모형실험을 통한 고정 및 이동하중 재하 방법에 따른 노반 변형거동 비교

A Comparative of Ground Stress with Difference of the Fixed Point Loading and Moving Wheel Loading

최찬용[†] · 신은철¹ · 엄기영² · 신민호²

Chan-Yong Choi · Eun-Chul Shin · Ki-young, Eum · Min-ho, Shin

Abstract In this paper, it was compared the characteristics of the stress and settlement that occur from a track on the ground using a model test and has quantitatively analyzed the difference based on stress path and effect of the rotation of principal stress. Under identical roadbed conditions, the settlement generated by moving wheel loads were found to be 6 times and 3 times larger than that from static loads and cyclic loads, respectively. The deviator stress affecting shear deformation and the length of stress path generated by moving loads were twofold or greater increase than those by static loads. Furthermore, the stress path generated by moving loads was approached more closely to Mohr-Coulomb failure criteria compared to that by static loads. Also, it was found that ballasted track was occurred about 60% of maximum stress at 40° of the rotation angle of principal stress and was affected with rotation of principal stress with moving wheel loading condition.

Keywords : Ground stress, Settlement, Stress path, Moving wheel loading, Model test

초 록 이 논문에서는 모형토조 실험으로 하중을 재하하는 방법에 따라 응력과 침하특성을 비교하였으며, 하중재하 방법의 차이를 정량적으로 평가하기 위하여 응력경로와 주응력 방향의 회전영향을 평가하였다. 실험결과 동일 시험조건에서 하중재하 방법에 따라 침하량과 토압이 달라지며, 이동하중의 경우 고정된 지점에서의 정적하중보다 침하량이 약 6배, 반복하중보다 약 2배 이상 크게 발생하였다. 응력경로에서도 고정된 지점에서의 반복하중보다 응력경로의 길이(L)는 2배 이상이 길고 전단변형에 영향을 주는 축차응력도 약 2배 이상 크게 나타났다. 또한, 도상자갈이 있는 궤도에서의 이동하중의 경우 주응력 방향의 회전각이 약 $\Delta\theta=40^\circ$ 최대 응력의 약 60%정도 발생하고 있으며, 주응력 방향의 회전에 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 지중응력, 침하, 응력경로, 이동하중, 모형실험

1. 서 론

궤도를 지지하고 있는 노반은 궤도구조의 중량과 열차하중을 지지하는 기초이자 선로를 구성하는 중요한 요소이다. 특히 고속화에 대응하기 위해서는 노반은 충분한 강도를 가져야 하고 견고하여야 하며 열차의 반복하중에 의한 점진적인 궤도파괴에 저항할 수 있는 구조이어야 한다.

반복하중을 받는 노반의 파괴 메커니즘과 누적 소성변형에 대한 연구는 철도나 도로설계에서 경제적인 설계와 유지보수 계획을 수립하는데 매우 중요한 인자로 평가되고 있다.

Shackelf[9]은 반복하중을 받는 노반재료의 누적소성변형에 영향을 주는 주요인자로 는 누적소성 전단변형, 압밀, 다짐 정도에 의한 것이라고 발표한 바 있다.

일반적으로 교통하중을 받는 지반의 거동은 실제 현장에서 측정된 결과가 가장 정확하지만, 현장계측은 공간적, 시간적 제약과 비용문제로 많은 실험을 하기에는 어려움이 따른다. 따라서 이러한 한계성을 보완하고자 실내에서 상사성(Similarity)에 근거한 모형실험을 많이 실시하고 있다.

모형실험에서 가장 보편적으로 사용하는 하중재하 방법은 고정된 지점에서 정적하중 또는 반복하중으로 하중을 재하시켜 지반의 응답특성을 평가하고 있다. 그러나 이러한 하중재하 방법은 동일한 지점에서 하중을 재하하기 때문에 교통하중과 같이 하중이 이동하는 경우에는 실제 고정된 지점에서의 하중조건과 다른 거동을 보이며, 지반내부의 응력거동은 매우 복잡하게 거동하게 된다[1,2,4,5].

