

고강도 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트의 장기거동 특성에 관한 상관관계 연구

An experimental study on the relationship between SFRC and HSC at long-term response.

서 증 명*
Seo, Jong-Myeong

이 주 하**
Lee, Joo-Ha

윤 영 수***
Yoon, Young-Soo

ABSTRACT

In recent years, according to the development of construction technique, the constructions of longer span bridges, taller buildings, deeper offshore structures, and other mega-structures are calling for construction materials with increasingly improve properties. So, the demand for high-strength concrete(HSC) have been increased and many new structures have been built using HSC with the compressive strength about 100MPa. However, it is well-known that as the strength of concrete increases, concrete becomes more brittle. Recent studies, however, shown that the brittleness of HSC can be improved by adding some fibers to the concrete. Especially steel fiber reinforced concrete(SFRC) can be used in this case. Many research works have shown that SFRC results in better crack and deflection control, higher shear strength, improved fatigue performance, increased impact strength, reformed flexural strength, advanced fracture toughness and enhanced post-cracking resistance. So, this is a study on the long-term response of SFRC applied to HPC about 40MPa. Therefore, in this study, the test results of twenty-six high-strength concrete specimens and steel fiber-reinforced concrete specimens, with steel fiber content of 1% by volume were presented. And the results are analyzed by using of the factors of time, mix properties, humidity/temperature, and loading conditions.

1. 서론

건설 기술의 발전에 따라 장대 교량, 초고층 빌딩, 심해 구조물 등이 건설되면서, 구조 부재의 개선이 요구되고 있다. 이에 따라 100MPa 이상의 압축강도를 지닌 고강도 콘크리트가 사용되기도 한다. 그러나 알려진 바와 같이 강도의 증가는 취성을 증가시키고 이는 고강도 콘크리트의 사용에 제한 요소로 작용한다. 이러한 취성은 콘크리트에 어떤 종류의 섬유를 첨가함으로써 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)는 취성의 개선 뿐만 아니라 인성의 증가, 내구성의 증가, 피로 저항성의 개선 등의 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 지속하중에 대한 장기 거동에 대한 연구 성과는 극히 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 고강도 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트의 장기 거동 특성에 대한 실험을 수행하고 해석적 방법을 통하여 기존의 예측식들을 검증해 보았다.

*정회원, SK건설 토목부문 사원

**정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

***정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

2. 실험개요

2.1. 실험개요 및 방법

탄성계수는 ASTM C-469에 따라 각 3개의 공시체에 대하여 세로방향 변형률이 5.0×10^{-5} 일 때의 하중과 극한 하중의 40%하중에서의 변형률을 측정하여 Eq. 1을 통하여 산출하였다.

$$E_c = \frac{f_2 - f_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, f_1 =세로 변형률 0.0005에 대한 응력, f_2 =극한 하중의 40%에 해당하는 하중에 의한 응력 ϵ_1 =응력 f_2 에 의해 생긴 세로 방향 변형률이다.

건조수축과 크리프 실험은 약 40MPa 강도의 고강도 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트 각각에 대하여 Table 1과 같이 ASTM C-512와 ASTM C-157 규정을 따랐다. 또한 습도의 영향을 분석하기 위하여 각각 2조의 공시체는 파라핀으로 도포하였다. 하중조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 1 Creep, Shrinkage test condition

	Size (cm)	RH (%)	Temp. (°C)	Age (days)	Strain measurement	Load control
Creep	Cylinder φ15×30	50±4	23±2	3, 7, 28, and 90	Every 2 hour after setting until the first day, every day until the first week, every week until the first month and every month until 6 months	every stress loss over 2%
Shrinkage						-

Table 2 Load condition for creep test

	0.4Pu	0.4Pu(Sealed)	0.6Pu	Repeat	Increment
Load variation	0.4	0.4	0.6	0.2→0→0.2→0→0.4 →0→0.4→0→0.6	0.2→0.3→0.4 →0.5→0.6
Period	Sustained	Sustained	Sustained	Two weeks	Four weeks

2.2. 실험재료 및 배합

실험에 사용된 공시체의 배합비는 Table 3과 같고 배합에 사용된 강섬유 혼입률은 다른 여러 연구결과에 따라 최적 배합이라고 여겨지는 값을 따랐다. 또한, 실험에 사용된 각 재료의 특성은 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Table 3 Mix proportions of specimen

