

사용피로하중에 대한 철근콘크리트 구조물의 균열특성

Crack Behavior of RC Structures under High Cycle Loading

강보순[†]
Kang Bo-Soon

Abstract

Fatigue behavior of reinforced concrete(RC) elements has been experimentally and analytical investigated. Fatigue behavior is influenced by a longitudinal reinforcement ratio, strength of concrete and a load ratio P_u/P_o . The purpose of this study to propose an empirical formula for the fatigue behavior on the 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 : 철근콘크리트 피로거동, 강성변화, 균열발전, 사용반복하중

1. 서론

구조물의 사용성에서는 균열상태와 처짐 변화의 관찰이 아주 중요하다. 특히 교량, 슬래브계도 및 침목과 같은 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트로 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 내구성 및 안전성에 심각한 문제가 될 수 있으므로 본 논문에서는 철도에서와 같은 반복되는 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 균열 제한을 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[2]. 이들 기존의 연구는 지진하중에서 올 수 있는 반복횟수가 낮은 피로하중(low cycle fatigue loading)에 대한 연구로서 철도 및 도로에서 주로 발생할 수 있는 반복횟수가 높은 피로하중(high

cycle fatigue loading)하에 RC 및 PSC구조물의 균열 및 강성특성에 관한 연구는 미비한 상태이다[5]. 따라서 본 연구는 철도와 같이 철근콘크리트(RC)구조물의 공용기간에 주기적으로 반복되는 사용하중에 대한 균열발전 및 강성의 변화에 관한 실험적 연구이다.

2. 철근콘크리트보의 사용피로하중에 대한 균열발전과 동적강성의 변화

2.1 시편 및 실험수행

사용된 콘크리트 배합은 시멘트 $305\text{kg}/\text{m}^3$, 물-시멘트는 0.61, 최대골재의 크기는 16mm이다. 실험은 정적으로 최대 사용하중까지 재하한 후 연속하여 각각 사용피로하중의 진폭의 크기인 최소하중/최대하중비($P_{\min}/P_{\max}=0.1;0.4;0.7$)에 따라 각각 3개씩 총 9개가 제작된 철근콘크리트의 보에 피로하중을 주어 수행하였다. 사용된 콘크리트의 강도는 $25\text{N}/\text{mm}^2$, 철근비는 0.5%이고 스티럽은 없으며 시편크기는 길이가 150cm, 단면폭이 15cm, 단면높이는 20cm인 철근콘크리트보이다. 필요한 제반 측정값은 보의 중앙 처짐, 콘크리트의 압축변형①, 철근의 변형(3곳:②~④), 및 균열 측정(5곳:⑤~⑨)이다(Fig. 1).

[†] 책임저자 : 경주대학교 건설환경공학부, 조교수

표 1. 제작된 시편

B25, 2ø10mm	Pmin/Pmax=0.1	Pmin/Pmax=0.4	Pmin/Pmax=0.7
Nos of Specimen	3	3	3

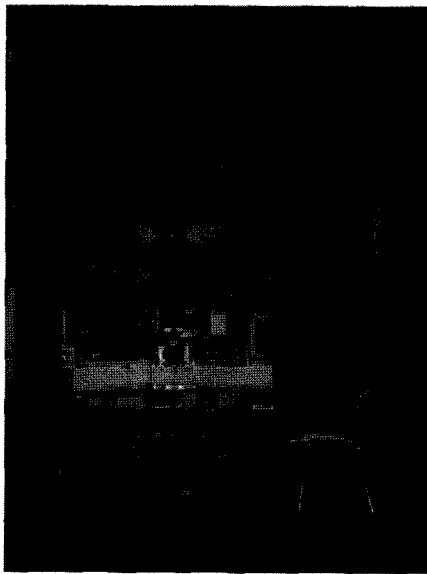
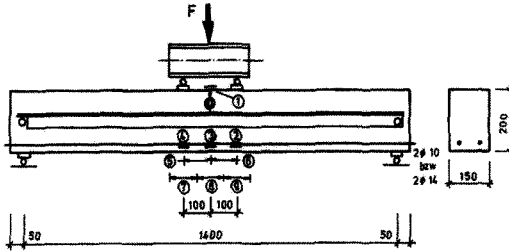


Fig. 1. 시편 및 Test set up 사진

실험수행은 600kN 액추에이터 밑에 철근콘크리트시편을 설치하고 사용하중으로 Pmax는 최대설계하중 23kN을 정적으로 재하하고 이어서 Fig. 2와 같이 사용피로하중(6Hz)을 철도하중에서 발생할 수 있는 진폭의 크기를 다양하게 각각 변화시켜 100만 번까지 재하 시켰다.

