

피로하중을 받는 철근콘크리트 휨부재의 처짐산정을 위한 반복크리프 모델

오병환^{1)*} · 김동욱²⁾

¹⁾서울대학교 토목공학과 ²⁾유신코퍼레이션

2001년 1월 9일 접수, 2001년 7월 2일 심사완료)

Cyclic Creep Model for the Deflection Calculation of Reinforced Concrete Flexural Members under Fatigue Loads

Byung-Hwan Oh^{1)*} and Dong-Wook Kim²⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Yooshin Corporation, Yooshin Bldg., 135-936, Korea

(Received on January 9, 2001, Revised on July 2, 2001)

ABSTRACT

The present paper focuses on the development of a realistic analysis model for the deformation calculation of reinforced concrete beams subjected to fatigue loadings. The proposed model considers the effect of cyclic creep, which arises from the repeated loading, to calculate the deformation of reinforced concrete beams. A comprehensive experimental program has been set up to identify the deformation accumulation of reinforced concrete beams under repeated loadings. The major test variables were the concrete compressive strength and the magnitude of fatigue loads. The model was calibrated from the present test results. The proposed model allows more realistic analysis of reinforced concrete beams under fatigue loads, especially deformation accumulation of such beams.

Keywords: reinforced concrete, cyclic creep, fatigue, flexural damage, repeated loading

1. 서 론

최근 들어 철근콘크리트 보에 대한 피로연구들이 많이 이루어지고 있으며 이렇게 다양한 연구들에 사용된 접근 방식에는 통계적, 손상역학적, 파괴역학적 방법들이 쓰이고 있다^{1,2)}.

실질적으로 철근콘크리트 구조물의 피로하중을 받는 경우 처짐과 균열의 증가현상이 나타나며, 이것은 압축영역에서 반복응력 작용에 따른 크리프의 발생과 함께 인장영역에서 균열진전으로 인한 철근과 콘크리트사이의 부착력의 점진적인 약화, 인장철근의 반복변형을 작용으로 인한 손상누적 등의 상호작용으로 인한 유효휨강성(E_{ef})의 저하현상으로 설명될 수 있다³⁾. 그러나, 아직까지 반복하중을 받는 철근콘크리트 보에 피로손상과 피로지속하중에 의한 크리프에 영향을 합리적으로 고려하지 못하여 왔다. 따라서, 본 연구의 목적은 반복피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 처짐의 증가현상 등의 손상누적을 잘 예측하기 위하여 합리적인 반복크리프 모델을 정립하여 이를

실제부재에 적용하는데 있다. 뿐만아니라, 철근콘크리트 보의 휨파괴 기구에서 압축영역의 콘크리트 변형률 증가를 주된 손상기구로 보아 기존의 접근법과는 차이를 갖는다.

이를 위해 반복크리프 모델을 유도하고, 이의 적용을 위하여 철근콘크리트 보에 대해 반복피로실험을 수행하였다. 주요 실험변수는 콘크리트 강도와 하중크기로서, 강도는 보통강도 콘크리트(28 MPa), 고강도콘크리트(45 MPa), 그리고 초고강도콘크리트(70 MPa)까지 실험을 수행하였다. 피로하중의 크기는 최대정적 파괴하중의 70 %($R_1=0.61$)와 85 %($R_2=0.76$)로 하여 실험을 수행하였다.

2. 반복크리프 거동과 모델

2.1 반복크리프 거동

반복크리프(cyclic creep)란 반복하중하에서 크리프의 증가를 뜻하고, 피로크리프(creep fatigue), 동적크리프(dynamic creep)로 불려지기도 한다. 평균응력은 지속하중으로 고려하고 최대응력과 최소응력에 의한 하중범위는 피로하중의 영향을 고려한다. 즉, 전자의 하중은 크리프 변형률로 전환이 되고 후자는 피로의 영향만이 포함된 변

* Corresponding author

Tel : 02-880-7350 Fax : 02-887-0349

E-mail : civilcon@gong.snu.ac.kr

형률을 반영한 것이다. 따라서, 한가지 피로현상에서 두가지 메카니즘을 중첩의 원리로서 표현할 수 있다.

