

## 지속하중 재하시 보강토 옹벽의 거동특성 - 축소모형실험

### Behavior of Geosynthetic Reinforced Modular Block Walls under Sustained Loading

유충식<sup>1)</sup>, Chungsik Yoo, 김선빈<sup>2)</sup>, Sunbin Kim, 변요셉<sup>3)</sup>, Joseph Byun, 김영훈<sup>3)</sup>, Younghoon Kim, 한대희<sup>3)</sup>, Daehui Han

1) 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ

2) 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

3) 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

**SYNOPSIS** : Despite a number of advantages of reinforced earth walls over conventional concrete retaining walls, there exist concerns over long-term residual deformation when used as part of permanent structures. In view of these concerns, time-dependant deformation characteristics of geosynthetic reinforced modular block walls under sustained loads were investigated using reduced-scale model tests. The results indicated that a sustained load can yield appreciable magnitude of residual deformation, and that the magnitude of residual deformation depends on the loading characteristic as well as reinforcement stiffness.

**Key words** : Geosynthetic, Geosynthetic-reinforced modular block wall, Sustained load, Reduced-scale model test

## 1. 서 론

토목합성재료(geosynthetics)을 이용하는 보강토 공법은 기존의 콘크리트 구조물에 비하여 우수한 경제성 및 안정성, 수려한 외관 등의 이유로 토목구조물의 사면, 도로, 옹벽 등과 접목되어 기존 공법의 대체공법으로서 자리매김을 하고 있다. 특히 아파트 단지나 택지개발 등의 공사에 있어 성토 후 옹벽을 시공할 필요성이 있는 부지에 적극적으로 적용되고 있는데 보강토 공법은 현재 적용되고 있는 설계법이 보수적임에도 불구하고 시공중 및 시공후 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 철도 분야의 성토부 혹은 교대 부분에서의 적용이 매우 긍정적으로 평가되고 있다. 최근에 이러한 분야에의 영구구조물로서 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 구조물로서의 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.

이러한 관점에서 성균관대학교 지반연구실에서는 앞서 보강토에 지속하중 및 반복하중 등 다양한 하중이력에 대한 보강토 구조물의 장기변형 특성 메카니즘의 기초연구 차원에서 요소(element) 수준의 거

동특성 연구를 수행하여 보고한 바 있으며, 본 연구에서는 이를 토대로 구조물 수준에서의 거동특성을 고찰하기 위하여 축소모형실험을 수행하여 보강토 옹벽의 지속하중에 대한 시간 의존적 잔류변형 메카니즘에 대한 규명을 시도하였다.

## 2. 축소모형실험

### 2.1 토조 및 모형옹벽 실험장치

본 연구에서는 그림 1과 그림 2의 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 40mm인 스테인리스강 파이프로 제작하였으며, 블록마다 2개소에 구멍을 뚫어 전단키(shear key)가 설치될 수 있도록 하였다. 아울러 보강토 옹벽의 블록은 여러개의 콘크리트 블록을 쌓아 연속벽체로 구현하나 축소모형실험에서는 이를 평면변형으로 간주하여 각 층당 800mm의 폭을 가진 스테인리스강 파이프를 사용하여 실험을 단순화하였다. 그림 3은 모형 보강토 옹벽 실험에 사용된 스테인리스강 파이프 블록을 실험에 적용한 사진을 보이고 있다. 한편, 보강토 옹벽의 평면변형상태를 유지하기 위하여 모형 벽체와 벽면 사이에는 건설 마감재료인 문풍지를 설치하여 모래의 유실을 방지하였으며 마찰을 최소화 하였다.

현장에서 사용하는 보강토 옹벽의 뒤채움흙은 양질의 화강풍화토이나 모형실험에서는 주문진 표준사를 강사하여 조성하였으며, 표 1에서 뒤채움흙의 제원을 정리하였다. 입도분포 실험후 통일 분류법(USCS)에 의한 분류결과 SP에 해당하는 입도분포의 균등한 모래질 흙으로 분석되었다.

실험에 사용한 보강재는 ○○사의 40kN/m의 인장강도를 갖는 polypropylene(PP) 재질의 지오그리드와 △△사의 55kN/m의 인장강도를 갖는 polyester(PET) 재질의 지오그리드이며 구체적인 제원은 표 2와 같다. 축소모형실험에 사용하기 위하여 각 지오그리드는 상사를 고려하여 1/2~1/3로 scale down 하였으며 간격 16cm, 포설길이 1H(H=보강토 옹벽 높이)를 확보하여 실험을 수행하였다.

