

효율적인 대각보강 콘크리트 연결보의 이력거동 예측

Efficient Simulation of Hysteretic Behavior of Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beams

고혜영¹⁾ · 한상환^{1)*} · 이창석¹⁾

Koh, Hyeyoung¹⁾ · Han, Sang Whan^{1)*} · Lee, Chang Seok¹⁾

¹⁾한양대학교 건축공학과

¹⁾Department of Architectural Engineering, Hanyang University

/ A B S T R A C T /

Diagonally reinforced concrete coupling beams (DRCB) play an important role in coupled shear wall systems since these elements dissipate most of seismic input energy under earthquake loading. For reliable seismic performance evaluation using nonlinear response history analysis, it is important to use an accurate analytical model for DRCBs. In this study, the Pinching4 model is used as a base model to simulate the cyclic behavior of DRCBs. For simulating the cyclic behavior of DRCBs using the Pinching4 model, the analytical parameters for backbone curve, pinching and cyclic deterioration in strength and stiffness should be computed. To determine the proper values of the constituent analytical parameters efficiently and accurately, this study proposes the empirical equations for the analytical parameters using regression analyses. It is shown that the hysteretic behavior of coupling beams can be simulated efficiently and accurately using the proposed numerical model with the proposed empirical equations of model parameters.

Key words: Diagonally reinforced concrete coupling beam, Numerical parameter, Regression, Shear wall, Empirical equation

1. 서론

병렬전단벽시스템(Coupled shear wall system)에서 연결보는 지진이 나 바람과 같은 횡하중 발생 시 큰 전단변형이 발생하게 된다. 이 때 연결보의 취성 파괴를 방지한다면 시스템이 받는 대부분의 지진에너지를 연결보가 소산시킬 수 있다. 따라서 연결보의 적절한 철근 배근 상세가 요구되며, 이에 Paulay and Binney [1]은 대각보강 콘크리트 연결보(Diagonally reinforced concrete coupling beam, DRCB)를 최초로 제안하였다. 이후 대각보강 연결보는 일반 배근상세를 갖는 연결보에 비하여 우수한 변형능력과 에너지소산능력을 보유하였음이 입증되었다 [2-4].

이러한 대각보강 콘크리트 연결보의 내진거동을 평가하고 정확하게 예측하기 위해서 실험적 또는 해석적 연구가 끊임없이 수행되고 있다. 최근까지 진행된 대각보강 연결보의 해석모델에 관한 연구는 다음과 같다.

Naish et al. [5]은 집중소성형지 기반 해석모델을 Perform 3D 상에서

제안하였다. 보의 단부 또는 중앙에 힌지를 설치하여 연결보의 비선형 이력 거동을 예측하였다. 형상비 2 이상 4 이하의 범위를 가지는 대각보강 콘크리트 연결보 7개의 실험결과를 바탕으로 해석모델을 검증하였다.

Barbachyn et al. [6]은 섬유단면을 이용한 스트럿-타이 기반 해석모델을 제안하였다. 연결보 내의 하중 저항 요소(load-resisting components)의 거동을 개별적으로 해석할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 모델 특성상 부재의 파괴 이후 거동을 예측하지 못하였다.

Hindi and Hassan [7]은 Paulay and Binney [1]의 대각철근이 연결보 내의 모든 압축력과 인장력에 대하여 저항한다는 가정이 연결보의 강도를 보수적으로 평가한다고 판단하였다. 이를 보완하여 압축력에 대해 저항하는 스트럿에 대각철근과 더불어 콘크리트 코어의 영향을 함께 고려한 해석 모델을 제안하였다. 형상비 1.0 이상 2.8 이하의 실험체 13개의 실험결과를 바탕으로 연결보의 단조뼈대곡선을 예측하였다.

위 선행연구들은 공통적으로 해석모델을 검증하는 데에 사용된 대각보강 연결보 실험체 개수가 10개 내외로 한정적이었다. 또한 실험데이터에 대하여 캘리브레이션(calibration)만 수행되었을 뿐, 경험식이 제안되지 않아 임의의 대각보강 연결보 부재에 대하여 해석모델을 구성하기 어렵다는 문제점이 존재하였다.

본 연구는 임의의 대각보강 콘크리트 연결보의 반복이력거동을 예측할

*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swan82@gmail.com

(Received November 6, 2017; Revised February 5, 2018; Accepted February 14, 2018)

수 있는 해석적 연구를 진행하고자 한다. 이력거동 예측을 위하여 선행연구로부터 실험체 21개를 수집하였다. Koh et al. [9]에서는 OpenSees [10] 프로그램을 사용하여 Pinching4 모델 [11]의 해석 매개변수를 결정하는 방법을 제안하였다. 따라서 본 연구는 Koh et al. [9]에서 제안한 매개변수 결정방법을 토대로 21개 실험체에 대하여 매개변수를 결정한다. 이를 토대로 회귀분석을 수행하여 뼈대곡선, 핀칭, 그리고 강도 및 강성 저하의 매개변수에 대한 경험식을 제안할 것이다.

