

지오그리드의 장기설계인장강도에 미치는 시공시 손상 및 크리프 변형 복합효과에 대한 실험적 평가

Experimental Investigations of Combination Effects of Installation Damage and Creep Deformation on Long-Term Design Strength of Geogrids

*1 조삼덕 Cho, Sam-Deok

*2 이광우 Lee, Kwang-Wu

*2 오세용 Oh, Se-Yong

*4 이도희 Lee, Do-Hee

Abstract

The factors affecting the long-term design strength of geogrid can be classified into factors on creep deformation, installation damage, temperature, chemical degradation and biological degradation. Especially, creep deformation and installation damage are considered as main factors to determine the long-term design strength of geogrid. Current practice in the design of a reinforced soil structures is to calculate the long-term design strength of a geosynthetic reinforcement damaged during installation by multiplying the two partial safety factors, RF_{ID} and RF_{CR} . This method assumes that there is no evaluation of synergy effect between installation damage and creep deformation of geogrids. This paper describes the results of a series of experimental study, which are carried out to assess the combined effect of the installation damage and the creep deformation for the long-term design strength of geogrid reinforcements. A series of field tests was carried out to assess installation damage of various geogrids with respect to different fill materials, and then creep tests are conducted to evaluate the creep deformation of both undamaged and damaged geogrids. The results indicated that the tensile strength reduction factors, RF, considering the combined effect between the installation damage and the creep deformation is less than that calculated by the current design method.

요 지

지오그리드의 장기설계 인장강도는 크리프 변형, 시공시 손상 및 환경적 요인(온도, 화학적 손상, 생물학적 손상)에 영향을 받는다. 특히, 크리프 변형 및 시공시 손상이 가장 크게 영향을 미치는 요인으로서 반영된다. 보강토구조물에 대한 대부분의 현행 설계법에서는, 이들 영향요인을 각각 산정하여 이를 장기인장강도 산정에 반영하고 있다. 즉, 이러한 방법에서는 지오그리드의 시공 중 손상과 크리프 변형의 복합효과가 장기 설계인장강도 산정에 어떤 영향을 미치는가에 대한 검토가 되어 있지 않다. 본 연구에서는 지오그리드의 시공 중 손상과 크리프 변형의 복합효과가 지오그리드의 장기인장강도 산정에 영향을 미치는 영향을 평가하기 위한 일련의 실험적 연구를 수행하였다. 다양한 지오그리드를 대상으로 성토흙 종류에 따른 현장 내시공성시험을 수행하였고, 지오그리드 원시료와 시공중 손상을 입은 시료를 대상으로한 크리프시험을 수행하였다. 연구결과 두 영향인자의 복합효과를 고려하여 산정한 지오그리드의 인장강도 감소계수가 현행 설계법에 의해 산정된 감소계수보다 작은 것으로 나타났다.

Keywords : Geogrids, Long-term design strength of geogrid, Installation damage, Creep deformation

*1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (Research Fellow, Geotechnical Eng. Research Dept., KICT)

*2 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Researcher, Geotechnical Eng. Research Dept., KICT)

*3 대우건설 수원-인천 북선전철 6공구 현장 소장 (Director, DAEWOO E&C)

1. 서론

1979년 영국에서 개발된 지오그리드는 우수한 강도특성과 현장 적용성으로 인해 연약지반 보강, 성토 사면 보강, 보강토 옹벽 등 다양한 토목현장에서 보강재로서 폭넓게 활용되고 있다. 그러나 이러한 용도로 영구 토목구조물에 적용된 지오그리드에 대한 현장 적용기간이 그다지 길지 않기 때문에 장기간 현장에 적용된 지오그리드 보강재의 내구성에 관해서는 아직까지 불확실성이 존재하고 있다. 시간경과에 따른 지오그리드 보강재의 공학적 특성(특히 인장강도) 저하정도는 시공시 손상(installation damage), 크리프(creep), 온도, 화학용액, 미생물 등과 같은 요인에 의해 영향을 받으며, 특히 시공시 손상과 크리프 변형에 의한 영향이 가장 크다. 따라서 지오그리드의 시공시 손상 및 크리프 특성을 평가하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 수행되고 있다(Austin, 1997; Cazzuffi et al., 2001; Watn and Chew, 2002; Jeon et al., 2002; Kaliakin & Dechasakulsom, 2002; Sawicki, 1999).

현행 보강토구조물 설계법에서는 지오그리드 보강재의 장기설계인장강도 산정시 지오그리드의 장기간 안정에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들에 대한 인장강도 감소계수를 안전율 개념으로 반영하고 있다. 그러나 이들 인장강도 감소계수를 영향인자별로 각각 산정하고 있는 실정이어서 각 영향인자 상호간의 복합효과를 반영하지 못하고 있으며, 이는 비경제적인 설계의 원인이 되고 있다. 따라서 최근 토목섬유 보강재의 장기설계인장강도에 크게 영향을 미치는 크리프와 시공시 손상의 복합효과를 규명하기 위한 실험적 연구가 시도되고 있다. Pinho-Lopes et al.(2002)와 Greenwood(2002)는 지오그리드 등의 토목섬유 보강재에 대한 일련의 실험적 연구를 통해, 시공성 강도감소계수(RF_{ID})와 크리프 강도감소계수(RF_{CR})의 곱으로 산정되는 현행 설계법 상의 장기설계인장강도 감소계수는 이들 두 영향인자의 복합효과를 고려한 인장강도 감소계수를 다소 과대평가함을 확인하였다. 그러나 이러한 복합효과는 보강재의 종류 및 시공조건에 따라 그 영향 정도가 달라질 수

있다.

본 연구는 크게 두 부분으로 나누어 수행되었다. 우선, 성토재 종류에 따른 지오그리드 내시공성을 평가하기 위하여, 현재 국내에서 보강토구조물 축조시 사용되고 있는 다양한 종류의 지오그리드를 대상으로 국내의 보강토구조물 시공조건을 고려한 일련의 현장 내시공성시험을 수행하고, 다음으로 내시공성 시험에 사용된 일부 지오그리드에 대해서는 일련의 크리프시험을 수행하여 지오그리드의 장기설계인장강도에 미치는 시공시 손상과 크리프의 복합효과를 평가하였다.

2. 보강재의 장기설계인장강도 산정법

일반적으로 토목섬유 보강재의 인장특성은 크리프(creep), 시공시 손상(installation damage), 온도, 화학용액, 미생물 등과 같은 환경적인 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 보강재의 장기설계인장강도 산정을 위해서는 보강재의 허용인장변형과 크리프 특성, 시공시 손상 등 가능한 모든 강도저하요인을 고려하여야 한다. 실제 대부분의 설계법(BS8006, 1995; FHWA, 1996 등)에서는 보강재의 장기간 안정에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들을 반영하고 있다.

보강재의 장기설계인장강도 산정방법으로는 일반적으로 보강재의 장기간 안정에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들에 대한 보강재의 인장강도 감소계수를 적용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 토목섬유 보강재의 장기설계인장강도, T_d는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(FHWA, 1996).

$$T_d = \frac{T_{ult}}{RF \cdot FS_{uc}} \quad (1)$$

여기서,

T_{ult} = 보강재의 최대(극한) 인장강도

RF = 보강재의 장기간 강도손실을 고려한 총 인장강도 감소계수(RF=RF_{CR}×RF_{ID}×RF_D)

RF_{CR} = 크리프 감소계수. 실내 크리프시험에서 얻은 보강재의 크리프 한계인장강도에 대한 최대인장강도의 비

RF_{ID} = 시공성 감소계수. 시공중 보강재의 손상에 따른 인장강도 손실정도를 나타냄.

