반복하중에 의한 콘크리트 궤도 노반의 누적 소성 변위 예측

Prediction of Cumulative Plastic Displacement in the Concrete Track Roadbed Caused by Cyclic Loading

원상수 · 이진욱 · 이성혁 · 정영훈*

Sang-Soo Won · Jin-Wook Lee · Seong-Hyeok Lee · Young-Hoon Jung

Abstract Plastic deformation of roadbed influences the stability and maintenance of concrete slab track. Long-term plastic deformation in a railway roadbed is generated primarily due to accumulated inelastic strains caused by repeated passing of trains. Prediction of cumulative plastic deformation is important in cost-effective maintenance of railway tracks as well as for the safe operation of trains. In this study, the vertical displacements in railway roadbeds with different thicknesses of reinforced roadbed were computed. Parameters of the power model for cumulative plastic strain were calibrated by using the data from triaxial tests and full-scale loading tests. Results of three-dimensional finite element analyses of standard roadbed sections provide us with design guidelines for the selection of the thickness of reinforced roadbed.

Keywords : Plastic deformation, Cumulative displacement, Cumulative plastic model, Numerical analysis, Full-scale test

초 록 노반 성토체에서 발생하는 소성 변형은 콘크리트 궤도의 안정성과 유지보수에 영향을 미친다. 철도 노반에서의 장기적인 소성 변형은 주로 반복적인 열차 통과로 발생하는 누적된 비탄성적 변형률에 의해 발생한다. 누적 소성 변형의 예측은 궤도의 유지보수와 열차의 안전한 운영을 위해서 중요하다. 본 연구에서는 서로 다른 강화노반 두께를 가진 철도노반에서 발생하는 연직 변위를 계산하였다. 누적 소성 변형률을 계산하기 위한 멱함수의 상수는 삼축 실험과 실대형 재하 실험의 결과로부터 구하였다. 표준 노반 단면에 대한 3차원 유한요소해석 결과로부터 강화노반의 두께를 선정하는 가이드라인을 제시하였다.

주요어 : 소성변형, 누적변위, 누적소성모델, 수치해석, 실대형실험

1. 서 론

최근 고속철도 건설의 증가로 인해 궤도 구조의 선정과 유지관리는 중요한 요인으로 고려되고 있으며, 정기적인 유지보수를 전제로 하는 유도상 궤도를 대신하여 주행 안정성과 유지보수비의 절감을 위해 콘크리트 궤도의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 콘크리트 궤도는 궤도 구조의 국부적인 비틀림이나 기타 변형의 발생 시 체결장치 등을 이용한 조정이 가능하지만, 하부구조인 노반의 과다 침하에 따른 변형 발생 시 유지보수가 어려운 단점이 있다.

노반의 침하는 반복적인 열차 하중의 작용으로 인해 변형이 누적되어 발생하며, 이러한 반복하중에 의한 노반의 변형은 회복변형과 영구변형으로 나눌 수 있다.

회복변형은 노반에서 발생하는 탄성변형으로 반복하중의 영향에서 하중 제거 시 회복되는 변형 부분을 의미하며 비례하고 구속응력에 반비례하며[1,2], 축차응력과 구속응력으로 구성된 응력비(Stress ratio)에 의해 영향을 받는다[3-6]. 또한 Lekarp와 Dawson[7]에 의하면 낮은 응력상태에서는 하

중 재하 횟수가 증가하여도 소성 변형량은 증가함과 밀접한 관련이 있다. 이와 반대로 영구변형은 회복이 불가능한 변형으로 소성변형을 의미하는데, 일반적으로 축차 응력에 일정한 값에 수렴하나, 높은 응력상태에서는 재하 횟수 증가 시 소성 변형률이 계속해서 증가하여 파괴 상태에 이른다고 보고한 바 있다[8].

현재까지 많은 연구자들에 의해 반복하중을 받는 노반의 소성 변형률을 간단한 수식으로 표현하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 연구들은 기본적으로 식 (1)과 같이 재하 횟수 N 의 멱함수(Power function) 형태를 사용하거나 변수를 추가하여 수정하여 사용한다[9-11].

$$\varepsilon_p = A \cdot N^b \quad (1)$$

여기서, ε_p 는 누적 소성 변형률(Cumulative plastic strain, %), A 와 b 는 흙의 종류 및 물리적 특성, 응력상태 등에 의해 결정되는 재료 상수이다[10]. 상수 A 는 재하 횟수 초기의 변형률 크기를 결정하며, 상수 b 는 재하 횟수에 따른 누적 소성 변형률 변화량을 결정한다. 이 외에 로그식이나 제곱근 방정식 및 다항식 모델을 사용한 예측 모델이 다양하게 제안되었다[1,4]. 이러한 예측 모델들은 반복횟수에 관한 사항을 고려하며, 현장과 실험실에서의 연구를 통한 경험적 테

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-201-2574, E-mail : jyounghoon@khu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.1.52

이터를 기반으로 구성된다.

