

평면변형압축시험을 이용한 보강토의 시간 의존적 변형 특성 연구

Time-Dependent Deformation Characteristics of Geosynthetic-Reinforced Soil Using Plane Strain Compression Tests

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik
김 선 빈² Kim, Sun-Bin
이 봉 원³ Lee, Bong-Won

Abstract

Despite a number of advantages of reinforced earth walls over conventional concrete retaining walls, there exist concerns over long-term residual deformation when subjected to repeated and/or cyclic loads, especially when used as part of permanent structures. In view of these concerns, in this paper time-dependent deformation characteristics of geosynthetic reinforced soil under sustained and/or repeated loads were investigated using a series of plane strain compression tests on geogrid reinforced weathered granite soil specimens. The results indicate that sustained or repeated loads can yield appreciable magnitudes of residual deformations, and that the residual deformations are influenced not only by the loading characteristics but by the mechanical properties of geogrid. It is also found that the preloading technique can be effectively used in controlling residual deformations of reinforced soils subjected to sustained and/or repeated loads.

요 지

보강토 구조물은 그동안의 다양한 분야에서의 적용을 통해 기존의 옹벽구조물의 대체 공법으로서 그 적용성을 인정받고 있다. 최근 들어 교대 및 철도 시설 등에 적용됨에 따라 단기적인 안정성 이외에 장기적으로 지속하중 혹은 반복하중에 노출됨에 따른 장기거동에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 이러한 연구의 필요성에 근거하여 보강토체에 발생할 수 있는 장기변형 특성 고찰에 주안점을 두고 우리나라에서 생산되는 지오그리드와 화강풍화토로 형성된 보강토에 대한 지속하중 혹은 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 보강토 구조물의 장기 변형 특성 메카니즘을 평면변형압축(plane strain compression; PSC)시험을 통해 고찰하였다. 그 결과 보강토의 시간 의존적 압축변형은 보강토체에 작용하는 하중 특성뿐만 아니라 보강재의 역학적 특성에도 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 선행하중을 작용함으로써 시간 의존적 잔류변형을 제어할 수 있는 것으로 분석되었다.

Keywords : Geosynthetic, Plane strain compression test, Reinforced earth, Reinforced soil retaining wall, Repeated load, Sustained load

1. 서 론

토목합성재료(geosynthetics)를 이용하는 보강토 공법

은 기존의 콘크리트 구조물에 비해 우수한 경제성 및 안정성, 수려한 외관 등의 이유로 기존 옹벽공법의 대체공법으로서 자리 매김을 하고 있다. 특히 아파트단지나

1 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu)

2 성균관대학교 토목공학과 석사 과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

3 성균관대학교 토목공학과 석사 과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

택지개발 등의 공사에 있어 성토 후 옹벽을 시공할 필요성이 있는 부지에 적극적으로 적용되고 있는데 보강토 공법은 현재 적용되고 있는 설계법이 보수적임에도 불구하고 시공 중 및 시공 후 각종 사고사례가 보고되고 있어(유충식 등 2005, Collin 1997) 이론과 실무사이에 존재하는 틈새를 좁히기 위해서는 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다.

보강토 공법은 앞서 언급한 장점이외에도 지진시 안정성이 탁월한 것으로 보고되고 있어 도로 혹은 철도분야의 성토부 혹은 교대 부분의 적용이 매우 긍정적으로 평가되고 있다(그림 1). 최근에 이러한 분야에의 영구 구조물로서 보강토 공법이 적용되기 시작하고 있으나 영구구조물의 일부로 적용하는데 있어 기존의 콘크리트 구조물보다는 지속하중 혹은 반복하중 작용시 잔류변위에 대한 우려가 있어 보다 적극적인 적용에 장애가 되고 있다.

이러한 관점에서 도로시설의 옹벽이나 교대 등에 적용되는 영구 구조물로서 보강토 공법이 적용되기 위해서는 지속하중 및 반복하중 작용시 보강토의 시간 의존적 잔류변형 특성 메카니즘에 대한 이해가 필요하며, 나아가 잔류변형량의 예측을 통해 이를 설계에 반영하려는 시도와 아울러 이러한 지속하중이나 반복하중에 의한 잔류변형을 억제할 수 있는 대책공법 개발을 위한 시도가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 보강토의 지속하중 및 반복하중에 대한 하중응답특성 및 시간 의존적 잔류변형 메카니즘에 대한 기초연구를 수행하였다. 본 연구는 구조물 수준의 잔류변형 특성 연구 이전에 선행되어야 할 요소(element) 수준의 거동특성 고찰에 주안점을 두었으며 이를 위해 평면변형상태에서의 다양한 하중

이력에 대한 하중재하가 가능한 평면변형압축(plane strain compression, PSC) 시험 장치를 제작하고 이를 이용하여 우리나라에서 생산되는 다양한 지오그리드와 화강 풍화토로 뒤채움된 보강토의 지속하중 혹은 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 거동 특성을 고찰하였다.

2. 기존연구의 연구동향

현재 적용되는 한계평형기법에 근거한 보강토 구조물 설계법(NCMA 1997; FHWA 1997)에서는 식 (1)과 같이 크리프 감소계수(creep reduction factor, RF_{CR})를 사용하여 보강재의 인장강도를 일률적으로 감소시키는 방법을 통해 보강토 구조물의 장기적인 안정성을 고려하고 하고 있다.

$$T_d = T_{ult} / (RF_{cr} \cdot RF_D \cdot RF_{ID} \cdot FS_{overall}) \quad (1)$$

여기서,

- T_D = 보강재 장기인장강도
- T_{ult} = 보강재 극한인장강도
- RF_{CR} = 크리프 감소계수
- RF_D = 내후성 감소계수
- RF_{ID} = 내시공성 감소계수
- $FS_{overall}$ = 불확실성에 대한 안전율

위에서와 같이 크리프 감소계수로 인장강도를 감소시키는 접근방법은 Isochronous 개념에 기반을 둔 것으로서 Isochronous 개념은 지오그리드의 크리프 특성을 고려하여 임의의 지오그리드에 대해 다양한 변형율속도(strain rate)로 수행한 인장시험 결과로 크리프 파단곡선(creep rupture curve)을 그림 2와 같이 작성하고 이를 다시 안전율을 고려하여 수정한 그림 3과 같은 파단곡선(factored creep rupture curve)으로부터 설계연한을 감안하여 설계강도를 결정하는 방법이다. 이러한 방법은 보강재의 인장강도를 과소평가하는 직접적인 요인이 되고 있으며 따라서 비경제적인 설계를 초래할 수 있는 문제점을 안고 있다(Tatsuoka 등 2004). 또한 보강토 구조물의 설계는 안정성뿐만 아니라 사용성(serviceability) 관점에서 시공중 구조물의 사용연한 동안 발생할 수 있는 장기변형에 대한 고려가 필요하며 특히 보강토 구조물이 영구 구조물로 보다 적극적으로 활용되기 위해서는 설계시 장기변형에 대한 고려가 뒤따라야 하나 감소계수를 적용하는 방법은 그다지 효율적이라고 볼 수 없다.

