강화노반 쇄석재료의 전단강도특성을 고려한 영구변형예측모델 개발

Development of Permanent Deformation Prediction Model for Trackbed Foundation Materials based on Shear Strength Parameters

임유진* · 황정규 · 조호진

Yujin Lim · Jungkyu Hwang · Hojin Cho

Abstract Formation used as trackbed foundation for providing vertical bearing capacity onto rail foundation are composed of crushed stones usually with certain type of grain size distribution. Permanent deformation in trackbed foundation can be generated by increasing number of load repetition due to train traffic increases, causing track irregularity. In this study, a specially prepared trackbed foundation materials (M-40) used in Korea has been tested using a large repetitive tri-axial compression apparatus in order to understand resilient and permanent deformation characteristics of the material. From these test results, resilient and permanent deformation characteristic are analyzed so that a permanent deformation model is developed which can consider number of load repetition N , confining stress (σ_3), shear stress ratio (τ/σ_3) and stiffness of the material.

Keywords : Permanent deformation, Shear stress ratio, Large triaxial repeated load test, Prediction model

초 록 궤도하부층의 지지강성을 확보하기 위하여 설치하는 강화노반은 통상 일정 입도분포의 쇄석재료로 구성된다. 이러한 강화노반은 통과톤수의 누증 즉, 과도한 열차하중이 반복적으로 가해질 경우 영구변형이 발생할 수 있으며 이러한 영구변형은 궤도틀림의 한 원인이 될 수 있다. 또한 강화노반 재료의 적정두께를 확정하기 위해서는 이러한 영구변형 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국내 강화노반 재료로 사용될 가능성이 높은 M-40 쇄석재료를 선정하여 대형반복삼축시험을 실시하여 재료의 회복탄성 특성과 영구변형 특성을 분석하였다. 시험으로부터 임의의 전단응력비 및 반복재하횟수에 따른 회복탄성계수 특성과 영구변형 발생특성을 분석하였으며 M-40 쇄석강화노반 재료의 영구변형에 영향을 미치는 인자(반복재하횟수, 구속압, 전단응력비, 탄성계수 등)를 함께 고려할 수 있는 영구변형 예측모델을 제시하였다.

주요어 : 영구변형, 전단응력비, 대형반복삼축압축시험, 영구변형예측모델

1. 서 론

철도 궤도하부구조는 반복적인 열차 하중에 의해 누적되는 소성변형이 발생할 수 있다. 이러한 소성변형의 누증은 열차하중의 크기, 반복재하횟수 및 궤도하부구조 내 발생하는 응력의 크기와 구성 재료의 탄성계수 등에 복합적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

궤도하부구조는 공용초기 즉, 반복재하 초기에는 일정기간 동안 회복탄성거동에 의해 지배되지만 재하횟수가 증가하면 일정 반복재하횟수에서 급격히 소성변형이 증가하는 특성을 갖는다. 이러한 소성변형은 궤도 하부구조의 영구변형으로 이해되며 궤도틀림의 한 원인으로 지목되고 있다. 따라서 초기의 회복탄성거동과 반복재하 횟수의 증가에 따른 영구변형의 발생특성은 서로 밀접히 연관되며 운중의 크기 및 궤도 하부구조내 발생하는 응력의 크기와 재료의 회복탄

성계수 특성 등을 고려한 영구변형 예측모델의 개발은 매우 시급한 과제이다.

궤도하부구조층 또는 포장구조체 구성층의 영구변형을 예측하기 위한 모델개발이 여러 연구자에 의해 시도된 바 있다[1-4]. 특히, 강화노반 또는 보조기층 등 쇄석층의 영구변형은 반복재하횟수, 구속압 및 축차응력의 크기 등 응력조건, 함수비, 다짐도 및 입도분포 등의 재료조건 등에 크게 의존하는 것으로 밝혀진 바 있다[5-9,16].

