

시멘트모르터 충전형 포장궤도의 실물 반복재하특성에 관한 연구

Study on the Full-Scale Cyclic Loading Characteristics for Cement Mortar Pouring type Paved Track

이일화[†] · 장승엽^{*} · 김 은^{*}
Il-Wha Lee · Seung-Yup Jang · Eun Kim

Abstract

Gravel ballasted tracks are used as a basic structure for the domestic railway tracks. However, such kind of tracks has few disadvantages with service life of the structure, such as rapid deterioration of the tracks. Due to this reason, there is a need to develop low maintenance track to improve the service life of the conventional line tracks. CMP paved tracks are one of the kind of concrete tracks those were manufactured by using the prepacked concrete techniques. The purpose to develop paved tracks is to reduce the maintenance cost. The most important controlling factors to design the paved tracks are surrounding environmental condition and repeated train loading. In this study, in order to investigate the deformation characteristics such as displacement, earth pressure, strain ratio, and crack along the repeated loading cycle, cyclic loading test through real scale model was carried out.

Keywords : Paved Track(포장궤도), Real Scale(실물), Cyclic Loading Test(반복재하시험)

1. 서론

현재 국내에서는 여러 가지 유지관리상의 단점에도 불구하고 자갈도상궤도가 가장 많이 적용되고 있는데, 이는 부설이나 보수가 용이하고 건설비가 저렴하기 때문이다. 그러나, 최근 고속화, 고밀화 등에 의한 선로 부담력의 증가에 따른 노후화 속도가 빨라짐에 따라, 소요되는 유지보수비 또한 증가하는 추세이다. 이러한 현상에 대한 대처방안으로서 신선의 경우는 유지보수가 거의 필요 없는 콘크리트궤도의 적용이 고려되고 있고 기존선의 경우에는 포장궤도나 B2S공법 등이 검토되고 있다. 포장궤도는 일정 도상자갈층을 시멘트모르터 충전 등의 방법으로 콘크리트 슬래브화(化)시키는 공법으로서 열차 운행에 지장을 주지 않으면서 궤도구조를 개선하여 기존선의 유지보수업무를 획기적으로 줄이는데 목적이 있다. 포장궤도는 운행 중인 기존선의 생력화를 목표로 하며 최소 열차차단시간(3~4시간)내에 일

정작업이 수행된다. 포장궤도는 기본적으로 콘크리트궤도 수준의 유지 관리성을 목표로 하고 있다. 이를 만족하기 위해서는 궤도구성품을 비롯한 충전 재료(시멘트계)와 충전재의 두께, 침목의 폭과 간격(체결장치의 간격) 및 경제성과 시공성의 조건에서 본 최적구조의 개발과 현장적용시 충분한 내구성과 안정성을 확보하여야 한다. 본 논문에서는 제안된 포장궤도구조에 대한 내구성 평가를 위하여 반복재하시험을 수행하였다. 이를 위하여 실물의 포장궤도 공시체를 제작하여 반복재하에 따른 토압, 변위, 변형률 등의 특성변화를 검토하였다.

2. 시멘트모르터 충전형 포장궤도의 구조

시멘트모르터충진형(Cement Mortar Pouring, CMP) 포장궤도를 구성하는 궤도구성품은 크게 대형침목, 저탄성패드, 가변체결구, 충전재, 토목섬유와 재활용된 도상골재가 있다. 각 궤도구성품은 포장궤도의 목적에 맞게 개량되어 사용되며, 각 구성품의 특성값이 전체 궤도의 지지강성에 영향을 미치기 때문에 선정시 세심한 주의가 요구된다. 구

[†] 책임저자: 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부
E-mail: iwlee@krti.re.kr

TEL: (031)460-5326 FAX: (031)460-5319

^{*} 정희원, 한국철도기술연구원

성품의 개별적 특성[4]을 고려하여 최종적으로 결정한 포장 궤도의 표준단면은 Fig. 1과 같으며, 실제 시공시에는 충분한 안전율을 고려하여야 한다[2-4]. 포장궤도 표준 단면은 1급선 설계기준을 표준으로 하였다. 설계속도는 200km/h, 축하중은 22tonf에 50kg레일을 기준으로 하였다.

3. 실물재하시험의 개요

궤도는 차량 주행에 의해 발생하는 동하중과 불규칙적인 주변 환경하에서 반복적으로 거동하는 복잡한 메카니즘을 가지고 있다. 따라서, 궤도시스템의 특성을 탄소성이론이나 수치해석으로 규명하는 것보다는 실제의 상황을 재현하여 시험하는 것이 가장 효과적이다. 재하시험은 종합궤도노반 시험장치를 이용하여 실제 현장의 철도노반 상황을 모사하고, 포장궤도를 실물로 제작하여 수행하였다[1]. 노반은 다짐장비로 조성하고 그 강성도를 평가하였다. 노반의 강성수