이동하중에 대한 연구는 도로의 포장분야에서 포장층의 균열의 진전도 평가와 포장설계 최적화를 위하여 많은 연구가 진행되었다[2,4,6,11]. 영국 노팅햄 대학교에서는 이동하중과 동일한 하중을 모사하기 위하여 가속시험기를 이용하여 포장 구조체의 균열거동과 소성변형을 평가하여 많은 연구결과들을 발표한바 있으며, 동일한 지반조건에서 고정된 지점

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 철도구조연구실
E-mail : cychoi@krii.re.kr

¹인천대학교 토목환경공학과

²한국철도기술연구원 철도구조연구실

에서의 정적 또는 반복하중보다 이동하중이 더 큰 잔류변형이 발생된다고 보고한 바 있다[2,10]. 이러한 이유로 Ledbetter[4]은 이동하중의 경우 고정하중과 달리 지반내부의 응력상태는 인장과 압축에 의해 전단변형이 커지기 때문이라고 하였다. 이와 같이 도로에서는 이동하중에 대한 많은 연구실적을 통해 잔류변형특성을 고려한 재료의 사용 연수 평가와 설계개념을 도입하고 있다. 이에 비해 철도에서는 아직까지 이동하중에 대한 연구실적이 매우 미흡하다고 볼 수 있다. 일본에서는 Momoya 등[5]이 도상자갈을 제외한 레일과 침목을 체결한 축소모형실험을 통해 동일한 실험조건에서 고정하중으로 재하하는 것보다 이동하중으로 재하한 경우가 잔류침하량이 약 3~6배 크다고 발표한 바 있다. 즉, 하중 재하 방법에 따라 잔류변형의 차이가 있으며, 철도와 같이 하중이 이동하는 경우에는 이동되는 하중 특성을 고려하여 노반 설계가 되어야 보다 정확한 설계가 될 수 있다고 제안하였다.

따라서, 이 논문에서는 축소모형실험을 통해 레일과 침목을 체결하고 자갈도상이 포함된 궤도와 노반으로 모형단면을 조성하여 하중재하 방법에 대한 차이를 응력경로와 잔류변형 차이로 정량적으로 평가하였다. 또한, Bousinessq's 반무한 탄성이론에 근거하여 궤도조건을 고려한 이동하중에 대한 주응력 방향의 회전영향을 실험 값과 비교하였다.

2. 이동하중에 의한 지반내 거동

2.1 고정하중과 이동하중의 지반내 응력특성

Brown 와 Brodrick[2]은 노팅햄 대학에 구축되어 있는 고속 윤하중 실험 장비를 이용하여 노반 흙의 잔류변형과 회복변형 특성을 비교한 결과, Fig. 1에서와 같이 동일한 지반 조건에서 이동하중과 반복하중과의 차이가 분명히 발생하고 있으며, 이동하중이 반복하중보다 약 3~4배 잔류변형이 더

Fig. 1 Comparisons of wheel loading and repeated plate loading for field rutting performance[2]

크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 이동하중의 경우 주응력 방향 회전영향에 의해 전단변형이 더 크게 발생하여 잔류변형이 커진다고 설명하였다. Wong 등[7]은 이동하중에 의한 잔류침하량을 평가하기 위하여 실험한 결과 동일한 조건에서 이동하중에 의한 잔류침하량이 약 2배 이상 커진다고 발표하였다.

Ledbetter[4]은 이동하중에 대하여 지반의 응력상태를 응력경로로 평가한 바 있다. Fig. 2는 이동하중에 대한 응력경로를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 일반적으로 고정된 지점에 수직하중을 받는 경우에는 압축거동만 받아 응력경로상에서 A→D으로 거동하지만, 이동하중의 경우 응력경로상에서 보면 A→B→C→D으로 압축뿐만 아니라 인장도 받고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 이동하중의 경우 수직하중에서의 하중 경로와 달리 인장거동을 하기 때문에 전단변형과 소성변형이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2 Deviator stress, q, vs. mean normal stress, p, stress space for a moving wheel load[4]

이러한 이동하중에 대한 지반내의 응력상태를 보면 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 그림에서와 같이 임의의 지점에서 응력상태는 임의의 지점에 하중이 도달하기 전에는 수직응력보다 수평응력이 더 커지며($\sigma_v < \sigma_h$), 하중이 도달하게 되면 수직응력이 수평응력보다 커지게($\sigma_v > \sigma_h$)가 되어 응력상태는 하중이 이동하면서 변화하게 된다[10].

