

## 반복하중에 따른 철도 노반재료의 소성침하예측

### Prediction of Plastic Settlement of Roadbed Materials through Cyclic Loading Test

최 찬 용<sup>1\*</sup> Choi, Chan-Yong

신 은 철<sup>2</sup> Shin, Eun-Chul

강 현 회<sup>3</sup> Kang, Hyoun-Hoi

#### ABSTRACT

If the railways consisting of soil subgrade is applied to repetitive loading, elastic deformation and plastic deformation will occur at the same time. So the repeat traffic loading condition should be considered to predict the long-term deformation on railway roadbed. In this study, laboratory data from the repeated load triaxial tests and cylinder model test were used to predict accumulated settlement on railway foundation and results were analyzed based on the nonlinear models and stress state considered. It has proposed predict model using power function model on plastic settlement of roadbed materials.

#### 요 지

흙노반으로 이루어진 철도 구간의 경우 반복적인 하중재하에 따라 탄성상태로 복귀하는 회복변형과 영구 변형이 동시에 발생한다. 따라서 열차하중이 반복적으로 작용하는 철도하부 지반에서의 변형예측을 위하여 반복하중에 대한 장기변형 예측이 필요하다. 본 논문에서는 최적함수비 범위에서의 최적함수비의 일반토사를 대상으로 진동삼축압축시험과 원형토조시험을 통해 반복하중에 따른 변형 특성을 비교하였으며, 파워함수 모델을 이용하여 각 재료별 축차응력과 반복횟수를 고려한예측모델식을 제안하였다.

**Keywords** : Plstic settlement, Repeat traffic loading, Railway roadbed

#### 1. 서 론

교통하중이 작용하는 기초지반의 성능과 철도 하부 지반에서의 변형예측을 위해서는 교통하중에 대한 장기변형 예측이 필요하다고 볼 수 있다(박성완 등, 2010). 일반적으로 노반의 지지강성은 겨울철에 지반이 동결됨에 따라 가장 크고, 봄철 동결된 지반이 융해되거나 또는 강우에 의해 노반이 포화될 때 가장 작은 지지강성을 가지게 된다고 알려져 있다. 따라서 철도의 경우, 장기간의 반복하중에 의해 자갈이 노반에 관입되고 배수가 불량하게 되어 노

반이 연약화되어 분니 등이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 콘크리트층을 두거나 상부노반위에 강화노반층을 설치하여 도상자갈이 관입되는 것과 우수 등에 의해 상부노반이 강성을 저하시키는 것을 방지하고 있다. 강화노반 재료의 요건은 지지력을 강화시키면서 원활한 배수가 될 수 있는 재료로 사용되고 있다. 그러나 고속철도를 제외하고 나머지 선로에서는 아직까지 강화노반층이 설치되지 않고 있는 구간이 많다. 이러한 구간에서는 반복하중에 의한 노반재료는 반복적인 하중특성과 낮은 범위의 주응력이 회전하면서 지중에 작용하고 있어 변형 후 다시 탄

1\* 정희원, 한국철도기술연구원, 고속철도인프라시스템연구단 선임연구원 (Member, Senior Researcher, High-Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, E-mail: cychoi@krri.re.kr)

2 정희원, 인천대학교, 토목환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Department of civil and Environmental Engineering, University of Incheon)

3 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Department of civil and Environmental Engineering, University of Incheon)

성 상태로 복귀하는 회복변형과 복원되지 않는 영구변형이 동시에 발생하게 된다. 따라서 철도 하부지반의 유지관리 및 경제적 분석을 위해서는 반복하중 조건에서의 장기 변형 평가기법에 대한 중요성이 대두되고 있다. 따라서 본 논문에서는 철도노반재료로 널리 활용하고 있는 양질의 재료를 분류하여 이를 진동삼축압축시험과 원형토조시험으로 반복하중에서의 장기 침하거동을 파악하고 이를 이용하여 파워모델 식을 이용하여 장기변형을 예측모델 식을 제안하였다.

## 2. 반복하중에 대한 노반의 거동

교통하중과 같이 이동하중을 받는 지반의 소성변형 특성은 매우 복잡한 거동을 일으키며 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 실험실에서 소성변형을 평가하기 위해서는 반복재하횟수, 재하하중에 의한 응력상태, 재하된 지반의 응력비 중 하나는 고려하여야 한다고 알려져 있다(김동수 등, 2005). 일반적으로 반복하중에 의한 노반재료의 변형특성은 반복적인 하중특성과 낮은 범위의 주응력이 회전하면서 지중에 작용하고 있어 변형 후 다시 탄성 상태로 복귀하는 회복변형과 복원되지 않는 영구변형이 동시에 발생하게 된다고 알려져 있다(Lekarp et al., 2000; 박성완 등, 2010). 그림 1과 같이 회복변형은 도로의 설계에서 장기적인 관점에서 공용성을 예측하는 매우 중요한 요소이다.