2.2 실험결과

Fig. 3에서는 사용피로하중에 대한 목표압축강도는 25 N/mm²이고 철근비가 0.5%인 철근콘크리트보의 균열특성을 잘 보여주고 있다. 50만 번부터는 균열발전의 기울기가 작아지는데 이것은 단순히 콘크리트와 철근 사이에서 부착 특성에 대한 진동크리프에 의한 것으로 판단된다.

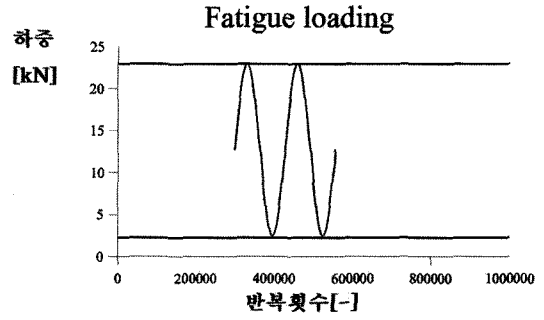


Fig. 2. 사용피로하중의 진폭변화

균열폭 [mm]

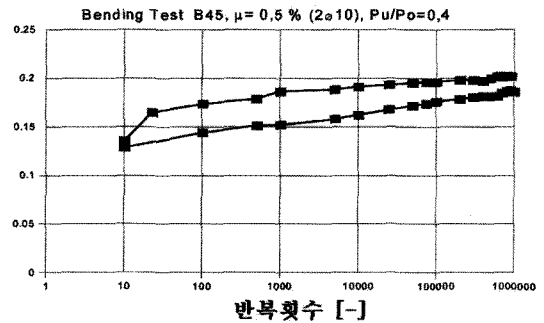


Fig. 3. 반복횟수에 대한 균열발전

모멘트 [KNmm]

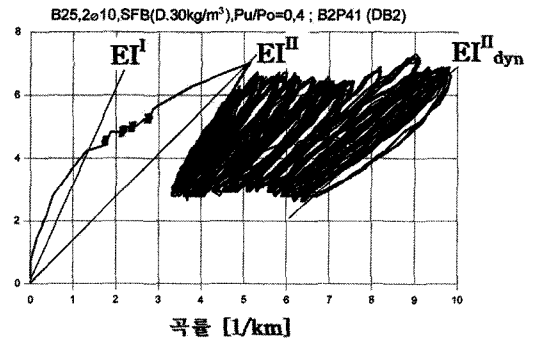


Fig. 4. 모멘트-곡률곡선에서의 강성변화

Fig. 4는 정적 및 동적 실험의 모멘트-곡률 곡선이다. 일반적으로 정적실험에서는 영점에서부터 모멘트-곡률 곡선의 매점 연결직선의 기울기가 활선 강성이다. 균열전의 보의 초기강성은 EI^I = 3.00MNm² 이다.

그러나 균열발생 후 강성은(EI^{II} = M/κ) 그림에서 볼 수 있는 것처럼 현저하게 떨어진다. 보통 반복하중이 작용할 경우는 동적 강성은 최대하중과 최소하중이 반복되는 동안 충분히 하중에서 벗어나기 전에 다시 재하 되므로 위에서 언

