



03

섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침

The Structural Design Guideline of the Fiber Reinforced
SUPER Concrete

최정욱 Jung-Wook Choi
한국콘크리트학회 공학연구소
책임연구원

조창빈 Changbin Joh
한국건설기술연구원
구조연구부 연구위원

김지상 Jee-Sang Kim
서경대학교 토목공학과
교수

1. 머리말

초고성능 콘크리트를 국내외 건설시장에 적극적으로 활용하기 위하여 한국콘크리트학회는 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침을 작성하였다. 이번 특집에서는 섬유보강 SUPER Concrete의 재료 및 부재 거동 특성과 구조설계 지침내용에 대해 간단히 소개하고자 한다.

2. 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침

한국콘크리트학회는 섬유보강 SUPER Concrete(한국건설기술연구원 개발)를 사용하여 만든 구조물의 안전성, 사용성, 내구성 확보를 위하여 구조설계지침¹⁾을 작성하였다. 이 지침은 기본적으로 설계 압축강도 120 MPa, 150 MPa, 180 MPa(이하 SC120f, SC150f, SC180f)를 갖는 섬유보강 SUPER Concrete에 적용하기 위한 것으로, 프랑스와 일본의 초고성능 콘크리트 구조설계 기준을 참고^{2,3)}하고 SUPER Structure 2020(압축강도 80 ~ 180 MPa급 맞춤형 SUPER Concrete 재료 및 구조물 기술 개발)의 연구 성과를 반영한 것이다.

2.1 재료 특성

2.1.1 기본 배합

섬유보강 SUPER Concrete는 프리믹싱 결합재, 골재, 고성능 감수제, 강섬유 등으로 구성된다. 재료의 기본 배합은 물-결합재비(W/B)가 0.2 ~ 0.23이고, 프리믹싱 결합재는 시멘트, 지르코늄, 충전재, 팽창재, 수축저감제 등으로 구성되며, 골재는 지름 0.5 mm 이하, SiO₂ 함유량 96% 이상의 규사를 사용한다. 유동성 확보를 위해 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하는데, 그 사용량은 환경조건 및 요구되는 유동성능에 따라 달라질 수 있다. 강섬유는 요구되는 인장강도와 경제성을 고려하여 1.5 ~ 2%(부피비)를 사용한다.

2.1.2 압축 응력-변형률 모델

섬유보강 SUPER Concrete는 공극이 매우 작고 치밀하기 때문에 압축 응력-변형률 곡선이 거의 선형으로 나타난다

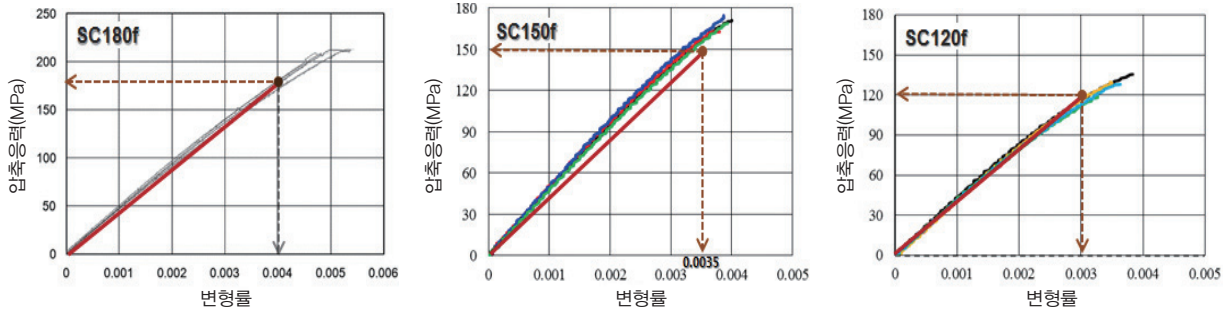


그림 1. 압축 응력-변형률 관계

〈그림 1〉. 이와 같은 섬유보강 SUPER Concrete의 압축거동을 반영하여 압축 응력-변형률 설계모델을 직선으로 단순화하였다. 이때, 탄성계수 기준 값은 각각 4.5×10^4 MPa(SC180f), 4.3×10^4 MPa(SC150f), 4.0×10^4 MPa(SC120f)이고 탄성범위에서 압축과 인장의 탄성계수는 거의 동일하다. 설계지침에서 SC180f, SC150f, SC120f(설계압축강도가 180 MPa, 150 MPa, 120 MPa 인 섬유보강 콘크리트)의 극한변형률은 각각 0.004, 0.0035, 0.003으로 규정하였다. 일반적으로 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 극한변형률이 감소하나 섬유보강 SUPER Concrete는 강섬유의 혼입에 의해 압축강도 이후 변형능력이 증가한다.

