

포장 하부구조의 탄성계수 평가 기법(1)

- 개념소개와 실내시험을 위주로 -

권기철* · 최성준**

1. 머리말

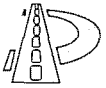
현재 도로건설시 대부분의 포장설계는 아직도 경험적 방법이 많이 사용되고 있고, 일부 개정된 86 AASHTO 설계법을 혼용하여 쓰는 경우도 있으나 정확한 개념을 인식하지 못하고 설계를 단순히 답습하고 있는 실정이다. 포장의 상부구조인 아스팔트 포장과 시멘트 콘크리트 포장의 두께설계는 특집논단으로 이미 소개되었거나 소개예정이므로 본 고에서는 포장 하부구조의 역학적 특성을 대표하는 물성치인 회복탄성계수(M_R) 개념에 대해 기술하고 이를 구하기 위한 실내시험 및 현장시험에 대해 소개하고자 한다. 회복탄성계수는 차량하중의 반복재하 조건에서 유발되는 포장재료의 응력-변형 상태를 반영한 특성치로서, 이론적인 포장 설계 및 해석에 기본이 되는 입력 물성치이며, 포장재료의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있는 물성치로 평가되고 있다. 회복탄성계수는 '86 AASHTO 설계법에서 노상의 기본 입력 물성치로 적용한 이후, 포장 설계·해석뿐 아니라 포장 평가, 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다. 또한, 설계-시공-유지관리에 사용되는 개념의 통일성 확보를 위하여, 다짐시공에서 탄성계수 개념에 근거한 다짐관리 기법의 개발이 요구되고 있는 바, 우리 포장기술

자들의 개념정립이 더욱 필요한 현실이다. 그러므로 본 고에서 소개한 탄성계수의 개념정립과 실내시험 및 현장시험으로부터의 탄성계수 추정방법을 통하여 우리 회원들이 향후 포장설계 및 시공과 유지관리에 역학적 개념을 도입하는 데 기여하고자 한다.

2. 탄성계수 개념정립

기존의 경험적인 CBR에서 탄성계수 개념으로의 전환은 포장기술의 많은 발전을 가져왔다. 그러나, 탄성계수를 적용한 초기에는 연구단계에서 개발된 여러 시험법들이 고가의 장비를 필요로 한다거나, 까다로운 시험절차, 고도로 숙련된 전문적 기술을 요구하는 등의 문제점으로 인하여 실제 적용에 많은 문제점을 드러내기도 하였다. 이러한 탄성계수를 결정하는 과정의 현실적인 어려움때문에 회복탄성계수(M_R)가 포장재료의 응력-변형 상태를 합리적으로 반영할 수 있는 특성치로 평가받고 있음에도 불구하고, 경험적 포장 설계법에서 역학적 포장 설계법으로의 전환을 가로막는 중요한 장애요인으로 작용하는 아이러니한 상황이 발생하기도 하였다. 하지만 꾸준한 장

* 정희원 · 동의대학교 토목공학과 조교수, gckweon@hyomin.donggeui.ac.kr
 ** 정희원 · 인덕대학 건설환경계열 전임강사, soilpave@mail.induk.ac.kr



비의 발달과 효율적인 시험기법의 개발에 힘입어, 현재에는 시험법의 현실 적용성에 대한 문제점들이 많은 부분 해결되고 있는 과정에 있다.

포장 하부구조 재료의 탄성계수에 대한 영향 인자로는 크게 환경 및 토성 인자(함수비, 밀도, 다짐, 동결융해 작용, 입도 등)와 실험적 인자(응력크기, 변형률 크기, 반복하중의 파형, 하중주파수, 하중반복횟수, 응력조합 순서, 응력경로 등)로 구분된다. 환경 및 토성 인자 중 함수비와 밀도는 노상토의 탄성계수에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자로서 계절에 따른 함수상태의 변화로 인한 영향과 시공 단계에서 노상토의 다짐 상태를 규명하는데 필수적으로 고려되어야 한다.

