

실내 진동 모형실험을 통한 철도 노반재료의 소성변형특성

Plastic Deformation of Rail Roadbed through Laboratory Cyclic Loading Test

신은철*
Shin Eun-Chul

강현희**
Kang Hyoun-hoi

최찬용***
Choi Chan-Young

ABSTRACT

Analysis of settlement of foundation under the cyclic loading is very important element in the field construction. The fatigue of construct is inflicted by wheel load of mobile unit with railroad and superhighway. The settlement behavior under the cyclic loading is investigated through Power Model by Li and Selig. However, the settlement tendency of foundation appears to be the settlement of general Europe cohesive soil. In this study, the Power Model was used to determine the plastic deformation for sandy soil. Based on the laboratory cyclic loading test a, m, b parameters, for using in the Power Model were presented.

1. 서 론

철도와 고속도로와 같이 교통하중을 받는 이동 차량의 운하중에 의해 시설물의 피로가 가해지는 분야의 경우 반복 하중에 대한 지반의 침하분석은 유지보수 측면에서 중요한 요인이 된다. 이와 같이 반복하중의 분석이 필요한 구조물의 침하나 변형율에 대해 연구가 파워모델을 통해 Li and Selig에 의해 연구되었다. 그러나 이 연구에 의해 나타난 지반의 침하경향은 초기의 침하보다는 반복하중이 증가 함으로 침하가 지속적으로 늘어나는 점성토 계열의 시료가 일반적인 유럽의 환경에 맞는 파워모델의 변수값이 구해져 점성토계열에 대해서만 경향을 알 수가 있다. 그래서 이를 현재 우리 나라 사정에 맞추기 위해서는 가장 많이 분포된 반복하중에 의해 침하가 촉진되기보다는 초기의 하중에 의해 침하가 많이 발생하는 사질토계열의 지반에 대한 파워모델 함수의 변수값을 찾는 것이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 Li and Selig에 의해 제시된 실험식의 a,m,b의 토질 재료 정수 값을 구하기 위하여 원형 토조에 반복 하중 실험을 통해 침하특성을 분석함으로 그 정수값이 산출하는데 목적을 두고 시행을 하였다.

2. 교통하중에서의 반복하중 영향

2.1 소성변형 영향인자

소성변형에 영향을 주는 인자에 대하여 Barsdale(1972)은 소성변형률은 축차응력에 비례하고 구속응력에 반비례한다고 하였으며, 응력의 증가함에 따라 소성변형이 급격히 발생 되며 구속응력이 증가할때

* 인천대학교, 토목환경시스템공학과, 정회원

E-mail : ecshin@incheon.ac.kr

TEL : (032)770-8466 FAX : (032)770-8460

** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

*** 철도기술연구원 선임연구원

천천히 증가한다고 발표하였다(Morgan 1966, Wood 1982). 이후 Brown and Hyde(1975)는 영구변형의 영향을 받는 중요 인자는 축차응력과 구속응력으로 구성된 응력비(Stress Ratio)에 주로 지배된다고 보고하였고, Pumphrey and Lentz(1986)은 동적축변형(Dynamic Axial Stress)과 구속압의 비(Stress Ratio)로에 따라 응력비가 커짐에 따라 영구축변형도 커진다고 보고하였다. Sweere(1990)은 반복응력(σ_{Cycle})과 구속압(σ_3)의 응력비(Stress Ratio)로서 반복재하횟수와 응력비의 크기에 따른 축변형에 대하여 실험을 실시하였다.

2.2 노반재료의 소성변형 예측 모델

다음의 표1은 이러한 소성변형에 대하여 기존연구자들이 노반재료별로 제안한 모델식을 나타낸것이다.