이와 같은 쇄석층의 영구변형 예측모델은 주로 반복재하 횟수를 이용하여 power 모델(식 1)로 표현하여 왔지만 모델계수(A 및 b)에 미치는 영향요소를 정량화하지는 못하였다. 본 연구에서는 이와 같은 power 모델의 제한성을 극복하기 위하여 모델계수와 상관성이 있는 여러 가지 영향요소 중 재료의 탄성계수와 강도정수 및 응력조건에 초점을 맞추어 이들을 반영한 영구변형 예측모델 수립을 시도하였다.

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

여기서, ε_p = 영구변형률, A , b = 모델계수

일반적으로 흙재료의 다짐도와 탄성계수는 매우 밀접한

*Corresponding author.

Tel.: +82-42-520-5402, E-mail : yujin@pcu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSRR.2012.15.6.623

상관성이 있음이 지적되어 왔다[9,10]. 또한 응력비 개념에 의해 파괴시 축차응력에 대한 축차응력비(q/q_f) 또는 파괴시의 최대주응력에 대한 최소주응력비(σ_3/σ_1) 및 재료의 전단강도에 대한 전단응력의 비 즉, 전단응력비(τ/τ_f) 등이 영구변형의 발생에 중요한 영향을 미치는 변수로 지적된 바 있다[8,11]. 이와 같은 지적은 흙재료의 응력조건과 영구변형이 밀접한 관련성을 갖고 있음을 밝힌 것으로서 본 연구를 진행하기 위하여 이와 같은 영향요소들이 구체적으로 반영될 수 있는 시험 프로그램을 구성하였다. 이를 위하여 직경 $D=30\text{cm}$, 높이 $H=60\text{cm}$ 인 시편에 대한 시험이 가능한 대형 반복삼축압축시험 장치를 구성하여 다짐된 M40강화노반 쇄석재료에 대한 반복삼축압축 시험으로부터 회복탄성변형특성과 영구변형 특성을 파악하였으며, 이로부터 영구변형 발생에 미치는 영향인자(반복재하횟수, 전단응력비, 탄성계수)를 고려할 수 있는 영구변형예측모델을 개발하였다.

2. 대형반복삼축재하시험

2.1 전단강도특성을 고려한 대형반복삼축압축 시험 조건

대형반복재하시험을 실시하는데 있어 중요한 시험매개변수로서 반복재하횟수 N , 구속응력 σ_3 및 축차응력(σ_d)을 고려하였으며 시편에 가할 축차응력의 크기는 주어진 구속압 조건하에서 전단강도(τ_f) 대비 발생전단응력(τ)의 크기 즉, 전단응력비 수준을 예상하여 결정하였다. 즉, 시편 내에 발생할 수 있는 전단응력비(τ/τ_f)를 몇 개 수준으로 정하여 이에 상응하는 축차응력을 결정하였다. 이와 같이 정한 이유는 전단응력비가 입상재료의 영구변형을 제어할 수 있기 때문이다[8]. 따라서 동일조합의 응력수준에서 전단강도 정수인 마찰각(ϕ)이 증가하면 전단응력비(τ/τ_f)는 감소한다. 이와 같이 전단응력비를 고려하면 궤도 하부구조 구성재료의 영구변형을 제어할 수 있는 허용응력의 크기를 결정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 영구변형시험을 위한 반복삼축압축시험에 앞서 전단강도정수 추출을 위하여 동일 대형삼축시험기를 이용, 시험대상 강화노반층재료에 대한 정삼축시험(CD)을 먼저 실시하였다.

정삼축시험으로 구한 강도 정수는 아래 Table 1과 같으며, 전단강도 정수값을 기초로 계산된 응력조건은 Table 2 및 Table 3과 같고 각 구속압 단계에서 요구되는 전단응력비 및 이에 따른 축차응력을 고려하여 각 10,000회씩의 반복재하

Table 1 Test results of static triaxial test

	C (kPa)	ϕ (Degree)
Quarry A	67	45.35
Quarry B	46	47.68

Table 2 Test conditions for large repeated load test (quarry A)

