

# 초유동 콘크리트의 재료특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Research on the Material Properties of Super Flowing Concrete

김진근\*    한상훈\*\*    박연동\*\*\*    노재호\*\*\*  
J. K. Kim   S. H. Han   Y. D. Park   J. H. Noh

### ABSTRACT

In this study, the properties of super flowing concrete containing fly ash were experimentally investigated and compared with those of ordinary concrete. Tests were carried out on five types of super flowing concrete mixes containing fly ash and three types of ordinary concrete mixes without fly ash. Flow test, O-funnel test, box test, L type test and slump test were carried out to obtain the properties for the workability of fresh concrete. Compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, creep and shrinkage test were also obtained as the mechanical properties of hardened concrete.

In fresh concrete, it was found that super flowing concrete had excellent workability and flowability compared with ordinary concrete, and the volume ratio of coarse aggregate to concrete volume greatly influenced flowability. Super flowing concrete also had good mechanical properties at both early and late ages with compressive strengths reaching as high as 40 MPa at 28 days. The creep deformation of super flowing concrete investigated were relatively lower than that of ordinary concrete.

### 1. 서 론

최근 새로운 혼화재와 결합재의 출현으로 고성능 콘크리트(High Performance Concrete)의 생산이 가능해 졌다. 여기서 고성능 콘크리트는 고강도, 고유동, 고내구성의 성질을 가진 콘크리트로 정의될 수 있다. 특히 유동성을 강조한 고성능 콘크리트인 초유동 콘크리트는 1980년대 후반 일본에서 개발된 이래 콘크리트에 대한 기존의 고정 관념을 뛰어 넘는 혁신적인 재료로 평가되

고 있으며, 많은 연구자들의 관심과 함께 차세대 건설재료로 크게 각광받고 있다.

1988년 일본 동경대에서 첫 시험 타설에 성공한 이후 일본 건설회사 및 대학연구소에서 실용화를 위한 많은 연구들이 행해져 오고 있으며 몇 번의 현장시공도 이루어 졌다. 그러나 좀 더 신뢰성을 가지고 초유동 콘크리트를 사용하기 위해서는 유동성과 작업성에 대한 측정 방법의 개선, 초유동 콘크리트의 재료역학적인 성질에 대한 연구, 타설과 펌프 압송 등에 대한 현장 기준의 마련 등이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 초유동 콘크리트의 경화

\* 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

\*\*\* 동양중앙연구소 선임연구원

Table 1. Basic mixture proportions

Specific number	Classification	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Binder(kg/m <sup>3</sup> )		Aggregate(kg/m <sup>3</sup> )		Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Water-Cement ratio (%)	Volume ratio of coarse aggregate to concrete volume
			Cement	Fly ash	Fine	Coarse			
SF 1-1	Super flowing concrete mixes	195	390	267	814	733	10.0	35	0.27
SF 1-2		185	370	159	782	820	10.0	35	0.31
SF 1-3		175	350	150	739	917	10.0	35	0.35
SF 1-4		165	330	141	678	1032	9.9	35	0.39
SF 2		190	300	200	778	819	8.5	38	0.31
NC 1	Ordinary concrete mixes	185	350.4	0	775	1035	0.0	53	0.39
NC 2		175	400.5	0	760	1035	4.0	44	0.39
NC 3		175	500	0	677	1032	7.5	35	0.39

전의 물성과 경화 후의 물성을 측정하여 두 물성의 상관관계를 검토하여 초유동 콘크리트의 재료역학적인 특성에 대한 좀 더 심도 있는 연구를 수행하였다. 또한 초유동 콘크리트와 일반콘크리트의 재료 물성을 비교검토하기 위해 일반콘크리트에 대한 실험도 병행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 배합설계

SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 는 결합재 중량의 30%가 플라이 애쉬이며 SF 2는 결합재 중량의 40%가 플라이 애쉬이다. 콘크리트의 부피를 1로 보았을 때, SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 는 각각 0.27, 0.31, 0.35, 0.39 의 골재부피를 가지고 있다. NC 1, NC 2, NC 3 은 일반적인 콘크리트 배합으로 배합강도가 각각 20MPa, 40MPa, 60MPa 이다.