과거에는 정적시험, 동적시험, 또는 반복재하시험에서 결정되는 탄성계수가 서로 다른 것으로 인식하여, 각각의 시험에서 결정되는 탄성계수를 동탄성계수(dynamic modulus), 정탄성계수(static modulus), 회복탄성계수(resilient modulus) 등으로 서로 다른 명칭을 사용함은 물론, 서로 다른 역학적 특성치로 취급하였다. 그러나, 현재의 많은 연구성과에 의하면 탄성계수에 대한 다양한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있음이 밝혀지고 있다. 즉, 시험방법에 의한 동탄성계수, 정탄성계수, 또는 회복탄성계수의 차이는 무의미함을 의미하고, 시험이 수행되는 조건(변형률 크기, 하중주파수, 하중 반복회수, 응력 조건 등)에 의해서 서로 다른 탄성계수가 결정되는 것으로 확인되고 있다.

따라서, 설계-시공-유지관리의 각 단계에서 서로 다른 시험기법이 적용된다고 하여도, 사용되는 시험기법의 차이를 합리적으로 고려한다면 동일한 값의 획득이 가능함을 의미한다. 즉, 설계-시공-유지관리에 각기 다른 시험기법이 적용되어도, 각 단계에서 사용되는 시험기법의 차이를 합리적으로 고려하면 일관된 개념에서의 관리가 가능하고, 아울러 각 단계에서 적용되는 시험법은 모두 탄성계수 개

념에 부합되는 시험법으로의 전환이 요구된다.

탄성계수를 결정하는 시험법은 설계단계에서 입력변수 결정에 주로 사용되는 실내시험과, 다짐 시공의 품질관리 또는 유지관리(포장의 구조적 평가)에 사용되는 현장시험 기법으로 나누어진다. 여러 시험법은 시험 수행이 가능한 조건이 서로 틀리고, 시험의 장단점이 서로 상이하다. 따라서, 시험기의 가용 상태, 평가 신뢰도의 목표수준 등과 시험장치의 특성을 고려하여 합당한 시험법을 선정하게 되며, 경우에 따라서는 여러 시험법을 조합하여 적용하기도 한다.

3. 실내시험

포장 하부구조 재료, 즉, 지반재료의 탄성계수를 평가하는 실내 시험법은 매우 다양하다. 그 중에서, 실제 포장체가 경험하는 응력상태를 가장 잘 모사하여 개발된 시험법이 반복재하식 회복탄성계수 시험이지만, 실제 포장체가 경험하는 응력상태를 완벽하게 모사하고 있는 것은 아니다.

실제 포장체가 경험하는 응력상태를, 즉 포장체에 차량 이동으로 인한 축하중이 작용할 때, 포장체는 그림 1과 같은 응력을 경험하게 된다. 그림 1에 나타낸 포장체 내부의 응력분포를 포장체 내의 하나의 요소를 기준으로 본다면, 차량하중의 이동에 의해 시간변화에 따라 발생하는 응력 변화와 같게 된다. 즉, 윤하중이 포장체 내부의 어느 한 요소에 접근함에 따라 축차응력이 점점 증가하여 요소 중심에 올 때 최고 값을 갖고 멀어짐에 따라 축차응력이 감소한다. 연속적인 차량하중 재하로 포장체 내부의 요소는 반복적인 축차응력을 경험하게 된다. 이때 요소에 작용하는 축차응력의 크기는 차량하중의 크기에 따라 변화하고, 구속응력의 크기는 요소 상부의 포장체 두께와 층 구조에 따라 결정된다. 또한 차량하중에 의해서 수평방향의 하중 또한 변화하게 되고, 수평방향 하중의 크기는 토압계수에 따라서 수직응력

