

스트럿-타이 모델을 이용한 반복하중을 받는 철근 콘크리트 보의 전단피로손상거동에 관한 연구

A Study on the Shear Fatigue Damage Behavior of the Reinforced Concrete Beams Subject to Repeated Loading Using the Strut-Tie Model

오병환*

Oh, Byung Hwan

한승환**

Han, Seung Hwan

유 영***

You, Young

Abstract

This paper represents the investigation of the shear fatigue behavior and damage procedure of reinforced concrete beams subject to repeated loading using the strut-tie model. Damage Index is defined as the ratio of deflection at each cycle to the ultimate deflection of inelastic region. Two types of strut-tie model are designed according to the inclined angles of concrete-struts and the consideration of concrete-ties. In one model, aggregate interlock and resistance of uncracked concrete are regarded as the main shear resisting mechanism and in the other, stirrup is. The results show that the strut-tie model combined with damage index can describe the shear fatigue behavior of RC beams subject to repeated loading effectively.

1. 서 론

본 연구의 목적은 철근 콘크리트 보 구조물의 반복하중에 의한 손상의 누적과정과 그 현상을 실험적 분석을 통하여 규명하고, 그 손상의 정량적 평가를 위한 이론적 연구를 수행함에 있다. 기존의 피로실험은 주로 각 변수에 따른 구조물의 수명예측에 관심을 두고 진행되어 왔으나 본 연구에서는 반복되는 하중이 구조물의 거동에 어떤 변화를 발생시키는지 그 손상과정을 주 관심대상으로 하였다. 특히 전단

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 한국도로공사 연구원

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정

파괴양상을 보이는 철근 콘크리트 보의 거동이 반복하중 재하시에 어떤 특성을 보이는가를 관찰하기 위하여 전단설계의 기본개념으로 널리 쓰이는 스트럿-타이 모델을 이용하였다. 극한해석에 주로 쓰이는 스트럿-타이 모델을 피로손상을 입는 철근 콘크리트 보의 모델로 채택하여 그 손상과정에 대한 면밀한 관찰을 통해 부재 내부의 힘의 흐름과 손상의 누적과정을 규명하고자 하였다.

2. 단순 지지된 철근 콘크리트 보의 스트럿-타이 모델

전단을 받는 구조물의 설계에 일반적으로 많이 쓰이는 모델이 스트럿-타이 모델이다. 스트럿-타이 모델은 주로 설계의 목적으로 쓰이므로 극한해석모델이라고 보는 것이 타당하다. 그러나 본 실험에서는 첫 cycle에서 이미 경사균열이 발생하기 시작하므로 스트럿-타이 모델을 적용하는데 큰 무리가 없다고 볼 수 있다. 스트럿-타이 모델에서는 다음의 표와 같이 모델링을 하게 된다. 일반적인 스트럿-타이 모델은 다음과 같다.

3. 철근 콘크리트 보의 정적 및 동적 재하실험

표 1 스트럿-타이 모델의 구성성분⁴⁾

철근 콘크리트 보	스트럿-타이 모델
인장철근	하현(인장)
압축영역	상현(압축)
스터립	타이(인장)
복부 콘크리트	스트럿(압축)

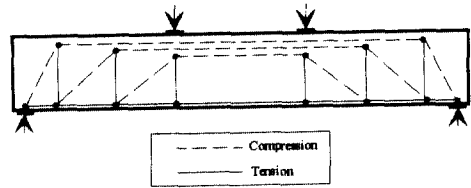


그림 1 스트럿-타이 모델

3.1 철근 콘크리트 보의 정적 재하실험 및 결과

정적 재하실험은 동적실험 전에 철근 콘크리트 부재의 경사균열강도 및 스테리프 항복강도, 극한강도를 구하기 위한 실험이다. 실험변수는 전단철근량이다. 전단철근량은 전체 부재를 A, B-series로 나누고, 전단파괴를 일으키는 최대전단철근량의 0%, 75%를 각각 배근한다. 재하는 4점 재하를 하게되

