

지속하중 및 반복하중 재하시 보강토 옹벽의 잔류변형 특성

Time-dependent Deformation Characteristics of Geosynthetic Reinforced Modular Block Walls under Sustained/Cyclic Loading

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

김 선 빈² Kim, Sun-Bin

김 영 훈³ Kim, Young-Hoon

한 대 희⁴ Han, Dae-Hui

Abstract

Despite a number of advantages of reinforced earth walls over conventional concrete retaining walls, there exist concerns over long-term residual deformation when they are 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 modular block walls under sustained and/or repeated loads were investigated using reduced-scale model tests. The results indicated that a sustained or repeated load can yield appreciable magnitude of residual deformation, 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 옹벽은 기존 콘크리트 옹벽에 비하여 많은 장점을 지니고 있으나 장기적으로 지속하중 혹은 반복하중 등에 의한 잔류변형의 우려로 영구 구조물로서의 적극적인 적용에 장애가 되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 보강토 구조물의 시간의존적 잔류변형 메카니즘의 규명과 아울러 잔류변형을 예측하고 제어하는 기술이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 연구의 필요성에 근거하여 보강토 옹벽에 발생할 수 있는 장기변형 특성 고찰에 주안점을 두고 지오그리드와 표준사로 뒤채움된 모형 보강토 옹벽에 대한 지속하중 혹은 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 보강토 구조물의 장기변형 특성 메카니즘을 축소모형실험을 통해 고찰하였다. 그 결과 보강토 옹벽의 시간의존적 변형은 작용하는 하중특성 뿐만 아니라 뒤채움흙 및 보강재의 역학적 특성에도 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 선행하중을 작용함으로써 시간 의존적 잔류변형을 제어할 수 있는 것으로 파악되었다.

Keywords : Cyclic load, Geosynthetic, Preloading, Reduced-scale model test, Reinforced earth wall, Sustained load

1. 서 론

보강토 구조물은 현재까지 다양한 분야에서의 적용을 통해 기존 콘크리트 구조물의 대체공법으로 그 적용

성을 인정받고 있다. 최근에는 단기적인 안정성 이외에도 장기적으로 지속하중 혹은 반복하중이 작용할 수 있는 영구구조물에서 보강토 공법 적용을 시도하고 있으나 콘크리트 구조물에 비하여 지속하중 및 반복하

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Graduate Student. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., ksb9677@hanmail.net, 교신저자)

3 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

4 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

중 작용에 대한 잔류변형의 우려가 있어 적극적인 적용에 장애가 되고 있다. 영구구조물로서의 보강토 공법이 적용되기 위해서는 지속하중 및 반복하중 등으로 인한 보강토 구조물의 시간의존적 잔류변형 특성 메커니즘에 대한 이해가 필요하며, 잔류변형의 예측을 통해 이를 설계에 반영하여야 한다. 아울러 이러한 잔류변형을 억제할 수 있는 대책공법 개발을 위한 노력이 필요하다.

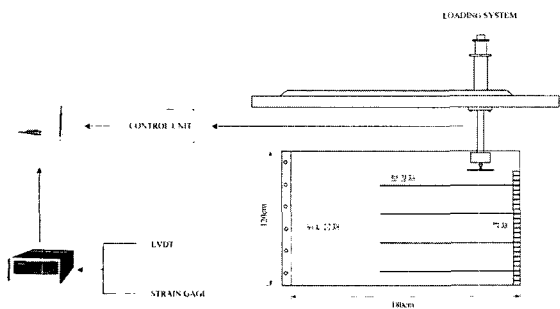
한계평형기법에 근거한 보강토 구조물 설계법(NCMA 1997; FHWA 1997)에서는 크리프 감소계수를 사용하여 보강재의 인장강도를 일률적으로 감소시키는 방법을 통해 보강토 구조물의 장기적인 안정성을 고려하고 있다. 이러한 방법은 보강재의 인장강도를 과소평가하는 직접적인 요인이 되고 있으며 따라서 비경제적인 설계를 초래할 수 있는 문제점이 있다. 보강토 구조물이 영구 구조물로 보다 적극적으로 활용되기 위해서는 안정성 뿐만 아니라 사용성 관점에서 사용연한 동안 발생할 수 있는 장기변형을 고려해야 하며, 이를 위해서는 보다 근본적인 접근방법이 필요하다. 대표적인 연구로서 일본 동경대학의 Tatsuoka 연구그룹에서는 다양한 하중이력에서 보강재의 크리프 특성에 대한 연구뿐만 아니라 요소수준 및 구조물 수준에서 보강토의 시간 의존적 응력-변형률 관계에 대한 연구를 수행하고 있으며 이와 관련된 결과를 발표한 바 있다(Hirakawa 등 2002, Tatsuoka 등 2004). 한편, 성균관대학교 지반연구실에서는 앞서

보강토에 지속하중 및 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 보강토 구조물의 장기변형 특성 메커니즘의 기초연구 차원에서 뒤택음 흙으로 사용하는 화강풍화토와 국내에서 생산되는 지오그리드를 대상으로 요소(element) 수준의 거동특성 연구를 수행하여 보고한 바 있으며(유충식 2005, 유충식 등 2005a, 2005b, 유충식 등 2006), 본 연구에서는 이를 토대로 구조물 수준에서의 거동특성을 고찰하기 위하여 축소모형실험을 수행하여 보강토 옹벽의 지속하중 및 반복하중에 대한 시간 의존적 잔류변형 메커니즘에 대한 규명 시도와 아울러 잔류변형을 제어하기 위한 수단으로 선행하중공법의 적용성을 검토하였다.

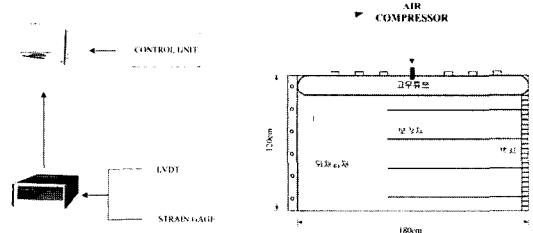
2. 축소모형실험

2.1 토조 및 모형실험 장치

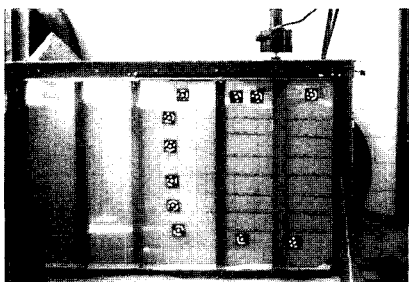
본 연구에서는 그림 1의 모형토조를 사용하여 축소모형실험을 수행하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 모형토조는 길이 1.8m 높이 1.2m, 폭 0.92m의 크기로 설정하였다. 토조내 지반조성 및 상재하중 재하시 측면 변형(배부름)이 없도록 30mm 두께의 아크릴판으로 제작하였으며 측면 아크릴 벽체와 상부 반력판에는 프레임을 설치하여 휨변형이 억제될 수 있도록 하였다. 보강토 옹벽의 벽체로 사용하는 블록은 규격이 길이 60mm, 높이



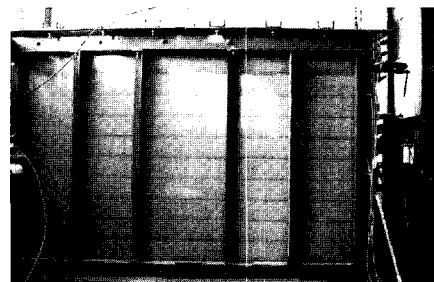
(a) 유압을 이용한 하중재하 시스템



(b) 공압을 이용한 하중재하 시스템



(c) 유압을 이용한 하중재하 시스템



(d) 공압을 이용한 하중재하 시스템

그림 1. 토조 및 재하장치 계통도 및 사진

40mm인 스테인리스강 파이프로 제작하였으며, 블록마다 2개소에 구멍을 뚫어 전단키(shear key)가 설치될 수 있도록 하였다. 아울러 보강토 옹벽의 블록은 여러 개의 콘크리트 블록을 쌓아 연속벽체로 구현하나 축소모형실험에서는 이를 평면변형으로 간주하여 각 층당 800mm의 폭을 가진 스테인리스강 파이프를 사용하여 실험을 단순화하였으며 보강토 옹벽의 평면변형상태를 유지하기 위하여 모형 벽체와 벽면 사이에는 건설 마감재료인 문풍지를 설치하여 모래의 유실을 방지하였으며 마찰을 최소화 하였다.

한편, 시험장치로는 단순재하하중(continuous monotonic loading, CML), 지속하중(sustained loading, SL) 및 반복하중(cyclic loading, CL)의 구현이 가능한 유압 재하장치와 로드셀 및 변위/변형을 측정 장치등의 계측센서, 공기압 시스템 컨트롤 박스, 데이터 수집장치 및 저장장치로 구성되어 있다. 시험장치의 주요 특징은 표 1에서 정리하고 있다. 그림 1에서 보이는 바와같이 축조된 모형 보강토 옹벽은 배면 상부 전반에 걸쳐 고루 하중을 재하할 수 있도록 공압을 이용하여 하중을 재하하는 방

식[그림 1(b)]와 기초 footing에 하중을 재하할 수 있도록 유압을 이용하는 방식[그림 1(a)]를 모두 채택하였으며, 유압 재하방식의 경우 정적·동적 재하가 모두 가능하도록 구축하였다. 실험 중 계측은 100mm 용량의 LVDT로 벽체변위를, 300mm 용량의 내부변위계로 유압 재하판의 연직변위를, 200kN 용량의 로드셀로 유압재하장치의 수직하중을 측정하였으며 지오그리드에 부착된 스트레인게이지를 이용하여 변형률을 측정하였다. 각종 데이터의 수집은 TDS-303 데이터로거를 이용하였다.