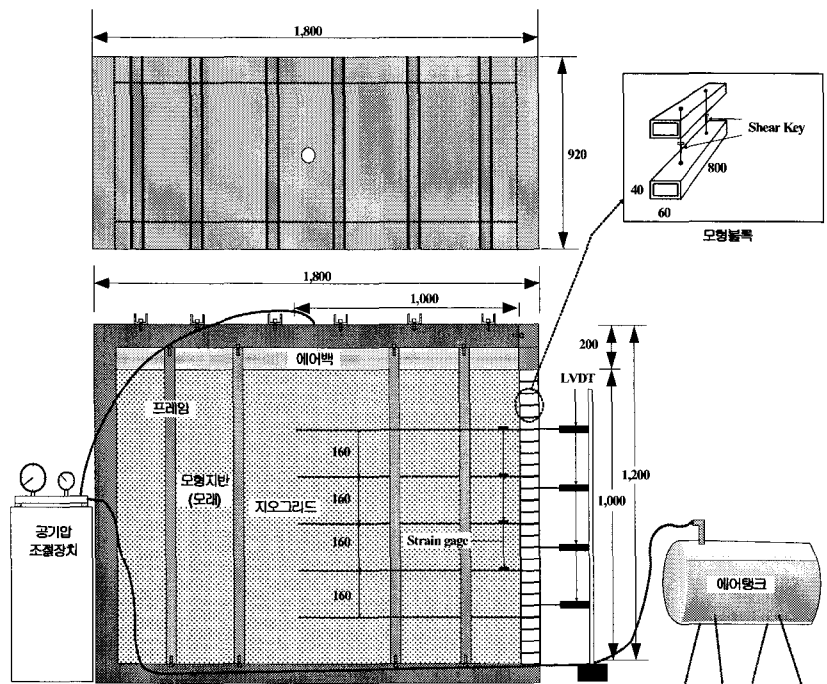
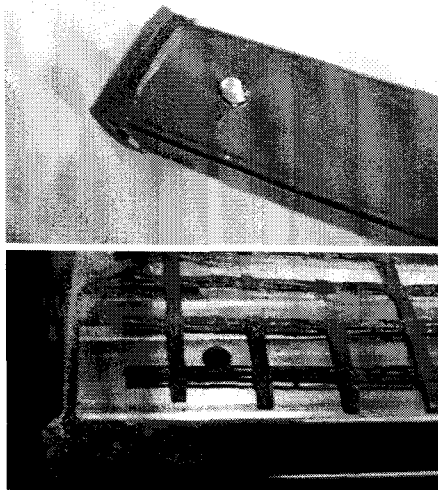


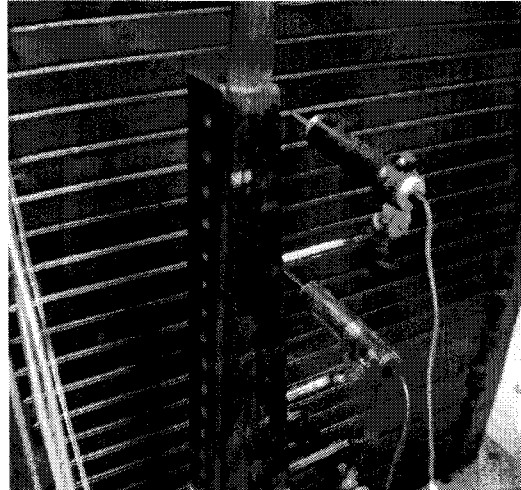
그림 1. 축소 모형실험을 위한 토조장치



그림 2. 축소 모형실험을 위한 토조장치 전경(사진)



(a) 전단키 및 지오그리드 연결



(b) 벽체 형성 모습

그림 3. 모형 벽체(스테인리스강 파이프 블록)

실험중 계측은 변위계(LVDT)와 사진촬영을 통하여 벽체의 변위를 분석하였으며, 지오그리드에 부착된 스트레인게이지를 이용하여 지속하중 재하시 지오그리드 보강재의 변형률을 측정하였다. LVDT는 Tokyo Sokki사의 변위계를 사용하였으며, 50mm 용량의 변위계를 옹벽에 200mm 간격으로 4개소에 설치하였다. 스트레인게이지는 Tokyo Sokki사의 소성 스트레인게이지(YFLA-5-1L)를 사용하였으며, 이는 10~15%의 큰 변형률을 측정할 수 있는 게이지로 탄성영역의 반복 측정이 가능하다는 특징이 있다. 표 3은 본 시험에 사용된 스트레인게이지의 제원을 보여주고 있다. 스트레인게이지는 벽체로부터 10cm 이격된 지오그리드 중앙지점에 부착하였으며 그림 1에서 보이는 바와 같이 최하단 지오그리드를 제외한 4개소에 설치하였다.

