

## 강섬유철근콘크리트 구조물의 균열폭 계산 Calculation of Crack Width in SFRC Structures

강보순\*  
Bo-Soon Kang

### Abstract

A method is described for predicting crack width and spacing in Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). The crack behavior of SFRC influenced by longitudinal reinforcement ratio, volume and type of steel fiber, strength of concrete. It can be observed from experimental results that addition of steel fiber to reinforced concrete beam reduces crack width in serviceability limit states. The proposed method predicts crack widths in cracking stage of the beam. Calculated crack widths obtained for reinforced concrete beams and different volume and type of steel fiber, strength of concrete showed good agreement with experimental results.

**Keywords** : 슬래브궤도, 철근콘크리트, 강섬유철근콘크리트, 균열거동

### 1. 서론

다양한 품목으로 구성된 철도시스템 중에서 공사에 상당한 비중이 있는 교량, 터널 및 궤도구조물에 대한 요구가 점차 증대되고 있다. 특히 고속열차의 주행시 안정성, 내구성 및 부설에 따른 경제성 그리고 향후 유지관리 등의 측면에서 더욱 더 경쟁력이 있는 구조물을 찾게 된다. 예를 들면 슬래브궤도의 경우 초기건설비용은 물론 지금은 자갈궤도보다 많이 드나 계획된 50년 공용기간에 대한 제작비용 및 운용비용을 자세히 살펴보면 현저한 보수/보강비용의 절약으로 오히려 많은 유리한점들을 찾을 수 있다. 슬래브궤도의 도입은 고속철도건설의 1단계사업에서는 터널에만 사용됐지만 2단계에서는 토공에서도 사용된다. 슬래브궤도는 앞으로는 제작비용도 계속해 절약될 수 있어 전체 궤도건설에 있어서 신설선 뿐만 아니라 개량선에서도 경쟁력이 있을 것으로 판단되므로 앞으로는 일반철도에서도 궤도건설에 좀 더 적극적으로 도입될 것으로 예상된다.

고속철도 1단계 사업에서는 구조물의 내진설계가 부분적으로 과다설계가 되는 경향이 있어 시공의 어려움을 겪었다. 한편으로는 설계자에게는 콘크리트구조물의 경우 사

용성에 더 관심이 많을 수 있다. 철근콘크리트구조물의 사용성에서는 균열상태와 처짐변화가 아주 중요하다. 특히 철근콘크리트로된 철도구조물은 공용기간에 계속되는 반복하중하에 놓이게 되므로 사용조건에 대한 균열발전은 구조물의 강성을 감소시키고 처짐이 증가되는 현상을 가져오게 된다. 이와 같은 사용성의 문제를 간과하게 되면 콘크리트구조물의 심각한 문제가 될 수 있으므로 먼저 내구성이 우수하고 균열을 저감시킬 수 있는 기존의 철근콘크리트를 보강할 수 있는 재료에 관한 구체적 연구가 필요하다.

일반적으로 철근콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도는 상대적으로 매우 작으므로 인장강도의 증진과 균열제한을 위한 많은 연구가 수행되고 있다[7]. 철근콘크리트에 강섬유를 보강시키면 균열발생을 억제함은 물론 균열발전후에도 균열폭을 억제함으로써 하중전달능력을 향상시키는 데 효과가 있어 일반적인 철근콘크리트보다 강섬유철근콘크리트는 사용성 및 극한 상태에서 우수한 성능을 갖고 있다. 최근 강섬유 콘크리트(SFC)에 관한 연구논문들이 살펴보면 동하중하에서는 강섬유의 이와 같은 효과가 더욱 더 우수하게 나타난다[1].

