

선행하중작용시 Back-To-Back(BTB) 보강토 옹벽의 거동 특성 Effect of preloading on residual deformation of Back-To-Back reinforced wall

김선빈¹⁾, Sunbin Kim, 유충식²⁾, Chungsik Yoo, 김재왕³⁾, Jaewang Kim, 주성용⁴⁾, Sungyong Joo

- 1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 3) 성균관대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 4) 성균관대학교 사회환경시스템공학과 졸업, Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

개요(SYNOPSIS) : The use of reinforced earth walls in permanent structures is getting its popularity. 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, during their service period. In this investigation, the effect of preloading in reducing long term residual deformation of back-to-back reinforced soil wall under sustained and/or repeated loading environment using a series of reduced-scale model tests. It is found that the preloading technique can be an effective means of controlling residual deformations of reinforced soils under various loading conditions.

Key words : reinforced earth, preloading, prestressing, residual deformation, reduced scale model test

1. 서 론

최근에는 보강토 구조물의 적용범위가 도로나 철도분야에 적용되어 하중지지 구조물로까지 확장기 시작하였으며 이에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 경우 시공중 및 단기적 안정성 뿐만 아니라 장기적인 측면, 그리고 사용성(serviceability) 측면에서도 요구조건을 만족시켜야 한다. 일반적으로 장기적 안정성은 토목섬유류의 크리프 특성을 감안하여 인장강도를 감소시키는 간접적인 방법으로 고려하는 정도에 불과하며 주 구성요소라고 할 수 있는 뒤채움흙의 하중 재하시 잔류변형에 대한 고려는 하지 않고 있다. 따라서 장기변형을 억제하여 사용성을 확보하여야 하는 영구 구조물의 설계관점에서는 보강재와 뒤채움흙의 잔류변형을 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다.

이러한 맥락에서 일본 및 북미에서는 보강토체에 선행하중(Preloading, PL)을 재하하여 하중재하시 장기적인 잔류변형을 억제하는 공법을 적용하고 있다. 관련된 연구로서 Shinoda 등(2003), Uchimura 등(2003), Tatsuoka 등(2004)은 잔류 변형 제어 수단으로 모래로 뒤채움된 보강토에 선행하중(Preloading, PL) 공법의 적용성을 검토하고 실험에 적용하여 적용성을 검토한 바 있으며, Wu 등(2001)은 철도교 교대부 보강토 옹벽에 선행하중을 작용하여 보강토체에 프리스트레스를 주는 방법으로 이를 적용한 사례를 보고한 바 있다. 또한 유충식 등(2005, 2007)은 화강풍화토를 뒤채움흙으로 사용하는 경우에 대해서도 PL 공법이 잔류변형을 억제하는데 효과가 있는지를 요소수준의 평면변형율시험을 통해 검토하여 보고한 바 있다.

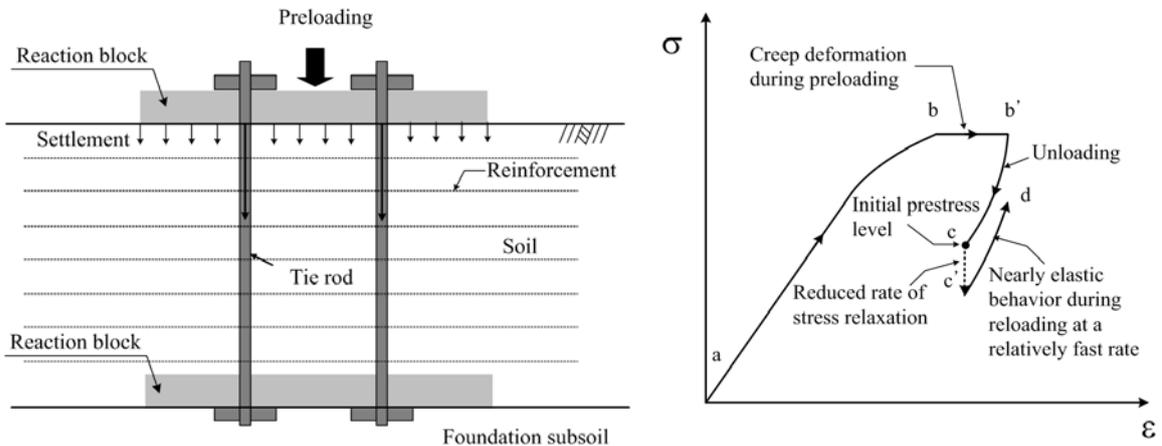
본 연구에서는 선행 연구 결과의 확장을 위해 화강풍화토로 뒤채움된 보강토 구조물에 대해 축소모형 실험을 수행하여 구조물 수준에서의 PL 공법 적용시 잔류변위 억제 메커니즘을 살펴보았으며 이와 아울러 잔류변위에 영향을 미칠 수 있는 작용 하중 조건 등에 따른 PL 개념의 적용 범위를 고찰하였다.

