

회복탄성계수 예측모델을 이용한 철도노반의 거동 분석

An Analysis of Railroad Trackbed Behavior Using Resilient Modulus Prediction Models

박철수* 정재우** 오상훈*** 김은정*** 목영진†
Park, Chul-Soo Jung, Jae-Woo Oh, Sang-Hoon Kim, Eun-Jung Mok, Young-Jin

ABSTRACT

In the trackbed design using an elastic multi-layer model, the stress-dependent resilient modulus is the key input parameter, which reflects substructure performance under repeated traffic loading. The prediction models of resilient modulus of crushed stone and weathered granite soil were developed from nonlinear dynamic stiffness, which can be combined by in-situ and laboratory seismic measurements. The models accommodate the variation with the deviatoric and/or bulk stresses. To investigate the performance of the prediction models proposed, the elastic response of the test trackbed near PyeongTaek, Korea was evaluated using a 3-D nonlinear elastic computer program (GEOTRACK) and compared with measured elastic vertical displacement caused by the passages of freight and passenger trains. The material types of the test sub-ballasts are crushed stone and weathered granite soil, respectively. The calculated vertical displacements within the sub-ballasts are within the order of 1mm, and agree well with measured values with the reasonable margin. The prediction models are thus concluded to work properly in the preliminary investigation.

1. 서 론

노반의 회복탄성계수는 열차의 반복하중에 의한 궤도하부 거동을 좌우하는 인자로서 다층탄성모델을 이용한 노반 설계에 가장 중요한 설계 물성이다. 그러나 열차의 반복하중에 의한 철도노반의 회복탄성 거동을 이상적으로 묘사할 수 있는 기존의 시험법은 적용에 어려움이 많아 현장 및 실내 시험으로부터 획득한 동적물성치를 이용하여 토사노반 및 쇄석노반 재료의 회복탄성계수 모델을 개발하였다. 열차 운행 중에 노반이 경험하는 응력 조건을 고려하여 동적물성치로부터 결정된 회복탄성계수는 축차응력 및 체적응력을 함수로 한 거듭제곱 형태의 예측모델로 제안하였다. 본 연구에서는 제안된 회복탄성계수 예측모델을 검증하기 위해 3차원 다층탄성해석에 회복탄성계수 예측모델을 입력변수로 적용하여 수치해석을 수행하였고, 수치해석의 결과인 수직 탄성변위를 현장 계측치와 비교하였다. 수치해석에 필요한 레일과 침목 물성, 그리고 열차의 운행 속도를 고려한 동적 윤택중은 계측 현장의 조건과 동일하게 적용하였다. 대상 계측 현장은 평택에 위치한 강화노반 현장부설 구간이며 속도계를 이용하여 계측위치에서 열차 통과시 윤택중에 의한 노반 내부의 입자 진동속도 시간이력과 스펙트럼을 계측하였고, 계측된 결과를 적분하여 노반의 수직 탄성변위로 환산하였다.

* 경희대학교 토목공학과, 박사과정, 정회원

** 경희대학교 토목공학과, 박사과정, 비회원

*** 경희대학교 토목공학과, 석사과정, 비회원

†교신저자 : 경희대학교 토목건축대학, 교수, 정회원

E-mail : yjmok@khu.ac.kr

TEL : (031)201-2927 FAX : (031)202-8854

2. 현장부설구간 강화노반 재료의 회복탄성계수

2.1 대상 현장 개요

본 연구에서는 평택에 위치한 강화노반 현장부설구간의 쇄석 및 토사 재료의 회복탄성계수 예측모델을 제안하고 검증하고자 현장 탄성과 시험과 열차 운행에 따른 노반의 진동을 계측하였다. 대상 현장은 경부선 수원-천안간 2복선 구간 중 서울기점 상2선 70k400m~70k560m 구간으로 직선 구간이다. 원지반은 논이며 양질의 토사를 이용하여 성토고 3m, 폭 10m, 비탈구배 1: 1.5로 되어있다(철기연 2000). 현장 계측이 수행된 평택의 강화노반 현장부설구간의 단면 층은 그림 1과 같이 자갈도상(ballast) 아래에 노반(sub-ballast), 노상(subgrade), 원지반(foundation) 순으로 층을 구성하고 있다. 본 논문에서는 도상 아래에 위치하여 동일한 기능을 수행하지만 각기 다른 용어로 표현되는 강화노반 혹은 입도조정층을 포함한 보조도상을 혼용을 피하기 위해 노반으로 통일하여 사용하기로 한다. 입자속도 계측 위치는 노반 층을 구성한 재료가 각기 다른 두 개소이며 노반의 두께는 0.8m로 동일하다. 첫 번째 단면은 양질의 토사재료를 다짐도 95%이상으로 충분히 잘 다져 노반 층을 구성하였고 다른 위치의 단면은 입도조정쇄석으로 노반 층을 구성하였다. 속도계를 이용한 입자 진동속도 계측은 크로스홀 시험을 수행한 기존의 검측공을 활용하였고, 현장부설구간의 단면도와 열차운행 진동 계측위치는 그림 1에 나타내었다.

2.2 비선형 변형계수를 이용한 회복탄성계수 예측모델

철도노반은 열차의 반복하중 상태에서 중간변형률($10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$)에 해당하는 변형을 경험한다. 이와 같은 운행환경이 반영된 노반의 역학적 물성치는 회복탄성계수로 표현된다. 회복탄성계수는 이론적으로 가장 이상적이고 노반이 경험하는 응력상태 등이 잘 반영된 탄성계수임에도 불구하고 그 값의 결정 방법이 매우 어렵고 보편화되어있지 않다. 따라서 현장의 크로스홀 시험과 실내 공진주시험을 도입하여 동적물성치를 획득하고, 이를 이용하여 토사노반 및 쇄석노반 재료의 회복탄성계수를 결정하였다.

대표적인 노반의 동적물성치는 전단파속도 또는 전단변형계수(G , shear modulus)이다. 현장 탄성과 시험을 통해 측정된 전단파속도로부터 최대전단변형계수(G_{max})를 획득할 수 있고, 실내 공진주시험 또는 경험곡선으로부터 결정된 중간변형률 영역의 정규화 전단변형계수 감소곡선(G/G_{max})을 결합하여 변형률 크기에 따른 철도노반의 전단변형계수 감소곡선(shear modulus reduction curve)을 획득한다. 전단변형계수 및 전단변형률은 그림 2와 같이 포아송비(ν , poisson's ratio)를 이용하여 영탄성계수(E , Young's modulus)와 축변형률(ϵ)로 변환된다. 노반(sub-ballast)의 깊이에 따른 구속응력이 반영된 비선형 영탄성계수로부터 노반이 경험하는 축차응력(변형률 크기)에 해당하는 영탄성계수를 회복탄성계수로 대체한다. 쇄석노반 구속응력 범위는 5kPa에서 110 kPa으로 설정하였고 토사노반의 경우 4kPa에서 16kPa의 범위를 구속응력으로 적용하였다.

