강성벽체와 단보강재를 갖는 철도보강노반에 대한 연구
Research on the railroad reinforcement subgrade with short reinforcement and rigid facing

김대상[1], Dang-Sang Kim, 김기환[2], Ki-Hwan Kim

[1] 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 책임연구원, Principal Researcher, Vehicle & Track research division, Korea Railroad Research Institute

[2] 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 연구원, Researcher, Vehicle & Track research division Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : To enhance the application of the reinforced retaining walls in the railway industry, this paper suggested a type of reinforcement subgrade with short reinforcement and rigid facing. To become popular the reinforced retaining walls in the industry, the deformation of retaining walls should be controlled below some limited level. In this paper, small scale and full scale tests of the proposed retaining walls were performed and their deformation characteristics were evaluated. Even though it has short reinforcement, the rigid type retaining wall had small deformation to the external train loading than the segmental type retaining wall had.

Keywords : retaining wall, railroad, subgrade, reinforcement, rigid facing

1. 서 론

국내 철도노반분야에 적극적으로 도입되고 있지 않은 보강토체의 적용성 향상을 위하여 적용이 활발하지 않은 이유에 대하여 정리한 바 있다.[1)] 또한, 보강토 옹벽의 적용성 향상을 위하여 철도노반 조성 후 지속적으로 반복되는 대중량 반복 열차하중에 대하여 노반 발생 변위를 최소화할 수 있는 보강토 형식의 필요성에 대해서도 언급한바 있다. 이는 2010년 건설이 완료될 예정인 경부고속철도 2단계(대구~부산) 및 호남고속철도에 적용될 콘크리트도상 궤도에서의 궤도 시공 후 변위제한 규정이 더욱 엄격하게 적용됨에 따라 가시화 된 바 있다.

현재 국내에 보편적으로 적용되고 있는 보강토옹벽 형식은 블럭식과 패널식이다. 두 형식 모두 벽체가 분할되어 벽체의 주된 기능이 배면토의 유출 방지로, 안정계산 시 역학적인 기능은 발휘하지 못하는 구조이다. 분할벽체에 대한 설계법은 층 별 수평방향 힘의 평형조건(토압 = 보강재 인장력)을 만족하면 되고, 층 별 전단력을 무시한 설계법이다. 따라서 벽체의 역학적 기능을 기대할 수 있는 일체형 강성벽체를 사용하는 경우 토체 상부토압이 하부로 전달되게 되어, 토체 상부에서의 인발 저항력을 증가 시킬 수 있고 보강재의 길이를 짧게 할 수 있다. 또한, 강성벽체의 사용은 동하중 작용 시 토체의 구속압을 증가시켜 노반의 변형을 억제함으로서 열차 승차감의 향상을 꾀할 수 있다.

본 연구에서는 슬림화된 강성벽체와 단보강재를 사용함으로서 용지 확보가 어려운 도심지 철도 복선화 시 적용성이 높을 것으로 예상되는 보강토공법에 대한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 축소모형실험

2.1 모형제원 및 구성요소

축소모형실험은 가속도에 기초한 상사법칙을 이용하여, 길이에 대한 상사비(1/10)를 기준으로 적용하였다. 실험에 사용된 토조는 폭 62cm, 높이 60cm, 길이 100cm로, 실험 중 모래의 거동 관찰이 가능하도록 토조 측면은 투명 아크릴판을 사용하였다<그림 1>. 토조 측면 벽과 토체의 마찰을 최소화함으로서 평면변형률 조건을 만족할 수 있도록 하였다.

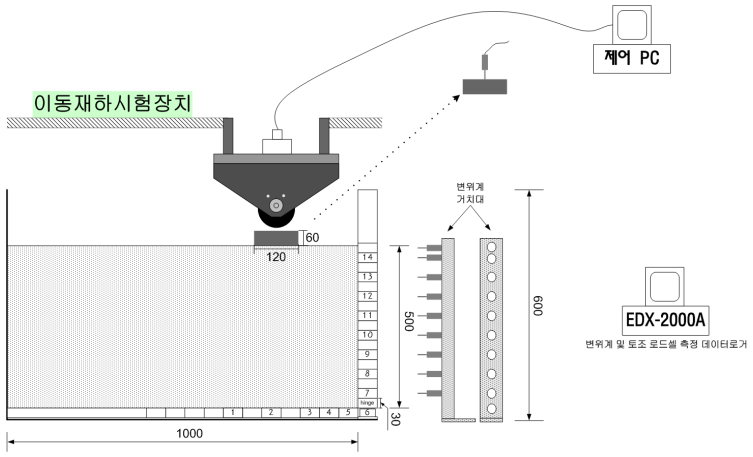


그림 1. 모형토조 개념도(단위, mm)