표 1은 기존 노반재료의 소성변형에 대하여 다수의 연구자들이 제안한 노반재료의 예측 모델을 정리한 표이다. 표에서와 같이 대부분 파워함수로 표현되는 예측 모델식을 이용하고 있는 것을 볼 수 있다.

소성변형에 영향을 주는 인자에 대하여 Barsdale(1972)은 소성변형률은 축차응력에 비례하고 구속응력에 반비례한다고 하였으며, 응력의 증가함에 따라 소성변형이 급격히 발생되며 구속응력이 증가할때 천천히 증가한다고 발표하였다(Morgan, 1966; Wood, 1982). 이후 Brown and Hyde(1975)는 영구변형의 영향을 받는 중요 인자로는 축차응력과 구속응력으로 구성된 응력비(Stress Ratio)에 의해 주로 지배된다고 보고하였으며, Pumphrey and Lentz (1986) 등은 동적축변형(Dynamic Axial Stress)과 구속압의 비(Stress Ratio)로 소성변형 특성을 구하였으며, 응력비가 커짐에 따라 영구 축변형도 커진다고 보고하였다. 또한, Sweere(1990)은 반복응력( $\sigma_{Cycle}$ )과 구속압( $\sigma_3$ )의 응력비(Stress Ratio)로서 반복재하횟수와 응력비의 크기에 따른 축변형에 대하여 실험을 실시하여 소성변형 특성을 관찰하였다.

식 (1)은 반복하중을 받는 지반재료의 누적영구변형률( $\epsilon_p$ )에 대한 특성을 나타내는 가장 일반적인 모델로써 파워모델로 사용하고 있으며, 초기 하중반복횟수에서 영구 변형률은 많이 발생되나 그 이후의 하중반복횟수에서 영

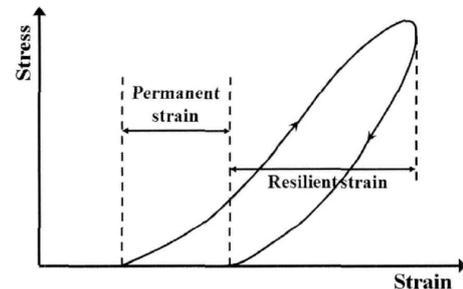


그림 1. 지반재료의 반복하중에서의 응력-변형률의 관계(Lekarp et al., 2000; 박성완 등, 2010)

표 1. 노반재료의 소성변형에 대한 예측 모델(최찬용, 2008)

제안	소성모델 경험식	변수	제안	소성모델 경험식	변수
Suiker Ionescu et al. Jeffer & Marich Barksdale	$S_N = a(1 + k \log N)$	a, k	Indraratna et al.	$S_N = aN^b$	a, b
			Li and Selig	$\epsilon_p = AN^b$ $\epsilon_p = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b$	
Lentz & Baladi	$\epsilon_p = a + b \ln N$		Sweere K. Okada	$\rho_{CPT} = AN^b$	$A = a \left( \frac{P}{CBR} \right)$
Thompson et al.	$\log \epsilon_p = a + b \log N$		Wei Zhang et al.	$\epsilon_{PZ} = A^* N^{\alpha} \left( \frac{\sigma_z}{P} \right)^{\beta} (\epsilon_z)^{\gamma}$	A, $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$
Ullidtz	$\epsilon_p = AN^{\alpha} \left[ \frac{\sigma_z}{\sigma} \right]^{\beta}$		Paute et al.	$\epsilon_{i,p} = A \left\{ 1 - \left( \frac{N}{100} \right)^{-B} \right\}$	
Puppala et al.	$\epsilon_p = AN^{\alpha} \left[ \frac{\sigma_{oct}}{\sigma_{atm}} \right]^{\beta}$		Wolff and Visser	$\epsilon_{i,p} = (cN + a)(1 - e^{-bN})$	

구변형률은 증가하는 경향을 보이거나, 반복재하횟수가 증가함에 따라 하중반복횟수에서 영구변형률의 증가량은 감소하는 경향을 보이는 것이 일반적인 노반재료에 대한 소성변형 특성이다. 식 (1)의 파워모델 수식으로 모델계수 b는 응력조건과 밀도에 따라서는 관계가 없고 함수비가 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보이며, 그 변화량은 매우 미미하다고 알려져 있다. 또한, 상수 a는 노반재료의 특성으로 축차응력, 함수비, 밀도, 흙의 종류 등의 변화에 따라 많은 영향을 받는다고 알려져 있다(Li and Selig, 1996; 박성완, 2010).

$$\epsilon_p = a \cdot N^b \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_p$ 는 누적영구변형률(%), N은 반복재하횟수, a, b는 흙의 재료에 따른 상수(a=전대수상의 직선의 절편(N=1), b=전대수상의 직선의 기울기)이다.