본 논문에서는 누적 소성 변형을 변화 특성을 나타내는 가장 일반적인 예측식인 식 (1)을 사용하였다. 또한 식 (1)의 상수를 결정하게 위해 노반설계기준에 부합하는 강화노반 및 흙노반 재료에 대해 제시된 모델 상수를 재하 횟수에 따른 예측 연직 변형량으로 계산한 후, 실험실시험의 실제 누적 침하량 측정결과와 비교하여 모델 상수를 수정하였다. 설정된 모델을 사용하여 콘크리트 궤도를 위한 표준성도단면을 유한요소 해석하였고 열차 반복하중에 의한 노반의 장기적인 누적 소성 변위를 예측하였다. 이를 통해 강화노반 두께 및 흙노반 탄성계수의 변화에 따른 누적 소성 변위의 발생 양상을 분석하여 강화노반 두께를 선정하는 가이드라인을 제시하였다.

2. 누적 소성 변위 예측

2.1 유한요소해석 모델링 및 물성

누적 소성 변위 예측을 위해 콘크리트 궤도를 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[12]를 이용하여 콘크리트 궤도 표준성도단면을 대상으로 모델링한 단면이다. 모델링에 사용된 요소로 레일은 2절점 빔(Beam)요소, 레일과 침목을 연결하는 패드(Pad)는 스프링 요소로 모사하였다. 침목, TCL(Track

Concrete Layer), HSB(Hydraulic Stabilized Base), 강화노반, 흙노반, 자갈도상은 4각형 4절점 3차원 연속체 요소를 사용하였다. 바닥면의 경계조건은 축방향과 수평방향 고정이며, 사면 반대방향은 축방향 자유 수평방향 고정으로 설정하였다. 해석 단면의 크기는 총 길이 19.3m, 강화노반을 포함한 노반 깊이 6m, 폭은 6.5m이다.

정영훈 등[13]과 Ernest 등[14], 한국철도기술연구원[15]의 연구에서 충분한 재하횟수 이상이 되면 불연속적인 재하횟수를 연속적인 시간에 근사시킬 수 있고 따라서 반복재하에 따른 누적소성변형 거동을 고전적인 Shakedown 소성 이론으로 근사시킬 수 있음을 보였다, 본 연구에서도 Shakedown 소성 이론을 크리프 모델로 표현하여 누적 소성 변위 예측 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 식 (1)의 역함수 모델에서 재하횟수를 시간으로 치환하여 소성 변형을 계산에 사용하였고, 이를 ABAQUS에서 사용하기 위해 사용자 정의 서브루틴(User defined subroutine)을 별도로 작성하였다.

해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다. 여기서 흙노반 층을 제외한 요소의 재료 물성은 한국철도기술연구원 [15]에서 수행한 기존 문헌 조사에 의한 값으로 궤도 구조 해석을 위한 연구에서 사용되고 있다[13-16]. 본 연구에서는 다양한 노반 조건에서의 누적 소성 변위 분석을 위해 강화노반층의 두께를 0.2~0.8m, 흙노반의 탄성계수를 10~100MPa로 변화시키며 수치해석을 수행하였다.

Fig. 1 Three-dimensional numerical analysis modeling for standard section of concrete track

Table 1 Materials used in numerical analysis

	Elastic modulus E (MPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m^3)	Note
Rail	210000	0.3	78	Moment of inertia = 3040cm^4
Sleeper	29100	0.2	23	
TCL	34000	0.2	23	
HSB	12900	0.2	23	
Reinforced roadbed	180	0.2	20	Thickness = 0.2~0.8m
Subgrade	10~100	0.3	20	
Ballast	100	0.2	20	

해석을 위해 사용한 반복하중의 크기는 열차 속도에 의해 발생하는 충격하중을 고려하여 KTX 열차의 운중 85kN에 해당 속도에 대한 충격계수를 곱하여 계산하였다. 충격계수 산정식은 식 (2)와 같으며 i 는 충격계수, v 는 열차속도(km/h)이다.