2.2 축소모형 실험

2.2.1 이동하중 재하 장비

이동재하 실험장비는 하중재하부와 제어부, 그리고 토조로 크게 3부분으로 이루어져 있다. 이동재하 실험장비의 재하하중은 최대 50kN으로 설계 되어 있으며, 하중을 직접 받는 롤러 부분은 최대 150kN까지 하중을 받을 수 있도록 설계되어 있다. 하중재하주파수는 최대 5Hz까지 재하할 수 있으며, 하중 형태는 정현파, 삼각형파, 사각형파 등 다양한 하중파형을 재현할 수 있다. 이러한 일련의 모든 구동은 구동 프로그램에서 제어 가능하도록 설계되어 있다.

토조의 크기는 2.2m(L)×0.6m(H)×0.8(W)이며, 재하하중에

Table 1 Specification of moving wheel loading system

Components	Specification
Main body frame of base	- Size : 3.5m(Length)×1.5m(width)×2.0m(Depth) - Capacity of loading and material: 150kN, H Beam 200×200
Reacting frame of vertical moving wheel loading	- Size : 3.5m(Length)×1.5m(width)×0.5m(depth) - Capacity of reaction and material: 150kN, H Beam 200×100
Soil tank	- Reaction frame Size : 2.2m(Length)×0.6m(Width)×0.8m(Depth) - Capacity and material of reaction frame : 150kN, H Beam 200×100 - Type : strengthened acrylic face, drainage valve bottom, variety under the loading state≤0.01mm
Loading wheel roller	- 150mm(Diameter)×250mm(Width), - Capacity of vertical loading : 500kN
Performance	- Capacity of loading: 0~50kN(Capacity of load cell: 50kN) - Capacity of moving loading: 50kN, - Max. moving wheel velocity: 2km/hr - Max. loading frequency: 5Hz, - Types of loading: static, sine, triangle, moving

Table 2 Soil properties used for loading tests

Water content (%)	Gs	Sieve analysis test				Atterberg limit tests			U.S.C.S.	Compaction test	
		Passing #200(%)	Effective size(mm)	C _u	C _c	LL(%)	PL	PI		γ (kN/m ³)	ω_{opt} (%)
11.3	2.74	1.5	0.3	6.67	0.66	23.9	22.4	1.5	SP	20.1	10.2

Fig. 3 Rotation of principal stress axes beneath a rolling wheel load[11]

의해 토조의 변형이 생기지 않도록 벽체를 가로, 세로빔(Beam)으로 보강하였다. 또한 전면부는 토조의 내부를 확인할 수 있도록 두께(t) 20mm의 투명 아크릴판으로 제작하여 변형형태 등을 관찰할 수 있도록 하였다.

Table 1은 이동재하실험장비의 사양과 특징이다. 표에서와 같이 하중재하는 유압실린더와 로드셀, 지그로 구성되었으며 제어프로그램을 통해 다양한 형태의 하중을 재현하고 로드셀(Loadcell)을 통해 실시간으로 확인하고 저장할 수 있도록 하였다. 하중이 재하 되는 풀리는 이동하중 재하시 편심하중과 이동 중에 방향성을 확보하기 위하여 원통 형태로 제작하였으며 크기는150mm(직경)×250mm(폭)으로 제작하였다.

Fig. 4 Stress paths under approaching and departing wheel[4]

Fig. 3은 이동재하실험장비와 계측기가 설치된 지점의 단면이다. 본 연구에 사용된 계측기는 토압계, 침하계를 설치하였으며 각 계측기로부터 출력된 신호를 데이터 수집장비인 EDX1500-A를 통하여 변위와 토압을 측정하였다.

2.2.2 노반재료의 기본물성시험

노반재료의 기본물성시험 결과를 요약하면 Table 2과 같다. 표에서와 같이 비중(G_s) 2.74, 액성한계(LL) 23.9%, 소성한계(PL) 22.4%, 소성지수(PI)는 1.5이며, 입도분포시험결과 균등계수(C_u) 6.7, 곡률계수(C_c) 0.6, 200번체 통과율 1.5%으로 통일 분류법에 의해 흙을 분류하면 SP로 분류되었다.