2.2 모형지반 및 보강재

모형옹벽의 뒤채움흙은 주문진 표준사를 사용하여 조성하였다. 사용된 표준사에 대한 입도분포 실험후 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과 SP에 해당하는 입도분포의 균등한 모래질 흙으로 분석되었으며, 그림 2의 강사장치로 1.5m 높이에서 강사하여 상대밀도 75% 정도로 조성시 뒤채움흙의 내부마찰각은 약 40°로 산정되

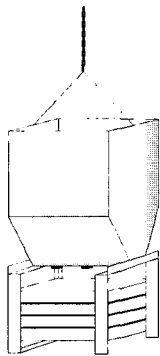
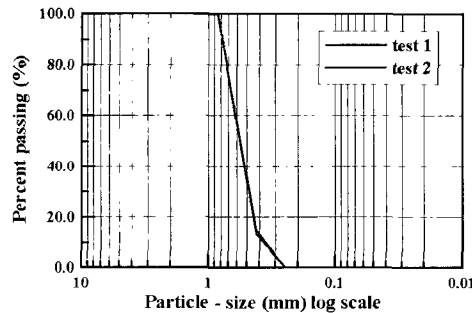
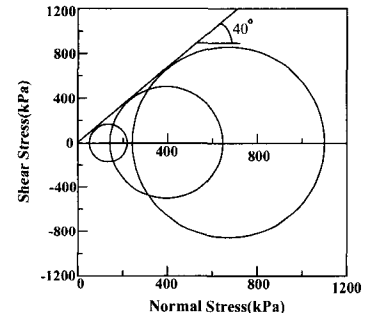


그림 2. 강사장치



(a) 입도분포곡선



(b) 파괴 포락선

그림 3. 모형지반의 입도분포곡선 및 파괴포락선

표 1. 시험장치 사양

구성장치		사양 및 특징
유압재하장치		정적 및 동적재하 변위제어/하중제어 가능 변위제어-재하속도 : 0.001~100mm/min 하중제어-재하속도 : 0.8~2kPa/min 최대재하능력 : 200.0kN 0.001~1.0 Hz의 sine 파형 구현
모형토조		92cm(폭) × 180cm(길이) × 120cm(높이)
계측 센서부	수직하중 로드셀	용량: 200.0kN
	내부변위 측정장치	용량: 300mm
	벽체변위 측정 LVDT	용량: 100mm
	지오그리드 변형률 측정용 strain gauge	10~15% 정도의 변형률 측정 가능
데이터 수집시스템	TDS-303 데이터로거	데이터의 디스플레이 및 컴퓨터로의 전송
공압 시스템	압력컨트롤 패널, 에어백, 반력판	최대가압능력 : 300kPa

었다. 그림 3에서 뒤채움흙의 입도분포곡선 및 파괴포락선을 보여주고 있다.

보강재는 20kN/m, 40kN/m, 55kN/m의 인장강도를 갖는 polypropylene(PP), polyester(PET) 재질의 다양한 지오그리드가 사용되었다. 이에 대한 구체적인 제원은 표 2와 같다.

모형지반은 블록을 3단씩 설치한 후 상대밀도 75% 정도가 되도록 강사하여 조성하였으며, 각 층에서 강사가 완료된 후 준비된 지오그리드를 1H(H = 옹벽높이) 길이로 포설하였다.

2.3 실험조건 및 방법

2.3.1 실험조건

본 연구에서 수행한 보강토 옹벽의 축소모형실험에 대한 실험조건을 표 3에 정리하고 있다. 정리한 바와 같이 지속/반복하중 수준(q_{SL} , q_{CL})과 반복하중 진폭(double amplitude, Δq) 및 반복하중 횟수(N_{CY}), 지오그리드 재질 및 강성 등에 따른 보강토 옹벽의 시간의존적 잔류변형 특성을 살펴보기 위하여 다양한 하중이력에 대한 실험을 수행하였다. 아울러 지속하중(Sustained Loading, SL) 혹은 반복하중(Cyclic Loading, CL)에 노출되는 보강토 옹벽의 잔류변형 제어수단으로서 선행하중(Pre-loading, PL)의 적용성을 검토하였다.

2.3.2 실험방법

본 실험에서의 모형 보강토 옹벽 시공과정은 그림 4와 같이 먼저 스테인리스강 블록을 일정 높이까지 축조한 후 뒤채움흙인 표준사를 30cm 두께로 강사한 후 준비된 지오그리드를 포설하며, 다시 지오그리드의 설치간격

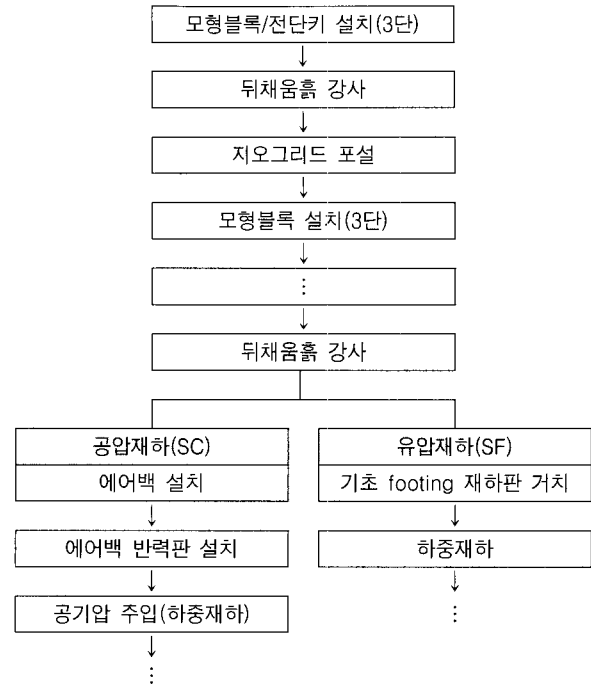


그림 4. 모형 옹벽 조성 및 시험과정

표 2. 모형실험에 적용된 지오그리드 제원 및 재질

시편	재질	코팅	파단강도 (kN/m)	파단시 변형률 (%)	strand 수/10cm	격자크기 (mm)
GPET-2T	Polyester	PVC	20	<20	2	35×35
GPET-4T	Polyester	PVC	40	7.5	2	30×70
GPP-2T	Polypropylene	PVC	20	12	2	40×40
GPP-4T	Polypropylene	PVC	40	<12	2	30×35
GPET-5T	Polyester	PVC	50	12.5	4	15×20

표 3. 모형실험 실험조건

구분	재하이력	CML 재하속도 δ (kPa/hr)	SL시 지속하중 (kPa)	SL시 지속시간 (hour)	CL시 진폭 (kPa)	CL시 반복횟수 (times)	하중이력
SC-SL	CML→SL	100	20/40/60/100	2 or 5	-	-	b)
SF-ML	CML	100	100	-	-	-	a)
SF-SL	CML→SL	50/100	50 or 100	2 or 5	-	-	b)
SF-CL	CML→CL	100	-	-	20, 40	180 or 360	c)
SF-PSL	CML→SL	100	50	2	-	-	e)
SF-PCL	CML→SL→CL	100	50 or 100	2	20	180	d)

- a) 일정하중재하조건(CML, 공압 및 기초하중), 재하속도 $\delta = 100 \text{ kPa/hr}$
- b) CML 후 지속하중(q_{SL}), 지속시간 $t_{SL} = 2 \text{ or } 5 \text{ hr}$
- c) CML 후 반복하중(q_{CL}), 하중진폭 $\Delta q = 20 \text{ or } 40 \text{ kPa}$, 반복회수 $N_{CY} = 180 \text{ or } 360$
- d) CML로 선행하중(q_{PL}) 재하 후, 제하 및 q_{CL} , 하중진폭 $\Delta q = 20 \text{ kPa}$, 반복회수 $N_{CY} = 360$
- e) CML로 선행하중(q_{PL}) 재하 후, 제하(q_{UNL}) 및 q_{SL} , $t_{SL} = 2 \text{ hr}$

에 해당하는 높이까지 블록을 추가로 축조하고 뒤채움흙을 포설하는 일련의 과정을 반복하여 완성하였다. 시공 완료후 재하조건에 따라 공압을 이용하여 상재하중을 작용하는 경우 모형지반 상부에 에어백과 반력판을 설치한 후 공기압을 주입하여 하중을 재하하였으며, 유압재하장치를 이용하여 기초 footing에 하중을 재하하는 경우 재하장치에 기초 footing 재하판을 거치하여 재하하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 지속하중 작용에 따른 보강토 응벽의 잔류변형 특성

본 시험에서는 보강토 응벽이 교량의 교대부에 영구 구조물로 적용되어 상판 기초를 지지하는 경우나 보강토 응벽에 확대기초 등의 상재하중이 설계연한 동안 지속적으로 작용하는 경우 보강토 응벽에 발생할 수 있는 시간 의존적 잔류변위 특성 메카니즘 고찰에 주안점을 두었다. 그림 5는 본 연구에서 사용한 각종 기호를 도식적으로 나타내고 있으며 시험조건은 다음의 표 4와 같다.

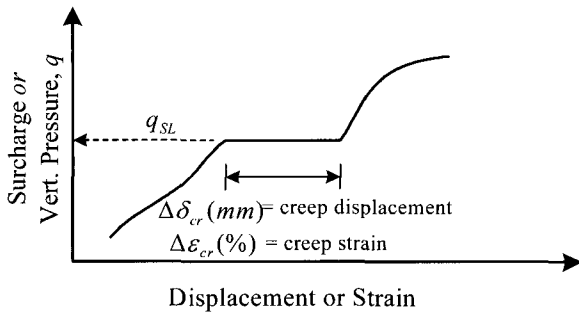


그림 5. 지속하중 시험의 기호 정의

표 4. 지속하중 시험조건

TEST	재질	강도 (kN/m)	지속하중 수준 q_{sl} (kPa)	지속시간 t_{sl} (hr)	하중이력	
등분포 상재하중재하 (SC)	GPET-5T	PET	50	20/40/60	1 (각 하중별)	(1)
	GPP-2T	PP	20	100	2	(2)
	GPP-4T	PP	40	100	5	(3)
	GPET-4T	PP	40	100	5	(3)
기초하중재하 (SF)	GPP-2T(R)	PP	20	50/100	2	(4)
	GPP-2T(R)	PP	20	100	5	(5)
	GPP-2T	PP	20	100	5	(5)
	GPP-4T	PP	40	100	5	(5)
	GPET-5T	PET	50	100	5	(5)

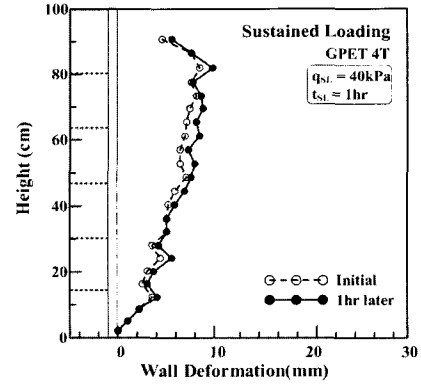
주¹) 하중이력: (1) 0 → 20kPa → 40kPa → 60kPa → 80kPa; (2) 0 → 30kPa → 50kPa → 80kPa → 100kPa; (3) 0 → 30kPa → 50kPa → 80kPa → 100kPa; (4) 0 → 50kPa → 100kPa → 120kPa; (5) 0 → 100kPa;

주²) (R) : scale down(지오그리드의 스트랜드의 가닥을 줄이는 방법으로 강성과 강도를 1/2로 감소)

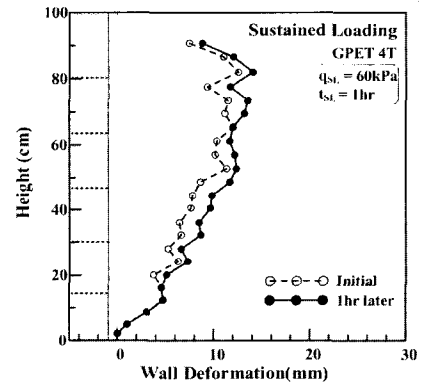
3.1.1 기본 메카니즘

1) 공압을 이용한 상재하중 재하조건

표 4에 제시된 공압을 이용한 상재하중 작용조건 중 PET-5T 지오그리드가 사용된 GPET-5T에 대한 지속하중 실험결과를 제시하고 있다. 먼저 그림 6은 축조완료 후 공압을 이용하여 상재하중을 재하하는 과정에서의 발생한 벽체 프로파일을 보여주고 있는데 보이는 바와



(a) 지속하중 40kPa



(b) 지속하중 60kPa

그림 6. 지속하중 전후 벽체변위 프로파일

같이 1시간의 지속하중 재하기간 동안 벽체 전반에 걸쳐 잔류변위가 유발되어 최대 3mm 정도까지 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

그림 7에서는 벽체변위와 보강재 변형률의 시간에 따른 이력곡선을 보여주고 있다. 먼저 상재하중 작용에 따른 벽체 수평변위와 보강재 변형률 이력곡선을 보여주고 있는 그림 7(a), 7(b)를 관찰하면 각 하중단계에서의 $\delta_{w,h}$ 와 ϵ 는 벽체 하단부로부터 약 0.8H 상부 지점에서 최대값이 발생하여 $q_{SL} = 20kPa$ 에서는 $\delta_{w,h} = 7.5mm$, $\epsilon = 0.35\%$, $q_{SL} = 40kPa$ 에서는 각각 $8.0mm$, 0.75% , 그리고 $q_{SL} = 60kPa$ 에서 $10.0mm$, 1.20% 로 재하하중 증가로 인해 벽체 변위 및 보강재 인장변형률이 증가하고 있다.