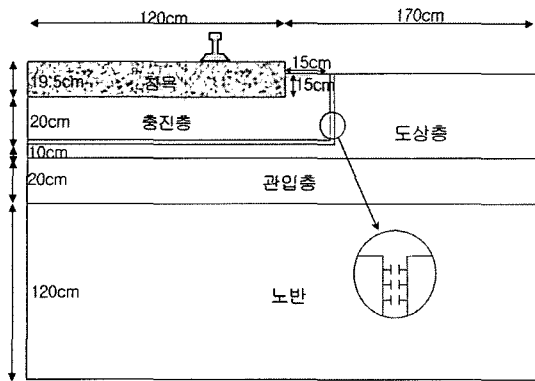


Fig. 1. Standard section of CMP paved track

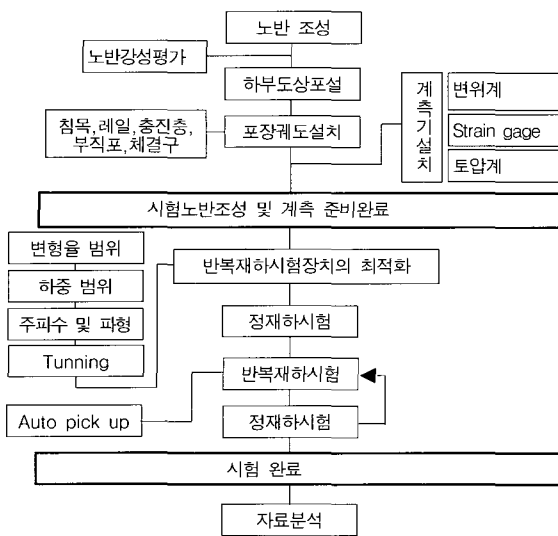


Fig. 2. Diagram of cyclic loading test

준은 K_{30} 으로 환산할 경우, $7 < K_{30} \leq 11 \text{kg/cm}^3$ 으로 다소 낮은 편이다. 노반 조성이 완료된 후 실물 포장궤도를 제작함에 있어 시공상의 오차가 다소 발생하였으며, 모르타 타설 후 충분한 강도확보를 위하여 28일 양생후 시험을 실시하였다. 시험 완료후 코어공시체의 압축강도는 25~30MPa의 수준으로 시험조건을 만족하였다. 본 연구에서 실시한 실대형 반복재하시험의 순서는 Fig. 2에서와 같은 방법으로 시험을 실시하였다.

3.1 재하 조건

재하조건은 정적시험과 동적시험을 고려하여 결정하였다. 정적재하는 시험전, 시험중, 시험후로 나누어 각각의 재하 하중에 대한 특성을 평가하였다. 동적 재하는 열차의 반복 통과 효과를 모사하기 위한 시험으로서 1차에서는 1.3백만회, 2차에서는 45만회 재하시험을 통하여 반복재하시의 포장궤도의 변형특성을 검토하였다(Fig. 3). 1차 반복재하시험은 저탄성의 베이스플레이트패드가 삽입되어진 모델로 포장궤도의 기본모델이다. 2차 반복재하시험은 하부층으로의 하중 전달효과를 높이기 위하여 저탄성 패드를 제거하고 극한 조건에서 시험하였다. 하중 조건 및 시험조건을 요약하면 Table 1과 같다.

시험하중은 윤중 기준으로 각각 11, 14, 17.6, 24tonf을 사용하였다. 11tonf은 정적설계하중, 17.6tonf은 충격율이 반영된 정적설계하중, 14tonf은 피로특성이 반영된 동적설계하중이고 24tonf은 본 시험기에서 최대로 재하 할 수 있는 시험운하중이다.

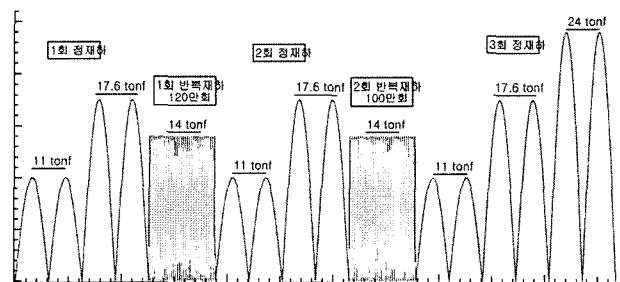


Fig. 3. Static and dynamic Loading sequence

Table 1. Loading condition of cyclic test

항목	내용
시험 조건	<ul style="list-style-type: none"> 반복 하중 : 최대운하중 14.3tonf, 최소하중 1tonf 재하 파형 : Sine파 반복 횟수 : 1차 130만회, 2차 45만회 재하 진동수 : 4Hz

3.2 시험장비의 구성

종합궤도노반시험장비는 실제 현장의 철도노반 상황을 그대로 재현, 실내에서 시험을 할 수 있게 한 장치로 현장계측에서 오는 문제점을 해결할 수 있는 장점을 가지고 있다. 시험장비는 토조(Soil Tank), 하중재하장치>Loading System, MTS)와 하중작용시 반력대 역할을 하기 위한 하중 반력대>Loading Frame)등 3 가지로 구성되어 있으며, 중앙계측실에서 자동계측할 수 있는 자동제어장치>Control System), 펌프실, 냉각장치 등으로 구성되어 있다. 시험에서는 실제 현장조건과 거의 유사한 상태로 구현하였으며 대부분의 재료도 현장에서 실제로 시공하는 재료를 사용하여 구성하였다.

