

반복하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 응력-변형률곡선

Softened Stress-Strain Curve of Concrete Subjected to Reversed Cyclic Loading

이 정 윤*

Mohamed Mansour**

Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

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.

1. 서론

전단력을 받아 사인장 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도 및 변형률은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 압축강도 및 변형률과 큰 차이를 나타낸다. 균열이 발생한 콘크리트에 압축력이 작용할 경우 콘크리트의 압축강도 및 변형률은 균열수직방향의 콘크리트의 변형률과 콘크리트 실린더 압축강도에 영향을 받아 변화하게 되며, 이와 같은 현상을 연화효과(softening effect)에 의한 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화라 한다. Robinson 과 Demorieux¹⁾는 전단력을 받아 균열이 발생한 콘크리트의 압축강도는 실린더 압축강도보다 작음을 지적하였다. Collins 등²⁾과 Hsu 등³⁾은 철근콘크리트 패널 실험을 통하여 연화작용에 의한 콘크리트의 압축강도 감소는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률과 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.

연화효과가 미치는 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화에 대한 연구는近年 비교적 활발히 진행되어, 단조하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 압축강도 평가식이 Collins 등²⁾과 Hsu 등³⁾에 의하여 제안되었다. 그러나 지진력을 받는 철근 콘크리트 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.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 전임강사,

** University of Houston, Department of Civil and Environmental Engineering, Research Assistant

2. 실험 계획 및 실험

2.1 시험체 계획

반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위해, 철근 콘크리트 패널 실험이 휴스턴대학의 만능 패널 실험기에 의해 이루어졌다. 시험체의 크기는 $1397 \times 1397 \times 178$ 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 ϵ_y 를 다르게 하였다. 시험체 CVE3-1, CVE3-2, CVE3-3의 ϵ_y 는 각각 0.0044, 0.03, 0.012이며, 세 시험체의 콘크리트의 평균 압축강도는 449kgf/cm^2 이었다. 시험체의 재료 특성 및 ϵ_y 의 값은 표1에 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 변형률에 의해 제어되었다. 시험체의 변위는 각 면에 설치된 8개의 변위측정기(LVDT)를 통해 수직, 수평 및 전단변형이 측정되었다. 이 실험에서는, 균열수직방향의 변형률이 콘크리트의 응력과 변형률에 미치는 연화효과를 측정하기 위하여 그림1과 같이 세로방향(y -방향)의 변형률을 일정하게 유지한 채 가로방향(x -방향)에 반복하중이 가해졌다.

표1. 시험체의 재료특성 및 y 축방향의 변형률

Panel	Concrete f'_c (kgf/cm^2)	Steel				Transverse tensile strain ϵ_y
		x -direction		y -direction		
		ρ_x	f_{xy} (kgf/cm^2)	ρ_y	f_{yy} (kgf/cm^2)	
CVE3-1	490	0.0114	4335	0.0114	4335	0.0044
CVE3-2	418					0.0300
CVE3-3	439					0.0120

f'_c : 원주공시체 콘크리트의 압축강도, ρ_x : x 방향 철근비, f_{xy} : x 방향 철근 항복강도, ρ_y : y 방향 철근비, f_{yy} : y 방향 철근 항복강도

Tensile Strain

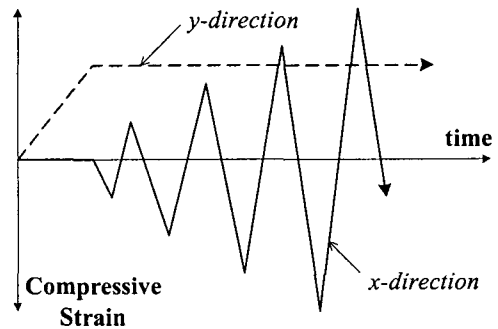


그림 1. 가력프로그램

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 구분되

있다. 가력방향이 전환될 때의 응력의 20%이하에서는 콘크리트의 강성은 현저하게 감소하였다. 그림 2(a)에서 2(c)까지는 실험에서 얻어진 x-방향의 응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 그림2(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.

