

다양한 시험기법을 이용한 반복하중을 받는 철도노반의 변형특성 평가
**Evaluation of Deformational Characteristics of Railway Roadbeds subjected to
Cyclic Load Using Various Testing Methods**

이승원*
Lee, Seong-Won

권기철**
Kweon, Gi-Chul

정재민***
Chung, Jae-Min

황택진****
Hwang, Taik-Jean

ABSTRACT

It is very important to evaluate the reliable deformational characteristics of soils not only in the analysis of geotechnical structures under working stress conditions as foundation in railroad or road system but also for the soil dynamic problems. Different testing techniques are likely to have different testing conditions as strain amplitude, stress level, loading frequency and number of loading cycles. The deformational characteristics of soils can be affected by these variables. In this paper, the effects on modulus of soils subjected to cyclic load were investigated. For the evaluation of deformational characteristics of soils subjected cyclic load, various testing such as TS, RC, TX, and FFRC tests were performed. It was shown that the modulus evaluated by various testing methods are comparable to each other fairly well when the effects of these factors were properly taken into account. For reliable evaluation, therefore, those effects on the modulus need to be considered, and measured values should be effectively adjusted to actual conditions where the soil is working.

1. 서 론

토목구조물의 동적해석 뿐 아니라 철도노반 또는도로기초와 같은 공용상태 구조물 기초의 변형해석을 위해서는 지반의 신뢰성 있는 변형특성 평가가 매우 중요하다. 지반 재료의 탄성계수는 변형률 크기, 구속응력, 함수비, 하중주파수, 하중 반복회수 등 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 서로 다른 시험기법은 변형률 크기, 응력수준, 하중주파수, 하중반복회수 등의 조건이 서로 상이하므로, 변형특성은 이러한 요소에 영향을 받는다.

지반 재료의 탄성계수는 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 따라서 지반의 탄성계수를 하나의 값으로 제시하기는 불가능하다. 다만 지반의 거동이 좁은 범위에서 결정되어 있는 특정한 해석의 경우에는 지반이 거동하는 조건들을 고려하여 하나의 탄성계수(선형탄성계수)를 사용하기도 한다. 물론 동일한 지반이라 할지라도 지반의 거동 조건이 변화되면(하중 및 변형률 크기 또는 또는 해석 방법의 변화) 적용하는 탄성계수를 변화된 조건에 맞추어 새롭게 결정해야 한다. 따라서 시험조건과 해석대상 지반의

* 경북대학 건설환경정보과 교수, 정회원
E-mail : Swlee@kyungbok.ac.kr
TEL : 031)539-5360 FAX : (031)539-5368
** 동의대학교 토목공학과 부교수
*** 한국철도시설공단 남북민자PM 팀장

거동특성을 고려하지 않고, 특정한 조건에서 결정된 탄성계수를 별도의 검토 없이 해석에 사용한다면 많은 오차를 유발할 수 있다.

최근에 들어서 지반의 탄성계수 결정을 위한 다양한 시험기법이 국내에 도입되고 있고, 현장시험과 실내시험에서 결정된 탄성계수를 영향요소를 고려하여 결합함으로써 대상 지반의 탄성계수 특성을 체계적으로 평가하는 기법이 제안되고 있다(한국지반공학회, 2006). 그러나, 여러 시험방법에서 결정되는 탄성계수의 명확한 특성 규명과 국내 지반의 탄성계수에 대한 영향요소 연구가 부족하여 해석 및 설계에 필요한 신뢰성 있는 탄성계수 결정에 어려움이 있다.

본 논문에서는 반복하중을 받는 노반의 변형특성에 대한 영향요소를 평가하였다. 반복하중을 받는 노반의 변형특성 평가를 위하여 TS, RC, TX 및 FFRC 등의 다양한 시험을 수행하였다. 다양한 시험에서 결정된 탄성계수는 변형특성에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한 후 비교하면 서로 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 신뢰성 있는 변형특성 평가를 위해서는 각각의 시험조건에서 결정된 탄성계수를 현장조건에서 지반이 경험하는 조건으로 변형특성에 대한 영향요소를 고려하여 합리적으로 보정되어야 한다.

2. 시험시료 및 시험장치

2.1 시험시료

본 연구에서는 철도노반 또는 도로 노상으로 적용 가능한 토사시료 7종, 강화노반 또는 도로 보조기층 재료로 적합한 입상의 쇄석재료 7종에 대하여 시험을 수행한 결과를 분석하였다. 시험시료의 기본 특성, 시료성형 방법, 시험항목 등은 표 1과 같다.