만약에 반복하중의 가력형태를 싸인함수로 고려 할 때에 응력은 다음 식 (1)과 같이 시간에 따라 변동한다²⁾.

$$f = f_m + \frac{\Delta}{2} \sin(2\pi\omega t) \quad (1)$$

여기서, $f_m = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$

$\Delta = f_2 - f_1$

ω : 초당하중재하수

t : 시간(sec)

2.2 반복크리프 모델

철근콘크리트 구조물에 작용하는 전체변형률은 식 (2)와 같이 탄성변형률과 시간에 따른 변형률로 표현할 수 있다. 여기서, 시간에 따른 크리프변형률 ϵ_{creep} 은 Bazant 모델에 의해 표현하였다⁴⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon_{max} &= \epsilon_e + \epsilon_t \\ &= \epsilon_e + \epsilon_{creep} \\ &= \frac{f}{E_0} + \frac{f\phi}{E_0} (t'^{-m} + \alpha')(t-t')^n \end{aligned} \quad (2)$$

상기식은 단순히 시간에 따라 발생하는 크리프변형률만 표시된 것이고, 반복하중에 의한 영향은 고려되지 않은 것이다. 따라서, 반복하중의 범위 R의 작용에 따른 영향을 고려하여 본 연구에서는 식 (2)에서 하중재하시점 $(t-t')$ 의 영향에 반복하중의 횟수 N의 영향을 고려하여 식(3)과 같이 수정제시하였다⁵⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon_{max} &= \epsilon_e + \epsilon_t \\ &= \epsilon_e + \epsilon_{creep} + \epsilon_{fatigue} \\ &= \frac{f}{E_0} + \frac{f\phi}{E_0} (t'^{-m} + \alpha')(t-t')^{n_1} + \frac{f\phi}{E_0} (t'^{-m} + \alpha)RN^{n_2} \\ &= \frac{f}{E_0} + \frac{\alpha f_m (t-t')^{n_1}}{E_0} + \frac{\beta f_m RN^{n_2}}{E_0} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, f_m : 평균응력, R: 응력범위

t : 하중재하시점, t' : 하중재하종료시점

$(t-t')$: 하중재하시점, E_0 : 초기 탄성계수

한편, Whaley-Neville은 반복크리프를 실험적으로 관계식을 얻었는데 다음과 같다²⁾.

$$\epsilon_t = 129 f_m t_d^{1/3} + 178 f_m RN^{1/3} \quad (4)$$

여기서 ϵ_t : 반복하중에서의 반복크리프 ($\times 10^{-6}$)

t_d : 반복하중 작용시간(hours)

위에 식(4)에서는 하중재하 시간과 하중반복횟수 N에 대하여 동일한 지수 n을 적용하였다. 앞에서 유도한 식(3)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \frac{f}{E_0} + \frac{\alpha f_m (t_d)^{n_1}}{E_0} + \frac{\beta f_m RN^{n_2}}{E_0} \quad (5)$$

위 식(5)를 보면 응력의 최대치와 최저치에 의한 응력범위 R, N, 재하시점과 속도를 알면 총변형률과 크리프변형률을 예측할 수 있으며, 또한 식 (4)와는 달리 지속시간 t_d (즉, 크리프의 영향고려)와 반복회수 N(즉, 피로손상의 고려)의 지수를 크리프 지수 n_1 , 피로반복지수 n_2 로 각각 다르게 고려할 수 있도록 한 것이다. 이와 같이 총변형률은 탄성변형률 외에 평균지속하중에 의한 크리프변형률, 그리고 반복하중성분에 의한 변형률을 합하여 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다.

총변형률은 식(5)에서 보듯이 계수 α, β 뿐만아니라 재하시점 t_d 와 반복횟수 N에 대한 지수 n_1, n_2 에 따라서도 큰 영향을 받게된다. 초기탄성변형률이 크더라도 최종적인 변형률에 큰 차이가 없다면 피로의 영향이 작다고 보고, 역으로 초기 변형률이 작더라도 상대적으로 최종변형률이 크다면 피로의 영향이 크다고 볼 수 있다. 따라서, 반복크리프 모델에서 이러한 경향의 반영은 반복크리프 지수로 결정이 된다.

본 연구에서는 지속하중의 크리프 영향을 고려하는 지수 α 및 β , n_1 은 Bazant 및 Whaley-Neville, Balagru의 모델에 따르고, n_2 는 본 연구에서 피로실험을 통하여 실험결과로부터 결정하고자 한다.