본 논문에서 검토한 반복하중에 대한 노반의 소성변형 예측 모델은 식 (2)와 같다. 이 식은 반복응력 작용에서 다양한 미립자를 함유한 흙을 대상으로 많은 시험을 한 결과를 바탕으로 유도되었다(Li, 1994; Li and Selig, 1996). 식 (2)은 응력비는 흙의 축차응력과 정적강도의 비로서 응력비를 구현하였으며, 적용된 반복응력의 횟수와 이 식을 통해 최종적으로 흙의 종류에 따른 누적소성변형률(strain)로 구할 수 있다. 또한 식 (2)은 노상층의 변형을 일으키는 전체 부분에서 변형율로 계산되는 누적소성변형(deformation)을 통해 최종적인 노반의 소성침하량을 구할 수 있다. 식 (2)의 노반재료의 함수비, 건조밀도 등과 같은 물리적인 영향을 나타내는 것은 정적강도( $\sigma_s$ )와 노반 재료의 재료 변수(a, m, b)는 실험을 통해 변수를 구할 수 있도록 하였다.

$$\epsilon_p (\%) = a \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b \quad (2)$$

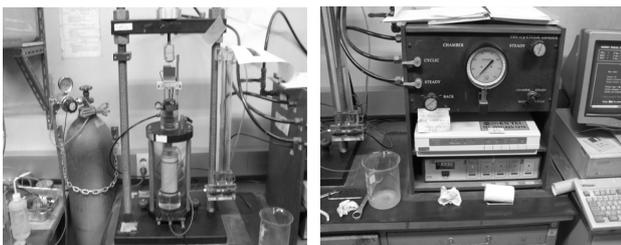


그림 2. 진동삼축압축시험장비

여기서,  $\epsilon_p$ =누적 소성 변형율(strain), N=반복응력의 작용 횟수,  $(\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3)$ =열차 축하중에 의한 흙의 축차응력,  $\sigma_s$ =흙의 압축강도, (a, m, b)=흙 종류에 따른 변수

### 3. 진동삼축압축시험과 원형토조시험

이 논문에서의 사용된 노반재료는 현장에서 손쉽게 구할 수 있는 노반재료를 대상으로 하여 실제 적용가능한 소성침하 모델의 제안을 목표로 하였다. 적용 대상 시료는 사용 가능한 노반재료로 통일분류법으로 분류되는 4개의 시료군을 선정하였다. 선정된 4가지의 시료를 반복하중에 따른 노반의 변형특성을 분석하기위하여 사질토 계열의 시료로 진동삼축 압축시험을 실시하였고, 이 시료와 자갈 계열의 시료를 원형토조 실험에 적용하여 소성변형 모델을 분석하였다. 실험은 공시체 지름 50mm, 높이 100mm의 공시체를 적용하는 진동삼축압축시험과 시료의 입경크기를 고려하여 지름 300mm, 높이 300mm의 원형토조를 이용하여 반복재하시험의 2단계로 하여 진행하였다.

#### 3.1 대상시료의 특성

실험에 사용하는 시료의 기본물성결과는 표 3과 같다. 기본 물성 실험의 결과 최대건조단위 중량은 SW와 SP는 1.76~1.81정도 나타났고, GW와 GP의 자갈계열의 시료는 2.0이상의 단위중량이 나타는 것으로 나타났다. 4.75mm를 기준으로 G계열과 S계열은 통과율이 각각 50%이상과 50%이하로 나타나 재료 선정에 이상이 없음을 알 수 있었다.

#### 3.2 실험조건

##### 3.2.1 진동삼축압축시험

진동삼축압축시험의 공시체는 최적함수비 상태에서 90%의 다짐도로 구성을 하였으며 상부와 하부의 다짐도의 차

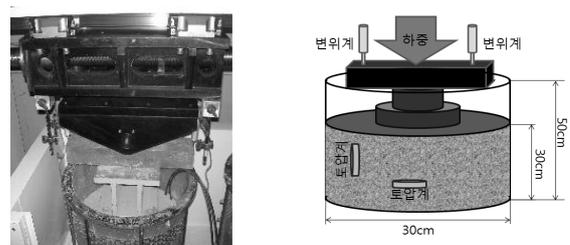


그림 3. 원형토조시험장비

표 2. 시료의 물리적 특성 및 분류(통일분류법 다시 검토, 단위중량 단위)

실험명		SW	GW	GP	SP
입도 분석	Cu	6.4	32	10	14.5
	Cc	1.34	1.20	0.93	0.86
	#200통과율(%)	1.5	0.8	0	0
통일분류법		SW	GW	GP	SP
다짐실험 (D다짐)	최적함수비(%)	16.02	15.4	15.8	17
	최대건조 단위중량( $t/m^3$ )	1.766	2.01	2.12	1.81