2. 선행하중 작용 개념

Tatsuoka 등(1997)은 하중지지 구조물로서 보강토 구조물이 적용되는 경우 잔류변형을 억제하기 위한 방법으로서 보강토에 선행하중(preloading, PL) 및 프리스트레스(prestress, PS)를 적용한 개념을 제시하였다. 이는 임의 사용하중 상태에 있는 보강토체가 탄성 및 강성거동을 하도록 유발시킴으로써 잔류변위를 억제하는 개념으로 다음과 같은 방법으로 적용된다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 사용하중보다 큰 선행하중(PL)을 작용하여 침하를 유발시킨 후 제하시(unloading, UL) 임의 응력 수준에서 기초지반에 설치된 반력판과 지상에 설치된 반력판을 연결하는 연결봉(tie rod)를 고정시키는 방법으로 프리스트레스를 유발시킨다. 이와같이 PL과 PS가 적용된 보강토체는 그림 1(b)에서 보이는 바와 같이 거동하게 되는데, 즉 선행하중 작용시까지 a → b의 경로를 따라 응력이 증가함에 따라 변형이 증가하고, PL 재하 중에는 크리프 변형이 유발되는 거동형태를 보이며, c 수준까지 UL 후 PS 적용 후에는 c → c' 경로를 따라 일정 크기의 릴렉сей션이 발생한 후 재재하(reloading, RL)시 c' → d 경로를 따르는 탄성 및 강성에 가까운 거동형태를 나타내게 된다.

이와같이 PL-PS를 적용한 선행하중 공법은 하중지지 구조물로 적용되는 보강토 구조물에서 잔류변위를 억제할 수 있는 공법으로서 보강토 구조물의 적용범위를 확장시키는 것이 가능한 효과적인 공법이라 할 수 있다.



(a) PL-PS 적용 모식도

(b) PL-PS 적용시 응력-변형을 거동

그림 1. 선행하중 공법 개념(Tatsuoka 등, 1997)