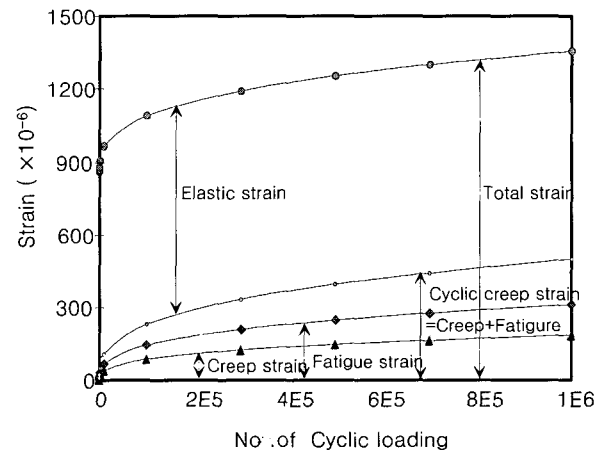


Fig. 1 Strain components of creep model

2.3 반복크리프 모델의 특성

반복크리프에 의한 변형률은 평균응력, 응력범위, 최초의 작용시점, 작용기간, 반복횟수 등의 다양한 인자들의 영향으로 이루어진다. 이들 인자중에서 작용되는 응력과 작용시점이 정해질 경우 결국, 이 모델은 작용기간(t), 반복횟수(N)의 함수로 이루어진다. 이것을 다시 쓰면 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \frac{f}{E_0} + \frac{\alpha f_m t_d^{n_1}}{E_0} + \frac{\beta f_m R N^{n_2}}{E_0} \\ &= f(f_{mean}, R, t, t', N) \\ &= f(t, N) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 함수 f(t,N)는 각각 시간 t와 N에 대해서 편미분이 될 수 있다. 이러한 편미분은 각각의 변화에 대한 변형률의 증가율을 의미한다. 즉, t에 대해 미분이 된 것은 크리프 손상의 속도를 의미하는 것이고(식(7)), N에 대해 미분을 한 것은 피로에 대한 손상영향 속도를 의미하는 것이다(식(8)).

$$df/dt = \frac{\alpha f_m}{E_0} n_1 t_d^{n_1-1} = V_c \quad (7)$$

$$df/dN = \frac{\beta f_m}{E_0} n_2 R N^{n_2-1} = V_f \quad (8)$$

3. 반복크리프모델을 고려한 휨부재의 처짐거동

주어진 반복횟수에서 최대응력에 대한 탄성변형률과 반복크리프 변형률을 합하면 총 변형률이 계산된다. 이러한 총 변형률에 의한 탄성계수를 E_n 이라고 할때, 이 E_n 은 하중이 반복됨에 따라, Fig. 2에서와 같이 계속적으로 변화해 가고 응력의 변화는 Fig. 3과 같다. 이것을 식으로 표현한 것이 식(9)이며, 이식에서 ϵ_t 가 하중반복에 따른 크리프와 피로의 영향을 고려한 변형률이 된다⁶⁾.

$$E_n = \frac{f_{\max}}{\epsilon_{\max}} = \frac{f_{\max}}{\epsilon_e + \epsilon_t} = \frac{f_{\max}}{\frac{f_{\max}}{E} + \epsilon_t} \quad (9)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_{creep} + \epsilon_{fatigue} \quad (10)$$

여기서, E : 초기 하선 탄성계수

E_n : N회 반복하중을 받은 후의 탄성계수

철근콘크리트 보의 휨인장균열을 고려하여 유효단면2차 모멘트를 표시한 것이 식(11)이다. 이식은 구조설계기준에 제시되어 있으며, 이것을 반복하중의 영향을 고려하여 다시 쓴 것이 식(12)이다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (11)$$

$$I_{e,n} = \left(\frac{M_{cr,n}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr,n}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr,n} \leq I_g \quad (12)$$

이식에서, 균열모멘트 $M_{cr,n}$ 은 식(13)과 같이 표시되며, 반복하중에 따른 콘크리트 휨강도의 변화 $f_{r,n}$ 은 Raju(ACI SP-75, 1982)의 실험결과에 따라 식(14)로 표시하였다²⁾.

$$M_{cr,n} = \frac{I_g f_{r,n}}{y_t} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_{r,n} &= f_r \left(1 - \frac{\log_{10} N}{\gamma}\right) \\ &= f_r \left(1 - \frac{\log_{10} N}{10.954}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