강성벽체와 블록식 벽체는 중공형 알루미늄재 블럭에 구멍을 뚫고 20mm 직경의 강봉 4개를 삽입하여 모든 블럭이 하나의 연속체로 거동하도록 함으로서 묘사하였다. 블록식 벽체는 강봉을 해체함으로서 묘사할 수 있도록 제작하였다. 또한 벽체 수평방향 변형을 최소화하기 위하여 "ㄱ"자형 앵글을 분할벽체 배면에 보강하였다<그림 2>.

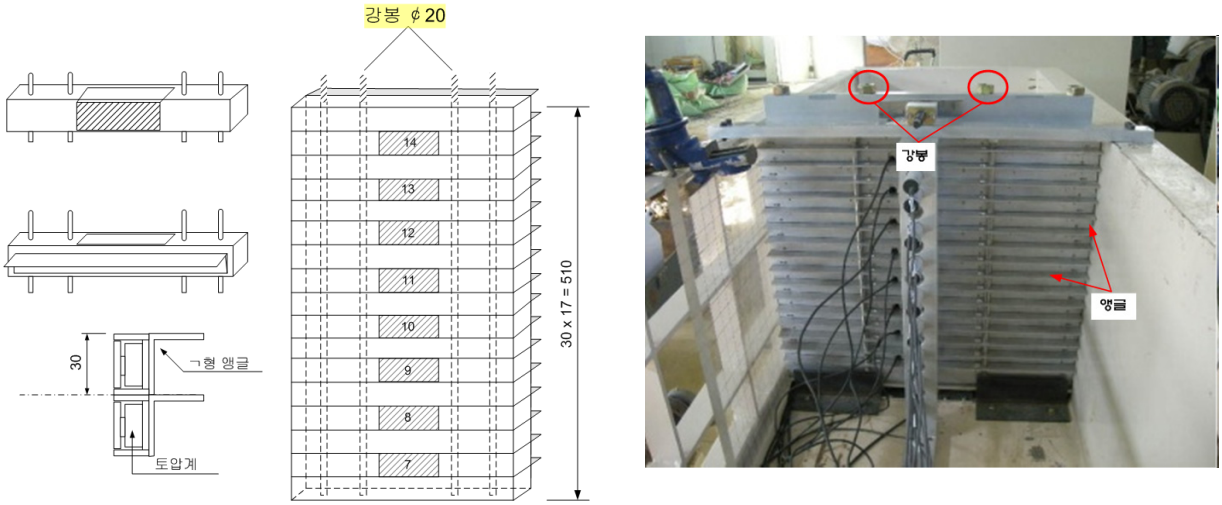


그림 2. 벽체 개념도

실험에 사용한 보강재는 0.5mm 두께의 비닐계 아스테이지를 사용하였다. 보강재는 보강옹벽의 변형특성을 평가함에 있어서 가장 중요한 재료 중의 하나로, 특히 보강재의 강성과 마찰특성이 보강옹벽의 변형특성을 지배한다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 실제 현장에서 사용되고 있는 보강재의 강성이 1,000~10,000kN/m범위에 있는 것으로 가정하고, 축소모형실험의 상사율(1/10)을 고려하여 상사율 범위를 크게

벗어나지 않는 보강재를 선정(319kN/m) 사용하였다<그림 3>. 보강재 형상은 지오그리드와 같은 형상으로 제작하여 형상에 의한 마찰특성을 표현할 수 있도록 하였다<사진 1>. 보강재 변형 및 축력 측정을 목적으로 보강재 표면에 스트레인게이지를 부착하였다. 시험에 사용한 보강재 길이는 블럭식의 경우 35cm(0.7H), 강성벽형의 경우 18cm(0.35H)를 기본으로 하였다.