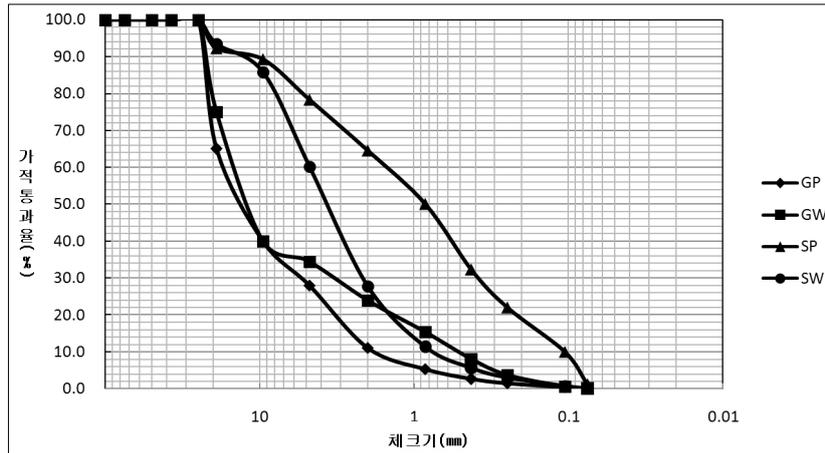


그림 4. 시료별 입도 분포곡선

표 3. 진동삼축 실험 시료 조건

실험명		SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
비중		2,599	2,69	2,48	2,57	2,40	2,85	2,61	2,66	2,81	2,66
입도 분석	Cu	6.4	9.6	13.98	8.82	17	14.5	8.4	4.82	4.90	3.78
	Cc	1.34	1.23	1.01	1.14	2.88	0.91	0.76	0.91	0.82	0.84
	#200통과율 (%)	1.5	4.5	2.1	2.3	4.2	0	0	2.3	2	1.6
다짐실험	$W_{opt}$	16.0	12.3	15.4	16	17	17	13	12.5	15	13.2
	$\gamma_{dmax}$	1.77	1.86	1.84	1.72	1.81	1.81	1.72	1.78	1.68	1.81

표 4. 진동삼축 실험조건

흙의 종류	축차응력 (kPa)	반복횟수(속도)	비고
SP	10, 15, 20	500(3hz)	최적 함수비조건 시료의 종류 : 각 5종
SW	10, 15, 20	500(3hz)	

이를 최소화 하기 위하여 5층 단계다짐을 실시하였다. 진동 삼축시험은 시료주위에 수압을 통한 구속응력재하상태에서 상부의 하중을 반복적으로 재하하여 그 변형률을 측정 하는 형식으로 요구 구속응력 상태를 만들기 위하여 공시체는 주위를 멤브레인으로 감싸 물이 통과하지 않도록 하였다. 공시체의 크기는 지름 5cm에 높이 10cm 원통형으로 되어 방향에 따른 하중의 강도가 상이 하지 않도록 시험을 실시할 수 있다. 표 3은 이러한 공시체를 구성하는

시료의 조건을 나타낸 것이고, 표 4는 각 시료의 축차응력과 반복횟수 등의 실험 조건이다. 그림 5는 공시체의 제작과 셀에 거치후 실험 실시, 최종 500회 반복후의 시료의 변형을 나타낸 것이다.

### 3.2.2 원형토조시험

원형토조시험은 시료의 입경에 따른 오차와 진동삼축 압축시험의 복잡한 시험절차를 줄이고 간소한 방법으로

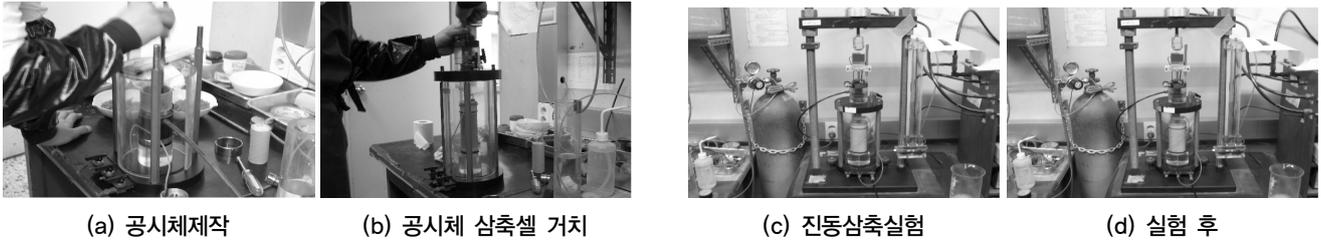


그림 5. 진동삼축실험 과정

표 5. 시험조건

최대 하중강도 (kN)	최소 하중강도 (kN)	반복횟수/재하횟수
15, 20, 25	5	2000(3Hz)
15, 20, 25	5	2000(3Hz)
15, 20, 25	5	2000(3Hz)
15, 20, 25	5	2000(3Hz)

평가할 수 있는 방법인가를 확인하기 위하여 실험을 실시하였다. 원형토조시험장비는 수직하중만을 재하할 수 있으며, 구속압력은 재하할 수 없는 시스템이다. 본 논문에서는 원형토조의 수평방향으로 토압계를 설치하여 수평하중에 따른 반력을 측정하여 이를 수평응력으로 가정하여 평가하였다.

표 5는 원형토조시험의 실험조건이다. 축차응력( $\sigma_d = \sigma_v - \sigma_h$ )의 변화를 주기 위하여 수직하중을 15kN, 20kN, 25kN으로 하중을 재하하였으며, 하중재하반복횟수(N)는 2000회 이상으로 재하하였다. 실험 케이스는 흙의 종류당 2케이스의 시료를 가지고 각 하중단계에 대하여 총 24케이스의 실험을 실시하였다.