2.1.3 인장 응력-변형률 모델

콘크리트는 일반적으로 균열강도 이후 취성 파괴되거나 섬유보강 SUPER Concrete는 균열 이후 강섬유의 가교작용(bridging action)으로 인장강도가 증가(경화현상)하고 인장강도 이후에도 안정적으로 인장응력을 부담(연화현상)한다(그림 2). 기본배합을 갖는 SC180f,

SC150f, SC120f의 인장강도 기준 값은 각각 11 MPa, 9 MPa, 7 MPa를 사용할 수 있다.

2.1.4 2축 인장-압축 응력

콘크리트는 일반적으로 압축-압축 2축 응력상태에서 압축파괴응력이 증가하고 인장-압축 2축 응력상태에서 압축파괴응력은 감소한다. 그러나 섬유보강 SUPER Concrete는 인장-압축 2축 응력상태에서 강섬유의 가교작용으로 인해 압축응력의 감소가 전혀 없었다.

SC120f, SC150f에 대한 2축 응력 실험 결과(그림 3)는 강섬유가 혼입되지 않은 실험체의 경우 인장응력 증가에 따라 최대 압축강도가 감소하는 콘크리트의 전형적인 연화현상(softening effect)을 보였으나 강섬유가 1% 이상 혼입된 실험체의 경우 인장응력 증가에 관계없이 최대 압축응력은 감소하지 않았다.

강섬유의 혼입으로 인해 섬유보강 SUPER Concrete의 인장-압축 파괴포락선(failure envelope)은 강섬유가 혼입되지 않은 SUPER Concrete의 포락선에 비해 그 범위가 크게 확대되었다(그림 4).

