

강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C보의 반복크리프 개념을 적용한 피로거동에측

The Prediction of Fatigue Behavior using Cyclic Creep Concept of R/C Beam Strengthened with Steel Plate and Carbon Fiber Sheet

심종성* 문도영** 박경동***
Sim, Jong Sung Moon, Do Young Park, Kyung Dong

ABSTRACT

Fatigue strength of concrete is usually presented by the Wöhler Curve. But, new dimension T(time) from the view point of cyclic creep concept should be considered. This paper presented four variable F-N-T-R relationship, this four variable relationship simultaneously accounts for the time effect and the effect of load rate. And analytical models are presented to predict fatigue strength of R/C beam strengthened with steel plate and carbon fiber sheet. Also, the correlation between the ratio of stress and the fatigue life was investigated.

1. 서론

최근 들어 철근콘크리트 구조물의 사용성 향상과 강도회복을 목적으로 다양한 보강공법이 적용되고 있으며 이들의 보강효과와 파괴양상 그리고 거동특성에 대한 연구들이 정적 혹은 피로실험을 통해 활발히 진행되고 있다. 구체적으로 정적하중 재하의 경우에 있어서는 실험시 사용된 여러 가지 변수연구를 통하거나 혹은 해석적 연구를 통해 그 거동을 규명하고자 하는 많은 연구가 수행되고 있으며, 반복하중 재하시의 해석에 있어서는 기존 강구조물에서 적용되던 Wöhler Curve(F-N Curve 혹은 S-N Curve)를 사용하여 피로손상지수 및 피로수명 예측 등의 다양한 범위에서 피로 거동을 묘사하고 있다.

하지만 수많은 연구에서 피로강도산정시 반복하중 재하시의 재하횟수(N) 만을 고려할 뿐, 다른 여러 변수들의 영향을 도입한 연구는 미미한 실정이다. 특히 콘크리트구조의 경우는 강구조와는 달리 시간의 함수로 주어지는 반복크리프의 관점에서 시간개념 도입의 중요성이 매우 크다는 사실은 자칫 구조물의 피로 수명예측 및 거동의 고찰에 있어 중대한 실수를 범할 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 반복크리프를 결정짓는 세가지 인자와 동일한 인자가 피로강도를 결정한다고

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정 수료

*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

가정하고 여러 보강공법들 중 강판 및 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체의 피로실험결과⁽¹⁾로부터 시간개념을 도입하여 F-N-T-R 회귀식을 유도하였으며 그 결과로부터 피로강도를 산정하였다. 또한 F-N 평면상의 응력비(R)에 따라 다르게 나타나는 계수값을 통해 하중재하횟수 및 하중재하시간 등의 영향을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

본 연구에서 사용된 실험은 2.4m의 철근콘크리트 보에 대하여 응력수준, 보강재료 및 보강길이를 변수로 하였으며 보강재료는 강판과 탄소섬유쉬트(이하 CFS라 함)가 사용되었고 보강길이는 각각의 재료에 대해 1.5m와 1.9m를 사용하였다. 제작된 시험체 명칭 및 보강현황은 표 1과 같다.

표 1 시험체의 명칭 및 보강현황

시험체의 명칭	보강재료	보강길이(cm)	시험체 명칭	보강재료	보강길이
C-0-60	없음	없음	S-1.5-60	강 판	150
C-0-70			S-1.5-70		
C-0-90			S-1.5-90		
F-1.5-60	탄소섬유sheet	150	S-1.9-60	강 판	190
F-1.5-70			S-1.9-70		
F-1.5-90			S-1.9-90		
F-1.9-60	탄소섬유sheet	190	*주)보강재료별 두께 1. 강판 : 2.3mm 2. 탄소섬유sheet : 0.22mm		
F-1.9-70					
F-1.9-90					

2.2 실험개요

시험체는 콘크리트 압축강도 211kgf/cm²의 단순 R/C 보(15×25cm)를 제작한 후, 인장부위의 하단면에 보강재를 접착하였다. 재하하중은 정적최대 극한하중의 60%, 70%, 90%로 하였으며, 응력비는 약 0.1 정도로 일정유지하였다. 재하속도는 3Hz의 속도로 시험체가 파괴될 때까지 단진재하하였으며 하중재하는 0.5ton 간격으로 3점 재하하였다. 그림 1은 정적 및 피로실험의 개략도를 나타내었다.