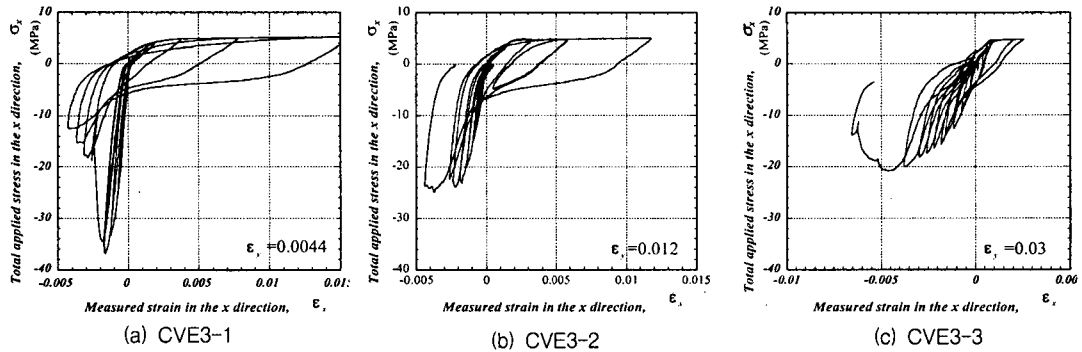


그림 2. x방향의 응력-변형률 곡선

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, Collins 등, Hsu 등은 실험을 통하여 연화효과는 균열수직방향의 콘크리트의 변형률과 밀접한 관계가 있음을 지적하였다. 이 연구에서는 균열수직방향의 변형률이 다른 철근콘크리트 패널실험에 근거하여 그림3과 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)

그림2에서 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 그림3의 C1과 C2단계, 인장에 대하여 T1과 T2가 해당된다. 이 논문에서는 모델의 포락선의 응력-변형률 관계를 단조하중을 받는 콘크리트의 연화효과를 고려한 모델인 Hsu등의 모델을 근거로 하여 다음과 같은 식(1)에서 (4)를 채택하였다. 식(1)과 (2)의 압축응력과 변형률은 유효계수 ν_σ 와 ν_ϵ 를 함수로하여 균열수직방향의 변형률이 미치는 연화효과를 고려하고 있다.

$$\sigma_c = (\nu_\sigma f'_c - f_{cM}) \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\nu_\epsilon \epsilon_o} \right)^2 \right] + f_{cM} \quad \epsilon_o \leq \epsilon_c < 0 \quad (C1단계) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \nu_\sigma f'_c \left[1 - \frac{\epsilon_c / \epsilon_o - 1}{4 / \nu_\epsilon - 1} \right] \quad \epsilon_c < \epsilon_o \quad (\text{C2단계}) \quad (2)$$

$$\sigma_c = E_{cr} \epsilon_c \quad 0 \leq \epsilon_c \leq 0.00008 \quad (\text{T1단계}) \quad (3)$$

$$\sigma_c = f_{cr} \left(\frac{0.00008}{\epsilon_c} \right)^{0.4} \quad \epsilon_c > 0.00008 \quad (\text{T2단계}) \quad (4)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트의 평균응력, ϵ_c 는 콘크리트의 평균변형률, E_{cr} 는 콘크리트의 탄성계수, f_{cr} 는 콘크리트의 균열 발생 강도, f'_c , ϵ_o 는 콘크리트의 실린더 압축 강도 및 변형률, $f_{c\#}$ 는 T4단계에서 C1단계로 변환할 때의 콘크리트 응력(그림3의 TD점), ν_σ, ν_ϵ 는 연화효과에 의한 콘크리트의 유효 압축 응력 및 변형률 계수이다. 논문에서는 Hsu등에 의하여 제안된 식(5)의 유효 압축 응력 및 변형률 계수를 채택하였다.

$$\nu_\sigma = \nu_\epsilon = \frac{5.9}{\sqrt{f'_c(\text{MPa})}} \frac{1}{\sqrt{(1+400 \epsilon_1)}} \quad (5)$$

여기서 ϵ_1 는 콘크리트의 주인장 변형률이다.