	Strength (MPa)	G _{max} (mm)	W/C(%)	s/a(%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Air content(%)	Fiber content(%)
SFRC	40	25	42.0	45.0	175	417	3.0	1.0
NRC	40	25	42.0	45.0	175	417	3.0	-

Table 4 Properties of cement and aggregate

Classification	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
Specific gravity	3.17	2.50	2.59
Absorption rate(%)	-	0.91	1.03
Maximum size(mm)	-	-	25

Table 5 Physical properties of Steel fibers

Length(mm)	30
Diameter(min)	0.5
Aspect ratio(l/d)	60
Gravity	7.9

3. 실험결과 및 분석

3.1. 탄성계수

Fig.1은 크리프 계수 산정을 위한 재하 재령 7일에서의 탄성계수 값이다. Fig.1에서 보이는 것과 같이 강섬유의 혼입이 압축 강도와 탄성계수의 증가에 기여하는 것을 알 수 있다

Table 6 Static modulus of elasticity and compressive strength

	Compressive strength (MPa)				Elastic modulus (MPa)			
	7 days	Variation(%)	28 days	Variation(%)	7 days	Variation(%)	28 days	Variation(%)
SFRC	41.7	+1.0	53.2	+1.5	26140	+3.7	32850	+3.1
NRC	41.4	-	52.4	-	25170	-	31850	-

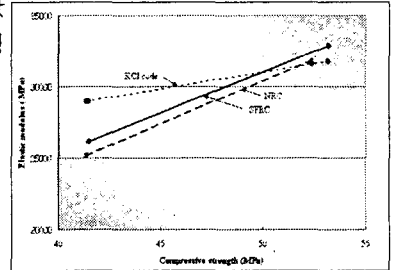


Fig.1 Relationship between compressive strength and elastic modulus

3.2. 건조수축

Fig.2와 Fig.3은 NRC와 SFRC의 건조수축 변형을 나타낸 그래프이다. Fig.에서 볼 수 있듯이 NRC와 SFRC는 비슷한 양상의 건조수축 변형을 나타내며, 두 조건에서 모두 AASHTO LRFD-02 코드와 유사한 형태의 곡선을 나타내고 있다. 또한, SFRC의 건조수축 변형이 더 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 강섬유가 콘크리트 매트릭스를 구속하여 변형을 억제하는 효과가 있기 때문인 것으로 판단된다.

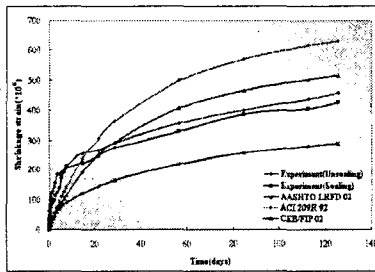


Fig.2 Shrinkage strain of NRC compared with codes

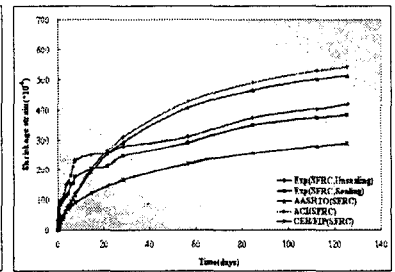


Fig.3 Shrinkage strain of SFRC compared with codes

3.3. 크리프

Fig.4와 Fig.5는 NRC와 SFRC의 비크리프를 나타낸 그래프이다. Fig.에서 볼 수 있듯이 NRC와 SFRC는 비슷한 양상의 비크리프를 나타내며, 두 조건에서 모두 건조수축과 유사하게 AASHTO LRFD-02와 유사한 형태의 곡선을 나타내고 있다. 또한, SFRC의 건조수축 변형이 더 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 양단 Hook형 강섬유가 시멘트 매트릭스 내에서 변형을 구속하기 때문인 것으로 보인다.

