외부압력으로 부착된 강판으로 보강된 구속콘크리트의 압축반복거동 모델

Numerical Model for Cyclic Compressive Behavior of Concrete Confined by Steel Plates Using External Pressure

최은수* · 송세근**

Choi, Eunsoo · Song, Segeun

Abstract

This study provides a model for cyclic compressive behavior of concrete confined by steel wrapping jackets without grouting. This study uses concrete specimens of 150 mm×300 mm ($\Phi \times H$) with steel jackets of the thickness of 1.0 mm and 1.5 mm. The peak strength of concrete increases by 32.1% and 45.6% with applying the steel jacket of 1.0 mm and 1.5 mm, respectively. This study adopts the Sakai and Kawashima model for cyclic compressive behavior of confined concrete, and it is found that the experimental results correspond well to the adopted model.

Key words : Confined concrete, Cyclic behavior, Compressive behavior, Steel jacket

요 지

본 연구에서는 그라우팅 없이 외부압력을 이용해서 부착된 강판으로 보강된 콘크리트의 압축반복거동에 대한 응력-변형률 모델을 개발하여 제공하고자 한다. 두께 1.0 mm와 1.5 mm 두 종류의 스테인레스 스틸로 150 mm×300 mm ($\Phi \times H$)의 시편을 보강하였다. 압축강도가 1.0 mm 및 1.5 mm 두께에 대해서 각각 강도 증가율이 32.1% 및 45.6% 으로 나타났으며 Sakai and Kawashima 모델을 이용하여 구속 효과를 확인하기 위해 보강된 콘크리트 기둥의 반복하중 거동을 분석하였다. 본 연구 실험의 반복하중 거동을 Sakai and Kawashima 모델과 비교 분석해 본 결과, 제하 이력곡선과 재재하 이력곡선이 값의 재해석을 통해 매우 일치함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 구속콘크리트, 반복거동, 압축거동, 강판보강

1. 서 론

콘크리트에 횡방향으로 구속압력을 가하면 콘크리트의 압축강도 및 연성거동이 증가하는 것은 일반적으로 인식된 사실이다(Park and Paulay, 1975). 지진으로부터 콘크리트 구조물을 보호하기 위해서 연성도 능력이 요구되는 경우, 외부에 자켓으로 수동구속압력을 발생시켜 콘크리트 구조물의 연성도 능력을 향상시키는 기술이 개발되고 사용되어 왔다(Chai et al., 1991). 이를 위해서 사용되는 대표적인 재료는 강과 FRP(Fiber Reinforced Polymer)이다(Chai et al., 1991). 최근에는 형상기억합금(shape memory alloy) 와이어를 이용한 보강기법도 개발되었다(Janke et al., 2005). 강을 사용하

는 경우, 강판을 미리 제작하여 용접으로 구조물에 부착한 후, 틈은 그라우팅으로 채워서 보강을 완성하였다. FRP 보강은 강과 달리 얇은 시트로 되어 있어 접착제를 이용하여 콘크리트 표면에 부착하였다. 이러한 부착은 일반적으로 수작업으로 완성되는데, FRP 시트가 완전하게 긴장되어 콘크리트 표면에 부착하게 하는데 어려움이 있었다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 FRP 자켓을 구조물에 맞도록 미리 제작하여 벨트를 이용한 외부압력과 접착제를 이용하여 보강하는 기술이 시도 되었으며, 철근콘크리트 기둥에 실험으로 보강기술의 성능을 입증하였다(Xiao and Ma, 1997). 그러나 FRP는 강보다 고가의 재료이며, 기 제작된 FRP 자켓은 특히 제작비의 상승을 불러온다. 그라우팅을 이용한 강판 보강은 효과 면

*교신저자. 정회원. 홍익대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-2-320-3060, Fax: +82-2-322-1244, E-mail: eunsoochoi@hongik.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Associate professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

**홍익대학교 토목공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University

에서는 우수하나, 단면의 증가, 시공의 어려움, 특히 구조물의 진동특성 변화 등의 단점을 가지고 있다(Chai et al., 1994).