대체 시험법으로 각 재료에 대하여 결정된 회복탄성계수(그림 3)를 거듭제곱 형태(power relationship)의 예측모델 식에 적용하고 회귀분석(regression analysis)을 통하여 모델상수(k , model parameter)를 결정하였다. 쇄석 재료에 대해 제안된 회복탄성계수는 동일한 구속응력에서는 축차응력(σ_d)이 증가함에 따라 감소하였으며 구속응력(또는 체적응력)이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 쇄석의 회복탄성계수 예측모델은 축차응력과 체적응력이 모두 고려된 거듭제곱 형태의 예측모델을

그림 1. 계측현장 철도노반 단면의 층 구성 및 계측 위치

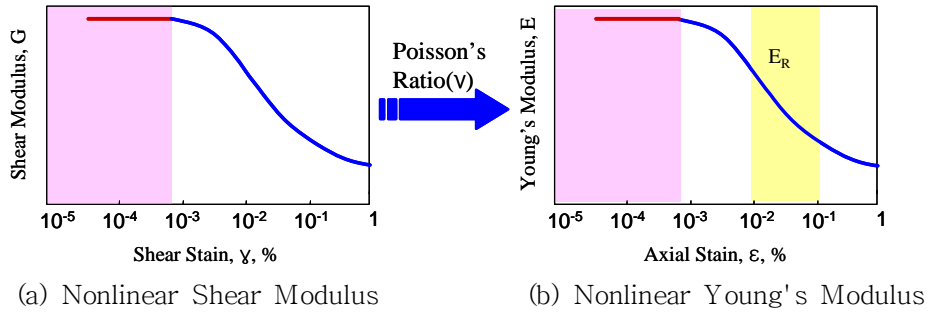


그림 2. 영 탄성계수와 축변형률 관계 결정 과정

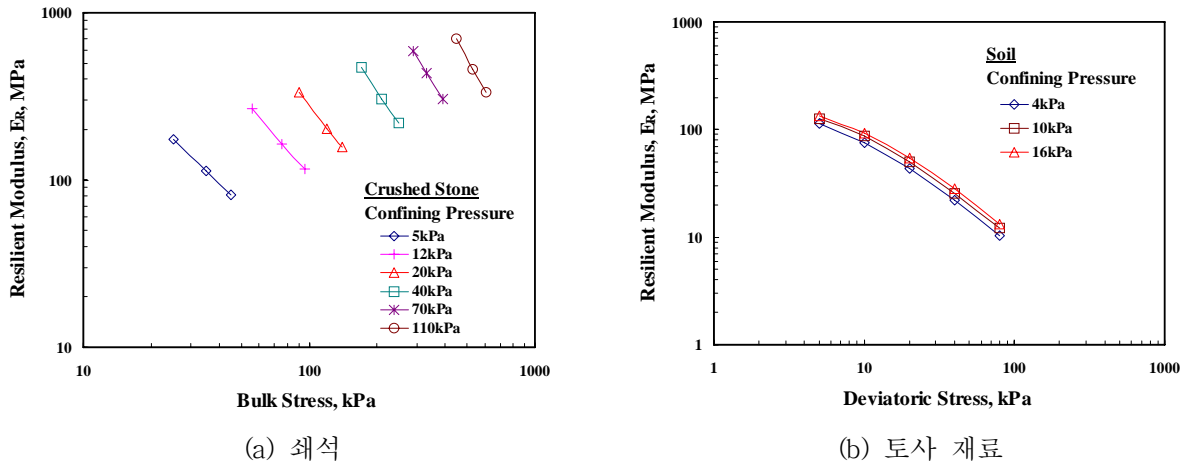


그림 3. 체적응력 또는 축차응력에 따른 쇄석과 일반 토사 재료의 회복탄성계수(박철수 등, 2008)

적용하는 것이 타당하였다. 토사 재료의 경우 회복탄성계수는 충분히 잘 다져진 상태에서 상대적으로 구속응력의 영향이 크지 않아 축차응력만을 모델 변수로 사용하였다. 제시된 예측모델에 대하여 결정된 모델상수는 시험과정에서 적용된 응력의 범위 내에서 사용 가능할 것으로 판단된다.

해석과 현장의 탄성변위 계측은 양질의 토사 재료와 입도 조정 쇄석으로 조성된 두 위치에 대해 모두 수행되었다. 해석에 사용된 각 층의 재료에 대한 역학적 물성치는 도표 1에 정리하였다. 토사 노반과 쇄석 노반의 탄성과 속도(P-파, S-파)와 포아송비(ν)는 크로스홀 시험을 이용하여 계측된 결과이다(목영진 등, 2007). 각 층의 입력 변수 중 가장 중요한 변수는 응력의 함수로 표현되는 재료에 따른 적절한 회복탄성계수(E_R) 예측모델이다. 해석 시 도상층의 입력 회복탄성계수 예측모델은 프로그램에서 도상층에 대해 제공하는 체적응력(θ)의 거듭제곱 형태의 모델과 모델상수를 적용하였다. 그 외의 토사 노반층, 쇄석 노반층, 노상층, 그리고 원지반의 회복탄성계수 예측모델과 모델 상수는 동적물성치를 이용하여 대체 시험법으로 결정된 식을 적용하였다(박철수 등, 2008).

도표 1. 계측현장 철도노반의 층별 역학적 물성치

Trackbed Layer	Material Type	Thickness (m)	γ_t (kN/m ³)	Poisson's Ratio (ν)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	Resilient Modulus, E_R (MPa)
Ballast		0.3	25	0.28	-	-	$1569P_a(\frac{\theta}{P_a})^{0.535}$
Sub-Ballast	Weathered Soil	0.8	19.73	0.33	357	182	$559.28(\sigma_d)^{-0.85}$
	Crushed Stone		23.07	0.26	461	254	$16.8(\theta)^{1.87}(\sigma_d)^{-1.6}$
Subgrade		2.2	19.8	0.33	-	-	$559.28(\sigma_d)^{-0.85}$
Foundation		-	18	0.3	-	-	$559.28(\sigma_d)^{-0.85}$

Note θ [kPa], σ_d [kPa], $P_a=100$ kPa

3. 탄성변위 예측을 위한 3차원 다층탄성해석

철도의 궤도는 레일, 침목, 도상부 등 간단한 구조로 되어 있으나, 열차하중이 작용할 때 레일 및 침목을 포함하여 궤도하부구조인 철도노반에서의 응력은 다양하게 변화한다. GEOTRACK은 이와 같은 궤도구조를 해석하기 위해 다층탄성이론을 적용한 모델을 기본으로 한다(Chang et al., 1980; Selig and Waters, 1994). GEOTRACK은 윤하중, 레일과 침목의 물성치, 침목 간격, 궤도하부구조의 물성치와 층두께 등을 고려하여 도상, 보조도상(노반), 노상, 그리고 원지반에서의 3차원 상태의 응력 및 수직 변위를 해석할 수 있다. 특히 궤도하부 철도노반의 각 층에 응력 의존적인 회복탄성계수를 입력변수로 사용한다. 해석 초기에 가정한 회복탄성계수로부터 해석을 통해 궤도하부 각 층의 응력이 계산되면 이 응력을 각 층의 회복탄성계수 예측모델에 적용하여 궤도하부 각 층의 회복탄성계수를 다시 결정하게 된다. 결정된 회복탄성계수는 다시 해석에 사용되고 각 층의 응력이 수렴할 때 까지 반복된다. GEOTRACK은 대개 3번의 반복해석(iteration)을 통해 궤도하부 각 층의 응력이 수렴한다. 수렴된 마지막 단계의 수직 변위가 적용된 열차 윤하중에 대한 노반 각 층의 탄성변위이다.

