

## 보강용 지오킴포지트의 장기변형거동 해석

### Analysis of Long-Term Deformation Behaviors of Geocomposites for Reinforcement

\*1 전한용 Jeon, Han Yong

\*2 허대영 Heo, Dai Young

#### Abstract

Geocomposite mechanically bonded with woven type geotextile and nonwoven geotextile was used to examine to the long-term creep deformation behaviors by the SIM(Stepped Isothermal Method). The temperature steps were 26°C, 40°C, 54°C, 68°C, 82°C and loading levels were 40%, 50%, 60% of designed strength for stepped isothermal method. Results of creep tests are showing that their strain were lower than 10% during 10,000 hours(GRI GS 10). Also, the effect of weft injection density to the creep deformation behaviors were examined. The weft densities of 0%, 50%, 100% of the original weft density showed the creep strain within 10% and the creep strain was increased with the decrease of weft injection density.

#### 요 지

단계 등온법에 의한 장기 크리프 특성을 분석하기 위하여 직포형 지오텍스타일과 부직포형 지오텍스타일을 기계적으로 결합시킨 지오킴퍼지트를 사용하였다. 단계 등온법의 경우 온도구간은 26°C, 40°C, 54°C, 68°C, 82°C 이었으며, 하중구간은 설계강도의 40%, 50%, 60%이었다. GRI GS 10에 의한 10,000시간 크리프 시험 결과 10%미만의 변형률을 나타내었다. 또한 크리프 변형률에 대한 위사 위입밀도의 영향을 분석하였다. 위사 위입밀도가 0%, 50%, 100%인 경우 모두 크리프 변형률이 10% 미만이었으며, 크리프 변형률은 위사 위입밀도가 감소할수록 증가하였다.

**Key words :** Geocomposites, woven type geotextile and nonwoven geotextile, creep deformation behaviors, SIM(steped isothermal method), creep strain, effect of weft injection density

#### 1. 서 론

보강구조물에서 토목합성재료(Geosynthetics)가 보강용으로 이용 될 경우, 구조물의 설계 시 재료의 인장특성이 기본적으로 고려되어야 하며, 재료의 장기거동의 예측이 반드시 필요하게 된다. 보강용 토목합성재료는 보강도 옹벽, 도로의 둑, 사면 등에

서 가장 널리 이용되며, 이러한 구조물의 이용 시 토목합성재료의 용도에 따른 장기거동예측이 필수적이다<sup>4)</sup>.

일반적으로 보강용 토목합성재료는 영구적인 구조물에 이용되기 때문에 토목합성재료의 장기물성 해석을 위해 dead weight을 이용하여 시간변화에 따른 변형률의 변화를 해석하는 방법인 크리프 시

\*1 정회원, 전남대학교 응용화학공학부 교수 (Member, Faculty of Applied Chemical Eng., Chonnam National Univ.)

\*2 정회원, 부산/거제간 연결도로건설조합 시설서기관 (Member, Vice-Chief, Busan/Geoje Fixed Link Association, 618-270, Busan, Korea)

험이 사용된다.

크리프 시험 방법은 ASTM(American Standard Test Method), GRI(Geosynthetics Reaserch Institute)에 규정되어 있는 방법이 널리 통용되며, 고분자물질의 장기 물성의 예측을 위해 Boltzman이 실험적으로 제시한 시간-온도 중첩원리가 사용되고 있으며, 시간-온도 중첩의 원리를 응용한 단계적 등온법(SIM)이 J. S. Thronton 등에 의해서 새롭게 제시되어 크리프 시험 방법으로 널리 이용되고 있다<sup>5~7)</sup>.

토목합성재료 특히 지오그리드에 대한 응력완화와 크리프 특성의 시험분석이 선행 연구자들에 의해 이미 연구가 되었으며, K. Farrag는 시간-온도 중첩 원리를 통한 지오그리드의 크리프 특성의 해석과 더불어 실시간 시험을 통해서 시간-온도 중첩원리의 효용을 검증한 바 있다<sup>8,9)</sup>.