2. 해석모델 구성 및 실험체 선정

해석 프로그램으로는 OpenSees를 사용하였고, 해석모델은 프로그램 상의 Pinching4 모델을 사용하였다. Pinching4 모델은 이력곡선 상에서 4선형 뼈대곡선을 토대로 구조물의 강도 및 강성저하, 그리고 핀칭을 반영할 수 있는 집중소성형지 모델이다. 각각의 뼈대곡선, 핀칭, 그리고 강도 및 강성 저하의 매개변수를 입력하여 구조물의 반복이력거동을 예측할 수 있다. 본 연구는 연결보의 양단에 모멘트 힌지를 배치하여 해석모델을 구성하였다. 각 매개변수를 결정하는 방법은 다음과 같으며, 자세한 사항은 Koh et al. [9]에 제시되어 있다.

2.1 뼈대곡선

뼈대곡선은 Fig. 1(a)와 같이 4개의 지점으로 구성되어 있다. 4개의 지점은 각각 항복 지점(yield point), 캐핑 지점(capping point), 극한 지점(ultimate point), 그리고 잔류 지점(residual point)으로 결정되어야 할 매개변수는 총 8개($V_y, V_c, V_u, V_r, \theta_y, \theta_c, \theta_u, \theta_r$)이다. 각 실험체의 이력곡선을 토대로 뼈대곡선 매개변수를 결정하였다.

2.2 핀칭

핀칭은 총 3개의 매개변수($rForce, rDisp, uForce$)로 결정된다. 각 매개변수는 핀칭 효과의 정도에 따라 -1 이상 1 이하의 값을 보유한다. 임의의 매개변수를 적용한 해석결과와 실험결과의 이력곡선을 비교하여, 두 이력

곡선이 시각적으로 가장 잘 일치할 때까지 매개변수를 반복적으로 조정하였다. 하지만 수집된 모든 대각보강 연결보 실험체에서 핀칭 효과가 미미하게 발생하였고, 매개변수 $uForce$ 만 10% 내외의 영향을 끼치는 것을 확인하였다 [9]. 따라서 본 연구는 $rForce$ 와 $rDisp$ 은 모든 실험체에 동일하게 1.0을 적용하였으며, $uForce$ 한가지만 고려하여 이력거동을 모사하였다.

2.3 강도 및 강성 저하

반복하중으로 인한 강도 및 강성 저하는 손상지수(damage index, δ_i)에 따라 결정된다.

$$\delta_i = \alpha_2 \left(\frac{E_i}{1000E_{monotonic}} \right) \tag{1}$$

$$\delta_{i, test} = 1 - \frac{x_i}{x_{0,i}} \tag{2}$$

여기서, E_i 는 i 번째 사이클까지의 누적에너지 소산량, $E_{monotonic}$ 은 뼈대곡선의 넓이, α_2 는 저하 매개변수, x_i 는 i 번째 사이클에서의 전단강도 또는 강성, $x_{0,i}$ 는 뼈대곡선에서 상응하는 값이다.

반복하중으로 의한 강도 및 강성 저하를 정확하게 예측하기 위해서는 적절한 α_2 값을 결정해야 한다. 따라서 식 (1)과 (2)의 손상지수를 비교하여, 두 손상지수가 일치하도록 하는 α_2 를 선형 회귀분석을 통해 결정하였다.

2.4 실험체 선정

집중소성형지 기반 해석모델에 사용되는 해석 매개변수는 회귀분석을 이용한 경험식으로 제안되는 경우가 많다. 하지만 회귀분석 특성상, 사용된 표본의 범위를 벗어나는 값에 대해서는 경험식의 정확도가 급격히 저하된다. 이러한 문제점을 예방하기 위해서는 가능한 한 넓은 범위의 표본이 수집되어야 한다. 따라서 본 연구는 12개의 선행연구로부터 반복하중을 받는 대각보강 연결보 실험체 21개를 수집하였다 [2-4], [12-20]. 전체 실험체의