제안된 회복탄성계수 예측모델을 입력변수로 적용하여 노반의 탄성거동을 분석하기 위해 3차원 다층탄성해석 프로그램인 GEOTRACK 프로그램을 사용하였다. GEOTRACK은 철도노반의 물성치를 4개의 층으로 구분하여 입력할 수 있다. 수치해석에 필요한 레일과 침목 물성, 그리고 열차의 운행 속도를 고려한 동적 윤하중은 계측 현장의 조건과 동일하게 적용하였다.

GEOTRACK은 설정된 각 층 내부의 해석 위치에서 상재하중에 의한 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 실제 철도노반의 현상은 해석 위치로부터 상부에 해당하는 철도노반 층이 상재하중으로 작용하기도 하지만 그만큼 유효응력이 증가하여 구속효과를 갖게 된다. 그러나 본 연구에서 사용한 GEOTRACK은 토공노반의 유효응력을 배제하고 단지 열차의 윤하중만을 고려할 수 있다. 해석 결과의 분석 시 이러한 점을 반드시 고려해야 할 것이다.

3.1 열차의 동적 윤하중 결정

GEOTRACK을 이용한 3차원 다층탄성해석의 입력 윤하중은 각 층의 물성치와 더불어 해석결과에 지배적인 영향을 미치는 변수이므로 열차 하중의 산정은 매우 중요하다. 철도의 궤도 구조는 침목 중앙의 궤도 중심선을 기준으로 대칭이며, 해석 프로그램에서 열차의 하중을 적용할 때 대칭이 되는 궤도의 한쪽 레일이 위치한 침목에 열차 하중(축중, axial load)의 절반인 윤하중(wheel load)을 재하 시켜 해석하도록 되어있다. 해석시 레일의 위치는 전체 침목길이 1/2부분을 침목 바깥쪽부터 궤도 중심선까지 5개의 부분(segment)으로 나누어 침목 바깥쪽으로부터 2번째와 3번째 부분(segment)의 사이에 놓이게 된다. 바로 이 지점이 열차 윤하중의 재하 위치가 된다.

도표 2. 계측현장 통과열차의 동력 및 차량 제원

Train	No. of Engine/Car	Engine	Length (mm)	Bogie Spacing (mm)	Static Axle Load (kN)
Passenger (Electric)	10	Electric Rail Car (Class 5000 series)	20,000	13,800	86
Freight	1/20	Diesel Locomotive (Class 7000 series)	19,650	12,540	220

도표 3. 열차 통과속도를 고려한 열차운행 동적 윤하중

Train	Elapsed Time (sec)	Passing Speed (km/hr)	Impact Factor (i)	Dynamic Axle Load (kN)	Wheel Load (kN)
Passenger (Electric)	9	55	1.17	100	50
Freight	13	73	1.22	268	134

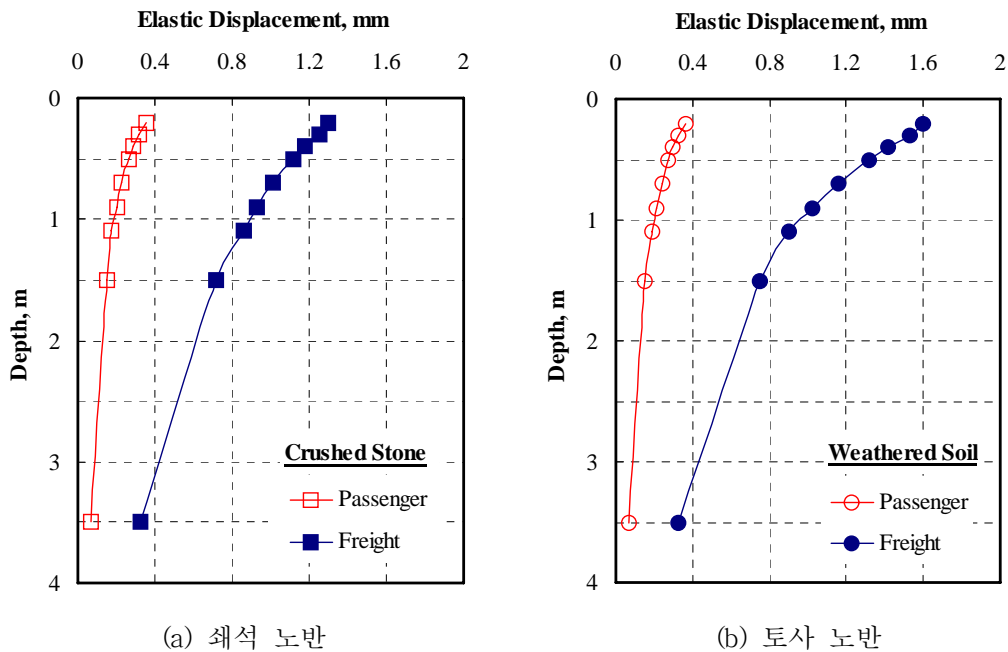


그림 4. GEOTRACK을 이용한 다층탄성해석으로 결정된 토사노반 및 쇄석노반의 탄성변위

프로그램의 입력 열차 운하중은 계측이 실시된 현장을 통과하는 열차의 하중을 적용하였다. 계측 운행선의 통과 열차는 화물열차와 여객열차(전동차)이며 열차의 동력 및 차량 제원은 도표 2와 같다. 일반적으로 철도노반의 응력 및 변형 특성은 궤도 구조, 운하중, 열차 속도 등이 함께 고려되어야 하고 특히 열차운행에 따른 동적 운하중은 열차 속도에 의한 충격계수(impact factor)가 반드시 곱해져야 한다 (Hwang, 2004).

열차의 통과 속도는 계측구간의 통과 시간과 열차의 길이를 고려하여 현장에서 직접 측정하였다. 평균적으로 전동차의 통과 속도는 55km/hr였으며, 양회를 운반하는 화물차의 경우 대개 73km/hr였다. 전동차는 통과구간 직전에 지체역에 정차하고 출발하는 열차여서 완전히 가속이 완료되기 전의 속도로 다소 느리게 통과 하였다. 충격계수는 직선부 장대레일(1+0.3V/100)을 기준으로 산정하였으며 계산된 충격계수는 각각 1.17과 1.22였다. 도표 2의 열차 종류에 따른 정적 축하중에 열차 통과 속도가 고려된 충격계수를 곱하여 동적 축하중이 계산되면 동적 축하중의 절반이 해석에 적용되는 열차 운하중이 된다. 이와 같은 일련의 결과는 도표 3에 정리하였다.

3.2 다층탄성모델을 이용한 탄성변위 예측 결과

GROTRACK을 이용한 수치해석으로부터 전동차 및 화물열차에 의한 토사 노반과 쇄석 노반의 수직 탄성변위가 결정되었다(그림 4). 그림 4의 깊이는 도상층 표면으로부터의 깊이이며, 0.3m 두께의 도상층 아래 0.8m 두께의 노반층에 해당하는 깊이는 0.3m에서 1.1m 까지 이다.

전동차가 하중으로 작용할 때는 토사 노반과 쇄석 노반의 탄성변위가 0.4mm 이내에서 노반 깊이에 따라 감소하였다. 노반 재료에 따른 차이는 크지 않았으나 토사노반의 변위가 쇄석 노반보다 약간 크게 평가되었다.

화물열차에 의한 토사 및 쇄석 노반의 변위는 대략 1mm 내외의 크기를 보였으며 쇄석 노반의 변위가 토사 노반보다 작았다. 토사 노반과 쇄석 노반의 변위 차이는 전동차가 열차하중으로 작용할 때보다 화물열차가 열차하중으로 작용할 때 상대적으로 컸다.