RF_D = 내구성 감소계수. 화학약품, 미생물, 온도 등에 의한 보강재의 인장강도 손실정도를 나타냄.

FS_{UC} = 구조물의 형상과 뒤채움재의 특성, 외부 작용하중 등의 불확실성 및 구조물의 중요도 등을 고려한 안전율로 설계자의 판단에 의해 1.0~1.5의 범위에서 사용하는 것이 추천되지만, 특별한 경우를 제외하고는 FS_{UC}=1.0을 사용.

한편, 미국 GRI(1995)방법에 의하면, 식 (1)에 나타난 보강재의 인장강도 감소계수 RF는 식 (2)에 나타낸 바와 같이 보강재의 최대 인장강도에 대한 각 영향인자를 고려한 인장강도의 비로부터 산정할 수 있다.

$$RF_{ID} = \frac{T_{ult}}{T_{ID}} \quad (2-a)$$

$$RF_{CR} = \frac{T_{ult}}{T_{10}} \quad (2-b)$$

$$RF_{CD} = \frac{T_{ult}}{T_{CD}} \quad (2-c)$$

$$RF_{BD} = \frac{T_{ult}}{T_{BD}} \quad (2-d)$$

여기서,

T_{ult} = 보강재의 최대(극한) 인장강도(t/m)

T_{ID} = 다짐시공 등에 의해 손상된 보강재의 인장강도(t/m)

T₁₀ = 시간-크리프 변형률 곡선에서 10% 이하의 크리프 변형률에 접근하게 되는 최대 재하하중을 고려한 인장강도(t/m)

T_{CD} = 화학약품에 의해 손상된 보강재의 인장강도(t/m)

T_{BD} = 미생물에 의해 손상된 보강재의 인장강도(t/m)

3. 성토재 종류에 따른 지오그리드의 내시공성 평가를 위한 현장실험

국내의 경우 식 (1) 및 식 (2)에서 반영하고 있는 보강재의 장기안정과 관련된 여러 영향인자들에 대한 적절한 평가기준이 마련되어 있지 않을 뿐 아니라 보강재의 재료성질과 형태, 보강재가 포설되어 있는 주위환경 및 외부하중 등에 따라 달라질 수 있는 제반 인장강도 감소계수들이 적절히 제시되지 못한 실정인바, 보강토구조물의 합리적인(즉, 안정적이면서도 경제적인) 설계에 많은 어려움이 따르고 있다. 특히, 일반적으로 산흙(화강풍화토)을 뒤채움재로 많이 사용하고 있는 국내 현장 시공여건을 고려할 때 지오그리드의 시공중 강도감소의 적절한 평가 및 반영이 시급히 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 다양한 지오그리드를 대상으로 최대입경 40mm, 60mm 및 80mm의 화강풍화토와 25mm 직경의 쇠석을 성토흙으로 사용한 경우에 대한 일련의 현장 내시공성시험을 통해, 보강토구조물의 설계시 필요한 보강재의 시공중 강도감소에 대한 화강풍화토 성토흙의 입도별 안전율을 제시하여 설계에 반영할 수 있도록 하고자 한다.

3.1 내시공성 평가 시험법

토목섬유 보강재의 내시공성은 보강재, 뒤채움흙 등 사용재료의 종류와 시공방법에 영향을 받는다. 보강토 구조물에 대한 해외의 여러 지침에서는 토목섬유 보강재의 내시공성을 통상 일련의 실내 및 현장 실험을 통해 평가하도록 하고 있다. 한 예로 FHWA (1996)에 의하면, 시공성 감소계수는 ASTM D 5818 (1995)에서 규정하고 있는 현장실험을 통해 결정하도록 하고 있으며, 토목섬유 보강재의 내시공성 감소계수는 통상 1.1~2.0의 범위를 가지는 것으로 나타나 있다. 그러나 국내에서는 토목섬유의 내시공성 평가와 관련하여 아직 명확하게 규정된 바가 없다.

내시공성시험 방법은 통상 그림 1에 나타낸 바와

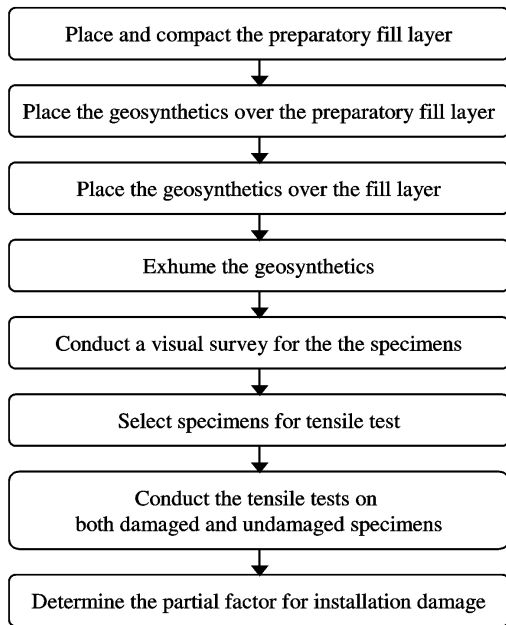
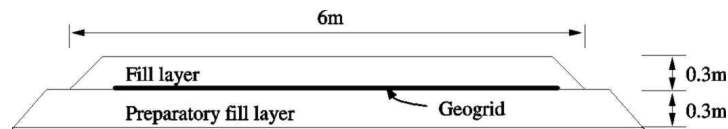


그림 1. 일반적인 내시공성 시험 절차

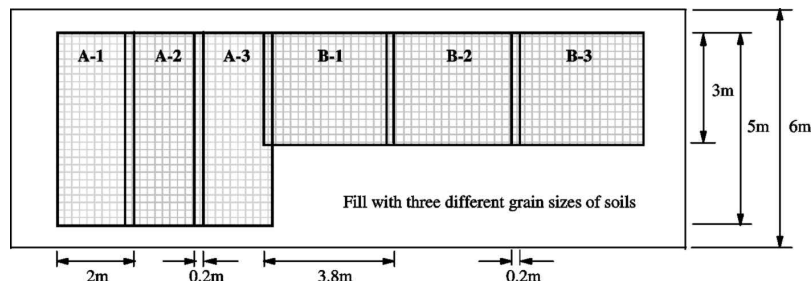
같은 순서로 수행하게 된다. 일반적인 시험방법은 기초노상을 실제 구조물 축조시와 동일하게 처리한 후 규정 면적의 지오그리드 시료를 포설하고, 그 상부에 성토재를 포설한 후 실제 구조물 축조시와 동일하게 다짐한다. 다짐 완료후에는 다짐된 상부 흙을 비기계적인 방법으로 지오그리드에 손상이 가지 않도록 제거하여 지오그리드 시료를 추출하고, 추출된 시료에 대한 인장 시험을 수행하여 원시료의 인장강도와 비교한다.

