철도노반 보강용 지오그리드의 크리프 및 손상이 장기 인장강도에 미치는 영향평가

Assessments of the Combined Effect of Installation Damage and Creep on the Long-Term Design Strength of Geogrid for Railroad Reinforcement

이도희* 박태순** 조삼덕*** 이광우****
Lee, Do-Hee, Park, Tae-Soon, Cho, Sam-Deok, Lee, Kwang-Wu

ABSTRACT

The factors affecting the long-term design strength of geogrid for railroad reinforcement can be classified into factors on creep deformation, installation damage, temperature, chemical degradation, biological degradation. Especially, creep deformation and installation damage are considered as main factors to determine the long-term design strength of geogrid. This paper describes the results of a series of experimental study, which are carried out to assess the combined effect of installation damage and creep deformation for the long-term design strength of geogrid reinforcement. In this study, a series of field tests are carried out to assess installation damage of a various geogrids according to different fill materials, and then creep tests are conducted to assess the creep properties of both undamaged and damaged geogrids.

1. 서 론

일반적으로 토목섬유 보강재의 장기 인장특성은 크리프(creep), 시공시 손상(installation damage), 온도, 화학용해, 미생물 등과 같은 환경적인 요인에 의해 영향을 받으며, 특히 크리프와 시공시 손상에 의한 영향이 가장 크다. 이러한 영향은 보강재의 장기설계인장강도 산정시 보강재의 장기간 안정에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들에 대한 보강재의 인장강도 감소계수를 반영함으로써 고려되어진다. 그러나 현행 설계법에서는 이들 인장강도 감소계수를 영향인자별로 각각 산정하고 있는 설정이어서 각 영향인자 상호간의 복합효과를 반영하지 못하고 있으며, 이는 비경제적인 설계의 원인이 되고 있다. 따라서 최근 토목섬유 보강재의 장기설계인장강도에 큰 영향을 미치는 크리프와 시공시 손상의 복합효과를 규명하기 위한 실험적 연구가 시도되고 있다. Pinho-Lopes et al.(2002)은 다양한 토목섬유 보강재에 대한 일련의 실내 및 현장 대시공성시험과 크리프시험을 통해, 이들 영향인자의 복합효과를 고려할 경우 보강재의 인장강도 감소계수가 감소함을 확인하였고, Greenwood(2002)는 PET(polyester) 지오그리드에 대한 실험연구를 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 약 7% 과대평가함을 확인하였다. 그러나 이러한 복합효과는 보강재의 종류 및 시공조건에 따라 그 영향 정도가 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 국내

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원
** 서울산업대학교 교수, 정회원
*** 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구위
**** 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

에서 철도 보강용 보강토구조물 축조시 많이 사용되고 있는 국산 지오그리드를 대상으로 국내의 보강토구조물 시공조건을 고려한 일련의 현장 내시공성시험 및 크리프시험을 수행하여 지오그리드의 장기설계인장강도에 미치는 시공시 손상과 크리프의 복합효과를 평가하고자하며, 이를 보강토구조물의 설계기법 합리화를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 지오그리드에 대한 현장 내시공성시험

2.1 현장 내시공성시험 방법 및 재료

보강토 구조물에 대한 해외의 여러 지침에서는 토목섬유 보강재의 시공시 손상정도를 일련의 실내실험(ENV ISO 10722, 1998) 및 현장실험(BS 8006,1995; ASTM D 5818, 1995; FHWA, 1996 등)을 통해 평가하도록 하고 있으며, 주로 현장 내시공성시험을 통한 평가가 많이 이루어지고 있다. 국내의 경우 토목섬유 보강재의 내시공성 평가에 대한 규정이 아직 없는 관계로, 해외의 여러 시험법들을 비교·검토하여 다음과 같이 현장 내시공성시험을 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 상부 성토층의 다짐작업 완료후 각각의 성토높이는 그림 1에 나타낸 바와 같이 대략 30cm가 되도록 하였다. 다짐 완료 후, 지오그리드가 손상되지 않도록 백호우와 인력으로 조심스럽게 성토재를 제거하고 지오그리드 시료를 추출하였다. 추출된 지오그리드 시료에 대해 시공시의 손상정도를 육안으로 자세히 조사/기록하고, 광폭인장강도시험 및 크리프시험을 위한 시편을 채취하였다.