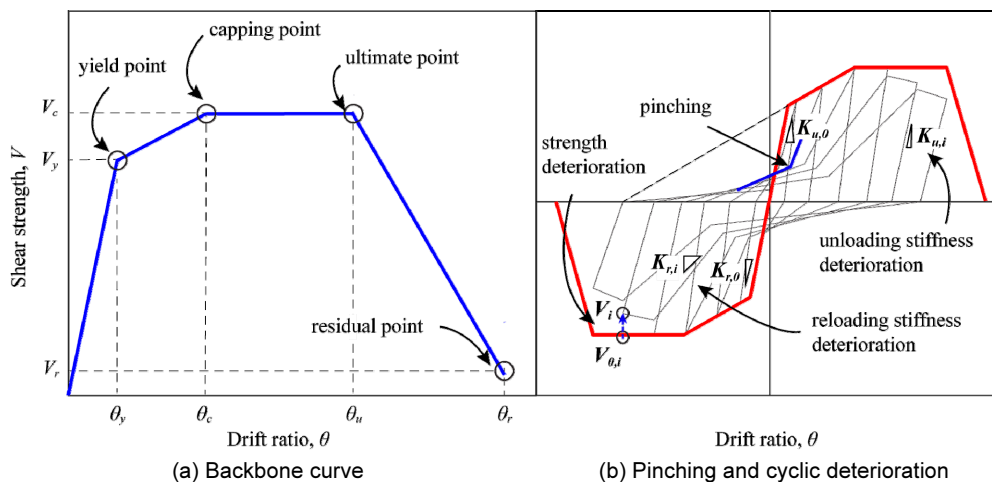


Fig. 1. Summary of the Pinching4 model

Table 1. Selected specimens for coupling beam with diagonal reinforcement

Author	No.	Specimen	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>l_n</i> (mm)	<i>l_n/h</i>	α (°)	<i>f_c'</i> (MPa)	<i>f_{yd}</i> (MPa)	<i>f_{yt}</i> (MPa)	<i>f_{ys}</i> (MPa)	<i>s</i> (mm)
Tassios et al. (1996)	1	CB-2A	130	500	500	1.0	24.0	28.5	504	281	281	120
	2	CB-2B	130	300	500	1.7	28.8	26.3	504	281	281	120
Galano and Vignoli (2000)	3	P07	150	400	600	1.5	33.0	54.0	567	567	567	200
	4	P12	150	400	600	1.5	33.0	41.6	567	567	567	200
Gonzalez (2001)	5	K	305	445	1220	2.7	19.0	35.6	465	465	465	244
Kwan and Zhao (2002)	6	CCB11	120	600	700	1.2	38.7	44.9	517	517	346	140
Dugas (2002)	7	D30	300	880	1000	1.1	30.0	32.8	456	476	476	275
Canbolat et al. (2005)	8	Specimen1	200	600	600	1.0	36.0	41.0	450	480	480	130
Yun et al. (2006)	9	PCB-DC	200	600	600	1.0	30.0	44.0	475	291	291	150
Fortney et al. (2008)	10	DCB-1	254	356	914	2.6	13.0	37.6	431	418	414	76
	11	DCB-2	254	305	914	3.0	13.0	55.3	477	461	461	51
Naish et al. (2013)	12	CB24F	305	381	914	2.4	15.7	47.2	483	414	414	76
	13	CB24D	305	381	914	2.4	15.7	47.2	483	414	414	64
	14	CB33F	305	457	1524	3.3	12.3	47.2	483	414	414	76
	15	CB33D	305	457	1524	3.3	12.3	47.2	483	414	414	64
Han et al. (2015)	16	SD-2.0	250	525	1050	2.0	20.4	44.0	438	506	506	120
	17	SD-3.5	250	300	1050	3.5	8.9	44.0	442	506	506	110
Lim et al. (2016)	18	CB10-1	250	500	500	1.0	26.0	34.5	486	467	468	100
	19	CB20-1	300	500	1000	2.0	16.0	52.1	466	502	502	100
Lim et al. (2016)	20	CB30-DA	300	500	1500	3.0	8.8	39.7	465	441	441	200
	21	CB30-DB	300	500	1500	3.0	8.8	38.4	465	475	475	100

Table 2. Ranges of variables for DRCBs

Property variables	Range
area of a group of diagonal bars, $A_{vd}(mm^2)$	$571 \leq A_{vd} \leq 6539$
(total area of longitudinal reinforcement), $A_l(mm^2)$	$190 \leq A_l \leq 3581$
area of transverse bars within spacing $A_t(mm^2)$	$64 \leq A_t \leq 380$
Diagonal reinforcement ratio, ρ_d	$0.008 \leq \rho_d \leq 0.080$
Longitudinal reinforcement ratio, ρ_l	$0.002 \leq \rho_l \leq 0.017$
Transverse reinforcement ratio, ρ_t	$0.002 \leq \rho_t \leq 0.015$
Effective depth, $d(mm)$	$275 \leq d \leq 840$

목록과 주요 물성치는 Table 1에 요약하였으며, Table 2에 추가적인 물성치에 대한 범위를 요약하였다.

3. 해석 매개변수의 경험식 제안

Pinching4 모델을 구성하는 해석 매개변수에 대한 경험식을 제안하고자 한다. 회귀분석을 통하여 해석 매개변수를 결정하기 위해서는 실험체의 정확한 이력곡선이 필요하다 [21]. 하지만 수집한 21개의 이력곡선 중, 디지털 데이터를 구할 수 없는 실험체도 존재하였다. 이와 같이 이력곡선에 대하여 그래픽 데이터만 존재하는 실험체의 경우에는 데이터 추출 프로그램 WebPlotDigitizer [22]을 사용하여 그래픽 데이터를 수치 데이터(numerical data)로 변환하였다.