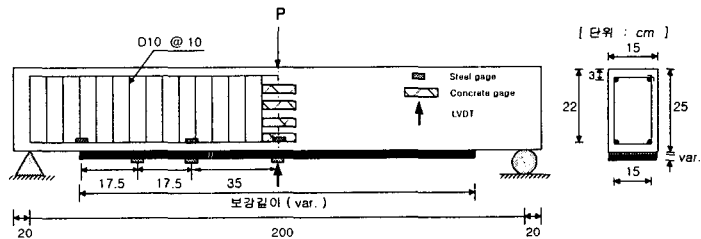


그림 1 정적파괴실험 및 피로실험 개략도

3. 반복크리프와 S-N Curve

3.1 반복크리프의 손상모델

Bazant는 자신이 표현한 크리프 모델로부터 반복하중 재하시의 재하횟수 N의 영향을 고려한 수정 크리프 모델을 식 (1)과 같이 제시하였다.⁽²⁾

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\max} &= \varepsilon_e + \varepsilon_t \\
&= \varepsilon_e + \varepsilon_{\text{creep}} + \varepsilon_{\text{fatigue}} \\
&= \frac{f}{E_0} + \frac{f\psi}{E_0} (t'^{-m} + \alpha')(t-t')^{n1} + \frac{f\psi}{E_0} (t'^{-m} + \alpha)RN^{n2} \\
&= \frac{f}{E_0} + \frac{\alpha f_m(t-t')^{n1}}{E_0} + \frac{\beta f_m RN^{n2}}{E_0}
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, f_m : 평균응력, R : 응력범위
 $(t-t')$: 하중재하시간, E_0 : 초기 탄성계수

반복하중이 작용하는 구조물에서 발생하는 부재의 변형을 앞서 유도된 반복크리프 모델의 입장에서 본다면 결국 부재의 변형은 평균응력, 응력범위, 하중재하시간, 반복횟수 등의 다양한 인자들의 영향으로 볼 수 있다. 이 때 이들 인자들 중에서 다른 인자들이 미리 정해진다면 작용기간(t)와 반복횟수(N) 및 응력비(R)의 함수로 나타낼 수 있으며 결국 부재의 변형정도를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{\max} = f(t, N, R) \tag{2}$$

3.2 관련연구

Sparks와 Menzies⁽³⁾, Awad 와 Hilsdorf⁽⁴⁾는 콘크리트의 피로강도가 시간인자에 따라 변화된다는 것을 밝힌 바 있으며, Rusch⁽⁵⁾는 콘크리트의 정적 강도를 시간에 따른 함수로 나타내었다. 그림 2와 3는 각각 이들의 시험결과를 나타내었다.

Rusch의 시험결과로부터 Hsu⁽⁶⁾는 기존에 Wöhler Curve와는 달리 지속하중에 대한 최대응력비가 반복횟수 및 시간과 비례한다고 보고, 1000회 재하시를 기준으로 Low-Cycle Fatigue와 High-Cycle Fatigue로 구분한 뒤, 식 (3)과 같은 F-N-T-R 관계를 제안하였다. 이 때 응력비 R 은 직선적으로 거동한다고 가정하였다.