철근콘크리트 보의 처짐은 반복하중의 영향이 고려된 새로운 유효강성 $E_n I_{e,n}$ 을 사용하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_N = \frac{F(\text{Loads, Spans})}{E_n I_{e,n}} \quad (15)$$

4. 철근 콘크리트 보의 정·동적 실험

4.1 실험목적 및 실험변수

앞의 이론과 모델의 비교검증을 위하여 철근 콘크리트

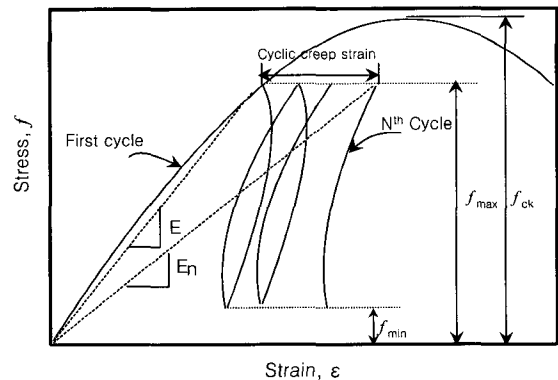


Fig. 2 Change of elastic modulus due to cyclic damage

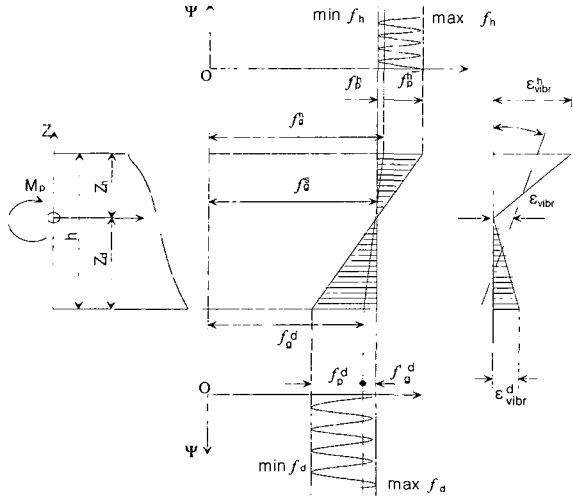


Fig. 3 Flexural stress distribution due to repeated loading

보 부재를 대상으로 정·동적 실험을 수행하였다. 정적 실험은 피로실험을 수행하기 위한 기본실험으로 피로실험의 기준으로 삼는다.

이에 따른 부재의 설계는 휨파괴가 일어나도록 이루어졌다. 기본적인 정적 재하실험의 변수는 콘크리트 강도이다. 강도의 종류는 보통강도인 28 MPa(N형), 고강도에는 45 MPa(M형), 초고강도에는 70 MPa(H형)을 설정하였다. 또한, 피로시험에서는 추가적인 변수로 반복하중의 범위 2가지가 포함된다. 실험배합 및 자세한 재료조건의 설명은 생략하기로 한다.

본 연구에 사용된 철근콘크리트 보 부재는 아래의 Fig. 4와 같은 형상과 제원을 갖고 있다.

4.2 실험과정 및 방법

재하방식은 Fig. 5와 같은 4점재하방식으로서 피로시험에서는 4 cycle/sec로 재하하였다. 하중재하시 변형률 및 변위의 측정은 철근 콘크리트 보의 내부에 설치되어 있는 철근 게이지와 보의 외부에 설치되어 있는 콘크리트 게이지와 변위계를 통하여 이루어졌다. 또한, 각 응답의 측정시 자동제어 MTS 구조시험기에 내장된 로드셀로부터 재하하는 하중값을 동시에 측정한다.

피로시험에서 하중범위는 정적휨파괴가 일어나는 인장 철근의 극한강도 P_u 를 기준으로 상대적인 비율로 정하였으며, 이때 최대하중 70%와 85%정도 그리고 최소하중 9%으로 결정하였다. Fig. 6는 피로하중재하도의 형태이다.