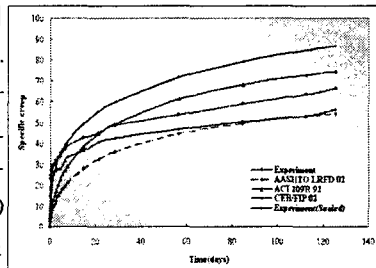


Fig.4 Specific creep of NRC compared with codes

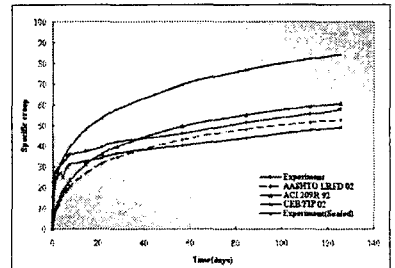


Fig.5 Specific creep of SFRC compared with codes

반복하중과 점증하중을 분석하기 위한 기준식은 지속하중의 크리프와 건조수축의 실험에서 실제 거동과 가장 유사한 예측을 한 AASHTO LRFD-02식을 사용하였다. Fig.6과 Fig.7 그리고 Fig.8과 Fig.9에서 보는 바와 같이 EMM과 AEMM을 통한 해석은 실제의 거동을 비교적 잘 예측하였다. 반복하중과 점증하중의 크리프 역시 전체적으로 SFRC의 크리프 값이 NRC의 크리프 양보다 적게 나타났다. 이는 지속하중의 경우와 마찬가지로 강섬유가 콘크리트 매트릭스를 구속하는 효과를 나타내었기 때문인 것으로 보인다. 그러나 지속하중의 크리프 감소효과가 14.9%~15.9%인 것에 비해 그 감소량이 6.8%~8%로 작게 나타났다.

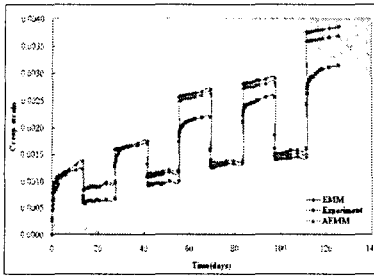


Fig.6 Creep strain of NRC under repeated load with analytical predictions

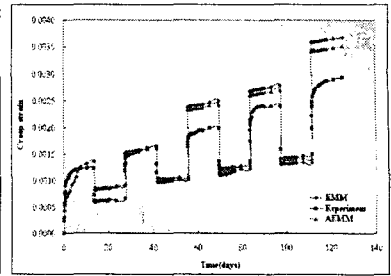


Fig.7 Creep strain of SFRC under repeated load with analytical predictions

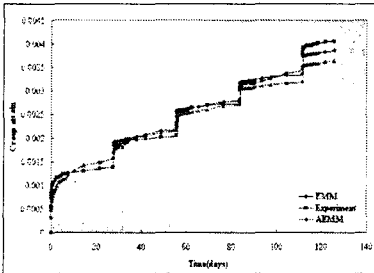


Fig.8 Creep strain of NRC under incremental load with analytical predictions

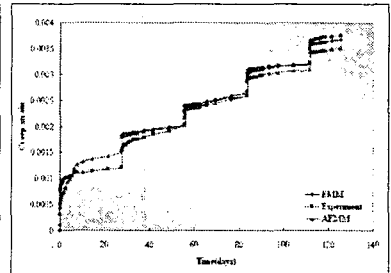


Fig.9 Creep strain of SFRC under incremental load with analytical predictions

4. 결론

- (1) 콘크리트의 탄성계수는 재령에 따라 증가한다. 또한 강섬유 보강 콘크리트의 탄성계수는 보통 콘크리트의 탄성계수보다 큰 값을 나타낸다.
- (2) 크리프와 건조수축으로 나타나는 콘크리트의 장기 처짐은 초기 재령에서 크게 나타나고 시간에 따라 빠르게 수렴한다. 그리고 강섬유 보강 콘크리트는 크리프와 건조수축의 저감에 우수한 성능을 나타낸다.
- (3) NRC와 SFRC를 구분하는 요소를 식에 포함하고 있지 않음에도 불구하고 AASHTO LRFD-02식이 실제 거동과 가장 유사한 결과를 보여주었다. 이는 SFRC를 사용함에 있어 특별한 고려를 하지 않고 사용하여도 안정성에 있어서는 문제를 발생시키지 않음을 나타낸다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 연구비지원(M10204000031-04J0000-01910)에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. Tan K. H., Paramasivam P., Tan K.C Instantaneous and long-term deflections of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Structural Journal 1994;91(4):384-393
2. Neville, A. M., "Property of Concrete," Pitman, London and Marshfield, Mass., 1981, pp. 359-432.
3. Zdeněk P. Bazant, "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future", Nuclear Engineering and Design 203,2003, pp.27 - 38