

특

집

신기능 콘크리트

고인성 콘크리트 High Toughness Concrete



박승범*

1. 서론

인성(Toughness)이란 일정량의 에너지 저항 능력으로서 정적, 동적 및 충격하중을 받을 때의 콘크리트 파괴저항 능력을 나타낸다.

건설재료로서 가장 널리 사용되는 콘크리트는 압축강도, 내구성이 우수하고 경제성이 우수한 성질을 가지고 있으나, 인장강도와 휨강도가 작고 인성이 작아 취성적 성질과 균열에 대한 저항능력이 작은 단점을 갖고 있다.

콘크리트의 취성거동을 연성거동으로 유도하고 인장저항력을 증대시키며 매트릭스의 국부적인 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등의 제반적인 역학적 성질을 개선 및 보강하기 위한 노력의 일환으로서 미국, 일본 및 유럽등의 선진국에서는 불연속적이며, 단상의 섬유질 재료를 불규칙한 배열로 콘크리트 속에 분산시켜 넣은 섬유보강 콘

크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 인장에 약한 콘크리트 매트릭스의 역학적 거동의 유용한 개선은 콘크리트 내에 분산된 섬유(강섬유, 폴리프로필렌 섬유, 유리섬유, 탄소섬유 등)를 혼합함으로써 얻을 수 있다. 일반적으로 섬유보강 콘크리트는 구조물과 구조적 요소(보의 전단/비틀림 저항성, 벽에서의 균열의 보수·보강, 콘크리트의 프레임의 연성 한지 등)의 개선된 공학적 성능을 발휘할수 있는 소재로서 기타의 다른 재료보다 터널 라이닝, 포장, 평면슬래브, 기초 등과 같은 특수한 구조물의 적용에 있어 더 많은 적용가능성이 있음이 발견되었다.

보강하지 않은 매트릭스에 비하여 FRC의 역학적 성질의 개선에서 가장 주목할 것은 우수한 파괴 저항성과 충격 및 순간하중에 대한 저항성이다.

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

최근 섬유보강 콘크리트에 관해 국·내외적으로 많은 관심과 팔목할만한 응용연구가 행해지고 있음에도 불구하고 아직 국내에서는 인식의 부족으로 특정분야에서만 일부 사용될 뿐 미진한 실정이다. 따라서 본고에서는 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 섬유중의 하나인 강섬유를 혼입한 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)에 대한 일반적인 소개와 인성평가방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 섬유와 매트릭스 특성

강섬유보강 콘크리트의 성질에 영향을 미치는 중요한 인자는 섬유의 혼입률, 섬유의 형상, 섬유의 분산 등으로 나뉘어 진다. 강도를 설명하는 데는 섬유의 간격(Fiber Space)과 관련된 "섬유간격설"과 섬유 혼입량, 섬유배향, 섬유의 형상비와 관련된 "복합재료의 혼합칙"이론의 2가지 설이 있다. 극한 강도의 경우에는 일반적으로 섬유간격보다는 섬유의 혼입률, 형상비 및 섬유의 결합특성 등의 영향을 고려한 혼합체 메카니즘(Composite Mechanism)으로 설명하고 있다.

일반적으로 섬유보강 콘크리트의 적용은 대부분은 휨강도에 의존하기 때문에 휨을 받는 부재의 균열후 강화메카니즘 해석은 직선응력상태에 있는 부재의 해석보다 중요하다. 하중이 증가할수

록 보통 콘크리트 보에서는 균열의 발생과 함께 파괴가 발생하나 강섬유보강 콘크리트의 경우는 인장축의 변형이 증가하여 균열이 발생하며, 균열 발생 후 균열사이의 섬유의 가교역할로 매트릭스에 인장력의 형태로 하중이 전달된다. 강섬유 보강 콘크리트 보의 압축축의 응력분포는 보가 파괴할 때까지는 직선적이며, 중립축이 상승하여도 압축축은 소성변형을 일으키지 않는다는 점이다.

