
실용 고강도 콘크리트의 크리프에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Creep of the High Strength Concrete for Practical Use



김생빈*

Kim, Saeng-Bin



김성욱**

Kim, Sung-Wook

•ABSTRACT

Due to the lack of experimental works for concrete creep in Korea, concrete creep was predicted by the specifications of foreign countries.

In this study, the creep test was carried out for three cases of concrete mix design which were applied to the prestressed concrete structure at a construction site, and the results of test were compared to the values of creep prediction by the ACI, CEB/FIP, KSCE, and JSCE design code. The creep coefficient predicted by CEB/FIP-90 was overestimated the test results, meanwhile, those by ACI 209-92 and JSCE-96 were underestimated the test results.

Though the creep coefficient predicted by KSCE-96 was similar to the test results, however the effect of compositions of materials which is not considered in current KSCE-96 should be corrected. In the future, a study which is based on extensive experiment for the concrete manufactured in Korea is required to predict the creep accurately.

Keywords : creep, prediction of creep, creep coefficient, creep test

* 정회원, 동국대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 2월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

콘크리트는 여러 가지 크기와 형태의 공극과 미결 정체를 지니기 때문에 철, 프라스틱 등의 균일한 재료에 비교하여 상대적으로 많은 양의 크리프가 발생하며 배합형태와 시공시의 주변환경조건에 따라 유사한 재료구성을 지녀도 발생량과 경향이 서로 다르게 나타날 수 있다. 특히 PS콘크리트에서는 설계단계에서 크리프, 건조수축, 기타 경화콘크리트의 물리적 특성치들을 표준식에 따라 예측 반영하지만 이들 값들은 실제 구조물의 거동과는 상이한 경우가 많기 때문에 중요도가 높은 구조물의 경우는 직접적인 실험이 요구된다.

콘크리트의 크리프에 대한 실험적 연구는 장기간의 시간과 노력을 요하기 때문에 국내에서는 아직까지 많은 실험결과가 축적되어 있지 못하고 대부분의 경우 콘크리트 분야의 기술 선진국에서 많은 실험과 이론적인 검토과정을 통하여 완성된 예측식을 인용, 사용하고 있는 것이 현실이다. 그러나 이러한 외국의 크리프 예측식들이 실제 국내의 콘크리트 구성재료와 환경요인에 적합한 크리프 예측 모델인지에 대한 검증은 별로 진행되지 못한 것 같다.

본 연구에서는 동일한 재료로 구성된 28일 설계기준강도가 35MPa(357kg/cm²)인 PS콘크리트용 실용 고강도 콘크리트의 3가지 다른 배합을 대상으로 실험을 수행하였으며 실험에 사용된 시험체는 현장 적용성을 높이기 위하여 현장의 배치 플랜트에서 생산된 콘크리트로 제작하였다. 제작된 시험체로 양생재령별 콘크리트의 기본 물성실험을 실시하고 이 실험결과를 근거로 콘크리트 탄성범위 내에서 크리프 시험을 수행하였다. 그리고 크리프 시험결과와 다른 물성치와의 연관성을 분석하고 기존의 크리프 관련 표준들과 비교분석함으로써 실제 국내에서 사용되는 콘크리트에 대한 이들 표준의 적용성을 비교 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험재료 고찰

일반적으로 콘크리트 크리프 시험에는 주로 1종 보통포틀랜드시멘트가 사용되었으며 초기의 경화속도와 강도발현속도가 현저하게 다른 3종 조강포틀랜드시멘트와 비교된 바도 있다¹⁾. 그러나 본 연구에서는 해안가에 위치한 대형 PS콘크리트 구조물의 크리프 시험 및 평가를 위하여 5종의 내황산염포틀랜드시멘트를 실험대상 재료로 선정하였다. 실험에 사용된 5종 내황산염시멘트의 화학구성성분 및 화합물과 포틀랜드시멘트의 전형적인 구성성분²⁾ 비교를 Table 1에 나타내었으며 물리적인 특성치는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Oxide and compound compositions of the used cement and the typical portland cement

oxide composition	tested portland cement	typical portland cement	oxide and compound composition	tested portland cement	typical portland cement
CaO	62.7	63	Others		1
SiO ₂	21.4	20	g. loss	1.0	2
Al ₂ O ₃	3.9	6	Residue	0.4	0.5
Fe ₂ O ₃	4.6	3	CA	2.6	10.8
MgO	3.5	1.5	C ₂ S	53.8	54.1
SO ₃	2.1	2	C ₃ S	20.8	16.6
K ₂ O			CAF	14.0	9.1
Na ₂ O	0.75	1			

Table 1에서 보는 바와 같이 실험에 사용한 시멘트의 주요 화합물 구성은 규산3칼슘(C₃S), 규산2칼슘(C₂S), 테트라칼슘알루미노페라이트(C₄AF)의 경우는 전형적인 포틀랜드시멘트와 구성비가 유사하다. 그러나 알루미늄산 3칼슘(C₃A)의 경우는 내황산염 작용을 위하여 아주 낮은 비율로 구성되어 있어서 초기 강도발현은 늦을 것이며 C₂S의 구성비율이 상대

Table 2 Physical properties of tested cement

	fineness			time of setting		soundness (%)	flow (cm)	compressive strength(kg/cm ²)			
	blain (cm ² /g)	88μ(%)	44μ(%)	initial set(min)	final set (h)			1 day	3 day	7 day	28 day
KSL 5201	2800			> 60	< 10	< 0.8			> 130	> 200	> 290
tested cement	3230	0.4	3.5	345	9:10	0.02	19.8	104	203	264	414

적으로 높으므로 강도발현이 상당기간 지속되는 콘크리트일 것이라고 추정된다.