초기 토목합성재료가 각종 구조물에 사용될 때는 단일 기능의 토목합성재료가 적용되었으나, 기술의 발전과 다양한 기능의 요구가 증가되었고, 이에 따라 여러 가지 기능을 동시에 수행하는 지오컴퍼지트의 생산이 크게 증가하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 직포형 지오텍스타일과 부직포형 지오텍스타일이 서로 복합화된 제품의 크리프 특성 평가가 이루어 졌다. GRI에 제시한 시험법 GS 10을 바탕으로 단계적 등온법(SIM)을 이용하여 본 지오컴퍼지트의 크리프 특성평가가 이루어 졌다. 최대인장강도( $t/m$ )에 대한 각각의 하중단계(40, 50, 60, 70%)를 적용하여 평가가 실시하였으며, 60% 하중에서 위사밀도의 크리프에 대한 영향을 평가하기 위해 최대 위사량의 0, 50, 100% 조건에서 크리프 특성평가를 실시하였다. 부가적으로 재료의 기본적인 공학적 특성 평가(인장, 투수성)를 실시하였다.

## 2. 이론적 배경<sup>1~3)</sup>

### 2.1 토목합성재료의 크리프 거동

재료에 일정하중을 가했을 때 일반적인 고분자 재료의 크리프 거동은 시간 축에 대해 일반적으로 S

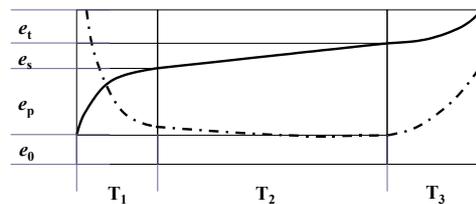
자형곡선을 나타내며 이들은 지수함수, 폭, 대수 등을 사용하는 것이 통상적이지만, 실험이 행하여진 범위 내에서 성립하는 것으로 범위를 초과할 경우에는 그 적합성이 떨어진다.

일반적인 크리프 거동은 모두 4구간으로 분류되는데, 하중이 가해짐과 동시에 나타나는 순간 완전탄성변형으로써의  $e_0$ (initial creep deformation), 초기의 지수함수적인 증가 경향을 나타내는  $e_p$ (primary creep deformation), 직선적인 경향을 나타내며 선형적 증가경향을 나타내는  $e_s$ (secondary creep deformation) 그리고, 파괴거동의 경향이 관찰되어 지며 장시간에 있어서 파괴현상이 나타나는  $e_t$ (tertiary creep deformation)로 구성된다.

Figure 1은 일반적인 크리프 변형의 경향을 나타낸 것으로 실선으로 도시된 부분은 시간에 따른 크리프 변형을 나타낸 것이고 점선으로 도시된 부분은 크리프 strain rate의 시간에 따른 변화를 표시한 것이다.

크리프 거동을 해석함에 있어서는 크리프 파괴가 나타나는 구간의 전단계인 일정 하중 하에서 선형점탄성 거동이 나타나는 구간인  $e_s$ 까지를 논하는 것이 간편하다. 또한, 크리프 실험을 통해서 파괴현상이 나타나는  $e_t$ 가 나타날 경우에는 설계 시 신중한 고려가 필요하다.

따라서, 점탄성체로 이루어진 지오컴퍼지트의 경우 부가한 일정 응력( $\alpha$ )으로 인해 생기는 시간  $t$ 에 따른 변형률( $e(t)$ )은 식 (1)과 같이 표현되어지며, 전체 변형률은 파괴가 발생하는 부분인  $e_t$ 를 제외한  $e_0$ ,  $e_p$  및  $e_s$ 의 3성분으로 식 (2)와 같이 표현된다.



$e_0$  = initial deformation       $e_p$  = primary creep deformation  
 $e_s$  = secondary creep deformation       $e_t$  = tertiary creep deformation

Figure 1. Typical creep strain and strain rate behavior with time

$$e_{(t)} = \sigma_o J(t) \quad (1)$$

$$e(t) = e_o + e_p + e_s \quad (2)$$

여기서,  $J(t)$ 를 크리프 콤플라이언스(creep compliance)라고 한다.

한편,  $e_o$ 는  $\alpha$ 를 가해줌과 동시에 생기는 순간적인 완전탄성변형으로서

$$e_o = \sigma_o J_o \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.

