

사용반복하중에 대한 강섬유철근콘크리트 부재의 피로거동

Fatigue Behavior of SFRC Elements under High Cyclic Loading

강 보 순*, 황 성 춘*, 오 병 현**

Kang, Bo-Soon, Hwang, Seong-Chun, Oh, Byung-Hyun

ABSTRACT

Fatigue behavior of reinforced concrete(RC) and steel fiber reinforced concrete(SFRC) elements has been experimentally investigated. Fatigue behavior influenced by longitudinal reinforcement ratio, volume and type of steel fiber, strength of concrete and load ratio P_u/P_o . It can be observed from experimental results that addition of steel fiber to reinforced concrete beam reduces crack widths and increases stiffness, and thus enhances the behavior in serviceability limit states also for high cyclic fatigue loading.

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 및 동하중에 우수한 성능을 갖고 있는 강섬유철근콘크리트의 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. 일반적인 철근콘크리트 구조물에 비하여 강섬유보강철근콘크리트는 우수한 성능을 갖고있다. 강섬유가 균열발생을 억제함은 물론 균열발전후에도 균열폭을 억제함으로써 하중전달능력을 향상시키는 데 효과가 있다. 최근 강섬유콘크리트(SFC)에 관한 연구논문들이 살펴보면 동하중하에서는 강섬유의

* 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사, **한국수자원공사연구소 선임연구원

이와같은 효과가 더욱 더 우수하게 나타난다 [1]. 강섬유철근콘크리트의 특성에 관한 연구 중 정하중하에 있는 단기거동에 관해서는 비교적 많은 연구논문이 발표되어 있고 일부는 동적하중에 대한 강섬유철근콘크리트의 강도증진 및 Ductility 향상에 관한 효과등을 규명한 연구실적 [2] 도 있으나 이들 기존의 연구는 지진하중에서 올 수 있는 반복횟수가 낮은 피로하중(low cycle fatigue loading)에 대한 연구로써 철도 및 도로에서 주로 발생할 수 있는 사용피로하중(high cycle fatigue loading)하에 강섬유철근콘크리트(SFRC)의 균열 및 강성특성에 관한 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구는 철근콘크리트(RC)보 및 강섬유철근콘크리트(SFRC)보의 공용기간에 주기적으로 반복되는 사용조건에 대한 균열발전 및 강성의 변화에 관한 실험적 연구로서 사용된 실험변수로는 철근비 및 2가지 종류의 강섬유의 혼입량을 선택하였다.

2. 강섬유콘크리트의 균열특성

강섬유콘크리트의 균열특성은 균열형성 및 균열발전에서 섬유효과와 균열발생후의 효과 사이에서 나눌 수 있다. 비균열 상태에서의 강섬유 효과는 자체응력 및 하중에 의한 마이크로 균열발생을 억제하고 균열발생 후 강섬유 효과는 균열폭 사이에 힘을 전달하여 균열폭을 제한한다.

철근콘크리트 구조물에 강섬유의 혼입은 균열폭의 제한을 위해 특별히 효과적인 대책으로써 입증되었다. 이런 강섬유의 효과는 균열제한을 위한 적용시 직접적인 인장실험에서 확실히 할 수 있다. 그림1 에서는 콘크리트, 철근콘크리트, 강섬유콘크리트, 강섬유철근콘크리트에 대한 직접 인장실험시 하중과 변형의 진행을 보여주고 있다.

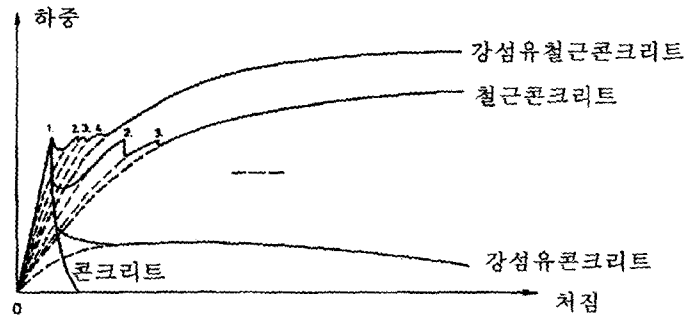


Fig.1---- 다양한 종류의 콘크리트 하중-처짐 곡선

강섬유철근콘크리트의 진행이 철근콘크리트에 강섬유콘크리트를 합한 값에 거의 일치하는 것을 확실히 알 수가 있다. 이때 균열 발전부분에 특별히 관심을 갖고 보면 첫 균열발생 후 강섬유철근콘크리트는 철근콘크리트보다 현저하게 큰 강성을 갖고있다 이것은 같은 변위조건 일 경우 더 많은 균열수를 갖고 있는 것을 의미한다. 강섬유의 영향은 부착시스템의 각

각 성분에 대한 인장하중의 분할로부터 정량적으로 유도 될 수 있다. 발생한 균열폭은 하중 분할의 변화에 따라 달라진다.