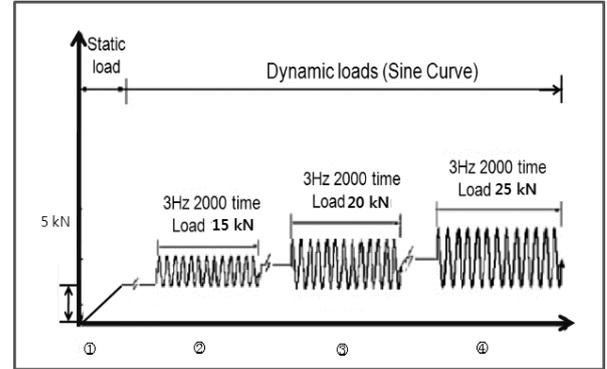
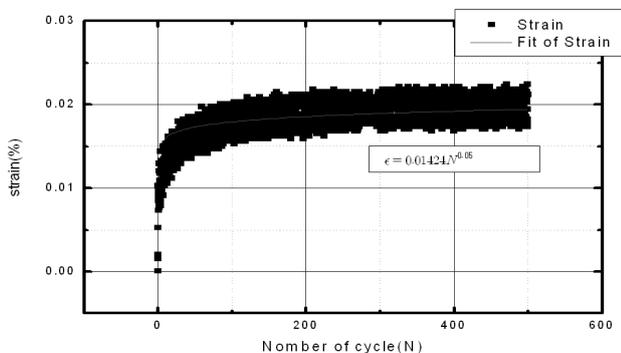


그림 6. 원형토조시험의 하중파형

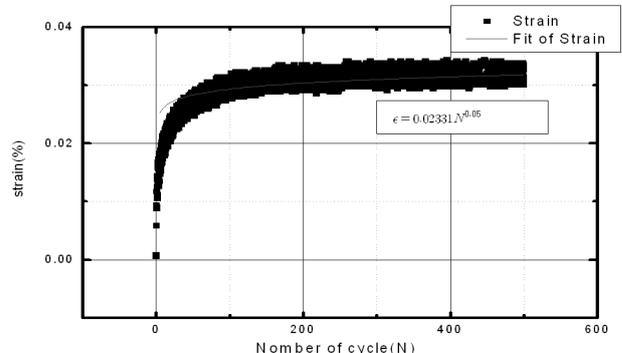
## 4. 반복하중에 따른 침하특성

### 4.1 진동삼축압축시험을 통한 침하특성

그림 7은 SW1 시료에 대하여 삼축압축실험을 실시한 침하거동특성 결과이다. 축차응력을 지속적으로 실험조건에 따라 유지하였을 경우 전반적으로 200회 이상일 때 수렴하는 경향성을 보인다. 또한, 재하응력조건에 따라 최대 침하거동특성은 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림에서와 같이 시료 25mm에 대한 최대변형률은 축차응력 10kPa, 15kPa 일 때 각각 약 0.02%이고, 0.03%로 반복하중이 증



(a) 축차응력 : 10 kPa



(b) 축차응력 : 15 kPa

그림 7. 하중횟수에 따른 침하경향(SW)

표 6. 대상시료에 대한 A, b값

시료종류	축차응력(kPa)	A	b	시료종류	축차응력(kPa)	A	b
SW1	10	0.01424	0.05	SP1	10	0.02623	0.05
	15	0.02331	0.05		15	0.04908	0.05
	20	0.04098	0.05		20	0.08197	0.05
SW2	5	0.01992	0.04	SP2	10	0.01029	0.3
	15	0.05976	0.04		15	0.02482	0.035
	25	0.12494	0.04		20	0.05497	0.035
SW3	10	0.01451	0.05	SP3	10	0.5412	0.07
	15	0.0349	0.05		12.5	0.08389	0.04
	20	0.05933	0.05		15	0.11598	0.045
SW4	10	0.01782	0.08	SP4	10	0.01097	0.07
	15	0.02672	0.08		15	0.03385	0.07
	20	0.04454	0.08		20	0.0657	0.07
SW5	10	0.00829	0.05	SP5	5	0.01992	0.04
	15	0.01795	0.05		15	0.05976	0.04
	20	0.03961	0.05		25	0.12494	0.04

가하면서 점진적으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 표 7은 대상시료에 대한 경향식의 A값과 b 값을 정리한 표이다.

표 2는 식 (1)의 소성 침하예측식의 대상시료별 재료변수(a, m, b)의 결과이다.