최근에 이러한 단점을 극복하기 위해서 얇은 강판을 외부 압력을 이용하여 콘크리트 표면에 밀착하고, 용접으로 부착을 완성하는 기법이 개발되었다(Choi et al., 2009). 콘크리트 공시편의 단순압축 실험에 콘크리트의 압축강도 및 연성거동의 증가를 입증하였으며, 철근콘크리트 기둥 실험을 통해서, 철근콘크리트 기둥의 휨 연성도 능력을 증가시키는 것이 확인되었다(Choi et al., 2010).

외부압력으로 부착된 강판으로 보강된 콘크리트에 대한 응력-변형을 모델의 개발은 추후 해석적 연구에 필요하며, 보강 기둥의 해석모델 개발에도 유용하다. 단순압축 거동에 대한 응력-변형을 모델은 개발되었으나, 반복하중 재하에 대한 모델은 아직 미개발 상태였다. 따라서 이 연구에서는 그라우팅이 없이 외부압력을 이용해서 부착된 강판으로 보강된 콘크리트의 압축반복거동에 대한 응력-변형을 모델을 개발하여 제 공하고자 한다.

2. 압축실험 및 결과

강판을 이용하여 콘크리트 공시체를 보강하기 위해 강판을 290 mm×481 mm(H×W)의 크기로 제작하였다. 강판의 폭은 시편의 둘레보다 10 mm 길게 제작되어 한쪽 끝이 다른 쪽 끝과 겹칠 수 있도록 하였다. 또한 강판의 높이는 시편의 높이보다 10 mm 작게 제작되어 압축 실험 중 압축력이 강판

Fig. 1. Attaching steel plates using clamps

(a) Test set-up (b) Specimen after testing

Fig. 2. Test set-up and specimens

에 직접 전달되는 것을 방지 하였다. 강판을 압착하여 부착하는 기법은 기존의 연구에 자세히 설명되어 있으며(Choi et al., 2009), Fig. 1과 같이 말뚝굽 모양이 부착된 클램프를 이용하여 세 곳에서 압력을 가하였다. 압력이 가해진 상태에서 강판의 겹친 부분을 용접하면 부착이 완성된다. 용접이 완료된 이후 덧댐 판을 측면용접이음부에 추가적인 용접을 실시하여 하중에 의한 용접부의 파괴저항성을 향상시켰다. Fig. 2(a)에서 보듯이, 보강시편의 상하부에 계측용 팔을 가진 두꺼운 원형 판을 설치하고 두 판 사이의 변위를 측정하고, 이를 시편의 길이로 나누어 축방향 변형율을 산정하였다. 보강시편 상하부의 원형 판은 압축력이 전혀 없는 경우 콘크리트 표면과 완전히 밀착되어 있다고 볼 수 없으므로 완전한 밀착을 위해서 초기에 10 kN이하의 압축력을 가한 상태에서 변위 제어 방식으로 압축실험을 실시하였다. 실험에 사용된 강판의 두께는 1.0 mm와 1.5 mm이며, 실험에서 두께를 변수로 사용하였다. 강판은 스테인레스강이며, 항복강도는 250 MPa로 측정되었다. Fig. 2(b)는 실험이 완료된 강판보강 시편을 보여주고 있으며, 실험 후에도 강판이 파괴되지 않고 있는 것을 관찰 할 수 있다.

실험에 사용된 시편은 150 mm×300 mm($\Phi \times H$)의 크기로, 무보강 4개, 보강된 시편은 각 두께별로 단순하중 재하 한 개와 반복하중 재하 세 개를 사용하였다. 무보강 시편의 평균 압축강도는 36.4 MPa로 측정되었으며, Fig. 3에는 무보강 및 보강된 시편의 단순하중 재하에 의한 응력-변형을 곡선이 나타나 있다. 또한, Fig. 4에는 보강된 시편의 반복하중에 의한 응력-변형을 이력곡선과 단순재하 곡선과 비교하여 나타 내었다.

