

## 콘크리트 장기거동 특성예측

송영철, 이대수, 조명석  
한국전력공사

### 요 약

콘크리트의 물리적 특성치인 크리이프, 건조수축, 탄성계수 및 포아슨비등은 배합조건, 부재의 크기, 양생 및 재하조건등 많은 요소들의 영향을 받고있다. 특히 크리이프와 건조수축은 복잡한 시간의존성 특성(time-dependent properties)으로 인해 아직까지도 이 분야에 대한 연구가 계속되고 있다. 따라서 본 연구에서는 불확실성이 많은 콘크리트의 장기거동에 따른 물리적 특성 규명을 위하여 재하재령을 변화(7, 28, 90, 180, 365일) 시키면서 크리이프, 탄성계수, 포아슨비등을 측정, 분석함으로써 콘크리트 장기거동 예측식을 제시하였으며, 이는 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 시간에 따른 응력손실을 고려한 유효 프리스트레스 응력 산정 및 구조물의 건전성 평가에 실질적 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### 1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 설계시 콘크리트의 장기거동 특성치들은 관련 코드 등으로 부터 가정된 특성치를 사용하고 있으나 이러한 가정된 특성치들이 실제적인 콘크리트의 장기거동 특성을 충분히 반영하였다고 볼수는 없으며 구조물의 실제 거동 해석에 사용 하기에는 부족한 점이 많다. 따라서 원자력발전소의 경우에는 건설초기 및 배합이 변경될 때 마다 콘크리트 특성치시험을 시행하고 그 결과가 설계 가정치의 허용폭을 벗어난 경우에는 설계회사(A/E)의 검토를 받고있다.

본 연구의 대상인 월성 2호기는 캐나다의 AECL에 의해 설계된 CANDU 형식의 원자로로서 다음과 같은 설계가정치를 사용 하였다.

- 28일 압축강도 :  $340 \text{ kg/cm}^2$
- 탄 성 계 수 :  $290,000 \text{ kg/cm}^2$
- 포 아 슨 비 : 0.15
- 크 리 이 프 : DIN 4227
- 건 조 수 축 : DIN 4227

위와 같은 콘크리트의 특성치들은 배합조건, 부재의 크기, 양생 및 재하조건등 많은 요소들의 영향을 받고 있다. 특히 크리이프와 건조수축은 그 복잡한 시간의존성 특성(time-dependent properties)으로 인해 아직까지도 이 분야에 대한 연구가 계속되고 있으며, 시험 및 경험에 의한 추정이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 불확실성이 많은 콘크리트의 장기거동에 따른 물리적 특성을 규명하고자 재하재령을 변화(7, 28, 90, 180, 365일)시키면서 크리이프, 탄성계수, 포아슨비등을 측정, 분석하여 콘크리트 장기거동 예측식을 제시함으로써 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 시간에 따른 응력 손실을 고려한 유효 프리스트레스 응력 산정 및 구조물의 건전성 평가에 실질적 도움을 주고자 한다.

## 2. 시험방법

### 2.1 콘크리트 배합비 및 압축강도

월성 2호기 건설에 사용된 콘크리트 28일 설계기준강도인  $340 \text{ kg/cm}^2$  (35 MPa)의 배합표는 표1과 같으며, 각 재령별 (7, 28, 90, 180, 365일)로 3개씩의  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  표준공시체를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

표 1. 콘크리트 배합표

W/C (%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Gravel (kg/m <sup>3</sup> )	WRA (ml)	AE (ml)	Cement type
40	165	412	746	980	1385	50	V

### 2.2 탄성계수, 포아슨비

탄성계수와 포아슨비는 콘크리트에 가해지는 응력산정 및 포스트텐션닝 시스템의 변형 및 손실예측에 매우 중요한 요소로서, 각각 변형률에 대한 응력의 비 및 횡방향 변형률의 종방향 변형률에 대한 비로서 정의된다. 측정시편으로는 각 재령별로 3개씩의  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  표준공시체가 제작되었으며, 세로방향 변형률을 측정하는 Compressometer와 가로방향 변형률을 측정하는 Extensometer를 사용하여 ASTM C469에 의해 세로방향 변형률이 0.00005배의 하중과 극한하중의 40% 하중에 대한 변형률을 측정, 아래식에 의해 탄성계수와 포아슨비를 결정하였다.