### 2.2 Fresh 콘크리트에 대한 실험 방법

Fresh 콘크리트의 유동성을 평가하기 위하여 슬럼프 실험, 플로우 실험, O형 깔대기 실험, 박스 충전성 실험, L형 충전성 실험 등을 실시하였다. 슬럼프 실험과 플로우 실험은 거의 같은 실험순서를 가지고 있다. 그러나 슬럼프 실험은 시료가 변형이 완전히 일어난 후의 높이를 측정하는 방법이고 플로우 실험은 변형 후 밑면의 지름을 측정하는 방법이다. O형 깔대기 실험은 시료가 깔대기에서 빠져나가는데 걸리는 시간을 측정함으로써 유동성을 평가하는 실험방법이다. 유동성이 좋을 수록 깔대기에서 빠져나가는 시간이 짧을 것이다. Box test는 왼쪽의 box에 시료를 채우고 왼쪽과 오른쪽 box를 연결하는 판을 들어 올리면 왼쪽 box에서 오른쪽 box로 시료가 이동할 것이다. 시료가 왼쪽 box에서 오른쪽 box로 이동하기 위해서는 D13 mm의 철근들이 배근되어 있는 부분을 통과해야 한다. 유동성은

왼쪽 box와 오른쪽 box의 높이차를 측정함으로써 평가한다. 충전성능의 판단을 하기 위해서는 L형 충전성 실험을 실시하였다. 시료투입구에 시료를 넣고 충전속도 및 최종 충전상태를 기준으로 충전성능을 육안으로 판단하여 우수(excellent), 양호(good), 보통(plain), 불량(bad)의 4가지 수준으로 구분한다.

### 2.3 경화 콘크리트에 대한 실험방법

압축강도( $f_c'$ ), 할렬인장강도( $f_t'$ ), 탄성계수( $E_c$ ), 크리프, 건조수축 등의 경화 콘크리트에 대한 성질들이 측정되었다. 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수는  $\phi 100 \times 200$  mm의 실린더를 이용하여 실험을 수행하였고 크리프는  $\phi 150 \times 300$  mm 실린더를, 건조수축은  $100 \times 100 \times 400$  mm의 직육면체의 공시체를 이용하여 실험을 수행하였다. 건조수축 실험을 제외한 모든 실험은 적어도 3개의 공시체에 대한 실험을 수행하여 그 값들의 평균값을 취했다. 건조수축은 2개의 공시체에 대해서 실험을 수행하여 그 값을 평균하였다.

압축강도는 ASTM C 39를 따라서 실험을 수행하였고 할렬인장강도는 ASTM C 496을, 탄성계수는 ASTM C 469에 제시된 실험법을 따라서 실험을 수행하였다. 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수는 전 배합에 대해서 실험을 수행하였다. 압축강도, 할렬인장강도는 재령 3, 7, 28, 90 일에 대해서 실험을 수행하였고 탄성계수는 재령 28, 90 일에 대해서 실험을 수행하였다. 실험 전에 공시체의 상·하면은 모두 유향으로 깎핑했다.

크리프는 SF 1-2, NC 2에 대해서 실험을 수행하였다. 크리프 공시체는 타설 후 24시간안에 탈형하여  $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 의 온도에서 28일 동안 수중양생하였다. 기본 크리프를 측정하기 위해서 공시체를 플라스틱 필름으로 싸서 외기와의 수분이동을 차단하였

다. 실험기간동안  $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 의 온도를 유지하였다. 공시체들은 재령 28일에 처음으로 하중을 가하기 시작하였는데 그 크기는 하중재하시의 압축강도의 약 40%를 재하하였다.