열차 하중에 관계없이 토사 노반의 변위가 쇄석 노반의 변위보다 크게 결정된 이유는 응력의 함수로 표현되는 회복탄성계수 모델이 각각 다르고 노반 재료에 따른 노반내부 응력의 차이 때문이다. 결론적으로 회복탄성계수가 더 큰 쇄석에서 상대적으로 작은 탄성변위를 보인 것이다. 노반 재료에 관계없이 열차하중에 의한 노반의 탄성변위는 화물열차가 전동차 보다 3배 가까이 컸다. GEOTRACK의 입력 변

수인 열차 율하중이 전동차는 50kN, 화물열차는 134kN이었던 점을 감안하면 프로그램 특성상(상재하중에 의한 구속효과를 반영하지 못함) 열차 율하중에 의한 변위 결과의 민감도가 큰 것은 당연한 결과로 보인다.

4. 노반의 수직 탄성변위 현장계측

4.1 속도계를 이용한 노반의 입자 진동속도 계측

지반의 진동을 계측하기 위해서 사용되는 대표적인 센서로는 지반의 가속도를 측정하는 가속도계 (accelerometer), 속도를 측정하기 위한 속도계 (geophone), 변위를 측정하기 위한 변위계 (displacement transducer)가 있다. 변위 측정을 위해서는 고정 기준점 (fixed reference point)이 필요하나 진동측정의 경우 고정 기준점 설정의 어려움으로 인하여 중력에 대하여 기준을 삼는 가속도계와 속도계가 사용되고 있다. 특히, 건설 및 교통하중에 의하여 유발되는 진동주파수 대역은 대략 10-100Hz 대역 이므로 이 영역에서 진동 측정이 용이한 속도계가 주로 사용되고 있다 (김동수 등, 1997).

속도계는 종류에 따라 적용 가능한 주파수 대역이 다르므로 계측할 진동의 주파수 대역에 부합하는 속도계의 선택이 매우 중요하고 사용 속도계의 주파수 대역에 따른 응답특성을 정확히 파악하고 있어야 한다. 본 연구에서 동적 율하중에 의한 노반의 거동을 계측하기 위해 사용한 속도계는 공진 주파수가 4.5Hz인 Mark product社의 L-10B (3740hms) 모델이다. 사용된 속도계의 주파수에 따라 일정한 출력 전압을 발생시켜주는 주파수 대역은 10-100Hz이고, 출력 전압이 일정한 주파수 대역에서 진동의 입자속도에 대한 전기적 출력비를 나타내는 감도 (sensitivity)는 0.276V/cm/sec 이었다. 계측 현장에 기존의 PVC 케이싱을 설치한 NX 크기 (직경 76mm) 검측공을 활용하기 위해 검측공에 삽입할 감지기를 제작하였고 계측위치에 삽입된 감지기가 노반에 밀실하게 고정 (coupling) 되도록 하기 위해 공기주머니 (air packer)를 사용하였다. 감지기에는 수직 (vertical) 방향으로 민감한 속도계를 내장하여 열차하중에 의한 노반의 수직 진동이 계측되도록 하였다.

계측이 수행된 운행선은 서울방향의 전동차와 화물열차가 열차 하중으로 작용하였고 30cm의 자갈도상, 80cm 두께의 노반 (강화노반), 2.2m의 토사 성토 노상, 그리고 실트질 모래의 원지반으로 구성되어 있다. 열차운행 율하중에 의한 입자 진동속도는 노반의 재료가 다른 두 위치 (토사 노반, 쇄석 노반)에서 계측되었다. 토사 노반과 쇄석 노반에는 대략 3.5m의 간격을 가진 두 개의 검측공이 각각 보존되고 있다. 보존된 기존의 검측공은 크로스홀 시험이 가능하며 이미 계측된 탄성과 속도 (P-파, S-파) 결과가 있다 (목영진 등, 2007). 탄성과 속도는 입자속도 (particle velocity)와 달리 파의 전달 속도 (wave propagation velocity)이다 (그림 5). 열차하중에 의해 계측된 수직 입자속도로부터 적분을 통해 노반의 수직 탄성변위가 계산되고, 계측된 입자속도와 크로스홀 시험의 압축파 속도를 이용하면 평면파 (plane wave) 전달이론에 근거하여 노반의 수직 변형률 (axial strain)을 계산할 수 있다 (백영식 등, 1996; Stokoe, 1980).

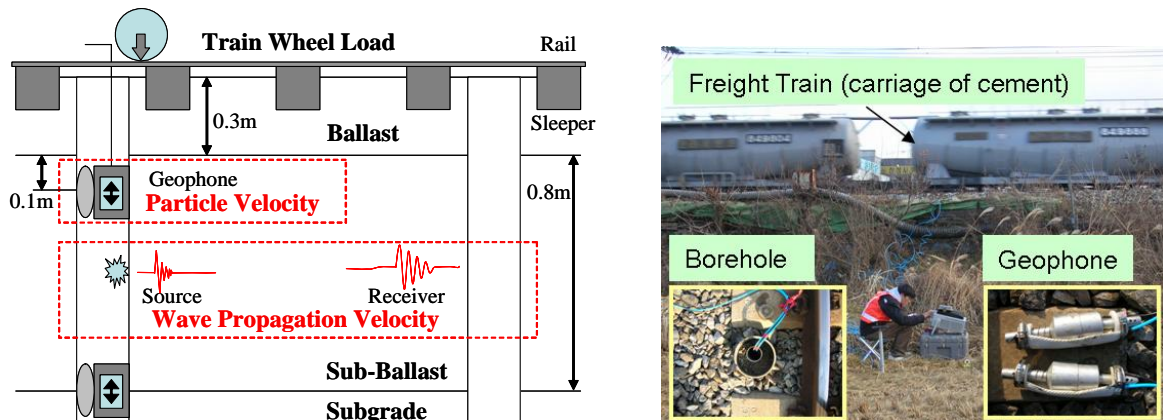
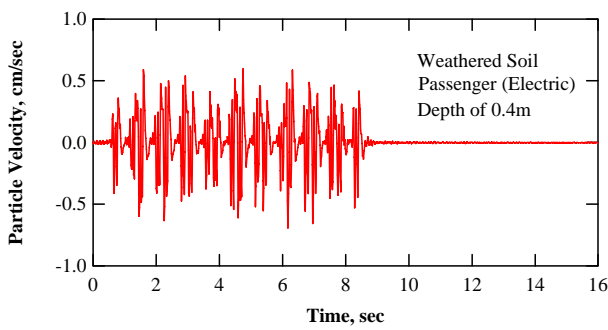
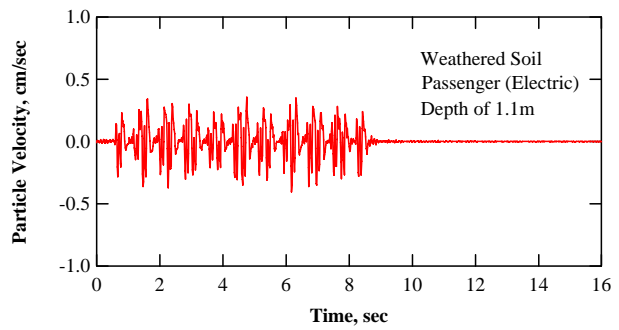