실무적인 관심사를 위해 강섬유의 능력은 일정한 조건하에서 재하된 철근콘크리트 구조물에서 균열 및 처짐의 감소가 파괴하중의 증대보다 더 큰 의미가 있다. 특히 균열 발생 후 기술적으로 이용할 수 있는 내하력의 입증은 강

\* 책임저자 : 정희원, 경주대학교 건설환경공학부, 조교수  
E-mail : bskang@kyongju.ac.kr  
TEL : (054)770-5282 FAX : (054)748-7556

섬유철근콘크리트의 고유특성으로 특별한 의미를 주고 있다. 시방서에 의해 철근을 배근하고 추가적으로 강섬유로 보강한 철근콘크리트 구조물은 파괴하중에서의 거동 보다 정하중 또는 반복되는 사용하중에서의 거동에 더 강한 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 균열상태에서 휨하중에 대한 강섬유철근콘크리트의 내하력을 표시 할 수 있는 방법을 개발하였고 특히 사용하중에 대한 예상 할 수 있는 균열거동에 관심을 두었다.

**2. 철근콘크리트의 균열발생시 강섬유의 효과**

강섬유콘크리트의 균열특성은 그림 1에서와 같이 균열형성 및 균열발전에서 섬유효과와 균열발생후의 섬유효과 사이에서 나눌 수 있다. 비균열 상태에서의 강섬유 효과는 자체응력 및 하중에 의한 마이크로 균열발생을 억제하고 균열발생 후 강섬유 효과는 균열 사이에 힘을 전달하여 균열폭을 제한한다.

강섬유는 콘크리트에서 미세한 내부균열을 억제하고 균열은 뿌리가 강섬유를 도달할 때까지 발전된다. 강섬유는 그 균열 및 발전하는 다른 균열을 안정시킨다. 전체적으로 같은 변위가 일어날 경우에는 더 작은 균열들이 여러 개 발생한다. 따라서 건조수축 균열발생률이 작아지며 가스 및 액체의 침투경과가 어렵고 건조경과(및 그와 더불어 건조수축경과)는 서서히 종료 되어 발생하는 응력집중을 완화시키는 결과를 가져온다. 그리고 또한 콘크리트의 인장강도가 방향에 관계없이 3차원으로 균일해진다. 섬유와 콘크리트사이에 상대변위가 일어나지 않으므로 강섬유 길이방향에서 강섬유의 기하학적 변화는 균열발생에 큰 영향을 미치지 못하지만(예를 들면 파선모양, 후크 처리된 모양의 섬유) 큰 섬유표면적을 갖고 있는 섬유는 특별히 효과적이다. 즉 같은 혼입량을 갖고 있을 때 균일하게 분포된 작은 섬유가 더 효과적이다.

구조물의 단면을 완전히 지나는 균열이 발생할 경우에도 강섬유는 균열폭 사이에서 힘을 계속 전달하므로 벌써 균열발전시 적어도 부분영역에서 균열을 분산시키는 결과를 가져오고 좀더 확대해서 보면 강섬유의 전 길이에 여러 개의

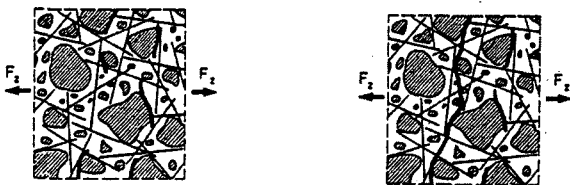


그림 1. 콘크리트의 균열발생시 강섬유 효과

미세한 균열로 분산된다. 발생된 균열 폭의 합계는 강섬유가 없는 일반 콘크리트와 거의 같지만 각각 하나의 균열폭을 살펴보면 뚜렷하게 작은 것을 알 수 있다. 균열폭에서 강섬유의 지속적인 힘의 전달은 보의 경우 단면내의 중립축의 이동이 작아져 동시에 균열깊이를 또한 감소시킨다[2,7].

균열 발생 후 섬유와 콘크리트사이에서는 상대변위가 발생한다. 충분한 섬유 자체강성이 수반된 강섬유의 길이방향의 변형은 생성된 우회적으로 전달되는 힘에 좋은 영향을 끼친다. 균열 면적을 통과해 충분한 힘의 전달을 위해서는 길고, 끝 부분을 후크 처리하여 기하학적으로 변화를 준 그리고 충분한 유연성이 있는 강섬유의 사용이 권장될 수 있다.

