

## 반복삼축압축실험을 통한 사질토의 소성변형 특성에 관한 연구 Study on Plastic Deformation of Cohesionless Soil through Cyclic Triaxial Test

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 강현희<sup>2)</sup>, Hyoun-Hoi Kang, 최찬용<sup>3)</sup>, Chan-Young Choi, 양희생<sup>4)</sup>, Hee-Aeeng YANG

<sup>1)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

<sup>2)</sup> 인천대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

<sup>3)</sup> 철도기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

<sup>4)</sup> 인천대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

**SYNOPSIS** : The structure of railroad or subway is that low fare transportation system of the large traffic volume. Like this structure is subjected to the cyclic load of moving vehicle. Consequently the result of the settlement analysis or plastic deformation prediction of railroad bed could be used as an important factor in safety of the railroad. The results of cyclic triaxial test were used in the numerical analysis of power model which Li and Selig(1994) developed. The soil samples were obtained from the construction site of railroad. Cyclic triaxial test was conducted with the variation of the magnitude of cyclic load and soil types. The large magnitude of plastic deformation in the railroad bed is caused of structure failure of the railroad.

**Key words** : power model, cyclic load, plastic deformation, cohesionless soil

### 1. 서론

토목 구조물중 철도 또는 지하철등의 구조물은 물동량을 대량으로 운송하거나 인력을 대량으로 수송할 수 있는 저 운임 운송수단의 예로 고유가 시대의 유류사용 절감의 하나의 방법으로 주목할 수 있다. 이러한 구조물은 이동차량의 반복하중에 의해 시설물의 피로가 가해져 파괴가 일어날 수 있는 분야이다. 따라서 반복하중에 대한 지반의 침하 분석 또는 소성변형 예측은 이러한 구조물의 안전성이나 시공후 유지 보수 측면에 중요한 인자로 사용 될 수 있다. 그래서 본 연구에서는 지반의 반복하중에 대한 소성 변형특성을 파악하기 위하여 반복삼축압축실험을 통한 반복하중에 대한 변형율의 분석을 실행하였다. 그리고 이러한 변형 특성을 도식화 하기위하여 기존의 연구자들에 의해 연구되었던 소성변형 예측모델식중 Li and Selig(1994)가 제안한 모델 함수식을 이용하였다. 이 모델식이 유럽환경에 맞는 점성토계열의 소성변형 모델식이라는 특징을 가지고 있다. 그러나 현재 우리 나라의 철도 부설물의 노반재료에 사용되는 재료는 거의 화강암 풍화토로 사질토계열로 분류되어 있다. 그래서 우리나라 실정에 맞는 침하예측을 하기 위하여 진동반복삼축압축시험을 하여 모델식의 변수중 재료 변수의 값을 사질토의 특성에 맞게 수정 제안 하는데 목적을 두고 연구를 수행하였다.

## 2. 반복하중상태의 소성변형특성

### 2.1 소성변형 거동특성 경향

소성변형 특성 연구는 지반공학자의 관심분야로서 노반의 과잉 소성변형의 메카니즘을 규명하기 위하여 재료의 소성변형특성에 대하여 연구를 수행하였다. 소성변형 거동특성에 대하여 Barsdale(1972)은 소성 변형률은 축차응력에 비례하고 구속응력에 반비례한다고 하였으며, 응력의 증가함에 따라 소성변형이 급격히 발생되며 구속응력이 증가할 때 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 동적축응력(Dynamic Axial Stress)과 구속압의 비(Stress Ratio)로에 따라 응력비가 커짐에 따라 영구축변형도 커진다고 보고하였다. Sweere(1990)은 반복응력( $\sigma_{Cycle}$ )과 구속압( $\sigma_3$ )의 응력비로서 반복재하횟수와 응력비의 크기에 따른 축변형에 대하여 실험을 실시하였다. 이들은 이러한 소성변형 거동특성을 분석하기 위하여 반복삼축압축시험이나 직접단 순전단시험등을 다양한 조건(배수 및 비배수, 포화 및 불포화)에서 실시를 하였다.

### 2.2 반복하중을 통한 지반의 변형을

반복하중 아래 노상의 점진적 전단파괴와 과잉 소성변형은 미립자 흙을 포함한 노상에서 주로 발생된다. 다음 두가지 식은 기존의 파워 모델을 변환한 노상의 누적소성 변형율(strain,  $\epsilon_p$ )와 변형(deformation,  $\rho$ )을 나타내는 식이다.