3. 강섬유철근콘크리트보의 피로하중에 대한 균열발전

본 연구에서는 사용피로하중에 대한 강섬유철근콘크리트(SFRC)보의 사용성에 관한 실험적 연구이므로 균열발전 및 강성변화를 다루었다. 사용된 실험변수로는 하중의크기, 콘크리트강도 및 철근비 그리고 2가지 종류의 강섬유 및 혼입량을 선택하였다. 실험은 정적으로 최대사용하중까지 재하한 후 연속하여 각각 사용하중의 진폭에 따라 112개의 철근콘크리트 및 강섬유철근콘크리트의 보를 피로하중하에서의 수행되었다.

3.1 시험체 및 실험측정값

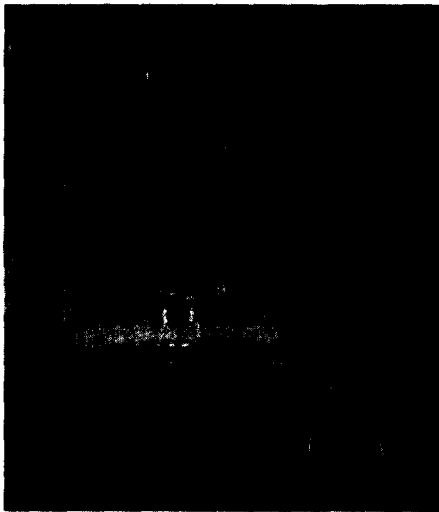


Fig.2---Test set up 사진

본 연구의 궁극적인 목적인 사용피로하중에 대한 길이 150cm, 단면폭 15cm, 단면높이 20cm 인 철근콘크리트 및 강섬유로 보강된 철근콘크리트보의 균열발전 및 강성의변화를 나타내는 것으로서 필요한 제반 측정값은 보의 중앙처짐, 콘크리트의 압축변형, 철근의 변형(3곳), 및 균열측정(5곳)이다.

균열폭은 100만번의 반복하중이 재하된 후 일반 철근콘크리트보의 균열폭보다 평균적으로 강섬유 30kg/m³를 혼입할 때는 35%, 60kg/m³를 혼입할때는 45% 정도로 감소된다. 일반 콘크리트보의 경우 50만번 부터는 균열발전의 기울기가 작아지는데 이것은 단순히 콘크리트의 진동크리프에 의한 것으로만 볼 수 있다. 반면에 강섬유(Harex) 30kg/m³를 혼입할 때는 50만번 부터는 균열발전의 기울기가 증가하는데 그이유는 강섬유와 콘크리트사이의 부착효과가 상실된 것으로 판단된다. 따라서 장기적인 균열제한에는 강섬유(Harex) 60kg/m³을 혼입하는 것이 적당한 것으로 판단된다.

그림4 은 사용피로하중에 대한 목표강도는 300 kg/cm² 이고 철근비가 0.5%인 강섬유철근콘크리트의 강섬유의 혼입량에 따른 강성의 변화를 나타내고 있다. 일반 철근콘크리트보의 경우에는 반복횟수1000부터 100만 번까지는 동적강성의 변화가 미세하다.

