

# 반복하중을 받는 콘크리트 막요소의 응력-변형률 관계

## Stress-Strain Relationship of Concrete Membrane Elements Subjected to Reversed Cyclic Loading

이 정 윤 \*  
 Lee, Jung-Yoon

### Abstract

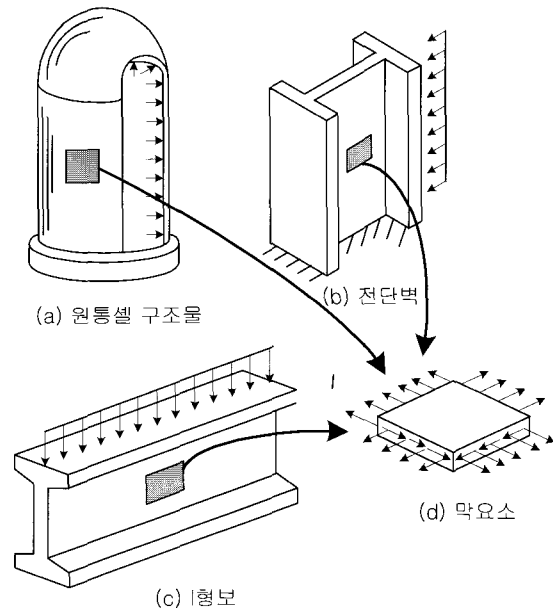
A stress-strain relationship for reinforced concrete membrane elements subjected to reversed cyclic loading is quite different to that of concrete cylinder subjected to uniaxial compression. The compressive strength of cracked concrete membrane elements is reduced by cracking due to tension in the perpendicular direction. Based on the three reinforced concrete panel tests, a softened stress-strain curve of concrete subjected to reversed cyclic loading is proposed. The proposed model consists of seven stages in the compressive zones and six stages in the tensile zones. The proposed model is verified by comparing to the test results.

**keywords :** reinforced concrete membrane elements, reversed cyclic loading, stress-strain relationship of concrete, reinforced concrete panels

### 1. 서 론

철근콘크리트 원통셀, 전단벽, I형보는 그림1과 같이 면내응력을 받는 막요소로 구성되어 있다. 이러한 구조물의 전체거동에 대한 분석은 각 구조물의 독립된 어느 한 막요소의 거동을 정확히 예측함으로써 가능하다. 면내응력을 받는 철근콘크리트 막요소에 대해서는 Collins 등<sup>1)</sup>, Hsu 등<sup>2)</sup>에 의하여 연구되었다. Collins 등은 순수전단을 받는 철근콘크리트 막요소의 전단응력-전단변형률 관계를 수정압축장이론(Modified Compression Field Theory)에 의하여 예측하였고, 이를 철근 및 프리스트레스 콘크리트 보의 전단강도 예측에 적용하였다. Hsu 등은 연화 트러스모델(Softened Truss Model)을 제안하여 철근콘크리트 막요소의 전단거동을 예측하였다. 이러한 막요소의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 그림 2와 같은 재료의 구성법칙이 필요하다. 그림2(a)는 단조하중을 받는 콘크리트의 압축응력-변형률관계

를 나타낸다.

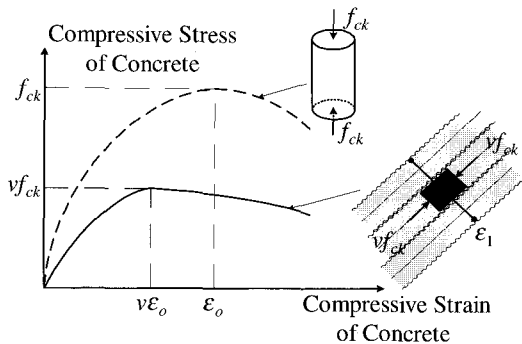


〈그림 1〉 철근콘크리트 구조물의 막요소

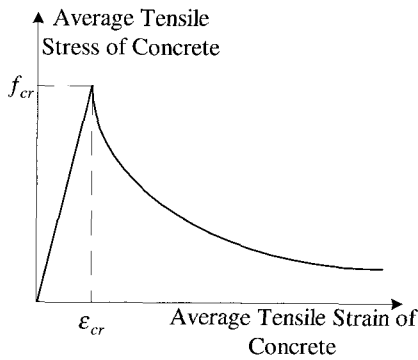
그림에서 점선은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 압축응력-변형률관계를 나타내며, 실선은 균