3.3 계측시스템

본 시험에서는 반복재하에 따른 포장궤도시스템의 변화를 측정하기 위하여 변위계, 토압계, 스트레인게이지를 각의 위치에 부착하여 사용하였다. 측정지점은 Fig. 5와 같이 하중재하지점을 기준으로 레일상면(①), 침목상면(②), 충전층상면(③) 노반면(④)에서 좌 우 각 1개소씩 변위를 측정하였으며, 재하 직하부에 토압계(⑤)를 좌 우측에 매설하여 토압의 변화를 관찰하였다. 그리고 각 부재위치에서의 변형율을 검토하기 위하여 하중재하 지점영역에 10개의 스트레

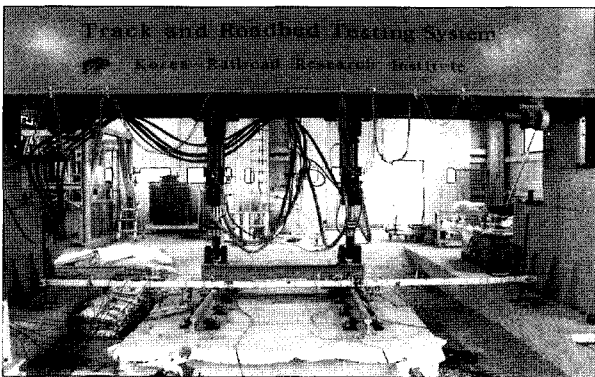


Fig. 4. Real scale cyclic loading test system

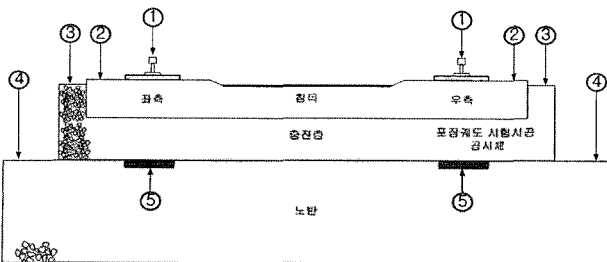


Fig. 5. Measurement points in paved track section

인게이지를 설치하여 변형율의 변동을 관찰하였다.

4. 정재하시험

정적 재하시험은 반복재하 시험에 따른 궤도·노반의 침하량, 노반의 토압 등의 변화를 정적 상태에서 검토하기 위하여 반복재하시험의 전, 중, 후에 실시하였다. 하중조건은 첫 번째 반복하중재하 전후로 11tonf와 17.6tonf을 재하하였으며, 베이스플레이트를 제거한 두 번째 반복하중재하 후 11tonf와 17.6tonf 그리고 24tonf을 사용하여 재하하였다. 하중을 재하>Loading)-제하>Unloading)하여 그 때마다 궤도·노반의 침하량, 노반의 토압 및 변형율을 측정하였다.

4.1 정적이중 재하시 토압 특성

노반의 연직방향 토압은 재하하중이 커짐에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 반복재하시험 완료 후 정적재하 시험을 하였을 경우에는 반복재하시험 전과 비교하였을 때 토압이 증가하였다. 이는 반복재하시험이 수행되는 과정에서 지반이 다져져 노반이 안정화됨에 따라 반복재하 시험후의 경우의 토압이 더 증가하였다고 분석된다.

4.2 정적이중 재하시 변위 특성

Table 4는 충격율을 고려한 정적해석시의 설계하중(17.6 tonf)으로 반복재하시험전에는 레일의 변위량이 4.02mm, 침목의 변위량이 0.91mm, 노반의 변위량은 0.56mm로서 레일의 경우 다소 과도한 변위가 발생하였다. 침목과의 상대 변위량을 감안하면 3.1mm 정도의 차이가 발생하는데, 베이스플레이트 패드에서 발생한 탄성변위와 시공직후 궤도시스템이 안정화 부족인 것으로 판단되며, 반복재하시험 후에

Table 2. Earth pressure at each loading condition (Unit : kPa)

	11tonf		17.6tonf	
	좌	우	좌	우
반복재하 전	20.604	34.986	29.682	51.51
반복재하 1회 후	21.114	35.19	32.436	57.426

Table 3. Maximum displacement of 11tonf loading (Unit : mm)

측정위치	재하시험 전	1회 반복재하 시험 후	2회 반복재하 시험 후
좌측-레일	2.086	0.846	0.856
좌측-침목	0.4825	0.4475	0.4705
좌측-노반	0.2695	0.2695	0.257

Table 4. Maximum displacement of 17.6tonf loading (Unit : mm)

측정위치	반복재하 시험 전	1회 반복재하 시험 후	2회 반복재하 시험 후
좌측-레일	4.026	1.222	0.808
좌측-침목	0.9065	0.661	0.4845
좌측-노반	0.5655	0.4245	0.2695

Table 5. Maximum displacement of 24tonf loading (Unit : mm)

측정위치	2회 반복재하 시험 후
좌측-레일	1.422
좌측-침목	1.0235
좌측-노반	0.628

는 그 차이가 대폭 감소되었다. 초기 변위치를 제외하면, 대부분의 변위값은 적절한 범위내에 포함되는 것으로 나타났다. 시험최대하중인 24ton재하시에도 기준을 만족하였으며 선형적인 변위증가를 나타내었다.