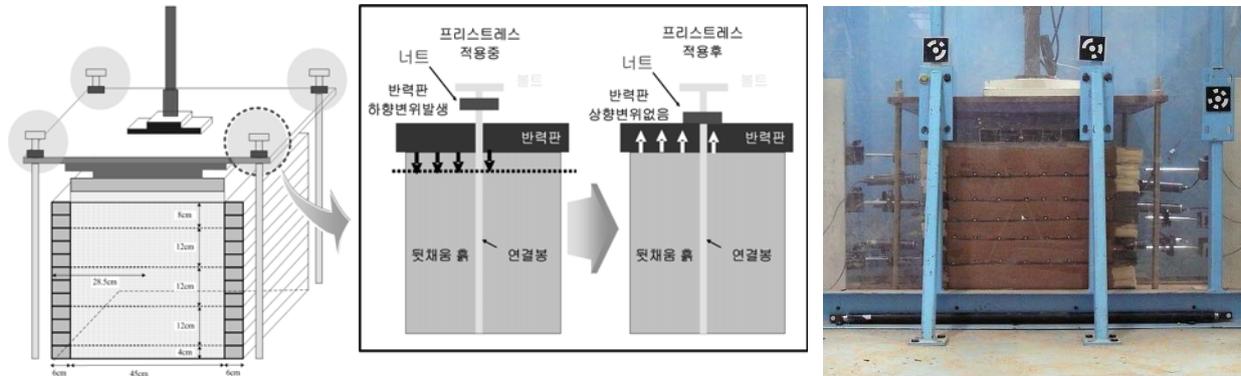
3. 축소모형실험

3.1 모형제작 및 모형실험장치

본 연구에서는 2장에서 기술한 Tatsuoka 등(1997)이 제시한 PL-PS 개념을 Back-To-Back 옹벽 형태의 구조물에 적용할 경우를 다루었으며 그림 2와 같은 모형을 제작하여 축소모형실험을 수행하였다. 즉, 그림 4에서와 같이 BTB 옹벽 모형은 1800mm, 높이 1200mm, 폭 800mm 인 토조 내부에 폭 510mm, 길이 800mm, 높이 480mm의 크기로 제작하였다. 모형옹벽의 벽체는 규격이 길이 60mm, 높이 40mm인 스테인리스강 파이프를 쌓아 축축하였는데 파이프 마다 2개소에 구멍을 뚫어 전단키(shear key) 형태의 연결시스템이 적용되도록 하였다. 한편, 보강토 옹벽의 평면변형상태를 유지하기 위하여 모형 벽체와 벽면 사이에는 건설 마감재료인 문풍지를 설치하여 뒤채움흙의 유실을 방지하고 마찰을 최소화 하였다. 뒤채움은 표 1에 제시되어 있는 물리적 특성을 갖는 화강풍화토를 다짐도 90%로 다짐하여 실시하였으며 폴리에스터 재질의 파단강도 40kN/m, 파단시 변형을 20%의 지오그리드를 중간 리브를 잘라 1/2로 축소하여 연직간격 4~12cm로 네 층에 포설하였다.

표 1. 화강풍화토의 입도분포 및 물리적·역학적 특성

D10 (mm)	균등계수 (C _u)	곡률계수 (C _c)	#200체 통과율 (%)	통일분류법 (USCS)	건조단위중량 (γ _d , kN/m ³)	최적함수비 (w, %)
0.15	4.00	1.00	2 ~ 5	SW	19.5	14.5



(a) 모형 제원 및 선행하중 적용방법

(b) 시험장치 전경

그림 2. BTB 옹벽 모형

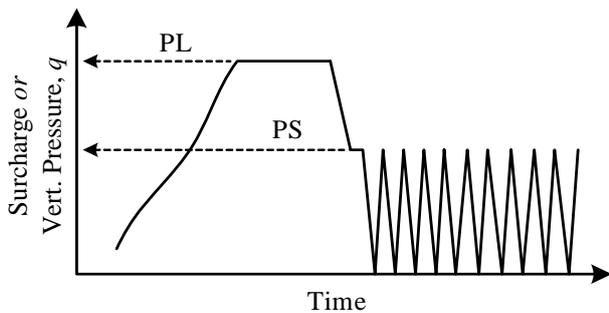


그림 3. PL 및 PS 정의

모형옹벽은 사용연한 동안 받을 수 있는 다양한 형태의 하중, 즉, 단순재하하중(continuous monotonic loading, CML), 지속하중(sustained loading, SL) 및 반복하중(cyclic loading)을 받는 경우를 고려하여 PL-PS 개념이 BTB 옹벽의 거동에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 경향을 고찰하였다. 그림 3은 본 연구에서 정의한 PL 및 PS에 대한 정의를 보여주고 있다.

표 2는 각각 하중재하 시스템 사양을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 재하시스템은 CMS, SL, CL의 구현이 가능한 10-ton 용량의 유압재하장치를 사용하였다. 하중재하시 옹벽의 거동 특성에 대한 고찰을 위해 LVDT를 이용하여 벽체 침하 및 수평변위는 측정하였으며 지오그리드에 스트레인게이지를 부착하여 하중재하시 보강재 인장변형율을 측정하였다. 아울러 계측데이터의 수집을 위해 TDS-303 데이터로거를 이용하였으며, 그림 4에서는 모형실험의 계통도를 보여주고 있다.

표 2. 재하 및 계측 시스템 사양

구성장치		사양 및 특징
유압재하장치		<ul style="list-style-type: none"> 정적 및 동적재하, 하중/변위제어 변위제어-재하속도 : 0.001~100mm/min 하중제어-재하속도 : 0.8 ~ 2kPa/min 최대재하능력 : 200kN 0.001~1.0 Hz의 sine 파형 구현
계측 센서부	수직하중 로드셀	• 용량: 200kN
	내부변위 측정장치	• 용량: 200mm
	벽체변위 측정 LVDT	• 용량: 100mm
	스트레인게이지 strain gauge	• 10~15% 정도의 변형률 측정 가능
계측	TDS-303 데이터로거	• 데이터의 디스플레이 및 컴퓨터로의 전송