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 전임강사

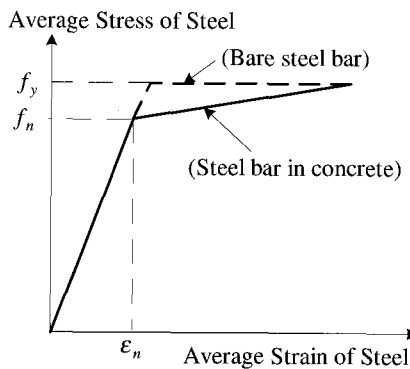
열이 발생한 콘크리트의 응력-변형률관계를 나타낸다. 면내응력을 받아 사인장 균열이 발생한 콘크리트 막요소의 압축강도 및 변형률은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 압축강도  $f_{ck}$  및 변형률  $\epsilon_0$ 과 큰 차이를 나타낸다. 균열이 발생한 콘크리트에 압축력이 작용할 경우 콘크리트의 압축강도 및 변형률은 균열 수직방향의 콘크리트의 변형률  $\epsilon_1$  과 콘크리트 실린더 압축강도  $f_{ck}$  에 영향을 받아 변화하게 되며, 이와 같은 현상을 연화효과(softening effect)에 의한 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화라 한다.



(a) 콘크리트 압축응력-변형률 관계



(b) 콘크리트 인장응력-변형률 관계



(c) 철근 평균 인장응력-변형률 관계

<그림 2> 단조하중을 받는 콘크리트, 철근의 응력-변형률 관계

Robinson 과 Demorieux<sup>3)</sup>는 전단력을 받아 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도  $v f_{ck}$  는 실린더 압축강도  $f_{ck}$  보다 작음을 지적하였다. Collins 등<sup>1)</sup>과 Hsu 등<sup>4)</sup>은 철근콘크리트 패널 실험을 통하여 연화작용에 의한 콘크리트의 압축강도 감소율  $v$ 는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률  $\epsilon_1$  과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 실험에서 균열수직방향의 콘크리트의 변형률이 0.01인 경우 콘크리트의 압축강도는 실린더 압축강도의 40%까지 감소함이 확인되었다. 또한 연화작용에 의하여 균열수직방향의 콘크리트의 변형률이 증가함에 따라 최대응력시의 콘크리트 압축변형률도 감소하게 된다.

그림2(b)는 단조하중을 받는 콘크리트의 인장응력-변형률관계를 나타낸다. 콘크리트의 인장응력은 균열발생 이전까지는 인장변형률과 선형적인 관계를 이루지만, 균열발생이후 급격히 감소한다. Collins 등<sup>1)</sup>, Hsu 등<sup>4)</sup>은 콘크리트의 균열발생강도  $f_{cr}$ 을 콘크리트실린더 압축강도  $f_{ck}$ 의 제곱근의 함수로 예측하였다.

그림2(c)는 단조하중을 받는 철근의 평균인장응력-변형률관계를 나타낸다. 그림의 점선은 콘크리트에 묻혀 있지 않는 보통철근(bare steel)의 응력-변형률관계를 나타내며, 그림의 실선은 콘크리트에 묻혀 있는 철근의 평균응력-변형률관계를 나타낸다. 그림에서 콘크리트 안에 배근되어 인장력을 받는 철근은, 철근과 콘크리트의 부착작용 (tension stiffening effect)에 의해 보통철근과 다른 응력-변형률 관계를 나타냄을 알 수 있다. 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 적다. Belarbi 등<sup>5)</sup>의 실험결과에 의하면,  $f_n$  값과  $f_y$  값의 차이는 철근비  $\rho$ , 콘크리트 균열강도  $f_{cr}$ , 주응력방향과 철근방향과의 각도에 좌우된다.

