

선행하중이 보강토 구조물의 잔류변형에 미치는 영향에 관한 축소모형실험

Reduced-Scale Model Tests on the Effect of Preloading on Residual Deformation of Reinforced Earth Structures

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

김 선 빈² Kim, Sun-Bin

Abstract

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 exists concerns over long-term residual deformations when subjected to repeated and/or cyclic loads, during their service period. In this investigation, the effects of pre-loading in reducing long term residual deformation of reinforced soil structures under sustained and/or repeated loading environment are investigated using a series of reduced-scale model tests. A model pier and a back-to-back (BTB) reinforced soil structures were constructed and tested under various loading and backfilling conditions. The results indicate that the pre-loading technique can be an effective means of controlling residual deformations of reinforced soils under various loading conditions.

요 지

보강토 옹벽의 영구구조물로서의 적용성이 증가함에 따라 지속 혹은 반복하중 등 다양한 하중조건하에서 장기적인 잔류변형이 설계/시공시 주요 관점이 되고 있다. 본 연구에서는 교량구조물의 피어 및 Back-to-Back(BTB) 형태의 보강토 옹벽을 대상으로 사용하중 작용 이전에 작용시키는 선행하중이 보강토 구조물의 잔류변위를 제어에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 모형 피어와 BTB 옹벽을 축조하여 단순재하, 지속하중, 반복하중 등 다양한 하중조건 및 시공조건에 대한 모형실험을 수행하였다. 그 결과 선행재하 공법은 다양한 하중 및 시공조건에서 잔류변위 제어에 탁월한 것으로 나타났다.

Keywords : Back-to-back wall, Pier, Preloading, Prestressing, Reduced-scale model test, Reinforced earth, Residual deformation

1. 서 론

1990년 초반부터 민간 건축현장에서 적용되기 시작
했던 보강토 공법은 최근 들어 그 적용범위가 확장되어

도로나 철도분야 등 옹벽배면에 하중이 작용하는 경우
에도 적용되는 등 하중지지 구조물로서 적용되고 있다.
옹벽을 포함한 모든 건설구조물은 시공 중 단계적 안정
성이 확보되어야 할 뿐만 아니라 장기적인 측면에서

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

안정성과 사용성(serviceability)이 확보되어야 한다. 폴리머 합성 재료를 보강재로 활용하는 보강토 옹벽의 경우 일반적으로 장기적 안정성은 토목섬유의 크리프 특성을 감안하여 인장강도를 감소시키는 방법을 적용하는 방법을 적용하고 있으나 사용성, 즉 변위 관련 검토는 특별히 수행하지 않고 있다.

보강토 구조물의 역학적 특성을 좌우하는 중요한 구성요소는 뒤채움흙과 보강재이며 따라서 보강토 구조물의 장기적인 거동, 특히 변형은 뒤채움흙과 보강재의 크리프 변형에 기인한다고 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 보강재의 크리프 특성은 보강재의 허용인장강도 산정시 크리프 감소계수를 적용함으로써 간접적으로 반영하고 있으나 뒤채움흙에 대한 크리프 특성은 고려하지 않고 있다. Hirakawa 등(2002), Tatsuoka(2004), 그리고 유충식(2007)이 수행한 보강토의 잔류변형에 관한 연구결과에 의하면 보강토에 지속하중 혹은 반복하중이 작용할 경우 장기적인 변형(잔류변형)은 보강재 보다는 뒤채움흙에서 주로 발생하는 것으로 보고된바 있다. 이러한 연구결과는 다량의 세립분이 포함되어 있는 화강풍화토를 뒤채움흙으로 활용하는 우리나라의 실정에서 사용성 측면에서의 효율성을 높이기 위해서는 뒤채움흙으로부터 발생하는 잔류변형을 억제하는 것이 매우 중요함을 나타낸다고 하겠다. 이러한 맥락에서 보강토 옹벽이 도로 혹은 철도분야의 성토체 지지용 구조물로서의 적용성을 확보하기 위해서는 차량 혹은 열차 하중의 반복적인 하중재하 및 장기적인 하중재하로 인해 발생할 수 있는 장기변형(long-term deformation)에 대한 대책과 제어 방안이 강구되어야 한다.

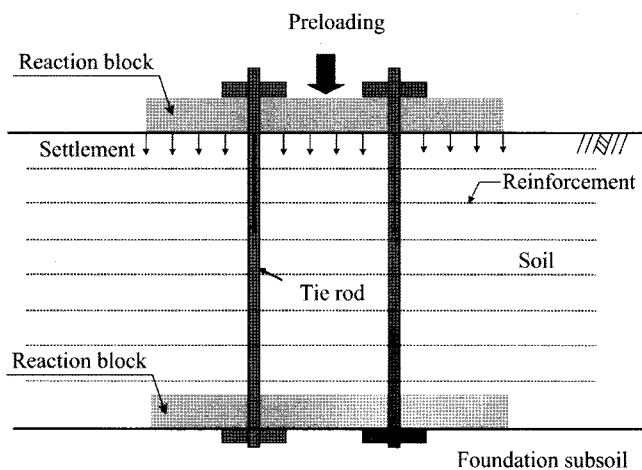
일본 및 북미에서는 하중지지 구조물의 용도로 시공되는 보강토 구조물의 장기적 변형을 제어하는 방법으로서 선행하중(Preloading, PL)을 본 하중재하 이전에 적용하여 본 하중 재하시 발생할 수 있는 잔류변형을 사전에 제거하는 개념을 적용하고 있다. 이와 관련된 연구로서 Shinoda 등(2003), Uchimura 등(2003), Tatsuoka 등(2004), Wu 등(2001) 등을 들 수 있는데 이들은 평면변형율시험, 축소모형실험, 실대형 현장 시험을 통해 잔류 변형 제어 수단으로서의 PL 개념의 타당성을 검증한 바 있다. 특히, Wu 등(2001)은 도로교 교대부 보강토 옹벽에 선행하중을 작용시켜 보강토체에 프리스트레스를 작용시키는 방법을 적용한 사례를 보고한 바 있으며 국내에서도 최근 들어 유충식 등(2005, 2007)은 화강풍화토를 뒤채움흙으로 사용하는 경우에 있어 PL 공법이 잔류변형을 억제하는데 효과가 있는지를 요소수준의 평면변형율시험 및 축소모형실험을 통해 검토하여 보고한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 연구자들이 대부분 뒤채움흙으로 모래를 적용하는 경우에 국한하여 연구를 수행한 데 착안하여 우리나라의 시공환경을 고려하여 화강풍화토를 뒤채움흙으로 적용하는 경우에 있어서의 PL 공법의 적용성 및 각종 역학적 메카니즘을 고찰할 목적으로 축소모형실험을 실시하고 그 결과를 고찰하였다.

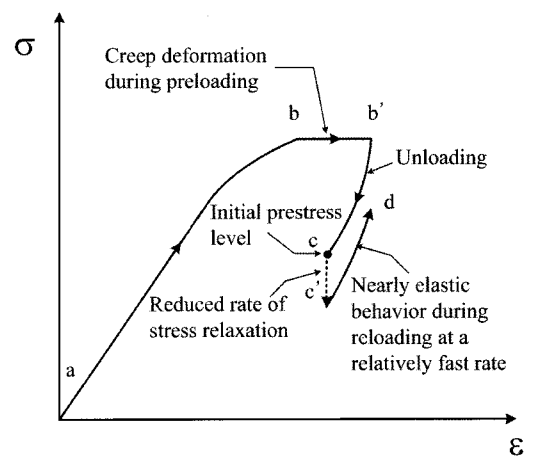
2. 선행재하 공법 개념 및 적용사례

2.1 선행재하 공법 개념

PL 공법은 보강토체의 잔류변형을 억제하는 수단으



(a) PL-PS 적용 모식도



(b) PL-PS 적용시 응력-변형을 거동

그림 1. 선행재하 공법 개념(Tatsuoka 등, 1997)

로서 Tatsuoka 등(1997)에 의해 제안된 공법으로서 보강토체의 선행하중을 작용시키고 선행하중(PL)의 일부가 잔류하도록 하여 프리스트레싱(Prestressing, PS)을 통해 보강토체의 강성을 증가시켜 지속 혹은 반복하중으로 인한 잔류변형을 억제하는 개념이라고 할 수 있다. 즉, 그림 1에서와 같이 사용하중보다 큰 선행하중을 작용시킨 후 일정 크기의 하중까지 제하한 후 기초지반에 설치된 반력판과 지상에 설치된 반력판을 연결하는 연결봉을 체결하여 보강토체에 일정한 크기의 하중을 유발시킨다. 이와 같이 PL과 PS가 적용된 보강토체에는 그림 1(b)에서 보이는 바와 같이 선행하중 작용시까지 a → b의 경로를 따라 하중재하로 인해 사전변형이 발생하고 c 수준까지 제하 후 나머지 하중으로 보강토체를 프리스트레싱 할 경우 c → c' 경로를 따라 일정 크기의 릴렉сей션(relaxation)이 발생한 후 재재하시 c' → d 경로를 따르게 되어 강성이 매우 증가된 토체를 형성할 수 있게 된다. 이러한 선행재하 공법의 적용범위는 보강토 공법뿐만 아니라 하중지지 구조물로 적용되는 토류구조물에 있어서 잔류변위를 효율적으로 억제할 수 있는 공법이며 일반 성토구조물 보다 크리프 변형이 더 발생할 수 있는 보강재가 포설되는 보강토 구조물에

그 적용성이 더 우수하다고 할 수 있다.