한편 잔골재, 굵은골재 모두 하천골재를 사용하였으며 선형 연구에서 골재의 물성에 대한 비교자료의 부족으로 골재의 물성에 대한 분석은 수행하지 않았다.

2.2 콘크리트 배합

Table 3은 실험에 적용된 3가지 콘크리트 배합표이며 고강도에 적합한 비교적 낮은 물시멘트를 유지하고 굵은 골재 구성비가 높으며, 낮은 물시멘트비에 따른 시공성 보상을 위하여 감수제와 공기연행제를 사용하는 것이 전체적인 배합의 특징이다. 실험에서는 가장 큰 배합변수로 W/C를 배합단계 별로 4%씩 증가시켰으며 단위수량의 변동폭은 작게 하고 단위시멘트량은 상대적으로 크게 변화시켰다.

Table 3 Mix design (m³)

item mix	W/C (%)	S/a (%)	water (kg)	cement (kg)	agg. (kg)	sand (kg)	WRA (%)	AEA (%)	air (%)
A	36	38	175	466	1016	619	0.4	0.0027	3
B	40	38	170	425	1061	624	0.3	0.0045	4.7
C	44	39	170	386	1063	651	0.3	0.0047	4.7

2.3 압축강도 및 탄성계수 시험

압축강도 시험을 위하여 각 배합별, 각 재령별로 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 원주형 공시체를 3개씩 제작하여 24시간 후 탈형하고, $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$, 100% RH가 유지되는 양생수조에서 양생하였다. 계속 습윤양생을 하면서 정해진 7일, 28일, 90일, 180일, 365일 재령시 3개의 시험체로 압축강도시험⁽¹⁾을 수행하고 이 결과를 바탕으로 ASTM C 469⁽²⁾에 따라서 콤프레소미터(compressometer)를 이용하여 탄성계수(static modulus of elasticity)를 측정하였다.

한편 본 논문에서는 재령(age)의 용어상의 혼돈을 피하기 위하여 습윤상태에서 하중이 재하되기 전의 재령을 양생재령(curing age), 재하후의 경과시간에 대한 재령의 증가를 나타내기 위하여 재하 또는 건조가 시작된 이후의 재령을 재하재령(load age)으로 정의하여 사용한다.

Table 4는 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 원주형 시험체를 이용하여 시험한 각 배합별, 재령별 압축강도와

탄성계수 시험값이며 Fig. 1은 365일까지의 압축강도 변화를, Fig. 2는 탄성계수 변화를 보여준다.

Table 4 Compressive strength and static modulus of elasticity with ages

curing age (days)	compressive strength(kg/cm ²)			curing age (days)	static modulus of elasticity ($\times 10^4$, kg/cm ²)		
	Mix-A	Mix-B	Mix-C		Mix-A	Mix-B	Mix-C
7	327	277	287	7	2.40	2.14	2.10
28	472	391	377	28	2.72	2.45	2.42
90	518	453	440	90	2.85	2.66	2.57
180	608	528	530	180	3.01	2.95	2.92
365	627	550	546	365	3.32	3.03	3.01

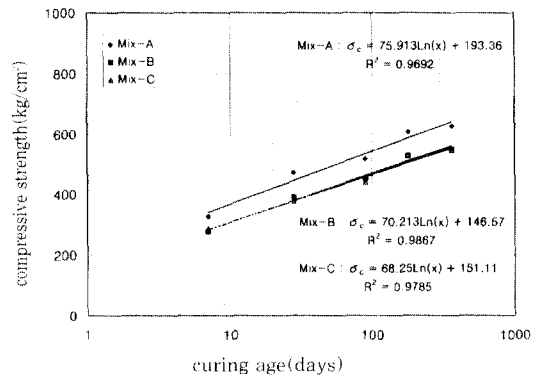


Fig. 1 Compressive Strength with ages

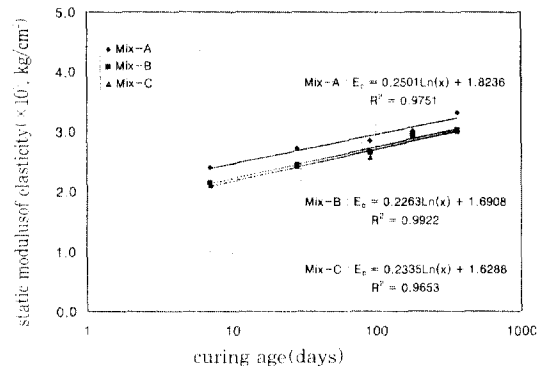


Fig. 2 Static modulus of elasticity with ages

실험에 사용한 콘크리트의 탄성계수 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 표준시방서⁽³⁾의 추정식에 따른 탄성계수와 시험으로 구한 탄성계수값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 시험에 사용한 콘크리트의 경우 탄성계수 추정식에 따라 구한 값