5. 반복재하시험

5.1 반복하중 재하시 토압변화 특성

토압계는 충진층 바로 아래에 위치하며 각 레일 직하면에 2개가 설치되었다. 토압계는 압력이 작용하는 면을 보호하고 균일하게 하중이 작용하도록 모래로 보호층을 설치하였다. Fig. 6은 본 설계구조를 적용하였을 때의 1차 반복재하시험시의 토압변화로서 재하횟수에 따른 변화는 거의 없으며, 토압의 범위는 20~40kPa로서 자갈도상궤도에서 노반에 작용하는 하중보다 작게 나타났다.

Fig. 7은 저탄성베이스플레이트 패드를 제거한 후의 2차

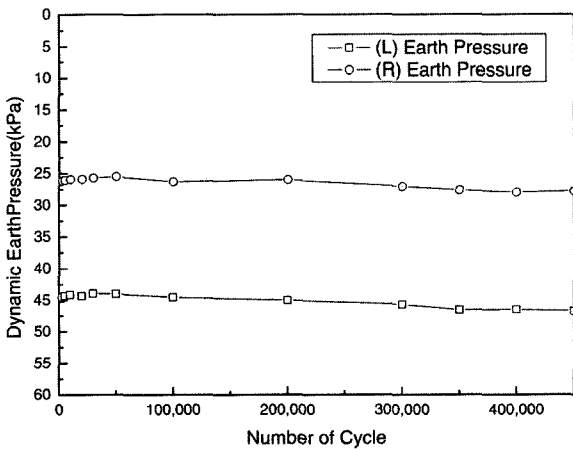


Fig. 7. Relationship between earth pressure and number of 2nd loading cycles

반복재하시험결과로서 노반으로 전달되는 하중이 13~25% 정도 증가하였다. 저탄성패드의 사용이 노반의 부담을 경감시켜준다는 것을 알 수 있다.

5.2 반복재하시 침하변화 특성

본 시험에서는 반복하중에 의한 변위를 측정하여 실제 노반에 부설 되었을 때의 내구성 및 침하량을 예측하기 위하여 실시하였다. 각 지점의 변위량은 각 재하횟수에 따라 변위계를 이용하여 레일, 침목, 충진층, 노반면의 변위량을 측정하였다. 측정자료는 재하횟수에 대하여 평균값을 사용하여 결과를 정리하였다.

5.2.1 레일에서의 누적변위

Fig. 8과 Fig. 9는 반복하중재하 횟수에 따른 레일에서의 변위 변화값으로 하중이 재하되었을 때의 탄성변위와 반복하중에 따른 궤도전체의 누적 소성변위가 포함된 값이다. 측정지점은 하중이 재하되는 좌우 레일 2개소((R)Rail_D, (L)rail_D)와 좌측레일 측정개소에서 64cm떨어진 두 번째 침목의 레일지점(R)Rail2_D)을 포함하여 총 3개소이다.

재하지점에서의 최종 누적변위량은 우측레일이 2.66mm, 좌측레일이 3.09mm로서 좌우측의 차이가 발생한다. (R)Rail2_D에서의 누적변위량은 1.61mm로서 선형탄성이라 가정할 경우, 첫 번째 침목에 작용하는 하중의 약 50%가 두 번째 침목으로 전달된다고 할 수 있다. 전체적인 누적변위량은 십만회까지는 안정화단계이고 그 이후부터는 선형적으로 누적침하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 2차 반복재하에서는 안정화까지의 반복횟수가 대폭 줄어들고 재하횟수에 따른 변위량의 증가도 없다.