2.2 PL 공법 적용사례

1) CASE 1 - Maidashi Bridge 피어(Kyushu, 일본) [Uchimura 등(2003)]

Uchimura 등(2003)은 선행재하 공법을 현장구조물에 적용하여 본 공법의 효율성을 보고한 바 있다. 선행재하 공법이 적용된 현장구조물은 그림 2에 P1으로 표시된 철도 교량의 가설피어(pier)로서 6.4 × 4.4m의 단면적에 높이가 2.7m의 제원으로 이루어졌다. 본 피어는 상부 거더의 자중과 철도차량의 충격하중을 고려한 활화중을 고려하여 각각 196kN과 1280kN의 설계하중으로 설계되었으며 파단강도 73.5kN/m의 PVC 지오그리드가 0.15m의 간격으로 포설되었다. 한편, 뒤채움 재료로는 최대 입경 30mm의 입도분포가 양호한 쇄석(사암)이 적용되었다. 본 피어를 시공하는데 있어 전면벽체를 타설하기 전에 2400kN의 하중(200kPa)으로 PL을 작용시켰으며 970kN까지 제하 후 특별히 고안된 Tie-rod를 이용하여 보강토체에 프리스트레싱이 유지되도록 하였다. 한편, 교대(A2)는 선행재하 공법이 적용되지 않은 일반

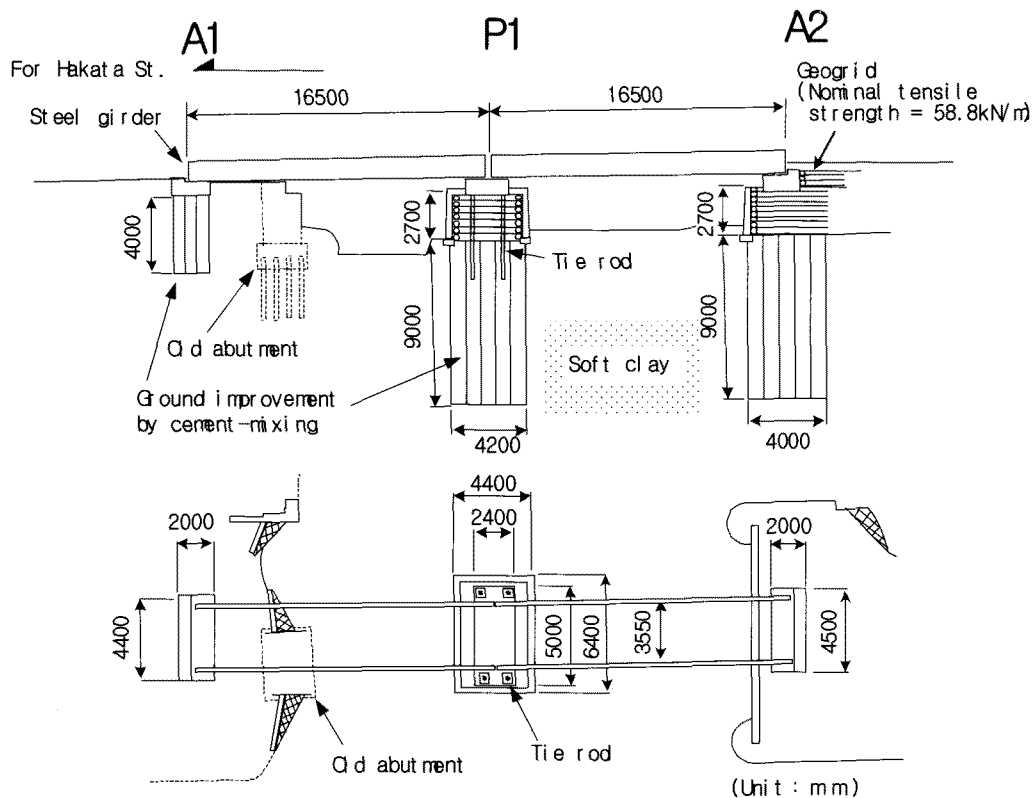


그림 2. PL 공법이 적용된 Maidashi 교량(Uchimura 등, 2003)

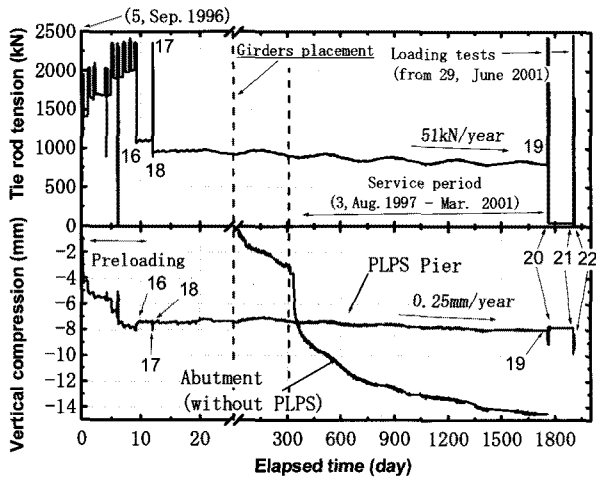


그림 3. 잔류침하 계속 결과(Uchimura 등, 2003).

형태의 보강토 구조물로 시공되었다.

그림 3은 선행재하 단계 및 시공완료 후 약 3년 동안의 계측결과를 나타내고 있다. 여기서는 선행재하 공법이 적용된 가설피어의 결과와 함께 일반 보강토옹벽 형태로 시공된 교대부(A2)에 대한 잔류침하 발생경향을 보여주고 있다. 먼저 PL이 적용된 가설피어의 경우 PL 적용시 약 4mm의 침하가 발생한 이후 철도차량 반복 통과(약 10^5 회)에 따른 잔류침하는 약 0.25mm/year의 속도로 매우 작게 발생하는 경향을 보이고 있다. 반면 PL이 적용되지 않은 일반 보강토 공법이 적용된 교대의 경우 시공 후 거더 설치시 약 8mm의 침하가 생긴 후 차량운행시 3년 동안 10mm 정도의 추가 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 PL 공법의 잔류침하 제어에 탁월한 효과를 직접적으로 나타낸다고 할 수 있다.

2) CASE 2 - Bobtail Road Bridge 교대 [Wu 등 (2002)]

북미에서 적용된 선행재하 공법이 적용의 대표적인 사례로서 미국 Bobtail Road 교량에 적용된 보강토 옹벽 교대를 들 수 있다(그림 4). 본 현장은 미국 콜로라도주에 시공된 36m 경간의 철 아치 교량인 Bobtail Road Bridge의 교대에 보강토 옹벽이 시공된 현장으로서 좌·우측 교대에 각각 2단의 계단식 보강토 옹벽이 시공되었다. 그림 4의 좌측에 최대 노출높이 5.4m의 하단옹벽에는 정방형 기초가 상단옹벽에는 띠형 기초가 하중을 지지하는 형태로 되어 있으며 상단 옹벽은 좌·우측 모두 1.8m 높이로 시공되었다.

당 현장에서는 시공 후 장기적인 잔류변형 발생을 제어

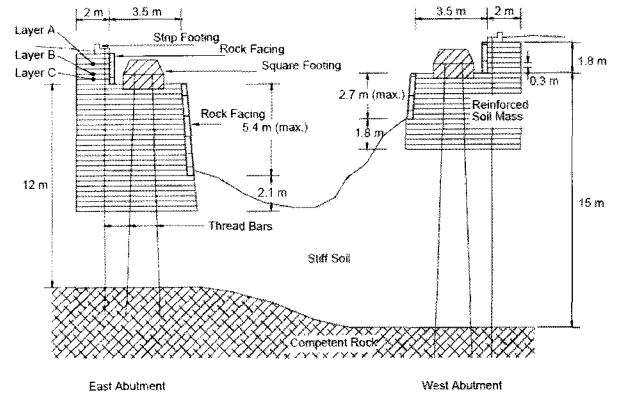


그림 4. 미국 Colorado Black Hawk 교대에 적용된 보강토 구조물 단면(Wu 등, 2001)

하기 위해 완공 후 정방형 기초와 띠형 기초를 각각 설계하중의 1.6~2.0배 크기의 하중으로 선행재하하여 보강토체에 프리스트레스를 가하는 공법을 채택하였으며 그 결과 설계하중 상태에서 침하는 선행재하시의 16~67% 수준까지 억제되었으며, 전면벽체 변위는 35~40% 수준으로 억제된 것으로 나타났다. 아울러 보강토체 및 보강재의 크리프 변형도 무시할 수준으로 억제된 것으로 나타났다. 이는 보강토 구조물 적용에 있어서 선행재하와 프리스트레싱 병용 공법을 적용함으로써 장기변형을 제거할 수 있음을 보여준 좋은 사례라고 할 수 있다.

3. 축소모형실험

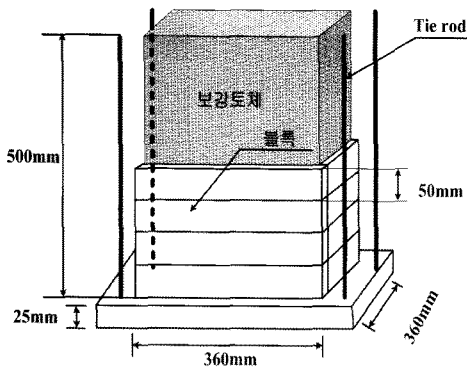
3.1 모형제작 및 모형실험장치

본 연구에서는 Wu 등(2001)과 Tatsuoka 등(2004)의 선행연구를 토대로 표준사 또는 화강풍화토로 뒤채움된 보강토의 장기변형과 선행하중의 상관관계를 고찰하기 위해 두 가지 형태의 모형 보강토 구조물에 대한 모형실험을 수행하였다. 즉, 교량의 피어와 같이 박스형태의 보강토 구조물(이하, 모형피어라 칭함)과 도로 혹은 철도분야에 적용되는 좌우측에 전면벽체가 형성되는 BTB 옹벽 형태의 보강토 구조물을 대상으로 하였다.