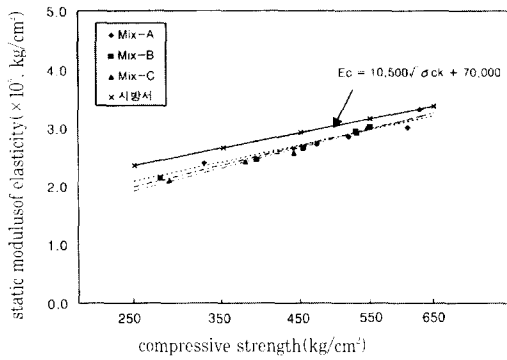


Fig. 3 Comparison of the static modulus of elasticity by KSCCE code and test

과 비교할 때 전체적으로 시험값이 추정값보다 낮은 값을 보여주며 초기 재령에서는 낮고 재령에 따른 증가 기울기는 높은 특징을 지닌 콘크리트이다. 이러한 실험결과는 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 초기에는 낮고 재령이 증가할수록 지속적으로 증가하는 특징과 연관 지을 수 있다.

2.4 크리프 및 건조수축 시험

콘크리트 크리프 시험은 ASTM C 512⁽⁴⁾에 따라서 시험하였다. 총크리프 변형률(total creep)을 구하기 위하여 재하장치에 일정한 지속하중을 가하여 총변형률(total strain)을 측정하고 총변형률에서 건조수축변형률(drying shrinkage strain)을 빼주기 위하여 크리프 시험과 동시에 동일한 크기와 형상의 원주형 시험체로 건조수축 변형률을 측정하였다.

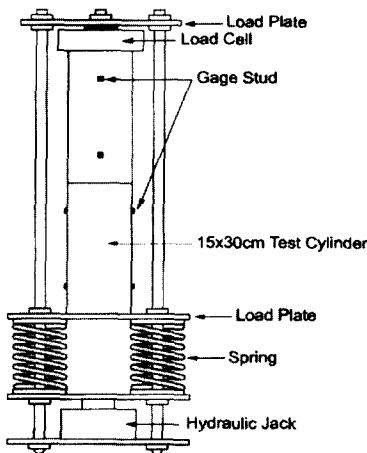


Fig. 4 Creep test equipment

시험에 사용한 크리프 시험기는 Fig. 4와 같은 스프링재하프레임(spring-loaded creep frame) 형태로서 하중을 먼저 유압잭(hydraulic jack)으로 가한 후 가력판(load plate)에 볼트를 체결하여 지속하중이 작용하도록 하였다.

일반적으로 동일한 콘크리트에서 크리프의 발생 정도는 작용응력에 비례하며 이 비례한계의 범위는 공시체에 압축력이 가해질 때 미세균열이 발생하는 시점인 응력/강도비가 0.4~0.6 정도로 알려져 있다⁽⁷⁾. ASTM C 512의 크리프 시험방법에서도 작용응력에 대한 크리프의 비례한계를 재하시점에서의 응력/강도비가 0.4일 때를 기준으로 하고 있다.

본 시험에서는 위의 이론에 근거하여 응력/강도비가 0.4 이하의 범위에서 재령별로 압축강도 시험치를 기준으로 하중을 변화시키며 재하하였다. Table 5는 각 시험시 적용한 재하하중과 응력/강도비를 나타낸 것으로 일부를 제외하고는 대략 응력/강도비가 35%~40%의 범위에 분포하고 있다.

Table 5 Load, stress, and stress/strength ratio used on test

mix type curing age	Mix-A			Mix-B			Mix-C		
	(1)*	(2)*	(3)*	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
7	20	113	0.35	20	113	0.40	20	113	0.39
28	29	164	0.35	25	141	0.36	25	141	0.38
90	29	164	0.35	30	170	0.38	30	170	0.39
180	30	170	0.35	35	198	0.38	35	198	0.37
365	30	170	0.35	35	198	0.38	35	198	0.36

* (1) : load (ton), (2) : stress (kg/cm²), (3) : stress/strength ratio

Table 5의 지속하중(sustained load)을 가하면서 측정한 총변형률과 하중을 차하지 않은 시험체(control specimen)로 측정한 건조수축 변형률 값들의 시간경과에 따른 변화를 Fig. 5의 그래프로 나타내었다.

3. 실험결과 분석

3.1 건조수축

실험결과에 의하면 건조수축 변형률의 경우는 전체적으로 상당히 큰 값을 나타내며 시험체의 습윤양생재령에 따라 다소 감소하지만 보통 강도의 콘크리트와 비교해서 그 감소폭은 상대적으로 작은 편이다. Fig. 5에 나타난 건조수축 변형률의 시간경과에 따