한편, 각 지속하중 단계에서 시간 의존적 변위 및 변형률 발생경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 이러한 경향은 지속구간에서의 벽체잔류변위 $[\Delta(\delta_{w,h})_{cr}]$ 와 지오그리드 잔류인장변형률 $(\Delta\epsilon_{cr})$ 을 보여주고 있는 그림 7(c)와 7(d)에서 관찰할 수 있다. 즉, 그림 7(c)에서의 시간에 따른 벽체 잔류변위 곡선 $[t_{SL} - \Delta(\delta_{w,h})_{cr}]$ 과 보강재 잔류

변형률 곡선 $(t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr})$ 을 관찰하면 40kPa의 상재하중을 1시간 재하시 잔류변위는 약 1mm, 잔류변형률은 0.03% 발생하는 것으로 나타났다. 모형실험의 치수효과로 인해 뒤채움흙의 응력수준은 낮은 반면 보강재는 상대적으로 강성이 큰 관계로 잔류변위 및 변형률의 절대적인 크기가 그다지 크지 않게 보여지나 잔류변형이 발생할 수 있는 소지를 보여주고 있다. 이러한 결과들은 모형실험의 치수효과로 인해 정량적인 제한사항은 있으나 보강토 구조물에 지속하중 작용시 잔류변형의 발생가능성을 보여주는 것이라 할 수 있다. 아울러 시간이력에 대한 잔류변형, 즉 $t_{SL} - \Delta(\delta_{w,h})_{cr}$ 관계는 그림 7(c)에서 보이는 바와 같이 전형적인 쌍곡선함수의 형태를 따르는 것으로 나타나 향후 잔류변형의 예측기법에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2) 기초하중 재하조건

기초하중 재하조건 중 지오그리드의 스트랜드의 가닥을 줄이는 방법으로 강성과 강도를 1/2로 감소시킨 PET-2T 지오그리드가 사용된 GPP-2T(R)에 대한 결과

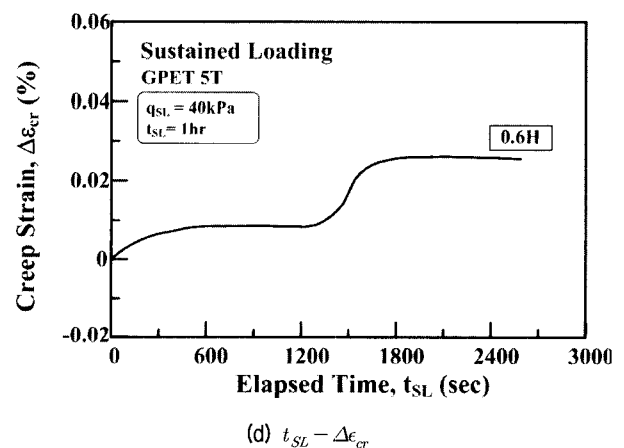
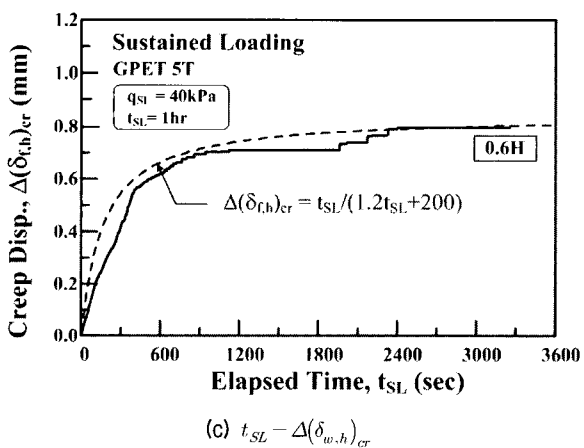
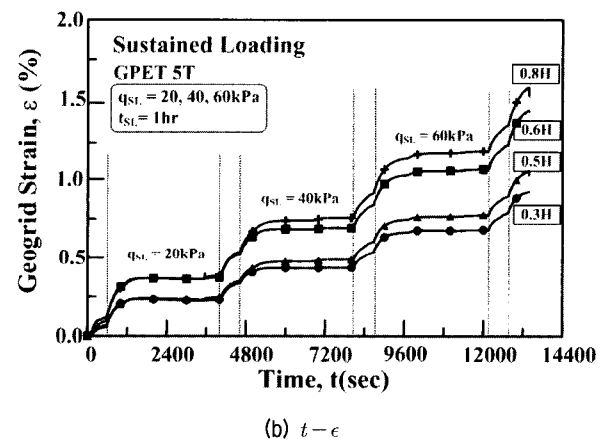
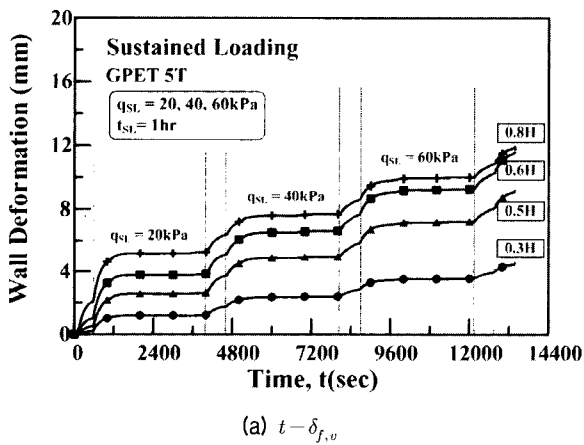


그림 7. 시간경과에 따른 벽체변위 및 지오그리드 변형률

가 그림 8~10에 제시되어 있다. 먼저 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$ 단계에서의 벽체 변위 프로파일을 보여주고 있는 그림 8을 관찰하면 5시간의 지속하중에서 변위가 증가하는 경향을 뚜렷하게 발생하는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 그림 9와 10을 관찰하면 전반적으로 최대 벽체변위(8mm), 지오그리드 인장변형률(0.6%)은 모형옹벽 상부에서 발생하며, 이들 시간이력에 따른 잔류변형 곡선은 상재하중 작용조건과 유사한 유형을 보이는 것으로 관찰되었다. 다만 잔류변형은 상대적으로 전체변위가 크게 발생한 지점인 벽체상부에서 주로 발생하였으며, 잔류침하량이 벽체 수평변위 보다는 우세한 것으로 나타났다. 즉, 그림 10에서 보이는 바와같이 지속하중 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$

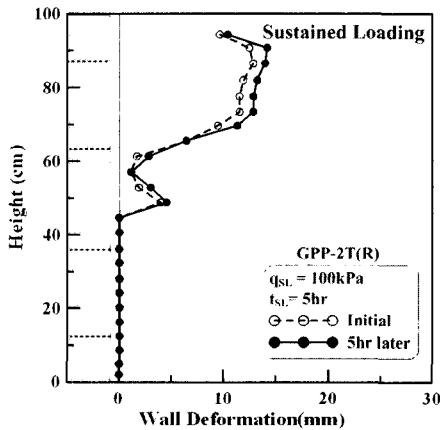


그림 8. 지속하중 전후 벽체변위 프로파일

을 5시간 재하 하는 동안 발생하는 기초의 잔류침하 $[\Delta(\delta_{fv})_{cr}]$ 는 기초폭(B)의 약 0.5%정도로 나타났으나 벽체의 수평변위 $[\Delta(\delta_{w,h})_{cr}]$ 의 경우 약 0.05%의 잔류변위가 발생하여 약 10배 정도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

이러한 경향으로부터 전반적으로 보강토 구조물 배면에 열차노반 혹은 건물기초하중 형태의 하중이 작용하는 경우 벽체자체의 수평변위 뿐만 아니라 기초자체의 잔류침하 또한 사용성에 있어서 중요한 검토 항목으로 간주하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3) 지속하중 작용시 파괴메카니즘

보강토 옹벽에 외부하중이 사용연한 동안 지속적으로 작용할 경우 보강토 옹벽의 전반적인 거동은 보강토 옹벽을 구성하고 있는 요소의 크리프 특성에 좌우된다. 일반적으로 크리프 변형이 발생하는 하중조건에서 재료의 파괴는 그림 11에서와 같이 크리프 파단곡선을 따르는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 보강재 스트랜드의 가닥을 줄이는 방법으로 강도를 1/2로 감소시키고 지속하중 수준을 증가시키는 방법으로 보강토 옹벽의 파괴 메카니즘을 고찰하였다.