Confining stress	Shear stress ratio (τ/τ_f)	Deviatoric stress (kPa)	Number of repetition (N)	
35kPa	0.3/0.7	86.25/249.96	5,000	10,000 total
	0.5/0.7	159.26/249.96	5,000	10,000 total
	0.7/0.7	249.96	10,000	
69kPa	0.3/0.7	124.39/360.49	5,000	10,000 total
	0.5/0.7	229.69/360.49	5,000	10,000 total
	0.7/0.7	360.49	10,000 total	

Table 3 Test conditions for large repeated load test (quarry B)

Confining stress	Shear stress ratio (τ/τ_f)	Deviatoric stress (kPa)	Number of repetition (N)	
35kPa	0.3/0.7	99.91/287.79	5,000	10,000 total
	0.5/0.7	183.99/287.79	5,000	10,000 total
	0.7/0.7	287.79	10,000 total	
69kPa	0.3/0.7	133.48/384.49	5,000	10,000 total
	0.5/0.7	245.81/384.49	5,000	10,000 total
	0.7/0.7	384.49	10,000 total	

를 실시하였다.

2.2 대형반복삼축압축 시험 결과

2.2.1 회복탄성계수(E_R)

대형반복삼축시험으로부터 획득한 회복탄성계수(E_R)는 그림 Fig. 1-Fig. 4와 같이 축차응력 - 축변형률 그래프상에서 재하(loading) 및 제하(unloading)시의 기울기의 평균값으로 결정하였다. 이때 반복재하 그래프는 평균 2회 반복재하되면 일정 기울기로 수렴하였다.

시험 프로그램에서 결정한 구속압 및 전단응력비 단계별

Fig. 1 Deviatoric stress-axial strain relation (confining stress: 35kPa)- quarry A

Fig. 2 Deviatoric stress -axial strain relation (confining stress: 69kPa)- quarry A

Fig. 3 Deviatoric stress -axial strain relation (confining stress: 35kPa)- quarry B

Fig. 4 Deviatoric stress -axial strain relation (confining stress: 69kPa)- quarry B

Table 4 Resilient modulus obtained for crushed rocks from quarry A

	Shear stress ratio (τ/τ_f)				
	0.3	0.7	0.5	0.7	0.7
No. load repetition	First half 5,000	Second half 5,000	First half 5,000	Second half 5,000	10,000
E_R (MPa) ($\sigma_3=35\text{kPa}$)	167	180	176	154	148
E_R (MPa) ($\sigma_3=69\text{kPa}$)	178	260	192	296	268

Table 5 Resilient modulus obtained for crushed rocks from quarry B

	Shear stress ratio (τ/τ_f)				
	0.3	0.7	0.5	0.7	0.7
No. load repetition	First half 5,000	Second half 5,000	First half 5,000	Second half 5,000	10,000
E_R (MPa) ($\sigma_3=35\text{kPa}$)	246	297	260	324	260
E_R (MPa) ($\sigma_3=69\text{kPa}$)	310	410	327	390	331

로 획득한 회복탄성계수 값은 Table 4 및 Table 5와 같다. 전체적으로 회복탄성계수는 최소 148MPa~최대 410MPa 사이의 값을 보였다. 변성암질인 B석산 강화노반 재료가 화강암질인 A석산 재료에 비해 높은 회복탄성계수값을 보였다.

또한 구속압이 증가할수록 회복탄성계수는 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 아울러 선행 전단응력비(τ/τ_f : 0.3 또는 0.5)를 경험한 재료의 경우 전단응력비를 증가(τ/τ_f : 0.7)시켜 반복재하할 경우 선행재하경험이 없는 반복재하에 비해

여 회복탄성계수가 더 크게 발현되는 경향을 보였다. 이는 선행하중효과(pre-loading effect)로 판단되지만 영구변형에 미치는 선행하중효과의 엄밀한 영향정도는 추가 연구와 분석이 필요할 것이다.

2.2.2 영구변형특성

영구변형률은 하중재하시 발생하는 총 변형률에서 회복변형률을 빼준 값이다. 측정된 축변형량 (δ)으로부터 영구변형률(ε_p)을 계산하기 위하여 선형변위계(LVDT)로 측정된 축변형량에 대한 시편의 높이변화를 고려하여 총 축변형률(ε)을 계산하고 각 하중재하횟수에서의 영구변형률(ε_p)을 계산하였다.