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

$$\rho = \int_0^T \epsilon_p dt \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_p$ =누적 소성 변형율(strain), N=반복응력의 작용 횟수,

$(\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3)$ = 흙의 축차응력,

$\sigma_s$ =흙의 압축강도

(a, m, b)=흙 종류에 따른 변수,

$\rho$ =누적 소성 변형,

T=노상층 두께

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 변형율특성을 나타낸다 식(2)은 노상층의 변형을 일으키는 부분에서 변형율에 의해 계산되는 누적소성 변형을 나타낸다. 흙의 함수비, 건조밀도등과 같은 물리적인 영향을 나타내는 강도인 정적강도  $\sigma_s$ (일축압축강도적용)와 축차응력 $\sigma_d$ (축방향응력과 횡방향응력의 차)를 구할 수 있을 때 현재 노반 재료의 재료 변수(a, m, b)에 의해 노반의 변형을 예측할 수 있다. 이러한 재료 변수는 반복삼축압축시험을 통하여 다음의 표1과 같이 제안 되었다.

표1. 흙의 종류에 따른 재료변수(Li and Selig, 1996)

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. 반복삼축압축 시험

#### 3.1 시료 선정 및 특성

진동삼축시험에 사용된 시료는 총 10개소의 시료로 SP계열 5개소와 SW계열 5개소를 선정하여 사용하였다. 다음 표2는 시험에 사용된 시료의 비중 및 입도 분석을 통한 균등계수와 곡률계수 그리고 200 체 통과량, 그리고 통일 분류에 의한 흙의 종류등과 이번 시험을 수행함에 있어서 공시체의 제작에 강도를 일정하게 맞추주기 위한 방법으로 사용된 A다짐을 통한 최적 함수비와 최대 건조 단위 중량을 나타내었다. 대체적으로 최대건조단위 중량은 1.7에서 1.8에 정도의 값이 일반적인 사질토의 조건을 가지고 있었으며, 최적함수비는 12%에서 17%까지의 값을 가지고 있었다.

표2. 시료별 물성치

실험명		SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
비중		2.60	2.69	2.48	2.57	2.40	2.85	2.61	2.66	2.81	2.66
입도 분석	C <sub>u</sub>	6.4	9.6	13.98	8.82	17	14.5	8.4	4.82	4.90	3.78
	C <sub>c</sub>	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
통일 분류		SW	SW	SW	SW	SW	SP	SP	SP	SP	SP
다짐 실험	최적 함수비	16.0	12.3	15.4	16	17	17	13	12.5	15	13.2
	최대 건조 단위 중량	1.77	1.86	1.84	1.72	1.81	1.81	1.72	1.78	1.68	1.81

### 3.2 진동삼축압축시험 절차

진동삼축압축시험의 공시체의 구성은 최적함수비상태에서 90%다짐도를 가지도록 하였다. 총 5층다짐을 실시하여 깊이별 다짐도를 일정하게 되도록 하였다. 그리고 공시체는 주위를 멤브레인으로 감싸 물이 통과하지 않도록 하였으며, 크기는 지름 5cm에 높이 10cm 원통형으로 만들었다. 그림1에 a)는 다짐도를 맞추주기 위하여 공시체를 다지는 것을 나타냈다. 총 5층에서 한층의 시료의 양을 산정하여 몰드에 넣은 후에 2.5cm까지 다짐을 하였다. 그림1에 b)은 5층다짐을 다 한 후 몰드를 탈거한 공시체가 완성된 모습이다. 그림1에 c)는 몰드가 탈거되어 완성된 공시체를 변위와 압력을 계측할 수 있는 진동삼축압축시험기에 설치된 전경이다. 설치된 공시체내부에는 공기가 없도록 물을 채워 구속압력을 줄수 있도록 하였다. 그리고 이러한 구속압력을 3차례 변화를 주어 시료당 시험의 횟수를 3회로 하여 실시하였다.