표 1. 시험시료의 기본 특성 및 시료성형 방법

구분	통일분류	시료성형 조건		시험항목	주요 시험변수 ¹⁾
토사시료	SM, SW, SP-SM	정적다짐	- $\gamma_{d,max}$ 의 95% - 함수비 변화	FF-RC, RC, TS, TX, M _R	①, ②, ④, ⑤, ⑥
입상 쇄석	GP, GW	진동다짐	- $\gamma_{d,max}$ 의 95% - 최적함수비	FF-RC, RC, TS, TX, M _R	①, ②, ④, ⑤

주 1) ① 변형률 크기, ② 구속응력, ③ 밀도(간극비), ④ 하중주파수, ⑤ 하중반복회수, ⑥ 함수비

우리나라 사용하고 있는 도로 노상토의 토사 재료는 대부분 모래 또는 실트질 모래(70% 이상)로 보고되고 있다. 또한 #200 체 통과량이 10% 이하인 경우가 50% 이상이고, 70% 이상이 비소성(NP)으로 나타나고 있다. 아울러 CBR과 노상지지력계수도 대단히 우수한 것으로 평가되고 있어서, 노상토의 특성으로는 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있음을 알 수 있다. 이것은 국내의 지반의 70% 이상이 화강풍화토라는 사실과 잘 일치하고 있는 것으로, 사질성분을 대단히 많이 함유하고 있어서 입상 재료와 유사한 거동을 한다는 특징이 있다.

강화노반 또는 보조기층에 사용하는 입상재료는 쇄석과 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 사용하는 것이 일반적이기 때문에, 통일분류법으로 GP 또는 GW로 분류되고, 비소성(NP)이며, #200체 통과량이 거의 대부분이 5% 미만으로 나타나고 있다.

2.2 시험장치

탄성계수를 결정하는 실내시험은 크게 동적시험, 반복재하시험, 정적시험으로 나눌 수 있다. 동적인 실내시험에는 공진특성을 이용하는 공진주시험(RC), 자유단공진주시험(FFRC), 탄성파의 속도를 측정하는 벤더엘리먼트 시험이 있다. 정적 또는 반복재하시험에는 비틀전단시험(TS), 삼축압축시험(TX)과 직접전단시험(DS) 등이 있다. 본 연구에서는 자유단공진주시험(FF-RC), 공진주시험(RC), 비틀전단시험(TS), M_R 시험, 그리고 정적 삼축압축시험(TX)을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 시험의 주요 특징은 표 2와 같다.

표 2 변형특성 평가 실내시험의 주요 특징

구분	변형특성		감쇠특성		주요 특징
	E_{max} 또는 G_{max}	비선형 탄성 계수	D_{min}	비선형 감쇠비	
공진주시험	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> - 전체 변형률 영역의 동적물성치 평가 가능 - 암석과 같이 강성이 큰 재료에 대한 시험 불가능 - 하중 반복횟수의 영향이 불분명 - 시험이 수행되는 하중주파수가 서로 다름
비틀전단시험	○	○	○	○	<ul style="list-style-type: none"> - 전체 변형률 영역의 동적물성치 평가 가능 - 암석과 같이 강성이 큰 재료에 대한 시험 불가능 - 하중 반복횟수, 하중주파수의 영향 평가 가능 - 공진주시험에 비하여 시험이 다소 어려움
자유단 공진주시험	○	X	○	X	<ul style="list-style-type: none"> - 시험이 공진주시험에 비하여 간편 - 비선형 특성 평가 불가능 - 강성이 큰 암석과 같은 시편에 대한 적용성이 우수 - 시편에 균열이 있는 경우 시험결과의 신뢰성이 낮음 - 이론적으로 포아송비의 측정이 가능하나 신뢰성은 낮음
삼축압축시험	△	○	△	○	<ul style="list-style-type: none"> - 강도특성과 변형특성의 동시 평가 가능 - 미소변형 측정장치를 설치하는 경우 전체 변형률 영역의 동적물성치 평가 가능 - 고변형률 영역의 하중반복횟수 영향 평가
반복재하 M_R 시험	-	○	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - 반복하중 재하 조건에서 중간변형률 영역의 탄성계수를 신뢰성 있게 평가 - 시험장치 고가, 시험이 어려움

공진주/비틀전단(RC/TS) 시험장치는 Stokoe 방식으로 고정단-자유단 + 추가 질량체의 경계조건에서의 주파수반응곡선(RC 시험)과 응력-변형 이력곡선(TS 시험)을 구하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 결정하였다. 본 시험장치는 동일한 공시체에 대하여 동적시험인 RC시험과 반복재하시험인 TS 시험을 동시에 수행할 수 있다. 특히 TS시험에서는 하중주파수의 조절이 자유로와 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향 검토에 매우 유용하다. 정적삼축압축시험은 하중과 변형을 삼축셀 외부에서 측정하방법을 적용하였고, 반복재하식 M_R 시험은 하중은 삼축셀 내부에서, 변형은 삼축셀 외부에서 측정하였다. 자유단공진주시험(Free-Free Resonant Column Test; FF-RC)은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 경계조건에서의 탄성과전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력과(압축과 또는 전단과)에 대한 공진 특성으로부터 미소변형률 영역의 최대 Young 계수와 최대전단탄성계수를 결정할 수 있다.