$$i = 1.0 + 0.3(v/100) \quad (2)$$

2.2 누적 소성 예측 모델의 결정

누적 소성 변위의 예측을 위한 모델 상수 결정을 위해 문헌조사를 수행하였으며, 한국철도기술연구원[15,16]에서 제시한 흙노반 및 강화노반 재료의 모델 상수를 사용하였다. 대형삼축압축실험 결과[15]에 의한 강화노반 재료의 모델 상수는 $A=2.05e-4$, $b=5.00e-2$ 이다. 강화노반 하부에 위치한 흙노반층은 노반하부로 갈수록 열차하중에 의해 전달되는 응력이 감소하므로, 흙노반 재료의 모델 상수는 이러한 응력수준의 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험실 실험을 수행하여 재하 횟수에 따른 노반 깊이 별 누적침하량을 측정하였고, 이를 이용하여 한국철도기술연구원[16]에서 제시하는 흙노반 재료의 모델 상수를 수정하였다. 실험실 실험은 콘크리트 궤도를 대상으로 이루어졌으며, 실험 조건은 Table 2와 같다. 실험실 실험의 침하량 측정 위치는 강화노반 상면으로부터 0.5m와 1.5m의 깊이에서 측정하였다.

Table 2 Full-scale test conditions of concrete track

Loading condition (kN)	Loading frequency (Hz)	No. of loading cycle ($\times 10^4$)
153	8	230

Fig. 2는 실험실 실험에서 측정된 노반 깊이 0.5m와 1.5m에서의 누적 침하량과 내삽법을 통해 수정된 예측 모델 상수를 이용한 침하량 추정 그래프이다. ▲, ▼의 표식은 누적 침하량 측정결과이며 실선은 수정된 모델 상수를 이용한 예측 연직 변위량 그래프를 나타내었다. 여기서, 예측 모델

Fig. 2 Calculated results of axial strain for confining pressure conditions

Table 3 Modification of parameters of cumulative plastic prediction model

Test condition			$\epsilon_p = A \cdot N^b$	
Condition	Confining pressure	Subgrade depth(m)	A→A'	b
①	7.5kPa	0.5~1.0	1.00e-4→2.53e-6	3.16e-1
②	15kPa	1.0~1.5	4.00e-5→9.00e-7	3.89e-1
③	30kPa	1.5~3.6	3.00e-5→2.10e-7	4.10e-1

의 상수는 초기 변형률과 관련있는 A를 감소시키며 실험실 실험 결과에 Curve fitting하여 수정하였다. Table 3은 삼축 압축실험의 구속압 조건 및 실험실 실험 노반 깊이에 해당하는 수정된 예측 모델의 상수를 정리하여 나타내었다. Curve fitting에 의한 수정 작업 후의 상수 A는 A'로 표기하였으며, 수정 후 약 1/100 수준으로 감소한 것을 알 수 있다.

기존 연구와의 응력수준 및 모델 상수 비교를 통해 앞서 수정 과정을 통해 결정한 흙노반과 강화노반 재료에 대한 모델 상수의 타당성을 확인하였다. Table 4는 Fig. 3과 유사한 응력조건으로 수행된 기존 연구를 대상으로 선정하여, 본 연구에서 결정한 모델 상수와 비교를 위해 정리한 것이다. Fig. 3은 강화노반 재료를 대상으로 수행한 삼축압축실험의 응력조건이다.

Table 4의 지수 함수 모델 상수를 이용하여 재하 횟수 300만회에 대한 소성 변형률 그래프를 작성하였고, 이를 본 연구에서 결정한 강화노반 및 흙노반 재료의 모델 상수에 의한 변형률 계산결과와 비교하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 그 결과, 기존 문헌에 의한 변형률 계산결과와 비교하여 본 연구에 의한 그래프 Fig. 4(b)가 좀 더 낮은 수준의 변형률 범위를 보였다. Fig. 4(a)에서 재하 횟수 300만회에 대한 최소 소성 변형률은 약 0.015%로서, Fig. 4(b)의 흙노반 1.5m 이하의 결과를 제외하고는 모두 이 최소 변형률 이상의 변