$$\text{탄성계수} : E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - 0.00005)$$

$$\text{포아슨비} : \mu = (\epsilon_{h2} - \epsilon_{h1}) / (\epsilon_2 - 0.00005)$$

여기서,  $\sigma_2$  : 극한하중의 40% 하중에 대한 응력 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma_1$  : 세로변형률 0.00005에 대한 응력 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\epsilon_2$  : 응력  $\sigma_2$ 로 생긴 세로방향 변형률

$\epsilon_{h2}$  : 응력  $\sigma_2$ 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

$\epsilon_{h1}$  : 응력  $\sigma_1$ 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

### 2.3 크리이프

크리이프 시험은 시간에 따른 하중과 압축변형률의 관계를 측정하는 것으로서 일반적으로 크리이프는 콘크리트 압축강도의 0 - 40% 까지는 응력에 비례하며, 최초 하중재하조건에 따라 그 특성이 결정된다. 측정은 ASTM C512 규정에 따라 각 재령별로  $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 의 표준공시체 6개씩을 제작 하였으며 시험기간은 1년으로 하였다. 이중 2개의 공시체는 압축강도를 측정하였고, 2개의 공시체는 하중을 재하하여 총 변형률을 구하였으며, 나머지 2개는 하중 이외의 변형요인(건조수축)을 구하기 위하여 이용되었다.

각 공시체는 크리이프 시험이 완료될 때까지 온도  $23.0 \pm 1.7^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \pm 4\%$ 를 유지하였으며, 크리이프 공시체에 재하직전에 압축강도를 측정하였다. 크리이프 재하하중(Sustained Load)은 각 재령에서 측정한 2개 공시체의 압축강도 평균값의 35%로 설정하였으며, 변형 측정은 재하직전, 직후 및 2-6시간 후, 그리고 처음 1 주일 간은 매일, 처음 1개월간은 매주마다, 1년까지는 매달 측정하였다.

총 변형률은 초기탄성변형률과 건조수축 변형률 및 크리이프 변형률의 합이므로 측정된 총 변형률에서 재하직후의 초기탄성변형률과 건조수축 변형률을 제하여 크리이프 변형률을 구하였다. 또한 임의의 재하재령에서 단위 응력에 대한 크리이프 변형률(비크리이프, Specific Creep)을 구하기 위하여 반대수 방안지에 가로축 대수눈금을 시간으로, 비크리이프를 세로축으로 하여 다음과 같은 형식의 크리이프 예측식을 도출하였다.

$$\epsilon = (1/E) + F(K) \ln(t + 1)$$

- 여기에서,  $\epsilon$  : 비크리이프 (단위응력에 대한 총 변형률,  $\times 10^{-6}/(\text{kg}/\text{cm}^2)$ )  
 $E$  : 순간 탄성계수 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $F(K)$  : Creep Rate (반대수지상의 크리이프 곡선의 기울기로 정의)  
 $t$  : 재하재령 (day)  
 $(1/E)$  : 단위응력에 대한 탄성변형률 (재하직전 및 직후의 변형률로부터 구함)

### 3. 시험 결과

#### 3.1 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

측정된 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비의 평균치를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 압축강도는 재령에 따라 증가하여 90일후에 약  $500 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에 도달 하였고, 28일 압축강도는  $359 \text{ kg}/\text{cm}^2$  으로서 설계기준강도인  $340 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에 근접한 값을 나타내었다. 탄성계수 또한 재령에 따라 증가하고 있으나 시간경과에 따라 점차적으로 일정한 값을 나타내는 경향을 보이고 있으며 모든 측정치가 설계기준치인  $290,000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 을 상회하였다. 포아슨비는 상대적으로 시간의 경과에 관계없이 일정한 값을 나타내었으며 90일후의 측정치인 0.21이 설계기준치인 0.15를 크게 초과하는 것으로 보아 설계시 안전측의 값을 적용한 것으로 볼 수있다.

표 2. 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

Curing Ages (days)	7	28	90	180	365
Compressive Strength( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	344	359	497	497	502
Modulus of Elasticity( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	293,882	312,161	319,192	339,581	345,908
Poisson's Ratio	0.22	0.23	0.21	0.21	0.21

#### 3.2 크리이프

각 재령별 크리이프 측정결과인 표3에서 총 변형률은 초기 탄성변형률, 건조수축 및 크리이프 변형률의 합으로 나타내었으며, 이중에서 크리이프 변형률이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한, 크리이프 계수에서 알수 있듯이 크리이프 변형률이 초기 탄성변형률의 2배 이상을 나타내고 있으며, 총 변형률, 건조수축 및 크리이프 변형률은 그림 1과 같이 재하 후 한달까지는 급격히 증가하다가 그 후에는 점차적으로 증가율이 둔화되는 경향을 나타내고 있다.