연화효과가 미치는 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화에 대한 연구는 근년 비교적 활발히 진행되어, 단조하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 압축강도 평가식이 Collins 등<sup>1)</sup>과 Hsu 등<sup>4)</sup>에 의하여 제안되었다. 그러나 지진력을 받는 철근 콘크

리트 구조물을 합리적이고 안전하게 설계하기 위해서는 지진하중을 받는 구조물의 거동 및 구성재료의 응력-변형률 관계를 정확히 알지 않으면 안됨에도 불구하고 반복하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 응력-변형률관계에 대한 연구는 극히 드문 실정이다. 따라서 이 연구에서는 철근콘크리트 패널 실험을 통하여 반복하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 응력-변형률관계의 예측 모델을 제안함을 목적으로 하고 있다.

## 2. 반복하중을 받는 철근콘크리트 패널의 실험

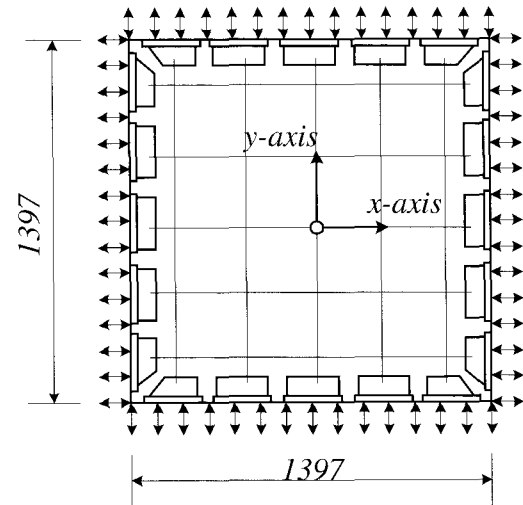
### 2.1 시험체 계획

반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위해, 철근 콘크리트 패널 실험이 휴스턴 대학의 만능 패널 실험기에 의해 이루어졌다. 시험체의 크기는 그림 3(a)와 같이 1397 × 1397 × 178 mm로 제작되었고, 철근은 가로방향(x-방향)과 세로방향(y-방향)에 2열씩 서로 직교하도록 배근되었으며 양방향의 철근비는 0.0114로 동일하게 하였다. 시험체의 변수로써 균열수직방향의 변형률이 콘크리트의 응력과 변형률에 미치는 연화작용을 측정하기 위하여 각 시험체의 세로방향(y-방향)의 변형률  $\epsilon_y$ 를 다르게 하였다. 시험체 CVE3-1, CVE3-2, CVE3-3의  $\epsilon_y$ 는 각각 0.0044, 0.03, 0.012이며, 세 시험체의 콘크리트의 평균 압축강도는 449kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 시험체의 재료 특성 및  $\epsilon_y$ 의 값은 표 1에 정리되어 있다.

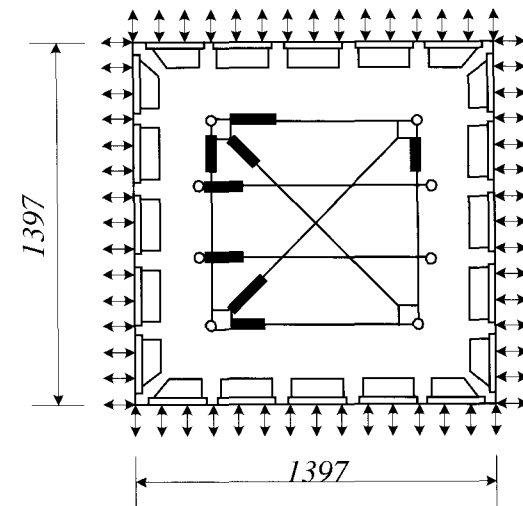
### 2.2 실험장치 및 하중이력

실험이 행해진 만능 패널 실험기는 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 전달한다. 시험체는 철근이 항복하기 전까지는 하중에 의해 제어되었고 철근 항복 후에는 변형

률에 의해 제어되었다.