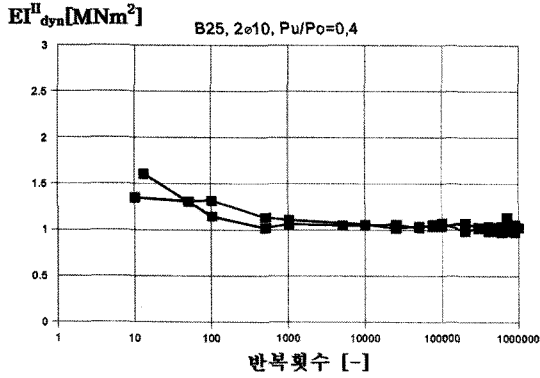


Fig. 5. 반복횟수에 대한 동적 강성의 변화

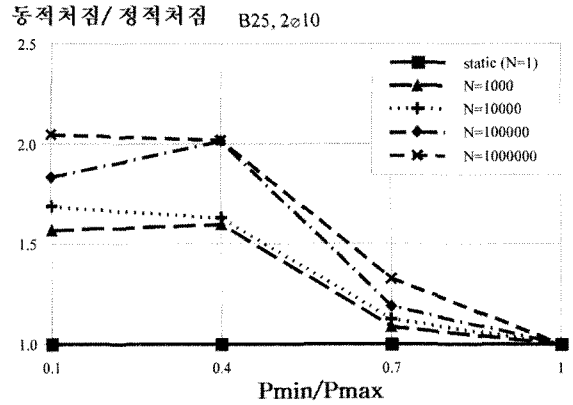


Fig. 7. 치짐 발전에 미치는 사용하중 진폭비(P_{min}/P_{max})의 영향

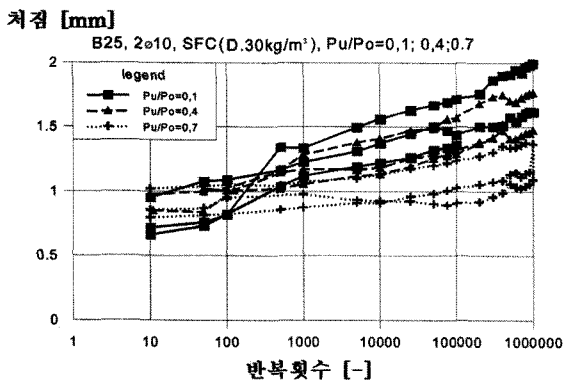


Fig. 6. 다양한 사용피로하중 하에서 반복횟수에 대한 치짐 발전

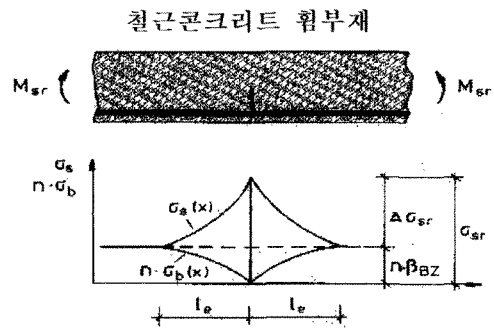


Fig. 8. 균열단면에서의 철근응력 및 콘크리트응력의 변화[5]

급한 정적강성보다 다소 큰 강성을 나타내고 있다($EI_{dyn}^{II} = (M_{max} - M_{min}) / (\kappa_{max} - \kappa_{min})$). Fig. 5는 사용피로하중에 대한 목표강도는 $25N/mm^2$ 이고 철근비가 0.5%인 철근콘크리트의 반복횟수에 따른 동적 강성의 변화를 나타내고 있다. 반복횟수 1000이후로는 강성변화가 거의 없이 일정한 것을 볼 수가 있다. 이것은 사용하중이 재하 되고 연속적인 균열 측정을 위해 LVDT가 설치된 중앙부 측, 최대모멘트가 작용하는 부분에서는 철근과 콘크리트사이의 부착진동크리프가 끝나 실제적으로 강성이 더 이상 감소되지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 다양한 사용피로하중 하에서 반복횟수에 대한 치짐의 발전을 보여주고 있다. 사용하중의 진폭이 클수록 치짐 발전의 기울기가 커짐을 알 수가 있다.

Fig. 7은 지속하중을 동적 치짐과 정적 치짐 사이에서 기준 점으로 1.0으로 놓으면 반복횟수 및 최소하중/ 최대하중비(P_{min}/P_{max})에 따른 실험치로부터 하중비의 연결선을 얻게 된다. Fig. 7에서는 최소하중과 최대하중 관계비가 작을수록 선택한 반복횟수의 치짐과 첫 사용하중 재하시의 치짐의 관계는 커진다.