표 1. 뒤채움흙 제원

사용 뒤채움흙	입도분포	통일분류법에 의한 분류	비중	건조단위중량	상대밀도
주문진 표준사	$D_{10}=0.36\text{mm}$ $C_u=1.61, C_c=1.10$	SP	2.60	$1.68\text{t/m}^3$	70%

표 2. 지오그리드 제원

제조사	재질	인장강도 (kN/m)	강성 (kN/m)	파단시 변형률 (%)	strand수/10cm
○○사	Polyester	55	170	12.5	4
△△사	Polypropylene	40	500	12	2

표 3. 스트레인게이지 제원

제조사	Lad Wires	Gage Factor	Gage Length	Gage Resistance	Transverse Sensitivity
Tokyo Sokki사	1m	$2.12 \pm 2\%$	5mm	$119.8 \pm 0.5\Omega$	0.2%

## 2.2 실험조건 및 방법

### 2.2.1 실험조건

표 4는 보강토 옹벽의 축소모형실험에 대한 실험조건을 정리하고 있다. 표에서 정리한 바와 같이 본 연구에서는 지속하중 수준과 지오그리드 재질에 따른 보강토 옹벽의 시간의존적 거동특성을 분석하기 위하여 실험조건을 선정하였다.

표 4. 실험 조건

지오그리드 재질	각 하중단계별 지속시간	하중재하	비고
Polypropylene	10min	10kPa → 20kPa → ... → 70kPa → 80kPa	-
	10min / 1hr	10kPa → 20kPa → ... → 70kPa → 80kPa	20, 40, 60kPa 재하시 지속시간 1hr
Polyester	10min	10kPa → 20kPa → ... → 70kPa → 80kPa	-
	10min / 1hr	10kPa → 20kPa → ... → 70kPa → 80kPa	20, 40, 60kPa 재하시 지속시간 1hr

### 2.2.2 실험방법

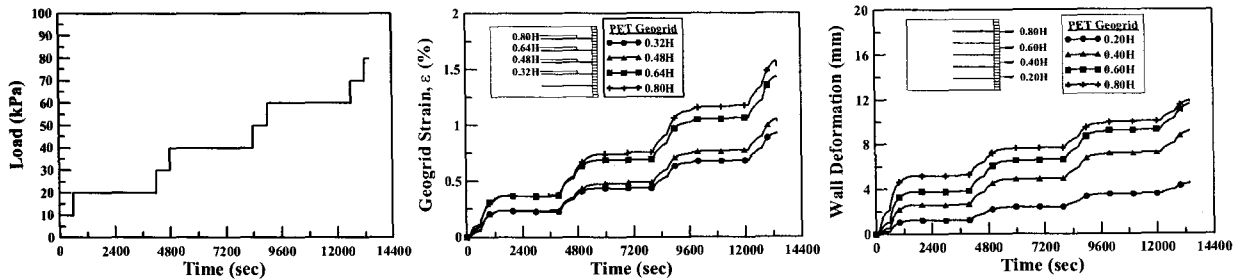
본 실험에서의 모형 보강토 옹벽 시공과정은 먼저 스테인리스강 블록을 일정 높이까지 쌓고 뒤채움흙인 표준사를 강사한 후 scale down 시킨 지오그리드를 포설하며, 다시 지오그리드의 설치간격 16cm에 해당하는 높이까지 블록을 추가로 설치하고 뒤채움흙을 포설하는 일련의 과정을 반복하여 완성하였다. 시공 완료후 보강토 옹벽 상부에 지속하중을 작용시키기 위하여 모래로 조성된 모형지반 상부에 에어백과 반력판을 설치한 후 공기압을 주입하여 하중을 재하하였다. 상재하중은 10kPa씩 증가시켰으며, 각 하중 단계당 10분 혹은 1시간씩 지속하중을 재하하였다.

### 3. 결과 분석 및 고찰 - 지속하중 작용시 잔류 변형 특성

#### 3.1 지속하중 작용시 보강토 옹벽의 거동

본 실험에서는 보강토 구조물이 교량의 교대부에 영구구조물로 적용되어 상판 기초를 지지하는 경우 혹은 확대기초 등의 상재하중이 사용 연한 동안 지속적으로 작용하는 경우 보강토 옹벽에 발생할 수 있는 잔류 변형 특성 고찰에 주안점을 두었다. 그림 4~그림 6은 PET 재질의 지오그리드를 이용하여 그림 4(a)에서와 같이 하중을 재하한 경우에 대한 실험결과를 보이고 있다. 그림 4는 벽체에 설치한 LVDT와 지오그리드에 부착한 스트레인게이지로부터 측정한 결과를 보이고 있으며 그림 6은 그림 5의 사진 자료를 분석하여 판독한 결과이다.

하중재하시 보강토 옹벽의 거동을 관찰하면, 먼저 벽체 수평변위의 양상은 그림 4(c)와 그림 6에서와 같이 지속하중 증가에 따라 벽체 변위가 증가하는 양상을 보이고 있으며 벽체 상부, 즉 0.5H(H:벽체높이) 이상에서 최대변위가 발생하는 것으로 나타났다. 지오그리드의 변형률 또한 그림 4(b)에서 보이는 바와 같이 지속하중 증가에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났으며, 벽체 수평변위가 최대로 발생한 지점에서 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있다.