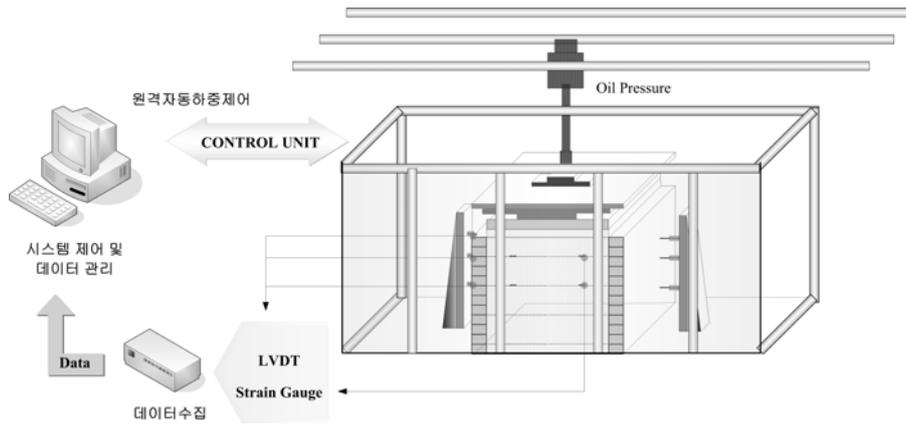


그림 4. 모형실험 계통도

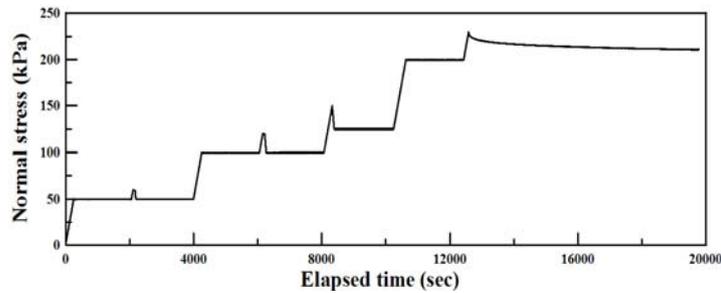
3.2 실험 조건

본 연구에서 수행한 실험조건을 표 3에서 정리하고 있다. 여기서 보이는 바와 같이 CML, SL, CL 하중재하조건에서 PL 작용 후 보강토체내에 유지시키는 PS 수준이 잔류변위에 미치는 영향을 고찰하는데 주안점을 두었다. 그림 5와 그림 6은 각각 각 실험조건에서의 하중 이력과 실험과정을 기술하고 있다.

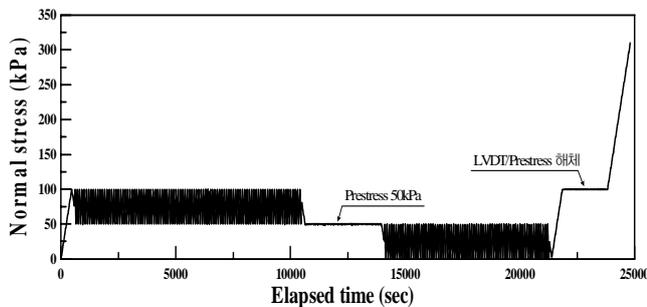
표 3. BTB 응벽 실험조건

뒤채움흙	재하이력	CML 재하속도 $\dot{\delta}(kPa/hr)$	SL시 지속하중 (kPa)	SL시 지속시간 (hour)	CL시 하중수준	CL시 진폭 (kPa)	CL시 반복시간 (hour)	하중이력
모래	CML→SL	100	100	0.5	-	-	-	a)
풍화토	CML→CL	100	-	-	50, 100	50	3	b)
풍화토	CML→CL	100	-	-	75, 100	50	2, 3	c)

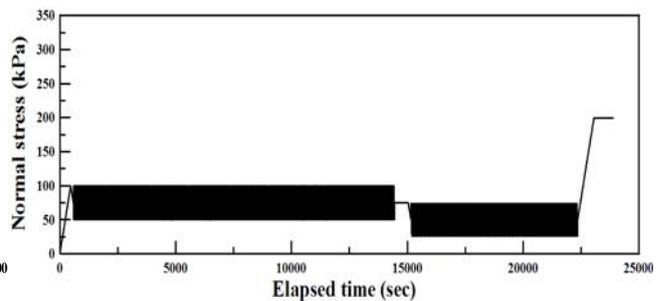
주) 반복하중시 주파수(f) 및 진폭(Δq): $f = 0.01Hz$, 이중진폭 $\Delta q = 25kPa$



(a) 하중이력 a)



(c) 하중이력 b)



(e) 하중이력 c)