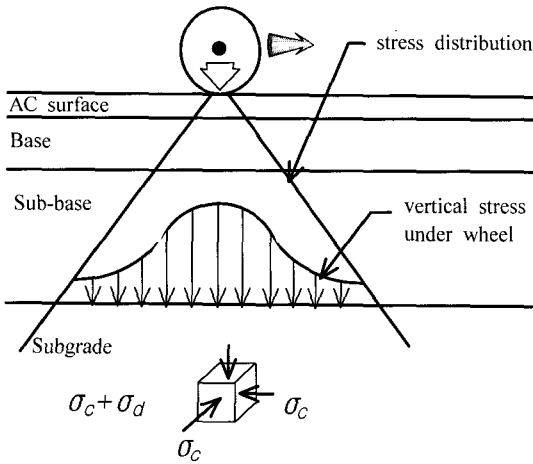
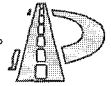


그림 1. 운하중에 의한 포장체 내부의 응력분포 (Baladi, 1989)

과 일정한 비를 갖게 된다.

일반적인 교통하중에 의해 포장체의 노상토 및 보조기층이 경험하는 변형률 크기는 저변형률($\epsilon < 10^{-3}\%$) 영역에서 중간변형률($\epsilon < 10^{-1}\%$) 영역 사이에 분포하는 것으로 알려져 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 M_R 시험과 삼축압축시험은 일반적으로 변형률 크기 $10^{-2}\%$ 이상에서 신뢰성 있는 결과를 제공하나, 현장공진주시험은 변형률 크기 $10^{-3}\%$ 이하에서 이루어지므로 시험이 수행되는 변형률 범위가 서로 상이하다. 공진주/비틀전단시험은 현장공진주시험이 수행되는 미소변형률 영역에서부터 반복해석 MR 시험이 수행되는 중간 변형률 크기를 포함한 전체 변형률 영역에서 시험이 가능하다.

그림 2의 여러 시험은 각 시험이 수행되는 변형률 크기의 차이뿐만 아니라 시험의 응력조건, 하중주파수 또는 하중재하속도 등 다양한 차이가 존재한다. 또한 여러 조건의 차이는 각 시험이 수행되는 조건과 실제 포장체가 경험하는 조건 사이에도 발생한다. 따라서, 특정한 조건의 특정한 시험에서 결정된 탄성계수를 포장체의 해석에 아무런 고려 없이 직접적으로 적용하면 대단히 큰 오차를 유발할 수 있으며, 시험조건과 해석하고자

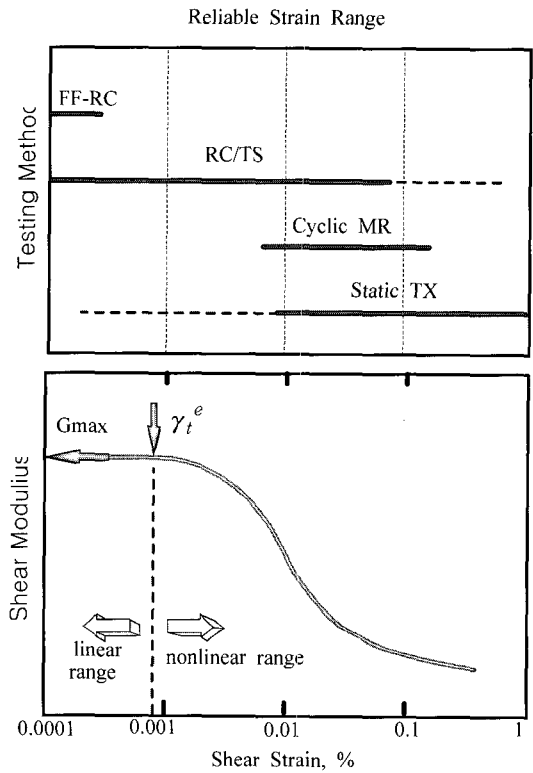


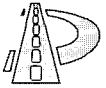
그림 2. 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화 및 각 시험이 신뢰성 있게 수행되는 변형률 범위

하는 조건의 차이를 엄밀히 고려하여 탄성계수를 평가하여야 한다.