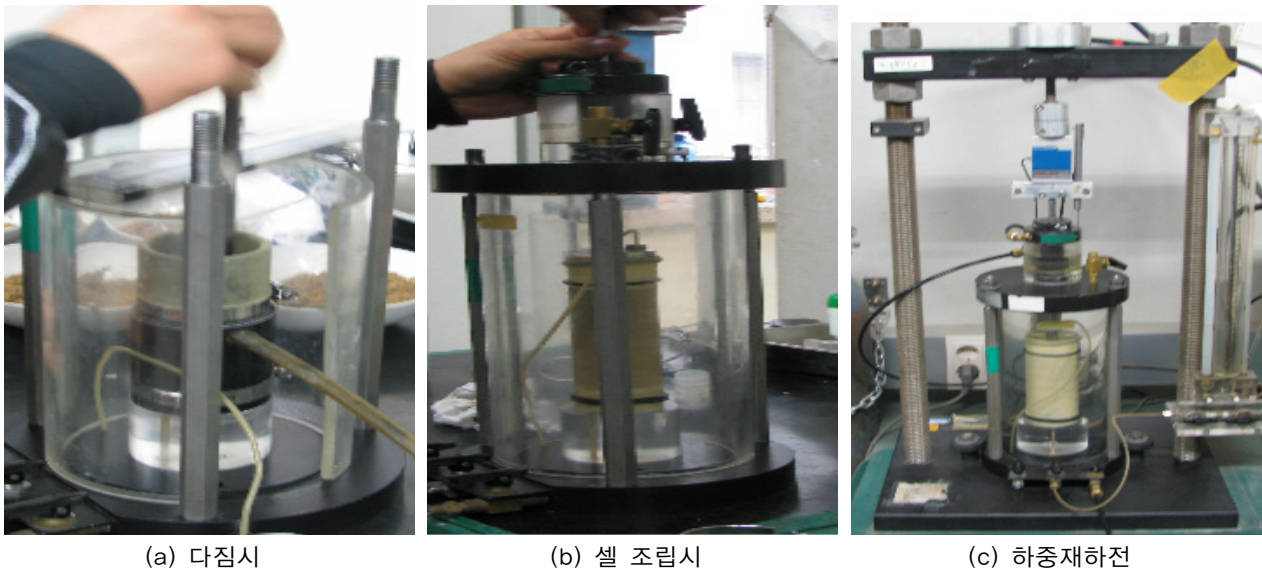


그림 1. 진동삼축압축시험 공시체 설치 모습

## 4. 반복삼축압축 시험을 통한 변형을 특성

### 4.1 변형을 분석

시험 케이스별로 각 하중 횟수당 침하량에 대한 그래프를 나타내면 그림6과 같이 시험 초반에 하중이 증가하다 수렴함을 볼 수 있다. 이를 통해 전체 시료 높이에 대한 변형율로 식(3)의 모델의 변수(A,b)를 산출하였다. 이 식은 식(1)의  $a(\frac{\sigma_d}{\sigma_s})^m$ , 즉 하중이 한번 가해 졌을 때의 침하율을 나타내는 변수를 A로 나타낸 식이다. 그림 2의 a) ~ c)는 SW1시료의 축차응력이 10kPa, 15kPa, 20kPa 일 때의 침하의 경향을 나타낸 것이다. 그리고 반복하중 횟수에 대한 변형률 그래프의 경향은 약 200회 이후에 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다. 그래프 안에 나타난 식은 변형율의 추세선에 대한 식(3)에 대한 모형의 식으로 산정한 침하식이다. 10kPa에서는  $\epsilon = 0.01424N^{0.05}$ 으로 나타나고, 15kPa에서는  $\epsilon = 0.02331N^{0.05}$ 로 그리고, 20kPa의 축차응력 상태에서는 침하 추세식이  $\epsilon = 0.04098N^{0.05}$ 로 나타났다. 여기서 0.04098은 초기침하를 나타내는 계수인 A이고, 0.05는 반복하중횟수에 제어 받는 변수인 b 값을 나타낸 것이다.

$$\epsilon(\%) = AN^b \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_p$  = 누적 소성 변형율(strain)  
 $N$  = 반복응력의 작용 횟수  
 $A, b$  = 노반재료에 따른 모델 변수