표1. 소성변형에 대한 모델식

제안	소성모델 경험식	변수	제안	소성모델 경험식	변수
Suiker(1997) Ionescu 등(1998)		a, k	Indraratna 등(2000)	$S_N = aN^b$	a, b
Jeffer & Marich(1987) Barksdale(1972)	$S_N = a(1 + k \log N)$		Li and Selig(1994)	$\epsilon_p = AN^b$ $\epsilon_p = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b$	
Lentz & Baladi(1981)	$\epsilon_p = a + b \ln N$		Sweere(1990) K. Okada(2002)	$\rho_{CPT} = AN^b$	$A = a \left(\frac{P}{CB} \right)$
Thompson 등 (1993)	$\log \epsilon_p = a + b \log N$		Wei Zhang 등(2002)	$\epsilon_{PZ} = A^* N^{\alpha*} \left(\frac{\sigma_z}{P} \right)^{\beta*} (\epsilon_p)$	A, α, β, γ
Ullditz(1993)	$\epsilon_p = AN^\alpha \left[\frac{\sigma_z}{\sigma} \right]^\beta$		Paute 등(1993)	$\epsilon_{l,p} = A \left\{ 1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right\}$	
Puppala 등 (1999)	$\epsilon_p = AN^\alpha \left[\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_{atm}} \right]^\beta$		Wolff and Visser(1994)	$\epsilon_{l,p} = (cN + a)(1 - e^{-bN})$	

2.3 반복하중을 통한 노반의 변형율과 변형

반복하중 아래 노상의 점진적 전단파괴와 과잉 소성변형은 미립자 흙을 포함한 노상에서 주로 발생된다. 다음 두가지 식은 노상의 누적소성 변형율(strain(ϵ_p))와 변형(deformation(ρ))을 나타내는 식이다.

$$\epsilon_p (\%) = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b \quad \text{식(1)}$$

여기서, ϵ_p =누적 소성 변형율(strain)

N=반복응력의 작용 횟수

($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$)=열차 축하중에 의한 흙의 축차응력

σ_s =흙의 압축강도

(a, m, b)=흙 종류에 따른 변수

이 두 가지 식은 반복응력 작용 하에 다양한 미립자를 함유한 흙을 대상으로 많은 시험을 한 결과를 바탕으로 유도되었다(Li, 1994; Li and Selig, 1996). 식(1)은 흙의 축차응력, 흙의 정적강도(static strength), 적용된 반복응력의 횟수, 그리고 흙의 종류에 따른 누적 소성 변형율(strain)특성을 나타낸다 식(2)은 노상층의 변형을 일으키는 부분에서 변형율에 의해 계산되는 누적소성 변형(deformation)을 나타낸다. 흙의 함수비, 건조밀도등과 같은 물리적인 영향을 나타내는 강도인 정적강도 σ_s 와 축차응력 σ_d 를 구할 수 있을 때 현재 노반 재료의 재료 변수(a, m, b)에 의해 노반의 변형이 좌우된다.

표2. 흙의 종류에 따른 재료변수

Soil Type	a	b	m
CH	1.2	0.18	2.4
CL	1.1	0.16	2.0
MH	0.84	0.13	2.0
ML	0.64	0.10	1.7

3. 실내시험

3.1 실험에 사용된 흙의 특성

실험에 사용될 시료의 분류와 최대건조단위중량과 최적 함수비를 알아보기 위하여 기본물성 실험을 실시하였다. 표3은 기본 물성 실험의 결과를 각 흙의 분류별로 하나의 시료에 대해서 나타낸 것이다. 최대건조 단위 중량은 SW와 SP는 1.76에서 1.81정도 나타났고, GW와 GP의 자갈계열의 시료는 2.0이상의 단위중량이 나타는 것으로 나타났다. 그리고 그림3은 표3에 나타난 케이스의 입도분포곡선을 나타낸 그래프이다. 4.75mm를 기준으로 G계열과 S계열은 통과율이 각각 50%이상과 50%이하로 나타나 재료 선정에 이상이 없음을 알 수 있었다.

표3. 시료의 물리적 특성 및 분류

실험명		SW	GW	GP	SP
입도 분석	C_u	6.4	11	35	14.5
	C_c	1.34	1.11	0.71	0.91
	#200통과율(%)	1.5	0.8	0	0
통일 분류		SW	GW	GP	SP
다짐실험	최적함수비	16.02	15.4	15.8	17
	최대건조 단위중량(t/m^3)	1.766	2.01	2.12	1.81