본 기술기사에서는 여러 실내시험법중 일반적으로 많이 쓰이고 있는 회복탄성계수시험(cyclic M_R test), 현장공진주시험(FF-RC), 정적삼축압축 시험(Static T.X.), 공진주/비틀전단시험(RC/TS)에 대하여 소개하고자 하며, 소개된 내용외에도 탄성파의 속도를 측정하는 벤더엘리먼트(BE: Bender Element) 또는 미소변형률 영역의 곡부 변형을 측정하는 LDT(Local Deformation Transducer)를 사용하는 삼축압축시험 등이 있다.

3.1 회복탄성계수 시험 (Cyclic M_R Test)

회복탄성계수 시험은 그림 1에 나타난, 실제



포장체가 경험하는 응력조건 중 수평방향의 응력은 일정하고 축방향 응력이 차량의 통과에 따라 일정한 주기를 갖는 반정현파형의 축차응력으로 모사한 시험 방법이다. 일반적으로 반복재하식 M_R 시험기는 축차하중 파형의 엄밀한 재하를 위하여 폐합식(closed loop)으로 하중신호를 제어하기 때문에 장비의 가격이 고가이고, 시험장치를 다루는데 고도의 숙련된 기술을 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 단점은 회복탄성계수를 적용한 '86 AASHTO 포장설계법의 적용을 가로막는 주요 장애요인의 하나였다.

반복재하식 M_R 시험에서는 운하중에 의해 포

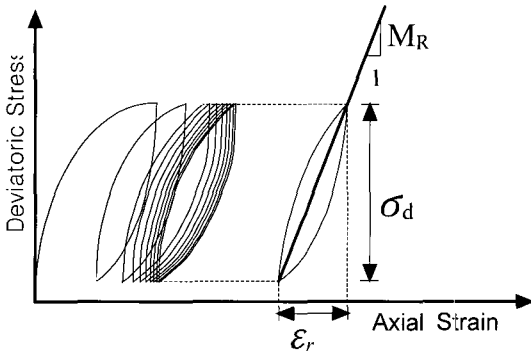


그림 3. 회복탄성계수시험에서 결정되는 응력-변형률 관계

장체에 유발되는 응력상태를 모사하여 0.1초간 반정현(harversine) 모양의 하중을 재하하고 0.9초의 휴지기간(rest period)을 갖는 일정한 주기의 축차응력을 반복적으로 재하하여 변형률 응답을 얻게된다. 이를 응력-변형률 관계로 나타내면 그림 3과 같은 결과를 획득할 수 있고 이로부터 회복탄성계수(M_R)를 결정한다.

이러한 반복재하식 M_R 시험의 신뢰성에 대하여 많은 의문이 제기되어 온 것이 사실이며, 이러한 반복재하식 M_R 시험의 신뢰성에 대한 의문은 주로 시편의 변형 측정방법에 대한 신뢰성 문제에 기인한다.

90년대 중반까지, 축방향 변형의 측정위치를 어디로 할 것인가에 관하여는 많은 논의가 있어왔다. 반복재하식 M_R 시험법에 관한 초기의 규정인 AASHTO T294-82에서는 클램프를 이용한 내부변형측정 방법과 삼축셀 외부에 설치된 두 개의 LVDT를 사용하는 외부변형측정 방법 모두를 제시하였다. 내부변형측정 방법은 시편의 변형만을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 클램프를 시편에 설치하기 위해서는 시편에 손상을 유발시킬 수 있으며, LVDT 설치 및 변형 측정 또한 매우 까다롭다. 초기의 외부변형측정방법은, 시편에 손상을 방지하고 시험이 간편한 장점에도 불구하고, 시편과 양 단부 캡 사이의 단부오차를 제거하기 힘들어 변형을 과다하게 평가하는 문제점을 갖고 있었다.