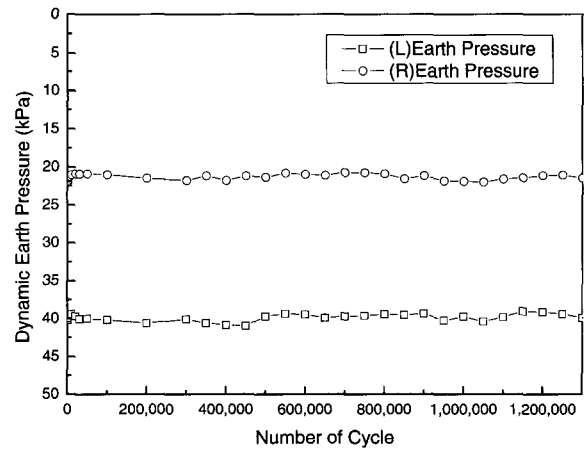


Fig. 6. Relationship between earth pressure and number of 1st loading cycles

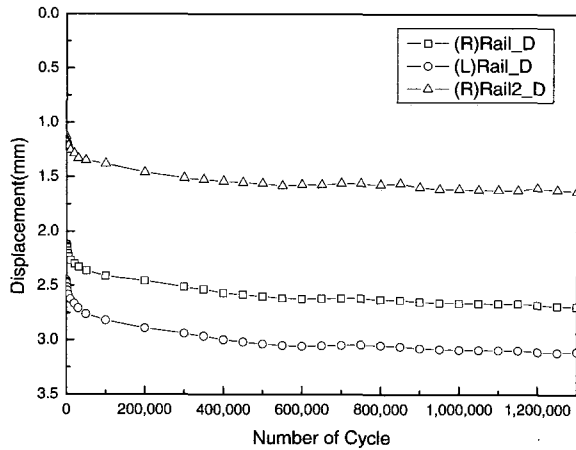


Fig. 8. Relationship between rail displacement and number of 1st loading cycles

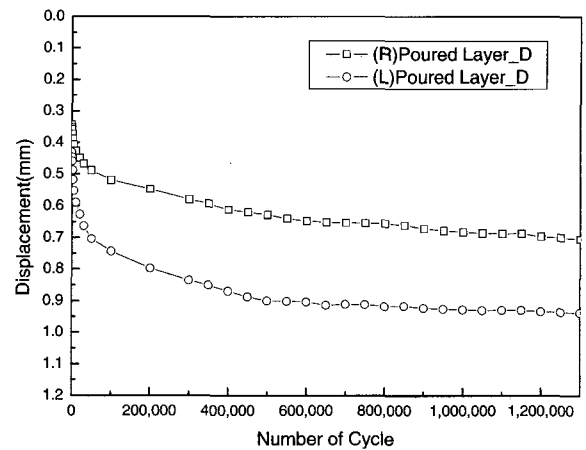


Fig. 10. Relationship between poured layer displacement and number of 1st loading cycles

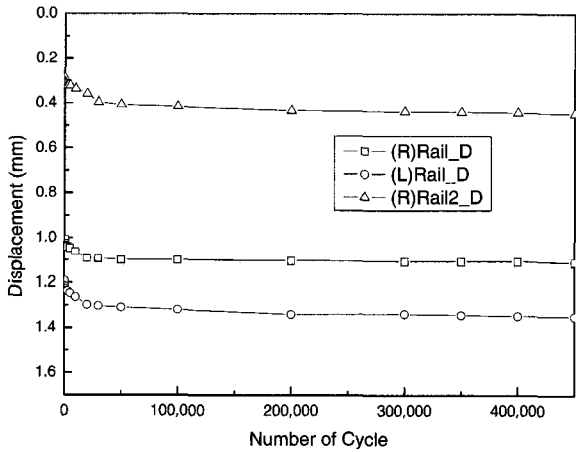


Fig. 9. Relationship between rail displacement and number of 2nd loading cycles

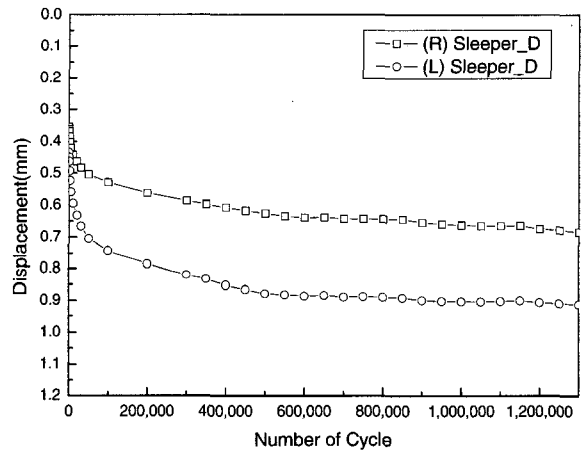


Fig. 11. Relationship between the sleeper displacement and number of 1st loading cycles

5.2.2 충전층 및 침목에서의 누적변위

Fig. 10은 하중재하지점 직하 충전층에서의 누적변위량을 나타낸 그림이며 Fig. 11은 하중재하지점 직하 침목에서의 누적변위량을 나타낸 그림이다. 두개의 측정지점은 서로 연결되어 있기 때문에 동일한 변위량과 경향을 나타내고 있다. 최종 누적변위량은 약 0.6, 0.9mm로서 레일에서의 변위량의 1/3정도인 것으로 나타났다.