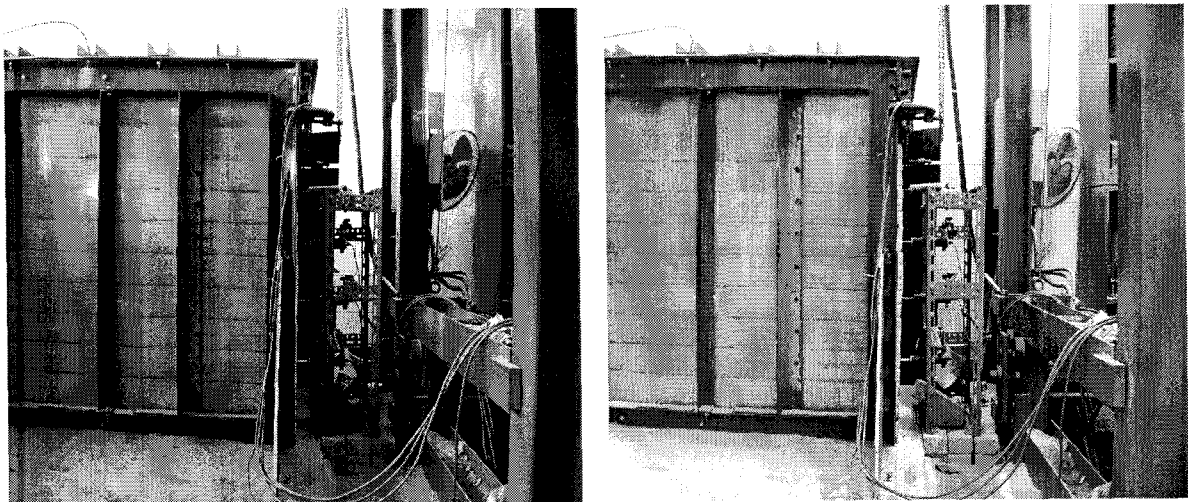


(a) 시간-하중

(b) 시간-지오그리드 변형률

(c) 시간-벽체변위

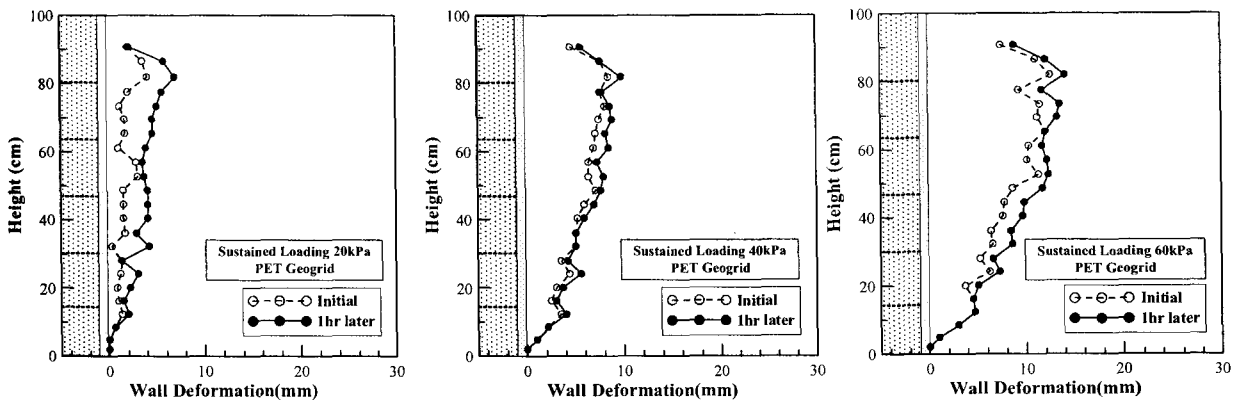
그림 4. 벽체변위 지오그리드 변형률



(a) 하중재하 이전 벽체변위

(b) 하중재하 이후 유발된 벽체변위 양상

그림 5. 하중재하 전후 벽체모습(PET 지오그리드 포설시)