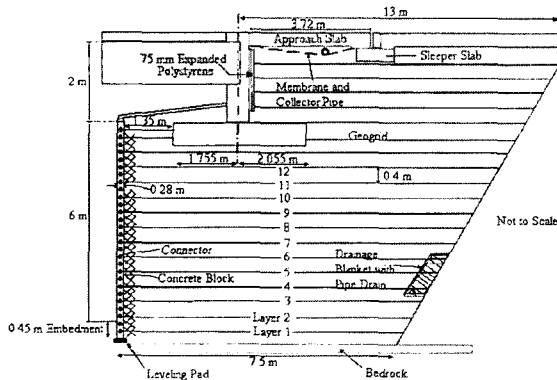


그림 1. 교대에 적용되는 보강토 구조물 예시

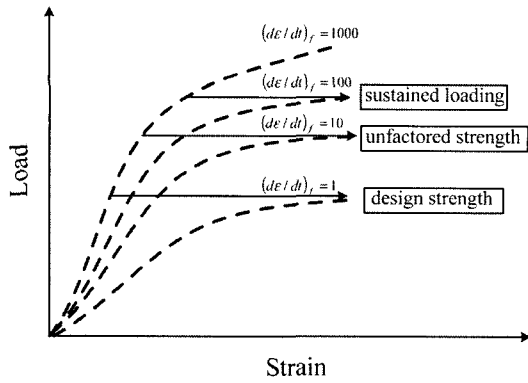


그림 2. 파단하중곡선(creep rupture curve) 결정을 위한 보강재 하중-변위 곡선

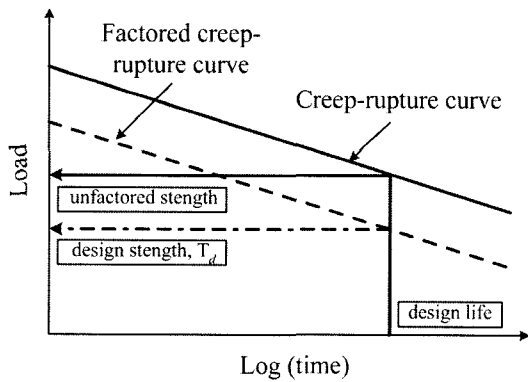


그림 3. 보강재의 설계강도 결정 방법

위에서 제시한 감소계수를 이용한 보강토 구조물의 장기적 안정성 확보의 접근방법에 대한 문제점을 제시하고 보다 근본적인 접근방법을 찾으려는 대표적인 연구그룹으로서 일본 동경대학의 Tatsuoka 교수 연구그룹을 들 수 있다. 이들은 다양한 하중이력에서 보강재의 크리프 특성에 대한 연구뿐만이 아니라 요소수준 및 구조물 수준에서 보강토의 시간 의존적 응력-변형을 관계

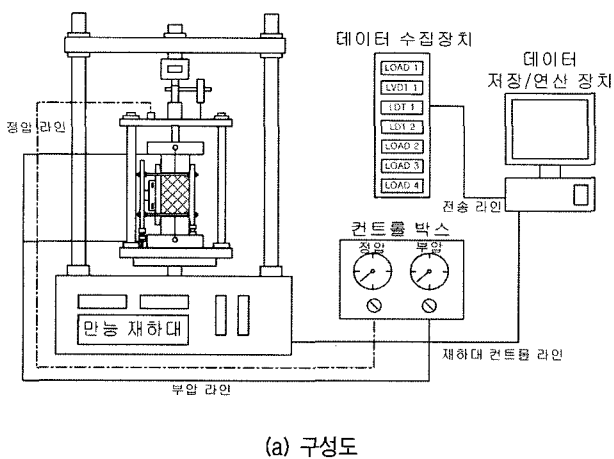
에 대한 연구를 수행하고 있다(Hirakawa et al. 2002, Uchimura et al. 2003). 이들의 연구에서는 보강토 구성 요소로서 모래를 대상으로 하고 있어 화강풍화토를 뒤 채움 흙으로 사용하는 우리나라에 시공여건에 그 결과를 직접 적용하는 데는 많은 어려움이 있다.

3. PSC 시험

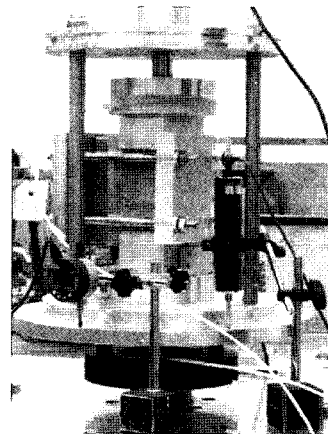
앞서 언급한 바와 같이 본 연구는 지속하중 혹은 반복하중에 노출되는 보강토의 장기거동 메카니즘 분석에 있어 구조물 수준의 고찰이전에 선행되어야 할 요소수준에 있어서의 잔류변형 특성에 주안점을 두었다. 보강토 구조물의 기하조건이 평면변형을 상태인 경우가 대부분이므로 본 연구에서는 평면변형을 하중조건하에서 지속하중과 반복하중의 구현이 가능한 평면변형압축시험장비를 제작하여 사용하였다.

3.1 시험기 구성 및 제원

PSC 시험장비는 아래 그림 4에 제시된 바와 같이 폭 92mm × 높이 120mm × 깊이 60mm 크기의 시편의 전·후면을 구속하여 하중재하시 평면변형을 조건의 형성이 가능하도록 하였으며 단순재하하중(continuous monotonic loading, CML), 지속하중(sustained loading, SL), 반복하중(cyclic loading, CL) 및 선행하중(preloading, PL)의 구현이 가능하도록 하였다. 한편, 구속압은 시험장비의 구조상 부압을 이용하여 변화시킬 수 있도록 하였으며 로드셀 및 변위측정장치 등의 계측센서, 부압 및 정압 시스템 컨트롤박스, 데이터 수집장치 및 저장장치로 구



(a) 구성도



(b) 사진

그림 4. 시험기 구성도 및 사진

표 1. 시험기 사양

구성장치		사양 및 특징
만능 재하대		<ul style="list-style-type: none"> • 정적 및 동적재하 • 재하속도 : 0.001~100mm/min • stroke : 45mm • 최대재하능력 : 2.0ton • 0.1 Hz의 sine 파형 구현
평면변형율셀		<ul style="list-style-type: none"> • 시료성형몰드 • 시료하강기 • 변형구속장치
계 측 센서부	수직하중 로드셀	• 용량: 1.0ton
	플레이트 하부 로드셀 2EA	• 용량: 300kgf
	수직변위 측정장치	• 용량: 50mm
	시료변형 측정장치(LDT)	
데이터 수집시스템	디지털 인디케이터 및 데이터 전송 장치	• 데이터의 디스플레이 및 컴퓨터로의 전송
압력컨트롤 패널	부압 및 정압 시스템 각각 1식	• 초기 구속압 조절

성 되어있다. 구성장치 및 주요특징은 표 1과 같으며 시험기 구성도 및 사진은 그림 4와 같다.

그림 5와 같이 3층의 보강재를 포설하였다. 시료 성형 후에는 구속압 30kPa을 작용시킨 후 해당 하중이력에 따라 실험을 시행하였다.

3.2 시편의 성형

본 PSC 시험의 시편은 보강토 구조물의 일반적인 뒤채움 재료인 화강풍화토를 사용하여 조성하였다. 사용된 뒤채움 흙은 표 2에서와 같이 입도분석 결과 균등계수 $C_u=9.44$ 곡률계수 $C_c=1.60$ 를 가지는 것으로 분석되었으며 #200체 통과율이 약 7.84%로서 통일분류법에 근거할 때 SW-SM으로 분류된다. 한편, 보강재로는 국내에서 생산되는 40kN/m의 인장강도를 갖는 polyester(PET), polypropylene(PP) 혹은 high-density polyethylene(HDPE) 재질의 지오그리드를 사용하였으며 이에 대한 구체적인 제원은 표 3과 같다.