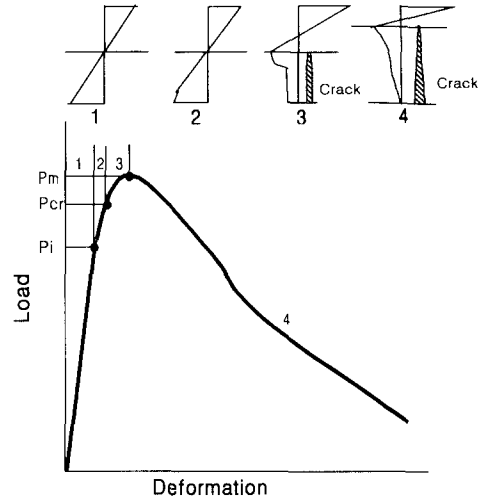


그림 2 SFRC 보의 이상적인 파괴거동

3. 강섬유보강 콘크리트의 배합

강섬유보강 콘크리트의 배합은 소요의 강도, 인성, 내구성, 수밀성 및 작업에 적합한 워커빌리티를 가지는 범위 내에서 단위수량이 될 수 있는 데로 적게 되도록 해야한다. 일반적으로 보통 콘크리트의 배합설계는 압축강도 만으로 그 품질을 규정하고 있으나, 강섬유보강 콘크리트의 경우는 휨강도 및 휨인성을 고려해야 한다는 사실에 주의해야 한다.

또한, 강섬유보강 콘크리트의 배합은 부착된 콘크리트에 소정의 강섬유 혼입량이 확보되고, 소요의 성능을 가지도록 정해야 한다. 콘크리트용 강섬유보강 콘크리트의 경우 노즐로부터 토출된 토출배합과 뿔어붙일면에 실제로 부착된 부착배합의 강섬유혼입량이 다르기 때문에 시방배합을 결정할때에는 부착된 콘크리트가 소요의 성능을

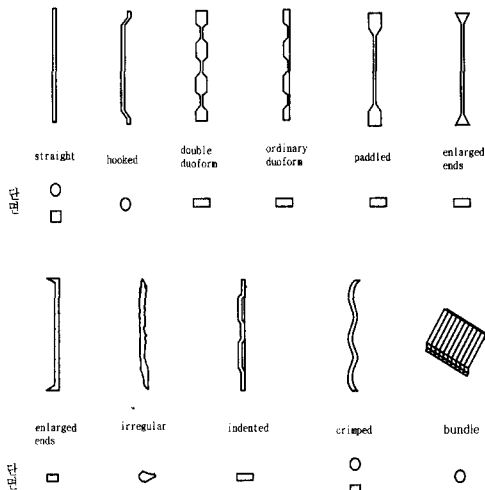


그림 1 강섬유 형상

가지도록 강섬유의 형상, 치수, 혼입률 등에 대해 사전에 충분히 고려해 둘 필요가 있다. 강섬유보강 스틱크리트도 마찬가지로 압축강도만으로 그 성능을 평가할 수 없으므로 휨강도, 인성 및 내구성도 고려하여 배합을 정할 필요가 있다.

