

反復크리프 특성을 이용한 疲勞荷重을 받는 RC 보의 휨損傷 研究

A Study on the Flexural Damage of RC Beams Under Fatigue Loading Using A Cyclic Creep Characteristics

오 병 환* · 김 동 욱** · 홍 경 욱**
Oh, Byung Hwan · Kim, Dong Wook · Hong, Kyung Ok

Abstract

The creep strain of the compression zone of concrete beams subjected to cyclic loading should be a significant factor in increasing strain and deflections. An analytical model which is similar to a previous one is presented to predict the increase in cyclic creep strain and the damage using the properties of the constituent materials: concrete and steel. The analytical expressions are compared with our experimental data. The effect of concrete-creep is accounted by the term E_n , $I_{cr,n}$, and $M_{cr,n}$. In this study, it is proved that cyclic creep exponents 'n' in Cyclic Creep Model, according to the parameters- strength, range of stress - have the various values. It is hoped that with the availability of more experimental data and better understanding of some of the complex behavior, the model could be further improved.

1. 서론

철근 콘크리트 보의 피로손상 메카니즘을 휨으로 인한 압축영역의 콘크리트의 반복크리프 특성으로 모사를 하고자 한다. 피로현상에 크리프의 특성을 고려 하므로써 실제의 사용하중상태에서 크리프와 피로가 공존함을 반영한다. 반복크리프 모델에서, 철근콘크리트 보의 휨손상 진행에 따른 압축영역의 손상속도를 정확히 대표할 수 있는 것은 반복크리프 모델의 '반복크리프 지수(n)'이다. 강도의 변화 및 하중크기의 변화에 따라서 그 지수가 어떠한 경향을 갖는지 알아본다. 그래서, 반복크리프 모델과 그 특성을 알아보도록 하고, 이를 위해 장기간에 걸쳐 강도별, 하중크기별로 많은 철근콘크리트 보를 제작하여 정적 및 동적 피로실험을 수행하였다. 보 중앙부의 처짐과 변형도를 실험과 이론의 기본적인 비교기구로 두고 두가지 변수에 대한 모델의 경향파악과 장기손상예측을 하고자 한다.

2. 반복 크리프 모델

2.1 반복크리프 정의

반복크리프(cyclic-creep)란 반복하중하에서 크리프의 증가를 뜻하고, 크리프피티그(creep-fatigue),

* 정회원, 서울대학교 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

동적크리프(dynamic-creep)로 불리워지기도 한다. 반복의 평균응력을 지속하중으로 바꾼 크리프하중의 상관적인 관계로 크리프를 측정한다. 또한 최대응력은 순수한 하중의 반복함수로 반복크리프 모델의 한 부분을 구성한다. 전자의 하중은 크리프 변형도로 전환이 되고 후자는 피로의 영향만이 변형도를 반영한 것으로서 한가지 피로현상에서 두가지 메카니즘을 중첩의 원리로서 표현하고 있다.

○ Creep Model (BP Basic creep Model)

$$\begin{aligned} \epsilon_{max} &= \epsilon_e + \epsilon_t && \blacktriangleright \text{탄성 + 시간 (Basic Creep)} \\ &= " + \epsilon_{creep} && \blacktriangleright \text{탄성 + 크리프} \\ &= \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma\phi}{E_0} (t^{-m} + a')(t-t')^n \end{aligned} \quad (1)$$

○ Cyclic Creep Model

BP모델에서 ,

$$(t-t')^n \rightarrow [(t-t')^n + RN^n] \quad \blacktriangleright \text{(시간 + 반복)함수}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{max} &= \epsilon_e + \epsilon_c && \blacktriangleright \text{탄성 + 반복크리프} \\ &= " + \epsilon_{creep} + \epsilon_{fatigue} && \blacktriangleright \text{탄성 + 크리프 + 피로} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma\phi}{E_0} (t^{-m} + a')(t-t')^n + \frac{\sigma\phi}{E_0} (t^{-m} + a)RN^n \\ &\approx \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\alpha\sigma_m(t-t')^{n1}}{E_0} + \frac{\beta\sigma_m RN^{n2}}{E_0} \end{aligned} \quad \blacktriangleright \text{계수 결정} \quad (2)$$

$$\approx \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\alpha\sigma_m(t_d)^n}{E_0} + \frac{\beta\sigma_m R N^n}{E_0} \quad \blacktriangleright \text{보다 간략화된 모델} \quad (3)$$

$$= f(\sigma_{mean}, \sigma_{range}, t, t', N)$$

- 여기서 , σ_m : 평균응력; σ_{range} : 응력범위(R)
 E_0 : 초기 합성 탄성계수; t : 하중재하 시점 (hours)
 t' : 하중재하 종료점 (hours); t_d : 총하중재하기간(hours)
 ϵ_e : 탄성변형도 ϵ_c : 반복크리프 변형도
 ϵ_{creep} : 크리프 변형도 $\epsilon_{fatigue}$: 피로 변형도
 N : 하중 반복횟수 n : 반복크리프 지수(n1, n2)