이와 같이 계산된 영구변형률을 석산재료별, 응력조합별 및 전단응력비에 따라 정리하면 Fig. 5~Fig. 6과 같다. 반복재하 횟수가 증가할수록, 전단응력비가 클수록 및 구속압이 작을수록 영구변형률이 더 크게 발생하는 경향을 확인할 수 있으며 반복재하횟수의 증가에 따른 영구변형률의 발생경향은 하이퍼볼릭(hyperbolic) 함수와 같은 형태의 비선형적 증가특성을 보였다. 특히, 전단응력비가 클수록 영구변형률이 반복재하 초기에 집중적으로 발생하며 일정 반복재하횟수를 넘어서면 추가적인 영구변형률의 발생 즉, 영구변형률증가속도는 감소추세를 보였다.

전단응력비 0.7-0.7의 경우, B석산 쇄석재료의 영구변형률이 A석산 쇄석재료의 영구변형률보다 작게 발생하였다. B석산재료에 대한 시험시 A석산재료에 대한 시험보다 가한

축차응력이 더 큰 것을 고려할 때 이는 앞 절에서 분석한 바와 같이 B석산 쇄석재료가 A석산 쇄석재료에 비해 더 높은 회복탄성계수값을 갖고 있기 때문으로 판단된다. 다만 본 영구변형 발생경향에 대한 분석결과는, 두 재료 사이의 영구변형 발생 크기 비교에 의한 것이므로 여러 재료에 대한 추가시험에 의해 이와 같은 경향이 대표성을 띤 것인지를 확인할 필요가 있다.

2.3 영구변형 예측모델

영구변형 예측모델 수립을 위하여 영구변형에 가장 큰 영향을 미치는 대표 매개변수로서 반복재하횟수(N), 전단응력비(σ/τ), 탄성계수(E)를 선정하였다. 강화노반 쇄석재료와 같은 입상재료는 구속압의 영향을 많이 받으므로 재료에 가하여지는 구속응력의 영향은 결국 탄성계수(E)로 대체할 수 있다[12]. 반복삼축시험으로부터 측정된 영구변형률과 대표 매개변수로 선택한 이들 인자들 및 인공신경망(neural network) 이론을 활용하여 아래 식 (2)와 같은 영구변형 예측모델의 기본형을 완성하였다.

$$\varepsilon_p = A \cdot e^{BN} \cdot e^{\frac{C}{\tau_f} N^D} \cdot E_R^E \quad (2)$$

여기서, ε_p : 영구변형률(%), N : 반복재하횟수, σ/τ_f : 전단응력비, E_R : 회복탄성계수(MPa), A, B, C, D, E : 회귀계수

Fig. 5 Permanent strain with number of load repetition obtained using crushed rocks of quarry A (confining stresses: 35kPa, 69kPa)

Fig. 6 Permanent strain with number of load repetition obtained using crushed rocks of quarry B (confining stresses: 35kPa, 69kPa)

식 (2)의 회귀계수값을 구하기 위해서 인공신경망 이론중 지반공학분야에 대한 적용이 효과적인 것으로 잘 알려진 LM (Levenberg-Marquardt)알고리즘을 사용[13]하여, 획득된 영구 변형시험 결과 데이터와 설정된 매개변수에 대한 통계분석을 실시하였다. LM 알고리즘은, 비선형 함수들의 제곱의 합으로 된 최소화 함수로 만들어진 Newton's method를 변형한 방법이다. LM 알고리즘에 대한 상세한 수학적 논리구성은 본 연구의 범위를 넘어섬으로 Kim and Kim [13] 또는 Hagan [14]을 참고할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 알고리즘을 프로그램내에서 선택, 구현시키도록 구성되어있는 통계분석 프로그램 SPSS[15]를 사용하였다. SPSS 프로그램 내에서 LM 알고리즘을 선택하고 선형 및 비선형 분석을 실시하여 영구변형 예측모델에 필요한 회귀 모델계수를 결정하였다. LM알고리즘을 이용한 SPSS 통계분석으로부터 최종적으로 제시된 예측모델은 아래 식 (3)과 같다.