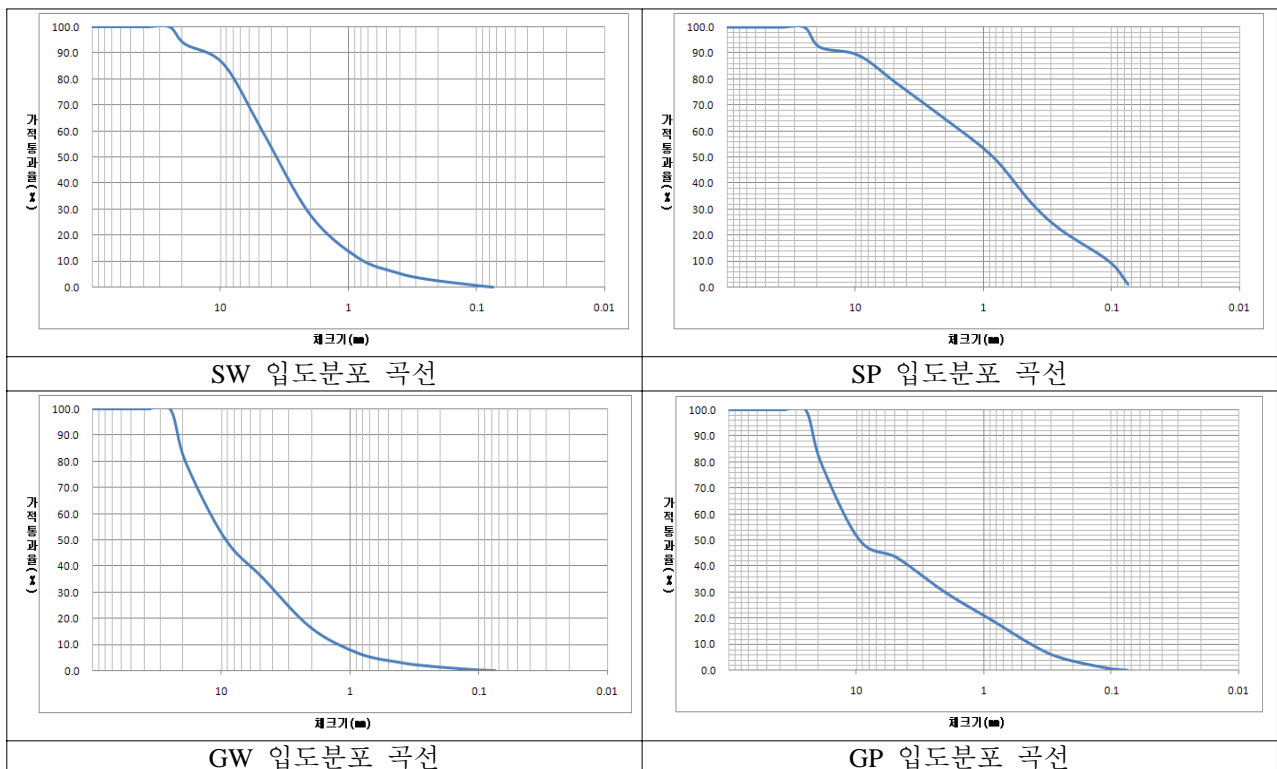


그림3. 시료별 입도 분포곡선

3.2 실험조건

누적 소성변형율을 식1에서 알 수 있듯이 반복하중제어상태의 시료대한 반복하중재하횟수와 시료의 축차응력상태와 정적 강도, 그리고 변형율의 관계를 통해 재료 변수(a, m, b)를 구 할 수 있다. 여기서 정적 강도는 최대건조 단위중량의 90%다짐도와 최적 함수비의 시료에 대한 일축 압축강도로 구하였다. 그리고 축차응력은 몰드의 횡도압과 종도압의 차로 나타내었으며, 변형율은 시료높이에 대한 침하량으로 산정하였다.



그림1. 시료 설치 전경

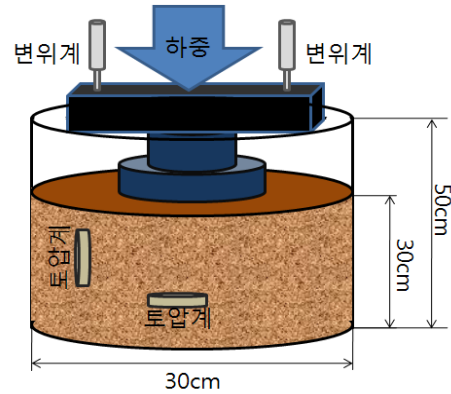


그림2. 시험 몰드 모식도

그림1과 그림2는 실험몰드 제작완료후 설치 전경과 몰드의 실험장치 설치에 관한 모식도이다. 위의 하중재하 장치에 의한 반복하중 상태에서 좌우의 변위계로 침하상태를 체크하여 주고 시료 내부의 토압계에 의해 횡방향 토압과 종방향의 토압을 계측 할 수 있다.