$e_p$ 는 지연탄성변형(delayed elastic deformation) 또는 1차 크리프 변형이라고도 불려지는 것으로서 응력을 부가한 순간 즉,  $t=0$ 에서는 0이며, 시간이 경과함에 따라 점차 증가되거나 어느 한도에서 평형값에 도달하는 구간이다. 일반적인 폴리에스터 소재의 지오킴포지트의 경우에 나타나는 1차 크리프 변형,  $e_p$ 는 전체적인 크리프 변형률의 값에 지배적인 경향을 보인다.  $e_p$ 는

$$e_p = \sigma_o J_\psi(t) \quad (4)$$

로 표시된다. 여기에서  $\psi(t)$ 는 지연콤플라이언스라 하며  $J$ 는 평형콤플라이언스이다.  $e_s$ 는 Newton의 점성법칙을 만족시키는 점성액체의 변형과 일치하는 Newton의 점성유동에 해당되며, 시간에 비례하여 증가되는 성분으로서

$$e_s = \sigma_o t / \eta \quad (5)$$

로 표시된다. 이는 비회복성 변형으로서 2차 크리프 또는 영구변형이라 한다.

## 2.2 SIM(steped isothermal method)에 의한 토목합성재료의 크리프 거동해석

일반적으로 토목합성재료 특히 지오그리드의 경우의 시간-온도중첩원리에서는 각각의 온도에서 1,000시간의 크리프 실험을 실시한 후 이동인자를 이용하여 하나의 마스터커브를 획득한 후 10,000

시간에서의 크리프 변형률을 예측하게 된다. 그러나 시간-온도중첩원리의 단점중의 하나는 실험시간이 3,000시간으로 비교적 길다는 것이며, 한 가지 sample의 완전한 크리프 특성평가(최대하중의 40, 50, 60%)를 위해서는 9,000시간이 걸리게 된다. 또 다른 단점으로는 시간-온도중첩원리에서는 수평으로의 shift만이 가능한데 실시간 실험 후 각각의 시료에서 발생하는 오차로 인하여 shift 하여도 중첩되지 않는 경우가 발생할 수 있게 된다.

이러한 경우에는 실험을 다시 실시하여야 하는 시간의 경제성이 상당히 떨어지게 되는 단점이 있다. 이러한 시간-온도중첩원리의 단점을 고려하여 새롭게 제시된 방법이 바로 SIM(steped isothermal method)법이다.

SIM법은 하나의 시료에 단계적으로 온도를 증가시켜 합성곡선을 만들어 내므로 실험의 효율성이 나타나고 시간과 비용의 절감 효과를 가져올 수 있게 한다.

SIM법은 최초로 TRI/Environmental Inc.에서 수행되었고 그에 관한 proceeding이 98 International Geosynthetics Society에 보고된 바 있다. 그후 온도 구간과 시험시간의 몇 가지 수정 작업을 거친 후 2000년 7월에 GRI(Geosynthetics Research Institute) Test Method GS 10으로 정식으로 채택되었다.

GS 10의 경우 폴리에스터에 대하여 reference 온도가 26°C이며, 온도 구배가 14°C, 각각의 온도 구간의 시험시간이 10,000초로 규정되어지고 있다. 또한 각각의 온도구간에 대한 이동인자를 제시하고 있다.

Table 1에 GRI GS 10에서 폴리에스터 고분자의 경우에 제시한 이동인자값을, Figure 2에 SIM 법의 개괄적인 방법을 각각 나타내었다.

Table 1. Values of shift factor with time(SIM)

Temperature(°C)	Shift factor(log a <sub>T</sub> )
26	0
40	-1.22
54	-2.48
68	-3.70
82	-4.95

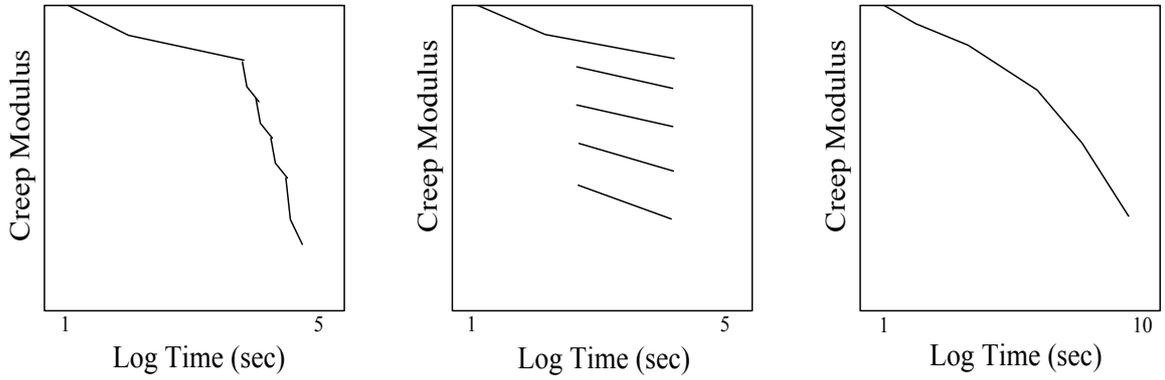


Figure 2. Schematic diagram of extrapolation process at SIM.