그림 5. 열차 율하중에 의한 노반 깊이별 입자속도 계측 개요도 및 계측전경
- 1717 -

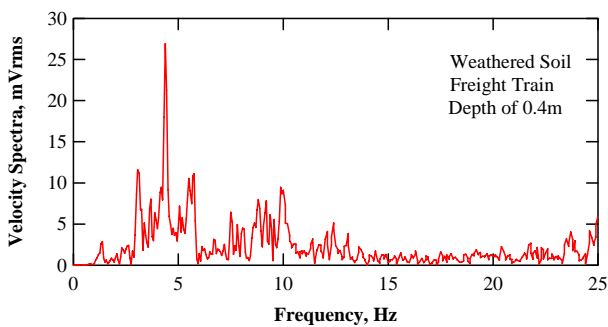


(a) Depth : 0.4m

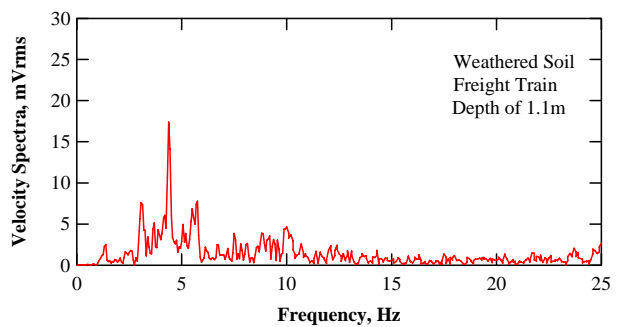


(b) Depth : 1.1m

그림 6. 진동에 의한 토사노반 입자속도 시간이력



(a) Depth : 0.4m



(b) Depth : 1.1m

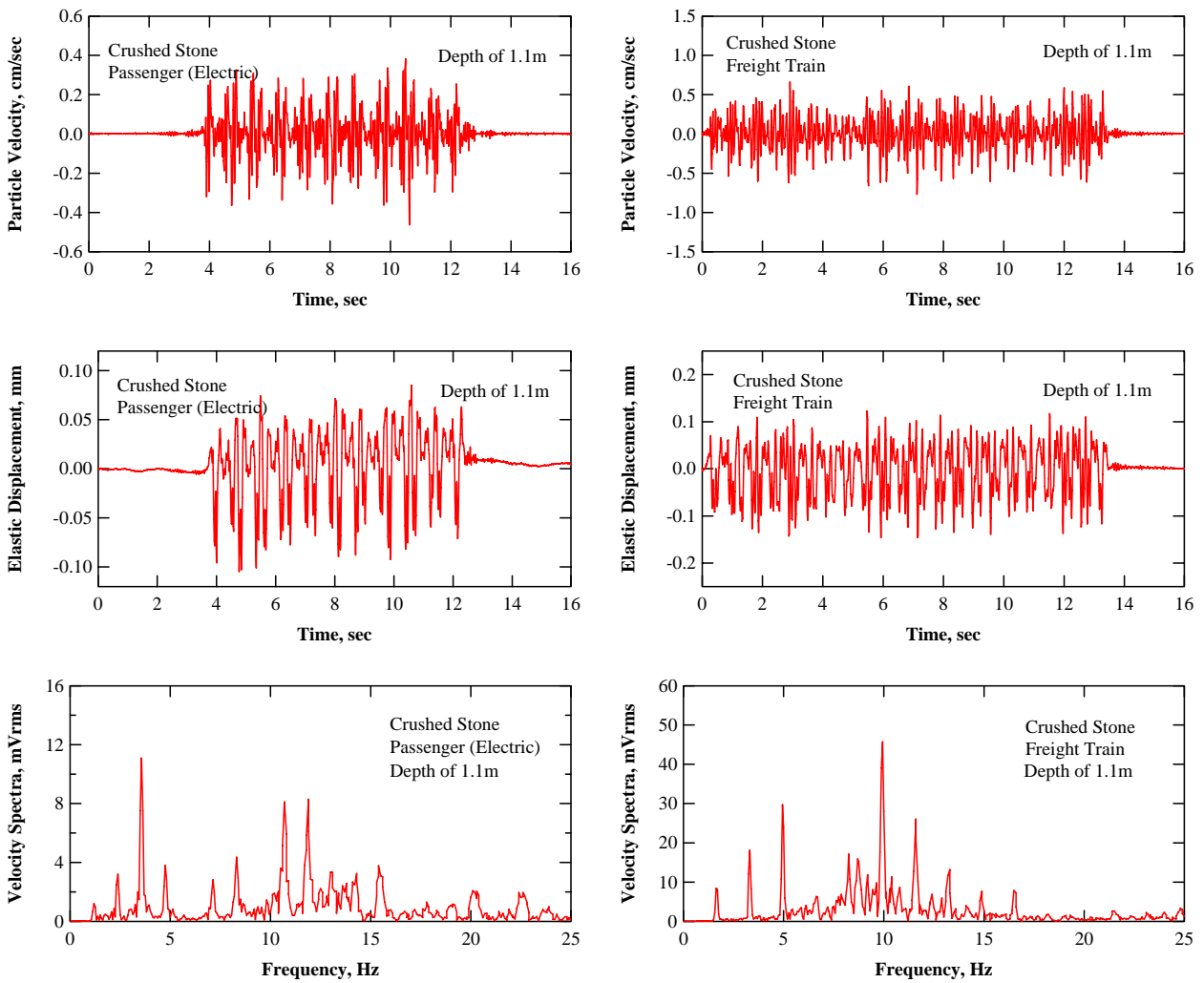
그림 7. 진동에 의한 토사노반 입자속도 스펙트럼

열차진동은 그림 5의 속도계 위치와 같이 두 개의 감지기를 사용하여 침목 아래로부터 40cm와 110cm 깊이의 노반(sub-ballast)에서 동일한 열차하중에 대해 동시에 계측되었다. 또한 노반의 입자속도는 시간영역과 주파수영역에서 동시에 계측되었다(목영진, 1993). 그림 5의 우측 사진은 화물열차가 통과할 때의 계측 전경이고 검측공은 레일에 바로 인접하여 침목 사이에 위치하고 있다.

계측 위치의 운행선을 통과하는 열차의 종류는 크게 화물열차와 여객열차 두 가지였다. 화물열차는 양회 운반, 컨테이너 운반 열차가 있었고, 여객열차는 전동차(전철)만 운행하였다. 아쉽게도 검측공이 보존된 계측 위치는 새마을호, 무궁화호가 통과하지 않는 운행선이어서 계측할 수 없었다. 또한 일부 직통 전동차를 제외하고 대부분의 전동차는 가까이에 인접한 지제역에 정차한 후 계측위치를 통과하기 때문에 전동차가 완전히 평균 주행 속도에 도달하기 전에 계측이 수행되었다.

열차하중에 의해 노반이 경험하는 진동은 속도계를 내장한 감지기에서 계측하고 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer, Agilent 35670A)를 이용하여 계측된 신호를 저장, 분석하였다. 최초 계측된 진동 시간이력은 속도계의 출력 전압으로 표현되지만 속도계의 감도로 나누어 입자속도에 대한 시간이력으로 변화하였다. 일반적으로 진동의 진폭은 여러 방법으로 정량화 될 수 있다. 정현파의 진동 진폭을 나타내는 방법으로는 최대-최대(peak-to-peak), 최대(peak), 평균(average), 그리고 RMS값 등이 있다. 본 연구에서는 계측된 입자속도 시간이력에서 peak-to-peak 값을 진폭으로 결정하였다.