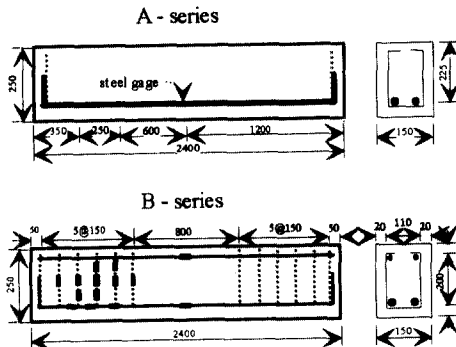


그림 2 정적 재하의 실험부재

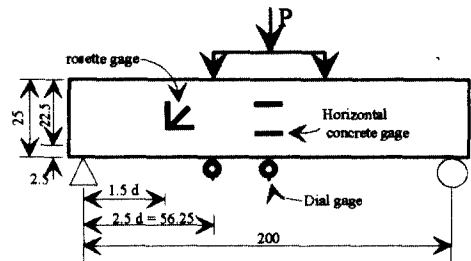


그림 3 정적 재하도

며, a/d (shear span to depth ratio)는 2.5로 고정시킨다.

A-series는 전단파괴를 일으키는 극한하중을 P_u 로 보았고, B-series는 전단철근의 항복시점을 P_y 로 하였다. 실험결과에 의하면 A-series의 항복강도는 12.5(t)이었고, B-series의 항복강도는 16.875(t)이었다.

3. 2 철근 콘크리트 보의 동적 재하실험 및 결과

실험변수로는 전단철근량, 하중범위, 재하횟수 등이 있다. 하중범위는 항복강도 P_y 를 결정하여 $0.8P_y$ 를 최대하중(P_{max})으로 재하하고, $0.1P_y$, $0.2P_y$, $0.4P_y$ 를 각각 최소하중으로 재하한다. 하중범위(R)는 다음과 같이 정의한다.

$$R = \frac{R_{max} - P_{min}}{P_y} \quad (1)$$

하중범위(R)는 0.4, 0.6, 0.7로 재하횟수는 10^3 , 10^4 , 10^5 로 변화시켜가며 재하한다. 재하위치는 a/d (shear span to depth ratio)를 2.5로 고정시킨 상태에서 3Hz의 재하속도로 반복하중을 가하였다. 각 재하횟수에서 처짐과 변형도, 균열의 전파 등을 측정하였고, 반복재하가 끝난 부재에 대해서는 잔류강도의 측정을 위해 파괴 시까지 정적 재하를 가하였다.

표 2 A, B-series의 실험결과

시편 번호	재하횟수(N)	하중범위(R)	P_{cr}	P_{res}
AS1	1	0.7	5.95t	1회 파괴
AS2	1364	0.6	5.01t	재하도중파괴
AS3	10000	0.4	5.99	11.48t
BS1	10000	0.7	6.44t	16.53t
BS2	100000	0.7	7.07t	15.04t
BS3	1000	0.7	6.91t	20.89t
BS4	10000	0.6	7.01t	20.04t
BS5	10000	0.4	6.9t	21.47t

4. 결과 분석

4. 1 손상지수의 정의

본 연구에서는 비탄성영역에서 극한상태의 처짐량에 대한 각 재하횟수에서의 처짐량의 비를 구하여 이를 손상지수로 이용하였다. 그리고 상수 α 를 이용하여 반복재하의 효과를 Damage Index에 포함시켰다.

$$w_i = \left(\frac{D_i - D_{cr}}{D_{ul} - D_{cr}} \right)^\alpha \quad (2)$$

w_i : 각 재하횟수에서의 손상값
 D_w : 극한상태의 처짐량(mm)

D_i : 각 재하횟수에서의 처짐량(mm)
 D_w : 최대 탄성 처짐량(mm)

$$1 \leq N \leq 100 \quad : \alpha = \sqrt[3]{\frac{100}{N}}$$

α : 상수

$$100 < N \leq 100000 : \alpha = 1$$

B-series에 대해 결정된 Damage값을 회귀분석을 통하여 다음의 함수로 표현하였다.