3.2 현장 내시공성시험 과정

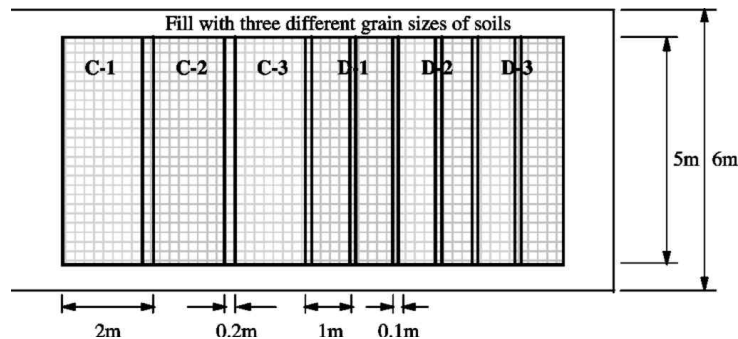
국내의 경우 지오그리드의 내시공성을 평가하기 위한 시험법이 아직 규정되어 있지 않은 관계로, 본 연구에서는 내시공성시험에 대한 해외의 여러 시험법들을 비교·검토하여 다음과 같이 현장 내시공성 시험을 수행하였다. 현장 내시공성시험 단면은 그림 2와



(a) 내시공성 시험 현장 종단면도



(b) 지오그리드의 배치 : I-현장 및 II-현장



(c) 지오그리드의 배치 : III-현장

그림 2. 내시공성시험 현장 단면도

같다. 본 연구에서는 총 12종류의 지오그리드를 대상으로 3개소의 현장에서 내시공성시험을 수행하였다. 실험시 흙종류와 입도분포에 따른 영향을 고찰하기 위해 과주시(Test site I, Test site II) 및 용인시(Test site III) 인근의 화강풍화토를 대상으로 자체 제작한 대형체가름장치(1.4m×2m, 사진 1 참조)를 이용하여 최대입경을 세 종류(40mm, 60mm, 80mm)로 조정하면서 체가름 작업을 수행한 후, 다짐작업시에 성토재로 사용하였으며, 일부 지오그리드시료에 대해서는 화강풍화토 이외에 직경 25mm의 쇠석을 성토재로 사용한 경우에 대한 실험도 추가로 수행하였다.

본 실험에서는 먼저 비교적 견고한 원지반을 정지한 후, 백호우로 성토재를 대략 40cm 두께로 깔고 정지한 다음, 국내에서 보강토구조물 시공시 다짐장비로 주로 사용되고 있는 10ton 진동로울러로 다짐을 실시하였다. 그리고 지오그리드를 다짐방향과 직각이 되도록 포설하고 그 위에 성토재를 40cm 정도 두께로 포설한 후 진동로울러를 사용하여 무진동으로 1회 및 진동으로 4회 다짐을 실시하였다. 하부성토층과 성토층의 다짐작업 완료후 성토높이는 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 대략 30cm가 되도록 하였고, 현장 들밀도시험을 수행하여 성토층의 상대다짐도(95% 이상)를 확인하였다. 다짐 후, 지오그리드가 손상되지 않도록 백호우와 인력으로 조심스럽게 성토재를 제거하고 지오그리드시료를 추출하였다. 추출된 지오그리드시료에 대해 시공시의 손상정도를 사진촬영을 포함하여 육안으로 자세히 조사/기록하고, 인장강도시험을 위한 시편(크기 : 0.2m×1.4m)을

각각 7개 이상 채취하여 사진 2에 나타난 바와 같이 광폭인장강도시험(EN ISO 10319)을 수행하였다.

3.3 사용 재료

1) 지오그리드

본 연구에서는 지오그리드의 재질, 제조방법 및 인장강도가 내시공성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 국내에서 보강토구조물에 일반적으로 사용되고 있는 3개사에서 생산된 12종류의 지오그리드를 대상으로 현장 내시공성 시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 지오그리드 보강재 원시료의 인장강도 및 변형 특성을 평가하기 위하여 광폭인장강도시험(EN ISO 10319)을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 지오그리드의 일반특성 및 광폭인장강도시험 결과는 표 1에 나타내었다. 표 1에서 광폭인장강도시험 결과는 시험시 사용한 20cm폭 시료의 리브수에 대한 단위 폭(1m) 당 리브수의 비율을 고려하여 단위 폭 당 인장강도로 환산한 값이다.

표 1에 나타난 바와 같이 폴리에스터(Polyester) 섬유를 격자형으로 교차시켜 제직/편직한 후 PVC로 코팅하여 결합형으로 제작한 결합형 지오그리드 6종(Woven 형 3종, WIWK 형 3종), 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene)를 열연신하여 제작한 일체형 지오그리드 3종 그리고 폴리에스터 레진(resin)을 압출실린더에 통과시켜 편평한 바(bar)형태로 추출한 후 냉각/연신 공정을 통하여 스트립형태로 만들어 이를 격자형으로 교차시켜 레이저 용접한 결합형



사진 1. 성토재 입도조정을 위한 체가름 모습

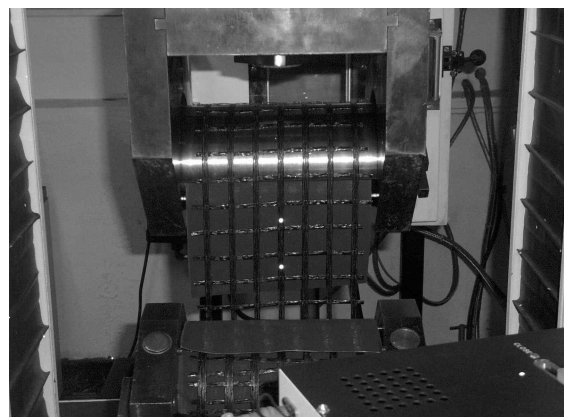


사진 2. 지오그리드시료에 대한 광폭인장강도시험 모습

표 1. 지오그리드 시료의 일반특성 및 광폭인장강도시험 결과

| 실험현장 | 지오그리드 종류 | 지오그리드 재질 및 제조 방법 | 광폭인장강도시험 결과 | |
|----------------------------|----------|--|-------------|----------|
| | | | 인장강도(kN/m) | 인장변형률(%) |
| Test site I & Test site II | A-1 | Woven PET-relatively flexible geogrid coated with PVC | 66.2 | 10.6 |
| | A-2 | | 94.7 | 13.0 |
| | A-3 | | 109.1 | 11.4 |
| | B-1 | WIWK PET-relatively flexible greogrid coated with PVC | 82.4 | 12.6 |
| | B-2 | | 104.9 | 13.3 |
| | B-3 | | 140.7 | 13.6 |
| Test site III | C-1 | Extruded HDPE-relatively rigid geogrid | 61.1 | 11.7 |
| | C-2 | | 82.3 | 12.1 |
| | C-3 | | 100.5 | 12.4 |
| | D-1 | PET flat ribs-relatively rigid geogrid welded to laser | 51.7 | 7.4 |
| | D-2 | | 81.5 | 7.0 |
| | D-3 | | 109.0 | 6.8 |

* PET : polyester, PVC : polyvinyl chloride
 WIWK : Weft Insertion Warp Knitted, HDPE : High Density Polyethylene

지오그리드 3종을 보강재로 선정하였다. 또한 지오그리드 인장강도가 내시공성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 각각의 지오그리드 종류별로 최대인장강도 크기가 다른 지오그리드 3가지씩을 실험재료로 선정하였다.

2) 성토재료

성토재의 종류 및 입도변화에 따른 지오그리드의 시공시 감소계수를 평가하기 위해 경기도 파주시 및 용인시 인근의 화강풍화토를 대상으로 최대 입자크기를 40mm, 60mm, 80mm로 변화시켜 내시공성 시험을 수행하였으며, B-2 및 C-2 지오그리드에 대해서는 화강풍화토 이외에 입경이 25mm로 비교적 일정한 쇄석을 성토재로 사용한 경우에 대한 실험도 추가로 수행하였다.

그림 3은 현장 체가름을 통해 입도가 조정된 흙시료의 입도분포곡선이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 세 현장의 흙시료 모두 통일분류법상 SW(입도분포가 양호한 모래)로 분류된다. 한편, 실내 다짐실험(D다짐) 결과, Test site I의 흙시료는 최대건조밀도 20kN/m³, 최적함수비 8.2%였으며, Test site II의 흙시료는 최대건조밀도 20kN/m³, 최적함수비 9.3%, 그

리고 Test site III의 흙시료는 최대건조밀도 19kN/m³, 최적함수비 11.1%였다.