회귀분석을 사용하여 해석 매개변수에 대한 경험식을 제안하기 위해 본 연구에서 사용한 선형 회귀식의 형태는 다음과 같다.

$$y = a_0 + x_1^{a_1} + x_2^{a_2} + \dots + x_n^{a_n} \quad (3)$$

여기서, y 는 응답변수(response variable), x_i 는 예측변수(predictor variable), a_i 는 회귀분석을 통하여 결정된 계수이다.

각 매개변수 경험식에 대하여 적절한 예측변수(x_i)를 선정하기 위해서, 선행연구 [1], [3], [4], [17] 등에서 대각보강 연결보 설계시 고려하였던 물성치를 중심으로 다음과 같은 후보변수들을 선정하였다. A_{vd} (대각방향철근의 단면적), A_l (수평방향철근의 단면적), A_t (횡구속철근의 단면적), A_g (전체 단면적), α (대각철근의 경사각), l_n (보의 순경간), h (보의 깊이), b (보의 폭), d (보의 유효깊이), l_n/h (형상비), f_c' (콘크리트 압축강도), 철근의 항복강도(f_{yt} , f_{ys} , f_{yd}), 철근비(ρ_l , ρ_t , ρ_d), ρ_d/ρ_l , ρ_l/ρ_t , $f_c'A_g$, $f_{yt}A_l$, $f_{yd}A_{vd}$, $f_{yt}A_t$, $f_{yd}A_{vd}/f_c'A_g$, $f_{yt}A_l/f_c'A_g$, s (횡구속 철근의 간격), $V_{n,c}$ ($=\sqrt{f_c'}bd/6$), $V_{n,s}$ ($=A_t f_{yt}d/s$), V_n ($=2A_{vd}f_{yd}\sin\alpha$), $V_{n,c}/V_{n,s}$, $V_{n,c}/V_n$, $V_{n,s}/V_n$, τ ($=V_n/bd$), τ_c ($=V_{n,c}/bd$), τ_s ($=V_{n,s}/bd$), $\tau/\sqrt{f_c'}$.

회귀분석 방법은 단계적 회귀분석(stepwise regression analysis)의 전진선택법(forward selection method)을 사용하였다 [23]. 위 후보 변수들 중 통계적으로 유의한 변수를 예측변수로 선정하여 각 매개변수 별로 적절한 예측변수를 찾았다. 이 때, 각 변수의 p -value가 5% 미만인 경우를 통계적으로 유의하다고 간주하였다.

3.1 뼈대곡선

뼈대곡선을 세우기 위해서는 8개의 매개변수(V_y , V_c , V_u , V_r , θ_y , θ_c ,

θ_u, θ_r 가 결정되어야 한다. 결정된 21개 실험체의 전단강도 매개변수(V_y, V_c)에 대하여 단계적 회귀분석을 수행한 결과, 전단강도와 가장 연관 있는 예측변수는 $f'_c A_g$ (kN), f_{yd} (MPa), $V_{n,s}$ (kN), V_n (kN), $V_{n,c}/V_{n,s}$ 로 나타났다. 항복 전단강도와 캐핑 전단강도에 대하여 제안된 경험식은 다음과 같다.

$$V_y = 684.066 - 0.055(f'_c A_g) - 1.843(f_{yd}) + 1.004(V_{n,s}) + 0.997(V_n) + 497.987\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (4)$$

$$V_c = 794.761 - 0.057(f'_c A_g) - 1.930(f_{yd}) + 0.995(V_{n,s}) + 0.995(V_n) + 495.236\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에 대한 결정계수는 0.943과 0.950으로 나타났으며, 위 식이 대각보강 연결부의 실제 전단강도를 높은 정확도로 예측하는 것을 확인하였다(Fig. 2).

결정된 21개 실험체의 변위각 매개변수($\theta_y, \theta_c, \theta_u$)에 대하여 단계적 회귀분석을 수행한 결과, 변위각과 가장 연관 있는 예측변수는 $f'_c A_g$ (kN), s (m), f_{yd} (MPa), ρ_d, τ_s (MPa), $V_{n,c}/V_{n,s}$ 로 나타났다. 항복 변위각, 캐핑 변위각, 그리고 극한 변위각에 대하여 제안된 경험식은 다음과 같다.

$$\theta_y = 2.923 + 0.008(0.01f'_c A_g) + 0.686(s) - 0.003(f_{yd}) - 2.812(\rho_d) + 0.092(\tau_s) - 0.028\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (6)$$

$$\theta_c = 2.392 - 0.016(0.01f'_c A_g) - 7.418(s) + 0.004(f_{yd}) + 12.681(\rho_d) + 0.112(\tau_s) - 0.966\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (7)$$

$$\theta_u = -7.579 + 0.018(0.01f'_c A_g) - 11.014(s) + 0.027(f_{yd}) + 120.402(\rho_d) + 0.051(\tau_s) - 1.978\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (8)$$

식 (6), (7) 그리고 식 (8)의 결정계수는 0.904, 0.504, 그리고 0.811로 나타났다(Fig. 3). 캐핑 변위각과 극한 변위각의 경우, 전단강도의 경험식보다 결정계수가 다소 낮게 측정되었다. 경험식의 정확도를 향상시키기 위하여, 변수가 로그 정규분포를 따르도록 변환한 비선형 회귀식 형태(식 (9))를 적용해 보았다. 비선형 회귀식 형태를 적용한 캐핑 변위각과 극한 변위각의 경험식은 다음과 같다.