(a) 시험체 크기 및 철근배근



(b) LVDT 측정위치

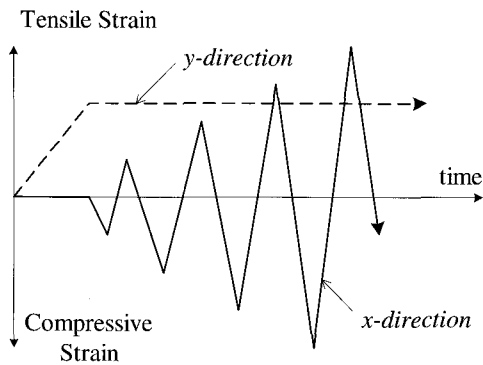
〈그림 3〉 철근콘크리트 패널 시험체

〈표 1〉 시험체 재료특성 및 y축방향의 변형률

Panel	Concrete	Steel				Transverse tensile strain $\epsilon_y$
	$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	x -direction		y -direction		
		$\rho_x$	$f_{xy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\rho_y$	$f_{yy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
CVE3-1	490					0.0044
CVE3-2	418	0.0114	4335	0.0114	4335	0.0120
CVE3-3	439					0.0300

$f_{ck}$  : 콘크리트의 압축강도,  $\rho_x$  : x 방향 철근비,  $f_{xy}$  : x 방향 철근 항복강도,  $\rho_y$  : y 방향 철근비,  $f_{yy}$  : y 방향 철근 항복강도

시험체의 변위는 그림 3(b)와 같이 각 면에 설치된 8개의 변위측정기(LVDT)를 통해 수직, 수평 및 전단변형이 측정되었다. 이 실험에서는, 균열수직방향의 변형률이 콘크리트의 응력과 변형률에 미치는 연화효과를 측정하기 위하여 그림4와 같이 세로방향( $y$ -방향)의 변형률을 일정하게 유지한 채 가로방향( $x$ -방향)에 반복하중이 가해졌다.

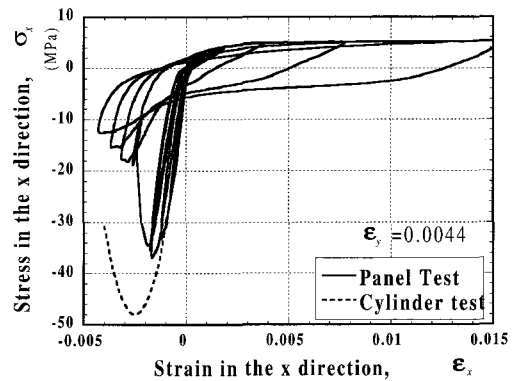


〈그림 4〉 가력 프로그램

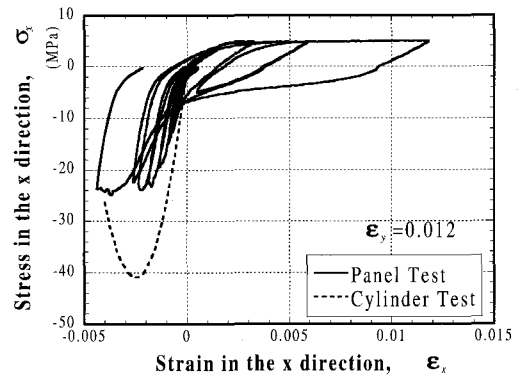
### 2.3 실험결과

시험체의 균열은 균열직각방향의 변형률이 증가함에 따라 증가하였다. 즉,  $y$ -방향의 변형률이 0.03인 시험체 CVE3-3의  $x$ -방향의 균열의 폭은  $y$ -방향의 변형률이 0.0044인 시험체 CVE3-1의  $x$ -방향의 균열의 폭보다 컸다. 균열이 발생한 철근콘크리트 패널에서의 콘크리트 압축강도는 연화효과에 의하여 콘크리트 실린더 압축강도의 34%에서 66%까지 감소하였다. 재(再)가력시의 콘크리트의 압축강성은 압축변형률이 증가함에 따라 감소하였으며, 제하(除荷)시의 콘크리트의 강성은 두 단계로 구분되었다. 가력방향이 전환될 때의 응력의 20%이하에서는 콘크리트의 강성은 현저하게 감소하였다.