그림 12는 인장강도 40 kN/m 의 PP재질의 지오그리드 강도를 1/2로 축소한 후 보강재가 포설된 보강토 옹벽에

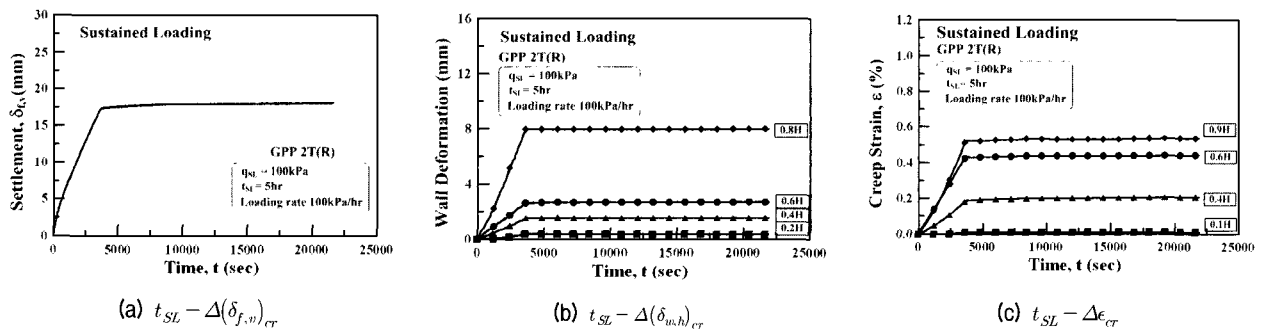


그림 9. 시간경과에 따른 기초침하/벽체변위/지오그리드 변형률

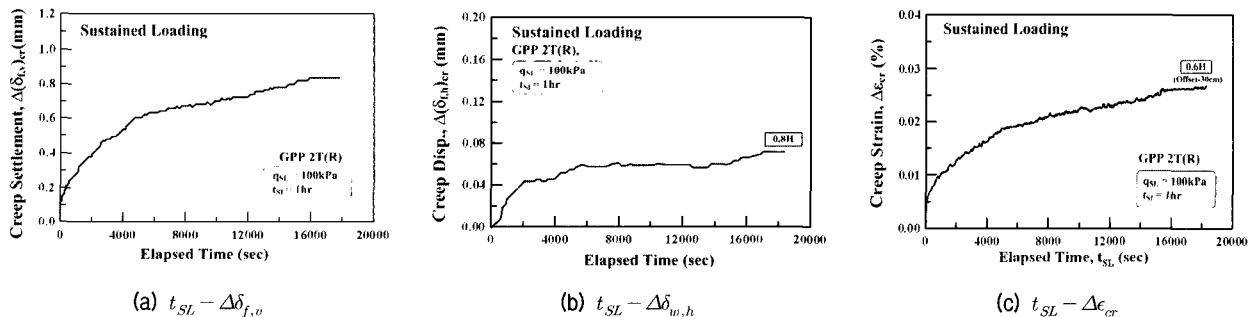


그림 10. 시간경과에 따른 기초잔류침하, 벽체잔류변위 및 지오그리드 잔류인장변형률

기초하중을 CML로 증가시킨 후 $q_{SL} = 150kPa$ 에서 하중을 지속시키는 조건에 대한 결과를 보여주고 있다. 실험을 수행하는데 있어 지속하중 재하 1시간 30분 경과 후 전면벽체와 보강재의 연결부에서 파단이 발생하여 보강토 옹벽 자체가 붕괴 되었다. 먼저 그림 12는 보강토 옹벽의 최대 수평변위를 지속시간에 따라 도시한 $t_{SL} - \Delta(\delta_{w,h})_{cr}$ 곡선과 보강재의 최대 유발 인장변형률을 지속시간에 따라 도시한 $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$ 곡선을 보여 주고 있다. 두 곡선은 전반적인 양상이 거의 일치하는데 보이는 바와 같이 그림 11의 크리프 파단곡선과 거의 일치하는

것으로 나타났다. 즉, 지속하중 재하 후 일정기간동안 잔류변형률이 증가하는 거동을 보이다가 시간에 따른 변위 혹은 변형률 증분속도가 거의 일정하게 되는 거동을 보인 후 변위 혹은 변형률이 급격히 증가하여 파괴에 이르는 전형적인 크리프 파괴 유형을 보여 주고 있다. 이러한 경향으로부터 보강토 구조물 또한 지속하중 작용시 기존의 크리프 이론으로 파괴 여부에 대한 검토가 가능한 것으로 나타났다.

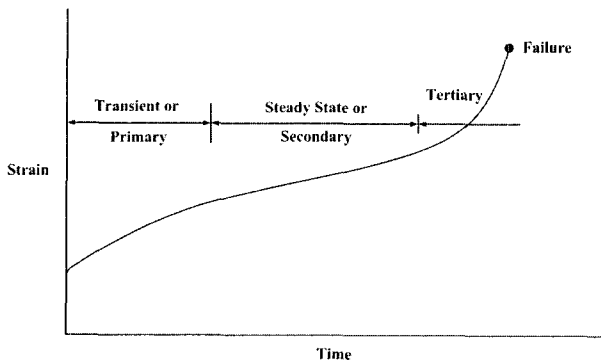
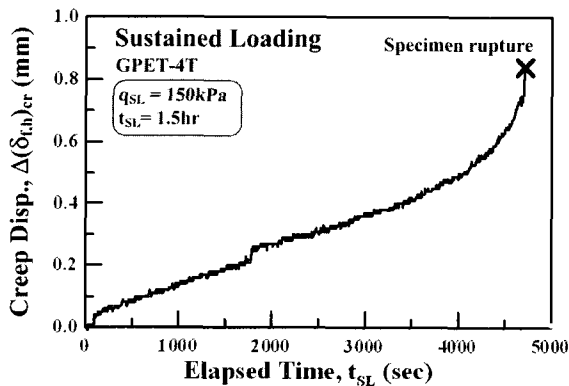


그림 11. 크리프 파단곡선(Mitchell, 1976)

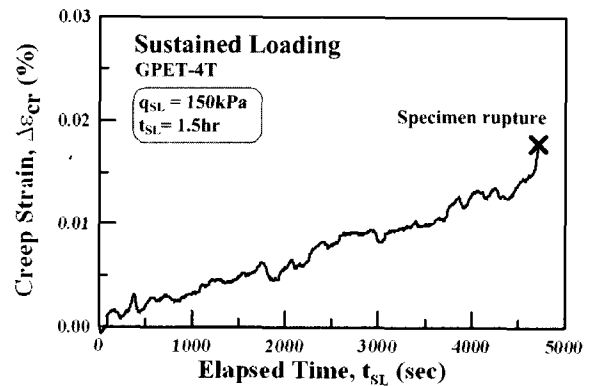
3.1.2 지속하중 수준의 영향

1) 공압을 이용한 상재하중 재하조건

그림 13은 PET-5T 지오그리드가 사용된 GPET-5T 시험조건에 대한 결과를 토대로 지속하중 수준이 보강토 옹벽 및 보강재 인장변형률에 미치는 영향을 보여주고 있으며, 아울러 하중-시간 이력($t - q_{SL}$)곡선을 보여주고 있다. 그림 13(a)에서는 CML 과정에서 $q_{SL} = 20, 40, 60kPa$ 3 단계의 지속하중에서 각각 한 시간 동안 재하한 시험조건에 대한 시간과 재하하중의 관계($t - q$)를 보여주고 있으며, 그림 13(b)와 13(c)는 각각 보강토 옹벽의 0.6H 위치에서의 시간-벽체 잔류변위 [$t_{SL} - \Delta(\delta_{f,h})_{cr}$], 시간-지오그리드 잔류변형률 ($t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$) 곡선을 보여주고 있다.

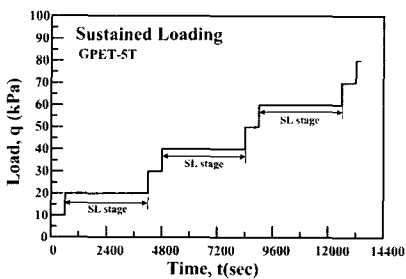


(a) 시간-벽체 잔류변위

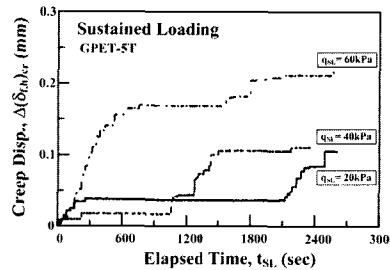


(b) 시간-그리드 잔류변형률

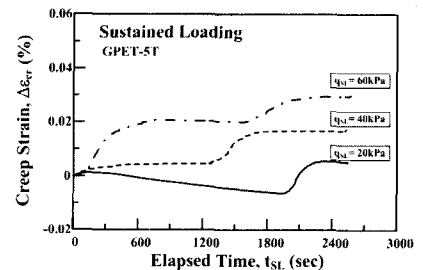
그림 12. 시간경과에 따른 벽체 잔류변위 및 지오그리드 잔류변형률



(a) $t - q$



(b) $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,h})_{cr}$



(c) $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$

그림 13. 지속하중 수준에 대한 시험결과(GPET-5T)

보이는 바와 같이 각 지속하중 단계에서 q_{SL} 이 각각 20kPa, 40kPa, 60kPa로 한시간 동안 작용함에 따라 벽체의 잔류변형은 0.08mm, 0.11mm, 0.22mm가 발생하는 것으로 나타나 지속하중 수준이 증가함에 따라 벽체의 잔류변형 또한 점차 증가하는 양상을 볼 수가 있다. 한편, 지오그리드 변형률의 경우 지속하중 수준이 20kPa, 40kPa, 60kPa으로 증가한 경우 해당 지속하중 구간에서 잔류변형률이 각각 0.005%, 0.015%, 0.03%로 발생하여 지속하중 수준이 증가함에 따라 보강재의 잔류변형률 또한 다소 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이러한 결과는 보강토 구조물의 잔류변형은 지속하중의 크기에 큰 영향을 받음을 나타내는 것으로서 현장 옹벽의 경우 배면에 성토 혹은 비교적 큰 규모의 구조물 건설시 크리프 변형에 따른 장기변형에 대한 평가가 필요함을 나타낸다고 하겠다. 따라서 잔류변위가 발생할 경우 사용성이 문제가 되는 조건에서 시공되는 보강토 구조물에 대해서는 이러한 장기변형이 감안되어야 할 것으로 판단된다.

2) 기초하중 재하조건

그림 14는 실험조건 GPP-2T(R)에 대해 유압을 이용하여 기초하중조건에 대한 결과를 보여주고 있다. 즉, 그림 14(a)와 14(b)에서는 보강토 옹벽 축조후 기초에 CML의 하중 재하시 $q_{SL} = 50, 100 \text{ kPa}$ 두 단계에서의 각각 두 시간 동안 지속적으로 하중을 재하 한 결과를

토대로 재하하중과 기초의 침하와의 관계($q-\delta_{f,v}$)를 보여주고 있으며 그림 14(c), 14(d), 14(e)에서는 지속하중 구간에서의 시간에 따른 기초 잔류침하 $[\Delta(\delta_{f,v})_{cr}]$ 와 벽체 잔류변위 $[\Delta(\delta_{w,h})_{cr}]$, 그리고 보강재 잔류변형률($\Delta\epsilon_{cr}$)을 보여주고 있다. 이 그림을 종합적으로 관찰하면 $q_{SL} = 50 \text{ kPa}$ 에서 잔류침하는 $\Delta(\delta_{f,v})_{cr} = 0.4 \text{ mm}$, 벽체 잔류변위는 $\Delta(\delta_{w,h})_{cr} \approx 0$ 정도로 발생하는데 반해 지속하중 수준을 두 배로 증가시킨 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$ 에서는 잔류침하가 75% 가량 증가하여 약 $\Delta(\delta_{f,v})_{cr} = 0.7 \text{ mm}$, $\Delta(\delta_{w,h})_{cr} = 0.12 \text{ mm}$ 는 정도가 발생하는 경향을 보여주고 있어 지속하중 수준이 증가할수록 잔류변형량 또한 증가하는 양상을 관찰할 수 있다. 한편, 지속구간에서의 $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$ 곡선에서는 지속하중 수준이 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$ 에서의 잔류인장변형률이 $\Delta\epsilon_{cr} = 0.2\%$ 로서 $q_{SL} = 50 \text{ kPa}$ 에 경우에 비해 10배 이상 크게 나타난 것을 볼 수 있어 지속하중 수준이 보강토 구조물의 잔류변위 및 보강재 잔류변형률에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