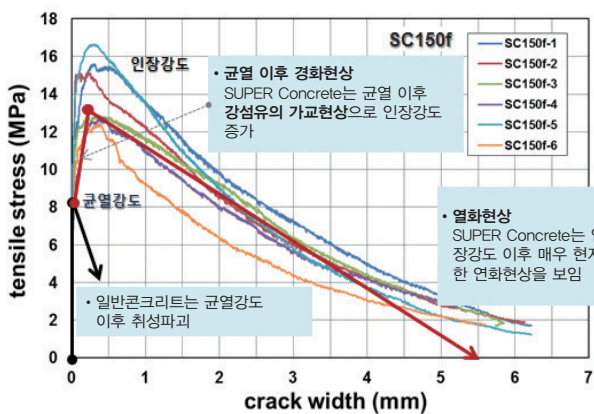


그림 2. 인장 응력-균열폭 관계

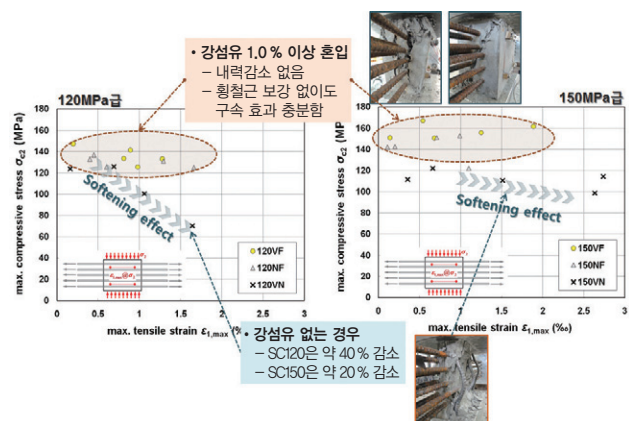


그림 3. 2축(인장-압축) 응력상태 실험 결과

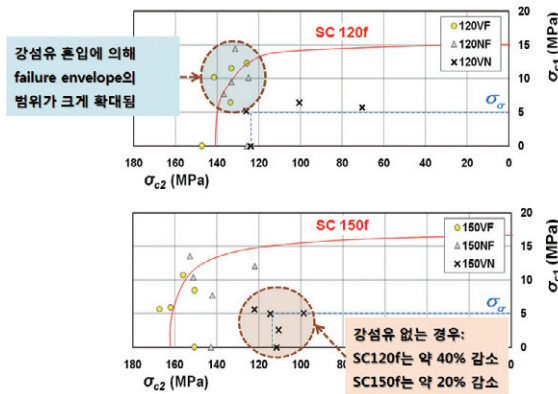


그림 4. 2축(인장-압축) 응력 파괴포락선

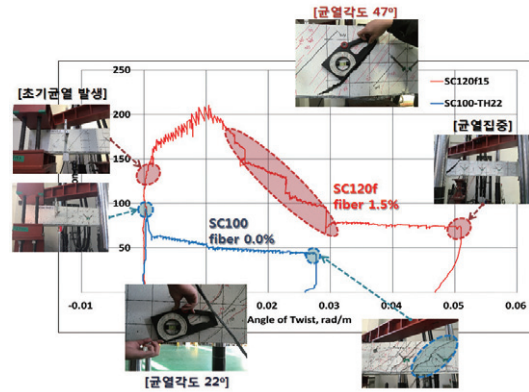


그림 6. 강섬유 혼입률에 따른 부재 거동 비교

2.2 부재 거동 특성

2.2.1 일반적인 부재 거동

섬유보강 SUPER Concrete 부재에 하중을 가하면 하중-변형이 거의 선형으로 증가하다가 초기 균열이 발생한다. 균열 발생 이후 최대강도에 이를 때까지 변형경화 현상을 보이는데, 이 변형경화 구간 동안 아주 미세한 균열이 실험체 전체에 분산되어 발생한다. 최대강도에 도달한 이후 섬유보강 SUPER Concrete 부재는 매우 큰 변형연화 현상을 보이고 이 변형연화 구간 동안 분산균열은 계속 확산되며 점차 균열이 한 곳에 집중되어 최종 파괴되는 거동을 보인다(그림 5).

섬유보강 SUPER Concrete와 일반 콘크리트의 주목할 만한 차이는 ① 변형경화로 인한 강도증가, ② 매우 미세한 분산균열, ③ 변형연화로 인한 연성증가이다.

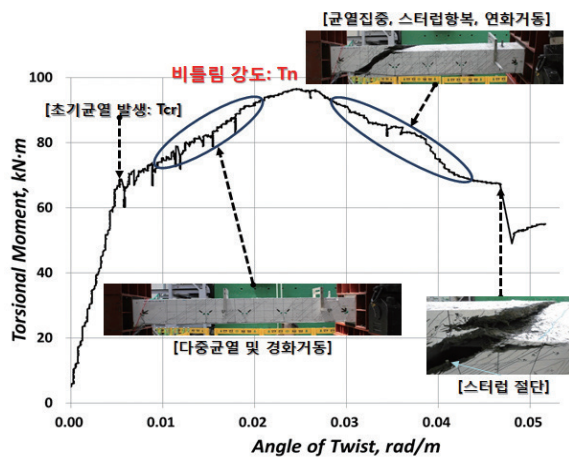


그림 5. 일반적인 부재 거동

2.2.2 강섬유 혼입 효과

(그림 6)은 강섬유가 없는 SC100 실험체와 섬유보강 SC120f 실험체의 비틀림 실험 결과를 비교한 것이다. 먼저 SC100 실험체는 최대강도 100 MPa 정도에 도달 이후 급작스런 취성거동을 보이고, 잔류응력 50 MPa에서 비틀림 하중을 지지하다 0.03 rad/m 정도에서 파괴되었다. 반면 SC120f 실험체는 대략 120 MPa에서 초기 균열이 발생하고, 이후 최대강도 200 MPa 정도까지 변형경화 현상을 보였다. 최대강도 이후 0.03 rad/m 정도까지 비틀림 저항능력이 점진적으로 감소하고, 잔류응력 75 MPa 정도로 비틀림에 저항하다 0.05 rad/m 정도에서 파괴되었다. 강섬유의 유무에 따른 차이는 비틀림 실험체뿐만 아니라 휨실험, 전단실험, 2축응력을 받는 면부재 실험 등에서도 유사하게 나타났다.

2.3 설계 모델

2.3.1 휨 설계 모델

2.1절에서 언급한 압축 및 인장 응력-변형률 관계를 이용하여 휨 설계모델을 작성하였다(그림 7). 힘의 평형 조건과 변형의 적합조건을 이용하면 휨 강도를 쉽게 구할 수 있다. 여기서 주목할 점은 일반 콘크리트는 압축 강도에 비해 인장강도가 매우 작기 때문에 구조설계에서 휨 강도에 대한 인장강도의 기여를 무시한다. 그러나 섬유보강 SUPER Concrete는 인장강도가 상대적으로 매우 높고 취성파괴 되지 않기 때문에 휨 설계에서 인장강도의 기여효과를 그대로 반영하였다. 섬유보강 SUPER Concrete 부재는 인장강도 기여 효과로 인해 휨강도가 대략 50 ~ 100% 정도 증진된다.