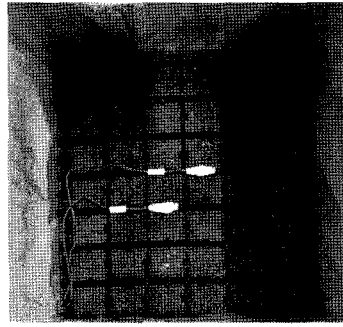
3.1.1 모형제작

1) 모형피어

먼저 그림 5에서는 모형피어의 개념도 및 관련 사진을 보여 주고 있는데 모형 피어는 단면의 크기가 360mm의 정방형이며 높이 500mm인 박스로 제작하였으며, 네면의 전면블록은 강성을 줄이기 위해 높이가 50mm인



(a) 모형 제원

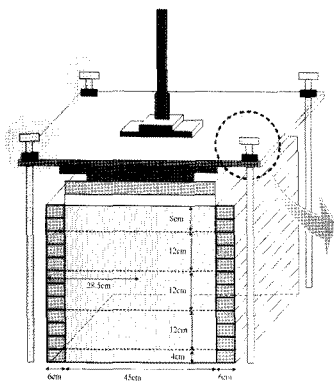


(b) 보강토체 조성과정

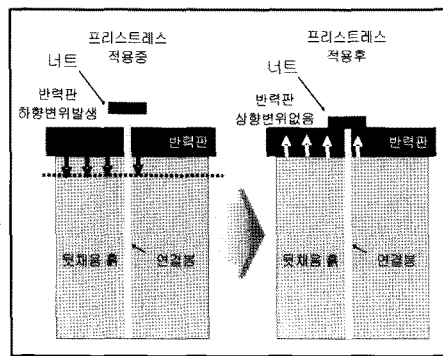


(c) 시험장치 전경

그림 5. 모형피어



(a) 모형 제원 및 선행하중 적용방법



(b) 시험장치 전경

그림 6. BTB 모형 옹벽

목재를 양 끝단에서 못으로 고정하여 박스형태를 유지하고 일정한 외력에의 저항력을 가질 수 있도록 하였다. 모형구조물은 전면박스블럭 설치 후 뒤채움흙을 다짐하는 방법으로 형성하였으며 보강재(추후 설명)는 50mm의 간격으로 포설하였다.

2) BTB(back-to-back) 옹벽

BTB옹벽은 그림 6에서와 같이 평면변형율조건의 구현이 가능한 종방향 길이 800mm의 토조에 높이 480mm 폭 510mm로 구축하였다. 좌·우 전면벽은 단면의 규격이 60 × 40 mm인 스테인리스 강 파이프를 이용하여 형성하였으며 매 파이프 마다 양단 2개소에 연결 볼트를 체결하여 전단기를 형성하여 블록형태의 전면벽체를 구현하였다. 토조의 전/후면은 아크릴판으로 되어있으며 브레이싱으로 보강하여 아크릴판 평면의 직각방향으로는 변형이 생기지 않도록 하였다. 한편, 전면벽체와 아크릴벽면 사이에는 토사유실을 방지하기 위해 건설 마감재료인 문풍지를 설치하였으며 보강재는 간격

12mm의 간격으로 총 4단으로 포설하였다.

3.1.3 뒤채움흙 및 보강재

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 표준사가 적용된 BTB 옹벽에 대한 한 가지 시험조건을 제외하고는 우리나라의 시공환경을 고려하기 위해 화강풍화토를 뒤채움흙으로 적용하였다. 그림 7은 표준사와 화강풍화토의

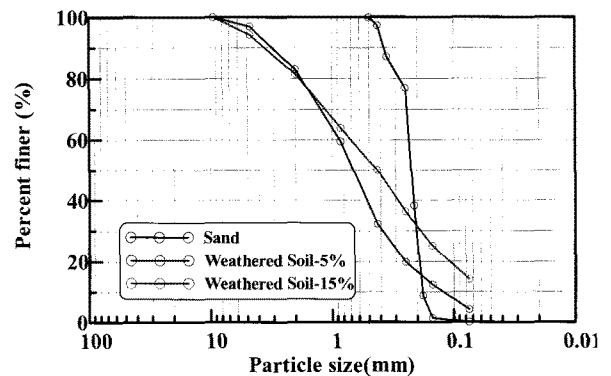


그림 7. 뒤채움흙의 입도분포 곡선

표 1. 뒤채움재료의 입도분포 및 물리적·역학적 특성

종류	200번체 통과량 (%)	D ₁₀ (mm)	균등계수 (C _u)	곡률계수 (C _c)	건조단위중량 (γ _d , kN/m ³)	최적함수비 (w, %)	통일분류 (USCS)
S(표준사)	0	0.18	1.38	0.88	15	9.5	SP
WS1(화강풍화토)	5	0.15	4.00	1.00	19.5	14.5	SW
WS2(화강풍화토)	15	0.075	13.3	1.07	20.25	14.1	SC

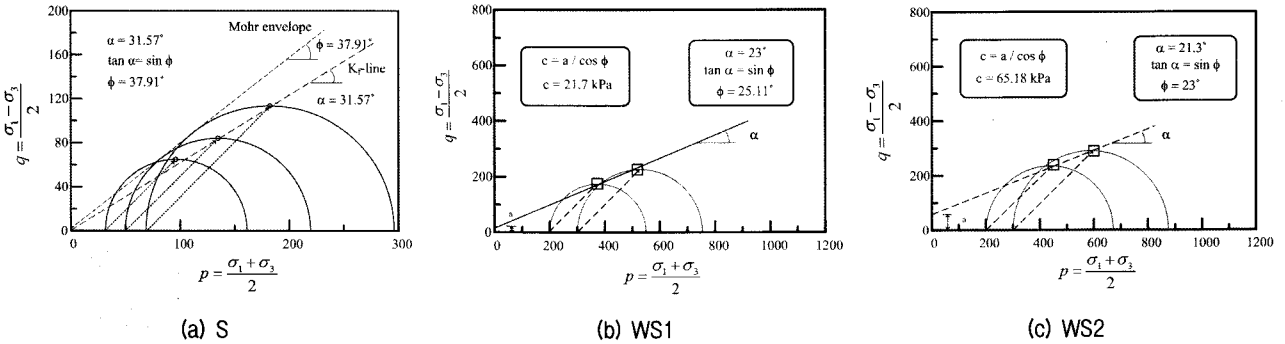


그림 8. 뒤채움흙의 파괴 포락선

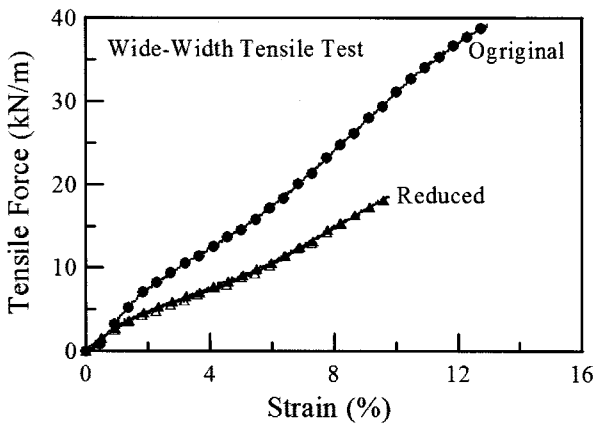


그림 9. 축소된 보강재의 광폭인장시험 결과

는 방법으로 조절하였으며 모형 보강토체 구축시 다짐도는 90%가 유지되도록 하였다. 한편, 각 시료별로 해당 다짐도에서의 전단강도 정수를 찾기 위해 삼축압축 시험을 수행하였으며 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

한편, 보강재로는 폴리에스터 재질의 파단강도 40kN/m, 파단시 변형율 20%의 직포형 지오그리드를 사용하였으며 모형실험임을 감안하여 보강재의 강성을 인위적으로 감소시키기 위해 주 인장방향의 스트랜드의 수를 반으로 줄여서 사용하였다. 그림 9는 축소된 지오그리드의 광폭인장시험 결과를 보여주고 있으며 파단강도와 파단시 변형율은 각각 18kN/mm, 10% 정도인 것으로 평가되었다.

입도분포곡선을, 표 1은 그 결과를 각각 나타내고 있다. 한편, 화강풍화토의 세립분 함유량에 따른 장기변형을 고찰하기 위해 인위적으로 #200체 통과량(F)을 추가하

3.1.4 실험장치

1) 하중재하 및 계측

보강토 구조물은 사용연한 동안 다양한 형태의 하중,

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 0.001~1.0Hz의 sine 파형 구현
계측 센서부	수직하중 로드셀	• 용량: 200kN
	내부변위 측정장치	• 용량: 200mm
	벽체변위 측정 LVDT	• 용량: 100mm
계측	스트레인게이지 strain gauge	• 10~15% 정도의 변형률 측정 가능
	TDS-303 데이터로거	• 데이터의 디스플레이 및 컴퓨터로의 전송

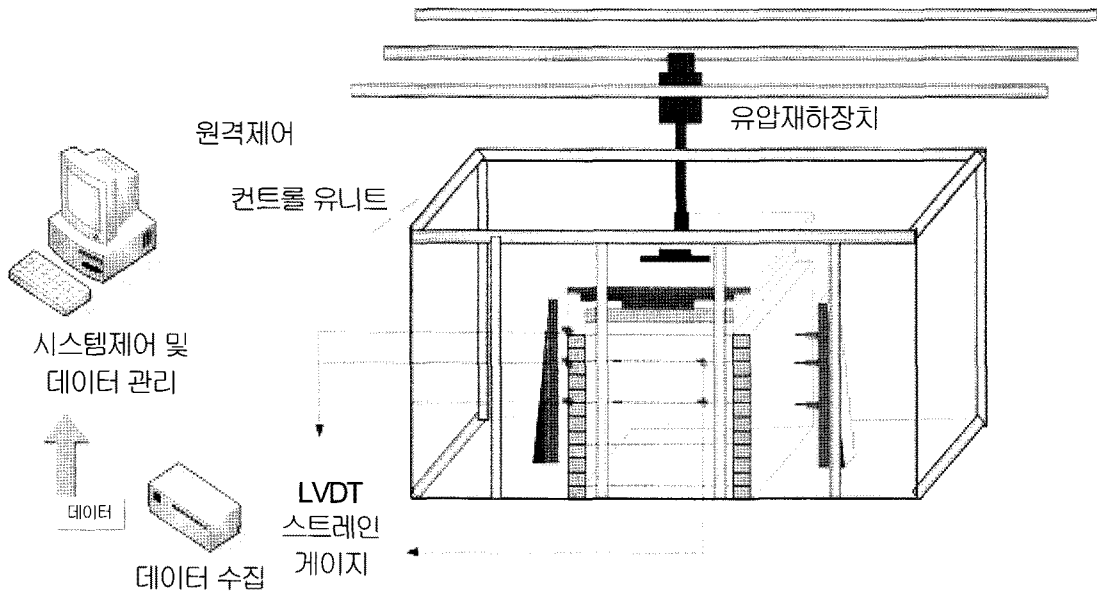


그림 10. 모형실험 계통도

즉, 단순재하하중(continuous monotonic loading, CML), 지속하중(sustained loading, SL) 및 반복하중(cyclic loading)을 경험하게 되므로 본 연구에서도 이를 감안하여 지속하중 혹은 반복하중의 재하하중이 모형 보강토 구조물에 작용하는 경우를 고려하였다.