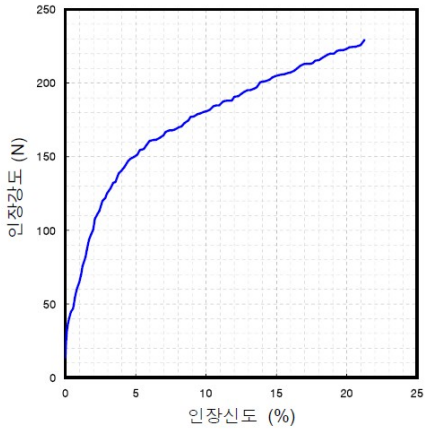


그림 3. 모형보강재 광폭인장실험 결과

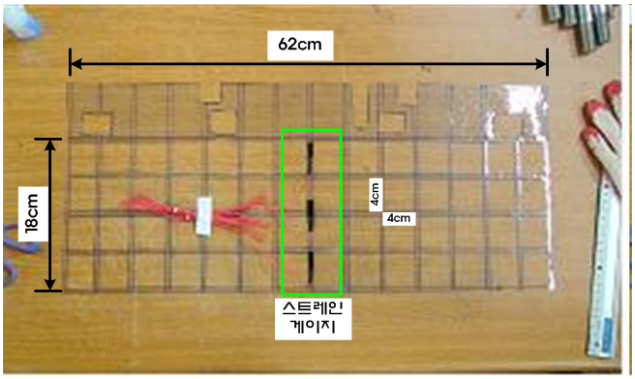


사진 1. 모형보강재

모형지반은 물성치가 명확한 건조상태의 주문진사를 사용하여 공중낙하법(강사높이 1m)으로 상대밀도 65%인 조밀한 상태의 노반을 조성하였다. 계측은 그림 1과 같이 기초침하량 및 전면벽의 수평변위 측정을 위하여 변위계 11개(수평변위계 9개, 기초 침하계 2개)와 수평 및 연직토압 측정을 위하여 토압계 14개(바닥 5개, 벽체 8개, 벽체 바닥 1개)를 사용하였다. 기초하중 재하 시 전단파괴면 관찰을 위하여 시험체 측면에서 비디오 촬영을 실시하였다. 파괴면의 명확한 관찰을 위하여 높이 6cm 간격으로 염색사를 포설하였다.

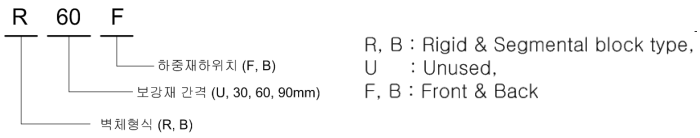
2.2 실험내용 및 방법

표 1은 전체 실험내용 및 목적으로, 정지(RUF_1) 및 주동토압(RUF_2) 실험은 실험 장치의 성능확인을 목적으로 2회 반복 실시하였다. 실험은 강성벽식(R60F)을 기본형으로 하고, 벽체강성을 변화시킨 블럭식(B60F)과 보강재 연직간격을 변화시킨 실험(R90F와 R30F)을 실시하였다.

표 1. 실험내용 및 목적

No	실험명	내용	목적	보강재 길이
1	RUF_1	1. 정지토압 상태	1. 실험 시스템 성능평가 2. 정지토압 시 수평변위 및 토압평가	없음
2	RUF_2	1. 정지토압 재현실험 2. 주동토압 상태	주동토압분포 및 벽체거동 확인	없음
3	R60F (기본형)	1. 강성벽형 수평변위 및 토압 2. 보강재 축력 측정	벽체 강성변화(강성벽식)	0.35H (18cm)
4	B60F	1. 블럭형 수평변위 및 토압 2. 보강재 축력 측정	벽체 강성변화(블럭식)	0.7H (35cm)
5	R90F	1. 강성벽형 수평변위 및 토압 2. 보강재 축력 측정	보강재 간격변화	0.35H (18cm)
6	R30F	1. 강성벽형 수평변위 및 토압 2. 보강재 축력 측정	보강재 간격변화	0.35H (18cm)

· 기호설명



강성벽체를 묘사하기 위해서 사전 제작된 모형보강재를 실험목적에 맞게 소정의 위치에 설치한 후, 강봉을 삽입하여 벽체를 완성하였다. 보강재 설치 층까지 표준사를 강사하고, 염색사를 포설한 후 보강재를 설치하는 일련의 과정을 반복 수행하였다<그림 4>. 뒷채움 완료 후 재하판(폭12cm*높이6cm*길이60cm)을 설치하고 침하계를 설치한 후 하중 재하실험을 실시하였다. 실험은 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 이동재하 시험 장비를 이용하여 구현하였다. 본 장비는 응력 제어형으로 정·동하중 재하가 가능하며, 최대작용하중은 4tf이며, 동 하중 재하 시 구현 가능 주파수 범위는 4~5Hz 범위이다. 재하판은 기초저면 마찰력으로 인하여 재하중이 경사지지 않도록 하기 위하여 가급적 매끄러운 재질을 사용하였으며, 정하중 재하 시 하중재하 속도는 1.67kPa/min로 최대한 천천히 하중을 재하하였다.