90년대 초반에 Pezo (1991)는 시편의 단부를 석고로 처리하여 단부오차(bedding error)를 제거할 수 있음을 확인하였고, AASHTO T294-92I 시험법에서도 이를 적용하게 되었다. 또한 김동수

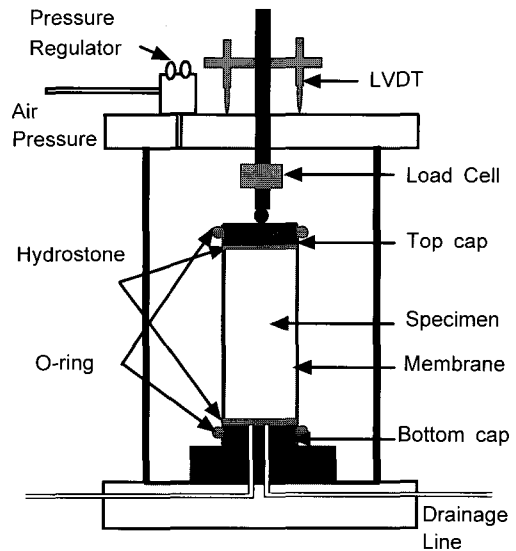
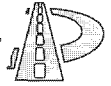


그림 4. 반복재하식 M_R 시험기 삼축셀



등 (2000)의 연구에서도, 국내에 도입되어 사용되는 그림 4의 반복재하식 M_R 시험장치에서 시편의 양단부를 석고로 처리하는 경우에는 단부오차 제거가 가능하고 신뢰성 있는 시험이 가능함을 확인하였다.

3.2 현장공진주시험 (FF-RC: Free-Free Resonant Column Test)

그림 5에 개요를 나타낸 현장공진주시험은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 조건에서의 탄성파전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력과(압축과 또는 전단파)에 대한 공진 특성으로부터 미소변형을 영역의 Young계수와 전단탄성계수를 결정할 수 있고, 아울러 포아송비도 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다. 본 시험은 시험이 매우 간편하고 직경 150mm 이상의 시편에 대하여도 간편한 시험이 가능하여 보조기층 재료의 시험에도 합당하게 적용될 수 있다. 그러나, 현재 개발되어 있는 시험장치는 구속압을 진공압을 사용하여 재하하게 되므로 100kPa 이상의 구속압 단계에서는 시험이 불가능한 단점이 있다. 한편, 시험이 수행되는 변형을 크기를 실험적으로 측정하는 것은 불가능하지만, 본 시험과 같은 탄성파시험 기법에서 사용하는 탄성파의 크기는 매

우 작기 때문에 시편이 경험하는 변형을 크기는 선형한계변형을 이하의 매우 작은 변형을 크기 범위에 있다.

3.3 정적삼축압축시험 (Static Triaxial Test)

정적삼축압축시험은 지반공학에서 사용되는 대표적인 시험으로서 지반공학자에게 매우 친근한 일상적 시험의 하나이다. 일반적인 삼축압축시험장치는 강도특성을 평가하는 데 초점을 두고 개발되어, 기계식(다이알게이지, 프루브링) 측정 장치를 적용한 경우 또는 단부오차를 충분히 제거하지 못한 삼축압축시험에서는 노상토 및 보조기층 재료가 경험하는 변형을 범위인 $10^{-2}\% \sim 10^{-1}\%$ 에서 신뢰성 있는 탄성계수 결정이 곤란한 경우가 많다. 따라서 $10^{-2}\%$ 변형을 범위까지 신뢰성 있는 시험이 가능하도록 전기식 LVDT와 Load Cell을 사용하거나, 보다 엄밀한 측정을 위해서 셀 내부에서의 변위 및 하중 측정방법(internal measurement), 또는 국부변위측정방법(local displacement measurement) 등을 적용하게 된다. 외부변위측정방법을 적용할 때는 변형을 측정의 가장 큰 오차 요인인 단부오차(bedding error)를 최대한 제거하기 위하여 시료의 양 단부를 석고로 처리할 필요가 있다.