다짐시험결과 최대건조단위중량(γ_{max}) 20.1kN/m³, 최적함수비(ω_{opt}) 10.2%로 나타났다.

Fig. 5 Overview of the moving wheel equipment and location of measurement sensors

3. 실험결과

3.1 하중 재하 방법에 따른 침하특성

Fig. 6은 하중재하에 따른 중앙 침목(#5)에서 측정된 침목의 침하곡선이다. 그림에서와 같이 실험시 하중을 어떤 식으로 재하하느냐에 따라 침하량의 차이가 크게 다르다는 것을 알 수 있으며, 고정된 지점에서의 정적과 반복하중으로 재하한 경우에는 약 2.23mm, 7.1~7.4mm로 반복하중이 정적하중보다 약 3배 이상 크게 발생하였으며, 이동하중의 경우에는 10.7~12.7mm로 반복하중보다 약 2배, 정적보다는 약 6배 더 큰 침하가 발생하였다. 이러한 결과를 볼 때 하중재하 방법에 따라 침하량의 차이가 확연히 달라지며, 실제 철도하중과 같이 하중이 이동하는 경우 고정된 지점에서의 하중재하 평가보다는 이동하중으로 평가하여야 보다 정확한 노반의 거동을 평가될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6(b)은 노반을 조성한 후 실험이 완료된 후 지반을 해체하지 않고 동일한 실험단면에서 순차적으로 하중조건을 변화시켜가며 실험한 결과이다. 실험은 반복과 이동하중 조건으로 하중 크기와 하중재하주파수를 변화시켜가며 실시하였다. 그림에서와 같이 반복하중 15kN에서 하중재하주파수를 1Hz에서 3Hz로 증가하였을 때 침목의 침하량은 매우 미미하게 변화하였으나, 하중을 30kN으로 2배 증가시켰을 때는 침하량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이후 반복하중 30kN에서 이동하중 15kN으로 감소시키면 하중이 감소한 만큼 침하도 같이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 침하거동은 하중크기에 따라 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 하중재하횟수(N)에 따른 침하 영향을 보면 반복하중에서는 그 영향이 미미하였으나, 이동하중에서는 이동하중 횟수가 증가함에 따라 침하가 점진적으로 증

Fig. 6 Variation of plastic settlement at center sleeper (#5) with each test condition

가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 모형실험을 할 때 이러한 차이를 분명히 인지하고 평가하여야만 실제 지반거동을 평가할 때 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 이후 이동하중 조건에서 하중을 30kN으로 증가하게 되면 반복하중 조건보다 더 급격한 침하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 즉, 노반의 침하를 지배하는 요인은 하중재하주파수 보다는 하중크기가 더 크다고 것을 알 수 있다. 이는 유럽철도연맹(UIC)에서도 궤도 보수에 영향을 주는 인자를 검토한 결과 동일한 조건에서 축중 20kN증가할 때 궤도의 파괴 정도는 약40% 발생하고, 열차속도 20km/h 증가하였을 때 파괴는 25% 증가하여 속도영향보다 하중의 영향이 더 지배적이라고 하는 것과 같은 결과이다.

Fig. 7은 비 반복법으로 실험한 반복재하 횟수에 따른 실험조건별 지중 침하특성이다. 그림에서와 같이 고정된 지점에서 반복하중의 경우 재하횟수가 증가함에 따라 노반의 침하변화는 미미하였으나, 이동하중의 경우 이동 재하횟수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 이동하중의 경우 노반 최상층부인 3층에서의 침하량이 약 1.86mm로 반복하중의 0.38mm보다 약 5배 이상 침하가 더 발생하였다. 이러한 결과는 Momoya 등[5]이 모래로 수행된 실험 결과의 3~6배와 유사한 결과이다. 따라서 노반과 침목

Fig. 7 Variation of plastic settlement at each soil layer with test conditions (Not-iterative Test)

의 침하 모두 하중 재하 방법에 따라 침하거동은 매우 달라질 수 있으며, 열차하중과 같이 하중이 이동하는 경우에는 고정지점에서 하중을 재하하는 방법과 다르게 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 열차하중에 의한 잔류침하량을 평가할 때는 하중재하 방법의 차이를 명확하게 이해하여 실험을 실시하여야 보다 정확한 평가를 실시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 하중 재하 방법에 따른 노반 응력 특성