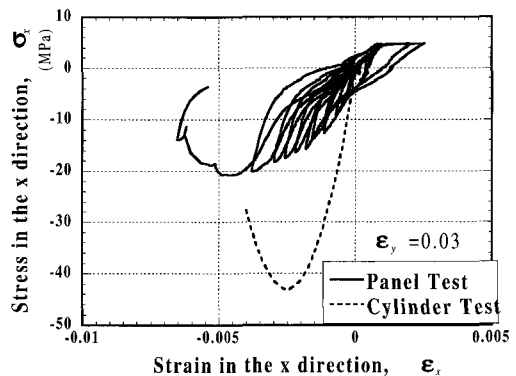
그림5(a)에서 5(c)까지는 실험에서 얻어진  $x$ -방향의 응력 - 변형률 관계를 나타내고 있다. 그림5(a), (b), (c)의 비교에서 패널의 압축응력은 균열직각방향의 변형률인  $y$ -방향의 변형률이 증가함에 따라 현저하게 감소함을 알 수 있다.  $y$ -방향의 변형률이 0.03인 시험체 CVE3-3의 압축응력은  $y$ -방향의 변형률이 0.0044인 시험체 CVE3-1의 압축응력의 약 57%에 지나지 않는다.



(a) CVE3-1



(b) CVE3-2



(c) CVE3-3

〈그림 5〉  $x$ -방향의 패널 응력-변형률 곡선

### 3. 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 모델

균열이 발생한 콘크리트에 압축력이 작용할 경우 콘크리트의 압축강도 및 변형률은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 압축강도 및 변형률과 큰 차이를 나타내며, 이와 같은 현상을 연화효과에 의한 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화라 한다.

Robinson 과 Demorieux<sup>3)</sup>, Collins 등<sup>1)</sup>, Hsu 등<sup>4)</sup>은 실험을 통하여 연화효과는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률과 밀접한 관계가 있음을 지적하였다. 이 연구에서는 균열수직방향의 변형률이 다른 철근 콘크리트 패널실험에 근거하여 그림6과 같은 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 모델은 C1에서 C7까지의 7단계의 압축응력-변형률곡선과 T1에서 T6까지의 6단계의 인장응력-변형률곡선으로 구성되어 있다.

### 3.1 포락선에서의 응력-변형률 곡선 (C1, C2단계, T1, T2단계)

그림 5에서 보여지는 것과 같이 연화효과에 의하여 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률이 증가함에 따라 감소한다. 균열수직방향의 변형률이 0.03인 시험체 CVE3-3의 압축강도는 실린더 압축강도의 34%에 지나지 않았다.

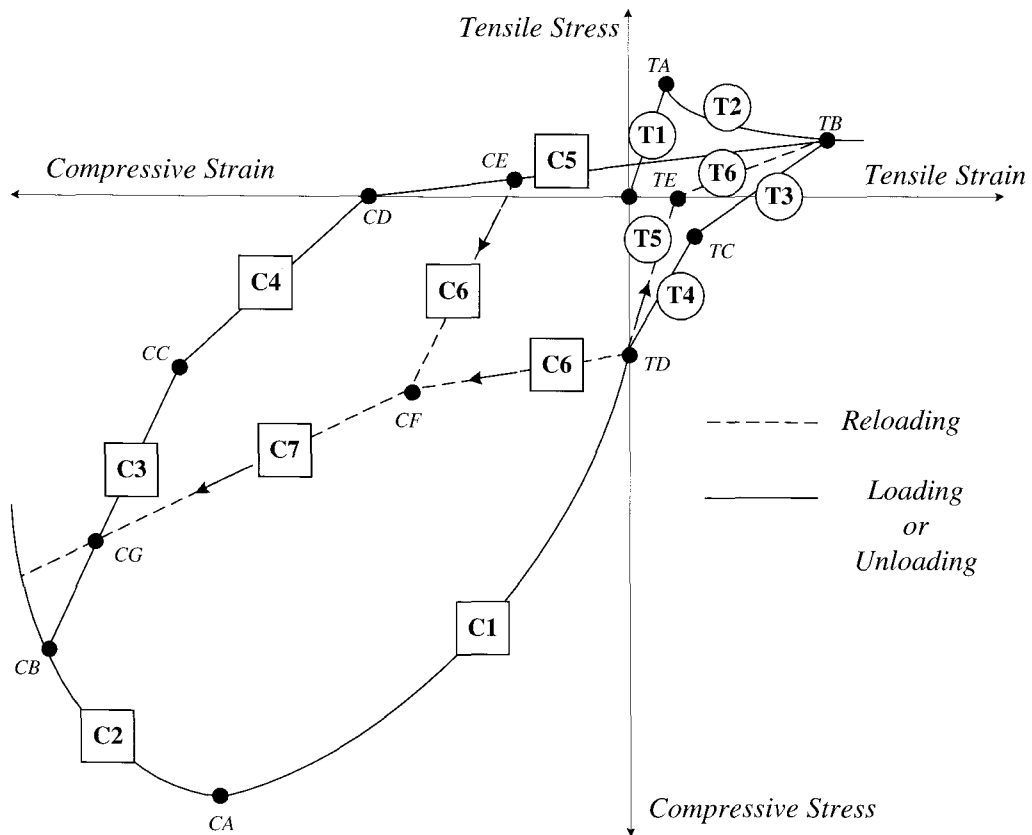
제안된 모델에서의 포락선은 압축에 대하여 그림 6의 C1과 C2단계, 인장에 대하여 T1과 T2가 해당된다. 이 논문에서는 모델의 포락선의 응력-변형률 관계를 단조하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 모델인 Hsu등<sup>4,5)</sup>의 모델을 근거로 하여 다음과 같은 식(1)에서 (4)를 채택하였다. 식(1)과 (2)의 압축응력과 변형률은 유효계수  $\nu_\sigma$  와  $\nu_\epsilon$  을 함수로 하여 균열수직방향의 변형률이 미치는 연화효과를 고려하고 있다.