$$1 \leq N \leq 100 \quad : \quad w(N) = 0.03869 + 0.25772 \log N \quad (3)$$

$$100 \leq N \leq 100000 \quad : \quad w(N) = 0.55413 + 6.09382e^{-7 \cdot N} \quad (4)$$

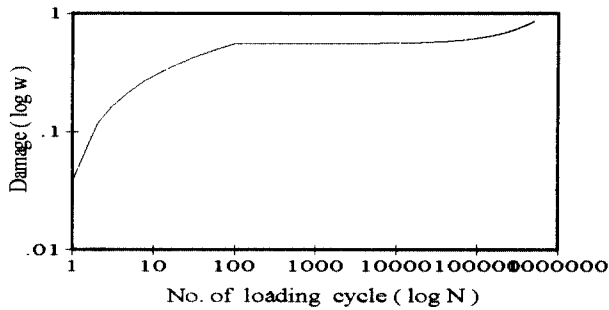


그림 4 손상지수의 회귀분석을 통한 손상함수

4.2 스트럿-타이 모델

모델링에서 하현은 철근 콘크리트 보의 인장철근의 위치와 단면제원을 그대로 사용한다. 상현은 압축을 받는 콘크리트 뿐 아니라 압축철근까지 고려한다. 그리고 상하현 사이의 거

리는 압축철근과 인장철근의 거리로 하였다. 스트럿의 단면적의 산정은 매우 불확실한 것이지만 단 순화를 위하여 1개 타이(스터럽)의 부담면적 225cm^2 에 $\sin(\text{경사각})$ 을 고려하여 단면적을 계산하였다. 스트럿의 경사각은 실제의 균열각과 깊은 관계가 있다. 실험을 관찰한 결과 100회 이상의 재하시 부터 반복효과에 의한 손상의 누적이 확연해지므로 100회 이전의 모델과 이후의 모델을 각각 만들었다. 스트럿의 경사각이 타이(스터럽)의 변형도나 응력이 가장 큰 영향을 미치는 변수이다. 100회 재하 이후의 모델에서는 실제로 발생한 주균열의 평균값을 이용하여 약 33° 로 하였고, 100회 재하 이전의 모델에서는 실제 균열도 및 균열의 불규칙성을 반영하여 33° 보다 작도록 모델링을 하였다.

반복하중에 의한 손상의 고려를 위해서 콘크리트의 탄성계수를 $E_c = E_{c0}(1-w)$ 와 같이 줄여주었다. 그러나 철근은 그 물성을 고려하여 손상을 무시하였다.

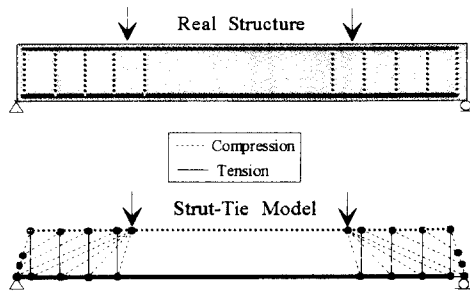


그림 5 100회 재하 이전

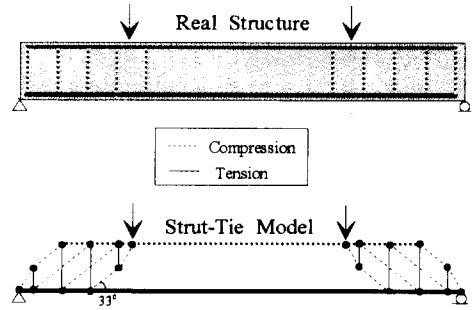


그림 6 100회 재하 이후

4.3 동적실험결과와 해석값의 비교분석

처짐(deflection) 및 반복하중의 최대값 P_{max} 에 대해 스테럽의 변형도를 비교한 결과는 다음과 같다.