(1) Creep modulus (2) Creep modulus at each temperature (3) Master curve

### 3. 실험

#### 3.1 시료

본 연구에 이용된 시료는 직포형 지오텍스타일과 부직포형 지오텍스타일이 서로 복합화된 지오킴퍼지트이다. 직포형 지오텍스타일의 원재료는 폴리에스터이며, 부직포형 지오텍스타일은 폴리프로필렌이다. 지오킴퍼지트의 복합화는 물리적인 방법인 knitting을 통해서 이루어졌으며, 직포형 지오텍스타일의 경우에는 경사와 위사 모두 PET 고강력사가 사용되었으며, 보강의 용도로 이용이 가능할 것으로 고려된다. 또한, 부직포형 지오텍스타일의 경우에는 AOS와 투수성이 우수하여 필터와 배수의 용도로 이용이 가능할 것으로 판단된다.

최종 제품인 지오킴퍼지트는 강력에 비하여 중량이 적어서 경제적으로 상당한 장점을 가지는 제품이다. Table 2에 지오킴퍼지트 중 직포형 지오텍스타일의 외관규격을, Table 3에 지오킴퍼지트의 중량과 두께를 각각 나타내었다.

Figure 3에 본 연구에 사용된 지오킴퍼지트 제품 사진을 나타내었다.

#### 3.2 지오킴퍼지트의 공학적 특성 실험

##### 3.2.1 인장 특성 실험

토목합성재료의 각종 구조물의 적용의 설계시 반

Table 2. Physical properties of woventype geotextile

Apparent size(mm)	A×B	C×D
	14.0×13.5	12.0×10.5
Number of ribs(/m)	warp	weft
	72±1	77±1

Table 3. Descriptive properties of geocomposite

Area Weight (g/m <sup>2</sup> )	650 ± 65
Thickness (mm)	3.0

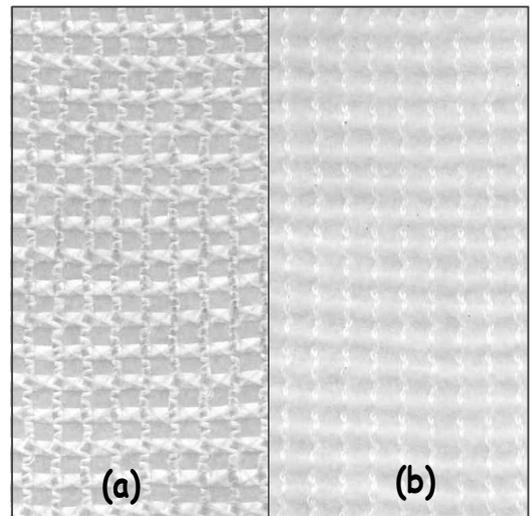


Figure 3. Shapes of geocomposite  
(a) Front (b) Back

드시 필요한 인장강력의 산출을 위하여 본 연구에 이용된 지오킴퍼지트에 대하여 광폭인장강도시험을 ASTM D 4595(Test method for tensile properties of

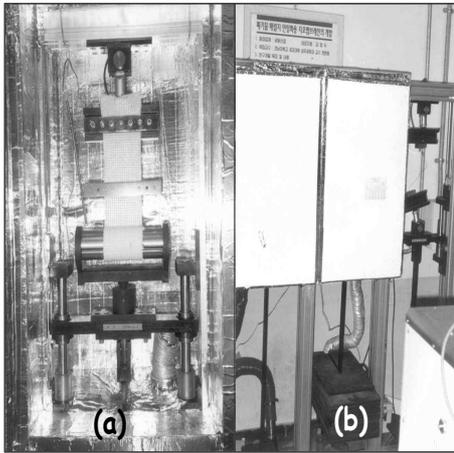


Figure 4. Photograph of creep test apparatus  
 (a) Clamping system  
 (b) Loading system and isothermal chamber

geotextile by the wide-width strip method)에 의거하여 실시하였다.