건조수축은 모든 초유동배합과 NC 2와 NC 3 배합에 대해서 실험하였다. 건조수축 공시체들은 크리프와 같은 조건으로 7일 동안 양생하였다. 양생 후, 공시체는 온도  $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 의 항온항습조에 보관하면서 실험하였다. 건조수축변형량은 Comparator를 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 Fresh 콘크리트의 실험결과 및 토의

실험 결과는 Table 2에 제시되어 있다. SF 1-1, SF 1-2 과 SF 1-3, SF 1-4 는 유동성에 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 콘크리트에 대한 굵은 골재의 부피비가 0.35(배합 SF 1-3)를 초과할 때, O형 깔대기 실험, 박스 실험, L형 충전성 실험들에서 유동성능이 저하됨을 알 수 있었다. 그래서, 골재의 부피비 0.31(SF 1-2)과 0.35(SF 1-3) 사이에 유동성능에 큰 영향을 미치는 임계의 골재 부피비가 존재함을 알 수 있다. Table 2에서 제시된 바와 같이 플라이 애쉬 대체율이 30%에서 40%로 증가하여도 유동성능에는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

일반 콘크리트 배합인 NC 1, NC 2, NC 3 배합과 초유동 콘크리트 배합인 SF 1-1, SF 1-2 의 유동성능 실험결과는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 플로우실험 결과는 고성능 콘크리트가 일반 콘크리트의 약 2배이며 일반콘크리트는 유동성이 부족하여 O-FUNNEL 실험 자체가 불가능하였다. L형 충전성 실험도 고성능 배합인 SF 1-1, SF 1-2 만 가능하고 일반 콘크리트는 시료가 배출구로 빠져나오지 못하여 유동성능을 평가할 수 없었다.

Table 2. Test data of fresh concrete

Specific number	Flow (cm)	O - funnel (sec)	Box (cm)	L. type	Slump (cm)
SF 1-1	65	6.9	2.5	excellent	-
SF 1-2	67	7.8	2.0	excellent	-
SF 1-3	65	closed	45.7	poor	-
SF 1-4	60	31.8	48.5	poor	-
SF 2	65	7.6	22.5	excellent	-
NC 1	40	closed	-	-	18.7
NC 2	36	closed	-	-	18.0
NC 3	36	closed	-	-	18.7

### 3.2 경화 콘크리트의 실험결과 및 토의

#### 3.2.1 압축강도( $f'_c$ )

플라이애쉬 대체율 30%일 때의 재령에 따른 콘크리트(수중양생조건)의 압축강도를 그림 1 (a)에 제시하였다. 콘크리트에 대한 골재의 부피비가 0.27, 0.31, 0.35 일 때의 압축강도는 재령에 따라서 거의 비슷하지만 부피비가 0.35 과 0.39 일 때의 압축강도는 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 이것으로 골재 부피비 0.35 와 0.39 사이에 압축강도에 영향을 미치는 임계 부피비가 존재함을 추정할 수 있다.

그림 1 (b)는 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 양상을 나타내고 있다. 두 종류의 콘크리트가 거의 비슷한 초기강도를 가지고 있었음에도 시간이 지날수록 초유동 콘크리트가 일반 콘크리트보다 압축강도가 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 초유동 콘크리트에 포함된 플라이 애쉬의 특성이 나타난 것으로 사료된다. 그림 1 (c)는 플라이 애쉬 대체율이 30%와 40% 일 때의 압축강도들을 비교하고 있다. 30%의 플라이 애쉬 대체율을 가진 콘크리트가 40%의 플라이 애쉬 대체

율을 가진 콘크리트보다 30~40% 큰 압축강도를 가지고 있다. 이것은 25% 이상의 플라이 애쉬 대체율을 가진 콘크리트는 일반적으로 플라이 애쉬 대체율의 증가에 따라 압축강도가 감소한다는 경향과 일치한다.

그림 2 (a), (b) 는 양생조건에 따른 압축강도의 변화를 나타내고 있다. 이 실험에 사용된 콘크리트 배합은 SF 1-2와 NC 3으로 둘 다 같은 불-시멘트비를 가지고 있다. 두 종류의 콘크리트 모두 재령 3일의 압축강도는 기건양생과 수중양생 사이에 차이가 거의 없거나 기건양생이 조금 크다. 그러나 재령이 경과함에 따라 수중양생 콘크리트의 압축강도가 기건양생 콘크리트의 압축강도보다 크다. 재령 28일에서 SF 1-2의 양생조건에 따른 압축강도의 차이는 10% 정도이고 NC 3의 양생조건에 따른 압축강도의 차이는 18%정도이다. 따라서 초유동 콘크리트가 일반콘크리트 보다 양생조건을 적게 받는다고 볼 수 있다.