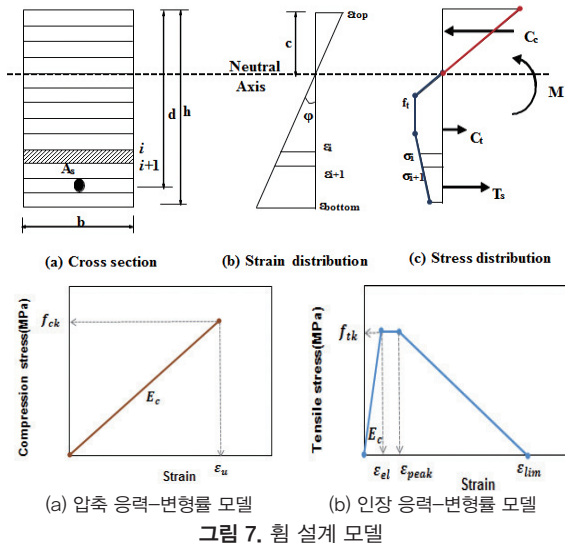


그림 7. 휨 설계 모델

2.3.2 전단 설계 모델

섬유보강 SUPER Concrete 부재의 전단강도 V_d 는 식 (1)과 같다.

$$V_d = V_{rpcd} + V_{fd} + V_{sd} + V_{ped} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, V_{rpcd} 는 콘크리트의 전단저항, V_{fd} 강섬유의 전단 저항, V_{sd} 는 전단보강재의 전단저항, V_{ped} 는 축방향 보강재의 전단저항이다.

섬유보강 SUPER Concrete의 전단강도는 강섬유의 전단저항을 반영하였고, 이때 강섬유 전단저항은 콘크리트 전단저항의 대략 3 ~ 5배 정도이다.

2.3.3 비틀림 설계모델

섬유보강 SUPER Concrete 부재의 비틀림강도 T_n 은 식 (2)와 같다.

$$T_d = T_s + T_{sc} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, T_s 는 주철근과 스티럽으로 구성된 입체트러스 철근의 비틀림 저항이고, T_{sc} 는 섬유보강 SUPER Concrete의 비틀림 저항이다.

휨 그리고 전단 설계모델과 동일하게 비틀림 설계모델 역시 섬유보강 SUPER Concrete의 높은 인장강도로 인한 비틀림 저항능력 증가를 설계모델에 그대로 반영하였다. 섬유보강 SUPER Concrete의 비틀림 저항 T_{sc} 는 철근

입체트러스의 비틀림 저항 T_s 에 대략 2 ~ 4배 정도이다.

2.3.4 최소철근비 설계지침

섬유보강 SUPER Concrete는 강섬유로 인해 최대강도 이후 연성거동을 보이고(그림 2, 5, 6), 이로 인해 최소철근을 배근하지 않아도 취성적인 파괴가 발생되지 않는다. 즉 전단이나 비틀림에 의해 사인장 균열이 발생하여도 강섬유의 가교작용으로 추가적인 인장력을 부담할 수 있을 뿐만 아니라 균열의 전파가 억제되거나 지연되어 예고 없는 취성파괴로 이어지지 않는다. 그러므로 이 구조설계지침에서는 최소철근비에 대한 기준을 전혀 규정하지 않았다.

2.3.5 피복두께 설계지침

콘크리트 구조물의 피복두께는 주로 콘크리트의 내구 성능과 철근-콘크리트의 부착성능에 따라 결정된다. 섬유보강 SUPER Concrete는 조직이 밀실하고 내부의 물질이동에 관한 모든 특성이 일반 콘크리트에 비해 현저히 우수하여 내구성이 향상된다. 예를 들어, 염소이온의 확산계수가 압축강도 30 MPa 정도를 가진 콘크리트의 경우 대략 $7.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, 압축강도 50 MPa 정도를 가진 고강도 콘크리트의 경우 $0.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 인 것에 비해 압축강도 180 MPa 정도를 가진 섬유보강 SUPER Concrete의 경우 $0.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 정도이다. 이로 인해 섬유보강 SUPER Concrete의 피복두께는 일반 콘크리트에 비해 매우 작게 설계할 수 있다.

섬유보강 SUPER Concrete의 부착성능은 일반 콘크리트에 비해 매우 우수하다. 인발 실험 결과, 압축강도 180 MPa 정도를 가진 섬유보강 SUPER Concrete 부착강도는 압축강도 30 MPa 정도를 갖는 일반 콘크리트 부착강도의 대략 8배 정도이다.

섬유보강 SUPER Concrete의 우수한 내구성과 부착성능을 고려하여 섬유보강 SUPER Concrete를 이용한 구조물의 철근 최소 피복두께를 보강강재 지름의 1.5 배, 20 mm 중 큰 값으로 규정하였다.