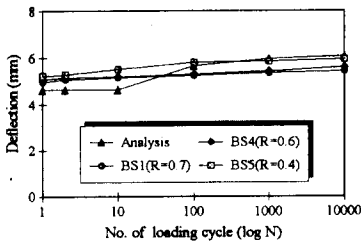


그림 7 동적실험결과와 해석값의 비교

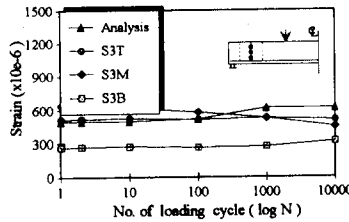


그림 8 BS1(R=0.7)의 스테럽(S3)

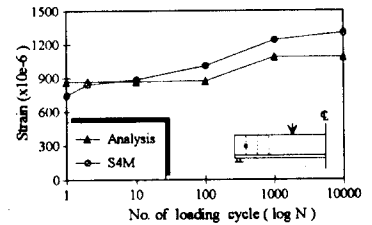


그림 9 BS1(R=0.7)의 스테럽(S4)

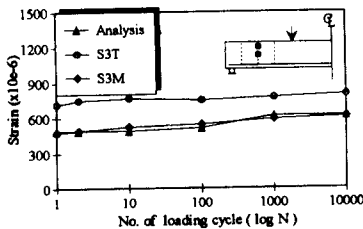


그림 10 BS4(R=0.6)의 스테럽(S3)

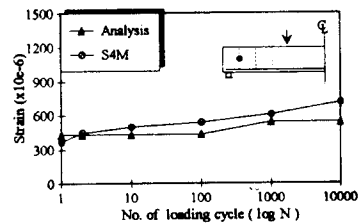


그림 11 BS4(R=0.6)의 스테럽(S4)

5. 결 론

본 연구에서는 전단파괴가 발생하는 철근 콘크리트 보에 반복하중을 재하하여 그 거동의 해석에 스트럿-타이 모델을 이용하였다. 재하횟수에 따른 처짐량, 스테럽의 변형도를 손상지수를 고려한 스트럿-타이 모델을 이용한 해석결과와 비교·분석하였다.

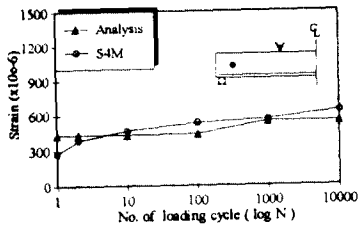


그림 12 BS5(R=0.4)의 스테럽(S3)

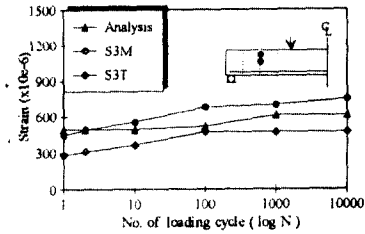


그림 13 BS5(R=0.4)의 스테럽(S4)

본 연구의 결과에 의하면 스트럿-타이 모델은 전단피로하중을 받는 철근 콘크리트 보의 전단의 흐름과 그 경향을 어느 정도 정확하게 해석한다고 할 수 있다. 따라서 스트럿-타이 모델은 설계 외의 해석적인 목적에도 매우 효과적인 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. A M Neville, "Properties of Concrete," PITMAN, 1981
2. Arther H. Nilson and George Winter, "Design of Concrete Structures," McGraw Hill, 1986
3. Mitchell P.Collins and Denis Mitchell, "Prestressed Concrete Structures," Prentice Hall, 1991
4. Jorg Schlaich, Kurt Schafer and Mattias Jennewein "Toward a Consistent Design of Structural Concrete," PCI Journal, May-June 1987, pp.74-150
5. 윤영목, 박문호, "스트럿-타이 모델 방법에 의한 단순지지 철근 콘크리트 보의 해석," 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 5호, 1995년 9월, pp.1097-1112
6. Tepfers, Ralejs, "Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete," ACI Journal, Proceedings V.76, No.8, Aug.1979, pp.919-933
7. Hsu,T.T.C., "Fatigue of Plain Concrete," ACI Journal, Proceedings V.78, No.4, Apr.1981, pp.292-304
8. K.E.L land, "Continuous Damage Model for Load-Response Estimation of Concrete," EMENT and CONCRETE RESEARCH. V.10, 1980, pp.395-402
9. Julie A. Bannantine, Jess J.comer and James L. Handrock "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, 1990