#### 3.2.2 활렬인장강도( $f'_t$ )

초유동 콘크리트의 28일 재령에 대한 활렬인장강도는 3.6~4.0 MPa 이다. 이 값은

Table 3. Test data of splitting tensile strength and elastic modulus

	3 days		7 days		28 days				90 days		
	$z f_c'$ (MPa)	$f_t'$ (MPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_t'$ (MPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_t'$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$E_c$ by ACI Code	$f_c'$ (MPa)	$f_t'$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
SF 1-1	20	2.4	33	3.5	47	4.0	28	32	53	4.7	31
SF 1-2	19	2.3	32	3.4	47	3.7	28	32	54	4.6	33
SF 1-3	16	2.0	31	2.9	46	3.7	28	32	53	4.4	33
SF 1-4	11	1.0	26	2.8	37	3.6	28	29	44	4.0	30
SF 2	11	1.1	23	2.5	34	3.5	25	27	42	4.4	29
NC 1	8	1.4	17	2.3	24	3.1	23	23	27	3.4	24
NC 2	18	2.6	30	3.7	42	4.0	28	31	43	4.2	31
NC 3	31	3.6	50	4.3	61	4.9	32	37	62	5.2	34

28일 압축강도의 약 8~10 %이고 이러한 비율은 같은 강도의 일반 콘크리트의 비율과 거의 일치한다.

### 3.2.3 탄성계수( $E_c$ )

초유동 콘크리트의 탄성계수는 재령 28일에서 27~28 GPa 정도이고 재령 90일에서는 30~33 GPa 정도이다. Table 3에 나타나 바와 같이 SF 1-3 과 SF 1-4는 압축강도가 20% 정도 차이가 나지만 탄성계수는 별 차이가 없다. 이것은 SF 1-4 배합이 좀더 많은 굵은 골재량을 가지고 있는데서 기인한 것으로 사료된다. 실험에서 구한 28일 탄성계수와 ACI 코드식에 의한 탄성계수의 값을 비교해 보면 대부분 실험치가 코드값보다 10~20 % 정도 작음을 알 수 있다.

### 3.2.4 크리프

초기 재령에서 초유동 콘크리트의 크리프 변형률은 ACI 코드식보다 조금 크고, 일반 콘크리트는 ACI 코드식과 거의 비슷하다. 그러나 재령이 경과할 수록 초유동 콘크리트의 크리프 변형률은 ACI 코드식보다 작

아지고 그 차이는 점점 커진다. 일반 콘크리트 또한 재령이 경과할 수록 ACI 코드식과의 차이가 커지기는 하지만 초유동 콘크리트 만큼 현저하지는 않다. 결론적으로 초기재령에서 초유동 콘크리트의 강성증가의 속도는 일반 콘크리트 보다 낮지만 재령이 경과할 수록 그 속도가 빨라진다고 이야기할 수 있다.

### 3.2.5 건조 수축

그림 4 (a), (b) 는 건조수축 실험의 결과들을 나타내고 있다. 배합 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 는 각각 195, 185, 175, 165의 단위 수량을 가지고 있다. 이러한 영향으로 그림 4 (a)에 보여지는 바와 같이 건조수축량은 SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4 의 순이다. SF 2는 190의 단위수량을 가지고 있으므로 SF 1-1과 SF 1-2사이에 존재해야 하나 SF 1-1과 건조수축량이 거의 비슷하다. 따라서 플라이 애쉬 대체율이 증가할 수록 건조수축량이 증가한다는 것을 추정할 수 있다. SF 1-2와 ACI코드식(플라이 애쉬에 대한 고려를 하지 않고 일

반 콘크리트로 가정하여 해 구함)에 의한 값을 비교해 보면 비슷한 경향을 나타내고 있고 초기재령에서는 약 60%정도, 30일 이상의 장기재령에서는 약 30%정도 실험치와 코드식의 값이 차이가 난다.

일반 콘크리트 배합인 NC 2와 ACI 코드식에 의한 값을 비교해 보면 위의 SF 1-2와 비슷한 결과를 얻었다. 이 실험을 통하여 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트의 건조수축량이 거의 비슷한 양상을 나타낸다고 추정할 수 있다.