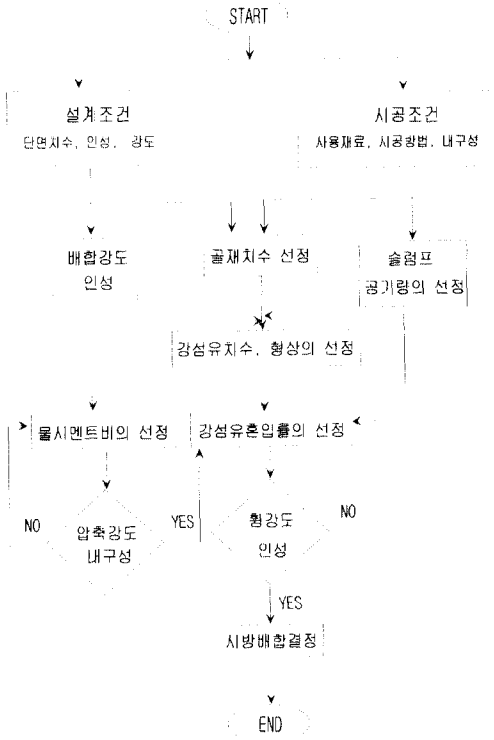


그림 3 SFRC의 배합설계를 위한 순서도

4. 강섬유보강 콘크리트의 일반적성질

4.1 강섬유보강 콘크리트의 굳지않은 성질

강섬유보강 콘크리트의 굳지않은 성질은 사용하는 강섬유의 형상, 치수, 재질등의 강섬유 자체의 특성과 골재의 종류 및 크기, 물·시멘트비, 잔골재율 등에 영향을 받으며, 이 경우 강섬유가 콘크리트중에서 균일하게 분산된다는 것을 전제 조건으로 하여야 한다. 굳지않은 콘크리트에 강섬유를 혼입하면, 그 컨시스턴시는 강섬유 혼입률의 증가와 함께 현저히 저하하는데, 그 이유는 강섬유의 표면적 효과와 강섬유 형상에 따른 콘크리트

트의 내부 마찰의 증대에 의한 것이다.

특히 콘크리트 중의 강섬유가 섬유용침(fiber-ball)이 생기면 강섬유의 혼입효과는 현저히 저하되는데 이 섬유용침이 발생하는 원인은 크게 4가지로 나누어진다.

- ① 강섬유를 균등하게 투입하지 못한 경우
- ② 강섬유의 혼입률이 지나치게 많은 경우
- ③ 강섬유보강 콘크리트의 슬럼프가 작은 경우
- ④ 굵은골재의 치수가 지나치게 큰 경우

강섬유보강 콘크리트의 배합 및 시공시에는 강섬유의 균등분산과 적절한 워커빌리티 및 요구성능의 확보라는 3가지 점을 항상 고려하는 것이 중요하다. 이런 관점에서 이들 특성값에 영향을 미치는 섬유관계요인(섬유혼입률, 형상, 치수, 아스펙트비, 기계적 성질 등), 매트릭스 관계요인(굵은골재의 최대치수, 혼화제의 종류 및 사용량, 혼화제의 종류 및 사용량, 물·시멘트비, 잔골재율 등), 혼합관계요인(섬유투입방법, 혼합의 종류, 혼합시간 등)의 3대 요인을 고려해야 한다.

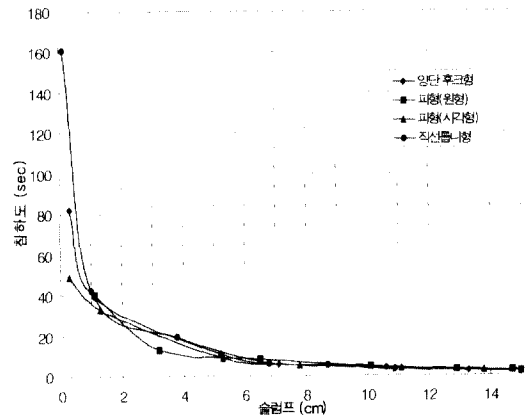


그림 4 SFRC의 슬럼프와 침하도

4.2 휨강도 및 휨인성 특성

강섬유보강 콘크리트의 휨강도와 휨인성 계수와의 관계는 사용 강섬유의 종류 및 강섬유 혼입률에 따라 크게 다르다.

일반적으로 강섬유보강 콘크리트의 휨강도는 같은 재형에서 섬유혼입률의 증가에 따라 휨강도가 크게 증진되며, 강섬유보강 콘크리트의 휨강도

는 강섬유의 길이가 클수록 증대되는 것으로 알려져 있다.

휨인성은 강섬유의 혼입물이나 사용된 강섬유의 종류 및 길이에 의해서 크게 변화한다. 또한 사용된 강섬유의 종류가 다르면 강섬유 혼입물이 동일하더라도 얻을 수 있는 휨강도 및 인성 또는 휨인성계수는 다르게 나타난다.