#### 4.1.1 소성침하 예측모델

진동삼축압축시험은 노반의 소성침하예측모델 나타난 재료 인자 a, m, b값을 산정 및 원형토조실험의 신뢰성 확보를 목적으로 실시되었다. 흙의 분류별로 각 SW의 시료 5종류와 SP의 시료 5종류의 시료를 가지고 각 3단계의 구속응력상태에서 진동삼축압축시험을 실시하여 침하의 경향을 분석하여 다음의 표 7의 시료별 재료변수의 결과를 얻을 수 있었다. a의 값은 약 3에서 10까지의 결과가 나타났고, m값은 1.7에서 2.1 정도이다. 그리고 반복하중의 횟

수에 대하여 변형률을 제어하는 변수인 b는 SW시료에는 0.05정도이고, SP시료는 0.035정도로 나타났다. a변수는 m변수의 크기에 따라 크게 변화하고, 소성침하식에서 가장 중요한 인자는 반복횟수에 대해 영향을 받는 b변수이므로 a변수의 간격이 크지만 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. b변수는 SP가 전체적으로 분산되어 있으나 전체적으로 SW시료와 변수값이 비슷한 것으로 보아 시공 후 침하의 정도가 시간에 따라 변화하는 변형률은 두시료 모두 비슷할 것으로 사료된다.

### 4.2 원형토조시험을 통한 침하특성

#### 4.2.1 A값과 b값 산정

실험 케이스별로 각 하중 횟수당 침하량에 대한 그래프를 나타내면 그림과 같이 실험 초반에 하중이 증가하다 수렴함을 볼 수 있다. 이를 통해 전체 시료 높이에 대한 변형률로 소성변형의 침하모델의 변수(A,b)를 산출하였다. A는  $a(\frac{\sigma_d}{\sigma_s})^m$ 을 단순화시킨 것으로 하중을 한번 재하시켰을 때 침하량이다. 원형토조 시험은 진동 삼축 압축 시험의 신뢰성을 확보하고, 진동삼축시험에서는 불가능한 자갈계열의 소성변형특성을 파악하기 위한 연구로 SP, SW, GW, GP계열의 시료를 15kN과 20kN, 25kN의 하중강도로 재하를 하여 침하량을 산출하였다. 침하량은 약 500회에 시료의 침하량은 일정하게 수렴하는 경향을 보이고, 이를 파워모델 함수로 회귀분석하여 소성변형 침하모델의 변수를 추정할 수 있다. 이렇게 구해진 변수 A와 b값은

표 7. 시료별 재료변수

흙의 종류	a	m	b
SW1	7.57	1.8	0.05
SW2	7.15	1.8	0.06
SW3	10.91	2	0.05
SW4	5.97	2	0.08
SW5	6.75	1.8	0.05
SP1	3.78	1.7	0.05
SP2	6.79	1.9	0.035
SP3	7.38	2.1	0.045
SP4	13.33	2	0.07
SP5	6.68	1.8	0.04

표 8. 원형토조시험을 통한 모델 변수

시료종류	하중강도(kN)	A	b	$\sigma_d/\sigma_s$	시료종류	하중강도(kN)	A	b	$\sigma_d/\sigma_s$
SP	15	1.04	0.055	0.52	GP	15	0.57	0.030	0.46
	20	1.60	0.055	0.64		20	0.92	0.030	0.61
	25	2.15	0.055	0.71		25	1.25	0.030	0.70
SW	15	1.01	0.05	0.42	GW	15	0.94	0.035	0.40
	20	1.80	0.05	0.52		20	1.44	0.035	0.49
	25	2.3	0.05	0.62		25	2.14	0.035	0.60

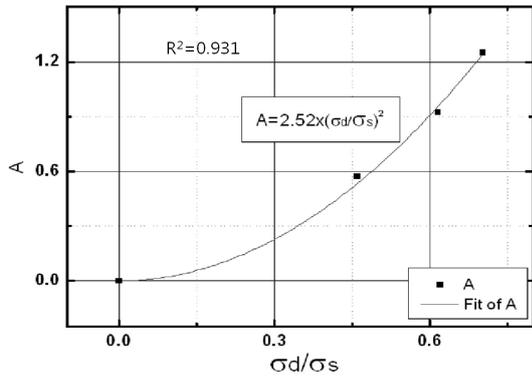


그림 8.  $\sigma_d/\sigma_s$ 와 A값에 따른 추세선(GP계열)

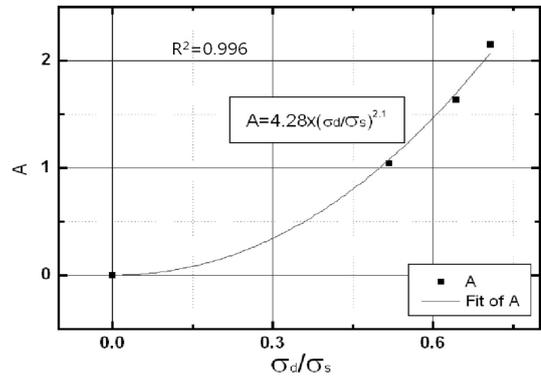


그림 9.  $\sigma_d/\sigma_s$ 와 A값에 따른 추세선(SP계열)

표 9. 시료별 재료변수

흙의 종류	a	m	b
SP	2.5~4.2	2.1	0.053
SW	2.3	1.8	0.05
GW	6.2~6.5	2.2	0.03
GP	2.5	2~2.2	0.035

표 8에 각 흙의 종류에 따른 각각의 하중강도 상태로 나누어 나타내었다. b의 값은 각 하중강도에 따라 일정하게 나오도록 고정을 시키고 A값을 산출하였는데, 강도의 크기에 따라 초기 변형률이 1%에서 3%의 차이를 보이도록 나타났으며, G계열의 시료가 S계열의 시료보다 하중 초기의 침하의 정도가 적다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 각 시료 종류별 하중강도와 하중 반복횟수에 따른 변형률 실험식을 완성할 수 있다.