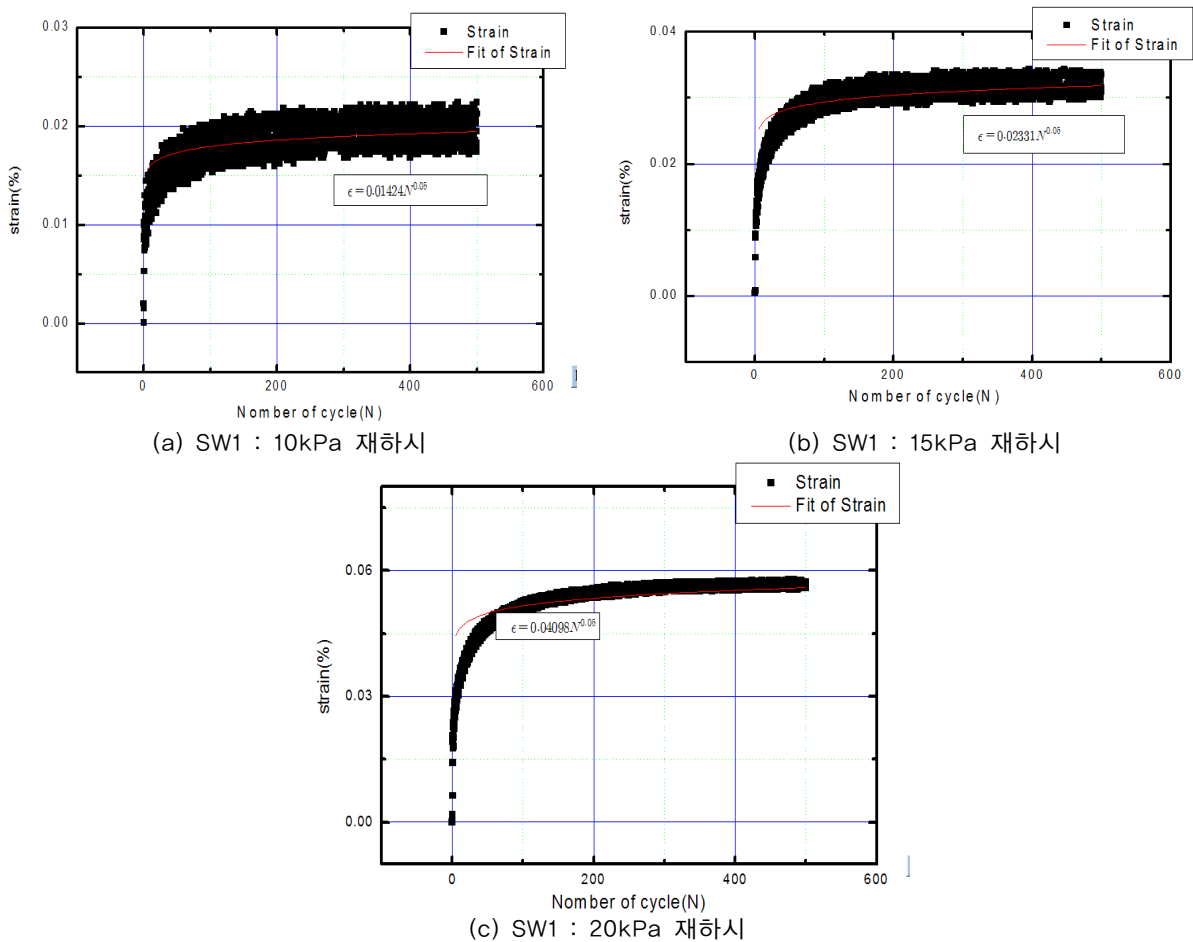


그림 2 하중횟수에 따른 침하경향

## 4.2 재료 변수 산정

4.1 절에서 얻은 진동삼축압축시험 결과를 통하여 산출해낸 축차응력별 A값을 다시 파워모델과 같은 모형으로 회귀 분석하면 A와  $\sigma_d/\sigma_s$ 에 대한 거듭제곱 형식의 추세식을 산출 할 수 있다. 이 추세식의 변수는 식(1)의 재료 인자 중 a, m값을 도출할 수 있다. 그리고 그림3은 4.1절을 통해 구해진 A값과 각 시료의  $\sigma_d/\sigma_s$ 를 비교하여 그래프에 나타내고 이를 통해 그려진 SW1추세식의 예를 보여준 그래프이다. 이는 흙의 종류별로 초기의 침하량의 경향을 보여준다.