3.4 내시공성 실험 결과 및 고찰

1) 육안관찰 결과

성토재의 최대입경을 세 가지 조건(40, 60, 80mm)으로 변화시켜 수행한 현장 내시공성 시험 후, 다짐작업으로 인한 지오그리드 표면의 손상정도를 알아보기 위해 추출된 지오그리드에 대한 육안관찰을 수행하였다.

일반적으로 육안관찰시 지오그리드의 시공중 손상정도는 벗겨짐(general abrasion), 짓눌림(bruise), 찢김(split) 혹은 절단됨(cut)으로 표현 및 기록된다(Austin, 1997). 본 내시공성시험 후 추출한 지오그리드를 물로 깨끗이 씻은 다음 육안관찰한 결과, 대부분의 손상은 지오그리드 표면부의 벗겨짐 혹은 짓눌림인 것으로 나타났다. 다만, 상대적으로 강성이 작은 A형 및 B형 지오그리드 시료의 경우에는 리브의 일부가 절단된 상태가 다소 발견되었다. 또한 동일한 지오그리드에 대한 손상지점수는 성토재의 최대입경이 클수록 더 많은 것으로 나타났다.

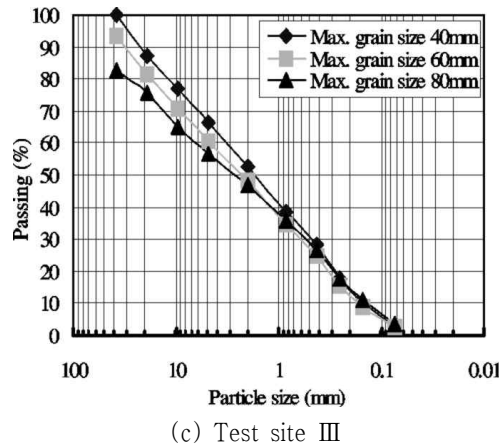
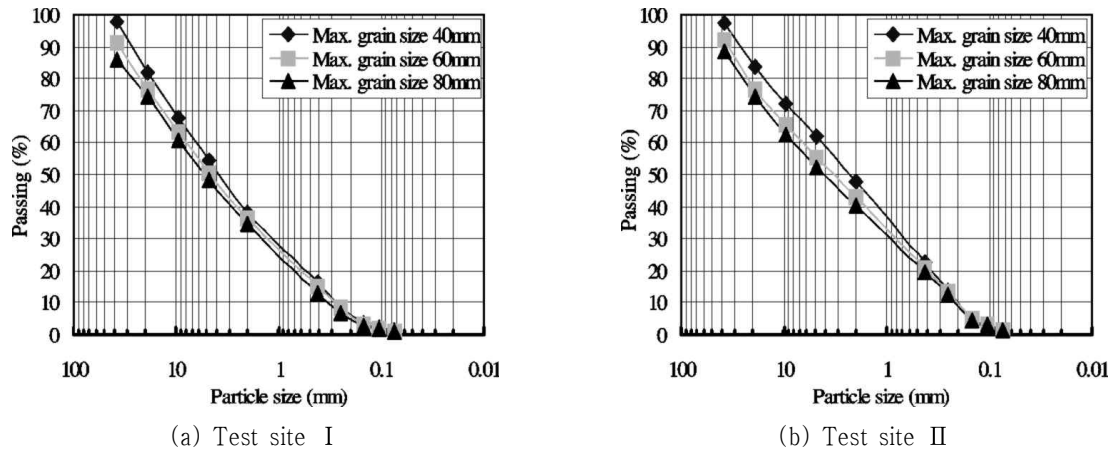


그림 3. 체가름된 성토재의 입도분포곡선

육안관찰결과를 토대로 광폭인장강도시험에 사용할 시편을 추출하였다. 즉, 부분적인 리브의 절단 등 손상정도가 매우 큰 경우는 보강사의 손상이 심하여 광폭인장강도시험이 사실상 어려울 뿐만 아니라 내시공성 시험에 사용된 전체 시료 중에서 차지하는 비중도 극히 미소하기 때문에 시편으로 사용하지 않았으며, 보강사의 손상정도가 미약한 경우는 광폭인장강도시험결과가 너무 안전측이 될 우려가 있을 것으로 판단되어 시편으로 사용하지 않았다. 따라서 “짓눌림”에 해당하는 부분 중 비교적 손상정도가 큰 것으로 판단되는 상태를 보이는 부분을 20cm×140cm (경사방향×위사방향) 크기로 재단하여 시편으로 사용하였다. 광폭인장강도시험시 시편의 중앙부에 손상된 부분이 위치하도록 하였다.

2) 성토재 종류에 따른 지오그리드의 시공 중 손상 정도

내시공성 시험 후 추출한 지오그리드 시료에 대하여 광폭인장강도시험을 수행하여 분석하였다. 광폭인장강도시험은 각 시료에 대하여 7회 이상씩 수행하였으며, 이 중 시험결과가 상이한 경우를 제외한 5회의 시험결과를 평균하였다.

국내에서 보강토구조물의 성토재로 일반적으로 사용하고 있는 화강풍화토의 최대입경이 지오그리드의 시공중 손상에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 화강풍화토를 성토재로 사용하여 수행한 현장 내시공성시험으로 인해 손상된 지오그리드의 인장강도 감소율 SRR(Strength Reduction Ratio)을 그림 4에 나타내었다. 지오그리드의 인장강도 감소율은 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도 감소정도

를 나타내며, 식 (3)으로 부터 산정할 수 있다.

$$SRR = \frac{(T_{ult} - T_{ID})}{T_{ult}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

그림 4에서 지오그리드의 인장강도감소는 지오그리드의 제조방법과 성토층의 최대입경에 영향을 받음을 알 수 있다. 즉, 성토층 다짐으로 인한 인장강도감소는, 비교적 강성이 작은 A 및 B 형 지오그리드의 경우 성토층의 최대입경이 클수록 인장강도감소율이 더 크고 그 값은 대략 20%~40%인 것으로 나타났고, 반면에 C 및 D 형 지오그리드의 경우는 성토층의 최대입경에 관계없이 5.2% 이하인 것으로 나타났다. 또한 지오그리드의 재질 및 제조방법이 동일한 경우, 지오그리드의 최대인장강도는 시공중 인장강도감소에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

한편, 동일한 지오그리드를 사용하여 내시공성시험을 수행한 Test site I과 Test site II의 시험결과를 비교해 보면, 성토재료의 자갈함유량은 유사함에도 불구하고(그림 3 참조) 대체적으로 Test site II 시료의 강도감소율이 다소 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 Test site II에서 사용한 화강풍화토에는 모서리가 날카로운 부순돌이 Test site I에 비해 다소 많이 포함되어 있어서 지오그리드 보강사에 보다 큰 손상을

을 입혔기 때문인 것으로 판단된다.

직경 25mm 쇠석을 성토재로 사용한 경우 지오그리드의 시공 중 손상을 평가하기 위해 추가로 수행된 B-2 및 C-2 지오그리드에 대한 시공중 강도감소 평가 결과를 화강풍화토 성토재를 사용한 시험결과와 함께 표 2에 나타내었다. 표 2에서, 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도감소는 최대인장변형률의 감소(표 1 참조)와 함께 발생함을 알 수 있다. 또한 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 평균 인장강도 감소율은, 지오그리드 B-2의 경우 25mm 쇠석 성토재 사용시 20%인 것으로 나타나 최대입경 40mm 인 화강풍화토 성토재를 사용한 경우와 유사한 것으로 나타났고, 지오그리드 C-2는 최대입경 40mm, 60mm 및 80mm 화강풍화토와 25mm 쇠석 성토재 사용시 모두 5% 미만인 것으로 나타났다.