2.2 Whaley-Neville의 연구 결과

Whaley-Neville은 반복크리프를 실험적으로 관계식을 얻었는데 다음과 같다.

$$\epsilon_c = 129 \sigma_m (1 + 3.87 R) dt^{1/3} \quad (4)$$

$$\epsilon_c = 129 \sigma_m t_d^{1/3} + 178 \sigma_m RN^{1/3} \quad (5)$$

여기서, 모든 응력(σ): f_c' 에 대한 응력비율($\frac{\sigma}{f_c'}$)

2.3 반복크리프 지수 (Cyclic Creep Exponent)

Whaley-Neville 은 앞에서와 같이 반복크리프 지수를 1/3으로 보았다. 그림 2 에 Whaley-Neville 의 지수와 저자의 실험결과와 비교를 통해 반복크리프지수의 변화 필요성을 보여주고 있다.

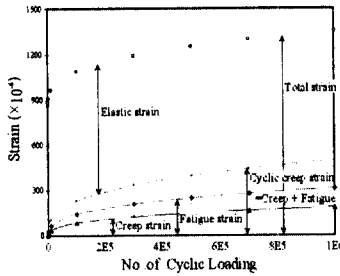


그림 1. 반복크리프 모델의 변형도 구성

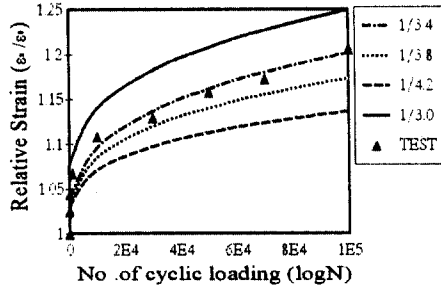


그림 2. 반복크리프 지수의 변화

3. 반복크리프 모델의 보의 힘에 응용

3.1 반복 크리프의 휨강성에 영향

3.2.1 콘크리트 탄성계수에 영향

주어진 반복회수에서 최대응력에 대한 탄성변형과 크리프 변형도를 합하면 총 변형도가 계산된다. 그래서, 압축영역의 콘크리트의 탄성계수를 변화시키고 이에 따라서 그 관계식은 다음과 같다.

$$E_n = \frac{\sigma_{\max}}{\epsilon_{\max}} = \frac{\sigma_{\max}}{\epsilon_e + \epsilon_c} = \frac{\sigma_{\max}}{\frac{\sigma_{\max}}{E} + \epsilon_c} \quad (6)$$

여기서, E : 초기활선탄성계수 ; E_n : N 회 반복하중을 받은 후의 탄성계수

3.2.2 유효단면 2차모멘트에 영향

정적하중에서 인장영역에서의 휨균열들을 고려한 콘크리트의 단면에 대한 영향은 ACI 318-77에서 유효단면2차모멘트를 사용하여 권장하고 있다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \rightarrow I_{e,n} = \left(\frac{M_{cr,n}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr,n}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr,n} \leq I_g \quad (7)$$

(1) 휨인장강도의 변화

$$f_{r,n} = f_r \left(1 - \frac{\log_{10} N}{\gamma}\right) = f_r \left(1 - \frac{\log_{10} N}{10.954}\right) \quad (8)$$

(2) 휨균열모멘트 변화

$$M_{cr,n} = \frac{I_g * f_{r,n}}{y_t} \quad (9)$$

3.2 처짐에 영향

따라서, 새로운 유효강성 $E_n I_{e,n}$ 가 강성으로 사용이 된다. 다음과 같은 관계식으로 정리된다.

$$\delta = \frac{F(Loads, spans)}{EI_e} \rightarrow \delta_N = \frac{F(Loads, spans)}{E_N I_{e,N}} \quad (10)$$

여기서, $Loads = P_u \times Range$

4. 철근콘크리트 보의 정적·동적 피로실험

철근 콘크리트 보의 정적, 동적실험을 시행하였다. 거푸집 제작, 철근조립, 콘크리트 타설 및 양생의 과정을 거쳐 완성된 철근 콘크리트 보는 그림 4와 같이 4점재하방식으로 피로하중을 재하한다.

