

콘크리트충전 각형 강관 가새부재의 파단 예측

Fracture Prediction in Concrete-Filled Square HSS Bracing Members

이 미 지* · 문 기 훈** · 한 상 환***

Lee, Mi-Ji · Moon, Ki-Hoon · Han, Snag Whan

요 약

가새골조의 정확한 내진성능평가를 위해서는 실험과 유사한 이력거동과 파단 시점을 잘 예측할 수 있는 해석적 모델이 필요하다. 가새의 이력거동을 모사하기 위해 본 연구에서는 이전 연구자들에 의해 제안된 물리적 이론 모델을 사용하였다. 또한, 가새부재의 국부좌굴에 의한 파단 예측을 위해 피로변수의 보정계수를 도입한 손상 지표를 개선하였다. 결과적으로 실험과 해석 결과를 비교하여 콘크리트충전 각형 강관 가새부재의 국부좌굴 효과를 반영한 피로 보정계수를 판폭두께비에 따라 회귀분석을 통해 결정하고, 본 연구에서 제안한 해석 모델의 결과와 이전 연구의 결과를 비교하여 검증하였다.

keywords : 콘크리트충전, 가새부재, 물리적 이론 모델, 국부좌굴, 파단 예측

1. 서 론

가새골조시스템은 가새부재의 축강성으로 횡력에 저항하며, 좌굴과 항복이 교대로 반복 축변형을 받게 된다. 이때 압축시 국부좌굴의 발생으로 인한 성능저하는 인장력 작용시 부재의 조기파단을 유발시킬 수 있다(한상환 등, 2004). 이는 가새부재에 콘크리트를 충전함으로써 국부좌굴의 심각성이 감소하여 파괴수명이 증가함이 확인된 바 있다(Lee and Goel, 1987; 한상환 등, 2005). 이러한 콘크리트충전 가새부재가 충분한 연성과 에너지 소산능력을 보유하고 있는지 판별하기 위해서 실제 가새부재의 이력거동과 파단 시점을 유사하게 구현할 수 있는 해석 모델을 이용하여 시스템에 대한 정확한 내진성능평가가 수행되어야 한다. 이에 따라 국부좌굴의 영향을 고려한 물리적 이론 모델(Physical Theory Model)을 사용하여 피로(Fatigue)로 인한 파단을 포함한 실제 재료 특징을 반영한 거동특성을 구현하였다. 본 연구에서는 제안된 파단모델을 사용하여 콘크리트충전 각형 강관 가새부재의 피로변수 보정계수를 제안하고 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 가새부재의 해석 모델

본 연구에서는 여러 해석 모델 중 탄성 및 비탄성 거동하는 보요소와 가새 중앙부에 소성 힌지를 갖는 간단한 구조 형태를 기초로 하여 역학적 관점에서 이력거동을 형성하는 물리적 이론 모델을 바탕으로 하였다(Uriz, 2005). 해석 모델의 구성은 그림 1과 같다.

* 학생회원 · 한양대학교 건축환경공학과 석사과정 emijiek@nate.com

** 정회원 · 한양대학교 건축환경공학과 BK21 박사후 연구원 acttr@hanmail.net

*** 정회원 · 한양대학교 건축공학부 교수 swan@hanyang.ac.kr

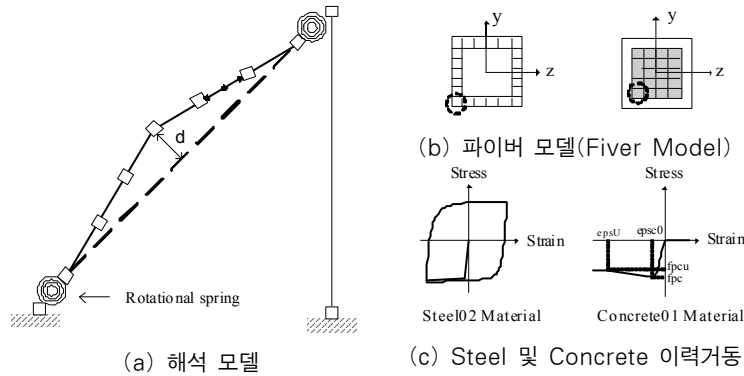


그림 1 가새부재의 해석 모델 구성

그림 1.(a)는 실제 가새부재를 해석 모델로 간략하게 형상화한 것이고, 변형률 이력을 정확하게 측정하기 위해 가새부재를 최소 20개의 요소로 나누었으며, 각 요소에는 총 7개의 적분점(Integration Point)을 가지고 있다. 또한 부재의 중앙점에 수직방향으로 부재 길이의 0.005%에 해당하는 초기 캠버(Initial Camber)를 주었다. 그림 1.(b)는 단면의 폭과 깊이를 각 15개층의 파이버로 분할한 것이고, 그림 1.(c)는 각 파이버에 초기 강성의 0.3%로 변형경화율(Strain Hardening Ratio)을 가정한 Menegotto-Pinto 모델과 Zero Tensile Strength 모델 적용하였다.