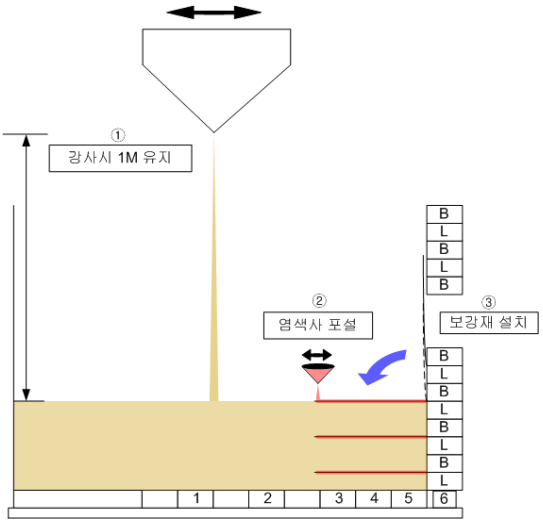


그림 4. 실험 과정 모식도

2.3 실험결과

2.3.1 벽체강성 및 보강재 연직간격 변화

그림 5는 강성벽식과 블럭식 보강옹벽의 모사열차하중 재하 시 기초평균압과 침하량 관계도이다. 강성벽식이 동일한 하중조건 하에서 기초침하량이 작아 하중에 대하여 내력이 큰 것을 알 수 있다. 동일한 보강재간격에 대한 벽체 강성변화 조건(B60F, R60F)하에서 50kPa(고속철도 궤도하중+열차하중)하중재하 시 기초침하량은 강성벽식에서 31.7%저감(7.90mm → 6.0mm)되는 것을 확인할 수 있었다. 50kPa 하중작용 시 기초의 평균침하량은 각각 R30F(5.0mm), R60F(6.0mm), R90F(11mm)로 동일한 상재하중 하에서 보강재 간격 증가에 따라 침하량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 B60F와 R90F의 경우 일정하중(40kPa)이상 하중 재하 시 비선형 거동을 보여 기초의 침하량이 크게 증가됨을 알 수 있었다. 궤도하중에 상응하는 10kPa의 하중 작용 시 R30F와 R60F는 1.1mm의 침하가 발생하였으나, R90F와 B60F는 1.4mm의 침하가 발생하여 침하량이 증가하였다.

그림 6은 강성벽식(R30F, R60F, R90F) 보강옹벽의 기초재하압과 벽체 수평변위 관계도로, 높이 0.99H(49.5cm)에서 측정한 벽체 수평변위이다.