그림 6은 열차가 통과할 때 도상 표면으로부터 깊이 0.4m(좌), 1.1m(우)에서 계측한 대표적인 입자속도 시간이력이다. 그림 6에서 보는바와 같이 토사 노반에서 전동차가 통과할 때 깊이가 깊어짐에 따라 입자속도는 상당히 줄어들을 알 수 있다. 계측 위치를 통과한 전동차는 특성상 별도의 동력 차량이 없고 객차로만 구성되어 있다. 객차의 편성 차량 수는 10개이고 차량당 2개의 대차가 연결되어 있다. 그림 6의 입자속도 시간이력에서 열차 통과시 주기적인 20개의 peak 값을 보이고 있다. 이는 열차하중이 대차를 통해 궤도 및 철도노반에 전달되고 있음을 보여주고 있다. 노반 내부의 입자 진동속도는 동적 신호분석기로부터 시간이력과 함께 주파수 스펙트럼을 동시에 계측하였다. 그림 7은 토사 노반에서



(a) 전동차

(b) 양회 운반 화물열차

그림 8. 쇄석노반의 입자속도 및 시간이력 탄성변위와 입자속도 스펙트럼

컨테이너 화물열차가 통과할 때 계측된 대표적인 깊이별 속도 스펙트럼이다. 속도 스펙트럼도 깊이에 따라 진폭이 크게 줄어들음을 확인할 수 있다. 컨테이너 화물열차는 양회를 운반하는 화물열차보다 상대적으로 느린 속도로 계측위치를 통과 하였으며 지배주파수(predominant frequency)가 대략 5Hz이었다.

그림 8은 쇄석노반의 깊이 1.1m에서 열차 종류에 따라 계측된 입자속도, 수직 탄성변위, 속도 스펙트럼이다. 노반의 수직 탄성변위는 입자속도 시간이력 데이터를 적분하여 구하였다. 입자속도의 시간이력은 DC성분을 포함하고 있어 이를 제거하고 적분하였다(백영식 등, 1996).

그림 8(a)는 전동차 통과시 계측된 결과로 대략 4Hz에서 지배주파수를 보였고 10-15Hz 사이에서도 다소 두드러지는 응답을 보였다. 그림 8(b)는 양회를 운반하는 화물열차가 하중으로 작용하여 계측된 결과이고, 속도 스펙트럼에서 지배주파수가 약 10Hz이었다. 앞서 그림 7의 컨테이너 화물열차와는 다른 주파수 대역의 응답을 보이고 있는데, 이는 열차 하중을 전달하는 대차의 계측위치 통과 속도가 다르기 때문이다. 즉, 상대적으로 더 빠른 속도를 보인 양회 운반 화물열차의 지배주파수가 보다 큰 것을 알 수 있다.

4.2 계측 결과 및 분석

계측된 입자속도, 탄성변위, 수직 변형률을 그림 9, 10, 11과 같다. 각각의 동일한 노반에서 전동차보다 화물열차에 의한 노반의 탄성변위가 더 크음을 알 수 있다. 또한 열차 하중에 관계없이 쇄석 노반의

탄성변위가 토사 노반의 탄성변위보다 작았다. 이는 수치해석 과정에서도 설명하였지만, 반복하중에 의한 재료의 역학적 특징을 대표하는 회복탄성계수의 차이 때문이다. 쇄석 재료의 회복탄성계수가 토사 재료의 회복탄성계수보다 크기 때문에 결국 쇄석 노반의 탄성변위가 더 작게 측정된 것이다.

두드러진 특징은 열차 하중에 관계없이 토사 노반과 쇄석 노반의 깊이에 따른 거동이 상이하다는 점이다. 토사 노반의 경우 깊이 0.4m의 탄성변위 보다 깊이 1.1m의 탄성변위가 확연하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그러나 쇄석 노반의 거동은 깊이가 깊어짐에 따라 토사 노반에 비해 상대적으로 작은 크기만 감소하였다. 이러한 차이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 열차하중이 토사노반을 통과 할 때는 노반 상부에서 상대적으로 큰 탄성변위가 발생하면서 노반 하부로 전달되는 열차 하중의 에너지가 상부에 비해 크게 감소하였다. 그러나 쇄석 노반의 경우 열차가 통과 할 때 노반의 상부와 하부 구분 없이 골고루 열차 하중이 전달되어 쇄석 노반층 전체가 토사 노반에 비해 상대적으로 강체(rigid body)와 유사하게 거의 함께 거동한 것으로 보인다.

그림 11은 측정된 최대 입자속도와 크로스홀 시험의 압축과 속도를 이용하여, 열차하중이 주기적(periodic)이고 노반 내부에서 1차원 평면과 전달이라는 가정 하에 계산된 수직 변형률(axial strain)이다. 토사 노반의 수직 변형률은 0.003-0.007%의 범위에서 깊이가 깊어짐에 따라 크게 감소하였고 화물열차에 의한 변형률이 전동차보다 더 컸다. 쇄석 노반의 경우 0.002-0.004%의 범위를 보였으며 노반 내부에서 깊이가 깊어짐에 따라 약간만 감소하였다. 토사 노반과 마찬가지로 화물열차에 의한 변형률이 전동차보다 컸다. 전반적인 거동 양상은 탄성변위와 비슷하였으며 앞에서 언급한 이유를 근거로 설명할 수 있겠다.