아울러 임의의 재하재령에서 크리이프 변형률을 구하기 위하여 ASTM C512의 규정에 따라 각 재령별 측정치를 회귀분석한 결과를 표 4 및 그림 2에 나타내었고, 재령의 구분없이 모든 측정치를 사용하여 회귀분석한 결과를 그림 3에 나타내었으며 그 결과는 아래와 같다.

$$\epsilon = 2.174 + 0.746 \ln(t + 1)$$

표 3. 크리이프 측정결과

Curing Ages (days)	Drying Shrinkage ( x 10 <sup>-6</sup> ,A)	Creep Strain ( x 10 <sup>-6</sup> ,B)	Instantaneous Strain ( x 10 <sup>-6</sup> ,C)	Total Strain ( x 10 <sup>-6</sup> ,D=A+B+C)	Creep Coefficient (E = B/C)
7	259	675	269	1203	2.51
28	243	644	295	1182	2.18
90	153	683	317	1153	2.15
180	115	595	284	994	2.10
365	146	596	285	1027	2.09

표 4. 각 재령별 회귀분석 결과

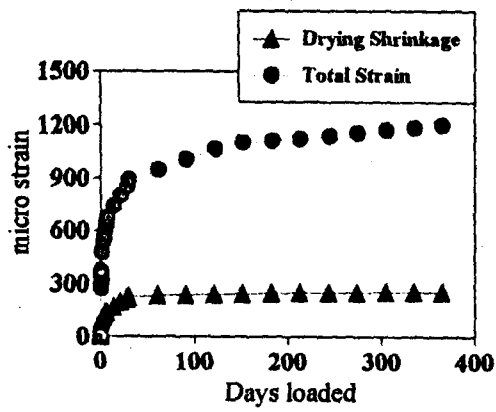
Curing Ages (days)	Sustained Load (kg/cm <sup>2</sup> )	Regression Equation (ε, x 10 <sup>-6</sup> )	Correlation Coefficient
7	96.2	ε = 3.052 + 1.122 ln(t+1)	1.00
28	127.3	ε = 2.415 + 0.779 ln(t+1)	0.99
90	152.8	ε = 2.006 + 0.668 ln(t+1)	0.99
180	164.1	ε = 1.763 + 0.474 ln(t+1)	0.99
365	164.1	ε = 1.634 + 0.687 ln(t+1)	0.99

4. 결 론

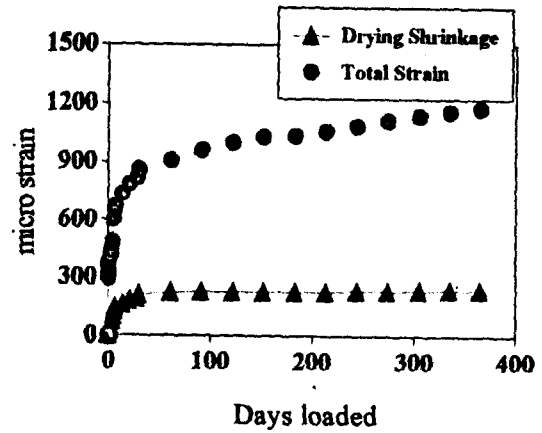
본 연구에서는 콘크리트의 장기거동에 따른 물리적특성 규명을 위하여 각 재령별(7일, 28일, 90일, 180일, 365일)로 크리이프, 탄성계수 및 포아슨비등을 측정, 분석하여 각 재령별 크리이프 예측식을 제시하였다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시간에 따른 응력손실은 콘크리트의 크리이프 및 건조수축, 그리고 텐돈의 이완(relaxation)에 기인하므로 본 특성시험에서 제시된 크리이프 예측식은 유효 프리스트레스 응력 산정 및 프리스트레스 구조물의 건전성 평가에 실질적인 도움을 줄수 있을것으로 판단된다. 아울러, 본 연구의 대상이었던 월성 2호기는 최초 구조물 건전성 시험(ISIT, Initial Structural Integrity Test) 후 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25년차에 수행되는 가동중 검사(ISI, Inservice Inspection)시의 구조건전성 평가를 위해 현장에 사용된 콘크리트와 같은 배합의 Test Beam (18개)과 표준공시체 (50개)를 제작하였으며, 그 시험결과는 본 연구성과와의 지속적인 비교,분석에 이용될 것이다.