그림 5. BTB응벽 실험조건 하중이력

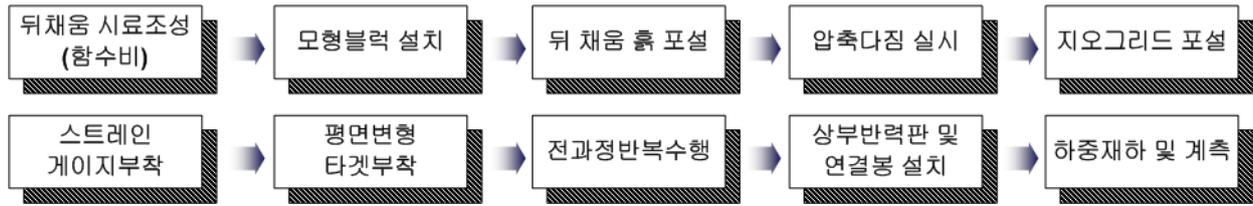
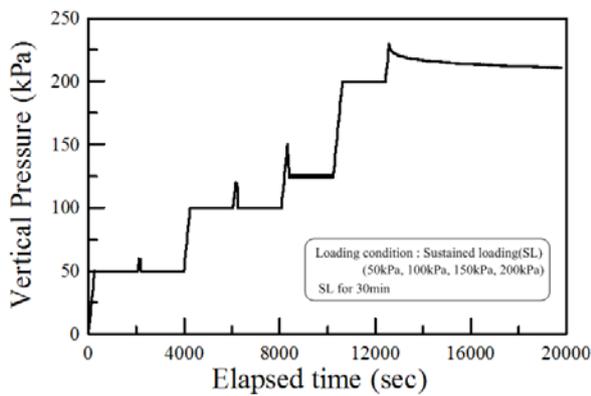


그림 6. 시험 과정

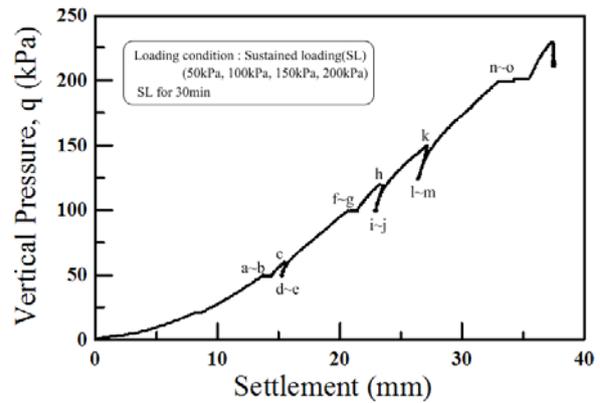
4. 실험결과 분석

4.1 잔류변위 억제 메커니즘

아래 그림 7, 8은 지속하중 조건에 대해 제시하고 있다. 그림 7에서는 하중-시간($p-t$) 이력곡선과 하중-침하($p-s$)곡선을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 지속하중은 다양한 하중 수준에서 30분 동안 작용시켰으며 PL 미적용 경우 적용한 경우의 비교가 될 수 있도록 CML 단계에서 UL-RL을 수행하였다. 그림 8은 지속하중 수준 $q_{SL} = 50, 100 \text{ kPa}$ 에서 잔류변위를 보여주고 있는데 관찰할 수 있는 바와 같이 PL 적용시 미 적용시와 비교하여 잔류변위(침하)를 거의 제거할 수 있는 것으로 나타났으며 그 효과는 하중 수준이 증가할 수록 뚜렷해지는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 상부하중을 지지하는 보강토 옹벽의 경우 잔류변위 혹은 침하가 우려되는 시공조건에서 PL 개념을 도입하면 지속하중 작용으로 인한 잔류변위를 크게 줄일 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다.

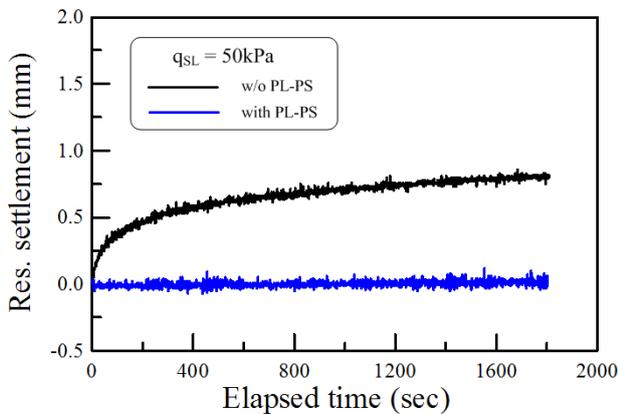


(a) $p-t$

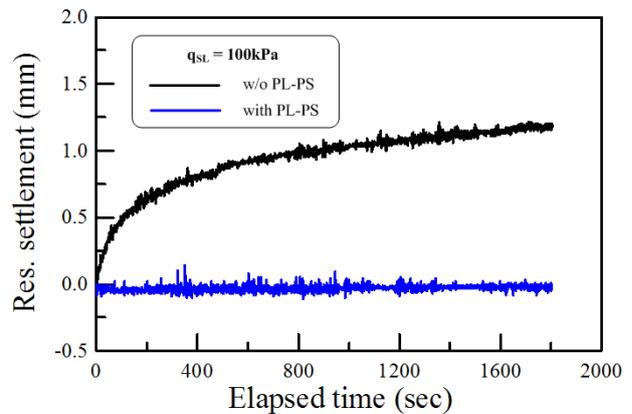


(b) $p-s$

그림 7. BTB 옹벽 실험의 하중-변위-시간 관계 (지속하중)