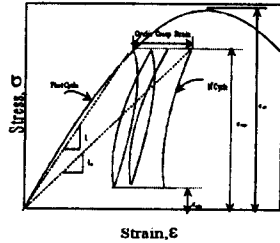


그림 3. 반복순상에 의한 탄성계수의변화

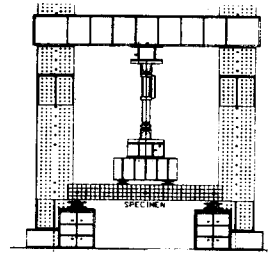


그림4. 가력장치 단면도

5. 피로실험결과와 해석과의 비교

5.1 콘크리트 압축변형도와 초기에 대한 상대적 비율

콘크리트 압축변형도를 반복하중 1회에 대한 상대적 변형도 비율을 그림 7에 보여주고 있다.

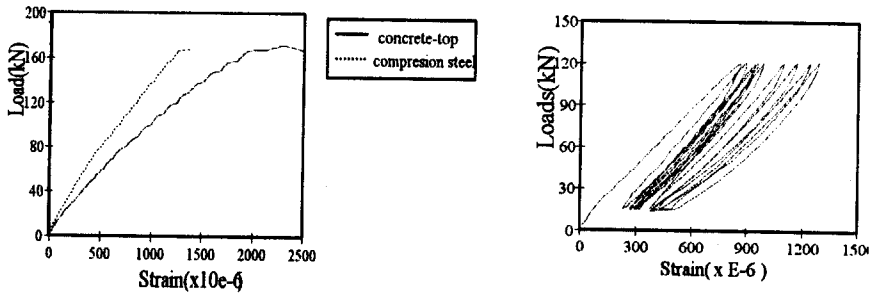


그림 5. 정적 및 동적 재하시험결과 (좌:정적시험변형도, 우:동적피로 시험도)

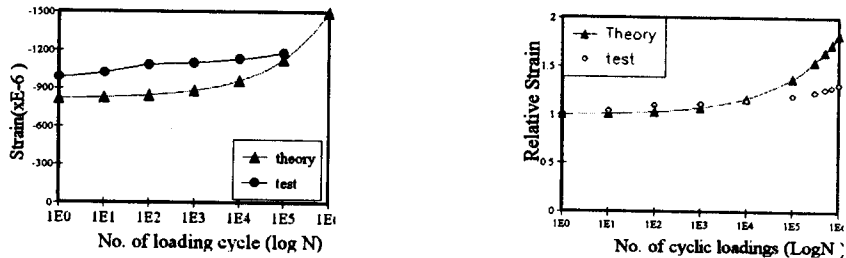


그림 6. 콘크리트 압축변형도의 증가

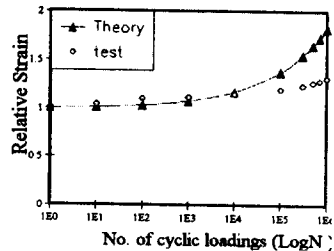


그림 7. 콘크리트 압축변형도의 상대증가량

6. 반복크리프 지수 경향과 결론

실험의 결과를 바탕으로 반복크리프 모델의 지수를 산출하였다. 실험에 의한 손상의 정도를 초기손상에 대한 반복횟수가 증가하면서 상대적인 손상의 비율로 비교를 해서 모델에 적용했을 때 가장 잘 맞는 반복크리프 지수를 결정하였다. 그 결과를 아래에 도표로 정리하였다. Whaly의 경우와 비교를 하였을 경우에 본 연구의 결과에 의한 지수가 작은 경향을 보여주고 있다.

표 1. 변수에 따른 반복크리프 지수

▶ Whaley: n = 1/3.0		콘크리트 압축강도(MPa)		
		28	45	70
처짐	0.7Pu	1/4.0	1/3.8	1/3.65
	0.85Pu	1/3.4	1/3.2	1/3.0

6.1 강도에 따른 영향

강도의 변화에 대해서 반복크리프 지수의 경향을 정리하였다. 강도가 28MPa에서 70MPa로 커지면서 지수는 커지는 경향을 보여주고 있다. 순수한 크리프모델의 지수에 있어서도 강도의 증가에 의해서 커지는 경향을 보여주고 있어 위의 결과를 어느 정도 입증해 줄 수 있을 것으로 본다.