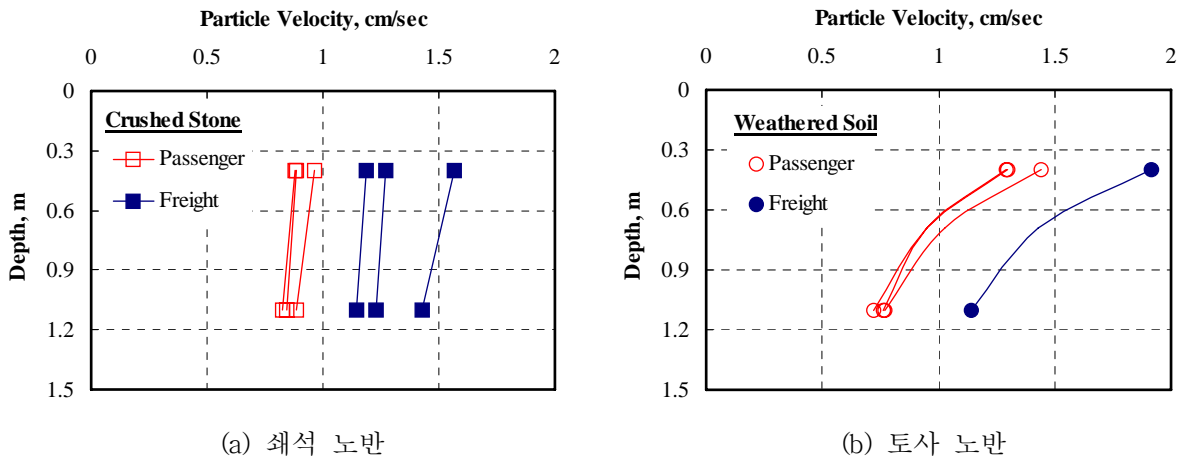


그림 9. 노반의 입자속도

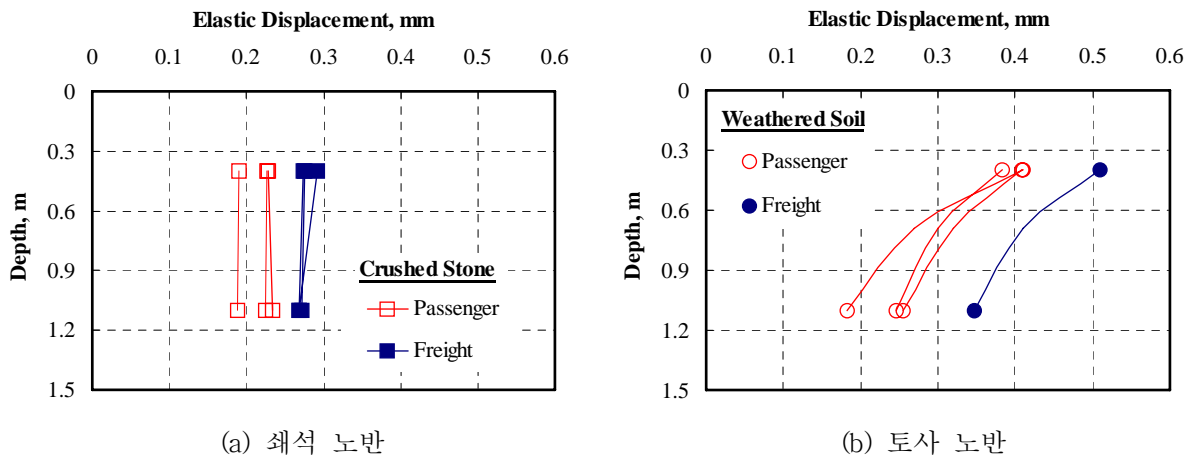


그림 10. 노반의 탄성변위

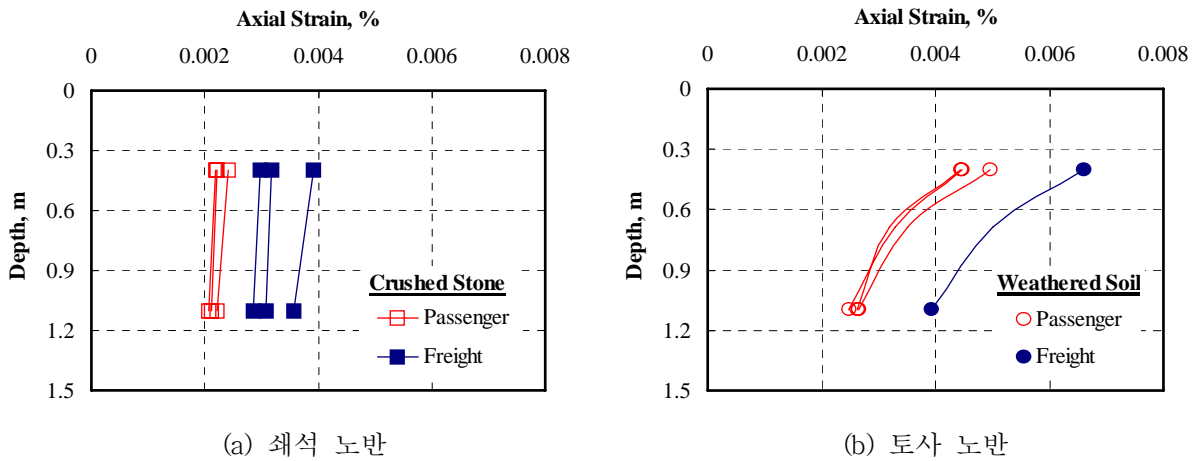


그림 11. 노반의 수직 변형률

5. 다층탄성해석과 현장계측 결과 비교

열차 하중에 의한 노반의 탄성변위를 현장에서 계측하고 3차원 다층탄성해석의 결과와 비교하였다. 그림 12(a)는 전동차 하중에 의한 노반의 변위이고 그림 12(b)는 화물열차에 의한 변위 결과이며 계측치와 해석결과를 같이 도시하였다. 전동차의 경우 계측결과와 해석결과가 거의 유사한 변위를 보였지만, 화물열차에 대한 변위는 해석결과가 다소 큰 값을 보였다. GEOTRACK 프로그램의 응력 해석결과는 상재하중에 의한 구속효과를 반영하지 못하고 단지 작용 윤택하중에 의해서만 좌우되는 특성이 있기 때문에 화물열차와 같이 큰 윤택하중에 의한 해석 결과의 경우 현장 계측치와 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 그러나 현장 계측치와 해석 결과가 전반적인 탄성변위는 1mm 이내에서 타당한 범위 내에서 차이를 보여 만족할 만 하였다. 열차하중이 주기적(periodic)이고 노반 내부에서 1차원 평면과 전달이라는 가정 하에, 현장에서 계측된 최대 입자속도와 크로스홀 시험의 압축과 속도를 이용하여 노반의 수직방향 수직 변형률(axial strain)을 계산하였다. 또한 수치해석으로 계산된 노반 내의 축차응력과 해당 회복탄성계수로부터 수직 변형률을 계산하였다. 그림 11은 전동차가 열차하중으로 작용할 때 계측치로부터 평가된 노반 변형률과 다층탄성해석으로 결정된 노반 변형률을 비교한 결과이다. 현장 계측치로부터 계산된 수직 변형률은 0.002-0.005%의 범위를 보였고, GEOTRACK을 이용한 수치해석의 결과는 0.005-0.05%의 범위에서 깊이가 깊어짐에 따라 감소하였다.