앞서 하중재하 방법에 따른 지반내의 침하거동이 다르게 변화한다는 것을 확인하였다. 이러한 차이를 보다 정량적으로 평가하기 위하여 응력상태를 비교하였다. Fig. 8(a)는 하중 재하를 고정된 지점과 이동하중 조건에서 지반내의 응력상태를 비교한 것이다. 특히 레일을 체결한 궤도조건에서는 하중이 재하되는 부분만 변위가 집중되어 침묵이 뜨게 되는 들뜸 현상이 발생하여 응력이 작게 전달되는 특징을 가지고 있다. 따라서 레일을 체결한 경우에는 노반의 거동이 작게

(a) Fixed loading case

(b) Moving wheel loading case

Fig. 8 Different of stress in soil mass with fixed point loading and moving wheel loading

평가될 수 있기 때문에 주의를 하여야 한다고 알려져 있다 [1,3]. 이와 달리 하중이 이동하는 경우에는 노반내부에서의 응력거동은 압축, 인장, 전단응력이 동시에 복합적으로 작용하여 3차원적인 거동을 보여 고정하중과 다른 응력상태에 놓여지게 된다.

Fig. 9는 반복법과 비 반복법으로 실시한 각 실험조건별 2층에서의 토압특성이다. 침하거동과 마찬가지로 하중재하 방법에 따라 토압 크기가 달라지는 것을 볼 수 있으며 가

(a) Non-iterative test

(b) Iterative test

Fig. 9 Earth pressure for different test condition

장 큰 토압을 받는 조건은 이동하중이며, 가장 작게 발생된 것은 고정된 지점에서의 반복하중으로 실험한 것이다. 특히, 반복하중의 경우 하중재하주파수가 증가함에 따라 오히려 토압 크기가 감소하고 있으며, 이러한 결과는 앞서 언급한 레일이 체결된 궤도 실험조건에서는 하중재하주파수가 증가하게 되면 침목의 들뜸이 더 많이 생겨 이로 인해 하중이 노반으로 충분히 전달되지 않기 때문에 노반의 토압이 적게 발생된 것이라고 볼 수 있다.

이동하중의 경우 하중을 이동하면서 반복하중을 주는 경우와 정적하중과 같이 지속하중을 주는 방법으로 재하 방법을 다르게 하여 실험하였다. 2가지 실험조건(지속하중과 반복하중) 모두 거의 유사한 크기의 토압이 발생하는 것을 볼 수 있다.

반복법으로 실험한 결과를 보면, 앞서 실험한 비 반복법과 마찬가지로 하중을 재하시키는 방법에 따라 토압 크기가 다르며, 토압이 가장 크게 발생된 하중 조건은 이동하중의 지속하중(30kN)의 실험조건이고 가장 작게 발생된 실험은 고정된 지점에서의 반복하중(15kN)의 실험조건이었다. 반복하중의 경우 이동하중조건보다 약 2배 이상의 토압 차이를 보이고 있으며, 현재 실내에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 레일과 침목을 체결하여 실험방법은 하중 방법의 차이로 인해 작게 평가될 수 있기 때문에 이를 고려하여 실험하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 10 Stress path of various test conditions at 3rd layer

Fig. 11 Stress path response for different cycles

실험단면 3층에 설치된 토압계를 이용하여 수평토압(σ_h)과 수직토압(σ_v)을 측정하여 축차응력(q)과 중간평균응력(p)을 구하였다.