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} \cdots x_n^{a_n} \quad (9)$$

$$\theta_c = 0.001(f'_c A_g)^{-0.179} (s)^{-0.433} (f_{yd})^{1.380} (\rho_d)^{0.100} (\tau_s)^{-0.907} \left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right)^{-1.191} \quad (10)$$

$$\theta_u = 0.029(f'_c A_g)^{-0.225} (s)^{-0.004} (f_{yd})^{1.431} (\rho_d)^{0.484} (\tau_s)^{1.211} \left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right)^{0.969} \quad (11)$$

식 (10)와 (11)에 대한 결정계수는 0.678과 0.866으로, 선형 회귀식을 적용한 경우(식 (7), (8))에 비하여 정확도가 향상되었음을 확인하였다(Fig. 4).

극한 전단강도는 캐핑 전단강도와 같은 값으로 가정하였으므로 캐핑 전단강도로부터 유추할 수 있다. 또한 잔류 전단강도는 0에 가까운 값을 사용하였으며, 잔류 변위각은 극한 변위각을 10% 증가시킨 값으로 가정하였으므로 극한 변위각으로부터 유추할 수 있다. 따라서 뼈대곡선을 구성하는 매개변수 중 위 세 가지 매개변수에 대한 경험식은 따로 제안하지 않았다.

3.2 핀칭 그리고 강도 및 강성 저하 매개변수

본 연구는 대각보강 Pinching4 모델의 세가지 핀칭 매개변수 중 $uForce$

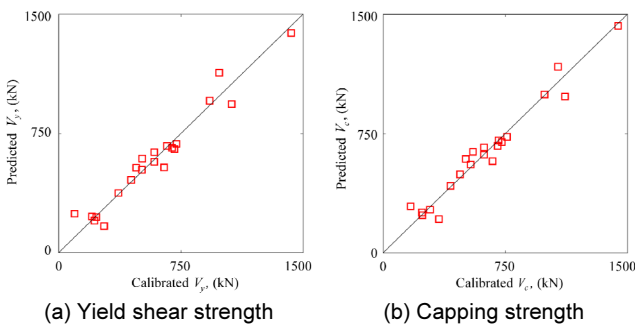


Fig. 2. Accuracy of empirical equations for shear strength parameters

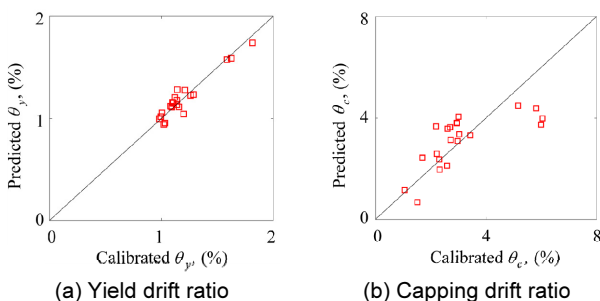


Fig. 3. Accuracy of empirical equations for drift ratio parameters with equation (3)

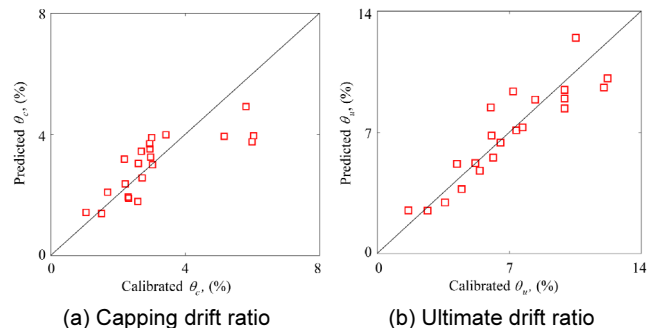


Fig. 4. Accuracy of empirical equations for drift ratio parameters with equation (9)

만 고려하여 이력거동을 모사하였고, 이를 바탕으로 핀칭 매개변수의 경험식을 제안하고자 한다. 핀칭 매개변수($uForce$)에 대하여 단계적 회귀분석을 수행한 결과, 핀칭과 가장 연관 있는 예측변수는 $f'_c A_g$ (kN), $f_{yd} A_{vd}$ (kN), $V_{n,c}/V_{n,s}$, τ_s (MPa), $f_{yt} A_t / f_{yt} A_t$ 로 나타났다. $uForce$ 에 대하여 제안된 경험식은 다음과 같다.

$$uForce = 0.366 + 0.006(0.01f'_c A_g) - 0.007(0.01f_{yd} A_{vd}) - 0.535\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) - 0.069(\tau_s) - 0.004\left(\frac{f_{yt} A_t}{f_{yt} A_t}\right) \quad (12)$$

식(12)에 대한 결정계수는 0.587로 나타났다(Fig. 5(a)). 결정계수가 뼈대곡선 매개변수의 경험식에 비하여 다소 낮았다. 하지만 $uForce$ 는 음수값을 보유했을 수 있으므로 비선형 회귀식과의 결정계수를 비교할 수 없었다. 따라서 선형 회귀식 형태만 고려하여 경험식을 제안하였다.