시편은 특수 제작된 시료 성형기를 이용하여 다짐도 90% 정도의 시편을 형성하기 위해 3층 다짐으로 조성하였고 각 층 다짐시 준비된 지오그리드 시편을 포설하여

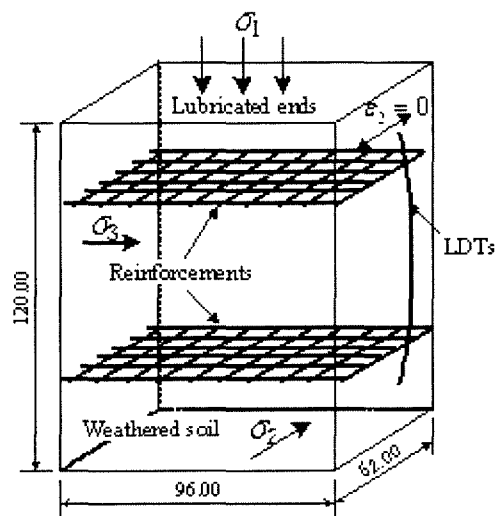


그림 5. PSC 시험 시편 제원(단위 mm)

표 2. 뒤채움 흙의 입도분포 및 물리적 특성

D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	균등계수 (C_u)	곡률계수 (C_c)	#200체 통과율 (%)	통일분류법 (USCS)	단위중량(γ , kN/m^3)
0.09	0.35	0.85	9.44	1.60	7.84	SW-SM	20

표 3. PSC 시험에서 사용된 지오그리드 제원 및 재질

시 편	재 질	파단강도 (kN/m)	강 성 (kN/m)	파단시 변형율 (%)	strand 수/10cm	격자크기 (mm)
GPET-4T	Polyester	40	350	7.5	4	25×20
GPP-4T	Polypropylene	40	500	12	2	43×36
GHDPE-4T	Polypropylene	40	500	<20	2	43×41
GPET-4T-1	Polyester	40	450	<12	4	25×25

표 4. PSC 시험에 사용한 하중작용 조건

시 험	재하이력	CML 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ (%/min)	SL시 지속시간 (hour)	CL시 진폭 (kPa)	CL시 반복회수
S-ML	CML	0.05	-	-	-
S-SL	CML-SL	0.05	1	-	-
S-CL	CML-CL	0.05	-	60, 120	900
S-PL-CL	PL-CL	0.05	-	60, 120	900
S-PL-SL	PL-SL	0.05	1	-	-

3.3 시험 조건 및 방법

본 시험에서는 표 4와 같이 임의 하중수준까지 단순 재하하중을 작용한 후 지속하중 혹은 반복하중을 가하는 방법으로 다양한 하중이력에 대한 시험을 수행하였다. 지속하중(sustained loading, SL)의 경우 지속시간($t_{SL} = 1hr$)을 1시간으로 하였으며 반복하중(cyclic loading, CL)의 경우 1Hz의 주파수를 갖는 일정크기의 반복하중을 다양한 진폭($\Delta q = 60, 120kPa$)으로 900회 ($N_{CYC} = 900$) 반복 재하 하는 방식을 채택하였다. 한편, SL 혹은 CL에 노출되는 보강토의 잔류변형 제어 수단으로서 선행하중(preloading, PL)의 적용성은 SL 혹은 CL 작용에 선행하여 임의 크기 하중을 작용시키는 방법으로 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 지속하중 작용시 크리프변형 특성

본 시험에서는 보강토 구조물이 교량의 교대부에 영구구조물로 적용되어 상판 기초를 지지하는 경우나 확대기초 등의 상재하중이 사용 연한 동안 지속적으로 작용하는 경우 보강토체에 발생할 수 있는 크리프변형 특성 고찰에 주안점을 두었다. 그림 6은 본 연구에서 사용한 각종 기호를 도식적으로 나타내고 있으며 본 연구를 위한 시험 조건은 아래 표 5와 같다.

4.1.1 지속하중 수준의 영향

그림 7에서는 GPET-4T 지오그리드가 사용된 시험조건 GPET-4T-SL의 결과를 보여 보여주고 있는데 여기서 응력비 R 은 그림 6에서와 같이 연직응력(σ_v)과 구속압(σ_c)의 비, $R = \sigma_v / \sigma_c$ 로 정의 된다. 그림 7(a)와 7(b)는 응력비-변형률($R - \Delta \epsilon_v$) 곡선을 보여주고 있으며 아울러 단순재하시험(GPET-4T-ML) 결과도 함께 제시하고 있다. 한편, 그림 7(c)와 7(d)는 각각 하중비-시간($R - t$) 이력곡선과 크리프변형률-시간($\Delta \epsilon_{cr} - t$) 곡선을 나타내고 있다.

$R - \Delta \epsilon_v$ 관계를 보여주는 그림 7(a)와 7(b)에서는 일정한 응력비에 도달한 후 지속하중을 작용시킴에 따라 크리프 변형이 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이때 발생하는 크리프변형량은 지속하중 수준이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 각 지속하중단계에

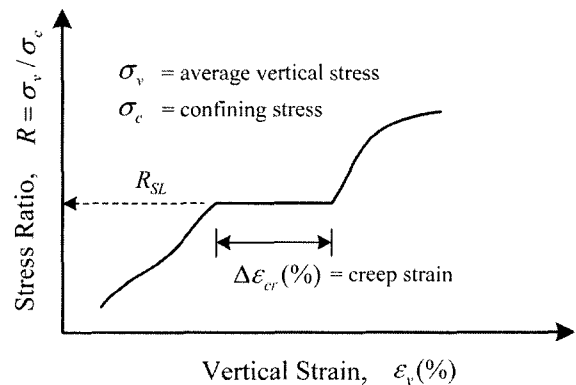
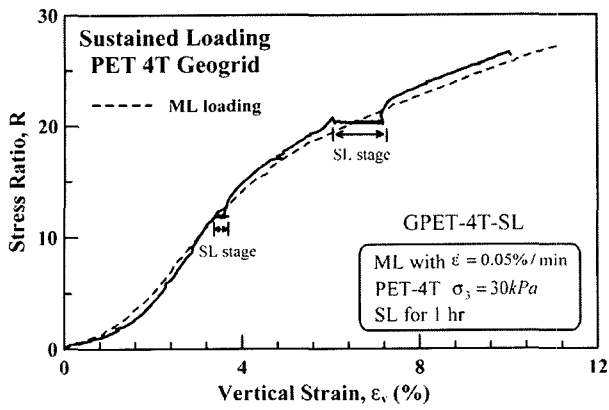


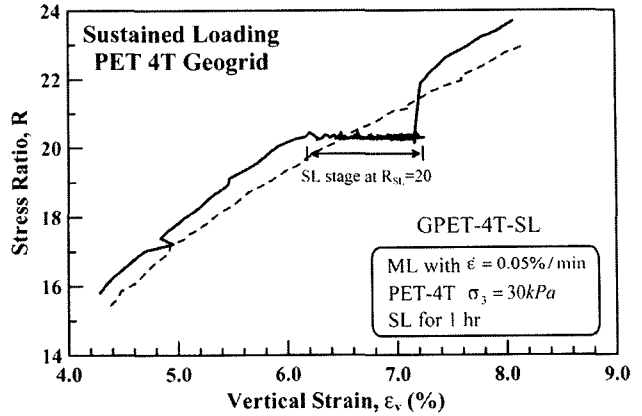
그림 6. 지속하중 시험의 기호 정의

표 5. 지속하중 시험조건

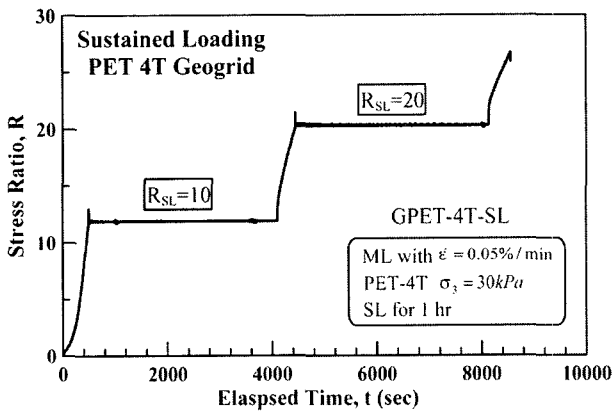
TEST	지오그리드재질	강도(kN/m)	지속하중수준, R_{SL}	지속시간, t_{SL} (sec)	하중이력
GPET-4T-ML	PET	40	N/A	N/A	CML
GPET-4T-SL	PET		$R_{SL} = 11, 20$	3,600	CML-SL
GPP-4T-ML	PP		N/A	N/A	CML
GPP-4T-SL	PP		$R_{SL} = 11, 20$	3,600	CML-SL