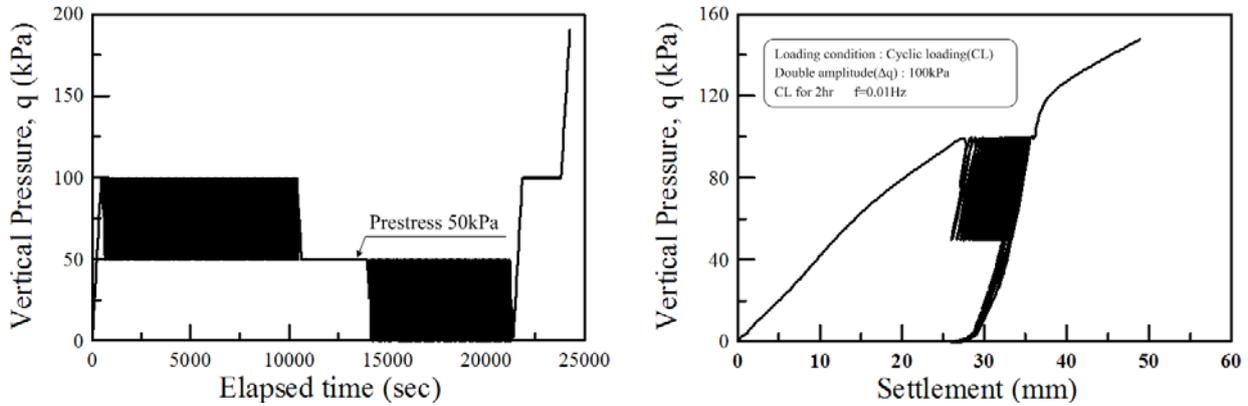
(a) 지속하중 50kPa



(b) 지속하중 100kPa

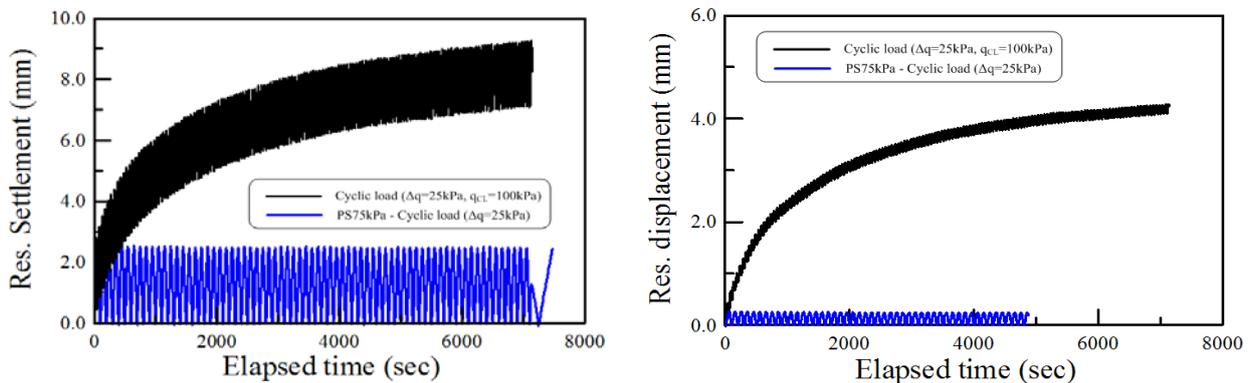
그림 8. PL 작용여부에 따른 잔류침하 - BTB 옹벽 (지속하중)

반복하중 작용시 PS 적용여부에 따른 모형 BTB 옹벽의 결과가 아래 그림 9~11에 제시되어 있다. 하중조건은 앞서 제시된 표 3에서 기술한 반와 같이 주파수 $f = 0.01Hz$, 이중진폭 $\Delta q = 25kPa$ 의 반복하중을 재하하는 조건으로서 CML로 100kPa로 재하 후 2시간 동안 반복하중을 재하한 후 다시 50kPa 까지 UL 하여 PS 의 상태에서 다시 같은 진폭으로 2시간 동안 반복하중을 수행하였다. 따라서 두 하중 재결과를 직접적으로 비교함으로써 PL/PS 적용 여부에 따른 잔류변형 거동 특성을 분석할 수 있다.