(a) 지속하중 20kPa

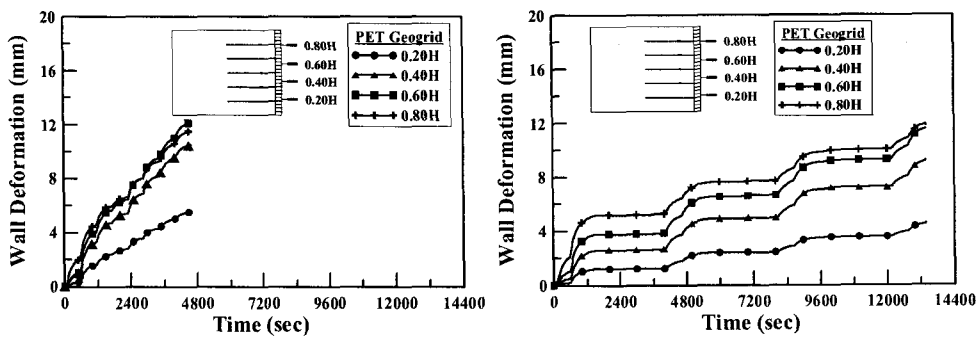
(b) 지속하중 40kPa

(c) 지속하중 60kPa

그림 6. 하중재하 전후 벽체모습

### 3.2 재하속도의 영향

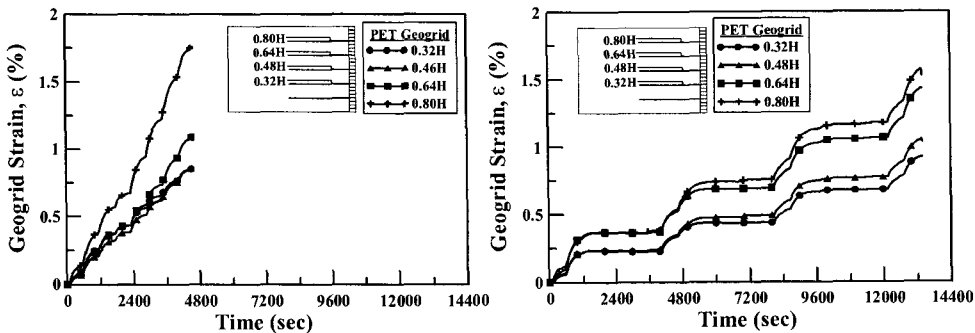
그림 7과 그림 8은 PET 재질의 지오그리드가 포설된 실험조건에서 지속하중을 각각 10분간 재하한 경우와 10분과 1시간을 반복하여 재하한 경우에 대한 실험결과를 보이고 있다. 각 층에서 발생한 벽체의 변형량을 시간에 따라 도시한 그림 7을 관찰하면 전반적으로 각 하중단계에서의 재하시간을 10분간 지속한 경우가 10분과 1시간을 반복하여 지속한 경우에 비하여 벽체변위가 크게 발생하는 경향을 보이고 있다. 전반적으로 하중재하속도를 빠르게 유지한 경우가 전반적으로 벽체 변위 및 지오그리드 유발 변형율이 크게 발생하는 경향을 보이고 있는데 이는 재하속도에 따라 보강토 용벽의 거동이 달라질 수 있음을 의미하는 것으로서 원인규명을 위한 추가적인 연구가 필요하다.



(a) 재하하중 10분 지속

(b) 재하하중 10분/1시간 반복

그림 7. 재하속도에 따른 벽체변위



(a) 재하하중 10분 지속

(b) 재하하중 10분/1시간 반복

그림 8. 재하속도에 따른 지오그리드 변형률

### 3.3 지속하중 수준의 영향

그림 9와 그림 10은 PET 재질의 지오그리드가 포설된 실험조건에서 각각 1시간씩 지속하중을 재하한 경우, 각 층에서 유발된 벽체와 지오그리드의 잔류 변형률을 지속하중 수준에 따라 도시한 것이다. 그림에서 관찰 할 수 있는바와 같이 벽체 변위와 지오그리드의 변형률은 시간이 경과함에 따라 지속적으로 증가하며 지속하중 수준이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나 있다. 정량적으로 살펴보면 0.8H 지점에서 지속하중이 20kPa로 작용하는 경우 1시간( $t=3600\text{sec}$ )의 재하시간 동안 유발된 벽체의 잔류 변형이 0.1mm, 지오그리드의 변형률 증분 0.02% 정도이나 지속하중이 60kPa로 작용하는 경우 각각 0.2mm, 0.045%로 나타나 약 2배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 보강 조건이나 보강재의 특성, 하중조건에 따라 장기적 측면에서 잔류 변형이 발생하여 장기변형이 누적되어 사용성 적인 측면에서 문제가 발생할 수 있음을 의미한다.