4.3 정적 및 피로실험의 결과

Fig. 7은 정적실험의 결과로서 보통강도(28 MPa)의 경우의 처짐이다. 콘크리트와 철근의 압축·인장의 변형률 및

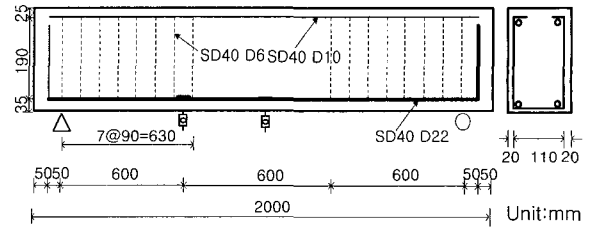


Fig. 4 Dimensions and bar arrangements($f_c' = 28$ MPa)

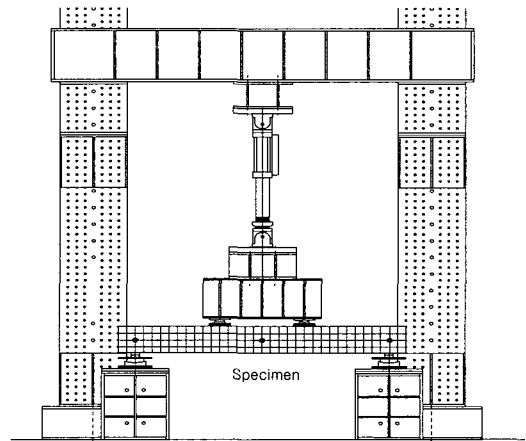


Fig. 5 Loading frame and test members

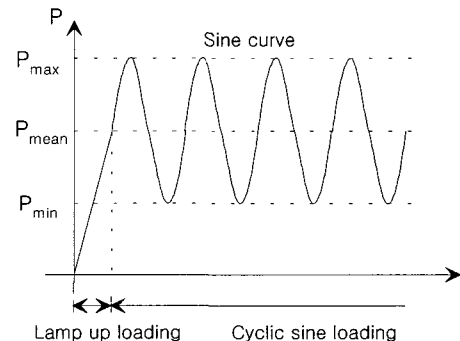


Fig. 6 Fatigue load cycles

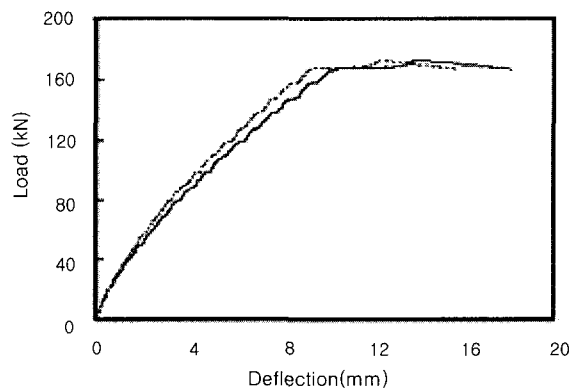


Fig. 7 Load-deflection curves for static loads($f_c' = 28$ MPa)

정적재하 시험결과는 Table 1에 요약되어 있다.

Fig. 8은 피로실험에 의한 하중-처짐 관계곡선이다. 피로실험결과가 Table 2에 요약되어 있다.

5. 실험결과와의 비교분석

5.1 반복크리프 지수(n_1 , n_2)의 도출

크리프 지수 n_1 은 식 16과 같이 Bazant 모델의 지수 n 결정법에 의하여 산정하였다.

$$n_1 = 0.115 + 0.61[f_c']^3 \times 10^{-6} \quad (16)$$

여기서, f_c' : 콘크리트 압축강도(MPa)

n_2 는 실험의 결과를 바탕으로 지수를 산출하였다. 콘크리트의 강도와 하중의 크기에 따른 지수 n_2 의 결과를 Table 3에 요약하였다. 이 표에서 보듯이 이 지수가 콘크리트 강도와 최대하중에 따라 변화하는 경향을 보여주고 있다. 즉, Whaley가 제시한 값 1/3 과는 다소 다르게 변화하고 있음을 알 수 있다. 식(8)에서 설명하였듯이, 피로 손상 지배적인 요인은 절대적인 변형을 뿐만이 아니라 반복횟수에 따른 변형률의 증가속도이다. 이는 변형률(ϵ): 반복횟수 $\log(N)$ 관계에서의 곡선의 기울기를 의미

한다. 따라서, n_2 는 실험결과와 회기분석을 통하여 최적의 n_2 를 결정하게된다. 즉, 실험결과 곡선의 변화에 가장 잘 들어맞는 n_2 를 얻는 것이다. 이런 n_2 를 얻기 위한 회기 분석 과정을 Fig. 9이 설명하며, Fig. 12는 하중반복에 따른 처짐의 영향을 본 이론에 의한 결과와 실험의 결과를 비교하는 과정을 보여주고 있다.