3.3 실험결과

그림3 에서는 사용피로하중에 대한 목표압축강도는 450 kg/cm²이고 철근비가 0.5%인 강섬유철근콘크리트보의 강섬유의 혼입량에 따른 균열특성을 잘 보여주고 있다. 강섬유철근콘크리트보의

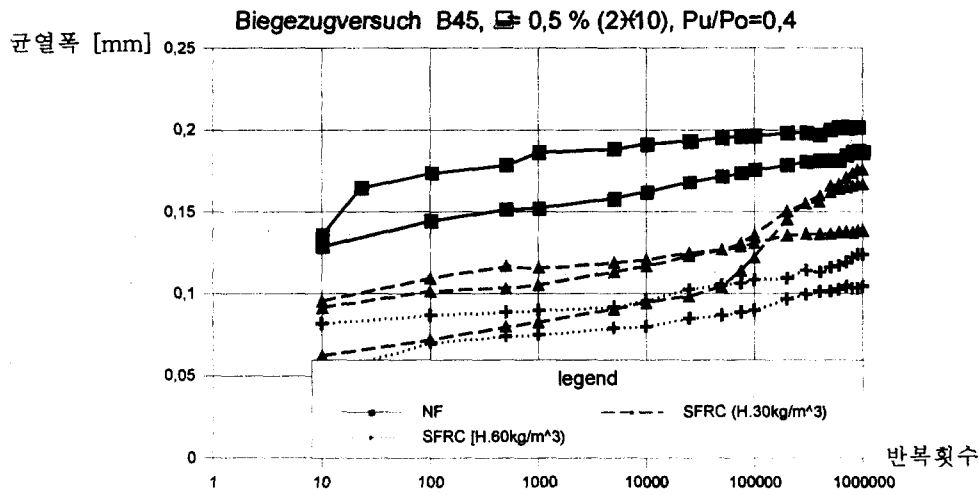


Fig.3---반복횟수-균열발전에 관한 강섬유의 영향

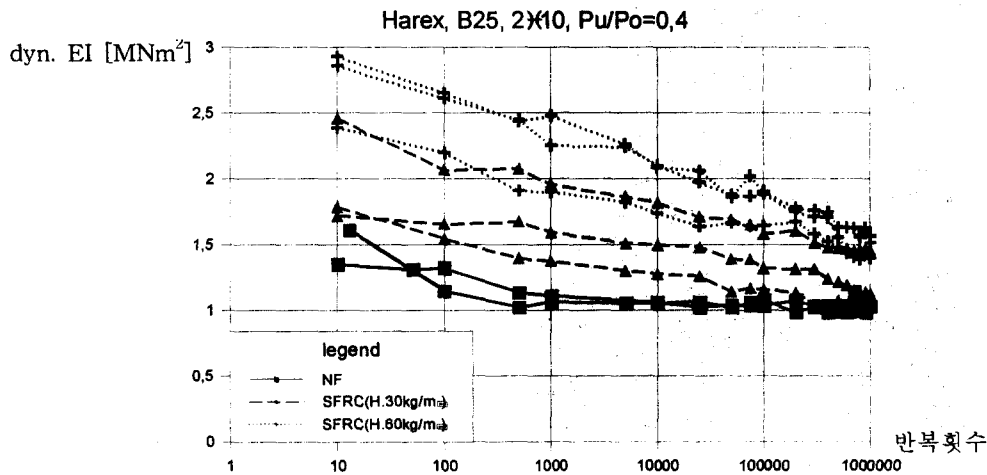


Fig.4---반복횟수-강성에 관한 강섬유의 영향

그 원인은 하중이 재하되고 연속적인 균열측정을 위해 LVDT가 설치된 중앙부 즉, 최대 모멘트가 작용하는 부분에 사용하중범위에서는 실제적으로 강성이 더 이상 감소되지 않는 것으로 판단된다. 반면에 강섬유철근콘크리트보들의 강성은 계속되는 균열발전으로 인해 거의 일정하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 100만 번의 반복하중이 재하된 후 일반 철근콘크리트보의 강성보다 평균적으로 강섬유 30kg/m³을 혼입할 때는 20%, 60kg/m³를 혼입할 때는 50% 정도로 증가된다.

4. 사용피로하중에 대한 강섬유철근콘크리트의 균열해석

그림5에서는 강섬유철근콘크리트의 균열단면에서의 각각의 응력상태를 도식화하여 보여 주고 있다. 일반적으로 순수한 인장이나 휨하중하에 있는 철근콘크리트 구조물의 균열발생은 인장부분의 가장 취약한 곳에서 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 발생한다. 이곳의 콘크리트 단면의 응력은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 폭으로 증가 하게 된다. 그러나 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 우회하는 응력의 일부분을 강섬유가 부담 하게되어 균열단면의 콘크리트의 응력이 없어지는 것이 아니라 일정량의 강섬유응력이 콘크리트의 응력을 대신하여 계속 유지하게 된다. 따라서 균열단면의 철근응력은 상대적으로 작아져 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 유효부착길어도 작아지므로 균열폭이 작아지게 된다.

