성법칙을 이용한 해석법은 실제의 전단응력-전단변형률관계를 매우 정확히 예측하고 있음을 알 수

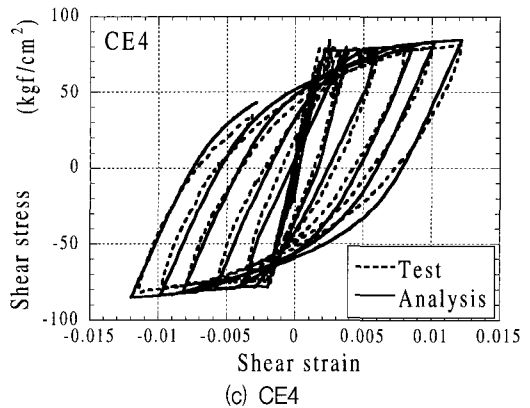
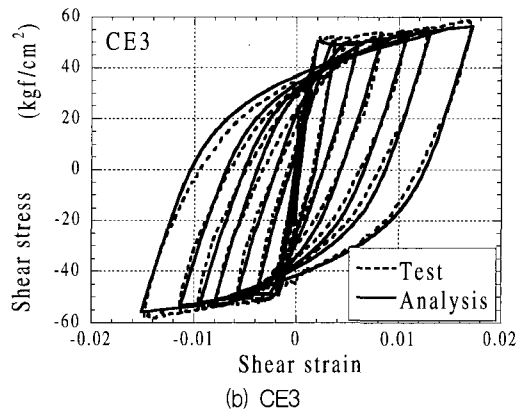
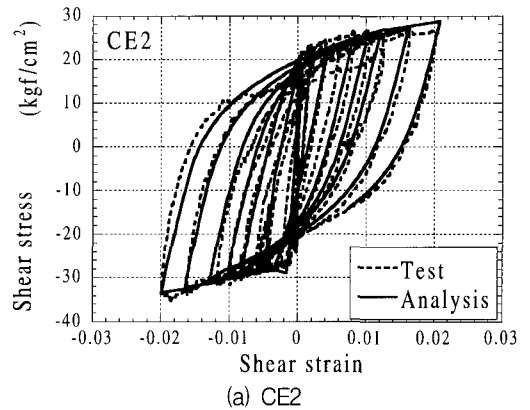


그림 8 전단응력-전단변형률관계의 비교

있다. 바우싱거 효과를 고려한 철근의 응력-변형률곡선을 적용한 해석법은 제하(除荷) 및 재(再)재하 시의 패널의 이력곡선을 매우 정확히 추적하였다. 또한, 해석에서 구해진 최대전단응력은 철근비가 점차 증가하는 CE2, CE3, CE4의 실제 최대전단응력과 거의 일치하였다.

5.2 축방향변형률 예측

실험 및 해석에서 구해진 철근콘크리트 패널의 전단응력-수직 및 수평변형률관계는 그림 9(a)-(c) 및 그림 10(a)-(c)에서 비교되었다. 그림에서 수직 및 수평변형률(t -방향, l -방향)은 철근비가 증가함에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 철근비가 0.0054인 시험체 CE2의 실험에서 얻은 최대 수직 및 수평변형률은 각각 0.035, 0.027이다. 그러나, 철근비가 0.0188인 시험체 CE4의 최대 수직 및 수평변형률은 각각 0.015,

0.014이다. 그림 9(a)-(c) 및 10(a)-(c)에서 반복하중을 받는 재료의 구성법칙을 이용한 해석법은 시험체 CE2의 실제 변형률을 약20% 과대 평가하지만, 시험체 CE3, CE4의 수직 및 수평변형률은 매우 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 시험체 CE2의 경우, 철근이 비교적 빨리 항복하여 가로방향(l -방향)과 세로방향(t -방향)에 동일한 힘이 가력되지 않아, 가로방향과 세로방향을 변형률에 차이가 발생하였다.

6. 결 론

이 연구에서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 패널의 이력거동을 힘의 평형조건, 변형의 적합조건 및 재료의 구성법칙을 이용한 재료메카니즘을 이용하여 예측하였다. 해석에서는 Lee 등이 제안한 반복하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률곡선을 이용하였다. 해석에 의하여 예측된 패널