### 3.2.2 크리프 특성 실험

본 연구에서는 최근 GRI에서 제시한 크리프 시험 방법인 GS 10에 의거하여 실험을 실시하였다. GS 10시험법에서는 SIM에 의한 크리프 시험법에 대해 제시하고 있으며, PET(폴리에스터)의 경우에는 온도구배가 14°C, HEPE의 경우에는 7°C를 제시하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 지오킴퍼지트의 크리프 특성에 영향을 미치는 직포형 지오텍스타일이 PET로 제조되었으므로, 온도구배가 14°C, 각각의 온도에서 10,000sec 동안 실험을 실시하였다. 하중 조건은 기본적으로 최대인장강도의 40, 50, 60%를 채택하였으며, 위사밀도가 지오킴퍼지트의 크리프 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 60% 하중조건에서 총 위사의 0, 50, 100%의 밀도조건에서 크리프 실험을 실시하였다.

Figure 4에 크리프 시험장치를 나타내었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 인장특성

Table 4에 지오킴퍼지트의 기계적 특성을 나타내

Table 4. Mechanical properties of geocomposite

Mechanical properties		
Tensile strength (kN/m)	Warp	62
	Weft	51
Elongation (%)	Warp	19
	Weft	19

었다. 보강용으로 사용되는 직포형 지오텍스타일의 강도가 knitting과 위사의 삽입으로 인하여 강도와 신율이 다소 증가하였을 것으로 고려되어진다. 또한, 직포형 지오텍스타일의 우수한 인장특성으로 인하여 부직포형 지오텍스타일을 보호하는 기능을 수행하여 분리/보강 기능이외에 보호기능이 유발될 것으로 고려되어진다.

### 4.2 크리프 특성

GRI GS 10의 시험방법으로 크리프 실험을 실시한 결과는 Figure 5와 같이 plotting되어진다.

각각의 온도조건에서의 데이터값을 실시간 값으로 다시 plotting 되며(Figure 6), 마지막으로 각각의 온도조건에서 이동인자값을 적용시켜 최종적으로 장기거동을 예측하는 그래프를 얻게 된다(Figure 7).

일반적으로 크리프에 대한 안전인자는 최소 10,000시간에서의 시험으로 결정되어지게 된다. Figure 7에서 알 수 있듯이 본 연구에 이용된 지오킴퍼지트는 10,000이상에서 크리프 변형률이 재하하중이 최대인장강도의 40, 50, 60, 70%인 모든 경우에서 10%미만의 아주 우수한 크리프 특성을 나타내고 있다.

또한, 위사의 밀도에 대한 크리프 영향을 나타낸 Figure 8에서는 위사의 밀도가 감소하여도 변형률이 10% 미만으로 우수한 특성을 나타내고 있으나, 위사의 밀도가 감소함에 따라 변형률이 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

이로부터, 경사에 위사를 결합함으로써 경사에 부가되는 하중을 위사 방향으로 효율적으로 결과적으로 크리프 특성을 향상시킨 것으로 고려되어진다.

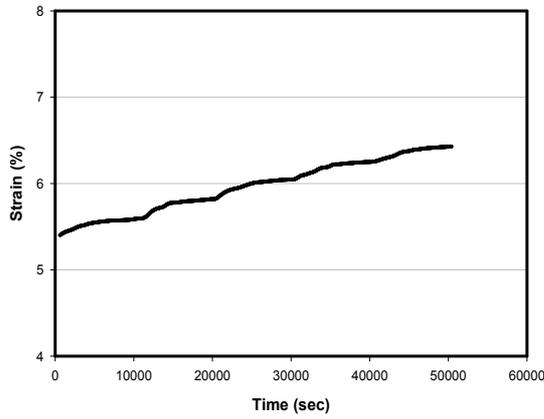


Figure 5. Creep strain vs. linear time for geocomposite ( $T_{design}$  60% load)