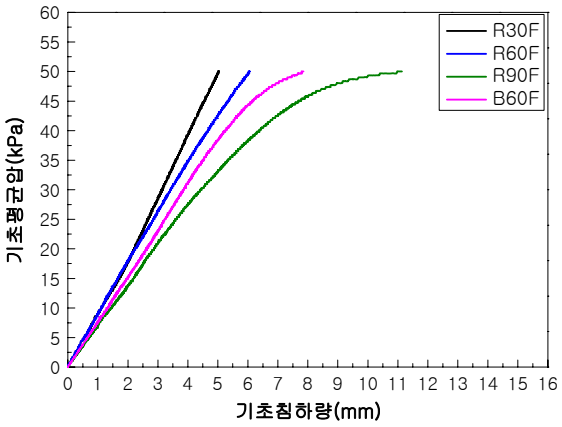


그림 5. 기초재하압~기초침하량

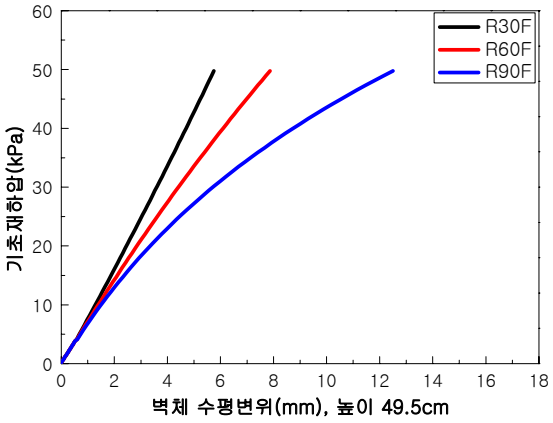


그림 6. 기초재하압~벽체 수평변위

R60F의 경우 50kPa의 작용 시 7.8mm(1.56%H)의 수평변위가 발생하였고, 변위 발생형태도 선형적이었다. 이와 비교하여 R90F의 경우 동일한 50kPa의 하중에 대하여 12.5mm(2.5%H)의 변위가 발생하였으며, 변위 발생형태는 비선형적이었다. 동일한 강성벽식에서 보강재 연직간격 변화에 대한 실험 결과로부터 보강재 간격 감소가 벽체 수평변위 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

그림 7은 모사열차하중 50kPa 재하 시 강성벽식과 블럭식 벽체 높이 별 발생 수평변위를 보여준다. 블럭식(B60F)은 수평변위 발생 패턴이 배부름 형태로 0.7H에서 최대수평변위(8.7mm)가 발생하였으며, 강성벽식(R30F, R60F, R90F)은 전면벽 상부끝단에서 최대수평변위가 발생하였다. 보강재 배치 연직간격의 증가와 함께 변위가 증가하였으며, 벽체 변형이 배부름형이 아닌 전도형임을 알 수 있다. 또한 강성벽식 R60F의 경우 블럭식 B60F와 보강층수는 8층으로 같으나, 보강재 길이가 약 1/2(18/35)임에도 불구하고 기초침하나 벽체 수평변위는 B60F보다 작았다. 이를 통하여 강성벽식을 이용하는 경우 짧은 보강재를 적용하였음에도 불구하고 발생 변위는 충분히 작은 범위에서 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