지금까지 언급한 모든 강섬유의 영향들은 콘크리트구조물의 조밀성에 대하여 아주 긍정적인 효과를 보여줌에 따라 철근콘크리트 구조물에 강섬유의 혼입은 균열폭의 제한을 위해 특별히 효과적인 대책으로서 입증되었다. 이런 강섬유의 효과는 균열제한을 위한 직접적인 인장실험에서 확실히 할 수 있다. 그림 2에서는 콘크리트, 철근콘크리트, 강섬유콘크리트, 강섬유 철근콘크리트에 대한 직접 인장실험시 하중과 변형의 진행을 보여주고 있다.

강섬유철근콘크리트의 진행이 철근콘크리트에 강섬유콘크리트를 합한 값에 거의 일치하는 것을 확실히 알 수가 있다. 이때 균열 발전부분에 특별히 관심을 갖고 보면 첫 균열 발생 후 강섬유철근콘크리트는 철근콘크리트보다 현저하게 큰 강성을 갖고 있다. 이것은 같은 변위조건 일 경우 더 많은 균열수를 갖고 있는 것을 의미한다. 강섬유의 영향은 부착시스템의 각각 성분에 대한 인장하중의 분할로부터 정량적으로 유도 될 수 있다. 발생한 균열폭은 하중분할의 변화에 따라 달라진다.

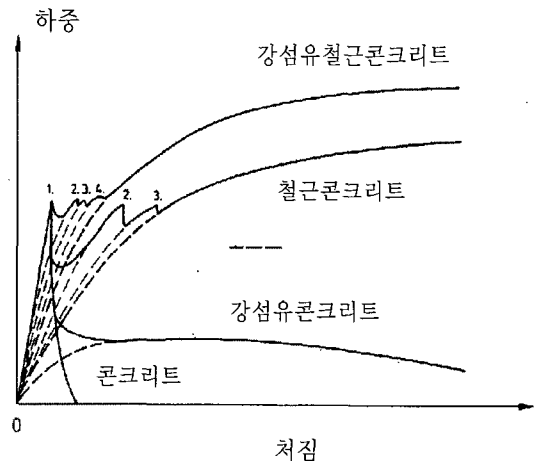


그림 2. 다양한 종류의 콘크리트 하중-처짐 곡선

### 3. 강섬유철근콘크리트의 균열이론

그림 3에서는 강섬유철근콘크리트의 균열단면에서의 각각의 응력상태를 도식화하여 보여주고 있다. 일반적으로 순수한 인장이나 휨하중하에 있는 철근콘크리트 구조물의 균열발생은 인장부분의 가장 취약한 곳에서 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 발생한다. 이곳의 콘크리트 단면의 응력

은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 쪽으로 증가하게 된다. 그러나 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 우회하는 응력의 일부분을 강섬유가 부담하게 되어 균열단면의 콘크리트의 응력이 없어지는 것이 아니라 일정량의 강섬유응력이 콘크리트의 응력을 대신하여 계속 유지하게 된다. 따라서 균열단면의 철근응력은 상대적으로 작아져 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 유효부착길이도 작아지므로 균열폭이 작아지게 된다. 그리고 강섬유철근콘크리트의 중립축의 위치가 콘크리트 압축방향으로 작게 이동하게 되어 같은 하중 하에서 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 준다. 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 응력의 일부분을 강섬유가 부담하게 되는 것을 고려하여 감소된 철근응력을 결정한다(그림 4).

그림 5와 그림 6에서는 위에서 언급한 내용을 종합해 실무에서 사용될 수 있도록 그래프를 만들었다. 이와 같은 그래프는 실무에서 철근비가 다른 강섬유철근콘크리트구조물의 인장 철근의 응력 및 균열폭을 예측할 수가 있다. 그림 5에서는 압축축의 상단에서 콘크리트 응력이 일정할 때 균열단면에서 철근비 및 강섬유 응력에 따른 철근응력의 변화를 보여주고 있다. 철근비가 0.25%일 때 섬유응력이 2.0 N/mm<sup>2</sup>으로 강섬유가 없는 일반 철근콘크리트보다 60%가 넘게 균열단면에서 철근응력이 감소된다. 철근비가 1.0 %일 때는 강섬유가 없는 일반 철근콘크리트보다 40%로 균열단면에서 철근응력이 감소한다.