지오그리드의 재질, 제조방법 및 인장강도가 내시공성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 국내에서 보강토구조물에 일반적으로 사용되고 있는 2개사에서 생산된 3종류의 지오그리드를 대상으로 현장 내시공성시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 지오그리드 보강재 원시료의 인장강도 및 변형 특성을 평가하기 위하여 광폭인장강도시험(ISO 10319)을 수행하였다. 실험에 사용된 지오그리드의 일반특성 및 광폭인장강도시험 결과는 표 1과 같다. 표 1에 나타낸 바와 같이 고강도 폴리에스터(Polyester)사를 사용하여 Weft Insertion Warp Knit법으로 격자모양의 원단을 만든 후 PVC로 코팅하여 제조한 겹합형 지오그리드 1종과 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene)을 열연신하여 제작한 일체형 지오그리드 2종을 보강재로 선정하였다.

한편, 실험시 흙종류에 따른 영향을 고찰하기 위해 파주시 인근의 화강풍화토를 대상으로 자체 제작한 대형 체가름장치(1.4m×2m)를 이용하여 체가름한 최대입경 80mm의 화강풍화토와 25mm 체석을 다짐작업시에 성토재로 사용하였다. 현장 체가름을 통해 입도가 조정된 흙시료에 대한 다짐시험(D다짐) 결과 최대건조밀도는 1.94g/cm^3, 최적함수비는 11.1%로 나타났으며, 흙시료의 입도분포 비율과 현장다짐밀도는 표 2에 나타낸 바와 같다.

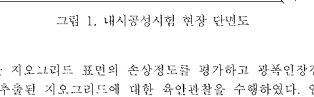


그림 1. 내시공성시험 현장 단면도

2.2 내시공성시험 결과 및 고찰

현장 내시공성시험 후, 다짐작업으로 인한 지오그리드 표면의 손상정도를 평가하고 광폭인장강도시험에 사용할 시편을 채취하기 위하여, 추출된 지오그리드에 대한 육안관찰을 수행하였다. 일반적으로 육안관찰시 지오그리드의 시공중 손상정도는 벗겨짐(general abrasion), 찢눌림(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 찢눌림인 것으로 나타났다. 다만, 상대적으로 강성이 작은 결합형 PET 지오그리드 시료의 경우에는 리브의 일부가 절단된 상태가 다소 발견되었다.

표 1. 지오그리드 시료의 일반특성 및 광폭인장강도시험 결과

지오그리드 종류	제질 및 제조 방법	광폭인장강도시험 결과	
		인장강도(t/m)	인장변형률(%)
A	WIWK PET geogrid coated with PVC	10.62	13.6
B	Extruded HDPE geogrid - relatively stiff	8.39	12.1
C		10.25	12.0

표 2. 화강풍화토 시료의 입도분포와 현장다짐밀도

최대입경 80mm	입도분포 (%)	자갈	43.3	현장다짐밀도 (g/cm^3)	1.91
		모래	53.1		
		실트 · 점토	3.6		
	흙 분류 (통일분류법)		SW	상대다짐(%)	99

표 3. 내시공성시험후 손상된 시료에 대한 광폭인장강도 시험 결과

성토재 종류	지오그리드 A				지오그리드 B				지오그리드 C			
	T_{dam} (t/m)	ε_{dam} (%)	R (%)	RF_{ID}	T_{dam} (t/m)	ε_{dam} (%)	R (%)	RF_{ID}	T_{dam} (t/m)	ε_{dam} (%)	R (%)	RF_{ID}
화강풍화토 (최대입경 80mm)	-	-	-	-	8.16	11.7	2.8	1.03	9.77	11.8	4.7	1.05
25mm 쇄석	8.50	11.9	20.0	1.25	8.00	11.7	4.7	1.05	-	-	-	-

육안관찰결과를 토대로 광폭인장강도시험 및 크리프시험에 사용할 시편을 추출하였다. 즉, 부분적인 리브의 절단 등 손상정도가 매우 큰 경우는 보강사의 손상이 심하여 광폭인장강도시험이 사실상 어려울 뿐만 아니라 내시공성시험에 사용된 전체 시료 중에서 차지하는 비중도 극히 미소하기 때문에 시편으로 사용하지 않았으며, 보강사의 손상정도가 미약한 경우는 시험결과가 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.

내시공성시험 후에 추출한 지오그리드 시료에 대한 광폭인장강도 시험결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 T_{dam} 및 ε_{dam}는 최대광폭인장강도 및 최대인장변형률의 평균값이고, R(인장강도감소율)은 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도 감소정도를 나타낸다. 한편, 지오그리드의 장기설계인장강도 계산시 요구되는 시공성 강도감소계수 RF_{ID}는 보강재의 최대인장강도를 다짐시공에 의해 손상된 보강재의 인장강도로 나눔으로써 산정된다. 표 3에서, 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도감소는 최대인장변형률의 감소(표 1 참조)와 함께 발생함을 알 수 있다.