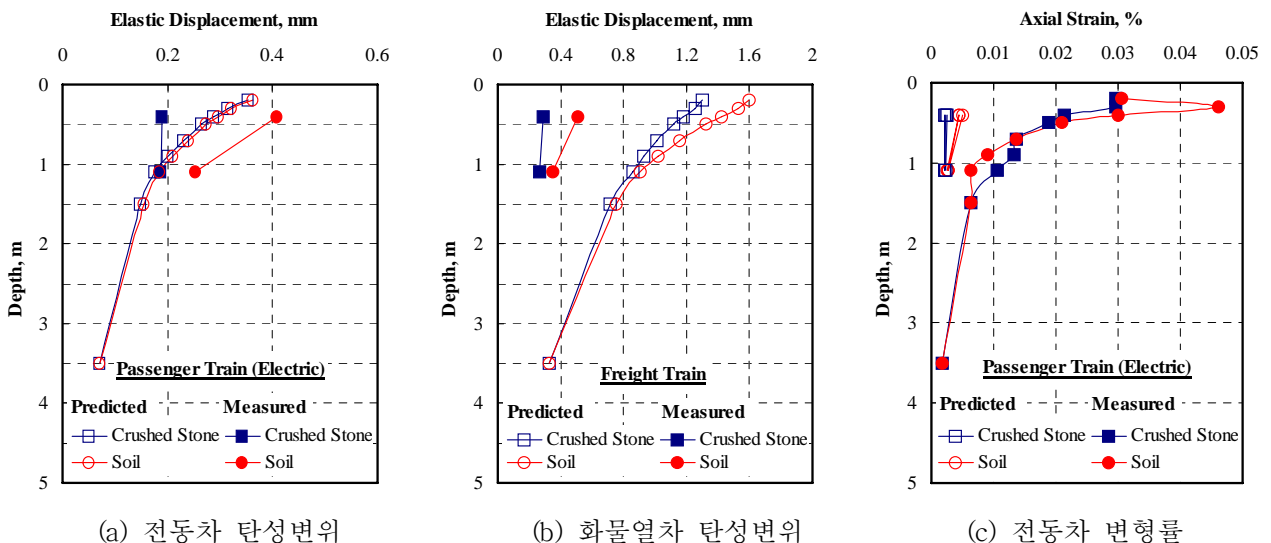


그림 12. 현장의 계측과 다층탄성해석으로 결정된 탄성변위 및 변형률 비교

적용된 회복탄성계수 측면에서 해석결과와 계측치의 차이를 설명하자면, 비선형 변형계수로부터 획득한 회복탄성계수 예측모델이 근본적으로 응력-변형률 곡선의 할선 탄성계수이기 때문으로 보인다. 변형률이 커질수록 반복 축차하중에 의한 이론적인 회복탄성계수에 비해 응력-변형률 곡선에서 탄성계수를 결정하는 할선의 기울기가 점차 작아진다(그림 13). 따라서 상대적으로 큰 열차하중이 작용하여 노반이 경험하는 변형률이 클 때는 실제의 거동을 좌우하는 회복탄성계수보다 작은 탄성계수가 수치해석에 적용되어 탄성변위의 결과가 더 크게 평가되었을 가능성을 배제할 수 없다. 최근 이러한 약점을 해결하는 하나의 방안으로 최소 2회 이상의 반복하중이 가해 소성변형을 제거한 응력-변형률 곡선으로부터 탄성계수를 결정하는 방법이 추천되고 있다. 향후 추가 연구를 통해 이러한 방법을 접목시킨다면 비선형 탄성계수 감소곡선을 이용하여 보다 신뢰성 있는 회복탄성계수 결정이 가능하리라 판단된다.

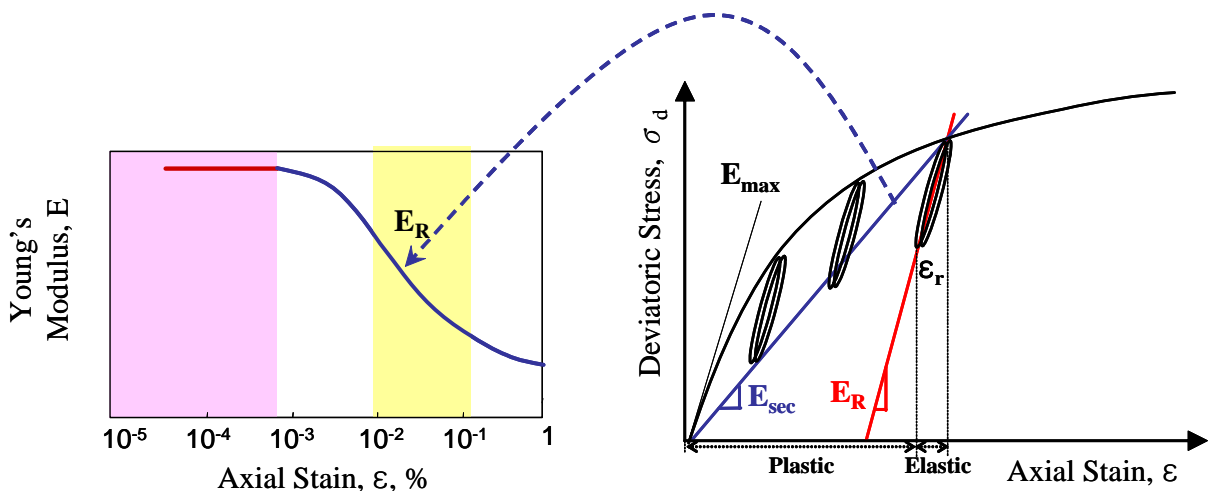


그림 13. 비선형 변형계수로부터 결정된 회복탄성계수와 실제 거동이 반영된 이론적인 회복탄성계수의 비교

6. 결 론

본 연구에서는 철도노반의 회복탄성계수 예측모델을 검증하기 위해 3차원 다층탄성해석을 수행하였고, 수치해석의 결과를 열차 운행 중에 계측한 수직 탄성변위와 비교하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄성변위에 대한 현장 계측치와 해석 결과가 1mm 이내의 비교적 타당한 범위 내에 존재하여 노반 재료의 회복탄성계수 예측모델은 검증되었다. 전동차가 열차 하중으로 작용할 때 노반 재료에 관계없이 계측결과와 해석결과가 비슷하였지만 화물열차에 대해서는 해석결과가 계측결과보다 다소 큰 값을 보였다.
- 2) 해석에 적용된 회복탄성계수는 응력-변형률 관계에서 원점으로부터의 할선 탄성계수이기 때문에 실제 반복 축차하중에 의한 회복탄성계수보다 과소평가 되었을 가능성이 있다. 그러나 약간 큰 탄성변위를 예측한 회복탄성계수 예측모델은 결과적으로 안전측이기 때문에 사용에 있어 문제는 없을 것으로 보인다. 향후 소성변형을 완전히 제거할 수 있는 접근방법이 추가로 연구될 필요가 있다.
- 3) 수치해석의 경우 사용 프로그램이 상재하중에 의한 구속효과를 반영하지 못하고 노반내의 응력이 단지 작용 윗하중에 의해서만 좌우되는 특성이 있기 때문에 큰 윗하중에 대한 해석결과가 현장 계측치와 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.
- 4) 현장에서 열차 통과 시 계측한 노반의 수직 탄성변위는 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였다. 윗하중이 큰 화물열차에 의한 탄성변위는 전동차 보다 더 컸고, 쇄석노반 보다 토사 노반에서 탄성 변위가 더 컸다. 주목할 점은 토사 노반의 경우 상부에서 큰 변형을 보이며 노반 하부에서 탄성변위가 급격히 감소하였다. 그러나 쇄석 노반에서는 탄성변위가 토사 노반에 비해 작았고, 노반으로 전달된 열차 윗하중이 노반 전체에 골고루 작용하여 감소하는 폭이 크지 않았다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설교통R&D정책□인프라사업의 연구비지원(C105B1000008-07B010000612)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김동수, 이진선, 조성호(1997), "3방향 진동감지기의 제작 및 검증," 한국지반공학회 논문집, 제13권, 제4호, pp.121-134.
2. 목영진(1993), 열차 주행에 의한 지반진동의 계측 및 분석," 한국지반공학회 지반진동위원회 학술발표집, 제2집, pp.15-53.
3. 목영진, 박철수, 임정열, 최충락(2007), 현장탄성파시험을 이용한 강화노반의 시간적 강성 변화," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
4. 박철수, 최찬용, 최충락, 목영진(2008), 강화노반 및 케도하부노반 재료의 회복탄성계수," 한국철도학회 논문집, 제11권, 제1호(계재승인).
5. 백영식 목영진, 이석진, 이용범(1996), "진동기록 데이터 처리와 적용," 대한토목학회 논문집, 제16권, 제4호, pp.351-358.
6. 한국철도기술연구원(2000), 철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구, 보고서, KRRI 연구 00-37.
7. Chang, C. S., Adegoke, C. W., and Selig, E. T. (1980), "GEOTRACK Model for Railroad Track Performance," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No.GT11, pp.1201-1218.
8. Hwang, S. K. (2004), "Settlement Characteristics of the Reinforced Railroad Roadbed with Crushed Stones Under a Simulated Train Loading," Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.20, No.2, pp.5-13.
9. Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994), Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford, London.
10. Stokoe, K.H., II (1980), "Field Measurement of Dynamic Soil Properties," Presented to the Specialty Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, ASCE, Sept. 15-17, Knoxville, TN, 31.