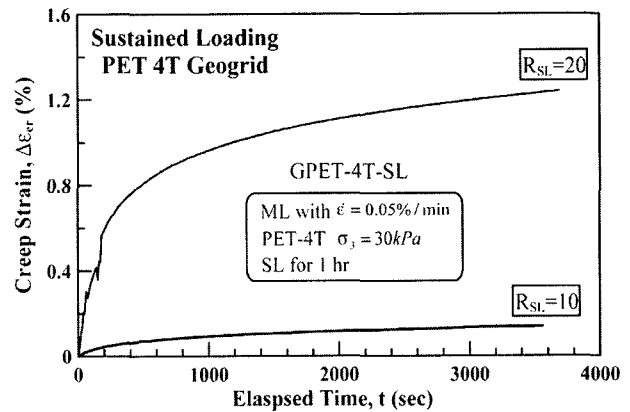
(a) $R - \Delta\epsilon_v$



(b) $R - \Delta\epsilon_v$ (확대부)



(c) $R - t$



(d) $\Delta\epsilon_{cr} - t$

그림 7. 지속하중 시험결과(GPET-4T-SL)

서의 $\Delta\epsilon_{cr} - t$ 곡선을 나타내고 있는 그림 7(d)에서는 전반적으로 시간경과에 따른 크리프곡선이 수렴하고는 있으나 지속적인 증가 추세를 보이고 있으며, 정량적으로 살펴보면 $R_{SL}=10$ 에서는 1시간($t=3600$ sec)의 지속하중 재하시간 동안 총 $\Delta\epsilon_{cr}=0.2\%$ 의 크리프 변형율이 발생하였으나 $R_{SL}=20$ 의 지속하중에서는 총 크리프 변형율이 $\Delta\epsilon_{cr}=1.2\%$ 에 육박하는 것으로 나타나 약 6배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이상과 같이 화강풍화토를 뒤채움 흙으로 사용하는 보강토의 경우 지속하중이 작용함에 따라 크리프변형이 발생하며, 그 크기는 지속하중 수준이 크리프 변형에 따라 달라질 수 있는 것으로 나타나 현장 구조물의 경우 지속하중 작용시 크리프 변형에 따른 장기변형에 대한 문제가 대두될 수 있을 것으로 판단된다.

이와 아울러 그림 7(a)와 7(b)에는 단순재하하중 시험(GPET-4T-ML) 결과도 함께 도시되어 있는데 여기서 관찰할 수 있는 특징적인 경향은 지속하중 재하 후 재하 시킬 경우 $R - \Delta\epsilon_v$ 이 단순재하 곡선에 합류하는 경

향으로서 보강토에서 발생하는 “크리프” 현상은 보강토 각 구성요소의 시간 의존적 점성특성(rate-dependent viscous property)에 기인하며 재료의 열화(degrading) 현상과는 무관하다는 Kongkitkul (2004)의 연구결과를 뒷받침하고 있다. 이러한 경향은 이러한 경향은 “재료의 열화”에 그 개념을 두고 있는 크리프 감소계수를 사용하여 보강재의 장기허용인장강도를 설정하는 접근방법을 채택하고 있는 현 설계법이 경우에 따라서는 매우 보수적인 결과를 초래할 수 있음을 단적으로 보여준다고 하겠다.

4.1.2 지오그리드의 강성의 영향

일반적으로 지오그리드 보강재의 경우 동일한 인장강도를 갖더라도 강성이 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 측면에서 인장강도는 동일하나 강성이 다른 보강재가 적용되는 경우 보강재의 강성이 크리프변형에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 8은 500kN/m의 강성을 갖는 PP 재질의 지오그리드(GPP-4T)가 사용된 GPP-4T-SL 시험결과를 350

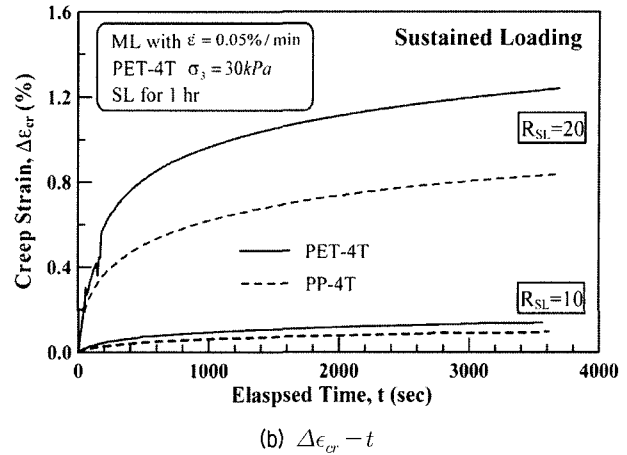
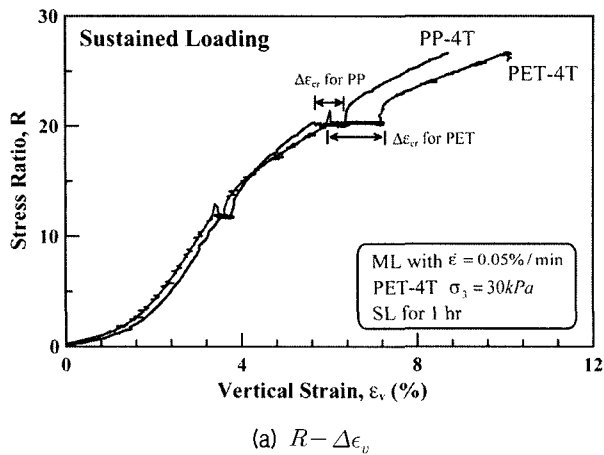


그림 8. GPP-4T vs. GPET-4T

kN/m의 강성을 갖는 GPET-4T-SL에 대한 결과와 비교하고 있다. 먼저 그림 8(a)에 제시된 $R - \Delta\epsilon_c$ 곡선에서는 강성이 큰 GPP-4T를 사용한 GPP-4T-SL의 결과가 GPET-4T-SL의 결과에 비해 다소 강화된 하중-변형률 응답특성을 보이는 경향을 관찰할 수 있으며 그 차이는 하중 수준이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 8(b)는 각 지속하중 단계에서의 크리프변형률을 시간에 따라 도시한 $\Delta\epsilon_{cr} - t$ 곡선을 GPET-4T-SL 시험 결과와 함께 도시하고 있는데 보이는 바와 같이 전반적으로 크리프 변형률 $\Delta\epsilon_{cr}$ 발생경향은 유사하나 강성이 큰 GPP-4T가 적용된 경우에 있어 $\Delta\epsilon_{cr}$ 가 작게 발생하는 것으로 나타났으며 그 차이는 지속하중수준 R_{SL} 이 증가할수록 증가하여 $R_{SL} = 20$ 의 경우 최대 40% 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 장기변형이 발생할 경우 사용성이 문제가 될 수 있는 분야에 지오그리드 보강토 구조물을 적용할 경우 같은 인장강도를 보유하더라도 강성이 큰 지오그리드를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.2 반복하중 작용시 잔류변형 특성

철도 구조물에 보강토 공법을 적용할 경우 보강토는 사용 연한동안 반복적인 철도차량 하중을 받게 되며 따라서 반복하중 작용에 따른 보강토의 잔류변형 거동 특

성 또한 보강토 구조물의 장기거동 관점에서 매우 중요하게 다루어져야 한다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 PSC 시험을 통해 ① 반복하중의 진폭 Δq ② 반복하중 재하 수준 R_{CL} ③ 보강재의 강성 등 세 가지 인자가 반복하중 작용시 보강토의 잔류변형에 미치는 영향을 정성·정량적으로 검토하였다. 그림 9는 반복하중 시험조건에서 사용한 기호를 도식적으로 나타내고 있다. 본 연구를 위한 시험 조건은 아래 표 6과 같다.