다음의 표 4는 각각의 실험의 조건들이다. 축차응력의 차이를 주기 위하여 1.5톤, 2톤, 2.5톤의 강도로 실험을 실행하였으며, 반복횟수는 2000회이상으로 하여 침하가 수렴하는 곳까지 계측을 실시하였다. 실험 케이스는 흙의 종류당 2케이스의 시료를 가지고 각 하중단계에 대하여 실험을 하여 총 24케이스의 실험을 실시하였다.

표4. 실험별 조건 정리

시료의 종류	하중강도(ton)	반복횟수(속도)	일축압축강도(kg/cm ²)
SP	1.5, 2, 2.5	2000(3hz)	1.39, 1.429
SW	1.5, 2, 2.5	2000(3hz)	4.023, 3.816
GP	1.5, 2, 2.5	2000(3hz)	1.39, 1.429
GW	1.5, 2, 2.5	2000(3hz)	4.023, 3.816

4. 반복하중에 따른 침하특성

4.1 침하 분석

실험 케이스별로 각 하중 횟수당 침하량에 대한 그래프를 나타내면 그림4와 같이 실험 초반에 하중이 증가 하다 수렴함을 볼 수 있다. 이를 통해 전체 시료 높이에 대한 변형율로 식3의 모델의 변수(A,b)를 산출하였다. 그림4과 그림5는 GW계열의 시료를 각각 재하 하중강도 1.5ton과 2.0ton 상태에 놓고 침하량을 산출한 데이터이다. 약 500회 이후에 시료의 침하량은 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다.

$$\epsilon(\%) = AN^b \quad \text{식(2)}$$

여기서, ϵ_p = 누적 소성 변형율(strain)

N = 반복응력의 작용 횟수

A, b = 노반재료에 따른 모델 변수

표5 은 각 흙의 종류에 따른 각각의 하중강도 상태의 침하를 분석하여 얻은 식2 의 변수값을 나타낸다. 이를 통해 각 시료 종류별 하중강도와 하중 반복횟수에 따른 누적소성변형율의 경험식을 완성할 수 있다. 반복횟수에 대한 변수인 b인자는 자갈계열일수록 작아져서 0.035로 나타나고, 모래질일 경우에는 0.04~0.055로 나타남을 알 수있다.

표 5. 시료별 A,b값

시료종류	하중강도(ton)	A	b	시료종류	하중강도(ton)	A	b
SP	1.5	1.19	0.055	GP	1.5	0.57	0.035
	2	1.80	0.055		2	0.92	0.035
	2.5	2.35	0.55		2.5	1.25	0.035
SW	1.5	0.91	0.04	GW	1.5	0.94	0.035
	2	1.94	0.04		2	1.44	0.035
	2.5	3.35	0.04		2.5	2.14	0.035

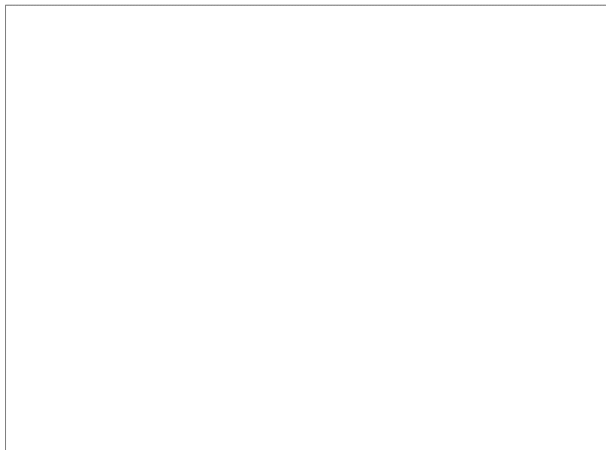


그림4. 하중 1.5 ton 상태에서 침하 경향(시료:GW)

그림5. 하중 2.0 ton 상태에서 침하 경향(시료:GW)

4.2 A값을 통한 a, m 인자 산출

4.1절에서 얻은 하중강도에 따른 A값을 가지에 대하여 시료 별로 정리 A와 σ_d/σ_s 에 대한 그래프를 그리면 거듭제곱 형식의 추세식을 산출 할 수 있고, 이 추세식의 변수는 식1의 재료 인자 중 a, m값을 도출할 수 있다. 표6는 각 시료의 하중 강도별 σ_d/σ_s 와 A값을 나타낸 것이다. 그리고 그림6와 그림7은 실이를 통해 그려진 추세식의 예를 GP계열의 시료와 SP계열의 시료를 대표적으로 보여준 그래프이다.