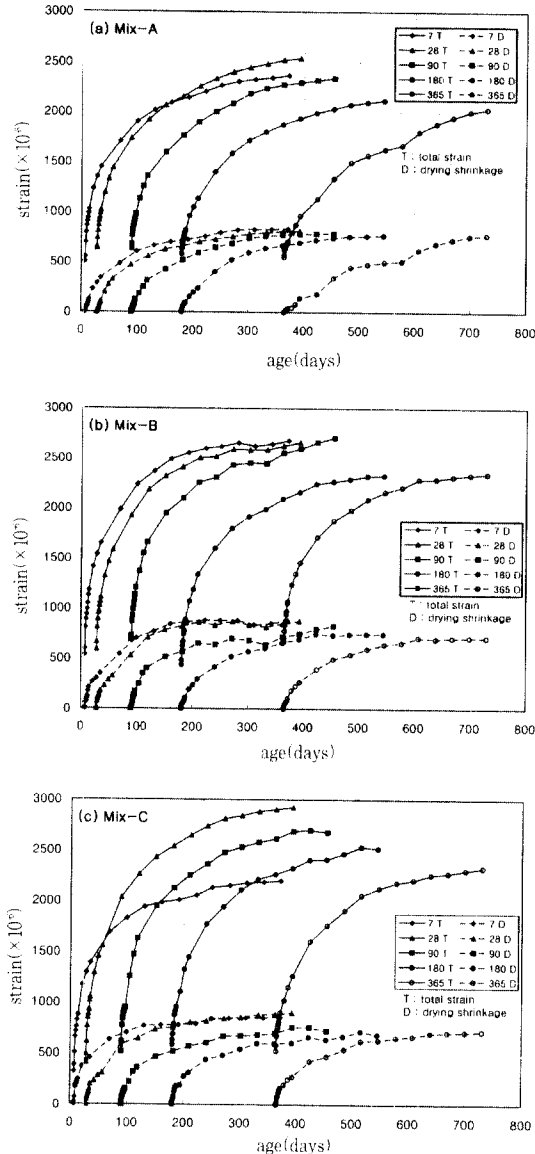


Fig. 5 (b) Total deformation under sustained load and drying shrinkage with control specimens for each mixes

른 변화추이로 미루어 판단할 때 50%의 상대습도에서 365일 경과된 현재, 향후 시간경과에 따른 현저증가는 없을 것으로 판단된다.

콘크리트 표준시방서에 따르면 설계상 수중양생의 경우 극한 건조수축 변형률을 510×10^{-6} 으로 제한하고 있는 것에 비교하면 실험값은 상당히 높으며, ACI 209-92에서는 1종과 3종 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 평균 극한 건조수축값을 780×10^{-6} 으로 가정

하는 것에 비추어 보면 각 실험값들은 습윤양생재령이 90일 이전의 것은 다소 제한치를 상회하며 그 이후의 양생재령은 제한치에 근접하는 경향을 나타낸다.

따라서 실험에 사용한 콘크리트는 상당히 높은 수준의 건조수축이 발생하는 콘크리트이며 건조크리프가 건조수축 변형률의 증가에 따라 증가하는 일반적인 경향에 비추어 볼 때 본 연구에 사용한 콘크리트의 비크리프 또는 크리프계수는 다소 높을 것으로 예상된다.

한편 배합 특성이 상당한 차이가 있는 Mix-A와 Mix-B,C의 두가지를 비교할 때는 양생재령별로 다소차이는 있으나 양생재령이 90일 이전에는 Mix-A보다 Mix-B,C가 다소 높으나 그 이후의 양생재령에서는 Mix-A보다는 Mix-B,C가 오히려 높다. 그러나 배합에서 단지 시멘트량의 차이만 있는 Mix-B와 Mix-C를 비교하면 시멘트량이 상대적으로 많은 Mix-B가 전체적으로 건조수축변형률이 크다.

3.2 크리프

크리프 시험의 평가는 Table 5에서 보여주는 바와 같이 배합별, 재령별로 상이한 재하하중과 응력/강도비 상태에서는 절대적 크기의 크리프 발생량을 상호 비교할 수 없다. 따라서 이들 시험값에서 총크리프 (total creep)을 구하고 이 값을 재하한 하중에 따른 응력값을 나누어 비크리프(specific creep)를 구하거나 총 크리프를 하중재하시 순간적으로 발생하는 변형률(instantaneous strain)을 나누어 크리프계수(creep coefficient)를 구하여 배합별, 재령별 콘크리트 크리프의 크기와 특징을 비교할 수 있다.

시험값으로부터 이 특성값을 구하는 과정은 아래 식들로 표현된다.

$$\epsilon_c(t, t_0) = \epsilon_{total}(t, t_0) - \epsilon_{sh}(t, t_0) - \epsilon_{el}(t_0) \quad (1)$$

$$\phi(t, t_0) = \frac{\epsilon_c(t, t_0)}{\epsilon_{el}(t_0)} \quad (2)$$

$$C(t, t_0) = \frac{\epsilon_c(t, t_0)}{\sigma} \quad (3)$$

여기서, $\epsilon_c(t, t_0)$: creep,

$\epsilon_{total}(t, t_0)$: total deformation

$\epsilon_{sh}(t, t_0)$: shrinkage,

$\epsilon_{el}(t_0)$: elastic strain

$C(t, t_0)$: specific creep.

$\phi(t, t_0)$: creep coefficient

위의 계산과정을 통하여 각 배합별 양생재령에 대한 1년 재하 후의 비크리프와 크리프계수값을 Table 6에 수록하였다.

Table 6 Specific creep and creep coefficient at 1 year after loading

mix	7 days		28 days		90 days		180 days		365 days	
	(1)*	(2)*	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
A	2.07	9.21	1.67	6.51	1.45	5.62	1.23	4.20	1.22	3.92
B	2.13	10.10	1.74	7.22	1.55	6.26	2.20	4.83	1.33	4.46
C	2.15	10.59	1.76	7.36	2.24	6.28	1.41	4.92	1.34	4.58

* (1) : creep coefficient, (2) : specific creep ($\times 10^{-4}$ / (kg/cm²))

Table 6의 크리프계수와 비크리프 시험값을 검토해보면 3가지 배합 모두 전체적으로는 양생재령이 짧을 수록 크고 양생재령이 점차 증가할수록 작아지는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 그러나 Mix-B의 180일 양생재령과 Mix-C의 90일 양생재령의 1년 재하 후의 크리프계수(=2.20, 2.24)는 일반적인 크리프 특성에 상반되는 값을 나타낸다. 한편 비크리프의 경우는 양생재령의 증가에 따라 값이 감소하는 일반적인 크리프 특성을 따르고 있다.