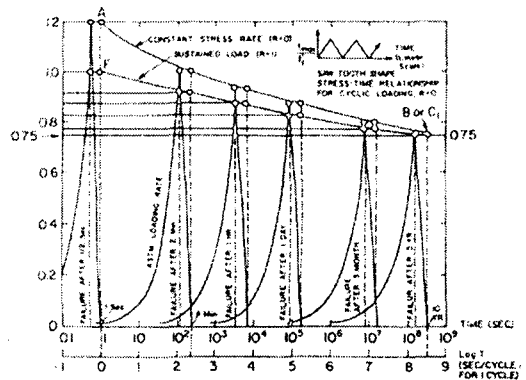


그림 2 Stress-Time 관계곡선 (By Rusch)

$$\frac{f_{\max}}{f'_{sus}} = \frac{f'_1}{f'_{sus}} - \beta(1 + \gamma - \gamma R) \log N - \alpha \log T \quad (\text{High-Cycle의 경우}) \tag{3}$$

여기서, f_{\max} = 반복하중시의 최대응력, f'_{sus} = 장기간 지속강도,
 f'_1 = 가상응력⁽⁶⁾, α = 시간축에 대한 응력축의 기울기,
 β = 재하횟수축에 대한 응력축의 기울기,
 γ = 응력비에 따른 달라지는 F-N Plane상에서의 기울기 비

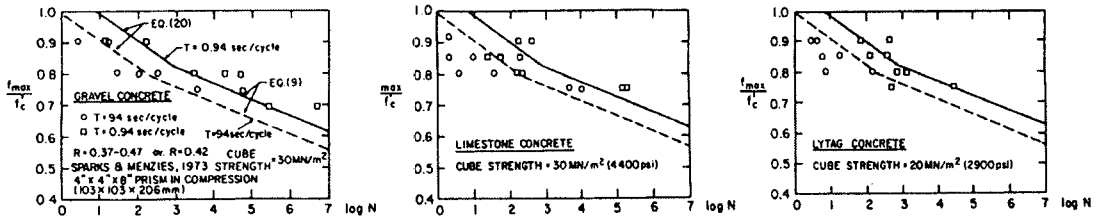


그림 3 피로강도에서의 시간 인자 T의 효과 (By Sparks and Menzies)

4. 제안식을 이용한 피로강도 산정

본 연구에서는 무보강 및 보강된 보에서의 F-N-T-R 관계를 Hsu⁽⁶⁾에 의해 제시된 관계식을 기본으로하여 산정하였다. 이 때 초기응력비는 Rusch⁽⁵⁾의 시험결과로부터 얻었으며, α 및 β 는 Hsu⁽⁶⁾의 방법으로, 각각의 응력비에 따른 달라지는 F-N 평면상에서의 기울기 비는 실험의 결과⁽¹⁾로부터 도출하였다.

그림 2로부터 $\log 10^{8.5}$ 년 경과 후 $f'_{sus}/f'_c = 0.75$ 이므로 $f'_1 = f'_c$ 라 하면, 지속하중에 대한 응력비는 식 (4)와 같이 산정된다. 이 때 응력, 재하 횟수, 시간의 세 축을 좌표로 나타내면 그림 4와 같다.

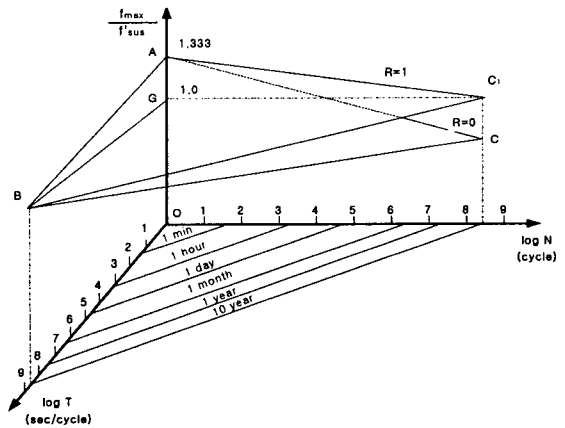


그림 4 F-N-T-R 관계

$$\frac{f'_1}{f'_{sus}} = \frac{f'_c}{f'_{sus}} = 1.333 \quad (4)$$

하중재하횟수에 따라 재하시간은 비례하여 증가하므로 $R = 1$ 에서 $\alpha = \beta$ 이며, $\log 10^{8.5}$ 년(10년) 경과시 F-N 및 F-T 평면상에서의 기울기는 식 (5)와 같다.

$$\alpha = \beta = \frac{\overline{AG}}{\overline{BG}} = \frac{\overline{AG}}{\overline{GC}_1} = \frac{0.333}{8.50} = 0.0392 \quad (5)$$

여기서, 응력비에 따른 달라지는 F-N 평면상에서의 기울기 비인 γ 는 실험으로부터 표 2와 같이 결정된다.