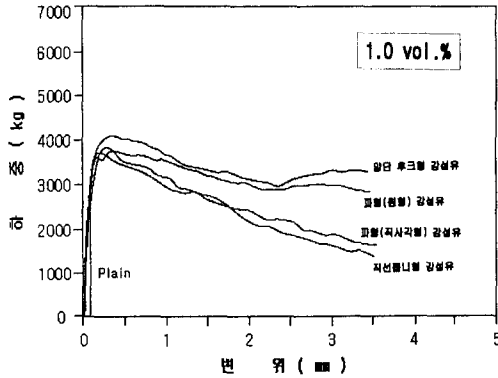


그림 5 섬유형상에 따른 하중-처짐곡선

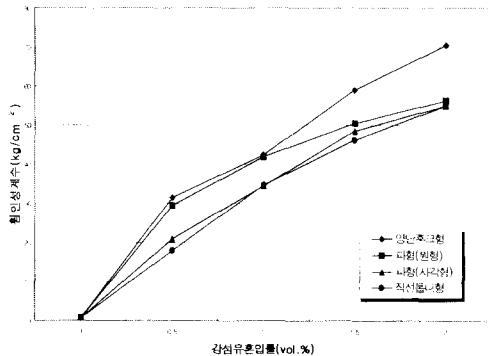


그림 6 섬유형상에 따른 휨인성 계수

강섬유보강 콘크리트를 구조물에 적용시 섬유보강효과와 섬유뭉침(Fiber-ball)발생억제 및 워커빌리티를 고려할 때 일반적으로 섬유혼입률을 0.5~1.5vol.%정도를 사용하고 있다.

4.3 강섬유보강 콘크리트의 내구성

4.3.1 동결융해 저항성

강섬유를 혼입함에 따라 동결시의 내부팽창압에 대한 구속효과에 의해 동결융해 저항성이 증가하는 경향을 나타내었으나, 보통 콘크리트와 같이 AE제의 혼입 유무에 따른 영향이 지배적이므로 강섬유보강 콘크리트에 AE제를 병용하면 강섬유혼입률이 증가함에 따라 내동해성은 현저히 개선되는 것으로 알려지고 있다.

4.3.2 화학저항성

강섬유보강 콘크리트의 화학저항성은 용액의 종류에 관계없이 강섬유를 혼입하지 않은 보통 콘크리트에 비하여 강섬유보강 콘크리트의 경우가 내화학성이 우수한 것으로 알려지고 있다.

4.3.3 내충격성

강섬유보강 콘크리트의 내충격성은 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 균열폭과 균열이 상당히 감소하는 경향을 나타내며, 균열수는 증대하나 최대균열폭은 현저히 감소하여 미세균열을 분산시키는 효과가 현저하여 보통 콘크리트에 비하여 충격하중에 대한 저항성이 현저히 개선되며 균열의 억제 및 인성증대에 크게 기여한다.

4.3.4 내마모성

강섬유보강 콘크리트의 내마모성은 보통 콘크리트에 비하여 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 내마모성에 대한 성질이 우수하며 고속유수, 조류, 자갈을 함유한 유수 및 기계적 마찰을 받는 토목구조물에 적용할 경우 내구성 증진에 큰 효과가 있다.

4.3.5 건조수축

강섬유보강 콘크리트의 건조수축은 강섬유혼입률의 증대에 따라 현저히 감소하며, 이는 혼입된 강섬유가 콘크리트 매트릭스의 부착력을 증진시켜 변형억제효과가 증대된 되는 것으로 알려지고 있으며, 이러한 경향은 물·시멘트비가 큰 경우에 현저히 나타난다.

4.3.6 크리프

동일양생 및 재하조건에서 압축크리프 변형은

강섬유를 혼입하지 않은 보통 콘크리트에 비하여 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 현저히 감소하며, 크리프 회복량도 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 적정량의 강섬유를 혼입함에 의하여 강섬유보강 콘크리트의 구조부재로의 응용시 크리프변형의 극소화에 크게 효과적인 것으로 나타나고 있다.