4.2.1 반복하중 특성의 영향

임의 주파수를 가진 반복하중은 진폭과 재하수준으로 특징지을 수 있다. 반복하중 특성에 따른 보강토의 잔류 변형 특성을 검토하기 위해 하중수준과 진폭을 달리하

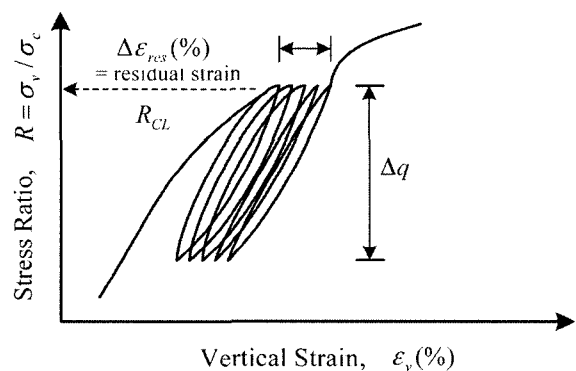
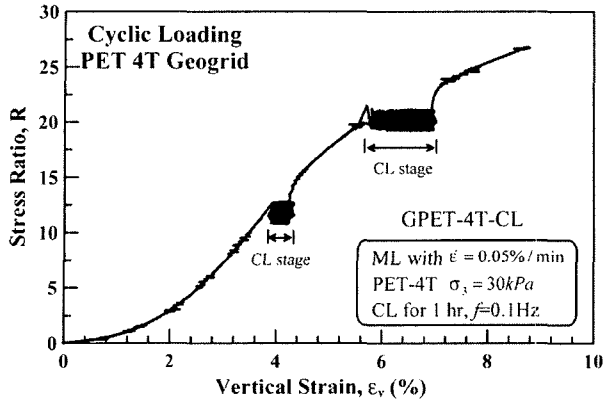


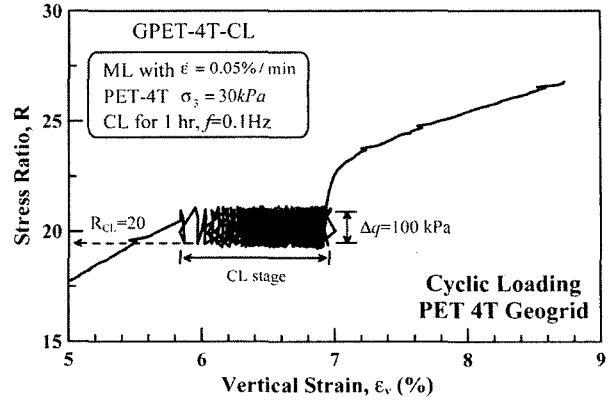
그림 9. 반복하중 시험 기호 정의

표 6. 반복하중 시험조건

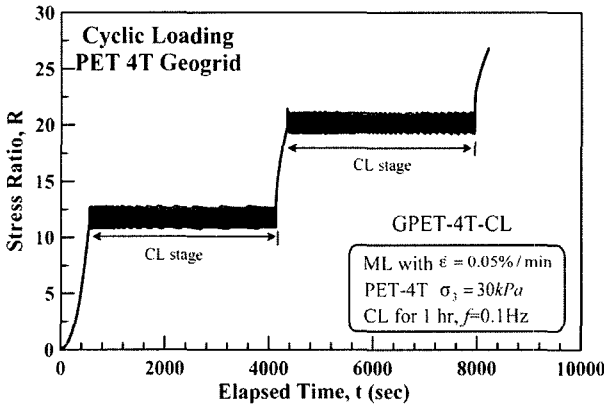
TEST	지오그리드 재질	반복하중 수준, R_{CL}	반복회수, N_{CL}	진폭, $\Delta q(kPa)$
GPET-4T-CL	PET	$R_{CL} = 11, 20$	900	60, 120
GPP-4T-CL	PP	$R_{CL} = 11, 20$	900	60, 120



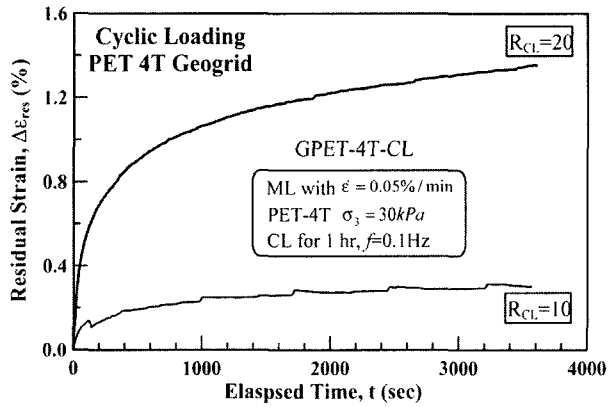
(a) $R - \Delta\epsilon_v$



(b) $R - \Delta\epsilon_v$ (확대부)



(c) $R - t$



(d) $\Delta\epsilon_{res} - t$

그림 10. 반복하중 시험결과 (GPET-CL, $\Delta q = 60kPa$)

며 시험을 수행하였다. 그림 10과 11은 PET 재질의 지오그리드가 적용된 시험 조건 GPET-4T-CL에 있어서 진폭 $\Delta q = 60kPa$ 의 반복하중이 작용함에 따른 잔류변형 ($\Delta\epsilon_{res}$)이 발생 경향을 보여주고 있다. 관찰할 수 있는 바와 같이 전반적으로 반복하중이 작용함에 따라 잔류 변형이 증가함과 아울러 잔류변형의 크기는 반복하중 수준 R_{CL} 이 증가함에 따라 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 반복하중에 따른 잔류변형의 시간 이력 곡선 $\Delta\epsilon_{res} - t$ 을 나타내고 있는 그림 10(d)에서 보다 잘 관찰할 수 있는데 반복하중의 반복회수가 증가하면서 수렴하는 경향을 나타내고 있으며 동일한 조건에서 $R_{CL} = 20$ 의 경우가 $R_{CL} = 10$ 의 경우에 비해 약 5배 이상 큰 잔류변형을 발생시키는 경향을 관찰할 수 있어 반복하중 재하수준 역시 잔류변형에 많은 영향을 미치는 매우 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

한편, 동일한 조건에서 진폭을 두 배($\Delta q = 120kPa$)로 증가시킨 시험에서 얻어진 $\Delta\epsilon_{res} - t$ 곡선을 보여주는 그

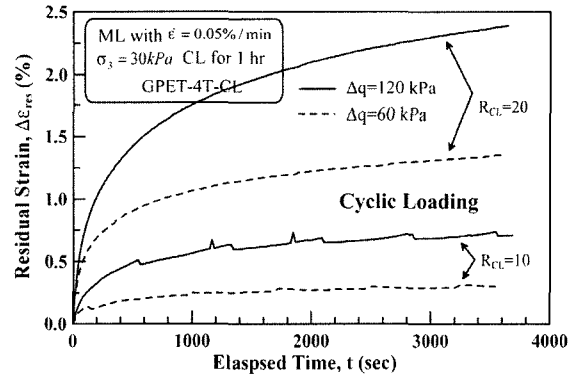


그림 11. 반복하중 진폭의 영향 비교(GPET-4T-CL)

림 11에서는 $\Delta q = 60kPa$ 의 경우에 비해 잔류 변형이 최대 80% 이상 증가하고 그 증가정도 역시 반복하중 재하 수준 R_{CL} 이 증가할 수 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이와 같이 반복하중 작용시 잔류 변형의 크기는 반복하중의 진폭 및 수준에 따라 달라지므로 잔류 변형 평가시 이러한 점이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4.2.2 지오그리드 강성의 영향

앞서 기술한 지속하중시험 결과에서 관찰한 바와 같이 보강토를 구성하고 있는 뒤채움 흙과 지오그리드의 점성특성으로 발생하는 크리프변형은 지오그리드의 강성에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 반복하중 작용시 지오그리드의 강성에 따른 잔류 변형 특성을 분석하였다.

그림 12에서는 GPET-4T-CL 시험조건 및 동일한 시험조건에서 PP 재질의 지오그리드로 보강된 GPP-4T-CL의 결과를 비교하고 있다. 먼저, 지속하중의 경우와 마찬가지로 강성이 큰 PP 지오그리드를 적용한 경우가 동일한 조건에서 잔류 변형이 작게 발생하여 최종단계 ($N_{CYC} = 900$)에서의 잔류 변형량을 비교할 때 강성이 작은 PET 지오그리드가 적용된 경우가 PP 지오그리드가 적용된 경우에 비해 40% 이상 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 반복하중 재하수준 R_{CL} 및 진폭 Δq 가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 따라서

반복하중을 받는 보강토 구조물의 경우 보강재 강성에 따라 잔류 변형이 많은 차이를 보일 수 있으므로 설계시 보강재의 인장강도뿐만 아니라 강성에 대한 고려도 매우 중요한 것으로 나타났다.