5.1.1 n_2 의 강도에 따른 영향

강도의 변화에 따른 반복피로 지수의 변화를 Fig. 10에

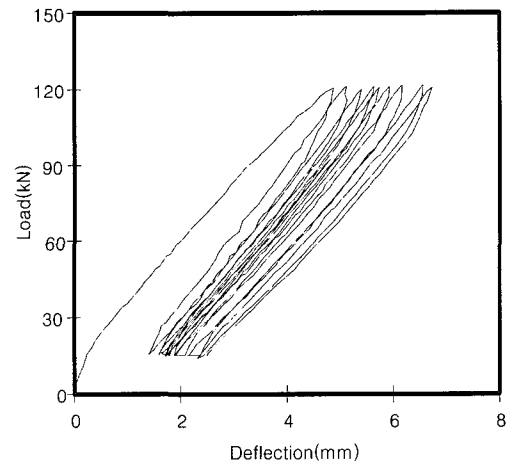


Fig. 8 Load-deflection curves for fatigue loads(f_c' : 28 MPa)

Table 1 Test results of static test

Test members	P_u (kN)	Flexural cracking load P_{crack} (kN)	Diagonal cracking load(kN)	Yield load of tensile steel(kN)	Deflection(mm)		Failure mode
					Midspan	Loading point	
N-S	171.6	13.8	60.3	156.3	14.34	12.69	Flexure
MH-S	253.1	20.2	107.1	244.6	9.04	8.20	Flexure
H-S	300.5	29.4	99.2	293.7	9.99	8.89	Flexure

Table 2 Test results for fatigue loads(R1: 0.7 P_u , R2:0.85 P_u)

Compressive strength	Load level	P_u (kN)	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	P_{mean} (kN)	Range	Failure-cycles
28 MPa	R1(0.61)	171.6	0.70 P_u (125.0)	0.09 P_u (16.6)	0.41 P_u (70.8)	0.61 P_u	972,897
	R2(0.76)		0.85 P_u (149.9)	0.09 P_u (16.6)	0.48 P_u (83.3)	0.76 P_u	127,554
45 MPa	R1(0.61)	253.1	0.70 P_u (176.9)	0.09 P_u (23.6)	0.395 P_u (100.3)	0.61 P_u	398,156
	R2(0.76)		0.85 P_u (212.3)	0.09 P_u (23.6)	0.465 P_u (118.0)	0.76 P_u	13,694
70 MPa	R1(0.61)	300.5	0.70 P_u (205.5)	0.09 P_u (27.0)	0.395 P_u (137.5)	0.61 P_u	1,000,000 (non-failure)
	R2(0.76)		0.85 P_u (249.8)	0.09 P_u (27.0)	0.470 P_u (138.3)	0.76 P_u	103,163

Table 3 Indices for cyclic creep model

▶ Whaley: n = 1/3.0		Compressive strength(MPa)		
		28	45	70
Fatigue load level	0.7Pu(R: 0.61)	1/4.0	1/3.75	1/3.65
	0.85Pu(R: 0.76)	1/3.4	1/3.2	1/3.0

도시하였다. 강도가 28 MPa에서 70 MPa로 커지면서 지수는 커지는 경향을 보여주고 있다. 순수한 크리프모델의 지수에 있어서도 강도의 증가에 의해서 커지는 경향을 보여주고 있어 적절한 경향을 보여주고 있다.

5.1.2 n₂의 하중범위에 따른 영향

하중범위가 커지면서 반복크리프 지수는 조금씩 커지는 경향을 보여주고 있다. 이것이 Fig. 11에 나타나 있다.

5.1.3 Whaley-Neville결과와 비교

Whaley-Neville이 정한 지수는 하중속도가 약 10 Hz이상에 대한 값으로 상당히 피로진전이 빨리 진전이 되고 평균응력 범위도 0.45이하로 제한이 되어 앞의 효과를 보여주지 못하고 있다. Fig. 12에 Whaley-Neville의 지수와 본 연구자의 실험결과 비교를 통해 반복크리프지수의 변화 필요성을 보여주고 있다.