본 연구에서는 가새의 단부를 핀접합으로 가정하지 않고 가새 플레이트의 회전 강성을 고려하여 단부에 회전 스프링(Rotational Spring)을 사용하였다(Yang, et al., 2006). 이는 식 (1)을 계산하여 구한다.

$$K_r = \frac{EI}{5L_b} \quad (1)$$

여기서, K_r 는 가새 단부에서의 회전 강성, E 는 강재의 탄성계수, I 는 가새 플레이트의 면외방향에 대한 단면 2차 모멘트이며, L_b 는 가새부재의 총길이이다.

3. 가새부재의 파단 예측 해석

3.1. 파단에 대한 실험적 분석

콘크리트충전 가새부재의 일반적 거동은 초기에 좌굴하중(P_{cr})에 도달하여 전체좌굴이 발생한 후 사이클 증가에 따라 국부좌굴이 순차적으로 발생하여 중앙부에서 파단되는 형태를 나타내었다(한상환 등, 2005).

그리고, 콘크리트충전의 영향으로 가새부재의 면내방향 국부좌굴이 방지되고 압축플랜지가 면외방향으로 국부좌굴이 발생하는 형태로의 변화는 플랜지간의 거리가 증가하여 좌굴된 단면의 단면계수가 크게 감소하지 않게 된다. 따라서 국부좌굴 발생 후 소성모멘트 능력의 급격한 저하가 발생하지 않는다. 또한, 플랜지와 웨브에 국부좌굴이 시간적 간격을 두고 발생하며, 국부좌굴이 평평한 반구형 형상으로 집중되어 단면 성능의 급격한 저하를 방지함으로써 국부좌굴의 심각성을 감소시켜 파괴수명을 증가시키는 것으로 나타났다.

3.2. 파단 예측의 해석적 연구

본 연구에서 사용하는 물리적 이론 모델은 가새부재의 피로로 인한 파괴를 반영하여 파단을 예측하도록 파이버 모델(Fiber Model)을 사용한다. 피로 파괴를 반영하기 위해서는 파이버 모델에 특정 재료의 피로 특

징을 나타내는 피로변수 값을 사용해야 한다. 피로변수는 식 (2)와 같이 소성 변형률과 파괴수명의 관계를 나타낸 Coffin-Manson 식을 기초로 하여, 일정 진폭 실험(Constant Amplitude Test)을 통해 측정된 특정 재료의 파괴수명을 적용하여 결정한다.

$$\varepsilon = \varepsilon_0(N_f)^m \quad (2)$$

여기서, ε_0 와 m 은 피로변수로써 각각 한사이클로 파괴를 일으키는 변형률의 진폭, 로그화된 변형률 크기와 파괴수명의 민감도(기울기)를 뜻한다. N_f 는 파괴까지 사이클수이며, ε 는 일정한 변형률의 진폭 크기이다.

3.3. 국부좌굴을 반영하는 피로보정계수 제안

보통 피로변수는 재료의 특성에 따라 결정되는 계수이지만 동일한 재료를 사용하였다 하더라도 모든 부재의 형상에 대해서 동일한 피로변수 값을 사용할 수 없다. 이는 실제 크기의 부재 실험을 통해 얻은 재료의 피로 저항성과 피로실험(Fatigue Tset)을 통해 얻은 재료의 피로 저항성은 서로 상당한 차이가 있으며, 두 실험에서의 파단까지의 수명 또한 많은 차이가 발생하기 때문이다(Bruneau, et al., 1998).

따라서, 본 연구에서는 기존 파단모델에 국부좌굴에 의한 피로 저항성의 영향을 반영할 수 있도록 부재의 피로보정계수 α 를 도입하였다(서아영 등, 2010). 피로보정계수 α 값은 해석결과의 변형률을 이용하여 파단이 발생하는 시점에 이르렀을 때 식 (3)에서의 DI 가 1이 되도록 계산하였다(Uriz, 2005).

$$DI = \alpha \sum \frac{n_i}{(\varepsilon_i/\varepsilon_0)^{\frac{1}{m}}} \quad (3)$$

여기서, $m = -0.6392$, $\varepsilon_0 = 0.5171$ 의 값으로 피로실험을 통해 얻은 강재의 피로변수이고(Nip, et al., 2009), DI 는 각 변형률 ε_i 에 해당하는 손상을 Miner's rule에 의해 선형적으로 누적한 손상 지표(Damage Index)이다.