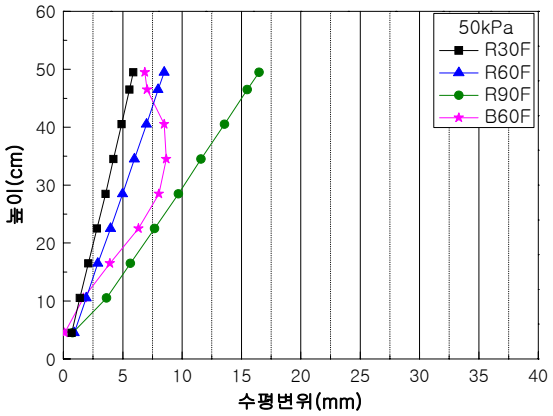


그림 7. 강성벽식과 블럭식 수평변위

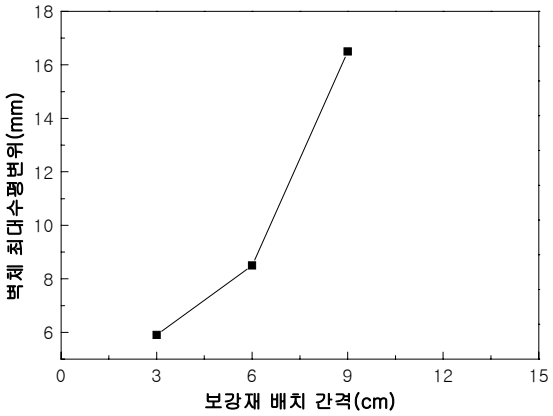


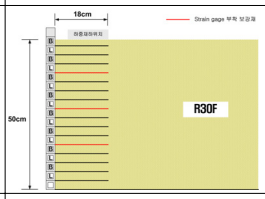
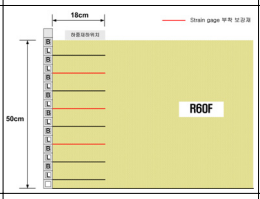
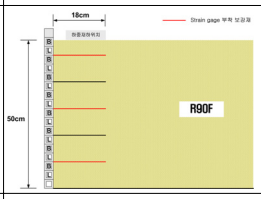
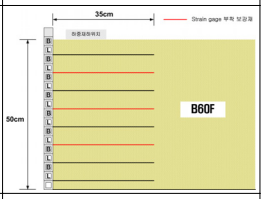
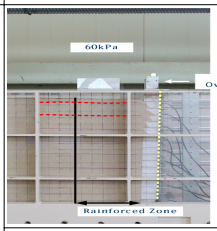
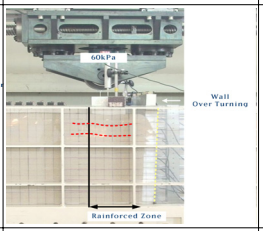
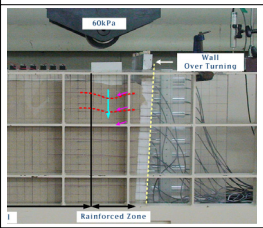
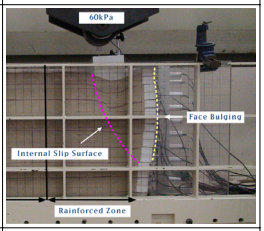
그림 8. 보강재 배치 간격 별 최대수평변위

한편, 그림 8에서 보이는 바와 같이 강성벽식에서 보강재 배치 간격 별 최대수평변위는 동일하중에 대하여 R30F가 가장 작게 나타났으며, R90F의 경우 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

2.3.2 벽체 형식별 파괴패턴 고찰

벽체 형식 및 보강재 연직 간격 별 보강토체의 파괴 형상을 비교 분석하기 위하여 실험 시 촬영한 사진을 분석하였다<표 2>. 블럭식의 경우 벽체 배부름과 함께 토체가 전단 파괴하는 것을 알 수 있었으며, 강성벽식은 벽체의 충분한 구속으로 벽체가 전도함에 따라 기초가 관입하는 파괴 형태를 보였다. 파괴 패턴 연구에 대해서는 향 후 보강재 길이 및 배치 형태에 따른 추가 실험을 계획 중에 있다.

표 2. 강성벽식과 블럭식 비교표 (단위 : mm)

실험명칭	R30F	R60F	R90F	B60F
보강층수				
최대수평변위 발생높이 및 발생량	H 5.7	H 7.9	H 12.5	0.7H 8.7
기초 침하량	5.0	6.0	11.0	7.8
파괴형태				
	전도	전도	전도	전단

3. 실대형시험

3.1 실험내용 및 방법

강성벽식 보강옹벽의 시공성을 확보하고, 실 열차하중 재하 시 블럭식과 강성벽식 보강옹벽의 거동을 비교 분석하기 위하여 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 실대형 토조(높이 3m, 폭 5m, 길이 22mm)를 사용하여 보강토체를 조성하였다<그림 9>와 <그림 10>. 토조 바닥에 잡석기초 20cm를 조성하고 R30F와 B(40~60)F를 기본 모델로 한 실대형 보강토체(높이 2.7m)를 조성하고 열차 반복하중 재하 시 보강토체의 거동을 확인하였다.

강성벽식 보강옹벽의 시공상의 특징은 뒷채움부를 철근을 사용하여 선 시공한 후 벽체를 현장타설콘크리트로 후 시공하는 데 있다. 뒤채움 토체를 동일하게 조성할 목적으로 뒤채움 토체를 3.5tonf 진동롤러를 사용하여 매 층마다 평균 12회씩 왕복 다짐하여 다짐도 95% 이상을 확보할 수 있도록 관리하였다. 사진 2와 사진 3은 강성벽식과 블럭식의 시공완료 후 전경이다. 변위계, 토압계, 변형률계를 사용하여 반복열차하중 작용 시의 벽체수평변위 및 침하, 수평토압 및 보강재 축력을 평가하였다.

사진 2. 강석벽식 보강옹벽

사진 3. 블럭식 보강옹벽

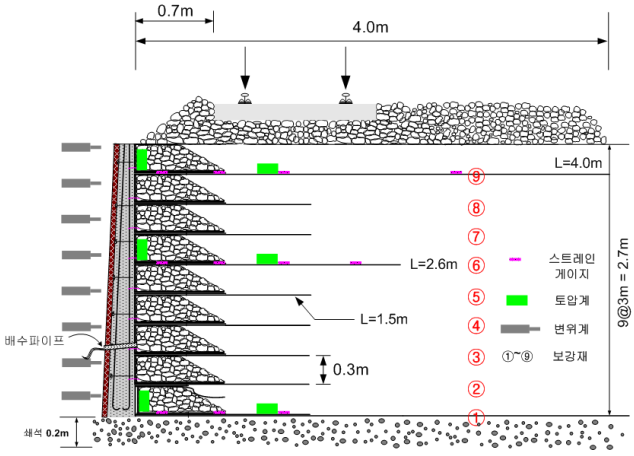


그림 9. 보강옹벽 단면도(강성벽식)