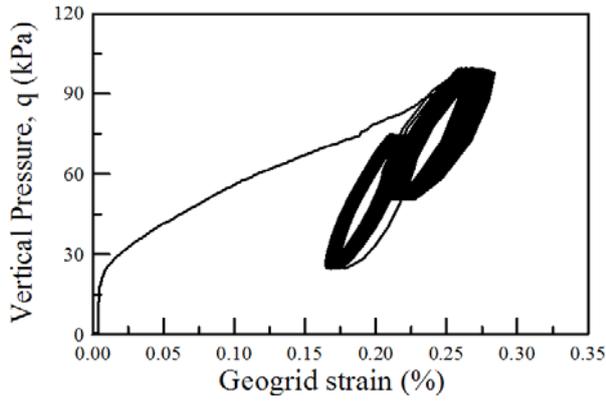
(a) $p-t$ (b) $p-s$
 그림 9. BTB 옹벽 실험의 하중-변위-시간 관계 (반복하중)

먼저 잔류침하와 벽체의 최대잔류변위를 비교하고 있는 그림 10에서 관찰할 수 있는 바와 같이 PS 미적용시 잔류침하는 재하기간동안 최대 9mm 정도, 잔류변위는 4mm 정도가 발생한 것으로 나타났으나 PS 적용시에는 잔류침하/변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 반복하중 재하의 경우에도 사용하중의 크기를 고려하여 적정수준의 PS 를 작용시킴으로써 반복하중으로 인한 잔류변위를 제거할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 결과는 보강재의 잔류유발인장 변형율을 나타내는 그림 11에서도 잘 관찰할 수 있다. 즉, 먼저 하중-인장변형율($p-\epsilon_g$)관계를 보여주는 그림 11(a)를 관찰하면 반복하중 재하시 보강재의 인장변형율은 루프를 그리며 거의 탄성적인 경향을 보이고 있는데 루프의 폭이 PS 적용시 작게 나타나고 있어 PS 작용여부가 보강재의 인장변형율에도 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이는 PS 미적용시 발생하는 0.1%의 잔류인장변형율이 PS 적용으로 인해 거의 제거되는 결과를 보여주는 그림 11(b)에서 보다 잘 관찰할 수 있다.

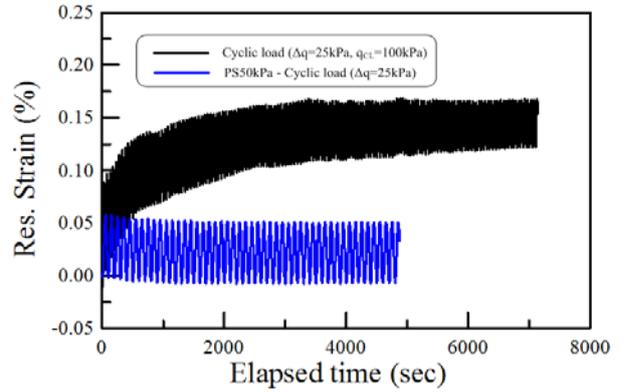


(a) 잔류침하 비교 (b) 벽체잔류변위 비교

그림 10. PL 작용여부에 따른 잔류변위 (반복하중)



(a) $p-\epsilon$

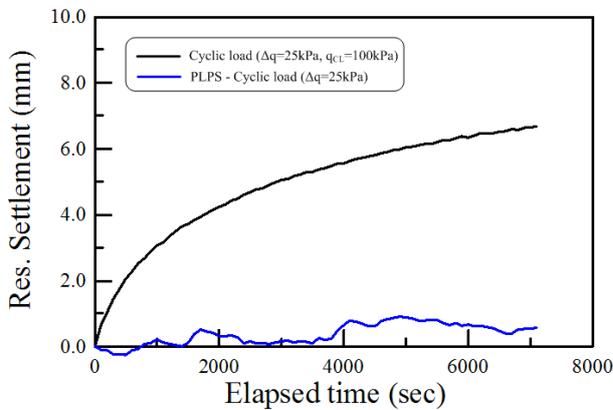


(b) 지오키드 잔류변형

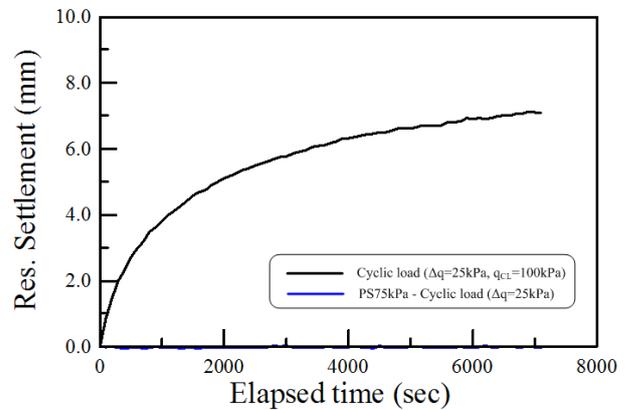
그림 11. PL 작용여부에 따른 지오키드 잔류변형 (반복하중)