3. 사용피로하중에 대한 철근콘크리트 휨부재의 균열이론

Fig. 8 및 9와 같이 철근콘크리트 휨부재의 최초의 균열단면 및 철근콘크리트 구조물에서 콘크리트와 철근의 상대변위에 발생하는 경우 응력 및 변위로부터 경계조건($x=0$ 및 $x=l_e$)을 설정해 미분 방정식을 풀어서 균열이론식을 유도하게 된다.

Fig. 8에서는 철근콘크리트 휨부재의 균열단면에서의 균열식을 유도하기 위한 각각의 철근 및 콘크리트의 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 균열단면의 인장력은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 폭으로 증가하게 되고 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 부착특성에 고려한 유효부착길이와 균열폭이 구해진다.

Fig. 9에서 $N=1$ (정하중)인 경우의 그래프를 따라가면 아래와 같은 사용하중에 대한 콘크리트와 철근의 부착특성을

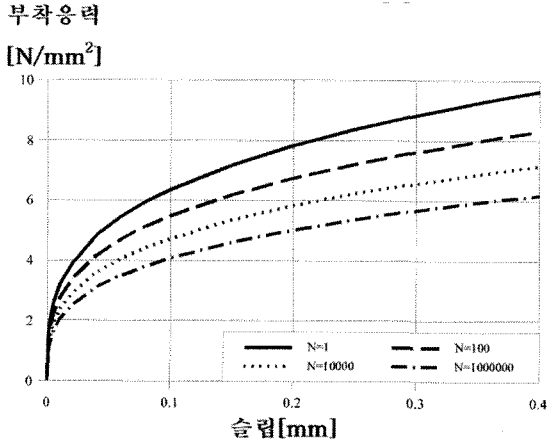


Fig. 9. 사용반복하중에 대한 부착응력-슬립의 관계[5]

일반적인 나타내고 있으므로 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있으며,

$$\tau_v = \sigma_{ck} \cdot a \cdot v^b$$

여기서, τ_v : 부착응력; v^b : 슬립; $a=0.31$; $b=0.30$:

일반적으로 사용하중에서 사용되는 부착상수[5]

윗 식과 함께 균열발생 시 철근 및 콘크리트 응력변화를 고려해 균열간격 및 균열폭을 구할 수 있다.

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

$$\text{균열폭: } w^I = 2 \left[\Delta\sigma_{sr} \frac{\sigma_{sr}}{E_s} \frac{d_s}{8} \frac{1+b}{\sigma_{ck} a} \right]^{\frac{1}{1+b}}$$

여기서, σ_{ck} : 콘크리트 설계기준강도

σ_{sr} : 균열발생단면의 철근응력

d_s : 철근직경; E_c, E_s : 콘크리트 및 철근의 탄성계수

n : 탄성계수비

4. 사용피로하중에 대한 철근콘크리트 휨부재의 균열이론

사용피로하중에 대해 반복횟수(N)가 늘어남에 따라 균열 폭은 커진다. 그 주된 원인은 휨 부재의 경우 압축 측에서 콘크리트크리프와 인장측의 철근과 콘크리트사이에 부착크리프이다. 균열폭의 발전은 부재의 압축과 인장측 사이에 강성관계가 결정적이다. 반복되는 하중과 함께 크리프변형

의 실제적인 비선형을 고려하지 않는다면 균열폭의 증가는 압축 측의 끝 부분 응력크기의 작은 영향만을 기대할 수밖에 없다. 그러나 압축 측에서 콘크리트크리프는 균열발전에 큰 영향은 미치지 않으므로 근사적으로 사용반복하중에 대한 철근콘크리트보의 균열은 부착크리프영향의 고려해 계산되어진다.

일반적으로 사용피로하중에 대한 철근과 콘크리트 사이에서 부착강도는 원형 콘크리트실린더에 묻힌 철근의 인발 실험의 결과로 얻어진 Fig. 9에서 같이 반복횟수가 증가할수록 작아진다[5]. 그것은 같은 부착응력 하에 시간이 지나거나 사용반복하중과 함께 크리프의 영향으로 아래와 같은 비선형 식으로 슬립은 커지게 된다.