이렇게 동일한 시험값을 가지고 비크리프로 해석할 경우와 크리프계수로 해석할 경우 두가지 특성값이 일치하지 않는 이유는 식(2)에서 보는 바와 같이 크리프계수의 경우 하중 재하시에 발생하는 탄성변형률(elastic strain, ϵ_e)과 총크리프(ϵ_c)의 두 변형률의 상관관계값이므로 식(1)에 따라 구한 총크리프량이 동일하더라도 탄성변형률의 변동에 따라 크리프계수는 크게 변할 수 있다. 반면 총크리프와 재하응력(σ)의 요소만으로 구성된 비크리프의 경우 동일한 하중이 주어질 경우 초기 탄성변형률의 발생시기와 상관없이 총크리프량이 같다면 동일한 비크리프 값을 갖는다.

실험에서 구한 크리프계수의 검증은 Table 6의 재하순간에 발생한 변형률(instantaneous strain)과 콘크리트 탄성비례한계 내에서 실험으로 구한 Table 4의 탄성계수값과 Table 5의 재하응력값을 아래의 식(4)에 대입하여 구한 초기탄성변형률값을 비교하므로써 이루어진다.

$$\epsilon_{ei}(t_0) = \frac{\sigma}{E_c(t_0)} \quad (4)$$

Table 7 Comparison of the instantaneous strain on creep loading and the elastic strain by Eq.(4)

mix	7 days		28 days		90 days		180 days		365 days	
	(1)*	(2)*	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
A	504	472	640	603	634	576	580	564	547	511
B	536	529	588	577	685	638	435	671	662	653
C	557	539	591	585	477	661	689	678	675	657

* (1) : instantaneous strain at loading ($\times 10^{-4}$)

(2) : elastic strain by Eq.(4) ($\times 10^{-4}$)

Table 7에서 보면 크리프 재하시에 발생한 순간변형률이 식(4)의 탄성변형률보다 전반적으로 큰 경향을 보인다. 이러한 현상은 크리프 재하시에 크리프 시험기의 가력장치가 유압액에 의해서 스프링을 압축시키고 스프링에 의해서 간접적으로 지속하중(sustained load)이 가해지도록 되어 있어서 압축시험기 또는 UTM에서 짧은 시간내에 측정되는 탄성계수값과 비교적 긴시간(대략 5~7분 소요)의 재하시간을 요하는 크리프 시험의 재하시간이 차이가 있기 때문에 초기 하중 재하시 엄밀한 의미의 크리프가 벌써 발생되기 때문이다. 그러나 ACI 209R-92의 commentary에 따르면 크리프 시험에서 Instantaneous strain은 하중재하 즉시 발생하는 탄성적인 것과 재하후 10~100분 사이에 발생하는 short time creep인 비탄성변형률(inelastic flow)을 포함한다고 정의한다. 한편 Neville⁽⁶⁾은 재하시의 순간변형률로부터 탄성변형률을 구분하지 않는 것이 대부분의 실험 목적상 일반적이라고 설명하며, ASTM C 512에서도 초기 탄성변형률은 시험에서 구한 순간변형률로 한다고 정의한다. 따라서 본 크리프 시험에서 순간변형률은 탄성변형률과 구분없이 적용하며 시험에서 구한 순간변형률값은 대부분 적절하다고 판단할 수 있다. 그러나 Mix-B의 180일 양생재령과 Mix-C의 90일 양생재령 시험체의 초기 순간변형률은 다른 값에 비교하여 아주 작은 값을 나타내므로 수정이 불가피하다.

비크리프의 경우 Table 6에서 보는 바와 같이 두가지 배합의 재령들도 시간증가에 따라 크리프의 발생추이곡선은 일반적인 크리프 특성을 따르므로 순수한 크리프 발생량은 시험값을 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 시험에서 구한 순간변형률과 식(4)에 의한 탄성변형률의 두 특성값의 차이가 양생재령에 따라 일정한 비례관계 또는 어떠한 규칙성도 없

으므로 본 연구에서는 문제의 두 배합의 재령에 대하여 다른 재령들의 평균 차이값을 취하여 Mix-B의 180일 재령에 대하여 초기 순간변형률은 $692(\times 10^{-6})$ 로 Mix-C 90일 재령에 대해서는 $677(\times 10^{-6})$ 로 수정하고 식(1)의 크리프 변형률 값을 시험값을 그대로 유지하는 값으로 수정하였다.

4. 크리프 시험의 비교 고찰

실험결과와 특성을 비교하기 위하여 각국의 표준과 비교 고찰하였다. 현재 사용되는 각국의 크리프 예측과 관련된 표준은 그 목적을 대부분 사용될 콘크리트에 대하여 크리프 및 기타 특성값에 대한 실험없이 설계 및 구조해석상의 크리프의 영향을 고려하기 위하여 크리프계수를 예측하는데 두고 있다. 따라서 표준에 따른 각 크리프 예측식의 구성은 각기 서로 다른 매개변수로 이루어져 있지만 모두 설계단계에서 결정되는 설계기준강도와 부재의 형상, 그리고 사용될 콘크리트의 배합설계 만으로 예측이 가능하도록 이루어져 있다.