이와 같이 장기적인 관점에서 지속하중 수준이 보강토 옹벽의 잔류변형에 미치는 영향을 검토한 결과 하중 수준이 비교적 크지 않은 일반 옹벽의 경우에는 크리프로 인한 잔류변형이 거의 발생하지 않으므로 그다지 문제되지 않을 것으로 보이나 옹벽 배면에 성토하중이나 구조물 건설로 인한 상재하중이 작용할 경우 보강토 옹

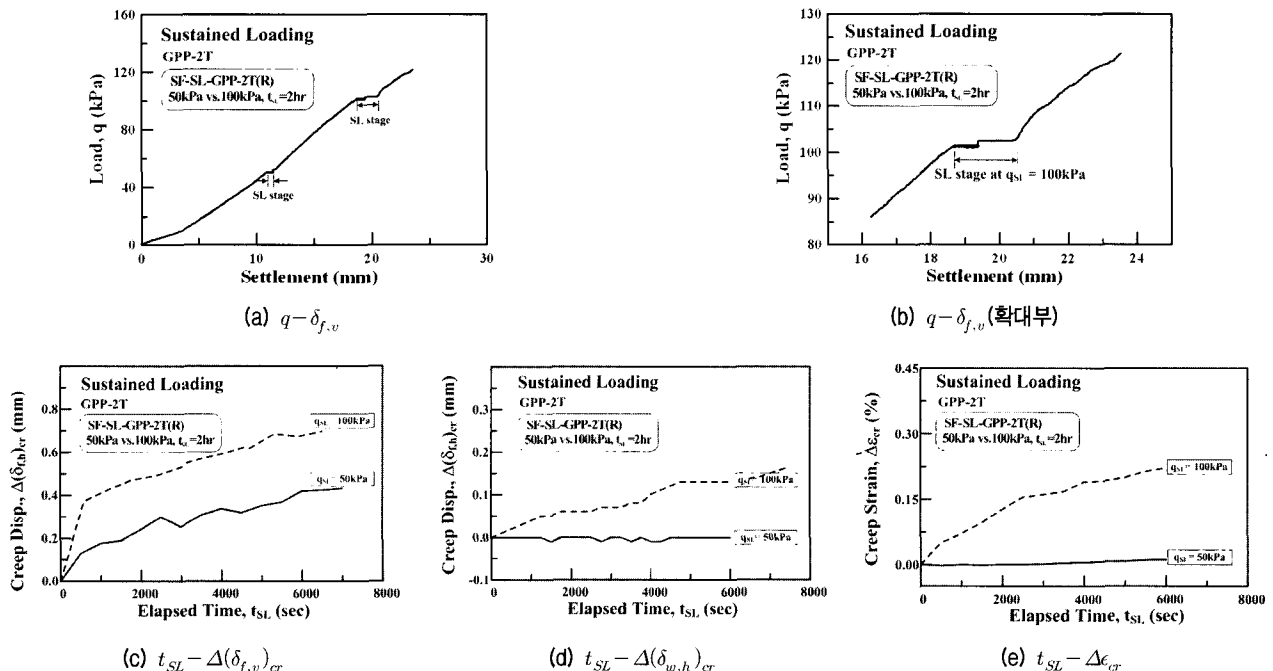


그림 14. 지속하중 수준에 대한 시험결과[GPP-2T(R)]

벽 및 기초하부에서 잔류변형이 유발되어 보강토 응벽 자체 및 상부 구조물에 영향을 미칠 수 있으므로 설계시 이를 반영하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

3.1.3 보강재 강도 및 강성의 영향

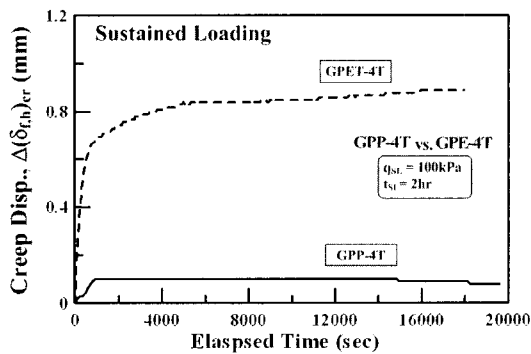
1) 공압을 이용한 상재하중 재하조건

그림 15는 동일한 인장강도를 가지나 강성에 있어서 큰 차이를 보이는 PP 재질의 지오그리드가 사용된 GPP-4T와 PET 재질의 지오그리드가 사용된 GPET-4T의 시험결과를 비교하고 있다. 먼저 그림 15(a)에 제시된 $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$ 곡선에서는 강성이 큰 PP-4T가 사용된 GPP-4T에서는 0.1mm 정도의 벽체 잔류변위가 발생하는 것으로 나타났으나 GPET-4T의 시험에서는 $\Delta(\delta_{w,h})_{cr} = 0.82mm$ 로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 그림 15(b)는 각 지속하중 단계에서의 크리프 변형률을 시간에 따라 도시한 $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$ 관계곡선에서도 벽체 잔류변형과 마찬가지로 강성이 큰 PP 재질의 지오그리드가 사용된 경우 $\Delta\epsilon_{cr}$ 는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났으나 PET 재질의 지오그리드가 사용된 경우 $\Delta\epsilon_{cr} = 0.05\%$ 가량으로 나타나 강성이 작은 지오그리드를 사용할 경우 보강토 응벽의 잔류변형은 보다 증가하는 것으로 나타났다.

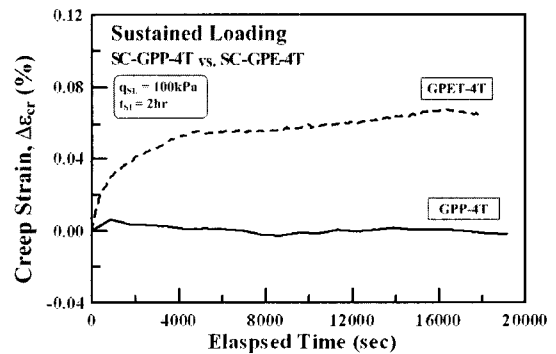
2) 기초하중 재하조건

기초하중 재하조건에 있어 보강재 재질 및 강성에 따른 보강토 응벽의 잔류변형 특성이 그림 16에 제시되어 있는데 여기서는 PP 재질의 지오그리드가 사용된 GPP-4T와 PET 재질의 지오그리드가 사용된 GPET-5T의 시험결과를 비교하고 있다. 그림 16을 관찰하면 앞서 제시된 바와 같이 강성이 큰 PP 재질의 지오그리드를 사용한 GPP-4T의 실험결과와 GPET-5T의 결과 비교시 기초침하는 그다지 차이가 없는 것으로 나타나고 있으나 벽체 잔류변위는 약 두 배 가량, 지오그리드 잔류인장변형률은 세 배 가량 차이를 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

그림 17은 PP 재질의 20kN/m 강도를 갖는 지오그리드가 사용된 GPP-2T와 동일한 지오그리드의 스트랜드 가닥을 줄이는 방법으로 강도를 1/2로 감소시킨 지오그리드가 사용된 GPP-2T(R)의 시험결과를 비교하고 있다. 먼저 그림 17(a)에 제시된 $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$ 곡선에서는 강도가 큰 PP-2T를 사용한 GPP-2T의 잔류침하가 0.8mm 가량 발생하여 강도를 감소시킨 GPP-2T(R)의 결과 1.6mm의 약 절반 수준으로 감소되는 경향을 관찰할 수 있다. 한편, 벽체의 잔류변위[그림 17(b)] 역시 GPP-2T의 실험결과에서는 벽체변형이 거의 발생하지 않은 것으로 나타나고 있으나 GPP-2T(R) 결과에서는 0.8mm 가

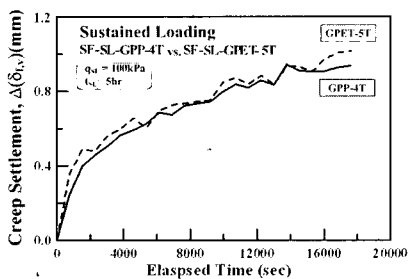


(a) $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$

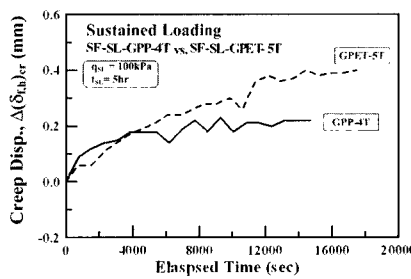


(b) $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$

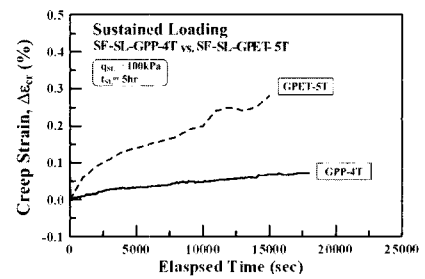
그림 15. 상재하중 재하조건 (GPP-4T vs. GPET-4T)



(a) $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$



(b) $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,h})_{cr}$



(c) $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$

그림 16. 기초하중 재하조건 (GPP-4T vs. GPET-5T)

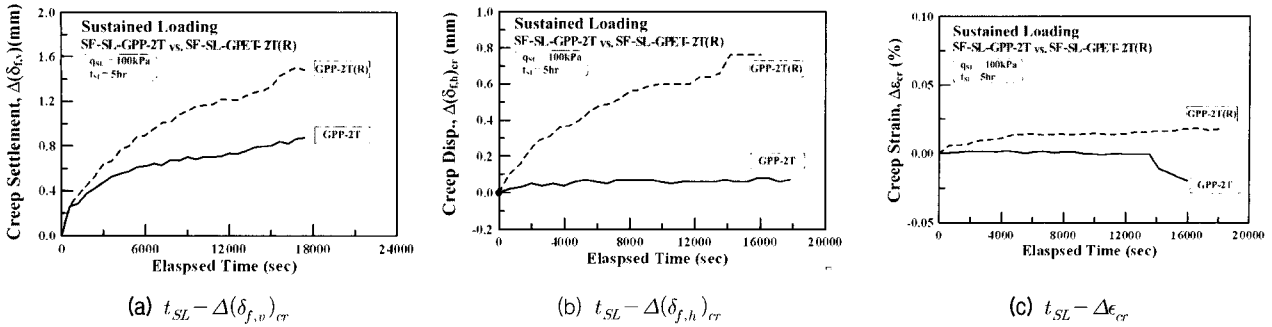


그림 17. 기초하중 재하조건(GPP-2T(R) vs. GPP-2T)

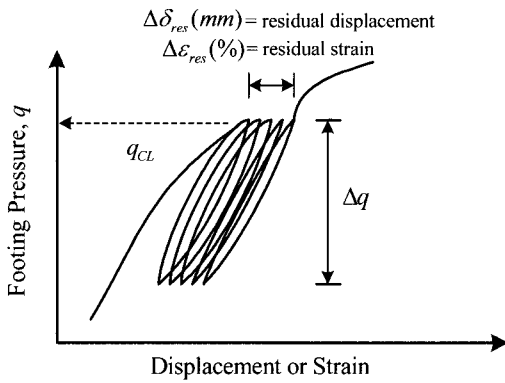


그림 18. 반복하중 시험조건에 대한 기호정의

량의 잔류변형이 발생하는 것으로 나타났으며 지속하중 구간에서의 크리프 변형률을 시간에 따라 도시한 $t_{SL} - \Delta\epsilon_{cr}$ 곡선에서도 이와 동일한 경향을 나타내고 있다.