#### 4. 결 론

초유동 콘크리트에 대한 위의 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

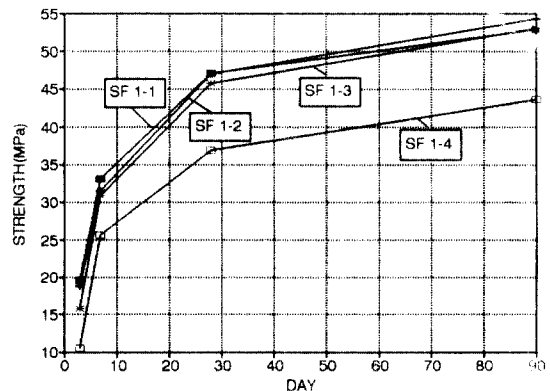
- 1) 초유동 콘크리트에 대한 골재의 부피비 0.31과 0.35사이에 압축강도에 영향을 미치는 임계의 부피비가 존재한다.
- 2) 초유동 콘크리트의 압축강도는 플라이 애쉬의 강도에 대한 특성 발현으로 초기 재령에서는 압축강도가 일반 콘크리트보다 낮고 장기재령에서는 일반 콘크리트보다 높았다.
- 3) 초유동 콘크리트의 압축강도는 수중과 기건양생 조건에 따른 영향이 일반 콘크리트보다 작았다.
- 4) 같은 압축강도의 초유동 콘크리트와 일반 콘크리트는 비슷한 활렬인장강도, 탄성계수를 가지고 있다.
- 5) 초유동 콘크리트는 초기재령에서 일반 콘크리트 보다 크리프 변형량이 크지만 장기재령에서는 그 경향이 반대가 된다.
- 6) 초유동 콘크리트는 일반 콘크리트와 비슷한 건조수축량을 가지고 있고 그 경향도 비슷하다.

#### 감사의 글

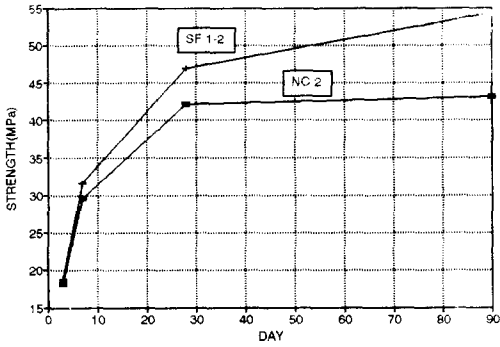
본 연구는 1995년도 건설교통부의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

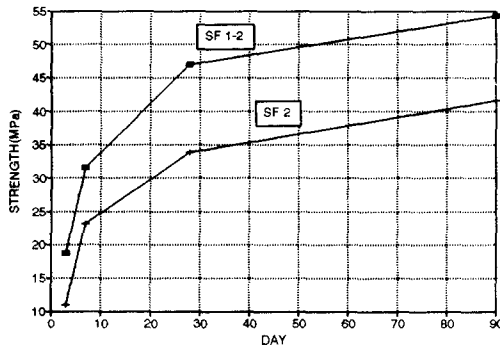
1. Carrette, G. G. ; Bilodeau, A. ; Chevrier, R. L. and Malhotra, V. M. (1993), "Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S", ACI Materials Journal, **90**(6), 535-544
2. Tikalsky, P. J. ; Carrasquillo, P. M. and Carrasquillo, R. L. "Strength and Durability Considerations Affecting Mix Proportioning of Concrete Containing Fly Ash", ACI Materials Journal, **90**(6), 535-544.
3. Toyoharu, N. ; Hitoshi, E. ; Masahiro, O. and Yasubumi, F. (1992), "A Study on Mix Proportion and Workability of High Flowing Concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, **14**(1), 369-374.
4. Noh, J. H ; Han, C. H ; Baeg, M. J ; Lee, B. G ; Park, K. C (1994) " 초유동 콘크리트의 유동성능에 미치는 배합요인의 영향", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, **6**(2), 115-120
5. Park, Y. D ; Cho, I. H ; Kwon, Y. H ; Park, C. L ; (1994) " 플라이 애쉬를 사용한 2성분계 초유동 콘크리트의 개발", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, **6**(2), 121-126