그림 6은 철근비가 작은 경우 작은 섬유응력이 계산된 균열폭이 50%가 넘게 작아질 수가 있다. 또한 철근비가 1.0%

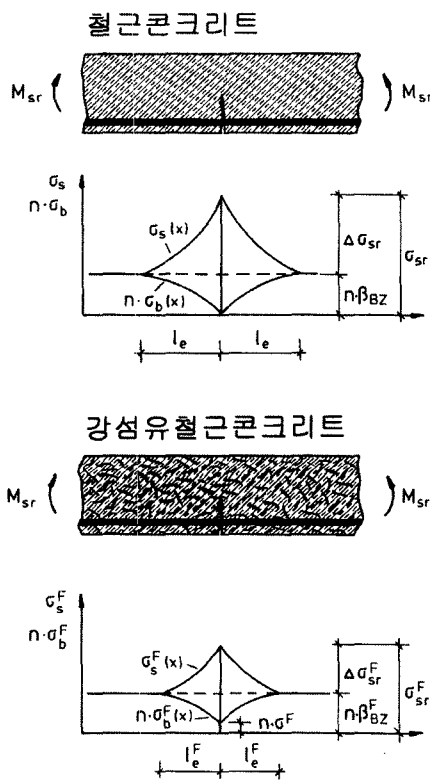


그림 3. 균열단면에서의 철근응력 및 콘크리트응력의 변화[7]

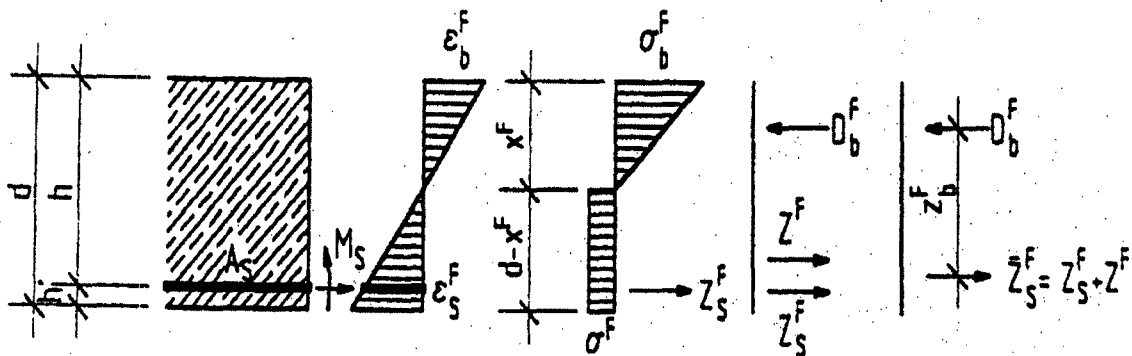


그림 4. 휨부재의 균열단면에서 작용하는 강섬유철근콘크리트의 변형, 응력 및 힘[7]

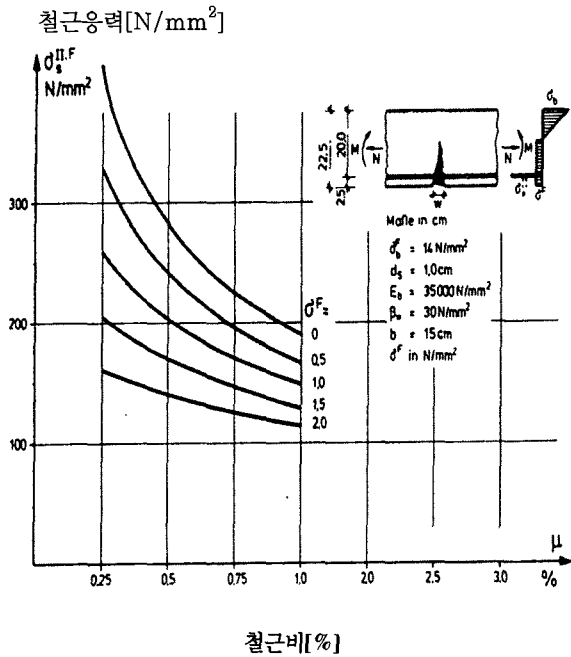


그림 5. 균열단면에서의 철근비에 대한 철근응력 변화[7]