3. 토사 및 입상 재료의 변형특성

시험에 적용된 국내 토사재료 및 입상재료의 탄성계수는 변형률 크기의 영향과 구속응력의 영향이 매우 중요한 것으로 나타났다. 국내에 사용되는 노상토의 변형특성 평가를 통하여 비선형 특성(변형률 크기의 영향), 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수, 함수비, 건조단위중량의 영향은 서로 독립적인 영향요소로 고려할 수 있음을 확인하였다. 탄성계수에 대한 하중반복횟수의 영향은 무시할 수 있음을 확인하였으나, 삼축압축시험에서는 초기하중 하중 재하 단계에서는 탄성변형과 함께 상당한 정도의 소성변형이 유발되므로, 재재하 단계 또는 역재하 단계의 응력-변형 곡선을 이용하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

하중주파수를 달리한 비틀전단시험 결과, 토사의 노상토는 하중주파수가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 하중주파수의 영향 정도는 소성지수와 상관성이 있는 것으로 확인되었다. 이에 반하여 입상 재료의 탄성계수는 하중주파수가 변화해도 일정하게 결정되어, 하중주파수의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

하중반복회수가 탄성계수에 미치는 영향을 살펴보면, 첫 번째 재하단계를 제외한 5회의 재재하-역재하단계에서 결정된 탄성계수는 반복재하 회수에 거의 영향을 받지 않고 일정한 값으로 결정되었다. 따라서 공학적 관점에서 하중반복회수의 영향은 무시하여도 될 것으로 판단된다. 또한, 입상 재료의 탄성계수도 하중반복회수의 영향을 무시할 수 있을 것으로 나타났다.

함수비와 구속응력 모두 탄성계수에 매우 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 입상 재료의 탄성계수는 체적응력 모델을 적용하여 효과적으로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 입상 재료에서 최대입자크기를 작게 한 시험시편 제작의 모델시료 성형기법으로는 matrix model, replace model, parallel model이 있다. 어떠한 모델을 적용하던 간에 시험결과 탄성계수에 대한 구속응력의 영향정도는 유사한 것으로 보고되어 있다. 비선형 특성을 나타내는 정규화 탄성계수 감소곡선은 matrix model 또는 parallel model을 적용하는 경우 원시료와 차이가 거의 없었으며 replace model을 적용하는 경우에는 다소 차이를 나타내었다. 한편, 탄성계수의 절대값은 matrix model 또는 parallel model을 적용하는 경우에 원시료에 비하여 평균 7% 큰 값으로 평가하고 있다. 따라서 입상재료의 경우에는 matrix model을 적용하여 시

편을 조제하고, 원시료의 탄성계수의 값은 모델시편의 경우보다 최대 입경이 1/2 감소함에 따라서 7% 감소시켜 평가 할 수 있고, 구속응력의 영향 정도에 대한 보정은 불필요 한 것으로 나타나 있다.

현장다짐조건을 모사한 선회다짐을 기준으로 다짐방법을 비교한 결과, 각각의 구속응력단계에서 선회다짐방법으로 결정된 탄성계수를 기준으로, 각각의 시편성형기법으로 결정된 최대탄성계수의 변화에 대하여 선회다짐, 정적다짐, 붕다짐, 진동다짐의 순으로 시편성형기법에 따라 탄성계수가 크게 평가되는 것으로 보고되었다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 시편성형방법의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있었다. 진동다짐을 제외하고, 나머지 다짐방법만을 비교하면 다짐방법에 따른 탄성계수 차이가 5% 이내임을 알 수 있다. 선회다짐이 실제 현장 다짐조건과 가장 유사할 것으로 생각되나, 시편성형이 까다로운 단점이 있다. 붕다짐의 경우에는 기술자들에게 매우 친숙하고, 선회다짐과의 차이가 5%이내이며, 다짐이 매우 간편하여 설계입력 물성치 결정을 위한 시편성형기법으로서 가장 합당한 것으로 판단된다.