본 연구에서는 지면관계상 각 표준의 예측식과 실험의 배합 및 실험환경에 해당되는 각 매개변수로 구성된 예측식의 부분계수(factor)의 적용값만 밝히고 이 값으로부터 산정된 예측 크리프계수를 실험 크리프계수와 비교 고찰하여 그 결과를 Fig. 6의 통합 그래프로 나타내었다. 한편 표준에서 사용하는 크리프 예측에 의한 각 기호는 혼돈을 막기 위해서 표준에 표기된 대로 사용하였다.

4.1 KSCE-96에 의한 크리프 예측

KSCE-96에 의한 크리프계수 예측은 식(5)로 표현된다.

$$\phi(t, t_i) = 3.5k_f K_f (1.58 - \frac{H}{120}) t_i^{-0.118} \frac{(t - t_i)^{0.6}}{10.0 + (t - t_i)^{0.6}} \quad (5)$$

여기서, 본 실험의 조건에서는 $H = 50\%$, $k_f = 1 (V/S = 38\text{mm})$, $K_f = 629 / (426 + \sigma_{ck}) = 0.803$, $t =$ 콘크리트의 재령(일), $t_i =$ 하중이 처음 재하되었을 때의 재령

4.2 ACI-209 (92)에 의한 크리프 예측

ACI-209(92)에 의한 크리프계수 v_t 는

$$v_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} v_u \quad (6)$$

$$v_u = 2.35 \gamma_c$$

여기서, v_u : 극한 크리프계수

(ultimate creep coefficient)

γ_c : 보정계수의 전체 곱

본 연구에서 수행된 3가지 배합의 콘크리트에 대한 각 보정계수값은 Table 8과 같다.

Table 8 Correction factors used on the ACI-209 equation of creep prediction

parameter	humidity	average thickness	slump	fine aggregate	air content
correction factor	γ_h	γ_s	γ	γ_a	γ_c
Mix-A	0.935 ($\lambda = 50\%$)	1.000 ($h = 150\text{mm}$)	1.058 ($s = 90\text{mm}$)	0.974 ($\psi = 39\%$)	1 ($\psi = 5\%$)
Mix-B				0.969 ($a = 37\%$)	
Mix-C					

Loading age: $t_0 = 0.994$, $t_{s0} = 0.844$, $t_{c0} = 0.735$
factor (γ): $t_{s0} = 0.677$, $t_{c0} = 0.623$

한편 Table 8에서 Mix-A, B, C에서 보정계수의 차이는 잔골재율(ψ)에서 약 0.005 정도의 차이 뿐이므로 Fig. 6에서는 3가지 배합 중 한가지 예측값으로 표시하였다.

4.3 CEB/FIP-90에 의한 크리프 예측⁽⁹⁾

CEB/FIP-90 크리프계수 예측식은 식(8)과 같다.

$$\phi(t, t_0) = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \beta_c(t, t_0) \quad (8)$$

본 연구에서 수행한 3가지 배합의 콘크리트에 대해서는 Table 9에 각 구성항의 변수값을 정리하였다. 이 예측식의 매개변수 구성상 3가지 배합의 차이는 없다.

Table 9 Value of terms used on the CEB/FIP-90 equation of creep prediction

term	ϕ_{RH}	$\beta(f_{cm})$	$\beta(t_0)$	β_c
value	2.196 (RH=50%, h=75mm)	$t_0 = 2.82$ $t_{s0} = 2.56$ $t_{c0} = 2.44$ $t_{s,c0} = 2.40$	$t_0 = 0.63$ $t_{s0} = 0.49$ $t_{c0} = 0.39$ $t_{s,c0} = 0.34$	362.511 (RH=50%, h=75mm)

4.4 JSCE-96에 의한 크리프 예측⁽¹⁰⁾

JSCE에서 규정하는 크리프 예측식은 식 (9)~(12)와 같으며 Table 3의 배합설계표에서 W/C, W.C 값을 찾아 대입하고 실험조건인 상대습도 RH=50%, V/S=3.75 값을 적용한 후 각 양생 재령과 재하재령에 따른 비크리프를 계산하였다.

$$\varepsilon'_{cc} = (ct, t', t_0) = [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}] \varepsilon'_{cr_x} \quad (9)$$

$$\varepsilon'_{cr_x} = \varepsilon'_{bc_x} + \varepsilon'_{dc_x} \quad (10)$$

$$\varepsilon'_{bc_x} = 1.5 \times 10^{-5} (c + W)^{0.2} (W/C)^{2.4} (1_n t')^{-0.67} \quad (11)$$

$$\varepsilon'_{dc_x} = 0.0045 (C + W)^{1.4} (W/C)^{4.2} (1_n (V/S))^{-2.2} (1 - (RH/100))^{0.36} (t_0)^{0.3} \quad (12)$$

여기서,

$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0)$ 비크리프 ($\times 10^5 / (\text{kg}/\text{cm}^2)$)

ε'_{cr_x} : 최종 비크리프 (ultimate specific creep, $\times 10^5 / (\text{kg}/\text{cm}^2)$)

ε'_{bc_x} : 최종 기본 비크리프 (ultimate basic specific creep, $\times 10^5 / (\text{kg}/\text{cm}^2)$)

ε'_{dc_x} : 최종 건조 비크리프 (ultimate drying specific creep, $\times 10^5 / (\text{kg}/\text{cm}^2)$)

JSCE에서는 비크리프 값을 예측하기 때문에 이 값을 실험값과 다른 기준에 따라 구한 크리프계수와 비교하기 위해서는 환산해야 한다. 탄성계수(Ec)값은 JSCE 규정에 의해서 357kg/cm²의 압축강도 값에 해당하는 값을 비례식으로 계산하여 Ec=2.97 ($\times 10^3$, kg/cm²)으로 가정하였다.