4.3 크리프변형과 잔류변형 특성 비교

보강토 구조물의 설계적 관점에서 지속하중 혹은 반복하중에 따른 크리프 혹은 잔류변형에 대한 예측은 구조물의 사용성 검토 측면에서 매우 중요한 부분이 될 수 있다. 본 연구에서는 PSC 시험결과를 토대로 크리프 혹은 잔류변형의 예측의 가능성에 대한 검토를 수행하였다. 기 제시된 시험결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이 $\Delta\epsilon_{res} - t$ 의 유형은 전형적인 log 함수의 유형을 따르고 있어 Log 함수를 이용하여 피팅을 시도해 보았다. 그림 13에서는 피팅 결과를 보여주고 있는데 보이는 바와 피팅한 결과가 결정계수 95% 이상을 보이고 있어 log 함수

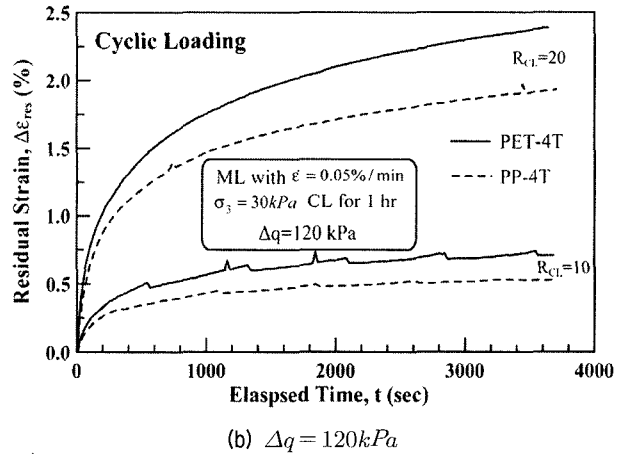
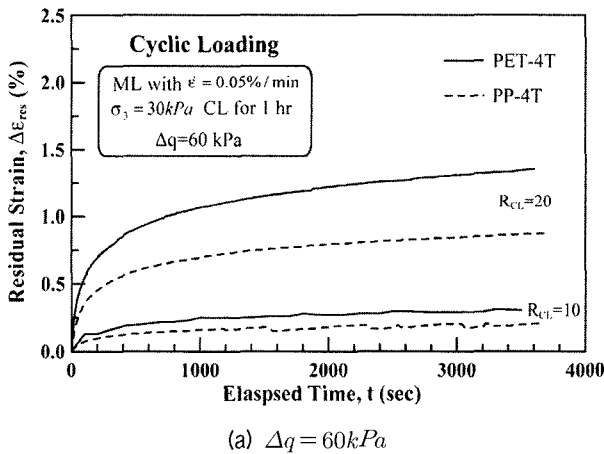


그림 12. 반복하중 시험결과(GPP-4T-CL)

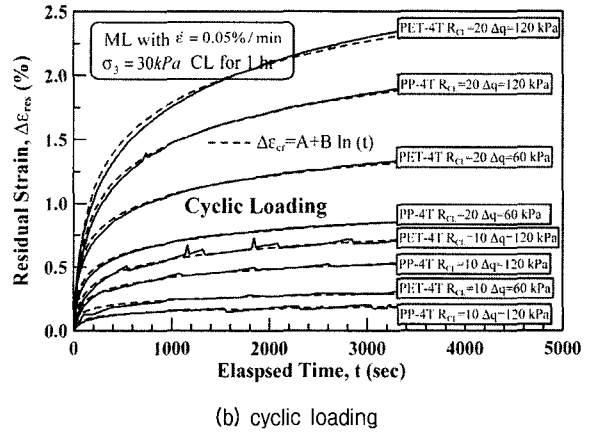
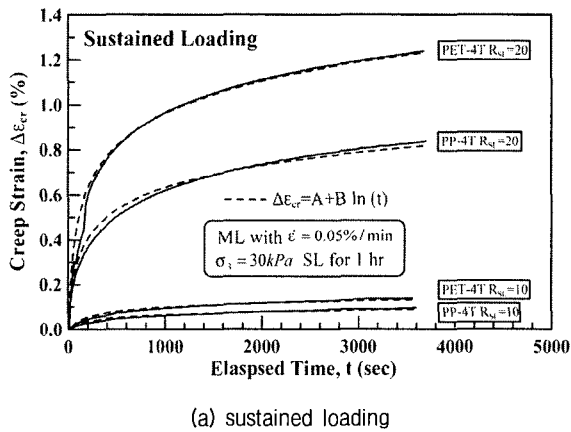


그림 13. 크리프변형 및 잔류변형 특성 비교

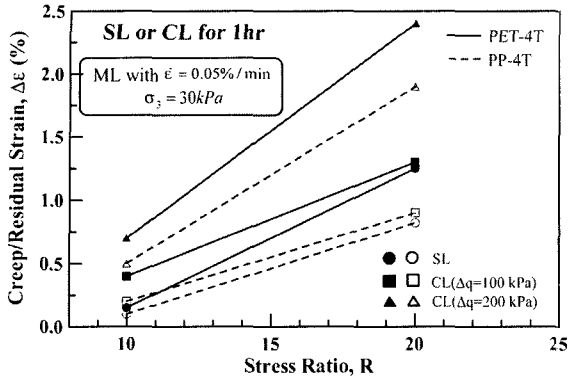


그림 14. $\Delta\epsilon_{cr}$ or $\Delta\epsilon_{res} - R$ 관계

는 다양한 조건에서의 $\Delta\epsilon_{res} - t$ 관계를 표현할 수 있는 것으로 나타나 향후 “크리프/잔류변형 예측기법” 개발에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것을 판단된다.

한편, 그림 14는 잔류 변형량($\Delta\epsilon_{res}$) 혹은 크리프 변형($\Delta\epsilon_{cr}$)과 하중재하수준(R_{SL} 혹은 R_{CL})과의 관계를 보여주고 있다. 본 시험에서는 두 가지의 하중수준($R=10, 20$)만을 고려하여 결론을 내리기에 무리가 있으나 전반적으로 CL 하중조건에서의 잔류 변형이 SL 하중에 의한 크리프 변형에 비해 전반적으로 80% 이상 큰 것으로 나타났으며 CL 하중재하 조건이 하중재하수준에 따른 잔류 변형 증가폭이 SL 하중에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 반복하중재하에 따른 다짐효과로 인해 발생한 추가적인 압축변형도 그 영향을 미쳤을 것이

라고 판단되나 90%정도의 다짐도로 준비된 시편을 사용한 점을 감안할 때 그 효과는 그다지 크지 않을 것이라고 판단되어 대부분의 변형이 뒤편 흡과 지오그리드의 시간-의존적 점성특성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 화강풍화토를 뒤편 흡으로 사용하는 국내 시공여건을 감안할 때 반복하중에 잔류 변형 또한 장기적인 사용성 확보 차원에서 매우 중요한 평가항목인 것으로 판단된다.

4.4 크리프/잔류변형 제어 수단으로서의 선행하중공법 적용성 검토

앞서 제시된 시험결과에서 관찰한 바와 같이 폴리머 재료의 지오그리드로 보강된 보강토에 지속하중이나 반복하중이 작용할 경우 잔류 변형이 발생하게 된다. Shinoda 등(2003), Uchimura 등(2003), Tatsuoka 등(2004)은 잔류 변형 제어 수단으로 모래로 뒤편된 보강토에 선행하중(preloading, PL) 공법의 적용성을 검토하고 실험에 적용하여 적용성을 검토한 바 있다.