표 2는 하중재하 시스템 사양을 보여주고 있는데 재하시스템은 CMS, SL, CL의 구현이 가능한 10-ton 용량의 유압식 재하장치를 사용하였다. 하중재하시 옹벽의 거동 특성에 대한 고찰을 위한 계측은 보강토체의 침하 및 전면벽체의 변위, 그리고 보강재의 인장변형률에 중점을 두었으며 벽체 침하 및 수평변위는 LVDT를 이용하여, 그리고 지오그리드에는 스트레인게이지를 부착하여 하중재하시 보강재에 유발되는 인장변형률을 측정하였다. 아울러 계측데이터의 수집을 위해 TDS-303 데이터 로거를 이용하였으며, 그림 10에 모형실험의 계통도를 나타내었다.

2) 선행하중 재하 및 프리스트레싱

본 연구에서는 모형 보강토 구조물 구축 후 일정한 크기의 PL을 재하한 후 다시, 일정 하중까지 재하한 후 이를 유지시켜 보강토체에 잔류응력이 발현이 될 수 있도록 특별장치를 고안하여 PS를 구현하였다(그림 6 참조). 그림 11은 본 연구에서 정의한 PL 및 PS에 대한 정의를 보여주고 있다.

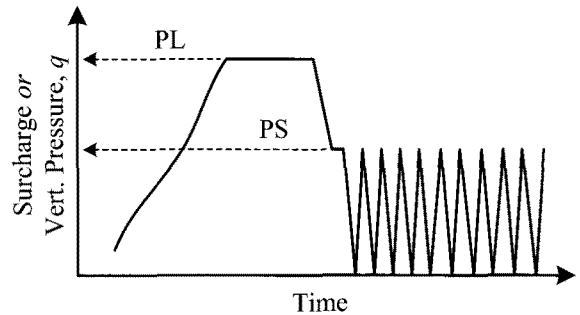


그림 11. PL 및 PS 정의

3.2 실험 조건

표 3과 4에서는 모형 보강토 구조물별로 실험조건을 각각 정리하고 있다. 하중조건은 표에 정리된 바와 같이 단순재하(CML), 지속하중재하(SL), 그리고 반복하중재하(CL)를 고려하였다. 즉, 표 3에서와 같이 모형피어 실험에서는 지속 및 반복하중 재하조건을 고려하였으며 아울러 뒤택음흙의 세립분함유량을 5%와 15%로 변화시켜 뒤택음흙의 특성을 달리하는 조건을 고려하였다. 한편, BTB 옹벽의 경우에는 주로 반복하중 재하조건에 초점을 맞추어 실험을 수행하였다. 지속하중의 경우 다양한 하중수준에서 1시간 혹은 2시간 동안 일정하중을 유지하도록 하였으며 반복하중의 경우 주파수(f) $f=0.01\text{Hz}$ 로 고정시키고 이중진폭(double amplitude) Δq 를 $\Delta q=25\text{kPa}$ 및 50kPa 로 변화시키며 진폭에 따른 영향도 고찰하였다. 그림 12와 13은 각각 모형피어와 BTB

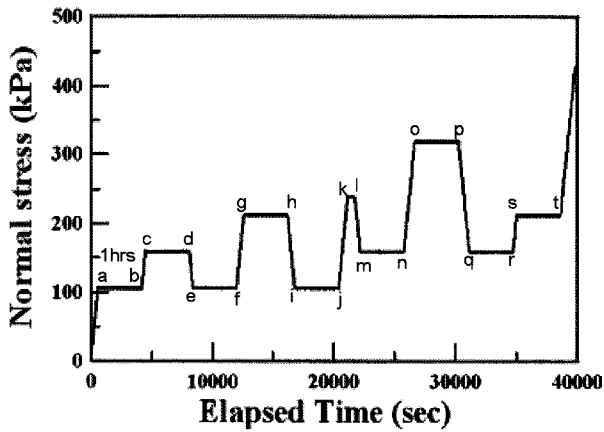
표 3. 모형피어 실험조건

Case	뒤채움흙	재하이력	CML 재하속도 $\delta(kPa/hr)$	SL시 지속하중 (kPa)	SL시 지속시간 (hour)	CL시 Δq (kPa)	CL시 반복시간 (hour)	하중 이력 (그림 12)
P-SL-WS1	WS1	CML→SL	200	100, 150, 200	1	-	-	A
P-CL-WS1	WS1	CML→CL	200	-	-	25, 50	1	B
P-SL-WS2	WS2	CML→SL	200	100, 150, 200	1	-	-	A
P-CL-WS2	WS	CML→CL	200	-	-	25, 50	1	B

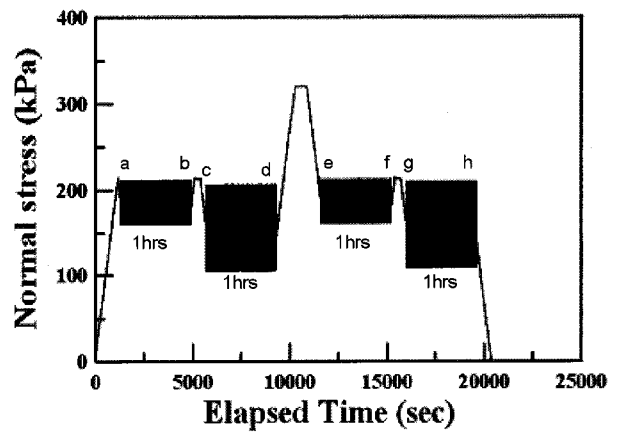
표 4. BTB 응벽 실험조건

Case	뒤채움흙	재하이력	CML 재하속도 $\delta(kPa/hr)$	SL시 지속하중 (kPa)	SL시 지속시간 (hour)	CL시 하중수준	CL시 반복시간 (hour)	하중 이력 (그림 13)
B-SL-S	SW	CML→SL	100	-	-	50, 100	3	A
B-CL1-WS1	WS1	CML→CL	100	-	-	50, 100	3	B
B-CL2-WS1	WS1	CML→CL	100	-	-	75, 100	2	C

주) 1. 반복하중시 주파수(f) 및 진폭(Δq): $f = 0.01Hz$, 이종진폭 $\Delta q = 25kPa$
 2. 뒤채움흙: $F=5\%$

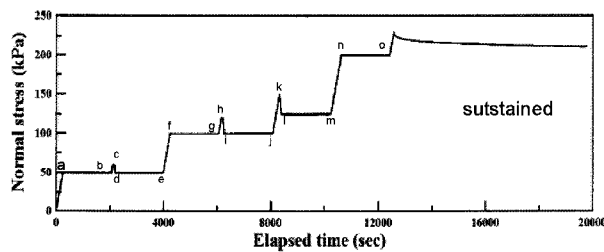


(a) 하중이력 A

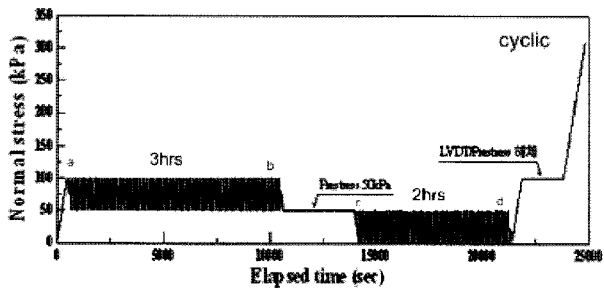


(b) 하중이력 B

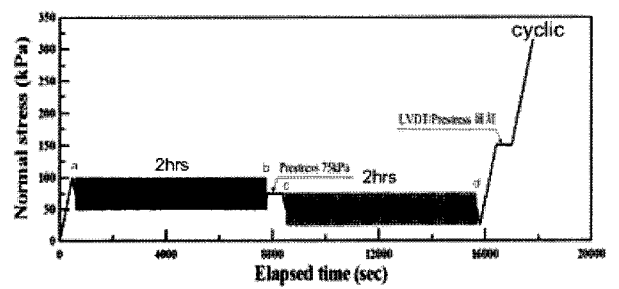
그림 12. 가설피어 실험조건 하중이력



(a) 하중이력 A



(b) 하중이력 B



(c) 하중이력 C

그림 13. BTB응벽 실험조건 하중이력

옹벽 실험조건에서 고려한 하중이력을 나타내고 있다.

4. PL/PS의 잔류변위 제어 메카니즘

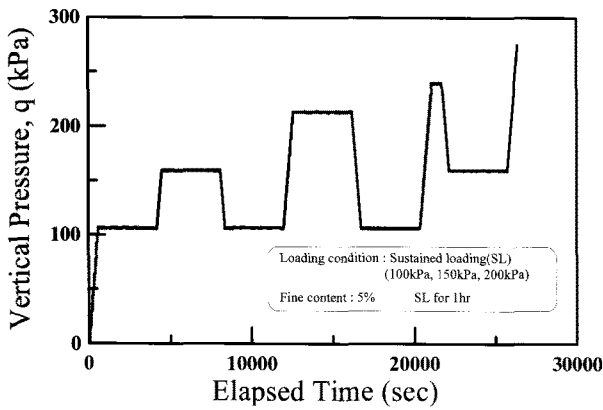
4.1 지속하중 조건

모형피어에 대한 P-SL-WS1 실험결과를 그림 14에 나타내었다. 이 그림에서는 하중-시간($p-t$) 이력곡선과 하중-침하($p-s$)곡선의 형태로 보여주고 있는데 본 실험에서는 다양한 하중수준까지 단순재하(ML) 후 재하(UL) 그리고 재 재하(RL)하는 하중경로를 채택하여 PL 및 PS 작용효과를 갖도록 하였다. 예를 들어 $a-b, c-d, g-h, k-l$ 구간은 $PL-PS$ 없이 지속하중이 작용하는 경우이며, $e-f, i-j, m-n$ 구간은 $PL-PS$ 가 적용된 구간이다.