Fig. 10은 반복하중과 이동하중에 대하여 응력경로를 표시한 그림이다. 파괴포락선은 삼축압축시험을 통해 점착력(c)은 16.8 kN/m^2 이고 파괴각(ϕ)은 31° 의 조건으로 파괴포락선을 작도하였다. 그림에서와 같이 이동하중의 경우 반복하중 실험보다 응력경로의 길이(L)는 2배 이상이 길고, 파괴포락선에 더 가깝게 접근하고 있는 것을 볼 수 있으며, 전단변형에 영향을 주는 축차응력도 반복하중보다 약 2배 이상 크게 나타났다. 이러한 응력경로의 길이(L)와 축차응력(q)이 2배 이상 크다는 것은 전단변형과 압축변형이 약 2배 이상 크다고 볼 수 있다. 따라서 동일한 하중크기 일지라도 이동하중이 반복하중보다 더 큰 응력을 받고 있기 때문에 노반내의 전단변형이 증가하여 소성 침하량도 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 반복하중에서 하중주파수 1Hz 실험 조건으로 반복재하횟수(N)=20회와 $N=2,560$ 회 때, 이동하중 왕복횟수 $N=20$ 회와 $N=640$ 회 때의 응력경로이다. 그림에서와 같이 반복하중의 경우 거의 미미한 변화를 보이고 있으나, 이동하중에서는 왕복횟수에 따라 응력경로의 기울기(M)와 길이(L)가 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이동하중의 경우 왕복횟수가 증가함에 따라 초기보다 응력경로의 길이는 약 26%, 기울기는 약 8%정도 증가하였다.

3.4 이동하중에 의한 주응력 방향의 회전 영향

앞서 연구에서와 같이 고정된 지점에서의 하중 재하방법과 이동하중 방법은 노반에 서로 다른 응력상태와 침하 거동을 보이며 이동하중은 고정하중보다 약 2배 이상 크다는 것을 확인한 바 있다. 이러한 이유로는 이동하중은 고정하중과 달리 하중이 이동하여 주응력 방향이 회전하기 때문에 응력중첩에 의해 응력상태가 변화하고 응력이 커진다고 알려져 있다. 이러한 영향을 검토하기 위하여 도상자갈이 포함된 궤도조건에서 이동하중에 의한 주응력 방향의 회전 영향에 대하여 분석하였다.

Momoya 등[5]는 이동하중에 의한 주응력 방향이 회전하는 영향을 보기 위하여 Fig. 12에서와 같은 실험단면으로 평

(a) Strip load moving directly on the ground surface

(b) Wheel loading moving on rail supported by sleeper

Fig. 12 Stress condition in the ground [5]

가하였다. 도상자갈을 제외한 궤도조건에서는 하중이 노반에 등분포 하중으로 작용하지 않고 침목을 통해 직접 노반에 전달되기 때문에 주응력 방향의 회전 영향이 미미하다고 평가한바 있다. 그러나 이는 도상자갈을 제외하여 평가하였기 때문에 실제로는 도상자갈이 있는 경우에는 노반에 등분포 하중이 작용하기 때문에 다른 결과가 나타난 것으로 판단된다.

본 논문에서는 도상자갈을 포함한 궤도조건으로 이동하중에 대한 주응력 방향의 회전 영향을 검토하였다. 또한, Boussinesq의 반무한 탄성이론에 의한 식 (1)을 이용하여 주응력 방향의 회전을 이론과 비교하였다. Boussinesq 탄성이론에서 가정된 변수는 균등하중(p)은 68kPa, 균등하중의 크기(2a)는 10cm하여, 이를 노반에 등분포하중으로 재하 하였으며, 노반의 깊이(z)를 26cm로 가정하였다.

$$\begin{aligned}\sigma_z &= (\theta_0 + \sin \theta_0 \cos 2\theta_a)p \\ \sigma_x &= (\theta_0 - \sin \theta_0 \cos 2\theta_a)p/\pi \\ \tau_{xz} &= (\sin \theta_0 \cos 2\theta_a)p/\pi \\ \theta_0 &= \theta_1 - \theta_2, \quad \theta_a = (\theta_1 + \theta_2)/2\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, σ_z 는 수직응력, τ_{xz} 는 z방향의 전단응력, θ_0 , θ_1 , θ_2 , θ_a 는 회전각이다.

Fig. 13은 이 논문에서 적용한 모형실험 단면 구조이다. 그림에서와 같이 이동하중은 중앙부에 하중이 수직으로 작용될 때 최대 주응력(σ_{1max})이 발생하고 하중이 중앙에서 멀어짐에 따라 주응력(σ_1)과 회전각(θ)이 작아지게 된다.