내시공성시험결과로부터 A형 및 B형 지오그리드에 비해 상대적으로 두께와 강성이 큰 C형 및 D형 지오그리드의 경우가 성토층 다짐 시공으로 인한 강도손실에 적게 영향을 받음을 알 수 있다.

3) 지오그리드의 시공성 감소계수 평가

지오그리드의 장기설계인장강도(식 (1)) 계산시 요구되는 시공성 감소계수 RF_{ID} 는 식 (2-a)에 나타낸

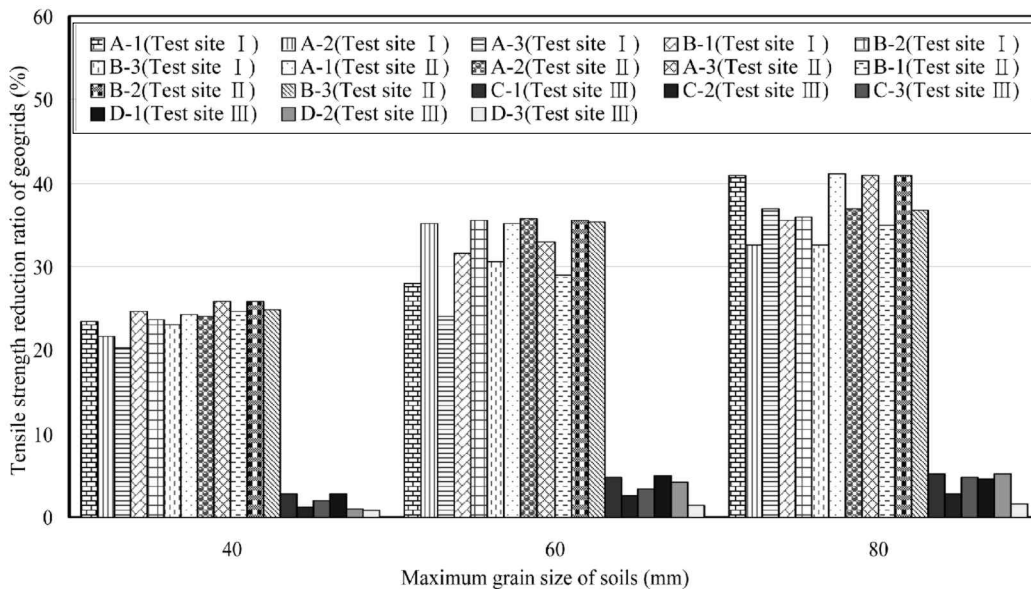


그림 4. 성토층 다짐에 의한 지오그리드의 인장강도 감소율

표 2. 시공중 손상된 지오그리드에 대한 광폭인장강도시험 결과

| 성토재 종류 | | Geogrid B-2 | | | Geogrid C-2 | | |
|----------------------------|----|-------------------------|-----------------|---------|-------------------------|-----------------|---------|
| | | Test site I | | | Test site III | | |
| | | Tensile strength (kN/m) | Peak strain (%) | SRR (%) | Tensile strength (kN/m) | Peak strain (%) | SRR (%) |
| Soil (Max. grain size, mm) | 40 | 80.3 | 9.6 | 23.6 | 81.3 | 11.9 | 1.2 |
| | 60 | 67.9 | 8.5 | 35.5 | 80.2 | 12.2 | 2.5 |
| | 80 | 67.4 | 7.9 | 35.9 | 80.0 | 11.7 | 2.8 |
| Rubble (D 25 mm) | | 83.4 | 11.9 | 20.0 | 78.5 | 11.7 | 4.7 |

바와 같이 보강재의 최대인장강도를 다짐시공에 의해 손상된 보강재의 인장강도로 나눔으로서 산정된다. 본 연구에서 수행한 내시공성시험결과로부터 평가된 성토재 최대입경별 지오그리드의 시공성 감소계수는 표 3과 같다.

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 화강풍화토 성토재를 사용하여 수행한 내시공성시험 결과, 지오그리드의 시공성 감소계수는 추가적인 안전율을 고려하면 강성이 비교적 작은 A형 및 B형 지오그리의 경우 화강풍화토 성토재의 최대입경이 40mm, 60mm 및

80mm일 때 각각 1.35, 1.55 및 1.70로 평가할 수 있고, C형 및 D형 지오그리의 경우에는 성토재 최대입경에 관계없이 1.05로 평가할 수 있다. 한편, 25mm 쇄석을 성토재로 사용하여 수행한 현장 내시공성시험 결과로부터 산정한 시공성 감소계수는, B-2 지오그리드의 경우 최대입경 40mm인 화강풍화토 성토재를 사용한 경우와 비교적 유사한 것으로 나타났고, C-2 지오그리드의 경우에는 화강풍화토 성토재를 사용한 경우와 유사하게 시공 중 다짐으로 인한 지오그리드의 손상이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

표 3. 지오그리드의 시공성 강도감소계수 평가

| 상대적인 강성도 | 지오그리드 종류 | 성토재 종류에 따른 시공성 감소계수 | | | |
|----------|----------|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | 화강풍화토 (Maximum grain size, mm) | | | 쇄석 (D 25mm) |
| | | 40 | 60 | 80 | |
| Flexible | A-1 | (1.31, 1.32) | (1.39, 1.54) | (1.69, 1.70) | - |
| | A-2 | (1.28, 1.26) | (1.54, 1.55) | (1.48, 1.59) | - |
| | A-3 | (1.25, 1.35) | (1.31, 1.49) | (1.59, 1.69) | - |
| | B-1 | (1.33, 1.33) | (1.46, 1.41) | (1.55, 1.54) | - |
| | B-2 | (1.31, 1.35) | (1.55, 1.55) | (1.56, 1.69) | 1.25 |
| | B-3 | (1.30, 1.33) | (1.44, 1.55) | (1.48, 1.58) | - |
| Rigid | C-1 | 1.03 | 1.05 | 1.05 | - |
| | C-2 | 1.01 | 1.03 | 1.03 | 1.03 |
| | C-3 | 1.02 | 1.03 | 1.05 | - |
| | D-1 | 1.03 | 1.05 | 1.05 | - |
| | D-2 | 1.01 | 1.04 | 1.05 | - |
| | D-3 | 1.01 | 1.01 | 1.02 | - |

In case of A and B type geogrid, (No., No.) is the results of (Test site I, Test site II)

4. 지오그리드의 내시공성과 크리프 변형의 복합효과

현장 내시공성 평가에 사용된 일부 지오그리드를 대상으로 원시료와 손상된 시료에 대한 일련의 크리프시험을 수행하여 성토층 다짐으로 손상된 지오그리드의 크리프특성을 분석함으로써, 지오그리드의 시공시 손상 및 크리프 변형이 장기 설계인장강도에 미치는 복합효과를 평가하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 쇄석을 성토재로 사용하여 현장 내시공성시험을 수행한 Geogrid B-2 및 C-2와 최대입경 80mm의 화강풍화토를 성토재로 사용하여 현장 내시공성시험을 수행한 Geogrid C-2 및 C-3를 대상으로 일련의 크리프시험을 수행 및 분석하였다.

