

# 사용반복하중에 대한 철근콘크리트 보의 피로거동 Fatigue behavior of RC Beams under High Cycle Loading

강보순\*                      황성춘\*  
Kang Bo-Soon, Hwang Seong-Chun,

## ABSTRACT

Fatigue behavior of reinforced concrete(RC) elements has been experimentally and analytical investigated. Fatigue behavior influenced by longitudinal reinforcement ratio, strength of concrete and load ratio  $P_u/P_o$ . The purpose of these studies is to propose an empirical formula for fatigue behavior on basis of experimental results. Also an analytical method to predict the crack propagation of RC beams has been developed based on the relationships between bond stress and slip.

**Keywords :** 피로거동, 강성변화, 균열발전, 사용반복하중, RC, SFRC

### 1. 서론

구조물의 사용성에서는 균열상태와 처짐 변화의 관찰이 아주 중요하다. 특히 철근콘크리트로 된 철도구조물과 도로구조물은 공용기간에 계속되는 반복하중이 받게 되므로 사용조건에 대한 균열발전은 구조물의 강성을 감소시키고 처짐이 증가하는 현상을 가져오게 된다. 특히 이런 사용성의 문제를 간과하게 되면 급기야 콘크리트 구조물의 심각한 문제가 될 수 있으므로 본 논문에서는 피로하중에 대한 철근콘크리트 부재의 사용성 즉, 균열발전, 처짐 및 강성의 변화에 대하여 실험적 연구를 하고자 한다.

일반적으로 철근콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도는 상대적으로 매우 작으므로 인장강도의 증진과 균열제한을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 반복하중에 대한 철근콘크리트의 특성에 관한 연구 중에는 지진하중에 대한

철근콘크리트의 강도증진 및 Ductility 향상에 관한 효과 등을 규명한 연구실적들이 대부분이다. 이들 기존의 연구는 지진하중에서 올 수 있는 반복횟수가 낮은 피로하중(low cycle fatigue loading)에 대한 연구로서 철도 및 도로에서 주로 발생할 수 있는 사용피로하중(high cycle fatigue loading)하에 RC구조물의 균열 및 강성 특성에 관한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구는 철근콘크리트(RC)보의 공용기간에 주기적으로 반복되는 사용조건에 대한 균열발전 및 강성의 변화에 관한 실험적 연구로서 사용된 실험변수로는 콘크리트의 강도와 철근비 그리고 사용반복하중의 진동폭 크기를 선택하였다.

### 2. 철근콘크리트보의 사용피로하중에 대한 균열발전과 동적강성의 변화

실험은 정적으로 최대사용하중까지 재하한 후 연속하여 각각 사용하중의 진폭에 따라 12개의

균열폭 [mm]

철근콘크리트의 보를 피로하중하에서의 수행되었다.

### 2.1 시험체 및 실험측정값

본 연구의 궁극적인 목적인 사용피로하중에 대한 길이 150cm, 단면폭 15cm, 단면높이 20cm인 철근콘크리트보의 균열발전 및 강성의 변화를 나타내는 것으로서 필요한 제반 측정값은 보의 중앙 처짐, 콘크리트의 압축변형, 철근의 변형(3곳), 및 균열측정(5곳)이다.

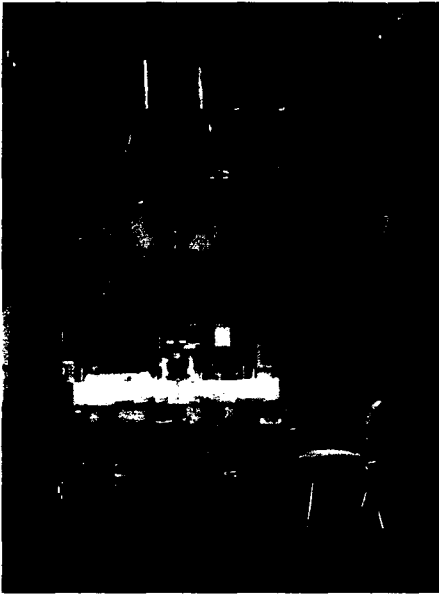


Fig.1---Test set up 사진

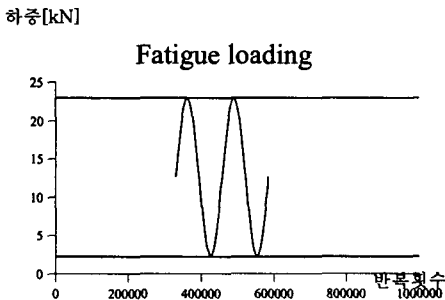


Fig.2---사용반복하중의 진폭변화

### 2.2 실험결과

그림3에서는 사용피로하중에 대한 목표압축강도는  $450 \text{ kg/cm}^2$ 이고 철근비가 0.5%인 철근콘크리트보의 균열특성을 잘 보여주고 있다. 50만 번부터는 균열발전의 기울기가 작아지는데 이것은 단순히 콘크리트의 진동크리프에 의한 것으로만 볼 수 있다.