하중 재하-역재하(제하)를 포함한 일반적인 삼축압축시험에서는 그림 6과 같은 응력-변형을 곡선을 얻게 된다. 초기의 하중 재하단계에서는 소성변형과 탄성변형이 동시에 유발되고 동시에 많은 단부오차를 포함하게 된다. 따라서, 반복하중이 작용하는 포장체의 조건과 신뢰성 있는 시험을 위하여 재재하단계 또는 역재하단계에서 탄성계수를 결정하게 된다. 정적삼축압축시험은 하중 파형이 차량하중에 의해 발생하는 파형과 차이가 있고, 하중 재하속도의 차이가 크므로 탄성계수가 하중주파수의 영향을 받는 경우에는 이러한 차이를 고려해야 한다.

그림 6에서 응력-변형을 곡선에서 재재하가 시

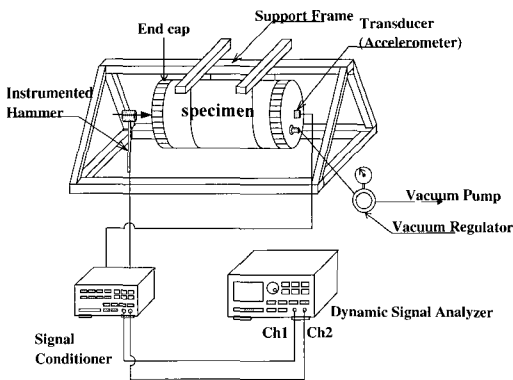


그림 5. 현장공진주시험 장치 개요도

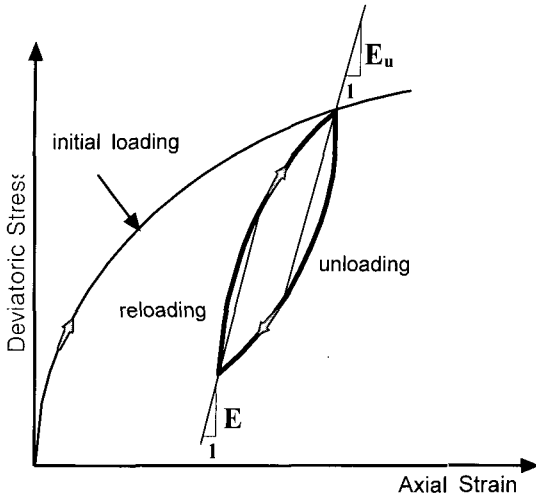
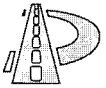


그림 6. 삼축압축시험에서 역재하 및 재재하 시 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정

작되는 점을 기준으로 한 응력-변형률 곡선의 기울기로부터 재재하 단계의 변형률 크기에 따른 할선탄성계수(E_r)를 결정할 수 있다. 마찬가지로 역재하가 시작되는 점을 기준으로 역재하 단계의 변형률 크기에 따른 할선탄성계수(E_u)를 결정할 수 있다. 이때 변형률 크기는 재재하가 시작되는 점 또는 역재하가 시작되는 점으로부터 할선탄성계수가 결정된 점 사이의 변형률 차이로 결정된다.

3.4 공진주/비틀전단시험 (RC/TS; Resonant Column/Torsional Shear Test)

공진주/비틀전단시험은 변형률 크기에 따른 탄성계수의 변화와 하중주파수의 영향을 검토할 수 있는 시험으로 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 동적시험인 공진주시험과 반복재하시험인 비틀전단시험을 동일한 시편에 대하여 수행함으로써 두 시험결과와의 효율적인 비교가 가능하다. 둘째, 순응도(compliance) 문제없이 저변형률($\gamma < 10^{-3}\%$) 이하에서의 비틀전단시험이 가능하다. 마