5.2 반복하중에 의한 변형률 증가율의 비교

본 연구의 실험결과를 근거로 하여 반복크리프모델(식(6))의 지수 n₁과 n₂를 도출한 것이 Table 4에 요약되어 있다. 이 결과에서 보듯이 일반적으로 하중지속에 의한 크리프영향지수 n₁보다는 하중반복에 따른 피로의 영향에 대한 지수 n₂가 다소 더 큰 것으로 나타나 피로의 영향이 좀 더 큰 것으로 볼 수 있다. 또한, 식 (7), (8)에 의해 크리프와 반복피로에 의한 변형률 증가율을 비교를 하였을 때 식(8)에 의한 결과가 크게 나와 본 실험은 피로가 지배적임을 알 수 있다.

5.3 피로파괴의 파괴역학적 접근

본 연구는 반복하중에 의한 처짐과 변형률의 증가현상을 이론 및 실험적으로 예측하기 위한 연구로서 피로파괴에 대한 직접적인 사항은 연구범위에 포함하지 않았다. 그러나, 앞의 피로파괴에 대한 영향을 연구할 때 인장부의 파괴역학적 접근도 바람직할 것으로 사료되며, 이에 대한 지속적인 연구를 할 예정이다.

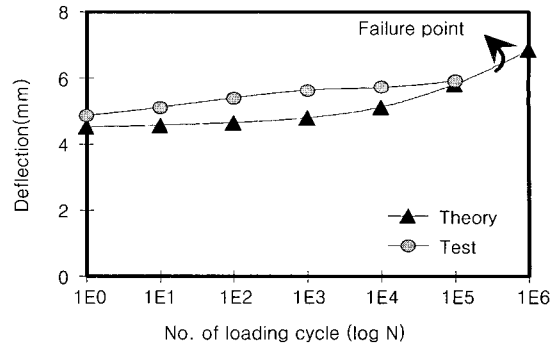


Fig. 9 Comparison of theoretical and measured deflections

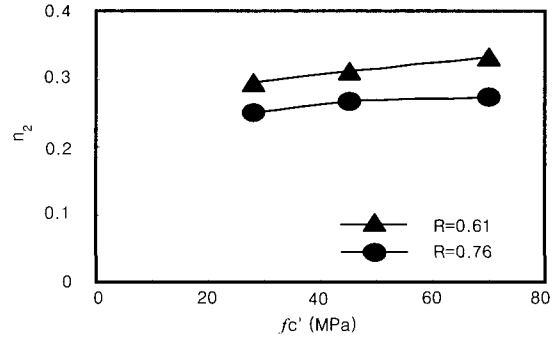


Fig. 10 Cyclic creep indices according to f'c (0.7, 0.85Pu)

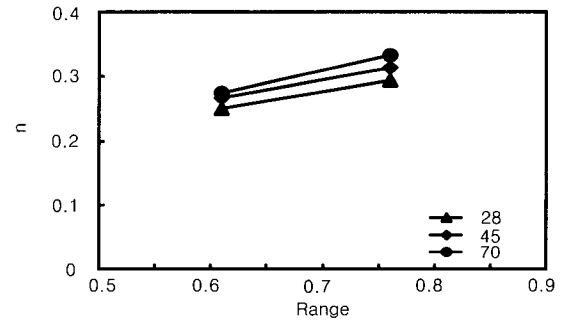


Fig. 11 Cyclic creep indices according to fatigue load range(28~70 MPa)

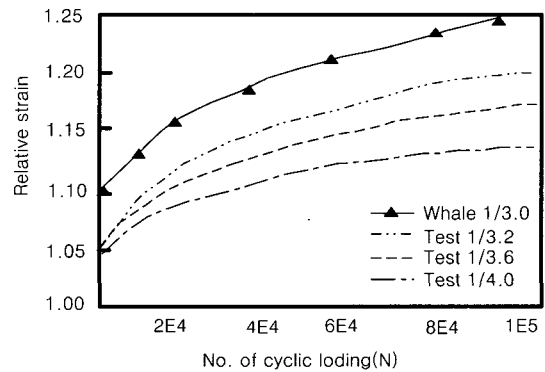


Fig. 12 Increase of relative strains according to number of load cycles

Table 4 Results for cyclic creep model for various test variables

Compressive strength	Load type	Components	Load range	t_d (hour, N)	n_1	n_2	Failure modes
28 MPa	R1	Creep	0.61	67.56	1/7.7		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.61	972,897		1/4.0	Fatigue failure
	R2	Creep	0.76	8.85	1/7.7		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.76	127,554		1/3.4	Fatigue failure
45 MPa	R1	Creep	0.61	27.64	1/5.6		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.61	398,156		1/3.75	Fatigue failure
	R2	Creep	0.76	0.95	1/5.6		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.76	13,694		1/3.2	Fatigue failure
70 MPa	R1	Creep	0.61	69.44	1/3.1		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.61	1,000,000		1/3.6	Fatigue damage
	R2	Creep	0.76	7.16	1/3.1		$V_c < V_f$
		Fatigue	0.76	103,163		1/3.0	Fatigue failure