Fig. 3 Stress condition of triaxial tests

Table 4 Comparison of stress conditions and model parameters

Material	Deviator stress	Mean normal stress	Stress ratio	Model parameters		Note
	$q_{\max}$ (kPa)	$p_{\max}$ (kPa)	$(q/p)_{\max}$	A	b	
Base	43.00	34.33	1.25	5.70e-5	2.70e-1	①
	50.00	36.67	1.36	2.10e-5	2.20e-1	
	20.00	26.67	0.75	1.60e-5	2.00e-1	
Subgrade	20.00	26.67	0.75	1.40e-4	1.10e-1	②
	50.00	36.67	1.36	3.00e-5	1.10e-1	
Sand	20.00	20.00	1.00	9.70e-4	5.00e-3	②
	20.00	13.30	1.50	8.50e-4	5.10e-3	

Note ① : Qiao [17], ② : Hornych [18]

(a) Calculated results of axial strain using literature ①, ②

(b) Calculated results of axial strain in this study

Fig. 4 Comparison of axial strain

형틀을 나타냈다. 흙노반 1.5m 이하에 대한 변형률은 재하 횟수 300만회에서 약 0.01%로 기존 문헌의 최소 소성 변형률 범위에 비해 약 0.05% 작다. 본 연구에서 결정한 모델 상수는 삼축압축실험을 통해 제시된 상수 A, b를 실험실에서 측정된 누적 침하량과 비교하여 초기 변형률과 연관 있는 상수 A를 1/100 수준으로 감소시켜 결정한 것이다. 실험실 실험의 하중 재하 시 노반으로 전달되는 응력은 노반 하부로 갈수록 작아지며, 특히 콘크리트 궤도의 경우 궤도 상부구조가 TCL층과 HSB층의 강성 구조로 구성되어 있어 대부분의 응력분담이 콘크리트 층에서 이루어지므로, 노반 하부에 전달되는 응력은 더욱 감소한다. 그러므로 노반 하부에서의 침하량은 이러한 응력조건에 의해 상대적으로 낮은 수준의 침하량이 발생되어, 노반 1.5m 이하의 모델 상수에 의한 소성 변형률도 기존 변형률 범위에 비해 작게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Table 4에서 기존문헌 ①, ②에 의한 응력조건과 실험실에서 측정된 노반 깊이별 토압 측정결과를 바탕으로 응력경로를 작성한 결과이다. 실험실 실험의 경우 노반 하부로 갈수록 응력경로의 길이는 짧아졌으며, 열차하중에 대해 노반 하부에서 경험하는 응력수준은 매우 낮은 것으로 판단된다. 기존 문헌의 응력조건은 등방응력 상태에서부터 일정 응력비까지 축응력을 가하여 수행되었고, 실험실 실험의

Fig. 5 Comparison between full-scale test results and literature review conditions

응력경로와 비교하여 상대적으로 큰 수준의 응력이 재하된 것을 감안 할 때, 본 논문의 강화노반 및 흙노반 재료에 대한 모델 상수는 콘크리트 궤도 구조와의 상호작용과 실제 열차하중에 의한 응력수준이 고려된 것으로서, 소성 침하량 예

측을 위해 3차원 유한요소 해석에 적용함에 있어 타당하다고 판단된다.

2.3 유한요소해석을 통한 누적 소성 변위 예측 결과

강화노반 및 흙노반 깊이 별 모델 상수는 Table 5와 같다. 이를 2.1 절에서 언급한 노반 재료의 소성 모델을 이용한 유한요소해석 단면 및 해석조건에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과는 레일 중앙의 하중 재하 위치 아래의 강화노반 상면에서 발생하는 누적 소성 변위를 기준으로 나타내었다.

Table 5 Model parameters used in numerical analysis

		$\epsilon_p = A \cdot N^b$	
		A	b
Reinforced roadbed		2.05e-4	5.00e-2
Subgrade	0.5~1.0m	2.53e-6	3.16e-1
	1.0~1.5m	9.00e-7	3.89e-1
	Below 1.5m	2.10e-7	4.10e-1

Fig. 6은 흙노반 탄성계수 80MPa에 대한 누적 소성 변위 예측 결과이다. 재하횟수 100만회 재하 시 침목 및 레일에의 누적 소성 변위는 각각 1.16mm와 2.69mm이며, 강화노반 상면은 약 1.02mm로 철도설계기준 노반편[17]에서 제시하는 열차하중에 의한 변위 기준인 5mm 이하를 만족하였다. Fig. 6에서 나타난 변위 발생 경향은 지수함수 모델의 특징과 매우 유사하여 하중 재하 초기에 많은 변위가 발생하고 재하 횟수 증가에 따라 변위 증가율은 점차 감소하는 것으로 나타났다.