$$\varepsilon_p = 0.081 \cdot e^{1.02 \times 10^{-6} N} \cdot e^{2.756 \frac{\tau}{\tau_f} N^{0.056}} \cdot E_R^{-0.191} \quad (3)$$

본 연구에서 제시한 예측모델은 반복재하횟수(N)와 전단 응력비(τ/τ_f)가 증가할수록 영구변형률이 비선형으로 증가하며 회복탄성계수가 클수록 영구변형률은 감소하는 경향을 분

명히 보인다. 또한 반복재하횟수가 계속해서 증가하여 어느 수준에 도달하면 영구변형률이 급격히 증가하여 결국 파괴에 근접하는 shakedown 특성 또한 설명할 수 있는 장점이 있다.

3. 예측모델의 적용성 평가

3.1 예측모델과 시험값의 비교

Fig. 7~Fig. 10은 A석산 및 B석산 강화노반 쇄석재료의 영구변형 시험결과와 위의 예측모델을 이용하여 구한 영구변형률을 비교, 도시한 그래프이다. 영구변형예측모델에 대한 매개변수로서 반복재하횟수, 전단응력비 그리고 시험에서 구한 회복탄성계수값을 사용하였으며, 실측값과 예측값은 영구변형 시험조건인 동일 전단응력비와 구속압 상황에서 비교하였다. A, B석산 쇄석재료 모두 전단응력비가 매우 낮은 경우($\tau/\tau_f=0.3$) 실측값과 예측값의 영구변형 발생패턴은 다소 차이가 발생하였지만, 총 영구변형률값은 비슷하거나 예측값이 약간 큰 것을 확인 할 수 있다. 또한 반복재하횟수가 증가되면서 전체적인 영구변형률의 크기는 예측값과 실측값이 매우 비슷한 크기가 되는 경향을 보였다. 반복재하 횟수가 약 5000회에 이르면 전체적으로 예측값과 실측값이

Fig. 7 Comparison of predicted permanent strain with measured values with number of load repetition: quarry A (confining stress: 35kPa)

Fig. 8 Comparison of predicted permanent strain with measured values with number of load repetition: quarry A (confining stress: 69kPa)

Fig. 9 Comparison of predicted permanent strain with measured values with number of load repetition: quarry B (confining stress: 35kPa)

Fig. 10 Comparison of predicted permanent strain with measured values with number of load repetition: quarry B (confining stress: 69kPa)

잘 맞는 것으로 확인 되었다. 위의 모델은 강화노반(M-40) 쇄석재료에만 해당하는 영구변형 예측모델이므로 추후 추가적인 시험과 분석을 통해 상부 흙노반의 영구변형에 대한 실험을 실시함으로써 적절한 예측모델을 개발한다면, 궤도 하부구조 설계인자중 중요한 설계인자로서 영구변형을 채택할 수 있을 것이다. 또한 설계하고자 하는 궤도 하부구조에 대한 구조해석을 병행하여 전단응력비의 분포 즉, 구조층재료의 전단강도 대비 전단응력비를 파악함으로써 영구변형값을 예측하고 이에 기초하여 설계의 안정성 여부를 판단할 수 있을 것이다.

3.2 예측모델 매개변수 변화에 따른 민감도분석

Fig. 11 및 Fig. 12는 본 연구에서 제시한 영구변형 예측모델(식 (3))의 영향인자들 (반복재하횟수, 전단응력비, 탄성계수)에 대한 민감도 분석을 실시한 결과 그래프이다. 먼저 Fig. 11은 동일 탄성계수에서 전단응력비에 대한 민감도 분석 결과를 도시한 것이다. 반복재하횟수 증가에 따라 영구변형률은 비선형으로 증가하는 경향을 보였고, 전단응력비가 증가할수록 영구변형률도 증가하였다. 전단응력비가 0.5 이상의 경우 영구변형률이 급격히 커지는 경향을 보였다. 이는 해당층의 전단강도에 대한 전단응력수준의 비를 의미하는 전단응력비가 영구변형에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한, Fig. 12와 같이 동일한 전단응력비조건($\tau/\tau_f=0.5$)에서 탄성계수만 증가시킬 경우 동일 반복재하횟수(N)에서