4.2 PL 수준에 따른 잔류변위

PL/PS 개념을 적용하는데 있어 실무적 관점에서 중요한 사항은 PL 및 PS 수준이라고 하겠다. 그림 12는 BTB 옹벽에 대한 반복하중 $q_{CL} = 100 kPa$ 조건에 있어 $PL/PS = 0.5, 0.75$ 에 대한 결과를 제시하고 있다. 보이는 바와 같이 $PL/PS = 0.5$ 의 경우 1mm 정도의 잔류변위가 발생하나 PL/PS 수준을 0.75로 증가시킬 경우 잔류변위가 완벽히 제거되는 것으로 나타나 반복하중 재하조건 역시 PL/PS 수준을 증가시킴으로서 잔류변위를 추가적으로 억제할 수 있는 것으로 나타났으며 $PL/PS = 0.75$ 시 잔류변위를 거의 제거할 수 있는 것으로 나타나 PL/PS 수준에 따라 잔류변위 제어 효율이 달라질 수 있는 것으로 검토되었다.



(a) $PS/PL=0.5$



(b) $PS/PL=0.75$

그림 12. PS 수준에 따른 잔류변위 억제 효과 (반복하중)

5. 결론

본 논문에서는 $PL-PS$ 개념의 현장 적용성 검토를 위해 화강풍화토로 뒤채움된 BTB 보강토 옹벽에 대한 축소모형실험을 수행하였으며, 실험결과를 토대로 PL 공법 적용시 잔류변위 억제 메커니즘을 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다

- (1) 모형시험 결과를 분석한 결과 하중-변위관계에서 재하경로의 기울기보다 재 재하 경로의 기울기가

큰 경향을 관찰할 수 있었으며 이러한 경향이 결국 PL 공법 적용을 통해 사용하중 작용시 보강 토체가 재하경로가 아니라 재 재하 경로를 따르게 함으로써 잔류변위를 억제할 수 있는 것으로 분석되었다.

- (2) PL/PS 공법 적용시 직속하중 이나 반복하중으로 인해 사용연한동안 발생할 수 있는 잔류변위/침하의 일부 혹은 전부를 제거할 수 있는 것으로 나타났으며 그 정도는 PL 및 PS 수준에 따라 결정된다.
- (3) PL/PS 공법은 보강토체의 변위뿐만이 아니라 보강재의 잔류 인장변형을 제어에도 효율적으로 나타났으며 사용하중 수준 이상의 하중 재하 후 일정하중 만큼 재하한 후 사용하중을 작용시킬 경우 잔류침하 및 보강재 잔류 인장변형율을 거의 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0), 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700) 및 철도기술연구원 기본사업(과제번호 : PK07002A-1)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식, 김선빈, 김영훈, 한대희 (2007), “지속하중 및 반복하중 재하시 보강토 옹벽의 잔류변형 특성”, *한국지반공학회논문집*, 제23권, 6호, pp. 5-21.
2. 유충식, 김선빈, 이봉원 (2005), “평면변형압축시험을 이용한 보강토의 시간 의존적 변형 특성 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 10호, pp. 1-13.
3. 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.
4. Tatsuoka, F., Hirakawa, D. Shinoda, M., Kongkitkul, W, Uchimura, T. 2004. "An Old but New Issue; Viscous Properties of Polymer Geosynthetics Reinforcement and Geosynthetic-Reinforced Soil Structures", Keynote Lecture, *Proc. of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Seoul, 2004, Shim et al. (eds.), Korean Geosynthetic Society, pp.29-77.
5. Won, G.W., Hull, T., De Ambrosis, L. 1996. Performance of a geosynthetics segmental block wall structure to support bridge abutments. In Ochiai, H., Yasufuku, N., Omine, K. (Eds.), *Earth Reinforcement: Vol. 1*. 543-548. Rotterdam: Balkema.
6. Wu, J.T.H., Ketchart, K., Adams, M. 2001. GRS bridge piers and abutments. Report FHWA-RD-00-038. FHWA, US Department of Transportation, 136pp.