표6. 하중 강도별 σ_d/σ_s 와 A값

시료종류	하중강도 (ton)	A	σ_d/σ_s	시료종류	하중강도 (ton)	A	σ_d/σ_s
SP	1.5	1.04	0.52	GP	1.5	0.57	0.46
	2	1.60	0.64		2	0.92	0.61
	2.5	2.15	0.71		2.5	1.25	0.70
SW	1.5	1.01	0.42	GW	1.5	0.94	0.40
	2	1.80	0.52		2	1.44	0.49
	2.5	2.3	0.62		2.5	2.14	0.60

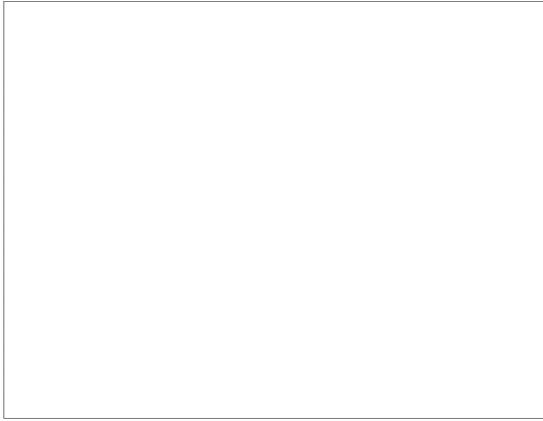


그림6. σ_d/σ_s 와 A값에 따른 추세선 그래프(GP 계열) 그림7. σ_d/σ_s 와 A값에 따른 추세선 그래프(SP 계열)

4.3 흙의 종류별 소성침하량 예측을 위한 재료변수 제안

식 1에 나타난 재료 인자 a, m, b값을 산정하기 위해 본 실험을 실시한 결과표와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 Li and Selig에 의해 연구된 ML, CL의 점토재료와 비교하여 초기 침하량을 나타내는 인자인 a값의 증가함을 알 수 있고, 반복하중 횟수에 의존하는 인자인 b값은 감소함을 볼 수 있었다. 표7는 실험을 통해 분석된 각 재료마다의 변수값을 나타낸 것이다.

표7. 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

5. 결론

본 연구는 기존에 연구된 점성토의 반복하중에 대한 누적소성변형을 경험식을 한국의 지반상태에 맞는 사질토 계열에 대한 재료 인자를 구하는 것을 목적으로 하고 수행을 하였다. 총괄 연구 분석에 따른 결론사항은 다음과 같다.

1. 반복하중 횟수에 제어를 받는 재료 인자인 b값은 지반재료가 강성이 강해지는 자갈계열로 갈수록 적어짐을 알 수 있었고, 그 값은 0.05~0.035로 점성토계열의 1.7보다 작아짐을 알 수 있어 현재 우리나라 지반상태에서와 큰 편차를 갖는 것으로 판단된다.
2. a, m의 재료 인자는 a가 2.5에서 6.5까지로 이루어져 있고, m이 1.8부터 2.2로 이루어져 있어 기존에 연구된 점성토의 a값은 0.64에서 1.2사이의 값으로 3배정도가 증가함을 알 수 있고, m값 1.7에서 2.4로 나타나는 점성토와 비슷한 추세를 보임을 알 수 있다. 이는 재하 초기 침하가 많이 일어나는 사질토의 경향이 나타나 점성토 계열보다 a값이 커진 것으로 사료 된다.
3. 반복하중에 의해 나타는 침하의 위의 식에 의해 구해질 수 있으나 현장의 시료의 수분함량등의 조건에 따라 정도의 차이가 발생할 것으로 사료 된다.

참고문헌

1. 김대상, 이수형, 최찬용, 황선근 (2005), “일반철도와 고속철도의 강화노반두께에 관한 연구” , 한국철도학회, 제8권, 제2호
2. Dingqing Li, and T. Selig(1996) ,“Cumulativeplastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils" *Journal of Geotechnical Engineering*
3. 대한토목학회 (2004), “철도설계편람(토목편)(Ⅱ) 토공 안전 및 부대시설”