5. 참고문헌

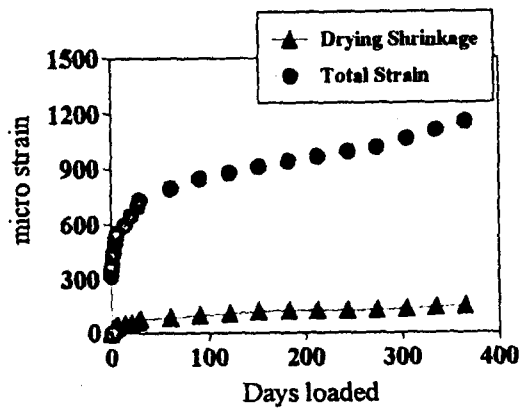
- (1) NEVILLE A.M., DILGER W. H., BROOKS J.J., "Creep of Plain and Structural Concrete", Construction Press, 1983
- (2) "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression", ASTM C512
- (3) "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", ASTM C649
- (4) "Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM C39
- (5) "Design Report for Reactor Building, Stress Analysis Report", 86-21020-0002-00-DR-A, 1991 AECL



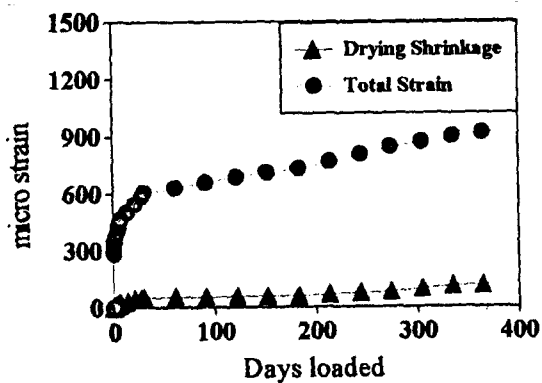
(A) Loaded after 7 days curing



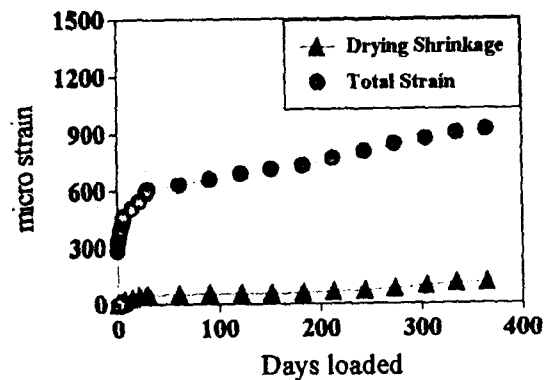
(B) Loaded after 28 days curing



(C) Loaded after 90 days curing



(D) Loaded after 180 days curing



(E) Loaded after 365 days curing

Figure 1. Measured Creep Characteristics

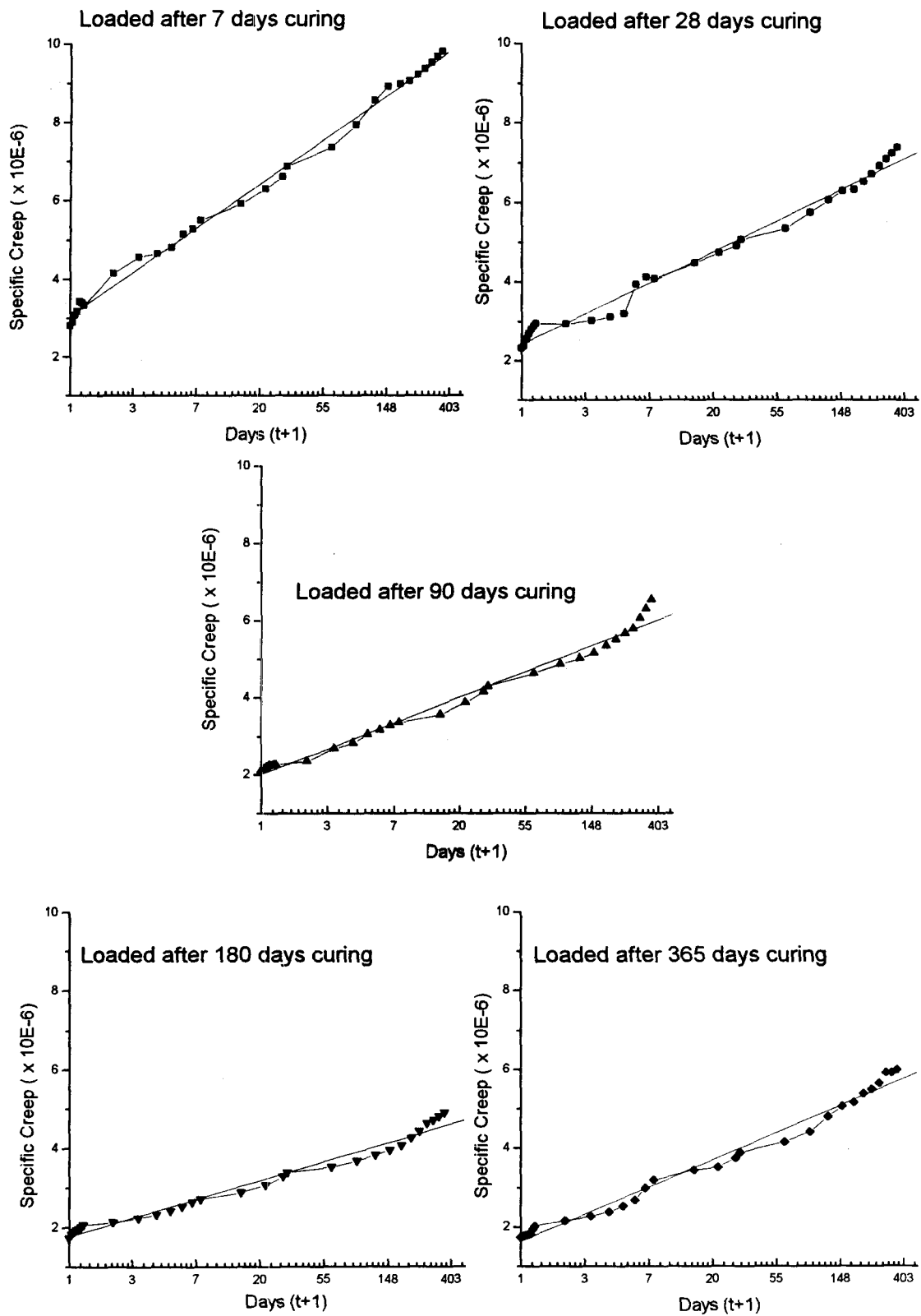


Figure 2. Regression Analysis of Specific Creep Per Curing Age

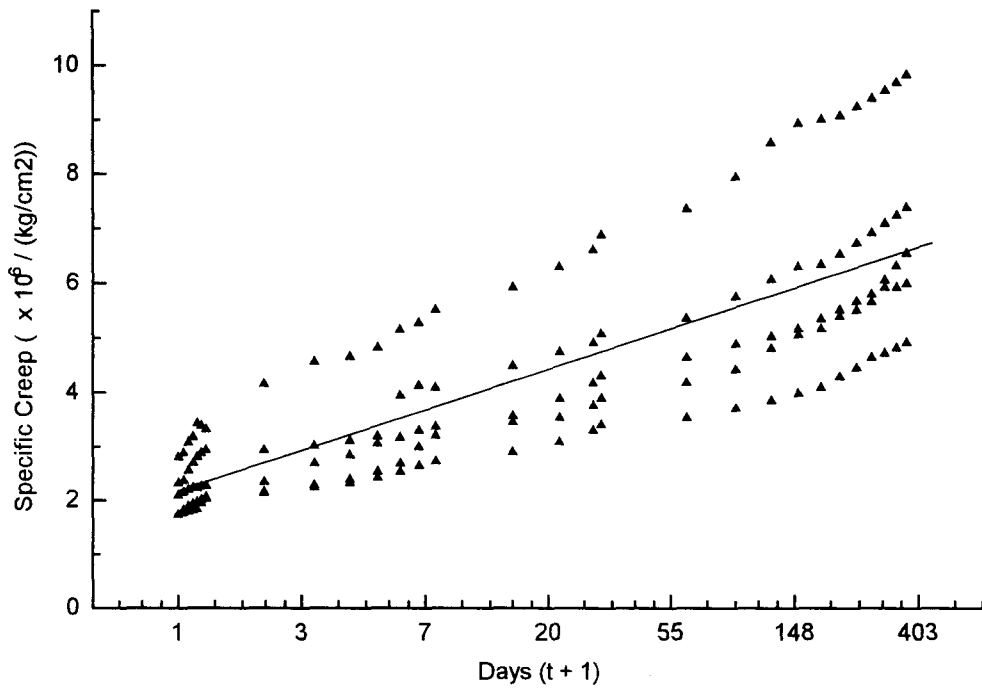


Figure 3. Regression Analysis of All Values Measured