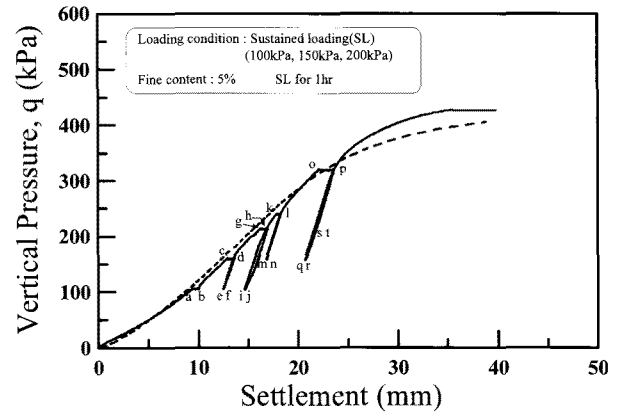
먼저 그림 14(b)의 $p-s$ 곡선을 살펴보면 ML 경로의 기울기보다 RL 경로의 기울기가 큰 경향을 나타내고 있는데 이는 PL 을 작용시킴에 따라 보강토체의 강성도

(stiffness)가 증가됨을 보여주고 있다. 즉, ML 및 RL 구간에서 보강토체의 평균강성도를 비교해보면 ML 과 RL 구간에서의 각각 $5000kPa$ 과 $20000kPa$ 로 산정되어 약 4배 이상이 증가되는 것으로 나타나 PL 작용을 통해 보강토체의 강성도를 현저히 증가시킴으로써 임의 재하 하중에서의 변형을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, 그림 15에서는 지속하중 구간에서의 잔류침하 발생 이력곡선을 보여주고 있는데 PL 이 적용되지 않은 그림 15(a)에서는 각 지속하중단계에서 잔류침하가 발생하며 지속하중 수준이 증가할수록 잔류침하량 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 지속하중 구간에서 시간경과에 따라 지속적인 침하발생 추세를 보이고 있어 침하에 예민한 구조물을 지지하는 옹벽의 경우(예를 들어 철도노반지지 옹벽)에는 잔류변형의 문제가 대두될 수 있음을 나타낸다고 하겠다. 한편 이러한 잔류변형 이력곡선은 유충식 등(2007)의 연구에서도 제시한 바와 같이 멱함수의 형태를 보이는 것으로 나타났다. 그

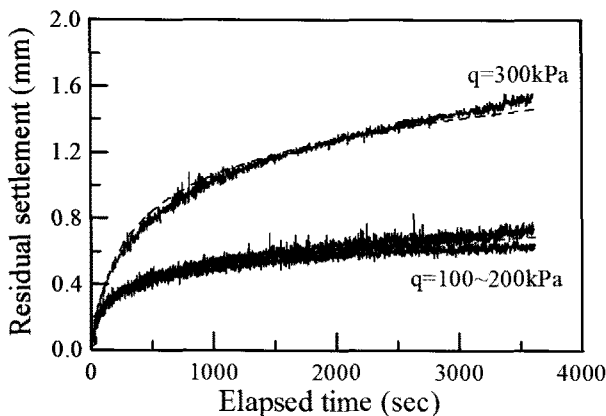


(a) $p-t$

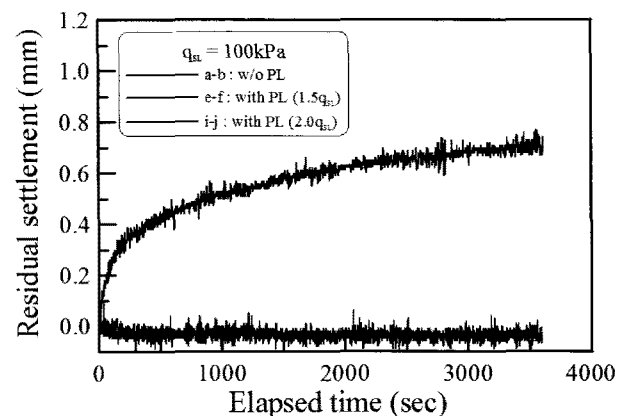


(b) $p-s$

그림 14. 가설피어 실험의 하중-변위-시간 관계(지속하중)



(a) w/o PL



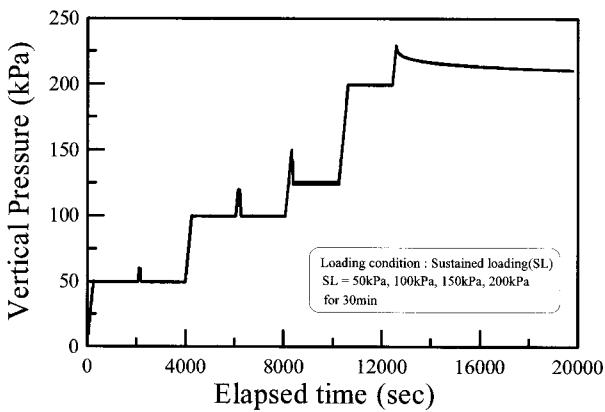
(b) with PL

그림 15. PL 작용여부에 따른 잔류침하 - 가설피어(P-SL-WS1)

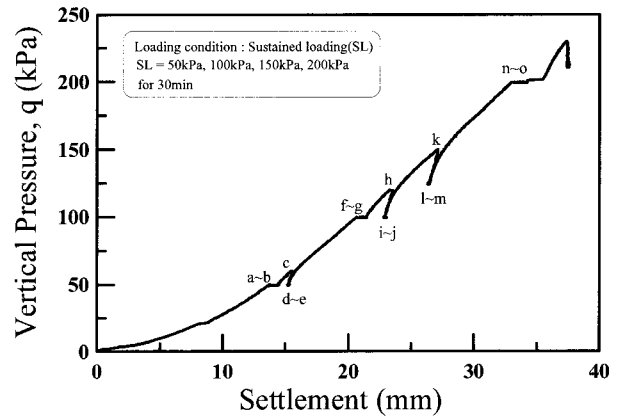
림 15(b)에서는 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$ 에서 $1.5q_{SL}$, $2.0q_{SL}$ 수준의 PL 을 작용시킨 결과를 PL 이 적용되지 않은 결과와 함께 보여주고 있는데 PL 이 적용되지 않은 경우에는(a-b 구간) 1시간의 지속하중 재하로 인해 0.6mm의 잔류침하가 발생하였으나 PL 이 적용된 경우에는(e-f, i-j 구간) 잔류침하가 거의 발생하지 않는 결과를 나타내고 있다.

BTB옹벽에 대해 동일한 방법으로 PL 을 적용한 결과(B-SL-S)가 그림 16과 17에 제시되어 있다. BTB 옹벽에 대한 실험은 평면변형을 상태에서의 실험이라는 점과 뒤채움흙으로 표준사를 사용하였다는 점에서 모형 피어 조건과 다소 차이가 있다고 할 수 있다. 먼저 그림 16에서는 하중-시간($p-t$) 이력곡선과 하중-침하($p-s$) 곡선을 보여주고 있는데 지속하중은 다양한 하중 수준에서 30분 동안 작용시켰으며 PL 미적용 경우와 적용한 경우가 비교 될 수 있도록 CML 단계에서 $UL-RL$ 을 수행하였다. 그림 17은 지속하중 수준 $q_{SL} = 50, 100 \text{ kPa}$

에서 PL 미적용 및 적용 경우에 대한 잔류침하를 보여주고 있다. 즉, 그림 17(a)에서는 $q_{SL} = 50 \text{ kPa}$ 경우에 대해서 구간 a-b(PL 미적용) 및 d-e(PL 적용) 구간에 대한 결과를 제시하고 있으며, 그림 17(b)에서는 $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$ 경우에 대해서 구간 f-g(PL 미적용) 및 i-j(PL 적용) 구간에 대한 결과를 제시하고 있는데 여기서 두 하중 수준 공히 PL 은 작용하중 수준(q_{SL})의 1.25배, 즉 $PL = 1.25q_{SL}$ 을 적용하였다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 두 하중 수준 공히 PL 적용시 잔류침하를 거의 "0"의 수준으로 제거할 수 있는 것으로 나타났으며 그 효과는 하중 수준이 증가할수록 뚜렷해지는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 상부하중을 지지하는 보강토 옹벽의 경우 잔류변위 혹은 침하가 우려되는 시공조건에서 PL 개념을 도입하면 지속하중 작용으로 인한 잔류침하를 크게 줄일 수 있음을 보여주는 결과라고 하겠다.