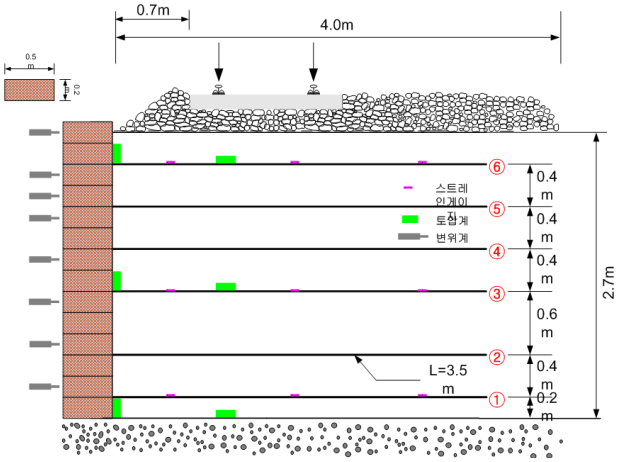
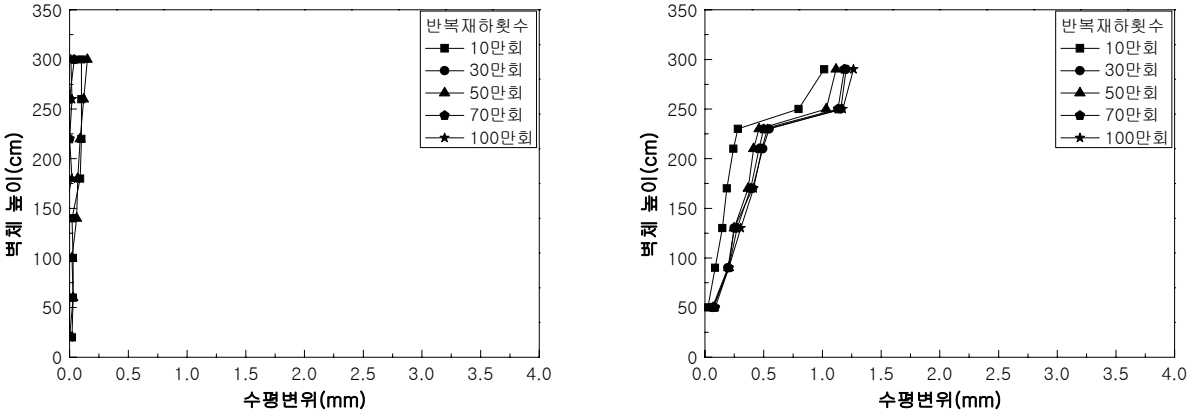


그림 10. 보강옹벽 단면도(블럭식)

재하 열차하중은 철도 설계 시 적용하는 LS22하중을 설계속도 200km/h, 직선부 장대레일로 가정하여 윤중 14.3tonf을 적용하였다. 열차 하중 재하주파수는 최고속도를 200km/h를 고려하여 5Hz로 하였으며, 반복 재하횟수는 100만회(약 1년 6개월 열차통과)로 하였다.

3.2 실험결과

벽체 수평변위 발생을 유도하기 위하여 열차하중 재하 위치를 벽체 끝단으로부터 1.2m에 근접하여 위치시켰다. 그림 11은 반복열차하중 100만회 재하 시 벽체 높이에 따른 벽체 형식별 발생 수평변위 분포를 보여준다. 블럭식의 경우 높이 0.76H에서부터 과도한 수평변위(1.26mm)가 발생하였으나, 강성벽식은 100만회 재하 후 벽체 최대 수평변위가 0.1mm에 불과하였다. 블럭식의 경우 근접한 열차하중 재하로 인하여 벽체 상단에서 큰 수평변위가 발생하였으나, 강성벽식은 수평변위가 거의 발생하지 않았다.