그리고 표3은 연구에 사용된 모든 시료 10가지의 재료변수를 산정한 것이다. SW시료는 a값이 6~10 정도로 나타나고, m값은 2, 그리고 b값은 0.05~0.08으로 산정되었다. SP시료는 a와 m값은 비슷하나 b값은 0.03~0.04의 경향을 보인다.

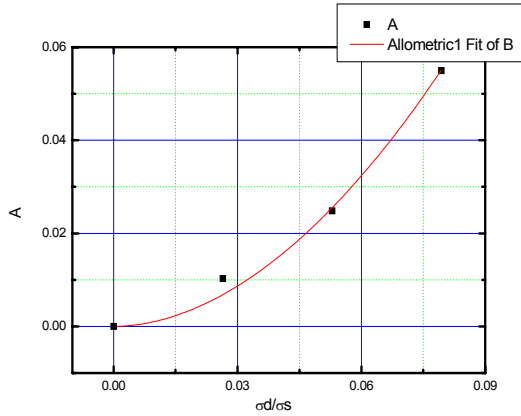


그림3. SP 추세선 그래프

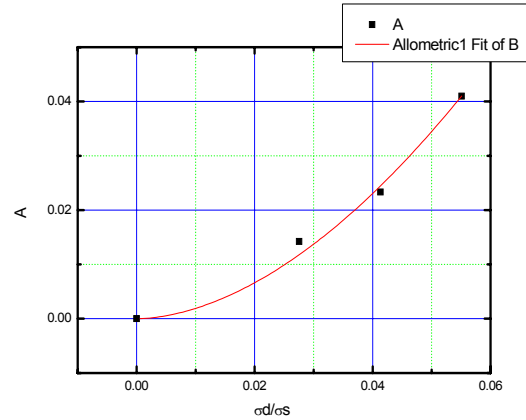


그림4. SW 추세선 그래프

표3. 각 시료별 재료 변수

흡의 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

## 5. 결론

본 연구는 시료를 사질토로 하여 이를 진동삼축압축시험 실시함으로써 소성변형경험식인 식(1)에 나타난 재료 인자 a, m, b값을 산정하는 것을 목적으로 실시되었다. 이 연구의 결론은 다음과 같이 분석할 수 있었다.

1. 흡의 분류별로 각 SW의 시료 5종류와 SP의 시료 5종류의 시료를 가지고 각 3단계의 구속응력상태에서 진동삼축압축시험을 실시하여 침하의 경향을 분석하여 다음의 표3의 시료별 재료변수의 결과를 얻을 수 있었다. a의 값은 약 3에서 10까지의 결과가 나타났고, m값은 1.7에서 2.1정도이다. 그리고 반복하중의 횟수에 대하여 변형률을 제어하는 변수인 b는 SW시료에는 0.05정도이고, SP시료는 0.035정도로 나타났다.

2. 진동삼축압축시험을 통한 사질토의 재료 변수 값은 다음과 같이 제안하였다. a, m값은 비슷한 경향을 보이거나 반복하중횟수에 의해 제어를 받는 b값이 0.05와 0.04정도로 차이남을 알 수 있다. 이는 비슷한 조건시에 SP계열이 강도가 SW에 비하여 강하기 때문으로 사료된다.

표4. 진동삼축시험을 통한 사질토계열 재료변수

흙의 종류	a	m	b
SW	6.86	1.9	0.053
SP	6.16	1.9	0.042

3. 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 변형율은 두시료 모두 비슷할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구를 위해 지원을 아끼지 않으신 철도기술연구원 연구진분들에게 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 원하던 결과를 얻을 수 있도록 진동삼축시험에 도움을 주신 인하대학교 윤여원 교수님과 지방공학연구소 학우여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고문헌

1. 김대상, 이수형, 최찬용, 황선근 (2005), “일반철도와 고속철도의 강화노반두께에 관한 연구”, 한국철도학회, 제8권, 제2호
2. 대한토목학회 (2004), “철도설계편람(토목편)(II) 토공 안전 및 부대시설”
3. 김방식 (2005), “자갈-모래 혼합투의 액상화 거동”
4. 신은철, 강현희, 최찬용 (2008) “실내 진동 모형실험을 통한 철도 노반재료의 소성변형특성” 한국철도학회 추계학술대회
5. Dingqing Li, and T. Selig(1996) ,“Cumulativeplastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils" Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 12