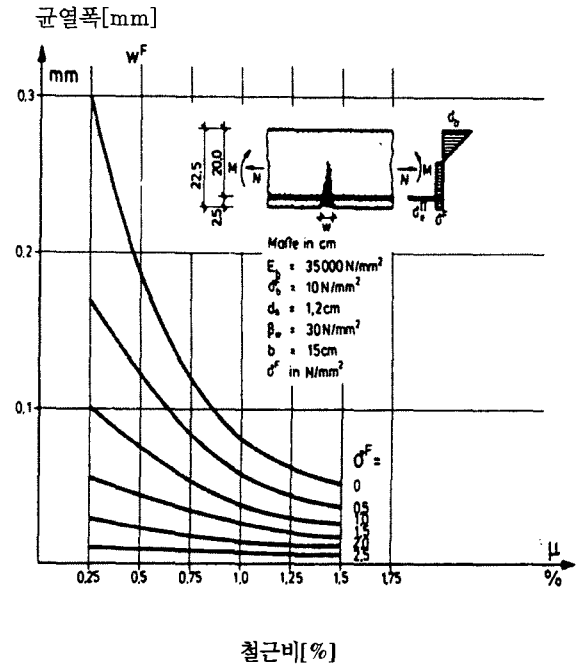


그림 6. 균열단면에서의 철근비에 대한 균열폭의 변화[7]

까지 균열폭 감소가 곡선 형태로 크게 떨어지는 반면에 큰 철근비를 갖고 있는 경우 균열폭 감소가 거의 일정하다.

이 그림을 통해서 강섬유에 의해 전달되는 힘은 철근이 받는 힘보다 같거나 더 큰 경우 강섬유의 영향이 더욱 더 효과적 나타난다. 따라서 철근비가 작은 철근콘크리트 구조물에 강섬유보강이 적합한 사실을 알 수 있다.

철근과 주위에 에워싸고 있는 콘크리트에 휨구조물에 모멘트가 발생하면 철근과 콘크리트사이에서는 상대변위가 생기므로 이것을 미분방정식으로 유도하여 위에서 언급한 이론을 토대로 또한 강섬유 보강을 고려한 철근콘크리트 균열폭의 계산을 위한 이론식이 제공될 수 있다. 실무에서는 이론식에서 큰 영향을 주는 요소들만으로 정리한 간략식도 사용될 수 있다.

균열거리

$$\text{이론식: } l_{e:sfrc} = \frac{2}{1-b} \cdot \left[ \frac{\Delta\sigma_{sr}^F \cdot E_s^b}{(\sigma_{sr}^F - n \cdot \sigma^F)^b} \cdot \frac{d_s}{8} \cdot \frac{1+b}{\beta_w \cdot a} \right]^{\frac{1}{1+b}}$$

$$\text{간략식: } l_{e:sfrc} = l_{e:rc} \left( \frac{\sigma_{bt} - \sigma^F}{\sigma_{bt}} \right)^{\frac{1-b}{1+b}}$$

균열폭

$$\text{이론식: } w_{sfrc} = 2 \cdot \left[ \Delta\sigma_{sr}^F \cdot \frac{(\sigma_{sr}^F - n \cdot \sigma^F)}{E_s} \cdot \frac{d_s}{8} \cdot \frac{1+b}{\beta_w \cdot a} \right]^{\frac{1}{1+b}}$$

$$\text{간략식: } w_{sfrc} = w_{rc} \left( \frac{\sigma_{bt} - \sigma^F}{\sigma_{bt}} \right)^{\frac{2}{1+b}}$$