이상과 같이 보강토 옹벽의 잔류변형특성은 사용되는 지오그리드의 강도 및 강성에 영향을 받는 것으로 나타나 장기적인 변위가 사용성 측면에 문제를 야기 시키는 시공조건에서는 보강재의 강도 뿐만 아니라 강성 또한 고려된 설계가 필요한 것으로 나타났다.

3.2 반복하중 작용에 따른 보강토 옹벽의 잔류변형 특성

선행 연구결과로부터 보강토가 반복하중을 받게 될

경우 ratchetting 효과로 인해 크리프 형태의 잔류변형이 발생하게 되므로 반복하중 작용에 따른 보강토의 잔류 변형 거동 특성 또한 보강토 구조물의 장기거동 관점에서 매우 중요하게 다루어져야 함이 도출된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 모형 보강토 옹벽 실험을 통해 반복하중의 진폭(Δq), 반복하중 재하 수준(q_{CL}), 보강재 강성(f) 등의 인자가 반복하중 작용시 보강토 구조물의 잔류 변형에 미치는 영향을 정성·정량적으로 검토하였다. 반복하중 시험조건에서 사용한 기호를 그림 18에서 도식적으로 나타내고 있으며, 시험 조건은 아래 표 5와 같다.

3.2.1 기본 메카니즘

앞서 언급한 바와 같이 보강토 구조물에 반복하중이 작용할 경우 뒤채움흙과 보강재에 하중이 반복적으로 작용함에 따라 ratchetting 현상이 발생하여 크리프 형태의 잔류변형이 발생한다. 이러한 경향은 기초하중 재하조건에서 $q_{CL} = 100 \text{ kPa}$ 까지 CML 재하후 $\Delta q = 20 \text{ kPa}$ 의 진폭, $f = 0.01 \text{ Hz}$ 의 주파수로 $N_{CY} = 180$ 회 재하한 실험결과를 보여주는 그림 20에서 잘 관찰되고 있다. 즉, 그림 20(a)의 하중-기초침하($q - \delta_{f,v}$) 곡선을 살펴보면 CML 후 $q_{CL} = 100 \text{ kPa}$ 에서 진폭 $\Delta q = 20 \text{ kPa}$ 로 180회 반복재하

표 5. 반복하중 시험조건

TEST	지오그리드		반복하중 수준, q_{CL} (kPa)	반복회수, N_{CY}	진폭, Δq (kPa)	주파수, f	하중이력
	재질	강도 (ton/m)					
GPET-4T-A20	PET	4	$q_{CL} = 100$	180	20	0.01	(1)
GPP-2T-A20	PP	2	$q_{CL} = 100$	180	20	0.01	(1)
GPP-2T-A20(R)	PP	2	$q_{CL} = 100$	180	20	0.01	(1)
GPP-2T-A40(R)	PP	2	$q_{CL} = 100$	180	40	0.01	(2)
GPP-2T-A20(R)	PP	2	$q_{CL} = 50$	360	20	0.05	(3)
GPP-2T-A20(R)	PP	2	$q_{CL} = 50$	180	20	0.01	(4)

주) 하중이력: (1), (2), (3) 0 → 100kPa; (4) 0 → 50kPa → 100kPa

됨에 따라 약 $\Delta(\delta_{f,v})_{res} = 5mm$ 의 잔류침하가 발생하는데 이러한 경향은 시간이력에 따른 잔류변형 발생 경향을 보여 주고 있는 그림 21에서 또한 잘 관찰할 수 있다. 이러한 잔류변형 발생 특성을 알아보면 전반적으로 앞서 관찰하였던 지속하중 결과에서와 마찬가지로 반복하중 작용시 초기 약 1시간 동안 발생한 잔류변형이 전체 재하시간동안 발생한 변형량의 70~80% 가량 발생하는 것으로 나타났으며, 기초의 잔류침하 성분 $\Delta(\delta_{f,v})_{res} = 5mm$ 이 벽체 잔류변위 성분 $\Delta(\delta_{w,h})_{res} = 2.5mm$ 보다 큰 것으로 나타나고 있다.

한편, 보강재에 발생하는 잔류 인장변형률의 경우 최대 $\Delta\epsilon_{\sigma} \approx 0.1\%$ 정도여서 상대적으로 크지 않게 나타났

으며 하단부 보강재에서는 변형률이 감소하는 릴렉세이션 현상이 발생하는 것으로 관찰되었다. 이러한 경향은 유사한 연구주제를 수행하고 있는 Tatsuoka 연구팀의 결과(Hirakawa 등, 2004)와 정성적으로 유사한 것으로 나타나 반복하중시 보강토 구조물의 잔류변형의 주원인은 뒤채움흙의 잔류변형 특성에 좌우된다는 보고 내용과 잘 일치하고 있다. 따라서 결국 반복하중의 경우에도 반복하중 재하시 보강토 구조물의 잔류침하 억제 대책은 보강재보다는 뒤채움흙의 잔류변형 억제에 보다 초점을 맞추어야 할 것으로 판단된다. 아울러 그림 21은 5시간 동안의 반복재하로 인한 기초잔류침하 및

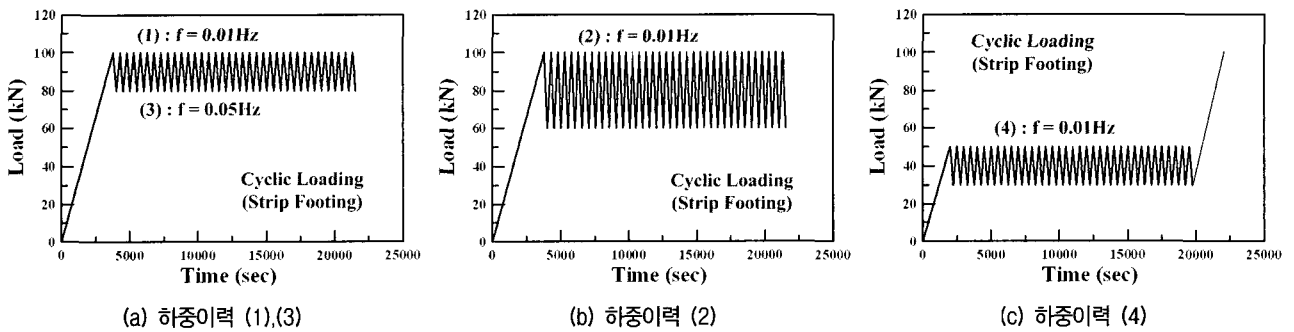


그림 19. 시험조건별 하중이력

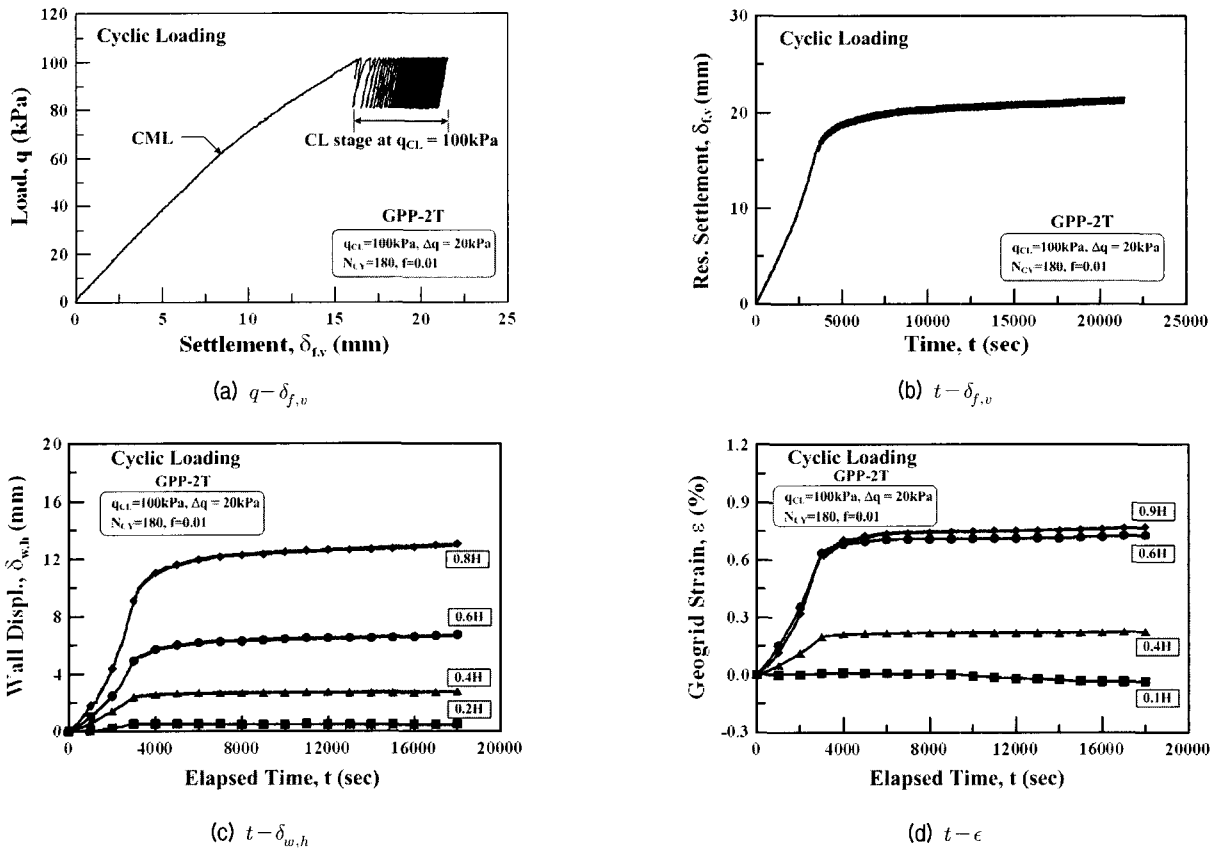


그림 20. 반복하중 시험결과(GPP-2T-A20)

벽체잔류변위, 지오그리드 잔류인장변형률이 일정 수준에서 수렴되지 않고 계속적인 증가추세에 있는 것을 보여주고 있는데, 이 결과로부터 보강토 옹벽에 반복하중이 작용시 잔류변형이 누적될 수 있음을 보여주는 것으로써 그 사용목적에 따라 잔류변형이 문제가 될 수 있는 경우에는 설계시 이를 충분히 고려해야 할 것으로 판단할 수 있다.