본 연구에서는 PL 공법이 우리나라와 같이 화강풍화토를 뒤편 흡으로 사용하는 경우에 있어서도 적용될 수 있는지를 검토하기 위해 PSC 시험을 이용하여 ①PL 수준(R_{PL}) ②지속/반복하중 수준(R_{SL} or R_{CL}) 등이 반복하중 및 지속하중 작용시 보강토에 발생하는 잔류 변형에 어떠한 영향을 미치는지를 정성·정량적으로 검토하였

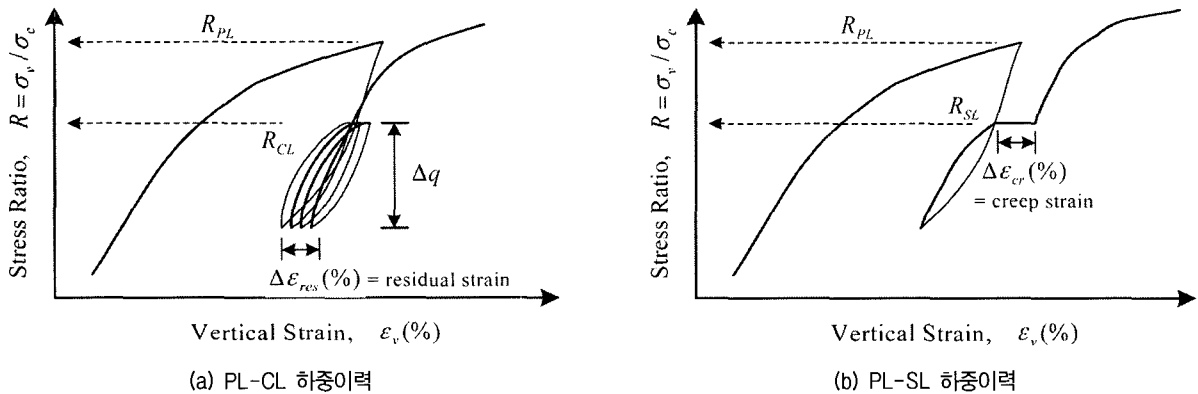


그림 15. 선행하중 공법 기호 개요도

표 7. PL 시험조건

TEST	보강재 재질	선행하중, R_{PL}	지속/반복하중, R_{UNL}	진폭, Δq (kPa)	지속/반복시간
GPET-4T-PL-CL	PET	25	11, 20	60	1 시간
GPP-4T-PL-CL	PP			60	
GPET-4T-PL-SL	PET			-	
GPP-4T-PL-SL	PP			-	

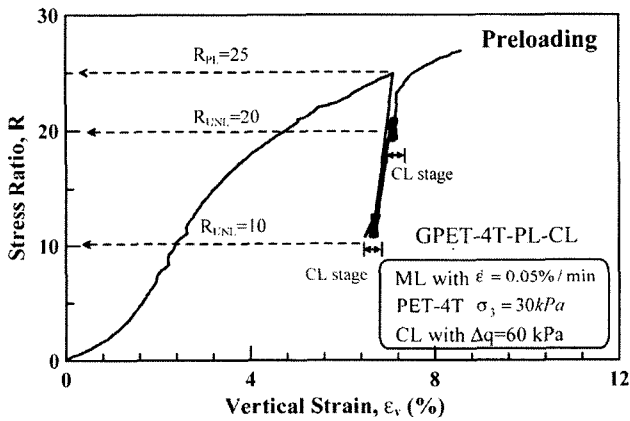
다. 그림 15는 PL 적용성 검토에서 사용한 제반 기호를 도식적으로 설명하고 있으며 표 7은 시험조건을 기술하고 있다.

4.4.1 PL 적용시 보강토의 크리프/잔류변형 거동 특성

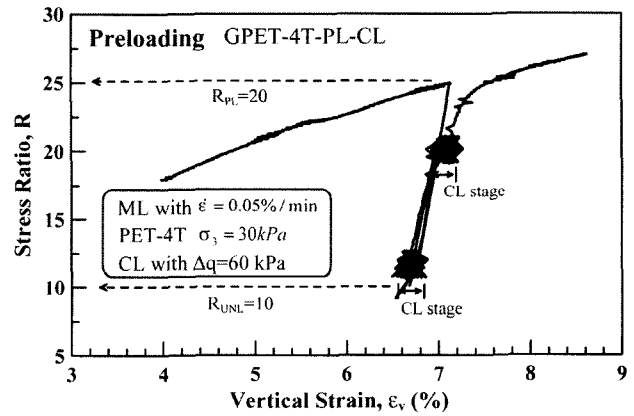
그림 16은 선행하중 작용 후 반복하중을 재하하는 GPET-4T-PL-CL 시험조건을 보여주고 있다. 그림 16(a)는 $R - \Delta\epsilon_v$ 곡선을 보여주고 있는데 선행하중 효과로 인해 재하 후 작용하는 반복하중으로 인한 잔류 변형이 미미하게 발생하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 한편, 잔류 변형-시간이력 ($\Delta\epsilon_{res} - t$)을 나타내고 있는 그림 16(d)에서는 선행하중을 적용하지 않은 경우도 함께 도시하고 있는데 보이는 바와 같이 선행하중을 작용시킴에 따라 반복하중 재하 최종단계에서의 잔류 변형이 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 선행하중의 잔류 변형 저감효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 모래를 대상으로 한 Tatsuoka 등

(2004)의 연구결과를 잘 뒷받침하는 것으로서 선행하중 개념의 잔류 변형 제어 효과를 보여주는 것이라 할 수 있다.

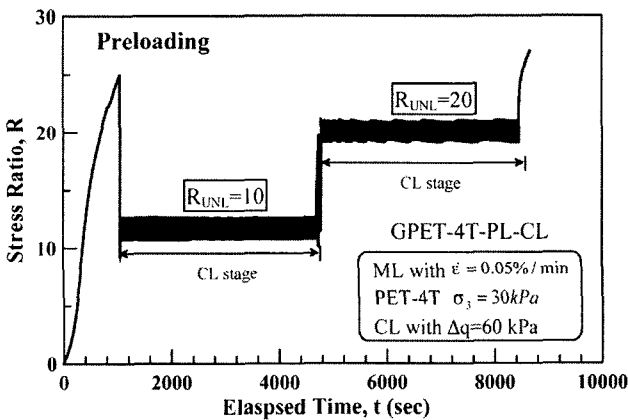
PL 공법의 지속하중시 크리프 변형 억제효과를 검토하기 위해 반복하중의 경우와 동일하게 응력비 $R_{PL} = 25$ 까지 단순재하한 후 $R_{SL} = 10, 20$ 에서 1시간 가량의 지속하중을 가하는 하중이력에 대한 시험(GPET-4T-PL-SL)을 수행하였다. 먼저 $R - \Delta\epsilon_v$ 곡선을 나타내는 그림 17(a)에서는 선행하중 효과로 인해 지속하중에 의한 크리프 변형이 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며 $\Delta\epsilon_{cr} - t$ 를 보여주는 그림 17(b)에서도 크리프 변형율이 선행하중을 적용하지 않은 경우에 비해 1/10 수준으로 감소하는 것으로 나타나 선행하중 작용시 지속하중에 따른 크리프 변형을 거의 전부 제거할 수 있는 것으로 분석되었다.