강화노반 두께 및 흙노반 탄성계수 변화에 따른 누적 소성 변위 예측 결과는 Fig. 7과 같다. 강화노반 두께에 의한 변위 차이는 없는 것으로 나타났으며, 흙노반 탄성계수 변화에 따라 차이가 발생하였다. 흙노반 탄성계수 10MPa에서 누적 소성 변위는 약 4.6mm, 80MPa에서는 1.02mm로 나타났다. 그래프의 경향을 살펴보면 흙노반의 탄성계수가 10~30MPa 조건일 때 누적 소성 변위 발생에 가장 큰 영향을 주며, 흙노반 탄성계수 50MPa 이상 조건에서는 변위 차가 작은 것으로 나타났다.

Fig. 7의 결과에서 임의의 누적 소성 변위 예측량을 기준으로 강화노반 두께와 흙노반 탄성계수에 대한 가이드라인을 Fig. 8과 같이 작성하였다. 가이드라인에 적용한 누적 소성 변위 기준은 Fig. 7에 표시된 화살표 점선과 같이 2mm, 1.5mm, 1mm이다. 이는 철도설계기준 노반편[17]에서 제시하는 침하량 기준 5mm의 1/2 이하 수준으로 노반 시공성과 강우영향 등을 고려하여 안전측으로 선정하였다. Fig. 8의 누적 소성 변위 2mm 기준에 대한 흙노반 탄성계수는 약 27MPa, 1.5mm 기준에 대해서는 42MPa, 1mm에 해당하는 조건은 80MPa로 나타났다. 흙노반에 대한 고속철도 다짐품질기준은 $E_{I2} \geq 80\text{MPa}$ 로서 변형계수(E_{I2})와 탄성계수(E)간의 상관관계($E_{I2} \approx 1.5E$)에 의해 흙노반 탄성계수는 약 50MPa

Fig. 6 Results of numerical analysis for standard cross section of concrete track

Fig. 7 Computed settlements for different elastic moduli of subgrade

Fig. 8 Results of numerical analysis in order for various roadbed conditions

이다. 따라서 노반 시공 시 다짐품질기준을 만족하는 경우 반복하중에 의해 발생하는 누적 소성 변위는 Fig. 8의 가이드라인을 참고하여 1.5mm이하로 예상할 수 있다.

누적 소성 변위는 흙노반 강성에 많은 영향을 받지만, 강화노반 두께 변화에 대해서는 그 영향이 제한적인 것으로 나타났다. Fig. 8의 결과를 통해 강화노반을 제외한 흙노반만

으로도 열차하중을 지지하는 충분한 강성이 확보될 것으로 예상되지만, 강화노반의 부설 목적은 하중지지만이 아닌 노반의 동상방지와 강우 시 원활한 배수, 지지강성 연속성 확보 기능 등을 포함하고 있다. 따라서 철도설계기준 노반편 [17]에서 제시하고 있는 강화노반 최소 두께 200mm를 가이드라인에서의 강화노반 두께 하한선으로 작성하였다.

Fig. 8에서 제시하는 가이드라인을 통해 강화노반은 최소 두께인 200mm까지 감소 가능하며, 다짐품질기준 이상의 노반 강성 확보 시 열차하중에 의한 침하량 제한 범위[17]를 충분히 만족할 것으로 판단된다.

3. 결 론

콘크리트 궤도에서 열차반복하중에 의해 발생하는 누적 소성 변위를 3차원 유한요소해석을 통해 분석하였고, 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 유한요소해석에서 노반의 소성 변형률 예측을 위해 맥함수 모델을 사용하였다. 노반 재료에 대한 삼축압축실험 결과를 이용하여 모델 상수 A, b를 결정하였다. 하지만 삼축압축실험의 재하 응력 변화가 실제 열차하중에 의해 노반에서 발생하는 응력의 변화에 비해 과도하여, 삼축실험으로 결정된 모델 상수를 사용할 경우 과다한 변위량이 예측되었다. 실제 열차 하중 조건에 적절한 해석을 위해 실험실 실험의 계측 결과를 이용하여 예측 모델의 상수를 보정하여 해석에 사용하였다.