(a) 강성벽식 (b) 블럭식

그림 11. 반복열차하중에 대한 벽체 수평변위

그림 12는 반복재하횟수에 따른 노반의 탄소성 침하를 보여준다. 승차감과 직접적으로 관련되는 탄성침하의 경우 강성벽식이 0.2mm, 블럭식이 0.4mm로 블럭식이 2배 이상 크게 발생하였다. 노반의 안정성 및 궤도 유지보수와 상관성이 높은 소성침하의 경우 100만회 재하 시 강성벽식이 0.5mm, 블럭식이 1.61mm로 블럭식이 3배 이상 크게 발생하였다. 실험 결과로부터 강성벽식 보강토체의 탄소성 침하가 상당히 억제되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 벽체 강성으로 인한 뒤채움부의 구속효과에 기인한 것으로 판단되었다.

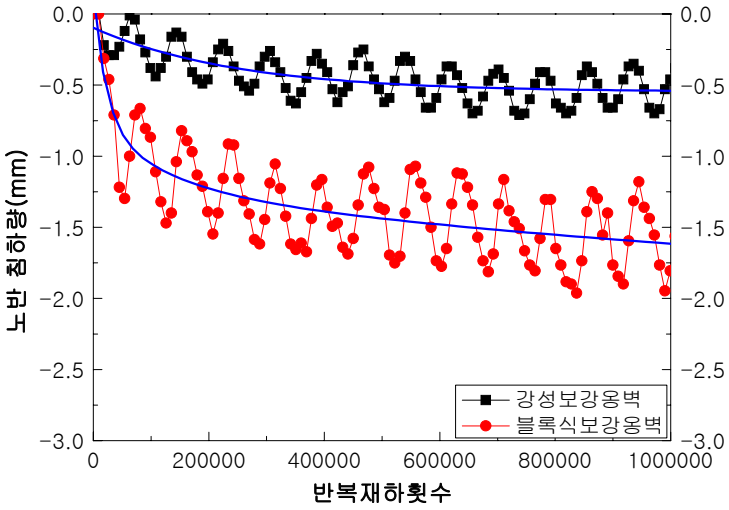


그림 12. 반복열차하중에 대한 노반침하량

4. 결 론

보강토체에 적용되고 있는 전면벽체의 역학적 역할을 평가하기 위하여 블럭식과 강성벽식에 대한 축소모형실험과 실대형 시험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 상사비 1/10의 축소모형실험을 통하여 강성벽식이 블럭식과 비교하여 하중에 대한 내력이 크고, 기초

침하 및 벽체 수평변위 측면에서 유리한 것으로 확인되어, 강성벽식을 이용하는 경우 짧은 보강재를 적용하였음에도 불구하고 발생 변위는 충분히 작은 범위에서 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2) 보강토체의 파괴패턴은 블럭식이 전단파괴형 인데 반해, 강성벽식이 벽체 전도형 관입파괴 형태를 보였다.

3) 보강재의 연직 배치간격이 증가함에 따라 기초침하량과 벽체 수평변위는 증가하는 경향을 보였다.

4) 강성벽식 보강옹벽의 시공성 확보 및 블럭식과의 성능비교를 위하여 실시한 실대형 시험에서도 강성벽식의 경우 짧은 보강재 길이에도 불구하고, 벽체 수평변위가 1/11이하로 작았으며, 노반 탄성침하의 경우 1/2, 소성침하량 측면에서도 1/3이하로 변위제어 성능이 훨씬 뛰어난 것을 알 수 있었다.

상기의 결과를 종합적으로 정리해 보면, 강성벽식이 블럭식과 비교하여 단보강재를 사용하였음에도 불구하고 열차하중에 의한 노반침하와 발생 벽체 수평변위 측면에서 성능이 뛰어났다. 본 실험을 통하여 반복 대용량 열차하중에 대한 보강토체의 변위제어 가능성을 확인하였으며, 이는 강성벽식 보강토체가 엄격한 변위제한 규정이 적용되는 콘크리트궤도용 고속철도 노반에도 적용성이 높을 것임을 시사한다.

참고문헌

1. 김대상, 정영훈, 최찬용(2007), “철도분야 보강토옹벽 적용성 향상을 위한 고찰”, 한국토목섬유학회 추계학술대회논문집
2. 유충식, 정혁상, 전상수, 이봉원, 김기연, 전한용(2005), “축소모형실험에 의한 계단식 보강토옹벽의 파괴 메카니즘”, 한국지반공학회논문집 제21권, 3호, pp.65～77
3. 龍岡文夫,"新しい補强土擁壁のすべて - 盛土から地山まで-", 總合土木研究所