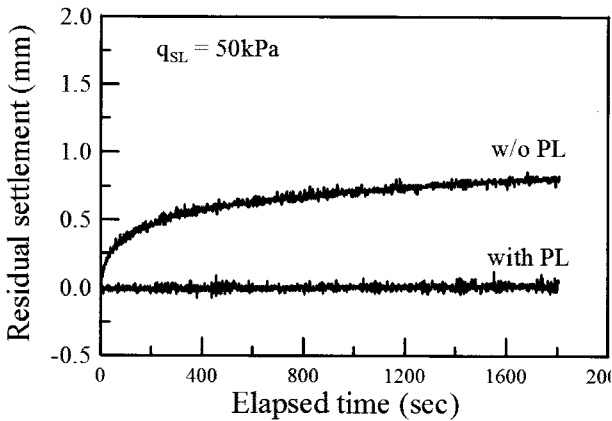


(a) $p-t$

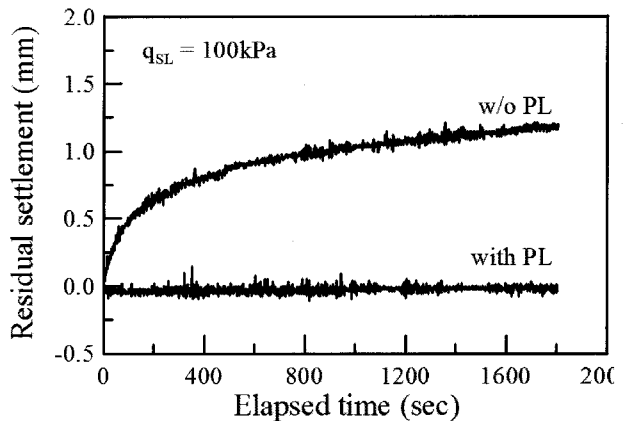


(b) $p-s$

그림 16. BTB 옹벽 실험의 하중-변위-시간 관계(지속하중)



(a) $q_{SL} = 50 \text{ kPa}$



(b) $q_{SL} = 100 \text{ kPa}$

그림 17. PL 작용여부에 따른 잔류침하 - BTB 옹벽(B-SL-S)

4.2 반복하중조건

1) 가설피어

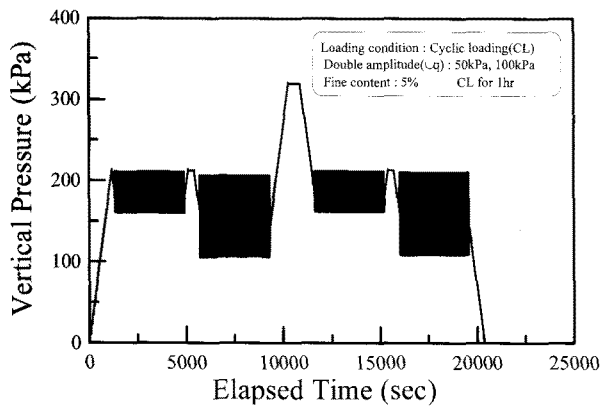
그림 18과 19는 가설피어에 대한 반복하중조건(P-CL1-WS1)에서의 PL 적용 결과를 각각 나타내고 있다. 지속하중 조건과 마찬가지로 임의 하중까지 ML로 재하한 후 UL-RL 후 다시 반복하중을 가하는 방법으로 반복하중시 발생하는 잔류침하를 PL을 적용함으로써 감소시킬 수 있는지 여부를 확인하였으며 반복하중의 특성 변화시 PL 효과를 확인하기 위해 진폭 및 주파수(반복횟수)를 변화시켜 이에 대한 영향을 검토하였다. 하중이력을 보여주고 있는 그림 18에서와 같이 a-b 및 c-d 구간은 PL이 적용되지 않은 구간이며 h-i와 fg는 PL이 적용된 경우로서 a-b와 fg, 그리고 b-d와 h-i에 대한 직접적인 비교를 통해 PL 효과에 대한 검토가 가능하다.

그림 19는 그림 18(b)에서의 지속하중 구간에서의 결과를 분석하여 정리한 결과로서 PL 미적용의 경우(a-b)와 작용하중의 1.5배에 달하는 PL 적용 후(즉 1.5q_{CL}) 같은 하중수준에서 반복하중을 재하한 경우(f-g)에서의 결과를

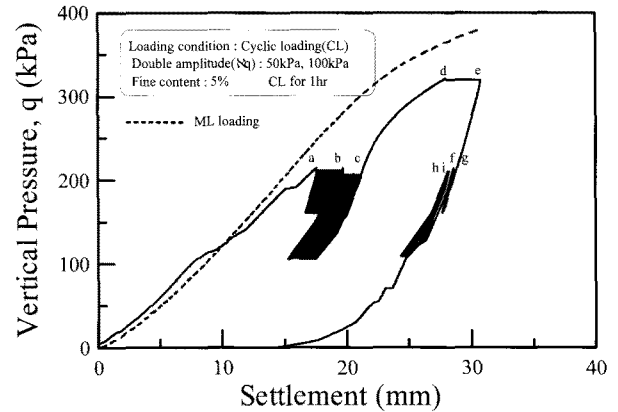
비교하고 있다. 잔류침하를 나타내는 그림 19(a)에서는 PL 미적용시 (a-b)에서는 1시간 동안의 반복하중 재하로 인해 약 3mm에 달하는 잔류침하가 발생하는 경향을 보이고 있으나 1.5q_{CL}의 PL 적용시에는 반복하중 재하기간에도 잔류침하가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 한편, 포설된 보강재에 설치된 스트레인게이지에서 측정된 잔류인장변형율을 비교하는 그림 19(b)에서도 유사한 경향을 관찰할 수 있는데 1.5q_{CL}의 PL 적용시에는 잔류인장변형율이 발생하지 않으나 미적용시에는 지속적으로 증가추세의 잔류변형율이 반복하중 재하기간동안 약 0.04% 발생하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 지속하중 결과에서와 마찬가지로 PL의 효과를 단적으로 보여주는 것으로서 사용하중 수준 이상의 하중 재하 후 일정하중 만큼 제하한 후 사용하중을 작용시킬 경우 잔류침하 및 보강재 잔류인장변형율을 거의 제거할 수 있음을 의미한다.

2) BTB 용벽

BTB 용벽의 조건(B-CL1-WS1)에 대한 결과가 그림 20~22에 제시되어 있는데 하중조건은 앞서 제시된 표

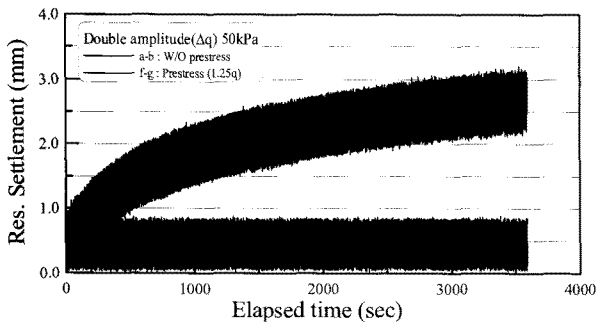


(a) p-t

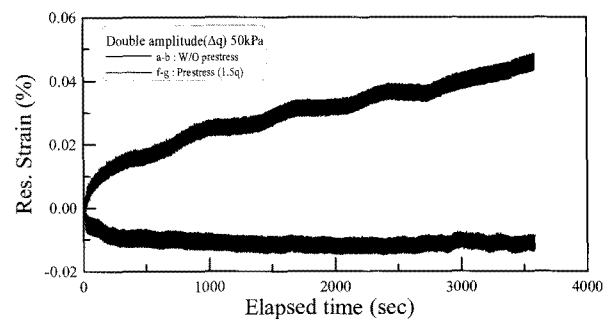


(b) p-s

그림 18. 가설피어 실험의 하중-변위-시간 결과(P-CL1-WS1)



(a) 잔류침하



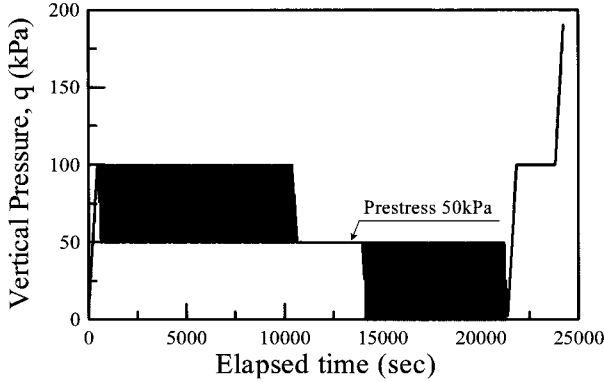
(b) 보강재 잔류인장변형율

그림 19. PL 작용여부에 따른 잔류침하/잔류인장변형율 - 모형피어(P-CL1-WS1)

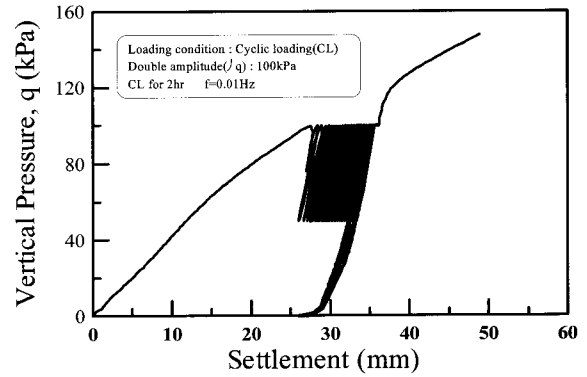
3에서 기술한 바와 같이 주파수 $f=0.01Hz$, 이중진폭 $\Delta q=25kPa$ 의 반복하중을 재하하는 조건으로서 CML로 100kPa로 재하 후 2시간 동안 반복하중을 재하한 후 다시 50kPa 까지 UL하여 PS의 상태에서 다시 같은 진폭으로 2시간 동안 반복하중을 부가하였다. 즉, 여기서 a-b구간은 PL이 적용되지 않은 경우이며 c-d 구간은

100kPa의 선행하중, 즉 $PL=2.0q_{CL}$ 이 적용된 구간으로서 두 구간에 대한 직접적인 비교를 통해 PL 적용여부에 따른 잔류침하 발생 경향을 확인할 수 있다.