3. 지오그리드의 크리프특성 평가시험

3.1 지오그리드의 크리프시험 방법 및 내용

내시공성시험에 사용된 3종의 지오그리드를 대상으로 현장 내시공성시험 전의 원시료 및 내시공성시험 완료 후 추출한 손상된 시료에 대한 크리프시험을 수행하였다. 크리프시험은 지오그리드의 소재에 따라 두 가지 방법으로 수행하였다.

먼저, 폴리에스터 지오그리드에 대해서는 ASTM D 5262-02에 규정되어 있는 시험법을 기준으로 하여 20℃, 35℃ 및 50℃ 온도에서 최대 1,000시간 동안 단기 속성크리프시험을 수행하였으며, 크리프 하중으로는 표 1에 나타낸 원시료의 광폭인장강도를 기준으로 50% 및 60%의 하중을 사용하였다. 단기간의 실험결과를 통해 보다 긴 시간에서의 예측치를 얻기 위해 Boltzman이 제시한

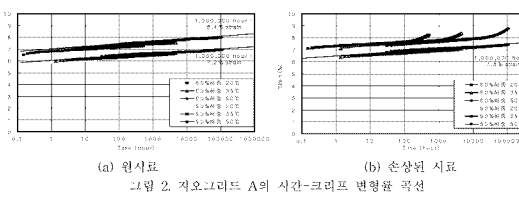
시간-온도 중첩원리를 이용하였다(Vinogradov & Malkin, 1980; Takaku, 1980).

한편, 지오그리드 B 및 C의 경우는 폴리에틸렌으로 제작되어 지오그리드의 크리프거동이 온도 변화에 매우 민감한 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 일본의 토목연구센터 & 지오텍스타일 보강토공법 보급위원회(2000)와 ASTM D 5262-02에서 제시한 크리프시험 방법을 토대로 하여 20℃ 온도에서 5종류 이상의 재하하중별로 최대 1,000시간 동안 단기 크리프시험을 수행하였으며, 하중재하 후 시간경과에 따른 크리프 인장변형률을 측정하여 지오그리드의 크리프 하중을 평가하였다.

3.2 크리프시험 결과 및 고찰

3.2.1 지오그리드 A

온도에 따른 이동인자(shift factor)를 산정하여 측정조건에서 실시한 시험결과를 시간축으로 이동시킴으로써 장시간 후의 크리프 하중을 평가하는 시간-온도 중첩원리를 사용하여 지오그리드 A의 크리프특성을 평가하였다. 본 지오그리드 A의 온도에 따른 이동인자(shift factor)는 20℃, 35℃ 및 50℃에서 각각 0, -0.953 및 -2.310로 산정되었다. 산정된 이동인자를 고려한 크리프시험결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 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.



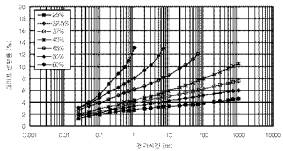
(a) 원시료 (b) 손상된 시료

그림 2. 지오그리드 A의 시간-크리프 변형률 곡선

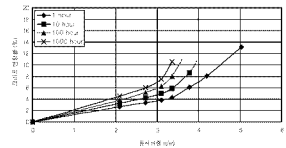
3.2.2 지오그리드 B 및 지오그리드 C

일본의 토목연구센터 & 지오텍스타일 보강토공법 보급위원회에서 제안한 크리프 하중 평가방법은, 지오그리드 최대인장강도의 10%~90% 범위에서 5종류 이상의 하중을 재하하여 시간경과에 따른 크리프 변형률을 측정한 후, 재하하중별 경과시간-크리프 변형률 관계곡선, 등시하중(等時荷重)-크리프 변형률 관계곡선, 한계 크리프 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 관계곡선을 순차적으로 도시함으로써 지오그리드가 사용되는 구조물의 내구년수를 고려한 지오그리드의 크리프 하중을 예측할 수 있다. 또한 예측된 크리프 하중에 대한 검증을 위해 하중비(荷重比)-크리프 변형 증가율 곡선을 도시하여 크리프 변형률이 급증하게 되는 재하하중 수준과 비교/평가하도록 하였다. 본 연구에서는 GRI-GG4 방법에 준하여 지오그리드의 한계 크리프 변형률을 10%로 하여 크리프 하중을 예측/평가하였다.

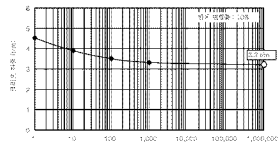
지오그리드 B 원시료에 대한 크리프시험 결과를 토목연구센터 & 지오텍스타일 보강토공법 보급위원회에서 제안한 크리프 하중 평가방법을 이용해 나타내면 그림 3과 같다. 동일한 방법으로 분석한 지오그리드 B 및 지오그리드 C에 대한 크리프시험결과를 표 4에 정리하였으며, 그림 4는 지오그리드 B 및 지오그리드 C의 한계 크리프 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선이다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 시공시 손상으로 인해 크리프 하중이 대략 1% 감소하는 것으로 나타났다.