#### 4.2.2 A값을 통한 a, m 인자 산출

앞서 구한 하중강도에 따른 A값을 가지에 대하여 시료별로 정리 A와  $\sigma_d/\sigma_s$ 에 대한 그래프를 그리면 거듭제곱형식의 추세식을 산출할 수 있고, 이 추세식의 변수는 식 2의 재료 인자 중 a, m값을 도출할 수 있다. 표 6은 각 시료의 하중 강도별  $\sigma_d/\sigma_s$ 와 A값을 나타낸 것이다. 그림 8과 그림 9는 파워모델식 통해 그려진 추세로 GP계열의

시료와 SP계열의 시료의 그래프이다.

소성변형 침하모델에 나타난 재료 인자 a, m, b값을 산정하기 위해 본 실험을 실시한 결과 표 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 Li and Selig(1996)에 의해 연구된 ML, CL의 점토재료와 비교하여 초기 침하량을 나타내는 인자인 a값의 증가함을 알 수 있고, 반복하중 횟수에 의존하는 인자는 b값은 감소함을 볼 수 있었다. 표 9는 실험을 통해 분석된 각 재료마다의 변수값을 나타낸 것이다. GW계열의 시료는 초기의 침하는 S계열의 시료보다 많을 것으로 예측되나 b의 값이 적어 장기적인 소성변형은 더 작아질 것으로 예측된다.

#### 4.3 진동삼축압축시험과 원형토조시험에서의 소성 침하 예측모델

반복하중에 따른 사질재료의 재료변수를 구하기 위해

표 10. 실험별 재료 변수값의 비교

흙의 종류	a		m		b	
	원형토조	진동삼축	원형토조	진동삼축	원형토조	진동삼축
SW	2.3	7.67	2.1	1.9	0.050	0.058
SP	3.4	7.59	2.1	1.9	0.053	0.048

표 11. 흙의 종류별 소성침하 예측모델 식

흙의 종류	소성침하 예측모델	비교	
		a, m값의 R <sup>2</sup>	b값의 표준편차
SW	$\epsilon(\%) = 2.3 \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^{1.8} \times N^{0.05}$	0.9952	$1.25 \times 10^{-2}$
SP	$\epsilon(\%) = 2.7 \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^{2.1} \times N^{0.053}$	0.9963	$1.37 \times 10^{-2}$
GW	$\epsilon(\%) = 6.35 \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^{2.2} \times N^{0.03}$	0.98377	$3.81 \times 10^{-3}$
GP	$\epsilon(\%) = 2.25 \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s}\right)^{2.1} \times N^{0.035}$	0.93128	$1.86 \times 10^{-3}$

실시한 진동삼축압축시험과 원형토조모형시험의 재료변수의 결과는 표 10과 같다. 표에서 보면 시험방법에서 구한 재료변수초기 침하량을 결정하는 a값의 경우 원형토조 모형시험의 경우가 진동삼축압축시험의 경우보다 1/2정도로 나타나고 m, b의 유사한 값이 산정됨을 알 수 있다. 이를 통해 초기의 침하는 서로 상이하나 반복재하횟수가 증가 할수록 서로의 거동이 유사해 짐을 알 수 있다.

원형토조 시험과 진동 삼축시험을 통하여 철도 노반재료로 사용가능한 시료의 소성 침하 예측 모델을 제안 표 11과 같이 제안하였다. 표 10에서 나타났듯이 초기 변형율에 대한 모델변수인 a값의 경우 진동삼축시험이 과대하게 나타남을 알 수있다. 이는 진동삼축의 경우 하중재하시공시체의 침하 안정화를 거치지 않아 초기 변형율이 크게 나타났음으로 사료된다. 이는 철도 구조물 설치시 초기의 침하를 예측하기에 알맞을 것이나 일반적인 실운영에 있어 노반은 시험운영과 철저한 다짐관리로 초기 과다 발생할 수 있는 변형이 최소화 되어있어 원형토조 시험의 결과가 부합할 것으로 판단된다. 표 10에 나타난 소성침하예측 모델은 노반의 안정화가 진행된 예측모델이다. 사질토 계열의 시료는 초기의 변형이 적고 반복하중이 재하에 대하여 민감한 변형특성을 나타낸다. GW계열의 시료의 경우 초기의 변형은 극대화 되어 있으나 초기의 침하가 안정화된 후의 변형은 미미함을 알 수 있고 GP의 경우 초기의