5. 인성평가

최근 국내에서도 도로의 신설 및 확장이가 활발해지면서 터널에의 강섬유보강 스틱크리트의 적용이 증가되고 있다. 강섬유보강 콘크리트 또는 스틱크리트의 품질관리 중에서 중요시 되고 있는 사항은 휨강도 및 휨인성의 관리이다. 이러한 휨강도 및 휨인성 특성에 영향을 미치는 요인으로서는 하중제하의 속도, 하중의 제어방법, 처짐측정 방법 또는 인성계산방법 등이 있다. 현재 인성평가로서 실행되고 있는 대상 구조물은 보와 슬래브로 대별되고 있으며, 이러한 인성평가방법은 절대평가와 상대평가로 나뉘어진다.

5.1 인성평가방법

대부분의 인성측정방법은 절대적인 값과 상대적인 값의 접근을 토대로 서술되어진다. 먼저 절대평가의 방법으로서 Johnston, JSCE-SF4 유럽통합규격(EFNARC) 등의 방법이 있으며 상대평가의 방법으로서 ACI 544 위원회, Barr, ASTM C 1018 등의 방법이 있다. 이러한 서로 다른 시험방법 중에서 시편의 크기, 형상, 그리고 지간이 약간 다를지라도 인성측정에 있어서 큰 차이를 나타내는 것은 인성에 대한 정의와 계산 방법 또는 처짐측정방법에 있다. 현재 국내에서의 휨인성 산출은 ASTM C 1018과 JSCE SF-4 방법을 사용하고 있다.

휨인성은 측정하는 방법에 따라 민감하기 때문에 휨인성에 대한 평가는 측정방법에 대한 많은 문제점(외부 처짐, 적은 섬유혼입량의 불안정성, 하중제어방법, 하중속도 등)들이 해결된 후 결정되어야 한다. 이러한 시험방법들을 이용함에 있어 동일한 결과를 얻기 위해서 시편의

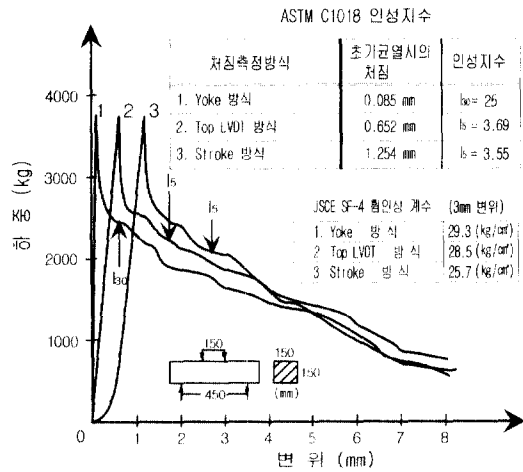


그림 7 처짐측정방법에 따른 하중-처짐곡선

지지부나 기계의 변형등에 의해 발생하는 외적 처짐을 제거시켜야 하며, 부재의 순수처짐을 측정하기 위해서는 부재 중앙의 Bar에 LVDT를 설치하는 것이 바람직하다.

일반적으로 섬유의 혼입률과 다른 형태의 섬유들 사이의 특성을 구별하기 위해서는 ASTM C 1018의 인성지수 I_5 , I_{10} 과 $R_{5,10}$ 보다도 JSCE SF-4 인성계수와 ASTM C 1018의 $R_{30,50}$ 의 활용이 더욱 유용하다고 보고되고 있다. 또한 섬유의 혼입률이 적은 섬유보강 콘크리트에 대해서는 정확한 전체적인 하중-처짐관계를 측정하기가 어렵기 때문에 파괴후의 불안정성이 적절하게 다루어지지 않는다면 이 하중-처짐곡선을 토대로 이 재료를 평가하는 것은 적절하지 않다고 보고되고 있다.