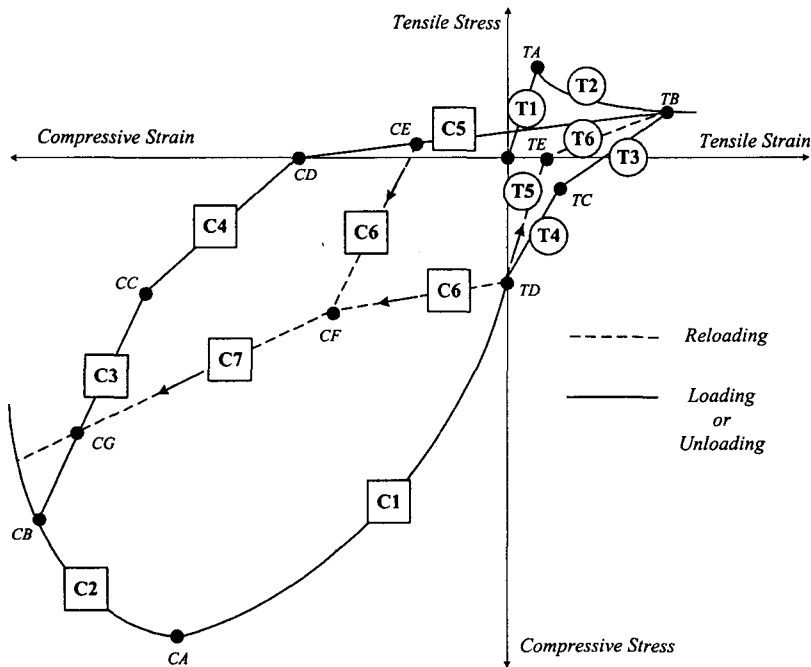


그림 3. 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 곡선

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 콘크

리트의 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 그림3의 TB를 초과할 경우 곡선은 식(4)의 포락선의 인장응력-변형률 곡선을 쫓게 된다. 압축방향으로 하중이 다시 가력 될 경우 응력-변형률관계는 제하(除荷)시 응력의 20%가 되는 응력점(그림3의 CF점)을 경계로 하여 C6과 C7의 2개의 직선으로 표현된다. 또한 C7단계는 제하(除荷)시 응력과 변형률의 85% 및 98%가 되는 그림 10의 CG점을 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 σ_{ci} 와 ϵ_{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 σ_{ci+1} 와 ϵ_{ci+1} 은 각 단계 끝에서의 콘크리트의 응력 및 변형률을 나타내며 σ_{ci} , ϵ_{ci} , σ_{ci+1} , ϵ_{ci+1} 는 표2와 같이 정리할 수 있다.

표2. 각 단계의 시작 및 끝점의 응력과 변형률

Stage	Points	ϵ_{ci}	σ_{ci}	Points	ϵ_{ci+1}	σ_{ci+1}
Stage C3	CB	ϵ_{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	ϵ_{cc2}	f_{cc2}
Stage C6	CE	ϵ_{cc6}	f_{cc6}	CF	ϵ_{cc1}	$0.2f_{cc2}$
Stage C7	CF	ϵ_{cc1}	$0.2f_{cc2}$	CG	$0.98\epsilon_{cc2}$	$0.85f_{cc2}$
Stage T3	TB	ϵ_{cc2}	f_{cc2}	TC	$\epsilon_{cc2}/3$	$-0.2f_{cc2}$
Stage T4	TC	$\epsilon_{cc2}/3$	$-0.2f_{cc2}$	TD	0.0	f_{cc4}
Stage T5	TD	0.0	f_{cc4}	TE	$\epsilon_{cc2}/6$	0.0

표2에서 ϵ_{cc2} 와 f_{cc2} 는 C2단계에서 C3단계의 제하(除荷)시 응력 및 변형률, ϵ_{cc6} 과 f_{cc6} 은 C5단계에서 C6단계의 재(再)가력시의 응력 및 변형률, ϵ_{cc2} 와 f_{cc2} 는 T2단계에서 T3단계의 제하(除荷)시 응력 및 변형률, $f_{cc4} = -f_{cr} + 0.8f_{cc2}$, $\epsilon_{cc2}' = f_{cc2}/E_c$, $E_c = 2f_c'/\epsilon_o$, $\epsilon_{cc1} = \frac{2(\epsilon_{cc2} - 1.5\epsilon_{cc2}') + \epsilon_{cc6}}{3}$ 이다.

4. 제안모델과 실험결과의 비교

3장에서 설명된 연화효과가 고려된 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률모델은 그림4에서 보여지는 것과 같이 패널 실험결과와 비교되었다. 그림4의 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.

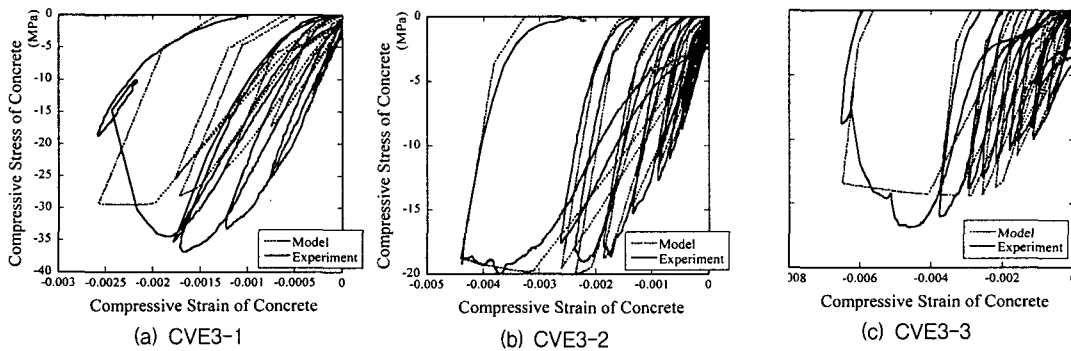


그림4. 압축응력-변형률관계에 대한 제안모델과 실험결과의 비교

5. 결론

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 인장응력-변형률곡선으로 구성되어 있다.
- 2) 제안된 모델은 연화효과에 의하여 균열직각방향의 변형률이 증가함에 따라 감소하는 콘크리트의 압축강도를 약15%의 차이에서 예측하였다.
- 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.

참고문헌

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.