여기서,

$l_{e:sfrc}, w_{sfrc}; l_{e:rc}, w_{rc}$  : 철근콘크리트와 강섬유철근콘크리트의 균열거리 및 균열폭

$\sigma_{bt}$  : 콘크리트의 휨인장강도,  $\beta_w$  : 콘크리트의 압축강도

$\sigma^F$  : 강섬유응력(=post cracking strength),

$E_s, d_s$  : 철근의 탄성계수 및 지름

$\Delta\sigma_{sr}, \sigma_{sr}, \Delta\sigma_{sr}^F, \sigma_{sr}^F$  : 철근콘크리트와 강섬유철근콘크리트의 균열 단면에서의 철근응력증가 및 철근응력

a, b : 철근과 콘크리트의 부착특성에 관한 상대변위의 상수 ( $\tau = a\sigma_c s^b$ )

즉 간략식은 이론식에서 영향이 아주 미세한 요소는 고려하지 않고 큰 영향을 주는 요소들만으로 정리하여 실무자가 일반 철근콘크리트의 휨부재균열폭을 먼저 계산한 후 강섬유의 영향인자인 강섬유응력(Post cracking strength)을 빼주어 계산하면 강섬유철근콘크리트의 균열폭을 계산할 수 있다.

본 연구의 사용된 시편은 그림 1과 같이 길이 150cm, 단면폭 15cm, 단면높이 20cm인 철근콘크리트보로 측정된 값은 보의 중앙 처짐, 콘크리트의 압축변형, 철근의 변형(3

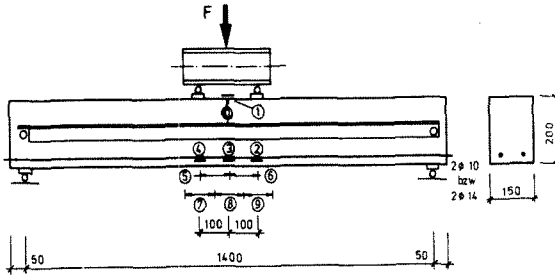


그림 7. 사용된 시편 및 측정위치

표 1. 강섬유철근콘크리트의 균열폭에 대한 실험치 및 이론치와의 비교

B25, 2φ10mm	실험치: Wm[mm]	계산치: Wm[mm]	실험치/계산치
RC	0.105	0.114	0.92
SFRC(Dramix 30)	0.070	0.076	0.92
SFRC(Dramix 60)	0.061	0.054	1.13
SFRC(Harex 30)	0.080	0.078	1.03
SFRC(Harex 60)	0.062	0.055	1.13

표 2. 강섬유철근콘크리트의 균열폭에 대한 실험치 및 간략치와의 비교

B25, 2φ10mm	실험치: Wm[mm]	계산치: Wm[mm]	실험치/간략치
RC	0.105	-	-
SFRC(Dramix 30)	0.070	0.073	0.96
SFRC(Dramix 60)	0.061	0.058	1.05
SFRC(Harex 30)	0.080	0.077	1.04
SFRC(Harex 60)	0.062	0.059	1.05

곳), 및 균열측정(5곳)이다.

표 1, 2에서 나타난 것처럼 균열폭에 대한 실험치, 이론치 및 간략치가 허용할 수 있을 만큼 잘 일치하는 것을 알 수가 있다.

#### 4. 강섬유철근콘크리트 슬래브궤도의 균열특성

이러한 실험결과로 인해 130m 슬래브궤도 시험구간을 독일 Waghäuser에서 강섬유철근콘크리트로 제작할 수 있었다. 공용조건하에서 두 대책의 거동을 관찰하기 위해서 비교구간으로 130m 철근콘크리트구간과 함께 이 시험구간을 약 3년간 관찰하였다.

그림7은 공용조건하에서 3년 동안 두 노선구간 위한 측정

전체도수분포[%]