5.2.3 노반에서의 누적변위

Fig. 12는 노반에서의 누적변위량으로서 최종 누적변위량은 각각 0.29, 0.68mm로서 매우 작은 값을 나타내었다. 약 40만회의 재하 이후, 안정화되었으며 안정화 이후에는 더 이상의 침하가 발생되지 않았다. 하중의 재하(loading)-제하(unloading)에 따른 탄성변위량이 0.25mm인 것을 감안하면 실제 노반침하량은 최대 0.43mm이다. 이와 같이 침하량이

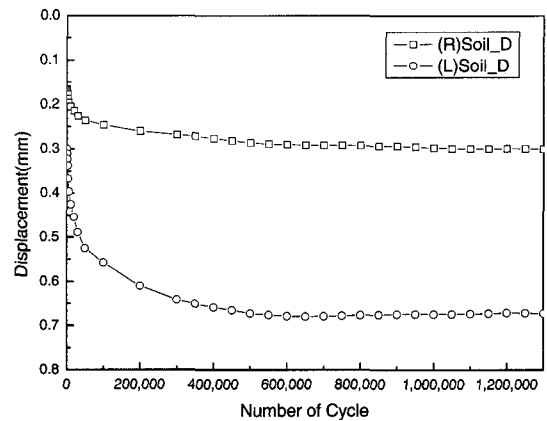


Fig. 12. Relationship between roadbed displacement and number of 1st loading cycles

작은 것은 유도상궤도와 달리 포장궤도 상부에서 응력분산 효과가 높고, 노반으로 전달되는 하중이 작기 때문이라 할

수 있다.

5.2.4 탄성 변위

탄성변위는 반복재하가 진행되는 동안 소성변위량을 제외한 값으로서 단순히 하중이 재하-제하되었을 때의 변동값이다. Fig. 13은 각 측정지점에서의 탄성변위량을 나타낸 그림으로서 노반층, 충전층, 침목은 선형적인 탄성거동을 보이지만, 레일에서 측정된 탄성변동값은 재하 횟수에 따라서 다소 증가하는 경향을 보이며 대부분의 탄성변위는 레일면 즉, 저탄성패드에서 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 저탄성 베이스플레이트패드가 없는 경우로서 Fig. 13과 비교할 때 충전층 및 노반에서의 변동량은 차이가 없으나 레일면에서의 변동량은 큰 차이를 보이고 있다. 레일에서의 최종탄성변위는 0.78mm이며 패드가 있는 경우(2.55mm)와 비교하여 약 70%정도 변위가 감소하였다. 즉

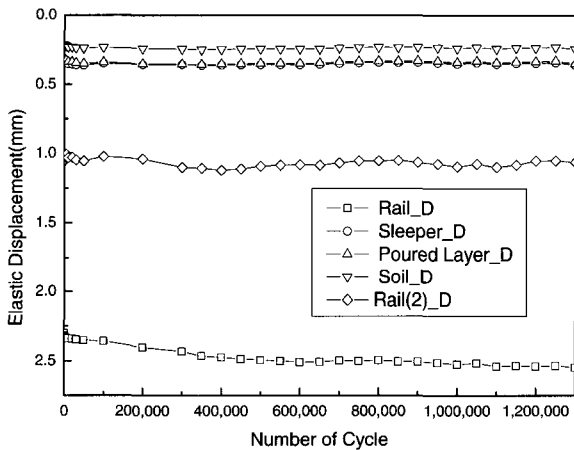


Fig. 13. Relationship between the elastic displacement and number of 1st loading cycles

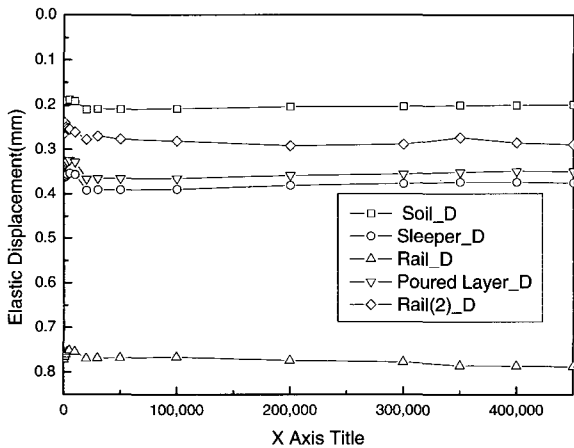


Fig. 14. Relationship between the elastic displacement and number of 2nd loading cycles

레일면에서 측정된 변위량의 대부분이 패드에서 발생되었는데, 이는 패드의 스프링계수가 20kN/mm로 저탄성재료가 사용되었기 때문이다.

5.2.5 측정위치별 변위특성

Fig. 15와 Fig. 16은 1차 및 2차 재하시험시의 전체 반복 재하시간동안 시험단면에서 발생한 누적변위량을 측정위치별로 나타낸 그림이다. 130만회 재하 후 레일두부를 제외한 시험단면의 누적변위량은 약 0.5~1.0mm의 범위를 가지며, 레일두부에서의 누적변위량은 약 2.2~3.0mm의 범위를 나타내었다. 자갈도상궤도와 비교하여 유사한 변형패턴을 나타내지만, 노반과 충전층에서의 안정화속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이는 충전층과 침목이 일체화가 되어 있고 일체화된 층에서의 하중분산 효과가 크기 때문일 것으로 판단된다. 특히 충전층에서의 하중분산 및 전달효과는 하부 노반으로