6.2 하중범위에 따른 영향

강도변화와 더불어 하중범위에 따른 영향을 정리해 보았다. 하중범위가 커지면서 반복크리프 지수는 강도변화 만큼은 아니지만 조금씩 커지는 경향을 보여 주고 있다. S-N곡선에서 하중범위의 영향이 커지면서 곡선의 기울기가 급해진다는 것을 보면 위의 사실을 어느 정도 입증해 준다고 사료된다. 그림에 그 경향과 하중범위의 영향에 따른 반복크리프 지수의 회기식을 유도하였다.

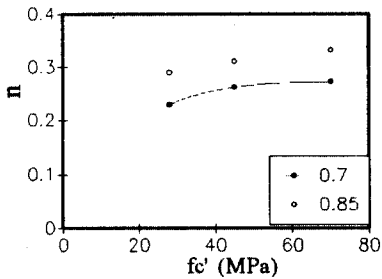


그림 8. 강도에 따른 반복크리프 지수

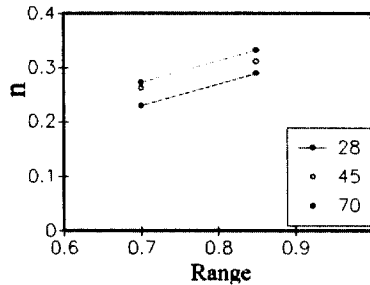


그림 9. 하중범위에 따른 반복크리프 지수

7. 결론

반복크리프 지수는 강도가 커지면서 커지는 경향을 보여주었고, 또한 하중범위가 커지면서도 비례하는 경향을 보여주었다. 이것은 강도와 하중범위의 영향에 의해서 피로의 진전속도 뿐만 아니라, 크리프의 진전속도도 비슷한 영향을 갖는 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

1. Bazant Z. P. and Wittmann F. H. , "Creep and Shrinkage in Concrete Structures", A Wiley-Interscience Publication, 1982
2. Bazant Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete", A Wiley-Interscience Publication, 1988
3. Neville M., Dilger W. H., and Brooks J. J., "Creep of plain and structural concrete", Construction Press, 1983
4. Neville A. M., "Properties of Concrete", PITMAN, 1981
5. Balaguru P., Shah S. P., "A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading", ACI-SP75, 1982, pp. 153-176
6. Bazant Z. P., and Wang T. S., "Practical prediction of cyclic humidity effect in creep and shrinkage of concrete",
7. ISFF '91, "Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures", ISFF '91 PRECEDINGS, Dec. 19-21, 1991
8. Balaguru P., Shah S. P., "A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading", ACI-SP75, 1982, pp. 153-176
9. Balaguru P., "Analysis of Prestressed Concrete Beams for Fatigue Loading ", Prestressed Concrete Institute Journal, Vol. 26, May-Jun. 1981, pp. 70-94.
10. Whaley C. P. and Neville, A. M., "Non-elastic Deformation of concrete Under Cyclic Compression", Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, Sep. 1973, pp. 145-154.
11. ACI Committee 215, "Consideration for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI Journal, Vol.71, No. 3, Mar. 1974, pp. 97-121
12. Sparks P. R. and Menzies J. B., "The Deflection of Reinforced Concrete Beams Under Fluctuating Load with a Sustained Component", The Structural Engineer, Vol. 51, No. 11, Nov. 1973, pp. 413-420
13. Comite Euro-International Du Beton, "RC Elements Under Cyclic Loading", State of the Art Report of CEB, 1996
14. Chu K. H. and Carreriara D. J., "Time-Defendent Cyclic Deflections in R/C Beams", ASCE, Vol. 112, No. 5, May 1986, pp. 943-959
15. Mor A., Gerwick B. C., and Hester W. T., "Fatigue of High-Strength Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 2, Mar-Apr. 1992, pp. 197-206
16. Bazant Z. P., and Wang T. S., "Practical prediction of cyclic humidity effect in creep and shrinkage of concrete",
17. Paulson K. A., Nilson A. H., and Hover K. C., "Long-Term Deflection of High-Strength Concrete Beams", ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, Mar-Apr. 1991, pp. 197-206