$$\epsilon_o \leq \epsilon_c < 0 \quad (C1단계)$$

$$\sigma_c = (\nu_\sigma f_{ck} - f_{ctk}) \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right)^2 \right] + f_{ctk} \quad (1)$$

$$\epsilon_c < \epsilon_o \quad (C2단계)$$

$$\sigma_c = \nu_\sigma f_{ck} \left[ 1 - \frac{\epsilon_c / \epsilon_o - 1}{4 / \nu_\epsilon - 1} \right] \quad (2)$$



〈그림 6〉 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 곡선

$$0 \leq \epsilon_c \leq 0.00008 \text{ (T1단계)}$$

$$\sigma_c = E_{cr} \epsilon_c \quad (3)$$

$$\epsilon_c > 0.00008 \text{ (T2단계)}$$

$$\sigma_c = f_{cr} \left( \frac{0.00008}{\epsilon_c} \right)^{0.4} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_c$  는 콘크리트의 평균응력,  $\epsilon_c$  는 콘크리트의 평균변형률,  $E_{cr}$  는 콘크리트의 탄성계수,  $f_{cr}$  는 콘크리트의 균열 발생 강도,  $f_{ck}$ ,  $\epsilon_o$  는 콘크리트의 실린더 압축 강도 및 변형률,  $f_{ct}$  는 T4단계에서 C1단계로 변환할 때의 콘크리트 응력(그림6의 TD점),  $\nu_o, \nu_\epsilon$  는 연화효과에 의한 콘크리트의 유효 압축 응력 및 변형률 계수이다. 논문에서는 Hsu 등4)에 의하여 제안된 식(5)의 유효 압축 응력 및 변형률 계수를 채택하였다.

$$\nu_o = \nu_\epsilon = \frac{5.9}{\sqrt{f_c(MPa)}} \frac{1}{\sqrt{(1+400 \epsilon_1)}} \quad (5)$$

여기서  $\epsilon_1$  는 콘크리트의 주인장 변형률이다.

### 3.2 제하(除荷) 및 재(再)가력시의 응력-변형률 곡선 (C3에서 C7단계, T3에서 T6단계)

철근콘크리트 패널이 반복하중을 받을 경우 콘크리트에 발생한 균열은 하중방향에 따라 개폐를 반복하게 되며 이에 따라 콘크리트의 강성은 변화하게 된다. 균열의 폭이 최대로 열려져 있을 경우 콘크리