2.3.6 정착 및 이음 설계지침

섬유보강 SUPER Concrete의 부착성능을 고려하여 철근의 기본 정착길이 l_{db} 를 식 (3)과 같이 규정하였다.

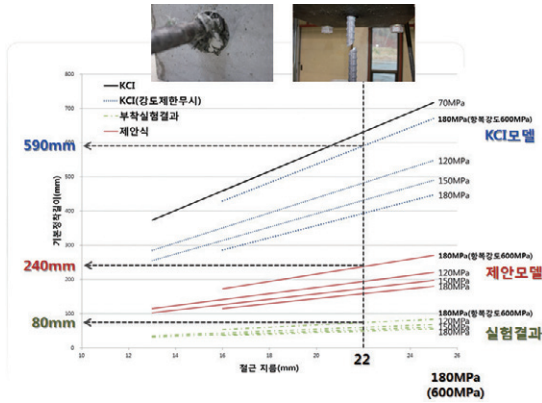


그림 8. 철근 정착 길이 실험 및 설계

$$l_{db} = \frac{0.186d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, d_b 는 철근, 철선 또는 긴장재의 공칭 지름, f_{yk} 는 철근의 항복강도 기준값, f_{ck} 는 섬유보강 SUPER Concrete의 압축강도 기준값이다.

섬유보강 SUPER Concrete는 부착성능이 매우 우수하므로 정착 및 이음 길이를 현저히 감소시킬 수 있다. 실험결과에 따르면<그림 8> 섬유보강 SUPER Concrete의 정착 길이는 콘크리트 구조기준(KCI)⁴⁾에 의한 정착 길이의 약 1/8로도 충분하다. 하지만 시공 오차와 편의를 고려하여 약 250%의 충분한 안전 여유도를 적용하였다. 이음 길이는 콘크리트 구조기준(KCI)에 따라 결정된 값의 1/3을 사용하고 최소 겹침 이음길이를 100 mm로 규정하였다.

3. 맺음말

한국콘크리트학회에서 작성한 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침은 특정 배합과 특정 설계압축강도를 대상으로 최소한의 재료시험 및 부재실험을 수행하여 작성한 맞춤형 지침이다. 이 맞춤형 지침을 설계압축강도 120 ~ 180 MPa의 모든 섬유보강 SUPER Concrete에 일반적으로 적용하기 위해서는 더욱 많은 구조적 검증을 통한 신뢰성 확보가 중요할 것이다.

담당 편집위원 : 강수태(대구대학교) stkang@daegu.ac.kr

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, SUPER Concrete 구조설계지침, 보고서, 2015.
2. AFGC(French Association of Civil Engineers)/SETRA, "Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Interim Recommendations", 2002.
3. 日本土木學會, "超高強度纖維補強コン크리트의設計·施工指針(案), 콘크리트 라이브러리-113", 2004.
4. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 구조기준」, 2012.



최정욱 책임연구원은 2003년 전남대학교 건축공학과에서 무량판구조의 횡하중 해석모델로 박사학위를 취득한 후 University of Alberta에서 슬래브-기둥 접합부의 횡하중 저항성능에 대한 연구를 수행하고, 2007년부터 우리 학회 공학연구소에 재직 중이다. 주 관심 연구 분야는 성능중심 콘크리트 설계기준과 초고성능 콘크리트 구조물의 설계기준 등이다.

jjchoi@kci.or.kr



조창빈 연구위원은 1998년 Purdue University, School of civil Engineering에서 Application of Fracture Mechanics to Steel Moment Connections로 박사학위를 취득한 후 서울대학교 초빙교수, University of Hawaii at Manoa의 연구원을 거쳐 2002년부터 한국건설기술연구원 인프라구조연구실에서 연구원으로 재직하고 있다. 현재 주 관심 연구 분야는 고성능 및 초고성능 콘크리트 구조물의 설계기준과 PSC 구조물의 비파괴 상태 평가 등이다.

cjoh@kict.re.kr



김지상 교수는 1992년 서울대학교 토목공학과에서 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 피로해석 및 설계로 박사학위를 취득한 후 한국통신 연구개발본부, 현대산업개발을 거쳐 2000년부터 서경대학교 토목건축공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 콘크리트 구조물의 설계기준 및 시험방법 표준화, PSC 구조물의 설계, 초고성능 콘크리트 재료, 콘크리트 재료 비파괴 검사, 콘크리트 재료 통계적 특성 연구 등이다.

zskim@skuniv.ac.kr