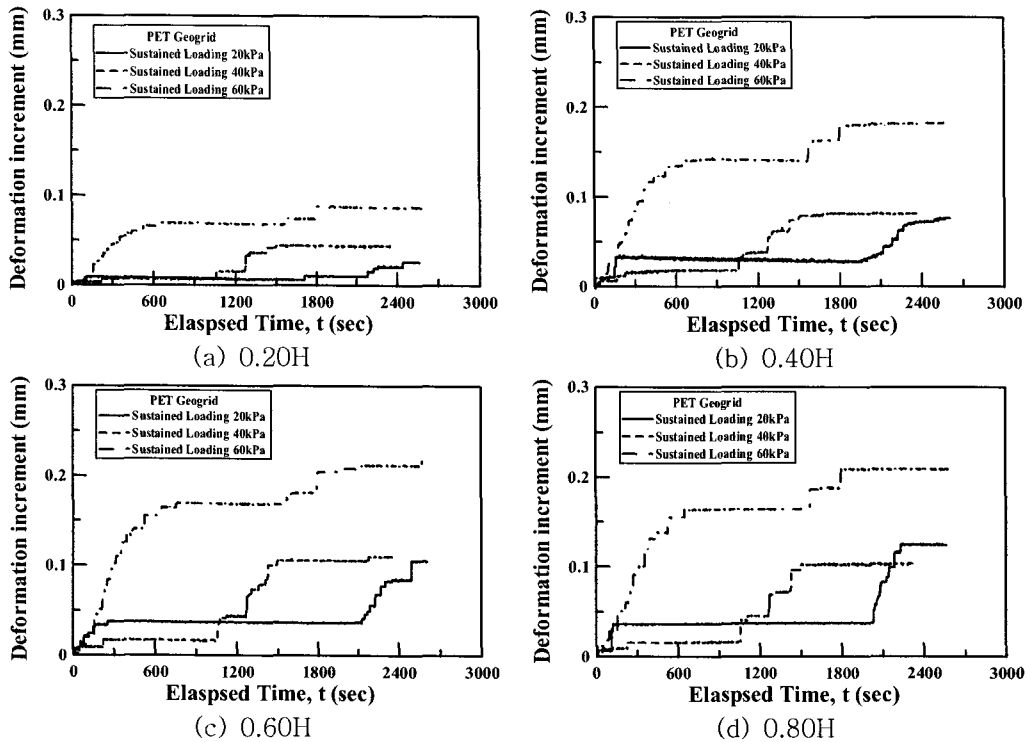


그림 9. 지속하중 수준에 따른 벽체의 잔류 변형 증분

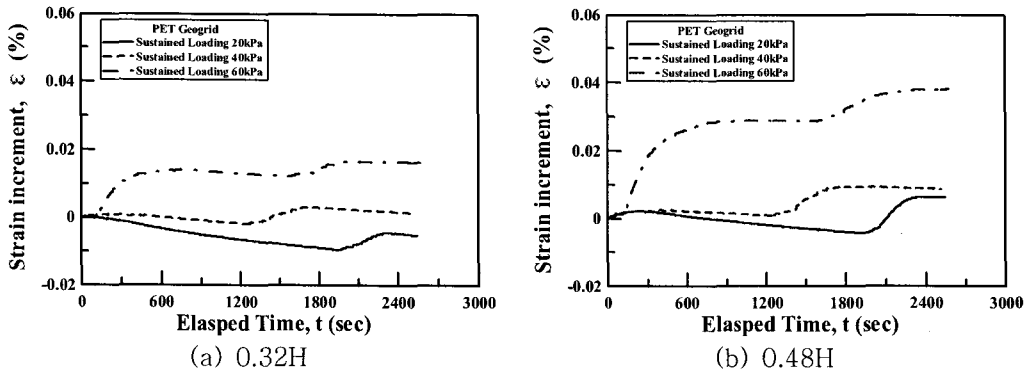


그림 10. 지속하중 수준에 따른 지오그리드 잔류 변형률 증분(계속)

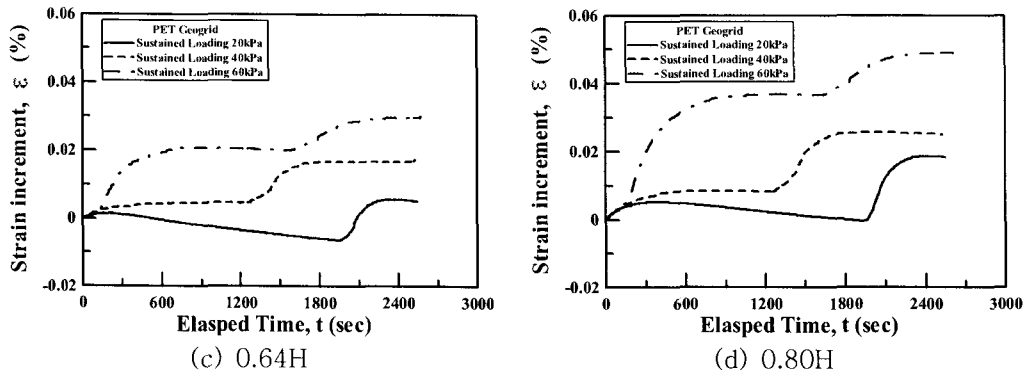


그림 10. 지속하중 수준에 따른 지오그리드 잔류 변형률 증분

### 3.4 지오그리드의 강성에 따른 영향

그림 11~그림 13은 170kN/m의 강성을 갖는 PET 재질의 지오그리드와 500kN/m의 강성을 갖는 PP 재질의 지오그리드를 각각 포설한 보강토 옹벽의 각 지속하중 단계에서의 벽체와 지오그리드의 잔류 변형 특성을 비교하고 있다. 먼저 그림 11과 그림 12에서는 강성에 따라 벽체 변위 및 보강재 유발 인장변형율이 상당한 차이가 발생하는 당연한 결과를 잘 관찰할 수 있다. 다만 주목할 만한 경향은 강성이 작은 PET보강재가 적용된 경우가 큰 강성의 PP보강재가 적용된 경우에 비해 유발인장력 및 변위 수렴속도가 완만한 경향을 보이고 있다는 점이다. 이는 강성이 작은 보강재가 적용되는 경우 같은 하중수준에 있어서 보강재 유발 응력(변형율) 수준이 강성이 큰 보강재의 경우보다 현저히 크게 되어 재료적 측면에서의 소성(plastic)/점성(visco) 변형이 발생하기 때문으로서, 보강토 구조물의 장기변위 제어를 위해서는 대상 구조물 및 하중조건에 적절한 보강재의 재질 및 강성의 선정이 매우 중요함을 나타낸다고 하겠다.