강판 보강 시편의 경우, 압축강도가 1 mm 및 1.5 mm 두께에 대해서 각각 48.1 및 53.0 MPa로 강도 증가율이 32.1% 및 45.6%이다. 또한, 압축강도에 상응하는 변형율은 0.567% 및 0.89%로 비보강 콘크리트의 최대압축강도 변형율에 비해 2-3배 증가한 것을 관찰할 수 있다. 단순재하 곡선과 반복재하 이력곡선의 포락선은 1.0 mm 강판보강의 경우 거의 일치하고 있으나, 1.5 mm 강판보강의 경우는 단순재하에 비해서 응력이 약간 작게 나타나고 있다. 반복재하 실험의 응력-변형을 곡선에서 최대압축강도 및 상응 변형율은 단순재하의 경우와 거의 같은 값에서 발생하고 있다.

Fig. 3. Stress-strain curve due to monotonic loading

Fig. 4. Stress-strain hysteresis due to cyclic loading

3. 기존의 반복하중 거동 모델

콘크리트의 반복거동은 Fig. 5와 같이 특정 점에서 하중을 감소시켜 발생하는 곡선 즉 제하 이력곡선(unloading path)과 응력이 영인 점에서 다시 하중을 가하여 발생하는 곡선, 즉 재재하 이력곡선(reloading path)을 구현하는 것을 핵심내용으로 한다. 하중을 제거하면 초기 변형률에서 일부를 회복하며, 남아 있는 잔류변형률은 소성변형률(plastic strain)과 일치한다. 무보강 콘크리트 반복하중 거동의 모델은 Sinha et al. (1964)에 의해서 처음으로 제안되었다. Park et al.(1972)은 보강된 콘크리트에 대해 반복하중 거동을 분석하여 반복하중의 재재하 이력(reloading path) 및 제하 이력(unloading path)을 직선식으로 정의를 하고 모델을 개발하였다. 그러나 반복하중 거동은 직선 형태가 아니고, 포물선과 직선의 조합으로 이루어져 있기 때문에 직선식으로는 정확한 모델을 개발하는데 어려움이 있었다. Mander et al.(1988)은 제하이력곡선을 포물선과 직선의 분수식으로 정의를 하였지만, 재재하 이력곡선은 직선식으로 정의하였다. Martinez-Rueda and Elnashai (1997)는 Mander 모델에 반복 거동에 따른 강도와 강성의 저감 효과를 적용하였지만, 역시 재재하 이력곡선에 대해서는 직선식으로 정의하였다. Sakai and Kawashima(2000, 2006)는 재재하 이력곡선을 포물선과 직선식으로 제안함으로써 제하 및 재재하 이력곡선 모두를 포물선과 직선식의 조합으로 만들어 모델을 개선하였다. 본 연구에서는 1.0 mm와 1.5 mm 두 종류의 강판을 이용하여 보강된 콘크리트의 압축 반복거동에 Sakai and Kawashima 모델을 적용하였다.

Fig. 5. Schematic model of cyclic behavior

4. Sakai and Kawashima 모델

Sakai and Kawashima 모델을 적용하기 위해서 보강된 콘크리트 공시편의 압축반복하중 거동을 분석하였다. 반복하중 모델은 소성 변형률 $\epsilon_{pl,n}$ 과 제하응력 $\sigma_{ul,n}$ 을 변수로 사용하였다. $\epsilon_{pl,n}$ 은 n번째 제하이력곡선에서 응력이 0이 되는 지점의 변형률이고, $\sigma_{ul,n}$ 은 n번째 제하 이력곡선에서 제하 이력이 시작되는 지점의 응력 값이다. 또한 Sakai and Kawashima 모델에서는 제하이력 변형률 값 ϵ_{ul} 을 최대 하중의 변형률 ϵ_{cc} 을 이용하여 식 (1)과 같이 정의하였다. 제하이력변형률의 범위는 $0 \leq \epsilon_{ul} \leq 0.03$ 이다.

$$\epsilon_{ul} = \frac{k}{4} \epsilon_{cc} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

여기서, ϵ_{cc} : 최대 하중 시 변형률

m : 제하이력의 횟수

Sakai and Kawashima 모델은 제하 이력곡선(unloading path)과 재재하 이력곡선(reloading path)을 식 (2) 및 식 (3)으로 정의하였다. Fig. 5에서 보는바와 같이 소성변형률(plastic strain) ϵ_{pl} 값이 0에 가까우므로 0으로 가정하였고, 제하응력 σ_{ul} 값은 실험 데이터에서 추출하였다. 식 (3)에서 재재하 곡선의 제하하중 $\sigma_{ul,n+1}$ 은 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, β 값은 반복하중에 의한 감소계수로 Sakai and Kawashima는 β 값의 범위를 0.914-0.919로 정의하였고, 본 연구에서는 0.914를 사용하였다. 식 (3)에서 E_{rl} 은 재재하의 평균 탄성계수이다.