강도 및 강성 저하 매개변수(α_2)에 대하여 단계적 회귀분석을 수행한 결과, 저하와 가장 연관 있는 예측변수는 l_n (m), $f'_c A_g$ (kN), $f_{yt} A_t$ (kN), $V_{n,s}$ (kN), $V_{n,c}/V_{n,s}$ 로 나타났다. α_2 에 대하여 제안된 경험식은 다음과 같다.

$$\alpha_2 = 23.551 - 31.989(l_n) - 0.006(f'_c A_g) - 0.019(f_{yt} A_t) + 0.059(V_{n,s}) + 42.775\left(\frac{V_{n,c}}{V_{n,s}}\right) \quad (13)$$

식(13)에 대한 결정계수는 0.704로 나타났으며(Fig. 5(b)), 강도 및 강성 저하를 높은 정확도로 예측하는 것을 확인하였다.

4. 검증

본 연구는 반복하중을 받는 대각보강 콘크리트 연결부의 이력거동을 예측하기 위하여 Pinching4 모델을 사용하였다. 이력거동을 효율적이고 정확하게 예측하기 위하여 뼈대곡선, 핀칭, 그리고 저하 등의 해석 매개변수에 대한 경험식을 제안하였다. 본 절에서는 제안된 경험식의 정확도를 검증하고자 한다.

제안된 경험식을 적용하여 예측한 매개변수를 통해 이력곡선을 모사하였고, 이를 실험 이력곡선과 비교하였다. 검증에는 공간상의 문제로 총 6개의 실험체(P07, Specimen 1, CB24F, SD-3.5, CB20-1, CB30-DB)가 선정되었다. 해석결과와 실험결과를 비교한 이력곡선은 Fig. 6에 나타내었다. 제안된 경험식을 사용하여 예측한 매개변수는 Table 3에 요약하였다. Tables

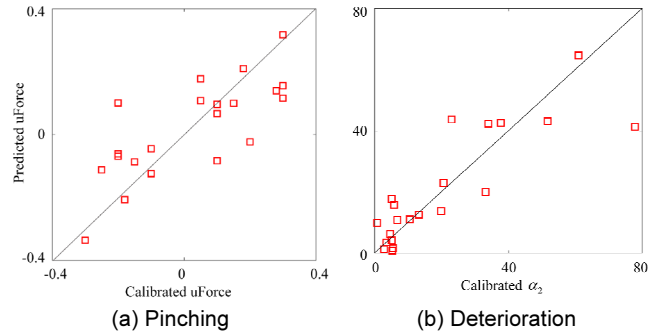


Fig. 5. Accuracy of empirical equations for pinching and deterioration parameters