3.2.2 반복하중 특성의 영향

반복하중은 반복하중의 수준(q_{CL})과 진폭(Δq), 그리고 반복횟수(N_{CY}) 등으로 특징 지을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 반복하중 특성이 보강토 옹벽의 잔류변형에 미치는 영향을 검토하였다.

1) 반복하중 수준(q_{CL}) 및 진폭(Δq)의 영향

반복하중에 의한 잔류변형은 하중수준이 증가할수록 그 영향이 커지는 점성요소(viscous component)와 반복하중의 진폭이 커질수록 증가하는 반복하중 요소(cyclic loading component)로 구성되는데 이 두 가지 요소가 잔류변형에 미치는 영향이 그림 22와 23에 제시되어 있다. 그림 22에는 기초하중 재하조건에 있어 GPP-2T 보강재가 적용된 조건에서 $q_{CL} = 100 kPa$ 에서 $\Delta q = 20, 40 kPa$ 의 다른 진폭으로 재하한 결과를 보여주고 있으며, 그림 23에서는 동일한 진폭($\Delta q = 20 kPa$)에서 반복하중 수준을 달리하여 $q_{CL} = 50, 100 kPa$ 로 재하한 결과를 보여주고 있다. 먼저 반복하중의 진폭이 두 배 증가함에 따라서 기초의 잔류침하는 약 70%가 증가하는 경향을 관찰할 수

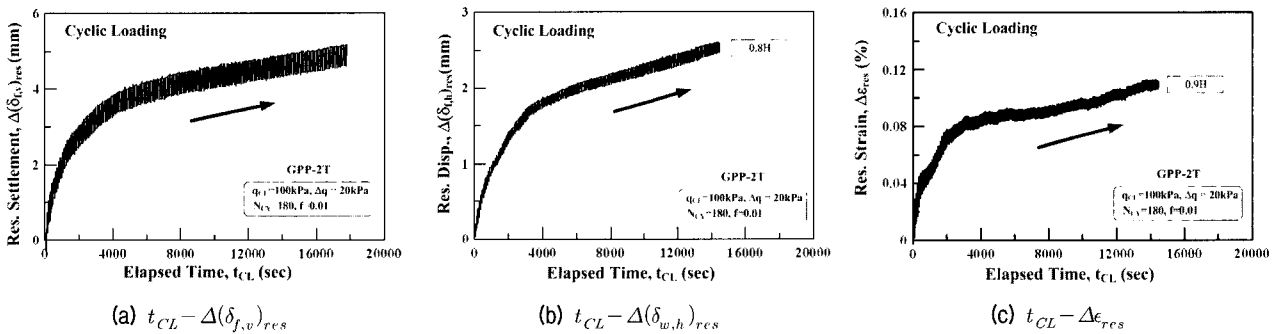


그림 21. 반복하중에 따른 잔류변형 (GPP-2T)

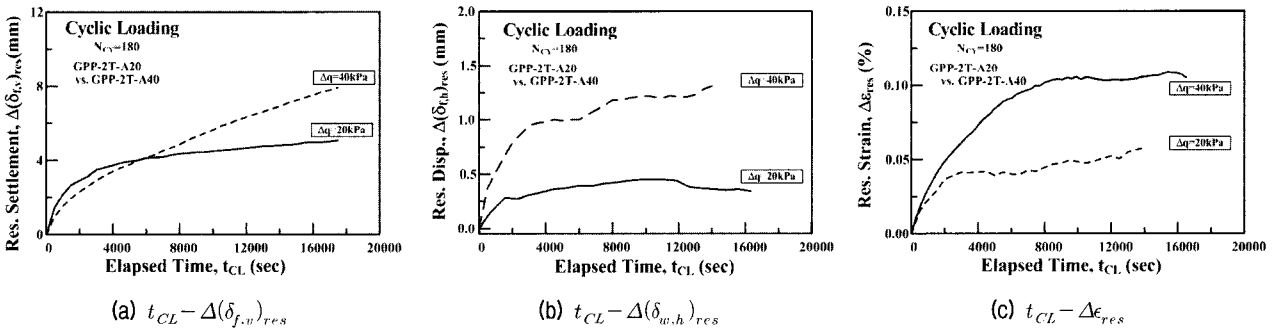


그림 22. 반복하중 진폭에 따른 기초잔류침하, 벽체변위 및 지오그리드 잔류변형률

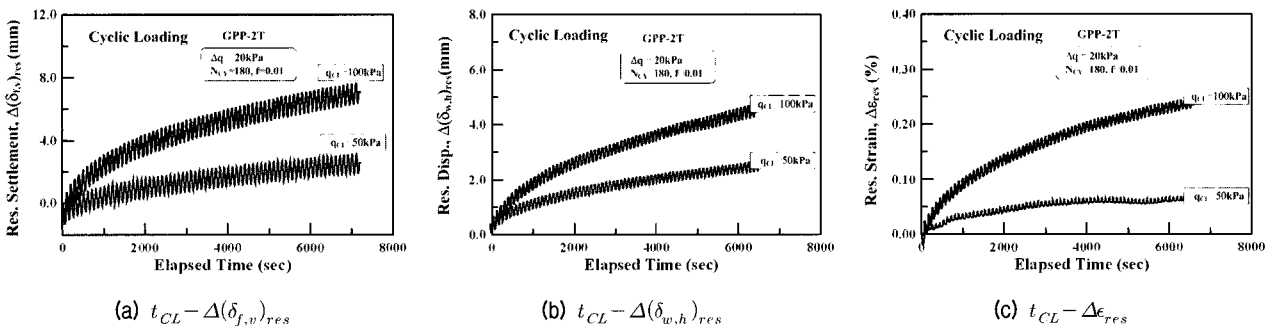


그림 23. 반복하중 수준에 따른 기초잔류침하, 벽체변위 및 지오그리드 잔류변형률

있으며 벽체 잔류변위와 보강재의 잔류변형을 또한 100% 이상 증가하는 경향을 보이고 있으며, 반복하중 수준이 두 배 증가한 경우 기초의 잔류침하 및 벽체 잔류변위는 약 100%가 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 보강재의 잔류변형율은 약 5배 가량 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 반복하중의 수준과 진폭이 보강토 구조물의 잔류침하에 매우 큰 영향을 미치는 영향인자임을 알 수 있었으며, 반복하중의 진폭보다는 반복하중 수준이 보다 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

2) 반복회수의 영향

그림 24는 PP 재질의 지오그리드를 사용하여 실험을 수행한 결과로서 기초에 동일 시간동안 작용하는 반복하중의 횟수에 따라 보강토 옹벽에 발생하는 잔류변형을 각각 나타내고 있다. 그림 24(a)에서 보이는 바와 같이 반복하중 횟수가 180회($f=0.01$)인 경우와 360회

($f=0.05$)인 경우를 비교시 벽체잔류변위는 각각 약 3mm, 6mm로 발생하여 반복하중 횟수가 2배 증가시 벽체잔류변위는 약 두 배 가량 증가하는 것으로 나타났으며, 그림 24(b)에서 보이고 있는 지오그리드 잔류변형을 역시 세 배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 관찰 결과로부터 동일 시간동안의 반복하중 작용횟수, 즉 반복하중 주기 역시 잔류 변형의 크기를 좌우하는 매우 중요한 영향인자임을 보여주고 있다.

3.3 잔류 변형 제어 수단으로서의 선행하중공법 적용성 검토

앞서 제시된 실험결과를 통해 지속하중 및 반복하중에 노출되는 보강토 옹벽의 경우 잔류변형이 발생하게 됨을 관찰하였다. 본 절에서는 이와같은 잔류변형에 대한 제어수단으로서 선행하중공법의 적용성을 검토하였다. 그림 25는 선행하중 적용성 검토에서 사용한 제반기

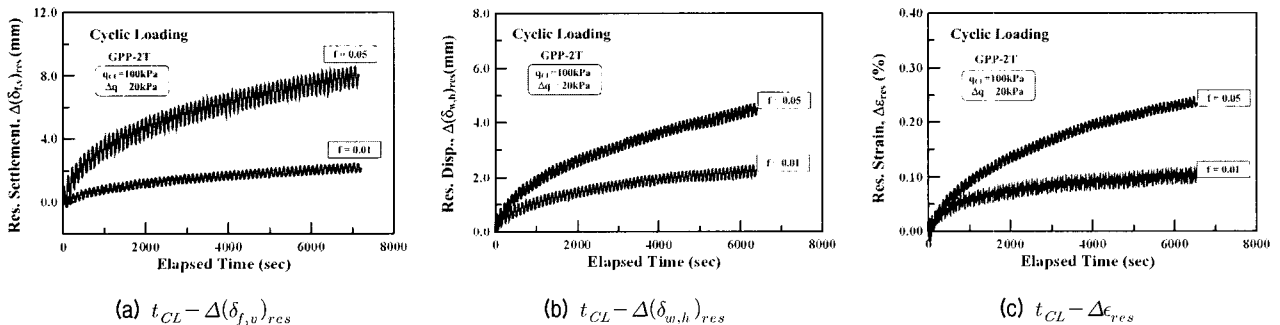


그림 24. 반복하중 수준에 따른 기초잔류침하, 벽체변위 및 지오그리드 잔류변형율

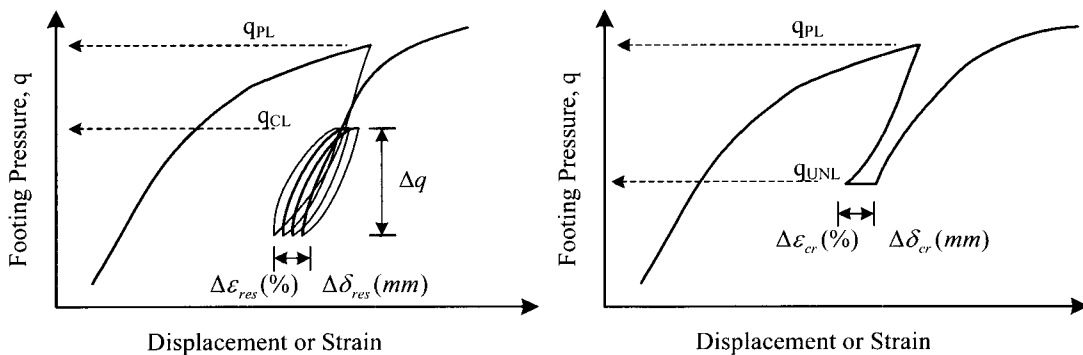


그림 25. 선행하중 공법 기호 개요도

표 6. 선행하중-지속하중 시험조건

TEST	지오그리드		선행하중수준, q_{PL} (kPa)	지속하중 수준, q_{UNL} (kPa)	지속시간, t (hr)	하중이력
	재질	강도(kN/m)				
GPP-2T(R)	PP	20	-	$q_{SL} = 50$	2	(1)
PCL-GPP-2T(R)	PP	20	$q_{PL} = 100$	$q_{UNL} = 50$	2	(2)

주) 하중이력 : (1) 0 → 50kPa → 100kPa; (2) 0 → 100kPa → 50kPa → 100kPa

호를 도식적으로 설명하고 있다.