제하 이력곡선(Unloading path):

$$\sigma_c = \sigma_{ul} \cdot \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl}} \right)^2 \quad (2)$$

재재하 이력곡선(Reloading path):

$$\sigma_c = \begin{cases} 2.5 \sigma_{ul} \cdot \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl}}{\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl}} \right)^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq 0.2 \\ E_{rl}(\epsilon_c - \epsilon_{ul}) + \sigma_{ul,n+1} & 0.2 \leq \epsilon_c \leq 0.1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } E_{rl} = \frac{\sigma_{ul,n+1} - 0.1 \sigma_{ul,n}}{0.8(\epsilon_{ul} - \epsilon_{pl,n})}$$

Fig. 6. Comparison of experimental data with Sakai model

Fig. 7. Comparison of experimental data with modified Sakai model

$$\sigma_{ul \cdot n+1} = \beta \cdot \sigma_{ul \cdot n} \quad (4)$$

Sakai and Kawashima 모델을 Fig. 4의 1 mm와 1.5 mm 강판으로 보강한 콘크리트 시편에 대한 반복거동 실험 데이터에 적용한 경우, Fig. 6과 같이 Sakai and Kawashima 모델과 실험결과가 일치하지 않는 것을 발견하였다. 그 이유는 Sakai and Kawashima 모델과 본 연구의 반복실험의 변형을 증가량이 다르기 때문이며, 모델에서 제하 변형율은 실험에서의 제하 변형율과 완전히 일치해야만 정확한 반복하중 모델 거동을 분석할 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 반복하중 단계와 일치하도록 식을 정의하여도 매우 작은 값의 오차에도 큰 차이가 발생하여 정확한 제하 변형율을 분석하기가 불가능했다. Sakai and Kawashima 모델에서 정의한 제하 이력 변형율 값을 식 (5)와 같이 사용한 경우, 반복거동 모델이 실험값과 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 값은 포락곡선(envelop curve)에서 찾아낸 각 곡선 당 변형율을

Fig. 8. Sakai and Kawashima Model and experimental results

직접 적용시켰다. Fig. 7은 본 실험에서 얻은 곡선과 식 (5)을 적용하여 얻은 모델을 비교한 것이다.

$$\varepsilon_{ul} = \varepsilon_{un} \quad (5)$$

포락곡선과 Sakai and Kawashima 모델로 구한 모델을 병합하면 전체 반복거동 모델을 분석할 수 있다. 반복거동의 포락곡선은 콘크리트 반복하중 거동을 정적하중 거동으로 표현한 것과 같다. 포락곡선에서 각 단계의 제하하중과 상응하는 제하변형율을 구하여 표 (1)에 나타냈으며, 이 값들을 Sakai and Kawashima 모델에 적용하여 실험값과 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

콘크리트가 최대압축응력에 도달하기 전까지 거의 일치함을 볼 수 있다. 하지만 최대압축응력 이후에는 제하 이력곡선에서 미세한 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 콘크리트가 최대압축응력 이후 체적이 증가하여 발생하는 오차로 판단되며 이에 대한 식의 고려가 필요할 것으로 사료된다. 강판 두께 1.0 mm와 1.5 mm 실험체에서 실험값과 모델 추정

Table 1. Values of and for each cyclic unloading point

Curve		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t=1.0 mm	ε_{un}	0.0052	0.0086	0.0121	0.0157	0.0192	0.0260	0.0327	0.0394	0.0461	0.0528	0.0594
	σ_{un} (MPa)	33.80	37.71	39.72	40.69	41.23	41.39	37.94	36.53	32.99	28.60	21.96
t=1.5 mm	ε_{un}	0.00117	0.00474	0.00835	0.0119	0.0155	0.0191	0.0258	0.0325	0.0393	0.0461	0.0529
	σ_{un} (MPa)	10.42	37.94	48.42	48.64	46.54	44.76	44.12	43.69	43.71	43.33	42.90

치의 변형율을 비교한 결과, 오차율이 마지막 주기의 제하 이력곡선에서 최대 0.91% 및 1.74%가 발생하였다.