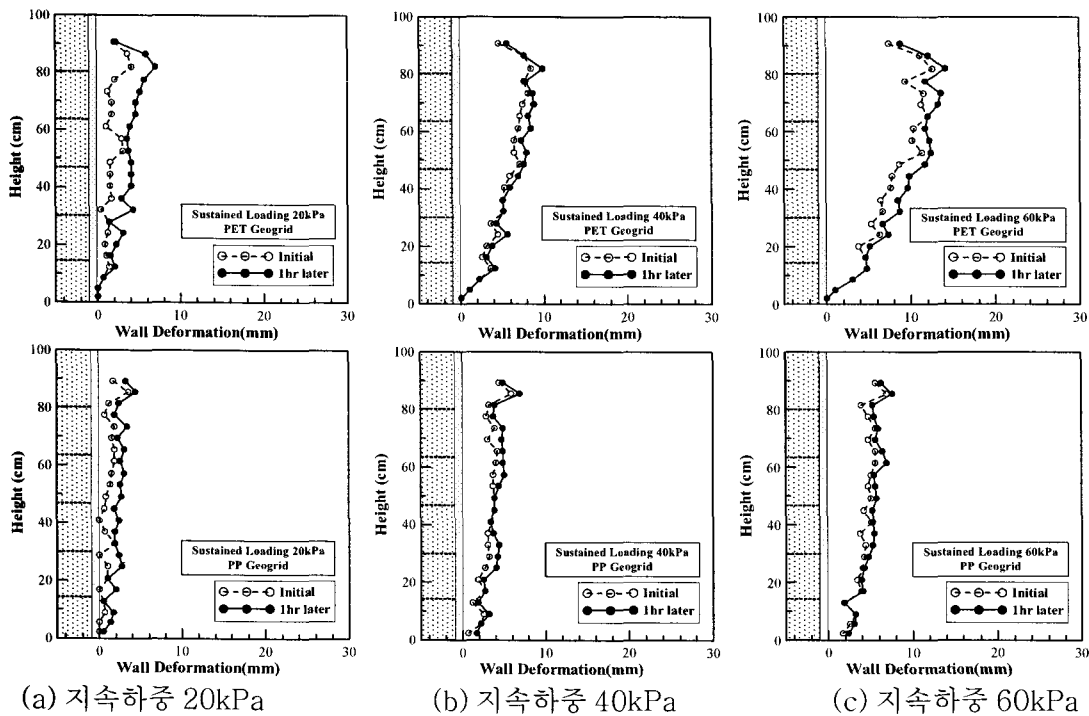


그림 11. 각 지속하중 단계에서의 벽체 잔류 변형



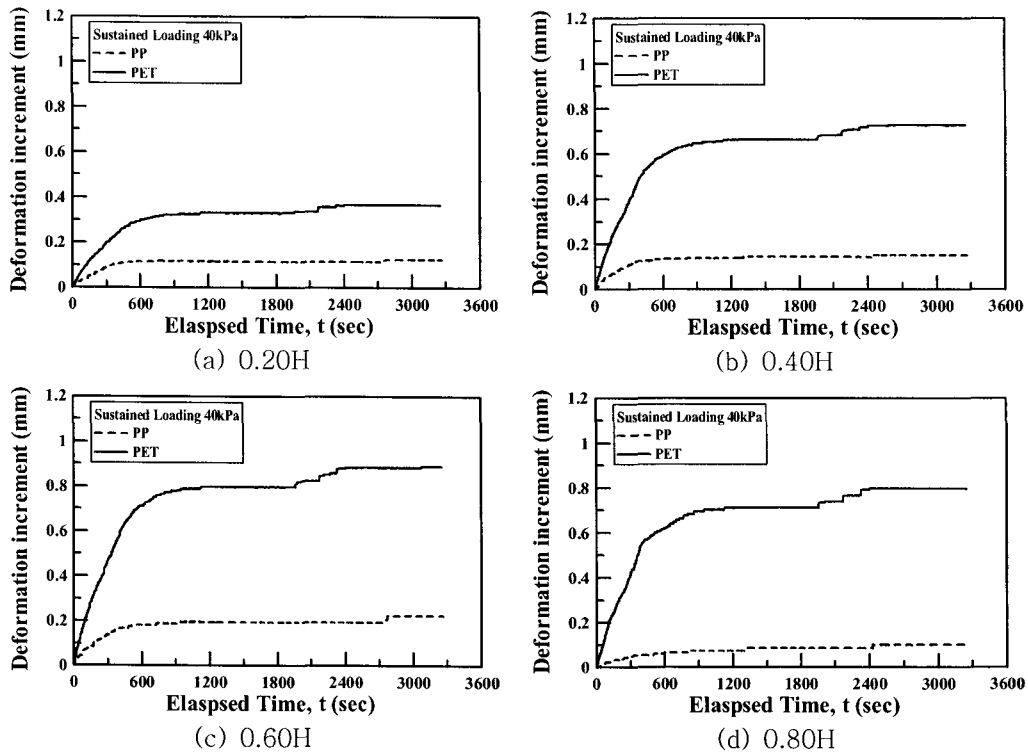


그림 12. 지오그리드 재질에 따른 벽체의 잔류 변형률 증분 비교

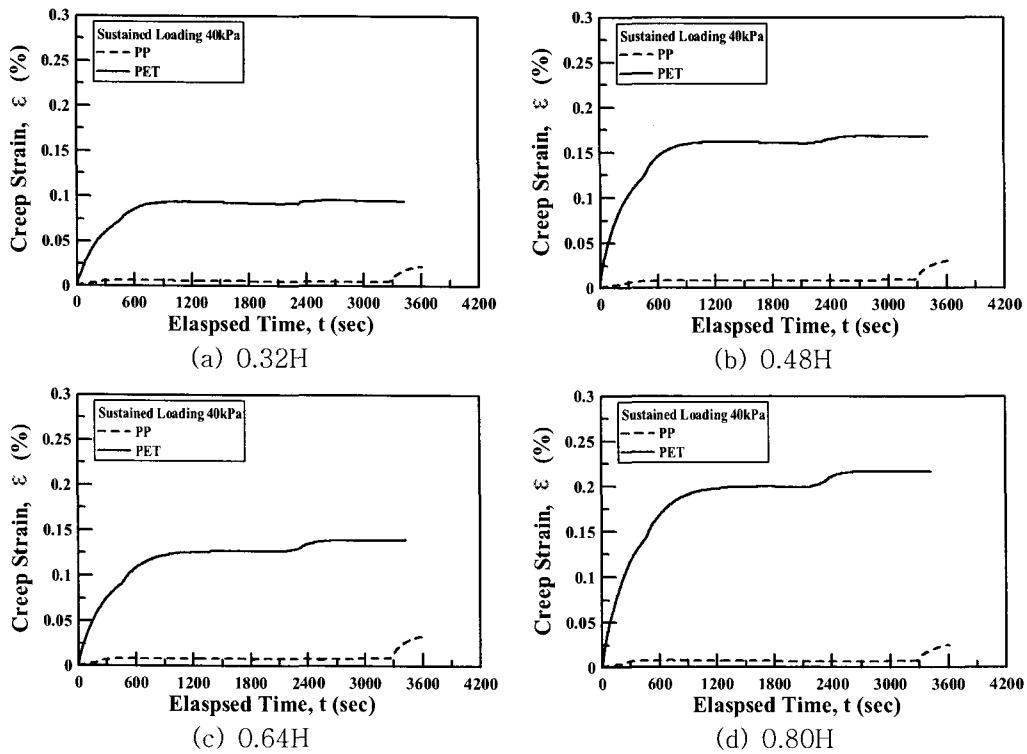


그림 13. 지오그리드 재질에 따른 지오그리드의 잔류 변형률 증분 비교

## 4. 결론

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

- 지속하중으로 인한 벽체와 지오그리드의 잔류변형은 시간 의존적인 형태로 발생하므로 사용연한에 걸쳐 발생할 수 있으며 그 크기는 지속하중의 수준이 클수록 증가하는 것으로 나타났다.
- 전반적으로 하중재하속도를 빠르게 유지한 경우가 전반적으로 벽체 변위 및 지오그리드 유발 변형율이 크게 발생하는 것으로 나타났으며 이는 재하속도에 따라 보강토 옹벽의 거동이 달라질 수 있음을 의미하는 것으로서 이에 대한 원인규명을 위한 추가적인 연구가 필요하다.
- 강성이 작은 보강재가 적용되는 경우 같은 하중수준에 있어서 보강재 유발 응력(변형율) 수준이 강성이 큰 보강재의 경우보다 현저히 크게 되어 재료적 측면에서의 소성(plastic)/점성(visco) 변형이 크게 발생하여 잔류변형 발생으로 인한 장기변위가 발생할 수 있다.
- 이러한 결과를 종합할 때 보강토 구조물의 장기변위 제어를 위해서는 대상 구조물 및 하중조건에 적절한 보강재의 재질 및 강성의 선정이 매우 중요하다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 유충식, 김선빈, 이봉원 (2005), "평균변형압축시험을 이용한 보강토의 시간 의존적 변형 특성 연구", *한국지반공학회논문집*, 제21권, 10호, pp. 1-13.
2. 유충식, 정혁상, 전상수, 이봉원, 김기연, 전한용 (2005), "축소 모형 실험에 의한 계단식 보강토옹벽의 파괴 메카니즘", *한국지반공학회논문집*, 제 21권 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. 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.
6. Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Shinoda, M., Kongkikul, W., and Uchimurra, 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.