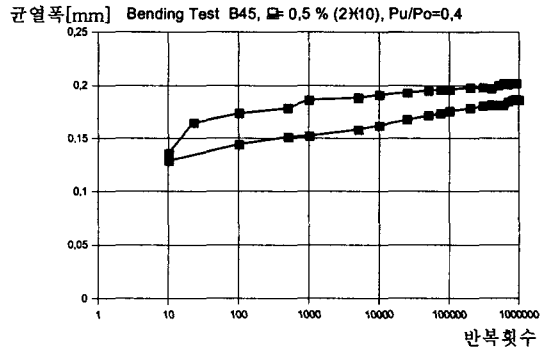


Fig.3---반복횟수에 대한 균열발전

그림4는 정적 및 동적 실험의 모멘트-곡률 곡선이다. 일반적으로 정적실험에서는 영점에서부터 모멘트-곡률 곡선의 매점 연결직선의 기울기가 활선 강성이다. 균열전의 보의 초기강성은  $EI^I = 3.00 \text{ MNm}^2$ 이다.

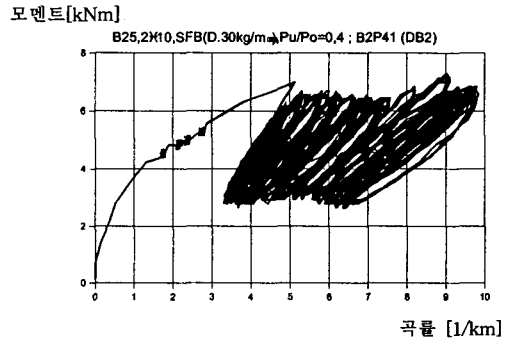


Fig.4---모멘트-곡률곡선에서의 강성변화

그러나 균열발생 후 강성은 ( $EI^II = M/\kappa$ ) 그림에서 볼 수 있는 것처럼 현저하게 떨어진다. 보통 반복하중이 작용할 경우는 동적 강성은 최

대하중과 최소하중이 반복되는 동안 충분히 하중에서 벗어나기 전에 다시 재하되므로 위에서 언급한 정적강성보다 다소 큰 강성을 나타내고 있다. ( $EI_{dyn} = (M_{max} - M_{min}) / (\kappa_{max} - \kappa_{min})$ )  
 $dyn. EI [MNm^2]$

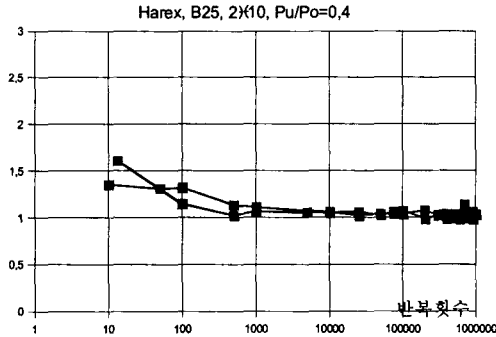


Fig.5---반복횟수에 대한 동적 강성의 변화

그림5은 사용피로하중에 대한 목표강도는  $300 \text{ kg/cm}^2$  이고 철근비가 0.5%인 철근콘크리트의 반복횟수에 따른 동적 강성의 변화를 나타내고 있다. 그 원인은 하중이 재하되고 연속적인 균열측정을 위해 LVDT가 설치된 중앙부 즉, 최대모멘트가 작용하는 부분에 사용하중범위에서는 철근과 콘크리트사이의 부착 진동 creep가 끝나 실제적으로 강성이 더 이상 감소되지 않는 것으로 판단된다.

그림5에서는 철근콘크리트 휨부재의 균열단면에서의 각각의 응력상태를 도식화하여 보여주고 있다. 일반적으로 순수한 인장이나 휨 하중 하에 있는 철근콘크리트 구조물의 균열발생은 인장부분의 가장 취약한 곳에서 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 발생한다. 이곳의 콘크리트 단면의 원력은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 폭으로 증가하게되고 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 부착특성에 고려한 유효부착길이와 균열폭이 구해진다.