트의 강성은 최소가 되며 균열이 완전히 닫혀질 때 콘크리트의 강성은 최대가 된다. 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 각각 80%와 20%와 같다. 하중이 인장방향으로 계속 증가하여 변형률이 그림6의 TB를 초과할 경우 곡선은 식(4)의 포락선의 인장응력-변형률 곡선을 쫓게 된다. 압축방향으로 하중이 다시 가력될 경우 응력-변형률관계는 제하(除荷)시 응력의 20%가 되는 응력점(그림6의 CF점)을 경계로 하여 C6과 C7의 2개의 직선으로 표현된다. 또한 C7단계는 제하(除荷)시 응력과 변형률의 85% 및 98%가 되는 그림 6의 CG 점을 통과한다. 제안된 모델에서는 제하(除荷) 및 재(再)가력시의 응력-변형률관계인 C3에서 C7단계, T3에서 T6단계까지를 식(6)에서 구할 수 있게 하였다.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} + E_{cc}(\epsilon_{ci} - \epsilon_c) \quad (6)$$

여기서  $\sigma_{ci}$ 와  $\epsilon_{ci}$ 는 각각 제하(除荷)시의 콘크리트의 응력 및 변형률,  $E_{cc}$ 는 콘크리트의 접선강성을 나타내며  $E_{cc}$ 는 식(7)에서 구할 수 있다.

$$E_{cc} = \frac{\sigma_{ci} + \sigma_{ci+1}}{\epsilon_{ci} - \epsilon_{ci+1}} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_{ci+1}$ 와  $\epsilon_{ci+1}$ 은 각 단계 끝에서의 콘크

〈표 2〉 각 단계의 시작 및 끝점의 응력과 변형률

Stage	Points	$\epsilon_{ci}$	$\sigma_{ci}$	Points	$\epsilon_{ci+1}$	$\sigma_{ci+1}$
Stage C3	CB	$\epsilon_{cc2}$	$f_{cc2}$	CC	$\epsilon_{cc2} - \epsilon_{cc2}'$	$0.2f_{cc2}$
Stage C4	CC	$\epsilon_{cc2} - \epsilon_{cc2}'$	$0.2f_{cc2}$	CD	$\epsilon_{cc2} - 2\epsilon_{cc2}'$	0.0
Stage C5	CD	$\epsilon_{cc2} - 2\epsilon_{cc2}'$	0.0	TB	$\epsilon_{cc2}$	$f_{cc2}$
Stage C6	CE	$\epsilon_{cc6}$	$f_{cc6}$	CF	$\epsilon_{cc1}$	$0.2f_{cc2}$
Stage C7	CF	$\epsilon_{cc1}$	$0.2f_{cc2}$	CG	$0.98\epsilon_{cc2}$	$0.85f_{cc2}$
Stage T3	TB	$\epsilon_{cc2}$	$f_{cc2}$	TC	$\epsilon_{cc2}/3$	$-0.2f_{cr}$
Stage T4	TC	$\epsilon_{cc2}/3$	$-0.2f_{cr}$	TD	0.0	$f_{ct}$
Stage T5	TD	0.0	$f_{ct}$	TE	$\epsilon_{cc2}/6$	0.0

리트의 응력 및 변형률을 나타내며  $\sigma_{ci}, \epsilon_{ci}, \sigma_{ci+1}, \epsilon_{ci+1}$  는 표2와 같이 정리할 수 있다.

표2에서  $\epsilon_{c2}$  와  $f_{c2}$  는 C2단계에서 C3단계의 제하(除荷)시 응력 및 변형률,  $\epsilon_{c6}$  과  $f_{c6}$  은 C5단계에서 C6단계의 재(再)가력시의 응력 및 변형률,  $\epsilon_{c2}$  와  $f_{c2}$  는 T2단계에서 T3단계의 제하(除荷)시 응력 및 변형률을 나타낸다. 또한,  $f_{cM} = -f_{cr} + 0.8f_{c2}$ ,  $\epsilon_{c2}' = f_{c2}/E_c, E_c = 2f_c'/\epsilon_o, \epsilon_{c2} = \frac{2(\epsilon_{c2} - 1.5\epsilon_{c2}') + \epsilon_{c6}}{3}$  이다.