Fig. 14는 이동하중에 따른 최대 주응력과 회전각의 정규화 곡선이다. 이동하중의 경우 주응력 방향의 회전각이 약 $\Delta\theta = 40^\circ$ 에서도 최대 응력의 약 60% 정도 발생하고 있으며,

Fig. 13 Stress condition in the ground in this study

Fig. 14 Relationship between angle and normalized maximum principal stress [$\sigma_1/\sigma_{1max} |_{\Delta\theta=0}$]

이는 이동하중에 의한 주응력 방향의 회전 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 도상자갈을 제외한 기존 연구에서는 주응력 방향의 회전 영향이 작게 평가되었지만 실제 도상자갈이 포함된 자갈궤도의 경우에는 도상자갈이 노반에 등분포 하중으로 작용되기 때문에 주응력 방향의 회전 영향이 더 크게 발생하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 모형토조 실험으로 하중을 재하하는 방법의 차이에 따라 응력과 침하특성이 달라지는 것을 비교하였으며, 정량적으로 평가하기 위하여 응력경로를 이용하였다. 또한 이동하중에 대한 주응력 방향의 회전영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동일 시험조건에서 하중재하 방법에 따라 침하특성이 달라지며, 이동하중 조건에서의 침하량은 고정된 지점에서의 정적하중보다 약 6배, 반복하중보다 약 2배 이상 크게 발생하였다.

(2) 이동하중의 경우 고정된 지점에서의 반복하중 실험보다 응력경로 길이(L)는 2배 이상이 길고, 파괴포락선에 더 가깝게 접근하였으며, 전단변형에 영향을 주는 축차응력(q)도 고정된 지점에서의 반복하중보다 약 2배 이상 크게 나타났다. 이러한 응력경로 길이(L)와 축차응력(q)이 2배 이상

크다는 것은 전단변형과 압축변형이 약2배 이상 크다는 것을 의미한다.

(3) 도상자갈이 있는 실험조건에서의 이동하중에 대한 주응력 방향의 회전영향을 검토한 결과 이동하중에서 반복하중과 지속하중 모두 주응력 방향의 회전각이 약 $\Delta\theta = 40^\circ$ 에 서로 최대 응력의 약 60%정도 발생하고 있으므로 주응력 방향의 회전에 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] C.Y. Choi (2008) Prediction of Plastic settlement for railway roadbed under Moving single Wheel Load, Ph D thesis, Dept. of Civil and Environmental System Engre., University of Incheon, Incheon, South Korea (In Korea).
- [2] S.F. Brown, B.V. Brodrick (1999) 25year's experience with the pilot-scale Nottingham Pavement Test Facility, Proc. Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing. Reno, NV.
- [3] S.K. Hwang, S.H. Lee, C.Y. Choi (2002) Characteristics of Displacement of the Reinforced Roadbed Material with Cycle loading, *Journal of the Korean Society for Railway*, 5(2) pp. 83-89 (In Korea).
- [4] R.H. Ledbetter (1977) General deformation(elastic and inelastic)and stress distribution theory in soils, Technical Report S-77-10, Soils and Pavements Laboratory, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 117 pages.
- [5] S. Momoya, E. Sekine, F. Tatsuoka (2005) Deformation characteristics of Railway Roadbed and Subgrade under Moving Wheel Load, *Japanese Geotechnical Society(JGS), Soil and Foundations*, 45(4), 99-118.
- [6] C.L. Monismith, N. Ogawa, C.R. Freeme (1975) A Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading, *Transportation Research Record* 537, Washington D.C., TRB, pp. 1-17.
- [7] R.K.S. Wong, J.R.F. Arthur (1986) Sand Shear by Stresses with Cyclic Variations in Direction, *Geotechnique*, 36(2), pp. 215-226.
- [8] D.M. Wood (1982) Laboratory Investigations of the Behavior of Soils under Cyclic Loading: A Review. *Soil Mechanics-Transient and Cycle Loads*, G.N. Pance and O.C. Zienkiewicz, ed., John Wiley and Sons Inc., New York, NY, pp. 513-582.
- [9] J.W. Pappin (1979) Characteristics of granular material for pavement analysis, PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, England.
- [10] B. Shackel (1973) Repeated Loading of Soils, *Australian Road Research*, 5(3), pp. 22-49.
- [11] E. Tutumluer (2005) Stress Rotations Due to Moving Wheel Loads and Their Effects on Pavement Materials Characterization, OMP Brown Bag Seminar Presentation, June.

접수일(2010년 11월 3일), 게재확정일(2010년 12월 20일)