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

여기서, $\tau_v(N)$: 부착응력; $v(N)^b$: 슬립;

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

$a=0.31$; $b=0.30$: 일반적으로 사용하중에서 사용되는 부착상수[5]; N:반복횟수

위와 같이 사용피로하중 하에 철근과 콘크리트사이의 부착에서 콘크리트크리프를 고려하여 반복되는 하중에 대한 균열거리와 균열폭을 계산할 수 있다.

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

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

여기서, σ_{ck} :콘크리트 설계기준강도

σ_{sr} : 균열발생단면의 철근응력; d_s : 철근직경;

E_c, E_s : 콘크리트 및 철근의 탄성계수; n : 탄성계수비

Fig. 10에서는 다양한 사용반복하중크기에 따른 균열발전에 대한 실험치와 이론치를 함께 비교하였다.

먼저 사용피로하중에 대한 각각 진폭에 따른 균열폭의 발전을 각각 특정한 반복횟수에 따라 나타내었고 이와 같은 다양한 사용피로하중 하에서 발생하는 모든 실험측정치에서 평균값을 구해 경험식으로 도출하고자 하였다. 사용피로하중에 대한 모든 시편의 균열발전은 log를 취한 반복횟수에 대하여 거의 직선변화를 하므로 Fig. 10에서는 실선으로

5. 결론

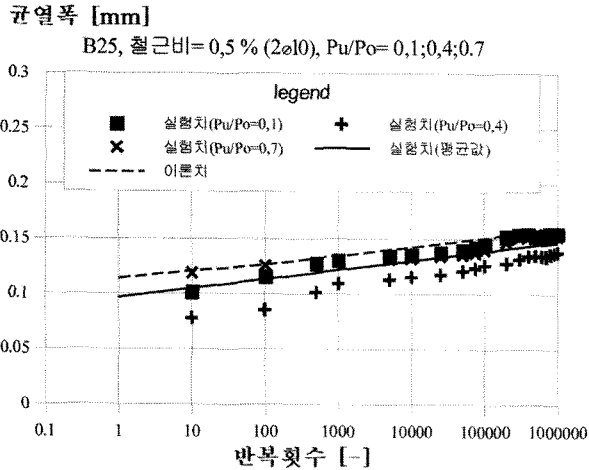


Fig. 10. 사용반복하중 하에서 균열발전에 대한 실험치와 이론치의 비교[5]

나타낸 것처럼 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$w(N)=w(0)+k \log N$$

여기서 $w(N)$: 사용피로하중회수 N 에 대한 평균 균열폭,
 $w(0)$: 첫 하중 재하 시 균열폭
 k : 실험상수(0.00767)

Fig. 10에서 점선은 위에서 언급한 철근과 콘크리트의 부착특성을 고려하여 유도된 균열발전의 이론치이다. 계산치는 실험치보다 위에 있으므로 안전한 측면에서 사용될 수 있다.

- (1) 철근콘크리트구조물에서 균열은 강성과 밀접한 관계를 갖고 있어 사용반복하중 하에서 균열발전은 강성을 저하시키고 처짐을 증가시키므로 사용성 평가에 중요한 요소이다.
- (2) 사용피로하중 하에서 50만 번부터는 콘크리트와 철근사이의 진동크리프에 의해 균열발전의 기울기가 점차로 작아지고 일반 콘크리트의 동적 강성은 1000부터 100만 번까지는 거의 변화가 없다.
- (3) 사용하중의 진폭이 클수록 처짐 발전의 기울기가 커진다.
- (4) 다양한 사용하중의 크기를 종합해서 공용기간에 사용성을 평가할 수 있도록 철근콘크리트의 균열발전을 반복횟수에 따라 계산할 수 있도록 계산식 및 실험에 의한 경험식을 제안했다.
- (5) 사용하중 하에 균열폭 발전에 대한 실험치와 이론치가 허용할 수 있을 만큼 잘 일치한다.

참고 문헌

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