철근콘크리트의 휨부재

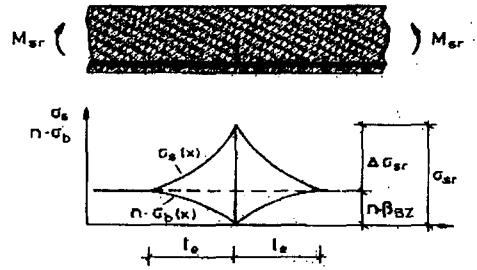


Fig.5---균열단면에서의 철근응력 및

부착응력 콘크리트응력의 변화  
 $[N/mm^2]$

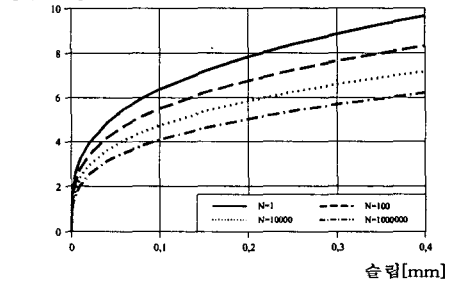


Fig.6--- 사용반복하중에 대한

부착응력-슬립의 관계

그림7은 다양한 사용반복하중 하에서 반복횟수에 대한 처짐의 발전을 보여주고 있다. 사용하중의 진폭이 클수록 처짐 발전의 기울기가 커짐을 알 수가 있다.

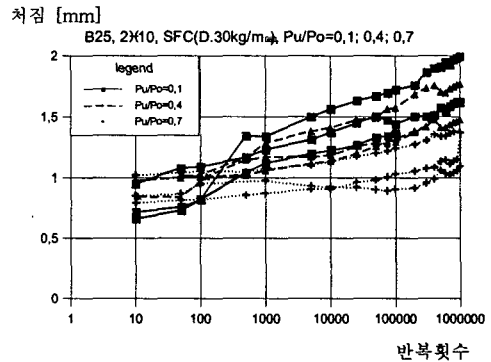


Fig.7---다양한 사용반복하중 하에서 반복횟수에 대한 처짐 발전

그림8은 지속하중을 동적 처짐과 정적 처짐 사이에서 기준 점으로 1.0으로 놓으면 반복횟수 및 최소하중/ 최대하중비 (Pmin/Pmax)에 따른 실험 치로부터 하중 비의 연결선을 얻게된다. 그림8에서는 최소하중과 최대하중 관계비가 작을수록 선택한 반복횟수의 처짐과 첫 사용하중 재하시의 처짐의 관계는 커진다.

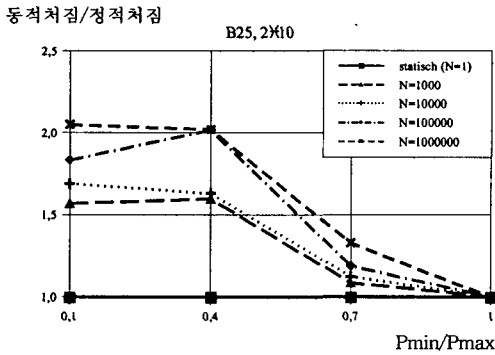


Fig.8---처짐 발전에 미치는 사용하중 진폭비(P<sub>min</sub>/P<sub>max</sub>)의 영향

### 3. 사용피로하중에 대한 철근콘크리트 휨부재의 균열이론

사용피로하중에 대하여 반복횟수가 늘어남에 따라 균열폭은 커진다. 그 주된 원인은 휨 부재의 경우 압축 측에서 콘크리트creep와 인장 측의 철근과 콘크리트사이에 부착creep이다. 균열폭의 발전은 부재의 압축과 인장측 사이에 강성관계가 결정적이다. 반복되는 하중과 함께 creep변형의 실제적인 비선형을 고려하지 않는다면 균열폭의 증가는 압축 측의 끝 부분 응력 크기의 작은 영향만을 기대할 수밖에 없다. 그러나 압축 측에서 콘크리트creep은 균열발전에 큰 영향은 미치지 않으므로 근사적으로 사용반복하중에 대한 철근콘크리트보의 균열은 부착 creep영향의 고려해 계산되어진다.

일반적으로 사용반복하중에 대한 철근과 콘크리트 사이에서 부착강도는 작아진다. 그것은 같은 부착 응력하에 시간이 지나거나 사용반복하

중과 함께 creep의 영향으로 아래와 같은 비선형 식으로 슬립은 커지게 된다.(그림 6)

$$\tau_v(N) = \sigma_{ck} \cdot A(N) \cdot v(N)^b$$

여기서,

$\tau_v(N)$  :부착응력;  $v(N)^b$ :슬립;

$$A(N) = \frac{a}{(1 + \varphi_v(N))^b}$$

a=0.31; b=0.30; N:반복횟수

위와 같이 사용반복하중하에 철근과 콘크리트 사이의 부착에서 콘크리트의 creep를 고려하여 균열거리와 균열폭을 계산할 수 있다.