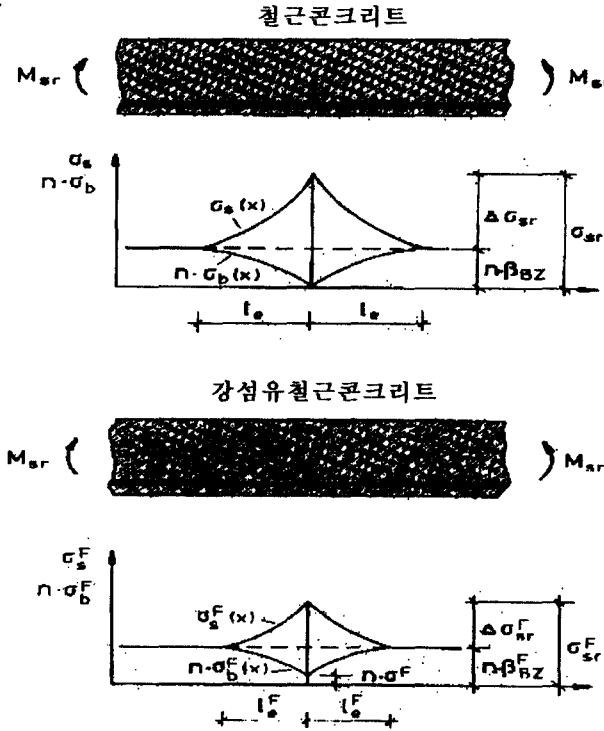


Fig.5---균열단면에서의 철근응력 및 콘크리트응력의 변화

그리고 또한 강섬유철근콘크리트의 중립축의 위치가 콘크리트 압축방향으로 작게 이동하게 되어 같은하중하에서 강섬유철근콘크리트의 균열깊이가 강섬유가 없는 보통철근콘크리트 보다 작아져서 결과적으로는 강성을 증가시키고 처짐을 감소시킨다. 이러한 균열특성의 결정적인 변화는 강섬유를 보강함으로써 철근콘크리트 구조물의 변위 내지는 사용성 상태에 큰 영향을 줄 수가 있다. 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 응력의 일부분을 강섬유가

부담 하계되는 것을 고려하여 감소된 철근용력을 결정한다.

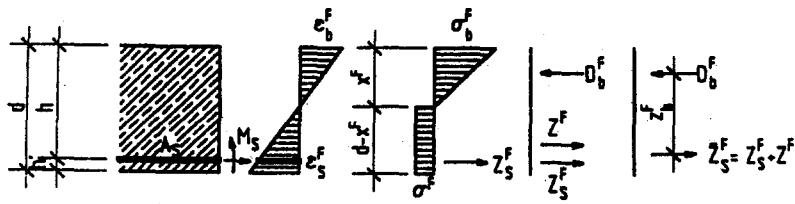


Fig.6--- 휨부재의 균열단면에서 작용하는 강섬유철근콘크리트의 변형, 응력 및 힘

5. 강섬유철근콘크리트의 균열이론

사용피로하중에 대하여 반복횟수가 늘어남에 따라 균열폭은 커진다. 그 주된 원인은 휨부재의 경우 압축측에서 콘크리트creep와 인장측의 철근과 콘크리트사이에 부착creep이다. 균열폭의 발전은 부재의 압축과 인장측 사이에 강성관계가 결정적이다. 반복되는 하중과 함께 creep변형의 실제적인 비선형을 고려하지 않는다면 균열폭증가는 압축측의 끝 부분 응력 크기의 작은 영향만을 기대할 수밖에 없다. 그러나 압축측에서 콘크리트creep은 균열발전에 영향은 미치지 않으므로 사용하중범위에서 강섬유의 영향이 콘크리트creep에 크지 않다면 근사적으로 사용반복하중에 대한 강섬유철근콘크리트보의 균열은 부착creep영향의 고려해 계산되어진다.