표 2 시험체에 따른 γ 값의 변화

시험체 명칭	재하횟수	재하횟수 (log N)	재하시간 (sec)	γ	시험체 명칭	재하횟수	재하횟수 (log N)	재하시간 (sec)	γ
C-0-60	425,882	5.6293	141,960	1.6512	S-1.5-60	757,800	5.8796	252,600	1.5274
C-0-70	111,014	5.0454	37,005		S-1.5-70	469,572	5.6717	156,524	
F-1.5-60	98,660	4.9941	32,887	2.0127	S-1.9-60	35,717	4.5529	11,906	2.3126
F-1.5-70	51,285	4.7099	17,095		S-1.9-70	15,180	4.1813	5,060	
F-1.9-60	69,941	4.8447	23,314	2.1089	*주) Hsu의 경우 1.25로 가정함.				
F-1.9-70	18519	4.2676	6,173						

결국 식 (3)~(5)와 표 2에 따라 지속하중(f'_{sus})에 대한 최대응력(f_{max})비는 식 (6)과 같이 되며. 이를 식 (4)에서의 $f'_{sus} = 0.75f'_c$ 로부터 피로강도를 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\frac{f_{max}}{f'_{sus}} = 1.333 - 0.0392(1 + \gamma - \gamma R) \log N - 0.0392 \log T \quad (6)$$

$$S = \frac{f_{max}}{f'_c} = 1 - 0.0294(1 + \gamma - \gamma R) \log N - 0.0294 \log T \quad (7)$$

식 (7)과 표 2로부터 피로강도식을 결정하고 100만회 재하시의 피로강도를 산정하였다. 아울러, 일반적으로 사용되는 Wöhler Curve를 이용한 피로강도와 비교하였으며 그 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 산정된 피로강도와 Wöhler 값과의 비교

시험체 명칭	제안식	피로강도 (% (①))	피로강도 (% (②)) (By Wöhler) ⁽⁶⁾	오차 (%, ②-①)
C-0	$1 - 0.0735 \log N - 0.0294 \log T$	57.61	61.6	3.99
F-1.5	$1 - 0.0829 \log N - 0.0294 \log T$	51.66	57.2	5.54
F-1.9	$1 - 0.0854 \log N - 0.0294 \log T$	50.13	56.7	6.57
S-1.5	$1 - 0.0704 \log N - 0.0294 \log T$	59.30	63.2	3.90
S-1.9	$1 - 0.0909 \log N - 0.0294 \log T$	46.92	54.6	7.68

5. 피로거동의 고찰

5.1 시험체에 따른 N- γ 의 상관관계

Hsu⁽⁶⁾가 제시한 기본적인 가정으로부터, 본 연구에서 역시 응력비 R=1에서 R=0까지 선형적으로 변화한다는 가정하에 피로강도를 산정하였다. 이는 CEB-FIP MC 90⁽⁷⁾에서 얻어진 그림 5의 응력비에 따른 거동과 유사하다. 그러나, 실제 구조물에서의 반복하중재하시 재하횟수에 따른 피로강도는 비선형적으로 거동함이 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바 있다. 이러한 사실로 하중재하횟수가 증가 할수록 F-N 평면상의 기울기 비인 γ 값이 비선형적으로 나타나게 됨을 짐작할 수 있으며 이 양상을 본 연구에서 얻어진 그림 6을 통해 확인할 수 있었다.

그림 6에서와 같이 시험체에 따른 N- γ 의 상관관계는 Hsu⁽⁶⁾가 제안한 1.25와는 다르게 시험체에 따라 재하횟수가 증가할수록, 응력수준이 감소할수록 γ 값은 차츰 증가하는 양상을 보였으며, 피로강도는 모든 시험체에 있어 표 3에서와 같이 Wöhler Curve를 이용하여 추정된 피로강도보다 작게 나타났다.