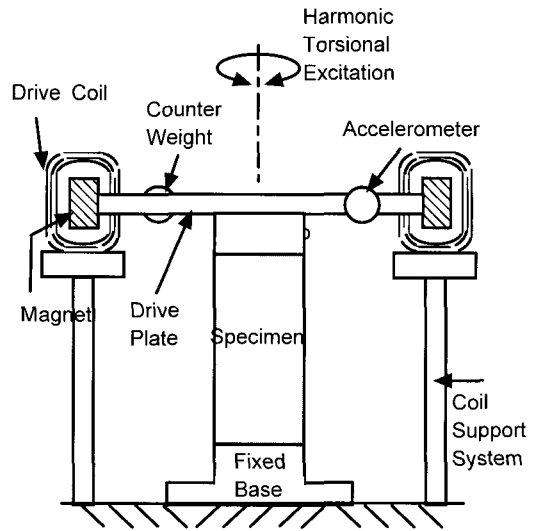


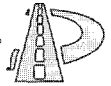
그림 7. 고정단-자유단 방식 공진주시험기 개요도

지막으로, 비틀전단시험에서 하중주파수를 자유로이 조절할 수 있어서 주파수 변화에 대한 지반의 변형특성을 효과적으로 규명할 수 있다. 일반적인 RC/TS시험에서는 직경 71mm의 시편에 대한 시험까지 가능하며 입자크기가 큰 보조기층재료에 대해서는 모델시료에 대하여 시험을 수행해야 하는 단점이 있다.

공진주시험기는 그림 7에서와 같이 시편의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 시편의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다.

공진주시험의 기본원리는 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 시편의 크기와 무게를 이용하여 전단파속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구하는 동적인 시험방법이다.

비틀전단시험은 공진주시험과 동일한 시험장치를 사용하고, 작동방법을 달리하여 변형특성을 결



정하는 반복재하시험이다. 시편을 바닥에 고정시키고 시편 상부와 연결된 진동 시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 공진주파수를 구하는 대신 시편에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist) 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구한다. 비틀각은 간격측정기(proximator)를 이용하여 측정하고, 비틀력은 시험기 제작시 검증된 가진전압과 비틀력의 관계를 사용하여 시료에 가해진 가진전압의 크기를 측정하여 획득한다. 전단탄성계수는 응력-변형 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로부터 결정할 수 있고, 아울러 응력-변형 이력곡선의 면적을 이용하여 감쇠비(damping ratio)를 결정할 수 있다. 가진전압의 크기를 변화시키면 전단 변형률이 변화하여, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 결정할 수 있다. 또한 동일한 가진전압 크기에서 하중주파수를 변화시키며 시험을 수행하여 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화를 검토할 수 있는 시험장치다.

4. 맺음말

포장 하부구조의 탄성계수는 포장체의 응력-변형 상태를 반영한 특성치로서, 포장 설계 및 해석에 핵심이 되는 입력 물성치이다. 따라서 합리적

인 설계·해석을 위해서는 하부구조 재료의 탄성계수를 신뢰성 있게 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 아울러 설계-시공-유지관리에 사용되는 개념의 통일성 확보를 위하여, 다짐시공에서 탄성개수 개념에 근거한 다짐관리기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

현재의 많은 연구성과에 의하면 탄성계수에 대한 다양한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있음이 밝혀지고 있어, 시험방법에 의한 동탄성계수, 정탄성계수, 또는 회복탄성계수의 차이는 무의미하고, 시험이 수행되는 조건(변형률 크기, 하중주파수, 하중 반복회수, 응력 조건 등)과 해석조건을 합리적으로 고려하는 것이 무엇보다 중요하게 부각되고 있다. 따라서, 수행 조건과 장단점이 서로 상이한 여러 시험법에서, 시험기의 가용 상태, 평가 신뢰도의 목표수준 등과 시험장치의 특성을 고려하여 합당한 시험법을 선정하여야 하고, 경우에 따라서는 여러 시험법을 조합하여 적용하는 것도 검토할 필요가 있다. 본 포장 하부구조의 탄성계수 평가 기법(1)의 탄성계수 개념정립과 실내시험에 이어 다음호에는 포장하부구조의 탄성계수를 결정하기 위한 현장시험에 대해 소개하고자 한다.