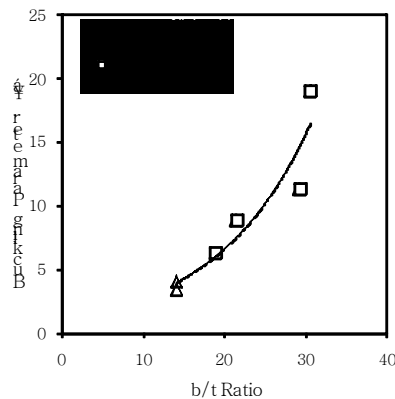


그림 2 판폭두께비에 따른 피로보정계수

그림 (2)는 판폭두께비에 따른 부재의 피로보정계수 결과로써, 판폭두께비가 증가할수록 부재의 피로보정계수도 증가하였으며, 그 경향이 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이는 판폭두께비가 클 경우 국부좌굴로 인해 피로 저항성이 급격하게 감소하여 파단수명이 줄어든 것을 의미한다(서아영 등, 2010). 회귀분석을 통해 구한 판폭두께비에 따른 피로보정계수 α 의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$\alpha = 1.17e^{0.09\left(\frac{b-2t}{t}\right)} \quad (4)$$

4. 해석결과 분석

그림 (3)은 판폭두께비가 21.44, 18.83인 가새부재의 실험결과(한상환 등, 2004)와 본 연구에서 제안한 파단 모델의 타당성을 검증하기 위해 비교하였다.

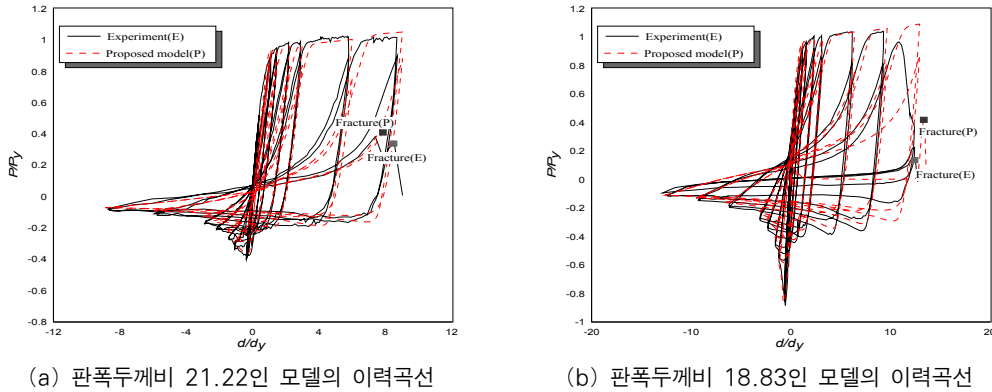


그림 3 실험결과와 본 연구에서 제안한 모델과의 비교

수행한 해석 결과 그림 (3)에서 보는 바와 같이 실제 실험의 파단 시점과 해석을 통해 얻은 파단 시점이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년 (주)포스코 Genesis연구과제 (2010Z074) 연구비 지원사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 수행할 수 있게 해주신 것에 대해 감사드립니다.

참고문헌

- 서아영, 문기훈, 한상환 (2010) 가새부재에서의 국부좌굴로 인한 파단 예측, **대한건축학회논문집 구조계** 26(12), pp.91~98.
- 한상환, 김욱태 (2005) 판폭두께비에 따른 콘크리트 충전 HSS 가새부재의 구조성능, **대한건축학회논문집 구조계** 21(2), pp.29~37.
- Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A., (1998) *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw-Hill, New York.
- Lee, S.S., and Goel, S.C., (1987) Seismic behavior of hollow and concrete-filled square tubular bracing members, Report No.UMCE 87-11, University of Michigan, Ann Arbor.
- Nip, K., et al. (2009) Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(1), pp.96~110.
- Uriz, P. (2005) Towards Earthquake Resistant Design of Concentrically Braced Steel Structures, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- Yang, T.Y., Jack, P.M., and Bozidar, S. (2006) Performance Evaluation of Innovative Steel Braced Frames, University of California, Berkeley.