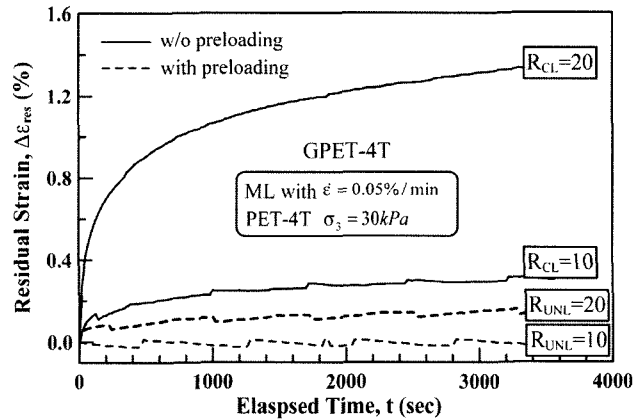
(a) $R - \Delta\epsilon_v$



(b) $R - \Delta\epsilon_v$ (확대부)



(c) $R - t$



(d) $\Delta\epsilon_{res} - t$

그림 16. 선행하중 시험결과(GPET-PL, $\Delta q = 50 kPa$)

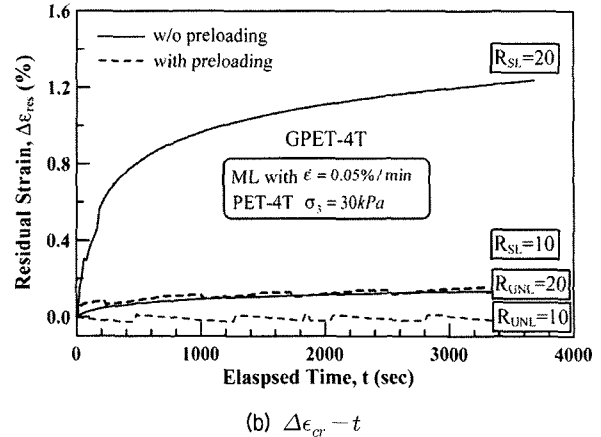
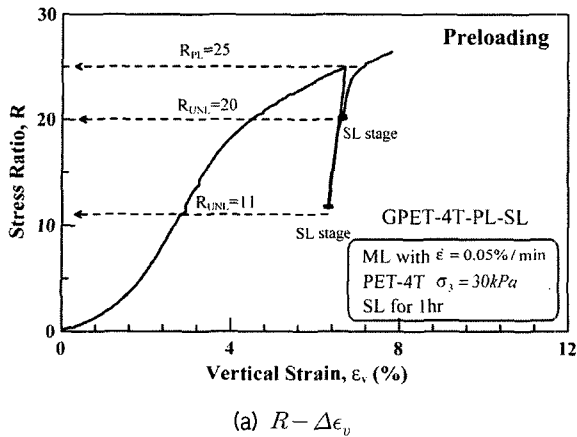


그림 17. 선행하중 시험결과 (GPET-PL, $\Delta q = 50kPa$)

4.4.2 선행하중비 [$R_{PL}/(R_{SL} \text{ or } R_{CL})$]에 따른 크리프/잔류 변형 특성

선행하중비 [$R_{PL}/(R_{SL} \text{ or } R_{CL})$]에 따른 크리프/잔류 변형 특성은 앞 절에서 관찰한 바와 같이 PL 공법을 잔류 변형 제어 수단으로 활용할 경우 선행하중 작용후 일정 하중까지 제하한 상태에서 지속하중 혹은 반복하중 작용시 선행하중의 효과가 발휘된다. 따라서 PL공법의 적용에 있어서 선행하중비 [$(R_{SL} \text{ or } R_{CL})/R_{PL}$]가 크리프/잔류 변형 제어 효과에 많은 영향을 미치므로 이에 대해 세부적으로 고찰하였다. 여기서 선행하중비는 과압밀비 (over-consolidation ratio, OCR)로 간주할 수 있다.

그림 18에서는 S-SL, S-CL, S-PL-CL 및 S-PL-SL 시리즈 시험결과를 토대로 선행하중 작용에 따른 잔류 변형 발생경향을 비교하였다. 여기서 횡축은 선행하중과 지속하중 혹은 반복하중 비 ($R_{SL} \text{ or } R_{CL})/R_{PL}$ 를 나타내며 종축은 선행하중이 작용하지 않은 경우의 비로 표현된 크리프 변형 혹은 잔류 변형을 나타낸다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 선행하중의 효과는 지속하중 혹은 반

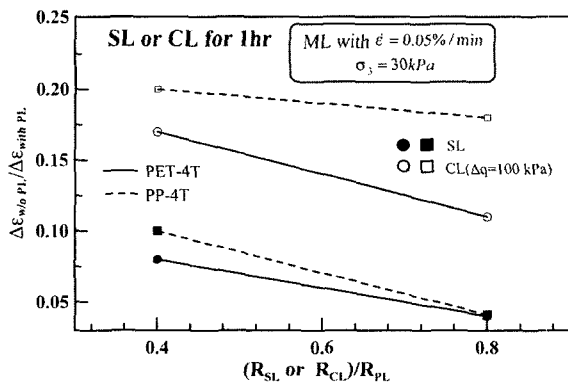


그림 18. 선행하중의 효과

복하중 수준이 높을수록 증가하는 것으로 나타났으며 이는 지속하중 혹은 반복하중 수준이 높을수록 선행하중으로 인한 잔류 변형 억제 효과가 큰 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서 화강풍화토로 뒤채움된 보강토에 지속하중 혹은 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 보강토 구조물의 장기 변형 특성 메카니즘의 기초 연구로서 PSC 시험을 수행하였으며 그 결과를 아래와 같이 요약한다.

- (1) 보강토에 지속하중 재하시 발생하는 크리프 변형은 뒤채움 흙과 보강재의 점성특성에 기인하며 보강재의 강성 및 지속하중수준에 따라 달라진다.
- (2) 지속하중 재하 후 재 재하시 응력-변형을 곡선은 단순재하곡선에 합류하는 경향을 보이며 이는 크리프 변형은 보강토를 구성하는 구성요소의 시간 의존적인 점성특성과 직접적인 연관이 있는 것으로서 각 구성요소의 시간에 따른 성능저하와는 무관함을 나타낸다.
- (3) 반복재하 형태의 하중이 작용하는 보강토의 경우 잔류 변형은 시간 의존적인 형태로 발생하므로 사용연한에 걸쳐 발생할 수 있으며 그 크기는 작용하는 반복하중의 진폭 및 하중수준에 좌우된다.
- (4) 반복하중으로 인한 잔류 변형량은 보강재의 강성에 따라 현격한 차이를 보이므로 철도노반과 같이 반복하중에 따른 잔류 변형 제어가 필요한 분야에 적용시에는 보강재 강성 선정에 있어서 주의가 요망된다.

(5) 반복/지속하중 작용 이전에 반복하중의 최대치를 초과하는 하중을 선행하중으로 작용시킬 경우 반복/지속하중으로 인한 잔류 변형을 현저히 감소시킬 수 있으며 따라서 시공 중 혹은 직후 적절한 크기의 하중을 가해주는 선행하중 공법이 잔류 변형 제어를 위한 수단이 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0)지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 유충식, 정혁상, 정혜영 (2005), "사면안정측면에서의 보강토 옹벽 붕괴 요인 분석", 2005 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 제주, pp.11-20.

2. Collin, J.G. (1997), "Lessons learned from a segmental retaining wall failure", *Geotextiles and Geomembranes*, 19(7), pp.445-454.

3. FHWA (1997), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines, *FHWA Demonstration Project 82*, FHWA, Washington, DC, FHWA-SA-96-071.

4. Hirakawa, D., Uchimura, T., Shibata, Y., and Tatsuoka, F. (2002), "Time-dependant deformation of geosynthetics and geosynthetic-reinforced soil structures", *Proc. of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, Vol.4, pp.1427-1430.

5. Kongkitkul, W. (2004), "Effects of material viscous properties on the residual deformation of geosynthetic-reinforced sand", Ph.D Thesis, University of Tokyo.

6. NCMA (1997), Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2nd Ed., NCMA, Virginia.

7. Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Shinoda, M., Kongkitkul, W., and Uchimura, T. (2004), "An Old but New Issue; Viscous Properties of Polymer Geosynthetic Reinforced and Geosynthetic-Reinforced Soil Structures", Kenote Lecture, *Proc. 3rd Asian Regional Conf. On Geosynthetics*, Seoul, Korea, pp.29-77.

8. Uchimura, T., Tateyama, M., Tanaka, I., and Tatsuoka, F. (2003). "Performance of a preloaded-prestressed geogrid-reinforced soil pier for a railway bridge", *Soils and Foundations*, Vol.43, No.6, pp. 155-172.

(접수일자 2005. 8. 16, 심사완료일 2005. 12. 28)