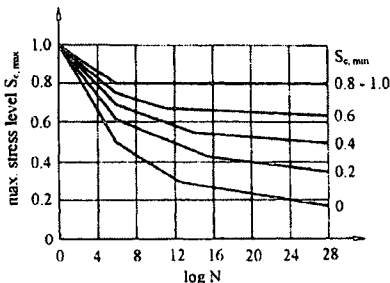


그림 5 해석적 S-N 관계(CEB-FIP MC 90)

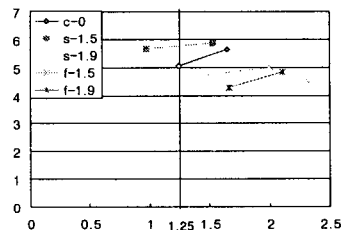


그림 6 N- γ 의 상관관계

5.2 하중재하속도의 영향

하중재하속도의 영향을 알기 위해 같은 단면체원으로 제작되어, 하중재하 2Hz속도로 실험된 바 있는 1.9m로 보강된 시험체의 γ 값을 산정하여 그림 7과 같이 비교하였다.

그림 7에서 대체적으로 모든 시험체의 경우 어느 일정범위 내에 γ 값이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 2Hz로 재하된 시험체의 경우 대부분의 시험체가 3Hz로 재하된 시험체에 비해 작은 γ 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 빠른 속도로 하중 재하된 경우의 피로강도가 반대의 경우보다 작게 추정됨을 나타낸다.

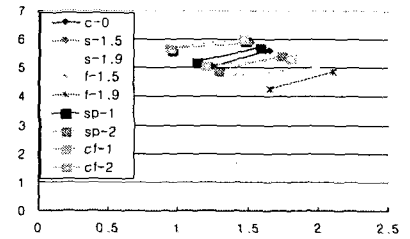


그림 7 하중재하속도에 따른 변화

6. 결론

본 연구에서는 강판 및 탄소섬유시트로 보강된 시험체의 피로실험결과로부터 반복크리프의 시간개념을 도입하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 피로강도를 하중재하횟수의 일차원적 함수관계로 고려하는 기존의 연구와는 달리 네 가지 변수를 갖는 회귀식을 유도함으로써 다원화시켰다.
- 2) 모든 시험체에 대해 F-N-T-R 회귀식으로부터 추정된 피로강도는 일반적으로 사용되는 Wöhler Curve를 이용하여 추정된 피로강도보다 작게 나타났다. 결국, Wöhler Curve에서는 F-N-T-R 회귀식으로부터 추정된 피로강도보다 과대 평가하고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 응력비에 따른 달라지는 F-N Plane 상에서의 기울기 비인 γ 의 고찰을 통해 재하횟수 증가에 따른 피로강도의 비선형적 거동을 확인하였으며 일반적으로 재하횟수가 증가할수록, 응력수준이 감소할수록 γ 가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 하중재하속도의 증가에 따른 피로강도가 작게 추정되는 양상을 확인하였다.

참고문헌

1. 심종성 등, "강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 RC보의 피로거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1995, pp. 319-324.
2. Bazant Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete", A Willy Interscience Publication, 1988, pp. 153-176.
3. Sparks P. R. and Menzies J. B. "The Effect of Rate of Loading Upon the static and Fatigue Strengths of Plain Concrete", Magazine of Concrete Research (London), Vol 25, No. 83, June 1973, pp. 73-80.
4. Awad, M. E, and Hilsdorf H. K., "Strength and Deformation Characteristics of Plain Concrete Subjected to High Repeated and Sustained Loads", Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 372, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Feb., 1971, pp. 266.
5. Rusch, H. "Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete", ACI Journal, Proceedings, Vol. 57, No. 1, July 1960, pp. 1-28.
6. Hsu T. T. C. "Fatigue of Plain Concrete", ACI Journal, July-Aug, 1981. pp. 292-304.
7. Comite Euro-International Du Beton, "The Text on Behavior, Design and Performance", CEB-FIP Model Code, 1999, vol 1, pp. 52-55.