4.1 크리프시험 방법

크리프시험(Unconfined Tension Creep Test)은 일정한 온도조건에서 지속적인 인장하중이 작용할 때 지오그리드의 불구속 인장 크리프거동을 평가하여, 장기설계인장강도 산정시 고려되는 크리프에 의한 인장강도 감소계수를 결정하기 위해 수행한다. 일반적인 시험방법은 크리프시험기에 장착되어 있는 상부 클램프와 하중재하장치가 붙어 있는 하부 클램프 사이에 지오그리드 시료를 설치하고, 시료 중심부에 인장변형 측정장치(예, LVDT)를 설치한 후 하중을 재하하여 시간경과에 따른 인장변형을 측정한다.

본 연구에서는 270cm×250cm×105cm 크기의 강재 프레임(frame) 내에 4개의 시료를 동시에 시험할 수 있는 시험장치를 제작하여 크리프 시험을 수행하였다. 본 시험장치는 2개의 항온실로 구성되어 각각 다른 온도조건에서 시험할 수 있도록 되어 있다. 크리프시험시 시료의 크기는 폭 20cm, 길이 80cm로 하였으며, 시료 중심부 20cm 길이에 LVDT를 부착하여 시간경과에 따른 인장변형을 자동으로 측정하였다. 사진 3은 크리프시험기 전경이다.

현장 내시공성시험 수행전의 지오그리드 원시료와 성토층 다짐시공에 의해 손상을 입은 지오그리드



사진 3. 크리프시험기 전경

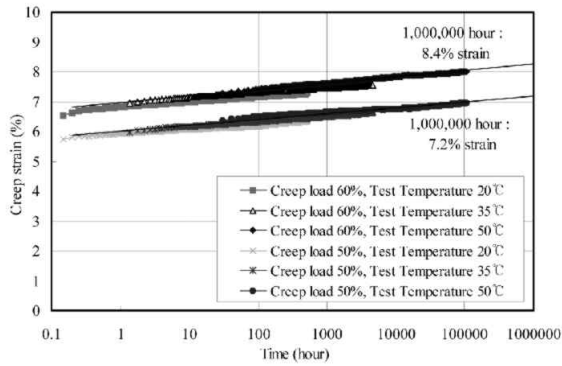
시료를 대상으로 일련의 크리프시험을 수행하였다. 크리프시험은 지오그리드의 소재에 따라 두 가지 방법으로 수행하였다. PET(Polyester)로 제조된 Geogrid B-2에 대해서는 20℃, 35℃ 및 50℃ 온도에서 최대 1,000시간 동안 크리프시험을 수행하였으며, 크리프 하중으로는 표 1에 나타난 원시료의 광폭인장강도를 기준으로 50% 및 60%의 하중을 사용하였다. 단기간의 실험결과를 통해 보다 긴 시간에서의 예측치를 얻기 위해 Boltzman이 제시한 시간-온도 중첩원리를 이용하였다(Vinogradov & Malkin, 1980; Takaku, 1980).

Geogrid C-2 및 C-3의 경우는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 제작되어 지오그리드의 크리프거동이 온도변화에 매우 민감한 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 일본의 PWRC(2000)에서 제시한 크리프 시험 방법을 토대로 하여 20℃ 온도에서 5종류 이상의 재하하중별로 최대 1,000시간 동안 단기 크리프 시험을 수행하였으며, 하중재하 후 시간경과에 따른 크리프 인장변형률을 측정하여 지오그리드의 크리프 하중을 평가하였다.

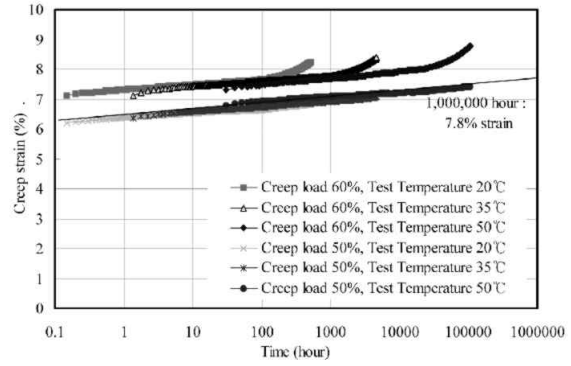
4.2 크리프시험 결과 및 고찰

4.2.1 Geogrid B-2

온도에 따른 이동인자(shift factor)를 산정하여 속성조건에서 실시한 시험결과를 시간축으로 이동시킴으로써 장시간 후의 크리프 하중을 평가하는 시간



(a) 원시료



(b) 손상된 시료

그림 5. Geogrid B-2의 시간-크리프 변형률 곡선

온도 중첩원리를 사용하여 Geogrid B-2의 크리프 특성을 평가하였다. 본 Geogrid B-2의 온도에 따른 이동인자(shift factor)는 20°C, 35°C 및 50°C에서 각각 0, -0.953 및 -2.310로 산정되었다. 산정된 이동인자를 고려한 크리프시험결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 원시료의 경우 광폭하중의 50% 및 60% 하중에 대하여 1,000,000시간 이후의 장기 크리프 변형이 각각 7.2% 및 8.4%로 나타나 10%의 변형률을 벗어나지 않는 안정한 크리프특성을 가지는 것으로 평가되었다. 반면에 내시공성시험 후 손상된 시료는, 50% 하중에서는 1,000,000시간 이후의 장기 크리프 변형이 7.8%로 평가되어 안정한 크리프특성을 가지나, 60% 하중에 대해서는 크리프 변형률 거동이 시간경과에 따라 수렴하는 안정적인 거동을 보이지 않는 것으로 나타나, 적정 크리프 하중은 광폭하중의 50%~60%의 사이에 존재함을 알 수 있다.

4.2.2 Geogrid C-2 및 Geogrid C-3

PWRC(2000)에서 제안한 크리프 하중 평가방법은, 지오그리드 최대인장강도의 10%~90% 범위에서 5종류 이상의 하중을 재하하여 시간경과에 따른 크리프 변형률을 측정후, 재하하중별 경과시간-크리프 변형률 관계곡선(그림 6(a)), 등시하중(等時荷重)-크리프 변형률 관계곡선(그림 6(b)), 한계 크리프 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 관계곡선

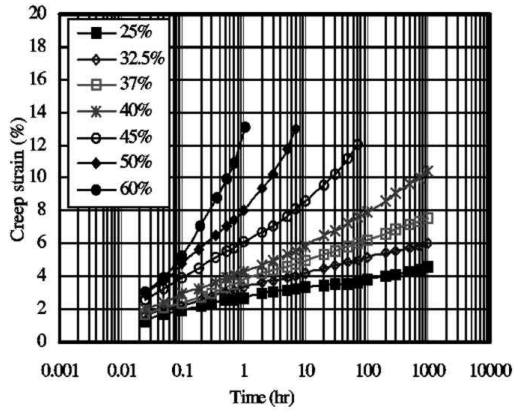
(그림 6(c))을 순차적으로 도시함으로써 지오그리드가 사용되는 구조물의 내구년수를 고려한 지오그리드의 크리프 하중을 예측하는 방법이다. 또한 예측된 크리프 하중에 대한 검증에 위해 하중비(荷重比)-크리프 변형 증가율 곡선(그림 6(d))을 도시하여 크리프 변형률이 급증하게 되는 재하하중 수준과 비교/평가하도록 하였다. 하중비-크리프 변형 증가율 곡선에서 하중비는 지오그리드의 최대인장강도에 대한 재하하중의 비율(%)이며, 크리프 변형 증가율은 식 (4)로 구한다.