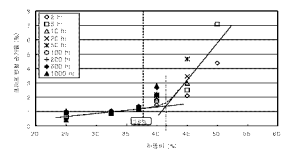
(a) 재하하중별 경과시간-크리프 변형률 곡선



(b) 등시하중-크리프 변형률 곡선



(c) 한계 변형률(10%)에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선



(d) 하중비-크리프 변형 증가율 곡선

그림 3. 지오그리드 B 원시료의 크리프 하중 평가

표 4. 지오그리드 B 및 지오그리드 C의 크리프 하중 평가

구 분	지오그리드 B			지오그리드 C	
	원시료	손상된 시료 (화강풍화토)	손상된 시료 (세석)	원시료	손상된 시료 (화강풍화토)
1,000,000시간 경과시 크리프 하중 (t/m)	3.2	3.1	3.1	3.9	3.8
최대인장강도에 대한 크리프 하중의 비율 (%)	38	37	37	38	37

4. 내시공성 및 크리프 복합효과 평가

내시공성 및 크리프 복합효과가 지오그리드의 장기 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, 지오그리드 A의 경우 복합효과 고려시 인장강도 감소계수가 4.3%~20.1% 감소하고, 지오그리드 B 및 지오그리드 C의 경우에는 0%~2.2% 감소하는 것으로 나타났다. 지오그리드 B 및 지오그리드 C의 경우 내시공성과 크리프의 복합효과가 비교적 작게 평가된 원인은, 두 지오그리드의 경우 시공중 강도감소가 상대적으로 작았기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 본 연구를 통해 내시공성 및 크리프 복합효과가 지오그리드의 장기

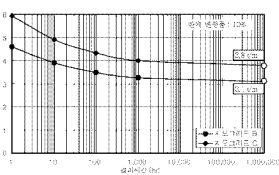


그림 4. 지오그리드 B 및 지오그리드 C의 한계 변형률에 대한 경과시간-크리프 하중 곡선

설계인장강도 산정에 미치는 영향은 시공중 강도감소가 큰 경우에 더 크게 나타나고, 현행 설계법으로 산정된 지오그리드의 강도감소계수는 안전측임을 알 수 있다.

표 5. 지오그리드의 강도감소계수(RF) 평가

성토재 종류	지오그리드 A				지오그리드 B				지오그리드 C			
	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 쇄석	1.25	1.67	2.09	1.67~2.0	1.05	2.63	2.76	2.71	-	-	-	-

5. 결론

1. 성토층 다짐으로 인한 지오그리드의 인장강도감소는 최대인장변형률의 감소와 함께 발생하고, 육안관찰 결과 대부분의 손상은 지오그리드 표면부의 벗겨짐 혹은 찢늘림인 것으로 나타났다.

2. 지오그리드의 크리프 강도감소계수는 결합형 PET 지오그리드에 비해 일체형 HDPE 지오그리드의 경우가 50% 정도 큰 것으로 나타나, 지오그리드의 크리프특성은 지오그리드의 재질 및 제조방법에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

3. 대시공성과 크리프 복합효과 고려시의 인장강도 감소계수 감소율은 결합형 지오그리드(대시공성시험 후 인장강도감소율 20%)와 일체형 지오그리드(대시공성시험 후 인장강도감소율 2.8%~4.7%)에서 각각 4.3%~20.1%와 0%~2.2%인 것으로 나타나, 대시공성과 크리프의 복합효과가 지오그리드의 장기 설계인장강도 산정에 미치는 영향은 시공중 강도감소가 큰 경우에 더 큼을 알 수 있었다.

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

참고문헌

1. 일본 토목연구센터 & 지오텍스타일 보강토공법 보급위원회(2000), 지오텍스타일을 이용한 보강토의 설계·시공 매뉴얼, 305pp.
2. Austin, R.A.(1997), "The Effect of Installation Activities and Fire Exposure on Geogrid Performance" Geotextiles and Geomembranes 15. pp. 367-376.
3. Greenwood, J.H. 2002. The Effect of Installation Damage on the Long-Term Design Strength of a Reinforcing Geosynthetic. Geosynthetics International 9(3). pp. 247-258.
4. 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.
5. Takaku, A., 1980, Effect of Temperature on Creep Fracture of Polypropylene Fibers, Journal of Apllied Polymer Science, 25, pp. 1861~1866
6. 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