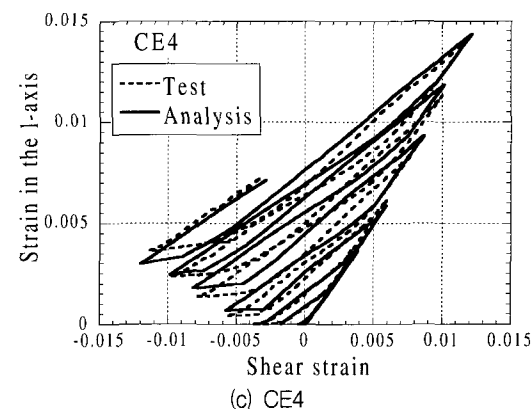
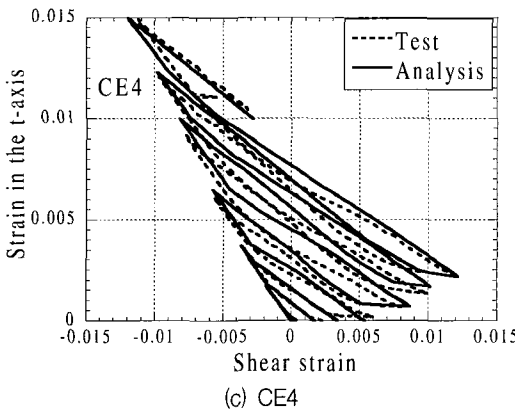
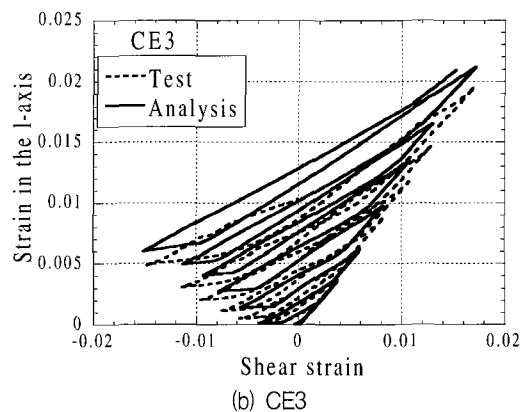
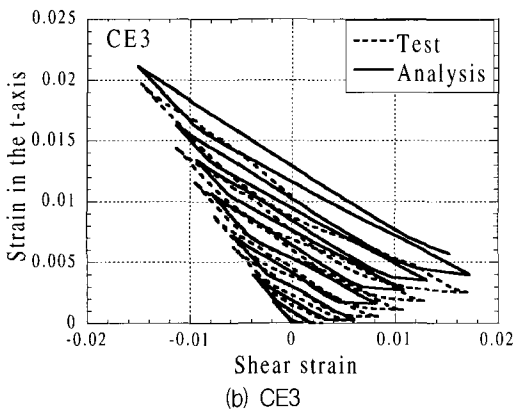
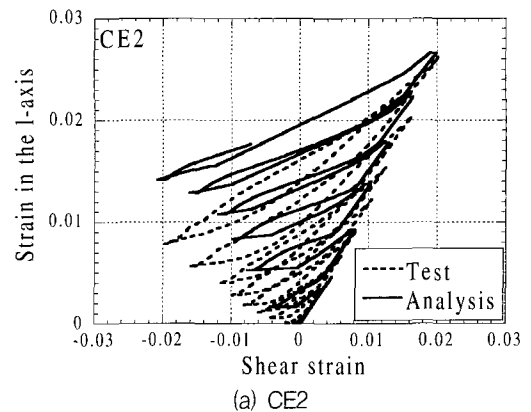
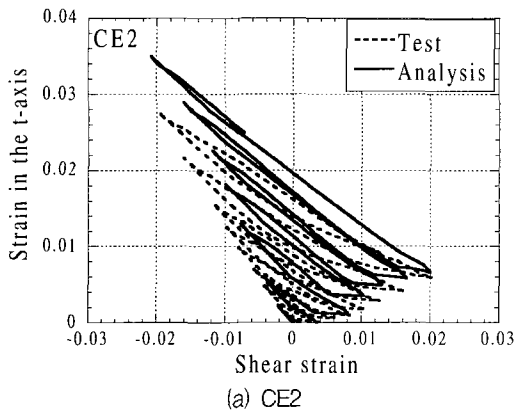


그림 9 전단변형률-수직변형률관계의 비교

그림 10 전단변형률-수평변형률관계의 비교

의 이력거동은 철근비가 다른 3개의 철근콘크리트의 패널시험에 의하여 검증되었다. 해석법은 패널의 이력곡선을 추적하여 철근비가 점차 증가하는 시험체의 최대전단응력을 매우 정확히 예측하였다. 해석에 의하여 예측된 수직 및 수평 변형률은 철근이 비교적 빨리 항복한 시험체 CE2의 실제 변형률을 약 20% 과대 평가하지만, 시험체 CE3, CE4의 수직 및 수평변형률은 매우 정확히 예측하였다.

참 고 문 헌

1. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Structural Journal*, Vol. 83, No. 2, 1986. 3-4, pp. 219-231.
2. Hsu, T. T. C., "Softened truss model theory for shear and torsion," *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 6, 1988. 11-12, pp. 624-635.
3. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "Predicting the response of reinforced concrete beams subjected to shear using modified compression field theory," *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 3, 1988. 5-6, pp. 258-268.
4. Ohmori, N., Takahashi, T., Tsubota, H., Inoue, N., Kurihara, K., and Watanabe, S., "Experimental studies on nonlinear behaviors of reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural institute of Japan, No. 403, 1989, pp. 105-118.
5. Kurihara, K., Ohmori, N., Takahashi, T., Tsubota, H., Inoue, N., and Watanabe, S., "Analytical hysteresis model for reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural institute of Japan, No. 410, 1990, pp. 93-105.
6. Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P., "Reinforced concrete subjected to reversed cyclic shear - Experiments and constitutive model," *American Concrete Institute Structural Journal*, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 135-146.
7. Mansour, M., Lee, J. Y., and Hsu, T. T. C., "Cyclic stress-strain curves of concrete and steel bars in membrane elements," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 12, 2001. 12, pp. 1402-1411.
8. Robinson, J. R. and Demorieux, J. M., "Essais de traction-compression sur models d'ame de poutre en Beton Arme," *IRABA Report*, IRABA, 1968. 6, pp. 44.
9. Belarbi, A. and Hsu, T. T. C., "Constitutive laws of softened concrete in biaxial tension-compression," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 5, 1995, pp. 562-573.
10. 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, 1994. 7-8, pp. 465-474.