그림 21에서는 잔류침하와, 벽체변위 결과를 보여주고 있으며 그림 22는 보강재의 잔류변형을 측정결과를 보여주고 있다. 먼저 잔류침하와 벽체의 최대잔류변위

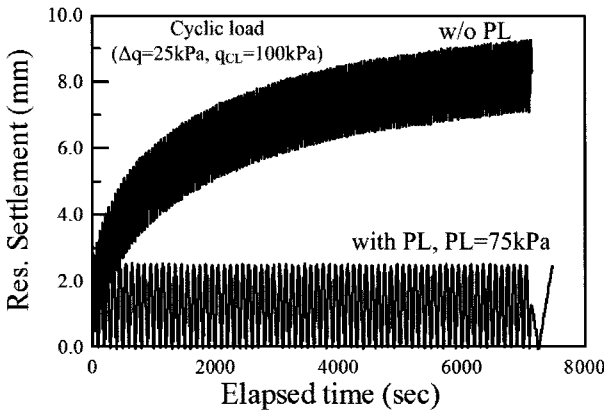


(a) p-t

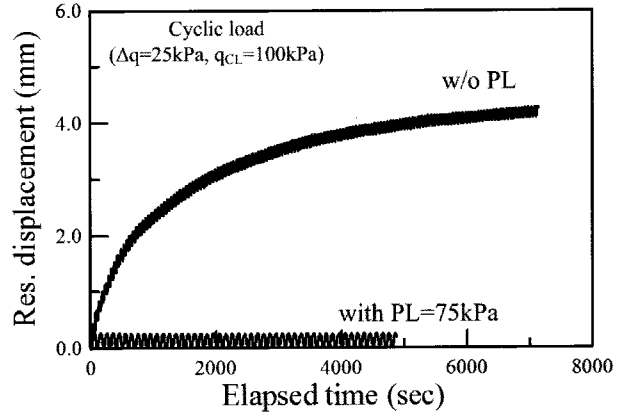


(b) p-s

그림 20. BTB 옹벽 실험의 하중-변위-시간 관계(B-CL1-WS1)

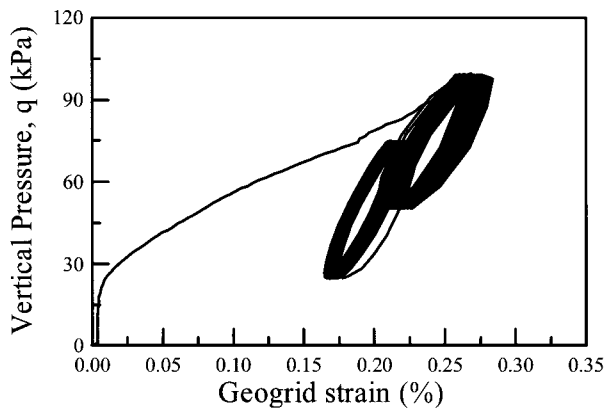


(a) 잔류침하 비교

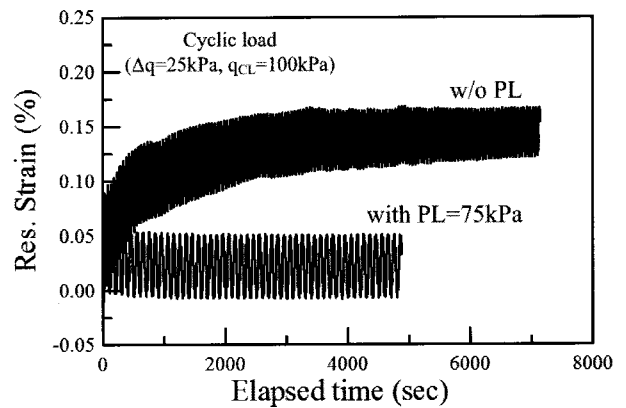


(b) 벽체잔류변위 비교

그림 21. PL 작용여부에 따른 잔류변위 - BTB 옹벽(B-CL1-WS1)



(a) p-ε



(b) 지오그리드 잔류변형

그림 22. PL 작용여부에 따른 지오그리드 잔류변형 - BTB 옹벽(B-CL1-WS1)

를 비교하고 있는 그림 21을 살펴보면 PL 미적용시 반복재하로 인해 잔류침하는 최대 9mm 정도, 잔류변위는 최대 4mm 정도가 발생한 것으로 나타났으나 PL 을 적용함에 따라 잔류침하 및 벽체변위를 거의 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 이러한 결과는 보강재의 잔류인장 변형율을 나타내는 그림 22에서도 확인할 수 있다. 즉, 먼저 하중-인장변형율($p-\epsilon_g$)관계를 보여주는 그림 22(a)에서는 반복하중 재하시 보강재의 인장변형율 나타내고 있는데 $p-\epsilon_g$ 관계에서 관찰되는 루프의 폭이 PL 적용시 작게 나타나고 있어 PL 작용여부가 보강재의 인장변형율에도 영향을 미침을 알 수 있으며 이러한 경향은 PL 미적용시 발생하는 0.15%의 잔류인장변형율이 PL 적용으로 인해 거의 제거되는 결과를 보여주는 그림 22(b)에서 잘 확인할 수 있다.

4.2 영향인자 분석

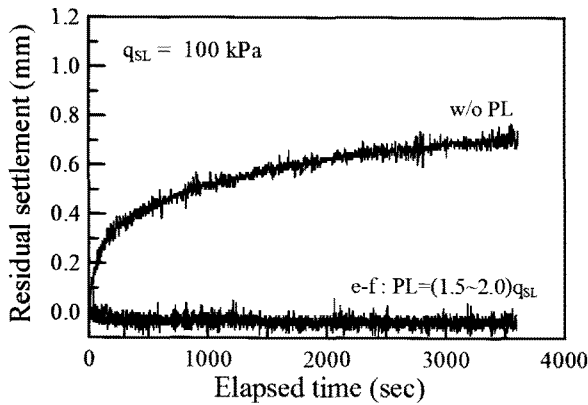
4.2.1 PL 수준

PL 개념을 적용하는데 있어 실무적 관점에서 중요한

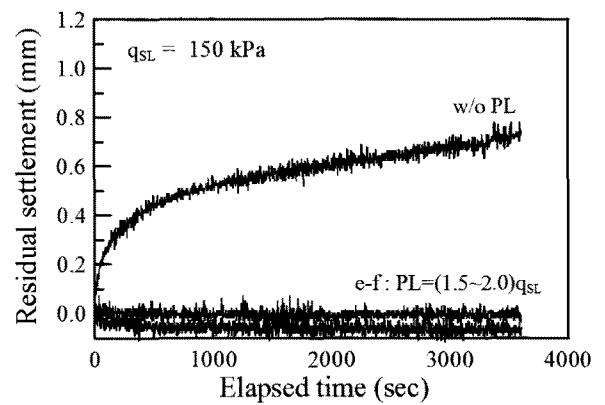
항목은 적정 PL 수준 산정이라고 하겠다. 이러한 관점에서 그림 23과 24에서는 각각 가설피어 조건과 BTB옹벽 조건에서 지속하중 혹은 반복하중 작용시 PL 수준에 따른 잔류침하 억제 경향을 고찰하였다.

먼저 그림 23은 가설피어의 지속하중 조건에 대해 두 가지 하중재하수준 즉, $q_{SL} = 100, 150 kPa$ 에 대한 결과를 보여주고 있다. 여기서 PL 미 적용시의 경우 1시간 동안의 잔류침하는 정량적으로 비교하면 거의 같은 수준의 잔류침하가 발생하나 경과 시간에 따른 잔류침하 발생 추이를 뚜렷하게 확인할 수 있다. 한편, 두 하중수준 공히 $PL = 1.5q_{SL}$ 정도만 작용시켜도 잔류변위를 완전히 제거할 수 있는 것으로 나타났으며 하중수준이 클수록 PL 적용 효과가 뚜렷해지는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 지속하중 수준 대비 PL 수준에 따른 잔류침하 감소 경향을 보여주고 있는 그림 23(d)에서 더 뚜렷하게 확인할 수 있는데 사용하중 대비 1.2배 이상의 PL 을 적용할 경우 잔류침하를 거의 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

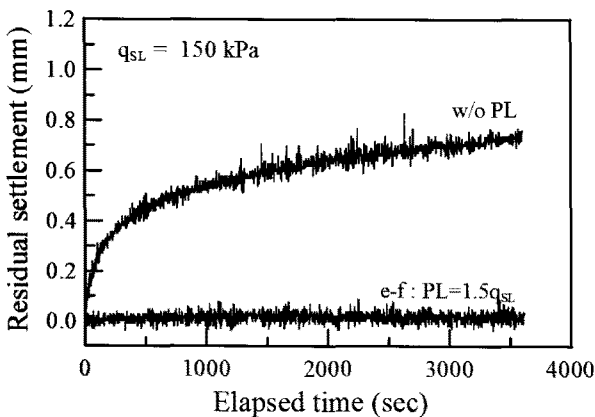
한편, 그림 24에서는 반복하중이 작용하는 BTB 옹벽



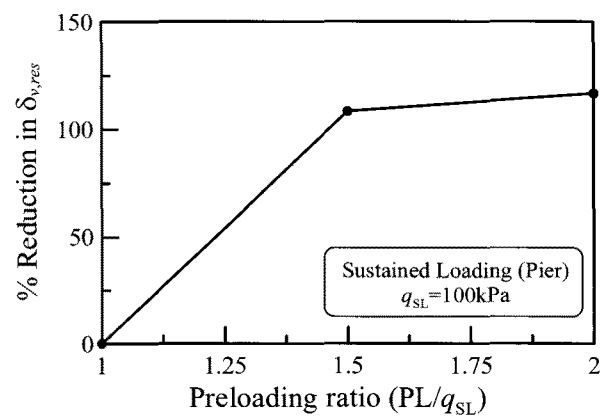
(a) $q = 100 kPa$



(b) $q = 150 kPa$



(c) $q = 200 kPa$



(d) 잔류침하 감소율

그림 23. PL 수준에 따른 잔류변위 억제 효과 - 가설피어(지속하중)

에 있어서 작용하중 대비 PL 수준에 따른 잔류침하 변화 경향을 보여주고 있다. 여기서 잔류침하 이력곡선은 반복하중 작용으로 인해 누적되는 변위를 나타내고 있으며 반복하중 $q_{CL} = 100\text{ kPa}$ 조건에 있어 $PL = 1.33q_{CL}$ 및 $2.0q_{CL}$ 에 대한 결과를 제시하고 있는데 $PL = 1.33q_{CL}$ 의 경우 1 mm 정도의 잔류변위가 발생하나 $2.0q_{CL}$ 로 PL 수준을 증가시킬 경우 잔류침하를 완전히 제거할 수 있

는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 PL 수준에 따른 잔류침하 감소율을 보여주고 있는 그림 24(c)에서 뚜렷하게 확인할 수 있으며 이는 PL 의 탁월한 변위제어 능력을 단적으로 보여주는 결과로서 작용하중 수준의 일정 수준으로 PL 을 적용시킴에 따라 변위 제어가 가능할 것으로 판단된다.