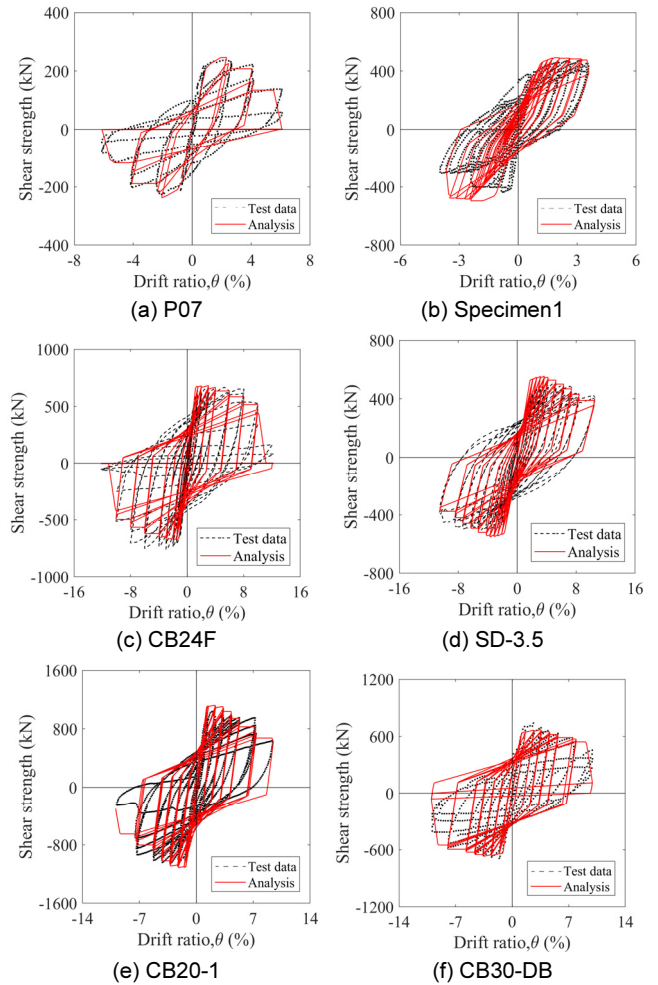


Fig. 6. Actual and simulated cyclic curves

Table 3. Predicted parameters for Pinching4 model

No.	Specimen	Backbone					Pinching	Deterioration
		V_y (kN)	V_c (kN)	θ_y (%)	θ_c (%)	θ_u (%)	$uForce$	α_2
1	P07	216.38	245.95	1.16	1.79	2.93	-0.09	41.68
2	Specimen1	459.66	496.05	1.16	1.79	2.93	-0.21	2.37
3	CB24F	718.98	763.36	1.20	3.89	10.12	0.11	11.85
4	SD-3.5	526.63	582.60	1.74	3.93	12.45	-0.12	11.44
5	CB20-1	1108.21	1145.84	1.28	3.18	9.44	0.16	16.50
6	CB30-DB	636.51	680.87	1.15	3.44	8.37	0.12	4.12

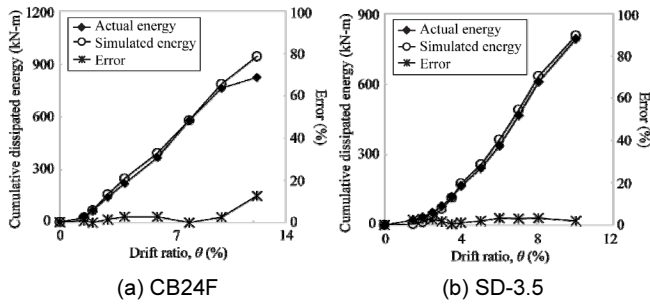


Fig. 7. Cumulative dissipated energy

1과2에 제시되어 있는 실험체의 물성치를 제안된 경험식에 대입하여 각 매개변수를 예측할 수 있다.

이력곡선의 비교를 통해 전반적으로 최대강도, 핀칭, 강도 및 강성 저하가 적절히 모사된 것을 확인하였다. 하지만 Fig. 6(e)의 경우, 변위각 7% 부근에서 해석결과가 실험결과의 강도를 정확하게 예측하지 못하였다. 이는 식 (1)의 손상지수가 누적에너지소산량과 선형관계이므로 강도저하가 일정하게 나타나는 반면, 실험결과에서는 변위각 7% 이후 급격한 강도저하가 발생하였기 때문인 것으로 보인다. 또한 실험결과가 비대칭으로 나타난 경우에는(Fig. 6(b)), 한 방향에 대한 이력거동만을 정확하게 예측하였다. 본 연구는 실험체가 정가력과 부가력 방향에 대하여 대칭적인 거동을 한다는 가정하에 비대칭성을 결정하였다. 따라서 제안된 경험식을 사용하고자 할 때에는 실험체가 대칭적으로 거동한다는 가정 하에 경험식을 사용하여야 한다는 한계점이 존재한다.

추가적으로 6개의 실험체 중 디지털 데이터를 보유한 실험체 2개(CB24F, SD-3.5)에 대하여 누적에너지소산량을 비교하였다(Fig. 7). 변위각이 증가함에 따라 실험결과와 해석결과 간의 오차가 증가하였다. 각 실험체에 대하여 최대오차는 12.7%, 1.9%로 나타났다. 실험체 CB24F의 경우 변위각 10% 까지 3% 미만의 오차를 보였으나, 변위각 12%에서 오차가 급격히 증가하였다. 이는 실험결과(Fig. 6(c))에서 알 수 있듯이 마지막 두 사이클의 강도저하가 급격히 나타나, 해석결과의 누적에너지소산량이 실험결과보다 크게 측정되어 오차가 증가한 것으로 보인다.

이력곡선과 누적에너지 소산량을 통하여 해석결과를 검증한 결과, 앞 절에서 구한 경험식이 대각보강 연결부의 이력거동을 정확하게 예측하였다고 할 수 있다. 다만 경험식이 회귀분석을 기반으로 진행되었으므로 제안된 경험식을 사용하고자 할 때에는 Table 1의 물성치 범위 내에 있는 대각보강 연결부에 대하여 사용하도록 주의하여야 한다.

5. 결론

본 연구는 Pinching4 모델을 사용하여 반복하중을 받는 대각보강 콘크리트 연결부의 이력거동을 예측하였다. 비대칭성, 핀칭, 그리고 강성 및 강도 저하에 대한 매개변수를 결정하기 위해 회귀분석을 사용하여 경험식을 제안하였다. 각 경험식에 필요한 알맞은 예측변수를 정하기 위하여 단계적 회귀분석의 전진선택법을 사용하였다. 가능한 한 넓은 범위의 실험체가 필요하였으며, 본 연구는 선행연구로부터 21개의 대각보강 연결부 실험체를 수집하였다.