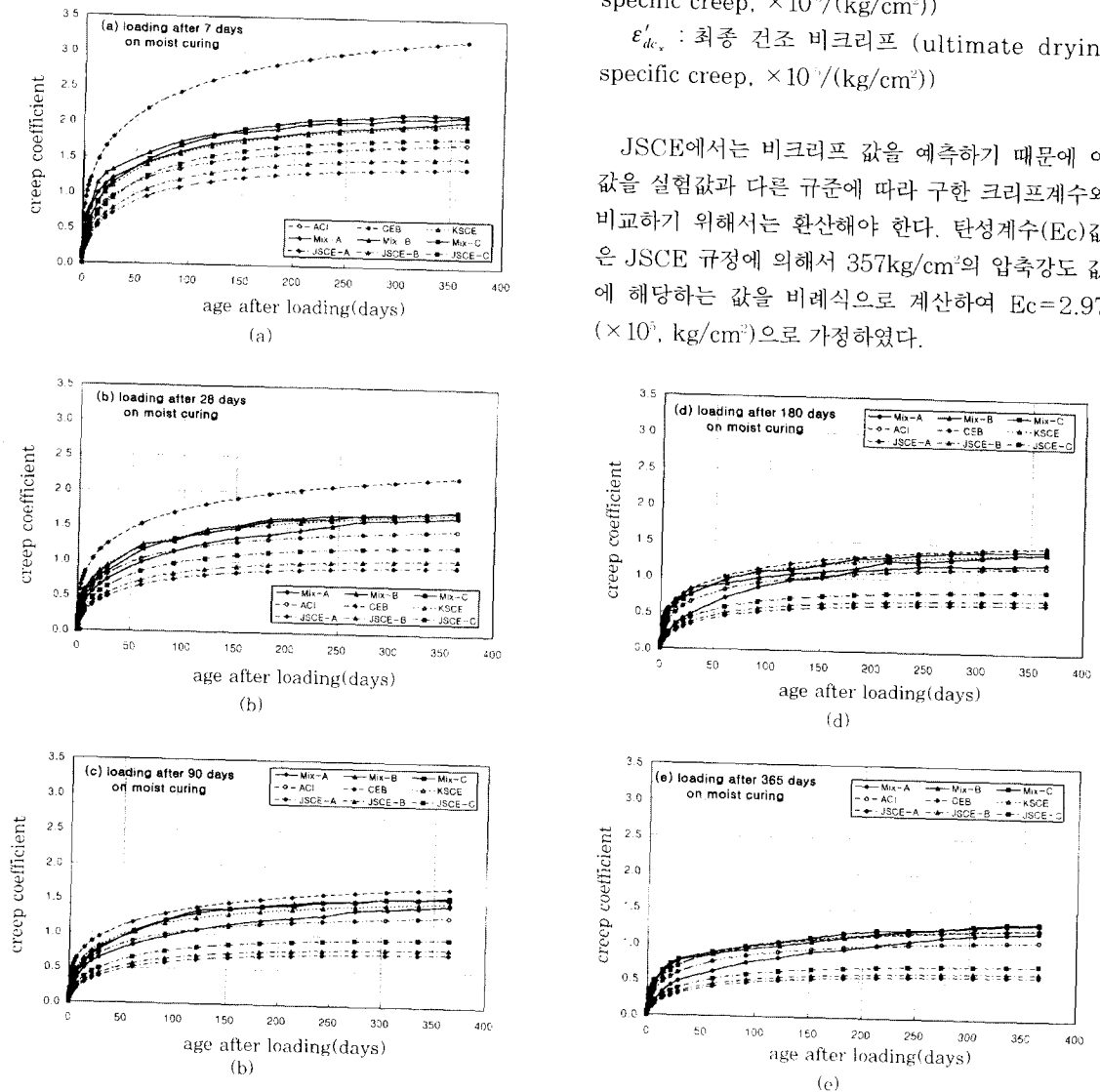


Fig. 6 Comparison on creep coefficients with ages

4.5 각 기준 예측치와 시험치의 비교 고찰

먼저 각 기준의 크리프 예측치를 상호 비교해보면 CEB/FIP 90에 따른 크리프계수 예측치가 가장 높은 값을 보여주며 JSCE-96 예측치가 가장 낮은 값을 보여준다. 한편 KSCE-96에 의한 크리프계수 예측치는 CEB/FIP-90과 ACI 209-92의 대략 중간값 정도를 나타낸다.