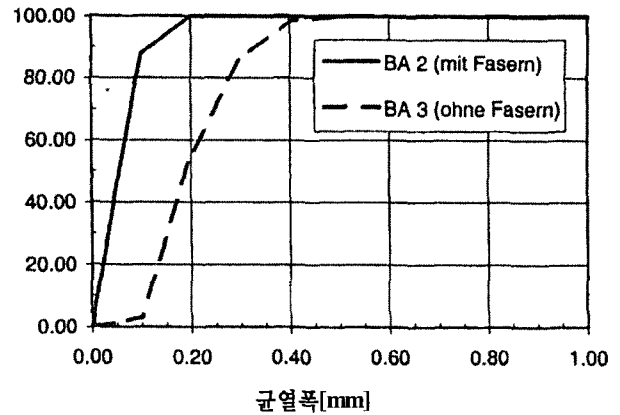


그림 8. 3년 동안 슬래브궤도의 공용하중에 대한 전체 균열폭

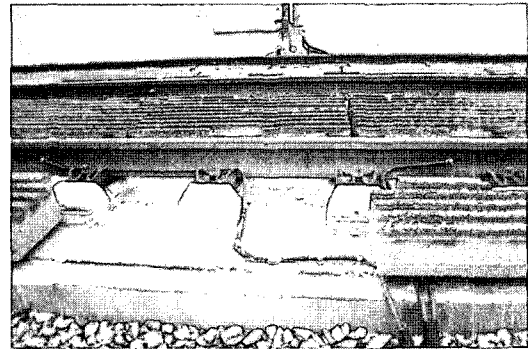


그림 9. 슬래브궤도 시험구간

된 균열폭을 보여주고 있다. 그림에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 구간의 평균균열은 0.05mm를 초과하고, 최대 균열폭은 0.2mm를 나타냈다. 반면에 강섬유가 없는 철근콘크리트구간은 평균 균열폭은 0.2mm이고 최대 균열폭을 0.5mm였다.

이와 같이 철근콘크리트에 강섬유 40kg/m<sup>3</sup>을 혼입함으로써 슬래브궤도의 균열폭이 실제적으로 50%이상 감소되는 것은 반 무한한 철근콘크리트 구조물의 사용성이 확실히 향상되고 내구성도 양호하게 된다는 사실을 입증하고 있다. 이런 방향에서의 연구결과는 계속해서 철근콘크리트 구조물의 철근량 감소를 기대할 수 있게 된다.

Waghäuser에 강섬유철근콘크리트 시험구간에서 연구는 실험실에서도 보여준 것처럼 혼합철근구상으로 특히 공용기간에 주기적으로 반복되는 하중 및 온도변화에 대한 균열폭 진전이 일반 철근콘크리트 슬래브궤도보다 월등히 좋은 결과를 보여주었다. 중앙부의 온도변화시 균열도 0.2mm 아래로 작게 되어 그것은 곧 슬래브궤도의 변위가 계획한대로 아주 작아지게 결과를 낳게 된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

- (1) 이와 같은 실험결과로 강섬유 40kg/m<sup>3</sup>을 혼입함으로써 슬래브궤도의 균열폭이 실제적으로 50%이상 감소된다.
- (2) 균열폭에 대한 실험치와 제안 계산치 및 간략치가 양호하게 일치한다.
- (3) 제안한 그래프 그림 5 및 그림 6에서와 같이 균열단면에서의 섬유혼입량의 증가에 따라 철근응력 감소 및 균열폭이 감소하므로 실무에서 정량적으로 활용할 수가 있다.
- (4) 사용하중에 대한 철근콘크리트 및 강섬유 철근콘크리트의 부재에 대해 제안한 균열식으로 균열예측이 가능하다.
- (5) 실제 철도하중하에서 철근콘크리트에 보강된 강섬유는 뚜렷한 균열억제와 처짐이 감소 하여 공용기간에 강섬유 철근콘크리트 슬래브궤도의 사용성이 향상됨을 입증하였다.

본 연구와 관련하여 추후 연구과제로서는 사용피로하중에 대한 강섬유 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구가 계속해 필요하다고 판단된다.

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. 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.
8. Falkner: Stahlfaserbeton-Forschung und Anwendung, Massivbau 2001 Forschung, Entwicklungen und Anwendung, TU Muenchen 2001.
9. H.Charkas, H. A. Rasheed, and H. Melhem: Rigous Procedure for Calculating Deflection of Fiber Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams. Struct. Div., ACI, 2003. vol.100, 4-6, 1835-1852.
10. Y.K. Kwak, M.O. Marc. Eberhard, W.S.Kim, J..Kim: Shear Strength do Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. Struct. Div., ACI, 2002. vol.99, 4-6, 530-538.