앞서 수행된 모형 보강토 응벽을 이용하여 선행하중 작용 후 지속하중 및 반복하중 작용시 잔류변위 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 수행된 실험조건은 다음의 표 6, 7과 같다.

아래 그림 26(a), 26(b)는 선행하중 작용후 지속하중 재하시 하중-침하 관계곡선, 그리고 그림 26(c), 26(d)는 각 지속하중 단계에서의 잔류변위 곡선을 보여주고 있다. 관찰할 수 있는 바와 같이 선행하중 재하 없이 $q_{SL} = 50kPa$ 구간에서의 잔류침하는 약 0.4mm가 발생하였으나 $q_{PL} = 100kPa$ 의 선행하중 작용 후 제하하여 $q_{UNL} = 50kPa$ 에서 지속하중을 작용시킨 경우에는 잔류침하가 0.2mm로 두 배가량 감소하는 것으로 나타나 선행하중 공법이 잔류침하 제거에 효율적으로 적용될 수

있는 것으로 나타났다.

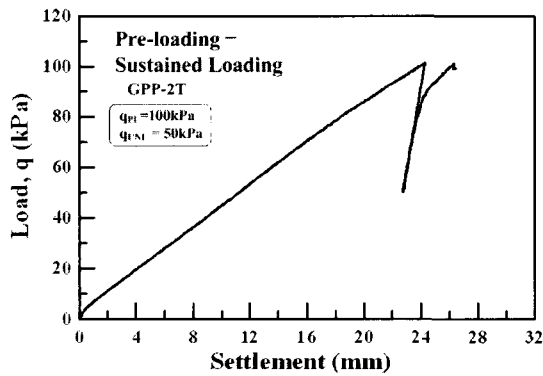
그림 27은 선행하중 작용후 반복하중 재하시 하중-침하 관계곡선과 하중 제하 후 반복하중 단계에서의 잔류변위 곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 선행하중 재하 없이 $q_{CL} = 50kPa$ 에서 반복하중을 재하시킨 경우에는 약 8mm 정도의 잔류침하가 발생하는 것으로 나타났으나 $q_{PL} = 100kPa$ 의 선행하중 작용한 후 제하하여 $q_{CL} = 50kPa$ 에서 반복하중을 작용시킨 경우에 있어서 잔류침하에 있어서는 약 3.5mm로 두 배 이상 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 아울러 벽체 잔류변위는 약 40%, 그리고 보강재 잔류 인장변형률은 50%의 잔류변형을 억제하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 선행하중을 작용시킴에 따라 지속하중 혹은 반복하중 재하시 잔류변형이 현저히 작아

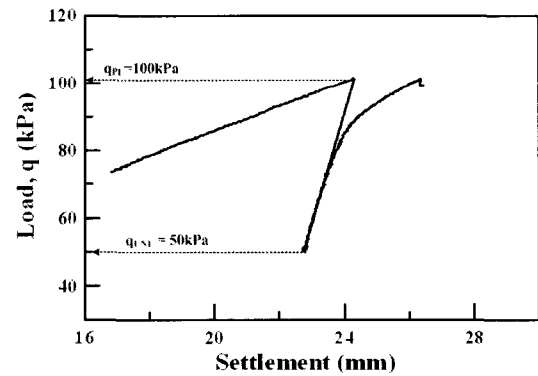
표 7. 선행하중-반복하중 시험조건

TEST	지오그리드		선행하중수준, q_{PL} (kPa)	반복하중 수준, q_{CL} (kPa)	반복회수, N_{CR}	진폭, Δq (kPa)	주파수, f	하중이력
	재질	강도(kN/m)						
GPP-2T-A20(R)	PP	20	-	$q_{CL} = 50$	720	20	1.0	(1)
PCL-GPP-2T-A20(R)	PP	20	$q_{PL} = 100$	$q_{CL} = 50$	180	20	1.0	(2)

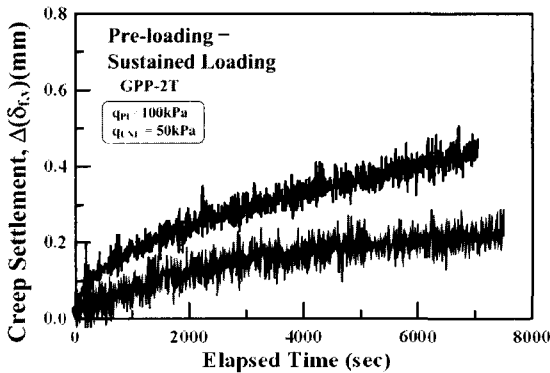
주) 하중이력 : (1) 0 → 50kPa → 100kPa; (2) 0 → 100kPa → 50kPa → 100kPa



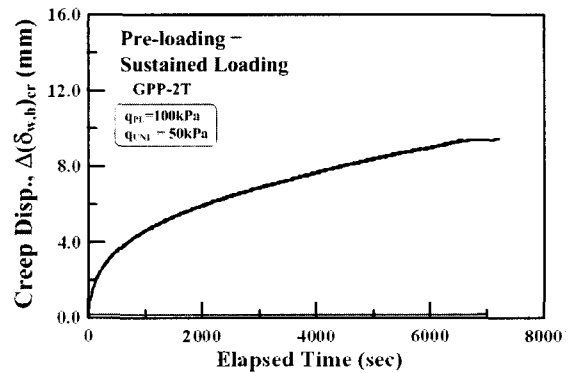
(a) $q - \delta_{f,v}$



(b) $q - \delta_{f,v}$ (확대부)

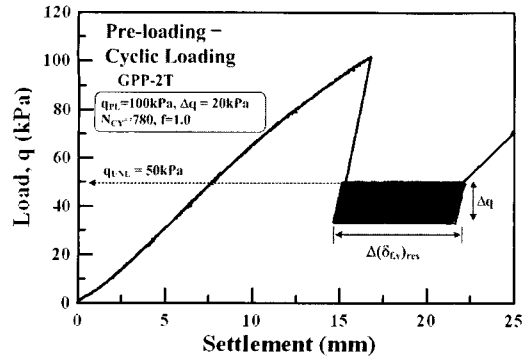


(c) $t_{SL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$

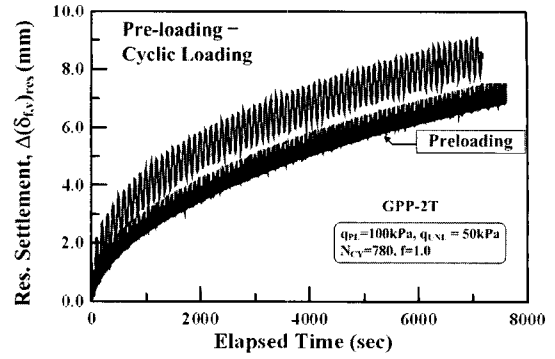


(d) $t_{SL} - \Delta(\delta_{v,h})_{cr}$

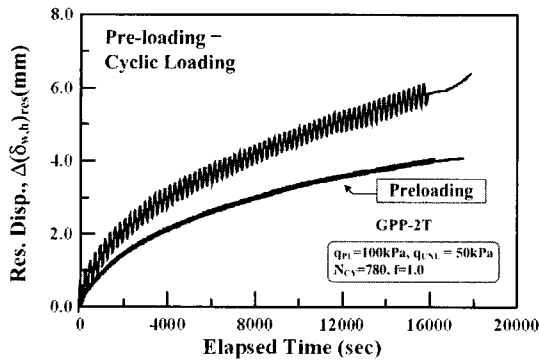
그림 26. 선행하중-지속하중 시험결과(GPP-2T)



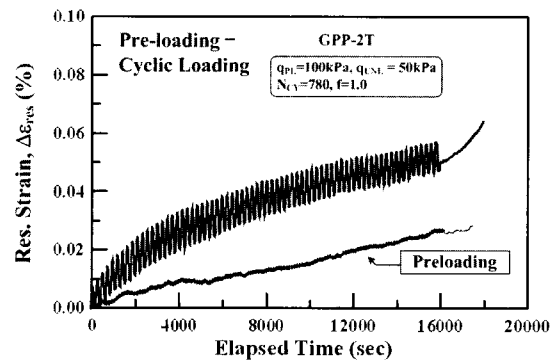
(a) $q - \delta_{f,v}$



(b) $t_{CL} - \Delta(\delta_{f,v})_{cr}$



(c) $t_{CL} - \Delta(\delta_{w,b})_{cr}$



(d) $t_{CL} - \Delta\epsilon_{res}$

그림 27. 선행하중-반복하중 시험결과(GPET-2T)

지는 것으로 나타나 선행하중의 잔류변형 저감효과가 매우 큰 것으로 파악되었다. 이 결과 역시 Tatsuoka 등 (2004), 유충식 등(2005)의 연구결과와 그 경향이 일치하고 있어 선행하중 개념의 잔류변형 제어효과를 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 보강토 옹벽에 지속하중 및 반복하중이 작용하는 경우 보강토 옹벽의 시간 의존적 잔류변형 특성을 고찰하기 위하여 축소모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보강토 구조물에 지속하중 작용시 기존 크리프 이론의 크리프 파단곡선을 따르는 것으로 나타나 보강토 구조물 역시 기존 이론을 적용하여 파괴 여부에 대한 검토가 가능하다.
- (2) 보강토 옹벽에 지속하중 혹은 반복하중 재하시 발생하는 잔류변형은 뒤채움흙과 보강재의 강도, 강성 및 지속/반복하중 수준에 따라 달라질 수 있다.
- (3) 반복하중 재하 형태의 하중이 작용하는 경우 잔류

변형은 시간의존적 형태로 발생하므로 사용연한에 걸쳐 발생할 수 있으며, 그 크기는 반복하중의 진폭과 주기, 하중 수준에 좌우된다.

- (4) 지속/반복하중 작용 이전 해당 하중수준 이상의 선행하중을 작용하는 경우 잔류변형을 현저히 감소시킬 수 있는 것으로 나타나 잔류변형의 제어를 위해 선행하중 공법이 효과적인 수단이 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0) 및 2005년 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 유충식, 김선빈, 이봉원 (2005), "평면변형압축시험을 이용한 보강토의 시간 의존적 변형 특성 연구", 한국지반공학회논문집, 제 21권, 10호, pp.1-13.
2. 유충식, 정혁상, 전상수, 이봉원, 김기연, 전한용 (2005), "축소 모

형 실험에 의한 계단식 보강토옹벽의 파괴 메카니즘”, *한국지반공학회논문집*, 제21권 3호, pp.65-77.

3. 유충식, 정혁상, 정혜영 (2005), “사면안정측면에서의 보강토 옹벽 붕괴 요인 분석”, *2005 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, 제주, pp.11-20.
4. Collin, J.G. (1997), “Lesson learned from a segmental retaining wall failure”, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(7), pp.445-454.
5. 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*.
6. 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.

7. NCMA (1997), *Design manual for segmental retaining walls*, 2nd Ed., NCMA, Virginia.
8. Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Shinoda, M., Kongkikul, 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.

(접수일자 2006. 7. 31, 심사완료일 2007. 6. 20)