(2) 누적 소성 예측 모델을 적용한 콘크리트 궤도 표준성 토단면의 3차원 수치해석 결과, 강화노반 상면에서의 누적 소성 변위는 100만회 재하 시 약 1.02mm, 침목과 레일에서는 각각 1.16mm와 2.69mm가 발생하는 것으로 예측되었고, 이는 철도설계기준의 침하량 제한 범위를 만족한다.

(3) 다양한 노반 조건에서의 수치해석을 수행하여, 누적 소성 변위를 고려하는 강화노반 두께 및 흙노반 탄성계수 조건에 대한 가이드라인을 제시하였다. 그 결과, 강화노반은 가이드라인의 하한선인 최소 200mm까지 감소가 가능하며, 흙노반 탄성계수 50MPa 이상의 조건에서 발생하는 누적 소성 침하량은 1.5mm 이하로 열차의 반복적인 하중 하에서 궤도 구조체의 장기 공용성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반 연구” 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

[1] R.D. Barksdale (1972) Laboratory evaluation of rutting in base course materials, *3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement*, London, pp. 161-174.
[2] J.R. Morgan (1966) The response of granular material to

repeated loading, *Proceedings, Australian Road Research Board*, 3(2), pp. 1178-1192.
[3] S.F. Brown, A.F.L. Hyde (1975) Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material, *Transportation Research Record*, 537, pp.49-58.
[4] G.T.H. Sweere (1990) Unbound granular bases for roads, *PhD thesis*, University of Delft, Delft, Netherlands.
[5] E.C. Shin, H.S. Yang, C.Y. Choi (2008) Estimation of reinforced roadbed thickness based on experimental equation, *Spring conference of the Korean Society for railway*, Daegu, pp. 1734-1742.
[6] J.W. Pappin (1979) Characteristics of granular material for pavement analysis, *PhD thesis*, Dept. of civ. Eng., University of Nottingham, Nottingham, UK.
[7] F. Lekarp, A.R. Dawson (1998) Some influences on the permanent deformation behavior of unbound granular materials, *Transportation Research Board*, RE 960372.
[8] S.W. Park, K.Y. Hwang (2008) Repeated load triaxial tests on unbound geomaterials in pavement foundations, *Journal of the Korean Society for Road Engineers*, 10(1), pp. 49-62.
[9] C.L. Monismith, N. Ogawa, C.R. Freeme (1975) Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading, *Transportation Research Board*, Washington D.C., No.537.
[10] D. Li, E.T. Selig (1996) Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(12), pp. 1006-1013.
[11] E.C. Shin, H.H. Kang, C.Y. Choi (2008) Plastic deformation of rail roadbed through laboratory cyclic loading test, *Spring conference of the Korean Society for Railway*, Daegu, pp. 1692-1698.
[12] ABAQUS (2008) User's manual version 6.9.
[13] Y.-H. Jung, E. Nsabimana, M. Sagong (2012) An elasto-plastic constitutive model of shakedown plasticity to predict accumulative permanent deformation in railway trackbed, *KGS spring national conference 2012*, Korean Geotechnical Society, Gyeonggi, pp. 433-442.
[14] E. Nsabimana, S.S. Won, Y.H. Jung, S.H. Lee (2013) Numerical prediction of cumulative plastic strains in the railway subgrade under low-amplitude cyclic loading, *KGS Spring National Conference 2013*, Gyeongbuk, Korean Geotechnical Society, pp. 1156-1169.
[15] KRRI (2011) Research for ensuring competitiveness of railway construction (interim report), Korea Rail Network Authority.
[16] KRRI (2012) Development of asphalt roadbed and track system suited to speed up, Korea Railroad Research Institute.
[17] Korea Railway Network Authority (2011) *Rail Design Standard (Roadbed)*, Korea Railway Network Authority.
[18] Y. Qiao (2010) A study on the permanent deformation behavior of unbound granular material in flexible pavements, *Master thesis*, Dept. of Geo and Water Eng., Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

- [19] P. Hornych (2004) Selection and evaluation of models for prediction of permanent deformations of unbound granular materials in road pavements, SAMARIS.

접수일(2013년 6월 6일), 수정일(2013년 8월 12일),
게재확정일(2013년 12월 12일)

Sang Soo Won : sangsuw@krri.re.kr

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee University, Seochon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-701, Korea

Jin-Wook Lee : jinugi@krri.re.kr

High-speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Seong-Hyeok Lee : shlee@krri.re.kr

High-speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Young-Hoon Jung : jyounghoon@khu.ac.kr

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee University, Seochon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-701, Korea