ACI, CEB/FIP 및 KSCE의 크리프 예측에 사용되는 구성 파라미터들은 콘크리트의 구성재료의 양적 변동에 크게 영향 받지 않기 때문에 유사한 목표 강도를 갖는 콘크리트에서는 배합별 크리프계수 예측치의 차이가 거의 없는 반면에 물시멘트비, 시멘트량, 단위수량의 양적 변동에 비중을 많이 둔 JSCE-96 예측식은 배합구성에 따라 뚜렷한 크리프계수 예측치의 차이를 볼 수 있다.

배합설계가 완성되고 단면이 결정된 후 주변환경을 가정하여 예측되는 각 기준의 크리프계수 예측치와 시험치를 비교할 때 본 실험에서 사용된 콘크리트는 KSCE-96 예측식에 가장 가까운 결과를 보여준다. 그러나 배합구성 재료와 강도 요소의 차이가 많은 MIX-A와 Mix-B, Mix-C의 상대적 차이는 실험결과에서는 분명하지만 예측식으로는 구분이 안된다.

5. 결론

동일한 설계기준강도를 갖는 세가지의 배합설계 콘크리트에 대하여 재하재령을 달리한 본 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크리프 시험을 수행할 경우, 초기 재하시 발생하는 순간변형률에 대한 검토를 위하여 동일한 배합, 배치의 콘크리트에 대한 탄성계수를 미리 측정하고 이 값을 탄성이론에 의해서 재하시 발생하는 가상의 탄성변형률을 산정하여 실제 크리프 재하시의 순간 변형률과 비교 평가하여야 실험에서 얻어진 크리프 계수의 타당성을 평가할 수 있다.

(2) 외국의 기준에 따른 크리프 예측은 국내에서 생산되는 재료로 구성된 콘크리트에는 상대적으로 높거나 낮은 크리프계수값을 나타내는 경향이 있다.

(3) 96년에 개정된 콘크리트 표준시방서의 크리

프 예측식은 본 실험에서 적용한 실용 고강도(350~400 kg/cm²) 범위에 콘크리트에는 크리프를 예측하는데 비교적 적절하다고 판단된다.

(4) 그러나 구조물이 놓인 환경적 요인과 부재형상이 같다는 가정하에 설계기준 강도가 일치한다면 동일한 크리프 예측을 할 수 밖에 없는 KSCE-96의 크리프 예측식은 콘크리트 배합의 구성차이가 클 경우 아주 상이한 예측을 할 수도 있을 것으로 판단된다.

(5) 따라서 콘크리트 표준시방서에 콘크리트 구성 재료적 요인에 대한 파라미터를 도입하여 위의 결점을 보완할 수 있는 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 크리프 관련 실험은 많은 시간과 노력을 요하기 때문에 콘크리트 구조물을 건설할 때마다 수행하기가 어렵다. 그러므로 콘크리트 공사시에 수행하는 품질관리 수단인 다른 일반적인 콘크리트 특성치를 추가 요소로 도입하는, 보다 정확한 크리프 예측을 할 수 있는 많은 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. Hummel, A., "Vom Einfluss der Zementart des Waasserzement-verb ltnisses und des Belastungsalters auf das kriechen von Beton", Zement-Kalk-Gips, 12, No. 5, 1959, pp. 181-187
2. Neville, A. M., Properties of Concrete (3rd edn), Pitman London and Marshfield, Mass., 1981, p. 11.
3. ASTM C 39, "Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.
4. ASTM C 469, "Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", American Society for Testing and Materials, Vol. 04. 02, 1990.
5. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서, 설계편", 대한토목학회, 1996, pp. 14-17.
6. ASTM C 512, "Test Method for creep of concrete in compression", American Society for testing and Materials, Vol. 04. 02., 1990.
7. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperture Effects in Concrete Structures", ACI 209R-92, ACI Manual of

- Concrete Practice. 1994.
8. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, New York, 1983, pp. 8-16.
9. CEB-FIP Model 규준, Comite Euro-International du Beton. 1990.
10. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書 (平成 8年版), 設計編, 1996, pp. 26-32.
11. 百島祐信 譯, 콘크리트構造物の크립乾燥收縮, 鹿島出版社, 1980

요 약

지금까지 국내에서는 콘크리트의 크리프에 관한 실험적 연구가 많이 진행되지 못하여 해당 구조물의 설계기술 도입국의 규준에 따라 크리프를 예측해왔다. 그러나 예측된 크리프 모델이 국내 콘크리트 재료의 특성에 적합한지에 대한 실험적 검증은 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 프리스트레스 콘크리트 구조물에 적용하는 실용 고강도 콘크리트의 크리프 값을 예측하기 위해 동일한 설계기준강도를 갖는 세 가지 배합에 대하여 재령별로 크리프 시험을 수행하고 이 시험결과를 ACI, CEB/FIP, KSCE, JSCE 규준들의 크리프 예측식과 비교 분석하였다. 시험결과와 이들 규준들에 대한 비교분석에 의하면 CEB/FIP-90 크리프 예측식은 비교적 과대 평가되고 ACI 209-92와 JSCE-96의 경우는 과소 평가되었으나 콘크리트 표준시방서 KSCE-96 크리프 예측식은 비교적 시험결과에 근접하는 것으로 평가되었다.

그러나 구성재료의 양적 변동에 따른 배합별 시험결과와의 차이를 반영할 수 있는 점이 보완되어야 할 것으로 보며 향후 많은 실험결과를 바탕으로 국내에서 생산되는 콘크리트에 대하여 보다 정확히 크리프를 예측할 수 있는 연구가 필요하다.

(접수일자 : 1997. 6. 20)