또한 ASTM C 1018의 $R_{30,50}$ 또는 $R_{50,80}$ 과 같은 잔류강도계수는 JSCE SF-4에서의 초기균열이전의 부분을 포함하는 곡선의 평균하중을 토대로 한 휨인성계수보다 더 의미가 있는 것으로 판단된다. 그러나 수많은 연구자들은 비록 JSCE SF-4시험 방법이 약간 단순하지만 ASTM C 1018 보다 시험과 평가에 있어 덜 민감하기 때문에 시공에 대한 시방 목적에 더 적합한 것으로 보고하고 있으며 서로 다른 섬유의 종류와 섬유 혼입률에 따른 차이점의 평가에 있어 더 효율적이라고 보고되고 있다.

6. 맺음말

고인성 콘크리트는 선진국의 경우 이미 오래전부터 산업현장에 적용하여 왔으나 국내에서는 일부분야에 국한되어 사용되고 있기는 하나 점차 적용분야 및 활용이 다양화되고 있는 추세이다.

강섬유보강 콘크리트는 이미 알려진 바와 같이 보통 콘크리트에 비해 우수한 성능을 나타내어 포장, Overlay 및 터널라이닝 등의 토목구조물은 물론 원심력 성형 콘크리트관 등의 2차제품 또는 내진벽, 기둥, 보접합부 등의 진단보강 등에 적용이 기대된다.

국내의 경우는 아직 요구되는 품질의 강섬유보강 콘크리트의 제조관리체계가 확립되지 않은 상태이기 때문에 앞으로 많은 시공실적의 축적을 통한 품질관리시스템의 확립이 요망된다.

참고문헌

1. ASTM C 1018 - 94 . "Standard Test Method for Flexural Toughness and First - Crack Strength of Fiber - Reinforced Concrete (using Beam with Third Point Loading)", ASTM C 1018-94, pp.656~661, 1994
2. Banthia, N., Trottier, J. F., "Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers", Part 2 : Toughness Characterization ACI Structural J. March-April, 1995, pp.146~154
3. ACI Committee 544 " Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete " ACI Material Journal, V.90, No.1, 1993
4. Mindess, S., Chen, L. and Morgan, D.R., First Crack Strength and Flexural Toughness of Steel fibre Reinforced Concrete, Journal of Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, NO.5, pp., 201-208, 1994.
5. Johnston, C. D., "Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete", J. of Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 4, No. 2, pp.53~60, 1982
6. Swamy,R.N.(Ed). Fibre Reinforced Cement and Concrete:Proc. 4th RILEM Int. Symp., E&FN Spon, London, July 1992.
7. ACI Committee 544, "Measurement of properties of fiber reinforced concrete" ACI Materials Journal, November December 1988, pp.583~593
8. 日本土木學會, "纖維補強コンクリートの設計施工指針(案)", 1983
9. JSCE-SF 4, "纖維補強コンクリートの曲げタフネス試験方法 - 纖維補強コンクリートの試験方法に関する規準", 日本コンクリート工學協會, pp.11~17, 1987
10. 박승범 외, "에너지 절약형 고기능 섬유보강 콘크리트의개발 및 설계·시공 지침안 작성에 관한 연구 (I)", 연구개발사업 연차보고서, 1996.12
11. 박승범 외, "에너지 절약형 고기능 섬유보강 콘크리트의개발 및 설계·시공 지침안 작성에 관한 연구 (II)", 연구개발사업 연차보고서, 1997.12
12. 박승범 외, "에너지 절약형 고기능 섬유보강 콘크리트의개발 및 설계·시공 지침안 작성에 관한 연구 (III)", 연구개발사업 최종보고서, 1998.
13. 박승범 외, "최신 콘크리트공학", 한국콘크리트학회, pp.585~628, 1992.
14. 문계길, 홍익표, "섬유 보강 콘크리트 보의 진단거동에 미치는 강섬유의 효과", 한국콘크리트학회지, 제 6권, 2호, pp.118-128, 1994.8. 