일반적으로 사용반복하중에 대한 철근과 콘크리트 사이에서 부착강도는 작아진다. 그것은 같은 부착응력하에 시간이 지나거나 사용반복하중과 함께 creep의 영향으로 아래와 같은 비선형식으로 슬립은 커지게 된다.(그림 7)

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

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

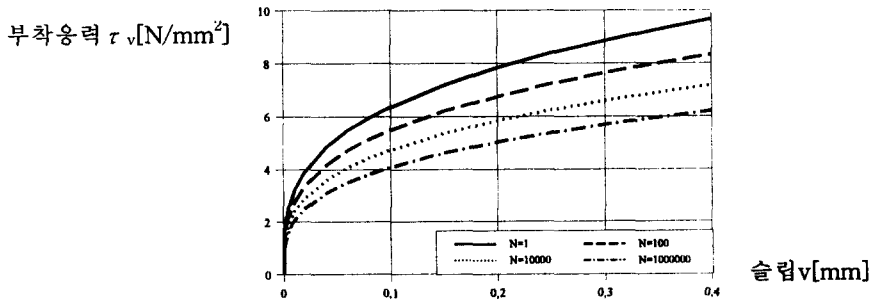


Fig.7--- 사용반복하중대한 부착응력-슬립의 관계

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

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

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

여기서, σ_{sr}^F : 균열시 철근의응력; d_s : 철근직경; E_s : 철근의 탄성계수; n : 탄성계수비

공용기간에 구조물은 여러가지 크기의 사용반복하중이 재하되므로 다양한 사용하중의 크기 (Pu / Po= 0,1; 0,4; 0,7)를 종합해서 강섬유철근콘크리트의 균열발전을 철근콘크리트의 균열 이론을 근거로 수정하여 반복횟수에 따라 계산 할 수 있도록 하였다.

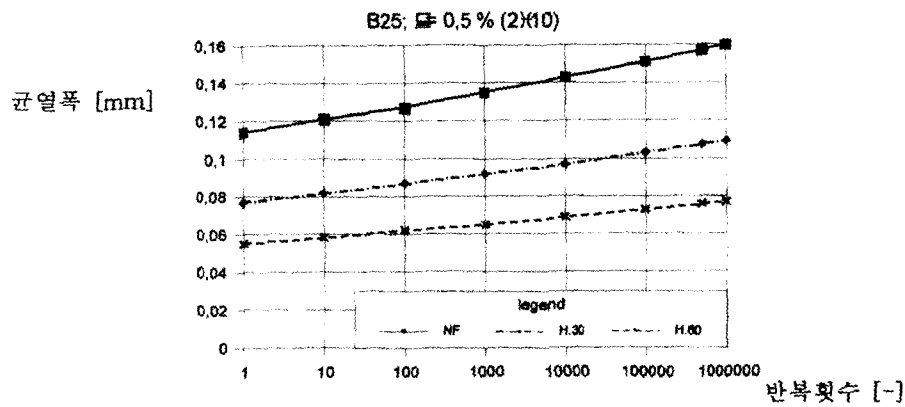


Fig.8--- 사용반복하중하에서 섬유혼입량에 따른 균열발전

6. 결론 및 추후연구과제

- 피로하중하에서 철근콘크리트에 보강된 강섬유는 뚜렷한 균열억제와 강성이 증대되어 공용기간에 강섬유철근콘크리트 구조물의 사용성이 향상됨을 입증하였다.
- 강섬유콘크리트보의 강성은 100만 번의 반복하중이 재하된 후 일반 철근콘크리트보의 강성 보다 평균적으로 강섬유 30kg/m³을 혼입할 때는 20%, 60kg/m³을 혼입할때는 50% 정도로 증가된다.
- 강섬유철근콘크리트보의 균열폭은 100만 번의 반복하중이 재하된 후 일반 철근콘크리트보의 균열폭보다 평균적으로 강섬유 30kg/m³를 혼입할 때는 35%, 60kg/m³를 혼입할때는

45% 정도로 감소된다.

- 강섬유(Harex) 30kg/m³을 혼입할 때는 50만 번 부터는 강섬유와 콘크리트사이의 부착효과가 상실되어 균열발전의 기율이 감소한다.
- 다양한 사용하중의 크기를 종합해서 공용기간에 사용성을 평가 할 수 있도록 강섬유철근 콘크리트의 균열발전을 반복횟수에 따라 계산할 수 있도록 계산식을 제안했다.
- 사용하중하에 균열폭 발전에 대한 실험치와 이론치가 허용할 수 있을 만큼 잘 일치한다.

참고문헌

- /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.