(a) Mixes SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4

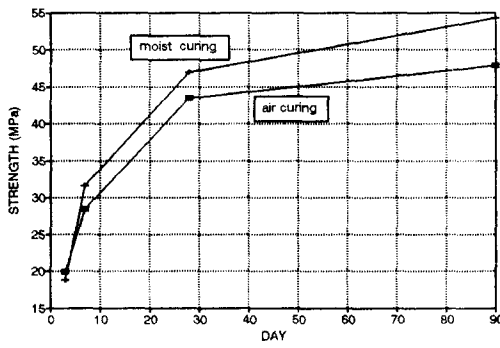


(b) Mixes SF 1-2 and NC 2

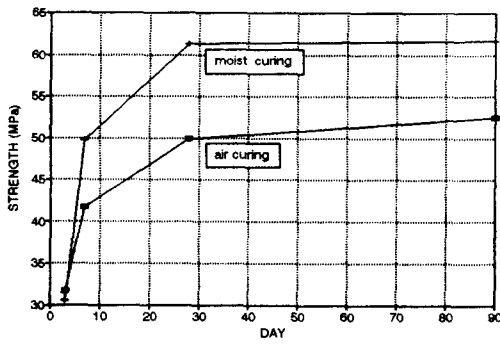


(c) Mixes SF 1-2 and SF 2

Fig. 1 The compressive strength

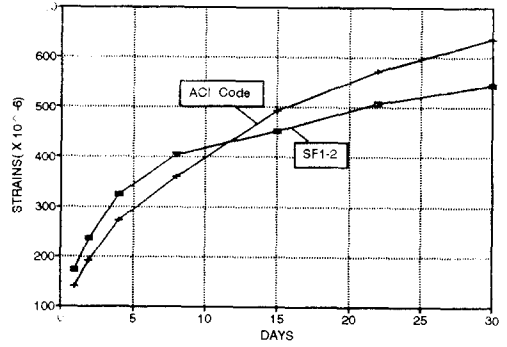


(a) Mix SF 1-2

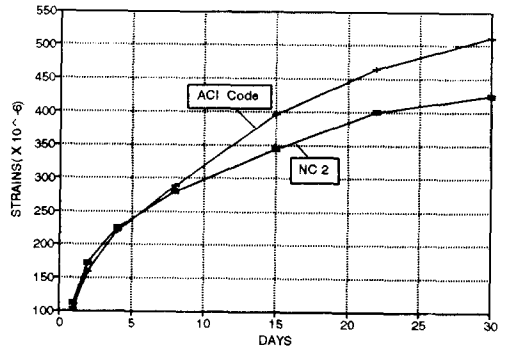


(b) Mix NC 3

Fig. 2 The strengths with curing conditions

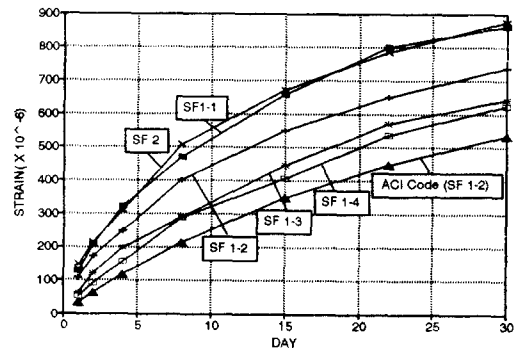


(a) Mix SF 1-2

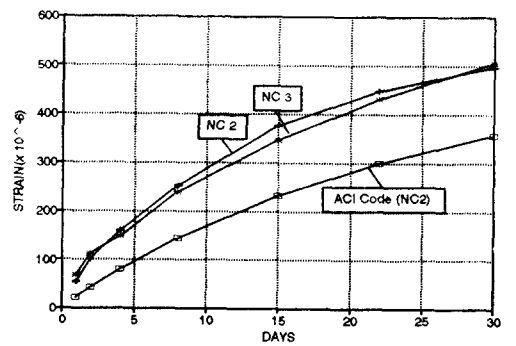


(b) Mix NC 2

Fig. 3 The creep strains



(a) Mixes SF 1-1, SF 1-2, SF 1-3, SF 1-4, SF 2



(b) Mixes NC 2, NC 3

Fig. 4 The shrinkage strains