균열간격:

$$l_e^I = \frac{2}{1-b} \left[ \frac{\Delta\sigma_{sr} E_s^b}{(\sigma_{sr})^b} \frac{d_s}{8} \frac{1+b}{\sigma_{ck} A(N)} \right]^{\frac{1}{1+b}}$$

균열폭:

$$w^I = 2 \left[ \Delta\sigma_{sr} \frac{\sigma_{sr}}{E_s} \frac{d_s}{8} \frac{1+b}{\sigma_{ck} A(N)} \right]^{\frac{1}{1+b}}$$

여기서,  $\sigma_{sr}$ :균열발생단면의

철근응력;  $d_s$ :철근직경;

$E_s$ :철근의 탄성계수; n:탄성계수비

공용기간에 구조물은 여러 가지 크기의 사용반복하중이 재하되므로 다양한 사용하중의 크기(Pmin / Pmax= 0.1; 0.4; 0.7)를 종합해서 철근콘크리트의 균열발전을 철근과 콘크리트의 부착특성을 근거로 이론적으로 만들어 반복횟수에 따라 계산 할 수 있도록 하였다.

그림6에서는 사용하중하에서 다양한 하중크기에 따른 균열발전에 대한 실험치와 이론치를 하였다. 실선은 다양한 사용하중크기를 재하한 균열발전의 실험치에 대한 평균한 값이고 점선은 위에서 언급한 철근과 콘크리트의 부착특성

을 고려한 균열발전의 이론치이다. 계산치는 실험치보다 위에 있으므로 안전한 측면에서 사용될 수 있다.

**참고문헌**

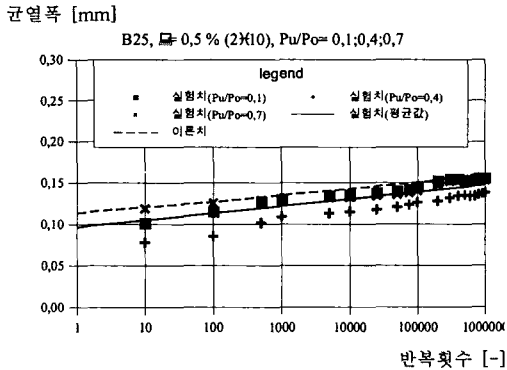


Fig.6---사용반복하중 하에서 균열발전에 대한 실험치와 이론치의 비교

**4. 결 론**

○ 철근콘크리트구조물에서 균열은 강성과는 밀접한 관계를 갖고 있어 사용반복하중 하에서 균열발전은 강성은 저하시키고 처짐은 증가되므로 사용성 평가에 중요한 요소이다.

○ 사용피로하중 하에서 50만 번부터는 콘크리트와 철근사이의 진동 creep에 의해 균열발전의 기울기가 점차로 작아지고 일반 콘크리트의 동적 강성은 1000부터 100만 번까지는 거의 변화가 없다.

○ 사용하중의 진폭이 클수록 처짐 발전의 기울기가 커진다.

○ 다양한 사용하중의 크기를 종합해서 공용기간에 사용성을 평가 할 수 있도록 철근콘크리트의 균열발전을 반복횟수에 따라 계산할 수 있도록 계산식을 제안했다.

○ 사용하중 하에 균열폭 발전에 대한 실험치와 이론치가 허용할 수 있을 만큼 잘 일치한다.

/1/ Stangenberg, F. : Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für stossbeanspruchte Bauteile. Bauingenieur Nr.61, 1986, 339-345.

/2/ Heiland, D. : Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten von stahlfaserverstärktem Stahlbeton bei globaler und elementweise differenzierter Betrachtungsweise. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1991.

/3/ Schnütgen, B. : Rohre aus Stahlfaserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 1/1989, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1989.

/4/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Ausgabe September 1992, Beuth-Verlag Berlin, 1992.

/5/ White, R. N., and Holley, M.J. (1972). "Experimental studies of membrane shear transfer." J. Struct. Div., ASCE, 98(8), 1835-1852.

/6/ Walraven, J. : "Rough Cracks Subjected to Earthquake Loading" Journal of Structural Engineering, ASCE Vol. 120, No. 5, May, 1994.

/7/ Kang, B.S. : Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.