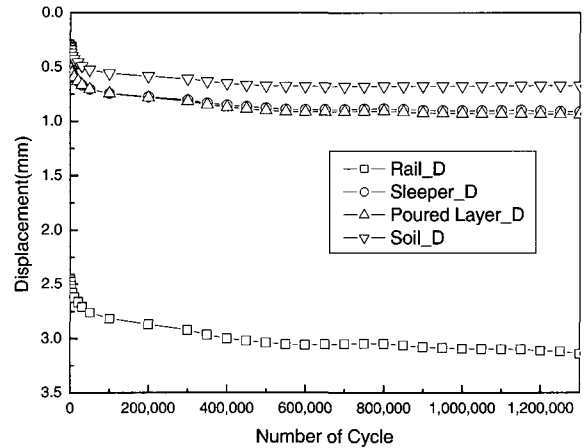


Fig. 15. Relationship between the displacement at each location and number of 1st loading cycles

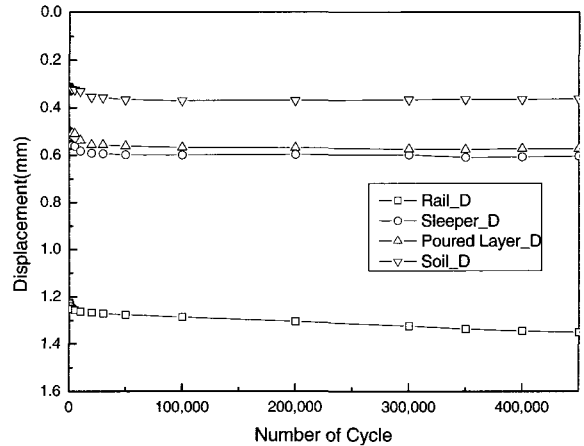


Fig. 16. Relationship between the displacement at each location and number of 2nd loading cycles

전달되는 하중을 상당히 감소시키기 때문에 노반의 부담력 또한 감소하는 것으로 나타났다.

6. 변형을 분포 특성

시험체에서 발생하는 응력의 상태를 측정하기 위하여 시험체 표면을 매끈하게 면처리한 후 스트레인게이지를 부착하여 변형율을 측정하였다. 총 10개의 스트레인게이지가 사용되었으며, 최대 변형율을 측정하기 위하여 재하점 부근에 집중 설치되었다. Fig. 17의 게이지 부착 위치를 참조하여 Table 6에 각 위치에서 시험조건별로 획득한 변형율의 최대

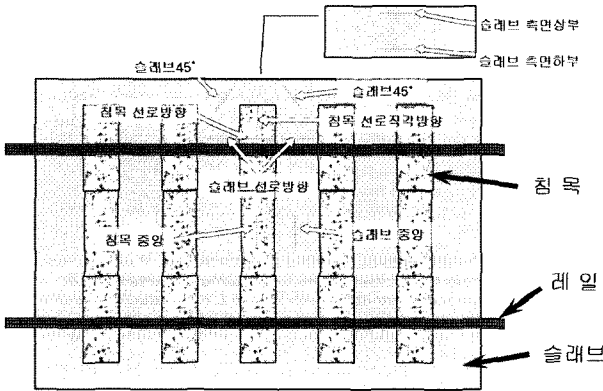


Fig. 17. attached location of strain gages

Table 6. Results of the strain ratio(+compression, -tension)

부착 위치	스트레인 게이지(Strain Gage) 최대값(μe)					
	2회 정재하		2회 반복재하	3회 정재하		
	11tonf	17.6tonf	14tonf	11tonf	17.6tonf	24tonf
침목종양	6.692	10.263	7.832	7.644	7.730	17.521
슬래브종양	4.749	7.038	5.394	4.941	5.595	11.917
슬래브 선로방향	-21.03	-34.868	-19.764	-22.810	-23.034	-50.81
슬래브 45°	-14.47	-23.470	-22.77	-15.394	-14.930	-33.21
침목선로 직각방향	6.598	9.684	11.477	6.224	6.675	15.251
침목 선로방향	-24.29	-42.324	-31.705	-28.237	-27.666	-62.90
슬래브 선로방향	-18.06	-30.049	-9.231	-20.028	-19.843	-46.01
슬래브 45°	-11.06	-5.605	-	4.457	-1.330	-3.808
슬래브측면 상부	-6.083	-10.220	-9.231	-4.515	-5.229	-19.40
슬래브측면 하부	13.261	21.681	17.618	13.454	14.151	31.809

값을 나타내었다.