변형과 반복하중에 의한 변형특성 모두 안정적인임을 알 수 있다. 재하 강도에 대한 민감성은 GW시료가 가장 민감함을 알 수 있으나 각 모델식의 차이가 미미함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 기존 점성토 대상으로 반복하중에 대한 누적소성변형을 경험식을 사질토 계열에 대한 재료 인자를 구하여 반복하중에 대한 소성침하량을 예측하는 것을 목적으로 진동삼축압축시험과 원형토조시험을 실시하였다. 두 시험을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 진동삼축압축시험과 원형토조시험에서 구한 사질토의 누적소성침하 예측모델의 재료변수에 대한 인자는 두 시험에서 거의 유사한 값을 도출하였으며, 이를 통해 간편한 방법으로 재료변수를 추정할 수 있다는 것을 확인하였다.
- (2) 철도 흙 노반재료의 장기 누적소성침하 예측모델의 재료변수 인자의 선정을 위하여 진동삼축압축시험과 원형토조시험을 실시하여 반복하중 재하 횟수에 대한 변형율을 검토한 결과 축차응력과 하중반복횟수가 증가함에 따라 영구 변형을 또한 증가함을 알 수 있었고, 이러한 경향을 통하여 응력수준과 하중반복횟수가 영

구 변형 발생에 가장 큰 요인이라는 선행 연구결과들과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

- (3) 반복하중 횟수에 제어를 받는 재료 인자인  $b$ 값은 지반 재료가 강성이 강해지는 자갈계열로 갈수록 적어짐을 알 수 있었고, 그 값은 0.05~0.035로 점성토계열의 1.7보다 작아짐을 알 수 있어 현재 우리나라 지반상태에 서와 큰 편차를 갖는 것으로 판단된다.
- (4)  $a$ ,  $m$ 의 재료 인자는  $a$ 가 2.5에서 6.5까지로 이루어져 있고,  $m$ 이 1.8부터 2.2로 이루어져 있어 기존에 연구된 점성토의  $a$ 값은 0.64에서 1.2사이의 값으로 3배정도가 증가함을 알 수 있고,  $m$ 값 1.7에서 2.4로 나타나는 점성토와 비슷한 추세를 보임을 알 수 있다. 이는 재하 초기 침하가 많이 일어나는 사질토의 경향이 나타나 점성토 계열보다  $a$ 값이 커진 것으로 판단된다.
- (5) 반복하중에 의해 나타는 소성침하는 제안된 식을 통해 구할 수 있으나, 현장의 시료의 수분함량 등의 조건에 따라 차이가 발생되기 때문에 현장의 함수비 편차 등을 고려할 수 있는 방안에 대한 연구가 추가적으로 실시되어야 하며 제안된 식의 신뢰성을 확보하기 위하여 흙노반 철도 현장에서 반복하중에 대한 침하경향을 파악하고 이를 예측치와 비교할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 “남북 및 대륙 철도의 실용주의적 진출을 위한 상호연계기술 개발” 과제에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 김동수, 서원석, 권기철 (2005), “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가”, *한국지반공학회는 논문집*, 제21권, 제6호, pp.67-79.
2. 박성완, 안동석 (2010), “반복교통하중에 의한 도로지반의 장기변형 예측”, *대한토목학회논문집*, 제30권, 제50호, pp. 505-512.
3. 최찬용 (2008), *이동하중을 고려한 철도노반재료의 소성 침하 예측*, 박사학위논문, 인천대학교.
4. Barksdale, R. D. (1972), “Laboratory evaluation of rutting in basecourse materials”, *Proceedings 3rd International Conference on Structure of Asphalt Pavements*, pp.161-174.
5. Brown, S.F. and Hyde, A. F. L. (1975), *Significance of Cyclic Confining Stress in Repeated-Load Triaxial Testing of Granular Material*, Transportation Research Record 537, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.49-58.
6. Lekarp F., Isacsson U. and Dawson A. (2000), “State of the part I.: Resilient response of unbound aggregates”, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.126, No.1, pp.66-75.
7. Li, D. (1994), *Railway track granular layer thickness design based on subgrade performance under repeated loading*, Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts at Amherst.
8. Li, D. and Selig, T. (1996), “Cumulative plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.12, pp.1006-1013.
9. Morgan, J. R. (1966), “The Response of Granular Materials to Repeated Loading”, *Proceedings, Third Conference, Australian Road Research Board*, Sydney, pp.1178-1192.
10. Pumphrey, Jr., N. D. and Lentz, R. W. (1986), *A Deformation Analysis of Florida Highway Subgrade Sand Subjected to Repeated Load Triaxial Tests*, Transportation Research Record 1086, TRB, Washington D.C., pp.49-56.
11. Sweere, G. T. H. (1990), *Unbound Granular Bases for Roads*, PhD dissertation, University of Delft, Delft, The Netherlands.
12. Wood, D. M. (1982), “Laboratory Investigations of the Behavior of Soils under Cyclic Loading: A Review.” *oil Mechanics-Transient and Cycle Loads*, John Wiley and Sons Inc., New York, pp.513-582.

(논문접수일 2012. 5. 9, 심사완료일 2012. 7. 12)