비대칭성 매개변수 V_y , V_c , θ_y , θ_c , 그리고 θ_u 의 경험식에 대한 결정계수는 각각 0.950, 0.943, 0.904, 0.678, 그리고 0.866으로 나타났다. 핀칭 매개변수($uForce$)와 저하 매개변수(α_2)에 대한 결정계수는 각각 0.587과 0.704로 나타났다. 제안된 경험식의 정확성을 검증하기 위하여 6개의 반복하중을 받는 대각보강 콘크리트 연결부 실험체의 이력곡선을 모사하였고, 2개 실험체에 대하여 누적에너지 소산량을 비교하였다. 경험식을 적용하여 모사된 이력곡선이 실제 이력곡선과 높은 정확도로 일치하였으며, 변위각 증가에 따른 에너지 소산량 또한 높은 정확도로 예측하였다. 이로써 경험식이 적절하게 제안된 것을 확인하였다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2017년도 한국연구재단이 주관하는 중견연구지원사업(NRF-2017R1A2B3008937)의 지원을 받아 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Paulay T, Binney JR. Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls. ACI Special Publication, 1974;42:579-598.
2. Tassios TP, Moretti M, Bezas A. On the behavior and ductility of reinforced concrete coupling beams of shear walls. ACI Structural Journal, 1996;93(6):711-720.
3. Galano L, Vignoli A. Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts. ACI Structural Journal, 2000;97(6):876-885.
4. Fortney PJ, Rassati GA, Shahrooz BM. Investigation on effect of transverse reinforcement on performance of diagonally reinforced coupling beams. ACI Structural Journal, 2008;105(6):781-788.
5. Naish D, Fry A, Klemencic R, Wallace JW. Reinforced concrete coupling beams Part2: modeling. ACI Structural Journal, 2013;110(6):1067-1075.
6. Barbachyn SM, Kurama YC, Novak LC. Analytical evaluation of diagonally reinforced concrete coupling beams under lateral loads. ACI Structural Journal, 2012;109(4):497-507.
7. Hindi R, Hassan M. Simplified trilinear behavior of diagonally reinforced coupling beams. ACI Structural Journal, 2007;104(2):199-206.
8. Paulay T, Binney JR. Diagonally reinforced coupling beams of shear walls. ACI Special Publication, 1974;42:579-598.
9. Koh HY, Han SW, Lee CS. Calibration of parameters for predicting hysteretic behavior of diagonally reinforced concrete coupling beams. Earthquake Engineering Society of Korea, 2017;119:303-310
10. Pacific Earthquake Engineering Research Center. OpenSees, software. c2010. <http://opensees.berkeley.edu>
11. Lowes LN, Altoontash A. Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. Journal of Structural Engineering, 2003;129(12):1686-1697.
12. Gonzalez E. Seismic response of diagonally reinforced slender coupling beams. M.S. Thesis, University of British Columbia, Vancouver; c2001.
13. Kwan AKH, Zhao ZZ. Cyclic behavior of deep reinforced concrete

- coupling beams, *Structures and Buildings*, 2002;152(3):283–292.
14. Dugas DG. Seismic response of diagonally reinforced coupling beams with headed bars. M.S. Thesis, McGill University, Montreal, c2002.
 15. Canbolat BA, Parra–Montesinos GJ, Wight JK. Experimental study on seismic behavior of high–performance fiber–reinforced cement composite coupling beams. *ACI Structural Journal*. 2005;102(1):159–166.
 16. Yun HD, Kim SW, Jeon E, Park WS. Seismic performance of HPFRCC coupling beams with diagonal reinforcement. *Architectural Research*, 2006;22(4):57–64.
 17. Naish D, Fry A, Klemencic R, Wallace JW. Reinforced concrete coupling beams Part1 : Testing. *ACI Structural Journal*. 2013;110(6):1057–1066.
 18. Han SW, Lee CS, Shin M, Lee K. Cyclic performance of precast coupling beams with bundled diagonal reinforcement. *Engineering Structures*, 2015;93:142–151.
 19. Lim E, Hwang SJ, Wang TW, Chang YH. An investigation on the seismic behavior of deep reinforced concrete coupling beams. *ACI Structural Journal*. 2016;113(2):217–226.
 20. Lim E, Hwang SJ, Cheng CH, Lin PY. Cyclic tests of reinforced concrete coupling beam with intermediate span–depth ratio. *ACI Structural Journal*. 2016;113(3):515–524.
 21. Lignos D. Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations. Ph.D. Thesis, Stanford university. CA c2008.
 22. Rohatgi A. WebPlotDigitizer 3.8, software, c2016. <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer>.
 23. Chatterjee S, Hadi A, Price B. *The use of regression analysis by example*. Wiley NY; c2000.