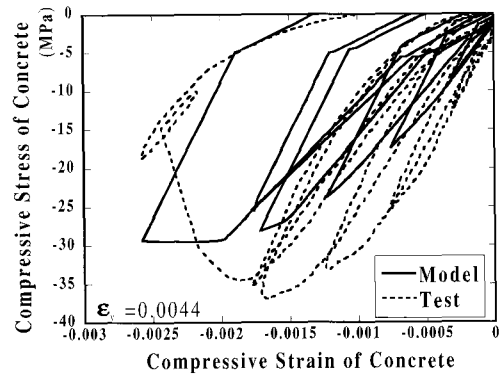
#### 4. 제안된 모델과 실험결과의 비교

3장에서 설명된 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률모델은 그림7에서 보여지는 것과 같이 패널 실험결과와 비교되었다. 그림7의 실험결과는 시험체에 가력된 전체 힘에서 철근 부담분을 제거하여 얻은 결과이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 제안된 모델은 연화효과에 의하여 균열직각방향의 변형률이 증가함에 따라 감소하는 콘크리트의 압축강도를 약15%의 차이에서 예측하였다. 또한 7단계로 구분된 제안된 압축응력-변형률 모델은 제하(除荷) 및 재(再)가력시의 실제의 응력-변형률관계를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

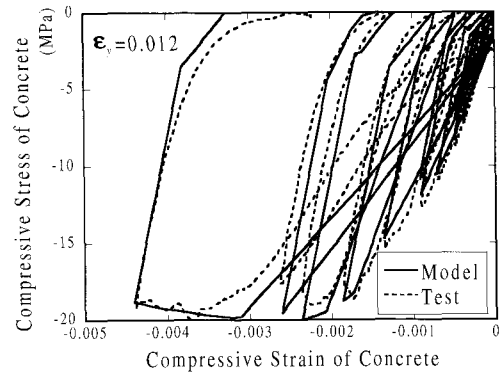
#### 5. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트 패널 실험을 통하여 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률관계의 예측 모델을 제안하였다. 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

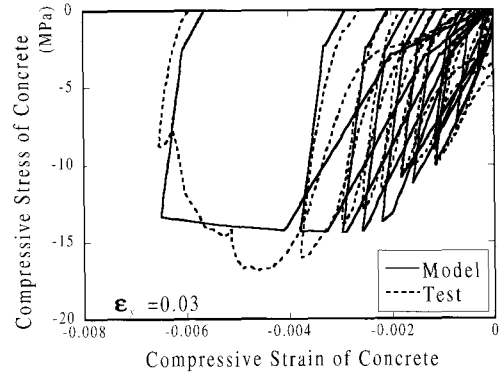
- 1) 균열수직방향의 변형률이 다른 철근콘크리트 패널실험에 근거하여 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 모델은 7단계의 압축응력-변형률곡선과 6단계의 인장 응력-변형률곡선으로 구성되어 있다.
- 2) 제안된 모델은 연화효과에 의하여 균열직각방향의 변형률이 증가함에 따라 감소하는 콘크리트의 압축강도를 약15%의 차이에서 예측하였다.



(a) CVE3-1



(b) CVE3-2



(c) CVE3-3

〈그림 7〉 콘크리트 압축응력-변형률관계에 대한 제안 모델과 실험결과의 비교

- 3) 7단계로 구분된 제안된 압축응력-변형률 모델은 제하(除荷) 및 재(再)가력시의 실제의 응력-변형률관계를 잘 예측하였다.
- 4) 균열이 발생한 철근콘크리트 패널의 콘크리트 압축강도는 연화효과에 의하여 균열직각방향의 변형률이 증가함에 따라 콘크리트 실린더 압축강도의 34%에서 66%까지 감소하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) Vecchio F. and Collins M.P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI Structural Journal, V. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp.219-231.
- 2) Hsu, T. T. C., "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion", ACI Structural Journal, Vol.85, No.6, November-December 1988, pp.624~635.
- 3) Robinson, J. R. and Demorieux, J.M., "Essais de traction-compression sur models d'ame de poutre en Beton Arme" IRABA Report, IRABA, June 1968, pp. 44
- 4) Belarbi, A. and Hsu, T.T.C., "Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-compression," ACI Structural Journal, V. 92, No. 5, 1995, pp. 562-573.
- 5) Belarbi, A. and Hsu, T.T.C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete", ACI Structural Journal, V.91, No.4, July-Aug 1994, pp.465-474