변형을 측정은 시험조건상 시험체의 표면에서만 측정할 값이기 때문에 시험체 전체의 최대값을 아니며, 부착위치에 따른 오차가 발생할 수 있다. 측정결과, 최대 변형율은 침목 선로방향으로 62.9kPa의 인장응력이 발생하였다. 전체적으로 변형율의 변동은 인장과 압축이 복잡하게 작용하지만, 변형율의 범위는 상대적으로 작기 때문에 시험체의 구조적 특성에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

7. 결론

시멘트모르타 충전형 포장궤도의 내구성능을 평가하기 위하여 실물반복재하시험을 수행하였다. 주요 검토항목은 반복재하상태에서 노반에 작용하는 토압과 각 측정지점에서의 누적변위량 및 변형율의 변화를 검토하였다. 재하시험은 정적시험과 동적시험을 고려하여 수행하였다. 정적재하는 시험전, 시험중, 시험후로 나누어 각 각의 재하하중에 대한 특성을 평가하였다. 동적 재하는 열차의 반복통과 효과를 모사하기 위한 시험으로서 저탄성의 베이스플레이트 패드를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우로 구분하여 시험하였다. 각 시험에 대한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 시험조건별 정재하시험결과, 초기 변위치를 제외하면 대부분의 변위값은 적절한 범위내에 포함되는 것으로 나타났다. 시험 최대축하중인 48tonf 재하시에도 선형적인 변위특성을 나타내었다. 또한 노반의 연직방향 토압도 재하하중이 커짐에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 반복재하시험은 총 1.75백만회에 걸쳐 진행되었으며, 130만회 1차 재하시험시 침목, 충전층의 누적변동(탄성 변위+소성변위)량 값은 약 0.5~1.0mm의 범위로서 자갈도상궤도에 비하여 약 50~70%가 감소하였다. 또한 레일면에서는 약 2.2~3.0mm의 범위로서 자갈도상궤도보다 약 20~30%가 감소하여 목표 성능을 확보하였다. 또한 노반층에서의 변위와 하중 특성을 분석한 결과, 침목과 충전층에서의 하중분산 효과가 높기 때문에 노반의 부담력도 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 저탄성 베이스플레이트패드가 없는 2차 반복재하시험의 경우, 충전층 및 노반에서의 변동량은 차이가 없으나 레일에서의 최종탄성변위는 0.78mm이며 패드가 있는 경우(1차 반복시험)에 비하여 약 70%정도 감소하였다. 탄성변위량은 패드의 지지계수에 매우 종속적이기 때문에 저탄성패드의 지지계수가 전체 포장궤도시스템의 강

성특성을 좌우한다고 할 수 있다.

- (4) 시험체 표면에서의 변형률 측정 결과, 최대 변형율은 침목 선로방향의 인장응력인 것으로 나타났다. 전체적으로 변형률의 변동은 인장과 압축이 복잡하게 작용하지만, 변형률의 범위는 상대적으로 작기 때문에 시험체의 구조적 특성에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이일화, 김현기, 황선근, 조용권 (2000), “고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, vol.20, vol.6-d, pp.681-690.
2. 김성환, 이일화, 윤경구 (2005), “포장궤도 골재용 도상자갈의 입도기준”, 한국철도학회 춘계학술발표회집.
3. 이호룡, 박종관, 황선근, 이일화 (2005), “포장궤도 모르터 충전 성능 확보를 위한 토목섬유의 적용”, 한국철도학회 추계학술발표회집.
4. 이일화, 이희업, 이준석, 이진욱 (2005), “궤도 무보수화를 위한 시멘트모르터충진형 포장궤도의 개발”, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
5. Etsuo Sekine and Katsumi Muramoto (1995), “Bearing Capacity of Actual Existing Roadbed”, RTRI Report, Vol.9, No.7.
6. Makoto Ishida, Shigeru Miura, Akiko Kono (1997), “The Influence of Track Stiffness on Track Dynamic Behaviour”, QR of RTRI, Vol.38, No.3.
7. “超速硬性セメントアスファルトグラウトおよびコンクリートの諸特性と施工上の諸問題に関する研究”-てん充道床軌道用- (1975), 日本國有鉄道 鉄道技術研究所.
8. “てん充道床軌道の耐久性試験” (1977), 日本國有鉄道 鉄道技術研究所.
9. 安藤勝敏 (1997), “土路盤上省力化軌道の支持構造とその設計に関する研究”.
10. 堀池高広外 3人 (2003), “レール継目部の沈下対策工法の開発”, RTRI REPORT, Vol.17, pp.17-22.
11. 小西俊之外 2人 (1995), 土路盤上省力化軌道の軌道沈下調査, 土木学会第50回学術講演会, pp.584-585.
12. 近藤隆士, 既設線省力化軌道のすすめ方, 鉄道線路, pp.75-78.
13. 小林悟外 1人, てん充道床軌道の施工条件, pp.22-26.
14. 小関昌信外 3人 (1995), “低廉型既設線用舗装軌道の開発”, RTRI REPORT, VOL.9, pp.25-30.
15. 中山光夫 (1989), “浜松高架舗装軌道の保守管理”, 新線路, pp.7-9.
16. Katsutoshi ANDO外 4人 (1995), “新軌道構造の技術的経済的可能性”, RTRI REPORT, VOL.9, pp.55-60.
17. 江本学 (1996), “既設線用道床強化軌道の開発”, 新線路, pp.26-28.