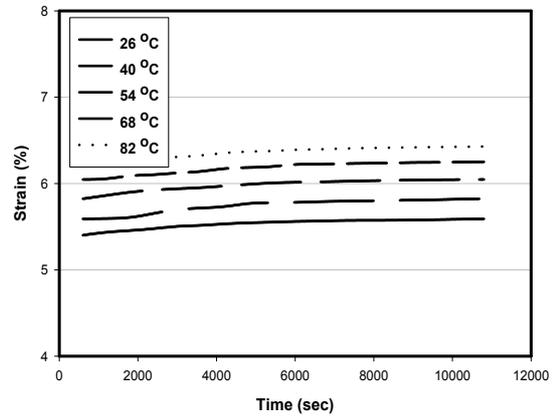


Figure 6. Creep strain from Figure 7 rescaled for new starting time

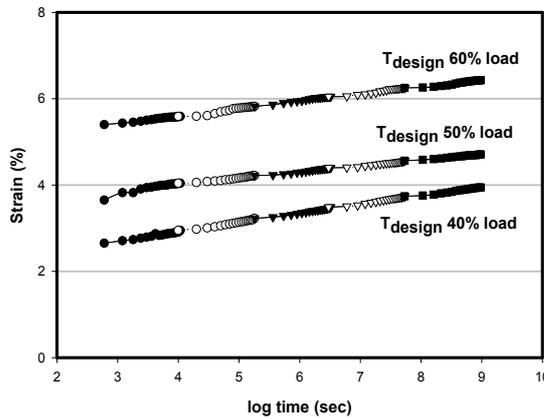


Figure 7. Creep strain master curves as a function of load level

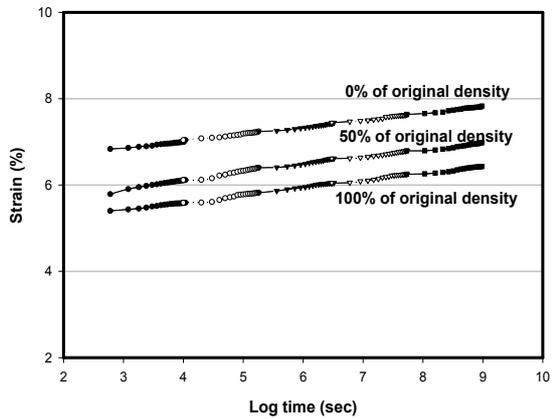


Figure 8. Creep strain master curves as a function of weft density

## 5. 결론

직포형 지오텍스타일과 부직포형 지오텍스타일이 복합화된 지오펜퍼지트의 공학적 특성과 크리프 특성에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 크리프 변형률이 10,000시간 이후에 10% 미만을 보이는 것을 통해서, 지오펜퍼지트의 매우 우수한 크리프 특성을 예측할 수 있었다.
2. 위사의 밀도가 감소할수록 크리프 변형률이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이로부터 경사와 위사를 결합함으로써 더욱 우수한 크리프 특성을 나타낼 것으로 고려되어진다.

이로부터 인장특성이 우수한 직포형 지오텍스타일과 수리적 특성이 우수한 부직포형 지오텍스타일을 복합화 함으로써, 분리와 보강기능을 동시에 수행하는 우수한 기대효과를 발휘할 것으로 고려되어진다. 또한, 부피가 상대적으로 작아 수송이나 시공 시 비용을 상당히 감소하는 경제적 이익이 유발될 것으로 예측된다.

## 참 고 문 헌

1. ASTM, "D 4751 Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile", ASTM Standard on geosynthetics, West Conshohocken.
2. ASTM, "D 4595 Test method for tensile properties of geotextile by the wide-width strip method", ASTM

- Standard on geosynthetics, West Conshohocken.
3. ASTM, "D 5262 Standard test method for evaluating the unconfined tension creep behavior of geosynthetics", ASTM Standard on geosynthetics, West Conshohocken
  4. F. Navarrete(2001), "Creep of geogrid reinforcement for retaining wall backfills", Geosynthetics Conference 2001, pp.567~578.
  5. J. S. Thronton(1997), "Approaches for the prediction of long term viscoelastic properties of geosynthetics from short term tests", Fifth International Conference on Geosynthetics, pp.277~291.
  6. J. S. Thronton(1998), "Conventional and stepped isotheraml methods for characterizing long term creep strength of polyester geogrids", Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.691~698.
  7. J. S. Thronton(1998), "The Stepped isothermal method for time-temperature superposition and its application to creep data on polyester yarn", Sixth International Conference on Geosynthetics, pp.699~706.
  8. Khalid Farrag(1997), "Prediction of long-term strains of geosynthetics from accelerated creep tests", Fifth International Conference on Geosynthetics, pp.267~276.
  9. Thomas. L. Baker(2001), "Comparision of results using the stepped isothermal and conventional creep tests on a woven polypropylene geotextile", Geosynthetics Conference 2001, pp.729~740.