6. 결 론

교량구조물과 같이 반복하중을 받는 부재들은 하중의 지속적인 작용에 따라 변형률과 처짐의 증가현상을 보인다. 본 연구에서는 이러한 변형률과 처짐의 증가현상을 모델하기 위하여 실험 및 이론연구를 수행하였다.

즉, 본 연구의 목적은 반복피로하중을 받는 철근콘크리트 휨 부재의 합리적인 변형률 누적 및 처짐 증가현상을 모델하여 이들을 합리적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 있다. 이를 위하여 수행된 주요 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 반복하중을 받는 휨 부재의 피로실험을 위하여, 강도의 영향을 고려하여 보통강도(28 MPa), 고강도콘크리트(45 MPa), 초고강도콘크리트(70 MPa) 의 실험을 수행하였으며, 피로하중의 크기는 정적과피하중은 각각 70%($R_1=0.61$), 85%($R_2=0.76$) 로 하여 실험을 수행하였다.

2) 본 연구에서는 반복피로하중으로 인한 영향을 하중 지속의 크립 영향과, 피로하중의 반복에 의한 피로의 영향으로 나누어 고려하였으며, 이들의 영향을 나타내는 크립 영향지수 n_1 과 반복피로지수 n_2 로 나누어 고려하여 모델에 포함한다.

3) 피로하중에 의한 실험결과 하중의 반복에 따라 변형률과 처짐이 증가하는 것으로 나타났으며, 이 영향을 모델하기 위한 지수 n_1 과 n_2 의 변화 양상을 고찰하였다. 또한, 실험변수 즉 콘크리트 압축강도, 반복하중의 크기에 따른, 영향지수에 변화양상을 비교분석하였으며, 이로부터 지수

의 예측식을 제시하였다.

4) 본 연구에서 얻어진 이들 모델의 지수는 이들 영향 지수인 압축강도와 반복하중의 크기에 따라 변화하는 것으로 나타났으며, 기존의 식에서는 이들 영향을 고려하지 못하고 있다.

5) 본 연구에서 제시된 모델은 반복피로하중을 받는 철근콘크리트 휨 부재의 처짐예측 등 변형의 증가현상을 비교적 잘 예측할 수 있는 것으로 나타나고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 인위재해방재기술사업으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ISFF '91, "Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures," ISFF '91 Proceeding, Dec. 19-21, 1991.
2. Balaguru P., and Shah S. P., "A Method of Predicting Crack Widths and Deflections for Fatigue Loading," ACI-SP75, 1982.
3. Neville A. M., "Properties of Concrete," PITMAN, 1981.
4. Bazant Z. P., and Wittmann F. H. , "Creep and Shrinkage in Concrete Structures," A Wiley-Interscience Publication, 1982
5. Bazant Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and

요 약

본 연구에서는 반복하중을 받는 철근콘크리트보의 피로현상에 피로의 지속으로 인한 크리프 특성을 고려함으로써 실제의 반복사용하중상태에서 크리프와 피로가 공존하는 것을 반영하여 모델을 구성하였다. 반복크리프 모델에서, 철근 콘크리트 보의 휨손상 진행에 따른 압축영역의 손상속도를 정확히 대표할 수 있는 반복크리프 지수(n)의 특성을 도입하여 평가하였다. 이 지수는 크리프특성의 지수 n_1 과 피로특성의 지수 n_2 로 구분하였다. 모델의 적정성을 평가하기 위하여 철근콘크리트보의 피로실험을 수행하였으며, n_2 의 경우 보통강도에서 고강도까지 콘크리트의 강도와 하중크기를 주요변수로 실험하였다. 본 실험결과로부터 반복하중에 의한 크리프모델의 지수를 결정하였다. 본 연구에서 제시된 반복크리프모델은 철근콘크리트 보의 피로손상의 누적과 처짐거동을 잘 설명할 수 있는 것으로 나타났으며, 앞으로 이들 부재의 피로거동해석에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 철근콘크리트, 반복크리프, 피로, 휨손상, 반복하중