크리프 변형 증가율 =

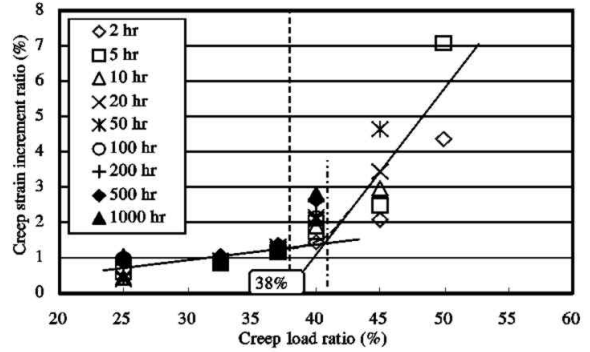
$$\frac{\varepsilon(t_n) - \varepsilon(t_{n-1})}{\log_{10} t_n - \log_{10} t_{n-1}} (\%) \quad (4)$$

여기서, $\varepsilon(t_n)$ 은 경과시간 t_n 에서의 크리프 변형률(%)이다.

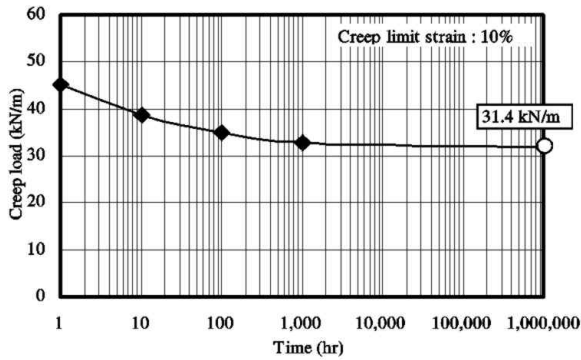
본 연구에서는 GRI-GG4(1995) 방법에 준하여 지오그리드의 한계 크리프 변형률을 10%로 하여 크리프 하중을 예측/평가하였다. Geogrid C-2 원시료에 대한 크리프시험 결과를 PWRC(2000)에서 제안한 크리프 하중 평가방법을 이용해 나타내면 그림 6과 같다. 동일한 방법으로 분석한, 손상된 Geogrid C-2 및 Geogrid C-3에 대한 크리프시험결과를 표 4에 정리하였으며, 그림 7은 손상된 C형 지오그리드의 한계 크리프 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선이다. 그림 7과 같이 예측된 크리프하중의 적정성



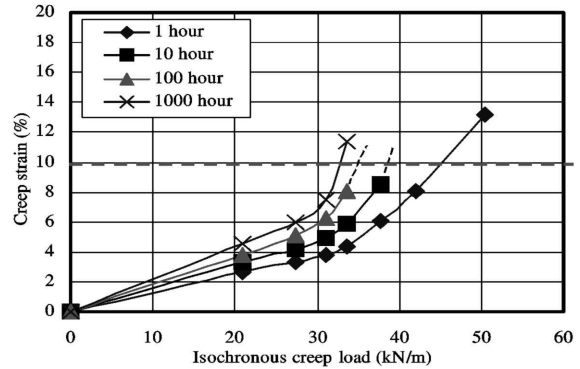
(a) 재하하중별 경과시간-크리프 변형률 곡선



(b) 등시하중-크리프 변형률 곡선



(c) 한계 변형률(10%)에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선



(d) 하중비-크리프 변형 증가율 곡선

그림 6. Geogrid C-2 원시료의 크리프 하중 평가

표 4. Geogrid C-2 및 Geogrid C-3의 크리프 하중 평가

| 구 분 | Geogrid C-2 | | | Geogrid C-3 | |
|------------------------------|-------------|-------------------|----------------|-------------|-------------------|
| | 원시료 | 손상된 시료 (화강풍화토) | 손상된 시료 (쇄석) | 원시료 | 손상된 시료 (화강풍화토) |
| 1,000,000시간 경과시 크리프 하중(kN/m) | 31.4 | 30.4 | 30.4 | 38.2 | 37.3 |
| 최대인장강도에 대한 크리프 하중의 비율(%) | 38 | 37 | 37 | 38 | 37 |

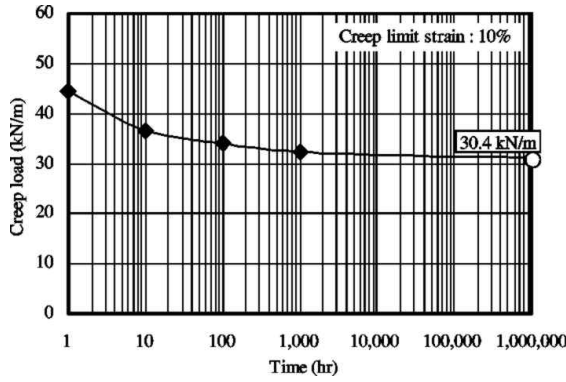
은 그림 87에 나타낸 바와 같이 하중비-크리프 변형 증가율 곡선을 도시하여 검증하였다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 시공시 손상으로 인해 C형 지오그리드의 크리프 하중이 원시료에 비해 2.6%~3.1% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

5. 내시공성 및 크리프 복합효과 평가

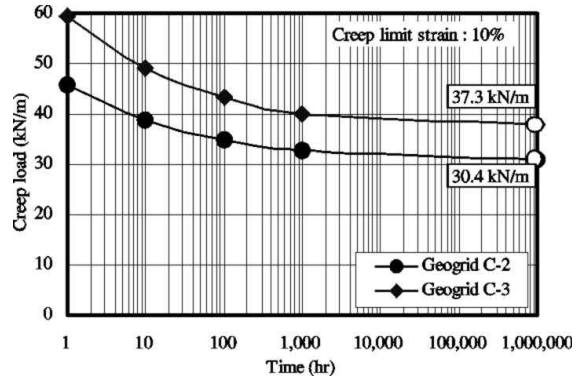
내시공성 및 크리프 복합효과가 지오그리드의 장

기 설계인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위해, 현장 내시공성시험 및 크리프시험 결과에 대해 GRI-GG4 방법으로 지오그리드의 시공성 강도감소계수(RF_{ID})와 크리프 강도감소 계수(RF_{CR})를 산정하여 표 5에 나타내었다.

표 5에서 알 수 있는 바와 같이, Geogrid B-2의 경우 복합효과 고려시 인장강도 감소계수가 4.3%~20.1% 범위 내에서 감소하고, Geogrid C-2 및 Geogrid C-3의 경우에는 0%~2.2% 감소하는 것으로 나타났

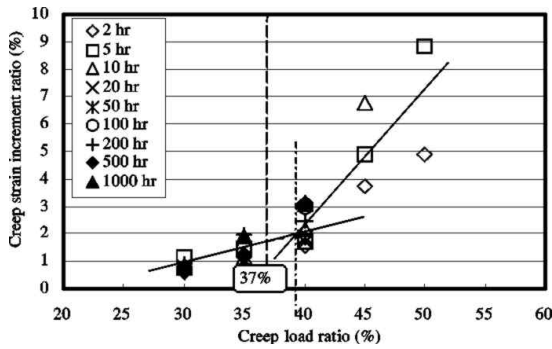


(a) Geogrid C-2(25mm 쇠석)

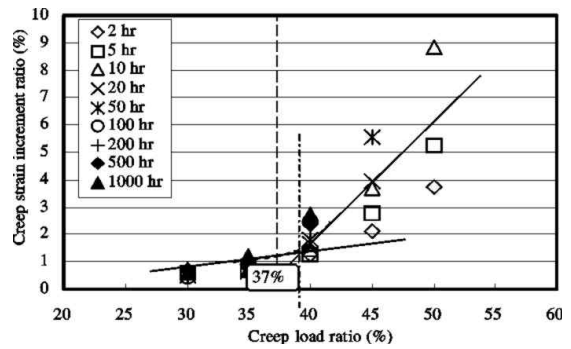


(b) Geogrid C-2 및 C-3(최대입경 80mm 화강풍화토)

그림 7. 손상된 Geogrid C-2 및 C-3의 한계 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선



(a) Geogrid C-2(25mm 쇠석)



(b) Geogrid C-2(최대입경 80mm 화강풍화토)

그림 8. 손상된 Geogrid C-2의 경과시간별 하중비-크리프변형 증가율 곡선

다. C형 지오그리드의 경우 내시공성과 크리프 복합 효과의 영향이 비교적 작게 평가된 원인은, 시공중 강도감소가 상대적으로 작았기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 본 연구를 통해 내시공성 및 크리프 복합효과가 지오그리드의 장기 설계인장강도 산정에 미치는 영향은 시공중 강도감소가 큰 경우에 더 크게 나타나고, 현행 설계법으로 산정된 지오그리드의 강도감소계수는 안전측임을 알 수 있다.