발생하는 영구변형률이 감소하는 경향을 보였다. 그러나, Fig. 11과 Fig. 12를 단순비교할 경우 영구변형에 미치는 영향에 있어서 전단응력비가 탄성계수보다 더 민감한 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 식 (2)의 예측모델을 이용하여 충분히 반복재하횟수를 증가시켰을 때의 영구변형률 변화추이를 도시한 것이다. 각각 반복재하횟수 $N=100,000$ 회에서와 반복재하횟수 $N=1,000,000$ 회에서의 영구변형률을 비교한 것이며, 20000회에서부터 영구변형 예측값은 비선형으로 서서히 증가하며, 반복재하횟수 800,000회 이상부터는 영구변형이 급격히 증가하여 파괴에 근접하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

아래 Fig. 14는 개발된 영구변형 예측모델에 사용된 매개변수(반복재하횟수, 전단응력비, 탄성계수)를 변화시킬 때 영구변형률 예측값의 민감도를 분석한 결과 그래프이다. 각 전단응력비수준 $\tau/\tau_f = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 에서 탄성계수 $E=100\text{MPa}, 200\text{MPa}, 300\text{MPa}$ 로 값의 변화를 주면서 영구변형률 발생 추세를 조사하였다. 민감도 분석결과 영구변형률 예측값은 전단응력비에 의해 가장 큰 영향을 받는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 특히, 전단응력비 0.9의 경우 반복재하횟수 증가시 급격히 영구변형률이 증가하면서 결국 파괴에 근접하는 경향을 보였다. 이는 파괴에 근접할 수 있는 매우 높은 응력수준의 전단응력비이므로 다른 전단응력비에 비해 반복재하횟수가 적게 발생해도 급격하게 영구변형률이 증가함을 뜻하며 궤도 기초의 영구변형 설계제한값 설정을

Fig. 11 Sensitivity analysis of permanent strain with shear stress ratio

Fig. 12 Sensitivity analysis of permanent strain with elastic modulus ($\tau/\tau_f=0.5$)

Fig. 13 Effect of number of load repetition on permanent strain generation

Fig. 14 Sensitivity analysis of developed prediction model with change of $(N, \tau/\tau_s, E_R)$ for permanent deformation of trackbed foundation

위해서는 강도정수에 입각한 전단응력비를 일정값 이내가 되도록 제한하는 방법을 취할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 강화노반재료로 사용될 가능성이 매우 높은 M-40쇄석재료를 사용하여 직경 $D=30\text{cm}$, 높이 $H=60\text{cm}$ 의 대형다짐시편을 제작하고 반복삼축압축시험을 실시하였으며 시험결과로부터 해당 재료의 영구변형 특성 및 회복탄성 특성을 파악하였다. 인공신경망이론을 이용하여 영구변형의 대표적인 영향인자로서 반복재하횟수, 전단응력비, 탄성계수를 사용하는 영구변형예측모델을 개발하였으며, 반복삼축압축시험에서 획득한 회복탄성계수(E_R)와 영구변형률(ϵ_p)을 통계처리 프로그램인 SPSS 내에서 LM알고리즘을 기반으로 회귀분석을 실시하여 회귀계수값을 산정하였다. 확정된 회귀계수가 적용된 영구변형 예측모델을 이용하여 시험결과와 비교한 결과 총 영구변형률값은 비슷하거나 예측값이 약간 크게 발생하여 보수적 설계와 검토가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 반복재하횟수가 증가할수록 예측 영구변형률의 크기가 실측값에 더욱 근사하는 결과를 보였다.