5. 결 론

외부압력을 이용한 강판부착 기법으로 구축된 콘크리트 시편의 압축반복거동에 모델을 제시하였으며, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구 실험의 반복하중 거동을 Sakai and Kawashima 모델과 비교 분석해 본 결과 제하 이력곡선과 재재하 이력곡선이 값의 재해석을 통해 매우 일치함을 확인할 수 있었다.
- 2) 1.0 mm와 1.5 mm 강판을 변수로 하여 2개의 모델의 오차율을 구한 결과 각각 마지막 주기의 제하 이력곡선에서 변형율에서 최대 0.91%와 1.74%차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 강판의 두께와 상관없이 Sakai and Kawashima 모델은 실제 거동과 매우 일치함을 확인할 수 있었다.
- 3) Sakai and Kawashima 모델은 한 구간에서 여러 번 반복되는 주기의 모델식을 제안하였다. 이를 본 실험에 적용하여 새로운 수정식을 제안할 필요가 있다.
- 4) 본 연구는 구축부재로 강판을 사용한 콘크리트의 반복거동 모델을 분석하였다. 추후 연구로 형상기억합금 또는 FRP 등으로 보강된 콘크리트 반복거동에 적용시켜 Sakai and Kawashima 모델이 구축부재 재료와 상관없이 적용이 됨을 확인할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

References

Chai, Y.H., Priestly, M.J.N., and Seible, F. (1991). Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance, *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No 5, pp. 572-582.

- Chai Y.H., Priestly M.J.N., and Seible, F. (1994) Analytical model for steel-jacketed RC circular bridge columns, *ASCE, J. Struct. Eng.*, 120 2358-76.
- Choi, E., Park, J., Nam, T.H., and Yoon, S.J. (2009) A new steel jacketing method for RC columns, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, No. 1, pp. 787-796.
- Choi, E., Chung, Y.S., Park, J., and Cho, B.S. (2010) Behavior of Concrete Cylinders and RC Columns Confined by A New Steel Jacketing, *ACI Structural Journal*, Vol. 170, No. 6.
- Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., and Ruth, J. (2005) Applications of shape memory alloys in civil engineering structures-overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*. Vol. 38, No. 279, pp. 578-592.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988a) Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Struct. Eng.*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988b) Observed stress-strain behavior of confined concrete, *J. Struct. Eng.*, Vol. 114, No. 8, pp. 1827-1849.
- Martinez-Rueda, E. and Elnashai, A.S. (1997) Confined concrete model under cyclic load, *Mater. Struct.*, 30, pp. 139-147.
- Park, R., Kent, D.C., and Sampson, R.A. (1972). Reinforced concrete member with cyclic loading, *J. Struct. Div. ASCE*, Vol. 98, No. 7, pp. 1341-1360.
- Park, R. and Paulay, T. (1975) Reinforced Concrete Structures. Wiley, New Zealand, pp. 17-30.
- Sakai, J., Kawashima, K., and Shoji, G. (2000) A stress-strain model for unloading and reloading of concrete confined by tie reinforcement, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, Japan Society of Civil Engineers, 654/I-52, pp. 297-316.
- Sakai, J. and Kawashima, K. (2006) Unloading and Reloading Stress-Strain Model for Confined Concrete, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, pp. 112-122.
- Sinha, B., Gerstle, K., and Tulin, L. (1964) Stress-strain relations for concrete under cyclic loading, *ACI Journal Proceedings*, Vol. 61, No. 2, pp. 195-212.
- Xiao, Y. and Ma, R. (1997) Seismic Retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing, *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 10, pp. 1357-1359.

- ◎ 논문접수일 : 2012년 10월 16일
- ◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 19일
- ◎ 심사완료일 : 2012년 10월 31일