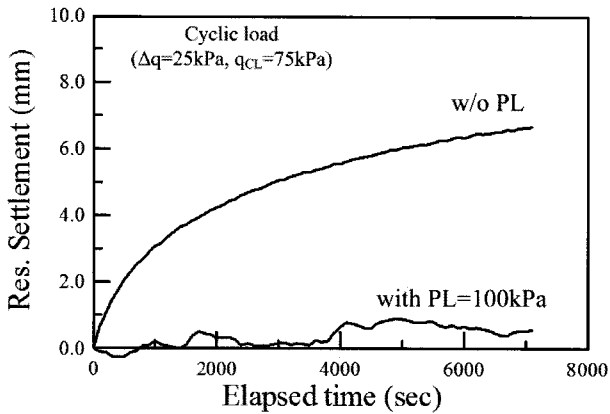
4.2.2 반복하중 진폭

PL/PS 공법 적용시 PL 의 효과는 다양한 인자에 의해 영향을 받을 수 있으며, 따라서 반복하중의 경우 반복하중 특성이라고 할 수 있는 진폭이 PL 의 효과에 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 같은 조건에서 진폭을 변화시킨 결과를 검토하였다. 그림 25는 P-CL1-WS1에 대한 결과를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 PL 의 수준은 같으나 반복하중의 진폭이 두 배, 즉 $\Delta q = 50\text{ kPa}$ 및 100 kPa 인 조건을 고찰할 때 진폭이 큰 경우 PL 도입시 잔류변위/침하 억제 효과가 큰 것으로 나타나 보다 진폭이 큰 하중조건에서 PL 개념이 보다 효율적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

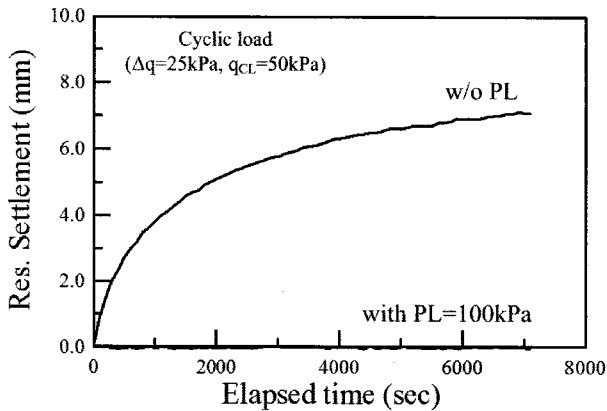
4.2.3 뒤택음 흡 조건

우리나라의 보강토 옹벽 시공환경에서는 현장토를 뒤택음시 그대로 사용하는 경우가 대부분이므로 시방에서 규정하는 세립분의 함유량을 초과하는 흙을 사용하는 경우가 많다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 세립분 함유량이 PL 공법 적용시 잔류변위 억제 효과에 어떠한 영향을 미치는지를 검토하기 위해 가설되어 시험조건에 대해 인위적으로 세립분 함유량을 5 및 15%로 변화시킨 조건(P-CL1-WS1, P-CL1-WS2)을 검토하였다.

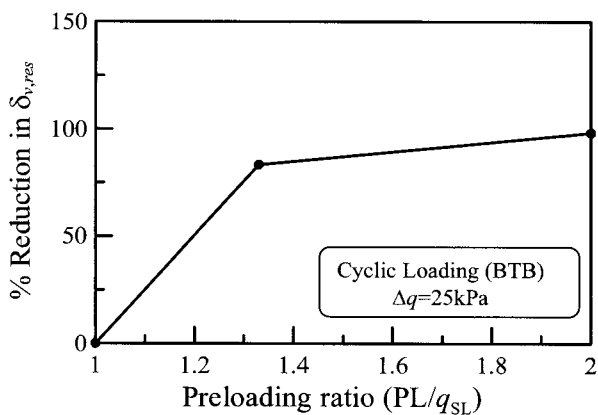
그림 26은 $\Delta q = 50\text{ kPa}$ 의 진폭으로 작용하는 반복하중 조건에 대한 결과를 보여주고 있는데 먼저 PL 미적용시의 경우 반복하중 횟수($f = 0.01\text{ Hz}$, 1시간 재하)가 그다지 크지 않아 그 차이가 크지 않으나 두 경우 공히 PL 개념 도입시 잔류침하 제어 효과가 거의 같은 것으로 분석되고 있어 PL 공법 적용시 뒤택음흡의 세립분 정도가 PL 혹은 PS 의 효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 PL 공법은 세립분이 많이 포함되어 크리프 변형이 우려되는 경우에 보다 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) $PL = 1.33q_{CL}$

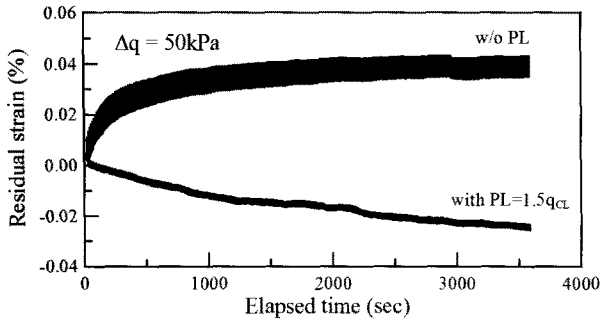


(b) $PL = 2.0q_{CL}$

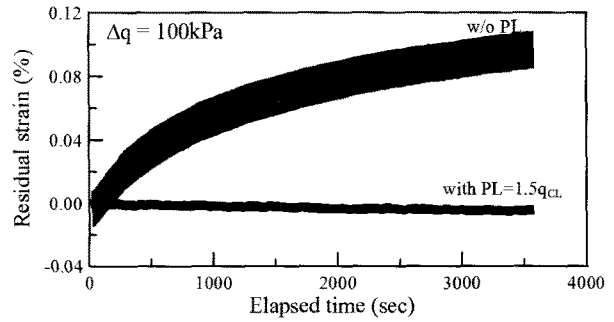


(c) 잔류침하 감소율

그림 24. PS 수준에 따른 잔류변위 억제 효과 - BTB(반복하중)

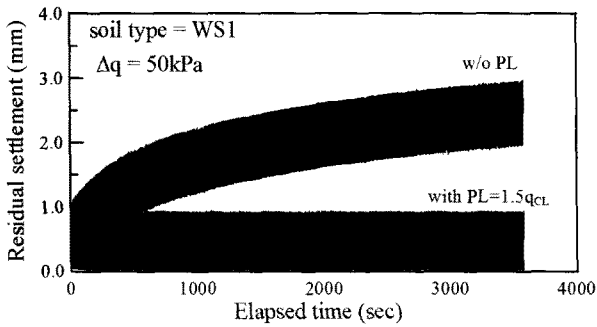


(a) $\Delta q = 50 \text{ kPa}$

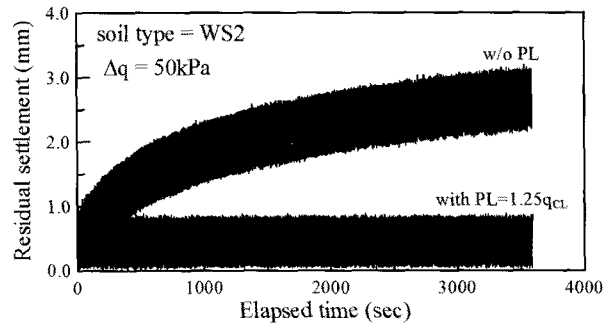


(b) $\Delta q = 100 \text{ kPa}$

그림 25. 반복하중 수준에 따른 PL 적용 효과 - 가설피어



(a) P-CL1-WS1



(b) P-CL1-WS2

그림 26. 반복하중 수준에 따른 PL 적용 효과 - 가설피어

5. 결론

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

- (1) 모형시험 결과를 분석한 결과 PL/PS 개념은 PL 적용을 통해 사용하중 작용시 보강토체가 재하경로가 아니라 재 재하 경로를 따르게 함으로써 잔류변위를 억제할 수 있는 것으로 분석되었다.
- (2) PL/PS 공법 적용시 직속하중 이나 반복하중으로 인해 사용연동안 발생할 수 있는 잔류변위/침하의 일부 혹은 전부를 제거할 수 있는 것으로 나타났으며 그 정도는 PL 및 PS 수준에 따라 결정된다.
- (3) 반복하중 재하시 보강재의 인장변형율은 루프를 그리며 거의 탄성적인 경향을 보이고 있는데 루프의 폭이 PL 적용시 작게 나타나고 있어 PL 작용여부가 보강재의 인장변형율에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(4) 전반적으로 PL/PS 개념은 보강토 구조물에 작용하는 하중 수준이 큰 경우 잔류변위 억제 효과가 더 큰 것으로 나타나고 있어 철도하중 혹은 상판기초를 지지하는 교량의 교대 등에 하중 지지 구조물로서 적용되는 보강토 구조물에 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 이와 같이 PL/PS 공법은 우리나라와 같이 화강풍화토를 대체흙층으로 사용하는 시공환경에서도 보강토체의 변위뿐만이 아니라 보강재의 잔류 인장변형을 제어에도 효율적으로 나타났으며 사용하중 수준 이상의 하중 재하 후 일정하중 만큼 제한한 후 사용하중을 작용시킬 경우 잔류침하 및 보강재 잔류 인장변형율을 거의 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0), 2005년 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700),

그리고 철도기술연구원 기본사업(과제번호 : PK07002A-1)의 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 유충식, 김선빈, 김영훈, 한대회 (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. Tatsuoka, F., Uchimura, T., and Tateyama, M. (1997), “Preloaded and prestressed reinforced soil”, *Soils and Foundations* 37(3):79-94.
6. Shinoda, M., Uchimura, T., Tatsuoka, F. (2003), “Increasing the stiffness of mechanically reinforced backfill by preloading and prestressing”, *Soils and Foundations* 43(1):75-114.
7. Uchimura, T., Tateyama, M., Tanaka, I., Tatsuoka, F. (2003), “Performance of a preloaded-prestressed geogrid-reinforced soil pier for a railway bridge”, *Soils and Foundations* 43(6): pp.155-172.
8. 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.

(접수일자 2008. 5. 29, 심사완료일 2008. 6. 27)