응력조건 및 함수비조건에 따라 최종 영구변형률은 차이가 있으나 토사 노상토의 평균 영구변형률은 0.34%, 입상재료의 평균 영구변형률은 0.23%로 토사가 조금 더 큰 것으로 나타났다. 특히 토사재료의 경우에는 화강풍화계열의 SW시료로 양질의 재료임에도 불구하고 전체 영구변형의 상당부분을 차지하므로 입도가 양호하지 못하거나 세립분이 많은 SM계열의 토사에서는 더 많은 영구변형이 발생될 것으로 예상된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 토사 및 입상재료의 변형특성은 다양한 영향요소의 영향을 받고, 여러 시험에서 얻어지는 탄성계수는 각 시험 조건의 차이에 따라 서로 다른 값으로 결정되었다. 그러나, 탄성계수에 대한 영향요소를 고려한 후 여러 시험에서 결정되는 탄성계수를 비교하면 서로 유사한 값을 얻을 수 있었다. 따라서 신뢰성 있는 해석을 위해서는, 시험조건의 특성을 명확히 규명하고 시험조건과 실제 현장조건의 차이를 영향요소를 고려하여 보정하는 것이 중요함을 확인 할 수 있고, 철도노반재료와 같이 반복하중을 받는 재료의 변형특성 평가를 위해서는 그림 1과 같은 평가시스템이 필요한 것으로 판단된다.

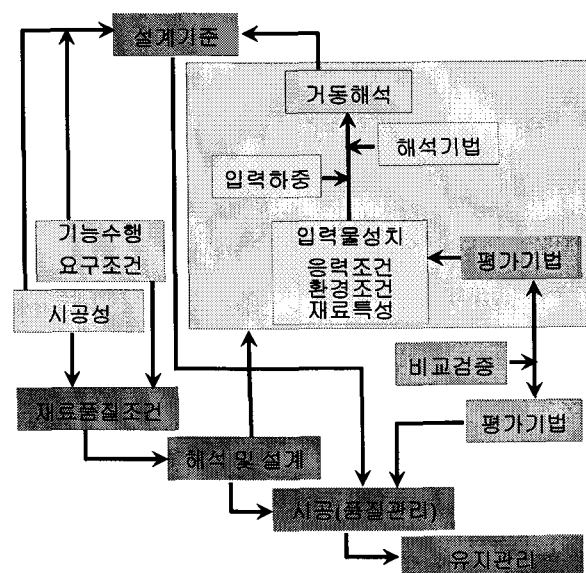


그림 1 반복하중 을 받는 재료의 변형특성 평가 시스템 개요도

4. 결론

토목구조물의 동적해석 뿐 아니라 철도노반 또는 도로기초와 같은 공용상태 구조물 기초의 변형해석을 위해서는 지반의 신뢰성 있는 변형특성 평가가 매우 중요하다. 지반 재료의 탄성계수는 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 따라서 지반의 탄성계수를 하나의 값으로 제시하기는 불가능하다. 다만 지반의 거동이 좁은 범위에서 결정되어 있는 특정한 해석의 경우에는 지반이 거동하는 조건들을 고려하여 하나의 탄성계수(선형탄성계수)를 사용하기도 한다.

최근에 들어서 지반의 탄성계수 결정을 위한 다양한 시험기법이 국내에 도입되고 있고, 현장시험과 실내시험에서 결정된 탄성계수를 영향요소를 고려하여 결합함으로써 대상 지반의 탄성계수 특성을 체계적으로 평가하는 기법이 제안되고 있다. 여러 시험방법에서 결정되는 탄성계수의 명확한 특성 규명과 국내 지반의 탄성계수에 대한 영향요소 연구가 부족하여 해석 및 설계에 필요한 신뢰성 있는 탄성계수 결정에 어려움이 있다. 본 논문에서는 반복하중을 받는 노반의 변형특성에 대한 영향요소를 평가 결과를 검토하여, 반복하중을 받는 재료의 변형특성 평가 시스템을 제안하였다.

참고문헌

1. AASHTO (2002), "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials AASHTO T 307-99", AASHTO, Washington D.C.
2. 한국지반공학회, (2006) "지반구조물의 내진설계, 지반공학 시리즈 8" 구미서관, ISBN 89-8225-535-4.
3. 권기철 (2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델" 대한토목학회논문집, 제30권, 제 3-D 호, pp. 301-310.
4. 건설교통부 (2002, 2003, 2004, 2006), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발(하부구조 물성정량화)"
5. 권기철 (2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델" 대한토목학회논문집, 제30권, 제 3-D 호, pp. 301-310.
6. 권기철 (2004) "낮은 구속응력 단계에서 지반의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향", 한국지반공학회, 제20권 4호, pp. 57-63.