6. 결론

성토재 종류에 따른 지오그리드 내시공성을 평가하기 위하여, 현재 국내에서 보강토구조물 축조시 사용되고 있는 다양한 종류의 지오그리드를 대상으로 국내의 보강토구조물 시공조건을 고려한 일련의 현장 내시공성시험을 수행하였다. 또한 내시공성시험에 사용된 일부 지오그리드에 대해서는 일련의 크리

표 5. 지오그리드의 강도감소계수(RF) 평가

| 성토재 종류 | Geogrid B-2 | | | | Geogrid C-2 | | | | Geogrid C-3 | | | |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|----------|------------------|------------------|-------------------------------------|----------|------------------|------------------|-------------------------------------|----------|
| | GRI-GG4 | | | 복합효과 고려시 | GRI-GG4 | | | 복합효과 고려시 | GRI-GG4 | | | 복합효과 고려시 |
| | RF _{ID} | RF _{CR} | RF _{ID} × RF _{CR} | RF | RF _{ID} | RF _{CR} | RF _{ID} × RF _{CR} | RF | RF _{ID} | RF _{CR} | RF _{ID} × RF _{CR} | RF |
| 화강풍화토 (최대입경 80mm) | - | - | - | - | 1.03 | 2.63 | 2.71 | 2.71 | 1.05 | 2.63 | 2.76 | 2.70 |
| 25mm 쇠석 | 1.25 | 1.67 | 2.09 | 1.67~2.0 | 1.05 | 2.63 | 2.76 | 2.71 | - | - | - | - |

프시험을 수행하여 지오그리드의 장기설계인장강도에 미치는 시공시 손상과 크리프의 복합효과를 평가하였다.

연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도감소(내시공성) 효과는 지오그리드의 재질 및 제조방법이 동일한 경우, 원시료의 인장강도 크기에 관계없이 유사하게 나타났다.
2. 지오그리드의 시공성 감소계수 RF_{ID} 는 강성이 비교적 작은 결합형 PET 지오그리드인 경우 최대입경이 40mm, 60mm 및 80mm일 때 각각 1.35, 1.55 및 1.70, 상대적으로 강성이 큰 지오그리드의 경우에는 성토재 최대입경에 관계없이 1.05로 평가되어, 비교적 강성이 작은 결합형 PET 지오그리드의 경우 성토재의 최대입경이 클수록 시공중 인장강도감소가 크고, 상대적으로 강성이 큰 지오그리드의 경우에는 연성인 지오그리드에 비해 시공중 인장강도 감소가 작을 뿐 아니라 성토재 최대입경의 크기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도감소는 지오그리드의 제조방법과 성토재의 최대입경에 영향을 받을 수 있다.
3. 지오그리드의 시공성 강도감소계수는 결합형 PET 지오그리드가 상대적으로 강성이 큰 일체형 HDPE 지오그리드 보다 큰 반면에 크리프 강도감소계수는 일체형 HDPE 지오그리드의 경우가 50% 정도 큰 것으로 나타나, 지오그리드의 내시공성 및 크리프 특성은 지오그리드의 재질 및 제조방법에 크게 영향을 받을 수 있다.
4. 내시공성과 크리프 복합효과 고려시의 인장강도 감소계수 감소율은 결합형 지오그리드(내시공성 시험 후 인장강도감소율 20%)와 일체형 지오그리드(내시공성시험 후 인장강도감소율 2.8%~4.7%)에서 각각 4.3%~20.1% 범위내의 값과 0%~2.2%인 것으로 나타나, 내시공성과 크리프의 복합효과가 지오그리드의 장기 설계인장강도 산정에 미치는 영향은 시공중 강도감소가 큰 경우에 더 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 지오그리드의 장기 설계인장강도 산정시 필요한 인장강도 감소계수를 영향인자별로 각각 산정하고 있는 현행 설계법은, 각 영향인자 상호간의 복합효과를 고려하여 강도감소계수를 산정하는 방법에 비해 지오그리드의 강도감소계수를 안전측으로 산정한다.

참고문헌

1. ASTM D 5818(1995), *Annual Book ASTM Standards. Standard Practices for Obtaining Samples of Geosynthetics from a Test Section for Assessment of Installation Damage*, American Society for Testing and Materials.
2. Austin, R. A.(1997), "The Effect of Installation Activities and Fire Exposure on Geogrid Performance", *Geotextiles and Geomembranes* 15, pp.367-376.
3. BS 8006(1995), *Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and other Fills.*, British Standard Institution.
4. Cazzuffi, D., Mongiovi, L., Torresendi, M.(2001), "Laboratory and Field tests for the Evaluation of Installation Damage of Geosynthetics in Reinforced Earth Structures", 15th ICSMGE, Istanbul, pp.1565-1568.
5. EN ISO 10319(1993), *Geotextiles : Wide-width tensile test.*, International Organization for Standardization.
6. FHWA(1996), *Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforces Soil Slopes*, FHWA Publication No. FHWA-SA-96-072, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
7. Greenwood, J. H.(2002), "The Effect of Installation Damage on the Long-Term Design Strength of a Reinforcing Geosynthetic", *Geosynthetics International*, Vol.9, No.3, pp.247-258.
8. GRI(1995), *GRI Test Methods GG4(b) : Determination of the Long-Term Design Strength of Flexible Geogrids*, Drexel University, USA.
9. Jeon, H.Y., Kim, S. H., & Yoo, H. K.(2002), "Assessment of long-term performances of polyester geogrids by accelerated creep test", *Polymer Testing* 21, pp.489-495.
10. Kaliakin, V. N. & Dechasakulsom, M.(2002), "Development of General Time-Dependent Model for Geogrids", *Geosynthetics International*, Vol.9, No.4, pp.319-344.
11. Pinho-Lopes, M., Recker, C., Lopes, M.L. & Müller-Rochholz, J.(2002), "Experimental Analysis of the Combined Effect of Installation Damage and Creep of Geosynthetics -New Results", *Geosynthetics-7th ICG-Delmas*, pp.1539-1544.
12. PWRC(2000), *Design and Construction Manual for Reinforced Soil using Geotextiles*, Public Works Research Center, Japan(in Japanese).
13. Sawicki, A. & Kazimierowicz-Frankowska, K.(1998), "Creep Behaviour of Geosynthetics", *Geotextiles and Geomembranes* 16, pp.365-382.

14. Takaku, A.(1980), "Effect of Temperature on Creep Fracture of Polypropylene Fibers", Journal of Applied Polymer Science, 25, pp.1861-1866.
15. Vinogradov, G. V. and Malkin, A. Ya.(1980), "Rheology of Polymers; Viscoelasticity and Flow of Polymers", Mir Publishers Moscow Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, pp.74-82.
16. Watn, A., Chew, S. H.(2002), "Geosynthetic Damage-from Laboratory to Field", Geosynthetics-7th ICG-Delmas, pp.1203-1226.