Power모델과 같은 기존의 영구변형 예측모델들은 비교적 단순하게 반복재하횟수의 영향만을 고려하여 영구변형에 미

치는 영향인자들을 구체적으로 고려하지 못하는 단점이 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 영구변형 예측모델은 정밀하게 하부구조가 경험하는 응력조건 등을 반영할 수 있어 기존의 예측모델을 대체할 수 있을 것으로 판단되지만, 국내의 대표적인 일부 강화노반 쇄석재료에 대해서만 적용된 한계점이 있으며, 이는 추가로 여러 가지 강화노반 쇄석재료에 대한 시험을 통해 오차범위를 줄여 일반적인 모델로 보완할 수 있을 것이다. 또한, 추후 상부노반 재료에 대한 영구변형 실험을 통해 적합한 예측모델을 추가로 개발한다면, 궤도 하부구조 설계인자중 중요한 영향인자로서의 영구변형을 설계단계에서 직접 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운영비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발”(-고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 궤도구조 개발-) 과제 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.: 2012R1A1A4A01009639)의 성과물로서 양 기관의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Li, E. T. Selig (1998) Method for railroad track foundation design. I: development, *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, ASCE, 124(4), pp. 316-322.
- [2] UIC (1994) *Earthworks and track-bed layers for railway lines. UIC Code 719R*, International Union of Railways, Paris, France.
- [3] D.L. Heath, M.J. Shenton, R.W. Sparrow, J.M. Waters (1972) Design of conventional rail track foundations, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 51, pp.251-267.
- [4] E.C. Shin, H.S. Yang, C.Y. Choi (2008) Estimation of Reinforced Roadbed Thickness based on Experimental Equation, *Proc. 2012 Spring Conf. Korean Society for Railways*, pp. 1734-1742.
- [5] R.D. Barksdale (1972) Laboratory evaluation of rutting in base course materials, *Proc. 3rd Int. Conf. on the Structural Design*

- of Asphalt Pavements, London.
- [6] E.T. Selig, C.S. Chang (1981) Soil Failure Modes in Undrained Cyclic Loading, *Journal of Geotechnical Eng. Division*, ASCE, 107(GT5), pp. 539-551.
- [7] P. Gräbe, C. Clayton (2009) Effects of Principal Stress Rotation on Permanent Deformation in Rail Track Foundations, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(4), pp.555-565.
- [8] I.T. Kim (2005) *Permanent deformation behavior of airport flexible pavement base and subbase courses*, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [9] A.A. van Niekerk (2002) *Mechanical behavior and performance of granular bases and sub-bases in pavement*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- [10] L.W. Cheung, A.R. Dawson (2002) Effects of Particle and Mix Characteristics on the Performance of some Granular Materials, *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, pp. 90-98.
- [11] L. Korkiala-Tanttu (2008) *Calculation Method for Permanent Deformation of Unbound Pavement Materials*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Env. Engineering, Helsinki Univ. of Tech., Helsinki, Finland.
- [12] N. Janbu (1963) Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests, *Proc. Euro. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wissbaden, Germany, Vol. I, pp. 19-25.
- [13] Y. S. Kim, D. M. Kim (2009) Evaluation for Applications of the Levenberg-Marquardt Algorithm in Geotechnical Engineering, *Journal of Korean Geo-environmental Society*, KGS, 10(5), pp. 49-57.
- [14] Hagan, M.T. (1996) *Neural network design*, 1st ed, PWS Pub., Boston.
- [15] IBM (2010) SPSS: the Statistical Package for the Social Sciences program, USA.
- [16] M. Sagong, D.H. Kim, C.Y. Choi (2008) Evaluation of the Resilient and Permanent Behaviors of Cohesive Soils, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(1), pp.61-68.

접수일(2012년 9월 11일), 게재확정일(2012년 10월 29일)

Yujin Lim : yujin@pcu.ac.kr

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering,
PaiChai University, 155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon 302-735,
Korea

Jungkyu Hwang : zzon202@sedamenc.com

Sedam E&C, 4F Serim Bldg., 94 SeoungSu-Ro, SeongDong-Gu,
Seoul 133-110, Korea

Hojin Cho : hojiny81@naver.com

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering,
PaiChai University, 155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon 302-735,
Korea